原子炉施設故障等報告書

関西電力株式会社

件名	美浜発電所２号機　蒸気発生器伝熱管損傷事象について		
事象発生の日時	平成３年２月９日　１３時４７分頃　（出力降下開始）		
事象発生の場所	美浜発電所２号機	天候	晴れ
事象発生の原子炉施設名	原子炉冷却系統設備　蒸気タービン付属設備 蒸気発生器、加圧器逃がし弁　主蒸気隔離弁		
事象の状況	美浜発電所２号機は定格出力（５０万キロワット）運転中、平成３年２月９日１２時４０分頃運転員が蒸気発生器ブローダウン水モニタ（以下Ｒ－１９）の記録が若干上昇傾向を示しているのを発見し、サンプリング測定を実施していたところ、１３時４０分頃復水器空気抽出器ガスモニタ（以下Ｒ－１５）の計数率注意警報（設定値2×10^{3}cpm）が発信、続いて１３時４５分頃Ｒ－１９計数率注意警報（設定値4×10^{2}cpm）が発信した。このため１３時４７分頃負荷降下を開始したが、１３時５０分に加圧器圧力低により原子炉が自動停止し、引き続き加圧器圧力低と加圧器水位低の一致により安全注入が動作した。 上記の状況およびＡ－蒸気発生器（以下Ｓ／Ｇ）の水位上昇が認められたこと等からＡ－Ｓ／Ｇからの漏洩と判断し、Ａ－Ｓ／Ｇの隔離を行うとともに、原子炉冷却系統（以下ＲＣＳ）の降圧操作等を行い、プラントを安定停止状態に移行させた。 Ａ－Ｓ／Ｇの隔離操作の際、１３時５５分、Ａ－主蒸気隔離弁の閉止操作を中央制御室において行ったが、同弁の完全閉止を確認することが出来なかった。このため、現場においてチェーンブロックを用いて増し締めを行い、１４時２分頃完全に閉止した。 また、ＲＣＳ降圧操作の際、加圧器逃がし弁の開操作を実施したが、動作しなかったため、加圧器補助スプレを使用した。 なお、本事象に伴い、放射性物質約2.3×10^{10}Ｂｑ（１号機補助建屋排気筒以外について約1.8×10^{10}Ｂｑ）の大気への放出があったが、野外モニタ指示値は通常と変化なく環境への影響はなかった。 その後の調査の結果、Ａ－Ｓ／Ｇ低温側の伝熱管１本（アドレスＸ４５－Ｙ１４）が第６管支持板上端部で円周に沿って破断し、分離していることが確認された。 また、主蒸気隔離弁の分解調査を行なった結果、弁棒グランドパッキン摺動部に黒鉛パッキンの付着物が確認され、摺動部の表面粗度は０．８Ｓ程度であることが計測された。 また、加圧器逃がし弁に作動用空気を供給する制御用空気系統の弁の開閉状態を調査した結果、開となっているべき空気元弁（Ｖ－３３７３）が閉止されていることが確認された。		
事象の原因	［製作不完全］ 破断管は振止め金具で支持されていなかったため、伝熱管のＵ字部に流力弾性振動が発生し、固定支持となった第６管支持板部で高サイクルのフレッチング疲労によりき裂が発生し、破断に至ったものと考えられる。 ［作業者の過失］ 原子炉起動前に行った作動用空気分配箱（AJB）の弁点検において、加圧器逃がし弁作動用空気元弁を誤って閉止し、さらにその後の点検記録のチェック過程で見過ごされたため、加圧器逃がし弁に作動用空気が供給されず作動しなかったものである。 ［保守不完全］ 前回定検時に、主蒸気隔離弁の弁棒摺動部に鏡面仕上げを実施したため、黒鉛パッキンが弁棒摺動部に付着し、グランドパッキン摺動抵抗が設計値の約１．５倍に増加したため、閉弁抵抗が全閉付近での閉弁力を上回り、完全には閉止しなかったものと判断される。		
保護装置の種類および動作状況	「加圧器圧力低」による原子炉自動停止 「加圧器圧力低と加圧器水位低の一致」による安全注入動作 } 動作「適」		

放射能の影響	し
被害者	な し
他に及ぼした障害	な し
復旧の日時	平成6年9月26日10時58分並列
再発防止対策 —	1．品質保証活動の強化 伝熱管の破断原因、加圧器逃がし弁の不作動の原因に鑑み、設計、製作、施工、運転の各段階における品質保証活動を強化した。 2．蒸気発生器伝熱管の健全性の向上 伝熱管の一層の健全性向上の観点から、伝熱管に係る既存の損傷形態についても新しい知見、技術等を積極的に導入している。 3．保守管理方法の改善等 (1) 主蒸気隔離弁の不具合の原因に鑑み、主蒸気隔離弁の弁棒摺動部表面の粗度を確認した。 また同弁の閉弁力を増加させるとともに手動により迅速に同弁を閉止できるよう増締装置を設置した。 (2) 加圧器逃がし弁不作動の原因に鑑み、作業管理システムの改善を図るとともに、加圧器逃がし弁等安全上重要な機能を有する機器の制御用空気系統の配置については、安全機能を阻害する可能性のある手動弁の取付けを極力避ける等誤操作防止のための配慮等を行った。 4．運転マニュアルの充実等 加圧器逃がし弁不作動及び主蒸気隔離弁不完全閉の場合の具体的な応用操作について運転マニュアルに記載した。また、異常な事象の発生時にその他の安全上重要な機能を果たす機器に異常が発生した場合にも、運転員が容易に判断し適切に対応できるよう、具体的な操作手順を運転マニュアルに追加するとともに、各運転マニュアルにおける機器操作の時期、順序及び条件等の表現の明確化を図った。 5．モニタリングシステム及び計測制御システムの改善 (1) 今回のような進展の速い事象に対応するために、蒸気発生器漏洩モニタリングシステムを改善した。 (2) PAMトレンドのシステムに係るプラントパラメータのコンピュータの計算能力及びアラームタイプライタ記録の処理能力の増加等を図った。 (3) 異常な事象の発生時におけるプラントの状況把握をより向上させるよう計測システムを改善した。 (4) 異常な事象の収束手段を多様化させるため、外部電源が利用可能な場合には、非常用電源から給電される機器に加え常用電源から給電される機器も用いて事態を収束できるようプラント制御システムを変更し、これに対応した運用マニュアルを作成した。

美浜発電所２号機

蒸気発生器伝熱管損傷事象について

関西電力株式会社

目　　次

ページ

1．概要 …… 1
1.1　件名 …… 1
1.2　事象の発生日時 …… 1
1.3　事象発生の電気工作物 …… 1
1.4　事象発生前の運転状況 …… 1
1.5　事象の概要 …… 1

2．事象の経過と考察 …… 3
2.1　事象の経過 …… 3
2.1.1　事象発生前のプラント状態 …… 3
2.1.2　安全注入動作開始までの期間 …… 4
2.1.3　損傷側蒸気発生器隔離完了までの期間 …… 6
2.1.4　加圧器逃がし弁開放操作完了までの期間 …… 7
2.1.5　1次冷却系の減圧操作完了までの期間 …… 8
2.1.6　1次冷却系が冷態停止状態になるまでの期間 …… 9
2.2　プラントの応答状況に対する考察 …… 11
2.3　運転操作に関する考察 …… 19
2.3.1　運転操作に関する考察 …… 19
2.3.2　運転マニュアルに関する考察 …… 19
2.4　その他の考察 …… 21
2.4.1　主蒸気隔離弁不完全閉について …… 21
2.4.2　加圧器逃がし弁不作動について …… 25
2.4.3　プラント計算機について …… 29
2.4.4　通報連絡等について …… 31

3．事象の評価 …… 32
3.1　事象の再現解析 …… 32
3.2　炉心の健全性評価 …… 34
3.3　環境への放射性物質の放出量とその影響評価 …… 36
3.3.1　環境への放射性物質の放出量の算出及びその評価 …… 36
3.3.2　実効線量当量の算出及びその評価 …… 40
3.4　原子炉設置変更許可時の安全評価のための解析と
今回の事象の比較とその評価 …… 42
3.5　原子炉容器等の健全性評価 …… 44
3.5.1　加圧熱衝撃に関する検討 …… 44
3.5.2　熱疲労に関する検討 …… 49
3.6　炉心の健全性に関するその他の考察 …… 54
3.6.1　燃料の状況に関する考察 …… 54
3.6.2　1次冷却材の状態に関する考察 …… 55

4．蒸気発生器伝熱管の損傷原因調査 …… 59
4.1　蒸気発生器伝熱管損傷に関する調査 …… 59
4.1.1　破断管調査 …… 59
4.1.2　周辺管調査 …… 64
4.1.3　管支持板調査 …… 67
4.1.4　環境調査 …… 69
4.1.5　振止め金具調査 …… 71
4.1.6　まとめ …… 73
4.2　流動励起振動解析 …… 76
4.2.1　流体力による振動 …… 76
4.2.2　流動励起振動解析 …… 77
4.2.3　まとめ …… 80
4.3　伝熱管損傷原因の推定 …… 81
4.3.1　破断管の損傷原因の推定 …… 81
4.3.2　破断管の損傷に関する時間的考察 …… 86

4.3.3 周辺管の損傷原因の推定 …… 90
4.3.4 まとめ …… 93
4.4 結論 …… 94
4.4.1 振止め金具 …… 94
4.4.2 破断管 …… 94
4.4.3 周辺管 …… 95

5．再発防止対策等 …… 96
5.1 自主保安の強化 …… 96
5.2 技術開発の推進等の中長期的課題への取り組み …… 101
5.3 異常な事象の発生時における即時対応策の改善 …… 101
5.4 原子力安全研究体制の確立 …… 102
5.5 蒸気発生器の信頼性向上 …… 102
5.6 蒸気発生器漏洩時の措置 …… 102

6．復旧計画 …… 103

添付－表

		ページ
表-2.1.1	蒸気発生器伝熱管損傷に係る事象の経過	1
表-2.1.2	蒸気発生器２次側器内水の放射能濃度分析結果	16
表-3.1.1	ＭＡＲＶＥＬコードに対する主な変更点	17
表-3.1.2	今回の事象の再現解析の解析条件	18
表-3.2.1	炉心の健全性評価に関する解析条件	21
表-3.3.1	大気又は海への放射性物質の放出量の算出に用いた放射性物質の測定値	22
表-3.3.2	１次冷却材の放射性物質の測定値	23
表-3.3.3	放射性物質の放出経路及び放出期間	24
表-3.3.4	放射性希ガス及び放射性よう素の大気への放出量の算出結果	25
表-3.3.5	大気へ放出された放射性希ガス及び放射性よう素により周辺公衆が受けると考えられる実効線量当量の算出結果	26
表-3.4.1	安全解析と今回の事象の比較とその評価	27
表-3.5.2.1	評価対象部位別応力解析方法	31
表-3.5.2.2	疲れ累積係数	32
表-3.6.1	１次冷却系への水の注入量及び損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の推移	33
表-4.1.1	破断管の材料性状	34
表-4.1.2	管支持板部減肉状況（Ｘ４５列低温側）	35
表-4.1.3	管支持板クレビス部の調査結果	36
表-4.1.4	通常運転時の蒸気発生器の２次系水質	37
表-4.2.1	流力弾性振動解析結果	38
表-4.3.1	破断管の安定比の最大値の変化	39
表-4.3.2	Ｘ４５列伝熱管の損傷原因調査結果の概要	40
表-6.1	美浜２号機蒸気発生器復旧計画工程表	41

添付－図

		ページ
図-2.1.1	運転記録の概要	1
図-2.1.2	第１４運転期間における主要な運転パラメータの推移	3
図-2.2.1	１次冷却系の主要機器の配置及び主要パラメータの測定位置の概要	5
図-2.4.1.1	主蒸気隔離弁構造の概要	6
図-2.4.1.2	主蒸気隔離弁作動原理	7
図-2.4.1.3	損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁弁棒グランドパッキン摺動部点検結果	8
図-2.4.1.4	主蒸気隔離弁閉弁力と閉弁抵抗の関係	9
図-2.4.2.1	加圧器逃がし弁構造の概要	10
図-2.4.2.2	加圧器逃がし弁作動用空気系統の概要	11
図-2.4.3.1	プラントデータ処理システムの構成の概要	12
図-2.4.3.2	プラント計算機の負荷の概要	13
図-3.1.1	事象の再現解析結果と計測値との比較(1)～(8)	14
図-3.1.2	安全注入流量の再現解析結果と計測値との比較(1),(2)	18
図-3.1.3	高圧注入ポンプの注入特性	19
図-3.2.1	炉外核計装記録の説明	20
図-3.2.2	最小ＤＮＢＲの解析結果	21
図-3.3.1	放射性物質の主な放出経路	22
図-3.4.1	安全解析の解析結果と今回の事象の再現解析の解析結果との比較	23
図-3.5.1.1	１次冷却系主要配置の概要	24
図-3.5.1.2	１次冷却材の流量の設定	25
図-3.5.1.3	混合挙動の把握試験結果（ループ流停止の場合）	26
図-3.5.1.4	１次冷却材の温度及び原子炉容器の温度の推移	27
図-3.5.1.5	破壊力学による評価結果	28
図-3.5.2.1	疲労評価対象部位	29
図-3.5.2.2	今回の事象における低温側冷却材の温度変化	30
図-3.5.2.3	注入経路の概要	31
図-3.6.1	燃料中心温度及び燃料被覆管表面温度の解析結果	32
図-3.6.2	１次冷却材中のよう素１３１濃度の推移（美浜２号機第１４運転期間）	33
図-3.6.3	炉心上端部の１次冷却材の温度、局所ボイド率及び熱流束の解析結果	34
図-3.6.4.1	飽和温度、炉心出口温度の最大値、健全側ループの高温側及び低温側冷却材温度の推移	35
図-3.6.4.2	飽和温度、炉心出口温度の最大値、損傷側ループの高温側及び低温側冷却材温度の推移	35
図-3.6.5	１次冷却材の流量の解析結果	36
図-3.6.6	原子炉容器頂部におけるボイド量の解析結果	36
図-3.6.7	ボイド発生時のイメージ図	37
図-4.1.1	蒸気発生器伝熱管破断位置	38
図-4.1.2	破面主起点部付近観察結果（下側破面）	39
図-4.1.3	主起点部付近の断面ミクロ観察結果（下側破面）	40
図-4.1.4	き裂伝播部破面観察結果（下側破面）	41
図-4.1.5	破面観察結果の概要	42
図-4.1.6	破断部の外表面観察結果（下側破面）	43
図-4.1.7	破断管高温側第６管支持板部の概略形状	44
図-4.1.8	周辺管調査概要	45
図-4.1.9	低温側第６管支持板部の摩耗減肉状況観察結果	46
図-4.1.10	第６管支持板の水平断面ミクロ観察結果（管支持板板厚中央）	47
図-4.1.11	蒸気発生器伝熱管振止め金具の概要	48
図-4.1.12	振止め金具挿入形状の推定	49
図-4.1.13	振止め金具挿入状況の推定	50
図-4.1.14	振止め金具取出し後の状況	51
図-4.2.1	流動励起振動解析手順の流れ	52
図-4.2.2	破断管及び周辺管の安定比	53
図-4.3.1	粗さパラメータの測定結果及び応力拡大係数範囲との関係	54
図-4.3.2	ストライエーション間隔の測定結果及び応力拡大係数範囲との関係	55
図-4.3.3	破面解析による応力振幅推定結果	56
図-4.3.4	通常疲労強度試験結果	56
図-4.3.5	インコネル６００伝熱管の疲労限度線図	57
図-4.3.6	フレッチング疲労試験片と破断管の外表面観察結果	58

図-4.3.7	フレッチング疲労試験片と破断管の断面及び破面の詳細観察結果	59
図-4.3.8	相対すべり量計測試験結果	60
図-4.3.9	フレッチング疲労き裂発生限界試験結果	60
図-4.3.10	フレッチング疲労き裂発生寿命試験結果	61
図-4.3.11	フレッチング疲労試験結果	61
図-4.3.12	フレッチング疲労き裂の深さ方向伝播	62
図-5.1.1	原子力監査プロジェクトチームの業務体制	63
図-5.1.2	運転管理体制の強化組織図	64
図-5.1.3	各種技術情報処理業務フロー	65
図-5.1.4	変更管理について	66
図-5.3.1	異常事象発生時の通報連絡体系概要図（休祭日の例）	67
図-5.4.1	原子力安全システム研究所の概要	68

添付－資料

		ﾍﾟｰｼﾞ
資料-1.1	美浜２号機の設備概要	1
資料-2.1.1	所内電源喪失に関する考え方について	6
資料-2.2.1	加圧器内流体挙動の解析について	9
資料-2.2.2	１次冷却系の圧力挙動に関する考察	19
資料-2.2.3	加圧器水位上昇と１次冷却系（ＲＣＳ）への注入量のバランスに関する計算	22
資料-2.3.1	運転操作に関する考察	29
資料-2.4.1.1	主蒸気隔離弁の弁棒グランドパッキン摺動部への付着物の成分分析	40
資料-2.4.1.2	主蒸気隔離弁弁棒グランドパッキン摺動部の鏡面仕上げ要領	43
資料-2.4.1.3	他の国内ＰＷＲプラントの主蒸気隔離弁に関する調査	45
資料-2.4.1.4	アスベストパッキン油脂分の付着性確認試験	47
資料-2.4.1.5	主蒸気隔離弁グランドパッキン摺動抵抗測定試験	51
資料-2.4.1.6	黒鉛パッキン付着による主蒸気隔離弁グランドパッキン摺動抵抗測定試験	56
資料-2.4.1.7	主蒸気隔離弁不完全閉の推定メカニズム	62
資料-2.4.4.1	通報連絡状況に関する主な経緯	65
資料-2.4.4.2	見学者対応状況	67
資料-3.1.1	今回の事象の再現解析の手法について	69
資料-3.1.2	今回の再現解析に係るモデルの変更について	81
資料-3.1.3	損傷側蒸気発生器主蒸気隔離弁から２次側下流への蒸気流出量について	89
資料-3.1.4	高圧注入ポンプの設計について	92
資料-3.2.1	今回の事象における炉心の健全性評価のための解析方法	97
資料-3.3.1	放射性物質の放出量の算出方法について	109
資料-3.3.2	実効線量当量評価におけるトリチウムの取扱いについて	117
資料-3.3.3	実効線量当量の算出に用いたデータ	119
資料-3.3.4	モニタリングポストの設置状況について	122
資料-3.3.5	海へ放出された放射性物質による実効線量当量について	126
資料-3.5.1.1	ＰＴＳに係る今回事象の経過	128
資料-3.5.1.2	１次冷却系低温側配管注入流量	131

資料-3.5.1.3	自然循環がある場合の流動状況について	134
資料-3.5.1.4	１次冷却材温度記録	136
資料-3.5.1.5	混合挙動の把握試験体系図	139
資料-3.5.1.6	破壊力学による原子炉容器の健全性評価手法	142
資料-3.5.1.7	ＰＴＳに関する今回の解析条件	145
資料-3.5.2.1	熱疲労に関する解析条件の詳細	148
資料-3.6.1	燃料検査結果	183
資料-3.6.2	炉心出口温度と冷却材配管内の冷却材温度の推移に関する検討	186
資料-3.6.3	１次冷却系への水の注入量及び損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量（解析開始時点から安全注入の開始時点まで）	199
資料-3.6.4	１次冷却系への水の注入量及び損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量（安全注入の開始時点から安全注入開始後５分の時点まで）	203
資料-3.6.5	１次冷却系への水の注入量及び損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量（安全注入の開始後５分の時点から減圧開始の時点まで）	208
資料-4.1.1.1	破断管調査結果	212
資料-4.1.1.2	蒸気発生器伝熱管製造・組立履歴調査結果	282
資料-4.1.2.1	周辺管調査結果	297
資料-4.1.2.2	破断管による隣接管への影響調査結果	368
資料-4.1.3.1	管支持板調査結果	387
資料-4.1.3.2	伝熱管振動計測結果	398
資料-4.1.4.1	２次系水質履歴調査結果	424
資料-4.1.4.2	水素脆化評価結果	430
資料-4.1.4.3	照射脆化評価結果	434
資料-4.1.5.1	振止め金具に関する各種調査結果	438
資料-4.2.1.1	１次系流体による不安定振動の可能性の検討結果	517
資料-4.2.1.2	カルマン渦による振動の可能性の検討結果	522
資料-4.2.2.1	流動励起振動解析手法について	524
資料-4.2.2.2	美浜２号機流動励起振動解析結果	542
資料-4.3.1.1	伝熱管管支持板部の応力解析結果	556
資料-4.3.1.2	疲労き裂伝播試験結果	563

資料-4.3.1.3	粗さパラメータを基にした作用応力推定結果	570
資料-4.3.1.4	ストライエーション間隔を基にした作用応力推定結果	579
資料-4.3.1.5	疲労強度文献調査結果	586
資料-4.3.1.6	ｲﾝｺﾈﾙ600伝熱管の通常疲労強度とフレッチング疲労強度試験結果	592
資料-4.3.1.7	フレッチング疲労文献調査結果	604
資料-4.3.1.8	伝熱管のすべり計測試験結果	614
資料-4.3.1.9	フレッチング限界面圧－すべり線図試験結果	620
資料-4.3.2.1	渦電流探傷検査記録による管支持板クレビス部閉塞時期の推定結果	625
資料-4.3.2.2	Ｘ４５列伝熱管の摩耗解析結果	629
資料-4.3.2.3	酸化皮膜厚さからの破面形成時期の検討結果	641
資料-4.3.2.4	フレッチング疲労き裂発生寿命試験結果	646
資料-4.3.2.5	定検時に潜在していたき裂寸法の推定結果	654
資料-4.3.2.6	周方向疲労き裂検出性確認試験結果	657
資料-4.3.2.7	き裂貫通から破断までの時間の検討結果	660
資料-4.3.2.8	Ｕ字管疲労破断試験結果	668
資料-5.1.1	取替え新蒸気発生器の改良点について	677
資料-5.1.2	主蒸気隔離弁弁棒摺動部の保守管理の改善について	680
資料-5.1.3	主蒸気隔離弁閉弁機能の改善について	682
資料-5.1.4	加圧器逃がし弁制御用空気系統の改善について	685
資料-5.1.5	安全機能を阻害する可能性のある制御用空気系統手動弁の配置見直しについて	687
資料-5.1.6	手動弁の管理に係る改善について	691
資料-5.1.7	プラント起動前点検に係る改善について	694
資料-5.1.8	運転マニュアルの充実について	696
資料-5.1.9	蒸気発生器伝熱管の漏洩監視モニタリングシステムの改善	698
資料-5.1.10	プラント計算機の改善対策について	700
資料-5.1.11	原子炉水位計の概要について	702
資料-5.1.12	主蒸気放射線計測装置（主蒸気管モニタ）の概要について	705
資料-5.1.13	安全注入信号発信時の常用母線への給電方法の改善について	707
資料-5.3.1	見学者の対応方法について	710

資料-5.3.2	異常な事象発生時の放出放射能量等評価システムについて	712
資料-6.1.1	長期停止に伴う機器の保全管理について	716
資料-6.1.2	プラント起動にあたっての健全性確認について	721

添付－その他資料

		ページ
その他資料-1	美浜２号機蒸気発生器他原因調査実績工程表	1
その他資料-2	流出した１次冷却材を含む２次系統水の処理	4
その他資料-3	見学者及び放射線業務従事者の線量当量評価結果	6
その他資料-4	原因調査作業に係る放射線業務従事者の線量当量実績	9
その他資料-5	周辺監視区域外での放射性物質の濃度に対する事象の影響について	11
その他資料-6	原子炉容器等の非破壊検査結果	15
その他資料-7	運転記録等データ集	17
その他資料-8	写真集	295

1．概要

1.1 件名

美浜発電所２号機

蒸気発生器伝熱管損傷事象について

1.2 事象の発生日時

平成３年２月９日　１３時４７分頃（出力降下開始）

1.3 事象発生の電気工作物

Ａ－蒸気発生器、Ａ－主蒸気隔離弁、加圧器逃がし弁

1.4 事象発生前の運転状況

定格出力（５０万キロワット）運転中

1.5 事象の概要

美浜発電所２号機は定格出力（５０万キロワット）運転中、平成３年２月９日１２時４０分頃運転員が蒸気発生器ブローダウン水モニタ（以下Ｒ－１９）の記録が若干上昇傾向を示しているのを発見し、サンプリング測定を実施していたところ、１３時４０分頃復水器空気抽出器ガスモニタ（以下Ｒ－１５）の計数率注意警報（設定値2×10^{3}cpm）が発信、続いて１３時４５分頃Ｒ－１９計数率注意警報（設定値4×10^{2}cpm）が発信した。このため１３時４７分頃負荷降下を開始したが、１３時５０分に加圧器圧力低により原子炉が自動停止し、引き続き加圧器圧力低と加圧器水位低の一致により安全注入が動作した。

上記の状況およびＡ－蒸気発生器（以下Ｓ／Ｇ）の水位上昇が認められたこと等からＡ－Ｓ／Ｇからの漏洩と判断し、Ａ－Ｓ／Ｇの隔離を行うとともに、原子炉冷却系統（以下ＲＣＳ）の降圧操作等を行い、プラントを安定停止状態に移行させた。

Ａ－Ｓ／Ｇの隔離操作の際、１３時５５分、Ａ－主蒸気隔離弁の閉止操作を中央制御室において行ったが、同弁の完全閉止を確認することが出来なかった。このため、現場においてチェーンブロックを用いて増し締めを行い、１４時２分頃完全に閉止した。

また、ＲＣＳ降圧操作の際、加圧器逃がし弁の開操作を実施したが、動作しなかったため、加圧器補助スプレを使用した。

なお、本事象に伴い、放射性物質約2.3×10^{10}Bq（１号機補助建屋排気筒以外について約1.8×10^{10}Bq）の大気への放出があったが、野外モニタ指示値は通常と変化なく環境への影響はなかった。

その後の調査の結果、Ａ－Ｓ／Ｇ低温側の伝熱管１本（アドレスＸ４５－Ｙ１４）が第６管支持板上端部で円周に沿って破断し、分離していることが確認された。

また、主蒸気隔離弁の分解調査を行った結果、弁棒グランドパッキン摺動部に黒鉛パッキンの付着物が確認され、摺動部の表面粗度は０．８Ｓ程度であることが計測された。

また、加圧器逃がし弁に作動用空気を供給する制御用空気系統の弁の開閉状態を調査した結果、開となっているべき空気元弁（Ｖ－３３７３）が閉止されていることが確認された。

以上の状況を含め、今回の発生事象に係る各種原因調査、事象の経過における検討評価、再発防止対策の実施内容について、以下のとおり整理したので報告する。

（資料-1.1）

2．事象の経過と考察

美浜２号機の蒸気発生器伝熱管損傷事象に係る事象の経過、プラントの応答状況及び運転操作等に関する考察は、以下のとおりである。

2.1 事象の経過

平成３年２月９日に発生した美浜２号機の蒸気発生器伝熱管損傷事象の経過を記述する。

（表-2.1.1、図-2.1.1）

今回の事象の経過は、主として以下の５つの記録に基づきまとめている。

① シーケンスオブイベント記録
② アラームタイプライタ記録
③ ＰＡＭ（事故後監視計）トレンド記録
④ プラント計器記録（チャート）
⑤ 当直課長引継簿

2.1.1 事象発生前のプラント状態

美浜２号機は、平成２年７月２５日に第１３回定期検査を終了し、蒸気発生器伝熱管損傷事象が発生するまで正常に運転されており、主要な運転パラメータは安定して推移していた。（図-2.1.2）

平成３年２月７日９時０分頃に行った蒸気発生器２次側への１次冷却材の漏洩の有無を検知するための蒸気発生器２次側器内水の放射能濃度の定期分析結果は、検出限界値（検出限界値：２．５０×１０$^{-3}$Bq/cm^3）以下であり、異常は認められなかった。

（表-2.1.2）

また、蒸気発生器２次側への１次冷却材の漏洩の有無を蒸気発生器２次側器内水のブローダウン水の放射能濃度で連続監視している蒸気発生器ブローダウン水モニタ（以下「Ｒ－１９」という。）及び復水器からの抽出空気の放射能濃度で連続監視している復水器空気抽出器ガスモニタ（以下「Ｒ－１５」という。）の各々の記録は、第１３回定期検査終了時から蒸気発生器伝熱管損傷事象が発生するまでの間、約３５cpm 及び約８００cpm を示しており、異常は認められなかった。（図-2.1.2）

2.1.2 安全注入動作開始までの期間

(1) 美浜２号機は、平成３年２月９日定格出力で運転中のところ、１２時２４分、プラント計算機のＲ－１９計数率高注意信号（設定値：６０cpm ）が発信し（注）、引き続き１２時３３分、プラント計算機のＲ－１５計数率高注意信号（設定値：９００cpm ）が発信した。このため、運転員はＲ－１９及びＲ－１５の監視を強化していた。

（注） プラント計算機の注意信号は、異常の兆候を早期に発見し運転員の注意を喚起することを目的に、プラントパラメータの微小な変動を検出した場合に発信する信号である。

Ｒ－１５、Ｒ－１９等のモニタの指示値は、一般に検出対象の放射能濃度が低い場合には自然放射線等の影響により比較的ゆらぎが大きい。このため、蒸気発生器２次側への１次冷却材の漏洩がない場合であっても、プラント計算機のＲ－１５及びＲ－１９の注意信号が発信することがあり、発信時には運転員は監視を強化することとしていた。

(2) １２時４０分頃、運転員はＲ－１９の記録（チャート）が若干上昇傾向を示しているのを発見した。１２時４０分頃、当直課長は蒸気発生器２次側への１次冷却材の漏洩の有無を確認するため、放射線管理課員に対し蒸気発生器２次側器内水を採取しその放射能濃度の分析を行うよう指示した。

１３時０分頃、同放射線管理課員は蒸気発生器２次側器内水のサンプルを採取した。このサンプルの放射能濃度分析の結果は１３時２０分頃に判明し、Ａ－蒸気発生器２次側器内水の放射能濃度は６．００×１０$^{-3}$Bq/cm^{3}であった。一方、Ｂ－蒸気発生器２次側器内水の放射能濃度は検出限界値（検出限界値：２．４２×１０$^{-3}$Bq/cm^3）以下であった。１３時２０分頃、当直課長は、同放射線管理課員に対し蒸気発生器２次側器内水を採取しその放射能濃度の分析を行うよう再度指示した。（表-2.1.2）

(3) １３時４０分頃、Ｒ－１５「計数率注意」警報（設定値：２×１０^{3}cpm）が中央監視盤において発信した。この結果、放射性物質の大気への放出を抑制するため、脱気器ベントからの放出経路が大気への直接放出から復水器側へ自動的に切り替えられ、また、復水器空気抽出ポンプからの放出経路が大気への直接放出からチャコールフィルタ経由

の１号機原子炉補助建屋排気筒側へ自動的に切り替えられた。

(4) １３時４５分頃、Ｒ－１９「計数率注意」警報（設定値：４×１０^{2}cpm）が中央監視盤において発信した。この結果、１３時４５分、放射性物質を含む蒸気発生器ブローダウン水の海への放出を防ぐため、蒸気発生器ブローダウン隔離弁、蒸気発生器ブローダウンサンプル隔離弁及び蒸気発生器ブローダウンタンク水位制御弁が各々自動閉止した。さらに、１次冷却系の圧力が低下し、１３時４５分、「加圧器圧力(１次冷却系の圧力)低バックアップヒータ自動入」警報（設定値：１５５．０kg/cm^{2}）が中央監視盤において発信した。

加圧器水位及び１次冷却系の圧力が低下していたことから、１次冷却材の減少を補うため１３時４５分、運転員は充てんポンプ１台を追加起動し、それまでの２台運転から３台運転とした。

また、１３時４５分、プラント計算機のＡ－蒸気発生器水位高注意信号（設定値：５５．０%）、加圧器水位低注意信号（設定値：４５．０%）、加圧器水位低低注意信号（設定値：４４．０%）、加圧器圧力低注意信号（設定値：１５５．５kg/cm^{2}）及び加圧器圧力低低注意信号（設定値：１５１．５kg/cm^{2}）が連続して発信した。

１３時４６分、プラント計算機のＡ－蒸気発生器水位高高注意信号（設定値：５７．０%）が発信した。また、１次冷却材の平均温度が低下したため、１３時４６分、一部の制御棒の位置が自動的に調整された。

(5) 運転員は原子炉を停止すべく１３時４７分頃、手動で発電機出力の降下を開始するとともに、大気への放射性物質の放出を抑制するため、１３時４８分、Ａ－蒸気発生器（以下「損傷側蒸気発生器」という。）からタービン動補助給水ポンプへ駆動用の蒸気を供給する配管の元弁を閉止した。

(6) １３時４９分、加圧器ヒータの保護等を目的とした「加圧器水位低ヒータ自動切及び抽出水隔離弁自動閉」警報（設定値：２０%）が中央監視盤において発信した。この結果、加圧器ヒータの電源が自動的に遮断するとともに、抽出水隔離弁が自動的に閉止した。

(7) 発電機出力の降下に伴い１次冷却材の平均温度の設定値と実際の１次冷却材の平均温度が乖離したため、１３時４９分から１３時５０分までタービンバイパス弁が自動的に開閉した。

(8) １３時５０分頃、Ｒ－１５「計数率高」警報（設定値：１×１０^{6}cpm）が中央監視盤において発信した。この結果、大気への放射性物質の放出を抑制するため、復水器空気抽出ポンプからの放出経路がチャコールフィルタ経由の１号機補助建屋排気筒側から原子炉格納容器側へ自動的に切り替えられた。

(9) １３時５０分、「加圧器圧力（１次冷却系の圧力）低」(設定値：１３４．３kg/cm^{2})による原子炉トリップ信号が中央監視盤において発信し、原子炉が自動的にトリップするとともにタービンが所定の順序どおり自動的にトリップした。引き続き、１３時５１分、発電機が自動的にトリップした。

(10) 原子炉トリップから７秒後、「加圧器圧力(１次冷却系の圧力)低及び加圧器水位低の一致」（設定値：圧力；１２８．３kg/cm^{2}、水位；５．５%）による安全注入信号が中央監視盤において発信した。安全注入信号の発信に伴い、非常用ディーゼル発電機の起動、非常用炉心冷却装置関連機器の起動による１次冷却系への水の注入、原子炉格納容器隔離、発電機トリップ後の常用母線への給電停止及びＡ、Ｂ－電動補助給水ポンプ等の起動が自動的に行われた。その結果、原子炉トリップ後のタービンバイパス弁を用いた復水器による１次冷却系の冷却に必要な機器の作動は、最大でも常用母線への給電が行われていたタービントリップから発電機トリップまでの３０秒間に限られた。

（資料-2.1.1）

2.1.3 損傷側蒸気発生器隔離完了までの期間

(1) 運転員はＢ－蒸気発生器（以下「健全側蒸気発生器」という。）による１次冷却系の冷却に先立ち損傷側蒸気発生器を隔離するため、１３時５２分、Ａ－電動補助給水ポンプ出口弁を閉止し、損傷側蒸気発生器への補助給水を停止するとともに、電動補助給水ポンプ出口連絡弁を開放し、健全側蒸気発生器への補助給水量を増加させた。

(2) 運転員は損傷側蒸気発生器を隔離するため、１３時５５分、損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁の閉止操作を中央制御室において行ったが、中央監視盤において同弁の開閉表示灯の開表示と閉表示が両方とも点灯したため同弁の完全閉止を確認することができなかった。このため、１３時５５分頃、当直課長は機械保修課員に対し現場において同弁を閉止するよう指示した。

同機械保修課員は、チェーンブロックを用いて現場において損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁の増締めを行い、１４時２分頃同弁を完全に閉止した。

2.1.4 加圧器逃がし弁開放操作までの期間

(1) 運転員は健全側蒸気発生器を介して１次冷却系を冷却するため、１４時２分、健全側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁を開放した。

(2) 運転員は１次冷却材ポンプ及び循環水ポンプの再起動に備え、１４時５分、常用母線への給電を再開した。

(3) 運転員は加圧器逃がし弁による１次冷却系の減圧操作に備え加圧器逃がし弁の作動用空気の供給を確保するため、１４時７分、原子炉格納容器隔離信号を解除し同信号により閉止されていた制御用空気系統の原子炉格納容器隔離弁を開放した。

(4) 運転員は高圧注入ポンプ停止後の１次冷却系の保有水量を制御し、及び１次冷却材ポンプ再起動時の同ポンプ軸封水を確保するため、１４時９分、安全注入信号により停止されていた充てんポンプ３台を再起動した。

(5) １４時１４分、運転員は安全注入信号を解除した。

(6) 運転員は健全側蒸気発生器に係る１次冷却材回路（以下「健全側ループ」という。）の高温側冷却材温度が目標値（２５８．２℃）以下に達していることを確認の上、１４時１７分、健全側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁を閉止した。

(7) １４時１９分、損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁が自動開閉した。

(8) 運転員は１次冷却系の圧力と損傷側蒸気発生器２次側の圧力を等しくすることにより損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材の流出を止めるため、１４時１０分頃から１４時２５分頃まで加圧器逃がし弁の開放操作を複数回行い１次冷却系の減圧を試みた。また、１４時１７分から１４時２１分まで運転員は加圧器逃がし弁元弁を閉止、開放した。しかし、２台ある加圧器逃がし弁はいずれも開放不能であった。

１４時２５分頃、当直課長は加圧器逃がし弁は開放不能と最終的に判断した。

2.1.5 １次冷却系の減圧操作完了までの期間

(1) 運転員は余熱除去ポンプの長時間のミニマムフロー運転（最小流量による循環運転）を避けるため、１４時２６分及び１４時２７分、余熱除去ポンプ２台を各々停止した。

(2) １４時２８分頃、当直課長は運転員に対し加圧器補助スプレによる１次冷却系の減圧操作を指示した。しかしながら、運転員は加圧器補助スプレ弁の操作に必要な鍵の取り出しに手間取り、１４時３４分、加圧器補助スプレによる減圧操作を開始した。

(3) １４時２９分、損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁が自動開閉した。

(4) 運転員は非常用ディーゼル発電機の長時間の無負荷運転を避けるため、１４時３１分及び１４時３３分、非常用ディーゼル発電機２台を各々停止した。

(5) 運転員は加圧器水位及び１次冷却材のサブクール度（その圧力に応じて沸騰する温度と実際の温度との差）を確認の上、１４時３７分、高圧注入ポンプ２台を各々停止した。

(6) １４時３９分、損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁が自動開閉した。

(7) 運転員は１次冷却材の温度を制御するため、１４時４２分、健全側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁を調整開とした。

(8) 運転員は１次冷却系の圧力が低下し損傷側蒸気発生器２次側の圧力とほぼ一致したため、１４時４８分、加圧器補助スプレ弁を閉止し１次冷却系の減圧操作を完了した。

2.1.6 １次冷却系が冷態停止状態になるまでの期間

(1) 運転員は健全側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁を用いた１次冷却系の冷却からタービンバイパス弁を用いた復水器による１次冷却系の冷却に切り替えるため、１４時５５分及び１４時５８分、現場において循環水ポンプ２台を各々起動するとともに、１４時５７分、健全側ループの１次冷却材ポンプを起動した。１５時１３分、運転員はタービンバイパス弁を調整開とし、１５時１４分、健全側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁を閉止した。

(2) 運転員は１次冷却系を冷態停止状態（１次冷却材の温度：９３℃以下）に移行するのに備え、１次冷却材の温度の低下に伴う反応度の添加を補償するため、１５時５５分、１次冷却材のほう素濃縮操作を開始し、１６時１８分に完了した。

なお、１６時０分頃に実施した１次冷却材のほう素濃度分析結果は１，３４４ppm であり、冷態停止状態に移行するために必要なほう素濃度１，２８３ppm を上回っていた。

(3) 運転員は異常時の原子炉の停止能力を確保する（注）ため、１６時２４分から１６時３２分まで停止用制御棒を全て引き抜いた後、１６時４０分頃、１次冷却系の冷態停止状態へ向けてタービンバイパス弁を用いた復水器による１次冷却系の冷却を強化した。

（注） １次冷却材のほう素濃度が１，２８３ppm 以上であれば、停止用制御棒を全て引き抜いた状態で冷態停止状態に移行しても原子炉は未臨界状態を維持できるが、１次冷却材のほう素濃度が何らかの原因により希釈される等の異常な事態の発生時において停止用制御棒を挿入することにより負の反応度を急速に添加できるよう、停止用制御棒を引き抜いた状態にする。

(4) 運転員は１次冷却系の減圧に伴う損傷側蒸気発生器２次側器内水の１次冷却系への流入による１次冷却材のほう素濃度の低下を補償し、原子炉停止余裕をさらに確保するため、１７時２４分から１９時３７分まで１次冷却材のほう素濃縮操作を再度実施した。

なお、２３時０分頃に実施した１次冷却材のほう素濃度分析結果は１，６３８ppm であった。

(5) １次冷却系の圧力の低下に伴い損傷側蒸気発生器２次側器内水が１次冷却系へ流入し、損傷側蒸気発生器水位が低下したため、２０時１１分、「Ａ－蒸気発生器水位異常低」（設定値：１０％）による原子炉トリップ信号が発信し、全制御棒が自動的に挿入された。

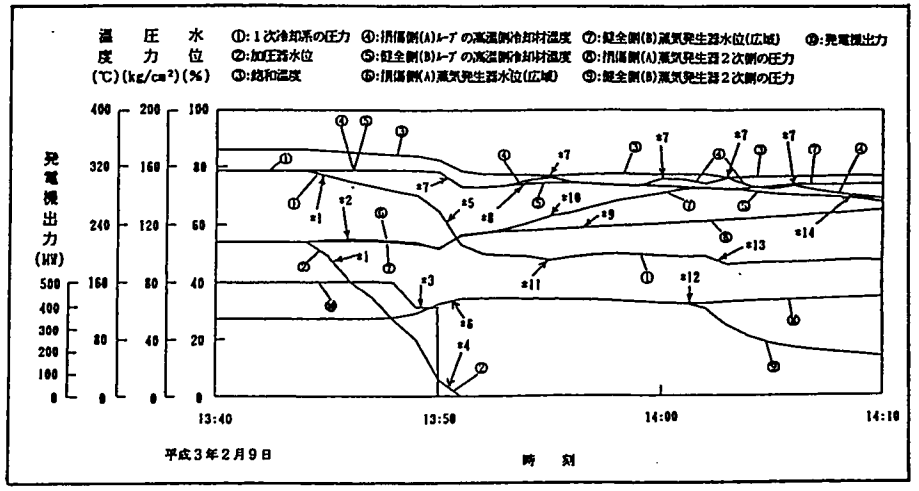
(6) ２２時１分、運転員はＡ－余熱除去ポンプを再起動し、２２時１０分頃、余熱除去系統による１次冷却系の冷却を開始した。また、２３時１７分、運転員はＢ－余熱除去ポンプを再起動した。

(7) 平成３年２月１０日２時３７分、１次冷却系は冷態停止状態となった。

2.2 プラントの応答状況に対する考察

事象の進展に伴うプラントの応答状況について、１次冷却系の圧力と損傷側蒸気発生器２次側の圧力とがほぼ一致した１４時４８分までの間を中心に考察した。なお、本文中に記載している「＊」は、図中の該当箇所に関する記述であることを示す。

１次冷却系の主要機器の配置及び主要パラメータの測定位置の概要を図-2.2.1に示す。



(1) 美浜２号機は平成３年２月９日定格出力で運転中のところ、１２時２４分、プラント計算機のＲ－１９計数率高注意信号が発信した。さらに、１２時４０分頃、運転員がＲ－１９の記録が若干上昇傾向を示しているのを発見した。これらの兆候及び１３時０分頃に採取した蒸気発生器２次側器内水の放射能濃度分析結果から、１２時４０分頃までに、Ａ－蒸気発生器の伝熱管の損傷に伴う蒸気発生器２次側への１次冷却材の微小な漏洩が発生していたものと推定した。

＊1１３時４５分頃から１次冷却系の圧力及び加圧器水位がほぼ直線的に低下を始めている。

＊2さらに、Ａ－蒸気発生器水位は１３時４５分頃から緩やかに上昇傾向を示している。定格出力運転時において蒸気発生器水位は狭域水位計で５２％を目標に制御されていることから、少量の漏洩ではこのような水位の上昇傾向を示すことはない。

以上から、１３時４５分頃にＡ－蒸気発生器の伝熱管の損傷が急激に拡大し、破断し分離したものと推定した。

(2) ＊3発電機出力は１３時４７分頃から低下を始め約７７％まで低下した後、タービントリップまでの間その状態を保持している。これは、発電機出力が目標降下率(５％／分)を超えて低下したことから、運転員が発電機出力の降下率を調整したことによるものである。

(3) ＊4加圧器水位は１３時５０分以降さらに低下を続け、１３時５１分には計測範囲外に振り切れている。これは、原子炉トリップに伴う燃料の発熱量の低下によって１次冷却材の温度が低下したことによる１次冷却材の体積の収縮及び破断管からの１次冷却材の損傷側蒸気発生器２次側への流出によるものである。（資料-2.2.1）

(4) ＊5１次冷却系の圧力は１３時５０分以降さらに急速に低下している。これは、原子炉トリップに伴い１次冷却材の温度が低下したことによる１次冷却材の体積の収縮及び破断管からの１次冷却材の損傷側蒸気発生器２次側への流出によるものである。

(5) ＊6蒸気発生器２次側の圧力は１３時５０分から１３時５１分までの間に上昇している。これは、タービントリップに伴う主蒸気止め弁の閉止によるものである。

(6) ＊7損傷側蒸気発生器に係る１次冷却材回路（以下「損傷側ループ」という。）の高温側冷却材温度は、定格出力運転時の約３１５℃から原子炉トリップにより約２９１℃まで低下し、その後１３時５４分以降健全側ループとは異なる挙動を示している。すなわち、１３時５５分、１４時０分、１４時３分及び１４時６分の４度にわたり上昇し、ピークを示している。これは、加圧器及び加圧器サージ管内の高温の１次冷却材等の影響若しくは原子炉容器頂部又は原子炉容器上部プレナム部（以下「上部プレナム部」という。）の高温の１次冷却材の影響によるものと推定した。

(7) ＊8健全側ループの高温側冷却材温度は１３時５１分から１３時５５分までの間は若干上昇するが、その後は順調に低下している。これは、健全側蒸気発生器２次側への補助給水の供給、高圧注入ポンプによる１次冷却系への水（約３０℃）の注入及び健全側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁の開放による冷却効果によるものである。

(8) *9損傷側蒸気発生器水位は１３時５１分以降ほぼ一定の割合で上昇している。これは、１次冷却系と損傷側蒸気発生器２次側との圧力差に大きな変動がなかったため、破断管から損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材の流出がほぼ一定の割合で継続したことによるものである。

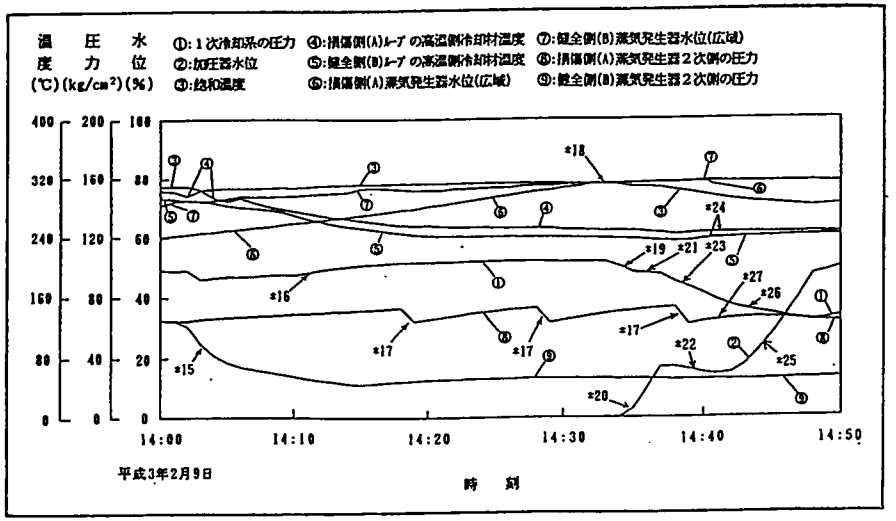
(9) *10 健全側蒸気発生器水位は１３時５１分以降上昇している。これは、健全側蒸気発生器２次側への補助給水の供給によるものである。

(10) *11 １次冷却系の圧力は１３時５５分以降緩やかに上昇している。これは、安全注入信号が発信した１３時５０分に高圧注入ポンプが２台とも自動起動し、１次冷却系低温側配管への水の注入が開始され、さらにその後１３時５５分には上部プレナム部への安全注入ライン止め弁が自動的に開放されたことにより上部プレナム部への水の注入が開始され、その結果、高圧注入ポンプによる１次冷却系への水の注入量が破断管からの１次冷却材流出量及び１次冷却材の温度の低下に伴う１次冷却材の体積の収縮量を上回ったことによるものと判断した。（資料-2.2.2）

(11) *12 健全側蒸気発生器２次側の圧力と損傷側蒸気発生器２次側の圧力は１４時２分以降乖離している。これは、損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁を完全に閉止したことによるものである。

(12) *13 １次冷却系の圧力は１４時２分から１４時３分までの間に約６kg/cm²低下している。これは、健全側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁を開放したため、１次冷却材の温度の低下に伴う１次冷却材の体積の収縮が生じたことによるものと推定した。

(13) *14 損傷側ループの高温側冷却材温度は健全側ループに比べ幾分高めに推移している。これは、損傷側ループについては、自然循環流量が低下し１次冷却材の流動が停滞する傾向にあったため、高圧注入ポンプにより注入された低温の水と上部プレナム部に滞留していた高温の１次冷却材とが十分に混合せず、１次冷却系高温側配管内に不均一な温度分布を形成したことによるものと推定した。



(14) *15 健全側蒸気発生器２次側の圧力は１４時２分以降急速に低下している。これは、１４時２分から１４時１７分まで健全側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁を開放したことによるものである。

(15) *16 １次冷却系の圧力は１４時１０分以降上昇傾向を示している。これは、充てんポンプ３台を再起動したことにより、１次冷却系への水の注入量が増加したことによるものである。（資料-2.2.2）

(16) *17 損傷側蒸気発生器２次側の圧力は１４時１９分、１４時２９分及び１４時３９分の３度にわたり変動している。これは、破断管から損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材の流出により、損傷側蒸気発生器２次側の圧力が上昇し、損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁が自動開閉したことによるものである。

(17) *18 損傷側蒸気発生器水位は１４時３２分以降約８０％で停滞している。水位が停滞しているのは、損傷側蒸気発生器の実際の水位が水位計用管台を超えて上昇したことによるものである。水位が１００％に達していないのは、損傷側蒸気発生器２次側器内水の比重が水位計校正時のそれに比べ小さかったことによるものである。

(18) *19 １次冷却系の圧力は１４時３３分から１４時３５分までの間に急速に低下している。これは、加圧器補助スプレを用いた１次冷却系の減圧によるものと判断した。

(19) *20 加圧器水位は１４時３５分、計測範囲内に回復している。これは、加圧器補助スプレを用いた１次冷却系の減圧により１次冷却系の圧力が低下したため、高圧注入ポンプによる１次冷却系への水の注入量が増加するとともに破断管から損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量が減少し、その結果１次冷却系の保有水量が増加したことによるものと判断した。 （資料-2.2.3）

(20) *21 １次冷却系の圧力は１４時３５分から１４時３７分までの間約９５kg/cm²で停滞傾向を示している。これは、加圧器補助スプレ等による減圧効果が高圧注入ポンプによる１次冷却系への水の注入により加圧器水位が押し上げられたことに伴う昇圧効果により相殺されたことによるものと判断した。

(21) *22 加圧器水位は１４時３７分から１４時４１分までの間に約３％低下している。これは、高圧注入ポンプを停止したことにより１次冷却系への水の注入量が減少したことに加え、破断管から損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材の流出が継続していたことによるものである。

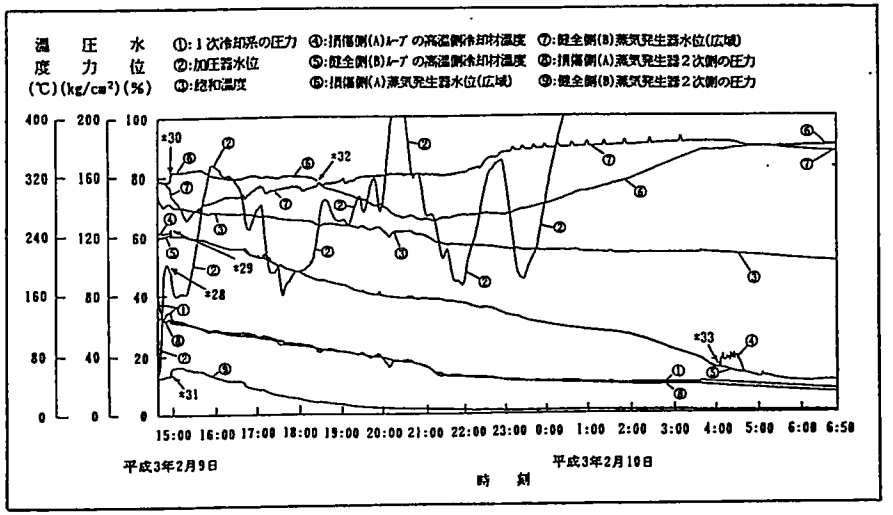
(22) *23 １次冷却系の圧力は１４時３７分から１４時４１分までの間に約１７kg/cm²低下している。これは、加圧器補助スプレ等による減圧効果、加圧器水位の低下に伴う減圧効果及び破断管から損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材の流出による減圧効果が重畳したことによるものと判断した。

(23) *24 健全側及び損傷側ループの高温側冷却材温度は１４時３８分から１４時５７分までの間緩やかに上昇している。これは、高圧注入ポンプの停止に伴い１次冷却系への低温の水の注入量が減少したことによるものである。

(24) *25 加圧器水位は１４時４２分から１４時４８分までの間に約３２％急速に上昇している。これは、１次冷却系の減圧に伴い１次冷却系内の比較的高温の部分にボイドが発生したことによるものと推定した。 （資料-2.2.3）

(25) *26 １次冷却系の圧力は１４時４２分から１４時４８分までの間に約１０kg/cm²低下し、１４時４８分には損傷側蒸気発生器２次側の圧力とほぼ一致している。１次冷却系の圧力の低下傾向が緩やかになっているのは、１次冷却材の損傷側蒸気発生器２次側への流出及び加圧器補助スプレによる減圧効果が１次冷却系内に発生したと推定されるボイドにより加圧器水位が押し上げられたことに伴う昇圧効果を上回っていたことによるものと判断した。

(26) *27 損傷側蒸気発生器２次側の圧力は１４時３９分から１４時４４分までの間緩やかに上昇している。これは、破断管から損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材の流出が継続していたことによるものである。



(27) *28 加圧器水位は１４時５２分から１５時６分までの間に約１１％低下している。これは、１次冷却系内の比較的高温の部分に発生したと推定されるボイドが消滅したことによるものと判断した。

(28) *29 損傷側ループの高温側冷却材温度は１４時５８分、一時的に上昇している。これは、１４時５７分に健全側ループの１次冷却材ポンプを再起動したことにより、損傷側ループでは通常の運転時とは逆向きの１次冷却材の流動が生じたため、比較的高温の損傷側蒸気発生器２次側器内水に保有されていた熱が１次冷却材に伝えられたことによるものと判断した。

(29) *30 損傷側蒸気発生器水位は１４時５８分、急激に上昇している。これは、１４時５７分の健全側ループの１次冷却材ポンプの再起動に伴い、損傷側蒸気発生器２次側に保有されていた比較的高温の器内水が冷却され比重が大きくなったことによるものと判断した。

(30) *31 健全側蒸気発生器２次側の圧力は１４時５８分、急激に上昇している。これは、１４時５７分の健全側ループの１次冷却材ポンプの再起動に伴い、比較的高温の損傷側

蒸気発生器２次側器内水に保有されていた熱が１次冷却系を介して健全側蒸気発生器２次側器内水へ伝達され、加熱されたことによるものと判断した。

(31) *32 損傷側蒸気発生器水位は１７時４８分から２１時１４分までの間低下傾向を示している。これは、１次冷却系の圧力の低下に伴い損傷側蒸気発生器２次側器内水が破断管から１次冷却系へ流入したことによるものである。

(32) *33 損傷側ループの高温側冷却材温度は平成３年２月１０日４時５分から４時３５分までの間健全側ループの高温側冷却材温度を大幅に上回っている。これは、加圧器の冷却のために加圧器補助スプレを使用したため、加圧器内に保有されていた比較的温度の高い１次冷却材が損傷側ループ高温側配管内に押し出されたことによるものである。

2.3 運転操作に関する考察

（資料-2.3.1）

2.3.1 運転操作に関する考察

美浜２号機は、美浜１号機と中央制御室を共用しており、当直課長を含めた１２名で１号機と２号機の運転操作を行うこととしている。

今回の事象においては、運転員以外の原子炉主任技術者等から事象対応の助言を受けるとともに、定期検査中の美浜３号機から、事象収束後の評価に用いる記録採取等の運転操作に関わらない支援を受けている。しかしながら、１号機の運転継続と２号機の事象の収束に当たって、運転員は１２名で適切に対処し、主蒸気隔離弁不完全閉、加圧器逃がし弁不作動といった事態が発生したにもかかわらず、事象を安全に収束させたと評価した。

2.3.2 運転マニュアルに関する考察

運転マニュアルは、運転員の操作、確認に関する手順を定めたものであり、運転員はこれに基づき対処することとしている。

今回の事象においては、運転マニュアルのうち、「蒸気発生器細管もれ（小リークの場合）」、「安全注入自動動作」、「蒸気発生器細管破損（安全注入動作の場合）」及び「原子炉停止（温態停止から冷態停止）」の４つの運転マニュアルを適用した。

これらの運転マニュアルについて検討を行った結果は、以下のとおりである。

(1) 応用操作

運転マニュアルでは、設計で想定される異常な事象について、その異常な事象毎に対処する操作手順を定めている。さらに、万一、設計で想定される事象を超える事象が発生した場合にも対処できるマニュアルを整備することが望ましいとの観点から、プラントの安全上重要な機能を確保するための操作手順を定め、運転マニュアルの充実を図っているところであるが、今回の事象のように蒸気発生器伝熱管破損事象に重畳した主蒸気隔離弁不完全閉、加圧器逃がし弁不作動といった機器の不具合に対する操作手順については記載していなかった。

運転員への負担を軽減し、判断及び操作を容易にするという観点から、異常な事象における安全上重要な機能を有する機器の不具合に対する操作手順についても、運転マニュアルに規定しておく必要がある。

(2) 運転マニュアルの表記方法

運転マニュアルにおいて、機器の操作時期、順序及び条件等の表現が明確になっていない部分が認められた。

また、今回の事象に対して、４つの運転マニュアルを適用していたが、事象の進展、収束に応じて、複数の運転マニュアルを使用することはやむを得ないが、そのつながりが明確になっていない部分が認められた。

このため、運転マニュアルにおける表現の明確化に努める必要がある。

2.4 その他の考察

今回の事象における主蒸気隔離弁不完全閉、加圧器逃がし弁不作動、プラント計算機及び通報連絡等について考察した結果は、以下のとおりである。

2.4.1 主蒸気隔離弁不完全閉について

(1) 概要

今回の事象において、運転員は損傷側蒸気発生器を隔離するため、平成３年２月９日１３時５５分、損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁の閉止操作を中央制御室において行ったが、中央監視盤において同弁の開閉表示灯の開表示と閉表示が両方とも点灯したため同弁の完全閉止を確認することができなかった。このため、機械保修課員が現場においてチェーンブロックを用いて同弁の増締めを行い、１４時２分頃同弁を完全に閉止した。

(2) 主蒸気隔離弁の設計思想と作動原理

主蒸気隔離弁の設計思想と作動原理は、以下のとおりである。

ａ．設計思想

(a) 主蒸気隔離弁は各主蒸気配管に１台ずつ設置されており、要求される機能は以下のとおりである。

イ．蒸気発生器伝熱管損傷事象において、原子炉トリップ後、損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁を閉止し、損傷側蒸気発生器からの放射性物質の放出を抑制する。

ロ．主蒸気管破断事象において、「主蒸気流量高と安全注入信号の一致」等の信号により主蒸気隔離弁は閉止し、蒸気発生器からの蒸気の流出を遮断し、１次冷却材の過冷却による反応度の異常添加を抑制する。

ハ．原子炉冷却材喪失事象において、「原子炉格納容器圧力異常高」の信号により主蒸気隔離弁は閉止し、原子炉格納容器を隔離する。

(b) 主蒸気隔離弁の弁閉止機能については、その作動に当たって外部からの動力の供給（外部入力）を必要としないことから静的機器とされ、「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」及び「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」（以下「安全評価審査指針」という。）に定める単一故障を仮定する必要はない。

ｂ．作動原理

主蒸気隔離弁は、出力運転時には主蒸気隔離弁の駆動装置内へ空気を供給することにより全開状態となっており、手動で又は自動的に主蒸気隔離弁の駆動装置内の空気を排気して、スプリング力及び弁体等の自重により閉止する。 （図-2.4.1.1、2.4.1.2）

(3) 原因調査

ａ．機器点検調査

(a) 損傷側及び健全側蒸気発生器の主蒸気隔離弁の分解点検調査を実施したところ、弁棒グランドパッキン摺動部（以下「弁棒摺動部」という。）に、従来確認されていない黒色の付着物が認められた。 （図-2.4.1.3）

付着物の大半は黒鉛であり、また、アスベストパッキンの油脂分の変質物が検出された。この黒鉛は、黒鉛パッキンの一部がはく離したものであった。

（資料-2.4.1.1）

弁棒摺動部の表面粗度を計測した結果は、０．８Ｓ程度であった。

主蒸気隔離弁のその他の部位については、特に異常は認められなかった。

(b) 損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁に関係する電気系統及び制御用空気系統の各弁等について分解点検等を実施した結果、特に異常は認められなかった。

ｂ．点検履歴の調査

前回定期検査時に損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁の弁棒摺動部に肌荒れが認められたため、弁棒摺動部に通常実施しているサンドペーパー仕上げに加え、弁シート面摺合わせ用の研磨剤を用いた鏡面仕上げ（表面粗度：０．８Ｓ程度）が行われていた。

（資料-2.4.1.2）

ｃ．美浜２号機以外の国内ＰＷＲプラントの主蒸気隔離弁に関する調査

(a) 大飯発電所２号機の主蒸気隔離弁４台の分解点検調査を実施したところ、弁棒摺動部に黒色の付着物は認められず、弁棒摺動部の表面粗度は３．２Ｓ程度であり、通常の仕上げ状態であった。

(b) その他の国内ＰＷＲプラントの主蒸気隔離弁の点検記録を調査したが、弁棒摺動部に鏡面仕上げを行っているものはなかった。（資料-2.4.1.3）

d．模擬試験

実物大の弁棒等を用いて、鏡面仕上げがグランドパッキン摺動抵抗に及ぼす影響に関する模擬試験を実施した結果は、以下のとおりである。

（資料-2.4.1.4、2.4.1.5、2.4.1.6）

(a) 弁棒摺動部に鏡面仕上げ（表面粗度：０．８Ｓ程度）を行った場合、定格出力運転時の温度状態を保持すると、アスベストパッキンから溶出した油脂分は、黒鉛パッキンと弁棒摺動部の隙間に侵入して保持され、この状態で加熱されることにより変質し、付着性が強くなる。この結果、黒鉛パッキンが弁棒摺動部に付着し、グランドパッキン摺動抵抗が設計値の約１．５倍まで増加した。

(b) 弁棒摺動部に通常の仕上げ（表面粗度：３．２Ｓ程度）を行った場合、定格出力運転時の温度状態を保持してもアスベストパッキンから溶出した油脂分は、黒鉛パッキンと弁棒摺動部の隙間に保持されず拡散して変質しない。このため、黒鉛パッキンが弁棒摺動部に付着せず、グランドパッキン摺動抵抗は増加しない。

(4) 原因

前回定期検査時に弁棒摺動部に鏡面仕上げ（表面粗度：０．８Ｓ程度）を実施したため、プラントの運転に伴いアスベストパッキンから溶出した油脂分が、黒鉛パッキンと弁棒摺動部の隙間に侵入して保持され、この状態で加熱されたことにより付着性の強い変質物となった。

この結果、黒鉛パッキンが弁棒摺動部に付着し、グランドパッキン摺動抵抗が設計値の約１．５倍に増加したため、閉弁抵抗が全閉付近での閉弁力を上回り、完全には閉止しなかったものと判断する。（図-2.4.1.4、資料-2.4.1.7）

(5) 考察

a．主蒸気隔離弁の不完全閉の原因は、弁棒摺動部の鏡面仕上げによるものであり、主蒸気隔離弁の弁棒摺動部の保守管理方法を改善する必要がある。

b．主蒸気隔離弁は、閉弁力に十分な余裕がなく完全には閉止しなかったため、閉弁力の増加等の改善を行う必要がある。

2.4.2 加圧器逃がし弁不作動について

(1) 概要

今回の事象において、運転員は加圧器逃がし弁による１次冷却系の減圧操作に備え加圧器逃がし弁の作動用空気の供給を確保するため、平成３年２月９日１４時７分、安全注入信号に伴う原子炉格納容器隔離信号（以下「Ｔ信号」という。）を解除し、Ｔ信号により閉止されていた制御用空気系統の原子炉格納容器隔離弁を開放した。

１４時１０分頃から１４時２５分頃まで、運転員は２台ある加圧器逃がし弁の開放操作による１次冷却系の減圧を試みたが、２台とも作動しなかった。

(2) 加圧器逃がし弁の設計思想と作動原理

ａ．設計思想

(a) 加圧器逃がし弁に要求される機能は、以下のとおりである。

イ．大幅な負荷減少等１次冷却系の圧力が著しく上昇する場合において、加圧器逃がし弁は自動開閉し、１次冷却系の過度の圧力上昇を防止する。

ロ．蒸気発生器伝熱管損傷事象において、加圧器逃がし弁を手動開閉し、１次冷却系を減圧する。

(b) 「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」では、加圧器逃がし弁の手動開閉機能の重要度は異常影響緩和系のクラス２に分類されており、加圧器逃がし弁の電気系統については、非常用電源から給電することが要求されている。

ｂ．作動原理

加圧器逃がし弁は通常の運転時には閉止しており、手動で又は自動的に加圧器逃がし弁駆動部に空気を供給して開放し、加圧器逃がし弁駆動部から空気を排気して閉止する。

（図-2.4.2.1、2.4.2.2）

(3) 原因調査

ａ．加圧器逃がし弁に作動用空気を供給する制御用空気系統（以下「加圧器逃がし弁作動用空気系統」という。）の弁の開閉状態を調査した結果、開となっているべき空気元弁（Ｖ－３３７３）が閉止されていた。（図-2.4.2.2）

ｂ．加圧器逃がし弁作動用空気系統の空気元弁とエアージャンクションボックス（空気分配箱、以下「ＡＪＢ」という。）（ＣＶ－１４）の空気元弁を独立して設置する設計となっておらず、空気元弁（Ｖ－３３７３）は、２台の加圧器逃がし弁及びＡＪＢ（ＣＶ－１４）に空気を供給する共通の空気元弁であった。

なお、このＡＪＢは、定期点検時以外には使用しないものであった。

ｃ．空気元弁（Ｖ－３３７３）の名称表示板には、「ＡＪＢ（ＣＶ－１４）空気元弁」と記載されていた。さらに、空気元弁（Ｖ－３３７３）とＡＪＢ（ＣＶ－１４）が隣接していたことから、空気元弁（Ｖ－３３７３）をこのＡＪＢのみの空気元弁と誤認しやすいものとなっていた。また、空気元弁には開閉状態の表示がなかった。

ｄ．原子炉起動前に行ったＡＪＢの点検記録を調査したところ、運転員が空気元弁（Ｖ－３３７３）を閉止した旨記載されていた。

ｅ．このため、ＡＪＢの点検マニュアル（チェックシート）を調査したところ、「ループ室（原子炉格納容器内の１次冷却系の機器を設置している場所）内のＡＪＢ（ＣＶ－６、ＣＶ－１２）は予備で空気元弁は閉止する」と規定されていたが、ＡＪＢ（ＣＶ－１４）については、具体的な規定が特に記載されていなかった。

ｆ．その他加圧器逃がし弁本体、関係する電気系統及び加圧器逃がし弁作動用空気系統の各弁等について分解点検等を実施した結果、特に異常は認められなかった。

(4) 原因

原子炉起動前に行ったＡＪＢの点検において、運転員はＡＪＢ（ＣＶ－１４）の空気系統が加圧器逃がし弁作動用空気系統と共用しているものとは考えず、ループ室内の予備のＡＪＢと同様にＡＪＢ（ＣＶ－１４）の空気元弁を閉止すべきと考えたため、空気元弁（Ｖ－３３７３）を閉止した。また、空気元弁（Ｖ－３３７３）の閉止が、その後

のＡＪＢの点検記録のチェック過程で見過ごされたため、加圧器逃がし弁に作動用空気が供給されず、２台の加圧器逃がし弁が作動しなかったものである。

(5) 考察

ａ．機器配置に関する考察

加圧器逃がし弁等安全上重要な機能を有する機器の作動用空気は、空気母管から直接分岐した専用の空気配管及び空気元弁により供給できる設備としておく必要がある。

また、安全機能を阻害する可能性のある手動弁の取付けを極力避ける等の誤操作防止のための配慮を行っておく必要がある。

ｂ．運転管理に関する考察

(a) 空気元弁（Ｖ－３３７３）の名称表示板の記載が不適切であったことから、他の名称表示板の記載内容について確認し、改善する必要がある。

(b) ＡＪＢの点検マニュアル（チェックシート）に、ループ室内の予備のＡＪＢの空気元弁を閉止する規定があるが、空気元弁の点検は他の点検マニュアル（チェックシート）にも規定されており、誤操作防止の観点から各マニュアルの点検対象範囲を明確にしておく必要がある。

(c) 空気元弁（Ｖ－３３７３）の閉止が、その後のＡＪＢの点検記録のチェック過程で見過ごされており、主要機器の作業管理に関するチェックシステムを改善する必要がある。

(d) 開閉状況を表示する等手動弁の重要度に応じて管理を充実する必要がある。

ｃ．原子炉格納容器隔離信号に関する考察

加圧器逃がし弁の信頼性向上のため、加圧器逃がし弁作動用空気系統の原子炉格納容器隔離弁の閉止信号は、Ｔ信号から「原子炉格納容器圧力異常高」信号に伴う原子炉格納容器隔離信号に変更する必要がある。

ｄ．類似機器に関する考察

(a) 安全上重要な機能を有する機器については、その使用条件を詳細に検討し、その信頼性を確認する必要がある。

(b) 時代の進展とともにより信頼性を高める新しい設計を採用しているが、古い設計のプラントへの反映は、適時行っているものの必ずしも十分ではなく、今後は、新しい設計が採用されたときには古い設計の妥当性の確認等を行い、必要な対策を実施する必要がある。

2.4.3 プラント計算機について

(1) 概要

今回の事象において当直課長及び運転員がプラントの状況を把握し運転操作を行う上で不可欠な情報は、中央監視盤に設置されている指示計及び記録計等から適切に提供されていた。

他方、今回の事象収束後におけるプラントの応答状況等の評価においてアラームタイプライタ記録及びＰＡＭ（事故後監視計）トレンド記録等が活用されたが、これらの記録の一部に以下の欠落等が認められた。

① アラームタイプライタ記録において各種パラメータの変動により発生すると考えられた「注意信号」及び「機器の動作状況」の一部の記録が原子炉トリップ後約３分間欠落していた。

② ＰＡＭトレンド記録において上部炉心板の上部における１次冷却材の温度（以下「炉心出口温度」という。）の最大値及びサブクール度等のデータが原子炉トリップ後１０分間更新されなかった。

(2) プラントデータ処理システムの構成

プラントを操作する上で不可欠な情報は、各種検出器等から信号として伝送され、中央監視盤の指示計、記録計及び警報窓に表示されている。

また、各種検出器等から信号として伝送された情報の一部は、プラント計算機で処理され、アラームタイプライタ（注１）記録及びＰＡＭトレンド（注２）記録として印字、記録されるシステムとなっている。 (図-2.4.3.1)

（注１） アラームタイプライタのシステムは、異常兆候の早期発見等に資するため、伝送されてきたデータが設定値に達した場合又は主要な機器の動作状態に有意な変化が生じた場合に運転員に対し注意信号を発するとともに印字を行う。

（注２） ＰＡＭトレンドのシステムは、異常な事象が発生した際に中央制御室から離れた場所に設置される緊急時対策所において中央制御室の運転員以外の者が、そのプラントの応答状況等を把握するとともに事象収束後の的確な評価に資するため、主要なプラントパラメータのＣＲＴ表示及びそのデータの印字、保存を行う。

(3) 原因

a．アラームタイプライタ記録

アラームタイプライタのシステムは、プラント計算機で計算された「注意信号」及び「機器の動作状況」に関するデータをタイプライタが印字するまでの間、一時的に、これらのデータを記憶する構成となっている。

今回の事象において、原子炉トリップ後約３分間は、「注意信号」及び「機器の動作状況」の情報が集中し、このデータ記憶容量を超えたことからアラームタイプライタ記録に欠落が生じたものである。

b．ＰＡＭトレンド記録

ＰＡＭトレンドのシステムに係るプラント計算機の処理能力が不足していたため、事象発生に伴う「注意信号」等の割込み処理が増大した原子炉トリップ後１０分間は、炉心出口温度の最大値（注）等の計算が行われず、そのためＰＡＭトレンド記録の一部が更新されなかったものである。 (図-2.4.3.2)

（注） 炉心出口温度の最大値は、３９個の炉心出口温度計のうち１３個の測定値から８秒毎に求められることとなっている。

(4) 考察

今回のような事象が発生した場合においても、プラントの応答状況等を的確に評価するため、アラームタイプライタ記録及びＰＡＭトレンド記録に欠落等が発生しないよう、プラント計算機を改善する必要がある。

2.4.4 通報連絡等について

今回の事象に係る地元自治体等への通報連絡及び発電所見学者に対する対応については以下のとおりである。

(1) 地元自治体等への通報連絡について

a．通報連絡の実施状況

発電所において、異常な事象が発生した場合は地元自治体等に対し通報連絡を行うこととしている。

今回の事象発生は休日であったが、休祭日においても通報連絡等の対応のため休日当番体制を敷いて、これに備えることとしていた。しかしながら、今回の事象発生時の通報連絡は福井県に対しては平成３年２月９日１４時１７分、美浜町に対しては１４時４４分となり、また、敦賀市には翌２月１０日に状況説明を行うといった、迅速性に欠ける点があった。（資料-2.4.4.1）

b．考察

異常な事象発生時における地元自治体等に対する迅速、確実な通報連絡体制の一層の充実が必要である。

(2) 発電所見学者に対する対応について

a．見学者対応状況

今回の異常事象発生時及びその直後において、美浜発電所の構内見学に訪れた見学者は４組であったが、異常事象発生時に発電所構内にいる見学者に対する対応手順が定められていなかったことから、通常どおりの見学者対応が実施され、見学者に対し事象の概要説明等を行わなかった。（資料-2.4.4.2）

b．考察

異常な事象発生時においては、必要に応じ、見学の中止、見学者の誘導、見学者に対する事象の概要説明など、発電所見学者に対し迅速かつ、的確な対応を行う必要があるが、この点で対応上の不手際があった。

3．事象の評価

今回の事象の経過と考察を踏まえ、事象の再現解析、炉心の健全性及び放射性物質の放出量等を評価した結果は以下のとおりである。

3.1 事象の再現解析

(1) 解析の目的

今回の事象における１次冷却系の圧力及び蒸気発生器２次側の圧力等の計測値を解析により再現することで、損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量等の計測又は記録されていないデータであって今回の事象を把握する上で重要なものを的確に推計する。

(2) 解析に用いた計算コード

解析には、ＭＡＲＶＥＬコードを用いた。本コードは原子炉設置変更許可時の原子炉施設の安全評価のための解析において用いられている。また、本コードは実際のプラントの運転により得られたデータとの照合等により、その妥当性が認められているものである。（資料-3.1.1）

なお、解析に当たっては今回の事象を再現するため、ＭＡＲＶＥＬコードに対して部分的な変更を加えた。（表-3.1.1、資料-3.1.2）

(3) 解析条件

解析条件は、表-3.1.2のとおりである。

(4) 解析結果

解析結果と計測値の比較は図-3.1.1-(1)から図-3.1.1-(8)に示すとおりであり、解析は今回の事象をよく再現していると判断する。損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量等の解析結果は、以下のとおりである。

損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量	約 ５５ トン
損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁からの蒸気放出量	約 １．３ トン
損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁下流側への蒸気流出量	約 ６．８ トン

（資料-3.1.3）

安全注入量（注）	約 ５０ トン

（注）　ＰＡＭトレンド記録による安全注入流量のデータは、低流量域では計測誤差が大きいため、以下の評価においては本解析結果を用いている。

（図-3.1.2-(1),(2)）

3.2 炉心の健全性評価

今回の事象においては、原子炉トリップ信号の発信に伴い炉外中性子束が急減し、原子炉は停止した。（図-3.2.1）

このため、燃料の出力は十分低く、燃料被覆管から１次冷却材への熱流束が限界熱流束（注１）に達していなければ燃料棒が破損することはないことから、今回の事象における炉心（原子炉容器内で燃料集合体が装荷されている領域）の健全性について、安全評価審査指針に定義される「運転時の異常な過渡変化」に対する判断基準である限界熱流束比（以下「ＤＮＢＲ」という。（注２））に基づき評価した。

（注１）　燃料被覆管から１次冷却材への熱伝達が低下し、燃料被覆管温度が急上昇し始める熱流束

（注２）　限界熱流束と実際の熱流束の比（ＤＮＢＲ＝限界熱流束／実際の熱流束）として定義されており、この値が大きいほど安全裕度は大きい。また、ＤＮＢＲの許容限界値はＤＮＢ相関式を作成する際の試験データのばらつきを考慮して定められており、ＭＩＲＣ－１相関式の場合には１．１７とされている。

(1)　解析に用いた計算コード及び相関式　（資料-3.2.1）

ＤＮＢＲの解析には、原子炉トリップ直後まではＴＨＩＮＣ－Ⅲコード（ＤＮＢ相関式：ＭＩＲＣ－１相関式）を用いた。

また、その後は、ＭＡＣＢＥＴＨ相関式を用いた。

なお、これらの解析に必要な熱流束については、ＦＡＣＴＲＡＮコードを用いて求めた。

これらのコード及び相関式は、原子炉設置変更許可時の原子炉施設の安全評価のための解析において用いられている。

(2)　解析条件

解析条件は、表-3.2.1のとおりである。

(3)　解析結果とその評価

最小ＤＮＢＲの解析結果は、図-3.2.2のとおりである。

最も厳しい炉心位置における最小ＤＮＢＲは、原子炉トリップ前において約２．７６であった。この値は、許容限界値１．１７を下回っていない。

このため、今回の事象においては、燃料被覆管から１次冷却材への熱伝達が低下して燃料被覆管温度が急上昇し始める状態には至っておらず、燃料棒は破損していない。

3.3 環境への放射性物質の放出量とその影響評価

今回の事象における環境への放射性物質の放出量とその周辺公衆へ及ぼす影響の評価結果は、以下のとおりである。

3.3.1 環境への放射性物質の放出量の算出及びその評価

(1) 算出方法

今回の事象における放射性物質の放射量の算出に当たっては、損傷側蒸気発生器の主蒸気配管内の蒸気の放射能濃度の測定値はなかったものの、各放出経路毎に放射線モニタの実測値がある場合にはその実測値（Ｒ－１５及び１号機補助建屋排気筒ガスモニタの記録）を用い、放射線モニタの実測値がない場合には表-3.3.1に示す測定値及び「3.1 事象の再現解析」で求めた解析値等を用いた。

大気へ放出された放射性物質は、１次冷却材の放射性物質の濃度の測定値から放射性希ガス及び放射性よう素を評価の対象とした。（表-3.3.2）

海へ放出された放射性物質については、美浜発電所原子炉施設保安規定に年間放出管理目標値を定めている核種を評価の対象とした。（資料-3.3.1）

なお、トリチウムは、低エネルギーの純ベータ線放出核種であり、実効線量当量への寄与が小さいため、評価の対象としていない。（資料-3.3.2）

(2) 主な放出経路

今回の事象において損傷側蒸気発生器の損傷管を通じ、損傷側蒸気発生器２次側へ流出した１次冷却材に含まれていた放射性物質は、損傷側蒸気発生器２次側器内水で希釈され、そのほとんどは損傷側蒸気発生器２次側器内水に残留したが、その一部は蒸気とともに損傷側蒸気発生器の主蒸気配管を通じ損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁下流側等へ、又は液体の状態で蒸気発生器ブローダウンタンクへ移行した。

損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁下流側へ移行した蒸気に含まれていた放射性物質は、損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁が完全に閉止されるまでの間は、復水器空気抽出ポンプ、脱気器ベント、１号機補助建屋排気筒及びグランドスチームコンデンサベントからその一部が大気へ放出された。また、損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁が完全に閉止された後は、１号機補助建屋排気筒、損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁等からその一部が大気へ放出された。

蒸気発生器ブローダウンタンクへ移行した液体に含まれていた放射性物質の一部は、蒸気発生器ブローダウンタンクベントから大気へ、又は蒸気発生器ブローダウン隔離弁の自動閉止までの間は海へ放出された。（表-3.3.3、図-3.3.1）

(3) 放射性希ガス及び放射性よう素の大気への放出量の算出

a．復水器空気抽出ポンプ及び脱気器ベントからの放出

復水器空気抽出ポンプからの放出期間は、１２時４０分（Ｒ－１９の記録が若干の上昇傾向を示した時点）から１３時４０分（復水器空気抽出ポンプからの放出経路が大気への直接放出からチャコールフィルタ経由の１号機補助建屋排気筒側へ自動的に切り替えられた時点）までの間とした。

また、脱気器ベントからの放出期間は、１２時４０分（同上）から１３時４０分（脱気器ベントからの放出経路が大気への直接放出から復水器側へ自動的に切り替えられた時点）までの間とした。

放射性希ガスの放出量は、この期間内のＲ－１５の記録、復水器空気抽出ポンプの排気量並びに復水器及び脱気器への蒸気流入量から算出した。

放射性よう素の放出量は、損傷側蒸気発生器２次側器内水の放射性よう素濃度並びにこの期間内の復水器及び脱気器への蒸気流入量に基づき、蒸気発生器及び復水器におけるよう素の気液分配係数（液相に含まれる放射性物質の濃度に対する気相中に存在する放射性物質の濃の度比）を考慮して算出した。

b．１号機補助建屋排気筒からの放出

復水器空気抽出ポンプからの放出経路は１３時４０分に大気への直接放出からチャコールフィルタ経由の１号機補助建屋排気筒側へ自動的に切り替えられ、１３時５０分にチャコールフィルタ経由の１号機補助建屋排気筒側から原子炉格納容器側へ自動的に切り替えられたが、放射性希ガスがチャコールフィルタに保持されたため、１号機補助建屋排気筒からの放出期間は、１３時４０分から１号機補助建屋排気筒ガスモニタの記録が通常値となった１６時０分までの間とした。

放射性希ガスの放出量は、この期間内の１号機補助建屋排気筒ガスモニタの記録及び１号機補助建屋排気筒の排気量から算出した。

なお、放射性よう素はチャコールフィルタで除去されたため、この期間内の排気中の

放射性よう素濃度は検出限界値以下であり、放射性よう素の有意な放出はなかったと判断される。

c．グランドスチームコンデンサベントからの放出

グランドスチームコンデンサベントからの放出期間は、１２時４０分（Ｒ－１９の記録が若干の上昇傾向を示した時点）から１４時２分（損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁が完全に閉止された時点）までの間とした。

放射性希ガスの放出量は、１２時４０分から１３時５０分（タービンがトリップした時点）までの間は復水器空気抽出ポンプ及び１号機補助建屋排気筒からの放射性希ガスの放出量並びに復水器及びグランドスチームコンデンサへの蒸気流入量から、また、１３時５０分から１４時２分までの間は損傷側蒸気発生器の２次側に流出した１次冷却材に含まれていた放射性希ガスの量並びに損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁下流側への蒸気流出量及びグランドスチームコンデンサへの蒸気流入量から放出した。

また放射性よう素の放出量は、損傷側蒸気発生器２次側器内水の放射性よう素濃度及びグランドスチームコンデンサへの蒸気流入量に基づき、蒸気発生器におけるよう素の気液分配係数を考慮して算出した。

d．損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁等からの放出

損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁からは、１４時１９分、１４時２９分及び１４時３９分に３回作動した際に放出された。

放射性希ガスの放出量は、損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁のそれぞれの作動時までに損傷側蒸気発生器２次側に流出した１次冷却材に含まれていた放射性希ガスの量及び損傷側蒸気発生器２次側の蒸気量に対する損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁からの蒸気放出量の割合から算出した。

放射性よう素の放射量は、損傷側蒸気発生器２次側器内水の放射性よう素濃度及び損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁からの蒸気放出量に基づき、蒸気発生器におけるよう素の気液分配係数を考慮して算出した。

また、１次冷却系と損傷側蒸気発生器２次側の圧力がほぼ一致した時点（１４時４８分）以降の２４時間における損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁及び主蒸気安全弁からの大気への漏洩についても算出することとし、これらの弁の設計漏洩率を考慮して算出

した。

e．蒸気発生器ブローダウンタンクベントからの放出

蒸気発生器ブローダウンタンクベントからの放出時間は、１２時４０分（Ｒ－１９の記録が若干の上昇傾向を示した時点）から１３時４５分（蒸気発生器ブローダウン隔離弁が自動的に閉止した時点）までの間とした。

放射性希ガスの放出量は、損傷側蒸気発生器２次側器内水の放射性希ガス濃度及びこの期間内の損傷側蒸気発生器ブローダウン水の流量から算出した。

放射性よう素の放出量は、損傷側蒸気発生器２次側器内水の放射性よう素濃度及びこの期間内の損傷側蒸気発生器ブローダウン水の流量に基づき、蒸気発生器ブローダウンタンクにおけるよう素の気液分配係数を考慮して算出した。

なお、健全側蒸気発生器からの放射性物質の放出については、健全側蒸気発生器２次側器内水の放射性希ガス濃度及び放射性よう素濃度の分析結果が検出限界値以下であったことを踏まえ、健全側蒸気発生器からの有意な放出はなかったと判断される。

(4) 放射性物質の海への放出量の算出

放射性物質の海への放出経路は、蒸気発生器ブローダウンタンクからのみであり、蒸気発生器ブローダウンタンクからの放出期間は、１２時４０分（Ｒ－１９の記録が若干の上昇傾向を示した時点）から１３時４５分（蒸気発生器ブローダウン隔離弁が自動的に閉止した時点）までの間とした。

放出量は、この期間内の損傷側蒸気発生器及び健全側蒸気発生器の２次側器内水の放射能濃度及び蒸気発生器ブローダウン水の流量から算出した。

(5) 算出結果 (表-3.3.4)

算出結果は、以下のとおりである。

大気へ放出された放射性希ガス	約2.3×10^{10}Bq（約0.6Ci）
大気へ放出された放射性よう素	約3.4×10^{8}Bq（約0.01Ci）
海へ放出された放射性物質	約7.0×10^{6}Bq（約2×10^{-4}Ci）

(6) 評価結果

放射性希ガス及び放射性よう素の大気への放出量並びに放射性物質の海への放出量は、美浜発電所原子炉施設保安規定に定める放射性気体廃棄物の放射性物質の年間放出管理目標値（放射性希ガス2.1×10^{15}Bq、よう素１３１：7.4×10^{10}Bq）並びに放射性液体廃棄物の放射性物質の年間放出管理目標値（1.1×10^{11}Bq）を十分に下回っている。

3.3.2 実効線量当量の算出及びその評価

(1) 算出方法

今回の事象に伴い大気へ放出された放射性物質により周辺公衆が受けると考えられる実効線量当量の算出方法は、以下のとおりである。 （資料-3.3.3）

a．放出モード

実効線量当量の算出に当たっては、１号機補助建屋排気筒からの放出については放出源の有効高さを考慮し、その他の経路からの放出については放出源の有効高さを考慮しない地上付近の放出とした。

平成３年２月９日１２時から１６時までの気象データ（風向、風速、大気安定度）を用いて、各放出経路毎に各々の放出期間において１時間毎とのＤ／Ｑ（放出性物質の単位放出率当たりの空気吸収線量率）及びχ／Ｑ（放射性物質の単位放出率当たりの放射性物質の濃度）を算出した。

b．大気へ放出された放射性希ガスによる実効線量当量

大気へ放出された放射性希ガスの各核種から放出されるガンマ線エネルギーを０．５MeVで換算した上で、Ｄ／Ｑが最大となる１時間に放射性希ガスが全て放出されるものとして実効線量当量を算出した。

c．大気へ放出された放射性よう素による実効線量当量

大気へ放出された放射性よう素の各核種の放出量をよう素１３１等価換算した上で、χ／Ｑが最大となる１時間に放射性よう素が全て放出されるものとして呼吸摂取による小児の実効線量当量を算出した。

(2) 算出結果

大気へ放出された放射性希ガス及び放射性よう素による実効線量当量は、約1×10^{-5}mSv（約1×10^{-3}mrem）であった。（表-3.3.5）

(3) 評価結果

大気へ放出された放射性物質により周辺公衆が受けると考えられる実効線量当量の算出結果は、安全評価審査指針における事故時の実効線量当量の判断基準（５mSv）を十分に下回っている。

また、この値は、自然界からの放射線によって人が１年間に受ける実効線量当量（約１mSv）に対しても約１０万分の１の値であり、周辺公衆に対し影響を与えるものでない。

なお、美浜発電所周辺における空間放射線の線量率の連続測定値及び浮遊じん、海水、海産生物等の各種環境試料の放射性物質の濃度分析結果は、平常時と比較して有意な変化はなく今回の事象に伴う周辺環境への影響は認められない。

（資料-3.3.4.3.3.5）

3.4 原子炉設置変更許可時の安全評価のための解析と今回の事象の比較とその評価

(1) 蒸気発生器伝熱管損傷事象の考え方

安全評価審査指針において蒸気発生器伝熱管損傷事象は、蒸気発生器の伝熱管の破損により１次冷却材が蒸気発生器２次側へ流出し、主蒸気逃がし弁等を通じて原子炉格納容器の外部に放出される事象とされている。

この蒸気発生器伝熱管損傷事象は、１次冷却材が１次冷却系外へ流出するため原子炉冷却材喪失事象の一形態とも考えられるが、炉心の冷却性の観点からは原子炉設置変更許可時の原子炉冷却材喪失事象の方がより厳しい事象となっており、この原子炉冷却材喪失事象の解析により非常用炉心冷却装置の性能を評価している。

一方、原子炉冷却材喪失事象においては放射性物質が原子炉格納容器内に放出されるのに対して、蒸気発生器伝熱管損傷事象においては放射性物質が原子炉格納容器の外部に直接放出されるため、安全評価審査指針において「新たに燃料棒の破損が生じないこと」を確認した上で「周辺の公衆に対し、著しい放射線被ばくのリスクを与えないこと」を評価することとされている。

このため、原子炉設置変更許可時の蒸気発生器伝熱管損傷事象の安全評価のための解析においては、実効線量当量の評価結果を最も厳しくする機器の単一故障を仮定するのに加えて、実効線量当量の評価結果をより厳しくする解析条件（燃料被覆管欠陥率、高圧注入ポンプの注入特性等）を選定することとされている。

(2) 原子炉設置変更許可時の安全評価のための解析と今回の事象の比較

美浜発電所原子炉設置変更許可申請書（平成２年９月１７日許可）の美浜２号機に係る蒸気発生器伝熱管損傷事象の安全評価のための解析（以下「安全解析」という。）の解析結果と今回の事象の再現解析の解析結果との比較は、図-3.4.1のとおりである。

また、安全解析の解析条件、解析結果及び評価結果と今回の事象の経過、解析結果及び評価結果の相違点は、表-3.4.1のとおりである。

a．「新たに燃料棒の破損が生じないこと」について

「3.2 炉心の健全性評価」で評価したとおり、今回の事象における最小ＤＮＢＲは約２．７６であった。これに対し、安全解析によれば最小ＤＮＢＲは約１．３９であり、今回の事象における最小ＤＮＢＲは安全解析の評価結果を上回っている。

b．「周辺の公衆に対し、著しい放射線被ばくのリスクを与えないこと」について

「3.3 環境への放射性物質の放出量とその影響評価」で評価したとおり、今回の事象における実効線量当量は約1×10^{-5}mSv であった。これに対し、安全解析によれば実効線量当量は約０．３９mSv であり、今回の事象における実効線量当量は安全解析の評価結果を下回っている。

(3) 結論

今回の事象の経過は加圧器逃がし弁不作動等安全解析の条件と相違している部分がある。しかしながら、蒸気発生器伝熱管損傷事象全体としてみれば安全解析の結果とほぼ類似しており、かつ安全解析上着目すべき燃料の健全性及び周辺の公衆に対する放射線被ばくのリスクの観点からみれば、今回の事象は「新たに燃料棒の破損が生じないこと」及び「周辺の公衆に対し、著しい放射線被ばくのリスクを与えないこと」の両方の条件を満足しており、安全解析の評価結果の範囲内であると判断する。

3.5 原子炉容器等の健全性評価

今回の事象では、高圧注入ポンプ等の作動により原子炉容器等の１次冷却系へ水が注入された。これに伴って発生した温度変化は、脆性破壊及び熱応力の観点から、構造物の健全性に対して影響を及ぼす可能性がある。このため、今後の使用に当たっての原子炉容器等の健全性を確認する目的で加圧熱衝撃及び熱疲労に関する検討を行った。

3.5.1 加圧熱衝撃に関する検討

加圧熱衝撃（以下「ＰＴＳ」という。）とは、高温高圧の原子炉容器内で何らかの原因により急激な冷却が起こると、原子炉容器内外面間の温度差による熱応力が発生し、これと原子炉容器の内圧による応力が重畳して引張応力が原子炉容器内面に発生する事象である。

一方、原子炉容器の構成材である低合金鋼は、材料固有のある温度以下になると靭性が急激に小さくなり、脆くなる性質がある。また、この温度は多量の高速中性子の照射を受けると上昇する。

このため、原子炉容器内面の多量の高速中性子の照射を受ける部分に万一欠陥が存在する場合には、ＰＴＳによって原子炉容器内面に発生する引張応力がある限度を超えると、欠陥が進展し、原子炉容器は損傷するおそれがある。

今回の事象における原子炉容器のＰＴＳに関する評価は、以下のとおりである。

(1) 評価対象部位

今回の事象では、高圧注入ポンプの起動によって１次冷却系低温側配管及び上部プレナム部へ水が注入された。また、高圧注入ポンプ停止後の１次冷却系の保有水量の制御等のため再起動した充てんポンプによって健全側ループ低温側配管へ水が注入された。（資料-3.5.1.1）

このうち、上部プレナム部への水の注入による影響については、多量の高速中性子の照射を受ける原子炉容器の炉心領域部内面が上部プレナム部へ注入された水により直接冷却されないこと、及び上部プレナム部は高速中性子の照射量が10^{16}n/cm^2 以下と低く高速中性子の照射による脆化の影響が無視できる程度であることから、ＰＴＳに関する評価上問題とはならない。（図-3.5.1.1）

以上のことから、ここでは、１次冷却系低温側配管への水の注入が原子炉容器の炉心領域部に及ぼす影響について評価を行った。

(2) 原子炉容器の温度による評価

今回の事象における原子炉容器の脆性破壊に対する健全性を評価するため、原子炉容器の炉心領域部の最低到達温度と原子炉容器のＲＴ$_{NDT}$（関連温度：材料の靭性の目安を示す温度で、これ以下では材料の脆性破壊が発生する可能性のある温度）との比較を以下のとおり実施した。

a．解析条件

１次冷却材の温度は、１次冷却系の自然循環によって大きく影響を受けるため、自然循環の状況が異なる健全側ループ及び損傷側ループそれぞれについて解析を行った。

原子炉容器の炉心領域部の温度算出に当たり、以下の条件を設定した。なお、原子炉容器の炉心領域部の温度としては、温度低下の効果を厳しく評価するため、原子炉容器ダウンカマ上部における温度で代表させた。

(a) 解析対象時間

解析対象時間は、損傷側ループについては高圧注入ポンプが起動した平成３年２月９日１３時５０分からこれを停止した１４時３７分まで、健全側ループについては同じく１３時５０分から化学体積制御系統を復旧させた１５時５分までとした。

(b) １次冷却系低温側配管への注入量

高圧注入ポンプによる１次冷却系低温側配管への注入量については、「3.1 事象の再現解析」に示す解析結果を用いた。また、充てんポンプによる健全側ループ低温側配管への注入量については、「3.6 炉心の健全性に関するその他の考察」に示す充てん量を参考として設定した。（資料-3.5.1.2）

(c) １次冷却系低温側配管へ注入された水の温度

１次冷却系低温側配管へ注入された水は燃料取替用水タンク等を水源としている。解析では温度低下の効果を厳しく評価するため、通常３０℃で温度制御されている燃料取替用水タンクの水温を温度低警報の設定値である２７℃に設定して、これを注入された水の温度とした。

(d) 自然循環流量

自然循環流量については、「3.6 炉心の健全性に関するその他の考察」に示す解析結果を参考として、温度低下の効果を厳しく評価するよう以下のとおり設定した。

健全側ループについては、定格流量の４％とした。

損傷側ループについては、原子炉トリップ直後は定格流量の４％とし、その後蒸気発生器での熱除去が行われないため１４時１０分には定格流量の１％まで低下し、この時点以降、定格流量の０％とした。（図-3.5.1.2）

(e) 原子炉容器ダウンカマ上部での１次冷却材の温度

原子炉容器ダウンカマ上部での１次冷却材の温度については、１次冷却材の温度検出器、安全注入管台及び充てん管台の位置関係並びに１次冷却材回路を流れる水（以下「ループ流」という。）と１次冷却系低温側配管へ注入される水の混合状況を考慮して以下のとおり設定した。

健全側ループについては、ループ流と健全側ループ低温側配管へ注入された水は自然循環により完全混合状態になるため、両者の混合平均温度を原子炉容器ダウンカマ上部での１次冷却材の温度とした。ここで、ループ流の温度は「3.6 炉心の健全性に関するその他の考察」に示す低温側冷却材温度の記録を用いた。

損傷側ループについては、自然循環停止（１４時１０分）までは、ループ流と損傷側ループ低温側配管へ注入された水は自然循環により完全混合状態になるため、健全側ループと同様に両者の混合平均温度を原子炉容器ダウンカマ上部での１次冷却材の温度とした。自然循環停止後は、美浜２号機の１／３モデルでの混合挙動の把握試験の結果に基づいて解析した。（図-3.5.1.3、資料-3.5.1.3、3.5.1.4、3.5.1.5）

(f) 原子炉容器の熱伝導解析

原子炉容器の炉心領域部の温度算出に当たっては、算出した原子炉容器ダウンカマ上部での１次冷却材の温度を用いて１次冷却材から原子炉容器への熱伝達及び原子炉容器の板厚方向の熱伝導を考慮した。

b．解析結果

原子炉容器ダウンカマ上部での１次冷却材の温度及び原子炉容器の炉心領域部の温度の解析結果は、以下のとおりである。（図-3.5.1.4）

(a) 原子炉容器ダウンカマ上部での１次冷却材の温度

原子炉容器ダウンカマ上部での１次冷却材の温度は、健全側ループでは２１１℃まで低下した。一方、損傷側ループでは、１４時１０分に自然循環が停止して高温の１次冷却材の循環がなくなるため、１７３℃まで低下した。

(b) 原子炉容器の炉心領域部の温度

原子炉容器の炉心領域部の温度は、後述する破壊力学による評価手法における評価点である仮想欠陥先端部において健全側ループで２１９℃、損傷側ループで１９５℃まで低下した。

c．温度評価

昭和５５年に美浜２号機の原子炉容器の監視試験を実施している。このときに取り出された監視試験片が受けた高速中性子の照射量は、約１３ＥＦＰＹ（定格負荷相当年数）運転した原子炉容器内面の高速中性子の照射量に相当し、そのＲＴ$_{NDT}$は５９℃であった。今回の事象の発生時点までの原子炉容器内面の高速中性子の照射量は約１２ＥＦＰＹ相当であることから、原子炉容器のＲＴ$_{NDT}$はほぼこの試験片のＲＴ$_{NDT}$に相当する。

一方、原子炉容器の炉心領域部の最低到達温度は１９５℃であることから、今回の事象では、原子炉容器は十分な余裕をもって、脆性破壊が発生する可能性のある温度領域にはなかった。

(3) 破壊力学による評価

昭和５８年度から平成３年度までの予定で実施している「原子炉圧力容器加圧熱衝撃試験」において実証された破壊力学による評価手法を用い、今回の事象に係る原子炉容器の健全性を評価した。この評価手法は、材料中に欠陥が存在していることを仮想する厳しい条件で評価するもので、仮想欠陥周辺の応力状態を特徴づけるパラメータであるK_I（応力拡大係数）と材料の脆性破壊に対する抵抗の大きさを示すK_{IC}(破壊靭性値)とを比較し、両者を図示した曲線が交差しなければ、仮想欠陥は進展しないというものである。（資料-3.5.1.6、3.5.1.7）

a．評価条件

今回の事象に関するK_{IC}とK_Iを以下のとおり設定した。

(a) K_{IC}下限包絡曲線

K_{IC}については、美浜２号機の中性子照射前及び監視試験時の切欠付き試験片の試験結果から求められている。このK_{IC}の値を今回の事象の発生時点相当の高速中性子の照射を受けたK_{IC}の値に補正し、これらを包絡するK_{IC}下限包絡曲線を設定した。

(b) K_Iの算出

K_Iについては、内圧による応力、熱応力及び仮想欠陥の大きさから求めた。

内圧による応力については、今回の事象による１次冷却系の圧力変化を考慮し、１０５kg/cm^{2}で一定として算出した。

また、熱応力については、原子炉容器ダウンカマ上部での１次冷却材の温度の時間変化、１次冷却材から原子炉容器への熱伝達及び原子炉容器の板厚方向の熱伝導を考慮して原子炉容器の温度分布を求めて算出した。

仮想欠陥は、原子炉容器内面に存在するものとし、原子炉容器の超音波探傷試験の検出可能な寸法等を厳しく評価して深さ１０mm、長さ６０mmとした。

b．評価結果

K_{IC}下限包絡曲線とK_I曲線を比較すると、健全側ループ及び損傷側ループともにK_{IC}とK_Iは大きく離れていることから、仮想欠陥の進展はなく原子炉容器の脆性破壊の可能性はなかった。（図-3.5.1.5）

(4) 結論

今回の事象においては、原子炉容器の温度による評価結果及び破壊力学による評価結果から、脆性破壊の可能性はなかった。したがって、ＰＴＳに関する評価上、原子炉容器への影響は生じておらず、今後の原子炉容器の使用に当たって問題となるものではないと判断される。

3.5.2 熱疲労に関する検討　（資料-3.5.2.1）

構造部材中に温度差が生じると、熱ひずみが発生する。熱疲労とは、この熱ひずみの発生が繰り返されることにより材料がやがて損傷する現象である。

今回の事象では、高圧注入ポンプ等の作動により原子炉容器等の１次冷却系へ水が注入された。

１次冷却系へ水が注入されると、原子炉容器、配管等の構造部材中に温度差が生じ、熱ひずみが発生する。このひずみの繰り返しによる疲労損傷への影響については、設計時に１次冷却系への水の注入を含めた過渡事象について評価を実施しているが、ここでは今回の事象による疲労への寄与について評価を行った。以下にその内容を示す。

(1)　疲労評価

評価対象部位、温度・圧力等の過渡条件及び解析手法は、以下のとおりである。

a．評価対象部位　（図-3.5.2.1）

今回の事象では、平成３年２月９日１３時５０分に高圧注入ポンプが起動し、１次冷却系低温側配管の安全注入管台を通じて燃料取替用水タンク等から水が注入され、さらに、５分後に原子炉容器の上部プレナム部への安全注入ライン止め弁が自動的に開放されたことにより原子炉容器の安全注入管台を通じて水が注入された。

また、１４時９分には高圧注入ポンプ停止後の１次冷却系の保有水量の制御等のために充てんポンプを再起動し、これにより健全側ループ低温側配管の充てん管台を通じて、１４時１８分までは体積制御タンクから、それ以降は燃料取替用水タンクから水が注入された。

さらに、１４時３４分に１次冷却系の減圧操作のため加圧器補助スプレ弁を使用したことにより、加圧器のスプレライン用管台を通じて加圧器へも燃料取替用水タンクの水が注入された。

以上のことから燃料取替用水タンク等からの水が注入された部位のうち、温度変化の大きい以下に示す部位を評価対象とした。

①　１次冷却系低温側配管の安全注入管台
②　１次冷却系低温側配管
③　原子炉容器の入口管台
④　原子炉容器の安全注入管台
⑤　１次冷却系低温側配管の充てん管台

⑥　加圧器のスプレライン用管台

なお、他の部位については、注入された水による温度変化は小さくこれらの部位の評価を行うことで包絡される。

b．過渡条件

それぞれの評価対象部位に適用する過渡条件については、今回の事象における１次冷却系等の圧力、温度及び流量を以下のとおり設定した。

(a)　全ての評価対象部位の圧力変化については、「3.1 事象の再現解析」に示す解析結果を適用した。

(b)　１次冷却材回路の低温側冷却材の温度変化については、図-3.5.2.2のとおり設定した。

ただし、損傷側ループ低温側配置及び原子炉容器の損傷側ループ入口管台では熱成層現象（注）が生じることを考慮し、「3.5.1 加圧熱衝撃に関する検討」で用いた美浜２号機の１／３モデルでの混合挙動の把握試験の結果に基づいて温度変化を設定した。

（注）　熱成層現象とは、流体の温度が配管内で均一とならず、層状の温度分布となる現象である。

(c)　加圧器内の温度変化は、「3.1 事象の再現解析」に示す解析結果の圧力に対する飽和温度の変化を適用した。

(d)　１次冷却系へ注入された水の温度変化は、以下のとおり設定した。

イ．各系統からの注入開始及び終了時刻は、「2.1 事象の経過」に示すポンプの起動停止時刻あるいは弁の開閉時刻とした。

ロ．注入された水の温度は水源の警報設定温度等に基づき温度変化幅が大きく、かつ、温度変化率が厳しくなるように設定した。　（図-3.5.2.3）

ハ．前記ロ．で設定した温度の持続期間は、系統を構成する容器及び配管の容積と注入流量を用いて設定した。ただし、ここでの注入流量としては「3.1 事象の再現解析」に示す解析結果等を基に、冷却が行われる時間を長めに評価するように設定した。

(e) 高圧注入ポンプにより１次冷却系へ注入された水の流量は、「3.1 事象の再現解析」に示す解析結果及びＰＡＭトレンド記録の最大値を包絡する一定値とした。また、充てんポンプより充てんライン及び加圧器補助スプレラインへ注入された水の流量は、充てんポンプの設計上の最大流量に基づいて設定した。

なお、今回の事象において１次冷却系へ注入された水の乱れによる壁面局部の微小な温度変動については、それに伴い発生する応力が疲労限以下であり疲労評価に影響を及ぼすものではないことから過渡条件には考慮していない。

c．解析手法

美浜２号機の評価対象部位の形状に基づいた解析モデルを作成し、以下のとおり応力を算出し、それに基づく疲労評価を行った。 (表-3.5.2.1)

(a) 評価対象部位のうち管台部については、有限要素法等により、また、１次冷却系低温側配管については「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（昭和５５年通商産業省告示第５０１号）」（以下「告示５０１号」という。）により、応力の算出を行った。

(b) 疲労評価は、告示５０１号により実施した。

(2) 疲労評価結果

a．今回の事象による疲れ累積係数への寄与

評価部位に対する今回の事象による疲れ累積係数（注１）への寄与は、以下のとおりであった。

１次冷却系低温側配管の安全注入管台	０．００３
１次冷却系低温側配管	０．００６
原子炉容器の入口管台	０．００１
原子炉容器の安全注入管台	０．００８
１次冷却系低温側配管の充てん管台	０．００１
加圧器のスプレライン用管台	０．００１

（注１） 疲れ累積係数とは、疲労損傷にいたるまでの疲労の累積の程度を表す係数であり、以下のように示される。

$$U = \Sigma U_i \quad , \quad U_i = \frac{N_i}{N_i^*}$$

U ：疲れ累積係数

N_i ：荷重の組合せｉの実際の繰返し数

N_i^*：荷重の組合せｉの繰返しピーク応力強さに対応する許容繰返し数

b．疲れ累積係数

最新の設計評価基準において用いられているプラントの起動・停止、負荷の喪失等の設計過渡条件（注２）に、今回の事象を加えて疲労評価を実施した結果、表-3.5.2.2に示すとおり今回の事象が発生したことによる影響はほとんどなく、また、告示５０１号で定める許容値に対して十分に小さな値であった。

（注２） 美浜２号機の設計過渡条件を包絡している国内ＰＷＲの最新２ループプラントの設計過渡条件を使用。

(3) 結論

今回の事象による疲れ累積係数への寄与は最大でも０．００８であり、これを加算した疲れ累積係数が許容値より十分小さいことから、疲労評価上、今回の事象は機器の健全性に与える影響はほとんどなく、今後の使用に当たって問題となるものではないと判断される。

3.6 炉心の健全性に関するその他の考察

今回の事象における炉心の健全性については、「3.2 炉心の健全性評価」で既に評価しているが、念のため燃料の状況を把握する等のため以下の項目について検討した。

3.6.1 燃料の状況に関する考察

(1) 燃料中心温度及び燃料被覆管表面温度

今回の事象においては原子炉トリップに伴い原子炉が停止したため燃料の破損に至るような温度上昇は考えられないが、念のため解析により燃料中心温度及び燃料被覆管表面温度を評価した。

a．解析に用いた計算コード

解析には、ＦＡＣＴＲＡＮコードを用いた。

b．解析条件

解析条件は、表-3.2.1のとおりである。

ただし、熱流束熱水路係数（F_Q）については燃料ペレットの焼きしまりの効果を考慮し１．６９とした。

c．解析結果とその評価

燃料中心温度及び燃料被覆管表面温度の解析結果は、図-3.6.1のとおりである。

最も厳しい炉心位置における燃料中心温度の最高値は、約１，４３０℃であった。燃料中心温度は、原子炉トリップによる原子炉出力の低下に伴い急速に低下した。

また、最も厳しい炉心位置における燃料被覆管表面温度の最高値は、約３３３℃であった。燃料被覆管表面温度は、原子炉トリップによる原子炉出力の低下に伴い低下した。

(2) １次冷却材中のよう素１３１濃度

平成２年７月から今回の事象が発生するまでの１次冷却材中のよう素１３１濃度の測定値は、３～４Bq/cm^{3}程度と安定して推移しており、その後は低下傾向を示している。このため、燃料被覆管の漏洩は生じていないと判断される。（図-3.6.2）

(3) 燃料集合体シッピング検査等の実施結果

今回の事象の発生後、念のため燃料集合体からの放射性物質の漏洩の有無を確認する「燃料集合体シッピング検査」及び燃料集合体の外観の異常の有無を確認する「燃料集合体外観等検査」を燃料集合体全数について実施したが、異常は認められなかった。

（資料-3.6.1）

3.6.2 1次冷却材の状態に関する考察

炉心が膜沸騰状態（注）になる場合には燃料の健全性が失われるおそれがあるため、「3.2 炉心の健全性評価」でＤＮＢＲ評価により、今回の事象においてはＤＮＢＲが許容限界値を下回っておらず燃料の健全性に問題がないことを確認しているが、念のため1次冷却材の状態を以下のとおり検討した。

（注） 燃料被覆管表面が蒸気の膜で覆われ、燃料被覆管から1次冷却材への熱伝達が悪化する状態

(1) 炉心の1次冷却材の状態

今回の事象において、炉心出口温度の最大値が１３時５０分から１３時５９分までの間記録されていないことから、炉心上端部の1次冷却材の温度を解析により推計した。

なお、定格出力運転中において炉心の1次冷却材の温度は飽和温度を下回っているが、燃料被覆管表面の一部にボイドが発生していることから、原子炉トリップ前後の局所ボイド率（特定の流路における単位体積に占めるボイドの体積の割合）の解析も行った。

a．解析に用いた計算コード

解析には、ＴＨＩＮＣ－Ⅲコードを用いた。

b．解析条件

解析条件は、表-3.2.1のとおりである。

c．解析結果とその評価

炉心上端部の1次冷却材の温度及び局所ボイド率の解析結果は、図-3.6.3のとおりである。なお、ＦＡＣＴＲＡＮコードによる熱流束の解析結果を図-3.6.3に併せて示す。

炉心上端部の1次冷却材の温度は、事象の発生前から収束までの全ての期間において常に飽和温度を下回っていた。また、炉心で最も出力の高い燃料集合体の局所ボイド率は、原子炉トリップ直前に1次冷却系の圧力の低下によりわずかに上昇し最大０．６％に至るが、原子炉トリップ後の熱流束の低下に伴い０％となった。

なお、１４時２分頃に健全側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁を開放したため、１４時３分以降1次冷却材の温度が顕著に低下しているが、炉心出口温度の最大値が1次冷却系高温側配管の1次冷却材の温度よりも低く推移している期間がある。

（図-3.6.4.1、3.6.4.2）

これは1次冷却材の温度の低下が顕著な場合、

① 上部炉心板を通過する1次冷却材は上部プレナム部上部の比較的高温の1次冷却材と混合した後に1次冷却系高温側配管に流出するため、高温側冷却材温度検出器近傍の1次冷却材の温度は炉心出口温度検出器近傍の1次冷却材の温度に比べて遅れて低下すること

② 検出器の熱容量の差により炉心出口温度の計測に比べて高温側冷却材温度の計測には時間遅れがあること

③ 損傷側ループについては、自然循環流量が低下し1次冷却材の流動が停滞する傾向にあるため、1次冷却系高温側配管内に不均一な温度分布が生じる可能性があること

によるものと推定される。（資料-3.6.2）

(2) 自然循環流量及び1次冷却系内のボイド発生量

今回の事象において、健全側ループの高温側冷却材温度が順調に低下していること及び高温側冷却材温度と低温側冷却材温度との差が維持されていることから健全側ループにおいて自然循環が成立し、炉心の冷却は確保されていたと判断されるが、念のため自然循環流量について解析を行い定量的に評価した。（図-3.6.4.1）

なお、プラント計器記録の一種である飽和温度記録（チャート）においても健全側及び損傷側ループの高温側冷却材温度は常に飽和温度を下回っている。

また、「2.2 プラントの応答状況に対する考察」において1次冷却系の減圧に伴い1次冷却系内にボイドが発生していたと推定されているため、このボイドの発生した期間及び発生量を解析により定量的に推計し、健全側ループの自然循環に影響を及ぼしてい

ないことを評価した。

a．解析に用いた計算コード

解析には、ＭＡＲＶＥＬコードを用いた。

b．解析条件

解析条件は、表-3.1.2のとおりである。

c．解析結果とその評価

自然循環流量の解析結果は、図-3.6.5のとおりである。

健全側蒸気発生器による自然循環の流量は、１次冷却材ポンプの停止に伴う１次冷却材の強制循環停止後においても定格流量の約４％が確保されていた。

１次冷却系内のボイドは、１次冷却系の減圧操作に伴い１次冷却系内の比較的高温のまま維持される部分に発生し、その量は最大約５m^3であった。仮に、炉心に近い原子炉容器頂部にこのボイドが発生したとしても、炉心上端から約４ｍ上方、及び１次冷却系高温側配管から約２ｍ上方に位置するため、健全側ループの自然循環を妨げるものではなかった。（図-3.6.6、3.6.7）

なお、このボイドは、健全側ループの１次冷却材ポンプの起動による１次冷却材の強制循環に伴い消滅したと推定される。

(3) 炉心の冠水状態に関する考察

今回の事象において、炉心の冠水状態そのものを示す計測値はなかったが、前述のとおり健全側ループでは自然循環が成立し炉心は冠水していたと判断される。

以下、念のため、「3.1 事象の再現解析」に基づき炉心の冠水状態について検討した。（表-3.6.1）

a．解析開始時点から安全注入の開始時点（高圧注入ポンプから１次冷却系に水の注入が開始される時点）までの間は、損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量が１次冷却系への水の注入量を約７．０トン上回っている。しかし、これは加圧器器内水が約９．０トン減少したことにより補われていた。なお、加圧器器内水の減少量が、１次冷却材流出量から１次冷却系への水の注入量を差し引いた量を上回っていたのは、１次冷却材の温度の低下に伴い１次冷却材の体積が収縮したことによるものである。（資料-3.6.3）

b．安全注入の開始時点から５分間は、損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量が１次冷却系への水の注入量を約１．０トン上回っている。しかし、これは安全注入開始直後の加圧器サージ管内の１次冷却材が約０．６トン減少したこと及び１次冷却材の温度の上昇に伴う１次冷却材の体積の膨張（膨張量を重量換算すると約０．４トン）により補われていた。（資料-3.6.4）

c．安全注入の開始から５分以降は、高圧注入ポンプによる１次冷却系への水の注入量が、損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量を概ね上回っている。この上回った水の注入量は、１次冷却材の温度の低下に伴う１次冷却材の体積の収縮に見合っていた。（資料-3.6.5）

以上のとおり、１次冷却材の温度の変化に伴う１次冷却材の体積の変化、損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量、充てんポンプからの水の注入量等による１次冷却系の圧力の変化に応じ、高圧注入ポンプは設計どおり作動し、炉心の冠水は維持されていたと判断される。

4．蒸気発生器伝熱管の損傷原因調査

蒸気発生器伝熱管の損傷原因を究明するため、現場における損傷状況調査、金属調査、流動励起振動解析、流動試験、応力解析、材料強度試験等を行い、これらの調査、解析、試験の結果から伝熱管損傷の原因を検討した結果は、以下のとおりである。

4.1 蒸気発生器伝熱管損傷に関する調査

4.1.1 破断管調査　（資料-4.1.1.1）

破断管の損傷状況について、小型テレビカメラ等により調査するとともに、同管を引き抜き、金属調査を実施した結果は、以下のとおりである。

(1) 破断位置

破断管の位置はＸ４５－Ｙ１４であり、低温側第６管支持板上端部で円周に沿って破断し、分離していた。（図-4.1.1）

破断面は、伝熱管の長手方向（以下「管軸方向」という。）に対して、全体的にほぼ直角であるが、約４㎜の高低差を伴っており、９０度（「水室仕切板方向を０度とし、伝熱管を上から見て時計回り方向の円周角座標での角度」、以下同じ。）付近では、管支持板上端から約１㎜ないし２㎜下方に位置していた。

(2) 破面

破断管の破面について、金属調査を実施した結果は、以下のとおりである。

なお、下側破面（低温側直管部の頂部に形成された破面）と上側破面（Ｕ字部の下端に形成された破面）は、同様の特徴を有していた。

ａ．主起点部及びその付近

９０度付近の破面は、管軸方向に対して全体的に直角かつ平坦であるが、段差のある状態で発生した複数の微小破面が伝播に伴い合体して形成される破面の細かい段差模様（以下「ステップ」という。）が、９０度付近の外表面側を中心として、内表面側にかけて扇状に広がる傾向を示していた。また、扇状のステップの外表面側に、半楕円形状のき裂が複合した領域が外周に沿って長さ３．５㎜程度、板厚方向への深さ０．３㎜程度にわたって認められた。

これらのことから、９０度付近の半楕円形状のき裂が複合した領域の外表面が主起点部と判断される。

主起点部と判断された領域の外表面側の破面は、管軸方向に対して４５度程度傾いていた。この領域を含めて外表面から内表面にかけての領域には、電子顕微鏡観察の結果、インコネル材の低速度伝播疲労破面の特徴である、微細な段差のある粒内割れが集積された破面（以下「立体モザイク模様」という。）が認められた。

この立体モザイク模様は、外表面から内表面に向かうに従って細かくなる傾向が認められた。また、外表面側には破面の開閉時に破面同士が繰り返し接触した場合に生じるタイヤの跡状模様（以下「タイヤトラック」という。）が認められた。（図-4.1.2、4.1.3）

主起点部及びその付近においては、破面は主として粒内割れであり、応力腐食割れ、粒界腐食割れを示唆する明瞭な粒界破面は認められなかった。

内表面側には、せん断破断を示す破面の傾き（シヤーリップ）及び延性破面を特徴付けるくぼみ（以下「ディンプル」という。）は認められなかった。

なお、立体モザイク模様の破面の外表面から板厚方向に０．０５㎜程度までの領域には、母材の酸化により生成された皮膜層（以下「酸化皮膜層」という。）が認められた。

ｂ．副起点部

２７０度付近の外周に沿って長さ４㎜程度、板厚方向への深さ０．２㎜程度の領域は、９０度付近と同様、管軸方向に対して傾いており、電子顕微鏡観察の結果、立体モザイク模様が認められた。この立体モザイク模様の破面はディンプルのみの破面で取り囲まれていた。

これらのことから、２７０度付近の外表面は副起点部と判断される。

なお、この立体モザイク模様の破面の外表面に近い領域には、９０度付近と同様、母材の酸化皮膜層が認められた。

ｃ．き裂伝播部

電子顕微鏡観察の結果、主起点部から１０度程度以上離れた領域、すなわち０度付近から８０度付近及び１００度付近から１８０度付近の領域には、縞模様（以下「ストライエーション」という。）が認められ、このうち、０度付近から５０度付近及び１３０度付近から１８０度付近の領域には、高サイクル疲労（破断までの繰返し数が10^5回

程度以上の疲労）破面を特徴付ける明瞭なストライエーションが認められた。

ストライエーションが認められた領域では、き裂は全体的に周方向に伝播していた。

さらに、１８０度付近からは、ストライエーション領域とディンプル領域が混在し、２５０度付近から３５０度付近まではディンプルが認められた。（図-4.1.4、4.1.5）

d．最終破断部

１８０度付近から３５０度付近にかけて板厚の減少がみられ、特に３１０度付近から３５０度付近は顕著であり、電子顕微鏡観察の結果、破面にはディンプルのみが認められた。これらのことから、この部分が最終破断部と判断される。（図-4.1.5）

以上のことから、破断の原因は高サイクル疲労であり、破断に至ったき裂（以下「主き裂」という。）は、９０度付近の外表面から発生し、内表面方向に伝播して板厚貫通後、０度方向及び１８０度方向に伝播し、３１０度付近から３５０度付近で最終破断したものと判断される。

また、主き裂が先に伝播を開始したため、副起点部のき裂は伝播しなかったものと判断される。

なお、２７０度付近に９０度付近と同様、立体モザイク模様を含む副起点部が認められたことから、破断管のＵ字部には９０度方向と２７０度方向の両振り繰返し荷重が作用していたものと判断される。

(3) 伝熱管外表面

伝熱管の低温側及び高温側両方の第６管支持板上端部の９０度付近及び２７０度付近の外表面には、管支持板との管軸方向のこすれ跡及びその中に多数の周方向の微小き裂が認められた。これらの微小き裂は粒内き裂で、管軸方向に対して傾いており板厚方向への深さは０．１㎜程度であった。（図-4.1.3、4.1.6）

また、伝熱管外表面には母材の酸化皮膜層が認められた。

伝熱管の低温側及び高温側両方の第６管支持板上端部の外表面のいずれの位置にも、管支持板との管軸方向のこすれ跡及びその中に多数の周方向の微小き裂が認められたことから、破断管のＵ字部には９０度方向と２７０度方向の両振り繰返し荷重が作用していたものと判断される。

なお、主起点部及び副起点部付近には腐食減肉及び孔食は認められなかった。

(4) 寸法

寸法検査の結果、低温側及び高温側の管支持板部において、伝熱管の外径、内径及び板厚は設計仕様どおりであり、デンティング（伝熱管が管支持板の腐食生成物等により圧迫され、伝熱管の健全性を損なうような変形を生じること）を示唆するような寸法変化は認められなかった。

なお、高温側第６管支持板上端部１８０度付近及び下端部０度付近の限定された位置に深さ０．３㎜程度の微小な変形（へこみ）が認められた。（図-4.1.7）

これらの変形は管支持板上・下端部とも一方向に限定され、互いに反対方向に位置することから、デンティングによるものではなく、また、前回定期検査までの渦電流探傷検査では変形信号が認められていないことから、破断時に伝熱管のＵ字部が高温側第６管支持板部を支点として振れたため生じたものと推定される。

(5) スケール

伝熱管と管支持板との隙間（以下「管支持板クレビス部」という。）、破面及び破断管外表面のスケールを分析した結果、主成分は鉄であり、腐食要因となる塩素、ナトリウム等の成分は検出されなかった。また、管支持板クレビス部のスケールにりんが検出されたが、りんが検出された位置にはカルシウムも検出されたことから、腐食性でないりん酸カルシウムとして存在していたものと推定される。

(6) 材料性状

管材は、化学成分、機械的性質とも規格値の範囲内であり、その金属組織に異常は認められなかった。（表-4.1.1）

また、破断管の直管部の引張試験の結果、試験片の破面は全てディンプルで覆われており、粒界破面は認められなかった。

(7) その他

a．現場における小型テレビカメラ等による破断管破断部近傍の点検の結果、破断の原因になり得るような異物は認められなかった。

b．破断管について製造時の履歴を調査した結果、材料性状、製管時の熱処理及び曲げ加工等いずれにも異常は認められなかった。（資料-4.1.1.2）

4.1.2 周辺管調査（資料-4.1.2.1）

伝熱管損傷の原因調査のため、破断管の周辺の伝熱管（以下「周辺管」という。）について、渦電流探傷検査及び小型テレビカメラによる調査、並びに引き抜いたＸ４４～Ｘ４６列の伝熱管の金属調査を実施した結果は、以下のとおりである。

（図-4.1.8）

(1) 周辺管５９１本について、渦電流探傷検査を実施した結果、過去に施栓した伝熱管のうち、Ｘ４４－Ｙ２０、Ｘ４５－Ｙ１６～Ｙ２０、Ｘ４６－Ｙ１７及びＸ４６－Ｙ１９～Ｙ２２の一部の管支持板部又は振止め金具部において、施栓時に記録された信号から、減肉の深さあるいは体積の増加を示す信号の変化又は新たな減肉信号が認められた。

また、小型テレビカメラによる伝熱管内面観察の結果、過去に施栓した伝熱管のうち、Ｘ４４－Ｙ２１、Ｘ４５－Ｙ１９～Ｙ２１、Ｘ４６－Ｙ１９及びＸ４６－Ｙ２１の第６管支持板部において、伝熱管内面への膨らみ等が認められた。

これらの異常な変化は、後述する振止め金具が設計どおりの範囲まで挿入されていなかった範囲の伝熱管にのみ認められた。

(2) 渦電流探傷検査等で異常な変化が認められた伝熱管のうち、Ｘ４５－Ｙ１６～Ｙ２１、Ｘ４６－Ｙ１９及びＸ４６－Ｙ２１の８本を引き抜いて金属調査を実施した結果、いずれの伝熱管にも第６管支持板部で周方向の摺動痕を伴う減肉が認められた。この減肉部の底部には、ほぼ円形の小打痕状模様が観察されたものの、微小き裂等が認められなかったことから、この減肉は摩耗減肉であると判断される。

また、Ｘ４５－Ｙ１９、Ｘ４５－Ｙ２１及びＸ４６－Ｙ１９で、伝熱管内面への膨らみ等が認められた位置で摩耗減肉が板厚を貫通していた。さらに、Ｘ４６－Ｙ１９を除く７本には、低温側第６管支持板より下段の管支持板部でも摩耗減肉が認められた。

（図-4.1.9）

なお、Ｘ４６－Ｙ１７及びＸ４６－Ｙ１９～Ｙ２２の伝熱管の振止め金具部に、摩耗減肉が認められた。

(3) 渦電流探傷検査等で異常な変化が認められなかった伝熱管のうち、Ｘ４５－Ｙ１１～Ｙ１３、Ｘ４５－Ｙ１５、Ｘ４５－Ｙ２２及びＸ４６－Ｙ１４を引き抜いて金属調査を実施した結果、破断管より曲げ半径の大きい隣接管であるＸ４５－Ｙ１５には、低温側

第６管支持板部で、渦電流探傷検査の検出限界値以下の周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められた。（図-4.1.9）

また、Ｘ４５－Ｙ２２には、低温側第６管支持板部及び低温側第４管支持板部で周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められた。

一方、破断管より曲げ半径の小さいＸ４５－Ｙ１１～Ｙ１３及び破断管と曲げ半径の等しい隣接管であるＸ４６－Ｙ１４の伝熱管には、いずれも摩耗減肉及び微小き裂は認められなかった。

(4) Ｘ４５列の伝熱管の低温側管支持板部における摩耗減肉の最大深さは、曲げ半径が大きくなるに従って増大する傾向があった。（表-4.1.2）

(5) 振止め金具が挿入されていたＸ４４－Ｙ２５及びＸ４６－Ｙ２５の伝熱管を引き抜いて金属調査を実施した結果、いずれも摩耗減肉及び微小き裂は認められなかった。

(6) Ｘ４３－Ｙ２３の伝熱管は、本来Ｘ４２－Ｘ４３の間及びＸ４３－Ｘ４４の間の振止め金具に支持されるべきところ、Ｘ４４側に１列ずれて片側のみが振止め金具により支持されていた。このため、Ｘ４５－Ｙ２３の伝熱管のＵ字部の外表面に、隣接管であるＸ４４－Ｙ２３及びＸ４６－Ｙ２３と接触していた跡が認められた。

(7) 伝熱管の破断による破断管のＵ字部及び隣接管への影響を調査した結果、破断管の低温側第６管支持板部の直上部、上方部及びＵ字部の背側に、破断後に隣接管と接触したと考えられる跡が認められた。また、隣接管であるＸ４４－Ｙ１４、Ｘ４４－Ｙ１５、Ｘ４５－Ｙ１５、Ｘ４６－Ｙ１４の低温側第６管支持板上方部及びＸ４５－Ｙ１５のＵ字部の腹側に、破断管と接触したと考えられる跡が認められた。これらの接触跡にはいずれもへこみ等はなく、伝熱管のスケール表面が薄くこすれた程度の軽微なものであった。

なお、昭和５０年度から昭和５５年度まで実施された「蒸気発生器信頼性実証試験」において、伝熱管のＵ字部での破断を模擬した試験を基にした解析の結果、破断管及び隣接管にはわずかな塑性変形を生ずる可能性があるが、隣接管が破断することはないことが確認されている。

以上のことから、伝熱管の破断による隣接管への影響は軽微であり、破断管が隣接管を損傷に至らしめるものではなかったと考えられる。（資料-4.1.2.2）

(8) 金属調査の結果、いずれの伝熱管においても材料性状、付着スケールの性状に異常は認められなかった。

4.1.3 管支持板調査　（資料-4.1.3.1）

伝熱管損傷の原因調査のため、破断管及び周辺管の第６管支持板の一部を切り出し光学拡大観察等を実施した結果、及び振動計測により管支持板部での伝熱管の支持状態を評価した結果は、以下のとおりである。（表-4.1.3、図-4.1.10）

(1) 破断管Ｘ４５－Ｙ１４の低温側及び高温側の第６管支持板を調査した結果、管支持板クレビス部にスケールが詰まり、管支持板部で伝熱管が拘束されている状態（以下「固定支持」という。）であったが、破断管の寸法検査の結果、寸法は設計仕様どおりであり、デンティングとは異なった状態であったと判断される。

また、スケールはほぼ同じ厚さの３層に大別され、伝熱管側から、りんを含んだ層、２次系水中の不純物を多く含んだ層、管支持板が腐食した層となっていた。

(2) 使用管であるＸ４５－Ｙ１５の低温側及び高温側の第６管支持板を調査した結果、管支持板管穴内表面のスケール付着は少なく、伝熱管と管支持板との間に隙間が存在する支持状態（以下「間隙支持」という。）であったと判断される。

(3) 使用管であるＸ４５－Ｙ１２及びＸ４６－Ｙ１４の低温側の第６管支持板を調査した結果、管支持板クレビス部にスケールが詰まっており、固定支持であったと判断される。

また、第２回定期検査時に施栓した伝熱管であるＸ４５－Ｙ１３及びＸ４６－Ｙ２１の低温側の第６管支持板を調査した結果、管支持板管穴内表面のスケール付着は少なく、間隙支持であったと判断される。

(4) 現場における伝熱管の振動計測の結果に基づき第６管支持板部における支持状態を評価した結果、破断管、Ｘ４５－Ｙ１１、Ｘ４５－Ｙ１２、Ｘ４６－Ｙ１４及び第６回定期検査時に施栓した伝熱管であるＸ４７－Ｙ４１は固定支持であり、Ｘ４５－Ｙ１５及び第２回定期検査時に施栓した伝熱管（Ｘ４４－Ｙ１６、Ｘ４４－Ｙ１８、Ｘ４４－Ｙ２０～Ｙ２１、Ｘ４５－Ｙ１３、Ｘ４５－Ｙ１６～Ｙ２２、Ｘ４６－Ｙ１９等）は固定支持ではなかった。（資料-4.1.3.2）

以上のことから、使用管（Ｘ４５－Ｙ１５を除く。）及び第６回定期検査時に施栓した伝熱管の管支持板クレビス部は、伝熱管表面での局所的な蒸発現象により、スケールが生成しやすい部分であるため、当初は間隙支持であったものが、運転時間の経過とともに、固定支持になったものと考えられる。

また、第２回定期検査時に施栓した伝熱管は、施栓時においては間隙支持であり、施栓後は伝熱管表面での蒸発現象が起きないため、固定支持にならなかったものと考えられる。

4.1.4 環境調査

伝熱管損傷の原因調査のため、伝熱管に対する環境の影響について調査した結果は、以下のとおりである。

(1) ２次系水質履歴調査 （資料-4.1.4.1）

２次系の水処理は、運転開始初期はりん酸塩処理を適用していたが、第２運転期間までに伝熱管の管支持板部、管板直上部でりん酸塩の濃縮により、損傷側蒸気発生器で１７１本の伝熱管の腐食減肉を経験したことから、第３運転期間から、減肉防止対策として揮発性薬品処理（以下「ＡＶＴ」という。）に変更している。ＡＶＴに変更した後は、渦電流探傷検査や金属調査の結果において、新たな腐食減肉の発生や進展は認められていない。

また、２次系水質は、全ての期間を通じて水質管理値内であり、異常は認められなかった。 （表-4.1.4）

(2) ２次系水質による腐食疲労の可能性について （資料-4.3.1.5）

破断管の金属調査の結果、主起点部及びその付近において、応力腐食割れ、粒界腐食割れを示唆する明瞭な粒界破面は認められなかった。また、文献調査では、インコネル６００の疲労強度は、実機と同等の高温ＡＶＴ水中においても室温大気中とほとんど変わらないとされている。

これらのことから、伝熱管の破断の原因に関し、２次系水質環境による腐食の影響はあったとしても小さく、伝熱管の疲労強度に及ぼした影響は無視し得るものと考えられる。

(3) 水素脆化の可能性について （資料-4.1.4.2）

文献調査では、インコネル６００は水素脆化が生じにくい材料であるが、室温程度で金属内部に強制的に水素を取り込ませると脆化が生じるとされている。しかし、１６０℃程度以上の温度になると水素の拡散速度が大きくなり、金属内部にはほとんど水素は取り込まれないとされている。このため、実機の運転状態では伝熱管に水素脆化は生じないと考えられる。一方、水素を強制的に取り込ませて水素脆化を生じさせると、その破面は主として粒界破面になるとされている。これに対し、破断管の破面にはこのような特徴は認められておらず、また、破断管の直管部の引張試験の結果、試験片の破面は

全てディンプルで覆われており粒界破面は認められなかった。

これらのことから、伝熱管の破断に対しては水素脆化の影響はなかったと考えられる。

(4) 照射脆化の可能性について （資料-4.1.4.3）

一般に、中性子による金属材料の照射脆化については、熱中性子の影響は高速中性子に比べ無視できる程度とされている。

文献調査では、インコネル６００の場合、高速中性子の照射量が10^{20}n/cm^{2}程度以下であれば、材料強度に影響が現れないとされており、美浜２号機の伝熱管の場合、高速中性子の照射量は10^{14}n/cm^{2}以下である。

また、破断管の直管部の引張試験の結果、伸び等は規格値の範囲内であった。 （表-4.1.1）

これらのことから、中性子の照射による破断管への影響はなかったと考えられる。

4.1.5 振止め金具調査　（資料-4.1.5.1）

伝熱管損傷の原因調査のため、振止め金具について調査した結果は、以下のとおりである。

(1) 挿入状況調査

美浜２号機の蒸気発生器の設計では、伝熱管の上部に位置するＵ字部に、最外周からＹ１２列まで、Ｕ字部の伝熱管と伝熱管の間にＶ字型の振止め金具を挿入することとしている。（図-4.1.11）

このため、損傷側蒸気発生器について、振止め金具が設計どおりの範囲まで入っているか等を、ファイバースコープ等を用いて確認した結果は、以下のとおりである。

a．Ｘ４４－Ｘ４５の間及びＸ４５－Ｘ４６の間の振止め金具については、上部及び下部の振止め金具とも、設計どおりの範囲まで入っておらず、破断管を含めＸ４５－Ｙ１２～Ｙ２２の伝熱管は、両側とも振止め金具に支持されていなかった。（図-4.1.12）

b．Ｘ４３－Ｙ２３の伝熱管は、本来Ｘ４２－Ｘ４３の間及びＸ４３－Ｘ４４の間の振止め金具に支持されているべきところ、Ｘ４４列側に１列ずれて片側のみが振止め金具により支持されていた。（図-4.1.13）

(2) 取出し調査

Ｘ４４－Ｘ４５の間及びＸ４５－Ｘ４６の間の上部及び下部の振止め金具を取り出し、調査を行った結果は、以下のとおりである。（図-4.1.14）

a．上部振止め金具の長さはいずれも設計値より４０cm程度から５０cm程度短くなっていたが、下部振止め金具の長さはいずれも設計の範囲内であった。

b．上部及び下部の振止め金具はいずれも設計形状から変形しており、また、上部振止め金具の端面にはいずれも設計とは異なる切断加工跡が認められた。

(3) 経年変化調査

施工された振止め金具は、過去と最近の渦電流探傷検査記録を比較した結果、移動した形跡が認められないこと及び流体力に対して十分な強度を有することから、経年的に移動、変形する可能性のないことが確認された。したがって、振止め金具の大幅な挿入不足は、蒸気発生器の製造時に発生したものと考えられる。

なお、振止め金具の挿入状況については、定期検査時に行われる渦電流探傷検査記録により確認することができるものであったが、伝熱管の損傷の検出を目的としていたため、振止め金具の挿入状況を確認する手段として着目しておらず、運転開始以降、振止め金具の挿入状況の確認は行っていなかった。

(4) 設計・施工状況の調査

損傷側蒸気発生器の設計・施工状況について、製造当時の記録、関係者からの聞き取り等により調査した結果は、以下のとおりである。

a．美浜２号機の蒸気発生器は国産初の蒸気発生器であり、三菱重工業（株）が米国ウェスチングハウス社の指導を受け設計・製造したが、振止め金具に関して残存する製造記録は、組立図のみであった。

b．振止め金具は、伝熱管のＵ字部の流体力による振動を抑制するため伝熱管と伝熱管の間に挿入するものであり、米国の民間の設計基準であるＴＥＭＡ（STANDARDS OF TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION ）の１９６８年版を参考にして設計されていた。

c．当時の振止め金具に対する設計上の重要性の認識が不十分であったこと、品質管理部門による挿入深さの検査も行われていなかったこと等から、施工管理、品質管理について、十分な注意が払われていなかったため、設計どおりの範囲まで挿入されなかったものと考えられる。

(5) 挿入不足の原因推定

損傷側蒸気発生器の製造時に、どのように振止め金具を施工したかは不明であるが、振止め金具挿入の際、正確に伝熱管と伝熱管の間に挿入されなかったため、Ｘ４４－Ｘ４５の間及びＸ４５－Ｘ４６の間の振止め金具が、伝熱管によって挿入が妨げられたことから、設計どおりの範囲まで挿入されなかったものと推定される。

4.1.6 まとめ

振止め金具並びに破断管及び周辺管の損傷状況について調査した結果は、以下のとおりである。

(1) 振止め金具

a．破断管及び損傷が認められた周辺管は本来振止め金具で支持されるべきところ、振止め金具が大幅な挿入不足であったため、支持されていなかった。

b．損傷側蒸気発生器の製造時に、振止め金具に対する施工管理、品質管理について、十分な注意が払われていなかったため、振止め金具が設計どおりの範囲まで挿入されなかったものと推定される。

c．運転開始以降、振止め金具の挿入状況の確認は行っていなかった。

(2) 破断管

a．破断管の位置はＸ４５－Ｙ１４であり、低温側第６管支持板上端部で、円周に沿って破断し、分離していた。

b．水室仕切板方向を０度とし、伝熱管を上から見て時計回り方向の円周角座標でみたとき、主起点部は９０度付近の外表面と判断され、２７０度付近の外表面に副起点部が認められた。

c．主起点部近傍の破面には、インコネル材の低速度伝播疲労破面の特徴である立体モザイク模様が、主起点部から離れたき裂伝播部の破面には、高サイクル疲労破面を特徴付ける明瞭なストライエーションが認められたことから、破断の原因は高サイクル疲労であると判断される。

d．主き裂は９０度付近の外表面から発生し、内表面方向に伝播して板厚貫通後、０度方向及び１８０度方向に伝播し、３１０度付近から３５０度付近で最終破断したものと判断される。

e．主起点部及び副起点部の外表面には、管支持板との管軸方向のこすれ跡及びその中に多数の周方向の微小き裂が認められた。これらの微小き裂は粒内き裂で、管軸方向に対して傾いていた。

f．破面の９０度付近に主起点部、２７０度付近に副起点部が認められたこと、並びに高温側第６管支持板部の９０度付近及び２７０度付近の外表面にも管支持板との管軸方向のこすれ跡及びその中に多数の周方向の微小き裂が認められたことから、伝熱管のＵ字部には面外方向に両振り繰返し荷重が作用していたものと判断される。

g．起点部の立体モザイク模様の破面の外表面に近い領域には、母材の酸化皮膜層が認められた。

h．低温側及び高温側の第６管支持板クレビス部にスケールが詰まっており、固定支持であったと判断される。

i．デンティング、応力腐食割れ及び粒界腐食割れを示唆する特徴は認められなかった。また、腐食疲労、水素脆化及び照射脆化の影響はなかったものと考えられる。

(3) 周辺管

a．破断管よりも曲げ半径の大きい伝熱管の管支持板部で、周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められたが、これらはいずれも振止め金具が設計どおりの範囲まで挿入されていなかった範囲の伝熱管に限られていた。また、これらの伝熱管の第６管支持板部での支持状態は間隙支持であったと判断される。

b．振止め金具が設計どおりの範囲まで挿入されていなかった範囲で、破断管よりも曲げ半径の小さい伝熱管においては、摩耗減肉及び微小き裂等の異常は認められなかった。

c．振止め金具が設計どおりの範囲まで挿入されていた伝熱管では、摩耗減肉及び微小き裂等の異常は認められなかった。

d．伝熱管の破断による隣接管への影響は、隣接管のスケール表面が薄くこすれた程度の軽微なものであり、破断管が隣接管を損傷に至らしめるものではなかったと考えられる。

4.2 流動励起振動解析

4.2.1 流体力による振動

破断管の金属調査の結果、破断の原因は高サイクル疲労であり、この繰返し応力の発生源は、蒸気発生器内部の流体力による伝熱管U字部の面外方向の振動であると考えられる。伝熱管の管内外を流れる流体により励起され得る振動には以下のものがあり、これらの振動が発生する可能性について検討を行った。

① 管内流による振動 ： 不安定振動

② 管外流による振動 ： カルマン渦による振動、ランダム振動、流力弾性振動

(1) 不安定振動は、一般に、管内流がある限度の流速（限界流速）以上にならないと発生しないものであるが、蒸気発生器伝熱管における限界流速は1次系流体の管内流速に比べ数倍以上大きいことから、管内流による不安定振動の発生の可能性はない。

（資料-4.2.1.1）

(2) カルマン渦による振動は、一般に、物体がその下流側に規則的に発生、離脱を繰り返すカルマン渦により荷重を受けて共振状態で振動する現象であるが、蒸気発生器伝熱管U字部における気液二相流状態では、カルマン渦は発生しないことが確認されていることから、カルマン渦による振動の発生の可能性はない。（資料-4.2.1.2）

(3) ランダム振動は、一般に、流体の速度や密度のゆらぎにより振動を生じる現象であり、蒸気発生器伝熱管U字部における気液二相流状態でも発生する。

(4) 流力弾性振動は、一般に、伝熱管群に対して、ある限度以上の流速が作用した場合に急激に大きな振動振幅が発生する現象であり、蒸気発生器伝熱管U字部における気液二相流状態でも発生する可能性がある。

したがって、高サイクル疲労の原因となり得る応力の発生源は、ランダム振動と流力弾性振動に限定されるため、これらの流体力による振動について、流動励起振動解析を実施した。

4.2.2 流動励起振動解析　　（資料-4.2.2.1、4.2.2.2）

蒸気発生器２次側の流動解析により、伝熱管群内の流動分布（流速分布及び流体密度分布）を求め、これに基づき流動励起振動解析を行うことにより、ランダム振動に関する検討及び流力弾性振動の発生の可能性の検討を行った。なお、評価対象は破断管と周辺の伝熱管（Ｘ４５－Ｙ１１～Ｙ２２）とした。　　（図-4.2.1）

(1)　流動解析

蒸気発生器２次側では、給水が器内循環水と混合して伝熱管群に入り、ここで沸騰して気液二相流となり伝熱管のＵ字部を通過する。

美浜２号機の蒸気発生器の構造パラメータ（形状、寸法、圧損係数等）及び運転パラメータ（温度、圧力、流量等）を解析コードに入力し、伝熱管群内の流速分布（流速の管軸直交成分の分布）及び流体密度分布を求めた。

損傷側蒸気発生器は、第２回定期検査時に１７１本施栓され、その後の施栓を含め現在１８７本の施栓管（施栓率５．７％）となっているが、第３回定期検査以降の施栓が少なく、これによって流動分布はほとんど変化しないと考えられるため、解析は現在の施栓状況で行った。

(2)　ランダム振動解析

ランダム振動解析として、気液二相流中での実験結果をもとに、流動解析から求まる伝熱管群内の流動分布から流体力を求め、ランダム振動解析により伝熱管の振動応答を求めた。

破断管のランダム振動に関する解析の結果、伝熱管のＵ字部における振動振幅は最大０．０２㎜程度であり、第６管支持板部に作用する応力振幅は最大０．０３kg/㎟程度で無視し得るものであった。

(3)　流力弾性振動解析

ａ．解析手法

流力弾性振動の発生の可能性は、次式で求められる安定比（ＳＲ）により評価した。

$$SR = \frac{\dot{U}e}{Uc} \times PF$$

ここに、Ｕｃは限界流速と呼ばれ、次式に示すコナーズの式で求める。なお、この式は現在、米国の民間の設計基準であるＴＥＭＡで採用されている。

$$\frac{Uc}{fD} = K \left(\frac{m\delta}{\rho D^2} \right)^{1/2}$$

ここに、ｆは伝熱管の固有振動数、ｍは伝熱管の単位長質量、δは伝熱管の対数減衰率（$\delta = 2\pi h$，ｈ：減衰比。以下では減衰比を用いる。）、ρは流体密度、Ｄは伝熱管の外径、Ｋは限界係数である。

一方、Ｕｅは有効流速と呼ばれ、伝熱管のＵ字部における流動分布と伝熱管の振動モードとを考慮した流速である。

また、ＰＦはピーキングファクタと呼ばれ、振止め金具の挿入深さに不揃いがある場合に局所的に流れが速くなる効果を表わす係数である。

なお、安定比の評価に必要な流速、流体密度等の各パラメータはばらつきを有しているため、Ｕ字管の管群で実機の気液二相流を模擬した流動試験等により、各パラメータのばらつき範囲を求めた。

以下に、各パラメータのばらつき範囲を考慮した安定比評価の手順を示す。

①　各パラメータの中心値を用いて解析を行い、安定比の中心値を求めた。

②　各パラメータのばらつき範囲から、安定比のばらつき範囲を評価し、安定比の最大値が１以上であるか否かにより、流力弾性振動発生の可能性を評価した。

ｂ．解析条件

(a)　伝熱管の第６管支持板部における支持条件は、振動計測の結果及び管支持板調査の結果に基づき、Ｘ４５－Ｙ１５以外の使用管は固定支持とし、Ｘ４５－Ｙ１５及び施栓管はピン支持（管支持板部での伝熱管の変位は拘束、回転は自由とする。）とした。

なお、間隙支持での試験で得られた固有振動数は、ピン支持での固有振動数の解析の結果とほぼ同じであり、振動モードの観点からは間隙支持はピン支持と同等の支持条件とみなせることから、解析上は間隙支持をピン支持として取り扱った。

(b)　振止め金具の挿入状況が流力弾性振動の発生に及ぼす影響を比較するため、振止め金具が実機の取付け状態の場合と設計どおりの取付け状態の場合について解析した。

(c)　破断管周辺の施栓状況が流力弾性振動の発生に及ぼす影響を検討するため、施栓管

が破断管周辺に集中していない場合についても解析した。

c．解析結果

(a) 破断管

イ．破断管は、振止め金具が実機の取付け状態の場合、振止め金具で支持されていなかったため、ばらつき範囲を評価した安定比の最大値は１．２０であり、流力弾性振動が発生する可能性があった。

ロ．破断管は、振止め金具が設計どおりの取付け状態の場合、振止め金具で支持されることとなり、ばらつき範囲を評価した安定比の最大値は０．１７であり、流力弾性振動が発生する可能性はなかった。

振止め金具で支持されていなかった場合の安定比は、支持されていた場合の安定比に比べ、固有振動数が低くなることによる効果（約５倍）とピーキングファクタが高くなることによる効果（約１．４倍）により、約７倍となる。

ハ．破断管の周辺に施栓管がない場合の安定比は、周辺に施栓管がある場合と同程度であり、流力弾性振動の発生に対して施栓管の影響は、ほとんどなかったものと考えられる。（表-4.2.1）

(b) 周辺管

イ．Ｘ４５－Ｙ１１及びＸ４５－Ｙ１２の伝熱管は、振止め金具が実機の取付け状態の場合においても、ばらつき範囲を評価した安定比の最大値は１未満であり、流力弾性振動が発生する可能性はなかった。

ロ．Ｘ４５－Ｙ１３～Ｙ２２の伝熱管は、振止め金具が実機の取付け状態の場合、振止め金具で支持されていなかったため、ばらつき範囲を評価した安定比の最大値は１以上となり、流力弾性振動が発生する可能性があった。

しかし、振止め金具で支持されていた場合には、流力弾性振動が発生する可能性はなかった。（表-4.2.1、図-4.2.2）

4.2.3 まとめ

破断管及び周辺管について、流動励起振動解析を実施した結果は、以下のとおりである。

(1) 破断管のランダム振動解析の結果、第６管支持板部に作用する応力振幅は極めて小さく、無視し得る程度であった。

(2) 破断管は、流力弾性振動解析の結果、ばらつき範囲を評価した安定比の最大値が１以上となることから、流力弾性振動が発生する可能性があった。

しかし、振止め金具で支持されていた場合には、ばらつき範囲を評価した安定比の最大値は１未満であり、流力弾性振動が発生する可能性はなかった。

(3) 周辺管（Ｘ４５－Ｙ１１～Ｙ２２）のうち、Ｘ４５－Ｙ１１及びＸ４５－Ｙ１２の伝熱管は、振止め金具で支持されていない場合でも、ばらつき範囲を評価した安定比の最大値が１未満であり、流力弾性振動が発生する可能性はなかった。

また、Ｘ４５－Ｙ１３～Ｙ２２の伝熱管は、振止め金具で支持されていなかったため、ばらつき範囲を評価した安定比の最大値は１以上となり、流力弾性振動が発生する可能性があった。しかし、振止め金具で支持されていた場合には、流力弾性振動が発生する可能性はなかった。

4.3 伝熱管損傷原因の推定

4.3.1 破断管の損傷原因の推定

金属調査の結果及び流動励起振動解析の結果から、破断管は流力弾性振動による高サイクル疲労により破断したものと考えられるため、以下の疲労モードについて検討した。

① 通常疲労

② 腐食疲労

③ フレッチング疲労

(1) 破断管に作用する応力

疲労モードの検討を行うため、運転中に破断管の低温側第６管支持板部に作用していたと想定される応力を解析した。

a．平均応力　（資料-4.3.1.1）

管支持板部での支持状態、運転時の１、２次系の温度条件及び圧力条件を考慮して、運転中に破断管の第６管支持板部に作用していた静的応力（平均応力）を、有限要素法を用い解析した結果、破断管外表面の管軸方向応力は管支持板上端部で７～１４kg/mm²、管支持板部の破断管外表面に作用する平均面圧は２．０～４．７kg/mm²であった。

b．変動応力　（資料-4.3.1.2、4.3.1.3、4.3.1.4）

(a) 破面解析

破断管の第６管支持板部に作用していた変動応力は、両振り繰返し応力であり、その応力振幅（最大値と最小値の幅の１／２）は、破面の粗さパラメータ（破面の微視的な凹凸を定量化したもの。破面に作用した応力と相関がある。）及びストライエーション間隔に基づき算出した。

イ．主起点部付近については立体モザイク模様の粗さパラメータを測定し、き裂伝播試験で得られた粗さパラメータと応力拡大係数範囲との関係式から応力拡大係数範囲を求め、この応力拡大係数範囲から応力振幅を求めた。

ロ．き裂伝播部については、ストライエーションが認められたため、ストライエーション間隔の実測値を基に、き裂伝播試験で得られたストライエーション間隔と応力拡大係数範囲との関係式から応力拡大係数範囲を求め、この応力拡大係数範囲から応力振幅を求めた。

ここで、観察された各点の粗さパラメータ及びストライエーション間隔から求められた応力振幅の値は、それぞれの領域において正規分布を示していること、また、これらの粗さパラメータ及びストライエーション間隔のばらつき幅は、一定の応力振幅の条件での試験から得られた測定値のばらつき幅と同程度であることから、それぞれの領域における応力振幅の値としては、その正規分布における中央値を用いることとする。

以上の方法から求めた破断管の第６管支持板部に作用していたと推定される応力振幅の中央値は、主起点部付近では５．２kg/mm²、０度側では４．５kg/mm²及び１８０度側では６．１kg/mm²であった。

Ｕ字管を用いた疲労試験の結果、き裂が周方向に伝播する場合には、Ｕ字管の形状等に起因すると考えられるき裂伝播の非対称性を示した。破断管のき裂伝播部である０度側と１８０度側における応力振幅の差異は、このような非対称性に起因していると考えられる。また、主起点部付近の応力振幅の中央値は、０度側及び１８０度側の応力振幅の中央値の平均値とほぼ同等である。　（図-4.3.1.、4.3.2、4.3.3）

以上のことから、以下の評価には、主起点部付近の応力振幅の中央値である５．２kg/mm²を用いることとする。

(b) 流力弾性振動面からの検討

金属調査の結果及び流動励起振動解析の結果から、流力弾性振動が発生した可能性があると考えられるＸ４５－Ｙ１３～Ｙ２２の伝熱管に、Ｘ４４列及びＸ４６列の隣接管と運転中に接触した痕跡が認められなかったこと、及び実機と同等の温度・圧力での流力弾性振動発生試験において、振動振幅が発散的でなく制限的であることが確認されていることから、破断管の振動振幅も制限的であったと考えられる。

仮に、破断管が隣接管との隙間に相当する振幅（片振幅で約９mm）で振動していたとすると、破断管の第６管支持板部に作用する応力振幅は固定支持の場合２１kg/mm²程度となるが、上記のとおり運転中に隣接管と接触した痕跡が認められなかったことから、実際の応力振幅はこれより低かったものと考えられる。

また、仮に、流力弾性振動が発生しなかったとして、ランダム振動のみにより破断

管のU字部に発生したと推定される振動振幅は最大０．０２㎜程度（片振幅）、第６管支持板部に作用していたと推定される応力振幅は最大０．０３kg/㎟程度である。

流力弾性振動の発生により応力振幅は急増するものであること、及び破面解析から求めた応力振幅５．２kg/㎟が以上の応力振幅の範囲内にあることから、破面解析から求めた応力振幅は流力弾性振動の発生により生じた可能性がある。また、この応力振幅に相当する伝熱管のU字部の振動振幅は２㎜程度（片振幅）となる。

(2) 通常疲労 （資料-4.3.1.5、4.3.1.6）

本報告書において、通常疲労とは、疲労強度が機械的な繰返し外力又は変位のみに支配される疲労モードをいい、平均応力の効果がある場合も含めて考えるものとする。

文献調査では、インコネル６００の疲労強度は、実機と同等の高温ＡＶＴ水中においても室温大気中とほとんど変わらないとされていることから、以下の評価では室温大気中で行った試験結果を用いるものとする。

今回実施した伝熱管の曲げ疲労試験により得られた10^7回までの疲労強度を、厳しい側の疲労強度を与える直線近似式を用いて外挿すると、通常疲労の応力振幅で表示した疲労強度（以下「疲労強度」という。）は、10^9回で１５kg/㎟程度、10^{10}回で１２kg/㎟程度である。 （図-4.3.4）

なお、破断管の固定支持での固有振動数３２Hzと総運転時間約1.1×10^5時間から、破断管に作用した変動応力の最大繰返し数を求めると10^{10}回程度となる。

破断管の第６管支持板部に作用していたと推定される平均応力が通常疲労に及ぼす影響について、伝熱管の曲げ疲労試験の結果を基に、疲労限度線図（修正グッドマン線図）で評価した結果、破断管の第６管支持板部に作用していたと推定される応力振幅は、10^{10}回の疲労限度より低くなる。 （図-4.3.5）

以上のことから、10^{10}回の疲労強度は、破断管の第６管支持板部に作用していたと推定される応力振幅に比べて高く、破断管は通常疲労によりき裂を発生し、破断することはないと考えられる。

(3) 腐食疲労

「4.1.4 環境調査」で検討したとおり、２次系水質環境による腐食の影響はあったとしても小さく、伝熱管の疲労強度に及ぼした影響は無視し得るものと考えられる。

(4) フレッチング疲労 （資料-4.3.1.7）

フレッチング疲労とは、ある物体が別の物体に接触し面圧を受けた状態で、繰返し荷重を受けると、接触部で相対すべりが生じ、通常疲労の場合より低い応力で微小き裂を発生することによって破壊する疲労モードをいう。

一般に、フレッチング疲労においては、その特徴として外表面に対して傾斜したき裂、外表面のこすれ跡及びその中に多数の微小き裂が観察される。

フレッチング疲労試験で破断した伝熱管のき裂起点部の板厚方向に０．２㎜程度の深さの領域の破面は、管軸方向に対して３０～６０度程度傾いており、起点部及びその付近の破面には立体モザイク模様が認められ、き裂伝播領域にはストライエーション、最終破断部にはディンプルのみが認められた。また、外表面の起点部付近には、こすれ跡及びその中に多数の周方向の微小き裂が認められ、これらのき裂は粒内き裂であった。

試験から得られたこれらの特徴は、破断管にも認められており、破断管はフレッチング疲労により破断したものと判断される。 （図-4.3.6、4.3.7）

フレッチング疲労では、接触する二物体間の相対すべり量と面圧が支配因子であるため、伝熱管と管支持板との相対すべり量や面圧とフレッチング疲労強度との関係について定量的に評価し、伝熱管がフレッチング疲労により破断する可能性を検討した。

a．相対すべり量 （資料-4.3.1.8）

インコネル６００伝熱管と管支持板材（ＳＢ４２）との組合せにより、応力振幅と平均面圧をパラメータにした相対すべり量を計測した結果、破断管の第６管支持板部に作用していたと推定される平均面圧及び応力振幅が加わる場合、管軸方向の相対すべり量は１０～１３μm程度であった。また、伝熱管と管支持板との間に隙間を設け間隙支持とした場合、相対すべりは管軸方向と周方向に発生し、その相対すべり量は、面圧を加えた場合（固定支持）の１０倍以上と大きな値であった。 （図-4.3.8）

b．フレッチング疲労き裂発生限界 （資料-4.3.1.9）

インコネル６００伝熱管と管支持板材との組合せにより、平均面圧と相対すべり量をパラメータにしたフレッチング疲労き裂発生限界試験の結果、き裂は平均面圧と相対すべり量により限定された領域のみに認められ、相対すべり量が大きくなると、摩耗のみが認められた。 （図-4.3.9）

破断管の外表面に作用したと推定される平均面圧２．０～４．７kg/㎟と、相対すべ

り量１０～１３μｍ程度との関係を示す範囲と、10^7 回のフレッチング疲労き裂発生限界試験の結果を10^{10}回に外挿したき裂発生限界領域との関係から、破断管にはフレッチング疲労によるき裂が発生し得るものと考えられる。

ｃ．フレッチング疲労強度　（資料-4.3.1.6）

インコネル６００伝熱管と管支持板材との組合せによるフレッチング疲労試験の結果、フレッチング疲労強度は通常疲労の場合より低く、管支持板部での平均面圧が高いほど低下した。

試験の結果から、破断管に作用していたと推定される平均面圧２．０～４．７kg/mm^{2}で、10^8 回までの試験データを一般に疲労評価に使用されるストロマイヤ式を用いて外挿すると、10^{10}回フレッチング疲労強度は６．０～６．９kg/mm^{2}となる。また、厳しい側の疲労強度を与える直線近似式を用いて外挿すると、10^{10}回フレッチング疲労強度は４．５～５．２kg/mm^{2}となる。

破面解析から得られた応力振幅５．２kg/mm^{2}は、ストロマイヤ式外挿による10^{10}回フレッチング疲労強度と直線近似式外挿による10^{10}回フレッチング疲労強度との間にあることから、破断管は応力振幅５．２kg/mm^{2}の場合、直線近似式外挿による繰返し数３．５×10^9 回と最大の繰返し数10^{10}回程度の間の繰返し数でフレッチング疲労により破断し得るものと考えられる。　（図-4.3.10）

以上の結果、破断管の破面及び外表面の特徴がフレッチング疲労試験で破断した伝熱管の特徴とほぼ一致していたこと、破断管の第６管支持板部に作用していたと推定される平均面圧と相対すべり量は、フレッチング疲労き裂が発生し得る領域にあったこと及び応力振幅はフレッチング疲労試験で示されたフレッチング疲労により破断し得る範囲にあったことから、破断管は高サイクルのフレッチング疲労により破断したものと判断される。

4.3.2 破断管の損傷に関する時間的考察

破断管は、高サイクルのフレッチング疲労により破断したと判断されることから、振動発生時期、き裂発生・伝播時期について検討した結果は、以下のとおりである。

(1) 振動発生時期の検討

金属調査の結果及び流動励起振動解析の結果から、流力弾性振動が発生したと考えられるため、破断管に流力弾性振動が発生した時期について検討した。

ａ．渦電流探傷検査記録による管支持板クレビス部閉塞時期の推定　（資料-4.3.2.1）

破断管の各定期検査時の渦電流探傷検査記録を基に、管支持板クレビス部のスケールの付着状況を模擬したモデルを作成し、各定期検査時における管支持板部での支持状態を推定した。そのうち、第３回定期検査時の渦電流探傷検査記録を模擬したモデルでは、伝熱管の振動計測の結果、第６管支持板部での伝熱管の支持状態は固定支持ではなかった。また、第４回定期検査時の渦電流探傷検査記録を模擬したモデルでは、固定支持であった。したがって、第４運転期間の頃に第６管支持板クレビス部が閉塞し、それ以降支持状態が固定支持であったものと推定される。

ｂ．振動計測による管支持板クレビス部閉塞時期の推定　（資料-4.1.3.2）

振止め金具が設計どおり挿入された範囲にあったため、渦電流探傷検査において、信号変化又は信号の新規検出が認められなかった施栓管の振動計測を実施した結果、第２回定期検査時に施栓した伝熱管の第６管支持板部での支持状態は間隙支持であったが、第６回定期検査時に施栓した伝熱管は固定支持であった。これらのことから、破断管の第６管支持板クレビス部は第６運転期間までには閉塞していたものと推定される。

ｃ．管支持板クレビス部の閉塞状況

使用管の管支持板クレビス部は、伝熱管表面での局所的な蒸発現象により、スケールが生成しやすく、運転時間の経過とともに固定支持になる傾向がある。

しかし、使用管であっても、当初の間隙支持の状態から流力弾性振動が発生して、伝熱管が管支持板管穴内で繰り返しすべりを生じると、管支持板クレビス部にスケールが生成しにくいと考えられる。

使用管であるＸ４５－Ｙ１５が間隙支持で、周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められた原因は、間隙支持の状態から流力弾性振動が発生していたためと考えられる。

一方、破断管Ｘ４５－Ｙ１４の管支持板の調査の結果、第６管支持板クレビス部はスケールが詰まって閉塞していたことから、間隙支持であった時期に流力弾性振動が継続的に発生していた可能性は低いと考えられる。

ｄ．摩耗の状況　（資料-4.3.2.2）

破断管の摩耗解析の結果、運転開始当初から第４運転期間まで間隙支持の状態で、流力弾性振動が継続的に発生していたとすると、周辺管と同様に管支持板部で周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が生じるが、金属調査の結果、周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められていないことから、運転開始当初から流力弾性振動が継続的に発生していた可能性は低いと考えられる。

ｅ．運転時の流速、流体密度及び支持条件の変化が安定比に及ぼす影響

運転開始以降の各運転時期の２次系流体の流速及び流体密度の変化が流力弾性振動の発生に関する安定比に及ぼす影響を検討した結果、固定及び間隙それぞれの支持条件における安定比の最大値の変化は高々２％程度であった。一方、固定支持は間隙支持に比べ、固有振動数は高くなるが、減衰比は小さくなる等の要因により、総合的には安定比の最大値が４％程度大きくなり、固定支持の方が、やや流力弾性振動が発生しやすい傾向にある。このため、支持条件の変化が流力弾性振動発生の契機となった可能性が考えられる。　（表-4.3.1）

ｆ．破面の酸化皮膜の状況　（資料-4.3.2.3）

伝熱管材であるインコネル６００は腐食されにくい材料であるが、高温水中に長時間さらされていると、表面には母材の酸化により、室温水中に比べ格段に厚い１μｍオーダの厚さの酸化皮膜層が形成されることが知られている。

破断管破面の断面ミクロ観察の結果、起点部の立体モザイク模様の破面の外表面に近い領域に、最大厚さ２．５μｍの酸化皮膜層が認められた。

この皮膜層の厚さを形成するのに必要な時間を文献調査結果から評価すると、起点部の立体モザイク模様の破面は、少なくとも１年以上前に形成されていたものと推定される。

ｇ．破面から推定した応力振幅

破面解析から破断管に作用していたと推定される応力振幅の中央値５．２kg/mm²と、直線近似式を用いて外挿したフレッチング疲労強度との関係から、破断管は破断するまでに３．５×１０⁹ 回程度以上振動していたものと推定される。

破断管の固定支持での固有振動数を考慮すると、この振動回数は３１，０００時間に相当する。一方、第４運転期間以降、破断までの運転時間が約８０，０００時間であることから、累積振動時間は３１，０００～８０，０００時間程度と推定される。

以上のことを総合的に評価すると、

① 運転開始当初から流力弾性振動が継続的に発生していた可能性は低く、間隙支持であった第６管支持板クレビス部にスケールが詰まり、固定支持となった後のある時点から流力弾性振動が発生した可能性があると考えられる。

② 固定支持となった時期は、第４運転期間以降であると推定される。

③ また、流力弾性振動は発生開始時点以降、その後継続的に振動する場合と、断続的に発生する場合が考えられるが、破断までに要した流力弾性振動の累積振動時間は、３１，０００時間～８０，０００時間程度と推定される。

④ ①～③で述べたことを整理すると、

(イ) 第４運転期間以降、流力弾性振動が継続的に発生し累積振動時間が８０，０００時間程度となった場合。

(ロ) 第４運転期間以降、流力弾性振動が断続的に発生し累積振動時間が３１，０００時間程度となった場合。

(ハ) 破断の３１，０００時間程度前から、流力弾性振動が継続的に発生した場合。

(ニ) 上記(イ)～(ハ)の中間的な場合。

が考えられる。

(2) き裂発生・伝播時期の検討　（資料-4.3.2.4）

ａ．フレッチング疲労き裂発生寿命試験の結果、破断までの繰返し数の３％程度で深さ０．０２mm程度のき裂が発生し始めており、このき裂は外表面のこすれ跡の中に発生し、管軸方向に対して傾いている等、破断管の破面の主起点部及び副起点部の特徴と一致している。このことから、破断管も固定支持になって流力弾性振動が発生した後、比較的

早い時期に微小なき裂が発生したものと考えられる。（図-4.3.11）

b．フレッチング疲労き裂発生寿命試験の結果、発生した微小なき裂（板厚方向への深さ０．０２㎜程度）は初期の頃は極めて遅く伝播し、破断までの時間のほとんどを０．２㎜程度までの微小なき裂の状態で費やしていることから、破断管に発生した微小なき裂も、破断までの時間のほとんどを微小なき裂の状態で費やし、その後、板厚を貫通したものと考えられる。（図-4.3.12）

このため、破断管の主起点部及びその付近の領域には、インコネル材の低速度伝播疲労破面の特徴である立体モザイク模様が認められたものと考えられる。

c．前回定期検査時におけるき裂の寸法を、き裂伝播速度と応力拡大係数範囲との関係を用いて解析した結果、深さ０．４㎜程度であったと推定される。この深さは、周方向欠陥検出手法（８×１探傷子による渦電流探傷検査）による検出可能き裂（き裂長さ５～１０㎜の場合、深さ０．８～０．５㎜）より小さいものである。

（資料-4.3.2.5、4.3.2.6）

また、このき裂が伝熱管の板厚を貫通した後破断に至るまでの時間を、き裂伝播速度と応力拡大係数範囲との関係を用いて解析した結果、８０～１５０分程度と推定される。

（資料-4.3.2.7、4.3.1.2）

d．最終破断部は３１０度付近から３５０度付近の範囲にあり、この範囲は主起点部の反対側である２７０度から偏っていた。このことはU字管を用いた疲労試験で再現されているように、き裂が周方向に伝播する場合には、U字管の形状等に起因すると考えられるき裂伝播の非対称性により、９０度付近において発生したき裂が、０度側と１８０度側では異なった速度により伝播したことによるものと考えられる。

（資料-4.3.2.8）

4.3.3 周辺管の損傷原因の推定

振止め金具が設計どおりの範囲まで挿入されていなかったＸ４４～Ｘ４６列のＹ１２～Ｙ２３列の伝熱管のうち、破断管より曲げ半径の大きい伝熱管の管支持板部で、周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められた。

また、これらの摩耗減肉の認められた伝熱管の管支持板部での支持状態は間隙支持であったと判断される。

一方、摩耗解析の結果、ランダム振動のみでは観察できるほどの摩耗は生じないが、流力弾性振動が発生すると伝熱管と管支持板との間隙等の状況によっては、周辺管で観察された程度の摩耗減肉が生じ得ることが確認された。

したがって、伝熱管の管支持板部の摩耗減肉は、間隙支持の状態で流力弾性振動による繰返し荷重が作用したため、伝熱管が管支持板管穴内で周方向にすべったことにより生じたものと考えられる。

周辺管の損傷原因について、金属調査の結果及び流動励起振動解析の結果に基づき検討した結果は、以下のとおりである。

(1) Ｘ４５列の周辺管（表-4.3.2）

a．使用管であるＸ４５－Ｙ１１及びＸ４５－Ｙ１２は、固定支持であった。流力弾性振動の発生に関する安定比の最大値は１未満であり、流力弾性振動が発生する条件にはなく、金属調査の結果でも微小き裂等の損傷は認められなかった。

これらのことから、振止め金具をＹ１２列まで挿入する設計は妥当であったと考えられる。

b．施栓管であるＸ４５－Ｙ１３は、間隙支持であった。流力弾性振動の発生に関する安定比の最大値は１以上であり、流力弾性振動が発生する可能性があった。しかし、金属調査の結果、摩耗減肉が認められていないことから、流力弾性振動が発生していた可能性は低いと考えられる。

c．使用管であるＸ４５－Ｙ１５は、間隙支持であった。流力弾性振動の発生に関する安定比の最大値が１以上であったこと及び金属調査の結果、摩耗減肉が認められたことから、流力弾性振動が発生していたと考えられる。

当該管は使用管であり固定支持になる可能性があったが、運転開始当初の間隙支持の

状態から流力弾性振動が発生して、管支持板クレビス部にスケールが生成しにくかったため、間隙支持のままの状態であったと考えられる。この状態で伝熱管に流力弾性振動による繰返し荷重が作用したため、伝熱管が管支持板管穴内で周方向にすべったことにより、伝熱管の管支持板部で摩耗減肉が生じたものと考えられる。

d．施栓管であるＸ４５－Ｙ１６～Ｙ２２は、間隙支持であった。流力弾性振動の発生に関する安定比の最大値はいずれも１以上であったこと及び金属調査の結果、摩耗減肉が認められたことから、流力弾性振動が発生していたと考えられる。

これらの伝熱管は、全て第２回定期検査時に施栓したものであり、施栓により管支持板クレビス部にスケールが生成しにくかったため、間隙支持のままの状態であったと考えられる。この状態で伝熱管に流力弾性振動による繰返し荷重が作用したため、伝熱管が管支持板管穴内で周方向にすべったことにより、伝熱管の管支持板部で摩耗減肉が生じたものと考えられる。

この摩耗減肉は、伝熱管の曲げ半径が大きくなるほど減肉深さが大きくなる傾向があり、一部の伝熱管では、運転中の２次側圧力により圧壊して管内面への膨らみを生じ、更に減肉の進んだ一部の伝熱管では摩耗減肉が継続し、板厚を貫通するに至ったものと考えられる。また、これらの伝熱管ではＵ字部の振動が下方まで伝わったため、下部の管支持板部でも摩耗減肉が生じたものと考えられる。

e．振止め金具で支持されていれば、摩耗減肉が認められた伝熱管の流力弾性振動の発生に関する安定比の最大値は１未満となり、流力弾性振動は発生せず、摩耗減肉は生じることはなかったものと考えられる。

f．流動励起振動解析により、流力弾性振動の発生に関する安定比の最大値で流力弾性振動の発生を評価した結果は、破断管及び周辺管の金属調査の結果をよく説明しており、本解析手法による評価は妥当なものと考えられる。

(2)　Ｘ４４列及びＸ４６列の周辺管

Ｘ４４列及びＸ４６列のＹ１７～Ｙ２２の施栓管の一部で、伝熱管の管支持板部又は振止め金具部で摩耗減肉が認められたものがあった。

これらの伝熱管は、片側に振止め金具が挿入されていたが、振止め金具としての機能が不十分であったため、Ｘ４５列の伝熱管と同様に流力弾性振動が発生していたと考えられる。これらの伝熱管は間隙支持のままの状態であり、この状態で流力弾性振動による繰返し荷重が作用したため、伝熱管が管支持板管穴内ですべったこと若しくは振止め金具と繰り返しこすれ合ったことにより、伝熱管の管支持板部又は振止め金具部で摩耗減肉が生じたものと考えられる。

4.3.4 まとめ

破断管及び周辺管の損傷原因について検討した結果は、以下のとおりである。

(1) 破断管は振止め金具で支持されていなかったため、伝熱管のU字部に流力弾性振動が発生した。固定支持となった第6管支持板部に面圧が作用する状態で、流力弾性振動による繰返し荷重が作用したため、第6管支持板部で高サイクルのフレッチング疲労によりき裂が発生し、破断に至ったものと考えられる。

(2) 周辺管は振止め金具で支持されていなかったため、伝熱管のU字部に流力弾性振動が発生した。間隙支持の状態で流力弾性振動による繰返し荷重が作用したため、伝熱管が管支持板管穴内で周方向にすべったことにより摩耗減肉が生じたものと考えられる。

(3) 破断管及び周辺管は、振止め金具で支持されていれば流力弾性振動は発生せず、これらの損傷は発生しなかったものと考えられる。

(4) X45－Y11及びX45－Y12の伝熱管において、流力弾性振動が発生しなかったことから、振止め金具をY12列まで挿入する設計は妥当であったと考えられる。

4.4 結論

破断管及び周辺管の損傷原因について、現場における損傷状況調査、金属調査、流動励起振動解析、流動試験、応力解析、材料強度試験等の結果に基づき検討した結果、これらの伝熱管は、振止め金具が大幅な挿入不足であったため、伝熱管のU字部に流力弾性振動が発生し、振止め金具による支持がなく振動振幅が制限されなかったことから、疲労破断あるいは摩耗減肉が生じたものと考えられる。

振止め金具並びに破断管及び周辺管の損傷についての検討結果は、以下のとおりである。

4.4.1 振止め金具

(1) 損傷側蒸気発生器の製造時に、振止め金具に対する施工管理、品質管理について、十分な注意が払われていなかったため、振止め金具が設計どおりの範囲まで挿入されなかったものと推定される。

(2) 運転開始以降、振止め金具の挿入状況の確認は行っていなかった。

4.4.2 破断管

(1) 主起点部近傍の破面には、インコネル材の低速度伝播疲労破面の特徴である立体モザイク模様が、主起点部から離れたき裂伝播部の破面には、高サイクル疲労破面を特徴付けるストライエーションが認められたことから、破断の原因は高サイクル疲労であると判断される。

(2) 破断管は振止め金具で支持されていなかったため、伝熱管のU字部に流力弾性振動が発生した。固定支持となった第6管支持板部に面圧が作用する状態で、流力弾性振動による繰返し荷重が作用したため、第6管支持板部で高サイクルのフレッチング疲労によりき裂が発生し、破断に至ったものと考えられる。

(3) 破断管は振止め金具で支持されていれば、流力弾性振動は発生せず、破断することはなかったものと考えられる。

4.4.3 周辺管

(1) 周辺管は振止め金具で支持されていなかったため、伝熱管のU字部に流力弾性振動が発生した。間隙支持の状態で流力弾性振動による繰返し荷重が作用したため、伝熱管が管支持板管穴内で周方向にすべったことにより摩耗減肉が生じたものと考えられる。

(2) これらの摩耗減肉が認められた伝熱管は、振止め金具による支持が不十分である範囲にあり、かつ、破断管より曲げ半径の大きいものに限られており、破断管より曲げ半径の小さい伝熱管には認められなかった。

(3) 振止め金具で支持されていれば、摩耗減肉が認められた伝熱管には流力弾性振動は発生せず、これらの損傷は発生しなかったものと考えられる。

(4) Ｘ４５－Ｙ１１及びＸ４５－Ｙ１２の伝熱管において、流力弾性振動が発生しなかったことから、振止め金具をＹ１２列まで挿入する設計は妥当であったと考えられる。

(5) 伝熱管の破断による隣接管への影響は、隣接管のスケール表面が薄くこすれた程度の軽微なものであり、破断管が隣接管を損傷に至らしめるものではなかったと考えられる。

5．再発防止対策等

5.1 自主保安の強化

(1) 品質保証活動の強化

品質保証活動については、設計、製作、施工、運転の各段階の充実を図るため、以下のとおり体制及び活動を充実強化した。

a. 体制強化

(a) 社長を原子力本部長とし、原子力部門の品質保証の強化を図っている。

(b) 原子力部門に対する独立した品質監査機能の強化を図るため、品質監査上の観点から原子力本部長ならびに関係職位に対して直接、助言、勧告を行う役員を配置した。

さらに、この役員の指導する社長室品質監査グループに「原子力監査プロジェクトチーム」を設置し、品質監査活動を実施している。

(図-5.1.1)

(c) 原子力部門の品質保証活動については社内基準により組織、権限を明確にし実施しているが、今回この活動を一層強化する観点から原子力・火力本部に専任の役職者（調査役または副調査役）を配置し、これにあたらせるとともに、若狭支社原子力品質管理センター等の増強ならびに運転・保守管理の充実のため発電所の体制強化を図った。

(図-5.1.2)

b. 活動強化

原子力部門において次のとおり活動を強化している。

(a) 今回明らかになった具体的な再発防止対策については、実施計画に基づき既設プラントに反映しており、また、より信頼性を高めるため新しい知見、技術や国内外の事故・故障等の情報についても反映要否の定期的な検討等により継続的に取り組んでいる。

(図-5.1.3)

(b) 設計変更または運転・保守管理方法変更にあたってはその変更の妥当性を十分に検討するとともに、変更の結果が的確にチェックシート等に反映できるよう管理のしくみを充実し、徹底した。

(図-5.1.4)

あわせて、ヒューマンエラーの防止については、ヒューマンファクター研究成果の反映を行うとともに、発生事例の要因分析を行い、再発防止対策の徹底を図っている。

(c) 民間基準としては、日本電気協会により「原子力発電所の品質保証指針（ＪＥＡＧ4101,1993）」が作成されているが、設計、製作、施工、運転の各段階における電気事業者間の統一した自主的な基準の策定についても、引き続き日本電気協会において検討を進めている。

なお、品質保証活動における独立した監査組織の基本的な機能、位置付けについて明確化を図るため、日本電気協会に品質保証特別検討会が設置され、「原子力発電所の品質保証指針（ＪＥＡＧ 4101,1990）」の改訂が行なわれた。

(d) プラント製作者及び主要機器製作者における品質保証活動への監査を充実・強化し、定期的に実施している。

また、従来現場工事の請負会社に対し、品質保証活動の強化を指導してきているが、これらの会社と契約関係にある協力会社の品質保証活動を向上させるため、当社が定期的に実施している工事請負会社に対する監査を通じて、指導を強化している。

c. 「原子力監査プロジェクトチーム」においては、「原子力は地域社会の信頼性から」という考え方をもとに第三者的視点に立ちつつ、特に安全に重点をおき品質保証活動上の重要な事項について、原子力部門とは独立した立場で監査テーマを計画的に策定し、監査を実施するとともに、監査結果については監査担当役員から原子力本部長に対し直接、助言、勧告を行い、改善についての徹底を図っている。 (図-5.1.1)

(2) 蒸気発生器伝熱管の健全性の向上

振止め金具の重要性に鑑み、当社及びプラント製作者において振止め金具が設計どおりの範囲まで確実に挿入され、維持、管理できるよう設計、製作、施工、運転の各段階で品質保証活動の充実強化を図ることとした。

具体的には以下のとおり、品質保証活動の充実強化を図っている。

＜設計段階＞

流動励起振動に対する伝熱管の健全性確認を行った。

＜製作、施工段階＞

当社社員をプラント製作者の工場に常駐させ、材料、寸法、外観検査を実施するとともに、ＥＣＴやテレビカメラ等により振止め金具が設計どおりの範囲まで挿入されていることを確認した。

＜運転段階（定期検査）＞

新蒸気発生器については、振止め金具挿入・据付状態を確認しているが、再起動後、定期的にＥＣＴ等により振止め金具挿入・据付状況を確認する。

また、蒸気発生器伝熱管の既存の損傷形態についても、その発生を防止、抑制する観点から、今後とも水質管理技術、検査・保修技術の改良を含めた新しい知見、技術等を積極的に導入する。なお、伝熱管の管支持板部における変形については今後とも調査を行う。

さらに、取替用蒸気発生器を含めた新設の蒸気発生器における設計、製作、施工、運転の各段階においても、今後ともに継続的に新しい知見、技術等の習得に努め、積極的に反映する。 (資料-5.1.1)

(3) 保守管理方法の改善等

a. 主蒸気隔離弁弁棒摺動部の管理基準を作業要領書に明記するとともに、弁分解時に弁棒摺動部の表面粗度計測を行い、適切な仕上げであることを確認した。 (資料-5.1.2)

b. 主蒸気隔離弁グランドパッキン摺動抵抗の低減、閉弁力の増加により、閉弁機能を向上させた。 (資料-5.1.3)

c. 主蒸気隔離弁閉止操作後の手動による迅速な増締めが行えるよう、増締め装置の構造、操作性等の検討、閉止機能の改善効果確認を実施し、手動増締め装置を設置した。 (資料-5.1.3)

d. 作業管理システムの改善のため、発電所における保守管理方法の変更管理の見直しを行うとともに、定期検査期間中の主要機器の作業管理に関するチェックの改善を図るため、発電所発電室に定期検査担当の役職者を配置した。 (図-5.1.2、5.1.4)

e. 誤操作を防止し、加圧器逃がし弁作動用空気系統の信頼性を高めるため、同空気系と同じ分岐管に接続されている予備エアージャンクションボックスおよび同元弁を撤

去するとともに、その他の作動用空気系統の使用されていない予備エアージャンクションボックスについて分岐管以降を撤去した。

また、加圧器逃がし弁作動用空気系統については、信頼性向上のため全ての加圧器逃がし弁の作動空気が同一の計器用空気母管から供給されることのないように多重化・独立化を図った。（資料-5.1.4）

さらに、その他の安全上重要な機能を有する機器の制御用空気系統の信頼性を向上させるため、手動弁の配置を見直し一部の手動弁を撤去した。（資料-5.1.5）

f. 誤操作により原子炉の安全機能の低下、あるいは環境に影響を及ぼす可能性のある手動弁について、施錠管理対象範囲を見直し、これらの弁ハンドルを色別表示するとともに、弁リストを整備し、施錠弁の点検マニュアル（チェックシート）を見直した。

なお、この点検マニュアル（チェックシート）により、弁の開度(開、閉、調整開)、施錠状態および弁ハンドルの色別表示を確認した。（資料-5.1.6）

また、点検時の誤認を回避するため、手動弁の弁名称表示を表示板またはタグ表示により明確化した。

さらに、プラント起動前の点検に使用する点検マニュアル（チェックシート）は、誤操作を防止するため、点検対象、基準等の明確化の見直しを行い、これに基づき操作と分離して確認した。（資料-5.1.7）

g. 加圧器逃がし弁その他安全上重要な機器等についても、単一の故障、誤操作により多重化された機能が同時に喪失する要因がないか検討し問題のないことを確認した。

(4) 定期点検項目の見直し、内容の充実

定期検査の中で以下の検査を行い、機器の信頼性確保に努めることとしている。

a. 蒸気発生器振止め金具の挿入状況の定期的な検査及び管支持板部における伝熱管の変形の有無に係る検査

b. 重要系統について起動前に弁及び機器が正規の状態にあることを確認するための検査

c. 主蒸気隔離弁の温態状態での機能を確認する検査

(5) 運転マニュアルの充実等

a. 蒸気発生器伝熱管損傷時に加圧器逃がし弁が不動作及び主蒸気隔離弁が不完全閉止

した場合の対応操作を取り入れた運転マニュアルとした。（資料-5.1.8）

b. 安全上重要な機能を有する機器が故障した場合に、運転員が容易に判断し、適切に対応できるよう、具体的な操作手順を取り入れた運転マニュアルを作成した。（資料-5.1.8）

c. 関連する運転マニュアルのつながりの明確化、機器の操作時期、順序、条件等の表現を平易化し、充実を図った。（資料-5.1.8）

d. 今後とも国内外の事故・故障等を教訓として、運転マニュアルの充実を図るとともに、マニュアル改訂の際にはシミュレータを活用して教育訓練を行い徹底を図っている。

(6) モニタリングシステム及び計測制御システムの改善

a. 蒸気発生器伝熱管漏洩をより迅速、確実に検出し、かつ漏洩蒸気発生器の特定ができるよう、各主蒸気管ラインに窒素１６に着目した放射線モニタを開発し設置した。（資料-5.1.9）

b. 事故後監視計（ＰＡＭ）トレンドシステムに係るプラントパラメータのコンピュータの計算能力の向上等及びアラームタイプライタ記録の記憶容量の見直しを図った。（資料-5.1.10）

c. 最近の技術進歩を踏まえ、炉心の冷却状態を監視するパラメータを多様化するため、原子炉水位計を設置した。（資料-5.1.11）

また、主蒸気管を経由して放出される放射能量を迅速かつ的確に把握できるよう、主蒸気放射線計測装置（主蒸気管モニタ）を設置した。（資料-5.1.12）

さらに、今後とも異常な事象発生時におけるプラントの状況把握を向上させるため、新技術、知見の収集に努めることとしている。

d. 外部電源が利用可能な場合には、事故収束手段の多様化を図る観点からプラント制

御システムを検討し、非常用電源のみならず常用電源から給電される機器も用いることができるよう改善した。（資料-5.1.13）

また、設備の変更に合わせて、必要な運転マニュアルを作成した。

5.2 技術開発の推進等の中長期的課題への取り組み

(1) ＥＣＴ精度の一層の向上等、検査技術の高度化に積極的に取り組むこととしている。

また、振動による蒸気発生器伝熱管の微小き裂検出のための技術開発に積極的に取り組むこととしている。

(2) プラントの操作や作業時におけるヒューマンエラーの防止をめざした関連技術の開発、推進に努めることとしている。

(3) 原子力発電施設の重要な設備における流動励起振動及び熱水力挙動に係る国内外の知見、技術を積極的に取り入れるとともに、実験等を通じて、これらの評価手法等の更なる充実を図ることとしている。

5.3 異常な事象の発生時における即時対応策の改善

(1) 通報連絡体制の充実

通報連絡体制の充実のため、通報連絡先の拡充、通報連絡事項の充実等を要領に反映するとともに、迅速かつ的確な通報連絡が行うことができるよう、社内外にファックス網を整備するなど、通報連絡手段の改善を図った。（図-5.3.1）

(2) 発電所見学者に対する迅速かつ適切な対応

見学の中止、見学者の誘導、見学者に対する概要説明など、迅速な対応を図るべく要領を制定して運用している。

また、対応の実効性を高めるため、関係職員の教育・訓練を定期的に実施している。（資料-5.3.1）

(3) 放出放射能量の迅速な推計

発電所周辺環境への放出放射能量等を迅速かつ的確に評価するため、放出放射能量等

評価マニュアルを作成、運用するとともに、そのシステム化を図った。（資料-5.3.2）

5.4 原子力安全研究体制の確立

安全第一の視点から、原子力安全システム研究所を設置（平成４年３月）し、広く外部の専門家の知見を活用するとともに、国内外事例の徹底した調査・分析、経年事象の解明など発電所の保守管理及び新技術の向上について現場に密着した研究体制を確立し、設備信頼性及び安全性の向上を図っている。

また、これに加えて原子力発電と社会の調和を探る自由活発な研究体制を確立し、社会的信頼性向上を図ることとした。（図-5.4.1）

5.5 蒸気発生器の信頼性向上

振止め金具部における伝熱管の摩耗減肉を抑制し、信頼性の一層の向上を図るため、美浜発電所２号機については、新型振止め金具を有する新型蒸気発生器に取替えた。

なお、従来型振止め金具を有するプラントについては、改良型振止め金具に計画的に取替を実施している。

5.6 蒸気発生器漏洩時の措置

原子力発電所の運転管理においては安全最優先を大原則とし、「二次系冷却水水質等のパラメータ（放射能濃度）に有意な変化が認められた場合には、原子炉の運転を停止する措置を直ちに講ずる」ことについては、今後も継続して遵守していくこととする。

6．復旧

今回の事象の復旧については、経済性、社会的信頼性などを総合的に勘案し、蒸気発生器を取替復旧した。（表-6.1）

なお、蒸気発生器取替完了までの間、プラントが長期間停止したことから機器の保全管理に万全を期した。

（資料-6.1.1）

また、プラントの復旧にあたっては各系統・機器の健全性確認を十分に行うと共に、長期停止であったこと及び今後の安定安全運転を確保するため、調整運転後プラントを停止し、長期停止の間は使用しなかった系統等を中心に点検を実施後、プラントを復旧した。

（資料-6.1.2）

添付－表

表－目次

		ﾍﾟｰｼﾞ
表-2.1.1	蒸気発生器伝熱管損傷に係る事象の経過	1
表-2.1.2	蒸気発生器２次側器内水の放射能濃度分析結果	16
表-3.1.1	ＭＡＲＶＥＬコードに対する主な変更点	17
表-3.1.2	今回の事象の再現解析の解析条件	18
表-3.2.1	炉心の健全性評価に関する解析条件	21
表-3.3.1	大気又は海への放射性物質の放出量の算出に用いた放射性物質の測定値	22
表-3.3.2	１次冷却材の放射性物質の測定値	23
表-3.3.3	放射性物質の放出経路及び放出期間	24
表-3.3.4	放射性希ガス及び放射性よう素の大気への放出量の算出結果	25
表-3.3.5	大気へ放出された放射性希ガス及び放射性よう素により周辺公衆が受けると考えられる実効線量当量の算出結果	26
表-3.4.1	安全解析と今回の事象の比較とその評価	27
表-3.5.2.1	評価対象部位別応力解析方法	31
表-3.5.2.2	疲れ累積係数	32
表-3.6.1	１次冷却系への水の注入量及び損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の推移	33
表-4.1.1	破断管の材料性状	34
表-4.1.2	管支持板部減肉状況（Ｘ４５列低温側）	35
表-4.1.3	管支持板クレビス部の調査結果	36
表-4.1.4	通常運転時の蒸気発生器の２次系水質	37
表-4.2.1	流力弾性振動解析結果	38
表-4.3.1	破断管の安定比の最大値の変化	39
表-4.3.2	Ｘ４５列伝熱管の損傷原因調査結果の概要	40
表-6.1	美浜２号機蒸気発生器復旧計画工程表	41

表－２．１．１ 蒸気発生器伝熱管損傷に係る事象の経過

〔 時刻は、シーケンスオブイベント記録及びアラームタイプライタ記録のものを他の記録のものに優先させている。〕

日 時	事象又は機器動作	操作、確認等の内容	根拠となる記録等	備　　考
平成３年 ２月７日 09：00頃		Ａ、Ｂ－蒸気発生器（Ｓ／Ｇ）２次側器内水の放射能濃度分析結果：検出限界値以下 （検出限界値：2.50×10^{-3}Bq/cm^3）	放射線管理操作業日誌	Ｓ／Ｇ２次側器内水の放射能濃度分析頻度：１回／週
平成３年 ２月９日 12：24	プラント計算機によるＲ－１９（Ｓ／Ｇブローダウン水モニタ）の計数率高注意信号発信 （印字値：60cpm）	プラント計算機記録の一種であるプロセスモニタ打点式記録（チャート）を確認するが有意な変化なし（注意を継続）	(1) アラームタイプライタ記録 (2) プロセスモニタ打点式記録	プラント計算機によるＲ－１９計数率高注意信号設定値：60cpm （通常値：約35cpm）
12：33	プラント計算機によるＲ－１５（復水器空気抽出器ガスモニタ）の計数率高注意信号発信 （印字値：910cpm）	プロセスモニタ打点式記録を確認するが有意な変化なし（注意を継続）	(1) アラームタイプライタ記録 (2) プロセスモニタ打点式記録	プラント計算機によるＲ－１５計数率高注意信号設定値：800cpm （通常値：約800cpm）
12：40頃		Ｒ－１９の記録（チャート）が若干上昇傾向を示しているのを発見、Ｓ／Ｇ２次側器内水の放射能濃度分析を指示	プロセスモニタ打点式記録	
13：00頃		Ａ、Ｂ－Ｓ／Ｇ２次側器内水のサンプル採取	放射線管理操作業日誌	
13：20頃		放射能濃度分析結果判明 Ａ－Ｓ／Ｇの２次側器内水の放射能濃度は6.00×10^{-3}Bq/cm^3 Ｂ－Ｓ／Ｇの２次側器内水の放射能濃度は検出限界値以下 （検出限界値：2.42×10^{-3}Bq/cm^3） Ａ、Ｂ－Ｓ／Ｇの２次側器内水の放射能濃度分析を再度指示 （13：45頃にサンプル採取）	放射線管理操作業日誌	（時刻は運転員の記憶）
13：40頃	Ｒ－１５「計数率注意」警報発信 (1) 脱気器ベントからの放出経路を大気側から復水器側へ自動切替え (2) 復水器空気抽出ポンプからの放出経路を大気側からチャコールフィルタ経由の１号機補助建屋排気筒側へ自動切替え	プロセスモニタ打点式記録の確認 Ｒ－１５「計数率注意」警報発信に関連する機器動作の確認	(1) 当直課長引継簿 (2) プロセスモニタ打点式記録 １号機プロセスモニタ打点式記録 （１号機Ｒ－１３（補助建屋排気筒ガスモニタ）及び１号機Ｒ－１４（補助建屋排気筒ガスモニタ））	Ｒ－１５「計数率注意」警報設定値：2×10^3cpm １号機Ｒ－１３ ：約650cpmに上昇 （通常値：約400cpm） １号機Ｒ－１４ ：約650cpmに上昇 （通常値：約550cpm）

日 時	事象又は機器動作	操作、確認等の内容	根拠となる記録等	備　　考
２月９日 13：45頃			当直課長引継簿 （１、２号機、３号機）	中央給電指令所への連絡 （矢浜１、２号機の中央制御室から矢浜３号機の中央制御室経由で緊急に発電機出力を降下する旨連絡 13：47頃、矢浜３号機の中央制御室から矢浜１、２号機の中央制御室へ中央給電指令所への連絡が完了した旨連絡）
	Ｒ－１９「計数率注意」警報発信	プロセスモニタ打点式記録の確認	(1) 当直課長引継簿 (2) プロセスモニタ打点式記録	Ｒ－１９「計数率注意」警報設定値：4×10^2cpm
		Ｒ－１５「計数率注意」警報発信に関連する機器動作により、指示値の上昇が予想される１号機Ｒ－１３、Ｒ－１４の指示値の上昇を確認	１号機プロセスモニタ打点式記録	１号機Ｒ－１３ ：約1,000cpm １号機Ｒ－１４ ：約1,000cpm
13：45	蒸気発生器ブローダウン隔離弁（AOV-1936A,B）自動閉止、蒸気発生器ブローダウンサンプル隔離弁（AOV-1923A,B）自動閉止、蒸気発生器ブローダウンタンク水位制御弁（LCV-1903）自動閉止	Ｒ－１９「計数率注意」警報発信に関連する機器動作の確認	アラームタイプライタ記録	（蒸気発生器ブローダウンタンク水位制御弁（LCV-1903）自動閉止については運転員の記憶）
	「加圧器圧力低バックアップヒータ自動入」警報発信		アラームタイプライタ記録	「加圧器圧力低バックアップヒータ自動入」警報設定値 ：155.0kg/cm^2 （通常値：約157.2kg/cm^2）

日 時	事象又は機器動作	操作、確認等の内容	根拠となる記録等	備　　考
2月9日 13：45		B－充てんポンプ追加起動 2台 → 3台	アラームタイプライタ記録	
	プラント計算機によるA－SG水位高注意信号発信 （印字値：55.4%）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機によるA－SG水位高注意信号設定値：55.0% （通常値：約51.5%）
	プラント計算機によるR－26（補助蒸気復水モニタ）計数率高注意信号発信 （印字値：400cpm）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機によるR－26計数率高注意信号設定値：400cpm （通常値：約160cpm）
	プラント計算機による加圧器水位低注意信号発信 （印字値：44.8%）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機による加圧器水位低注意信号設定値：45.0% （通常値：約54%）
	プラント計算機による加圧器水位低低注意信号発信 （印字値：43.8%）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機による加圧器水位低低注意信号設定値：44.0%
	プラント計算機による加圧器圧力低注意信号発信 （印字値：155.3kg/cm²）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機による加圧器圧力低注意信号設定値：155.5kg/cm²
	プラント計算機による加圧器圧力低低注意信号発信 （印字値：151.4kg/cm²）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機による加圧器圧力低低注意信号設定値：151.5kg/cm²

日 時	事象又は機器動作	操作、確認等の内容	根拠となる記録等	備　　考
2月9日 13：46	プラント計算機によるA－SG水位高高注意信号発信 （印字値：57.1%）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機によるA－SG水位高高注意信号設定値：57.0%
	プラント計算機による制御用制御棒（グループD）引抜き位置高注意信号発信 （印字値：213ステップ）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機による制御用制御棒（グループD）引抜き位置高注意信号設定値：213ステップ （通常位置：210ステップ）
13：47頃		発電機出力降下開始 （目標降下率：5%／分）	(1) 当直課長引継簿 (2) プラント計器記録の一種である発電機電力記録（チャート） (3) プラント計器記録の一種である蒸気加減弁開度記録（チャート）	
13：48	プラント計算機による第3蒸気加減弁開度低注意信号発信 （印字値：51.2%）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機による第3蒸気加減弁開度低注意信号設定値：52.0%
		放射性物質の放出抑制のため、タービン動補助給水ポンプ駆動用蒸気A－SG側元弁(HS-060)閉止	アラームタイプライタ記録	

日 時	事象又は機器動作	操作、確認等の内容	根拠となる記録等	備　　考
2月9日 13：49	「加圧器水位低ヒータ自動切及び抽出水隔離弁(LCV-465)自動閉」警報発信		アラームタイプライタ記録	「加圧器水位低ヒータ自動切及び抽出水隔離弁(LCV-465)自動閉」警報設定値 ：20%
	プラント計算機によるタービンバイパス弁開注意信号発信 PCV-482C 〃　G 〃　D 〃　H		アラームタイプライタ記録	（8台中4台開） タービンバイパス弁自動閉設定値： 1次冷却材の温度偏差 PCV-482C,G　2.2℃ PCV-482D,H　4.2℃ （通常値：約-0.2℃）
	プラント計算機によるB－SG水位低注意信号発信 （印字値：47.0%）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機によるB－SG水位低注意信号設定値 ：48.0% （通常値：約51.5%）
	プラント計算機によるB－SG水位低注意信号リセット （印字値：49.3%）		アラームタイプライタ記録	
13：50頃	R－15「計数率高」警報発信		プロセスモニタ打点式記録	R－15「計数率高」警報設定値：1×10^{6}cpm
	復水器空気抽出ポンプからの放出経路をチャコールフィルタ経由の1号機補助建屋排気筒側から原子炉格納容器側へ自動切替え	R－15「計数率高」警報発信に関連する機器動作の確認		（時刻は運転員の記憶） 〔機器の動作は、15：45に復水器空気抽出ポンプを起動した際、2号機R－1Sの指示値が上昇したにもかかわらず1号機R－13、R－14の指示値が上昇していないことからも推定できる。〕
13：50	プラント計算機によるタービンバイパス弁開注意信号リセット PCV-482D 〃　H 〔PCV-482C 〃　G〕		アラームタイプライタ記録 （但し、PCV-482D,Hのみ印字）	〔13：50には、プラント計算機への入力信号が多くなりオーバーフローし、印字されなかった。なお、15：13にはPCV-482C,G型が印字されている。〕 タービンバイパス弁自動閉止設定値： 1次冷却材の温度偏差 PCV-482D,H　4.2℃ PCV-482C,G　2.2℃
	プラント計算機によるAループサブクール度低注意信号発信 （印字値：19.9℃）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機によるAループサブクール度低注意信号設定値：20.0℃ （通常値：約27℃）

日 時	事象又は機器動作	操作、確認等の内容	根拠となる記録等	備　　考
2月9日 13：50	「加圧器圧力低」による原子炉トリップ信号発信		(1) シーケンスオブイベント記録 (2) アラームタイプライタ記録	「加圧器圧力低」原子炉トリップ設定値：134.3kg/cm²
	タービントリップ		(1) シーケンスオブイベント記録 (2) アラームタイプライタ記録	
	「加圧器圧力低及び加圧器水位低の一致」による安全注入（SI）信号発信	下記機器の自動起動を確認 (1)A、B－非常用ディーゼル発電機 (2)Ⓐ、Ⓑ－非放射性機器冷却水ポンプ (3)A、B－高圧注入ポンプ (4)A、B－余熱除去ポンプ (5)Ⓐ、Ⓑ－放射性機器冷却水ポンプ (6)Ⓐ、C－海水ポンプ (7)A、Ⓑ－格納容器冷却水ポンプ (8)A、Ⓑ、Ⓒ、Ⓓ－格納容器循環ファン (9)A、B－電動補助給水ポンプ ○印：SI信号発信前から運転していた機器	(1) シーケンスオブイベント記録 (2) CRTハードコピー (3) 運転日誌	「加圧器圧力低及び加圧器水位低の一致」安全注入設定値 圧力：128.3kg/cm² 水位：5.5% 〔A、B－非常用ディーゼル発電機については運転員の記憶。なお、14:31及び14:33に各々A、B－非常用ディーゼル発電機の停止がアラームタイプライタ記録に印字されている。〕
	「原子炉格納容器隔離」			〔原子炉格納容器隔離については運転員の記憶〕
	「A－SG水位異常低」及び「B－SG水位異常低」の一致によるタービン動補助給水ポンプ起動		シーケンスオブイベント記録	「SG水位異常低」設定値 ：10% 〔起動については運転員の記憶。なお、14:35には停止がアラームタイプライタに印字されている。〕
	プラント計算機による加圧器水位オーバレンジ低注意信号発信		アラームタイプライタ記録	プラント計算機による加圧器水位オーバレンジ低注意信号設定値：-5%
13：51	発電機トリップ 常用母線への給電停止		シーケンスオブイベント記録	
13：52	プラント計算機による加圧器気相部温度低注意信号発信 （印字値：319.9℃）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機による加圧器気相部温度低注意信号設定値：320.0℃ （通常値：約343℃）

日 時	事象又は機器動作	操作、機器等の内容	根拠となる記録等	備　　考
2月9日 13：52	プラント計算機による加圧器液相部温度低低注意信号発信 （印字値：309.9 ℃）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機による加圧器液相部温度低低注意信号設定値：310.0℃ （通常値：約343℃）
		損傷側蒸気発生器隔離のため、Ａ－電動補助給水ポンプ出口弁（FV-050）閉止	アラームタイプライタ記録	
		Ｂ－ＳＧへの補助給水量を増加させるため、電動補助給水ポンプ出口連絡弁（FV-064）開放	アラームタイプライタ記録	
13:54	プラント計算機によるＢ－ＳＧ広域水位高注意信号発信 （印字値：60.1%）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機によるＢ－ＳＧ広域水位高注意信号設定値：60.0% （通常値：約51.5%）
13：55頃	Ｒ－１９「計数率高」警報発信		プロセスモニタ打点式記録	計数率高警報設定値 ：3×10^3cps
13：55	プラント計算機による原子炉容器上部プレナム部安全注入ライン止め弁(V-1855A,B) 開注意信号発信		アラームタイプライタ記録	〔原子炉容器上部プレナム部安全注入ライン止め弁は、ＳＩ信号発信から５分後に自動的に開放される。〕
		損傷側蒸気発生器隔離のため、Ａ－主蒸気隔離弁（V-2001）閉止操作	アラームタイプライタ記録	〔中央制御室の中央監視盤のＡ－主蒸気隔離弁の開表示灯と閉表示灯がともに点灯したため機械保修員に対し同弁の閉止を指示（指示した時刻は運転員の記憶）〕
14：00	プラント計算機によるＡ－ＳＧ広域水位高注意信号発信 （印字値：60.0%）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機によるＡ－ＳＧ広域水位高注意信号設定値：60.0% （通常値：約51.5%）
	プラント計算機によるＢ－ＳＧ広域水位高高注意信号発信 （印字値：70.2%）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機によるＢ－ＳＧ広域水位高高注意信号設定値：70.0%
	プラント計算機によるＡループサブクール度低低注意信号発信 （印字値：5.4℃ ）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機によるＡループサブクール度低低注意信号設定値：10.0℃

日 時	事象又は機器動作	操作、機器等の内容	根拠となる記録等	備　　考
2月9日 14：02頃		Ａ－主蒸気隔離弁（V-2001）の閉止完了	ＰＡＭトレンド記録	〔Ａ－ＳＧ２次側圧力とＢ－ＳＧ２次側圧力が乖離し始めていることから判断〕
14：02		１次冷却系の冷却を行うため、Ｂ－ＳＧ主蒸気逃がし弁(PCV-482B) 開放	アラームタイプライタ記録	
	プラント計算機によるＡループサブクール度低低注意信号リセット （印字値：10.6℃ ）		アラームタイプライタ記録	
14：03	プラント計算機によるＢ－ＳＧ主蒸気圧力低注意信号発信 （印字値：53.7kg/cm²）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機によるＢ－ＳＧ主蒸気圧力低注意信号設定値：54.0kg/cm² （通常値：約55.8kg/cm²）
	プラント計算機によるＢ－ＳＧ主蒸気圧力低低注意信号発信 （印字値：52.7kg/cm²）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機によるＢ－ＳＧ主蒸気圧力低低注意信号設定値：53.0kg/cm²
14：04	プラント計算機による燃料取替用水タンク水位低注意信号発信 （印字値：95.5%）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機による燃料取替用水タンク水位低注意信号設定値：95.5% （通常値：約95.0～98.5%）
14：05	プラント計算機による復水タンク水位低注意信号発信 （印字値：8.3m）		アラームタイプライタ記録	プラント計算機による復水タンク水位低注意信号設定値：8.3m （通常値：約8.1～8.9m）
		１次冷却材ポンプ及び補機冷却水ポンプの再起動に備え常用母線への給電を再開	原子炉保護系監視記録	

日 時	事象又は機器動作	操作、確認等の内容	根拠となる記録等	備　　考
2月9日 14：07		原子炉格納容器隔離信号解除 加圧器逃がし弁による1次冷却系の減圧操作に伴え、制御用空気系統の原子炉格納容器隔離弁（V-3323）開放	アラームタイプライタ記録 アラームタイプライタ記録	
14：09		高圧注入ポンプ停止時の1次冷却系の保有水量を制御し、及び1次冷却材ポンプ再起動時の同ポンプ軸封水を確保するため、A、B、C一充てんポンプ再起動	アラームタイプライタ記録	
14：10頃		1次冷却系を減圧するため、加圧器逃がし弁（PCV-455C、PCV-456）開放操作		（時刻は運転員の記憶） 開放操作を複数回試みたが2弁とも開放できなかった。
14：11	プラント計算機による充てんポンプ出口流量高高注意信号発信 （印字値：14.4m³/h） プラント計算機による燃料取替用水タンク水位低低注意信号発信 （印字値：94.5%）		アラームタイプライタ記録 アラームタイプライタ記録	プラント計算機による充てんポンプ出口流量高高注意信号設定値：8.5m³/h （通常値：約6.5m³/h） プラント計算機による燃料取替用水タンク水位低低注意信号設定値：94.5%
14：14	SI信号解除により、原子炉トリップ信号リセット	SI信号解除	(1) シーケンスオブイベント記録 (2) アラームタイプライタ記録	（SI信号により自動起動した機器は運転を継続）

日 時	事象又は機器動作	操作、確認等の内容	根拠となる記録等	備　　考
2月9日 14：16	プラント計算機によるA－SG水位高注意信号発信 （印字値：55.1%）		アラームタイプライタ記録	
14：17 ～ 14：21		加圧器逃がし弁（PCV-455C）の機能回復を期待して、加圧器逃がし弁元弁（V-530）閉止、開放（2回）	アラームタイプライタ記録	
14：17		健全側ループ高温側冷却材温度が目標値に達したため、B－SG主蒸気逃がし弁（PCV-482B）閉止	アラームタイプライタ記録	健全側ループ高温側冷却材温度目標値：258.2℃以下
14：18	充てんポンプへの水の供給を体積制御タンク側から燃料取替用水タンク側へ自動切替え		アラームタイプライタ記録	自動切替え設定値： 体積制御タンク水位 4.0%
14：19	A－SG主蒸気逃がし弁（PCV-482A）自動開閉		アラームタイプライタ記録	A－SG主蒸気逃がし弁自動 開放設定値：73.8kg/cm² 閉止設定値：71.8kg/cm²
14：24	「A－SG水位異常高タービントリップ」警報発信 プラント計算機による加圧器水位オーバレンジ低注意信号リセット		(1) シーケンスオブイベント記録 (2) アラームタイプライタ記録 アラームタイプライタ記録	「A－SG水位異常高タービントリップ」警報設定値：75%

日 時	事象又は機器動作	操作、離認等の内容	根拠となる記録等	備　　考
2月9日 14：25頃		加圧器逃がし弁（PCV-455C、PCV-456）は開放不能と最終的に判断	当直課長引継簿	
14：26		長時間のミニマムフロー運転（最小流量による循環運転）を避けるため、A－余熱除去ポンプ停止	アラームタイプライタ記録	
14：27		長時間のミニマムフロー運転（最小流量による循環運転）を避けるため、B－余熱除去ポンプ停止	アラームタイプライタ記録	
14：29	A－SG主蒸気逃がし弁（PCV-482A）自動開閉		アラームタイプライタ記録	
14：31		長時間の無負荷運転を避けるため、A－非常用ディーゼル発電機停止	アラームタイプライタ記録	
14：33		長時間の無負荷運転を避けるため、B－非常用ディーゼル発電機停止	アラームタイプライタ記録	
14：34		1次冷却系を減圧するため、加圧器補助スプレ弁（V-202）開放	アラームタイプライタ記録	14：28頃、当直課長は運転員に対し加圧器補助スプレによる1次冷却系の減圧操作を指示（時刻は運転員の記憶）

日 時	事象又は機器動作	操作、離認等の内容	根拠となる記録等	備　　考
2月9日 14：36	「加圧器圧力低及び加圧器水位低の一致」によるS1信号リセット		(1) シーケンスオブイベント記録 (2) アラームタイプライタ記録	
14：37		A、B－高圧注入ポンプ停止	アラームタイプライタ記録	
14：39	A－SG主蒸気逃がし弁（PCV-482A）自動開閉		アラームタイプライタ記録	
14：42		1次冷却材の温度を制御するため、B－SG主蒸気逃がし弁（PCV-482B）調統開	アラームタイプライタ記録	
14：44	「加圧器水位低ヒータ自動切及び抽出水隔離弁（LCV-465）自動閉」警報リセット		アラームタイプライタ記録	
14：48	プラント計算機による加圧器水位低低注意信号リセット （印字値：44.6%） プラント計算機による加圧器水位低注意信号リセット （印字値：45.6%） 1次冷却系の圧力とA－SG2次側の圧力がほぼ一致 （1次冷却系の圧力：63.8kg/cm²） （A－SG2次側の圧力：64.0kg/cm²）	加圧器補助スプレ弁（V-202）閉止 抽出水隔離弁（LCV-465）開放	アラームタイプライタ記録 アラームタイプライタ記録 PAMトレンド記録 アラームタイプライタ記録 アラームタイプライタ記録	
14：49		再生クーラ抽出水オリフィスしゃ断弁（V-200A）開放	アラームタイプライタ記録	
14：55		主蒸気逃がし弁を用いた1次冷却系の冷却からタービンバイパス弁を用いた1次冷却系の冷却に切り替えるため、A－補機水ポンプ再起動	アラームタイプライタ記録	
14：57		1次冷却系を冷却するため、B－1次冷却材ポンプ再起動	(1) シーケンスオブイベント記録 (2) アラームタイプライタ記録	

日 時	事象又は機器動作	操作、確認等の内容	根拠となる記録等	備　　考
2月9日 14：58		主蒸気逃がし弁を用いた1次冷却系の冷却からタービンバイパス弁を用いた1次冷却系の冷却に切り替えるため、B－補機冷却水ポンプ再起動	アラームタイプライタ記録	
14：59		1次冷却系の圧力を制御するため、加圧器スプレ弁(PCV-455B)調整開	アラームタイプライタ記録	
15：04 ～ 15：05		充てんポンプへの水の供給を燃料取替用水タンク側から体積制御タンク側へ切り替え	アラームタイプライタ記録	
15：13		タービンバイパス弁（PCV-482C、PCV-482G）調整開	アラームタイプライタ記録	
15：14		B－SG主蒸気逃がし弁（PCV-482B）閉止	アラームタイプライタ記録	
15：45頃		B－復水器空気抽出ポンプ再起動	当直課長引継簿	
15：55		冷態停止状態に移行するのに備え、1次冷却材のほう素濃縮開始	アラームタイプライタ記録	冷態停止に必要なほう素濃度：1,283ppm 以上 （冷態停止状態とは1次冷却材の温度が93℃以下の状態をいう。）
16：18		1次冷却材のほう素濃縮完了	(1) アラームタイプライタ記録 (2) 当直課長引継簿	（16:00頃に採取した1次冷却材のほう素濃度分析結果は1,344ppmであった）
16：23		制御棒を引き抜くため、原子炉トリップ遮断器投入	(1) シーケンスオブイベント記録 (2) アラームタイプライタ記録	
16：24		制御棒の引抜き開始	(1) アラームタイプライタ記録 (2) 当直課長引継簿	

日 時	事象又は機器動作	操作、確認等の内容	根拠となる記録等	備　　考
2月9日 16：26		蓄圧タンク隔離のため、蓄圧タンク出口弁（V-1856A、V-1856B）閉止	アラームタイプライタ記録	
16：32		制御棒の引抜き完了	(1) アラームタイプライタ記録 (2) 当直課長引継簿	（停止用制御棒全引抜き（0→228ステップ） 制御用制御棒引抜き（0→5ステップ））
16：40頃		冷態停止状態へ向けて1次冷却系の冷却強化	当直課長引継簿	
17：24 ～ 19：37		1次冷却系の減圧に伴う損傷側蒸気発生器2次側器内水の1次冷却系への流入による1次冷却材のほう素濃度の低下を補償し原子炉停止余裕をさらに確保するため、1次冷却材のほう素濃縮操作を再度実施	(1) アラームタイプライタ記録 (2) 当直課長引継簿	（23:00頃に採取した1次冷却材のほう素濃度分析結果は1,638ppmであった）
20：11	「A－SG水位異常低」による原子炉トリップ信号発信		(1) シーケンスオブイベント記録 (2) アラームタイプライタ記録	「SG水位異常低」原子炉トリップ設定値：10%
20：25頃 ～ 20：55頃		体積制御タンクを使用して1次冷却材に含まれる放射性希ガス等を除去（1回目）	当直課長引継簿	
22：01		A－余熱除去ポンプ再起動	アラームタイプライタ記録	
22：10頃		余熱除去系統による1次冷却系の冷却開始	当直課長引継簿	
22：18		タービンバイパス弁（PCV-482C、PCV-482G）閉止	アラームタイプライタ記録	
23：00頃 ～ 23：30頃		体積制御タンクを使用して1次冷却材に含まれる放射性希ガス等を除去（2回目）	当直課長引継簿	
23：17		B－余熱除去ポンプ再起動	アラームタイプライタ記録	

日 時	事象又は機器動作	操作、確認等の内容	根拠となる記録等	備　　考
2月9日 23：23頃		復水器真空破壊弁（BS-504）開放	アラームタイプライタ記録	弁の操作時刻は、プラント計算機による復水器真空度低注意信号発信時刻から推定
23：28頃		R－15「計数率高」警報解除	当直課長引継簿	
平成3年 2月10日 01：30頃	加圧器気相部消滅		当直課長引継簿	
02：00頃 ～ 02：55頃		体積制御タンクを使用して1次冷却材に含まれる放射性希ガス等を除去（3回目）	当直課長引継簿	
02：37	1次冷却系は冷態停止状態に到達 （Aループ高温側冷却材の温度：約92.8℃） （Bループ高温側冷却材の温度：約91.8℃）		PAMトレンド記録	
03：36		B－1次冷却材ポンプ停止	(1) シーケンスオブイベント記録 (2) アラームタイプライタ記録	
04：05頃		加圧器を冷却するため、加圧器補助スプレ弁（V-202）開放	当直課長引継簿	
05：00頃 ～ 05：50頃		体積制御タンクを使用して1次冷却材に含まれる放射性希ガス等を除去（4回目）	当直課長引継簿	
06：00			PAMトレンド記録	Aループ高温側冷却材の温度：約42.2℃ Bループ高温側冷却材の温度：約42.4℃ 1次冷却系の圧力：約17.1kg/cm²

表－2．1．2 蒸気発生器2次側器内水の放射能濃度分析結果

(単位：Bq/cm³)

サンプル採取時刻	A－蒸気発生器	B－蒸気発生器
平成3年2月7日 9時0分頃	ND (2.50×10^{-3})	ND (2.50×10^{-3})
平成3年2月9日 13時0分頃	6.00×10^{-3} (2.42×10^{-3})	ND (2.42×10^{-3})
平成3年2月9日 13時45分頃	8.80×10^{-1} (2.42×10^{-3})	1.97×10^{-2} (2.42×10^{-3})

（注）　数値は全ガンマ値

ND：検出限界値以下

（ ）内は検出限界値

測定器：NaIシンチレーション計数装置

表－３．１．１ ＭＡＲＶＥＬコードに対する主な変更点

項　　目	変　更　内　容		変 更 理 由	変更に伴う影響
	安全評価のための解析	今回の事象の再現解析		
１．破断流モデル	・伝熱管破断時の破断流の初期値は、単相臨界流の実験式であるZaloudekの式で算出した値に余裕をみた流量を使用している。 ・その後の破断流量は１次冷却系と２次冷却系の差圧と破断時のそれとの比の平方根に比例するものとしている。	・臨界流としては修正Zaloudekの式を使用して算出した値に流出係数を考慮した。 ・圧損流としてはオリフィスの式を使用した。 ・解析では臨界流と圧損流を計算し小さい方の値を用いた。	・１次冷却系及び２次冷却系の圧力挙動をより現実的に模擬するため。	・破断流量が小さくなっている。
２．原子炉容器頂部モデル	・原子炉容器頂部へのスプレノズルからの１次冷却材の流入流量は１次冷却材の流量に比例するものとしている。 ・気液熱平衡の１ノードで模擬している。	・原子炉容器頂部へのスプレノズルからの流入流量は、原子炉容器出入口の圧力差に、ダウンカマ部と原子炉容器頂部の１次冷却材の密度差を考慮して計算した。 ・ボイドの消滅過程では、気液境界面での熱伝達を考慮した気液熱非平衡の１ノードで模擬した。	・原子炉容器頂部のボイドの挙動の模擬を通じ、加圧器水位の挙動をより現実的に模擬するため。	・原子炉容器頂部の温度が高めに推移するため、原子炉容器頂部にボイドが発生しやすくなる。 ・原子炉容器頂部のボイドが消滅しにくくなる。
３．損傷側蒸気発生器２次側モデル	・１ノードで模擬している。	・内側と外側の２ノードで模擬した。	・主蒸気隔離弁閉止後の損傷側蒸気発生器２次側の圧力挙動をより現実的に模擬するため。	・損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量が小さくなっている。

表－３．１．２　今回の事象の再現解析の解析条件　（１／３）

項　　目	解 析 条 件	解 析 条 件 設 定 の 根 拠
１．解析期間		
解析開始	１３：４０	
解析完了	１次冷却系と損傷側蒸気発生器２次側の圧力が一致した時点	
２．伝熱管の破断発生時刻等		
破断発生時刻	１３：４５	
破断形態	周方向破断	
破断面積	約３．１cm^2×２	
初期流出量	約８０t/h	修正Zaloudekの式を用いて求めた値
破断位置	低温側第６管支持板上端部	
３．初期条件		
原子炉出力	９７．９％	美浜２号機に関する平成３年２月９日１３時０分の計測値で評価
１次冷却材の平均温度	３００．９℃	
加圧器圧力	１５７．１kg/cm^2	
蒸気発生器水位	５２％	
加圧器水位	５３．９％	
４．１次冷却材の体積	１６５m^3	実際のプラントデータを使用

項　　目	解 析 条 件	解 析 条 件 設 定 の 根 拠
5．核パラメータ		
遅発中性子割合	0．5 7 %	美浜２号機第１４運転期間の炉心、燃焼度5,424MWd/t時点（事象発生時の炉心平均燃焼度）での解析値
減速材温度係数	－４０pcm/℃	
ドップラ効果による反応度添加量	９１０pcm（100%→0%）	
トリップ時の制御棒の添加反応度価値	7．0%Δk/k	
崩壊熱	新ANS(注)×０．９５	（注）ANSI／ANS－5．1－１９７９に基づいて三菱原子力工業（株）が作成した崩壊熱曲線
6．安全保護系の信号設定値		
「加圧器圧力低」トリップ	１３４．３kg/cm²	実際の設定値を使用
「加圧器圧力低及び加圧器水位低の一致」安全注入	１２８．３kg/cm² 5．5%	
7．ポンプ関連データ		
高圧注入ポンプによる注入特性	実際に設置されている高圧注入ポンプの注入特性（２台）	使用前検査に基づいた特性［図－３．１．３］に燃料取替用水タンクまでの水頭差を考慮 [資料-3.1.4]
充てんポンプ	３台	今回の作動を考慮
補助給水ポンプ	電動補助給水ポンプ２台 タービン動補助給水ポンプ１台	
１次冷却材ポンプ慣性	3．４６０kg·m²	実際のプラントデータを使用

項　　目	解 析 条 件	解 析 条 件 設 定 の 根 拠
8．運転操作		
損傷側蒸気発生器の隔離	２分前にタービン動補助給水ポンプ駆動用蒸気隔離 ２分後に補助給水隔離 ５分後に主蒸気隔離弁閉止操作 １２分後に主蒸気隔離弁閉止完了	今回の事象の推移に沿っている。
主蒸気逃がし弁による１次冷却系の冷却開始	１２分後に健全側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁開放	
１次冷却系の減圧開始	４４分後に加圧器補助スプレ弁開放	
１次冷却系の減圧終了	１次冷却系と損傷側蒸気発生器２次側の圧力が一致した時点で加圧器補助スプレ弁閉止	
高圧注入ポンプの停止	４７分後に停止	
9．その他の入力条件		
外部電源	外部電源有り （タービントリップの３０秒後に常用母線への給電停止）	今回の事象の推移に沿っている。
原子炉出力の降下	２分前に手動で発電機出力の降下を開始（５%／分）	目標降下率

（注）　経過時間は原則として原子炉トリップを基準としている。

表－３．２．１　炉心の健全性評価に関する解析条件

項　　目	解　析　条　件	解　析　条　件　設　定　の　根　拠
１．ＴＨＩＮＣ－Ⅲコード（ＭＩＲＣ－１相関式）		
・１次冷却材の温度 ・１次冷却系の圧力 ・１次冷却材の流量 ・熱流束	ＭＡＲＶＥＬコードによる今回の事象の再現解析結果 ＦＡＣＴＲＡＮコードによる解析結果	ＭＡＲＶＥＬコードの解析条件は、表－３．１．２に示す。 ＦＡＣＴＲＡＮコードの解析条件は、「３．ＦＡＣＴＲＡＮコード」の欄を参照
・核的エンタルピ上昇熱水路係数（$F^{N}_{\Delta H}$）	１．３８	美浜２号機に関する平成３年１月２１日の中性子束分布測定結果に基づく値
・最大出力の燃料集合体の相対出力	１．１７	
・ＤＮＢＲ乗数	０．７５	不確かさを考慮
２．ＭＡＣＢＥＴＨ相関式		
・１次冷却材の温度 ・１次冷却系の圧力 ・１次冷却材の流量 ・熱流束	ＭＡＲＶＥＬコードによる今回の事象の再現解析結果 ＦＡＣＴＲＡＮコードによる解析結果	ＭＡＲＶＥＬコードの解析条件は、表－３．１．２に示す。 ＦＡＣＴＲＡＮコードの解析条件は、「３．ＦＡＣＴＲＡＮコード」の欄を参照
・熱流束熱水路係数（F_Q）	１．６２	美浜２号機に関する平成３年１月２１日の中性子束分布測定結果に基づく値（軸方向に一様な値とした。）
３．ＦＡＣＴＲＡＮコード		
・原子炉出力 ・１次冷却材の温度 ・１次冷却系の圧力 ・１次冷却材の流量	ＭＡＲＶＥＬコードによる今回の事象の再現解析結果に定常誤差を考慮	ＭＡＲＶＥＬコードの解析条件は、表３．１．２に示す。
・熱流束熱水路係数（F_Q）	１．６２	美浜２号機に関する平成３年１月２１日の中性子束分布測定結果に基づく値

表－３．３．１　大気又は海への放射性物質の放出量の算出に用いた放射性物質の測定値

１．大気へ放出された放射性希ガス

１次冷却材の放射性希ガスの濃度（平成３年２月５日）

核種	濃　度（Bq/cm³）[10:55]
Ａｒ-４１	１．３３×１０³
Ｋｒ-８５ｍ	１．４０×１０¹
Ｋｒ-８７	２．２５×１０¹
Ｋｒ-８８	２．３６×１０¹
Ｘｅ-１３３	１．０４×１０²
Ｘｅ-１３５	１．１０×１０²

測定器：ゲルマニウム半導体波高分析装置

蒸気発生器２次側器内水の放射性希ガスの濃度（平成３年２月９日）

核種	濃　度（Bq/cm³）	
	損傷側蒸気発生器[14:00]	健全側蒸気発生器[14:05]
Ａｒ-４１	ＮＤ	ＮＤ
Ｋｒ-８５ｍ	ＮＤ	ＮＤ
Ｋｒ-８７	ＮＤ	ＮＤ
Ｋｒ-８８	ＮＤ	ＮＤ
Ｘｅ-１３３	ＮＤ	ＮＤ
Ｘｅ-１３５	６．１４	ＮＤ

測定器：ゲルマニウム半導体波高分析装置

２．大気へ放出された放射性よう素

蒸気発生器２次側器内水の放射性よう素の濃度（平成３年２月９日）

核種	濃　度（Bq/cm³）			
	損傷側蒸気発生器[14:00]	損傷側蒸気発生器[15:30]	健全側蒸気発生器[14:05]	健全側蒸気発生器[15:30]
Ｉ-１３１	１．１０	１．７８	ＮＤ	ＮＤ
Ｉ-１３２	２．３２×１０¹	２．７２×１０¹	ＮＤ	ＮＤ
Ｉ-１３３	１．２０×１０¹	１．９３×１０¹	ＮＤ	ＮＤ
Ｉ-１３５	２．４８×１０¹	３．２７×１０¹	ＮＤ	ＮＤ

測定器：ゲルマニウム半導体波高分析装置

１号機補助建屋排気筒の放射性よう素の濃度（平成３年２月１３日）

核種	濃　度（Bq/cm³）[2/7 09:25～2/13 09:30]
Ｉ-１３１	ＮＤ
Ｉ-１３２	ＮＤ
Ｉ-１３３	ＮＤ
Ｉ-１３５	ＮＤ

測定器：ゲルマニウム半導体波高分析装置

３．海へ放出された放射性物質

蒸気発生器２次側器内水の全ガンマ放射能の濃度（平成３年２月９日）

（単位：Bq/cm³）

損傷側蒸気発生器[13:00]	損傷側蒸気発生器[13:45]	健全側蒸気発生器[13:00]	健全側蒸気発生器[13:45]
６．００×１０⁻³	８．８０×１０⁻¹	ＮＤ	１．９７×１０⁻²

測定器：ＮａＩシンチレーション計数装置

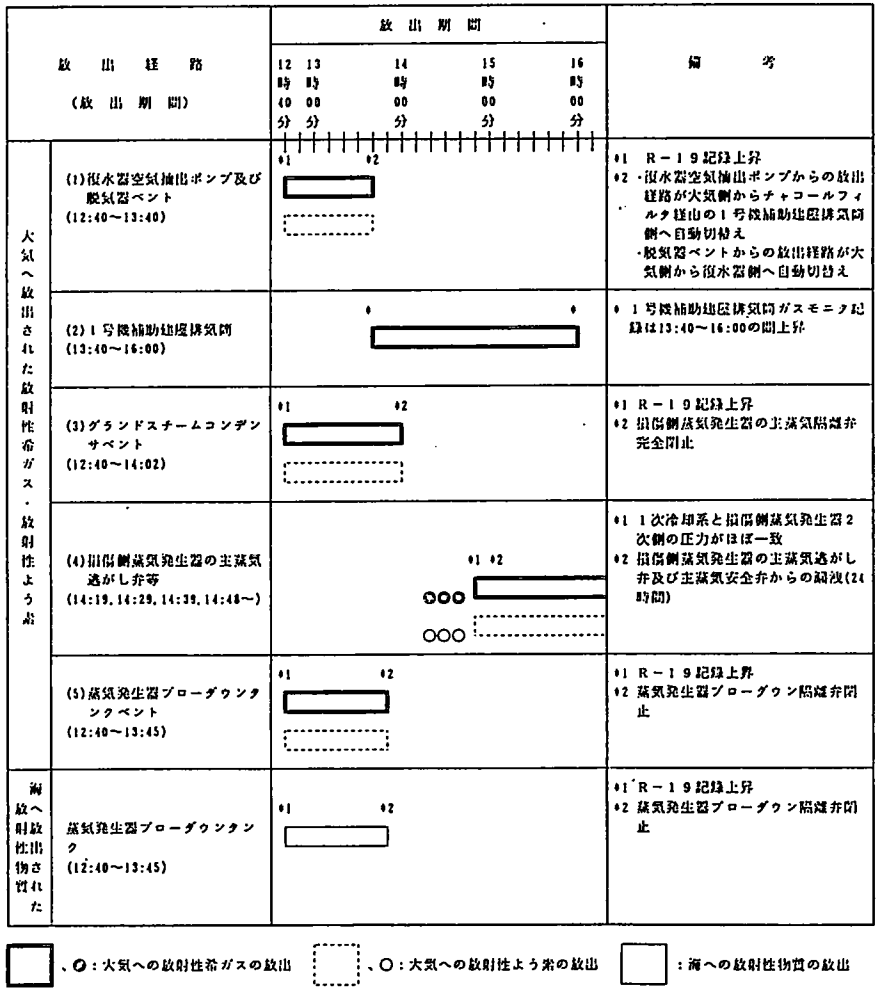
（注）（　）内は測定年月日、［　］内は試料採取時刻
ＮＤ：検出限界値以下
１号機補助建屋排気筒の放射性よう素の濃度は、平成３年２月７日９時２５分から平成３年２月１３日９時３０分までの間に採取した試料の放射性物質の総量から算出した平均濃度である。

表－３．３．２　１次冷却材の放射性物質の測定値

	核　種	濃　度 (Bq/cm^3)
放射性希ガス（平成３年２月５日）［10時55分］	Ａｒ－４１	１．３３×１０^3
	Ｋｒ－８５ｍ	１．４０×１０^1
	Ｋｒ－８７	２．２５×１０^1
	Ｋｒ－８８	２．３６×１０^1
	Ｘｅ－１３３	１．０４×１０^2
	Ｘｅ－１３５	１．１０×１０^2
放射性よう素（平成３年２月８日）［10時10分］	Ｉ－１３１	３．８８
	Ｉ－１３２	９．１４×１０^1
	Ｉ－１３３	４．４０×１０^1
	Ｉ－１３５	９．９１×１０^1

（注）　測定値が検出限界値以下の核種については記載していない。
（　）内は測定年月日、［　］内は試料採取時刻

表－３．３．３　放射性物質の放出経路及び放出期間



表－３．３．４ 放射性希ガス及び放射性よう素の大気への放出量の算出結果

放出経路	放射性希ガスの放出量	放射性よう素の放出量
復水器空気抽出ポンプ及び脱気器ベント	約１．１×１０^{7} Bq (約３．０×１０$^{-4}$ Ci)	約２．７×１０^{8} Bq (約７．３×１０$^{-3}$ Ci)
１号機補助建屋排気筒	約４．９×１０^{9} Bq (約１．３×１０$^{-1}$ Ci)	――――
グランドスチームコンデンサベント	約２．０×１０^{9} Bq (約５．４×１０$^{-2}$ Ci)	約２．５×１０^{6} Bq (約６．８×１０$^{-5}$ Ci)
損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁等	約１．６×１０^{10} Bq (約４．３×１０$^{-1}$ Ci)	約１．１×１０^{6} Bq (約３．０×１０$^{-5}$ Ci)
蒸気発生器ブローダウンタンクベント	約１．３×１０^{8} Bq (約３．５×１０$^{-3}$ Ci)	約６．６×１０^{7} Bq (約１．８×１０$^{-3}$ Ci)
合計	約２．３×１０^{10} Bq (約０．６ Ci)	約３．４×１０^{8} Bq (約０．０１ Ci)

表－３．３．５ 大気へ放出された放射性希ガス及び放射性よう素により周辺公衆が受けると考えられる実効線量当量の算出結果

項目	放出量	換算値	実効線量当量算出結果	備考
放射性希ガス	約２．３×１０^{10}Bq (約０．６Ci)	約５．１×１０^{10}Bq (約１．４ Ci) [ガンマ線エネルギー０．５MeV換算]	約６×１０$^{-6}$mSv [約６×１０$^{-4}$mrem]	安全評価審査指針における事故時の実効線量当量の判断基準：５mSv
放射性よう素	約３．４×１０^{8} Bq (約０．０１Ci)	約２．３×１０^{7} Bq (約６×１０$^{-4}$Ci) [よう素131等価換算]	約９×１０$^{-7}$mSv [約９×１０$^{-5}$mrem]	
合計			約１×１０$^{-5}$mSv [約１×１０$^{-3}$mrem]	

表－３．４．１ 安全解析と今回の事象の比較とその評価 (1／4)

項　　目	安 全 解 析	今 回 の 事 象	考　　察
1．解析期間			
解析開始	破断発生時点	１３：４０	今回の事象の再現解析については破断発生時刻の５分前から解析を開始
解析完了	加圧器逃がし弁閉確認後、１次冷却系と損傷側蒸気発生器２次側の圧力が一致した時点	１次冷却系と損傷側蒸気発生器２次側の圧力が一致した時点	
2．伝熱管の破断発生時刻等			
破断発生時刻	――――	１３：４５	
破断形態	周方向破断	周方向破断	
破断面積	約3．1cm²×２	約3．1cm²×２	
初期流出量	約１３０t/h	約８０t/h	安全解析では１次冷却材の初期流出量がより大きく、これは損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の増加に寄与している。なお、ＤＮＢＲ評価結果にはほとんど影響を及ぼさない。
破断位置	低温側管板近上	低温側第６管支持板上端部（低温側管板上約８ｍ）	安全解析では破断管の圧力損失がより小さく、これは損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の増加に寄与している。なお、ＤＮＢＲ評価結果にはほとんど影響を及ぼさない。
3．初期条件			
原子炉出力	１０２％（１００％）	９７．９％	安全解析では原子炉出力がより高く、これは最小ＤＮＢＲの低下に寄与している。なお、損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の評価結果にはほとんど影響を及ぼさない。
１次冷却材の平均温度	３０６．５℃（３０４．３℃）	３００．９℃	損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の評価結果及びＤＮＢＲ評価結果にはほとんど影響を及ぼさない。
１次冷却系の圧力	１５９．３kg/cm²（１５７．２kg/cm²）	１５７．１kg/cm²	
蒸気発生器水位	５２％	５２％	
加圧器水位	６０％	５３．９％	
4．１次冷却材の体積	１６０m³	１６５m³	

(注)　ＤＮＢＲの解析条件が損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の解析条件と異なるものについてのみ（ ）内に記載している。

(2／4)

項　　目	安 全 解 析	今 回 の 事 象	考　　察
5．安全保護系の信号設定値			
「加圧器圧力低」トリップ	１３２．３kg/cm²	１３４．３kg/cm²	損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の評価結果及びＤＮＢＲ評価結果にはほとんど影響を及ぼさない。
「加圧器圧力低及び加圧器水位低の一致」安全注入	１２６．２kg/cm²　０％	１２８．３kg/cm²　５．５％	
6．核パラメータ			
遅発中性子割合	０．７５％	０．５７％	
減速材温度係数	０pcm/℃	－４０pcm/℃	
ドップラ効果による反応度添加量	１４００pcm（１００％→０％）	９１０pcm（１００％→０％）	
トリップ時の制御棒の添加反応度価値	４．０％Δk/k	７．０％Δk/k	
崩壊熱	新ＡＮＳ＋２σ	新ＡＮＳ×０．９５	
核的エンタルピ上昇熱水路係数（Ｆ　）	１．７０	１．３８	安全解析では核的エンタルピ上昇熱水路係数がより大きく、これは最小ＤＮＢＲの低下に寄与している。なお、損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の評価結果にはほとんど影響を及ぼさない。
7．ポンプ関連データ			
高圧注入ポンプによる注入特性	実際に設置されている高圧注入ポンプより大きい注入特性(2台)	実際に設置されている高圧注入ポンプの注入特性(2台)	安全解析では高圧注入ポンプからの注入量がより多く、これは損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の増加に寄与している。なお、ＤＮＢＲ評価結果にはほとんど影響を及ぼさない。
充てんポンプ	――――	３台	損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の評価結果及びＤＮＢＲ評価結果にはほとんど影響を及ぼさない。
補助給水ポンプ	電動補助給水ポンプ２台	電動補助給水ポンプ２台 タービン動補助給水ポンプ１台	安全解析では１次冷却系の冷却効果がより小さく、これは損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の増加に寄与している。なお、ＤＮＢＲ評価結果にはほとんど影響を及ぼさない。
１次冷却材ポンプ慣性	３．１１０kg·m²	３．４６０kg·m²	安全解析では発電機トリップ後の１次冷却材の流量がより低下し、これは最小ＤＮＢＲの低下に寄与している。なお、損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の評価結果にはほとんど影響を及ぼさない。

項　　目	安全解析	今回の事象	考　　察
8．その他の入力条件			
外部電源	原子炉トリップと同時に外部電源喪失	外部電源有り（タービントリップの３０秒後に常用母線への給電停止）	安全解析ではタービンバイパスが使用できず損傷側蒸気発生器からの蒸気が復水器に回収されない。また、１次冷却材ポンプがトリップし同ポンプによる１次冷却系の冷却が行われない。これらは、大気への蒸気放出量及び損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の増加に寄与している。また、１次冷却材ポンプのトリップによる効果は最小ＤＮＢＲの低下に寄与している。
原子炉出力の降下	――――	約３分前に手動で発電機出力の降下を開始	安全解析では原子炉出力がより高く、これは最小ＤＮＢＲの低下に寄与している。なお、損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の評価結果にはほとんど影響を及ぼさない。
よう素１３１濃度(注１)	6.60×10^{4}Bq/g（燃料被覆管欠陥率１％を想定）	約4 Bq/cm^3（注２）（平成３年２月８日の測定値）	安全解析では燃料被覆管欠陥率１％を想定しており、これは損傷側蒸気発生器２次側への放射性物質の流出量及び大気への放射性物質の放出量の増加に寄与している。 （注１）　評価核種のうちよう素１３１についてのみ記入 （注２）　今回の事象における実効線量当量評価では、損傷側蒸気発生器２次側器内水の放射性よう素濃度の測定値を使用している。
9．運転操作			
損傷側蒸気発生器の隔離	１０分後にタービン動補助給水ポンプ駆動用蒸気隔離	約２分前にタービン動補助給水ポンプ駆動用蒸気隔離	安全解析ではタービン動補助給水ポンプ駆動用蒸気の隔離完了まで１０分間の余裕を見込んでおり、これは大気への蒸気放出量の増加に寄与している。なお、損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の評価結果及びＤＮＢＲ評価結果にはほとんど影響を及ぼさない。
	１０分後に補助給水隔離	約２分後に補助給水隔離	安全解析では補助給水の隔離完了まで１０分間の余裕を見込んでいることから、損傷側蒸気発生器２次側への補助給水量が多くなり損傷側蒸気発生器２次側器内水が冷却されるためその圧力がより低下する。これは損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の増加に寄与している。なお、ＤＮＢＲ評価結果にはほとんど影響を及ぼさない。
	１０分後に主蒸気隔離弁閉止	約５分後に主蒸気隔離弁閉止操作	安全解析では主蒸気隔離弁の閉止完了まで１０分間の余裕を見込んでいるが、今回の事象では損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁の閉止完了は約１２分後である。
	――――	約１２分後に主蒸気隔離弁閉止完了	
主蒸気逃がし弁による１次冷却系の冷却開始	２０分後に健全側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁開放	約１２分後に健全側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁開放	安全解析では健全側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁の開放までに２０分間の余裕を見込んでいることから、加圧器逃がし弁開放による減圧開始が遅くなっている。これは損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の増加に寄与している。なお、ＤＮＢＲ評価にはほとんど影響を及ぼさない。
１次冷却系の減圧開始	約２５分後に加圧器逃がし弁開放	約４４分後に加圧器補助スプレ弁開放	今回の事象では加圧器逃がし弁が使用できなかったこと等により、１次冷却系と損傷側蒸気発生器２次側の圧力が一致するまでの時間が、安全解析における加圧器逃がし弁開確認後の１次冷却系と損傷側蒸気発生器２次側の圧力が一致するまでの時間を上回っている。
１次冷却系の減圧終了	約２６分後に加圧器逃がし弁閉止	約５８分後に加圧器補助スプレ弁閉止	
高圧注入ポンプの停止	約２８分後に停止	約４７分後に停止	

（注）　経過時間は原則として原子炉トリップを基準としている。

項　　目	安全解析	今回の事象	考　　察
10．解析結果及び評価結果			
損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量	約３９トン（実効線量当量評価用 ４５トン）	約５５トン	今回の事象では損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量が安全解析の結果を上回っている。これは加圧器逃がし弁が使用できなかったこと等により、１次冷却系と損傷側蒸気発生器２次側の圧力が一致するまでの時間が、安全解析における加圧器逃がし弁開確認後の１次冷却系と損傷側蒸気発生器２次側の圧力が一致するまでの時間を上回っていたことによる。 なお、安全解析では解析結果に余裕をみた値を実効線量当量評価に用いている。
損傷側蒸気発生器から大気への蒸気放出量	約１２トン（実効線量当量評価用 ２０トン）	約2.２トン	約2.２トンの内訳は損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁からの約１.３トン及びグランドスチームコンデンサベントからの約0.９トンである。 今回の事象では損傷側蒸気発生器から大気への蒸気放出量が安全解析の結果を下回っている。これは以下の要因によるものである。 ①原子炉トリップ後最大３０秒間はタービンバイパスを用いて損傷側蒸気発生器からの蒸気が復水器へ回収された。 ②損傷側蒸気発生器２次側からのタービン動補助給水ポンプ駆動用蒸気は原子炉トリップの約２分前に隔離された。 なお、安全解析では解析結果に余裕をみた値を実効線量当量評価に用いている。
最小ＤＮＢＲ	約1.３９	約2.７６	今回の事象では最小ＤＮＢＲは安全解析の結果を上回っている。これは以下の要因によるものである。 ①後的エンタルピ上昇熱水路係数が安全解析の値を下回っていた。 ②外部電源があったため、１次冷却材ポンプによる１次冷却系の冷却が行われた。 ③原子炉トリップ時の原子炉出力が安全解析の値を下回っていた。
大気への放射性物質の放出量			
放射性希ガス	約2.0×10^{14}Bq（ガンマ線エネルギー０.５MeV換算）	約5.1×10^{10}Bq（ガンマ線エネルギー０.５MeV換算）	今回の事象では損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量が安全解析の結果を上回っているものの、大気への放射性物質の放出量は安全解析の結果を下回っている。これは以下の要因によるものである。 ①放射性希ガスについては１次冷却材の放射能濃度が安全解析の値を大きく下回っていた。 ②放射性よう素については１次冷却材の放射能濃度が安全解析の値を大きく下回っており、また損傷側蒸気発生器から大気への蒸気放出量が安全解析の結果を下回っていた。
放射性よう素	約3.4×10^{10}Bq（よう素１３１等価換算）	約2.3×10^{7}Bq（よう素１３１等価換算）	
実効線量当量	約0.３９mSv	約1×10^{-5}mSv	今回の事象では実効線量当量は安全解析の評価を下回っている。これは大気への放射性物質の放出量が安全解析の結果を下回っていたことによる。

表－３．５．２．１ 評価対象部位別応力解析方法

評価対象部位	圧力による応力	熱応力	外荷重
１次冷却系低温側配管の安全注入管台	圧力による応力及び熱応力は軸対称モデルに置換して２次元有限要素法により算出することとし、管台部周辺の圧力による応力状態が円筒胴のそれと等価になるように、円筒半径の１．５倍を平均半径とする２次元軸対称球殻モデルとした。 また、円筒胴（容器又は配管）に接続する管台部については胴の管台との接続部が非軸対称となるため、２次元軸対称モデルで３次元構造体の応力を厳しく求めるよう次のように考慮した。 ① 圧力による応力は、告示５０１号により算出した。 ② 熱応力については、拘束条件が最も厳しくなる軸方向断面を模擬した２次元軸対称平板モデルと周方向を模擬した２次元軸対称球殻モデルの両モデルに対し、今回の事象を包絡した過渡条件での熱応力を比較し、軸対称モデルで得られた応力の補正を行った。		（注１） 外荷重は非軸対称荷重であるので、管台と容器又は配管の接続部の断面については、バイラード法を、それ以外の断面については梁理論を用いて応力を算出した。
（注２） 原子炉容器の入口管台			
原子炉容器の安全注入管台			
１次冷却系低温側配管の充てん管台			
加圧器のスプレライン用管台	圧力による応力及び熱応力は、軸対称モデルに置換して、２次元有限要素法により算出した。		
（注２） １次冷却系低温側配管	告示５０１号により算出した。		

（注１） 「梁理論」とは、材料力学に基づき管台を容器又は配管に取り付けられる梁として取扱い、管台の応力を求める手法である。また、「バイラード法」とは米国コーネル大学のBijlaard教授が提案した理論をもとに実験による裏付けを踏まえて、K.R.Wichman らがＷＲＣ（Welding Research Council）ＢＵＬＬＥＴＩＮ １０７にまとめた、管台に外荷重が作用したときの容器又は配管側の管台接続部の応力を求める手法であり、国内外の産業界で広く用いられているものである。

（注２） 原子炉容器の入口管台及び１次冷却系低温側配管については、３次元有限要素法による構造解析を行い熱成層の影響も考慮した。

表－３．５．２．２ 疲れ累積係数

疲労評価部位	供用期間末期での疲れ累積係数（今回の事象による寄与）	告示 501号で定める許容値
１次冷却系低温側配管の安全注入管台	０．０５６ （０．００３）	１．０
１次冷却系低温側配管	０．０２８ （０．００６）	１．０
原子炉容器の入口管台	０．０９９ （０．００１）	１．０
原子炉容器の安全注入管台	０．１７７ （０．００８）	１．０
１次冷却系低温側配管の充てん管台	０．０１４ （０．００１）	１．０
加圧器のスプレライン用管台	０．２４５ （０．００１）	１．０

表－３．６．１１次冷却系への水の注入量及び
損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の推移

［単位：トン］

安全注入開始からの経過時間	安全注入量 a	充てんポンプからの注入量 充てん量 b	充てんポンプからの注入量 加圧器補助ｽﾌﾟﾚﾝ量 c	抽出量 d	注入量計 (A)= a+b+c-d	1次冷却材流出量 (B)	水収支 (A)-(B)
～０分(注1)	―	１．５	―	１．１	０．４	７．４	－７．０
０～５分	３．４	―	―	―	３．４	４．４	－１．０
５～10分	６．９	―	―	―	６．９	４．５	２．５
10～15分	６．８	―	―	―	６．８	４．７	２．１
15～20分	７．２	―	―	―	７．２	４．４	２．８
20～25分	６．８	０．６	―	―	７．４	４．３	３．１
25～30分	５．４	１．４	―	―	６．８	４．８	２．０
30～35分	３．８	１．６	―	―	５．４	４．８	０．６
35～40分	３．６	１．６	―	―	５．２	４．９	０．３
40～45分	４．１	１．５	０．１	―	５．７	４．８	０．９
45～50分	２．１	１．２	０．４	―	３．７	３．８	－０．１
50～55分	―	１．２	０．４	―	１．６	２．０	－０．４
55～57分	―	０．６	０．２	―	０．８	０．１	０．７
合　計	５０．１	１１．３	１．１	１．１	６１．４	５４．８	６．６

（注１）解析開始時点から安全注入開始時点までを示す。
（注２）四捨五入のため個々の数値の集計値と合計欄及び水収支の欄の合計数値は必ずしも一致しない。

表－４．１．１　破断管の材料性状

化学成分

（単位：%）

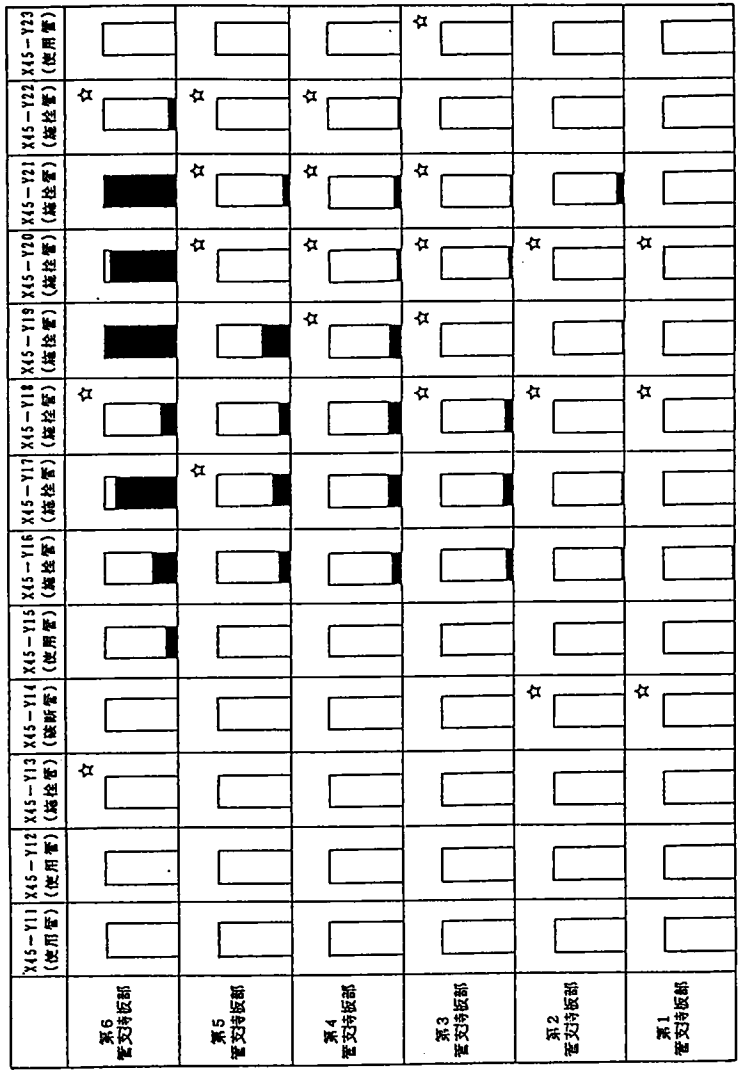
	C	Si	Mn	S	Ni	Cr	Fe	Cu
分析結果	0.017～0.018	0.30	0.24	＜0.005	74.9～75.2	14.9～15.0	7.83～8.07	0.18
規格値	≦0.15	≦0.5	≦1.0	≦0.015	≧72.0	14.0～17.0	6.0～10.0	≦0.5

機械的性質

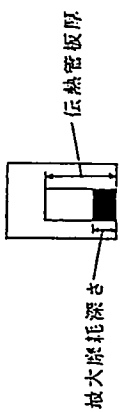
	引張特性			硬さ
	引張強さ (kg/㎟)	0.2%耐力 (kg/㎟)	伸び (%)	ロックウェル硬さ (HRB)
試験結果	68.4～69.7	30.2～32.1	43.0～43.8	81～85
規格値	≧56.2	≧24.6	≧30	≦92

（注）硬さについては、ビッカース硬さ（荷重０．５kg）の測定値（１５３～１６６）をロックウェル硬さに換算した。

表－４．１．２　管支持板部減肉状況（Ｘ４５列低温側）



☆は腐食減肉の認められたものを示し，その腐食深さは表示していない。



表－４．１．３　管支持板クレビス部の調査結果

位　置	調　査　結　果
Ｘ４５－Ｙ１２	管穴内表面はスケールの付着が多く、管支持板クレビス部は詰まっていた。また、管支持板に腐食が認められた。 スケールの平均厚さは約０．６㎜であった。
Ｘ４５－Ｙ１３	管穴内表面はスケールの付着は少なく、製造時の機械加工跡が認められた。また、管支持板に軽微な腐食が認められた。 伝熱管と管支持板との隙間は約０．５㎜、スケールの平均厚さは約０．０６㎜であった。
Ｘ４５－Ｙ１４	管穴内表面はスケールで覆れており、管支持板クレビス部は詰まっていた。また、管支持板に腐食が認められた。 スケールの平均厚さは約０．６㎜であった。
Ｘ４５－Ｙ１５	管穴内表面はスケールの付着は少なく、製造時の機械加工跡が認められた。また、管支持板に軽微な腐食が認められた。 伝熱管と管支持板との隙間は約０．５㎜、スケールの平均厚さは約０．０２㎜であった。
Ｘ４６－Ｙ１４	管穴内表面はスケールで覆れており、管支持板クレビス部は詰まっていた。また、管支持板に腐食が認められた。 スケールの平均厚さは約０．５㎜であった。
Ｘ４６－Ｙ２１	管穴内表面はスケールの付着は少なく、製造時の機械加工跡が認められた。また、管支持板に軽微な腐食が認められた。 伝熱管と管支持板との隙間は約０．５㎜、スケールの平均厚さは約０．０３㎜であった。

表－４．１．４　通常運転時の蒸気発生器の２次系水質

運転期間 / 項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ｐＨ	9.8	10.1	8.7	8.8	8.9	8.9	8.8	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.8	8.9
酸導電率* (μS/cm)	――	――	0.6	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Ｎａ (ppm)	16.7	16.9	0.02	4.1 (ppb)	5.8 (ppb)	1.6 (ppb)	1.9 (ppb)	1.9 (ppb)	0.8 (ppb)	0.8 (ppb)	0.8 (ppb)	0.6 (ppb)	0.4 (ppb)	0.3 (ppb)
Ｃｌ (ppm)	0.24	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	2.7 (ppb)	2.8 (ppb)	2.7 (ppb)	2.5 (ppb)	2.2 (ppb)

＊：　陽イオン交換樹脂により陽イオン（NH_3^+等）を除去した後の陰イオン（Cl^-、SO_4^{2-}等）による導電率であり、不純物濃度の指標となる。
なお、第２運転期間までりん酸塩処理のため酸導電率は測定していない。

（注）　りん酸塩処理では、りん酸ナトリウムを使用していたことから、ＡＶＴに比べ、ｐＨ及びＮａの濃度が高い。

表－４．２．１　流力弾性振動解析結果

振止め金具が実機の取付け状態の場合

位置 X	位置 Y	支持条件	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)	限界流速 (m/s)	有効流速 (m/s)	ピーキングファクタ	安定比の範囲	周辺に拘束のない場合の安定比の範囲
45	11	固定	49	1.33	8.1	3.0	1.45	0.23～0.83	0.23～0.83
45	12	固定	42	1.33	7.0	3.0	1.45	0.27～0.96	0.27～0.96
45	13	ピン	21	4.00	5.3	2.6	1.39	0.32～1.04	0.32～1.05
45	14	固定	32	1.33	5.3	2.9	1.40	0.34～1.20	0.34～1.20
45	15	ピン	16	4.00	4.5	2.7	1.50	0.43～1.41	0.43～1.41
45	16	ピン	16	4.00	4.1	2.8	1.54	0.48～1.58	0.49～1.60
45	17	ピン	15	4.00	3.7	2.7	1.54	0.53～1.74	0.53～1.74
45	18	ピン	14	4.00	3.5	2.8	1.54	0.57～1.87	0.58～1.89
45	19	ピン	13	4.00	3.2	2.7	1.54	0.61～2.00	0.63～2.05
45	20	ピン	12	4.00	2.9	2.7	1.51	0.65～2.12	0.66～2.16
45	21	ピン	11	4.00	2.7	2.7	1.32	0.61～2.01	0.62～2.03
45	22	ピン	10	4.00	2.5	2.7	0.78	0.39～1.28	0.39～1.28

振止め金具が設計どおりの取付け状態の場合

位置 X	位置 Y	支持条件	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)	限界流速 (m/s)	有効流速 (m/s)	ピーキングファクタ	安定比の範囲
45	11	固定	49	1.33	8.1	3.0	1.0	0.18～0.55
45	12	固定	119	1.33	19.8	3.2	1.0	0.08～0.24
45	13	ピン	174	4.00	44.0	2.9	1.0	0.03～0.10
45	14	固定	175	1.33	29.0	3.2	1.0	0.06～0.17
45	15	ピン	194	4.00	48.8	2.9	1.0	0.03～0.09
45	16	ピン	189	4.00	47.7	3.0	1.0	0.03～0.09
45	17	ピン	179	4.00	44.5	3.0	1.0	0.03～0.10
45	18	ピン	173	4.00	43.0	2.9	1.0	0.03～0.10
45	19	ピン	169	4.00	41.9	2.9	1.0	0.03～0.10
45	20	ピン	166	4.00	40.9	2.8	1.0	0.03～0.10
45	21	ピン	163	4.00	39.8	2.7	1.0	0.03～0.10
45	22	ピン	160	4.00	39.3	2.7	1.0	0.03～0.10

表－４．３．１ 破断管の安定比の最大値の変化

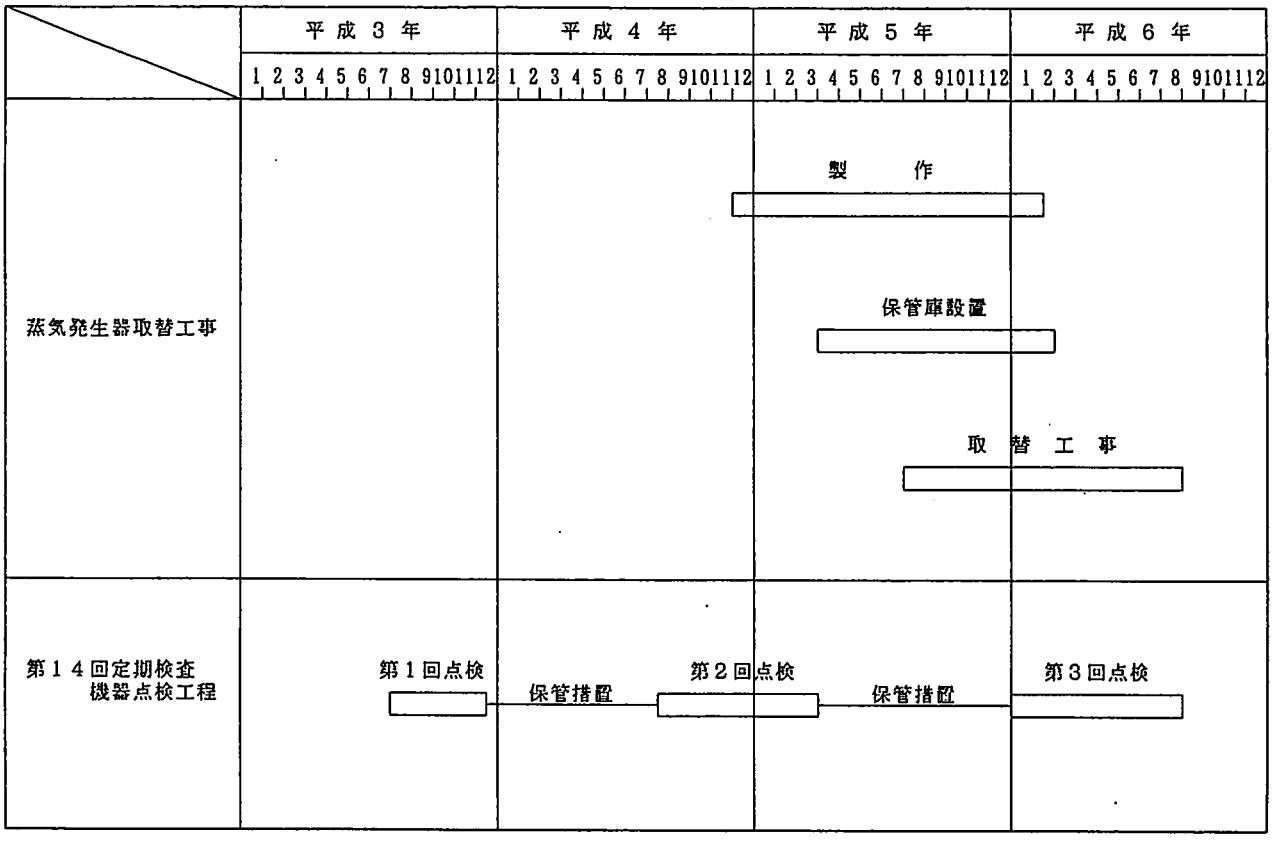
運転期間	安定比の最大値	
	ピン支持	固定支持
1	1.15	1.19
2	1.14	1.19
3	1.14	1.19
4	1.14	1.19
5	1.15	1.20
6	1.14	1.19
7	1.15	1.20
8	1.13	1.17
9	1.13	1.17
10	1.13	1.18
11	1.14	1.19
12	1.14	1.19
13	1.14	1.19
14	1.15	1.20

（注）間隙支持を解析上ピン支持として取り扱った。

表－４．３．２ Ｘ４５列伝熱管の損傷原因調査結果の概要

	X45-Y11	X45-Y12	X45-Y13	X45-Y14（破断管）	X45-Y15	X45-Y16	X45-Y17	X45-Y18	X45-Y19	X45-Y20	X45-Y21	X45-Y22
伝熱管の使用状態	使用管		施栓管	使用管		施栓管						
第６管支持板部での支持状態	固定支持		間隙支持	固定支持	間隙支持							
流力弾性振動解析による安定比の最大値	１未満			１以上								
金属調査結果 微小き裂の有無	無し			有り	無し							
金属調査結果 摩耗減肉の有無	無し				有り							
流力弾性振動発生に対する評価	発生せず		発生した可能性小	発生した								

表－6．1　美浜２号機　蒸気発生器復旧工程表

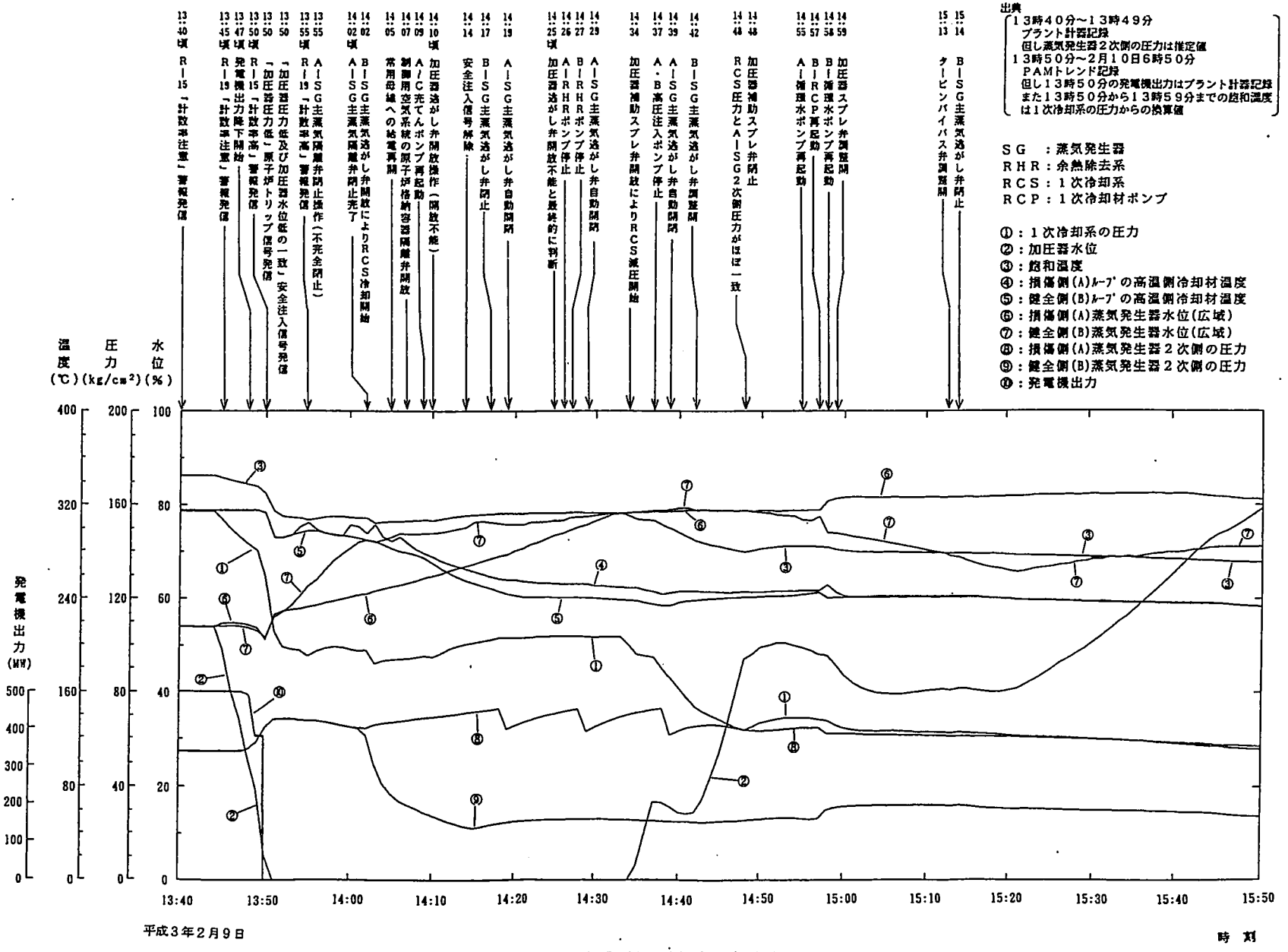


添付一図

図－目次

		ページ
図-2.1.1	運転記録の概要	1
図-2.1.2	第１４運転期間における主要な運転パラメータの推移	3
図-2.2.1	１次冷却系の主要機器の配置及び主要パラメータの測定位置の概要	5
図-2.4.1.1	主蒸気隔離弁構造の概要	6
図-2.4.1.2	主蒸気隔離弁作動原理	7
図-2.4.1.3	損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁弁棒グランドパッキン摺動部点検結果	8
図-2.4.1.4	主蒸気隔離弁閉弁力と閉弁抵抗の関係	9
図-2.4.2.1	加圧器逃がし弁構造の概要	10
図-2.4.2.2	加圧器逃がし弁作動用空気系統の概要	11
図-2.4.3.1	プラントデータ処理システムの構成の概要	12
図-2.4.3.2	プラント計算機の負荷の概要	13
図-3.1.1	事象の再現解析結果と計測値との比較(1)～(8)	14
図-3.1.2	安全注入流量の再現解析結果と計測値との比較(1),(2)	18
図-3.1.3	高圧注入ポンプの注入特性	19
図-3.2.1	炉外核計装記録の説明	20
図-3.2.2	最小ＤＮＢＲの解析結果	21
図-3.3.1	放射性物質の主な放出経路	22
図-3.4.1	安全解析の解析結果と今回の事象の再現解析の解析結果との比較	23
図-3.5.1.1	１次冷却系主要配置の概要	24
図-3.5.1.2	１次冷却材の流量の設定	25
図-3.5.1.3	混合挙動の把握試験結果（ループ流停止の場合）	26
図-3.5.1.4	１次冷却材の温度及び原子炉容器の温度の推移	27
図-3.5.1.5	破壊力学による評価結果	28
図-3.5.2.1	疲労評価対象部位	29
図-3.5.2.2	今回の事象における低温側冷却材の温度変化	30
図-3.5.2.3	注入経路の概要	31
図-3.6.1	燃料中心温度及び燃料被覆管表面温度の解析結果	32
図-3.6.2	１次冷却材中のよう素１３１濃度の推移（美浜２号機第１４運転期間）	33
図-3.6.3	炉心上端部の１次冷却材の温度、局所ボイド率及び熱流束の解析結果	34
図-3.6.4.1	飽和温度、炉心出口温度の最大値、健全側ループの高温側及び低温側冷却材温度の推移	35
図-3.6.4.2	飽和温度、炉心出口温度の最大値、損傷側ループの高温側及び低温側冷却材温度の推移	35
図-3.6.5	１次冷却材の流量の解析結果	36
図-3.6.6	原子炉容器頂部におけるボイド量の解析結果	36
図-3.6.7	ボイド発生時のイメージ図	37
図-4.1.1	蒸気発生器伝熱管破断位置	38
図-4.1.2	破面主起点部付近観察結果（下側破面）	39
図-4.1.3	主起点部付近の断面ミクロ観察結果（下側破面）	40
図-4.1.4	き裂伝播部破面観察結果（下側破面）	41
図-4.1.5	破面観察結果の概要	42
図-4.1.6	破断部の外表面観察結果（下側破面）	43
図-4.1.7	破断管高温側第６管支持板部の概略形状	44
図-4.1.8	周辺管調査概要	45
図-4.1.9	低温側第６管支持板部の摩耗減肉状況観察結果	46
図-4.1.10	第６管支持板の水平断面ミクロ観察結果（管支持板板厚中央）	47
図-4.1.11	蒸気発生器伝熱管振止め金具の概要	48
図-4.1.12	振止め金具挿入形状の推定	49
図-4.1.13	振止め金具挿入状況の推定	50
図-4.1.14	振止め金具取出し後の状況	51
図-4.2.1	流動励起振動解析手順の流れ	52
図-4.2.2	破断管及び周辺管の安定比	53
図-4.3.1	粗さパラメータの測定結果及び応力拡大係数範囲との関係	54
図-4.3.2	ストライエーション間隔の測定結果及び応力拡大係数範囲との関係	55
図-4.3.3	破面解析による応力振幅推定結果	56
図-4.3.4	通常疲労強度試験結果	56
図-4.3.5	インコネル６００伝熱管の疲労限度線図	57
図-4.3.6	フレッチング疲労試験片と破断管の外表面観察結果	58

図-4.3.7	フレッチング疲労試験片と破断管の断面及び破面の詳細観察結果	59
図-4.3.8	相対すべり量計測試験結果	60
図-4.3.9	フレッチング疲労き裂発生限界試験結果	60
図-4.3.10	フレッチング疲労き裂発生寿命試験結果	61
図-4.3.11	フレッチング疲労試験結果	61
図-4.3.12	フレッチング疲労き裂の深さ方向伝播	62
図-5.1.1	原子力監査プロジェクトチームの業務体制	63
図-5.1.2	運転管理体制の強化組織図	64
図-5.1.3	各種技術情報処理業務フロー	65
図-5.1.4	変更管理について	66
図-5.3.1	異常事象発生時の通報連絡体系概要図（休祭日の例）	67
図-5.4.1	原子力安全システム研究所の概要	68



図－2.1.1 運転記録の概要 (1/2)

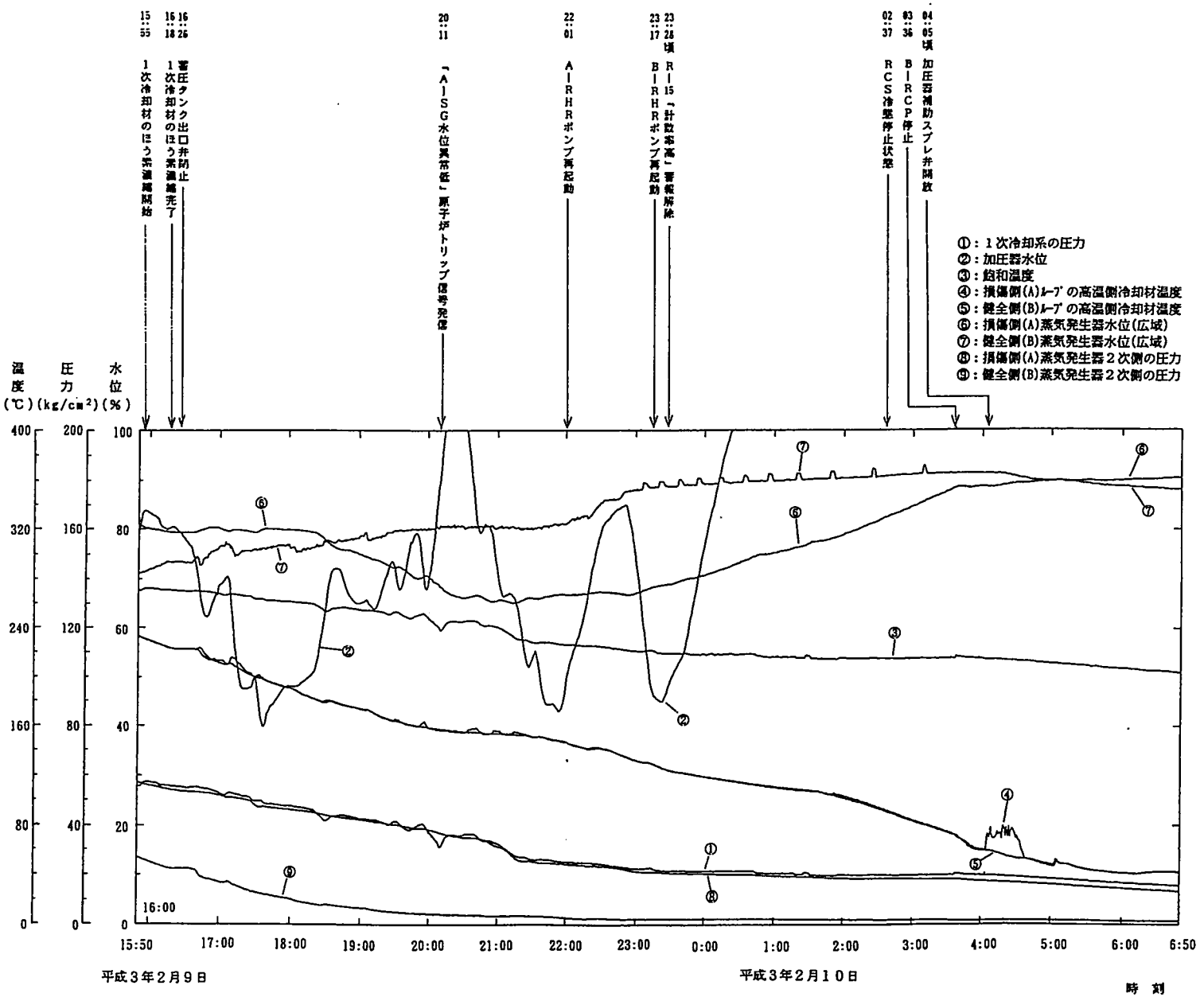
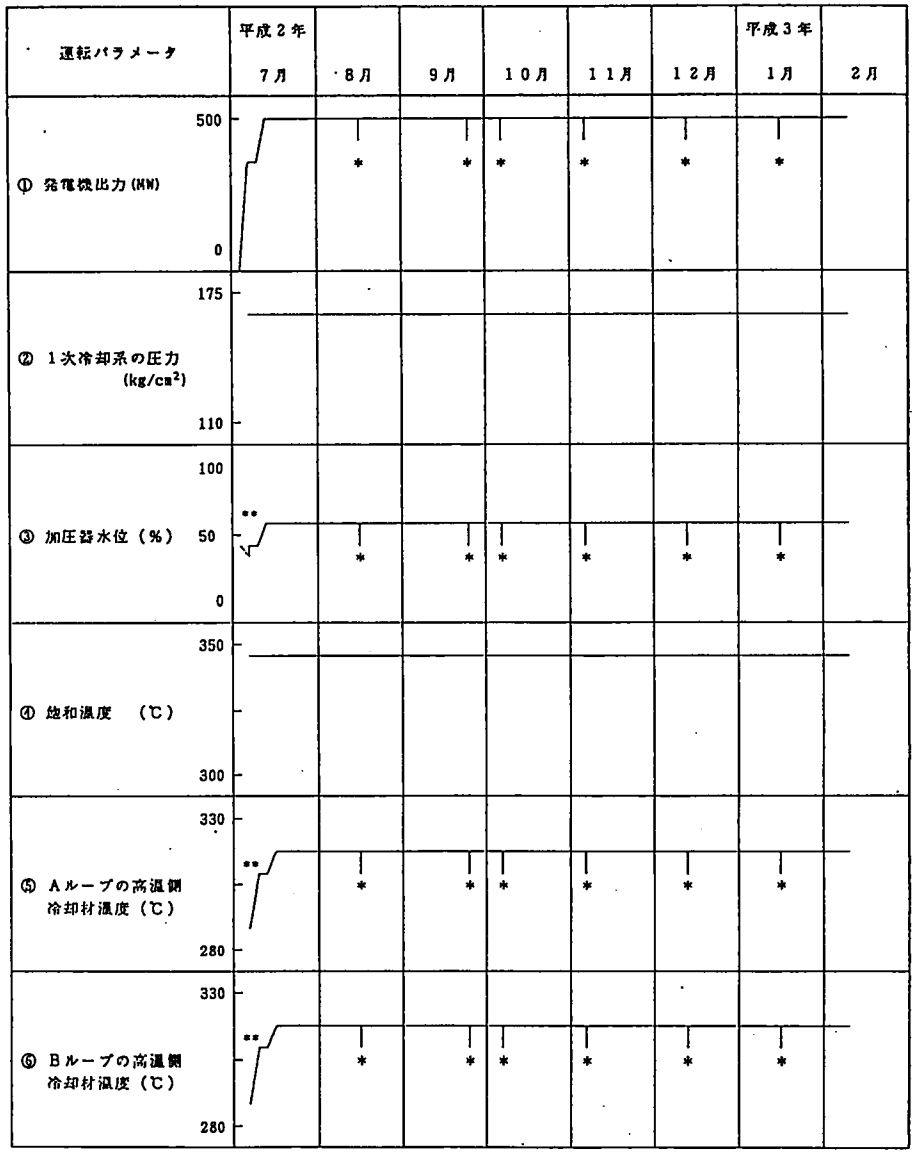
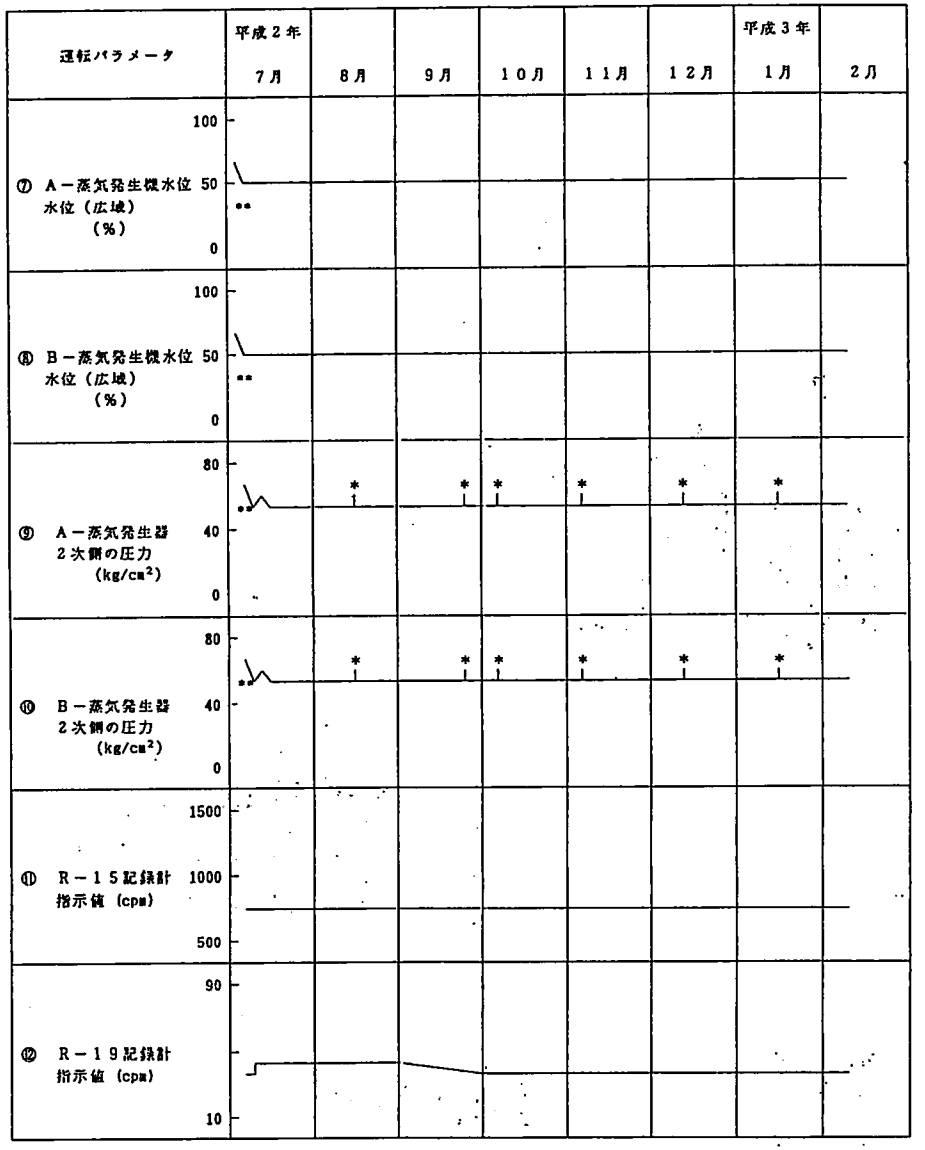


図-2.1.1 運転記録の概要 (2/2)

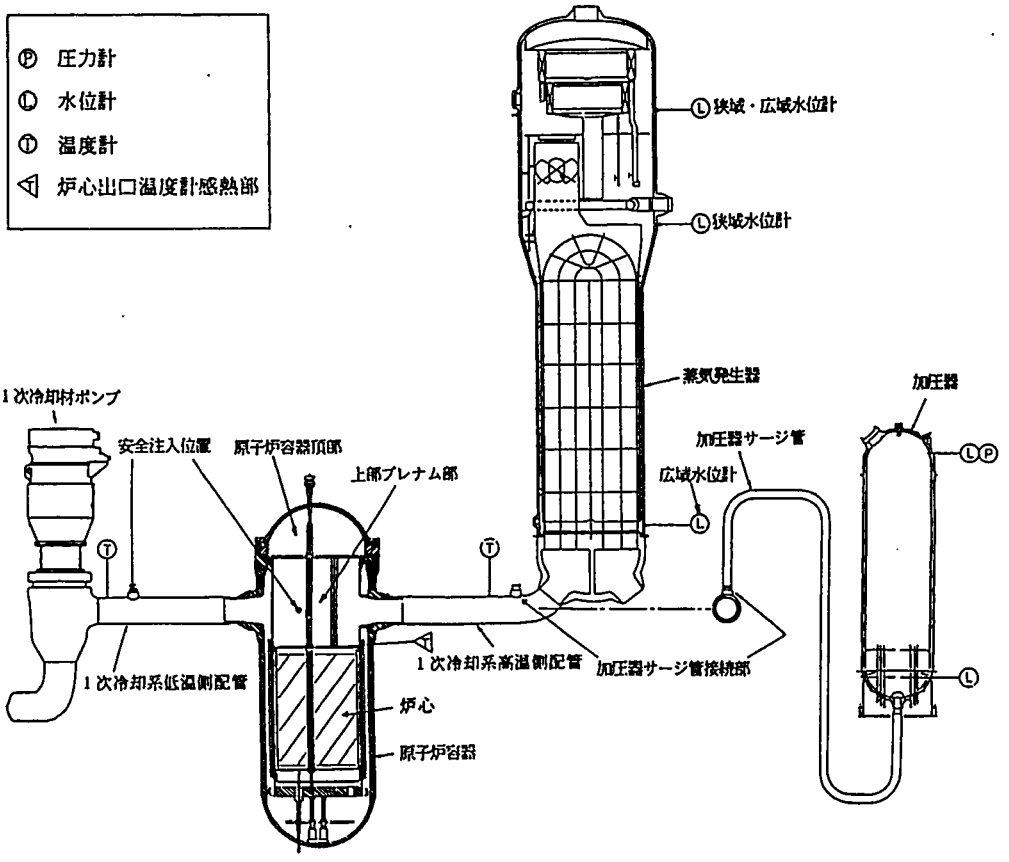


＊タービン主要弁作動試験に伴い変動している。
＊＊発電機出力上昇中につき定格出力運転中とは値が異なっている。
（平成２年７月４日～平成３年２月９日）

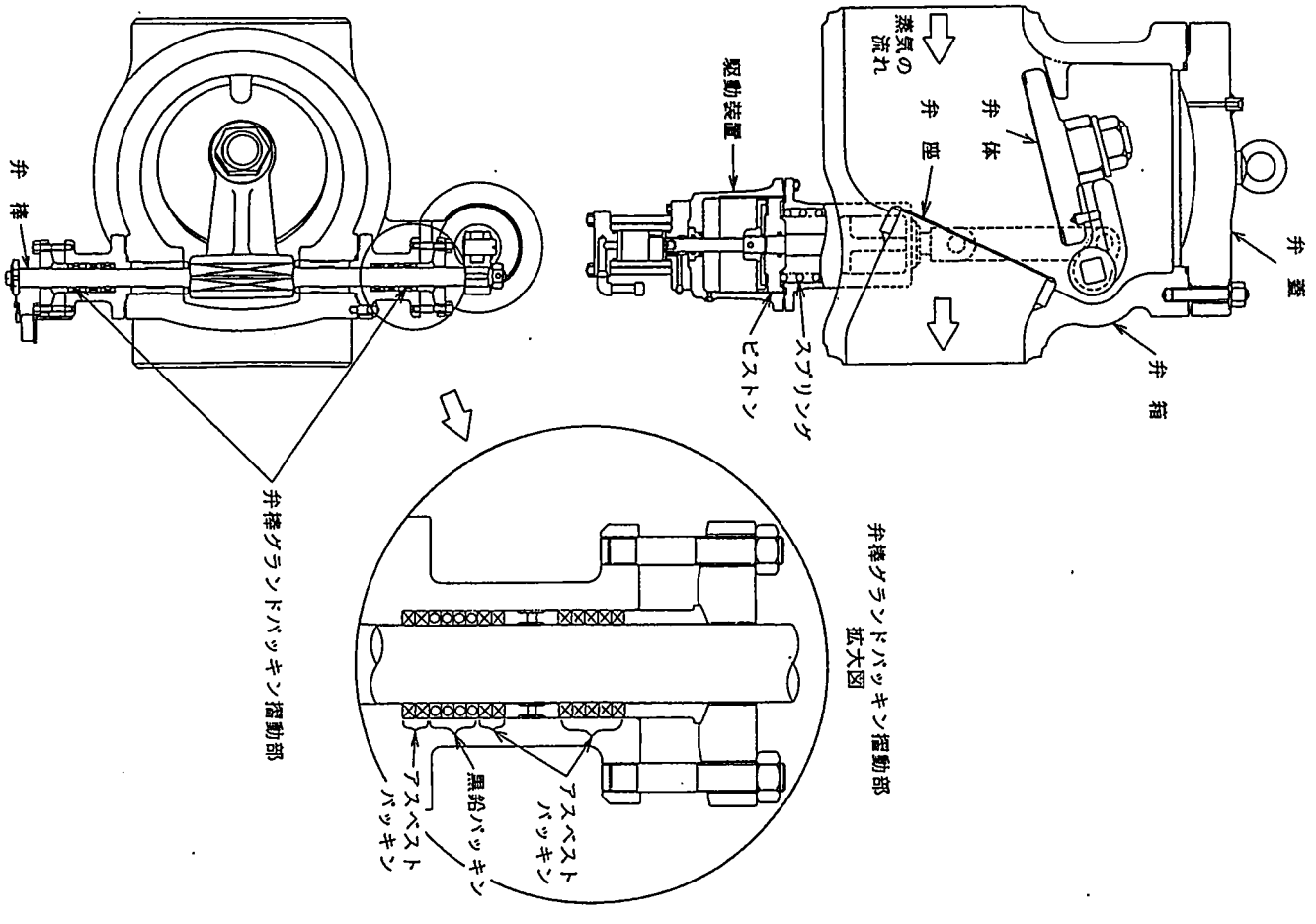


＊タービン主要弁作動試験に伴い変動している。
＊＊発電機出力上昇中につき定格出力運転中とは値が異なっている。
（平成２年７月４日～平成３年２月９日）

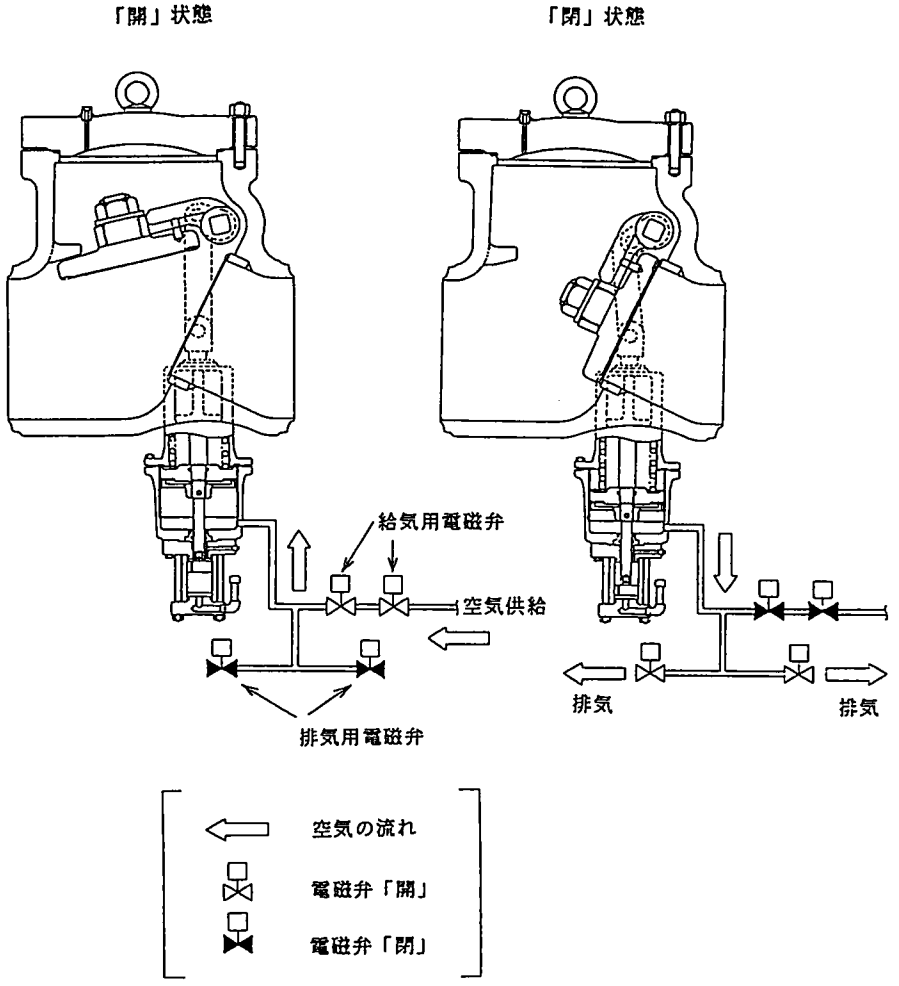
図－２．１．２　　第１４運転期間における主要な運転パラメータの推移



図－２．２．１　１次冷却系の主要機器の配置及び主要パラメータの測定位置の概要



図－２．４．１．１　主蒸気隔離弁構造の概要

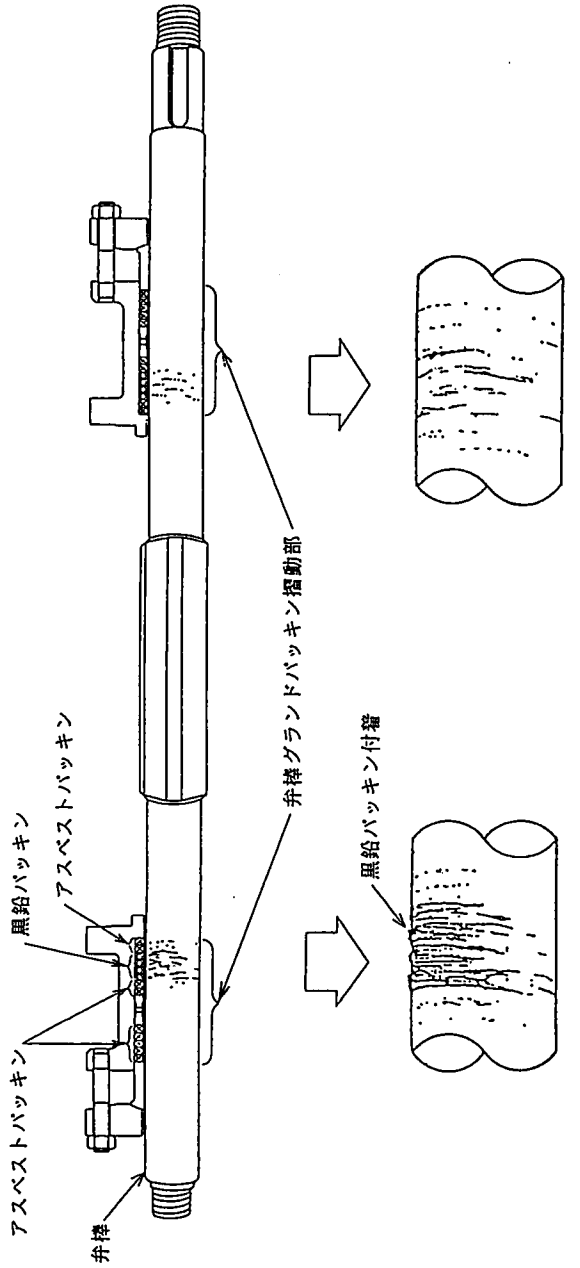


［作動原理］

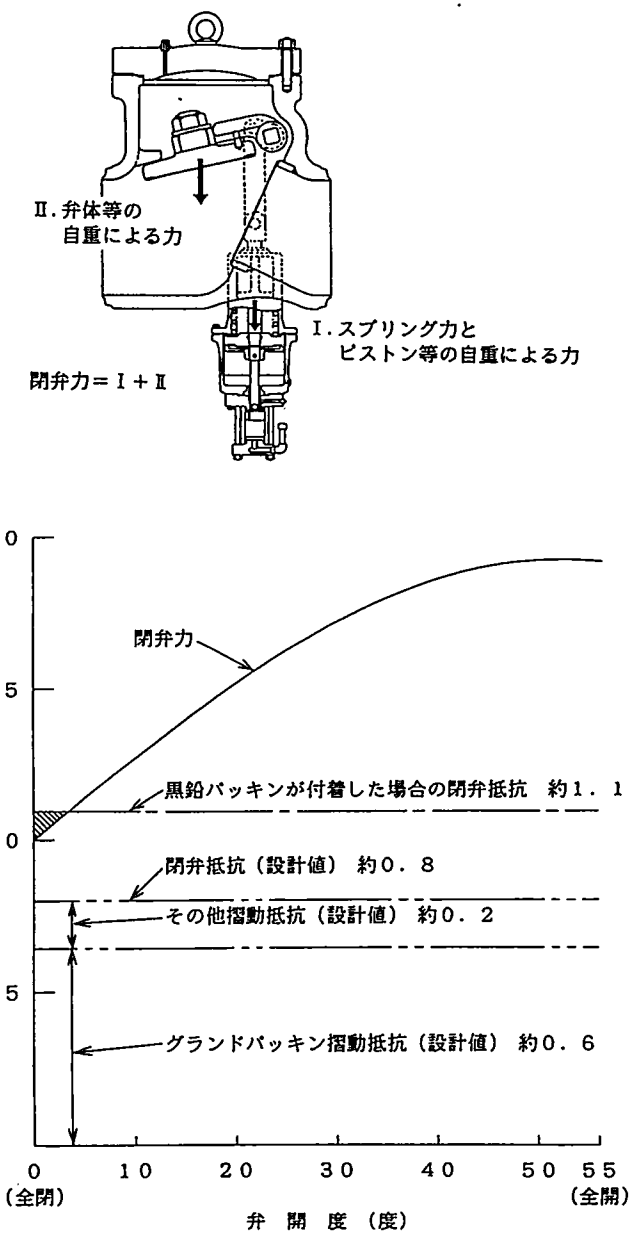
1．開放する場合
　給気用電磁弁「開」、排気用電磁弁「閉」により駆動装置内に空気を供給することによって開放する。

2．閉止する場合
　給気用電磁弁「閉」、排気用電磁弁「開」により駆動装置内の空気が排気される。空気圧の減少に伴い、スプリング力及び弁体等の自重による閉弁力により閉止する。

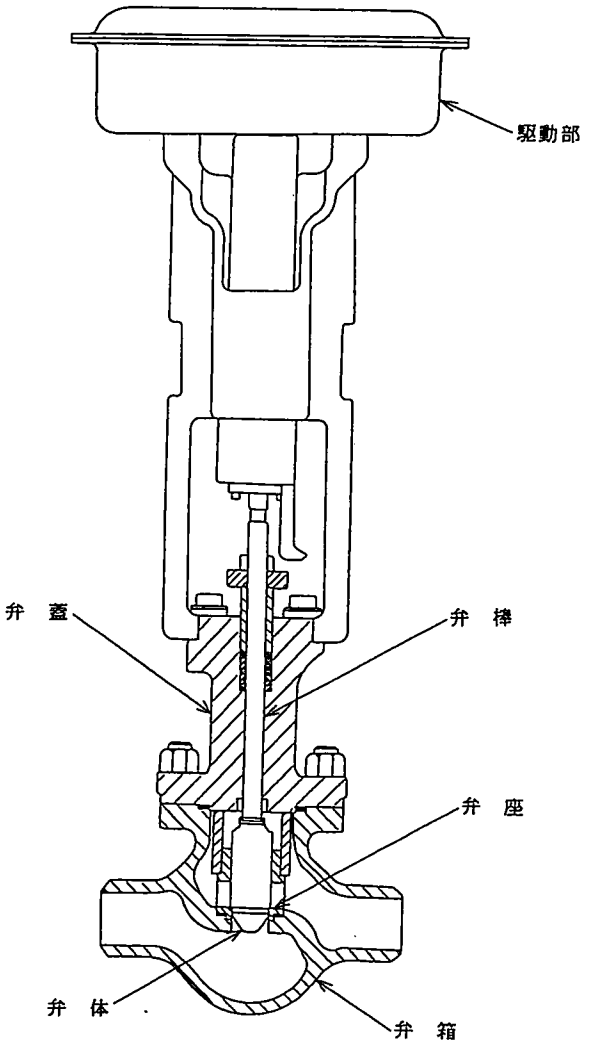
図－２．４．１．２　主蒸気隔離弁作動原理



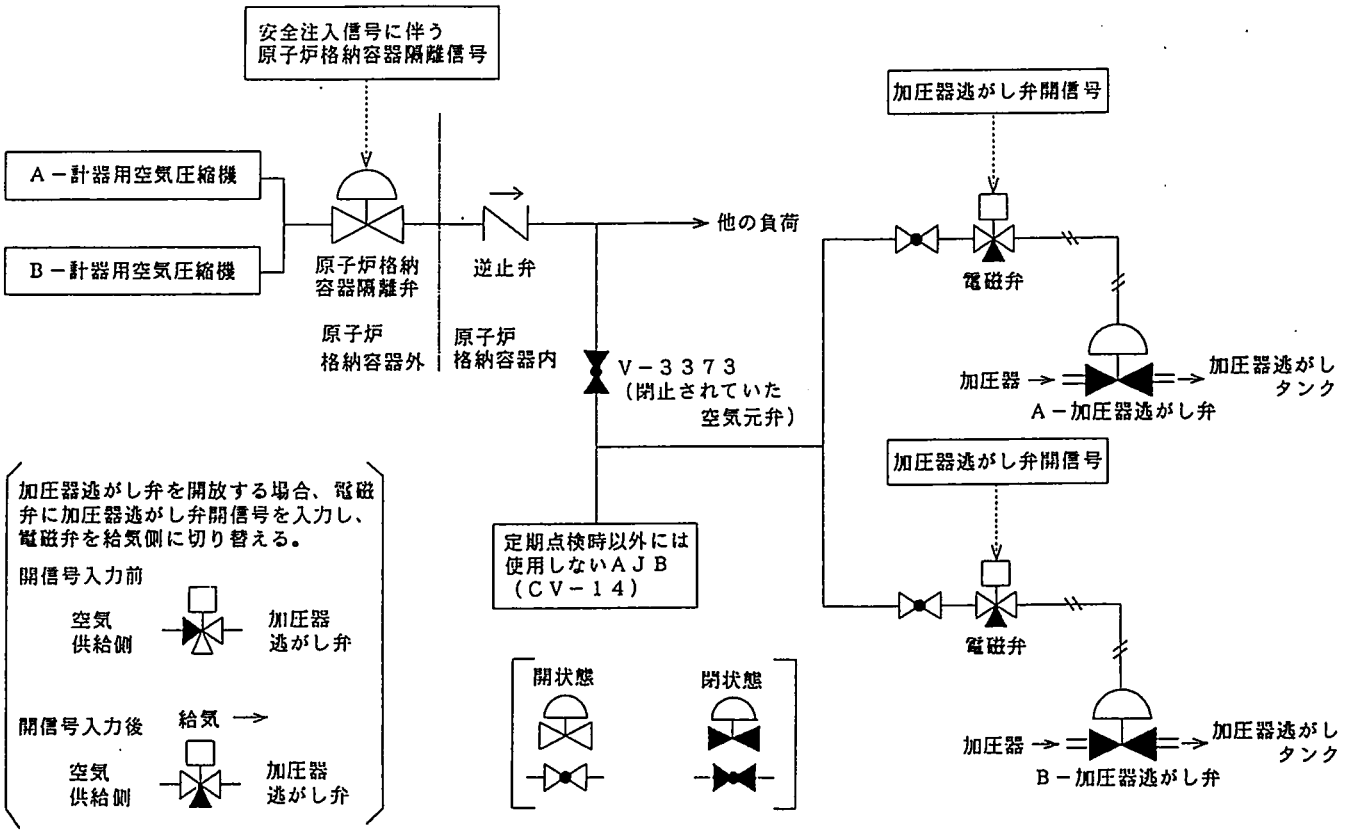
図－２．４．１．３　損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁弁棒グランドパッキン摺動部点検結果



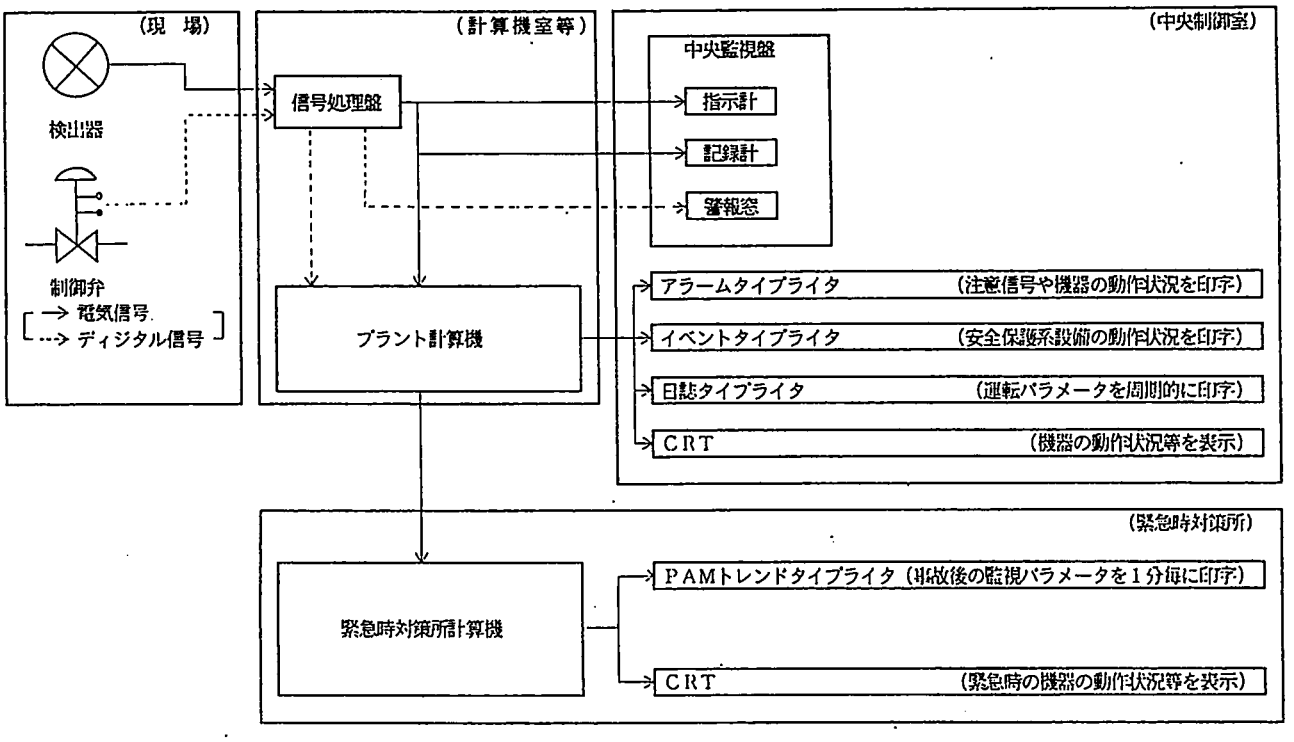
図－2．4．1．4　主蒸気隔離弁閉弁力と閉弁抵抗の関係



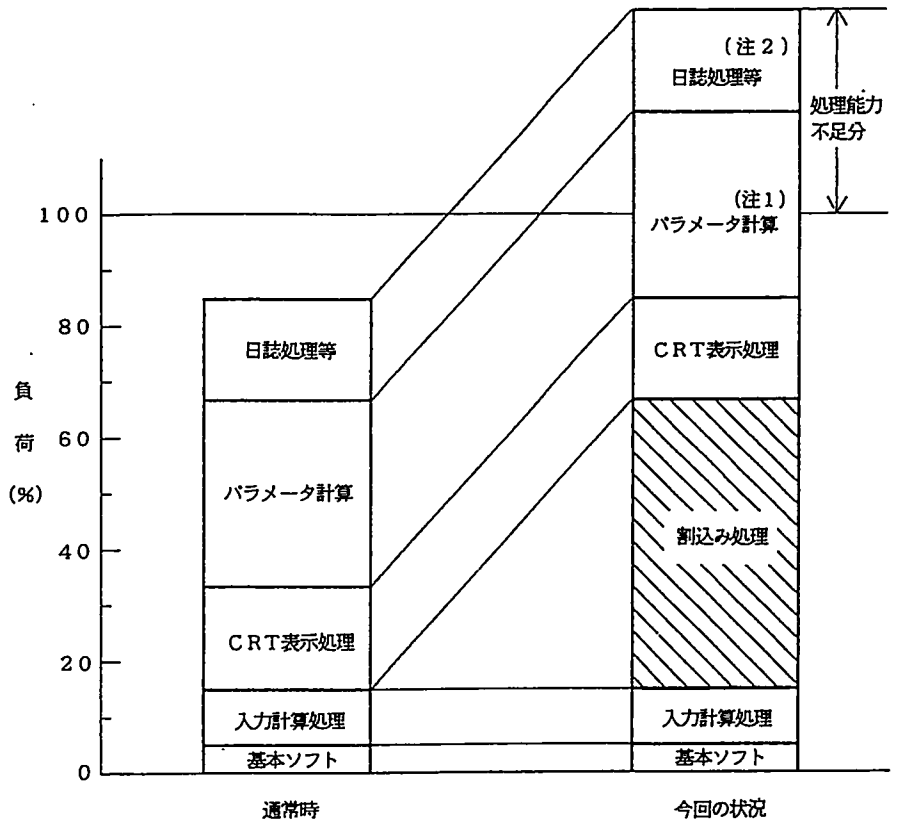
図－2．4．2．1　加圧器逃がし弁構造の概要



図－２．４．２．２　加圧器逃がし弁作動用空気系統の概要



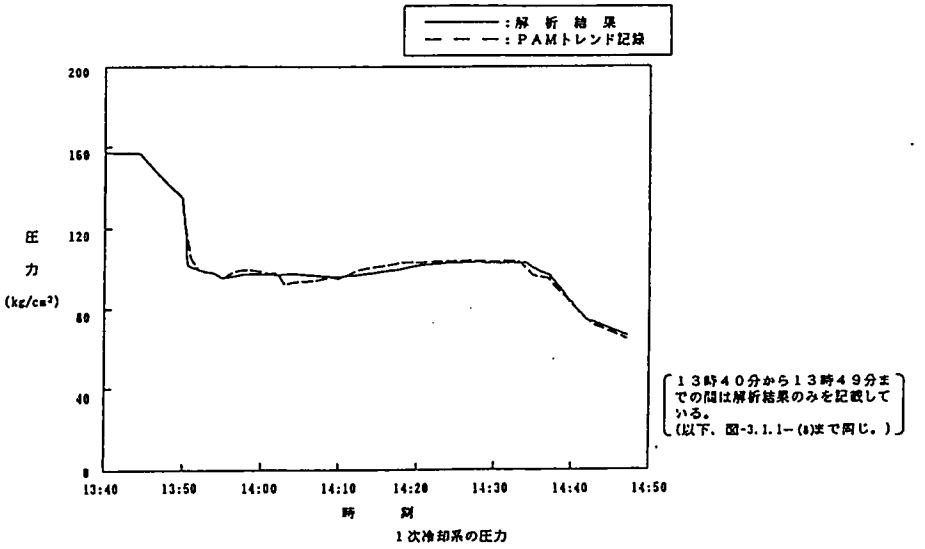
図－２．４．３．１　プラントデータ処理システムの構成の概要



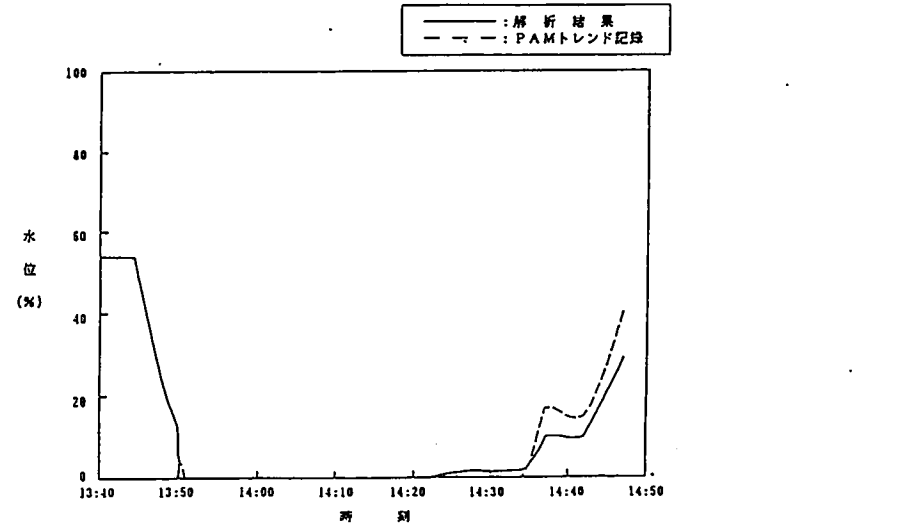
（注１）　サブクール度、飽和温度、炉心出口温度の最大値等は、処理能力不足により原子炉トリップ後１０分間計算されなかった。

（注２）　日誌の印字処理は、処理能力不足により遅れてなされたものと推定される。

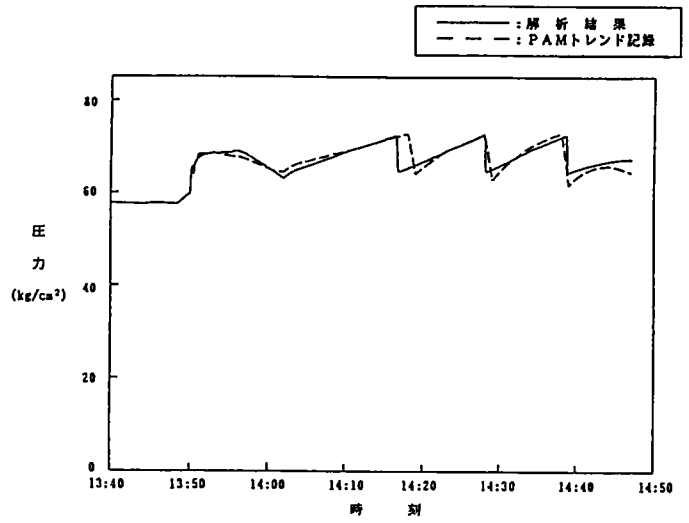
図－２．４．３．２　プラント計算機の負荷の概要



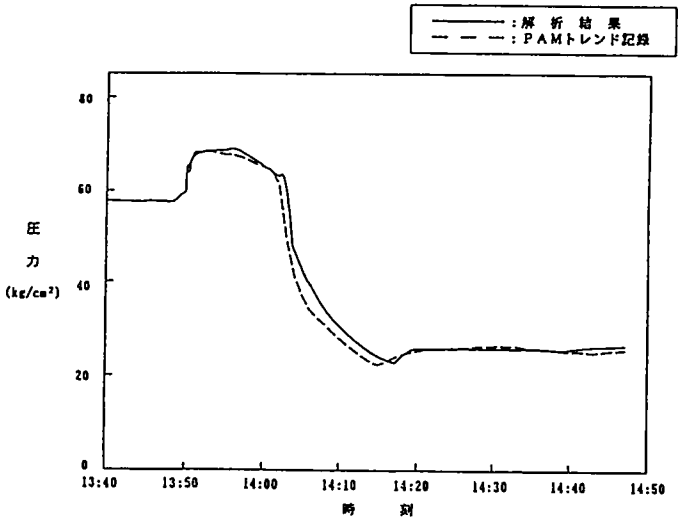
図－３．１．１－(1)　　事象の再現解析結果と計測値との比較



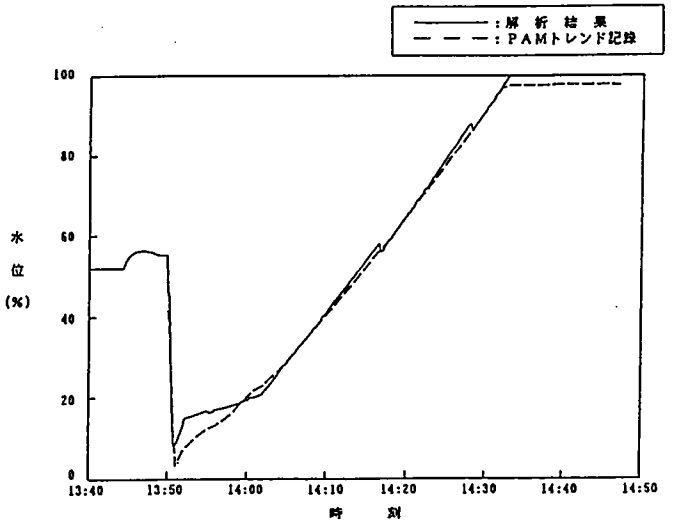
図－３．１．１－(2)　　加圧器水位



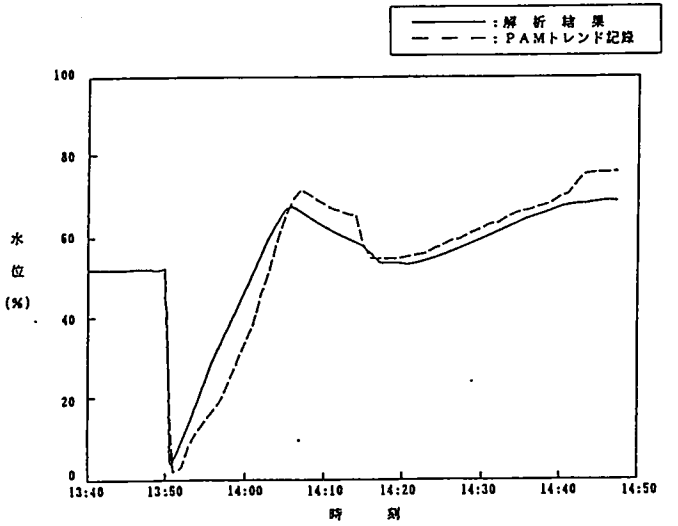
図－３．１．１－(3)　損傷側蒸気発生器２次側の圧力



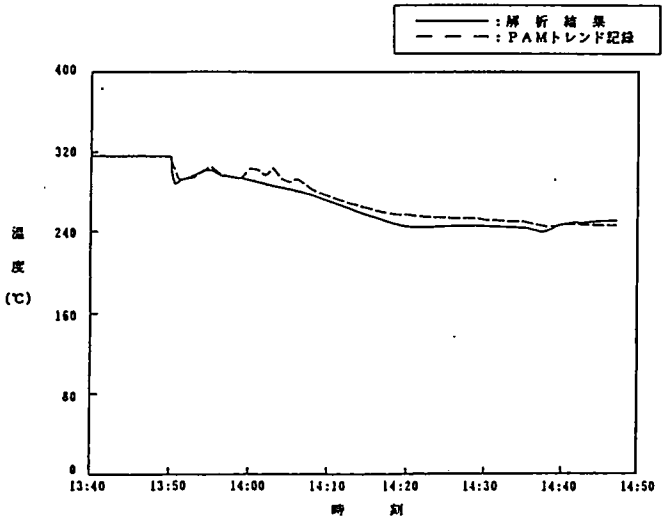
図－３．１．１－(4)　健全側蒸気発生器２次側の圧力



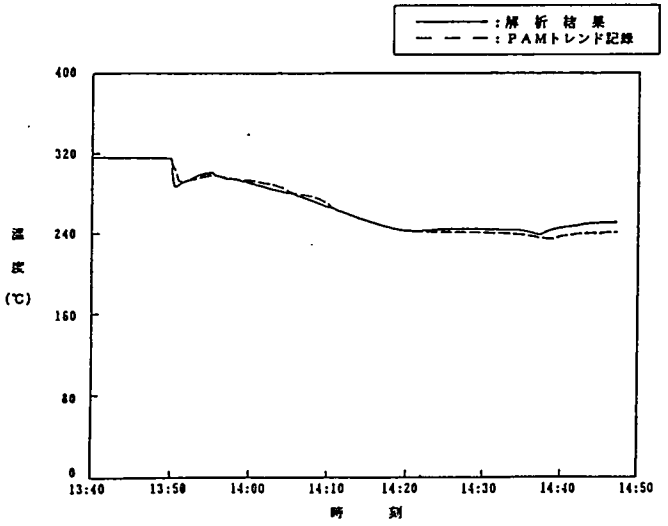
図－３．１．１－(5)　損傷側蒸気発生器水位（狭域）



図－３．１．１－(6)　健全側蒸気発生器水位（狭域）

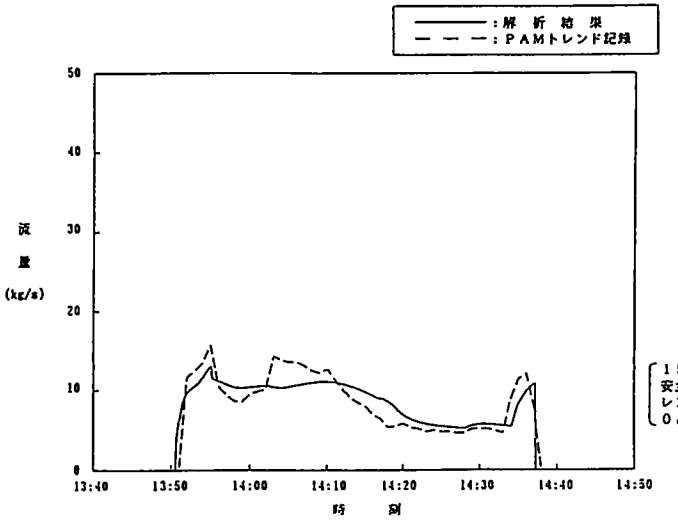


図－３．１．１－(7)　損傷側ループの高温側冷却材温度



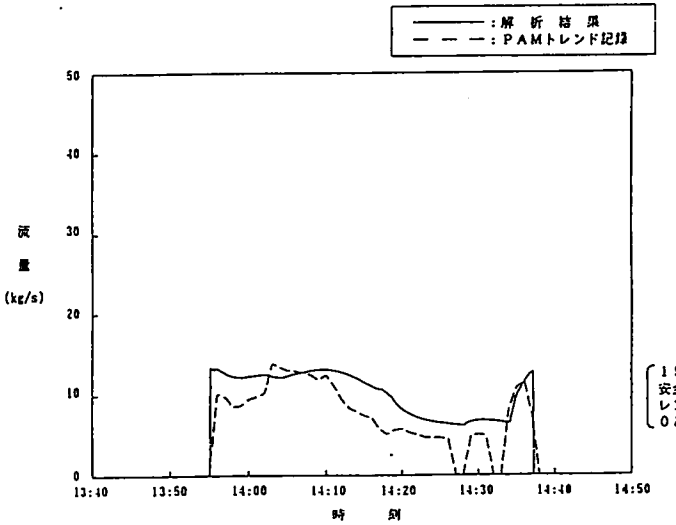
図－３．１．１－(8)　健全側ループの高温側冷却材温度

・安全注入流量の再現解析結果と計測値との比較



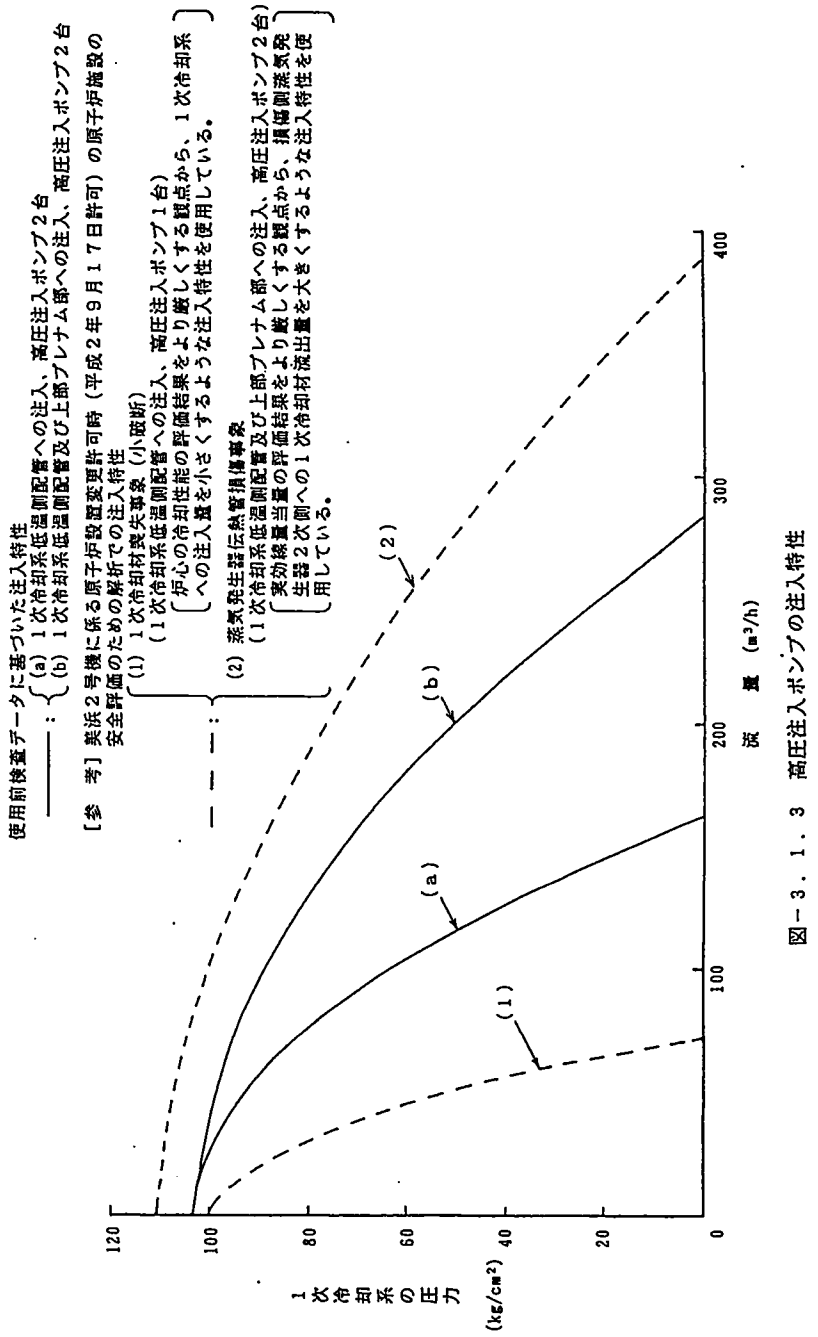
〔１５．８m³/h（約４．４kg/s）以下の安全注入流量の計測値は、ＰＡＭトレンド記録上はローカット処理され０と記録されている。〕

図－３．１．２－(1)　１次冷却系低温側配管への安全注入流量

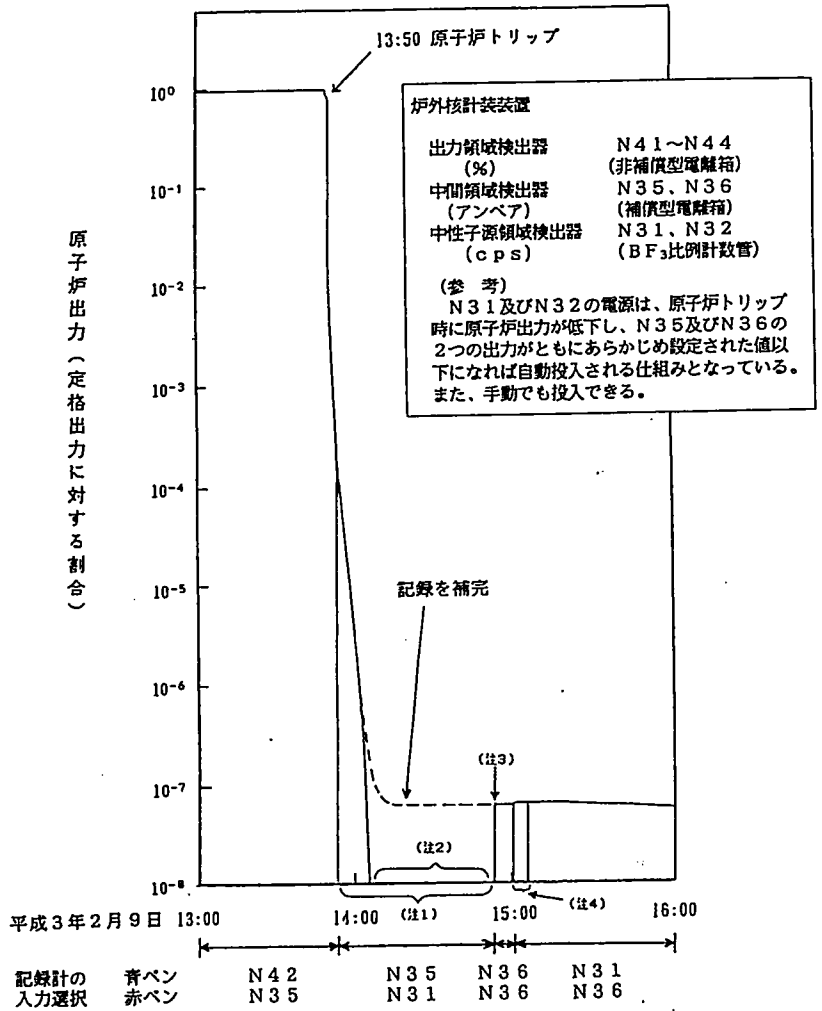


〔１５．８m³/h（約４．４kg/s）以下の安全注入流量の計測値は、ＰＡＭトレンド記録上はローカット処理され０と記録されている。〕

図－３．１．２－(2)　原子炉容器上部プレナム部への安全注入流量

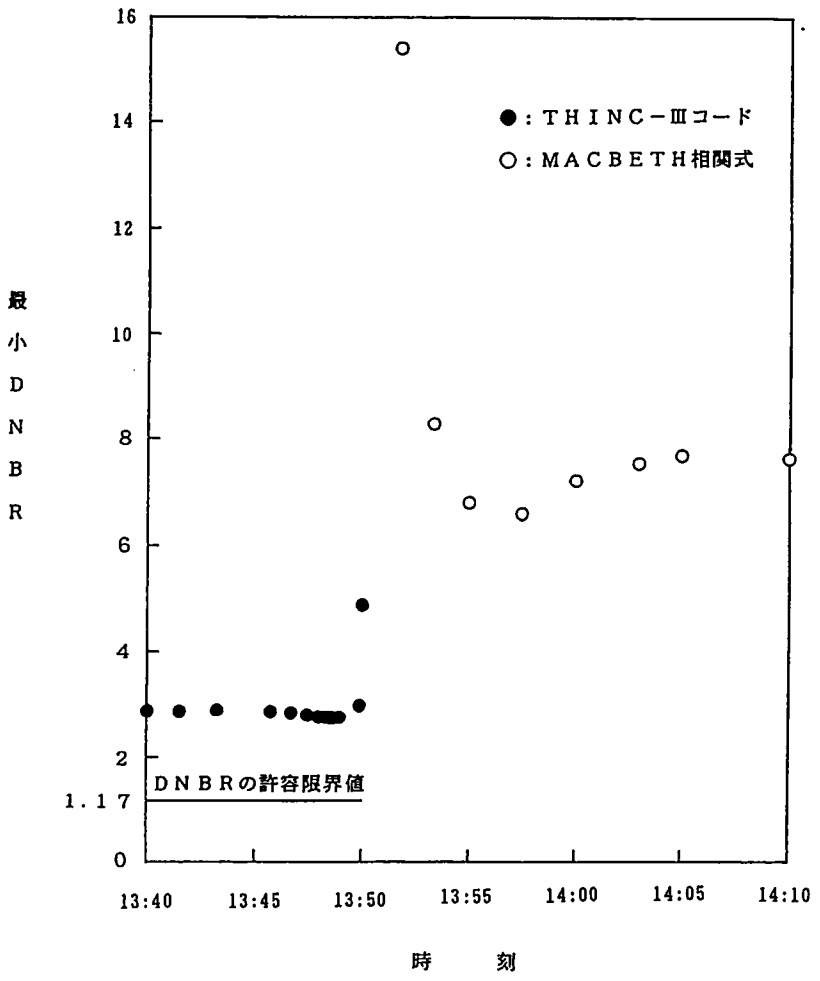


図－３．１．３　高圧注入ポンプの注入特性

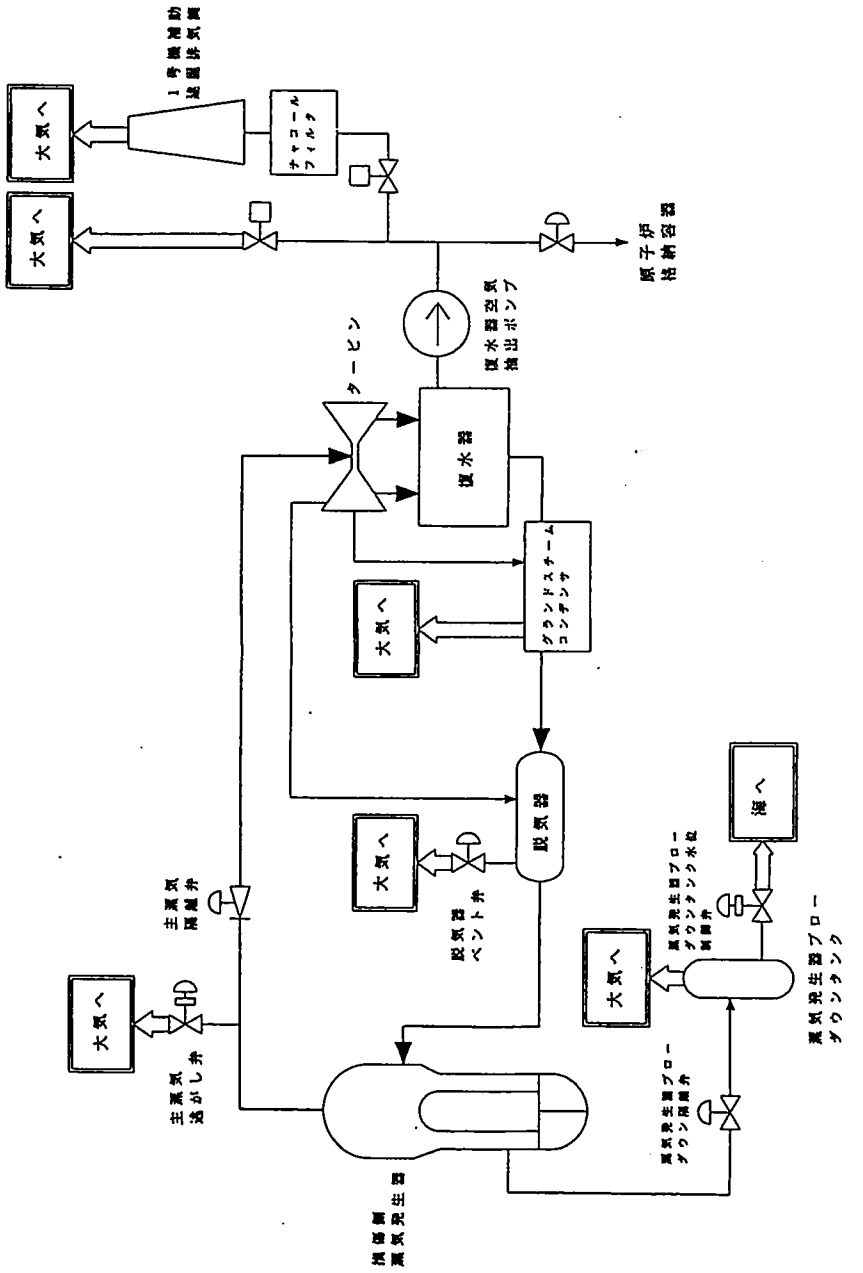


(注1) N31の指示値（赤ペン）が振り切れているのは、N36の出力がその補償特性からN31及びN32の電源が自動投入される出力以下に低下しなかったため、N31の電源が投入されなかったことによる。
(注2) N35の指示値（青ペン）が振り切れているのは、その補償特性による。
(注3) N35及びN31からN36に切り替えられたとき、N36の指示値（赤ペン、青ペン）の記録が開始された。
(注4) N36からN31に切り替えられたとき、N31の指示値（青ペン）が振り切れているのは、N31の電源が投入されていなかったためであり、その後手動でN31の電源が投入されN31の指示値の記録が開始された。

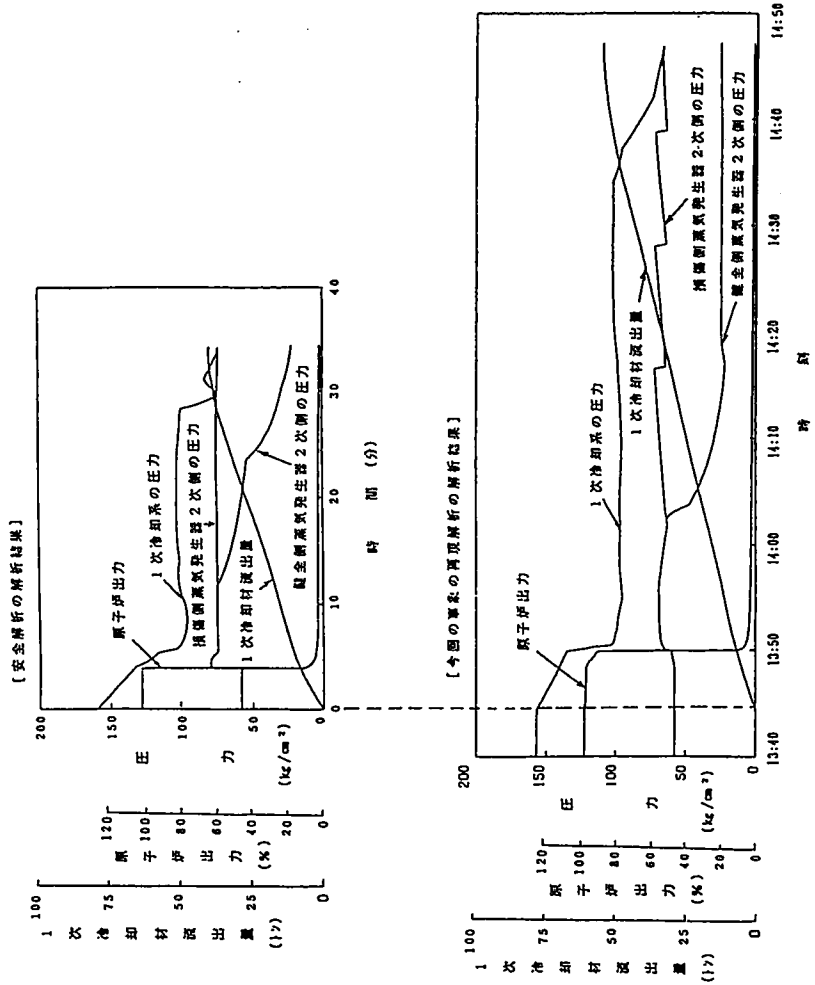
図－３．２．１　炉外核計装記録の説明



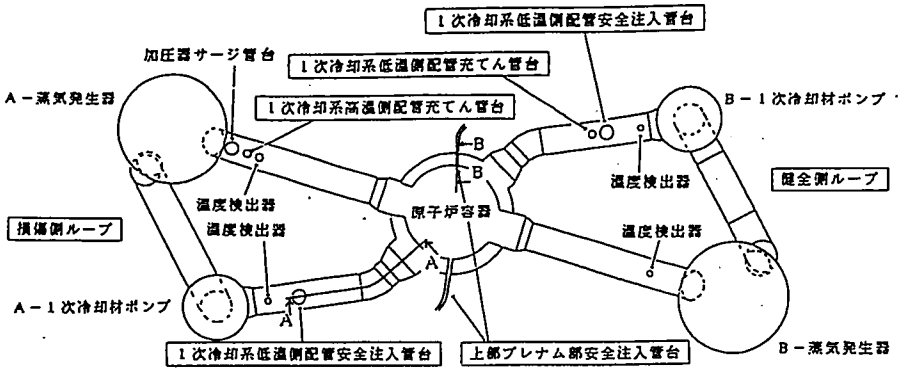
図－３．２．２　最小ＤＮＢＲの解析結果

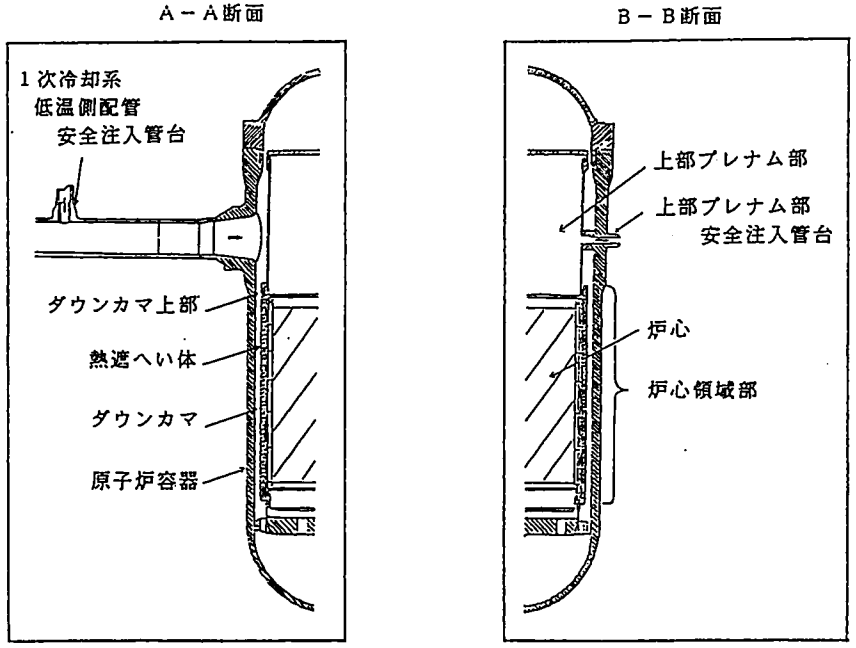


図－３．３．１　放射性物質の主な放出経路

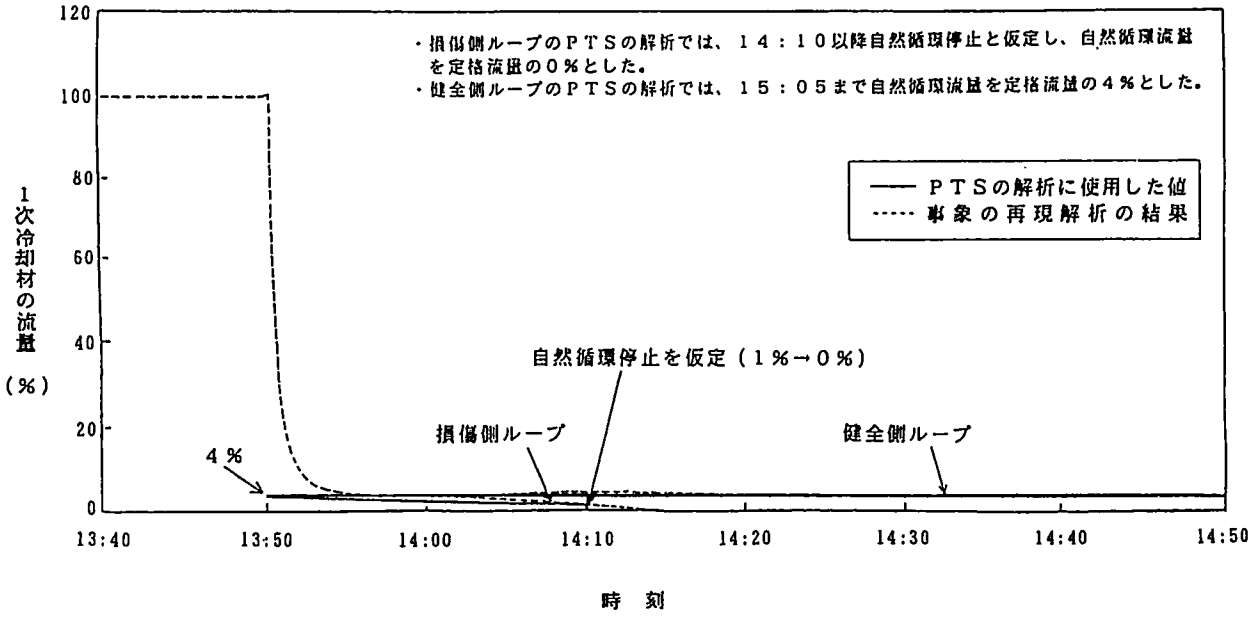


図－３．４．１　安全解析の解析結果と今回の事象の再現解析の解析結果との比較

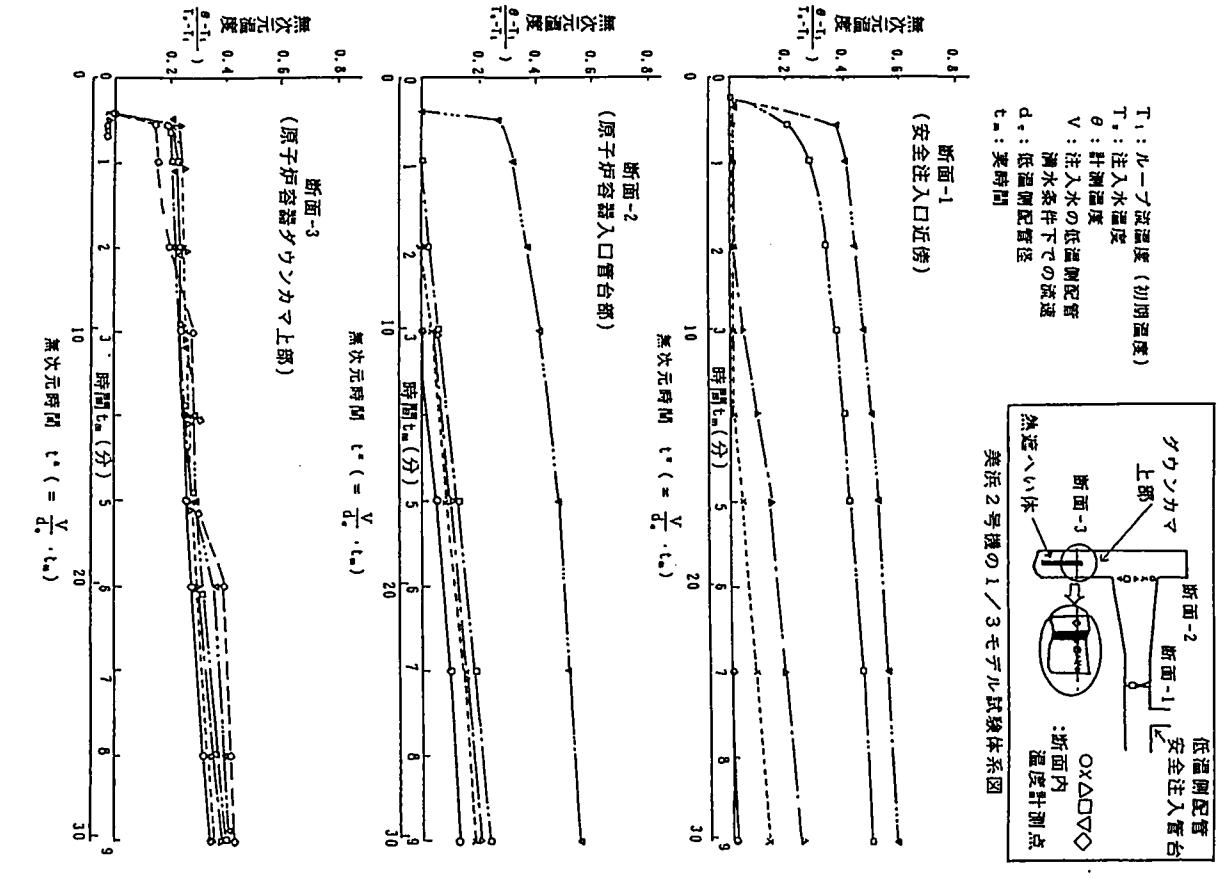




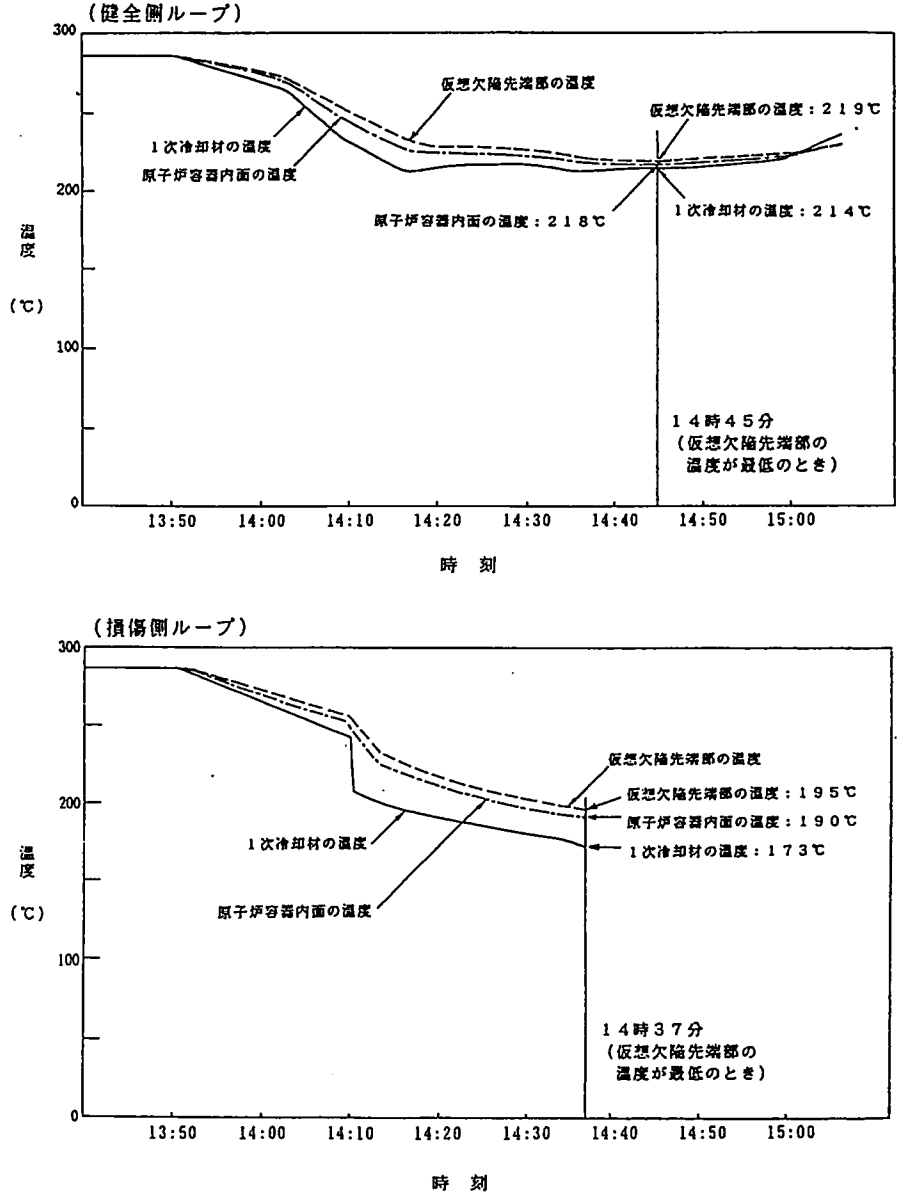
図－３．５．１．１　１次冷却系主要配置の概要



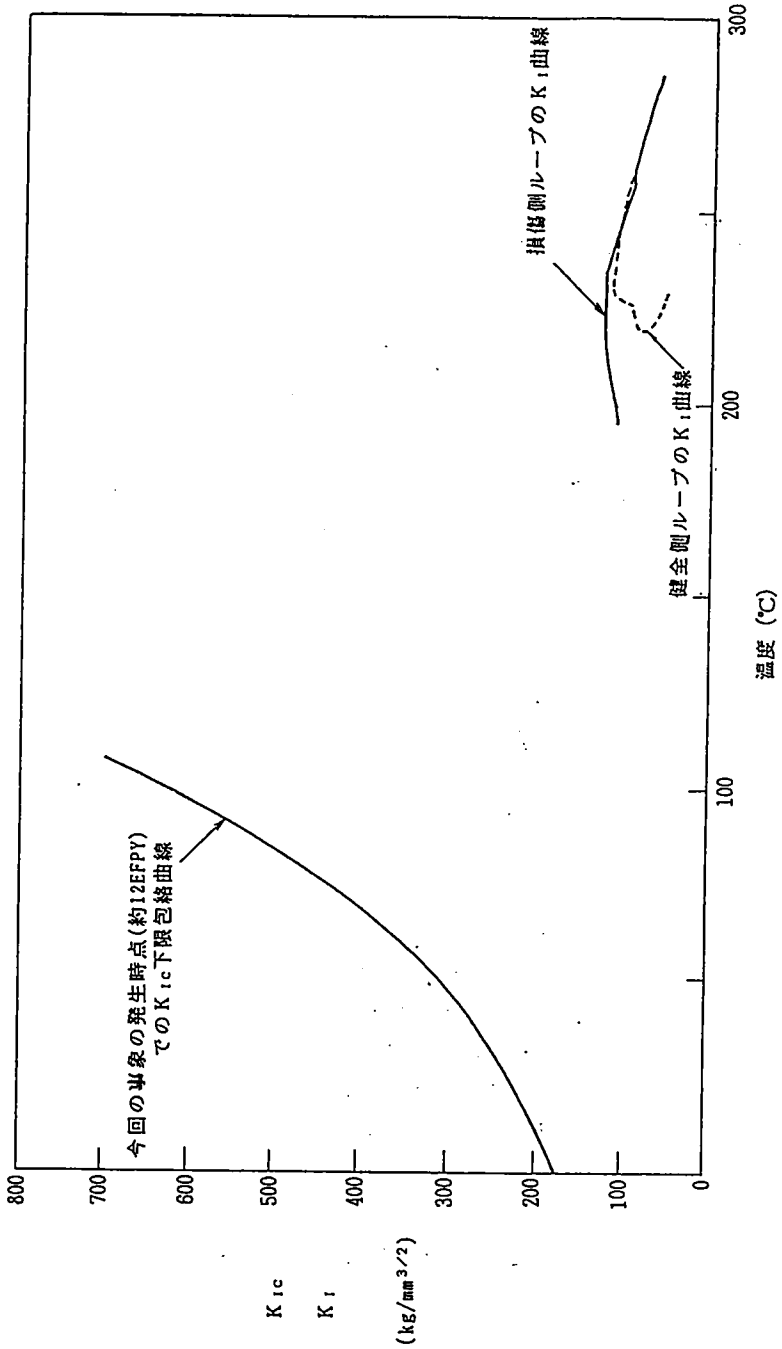
図－３．５．１．２　　１次冷却材の流量の設定



図－３．５．１．３　混合挙動の把握試験結果（ループ流停止の場合）

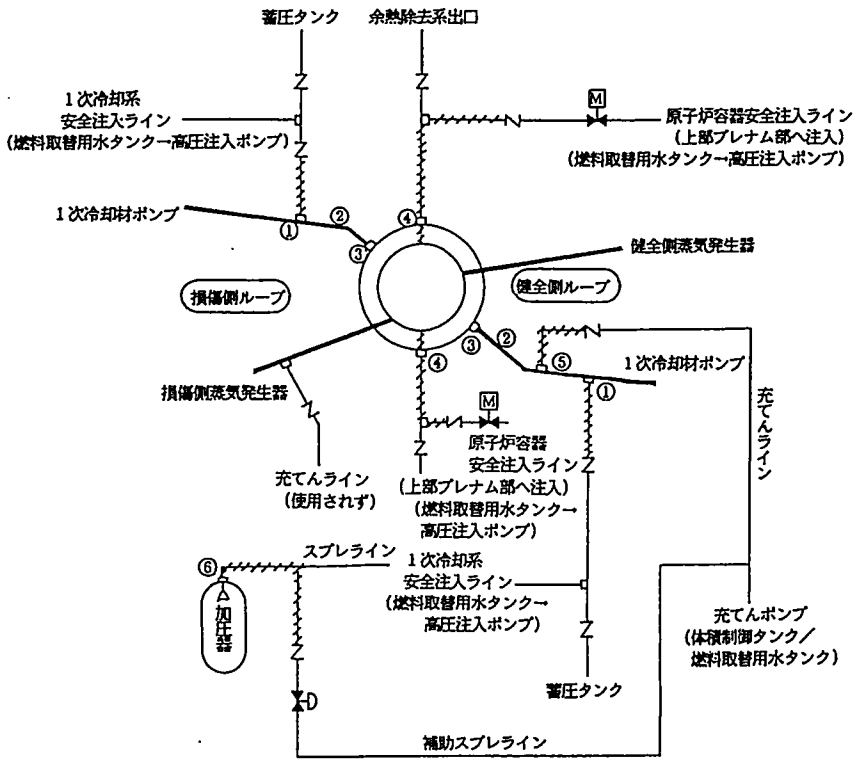


図－３．５．１．４　１次冷却材の温度及び原子炉容器の温度の推移



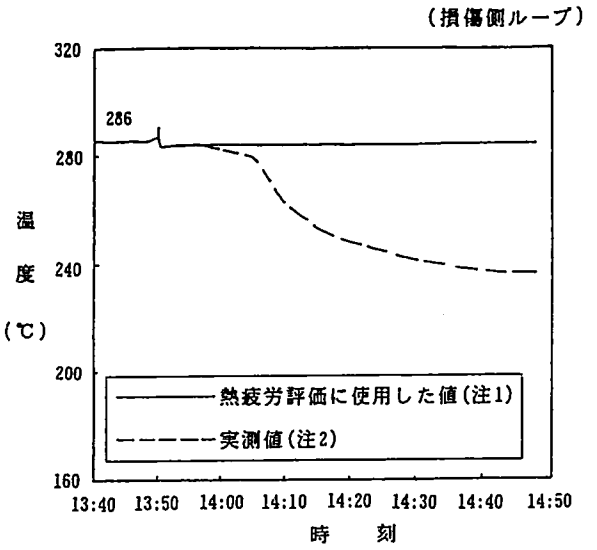
図－３．５．１．５　破壊力学による評価結果

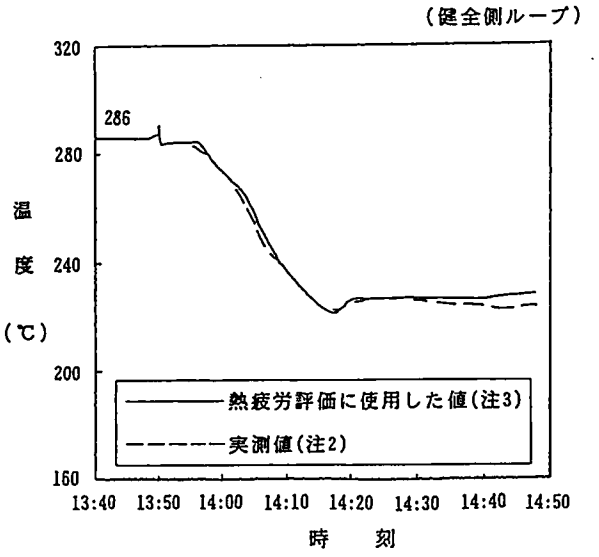
1次冷却系へ水が注入されたのは、／／／部に示すとおり。



① 1次冷却系低温側配管の安全注入管台
② 1次冷却系低温側配管
③ 原子炉容器の入口管台
④ 原子炉容器の安全注入管台
⑤ 1次冷却系低温側配管の充てん管台
⑥ 加圧器のスプレライン用管台

図－３．５．２．１　疲労評価対象部位



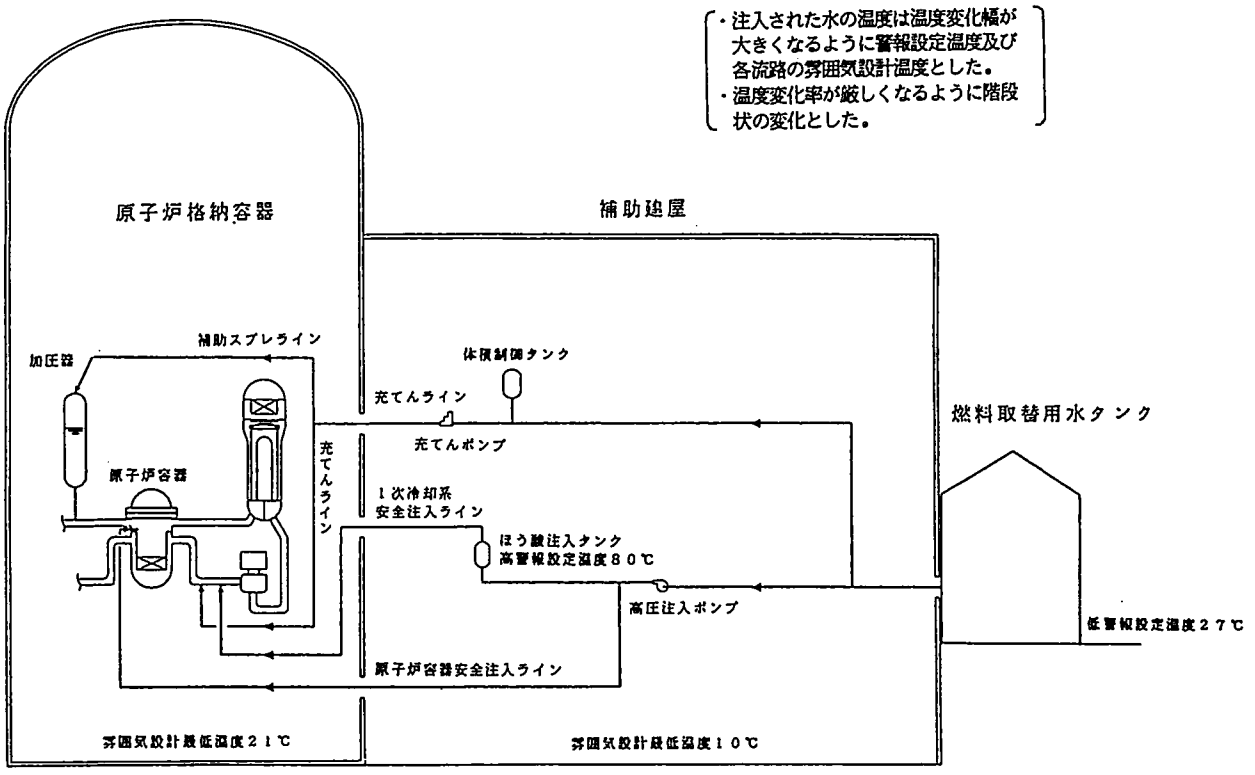


(注1)　ループ流が停止したと仮定して原子炉トリップ直後の温度に設定

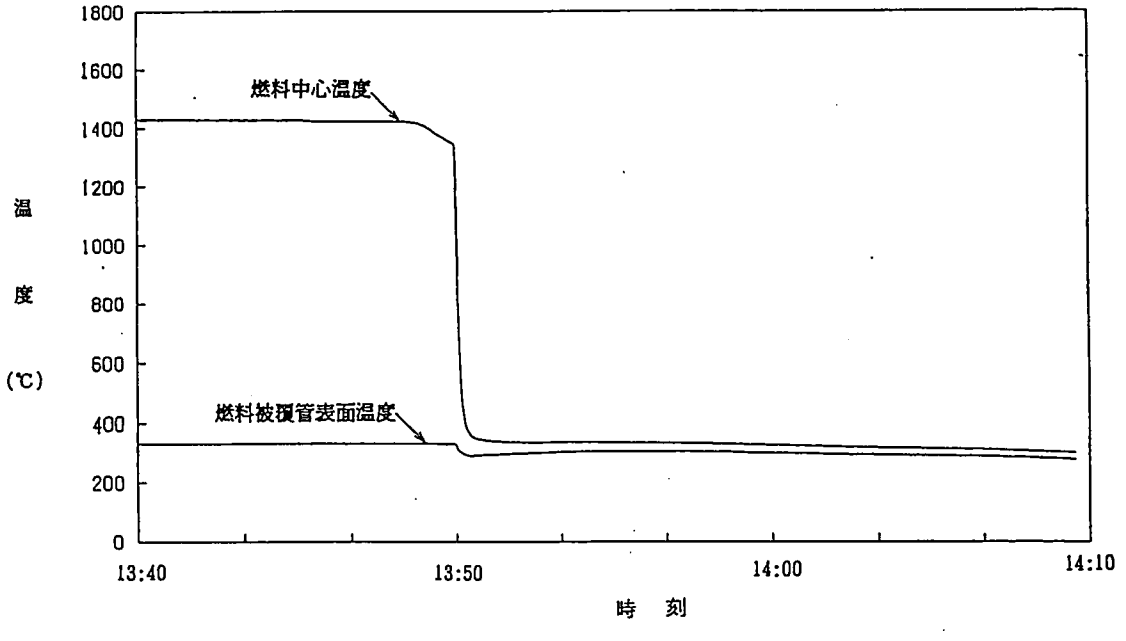
(注2)　１３時４０分から１３時４９分までの間は事象の再現解析の結果のみを記載

(注3)　事象の再現解析の結果を使用

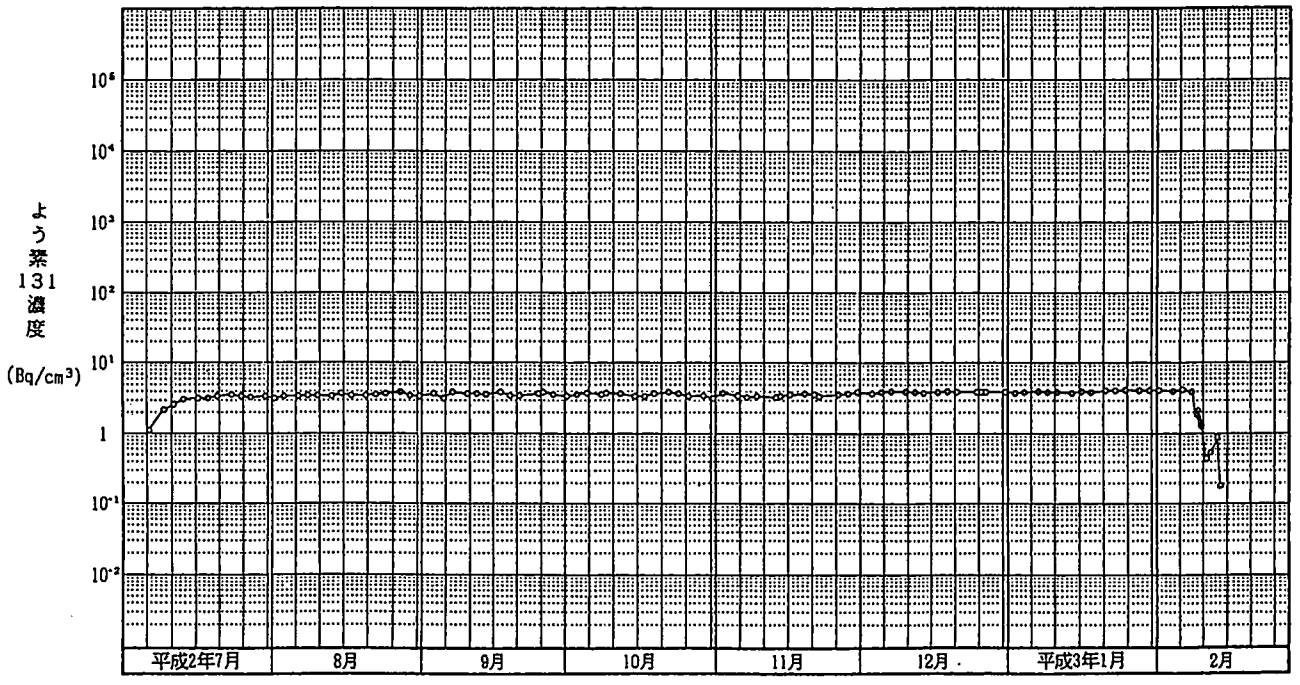
図－３．５．２．２　今回の事象における低温側冷却材の温度変化



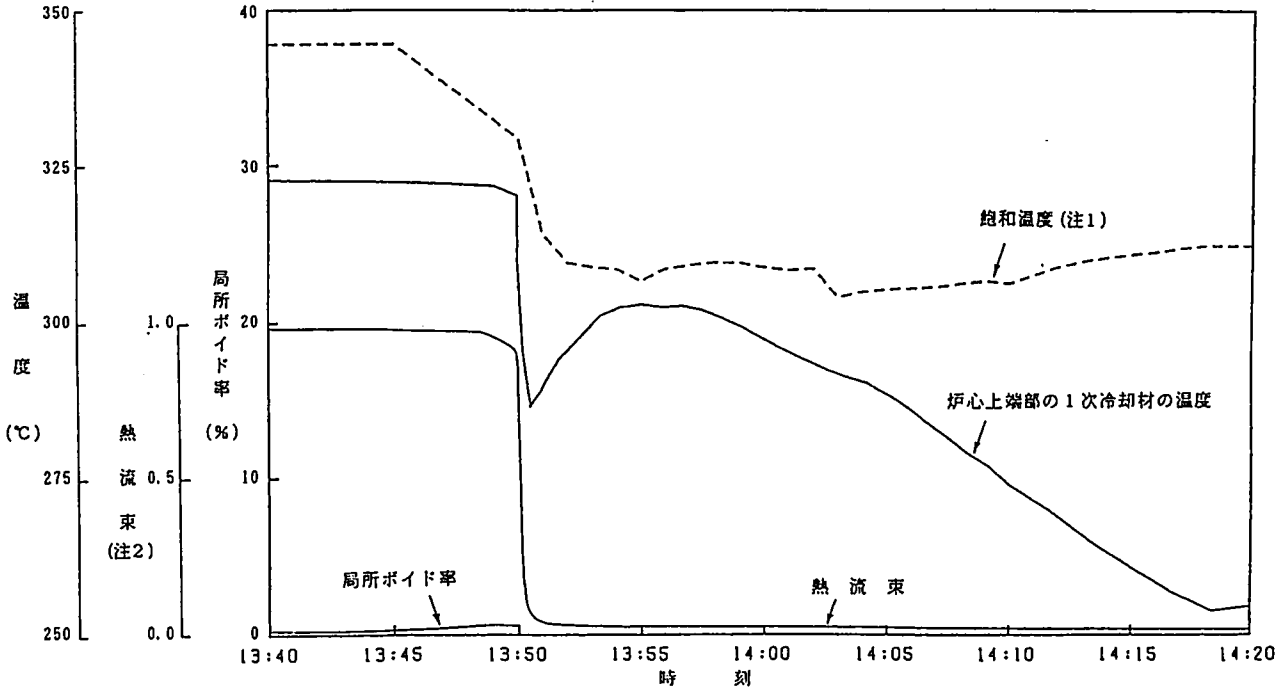
図－３．５．２．３　注入流路の概要



図－３．６．１　燃料中心温度及び燃料被覆管表面温度の解析結果

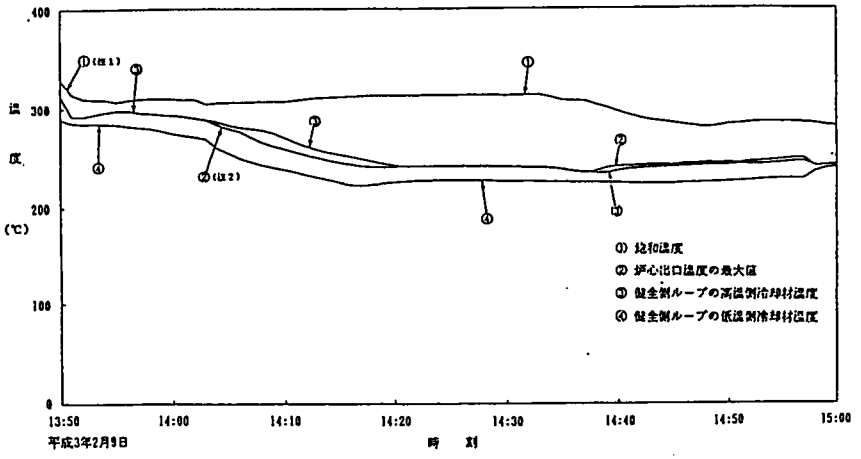


図－３．６．２　１次冷却材中のよう素１３１濃度の推移（美浜２号機　第１４運転期間）



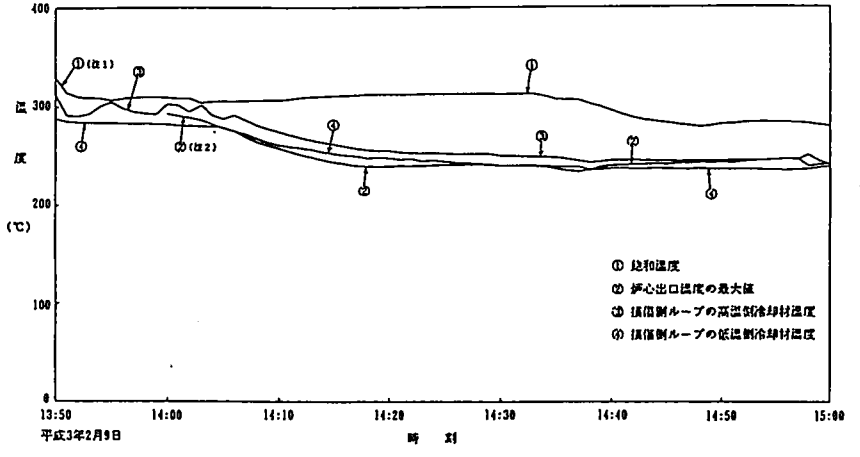
（注１）１３時４０分から１３時４９分の間：１次冷却系の圧力（プラント計器記録）からの換算値
１３時５０分から１３時５９分の間：１次冷却系の圧力（ＰＡＭトレンド記録）からの換算値
１４時０分以降：ＰＡＭトレンド記録
（注２）定格出力運転中の値に対する相対値

図－３．６．３　炉心上端部の１次冷却材の温度、局所ボイド率及び熱流束の解析結果



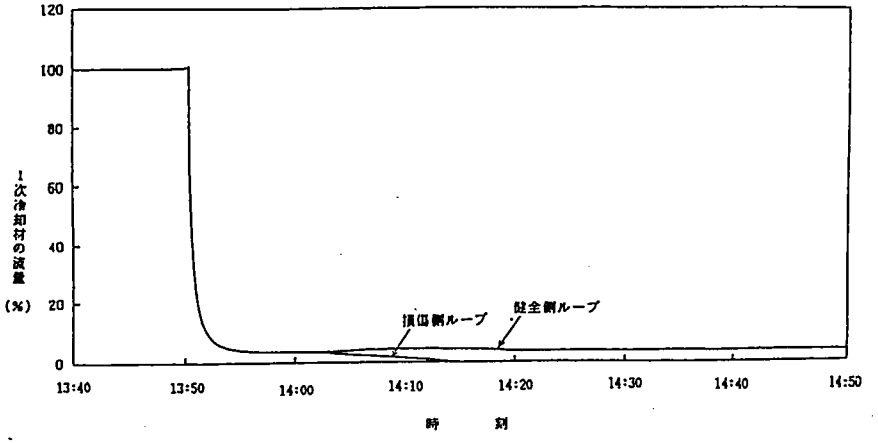
(注1) 13時50分から13時59分の間は1次冷却系の圧力からの換算値
(注2) 13時50分から13時59分の間は記録されていない。

図－３．６．４．１　飽和温度、炉心出口温度の最大値、
健全側ループの高温側及び低温側冷却材温度の推移

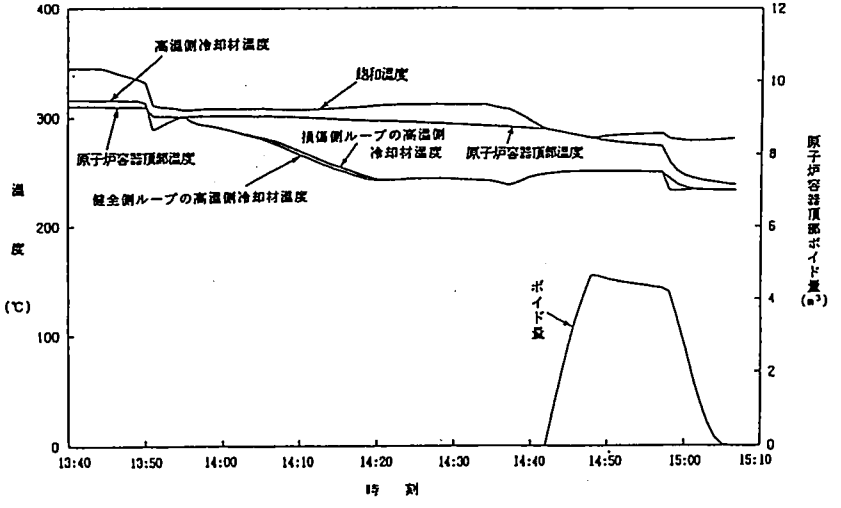


(注1) 13時50分から13時59分の間は1次冷却系の圧力からの換算値
(注2) 13時50分から13時59分の間は記録されていない。

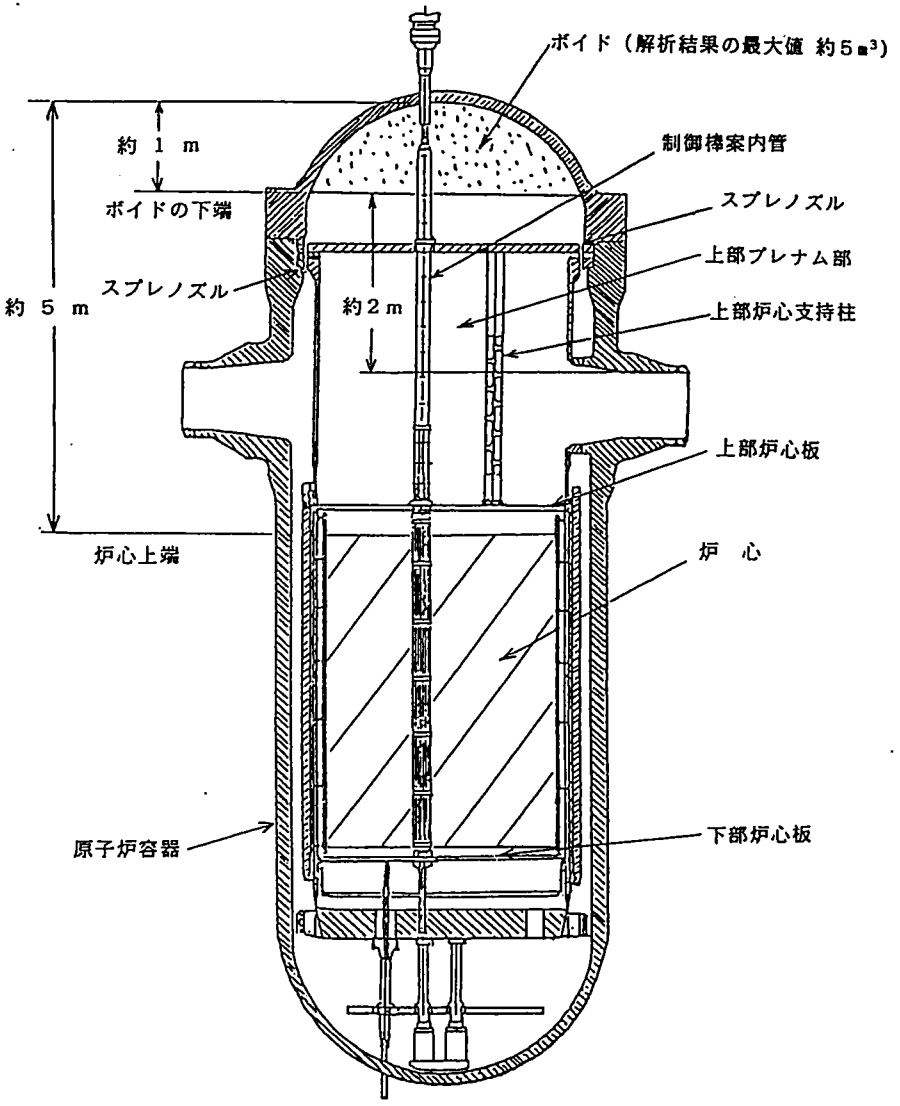
図－３．６．４．２　飽和温度、炉心出口温度の最大値、
損傷側ループの高温側及び低温側冷却材温度の推移



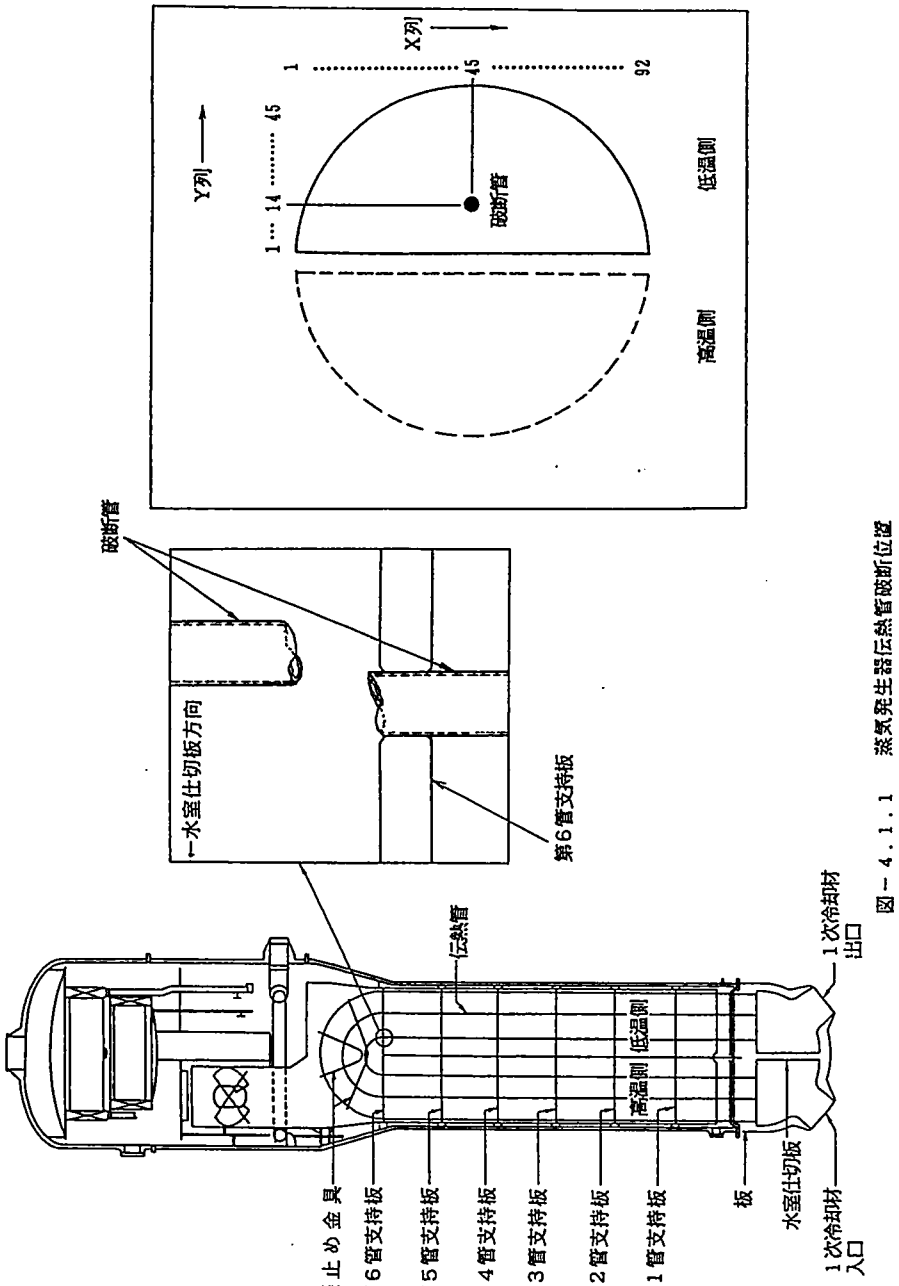
図－３．６．５．　１次冷却材の流量の解析結果



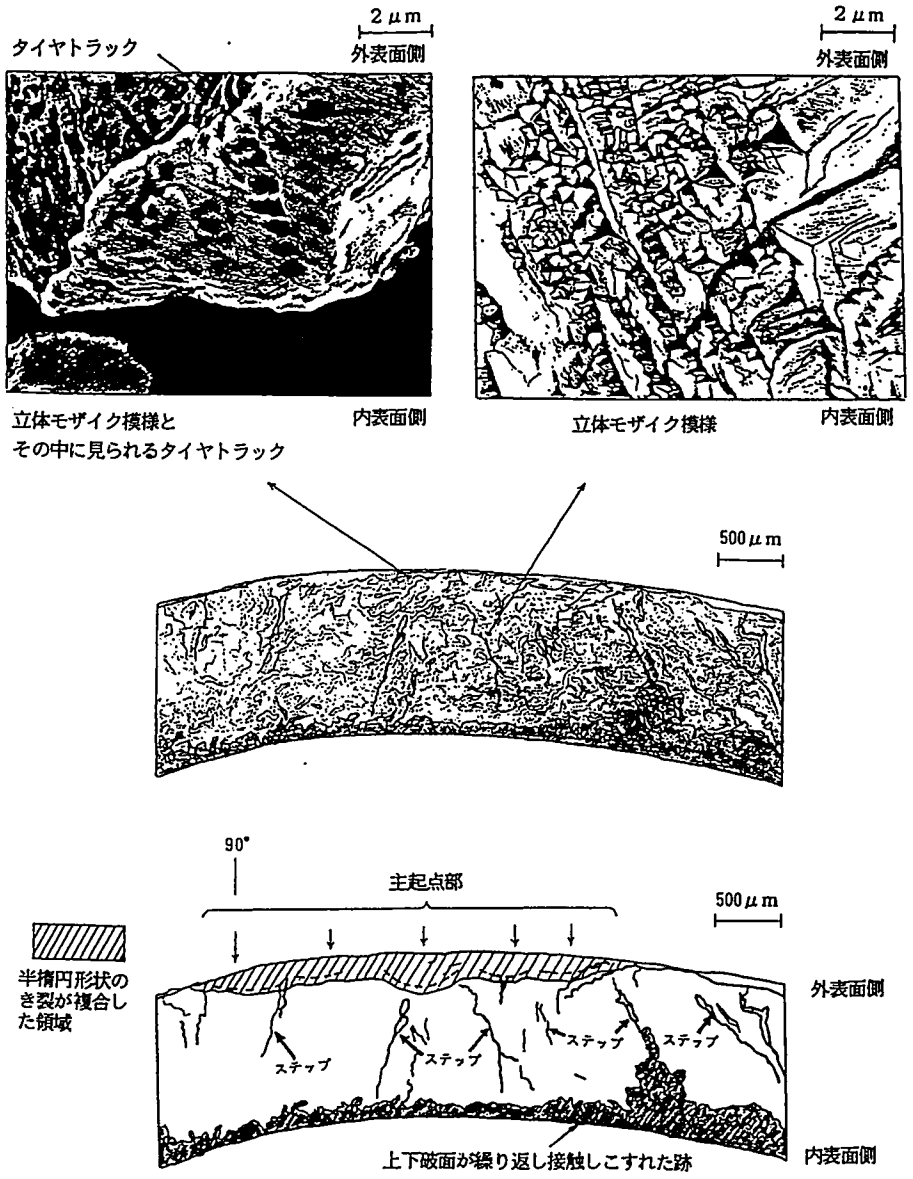
図－３．６．６　原子炉容器頂部におけるボイド量の解析結果



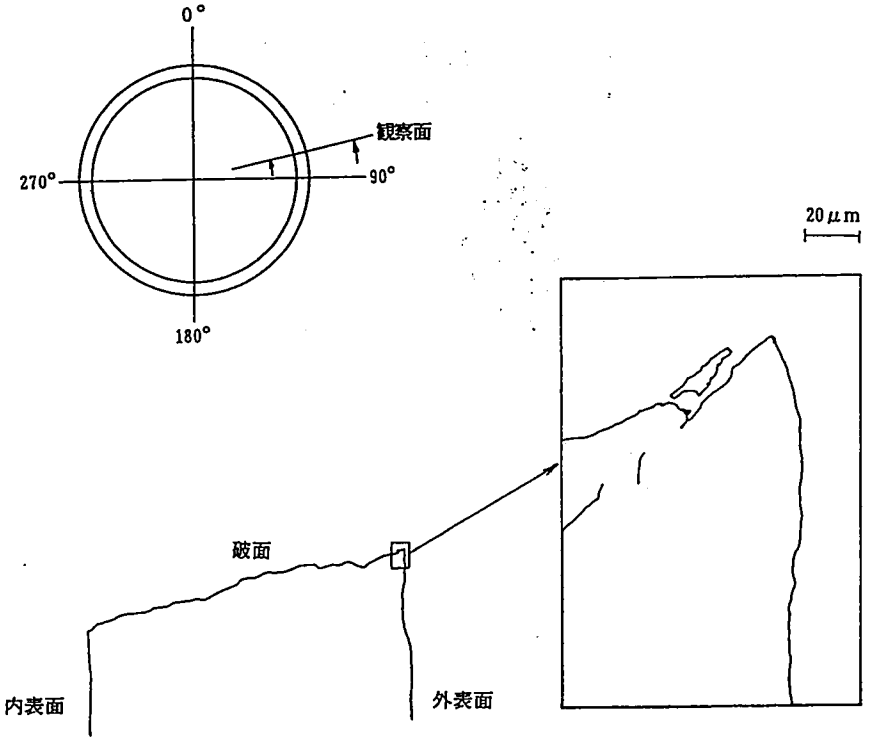
図－３．６．７　ボイド発生時のイメージ図



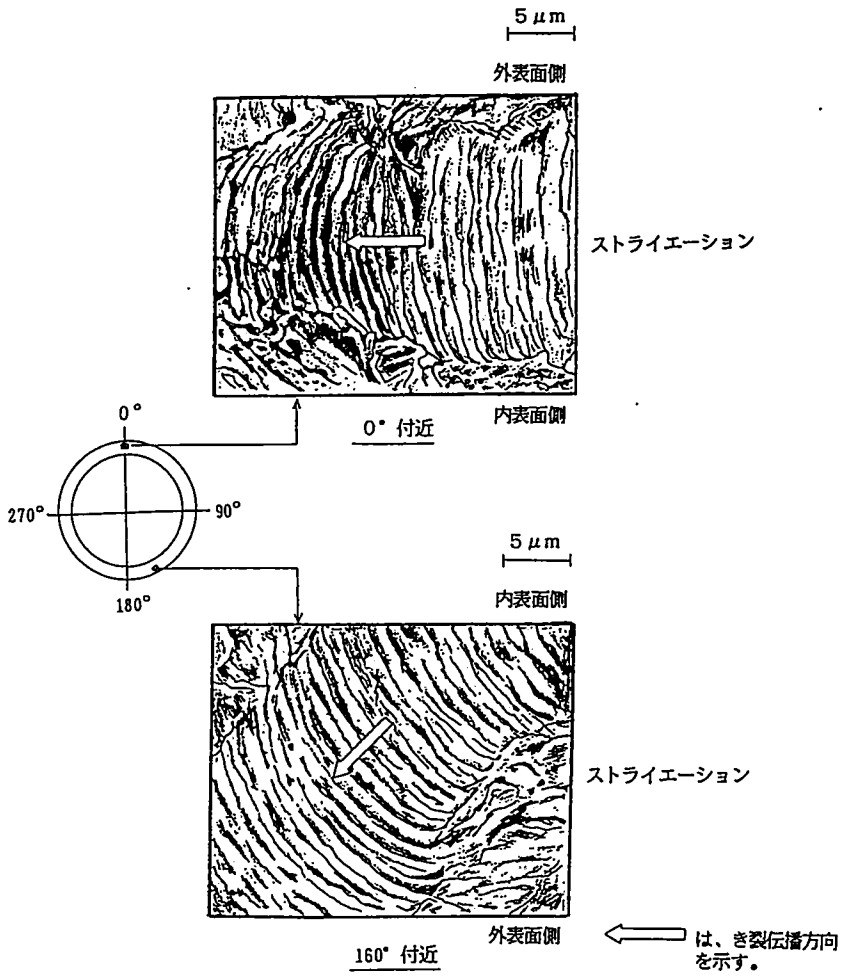
図－４．１．１　蒸気発生器伝熱管破断位置



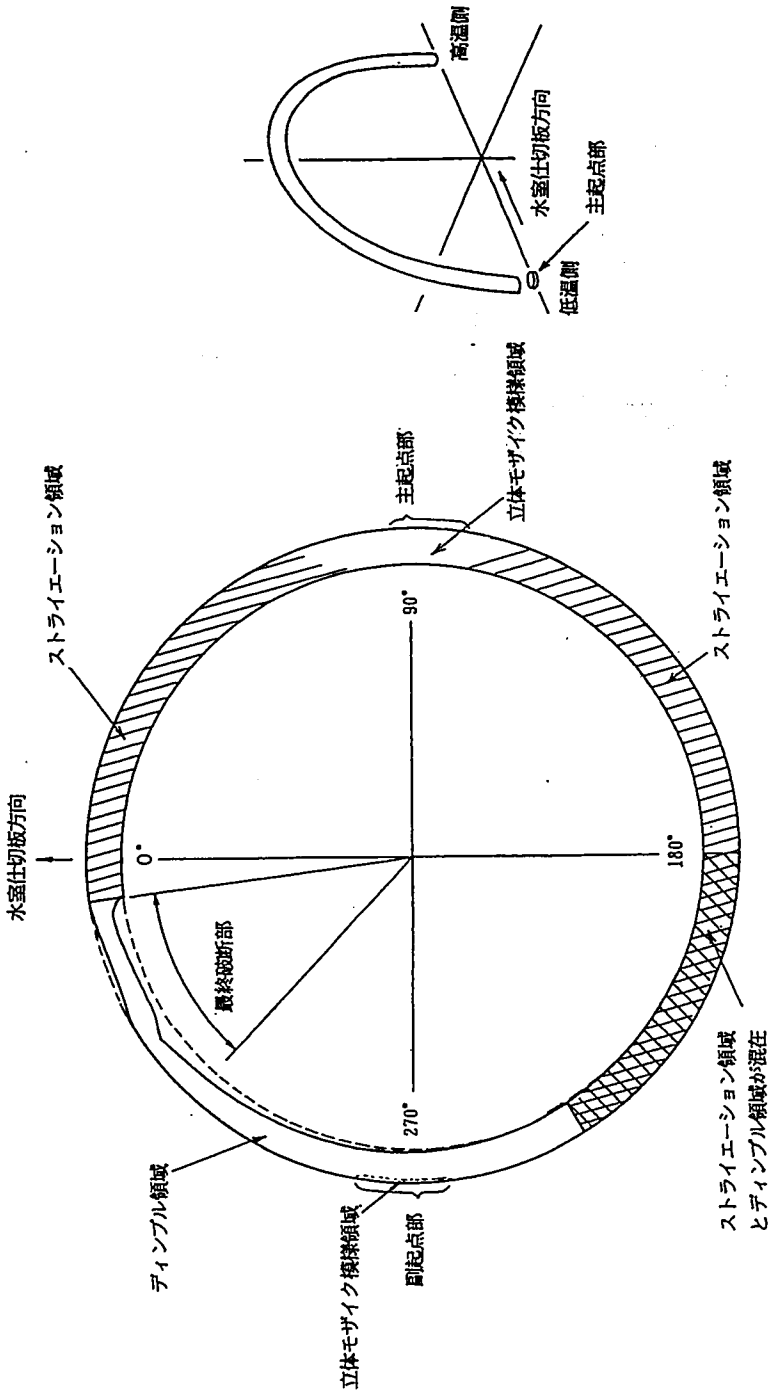
図－４．１．２　破面主起点部付近観察結果（下側破面）



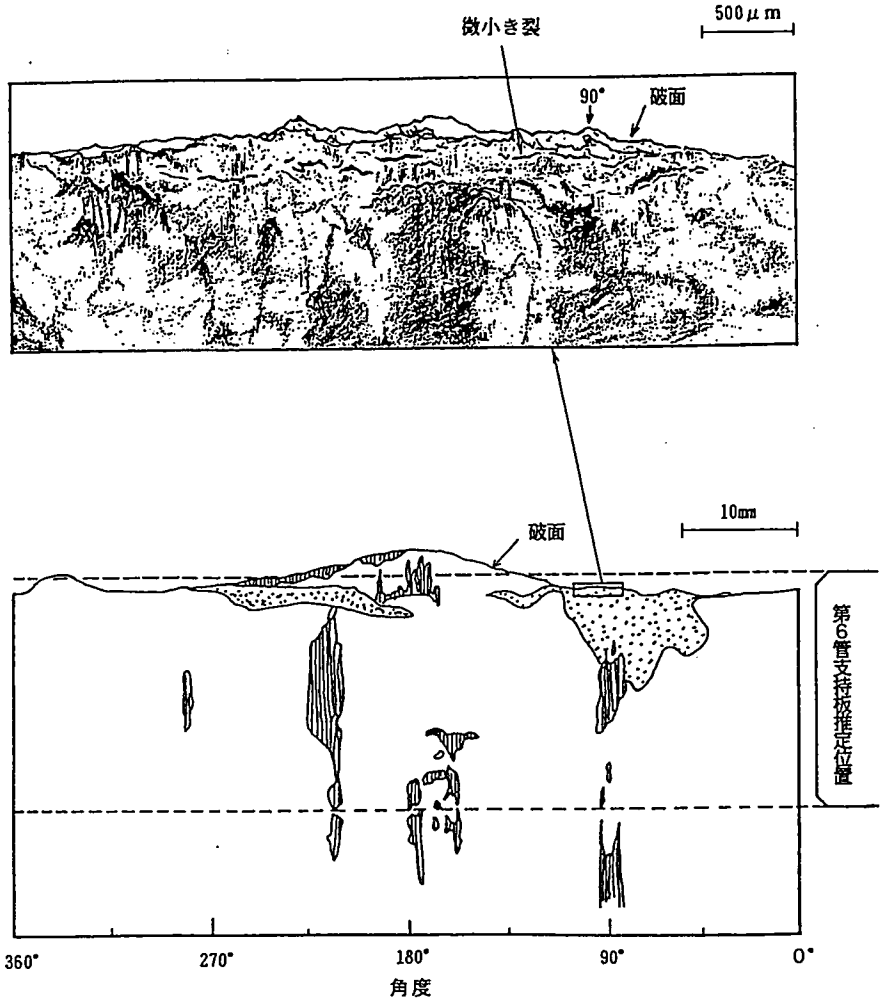
図－４．１．３　主起点部付近の断面ミクロ観察結果（下側破面）



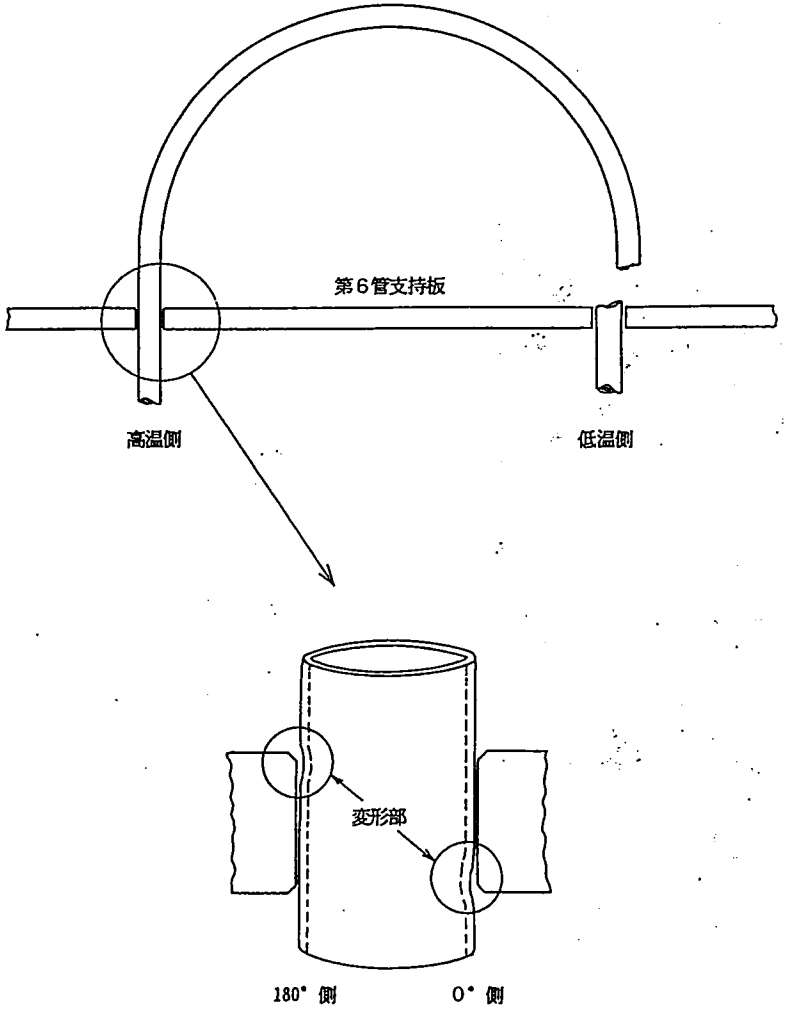
図－４．１．４　き裂伝播部破面観察結果（下側破面）



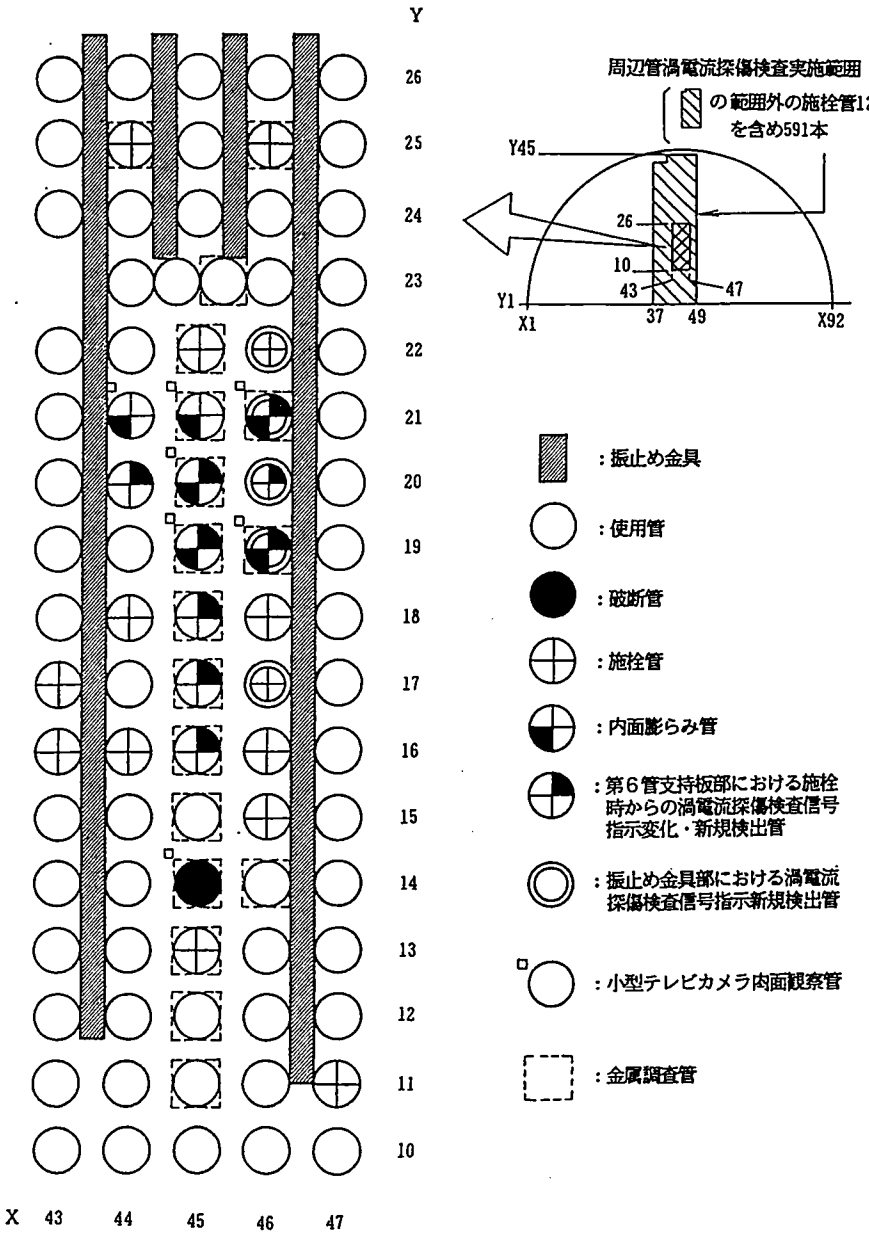
図－４．１．５　破面観察結果の概要

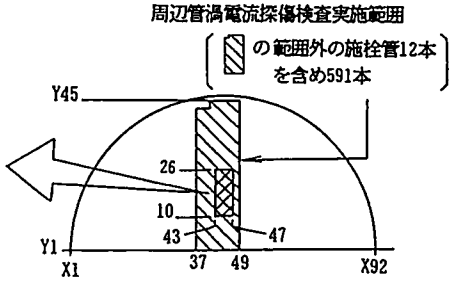


図－４．１．６　破断部の外表面観察結果（下側破面）

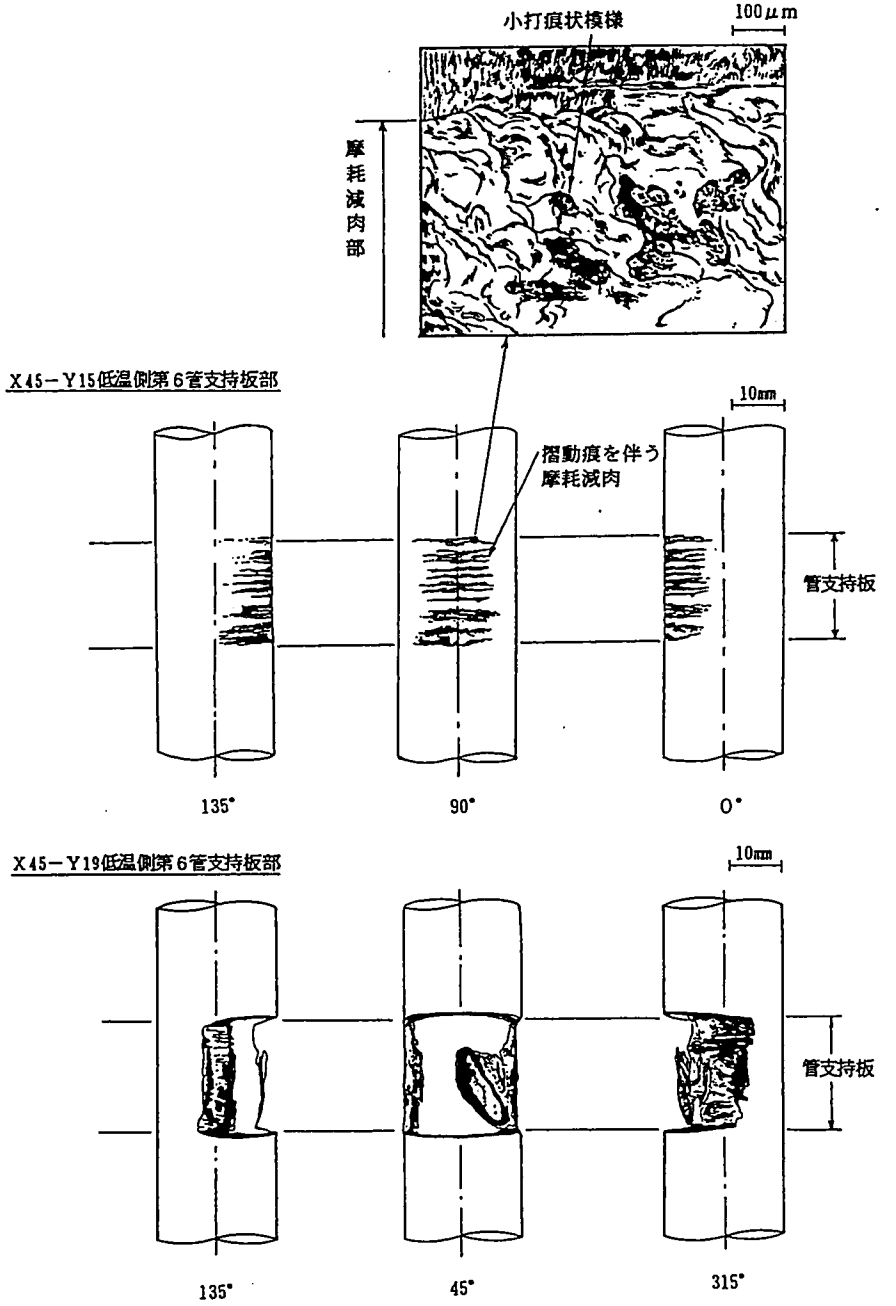


図－４．１．７　破断管高温側第６管支持板部の概略形状

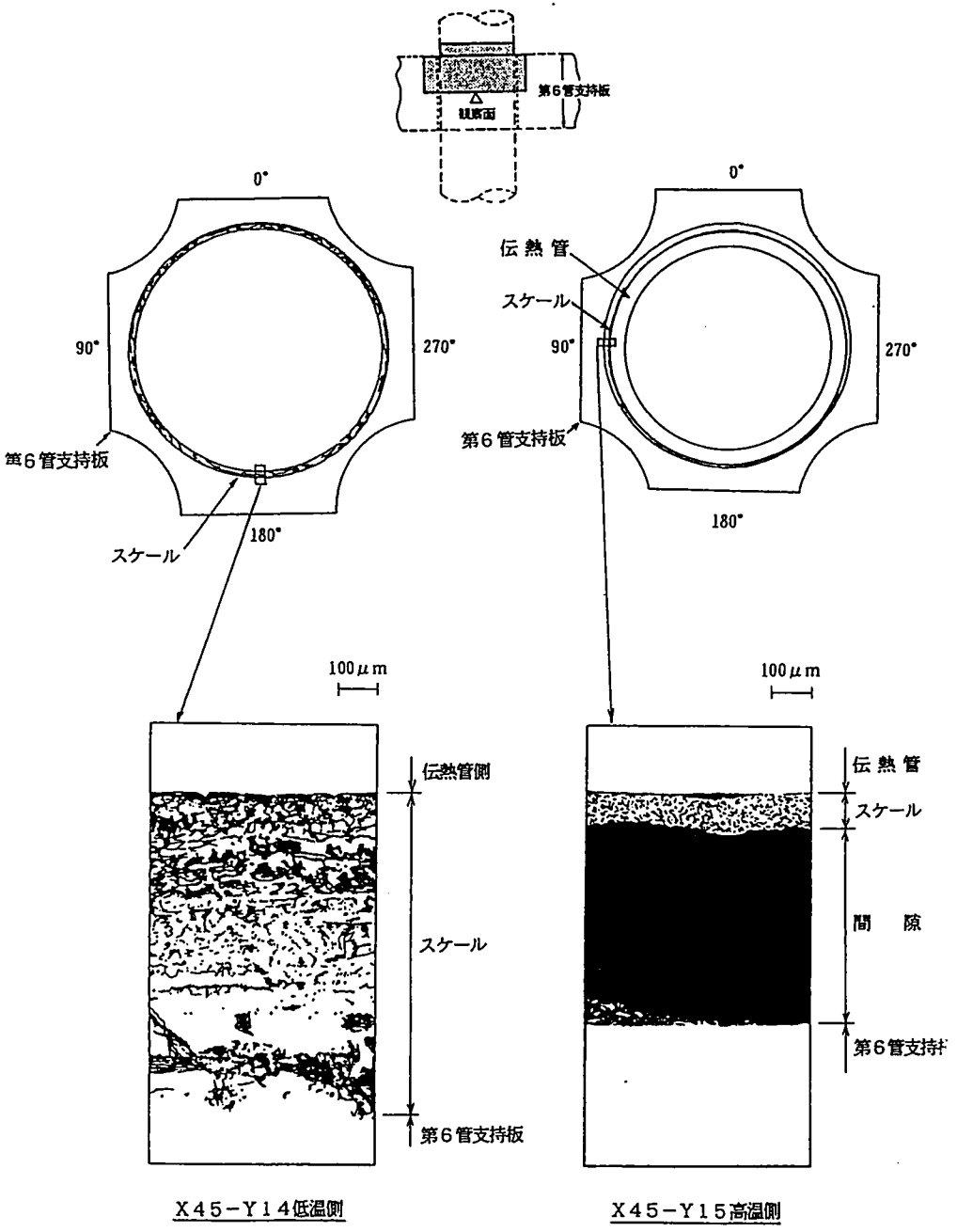




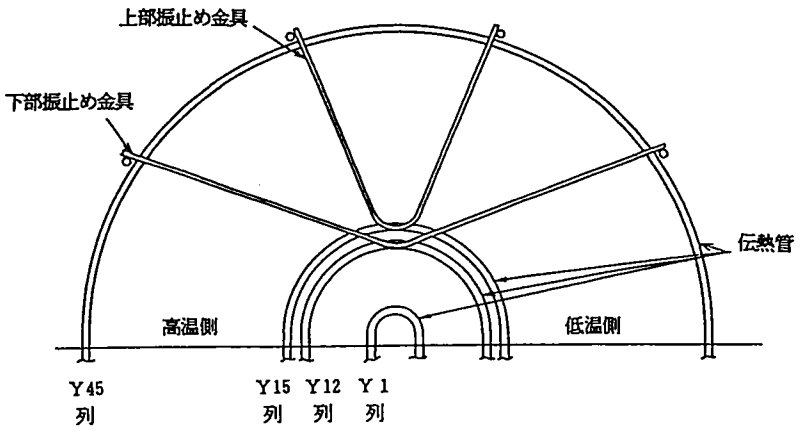
図－４．１．８　周辺管調査概要

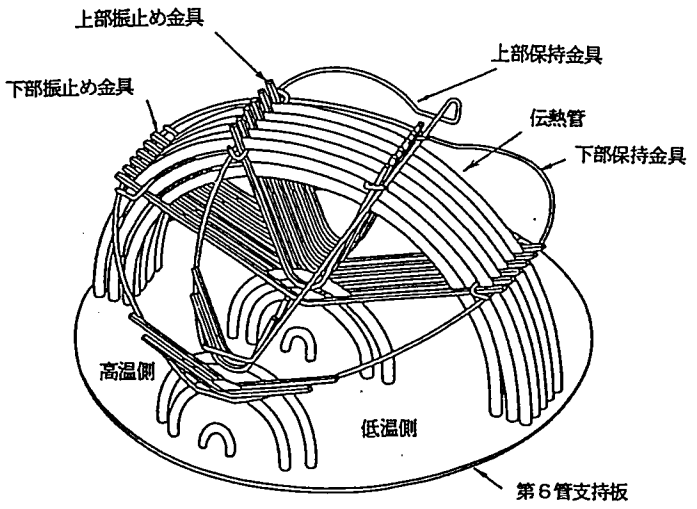


図－４．１．９　低温側第６管支持板部の摩耗減肉状況観察結果

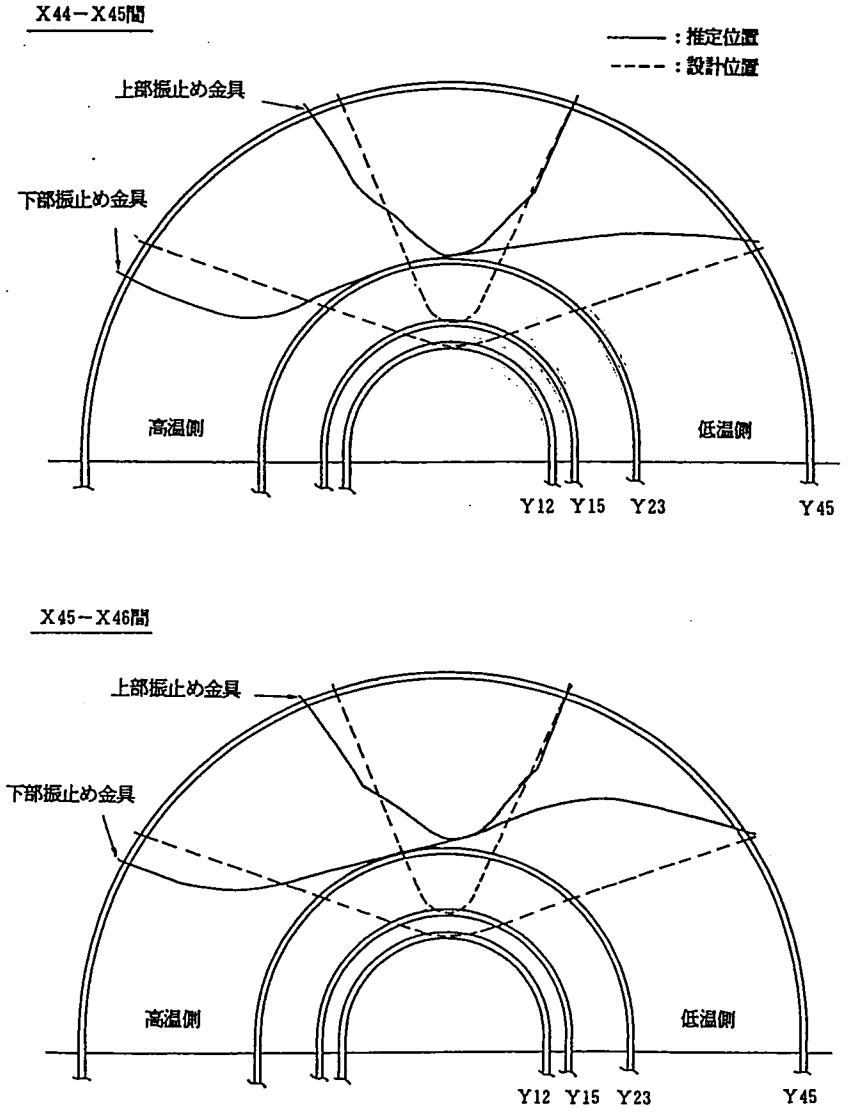


図－４．１．１０　第６管支持板の水平断面ミクロ観察結果（管支持板板厚中央）

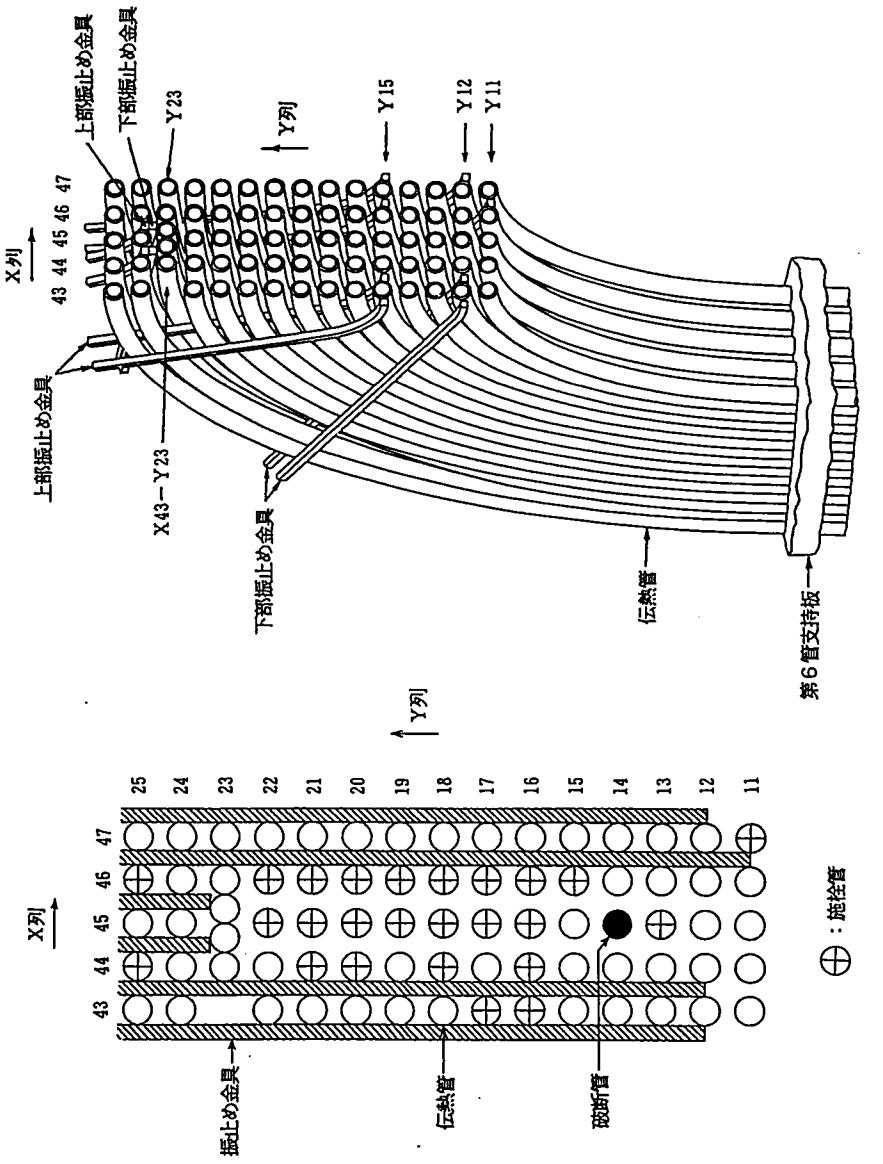




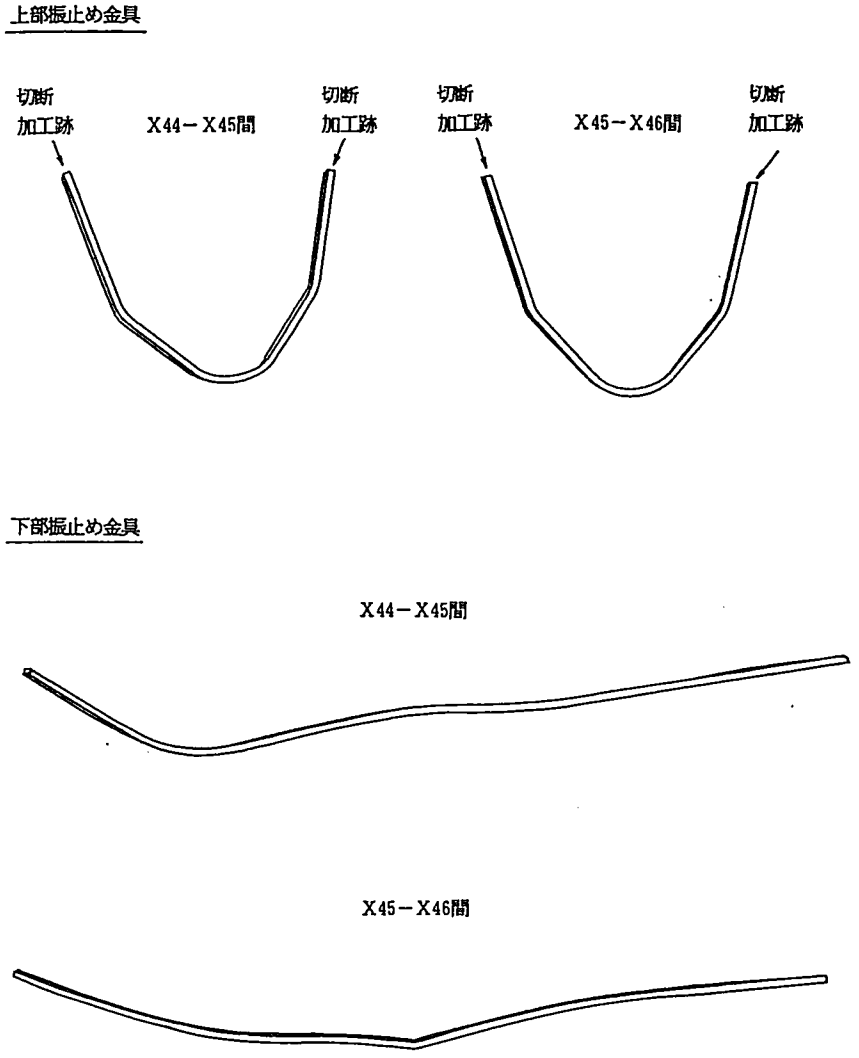
図－４．１．１１　蒸気発生器伝熱管振止め金具の概要



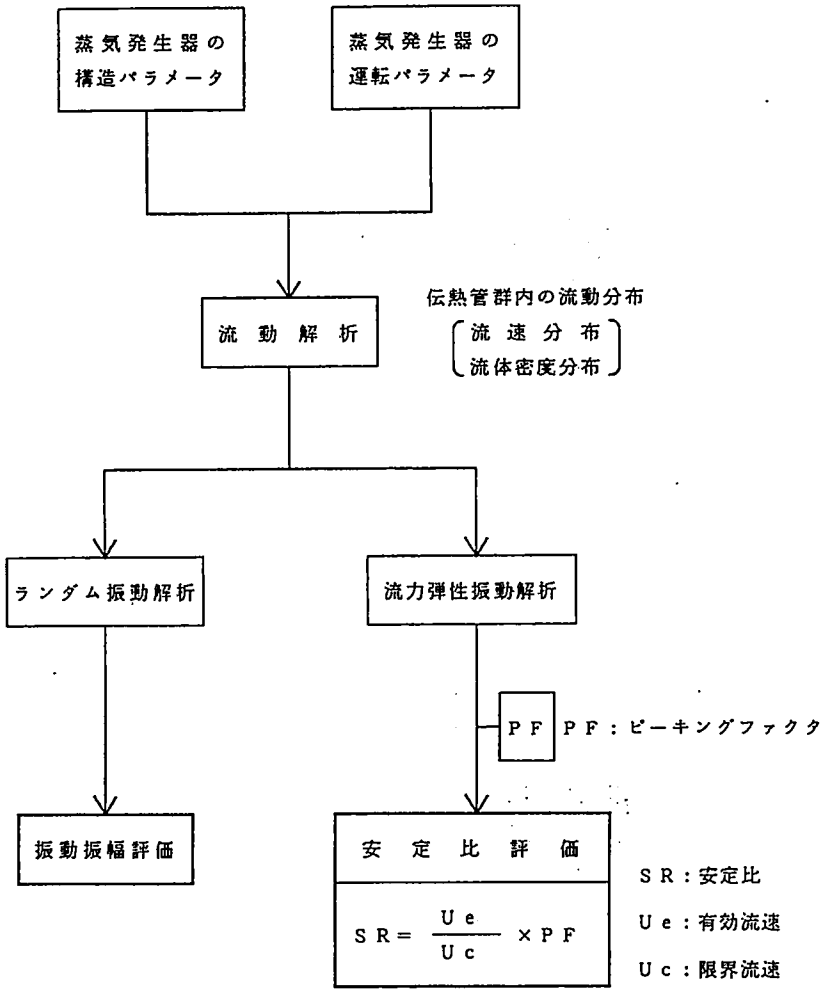
図－４．１．１２　振止め金具挿入形状の推定



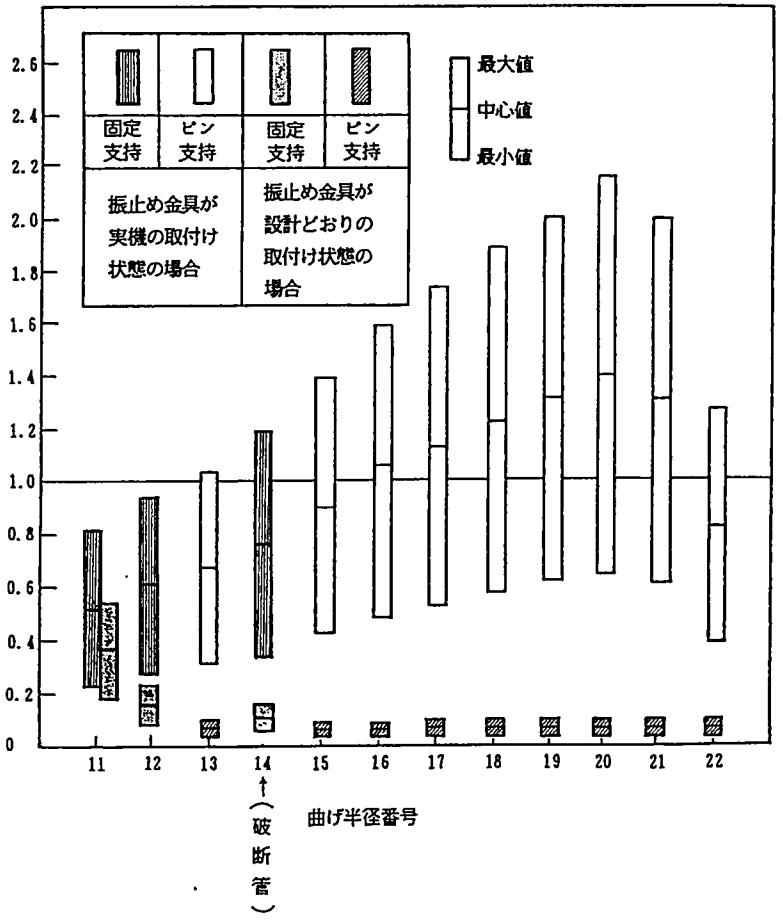
図－４．１．１３　振止め金具挿入状況の推定



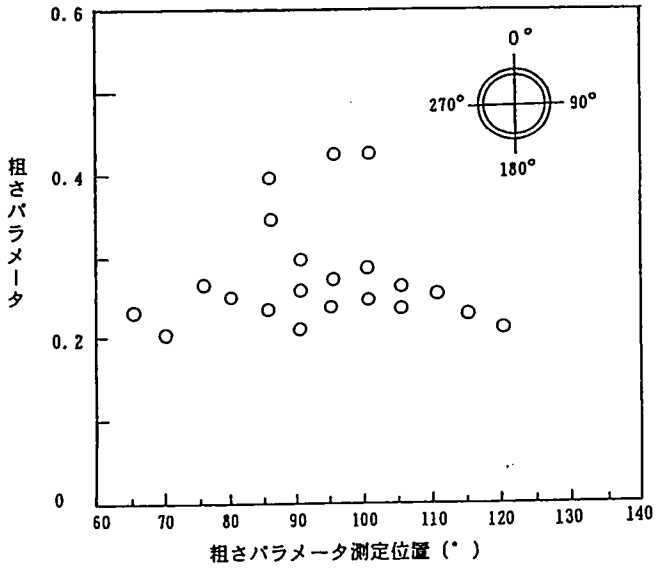
図－４．１．１４　　振止め金具取出し後の状況



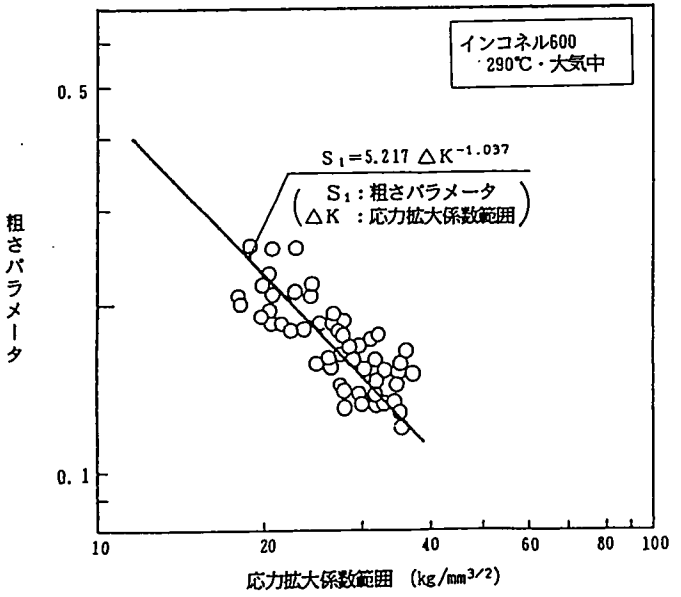
図－４．２．１　　流動励起振動解析手順の流れ



図－４．２．２　破断管及び周辺管の安定比

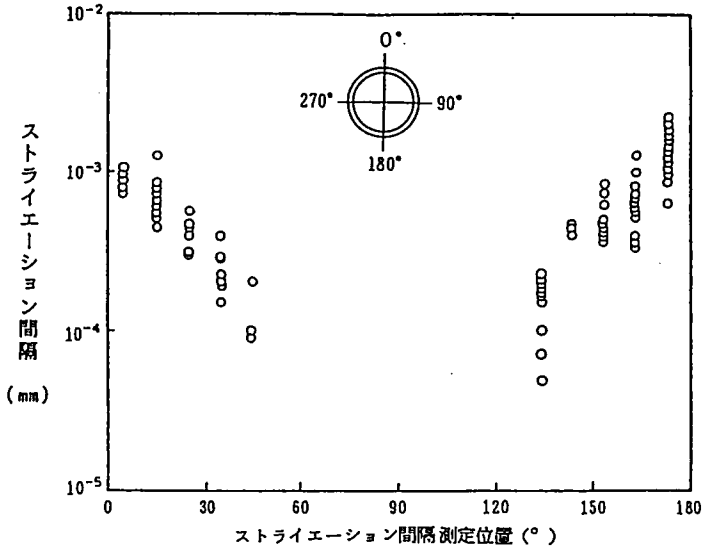


粗さパラメータ測定結果

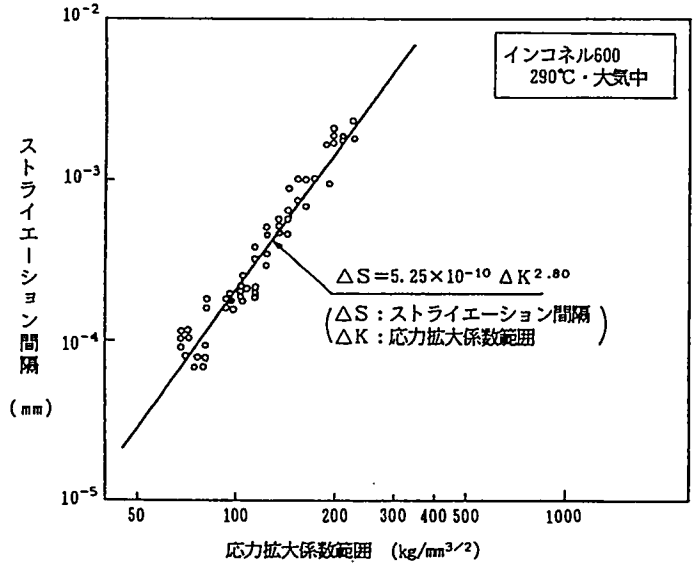


粗さパラメータと応力拡大係数範囲との関係

図－４．３．１　粗さパラメータの測定結果及び応力拡大係数範囲との関係

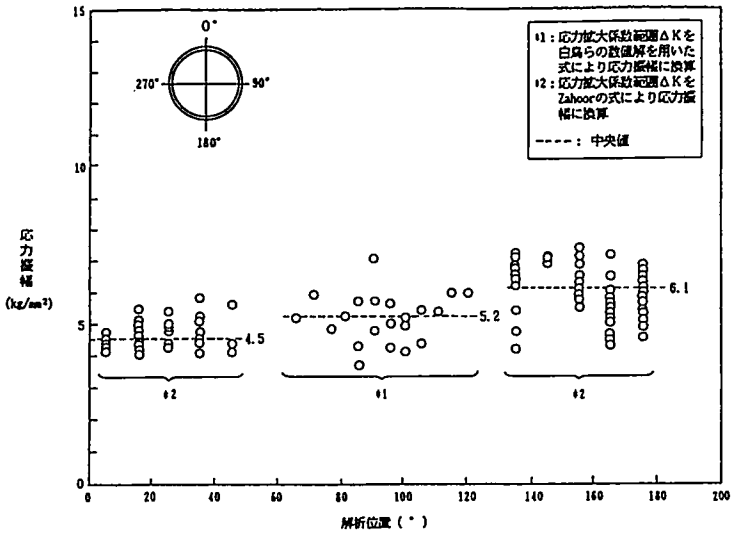


ストライエーション間隔測定結果

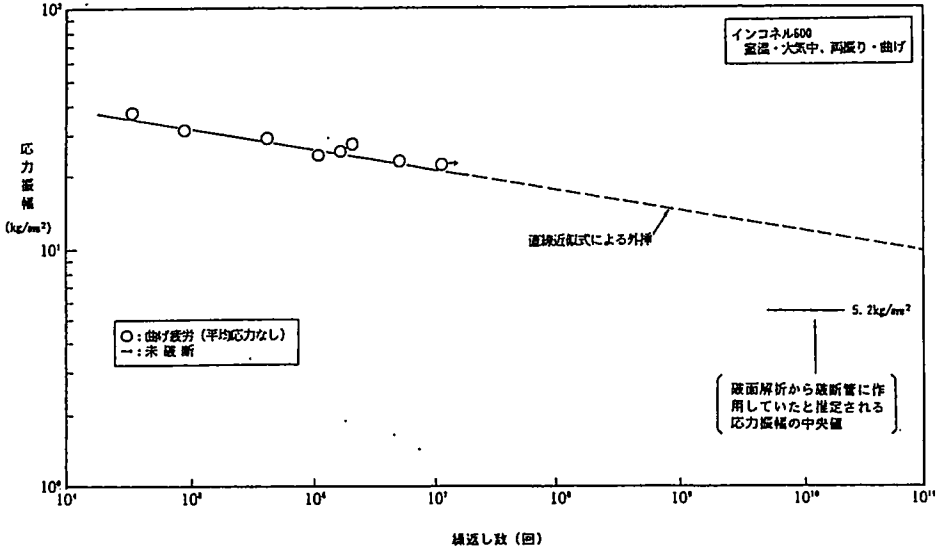


ストライエーション間隔と応力拡大係数範囲との関係

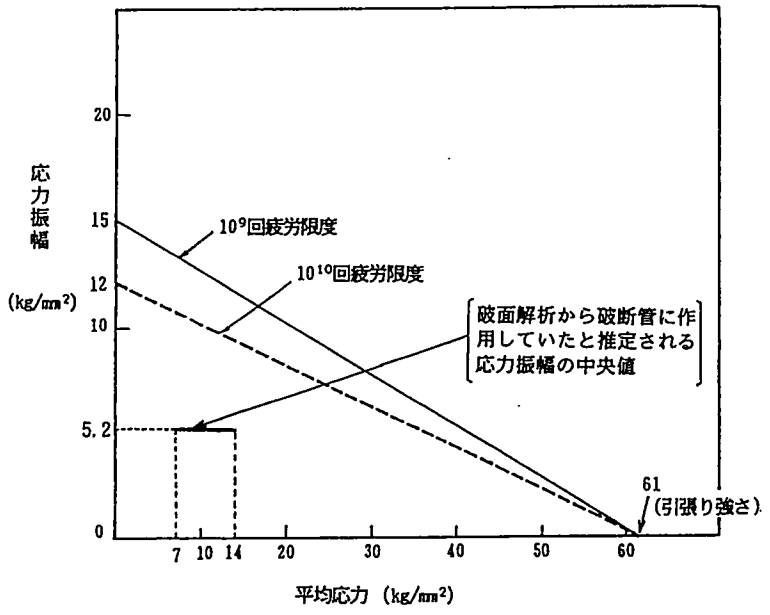
図－４．３．２　ストライエーション間隔の測定結果及び応力拡大係数範囲との関係



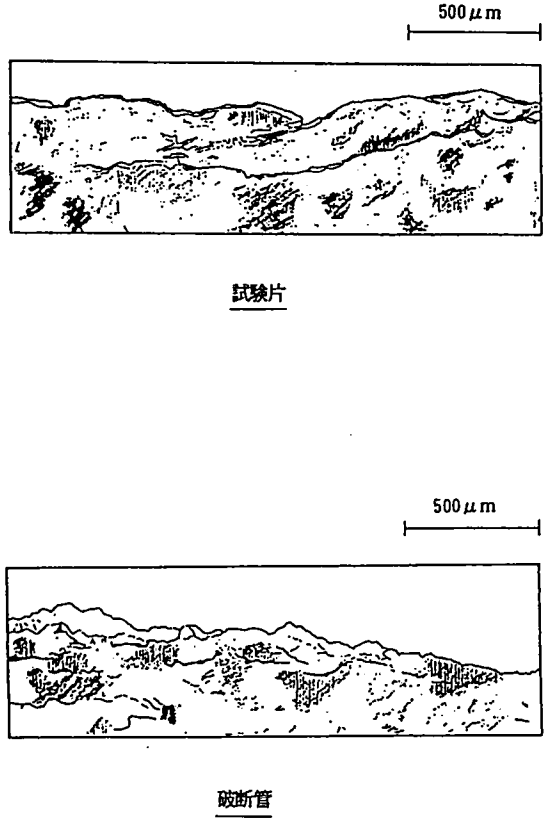
図－４．３．３　破面解析による応力振幅推定結果



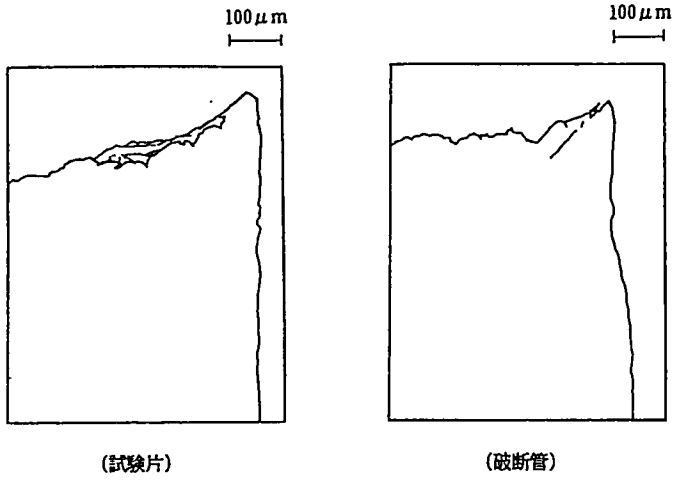
図－４．３．４　通常疲労強度試験結果



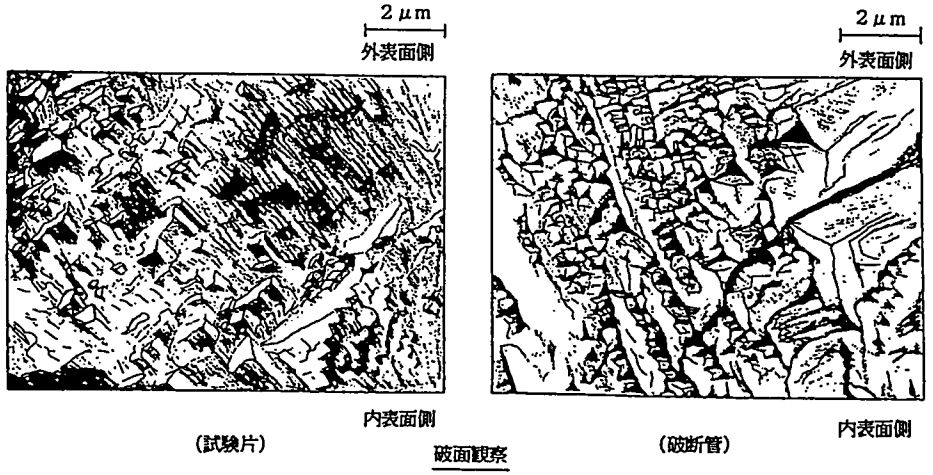
図－４．３．５　インコネル６００伝熱管の疲労限度線図



図－４．３．６　フレッチング疲労試験片と破断管の外表面観察結果

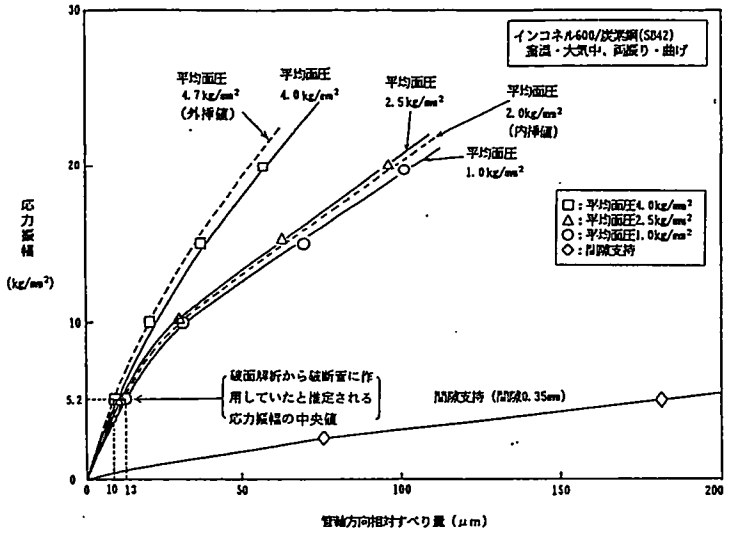


断面ミクロ観察

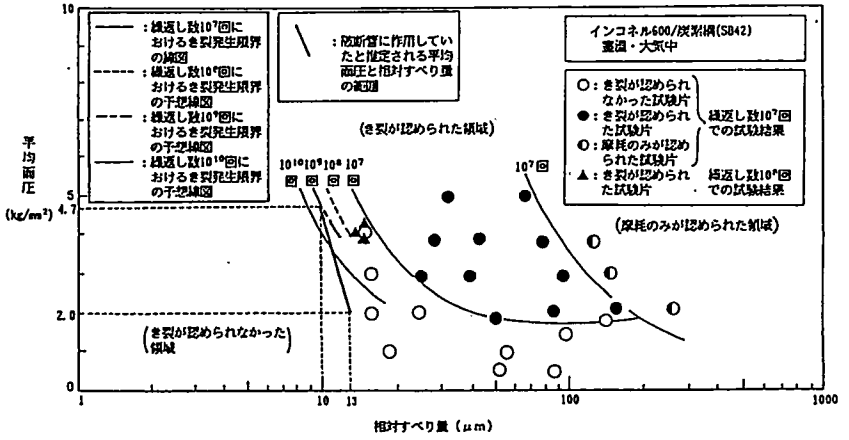


破面観察

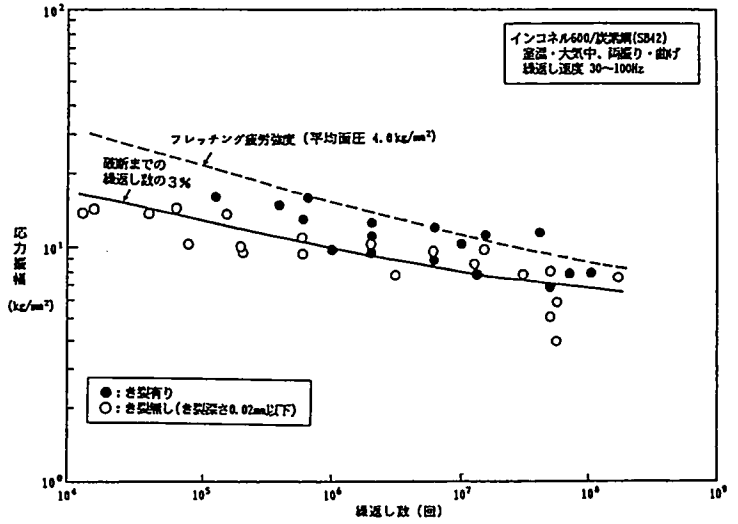
図－４．３．７　フレッチング疲労試験片と破断管の断面及び破面の詳細観察結果



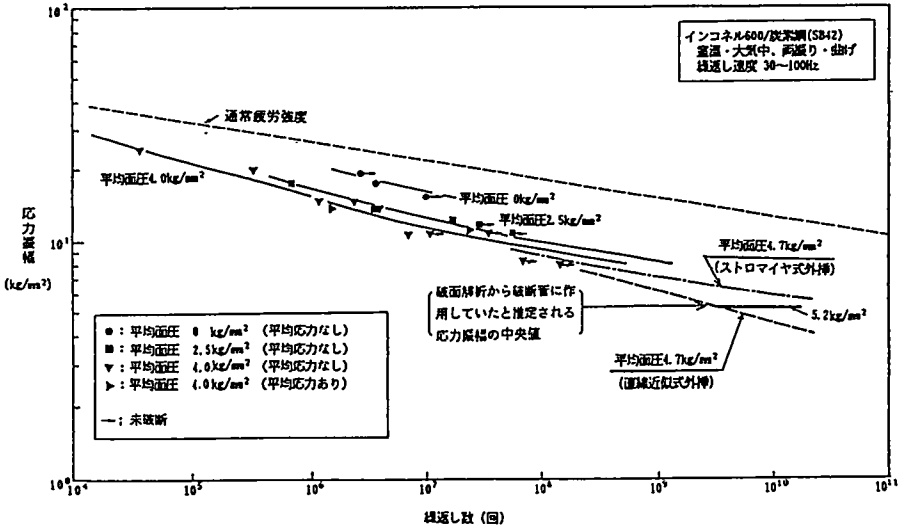
図－４．３．８　相対すべり量計測試験結果



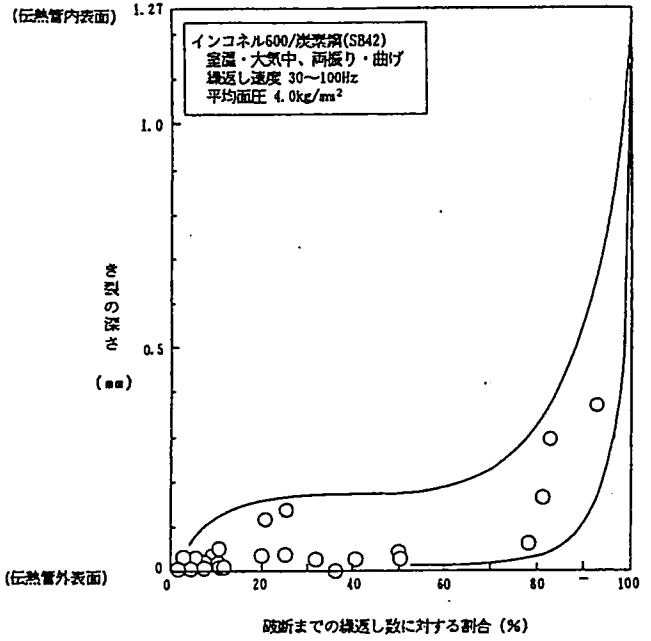
図－４．３．９　フレッチング疲労き裂発生限界試験結果



図－４．３．１０　フレッチング疲労き裂発生寿命試験結果



図－４．３．１１　フレッチング疲労試験結果



図－４．３．１２　　フレッチング疲労き裂の深さ方向伝播

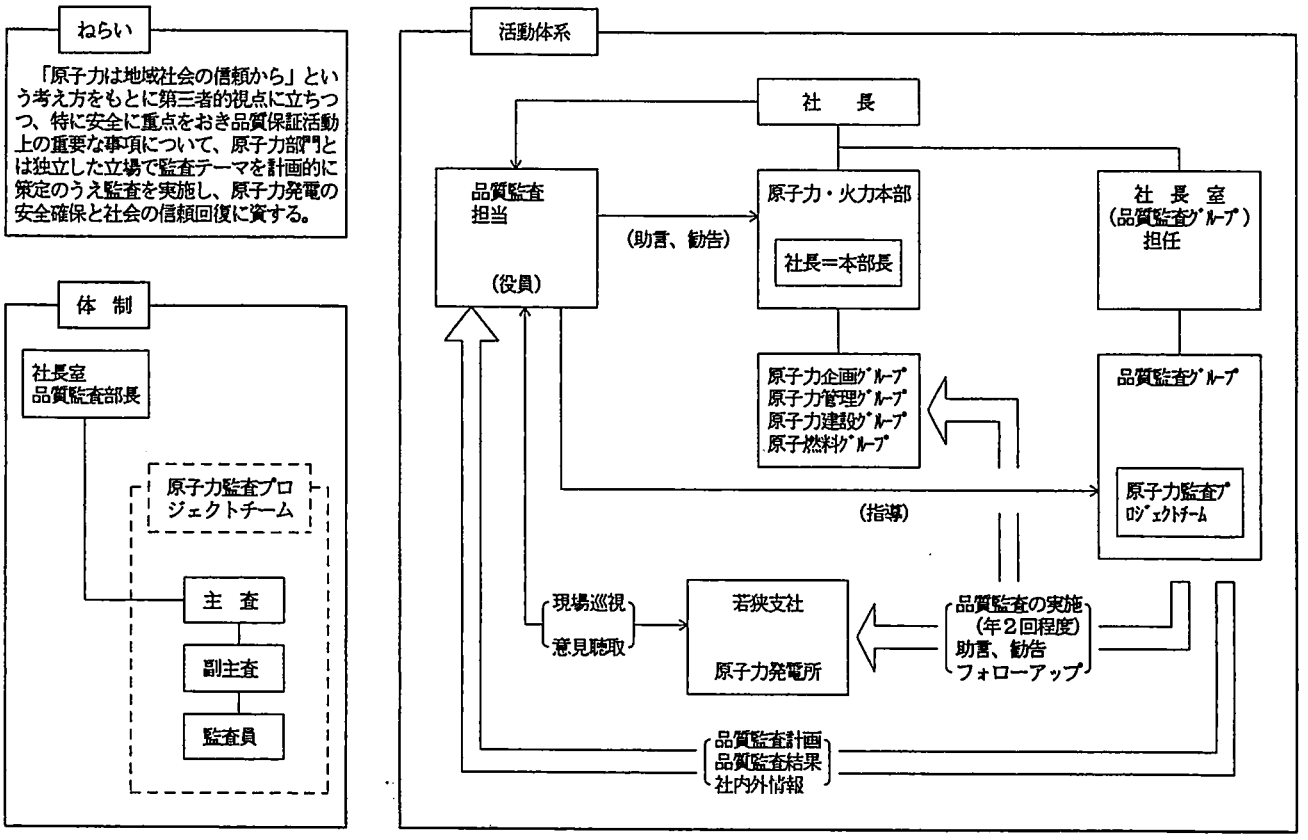
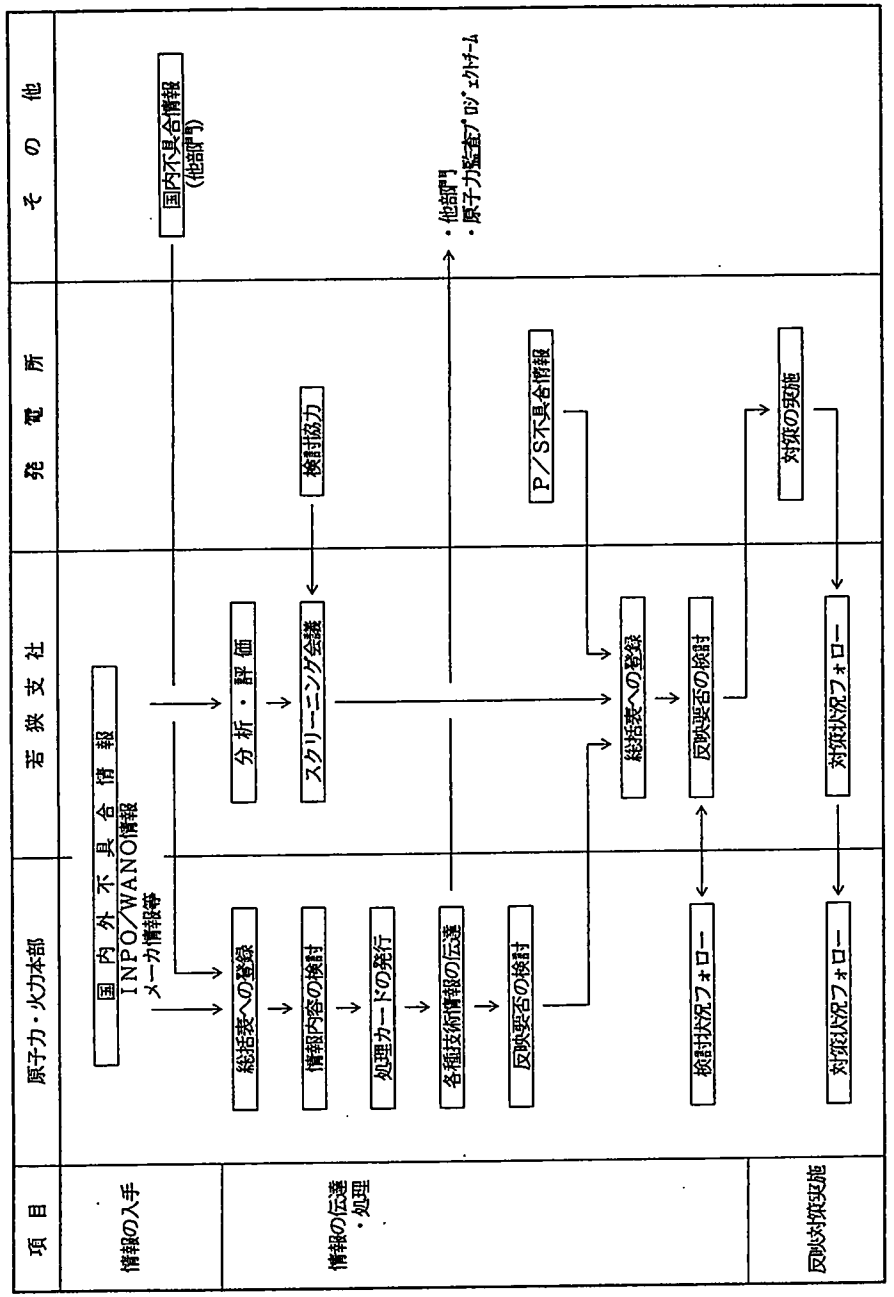


図-5．1．1 原子力監査プロジェクトチームの業務体系

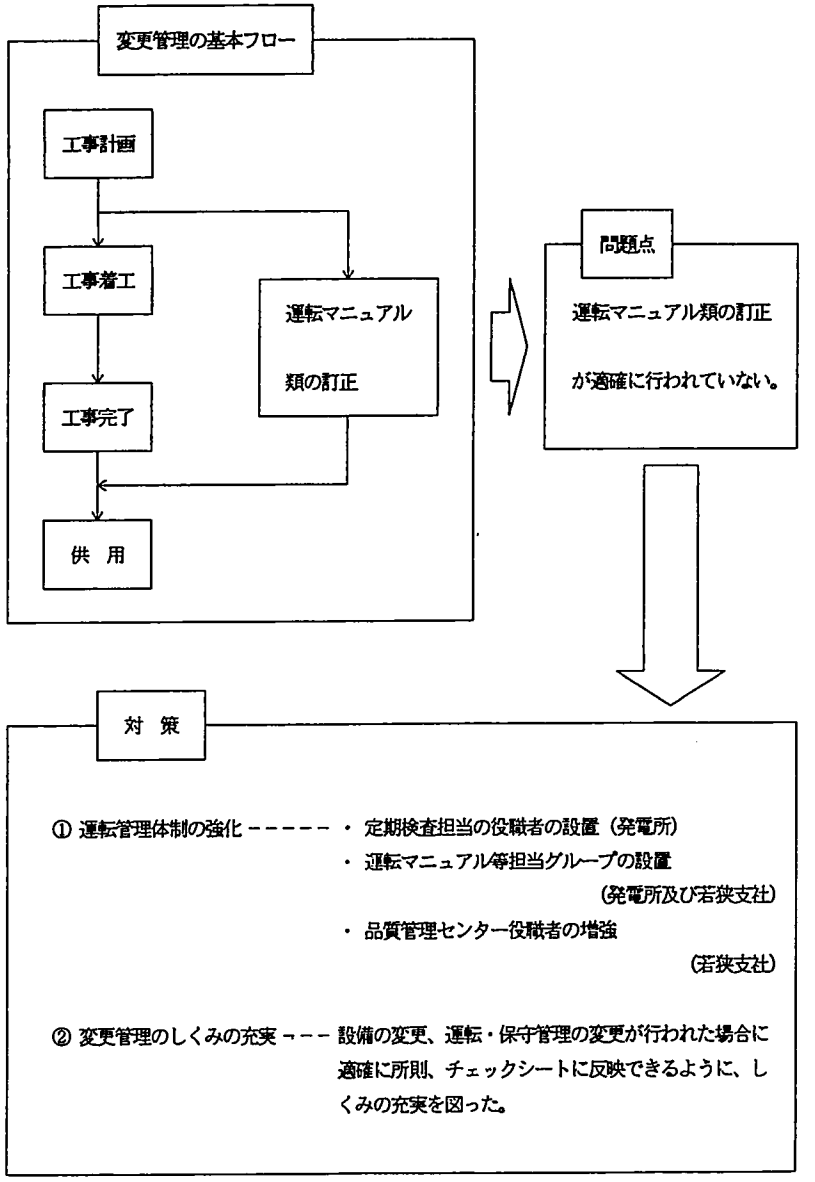
	変更前	変更後
美浜発電所	運転室長 ― 当直課長 ― 当直主任 ― 当直班長 運転室長 ― 業務係長 ＊所附（ES担当） ＊：エンジニアリングシミュレータ	発電室長 ― 当直課長 ― 当直主任 ― 当直班長 発電室長 ― 運営係長 定検担当 発電室長 ― 運営係長（2名） 発電所課長（所則・ES担当）
若狭支社	品質管理センター 所長 ― 副長 ― 主任（1名） 発電課長 ― 副長（運用担務） 発電課長 ― 副長（調査担務）	品質管理センター 所長 ― 副長 ― 主任 3名 発電課長 ― 副長（運用担務） 発電課長 ― 副長（調査担務） 発電課長 ― 副長（発電担務）

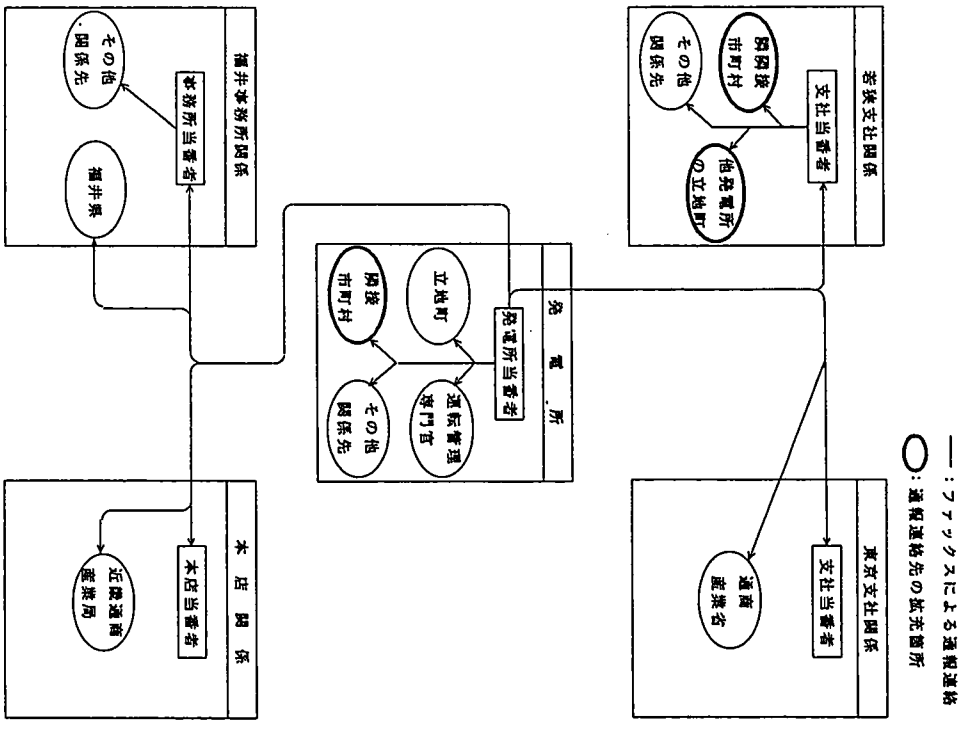
図-5．1．2 運転管理体制の強化組織図



図－5．1．3　各種技術情報処理業務フロー

図－5．1．4　変更管理について





図－5．3．1　異常事象発生時の通報連絡体系概要図（休祭日の例）

目　的

- 社内外の頭脳を結集し、社会及び技術面から専門的、客観的研究を行う。
- 第三者的立場から、電力会社の安全システムについてクロスチェックを行う。

ねらい

- 原子力と社会の調和を目指した社会システムについての研究
- 原子力発電の安全技術の向上を目指した現場に密着した技術システムについての研究

概　要

<研究所の形態>

- 研究所の運営に独立性、自主性を持たせるため別会社（株式会社）を設立する。
- 研究所
  社会システム研究所：社会と原子力の調和に関する研究
  技術システム研究所：現場に密着した安全技術の研究
- 独立、自由、かつ第三者的な研究を推進し、その研究成果に基づいて直接、当社に直言する。
- 社外有識者（海外含む）および中立なオピニオンリーダー等を顧問に招へいし、研究所に研究計画、運営に対する指導・助言を与えることにより、国民の立場に立った研究をめざす。

<研究の運営>

- 研究所自ら研究を実施するものの他に、大学等の研究機関にテーマ等を公募する方式および若手研究家に自由に研究を展開させていく方式の活用も検討する。
- 研究テーマに応じ、各分野の専門家に研究顧問を委嘱する。

図－5．4．1　原子力安全システム研究所の概要

添付－資料

資料－目次

		ページ
資料-1.1	美浜２号機の設備概要	1
資料-2.1.1	所内電源喪失に関する考え方について	6
資料-2.2.1	加圧器内流体挙動の解析について	9
資料-2.2.2	１次冷却系の圧力挙動に関する考察	19
資料-2.2.3	加圧器水位上昇と１次冷却系（ＲＣＳ）への注入量のバランスに関する計算	22
資料-2.3.1	運転操作に関する考察	29
資料-2.4.1.1	主蒸気隔離弁の弁棒グランドパッキン摺動部への付着物の成分分析	40
資料-2.4.1.2	主蒸気隔離弁弁棒グランドパッキン摺動部の鏡面仕上げ要領	43
資料-2.4.1.3	他の国内ＰＷＲプラントの主蒸気隔離弁に関する調査	45
資料-2.4.1.4	アスベストパッキン油脂分の付着性確認試験	47
資料-2.4.1.5	主蒸気隔離弁グランドパッキン摺動抵抗測定試験	51
資料-2.4.1.6	黒鉛パッキン付着による主蒸気隔離弁グランドパッキン摺動抵抗測定試験	56
資料-2.4.1.7	主蒸気隔離弁不完全閉の推定メカニズム	62
資料-2.4.4.1	通報連絡状況に関する主な経緯	65
資料-2.4.4.2	見学者対応状況	67
資料-3.1.1	今回の事象の再現解析の手法について	69
資料-3.1.2	今回の再現解析に係るモデルの変更について	81
資料-3.1.3	損傷側蒸気発生器主蒸気隔離弁から２次側下流への蒸気流出量について	89
資料-3.1.4	高圧注入ポンプの設計について	92
資料-3.2.1	今回の事象における炉心の健全性評価のための解析方法	97
資料-3.3.1	放射性物質の放出量の算出方法について	109
資料-3.3.2	実効線量当量評価におけるトリチウムの取扱いについて	117
資料-3.3.3	実効線量当量の算出に用いたデータ	119
資料-3.3.4	モニタリングポストの設置状況について	122
資料-3.3.5	海へ放出された放射性物質による実効線量当量について	126
資料-3.5.1.1	ＰＴＳに係る今回事象の経過	128
資料-3.5.1.2	１次冷却系低温側配管注入流量	131
資料-3.5.1.3	自然循環がある場合の流動状況について	134
資料-3.5.1.4	１次冷却材温度記録	136
資料-3.5.1.5	混合挙動の把握試験体系図	139
資料-3.5.1.6	破壊力学による原子炉容器の健全性評価手法	142
資料-3.5.1.7	ＰＴＳに関する今回の解析条件	145
資料-3.5.2.1	熱疲労に関する解析条件の詳細	148
資料-3.6.1	燃料検査結果	183
資料-3.6.2	炉心出口温度と冷却材配管内の冷却材温度の推移に関する検討	186
資料-3.6.3	１次冷却系への水の注入量及び損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量（解析開始時点から安全注入の開始時点まで）	199
資料-3.6.4	１次冷却系への水の注入量及び損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量（安全注入の開始時点から安全注入開始後５分の時点まで）	203
資料-3.6.5	１次冷却系への水の注入量及び損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量（安全注入の開始後５分の時点から減圧開始の時点まで）	208
資料-4.1.1.1	破断管調査結果	212
資料-4.1.1.2	蒸気発生器伝熱管製造・組立履歴調査結果	282
資料-4.1.2.1	周辺管調査結果	297
資料-4.1.2.2	破断管による隣接管への影響調査結果	368
資料-4.1.3.1	管支持板調査結果	387
資料-4.1.3.2	伝熱管振動計測結果	398
資料-4.1.4.1	２次系水質履歴調査結果	424
資料-4.1.4.2	水素脆化評価結果	430
資料-4.1.4.3	照射脆化評価結果	434
資料-4.1.5.1	振止め金具に関する各種調査結果	438
資料-4.2.1.1	１次系流体による不安定振動の可能性の検討結果	517
資料-4.2.1.2	カルマン渦による振動の可能性の検討結果	522
資料-4.2.2.1	流動励起振動解析手法について	524
資料-4.2.2.2	美浜２号機流動励起振動解析結果	542
資料-4.3.1.1	伝熱管管支持板部の応力解析結果	556
資料-4.3.1.2	疲労き裂伝播試験結果	563

資料-4.3.1.3　粗さパラメータを基にした作用応力推定結果　570
資料-4.3.1.4　ストライエーション間隔を基にした作用応力推定結果　579
資料-4.3.1.5　疲労強度文献調査結果　586
資料-4.3.1.6　ｲﾝｺﾈﾙ600伝熱管の通常疲労強度とフレッチング疲労強度試験結果　592
資料-4.3.1.7　フレッチング疲労文献調査結果　604
資料-4.3.1.8　伝熱管のすべり計測試験結果　614
資料-4.3.1.9　フレッチング限界面圧－すべり線図試験結果　620
資料-4.3.2.1　渦電流探傷検査記録による管支持板クレビス部閉塞時期の推定結果　625
資料-4.3.2.2　Ｘ４５列伝熱管の摩耗解析結果　629
資料-4.3.2.3　酸化皮膜厚さからの破面形成時期の検討結果　641
資料-4.3.2.4　フレッチング疲労き裂発生寿命試験結果　646
資料-4.3.2.5　定検時に潜在していたき裂寸法の推定結果　654
資料-4.3.2.6　周方向疲労き裂検出性確認試験結果　657
資料-4.3.2.7　き裂貫通から破断までの時間の検討結果　660
資料-4.3.2.8　Ｕ字管疲労破断試験結果　668
資料-5.1.1　取替え新蒸気発生器の改良点について　677
資料-5.1.2　主蒸気隔離弁弁棒摺動部の保守管理の改善について　680
資料-5.1.3　主蒸気隔離弁閉弁機能の改善について　682
資料-5.1.4　加圧器逃がし弁制御用空気系統の改善について　685
資料-5.1.5　安全機能を阻害する可能性のある制御用空気系統手動弁の配置見直しについて　687
資料-5.1.6　手動弁の管理に係る改善について　691
資料-5.1.7　プラント起動前点検に係る改善について　694
資料-5.1.8　運転マニュアルの充実について　696
資料-5.1.9　蒸気発生器伝熱管の漏洩監視モニタリングシステムの改善　698
資料-5.1.10　プラント計算機の改善対策について　700
資料-5.1.11　原子炉水位計の概要について　702
資料-5.1.12　主蒸気放射線計測装置（主蒸気管モニタ）の概要について　705
資料-5.1.13　安全注入信号発信時の常用母線への給電方法の改善について　707
資料-5.3.1　見学者の対応方法について　710
資料-5.3.2　異常な事象発生時の放出放射能量等評価システムについて　712
資料-6.1.1　長期停止に伴う機器の保全管理について　716
資料-6.1.2　プラント起動にあたっての健全性確認について　721

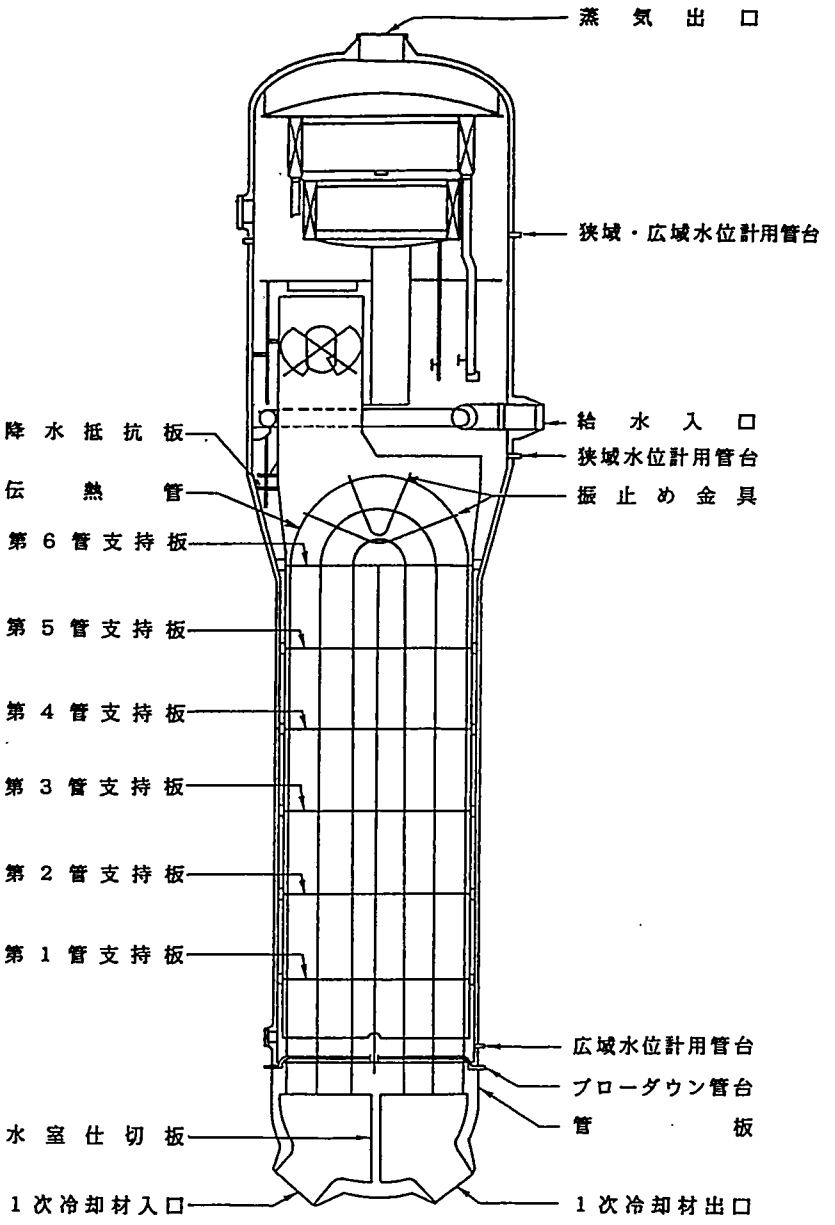
資料　1

美浜２号機の設備概要

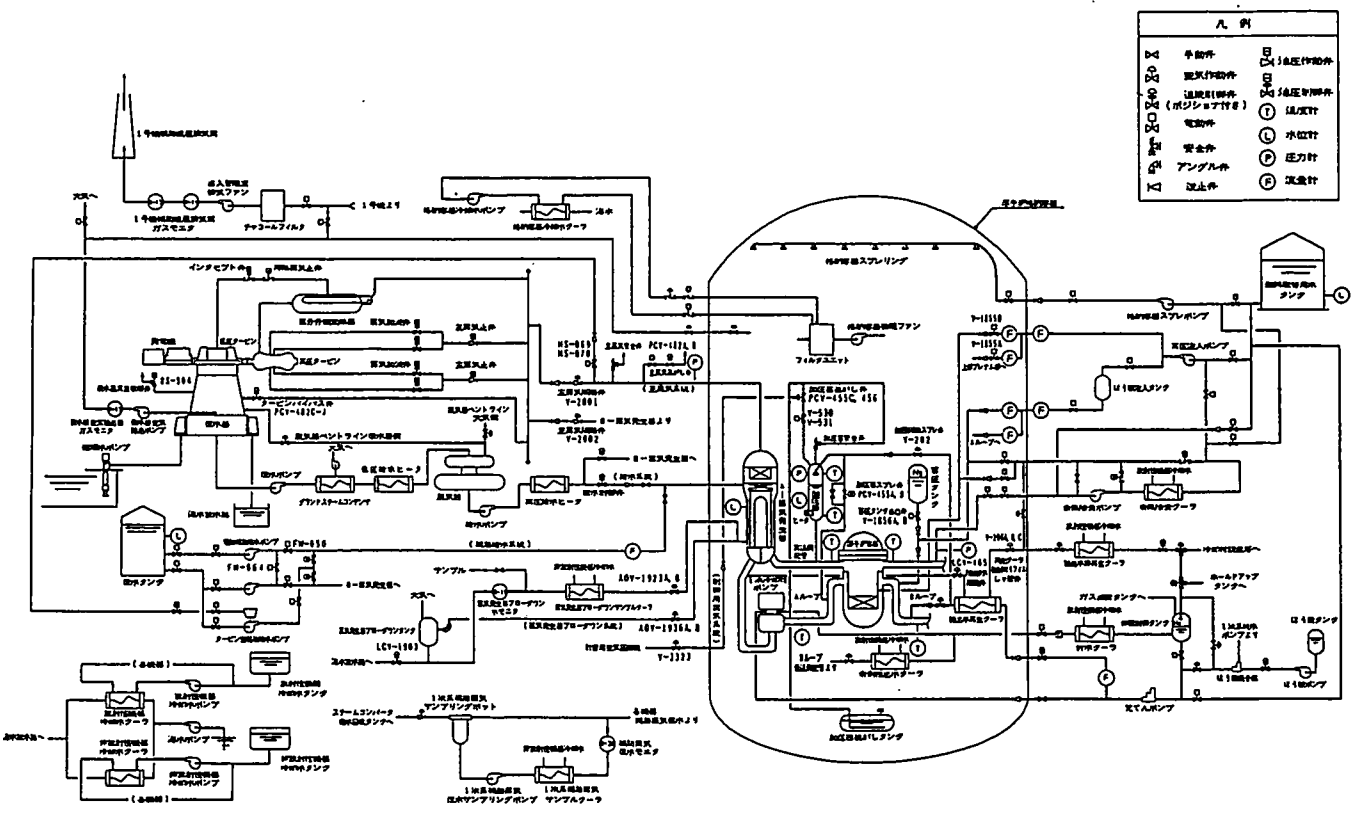
１．所在地	福井県三方郡美浜町丹生
２．営業運転開始	昭和４７年７月２５日
３．原子炉型式	軽水減速軽水冷却加圧水型原子炉
４．発電機出力	５００　ＭＷ
５．原子炉出力	１，４５６　ＭＷ
６．蒸気発生器	２　基
７．工学的安全施設	
ａ．高圧注入ポンプ	２　台
ｂ．余熱除去ポンプ	２　台
ｃ．蓄圧タンク	２　基
ｄ．格納容器スプレポンプ	２　台
ｅ．非常用ディーゼル発電機	２　台
ｆ．補助給水ポンプ	２　台　（電動） １　台　（タービン動）

表－１　蒸気発生器の主要設計諸元

種　　類		たて置Ｕ字管式
全　　高		１９．３　m
伝熱管	本　　数	３，２６０　本／基
	材　　料	インコネル６００
	外　　径	２２．２　㎜
	板　　厚	１．２７　㎜
	ピッチ	３１．３　㎜
管支持板	枚　　数	６　枚／基
	材　　料	炭　素　鋼　（ＳＢ４２）
	管穴径	２２．６　㎜
	板　　厚	１９　㎜
振止め金具	本　　数	上部振止め金具：８５　本／基 下部振止め金具：８７　本／基
	材　　料	インコネル６００（クロムメッキ処理）
	断面寸法	８．６×８．６　㎜
	設計挿入深さ	上部振止め金具：Ｙ４５～Ｙ１５列 下部振止め金具：Ｙ４５～Ｙ１２列
定格出力運転時の設計値	１次冷却材温度	蒸気発生器入口：約３２０℃ 蒸気発生器出口：約２８９℃
	１次冷却系圧力	約１５７　kg/cm²
	主蒸気温度	２７２．５　℃
	主蒸気圧力	５７．３　kg/cm²



図－１　蒸気発生器構造の概要



図－２　概略系統

資料　2

所内電源喪失に関する考え方について

１．基本的な考え方

ＳＩ信号が発生する異常時には、非常用母線は外部電源と非常用ディーゼル発電機の２系統から給電され十分な信頼性をもってＳＩ等安全施設の確実な作動を確保することとしている。

このため、ＬＯＣＡによる環境条件の悪化等により、常用母線から給電されている機器のトラブルが連携線を通じて波及することにより、非常用母線の健全性が損なわれることを防止するために、常用母線との連携を阻止することとしている。

２．系統概要

(1) 通常運転時には、常用母線は、所内変圧器（ＨＴｒ）から、しゃ断器４－２Ａ及び４－２Ｂを通じて発電機から給電されている。また、非常用母線との連携用しゃ断機４－２ＡＣＴ及び４－２ＢＤＴはしゃ断されている。

非常用母線は、起動変圧器（ＳＴｒ）から、しゃ断器４－２ＳＣ及び４－２ＳＤを通じて外部電源から給電されている。

(2) ここで、何らかの異常により、タービンがトリップすると、常用母線は、タービントリップ後３０秒間は、発電機がモータリングし、外部電源から給電されるため、前項の状態が維持されているが、３０秒経過後は、発電機がトリップするため、しゃ断器４－２Ａ、４－２Ｂがしゃ断されるが、しゃ断器が４－２Ａ、４－２Ｂが開となったことを検出すると直ちに非常用母線との連携用しゃ断器４－２ＡＣＴ及び４－２ＢＤＴが自動的に投入されて、起動変圧器から給電が継続される。

一方、非常用母線は、非常用母線の電圧低又はＳＩ信号の発生によりディーゼル発電機が起動するが、外部電源がある場合は、起動変圧器から給電が続けられる。

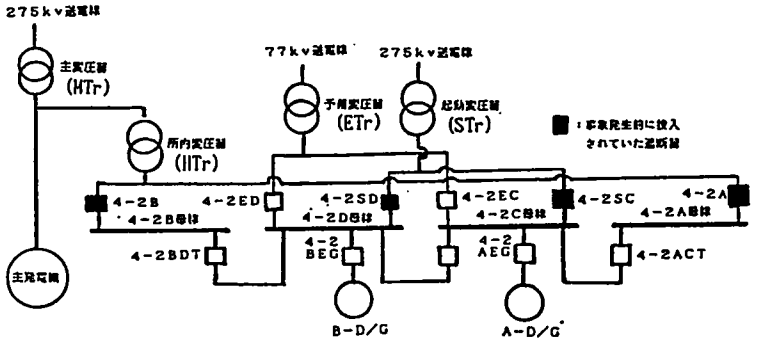
(3) 一方、ＳＩ信号発生時には、第１項の理由により、非常用母線と常用母線との連携を断つため、連携用しゃ断器４－２ＡＣＴ及び４－２ＢＤＴの投入阻止信号が出される。

このため、常用電源は、タービントリップ後３０秒間を経過すると停電する。

(4) ＳＩ信号発生時の常用母線の復旧方法は、「自動切替阻止リセット」ボタンを押し、投入阻止信号をリセットすることにより、連携用しゃ断器４－２ＡＣＴ及び４－２ＢＤＴが自動的に

投入される。

(5) 所内電源系統の概要は、下図のとおり。



各母線から給電される主要機器

４－２Ｃ母線（非常用）	４－２Ｄ母線（非常用）
Ａ電動補助給水ポンプ	Ｂ電動補助給水ポンプ
Ａ高圧注入ポンプ	Ｂ高圧注入ポンプ
Ａ、Ｂ海水ポンプ	Ｃ、Ｄ海水ポンプ
Ａ充てんポンプ*1	Ｂ、Ｃ充てんポンプ*1

４－２Ａ母線（常用）	４－２Ｂ母線（常用）
Ａ冷却材ポンプ	Ｂ冷却材ポンプ
Ａ復水ポンプ	Ｂ、Ｃ復水ポンプ
Ａ循環水ポンプ	Ｂ循環水ポンプ
Ａ、Ｃ給水ブースタポンプ	Ｂ給水ブースタポンプ
Ａ、Ｃ給水ポンプ	Ｂ給水ポンプ

（＊１：充てんポンプ（４４０Ｖ低圧母線に接続）はＳＩ信号により自動的に停止される）

加圧器内流体挙動の解析について

1．目的

美浜発電所２号機の蒸気発生器伝熱管損傷事象において、加圧器水位計の指示が振り切れたため、加圧器内流体挙動の解析を実施し、加圧器水位及び加圧器と１次冷却系との相互作用を解明することを目的とする。

2．解析手法

加圧器内流体挙動について以下の特徴を考慮した確認解析を行う必要があるため、解析コードとしてはTRAC-PF1コード（別紙）を用いた。

① 加圧器及び加圧器サージ管と１次冷却系の位置関係は図－１のとおりであり、その位置関係、形状を模擬する。

② 加圧器及び加圧器サージ管内は１次冷却系の圧力制御のためスプレ及びヒータの作動並びに１次冷却系の圧力変動に応じた１次冷却材のアウトサージ及びインサージがあり、気液二相流及び気液熱非平衡状態を扱う。

3．解析条件

解析条件は、表－１のとおりである。

なお、解析開始はＭＡＲＶＥＬコードによる事象の再現解析と同様に13時40分時点からとした。

4．解析モデル

今回使用した解析モデルは、図－２のとおりである。

加圧器は２７のセルに分割した。今回の解析においては、水位の低下及び回復を評価することを目的としているため、水位３１％以下について約２％程度の細かい分割としている。

また、高温側配管は４つのセルに、蒸気発生器入口プレナム部は３つのセルに、加圧器サージ管は１８のセルに各々分割した。

5．解析結果

解析結果を図－３～５に示す。

(1)加圧器及び加圧器サージ管

13時50分以降加圧器の水位は０となっているが、加圧器サージ管には高温水が残っている。特に、加圧器サージ管の下部水平配管部分には高温水が多く残っている。こ

れは加圧器サージ管の形状により、水が取り残された状態で加圧器と１次冷却系の圧力バランスが達成されたことを示している。

(2)高温側配管

① 高温側配管と加圧器サージ管との接続部分（以下「接続部」という。）で13時52分頃から13時55分頃及び14時3分頃ボイド率が最大５％程度まで上昇しているが、これは(1)に示す加圧器サージ管内に残った高温水及び蒸気のアウトサージにより接続部に蒸気が流入しているためである。このことは、接続部の原子炉側においては、事象の推移を通じてボイド率は上昇していないこと、及び接続部で存在しているボイドが蒸気発生器入口部分では消滅していることからも確認できる。

② 接続部では、アウトサージにより局所的にボイド率は上昇しているものの高温側配管内の１次冷却材は図－５に示すように未飽和状態を維持している。

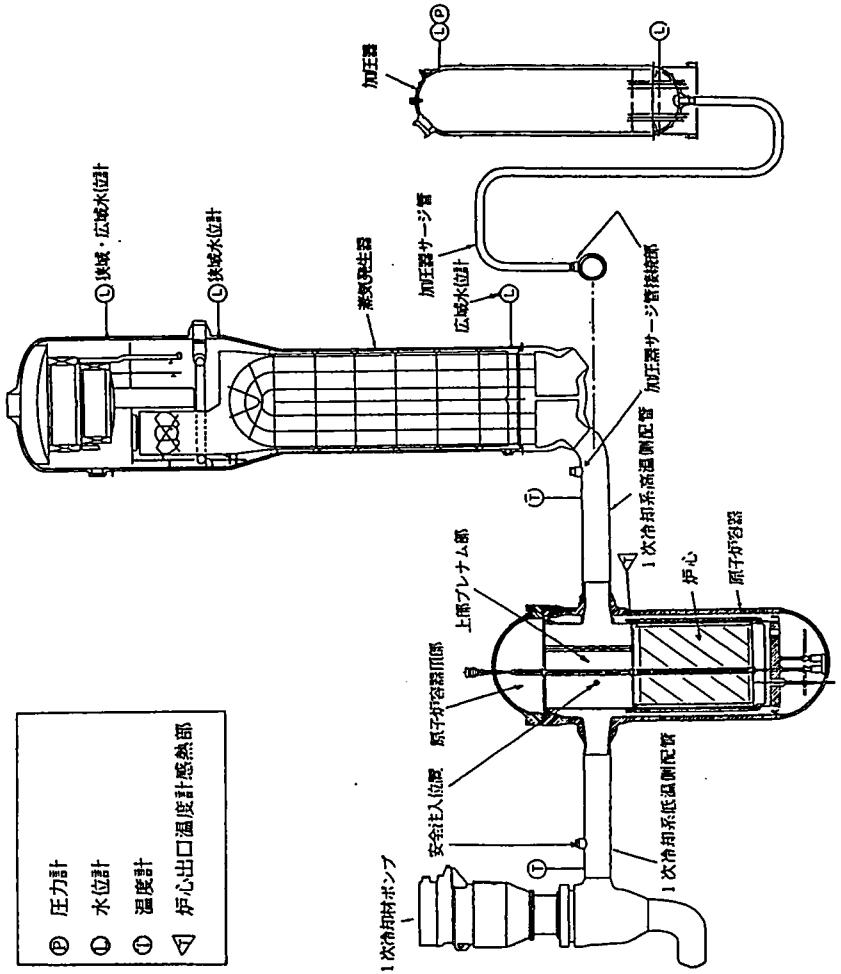
(3)気液界面

アウトサージ時に一時的に高温側配管内に気液界面が生じるが、今回の事象の加圧器水位が振り切れていた期間の大部分においては加圧器サージ管と高温側配管の接続部付近あるいは加圧器サージ管内に気液界面があったと考えられる。

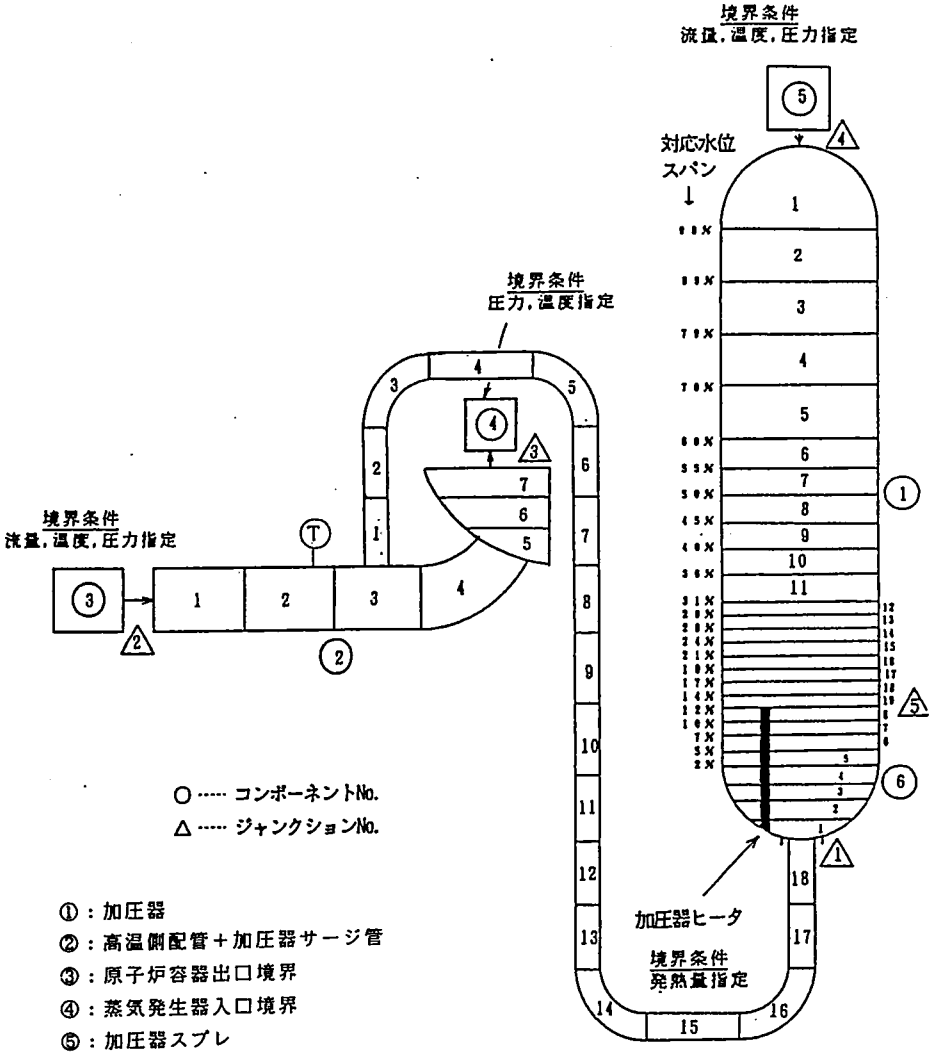
表－１　解析条件

	パラメータ		入力値
初期条件	１次冷却系の圧力		157.1kg/cm²
	高温側配管内１次冷却材温度		316.0℃
	加圧器水位		53.9%
	加圧器器内水温度		344.8℃
境界条件	高温側配管入口	流量	再現解析結果
		温度	再現解析結果
		圧力	ＰＡＭトレンド記録
	高温側配管出口	温度	再現解析結果
		圧力	ＰＡＭトレンド記録
	加圧器補助スプレ	流量	再現解析結果
		温度	再現解析結果
		圧力	ＰＡＭトレンド記録
	加圧器ヒータ	発熱量	再現解析結果

（注）境界条件となるパラメータのうち、圧力についてはＰＡＭトレンド記録を使用し、それ以外のパラメータについては使用可能な測定データがないため再現解析結果を使用する。

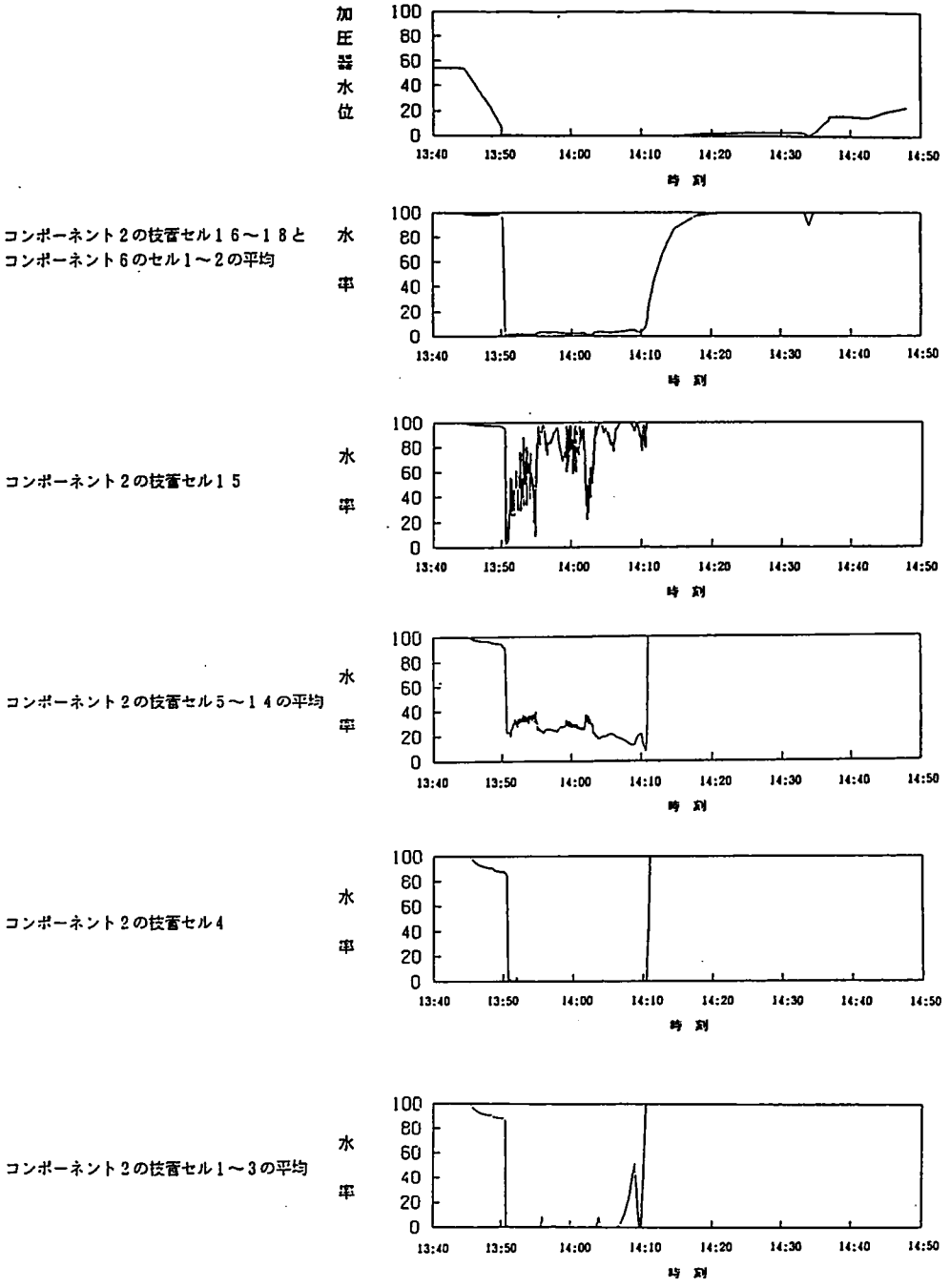


図－1　1次冷却系の主要機器の配置及び主要パラメータの測定位置の概要

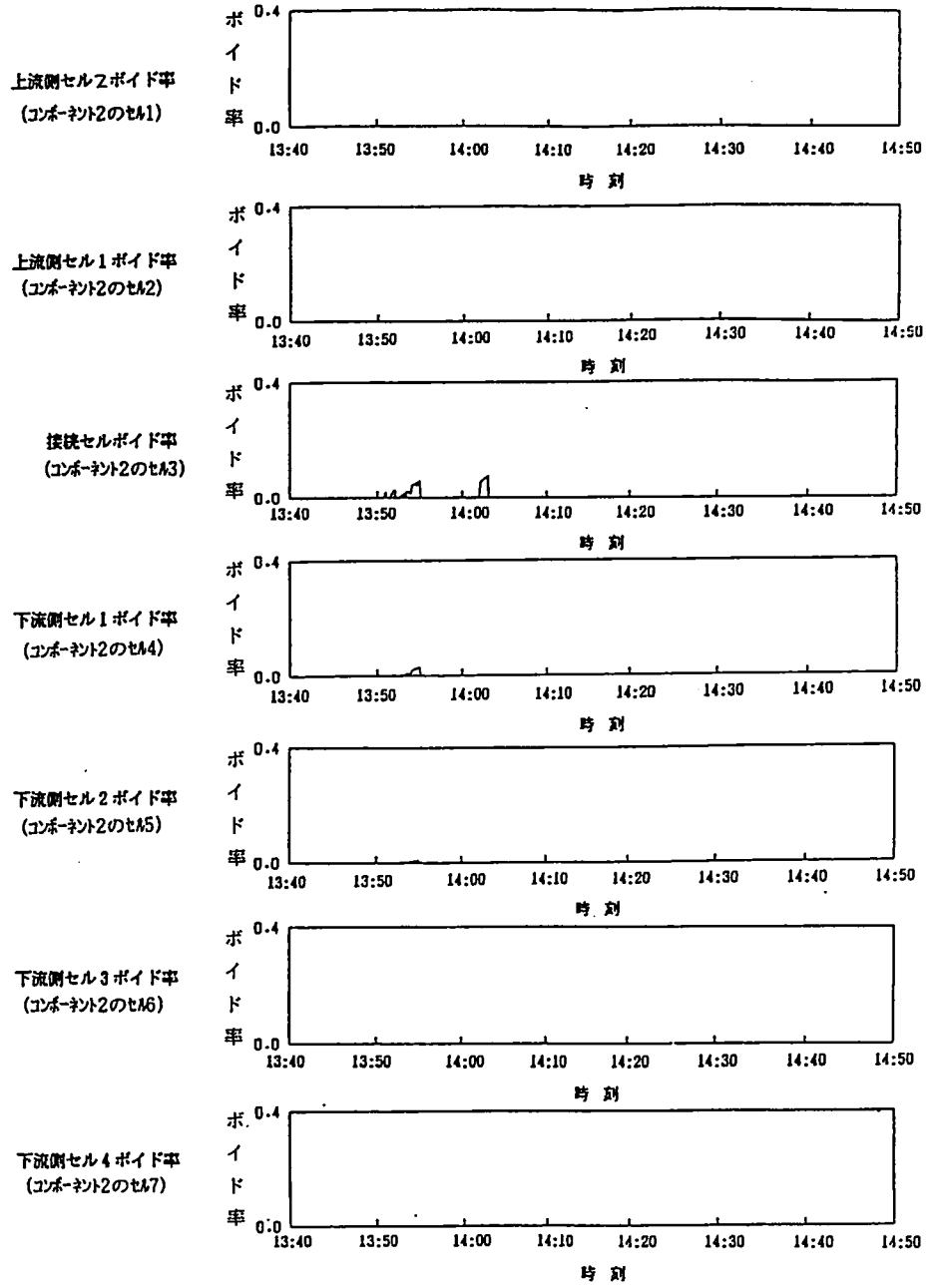


①：加圧器
②：高温側配管＋加圧器サージ管
③：原子炉容器出口境界
④：蒸気発生器入口境界
⑤：加圧器スプレ
⑥：加圧器ヒータ部

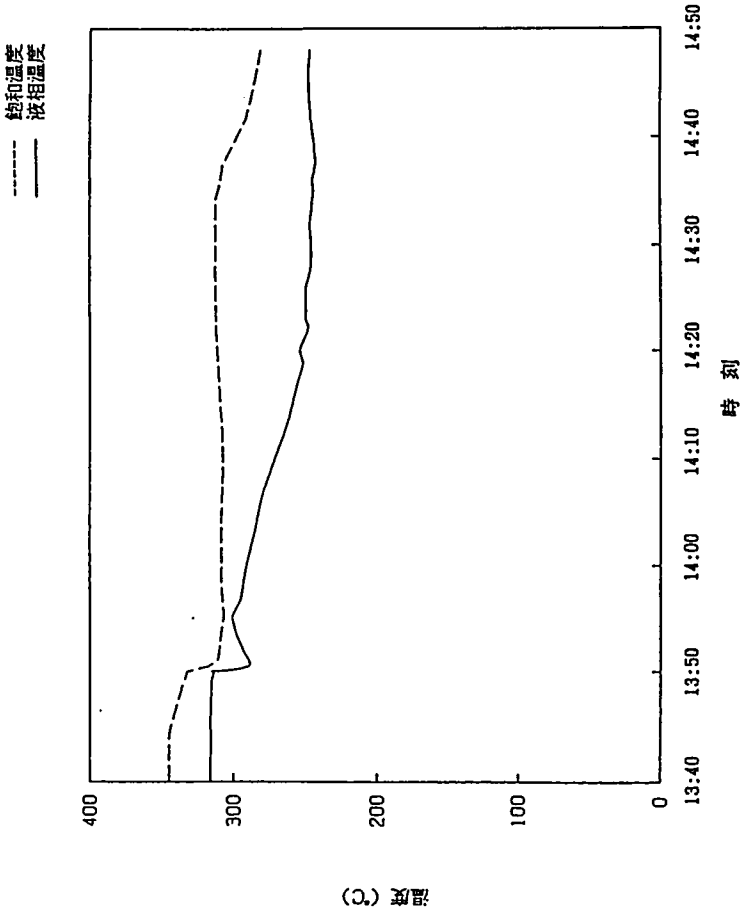
図－2　解析モデル



図－３　加圧器水位及び加圧器サージ管内の水の存在割合（水率）



図－４　高温側配管及び蒸気発生器入口プレナム部のボイド率



図－５　高温側配管と加圧器サージ管との接続部温度

別紙

ＴＲＡＣ－ＰＦ１コードのモデルについて

ＴＲＡＣ－ＰＦ１コードはＮＲＣにより開発されたＰＷＲのＬＯＣＡ解析等に使用する過渡解析コードであり、システムをノード・ジャンクションの形で表現している。また、基本方程式としては、蒸気と水の各々について質量保存則、運動量保存則及びエネルギー保存則を解いて、蒸気と水の各々の速度及び温度を求める２Ｖ２Ｔモデルを採用している。

また、解析を容易にするため、ＰＷＲの機器毎にコンポーネントというモジュールが用意されており、具体的な解析のモデル化に当たっては、解析に必要なコンポーネントを組み合わせて、かつ、各コンポーネント間をジャンクションでつなげば良いことになる。

コンポーネントはさらに計算の単位としてセルに分割される。セルは任意に分割が可能であり、一般に形状変化に対応した分割や流動変化に応じた分割を行う。計算は各セルの中心において、質量・エネルギー保存則を解くことで流体の圧力、温度等の状態量が求められ、各セルの境界において運動量保存則を解くことで流体の速度が求められる。

「TRAC-PF1/MOD1:An Advanced Best-Estimate Computer Program for Pressurized Water Reactor Thermal-Hydraulic Analysis」
ＮＵＲＥＧ／ＣＲ－３８５８，Ｊｕｌｙ　１９８６

１次冷却系の圧力挙動に関する考察

高圧注入ポンプによる１次冷却系への水の注入量は、１次冷却系の圧力が上昇すると減少し、低下すると増加する特性を有する。

一方、蒸気発生器破断管を通しての１次冷却系から損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材の流出量は、圧力が上昇すると増加し、低下すると減少する。このような両者の特性から、１次冷却系の圧力は、最終的に高圧注入ポンプによる１次冷却系への水の注入量と蒸気発生器破断管を通しての１次冷却系から損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材の流出量とが均衡する所に落ち着くことになる。

つまり、均衡点に至る前に高圧注入ポンプによる１次冷却系への水の注入量が蒸気発生器破断管を通しての１次冷却系から損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材の流出量よりも多い場合には、「１次冷却系の保有水量の回復→圧力上昇→破断管からの流出量増大、高圧注入ポンプの注入量減少→圧力上昇傾向の緩和」のメカニズムにより均衡点に向かうことになる。

逆に、蒸気発生器破断管を通しての１次冷却系から損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材の流出量が高圧注入ポンプによる１次冷却系への水の注入量より多い場合には、「１次冷却系の保有水量の減少→圧力低下→破断管からの流出量減少、高圧注入ポンプの注入量増大→圧力低下傾向の緩和」のメカニズムにより均衡点に向かうことになる。

１３時５５分以降の１次冷却系の圧力は、継続して上昇傾向を示している。したがって上記のようなメカニズムを考慮すると、高圧注入ポンプによる１次冷却系への水の注入量が蒸気発生器破断管を通しての１次冷却系から損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材の流出量を上回っていたものと判断される。

また、充てんポンプの起動により、１次冷却系の圧力の上昇率がやや大きくなるが、これは上記のメカニズムを考慮すると、１次冷却系への水の注入量が全体として増加するために１次冷却系への水の注入量と蒸気発生器破断管を通しての１次冷却系から損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材の流出量の差がより大きなものとなり、圧力の上昇率がより大きくなる傾向を示したものであると判断される。

なお、再現解析により次頁に示す結果を得ており、この結果からも、圧力が回復傾向になるのは、注入量が流出量を上回り結果として圧力が回復していくこと、さらに充てんポンプの起動により、１次冷却系への水の注入量と蒸気発生器破断管を通しての１次冷却系から損

傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材の流出量との差がより大きなものとなり、圧力の上昇率がより大きくなる傾向を示すというプラント挙動の考察の妥当性が裏付けられる。

	高圧注入ポンプによる注入量(a)	充てんﾎﾟﾝﾌﾟによる注入量(b)	流出量 (c)	収支 (a+b-c)
～13時50分(1)	0.0ﾄﾝ	0.4ﾄﾝ(2)	7.4ﾄﾝ	-7.0ﾄﾝ
13時51分～13時55分	3.4ﾄﾝ	0.0ﾄﾝ	4.4ﾄﾝ	-1.0ﾄﾝ
13時56分～14時00分	6.9ﾄﾝ	0.0ﾄﾝ	4.5ﾄﾝ	+2.5ﾄﾝ
14時01分～14時05分	6.8ﾄﾝ	0.0ﾄﾝ	4.7ﾄﾝ	+2.1ﾄﾝ
14時06分～14時10分	7.2ﾄﾝ	0.0ﾄﾝ	4.4ﾄﾝ	+2.8ﾄﾝ
14時11分～14時15分	6.8ﾄﾝ	0.6ﾄﾝ	4.3ﾄﾝ	+3.1ﾄﾝ

(1)事象発生以降の値１３時５０分までの期間

(2)充てんポンプによる注入量から抽出系統等を経由した抽出量の差

資料-2.2.3

加圧器水位上昇と１次冷却系（ＲＣＳ）への注入量のバランスに関する計算

１．目的

１次冷却系の保有水量を直接的に示すパラメータである加圧器の水位計指示が１４時３５分に回復しており、プラントパラメータから１次冷却系の保有水量を算出することが可能となる。ここでは、

（１）加圧器水位指示回復から高圧注入ポンプの停止までの期間
（１４時３５分～１４時３７分の２分間）

（２）加圧器の水位挙動から、１次冷却系内にボイドが発生したと考えられる期間
（１４時４２分～１４時４８分の６分間）

の２つの期間について、１次冷却系への水の注入量、１次冷却系からの１次冷却材の流出量から１次冷却系内の保有水量の変化を算出し、加圧器の水位変化から算出される１次冷却系内の保有水量の変化と比較することにより、１次冷却系内のボイド発生の有無について検討した。

なお、算出に当たっては、ＰＡＭトレンド記録等可能な限り実測に基づくデータを用いることとしたが、破断管を通じての１次冷却系から損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材の流出量については、再現解析の結果を用いている。

２．１次冷却系への水の注入量

１次冷却系への注入経路としては、次のものがある。

（１）高圧注入ポンプによるもの
　　１次冷却材配管低温側へ注入されるもの
　　上部プレナム部へ注入されるもの

（２）充てんポンプによるもの
　　充てん配管(*1)
　　補助スプレ配管(*1)
　　１次冷却材ポンプの軸封水注入配管

（＊１）：流量計は、両者の合計の流量を測っており、計算に当たっては
　　両者の合計を一つのものとして取り扱っている。

3．１次冷却系からの１次冷却材の流出経路

１次冷却系からの流出経路としては、次のものがある。

（１）破断伝熱管

（２）１次冷却材ポンプ軸封水戻配管

4．計算方法

上記の各期間について、当該期間内に１次冷却系へ注入された水の量をＰＡＭトレンド記録等に基づき算出する。同様に当該期間中に１次冷却系から流出した１次冷却材量を算出する。この両者の差が１次冷却系の保有水の増加量を与えることになる。さらに、加圧器の水位記録（ＰＡＭトレンド記録）から当該期間中の加圧器水位の上昇に基づく１次冷却系の保有水量の増加量が算出できるので、これを先に求めた１次冷却系への注入水量と１次冷却系からの１次冷却材の流出量に基づく１次冷却系の保有水の増加量と比較し、ほぼ等しければ、この間の加圧器の水位上昇は１次冷却系からの１次冷却材の流出量を上回る１次冷却系への水の注入がなされたことによるものと判断される。

一方、当該期間中の加圧器水位の上昇に基づく１次冷却系の保有水量の増加が１次冷却系への注入水量と１次冷却系からの１次冷却材の流出量に基づく１次冷却系の保有水の増加量を上回るような場合は、１次冷却系内でボイドが発生していたものと推定される。

5．計算結果

１４時３５分から３７分の２分間については、加圧器水位の上昇より算出した１次冷却系の保有水量の増加量は、この間の１次冷却系への注入水量と１次冷却系からの１次冷却材の流出量に基づく１次冷却系の保有水の増加量とほぼ等しくなっており、この間の加圧器の水位上昇は１次冷却系からの１次冷却材の流出量を上回る１次冷却系への水の注入がなされたことによるものと判断される。

１４時４２分から４８分の６分間については、加圧器水位の上昇より算出した１次冷却系の保有水量の増加量は、この間の１次冷却系への注入水量と１次冷却系からの１次冷却材の流出量に基づく１次冷却系の保有水の増加量を上回って（約３．４～３．９トン）おり、１次冷却系内にボイドが発生したものと推定される。

加圧器水位上昇と１次冷却系（ＲＣＳ）保有水量の変化に関する計算結果

（１４時３５分から１４時３７分の間）

項　　目	１４時３５分から１４時３７分の間の加圧器水位上昇時
１．高圧注入系からの注入量	14:35～14:37の間の注入量は14:36の値で代表した。 低温側注入量　　：43.6m³/h 上部プレナム注入量：42.0m³/h 30℃での比重：0.996トン/m³ 高圧注入系注入量合計：(43.6m³/h+42.0m³/h) ×0.996トン/m³×2/60 ＝ ２．８４トン
２．充てん系からの注入量（補助スプレ含む）	15m³/h～20m³/h 30℃での比重：0.996トン/m³ 充てん系注入量合計：15～20m³/h×0.996トン/m³×2/60 ＝０．５０～０．６６トン
３．その他のＲＣＳへの注入量	軸封部への　Ａ－ＲＣＰ　2.54m³/h 注入量　　Ｂ－ＲＣＰ　2.17m³/h 30℃での比重：0.996トン/m³ 注入量合計：(2.54m³/h+2.17m³/h)×0.996トン/m³×2/60 ＝ ０．１６トン
４．ＲＣＳへの注入量合計（１＋２＋３）	３．５０～３．６６トン

項　　目	１４時３５分から１４時３７分の間の加圧器水位上昇時
５．破損伝熱管からの流出量	１．７５トン（再現解析値より）
６．その他のＲＣＳからの流出量	軸封部からの戻量　Ａ－ＲＣＰ　0.5 m³/h Ｂ－ＲＣＰ　0.4 m³/h ５０℃での比重：0.988トン/m³ 戻り量合計：(0.5m³/h+0.4m³/h)×0.988トン/m³×2/60 ＝０．０３トン
７．ＲＣＳからの流出量合計（５＋６）	１．７８トン
８．ＲＣＳ保有水量の増加量（４－７）	１．７２～１．８８トン
９．加圧器水位の上昇から推定されるＲＣＳ保有水量の増加量	加圧器保有水量：14時35分　4.29トン 14時37分　6.14トン ＲＣＳ保有水増加量　１．８５トン
10．（ＲＣＳ保有水量の増加量）－（加圧器水位の上昇から推定されるＲＣＳ保有水量の増加量）（８－９）	－０．１３～＋０．０３トン となり、この間の加圧器水位の上昇は、１次冷却系への注入量と流出量の差に見合う値となることから、ボイドの生成はないものと考えられる。

加圧器水位上昇と１次冷却系（ＲＣＳ）保有水量の変化に関する計算結果

（１４時４２分から１４時４８分の間）

項　　目	１４時４２分から１４時４８分の間の加圧器水位上昇時
１．高圧注入系からの注入量	高圧注入ポンプ停止により、高圧注入系による注入なし
２．充てん系からの注入量（補助スプレ含む）	15m³/h～20m³/h 30℃での比重：0.996トン/m³ 充てん系注入量合計：15～20m³/h×0.996トン/m³×6/60h ＝１．４９～１．９９トン
３．その他のＲＣＳへの注入量	軸封部への注入量　Ａ－ＲＣＰ　2.54m³/h Ｂ－ＲＣＰ　2.17m³/h 30℃での比重：0.996トン/m³ 注入量合計：(2.54m³/h+2.17m³/h)×0.996トン/m³×6/60 ＝０．４７トン
４．ＲＣＳへの注入量合計（１＋２＋３）	１．９６～２．４６トン

項　　目	１４時４２分から１４時４８分の間の加圧器水位上昇時
５．破損伝熱管からの流出量	１．５１トン（再現解析値より）
６．その他のＲＣＳからの流出量	軸封部から　Ａ－ＲＣＰ　0.5 m^3/h の戻量　　Ｂ－ＲＣＰ　0.4 m^3/h ５０℃での比重：0.988トン/m^3 戻り量合計：(0.5m^3/h+0.4m^3/h)×0.988トン/m^3×6/60 ＝０．０９トン
７．ＲＣＳからの流出量合計（５＋６）	１．６０トン
８．ＲＣＳ保有水量の増加量（４－７）	０．３６～０．８６トン
９．加圧器水位の上昇から推定されるＲＣＳ保有水量の増加量	加圧器保有水量：14時42分　5.85トン 14時48分　10.13トン ＲＣＳ保有水増加量　４．２８トン
10．（ＲＣＳ保有水量の増加量）－（加圧器水位の上昇から推定されるＲＣＳ保有水量の増加量）（８－９）	加圧器の水位の上昇から推定されるＲＣＳ保有水の増加量はＲＣＳ保有水の増加量よりも大きく(約3.4～3.9トン)、このことから、ＲＣＳにボイドが生じていたと推定される。 なお、ボイド量としては、４．４２m^3～５．０７m^3であると推定される。

運転操作に関する考察

１．運転操作に関する考察

美浜２号機は、美浜１号機と中央制御室を共用しており、当直課長を含めた１２名で１号機と美浜２号機の運転操作 を行うこととなっている。（表－１）

今回の事象においては、運転員以外の原子炉主任技術者等から事象対応の助言を受けるとともに、定期検査中の美浜３号機から、事象収束後の評価に用いる記録採取等の運転操作に関わらない支援を受けている。しかしながら、１号機の運転継続と２号機の事象の収束に当たって、運転員は１２名で適切に対処し、主蒸気隔離弁不完全閉、加圧器逃がし弁不作動といった事態が発生したにもかかわらず、事象を安全に収束させたと評価される。

なお、今回の事象における運転員の判断と操作の状況は以下のとおりであった。

(1) 安全注入動作開始までの期間

ａ．１２時２４分、プラント計算機のＲ－１９計数率高注意信号が発信したため、運転員はＲ－１９及びＲ－１５の監視を強化していた。

ｂ．１２時４０分頃、運転員がＲ－１９の記録（チャート）が若干上昇傾向を示しているのを発見した。１２時４０分頃、当直課長は蒸気発生器２次側への１次冷却材の漏洩の有無を確認するため、放射線管理課員に対し蒸気発生器２次側器内水を採取しその放射能濃度の分析を行うよう指示した。このサンプルの放射能濃度分析の結果は１３時２０分頃に判明し、Ａ一蒸気発生器２次側器内水の放射能濃度は検出限界値を若干上回ったため（注）、当直課長は、同放射線管理課員に再度、蒸気発生器２次側器内水を採取しその放射能濃度の分析を指示した。

（注） 蒸気発生器２次側器内水の放射能濃度分析の結果が検出限界値に比べ、１０倍程度高い場合、蒸気発生器伝熱管漏洩と判断してきた。

ｃ．１３時４５分頃、当直課長は運転班長に対し、発電機出力の降下を行う旨を連絡するよう指示し、運転班長は、３号機中央制御室内の３号機運転班長に対し、中央給電指令所にその旨を通告するよう連絡した。

ｄ．１３時４５分頃から加圧器水位及び１次冷却系の圧力の下がり方が大きくなったため、

運転班長は、原子炉を停止すべく１３時４７分頃、手動で発電機出力の降下を開始するとともに、大気への放射性物質の放出を抑制するため、１３時４８分、Ａ－蒸気発生器からタービン動補助給水ポンプへ駆動用の蒸気を供給する配管の元弁を閉止した。

ｅ．１３時５０分、「加圧器圧力（１次冷却系の圧力）低」による原子炉トリップ信号が中央監視盤において発信し、原子炉が自動的にトリップするとともにタービンが所定の順序どおり自動的にトリップした。引き続き、１３時５１分、発電機が自動的にトリップした。原子炉トリップから７秒後「加圧器圧力低及び加圧器水位低の一致」による安全注入信号が中央監視盤において発信した。安全注入信号の発信に伴い非常用ディーゼル発電機の起動、非常用炉心冷却装置関連機器の起動による１次冷却系への水の注入、原子炉格納容器隔離、発電機トリップ後の常用母線への給電停止及びＡ、Ｂ－電動補助給水ポンプ等の起動が自動的に行われた。運転員は、原子炉、タービン、発電機のトリップ状態及び非常用炉心冷却装置関連機器等の自動作動状態が良好であることを確認した。

(2)　損傷側蒸気発生器隔離完了までの期間

ａ．運転員はＡ－蒸気発生器給水流量の減少及びＡ－蒸気発生器水位上昇から、Ａ－蒸気発生器伝熱管損傷と判断し、Ｂ－蒸気発生器による１次冷却系の冷却に先立ち損傷側蒸気発生器を隔離するため、１３時５５分、損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁の閉止操作を中央制御室において行ったが、中央監視盤において同弁の開閉表示灯の開表示と閉表示が両方とも点灯したため同弁の完全閉止を確認することができなかった。このため、当直課長は、機械保修課員に対し現場において同弁を閉止するよう指示した。

同機械保修課員は、チェーンブロックを用いて現場において損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁の増締めを行い、１４時２分頃同弁を完全に閉止した。

ｂ．この間、運転員は健全側ループの高温側冷却材温度が飽和温度を十分下回っていることから炉心が冠水し、除熱機能が確保されていると判断した。

(3)　加圧器逃がし弁開放操作までの期間

ａ．運転員は、蒸気発生器伝熱管損傷の場合、常用母線への給電を再開しても非常用母線

に悪影響を及ぼさないと判断し、１次冷却材ポンプ及び循環水ポンプの再起動に備え、１４時５分、常用母線への給電を再開した。

ｂ．１４時１４分、運転員は、余熱除去ポンプ及び高圧注入ポンプを停止させる準備操作として安全注入信号を解除した。

ｃ．運転員は、主蒸気逃がし弁を用いた１次冷却系の冷却がなされていることを確認の上、１次冷却系の圧力と損傷側蒸気発生器２次側の圧力を等しくすることにより、損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材の流出を止めるため、１４時１０分頃から１４時２５分頃まで、加圧器逃がし弁の開操作を複数回行い１次冷却系の減圧を試みた。

また、１４時１７分から１４時２１分まで運転員は加圧器逃がし弁元弁を閉止、開放した。しかし、２台ある加圧器逃がし弁はいずれも開放不能であった。

１４時２５分頃、当直課長は加圧器逃がし弁は開放不能と最終的に判断した。

(4)　加圧器補助スプレによる１次冷却系の減圧操作完了までの期間

ａ．１４時２８分頃、当直課長は運転員に対し加圧器補助スプレによる１次冷却系の減圧操作を指示した。しかしながら、運転員は加圧器補助スプレ弁の操作に必要な鍵の取り出しに手間取り、１４時３４分、加圧器補助スプレによる減圧操作を開始した。

ｂ．運転員は、安全注入停止条件である「１次冷却材のサブクール度が２０℃以上あること」及び「加圧器水位が水位計範囲内にあること」を確認の上、１次冷却系をさらに減圧するため、１４時３７分、高圧注入ポンプ２台を各々停止した。なお、安全注入停止条件の１つである「加圧器逃がし弁閉止後の１次冷却系圧力の５kg/cm²上昇」は、加圧器補助スプレを使用しているため確認する必要はなかった。

ｃ．運転員は１次冷却系の圧力が低下し損傷側蒸気発生器２次側の圧力とほぼ一致したため、１４時４８分、加圧器補助スプレ弁を閉止し１次冷却系の減圧操作を完了した。

(5)　１次冷却系が冷態停止状態になるまでの期間

ａ．運転員は健全側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁を用いた１次冷却系の冷却からタービン

バイパス弁を用いた復水器による１次冷却系の冷却に切り替えるため、１４時５５分及び１４時５８分、現場において循環水ポンプ２台を各々起動するとともに、１４時５７分、健全側ループの１次冷却材ポンプを起動した。

b．運転員は１次冷却系を冷態停止状態に移行するのに備え、１次冷却材の温度低下に伴う反応度の添加を補償するため、１５時５５分、１次冷却材のほう素濃縮操作を開始し、１６時１８分に完了した。

なお、１６時０分頃に実施した１次冷却材のほう素濃度分析結果は１，３４４ppm であり、冷態停止状態に移行するために必要なほう素濃度１，２８３ppm を上回っていた。

c．運転員は異常時の原子炉の停止能力を確保するため、１６時２４分から１６時３２分まで停止用制御棒を全て引き抜いた後、１６時４０分頃、１次冷却系の冷態停止状態へ向けてタービンバイパス弁を用いた復水器による１次冷却系の冷却を強化した。

d．運転員は１次冷却系の減圧に伴う損傷側蒸気発生器２次側器内水の１次冷却系への流入による１次冷却材のほう素濃度の低下を補償し、原子炉停止余裕をさらに確保するため、１７時２４分から１９時３７分まで１次冷却材のほう素濃縮操作を再度実施した。

なお、２３時０分頃に実施した１次冷却材のほう素濃度分析結果は１，６３８ppm であった。

２．教　訓

今回の事象において、運転マニュアルと今回の運転操作との相違点について検討を行った結果、以下の教訓となる事項が認められた。　（表－２）

(1)　応用操作

運転マニュアルでは、設計で想定される異常な事象について、その異常な事象毎に対処する操作手順を定めている。さらに、万一、設計で想定される事象を超える事象が発生した場合にも対処できる運転マニュアルを整備することが望ましいとの観点から、プラントの安全上重要な機能を確保するための操作手順を定め、運転マニュアルの充実を図っているところであるが、今回の事象のように蒸気発生器伝熱管破損事象に重畳した主蒸気隔離弁不完全閉、加圧器逃がし弁不作動といった機器の不具合に対する操作手順

については記載していなかった。

運転員への負担を軽減し、判断及び操作を容易にするという観点から、異常な事象における安全上重要な機能を有する機器の不具合に対する操作手順についても、運転マニュアルに規定しておく必要がある。

(2)　運転マニュアルの表記方法

運転マニュアルにおいて、機器の操作時期、順序及び条件等の表現が明確になっていない部分が認められた。

また、今回の事象に対して、４つの運転マニュアルが適用しており、事象の進展、収束に応じて、複数の運転マニュアルを使用することはやむを得ないが、そのつながりが明確になっていない部分が認められた。

このため、運転マニュアルにおける表現の明確化に努める必要がある。

３．再発防止対策

(1) 運転マニュアルの充実等

今回の事象において、運転員は適切に対処し安全に事象を収束させたものの、以下の観点から運転マニュアルの一層の充実を図るとともに、国内外の事故・故障等を教訓として、その充実を図り、また、その運転マニュアルに基づく教育、訓練を実施する。

まず、加圧器逃がし弁不作動及び主蒸気隔離弁不完全閉の場合の具体的な応用操作について運転マニュアルに記載する。

また、異常な事象の発生時にその他の安全上重要な機能を果たす機器に異常が発生した場合にも、運転員が容易に判断し適切に対応できるよう、具体的な操作手順を運転マニュアルに追加する。

さらに、各運転マニュアルにおける機器操作の時期、順序及び条件等の表現の明確化に努める。

表－１　運転操作体制

職名	主な職務	人数	2号機関係
当直課長	運転員の指揮、監督	1	1
当直主任	保安管理面からの当直課長の補佐	1	1
運転班長	電気設備の監視、操作、運転員の指揮	1	1
運転員	原子炉設備、タービン設備、１、２次系補機設備の運転操作及び巡回点検	9	5
合計		12	8

表－２　運転マニュアルと実操作の対比表　（１／４）

今回の操作	事故時操作所則等	今回の操作と運転操作所則との相違点
12:40　当直課長は放射線管理課員に対し、Ａ、Ｂ－ＳＧ２次側器内水の放射能濃度分析を指示した。 13:00頃　放射線管理課員はＡ、Ｂ－ＳＧ２次側器内水のサンプル採取を実施した。	Ａ、Ｂ－ＳＧサンプル隔離弁ＡＯＶ－１９２３Ａ、Ｂを交互に開閉し、どちらの蒸気発生器細管に漏えいが生じているか、ＳＧブローダウン水モニタ（Ｒ－１９）の指示により確認する。 Ａ、Ｂ－ＳＧ２次側水の試料採取によっても上記のことは確認できるが、放射線管理課での測定とは別にプロセスモニタによっても確認し、漏えいＳＧの発見に努める。放射線管理課と充分に連絡をとる。	今回の操作においては、ＳＧサンプル隔離弁の切り分け操作より蒸気発生器２次側器内水の放射能濃度分析を優先させているが、運転マニュアルでは、これらの操作を並行して漏洩ＳＧの発見に努めるような表現になっている。系統構成上これらの操作を並行して実施することは不可能である。 （美浜２号機における運転マニュアルの見直し） Ｎ－１６等の設備改善を図るとともに、暫定的には、まず試料採取を優先させ、それが時間的に遅れるような場合は、サンプル隔離弁切り分けによる漏洩ＳＧの発見に努める記載とする。
13:47頃　当直課長の指示により運転班長が発電機出力降下を開始した。	当直課長の指示によって、ユニット停止操作を行う。 (1)　復水器空気抽出器ガスモニタ(R-15)または蒸気発生器ブローダウン水モニタ(R-19)計数率注意動作の場合 ａ．負荷降下率　０．５％／分 (2)　復水器空気抽出器ガスモニタ(R-15)計数率高動作の場合 ａ．負荷降下率　５％／分 ｂ．負荷２５％になれば、原子炉手動トリップによりユニット停止を行う。	運転マニュアルでは、負荷降下率を０．５％／分または５％／分と記載しているが、所定の負荷降下率に設定する設備ではなく、設備に応じた記載となっていない。 （美浜２号機における運転マニュアルの見直し） 負荷降下率を目標降下率とし、「５％／分を目標として」という記載とする。

今回の操作	事故時操作所則等	今回の操作と運転操作所則との相違点
14:05　当直課長の指示により、運転班長が常用母線の給電を再開した	＜外部電源使用可能なとき＞ 非安全防護母線（常用母線）を復旧し、ディーゼル発電機の停止を指示する。	今回の操作においては、蒸気発生器伝熱管損傷であること及び設備の環境が保全されていること（常用母線を含む）から常用母線を復旧しているが、運転マニュアルでは、常用母線の復旧の項目が別の離れたところに記載されており、常用母線の復旧時期が不明確であった。 （美浜２号機における運転マニュアルの見直し） 常用母線の復旧は安全注入信号の解除後実施することとし、操作時期が明確になるような記載とする。
14:14　当直課長の指示により、２号機制御員が安全注入信号を解除した。	安全注入シーケンスが完了し、下記の条件がすべて満足された場合には、当直課長の指示で安全注入信号をリセットし、安全注入機器を順次１系列ずつ手動停止する。 ［安全注入停止条件］ (1)　加圧器逃がし弁閉止の確認後、原子炉冷却系統圧力が少なくとも５kg/cm²上昇した。 (2)　加圧器水位が水位計の範囲内に回復した。 (3)　原子炉冷却系統健全側ループはサブクール状態である。 （サブクール度は２０℃以上とする。）	今回の操作においては、加圧器逃がし弁不作動のため、安全注入信号のインターロックの誤配線も疑い、安全注入信号を手動で解除しているが、安全注入信号により自動起動した機器は運転を継続している。 その後、14:37 (2)及び(3)の条件を満足した後、安全注入機器（高圧注入ポンプ）を停止している。なお、加圧器逃がし弁は使用していないため (1)の条件は不要であった 運転マニュアルでは、安全注入停止条件は、安全注入機器を停止するのか安全注入信号の解除なのか明確な表現になっていない。 （美浜２号機における運転マニュアルの見直し） 安全注入停止条件が成立後、安全注入信号の解除ならびに安全注入機器の停止を実施するような記載とする。

今回の操作	事故時操作所則等	今回の操作と運転操作所則との相違点
14:35　タービン動補助給水ポンプ起動弁バイパス弁を閉止した。	直ちに行う操作 (9) タービン動補助給水ポンプ起動弁バイパス弁を閉じる。	13:48 の段階でＡ－ＳＧ側の損傷と疑いを持ち、タービン動補助給水ポンプ起動弁バイパス弁の上流側のタービン動補助給水ポンプ駆動用蒸気Ａ－ＳＧ側元弁を閉止したため、タービン動補助給水ポンプ起動弁バイパス弁の閉止操作は急ぐものではなかった。 （美浜２号機における運転マニュアルの見直し） ① 損傷ＳＧが判別されている場合は、損傷側ＳＧのタービン動補助給水ポンプ駆動用蒸気元弁を閉止する。 ② 損傷ＳＧが判別されていない場合は、タービン動補助給水ポンプ起動弁バイパス弁を閉止して、ウォーミングを停止する。 〔損傷ＳＧが判別され、損傷側ＳＧのタービン動補助給水ポンプ駆動用蒸気元弁が閉止されれば、ウォーミングを再開する。〕 という表現にする。
14:48　１次冷却系圧力が損傷側ＳＧ２次側圧力に等しくなったため、当直課長の指示により、２号機制御員が加圧器補助スプレによる減圧を停止した。	原子炉冷却系統を減圧中、下記条件で加圧器逃がし弁を閉じて減圧を停止する。 (1)　加圧器水位が、加圧器水位高、原子炉トリップ設定点（９０％）以上に上昇した。 (2)　原子炉冷却系統圧力が、破断蒸気発生器２次側圧力に等しくなった。	１次冷却系の減圧の停止は、(1) または(2) の条件が成立した場合であるが、(1) かつ(2) とも読み取れる表現となっている。 （美浜２号機における運転マニュアルの見直し） ２つの条件が独立のものであることが明確な記載とする

今回の操作	事故時操作所則等	今回の操作と運転操作所則との相違点
15:55　冷態停止状態に移行するのに備え、２号機制御員は１次冷却系のほう素濃縮を開始した。	原子炉冷却系統の圧力、温度が安定すれば運転操作所則「温態停止から冷態停止」に従って冷却を開始するよう指示する。 原子炉冷却系統の冷却を開始する。 (1)　原子炉冷却系統のほう素濃度を2,000ppmまで濃縮する。 原子炉冷却系統は、冷却を開始する前に冷態停止ほう素濃度（1,283ppm）以上に濃縮しなければならない。	運転マニュアルでは、温態停止から冷態停止への冷却開始時の１次冷却材のほう素濃度が「2,000ppm」と「冷態停止ほう素濃度（1,283ppm）以上」の２種類が記載されている。 （美浜２号機における運転マニュアルの見直し） マニュアル間のつながりについて見直しを行い、ＳＧＴＲにおいては、損傷側ＳＧからの逆流による希釈を考慮して、ＲＣＳのほう素濃度の目標値を2,000ppm以上とし、冷態停止ほう素濃度以上であることが確認できれば冷却を開始するような記載とする。

資料-2.4.1.1

主蒸気隔離弁の弁棒グランドパッキン摺動部への付着物の成分分析

1．目的

損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁の弁棒グランドパッキン摺動部に従来確認されていない黒色の付着物が認められたので、付着物の成分分析を行う。

2．供試体

損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁の弁棒グランドパッキン摺動部の付着物（黒色微粉末）

3．試験結果　（図－1）

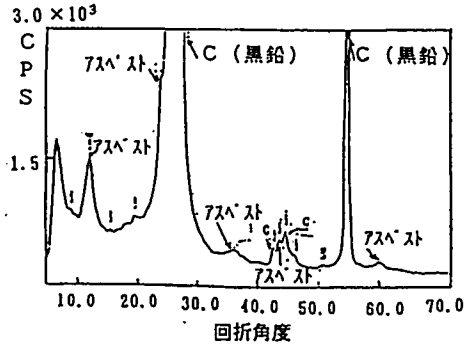
(1) X線回析の結果、付着物は黒鉛とアスベストであることを確認した。

(2) 赤外線分光分析の結果、アスベストパッキンに含まれている油脂分の高重合化物〔カルボニル基（C＝O）〕が検出された。

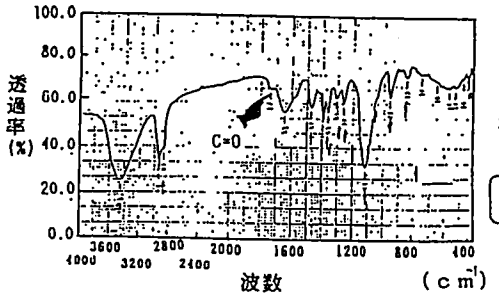
4．評価

付着物は黒鉛とアスベストであり、また、アスベストパッキン油脂分の高重合化物が検出された。当該黒鉛は、取り外した黒鉛パッキンにはく離跡があることから、黒鉛パッキンが弁棒に付着し、その一部がはく離したものと推定される。

(1) X線回折結果



(2) 赤外線分光分析結果



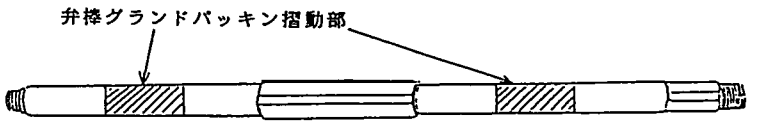
カルボニル基（C＝O）
（波数：１７３０cm⁻¹）
〔アスベストパッキンの油脂分の高重合化物〕

図－１　弁棒グランドパッキン摺動部付着物の成分分析結果

主蒸気隔離弁弁棒グランドパッキン摺動部の鏡面仕上げ要領

1　鏡面仕上げの範囲

弁棒グランドパッキン摺動部（下図に斜線で示す範囲）について鏡面仕上げを実施する。

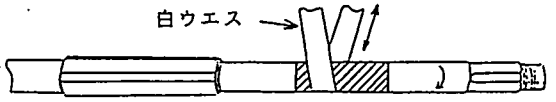


2．鏡面仕上げ要領

サンドペーパを用いて弁棒表面全体の表面処理を実施した後、以下の要領により鏡面仕上げを行う。

(1) 弁棒グランドパッキン摺動部に、弁シート面摺合せ用研磨剤（コンパウンド）を点在状に塗布する。

(2) 白ウエスを弁棒に当て弁棒周方向に動かしながら、弁棒を少しずつ回転させて研磨する。



(3) 滑らかに仕上がったことを触指及び目視により確認する。

(4) 鏡面仕上げ完了後、白ウエスにより研磨剤を入念に拭き取り、更に洗浄液を用いて弁棒表面全体の油脂等を完全に洗い落とす。

資料-2.4.1.3

他の国内ＰＷＲプラントの主蒸気隔離弁に関する調査

１．目的

他の国内ＰＷＲプラントの主蒸気隔離弁について、弁棒グランドパッキン摺動部に鏡面仕上げを実施しているかどうかを調査する。

２．調査結果

(1) 定期点検記録の調査

美浜２号機以外の国内ＰＷＲプラントについて、主蒸気隔離弁の分解点検記録等を調査したが、弁棒グランドパッキン摺動部に鏡面仕上げを行った記録はなかった。

(2) 表面粗度計測による調査

以下のプラントについては、平成３年度の定期検査時において分解点検した主蒸気隔離弁の弁棒グランドパッキン摺動部の表面粗度計測を実施し、通常の仕上げ（表面粗度：３．２Ｓ程度）であることを確認した。

北海道電力（株）泊発電所１号機	Ｂ－主蒸気隔離弁
九州電力（株）川内原子力発電所１号機	Ａ、Ｂ、Ｃ－主蒸気隔離弁
九州電力（株）川内原子力発電所２号機	Ａ、Ｂ、Ｃ－主蒸気隔離弁
関西電力（株）高浜発電所２号機	Ａ、Ｂ、Ｃ－主蒸気隔離弁
関西電力（株）高浜発電所４号機	Ａ、Ｂ、Ｃ－主蒸気隔離弁
関西電力（株）大飯発電所２号機	Ａ、Ｂ、Ｃ、Ｄ－主蒸気隔離弁

アスベストパッキン油脂分の付着性確認試験

1．目的

鏡面仕上げを実施した美浜２号機主蒸気隔離弁の弁棒グランドパッキン摺動部にのみ黒鉛パッキンの付着が認められたこと及び付着物の一部にアスベストパッキンの油脂分の高重合化物が認められたことから、弁棒グランドパッキン摺動部の表面粗度及びアスベストパッキンの油脂分の高重合化物の影響による黒鉛パッキンの付着について確認する。

2．供試体

・弁棒模擬品：金属円板　表面粗度０．８Ｓ程度（鏡面仕上げ）
　　表面粗度３．２Ｓ程度（通常仕上げ）
　　表面粗度６．３Ｓ程度

・黒鉛パッキン模擬品：黒鉛シート１９ｍｍφ×ｔ０．３８ｍｍ

3．試験装置及び試験条件

図－１に示す試験装置を用いて弁棒模擬品に黒鉛パッキン模擬品を挟み込み、実機と同等のグランドパッキン締付け面圧（１２５kg/cm²）となるよう締付けて、定格出力運転時の温度条件（２９０℃）において２４時間保持した後、黒鉛パッキン模擬品の付着状況の確認及び黒鉛パッキン模擬品の弁棒模擬品への付着力測定を実施した。

なお、アスベストパッキンの油脂分の高重合化を加速するためにアスベストパッキンの油脂分の点在状の塗布及び２％ＮａＯＨ（注）を添加した試験を、「アスベストパッキンの油脂分有りの場合」とした。

（注）文献調査の結果、アスベストパッキンの油脂分はアルカリ成分により高重合化が促進されることが確認された。また、新品のアスベストパッキンの温水抽出を行い、抽出液の原子吸光分析を実施した結果Ｃａ、Ｎａ等のアルカリ成分が０．４％程度認められた。このため、アスベストパッキンの油脂分の高重合化を加速するため２％ＮａＯＨを添加した。

4．試験結果　　（図－２）

(1) アスベストパッキンの油脂分有りの場合

a．弁棒模擬品の表面粗度に関係なく黒鉛パッキン模擬品は弁棒模擬品に付着した。黒鉛パッキン模擬品の付着量は、鏡面仕上げ（表面粗度：０．８Ｓ程度）の場合ほぼ全面に付着していた。通常の仕上げ（表面粗度：３．２Ｓ程度）及び６．３Ｓ程度の場合わずかな付着が認められた。

b．黒鉛パッキン模擬品の弁棒模擬品への付着力は、弁棒模擬品に鏡面仕上げ（表面粗度：０．８Ｓ程度）した方が通常の仕上げ（表面粗度：３．２Ｓ程度）及び６．３Ｓ程度の場合より２倍程度大きかった。

c．赤外線分光分析の結果、鏡面仕上げ（表面粗度：０．８Ｓ程度）の場合にはアスベストパッキンの油脂分の高重合化物が認められた。

(2) アスベストパッキンの油脂分無しの場合

鏡面仕上げ（表面粗度：０．８Ｓ程度）の場合、一部の試験結果では黒鉛パッキン模擬品が弁棒模擬品にわずかに付着した。黒鉛パッキン模擬品の弁棒模擬品への付着力は、アスベストパッキンの油脂分有りの場合の２分の１程度であった。

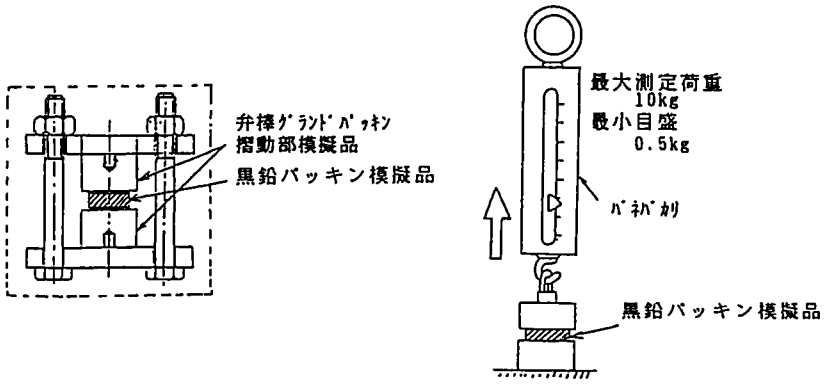
通常の仕上げ（表面粗度：３．２Ｓ程度）及び６．３Ｓ程度の場合、黒鉛パッキン模擬品は弁棒模擬品に付着しなかった。

5．評価

弁棒模擬品に鏡面仕上げ（表面粗度：０．８Ｓ程度）を行った場合、アスベストパッキンの油脂分は定格出力運転時の温度状態を保持すると高重合化し付着性が強くなるため、黒鉛パッキン模擬品がほぼ全面に付着することを確認した。

(1) 試験装置

(2) 黒鉛パッキン模擬品の付着力測定方法



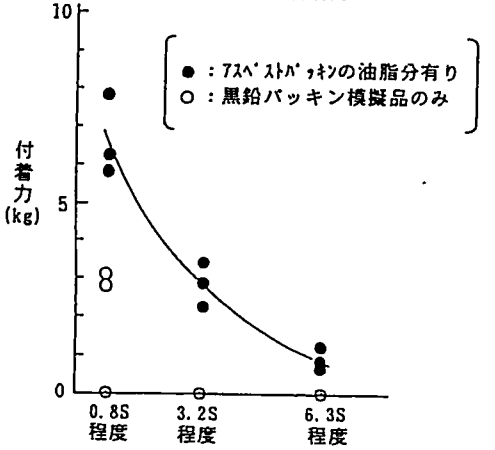
図－１　アスベストパッキンの油脂分の付着性確認試験装置

(1) 黒鉛パッキン模擬品の付着状況

弁棒模擬品表面粗度	黒鉛ﾊﾟｯｷﾝ模擬品のみ	ｱｽﾍﾞｽﾄﾊﾟｯｷﾝの油脂分有り
０．８Ｓ程　度	微量の付着有り	ほぼ全面に付着有り
３．２Ｓ程　度	付着無し	微量の付着有り
６．３Ｓ程　度	付着無し	微量の付着有り

黒鉛パッキンの付着量
表面粗度 0.8S程度 ＞ 表面粗度 3.2S程度 ＞ 表面粗度 6.3S程度

(2) 黒鉛パッキン模擬品の付着力



図－２　アスベストパッキンの油脂分の付着性確認試験結果

資料-2.4.1.5

主蒸気隔離弁グランドパッキン摺動抵抗測定試験

1．目的

実物大弁棒を用いて弁棒グランドパッキン摺動部（以下「弁棒摺動部」という。）の表面粗度の影響による弁棒摺動部への黒鉛パッキンの付着の有無及びグランドパッキン摺動抵抗の相違を確認する。

2．供試体

・実物大弁棒（弁棒摺動部の表面粗度０．８Ｓ程度、３．２Ｓ程度）

・実機と同等のグランドパッキン

3．試験装置及び試験条件

図－１に示す実機グランド部を模擬した装置に、実物大弁棒及びグランドパッキンを実機と同等のグランドパッキン締付け方法（冷態時２４kg･mのトルクで締付けを行い、温態時１８kg･mの締付けトルクで増締め）により組込み、定格出力運転時の温度条件（２９０℃）において４０時間及び１１０時間保持した後、グランドパッキン摺動抵抗を計測する試験を行った。

4．試験結果　（図－２）

(1) 弁棒摺動部に鏡面仕上げ（表面粗度：０．８Ｓ程度）を行った場合

ａ．定格出力運転時の温度状態を１１０時間保持すると、弁棒摺動部に黒鉛パッキンの付着が認められ、グランドパッキン摺動抵抗は約１４０kg･mまで増加した。（グランドパッキン摺動抵抗設計値　１００kg･m）

ｂ．赤外線分光分析の結果、定格出力運転時の温度状態を１１０時間保持した場合、アスベストパッキンの油脂分のわずかな高重合化物が認められた。

(2) 弁棒摺動部に通常の仕上げ（表面粗度：３．２Ｓ程度）を行った場合

弁棒摺動部に黒鉛パッキンの付着は認められず、グランドパッキン摺動抵抗は１００kg･m以下であった。

5．評価

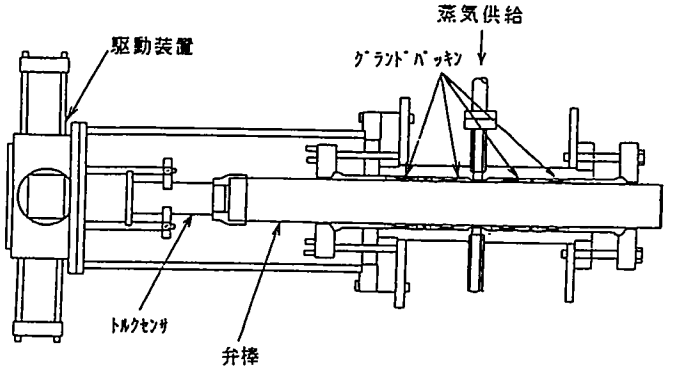
(1) 弁棒摺動部に鏡面仕上げ（表面粗度：０．８Ｓ程度）を行った場合、定格出力運転時の温度状態を１１０時間保持すると、アスベストパッキンの油脂分が高重合化して付着性が強くなるため、弁棒摺動部に黒鉛パッキンが付着し、グランドパッキン摺動抵抗が約１４０kg･mまで増加し、設計値（約１００kg･m）より高くなることを確認した。

(2) 弁棒摺動部に通常の仕上げ（表面粗度：３．２Ｓ程度）を行った場合、実機と同等の温度状態を保持してもアスベストパッキンの油脂分の高重合化物は認められず、黒鉛パッキンが弁棒摺動部に付着しないため、グランドパッキン摺動抵抗は設計値以下であることを確認した。

(3) 弁棒摺動部の表面粗度の差により、アスベストパッキンの油脂分の高重合化物の生成に差が生じる要因は、以下のとおりと推定される。

ａ．鏡面仕上げの場合、定格出力運転時の温度状態を保持することによりアスベストパッキンの油脂分が溶出し、黒鉛パッキンと弁棒摺動部の隙間に侵入し保持され、その状態で加熱されることにより、高重合化して付着性が強くなる。この結果、黒鉛パッキンが弁棒摺動部に付着し、弁の作動に伴い黒鉛パッキンがはく離して黒鉛パッキン間の摺動が発生するため、グランドパッキン摺動抵抗が設計値の約１．４倍まで増加した。

ｂ．通常の仕上げの場合、定格出力運転時の温度状態を保持しても、溶出したアスベストパッキンの油脂分は、黒鉛パッキンと弁棒摺動部の隙間に保持されず拡散する。このため、黒鉛パッキンが弁棒摺動部に付着せず、黒鉛パッキンと金属間の摺動のためグランドパッキン摺動抵抗は設計値より増加しない。



	実機弁	試験装置
流体条件	約290℃、約63kg/cm²	同左
弁棒の径	φ８０	同左
弁棒の回転角	約５５°	同左
ｸﾞﾗﾝﾄﾞﾊﾟｯｷﾝの種類	ｱｽﾍﾞｽﾄﾊﾟｯｷﾝ９個，黒鉛ﾊﾟｯｷﾝ４個	同左
ｸﾞﾗﾝﾄﾞﾊﾟｯｷﾝ締め付けﾄﾙｸ	冷態時 24kg・m　3回 温態時増締め 18kg・m	同左

図－１　グランドパッキン摺動抵抗試験装置

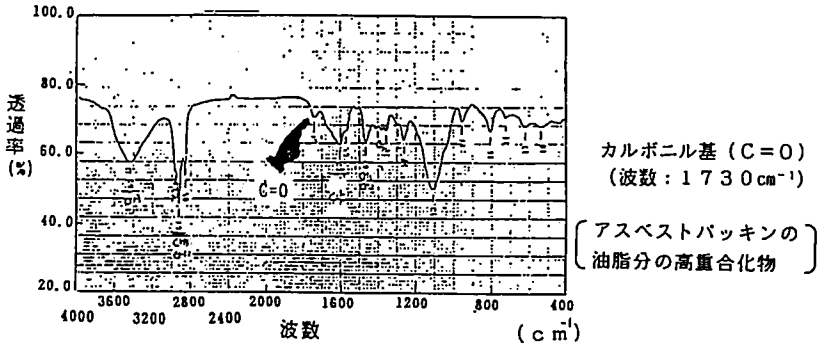
(1) グランドパッキン摺動抵抗測定結果

定格出力運転時の温度保持時間	弁棒グランドパッキン摺動部の表面粗度	グランドパッキン摺動抵抗測定結果			
		冷態時の動作試験	定格出力運転時到達後の動作試験	定格出力運転時の温度保持後の動作試験	冷却後の動作試験
４０時間	０．８Ｓ程度	１１３	８１	１０８	７４
		１２３	９９	１３１	９６
	３．２Ｓ程度	９０	６９	９３	７９
		１０２	８１	８４	６９
１１０時間	０．８Ｓ程度	１３２	８７	１４１	５１
	３．２Ｓ程度	９０	８４	７３	４９

［ 単位：kg・m ］

(2) 赤外線分光分析結果

弁棒グランドパッキン摺動部の表面粗度０．８Ｓ、定格出力運転時の温度を１１０時間保持した場合



カルボニル基（Ｃ＝Ｏ）
（波数：１７３０cm⁻¹）

〔アスベストパッキンの油脂分の高重合化物〕

図－２　グランドパッキン摺動抵抗試験結果

資料-2.4.1.6

黒鉛パッキン付着による主蒸気隔離弁グランドパッキン摺動抵抗測定試験

１．目的

アスベストパッキンの油脂分の高重合化を加速模擬し、弁棒グランドパッキン摺動部（以下「弁棒摺動部」という。）の表面粗度の影響による弁棒摺動部への黒鉛パッキンの付着の有無及びグランドパッキン摺動抵抗の相違を確認する。

２．供試体

・実物大弁棒（弁棒摺動部の表面粗度０．８Ｓ程度、３．２Ｓ程度）

・実機と同等のグランドパッキン

３．試験装置及び試験条件

図－１に示す実機グランド部を模擬した装置に、実物大弁棒及びグランドパッキンを実機と同等のグランドパッキン締付け方法（冷態時２４kg･mのトルクで締付けを行い、温態時１８kg･mの締め付けトルクで増締め）により組込み、定格出力運転時の温度条件（２９０℃）において２４時間保持した後、グランドパッキン摺動抵抗を計測する試験を行った。

なお、アスベストパッキンの油脂分の高重合化を加速するためにアスベストパッキンの油脂分の点在状の塗布及び２％ＮａＯＨの添加を行った試験を、「アスベストパッキンの油脂分有りの場合」とした。

（注）文献調査の結果、アスベストパッキンの油脂分はアルカリ成分により高重合化が促進されることが確認された。また、新品のアスベストパッキンの温水抽出を行い、抽出液の原子吸光分析を実施した結果Ｃａ、Ｎａ等のアルカリ成分が０．４％程度認められた。このため、アスベストパッキンの油脂分の高重合化を加速するため２％ＮａＯＨを添加した。

４．試験結果　（図－２）

(1) 弁棒摺動部に鏡面仕上げ（表面粗度：０．８Ｓ程度）を行った場合

ａ．アスベストパッキンの油脂分有りの場合

(a) 弁棒摺動部への黒鉛パッキンの付着が認められ、グランドパッキン摺動抵抗は約１５０kg･mまで増加した。

（グランドパッキン摺動抵抗設計値：約１００kg･m）

(b) 赤外線分光分析の結果、アスベストパッキンの油脂分の高重合化物が認められた。

b．アスベストパッキンの油脂分無しの場合

弁棒摺動部に黒鉛パッキンの付着が認められ、グランドパッキン摺動抵抗は約１２０kg･mまで増加した。

(2) 弁棒摺動部に通常の仕上げ（表面粗度：３．２Ｓ程度）を行った場合

アスベストパッキンの油脂分有り、無しの両方の場合とも、弁棒摺動部に黒鉛パッキンの付着は認められず、グランドパッキン摺動抵抗は約１００kg･m以下であった。

５．評価

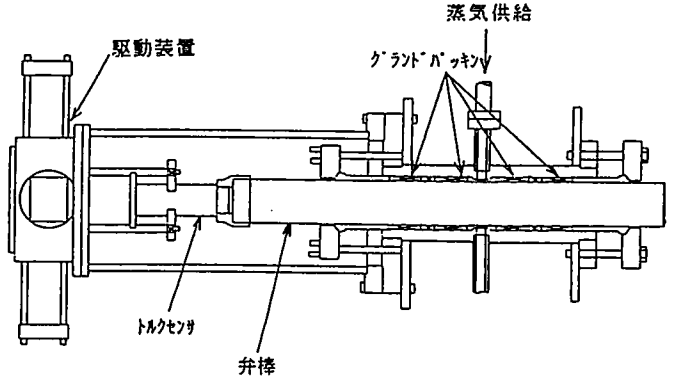
(1) 弁棒摺動部に鏡面仕上げ（表面粗度：０．８Ｓ程度）を行った場合、定格出力運転時の温度状態を保持すると、アスベストパッキンの油脂分が高重合化して付着性が強くなるため、弁棒摺動部に黒鉛パッキンが付着し、グランドパッキン摺動抵抗が設計値（約１００kg･m）の約１．５倍まで増加することを確認した。

(2) 弁棒摺動部に通常の仕上げ（表面粗度：３．２Ｓ程度）を行った場合には、定格出力運転時の温度状態を保持してもアスベストパッキンの油脂分の高重合化物は認められず、グランドパッキン摺動抵抗は設計値以下であることを確認した。

(3) 弁棒摺動部の表面粗度の差により、アスベストパッキンの油脂分の高重合化物の生成に差が生じる要因は、以下のとおりと推定される。

a．鏡面仕上げの場合、定格出力運転時の温度状態を保持することによりアスベストパッキンの油脂分が溶出し、黒鉛パッキンと弁棒摺動部の隙間に侵入し保持され、その状態で加熱されることにより、高重合化して付着性が強くなる。この結果、黒鉛パッキンが弁棒摺動部に付着し、弁の作動に伴い黒鉛パッキンがはく離して黒鉛パッキン間の摺動が発生するため、グランドパッキン摺動抵抗が設計値の約１．５倍まで増加した。

b．通常の仕上げの場合、定格出力運転時の温度状態を保持しても、溶出したアスベストパッキンの油脂分は、黒鉛パッキンと弁棒摺動部の隙間に保持されず拡散する。このため、黒鉛パッキンが弁棒摺動部に付着せず、黒鉛パッキンと金属間の摺動のためグランドパッキン摺動抵抗は設計値より増加しない。



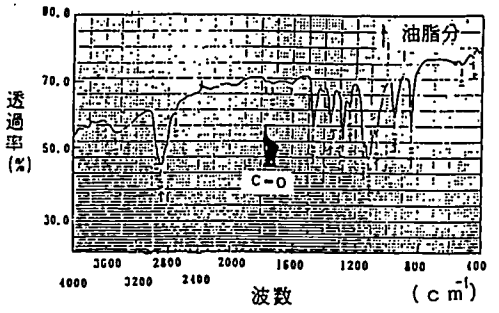
図－１　黒鉛パッキン付着によるグランドパッキン摺動抵抗測定試験装置

(1)　グランドパッキン摺動抵抗測定結果及び黒鉛パッキン付着状況

		グランドパッキン摺動抵抗測定結果（kg・m）	黒鉛パッキン付着状況
表面粗度０．８Ｓ程度	アスベストパッキンの油脂分有り	１５６	実機と同等の付着有り
	アスベストパッキンの油脂分無し	１２３	微量の付着有り
表面粗度３．２Ｓ程度	アスベストパッキンの油脂分有り	７８	付着無し
	アスベストパッキンの油脂分無し	９０	付着無し

(2) 赤外線分光分析結果

弁棒グランドパッキン摺動部の表面粗度０．８Ｓ程度、
アスベストパッキンの油脂分有りの場合



カルボニル基（Ｃ＝Ｏ）
（波数：１７３０cm⁻¹）
〔アスベストパッキンの油脂分の高重合化物〕

図－２　黒鉛パッキン付着によるグランドパッキン摺動抵抗測定試験結果

資料-2.4.1.7

主蒸気隔離弁不完全閉の推定メカニズム

1．機器点検調査結果

(1) 鏡面仕上げを実施した美浜２号機主蒸気隔離弁の弁棒グランドパッキン摺動部（以下「弁棒摺動部」という。）には、黒鉛パッキンの付着が認められた。また、アスベストパッキンの油脂分の高重合化物が検出された。

(2) 通常の仕上げであることを確認した大飯発電所２号機主蒸気隔離弁の弁棒摺動部には、黒鉛パッキンの付着は認められなかった。

2．模擬試験結果

(1) 鏡面仕上げの場合、定格出力運転時の温度状態を保持することによりアスベストパッキンの油脂分が溶出し、黒鉛パッキンと弁棒摺動部の隙間に侵入し保持され、その状態で加熱されることにより、高重合化して付着性が強くなる。この結果、黒鉛パッキンが弁棒摺動部に付着し、弁の作動に伴い黒鉛パッキンがはく離して黒鉛パッキン間の摺動が発生するため、グランドパッキン摺動抵抗が設計値の約１．５倍まで増加した。

(2) 通常の仕上げの場合、定格出力運転時の温度状態を保持しても、溶出したアスベストパッキンの油脂分は、黒鉛パッキンと弁棒摺動部の隙間に保持されず拡散する。このため、黒鉛パッキンが弁棒摺動部に付着せず、黒鉛パッキンと金属間の摺動のためグランドパッキン摺動抵抗は設計値より増加しない。

3．不完全閉の推定メカニズム

図－１に示すメカニズムにより主蒸気隔離弁の不完全閉が発生したものと考えられる。

弁棒グランドパッキン摺動部（以下「弁棒摺動部」という。）の鏡面仕上げを前回定期検査時に実施

⇩

温態状態の保持によるアスベストパッキン油脂分の高重合化
表面粗度０．８Ｓ程度の場合、アスベストパッキンから溶出した油脂分が弁棒摺動部と黒鉛パッキンの隙間に浸入して保持され、その状態で加熱されることにより高重合化する。

表面粗度３．２Ｓ程度の場合、アスベストパッキンか溶出した油脂分は保持されず、分解、拡散するため高重合化しない。

⇩

黒鉛パッキンの弁棒摺動部への付着
表面粗度０．８Ｓ程度の場合、高重合化したアスベスパッキンの油脂分は付着性が強いため、弁棒摺動部に黒鉛パッキンが付着する。

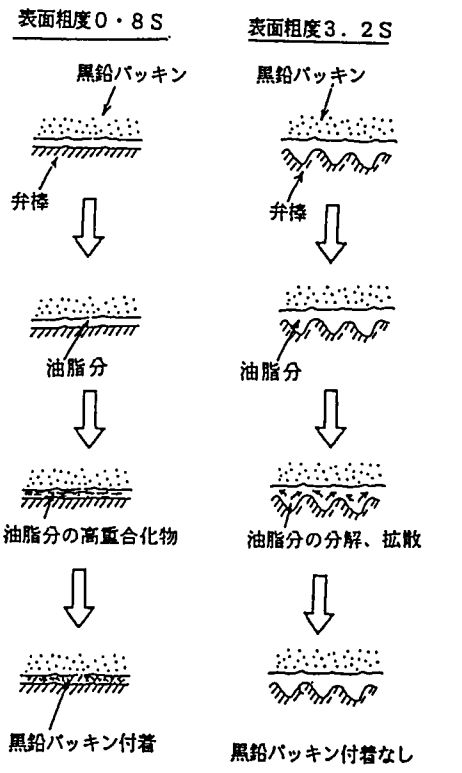
⇩

グランドパッキン摺動抵抗の増加
主蒸気隔離弁の閉作動に伴い、弁棒摺動部に付着した黒鉛パッキンがはく離して黒鉛パッキンと黒鉛パッキンの摺動が発生し、グランドパッキン摺動抵抗が増加する。

⇩

主蒸気隔離弁の不完全閉
グランドパッキン摺動抵抗が設計値の約１．５倍に増加して、閉弁抵抗が全閉付近での閉弁力を上回り不完全閉となった。

表面粗度の相違によるアスベストパッキンの油脂分高重合化物の生成プロセス（推定）



図－１　主蒸気隔離弁不完全閉の推定メカニズム

通報連絡状況に関する主な経緯

通報連絡状況に関する主な経緯

2/9	
13：40	・Ｒ－15「計数率注意」警報が発信。
13：45	・Ｒ－19「計数率注意」警報が発信。加圧器圧力・水位低下のため充てんポンプ追加起動操作実施。中央給電指令所へ負荷降下を連絡。
	・発電所休日当番者が発電所指揮者をポケットベルで呼出。
13：47	・負荷降下開始。
13：50	・「加圧器圧力低」による原子炉トリップ、その後「加圧器圧力低」＋「加圧器水位低」による安全注入動作。
13：52	・発電所休日当番者が発電所指揮者に状況連絡。発電所指揮者は直ちに美浜発電所事故対策会議召集。
13：53	・発電所休日当番者は、福井原子力事務所休日当番者へ連絡。
13：55 ～	・発電所休日当番者等は、発電所関係者への連絡、呼出を実施。 13：59 運転管理専門官に通報。 なお、自治体へは広報連絡責任者が連絡することになっており、その連絡に時間を要したため、美浜町へは 14：44 に通報連絡することとなった。
13：55 ～	・福井原子力事務所休日当番者は直ちに福井原子力事務所指揮者に状況連絡するとともに、東京支社、福井事務所に各々通商産業省、福井県への通報連絡を依頼。 14：10 通商産業省原子力発電運転管理室、14：17 福井県県民生活部原子力安全対策課、16：25 科学技術庁連絡調整官に通報。
	・福井原子力事務所指揮者は、直ちに福井原子力事務所事故対策会議を召集。
14：10 ～	・福井原子力事務所指揮者は、本店休日当番者に状況を連絡。直ちに本店当番者は本店関係者へ連絡し、また近畿通商産業局に通報した。
	・本店当番者から連絡を受けた原子力管理部長は本店事故対策会議を召集。 14：30 近畿通商産業局に通報。
16：45	・事象の概要を関西電力及び福井県がプレス発表。
2/10	
10：00	・敦賀市へ状況説明。

見学者対応状況

見学者対応状況

	A(29名)	B(26名)	C(30名)	D(38名)
PRセンター来客受付時刻	13：00	13：40	13：20	14：30
発電所入構時刻	13：58	13：55	14：45	14：45
発電所出構時刻	14：43	14：33	15：29	15：30
PRセンター出発時刻	14：55	15：40	15：45	16：40

[美浜発電所見学者案内コース]

正門→美浜３号機中央制御室→美浜３号機タービン建屋→放水口→正門

資料　3

今回の事象の再現解析の手法について

１．解析の目的及び解析コードの選定

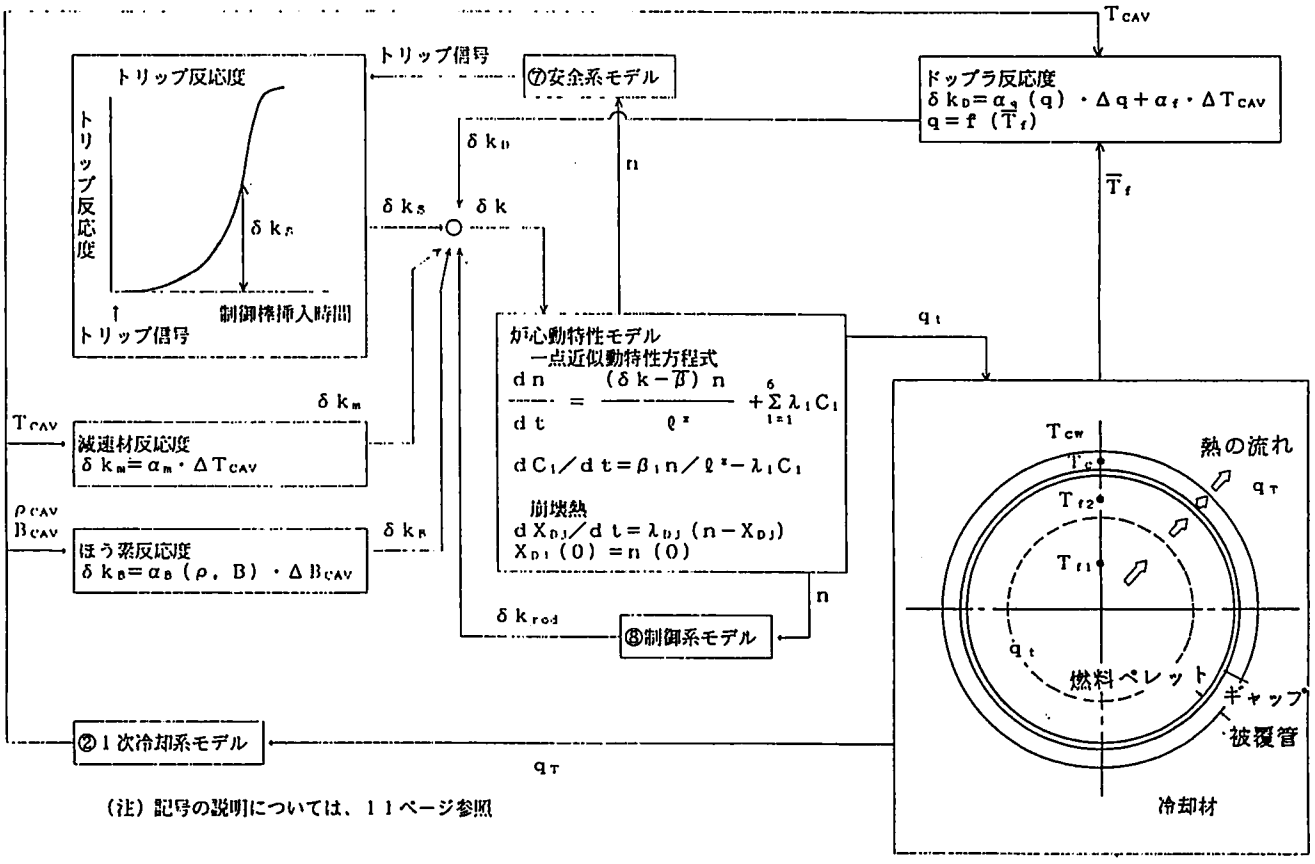
今回の事象をより良く理解するためには、プラント挙動の詳細な分析を行うことが必要である。しかしながら、損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量等の計測することが不可能なパラメータがあることから、１次冷却系の圧力、蒸気発生器２次側の圧力等の計測されているデータを可能な限り再現する解析を実施することにより、計測不可能なパラメータをできる限り精度良く評価するために実施している。

このため、その解析手法が基本的には公開され、実際のプラントの運転により得られたデータとの照合等によりその妥当性が実証され、原子炉設置変更許可時の原子炉施設の安全評価のための解析に使用されているＭＡＲＶＥＬコードにより、今回の解析を実施した。

２．解析モデル

今回使用したＭＡＲＶＥＬコードは以下のモデルから構成されており、その詳細を添付－１に示す。これらのモデル全ての関連によりプラントシステム全体の挙動、言い替えれば物理的挙動及びシステム間の相互作用を解析している。

①炉心核熱水力特性のモデル
②１次冷却系モデル
③加圧器モデル
④１次系流量モデル
⑤蒸気発生器モデル（熱系モデル、水位モデル）
⑥主蒸気・給水系モデル
⑦安全系モデル
⑧制御系モデル



（注）記号の説明については、１１ページ参照

①炉心核熱水力特性のモデル

炉心流路部

$$d(MU)/dt = q_T + W_{in} \cdot h_{in} - W_{out} \cdot h_{out}$$

混合部

$$d(MU)/dt = \Sigma_i W_{in} \cdot h_{in} - \Sigma_i W_{out} \cdot h_{out}$$

配管部

$$d(MU)/dt = \Sigma_i W_{in} \cdot h_{in} - \Sigma_i W_{out} \cdot h_{out}$$

蒸気発生器流路部

$$d(MU)/dt = -q_{sg} + W_{in} \cdot h_{in} - W_{out} \cdot h_{out}$$

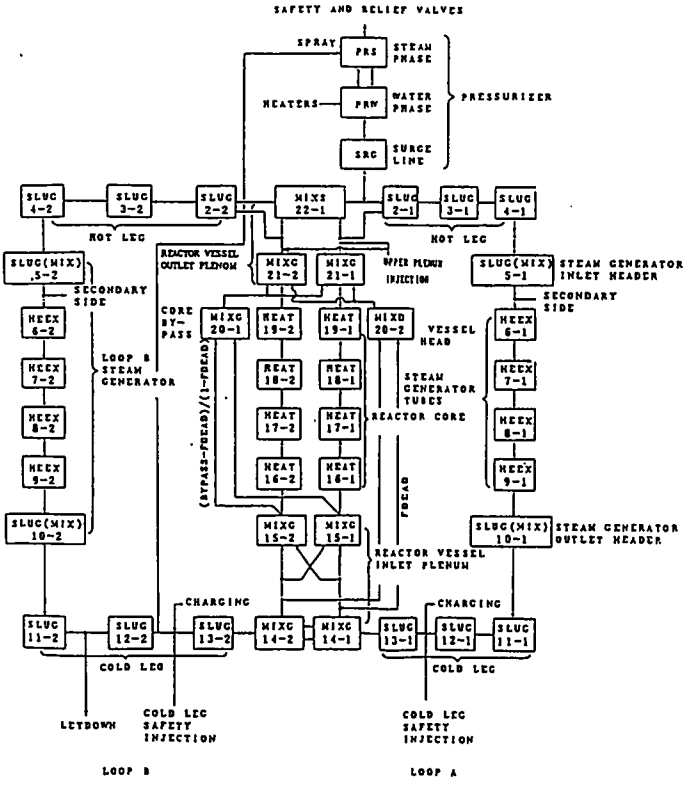
$$q_{sg} = (UA)_{sg} \Delta\theta$$

$$\Delta\theta = \frac{T_{out} - T_{in}}{\ell n \left(\frac{T_{out} - T_R}{T_{in} - T_R} \right)}$$

上記いずれにおいても

$dM/dt = \Sigma_i W_{in} - \Sigma_i W_{out}$ としている。

（注）記号の説明については、１１ページ参照



②1次冷却系モデル

③加圧器モデル

気液２相について熱非平衡モデルを採用し、温度、圧力等の状態量をエネルギー平衡式、質量平衡式、体積平衡式により、以下の式で計算する。

液相

$$dM_w/dt = m_{su} + (1+\mu)\, m_{sp} - m_{f\ell} + m_c$$

$$d(MU)_w/dt = h_f(1+\mu)\, m_{sp} - h_g m_{f\ell} + h_{su} m_{su} + h_f m_c + q_h$$

$$h_w = (MU)_w/M_w$$

$$V_w = v_w(h_w, P) \cdot M_w$$

気相

$$dM_s/dt = m_{f\ell} - \mu m_{sp} - m_{rv} - m_c$$

$$v_s = V_s/M_s = (V_{pr} - V_w)/M_s$$

$$P = P^0 (v_s^0/v_s)^K$$

（記号）

h	エンタルピー
K	断熱膨張圧縮係数
M	質量
m	質量流量
P	圧力
q_h	ヒーター熱量
t	時間
U	内部エネルギー
V	体積
v	比容積
μ	蒸気凝縮率

（添字記号）

c	凝縮
f	飽和水
fℓ	蒸発
g	飽和蒸気
pr	加圧器
rv	逃がし弁/安全弁
s	加圧器気相
sp	スプレー
su	サージ
w	加圧器液相
0	初期値

④１次系流量モデル

１次冷却材流量は１次冷却材ポンプの流量特性及び慣性効果を模擬し１次冷却材ポンプヘッド(H_{RCP})を計算し、以下の式で計算する。

$$\frac{1}{g}\Sigma\left(\frac{L}{A}\right)_{RV}\frac{dW_{RV}}{dt} + \frac{1}{g}\Sigma\left(\frac{L}{A}\right)_{LPi}\frac{dW_{LPi}}{dt}$$

$$= H_{RCP} + H_{RV} + H_{LPi} - \Delta P_{RV} - \Delta P_{LPi}$$

(i = 1, 2)

（記号）

g	重力加速度
H_{LP}	蒸気発生器等での密度差による水頭
H_{RCP}	１次冷却材ポンプによる水頭
H_{RV}	ダウンカマ部と炉心部での密度差による水頭
L／A	流路長/流路面積
t	時間
W	流量
ΔP	圧損

（添字記号）

RV	圧力容器
LP	ループ
1	損傷側ループ
2	健全側ループ

⑤蒸気発生器モデル（熱系モデル、水位モデル）

熱系モデル

１次冷却系から蒸気発生器２次側への熱伝達は以下の式で計算する。

$$q_{SG} = (UA)_{SG} \Delta\theta$$

$$\Delta\theta = \frac{T_{out} - T_{in}}{\ln\left(\frac{T_{out} - T_s}{T_{in} - T_s}\right)}$$

（記号）

q_{SG} ： １次冷却系から蒸気発生器２次側への伝熱量

$(UA)_{SG}$ ： 蒸気発生器伝熱管熱貫流係数と蒸気発生器伝熱面積の積

$\Delta\theta$ ： 対数平均温度差

T_s ： ２次側温度

T_{in} ： １次側入口温度

T_{out} ： １次側出口温度

水位モデル

蒸気発生器水位は２次側保有水体積と蒸気発生量との関係により以下の式で計算する。

$$Z_L = Z_{LZ}(V_{SGW}) + [Z_{LF}(V_{SGW}) - Z_{LZ}(V_{SGW})] \cdot f(\tau_{WL}, W, M_{SGS})$$

（記号）

Z_L ： 蒸気発生器水位

Z_{LZ} ： 零出力での蒸気発生器水位 （V_{SGW}の関数）

Z_{LF} ： 定格出力での蒸気発生器水位 （V_{SGW}の関数）

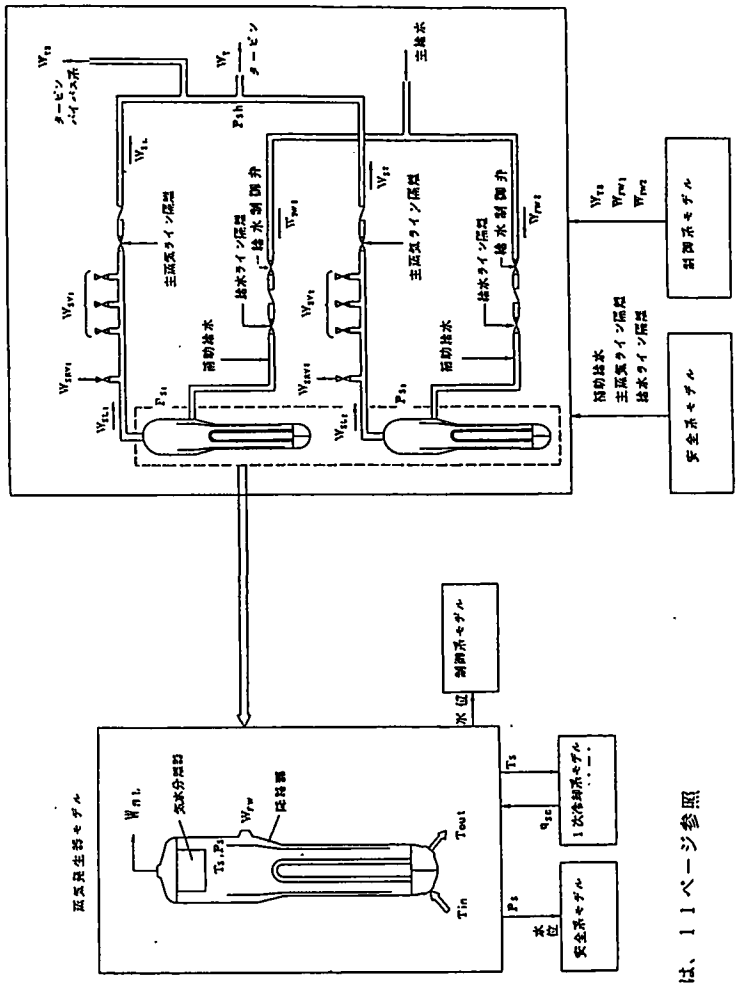
V_{SGW} ： ２次側全保有水体積

τ_{WL} ： 時定数

W ： 蒸気流量

M_{SGS} ： 蒸気発生器内気相質量

$f(\tau_{WL}, W, M_{SGS})$ ：時定数、蒸気流量、蒸気発生器内気相質量による水位の依存性関数



⑥主蒸気・給水系モデル

各蒸気発生器からの蒸気流量は、各蒸気発生器から主蒸気ヘッダーまでの主蒸気管内圧損に応じて、以下の式で計算する。

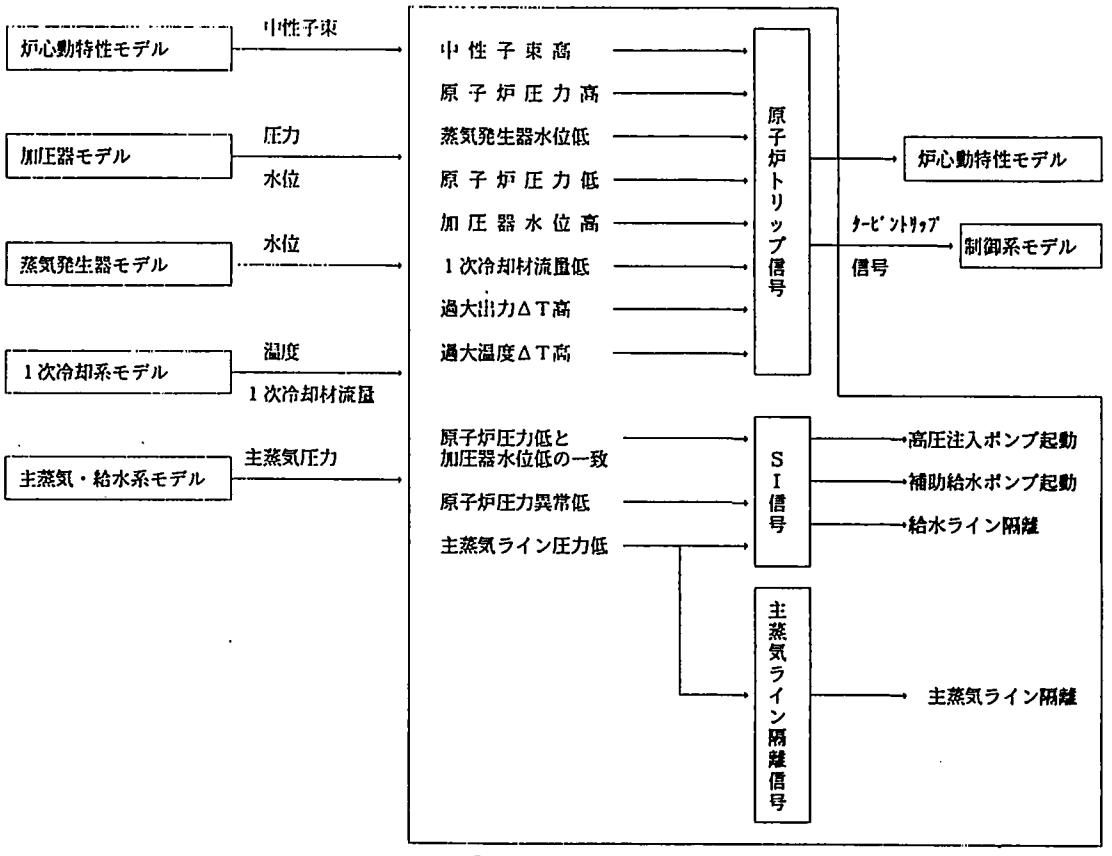
$$P_{si} - K_i (W_{sLi})^2 = P_{sh}$$

$$W_{si} = W_{sLi} - W_{SRVi} - W_{SVi}$$

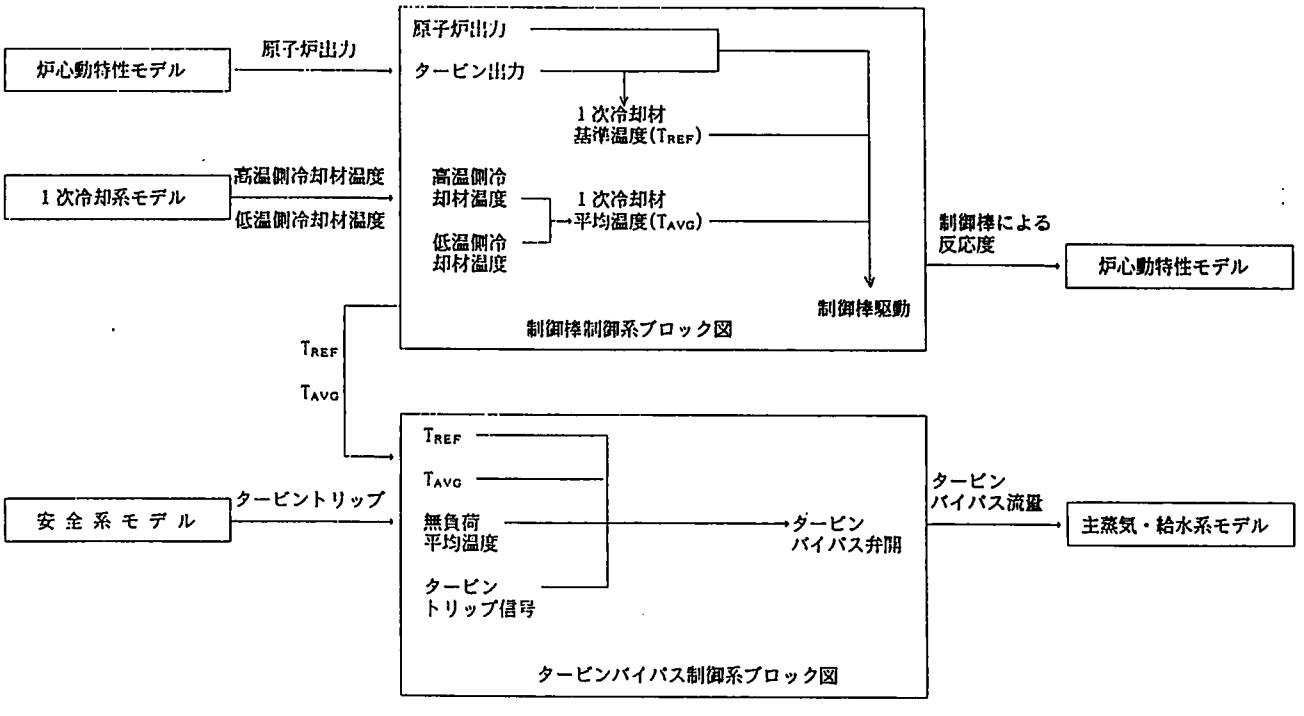
$$W_T + W_{TO} = \Sigma W_{si}$$

（ｉ＝１，２）

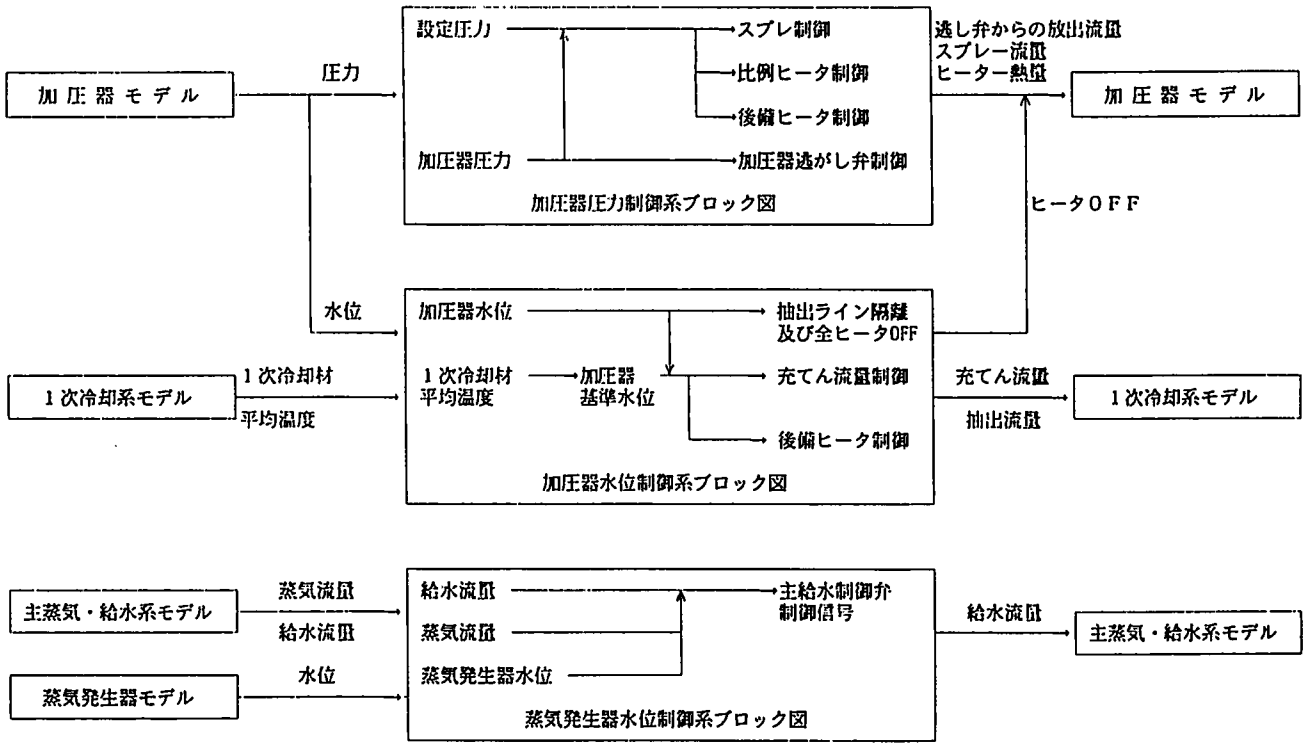
（注）記号の説明については、１１ページ参照



⑦ 安全系のモデル



⑧制御系モデル（1／2）



⑧制御系モデル（2／2）

記号

B	ほう素濃度
C_i	i番目の遅発中性子先行核濃度
$f()$	関数
h	エンタルピー
K	圧損係数
ℓ^*	即発中性子寿命
M	質量
n	中性子束レベル
P_S	蒸気発生器圧力
p	圧力
q	出力
q_{SG}	1次冷却系から蒸気発生器2次側への伝熱量
q_t	炉心発生熱量
q_T	炉心から1次冷却材への伝熱量
T	温度
T_f	燃料平均温度
T_S	蒸気発生器2次側温度
t	時間
U	内部エネルギー
(UA)	熱貫流係数×伝熱面積
W	流量
X_{DJ}	j番目の核分裂生成物密度
α_B	ほう素反応度係数
α_f	ドップラ温度係数
α_m	減速材温度係数
α_q	ドップラ出力係数
β_i	i番目の遅発中性子発生割合
β	遅発中性子発生割合
$\Delta\theta$	対数平均温度差
δk_B	ほう素濃度変化による反応度
δk_D	ドップラ係数による反応度
δk_m	減速材係数による反応度
δk_{rod}	制御棒による反応度
δk_S	トリップ反応度
λ_i	i番目の遅発中性子先行核崩壊定数
λ_{DJ}	j番目の核分裂生成物崩壊定数
ρ	密度

添字記号

C	被覆管
CAV	炉心平均
CW	炉心冷却材
FW	給水
f1	燃料内部領域
f2	燃料外部領域
in	入口
out	出口
s	蒸気
sh	主蒸気ヘッダー
SG	蒸気発生器
SL	主蒸気ライン
SRV	主蒸気逃がし弁
SV	主蒸気安全弁
T	タービン
TB	タービンバイパス
1	損傷側ループ
2	健全側ループ

今回の再現解析に係るモデルの変更について

美浜２号機の蒸気発生器伝熱管損傷事象の再現解析に使用したＭＡＲＶＥＬコードのモデルは、現実的な解析を行うため、従来の原子炉設置変更許可時の原子炉施設の安全評価のための解析（以下「安全解析」という）とは部分的に相違したより現実的なモデル（オプション）を使用している。以下にこれらの相違点につき述べる。

1　破断流モデル

安全解析では、伝熱管破断時の破断流初期値を単相臨界流の実験式であるZaloudekの式で求めた値に余裕をみたものを使用し、その後の時々刻々の破断流量は１次冷却系と２次冷却系の差圧の平方根に比例するものとしている。

$$G = G_0 \sqrt{\Delta P_t / \Delta P_{NOM}}$$

（記号）

G	：破断流量
G_0	：破断流初期値
ΔP_{NOM}	：定格時の１次冷却系と２次冷却系差圧
ΔP_t	：時刻ｔでの１次冷却系と２次冷却系差圧

今回の再現解析では、以下の修正Zaloudekもしくはオリフィスの式で破断流を計算するオプションを使用している。実際の計算においては、臨界流とオリフィス流を同時に計算し、小さい方の流量を用いており、圧力挙動に即した破断流量を計算できるようにしている。

（修正 Zaloudekの式）

Zaloudek 相関式

$G = 0.95\sqrt{2 g_c \cdot \rho \cdot (P - P_{sat})}$ を基にした式

なお、二相臨界流の式との連続性を考慮して、全体に元の式よりも大きい流量を与えるものとなっている。

（オリフィスの式）

$$G = C\sqrt{2 g_c \cdot \rho \cdot \Delta P}$$

（記号）

C	：係数
G	：破断流量
g_c	：力の変換係数
P	：１次冷却系圧力
P_{sat}	：１次冷却系の流体の飽和圧力
ΔP	：１次冷却系と２次冷却系の差圧
ρ	：流体の密度

2　原子炉容器頂部モデル

安全解析では、原子炉容器頂部は気液熱平衡状態として取扱っている。また、１次冷却材流量に比例したごく僅かな流れが、原子炉容器頂部冷却ノズル及び中央部の制御棒案内管経由で原子炉容器頂部へ流入し、周辺部の案内管から原子炉容器上部プレナム部へ流出するモデルとしている。

今回の再現解析では、１次冷却材ポンプ再起動後の原子炉容器頂部ボイドの凝縮を模擬するため、気液境界面での熱伝達を考慮した気液熱非平衡の状態を模擬するオプションを使用した。

(1)液相が飽和の時

（質量保存の式）

$$dM_T/dt = W_{in} - W_{out}$$

（エネルギー保存の式）

$$d(M_T \cdot U_T)/dt = W_{in} \cdot H_{in} - W_{out} \cdot H_{out} + Q_{TM}$$

$$\chi = f(U_T, P_{RCS})$$

$$M_S = \chi \cdot M_T$$

$$M_F = (1-\chi) \cdot M_T$$

(2)液相が未飽和の時

（質量保存の式）

$$dM_F/dt = W_{in} - W_{out} + W_{cond}$$

$$dM_S/dt = -W_{cond}$$

（エネルギー保存の式）

$$d(M_F \cdot U_F)/dt = W_{in} \cdot H_{in} - W_{out} \cdot H_{out} + W_{cond} \cdot H_S + Q_{TM}$$

$$W_{cond} = \eta \cdot A \cdot (P_{RCS} - P_{sat})$$

（記号）

A	：気液境界面での面積
f	：蒸気表
H_{in}	：原子炉容器頂部への流入流のエンタルピ
H_{out}	：原子炉容器頂部からの流出流のエンタルピ
H_S	：蒸気相のエンタルピ
M_F	：液相の質量
M_S	：蒸気相の質量
M_T	：原子炉容器頂部内流体の全質量（液相と蒸気相の質量の合計）

P_{RCS}	：１次冷却系の圧力
P_{sat}	：飽和圧力
Q_{TM}	：器壁等との熱伝達量
t	：時間
U_F	：液相の内部エネルギー
U_T	：原子炉容器頂部内流体の内部エネルギー
W_{cond}	：気液境界面での凝縮量
W_{in}	：原子炉容器頂部への流入流量
W_{out}	：原子炉容器頂部からの流出流量
η	：凝縮係数
χ	：蒸気クォリティー

原子炉容器頂部への流入流量としては、原子炉容器頂部冷却ノズル流量（W_{in1})及び中央部制御棒案内管経由の流量（W_{in2})があるが、安全解析においてこれらは、１次冷却材流量（W_{RCS}）に比例するとしている。今回の再現解析ではW_{in1}は原子炉容器出入口の圧力差に、ダウンカマ部と原子炉容器頂部の１次冷却材の密度差を考慮している。

$$P_{vi} - P_{vo} = \Delta P_{DC} + \Delta P_{CORE} + \Delta P_{OL} - H_{CORE}$$

$$P_{vi} - P_{vo} - H_{UPH} = \Delta P_{UPH}$$

$$H_{UPH} = Z_{UPH}(\rho_{DC} - \rho_{GT})$$

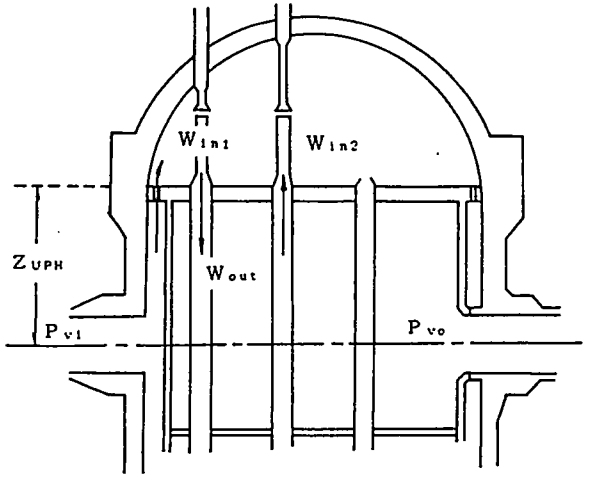
$$W_{in1} = \sqrt{K_1 \cdot \Delta P_{UPH}}$$

$$W_{in2} = K_2 \cdot W_{RCS}$$

（記号）

H_{CORE}	：炉心での浮力
H_{UPH}	：原子炉容器頂部での浮力
K_1	：係数
K_2	：同上
P_{vi}	：原子炉容器入口圧力
P_{vo}	：原子炉容器出口圧力
W_{in1}	：原子炉容器頂部冷却ノズル流量
W_{in2}	：中央部制御棒案内管経由の流量
W_{RCS}	：１次冷却材流量
Z_{UPH}	：上部炉心支持板と１次系配管中心線との距離
ΔP_{CORE}	：炉心圧力損失
ΔP_{DC}	：ダウンカマー圧力損失

ΔP_{OL} ：原子炉容器出口部圧力損失
ΔP_{UPH} ：原子炉容器頂部圧力損失
ρ_{DC} ：ダウンカマー部の冷却水密度
ρ_{GT} ：原子炉容器頂部上部炉心支持板近傍の周辺部制御棒案内管内の冷却水密度



3　蒸気発生器２次側モデル

安全解析では、蒸気発生器の２次側は気液熱平衡の１ノードで模擬している。

今回の再現解析では、液相部と気相部の熱非平衡状態が扱えるように、蒸気発生器２次側を外側と内側の２つのノードに分けて取扱うオプションを採用した。内側ノードは伝熱管近傍の領域、外側ノードは残りの領域としている。以下に蒸気発生器２次側における計算の詳細について述べる。

(1)安全解析

安全解析では蒸気発生器２次側は１ノードで気液熱平衡を仮定し、以下の式で計算する。

$$dM_{SG}/dt = W_F - W_S + W_L$$

$$d(M_{SG} \cdot U_{SG})/dt = W_F \cdot H_F - W_S \cdot H_S + W_L \cdot H_L + Q$$

これらより、

$$\rho_{SG} = M_{SG} / V_{SG}$$

$$T_{SG} = f(U_{SG}, \rho_{SG})$$

$$P_{SG} = f(T_{SG})$$

（記号）

f	：蒸気表
H	：エンタルピ
M	：質量
P	：圧力
Q	：１次側からの伝熱量
T	：温度
t	：時間
U	：内部エネルギー
V	：体積
W	：流量
ρ	：密度

（添字記号）

F	：給水
L	：１次冷却系からの流入
S	：蒸気
SG	：蒸気発生器２次側内

(2)今回の解析（蒸気発生器２次側２ノード模擬の時）

蒸気発生器２次側の温度を求めるため、内側及び外側ノードそれぞれについて、質量保存の式及びエネルギー保存の式を解いている。

a．内側ノードについて、質量の変化分は、１次冷却系からの流入により増加する量と内側ノードから外側ノードへの移行量から算出する。次に、エンタルピの変化分は、１次側からの伝熱量、１次冷却系からの流入水により持ち込まれるエンタルピと内側ノードから外側ノードへの移行により持ち出されるエンタルピから算出する。

$$dM_{SG1}/dt = W_L - W_1$$

$$d(M_{SG1} \cdot U_{SG1})/dt = W_L \cdot H_L - W_1 \cdot H_1 + Q$$

$W_1 \geq 0$ の時、$H_1 = H_{SG1}$

$W_1 < 0$ の時、$H_1 = H_{SG2}$

これらより、

$$T_{SG1} = f(U_{SG1}, P_{SG})$$

$$\rho_{SG1} = f(U_{SG1}, P_{SG})$$

$$W_1 = g(M_{SG1}, \rho_{SG1}, V_{SG1})$$

b．外側ノードについては、質量の変化分は、内側ノードから外側ノードへの移行量、給水流量及び蒸気流量から算出する。次に、エンタルピの変化分は、内側ノードから外側ノードへの移行により持ち込まれるエンタルピ、給水により持ち込まれるエンタルピ及び蒸気により持ち出されるエンタルピから算出する。

外側ノードの質量M_{SG2}及び内部エネルギーU_{SG2}を以下の式により求める。

$$dM_{SG2}/dt = W_F - W_S + W_1$$

$$d(M_{SG2} \cdot U_{SG2})/dt = W_F \cdot H_F - W_S \cdot H_S + W_1 \cdot H_1$$

これらより、

$$\rho_{SG2} = M_{SG2} / V_{SG2}$$

$$T_{SG2} = f(U_{SG2}, \rho_{SG2})$$

$$P_{SG} = f(T_{SG2})$$

（記号）

f	：蒸気表
g	：関数
H	：エンタルピ
M	：質量
P	：圧力
Q	：１次側からの伝熱量
T	：温度
t	：時間
U	：内部エネルギー
V	：体積
W	：流量

（添字記号）

F	：給水
L	：１次冷却系からの流入
S	：蒸気
SG	：蒸気発生器２次側
SG1	：蒸気発生器２次側の内側ノード
SG2	：蒸気発生器２次側の外側ノード
1	：内側ノードから外側ノードへの移行量

c．蒸気発生器２次側を２つのノードとして扱っているが、水頭差による圧力分布は計算していないので、圧力は１つで近似している。すなわち、蒸気発生器２次側圧力は、蒸気発生器上部の気相部を含む外側ノードの液相部の温度に対応する飽和圧力として算出している。

ただし、蒸気発生器の水位上昇により、気相部が圧縮され過熱状態となる場合には、蒸気相の質量と圧縮による気相部の体積の減少から蒸気の比容積を求め、圧力を定める。

損傷側蒸気発生器主蒸気隔離弁から２次側下流への蒸気流出量について

今回の事象において、損傷側蒸気発生器２次側圧力は損傷側蒸気発生器主蒸気隔離弁の隔離完了まで健全側蒸気発生器２次側圧力とともに低下しており、２次側下流へ蒸気が流出していた。

計測できない２次側のパラメータ（主蒸気逃がし弁からの蒸気の大気放出量等）を精度良く推定するためには、計測できている損傷側蒸気発生器２次側圧力及び水位の再現性を良くすることが必要となる。ＭＡＲＶＥＬコードの２次側の主蒸気流量は制御系の動作の模擬によって、タービン流量とタービンバイパス流量の和（以下「全主蒸気流量」という。）が定まる。これに基づき、各蒸気発生器と主蒸気ヘッダ間の圧力損失に見合って、各蒸気発生器からの蒸気流量が配分される。この蒸気流量に基づいて、蒸気発生器２次側の圧力及び温度が計算される。タービントリップによりタービン流量はなくなるが、発電機トリップすなわちタービンバイパス系の停止以前のタービンバイパス流量は、制御系の動作の模擬によって定まっている。しかしながら、タービントリップ以降の２次側下流への蒸気流出量は制御されていないため、入力値として扱うこととしており、今回の場合においても、入力値として扱っている。なお、今回の場合、蒸気発生器２次側圧力の再現性を良くするため、蒸気流量は二つの時間帯に分けている。

以下に、その妥当性を示す。

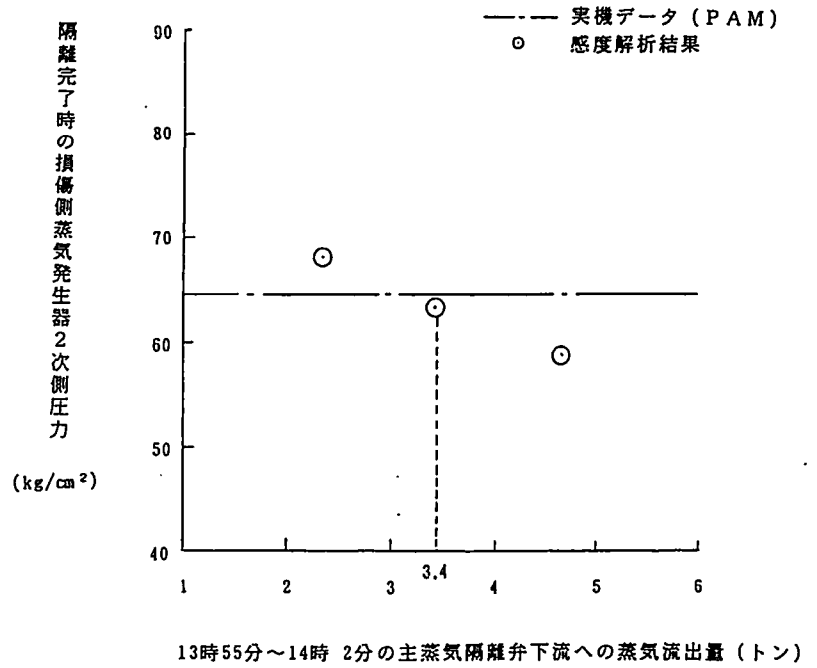
(1)タービントリップから主蒸気隔離弁不完全閉止まで

全主蒸気流量として定格の２％（約５７t/h；５分間で４．８t）を入力することで、蒸気発生器２次側圧力の挙動について、実測値と良い一致を見た。損傷側蒸気発生器へは高温の１次冷却材が流出しており、健全側蒸気発生器２次側圧力に比べて損傷側蒸気発生器２次側圧力は高めとなるため、損傷側蒸気発生器から蒸気は多く流れ、４．８tのうち３．４tが損傷側、１．４tが健全側から流れ主蒸気ヘッダで各蒸気発生器からの圧力損失がバランスする結果を得た。

(2)主蒸気隔離弁不完全閉止から主蒸気隔離弁完全閉止まで

主蒸気隔離弁完全閉止時点の損傷側蒸気発生器２次側圧力が、その後の主蒸気逃がし弁の作動回数に影響を与えることから、これを精度良く再現することが必要となる。(1)の全主蒸気流量として定格の２％（約５７t/h）では、原子炉トリップ後の時間経過により、１次系から２次系への伝熱量が低下しているため、蒸気発生器２次側圧力は低下し過ぎる結果となった。このため、この期間では全蒸気流量として若干小さ目の定格の１．５％（約４２t/h；７分間で４．９t）を入力し、蒸気発生器２次側圧力の挙動の実測値と良い一致を見た。(1)に述べたのと同じ理由から損傷側蒸気発生器から蒸気は多く流れ、４．９tのうち３．４tが損傷側、１．５tが健全側から流れ主蒸気ヘッダで各蒸気発生器からの圧力損失がバランスする結果を得た。

なお、この期間での損傷側蒸気発生器２次側圧力の再現性の重要性に鑑み、入力値の全主蒸気流量の感度解析を実施し、その妥当性を確認した。（図－１参照）



図－１　損傷側蒸気発生器２次側圧力と主蒸気隔離弁下流への蒸気流出量

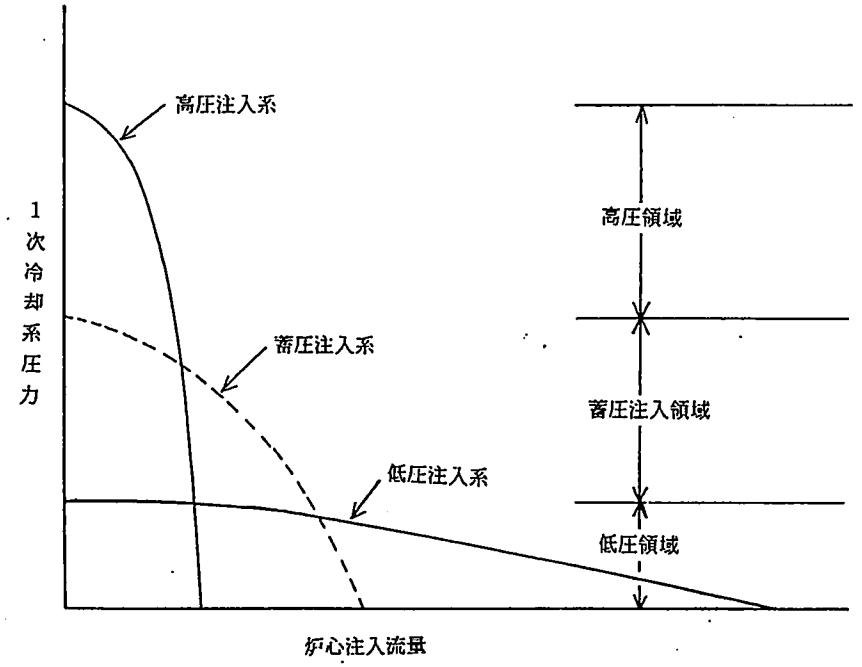
高圧注入ポンプの設計について

１．非常用炉心冷却設備の役割

非常用炉心冷却設備（ＥＣＣＳ）は、高圧注入系、蓄圧注入系及び低圧注入系で構成されており、非常用炉心冷却水（ＥＣＣＳ水）の注入を行う。

高圧注入系、蓄圧注入系及び低圧注入系は、図－１に示すように、主として機能する圧力領域がある。各事象発生時に過渡的に生じる原子炉圧力の領域に応じて機能するＥＣＣＳの系統は次に示すものである。

- 原子炉冷却材喪失事故（ＬＯＣＡ） → 高圧注入系、蓄圧注入系及び低圧注入系
- 主蒸気管破断事故 → 高圧注入系
- ２次冷却系の異常な減圧 → 高圧注入系
- 蒸気発生器伝熱管破損事故 → 高圧注入系



図－１　非常用炉心冷却設備の機能領域の概念図

２．高圧注入系の設計について

ＬＯＣＡ、２次冷却系の異常な減圧、主蒸気管破断事故あるいは蒸気発生器伝熱管破損事故が万一生じると、１次冷却材の保有量の減少あるいは２次側からの冷却による冷却材体積の収縮のため、加圧器水位が低下し、圧力が減少する。そして、加圧器水位低と圧力低の一致信号（あるいは加圧器圧力異常低信号）により、工学的安全施設作動信号が発信し、高圧注入系等が自動的に作動する。

高圧注入系はＥＣＣＳ水を原子炉に注入し、炉心の冷却と反応度の抑制を確実に行う。このＥＣＣＳ水の注入の必要流量は、設計上次の考え方で定められる。

(1)基本的な考え方

高圧注入ポンプに関しては、冷却材が喪失し、蓄圧注入系及び低圧注入系が機能し得ないような高圧の状態が長期に亘って維持される事象（小破断ＬＯＣＡ）において、１次冷却材を確保することを目的として設置される。従って、小破断ＬＯＣＡ時に、炉心に注入されるべき必要流量を定め、この要求を満たす注入特性を有することを設計上の要求としている。

また、このようにして決定された高圧注入ポンプを用いて、２次冷却系の異常な減圧、主蒸気管破断事故並びに蒸気発生器伝熱管破損事故の評価を行ない、その解析結果が安全設計上問題のないことを確認している。

(2)設計上の要求

ＬＯＣＡ時においては、破断口径が小さい場合、破断口から放出される熱エネルギーが大破断ＬＯＣＡに比べて少なく、蒸気発生器による冷却の割合が大きい。炉心発生熱は崩壊熱レベルであり小さいため、１次系圧力の減圧が進み２次系圧力程度となると、蒸気発生器での除熱に必要な１次系と２次系の温度差が小さくなり、１次系の温度が２次系の温度に漸近する。このため、１次系の圧力は、２次系安全弁設定圧力付近で一旦維持されることとなる。この時、破断口から放出される冷却材を補給し、炉心水位を維持するために必要なＥＣＣＳ水を注入できるものとする。

また、その後の低圧注入ポンプ注入開始時点までの期間を考慮して、炉心の崩壊熱により蒸発し、系外に失われる冷却材を補給すると仮定して、原子炉圧力が低圧注入系作動圧において、十分なＥＣＣＳ水を注入できるものとする。

(3)性能決定

小破断ＬＯＣＡ時の必要流量に対し、ポンプミニマムフロー、破断配管からの流出及び炉心注入流量に応じた配管抵抗並びに余裕を考慮した設計要求値を決定し、この要求を満足しうる性能を有するポンプを選定する。

更に、決定された高圧注入ポンプを用いて、２次冷却系の異常な減圧、主蒸気管破断事故並びに蒸気発生器伝熱管破損事故の評価を行ない、その解析結果が安全設計上問題のないことを確認している。

(4)他の事象への適合性の確認

ａ．２次冷却系の異常な減圧

２次冷却系の異常な減圧時の安全評価においては、過冷却により炉心に反応度が投入されても、炉心が再臨界になる前に高濃度のほう酸水であるＥＣＣＳ水が炉心に注入され、未臨界を維持できることを確認している。

ｂ．主蒸気管破断事故

主蒸気管破断事故の安全評価においては、過冷却により炉心に反応度が投入されても、高濃度のほう酸水であるＥＣＣＳ水が炉心に注入されることにより、炉心の燃料健全性(ＤＮＢが生じないこと)が確保できることを確認している。

ｃ．蒸気発生器伝熱管破損事故

蒸気発生器伝熱管破損事故時は、冷却材の喪失の観点において、高温側配管での小破断ＬＯＣＡに包絡される。従って、特にこの事象に基づく設計上の必要流量は定めていない。すなわち、蒸気発生器発生器伝熱管１本の完全両端破断時の破断面積は、約１インチ口径であり、これは、小破断ＬＯＣＡに相当する。

蒸気発生器伝熱管破損事故時においては、小破断ＬＯＣＡに対して流出先との圧力差が小さく、破断口からの冷却材流出が少ないため、冷却材の流出に伴う炉心水位の低下を防ぐ観点からの高圧注入ポンプへの要求は、小破断ＬＯＣＡ時の要求量に対し少ない。

従って、蒸気発生器伝熱管破損事故において要求される必要注入流量は、小破断ＬＯＣＡ時に破断口からの放出流量を供給するために必要とされる注入流量に包絡される。

また、小破断ＬＯＣＡより、１次系圧力が高い状態で推移する蒸気発生器伝熱管破損事故においては、ポンプ注入による冷却がほとんどない状態であったとしても、健全側蒸気発生器により炉心の冷却が行なわれており、

燃料健全性が問題となることはない。

なお、添付十評価においては、一般公衆の被ばくの観点から、放射能放出量が大きくなるよう2台の高圧注入ポンプの最大流量を仮定して評価している。

今回の事象における炉心の健全性評価のための解析方法

１．概　要

今回の事象発生時における炉心の健全性を評価するために、ＤＮＢＲ、燃料被覆管温度及び炉心の冷却性について解析コードにより解析を実施した。

解析にあたっては、解析手法が基本的には公開され、各種試験データ等との照合等によりその妥当性が実証され、原子炉設置変更許可時の原子炉施設の安全評価のための解析に使用されている解析コードを用いた。

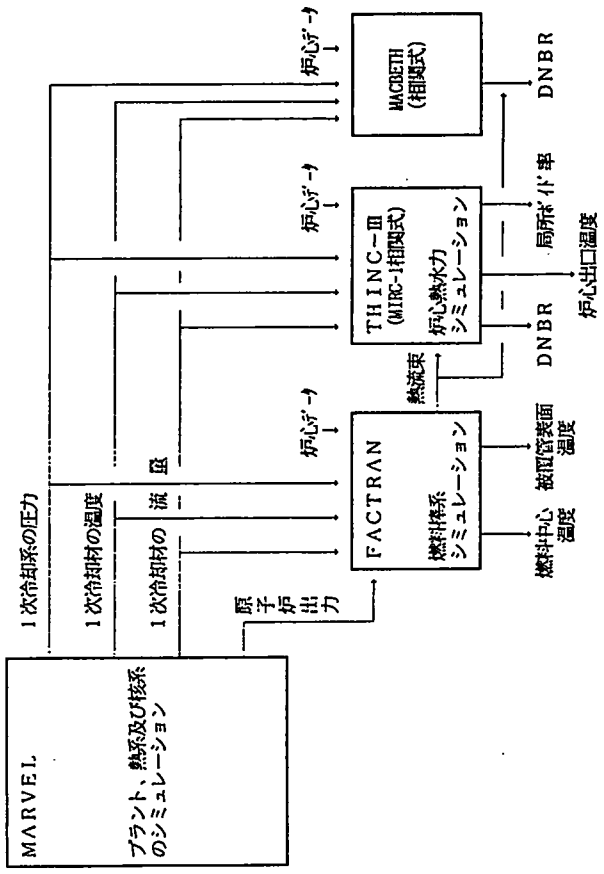
２．解析コード

解析にあたっては、ＭＡＲＶＥＬコードにて実施した今回の事象の再現解析結果に基づき、評価の目的に応じて以下の解析コードを使用した。

なお、使用した各解析コード間の関係は図－１に示すとおりである。

①ＤＮＢＲ評価　：原子炉トリップ前
　　ＴＨＩＮＣ－Ⅲコード
　　（ＤＮＢ相関式：ＭＩＲＣ－１相関式）
　原子炉トリップ後（自然循環状態）
　　ＤＮＢ相関式：ＭＡＣＢＥＴＨ相関式
②燃料被覆管温度評価　：ＦＡＣＴＲＡＮコード
③炉心冷却性評価　：ＴＨＩＮＣ－Ⅲコード

また、解析コード、ＤＮＢ相関式の概要（モデル等）については、別紙－１～３に示す。



図－１　炉心の健全性評価に用いた解析コードの体系

ＦＡＣＴＲＡＮコードの概要

１．概　要

ＦＡＣＴＲＡＮコードは、原子炉出力及び１次冷却材パラメータ（圧力、流量、温度密度）を時間の関数として入力することにより、燃料棒温度分布、被覆管温度、燃料棒表面での熱流束等の時間変化を計算するコードである。

本コードは、解析手法が基本的には公開され、他の公開コード等との照合等によりその妥当性が検証され、原子炉設置変更許可時の原子炉施設の安全評価のための解析において用いられているものである。

２．解析モデル

ＦＡＣＴＲＡＮコードは、別図－１のようにモデル化している。

（１）径方向に同心円状に分割し、各々のメッシュでの発熱及び熱伝導によるメッシュ間の熱の輸送を考慮する。

ただし、伝熱は径方向のみとし、軸方向及び円周方向は考慮しない。

径方向温度分布の算出には以下の非定常一次元熱伝導方程式を解く。

燃料ペレット部：

$$Cp_1 \cdot \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(r \cdot K_1 \frac{\partial T_1}{\partial r}\right) + Q_1$$

ギャップ部：

$$Cp_g \cdot \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(r \cdot K_g \frac{\partial T_g}{\partial r}\right)$$

燃料被覆管部：

$$Cp_c \cdot \rho_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(r \cdot K_c \frac{\partial T_c}{\partial r}\right) + Q_{Zr\text{-}H2O}$$

T　：温度
Cp　：比熱
ρ　：密度
K　：熱伝導率
Q_1　：燃料ペレット内の発熱量
$Q_{Zr\text{-}H2O}$　：燃料被覆管のジルカロイ－水反応による発熱量

r　：径方向位置
t　：時間
添字 i　：燃料ペレット
添字 g　：ギャップ
添字 c　：燃料被覆管

なお、燃料ペレット内の発熱量は、次式のとおりとする。

$$Q_i = (Q_0 \cdot Q_i(r)) \cdot F_q \cdot Q(t)$$

Q_0 ：定格値
$Q_i(r)$：ペレット内出力分布
F_q ：熱水路係数
$Q(t)$ ：過渡時原子炉出力（ＭＡＲＶＥＬコードより）

（２）冷却材条件としては、ＭＡＲＶＥＬコードより求めた流量、温度及び圧力の時間変化を入力する。

（３）熱伝達モデルは以下のとおり。

強制対流：Dittus-Boelter の式

$$\frac{hD}{K} = 0.023 \left(\frac{DG}{\mu}\right)^{0.8} \left(\frac{Cp \cdot \mu}{K}\right)^{0.4}$$

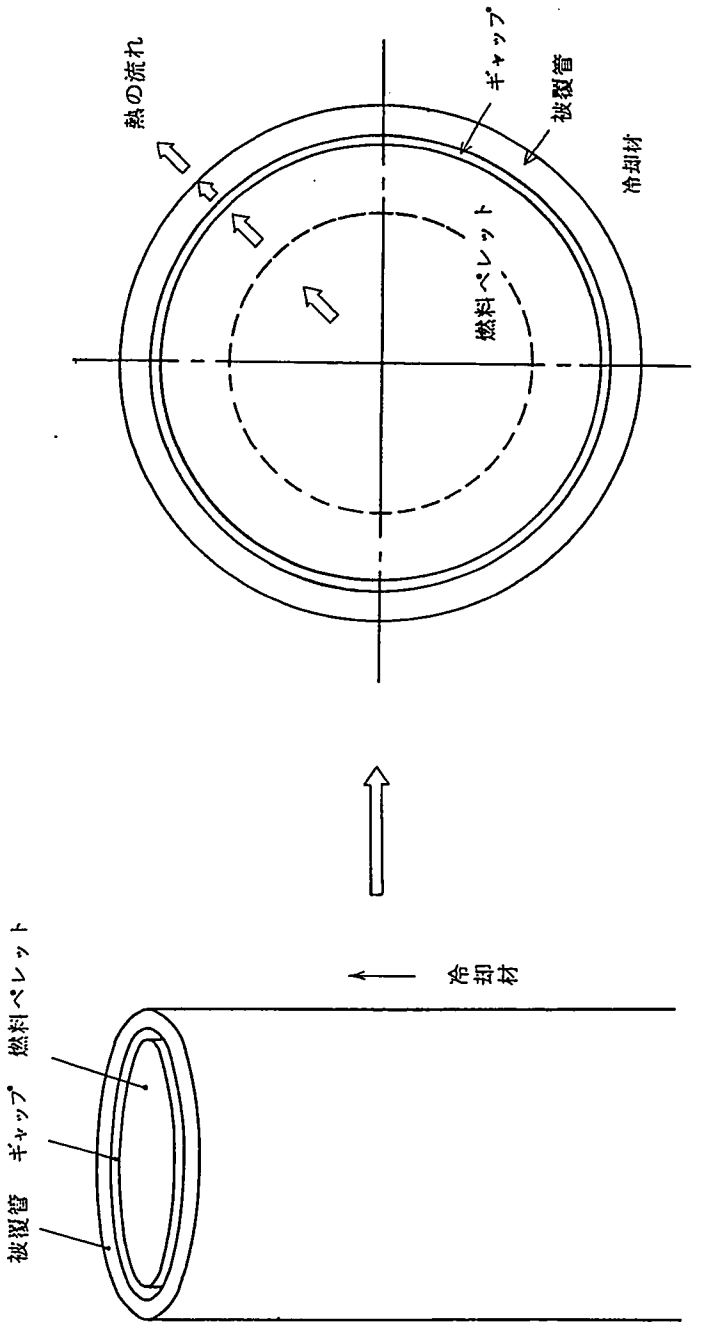
局所沸騰：Jens-Lottes の式

$$T = T_{SAT} + 1.9 q^{0.25} e^{-0.001111P}$$

膜沸騰　：Bishop-Sandberg-Tong の式

$$\frac{hD}{K} = 0.0193 \left(\frac{DG}{\mu}\right)^{0.8} \left(\frac{Cp \cdot \mu}{K}\right)^{1.23} \left(\frac{\rho_g}{\rho_b}\right)^{0.68} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.068}$$

h　：熱伝達率
μ　：粘性係数
D　：等価直径
G　：流量
K　：熱伝導率
Cp　：比熱
T　：被覆管表面温度
T_{SAT}　：飽和温度
q　：熱流束
P　：圧力
ρ_g　：密度（飽和蒸気）
ρ_l　：密度（飽和水）
ρ_b　：密度（混合平均）



別図－１　FACTRANコードのモデル

ＴＨＩＮＣ－Ⅲコードの概要

１．概　要

ＴＨＩＮＣ－Ⅲコードは、炉心出力及び炉心入口における冷却材流量、温度、圧力を時間の関数として入力することにより、局所的な冷却材密度、流速、エンタルピ、ボイド率等の時間変化並びにこれらから限界熱流束比（ＤＮＢＲ）の時間変化を計算するコードである。

本コードは、解析手法が基本的には公開され、試験データ等との照合等によりその妥当性が検証され、原子炉設置変更許可時の原子炉施設の安全評価のための解析に用いられているものである。

２．解析モデル

ＴＨＩＮＣ－Ⅲコードは、別図－１のようにモデル化している。

（１）炉心を半径方向には並行水路、軸方向には等間隔のメッシュに分割し、個々のメッシュに対して下記の質量保存式、エネルギー保存式、運動量保存式をもとに３次元の効果を考慮して時間依存で解く。

質量保存式　：$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho \vec{V}) = 0$

エネルギー保存式　：$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho \vec{V} H) = Q + (TC)$

運動量保存式　：$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + (\vec{V}\vec{\nabla})\rho \vec{V} = -\mathrm{grad}P + \vec{F}$

$$\vec{V}\vec{\nabla} = v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} + v_z \frac{\partial}{\partial z}$$

ρ ： 冷却材密度
$\bar{V}$ ： 冷却材速度
t ： 時間
H ： 冷却材エンタルピ
Q ： 発熱項
（ＴＣ）： 水路間の混合による熱移動量
P ： 圧力
$\bar{F}$ ： 外力

（２）水路間の混合による熱移動量は、以下の式により計算する。

$$(TC) = (TDC) \cdot a \cdot \bar{V} \cdot \bar{\rho} \cdot \Delta Z \cdot \Delta H$$

（ＴＤＣ）： 熱拡散係数
a ： 水路間の単位長さ
$\bar{V}$ ： 水路間の平均流速
$\bar{\rho}$ ： 水路間の平均密度
ΔZ ： ステップ長
ΔH ： 水路間エンタルピ差

（３）ボイド率は以下の相関式を用いて計算する。
壁面ボイド領域（壁面からのボイドの離脱なし）：Maurer の式

$$A = \frac{\{q'' - h\,(T_w - T_b)\} \cdot (Pr)_b \cdot K_b}{1.07\,h^2\,(T_{SAT} - T_b)}$$

T_w：壁面温度
T_b：冷却材混合平均温度
$(Pr)_b$：冷却材混合平均プラントル数
K_b：冷却材混合平均熱伝導率
h ：熱伝達率
q'' ：熱流束
T_{SAT}：飽和温度
A ：壁面ボイドの厚さ

上式のＡより壁面ボイドの占める面積を求め、これと流路面積の比としてボイド率が計算される。

サブクール沸騰領域（ボイドが壁面から離脱）及びバルク沸騰領域：
Bowring のモデル

$$X_b = \frac{p}{\rho A V \lambda (1+\varepsilon)} \cdot q'' \cdot (Z - Z_r)$$

p ：流路発熱部のぬれぶち長さ
ρ ：密度
A ：流路面積
V ：流速
λ ：流体の蒸発潜熱
ε ：実験定数
Z ：軸方向位置
Z_r：ボイド離脱点の軸方向位置
q'' ：ＺとＺｒの間の平均熱流束
X_b：蒸気クオリティ

上式のX_bを用いて、ボイド率α_bは下式により求める。

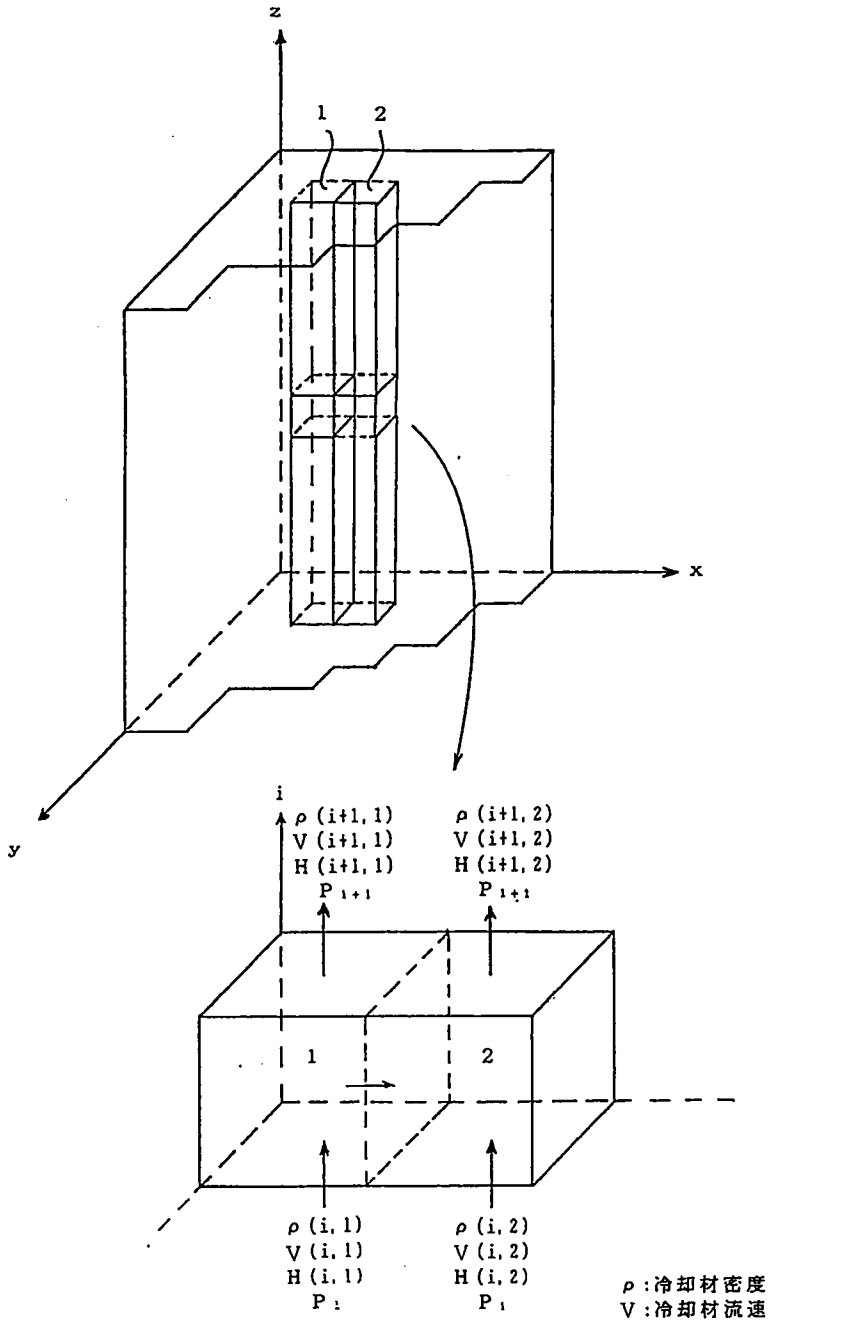
$$\alpha_b = \frac{X_b}{s\gamma(1 - X_b) + X_b}$$

γ ：蒸気と水の密度比
s ：スリップ比（ＴＨＩＮＣ－Ⅲコードでは均質流モデルを採用しており、ｓ＝１．０である。）

（４）ＤＮＢＲは以下のように計算する。

$$DNBR = \frac{q''^{NU}_{DNB}}{q''_{C}} \times F_{DNBR}$$

q''_C：ＦＡＣＴＲＡＮコードにより求められた局所熱流束
q''^{NU}_{DNB}：ＭＩＲＣ－１相関式（「発電用加圧水型原子炉の炉心熱設計評価指針」の解説においてＰＷＲ炉心の熱設計評価に用いることの妥当性が認められている相関式）により求められるＤＮＢ熱流束
F_{DNBR}：ＤＮＢＲ乗数（不確かさを考慮する因子；０．７５）



別図－1　ＴＨＩＮＣ－Ⅲコードのモデル

ＭＡＣＢＥＴＨ相関式の概要

１．概　要

ＭＡＣＢＥＴＨ相関式は、一様加熱流路における限界熱流束を与える相関式であり、水に対する広範囲なデータをもとに作成された相関式として良く知られており、「軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針」の付録ＩにおいてＤＮＢの判定に適用することが妥当と認められている相関式である。

２．相関式

ＭＡＣＢＥＴＨ相関式は、限界熱流束の質量速度に対する特性を考慮し、領域を低流速域と高流速域の２つに分けている。今回の美浜２号機の事象の自然循環時のような低流量時に適用できる低流速域でのＭＡＣＢＥＴＨ相関式は下式のとおりである。

$$\frac{q_{crit}}{10^6} = \frac{(G/10^6)\{H_{fg}+(H_{sat}-H_{in})\}}{158\cdot D^{0.1}(G/10^6)^{0.49}+4L/D}$$

q_{crit} ：限界熱流束
G ：質量速度
L ：発熱長
D ：等価直径
H_{fg} ：蒸発潜熱
H_{sat} ：飽和エンタルピ
H_{in} ：入口エンタルピ

３．ＭＡＣＢＥＴＨ相関式適用にあたっての留意点

ＭＡＣＢＥＴＨ相関式は一様加熱流路における限界熱流束を与える相関式であるため、ＰＷＲ燃料集合体のような管群流路に適用するにあたっては、以下の考え方により保守的に評価することとした。

高温燃料棒の熱流束は、高温点（F_Qポイント）における熱流束で軸方向に一様に分布しているとし、炉心出口でのＤＮＢ発生を仮定する。

管群流路では、横流れによるミキシングの効果によりエンタルピ上昇が緩和されることが考えられるが、この効果を無視する。

放射性物質の放出量の算出方法について

（大気へ放出された放射性希ガス）

放出経路	放出量	算出方法
①復水器空気抽出ポンプ及び脱気器ベント（地上放出）	1.1×10^{7}Bq	[復水器空気抽出ポンプ] R－15の記録と復水器空気抽出ポンプの排気量とから算出 R－15記録 (1):200/2cpm, (2):(1200+200)/2cpm × R－15校正定数（注2）$(9.41\times10^{-5}$Bq/cm^3/cpm) × 復水器空気抽出ポンプ排気量 $(6.8\times10^{6}$cm^3/min) × 排気時間 (1):45min[12:40～13:25], (2):15min[13:25～13:40] （注1） [脱気器ベント] R－15の記録、脱気器への蒸気流入量と復水器への蒸気流入量の比率とから算出 （①復水器空気抽出ポンプからの放出量）×（脱気器への蒸気流入量(2.1×10^{8}g/h)/復水器への蒸気流入量(1.6×10^{9}g/h)）
②1号機補助建屋排気筒（排気筒放出）	4.9×10^{9}Bq	1号機補助建屋排気筒ガスモニタの記録と1号機補助建屋排気筒の排気量とから算出 1号機補助建屋排気筒ガスモニタ記録 (1):$(2.5\times10^{-14}-1.5\times10^{-14})/2$ A, (2):$(2.0\times10^{-12}-1.5\times10^{-14})/2$ A, (3):$(2.5\times10^{-14}-1.5\times10^{-14})/2$ A × 1号機補助建屋排気筒ガスモニタ校正定数（注2）$(1.5\times10^{11}$Bq/cm^3/A) × 1号機補助建屋排気筒排気量 $(3.09\times10^{9}$cm^3/min) × 排気時間 (1): 5min[13:40～13:45], (2):10min[13:45～13:55], (3):125min[13:55～16:00] （注3）

（注1） 放出による記録の増加分を変化の異なる2つの時間帯に分割して、面積として算出
（注2） 校正定数：記録（計数率又は電流値）から放射性物質濃度への換算係数
（注3） 放出による記録の増加分を変化の異なる3つの時間帯に分割して、面積として算出

（大気へ放出された放射性希ガス）

放出経路	放出量	算出方法
③グランドスチームコンデンサベント（地上放出）	2．0×10⁹ Bq	(12:40～13:50) R－15の記録、1号機補助建屋排気筒ガスモニタの記録、ｸﾞﾗﾝﾄﾞｽﾁｰﾑｺﾝﾃﾞﾝｻへの蒸気流入量と復水器への蒸気流入量の比率とから算出 (①復水器空気抽出ポンプからの放出量＋②1号機補助建屋排気筒からの放出量)× (ｸﾞﾗﾝﾄﾞｽﾁｰﾑｺﾝﾃﾞﾝｻへの蒸気流入量(2.6×10⁶g/h)/復水器への蒸気流入量(1.6×10⁹g/h)) (13:50～14:02) 1次冷却材の放射性希ガス濃度と今回の事象の解析値とから算出 1次冷却系から損傷側蒸気発生器2次側に移行する放射性希ガス量の算出式 $Q=\int_{T1}^{T2} Ao\, e^{-\alpha t}\cdot L\,dt \quad , \alpha=\lambda+L/V$ （1次冷却系から損傷側蒸気発生器2次側へ流出した1次冷却材の放射性希ガスの希釈及び放射性崩壊による減少を考慮） 上式で求めたQから、この期間内の損傷側蒸気発生器の主蒸気隔離弁下流側への蒸気流出量に対するｸﾞﾗﾝﾄﾞｽﾁｰﾑｺﾝﾃﾞﾝｻ蒸気流入量の割合を用いて算出 Q：1次冷却系から損傷側蒸気発生器2次側に移行する放射性希ガス量 Ao：1次冷却材の放射性希ガス濃度 L：1次冷却系から損傷側蒸気発生器2次側への漏洩率 V：1次冷却材の重量 λ：崩壊定数 1次冷却材の放射性希ガス濃度（2月5日測定値） ・Ar-41 1330Bq/g ・Kr-85m 14Bq/g ・Kr-87 22.5Bq/g ・Kr-88 23.6Bq/g ・Xe-133 104Bq/g ・Xe-135 110Bq/g 損傷側蒸気発生器2次側に移行した放射性希ガス量×（ｸﾞﾗﾝﾄﾞｽﾁｰﾑｺﾝﾃﾞﾝｻへの蒸気流入量）／（主蒸気隔離弁下流側への蒸気流出量） (1.48 ×10¹⁰Bq) (0.9t) (6.8t)

（大気へ放出された放射性希ガス）

放出経路	放出量	算出方法
④損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁等（地上放出）	1．6×10¹⁰Bq	[損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁] 1次冷却材の放射性希ガス濃度と今回の事象の解析値とから算出 1次冷却系から損傷側蒸気発生器2次側に移行する放射性希ガス量の算出式 $Q=\int_{T1}^{T2} Ao\, e^{-\alpha t}\cdot L\,dt \quad , \alpha=\lambda+L/V$ （1次冷却系から損傷側蒸気発生器2次側へ流出した1次冷却材の放射性希ガスの希釈及び放射性崩壊による減少を考慮） 上式で、3回の損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁作動時までに損傷側蒸気発生器2次側に蓄積するQを求め、損傷側蒸気発生器2次側の蒸気量に対する損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁から蒸気放出量の割合を用いて算出 Q：1次冷却系から損傷側蒸気発生器2次側に移行する放射性希ガス量 Ao：1次冷却材の放射性希ガス濃度 L：1次冷却系から損傷側蒸気発生器2次側への漏洩率 V：1次冷却材の重量 λ：崩壊定数 1次冷却材の放射性希ガス濃度（2月5日測定値） ・Ar-41 1330Bq/g ・Kr-85m 14Bq/g ・Kr-87 22.5Bq/g ・Kr-88 23.6Bq/g ・Xe-133 104Bq/g ・Xe-135 110Bq/g 主蒸気逃がし弁作動時の蒸気発生器2次側の放射性希ガス量×主蒸気逃がし弁からの蒸気放出量／蒸気発生器2次側の蒸気量 [1回目] [2回目] [3回目] (1.6×10¹⁰Bq)×(0.48t)/(2.4t)＋(2.2×10¹⁰Bq)×(0.42t)/(1.8t)＋(2.3×10¹⁰Bq)×(0.37t)/(1.3t) [1次冷却系と損傷側蒸気発生器2次側の圧力がほぼ一致後の損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁及び主蒸気安全弁からの漏洩] 損傷側蒸気発生器2次側に残留した放射性希ガス量、設計漏洩率、漏洩時間から算出 損傷側蒸気発生器2次側に残留した放射性希ガス量／蒸気発生器2次側気相部容積 × 初期漏洩率 × 漏洩率降下の補正 (1.91×10¹⁰Bq) (68.5m³) (5m³/d) (2/3)
⑤蒸気発生器ブローダウンタンクベント（地上放出）	1．3×10⁸Bq	蒸気発生器2次側器内水の放射性希ガス濃度と蒸気発生器ブローダウン流量とから算出 蒸気発生器2次側器内水の放射性希ガス濃度 × 蒸気発生器ブローダウン流量 × 放出時間 （損傷側蒸気発生器：6.14Bq／g） (2.0×10⁷g/h) (65/60h) （健全側蒸気発生器：検出限界値以下）

（大気へ放出された放射性よう素）

放出経路	放出量	算出方法
①復水器空気抽出ポンプ及び脱気器ベント（地上放出）	2．7×10⁸Bq	[復水器空気抽出ポンプ] 蒸気発生器2次側器内水の放射性よう素濃度、復水器への蒸気流入量、蒸気発生器及び復水器におけるよう素の気液分配係数から算出 蒸気発生器2次側器内水の放射性よう素濃度 × 蒸気発生器におけるよう素の気液分配係数の逆数*1 × (6.11×10¹Bq/g) (1/100) 復水器におけるよう素の気液分配係数の逆数*2 × 復水器への蒸気流入量×放出時間 (15/100) (1.6×10⁹g/h) (60/60h) [脱気器ベント] 蒸気発生器2次側器内水の放射性よう素濃度、脱気器への蒸気流入量と蒸気発生器におけるよう素の気液分配係数とから算出 蒸気発生器2次側器内水の放射性よう素濃度 × 蒸気発生器におけるよう素の気液分配係数の逆数*1 × 脱気器への蒸気流入量 (6.11×10¹Bq/g) (1/100) (2.1×10⁹g/h) ×放出時間 (60/60h)
②1号機補助建屋排気筒（排気筒放出）	————	1号機補助建屋排気筒の放射性よう素濃度の測定結果 （検出限界値以下）
③グランドスチームコンデンサベント（地上放出）	2．5×10⁸Bq	(12:40～13:50) 蒸気発生器2次側器内水の放射性よう素濃度、ｸﾞﾗﾝﾄﾞｽﾁｰﾑｺﾝﾃﾞﾝｻへの蒸気流入量と蒸気発生器におけるよう素の気液分配係数とから算出 蒸気発生器2次側器内水の放射性よう素濃度 × 蒸気発生器におけるよう素の気液分配係数の逆数*1 × (6.11×10¹Bq/g) (1/100) ｸﾞﾗﾝﾄﾞｽﾁｰﾑｺﾝﾃﾞﾝｻへの蒸気流入量 × 放出時間 (2.6×10⁶g/h) (70/60h) (13:50 ～14:02) 蒸気発生器2次側器内水の放射性よう素濃度、この期間内のｸﾞﾗﾝﾄﾞｽﾁｰﾑｺﾝﾃﾞﾝｻへの蒸気流入量と蒸気発生器におけるよう素の気液分配係数とから算出 蒸気発生器2次側器内水の放射性よう素濃度 × 蒸気発生器におけるよう素の気液分配係数の逆数*1 × ((6.11×10¹+8.1×10⁰)/2Bq/g)（注） (1/100) この期間内のｸﾞﾗﾝﾄﾞｽﾁｰﾑｺﾝﾃﾞﾝｻへの蒸気流入量 (9×10⁵g)

（注） 13:50～14:02 の間の蒸気発生器2次側器内水の放射性よう素濃度は、2回の測定値の平均値

（大気へ放出された放射性よう素）

放出経路	放出量	算出方法
④損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁等（地上放出）	1．1×10⁸Bq	[損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁]（注） 蒸気発生器2次側器内水の放射性よう素濃度、今回の事象の解析値と蒸気発生器におけるよう素の気液分配係数とから算出 蒸気発生器2次側器内水の放射性よう素濃度×蒸気発生器におけるよう素の気液分配係数の逆数*1×主蒸気逃がし弁からの蒸気放出量 （損傷側蒸気発生器:8.1×10¹Bq/g) (1/100) (1.3×10⁶g) [1次冷却系と損傷側蒸気発生器2次側の圧力がほぼ一致後の損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁及び主蒸気安全弁からの漏洩]（注） 損傷側蒸気発生器2次側に残留した放射性よう素濃度、蒸気発生器におけるよう素の気液分配係数、設計漏洩率、漏洩時間から算出 蒸気発生器2次側器内水の放射性よう素濃度／比容積 × 蒸気発生器におけるよう素の気液分配係数の逆数*1 × 初期漏洩率 × （損傷側蒸気発生器:8.1×10¹Bq/g) (3×10⁻⁵m³/g) (1/100) (5m³/d) 漏洩率降下の補正 (2/3)
⑤蒸気発生器ブローダウンタンクベント（地上放出）	6．6×10⁷Bq	蒸気発生器2次側器内水の放射性よう素濃度、蒸気発生器ブローダウン流量と蒸気発生器ブローダウンタンクにおけるよう素の気液分配係数とから算出 蒸気発生器2次側器内水の放射性よう素濃度 × 蒸気発生器ブローダウンタンクにおけるよう素の気液分配係数の逆数*3 × （損傷側蒸気発生器:6.11×10¹Bq/g) (5/100) （健全側蒸気発生器:検出限界値以下） 蒸気発生器ブローダウン流量 × 放出時間 (2.0×10⁷g/h) (65/60h)

（注） 健全側蒸気発生器の放射性よう素濃度は検出限界値以下

＊1：「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する指針」
＊2：NUREG－0017
＊3：NUREG－0017

（海へ放出された放射性物質）

放出経路	放出量	算出方法
①蒸気発生器ブローダウンタンク	7．0×10^{6}Bq	蒸気発生器２次側器内水の全ガンマ放射能濃度と蒸気発生器ブローダウン流量とから算出 ［損傷側蒸気発生器］ （12:40～13:00） 蒸気発生器２次側器内水の全ガンマ放射能濃度 (6.00×10^{-3}Bq/g) × 蒸気発生器ブローダウン流量 (2.0×10^{7}g/h) × 放出時間 (20/60h) （13:00～13:45） 蒸気発生器２次側器内水の全ガンマ放射能濃度 ((6.00×10^{-3}＋8.80×10^{-1})/2 Bq/g)（注１） × 蒸気発生器ブローダウン流量 (2.0×10^{7}g/h) × 放出時間 (45/60h) ［健全側蒸気発生器］ （12:40～13:00） 蒸気発生器２次側器内水の全ガンマ放射能濃度 (検出限界値以下) （13:00～13:45） 蒸気発生器２次側器内水の全ガンマ放射能濃度 (1.97×10^{-2}Bq/g) × 蒸気発生器ブローダウン流量 (2.0×10^{7}g/h) × 放出時間 (45/60h)

（注１）　13:00～13:45の間の蒸気発生器２次側器内水の全ガンマ放射能濃度は、２回の測定値の平均値

放射性希ガスの濃度の測定値

・１次冷却材の放射性希ガスの濃度（２月５日）

核種	濃度(Bq/cm^{3}) [10:55]
Ar-41	1.33×10^{3}
Kr-85m	1.40×10^{1}
Kr-87	2.25×10^{1}
Kr-88	2.36×10^{1}
Xe-133	1.04×10^{2}
Xe-135	1.10×10^{2}

・蒸気発生器２次側器内水の放射性希ガスの濃度（２月９日）

核種	濃度(Bq/cm^{3})	
	損傷側蒸気発生器	健全側蒸気発生器
	[14:00]	[14:05]
Ar-41	ND	ND
Kr-85m	ND	ND
Kr-87	ND	ND
Kr-88	ND	ND
Xe-133	6.14	ND
Xe-135		ND

（注）　（ ）内は測定日、［ ］内は試料採取時刻
ＮＤ：検出限界値以下

放射性よう素の濃度の測定値

・１次冷却材の放射性よう素の濃度（２月８日）

核種	濃度(Bq/cm^{3}) [10:10]
I-131	3.88
I-132	9.14×10^{1}
I-133	4.40×10^{1}
I-135	9.91×10^{1}

・蒸気発生器２次側器内水の放射性よう素の濃度（２月９日）

核種	濃度(Bq/cm^{3})			
	損傷側蒸気発生器		健全側蒸気発生器	
	[14:00]	[15:30]	[14:05]	[15:30]
I-131	1.10	1.78	ND	ND
I-132	2.32×10^{1}	2.72×10^{1}	ND	ND
I-133	1.20×10^{1}	1.93×10^{1}	ND	ND
I-135	2.48×10^{1}	3.27×10^{1}	ND	ND

・１号機補助蒸気系の放射性よう素の濃度（２月１３日）

核種	濃度(Bq/cm^{3}) [2/7 9:25～2/13 9:30]
I-131	ND
I-132	ND
I-133	ND
I-135	ND

（注）　（ ）内は測定日、［ ］内は試料採取時刻
ＮＤ：検出限界値以下

実効線量当量評価におけるトリチウムの取扱いについて

１．トリチウムの位置付け

トリチウムは、低エネルギーの純ベータ線放出核種であること、人体において濃縮されないこと及び体内に取り込んだ時の実効線量当量への換算係数が小さいことから、実効線量当量への寄与は小さく、事故時の実効線量当量の評価対象核種に含まれていない。

なお、原子炉設置許可時の平常運転時の周辺公衆の受ける実効線量当量評価では、海へ放出される放射性物質とは別に、海へ放出されるトリチウムによる実効線量当量評価を実施しており、美浜発電所原子炉施設保安規定に年間のトリチウムの放出管理の基準値（年間１．２×１０^{14}Bq）を定めている。

２．設置許可申請書におけるトリチウムの取扱い

トリチウムは、美浜発電所原子炉設置変更許可申請（平成２年９月１７日許可）添付書類九において、年間に生成する１次冷却材中のトリチウムの全量に余裕を見た値（約１．２×１０^{14}Bq）が環境へ放出されるものとして評価しており、その値は年間約８．３×１０$^{-5}$mSvであり、線量目標値（５×１０$^{-2}$mSv）に比べ十分小さい。

また、この値は、大気へ放出される放射性希ガスのガンマ線からの外部被ばくによる実効線量当量（年間約３．２×１０$^{-3}$mSv）、放射性よう素摂取に伴う内部被ばくによる実効線量当量（年間約６×１０$^{-4}$mSv）、海へ放出される放射性物質の摂取に伴う内部被ばくによる実効線量当量（年間約４．５×１０$^{-3}$mSv）と比べても小さい値である。

実効線量当量の算出に用いたデータ

１．大気へ放出された放射性希ガスによる実効線量当量評価

（１）放出時間

地上放出　　平成３年２月９日　１２：４０～１４：３９
排気筒放出　平成３年２月９日　１３：４０～１６：００

（２）実効線量当量計算

（地上放出分）

時刻（時）	着目方位	D／Q (Gy/Bq)	Q（地上）(Bq)	実効線量当量 (Sv)
１２	ＥＳＥ	1.25×10^{-19}	4.0×10^{10}	$\underline{5.0\times10^{-9}}$
１３	ＳＳＥ	6.02×10^{-20}		2.4×10^{-9}
１４	ＳＳＥ	1.12×10^{-19}		4.5×10^{-9}

＊実効線量当量＝K_1・Ｑ・（Ｄ／Ｑ）
K_1：空気吸収線量から実効線量当量への換算係数（＝１Sv/Gy）
（Ｄ／Ｑ）：ガンマ線エネルギー０．５MeVにおける相対線量（Gy/Bq）

（排気筒放出分）

時刻（時）	着目方位	D／Q (Gy/Bq)	Q（排気筒）(Bq)	実効線量当量 (Sv)
１３	ＳＳＥ	6.59×10^{-20}	1.1×10^{10}	7.3×10^{-10}
１４	ＳＳＥ	7.07×10^{-20}		$\underline{7.8\times10^{-10}}$
１５	ＳＳＥ	4.68×10^{-20}		5.2×10^{-10}

＊実効線量当量＝K_1・Ｑ・（Ｄ／Ｑ）
K_1：空気吸収線量から実効線量当量への換算係数（＝１Sv/Gy）
（Ｄ／Ｑ）：ガンマ線エネルギー０．５MeVにおける相対線量（Gy/Bq）

上記の地上放出分と排気筒放出分のそれぞれの最大値を合計する。

$5.0\times10^{-9}+7.8\times10^{-10}=5.8\times10^{-9}$(Sv)

$\fallingdotseq\underline{6\times10^{-6}}$(mSv)

2．大気へ放出された放射性よう素による実効線量当量評価

（1）放出時間

地上放出　　平成3年2月9日　　12：40～14：39
排気筒放出　　1号機補助建屋排気筒は検出限界値以下

（2）実効線量当量計算
（地上放出分）

時刻（時）	着目方位	χ／Q (s/m³)	Q（地上）(Bq)	実効線量当量 (Sv)
12	ESE	5.91×10^{-6}	2.3×10^{7}	7.9×10^{-10}
13	SSE	2.56×10^{-6}		3.4×10^{-10}
14	SSE	6.61×10^{-6}		$\underline{8.8\times10^{-10}}$

＊実効線量当量＝$f_{HE}\cdot K_{HE}\cdot M_2\cdot Q_E\cdot(\chi/Q)$
f_{HE}：放射性よう素の呼吸摂取における成人の実効線量当量から小児の実効線量当量への補正係数　（＝2）
K_{HE}：I－131の呼吸摂取による成人の実効線量当量への換算係数（8.8×10^{-9} Sv/Bq）
M_2：成人の呼吸率（$=3.3\times10^{-4}m^3/s$）
Q_E：放射性よう素の放出量（I－131等価換算）
（χ／Q）：相対濃度(s/m³)

上記の最大値をよう素による実効線量当量とし、
8.8×10^{-10}(Sv)≒$\underline{9\times10^{-7}(mSv)}$

モニタリングポストの設置状況について

１．モニタリングポストの設置の考え方について

（１）基本的考え方

モニタリングポストの設置目的は、周辺公衆の放射線防護の観点から平常時及び事故時の発電所周辺環境における空間ガンマ線量率の状況を連続監視することである。

（２）設置場所の選定について

モニタリングポスト設置場所の選定は、周辺監視区域の境界、敷地周辺の人が居住する集落、及び発電所設置場所の地形等を考慮して決定する。

なお、設置場所の決定に際しては、「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」、「発電用軽水型原子炉施設における事故時の放射線計測に関する審査指針」及び「環境放射線モニタリングに関する指針」等の考え方を踏まえている。

２．美浜発電所のモニタリングポストの設置状況について　（図-1）

（１）モニタリングポスト設置場所の選定について

モニタリングポストは上記１．の考え方に従い、以下のとおり設置されている。

① 発電所周辺監視区域境界近傍（発電所中心から約２km以内）には６基のモニタリングポスト（モニタステーションを含む）が設置されている。なお、さらに約２km以遠には 当社が自主的に７基のモニタリングポストを設置している。

② 海側のように明らかに人が居住しない方向は除外し、陸側（対岸のあるものを含む）［16方位中6方位］に設置されている。

③ ６方位については、周辺監視区域境界近傍に設置することとしているが、集落がある場合には、集落内に設置されている。

（２）現状の設置状況でのモニタリングポストの検知能力について

① 今回の事象の場合、モニタリングポストの指示値は年間の自然変動幅程度であり、今回の事象による有意な変化を示さなかった。これは、今回の事象による放射性物質の放出量が微量（大気へ放出された放射性希ガスで約０．６Ｃｉ）であり、周辺公衆の受けると考えられる実効線量当量の評価結果も約１×１０$^{-5}$ｍＳｖと年間の自然界から受ける実効線量当量１ｍＳｖに比べても十分小さい値であったため、この程度の値ではモニタリングポストの指示値に有意な変化を示さないからである。

② 美浜発電所原子炉設置（変更）許可申請書添付書類十における蒸気発生器伝熱管破損事故のように、周辺公衆の受けると考えられる実効線量当量が自然

界から受ける実効線量当量と比べて有意な場合は、仮に風向きがモニタリングポストとモニタリングポストの間と仮定したとしても、モニタリングポストは十分な検知能力がある。

以上

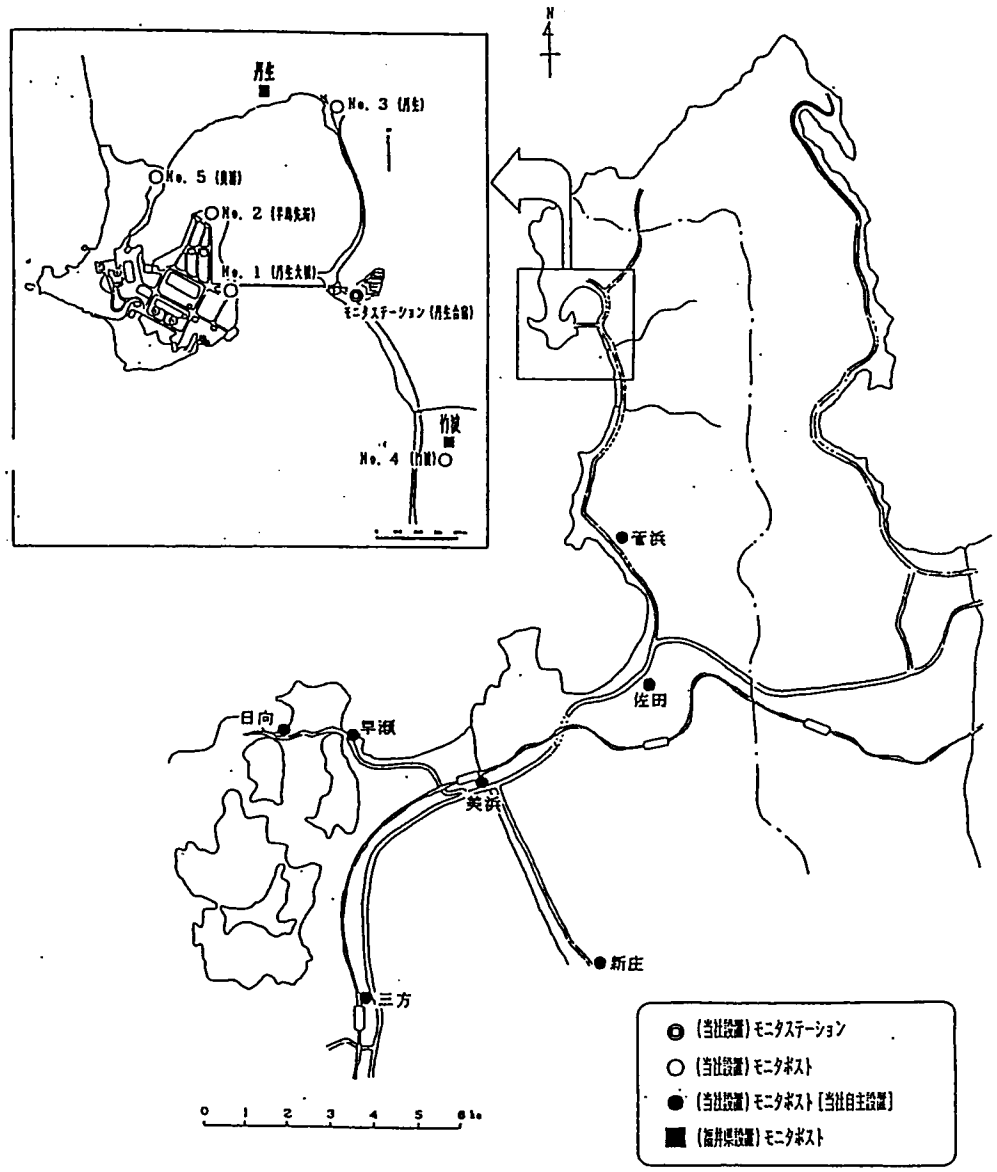


図-1　美浜発電所のモニタリングポストの設置状況

海へ放出された放射性物質による実効線量当量について

１．実効線量当量評価の考え方

蒸気発生器伝熱管損傷事象が発生すると、蒸気発生器ブローダウン水モニタにより異常が検知され、自動的に蒸気発生器ブローダウン系が隔離され、蒸気発生器ブローダウン水の放出は停止される。

モニタの警報設定点は、通常時のバックグラウンドレベルから有意な変化があれば検知できるように決められていることから、警報が発信されると直ちに放出が停止され、放出量は問題とはならないレベルに止まる。

したがって、海へ放出される放射性物質を実効線量当量評価の対象にする必要はない。

２．今回の事象における実効線量当量

今回の事象により海へ放出された放射性物質は７．０×１０^{6}Ｂｑである。これにより周辺公衆が受けたと考えられる実効線量当量は約４．３×１０$^{-7}$ｍＳｖと評価され、大気へ放出された放射性希ガス、放射性よう素による実効線量当量約１×１０$^{-6}$ｍＳｖに比較して十分小さい。

ＰＴＳに係る今回の事象の経過

ＰＴＳに係る今回の事象の主な経過を添付表に示す。

ＰＴＳについては、１次冷却系への水の注入経過が重要であり、以下のとおり１次冷却系低温側配管及び原子炉容器上部プレナム部に水が注入されている。

１３時５０分に高圧注入ポンプが自動起動し、損傷側ループ及び健全側ループの１次冷却系低温側配管に水が注入され、更に１３時５５分には、原子炉容器上部プレナム部安全注入ライン止め弁が開放され、原子炉容器上部プレナム部に水が注入されている。

また、１４時９分には、充てんポンプの再起動により、健全側ループの１次冷却系低温側配管に水が注入されている。

なお、１４時３７分には、高圧注入ポンプは停止され、以後損傷側ループ及び健全側ループとも、これによる水の注入はない。

また、１５時４分から５分にかけて、充てんポンプへの水の供給を燃料取替用水タンク側から体積制御タンク側へ切り替え、化学体積制御系統が復旧されていることから、以後健全側ループへの冷たい水の注入はない。

ＰＴＳに係る今回の事象の経過

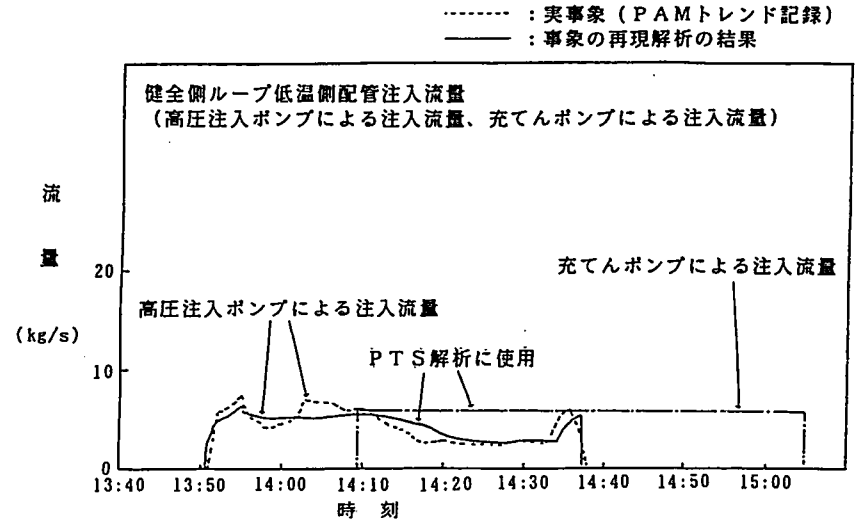
時　刻	事象・機器動作等	操作・確認等	健全側ループ	備　考
13:40頃	Ｒ－１５「計数率注意」警報発信			プロセス打点式記録他
13:50	原子炉トリップ信号発信			シーケンスイベント記録 アラームタイプライタ記録
	安全注入（ＳＩ）信号発信	Ａ、Ｂ－高圧注入ポンプ自動起動	低温側配管に注入	低温側配管に注入	シーケンスイベント記録他
13:55	原子炉容器上部プレナム部安全注入ライン止め弁開注意信号発信			アラームタイプライタ記録
14:02		Ｂ－ＳＧ主蒸気逃がし弁開放		アラームタイプライタ記録
14:09		Ａ～Ｃ－充てんポンプ再起動	低温側配管に充てん水注入（水源：体積制御タンク）	アラームタイプライタ記録
14:17		Ｂ－ＳＧ主蒸気逃がし弁閉止		アラームタイプライタ記録
14:18	充てんポンプへの水の供給を体積制御タンク側から燃料取替用水タンク側へ自動切替え		充てん水源切替え（水源：燃料取替用水タンク）	アラームタイプライタ記録
14:34		加圧器補助スプレ弁開放		アラームタイプライタ記録
14:37		Ａ、Ｂ－高圧注入ポンプ停止	低温側配管への注入停止	低温側配管への注入停止	アラームタイプライタ記録
14:42		Ｂ－ＳＧ主蒸気逃がし弁調整開		アラームタイプライタ記録
14:48		加圧器補助スプレ弁閉止		アラームタイプライタ記録
14:49		再生クーラ抽出水オリフィスしゃ断弁開放		アラームタイプライタ記録
14:57		Ｂ－１次冷却材ポンプ再起動		アラームタイプライタ記録
15:04 15:05		充てんポンプへの水の供給を燃料取替用水タンク側から体積制御タンク側へ切り替え	以後化学体積制御系統の復旧により冷たい水の注入はない	アラームタイプライタ記録

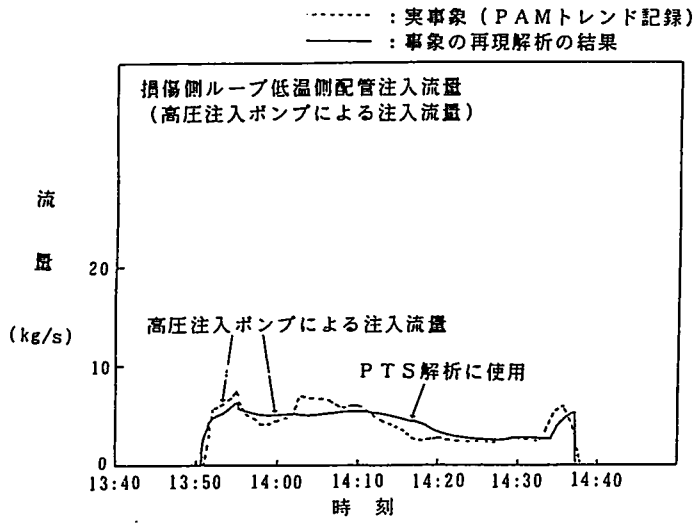
1次冷却系低温側配管注入流量

ＰＴＳの解析に用いた1次冷却系低温側配管への注入量を添付図に示す。

まず、高圧注入ポンプによる1次冷却系低温側配管への注入量については、実測値が低流量域ではローカット処理されるため、「3.1 事象の再現解析」に示す結果を用いている。

また、充てんポンプによる健全側ループ低温側配管への注入量については、充てん水が健全側ループの1次冷却系低温側配管に注入される間、「3.6 炉心の健全性に関するその他の考察」に示す充てん量を参考として、これを包絡する注入量（一定値）を用いている。





1 次冷却系低温側配管注入流量

自然循環がある場合の流動状況について

自然循環がある場合の流動状況については、美浜発電所２号機を模擬した混合挙動の把握試験結果を用いている。この試験は実機の１／３モデルで、原子炉容器ダウンカマ上部での温度を求めている。この試験結果を図１に示す。

図１において、×印はループ流と１次冷却系低温側配管へ注入された水が完全混合した時の混合平均無次元温度、⊙印は実測平均無次元温度を示している。×印と⊙印の差が小さいこと及び実測無次元温度分布幅が小さいことから、ループ流と１次冷却系低温側配管へ注入された水は完全混合していることが読みとれる。

尚、今回の事象では、原子炉トリップ後、定格流量の１～４％の自然循環流量を考慮しており、このときの注入された水の全流量に占める比は約０．０４～０．１５となり、この試験範囲となっている。従って、定格流量の１～４％の自然循環流量がある場合、完全混合していると判断できる。

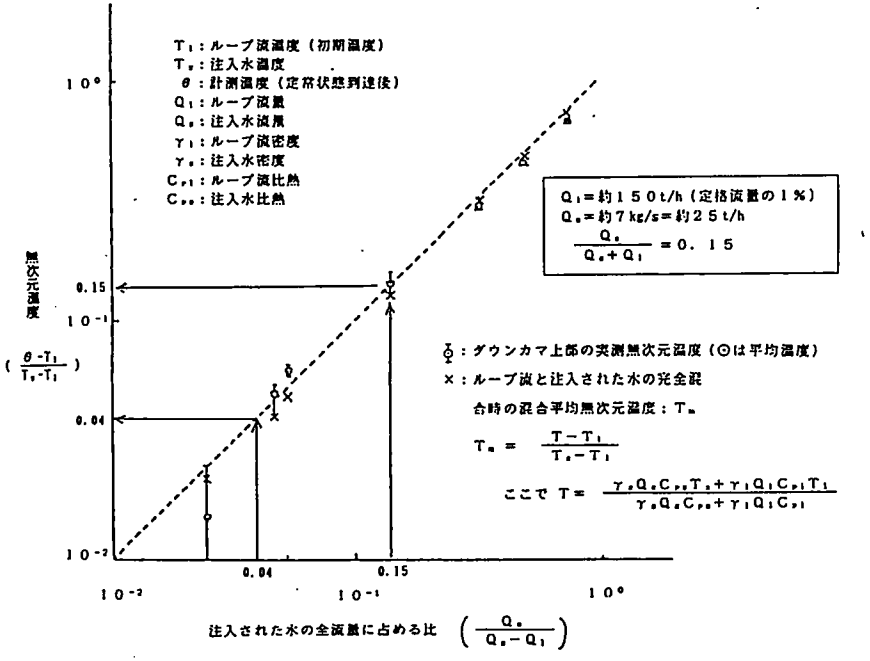


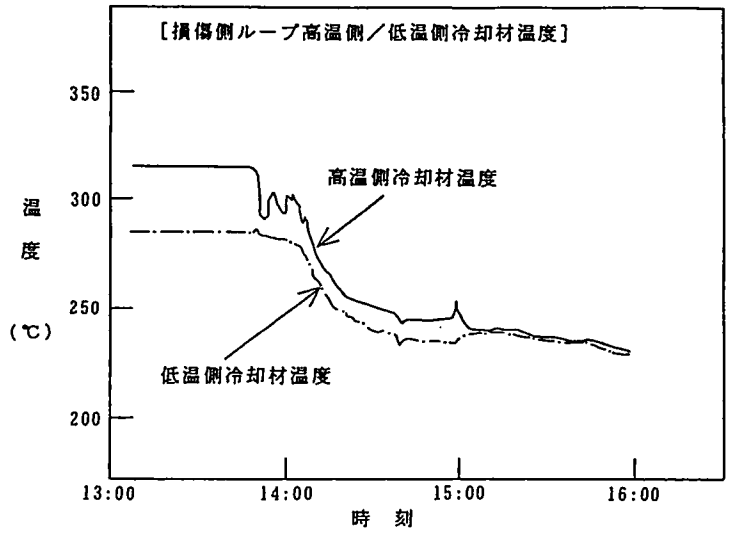
図１　自然循環がある場合の原子炉容器ダウンカマ上部での無次元温度

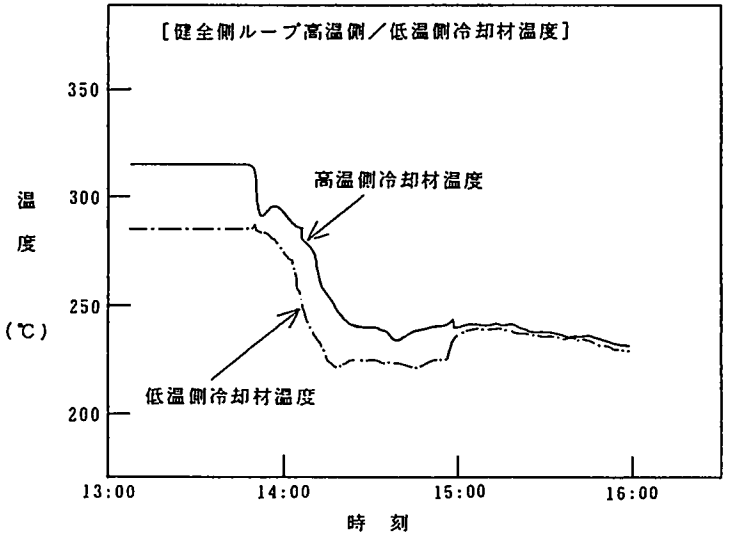
1次冷却材温度記録

今回の事象における損傷側ループ及び健全側ループの低温側冷却材温度の実測値の推移を添付図に示す。

健全側ループについては、ループ流と健全側ループ低温側配管へ注入された水は自然循環により完全混合状態になるため、両者の混合平均温度を原子炉容器ダウンカマ上部での温度としており、この時のループ流の温度として実測値を用いている。

また、損傷側ループについては、自然循環停止までは、ループ流と健全側ループ低温側配管へ注入された水は自然循環により完全混合状態になるため、健全側ループと同様に両者の混合平均温度を原子炉容器ダウンカマ上部での温度としており、この時のループ流の温度として実測値を用いている。


[損傷側ループ高温側／低温側冷却材温度]
350
300
250
200
温度
(℃)
高温側冷却材温度
低温側冷却材温度
13:00
14:00
15:00
16:00
時　刻


[健全側ループ高温側／低温側冷却材温度]
350
300
250
200
温度
(℃)
高温側冷却材温度
低温側冷却材温度
13:00
14:00
15:00
16:00
時　刻

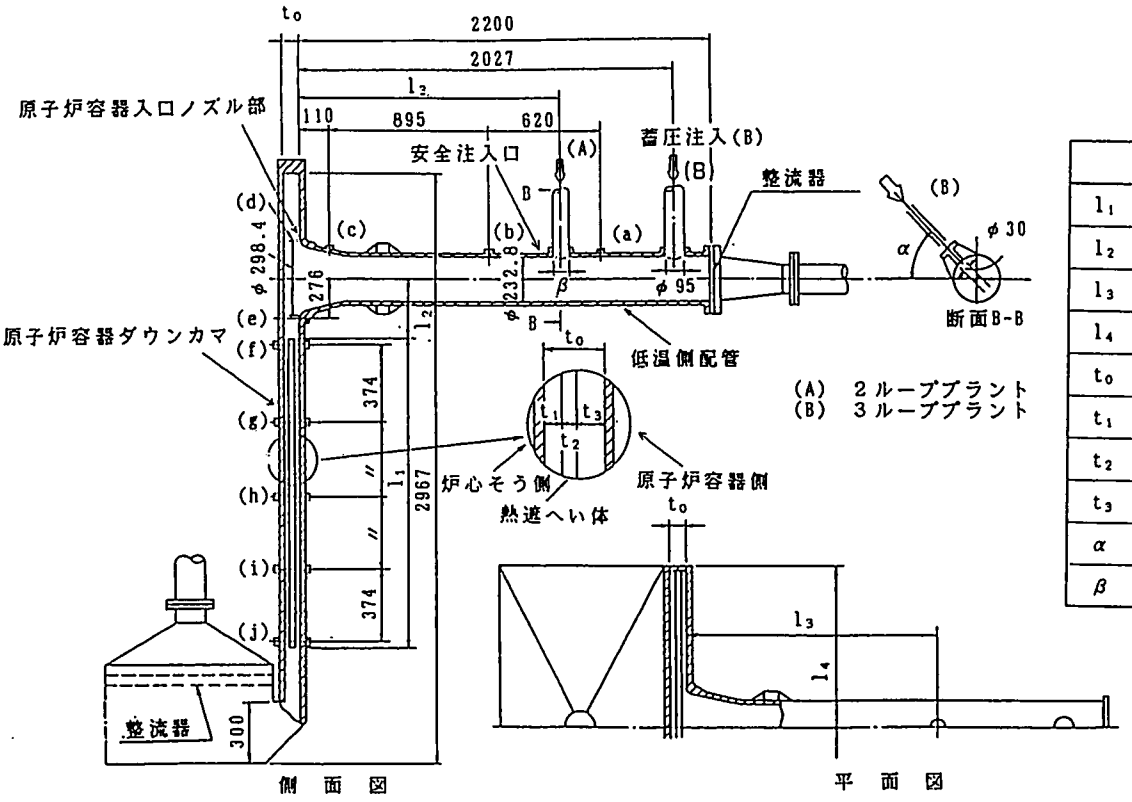
1次冷却材温度記録

混合挙動の把握試験体系図

自然循環停止後の原子炉容器ダウンカマ上部での温度評価に用いた混合挙動の把握実験の体系図を添付図に示す。

この実験は、美浜２号機等の実プラントの１／３モデルを用いて、ループ流と低温側配管へ注入される水の低温側配管からダウンカマ部に至る混合状態を把握するための実験である。

この試験により得られた結果に基づき、自然循環停止後の原子炉容器ダウンカマ上部での温度評価を行っている。



試験体諸元

	(A)	(B)
l_1	1524	1557
l_2	307.7	280.7
l_3	1407	1373
l_4	1624	1307
t_0	82.7	80.6
t_1	12	20
t_2	27.7	22.6
t_3	43	38
α	90°	45°
β	70	38

混合挙動の把握試験体系図

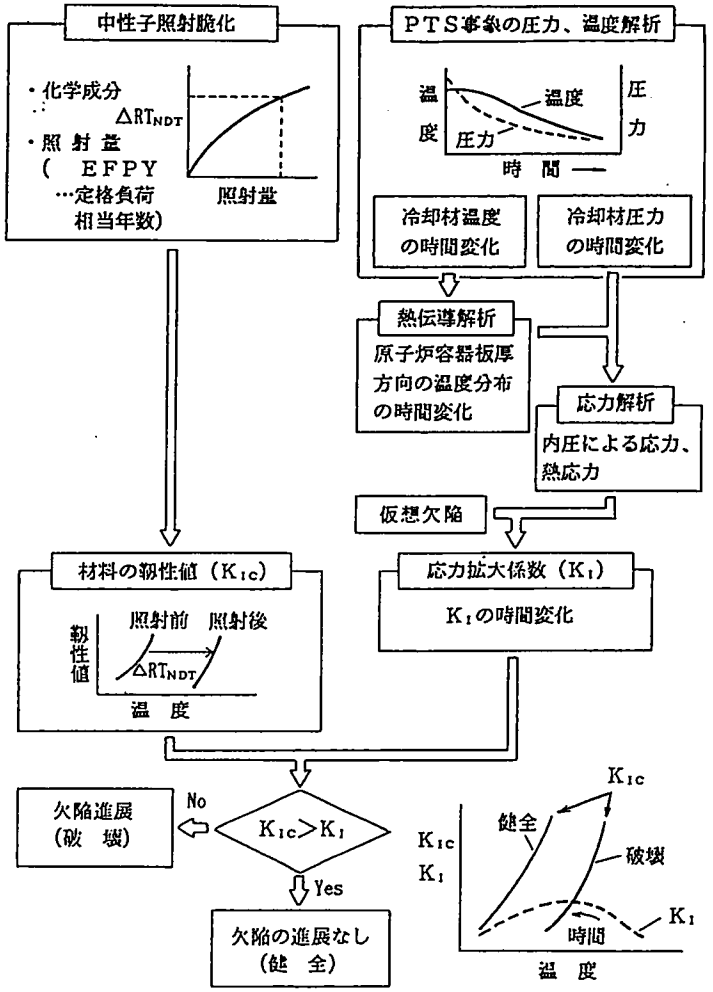
破壊力学による原子炉容器の健全性評価手法

破壊力学による原子炉容器の健全性評価手法のフローを添付図に示す。

K_{Ic}については、切欠付き試験片の試験結果から得られた実測値を対象時点相当の高速中性子照射量を受けたK_{Ic}の値に補正し、これらを包絡するK_{Ic}下限包絡曲線を設定する。

K_Iについては、ＰＴＳ事象発生時の冷却材圧力の時間変化及び冷却材温度の時間変化から生じる熱応力の時間変化に基づく応力解析結果並びに仮想欠陥の大きさにより算出する。

破壊力学による原子炉容器の健全性評価は、以上により設定された両者の曲線が交差しなければ、仮想欠陥は進展しないというものである。



破壊力学による原子炉容器の健全性評価手法

ＰＴＳに関する今回の解析条件

今回の破壊力学による評価の解析条件は、添付表の通りである。

K_{Ic}については、美浜２号機の中性子照射前及び監視試験時の切欠付き試験片の試験結果から得られたK_{Ic}実測値を今回の事象の発生時点相当の高速中性子照射量を受けたK_{Ic}の値に補正し、これらを包絡するK_{Ic}下限包絡曲線を設定している。

K_Iについては、まず算出対象時間は、損傷側ループは１３時５０分から１４時３７分まで、健全側ループは１３時５０分から１５時５分までとしている。応力解析の条件としては、「（２）原子炉容器の温度による評価」で求めた１次冷却材の温度変化に基づき熱伝導解析を行うとともに１次冷却系の圧力は今回の事象による圧力変化を考慮して１０５kg/cm^{2}一定としている。更に仮想欠陥としては、超音波探傷試験の検出可能な寸法等を考慮して深さ１０mm、長さ６０mmとしている。以上の応力解析の結果と仮想欠陥の大きさからK_Iを算出している。

今回の解析条件

1.原子炉容器の破壊靭性（K_{IC}）の設定	・美浜２号機の実測K_{IC}を今回の事象の発生時点相当に補正してK_{IC}下限包絡曲線を設定 ・実測K_{IC}……照射前試験、第１、２回監視試験 ・ΔRT_{NDT}……脆化予測式 $\Delta RT_{NDT}=(-16+1210P+215Cu+77\sqrt{Cu\cdot Ni}) \times f^{0.29-0.041\log f}$ （母材）
2.応力拡大係数（K_I）の算出	
(1)算出対象時間	・損傷側ループ：１３：５０～１４：３７ ・健全側ループ：１３：５０～１５：０５
(2)応力解析	
①熱伝導解析	
a.原子炉容器内面の温度	
1)１次冷却材の温度	
(a)健全側ループ	・完全混合として算出
(b)損傷側ループ	・１４：１０まで完全混合 ・１４：１０以降自然循環停止として算出 混合挙動の把握試験結果の活用
2)１次冷却材から原子炉容器への熱伝達	・Jackson-Fewsterの式 $Nu=Nu_1[1+4500Gr/Re^{2.625}Pr^{0.5}]^{0.31}$ 但し、$Nu_1=0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$
b.原子炉容器の板厚方向の熱伝導	・初期条件は２８６℃で一定 ・原子炉容器を板厚方向に50要素に分割し、差分法により１次元熱伝導方程式を解いた ・外面は断熱
②１次冷却系の圧力	・今回の事象による１次冷却系の圧力変化を考慮して１０５kg/cm^{2}一定と仮定
③応力解析	・内圧応力および熱応力については円筒として算出
(3)仮想欠陥	・超音波探傷試験の検出可能な寸法等を考慮して仮想欠陥は深さ１０mm、長さ６０mmとした
(4)K_Iの算出	・応力解析の結果と仮想欠陥の大きさから算出

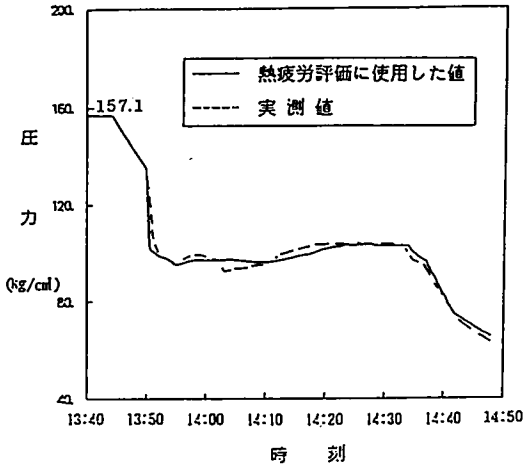
資料-3.5.2.1

熱疲労に関する解析条件の詳細

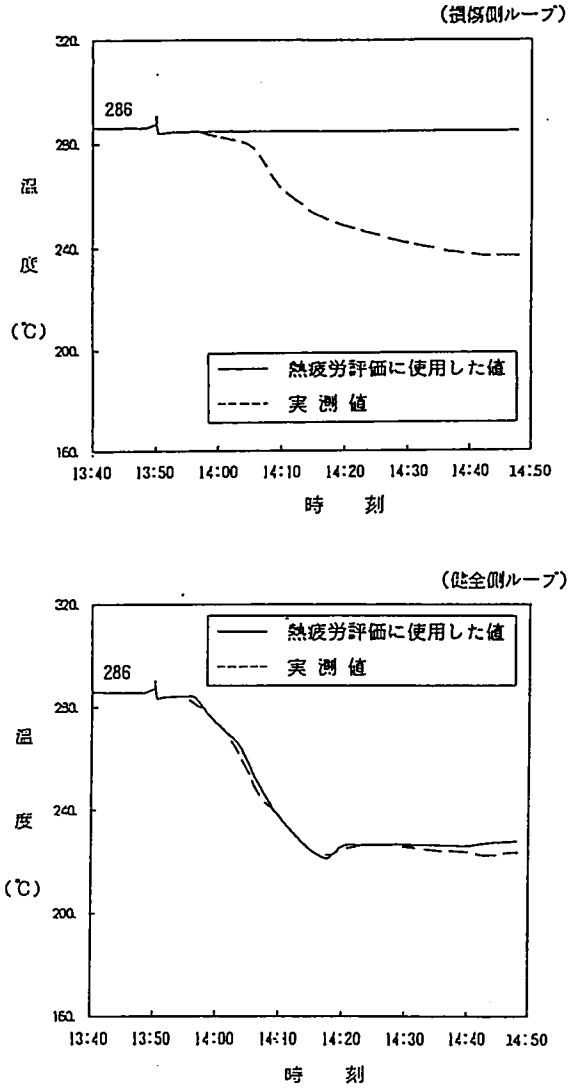
1．1次冷却系低温側配管安全注入管台

(1) 過渡条件

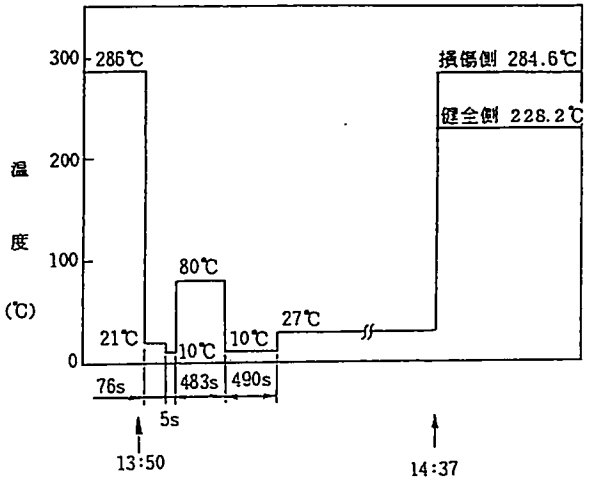
今回の事象における1次冷却系等の圧力，温度及び流量については「3.1 事象の再現解析」に示す解析結果及び実測値に基づき，以下の通り設定した。



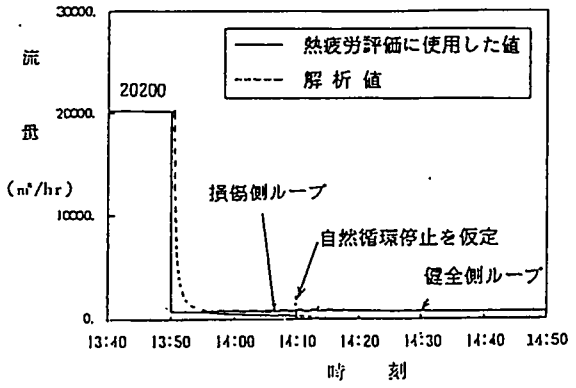
図－1　今回の事象における1次冷却系の圧力変化



図－２　今回の事象における低温側冷却材の温度変化



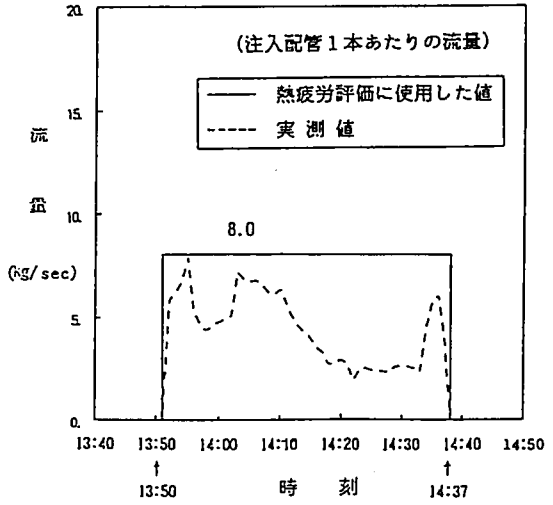
図－３　今回の事象における１次冷却系低温側配管安全注入管台内の温度変化



(注) ・損傷側ループは１４時１０分で自然循環停止と仮定

・健全側ループは４％の自然循環を考慮

図－４　今回の事象における１次冷却材の流量変化



図－５　今回の事象における１次冷却系低温側配管安全注入水の流量変化

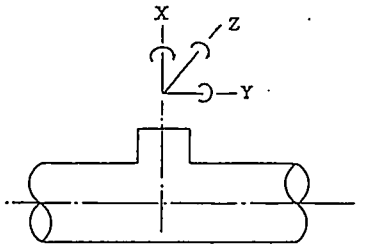
(2) 外荷重条件

応力解析にあたって圧力による応力及び熱応力の他に安全注入管台に加わる外荷重条件として，表－１に示す接続配管の自重及び熱膨張荷重を考慮した。

表－１　運転状態における外荷重

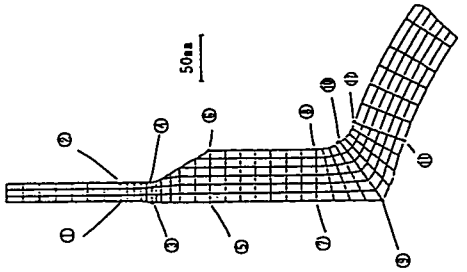
管台	荷重の種類	軸力，せん断力（t）			モーメント（t･m）		
		F_X	F_Y	F_Z	M_X	M_Y	M_Z
１次冷却系低温側配管安全注入管台	自重	-0.70	-0.24	0.77	-0.073	0.13	-0.063
	熱膨張	-2.6	-3.5	3.7	3.0	-3.4	2.6

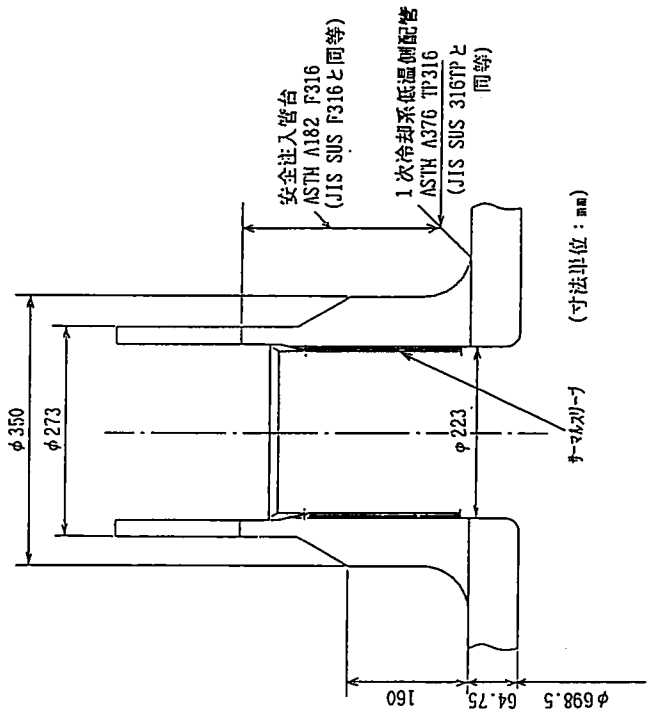
(注) 荷重の座標系は，下図による。



１次冷却系低温側配管安全注入管台

(3) 構造及び評価位置





(注) 図中○印内の数値は，応力評価位置を示す。
評価位置①が疲れ累積係数は最大である。

図－6　1次冷却系低温側配管安全注入管台の構造及び評価位置

表－2　1次冷却系低温側配管安全注入管台の設計過渡条件

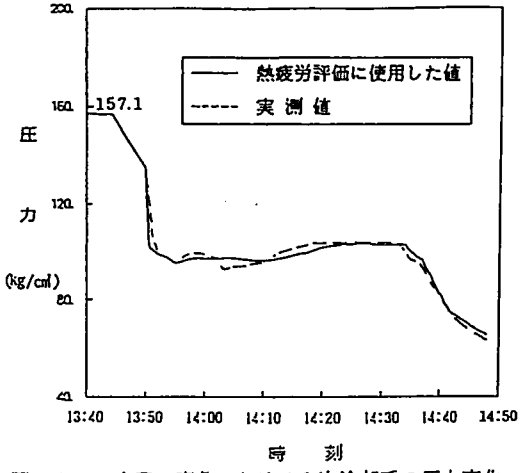
運転状態	設計過渡条件			過渡回数	冷水注入のある過渡条件	疲労評価に寄与する過渡条件
I	起動			200	－	○
	停止			200	－	○
	余熱除去運転（プラント冷却時）			200	○	○
	負荷上昇（15～100%）			13200	－	－
	負荷減少（100～15%）			13200	－	－
	90%から100%へのステップ状負荷上昇			2000	－	－
	100%から90%へのステップ状負荷減少			2000	－	－
	100%からの大きいステップ状負荷減少			200	－	－
	定常負荷運転時の変動			1×10^6	－	－
	燃料交換			80	○	－
	負荷上昇（0～15%）			1500	－	－
	負荷減少（15～0%）			1500	－	－
	1ループ停止／1ループ起動	停止	停止ループ	80	－	－
			運転ループ			
		起動	停止ループ	70	－	－
			運転ループ			
II	負荷の喪失			80	－	－
	外部電源喪失	補助給水されるループ		40	－	－
		補助給水されないループ				
	1次冷却材流量の部分喪失		健全側	80	－	－
			故障側			
	100%からの原子炉トリップ	不注意な冷却を伴わないトリップ		230	－	－
		不注意な冷却を伴うトリップ	冷却ループ	160	－	－
			正常ループ			
		不注意な冷却と安全注入を伴うトリップ（ほう酸注入タンクからの注入）	冷却ループ	10	○	○
			正常ループ			
	1次冷却系の異常な減圧（ほう酸注入タンクからの注入）			20	○	○
	制御棒クラスタの落下			80	－	－
	出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動（ほう酸注入タンクからの注入）			40	○	○
	1次冷却系停止ループの誤起動		停止ループ	10	－	－
			運転ループ			
	タービン回転試験			10	－	－
	1次系漏えい試験			50	－	－
	蓄圧タンクからの注入（1次冷却系の異常な減圧）			20	○	○
	蓄圧タンクからの注入（プラント冷却時の誤作動）			5	○	○
－	蒸気発生器伝熱管損傷事象（注1）		損傷側	1	○ 図3-1，図3-2，図3-3，図3-4，図3-5	○
			健全側			

(注1) 美浜2号機の蒸気発生器伝熱管損傷事象の過渡条件も合せて考慮する。

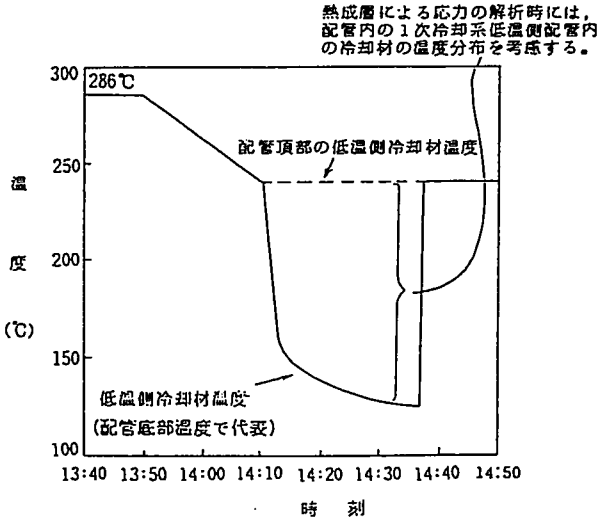
2．1次冷却系低温側配管

(1) 過渡条件

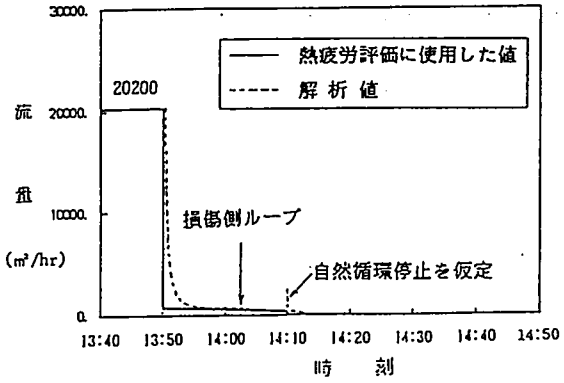
今回の事象における1次冷却系等の圧力，温度及び流量については「3.1 事象の再現解析」に示す解析結果及び実測値に基づき，以下の通り設定した。



図－1　今回の事象における1次冷却系の圧力変化



図－2　今回の事象における低温側冷却材の温度変化



(注) 損傷側ループは14時10分で自然循環停止と仮定

図－3　今回の事象における1次冷却材の流量変化

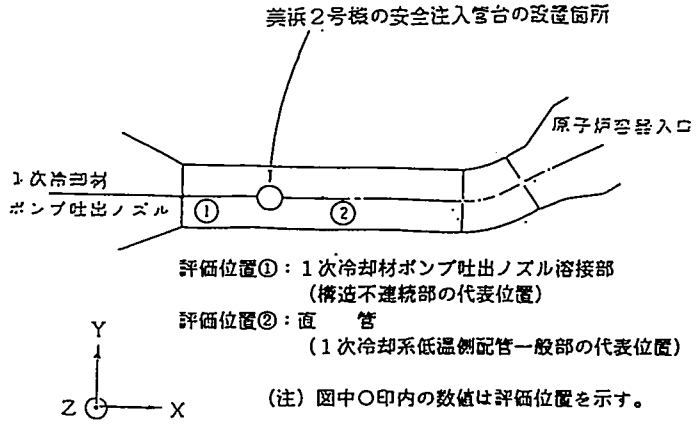
(2) 外荷重条件

応力解析にあたって圧力による応力及び熱応力の他に１次冷却系低温側配管に加わる外荷重条件として，表－１に示す自重及び熱膨張荷重を考慮した。

表－１　運転状態における外荷重

応力解析箇所	評価位置	荷重の種類	曲げモーメント（t･m）		
			M_X	M_Y	M_Z
１次冷却材ポンプ吐出ノズル溶接部	1	自　重	-2.5	-2.3	0.4
		熱膨張	-7.4	260.8	8.1
直　　管	2	自　重	-2.5	1.8	-0.2
		熱膨張	-7.4	46.3	9.3

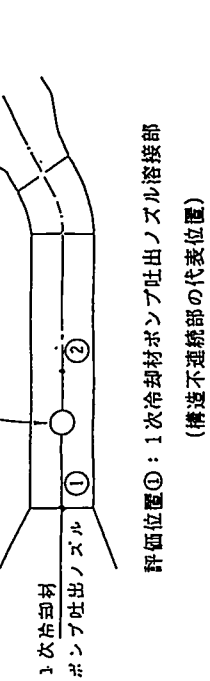
（注１）　座標系については下図による。



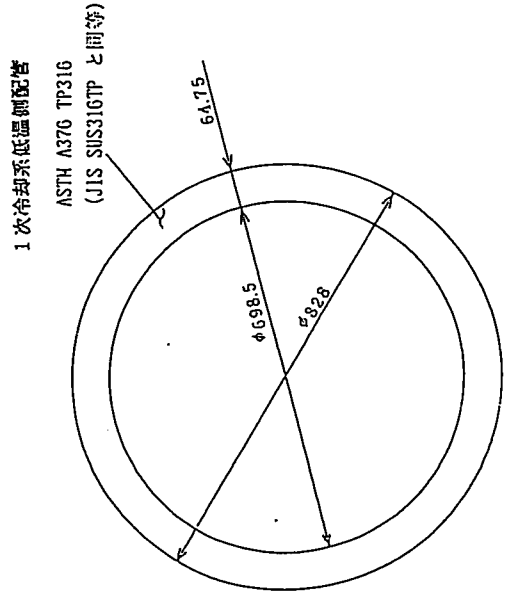
評価位置①：１次冷却材ポンプ吐出ノズル溶接部
（構造不連続部の代表位置）
評価位置②：直　　管
（１次冷却系低温側配管一般部の代表位置）

（注）図中○印内の数値は評価位置を示す。

(3) 構造及び評価位置



評価位置①：１次冷却材ポンプ吐出ノズル溶接部
（構造不連続部の代表位置）
評価位置②：直　　管
（１次冷却系低温側配管一般部の代表位置）



１次冷却系低温側配管断面図（寸法単位：mm）
（１次冷却系低温側配管一般部の代表位置）

（注）図中○印内の数値は，応力評価位置を示す。
評価位置①が疲れ累積係数は最大である。

（構　造）

図－４　１次冷却系低温側配管の構造及び評価位置

表－２　１次冷却系低温側配管の設計過渡条件

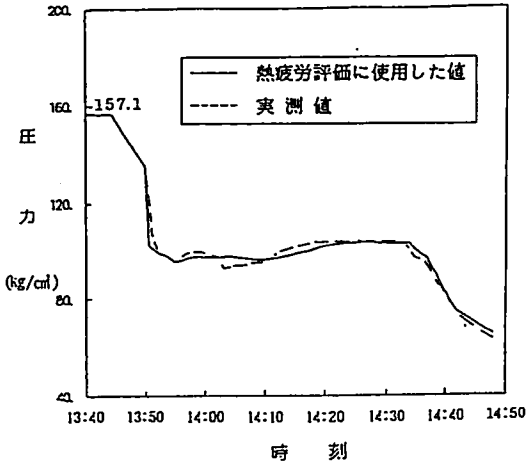
運転状態	設計過渡条件			過渡回数	冷水注入のある過渡条件	疲労評価に寄与する過渡条件
I	起動・停止			各200	－	○
	負荷上昇(15~100%)・負荷減少(100~15%)			各13200	－	○
	９０%から１００%へのステップ状負荷上昇			2000	－	－
	１００%から９０%へのステップ状負荷減少			2000	－	－
	１００%からの大きいステップ状負荷減少			200	－	○
	定常負荷運転時の変動			1×10^6	－	－
	燃料交換			80	－	○
	負荷上昇(0~15%)・負荷減少(15~0%)			各1500	－	－
	１ループ停止／１ループ起動	停止	停止ループ	80	－	－
			運転ループ			
		起動	停止ループ	70	－	－
			運転ループ			
II	負荷の喪失			80	－	○
	外部電源喪失	補助給水されるループ		40	－	○
		補助給水されないループ				
	１次冷却材流量の部分喪失		健全側	80	－	－
			故障側			
	１００%からの原子炉トリップ	不注意な冷却を伴わないトリップ		230	－	－
		不注意な冷却を伴うトリップ	冷却ループ	160	－	○
			正常ループ			
		不注意な冷却と安全注入を伴うトリップ	冷却ループ	10	○	○
			正常ループ			
	１次冷却系の異常な減圧			20	○	○
	制御棒クラスタの落下			80	－	○
	出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動			40	○	○
	１次冷却系停止ループの誤起動		停止ループ	10	－	－
			運転ループ			
	タービン回転試験			10	－	○
	１次系漏えい試験			50	－	○
－	蒸気発生器伝熱管損傷事象（注１）		損傷側	1	○	○

（注１）美浜２号機の蒸気発生器伝熱管損傷事象の過渡条件も合せて考慮する。

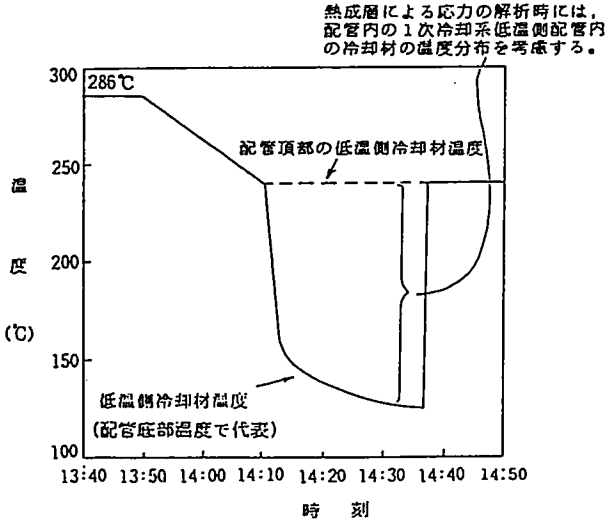
３．原子炉容器入口管台

(1) 過渡条件

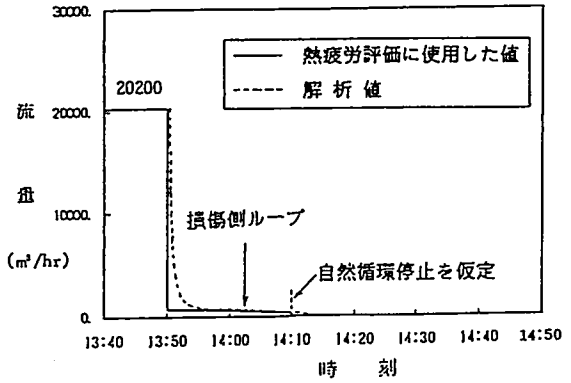
今回の事象における１次冷却系等の圧力，温度及び流量については「3.1 事象の再現解析」に示す解析結果及び実測値に基づき，以下の通り設定した。



図－１　今回の事象における1次冷却系の圧力変化



図－２　今回の事象における低温側冷却材の温度変化



（注）損傷側ループは１４時１０分で自然循環停止と仮定

図－３　今回の事象における１次冷却材の流量変化

(2) 外荷重条件

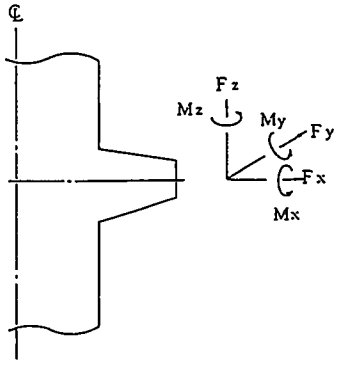
応力解析にあたって圧力による応力及び熱応力の他に入口管台に加わる外荷重条件として，表－１に示す接続配管及び支持金物の自重及び熱膨張荷重を考慮した。

表－１　運転状態における外荷重

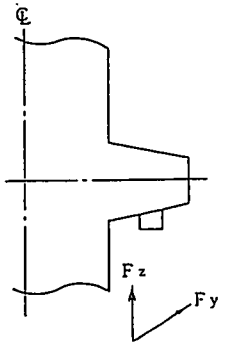
管台		荷重の種類	軸力，せん断力（t）			モーメント（t･m）		
			F_X	F_Y	F_Z	M_X	M_Y	M_Z
入口管台	管台反力	自重	0.0	-0.4	-5.4	5.6	5.6	-1.0
		熱膨張	6.8	-3.8	-129.8	132.3	228.0	9.3
	支持金物反力	自重	－	0.0	93.9	－	－	－
		熱膨張	－	0.8	83.0	－	－	－
		ｽｸﾗﾑ荷重	－	0.0	8.8	－	－	－

（注）　荷重の座標系は，下図による。

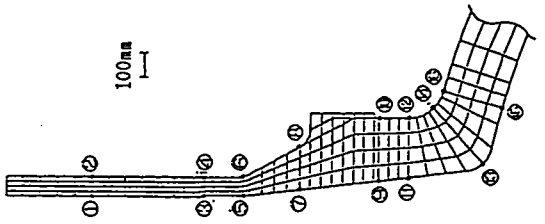
入口管台

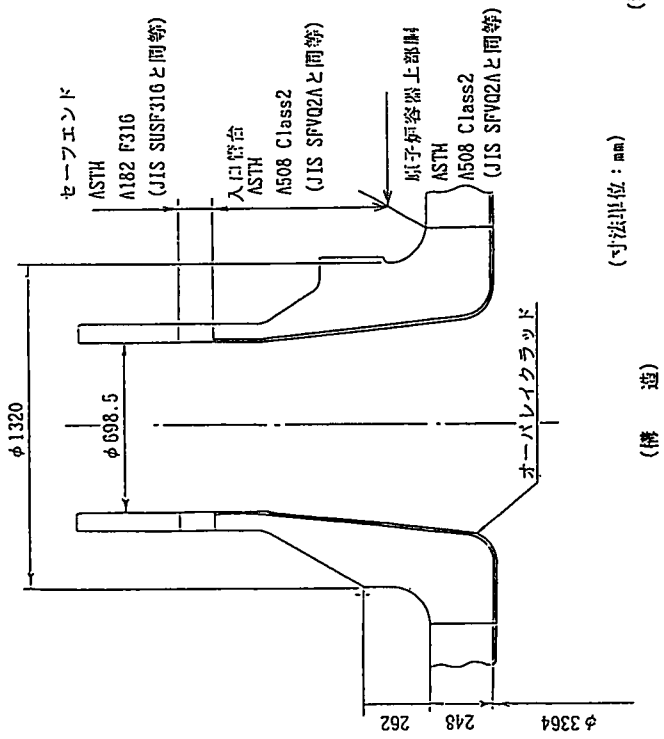


管台支持金物



(3) 構造及び評価位置





(注) 図中○印内の数値は，応力評価位置を示す。
評価位置⑮が疲れ累積係数は最大となる。

図－4　原子炉容器入口管台の構造及び評価位置

表－2　原子炉容器入口管台の設計過渡条件

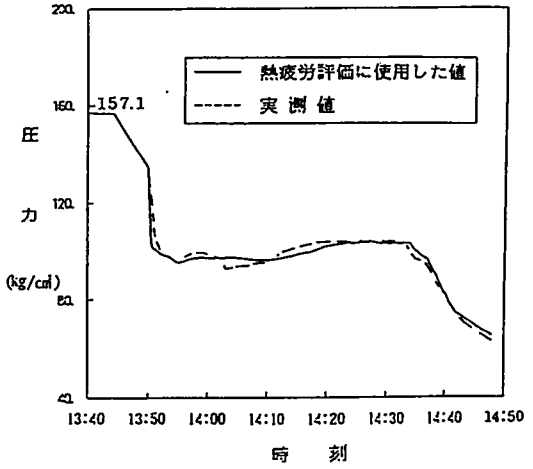
運転状態	設計過渡条件			過渡回数	冷水注入のある過渡条件	疲労評価に寄与する過渡条件
I	起　動			200	－	○
	停　止			200	－	○
	負荷上昇（15～100%）			13200	－	○
	負荷減少（100～15%）			13200	－	－
	90%から100%へのステップ状負荷上昇			2000	－	－
	100%から90%へのステップ状負荷減少			2000	－	－
	100%からの大きいステップ状負荷減少			200	－	－
	定常負荷運転時の変動			1×10^6	－	－
	燃料交換			80	－	○
	負荷上昇（0～15%）			1500	－	－
	負荷減少（15～0%）			1500	－	－
	1ループ停止／1ループ起動	停　止	停止ループ	80	－	－
			運転ループ			
		起　動	停止ループ	70	－	－
			運転ループ			
II	負荷の喪失			80	－	○
	外部電源喪失	補助給水されるループ		40	－	○
		補助給水されないループ				
	1次冷却材流量の部分喪失	健全側		80	－	－
		故障側				
	100%からの原子炉トリップ	不注意な冷却を伴わないトリップ		230	－	－
		不注意な冷却を伴うトリップ	冷却ループ	160	－	－
			正常ループ			
		不注意な冷却と安全注入を伴うトリップ	冷却ループ	10	○	○
			正常ループ			
	1次冷却系の異常な減圧			20	○	○
	制御棒クラスタの落下			80	－	－
	出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動			40	○	○
	1次冷却系停止ループの誤起動	停止ループ		10	－	○
		運転ループ				
	タービン回転試験			10	－	○
	1次系漏えい試験			50	－	○
－	蒸気発生器伝熱管損傷事象（注1）	損傷側		1	○（図-1，図-2，図-3，）	○

（注1）美浜2号機の蒸気発生器伝熱管損傷事象の過渡条件も合せて考慮する。

4．原子炉容器安全注入管台

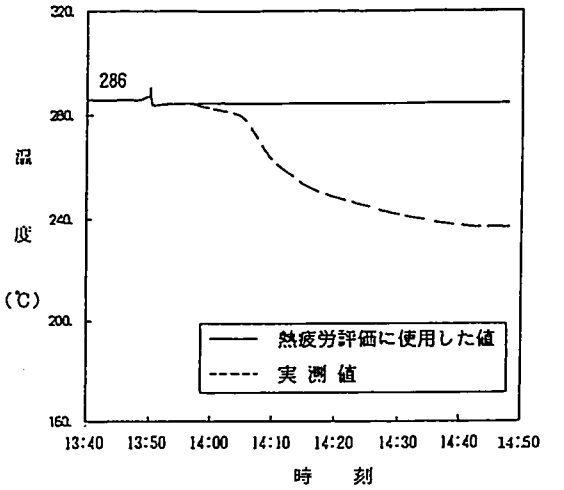
(1) 過渡条件

今回の事象における１次冷却系等の圧力，温度及び流量については「3.1 事象の再現解析」に示す解析結果及び実測値に基づき，以下の通り設定した。

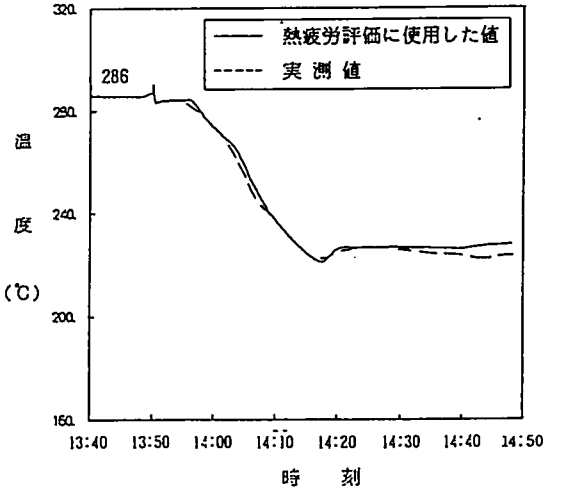


図－１　今回の事象における１次冷却系の圧力変化

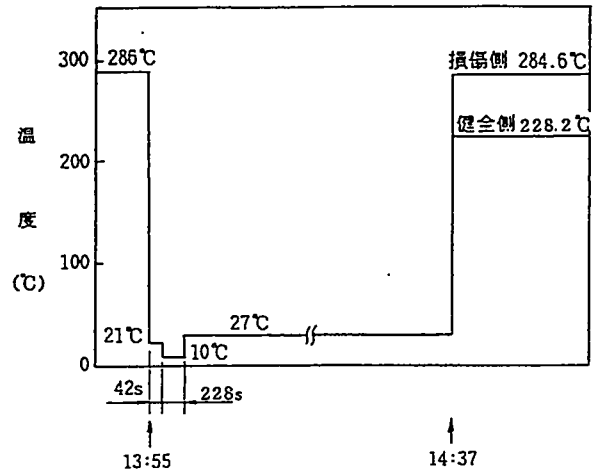
(損傷側ループ)



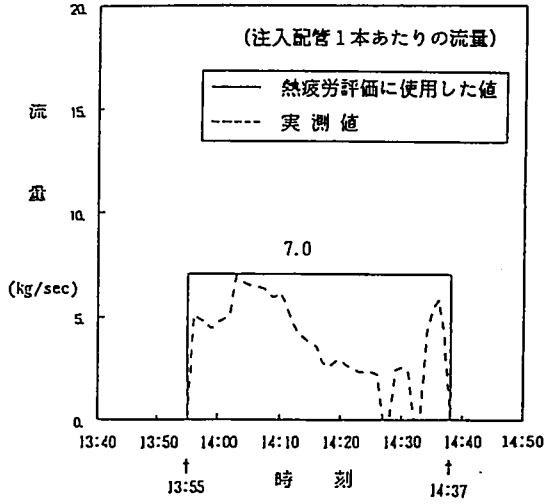
(健全側ループ)



図－２　今回の事象における低温側冷却材の温度変化



図－３　今回の事象における原子炉容器安全注入管台内の温度変化



図－４　今回の事象における原子炉容器安全注入水の流量変化

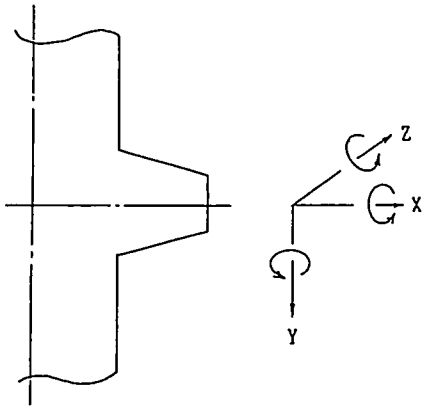
(2) 外荷重条件

応力解析にあたって圧力による応力及び熱応力の他に安全注入管台に加わる外荷重条件として，表－１に示す接続配管の自重及び熱膨張荷重を考慮した。

表－１　運転状態における外荷重

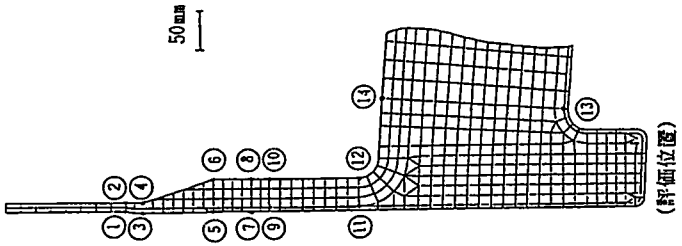
管　台	荷重の種類	軸力，せん断力（t）			モーメント（t･m）		
		F_X	F_Y	F_Z	M_X	M_Y	M_Z
原子炉容器	自　重	-0.001	0.120	-0.001	0.027	0.001	-0.170
安全注入管台	熱膨張	-0.48	0.027	-0.870	0.040	0.630	-0.047

(注) 荷重の座標系は，下図による。



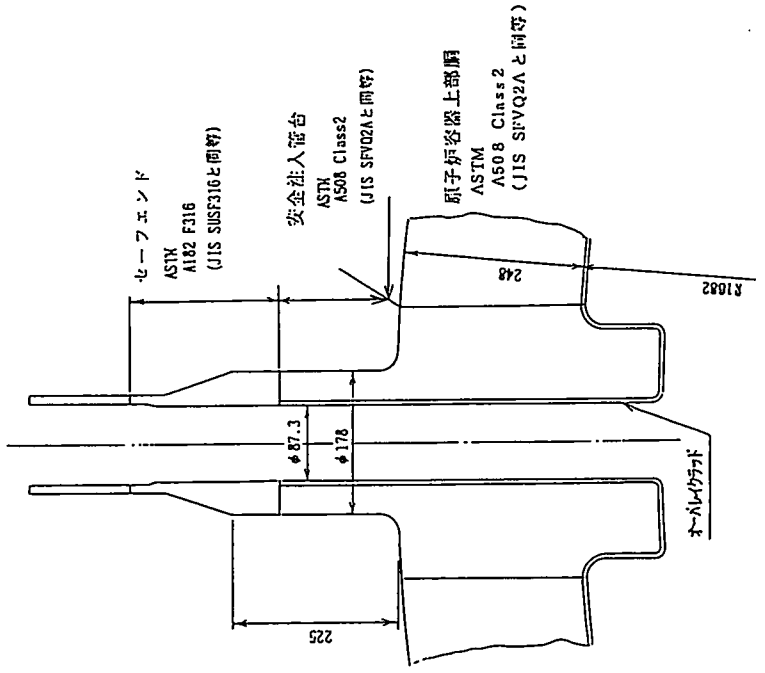
原子炉容器安全注入管台

(3) 構造及び評価位置



(評価位置)

(注) 図中○印内の数値は，応力評価位置を示す。
評価位置⑥が疲れ累積係数は最大である。



(構　造)　(寸法単位：mm)

図－5　原子炉容器安全注入管台の構造及び評価位置

表－2　原子炉容器安全注入管台の設計過渡条件

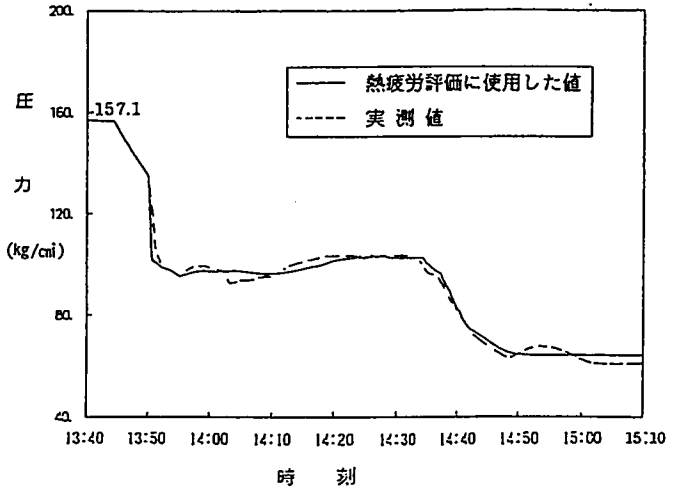
運転状態	設計過渡条件			過渡回数	冷水注入のある過渡条件	疲労評価に寄与する過渡条件
I	起　動			200	－	○
	停　止			200	－	○
	負荷上昇（15～100%）			13200	－	－
	負荷減少（100～15%）			13200	－	－
	90%から100%へのステップ状負荷上昇			2000	－	－
	100%から90%へのステップ状負荷減少			2000	－	－
	100%からの大きいステップ状負荷減少			200	－	－
	定常負荷運転時の変動			1×10^6	－	－
	燃料交換			80	－	－
	負荷上昇（0～15%）			1500	－	－
	負荷減少（15～0%）			1500	－	－
	1ループ停止／1ループ起動	停　止	停止ループ	80	－	－
			運転ループ			
		起　動	停止ループ	70	－	－
			運転ループ			
II	負荷の喪失			80	－	－
	外部電源喪失	補助給水されるループ		40	－	－
		補助給水されないループ				
	1次冷却材流量の部分喪失		健全側	80	－	－
			故障側			
	100%からの原子炉トリップ	不注意な冷却を伴わないトリップ		230	－	－
		不注意な冷却を伴うトリップ	冷却ループ	160	－	－
			正常ループ			
		不注意な冷却と安全注入を伴うトリップ	冷却ループ	10	○	○
			正常ループ			
	1次冷却系の異常な減圧			20	○	○
	制御棒クラスタの落下			80	－	－
	出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動			40	○	○
	1次冷却系停止ループの誤起動		停止ループ	10	－	－
			運転ループ			
	タービン回転試験			10	－	－
	1次系漏えい試験			50	－	－
－	蒸気発生器伝熱管損傷事象（注1）		損傷側	1	○（図-1，図-2，図-3，図-4）	○
			健全側			

（注1）美浜2号機の蒸気発生器伝熱管損傷事象の過渡条件も合せて考慮する。

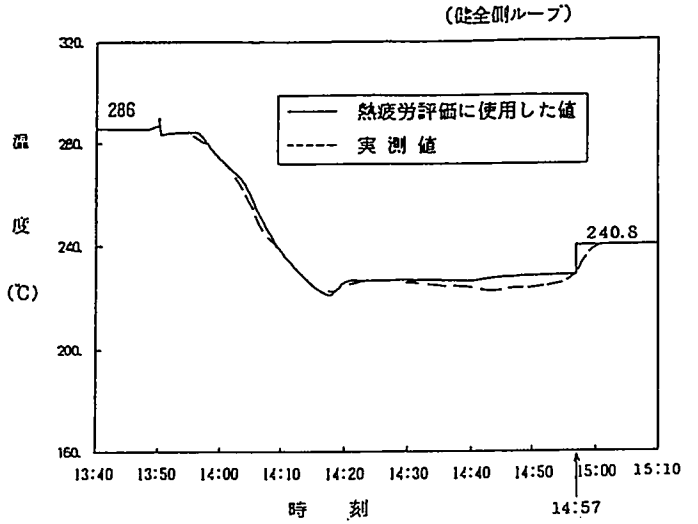
5．1次冷却系低温側配管充てん管台

(1) 過渡条件

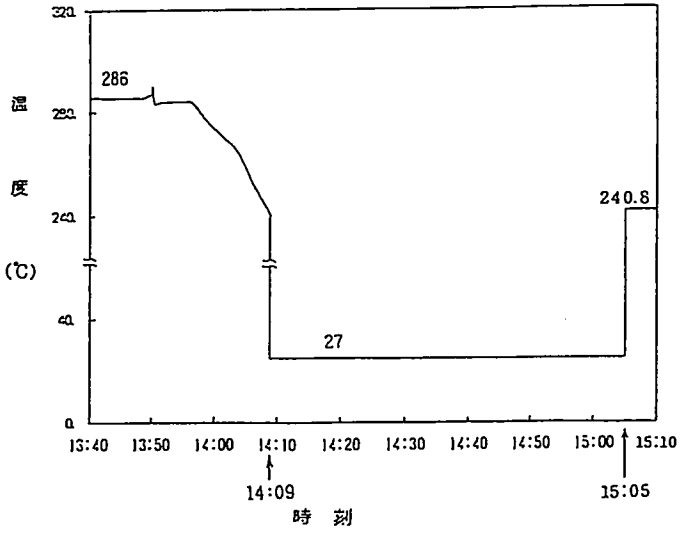
今回の事象における1次冷却系等の圧力，温度及び流量については「3.1 事象の再現解析」に示す解析結果及び実測値に基づき，以下の通り設定した。



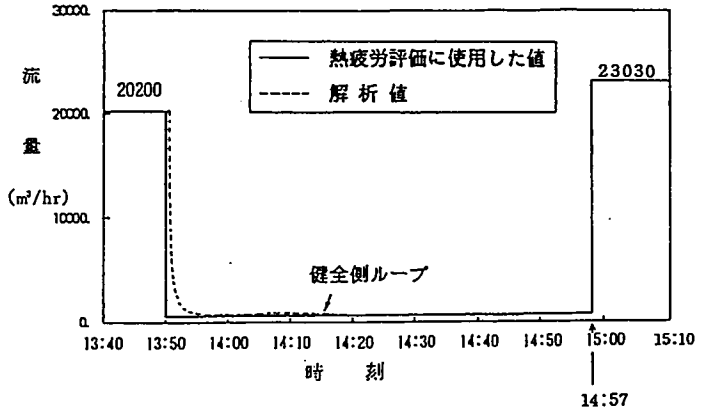
図－1　今回の事象における1次冷却系の圧力変化



図－2　今回の事象における低温側冷却材の温度変化

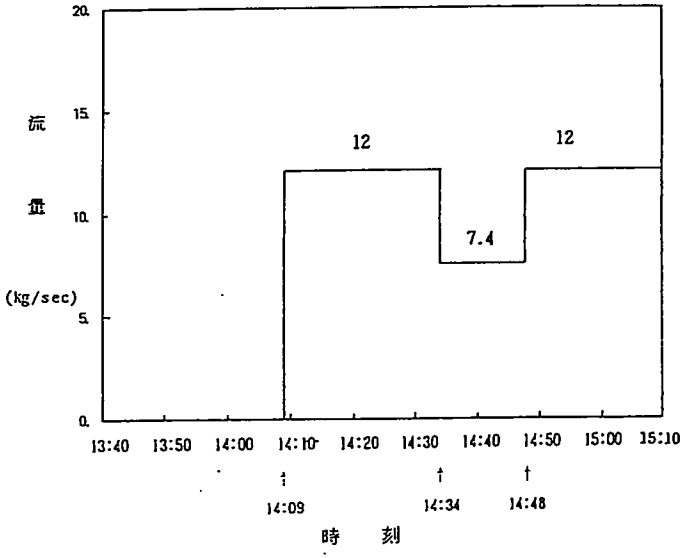


図－3　今回の事象における1次冷却系低温側配管充てん管台内の温度変化



（注）健全側ループは４％の自然循環を考慮

図－４　今回の事象における１次冷却材の流量変化



図－５　今回の事象における１次冷却系低温側配管充てん水の流量変化

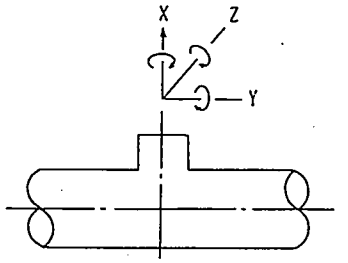
(2) 外荷重条件

応力解析にあたって圧力による応力及び熱応力の他に充てん管台に加わる外荷重条件として，表－１に示す接続配管の自重及び熱膨張荷重を考慮した。

表－１　運転状態における外荷重

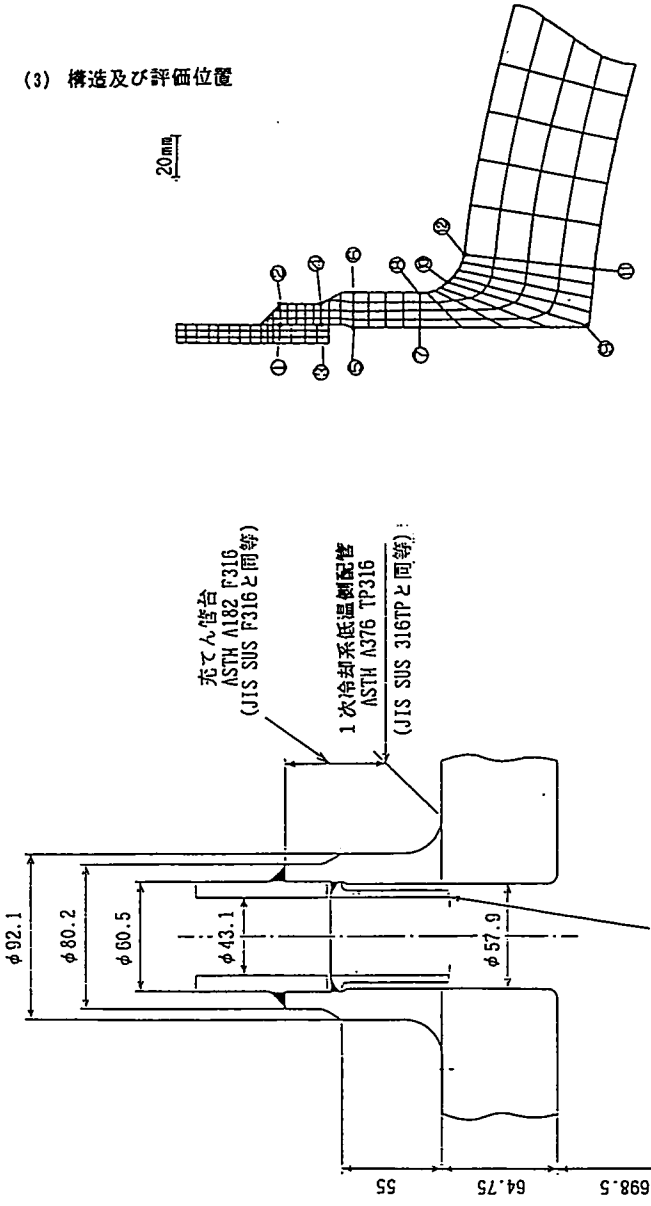
管　台	荷重の種類	軸力，せん断力（t）			モーメント（t･m）		
		F_X	F_Y	F_Z	M_X	M_Y	M_Z
１次冷却系低温側配管充てん管台	自　重	-0.075	-0.0077	0.026	-0.0094	0.031	-0.002
	熱膨張	0.22	0.12	-0.19	0.12	-0.15	0.083

（注）荷重の座標系は，下図による。



１次冷却系低温側配管充てん管台

(3) 構造及び評価位置



(注) 図中○印内の数値は，応力評価位置を示す。
評価位置①が疲れ累積係数は最大となる。

図－6　1次冷却系低温側配管充てん管台の構造及び評価位置

表－2　1次冷却系低温側配管充てん管台の設計過渡条件

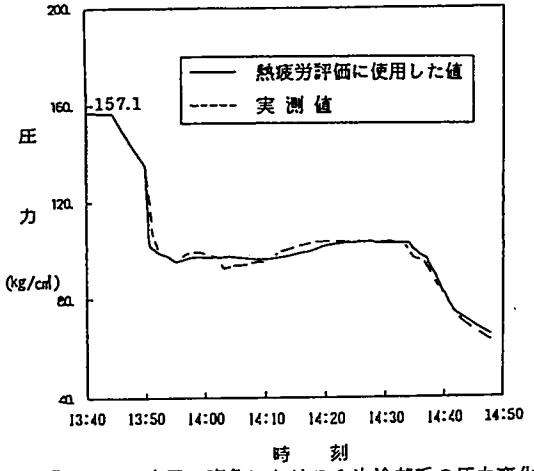
運転状態	設計過渡条件			過渡回数	冷水注入のある過渡条件	疲労評価に寄与する過渡条件
I	起動			200	－	○
	停止			200	－	○
	負荷上昇（15～100%）			13200	－	－
	負荷減少（100～15%）			13200	－	－
	90%から100%へのステップ状負荷上昇			2000	－	－
	100%から90%へのステップ状負荷減少			2000	－	－
	100%からの大きいステップ状負荷減少			200	－	－
	定常負荷運転時の変動			1×10^6	－	－
	燃料交換			80	－	－
	負荷上昇（0～15%）			1500	－	－
	負荷減少（15～0%）			1500	－	－
	1ループ停止／1ループ起動	停止	停止ループ	80	－	－
			運転ループ			
		起動	停止ループ	70	－	－
			運転ループ			
	保守			20	○	○
	抽出流量の100%増加及び復帰			13200	－	○
II	負荷の喪失			80	－	－
	外部電源喪失	補助給水されるループ		40	－	－
		補助給水されないループ				
	1次冷却材流量の部分喪失		健全側	80	－	－
			故障側			
	100%からの原子炉トリップ	不注意な冷却を伴わないトリップ		230	－	－
		不注意な冷却を伴うトリップ	冷却ループ	160	○	○
			正常ループ			
		不注意な冷却と安全注入を伴うトリップ	冷却ループ	10	○	○
			正常ループ			
	1次冷却系の異常な減圧			20	○	○
	制御棒クラスタの落下			80	○	○
	出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動			40	○	○
	1次冷却系停止ループの誤起動		停止ループ	10	－	－
			運転ループ			
	タービン回転試験			10	－	－
	1次系漏えい試験			50	－	○
－	蒸気発生器伝熱管損傷事象（注1）	健全側		1	○ 図-1 図-2 図-3 図-4 図-5	○

(注1) 美浜2号機の蒸気発生器伝熱管損傷事象の過渡条件も合せて考慮する。

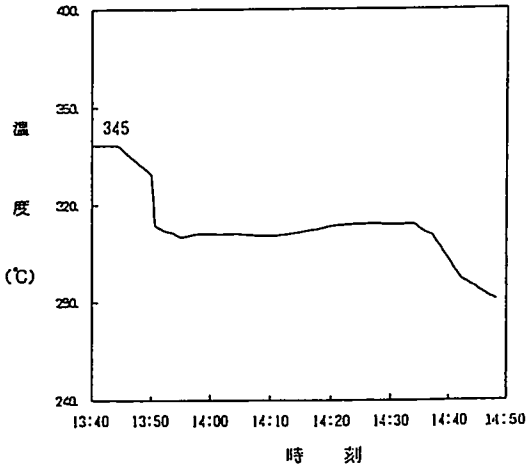
6．加圧器スプレライン用管台

(1) 過渡条件

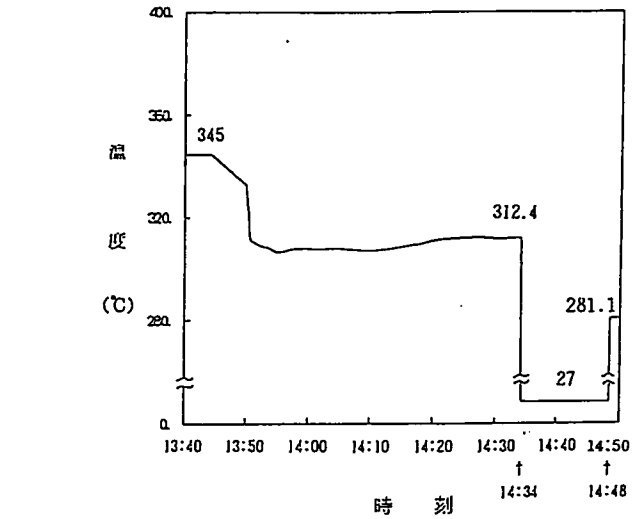
今回の事象における１次冷却系等の圧力，温度及び流量については「3.1 事象の再現解析」に示す解析結果及び実測値に基づき，以下の通り設定した。



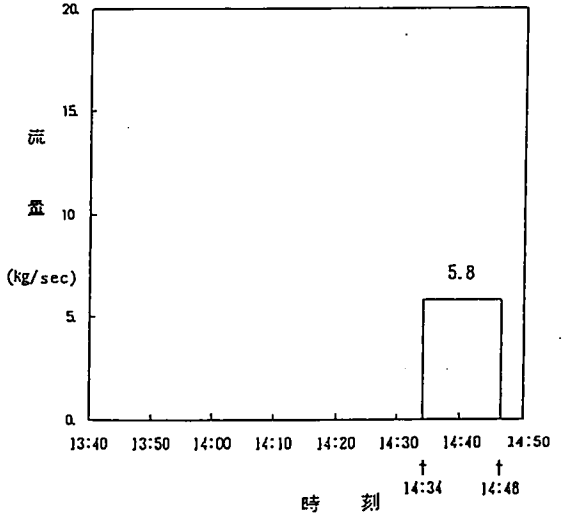
図－１　今回の事象における１次冷却系の圧力変化



図－２　今回の事象における加圧器内の温度変化



図－３　今回の事象における加圧器スプレライン用管台内の温度変化



図－４　今回の事象における加圧器補助スプレ水の流量変化

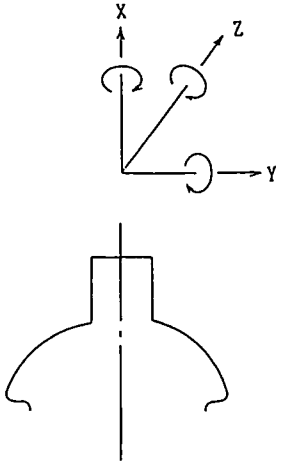
(2) 外荷重条件

応力解析にあたって圧力による応力及び熱応力の他にスプレライン用管台に加わる外荷重条件として，表－１に示す接続配管の自重及び熱膨張荷重を考慮した。

表－１　運転状態における外荷重

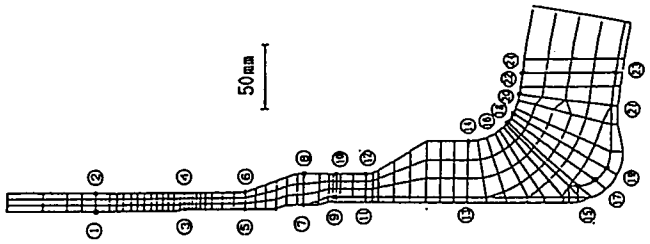
管台	荷重の種類	軸力，せん断力（t）			モーメント（t･m）		
		F_X	F_Y	F_Z	M_X	M_Y	M_Z
加圧器スプレライン用管台	自重	-0.12	0.018	-0.002	-0.003	0.0032	0.086
	熱膨張	-0.19	-0.18	0.033	0.020	0.0029	0.28

（注）荷重の座標系は，下図による。



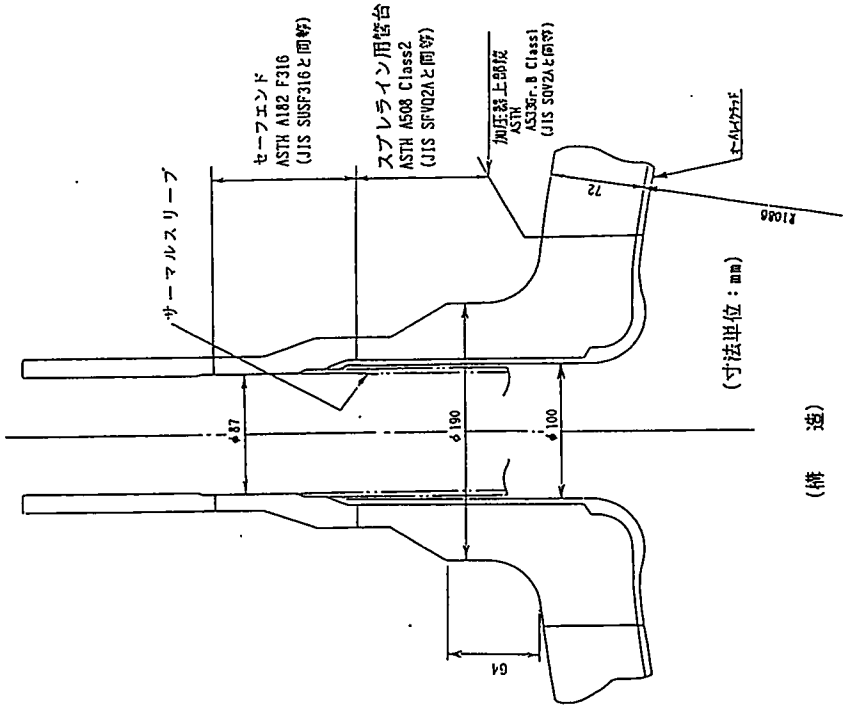
加圧器スプレライン用管台

(3) 構造及び評価位置



（評価位置）

（注）図中○印内の数値は，応力評価位置を示す。
評価位置⑤が疲れ累積係数は最大となる。



（寸法単位：mm）

（構　造）

図－５　加圧器スプレライン用管台の構造及び評価位置

表－２　加圧器スプレライン用管台の設計過渡条件

運転状態	設計過渡条件			過渡回数	冷水注入のある過渡条件	疲労評価に寄与する過渡条件
I	起　動			200	○ (注2)	○
	停　止			200	○ (注2)	○
	負荷上昇（１５～１００%）			13200	○	○
	負荷減少（１００～１５%）			13200	○	○
	９０%から１００%へのステップ状負荷上昇			2000	○	○
	１００%から９０%へのステップ状負荷減少			2000	○	○
	１００%からの大きいステップ状負荷減少			200	○	○
	定常負荷運転時の変動			1×10^6	○	○
	ほう素濃度の均一化			26400	○	○
	１ループ停止／１ループ起動	停　止	停止ループ	80	－	－
			運転ループ			
		起　動	停止ループ	70	○	○
			運転ループ			
II	負荷の喪失			80	○	○
	外部電源喪失	補助給水されるループ		40	－	－
		補助給水されないループ				
	１次冷却材流量の部分喪失		健全側	80	－	－
			故障側			
	１００%からの原子炉トリップ	不注意な冷却を伴わないトリップ		230	－	－
		不注意な冷却を伴うトリップ	冷却ループ	160	－	－
			正常ループ			
		不注意な冷却と安全注入を伴うトリップ	冷却ループ	10	－	－
			正常ループ			
	１次冷却系の異常な減圧	（一　般）		20	－	－
		補助スプレの誤操作		10	○	○
	制御棒クラスタの落下			80	－	－
	出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動			40	－	－
	１次冷却系停止ループの誤起動		停止ループ	10	－	－
			運転ループ		○	○
	タービン回転試験			10	－	－
	１次系漏えい試験			50	－	－
－	蒸気発生器伝熱管損傷事象（注１）		損傷側	1	○ (図-1, 図-2 図-3, 図-4)	○

（注１）美浜２号機の蒸気発生器伝熱管損傷事象の過渡条件も合せて考慮する。

（注２）起動及び停止時にスプレライン用管台からの注入は，スプレの操作を考慮し，それぞれ１２００回及び２４００回とする。

燃料検査結果

美浜２号炉蒸気発生器伝熱管破損事象において燃料の健全性については問題ないことが評価されている。なお、定期検査として燃料集合体検査を行ない、その健全性を確認した。

１．燃料集合体シッピング検査

ａ．目的

燃料集合体からの放射性物質の漏えいの有無を確認する。

ｂ．対象燃料

第１３サイクルに装荷されていた燃料集合体全数１２１体。

ｃ．検査方法

使用済燃料ピット内に据付られているシッピング装置のシッピングキャンに燃料集合体を１体ずつ装入し、窒素ガスを１６分間循環させた後、水サンプルを採取し、これを分析器（Ｇｅ(Ｌｉ)）より測定する。

今回は、炉停止から検査まで約３ケ月であるため、比較的半減期の長いセシウム137及び134の検出に着目する。

ｄ．検査結果

セシウム137及びセシウム134についてはバックグラウンドレベルと有意な差はなく、燃料集合体１２１体全数とも健全であると判定された。

２．燃料集合体外観等検査

ａ．目的

燃料集合体の外観を水中テレビで目視点検等することにより、損傷等の有無を確認する。

ｂ．対象燃料

第１３サイクルに装荷されていた燃料集合体全数１２１体。

ｃ．検査方法

水中テレビにより燃料集合体をモニタテレビに写しだし、カメラを上下に移動しながら、損傷、変形、燃料棒間隔変化等の異常の有無を燃料体４面について確認する。

なお、必要に応じスキマゲージを用い、燃料棒間隙を測定する。

d．検査結果

水中テレビ及びスキマゲージによる検査の結果からは、燃料集合体全数について損傷、変形はなく、燃料棒間隔には異常は認められなかった。

以　上

炉心出口温度と冷却材配管内の冷却材温度の推移に関する検討

1．目　的

炉心出口温度の最大値（Tcore；熱電対による測定値）はその下流に位置する冷却材配管内の冷却材温度（抵抗温度計による測定値）のうち、健全側ループの高温側冷却材温度（B－Thot）、損傷側ループの高温側冷却材温度（A－Thot）及び損傷側ループの低温側温度（A－Tcold）と乖離している期間があることから、これらの原因を検討した。（図－1、2）

2．健全側ループの高温側冷却材温度の推移の分析

（1）炉心出口温度との関係（図－1）

a．14時0分から14時2分の間については、B－ThotはTcoreとほぼ同じ温度を示している。

b．14時3分から14時20分の間については、B－ThotはTcoreよりも高く推移している。

c．14時21分から14時37分の間については、B－ThotはTcoreとほぼ同じ温度を示している。

d．14時38分以降については、B－ThotはTcoreよりも低く推移している。

（2）要因の検討

（1）のb項及びd項の現象の要因を以下のとおり検討した。

B－ThotとTcoreの推移を、時間軸を一致させたケース、TcoreをB－Thotより1分遅らせたケース、同じく2分遅らせたケース及び3分遅らせたケースについて図－3.1～図－3.4に示す。これによると、B－ThotとTcoreの推移はほぼ相似形をしていることから、B－ThotはTcoreに対して2～3分の時間遅れがあると考えられる。

B－ThotとTcoreに時間遅れが生じる要因については、

① 炉心出口付近の１次冷却材が上部プレナム部上部の１次冷却材と混合した後に高温側配管に流出するため、Ｂ－Ｔhotの抵抗温度計付近の温度変化はＴcoreの温度変化と比べて時間遅れを生じること

② 抵抗温度計は熱容量が大きいため、熱電対に比べ測定による時間遅れがあること

によるものと推定される。

（３）計算による模擬

（２）で述べた時間遅れによる温度差の発生を模擬するため、添付に示すモデルにより計算を行った。計算結果は添付のとおり測定値とほぼ一致している。

（４）結　論

以上のことから１４時３分から１４時２０分の間において、ＴcoreがＢ－Ｔhotを下回っているのは、Ｔcoreの低下に対してＢ－Ｔhotの低下が時間遅れを生じているためと判断される。

３．損傷側ループの高温側冷却材温度の推移の分析

（１）炉心出口温度との関係（図－２）

ａ．１４時０分から１４時６分の間については、Ａ－Ｔhotは周期的に変動しＴcoreよりも高く推移している。

ｂ．１４時７分以降については、Ａ－ＴhotはＴcoreよりも高く推移している。

（２）要因の検討

（１）のａ項及びｂ項の現象の要因を以下のとおり検討した。

ａ．項

Ａ－Ｔhotの変動は健全側ループには見られないことから変動の要因は損傷側ループ特有のものに起因すると考えられる。この変動要因として考えられる健全側ループと損傷側ループの違いは、

①加圧器の有無（損傷側ループ有、健全側ループ無）

②自然循環流量の大小（損傷側ループ小、健全側ループ大）

が挙げられる。

Ａ－Ｔhotの一時的な上昇は１３時５３分頃から４回起こっている。このうち１、２及び３回目の温度上昇は、この時に１次冷却系の圧力が低下していることから加圧器及び加圧器サージ管内の高温水及び高温蒸気が高温側配管に流出したことにより生じたものと推定される。また、４回目の温度上昇は、損傷側ループの自然循環流量が低下し１次冷却材の流動が停滞する傾向にあったため、高圧注入ポンプにより注入された低温の水と上部プレナム部に滞留していた高温の１次冷却材とが十分に混合せず、損傷側ループの高温側配管内に不均一な温度分布を形成したことによるものと推定される。

一方、Ｔcoreは上記要因の影響を受けないことからＡ－ＴhotはＴcoreより高く推移しているものと推定される。

ｂ．項

１４時７分以降は、損傷側ループの自然循環はほとんど停滞し、解析では自然循環は１４時１５分に停止している。また、１次冷却系と損傷側蒸気発生器２次側が同圧となるまで損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材の流出は継続している。このため、上部プレナム部に滞留していた高温の１次冷却材の一部が損傷側ループの高温側配管内に取り込まれ、損傷側ループの高温側配管内で不均一な温度分布を形成したことにより、Ａ－ＴhotはＴcoreより高い指示を示しているものと推定される。

（３）計算による模擬

（２）のｂ項に示した上部プレナム部上部の高温の１次冷却材の一部が損傷側ループの高温側配管に取り込まれたことによるＡ－Ｔhotの変化を模擬するため、添付に示すモデルにより計算を行った。計算結果は添付のとおり測定値とほぼ一致している。

（４）結　論

以上のことから、１４時０分から１４時６分の間については、加圧器及び加圧器

サージ管内の高温水及び高温蒸気が高温側配管に流出したことや１次冷却系の流量低下に伴い高温側配管内に不均一な温度分布が形成されたことにより、Ａ－ＴhotがＴcoreよりも高く推移したものと推定される。

また、１４時７分以降、Ａ－ＴhotがＴcoreを上回っているのは、上部プレナム部への安全注入によるＴcoreの低下に対して、Ａ－Ｔhotの低下に時間遅れが生じたことに加え、損傷側ループの流れがほとんど停滞するため高温側配管内に不均一な温度分布が形成されたためと判断される。

４．健全側ループと損傷側ループにおける高温側冷却材温度の差の原因について

以上の検討から、Ａ－ＴhotとＢ－Ｔhotの温度差の原因について以下のとおり推定される。

（１）損傷側ループには加圧器が接続されているため、加圧器及び加圧器サージ管内の高温水及び高温蒸気が高温側配管に流出したことから、Ａ－ＴhotがＢ－Ｔhotより高くなっている。

（２）損傷側ループの自然循環流量が少ないため、上部プレナム部の高温水の流入による高温側配管内での不均一温度分布の形成が損傷側ループで顕著なことから、Ａ－ＴhotがＢ－Ｔhotより高く推移している。

５．損傷側ループの低温側冷却材温度の推移の分析

（１）炉心出口温度との関係（図－２）

１４時０分から１４時３７分の間については、Ａ－Ｔcoldは１４時５分以降、Ｔcoreよりも高く推移している。

（２）要因の検討

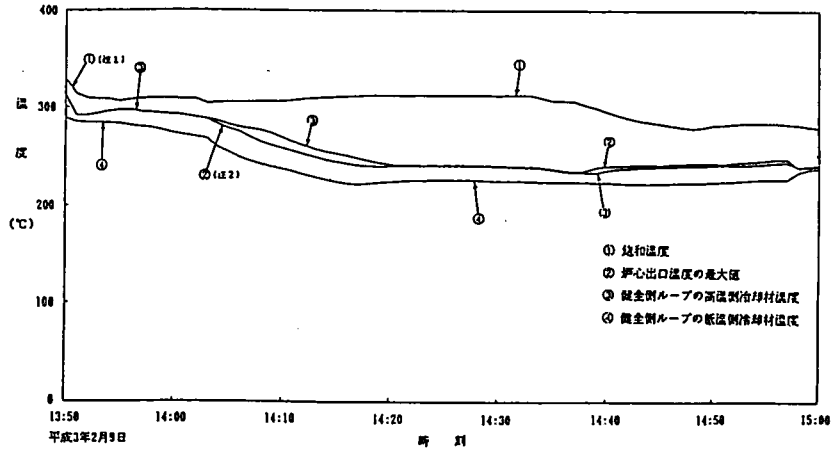
健全側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁の手動開により冷却された１次冷却材は健全側ループ低温側配管を通り炉心下部に到達する。その後、損傷側ループを循環し低温側の温度検出部に損傷側ループを循環する遅れ時間後に到達するが、損傷側蒸気発生器での熱交換がほとんど行われないため、ほとんど温度低下しない。このため、

Ａ－ＴcoldがＴcoreよりも高く推移したものと推定される。

このＴcoreに対するＡ－Ｔcoldの時間遅れは、損傷側ループにおける自然循環流量が漸減し、自然循環が停止するまで除々に増大したものと推定される。損傷側ループの自然循環が停止した後はＴcoreはＢ－Ｔcoldのみの影響を受け、Ａ－Ｔcoldとの相関はなくなったものと推定される。

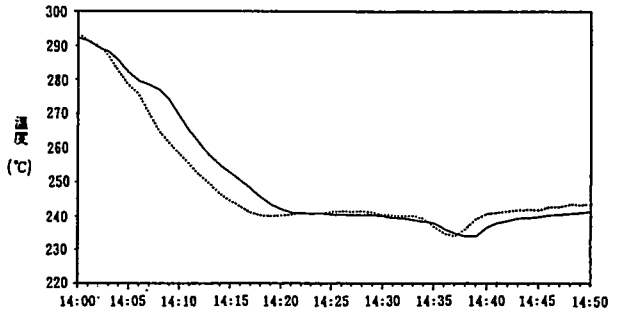
（３）結　論

１４時５分以降、Ａ－ＴcoldがＴcoreを上回っているのは、１次冷却材が損傷側ループを循環し低温側の温度検出部に至るまでの間の時間遅れが生じたためと推定される。なお、損傷側ループの自然循環停止後はＴcoreとＡ－Ｔcoldの相関はなく推移したものと考えられる。



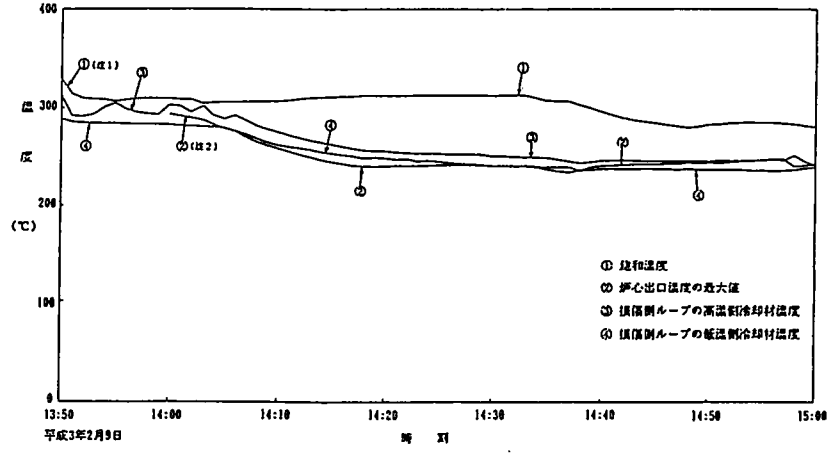
(注1) １３時５０分から１３時５９分の間は１次冷却系の圧力からの換算値
(注2) １３時５０分から１３時５９分の間は記録されていない。

図－１　飽和温度、炉心出口温度の最大値、健全側ループの高温側及び低温側冷却材温度の推移



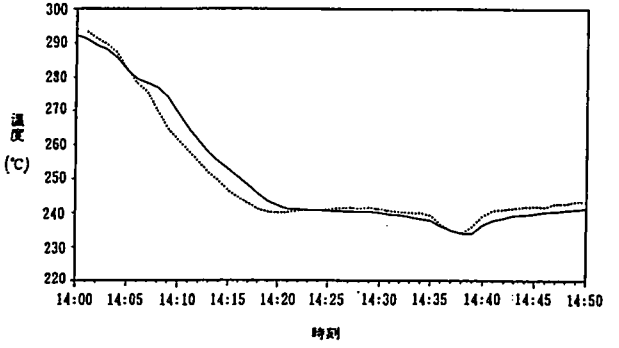
— 健全側T_{HOT}（実測） — 炉心出口温度（遅れなし）

図－３．１　B－T_{HOT}とT_{CORE}の比較



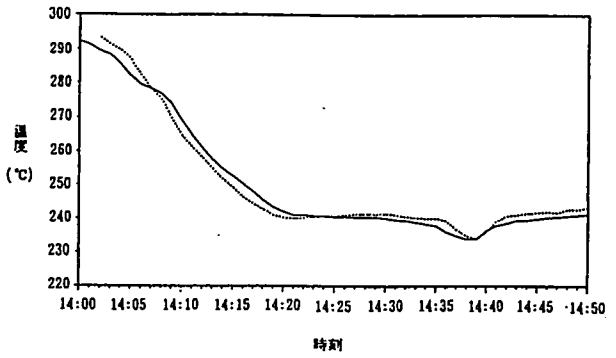
(注1) １３時５０分から１３時５９分の間は１次冷却系の圧力からの換算値
(注2) １３時５０分から１３時５９分の間は記録されていない。

図－２　飽和温度、炉心出口温度の最大値、損傷側ループの高温側及び低温側冷却材温度の推移

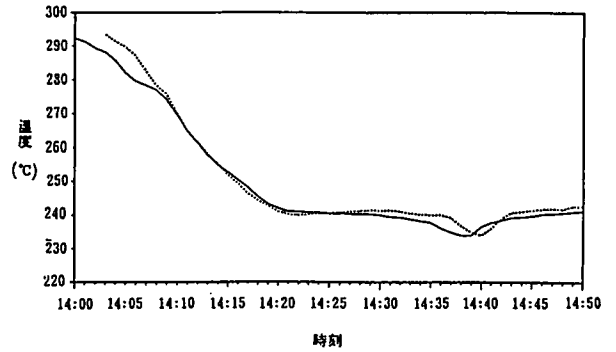


— 健全側T_{HOT}（実測） — 炉心出口温度（１分遅れ）

図－３．２　B－T_{HOT}とT_{CORE}の比較



図－3.3　B－T_{HOT}とT_{COUT}の比較



図－3.4　B－T_{HOT}とT_{COUT}の比較

高温側配管内の１次冷却材の温度変化の計算

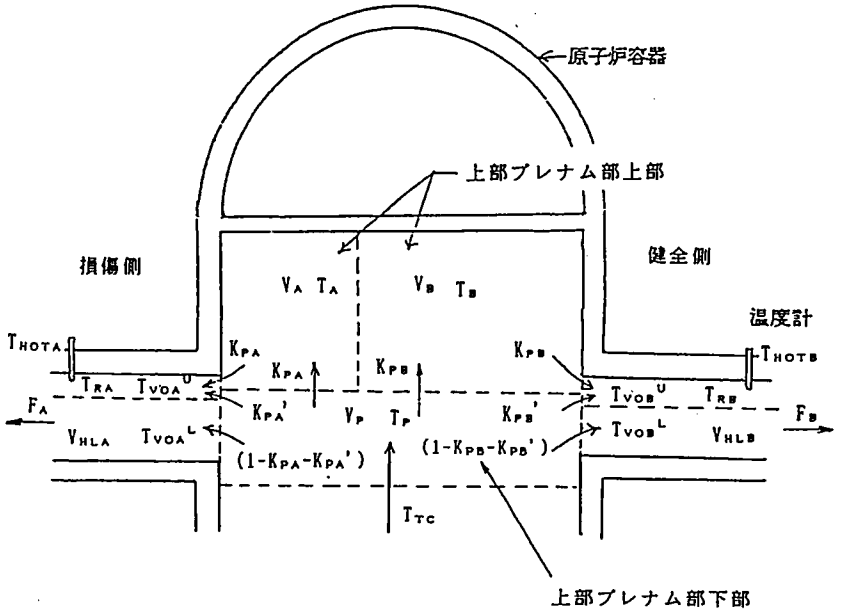
１．計算モデル

炉心を上昇する１次冷却材は、上部プレナム部下部（出口ノズルのレベル以下）を通過し、それぞれ損傷側ループの高温側配管と健全側ループの高温側配管へ流出する。

同時に、上部プレナム部下部を上昇する１次冷却材の一部は、上部プレナムを上部方向へ流れた後、上部プレナム部上部の１次冷却材と混合し高温側配管へ流出する。この流れは比較的小さく、また上部プレナム部上部の１次冷却材の温度低下は炉心出口の１次冷却材の温度低下より遅れるため比較的高温の１次冷却材であると考えられる。

したがって、高温側配管へ流出する１次冷却材の温度は相対的に配管の上部が高く下部が低い温度分布を示す。このような温度分布をもつ１次冷却材は、ある程度混合するが一部は混合しないで高温側配管を流れるため、配管上部に設置されている温度計には比較的高い温度が測定されるものと考えられる。このことは、自然循環流量の少ない損傷側ループで顕著である。

以上の流動状況を下記のモデルによって評価する。



ここで、

F_A, F_B ：１次冷却材の流量（損傷側、健全側）

T_{TC} ：炉心出口検出器での測定温度

V_P, V_A, V_B ：上部プレナム部の各部の容積

T_P, T_A, T_B ：上部プレナム部の各部の１次冷却材の温度

T_{VOA}^U, T_{VOB}^U ：高温側配管上部に流出する１次冷却材の温度（損傷側、健全側）

T_{VOA}^L, T_{VOB}^L ：高温側配管下部に流出する１次冷却材の温度（損傷側、健全側）

K_{PA}, K_{PB} ：上部プレナム部上部への１次冷却材の流量のループ流量に対する割合（損傷側、健全側）

K_{PA}', K_{PB}' ：高温側配管上部への１次冷却材の流量のループ流量に対する割合

K_{VOA}, K_{VOB} ：高温側配管上部への１次冷却材の流量のうちV_A, V_B 部分からの割合（損傷側、健全側）

$$K_{VOA} = \frac{K_{PA}}{K_{PA} + K_{PA}'} \qquad K_{VOB} = \frac{K_{PB}}{K_{PB} + K_{PB}'}$$

V_{HLA}, V_{HLB} ：高温側配管入口から高温側冷却材温度測定点までの高温側配管の容積（損傷側、健全側）

T_{RA}, T_{RB} ：温度測定点の１次冷却材の温度（損傷側、健全側）

T_{HOTA}, T_{HOTB} ：高温側冷却材温度測定値

τ_{RTD} ：抵抗温度計の検出遅れ時間

各部の１次冷却材の温度の変化は、各部での完全混合を仮定し、下記式にて計算する。

イ）上部プレナム部下部

$$\frac{dT_P}{dt} = \frac{F_A + F_B}{V_P} (T_{TC} - T_P)$$

ロ）上部プレナム部上部

$$\frac{dT_A}{dt} = \frac{F_A \cdot K_{PA}}{V_A} (T_P - T_A)$$

$$\frac{dT_B}{dt} = \frac{F_B \cdot K_{PB}}{V_B} (T_P - T_B)$$

ハ）高温側配管へ流出する１次冷却材の温度

$$T_{VOA}^U = (1-K_{VOA}) \cdot T_P + K_{VOA} \cdot T_A$$

$$T_{VOB}^U = (1-K_{VOB}) \cdot T_P + K_{VOB} \cdot T_B$$

$$T_{VOA}^L = T_P$$

$$T_{VOB}^L = T_P$$

ニ）高温側冷却材温度検出位置での１次冷却材の温度

$$\frac{dT_{RA}}{dt} = \frac{F_A}{V_{HLA}} (T_{VOA}^U - T_{RA})$$

$$\frac{dT_{RB}}{dt} = \frac{F_B}{V_{HLB}} (T_{VOB}^U - T_{RB})$$

ホ）抵抗温度計の検出時間遅れ

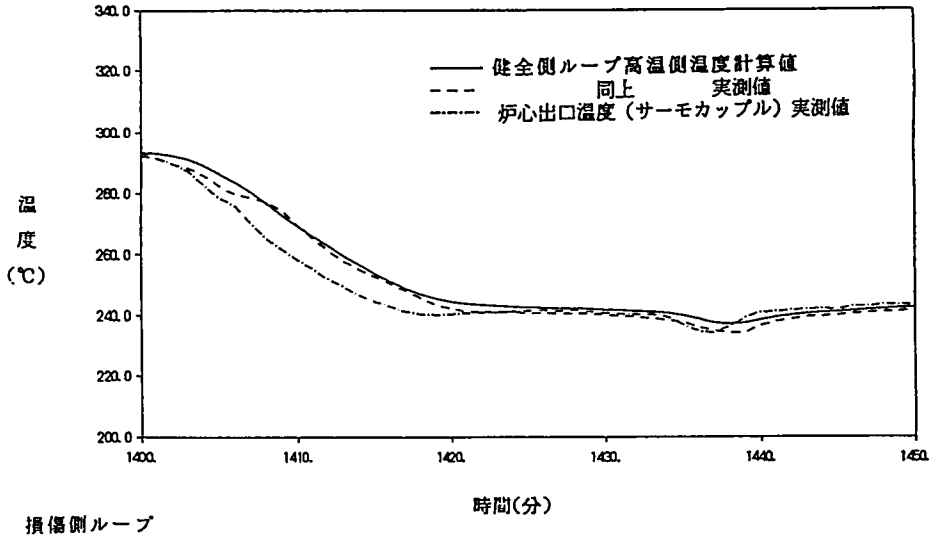
$$\frac{dT_{HOTA}}{dt} = \frac{1}{\tau_{RTD}} (T_{RA} - T_{HOTA})$$

$$\frac{dT_{HOTB}}{dt} = \frac{1}{\tau_{RTD}} (T_{RB} - T_{HOTB})$$

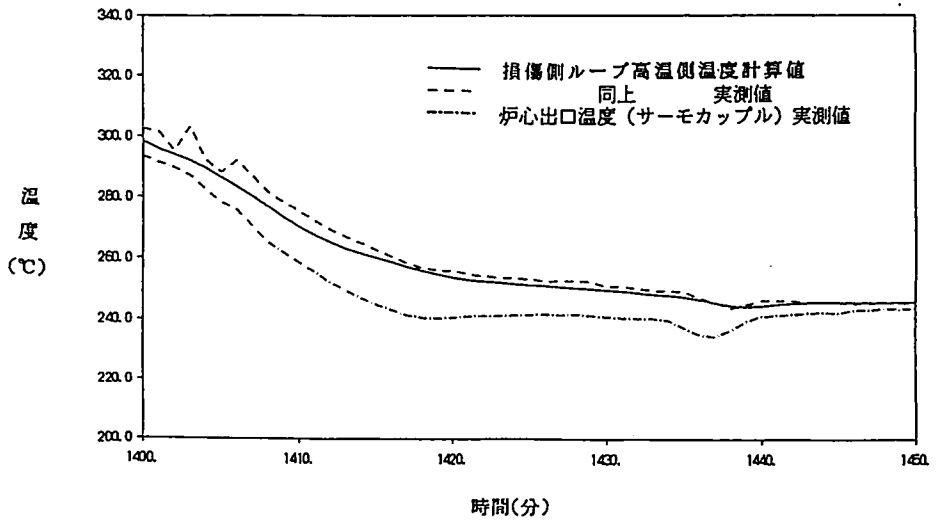
3．計算結果

上記のモデル及びデータにより計算した損傷側と健全側の高温側冷却材温度(検出器測定値)の実測値と計算値を比較して下記図に示す． 計算結果と実測結果はほぼ一致し、炉心出口温度と高温側冷却材温度の挙動は．ここで示した上部プレナム部での流動の状況と配管遅れ．測温抵抗体の検出遅れで十分に説明ができる．

健全側ループ



損傷側ループ



１次冷却系への水の注入量及び損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量
（解析開始時点から安全注入の開始時点まで）

１．目的

解析開始時点から安全注入の開始時点までの間の損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量等については再現解析の解析結果により得られているが、この妥当性についてプラントパラメータの推移から評価した。

２．前提条件

プラントパラメータはＰＡＭトレンド記録を使用した。なお、安全注入の開始は１次冷却系の圧力データ及び低温側安全注入流量データより１３時５１分のデータ採取後であると考えられるため、同時刻のデータを安全注入の開始時の値とした。また、同時刻には加圧器水位が０％以下となっていることから、安全注入の開始時点で加圧器は空になっていると仮定した。表－１に評価に当たっての前提条件を示す。

表－１　前提条件

項　目	前　提　条　件		根　拠
１次冷却系の圧力	解析開始時点 安全注入開始時	１５７．１kg/cm² １０５．６kg/cm²	 13:51のＰＡＭデータ
１次冷却材の平均温度	解析開始時点 安全注入開始時	３００．９℃ ２８８．５℃	 13:51のＰＡＭデータ Ａ、Ｂループの高温側・低温側冷却材温度の平均値
１次冷却材の体積	・１次冷却材の温度変化に伴う体積変化を算定する場合、温度変化の少ない原子炉容器頂部及び状態変化の大きい加圧器等は除く ・安全注入の開始時点で加圧器は空であったと仮定		

2．評価結果

１項に示した前提条件を基に加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の重量変化及び１次冷却材の温度変化に伴う体積変化の効果についての算定結果を表－２，３に示す。これによると、加圧器が空になった場合加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の減少量は約９．０トン、また安全注入の開始までの１次冷却材の温度低下による体積収縮の効果は約２．２トンとなっている。

表－２　加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の重量変化

解析開始時点の加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）重量（W_1）	１１．２３トン
安全注入開始時の加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）重量（W_2）	２．２６トン
加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の重量変化（W_1-W_2）	８．９７トン

表－３　温度変化に伴う１次冷却材の体積変化の効果

解析開始時点の水の重量（W_1）	１００．７４トン
安全注入開始時の水の重量（W_2）	１０２．９５トン
１次冷却材の体積収縮に吸収された水の重量（W_2-W_1）	２．２１トン

3．解析結果との比較

解析結果によると、安全注入の開始までの１次冷却材流出量は約７．４トンであり、またこの間の充てんポンプからの１次冷却系への水の注入量が約０．４トンとなっている。したがって１次冷却材流出量が約７．０トン上回っていることになる。これに対し２項で示した算定結果からは、加圧器器内水等の減少量が約９．０トンとなっており温度低下に伴う体積収縮の効果の約２．２トンを考慮すると約６．８トンとなる。すなわち１次冷却材流出量は加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の減少により補われている。（表－４）

表－４　解析結果との比較

加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の重量変化（A）		９．０トン
１次冷却材の体積収縮に吸収された水の重量（B）		２．２トン
（A）－（B）		６．８トン
解析結果	１次冷却材流出量（C）	７．４トン
	充てんポンプからの注入量（D）	０．４トン
	（C）－（D）	７．０トン

１次冷却系への水の注入量及び損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量

（安全注入の開始時点から安全注入開始後５分の時点まで）

１．目的

安全注入開始から５分間の損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量等については再現解析の解析結果により得られているが、この妥当性についてプラントパラメータの推移から評価した。

２．前提条件

プラントパラメータはＰＡＭトレンド記録を使用した。なお、安全注入開始は１次冷却系の圧力データ及び低温側安全注入流量データより１３時５１分のデータ採取後であると考えられるため、同時刻のデータを安全注入開始時の値とした。また、同時刻には加圧器水位が０％以下となっていることから、安全注入開始時点で加圧器は空になっていると仮定し、さらに安全注入開始１分後には加圧器サージ管も空になったと仮定した。表－１に評価に当たっての前提条件を示す。

表－１　前　提　条　件

項　目	前　提　条　件		根　拠	
１次冷却系の圧力	安全注入開始時	１０５．６kg/cm²	13:51	のＰＡＭデータ
	〃　１分後	９９．２kg/cm²	13:52	
	〃　２分後	９８．３kg/cm²	13:53	
	〃　３分後	９７．７kg/cm²	13:54	
	〃　４分後	９５．２kg/cm²	13:55	
	〃　５分後	９７．３kg/cm²	13:56	
１次冷却材平均温度	安全注入開始時	２８８．５℃	13:51	のＰＡＭデータ 健全側ループ* 高温側・低温側 冷却材温度の平均値
	〃　１分後	２８８．１℃	13:52	
	〃　２分後	２８９．１℃	13:53	
	〃　３分後	２９０．０℃	13:54	
	〃　４分後	２９０．４℃	13:55	
	〃　５分後	２８９．４℃	13:56	
１次冷却材の体積	・１次冷却材の温度変化に伴う体積変化を算定する場合、温度変化の少ない原子炉容器頂部及び状態変化の大きい加圧器等は除く ・安全注入の開始時点で加圧器は空になり、さらに安全注入開始１分後に加圧器サージ管も空になったと仮定			

＊：損傷側ループの高温側冷却材温度は加圧器及び加圧器サージ管内の高温の一次冷却材等の影響等により実際よりも高めに推移していると推定されるため健全側ループを使用した。

2．評価結果

１項に示した前提条件を基に加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の重量変化及び１次冷却材の温度低下に伴う体積変化の効果について算定した。なお、この期間については１次冷却材平均温度が上昇している期間と下降している期間があるため、期間を分けて評価した。

① 安全注入開始後１分間（１次冷却材温度低下期間）

この期間については、加圧器が空になりさらに加圧器サージ管内水が減少している期間と考えられる。したがって、評価では加圧器サージ管が空になった状態を仮定した。加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の重量変化の算定結果を表－２に示すが減少量は約０．６トンとなっている。なお、表－３よりこの期間の１次冷却材の体積変化はほとんどないことがわかる。

表－２　加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の重量変化

安全注入開始時の加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の重量（W_1）	２．２６トン
安全注入開始１分後の加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の重量（W_2）	１．６３トン
加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の重量変化（W_1-W_2）	０．６３トン

表－３　温度変化に伴う１次冷却材の体積変化の効果

安全注入開始時の水の重量（W_1）	１０２．９５トン
安全注入開始１分後の水の重量（W_2）	１０２．９１トン
１次冷却材の体積膨張により押し出された水の重量（W_1-W_2）	０．０４トン

② 安全注入開始１分後から４分後まで（１次冷却材温度上昇期間）

この期間は１次冷却材の温度が上昇し、１次冷却系の体積が膨張している期間である。この体積膨張の効果を算定した結果を表－４に示す。これによると、体積膨張により１次冷却系から押し出された水の重量は約０．７トンとなっている。この１次冷却系より押し出された水は、損傷側蒸気発生器２次側へ流出したものと考えられる。

表－４　温度変化に伴う体積変化の効果

安全注入開始１分後の水の重量（W_1）	１０２．９１トン
安全注入開始４分後の水の重量（W_2）	１０２．１７トン
１次冷却材の体積膨張により押しだされた水の重量（W_1-W_2）	０．７４トン

③ 安全注入開始４分後から５分後まで（１次冷却材温度低下期間）

この期間は１次冷却材の温度の上昇が止まり再度下降している期間であり、１次冷却系の体積は収縮している。この体積収縮の効果を算定した結果を表－５に示す。これによると、体積収縮により１次冷却系に吸収された水の重量は約０．３トンとなっている。したがってこの間の安全注入量の一部は、１次冷却系の体積収縮により吸収されたものと考えられる。

表－５　温度変化に伴う体積変化の効果

安全注入開始４分後の水の重量（W_1）	１０２．１７トン
安全注入開始５分後の水の重量（W_2）	１０２．５０トン
１次冷却材の体積収縮により吸収された水の重量（W_2-W_1）	０．３３トン

3．解析結果との比較

解析結果と２項で示した結果との比較を表－６に示すが、両者はよく一致している。したがって、この期間においては１次冷却材流出量が安全注入量を上回っているが、注入水量の不足分は加圧器サージ管内水の減少及び１次冷却材の温度上昇による体積膨張の効果により補われている。

表－６　解析結果との比較

安全注入開始後の経過時間	加圧器ｻｰｼﾞ管内水減少量(A)	体積変化による効果*(B)	解析結果		水収支
			1次冷却材流出量(C)	安全注入量(D)	(A)＋(B)＋(C)＋(D)
0～1(分)	0.6トン	0トン	－1.0トン	0.4トン	0.0トン
1～4(分)	―――	0.7トン	－2.7トン	1.9トン	－0.1トン
4～5(分)	―――	－0.3トン	－0.8トン	1.1トン	0.0トン
合　計	0.6トン	0.4トン	－4.4トン	3.4トン	－0.1トン

（注）四捨五入のため解析結果の個々の数値の集計値と合計欄の数値及び個々の数値の集計値と水収支欄の数値は必ずしも一致しない。

＊：体積収縮による効果を負、体積膨張による効果を正としている。

１次冷却系への水の注入量及び損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量
（安全注入開始後５分の時点から減圧開始の時点まで）

１．目的

安全注入開始の５分後から１次冷却系の減圧開始までの間の損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量等については再現解析の解析結果により得られているが、この妥当性についてプラントパラメータの推移から評価した。

２．前提条件

プラントパラメータはＰＡＭトレンド記録を使用した。評価は１３時５６分（安全注入開始５分後）から１４時３４分（減圧開始）までの間で行った。なお、１３時５６分には加圧器及び加圧器サージ管は空になっていると仮定し、１４時３５分には加圧器水位が約３％を示していることから、１４時３４分には加圧器水位計下端まで水位が回復しているものと仮定した。表－１に評価に当たっての前提条件を示す。

表－１　前提条件

項　目	前　提　条　件		根　拠
１次冷却系の圧力	安全注入開始５分後	９７．３kg/cm²	13:56のＰＡＭデータ
	減圧開始時	１００．２kg/cm²	14:34のＰＡＭデータ
１次冷却材平均温度	安全注入開始５分後	２８９．４℃	13:56のＰＡＭデータ 健全側ループ*高温側・低温側冷却材温度の平均値
	減圧開始時	２３８．０℃	14:34のＰＡＭデータ Ａ、Ｂループ 高温側・低温側冷却材温度の平均値
１次冷却材の体積	・１次冷却材の温度変化に伴う体積変化を算定する場合、温度変化の少ない原子炉容器頂部及び状態変化の大きい加圧器等は除く ・当初、加圧器及び加圧器サージ管は空であったが、減圧開始時点で、加圧器水位計下端まで水位が回復したと仮定		

＊：安全注入開始後約２０分の間、損傷側ループ高温側冷却材温度は加圧器及び加圧器サージ管内の高温の一次冷却材等の影響等により実際よりも高めに推移していると推定されるため健全側ループを使用した。

2．評価結果

１項に示した前提条件を基に１次冷却材の温度変化に伴う体積変化の効果及び加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の重量変化についての算定結果を表－２，３に示す。これによると、安全注入開始５分後から１次冷却系の減圧開始までの１次冷却材の温度低下による体積収縮の効果は約１１．９トン、１次冷却系の減圧開始時に加圧器サージ管まで水位が回復した場合加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の増加量は約１．５トンとなっている。

表－２　温度変化に伴う体積変化の効果

安全注入開始５分後の水の重量（W_1）	１０２．５０トン
１次冷却系の減圧開始時の水の重量（W_2）	１１４．４２トン
１次冷却材の体積収縮により吸収された水の重量（W_2-W_1）	１１．９２トン

表－３　加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の重量変化

安全注入開始５分後の加圧器及び加圧器サージ管内蒸気の重量（W_1）	１．５９トン
１次冷却系の減圧開始時の加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の重量（W_2）	３．０４トン
加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の重量変化（W_2-W_1）	１．４５トン

3．解析結果との比較

解析結果と２項で示した結果との比較を表－４に示すが、両者はよく一致している。したがって、この期間においては、安全注入量及び充てんポンプによる注入量が１次冷却材流出量を上回っているが、注入量の上回った分は１次冷却材の温度低下に伴う１次冷却材体積の収縮に見合っている。

表－４　解析結果との比較

１次冷却材の体積収縮に吸収された水の重量（A）		１１．９トン
加圧器及び加圧器サージ管内水（蒸気）の重量変化（B）		１．５トン
（A）＋（B）		１３．４トン
解析結果	１次冷却材流出量（C）	３５．４トン
	安全注入量（D）	４２．７トン
	充てんポンプからの注入量（E）	６．２トン
	{（D）＋（E）}－（C）	１３．５トン

資料　4

資料－4.1.1.1

破　断　管　調　査　結　果

1. 目的

伝熱管損傷の原因調査のため、破断管の破断状況調査及び渦電流探傷検査（以下「ＥＣＴ」という。）記録の調査を行うとともに、破断管を引き抜き金属調査を実施する。

2. 現場調査

2.1　調査方法

現場において、小型テレビカメラ等による破断管の破断状況調査、ＥＣＴによる伝熱管の損傷、変形等の調査及び振動計測装置による振動計測を実施する。

2.2　調査結果

(1) Ａ－蒸気発生器の１次側マンホールを開放後、２次側の水位上昇による破断管からの漏洩の観察から、破断管の位置はＸ４５－Ｙ１４であり、破断箇所は低温側第６管支持板部近傍であることが確認された。（図－１）

(2) 破断管を小型テレビカメラ等で観察した結果、破断管は低温側第６管支持板上端部で円周方向に破断し、分離していた。破断部の上側（Ｕ字部）は破断部の下側（第６管支持板部）から約3.5 ～４㎝上方へ移動し、またＸ４６－Ｙ１５の方向に約1.5 ～２㎝水平移動していた。（添付－１）

(3) 破断管破断部近傍の管支持板上を小型テレビカメラ等で点検した結果、破断の原因になり得るような異物は認められなかった。

(4) 破断管の過去のＥＣＴ記録を再評価した結果、有意な信号指示は認められなかった。

(5) 破断後に実施したＥＣＴ、内径計測及び振動計測の結果は、次のとおりであった。

a. ＥＣＴの結果、高温側第６管支持板上下端部に対応する位置に変形（へこみ）信号指示が認められたが、それ以外の部位には有意な信号指示は認められなかった。（添付－２）

b. 内径計測の結果、低温側第６管支持板部で変形は認められなかった。また、高温側第６管支持板上下端部に対応する位置にへこみが認められた。　（添付－３）

c. 振動計測の結果、伝熱管の振動数は固定条件での解析値に近い値を示したことから低温側第６管支持板部で固定支持と評価された。　（添付－４）
また、高温側第６管支持板部は、ピンと固定の中間の支持状態と評価された。

(6) 管支持板部のスケールの状況

伝熱管の引き抜き途中で、低温側第１～第６管支持板管穴内面に付着しているスケールの状況を、小型テレビカメラで観察した結果、スケールは黒褐色で著しい腐食は認められなかった。　（添付－５）

3. 金属調査

3.1 調査方法

調査サンプル採取位置を図－２に、各サンプルの調査項目を表－１に示す。

調査項目は以下のとおりである。

(1) 外観観察

サンプルの外観を観察、写真撮影（35㎜判カメラ）し記録する。

(2) 寸法検査

伝熱管の外径をレーザ外径測定装置を用いて測定する。

伝熱管の板厚をダイヤルゲージ式厚さ測定装置を用いて測定する。

伝熱管の減肉形状を万能表面形状測定器を用いて測定する。

(3) Ｘ線回折

サンプルに付着しているスケールの形態をＸ線回折装置を用いて分析する。

(4) 光学観察

破面及び外表面を拡大写真撮影装置を用いて拡大観察、写真撮影し記録する。

(5) 走査型電子顕微鏡（ＳＥＭ）観察

破面及び外表面を走査型電子顕微鏡を用いて、取り出したままの状態、およびスケール除去（３％塩酸で酸洗）した後の状態で高倍率で拡大観察、写真撮影し記録する。

(6) 断面ミクロ観察

サンプルを樹脂に埋込み、研磨、エッチングを行い、光学顕微鏡を用いて拡大観察、写真撮影し記録する。

(7) 硬度

サンプルの硬度をマイクロビッカース硬度計を用いて計測する。測定はJIS Z2244「ビッカース硬さ試験法」に準拠し、押し付け荷重500gにて実施する。

(8) ＥＰＭＡ（Electron Probe Micro Analysis）

サンプルに付着しているスケールの元素をＸ線マイクロアナライザを用いて分析する。

(9) ＧＤＳ（Glow Discharge Spectroscopy）

サンプルに付着しているスケールの厚さ方向の成分分布状況をグロー放電分光分析器を用いてスケール表面をスパッタリングし、スケール表面から飛び出す光スペクトルにより測定する。

(10) フェライトスコープ

サンプルのCr欠乏層の形成状況をフェライトスコープ強度測定装置を用いて測定する。

(11) 引張試験

サンプルの0.2 %耐力、引張強さ、伸びを精密万能試験機を用いて測定する。標点間距離50㎜の試験片によりJIS Z2241 「金属材料引張試験法」に基づいて実施する。

(12) 管材成分分析

サンプルの化学成分をプラズマ発光分光分析装置、燃焼熱伝導度型カーボン分析装置、分光光度計、電気炉燃焼法、ＥＤＴＡ容量法及び過マンガン酸容量法を用いて定量分析する。JIS Z2615, G1211, G1213, G1214, G1215, G1216, G1217 に基づく。

使用装置の型式等を添付－６に示す。

3.2 調査結果

低温側直管の頂部に形成された破面（下側破面）と、U字部の下端に形成された破面（上側破面）及び高温側第６管支持板部等を調査した結果は、以下のとおりである。

(1) 破断位置

破断位置は、低温側第６管支持板上端部であり、円周に沿って破断し、分離していた。（図－１）

破断面は、伝熱管の長手方向（以下「管軸方向」という。）に対して、全体的にほぼ直角であるが、約４㎜の高低差を伴っており、９０度（「水室仕切板方向を０度とし、伝熱管を上から見て時計回り方向の円周角座標での角度」、以下同じ。）付近では、管支持板上端から約１㎜ないし２㎜下方に位置していた。（図－３、添付－７）

(2) 破面

破断管の破面について、金属調査を実施した結果は、以下のとおりである。

なお、下側破面と上側破面は、同様の特徴を有していた。

a. 主起点部及びその付近

９０度付近の破面は、管軸方向に対して全体的に直角かつ平坦であるが、段差のある状態で発生した複数の微小破面が伝播に伴い合体して形成される破面の細かい段差模様（以下「ステップ」という。）が、９０度付近の外表面側を中心として、内表面側にかけて扇状に広がる傾向を示していた。また、扇状のステップの外表面側に、半楕円形状のき裂が複合した領域が外周に沿って長さ３．５㎜程度、板厚方向への深さ０．３㎜程度にわたって認められた。

これらのことから、９０度付近の半楕円形状のき裂が複合した領域の外表面が主起点部と判断される。（図－４）

主起点部と判断された領域の外表面側の破面は、管軸方向に対して４５度程度傾いていた。（図－５）

この領域を含めて外表面から内表面にかけての領域には、電子顕微鏡観察の結果、インコネル材の低速度伝播疲労破面の特徴である、微細な段差のある粒内割れが集積された破面（以下「立体モザイク模様」という。）が認められた。

この立体モザイク模様は、外表面から内表面に向かうに従って細かくなる傾向が認められた。また、外表面側には破面の開閉時に破面同士が繰り返し接触した場合に生じるタイヤの跡状模様（以下「タイヤトラック」という。）が認められた。（図－４）

主起点部及びその付近においては、破面は主として粒内割れであり、応力腐食割れ、粒界腐食割れを示唆する明瞭な粒界破面は認められなかった。

また、主起点部及びその付近においては、明瞭な縞模様（以下「ストライエーション」という。）は認められなかった。

内表面側にはせん断破断を示す破面の傾き（シヤーリップ）及び延性破面を特徴づけるくぼみ（以下「ディンプル」という。）は認められなかった。

なお、立体モザイク模様の破面の外表面から板厚方向に0.05㎜程度までの領域には、母材の酸化により生成された皮膜層（以下「酸化皮膜層」という。）が認められた。

b. 副起点部

２７０度付近の外周に沿って長さ４㎜程度、板厚方向への深さ0.2㎜ 程度の領域は、９０度付近と同様、管軸方向に対して傾いており、電子顕微鏡観察の結果、立体モザイク模様が認められた。

この立体モザイク模様の破面はディンプルのみの破面で取り囲まれていた。

これらのことから、２７０度付近の外表面は副起点部と判断される。

なお、この立体モザイク模様の破面の外表面に近い領域には、９０度付近と同様、母材の酸化皮膜層が認められた。

c. き裂伝播部

主起点部から１０度程度以上離れた領域、すなわち０度付近から８０度付近及び

１００度付近から１８０度付近の領域には、電子顕微鏡観察の結果、ストライエーションが認められ、このうち、０度付近から５０度付近及び１３０度付近から１８０度付近の領域には、高サイクル疲労（破断までの繰返し数がおよそ10^5 回程度以上の疲労）破面を特徴付ける明瞭なストライエーションが認められた。ストライエーションが認められた領域では、き裂は全体的に周方向に伝播していた。さらに、１８０度付近からはストライエーション領域とディンプル領域が混在し、２５０度付近から３５０度付近まではディンプルが認められた。

（図－６、図－７）

なお、ディンプルの形状は、１８０度付近及び３４０度付近は等軸ディンプル、３００度付近は伸長ディンプルであり、伸長ディンプルの方向は下側破面は外表面側向き、上側破面は内表面側向きであった。（図－７）

d. 最終破断部

１８０度付近から３５０度付近にかけて板厚の減少がみられ、特に３１０度付近から３５０度付近は顕著であり、電子顕微鏡観察の結果、破面にはディンプルのみが認められた。これらのことから、この部分が最終破断部と判断される。

（図－８）

以上のことから、破断の原因は、高サイクル疲労であり、破断に至ったき裂（以下「主き裂」という。）は、９０度付近の外表面から発生し、内表面方向に伝播して板厚貫通後、０度方向及び１８０度方向に伝播し、３１０度付近から３５０度付近で最終破断したものと判断される。

また、主き裂が先に伝播を開始したため、副起点部のき裂は伝播しなかったものと判断される。

なお、２７０度付近に、９０度付近と同様、立体モザイク模様を含む副起点部が認められたことから、破断管のＵ字部には、９０度方向と２７０度方向の両振り繰返し荷重が作用していたものと判断される。

(3) 伝熱管外表面

伝熱管の低温側（破断側）及び高温側両方の第６管支持板上端部の９０度付近及び２７０度付近の外表面には、管支持板との管軸方向のこすれ跡及びその中に多数の周

方向の微小き裂が認められた。これらの微小き裂は粒内き裂で、管軸方向に対して傾いており、板厚方向への深さは0.1mm 程度であった。（図－３、図－５）

また、低温側第６管支持板部の伝熱管外表面には、母材の酸化皮膜層が認められた。

伝熱管の低温側及び高温側両方の第６管支持板部上端部の外表面のいずれの位置にも管支持板との管軸方向のこすれ跡及びその中に多数の周方向の微小き裂が認められたことから、破断管のＵ字部には９０度方向と２７０度方向の両振り繰返し荷重が作用していたものと判断される。

なお、主起点部及び副起点部付近には腐食減肉及び孔食は認められなかった。

上側破面には、破断後に隣接管と接触したために生じたと推定されるすり傷が認められた。

(4) 寸法

寸法検査の結果、低温側及び高温側の管支持板部において、伝熱管の外径、内径及び板厚は設計仕様どおりであり、デンティング（伝熱管が管支持板の腐食生成物等により圧迫され、伝熱管の健全性を損なうような変形を生じること）を示唆するような寸法変化は認められなかった。（表－２、表－３、表－４、表－５）

なお、高温側第６管支持板上端部１８０度付近及び下端部０度付近の限定された位置に深さ 0.3mm程度の微小な変形（へこみ）が認められた。（図－９）

これらの変形は、管支持板上・下端部とも一方向に限定され、互いに反対方向に位置することから、デンティングによるものではなく、また、前回定期検査までのＥＣＴでは変形信号が認められていないことから、破断時に伝熱管のＵ字部が高温側第６管支持板部を支点として振れたため生じたものと推定される。

(5) スケール分析

a. Ｘ線回折

第６管支持板部の伝熱管外表面に付着したスケールの形態を分析した結果、付着スケールの主成分はマグネタイト（Fe_3O_4）、その他の成分として金属銅（Cu）等が認められたが腐食の加速要因となる酸化物（CuO 等）は検出されなかった。

（表－６）

b. ＥＰＭＡ

破面に付着していたスケールを分析した結果、これらのスケールは主に鉄、ニッケル、クロム等から成り、腐食要因となる塩素、ナトリウムは検出されなかった。

伝熱管外表面には、伝熱管合金成分であるニッケル、クロム、鉄以外に、２次系構成物及び不純物元素である銅、マンガン、りん等が検出された。この内、りんが検出された位置にはカルシウムも検出されたことから腐食性ではないりん酸カルシウム($Ca_3(PO_4)_2$)として存在していたものと推定される。　（図－10、11）

c. ＧＤＳ

管支持板部外表面に付着しているスケールの成分分布状況を測定した結果、スケールの厚さ方向にはスケールの成分は比較的均質であり、スケール中にはりんの存在が認められたが、その他の特異な成分は認められなかった。　（図－12）

e. 化学分析

管支持板クレビス部に付着していたスケールを分析した結果、主成分は鉄であり、腐食要因となる塩素、ナトリウム等の成分は検出されなかった。　（表－７）

(6) 材料性状

a. 管材成分の分析

管材成分を分析し、材料の規格値および製造時のミルシート記載値と比較した結果、いずれのサンプルの化学成分も規格値の範囲内であり、サンプル間での特異性はなかった。製造時のミルシート記載値とも同等であり、材料劣化は認められなかった。　（表－８）

b. 引張特性

直管部のサンプルを用い、引張試験を実施して0.2 %耐力、引張強さ、伸びを求めた。

0.2 %耐力、引張強さ、伸びは規格(ASME SB163)を満たしており、材料劣化は認められなかった。0.2 %耐力がミルシート記載値よりやや大きいことは、伝熱管引抜き時の伸びによる影響と考えられる。　（表－９）

また、引張試験の試験片の破面は全てディンプルで覆われており、粒界破面は認められなかった。

c. 硬度

(a) き裂起点部付近及び破面から離れた所ではビッカース硬さ（「以下「H_v」という。）は、H_v 160 前後であり、インコネル６００の規格値（ロックウェル硬さ９２以下、H_v 198以下相当）を満足していた。絞りの大きい領域では最大H_v 320 であり、塑性変形による加工硬化があったものと考えられる。　（図－13）

(b) 直管部及び管支持板部のビッカース硬さを測定した結果、H_v 160 前後であり、インコネル６００の規格値を満足していた。　（図－14）

d. フェライトスコープ

フェライトスコープ強度を測定した結果、いずれのサンプルでも0.07%であり、過去の抜管材の調査結果の範囲内であった。　（表－10）

e. ミクロ組織

ミクロ組織はインコネル６００として通常のものであり、異常は認められなかった。　（添付－８）

(7) 低温側第５～第１管支持板部、管板部及びU字部の調査

a. 管支持板部及び管板部の状況

(a) 低温側第５、第４、第３管支持板部及び管板部に異常は認められなかった。

低温側第２管支持板部には０度方向中央部に軽微な腐食が認められ、低温側第１管支持板部には１８０度から２７０度にかけて、梨地状の地肌を呈する軽微な腐食が認められた。

(b) 低温側管板上面直上部には約２０㎜高さのスラッジ堆積跡が認められた。

管板上面直下部はほぼ全面的に黒色を呈しており、４５度方向にやや青緑色がかったスケールが認められた。

(c) 低温側第５管支持板部及び管板部の断面ミクロ組織を観察した結果、いずれにも腐食、割れ等は認められなかった。

(d) 寸法検査の結果、デンティングを示唆するような寸法変化は認められなかった。

（表－11、表－12）

b. U字部の状況

破断管の低温側第６管支持板部の直上部、上方部及びU字部の背側に、破断後に隣接管と接触したと考えられる跡が認められた。

4. まとめ

(1) 破断管の位置はＸ４５－Ｙ１４であり、低温側第６管支持板上端部で、円周に沿って破断し、分離していた。

(2) 水室仕切板方向を０度とし、伝熱管を上から見て時計回り方向の円周角座標でみたとき、主起点部は９０度付近の外表面と判断され、２７０度付近の外表面に副起点部が認められた。

(3) 主起点部近傍の破面には、インコネル材の低速度伝播疲労破面の特徴である立体モザイク模様が、主起点部から離れたき裂伝播部の破面には、高サイクル疲労破面を特徴付ける明瞭なストライエーションが認められたことから、破断の原因は高サイクル疲労であると判断される。

(4) 主き裂は９０度付近の外表面から発生し、内表面方向に伝播して板厚貫通後、０度方向及び１８０度方向に伝播し、３１０度付近から３５０度付近で最終破断したものと判断される。

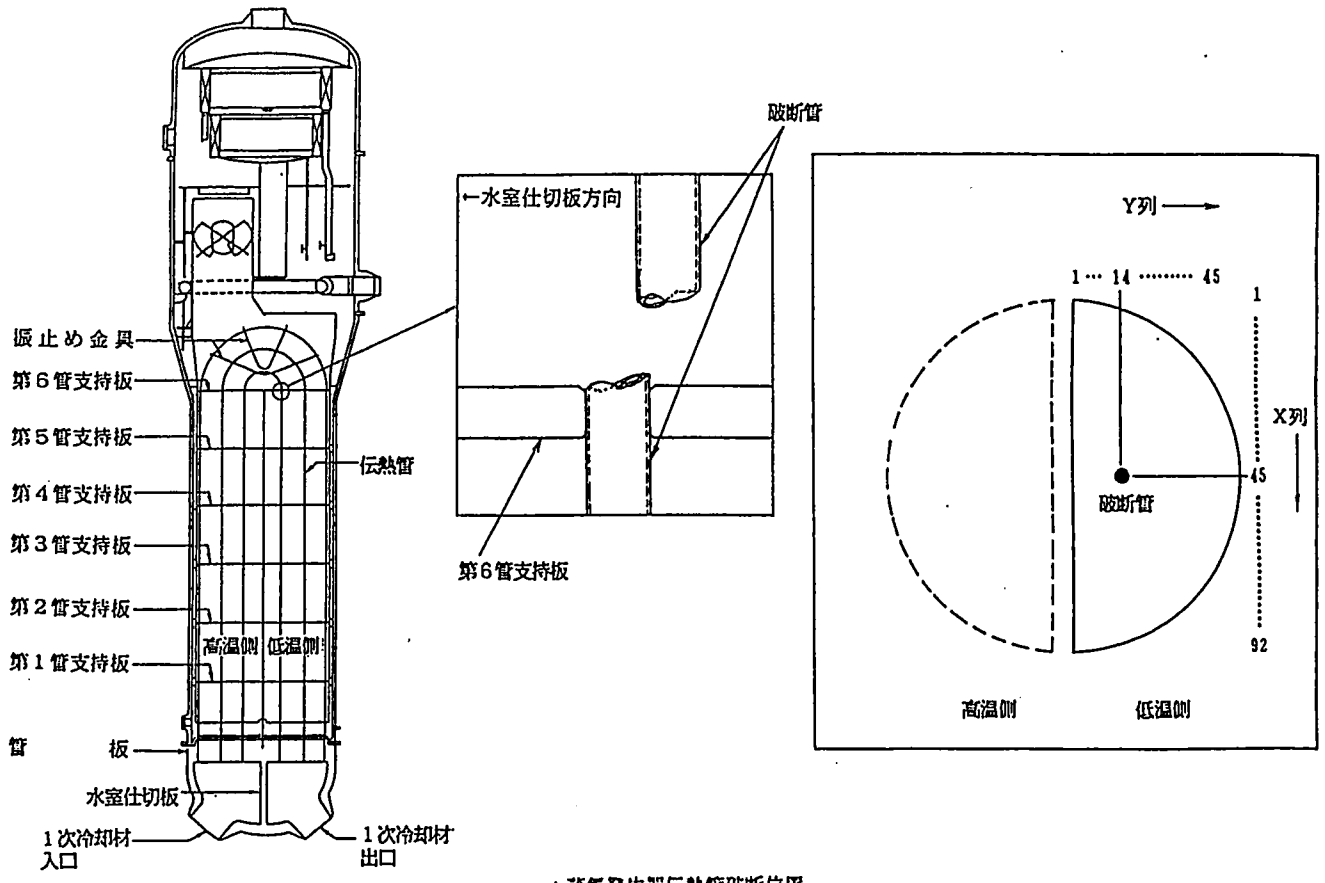
(5) 主起点部及び副起点部の外表面には、管支持板との管軸方向のこすれ跡及びその中に多数の周方向の微小き裂が認められた。これらの微小き裂は粒内き裂で、管軸方向に対して傾いていた。

(6) 破面の９０度付近に主起点部、２７０度付近に副起点部が認められたこと、並びに高温側第６管支持板部の９０度付近及び２７０度付近の外表面にも管支持板との管軸方向のこすれ跡及びその中に多数の周方向の微小き裂が認められたことから、伝熱管のU字部には面外方向に両振り繰返し荷重が作用していたものと判断される。

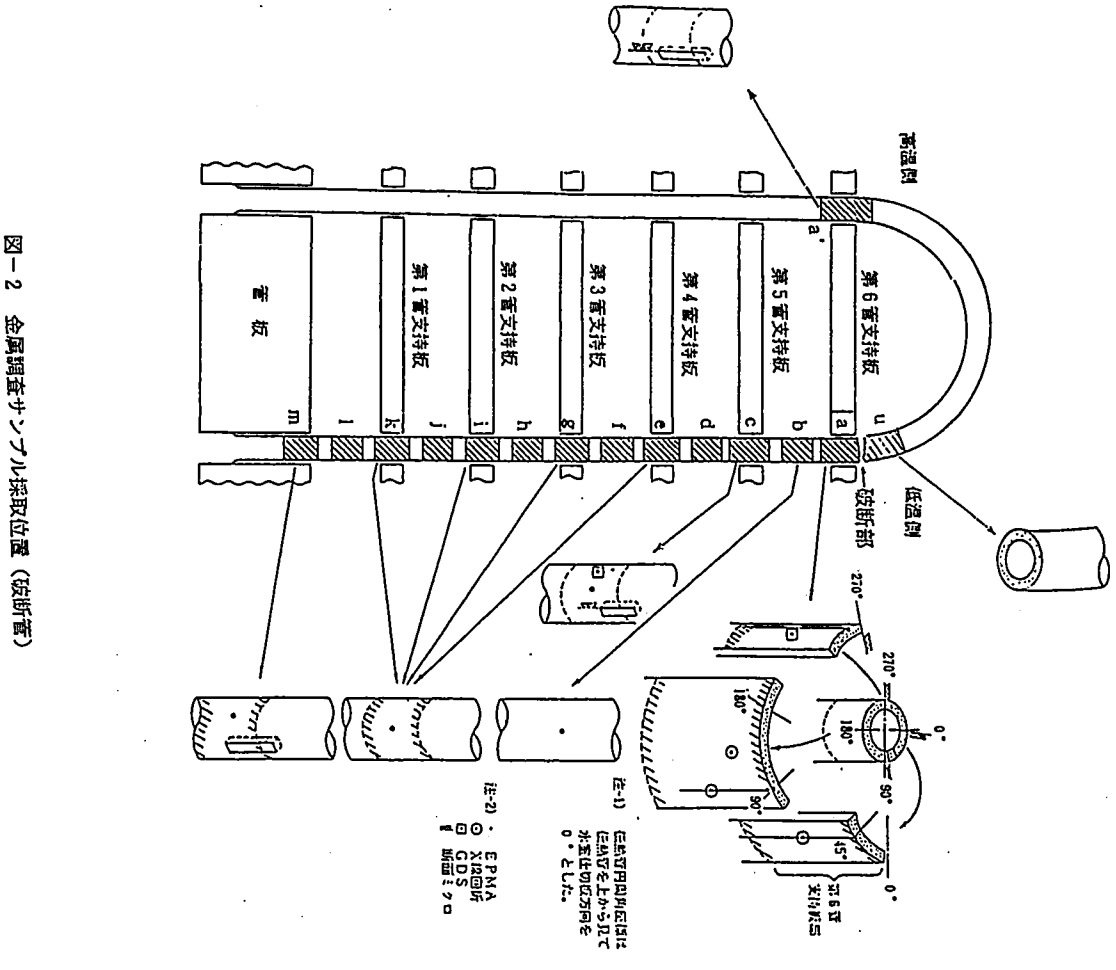
(7) 起点部の立体モザイク模様の破面の外表面に近い領域には、母材の酸化皮膜層が認められた。

(8) デンティング、応力腐食割れ及び粒界腐食割れを示唆する特徴は認められなかった。また、腐食疲労、水素脆化及び照射脆化の影響はなかったものと考えられる。

(9) 現場における小型テレビカメラ等による破断管破断部近傍の点検の結果、破断の原因になり得るような異物は認められなった。



図－1　蒸気発生器伝熱管破断位置

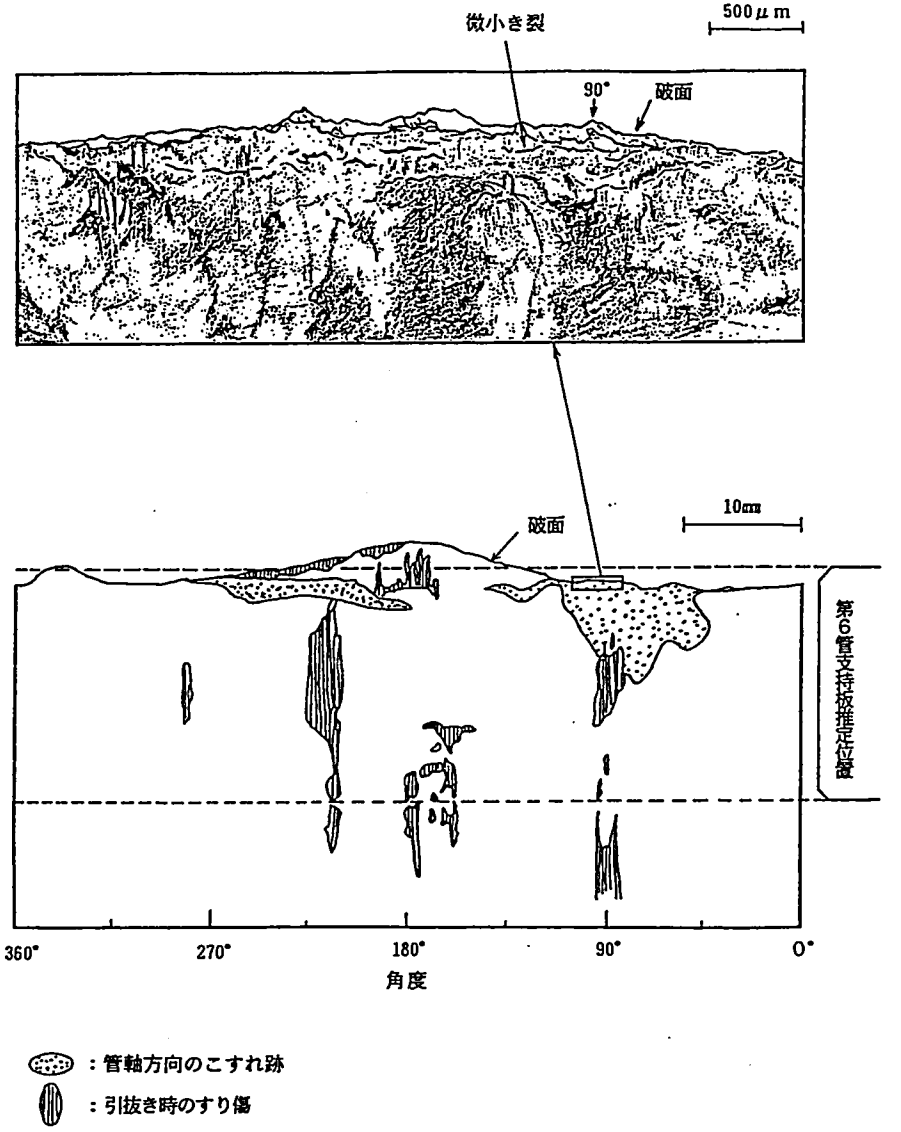


図－2　金属調査サンプル採取位置（破断管）

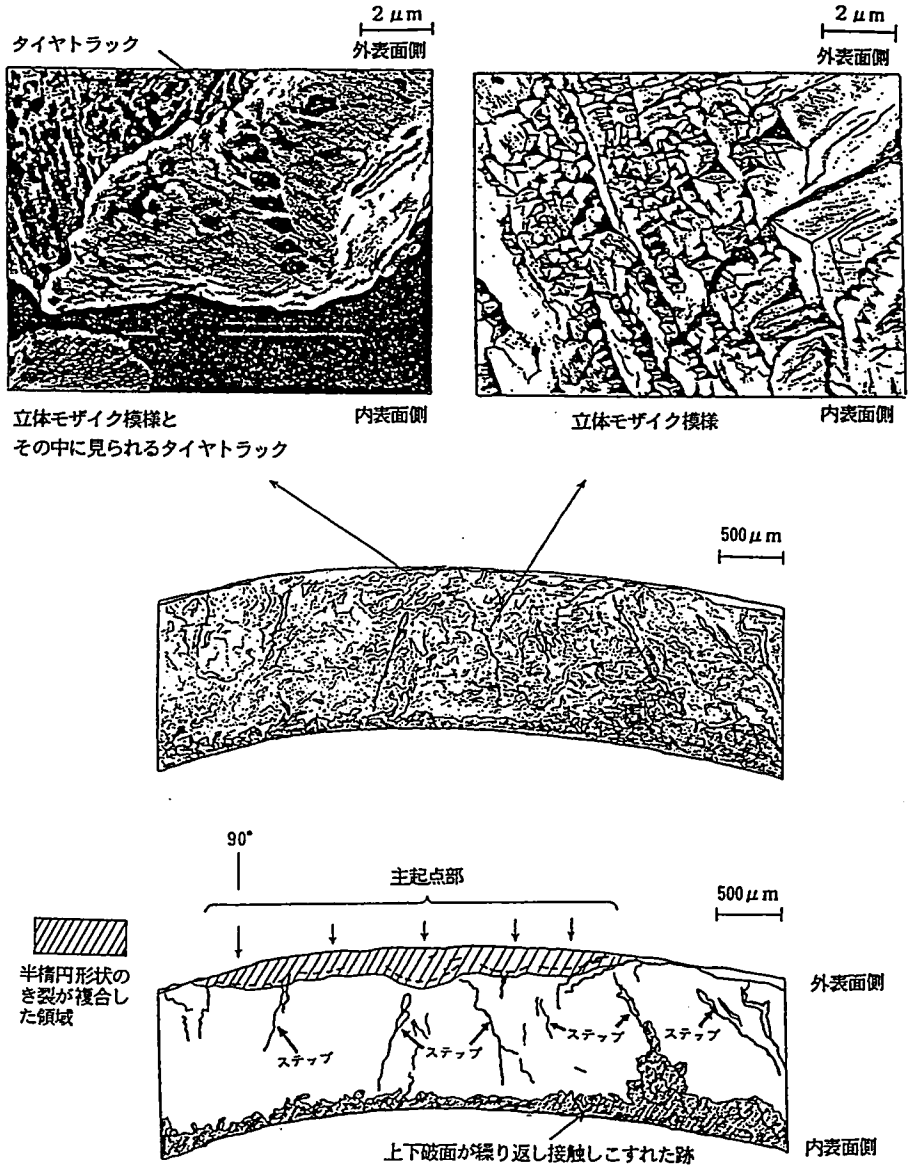
表－1　調 査 内 容

	サンプル	調査対象														
		低温側														高温側
		u	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	a'
伝熱管	管支持板部		○		○		○		○		○		○			○
	管板部														○	
	U字部	○														
1	外観観察	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2	寸法検査	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3	X線回折		○													
4	破面拡大観察	○	○													
5	破面SEM観察	○	○													
6	外表面拡大観察	○	○													○
7	外表面SEM観察	○	○													○
8	断面ミクロ		○		○							○			○	○
9	硬度		○	○	○											
10	EPMA		○	○	○		○		○		○		○		○	
11	GDS		○		○											
12	フェライトスコープ		○		○	○						○				
13	引張り					○						○				
14	管材成分		○		○	○						○				

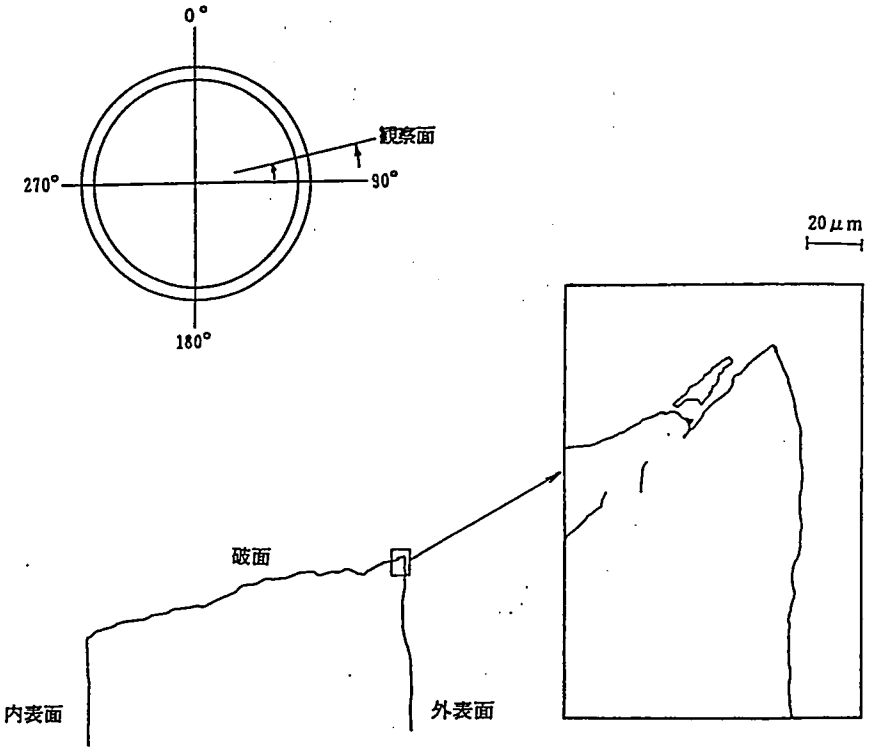
注）サンプルu，a～m，a'の具体的位置は図－2に示す。



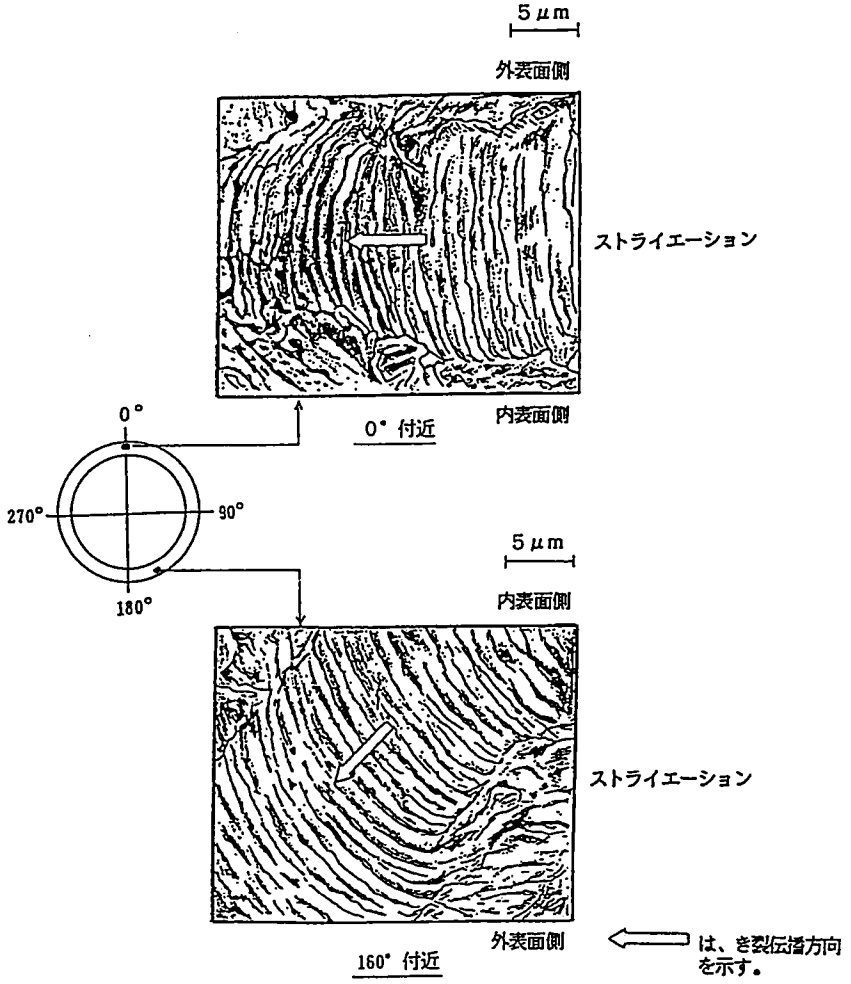
図－3　破断部の外表面観察結果（下側破面）



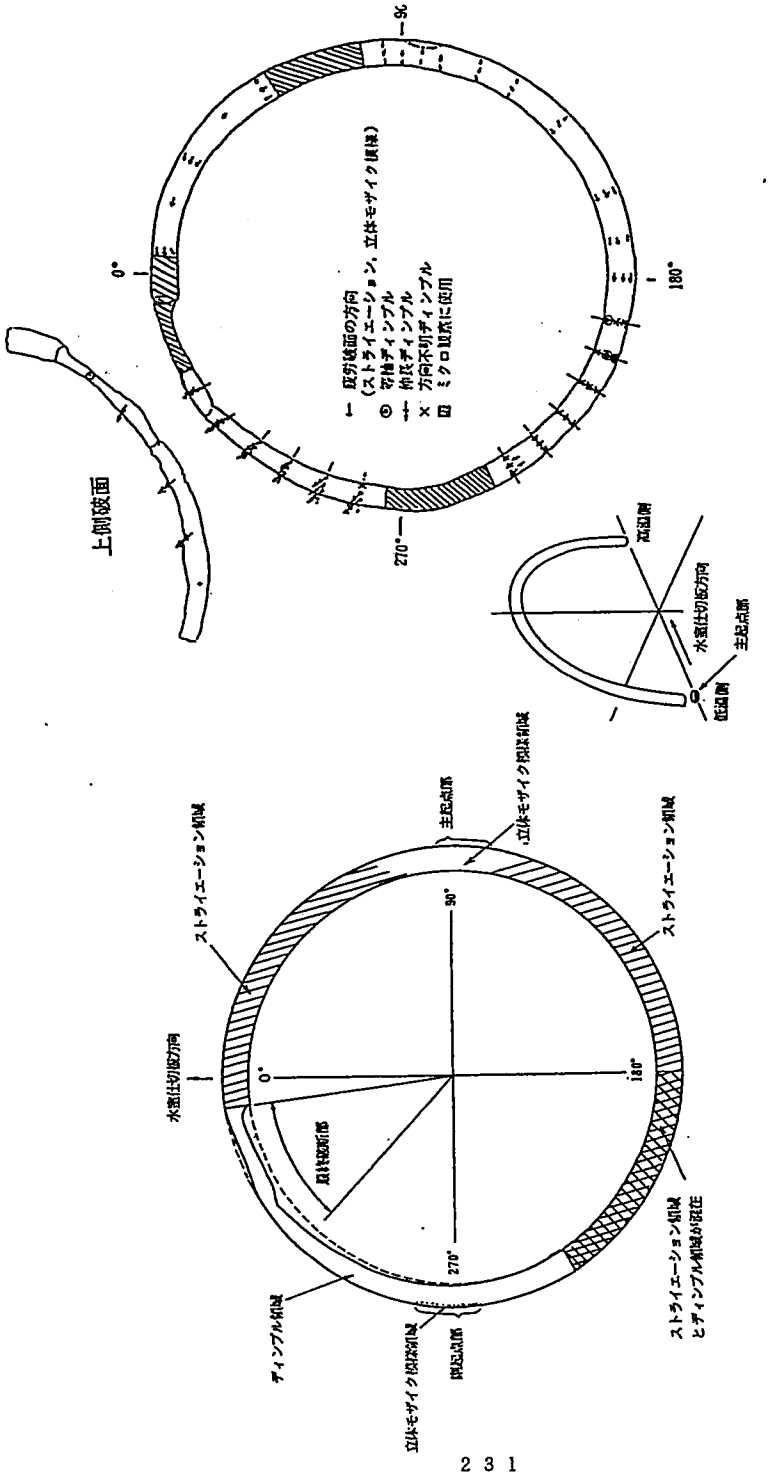
図－4　破面主起点部付近観察結果（下側破面）



図－5　主起点部付近の断面ミクロ観察結果（下側破面）



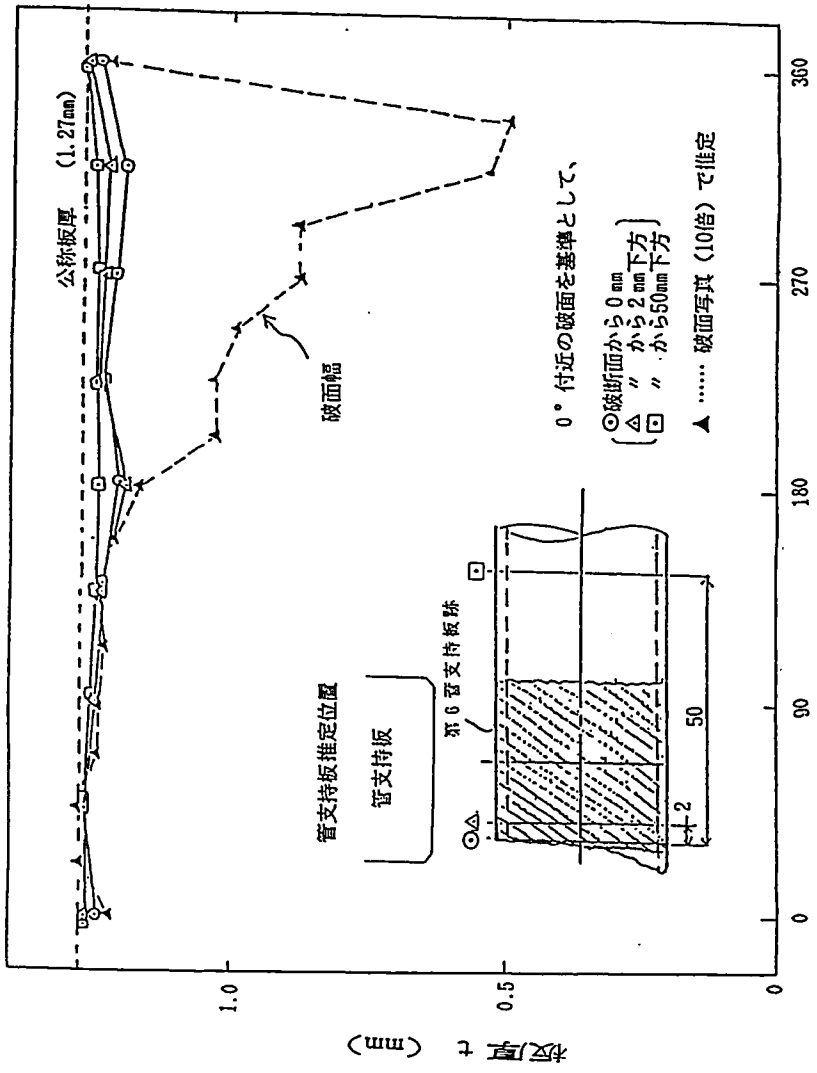
図－6　き裂伝播部破面観察結果（下側破面）



(1)　破面形態

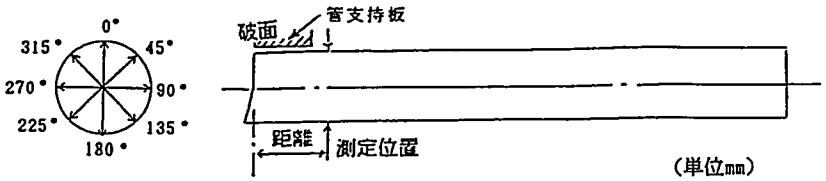
(2)　き裂進展方向

図－7　破面観察結果（下側破面）



図－8　第6管支持板部付近の板厚測定結果（周方向）

表－2　サンプルaの外径測定結果



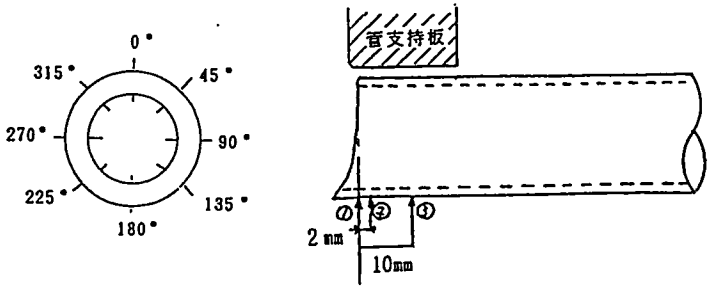
（単位mm）

方向＼距離	0	2	4	6
0° － 180° 方向	22.18	22.18	22.19	22.20
45° － 225° 方向	22.18	22.18	22.18	22.18
90° － 270° 方向	22.14	22.14	22.15	22.18
135° －315 ° 方向	22.14	22.12	22.17	22.19
平　均	22.16	22.16	22.17	22.19

方向＼距離	8	10	12	14
0 ° － 180° 方向	22.20	22.20	22.22	22.22
45° － 225° 方向	22.20	22.19	22.17	22.17
90° － 270° 方向	22.20	22.19	22.19	22.19
135° －315 ° 方向	22.21	22.23	22.22	22.22
平　均	22.20	22.20	22.20	22.20

方向＼距離	16	18	20
0 ° － 180° 方向	22.23	22.21	22.20
45° － 225° 方向	22.16	22.17	22.13
90° － 270° 方向	22.18	22.19	22.16
135° －315 ° 方向	22.22	22.22	22.20
平　均	22.20	22.20	22.17

表－３　サンプルａ破断部近傍の板厚測定結果



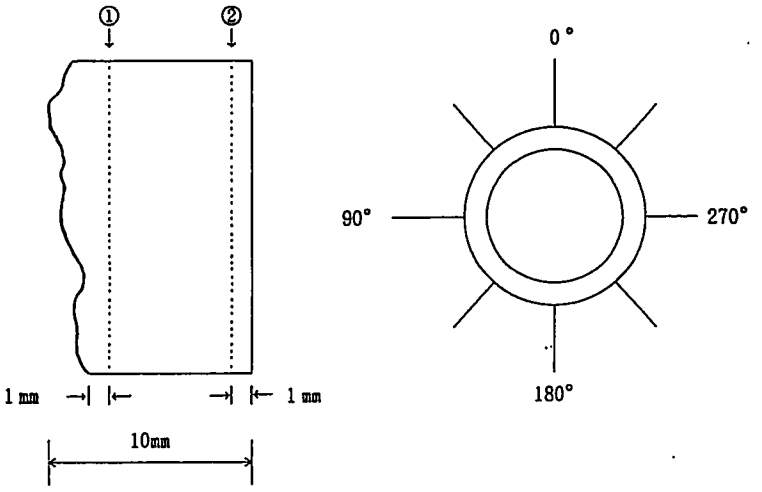
（単位mm）

管軸方向位置 / 円周方向位置	①	②	③
0°	—	1.26	1.25
45°	—	1.26	1.27
90°	—	1.24	1.21
135°	1.23	1.23	1.23
180°	1.20	1.19	1.20
225°	1.23	1.24	1.24
270°	1.21	1.23	1.24
315°	1.19	1.22	1.25
平　均	1.21	1.23	1.24

（注）　－印は測定せず。

表－４　破断部上面の板厚、外径測定結果

(1)　計測位置

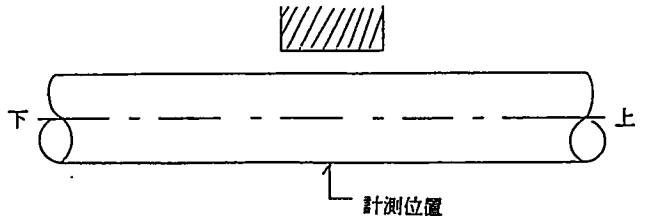


(2)　計測結果

伝熱管板厚（mm）			伝熱管外径（mm）		
位　置	①	②	位　置	①	②
0°	1.26	1.27	0° － 180°	22.07	22.29
45°	1.42	1.39	45° － 225°	22.37	22.46
90°	1.42	1.44	90° － 270°	22.59	22.66
135°	1.39	1.41	135° － 315°	22.57	22.63
180°	1.23	1.42			
225°	1.24	1.41			
270°	1.27	1.43			
315°	1.21	1.40			
平　均	1.31	1.40	平　均	22.40	22.51

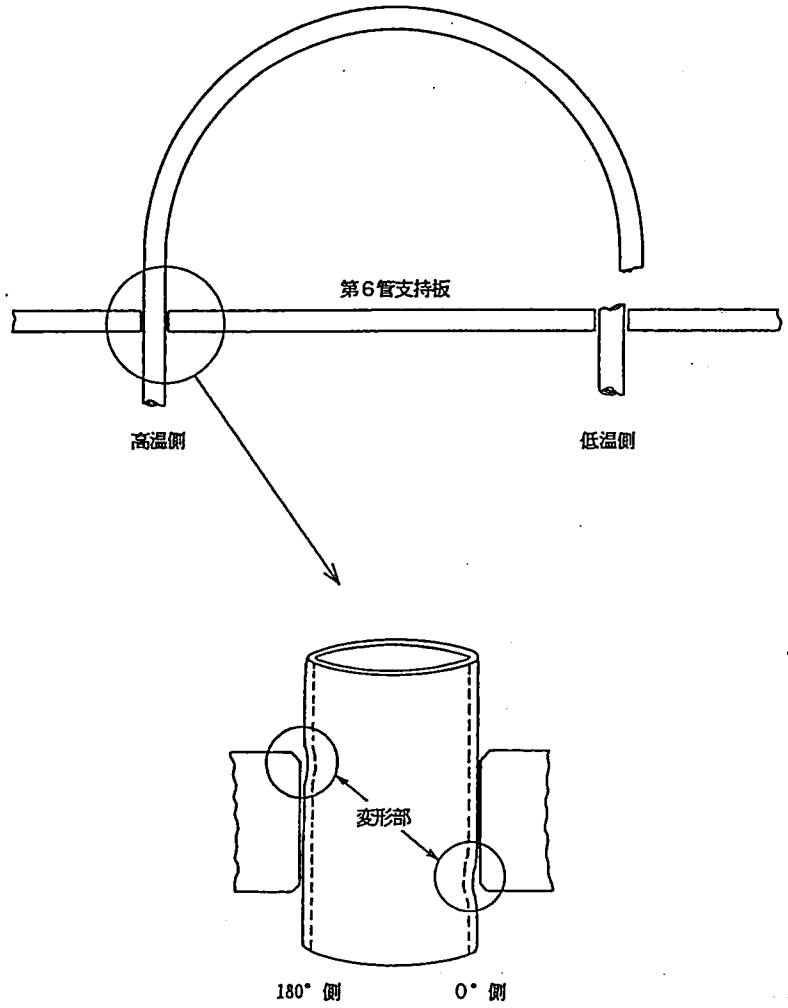
表－5　破断管高温側第6管支持板部の板厚、外径測定結果

(1) 計測位置



(2) 計測結果

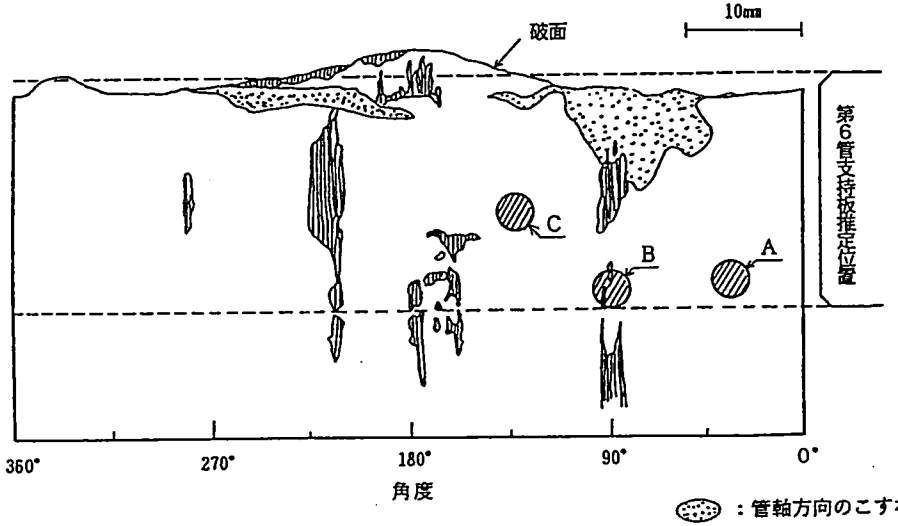
伝熱管板厚（mm）		伝熱管外径（mm）	
位　置	板　厚	位　置	外　径
0°	1.25	0° −180°	22.13
45°	1.27	45° −225°	22.14
90°	1.28	90° −270°	21.99
135°	1.28	135° −315°	21.94
180°	1.28		
225°	1.24		
270°	1.26		
315°	1.28		
平　均	1.27	平　均	22.05



図－9　破断管高温側第6管支持板部の形状

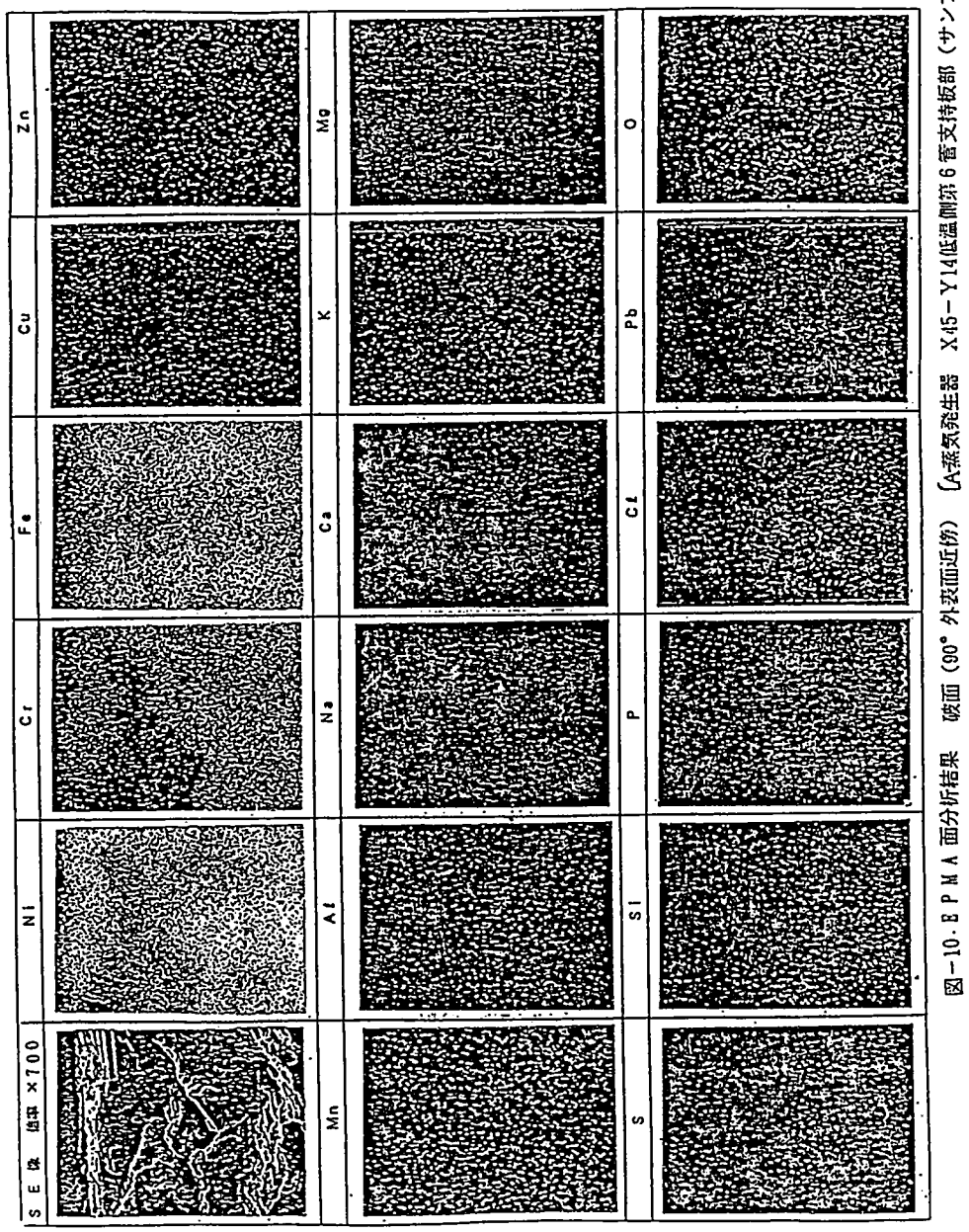
表－6　X線回折分析結果

No.	試料名 対象	項目		主成分	その他の成分	備考
1	サンプルa 管外表面	45°	A	Fe_3O_4	Cu (Fe, Zn) Al_2O_4 Zn_2SiO_4(微量)	母材成分ピーク有り
2		90°	B	Fe_3O_4	(Fe, Zn) Al_2O_4	母材成分ピーク有り
3		135°	C	Fe_3O_4	Cu (Fe, Zn) Al_2O_4 Zn_2SiO_4(微量)	母材成分ピーク有り

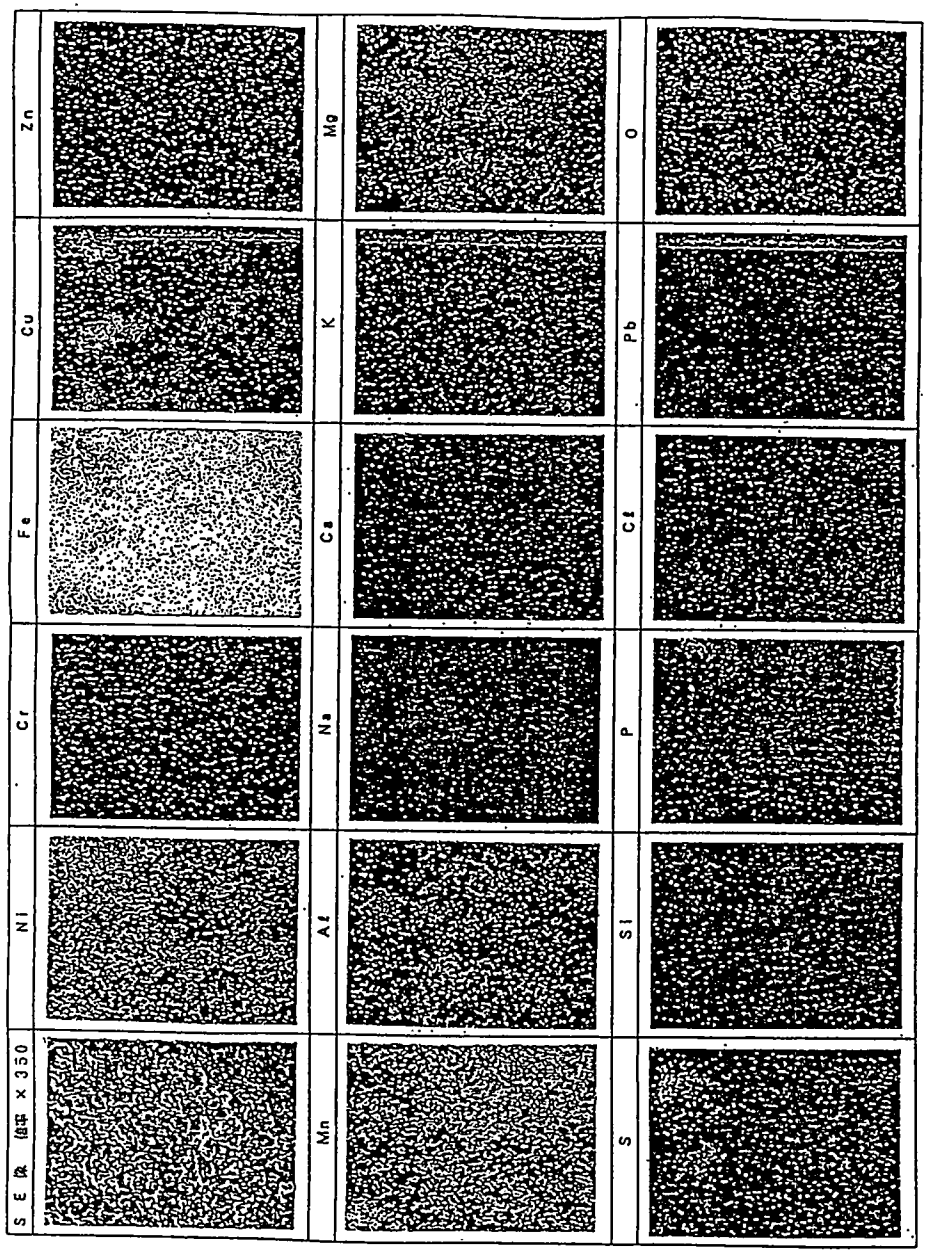


XRD測定箇所（破断部表面展開図）

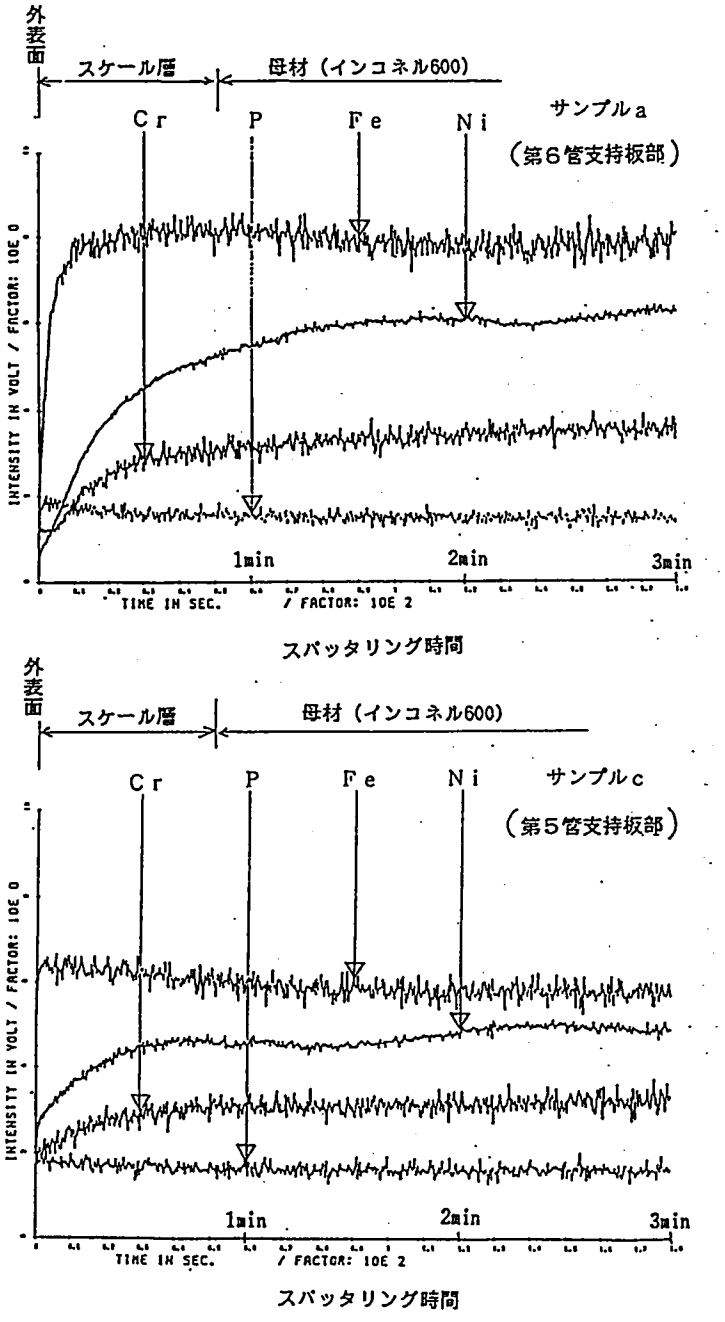
：管軸方向のこすれ跡
：引抜き時のすり傷



図－10. EPMA面分析結果　破面（90°外表面近傍）〔A蒸気発生器　X45－Y14低温側第6管支持板部（サンプルa）〕



図－ 11 EPMA面分析結果 外表面（90°破面近傍）〔A蒸気発生器 X45－Y14低温側第6管支持板部（サンプルa）〕



図－ 12 GDSによる第5，第6管支持板部付着スケールの表面分析結果

表－7　管支持板管穴スケールの分析結果
（酸溶性成分）

分析項目＼試料名		⑨ 6B部	⑧ 5B部	⑦ 4B部	⑥ 3B部	① 2B部	⑪ 1B部	直管部(6B~5B間)
酸不溶分	(%)	1.8	1.0	1.4	2.3	2.1	1.0	0.3
Fe as Fe_3O_4	(%)	77.8	79.3	78.8	76.7	78.6	87.6	80.0
Cu as Cu	(%)	10.3	11.4	9.53	7.33	9.74	4.47	14.1
Ni as NiO	(%)	0.85	0.98	0.98	1.18	0.98	1.37	0.80
Cr as Cr_2O_3	(%)	0.09	0.10	0.10	0.19	0.12	0.32	0.051
Zn as ZnO	(%)	2.75	2.30	2.74	3.35	3.52	1.94	2.64
Mn as MnO	(%)	1.14	0.79	1.03	1.36	1.20	0.87	0.60
Pb as PbO	(%)	0.03	0.01	0.05	0.11	0.09	0.07	<0.01
Ca as CaO	(%)	0.13	0.06	0.25	0.78	0.46	0.39	<0.005
Mg as MgO	(%)	0.13	0.036	0.12	0.32	0.22	0.15	0.008
Na as Na_2O	(%)	<0.01	<0.01	<0.01	0.04	<0.01	<0.01	<0.005
K as K_2O	(%)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.005
Al as Al_2O_3	(%)	0.34	0.23	0.37	0.55	0.53	0.30	0.23
S as SO_4	(%)	0.14	0.04	0.03	0.06	0.05	0.02	<0.01
P as PO_4	(%)	0.24	0.18	0.66	1.49	1.13	0.94	0.12
B as B	(%)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.005

（水溶性成分）

分析項目＼試料名		⑨ 6B部	⑧ 5B部	⑦ 4B部	⑥ 3B部	① 2B部	⑪ 1B部	直管部(6B~5B間)
PH	(at25℃)	6.1	6.2	6.2	6.5	6.6	6.6	6.4
F	(mg/kg)	<10	<10	<10	<10	<10	<10	< 5
CH_3COO	(mg/kg)	<40	<40	<40	<40	<40	<40	<20
HCOO	(mg/kg)	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<10
Cl	(mg/kg)	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<10
PO_4	(mg/kg)	<40	<40	<40	<40	<40	<40	<20
NO_3	(mg/kg)	<40	<40	<40	<40	<40	<40	<20
SO_4	(mg/kg)	85	50	95	155	110	110	60
Ca	(mg/kg)	60	70	150	290	205	185	25
Mg	(mg/kg)	35	30	75	190	100	85	<10
Na	(mg/kg)	25	25	<20	20	<20	20	10
K	(mg/kg)	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<10
B	(mg/kg)	95	55	50	50	75	20	<10
SiO_2	(mg/kg)	390	520	440	1620	605	425	<10

（注）<40等は検出限界以下を示す。

表－8　成分分析結果

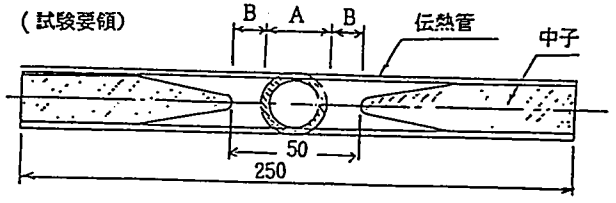
調査サンプル	化学成分 (%) C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Cu	Al	Ti	Ni
a	0.018	0.30	0.24	0.012	<0.005	14.9	7.88	0.18	0.20	0.27	75.0
c	0.018	0.30	0.24	0.012	<0.005	15.0	8.07	0.18	0.20	0.27	75.2
d	0.017	0.30	0.24	0.012	<0.005	15.0	8.02	0.18	0.20	0.27	75.0
j	0.017	0.30	0.24	0.012	<0.005	15.0	7.83	0.18	0.20	0.27	74.9
規格値 (ASME SB163 UNS NO6600)	≤0.15	≤0.5	≤1.0	—	≤0.015	14.0 ~17.0	6.0 ~10.0	≤ 0.5	—	—	≧72.0
(注) ミルシート記載値	0.019	0.25	0.25	—	0.008	15.15	8.15	0.19	—	—	76.00
	0.022	0.23	0.20	—	0.007	16.30	8.45	0.14	—	—	74.75

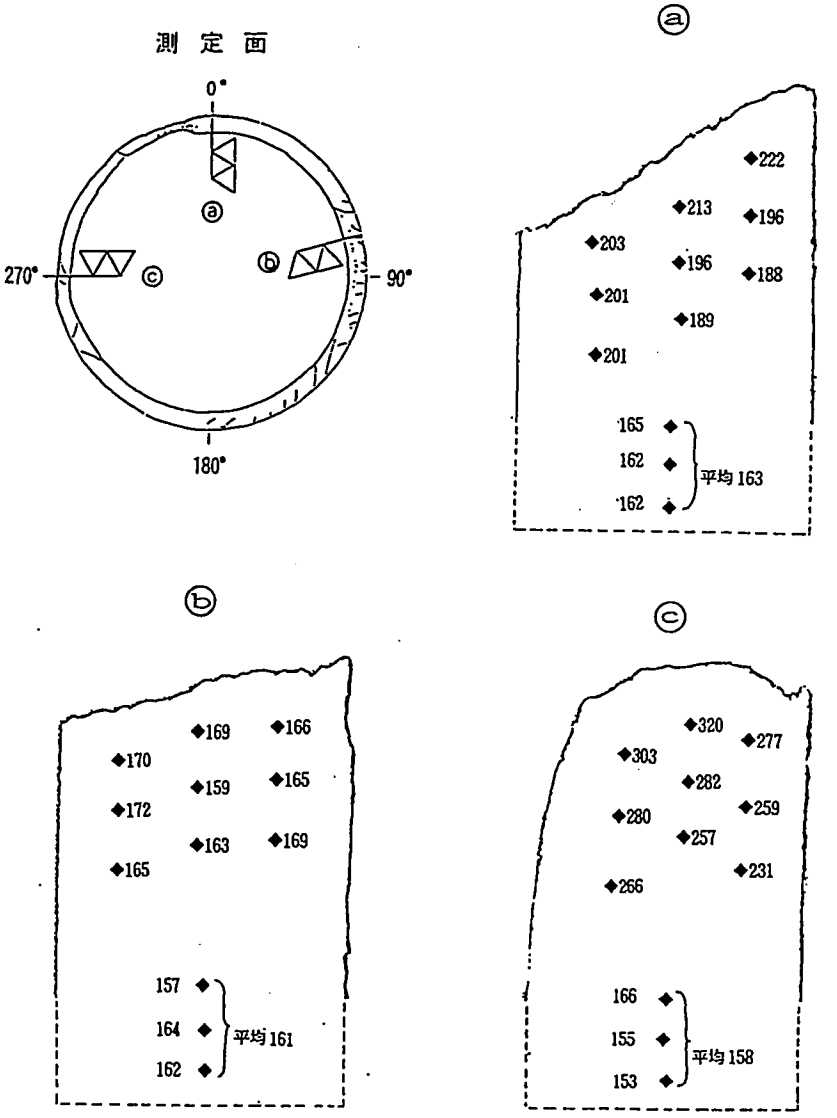
（注）Y14列の伝熱管のヒートNo.はNX0189とNX0202の2種類あるが，当該管はこの2種類のヒートのいずれであるか不明であるため両者の値を記載した。

表－９　破断管の引張試験結果

サンプル	試験温度 (℃)	0.2%耐力 (kg/mm²)	引張強さ (kg/mm²)	伸び (%)	破断位置
d	16	30.2	69.7	43.8	A
j	16	32.1	68.4	43.0	A
規格値		≧ 24.6	≧ 56.2	≧ 30	－
ミルシート値（注）		26.5	66.2	46	A
		28.1	67.3	47	
		27.5	66.4	50	
		27.6	65.8	46	

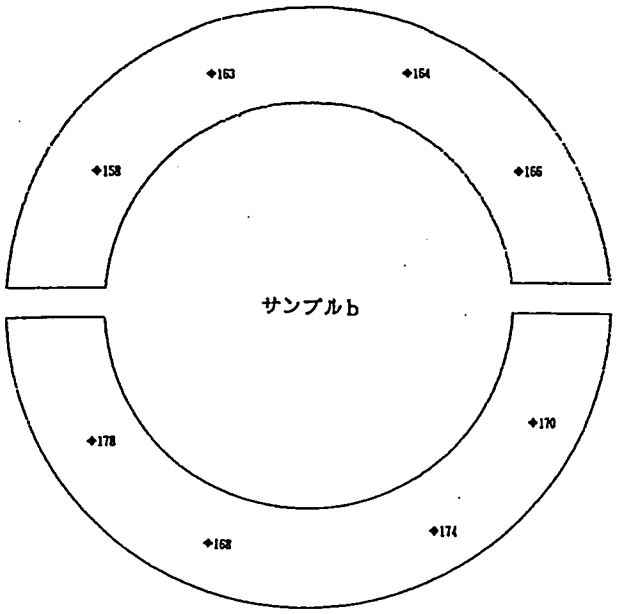
（注）　Y14列の伝熱管のヒートNo.はNX9189とNX9202の２種類であるが，当該管はこの２種類のヒートのいずれであるか不明であるため両者の値を記載した。



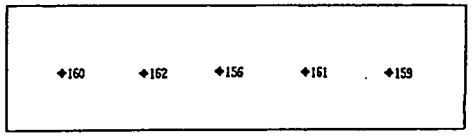


数値はビッカース硬さ(Hv)を示す。

図－ 13　サンプルａの硬さ測定結果



サンプルC



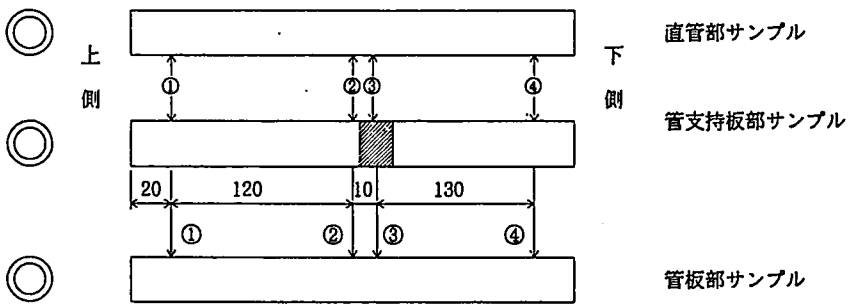
数値はビッカース硬さ(Hv)を示す。

図－14 サンプルb及びcの硬さ測定結果

表－10　フェライトスコープ測定結果

サンプル	a	c	d	j
フェライトスコープ強度	0.07%	0.07%	0.07%	0.07%

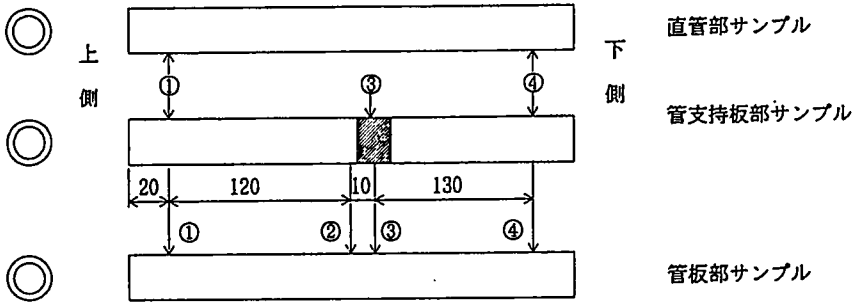
表－11　サンプルｂ～ｍの外径測定結果



サンプル		外径（mm）			
		①	②	③	④
直管部	b	22.01	22.16	－	22.15
	d	22.10	22.14	－	22.11
	f	22.14	22.15	－	22.14
	h	22.27	22.15	－	22.16
	j	22.12	22.12	－	22.17
	l	22.21	22.30	－	22.15
管支持板部	c	22.19	22.20	22.13	22.12
	e	22.13	22.20	22.18	22.19
	g	22.21	22.18	22.20	22.15
	i	22.15	22.11	22.14	22.21
	k	22.17	22.11	22.12	22.26
管板部	m	22.20	22.22	22.09	22.09

・測定値は外周４方向の平均値
・－印は測定せず

表－12　サンプルｂ～ｍの板厚測定結果



サンプル		板厚（mm）			
		①	②	③	④
直管部	b	1.25	－	－	1.24
	d	1.23	－	－	1.22
	f	1.24	－	－	1.24
	h	1.24	－	－	1.24
	j	1.25	－	－	1.23
	l	1.22	－	－	1.23
管支持板部	c	1.25	－	1.26	1.26
	e	1.25	－	1.27	1.27
	g	1.26	－	1.26	1.26
	i	1.27	－	1.26	1.25
	k	1.25	－	1.27	1.24
管板部	m	1.23	1.20	1.23	－

・測定値は外周８方向の平均値（スケール付着部は除く）
・－印は測定せず

添 付 目 次

添付－1　ファイバースコープによる破断管の点検結果

添付－2　破断管渦電流探傷検査結果

添付－3　破断管内径計測結果

添付－4　破断管振動計測結果

添付－5　小型テレビカメラによる破断管管支持板管穴内面点検結果

添付－6　金属調査に使用した装置

添付－7　破断管（Ｘ４５－Ｙ１４）の破断位置について

添付－8　蒸気発生器伝熱管管材金属組織

ファイバースコープによる破断管の点検結果

1. 目的

低温側第６管支持板上面における破断部の上側の変位を推定する。

2. 対象管

Ａ－蒸気発生器　　X45－Y14

3. 推定要領

・ファイバースコープが、破断管の中心になるように調芯用スタビライザーを取付け、低温側から管内に挿入する。

・以下に示す要領で収録した較正画面と破断管の画像を比較し、最も類似している較正試験の画像から上下・左右方向の位置ずれ量を推定する。

〈較正試験要領〉

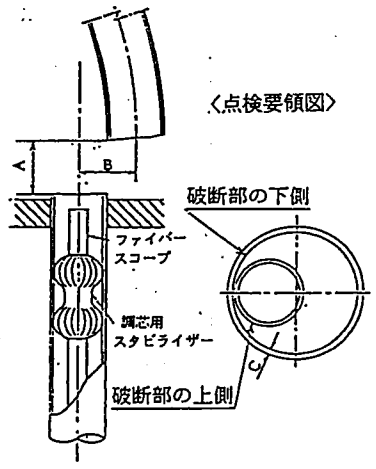
・ファイバースコープを試験片１（下部伝熱管ダミー）の中に入れ端面が画面外周近辺となる位置で固定する。

・試験片２（上部伝熱管ダミー）を、

上下方向：５㎜ピッチ

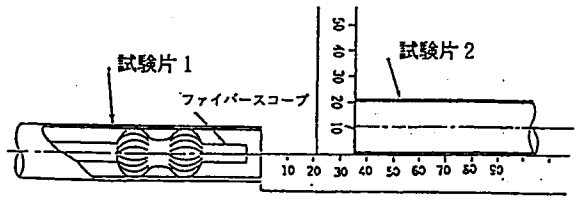
左右方向：５㎜ピッチ

で逐次移動させ、その画像をＶＴＲに収録する。



〈点検要領図〉

〈較正試験要領図〉



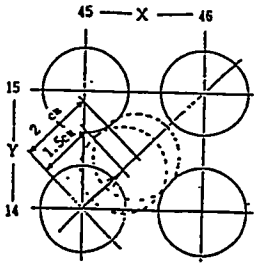
4. 点検結果

破断部の下側に対し、破断部の上側は、

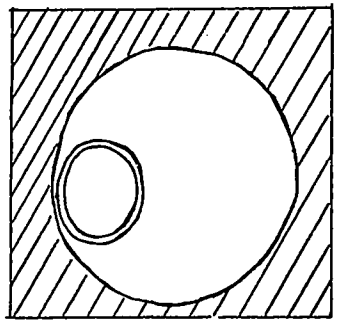
上下方向に　3.5cm～4.0cm程度

左右方向に　1.5cm～2.0cm程度

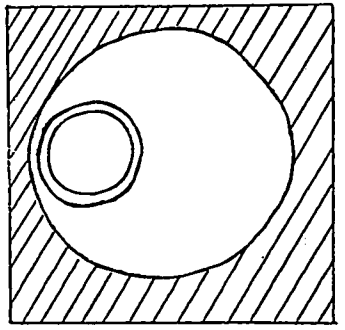
変位しているものと推定される。



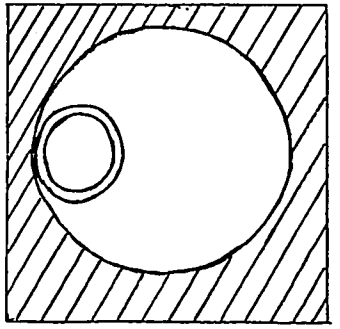
低温側からの観察結果



較正試験結果



(上下方向：3.5cm
左右方向：1.5cm)



(上下方向：4.0cm
左右方向：2.0cm)

添付－2

破断管渦電流探傷検査結果

1. 目的

伝熱管破断に関する調査の一環として、渦電流探傷検査（以下「ＥＣＴ」という。）を実施する。

2. 検査対象管

Ａ－蒸気発生器　　X45－Y14

3. 検査の種類と対象部位

実施したＥＣＴの種類と検査対象部位を下表に示す。

ＥＣＴの種類	検査対象
ＤＦ－ＥＣＴ	全　　長 (*)
８×１ＥＣＴ	直管部のみ (**)
３ｆ－ＤＦ－ＥＣＴ	全　　長 (*)

(*) ……破断部(C6B)を除く
(**)……Ｕ字部及び破断部を除く

4. 検査結果

(1) ＤＦ－ＥＣＴ検査結果

・高温側第６管支持板（Ｈ６Ｂ）部に変形（へこみ）信号指示が認められた。これは、前回（第13回定検）データで確認されていないものである。
なお、デンティングは認められなかった。

・それ以外の部位においては、異常は認められなかった。

(2) ８×１　ＥＣＴ検査結果

・Ｈ６Ｂ部の上下端部に変形信号指示が認められた。

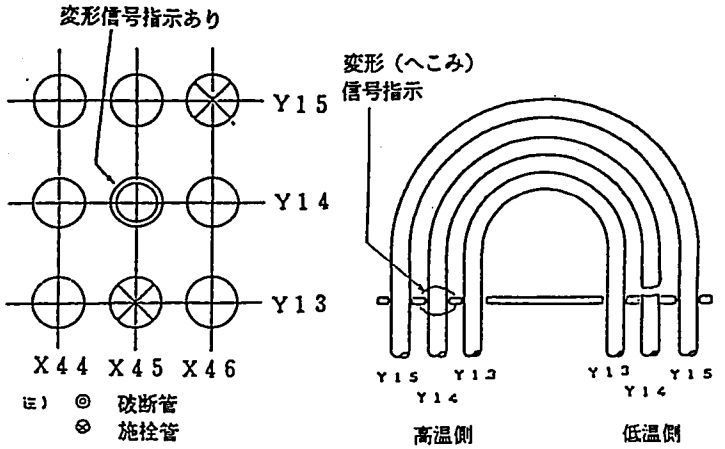
・それ以外の部位においては、異常は認められなかった。

(3) ３ｆ－ＤＦ－ＥＣＴ検査結果

・特に異常は認められなかった。

5. まとめ

高温側第6管支持板部に変形（へこみ）信号指示が認められたが、他の部位を含め、それ以外の有意な信号指示は認められなかった。



変形信号管配置図

添付－3

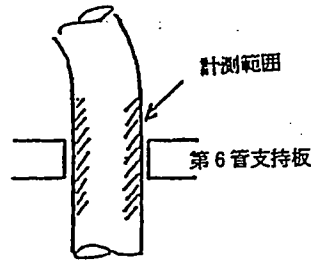
破 断 管 内 径 計 測 結 果

1. 目的

破断管（Ａ－蒸気発生器Ｘ45－Ｙ14）の第６管支持板部について、内径変化の有無を調査するため内径計測を行う。

2. 計測範囲

破断管の高温側及び低温側第６管支持板部近傍



3. 計測方法

歪ゲージ式内径計測プローブを伝熱管内に挿入し、管内面８方向の変位を測定する。計測位置の確認はプローブ下部に取り付けられたＥＣＴコイルにより管支持板を検出することにより行う。

伝熱管内径計測の仕様について

内径計測プローブの仕様は以下のとおりである。

測定方式…… プローブに取り付けた接触子の移動量を歪みゲージにより電気的に読み取る。（事前に較正カーブを取得する）

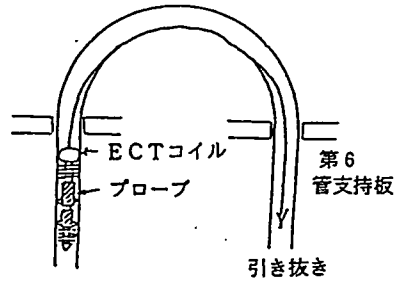
測定箇所…… 周方向45° ピッチで８方向（90° ピッチの４方向の接触子が２段取り付いている。）

プローブ及び送りチューブの長さ…… 約20m

送り速度…… 20mm/s

測定可能内径…… φ18.0～20.5mm（伝熱管内径19.69mm）

測定精度…… ±0.1mm



4. 計測結果

(1) 低温側第６管支持板部の計測結果

内径計測プローブを低温側から挿入し、高温側から挿入したファイバースコープにより位置決めを行った後プローブの引き抜き方向で計測を行った。

結果は図－１のとおりであり、デンティングは認められなかった。

(2) 高温側第６管支持板部の計測結果

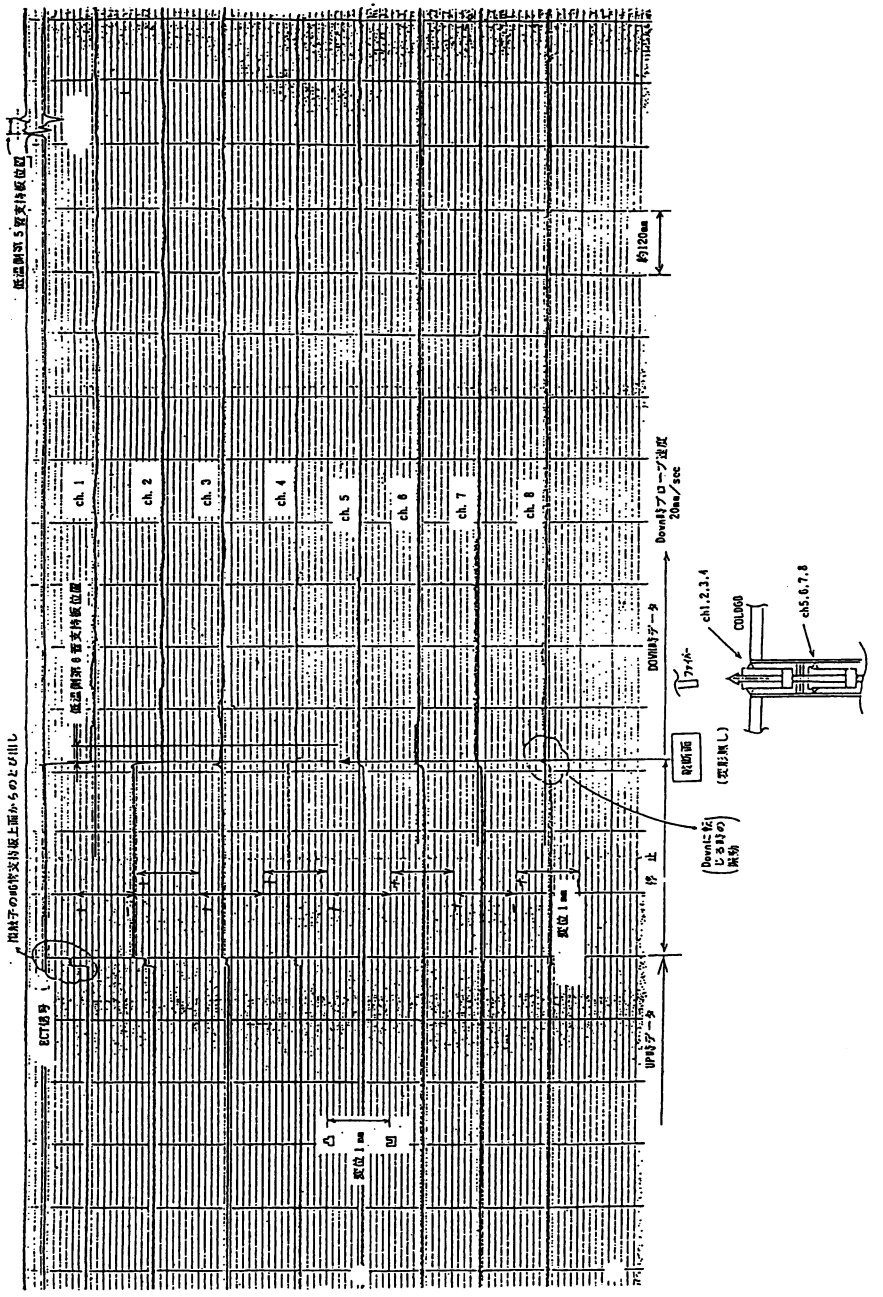
結果は図－２のとおりであり、管支持板部近傍で変形形状を示していた。変形部の断面図を図－３に示す。

なお、前回定検までのＥＣＴ記録ではデンティングを示す変形信号指示は認められていない。

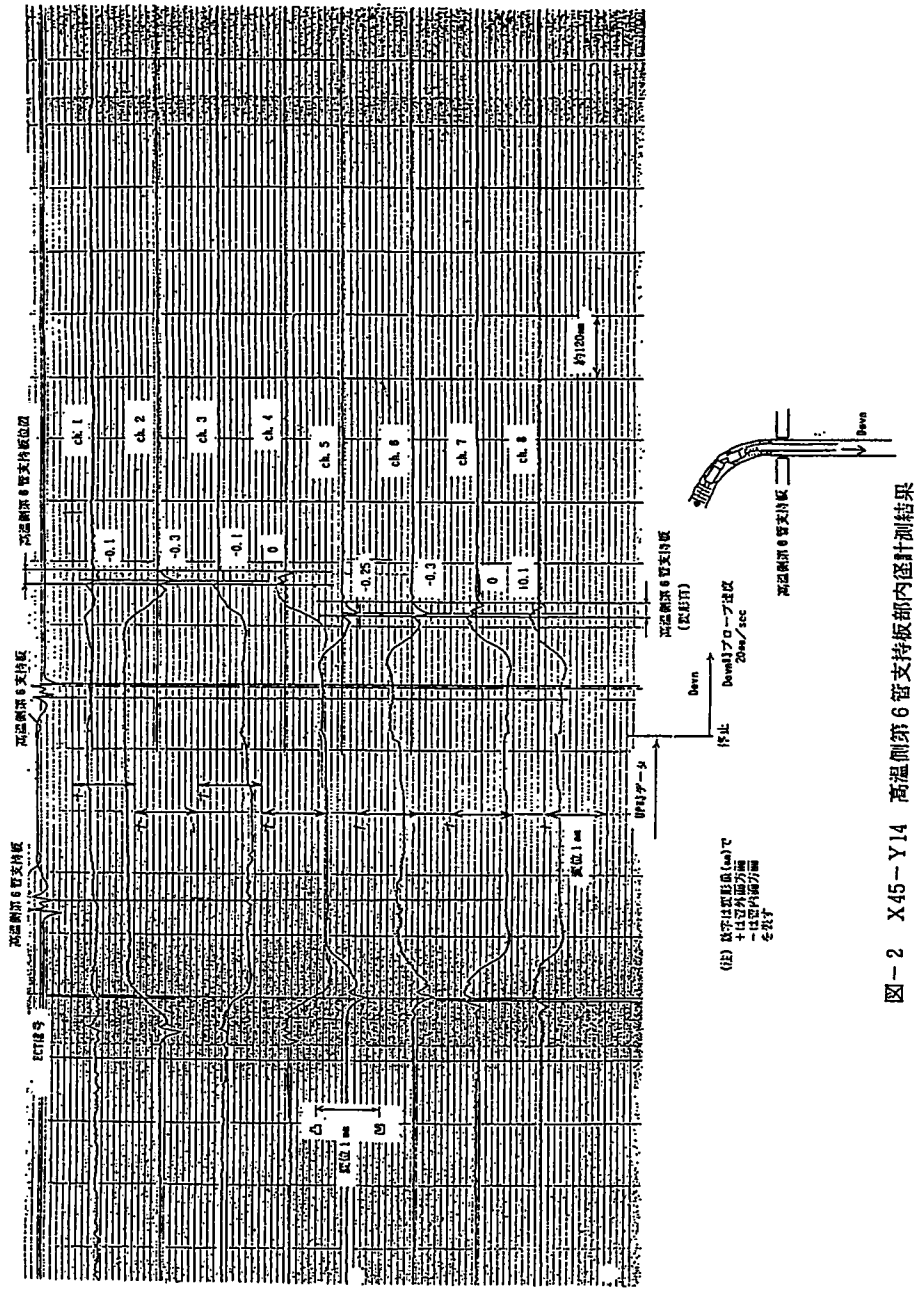
5. 考察

計測の結果、高温側第６管支持板部で認められた変形部の断面図は図－３のとおりであり、変形は管内面側に膨らんでいた。

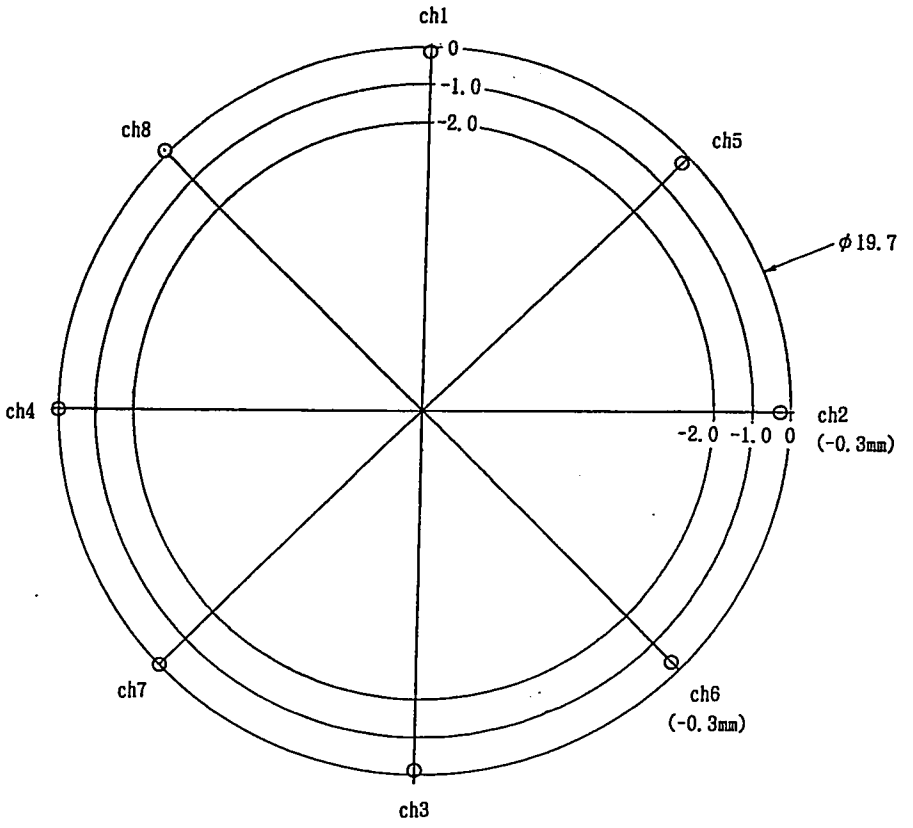
当該部は前回定検時のＥＣＴでデンティングが認められていないことから、破断時にＵ字部が振れて第６管支持板と干渉し、伝熱管が内面側に膨らんだものと推定される。



図－１　X45－Y14　低温側第６管支持板部内径計測結果



図－2　X45－Y14　高温側第６管支持板部内径計測結果



図－３　高温側第６管支持板部変形部の断面形状

破 断 管 振 動 計 測 結 果

1. 目的

破断管（A－蒸気発生器　X45－Y14）の第6管支持板部の振動計測を行い、管支持板部における伝熱管の支持状態を調査する。

2. 計測位置

計測位置は以下のとおりである。

① 高温側第6－第5管支持板間の直管部中央

② 低温側第6－第5管支持板間の直管部中央

③ U字部頂部

3. 計測方法

振動計測は、ＥＣＴ用プローブに加振装置及び加速度計を連結した専用プローブを用い、伝熱管を自由振動させ、周波数スペクトルを得る。

振動計測概念図を図－1に示す。

4. 計測要領（手順）

計測は以下の手順により実施する。

① プッシャーにてプローブを所定の位置まで挿入する。

（ＥＣＴセンサーで管支持板数をカウントして第5管支持板通過又は第6管支持板通過後、伝熱管測定予定部に加振用プローブが挿入された位置で停止する。）

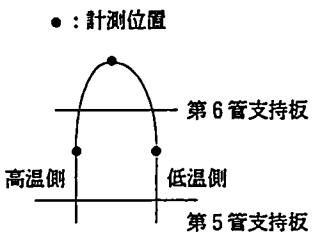
② 加振用プローブにて加振し、データを記録する。

5. 計測結果

・2項で述べた3つの位置で計測した周波数分析結果より各部で求めた伝熱管の振動数を以下に示す。

計測位置 / 計測対象管アドレス		第5～第6管支持板間直管部中央		U字部頂部
		低温側	高温側	
X45	Y14	65.0Hz	61.5Hz	67.0Hz

計測位置概略図



なお、参考として固有振動数が固定支持条件での解析値とピン支持条件での解析値を以下に示す。

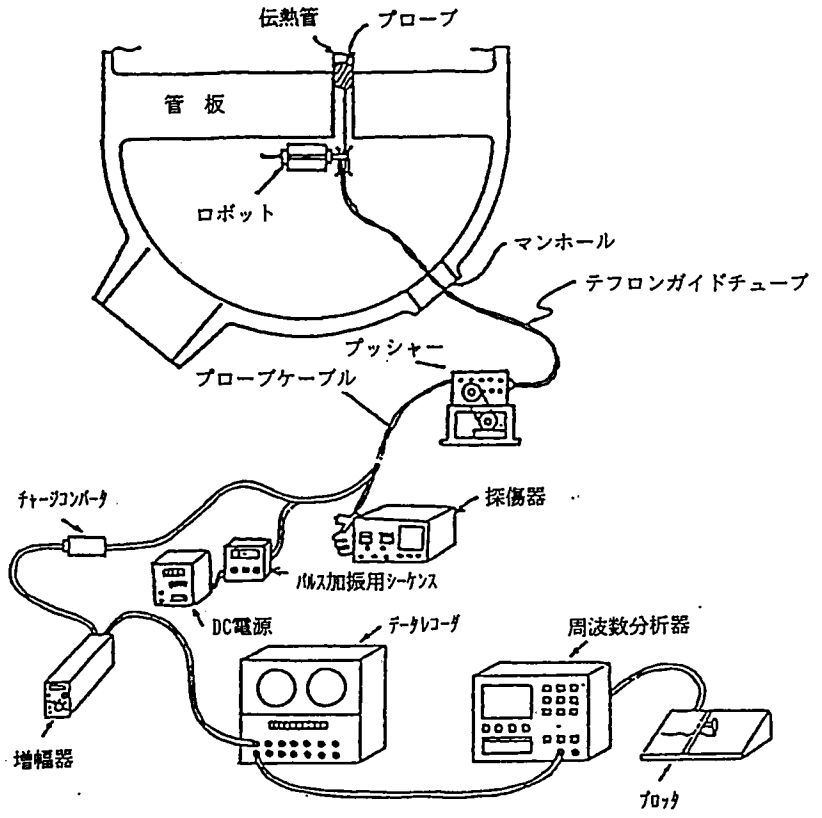
	直管部中央	U字部頂部
固定支持条件での解析値	72Hz	41Hz
ピン支持条件での解析値	34Hz	21Hz

直管部での計測結果から、第6管支持板部の支持状態は以下の様であったと考えられる。

なお、U字部については計測結果の振動数が解析値に比べ高く、隣接管と接触している可能性が考えられ、評価できなかった。

・高温側第6管支持板部：高温側直管部の計測値（61.5Hz）から固定支持とピン支持の中間の状態であったと評価される。

・低温側第6管支持板部：低温側直管部の計測値（65.0Hz）から固定支持の状態であったと評価される。



図－1 蒸気発生器伝熱管振動計測概念図

小型テレビカメラによる破断管管支持板管穴内面点検結果

1. 目的

破断管を支持していた低温側第６～１管支持板管穴内面の状況を確認するため、小型テレビカメラを使用して点検を実施する。

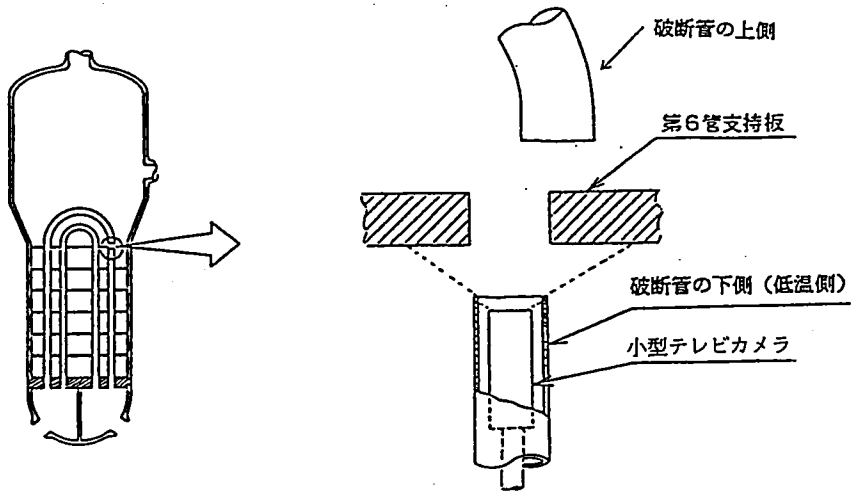
2. 対象射位置

Ａ－蒸気発生器　　X45－Y14　　第６～１管支持板部

3. 点検要領

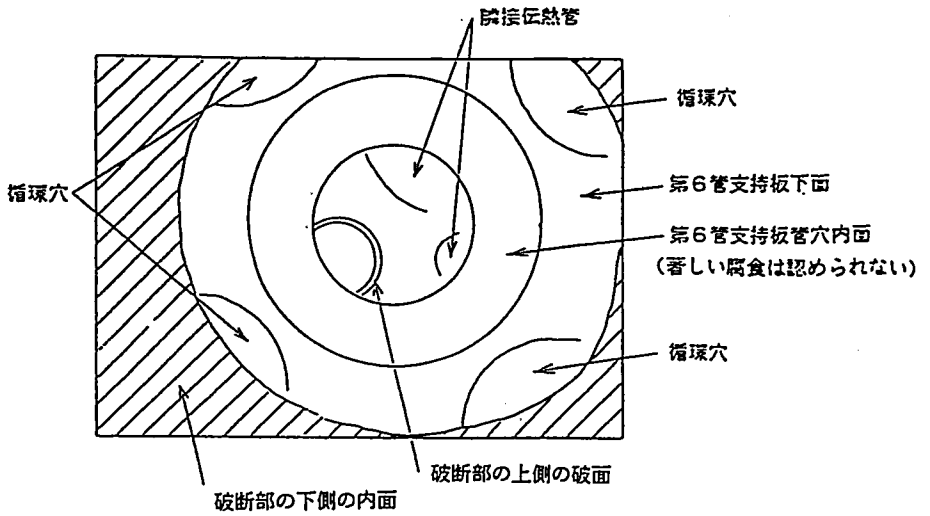
抜管途中*で小型テレビカメラを低温側から伝熱管内に挿入し、破断管を支持していた第６～１管支持板管穴内面について点検する。

＊注　伝熱管が各支持板下面より約20㎜下方まで引き抜けたところで点検を実施する。

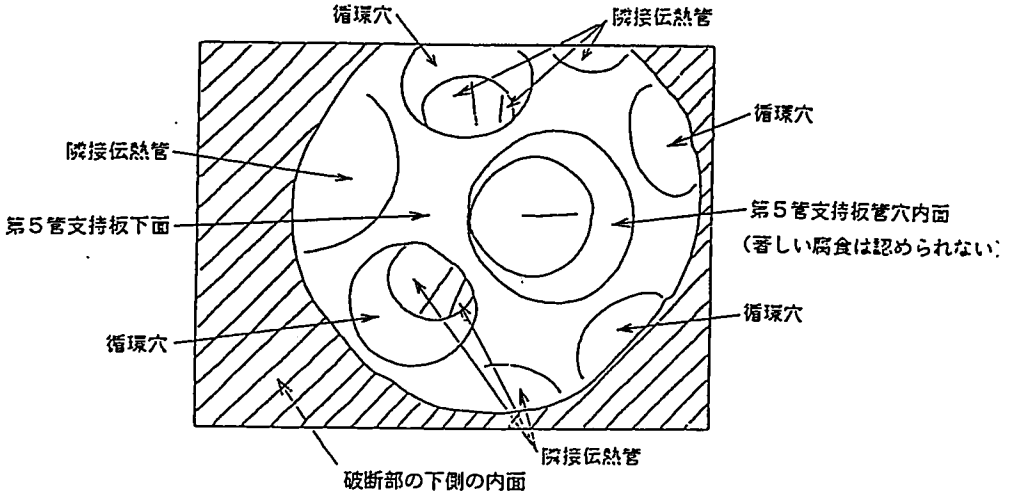


4. 点検結果

各管支持板管穴内面は黒褐色を呈しているが、著しい腐食は認められなかった。



図－1.　第6管支持板管穴内面観察結果



図－2.　第5管支持板管穴内面観察結果

金属調査に使用した装置

表　金属調査に使用した装置　（1／3）

試験項目	装置名	仕様
外観観察	35㎜判カメラ	ニコンF－3 ニッコール 105㎜
寸法計測 （形状測定）	レーザ外径測定装置	キーエンス製　LS-3100 測定範囲：0.8～60㎜ 測定精度：±3μm以下 表示分解能：0.1μm
	ダイヤルゲージ式厚さ測定装置	ダイヤルシクネスゲージ 測定範囲：最大10㎜ 精　度：0.01㎜
	万能表面形状測定器	小坂研究所製　MODEL SE-3C 測定項目：断面曲線，粗さ曲線， うねり曲線 倍　率：50～10^3倍（縦方向） 10～500倍（横方向）
光学観察	拡大写真撮影装置	ニコン製　マルチフォト 倍　率：0.95～40倍
ＳＥＭ観察	走査型電子顕微鏡	日立製　S-4000形 倍　率：×20～×300,000 加速電圧：0.5～30kV 試料サイズ：最大φ75×高さ25㎜ 観察用モニタ：12インチTVモニタ×2 画像表示速度：TV静止画像表示 2次電子像分解能：1.5㎚保証

表　金属調査に使用した装置（2／3）

試験項目	装置名	仕様
断面ミクロ	光学顕微鏡	ライヘルト社製 POLYVAR-MET 倍　率：1.2～1000倍
ＥＰＭＡ	X線マイクロアナライザ	島津製 SM-ST 分解能：100Å 電子線加速電圧：1～30kV 試料寸法：25.4mmφ×10mm 10×14×10mm 走査倍率：×70～140000 ASM-SX X線取出し角度：52.5° 型式：結晶直進式 波長比例方式 分析対象元素：5B～92U
Ｘ線回折	X線回折装置	理学電機製 RAD-RB 定格出力：10kW連続 対陰極：Co 安定度：±0.05% フォーカス：ライン 0.5×10 μm
硬　度	マイクロビッカース硬度計	明石製作所製：MVK-E型 10g～1000g
フェライトスコープ	フェライトスコープ強度測定装置	型式：三菱重工製フェライトスコープ FE8e5型 測定範囲：Ⅰレンジ　0～3%Fe Ⅱ　〃　0～10%Fe Ⅲ　〃　0～30%Fe 最小測定面積：5×3mm

表　金属調査に使用した装置（3／3）

試験項目	装置名	仕様
母材管材分析		
Ti, Aℓ, Co, Cu, Fe	プラズマ発光分光分析装置	セイコー電子製 焦点距離：100cm 波長範囲：175～500nm
C	燃焼熱伝導度型カーボン分析装置	LECO社製 測定レンジ：0.005～5%C
Si, Mn, P	分光光度計	日立製 U-1100型 波長範囲：200～100nm 波長精度：±1nm
S	電気炉燃焼法 （JIS G 1215準拠）	
Ni	ＥＤＴＡ容量法 （JIS G 1216準拠）	
Cr	過マンガン酸容量法 （JIS G 1217準拠）	
引張り	精密万能試験機	島津製　オートグラフAG 10TD型 秤量：最大10トン 負荷方式：コンピューターコントロールシステム 引張荷重測定精度：指示値の±1%以内 引張速度：0.005～1000mm/min （無段階設定）

表　　金属調査に使用した切断工具

装置名	仕様
ポータブルハックソー	Lipe-Rollway社製モデルC AC115, 1／3HP
砥石切断器	立正精機社製 AC 200V 回転数：最大1600rpm 切削刃：レジノイドブレード （φ200mm, t0.6mm）

破断管（Ｘ４５－Ｙ１４）の破断位置について

1. 目的

破断管の起点部（90度付近）の外表面観察結果から、起点部と管支持板との軸方向相対位置関係を推定する。

2. 調査結果

(1) 下側破面の外表面観察の結果、管支持板下端部と考えられるスケールの跡が認められ、この跡から管支持板板厚分を上方にとると、起点部は管支持板上端近傍と推定された。（図－１）

(2) 一方、上側破面の外表面観察の結果、90度付近の破断部から約0.5㎜ 上方に管支持板と接触してできたと考えられる軽微なこすれ跡が認められた。

(3) 管支持板の外観観察の結果、管支持板上端部の管穴の面取り部にスケールが固着していた形跡は認められなかった。

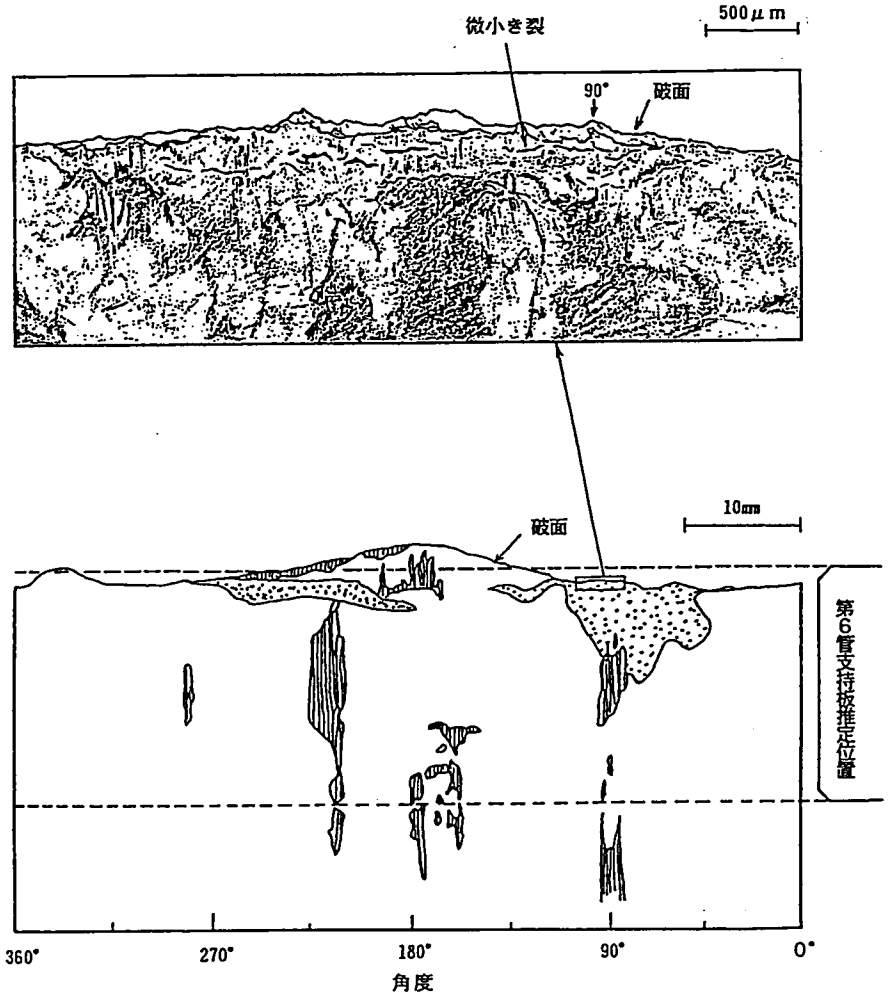
(4) 管支持板の断面ミクロ観察の結果、管穴内面には面取り部下端からスケールが固着していた。

（管支持板調査は、抜管後に実施しているため、面取り部下端のスケールが伝熱管と接触していたかどうかは不明であるが、面取り部にまではスケールは固着していなかったものと考えられる。）

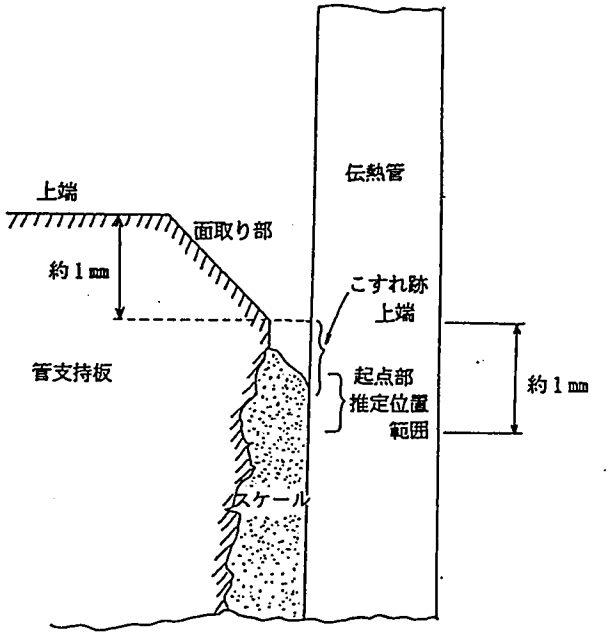
(5) 以上のことから、上側破面でみとめられた軽微なこすれ跡は、管支持板上部の面取り部下端部近くに固着したスケールと伝熱管がこすれ合った跡と考えられる。

3. まとめ

破断の起点となった位置は、管支持板上端から１㎜～２㎜の範囲であったものと考えられる。（図－２）



図－1　破断部の外表面観察結果（下側破面）



図－2　起点部軸方向相対位置推定図

蒸気発生器伝熱管管材金属組織

1. 目的

蒸気発生器伝熱管の管材の金属組織を調査する。

2. 調査方法

破断管及び周辺管のミクロ組織から、結晶粒度、結晶粒界の健全性、非金属介在物等を調査し、管材の金属組織が正常であるかどうかを評価する。

3. 調査結果

3.1 破断管

破断管のミクロ組織観察の結果、摩耗減肉や腐食減肉等の異常が認められなかった伝熱管と比べ、金属組織はインコネル６００として正常なものであり、異常は認められなかった。（表－１）

3.2 周辺管

周辺管のうち、摩耗減肉や腐食減肉等の認められなかった伝熱管及び摩耗減肉や腐食減肉等が認められた伝熱管とも、金属組織はインコネル６００として通常のものであり、異常は認められなかった。（表－１）

表－1　管　材　性　状

	結晶粒度	フェライトスコープ	硬　度
X45－Y14	約7	0.07%	Hv 168
X45－Y11	約7	0.07%	Hv 169
X45－Y13	約7	0.06%	Hv 181
X45－Y15	約7	0.07%	Hv 168
X45－Y16	約7	0.07%	Hv 170
X45－Y17	約7	0.06%	Hv 186

資料－4.1.1.2

蒸気発生器伝熱管製造・組立履歴調査結果

1. 目的

伝熱管損傷の原因調査のため、伝熱管の製造履歴及び組立履歴について、当時の資料に基づき調査する。

2. 調査方法

当時使用された製造仕様書、製作記録、品質管理記録に関し、現存している資料及び記録から、伝熱管の履歴を調査する。

また、美浜２号機伝熱管製作当時から現在に至るまでの設計、製作、品質管理面における変遷を明確にし、最新プラントと比較調査する。

3. 調査結果

3.1 伝熱管の設計仕様調査結果

(1) 伝熱管設計の概要 （表－１）

a．伝熱管材料

蒸気発生器の伝熱管には、高温における材料強度、伝熱性能の他に、１次系及び２次系水中での優れた耐食性が要求される。

この観点から、伝熱管材料は美浜１号機以来、高ニッケル合金であるインコネル６００（大飯３号機以降はインコネル６９０）が採用されている。

伝熱管材料の改良、開発研究は継続的に進められており、川内１号機以降、耐応力腐食割れ（ＳＣＣ）性の向上を目的とした特殊熱処理（ＴＴ）が適用されている。また、耐ＳＣＣ性、耐粒界腐食（ＩＧＡ）性に更に優れたインコネル６９０合金を開発し、大飯３号機以降に採用されている。

b．伝熱管寸法

伝熱管の寸法は、ＣＥ社製である美浜１号機蒸気発生器を除き、美浜２号機以降、ウェスチングハウス社（以下「WH社」という。）製、三菱重工製ともすべて外径7/8インチ（22.23㎜）、板厚0.05インチ(1.27㎜）が標準的に採用されている。

c．U字管曲げ

U字部は半円状の形状をしており、管曲げに際し、塑性変形による残留応力を低

く抑えるため、変形量（楕円率）を規定するとともに、曲げ半径の小さいものは応力除去焼鈍（ＳＲ）が実施（川内１号機以降）されている。

(2) 美浜２号機伝熱管の設計仕様

美浜２号機の蒸気発生器伝熱管の設計仕様は、ＷＨ社の伝熱管仕様を参考とし、適用規格であるASME Sec.Ⅱ SB-163（1966）Ni-Cr-Fe合金の要求を満足させるとともに、ASME Sec. Ⅲの要求をも満足させる仕様とされた。

概要は次のとおりである。

(a) 適用規格　　ASME Sec.Ⅱ SB-163 （1966）Ni-Cr-Fe Alloy

(b) 製造方法　　大気溶解材を熱間押出－冷間加工、熱処理

(c) 非破壊検査　　ＵＴ（直管時）、ＥＣＴ（直管時）、ＰＴ（曲げ後）

(d) 寸　　法　　外径　22.23 mm

板厚　1.27 mm

なお、美浜２号機の伝熱管の素管は米国インコ社で製造され、また、最終製品までの製管加工は住友金属工業㈱（Ａ－蒸気発生器）及びＷＨ社（Ｂ－蒸気発生器）で実施された。

(3) 設計仕様の変遷

伝熱管の材料は、美浜１号機以来高ニッケル合金であるインコネル６００（大飯３号機以降はインコネル６９０）が採用されている。その設計仕様は適用規格である ASME Sec.Ⅱ SB-163 及び通産省告示５０１号の要求を満足する内容となっているが、初期プラントにおける伝熱管損傷の経験から、耐ＳＣＣ性向上のための種々の改善項目及び品質向上のための改善項目も順次加えられてきている。

概要は以下のとおりである。

ａ．耐食性の改善

(a) 特殊熱処理の適用 …… 川内１号機以降

高ニッケル合金に 600～ 800℃で熱処理を施すと、高温高圧水中で耐ＳＣＣ性が著しく向上することが試験で確認されたため、最適条件の 700℃×15ｈで熱処理を実施。

(b) ＴＴ６９０合金の採用 …… 大飯３号機以降

従来の６００合金よりさらに耐食性（特に耐ＳＣＣ性）の優れた６９０合金を採用。

ｂ．Ｕ字部の残留応力の低減

(a) Ｕ字部の楕円率の制限強化 …… 大飯２号機以降

(b) 小曲げ管に応力除去焼鈍（ＳＲ）の実施 …… 川内１号機以降

小曲げ管Ｕ字部で１次側からのＳＣＣによる損傷を経験したことにより、特殊熱処理の適用と共に小曲げ管に曲げ加工後ＳＲを実施。

ｃ．製品品質の向上

(a) 内面ＥＣＴの適用 …… 玄海２号機以降

運転中プラントで採用しているＥＣＴを工場製作中においても適用。

(b) 模擬管支持板上におけるそりの規定 …… 高浜４号機以降

伊方１号機における伝熱管振止め金具部の摩耗減肉損傷に鑑み、伝熱管と振止め金具との隙間管理強化のために伝熱管のそりを厳しく管理。

ｄ．適用規格

ＪＩＳ規格の適用 …… 泊１号機以降

昭和55年の通産省告示 501号の改正と共に、ＪＩＳ規格も整備されてきたことから、従来のＡＳＭＥ規格からＪＩＳ規格に変更。

3.2 伝熱管の製造調査

(1) 美浜２号機伝熱管の製造要領　（図－１）

当時の製造フローは、図－１に示すとおりである。

ａ．素管処理（インコ社製素管の受入れ）

(a) 素管検査 ： ＵＴ、ＰＴ、寸法測定、重量測定

(b) ロット編成 ： 各ロットの使用先（曲げ半径）振分け

b．冷間加工（冷間圧延、マンドレル抽伸）

加工中の疵、寸法

c．熱 処 理

途中熱処理　：　大気雰囲気焼鈍炉

最終熱処理　：　水素雰囲気焼鈍炉

d．U字部曲げ加工

各管の曲げ加工後の寸法検査（曲げ半径、ピッチ、外径、その他）

e．試験検査

(a) 直管途中検査　：　UT、PT

(b) 直管成品検査　：　UT、ECT、外観、寸法

(c) U字管検査

水圧試験

PT．外観

寸法検査

f．梱　包

1本づつポリエチレン製袋に入れ、10段毎に結束して梱包。

(2) 伝熱管製造方法の変遷　（表－2、図－2）

蒸気発生器伝熱管は国産初号機の美浜2号機以降、輸入品を除き、全て住友金属工業で製造されている。

伝熱管は、溶解・精錬、造塊、分塊圧延で造ったビレットを熱間押出しにて素管を製作し、さらに冷間圧延、中間焼鈍、冷間抽伸を繰り返し、最終焼鈍、U字部曲げ加工が行われる。

美浜2号機以来、現在まで基本的な製造プロセスは変わってないが、耐食性及び寸法精度に関する製品品質向上のための種々の改善が加えられている。

概要は以下のとおりである。

a．溶解法 …… 玄海2号機以降に適用

伊方1号機までは、電気炉内精錬であったものを電気炉溶解とAODによる炉外精錬に改善。（AOD：($Ar+O_2$）ガスによる脱炭精錬法）

b．熱処理 …… 川内1号機以降に適用

伝熱管材料の耐食性改善のため、従来の最終焼鈍の後に特殊熱処理（TT処理：700℃×15h）を実施し、さらに、U字部曲げ加工後、小曲げ管に対し応力除去焼鈍（SR処理：700℃×2h）を実施。

c．冷間製管法 …… 大飯3号機以降

冷間抽伸工程において高圧抽伸法を採用し、管内外面の表面粗度を改善。

d．検査法の改善

製品品質向上のため、順次最新の技術、知見が採用されている。

(a) U字部超音波板厚測定 …… 美浜3号機以降

(b) 内面ECT適用 …… 玄海2号機以降

(c) 超音波による全長板厚測定 …… 玄海2号機以降

(d) 模擬管支持板上でのそりの測定の実施 … 高浜4号機以降

e．ハンドリングの改善

製管中のハンドリング時における疵の防止のため、ハンドリング作業頻度の減少と作業方法が改善されている。

(a) 専用パレット（運搬用治具）の採用 …… 玄海2号機以降

(b) ベルトコンベアによる検査のオンライン化 …… 川内1号機以降

(c) U字部曲げ加工と検査のライン化 …… 大飯3号機以降

3.3 伝熱管の組立調査　（表－3、4）

伝熱管の組立は、蒸気発生器下半胴に管支持板が組込まれた後、U字管挿入、下端部シール溶接、シール溶接部リークテスト、管板部拡管固定、振止め金具組立の一連の作業が行われる。

この中で伝熱管U字部に関する組立作業は、伝熱管挿入と振止め金具の組込みのみである。

伝熱管挿入作業の概要は以下のとおりである。

(1) 美浜２号機当時

・手作業による挿入

・伝熱管小曲げ半径管 …… 伝熱管U字面を垂直にして挿入

・伝熱管中～大曲げ半径管 …… 伝熱管U字面を水平にして挿入

・管支持板人孔部の伝熱管は最後に挿入

(2) 高浜３号機からの変更点

・伝熱管自動挿入装置を用いて施工

・伝熱管は全てU字面を水平にして挿入

・管支持板に人孔部は設けない。

伝熱管挿入作業は、美浜２号機当時から、重要な作業として、工場内に設置された専用のクリーンルーム内にて施工されている。

また、作業は図面を基本とし、施工上の注意点等を記した工作要領書の指示に基づき施工されている。

3.4 伝熱管品質管理調査 （表－５）

(1) 製造時の品質管理

伝熱管製造時の品質管理を調査した結果は、以下のとおりである。

a．美浜２号機当時

美浜２号機のＡ－蒸気発生器の伝熱管は、インコ社にて素管を製作し、住友金属工業㈱にて冷間圧延及び冷間引抜後、冷間曲げ加工によりU字管に仕上げたものである。

当時の検査項目は化学成分、機械的性質等の確認の他、下記の検査が実施されている。

(a) 直管時 ＵＴ

(b) 〃 ＥＣＴ

(c) 曲げ後 水圧試験

(d) 〃 ＰＴ

(e) 〃 そり検査

(f) 〃 外観・寸法検査

曲げ部のそり、形状は定盤上で全数、測定器による検査が実施されている。また、曲げ部の切開試験による寸法測定もこの当時より実施されている。

なお、高浜２号機以降は検査項目に直管時のＰＴが追加されている。

b．玄海２号機当時

曲げ管の内面ＥＣＴが玄海２号機以降適用されている。

さらに，直管時のＵＴに合わせて、全長のＵＴによる板厚測定も追加されている。

c．高浜３号機以降

小曲げ管について、U字部楕円率の連続測定が行われ、U字部楕円率もより細かな管理が行われるようになっている。

また、高浜４号機以降には、U字管のそり測定を定盤による測定に加え、実態と合わせた模擬管支持板による検査が実施されており、より厳しい品質管理が行われている。

(2) 伝熱管組立時の品質管理調査結果

伝熱管組立時の品質管理を調査した結果は、以下のとおりである。

伝熱管に対して美浜２号機当時から、以下の検査が行われている。

a. 材料確認検査（開先合せ含む）

b. シール溶接部ＰＴ

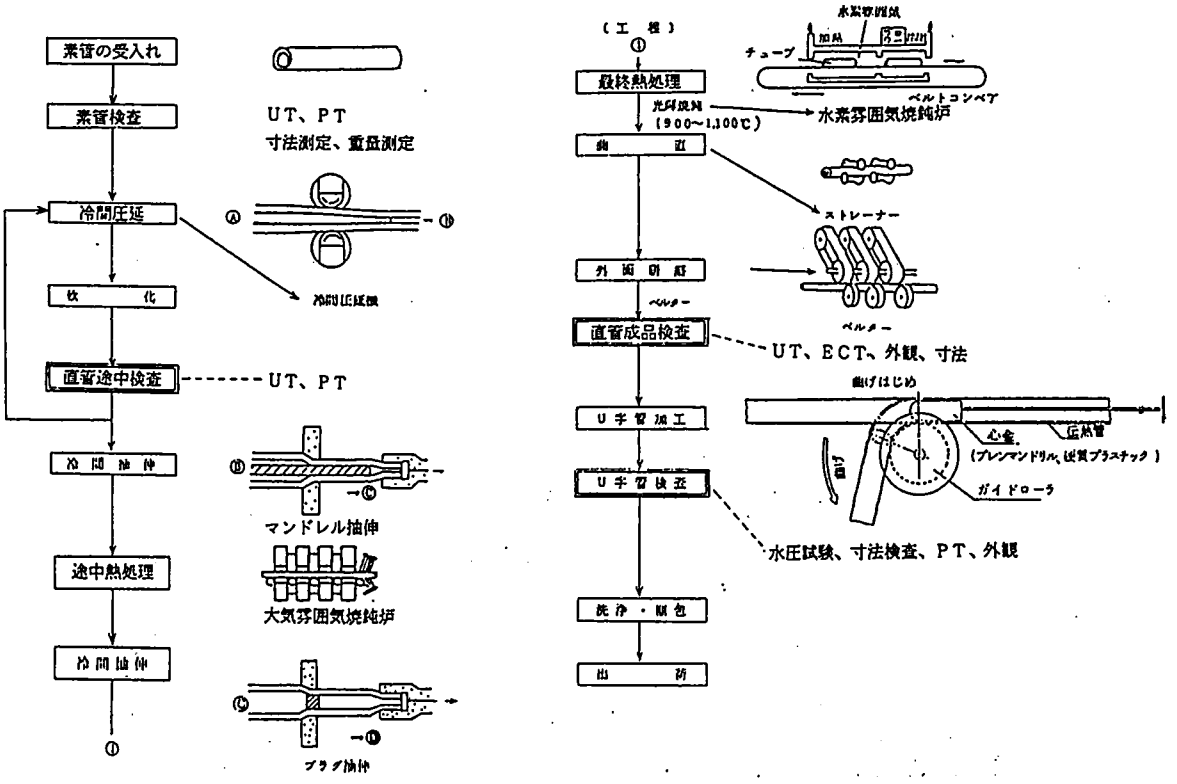
c. シール溶接部リークテスト

d. 振止め金具溶接後の周辺伝熱管の外観検査

e. 耐圧試験

表－１　伝熱管発注仕様の変遷

	材料規格	熱処理	非破壊検査						寸法
			UT（直管）	ECT（直管）	PT（直管）	ECT（曲げ管）	PT（曲げ管）	肉厚（曲げ管）	
美浜２号	ASME SB-163 Ni-Cr-Fe合金	焼鈍（MA）	○	○	－	－	○	－	22.23 $^{\phi}$×1.27^{t}
高浜１号	輸入品								
高浜２号	ASME SB-163 Ni-Cr-Fe合金	焼鈍（MA）	○	○	○	－	○	－	22.23 $^{\phi}$×1.27^{t}
玄海１号									
美浜３号								○	
大飯１号	輸入品								
大飯２号	ASME SB-163 Ni-Cr-Fe合金	焼鈍（MA）	○	○	○	－	○	○	22.23 $^{\phi}$×1.27^{t}
伊方１号									
玄海２号									
伊方２号									
川内１号		焼鈍（MA）＋特殊熱処理（TT）〔小曲げ管 曲げ後U字部 応力除去焼鈍〕	○（板厚測定を含む）			○			
高浜３号									
高浜４号									
川内２号									
敦賀２号									
泊１号	JIS NCF600-TB								
泊２号									
大飯３号以降	TT690 合金								



図－１　伝熱管の製作フロー（美浜２号機）

表－２　伝熱管製造方法の変遷（住友金属）

プラント	製造年月	材　質	溶解法	冷間成管法	熱　処　理	U　字　管
美浜２号 A－SG	1969/11 ～ 1970/4	インコ600	INCO社素管	冷間圧延 →冷間曲伸	燃焼（MA）	U曲げ加工：ロータリー Uベンダー（図1）
高浜２号	1971/6 ～ 1972/2		電気炉 回転造塊	冷間圧延 →冷間曲伸	同　上	
玄海１号	1972/3 ～ 1972/12					
美浜３号	1972/6 ～ 1973/5					
大飯２号	1973/2 ～ 1974/2					
伊方１号	1974/1 ～ 1975/2					
玄海２号	1976/8 ～ 1977/9		AOD精錬			
伊方２号	1977/10 ～ 1978/12					
川内１号	1979/4 ～ 1980/8				燃純（MA） ＋特殊熱処理(TT) ＋小曲げ管 SR	U字管検査台オンライン （図2）
高浜３号	1980/8 ～ 1981/9					
高浜４号	1981/5 ～ 1982/8					そり：模擬管支持板の管理
川内２号	1982/11 ～ 1982/12					
敦賀２号	1983/1 ～ 1984/3					
泊　１号	1984/12 ～ 1985/12					
泊　２号	1985/9 ～ 1986/11	↓				
大飯３号 以降	1987/8 ～	インコ690		冷間圧延 →高圧曲伸		U曲げ加工と検査のライン化

（図3）

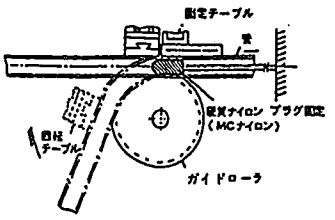


図1

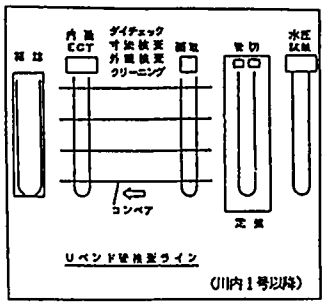
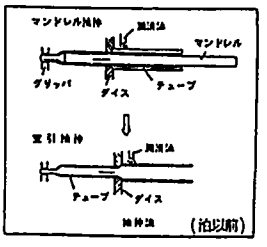




図2



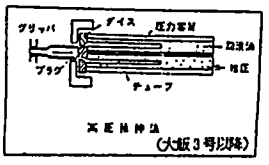
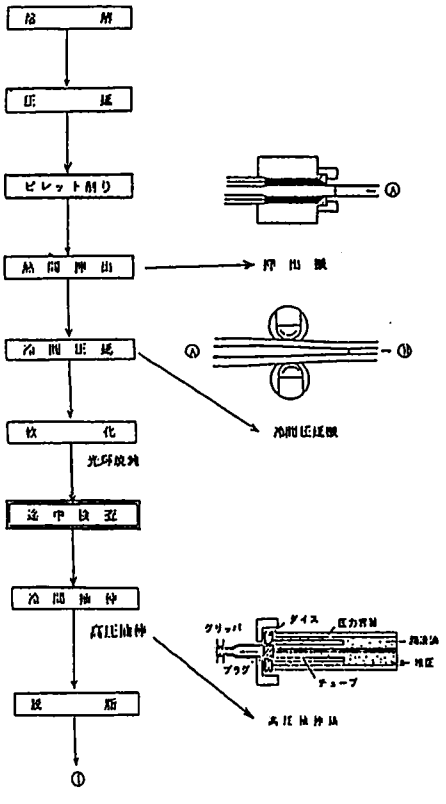
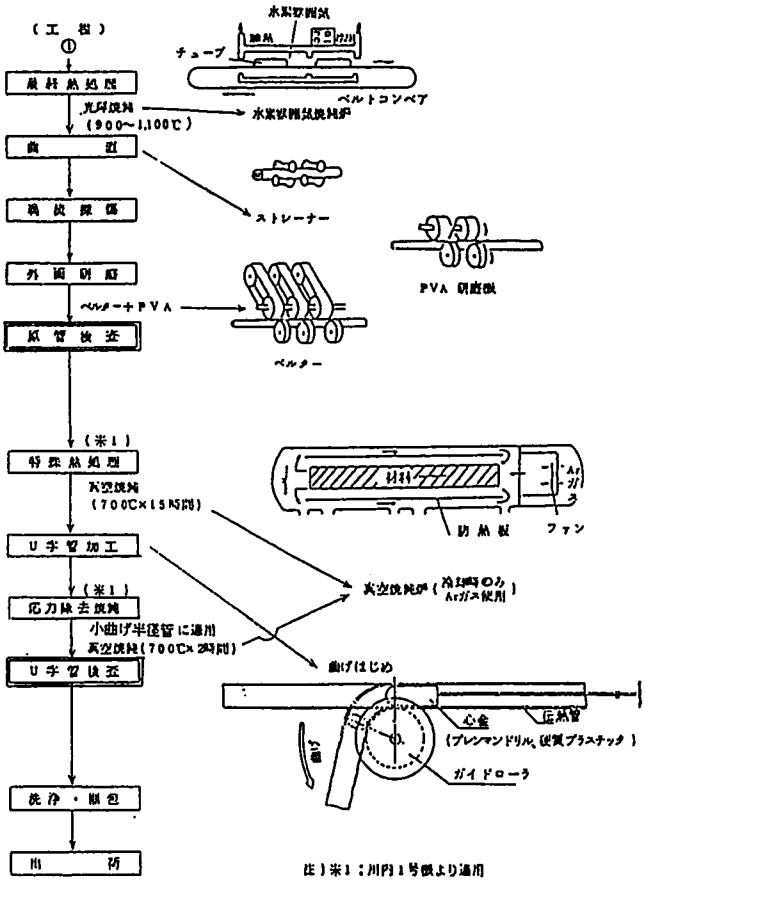


図3





図－２　　伝熱管の製作フロー（大飯３号機以降）

表－3　伝熱管挿入要領の変遷

プラント名	伝熱管挿入要領書 指示内容
美浜２号	1. 伝熱管取扱いの注意 ・変形を与えないこと ・傷をつけないこと ・清浄度の確保 2. 管孔の清浄度管理 3. 挿入手順
高浜２号	
玄海１号	
美浜３号	
大飯２号	
伊方１号	
玄海２号	1，2，3同上 4. ハンドリング時の支持点管理 5. U字部隙間確認
伊方２号	
川内１号	
高浜３号	1，2，3，4，5同上 自動挿入装置の適用に伴い要領書の見直し
高浜４号	
川内２号	
敦賀２号	
泊 １ 号	
泊 ２ 号	
大飯３号以降	

表－４　蒸気発生器伝熱管挿入要領

プラント名	挿入方法			挿入場所	伝熱管挿入作業における管理項目	挿入状況
	手動／自動	伝熱管挿入時向き	挿入手順			
美浜２号	手動挿入	・小曲げ半径管 伝熱管U字曲げ面を垂直にして挿入 ・中～大曲げ半径管 伝熱管U字曲げ面を水平にして挿入	・曲げ半径の小さな伝熱管から挿入 ・入孔断は段様に挿入	クリーンルーム ・ビニルシートによる隔離 ・エアコン ・作業床上下動 ・天井に頭の挿入出用開閉扉：有	伝熱管取扱いの注意 ・変形を与えない ・傷を付けない ・清浄度の確保	小曲げ半径管 SG 伝熱管 クリーンルーム 中～大曲げ半径管 SG 伝熱管 SG 伝熱管
高浜２号						
玄海１号		・挿入位置が不所の断所はSGを反転して挿入				
美浜３号		・入孔断に作業者が入り挿入(要動)				
大飯２号						
伊方１号					・伝熱管ハンドリング時の支持点管理	
玄海２号						
伊方２号						
川内１号						
高浜３号／４号	自動挿入	・伝熱管U字曲げ面を水平にして挿入	・曲げ半径の小さな伝熱管から挿入 ・入孔断は設計変更により狭くなる	クリーンルーム ・断熱隔板による隔離 ・エアコン ・自動挿入装置 ・箱の挿入出用台車：有	・上記に同じ	自動挿入装置 クリーンルーム SG 伝熱管 搬送台車
川内２号						
敦賀２号						
泊１号／２号						
大飯３号以降						

表－５　伝熱管検査の実施状況の変遷（製作工程）

	検査項目													備考
	寸法		外観	そり	直管時のNDT			曲げ後のNDT				水圧試験	楕円率	
	直管部外径，板厚他	曲げ部切開試験			UT	ECT	PT	ECT	PT	UT肉厚（直管部）	UT肉厚（曲げ部）			
美浜２号	○	○	○	○（定盤）	○	○	－	－	○	－	－	○	○	
高浜１号	輸入品													
高浜２号	○	○	○	○（定盤）	○	○	○	－	○	－	－	○	○	
玄海１号														
美浜３号											○			
大飯１号	輸入品													
大飯２号	○	○	○	○（定盤）	○	○	○	－	○	－	○	○	○	
伊方１号														
玄海２号								○		○				
伊方２号														
川内１号														
高浜３号													○（連続測定）	
高浜４号				○（定盤及び管板支持）				○		○				
川内２号														
敦賀２号														
泊１号														
泊２号														
大飯３号以降														

○：実施
－：実施せず

資料－4.1.2.1

周 辺 管 調 査 結 果

1. 目的

伝熱管損傷の原因調査のため、破断管の周辺の伝熱管（以下「周辺管」という。）について、状況調査及び渦電流探傷検査（以下「ＥＣＴ」という。）を実施するとともに一部の伝熱管を引き抜いて金属調査等を実施する。

2. 現場調査

2.1 調査方法

ＥＣＴ、小型テレビカメラ及び内径計測プローブで周辺管の損傷状況、内面状況等を調査する。

2.2 調査結果

(1) 周辺管５９１本についてＥＣＴを実施した結果、過去に施栓した伝熱管のうち、Ｘ44－Ｙ20、Ｘ45－Ｙ16～Ｙ20、Ｘ46－Ｙ17及びＸ46－Ｙ19～Ｙ22の一部の管支持板部又は振止め金具（以下「ＡＶＢ」という。）部において、施栓時に記録された信号から、減肉の深さあるいは体積の増加を示す信号の変化又は新たな減肉信号が認められた。（添付－１）

(2) 小型テレビカメラによる伝熱管内面観察の結果、過去に施栓した伝熱管のうち、Ｘ44－Ｙ21、Ｘ45－Ｙ19～Ｙ21、Ｘ46－Ｙ19及びＸ46－Ｙ21の第６管支持板部において、伝熱管内面への膨らみ等が認められた。（添付－２）

(3) 内径計測プローブにより周辺管のうちＸ44－Ｙ14、Ｘ45－Ｙ11、Ｙ13及びＹ15～Ｙ17について第６管支持板部近傍の内径計測を実施した結果、Ｘ45－Ｙ15（破断管の隣接管）の低温側第６管支持板上端近傍部に破断管との接触によると考えられる変形指示が認められたが、その他の伝熱管の第６管支持板部に変形指示はなく、デンティングは認められなかった。（添付－３）

なお、これらの異常なＥＣＴ信号及び形状の変化は、振止め金具が設計どおりの範囲まで挿入されていなかった範囲の伝熱管のみに認められた。（図－１）

3. 金属調査

3.1 調査対象管

抜管調査対象はX44列、X45列及びX46列のY11～Y45並びにX28－Y41、X43－Y23、X48－Y17の伝熱管（破断管を除き合計 107本）であり、このうちX44－Y25、X45－Y11～Y13、Y15～Y23、X46－Y14、Y19、Y21及びY25の17本について金属調査を行う。（図－1）

3.2 調査方法

調査項目は以下のとおりである。

(1) 外観観察

サンプルの外観を観察、写真撮影（35㎜カメラ）し記録する。

(2) 寸法検査

伝熱管の外径をレーザ外径測定装置を用いて測定する。

伝熱管の板厚をダイヤルゲージ式厚さ測定装置を用いて測定する。

伝熱管の減肉形状を万能表面形状測定器を用いて測定する。

(3) X線回折

サンプルに付着しているスケールの形態をX線回折装置を用いて分析する。

(4) 光学観察

伝熱管の外表面を拡大写真撮影装置を用いて拡大観察、写真撮影し記録する。

(5) ＳＥＭ観察

伝熱管の外表面を走査型電子顕微鏡を用いて、スケール除去（酸洗）した後の状態で高倍率で拡大観察、写真撮影し記録する。

(6) 断面ミクロ観察

サンプルを樹脂に埋め込み、研磨、エッチングを行い、光学顕微鏡を用いて拡大観察、写真撮影し記録する。

(7) 硬度

サンプルの硬度をマイクロビッカース硬度計を用いて計測する。測定はＪＩＳ Ｚ2244「ビッカース硬さ試験法」に準拠し、押し付け荷重500gにて実施する。

(8) ＥＰＭＡ（Electron Probe Micro Analysis）

サンプルに付着しているスケールの元素をX線マイクロアナライザを用いて分析する。

(9) フェライトスコープ

サンプルのＣｒ欠乏層の形成状況をフェライトスコープ強度測定装置を用いて測定する。

(10) 引張試験

サンプルの 0.2%耐力、引張強さ、伸びを精密万能試験機を用いて測定する。標点間距離50㎜の試験片によりＪＩＳ Ｚ2241「金属材料引張試験法」に基づいて実施する。

(11) 管材成分分析

サンプルの化学成分をプラズマ発光分光分析装置、燃焼熱伝導度型カーボン分析装置、分光光度計、電気炉燃焼法、ＥＤＴＡ容量法、過マンガン酸容量法を用いて定量分析する。ＪＩＳ Z2615、G1211 、G1213 、G1214 、G1215 、G1216 、G1217 に基づく。

使用装置の型式を添付－4に示す。

3.3 調査結果

3.3.1 管支持板部調査

(1) 損傷状況調査（表－1）

a. X44－Y25

外観観察の結果、高温側第6管支持板部には 350度付近から60度付近の範囲に腐食減肉が認められた。減肉深さは最大0.4㎜であった。

高温側第５～第１管支持板部には、減肉は認められなかった。

b. X45－Y11

(a) 外観観察の結果、低温側第６～第１管支持板部には減肉は認められなかった。

(b) ＳＥＭ観察及び断面ミクロ観察の結果、低温側第６管支持板部で軽微な（深さ５μｍ）粒界浸食のみが認められた。

c. X45－Y12

(a) 外観観察の結果、低温側第６～第１管支持板部及び高温側第６管支持板部には、減肉は認められなかった。

（低温側第６管支持板部については、管支持板と一体で取り出し、管支持板の断面ミクロ観察に使用したため、管支持板部の下半分の調査結果である。）

(b) ＳＥＭ観察及び断面ミクロ観察の結果、異常は認められなかった。

d. X45－Y13

(a) 外観観察の結果、低温側第６管支持板部には 100度付近から 150度付近の範囲に腐食により生じたと考えられる減肉が認められた。減肉深さは最大0.49㎜、減肉体積は20.1㎜^{3} であった。

低温側第５～第１管支持板部には、減肉は認められなかった。

(b) ＳＥＭ観察の結果、低温側第６管支持板部減肉部には微細なクレータが多数認められ、腐食減肉の様相を示していた。

(c) ＳＥＭ観察及び断面ミクロ観察の結果、その他の部位に異常は認められなかった。

e. X45－Y15

(a) 外観観察の結果、低温側第６管支持板部には20度付近から 135度付近及び180度付近から 290度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められた。減肉深さは最大0.2㎜、減肉体積は 32.6㎜^{3}であった。（図－2.3）

低温側第５～第１管支持板部には、減肉は認められなかった。

高温側第６管支持板部は、管支持板調査のため管支持板と一体で取り出し、

管支持板の断面ミクロ観察に使用したため、管支持板部の下半分のみの観察結果であるが、45度付近に摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められた。

(b) ＳＥＭ観察の結果、低温側第６管支持板部の減肉部の底部には、ほぼ円形の小打痕状模様が認められた。（図－２）

(c) ＳＥＭ観察及び断面ミクロ観察の結果、その他の部位に異常は認められなかった。

f. X45－Y16

(a) 外観観察の結果、低温側第６管支持板部には 270度付近から90度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められた。減肉深さは最大0.46㎜、減肉体積は 75.1㎜^{3}であった。

低温側第５管支持板部には 225度付近から 315度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められた。減肉深さは最大0.2㎜、減肉体積は16.2㎜^{3} であった。

低温側第４管支持板部には70度付近から 190度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められた。減肉深さは最大0.18㎜、減肉体積は12.0㎜^{3}であった。

低温側第３管支持板部には 300度付近から10度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められた。減肉深さは最大0.11㎜、減肉体積は16.5㎜^{3}であった。

低温側第２管支持板部には 100度付近から 180度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認めれた。減肉深さは最大0.06㎜、減肉体積は 3.3㎜^{3}であった。

低温側第１管支持板部には 320度付近から０度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められた。減肉深さは最大0.04㎜、減肉体積は 1.7㎜^{3}であった。

高温側第６管支持板部には45度付近から 200度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められた。減肉深さは最大0.29㎜、減肉体積は70.0㎜^{3} であった。

高温側第５～第３管支持板部には減肉は認められなかった。

(b) ＳＥＭ観察の結果、高温側第６管支持板部の減肉部の底部には、ほぼ円形の小打痕状模様が認められた。

(c) ＳＥＭ観察及び断面ミクロ観察の結果、その他の部位に異常は認められなかった。

g. X45－Y17

(a) 外観観察の結果、低温側第６管支持板部には 300度付近から90度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められ、45度付近には引き抜き時に生じたと考えられる開口部が認められた。減肉深さは最大 1.1mm、減肉体積は309.4mm³であった。

低温側第５管支持板部には90度付近から 290度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められ、185 度付近から 210度付近に腐食減肉が混在していた。減肉深さは最大0.52mm、減肉体積は106.2mm³であった。

低温側第４管支持板部には45度付近から 180度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められた。減肉深さは最大0.24mm、減肉体積は27.3 mm³ であった。

低温側第３管支持板部には 250度付近から０度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められた。減肉深さは最大0.16mm、減肉体積は17.4mm³ であった。

低温側第２管支持板部には90度付近から 135度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められた。減肉深さは最大0.05mmであった。

低温側第１管支持板部には減肉は認められなかった。

(b) ＳＥＭ観察の結果、低温側第６、第３、第２管支持板部の減肉部の底部には、ほぼ円形の小打痕状模様又は摺動痕が認められた。

(c) ＳＥＭ観察及び断面ミクロ観察の結果、その他の部位に異常は認められなかった。

h. X45－Y18

外観観察の結果、低温側第６管支持板部には 270度付近から45度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められ、そのうち 300度付近から20度付近の

範囲に腐食減肉が混在していた。減肉深さは最大0.44mm、減肉体積は 54.2mm³であった。

低温側第５管支持板部には20度付近から 225度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められた。減肉深さは最大0.２mm、減肉体積は 84.8mm³であった。

低温側第４管支持板部には０度付近から 135度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められた。減肉深さは最大0.23mm、減肉体積は24.6mm³であった。

低温側第３管支持板部には 250度付近から 350度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められ、そのうち 260度付近から 300度付近の範囲には腐食減肉が混在していた。減肉深さは最大0.60mm、減肉体積は 30.5mm³であった。

低温側第２管支持板部には 100度付近から 140度付近の範囲に腐食により生じたと考えられる軽微な減肉が認められた。減肉深さは最大0.１mm、減肉体積は、2.4mm³であった。

低温側第１管支持板部には 330度付近から 350度付近の範囲に腐食により生じたと考えられる軽微な減肉が認められた。減肉深さは最大0.１mm、減肉体積は、6.9mm³であった。

i. X45－Y19

(a) 外観観察の結果、低温側第６管支持板部の 270度付近から 145度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められ、そのうちで、350度付近から105度付近の範囲に貫通部が認められた。減肉部は貫通しており、減肉体積は測定不可能であったが、減肉形状より約700mm³と推定された。 （図－２）

低温側第５管支持板部には全周に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められた。減肉深さは最大0.49mm、減肉体積は207.0mm³であった。

低温側第４管支持板部には０度付近から90度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められ、そのうち０度付近から45度付近の範囲に腐食減肉が混在していた。減肉深さは最大0.35mm、減肉体積は 12.7mm³であった。

低温側第３管支持板部には 270度付近に腐食減肉が認められた。減肉深さは

最大0.49mm、減肉体積は13.4mm³ であった。

低温側第2管支持板部には、145 度付近から 220度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められた。

低温側第1管支持板部には減肉は認められなかった。

高温側第6管支持板部には 300度付近から90度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められ、そのうち 315度付近から50度付近の範囲に腐食減肉が混在していた。減肉深さは最大0.54mm、減肉体積は185.0mm³であった。

(b) ＳＥＭ観察の結果、低温側第6、第5管支持板部の減肉部の底部に摺動痕が認められた。

(c) ＳＥＭ観察及び断面ミクロ観察の結果、その他の部位に異常は認められなかった。

j. X45－Y20

外観観察の結果、低温側第6管支持板部には90度付近から 270度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められた。減肉深さは最大1.18mm、減肉体積は445.6mm³であった。

低温側第5管支持板部には 340度付近から20度付近の範囲に腐食減肉が認められた。減肉深さは最大0.4mm、減肉体積は13.2mm³ であった。

低温側第4管支持板部には 120度付近から 180度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められ、そのうち 150度付近から 160度付近の範囲に腐食により生じたと考えられる軽微な減肉が混在していた。減肉深さは最大0.22mm、減肉体積は7.7mm³であった。

低温側第3管支持板部には 280度付近から0度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められ、そのうち 290度付近から 350度付近の範囲に腐食により生じたと考えられる軽微な減肉が混在していた。減肉深さは最大0.2mm、減肉体積は10.5mm³ であった。

低温側第2管支持板部には 100度付近から 180度付近の範囲に腐食により生じたと考えられる軽微な減肉が認められた。減肉深さは最大0.06mm、減肉体積は1.8mm³であった。

低温側第1管支持板部には 190度付近から0度付近の範囲に腐食により生じた

と考えられる軽微な減肉が認められた。減肉深さは最大0.1mm、減肉体積は8.6mm³であった。高温側第6管支持板部には 270度付近から135度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められ、そのうち、60度付近に内面への膨らみが認められた。この膨らみが大きかったため、減肉深さ及び減肉体積の測定は不可能であったが減肉体積は約550mm³と推定された。

k. X45－Y21

(a) 外観観察の結果、低温側第6管支持板部には90度付近から 270度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められ、そのうち 180度付近に内面への膨らみが認められるとともに、 100度付近から 225度付近の範囲に貫通部が認められた。減肉部の内面への膨らみが大きかったため、減肉深さ及び減肉体積の測定は不可能であったが減肉体積は約 650mm³ と推定された。

低温側第5管支持板部には全周に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められ、250度付近から 290度付近の範囲に腐食減肉が混在していた。減肉深さは最大0.41mm、減肉体積は 53.8mm³であった。

低温側第4管支持板部には80度付近から 180度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められ、そのうち 100度付近から 180度付近の範囲に腐食減肉が混在していた。減肉深さは最大0.34mm、減肉体積は48.5mm³であった。

低温側第3管支持板部には 270度付近から0度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉と腐食により生じたと考えられる軽微な減肉が混在していた。減肉深さは最大0.13mm、減肉体積は7.4mm³であった。

低温側第2管支持板部には 100度付近から 180度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉が認められた。減肉深さは最大0.23mm、減肉体積は10.6mm³ であった。

低温側第1管支持板部には、減肉は認められなかった。

高温側第6管支持板部には 270度付近から 170度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴なう摩耗減肉が認められ、そのうち60度付近に内面への膨らみが認められるとともに、75度付近から 105度付近の範囲に貫通部が認められた。減肉部は内面への膨らみが大きかったため、減肉深さ及び減肉体積の測定は不可能であったが減肉体積は約650mm³と推定された。

(b) ＳＥＭ観察及び断面ミクロ観察の結果、その他の部位に異常は認められなかった。

l. X45－Y22

(a) 外観観察の結果、低温側第６管支持板部には 315度付近から90度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉と腐食減肉が混在していた。減肉深さは最大0.33mm、減肉体積は8.5mm³であった。

低温側第５管支持板部には 280度付近から 310度付近の範囲に腐食により生じたと考えられる軽微な減肉が認められた。減肉深さは最大0.2mm、減肉体積は2.3mm³であった。

低温側第４管支持板部には 180度付近から 270度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉と腐食減肉が混在していた。減肉深さは最大0.35mm、減肉体積は26.2mm³ であった。

低温側第３～第１管支持板部には減肉は認められなかった。

高温側第６管支持板部には 310度付近から70度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉と腐食減肉が混在していた。減肉深さは最大0.47mm、減肉体積は31.8mm³ であった。

(b) 断面ミクロ観察の結果、異常は認められなかった。

m. X45－Y23

(a) 外観観察の結果、低温側第６～第４管支持板部には減肉は認められなかった。

低温側第３管支持板部には 120度付近から 150度付近の範囲に腐食により生じたと考えられる軽微な減肉が認められた。減肉深さは最大0.09mm、減肉体積は1.6mm³であった。

低温側第２、第１管支持板部には減肉は認められなかった。

(b) ＳＥＭ観察及び断面ミクロ観察の結果、その他の部位に異常は認められなかった。

n. X46－Y14

(a) 外観観察の結果、低温側第６管支持板部には減肉は認められなかった。

（管支持板と一体で取り出し、管支持板の断面ミクロ観察に使用したため、管支持板部の上半分の調査結果である。）

(b) ＳＥＭ観察及び断面ミクロ観察の結果、異常は認められなかった。

o. X46－Y19

外観観察の結果、低温側第６管支持板部には 315度付近から 170度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められ、そのうち90度付近に内面への膨らみが認められるとともに、40度付近から 135度付近の範囲に貫通部が認められた。減肉部は内面への膨らみが大きかったため、減肉深さ及び減肉体積は測定不可能であったが、減肉体積は約650mm³と推定された。

高温側第６管支持板部には 315度付近から90度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められ、そのうち 340度付近から20度付近の範囲に腐食減肉が混在していた。減肉深さは最大0.83mm, 減肉体積は 95mm³であった。

p. X46－Y21

(a) 外観観察の結果、低温側第６管支持板部には 315度付近から 140度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められ、そのうち90度付近に内面への膨らみが認められた。減肉深さは最大1.1mm、減肉体積は519mm³であった。

低温側第５管支持板部には 135度付近から 270度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められ、そのうち 190度付近から 250度付近の範囲に腐食減肉が混在していた。減肉深さは最大0.55mm、減肉体積は129mm³であった。

低温側第４管支持板部には 120度付近から 230度付近の範囲に周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められ、そのうち 120度付近から 185度付近の範囲に腐食減肉が混在していた。減肉深さは最大0.30mm、減肉体積は66.5mm³ であった。

(b) ＳＥＭ観察及び断面ミクロ観察の結果、その他の部位に異常は認められなかった。

q. X46－Y25

外観観察の結果、高温側第３管支持板部には 270度付近から30度付近の範囲に腐食減肉が認められた。減肉深さは0.38mmであった。

高温側第６～第４、第２及び第１管支持板部には減肉は認められなかった。

摺動痕を伴う摩耗減肉部の最大深さとＹ列の関係を表－２に示す。

Ｘ45列の伝熱管の低温側管支持板部における摩耗減肉の最大深さは、曲げ半径が大きくなるに従って増大する傾向があった。

(2) 材料性状

a. 管材成分の分析

管材成分を分析し、材料の規格値及び製造時のミルシート記載値と比較した結果、いずれのサンプルの化学成分も規格値の範囲内であった。また、製造時のミルシート記載値とも同等であり、材料劣化は認められなかった。（表－３）

b. 引張試験

直管部のサンプルを用いた引張試験により、0.2 %耐力、引張強さ、伸びを求めた。

引張強さはミルシート記載値とほぼ同程度であり、規格（ASME SB163）を満たしていた。0.2 %耐力は、ミルシート値よりやや大きく、また、伸びは減少していたが、抜管時の荷重等からみて、0.2 %耐力を超えた負荷の作用により、0.2 %耐力の増大、伸びの減少を生じたものと推定される。（表－４）

c. 硬度

１次側から抜管したサンプルの平均の硬度は、ビッカース硬さ（以下「Hv」という。）168 ～223 であり、破断管のHv 161より高く、X45－Y17のサンプルではインコネル600 の規格値（Hv 198以下）より高い値を示した。これは、抜管時の荷重等からみて塑性変形が生じるような負荷が加わったため、硬度が上昇したものと推定される。（添付－５）

管支持板とともに取り出して、伝熱管に負荷が加わらなかった場合には、硬度は

Hv 155程度であった。（表－５）

d. フェライトスコープ強度

フェライトスコープ強度を測定した結果、いずれのサンプルでも0.06%～0.10%であり、過去の抜管材の調査結果の範囲内であった。（表－６）

e. ミクロ組織

ミクロ組織はインコネル600 として通常のものであり、異常は認められなかった。

(3) スケール分析

a. Ｘ線回折

管支持板部外表面に付着したスケールの形態を分析した結果、付着したスケールの主成分はマグネタイト（Fe_3O_4）、その他の成分として一部に金属銅（Ｃｕ）等が認められたが、腐食の加速要因となる酸化物は検出されなかった。（表－７）

b. ＥＰＭＡ

管支持板部外表面に付着したスケールを分析した結果、主成分は鉄であり、腐食要因となる塩素、ナトリウム等の成分は検出されなかった。また、一部のスケールにはりんが検出されたが、りんの検出された位置には鉄等が検出されたことから腐食性ではないりん酸鉄等として存在していたものと推定される。（図－４）

3.3.2 Ｕ字部調査（表－８）

(1) Ｘ44列のＹ12、13及びＹ16～Ｙ22の伝熱管は、Ｘ43－Ｘ44間のＡＶＢとの支持部（31ヶ所）のうち、３ヶ所で微小な摩耗減肉が認められた。一方、Ｘ43－Ｘ44間のＡＶＢにおいて伝熱管との接触部に減肉は認められなかった。

(2) Ｘ44列のＹ12，Ｙ13、Ｙ16～Ｙ22の伝熱管の減肉深さは３ヶ所測定したうちで最大0.18mm（Ｘ44－Ｙ22のＸ43側３Ｓ部）であった。

(3) Ｘ45列のＹ11～Ｙ22の伝熱管のＵ字部には異常は認められなかった。

(4) X46列伝熱管はX46－X47間ＡＶＢとの支持部（43ヶ所）のうち、25ヶ所で摩耗減肉が認められた。一方、X46－X47間ＡＶＢにおいては13ヶ所で伝熱管との摩耗減肉が認められた。

(5) X46列の伝熱管の減肉深さは、25ヶ所測定したうちで最大0.7㎜（X46－Y22のX47側１Ｓ部）であった。一方、ＡＶＢの減肉深さは、13ヶ所測定したうちで最大0.48㎜（X46－Y22のX47側１Ｓ部）であった。

4. その他の調査

4.1 管支持板部調査

X44－Y11～Y13及びY16～Y22の低温側第６管支持板部について外観調査等を実施した結果、一部の伝熱管に腐食減肉あるいは摺動痕を伴う摩耗減肉が認められた。（表－９）

4.2 U字部調査

X44列～X46列のY24～Y45のU字部について外観調査を実施した結果、一部の伝熱管に軽微な摩耗減肉が認められた。（表－10）

4.3 関連調査

X28－Y41の低温側第６管支持板部及びU字部、X48－Y17の高温側管板上面部近傍並びにX43－Y23のU字部について調査を実施した結果は、以下のとおりである。

(1) X28－Y41

a. 低温側第６管支持板部の外観観察の結果、減肉等は認められなかった。

b. ＥＣＴでＡＶＢ支持部（２Ｓ部）に微小減肉指示が認められたU字管の外観観察の結果、X27列側のＡＶＢ支持部のうちの２Ｓ部及びX29列側のＡＶＢ支持部のうちの３Ｓ部で微小な摩耗減肉が認められた。

(2) X48－Y17

a. 高温側管板上面部近傍の外観観察の結果、管板直上部には全周に腐食減肉が認められた。減肉深さは最大0.43㎜であり、第２回定期検査時のＥＣＴによる減肉深さ評価値とほぼ同等であった。

b. 寸法検査の結果、減肉部以外で管板上面より２㎜下方部の外径が直管部に比べてやや小さかったが、減肉部以外の板厚には異常は認められなかった。

この伝熱管は、今回のＥＣＴで微小な変形信号が認められたが、伝熱管内径測定の結果、管板上面部近傍に目視で確認できない程度のわずかな内径減少が認められ、この結果、ＥＣＴにより減肉深さが測定できなかったものと考えられる。

(3) X43－Y23

a. U字部の外観観察の結果、X44列側の外表面に、隣接管であるX44－Y23と接触していた跡が認められた。また、X43列側の外表面には、ＡＶＢとの接触跡が認められた。（図－５）

X44－Y23及びX45－Y23のU字部についても外観観察した結果、外表面に隣接管と接触していた跡が認められた。（図－５）

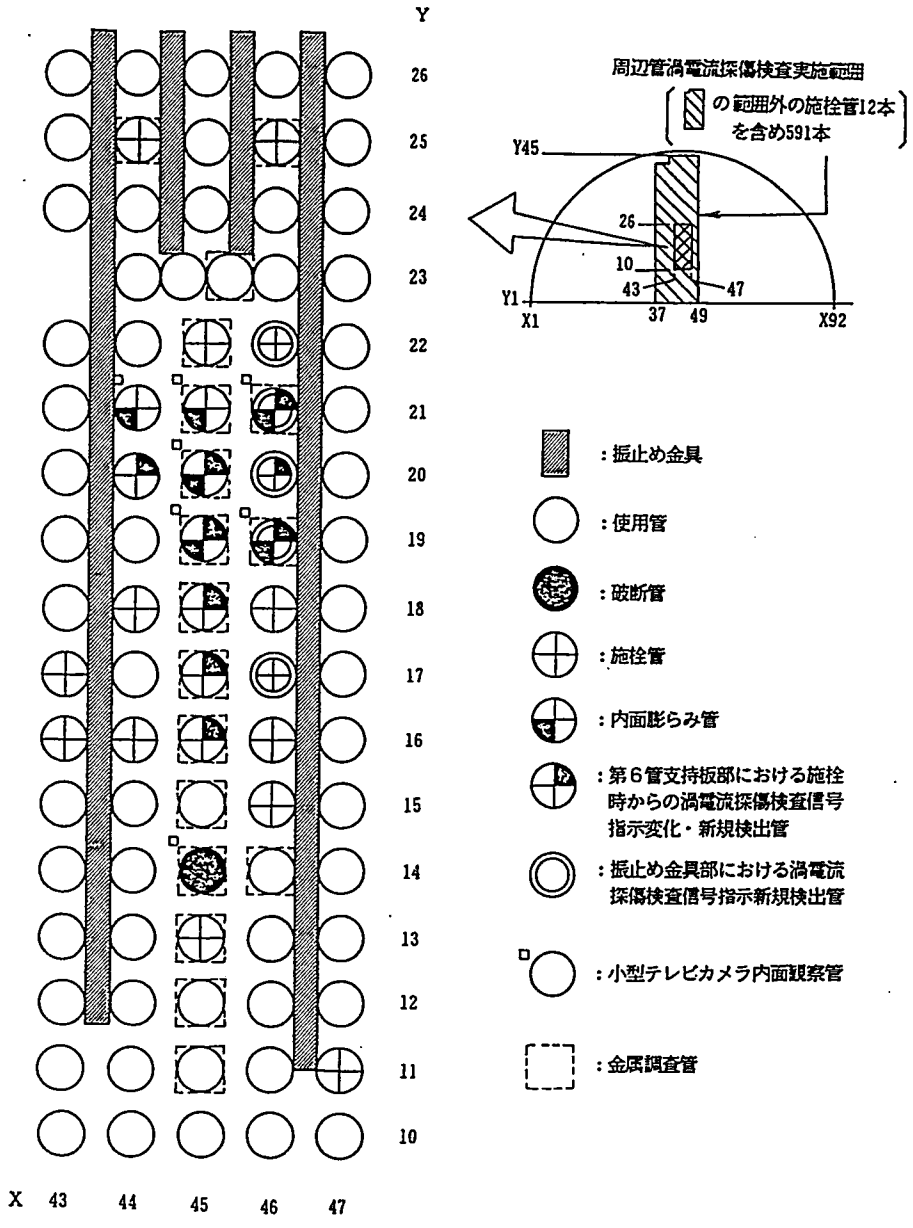
b. U字部のそり状況を確認するため、寸法測定を実施した結果、U字部頂部でX45列側へそりが認められた。（図－６）

5. まとめ

(1) 破断管よりも曲げ半径の大きい伝熱管の管支持板部で、周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められたが、これらはいずれも振止め金具が設計どおりの範囲まで挿入されていなかった範囲の伝熱管に限られていた。

(2) 振止め金具が設計どおりの範囲まで挿入されていなかった範囲で、破断管よりも曲げ半径の小さい伝熱管においては、摩耗減肉及び微小き裂等の異常は認められなかった。

(3) 振止め金具が設計どおりの範囲まで挿入されていた伝熱管では、摩耗減肉及び微小き裂等の異常は認められなかった。



図－１　周辺管調査概要

表－１（１／９）　周辺管金属調査の結果

位置	高温側・低温側	部位	外観，拡大観察	ＳＥＭ	断面ミクロ	最大減肉深さ（減肉率）	ＥＰＭＡ	Ｘ線回折	硬度	ミクロ組織	寸法
X14-Y25	高温側	H6B	350°～60°に腐食減肉有り	――	――	0.4 mm	腐食に関与する物質検出されず	主成分 Fe，Ni その他 Cu	――	――	異常なし
		H5B	減肉無し	――	――	――	――	――	――	――	――
		H4B	減肉無し	――	――	――	――	――	――	――	――
		H3B	減肉無し	――	――	――	――	――	――	――	――
		H2B	減肉無し	――	――	――	――	――	――	――	――
		H1B	減肉無し	――	――	――	――	――	――	――	――
X15-Y11	低温側	C6B	減肉無し	異常なし	異常なし（粒界なし境界近傍あり）	――	腐食に関与する物質検出されず	主成分 Fe，Ni その他 Cu	１６９	異常なし	異常なし
		C5B	減肉無し	――	――	――	――	――	――	――	異常なし
		C4B	減肉無し	――	異常なし	――	腐食に関与する物質検出されず	――	――	――	異常なし
		C3B	減肉無し	――	異常なし	――	――	――	――	――	異常なし
		C2B	減肉無し	――	――	――	――	――	――	――	――
		C1B	減肉無し	――	――	――	――	――	――	――	――

C6B：C－低温側（H：高温側）
6B－第6管支持板（1B～6B：第1～第6管支持板）

表－1（2／9） 周辺管金属調査の結果

位置	高温側／低温側	部位	外観，拡大観察	S E M	断面ミクロ	最大減肉深さ（減肉体積）	EPMA	X線回折	硬度 (Hv0.5kg)	ミクロ組織	寸法
X45-Y12	低温側	C6B	減肉無し（管支持板板厚下半部のみ調査）	――	異常なし	――	――	――	156	――	異常なし
		C5B	減肉無し	――	――	――	――	――	――	――	――
		C4B	減肉無し	――	――	――	――	――	――	――	――
		C3B	減肉無し	――	――	――	――	――	――	――	――
		C2B	減肉無し	――	――	――	――	――	――	――	――
		C1B	減肉無し	――	――	――	――	――	――	――	――
	高温側	H6B	減肉無し	異常なし	異常なし	――	――	――	――	――	異常なし
X45-Y13	低温側	C6B	100°～150°に腐食減肉有り	・減肉底に微細なクレータが多数有り ・き裂無し	異常なし	0.49 mm（20.1 mm³）	腐食に関与する物質検出されず	主成分 $Ni(Fe,Cr)_2O_4$	181	異常なし	異常なし
		C5B	減肉無し	――	――	――	腐食に関与する物質検出されず	――	――	――	異常なし
		C4B	減肉無し	――	異常なし	――	――	――	――	――	異常なし
		C3B	減肉無し	――	異常なし	――	――	――	――	――	異常なし
		C2B	減肉無し	――	――	――	――	――	――	――	――
		C1B	減肉無し	――	――	――	――	――	――	――	――

C6B：C －低温側（H：高温側）
6B－第6管支持板（1B～6B：第1～第6管支持板）

表－1（3／9） 周辺管金属調査の結果

位置	高温側／低温側	部位	外観，拡大観察	S E M	断面ミクロ	最大減肉深さ（減肉体積）	EPMA	X線回折	硬度 (Hv0.5kg)	ミクロ組織	寸法
X45-Y15	低温側	C6B	20°～135°，180°～290°に指動痕を伴う軽微な減肉有り	・小打痕状損傷有り ・き裂無し	異常なし	0.2 mm（32.6 mm³）	腐食に関与する物質検出されず	主成分 Fe_3O_4 その他 Cu	168	異常なし	異常なし
		C5B	減肉無し	――	――	――	腐食に関与する物質検出されず	――	――	――	異常なし
		C4B	減肉無し	――	異常なし	――	――	――	――	――	異常なし
		C3B	減肉無し	――	異常なし	――	――	――	――	――	異常なし
		C2B	減肉無し	――	――	――	――	――	――	――	――
		C1B	減肉無し	――	――	――	――	――	――	――	――
	高温側	H6B	45°付近に指動痕を伴う軽微な減肉（管支持板板厚下半部のみ調査）	――	・減肉部あり ・き裂無し	――	――	――	155	――	――

C6B：C －低温側（H：高温側）
6B－第6管支持板（1B～6B：第1～第6管支持板）

表－1（4／9） 周辺管金属調査の結果

位置	高温側／低温側	部位	外観，拡大観察	SEM	断面ミクロ	最大減肉深さ（減肉体積）	EPMA	X線回折	硬度（Hv0.5kg）	ミクロ組織	寸法
X45-Y16	低温側	C6B	270°～90°に摺動痕を伴う減肉有り	———	———	0.46 mm（75.1 mm²）	——	——	——	——	異常なし
		C5B	225°～315°に摺動痕を伴う軽微な減肉有り	———	———	0.2 mm（16.2 mm²）	——	——	——	——	——
		C4B	70°～190°に摺動痕を伴う軽微な減肉有り	———	———	0.18 mm（12.0 mm²）	——	——	——	——	——
		C3B	300°～10°に摺動痕を伴う軽微な減肉有り	———	異常なし	0.11 mm（16.5 mm²）	——	——	——	——	——
		C2B	100°～180°に摺動痕を伴う軽微な減肉有り	———	———	0.06 mm（3.3 mm²）	——	——	——	——	——
		C1B	320°～0°に摺動痕を伴う軽微な減肉有り	———	———	0.04 mm（1.7 mm²）	——	——	——	——	——
	高温側	H6B	45°～200°に摺動痕を伴う減肉有り	・小打痕状損傷有り ・き裂無し	異常なし	0.29 mm（70.0 mm²）	腐食に関与する物質検出されず	主成分 Fe_3O_4	170	異常なし	異常なし
		H5B	減肉無し	———	———	——	腐食に関与する物質検出されず	——	——	——	異常なし
		H4B	減肉無し	———	異常なし	——	——	——	——	——	異常なし
		H3B	減肉無し	———	———	——	——	——	——	——	異常なし

（C6B：C －低温側（H：高温側）
6B－第6管支持板（1B～6B：第1～第6管支持板）

表－1（5／9） 周辺管金属調査の結果

位置	高温側／低温側	部位	外観，拡大観察	SEM	断面ミクロ	最大減肉深さ（減肉体積）	EPMA	X線回折	硬度（Hv0.5kg）	ミクロ組織	寸法
X45-Y17	低温側	C6B	・300°～90°に摺動痕を伴う減肉 ・45°付近に開口部有り（引抜時に生じたと考えられる）	・小打痕状損傷有り ・き裂無し	異常なし	1.1mm（309.4 mm²）	腐食に関与する物質検出されず	主成分 Fe_3O_4	168	異常なし	異常なし
		C5B	・90°～290°に摺動痕を伴う減肉 ・185°～210°に腐食減肉有り	異常なし	異常なし	0.52 mm（106.2 mm²）	腐食に関与する物質検出されず	主成分 Fe_3O_4	——	——	異常なし
		C4B	45°～180°に摺動痕を伴う軽微な減肉有り	異常なし	異常なし	0.24 mm（27.3 mm²）	腐食に関与する物質検出されず	——	186	——	異常なし
		C3B	250°～0°に摺動痕を伴う軽微な減肉有り	・小打痕状損傷有り ・き裂無し	異常なし	0.16 mm（17.4 mm²）	腐食に関与する物質検出されず	——	——	——	異常なし
		C2B	90°～135°に摺動痕を伴う軽微な減肉有り	・周方向の摺動痕有り ・き裂無し	異常なし	0.05 mm	——	——	——	——	異常なし
		C1B	減肉無し	———	異常なし	——	——	——	——	——	異常なし
X45-Y18	低温側	C6B	・270°～45°に摺動痕を伴う減肉 ・300°～20°に腐食減肉有り	———	———	0.44 mm（54.2 mm²）	——	——	——	——	異常なし
		C5B	20°～225°に摺動痕を伴う軽微な減肉有り	———	———	0.2 mm（84.8 mm²）	——	——	——	——	——
		C4B	0°～135°に摺動痕を伴う軽微な減肉有り	———	———	0.23 mm（24.6 mm²）	——	——	——	——	——
		C3B	・250°～350°に摺動痕を伴う軽微な減肉 ・260°～300°に腐食減肉有り	———	———	0.60 mm（30.5 mm²）	——	——	——	——	——
		C2B	100°～140°に軽微な腐食減肉有り	———	———	0.1 mm（2.4 mm²）	——	——	——	——	——
		C1B	330°～350°に軽微な腐食減肉有り	———	———	0.1 mm（6.9 mm²）	——	——	——	——	——

（C6B：C －低温側（H：高温側）
6B－第6管支持板（1B～6B：第1～第6管支持板）

表－1（6／9） 周辺管金属調査の結果

位置	高温側／低温側	部位	外観，拡大観察	SEM	断面ミクロ	最大減肉深さ（減肉体積）	EPMA	X線回折	硬度（Hv0.5kg）	ミクロ組織	寸法
X45-Y19	低温側	C6B	・270°～145°に摺動痕を伴う減肉 ・350°～105°に貫通部有り	・周方向の摺動痕有り ・き裂無し	異常なし	貫通有り（注） （約700 mm²）	腐食に関与する物質検出されず	主成分 Ni(Fe,Ni)₂O₄	172	異常無し	異常無し
		C5B	全周に亘り摺動痕を伴う減肉有り	・周方向の摺動痕有り ・き裂無し	異常なし	0.49 mm （207.0mm²）	腐食に関与する物質検出されず	主成分 Fe_3O_4	——	——	異常無し
		C4B	・0°～90°に摺動痕を伴う減肉 ・0°～45°に腐食減肉有り	・減肉部は平坦 ・き裂無し	異常なし	0.35 mm （12.7 mm²）	腐食に関与する物質検出されず	主成分 Fe_3O_4	——	——	異常無し
		C3B	270°付近に腐食減肉有り	異常なし	異常なし	0.49 mm （13.4 mm²）	腐食に関与する物質検出されず	主成分 Ni(Fe,Ni)₂O₄	——	——	異常無し
		C2B	・145°～220°に摺動痕を伴う軽微な減肉有り	——	——	——	——	——	——	——	——
		C1B	減肉無し	——	——	——	——	——	——	——	——
	高温側	H6B	・300°～90°に摺動痕を伴う減肉 ・315°～50°に腐食減肉有り	——	——	0.54 mm （185.0mm²）	——	——	——	——	異常無し
X45-Y20	低温側	C6B	・90°～270°に摺動痕を伴う減肉有り	——	——	1.18 mm （445.6mm²）	——	——	——	——	異常無し
		C5B	・340°～20°に腐食減肉有り	——	——	0.4 mm （13.2 mm²）	——	——	——	——	——
		C4B	・120°～180°に摺動痕を伴う軽微な減肉 ・150°～160°に軽微な腐食減肉有り	——	——	0.22 mm （7.7 mm²）	——	——	——	——	——
		C3B	・280°～0°に摺動痕を伴う軽微な減肉 ・290°～350°に軽微な腐食減肉有り	——	——	0.2 mm （10.5 mm²）	——	——	——	——	——
		C2B	100°～180°に軽微な腐食減肉有り	——	——	0.06 mm （1.8 mm²）	——	——	——	——	——
		C1B	190°～0°に軽微な腐食減肉有り	——	——	0.1 mm （5.6 mm²）	——	——	——	——	——
	高温側	H6B	・270°～135°に摺動痕を伴う減肉 ・60°付近に内面への膨らみ有り	——	——	（注） （約550 mm²）	——	——	——	——	異常無し

（注）推定値

（C6B：C －低温側（H：高温側）
6D－第6管支持板（1D～6D：第1～第6管支持板）

表－1（7／9） 周辺管金属調査の結果

位置	高温側／低温側	部位	外観，拡大観察	SEM	断面ミクロ	最大減肉深さ（減肉体積）	EPMA	X線回折	硬度（Hv0.5kg）	ミクロ組織	寸法
X45-Y21	低温側	C6B	・90°～270°に摺動痕を伴う減肉 ・180°付近に内面への膨らみ貫通部有り	——	異常なし	貫通有り（注） （約650 mm²）	——	——	——	——	異常なし
		C5B	・全周に摺動痕を伴う減肉 ・250°～290°に腐食減肉有り	——	——	0.41 mm （53.8 mm²）	——	——	——	——	——
		C4B	・80°～180°に摺動痕を伴う減肉 ・100°～180°に腐食減肉有り	——	——	0.34 mm （48.5 mm²）	——	——	——	——	——
		C3B	270°～0°に軽微な腐食減肉及び摺動痕を伴う軽微な減肉有り	——	——	0.13 mm （7.4 mm²）	——	——	——	——	——
		C2B	100°～180°に摺動痕を伴う軽微な減肉有り	——	——	0.23 mm （10.6 mm²）	——	——	——	——	——
		C1B	減肉無し	——	——	——	——	——	——	——	——
	高温側	H6B	・270°～170°に摺動痕を伴う減肉 ・60°付近に内面への膨らみ貫通部有り	——	異常なし	貫通有り（注） （約650 mm²）	——	——	——	——	異常なし
X45-Y22	低温側	C6B	・315°～90°に摺動痕を伴う減肉 ・及び腐食減肉有り	——	異常なし	0.33 mm （8.5 mm²）	——	——	——	——	異常なし
		C5B	280°～310°に軽微な腐食減肉有り	——	——	0.2 mm （2.3 mm²）	——	——	——	——	——
		C4B	・180°～270°に腐食減肉及び摺動痕を伴なう減肉有り	——	——	0.35 mm （26.2 mm²）	——	——	——	——	——
		C3B	減肉無し	——	——	——	——	——	——	——	——
		C2B	減肉無し	——	——	——	——	——	——	——	——
		C1B	減肉無し	——	——	——	——	——	——	——	——
	高温側	H6B	・310°～70°に摺動痕を伴う減肉及び腐食減肉有り	——	異常なし	0.47 mm （31.8 mm²）	——	——	——	——	異常なし

（注）推定値

（C6B：C －低温側（H：高温側）
6D－第6管支持板（1D～6D：第1～第6管支持板）

表－1（8／9） 周辺管金属調査の結果

位置	高温側／低温側	部位	外観，拡大観察	S E M	断面ミクロ	最大減肉深さ（減肉体積）	EPMA	X線回折	硬度（Hv0.5kg）	ミクロ組織	寸法
X45-Y23	低温側	C6B	減肉無し	異常なし	異常なし	——	——	——	——	——	異常なし
		C5B	減肉無し	——	——	——	——	——	——	——	——
		C4B	減肉無し	——	——	——	——	——	——	——	——
		C3B	120°～150°に軽微な腐食減肉有り	——	——	0.09 mm（1.6 mm²）	——	——	——	——	——
		C2B	減肉無し	——	——	——	——	——	——	——	——
		C1B	減肉無し	——	——	——	——	——	——	——	——
X46-Y14	低温側	C6B	減肉無し	異常なし	異常なし	——	——	——	——	——	異常なし
X46-Y19	低温側	C6B	・315°～170°に摺動痕を伴う減肉 ・90°付近に内面への膨らみ貫通部有り	——	——	貫通有り（注）（約650 mm²）	——	——	——	——	異常なし
	高温側	H6B	・315°～90°に摺動痕を伴う減肉 ・340°～20°に腐食減肉有り	——	——	0.83 mm（95 mm²）	——	——	——	——	異常なし
X46-Y21	低温側	C6B	・315°～140°に摺動痕を伴う減肉 ・90°付近に内面への膨らみ有り	異常なし	異常なし	1.1 mm（519 mm²）	腐食に関与する物質検出されず	主成分 $Ni(Fe,Ni)_2O_4$	185	異常無し	異常なし
		C5B	・135°～270°に摺動痕を伴う減肉 ・190°～250°に腐食減肉有り	異常なし	異常なし	0.55 mm（129 mm²）	腐食に関与する物質検出されず	主成分 $Ni(Fe,Ni)_2O_4$	——	——	異常なし
		C4B	・120°～230°に摺動痕を伴う減肉 ・120°～185°に腐食減肉有り	異常なし	異常なし	0.30 mm（66.5 mm²）	腐食に関与する物質検出されず	主成分 Fe_3O_4	——	——	異常なし

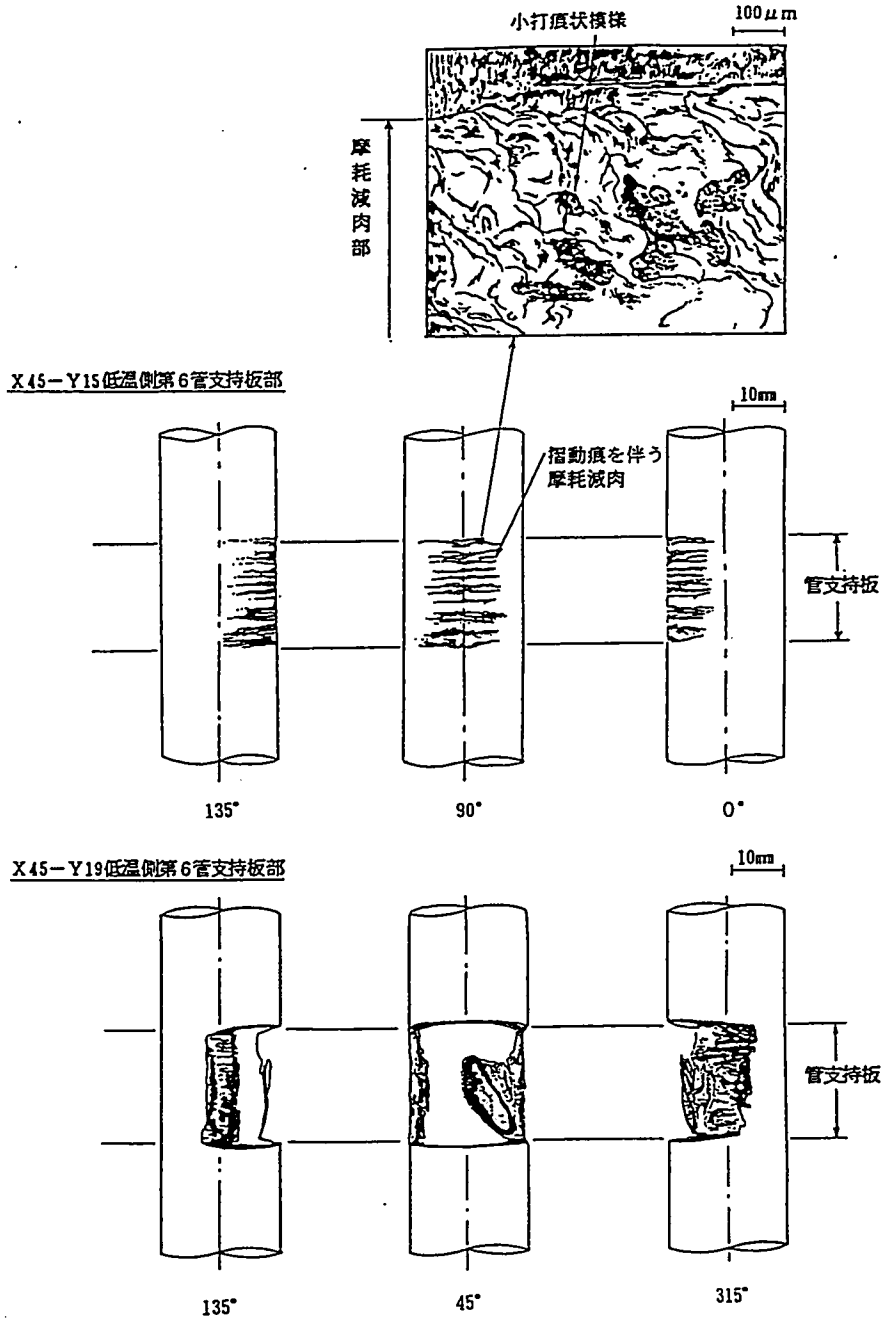
（注）推定値

{C6B：C －低温側（H：高温側）
6B－第6管支持板（1B～6B：第1～第6管支持板）

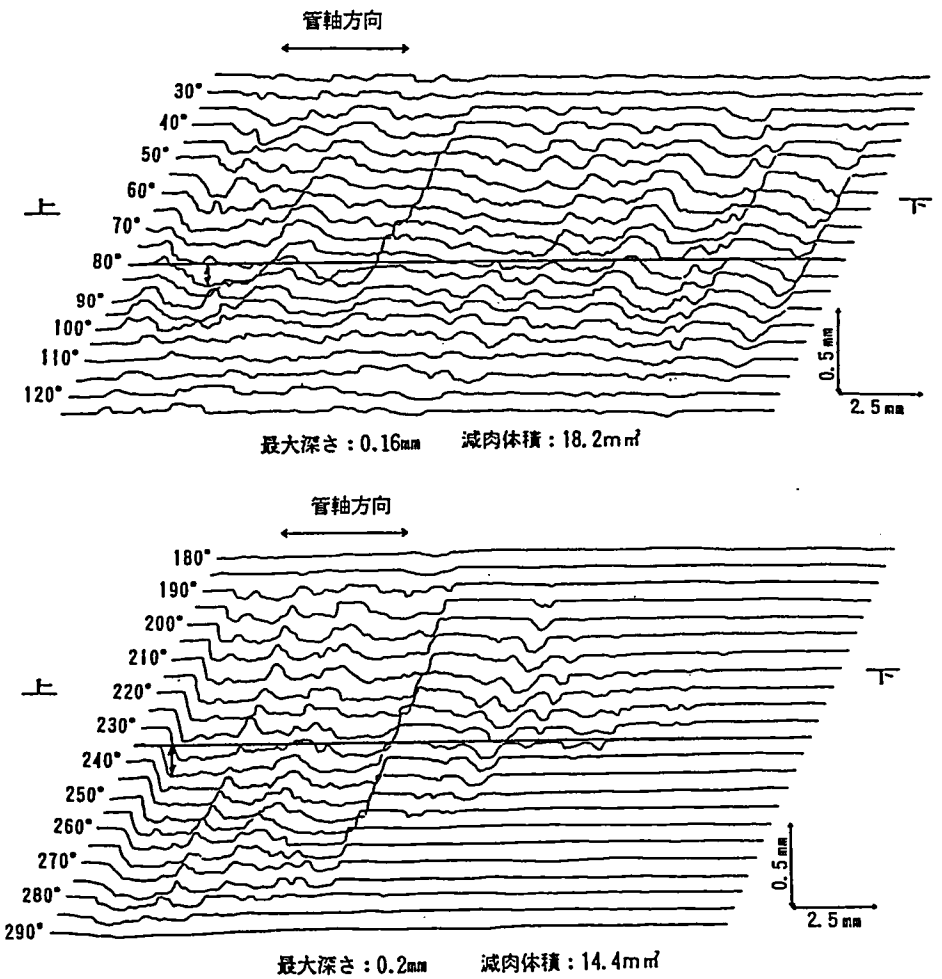
表－1（9／9） 周辺管金属調査の結果

位置	高温側／低温側	部位	外観，拡大観察	S E M	断面ミクロ	最大減肉深さ（減肉体積）	EPMA	X線回折	硬度（Hv0.5kg）	ミクロ組織	寸法
X46-Y25	高温側	H6B	減肉無し	——	——	——	——	——	——	——	——
		H5B	減肉無し	——	——	——	——	——	——	——	——
		H4B	減肉無し	——	——	——	——	——	——	——	——
		H3B	270°～30°に腐食減肉有り	——	——	0.38 mm	腐食に関与する物質検出されず	主成分 Fe_3O_4，その他 Cu	——	——	異常なし
		H2B	減肉無し	——	——	——	——	——	——	——	——
		H1B	減肉無し	——	——	——	——	——	——	——	——

{C6B：C －低温側（H：高温側）
6B－第6管支持板（1B～6B：第1～第6管支持板）

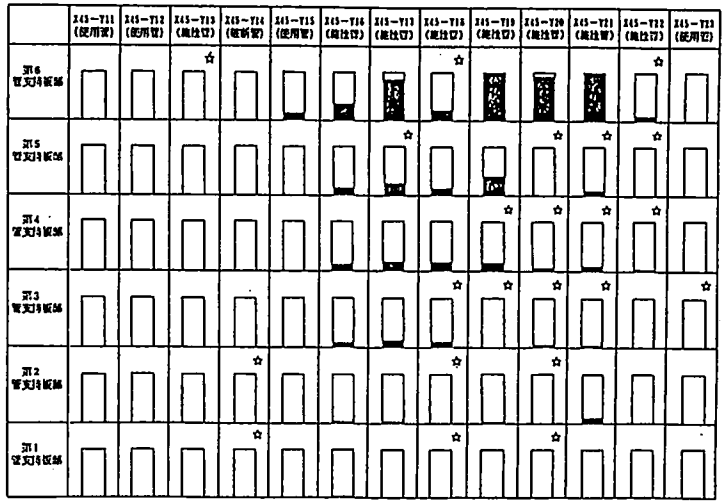


図－2　低温側第6管支持板部の摩耗減肉状況観察結果

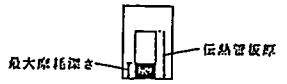


図－3　減肉部形状〔 X45－Y15 低温側第6管支持板部 〕

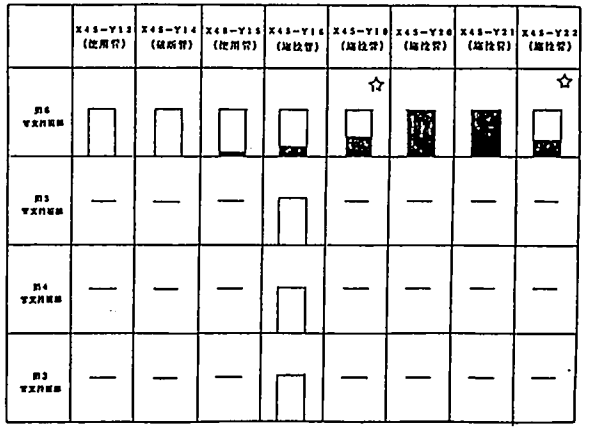
表－2（1／3）　管支持板部減肉状況（X45列低温側）



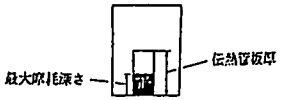
☆は腐食減肉の認められたものを示し，その腐食深さは表示していない。



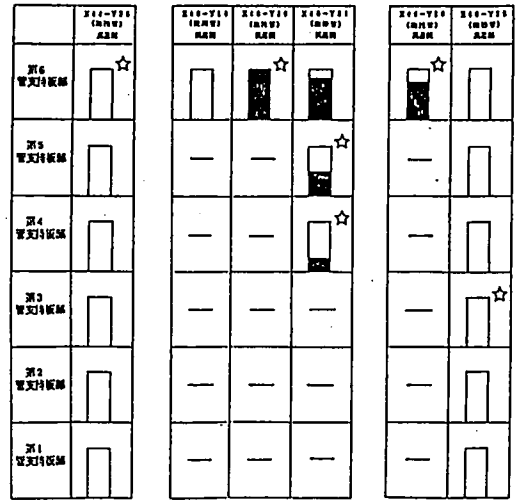
表－2（2／3）　管支持板部減肉状況（X45列高温側）



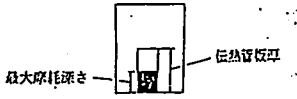
☆は腐食減肉の認められたものを示し，その腐食深さは表示していない。



表－2（3／3）　管支持板部減肉状況（X44列及びX46列）



☆は腐食減肉の認められたものを示し，その腐食深さは表示していない。



表－3　管材成分分析結果

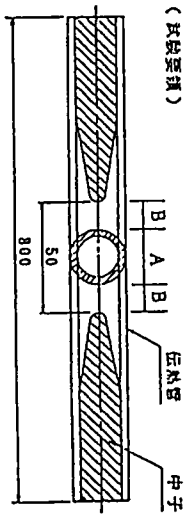
分析サンプル位置		化学成分（%）										
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Cu	Aℓ	Ti	Ni
X45－Y11 低温側	分析結果	0.022	0.22	0.20	0.013	<0.005	14.7	8.58	0.19	0.15	0.26	76.0
	ミルシート値(注)	0.012～0.027	0.19～0.25	0.19～0.24	—	0.006～0.010	14.80～16.40	6.80～8.65	0.01～0.18	—	—	74.45～77.65
X45－Y13 低温側	分析結果	0.017	0.28	0.25	0.012	<0.005	16.3	8.76	0.18	0.18	0.29	73.6
	ミルシート値(注)	0.012～0.050	0.15～0.30	0.17～0.30	—	0.005～0.009	15.15～16.50	6.80～8.50	0.01～0.29	—	—	74.50～77.60
X45－Y15 低温側	分析結果	0.016	0.28	0.25	0.013	<0.005	16.3	8.68	0.18	0.18	0.29	73.8
	ミルシート値(注)	0.012～0.017	0.19～0.24	0.20～0.25	—	0.006	15.20～16.55	6.80～8.70	0.01～0.19	—	—	74.00～77.60
X45－Y16 高温側	分析結果	0.017	0.24	0.23	0.012	<0.005	15.1	8.39	0.19	0.21	0.35	75.8
	ミルシート値(注)	0.019～0.032	0.19～0.24	0.23～0.34	—	0.006～0.010	15.30～16.50	8.70～7.85	0.01～0.19	—	—	73.85～76.20
X45－Y17 低温側	分析結果	0.016	0.24	0.21	0.011	<0.005	15.9	8.85	0.14	0.11	0.25	75.1
	ミルシート値(注)	0.012～0.050	0.19～0.24	0.17～0.29	—	0.005～0.010	15.20～15.65	6.80～8.75	0.01～0.19	—	—	75.05～77.60
X45－Y19 低温側	分析結果	0.016	0.24	0.21	0.011	<0.005	16.1	8.51	0.13	0.11	0.25	74.1
	ミルシート値(注)	0.017～0.036	0.22～0.24	0.19～0.21	—	0.006～0.007	15.40～16.25	7.26～8.62	0.12～0.14	—	—	74.45～76.80
X46－Y21 低温側	分析結果	0.026	0.30	0.27	0.011	<0.005	16.3	8.19	0.15	0.18	0.25	73.9
	ミルシート値(注)	0.028～0.042	0.24～0.30	0.17～0.26	—	0.006～0.009	14.95～16.35	7.30～8.25	0.11～0.21	—	—	74.95～76.50
規格値 (ASME SB163 UNS No. 6600)		≦ 0.15	≦ 0.5	≦ 1.0	—	≦ 0.015	14.0～17.0	6.0～10.0	≦ 0.5	—	—	≧ 72.0

（注）伝熱管のヒート数は各Y列で2～13種あり，当該管はこのヒートのいずれであるか不明であるため範囲を記載した。

表－4　伝熱管の引張試験結果

供試管		試験温度 (℃)	0.2%耐力 (kg/mm²)	引張強さ (kg/mm²)	伸び (%)	破断位置
X45－Y11 低温側	試験結果	18.0	37.1	69.8	35.7	A
	(注1) ミルシート値	—	26.4～31.1	64.8～67.2	46～50	—
X45－Y13 低温側	試験結果	18.0	37.8	69.2	40.5	A
	(注1) ミルシート値	—	26.5～29.9	65.5～70.2	46～52	—
X45－Y15 低温側	試験結果	18.0	30.4	71.5	— (注2)	— (注2)
	(注1) ミルシート値	—	26.7～27.2	65.8～67.9	47～50	—
X45－Y16 高温側	試験結果	18.0	32.5	69.6	43.2	A
	(注1) ミルシート値	—	27.4～29.7	63.7～71.4	48～52	—
X45－Y17 低温側	試験結果	18.0	43.4	68.8	37.0	A
	(注1) ミルシート値	—	27.4～29.7	65.4～69.3	47～52	—
X45－Y19 低温側	試験結果	21	33.2	68.4	42.7	A
	(注1) ミルシート値	—	27.3～27.7	64.2～65.0	48～50	—
X46－Y21 低温側	試験結果	21	37.8	71.9	42.2	A
	(注1) ミルシート値	—	26.3～28.4	67.6～70.8	48～50	—
規格値			≧ 24.6	≧ 56.2	≧ 30	—

（注1）伝熱管のヒート数は各Y列で2～13種あり，当該管はこのヒートのいずれである か不明であるため範囲を記載した。
（注2）試験中（0.2%耐力測定後）に片方の中子が移動し，実質上のゲージ間が変形したため，計測不能。



表−5(1/2)　硬さ測定結果

	測定サンプル	ビッカース硬さ(Hv 0.5Kg) 最小	最大	平均	引抜き力の最大値 (ton)
1次側からの抜管サンプル	X45−Y11 低温側	163	176	169	3.6
	X45−Y13 低温側	179	184	181	3.8
	X45−Y15 低温側	157	176	168	3.6
	X45−Y16 高温側	165	177	170	3.1
	X45−Y17 低温側	204	243	223	3.3
		181	195	186	
	X45−Y19 低温側	167	179	172	2.8
	X46−Y21 低温側	177	191	185	2.7
	X45−Y14 低温側（破断管）	153	165	161	2.8
支持板にもたれた抜管サンプル	X45−Y12 低温側	152	162	156	3.7
	X45−Y15 低温側	152	160	155	

表−5(2/2)　各プラントの最近の抜管調査結果・硬さ測定結果

プラント	点検	SG	位置 X	Y	硬さ(Hv)	引抜き力の最大値 (ton)
美浜2号	#13	B	40	15	237	5.1
		B	35	17	233	5.1
美浜3号	#11	B	39	11	200	4.9
		B	48	5	200	—
高浜1号	#11	B	76	18	190	5.1
		B	59	34	186	4.9
高浜2号	#11	C	64	20	183	4.3
		C	51	36	176	3.2
大飯1号	#9	C	41	18	201	1.8
		C	46	20	181	0.5
大飯2号	#7	C	22	23	178	4.9
		C	31	32	172	3.8

表−6　フェライトスコープ測定結果

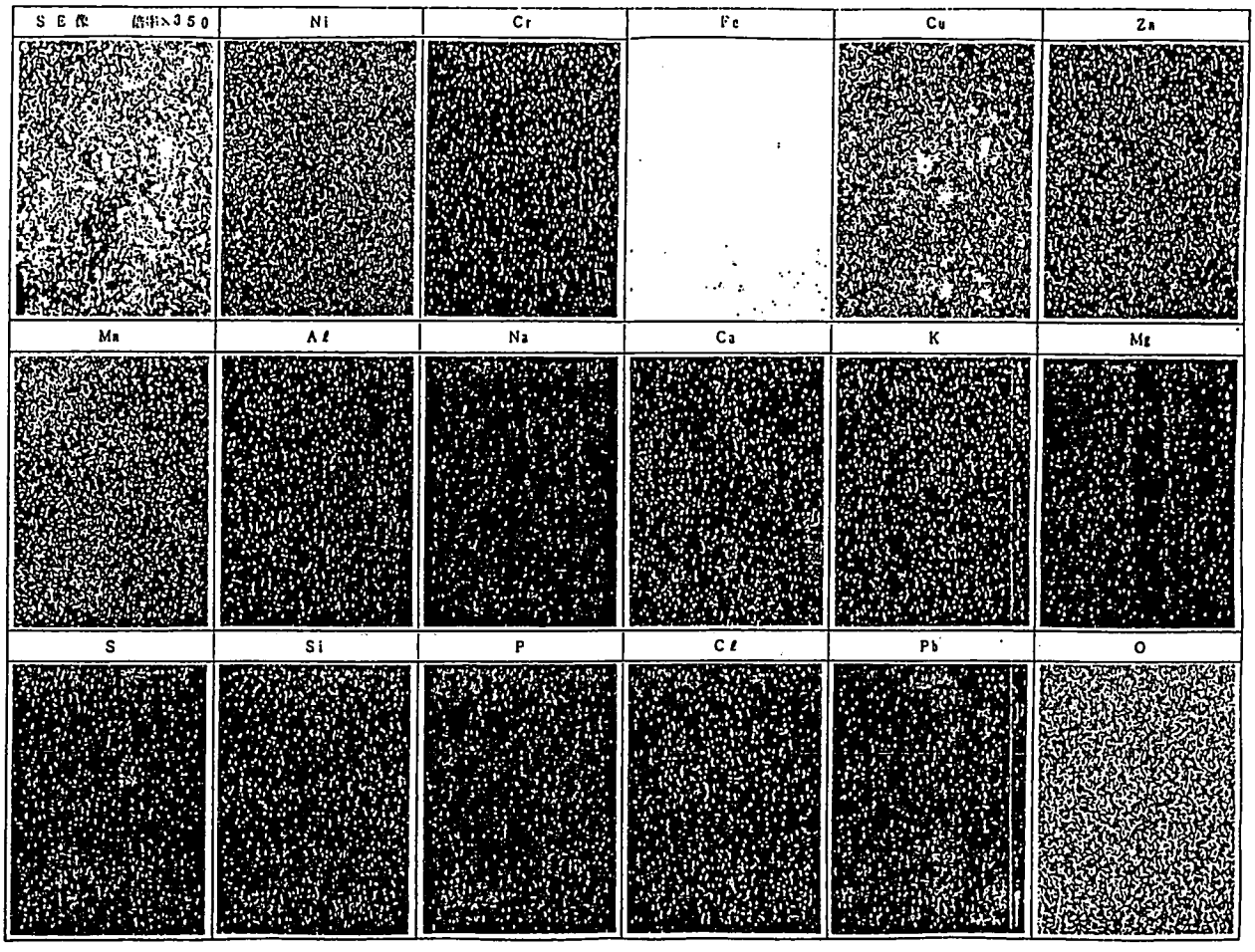
位置	フェライトスコープ強度(%)
X45−Y11 低温側	0.07
X45−Y13 低温側	0.06
X45−Y15 低温側	0.07
X45−Y16 高温側	0.07
X45−Y17 低温側	0.06
X45−Y19 低温側	0.07
X46−Y21 低温側	0.10

表－7（1/2）　X線回折分析結果

分析対象位置		主成分	その他の成分	備考
X45－Y11 低温側	第6管支持板部 90° （管支持板中央部）	Fe_3O_4	Cu	母材成分ピーク有り
X45－Y13 低温側	第6管支持板部 135° （減肉部中央）	$Ni(Fe, Cr)_2O_4$	－	母材成分ピーク有り
X45－Y15 低温側	第6管支持板部 60° （管支持板部中央，減肉部）	Fe_3O_4	Cu	母材成分ピーク有り
	第6管支持板部 225° （管支持板部中央，減肉部）	Fe_3O_4	－	母材成分ピーク有り
X45－Y16 高温側	第6管支持板部 90° （管支持板部中央，減肉部）	Fe_3O_4	－	母材成分ピーク有り
X45－Y17 低温側	第6管支持板部 45° （管支持板部中央，減肉部）	Fe_3O_4	－	母材成分ピーク有り
	第5管支持板部 150° （管支持板部中央，減肉部）	Fe_3O_4	－	母材成分ピーク有り
	第5管支持板部 200° （減肉中央部）	Fe_3O_4	－	母材成分ピーク有り

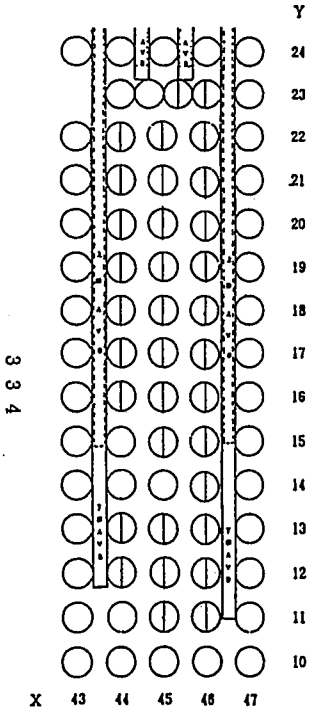
表－7（2/2）　X線回折分析結果

分析対象位置		主成分	その他の成分	備考
X45－Y19 低温側	第6管支持板部 30° （減肉部）	$Ni(Fe, Ni)_2O_4$	Silicate Hydroxide	母材成分ピーク有り
	第5管支持板部 315° （減肉部）	Fe_3O_4	Silicate Hydroxide	母材成分ピーク有り
	第4管支持板部 45° （腐食減肉部）	Fe_3O_4	－	母材成分ピーク有り
	第3管支持板部 280° （腐食減肉部）	$Ni(Fe, Ni)_2O_4$	－	母材成分ピーク有り
X46－Y21 低温側	第6管支持板部 45° （減肉部）	$Ni(Fe, Ni)_2O_4$	Silicate Hydroxide	母材成分ピーク有り
	第5管支持板部 225° （腐食減肉部）	$Ni(Fe, Ni)_2O_4$	Silicate Hydroxide	母材成分ピーク有り
	第4管支持板部 150° （腐食減肉部）	Fe_3O_4	－	母材成分ピーク有り
X44－Y25 高温側	第6管支持板部 45° （減肉部）	Fe_3O_4	Cu	母材成分ピーク有り
X46－Y25 高温側	第3管支持板部 315° （減肉部）	Fe_3O_4	Cu	母材成分ピーク有り



図－4　EPMA面分析結果　A蒸気発生器　X45－Y15　低温側　第6管支持板減肉部（70°）

表－8　X44列及びX46列のY11～Y22のAVBとの摩耗減肉状況



①：調査対象

伝熱管

Y列	X44列（X43列側）				X46列（X47列側）			
	1S	2S	3S	4S	1S	2S	3S	4S
23	○	○	○	○	○	○	○	○
22	○	△	△	○	▲	▲	△	△
21	○	○	○	○	▲	▲	▲	▲
20	○	○	○	○	▲	▲	△	△
19	○	○	○	○	▲	△	▲	△
18	△	○	○	○	○	○	○	△
17	○	○	○	○	△	▲	▲	○
16	○	○	○	○	△	△	△	○
15	－	－		－	△	△		○
14	－			－	○			○
13	○			○	○			○
12	○			○	○			○
11	－			－	○			○

AVB

X43－X44（X44列側）				X46－X47（X46列側）			
1S	2S	3S	4S	1S	2S	3S	4S
○	○	○	○	○	○	○	○
○	○	○	○	▲	△	○	○
○	○	○	○	△	△	▲	▲
○	○	○	○	▲	▲	▲	○
○	○	○	○	△	○	△	○
○	○	○	○	○	○	○	○
○	○	○	○	○	△	△	○
○	○	○	○	○	○	○	○
○			○	○			○
○			○	○			○
○			○	○			○
○			○	○			○
				○			○

○　減肉なし
△　軽微な減肉あり
▲　減肉あり
－　調査対象外

表－9　周辺管の調査結果

位置	高温側／低温側	部位	外観，拡大観察	最大減肉深さ（減肉体積）	寸法
X44－Y11	低温側	C6B	減肉無し	———	———
X44－Y12		C6B	減肉無し	———	———
X44－Y13		C6B	減肉無し	———	———
X44－Y16		C6B	140°～180°に軽微な腐食減肉有り	0.11mm (3.1mm³)	———
X44－Y17		C6B	減肉無し	———	———
X44－Y18		C6B	・320°～70°に摺動痕を伴う減肉 ・330°～70°に腐食減肉有り	0.57mm (112.5mm³)	———
X44－Y19		C6B	減肉無し	———	———
X44－Y20		C6B	60°～150°に摺動痕を伴う減肉	0.29mm (34.6mm³)	———
X44－Y21		C6B	・90°～210°に摺動痕を伴う減肉 ・90°～200°に腐食減肉 ・165°付近に貫通部有り	貫通有り（注） (約128mm³)	異常なし
X44－Y22		C6B	70°～120°に軽微な腐食減肉有り	0.26mm (6.7mm³)	———

（注）推定値　｛C6B：C　－低温側（II：高温側）
　　6B－第6管支持板（1B～6B：第1～第6管支持板）

表－10(1/3)　X44列のU字部外観観察結果

位置 Y ＼	X 43 側				X 45 側			
	1S	2S	3S	4S	1S	2S	3S	4S
24	○	○	○	○	○	○	○	○
25	○	○	○	○	○	○	○	○
26	○	○	○	○	○	○	○	○
27	○	○	△	○	○	△	○	○
28	○	△	△	○	○	△	○	○
29	△	△	○	○	○	○	○	○
30	○	○	○	○	○	○	○	○
31	○	○	○	○	○	○	○	○
32	○	○	○	○	○	○	○	○
33	○	○	○	○	○	○	○	○
34	○	○	○	○	○	○	○	○
35	○	○	○	○	○	○	○	○
36	○	○	○	○	○	○	○	○
37	○	○	○	○	○	○	○	○
38	○	○	○	○	○	○	○	○
39	○	○	○	○	○	○	○	○
40	○	○	○	○	○	○	○	○
41	○	○	○	○	○	○	○	○
42	○	○	○	○	○	○	○	○
43	○	○	○	○	○	○	○	○
44	○	○	○	○	○	○	○	○
45	○	○	○	○	○	○	○	○

備考　○：異常なし　△：減肉あり（軽微）

表－10(2/3)　X45列のU字部外観観察結果

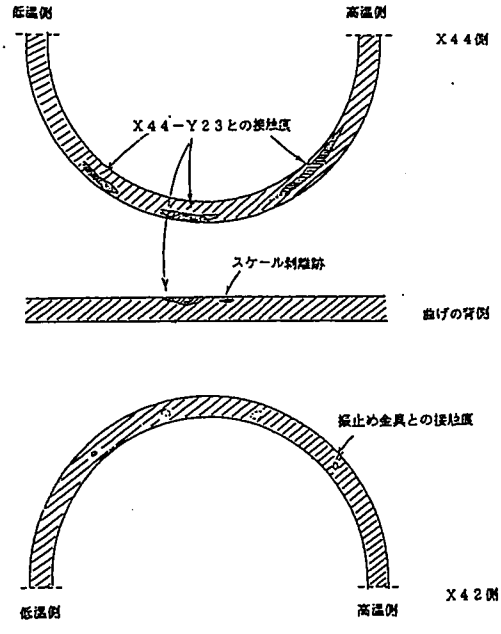
位置 Y ＼	X 44 側				X 46 側			
	1S	2S	3S	4S	1S	2S	3S	4S
24	○	○	○	○	○	○	○	○
25	○	○	○	○	○	○	○	○
26	○	○	○	○	○	○	○	○
27	○	○	○	○	○	○	○	○
28	○	△	○	○	○	○	○	○
29	○	○	○	△	△	△	○	○
30	△	○	○	○	○	○	○	○
31	○	○	○	○	○	○	○	○
32	○	○	○	○	○	○	○	○
33	○	○	○	○	○	○	○	○
34	○	○	○	○	○	○	○	○
35	○	○	○	○	△	○	○	○
36	○	○	○	○	○	○	△	○
37	○	○	○	○	△	△	△	○
38	○	△	○	○	△	○	○	○
39	△	○	○	○	△	○	○	○
40	△	○	○	○	△	○	○	○
41	○	○	○	○	△	○	○	○
42	○	○	○	○	△	○	○	○
43	○	○	○	○	△	○	○	△
44	○	○	○	○	○	○	○	○
45	○	○	△	○	○	○	○	○

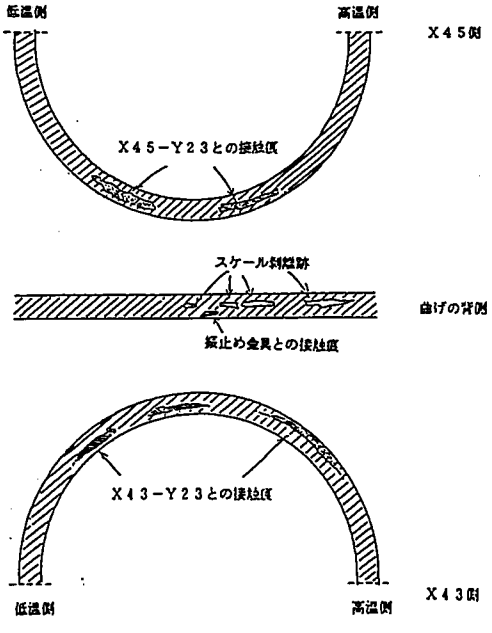
備考　○：異常なし　△：減肉あり（軽微）

表－10(3/3)　X46列のU字部外観観察結果

位置 / Y	X 45 側				X 47 側			
	1S	2S	3S	4S	1S	2S	3S	4S
24	○	○	○	○	○	○	△	○
25	○	○	○	○	○	○	○	○
26	○	○	○	○	○	○	○	○
27	○	○	○	○	○	△	○	○
28	○	○	○	○	○	○	○	○
29	△	△	○	○	○	○	○	○
30	○	○	○	○	○	△	○	△
31	○	○	○	○	○	○	○	○
32	○	△	○	○	○	○	○	○
33	△	○	○	○	○	○	○	○
34	○	○	○	○	○	○	○	○
35	○	○	○	○	○	△	○	○
36	△	○	○	○	○	△	○	○
37	△	△	○	○	△	○	○	○
38	△	○	○	○	○	○	○	○
39	○	○	○	○	○	○	○	○
40	△	○	○	○	△	○	○	○
41	○	○	○	○	○	○	○	○
42	△	○	○	○	○	○	○	○
43	△	△	○	○	○	○	○	○
44	△	△	○	○	○	○	○	○
45	△	△	○	○	△	△	△	○

備　考　○：異常なし　△：減肉あり（軽微）





（注）掘止め金具との接触痕には減肉は認められない

図－5(1/3)　伝熱管U字部の外観状況（X43－Y23）

図－5(2/3)　伝熱管U字部の外観状況（X44－Y23）

図－5 (3/3) 伝熱管U字部の外観状況 (X45－Y23)

図－6 U字部のそり状況調査結果

周 辺 管 の 渦 電 流 探 傷 検 査 結 果

周辺管ＥＣＴ実施範囲

検査対象管

分　　類	本 数	位 置	備　　考
周辺使用管	517 本	X37～49-Y1～45 ‡1	
周辺施栓管	62 本		
その他施栓管	12 本	上 記 範 囲 外	第５管支持板部減肉管　８本 第６管支持板部減肉管　２本‡2 ＡＶＢ部摩耗減肉管　３本

‡1：スリーブ付メカニカルプラグ施工管３本を除く
‡2：内１本は第５管支持板部減肉管と重複

検査の種類と対象部位

ＥＣＴの種類	検査対象部位
ＤＦ－ＥＣＴ	全　　長
８×１　ＥＣＴ	直管部　＊
３ｆ－ＤＦ－ＥＣＴ	付着物信号部位　（X46-Y15）

＊：管板部スリーブ施工管（X38-Y14，X40-Y14，X44-Y15，X44-Y17）４本の高温側を除く

周辺使用管ＥＣＴ検査結果一覧表

No.	位置		部位	評価
	X	Y		
1	44	15	C6B	新規検出（6B上方変形信号指示）
2	45	15	C6B	新規検出（6B上方及び上面近傍変形信号指示）

周辺施栓管ＥＣＴ検査結果一覧表（管支持板部及びＡＶＢ部）

No.	位置		部位	評価
	X	Y		
1	37	15	H0B	—
2	37	16	H0B	—
3	37	17	H0B	—
4	37	44	H4B	—
			H3B	—
			H1B	—
5	38	2	H2B	—
6	38	15	H0B	—
7	38	16	H0B	—
8	38	33	H2B	—
9	38	44	H3B	—
			H1B	—
10	39	15	H0B	—
11	39	16	H0B	—
12	39	17	H0B	—
13	39	44	H2B	—
14	39	45	C5B	—
15	40	15	H0B	—
16	40	16	H0B	—
17	40	17	H0B	—
18	40	38	UB（3S）	—
19	40	44	C4B	—
20	41	16	H0B	—
21	41	19	H0B	—
22	42	4	C5B	—
23	42	16	H0B	—
24	42	17	H0B	—

－：信号指示変化なし

周辺施栓管ＥＣＴ検査結果一覧表（管支持板部及びＡＶＢ部）

No.	位置 X	位置 Y	部位	評価
25	42	41	H1B	——
26	43	16	C4B	——
27	43	41	C2B	——
28	44	16	C5B	——
29	44	18	C3B	——
			C6B	——
			H6B	——
30	44	20	C4B	——
			C6B	新規検出
			H6B	——
31	44	21	C6B	——
32	44	25	H6B	——
33	44	45	H3B	——
			H2B	——
34	45	13	C6B	——
35	45	16	C6B	信号変化あり
			H6B	新規検出
36	45	17	C5B	——
			C6B	信号変化あり
			H6B	新規検出
37	45	18	C3B	——
			C6B	信号変化あり
			H6B	——
38	45	19	C3B	新規検出
			C5B	新規検出
			C6B	プローブ不通過により検査不可
			H6B	信号変化あり

－：信号指示変化なし

周辺施栓管ＥＣＴ検査結果一覧表（管支持板部及びＡＶＢ部）

No.	位置 X	位置 Y	部位	評価
39	45	20	C5B	——
			C6B	新規検出
			H6B	プローブ不通過により検査不可
			H5B	——
40	45	21	C4B	——
			C5B	——
			C6B	プローブ不通過により検査不可
			H6B	プローブ不通過により検査不可
41	45	22	C4B	——
			H6B	——
42	46	15	H0B	付着物信号と重複のため深さ評価不可
43	46	16	H6B	——
44	46	17	C3B	——
			C4B	——
			C5B	——
			C6B	——
			H6B	——
			UB（2S）	新規検出
			UB（3S）	新規検出
45	46	18	C3B	——
46	46	19	C3B	新規検出
			C4B	新規検出
			C5B	新規検出
			C6B	プローブ不通過により検査不可
			H6B	——
			UB（3S）	今回新規検出

－：信号指示変化なし

周辺施栓管ＥＣＴ検査結果一覧表（管支持板部及びＡＶＢ部）

No.	位置 X	位置 Y	部位	評価
47	46	20	C1B	―
			C3B	新規検出
			C4B	新規検出
			C6B	新規検出
			UB（1S）	新規検出
			UB（2S）	新規検出
48	46	21	C4B	―
			C5B	信号変化あり
			C6B	プローブ不通過により検査不可
			H6B	新規検出
			UB（1S）	新規検出
			UB（2S）	新規検出
			UB（3S）	新規検出
			UB（4S）	新規検出
49	46	22	H6B	―
			UB（1S）	新規検出
			UB（2S）	新規検出
50	46	25	H3B	―
51	47	11	C5B	―
52	48	17	H0B	変形信号と重複のため深さ評価不可
53	48	18	H1B	―
54	48	39	H3B	―
55	49	10	C6B	―
56	49	18	C6B	―
57	49	42	C4B	―
58	49	44	H1B	―
59	49	45	H2B	―

－：信号指示変化なし

周辺施栓管ＥＣＴ検査結果一覧表（管板部）

No.	位置 X	位置 Y	部位	評価
1	38	17	拡管境界部	―
2	38	35	クレビス部	―
3	47	41	クレビス部	―

－：信号指示変化なし

その他施栓管ＥＣＴ検査結果一覧表（管支持板部及びＡＶＢ部）

No.	位置		部位	評価
	X	Y		
1	2	10	H5B	—
			H3B	—
2	4	16	C5B	—
3	21	20	C5B	—
4	26	17	C5B	—
5	28	34	H5B	—
6	50	37	UB（3S）	—
7	50	40	UB（2S）	—
			UB（3S）	—
8	53.	30	C5B	—
9	56	43	C6B	—
			H5B	—
			H3B	—
			H2B	—
			H1B	—
10	61	41	UB（3S）	—
11	62	8	C6B	—
12	63	4	C5B	—

－：信号指示変化なし

小型テレビカメラによる周辺施栓管の管内面観察結果

1. 目的

破断管の周辺施栓管の状況調査のため行った抜栓時に水漏れの認められた伝熱管及びＥＣＴでプローブ不通過が認められた伝熱管の内面を小型テレビカメラにより調査する。

2. 調査対象

伝熱管６本（対象管を表－１に示す。）

3. 調査方法

小型テレビカメラを管内面に挿入し、内面の状況を調査する。

4. 調査結果

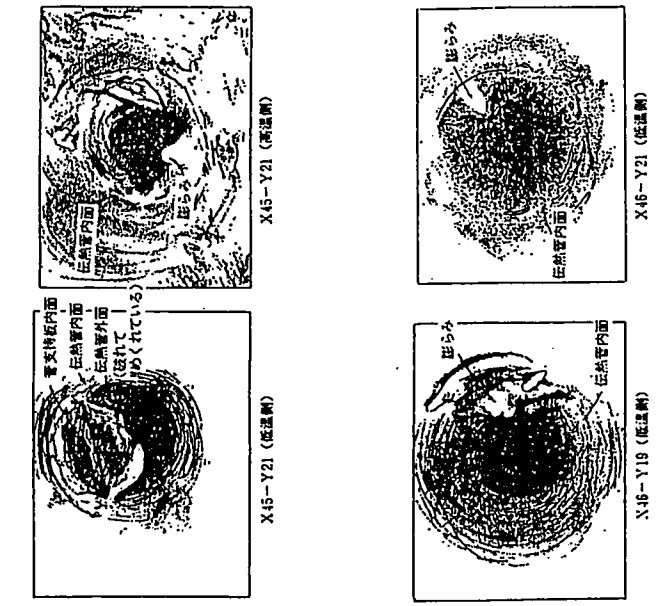
結果は表－１に示す通り、６本の伝熱管全数の内面に膨らみが認められた。

膨らみの状況を図－１に示す。

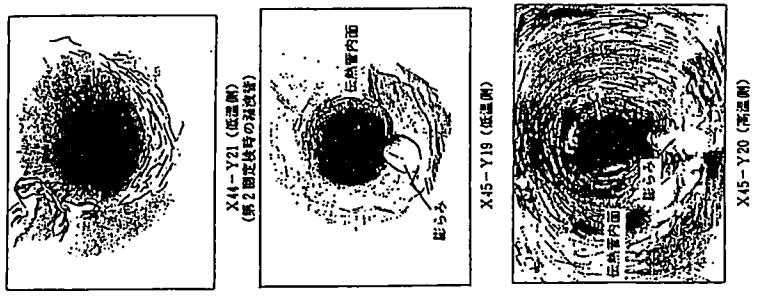
表－1　周辺施栓管調査結果一覧

No.	位置		小型テレビカメラ内面観察結果		(参考) 抜栓時水漏れ有無等		
					抜栓時		プローブ
	X	Y	高温側第6管支持板部	低温側第6管支持板部	高温側	低温側	不通過
1	44	21	○	内面膨らみ有り	水漏れ有り	水漏れ有り	○
2	45	19	○	内面膨らみ有り	水漏れ有り	水漏れ有り	不通過
3	45	20	内面膨らみ有り	○	水漏れ有り	水漏れ有り	不通過
4	45	21	内面膨らみ有り	内面膨らみ有り	水漏れ有り	水漏れ有り	不通過
5	46	19	○	内面膨らみ有り	水漏れ有り	水漏れ有り	不通過
6	46	21	○	内面膨らみ有り	○	○	不通過

○：異常なし



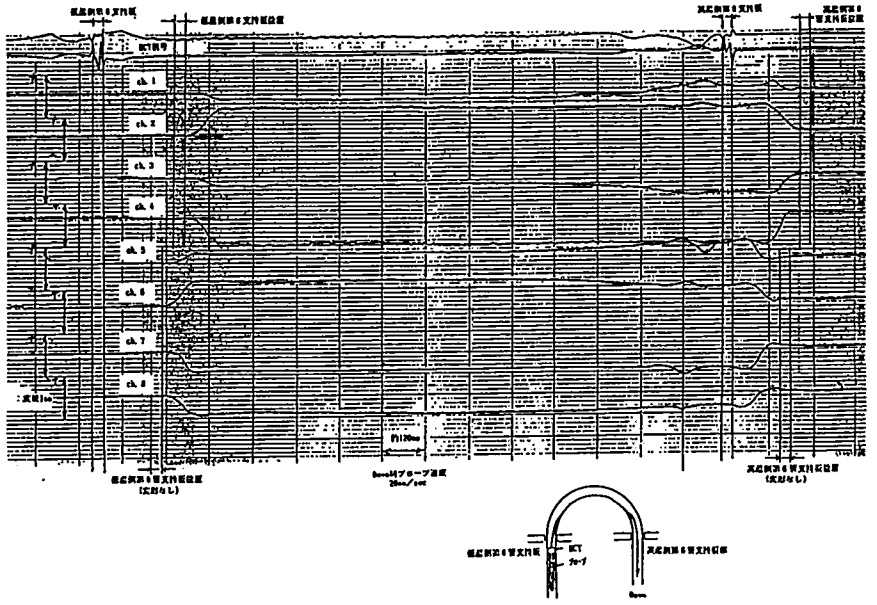
図－1（2／2）　内面膨らみの状況



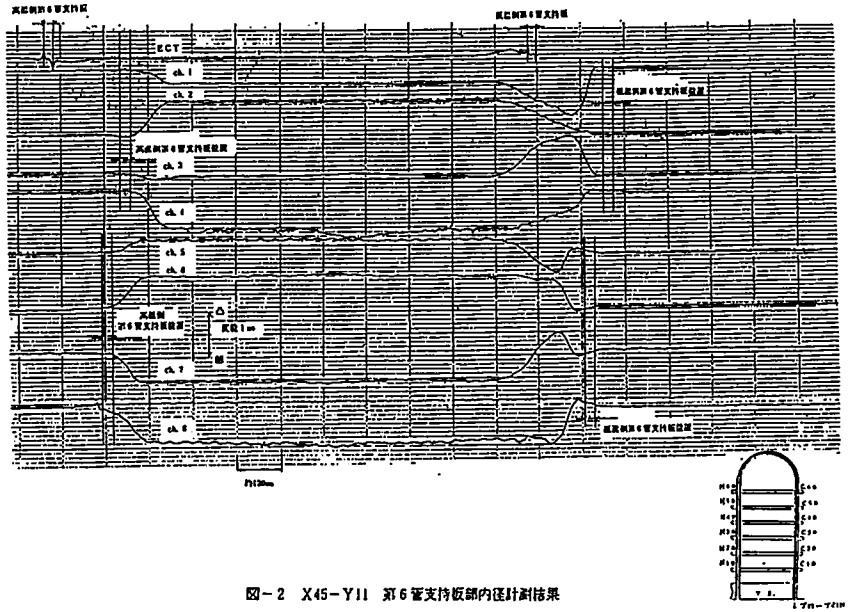
図－1（1／2）　内面膨らみ管の状況

周辺管の内径計測データ

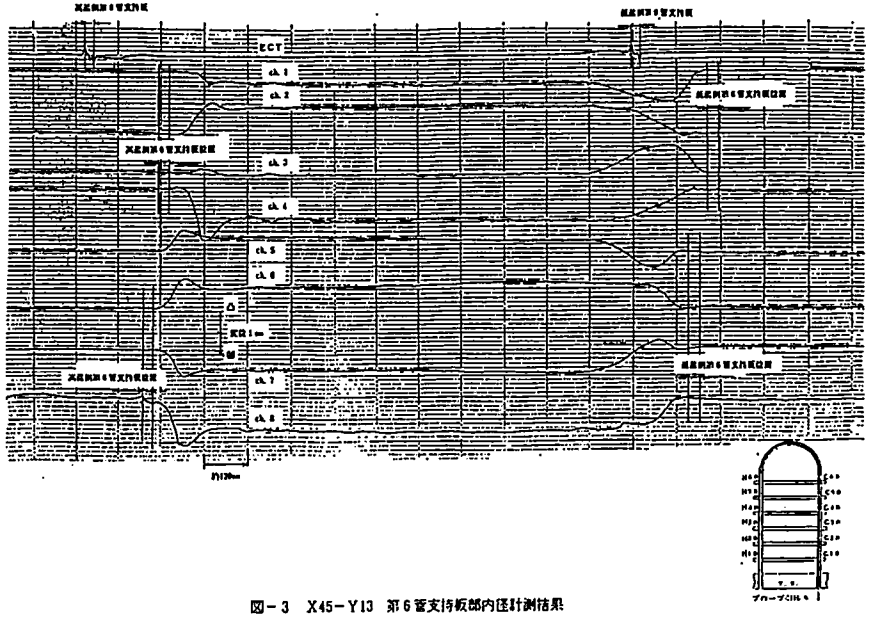
X44－Y14	第6管支持板部	図－1
X45－Y11	第6管支持板部	図－2
X45－Y13	第6管支持板部	図－3
X45－Y15	第6管支持板部	図－4
X45－Y16	第6管支持板部	図－5
X45－Y17	第6管支持板部	図－6



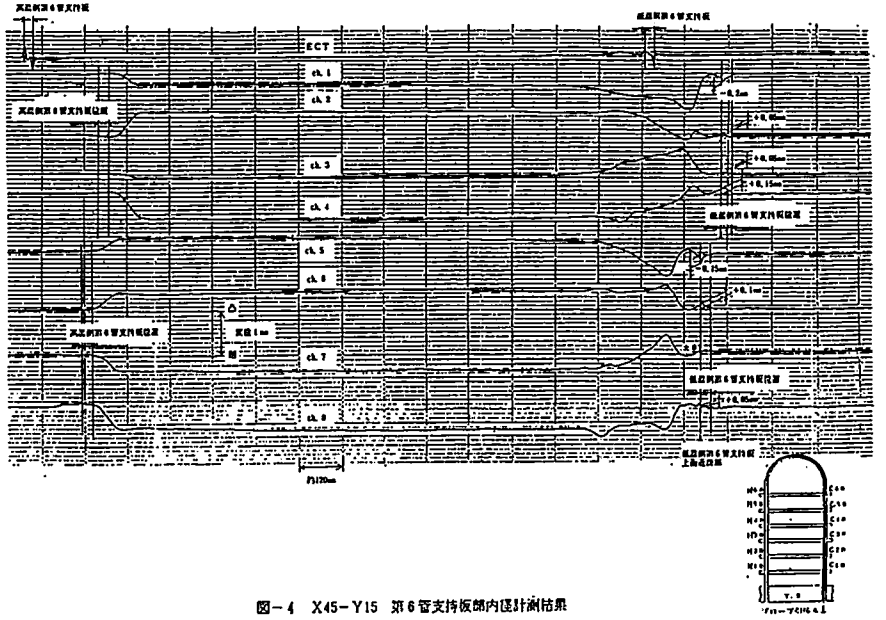
図－1　X44－Y14　第６管支持板部内径計測結果



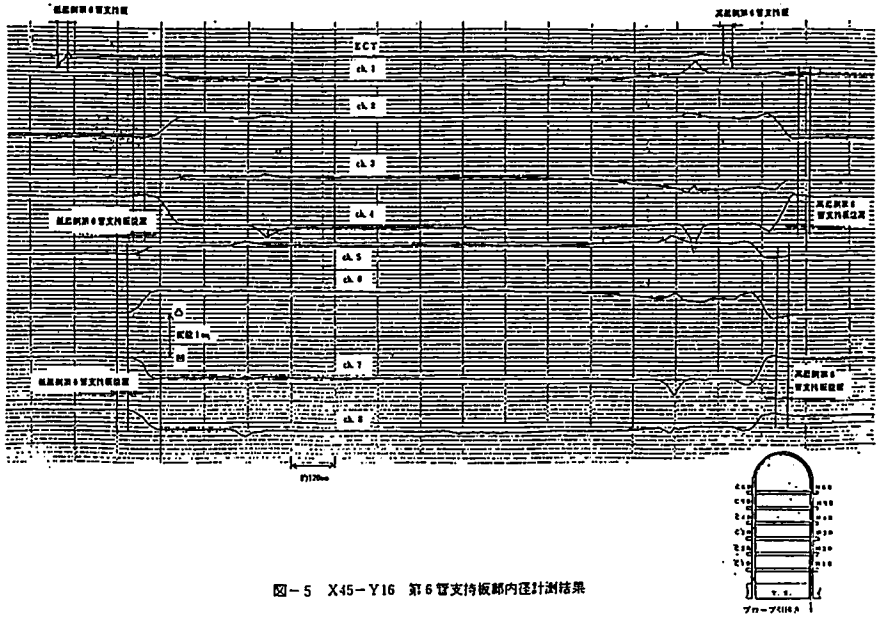
図－2　X45－Y11　第６管支持板部内径計測結果



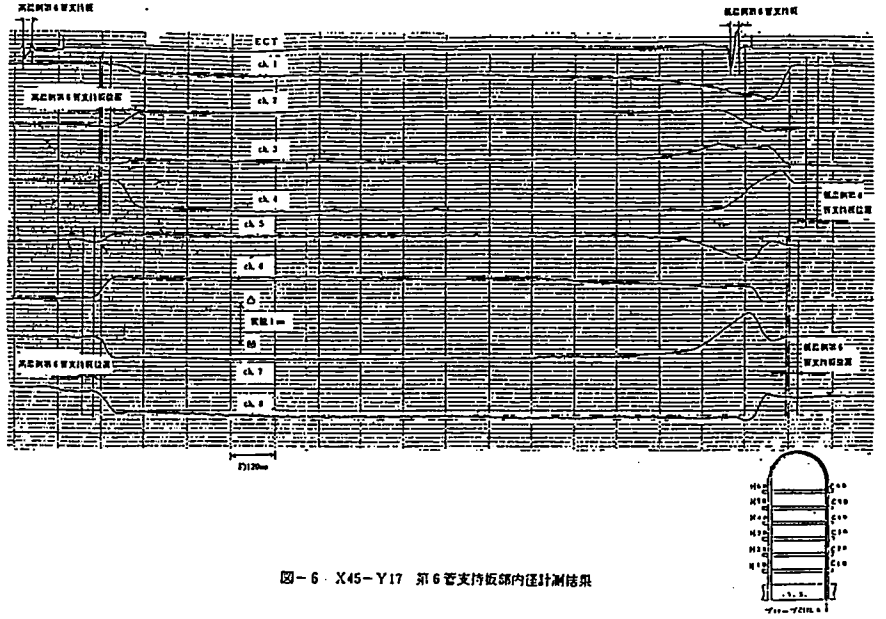
図－3　X45－Y13　第６管支持板部内径計測結果



図－4　X45－Y15　第６管支持板部内径計測結果



図－5　X45－Y16　第6管支持板部内径計測結果



図－6　X45－Y17　第6管支持板部内径計測結果

金属調査に使用した装置

表　金属調査に使用した装置（1／3）

試験項目	装置名	仕様
外観観察	35mm判カメラ	ニコンF－3 ニッコール 105mm
寸法計測 （形状測定）	レーザ外径測定装置	キーエンス製 LS-3100 測定範囲：0.8～60mm 測定精度：±3μm以下 表示分解能：0.1μm
	ダイヤルゲージ式厚さ測定装置	ダイヤルシクネスゲージ 測定範囲：最大10mm 精　度：0.01mm
	万能表面形状測定器	小坂研究所製 MODEL SE-3C 測定項目：断面曲線，粗さ曲線，うねり曲線 倍　率：50～10^3倍（縦方向） 10～500倍（横方向）
光学観察	拡大写真撮影装置	ニコン製 マルチフォト 倍　率：0.95～40倍
SEM観察	走査型電子顕微鏡	日立製 S-4000形 倍　率：×20～×300,000 加速電圧：0.5～30kV 試料サイズ：最大φ75×高さ25mm 観察用モニタ：12インチTVモニタ×2 画像表示速度：TV静止画像表示 2次電子像分解能：1.5nm保証

表　金属調査に使用した装置（2／3）

試験項目	装置名	仕様
断面ミクロ	光学顕微鏡	ライヘルト社製 POLYVAR-MET 倍率：1.2～1000倍
ＥＰＭＡ	X線マイクロアナライザ	島津製 SM-ST 分解能：100Å 電子線加速電圧：1～30kV 試料寸法：25.4mmφ×10mm 10×14×10mm 走査倍率：×70～140000 ASM-SX X線取出し角度：52.5° 型式：結晶直進式 波長比例方式 分析対象元素：5B～92U
X線回折	X線回折装置	理学電機製 RAD-RB 定格出力：10kW連続 対陰極：Co 安定度：±0.05% フォーカス：ライン 0.5×10 μm
硬度	マイクロビッカース硬度計	明石製作所製：MVK-E型 10g～1000g
フェライトスコープ	フェライトスコープ強度測定装置	型式：三菱重工製フェライトスコープ FE8e5型 測定範囲：Ⅰレンジ　0～3%Fe Ⅱ　〃　0～10%Fe Ⅲ　〃　0～30%Fe 最小測定面積：5×3mm

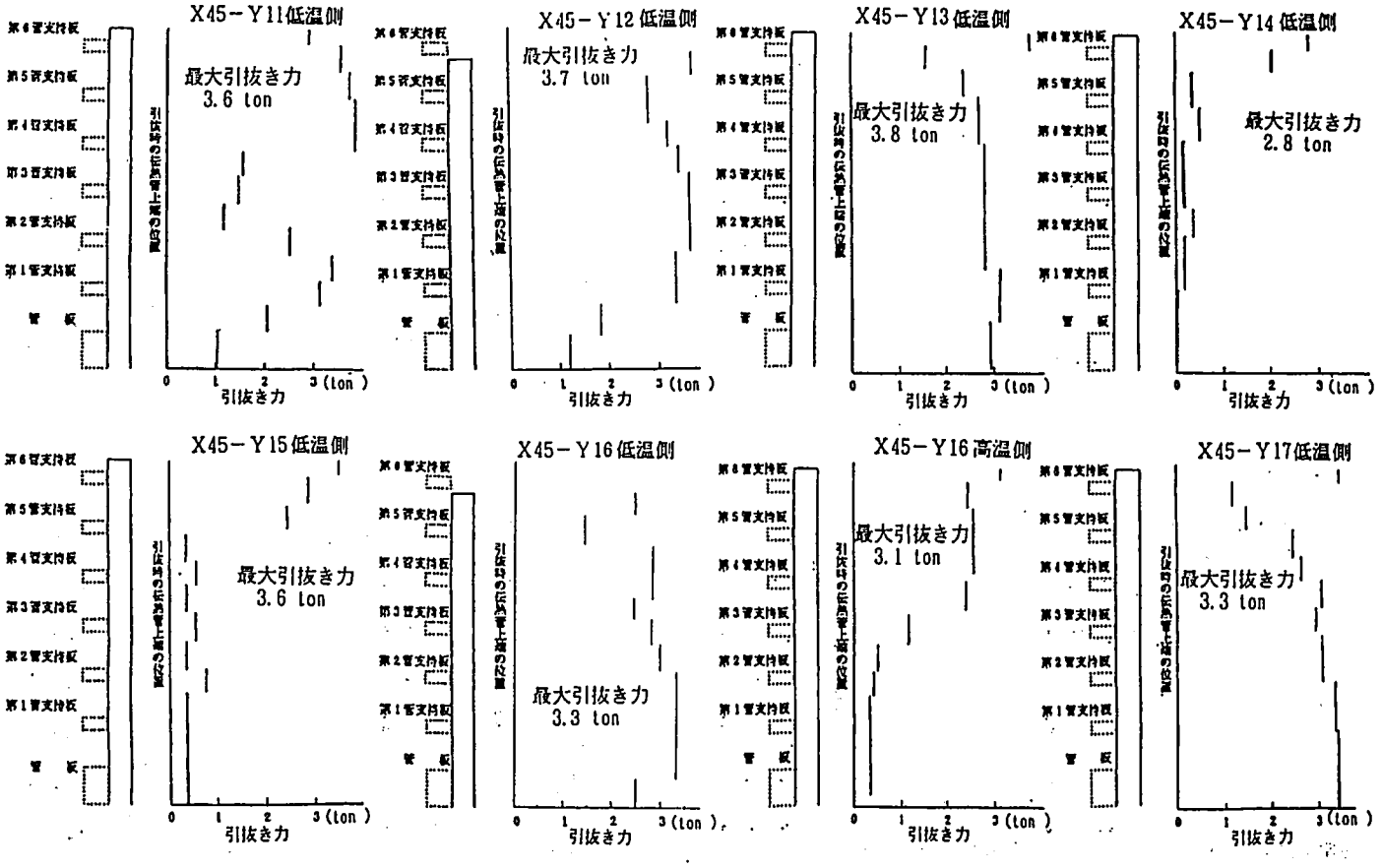
表　金属調査に使用した装置（3／3）

試験項目	装置名	仕様
母材管材分析		
Ti, Aℓ, Co, Cu, Fe	プラズマ発光分光分析装置	セイコー電子製 焦点距離：100cm 波長範囲：175～500nm
C	燃焼熱伝導度型カーボン分析装置	LECO社製 測定レンジ：0.005～5%C
Si, Mn, P	分光光度計	日立製 U-1100型 波長範囲：200～100nm 波長精度：±1nm
S	電気炉燃焼法 （JIS G 1215準拠）	
Ni	ＥＤＴＡ容量法 （JIS G 1216準拠）	
Cr	過マンガン酸容量法 （JIS G 1217準拠）	
引張り	精密万能試験機	島津製 オートグラフAG 10TD型 秤量：最大10トン 負荷方式：コンピューターコントロールシステム 引張荷重測定精度：指示値の±1%以内 引張速度：0.005～1000mm/min （無段階設定）

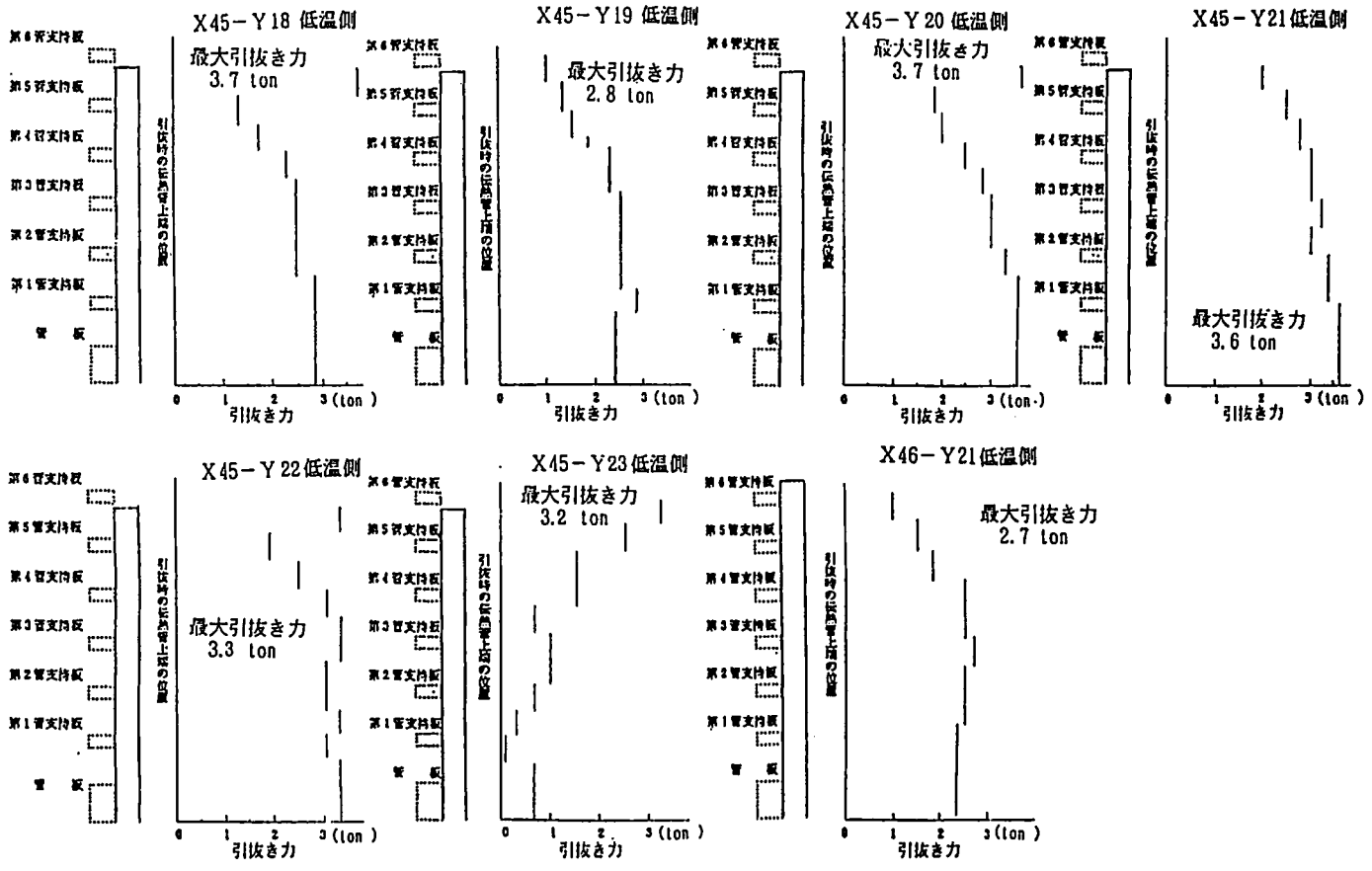
表　　金属調査に使用した切断工具

装 置 名	仕　　様
ポータブルハックソー	Lipe-Rollway社製モデルC AC115, 1／3HP
砥石切断器	立正精機社製 AC 200V 回転数：最大1600rpm 切削刃：レジノイドブレード （φ200mm, t0.6mm）

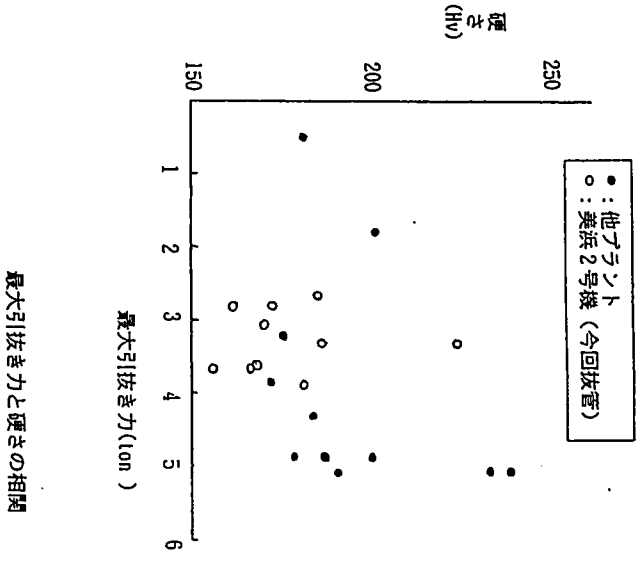
抜管時引抜力データ



引抜き力の抽移状況 (1／2)



引抜き力の伝播挙動(2／2)



最大引抜き力と硬さの相関

破断管による隣接管への影響調査結果

1. 目的

破断管は低温側第６管支持板上端部で破断しており、破断後の小型テレビカメラ観察結果において、隣接管にスケールの剥離跡が観察された。また、破断管及び隣接管の渦電流探傷検査（以下「ＥＣＴ」という。）結果において、変形信号の認められる部位があった。

これらの状況から、破断管のＵ字部が破断直後に破断部からの噴出流により振れ、隣接管と接触したことによる隣接管への影響を評価する。

2. 調査結果

破断管及び周辺管（Ｘ44～Ｘ46、Ｙ13～Ｙ15）について、ＥＣＴ、小型テレビカメラによる観察、内径計測、Ｕ字部取出し調査及び内面調査の結果は、以下のとおりである。

（表－１）

(1) Ｘ45－Ｙ14（破断管）

a. ＥＣＴの結果、高温側第６管支持板上下端部に変形信号が認められた。また、８×１プローブＥＣＴにおいても同じ位置に変形信号が認められた。

b. 小型テレビカメラ観察の結果、スケールの剥離は認められなかった。

c. 内径計測の結果、高温側第６管支持板部近傍で変形が認められた。（図－１）

d. Ｕ字部の取出し調査の結果は、以下のとおりであった。

(a) Ｕ字部の背側に比較的広範囲にわたり帯状の接触痕（へこみ等はなく、スケール表面が薄くこすれた状況）が認められた。

(b) 低温側第６管支持板部の約40～ 110㎜上方、 290度～ 295度付近の位置に接触跡（へこみ等はなく、スケール表面が薄くこすれた状況）が認められた。

(c) 破断部直上の外表面に以下の接触痕が認められた。（図－２）

イ．45度～67.5度間にこすれ跡。

ロ．135度付近にこすれ跡。

ハ．180度付近に当たり跡及び180度～202.5度間にこすれ跡。

(d) 上面破面の315度付近の外表面側にこすれ跡が認められた。

(e) 高温側第６管支持板部の内外表面の形状を計測した結果、管支持板上端部 180度付近及び下端部０度付近の限定された位置に深さ 0.3㎜程度の微小な変形（へこみ）が認められた。（図－３）

e. 以上のことからＥＣＴにより検出された変形信号は伝熱管の管支持板部での変形に

よるものであるが、これらの変形は管支持板上・下端部とも一方向に限定され、互いに反対方向に位置することから、デンティングによるのではなく、また、前回定期検査までのＥＣＴでは変形信号は認められていないことから、破断時に伝熱管のU字部が高温側第６管支持板部を支点として振れたため生じたものと推定される。

(2) X44－Y13

a. ＥＣＴの結果、異常は認められなかった。

b. 小型テレビカメラ観察の結果、スケールの剝離は認められなかった。

c. U字部の取出し調査の結果、異常は認められなかった。

(3) X44－Y14

a. ＥＣＴの結果、異常は認められなかった。

b. 小型テレビカメラ観察の結果、破断管上部破面位置近傍にスケールの剝離が認められた。（図－４）

c. 内径計測の結果、変形は認められなかった。

d. U字部の取出し調査の結果は、以下のとおりであった。

低温側第６管支持板部の約35～80㎜上方の 235度付近に接触痕（へこみ等はなく、スケール表面が薄くこすれた状況）が認められた。接触痕は 235度方向から 200度方向へ向けて管軸に対して傾きを持った帯状の接触痕であった。

e. 低温側第６管支持板部を切断して接触部に相当する伝熱管の内面の状況を調査した結果は、以下のとおりであった。

(a) サンプルを約100㎜長さに切断後、管軸方向に２つ割れに切断し、管内面を観察した結果、管内面には、ＥＣＴプローブが通過した際に付いたと考えられる微細な縦筋が認められた以外に変形等の異常は認められなかった。

(b) 接触痕の付いた部位の管内面を、接触痕のほぼ中央と±５㎜の位置を形状測定した結果、いずれの部位も円形の管内面形状を示しており、変形は認められなかった。（図－５）

(4) X44－Y15

a. ＥＣＴの結果は、以下のとおりであった。

(a) 低温側第６管支持板部より50～100 ㎜上方のU字管曲げ端部付近に変形信号が認められた。

(b) ８×１プローブＥＣＴにおいても、ほぼ同じ位置に変形信号が認められた。

(c) U字部取り出し後のＥＣＴの結果、低温側第６管支持板部の約75㎜上方、45度付近に変形信号が認められた。

b. 小型テレビカメラ観察の結果、スケールの剝離は認められなかった。

c. 内径計測の結果、変形は認められなかった。

d. U字部の取り出し調査の結果は、以下のとおりであった。

(a) 低温側第６管支持板部の約65～95㎜上方の 310度付近に接触痕（へこみ等はなく、スケール表面が薄くこすれた状況）が認められた。接触痕は 310度方向から 270度方向へ向けて、管軸に対して傾きを持った帯状の接触痕であった。

(b) ＥＣＴで変形信号の認められた部位には接触痕、スケール剝離跡は認められなかった。

なお、伝熱管外径を計測した結果、製作許容値（10%）以下ではあるが、２%程度の偏平が認められた。（図－６）

e. 低温側第６管支持板部を切断して接触部に相当する伝熱管の内面の状況を調査した結果は、以下のとおりであった。

(a) サンプルを約100㎜長さに切断後、管軸方向に２つ割れに切断し、管内面を観察した結果、管内面には、ＥＣＴプローブが通過した際に付いたと考えられる微細な縦筋が認められた以外に変形等の異常は認められなかった。

(b) 接触痕の付いた部位の管内面を、接触痕のほぼ中央と±５㎜の位置を形状測定した結果、いずれの部位も円形の管内面形状を示しており、変形は認められなかった。（図－７）

f. 以上のことから、ＥＣＴにより検出された変形信号は、伝熱管当該部の偏平率がわずかに大きいことにより、検出された信号であると考えられる。

(5) X45－Y13

a. ＥＣＴの結果、異常は認められなかった。

b. 小型テレビカメラ観察の結果、スケールの剥離は認められなかった。

c. 内径計測の結果、変形は認められなかった。

d. U字部の取出し調査の結果、以下のように異常は認められなかった。

(a) U字部には接触痕は認められなかった。

(b) 低温側第６管支持板部の寸法計測の結果、２次側の腐食減肉部以外の板厚、外径は直管部と同じであった。

(6) X45－Y15

a. ＥＣＴの結果、低温側第６管支持板部の上方及び上面近傍に認められ以下のとおりであった。

(a) 低温側第６管支持板部の上方

イ．低温側第６管支持板部より50～100 ㎜上方のU字管曲げ端部付近に変形信号が認められた。

ロ．８×１プローブＥＣＴにおいても、ほぼ同じ位置に変形信号が認められた。

ハ．U字部取出し後のＥＣＴの結果、低温側第６管支持板の約77㎜上方、 315度付近に変形信号が認められた。

(b) 低温側第６管支持板部の上面近傍

イ．８×１プローブＥＣＴにおいても、ほぼ同じ位置に変形信号が認められた。

b. 小型テレビカメラ観察の結果、破断管上部破面位置近傍にスケールの剥離が認められた。 （図－４）

c. 内径計測の結果、低温側第６管支持板部の上面近傍で変形が認められた。 （図－８）

d. U字部の取出し調査の結果は、以下のとおりであった。

(a) U字部の腹側に広範囲にわたり帯状の接触痕（へこみ等はなく、スケール表面が薄くこすれた状況）が認められた。この接触痕はX45－Y14の背側の接触痕と対応するものと考えられる。

(b) 低温側第６管支持板部の約30～50㎜上方の 330～０度付近にスケール剥離跡及び接触痕が認められた。

なお、この部位は破断管の低温側第６管支持板部からのＣＣＤ観察により、破断管の上側破面位置近傍にスケール剥離跡が認められた部位と位置的にほぼ同じと考えられる。

(c) 低温側第６管支持板部の上方のＥＣＴ変形信号部位には接触痕、スケール剥離跡は認められなかった。

なお、該当部近傍の管外径を計測した結果、製作許容値以下であるが、３％程度の偏平が認められた。 （図－６）

(d) 低温側第６管支持板部の寸法計測の結果、２次側の摩耗減肉部以外の板厚、外径は直管部と同じであった。また、支持板上面近傍のＥＣＴ変形信号部の変形は肉眼では確認できないほど軽微なもの（0.05㎜程度）であった。

e. 低温側第６管支持板部を切断して接触部に相当する伝熱管の内面の状況を調査した結果は、以下のとおりであった。

(a) サンプルを約100㎜長さに切断後、管軸方向に２つ割れに切断し、管外面及び管内面を観察した結果、管内面には、ＥＣＴプローブが通過した際に付いたと考えられる微細な縦筋が認められた以外に変形等の異常は認められなかった。

(b) 接触痕の付いた部位の管内面を、接触痕のほぼ中央と±５㎜の位置を形状測定した結果、いずれの部位も円形の管内面形状を示しており、変形は認められなかった。 （図－９）

f. 以上のことから、ＥＣＴにより検出された変形信号は、伝熱管当該部の偏平率がわずかに大きいことにより、検出された信号であると考えられる。

(7) X46－Y13

a. ＥＣＴの結果、異常は認められなかった。

b. 小型テレビカメラ観察の結果、スケールの剥離は認められなかった。

c. U字部の取出し調査の結果、異常は認められなかった。

(8) X46－Y14

a. ＥＣＴの結果、異常は認められなかった。

b. 小型テレビカメラ観察の結果、破断管上部破面位置近傍にスケールの剥離が認められた。 （図－４）

c. U字部の取出し調査の結果は、以下のとおりであった。

低温側第6管支持板から約70～200 ㎜上方、 110度付近に接触痕（へこみ等はなく、スケール表面が薄くこすれた状況）が認められた。

d. 低温側第6管支持板部を切断して、接触部に相当する伝熱管の内面の状況を調査した結果は、以下のとおりであった。

(a) サンプルを約 100㎜長さに切断後、管軸方向に2つ割れに切断し、管外面及び管内面を観察した結果、管内面には、ＥＣＴプローブが通過した際に付いたと考えられる微細な縦筋が認められた以外に変形等の異常は認められなかった。

(b) 接触痕の付いた部位の管内面を、接触痕のほぼ中央と±5㎜の位置を形状測定した結果、いずれの部位も円形の管内面形状を示しており、変形は認められなかった。

（図－10）

(9) X46－Y15

a. 小型テレビカメラ観察の結果、異常は認められなかった。

b. ＥＣＴの結果、異常は認められなかった。

c. U字部の取出し調査の結果、U字部には接触痕は認められなかった。

また、低温側及び高温側第6管支持板部の上方の管外径を計測した結果、局所的な偏平は小さかった。

3. 試験、解析結果

伝熱管の強度や伝熱管破断に関する研究が「蒸気発生器信頼性実証試験」（昭和50年度～昭和55年度）の一環として実施されている。

この中で、U字部の伝熱管破断に関しては種々の試験及び解析を実施し、破断管が隣接管に与える影響について検討している。

検討の結果、伝熱管破断時に、隣接管に発生する応力は26kg／㎟ 程度であり、伝熱管は多少の変形をする可能性はあるが、破断する可能性はないことが確認されている。

4. まとめ

伝熱管の破断による破断管のU字部及び隣接管への影響を調査した結果をまとめると以下のとおりである。

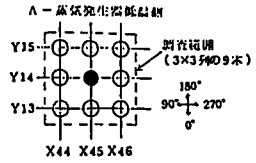
(1) 破断管の低温側第6管支持板部の直上部、上方部及びU字部の背側に、破断後に隣接管と接触したと考えられる跡が認められた。また、隣接管であるX44－Y14、X44－Y15、X45－Y15、X46－Y14の低温側第6管支持板上方部及びX45－Y15のU字部の腹側に、破断管と接触したと考えられる跡が認められた。これらの接触跡にはいずれもへこみ等はなく、伝熱管のスケール表面が薄くこすれた程度の軽微なものであった。

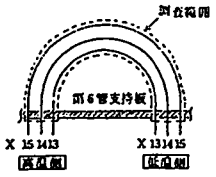
(2) X44－Y15及びX45－Y15の低温側第6 管支持板部の上方の変形信号は、U字部の取出し調査の結果、当該部の偏平率がわずかに大きく、これをＥＣＴにより検出したものと考えられる。

(3) 破断管との接触跡が認められ、抜き出した伝熱管のうち、4本の伝熱管について、接触部に担当する伝熱管の内面状況を調査した結果、いずれも、変形等の異常は認められなかった。

(4) U字管での伝熱管破断を模擬した試験及び解析の結果、破断管及び隣接管にはわずかな塑性変形を生ずる可能性はあるが、隣接管が破断することはないことが確認されている。

(5) 破断管は破断後上方に振れ隣接管に接触したが、その影響はスケールのわずかな剥離やスケール表面のこすれ程度の軽微なものであり、破断管が隣接管を損傷に至らしめるものではなかったと考えられる。



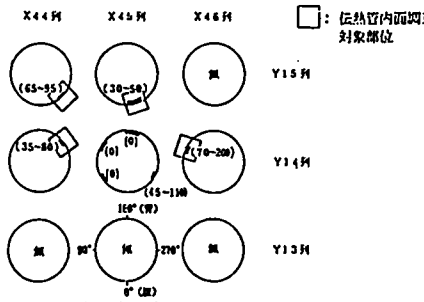


表－1　調査結果のまとめ

（調査方法）
（Ⅰ）渦電流探傷検査
（Ⅱ）小型テレビカメラ
（Ⅲ）内径計測
（Ⅳ）外観観察
（Ⅴ）寸法計測

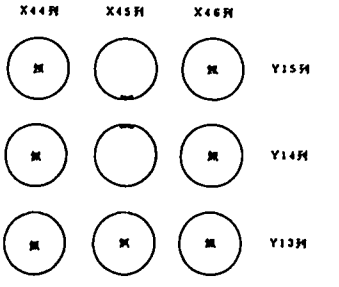
アドレス / 項目	X44 Y13	X44 Y14	X44 Y15	X45 Y13	X45 Y14（破断）	X45 Y15	X46 Y13	X46 Y14	X46 Y15
渦電流探傷検査	○	○	変形信号（C68の上方50～100mm）	○	変形信号（H68の上面、下面）	変形信号…（C68上方50～100mm、C68上面近傍）	○	○	○
小型テレビカメラ（破断管の低温側（第6管支持板より）	○	スケールの判読困難	○	○	○	スケールの判読困難	○	スケールの判読困難	○
内径計測	－	○	○	○	変形信号（H68部）	変形信号（C68上面近傍）	－	－	－
外観観察	○	C68上方に接触痕（35～80mm）235°	C68上方に接触痕（65～85mm）310°	○	以下に接触痕 (1)管側（形状） (2)C68上方（40～110mm）290～295° (3)破断部直上の外表面 (4)裏面315°	○	C68上方に接触痕（70～200mm）110°		○
寸法計測	－	－	程度な傾斜（C68の上方）	○（C68）	変形（H68の上面、下面）	程度な傾斜（C68の上方）	--	--	傾斜は44-15、45-15に比べ小さい

○：異常なし
－：調査せず
H68：高温側第6管支持板
C68：低温側第6管支持板



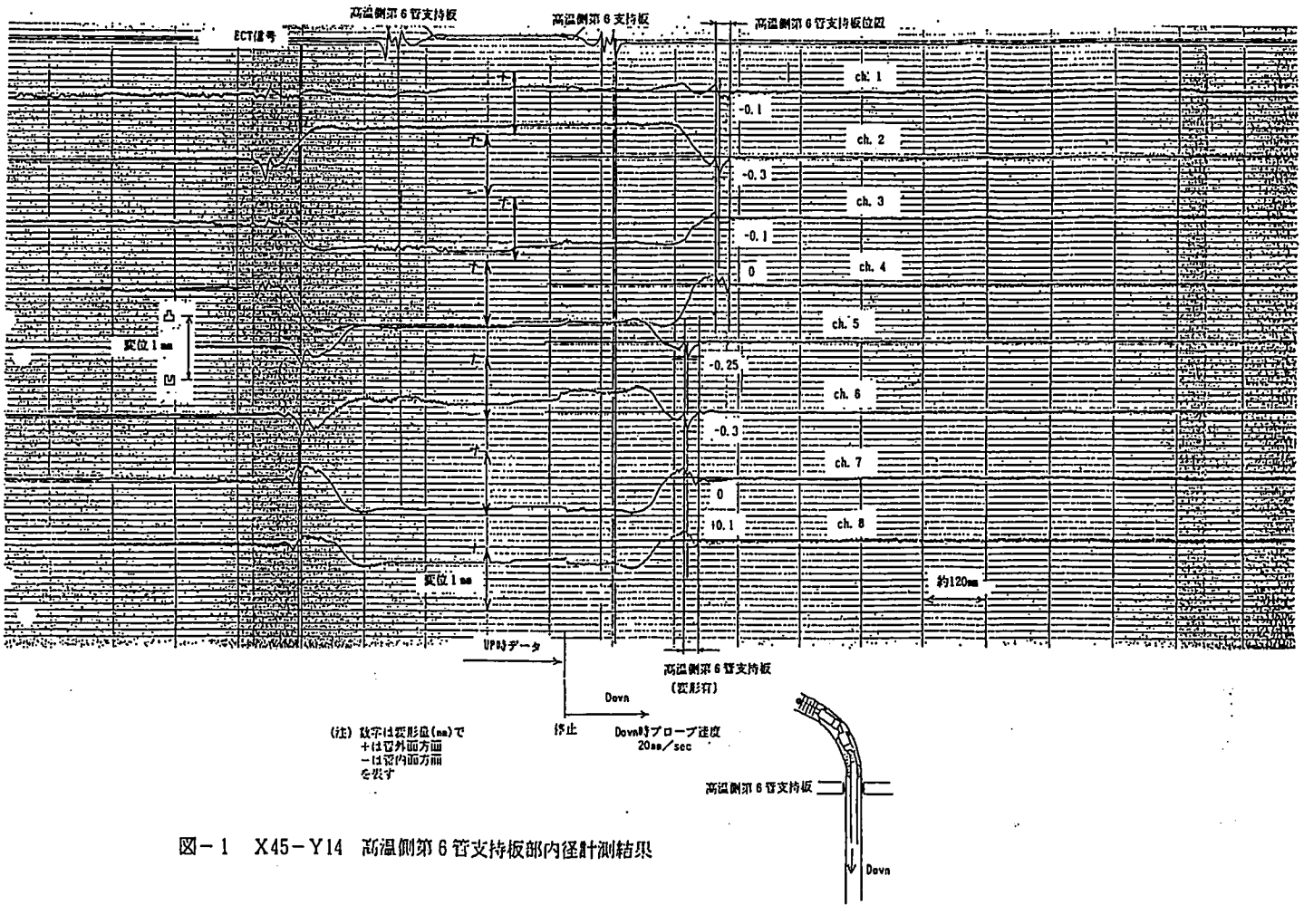
（備考）（ ）は低温側第6管支持板上面からの距離（mm）

低温側第6管支持板上方部の接触痕



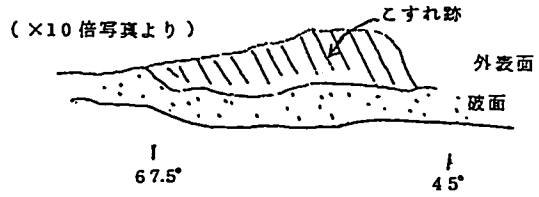
（備考）（ ）は傾状の接触痕が認められる範囲

U字部上方部の接触痕（傾状）

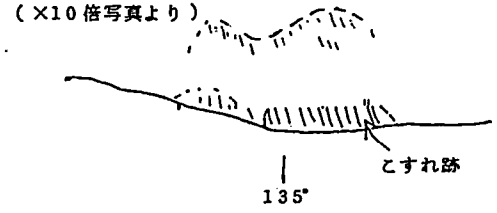


図－1　X45－Y14　高温側第6管支持板部内径計測結果

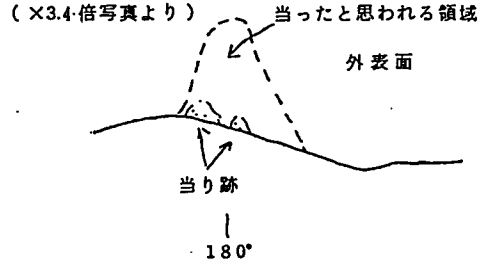
① 45°～67.5°間



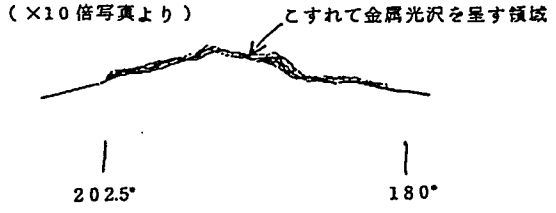
② 135°付近



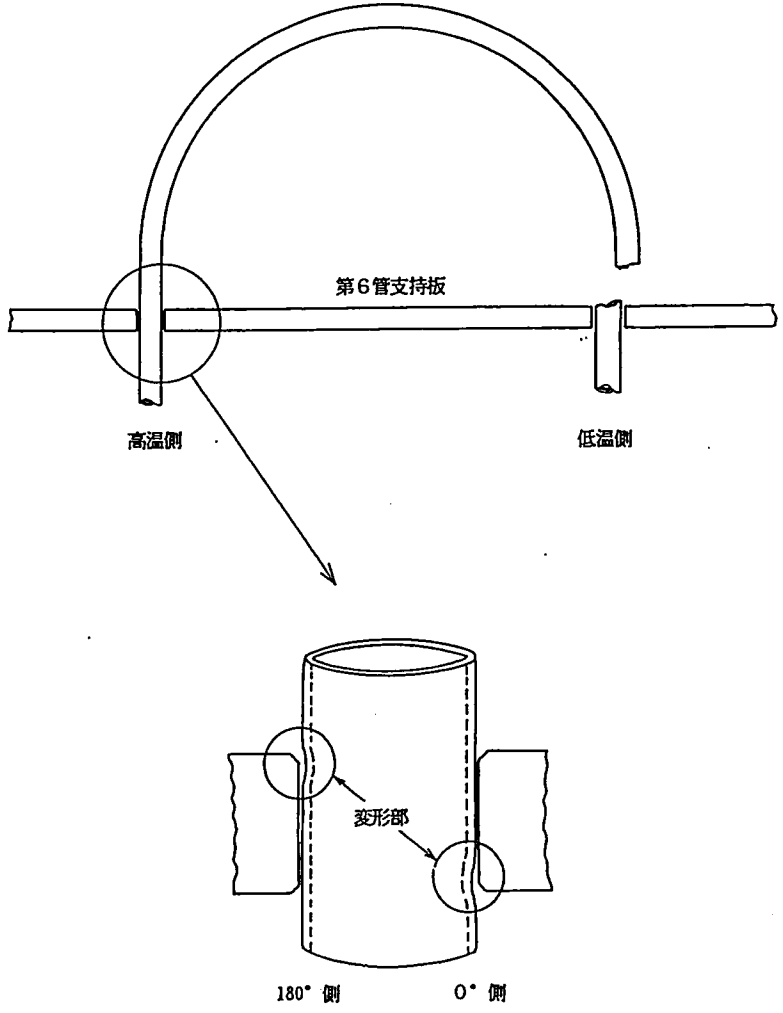
③ 180°付近



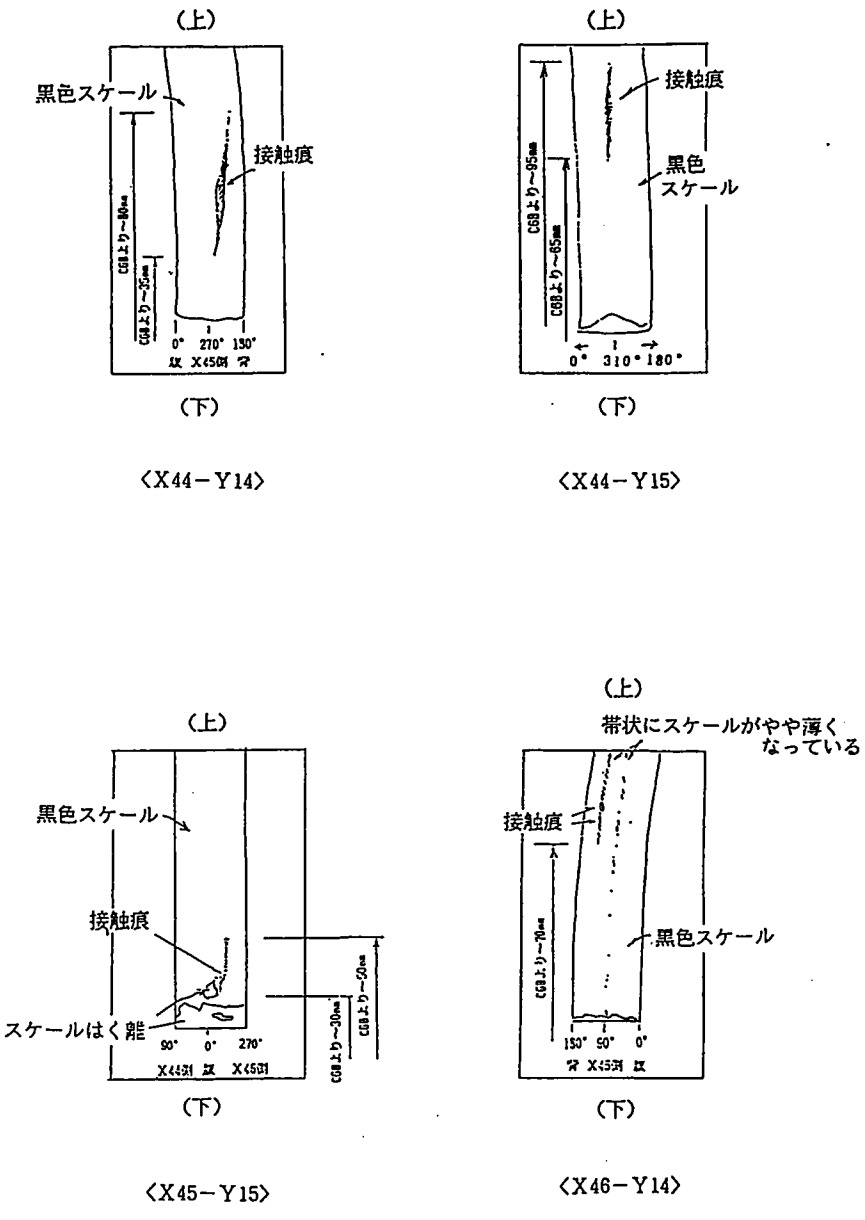
180°～202.5°間



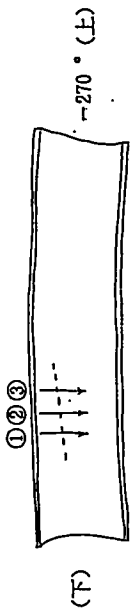
図－2　破断管（X45－Y14）の上側破面外表面端の接触痕

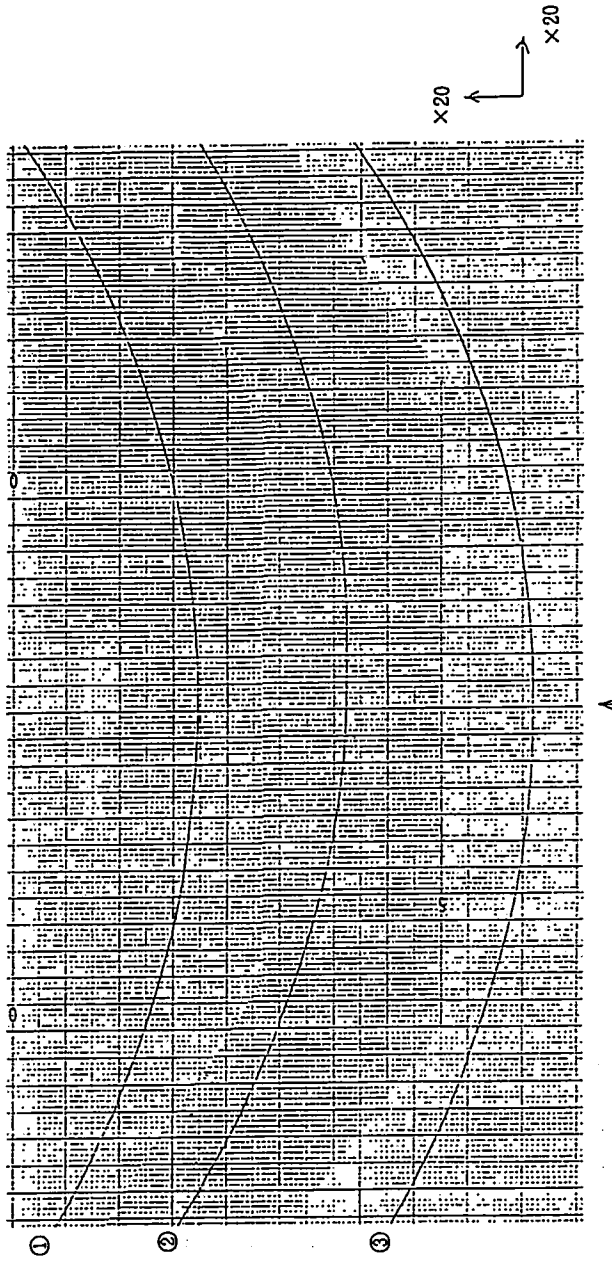


図－３　破断管高温側第６管支持板部の概略形状

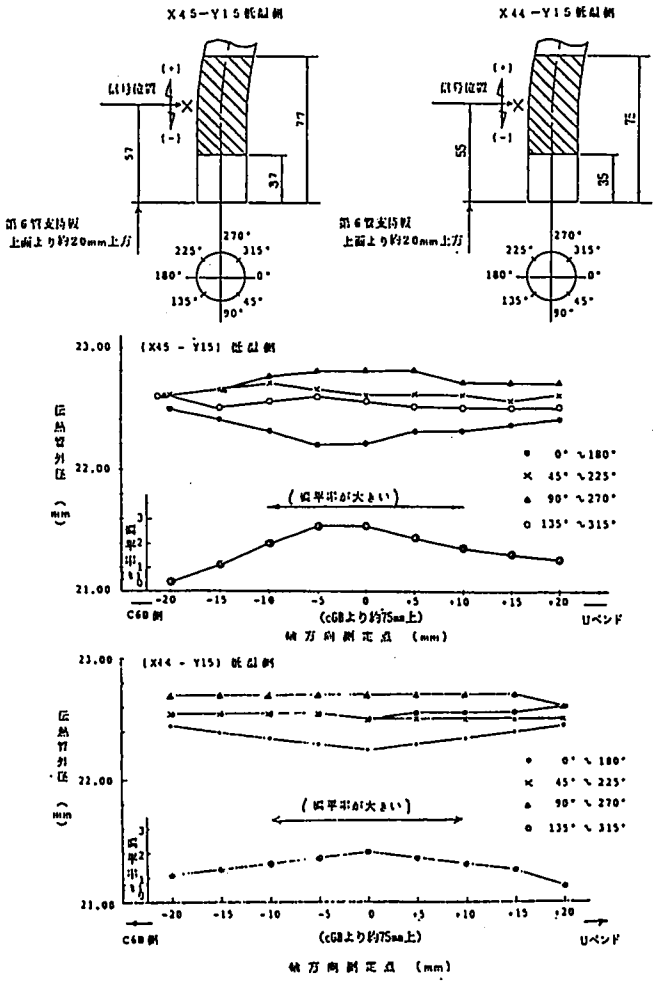


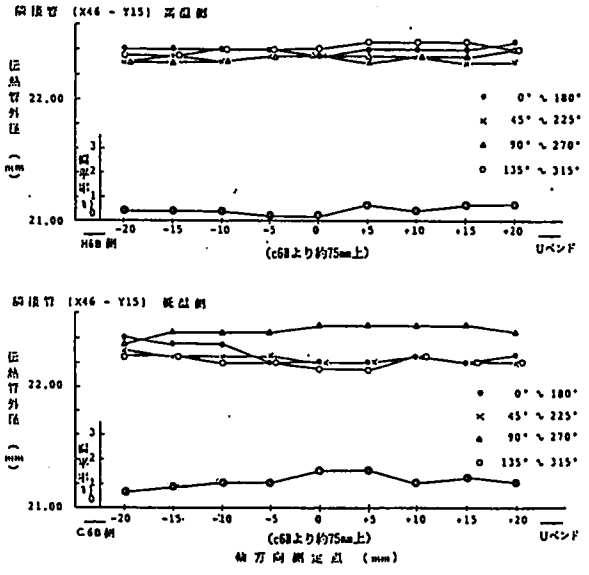
図－4　各サンプルの外観観察結果



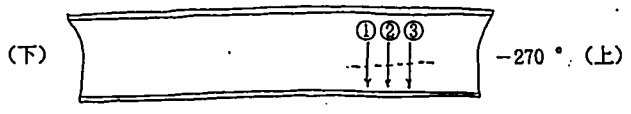


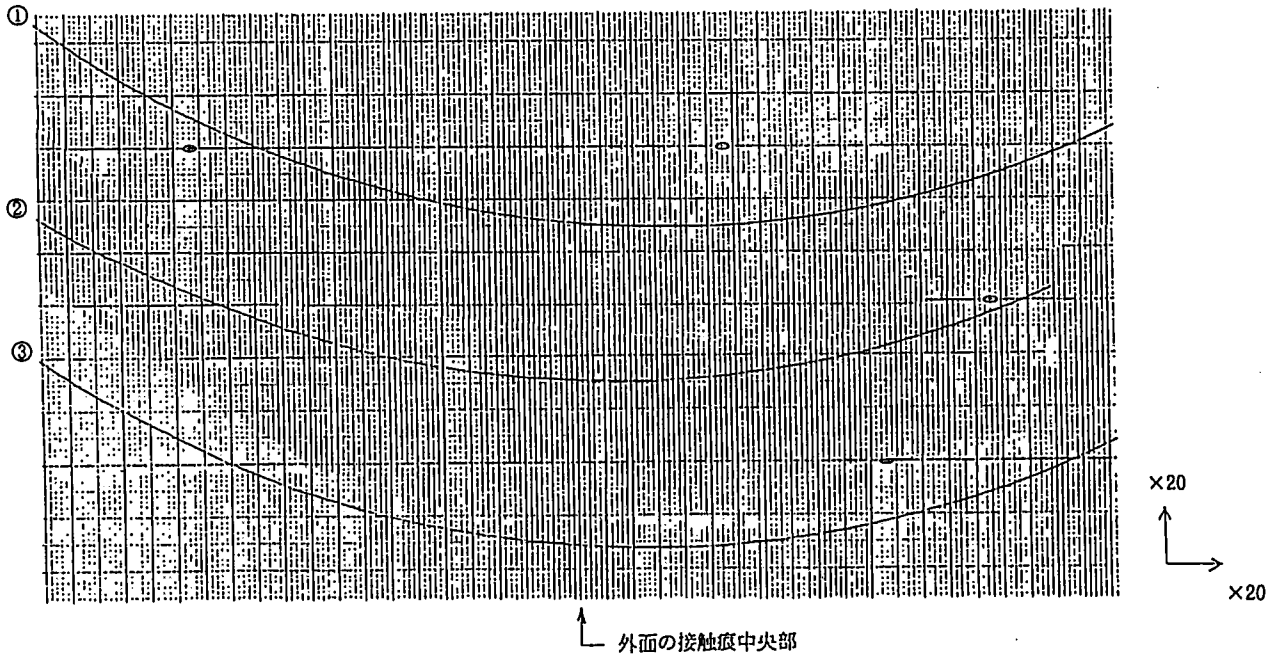
図－5　破断管の隣接管（X44－Y14）内面形状



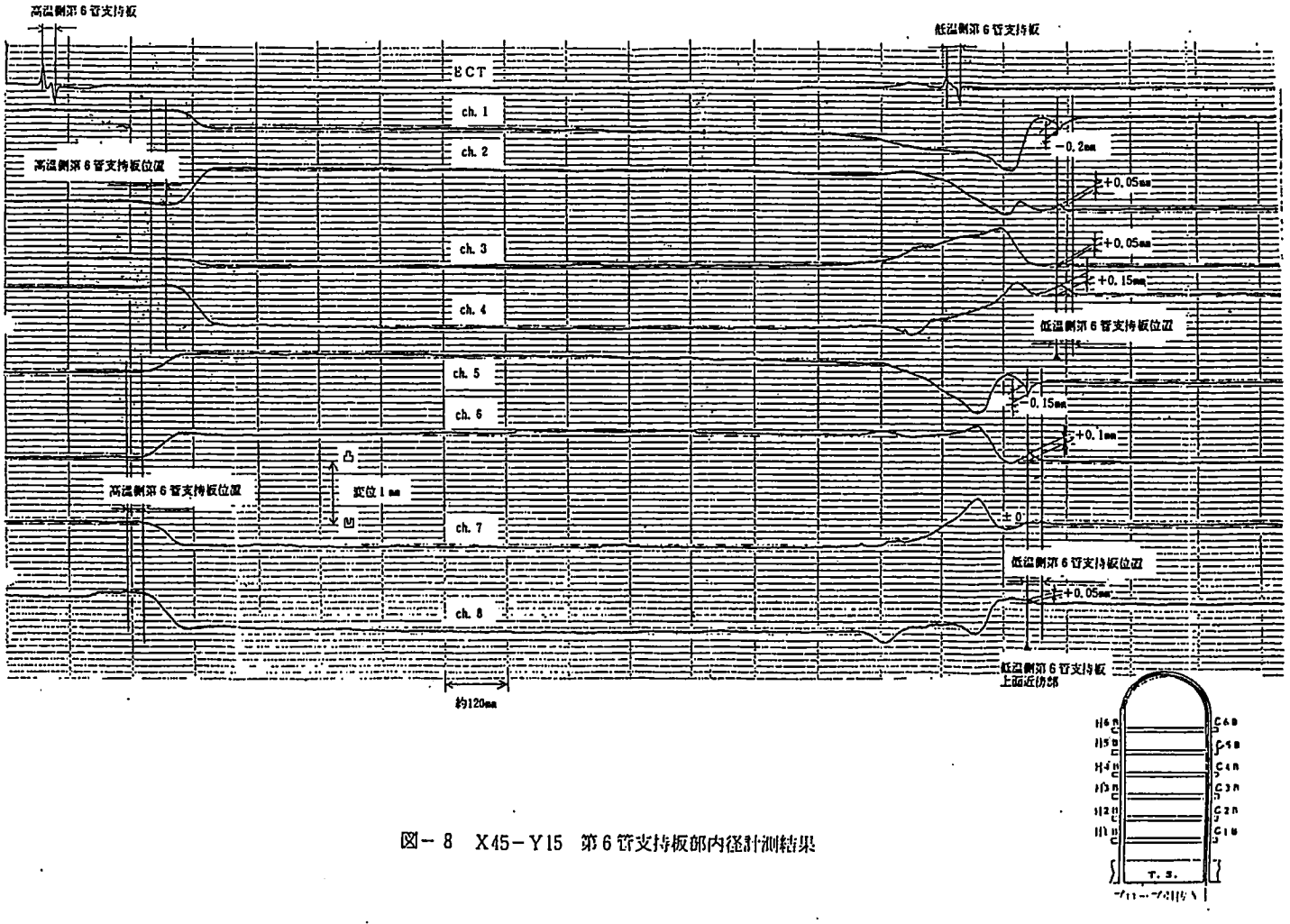


図－6　管外径計測結果

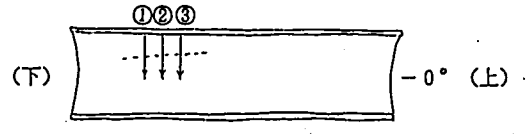


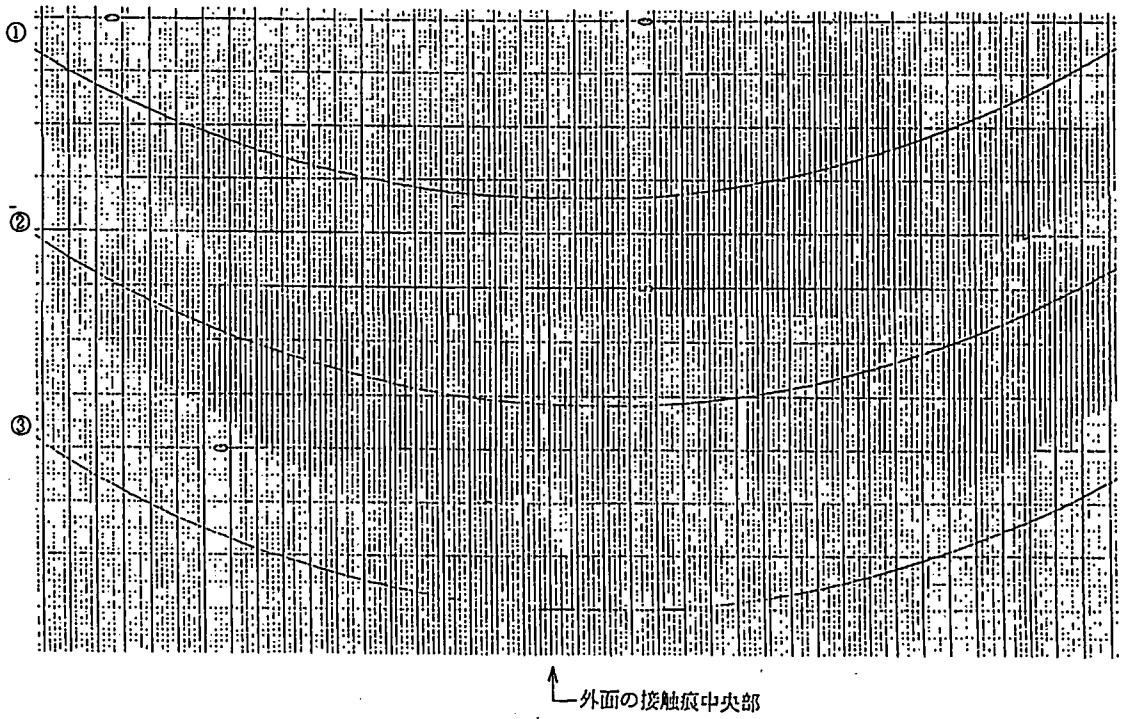


図－7　破断管の隣接管（X44－Y15）内面形状

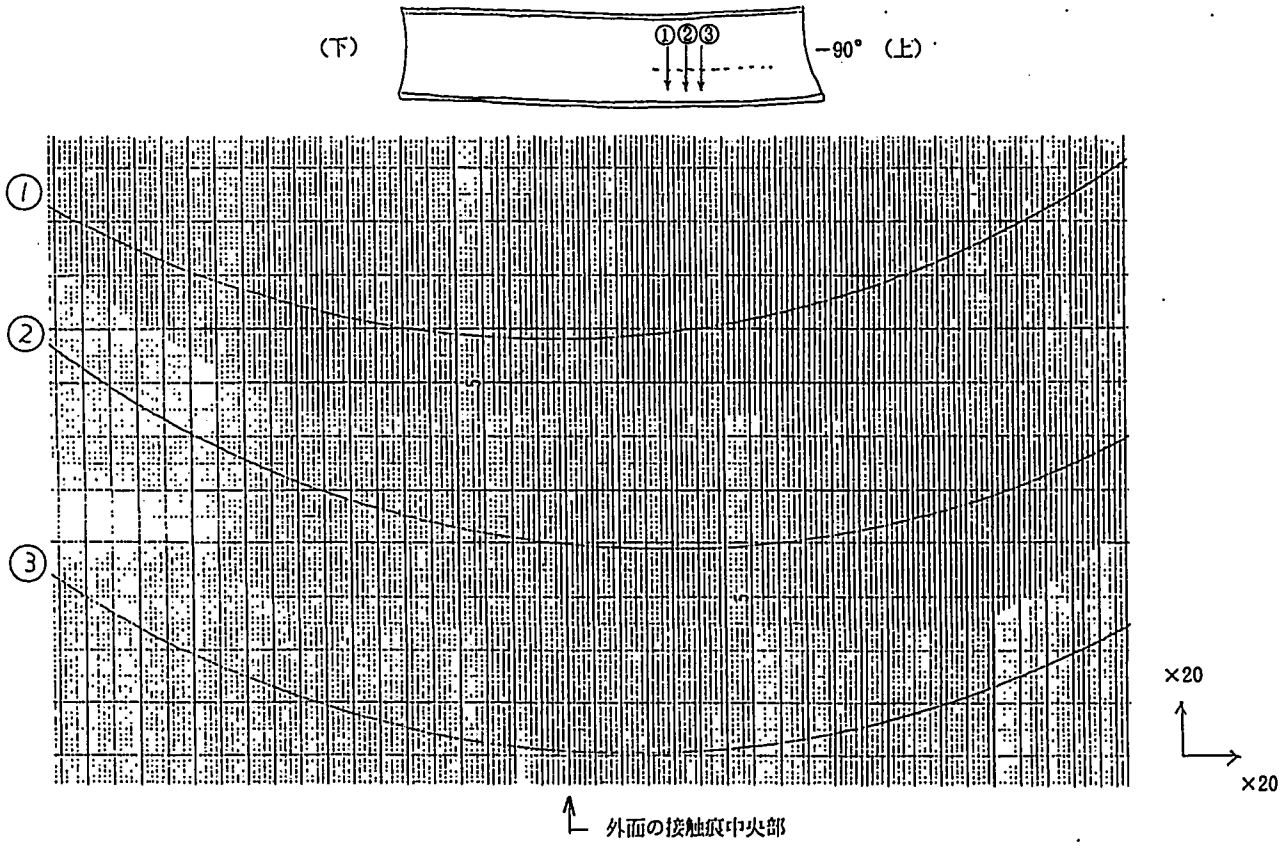


図－8　X45－Y15　第6管支持板部内径計測結果





図－9　破断管の隣接管（X45－Y15）内面形状



図－10　破断管の隣接管（X46－Y14）内面形状

資料－4.1.3.1

管支持板調査結果

1. 目的

伝熱管損傷原因調査のため、破断管及び周辺管の第６管支持板の一部を取り出し、金属調査を実施する。

2. 調査対象管支持板及び調査方法

調査対象管支持板を表－１に示す。これらの管支持板の調査サンプルについて、金属調査として外観観察、寸法計測、ミクロ観察、ＥＰＭＡ、化学分析、硬度測定を実施する。

（図－１）

3. 調査結果

3.1 破断管（X45－Y14）第６管支持板（低温側及び高温側）　（表－２）

(1) 外観観察

低温側、高温側とも管支持板クレビス部にはスケールが全面にわたり詰まっており、管支持板部で伝熱管が拘束されている状態（以下「固定支持」という。）であったと判断される。

(2) 寸法計測

管支持板の板厚は低温側、高温側ともに設計の範囲内であった。

(3) 断面ミクロ観察

低温側及び高温側管支持板管穴内表面は、ほぼ均等に腐食されておりスケールが全面にわたり詰まっていた。そのスケールの平均厚さは 0.6㎜であった。（図－２）

(4) ＥＰＭＡ（Electron Probe Micro Analysis）

低温側、高温側とも、管支持板管穴内表面に付着したスケールはほぼ同じ厚さの３層に大別され、伝熱管側を第１層、管支持板側を第３層、両者の中間を第２層とすると各層は以下の特徴を有していた。

① 第１層：りんが集中的に検出され、鉄濃度は低く、２次系冷却水から持込まれる不純物元素が多く検出された。なお、色調は灰黒色であった。

② 第２層：２次系冷却水から持込まれる不純物元素が検出された。なお、色調は灰黒色と灰色が混在していた。

③ 第３層：鉄が主体であり、金属銅以外に２次系冷却水から持込まれる不純物元素は検出されなかった。なお、色調は灰色であった。

以上より、第１層は２次系の水処理をりん酸塩処理としていた時期に伝熱管に付着したスケールの層、第２層は２次系の水処理をＡＶＴに変更した後に伝熱管に付着したスケールの層、第３層は管支持板が腐食したことにより形成された層と推定される。

(5) 化学分析

a. 低温側、高温側とも管支持板管穴に詰まったスケールの主成分は鉄であり、他に２次系冷却水から持込まれる不純物元素が検出された。

b. 水溶性成分分析の結果、管支持板の腐食を加速する有害元素は検出されなかった。

c. 低温側第５～第１管支持板管穴スケールにおいても管支持板の腐食を加速する有害元素は検出されなかった。

(6) 硬度

第１層のスケールはビッカース硬さ(Hv) 180～ 260、第２及び第３層の灰色スケールはHv 630～ 710であった。

以上の外観観察、断面ミクロ等の調査結果から、伝熱管は管支持板部で固定支持であったと判断される。

3.2 周辺管第６管支持板

〔使用管〕

(1) Ｘ45－Ｙ12低温側

a. 外観観察：低温側の管支持板クレビス部は部分的にスケールが詰まった状態であった。

b. 寸法計測：管支持板の板厚は設計の範囲内であった。

（以下の他のサンプルも同様であった。）

c. 断面ミクロ：管支持板板厚中央部の横断面観察結果ではクレビス部にスケールが詰まって閉塞している部分が円周方向に４ヶ所認められ、スケールの平均厚さは約 0.6㎜で、その領域は全周の約１／３に亘っていた。それ以外の部分では管支持板管穴内表面、伝熱管外表面のスケール厚さは0.05㎜程度であった。クレビス部は完全な閉塞状態でなかったが、部分的にスケールが詰まっており固定支持であったと判断される。スケールが詰まっている箇所では、管支持板管穴内表面は凹凸があり、管支持板穴内表面が腐食していたと考えられる。

d. ＥＰＭＡ：低温側の管支持板管穴内表面に付着したスケールは破断管のスケールと同様の３つの層に大別された。

e. スケール化学分析：スケールの主成分は鉄であり、他に２次系水より持ち込まれる不純物成分が検出されたが、管支持板の腐食を加速する程の有害元素は検出されなかった。

（以下、他のサンプルも同様であった。）

f. 硬度（ビッカース硬さ）：管支持板管穴内表面に付着したスケールの硬度を計測した結果、灰黒部はHv250 ～ 290で、灰色部はHv490 ～ 810であった。管支持板クレビス部は伝熱管材（Hv約 160）に比べ硬度の高いスケールが周方向４ヶ所で詰まっていることから、クレビス部における伝熱管の支持状態は固定であったと推定される。

(2) Ｘ45－Ｙ15高温側及び低温側

a. 外観観察：低温側、高温側ともに、管支持板管穴内表面にはスケールの付着は少なく、製造時の機械加工跡が認められ、スケールが詰まった状態ではなかった。

（図－３）

b. 断面ミクロ：伝熱管と一体になった状態で観察した結果、高温側管支持板管穴内表面のスケール付着量は約0.05㎜、伝熱管外表面（高温側のみ調査）のスケールの平均厚さは0.02㎜であり、管支持板クレビス部は閉塞されていなかった。低温側管支持板管穴内表面のスケール厚さは平均約0.02㎜であり、高温側と同様に管支持板クレビス部は閉塞されておらず、間隙支持であったと判断される。なお、管支持板管穴内表面に軽微な腐食が認められた。

(3) Ｘ46－Ｙ14低温側

a. 外観観察：管支持板クレビス部はスケールが詰まった状態であった。

b. 断面ミクロ：伝熱管と一体になった状態で観察した結果、管支持板管穴内面のスケー

ル厚さは、平均0.5㎜であり、管支持板クレビス部は閉塞しており、固定支持であったと判断される。管支持板管穴内表面は凹凸があり、管支持板管穴内表面が腐食していたと考えられる。

c. ＥＰＭＡ：管支持板管内表面に付着したスケールは破断管のスケールと同様の３つの層に大別された。

d. 硬度（ビッカース硬さ）：Ｘ46－Ｙ14の管支持板管穴内表面に付着したスケールの硬度を計測した結果、灰黒色部はHv 200～280 、灰色部はHV 470～1050であった。

このことから、Ｘ46－Ｙ14もＸ45－Ｙ12と同様、伝熱管は固定支持であったと推定される。

〔施栓管〕

(1) Ｘ45－Ｙ13低温側

a. 外観観察：管支持板穴内表面にはスケールの付着は少なく、製造時の機械加工跡が認められ、スケールが詰まった状態ではなかった。

b. 断面ミクロ：管支持板管穴内表面のスケール厚さは平均約0.06㎜であり、クレビス部は閉塞されておらず間隙支持であったと判断される。なお、管支持板管穴内表面に軽微な腐食が認められた。

c. ＥＰＭＡ：施栓管であるＸ45－Ｙ13低温側の管支持板管穴内に付着した 0.1㎜程度のスケールは鉄が主成分であった。

(2) Ｘ46－Ｙ21低温側

a. 外観観察：低温側の管支持板管穴内表面にはスケールの付着は少なく、製造時の機械加工跡が認められ、スケールが詰まった状態ではなかった。

b. 断面ミクロ：管支持板管穴内表面のスケールの平均厚さは約0.03㎜であり、クレビス部は閉塞されておらず、間隙支持であったと判断される。なお、管支持板管穴内表面に軽微な腐食が認められた。

4. まとめ

伝熱管損傷の原因調査のため、破断管及び周辺管の第６管支持板の一部を取り出し、光学拡大観察等を実施した結果は、以下のとおりである。

(1) 破断管Ｘ45－Ｙ14の低温側及び高温側の第６管支持板を調査した結果、管支持板クレビス部にスケールが詰まり、管支持板部で固定支持であったが、破断管の寸法検査の結果、寸法は設計仕様どおりであり、デンティングとは異なった状態であったと判断される。

また、スケールはほぼ同じ厚さの３層に大別され、伝熱管側から、りんを含んだ層、２次系水中の不純物を多く含んだ層、管支持板が腐食した層となっていた。

(2) 使用管であるＸ45－Ｙ15の低温側及び高温側の第６管支持板を調査した結果、管支持板管穴内表面のスケール付着は少なく、間隙支持であったと判断される。

(3) 使用管であるＸ45－Ｙ12及びＸ46－Ｙ14の低温側の第６管支持板を調査した結果、管支持板クレビス部にスケールが詰まっており、固定支持であったと判断される。

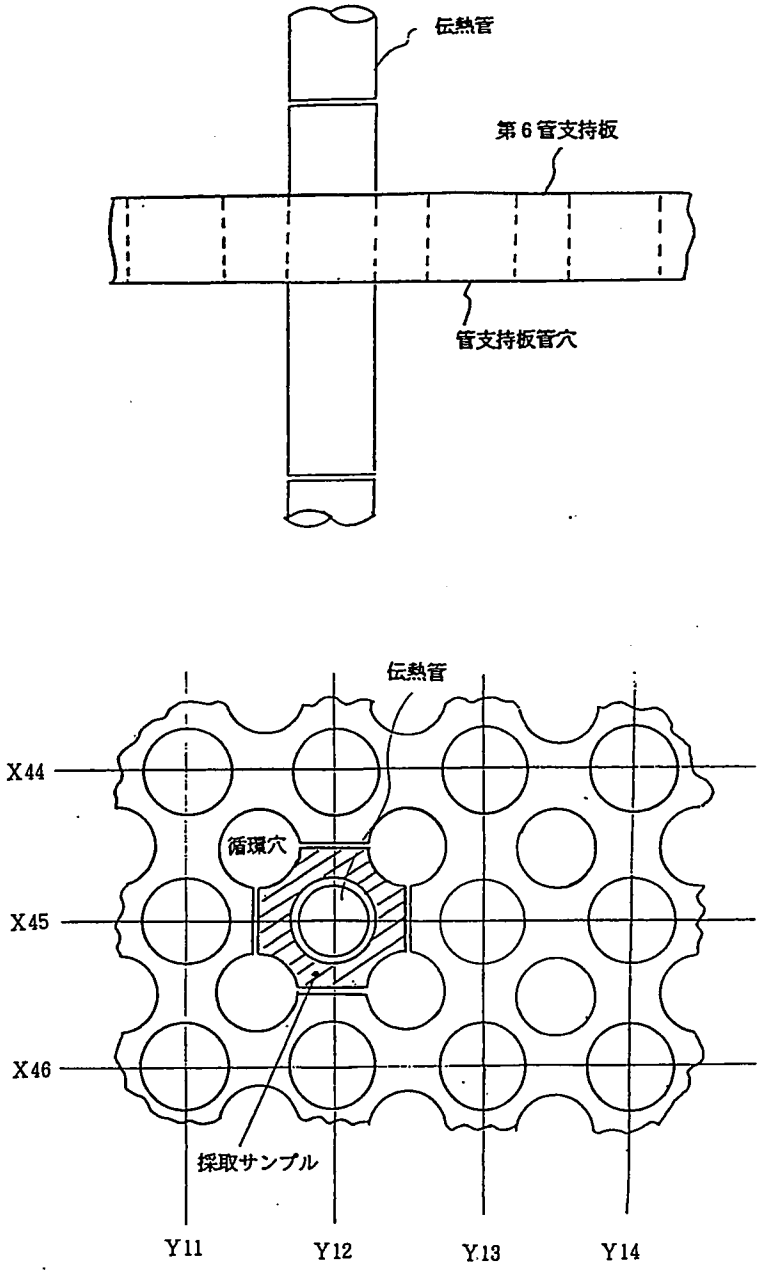
また、第２回定期検査時に施栓した伝熱管であるＸ45－Ｙ13及びＸ46－Ｙ21の低温側の第６管支持板を調査した結果、管支持板管穴内表面のスケール付着は少なく、間隙支持であったと判断される。

以上のことから、使用管（Ｘ45－Ｙ15を除く。）の管支持板クレビス部は、伝熱管表面での局所的な蒸発現象の効果により、スケールが生成しやすい部分であるため、当初は間隙支持であったものが、運転時間の経過とともに固定支持になったものと考えられる。

また、第２回定期検査時に施栓した伝熱管は、施栓時においては間隙支持であり、施栓後は伝熱管表面での蒸発現象が起きないため、固定支持にならなかったものと考えられる。

表－1　第６管支持板の調査対象位置

位置 X	位置 Y	低温側 ／ 高温側	備考
45	12	低温側	使用管
45	13	低温側	施栓管
45	14	低温側	使用管（破断管）
		高温側	
45	15	低温側	使用管
		高温側	
46	14	低温側	使用管
46	21	低温側	施栓管

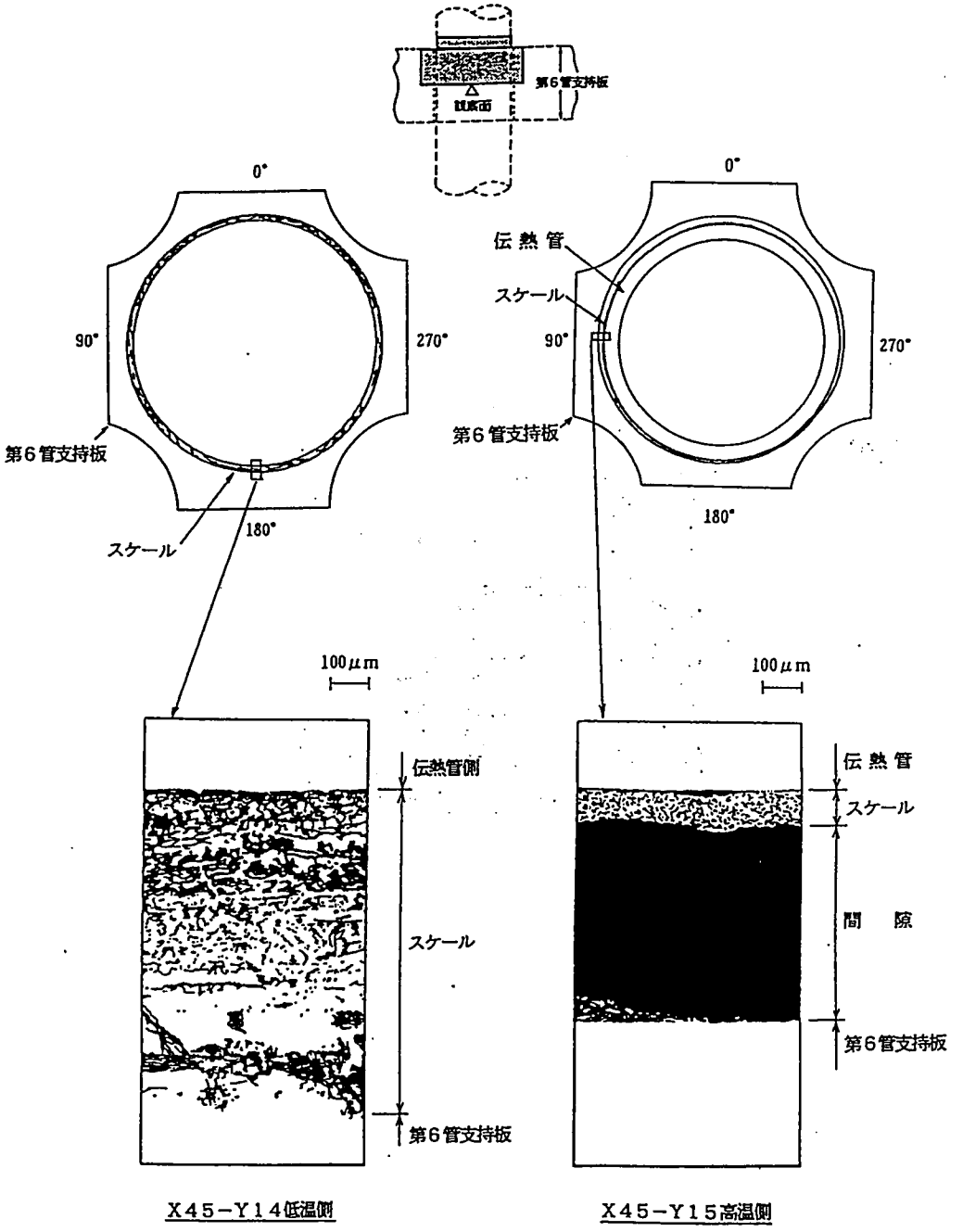


図－１　管支持板採取サンプルの例

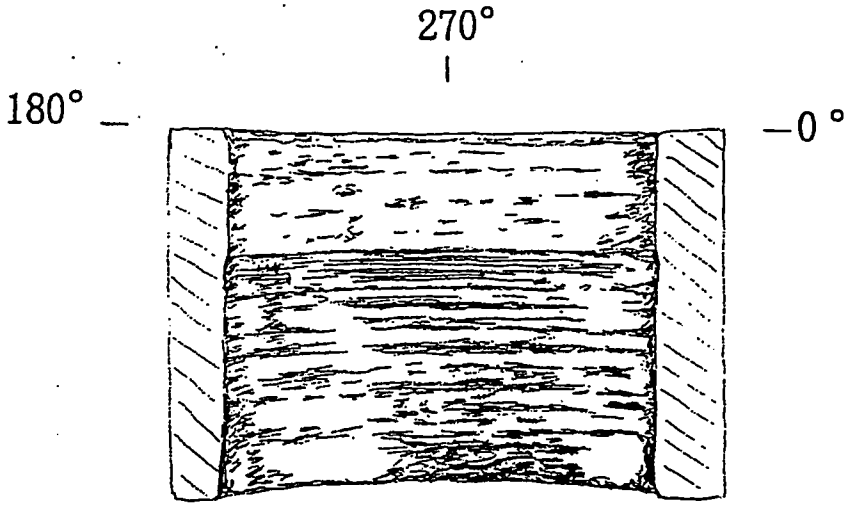
表－2　第６管支持板調査結果

位置 X	位置 Y	低温側／高温側	クレビス部の状況	調査より判断される支持状態	備考
45	12	低温側	管穴表面のスケール付着が多く、管支持板クレビス部は詰まっていた。また、管支持板に腐食が認められた。スケールの平均厚さは約 0.6㎜であった。	固　定	使用管
45	13	低温側	管穴内表面はスケールの付着は少なく、製造時の機械加工跡が認められた。また、管支持板に軽微な腐食が認められた。伝熱管と管支持板との隙間は、約 0.5㎜、スケールの平均厚さは約0.06㎜であった。	間　隙	施栓管
45	14	低温側	管穴内表面はスケールで覆れており、管支持板クレビス部は詰まっていた。また、管支持板に腐食が認められた。スケールの平均厚さは約 0.6㎜であった。	固　定	（使用破断管）
		高温側		固　定	
45	15	低温側	管穴内表面はスケールの付着は少なく、製造時の機械加工跡が認められた。また、管支持板に軽微な腐食が認められた。伝熱管と管支持板との隙間は、約 0.5㎜、スケールの平均厚さは約0.02㎜であった。	間　隙	使用管
		高温側		間　隙	
46	14	低温側	管穴内表面はスケールで覆れており、管支持板クレビス部は詰まっていた。また、管支持板に腐食が認められた。スケールの平均厚さは約 0.5㎜であった。	固　定	使用管
46	21	低温側	管穴内表面はスケールの付着は少なく、製造時の機械加工跡が認められた。また、管支持板に軽微な腐食が認められた。伝熱管と管支持板との隙間は、約 0.5㎜、スケールの平均厚さは約0.03㎜であった。	間　隙	施栓管

固　定：固定支持
間　隙：間隙支持



図－２　　第６管支持板の水平断面ミクロ観察結果（管支持板板厚中央）



図－3　管支持板管穴内表面外観観察結果例

（X45－Y15低温側第6管支持板）

資料－4.1.3.2

伝　熱　管　振　動　計　測　結　果

1. 目的

現場において破断管、周辺管及びその他の伝熱管の振動数の計測を実施し、伝熱管の管支持板部における支持状態を推定し、管支持板の調査とあわせて支持状態を判断する。また、支持状態の経年変化調査のため施栓時期の異なる施栓管についても調査する。

2. 計測対象管

計測対象は破断管（X45－Y14）、X44列、X45列、Y11列及び施栓管等の合計75本の伝熱管である。計測位置を表－1に示す。Y11列伝熱管は設計上ＡＶＢが挿入されていない最大曲げ半径管であり、U字部の計測が可能な伝熱管の代表として選定する。

3. 計測方法

振動計測は、ＥＣＴ用プローブに加振装置及び加速度計を連結した専用プローブを管板側よりプッシャーで計測位置まで挿入し、偏心重量を持つ小型モータの回転により伝熱管を自由振動させ、その周波数スペクトルから伝熱管の振動数を求め支持状態を評価する。

振動計測概念図を図－1に示す。

4. 計測要領（手順）

計測は以下の手順により実施する。

① ループ室内外に各装置をセットする。

② 案内装置にて計測アドレスにプローブを案内する。

③ プッシャーにてプローブを所定の位置まで挿入する。

④ 加振用プローブにて加振し、データを記録する。

上記手順を計測対象管毎に実施する。

なお、計測は蒸気発生器２次側が水抜きされているときに行う。

5. 計測結果

計測結果による評価一覧表を表－2に示す。

図－2～図－3に対象伝熱管の振動波形及び周波数分析結果の代表例を示す。

6. 解析方法及び解析とモックアップの対比

実機計測結果を評価するために、解析検討を行うが、解析方法の妥当性と振動数計測値との対応づけを、モックアップ実験を含め確認する。

(1) 解析方法

固有値解析はサブスペース法を用いて実施した。本解析コードと汎用振動解析コード（ＮＡＳＴＲＡＮ）による計算結果の比較は、次のとおりである。

本解析コードと汎用振動解析コードＮＡＳＴＲＡＮの比較例

モデル / 解析コード	U字部
本解析コード　（A）	1.0
ＮＡＳＴＲＡＮ　（B）	1.003

表中の数字は本解析コード結果を1.0 とした値を示す。

(2) モックアップとの対比

モックアップで固定状態を模擬するために伝熱管直管部の両端を接着剤で固定したケースと溶接にて固定したケースの実験を実施し、解析値と対比した。結果を図－４に示すが、いずれも解析値よりやや低目の振動数を示した。

解析における固定条件では伝熱管の端部は変位及び回転が完全理想状態で拘束されるが、モックアップ試験ではこの条件を完全には満足しないため、モックアップ試験の計測値が解析値より若干低い値となるものと考えられる。

以上のことから、振動数が解析値と比較しモックアップ試験結果でみられたばらつき範囲内であるものは、固定であるものとする。

7. 計測結果と解析値の比較

計測対象の伝熱管を、次の４つのカテゴリーに別けて整理する。　（表－１）

① 破断管（Ｘ45－Ｙ14）とその周辺使用管 …… 計16本

② 周辺施栓管 …… 計14本

③ Ｙ11列伝熱管（ＡＶＢ支持不要管） …… 計25本

④ 施栓時期の異なる施栓管 …… 計20本

以下、各々のカテゴリー毎に、計測結果と解析結果を比較して示す。

(1) 破断管と周辺使用管

U字部での計測値と解析値の比較を図－５、６に示す。

また、直管部での計測値と解析値の比較を図－７、８に示す。

(2) 周辺施栓管

U字部での計測値と解析値の比較を図－６、９に示す。

また、直管部での計測値と解析値の比較を図－８、10に示す。

Ｘ45－Ｙ19及びＸ46－Ｙ21については全ての管支持板間について計測した結果と解析値の比較を図－11及び図－12に示す。

(3) Ｙ11列伝熱管

U字部での計測値と解析値の比較を図－13に示す。

また、直管部での計測値と解析値の比較を図－14に示す。

(4) 施栓時期の異なる施栓管

直管部での計測値と解析値の比較を図－15に示す。U字（頂部）部計測値と解析値の比較を図－16に示す。

8. まとめ

振動計測及び管支持板調査（添付資料－4.1.3.1）の結果に基づき、伝熱管の管支持板部における支持状態を評価した結果は、以下のとおりである。　（表－２）

なお、周辺管についてはこれらの結果をまとめて表－３に示す。

(1) 破断管は、第６管支持板部は固定支持であった。

(2) 使用管の第６管支持板部の支持状態はＸ４５－Ｙ１５を除き固定支持であった。

なお、Ｘ４５－Ｙ１５は振動計測結果では、固定－ピンであるが、管支持板調査結果とあわせると実際はピン支持と判断される。

(3) 第２回定期検査時に施栓した伝熱管の第６管支持板部は振動計測結果ではピン支持もしくはそれに近い状態であり、管支持板調査結果とあわせるとピン支持と判断される。また、第６管支持板部以外の管支持板部も第６管支持板部と同様の支持状態であった。第３回定期検査において施栓した伝熱管の第６管支持板部は「固定－ピン」の支持状態であり、第４回定期検査において施栓した伝熱管は大部分固定支持であった。

一方、第５回定期検査及び第６回定期検査において施栓した伝熱管の第６管支持板部の支持状態はいずれも固定支持であった。

これらのことから、第５運転期間に使用管であった伝熱管は、第４運転期間の頃に固定支持になったものと推定される。

表－１(1/4) 計測位置一覧表

計測対象	計測位置		管支持板部			U字管	備考
	計測対象伝熱管		管支持板番号	低温側	高温側	頂部	
破断管と周辺(使用管)(A-S/G)	X45	Y14	第５－第６凹	○	○	○	破断管
	X28	Y40	〃	○	○	○	
	X28	Y41	〃	○	○	○	
	X43	Y23	〃	○	○	○	ＡＶＢ取出後
	X44	Y12	〃	○	○	○	〃
	X44	Y13	〃	○	○	○	〃
	X44	Y14	〃	○	○	○	
	X44	Y15	〃	○	－	－	(U字管取出後(高温側スリーブ管
	X44	Y17	〃	◎	○	○	ＡＶＢ取出後
	X44	Y19	〃	○	○	○	〃
	X44	Y22	〃	○	○	○	〃
	X44	Y23	〃	○	○	○	〃
	X45	Y12	〃	○	○	○	
	X45	Y15	〃	○	○	○	
	X45	Y23	〃	○	○	○	
	X46	Y14	〃	○	○	○	
周辺施栓管(A-S/G)	X44	Y16	〃	○	○	○	ＡＶＢ取出後
	X44	Y18	〃	○	○	○	〃
	X44	Y20	〃	○	○	○	〃
	X44	Y21	〃	○	○	○	〃
	X45	Y13	〃	○	○	○	
	X45	Y16	〃	○	○	○	
	X45	Y17	〃	○	○	○	
	X45	Y18	〃	○	○	○	

○：計測位置
－：計測せず

表－１(2/4) 計測位置一覧表

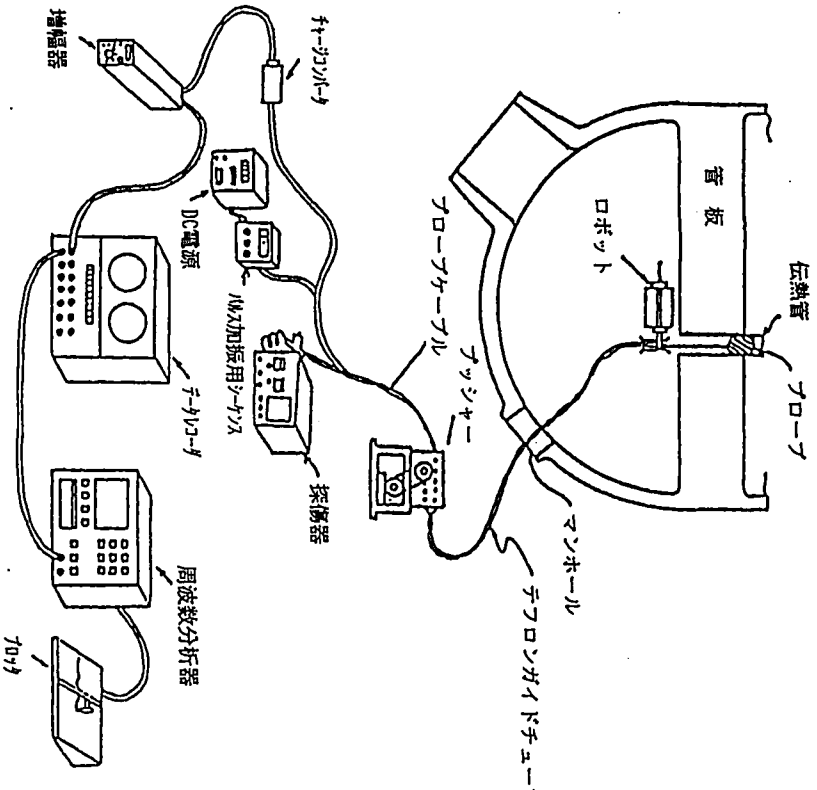
計測対象	計測位置		管支持板部			U字管	備考
	計測対象伝熱管		管支持板番号	低温側	高温側	頂部	
周辺施栓管(A-S/G)	X45	Y19	第５－第６凹	○	○	○	
			第４－第５凹	○	○		
			第３－第４凹	○	○		
			第２－第３凹	○	○		
			第１－第２凹	○	○		
			管板－第１凹	○	○		
	X45	Y20	第５－第６凹	○	○	○	
	X45	Y21	〃	○	○	－	U字管部プローブ挿入不可
	X45	Y22	〃	○	○	○	
	X46	Y19	〃	○	○	○	
	X46	Y21	第５－第６凹	○	○	○	
			第４－第５凹	○	○		
			第３－第４凹	○	○		
			第２－第３凹	○	○		
			第１－第２凹	○	○		
			管板－第１凹	○	○		
施栓特期の異なる施栓管(A-S/G)	X37	Y15	第５－第６凹	○	○	－	第２回定検施栓管
	X37	Y16	〃	○	○	－	〃
	X37	Y17	〃	○	○	－	〃
	X38	Y15	〃	○	○	－	〃
	X38	Y16	〃	○	○	－	第２回定検施栓管
	X38	Y17	〃	○	○	－	第13回定検施栓管
	X40	Y38	〃	○	○	－	第11回定検施栓管
	X47	Y41	〃	○	○	－	第６回定検施栓管
	X50	Y37	〃	○	○	－	第11回定検施栓管

表－1 (3/4) 計測位置一覧表

計測位置 カテゴリー / 計測対象伝熱管			管支持板部			U字管	備考
			管支持板番号	低温側	高温側	頂部	
Y11列伝熱管 (A-S/G)	X29	Y11	第5－第6間	○	○	○	(X47－Y11以外は使用管)
	X30	Y11	〃	○	○	○	
	X31	Y11	〃	○	○	○	
	X32	Y11	〃	○	○	○	
	X33	Y11	〃	○	○	○	
	X34	Y11	〃	○	○	○	
	X35	Y11	〃	○	○	○	
	X36	Y11	〃	○	○	○	
	X37	Y11	〃	○	○	○	
	X38	Y11	〃	○	○	○	
	X39	Y11	〃	○	○	○	
	X40	Y11	〃	○	○	○	
	X41	Y11	〃	○	○	○	
	X42	Y11	〃	○	○	○	
	X43	Y11	〃	○	○	○	
	X44	Y11	〃	○	○	○	
	X45	Y11	〃	○	○	○	
	X46	Y11	〃	○	○	○	
	X47	Y11	〃	○	○	○	施栓管
	X48	Y11	〃	○	○	○	
	X49	Y11	〃	○	○	○	
	X50	Y11	〃	○	○	○	
	X51	Y11	〃	○	○	○	
	X52	Y11	〃	○	○	○	
	X53	Y11	第5－第6間	○	○	○	

表－1 (4/4) 計測位置一覧表

計測位置 カテゴリー / 計測対象伝熱管			管支持板部			U字管	備考
			管支持板番号	低温側	高温側	頂部	
施栓時期の異なる施栓管 (B-S/G)	X46	Y13	第5－第6間	○	○	○	第6回定検施栓管
	X55	Y13	〃	○	○	○	第5回定検施栓管
	X43	Y15	〃	○	○	○	第5回定検施栓管
	X47	Y15	〃	○	○	○	第6回定検施栓管
	X33	Y20	〃	○	○	○	第3回定検施栓管
	X12	Y24	〃	○	○	○	第3回定検施栓管
	X29	Y24	〃	○	○	○	第5回定検施栓管
	X18	Y29	〃	○	○	○	第4回定検施栓管
	X34	Y29	〃	○	○	○	第6回定検施栓管
	X41	Y40	〃	○	○	○	第4回定検施栓管
	X51	Y41	〃	○	○	○	第4回定検施栓管



図－1 蒸気発生器伝熱管振動計測概念図

表－2(1/4) 支持状態の評価一覧表

計測位置 / 計測対象 / カテゴリー			管支持板番号	評価		
				管支持板部		U字部
				低温側	高温側	
破断管と隣接使用管(A-S/G)	X45	Y14	第5－第6間	固定	固定－ピン	隣接管に接触
	X28	Y40	〃	固定	固定	AVB支持
	X28	Y41	〃	固定	固定	AVB支持
	X43	Y23	〃	固定	固定	固定
	X44	Y12	〃	固定	固定	固定
	X44	Y13	〃	固定	固定	固定
	X44	Y14	〃	固定	固定	AVB支持
	X44	Y15	〃	固定	—	—
	X44	Y17	〃	固定	固定	固定
	X44	Y19	〃	固定	固定	固定
	X44	Y22	〃	固定	固定	固定
	X44	Y23	〃	固定	固定	固定
	X45	Y12	〃	固定	固定	固定
	X45	Y15	〃	固定－ピン	固定－ピン	隣接管に接触
	X45	Y23	〃	固定	固定	AVB支持
	X46	Y14	〃	固定	固定	AVB支持
周辺施栓管(A-S/G)	X44	Y16	〃	ピン	固定－ピン	ピン
	X44	Y18	〃	ピン	固定－ピン	ピン
	X44	Y20	〃	ピン	固定－ピン	ピン
	X44	Y21	〃	ピン	固定－ピン	ピン
	X45	Y13	〃	ピン	固定－ピン	ピン
	X45	Y16	〃	ピン	ピン	ピン
	X45	Y17	〃	ピン	固定－ピン	ピン
	X45	Y18	〃	ピン	固定－ピン	ピン

(注) ＊ 「固定－ピン」とは、固定支持とピン支持の中間の値を示す。
＊＊ 「隣接管に接触」とは、X45－Y14が破断後、隣接管に接触したことによる。
＊＊＊ 「AVB支持」とは、U字部がAVBに接触しているため固有振動数が高く、管支持板部の支持状態が判断できない状態を示す。

表－2(2/4) 支持状態の評価一覧表

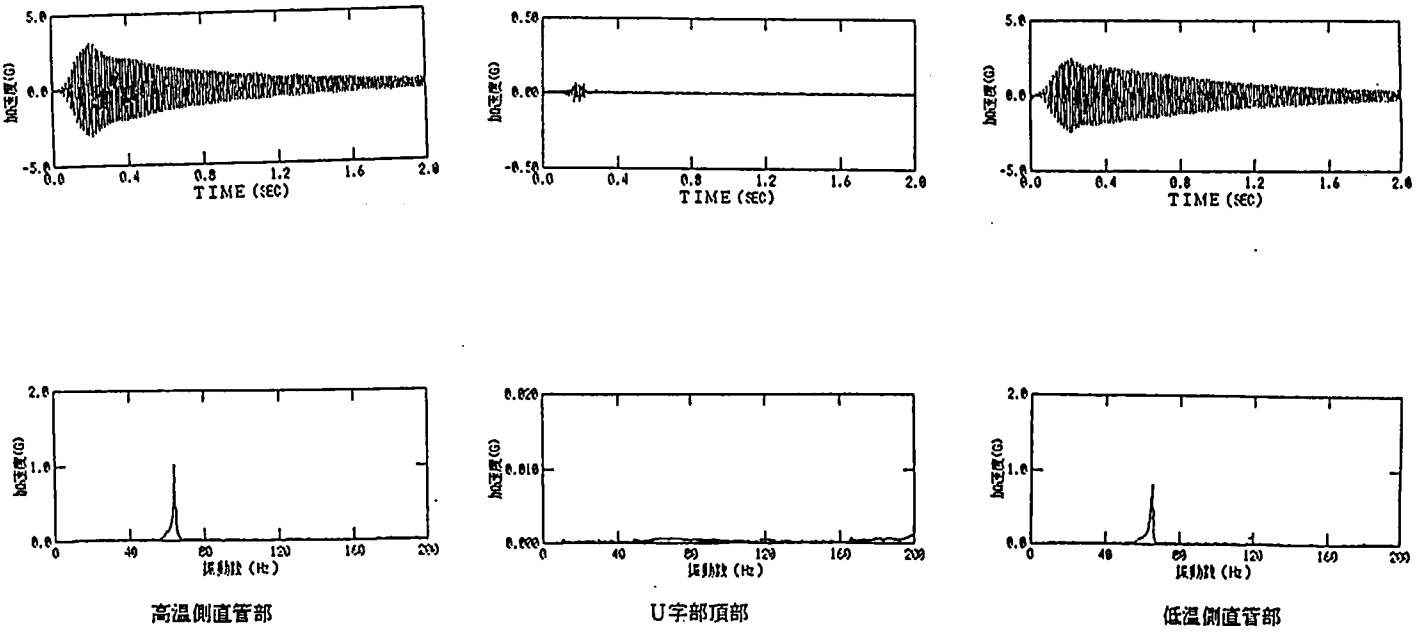
計測位置 / 計測対象 / カテゴリー			管支持板番号	評価		
				管支持板部		U字部
				低温側	高温側	
周辺施栓管(A-S/G)	X45	Y19	第5－第6間	ピン	ピン	ピン
			第4－第5間	ピン	ピン	
			第3－第4間	ピン	固定－ピン	
			第2－第3間	ピン	固定－ピン	
			第1－第2間	ピン	固定－ピン	
			管板－第1間	ピン	固定	
	X45	Y20	第5－第6間	ピン	固定－ピン	ピン
	X45	Y21	〃	ピン	固定－ピン	－
	X45	Y22	〃	固定－ピン	固定－ピン	固定－ピン
	X46	Y19	〃	ピン	ピン	ピン
	X46	Y21	第5－第6間	固定－ピン	ピン	ピン
			第4－第5間	固定－ピン	固定－ピン	
			第3－第4間	ピン	固定－ピン	
			第2－第3間	ピン	固定－ピン	
			第1－第2間	ピン	固定－ピン	
			管板－第1間	固定－ピン	固定	
施栓時期の異なる施栓管(A-S/G)	X37	Y15	第5－第6間	ピン	固定－ピン	－
	X37	Y16	〃	ピン	固定－ピン	－
	X37	Y17	〃	ピン	固定－ピン	－
	X38	Y15	〃	ピン	ピン	－
	X38	Y16	〃	ピン	ピン	－
	X38	Y17	〃	固定	固定	－
	X40	Y38	〃	固定	固定	－
	X47	Y41	〃	固定	固定	－
	X50	Y37	〃	固定	固定	－

表－2(3/4) 支持状態の評価一覧表

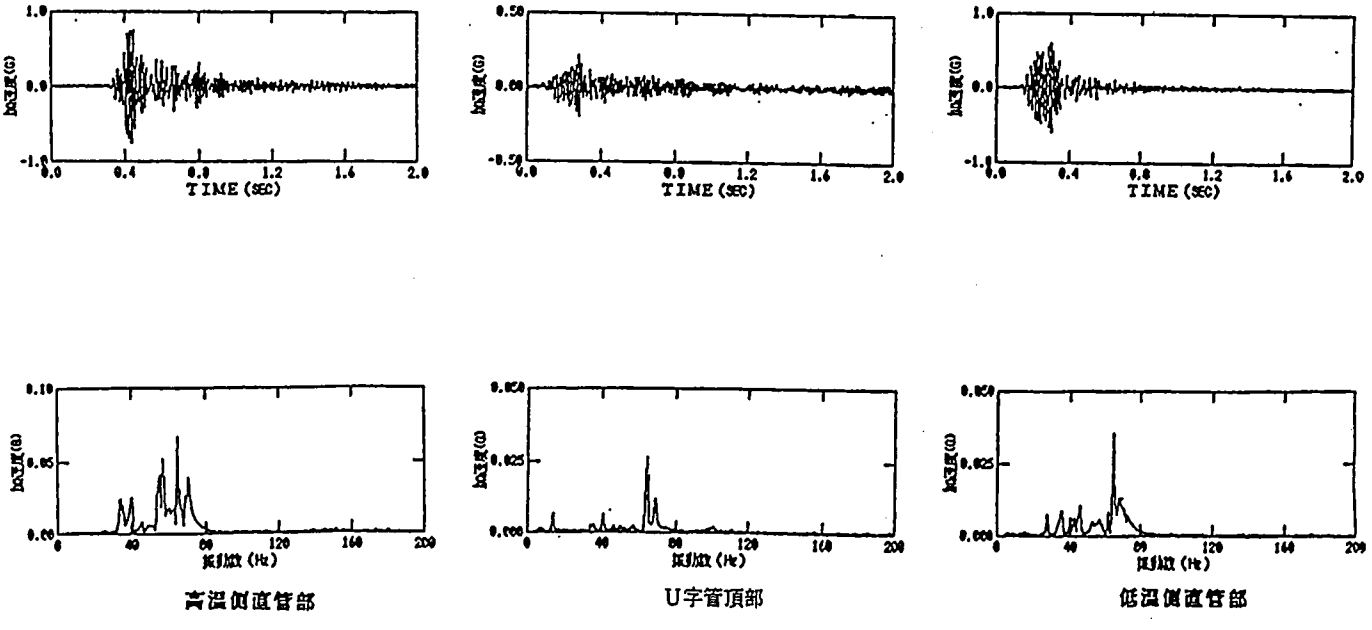
計測位置 / 計測対象 / カテゴリー			管支持板番号	評価		
				管支持板部		U字部
				低温側	高温側	
Y11列伝熱管 X47-Y11以外は使用管(A-S/G)	X29	Y11	第5－第6間	固定	固定	AVB支持
	X30	Y11	〃	固定	固定	AVB支持
	X31	Y11	〃	固定	固定	AVB支持
	X32	Y11	〃	固定	固定	AVB支持
	X33	Y11	〃	固定	固定	AVB支持
	X34	Y11	〃	固定	固定	AVB支持
	X35	Y11	〃	固定	固定	AVB支持
	X36	Y11	〃	固定	固定	AVB支持
	X37	Y11	〃	固定	固定	AVB支持
	X38	Y11	〃	固定	固定	AVB支持
	X39	Y11	〃	固定	固定	AVB支持
	X40	Y11	〃	固定	固定	固定
	X41	Y11	〃	固定	固定	固定
	X42	Y11	〃	固定	固定	固定
	X43	Y11	〃	固定	固定	固定
	X44	Y11	〃	固定	固定	固定
	X45	Y11	〃	固定	固定	固定
	X46	Y11	〃	固定	固定	AVB支持
	X47	Y11	〃	ピン	固定	固定－ピン
	X48	Y11	〃	固定	固定	AVB支持
	X49	Y11	〃	固定	固定	固定
	X50	Y11	〃	固定	固定	AVB支持
	X51	Y11	〃	固定	固定	AVB支持
	X52	Y11	〃	固定	固定	AVB支持
	X53	Y11	第5－第6間	固定	固定	AVB支持

表－2(4/4) 支持状態の評価一覧表

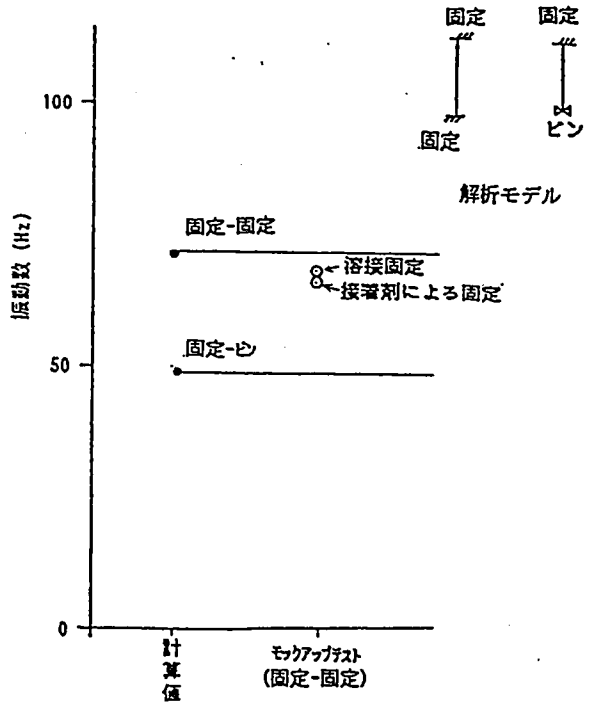
計測位置 / 計測対象 / カテゴリー			管支持板番号	評価		
				管支持板部		U字部
				低温側	高温側	
施栓時期の異なる施栓管(B-S/G)	X46	Y13	第5－第6間	固定	固定	AVB支持
	X55	Y13	〃	固定	固定	AVB支持
	X43	Y15	〃	固定	固定	AVB支持
	X47	Y15	〃	固定	固定	AVB支持
	X33	Y20	〃	固定－ピン	固定－ピン	AVB支持
	X12	Y24	〃	固定－ピン	固定－ピン	AVB支持
	X29	Y24	〃	固定	固定	AVB支持
	X18	Y29	〃	固定－ピン	固定	AVB支持
	X34	Y29	〃	固定	固定	AVB支持
	X41	Y40	〃	固定	固定	AVB支持
	X51	Y41	〃	固定	固定	AVB支持



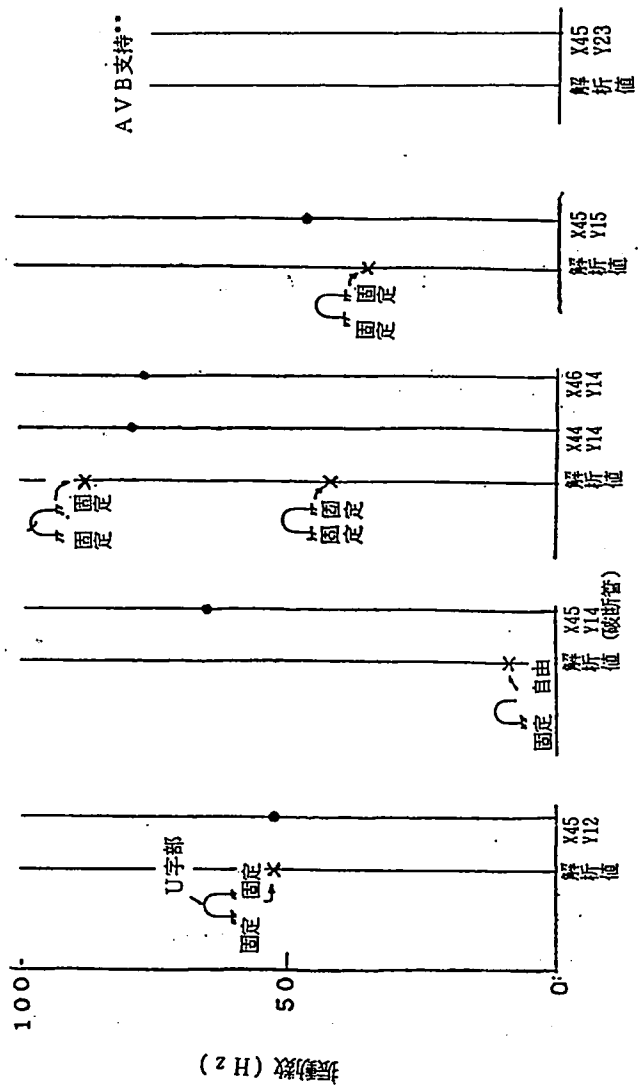
図－２　振動計測結果代表例（Ｘ２９－Ｙ１１）



図－３　振動計測結果代表例（Ｘ４６－Ｙ１９）

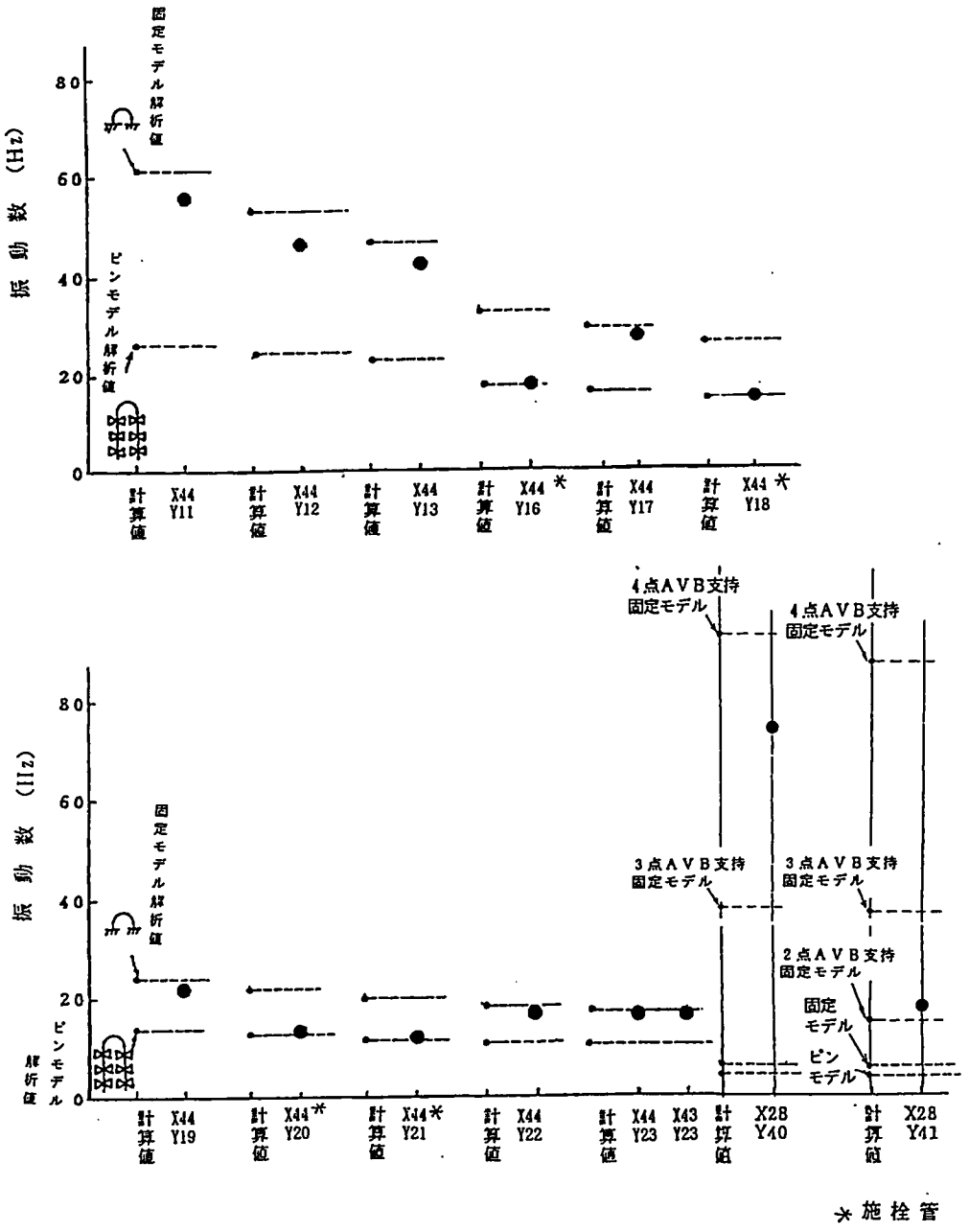


図－4　直管部の支持条件と振動数

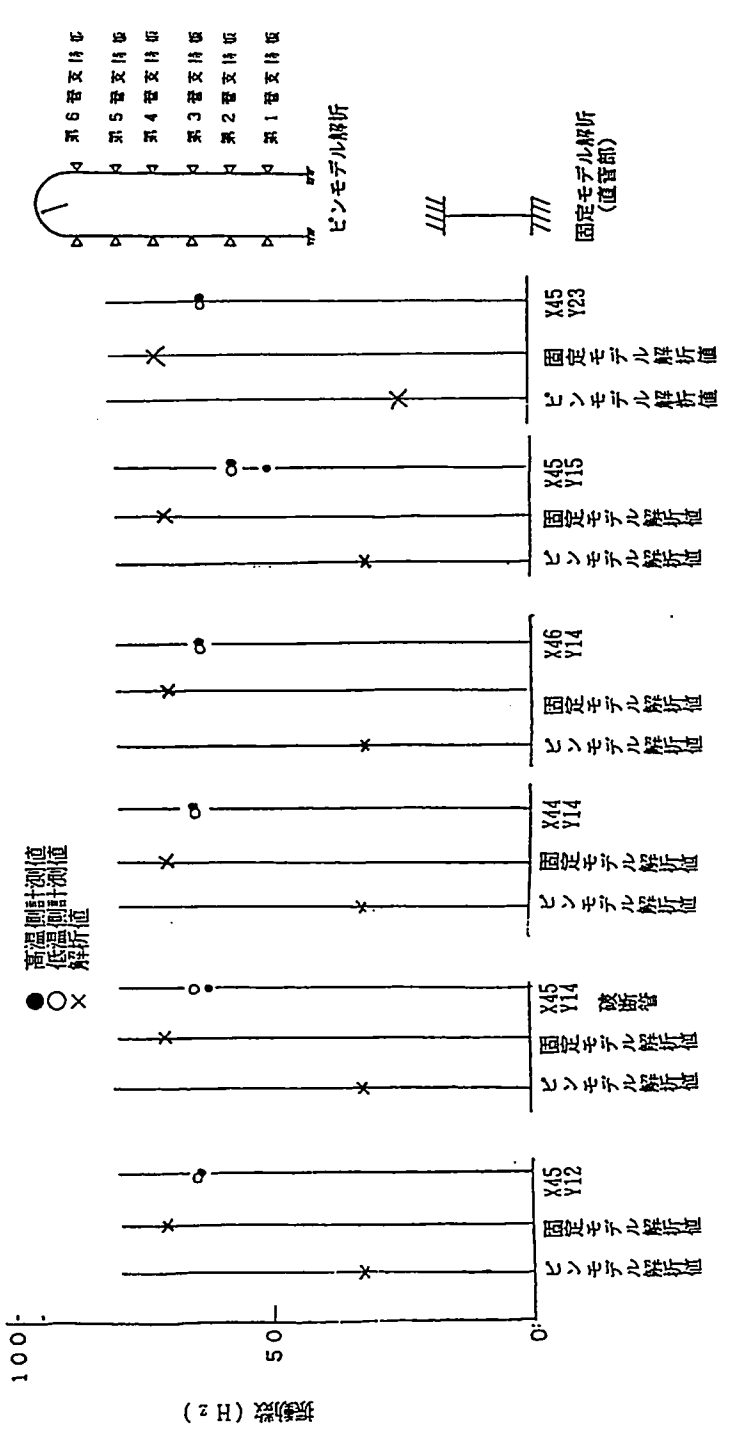


図－5　破断管及び周辺使用管のU字部計測値と解析値の比較

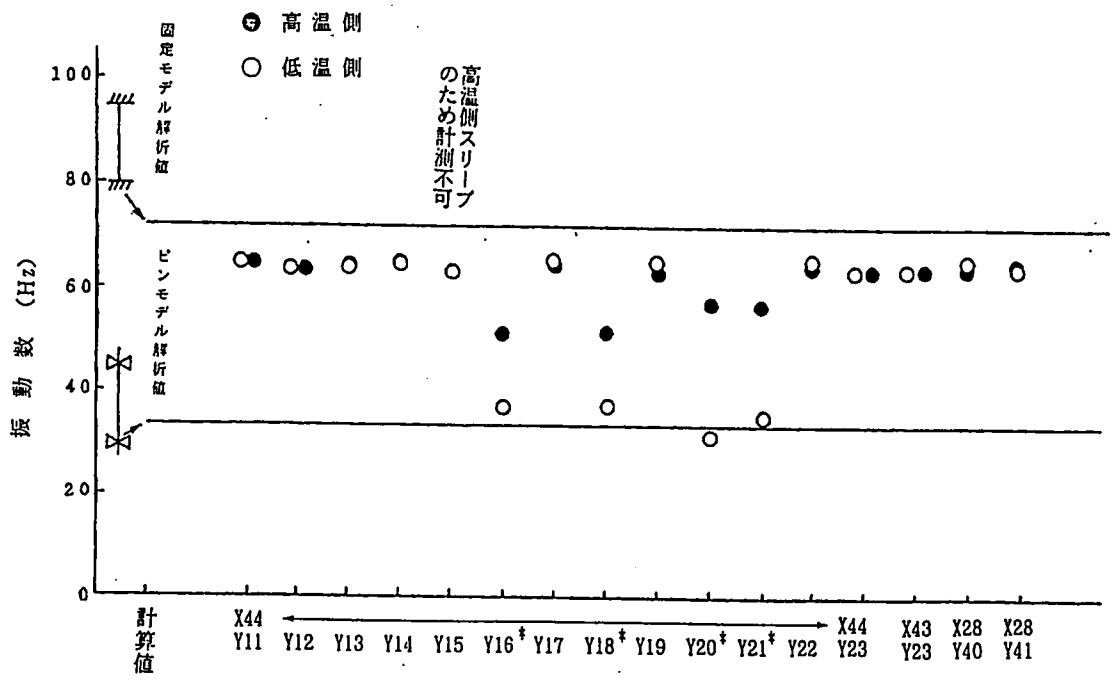
**固有振動数が高いため
計測値は判定不可



図－6　Uベンド（頂部）部計測値と解析値の比較

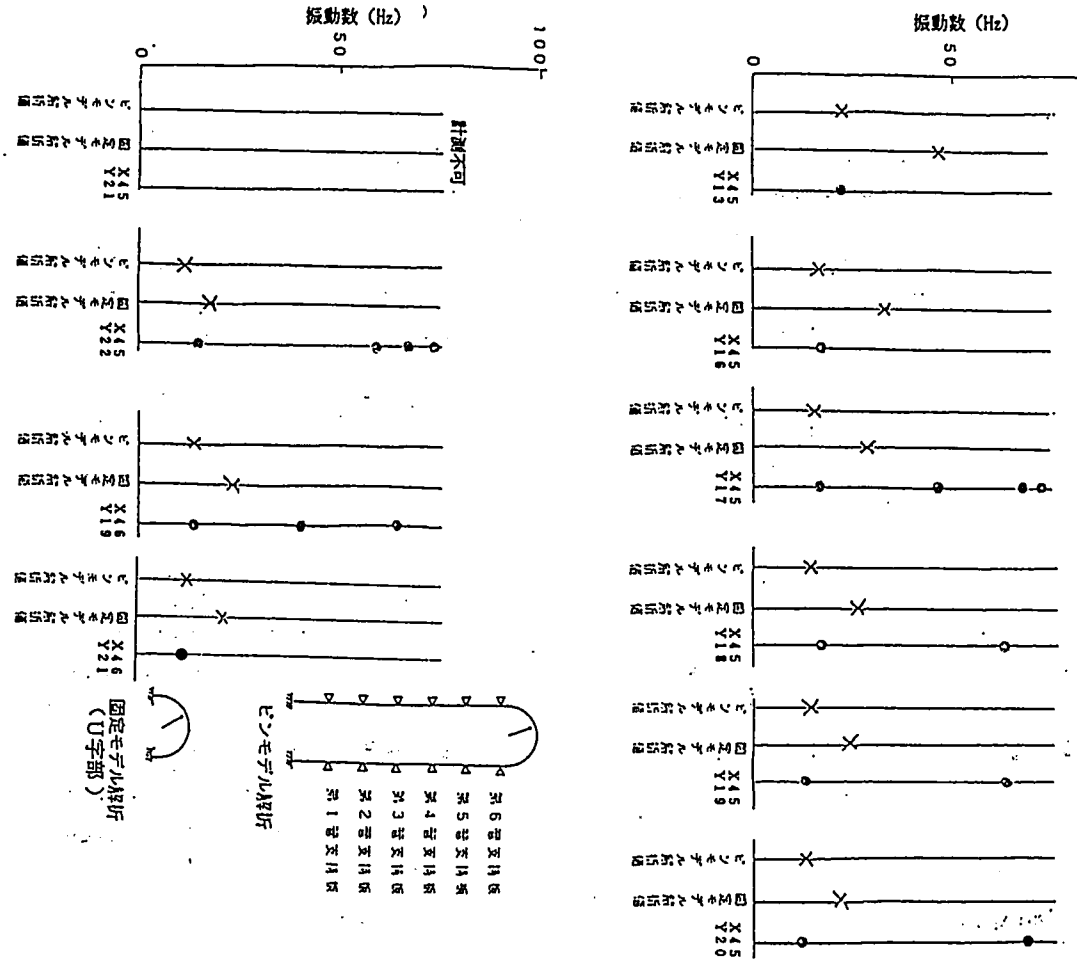


図－7　破断管及び周辺使用管の直管部計測値と解析値の比較

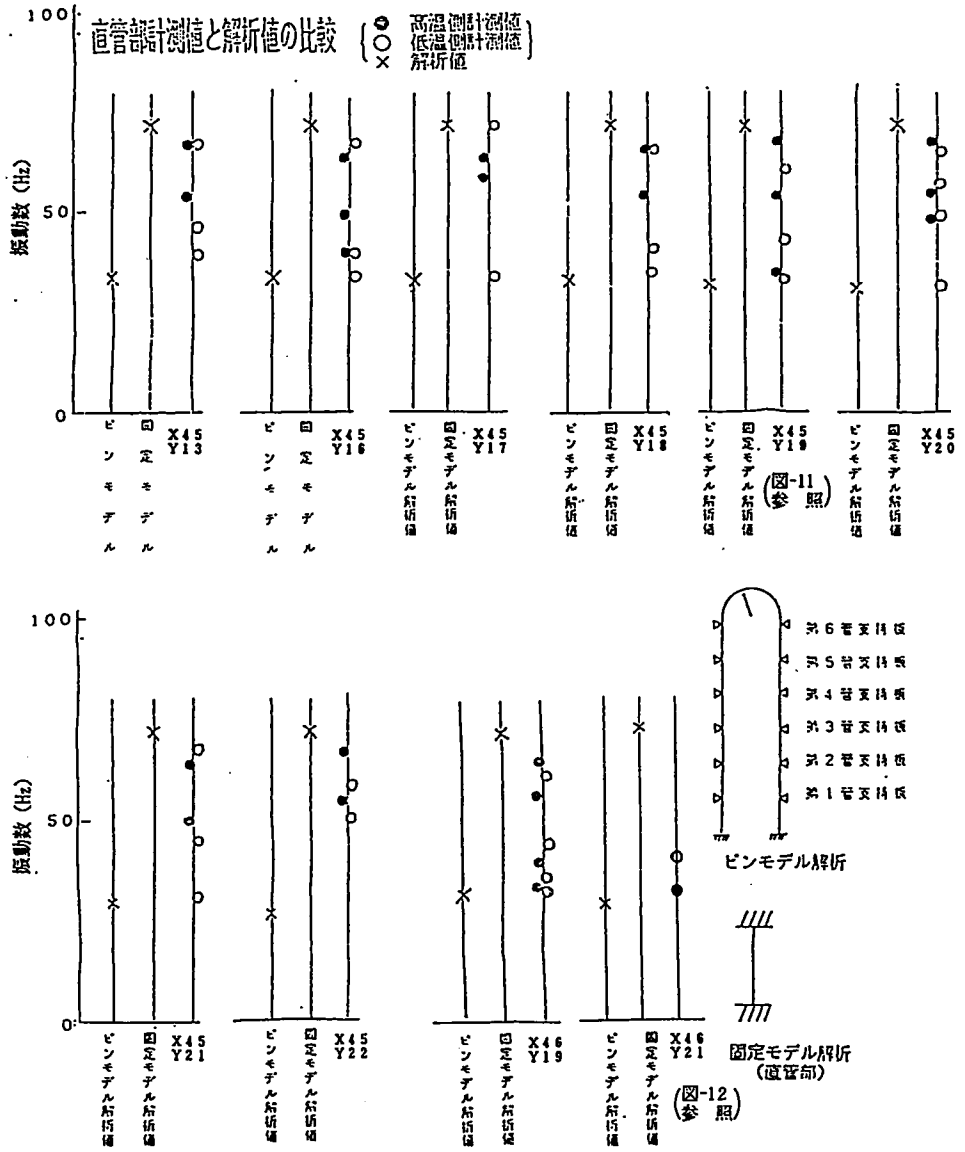


*施栓管

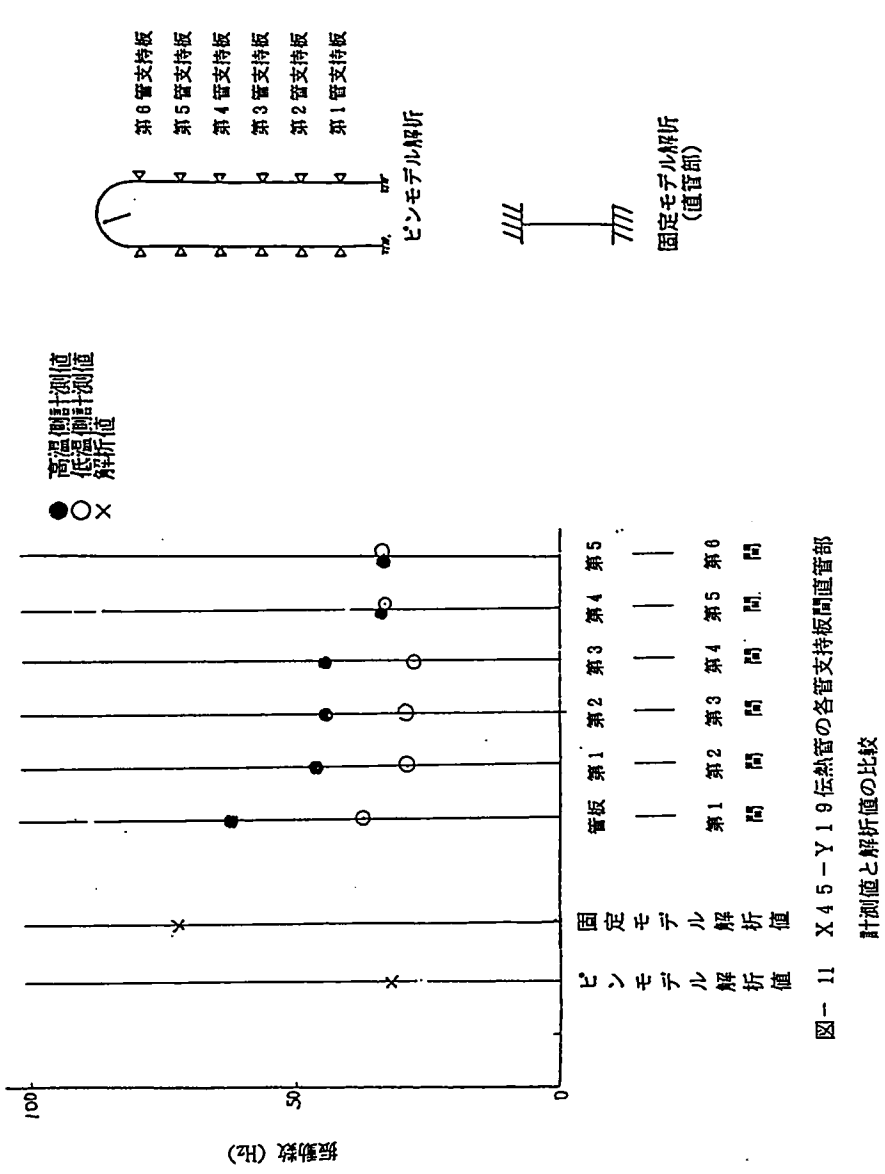
図－ 8 直管部計測値と解析値の比較



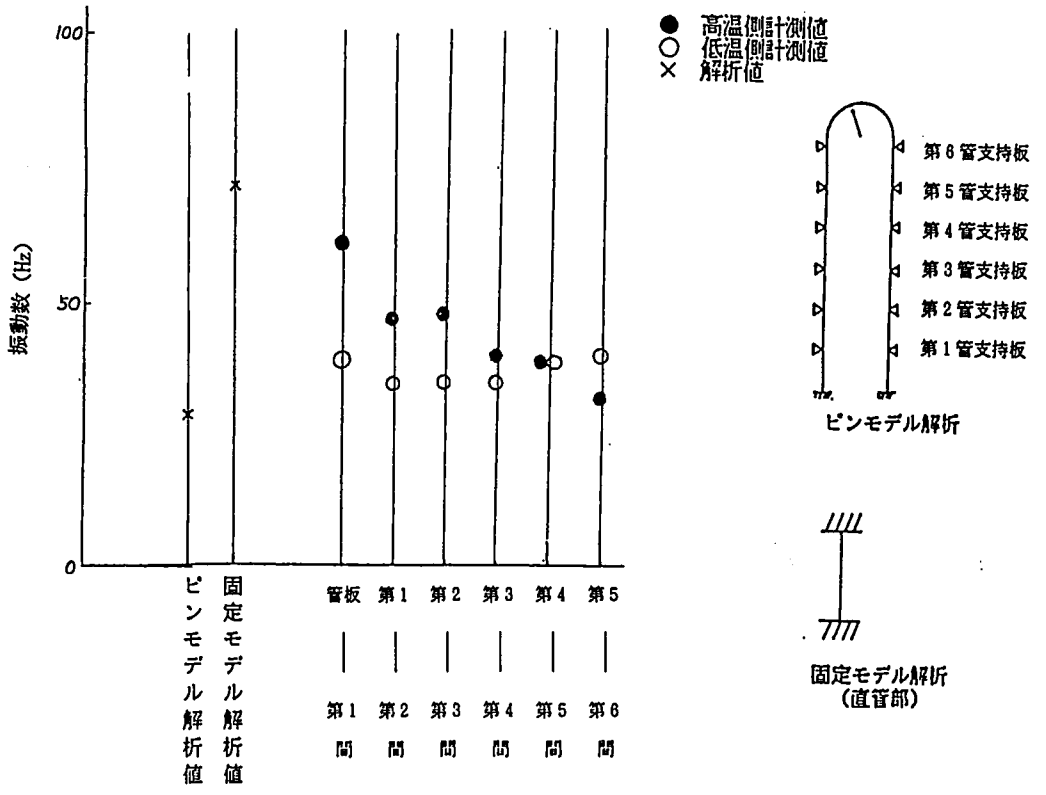
図－ 9 周辺施栓管の計測値と解析値の比較（U字部）



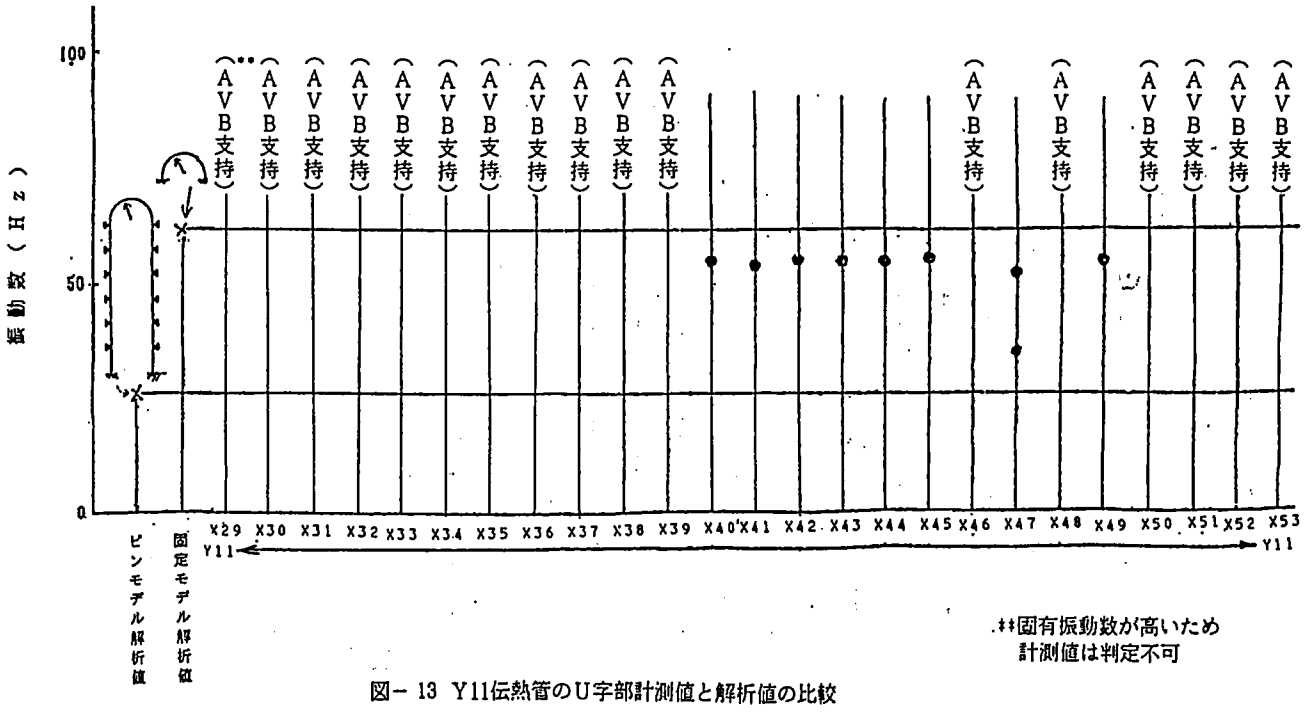
図－ 10　周辺施栓管の計測値と解析値の比較（直管部）



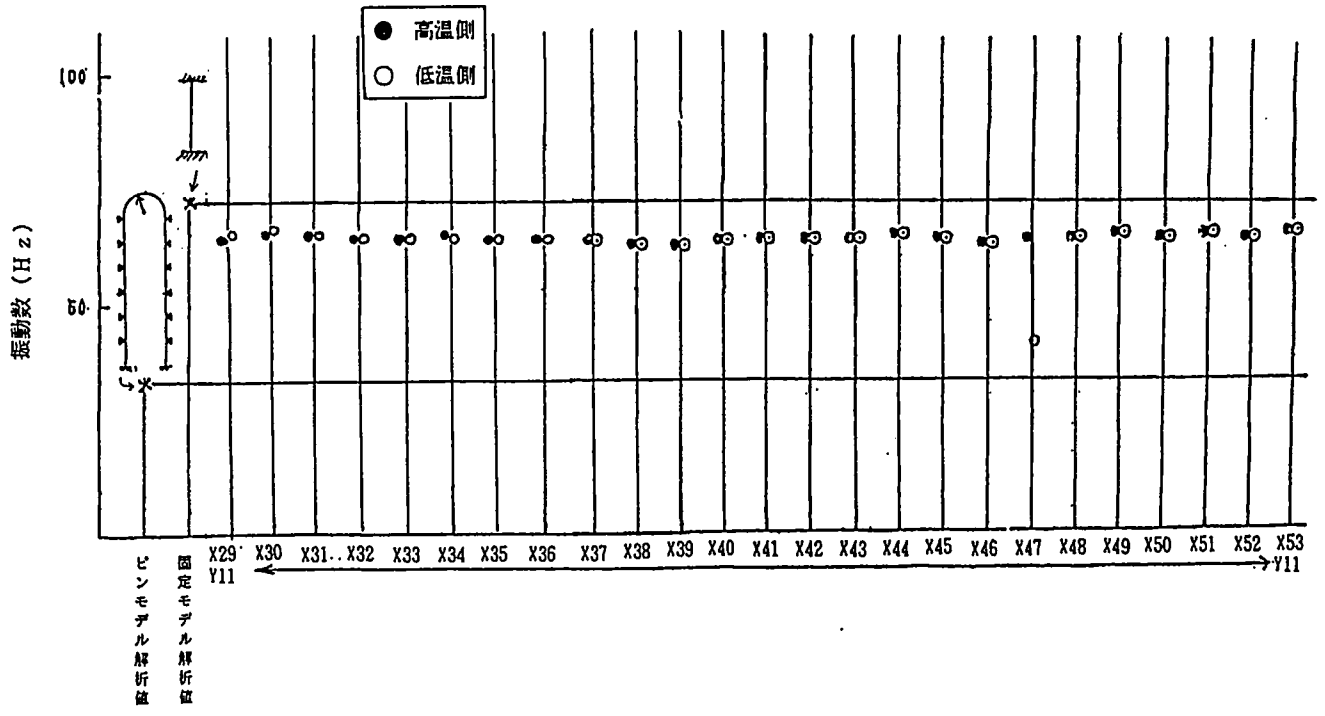
図－ 11　X45－Y19伝熱管の各管支持板間直管部計測値と解析値の比較



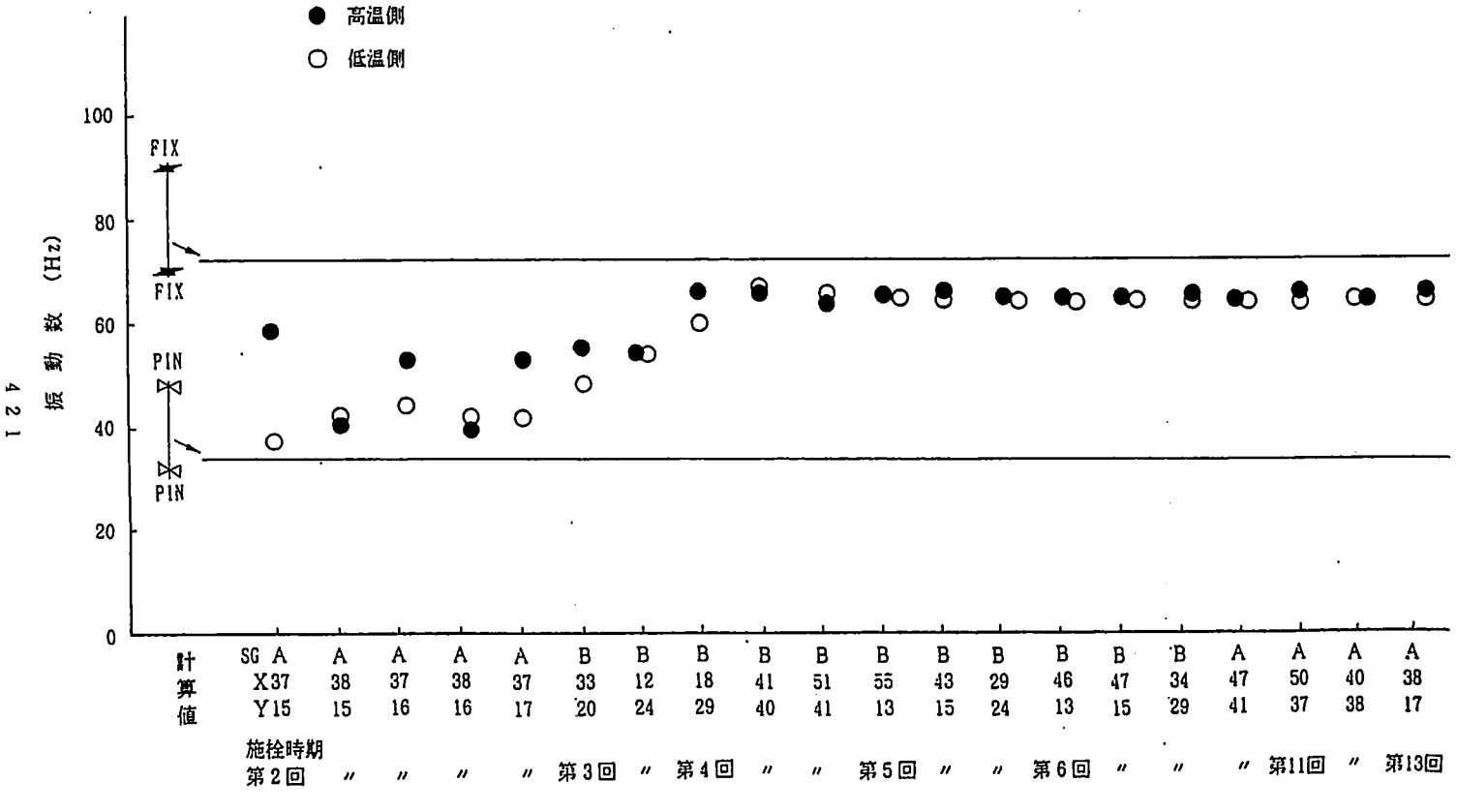
図－ 12　X４６－Y２１伝熱管の各管支持板間直管部計測値と解析値の比較



図－ 13　Y11伝熱管のU字部計測値と解析値の比較



図－ 14　Ｙ１１伝熱管の直管部計測値と解析値の比較



図－ 15　施栓時期の異なる施栓管の直管部計測値と解析値の比較

図－16　U字部（頂部）計測値と解析値の比較（施栓時期の異なる施栓管：B－SG）

**固有振動数が高いため
計測値は判定不可

表－3　振動計測結果及び管支持板調査結果に基づく支持状態

対象伝熱管	振動計測より推定される支持状態 (注1)			管支持板調査より判断される支持状態 (注2)		(注1) 解析に用いる支持状態	施栓管
	低温側直管部 (注3)	高温側直管部 (注3)	U字部	低温側	高温側		
X45－Y11	固　定	固　定	固　定	――	――	固　定	
X45－Y12	固　定	固　定	固　定	固　定	――	固　定	
X45－Y13	ピ　ン	固定－ピン	ピ　ン	間　隙	――	ピ　ン	○
X45－Y14	固　定	固定－ピン	隣接管に接触	固　定	固　定	固　定	
X45－Y15	固定－ピン	固定－ピン	隣接管に接触	間　隙	間　隙	ピ　ン	
X45－Y16	ピ　ン	ピ　ン	ピ　ン	――	――	ピ　ン	○
X45－Y17	ピ　ン	固定－ピン	ピ　ン	――	――	ピ　ン	○
X45－Y18	ピ　ン	固定－ピン	ピ　ン	――	――	ピ　ン	○
X45－Y19	ピ　ン	ピ　ン	ピ　ン	――	――	ピ　ン	○
X45－Y20	ピ　ン	固定－ピン	ピ　ン	――	――	ピ　ン	○
X45－Y21	ピ　ン	固定－ピン	U字部計測不可	――	――	ピ　ン	○
X45－Y22	固定－ピン	固定－ピン	固定－ピン	――	――	ピ　ン	○

（注1）　固　　定：第6管支持板部が固定支持　　○：施栓管を示す
　　ピ　　ン：第6管支持板部がピン支持
　　固定－ピン：第6管支持板部が固定支持とピン支持の中間
（注2）　固　　定：第6管支持板部が固定支持
　　間　　隙：第6管支持板部が間隙支持
（注3）　直管部はいずれも第5管支持板～第6管支持板間での測定に基づく。

2 次 系 水 質 履 歴 調 査 結 果

1. 目的

伝熱管損傷の原因調査の一環として、環境の影響を調査するために蒸気発生器の２次系の水質履歴について調査する。

2. 調査方法

蒸気発生器の２次系水の水質記録を調査し、他プラントの状況とも比較する。

3. 調査結果

3.1 ２次系水質履歴

美浜２号機の２次系の系統は図－１に示すとおりであり、２次系の水処理は、運転開始初期はりん酸塩処理が適用されていたが、第２運転期間までに伝熱管の管支持板部、管板直上部でりん酸塩の濃縮により、損傷側蒸気発生器で 171本の伝熱管の腐食減肉を経験したことから、第３運転期間から、減肉防止対策として揮発性薬品処理（以下「ＡＶＴ」という。）に変更された。

ＡＶＴに変更された後は、渦電流探傷検査や金属調査の結果において、新たな腐食減肉の発生や進展は認められていない。

また、２次系水質は、全ての期間を通じて水質管理値内であり、異常は認められなかった。（表－１、表－２）

3.2 ２次系水質

(1) 起動時の蒸気発生器２次系水の水質

起動時の蒸気発生器の２次系水の水質について、過去の実績及び他プラントと比較すると次のとおりであり、他プラントと比較しても特異なものではなかった。

プラント	美 浜 ２ 号 機			美浜１号機	大飯１号機
運転期間	第14運転期間 (H2. 7～)	第13運転期間 (H1. 3～)	第12運転期間 (S62. 10～)	第10運転期間 (S63. 4～)	第９運転期間 (H2. 3～)
Ｎａ (ppb)	7	7	18	6	0.4
Ｃｌ (ppb)	13	28	27	35	11

(2) 通常運転時の蒸気発生器２次系水の水質

蒸気発生器２次系水の不純物のうち、Ｎａ及びＣｌの運転期間平均値を前運転期間、他プラントの最近の例と比較してまとめると次のとおりであり、美浜２号機は他プラントの例と比べても特異なものではない。

プラント	美浜２号機			美浜１号機	大飯１号機
運転期間	第14運転期間	第13運転期間	第12運転期間	第10運転期間	第９運転期間
Ｎａ (ppb) Ｃｌ (ppb)	0.3 2.2	0.4 2.5	0.6 2.7	0.3 2.7	0.1 0.7

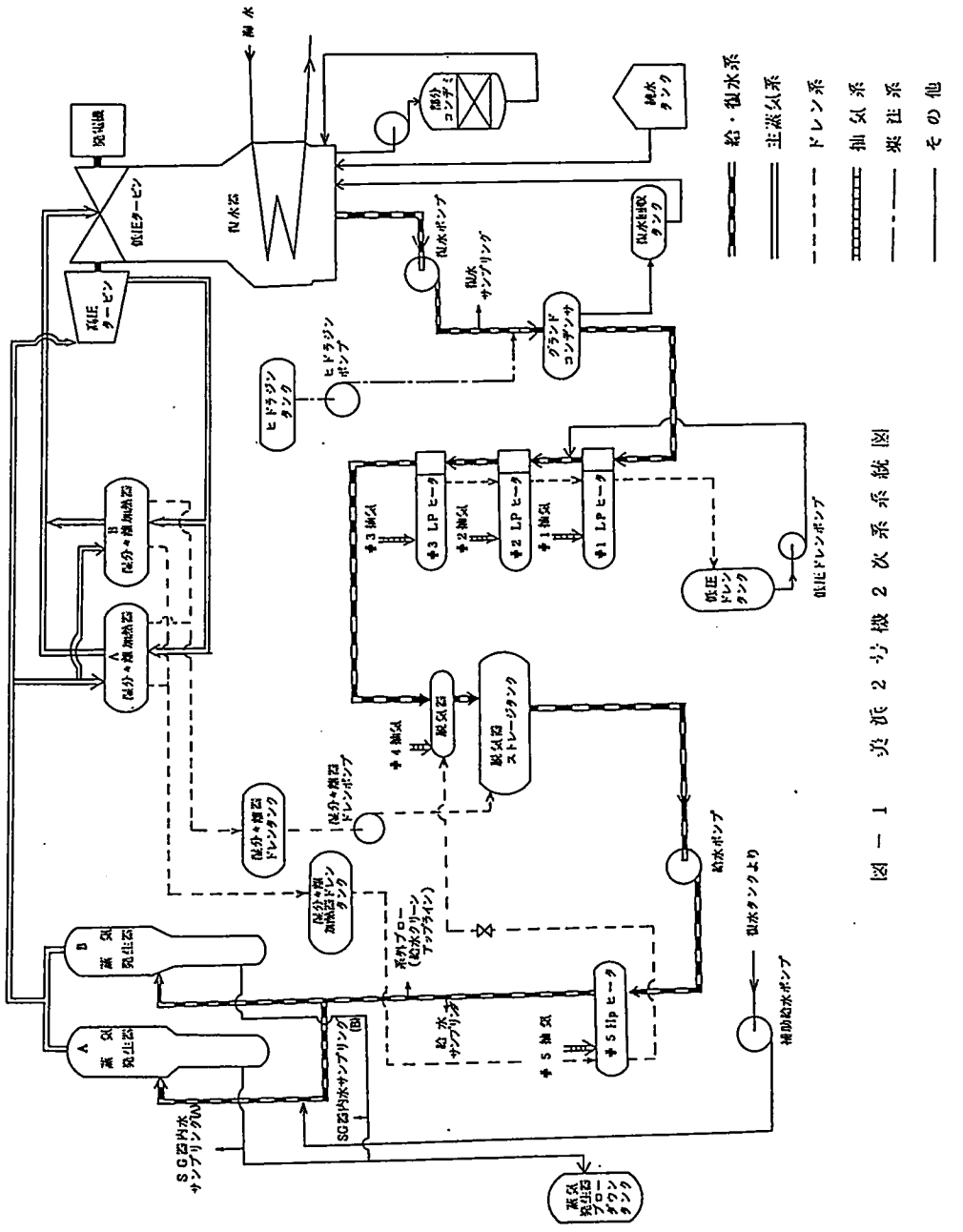
4. まとめ

運転開始以来の２次系水質を調査した結果は、以下のとおりである。

(1) ２次系の水処理は、運転開始初期はりん酸塩処理が適用されていたが、第３運転期間からＡＶＴに変更された。

(2) ＡＶＴ切替え後、蒸気発生器への不純物持込み低減を目的として水質改善対策を実施してきた結果、蒸気発生器２次系水の水質は起動時及び通常運転時のいずれにおいても改善されてきており、ＡＶＴに変更後の蒸気発生器の２次系水質は、全ての期間を通じて水質管理値内であり、異常は認められなかった。

(3) 他プラントと比較しても、特に有意な差は認められなかった。



図－１ 美浜２号機２次系系統図

表－1　２次系水質改善に係わる主要対策

(1)　還元性雰囲気強化対策

対　　策	目　　的	実施時期
部分復水脱塩処理装置設置による給水中ヒドラジン濃度の上昇	通常運転時の２次系水質の還元性を強化するため部分復水脱塩処理装置を設置し、運転中の給水ヒドラジン濃度を５～10ppb から100ppbに上昇させた。	第12運転期間以降
ヒドラジン煮き	定検中に生成された赤錆等の酸化物を起動前に還元する。	第９回定期検査以降

(2)　アルカリ等不純物対策

対　　策	目　　的	実施時期
補給水のモル比管理	蒸気発生器への遊離アルカリの持込みを無くする。	第９運転期間以降
スラッジランシング	運転中に蒸気発生器に持ち込まれた管板上の残留不純物を除去する。	第３回定期検査以降
温水洗浄	クレビス内に残留している不純物を定検起動時に除去する。	第３回定期検査以降
定検時清浄度管理	定検中の２次系系統内の清浄度管理を徹底する。	第７回定期検査以降
起動時水質管理	部分復水脱塩処理装置を有効に利用し、起動時の２次系系統中の浄化を図る。	第11回定期検査以降

表－２　通常運転時の蒸気発生器の２次系水質

項目＼運転期間	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH	9.8	10.1	8.7	8.8	8.9	8.9	8.8	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.8	8.9
酸導低電率*（μS/cm）	——	——	0.6	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Na（ppm）	16.7	16.9	0.02	4.1（ppb）	5.8（ppb）	1.6（ppb）	1.9（ppb）	1.9（ppb）	0.8（ppb）	0.8（ppb）	0.8（ppb）	0.6（ppb）	0.4（ppb）	0.3（ppb）
Cl（ppm）	0.24	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	2.7（ppb）	2.8（ppb）	2.7（ppb）	2.5（ppb）	2.2（ppb）

＊：陽イオン交換樹脂により陽イオン（NH_4^+等）を除去した後の陰イオン（Cl^-、SO_4^{2-}等）による導電率であり、不純物濃度の指標となる。
なお、第２運転期間までりん酸塩処理のため酸導電率は測定していない。

(注)　りん酸塩処理では、りん酸ナトリウムを使用していたことから、ＡＶＴに比べ、ｐＨ及びＮａの濃度が高い。

資料－4.1.4.2

水素脆化評価結果

1. 目的

伝熱管損傷の原因調査のため、伝熱管の破断に対する水素脆化の影響について検討する。

2. 検討方法

インコネル６００の水素脆化に関する文献調査及び破断管の金属調査の結果から、水素脆化が破断の原因として寄与していた可能性について検討する。

3. 検討結果

3.1 文献調査

一般に、インコネル６００やオーステナイト系ステンレス鋼のように固溶強化型の面心立方構造の材料では水素脆化が生じにくいとされている。[1]

また、インコネル６００の水素脆化に関連した研究については多くの報告がある。Totsuka, Smialowska[2],[3]らは、水素含有水、あるいは電気化学的に高温水中で水素チャージした条件での水素脆化に起因する粒界応力腐食割れ(IGSCC)の可能性を論じている。

また、昆、辻川ら[4]及び長谷川ら[5]によりインコネル６００（多結晶）に水素チャージした場合の破壊面は、粒界破面が主体となることが報告されている。したがって、インコネル６００に対する水素脆化の影響は粒界破面として現われやすいものと考えられる。

さらに、昆、辻川ら[6]によれば 160℃×10hrの脱水素処理により水素の追い出しができることが示されており、ＰＷＲプラントの２次系温度（約 270℃）においては脱水素現象が生じるものと考えられる。

3.2 ＰＷＲ環境での水素脆化発生の可能性について

3.1に述べたようにインコネル６００は水素脆化が生じにくい材料であるが、室温程度で金属内部に強制的に水素を取り込ませると脆化が生じるとされている。しかし、160℃程度以上の温度になると水素の拡散速度が大きくなり、金属内部にはほとんど水素は取り込まれないとされているので実機の運転状態（２次系 270℃程度）では伝熱管に水素脆化は生じないと考えられる。

3.3 破面の特徴からの検討

水素を強制的に取り込ませて水素脆化を生じさせると、その破面は主として粒界破面になるとされている。[7]

これに対し、破断管の破面にはこのような特徴は認められておらず、また、破断管の直管部の引張試験の結果、試験片の破面は全てディンプルで覆われており、粒界破面は認められなかった。

これらのことから、伝熱管の破断に対しては水素脆化の影響はなかったと考えられる。

4. まとめ

インコネル６００の水素脆化に関する文献調査及び破断管の金属調査の結果、伝熱管の破断に対しては水素脆化の影響はなかったと考えられる。

参考文献

(1) G. C. Smith
"Effect of Hydrogen on Nickel and Nickel Base Alloy"
Hydrogen in metals, 1974

(2) N. Totsuka, E. Lunarska, G. Crangnolino, S. Smialowska,
"Effect of Hydrogen on the Intergranular Stress Corrosion Cracking of Alloy 600 in High Temperature Aqueous Environments",
Corrosion, 43, 505 (1987)

(3) N. Totsuka and, S. Smialowska,
"Effect of Electrode Potential on the Hydrogen Induced IGSCC of Alloy 600 in an Aqueous Solution at 350 ℃,
Corrosion, 43, 734 (1987)

(4) 昆謙造, 佐藤昭規, 辻川茂男, 久松敬弘,
"水素チャージした６００合金のぜい化",
防食技術, 38, 657 (1989)

(5) 長谷川正義, 他２名,
"ニッケル基耐熱合金の水素損傷", 鉄と鋼, 第65巻 (1979) 第８号, 1213

(6) 昆謙造, 辻川茂男, 久松敬弘,
"水素チャージした６００合金単結晶のぜい化",
防食技術, 39, 179 (1990)

(7) 小寺沢良一編著, "フラクトグラフィとその応用", 日刊工業新聞社 (1981), 188

照　射　脆　化　評　価　結　果

1. 目的

破断管（Ｘ４５－Ｙ１４）の照射脆化の可能性について検討する。

2. 検討方法

インコネル６００の照射脆化に関する文献調査及び破断管の金属調査の結果から、照射脆化が破断の原因として寄与していた可能性について検討する。

3. 検討結果

(1) インコネル６００の照射脆化に関する文献による報告は以下のとおりである。

W.J. Mills[1] は、インコネル６００の照射前後の破壊靭性データをオーステナイト系ステンレス鋼のデータと共に中性子照射量に対して整理している。

Mills によると、これらの合金の中性子照射による靭性劣化（照射脆化）は0.5 ～1.0dpa（dpa : displacement per atom. 照射により、材料を構成する原子１個当りどれだけはじき出されるか（displacement)を示す照射量の指標）以上になって現われると評価している。この0.5 ～1.0dpaという値は、軽水炉の場合、概略10^{20}～10^{21}ｎ／㎠の高速中性子（エネルギー：１MeV 以上）照射量に相当している。

したがって、インコネル６００の場合、高速中性子の照射量が10^{20}ｎ／㎠程度以下であれば材料強度に影響が現れないこととなる。

(2) 美浜２号機の伝熱管の場合、高速中性子の照射量は１０^{14}ｎ／㎠以下である。

(3) 破断管（Ｘ４５－Ｙ１４）の直管部の引張試験の結果、伸び等は規格値の範囲内であった。（表－１）

これらのことから、中性子の照射による破断管への影響はなかったと考えられる。

4. まとめ

一般に、中性子による金属材料の照射脆化については、熱中性子の影響は高速中性子に比べ無視できる程度とされている。

文献調査では、インコネル６００の場合、高速中性子の照射量が１０^{20}ｎ／㎠程度以下

であれば、材料強度に影響が現れないとされており、美浜２号機の伝熱管の場合、高速中性子の照射量は10^{14}n／㎠以下である。

また、破断管の直管部の引張試験の結果、伸び等は規格値の範囲内であった。

これらのことから、中性子の照射による破断管への影響はなかったと考えられる。

参考文献

(1) W. J. Mills
"Fracture Toughness of Irradiated Steel Alloys",
Nuclear Technology, Vol.82, 290 (Sep. 1988)

表－１　破断管の引張特性

	引張強さ (kg／㎟)	0.2%耐力 (kg／㎟)	伸び (%)
試験結果	68.4～69.7	30.2～32.1	43.0～43.8
規格値	≧56.2	≧24.6	≧30

資料－4.1.5.1

振止め金具に関する各種調査結果

1. 目的

伝熱管の破断原因として、2次側流体による伝熱管の振動が考えられることから、伝熱管U字部の振動抑制のため設置されている振止め金具（以下「ＡＶＢ」という。）に関する調査を行う。

2. 調査対象及び調査方法

(1) ＡＶＢの設計、施工、品質管理の状況について、製作当時の記録調査及び関係者からの聞取り等により調査する。

(2) 破断管周辺のＡＶＢの挿入状況を、ファイバースコープにより調査する。

(3) ＡＶＢの挿入位置の経年的な変化の有無について、過去のＥＣＴ記録と最近のＥＣＴ記録の比較により調査する。

(4) ＡＶＢの変形形状等を調査するために、Ｘ４４－Ｘ４５の間、Ｘ４５－Ｘ４６の間及びＸ４６－Ｘ４７の間のＡＶＢの上部及び下部の合計６本を取り出して調査する。

3. 調査結果

ＡＶＢに関する各種調査結果は、以下のとおりである。

(1) 設計調査　（添付－１）

当該蒸気発生器の設計について、当時の記録、関係者の聞き取り等により調査した結果は、以下のとおりである。

a．ＡＶＢは、伝熱管U字部の流体による振動の抑制のため設けられている。国内の加圧水型炉の蒸気発生器は、美浜１号機を除き米国ウェスチングハウス社（以下「W社」という。）型であり、U字部の伝熱管と伝熱管の間にＶ字型の角棒（ＡＶＢ）を挿入し、伝熱管の面外の変位を抑制する機能を持たせている。

b．ＡＶＢの取付支持間隔については、基本的に米国の民間の設計基準であるＴＥＭＡ＊の1968年版を参考にして設計されていた。

＊ ＴＥＭＡ：STANDARDS OF TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION

c．美浜２号機についての基本的な設計は以下のとおりである。　（図－１）

(a) 美浜２号機蒸気発生器は初の国産蒸気発生器であり、三菱重工業㈱が、当時米国ポイントビーチ発電所１号機で採用されていた米国W社の設計を基に設計した。

(b) ＡＶＢは断面 8.6㎜× 8.6㎜の角棒をＶ字形に曲げたもので上部ＡＶＢと下部ＡＶＢの２組からなり、伝熱管Ｕ字部の周長をほぼ均等に支持するように、前者はＹ１５列、後者はＹ１２列の伝熱管まで挿入される。

(c) 材料はインコネル６００であり、表面にはクロムメッキ（摩耗防止の目的）が施工される。

(d) ＡＶＢは保持金具と溶接により固定される。

(2) 各種調査　（添付－２）

a．挿入状況調査

破断管周辺のＡＶＢが設計どおりの範囲まで入っているか等を、ファイバースコープ等を用いて確認した結果は、以下のとおりである。　（図－２）

(a) Ｘ４４－Ｘ４５の間及びＸ４５－Ｘ４６の間のＡＶＢについては、上部及び下部のＡＶＢとも、設計どおりの範囲まで入っておらず、破断管を含めＸ４５－Ｙ１２～Ｙ２２の伝熱管は、両側ともＡＶＢに支持されていなかった。

(b) Ｘ４３－Ｙ２３の伝熱管は、本来Ｘ４２－Ｘ４３の間及びＸ４３－Ｘ４４の間のＡＶＢに支持されているべきところ、Ｘ４４列側に１列ずれて片側のみがＡＶＢにより支持されていた。

b．取出し調査

Ｘ４４－Ｘ４５の間及びＸ４５－Ｘ４６の間の上部及び下部のＡＶＢを蒸気発生器から取り出し、寸法及び形状等の調査を行った結果は、以下のとおりである。　（図－３）

(a) 上部ＡＶＢの長さはいずれも設計値より40㎝程度から50㎝程度短くなっていたが、

下部ＡＶＢの長さはいずれも設計の範囲内であった。

(b) 上部及び下部のＡＶＢはいずれも設計形状から変形しており、また、上部ＡＶＢの端面にはいずれも設計とは異なる切断加工跡が認められた。

c．その他調査

ＡＶＢの位置の経年変化について、第２回定検後計画停止時（昭和５１年）及び第１３回定検時（平成２年）のＥＣＴ記録により評価した結果、移動した形跡が認められないこと及び流体力に対して十分な強度を有することから、経年的に移動、変形する可能性のないことが確認された。

(3) 施工・品質管理調査　（添付－１）

当該蒸気発生器の施工・品質管理状況について、当時の記録、関係者の聞取り等により調査を実施した結果は、以下のとおりである。

a．施工

(a) 当該蒸気発生器は、三菱重工業㈱が米国W社の指導を受け製造した。

(b) ＡＶＢに関する当時の書類で現存しているものは、ＡＶＢの組立図及び素材の購入要求書である。　（表－１）

(c) 三菱重工業㈱は、購入要求書により素材メーカに対しインコネルの棒材を発注し、納入後、製作要領書に基づき曲げ加工及びクロムメッキを施工したと考えられる。

(d) ＡＶＢは、伝熱管が全数組み込まれた後、伝熱管Ｕ字部に挿入され、保持金具と溶接することにより固定された。

ＡＶＢの組立は組立図に基づき実施され、施工上の注意事項、組立手順等を記載した組立要領書に従って施工されたと考えられる。

(e) 組立手順としては、伝熱管を水平にした状態で上部及び下部のＡＶＢともそれぞれ中央部からまず上方へ挿入され、その後中央部から下方へ挿入されたと考えられ

る。

なお、ＡＶＢ挿入に際しては、伝熱管を整列させるため挿入治具が使用されていたと考えられる。

(f) 当時の作業上の注意としては、伝熱管に損傷を与えないようにすることに重点が置かれ、ＡＶＢの挿入深さについては、十分な注意が払われていなかったと考えられる。

b．品質管理

(a) 当時の品質管理資料で現存しているものは、法令に基づく蒸気発生器の耐圧部に関する溶接検査関係記録であり、ＡＶＢに関する記録はない。

(b) 伝熱管については、U字部の曲げ加工後、外観検査・寸法検査・非破壊検査・耐圧試験等のほか、定盤上でのそりの検査も実施していた。

(c) しかし、ＡＶＢの組立に関しては、ＡＶＢと保持金具との溶接部が耐圧部材である伝熱管の近傍であることから、当該溶接部及び周辺伝熱管の外観検査は実施していたが、ＡＶＢの挿入深さの検査は実施することにはなっていなかったと考えられる。

(d) 当時の品質管理は、伝熱管等の耐圧部材が中心であり、溶接に重点が置かれていたと考えられる。

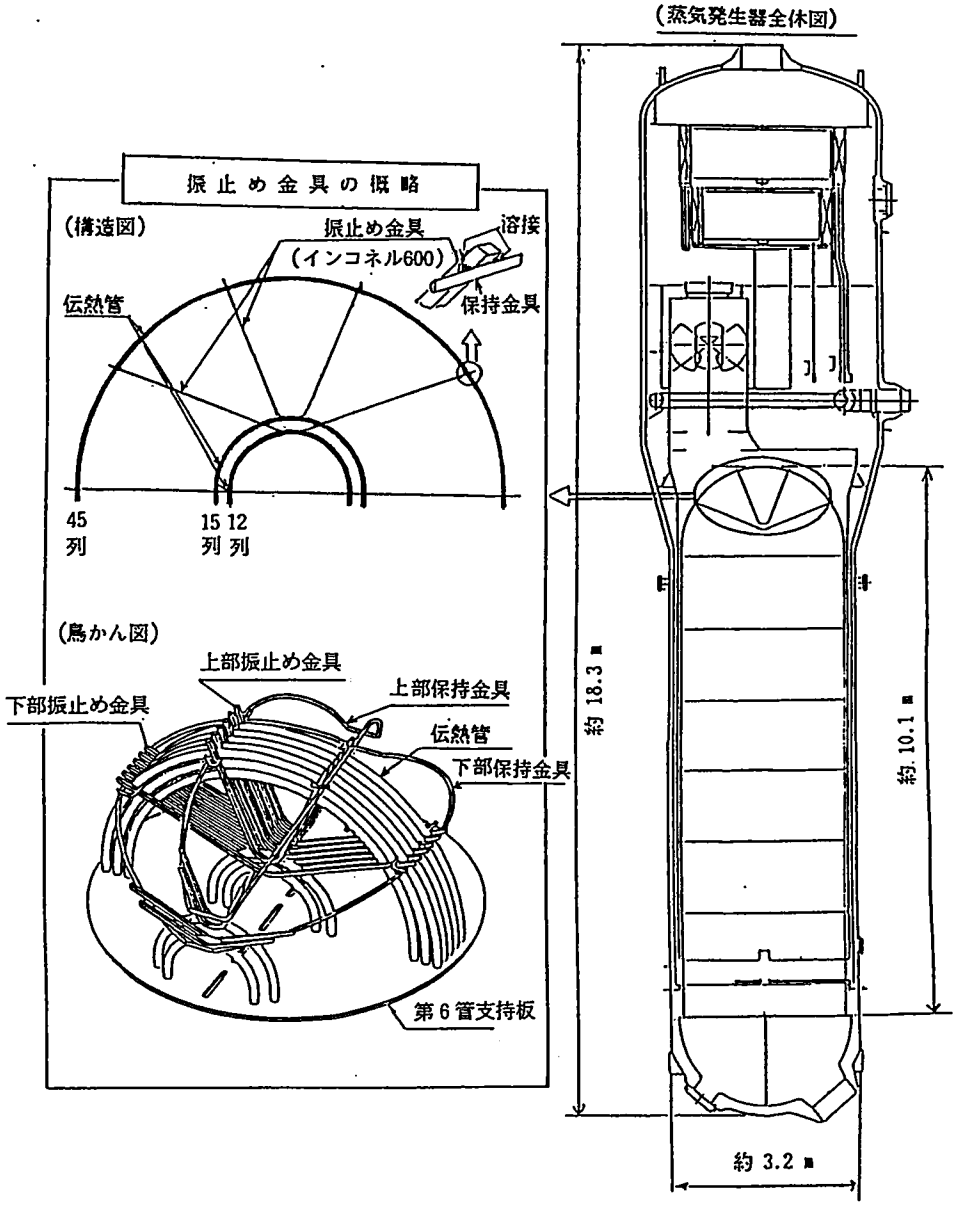
(e) 関西電力㈱における受入検査においても、ＡＶＢに関する挿入深さの検査は実施されなかった。

(4) 挿入不足の原因推定

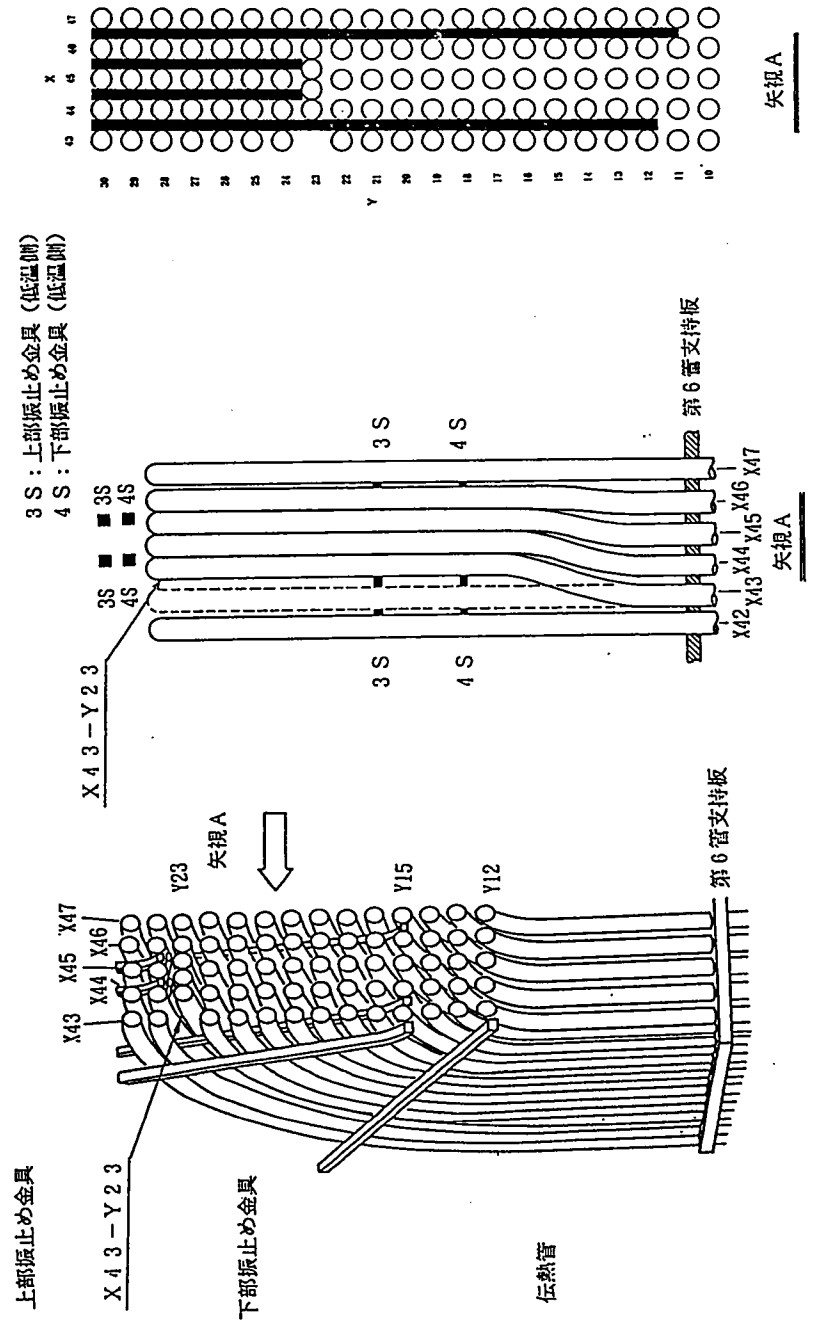
以上の調査の結果から、ＡＶＢ挿入不足の原因は次のようであったと推定される。

損傷側蒸気発生器の製造時に、どのようにＡＶＢを施工したかは不明であるが、ＡＶＢ挿入の際、正確に伝熱管と伝熱管の間に挿入されなかったため、Ｘ４４－Ｘ４５の間

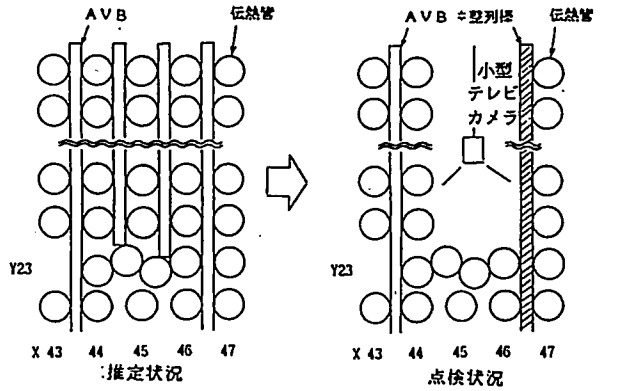
及びＸ４５－Ｘ４６の間のＡＶＢが、伝熱管によって挿入が妨げられたことから、設計どおりの範囲まで挿入されなかったものと推定される。



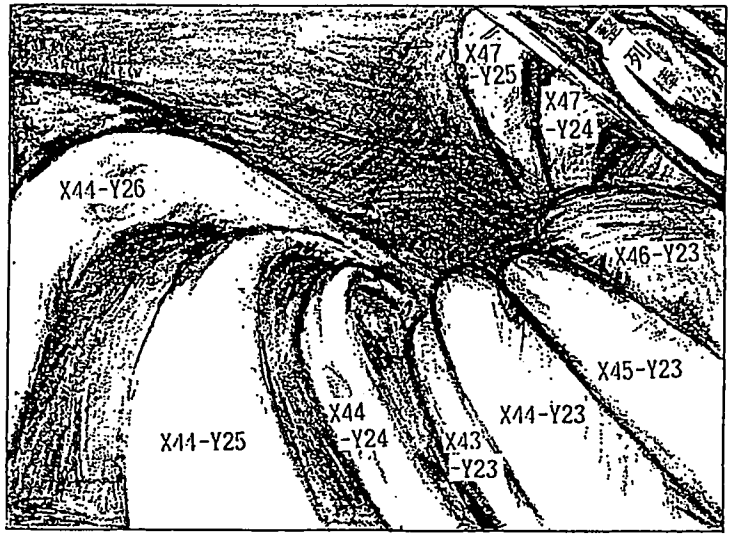
図－1　蒸気発生器伝熱管振止め金具概略図



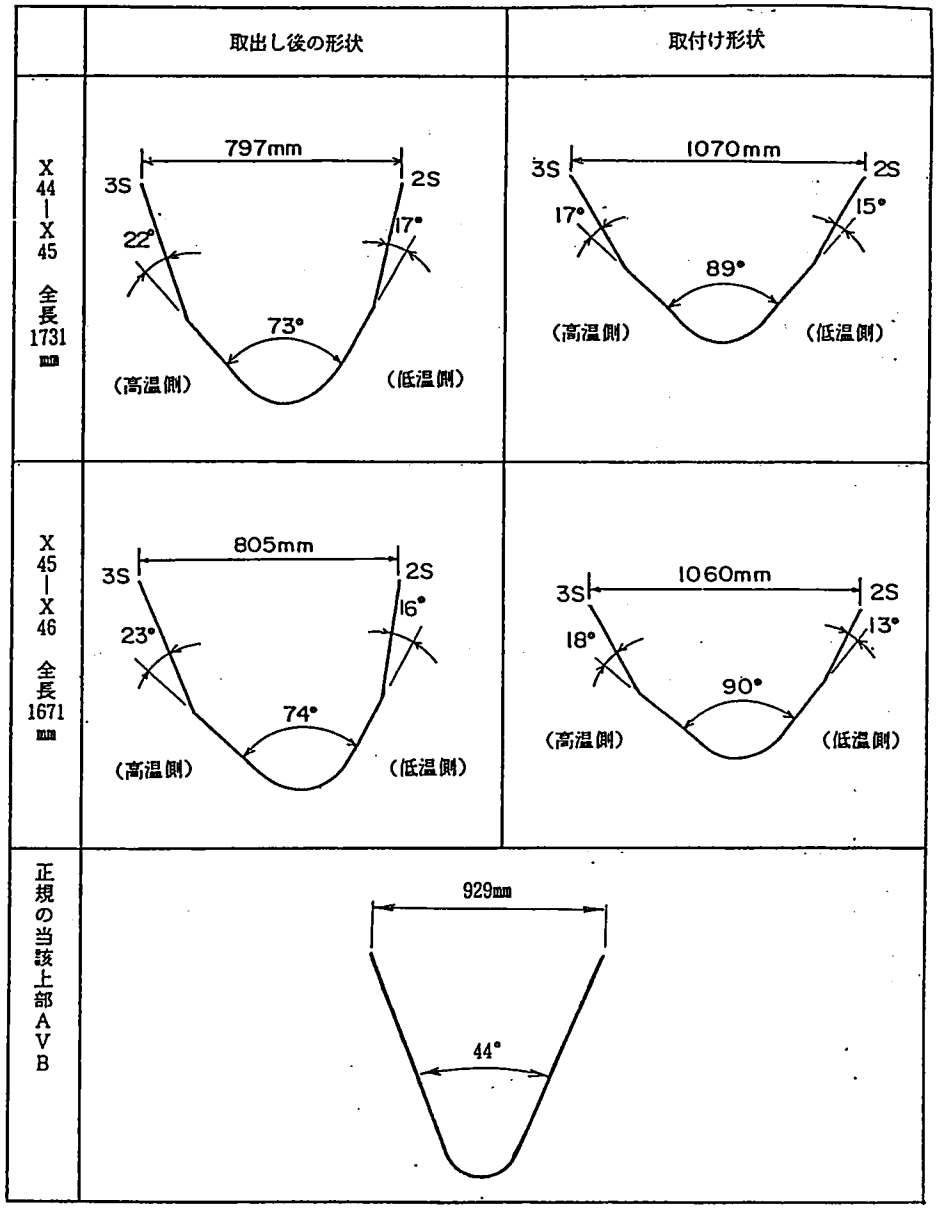
図－2（1／2）　A－蒸気発生器振止め金具のファイバースコープによる点検結果



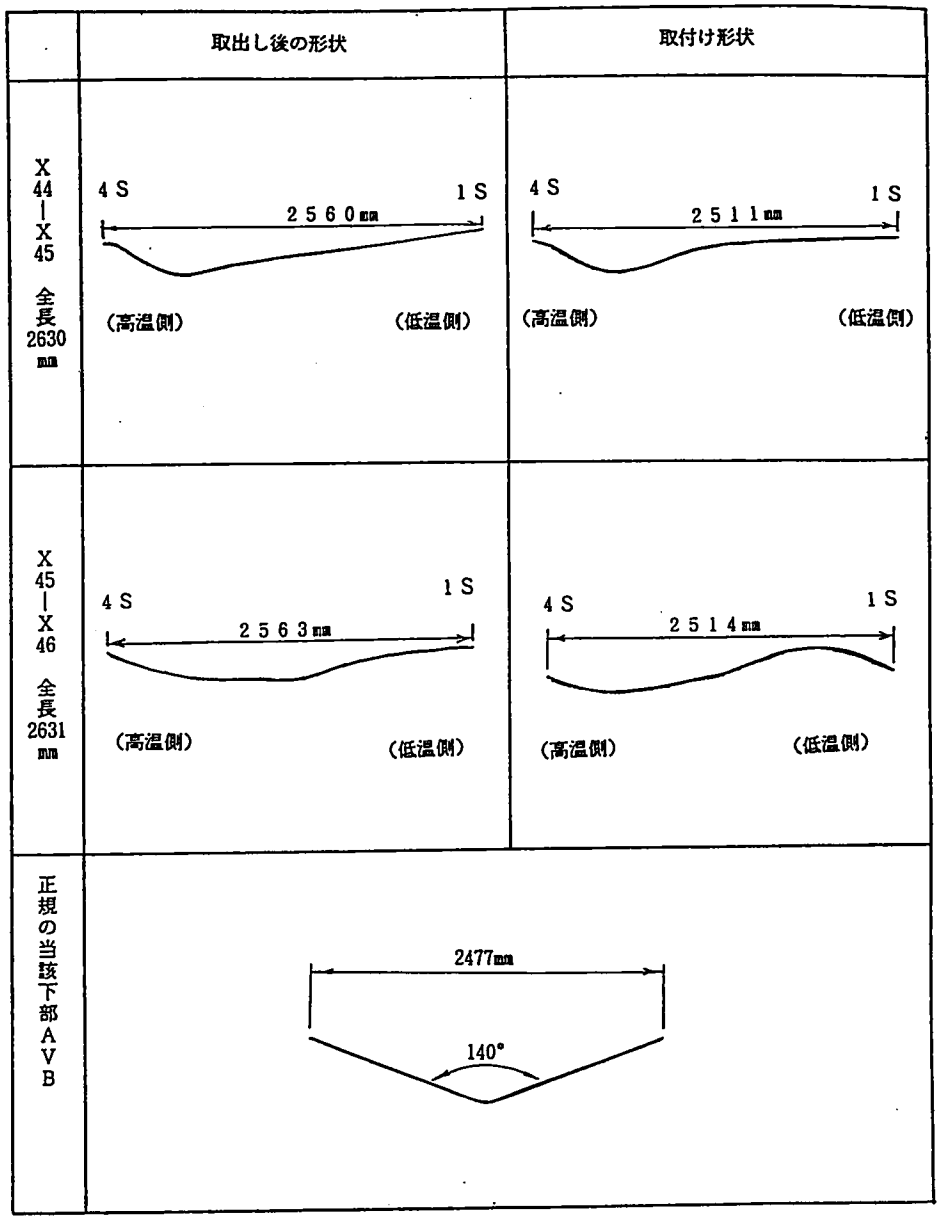
÷整列棒：ＡＶＢ取出調査に伴う伝熱管の移動を防止するための棒



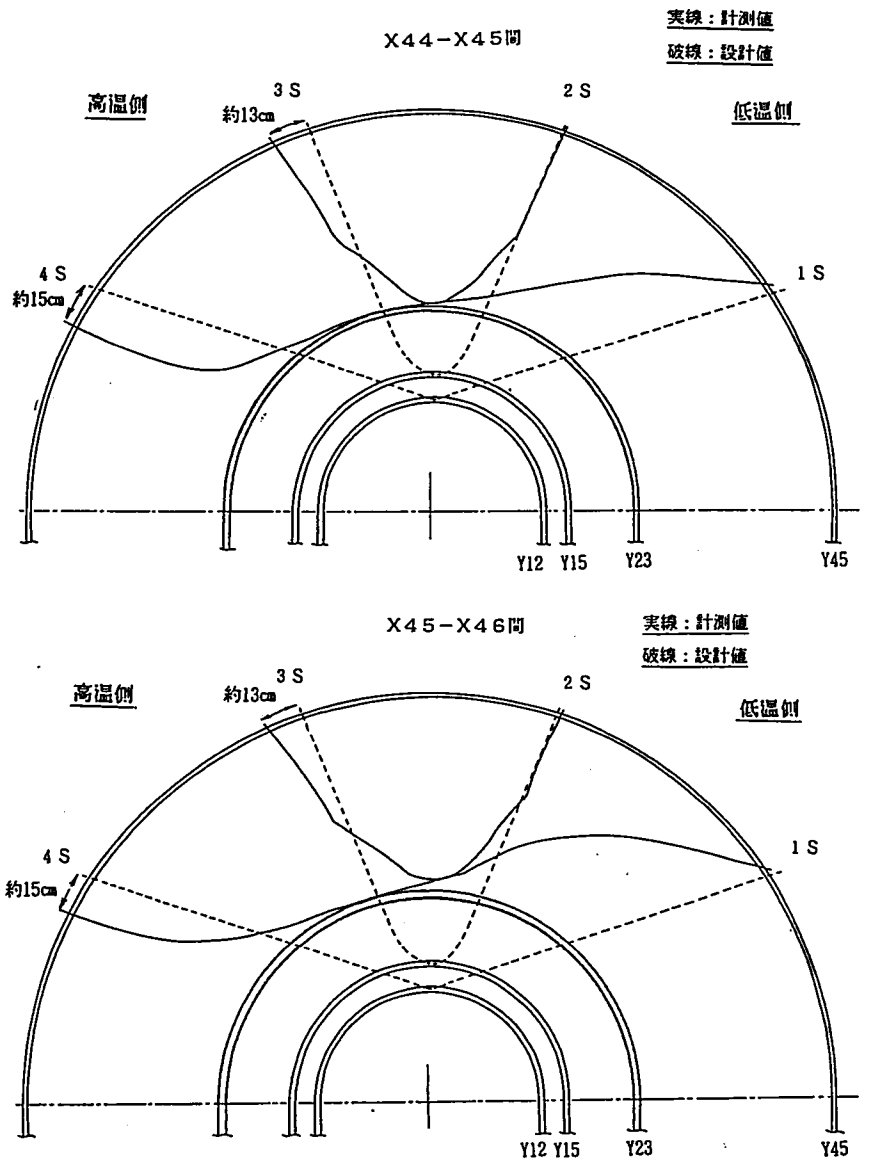
図－２ （２／２）Ａ－蒸気発生器Ｙ２３列伝熱管の配置状況点検結果



図－３ （１／３）取出し後の形状（上部ＡＶＢ）



図－3　（2／3）取出し後の形状（下部ＡＶＢ）



図－3　（3／3）振止め金具挿入形状推定図

表－1　現存する製造当時の書類の概要

書類名	主な記載事項
組立図	1. 数量、寸法、曲げ角度、材料規格 2. 挿入位置、挿入深さ、取付角度 3. 保持金具との溶接方法 4. 注意事項 (1) ＡＶＢにはバリや傷があってはならない (2) ＡＶＢは所定のメッキを行うこと (3) ＡＶＢは、下部胴組立後に取りつけること (4) ＡＶＢの溶接は、伝熱管を保護して行うこと
購入要求書	1. 数量、寸法、材料規格 2. 納期 3. 材料証明書の要求

振止め金具の設計・施工・品質管理調査結果

1. まえがき

美浜２号機Ａ－蒸気発生器の振止め金具（以下「ＡＶＢ」という。）に関して、製作組立当時の設計、製作、施工及び品質管理について調査する。

調査に当っては、三菱重工業㈱において約20年前から現存している資料、永久保存記録（マイクロフィルム）及び当時の関係者の記憶からまとめる。

また、美浜２号機製作当時から最近プラントまでの設計、製作、施工及び品質管理面における変遷についても調査する。

2. 設計

2.1 ＡＶＢ設計の変遷

ＡＶＢは、伝熱管Ｕ字部における振動を抑制するため設けられている。国内で用いられている蒸気発生器（以下「ＳＧ」という。）は美浜１号機を除きウェスチングハウス社（以下「W社」という。）型の設計であり、四角配列の伝熱管Ｕ字部の各列の間にＶ字型の角棒（ＡＶＢ）を挿入し、伝熱管の面外の変位を抑制する支持機能を持たせており、この基本的な構造は初期から現在まで変わっていない。

(1) ＡＶＢの設計の考え方の変遷

国内のＳＧの設計は、初期はW社の設計と同一のものであり、新たな評価技術や不具合の反映による検討を加えているが、最近に至るまで基本形状についてはほぼ同一のものが用いられている。

最近のＳＧについては新しい解析技術により評価を行っており、より確実な支持が得られるよう設計変更されている。

以下にＡＶＢの基本設計に関する考え方の変遷を時代順に述べる。

a. 美浜２号機ＳＧの設計

美浜２号機ＳＧは米国ポイントビーチ１号機のＳＧ（４４型）設計に基づき三菱重工業㈱で設計されたものである。

W社４４型ＳＧのＡＶＢの取付支持間隔については、基本的にＴＥＭＡ* の最大不支持長さ（Unsupported span）の考え方を参考にして設計されている。

（＊TEMA:STANDARDS OF TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION）

b. 高浜２号機以降の５１型、５１Ａ型ＳＧの設計

５１型ＳＧの初号機である高浜１号機のＳＧは、Ｗ社が設計製作しており、その後の高浜２号機以降の５１型ＳＧはＷ社の５１型ＳＧ設計に基づき三菱重工業㈱で設計されたものである。

５１Ａ型ＳＧの初号機である大飯１号機のＳＧも、Ｗ社が設計製作しており、その後の大飯２号機の５１Ａ型ＳＧは、Ｗ社の５１Ａ型ＳＧ設計に基づき三菱重工業㈱で設計されたものである。Ｗ社５１型、５１Ａ型ＳＧのＡＶＢ取付支持間隔についても基本的にＴＥＭＡの最大不支持長さを参考にして設計されている。

c. Ｗ社における流力弾性振動の概念検討

流力弾性振動の概念は1969年にH. J. Connors(当時米国Pittsburgh大学）が初めて提唱したが、その後 H. J. ConnorsはＷ社に移り、それ以来Ｗ社でもＳＧ内部における流力弾性振動の検討を行っている。ただし、５１型ＳＧについてもＡＶＢの設計は４４型ＳＧと同様のものが用いられている。

d. 川内１号機以降の５１Ｍ、５１Ｆ、５１ＦＡ型ＳＧの設計

国内のＳＧについては５１Ｍ型ＳＧ以降においてもＡＶＢの設計は変更していない。ただし、この時点でＷ社の新しい評価手法(H. J. Connorsの流力弾性振動）に関する情報を入手し、Ｕ字部に対しても５１Ｍ、５１Ｆ型ＳＧを評価し問題のない事を確認している。また、カルマン渦、ランダム振動等についての検討も併せて行われている。一方、伊方１号機（51型）で初めて伝熱管Ｕ字部にＡＶＢによる摩耗が発生した。この原因は、流体の乱れによる振動により、大きな隙間のある振止め金具部において伝熱管の支持状態が悪くなり、固有振動数が大幅に低下して生じたものと考えられた。このため特に大曲げ管に対する支持を強化するため、大きな隙間（伝熱管とＡＶＢ間の隙間）の発生を防止するための管理を強化し、種々の設計改良（伝熱管の面外方向のそりの制限、最外周部でのＡＶＢと伝熱管との隙間の管理）が行われている。

e. 大飯３号機以降の５２Ｆ、５２ＦＡ型ＳＧの設計

新しい設計評価により、伝熱管の支持状態を改良するため以下の考え方で設計されている。

ｏ大曲げ管に対し、振動による摩耗減肉の発生を防止するため、流力弾性振動発生の可能性を抑制する。

ｏランダム振動のレベルを低く抑制する。

このため、３本組のＡＶＢで伝熱管の支持点数を増加させるとともに伝熱管とＡＶＢ間の隙間が小さくされた。小曲げ管についても余裕を考慮し、Ｙ９列までＡＶＢを挿入することとされた。

以上の考え方の変遷を表－１に示す。

(2) ＡＶＢ設計の変遷

ＡＶＢの設計の変遷を表－２に示す。

主な検討事項は、以下のとおりである。

a. 摩耗減肉防止のための設計改良

伊方１号機で発生した大曲げ伝熱管のＡＶＢによる摩耗減肉を防ぐため、川内１号機以降のＳＧに対して、以下の設計改良が行われている。

ｏ最外周伝熱管の隙間管理

ｏ設計隙間値を小さくするためＡＶＢ厚さを漸増

ｏ小曲げ伝熱管Ｕ字部のそり管理を強化

b. 最新プラントにおける設計改良

大飯３号機以降は、以下の設計改良が行われている。

ｏＡＶＢ本数の増加（３本組）

ｏＡＶＢ材料の変更（ＳＵＳ４０５）

ｏＡＶＢと伝熱管の設計隙間値の減少

ｏＡＶＢ幅の増加

ｏＡＶＢの挿入深さの増加（Ｙ９列まで）

c. 取替型ＡＶＢの設計

取替型ＡＶＢについては、支持状態の改良を図るとともに、現地作業のために組立の容易なように、以下の設計が行われている。

ｏスライド式ＡＶＢとスロット付（柔構造）ＡＶＢとを組合せ、組立前後でギャップ可変の設計とする。

oＡＶＢは開脚可能なＶ字型（組立後開脚する）

oＡＶＢ本数は２本組（上下ではなく左右に取付ける）

oＡＶＢ材料はＳＵＳ４０５

oＡＶＢと伝熱管の設計隙間値は公称ゼロ

oＡＶＢ幅の増加

oＡＶＢの挿入深さはＹ１１列まで

2.2　美浜２号機ＡＶＢの設計について

(1)　考え方

美浜２号機のＡＶＢは、一般熱交換器の設計基準であるＴＥＭＡ（1968年版）＊の"unsupported span"の考え方を参考として設計されている。

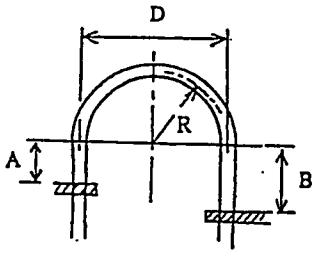
（＊）ＴＥＭＡ：STANDARDS OF TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION
一般的な熱交換器の設計基準で、構造等設計に関するものが主である。このうち、"BAFFLES AND SUPPORT PLATES"の中で、流体振動全般に対する基準としてＵ字部の最大支持間隔の規定がある。（参考－１参照）

具体的な設計は、Ｗ社の図面に基づいているが、これらの解釈は以下のとおりである。

a.　ＴＥＭＡの"unsupported span"の考え方によればＵ字部のサポートはφ19.05 mmのインコネル６００管のとき、右下図のＡ＋Ｂ＋Ｄの値が60インチ（＝1,524 mm）以下とすることとなっている。

b.　Ｕ字部の最外周伝熱管の曲げ半径は1,435mmであり、ＡＶＢを２本入れることから、"unsupported span"は約902mmである。

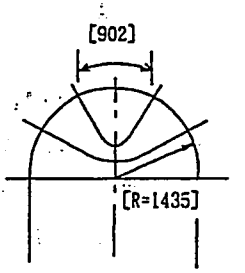
$$\left(\frac{\pi \times 1,435}{5} \fallingdotseq 902\right)$$



c.　ＡＶＢで支持されない小曲げ管においても　Ａ＋Ｂ＋Ｄ　の値が902mmより長くならないようにされている。

d.　各Ｕ字部の寸法は以下のとおりである。Ｙ１２列以上では"unsupported span"が902mmを超えるので、Ｙ12列以上を振止め金具で支持することとされている。

	曲げ半径	Ａ＝Ｂ	Ａ＋Ｂ＋Ｄ
Ｙ11列	369.06 mm	53 mm	844 mm
Ｙ12列	400.41 mm	53 mm	907 mm



(2)　設計仕様について

a.　形状、寸法及び材料

oＡＶＢは角棒をＶ字形に曲げたもので上部と下部の２組がらなる。

o材料はインコネル６００の母材表面にクロムメッキを施工したものが用いられる。

b.　挿入範囲及び挿入深さ

o上部ＡＶＢ……挿入範囲　Ｘ４－Ｘ５の間　～　Ｘ88－Ｘ89の間
挿入深さ　Ｙ15まで

o下部ＡＶＢ……挿入範囲　Ｘ３－Ｘ４の間　～　Ｘ89－Ｘ90の間
挿入深さ　Ｙ12まで

c.　組立て

o個別のＡＶＢは保持金具に溶接固定される。

o伝熱管群にＡＶＢ集合体を保持させるための短い保持金具が最大曲げ半径管列（Ｙ45列）に通され溶接される。

2.3　ＡＶＢ関連部材に関する調査

ＡＶＢ関連の部材として伝熱管及び管支持板について、設計・製作に関する変遷を調査した。

(1)　伝熱管の設計及び製作

a.　設計

伝熱管は高ニッケル合金であるインコネル600(ただし大飯３号機以降はインコネル

690)が用いられている。

伝熱管寸法は、外径 22.23㎜、板厚1.27㎜である。

基本仕様はほぼ同一であるが、川内１号機以降特殊処理（ＴＴ）を施して耐食性を向上させている他、高浜４号機以降Ｕ字部の寸法精度の管理がより強化されている。

表－３にこれらのまとめを示す。

b. 伝熱管の製作

伝熱管は溶解、造塊、分塊圧延で造ったビレットを熱間押出し後、冷間圧延・中間焼純・冷間抽伸・最終焼純・曲げ加工等の製管プロセスにより製作される。

美浜２号機以来今日まで基本的にはほぼ同一のプロセスであるが、材質、寸法に関する品質向上のため以下の改良が加えられている。

- o玄海２号機以降……製作中のハンドリング時の専用パレット（運搬器具）の採用
- o川内１号機以降……ＴＴ処理の適用
- o川内１号機以降……ベルトコンベアによるオンライン検査台の採用
- o高浜４号機以降 ……模擬管支持板を用いたＵ字部そり測定の採用

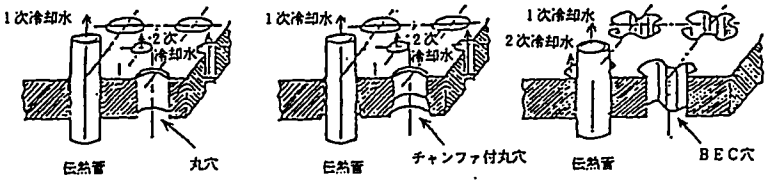
(2) 管支持板の設計・製作

管支持板は初期のＳＧでは炭素鋼、伊方２号機以降ではSUS405が用いられている。

管穴形状は丸穴→チャンファ付丸穴→ＢＥＣ型と変遷している。管穴の変遷の概要を下図に示す。

また、管穴の製作法については、当初ラジアルボール盤を用いていたが、美浜３号機以降はＮＣマシンを用いて加工精度の向上が図られている。この変遷を表－４に示す。

従来設計		改良設計		新設計
丸穴（その間に循環穴を有する）	⇨	チャンファ付丸穴（同左）	⇨	ＢＥＣ型（Broached Egg Crate）



管支持板の改善

3. 製作

3.1 素材の発注

ＡＶＢの製作に先立ち、仕様を明示した購入要求書によりＡＶＢ素材の発注が行われる。

3.2 ＡＶＢ単品の製作

ＡＶＢ素材が入荷された後、製造部門によりＡＶＢ単品が製作される。

ＡＶＢ単品の製作フローを図－１に、製作要領の変遷を表－５に示す。

美浜２号機から泊２号機のＡＶＢはインコネル棒材を曲げ加工し、クロムメッキを行ったものであり、大飯３号機からは材質をＳＵＳ４０５に変更し、保持金具との溶接部となる両端部にインコネルのパッチバーを取り付けたのち、曲げ加工、研削加工が行われる。

製作方法は、美浜２号機から泊２号機の間ではほぼ同様であるが、以下のような管理内容の変遷がある。

- ○高浜２号機から…… 部品番号打刻及び表面状態に関する注意
- ○高浜３号機から…… 歪及び曲げ部の板厚を規定

4. 施工

ＡＶＢは、下半胴に伝熱管が組み込まれた後、伝熱管Ｕ字部に挿入され、保持金具と溶接することにより固定される。（表－６）

組立施工の手順は、下部ＡＶＢ取り付け後、上部ＡＶＢが取り付けられる。泊２号機以前の蒸気発生器においては、ＡＶＢは中央部からまず上方へ挿入され、その後下方へ挿入された。

- ・組立施工の変遷は、以下のとおりである。
  - ○美浜３号機から…… ＡＶＢと保持金具の取付け位置変更
  - ○川内１号機から …… ＡＶＢと伝熱管の隙間を管理
  - ○大飯３号機から …… ＡＶＢ本数、挿入深さを変更
- ・組立は基本として組立図面により施工されたが、施工上の注意点を記した組立要領書にて作業指示がなされている。（表－７）

5. 品質管理

ＡＶＢの品質管理の変遷について表－８に示す。

(1) 美浜２号機当時

当時は、耐圧部材及びそれに溶接等で取り付けられる部材の組立、溶接に管理の重点が置かれており、耐圧部材（伝熱管）に直接、溶接で取り付けられないＡＶＢについては、重点管理外にあったということが、当時の関係者の記憶によっても確かめられた。

当時の品質管理資料としては、

- ・原子力発電プラント溶接検査通産省受検程度表
- ・溶接検査記録

が現存しているがＡＶＢに関する資料は含まれていない。

しかし、当時の関係者の記憶によると、以下①～③の項目を実施していたと思われる。

① ＡＶＢ単品検査

ⅰ）材料確認

ⅱ）曲げ形状

ⅲ）曲げ部の板厚

ⅳ）板　　厚

ⅴ）外　　観

これらの項目を受入検査員が実施していた。

② ＡＶＢの挿入状況の確認

挿入作業時、作業者が自主検査を行った。

③ ＡＶＢと保持金具との溶接後検査

伝熱管近傍の溶接である為、ＱＣ員が溶接部及び周辺伝熱管の外観検査を実施している。

(2) 美浜２号機以降から川内１号機までの変遷

美浜２号機以降のＡＶＢについての管理の変遷の要点は以下のとおり。

- ・検査項目の図面への具体的指示
- ・検査要領書の作成
- ・ＱＣによる立会範囲の拡大
- ・記録の採取

(3) 高浜３号機以降

伊方１号機の伝熱管のＡＶＢ部での摩耗減肉現象を契機にＡＶＢの組立精度の重要性が認識され、これによりＡＶＢ単品製作時、組立仕上がり状態の各工程で要領書に従い、ＱＣ員が立会し管理の強化、充実が図られている。

① 単品検査

ⅰ）材料確認

ⅱ）曲げ形状

ⅲ）曲げ部の板厚

ⅳ）歪

ⅴ）板　厚

ⅵ）外　観

ⅶ）パッチバー溶接部のＰＴ（大飯３号機以降）

② 取付け後検査

ⅰ）挿入深さ検査

ⅱ）外観検査

・溶接部及び周辺伝熱管の外観

・保持金具と伝熱管の干渉

・保持（抜止）金具とＹ45列伝熱管の位置関係（泊１号機以降）

ⅲ）最外周の伝熱管とＡＶＢとの隙間検査

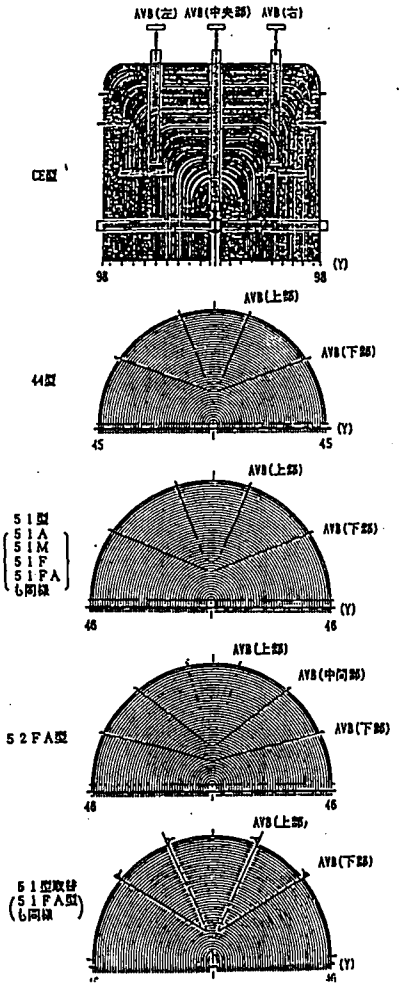
表－１　ＡＶＢの設計の変遷及び関連検討項目

プラント	SG型式	製作者	製作着手時期	設計思想	主な事象
美浜２号	44	三菱重工業㈱	1969年	oW社の設計と同一 oサポート間隔の設計は「TEMA」による	oH. J. Connors が流力弾性振動の概念を提唱（'69）
高浜１号	51	W 社	——	oサポート間隔の設計は「TEMA」による	
高浜２号		三菱重工業㈱	1971年	oW社の設計と同一 oサポート間隔の設計は「TEMA」による	
玄海１号			1971年		
美浜３号			1972年		
大飯１号	51A	W 社	——	oサポート間隔の設計は「TEMA」による	
大飯２号		三菱重工業㈱	1972年	oW社の設計と同一 oサポート間隔の設計は「TEMA」による	
伊方１号	51		1973年		
玄海２号	51M		1976年		
伊方２号			1977年		
川内１号			1979年	oサポート間隔の設計は「TEMA」による。 oW社の流力弾性振動に関するチェックを実施。 o大曲げ管の摩耗減肉防止のため隙間管理を実施	o伊方１号で初めてＡＶＢ部摩耗減肉発見（'81）
高浜３号	51F		1980年		
高浜４号			1980年		
川内２号			1981年		
敦賀２号	51FA		1982年		
泊 １ 号	51F		1984年		
泊 ２ 号			1985年		
大飯３号以降	52FA	三菱重工業㈱	1987年	oW社の流力弾性振動の面からも支持を確実とするようにＡＶＢ本数を増加 o挿入深さも余裕をとり９列目までとした	oノースアナ1号機伝熱管破断（'87）

W社：ウェスチングハウス社　　TEMA：STANDARDS OF TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION

表－2　ＡＶＢ組立に対する設計の変遷

SG型式	プラント	ＡＶＢ挿入状況．本数	ＡＶＢ材質	最外周隙間管理	挿入深さの認識（図面指示）	保持金具付の取位置確認
CE型	美浜１号	中央部：Ｙ１列まで　118枚 左，右：Ｙ48列まで各々96枚	炭素鋼	—	—	—
４４型	美浜２号	下　部：Ｙ12列まで　87本 上　部：Ｙ15列まで　85本	インコネル600 ＋Crメッキ	無	無	無
５１型	高浜１号 玄海１号 高浜２号* 美浜３号 伊方１号 大阪１号 大阪２号	下　部：Ｙ11列まで　91本 上　部：Ｙ15列まで　87本	インコネル600 ＋Crメッキ			
５１Ａ型						
５１Ｍ型	玄海２号 伊方２号					
	川内１号*					
５１Ｆ型	高浜３号*			有	有	有
	高浜４号* 川内２号*					
５１ＦＡ型	敦賀２号*					
５１Ｆ型	泊　１号 泊　２号					
５２ＦＡ型	大阪３号以降	下　部：Ｙ９列まで　９１本 中間部：Ｙ15列まで　８７本 上　部：Ｙ２１列まで　８１本	ＳＵＳ４０５			
５１型～５１ＦＡ型取替	*取替型 高浜４号 敦賀２号 高浜３号 川内１号分 高浜２号 川内２号	Ｙ11列まで（左右とも）　87本 Ｙ７列まで（周辺各２本）　４本	ＳＵＳ４０５			



（参考－１）　ＡＶＢの支持間隔に関する標準（ＴＥＭＡ）

SECTION 5
Mechanical Standards TEMA Class "R" Heat Exchangers

R-4 BAFFLES AND SUPPORT PLATES — (Continued)

R-4.5 SPACING OF BAFFLES AND SUPPORT PLATES

R-4.51 MINIMUM SPACING

Cross flow baffles shall not be pitched closer than 1/5 of the shell I.D. or 2", whichever is greater.

*R-4.52 MAXIMUM SPACING

Tube support plates shall be so spaced that the unsupported tube length does not exceed the value indicated in Table R-4.52 for the tube material used.

TABLE R-4.52
MAXIMUM UNSUPPORTED STRAIGHT TUBE LENGTH

Tube O.D. Inches	Maximum Unsupported Spans Inches — Tube Materials and Temperature Limits (°F) Carbon & High Alloy Steel (750) Low Alloy Steel (850) Nickel-Copper (600) Nickel (850) Nickel-Chromium-Iron (1000)	Aluminum & Aluminum Alloys (Cada) Copper & Copper Alloys (Cada)
3/4	60	52
1	74	64
1 1/4	88	76
1 1/2	100	87

NOTES: Above the metal temperature limits shown, maximum spans shall be reduced in direct proportion to the fourth root of the ratio of elastic modulus at temperature to elastic modulus at tabulated limit temperature. Above the corresponding tabulated limit temperature, tube shall be unsupported. The maximum unsupported span shall be such that the deflection of the tube midway between supports shall not exceed 1/150 of the diameter of the tube. Deflection of the tube midway between supports is that of the actual beam with the tube and its contents between supports, relative to the chord connecting the points of support of the tube.

R-4.53 U-TUBE REAR SUPPORT

The support plates or baffles adjacent to the bends in U-tube exchangers shall be so located that, for any individual bend, the sum of the bend diameter plus the straight lengths measured along both legs from supports to bend tangents does not exceed the maximum unsupported span determined from paragraph R-4.52.

R-4.54 SPECIAL CASES

Where the purchaser specifies pulsating conditions, unsupported spans shall be as short as pressure drop restrictions permit. If the span under these circumstances approaches the maximum permitted by paragraph R-4.52, consideration should be given to alternative flow arrangements which would permit shorter spans under the same pressure drop restrictions.

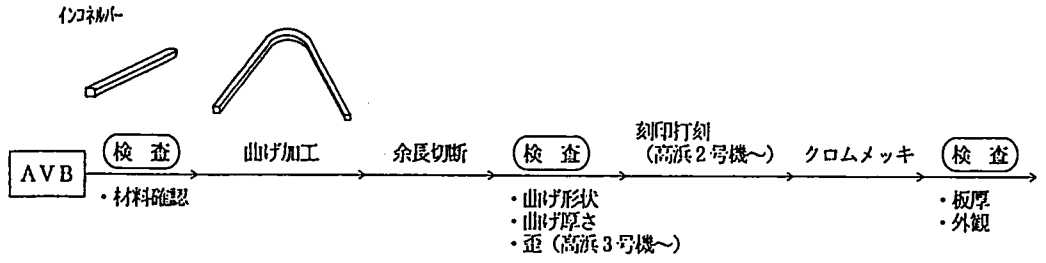
表－3　伝熱管の設計の変遷

プラント	材　料	外　径	肉　厚	そり管理	メーカー
美浜２号	MA600	φ22.23 mm	1.27mm	定盤上での管理	AS/G:住友金属 BS/G: W社
高浜１号					W社
高浜２号					住友金属
玄海１号					
美浜３号					
大飯１号					W社
大飯２号					住友金属
伊方１号					
玄海２号					
伊方２号					
川内１号	TT600				
高浜３号					
高浜４号				定盤上での管理及び模擬管支持板での管理	
川内２号					
敦賀２号					
泊　１号					
泊　２号					
大飯３号以降	TT690				

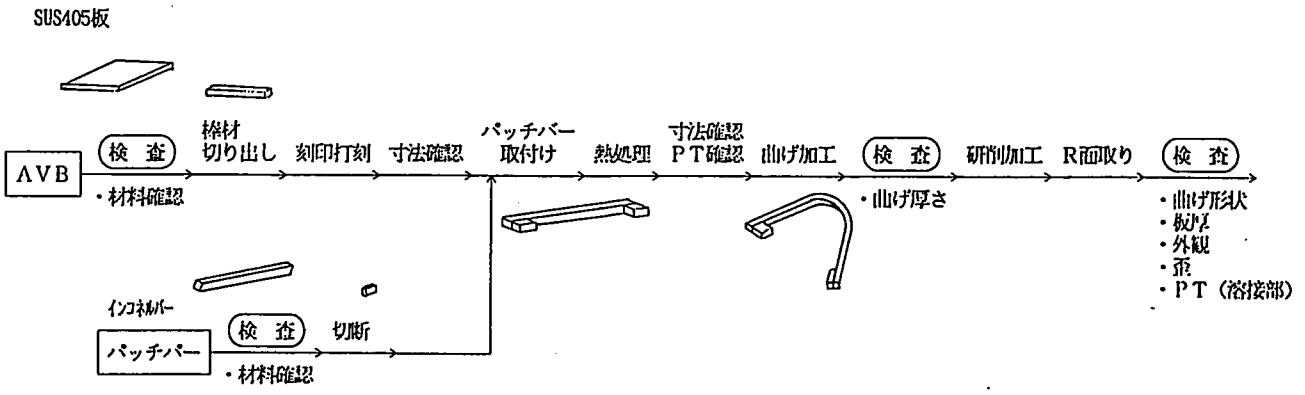
表－４　管支持板設計と製作の変遷

プラント	設計					製作
	材　料	板　厚	管穴形状	循環穴形状	管穴ピッチ	穴加工法
美浜２号	炭素鋼 (SB42)	19mm	φ22.6mm 丸穴	φ17.5mm	31.3mm	テンプレートで穴位置を定めラジアルボール盤で穴明け
高浜１号				φ19mm	32.5mm	
高浜２号						
玄海１号						
美浜３号						ＮＣ機械で穴位置を定め穴明け
大飯１号						
大飯２号						
伊方１号						
玄海２号						
伊方２号	SUS405		φ22.6mm チャンファ 付丸穴			チャンファ専用機で加工
川内１号						
高浜３号		29mm	ＢＥＣ型 (十字穴)	循環穴なし		基準穴はＮＣ機械で穴位置を定め穴明け ＢＥＣ専用機で十字穴加工
高浜４号						
川内２号						
敦賀２号						
泊　１号						
泊　２号						
大飯３号以降						

〔美浜２号機～泊２号機〕



〔大飯３号機以降〕



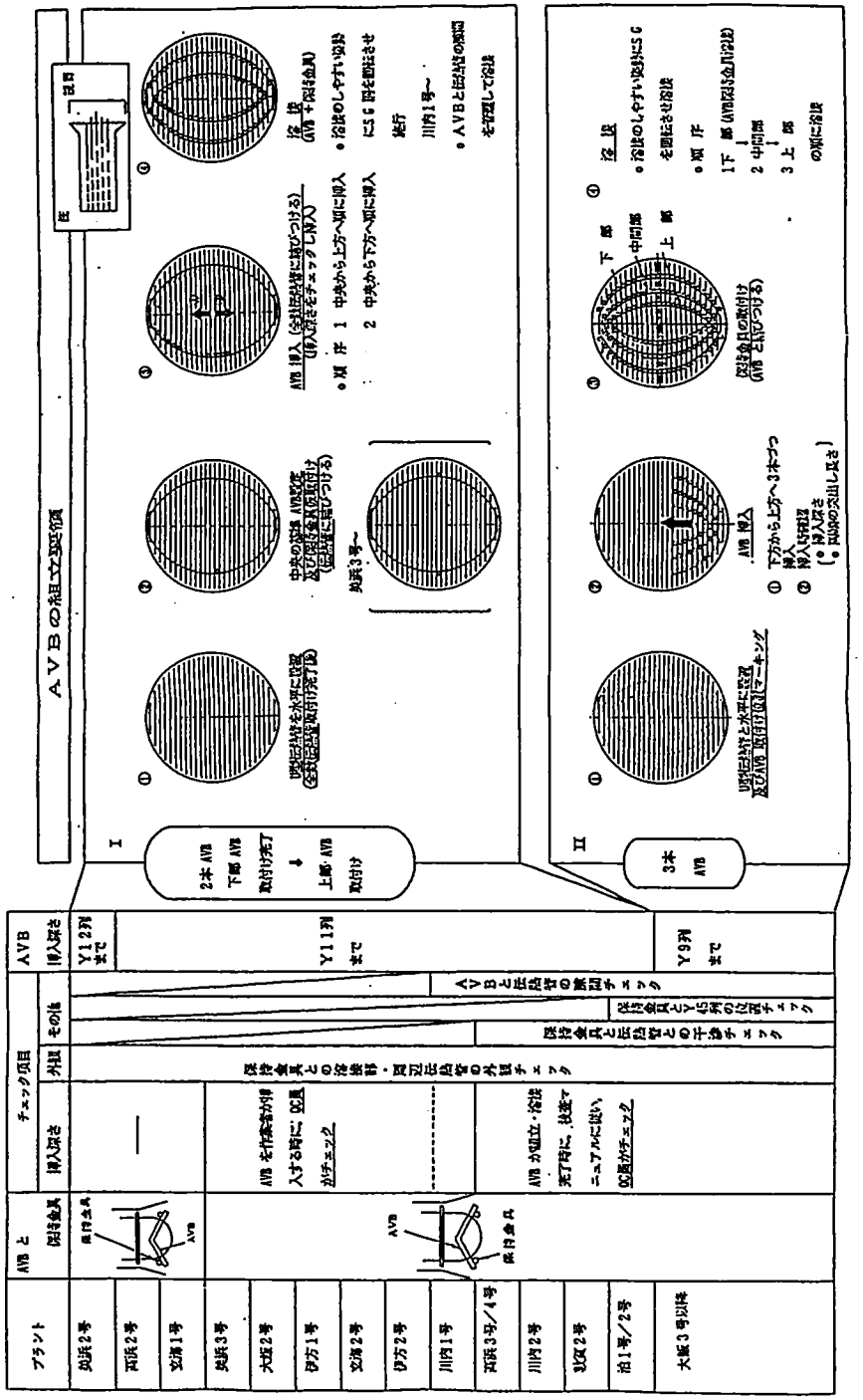
図－1 ＡＶＢの製作フロー

表－５ ＡＶＢ単品製作要領の変遷

プラント名	ＡＶＢ製作要領書 指示内容
美浜２号	1. 製作手順 2. 曲げ寸法
高浜１号(*)	
高浜２号	1. 製作手順 2. 曲げ寸法 3. 部品番号の打刻 4. 表面状態
玄海１号	
美浜３号	
大飯１号(*)	
大飯２号	1. 製作手順 2. 曲げ寸法 3. 部品番号の打刻 4. 表面状態
伊方１号	
玄海２号	
伊方２号	
川内１号	
高浜３号	1. 製作手順 2. 曲げ寸法 3. 部品番号の打刻 4. 表面状態 5. 歪み及び曲げ部の板厚
高浜４号	
川内２号	
敦賀２号	
泊１号	
泊２号	
大飯３号以降	

(*) 輸入品

表－6　蒸気発生器ＡＶＢの組立要領

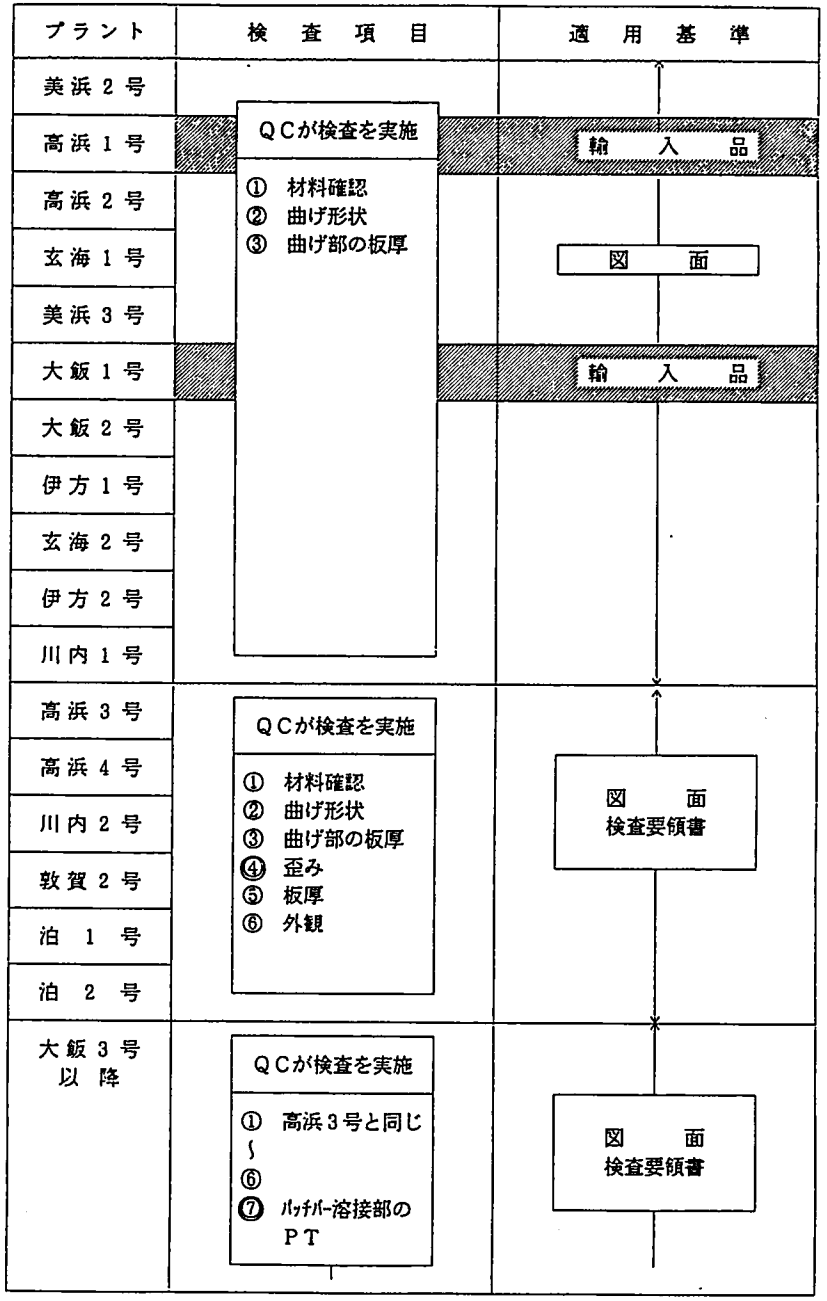


表－7　ＡＶＢ組立・製作要領の変遷

(*) 輸入品

プラント名	ＡＶＢ製作要領書 指示内容
美浜２号	1. 伝熱管を傷つけない注意 2. ＡＶＢの簡単な組立順序
高浜１号(*)	
高浜２号	
玄海１号	
美浜３号	1. 2. 同上 3. 挿入深さの確認（ＱＣの立会）
大飯１号(*)	
大飯２号	
伊方１号	
玄海２号	1. 2. 3. 同上 4. 保持金具を伝熱管に接触させない注意
伊方２号	
川内１号	1. 2. 3. 4. 同上 5. 伝熱管とＡＶＢの隙間管理
高浜３号	要領書を見直し、各指示項目について詳細に記述した。 1. 伝熱管を傷つけない注意 2. ＡＶＢの簡単な組立て順序 3. 挿入深さの確認 4. 保持金具を伝熱管に接触させない注意 5. 伝熱管とＡＶＢの隙間管理
高浜４号	
川内２号	
敦賀２号	
泊　１号	
泊　２号	
大飯３号以降	３本ＡＶＢ組立て要領書を新しく作成。（作業手順も含めた全面見直しを行った。）

表－8　ＡＶＢ検査実施状況の変遷（単品検査工程）



◎　追加項目

振止め金具の調査結果

目　　次

添付－2. (1) ファイバースコープによる振止め金具点検結果 …… 1

添付－2. (2) 振止め金具挿入状況に関する点検結果 …… 4

添付－2. (3) 振止め金具の経年変化 …… 7

添付－2. (4) 振止め金具の取出し調査結果 …… 21

添付－2. (5) 振止め金具の金属調査結果 …… 29

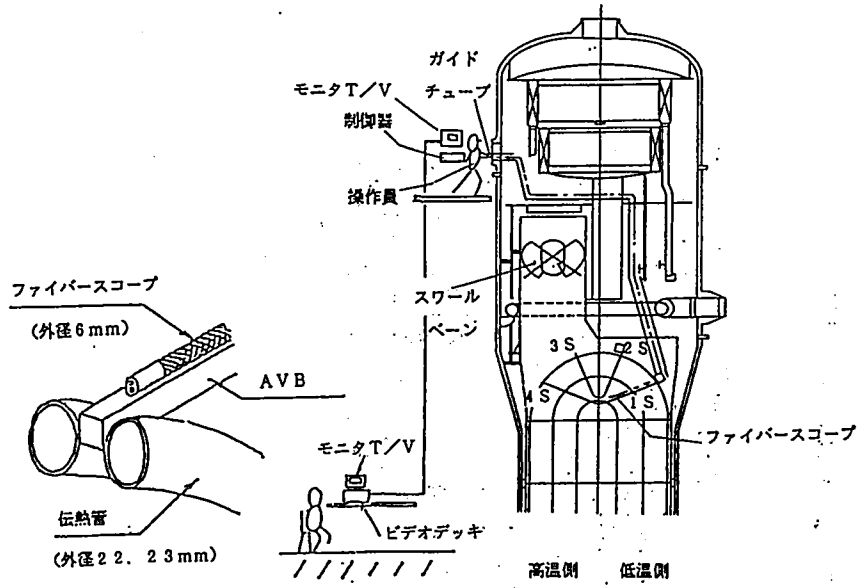
ファイバースコープによる振止め金具点検結果

1. 目的

Ｘ４３－Ｘ４４の間からＸ４６－Ｘ４７の間の上部及び下部ＡＶＢ４組について挿入深さを点検する。

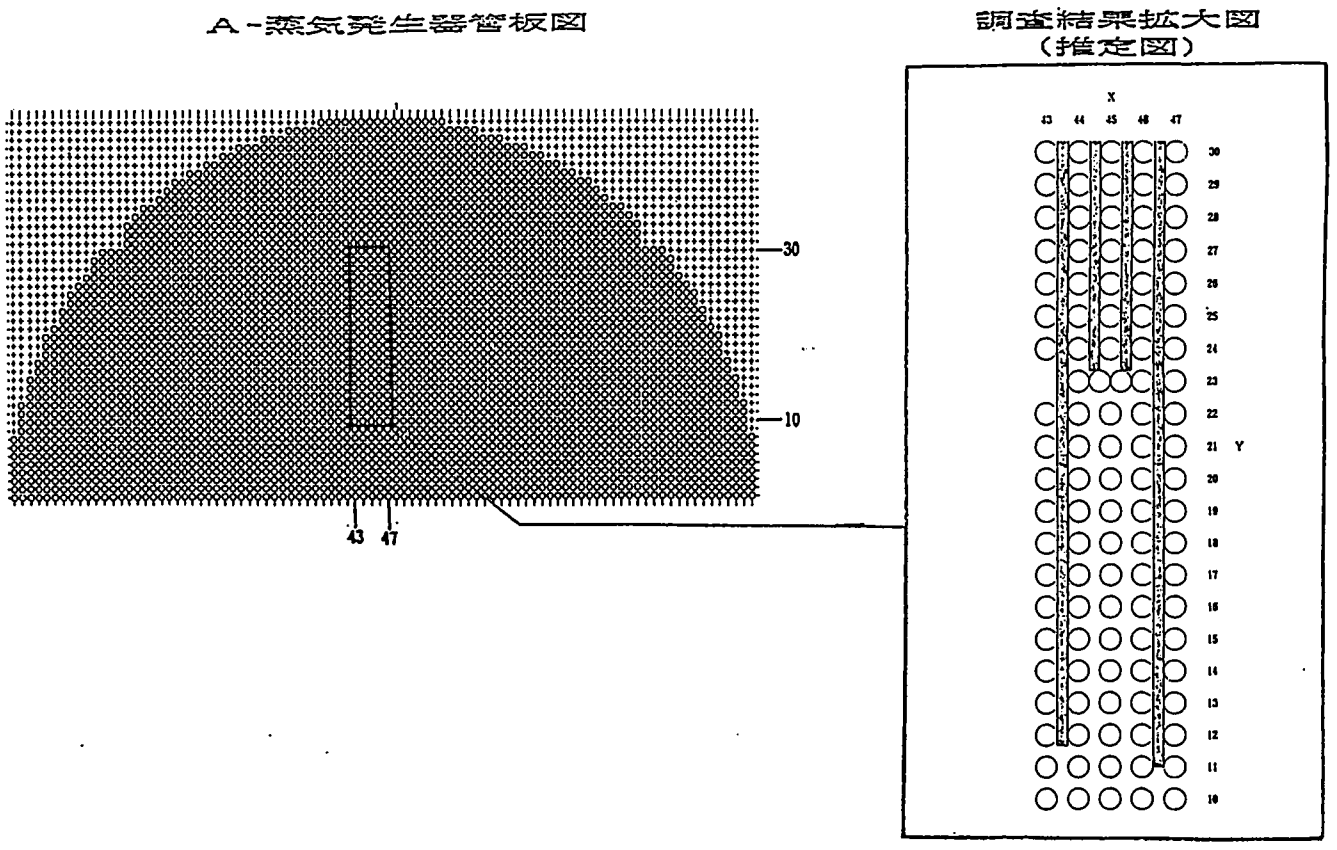
2. 方法

ファイバースコープをＡＶＢ上面に沿わせながら挿入し、モニタＴＶ画面上で伝熱管数をカウントし、ＡＶＢの挿入深さを調査する。また、ＡＶＢの挿入状況をモニタＴＶ画面上で点検する。



3. 点検結果

Ｘ45列伝熱管両サイドのＡＶＢは、設計位置まで挿入されておらず、上部と下部のＡＶＢはＶ字曲がり部が接触していることが確認された。　（図－１）



図－1　A－蒸気発生器下部振止め金具のファイバースコープによる調査結果

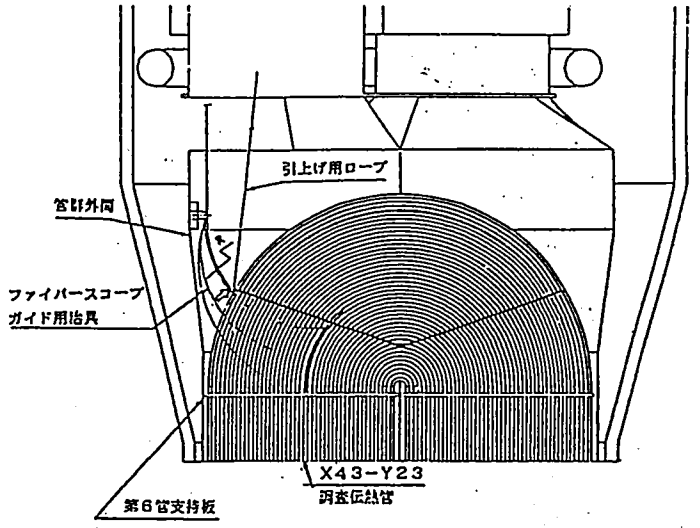
振止め金具挿入状況に関する点検結果

1. 目的

ＡＶＢの挿入状況について、ファイバースコープにより点検する。

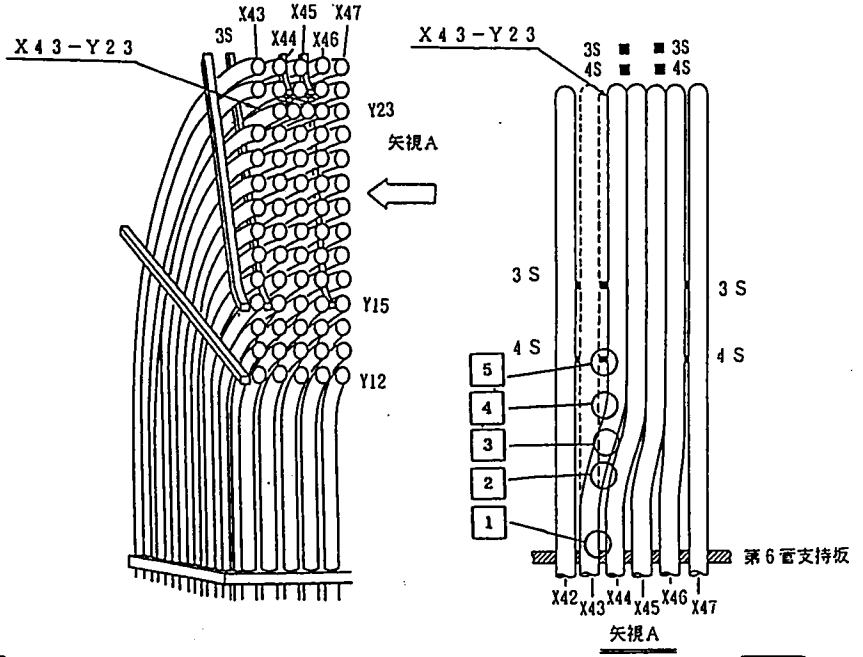
2. 点検方法

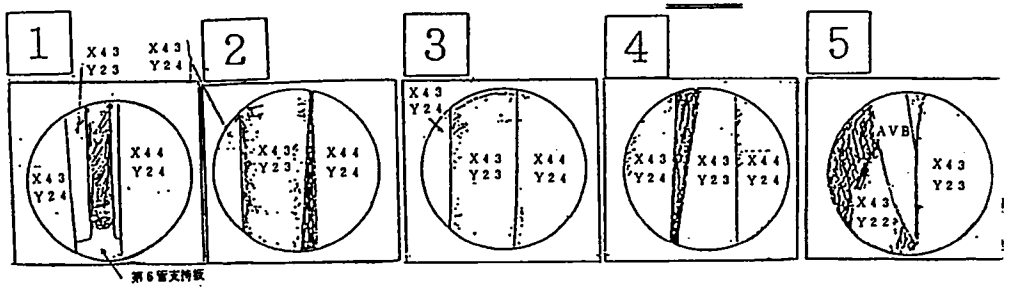
ＡＶＢの下面を目視するためのファイバースコープガイド用治具を管群外筒に取付け、Ｘ43－Ｘ44の間のＡＶＢの４Ｓ側の下面にファイバースコープを挿入し、ＡＶＢの挿入状況を点検する。



3. 点検結果

X43－Y23の伝熱管は、第6管支持板部では正規の位置にあるが、そこからX44列側に片寄り始め斜めに立ち上がっており、4S部では1ピッチX44列側に片寄り、X44－Y23の位置にX43－Y23の伝熱管があることが判明した。





添付－2(3)

振止め金具の経年変化

1. ＥＣＴによるＡＶＢの経年変化調査

1.1 目的

ＥＣＴにより検出されるＡＶＢの信号により、破断管近傍ＡＶＢ及びＡＶＢ全体の経年変化の調査を行う。

1.2 調査要領

1.2.1 破断管近傍ＡＶＢの経年変化調査

(1) ＡＶＢ挿入形状の現状調査

a. 第13回定検時（平成２年４月～７月）のX44、X45、X46列のU字部のＥＣＴ記録を再生する。ただし、施栓管については、平成３年３月の抜栓後のＥＣＴ記録を再生する。

b. ＡＶＢの信号が認められた場合は、Ｃ６Ｂ（低温側第６管支持板）からＡＶＢ信号位置までの距離を評価する。距離の評価については、Ｃ６ＢからＨ６Ｂ（高温側第６管支持板）までの距離を1.0とし、Ｃ６Ｂから各ＡＶＢの信号までの比率を求める。

c. ｂ項の距離をU字部の図面上に伝熱管１本毎にプロットし、滑らかな曲線で結ぶ。

(2) ＡＶＢ挿入形状の経年変化調査

第２回定検後計画停止時（昭和51年６月～９月）のＥＣＴ記録を用い、上記(1)項と同様の手順によりＡＶＢの挿入形状を推定し、経年変化を調査する。

1.2.2 ＡＶＢ全体の経年変化調査

(1) 第２回定検後計画停止時（昭和51年６月～９月）及び第13回定検（平成２年４月～７月）のU字部のＥＣＴ記録を、設計上のＡＶＢ挿入位置であるY12、Y15列の全てのX列について、再生する。

(2) ＡＶＢの信号が認められた場合は、低温側第６管支持板からＡＶＢ信号位置までの距離を評価する。

1.3 調査結果

(1) X44－X45の間及びX45－X46の間の上部ＡＶＢと下部ＡＶＢは、第２回定検後計画停止時及び第13回定検時ともＥＣＴ信号上その位置に有意な変化は認められなかった。（図－１）

(2) Y12列及びY15列の伝熱管のＡＶＢ信号位置は、第２回定検後計画停止時及び第13回定検時ともほぼ一致する。（図－２）

これらのことから、ＡＶＢが経年的に移動した形跡は認められなかった。

2. ＡＶＢの変形に関する解析

2.1 概　要

ＡＶＢには、運転中に流体力による上向きの荷重と自重による下向きの荷重が加わる。また、流体力と自重との差し引きの分は、ＡＶＢと伝熱管との摩耗による荷重またはＡＶＢと保持金具との溶接部での荷重となる。

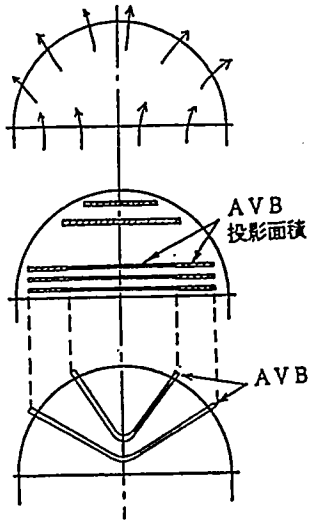
ＡＶＢに加わる流体力を評価しＸ４５－Ｘ４６の間に挿入されたＡＶＢが運転中に流体力により変形する可能性について検討する。検討は、Ｘ４５－Ｘ４６の間に挿入されたＡＶＢが設計通りの位置に挿入されたと仮定した場合について実施する。

2.2 ２次系の流体力

(1) U字部における２次系流体の流況は概ね半径方向に向かっており、ＡＶＢに加わる流体力を評価する上では、以下の仮定の下に安全側に評価する。

・ＡＶＢの投影面積に対して、流体力が作用するものとする。

・上記投影面積に対して、加わる流速はU字部を２次系流体が垂直方向に流れると仮定して算出する。



(2) ＡＶＢに加わる流体力F_1は動圧の最大の値がＡＶＢ全長に加わると考えると(1)式により求められる。

$$F_1 = C_D \frac{\gamma_U V_U^2}{2g} A_0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1)$$

ここで　$C_D = 2.2$（矩形柱の抗力係数）：機械工学便覧による。

$\gamma_U = 108 \times 10^{-9}$ kg/mm³（動圧が最大となる位置での比重量）

（図－３、図－４）

$V_U = 5.4 \times 10^3$ mm/sec（動圧が最大となる位置での流速）

（図－３、図－４）

動圧は下部ＡＶＢの最大となったことから上部、下部ＡＶＢに対して最大値となる値を用いた。（図－５）

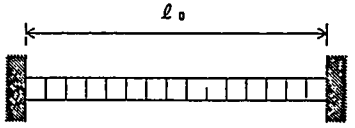
$g = 9806.65$ mm/s²（重力の加速度）

$$A_0 = \left\{ \begin{array}{l} 8.01 \times 10^3 \text{mm}^2 \text{（上部ＡＶＢ）} \\ 2.14 \times 10^4 \text{mm}^2 \text{（下部ＡＶＢ）} \end{array} \right\} \text{（ＡＶＢの投影面積）}$$

ゆえに

$$F_1 = \left\{ \begin{array}{l} 2.8 \text{kg（上部ＡＶＢ）} \\ 7.6 \text{kg（下部ＡＶＢ）} \end{array} \right\} \text{（ＡＶＢに加える流体力）}$$

2.3　ＡＶＢの強度



ＡＶＢの両端は保持金具に溶接固定されることから、ＡＶＢを両端固定の梁と考え一様な分布荷重Ｗが加わると考えるとＡＶＢに発生する応力σ_1は(2)の式で示される。

$$\sigma_1 = \frac{M}{Z} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

ここで、

Ｍ＝モーメント

$$M = \frac{W \ell_0^2}{24} = \left\{ \begin{array}{l} 250 \text{kg－mm（上部ＡＶＢ）} \\ 834 \text{kg－mm（下部ＡＶＢ）} \end{array} \right\}$$

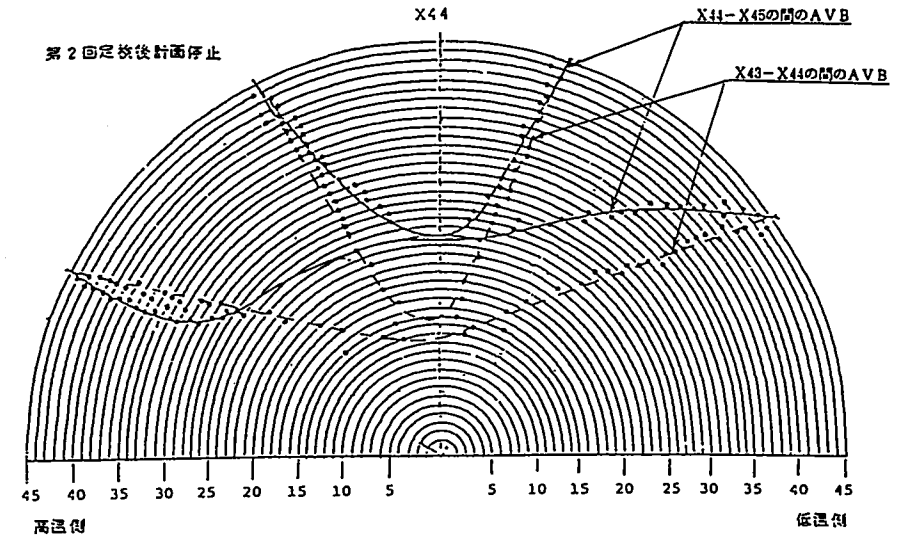
Ｚ＝断面係数

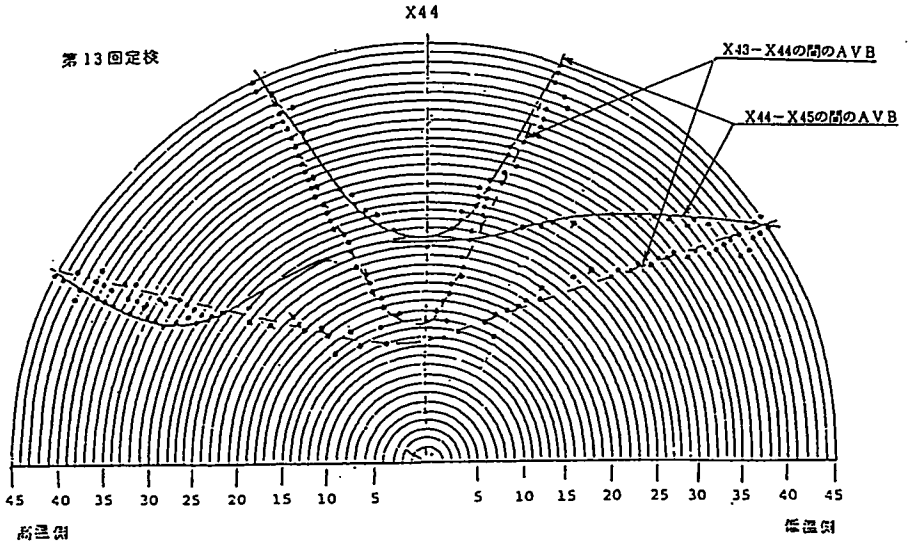
$$Z = \frac{b h^2}{6} = 107 \text{mm}^3$$

ゆえに

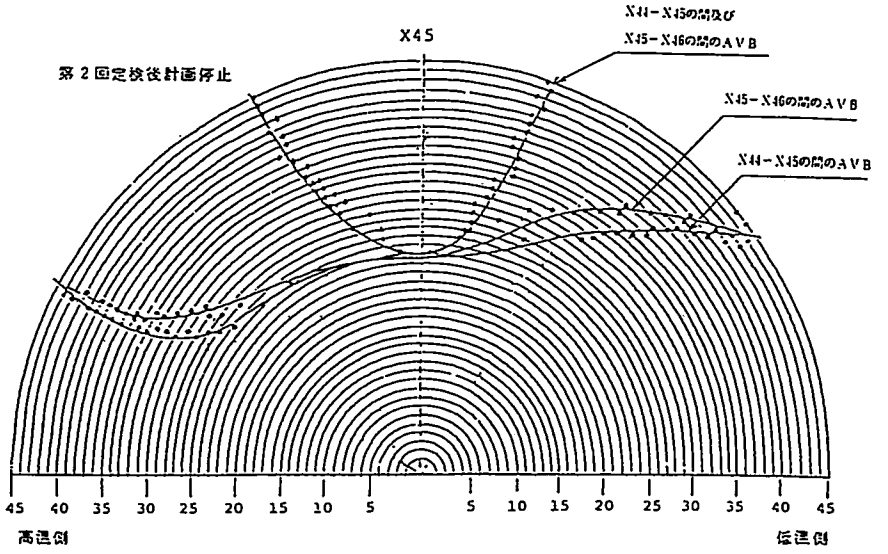
$$\sigma = \left\{ \begin{array}{l} 2.34 \text{kg／mm}^2 \text{（上部ＡＶＢ）} \\ 7.79 \text{kg／mm}^2 \text{（下部ＡＶＢ）} \end{array} \right\} < \text{Sy（設計降伏点）} = 20.1 \text{kg／mm}^2$$

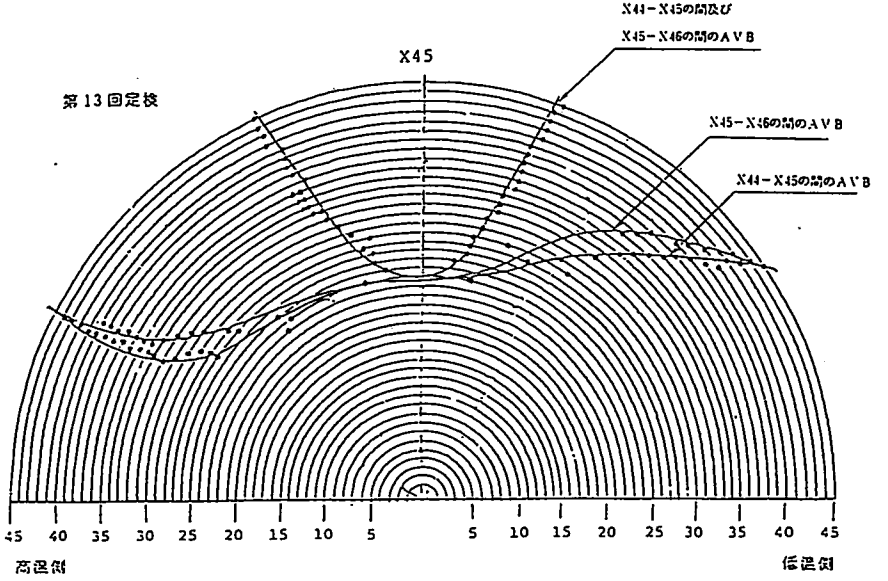
以上のことから、流体力によりＡＶＢに発生する応力は安全側に評価しても、設計降伏点に比べて小さく、運転中の流体力によって塑性変形する可能性はない。



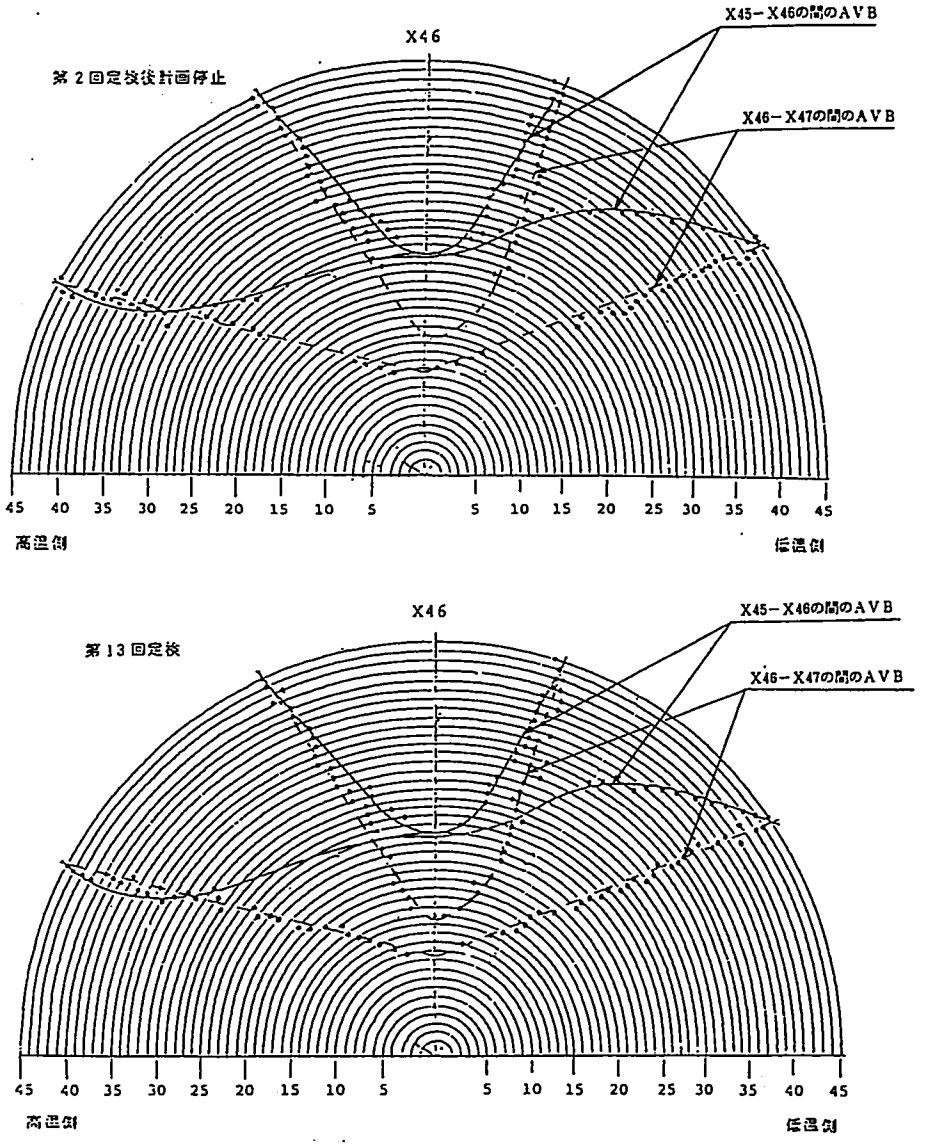


図－１（１／３）　美浜２号機Ａ－蒸気発生器ＡＶＢのＥＣＴによる推定形状

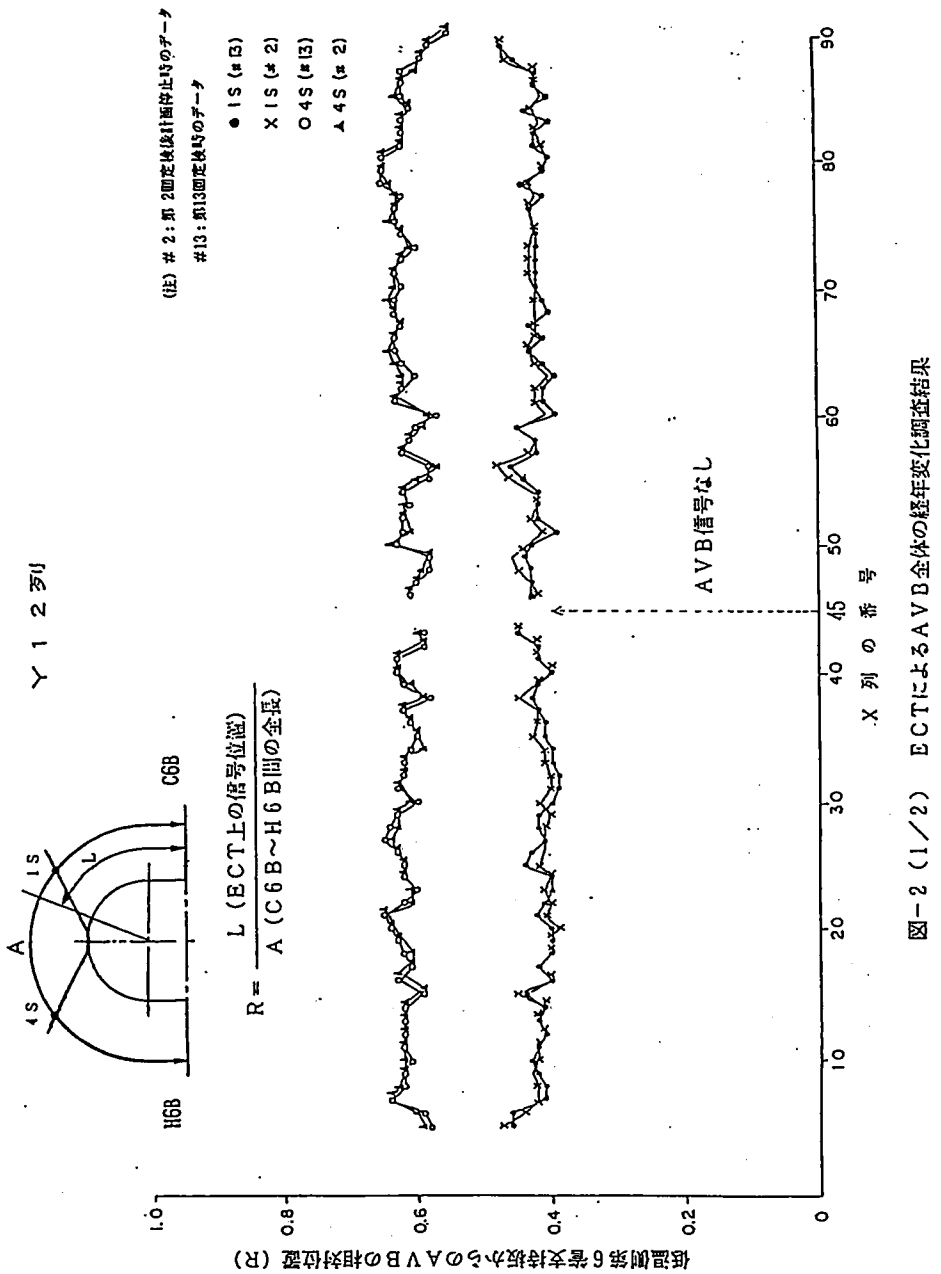




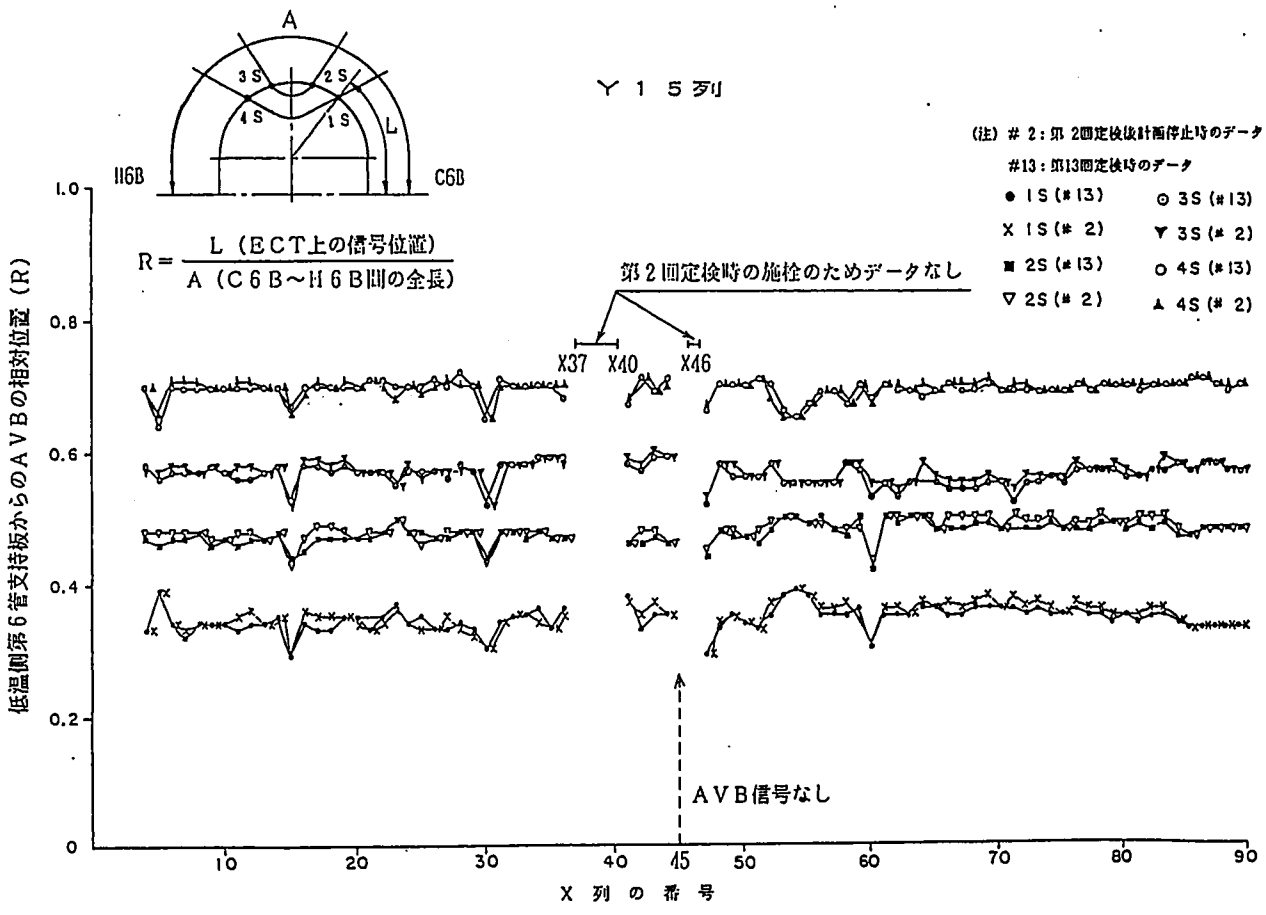
図－１（２／３）　美浜２号機Ａ－蒸気発生器ＡＶＢのＥＣＴによる推定形状



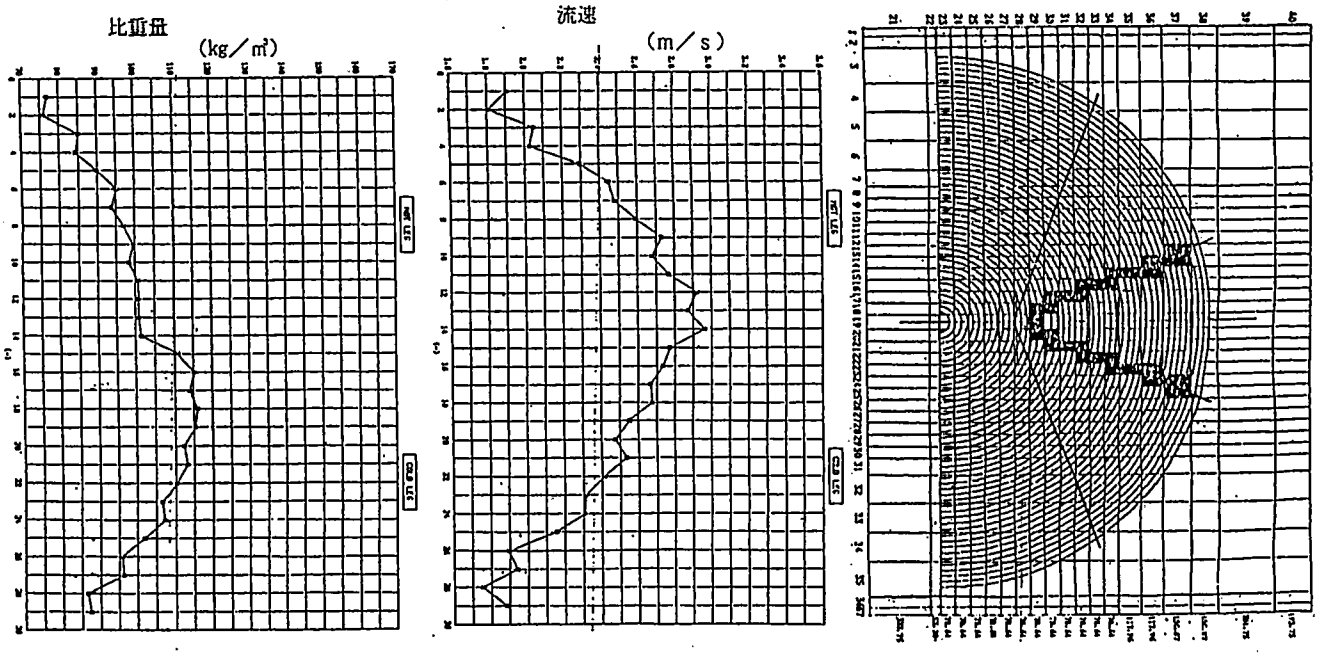
図－１（３／３）　美浜２号機Ａ－蒸気発生器ＡＶＢのＥＣＴによる推定形状



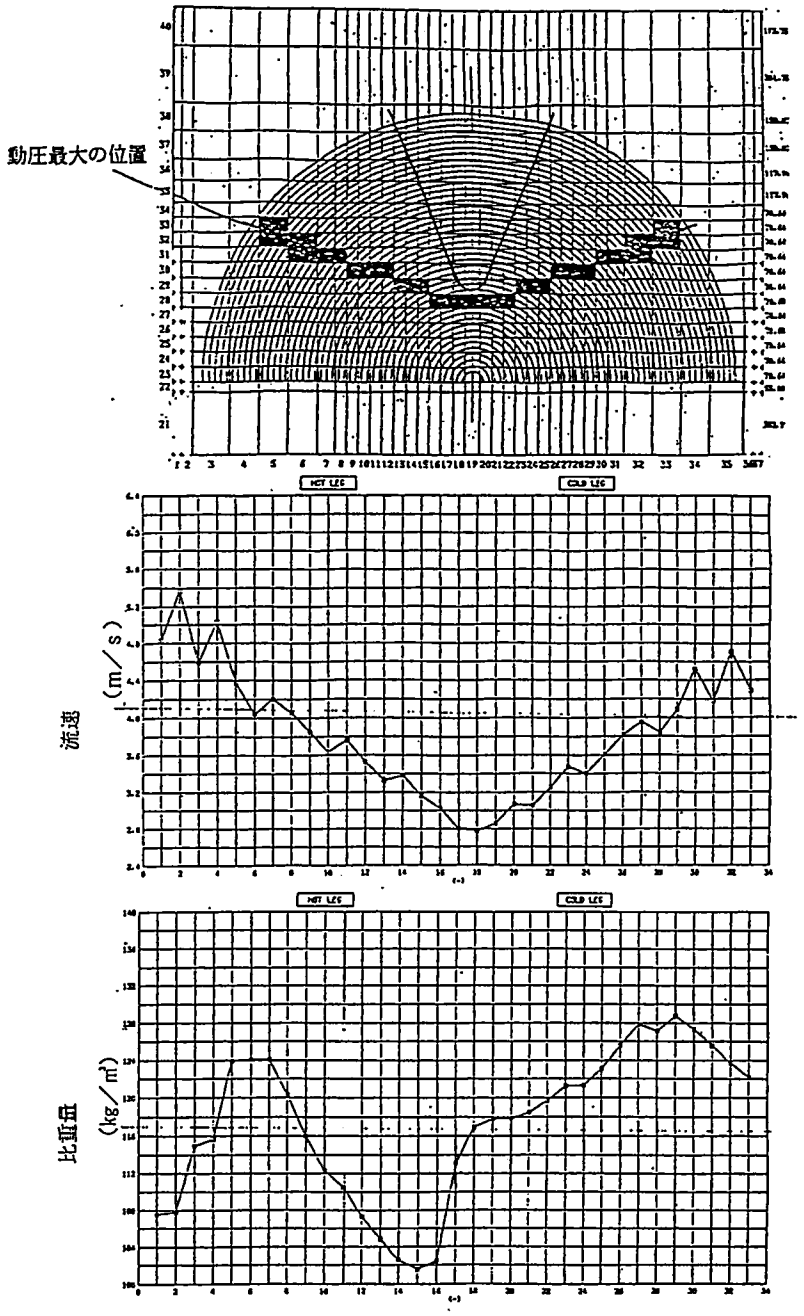
図－２（１／２）　ＥＣＴによるＡＶＢ全体の経年変化調査結果



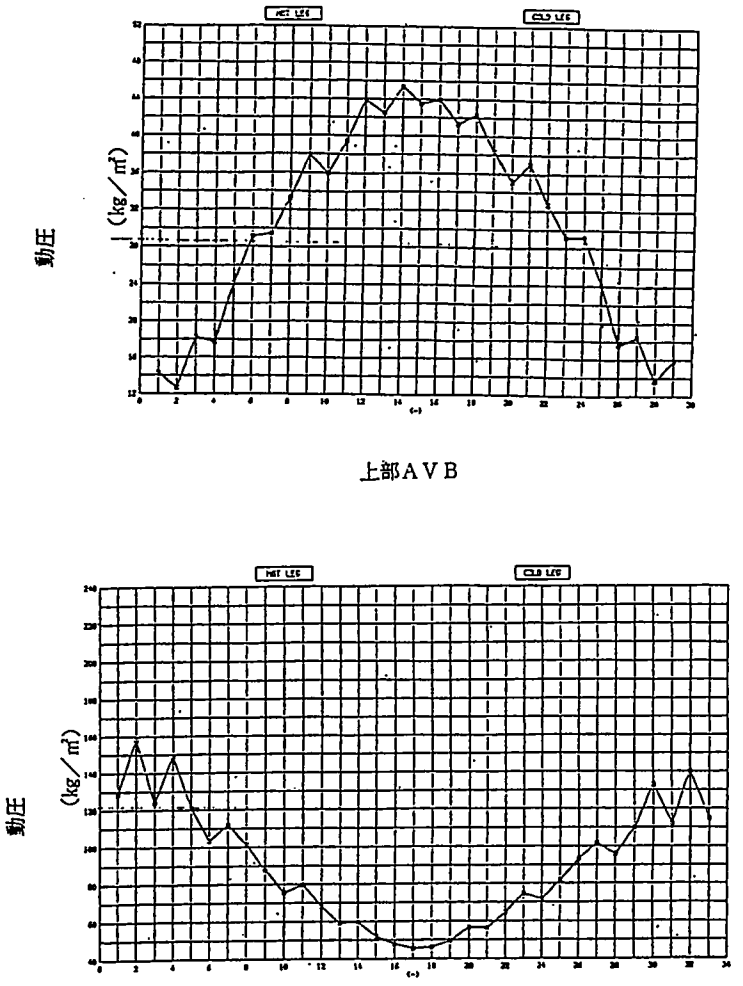
図－2（2／2） ECTによるAVB全体の経年変化調査結果



図－3 上部AVB位置での流速，比重量分布



図－４　下部ＡＶＢ位置での流速，比重量分布



図－５　上部，下部ＡＶＢ部での動圧の分布

振止め金具の取出し調査結果

1. 目的

ＡＶＢの曲がり形状及び外観状況を調査する。

2. 調査対象ＡＶＢ

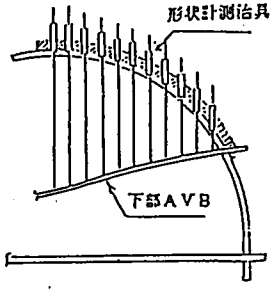
Ｘ４４－Ｘ４５の間、Ｘ４５－Ｘ４６の間、及びＸ４６－Ｘ４７の間の上下ＡＶＢ合計６本

3. 調査項目

(1)ＡＶＢの取付け形状

(2)ＡＶＢの外観・寸法

(3)ＡＶＢ支持間隔

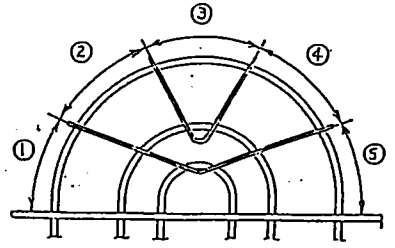


4. 調査方法

(1) 取出し前

a. ＡＶＢの取付け形状

形状計測治具を伝熱管上に置きゲージ棒の挿入量を約１００㎜ピッチで計測する。

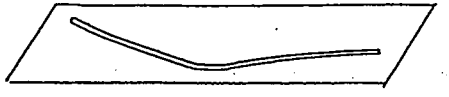


b. ＡＶＢ支持間隔

上部及び下部のＡＶＢ支持間隔を計測する。

(2) 取出し後

a. 曲がり形状を大版の紙に写し取る。



b. ＡＶＢの外観調査

ＡＶＢを取り出し後、外観・寸法を調査する。

5. 調査結果

(1) 取出し前

a. 取付け形状

Ｘ４４－Ｘ４５の間及びＸ４５－Ｘ４６の間のＡＶＢは挿入が不十分であるが、Ｘ４６－Ｘ４７の間のＡＶＢは、ほぼ設計どおりの範囲まで挿入されていた。

（図－１）

b. ＡＶＢ支持間隔

最外周伝熱管（Ｙ４５）におけるＡＶＢ位置については、１Ｓ及び２Ｓはほぼ設計どおりであったが、３Ｓは約１３㎝、４Ｓは約１５㎝それぞれ周方向で下側にずれていた。

（図－１）

(2) 取出し後

a. 外観

・Ｘ４４－Ｘ４５の間及びＸ４５－Ｘ４６の間の上部ＡＶＢは同じ形状であるが、いずれも底部以外に２箇所で折れ曲がっていた。

なお、Ｘ４６－Ｘ４７の間の上部ＡＶＢは、ほぼ設計どおりの形状であった。

・Ｘ４４－Ｘ４５の間及びＸ４５－Ｘ４６の間の下部ＡＶＢは波うっており、それぞれ形状は異なっていた。

なお、Ｘ４６－Ｘ４７の間の下部ＡＶＢは、ほぼ設計どおりの形状であった。

・上部、下部ＡＶＢとも、弾性歪みが残っており、２点ないし３点を拘束することによって、取出し前の寸法計測で得られた取付け形状とほぼ一致した。

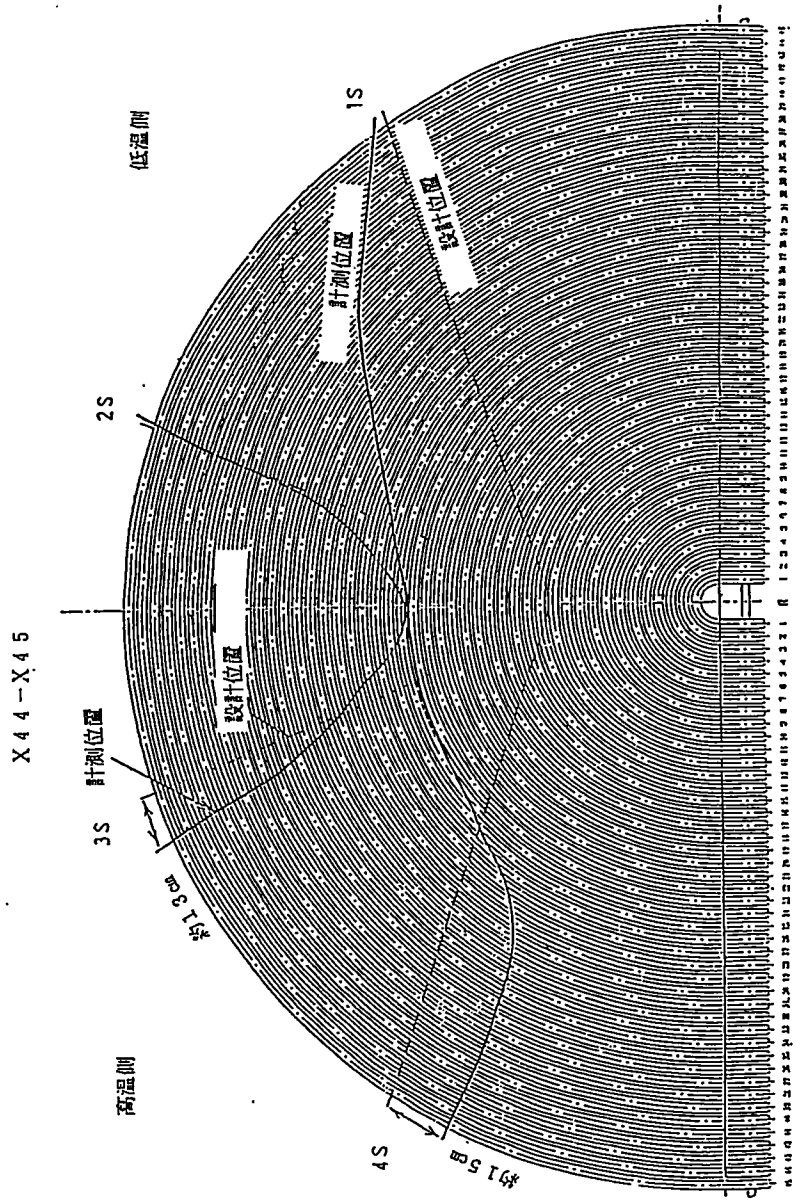
（図－２）

b. 寸法

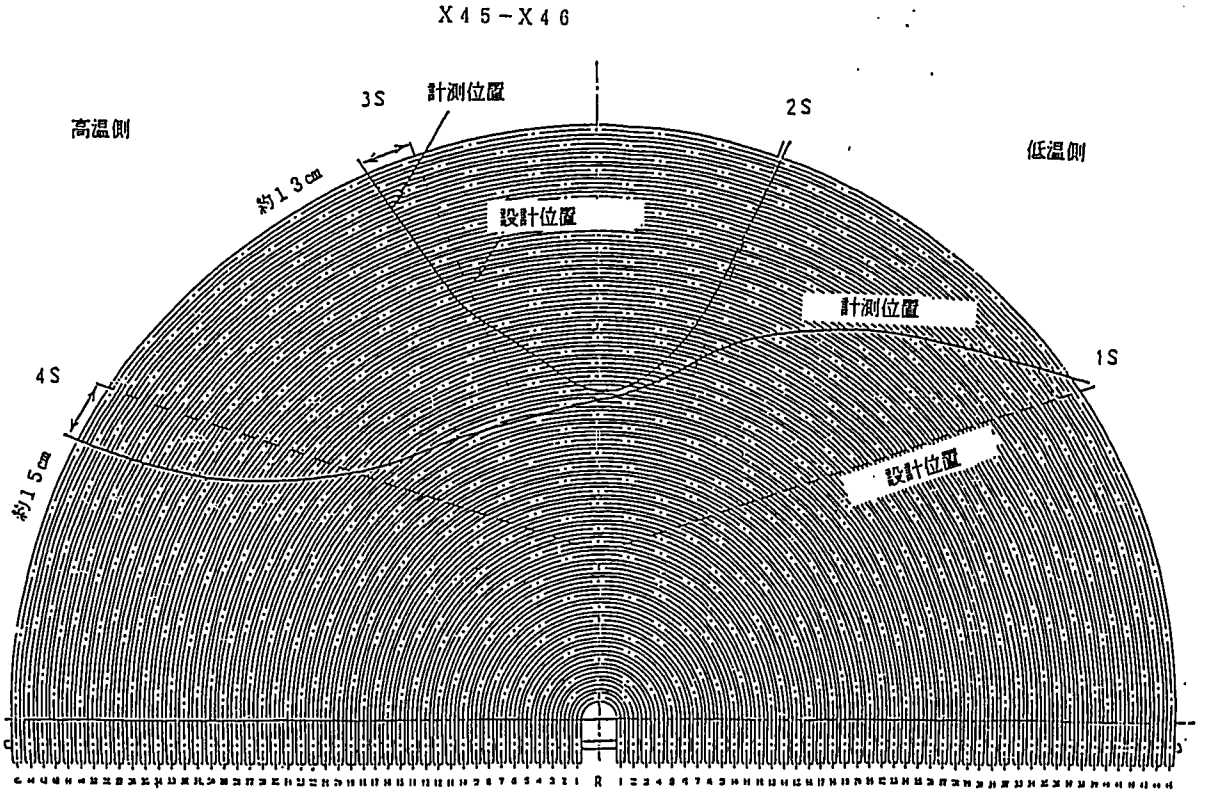
・Ｘ４４－Ｘ４５の間の上部ＡＶＢは約４２㎝、Ｘ４４－Ｘ４５の間の上部ＡＶＢは約４８㎝　設計寸法より短くなっていた。

・なお、Ｘ４６－Ｘ４７の間の上部ＡＶＢは、設計寸法の範囲内であった。

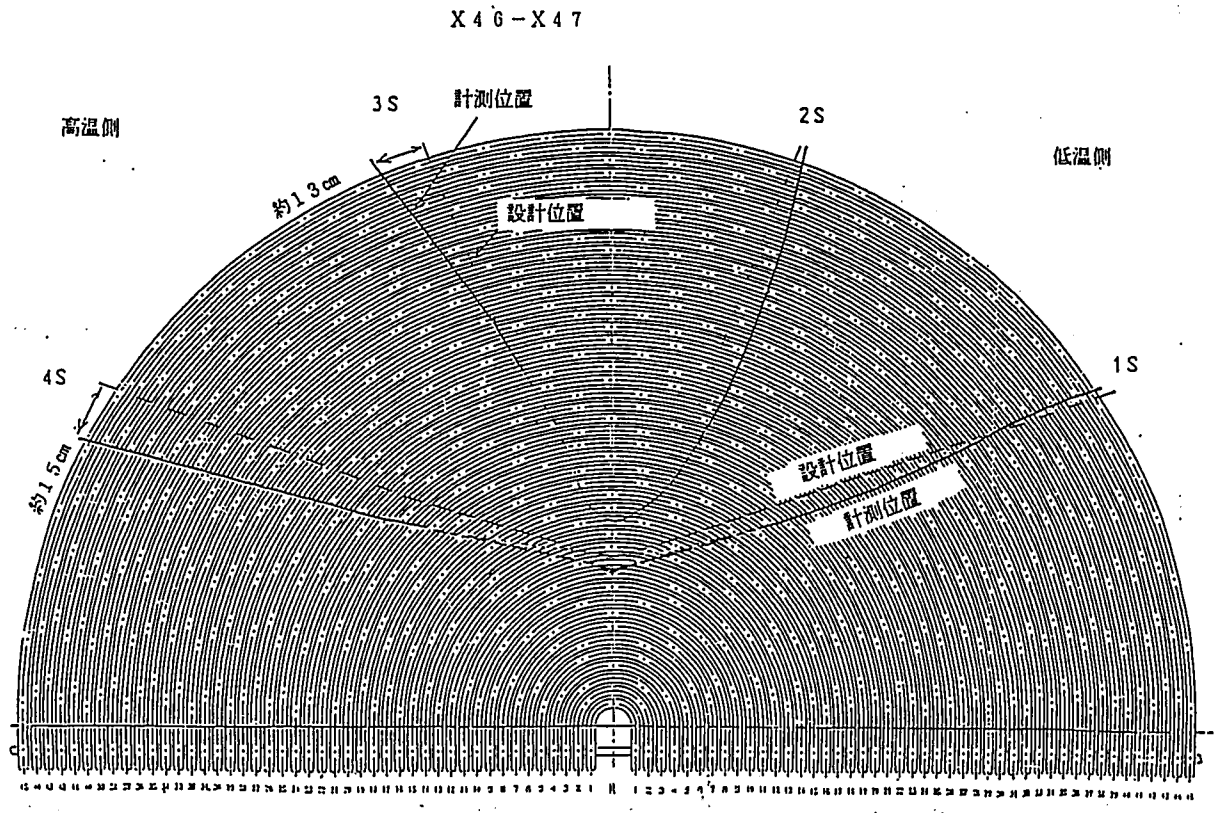
・下部ＡＶＢは、３本とも設計寸法の範囲内であった。



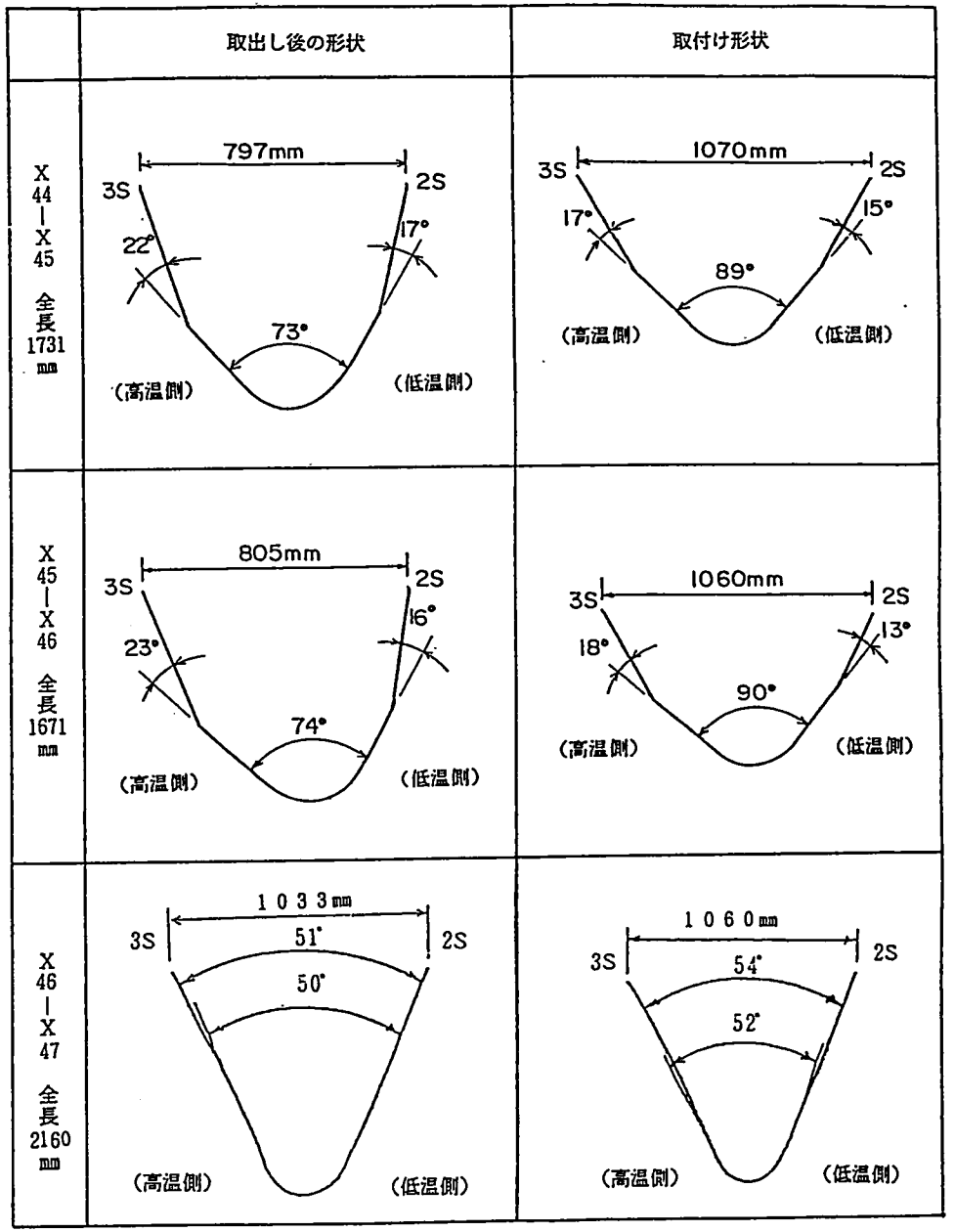
図－１（１／３）寸法計測による形状予想図



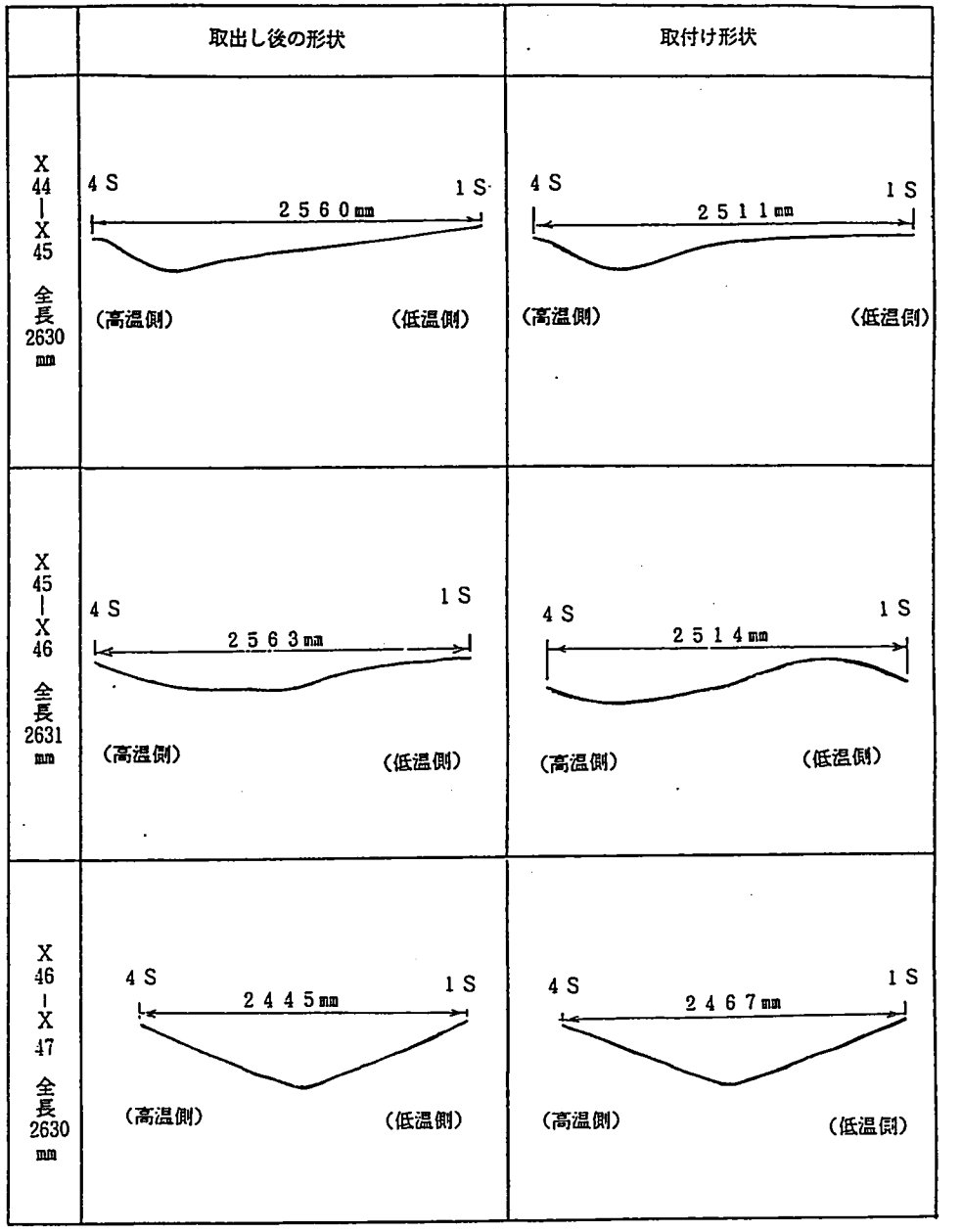
図－1（2／3）寸法計測による形状予想図



図－1（3／3）寸法計測による形状予想図



図－２（1／2） 取出し後の形状（上部ＡＶＢ）



図－２（2／2） 取出し後の形状（下部ＡＶＢ）

振止め金具の金属調査結果

1. 調査目的

破断管（X45－Y14）近傍のＡＶＢ６本を取出し金属調査を実施する。

2. 調査方法

調査対象ＡＶＢ及びサンプルの採取位置を図－１に示す。また、各サンプルの調査項目を表－１に示す。調査に使用した装置を表－２に示す。

3. 調査結果

3.1 外観観察

各サンプルとも、一様に薄い黒色スケールが付着していた。

X46－X47の間のＡＶＢのX46側の伝熱管との接触部に減肉が認められた。

3.2 寸法計測

各サンプルの厚さをノギスを用いて測定した結果を表－３に示す。測定結果は8.65～8.75㎜であり、設計値の範囲内であった。

3.3 拡大観察

(1) 端面

全ての端面に機械的に切断したと推定される多数の平行な縞模様が認められたが、X44－X45の間及びX45－X46－間の上部ＡＶＢの端面には他と異なる縞模様が認められた。（図－２）

(2) 曲がり部

X44－X45の間の上部ＡＶＢの高温側、低温側及び底部の曲がり部とも、メッキのはがれ等の加工形跡は認められなかった。

3.4 端面及び側面のミクロ観察

3.4.1 メッキの付着状況 （図－3）

ＡＶＢはクロムメッキが施行される設計となっているため、メッキの付着状況を調査した。なお、ＡＶＢのクロムメッキの施工は、ＡＶＢの端部を電極ではさむため、電極ではさまれた端部にはメッキは付着しないものとなっている。

(1) 上部ＡＶＢ

a. Ｘ44－Ｘ45の間及びＸ45－Ｘ46の間の上部ＡＶＢの高温側及び低温側とも、側面端部までメッキが付着していたが、端面にはメッキの付着は認められなかった。

b. Ｘ46－Ｘ47の間の上部ＡＶＢの高温側端部は側面から端面までメッキが付着していた。低温側は端面及び側面にメッキの付着は認められなかった。

(2) 下部ＡＶＢ

a. Ｘ44－Ｘ45の間の下部ＡＶＢの高温側端面は、メッキが付着していたが、側面でのメッキの付着は認められなかった。

b. Ｘ45－Ｘ46の間の下部ＡＶＢの高温側、低温側とも端面、側面にメッキの付着は認められなかった。

c. Ｘ46－Ｘ47の間の下部ＡＶＢの低温側の側面にはメッキが付着していたが、溶接跡と重なったため端面でのメッキの付着は認められなかった。高温側では端面、側面ともにメッキは付着していなかった。

3.4.2 ミクロ組織

いずれのサンプルもミクロ組織はインコネル600 で認められる通常の組織であった。また、Ｘ44－Ｘ45の間の上部ＡＶＢの高温側、低温側の曲がり部表面にすべり線が認められた。 （図－4）

3.5 硬さの測定

Ｘ44－Ｘ45の間の上部ＡＶＢの曲げ部と直線部の断面について硬さをマイクロビッカース硬度計により測定した。測定はJIS Z2244 "ビッカース硬さ試験法"に基づき、押し付け荷重1kg及び300gにて実施した。測定結果を図－5に示す。

直線部では厚さの中央部で平均 Hv290、表面近傍で平均 Hv305であり、曲がり部では厚さの中央部で平均 Hv290，曲げの内表面近傍では平均 Hv310であり、特に有意な差は認められなかった。

3.6 母材成分の分析

各ＡＶＢの高温側端部のサンプルを用い、母材成分をJIS Z2615，G1212，G1213，G1214，G1216，G1217、及び発光分光分析法（ＩＣＰ）により分析した。

分析の結果を規格値とともに表－4に示す。

いずれのサンプルの化学成分も規格値の範囲内であった。

3.7 減肉部の調査

Ｘ46－Ｘ47の間のＡＶＢにおけるＸ46列側伝熱管との接触部で認められた減肉深さの分布を図－6に示す。減肉の最大深さは上部ＡＶＢでは 0.4㎜、下部ＡＶＢでは0.48㎜であった。最大深さの減肉部の状況を図－7に示す。

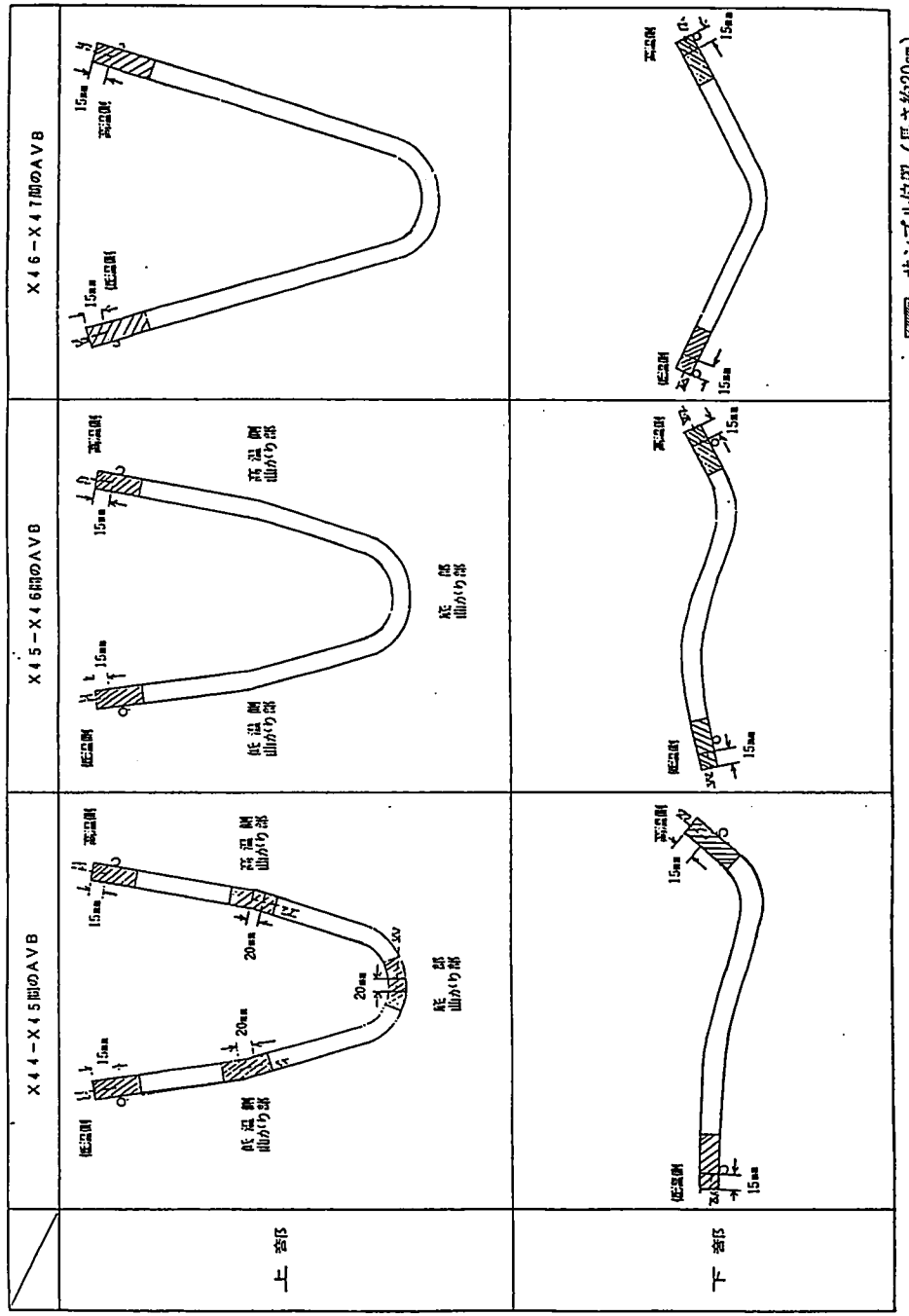
4. まとめ

取り出したＡＶＢについて、金属調査を実施した結果は、以下のとおりである。

(1) Ｘ44－Ｙ45の間及びＸ45－Ｙ46の間の上部ＡＶＢは寸法測定結果から、設計寸法より短く、メッキの付着状況及び端面で認められた縞模様から切断されたものと推定される。

(2) Ｘ44－Ｘ45の間の上部ＡＶＢの設計外の曲がり部では、曲げ加工によると考えられるすべり線が認められたが、硬さについては直線部と同程度であった。

(3) Ｘ46－Ｘ47の間のＡＶＢとＸ46列側伝熱管との接触部で減肉が認められた。減肉の最大深さは上部ＡＶＢでは0.4㎜、下部ＡＶＢでは0.48㎜であった。



図－1　AVBサンプル採取位置

サンプル位置（厚さ約20cm）

ミクロ観察面

表－1　金属調査項目

サンプル ＼ 調査項目		外観観察	寸法計測	拡大観察	端面ミクロ	断面ミクロ	硬さ	母材成分
X44－X45間 上部AVB	高温側上端	○	○	○	○	○	○	○
	高温側曲がり部	○	○	○		○	○	
	底部曲がり部	○	○	○		○	○	
	低温側曲がり部	○	○	○		○	○	
	低温側上端	○	○	○	○			
X44－X45間 下部AVB	高温側上端	○	○	○	○	○		○
	低温側上端	○	○	○	○			
X45－X46間 上部AVB	高温側上端	○	○	○	○	○		○
	低温側上端	○	○	○	○			
X45－X46間 下部AVB	高温側上端	○	○	○	○	○		○
	低温側上端	○	○	○	○			
X46－X47間 上部AVB	高温側上端	⊙	○	○	○	○		○
	低温側上端	○	○	○	○			
X46－X47間 下部AVB	高温側上端	○	○	○	○	○		○
	低温側上端	○	○	○	○			

表－2　金属調査に使用した装置

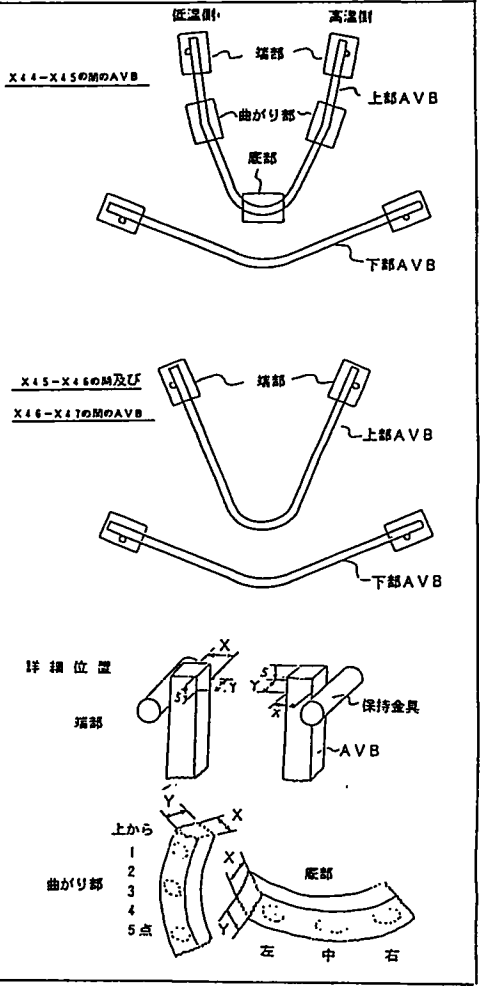
試験項目	装　置　名	仕　　様
外観記録	３５mm判カメラ	ニコンＦ－３ ニッコール１０５mm
寸法計測	ノギス	１級　精度１／２０mm
端面及び 表面拡大写真	拡大写真観察装置	ニコン製　：マルチフォト 倍　率　：0.95～40倍
端面及び 断面ミクロ (ミクロ 組織)	光学顕微鏡	ﾗｲﾍﾙﾄ社製：POLYVAR-MET 倍　率　：1.2～1000倍
硬　度	ﾏｲｸﾛﾋﾞｯｶｰｽ 硬度計	明石製作所製：MVK-E型 １０g　～１０００g
母材分析		
Cu, Fe	プラズマ発光分光分析装置	セイコー電子製 焦点範囲：100cm 波長範囲：175～500nm
C	燃焼熱伝導度型カーボン 分析装置	LECO社製 測定レンジ：0.005～５％C
Si, Mn	分光光度計	日立製：Ｕ－１１００型 波長範囲：200～100nm 波長精度：±１ｎｍ
S	電気炉燃焼法 (JIS G 1215準拠)	
Ｎｉ	ＥＤＴＡ容量法 (JIS G 1216準拠)	
Ｃｒ	過マンガン酸容量法 (JIS G 1217準拠)	

表－３　ＡＶＢの厚さ寸法測定結果

単位 mm

サンプル＼測定方向				X	Y
X44-X45間 AVB	上部	高温側	端部	8.65	8.65
			曲がり部 1	8.65	8.65
			曲がり部 2	8.70	8.65
			曲がり部 3	8.65	8.75
			曲がり部 4	8.70	8.70
			曲がり部 5	8.70	8.65
		底部	左	8.65	8.70
			中	8.65	8.70
			右	8.65	8.70
		低温側	曲がり部 1	8.70	8.70
			曲がり部 2	8.70	8.70
			曲がり部 3	8.65	8.70
			曲がり部 4	8.70	8.70
			曲がり部 5	8.65	8.70
			端部	8.70	8.75
	下部	高温側端部		8.70	8.70
		低温側端部		8.70	8.70
X45-X46間 AVB	上部	高温側端部		8.65	8.70
		低温側端部		8.65	8.70
	下部	高温側端部		8.75	8.70
		低温側端部		8.70	8.65
X46-X47間 AVB	上部	高温側端部		8.70	8.65
		低温側端部		8.70	8.70
	下部	高温側端部		8.70	8.70
		低温側端部		8.70*	8.70*

測　定　位　置

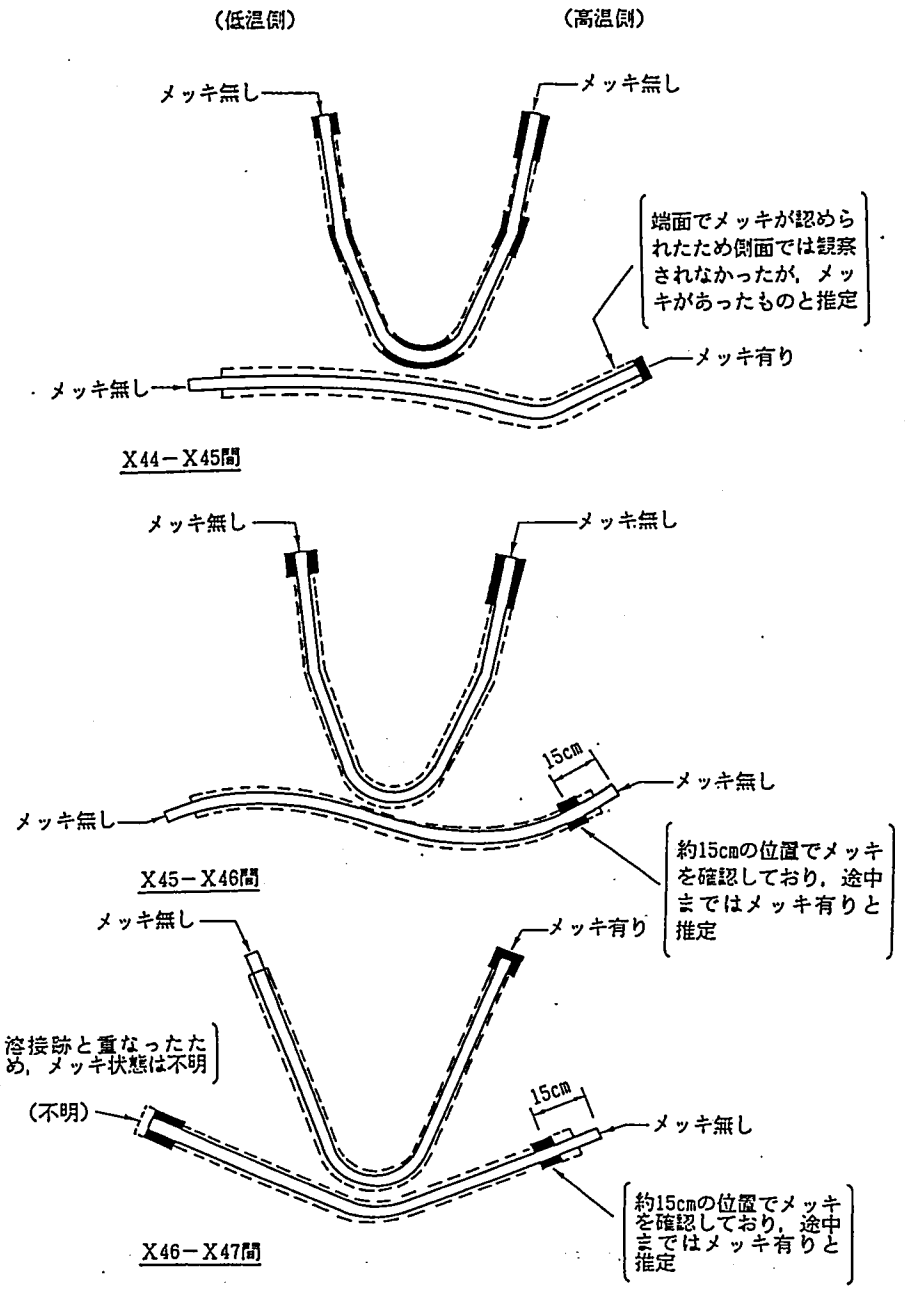


備考　測定具　ノギス

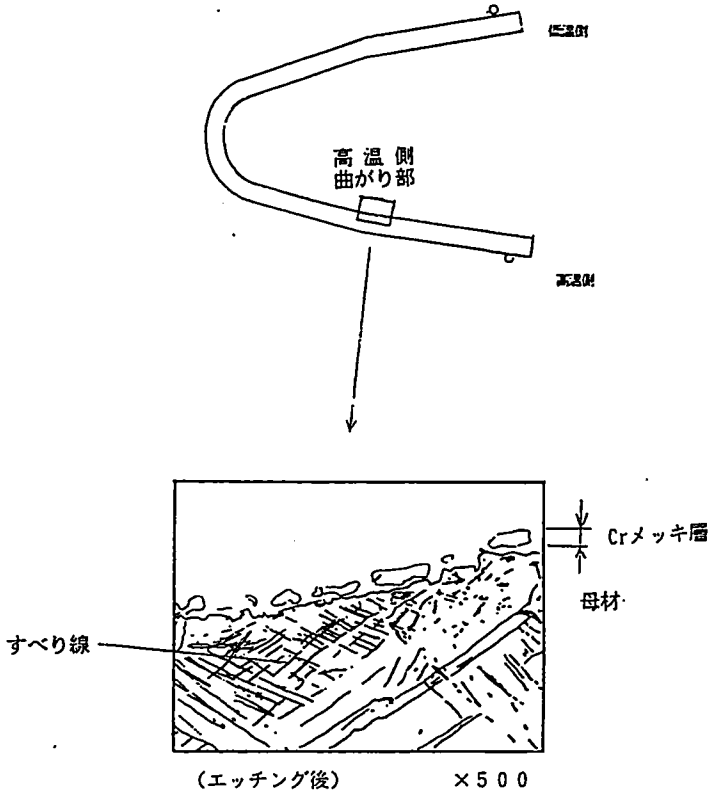
＊　保持金具との溶接部があるため，保持金具下から5mmを測定

位置	端面の状況	
X45－X46間の上部AVB 低温側	A視 低温側 高温側	A視
X45－X46間の上部AVB 高温側	A視 高温側 低温側	A視
X45－X46間の上部AVB 高温側	A視 高温側 低温側	A視

図－2　AVB端面の状況



図－3　AVBのメッキ付着状況（推定図）



図－４　X44－X45の間の上部ＡＶＢの高温側曲がり部のミクロ組織

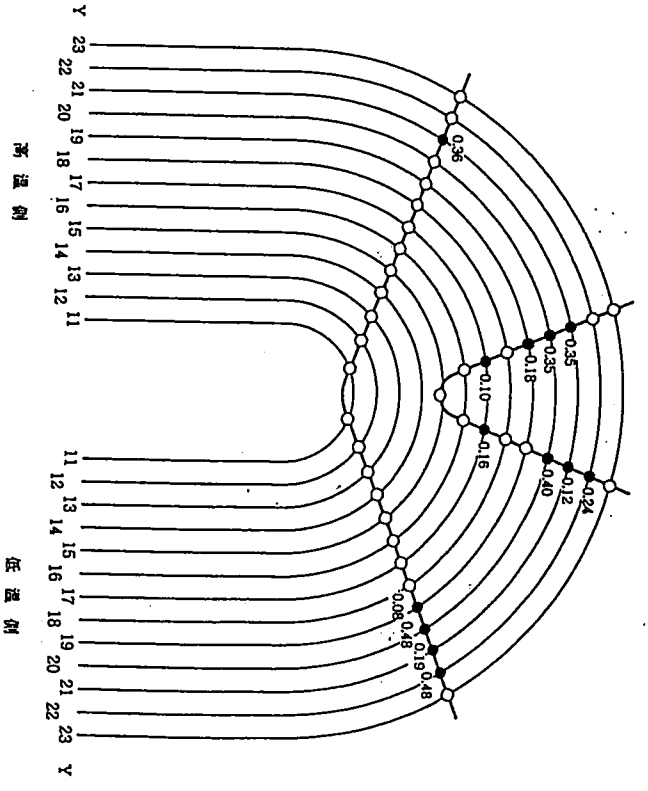
サンプル		測定値　（⊗ Hv（300g）　× Hv（1kg））
X44－X45間 上部AVB	高温側 端部	端面 0.05mm ⊗295 ×270 ⊗285 ⊗304 ×264 ⊗291 ⊗318 ×275
	高温側 曲がり部	0.05mm ⊗285 ⊗277 ⊗308 ×292 ⊗297 ⊗282 ⊗348 ×276 ⊗314 ⊗297 ⊗299 ×283
	低温側 曲がり部	0.05mm 301⊗ 299⊗ 281× 336⊗ 275⊗ 355⊗ 311× 313⊗ 294⊗ 309⊗
	底部 曲がり部	0.05mm ⊗269 ⊗314 ⊗315 ⊗284 ⊗329 ⊗293 ×253 ⊗286 ×288 ⊗290

図－５　ＡＶＢの硬さ試験結果

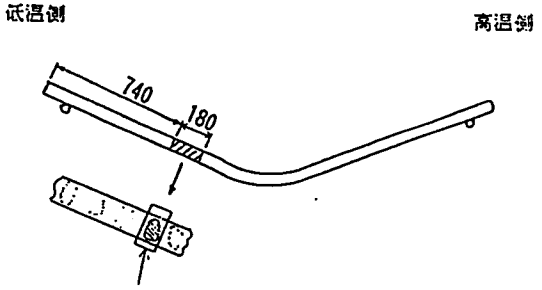
表－４　ＡＶＢ母材成分分析結果

（単位：重量%）

分析サンプル ＼ 化学成分		C	Si	Mn	S	Cr	Fe	Cu	Ni
X44－X45間 AVB	上部高温側	0.030	0.35	0.20	<0.005	16.5	8.03	<0.01	74.9
	下部高温側	0.036	0.35	0.19	<0.005	16.5	8.08	<0.01	75.0
X45－X46間 AVB	上部高温側	0.036	0.35	0.19	<0.005	16.5	7.96	<0.01	74.5
	下部高温側	0.035	0.32	0.18	<0.005	16.5	8.18	<0.01	74.9
X46－X47間 AVB	上部高温側	0.031	0.35	0.19	<0.005	16.5	7.98	<0.01	74.6
	下部高温側	0.033	0.32	0.20	<0.005	16.5	7.99	<0.01	74.9
規格値（ASTM B166）		≦0.15	≦0.5	≦1.0	≦0.015	14.0～17.0	6.0～10.0	≦0.5	≧72.0



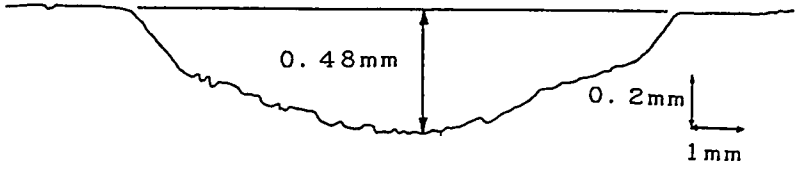
図－６　X46－X47の間のＡＶＢにおける減肉深さの分布（X46側）



(1) 減肉状況



(2) 減肉深さ測定結果



図－7　X46－X47間の下部ＡＶＢ減肉状況（X46側）

1次系流体による不安定振動の可能性の検討結果

1. 目的

U字管は、管内を流れる流体の流速がある値以上になると面内方向及び面外方向に不安定振動を発生することが知られている。蒸気発生器伝熱管のU字部におけるこれらの不安定振動発生の可能性について検討する。

2. 評価方法

文献(1)及び文献(2)によれば、管内を流体が流れる場合の面内及び面外方向の不安定振動に対する限界流速（V）は次式で示される。この式を用いて、不安定振動発生の可能性を評価する。

$$V = \frac{Vc}{\left(\frac{M}{EI}\right)^{1/2} \cdot R}$$

ここで　V　：限界流速（m／s）

Vc：無次元限界流速

M　：管内流体の単位長質量（$\frac{Kg \cdot s^2}{m^2}$）

E　：管材料の縦弾性係数（$\frac{Kg}{m^2}$）

I　：管の断面二次モーメント（m^4）

R　：管の曲げ半径（m）

3. 評価結果

3.1　面内方向の不安定振動

面内方向の不安定振動に対する無次元限界流速（Vc）は、図－1に示すようにU字部の曲げ角度によって異なるが、蒸気発生器伝熱管における曲げ角度$\alpha = \pi$〔$k = \frac{\alpha}{2\pi} = 0.5$〕の場合には最低次モード（振動モードA）に対して、Vc＝1.8 となる。

このとき限界流速は、式より曲げ半径約 1.5m（最大曲げ半径）の伝熱管で振止め金具（以下「AVB」という。）による支持のない場合、

V＝76.3m／s

となる。

一方、蒸気発生器伝熱管の管内流速は6 m／s 程度であり限界流速に比べ十分に低いことから、面内方向の不安定振動は発生しないと考えられる。

3.2　面外方向の不安定振動

面外方向の不安定振動に対する無次元限界流速（Ｖｃ）は、図－２に示すようにＵ字部の曲げ角度によって異なるが、蒸気発生器伝熱管における曲げ角度$\alpha=\pi$〔$k=\frac{\alpha}{2\pi}$ $=0.5$〕の場合には最低次モードに対して、Ｖｃ＝1.0 となる。

このとき限界流速は、式より曲げ半径約 1.5m（最大曲げ半径）の伝熱管でＡＶＢによる支持のない場合、

$V=42m/s$

となる。

一方、蒸気発生器伝熱管の管内流速は６ｍ／ｓ程度であり限界流速に比べ十分に低いことから、面外方向に関しても不安定振動は発生しないと考えられる。

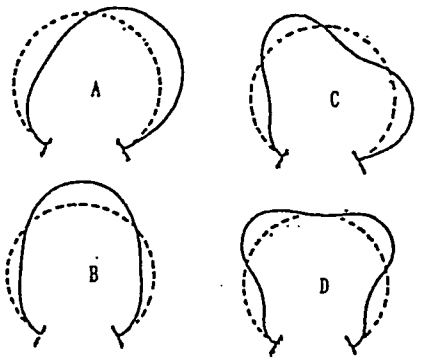
4．まとめ

管内流による不安定振動は、一般に、管内流がある限度の流速（限界流速）以上にならないと発生しないものであるが、蒸気発生器伝熱管における限界流速は１次系流体の管内流速に比べ数倍以上大きいことから、管内流による不安定振動の発生の可能性はない。

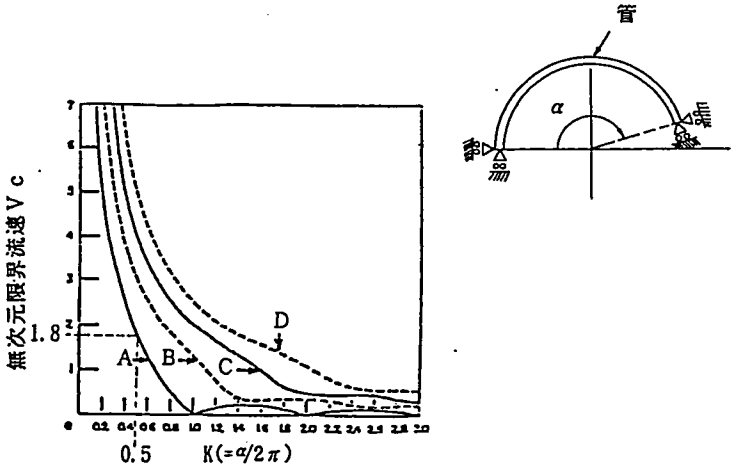
参考文献

(1) S. S. Chen,
"FLOW-INDUCED IN-PLANE INSTABILITIES OF CURVED PIPES", NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN, 23 (1972) 29-38.

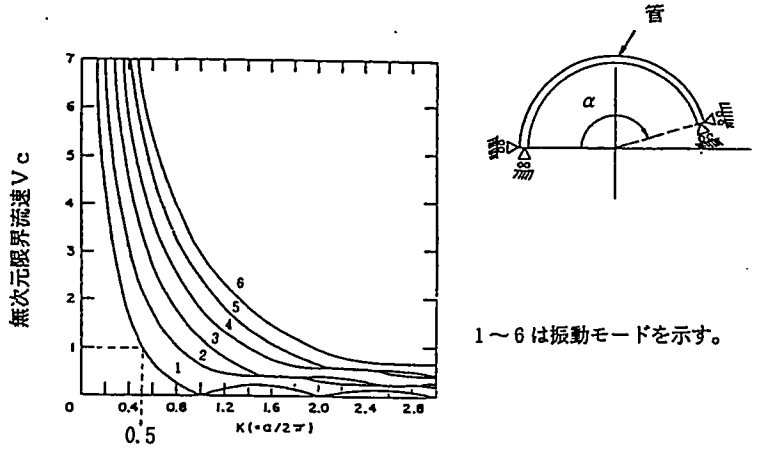
(2) S. S. Chen,
"Out-of-Plane Vibration and Stability of Curved Tubes Conveying Fluid" Transactions of the ASME, June 1973, P362-P368.



A～Ｄは振動モードを示す。



図－１　無次元限界流速とＵ字部の曲げ角度の関係
（面内方向不安定振動）



1～6は振動モードを示す。

図－2　無次元限界流速とU字部の曲げ角度の関係

（面外方向不安定振動）

資料－4.2.1.2

カルマン渦による振動の可能性の検討結果

1. 目的

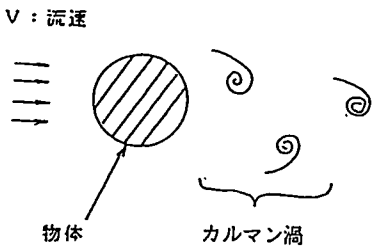
蒸気発生器伝熱管U字部で、カルマン渦による振動が発生する可能性について評価する。

2. 評価方法

文献調査と試験結果により評価する。

3. 評価結果

(1) 蒸気発生器伝熱管U字部における気液二相流の状態では、伝熱管の周辺の状況は渦が規則的に発生するものとはならず、カルマン渦は発生しないことが報告されている。[1]



(2) 伝熱管を流れの中に置いた試験において、伝熱管を単相（水）の流れの中においた場合、伝熱管の下流側に、規則的な渦が発生するが、液相と気相との混合比がある程度以上の気液二相流の場合には、カルマン渦は発生しなくなる。

4. まとめ

カルマン渦による振動は、一般に、物体がその下流側に規則的に発生、離脱を繰り返すカルマン渦により荷重を受けて共振状態で振動する現象であるが、蒸気発生器伝熱管U字部における気液二相流状態では、カルマン渦は発生しないことが確認されていることから、カルマン渦による振動の発生の可能性はない。

参考文献

(1) AECL-4771
R. I. HODGE, J. E. LeSURF and J. W. HILBORN
「STEAM GENERATOR RELIABILITY THE CANADIAN APPROACH」
Chalk River Nuclear Laboratories, Chalk River, Ontario.
April, 1974

資料－4.2.2.1

流動励起振動解析手法について

1. 目的

蒸気発生器伝熱管U字部の2次側流体による流動励起振動に関する評価を行うための流動解析および流動励起振動解析の手法を示す。

2. 評価手順

蒸気発生器伝熱管U字部の2次側流体による流動励起振動については、そのメカニズムとしてランダム振動と流力弾性振動が考えられる。

ランダム振動は、一般に、流体の速度や密度のゆらぎにより振動を生じる現象であり、蒸気発生器伝熱管U字部における気液二相流状態でも発生する。

流力弾性振動は、一般に、伝熱管群に対して、ある限度以上の流速が作用した場合に急激に大きな振動振幅が発生する現象であり、蒸気発生器伝熱管U字部における気液二相流状態でも発生する可能性がある。

蒸気発生器の流動励起振動に関する評価を行うには、これら2つのメカニズムに対する評価・解析手法が必要である。（図－1）

(1) ランダム振動解析としては、気液二相流中での実験結果を基に、流動解析から求まる伝熱管群内の流動分布から流体力を求め、ランダム振動解析により伝熱管の振動応答を求める。

(2) 流力弾性振動解析としては、評価対象となる蒸気発生器2次側の流動解析によりU字管群内の流速分布（流速の管軸直交成分の分布）、流体密度分布を求め、これらを流動励起振動解析コードに入力し流動励起振動解析を行って「有効流速（Ue）」を求める。同時に流動励起振動解析により流力弾性振動が発生する流速「限界流速（Uc）」を求め、安定比（SR＝Ue／Uc）を計算し、SRが1以上であれば流力弾性振動が発生し、1未満であれば発生しないと評価する。

また、振止め金具挿入深さに不揃いがある場合に局所的に流れが速くなる効果により「有効流速」が増加するため、流動試験で求めた「ピーキングファクター（PF）」により、この効果を考慮する。

したがって、安定比は以下のように定義される。

$$SR=\frac{Ue}{Uc}\times PF \qquad (1)$$

3. 流動解析

3.1 蒸気発生器の流動状況

蒸気発生器2次側では、給水（サブクール水）が器内循環水（飽和水）と混合して伝熱管群に入り、ここで沸騰して気液二相流となり伝熱管のU字部を通過する。

蒸気は伝熱管の低温側に比べて熱流束の高い高温側で多く発生し、高温側と低温側で非対称となっている。

また、伝熱管のU字部では伝熱管群は3次元の配置となっており、ここを気液二相流が通過する。

3.2 流動解析コード[1]~[4]

(1) 流動状況を定量的に評価し、流動励起振動解析に必要な流速分布、流体密度分布を求めるため3次元流動解析コード（ＦＩＴ－Ⅲ）を用いて計算を行う。

ＦＩＴ－Ⅲは、蒸気発生器の伝熱管群内の気液二相流の流動分布（流速分布、流体密度分布）を3次元で定常解析する目的で開発されたものである。

(2) ＦＩＴ－Ⅲの解析精度は、実機の気液二相流を模擬したフレオン3次元モデル蒸気発生器試験による伝熱管U字部の流速分布およびボイド率分布の計測結果との対比により評価・検証されている。

4. 流動励起振動解析

4.1 蒸気発生器の流動励起振動状況

蒸気発生器2次側には気液二相流が流れており、伝熱管群は流体力を受けている。特に伝熱管U字部ではこの気液二相流がU字部の面内方向を主体に流れ、伝熱管にとっては直交流となるため振動の原因となる可能性がある。

高サイクル疲労の原因となり得る応力の発生源は、以下の振動に限定される。[5]

① ランダム振動

② 流力弾性振動

4.2 ランダム振動解析

気液二相流の乱れた流れによる伝熱管のランダム振動評価については、ランダム振動理論と、モーダル解析を組み合わせて図－2の評価方法により解析を行う。[6]

これは、ランダムな流体力のパワースペクトル密度G」（ω）が、構造系（伝熱管）の伝達関数H」（ω）を介して、伝熱管の応答のパワースペクトル密度Q」（ω）として求められることである。

この中で、伝熱管の伝達関数H」（ω）は、減衰（4.4節と同じ）と有限要素法による構造解析モデルに基づく固有値解析結果により求める。

一方、ランダム流体励振力G」（ω）については、実圧・実温条件下の気液二相流のランダム流体力計測結果に基づき評価体系を作成しており、FIVATSコードで解析を行う。

4.3 流力弾性振動の従来の研究の概要

流力弾性振動という言葉は、直交流による管群の自励振動に対して通常用いられている。1969年に Connorsが初めてこの現象の存在を示した。[7]

流力弾性振動の生じる原因については、管の振動と密接に結びついた非定常な流体力によるものであると考えられている。この現象は管群の場合に生じるものであり、管群配列の影響を受けるため、様々な管群配列に対して実験的にその発生限界を求める試みが行われている。

気液二相流によっても流力弾性振動が生じることは、1973年に発表されたPettigrewの論文[8] の中で触れられていたが、その後1981年に発表された Heilker等の実験結果[9] や1985年に発表された吉川と原の気泡流による不安定振動の発生確認[10]、また、同年の Pettigrewらの新たな実験[11]などで確認された。また、中村らから1985年には室温・大気圧状態での水－空気二相流により流力弾性振動が発生することが発表[12]され、さらに1986年には最高5.8MPaの圧力で、 272℃まで温度を上昇させた状態の水－蒸気二相流による流力弾性振動の発生が確認された。[13] また、高温・高圧状態の水－蒸気二相流による流力弾性振動の発生に関しては、Axisa らの研究論文[14]が1984年に出ている。

4.4 流力弾性振動解析

流力弾性振動発生の限界流速Ｕｃは、次式に示すConnors の式で求める。[7] なお、この式は現在、米国の民間の設計基準であるＴＥＭＡで採用されている。

$$\frac{Uc}{fD}=K\left(\frac{m\delta}{\rho D^2}\right)^{1/2} \qquad (2)$$

ここに、Uc：限界流速　f：伝熱管の固有振動数　D：伝熱管の外径
K：限界係数　m：伝熱管の単位長質量
δ：伝熱管の対数減衰率　ρ：流体密度

気液二相流の場合、流速や流体密度などは流動解析により時間平均量として評価する。また、次式で伝熱管の単位長質量の評価を行う。

$$m=m_t+\pi\rho_o D^2/4 \qquad (3)$$

ここに、$\rho_o=\rho_l(1-\alpha)+\rho_g\alpha$
ρ_g：蒸気密度
ρ_l：液体密度
α：ボイド率（気体体積率）
$m_t=m_T+m_f$
（m_T：伝熱管自身の単位長質量
m_f：伝熱管内流体の単位長質量）

(2)式による限界流速Ucは流れが一様で、伝熱管も1自由度系として振動する場合の評価である。しかし、実際の伝熱管では、管支持板で支持される伝熱管は固有の形状を持って振動する。また、流れもU字部の伝熱管群内の流速分布を含めて一様ではない。

したがって、一様でない流速分布と、一様でない流体密度の分布などの伝熱管のU字部における流動分布及び構造条件である伝熱管の振動モードを考慮した流速を次式で評価し、これを有効流速U_{en}とする。

$$U_{en}=\left(\frac{\int_0^L \frac{\rho(x)}{\rho_o}\cdot U(x)^2\cdot\phi_n(x)^2\,dx}{\int_0^L \frac{m(x)}{m_o}\cdot\phi_n(x)^2\,dx}\right)^{1/2} \qquad (4)$$

ここに、U_{en}：n次モードの有効流速
$\phi_n(x)$：n次の振動モード
$\rho(x)$：流体密度ρの管軸方向の分布
$m(x)$：伝熱管の単位長質量mの管軸方向の分布
$U(x)$：管軸に直交する流速Uの管軸方向の分布
x：管軸に沿った座標成分
ρ_o、m_o：代表的流体密度、代表的単位長管質量
L：伝熱管の長さ

(2)式におけるρ、mをそれぞれρ_o、m_oで代表させて与えた上で、(4)式と(2)式の比をとる。限界流速Ucの計算に当たっては、各振動モード毎の振動数f_nを用いる。これをU_{cn}とすると、安定比は各振動モード毎に次式で求まる。

$$SR_n=\frac{U_{en}}{U_{cn}} \qquad (5)$$

この値をn次モードの安定比SR_nと呼び、$SR_n\geq 1$ならば流力弾性振動が生じる。一般には、各モードの中で安定比が最も大きくなるものを、その伝熱管の安定比と呼び、単にSRで表わす。

なお、安定比の評価に必要な流速、密度の評価は実機の気液二相流を模擬したフレオン3次元モデル蒸気発生器試験により検証されており、また限界係数K等はU字管群で実機の気液二相流を模擬した流動励起振動試験等により求められている。

4.5 振動解析コード

流動励起振動解析はＦＩＶＡＴＳコードを用いて行う。

ＦＩＶＡＴＳコードは、熱交換器管群の流動励起振動解析を行うためのもので、流動解析コード（ＦＩＴ－Ⅲ）と接合してランダム振動と流力弾性振動の解析が可能なコードである。

ＦＩＶＡＴＳコードでは、サブスペース法による固有値解析をベースにしたモーダル解析を基本としてＦＩＴ－Ⅲの結果を読み込み、ランダム振動振幅計算及び流力弾性振動に対する安定比計算を行う。

ＦＩＶＡＴＳコードによる流力弾性振動解析に用いられるパラメータは実機条件下

における試験等により評価されている。

5. 安定比の評価について

蒸気発生器伝熱管における流力弾性振動発生の評価は、流動解析と流動励起振動解析を組合せて行い、この解析に使用する種々のパラメータは、それぞれ計算や実験結果をもとに決めた値を用いる。このパラメータの中心値及びそのばらつき範囲が流力弾性振動発生の評価に影響を与えるため、安定比の評価にあたってはこれらのパラメータの中心値の評価に加えて、個々のパラメータのばらつき範囲を評価し、全体として安定比のばらつき範囲の評価を行う。

5.1 安定比とパラメータ

安定比は、流動励起振動解析により「限界流速（Ｕｃ）」と「有効流速（Ｕｅ）」を求め、「ＳＲ＝Ｕｅ／Ｕｃ」により評価するが、振止め金具の挿入深さに不揃いがある場合に有効流速が大きくなり、流力弾性振動が発生しやすくなるため、この効果は試験で求めた「ピーキングファクタ（ＰＦ）」を乗ずることにより考慮する。

この場合、安定比は次式で定義される。

$$SR = \frac{Ue}{Uc} \times PF \qquad (7)$$

安定比の評価に必要で、そのばらつきの要因となるパラメータは以下のものである。

減衰比（$h = \delta / 2\pi$）、固有振動数（ｆ）、限界係数（Ｋ）、流速（Ｕ）、流体密度（ρ）、ピーキングファクタ（ＰＦ）

これらのパラメータの中心値及びばらつき範囲の評価は以下のように行っている。

結果はまとめて表－１に示す。

(1) 流速分布、流体密度分布

フレオンを用いた３次元蒸気発生器モデルにてＵ字管群内の二相流流速分布・ボイド率分布を測定し（クロティア試験[13]）、流動解析コードの精度を評価した。（図－３）

(2) 固有振動数、構造減衰比

実寸伝熱管を用いた大気中タッピング試験により振動解析コード計算結果の精度を評価するとともに構造減衰の値を評価した。（図－４）

(3) 二相減衰比

実機模擬の水－蒸気二相流中の試験データ[16]より、二相流による付加減衰（二相減衰）の値を評価した。（図－５）

(4) 限界係数

Ｕ字管群で実機模擬の気液二相流中の試験データより、流力弾性振動の発生限界係数を評価した。

(5) ピーキングファクタ

実寸伝熱管を用いた、流動試験（ピーキングファクタ試験）により、振止め金具挿入状況を模擬し、流力弾性振動の発生限界流速を計測し、ピーキングファクタを評価した。

美浜２号機Ｘ４５列のピーキングファクタ（Ｙ１２～Ｙ２２列）を表－２に示す。

5.2 安定比のばらつき範囲の評価

各パラメータのばらつき範囲は表－１に示すとおりであるが、これらを基に評価した安定比のばらつき範囲は以下のとおりである。

$$\left| \frac{\Delta SR}{SR} \right| = \begin{cases} 0.56 & \text{（固定支持）} \\ 0.53 & \text{（ピン支持）} \end{cases}$$

5.3 安定比評価の手順について

安定比評価を実機に適用するにあたっては以下の手順で行う。

(1) 各パラメータの中心値を用いて解析を行い、安定比の中心値を求める。

(2) 各パラメータのばらつき範囲の評価から、安定比のばらつき範囲を評価し、安定比の最大値が１以上であるか否かにより、流力弾性振動発生の可能性を評価する。

6. まとめ

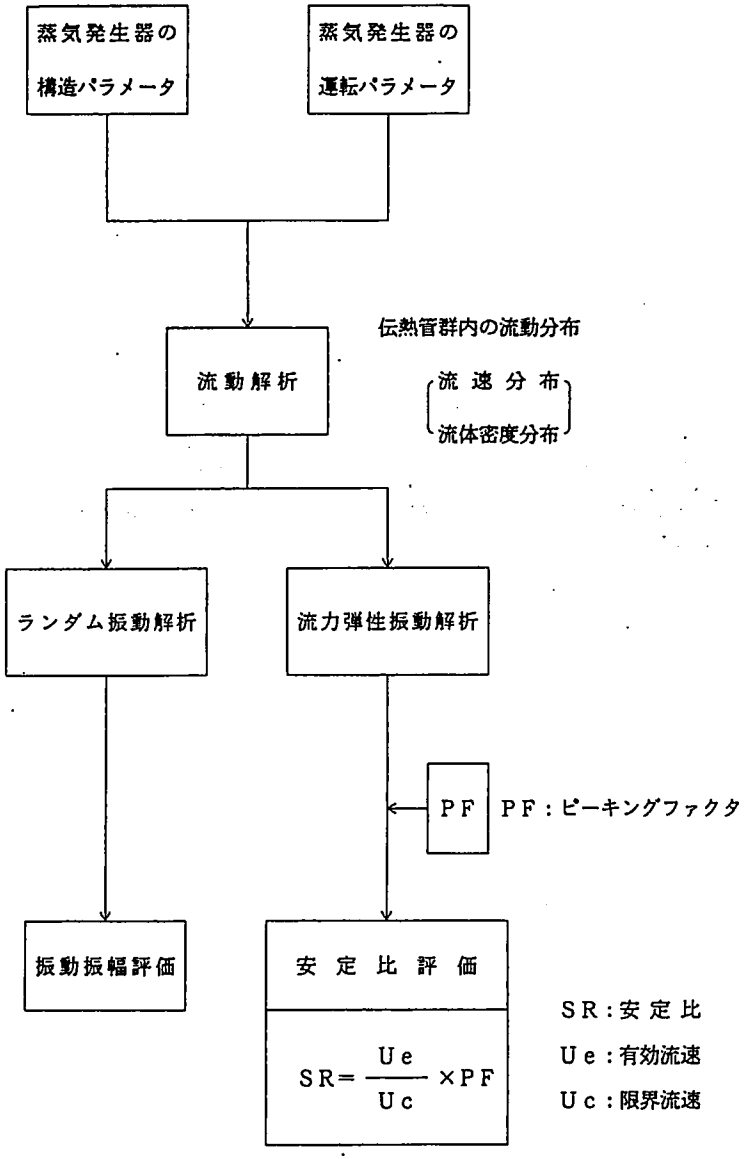
蒸気発生器伝熱管U字部の流動励起振動の評価を行うためには、U字部での流動状況の解析に基づいたランダム振動および流力弾性振動に関する評価が必要である。

流動解析には、伝熱管群内の二相流の流動分布（流速分布、流体密度分布）を求めるため３次元流動解析コード（ＦＩＴ－Ⅲ）を用いる。

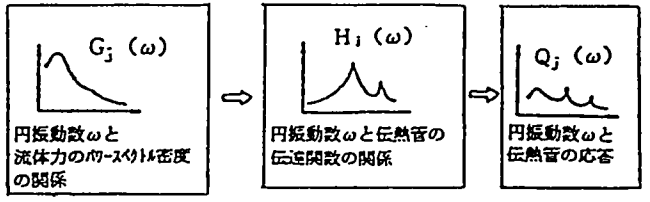
ランダム振動については、ランダム振動理論とモーダル解析を組合わせて伝熱管の応答解析を実施する。

また、流力弾性振動に対する評価は、限界流速（Uc)に対する有効流速（Ue)の割合を安定比として、安定比の評価を実施する。なお、安定比の評価においては、振止め金具の挿入深さの不揃いによる局所流速の増加の影響（ピーキングファクタ）を考慮する。

なお、流力弾性振動は自励振動現象の一種であり、非線型の振動系のため、その振動振幅を定量的に評価することは困難であるが、実機と同等の温度・圧力での流力弾性振動発生試験において、振動振幅が発散的でなく制限的であることが確認されている。



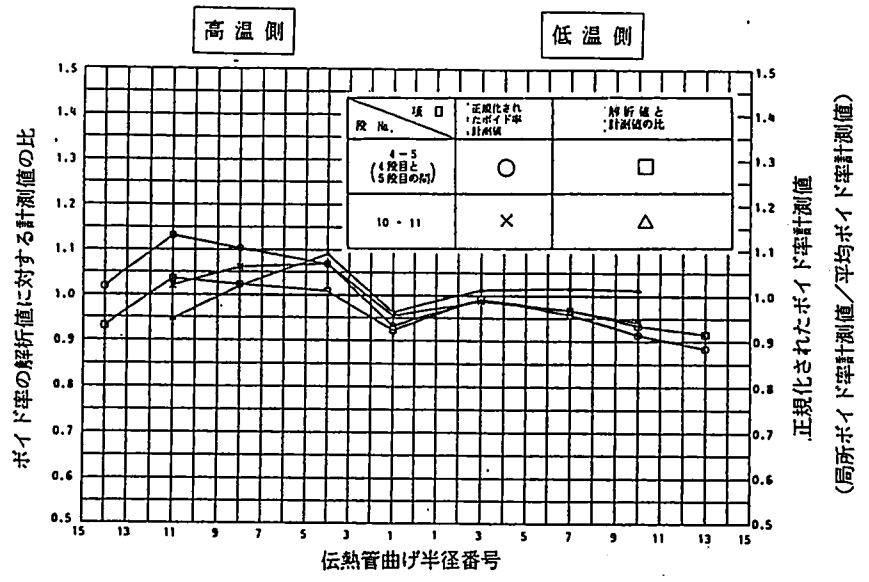
図－１　流動励起振動解析手順の流れ



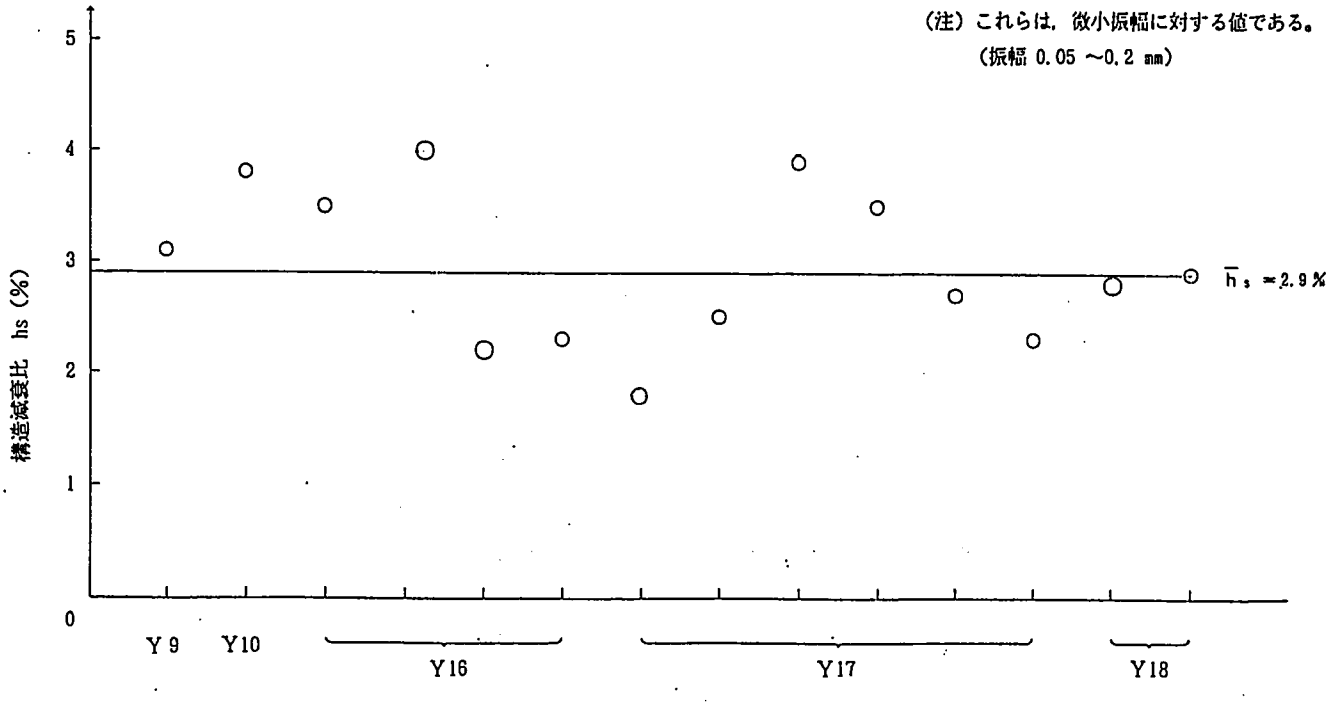
図－2　ランダム振動の評価

表－1　各パラメータの中心値とばらつき範囲

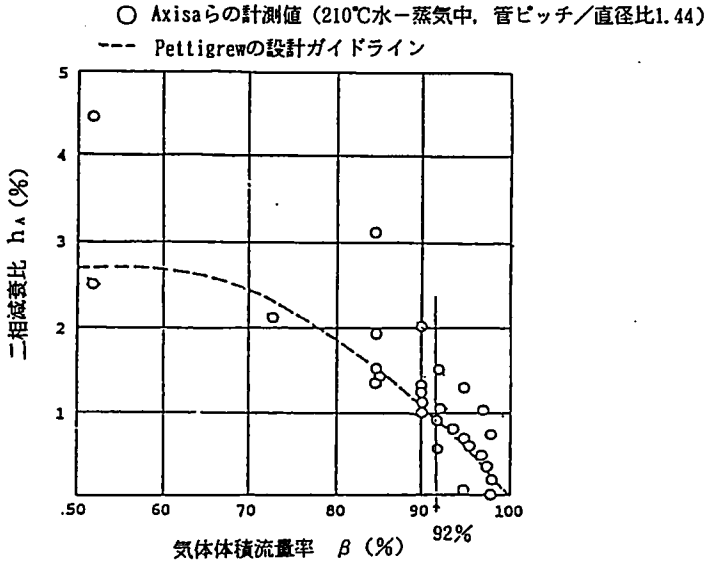
パラメータ		中心値	ばらつき範囲
流速分布（u／$\bar{u}$）		FIT-Ⅲ解析値	0．23
流体密度分布（ρ／$\bar{\rho}$）		FIT-Ⅲ解析値	0．51
固有振動数（f）	固定支持	解析値×0.90	0．038
	ピン支持	解析値×0.95	0．16
減衰比（h）	固定支持	1.33 %	0．54
	ピン支持	4.0 %	0．40
限界係数（K）		6.3	0．23
平均流速（$\bar{u}$）		FIT-Ⅲ解析値	0．038
平均流体密度（$\bar{\rho}$）		FIT-Ⅲ解析値	0．12
ピーキングファクタ（PF）		振止め金具挿入状況毎に試験を基に設定	偶然的ばらつき 0．17
			系統的ばらつき 0．03（固定支持） 0．01（ピン支持）



図－3　モデル蒸気発生器のU字部入口部でのボイド率の解析結果と計測値の比較例
（ＦＩＴ－Ⅲ解析とクロティア試験結果）



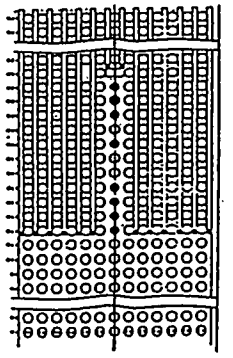
図－4　U字管の減衰比（間隙支持）（三菱重工データ）



図－5　水－蒸気二相流中の管群の減衰比

表－2　ピーキングファクタ

AVB挿入パターン	ピーキングファクタ



●対象管

Y列	ピーキングファクタ
12	1.45（固定）
13	1.39（ピン）
14	1.40（固定）
15	1.50（ピン）
18	1.54（ピン）
20	1.51（ピン）
21	1.32（ピン）
22	0.78（ピン）

参 考 文 献

(1) 藤原・他，「管群内二相流三次元熱流動解析に関する研究」，第17回日本伝熱シンポジウム講演論文集，（昭55-5），325.

(2) 中森，西川，日本機械学会特別講演会「軽水炉蒸気発生器の二相流動解析のポイント」（昭61）

(3) Y. Hirao, et al., Experimental and Analytical Studies on Thermal-hydraulic Behaviors of the PWR Steam Generator, 3rd ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Nevada, U.S.A., March 17-22, 1991.

(4) Y. Hirao, et al., Development of Thermal-hydraulic Computer code for Steam Generator, The first JSME-ASME Joint International Conference on Nuclear Engineering, Tokyo, Japan, Nov. 4-7, 1991.

(5) Pettigrew, M.J., 他２名, Vibration Analysis of Heat Exchanger and Steam Generator Designs, Nucl. Eng. Design 48 (1978), 97

(6) Davenport, A. G., Gust Loading Factors, J. of the structural Div., ASCE, ST3 (1967), 6

(7) Connors, H.J., Fluidelastic Vibration of Tube Arrays Excited by Cross Flow, ASME Annual Meeting, 1970

(8) Pettigrew, M.J., Gorman, D.J., Experimental Studies on Flow-Induced Vibration to Support Steam Generator Design, Part Ⅲ, Int. Symp. on Vibration Problems in Industry (1973) AECL-5804

(9) Heilker, W.J., Vincent, R.Q., Vibration in Nuclear Heat Exchangers Due to Liquid and Two-Phase Flow, Transactions of the ASME Vol. 103 April (1981), 358

(10) 吉川，原，「直交気液二相流による１列円柱群の振動に関する研究」，日本機械学会論文集（C編）51巻 470号（昭60－10），2487

(11) Pettigrew, M.J., 他２名, Vibration of Tube Bundles Subjected to Two-Phase Cross-Flow, J. of Pressure Vessel Tech., Vol. 107 Nov. (1985), 335

(12) 中村，他５名，「直交二相流による管群の流体振動に関する研究」（第１報），日本機械学会論文集（C編）52巻 473号（昭61－1），252

(13) 中村，他３名，「直交二相流による管群の流体振動に関する研究」（第２報），日本機械学会論文集（C編）52巻 483号（昭61－11），2790

(14) Axisa, F., 他４名, Vibration of Tube Bundles Subjected to Air-Water and Steam-Water Cross Flow : Preliminaly Results on Fluidelastic Instability, ASME Winter Annual Mtg. 2 (1984), 269

(15) Campan, J. L., Bouchter, J. C. (CEA), Steam Generator Experiment for Advanced Computer Code Qualification -Clotaire Int. Program, Third Int. Topical Meeting on Nucpear Power Plant T&H and Operations, Seoul, Korea, Nov. 1988

(16) Pettigrew, M. J. (AECL) 他２名, Vibration of Tube Bundles in Two-Phase Cross-Flow : Part 1- Hydrodynamic Mass and Damping, Transactions of the ASME, Vol. Ⅲ, Nov. 1989

資料－4.2.2.2

美浜２号機の流動励起振動解析結果

1. 目的

美浜２号機蒸気発生器の伝熱管に対し、流動励起振動解析を行う。

2. 評価対象

検討対象は破断管Ｘ４５－Ｙ１４及びその周辺の伝熱管（Ｘ４５列のＹ１１～Ｙ２２列）とする。破断管に対しては、流力弾性振動解析に加えてランダム振動解析も行う。

3. 流動解析

3.1 解析モデル

蒸気発生器２次側の３次元流動解析はＦＩＴ－Ⅲにより実施する。

解析モデルは美浜２号機蒸気発生器の２次側伝熱管群部を模擬したものである。

解析は管板から気水分離器までの全領域を模擬する。

損傷側蒸気発生器は、第２回定検検査時に 171本施栓され、その後の施栓を含め現在187本の施栓管（施栓率5.7％）となっているが、第３回定期検査以降の施栓が少なく、これによって流動分布はほとんど変化しないと考えられるため、解析は現在の施栓状況で行う。

3.2 解析条件

(1) 伝熱管の第６管支持板部における支持条件は、振動計測の結果及び管支持板調査の結果に基づき、Ｘ４５－Ｙ１５以外の使用管は固定支持とし、Ｘ４５－Ｙ１５及び施栓管はピン支持（管支持板部での伝熱管の変位は拘束、回転は自由とする。）とする。

なお、間隙支持での試験で得られた振動数は、ピン支持での固有振動数の解析の結果とほぼ同じであり、振動モードの観点からは間隙支持はピン支持と同等の支持条件とみなせることから、解析上は間隙支持をピン支持として取り扱う。

(2) 振止め金具の挿入状況が流力弾性振動の発生に及ぼす影響を検討するため、振止め金具が実機の取付け状態の場合と設計どおりの取付け状態の場合について解析する。

この場合の振止め金具部での支持条件はピン支持として取り扱う。

(3) 破断管周辺の施栓状況が流力弾性振動の発生に及ぼす影響を検討するため、施栓管が

破断管周辺に集中していない場合についても解析する。

(4) 解析は実際の運転パラメータで実施する。表－１に各運転期間毎の運転パラメータの経緯を示す。

表－１に示すように各運転期間毎のパラメータの変動は多少あるが、その差は２次側の動圧で約４％であり、安定比に対する影響としては約２％程度であることから、最新の運転期間のものを用いて解析を行う。

その主な解析条件を表－２に示す。

3.3 解析結果

解析の対象管（Ｘ４５－Ｙ１１～Ｙ２２）に対して以下を伝熱管毎に求めた。

① 管軸に直交する二相流平均流速分布 ： $U(\theta)$

② 二相流平均比重量分布 ： $\gamma(\theta)$

（$\gamma=\rho g$、ρ：密度、g：重力加速度）

代表例として、破断管に対する解析結果を図－１、図－２に示す。

4. ランダム振動解析

4.1 解析モデル及び解析条件

ランダム振動解析として、気液二相流中での実験結果を基に、流動解析から求まる伝熱管群内の流動分布から流体力を求め、ランダム振動解析により伝熱管の振動応答を求める。

4.2 解析結果

破断管のランダム振動に関する解析の結果、伝熱管のＵ字部における振動振幅は最大0.02mm程度であり、第６管支持板部に作用する応力振幅は最大0.03kg／mm² 程度で無視し得るものであった。

ランダム振動解析結果

ケース	振止め金具の有無	第６管支持板部 支持条件	ランダム振動解析結果	
			最大 RMS変位	最大 RMS応力
1	有	固定支持	0.01mm以下	0.01kg/mm²以下
2	無	固定支持	0.02mm	0.03kg/mm²

＊ RMS ：２乗和平方根

5. 流力弾性振動解析

5.1 解析モデル

Ｕ字部については図－３に示すように20等分に要素分割し、その各要素の部分に対して速度、密度の値をインプットする。

5.2 解析条件及び入力パラメータ

流力弾性振動に関する安定比評価は以下の式に基づき行う。有効流速U_{cn}及び限界流速U_{cn}はFIVATSコードにより求め、ピーキングファクタＰＦは試験で求めた値を用いる。

$$SR_n = \frac{U_{en}}{U_{cn}} \times PF \tag{1}$$

$$\frac{U_{cn}}{f_n D} = K\left(\frac{m_o \delta}{\rho_o D^2}\right)^{1/2} \tag{2}$$

ここにU_{cn}：ｎ次モードの限界流速　　f_n：ｎ次モードの伝熱管の固有振動数

Ｄ：伝熱管の外径　　Ｋ：限界係数

m_o：伝熱管の代表的単位長質量　　δ：伝熱管の対数減衰率

ρ_o：代表的流体密度　　ＰＦ：ピーキングファクタ

$$U_{en} = \left(\frac{\int_0^L \frac{\rho(x)}{\rho_o} \cdot U(x)^2 \cdot \phi_n(x)^2 dx}{\int_0^L \frac{m(x)}{m_o} \cdot \phi_n(x)^2 dx} \right)^{1/2} \tag{3}$$

U_{en}：ｎ次モードの有効流速

$\phi_n(x)$：伝熱管のｎ次振動モード

$\rho(x)$：流体密度ρの管軸方向の分布

$m(x)$：伝熱管の単位長質量ｍの管軸方向の分布

$U(x)$：管軸に直交する流速Ｕの管軸方向の分布

x：管軸に沿った座標成分

Ｌ：伝熱管の長さ

したがって、FIVATSコードの計算に必要なパラメータは以下のものである。

f_n、Ｋ、m_o、δ、ρ_o、$\rho(x)$、$U(x)$、$m(x)$、$\phi_n(x)$

このうちf_n、$\phi_n(x)$は解析モデル（支持条件）が与えられれば振動解析により求まるパラメータであり、また、m（x）は2次側流体の付加質量を考慮するためρ（x）と伝熱管の質量と1次側流体の密度が与えられれば計算されるパラメータである。

したがって、FIVATSコードのインプットに必要なパラメータは、以下のものとなる。

支持条件、K、m_o、h（$=\delta/2\pi$）、ρ_o、ρ（x）（$=\gamma(x)/g$、γ（x）：比重量の管軸方向分布、g：重力加速度）、U（x）

なお、以上の解析は各モード毎に実施し、その中で最大のSR$_n$を与える安定比をSRとし、このSRに相当する限界流速をU_cとする。

美浜2号機の解析に用いるこれらパラメータを以下に示す。

これらの値は添付資料－4.2.2.1の解析手法に基づいて設定する。

(1) 固有振動数

支持条件により、以下のとおりとする。

固定支持：f＝（FIVATS解析値）×0.90

ピン支持：f＝（FIVATS解析値）×0.95

(2) 限界係数（K）

K＝6.3とする。

(3) 伝熱管の代表的単位長質量（m_o）

U字部の2次側平均流体密度に基づく付加質量を加えたものとして、ＦＩＴ－Ⅲの計算結果により伝熱管毎に定める。

(4) 減衰比（h）

支持条件により、以下のとおりとする。

固定支持：h＝1.33%

ピン支持：h＝4.00%

(5) 代表的流体密度（ρ_o）

U字部の2次側平均流体密度をＦＩＴ－Ⅲの計算結果に基づき伝熱管毎に求める。

(6) 流体密度分布（ρ（x））、流速分布（U（x））

伝熱管毎に、ＦＩＴ－Ⅲの計算により求める。

(7) ピーキングファクタ（ＰＦ）

ピーキングファクタ試験結果を基に評価したピーキングファクタを伝熱管毎に定める。

5.3 解析結果

(1) 破断管に対する解析結果

破断管に対する解析結果を図－4に示す。

a. 破断管は、振止め金具が実機の取付け状態の場合、振止め金具で支持されていなかったため、ばらつき範囲を評価した安定比の最大値は1.20であり、流力弾性振動が発生する可能性があった。

b. 破断管は、振止め金具が設計どおりの取付け状態の場合、振止め金具で支持されることとなり、ばらつき範囲を評価した安定比の最大値は0.17であり、流力弾性振動が発生する可能性はなかった。振止め金具で支持されていなかった場合の安定比は、支持されていた場合の安定比に比べ、固有振動数が低くなることによる効果（約5倍）とピーキングファクタが高くなることによる効果（約1.4倍）により、約7倍となる。

c. 破断管の周辺に施栓管がない場合の安定比は、周辺に施栓管がある場合と同程度であり、流力弾性振動の発生に対して施栓管の影響は、ほとんどなかったものと考えられる。

(2) 周辺管に対する解析結果

周辺管に対する解析結果を表－3及び図－5に示す。

a. Ｘ４５－Ｙ１１及びＸ４５－Ｙ１２の伝熱管は、振止め金具が実機の取付け状態の場合においても、ばらつき範囲を評価した安定比の最大値は1未満であり、流力弾性振動が発生する可能性はなかった。

b. Ｘ４５－Ｙ１３～Ｙ２２の伝熱管は、振止め金具が実機の取付け状態の場合、振止め金具で支持されていなかったため、ばらつき範囲を評価した安定比の最大値は1以上と

なり、流力弾性振動が発生する可能性があった。

しかし、振止め金具で支持されていた場合には、流力弾性振動が発生する可能性はなかった。

6. まとめ

破断管及び周辺管について、流動励起振動解析を実施した結果は、以下のとおりである。

(1) 破断管のランダム振動解析の結果、第6管支持板部に作用する応力振幅は極めて小さく、無視し得る程度であった。

(2) 破断管は、流力弾性振動解析の結果、ばらつき範囲を評価した安定比の最大値が1以上となることから、流力弾性振動が発生する可能性があった。

しかし、振止め金具で支持されていた場合には、ばらつき範囲を評価した安定比の最大値は1未満であり、流力弾性振動が発生する可能性はなかった。

(3) 周辺管（X45－Y11～Y22）のうち、X45－Y11及びX45－Y12の伝熱管は、振止め金具で支持されていない場合でも、ばらつき範囲を評価した安定比の最大値が1未満であり、流力弾性振動が発生する可能性はなかった。

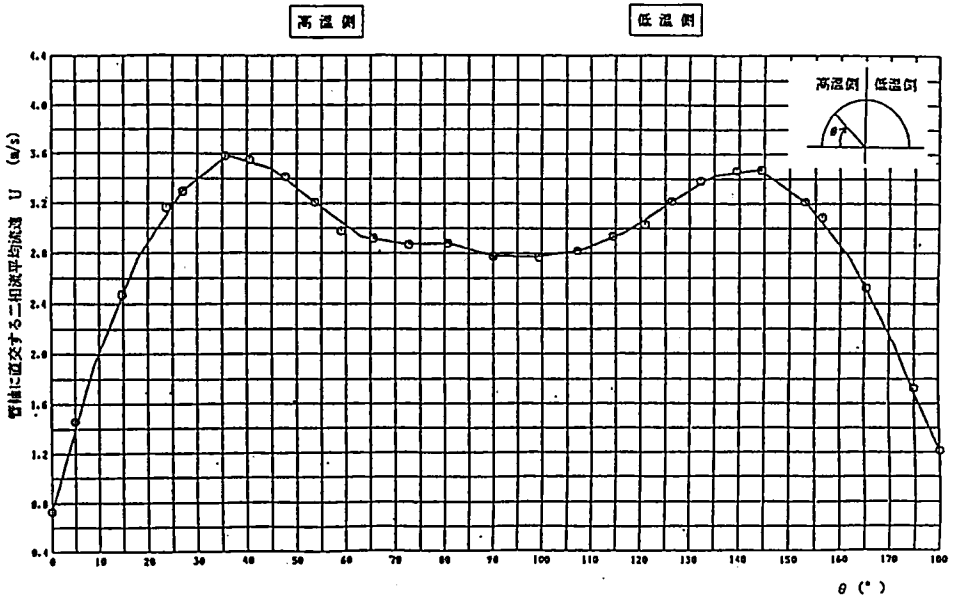
また、X45－Y13～Y22の伝熱管は、振止め金具で支持されていなかったため、ばらつき範囲を評価した安定比の最大値は1以上となり、流力弾性振動が発生する可能性があった。しかし、振止め金具で支持されていた場合には、流力弾性振動が発生する可能性はなかった。

表－1　美浜2号機　A－蒸気発生器運転パラメータ

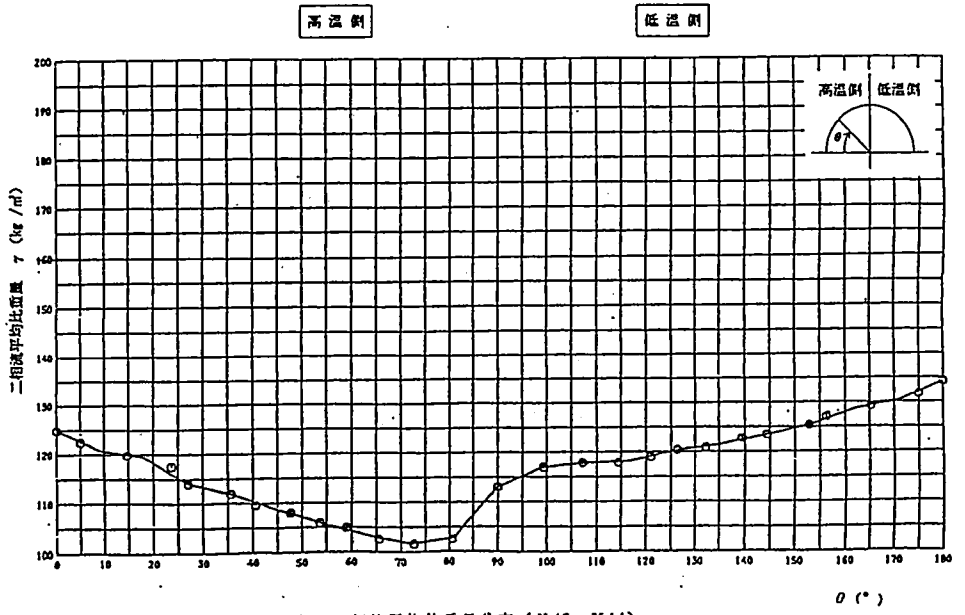
運転期間	熱出力 (MWt)	蒸気流量 (t／h)	給水温度 (℃)	蒸気圧力 (kg／cm²)	1次冷却材平均温度 (℃)	循環比	動圧 (kg／m²)	運転日数 (日)
1	731.8	1425.3	218.2	57.1	298.35	3.309	62.3	288.6
2	731.9	1426.8	218.5	57.3	298.30	3.305	62.1	289.1
3	734.5	1420.8	216.1	57.3	298.35	3.315	61.8	299.9
4	735.0	1425.9	217.6	57.3	298.43	3.300	61.9	197.0
5	731.9	1424.6	218.1	56.8	298.30	3.308	62.5	276.9
6	729.8	1419.0	218.1	57.2	298.70	3.316	61.7	275.9
7	730.1	1427.4	218.8	57.0	298.54	3.312	62.6	274.9
8	731.7	1426.7	218.8	59.0	300.55	3.294	60.1	302.9
9	728.4	1416.8	218.1	58.6	300.81	3.317	60.1	360.8
10	726.5	1414.6	218.1	58.4	300.88	3.327	60.4	350.5
11	730.7	1422.7	218.3	57.5	300.70	3.309	61.6	363.8
12	731.0	1429.6	220.0	57.9	300.93	3.291	61.4	373.0
13	732.9	1432.8	220.1	57.3	300.85	3.283	62.1	390.8
14	739.4	1435.0	220.2	56.9	300.89	3.274	62.6	220.0

表－２　　美浜２号機Ａ－蒸気発生器の解析条件

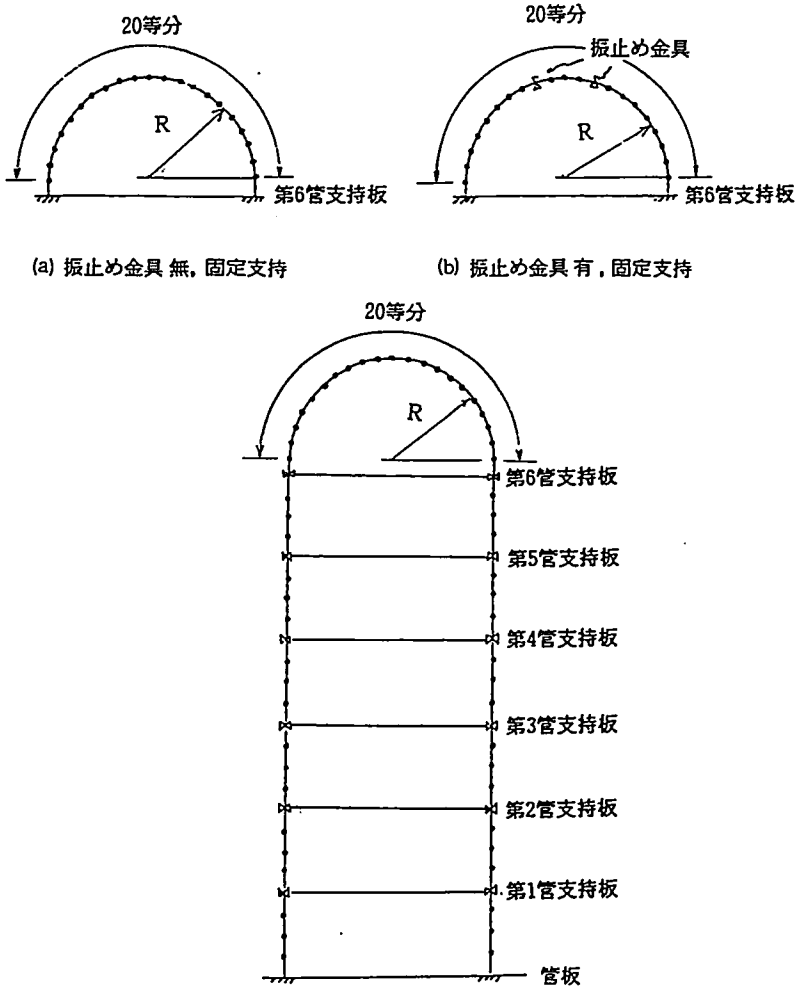
１次系	圧　　力	１５８．０　kg／cm²
	冷却材入口温度	３１５．４　℃
	冷却材出口温度	２８６．４　℃
	冷却材流量	１６５６５　t／h
２次系	蒸気圧力	５６．９　kg／cm²
	給水温度	２２０．２　℃
	給水流量	１４６４　t／h
	蒸気流量	１４３５　t／h
	循環比	３．２７



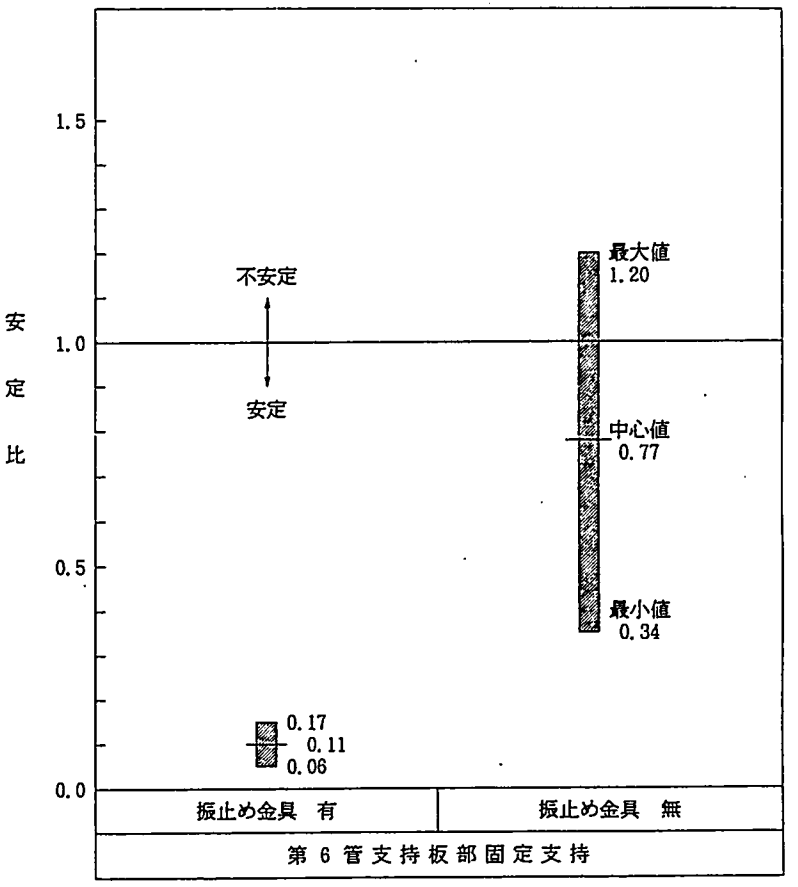
図－１　　U字部の管軸に直交する二相流平均流速分布（X45－Y14）



図－２　　U字部の二相流平均比重量分布（X45－Y14）



図－3　振 動 解 析 モ デ ル



図－4　破 断 管 の 安 定 比 評 価

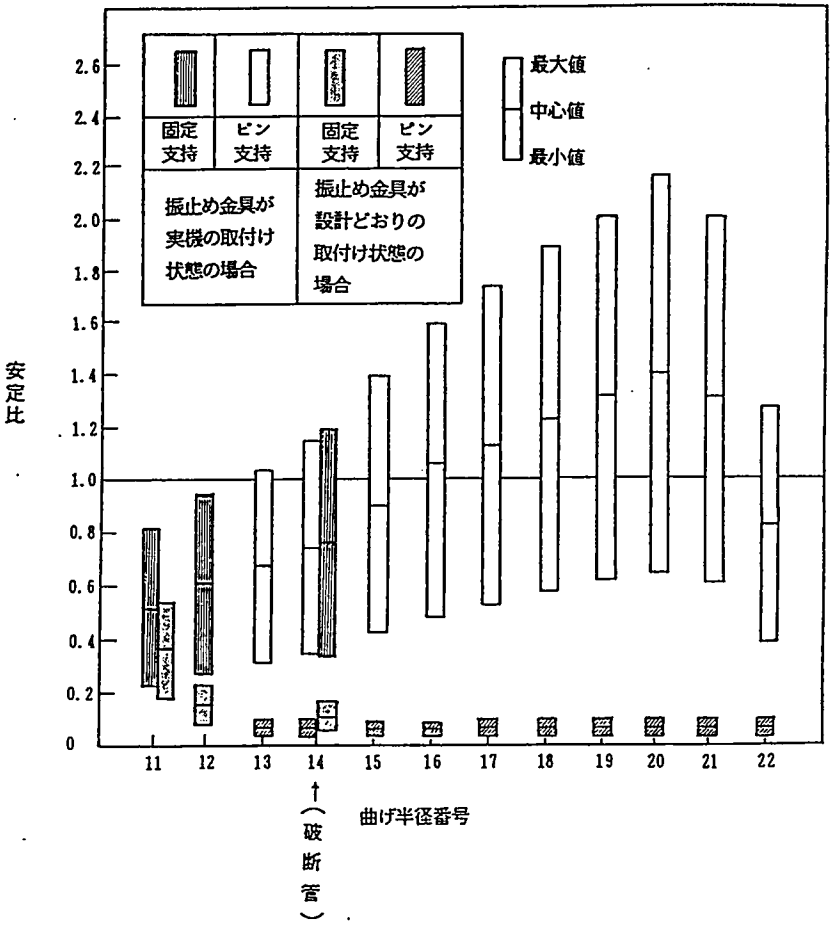
表－3　流力弾性振動解析結果

振止め金具が実機の取付け状態の場合

位置 X	位置 Y	支持条件	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)	限界流速 (m/s)	有効流速 (m/s)	ピーキングファクタ	安定比の範囲	周辺に施栓管のない場合の安定比の範囲
45	11	固定	49	1.33	8.1	3.0	1.45	0.23～0.83	0.23～0.83
45	12	固定	42	1.33	7.0	3.0	1.45	0.27～0.96	0.27～0.96
45	13	ピン	21	4.00	5.3	2.6	1.39	0.32～1.04	0.32～1.05
45	14	固定	32	1.33	5.3	2.9	1.40	0.34～1.20	0.34～1.20
		ピン	17	4.00	4.9	2.7	1.36	0.35～1.15	0.35～1.15
45	15	ピン	16	4.00	4.5	2.7	1.50	0.43～1.41	0.43～1.41
45	16	ピン	16	4.00	4.1	2.8	1.54	0.48～1.58	0.49～1.60
45	17	ピン	15	4.00	3.7	2.7	1.54	0.53～1.74	0.53～1.74
45	18	ピン	14	4.00	3.5	2.8	1.54	0.57～1.87	0.58～1.89
45	19	ピン	13	4.00	3.2	2.7	1.54	0.61～2.00	0.63～2.05
45	20	ピン	12	4.00	2.9	2.7	1.51	0.65～2.12	0.66～2.16
45	21	ピン	11	4.00	2.7	2.7	1.32	0.61～2.01	0.62～2.03
45	22	ピン	10	4.00	2.5	2.7	0.78	0.39～1.28	0.39～1.28

振止め金具が設計どおりの取付け状態の場合

位置 X	位置 Y	支持条件	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)	限界流速 (m/s)	有効流速 (m/s)	ピーキングファクタ	安定比の範囲
45	11	固定	49	1.33	8.1	3.0	1.0	0.18～0.55
45	12	固定	119	1.33	19.8	3.2	1.0	0.08～0.24
45	13	ピン	174	4.00	44.0	2.9	1.0	0.03～0.10
45	14	固定	175	1.33	29.0	3.2	1.0	0.06～0.17
		ピン	174	4.00	43.9	2.8	1.0	0.03～0.10
45	15	ピン	194	4.00	48.8	2.9	1.0	0.03～0.09
45	16	ピン	189	4.00	47.7	3.0	1.0	0.03～0.09
45	17	ピン	179	4.00	44.5	3.0	1.0	0.03～0.10
45	18	ピン	173	4.00	43.0	2.9	1.0	0.03～0.10
45	19	ピン	169	4.00	41.9	2.9	1.0	0.03～0.10
45	20	ピン	166	4.00	40.9	2.8	1.0	0.03～0.10
45	21	ピン	163	4.00	39.8	2.7	1.0	0.03～0.10
45	22	ピン	160	4.00	39.3	2.7	1.0	0.03～0.10



図－5　破断管及び周辺管の安定比

伝熱管管支持板部の応力解析結果

1. 目的

運転中に、破断管（X45－Y14）の第６管支持板部に作用していたと推定される静的応力（平均応力）及び平均面圧を有限要素法により解析し評価する。

2. 荷重条件

伝熱管の管支持板部に対応する部位（以下「管支持板部」という。）の静的応力（平均応力）及び面圧の発生要因としては、内圧、熱応力、腐食生成物等による局所変形が考えられる。それぞれについて以下のとおり検討する。

2.1 内圧による応力

１次系圧力と２次系圧力の差圧が内圧として作用する。

内圧によって伝熱管には径の増加が生じるが、破断管の第６管支持板部では管支持板クレビス部は閉塞していたため、伝熱管は自由に膨らむことができず、管支持板の上下端近傍で応力が生じていたと推定される。

2.2 熱応力

(1) 伝熱管内外表面温度差による応力

伝熱管の内外表面温度差（ΔT）は、当該部における１次系及び２次系の流体温度と表面の熱抵抗により求める。

(2) 管支持板と伝熱管の熱膨張差による応力

破断管の第６管支持板クレビス部は閉塞していたため、管支持板管穴と伝熱管の熱膨張差により熱応力が発生する。当該部における伝熱管の板厚平均温度及び管支持板温度（２次系流体温度）を用い、室温（20℃）からの熱膨張差を伝熱管外径（D。＝22.23㎜）に対して計算すると管支持板に比べて伝熱管の熱膨張が大きく、径の膨張差は 0.012㎜となる。すなわち、半径の熱膨張差は 0.006㎜となり、伝熱管は管支持板から熱膨張差分に相当する拘束を受けることになる。

(3) 高温側／低温側熱膨張差による応力

伝熱管の高温側と低温側の熱膨張差によって応力が発生する。熱膨張差によって生ずる応力（変位）は、伝熱管の面内方向の応力（変位）となる。

破断管の第６管支持板部における支持状態は固定支持のため、回転変位は拘束される。

また、管支持板の面外剛性は小さいことから、伝熱管の管軸方向の変位は拘束せず自由とする。

管板部を固定とし、第１管支持板部から第５管支持板部の支持条件を第６管支持板部の条件と同様とし、運転中の伝熱管の温度分布を与え、高温側／低温側の熱膨張差により、破断管の第６管支持板部に生ずる応力を求める。

2.3　局所変形による応力

金属調査の結果、当該部には局所変形は認められていないが、管支持板クレビス部は閉塞し、固定支持になっていた。このため、解析においては、停止時に渦電流探傷検査の検出限界（直径で約0.03mm）程度の変形が発生していたことも想定する。

3.　解析方法

内圧、伝熱管内外表面温度差、管支持板と伝熱管の熱膨張差及び局所変形により作用する応力は軸対称であり、軸対称要素モデルを用いる。管支持板との接触は、ギャップ要素によりモデル化する。なお、管支持板の剛性は、ギャップ要素のばね定数として表わす。　（図－１）

解析は、内圧と伝熱管内外表面温度差を与えた後、ギャップ要素の管支持板側節点（以下「管支持板節点」という。）を半径の熱膨張差に対応する値0.006mm だけ－ｒ方向（伝熱管に近づく方向）に移動させた状態で発生応力を求める。さらに、局所変形を模擬するため管支持板節点を更に－ｒ方向に移動させ応力の変化を評価する。

高温側／低温側熱膨張差の解析は、伝熱管全体を剛性の等価な梁要素にモデル化し、全長に温度分布を与えることにより解析する。管支持板部は前述のとおり回転変位拘束、管軸方向変位自由の支持状態とする。

高温側／低温側熱膨張差の解析には、各位置での板厚平均温度に基づくヤング率、線膨張率（室温からの平均）を用いる。

4.　解析結果

4.1　軸対称荷重（内圧、板厚方向温度差、径の熱膨張差、局所変形）

局所変形量が０㎜の場合、運転中の伝熱管の半径方向の変形量は0.0045㎜となり、伝熱管の外表面の管軸方向応力は最大11kg／㎟ である。管支持板部での管軸方向応力は最大７kg／㎟ 、平均面圧は 2.0kg／㎟ である。　（図－２、３）

局所変形量が最大の場合、すなわち停止時の渦電流探傷検査による検出限界の変形（直径で約0.03㎜）があった場合、運転中の伝熱管の半径方向の変形量は0.021 ㎜となり、伝熱管の外表面の管軸方向応力は最大21kg／㎟ である。伝熱管の管支持板部での管軸方向応力は最大14kg／㎟ 、平均面圧は 4.7kg／㎟ である。　（図－２、３）

4.2　高温側／低温側熱膨張差

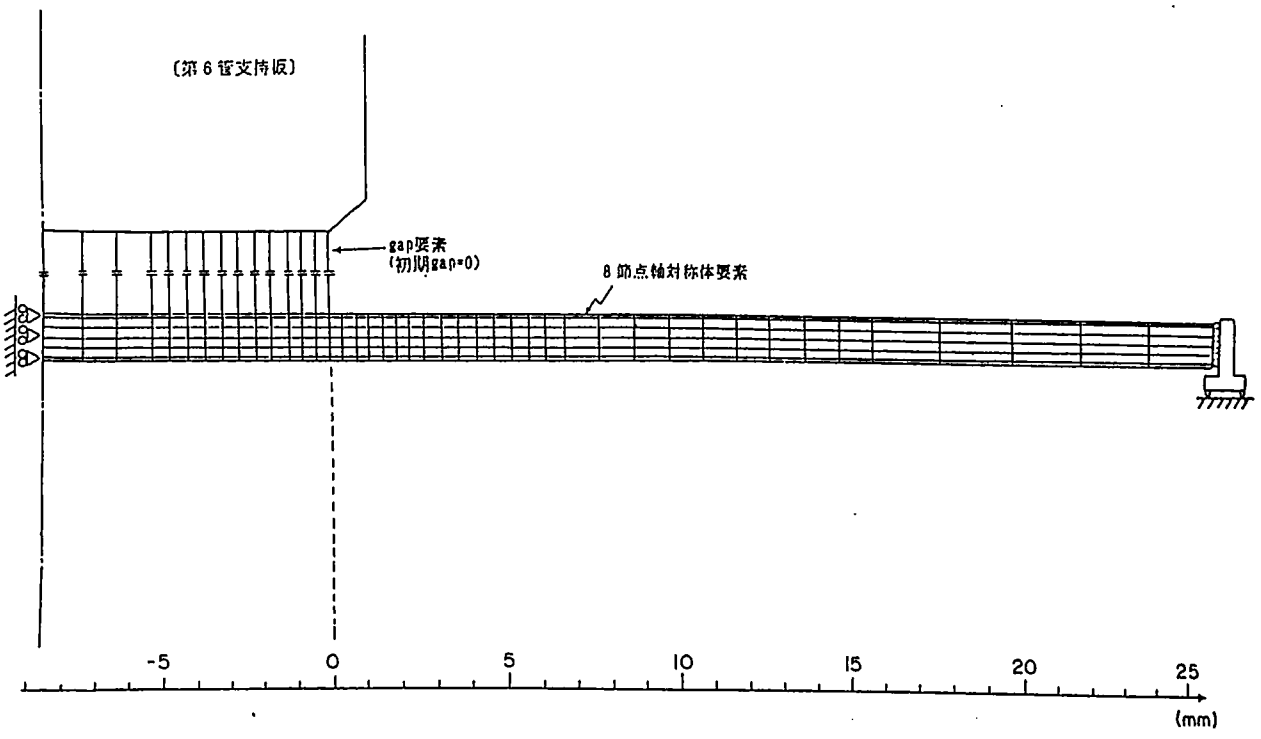
熱膨張差による伝熱管第６管支持板部外表面の管軸方向応力は、高温側、低温側とも曲げ状態であり、曲げ応力の大きさは高温側 0.4kg／㎟ 、低温側 1.4kg／㎟ となる。き裂の起点とみられる低温側90度の位置では、熱伸び差による応力はほとんど０kg／㎟ である。

5.　まとめ

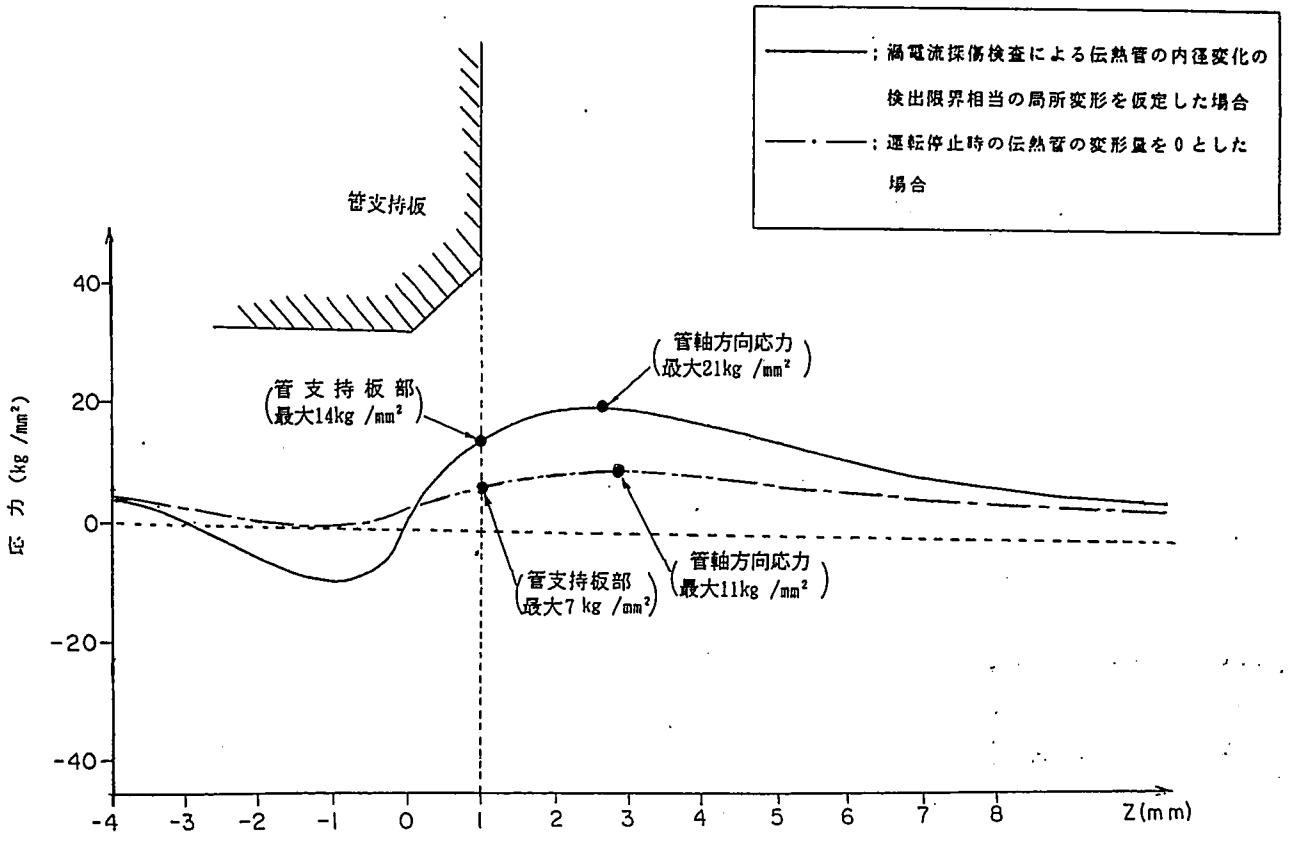
(1)　①停止時に伝熱管と管穴の隙間が閉塞している条件（局所変形なし）と②停止時に渦電流探傷検査の検出限界の変形が残る条件で、運転中の応力値と平均面圧はそれぞれ次のようになる。

管支持板部伝熱管外表面の管軸方向応力	①　７kg／㎟	②　14kg／㎟
管支持板部の平均面圧	①　2.0 kg／㎟	②　4.7 kg／㎟

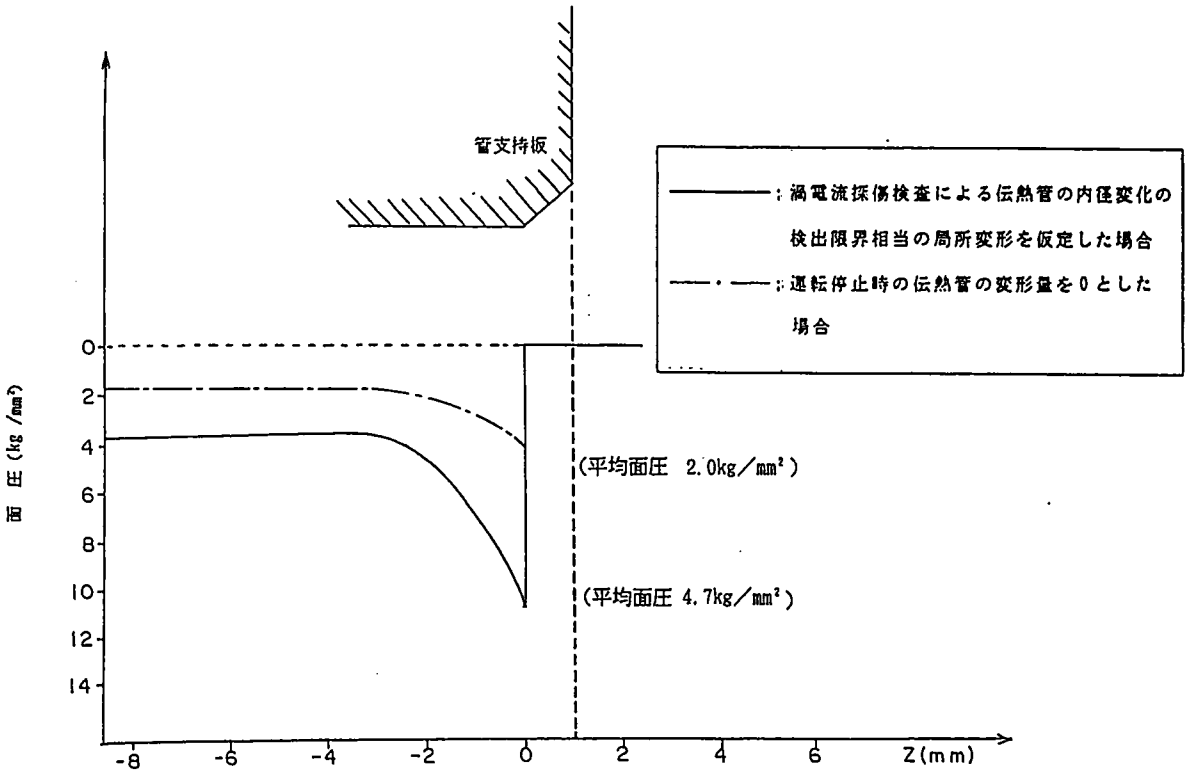
(2)　高温側と低温側の熱膨張差による応力は最大 1.4kg／㎟ 程度であり、破断起点部近傍ではほとんど０kg／㎟ である。



図－1　解析モデル



図－2　伝熱管外表面の管軸方向応力分布



図－3　管支持板部の面圧分布

資料－4.3.1.2

疲労き裂伝播試験結果

1. 目的

破断管の疲労き裂伝播解析に用いる疲労き裂伝播速度と応力拡大係数範囲との関係を調査する。併せて、ストライエーション間隔及び粗さパラメータと応力拡大係数範囲との関係を調査する。

2. 供試材料

試験片はインコネル600の板材であり、その化学成分及び引張特性を表－1に示す。

3. 試験方法

試験片は、図－1に示すＣＴ試験片を用いた。試験条件は以下のとおりである。

試験温度　：290 ℃（一部室温）

試験環境　：大気中、AVT 水中

応力比Ｒ　：0.1 及び 0.5

繰返し速度　：10～30Hz（大気中）、2 Hz（AVT水中）

試験は 290℃大気中及び 290℃ＡＶＴ水中でＡＳＴＭに規定された方法に従って行う。290℃大気中の試験では箱型の電気炉内に、290℃ＡＶＴ水中では、循環装置付のオートクレーブ内に試験片をセットし、油圧サーボ型疲労試験機を用い繰返し荷重を加える。試験中のき裂長さは、あらかじめ求めておいた較正曲線を用い、試験片の切欠き背面に貼付した抵抗線歪ゲージの歪出力の変化から除荷弾性コンプライアンス法により求める。

測定したき裂長さａを数点づつ、繰返し数Ｎの関数

$$a = A - B \cdot N - C \cdot N^2$$

で近似し、この係数からき裂伝播速度ｄａ／ｄＮを求める。

この時のき裂長さａと負荷している荷重の変動範囲ΔＰから次式を使い、応力拡大係数範囲ΔＫを求める。

$$\Delta K = \frac{\Delta P\,(2W+a)}{b\,(W-a)^{3/2}} \left[0.886 + 4.64\left(\frac{a}{W}\right) - 13.32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a}{W}\right)^4\right]$$

ここで、ｂ、Ｗ、ａは、それぞれ試験片の厚さ、幅、及びき裂長さである。

4. 試験結果

(1) き裂伝播速度da/dN と応力拡大係数範囲ΔKの関係は次のとおりであった。

$da/dN=1.05\times10^{-10}\ \Delta K^{2.98}$ ($\Delta K \geqq 16.8 kg/mm^{3/2}$)

$da/dN=4.98\times10^{-65}\ \Delta K^{17.3}$ ($\Delta K < 16.8 kg/mm^{3/2}$)

(2) ストライエーション間隔と応力拡大係数範囲との関係及び粗さパラメータと応力拡大係数範囲との関係を求めた。 (図－2、3)

表－1 材 料 性 状

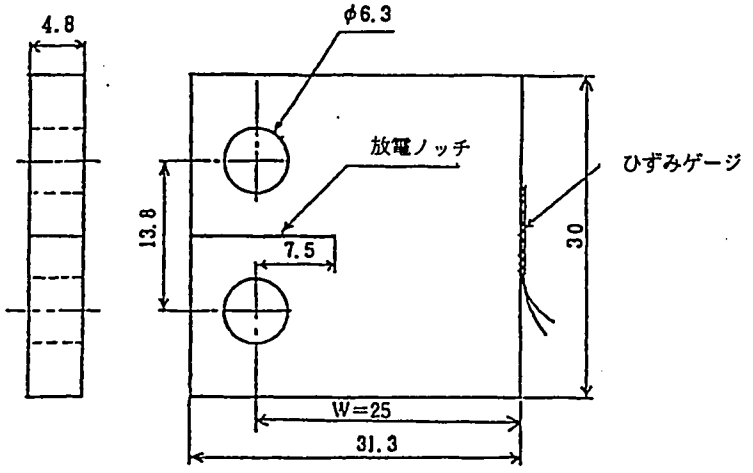
(1) 化 学 成 分

(単位：重量%)

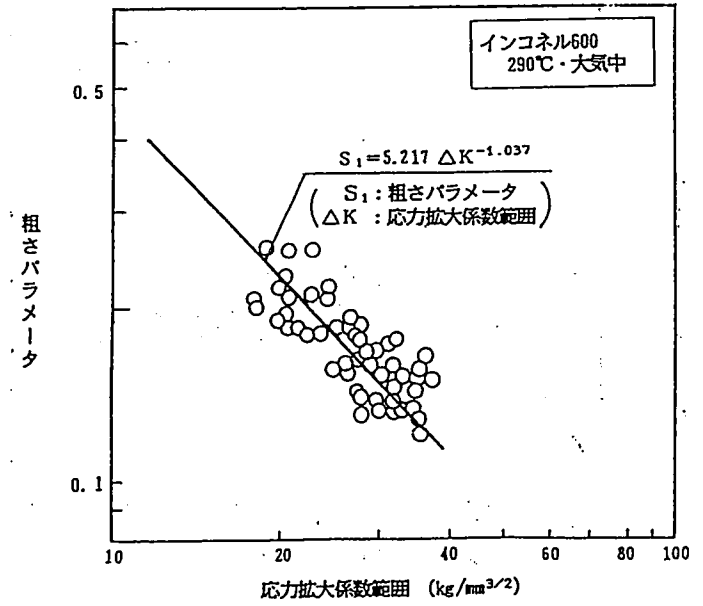
	C	Si	Mn	S	Ni	Cr	Fe	Cu
試 験 片	0.029	0.30	0.38	0.001	74.10	16.10	7.97	0.01
規 格 値	≦0.15	≦0.5	≦1.0	≦0.015	≧72.00	14.0 ～ 17.0	6.0 ～ 10.0	≦0.5

(2) 引 張 特 性

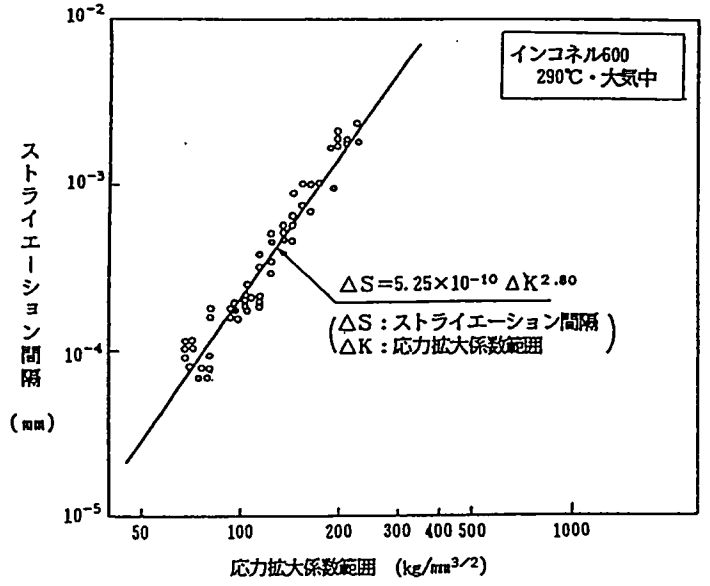
	0.2%耐力 (kg/mm^2)	引張強さ (kg/mm^2)	伸 び (%)
試 験 片	33.5	69.8	40.8
規 格 値	≧24.6	≧56.2	≧30



図－1　試験片形状寸法



図－2　粗さパラメータと応力拡大係数範囲との関係



図－3　ストライエーション間隔と応力拡大係数範囲との関係

資料－4.3.1.3

粗さパラメータを基にした作用応力推定結果

1. 目的

運転中に破断管に作用していたと推定される変動応力を解析する。

2. 解析方法

疲労によりき裂が伝播する場合、そのき裂伝播速度da/dN は、作用している応力とき裂形状の関数である応力拡大係数範囲ΔＫには図－１に示す関係がある。da/dN-ΔＫ曲線は、①き裂伝播速度の非常に遅い領域、②定常的に伝播する領域及び③不安定破壊に至る領域から成る。

疲労破面の特徴としてストライエーションが現れるのは、材料によって若干の違いはあるが、き裂伝播速度が10^{-5}～10^{-3}mm/cycleの範囲に限られ、ΔＫの小さな①の領域では、ストライエーションはほとんど認められなくなる。①の領域では、き裂先端の力学的な条件よりも、き裂先端に存在する結晶の特性に依存してき裂が伝播し、その特徴が破面に現れる。破面にはミクロ的な凹凸が②の領域よりも大きくなる。また③の領域は変形が大きい領域であり、破面には延性破壊の特徴であるディンプルが現れることが多い。

破面の情報から応力を求めようとする場合、ストライエーションが観察された領域については、ストライエーション間隔ΔＳとΔＫとの相関から、変動応力を求める方法が一般に採用されている。これと同様にストライエーションが観察されない領域でも、破面の粗さはき裂の伝播挙動を反映したものであるから、粗さを測ればき裂伝播中の状態（ΔK)が得られる。この考え方により、粗さパラメータＳ１から作用応力を推定する。粗さパラメータＳ１は図－２で示すように破面を粗さ計で測定し、粗さの変動幅（レンジペア）を積算し、測定距離で除した値である。[1]

3. 解析結果

伝熱管材料のインコネル６００について、粗さパラメータＳ１と応力拡大係数範囲ΔＫとの相関を疲労き裂伝播試験片の破面から求めた。（図－３）

次に、破断管破面のうち、ストライエーションの認められなかった９０度付近の破面について粗さパラメータＳ１を測定した。（図－４）

さらに測定した粗さパラメータＳ１を、粗さパラメータＳ１と応力拡大係数範囲ΔＫとの相関に基づいてΔＫに換算し、変動応力範囲S_Rを次の関係式から求めた。その結果を図－５に示す。

$$\Delta K = S_R \sqrt{\pi a/Q} \cdot f(a)$$

ここで、

Q　　：$1 + 1.464(a/c)^{1.65}$

a、c：き裂の深さ、長さ（外表面の半長）

f(a)　：白鳥ら[2] の数値解を用いた係数

粗さパラメータからは、破断管に作用した変動応力の応力振幅σ_a（$=S_R/2$）の中央値は5.2kg／mm² と推定された。

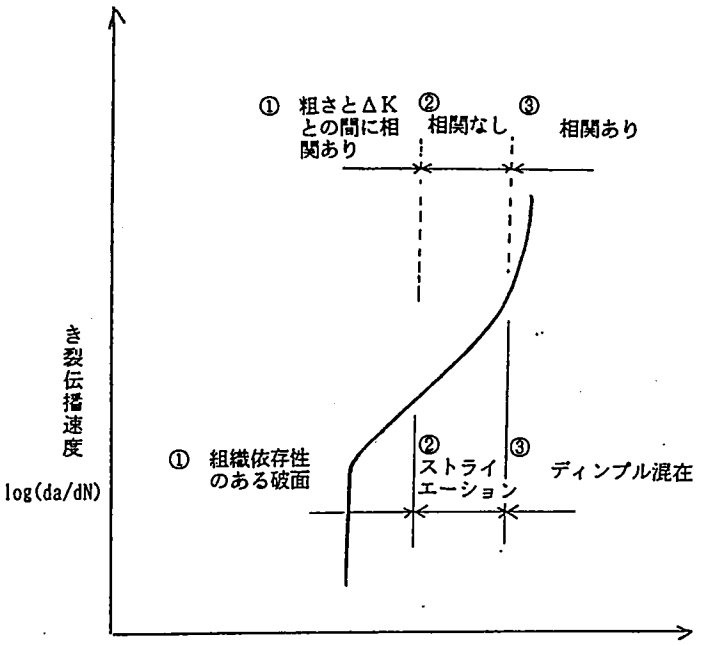
4. まとめ

破断管の破面のうち、９０度付近の破面について粗さパラメータ測定結果を基に破断管の第６管支持板部に作用していた変動応力の応力振幅σ_a（$=S_R/2$）の中央値は5.2kg／mm² と推定された。

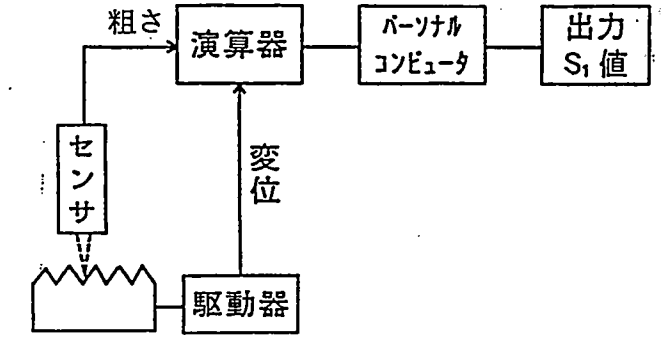
参考文献

(1) 藤原，近藤，服部，疲労破面粗さに基づく作用応力推定，「材料」第40巻第 453号，平成３年６月

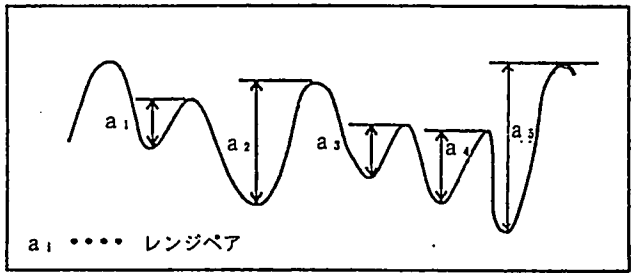
(2) 白鳥，原田，小川，円筒壁周方向表面き裂の応力拡大係数の解析，第５回破壊力学シンポジウム講演論文集，日本材料学会，平成元年9月



図－１　き裂伝播挙動



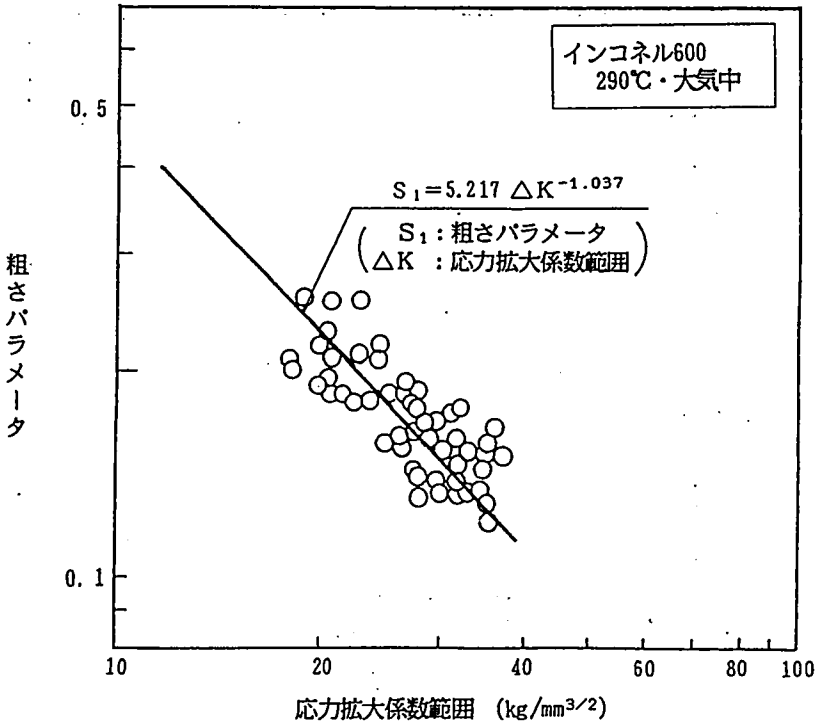
粗さプロファイル



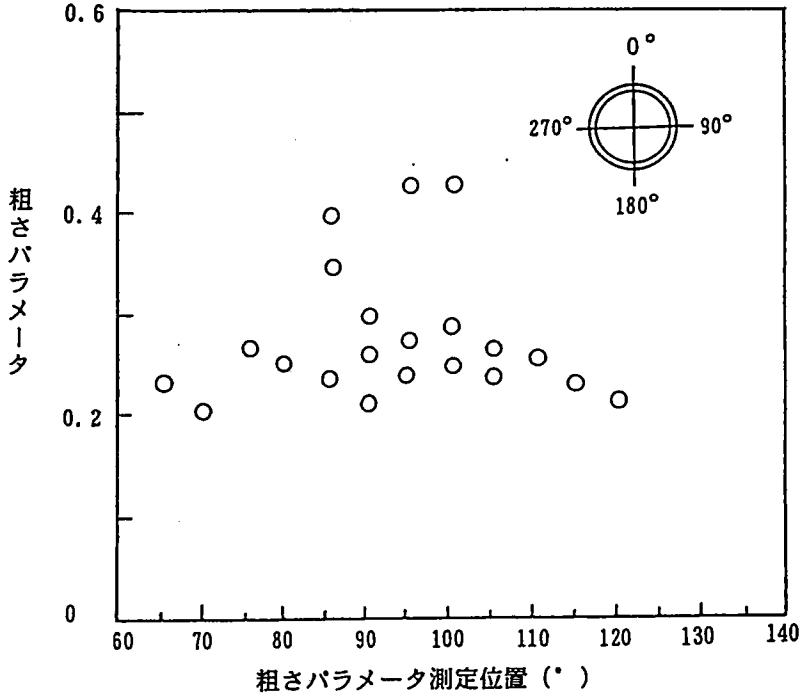
$$S_1 = \frac{\Sigma(\text{粗さレンジペア} \times \text{ひん度})}{\text{測定距離}}$$

単位：無次元

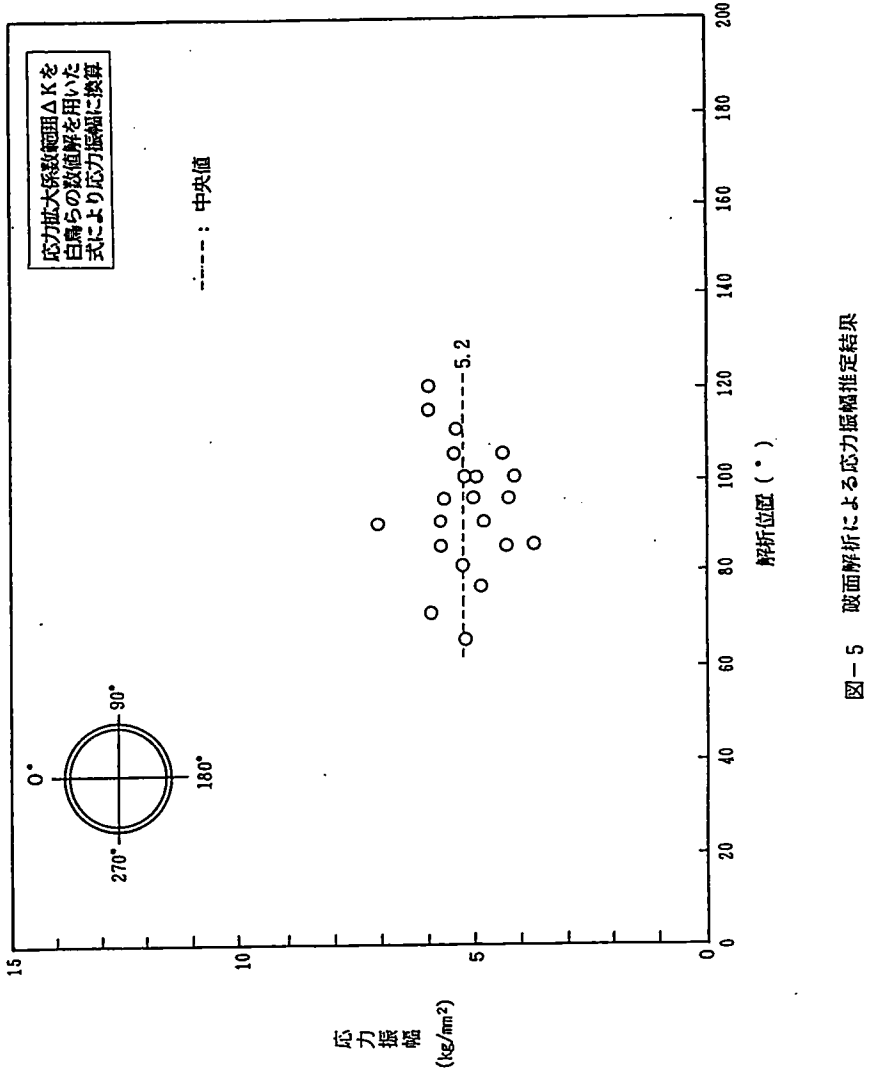
図－2　粗さパラメータ S_1 測定法



図－3　粗さパラメータと応力拡大係数範囲との関係



図－4　粗さパラメータ測定結果



図－5　破面解析による応力振幅推定結果

U字部の振動振幅と第6管支持板部に作用する応力振幅の解析結果

1. 目的

蒸気発生器伝熱管U字部の振動振幅と第6管支持板部に作用する応力振幅との関係を求める。

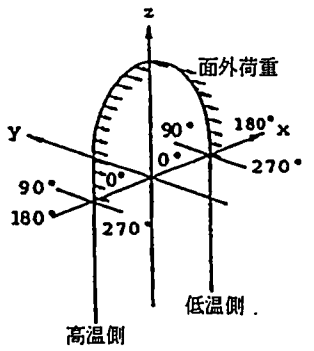
2. 解析方法

伝熱管のU字部を3次元はり要素でモデル化する。U字部の曲げ半径は破断管と同じY14とする。第6管支持板部での支持条件は固定支持とする。U字部の面外方向に等分布荷重が作用するとして、有限要素法により第6管支持板部の90度方向に作用する軸方向応力を求める。（図－1）

3. 解析結果

(1) U字部が、隣接管との隙間に相当する振幅（片振幅で約9㎜）で振動していたとした場合、伝熱管の第6管支持板部に作用する応力振幅は21kg/㎟程度となった。

(2) 伝熱管の第6管支持板部に 5.2kg/㎟の応力振幅が作用していたとした場合、U字部の振動振幅は2㎜程度（片振幅）となった。



図－1　解析モデル

資料－4.3.1.4

ストライエーション間隔を基にした作用応力推定結果

1. 目的

運転中に破断管に作用していたと推定される変動応力を解析する。

2. 解析方法

疲労によりき裂が伝播する場合、そのき裂伝播速度da／dNは、作用している応力とき裂形状の関数である応力拡大係数範囲ΔKと図－１に示す関係がある。da／dN－ΔK曲線は、①き裂伝播速度の非常に遅い領域、②定常的に伝播する領域及び③不安定破壊に至る領域から成る。このうち②の領域では、破面を電子顕微鏡で観察すると、き裂先端位置の跡であるストライエーションが認められる。ストライエーション間隔は、荷重が繰り返し負荷される毎の局部的なき裂進展量を表わしており、マクロ的な伝播速度da／dNと同様にΔKが大きくなる程、その間隔も広くなる。したがって、ストライエーション間隔ΔSもΔKと相関があることから、破面上のストライエーション間隔を測定して、対応するΔKを求め、ΔKを解析することにより作用していた応力を推定することができる。

この方法により、破断管の破面で認められたストライエーション間隔から、破断管に作用していた変動応力を推定する。

3. 解析結果

伝熱管材料のインコネル６００について、ストライエーション間隔ΔSとΔKの相関を疲労き裂伝播試験片の破面から求めた。（図－２）

次に破断管破面のストライエーション間隔ΔSを測定した。（図－３）

破断管破面のストライエーション間隔は起点部から離れる程大きくなり、その値は10^{-4}mmから10^{-3}mmオーダの値まで変化した。

さらに、各ストライエーション間隔ΔSを試験結果に基づいてΔKに換算した。ΔKから変動応力範囲S_Rを求めるのには次式（Zahoorの式）を用いた。

$$\Delta K = S_R \sqrt{\pi c} \cdot f(c)$$

c　　：き裂の半長

f(c)：係　数

破断管に作用していた応力を求めた結果を図－４に示した。

変動応力の応力振幅σ_a（$=S_R/2$）の中央値は、０度側では4.5kg／mm²、180度側では

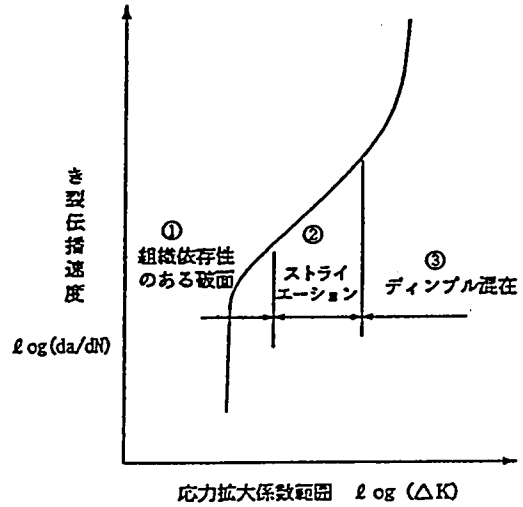
6.1 kg／mm²と推定された。

4. まとめ

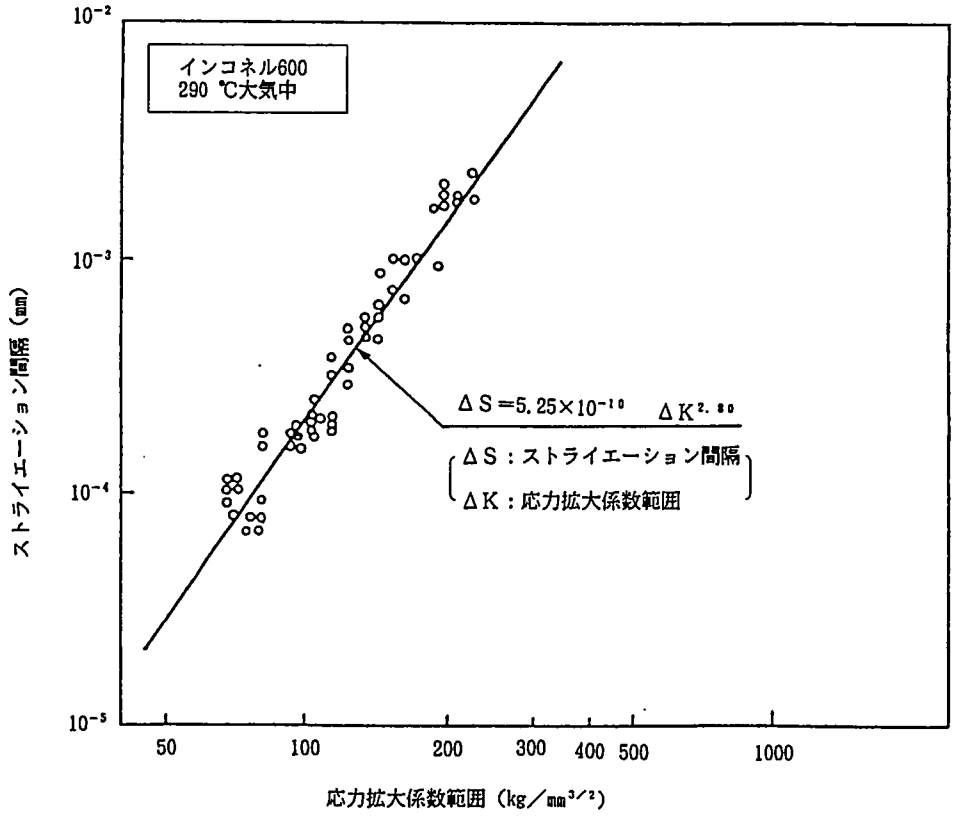
破断管の破面を観察して得られたストライエーション間隔を基に、破断管の第6管支持板部に作用していた変動応力の応力振幅σ_a（$=S_R/2$）の中央値は、0度側では4.5 kg/mm²、180度側では6.1 kg/mm²と推定された。

参考文献

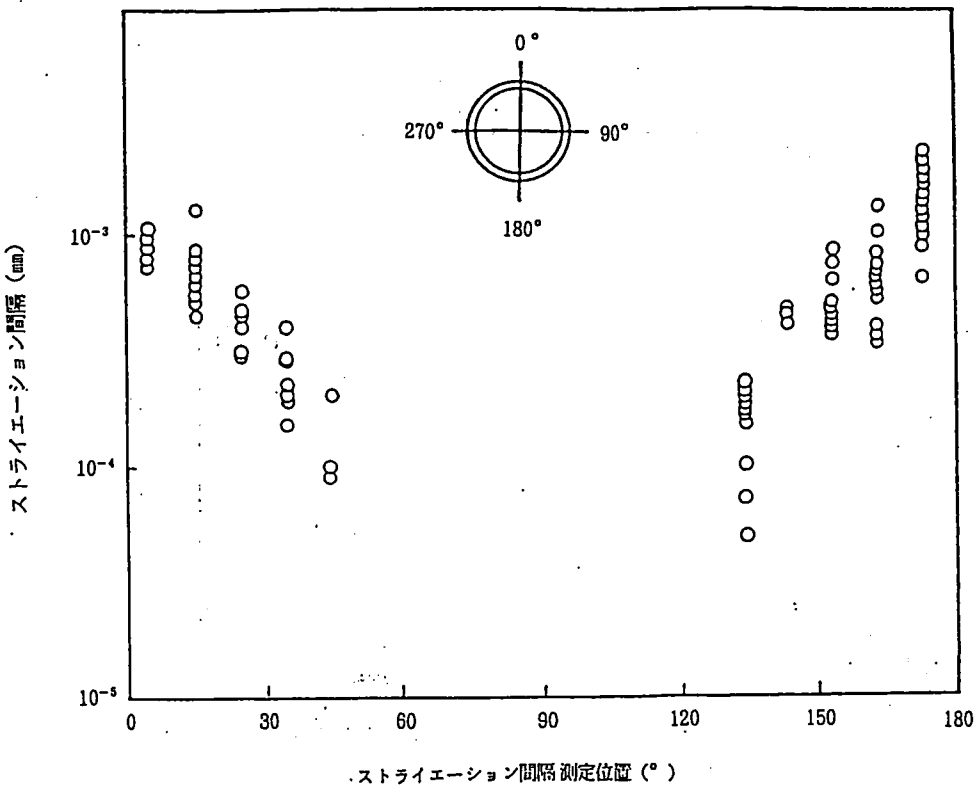
A. Zahoor, Ductile Fracture Handbook Vol.1 Circumferential Through Wall Cracks, EPRI NP-6301-D, 1989



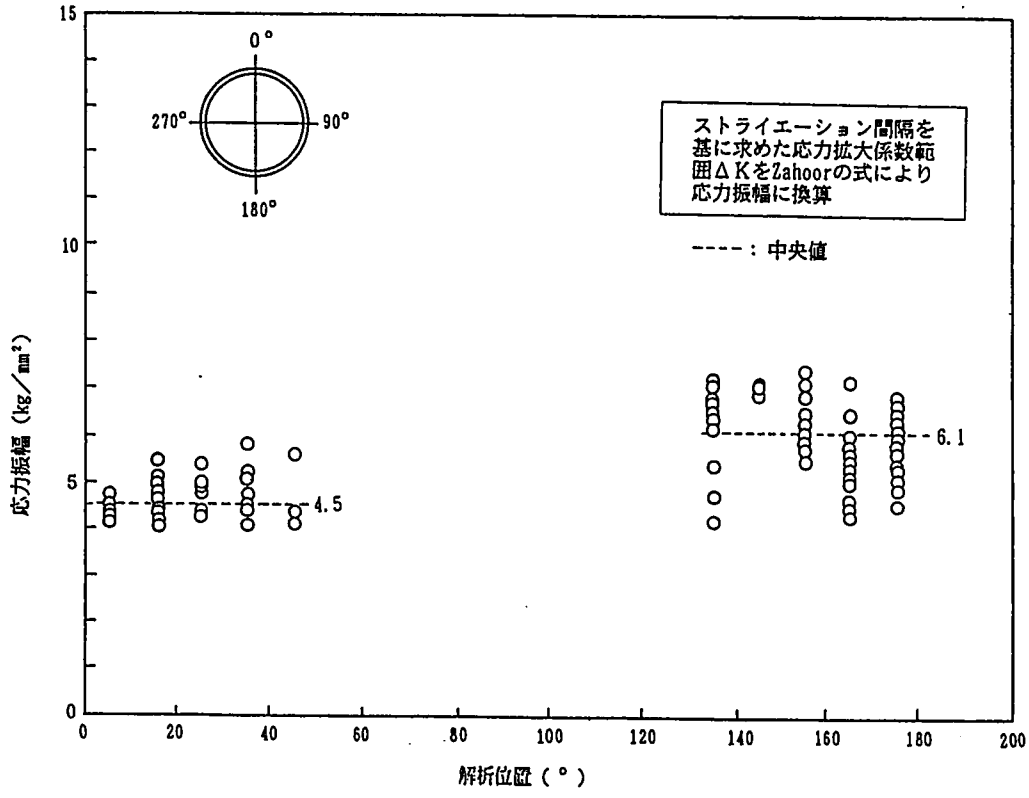
図－1　き裂伝播挙動



図－2　ストライエーション間隔と応力拡大係数範囲の関係



図－3　破断管のストライエーション間隔測定結果



図－4　破断管の破面解析による応力振幅推定結果

資料－4.3.1.5

疲労強度文献調査結果

1. 目的

インコネル６００の高サイクル疲労強度を文献から調査し、疲労強度に及ぼす環境の影響及び平均応力の影響について検討する。

2. 調査対象

今回調査したデータを表－１に示す。

3. 調査結果

3.1 環境の効果

環境の効果を検討したデータは表－１中のＦ～Ｖであった。この内で、Ｏ～Ｖは超音波式の疲労試験で得たデータであり、通常、この方法で得られた疲労強度は、引張圧縮、回転曲げ等の一般的な方法で得た疲労強度よりも高くなるとされている。また、Ｈ～Ｎのデータは環境が異なること等のため定量的な議論はできないと判断される。

これらのデータから、インコネル６００の通常疲労強度に及ぼす環境の影響は次のとおりである。

(1) 室温大気中と高温ＡＶＴ水中の試験結果では疲労強度はほとんど変わらないことから、高温ＡＶＴ水は、インコネル６００の通常疲労強度に有意な影響は及ぼさないと考えられる。（図－１）

(2) 環境が強アルカリ性又は強酸性になれば、疲労強度は低下する。

3.2 平均応力の影響

大気中で平均応力の影響を検討したデータはＣ及びＥのみであった。直線近似から推定される10^8回における疲労強度はＣで18.5kg/mm²、Ｅで16.8kg/mm²であった。Ｂ及びＤの結果も併せて平均応力の効果を安全側に評価するとされている修正グッドマン線図上にプロットした。いずれの温度でも修正グッドマンの推定線より、高応力側にデータが存在した。（図－２）

4. まとめ

文献により、インコネル６００の通常疲労強度に及ぼす環境の影響及び平均応力の影響を調査した結果は、以下のとおりである。

(1) インコネル６００の疲労強度は、実機と同等の高温ＡＶＴ水中においても室温大気中とほとんど変わらない。

(2) 環境が強アルカリ性又は強酸性になれば疲労強度は低下する。

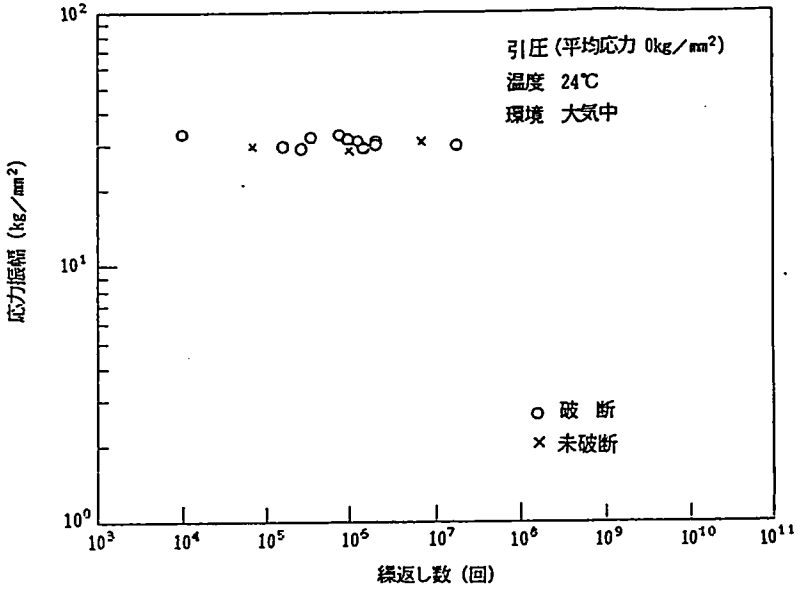
(3) 平均応力による顕著な疲労強度の低下はない。

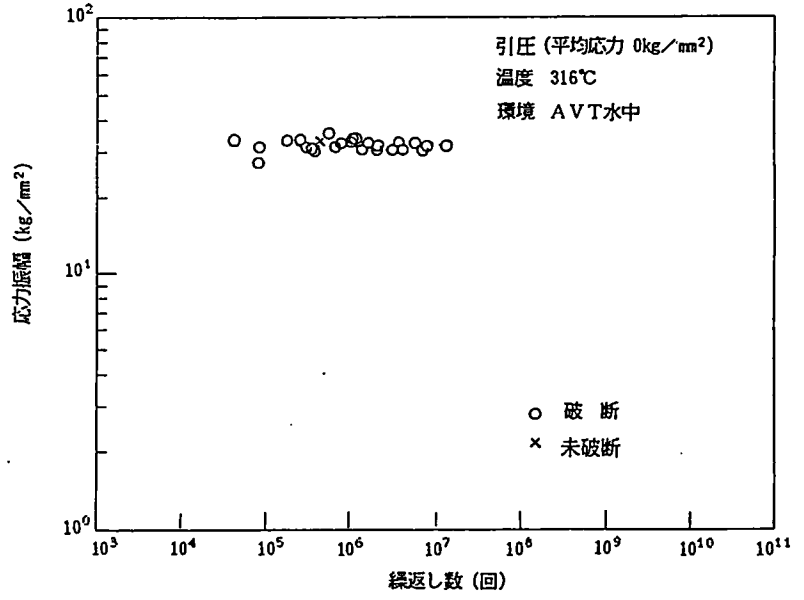
参考文献

(1) R. J. Jacko, "Fatigue Performance of Ni-Cr-Fe Alloy 600 Under Typical PWR Steam Generator Conditions", EPRI NP-2957 (1983)

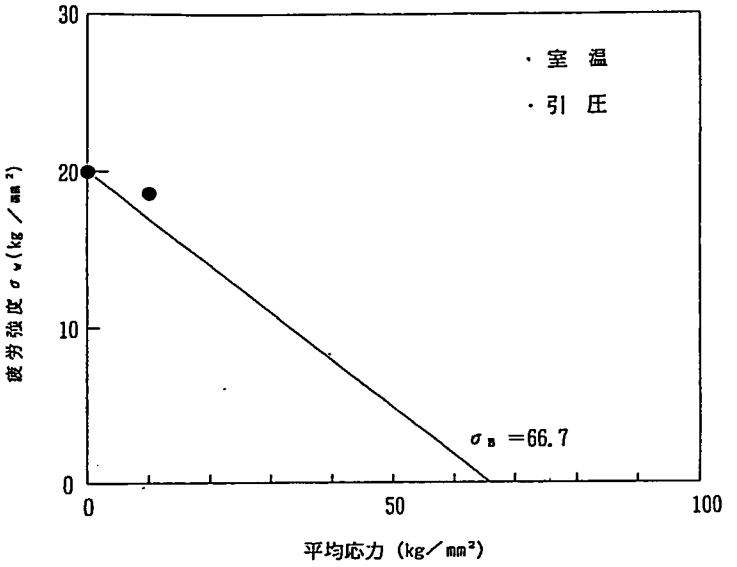
表－1　インコネル600 の高サイクル疲労データ

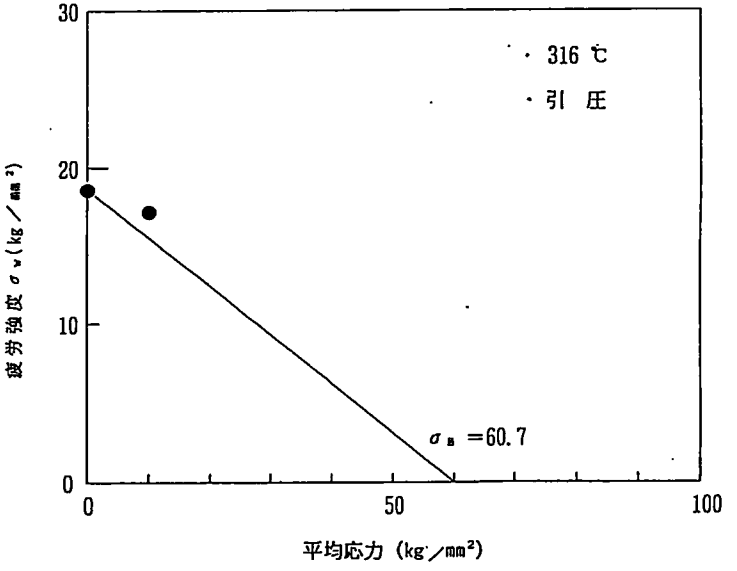
符号	材料		素材形状	機械的性質 室温 $\sigma_{0.2}$ (kg/mm²)	機械的性質 室温 σ_b (kg/mm²)	機械的性質 高温(316℃) $\sigma_{0.2}$ (kg/mm²)	機械的性質 高温(316℃) σ_b (kg/mm²)	平均応力 (kg/mm²)	負荷方法	試験温度 (℃)	環境	データソース
A	ＴＴ６００		管	35.4	74.6	—	—	0	引圧	室温	大気	三菱重工データ
B	溶体化６００ ＳＲ		棒	24.1	66.7	19.6	60.7	0		室温		
C								10.2				
D								0		316		
E								10.2		室温		
F	ＭＡ６００ ＳＲ		管	34.3	76.6	31.1	70.1	0		316	ＡＶＴ	
G										310	7%Na_2SO_4+1%Na_2SiO_3-PH12.6	
H										300	7%Na_2SO_4+1%Na_2SiO_3+H_2SO_4- PH2.0	EPRI NP-2957 (1) Project S110-1 Final Report
I								10.2				
J										289	7%Na_2SO_4+1%Na_2SiO_3+H_2SO_4+ 300ppbO_2-PH2.0	
K	ＭＡ６００.			40.8	73.4	35.7	70.9	0	超音波	290	10%NaOH+1%Na_2SO_4	
L	ＴＴ６００			39.2	77.2	33.6	72.4			316	ＡＶＴ	
M	ＭＡ６００ ＳＲ		管	34.3	76.6	31.1	70.1					
N										316	Super heated steam	
O										310	7%Na_2SO_4+1%Na_2SiO_3-PH12.6	
P	ＭＡ６００			40.8	73.4	35.7	70.9				7%Na_2SO_4+1%Na_2SiO_3+H_2SO_4- PH2.0	
Q	ＴＴ６００			39.2	77.2	33.6	72.4					
R	ＭＡ６００ ＳＲ			34.3	76.6	31.1	70.1			316	7%Na_2SO_4+1%Na_2SiO_3+H_2SO_4- PH2.0	
S												
T										316	10%NaOH+1%Na_2SO_4or 2%NaOH	
U												
V												
W	600 Forged	微細粒，高強度	不明	45.4	72.4	—	—	0	曲げ	室温	大気	
X		微細粒，低強度		28.5	64.7	—	—					
Y		粗粒，高強度		52.6	71.7	—	—					
Z		粗粒，低強度		23.0	60.8	—	—					
#	６００			34.5	69.7	—	—	0	引圧			
%	６００			29.9	67.1	—	—		曲げ			





図－1　インコネル６００伝熱管疲労強度





図－2　平均応力の影響

資料－4.3.1.6

インコネル６００伝熱管の通常疲労強度と フレッチング疲労強度試験結果

1. 目的

インコネル６００伝熱管の通常疲労強度及びフレッチング疲労強度を把握するため、並びに疲労試験片のき裂起点部の特徴を把握するため、伝熱管材について曲げ疲労試験を実施する。

2. 供試材料

試験片にはインコネル６００伝熱管を用いる。伝熱管寸法は実機と同じく外径 22.23㎜、板厚1.27㎜である。表－１に化学成分及び引張特性を示す。フレッチング疲労試験での管支持板材には、炭素綱（ＳＢ４２）を用いる。

3. 試験方法

3.1 通常疲労試験

通常疲労とは、ここでは、疲労強度が機械的な繰返し外力又は変位のみに支配される疲労モードをいい、平均応力の効果がある場合も含めて考えるものとする。

(1) 試験要領

通常疲労試験の概念図を図－１に示す。

試験は試験片に曲げ荷重を繰り返し加え、試験片が破断するまで行うことを目標とする。

(2) 試験条件

試験は応力振幅を変化させて室温大気中で実施する。

3.2 フレッチング疲労試験

フレッチング疲労とは、ある物体が別の物体に接触し面圧を受けた状態で、繰返し荷重を受けると、接触部で相対すべりが生じ、通常疲労の場合より低い応力で微小き裂を発生することによって破壊する疲労モードをいう。

(1) 試験要領

フレッチング疲労試験の概念図を図－２に示す。伝熱管に管支持板側からの押付けにより所定の面圧を与え、試験片端部に繰返し曲げ荷重をかけることによって管支持板端部の試験片外表面に管支持板との相対すべりを発生させると共に、フレッチング疲労き裂を発生させる。試験は、試験片が破断するまで行うことを目標とするが、長時間を要する場合には、途中で試験を終え、き裂発生の有無を確認する。

なお、一部の試験では試験片内部に金属棒を通し、試験片の他端を押して試験片に軸力を加え、平均応力の影響を調べる。

(2) 試験条件

試験は平均面圧及び応力振幅を変化させて室温大気中で実施する。

4. 試験結果と考察

4.1 通常疲労試験

インコネル６００伝熱管の通常疲労試験結果を図－３に示す。

試験結果を厳しい側の疲労強度を与える直線近似式で外挿して得られるインコネル６００伝熱管の通常疲労の応力振幅で表示した疲労強度（以下「疲労強度」という。）は10^3回で15kg/mm²程度、10^{10}回で12kg/mm²程度である。

4.2 フレッチング疲労試験

(1) 疲労強度

フレッチング疲労試験の結果を図－４に示す。フレッチング疲労強度は、管支持板部における平均面圧に依存し、平均面圧が高いほど疲労強度は低下した。ただし、平均面圧が０kg/mm²から2.5kg/mm² の場合の疲労強度の低下に比べ、平均面圧が2.5kg/mm² から４kg/mm²の場合の疲労強度の低下は小さく、平均面圧の増加割合に比べて、フレッチング疲労強度の低下は少なくなっていた。平均面圧が０kg/mm²（間隙あり）の場合も、曲げ負荷時に試験片が管支持板に接触し相対すべりが生じるため疲労強度は通常疲労強度より低く、接触により疲労強度の低下が生ずること、また高サイクル側になるほど通常疲労強度に対しフレッチング疲労強度の低下比率が大きくなっており、フレッチングが疲労強度へ与える影響の大きいことが明らかとなった。

平均面圧４kg/mm²では平均応力がある場合とない場合の試験を行ったが、両者に有意な差は認められなかった。

10^{10}回のフレッチング疲労強度を以下の方法によって外挿した。

フレッチング疲労試験データをストロマイヤ式（(1)式）及び直線近似式（(2)式）で近似し、最適指数αと定数Ａ、Ｂを求めた。

$$\sigma_a = AN_f^{\alpha} + B \quad (1)$$

$$\sigma_a = AN_f^{\alpha} \quad (2)$$

ただし、σ_aは応力振幅、N_fは破断までの繰返し数である。

試験の結果から、破断管に作用していたと推定される平均面圧 2.0～4.7 kg/mm²で、10^8 回までの試験データを一般に疲労評価に使用されるストロマイヤ式を用いて外挿すると、10^{10}回フレッチング疲労強度は 6.0～6.9 kg/mm²となる。また、厳しい側の疲労強度を与える直線近似式を用いて外挿すると、10^{10}回フレッチング疲労強度は、4.5 ～ 5.2 kg/mm²となる。

なお、破断管の固定支持での固有振動数32Hzと総運転時間約 1.1×10^5 時間から破断管に作用した変動応力の最大繰返し数を求めると10^{10}回程度となる。

(2) 破断部の状況

フレッチング疲労試験で破断した伝熱管のき裂起点部の板厚方向に0.2㎜程度の深さの領域の破面は、管軸方向に対して30～60度程度傾いており、起点部及びその付近の破面には立体モザイク模様が認められ、き裂伝播領域にはストライエーション、最終破断部にはディンプルのみが認められた。また、外表面の起点部付近には、こすれ跡及びその中に多数の周方向の微小き裂が認められ、これらのき裂は粒内き裂であった。 （図－５、６）

このき裂は、接触端から１㎜程度まで内部に入った位置にまで認められた管軸方向のこすれ跡の中に発生していた。 （図－７）

試験から得られたこれらの特徴は、破断管にも認められている。 （図－５、６）

通常疲労試験片では、図－８に示すように疲労き裂は伝熱管外表面にほぼ直角に発生、進展し、フレッチング疲労で生ずるような傾斜き裂とはならない。

5. まとめ

5.1 通常疲労試験

今回実施した伝熱管の曲げ疲労試験により得られた10^7 回までの疲労強度を、厳しい側の疲労強度を与える直線近似式を用いて外挿すると、通常疲労の疲労強度は10^9 回で15kg/mm²程度、10^{10}回で12kg/mm²程度である。

破断管の第６管支持板部に作用していたと推定される平均応力が通常疲労に及ぼす影響について、伝熱管の曲げ疲労試験の結果を基に、疲労限度線図（修正グッドマン線図）で評価

した結果、破断管の第6管支持板部に作用していたと推定される応力振幅は、10^{10}回の疲労限度より低くなる。（図－9）

以上のことから、10^{10}回の疲労強度は、破断管の第6管支持板部に作用していたと推定される応力振幅に比べて高く、破断管は通常疲労によりき裂を発生し、破断することはないと考えられる。

5.2　フレッチング疲労試験

(1)　インコネル６００伝熱管と管支持板材との組合せによるフレッチング疲労試験の結果、フレッチング疲労強度は通常疲労の場合より低く、管支持板部での平均面圧が高いほど低下した。

試験の結果から、破断管に作用していたと推定される平均面圧2.0～4.7 kg/mm²で、10^8 回までの試験データを一般に疲労評価に使用されるストロマイヤ式を用いて外挿すると、10^{10}回フレッチング疲労強度は6.0～6.9 kg/mm²となる。また、厳しい側の疲労強度を与える直線近似式を用いて外挿すると、10^{10}回フレッチング疲労強度は4.5～5.2 kg/mm²となる。

破面解析から得られた応力振幅5.2 kg/mm²は、ストロマイヤ式外挿による10^{10}回フレッチング疲労強度と直線近似式外挿による10^{10}回フレッチング疲労強度との間にあることから、破断管は応力振幅5.2 kg/mm²の場合、直線近似式外挿による繰返し数3.5×10^8 回と最大の繰返し数10^{10}回程度の間の繰返し数でフレッチング疲労により破断し得るものと考えられる。

(2)　フレッチング疲労試験片の観察の結果、試験片の外表面には、破断管と同様のこすれ跡及びその中に多数の周方向微小き裂が認められ、このき裂は粒内き裂で管軸方向に対して傾いており、起点部及びその付近の破面は立体モザイク模様を呈していた。

表－1　材　料　性　状

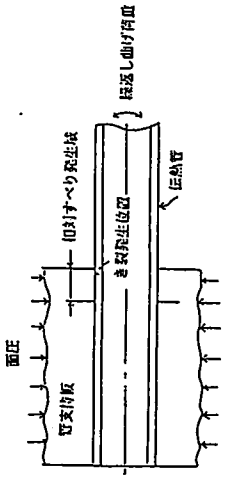
(1)　化　学　成　分

（単位：重量%）

	C	Si	Mn	S	Ni	Cr	Fe	Cu
試験片	0.026	0.26	0.30	0.001	74.70	15.80	8.40	0.01
規格値	0.15 以下	0.50 以下	1.00 以下	0.015 以下	72.00 以上	14.00 ～ 17.00	6.00 ～ 10.00	0.5 以下

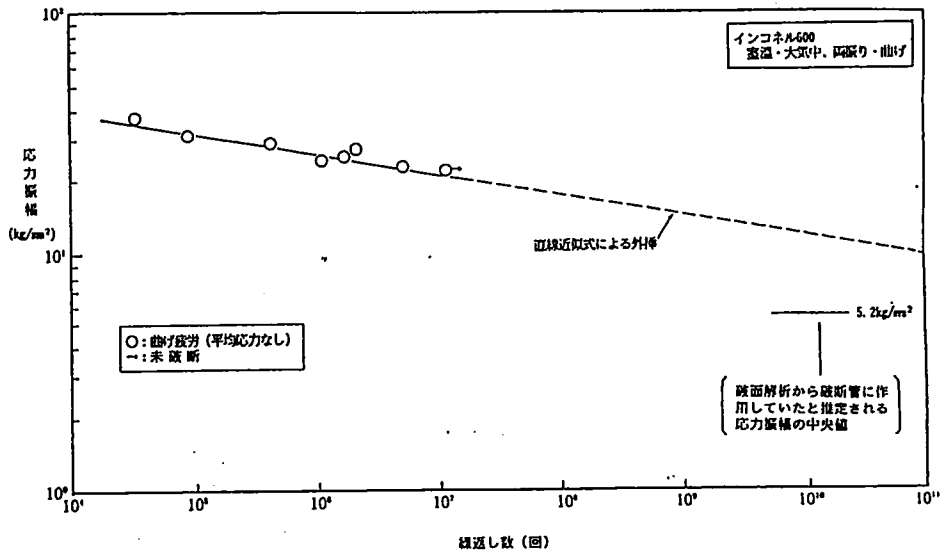
(2)　引　張　特　性

	0.2%耐力 (kg/mm²)	引張強さ (kg/mm²)	伸び (%)
試験片	34.7	69.0	45
規格値	25 以上	56 以上	30 以上

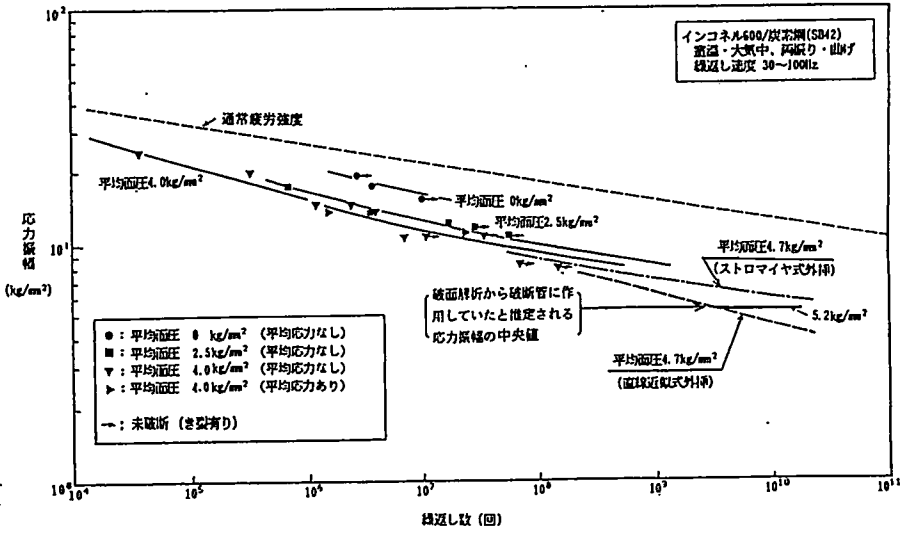


図－1　通常疲労試験概念図

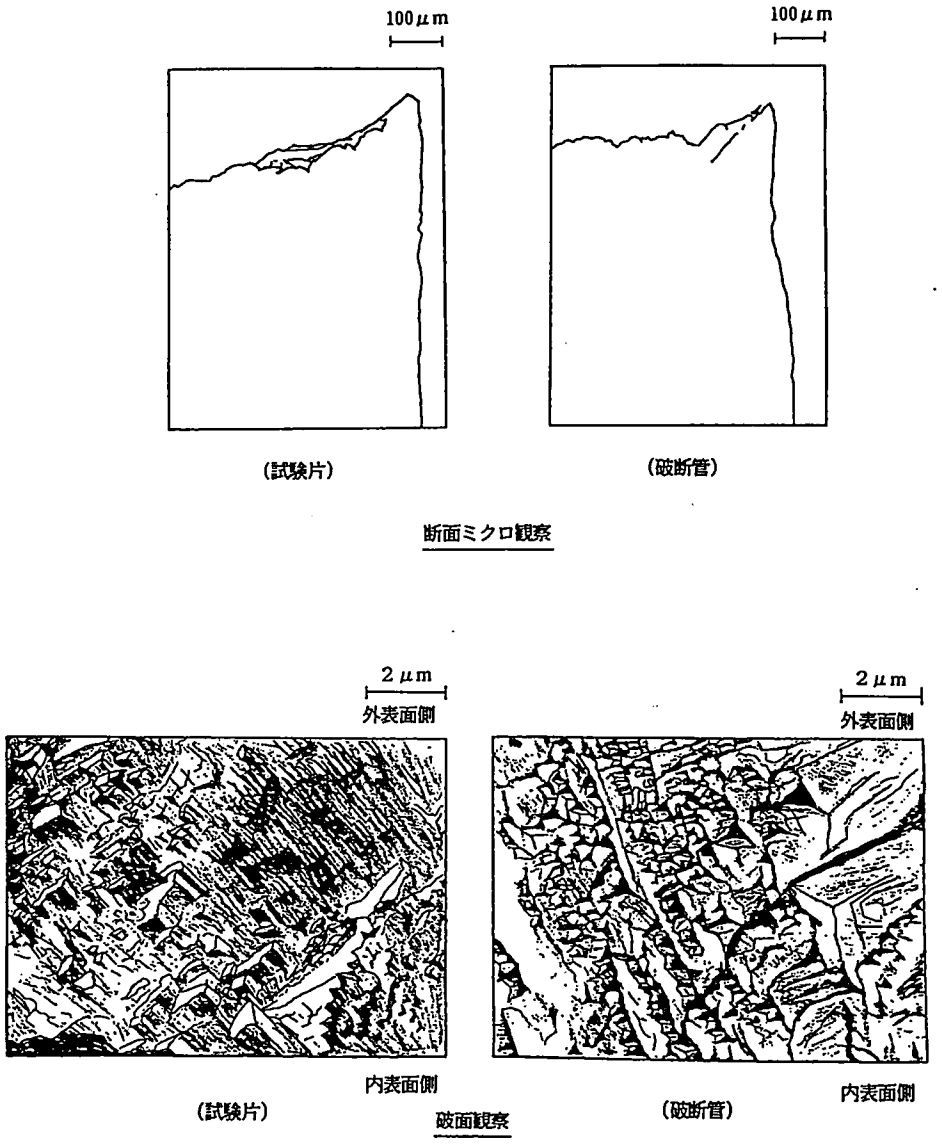
図－2　フレッチング疲労試験概念図



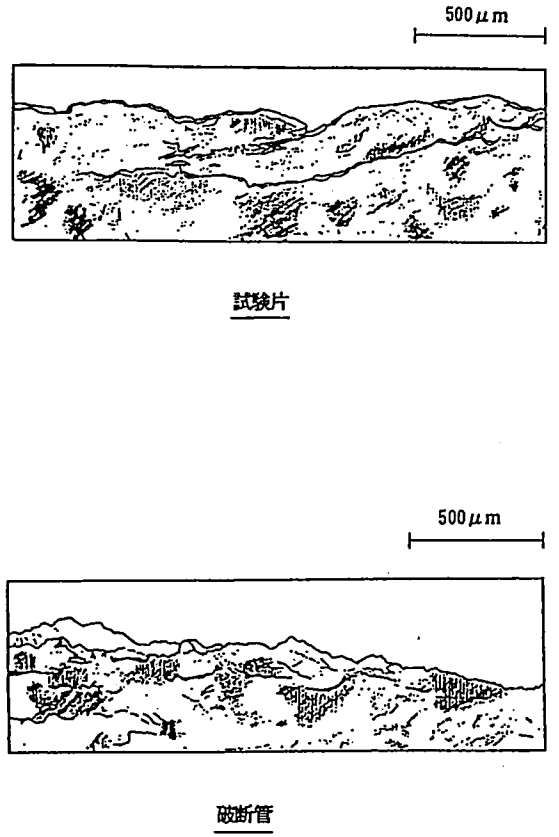
図－3　インコネル６００伝熱管の通常疲労強度試験結果



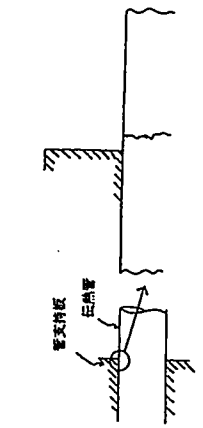
図－4　インコネル６００伝熱管のフレッチング疲労強度試験結果



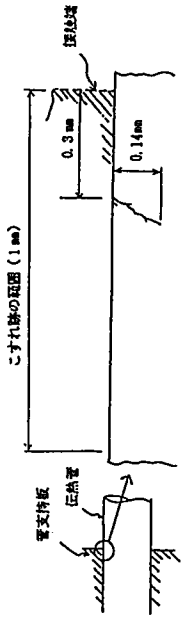
図－5　フレッチング疲労試験片と破断管の断面及び破面の詳細観察結果



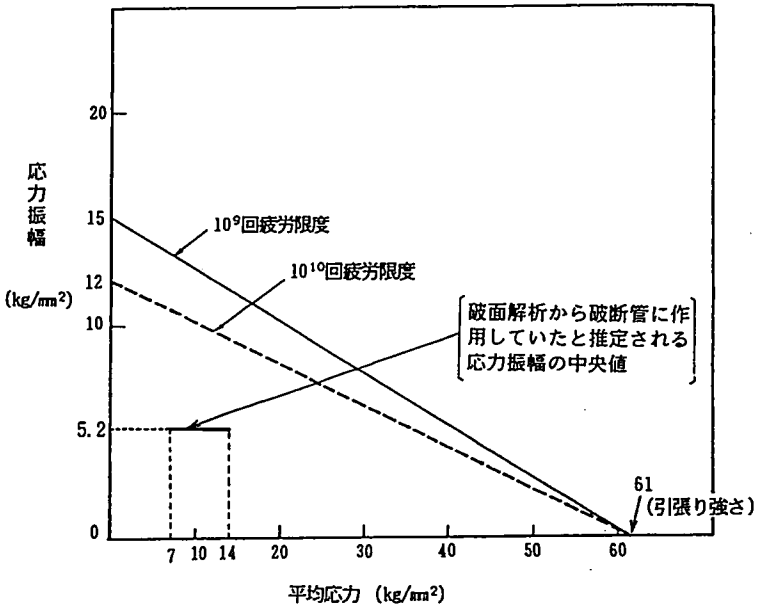
図－6　フレッチング疲労試験片と破断管の外表面観察結果



図－８　通常疲労試験片の断面ミクロ観察結果



図－７　フレッチング疲労試験片の断面ミクロ観察結果



図－９　インコネル６００伝熱管の疲労限度線図

資料－4.3.1.7

フレッチング疲労文献調査結果

1. 目的

フレッチング疲労の特徴を把握するため、文献を調査する。

2. 調査結果

2.1 供試材についての調査

フレッチング疲労試験に用いられた供試材を表－1に示す。

2.2 試験方法についての調査

従来から採用されているフレッチング疲労試験方法を図－1に示す。試験方法には、試験片が繰返し応力を受ける時に、(1)そのつかみ部や固定端に生じるフレッチングを利用し、疲労強度を求める方法（図－1中の(a)）や、(2)金属片を試験片に押し付け、繰返し応力を受ける時に試験片と押し付けられた金属片の間に生ずるフレッチングを利用する方法（図－1中の(b)、(c)、(d)、(e)、(f)、(g)）がある。

フレッチング疲労試験で利用される試験片形状を図－1の(h)に、相対すべり量の測定法を図－1の(i)に示す。

2.3 調査結果によるフレッチング疲労の特徴について

フレッチング疲労の特徴を列記すると下記のとおりである。

(1) 試験片と金属片が接触した面の状況を図－2に示す。図－2中の(a)、(b)に示すように接触面の端部には、図中黒く見える微小なすべりによる摩耗域があり、図－2中の(c)、(d)、(e)に示すように摩耗している領域には、微小なき裂が多数認められる。

(2) 摩耗域に多数見られる微小なき裂は、断面ミクロ観察により調べると図－3に示すように試験片の軸方向に対して傾斜している特徴がある。

(3) フレッチング疲労強度は素材の疲労強度より低い。フレッチング疲労強度に影響を及ぼす影響度合について図－4、図－5に示す。図－4(c)、(d)に示したようにフレッチング疲労強度は小さな面圧でも素材の疲労強度より低下する。低下の程度は、図－4(d)に示すように面圧の小さい時に大きく、ある面圧以上では低下は少なくなり、文献の例では面圧が2.5 kg／mm² より大きいと低下は少なくフレッチング疲労強度はほぼ一定となる。

(4) 相対すべり量が大きくなると、図－4(a)に示すようにフレッチング疲労強度は低下する。

ただし、すべり量が非常に大きいと、発生しかかったき裂が摩耗によって消滅するため、図－4(b)に示すようにき裂は発生せず、摩耗のみが認められるようになる。

(5) 繰返し応力の中の平均応力成分の影響を図－5(a)に示す。平均応力成分が変っても、フレッチング疲労き裂の発生応力は変らないが、試験片の疲労強度は平均応力が大きい程低下する。

(6) フレッチング疲労強度は、腐食環境及び繰返し速度の影響を受けるが、図－5(b)に示すようにこれらの条件の差は、フレッチングの有無よりも小さい。

また、Ｔｉ－６Ａℓ－４Ｖ及び13Ｃｒ鋼の大気中ならびにＣℓ⁻を含むｐＨ３雰囲気でのフレッチング疲労試験結果[11]によると、腐食環境下では13Ｃｒ鋼のフレッチング疲労強度は低下するが、Ｔｉ－６Ａℓ－４Ｖ鋼は低下しなかった。このことから、供試材に腐食ピットが生成し、応力集中が生じるなどの影響を受ける環境ではフレッチング疲労強度は低下するが、環境の影響を受けなければ低下はないと言われている。

インコネル６００はＡＶＴ環境で通常疲労強度は、大気中と同程度である。またインコネル６００はＡＶＴ環境では耐食性がある。したがって、そのフレッチング疲労強度は大気中とＡＶＴ環境で顕著な差はないと考えられる。

(7) 繰返し速度の影響を図－5(c)に示す。フレッチング疲労強度に及ぼす繰返し速度の差よりも、フレッチングの有無による疲労強度の低下の方が大きく、腐食環境と同様な効果を及ぼす。

(8) フレッチング疲労試験を行った後、通常の疲労試験を行い、フレッチングの影響について調べた結果を図－5(d)に示す。2×10^4 回までフレッチング疲労を行うと、その後通常の疲労にしても寿命は10^5 回であった。フレッチング疲労はその寿命の１／５程度（アルミの場合）の時期までに定まり、それ以後にフレッチングのない条件にしても寿命は、そのままフレッチング疲労を続けた場合と変らない。

表－１　文献で使用されている供試材

(1) 化学成分

（単位：重量%）

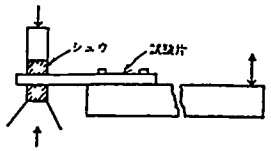
鋼種	材料	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	Ni	Cr
炭素鋼	S35C	0.33	0.18	0.49	0.043	0.036	0.14	——	——	——
	S38C	0.37	0.27	0.68	0.010	0.008	0.05	——	——	——
低合金鋼	SNC3	0.35	0.26	0.51	0.013	0.011	——	——	3.20	0.33
	Ni鋼	0.33	0.29	0.66	——	——	——	0.04	3.34	0.05

鋼種	材料	Al	V	O	H	N	C	Fe
Ｔｉ合金	Ti-6Aℓ-4V鋼	6.42	3.91	0.187	0.003	0.009	0.007	0.17

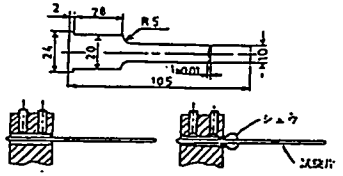
鋼種	材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
ｽﾃﾝﾚｽ鋼	13 Cr 鋼	0.20	0.56	0.56	0.013	<0.003	12.82	0.12

(2) 機械的性質

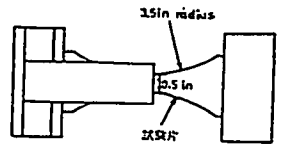
鋼種	材料	熱処理	降伏点 (kg／mm²)	引張強さ (kg／mm²)	伸び (%)	絞り (%)	かたさ (Hv)
炭素鋼	S35C	焼ならし	39.7	53.8	37.0	61.4	—
	S38C	焼ならし	39.2	56.8	34.0	64.0	170
		焼入焼もどし	126.1	131.1	5.5	—	370
		高周波焼入れ	———	———	—	—	630
低合金鋼	SNC3	焼入焼もどし	103.0	133.6	15.0	—	313
	Ni鋼	焼入焼もどし	72.8	82.6	25.0	—	250

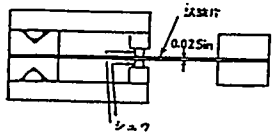


(a) 固定端を利用したフレッチング疲労試験 (1)(3)

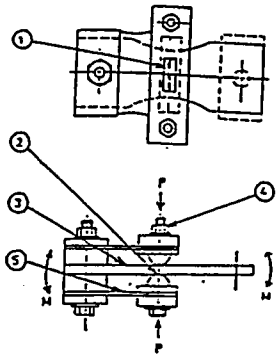


(b) Oding らによるフレッチング疲労試験の方法 (3)

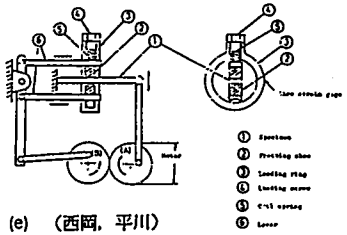




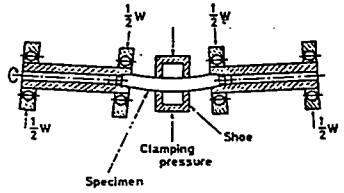
(c) Waterhouseによるフレッチング疲労試験 (3)



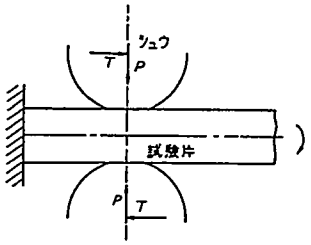
(d) 遠藤らによるフレッチング疲労試験方法 (3)
①ひずみゲージ，②シュウ，③試験片，④締付ナット，⑤薄板



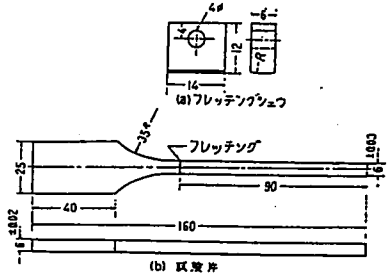
(e) (西岡，平川) 峯者らによるフレッチング疲労試験機 (3)(4)



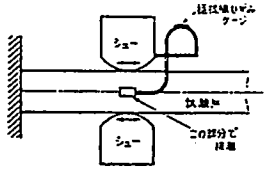
(f) すべり金を用いたフレッチング疲労テスト (1)



(g) フレッチング疲労試験方法の一例 (2)(7)

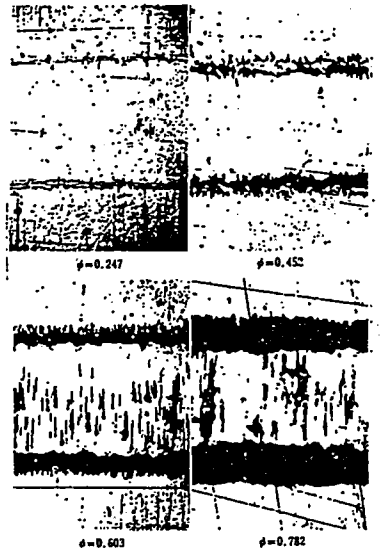


(h) フレッチング疲労試験片 (2)(4)(5)(6)(8)

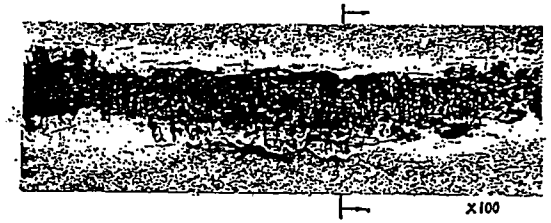


(i) 相対すべり量の測定 (4)

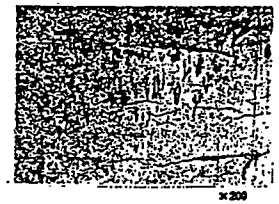
図－1 フレッチング疲労試験方法の例



(a) 円筒と平板の間の接線力の大きさとフレッチングの発生域 (2)(7)(10)



(b) フレッチング疲労試験後の試験片の表面状況 (2)(5)

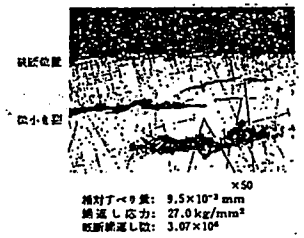




(c) 微小き裂の表面写真 (4)

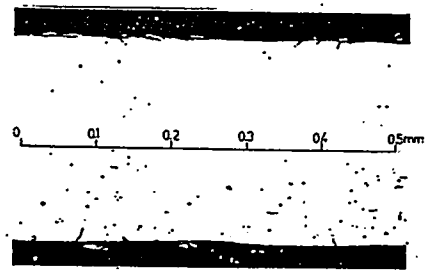


(d) フレッチング疲労試験により生じた微細き裂とピットの拡大写真 (×400)

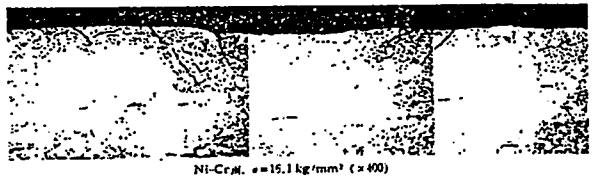


(e) 破断位置の近傍に発生している微小き裂の表面写真（試験後、表面に若干バフ研磨を行なった）(4)

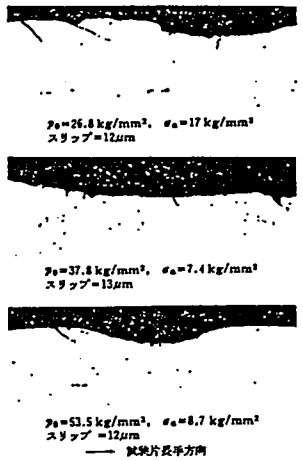
図－2 フレッチング疲労の外表面の特徴



(a) 微小き裂の断面写真 (4)

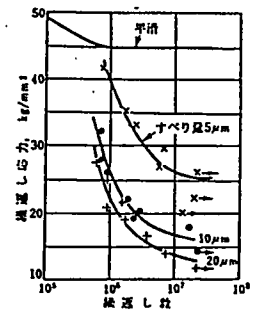


(b) 図2(b)の微細き裂の断面写真 (2)(5)

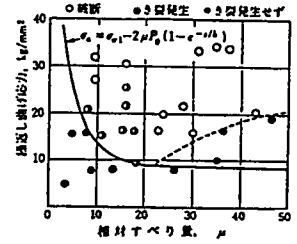


(c) 微細き裂の断面写真の一例 (100倍) (8)

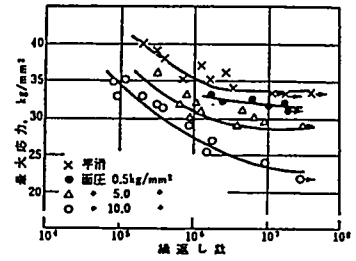
図－3 フレッチング疲労き裂の特徴



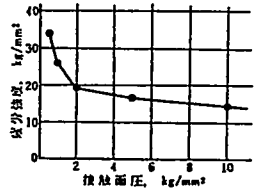
(a) 相対すべり量と $S-N$ 曲線
(中炭素鋼, 接触面圧5 kg/mm²一定) (9)



(b) フレッチング疲れ強さにおよぼす相対すべり量の影響
(高周波焼入れした炭素鋼 S35C) (2)(7)

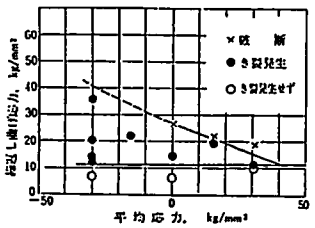


(c) 接触面圧と $S-N$ 曲線
(0.33%C炭素鋼, 片振り引張り) (9)

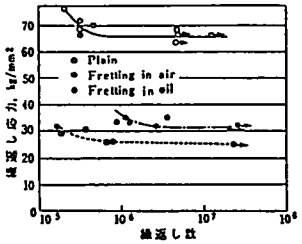


(d) 接触面圧と疲労強度の関係
(炭素鋼, 相対すべり10μm一定) (9)

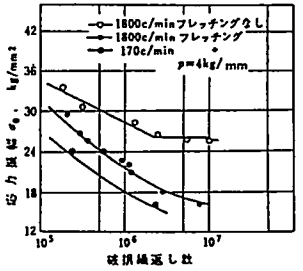
図－4 フレッチング疲労の影響因子(1)



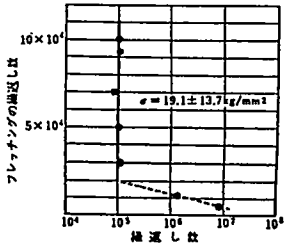
(a) 平均応力の影響 (2)(6)(9)



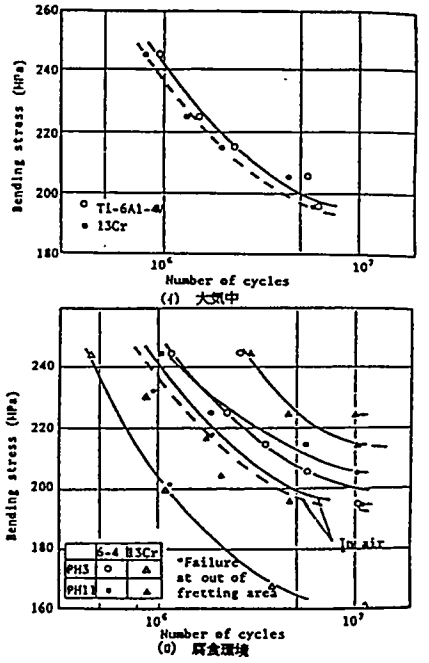
(b) フレッチング疲労強度におよぼす雰囲気の影響 (9)



(c) フレッチング疲労強度におよぼす繰返し速度の影響 (0.53%C炭素鋼, 平面曲げ) (9)



(d) フレッチングの繰返し数の影響 (アルミニウム合金L65) (9)



(e) Ti-6Aℓ-4V と13Cr鋼の比較 (11)

図－5　フレッチング疲労の影響因子(2)

フレッチング疲労に関する文献

(1) 西岡邦夫、平川賢爾、フレッチング疲労
材料（別冊）第18巻、第191号669～678　（昭和44年8月）

(2) 西岡邦夫、平川賢爾、フレッチング疲労の機構
潤滑　第15巻第2号80～90　(1970)

(3) 西岡邦夫、平川賢爾、フレッチング疲労に関する最近の研究の動向
日本材料強度学会誌　第5巻第1号　(1970)

(4) 西岡邦夫、平川賢爾、fretting疲れに関する研究（第2報、fretting疲れ試験機とその二、三の結果）
日本機械学会論文集（第1部）　34巻263号（昭和43－7）

(5) 西岡邦夫、平川賢爾、フレッチング疲れに関する研究（第3報、フレッチング疲れ時の諸現象と表面き裂発生の機構について）
日本機械学会論文集（第1部）　34巻266号（昭和43－10）

(6) 西岡邦夫、平川賢爾、フレッチング疲れに関する研究（第4報、平均応力の影響）
日本機械学会論文集（第1部）　34巻266号（昭和43－10）

(7) 西岡邦夫、平川賢爾、フレッチング疲れに関する研究（第5報、相対すべり量の影響）
日本機械学会論文集（第1部）　34巻268号（昭和43－12）

(8) 西岡邦夫、平川賢爾、フレッチング疲れに関する研究（第6報、接触面圧およびかたさの影響）
日本機械学会論文集（第1部）　37巻298号（昭和46－6）

(9) 西岡邦夫、平川賢爾、フレッチング疲労の基礎とその対策(1)
機械の研究　第22巻第11号(1970)

(10) 西岡邦夫、平川賢爾、フレッチング疲労の基礎とその対策(2)
機械の研究　第22巻第12号(1970)

(11) 坂本東男、外山和男、Ti-6Aℓ-4Vのフレッチング疲労強度に及ぼす腐食環境の影響
鉄と鋼、72 (1986) S732

資料－4.3.1.8

伝熱管のすべり計測試験結果

1. 目的

伝熱管が管支持板部で固定支持の状態で、繰返し曲げ応力が作用する場合には、伝熱管外表面に伸縮が生じるため、伝熱管と管支持板間に主として管軸方向の相対すべりが生じる。また、伝熱管が間隙支持の状態で、繰返し曲げ応力が作用する場合には、周方向へも相対すべりが生じる。これらの相対すべり量を把握することがフレッチング疲労評価上及び摩耗評価上重要である。

そこで、実機管支持板部モデルを製作し、固定支持及び間隙支持の場合について伝熱管に曲げ荷重を加えて、相対すべり量の計測を実施する。

2. 供試材料

試験片にはインコネル６００伝熱管を用いる。伝熱管寸法は実機と同じく外径 22.23㎜、板厚1.27㎜である。管支持板材には炭素鋼（ＳＢ42）を用いる。

3．試験方法

3.1 試験要領 （図－１）

(1) 固定支持の場合

伝熱管を模擬した試験片は第５管支持板相当部において管軸方向に移動しないようにするために板バネを介して固定し、第６管支持板相当部では伝熱管の表面に所定の面圧を与え伝熱管を固定する。この状態で伝熱管に負荷を与えながら、伝熱管と管支持板端部間の管軸方向の相対すべり量をクリップゲージにより計測する。

(2) 間隙支持の場合

伝熱管を模擬した試験片は、固定支持の場合と同様、第５管支持板相当部で固定し、第６管支持板相当部では管穴と伝熱管との間に間隙を設ける。

負荷を管支持板端部に与え、伝熱管の相対変位を非接触式の変位計を用いて測定し、伝熱管の周方向相対すべり量を求める。

3.2 試験条件

すべり計測試験は室温大気中で実施する。

(1) 固定支持の場合には、面圧を変化させて相対すべり量を測定する。

(2) 間隙支持の場合には、伝熱管と管支持板との間に間隙を設け、水平荷重及び垂直荷重を変化させて相対すべり量を測定する。

4. 試験結果と考察

4.1 管軸方向すべり

伝熱管外表面と管支持板端面との間の管軸方向相対すべり量と、応力振幅の関係を図－2に示す。

管軸方向相対すべり量は、繰返し曲げ応力振幅及び面圧に依存し、破断管に作用していたと推定される応力振幅5.2kg／mm² で、平均面圧2.0～4.7kg／mm² では10～13μm程度の相対すべり量であった。また、間隙支持であって伝熱管が管支持板管穴の中央にある場合には管軸方向の相対すべり量は 180μm以上となり、10倍以上になった。

4.2 周方向すべり

伝熱管に水平荷重及び垂直荷重を負荷して周方向の相対すべり量を計測した結果は、以下のとおりであった。

管軸方向すべりに加えて周方向へもすべり、周方向のすべり量は、水平荷重F_xと垂直荷重F_Yの荷重比、F_Y／F_xに依存する。

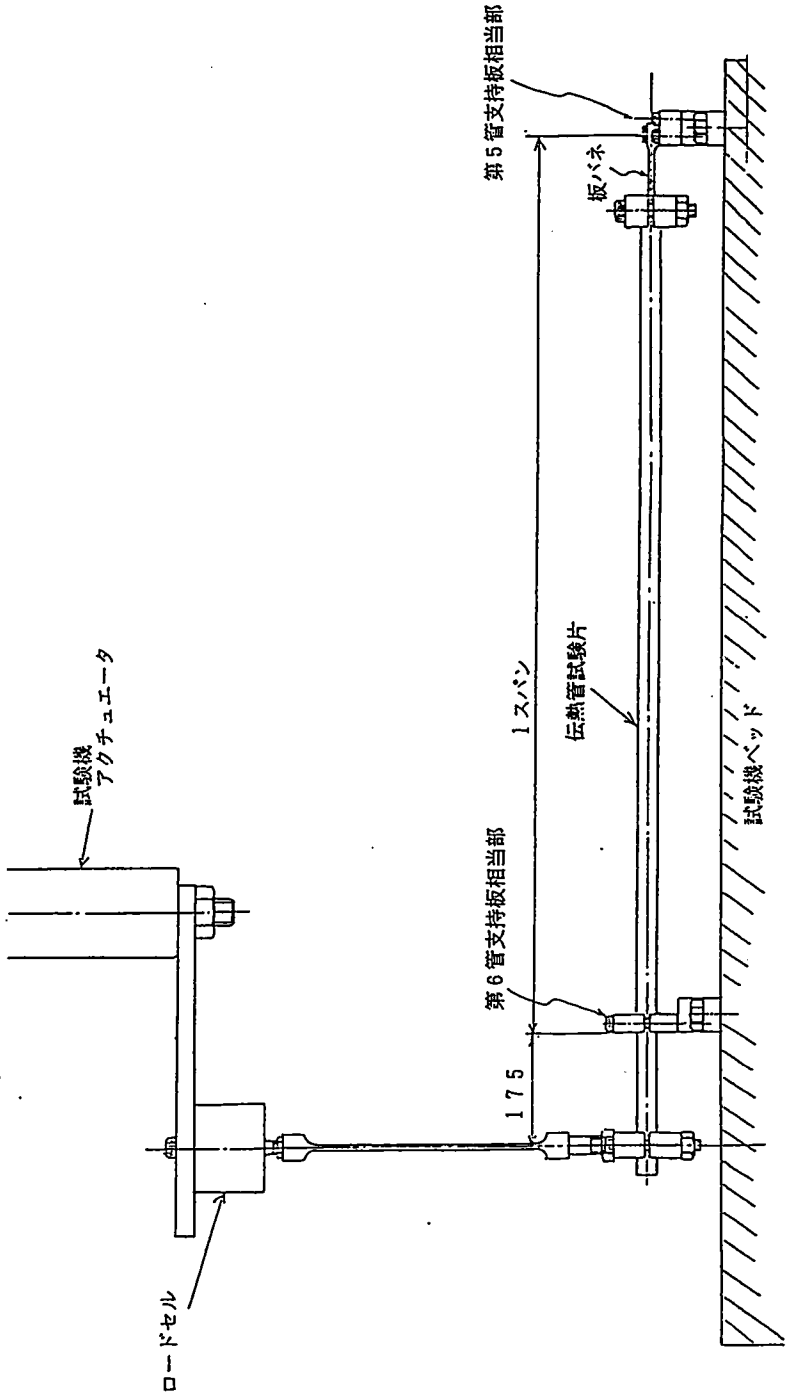
荷重比が大きくなるに従って相対すべり量は増加し飽和する。（図－3）

5. まとめ

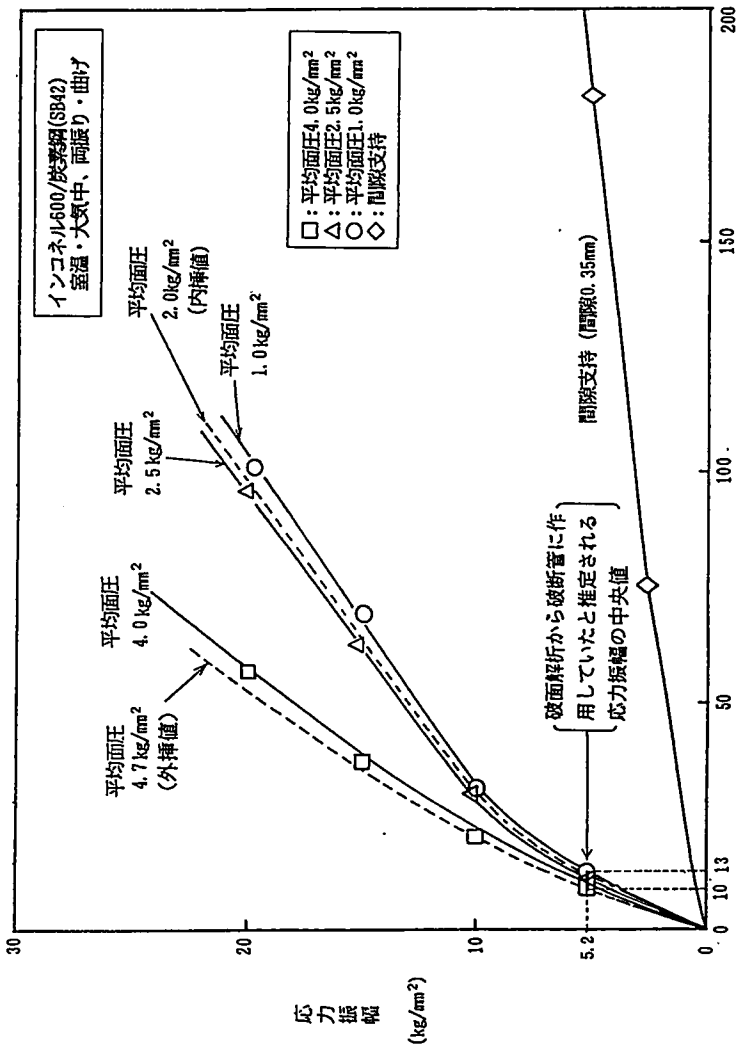
インコネル６００伝熱管と管支持板材（ＳＢ４２）との組合せにより、応力振幅と平均面圧をパラメータにした相対すべり量を計測した結果は、以下のとおりである。

(1) 破断管の第６管支持板部に作用していたと推定される平均面圧及び応力振幅が加わる場合、管軸方向の相対すべり量は１０～１３μm程度であった。

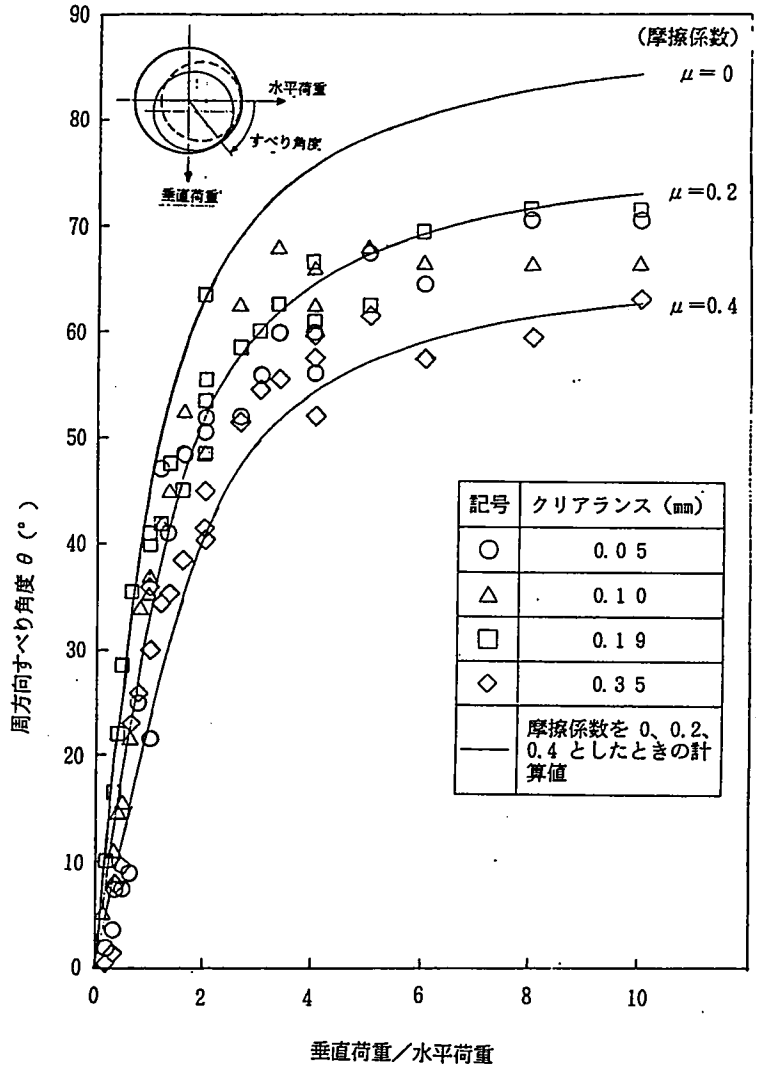
(2) 伝熱管と管支持板との間に間隙を設け間隙支持とした場合、相対すべりは管軸方向と周方向に発生し、その相対すべり量は、面圧を加えた場合（固定支持）の１０倍以上と大きな値であった。



図－１　すべり計測試験



図－2　相対すべり量計測試験結果



図－3　周方向すべり角度と荷重の関係

資料－4.3.1.9

フレッチング限界面圧－すべり線図試験結果

1. 目的

伝熱管が管支持板で固定支持の状態で、繰返し曲げ荷重が作用する場合には、伝熱管外表面に伸縮が生じるため、伝熱管と管支持板間に主として管軸方向の相対すべりが生じる。

面圧と相対すべりの組合せ条件により、フレッチング疲労き裂が発生したり、摩耗だけが生じたりする。そこで、平均面圧と相対すべり量をパラメータに、フレッチング疲労試験を行い、フレッチング疲労き裂発生限界を求めるとともに、フレッチング疲労き裂発生からフレッチング摩耗に遷移する条件を求める。

2. 供試材料

試験片には、インコネル６００伝熱管材を用いる。伝熱管寸法は実機と同じく外径 22.23㎜、板厚1.27㎜である。管支持板材には、炭素鋼（ＳＢ４２）を用いる。

3. 試験方法

3.1 試験要領

図－１の(1)のように伝熱管が管支持板で固定支持の状態で、繰返し曲げ応力が付与される場合を考える。伝熱管には繰返し曲げ応力が作用するので、外表面には(2)に示すように、伸び－縮みが生じようとする。このため、伝熱管と管支持板との接触端で(3)に示すように、面圧がある状態で相対すべりが生じている。

したがって、本試験では、(4)に示すように伝熱管端面に突起部を設け、管支持板に相当する平板状試験片に押し当て、周方向の微小繰返し変位を与え(3)の状態を模擬する。

試験終了後に、伝熱管試験片の接触部について、断面ミクロ、表面の走査型電子顕微鏡観察を行い、フレッチング疲労き裂の有無を調査する。

3.2 試験条件

試験は、平均面圧及び相対すべり量を変化させて、室温大気中で繰返しＮ＝10^7 及び 10^8 回まで実施する。

4. 試験結果と考察

平均面圧－相対すべり量の組合せ条件下で試験を実施し、き裂・摩耗の有無を調べた。その結果を図－２に示す。

平均面圧が約 1.5kg/mm²以上であると、相対すべり量の大小によりき裂が認められなかった領域、き裂が認められた領域および摩耗のみが認められた領域に分けることができる。例えば、平均面圧が約４kg/mm²の場合、相対すべり量が17μm程度を越えるとき裂が認められ、90μmを越えると摩耗のみが認められた。

また、相対すべり量が17μm以下であれば、き裂・摩耗は認められなかった。

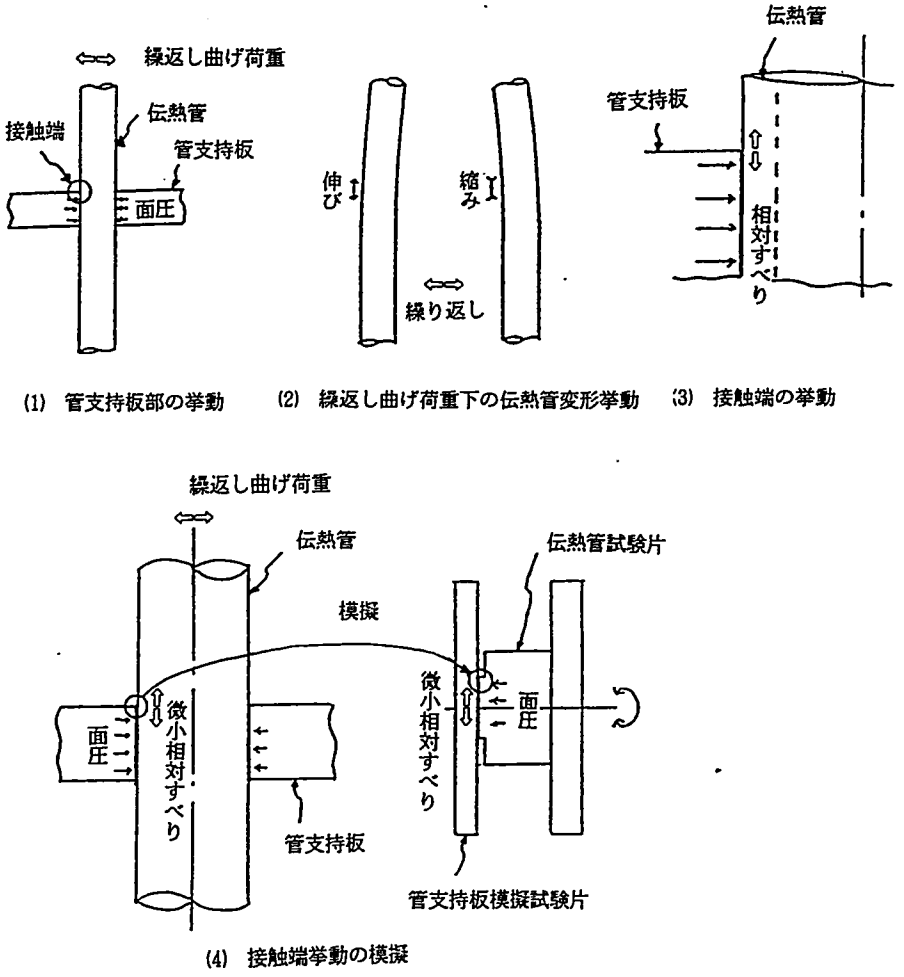
繰返し数が大きくなるに従い、き裂発生の限界線は相対すべり量が小さい方に移動する。

5. まとめ

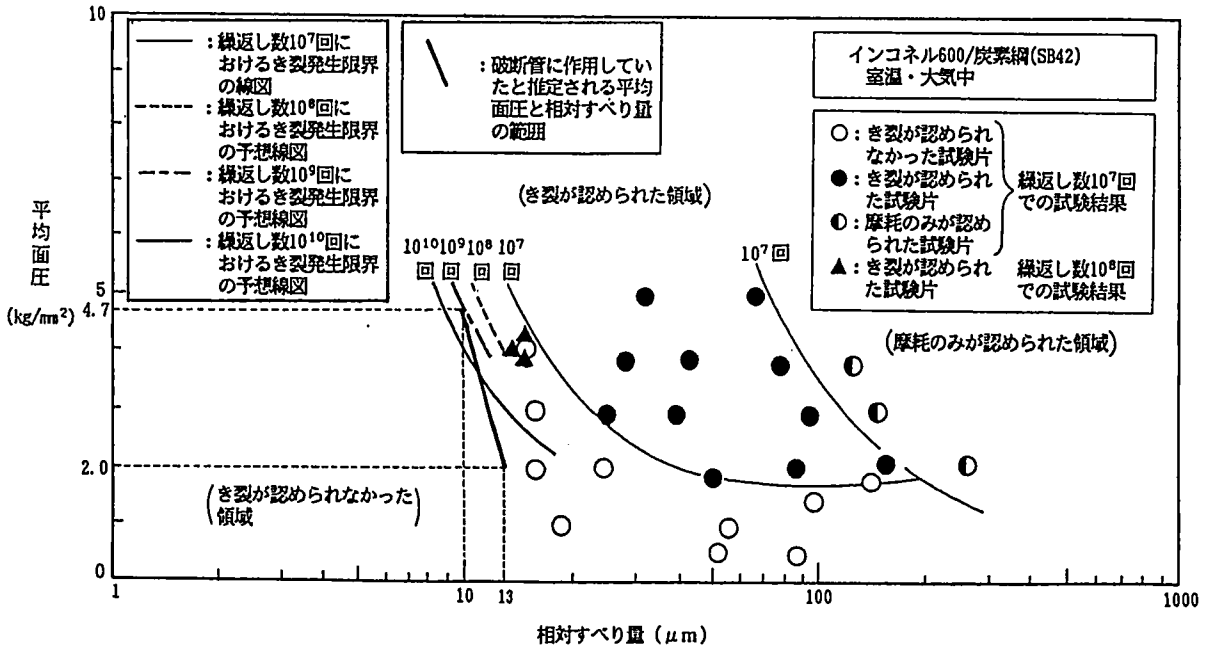
インコネル６００伝熱管と管支持板材との組合せにより、平均面圧と相対すべり量をパラメータにしたフレッチング疲労き裂発生限界試験の結果は、以下のとおりである。

(1) き裂は平均面圧と相対すべり量により限定された領域のみに認められ、相対すべり量が大きくなると、摩耗のみが認められた。

(2) 破断管の外表面に作用したと推定される平均面圧2.0～4.7kg/mm²と、相対すべり量10～13μm程度との関係を示す範囲と、10^7 回のフレッチング疲労き裂発生限界試験の結果を10^{10}回に外挿したき裂発生限界領域との関係から、破断管にはフレッチング疲労によるき裂が発生し得るものと考えられる。



図－１ 接触端におけるすべり挙動



図－2　フレッチング疲労き裂発生限界試験結果

資料－4.3.2.1

渦電流探傷検査記録による管支持板クレビス部閉塞時期の推定結果

1. 目的

各定期検査での渦電流探傷検査（以下「ＥＣＴ」という。）記録を基に、破断管の低温側第６管支持板クレビス部の閉塞時期を推定する。

2. 閉塞時期の推定方法

2.1 閉塞時期推定の考え方

破断管の低温側第６管支持板部の伝熱管には減肉や変形は認められず、管支持板クレビス部にはマグネタイトを主成分としたスケールが詰まっており、振動計測の結果、固定支持と評価された。したがって、模擬管支持板クレビス部にマグネタイトを主成分とするスケールの付着状況を模擬したモデルにより、破断管のＥＣＴ記録を再現するとともに振動計測を行い、管支持板部の支持状態を確認することによってクレビス部の閉塞時期を推定する。

2.2 試験方法

実機と同一材料、寸法の模擬伝熱管及び模擬管支持板を用い、管支持板クレビス部を模擬する。

この模擬クレビス部に美浜２号機のスケールと成分を近似させた模擬スケールを充填し、各充填段階でＥＣＴを実施して、過去の定期検査時の記録と比較する。（図－１）

ＥＣＴ記録を再現した模擬管支持板部を模擬伝熱管の両端に配置し、振動計測を行う。（図－２）

3. 試験結果

3.1 再現試験結果

模擬管支持板クレビス部に充填する模擬スケールの付着状況を変化させたモデルによって、第３回定期検査、第４回定期検査及び第８回定期検査時における破断管のＥＣＴ記録と類似の信号記録を再現した。

3.2 支持状態確認試験結果

ＥＣＴ記録を再現したモデルの支持状態を確認するため、第３回定期検査及び第４回定期検査時を再現したモデルについて振動計測を行った結果は、以下のとおりであった。

(1) 計測方法

振動計測は、加振装置及び加速度計を内蔵する専用の装置を伝熱管内の計測位置まで挿入し、伝熱管を自由振動させ、その周波数スペクトルから伝熱管の振動数を求め、支持状態を評価する。

(2) 計測結果

伝熱管の管支持板部における支持状態の分類基準は以下のとおりとした。

a. 計測振動数が固定支持条件での解析値に近い場合は固定支持とする。

b. 計測振動数が上記以外の場合は固定支持ではないとする。

この分類基準に基づき評価した結果、以下のとおりである。

① 第3回定期検査時を再現したモデルを用いた振動計測の結果、固定支持ではなかった。

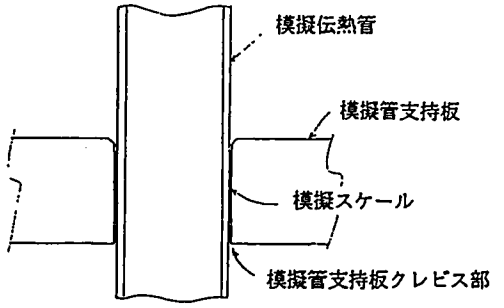
② 第4回定期検査時を再現したモデルを用いた振動計測の結果、固定支持であった。

4. まとめ

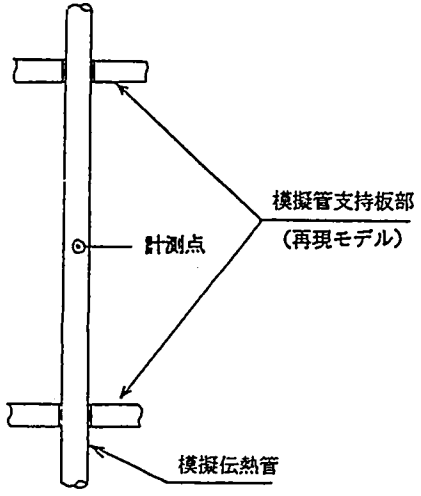
破断管の各定期検査時の渦電流探傷検査記録を基に、管支持板クレビス部のスケールの付着状況を模擬したモデルを作成し、各定期検査時における管支持板部での支持状態を推定した結果は、以下のとおりである。

(1) 第3回定期検査時の渦電流探傷検査記録を模擬したモデルでは、伝熱管の振動計測の結果、第6管支持板部での伝熱管の支持状態は固定支持ではなかった。

(2) 第4回定検検査時の渦電流探傷検査記録を模擬したモデルでは、固定支持であった。したがって、第4運転期間の頃に第6管支持板クレビス部が閉塞し、それ以降支持状態が固定支持であったものと推定される。



図－1 管支持板クレビス部スケール付着状況再現モデル



図－2 振動計測要領

X45列伝熱管の摩耗解析結果

1. 目的

摩耗解析により摩耗減肉に関する検討を行う。

2. 摩耗解析手法

構造物の振動解析は、一般に次の運動方程式を解くことにより、実施される。

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F\} \quad (1)$$

ここに、[M]、[C]、[K]：それぞれ質量、減衰、剛性マトリックス

$\{\ddot{X}\}$、$\{\dot{X}\}$、$\{X\}$：それぞれ加速度、速度、変位ベクトル

$\{F\}$：荷重ベクトル

衝突現象を含む場合、(1)式の右辺の荷重ベクトル$\{F\}$は、次のように2つの項で表わす。

$$\{F\} = \{F_I\} + \{F_E\} \quad (2)$$

ここに、$\{F_I\}$：衝突力ベクトル

$\{F_E\}$：励振力ベクトル

(2)式の右辺第1項は、変位$\{X\}$や速度$\{\dot{X}\}$の関数になっており、このために(1)式は非線形方程式となる。

$$\{F_I\} = \{F_I(X, \dot{X})\} \quad (3)$$

このような非線形方程式の解法としては、一般的に時刻歴シュミレーション解析を行う。

熱交換器伝熱管の支持部でのガタ衝突振動解析を行う解析コードＩＶＨＥＴ「Impact Vibration of Heat Exchanger Tube」は、上述のような非線形の運動方程式を、モーダル解析の手法を使って、時刻歴シュミレーションすることにより解く計算手法であり、次の内容の解析が可能である。

(i) 丸い穴の中あるいは並行な棒の間で丸い管が振れ回る挙動を、単純化したすべり現象を含めて、解析できる。

(ii) 加振力を、流体励振力などの任意の波形を時刻歴荷重$\{F_E\}$として、有限要素法によりモデル化した質点に与えることにより振動応答解析を行う。

(iii) 計算結果としては、管の変位、加速度、衝突力などの他に、下式に基づき求めた衝突部分におけるワークレート（WR）をアウトプットできる。

$$WR = \frac{1}{T_N} \sum_{i=1}^{N} F_N(t_i) \cdot \Delta X(t_i) \quad (kgmm/s) \quad (4)$$

ここに、$T_N = N \cdot \Delta t$（Δt：計算時刻刻み）

$F_N(t_i)$ ：時刻t_iにおける衝突力（kg）

$\Delta X(t_i)$ ：時刻t_iにおけるΔt時間内の周方向すべり距離（mm）

ワークレートが求まれば、摩耗量Vは次式で求められる。

$$V = w_e \cdot WR \cdot T \qquad (5).$$

ここに、w_e：比摩耗量（mm^2/kg）

T ：ワークレートが有効であった時間（s）

3. 摩耗解析対象伝熱管

金属調査を実施した伝熱管の中で、Y13、Y14、Y15、Y17、Y19の伝熱管を代表例として選定し、前述の摩耗解析手法により検討を加える。解析モデルの例を図－1に示す。

なお、X45列の伝熱管について金属調査を実施した結果の概要を表－1、図－2に示す。

4. 摩耗解析結果

4.1 X45－Y13

第2回定期検査時に施栓された管であり、第6管支持板部では間隙支持であった。

摩耗解析は、流力弾性振動発生時とランダム振動時の両方を模擬した励振力を与えたケースについて行い、両者を比較した。

解析の結果、流力弾性振動発生時のワークレートとランダム振動時のワークレートは1桁以上の差があった。流力弾性振動が継続的に発生していたと仮定すると、各パラメータのばらつきを考慮しても、摩耗量は金属調査で明瞭に認められる程度より大きく計算されるので流力弾性振動が発生していた可能性は低いと考えられる。

4.2 X45－Y14

第6管支持板部では固定支持であった。しかし、運転開始当初から一定期間内は、管支持板クレビス部には間隙が存在していたと考えられるので、その期間内に流力弾性振動が継続的に発生していたと想定し、解析を行った。

摩耗解析の結果、運転開始当初から第4運転期間まで間隙支持の状態で、流力弾性振動が継続的に発生していたとすると、周辺管と同様に管支持板部で周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が生じるが、金属調査の結果、周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められていないことから、運転開始当初から流力弾性振動が継続的に発生していた可能性は低いと考えられる。

4.3 X45－Y15

使用管であるが、第6管支持板部では間隙支持であった。

摩耗解析は、X45－Y13と同様に、流力弾性振動発生時及びランダム振動時の2ケースについて行った。

解析の結果、流力弾性振動発生時を模擬した場合には、金属調査で観察された摺動痕の位置と解析により得られた振動位置は概ね対応する結果が得られた。また、金属調査で計測された摩耗量は、流力弾性振動が発生したと仮定した場合の計算値と同程度であったが、ランダム振動のみの場合の摩耗量の計算値とは2桁以上の差が認められたため、流力弾性振動が継続的に発生していたと考えられる。

4.4 X45－Y17

第2回定期検査時に施栓された管であり、第6管支持板部では間隙支持であった。

摩耗解析は、間隙支持の状態で流力弾性振動が継続的に発生した場合について行った。

解析の結果、摺動痕の位置と解析により得られた振動位置は概ね対応する結果が得られた。また、各管支持板部での摩耗量は下方にいくにしたがって順次低減することが認められ、計算結果は金属調査結果と同様の傾向となった。

4.5 X45－Y19

第2回定期検査時に施栓された管であり、第6管支持板部では間隙支持であった。

摩耗解析は、間隙支持の状態で流力弾性振動が継続的に発生した場合について行った。

X45－Y19の第6管支持板部では、摩耗減肉が進行し、伝熱管板厚を貫通した結果、振動性状が変化した可能性があるので、間隙が大きくなったとして摩耗解析を行った。

解析の結果、管支持板毎の減肉量の相対的大小関係や第5管支持板部における全周にわたる摩耗減肉の発生など計算結果は金属調査結果と同様の傾向となった。

5. 考　察

5.1　摩耗解析結果に基づく評価

(1)　X45－Y13

金属調査の結果、摩耗減肉が認められていないこと、摩耗解析の結果、流力弾性振動が継続的に発生していたと仮定した場合は、摩耗減肉が認められると評価されたことから、流力弾性振動が発生していた可能性は低いと考えられる。

(2)　X45－Y14

金属調査の結果、摩耗減肉は認められていない。

運転開始当初から第4運転期間まで間隙支持の状態であり、この期間に流力弾性振動が継続的に発生していたと仮定して摩耗解析を行った結果、摩耗減肉が認められると評価された。

これらのことから、この管は間隙支持であった期間には、流力弾性振動が継続的に発生していた可能性は低いと考えれる。

(3)　X45－Y15

金属調査の結果、摩耗減肉が認められていること、流力弾性振動が継続的に発生していたと仮定して摩耗解析を行った結果、摩耗減肉が認められると評価されたことから、流力弾性振動が発生していたと推定される。

(4)　X45－Y16～Y22

施栓管であるX45－Y16～Y22は、間隙支持であった。流力弾性振動の発生に関する安定比の最大値はいずれも1以上であったこと及び金属調査の結果、摩耗減肉が認められたことから、流力弾性振動が発生していたと考えられる。

これらの伝熱管は、全て第2回定期検査時に施栓したものであり、施栓により管支持板クレビス部にスケールが生成しにくかったため、間隙支持のままの状態であったと考えられる。この状態で伝熱管に流力弾性振動による繰返し荷重が作用したため、伝熱管が管支持板管穴内で周方向にすべったことにより、伝熱管の管支持板部で摩耗減肉が生じたものと考えられる。

この摩耗減肉は、伝熱管の曲げ半径が大きくなるほど減肉深さが大きくなる傾向があり、一部の伝熱管では、運転中の2次側圧力により圧壊して管内面への膨らみを生じ、さらに、

減肉の進んだ一部の伝熱管では摩耗減肉が継続し、板厚を貫通するに至ったものと考えられる。また、これらの伝熱管ではU字部の振動が下方まで伝わったため、下部の管支持板部でも摩耗減肉が生じたものと考えられる。

5.2　摺動痕について

摩耗減肉部にはいずれも周方向の摺動痕が認められた。摩耗部と非摩耗部の管軸方向の境界は明瞭であり、伝熱管の管軸方向の相対すべり変位（伸び縮み）は、少なかったと推定される。走査型電子顕微鏡による摩耗減肉部の底部の観察でもほぼ円形の小打痕状模様が認められている。

これらの状況からみて、伝熱管は管支持板管穴内面を繰返し摺動したため、摩耗減肉となったと推定される。

摩耗解析の結果、管支持板部で、伝熱管は伝熱管中心と管支持板管穴中心とがずれている場合には周方向に摺動する軌跡をとっている。

この様な軌跡はP. L. Koの論文[1]でも報告されており、また、伝熱管の摩耗事例でも認められる事象である。蒸気発生器組立てにおいては、伝熱管中心と管支持板管穴の中心位置が合致するよりずれて設置される確率の方がはるかに高いことから、伝熱管が大きく振動する場合には、摺動痕を伴う減肉が生ずるものと考えられる。

6. まとめ

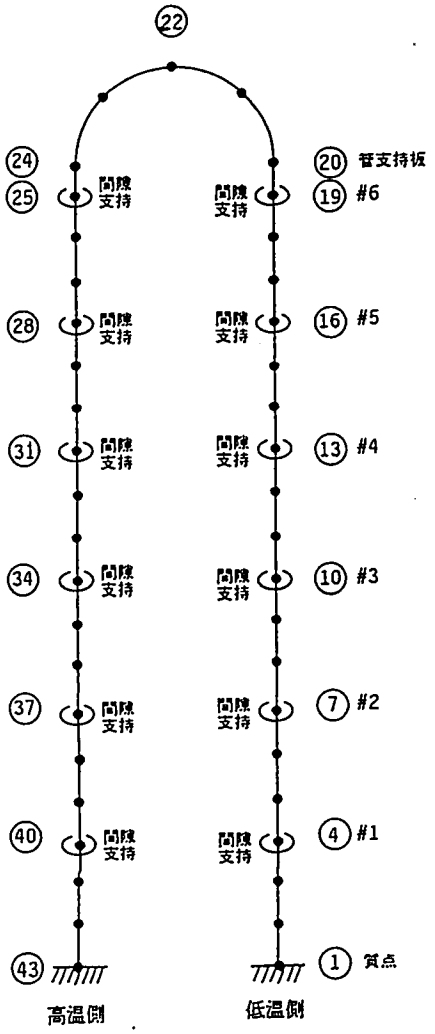
(1)　摩耗解析の結果、ランダム振動のみでは観察できるほどの摩耗は生じないが、流力弾性振動が発生すると伝熱管と管支持板との間隔等の状況によっては、周辺管で観察された程度の摩耗減肉が生じ得ることが確認された。

(2)　破断管の摩耗解析の結果、運転開始当初から第4運転期間まで間隙支持の状態で、流力弾性振動が継続的に発生していたとすると、周辺管と同様に管支持板部で周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が生じるが、金属調査の結果、周方向の摺動痕を伴う摩耗減肉が認められていないことから、運転開始当初から流力弾性振動が継続的に発生していた可能性は低いと考えられる。

(3)　周辺管の管支持板部の摩耗減肉は、間隙支持の状態で流力弾性振動による繰返し荷重が作用したため、伝熱管が管支持板管穴内で周方向にすべったことにより生じたものと考えられる。

参考文献

(1) P.L.Ko et. al. "Impact and Sliding Wear in Steam Generators and Heat Exchargers : New Experimental Test Rig and Wear Model" ASME PVP(Am Soc Mech Eng Press Vessels Pip Div) VOL. 154 PAGE. 63-69 1989

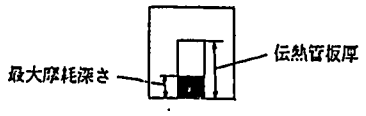


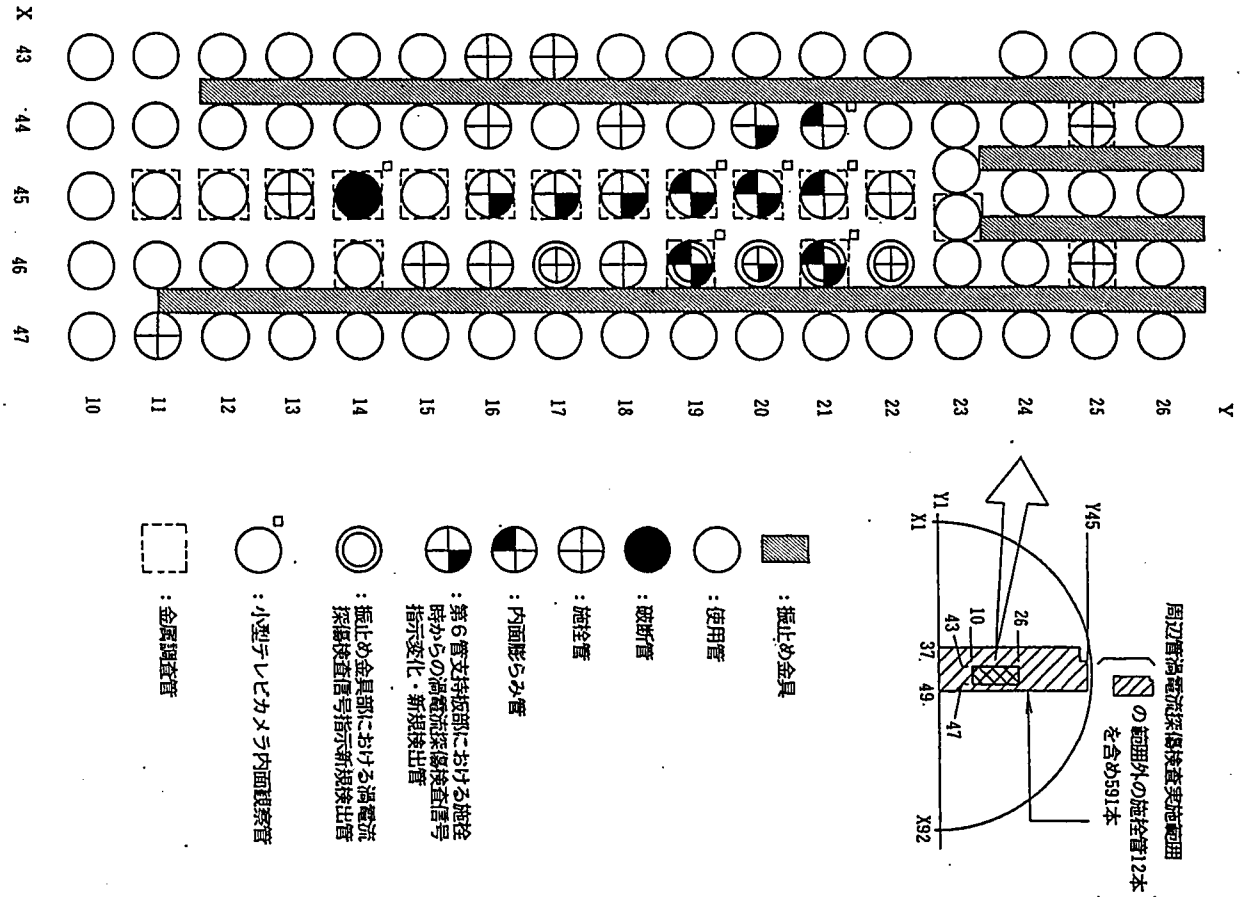
図－1　解析モデルの例

表－１　　管支持板部減肉状況（X45列低温側）

	X45－Y11（使用管）	X45－Y12（使用管）	X45－Y13（施栓管）	X45－Y14（破断管）	X45－Y15（使用管）	X45－Y16（施栓管）	X45－Y17（施栓管）	X45－Y18（施栓管）	X45－Y19（施栓管）	X45－Y20（施栓管）	X45－Y21（施栓管）	X45－Y22（施栓管）	X45－Y23（使用管）
第6管支持板部			☆					☆				☆	
第5管支持板部							☆			☆	☆	☆	
第4管支持板部									☆	☆	☆	☆	
第3管支持板部								☆	☆	☆	☆		☆
第2管支持板部				☆				☆		☆			
第1管支持板部				☆				☆		☆			

☆は腐食減肉の認められたものを示し，その腐食深さは表示していない。

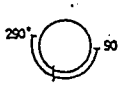
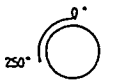




図－２　周辺管調査概要

表－2　第６管支持板部（低温側）摩耗量

Y列	解析条件	摩耗体積	
		解析値	実測値
Y13	流力弾性振動発生時	31.9 mm³	摩耗なし
	ランダム振動時	0.46 mm³	
Y14	流力弾性振動発生時	21 mm³	摩耗なし
Y15	流力弾性振動発生時	33.5 mm³	32.6 mm³
	ランダム振動時	0.33 mm³	
Y17	流力弾性振動発生時	278 mm³	309.4 mm³
Y19	流力弾性振動発生時	958 mm³	700 mm³

低温側	解析結果	金属調査結果
第６管支持板部		
第５管支持板部		
第４管支持板部		
第３管支持板部		

図－３　X45－Y17管の解析結果の例

資料－4.3.2.3

酸化皮膜厚さからの破面形成時期の検討結果

1. 目的

破断管の破面形成時期を推定する。

2. 推定方法

伝熱管材であるインコネル６００は腐食されにくい材料であるが、高温水中に長時間さらされていると、表面には母材の酸化により、室温水中に比べ格段に厚い１μmオーダの厚さの酸化皮膜層が形成されることが知られている。

そこで、破面起点部近傍に付着していた酸化皮膜から破面形成時期の推定を行う。

3. 破面に付着した酸化皮膜厚さ

主起点部近傍の約80度の断面ミクロ観察の結果、２次側表面には外観上、ち密な、厚さ約２μmのスケールとポーラスなスケールが観察されたが、ち密な層は運転中に母材の酸化により生じた酸化皮膜層、ポーラスな層は２次系から持ち込まれ伝熱管外表面に付着したスケール層であると推定される。

破面に付着している酸化皮膜層は、２次側表面極近傍の立体モザイク模様の破面にのみ限定されていた。図－１には観察位置を変えて観察した結果も含めて測定した酸化皮膜厚さの板厚方向分布を示す。２次側外表面から20～30μmの位置では最大厚さ１μmの皮膜が観察された。50μm以上離れると酸化皮膜は認められなかった。

270度側の断面ミクロ観察の結果、 270度側外表面には板厚方向への深さ0.２㎜程度のフレッチング疲労き裂が認められたが、そのうちの２次側外表面から30～40μmの位置に最大厚さ2.５μmの酸化皮膜層が認められた。

破断の主起点は90度付近であり、ほぼ同時期に生じたと考えられる 270度側フレッチング疲労破面に最大厚さ2.５μmの酸化皮膜が認められたことから、90度付近の酸化皮膜厚さも同程度と推定される。

なお、80度付近の破面上の酸化皮膜厚さは１μm以下と薄かったが、これは主起点からはずれていたために、破面の形成時期が遅かったためと考えられる。

また、高温側第６管支持板部のフレッチング疲労き裂においても、同様な傾向の酸化皮膜層が認められた。

4. 腐食データからの時間推定

pH的に同等である高温水中のインコネル６００の腐食試験データから破断管の 270度側破面に認められた厚さ2.5μmの酸化皮膜形成に必要な時間を推定した。

(1) 腐食生成物の放出量

腐食データにおいては、約10,000時間後の腐食生成物の放出量は腐食量に対して約９～21%である。全体の腐食量のうち91～79%が酸化皮膜となると仮定した。

(2) 腐食生成物の密度

インコネル６００がＡＶＴ環境中で腐食する場合、腐食生成物はスピネル化合物（$(Ni, Fe)(Fe, Cr)_2O_4$）となる。腐食生成物の密度は平均値の5.3g/cm³と仮定した。

(3) 酸化による重量増加

インコネル６００が酸化した場合には、生成物はスピネル化合物であり、酸素の分だけ重量増となる。ここで、インコネル６００の平均原子量を57.3とすると、重量は1.37倍となる。

(4) 酸化皮膜生成時間の試算

厚さ2.5μmの酸化皮膜生成に必要な腐食量は 0.00025cm×5.3／（1.37×0.91～0.79）＝1.06～1.22mg／cm²である。

インコネル６００の高温水中における腐食試験データより腐食量の時間依存性を調べた結果、1.06～1.22mg／cm²の腐食量に必要な時間は約1×10^4 ～2.3×10^5 時間（約1.1～26年）と試算された。

5. まとめ

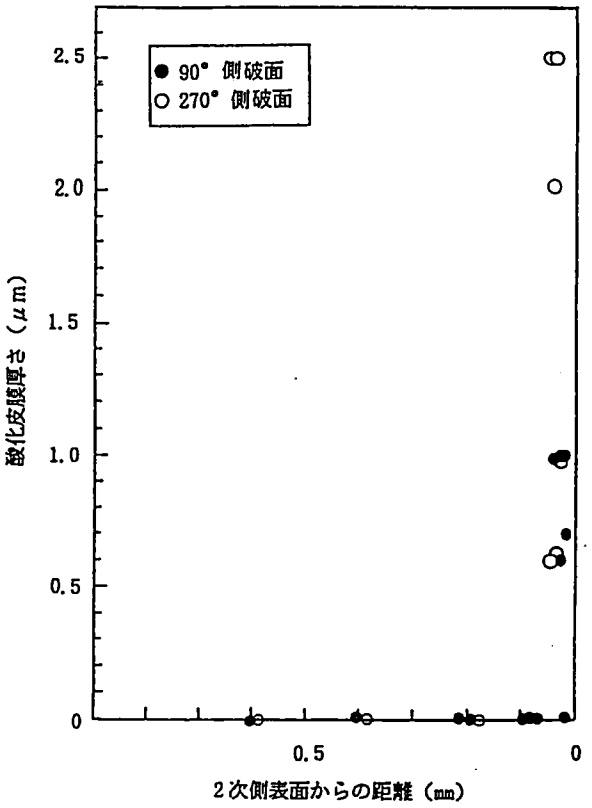
破断管破面の断面ミクロ観察の結果、起点部の立体モザイク模様の破面の外表面に近い領域に、最大厚さ2.5μmの酸化皮膜層が認められた。

この皮膜層の厚さを形成するのに必要な時間を文献調査結果から評価すると、起点部の立体モザイク模様の破面は、少なくとも１年以上前に形成されていたものと推定される。

参考文献

(1) （財）電力中央研究所，溶接部等熱影響部信頼性実証試験，除染部信頼性実証試験，平成２年度報告書（1991）

(2) D. VAN ROOYEN, ET AL, "CORROSION BEHAVIOR OF NICKEL-CHROMIUM-IRON ALLOY 600 IN BORATED PRESSURIZED WATER REACTOR ENVIRONMENTS" CORROSION-NACE Vol.25. P194 (1969)



図－1　酸化皮膜厚さ

資料－4.3.2.4

フレッチング疲労き裂発生寿命試験結果

1. 目的

インコネル６００伝熱管のフレッチング疲労き裂の発生時期を把握するため、フレッチング疲労き裂発生寿命試験を行う。

2. 供試材料

試験片にはインコネル６００伝熱管を用いる。伝熱管寸法は実機と同じく外径 22.23㎜ 板厚1.27㎜である。表－１に化学成分および引張特性を示す。管支持板材には、炭素鋼（ＳＢ４２）を用いる。

3. 試験方法

3.1 試験要領

フレッチング疲労試験の概念図を図－１に示す。

試験片を管支持治具により所定の平均面圧で支持し、試験片端部に繰返し曲げ荷重をかけることによって管支持治具端部の試験片外表面に相対すべりを繰り返し発生させる。

所定の繰返し数毎に、試験片の管支持治具との接触部について、フレッチング疲労き裂の発生有無を調査する。

3.2 試験条件

試験条件は次のとおりとする。

温　　度　：　室　温
雰 囲 気　：　大気中
繰返し速度　：　30～100Hz
平均面圧　：　2.5、４kg／㎟
応力振幅　：　４～15kg／㎟、両振り

4. 試験結果

4.1 き裂発生寿命

管支持治具で試験片に付与した平均面圧４kg／㎟ 及び2.５kg／㎟ でのフレッチング疲労き裂発生寿命試験結果は、以下のとおりであった。

10^8 回までの繰返しに対し、応力振幅7kg／mm² 以上の応力でフレッチング疲労き裂が発生した。破断までの繰返し数の3％程度で0.02mm程度の微小き裂が発生し始めていた。（図－2、3）

4.2　き裂の成長

フレッチング疲労き裂深さと、破断までの繰返し数N_fに対する試験片に与えた繰返し数nとの比$n／N_f$の関係を図－4に示した。

ここで用いた破断までの繰返し数はフレッチング疲労強度試験で求めた破断までの繰返し数の中央値である。

図－4によると、発生した微小なき裂（板厚方向への深さ0.02mm程度）は初期の頃は極めて遅く伝播し、破断までの時間のほとんどを 0.2mm程度までの微小なき裂の状態で費やしている傾向が認められた。

4.3　フレッチング損傷部の状況

管支持治具との間に相対すべりが繰り返された試験片の外表面には、フレッチングによるこすれ跡が認められた。

4.4　断面ミクロ観察結果

主き裂は管軸方向に対して傾いており、繰返し数比$n／N_f$が大きくなるに従って、き裂寸法はやや深くなり、かつ、微小なき裂の数が増加する傾向が認められた。

4.5　接触表面の拡大観察

試験片の外表面を走査型電子顕微鏡を用いて観察した結果、相対すべりの痕跡である管軸方向のこすれ跡が認められた。フレッチング疲労き裂は、このこすれ跡の中にこすれ跡に直交する方向（周方向）に発生していた。繰返し数が増すと、主たるき裂と平行し、微小間隔で多数の微小き裂が生じる傾向が認められた。

5.　まとめ

(1)　フレッチング疲労き裂発生寿命試験において、破断までの繰返し数の3％程度で深さ0.02mm程度のき裂が発生し始めていた。

(2)　フレッチング疲労き裂は外表面のこすれ跡の中に発生し、管軸方向に対して傾いていた。

(3)　発生した微小なき裂（板厚方向への深さ0.02mm程度）は初期の頃は極めて遅く伝播し、破断までの時間のほとんどを 0.2mm程度までの微小なき裂の状態で費やしていると推定される。

表－1　材　料　性　状

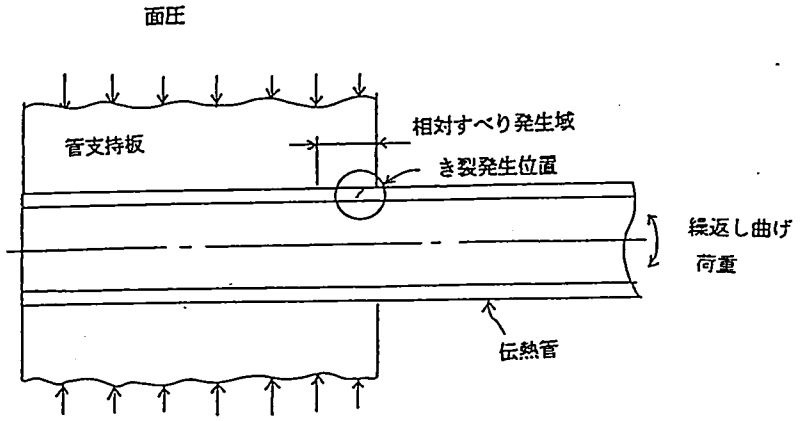
(1)　化学成分

（単位：重量%）

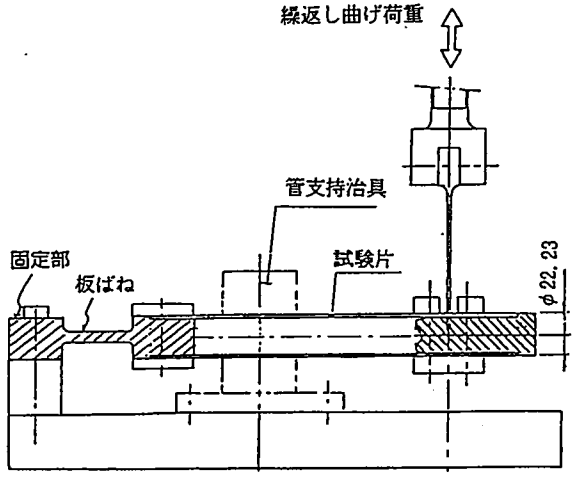
	C	Si	Mn	S	Ni	Cr	Fe	Cu
試験片	0.026	0.26	0.30	0.001	74.70	15.80	8.40	0.01
規格値	≦0.15	≦0.5	≦1.0	≦0.015	≧72.00	14.0 ～17.0	6.0 ～10.0	≦0.5

(2)　引張特性

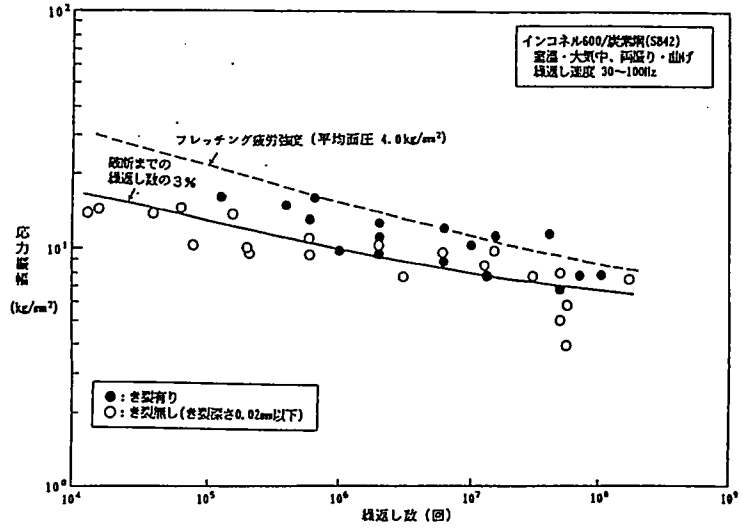
	0.2%耐力 (kg／mm²)	引張強さ (kg／mm²)	伸　び (%)
試験片	34.7	69.0	45
規格値	≧24.6	≧56.2	≧30



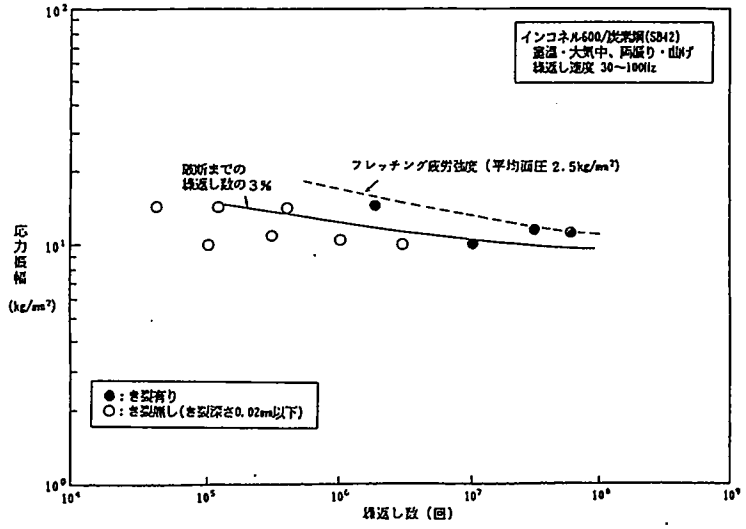
フレッチング疲労試験概念図



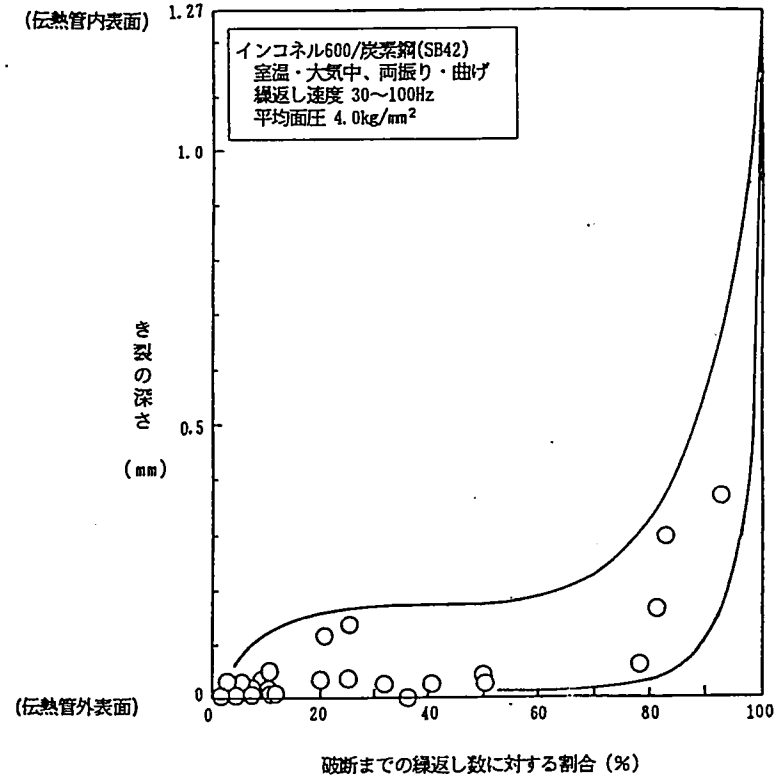
図－1　フレッチング疲労試験全体構成図



図－2　フレッチング疲労き裂発生寿命試験結果（平均面圧 4.0kg/mm²）



図－3　フレッチング疲労き裂発生寿命試験結果（平均面圧 2.5kg/mm²）



図－4　フレッチング疲労のき裂の深さ方向伝播

資料－4.3.2.5

定検時に潜在していたき裂寸法の推定結果

1. 目的

破断管において前回定期検査時に潜在していたき裂の寸法を推定する。

2. 解析方法

2.1 インコネル６００材の疲労き裂伝播特性

き裂伝播評価のベースとなるインコネル６００の高温における疲労き裂伝播特性は試験により求めた次の式を用いる。

$da/dN = 1.05\times10^{-10}\ \Delta K^{2.88}$ （$\Delta K \geqq 16.8 kg/mm^{\frac{3}{2}}$）

$da/dN = 4.98\times10^{-65}\ \Delta K^{47.3}$ （$\Delta K < 16.8 kg/mm^{\frac{3}{2}}$）

da/dN ： き裂伝播速度（mm／サイクル）

ΔK ： 応力拡大係数範囲

2.2 き裂伝播解析

疲労き裂伝播特性を$da/dN = B\Delta K^{m}$とするとき、前回定期検査時（t時間前）のき裂寸法aは、

$$a = a_f - \int_0^{N_1} B\cdot\Delta K^{m}\, dN$$

で計算される。

ここで、

a_f ：貫通時き裂深さ

N_1 ：前回定期検査からき裂が貫通するまでの繰返し数

$= f_0 \cdot t$

f_0 ：固有振動数

B、m：伝播速度に関する係数

ΔK ：応力拡大係数範囲

t ：前回定期検査からき裂が貫通するまでの運転時間（約5280時間）

ΔKの計算には、下図のような配管の周方向表面き裂に対する白鳥ら[1]の数値解を用いた式を用いる。

$$\Delta K = S_R \sqrt{\pi a / Q} \cdot f(a)$$

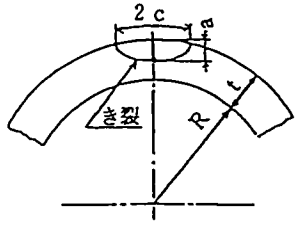
ここで、

Q　：$1 + 1.464\ (a/c)^{1.65}$

f(a)　：係　数

a、c：き裂深さ、長さ（外表面の半長）

S_R　：応力範囲



なお、a／cは実機貫通直前の破面形状に基づきa／c≒0.2とする。

a＝0.9㎜、2c＝9㎜

3. 解析結果

前回定期検査からき裂が貫通するまでの運転時間は約5280時間であることから、応力振幅 5.2kg／㎟ の変動応力が作用する場合、前回定期検査時には、深さ 0.4㎜程度のき裂が存在していたと推定される。

参考文献

(1) 白鳥，原田，小田，円筒壁方向表面き裂の応力拡大係数の解析，第5回破壊力学シンポジウム講演論文集，日本材料学会，平成元年9月

資料－4.3.2.6

周方向疲労き裂検出性確認試験結果

1. 目的

伝熱管外表面の周方向欠陥に対する渦電流探傷検査（以下「ＥＣＴ」という。）の検出性を確認する。

2. 試験方法

各種の長さと深さの周方向欠陥を有する伝熱管に模擬管支持板を組み合わせた上で、周方向欠陥検出手法（８×１プローブによるＥＣＴ）により欠陥を探傷し、その検出性を確認する。（図－１）

（注）　８×１渦電流探傷プローブについて

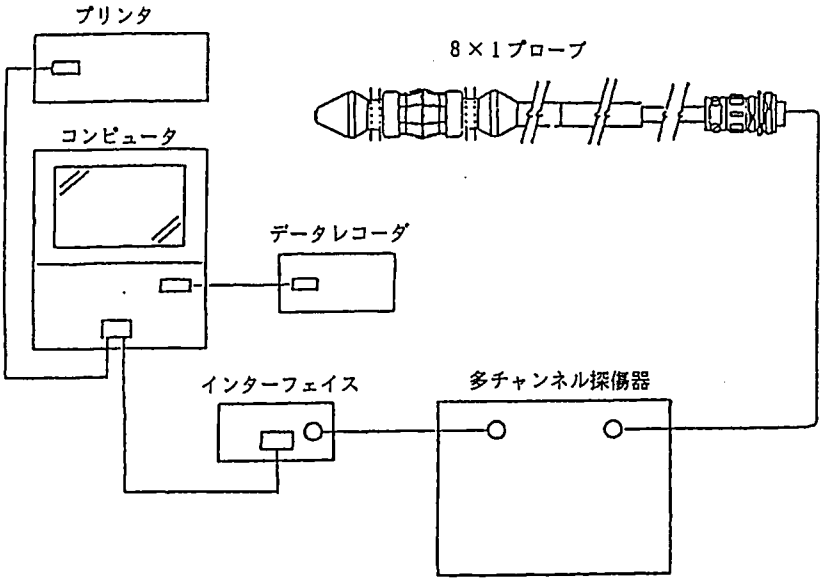
円形コイルを同一円周上に８個並べたもので、各々のコイルが個々に信号を検出できるような構造である。

3. 試験結果

伝熱管外表面の周方向の疲労き裂を対象として確認試験を行った結果、８×１プローブによる検出可能き裂は、長さ10㎜の疲労き裂であれば深さ約40％、長さ５㎜の疲労き裂であれば深さ約60％であることが確認された。

4. まとめ

８×１プローブによるＥＣＴで検出可能な周方向き裂は、き裂長さ10㎜以上の場合で深さ約40％（約 0.5㎜）、き裂長さ５㎜以上の場合で深さ約60％（約 0.8㎜）であることが確認された。



図－1　8×1プローブ探傷システムの構成

資料－4.3.2.7

き裂貫通から破断までの時間の検討結果

1. 目的

き裂が貫通した後、破断に至るまでの時間について検討する。

2. 検討要領

破面の解析結果から伝熱管に加わった応力振幅を求め、き裂の大きさとの関係から応力拡大係数を求める。

また、疲労き裂伝播試験により応力拡大係数範囲（ΔK）と疲労き裂伝播速度（da／dN）との関係を求め、き裂の伝播に要する時間を求める。

解析に用いた条件は以下のとおりである。

(1) 応力振幅

破面のストライエーション間隔及び粗さパラメータから求めた応力振幅は以下のとおりである。（図－１）

① ０度側の中央値　　σ_a ＝ 4.5 kg/mm²

② 90度付近の中央値　　σ_a ＝ 5.2 kg/mm²

③ 180度側の中央値　　σ_a ＝ 6.1 kg/mm²

表面き裂が貫通して、き裂先端が伝熱管内外表面に直角な周方向貫通き裂（以下「周方向き裂」という。）形状になり、Zahoorの式が適用できるまでは②の90度付近の応力振幅を用い、周方向き裂になってから伝播する場合には①及び③の応力振幅を用いる。

(2) 疲労き裂伝播速度

インコネル６００における疲労き裂伝播試験から求めた高温の疲労き裂伝播速度は下式に示すように２本の直線で近似され、これらの疲労き裂伝播速度を用いる。

$da/dN = 1.05\times10^{-10}\ \Delta K^{2.98}$ （$\Delta K \geqq 16.8 kg/mm^{3/2}$）

$da/dN = 4.98\times10^{-63}\ \Delta K^{17.3}$ （$\Delta K < 16.8 kg/mm^{3/2}$）

(3) 解析モデル

表面き裂が貫通してから周方向き裂形状になるまでの過程と、その後周方向にき裂が伝播して破断に至るまでの過程に分けて解析する。（図－２）

前者の解析には、三好らの平板の表面き裂が板厚を貫通した場合の応力拡大係数範囲を、後者の解析には、Zahoorの配管の周方向貫通き裂に対する応力拡大係数範囲を用いる。

3. 検討結果

(1) 表面き裂が周方向き裂になるまでの時間

伝熱管の外表面側から伝播し、内表面に達した直後のき裂がZahoorの式[1]が適用できる周方向き裂の形状になるまでの時間を求める。（図－2）

三好ら[2]は、表面き裂が板厚を貫通した時の応力拡大係数の補正係数を求めている。但し、三好らの解は平板のき裂を対象にしているので、伝熱管形状について三次元ＦＥＭ解析を行い、伝熱管形状と平板との形状の補正比を求めた。

これらの値を用いて、図－3のＡ点及びＢ点の応力拡大係数範囲を求め、き裂伝播速度から、Ｂ点が伝播し、Ａ点と同じ角度に達するまでの時間を計算した。その結果、34分程度と計算された。（図－3）

また、この時間に外表面のＡ点は 3.8度移動するため、周方向に伝播する周方向き裂の初期の大きさは31.5度となる。

(2) 周方向き裂の伝播の時間

周方向き裂の伝播解析には、以下に示す配管の周方向貫通き裂に対するZahoorの式を用いる。

$$\Delta K = S_R \cdot \sqrt{\pi c}\, f(C)$$

$$f(C) = 1 + A\left[4.5967\left(\frac{C}{\pi R}\right)^{1.5} + 2.6422\left(\frac{C}{\pi R}\right)^{4.24}\right]$$

$$A = \left[0.125\left(\frac{R}{t}\right) - 0.25\right]^{0.25}$$

ここでS_Rは応力振幅σ_aの2倍の値、Ｒは伝熱管の平均半径、ｔは伝熱管の厚さである。

破面解析から得られている0度側の応力振幅の中央値及び 180度側の応力振幅の中央値を用いると、それぞれの応力振幅の下での伝播時間は、

113分（σ_a＝4.5kg/mm²）

46分（σ_a＝6.1kg/mm²）

となる。（図－4）

前項の結果とあわせると、き裂が貫通してから破断に至るまでの時間は80～150分程度となる。

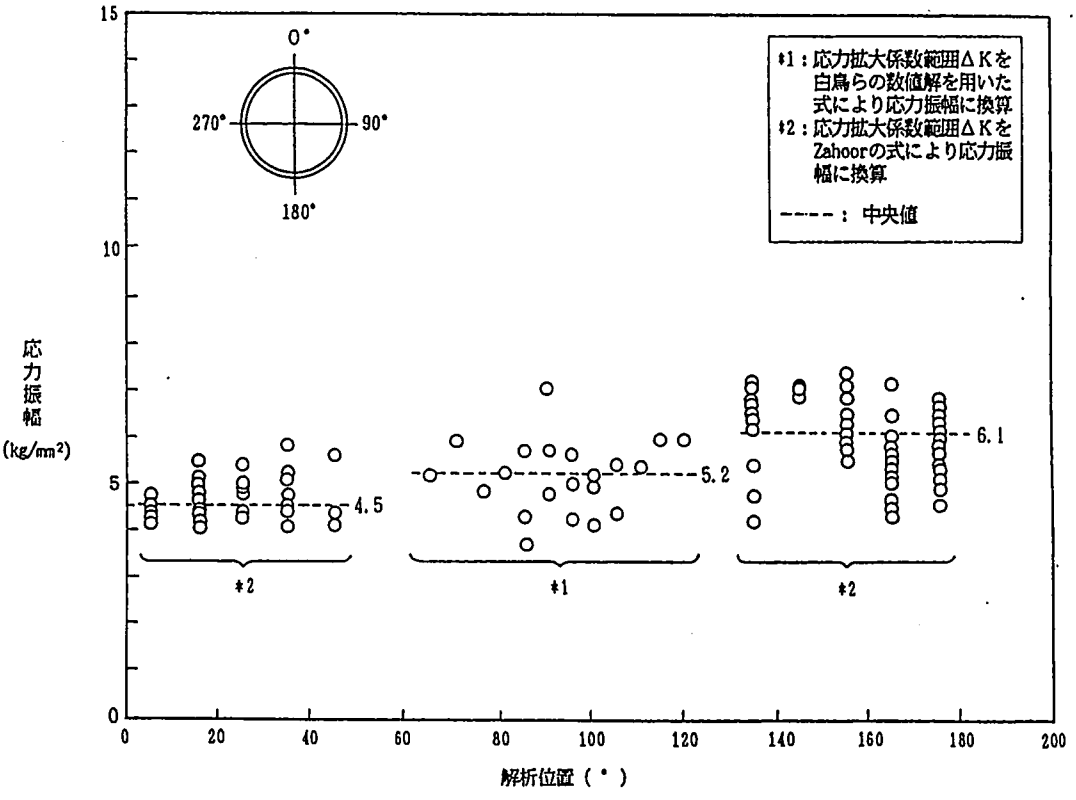
4. まとめ

き裂が貫通し、破断に至るまでの時間を求めた。その結果、80～150分程度と計算された。

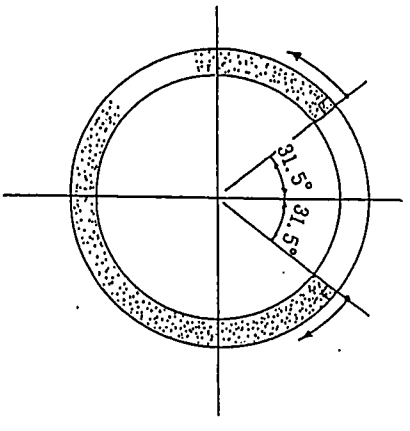
参考文献

(1) A. Zahoor　Ductile Fracture Handbook, NP-6301-D June 1989

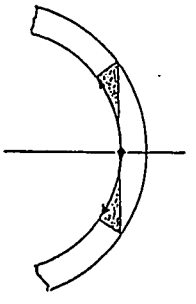
(2) 三好俊郎他，日本機械学会論文集（A 編）No.89-0580A　56巻 527号（1990-7）



図－1　破面解析による応力振幅推定結果

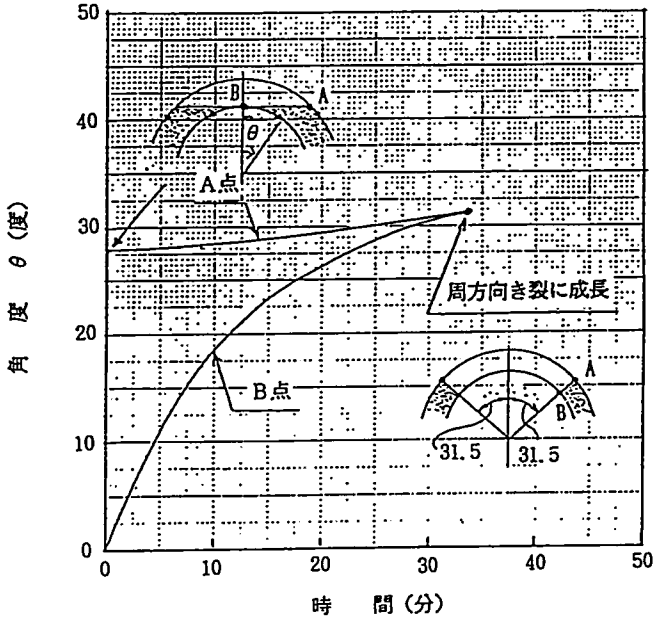


(2) 周方向き裂の伝播

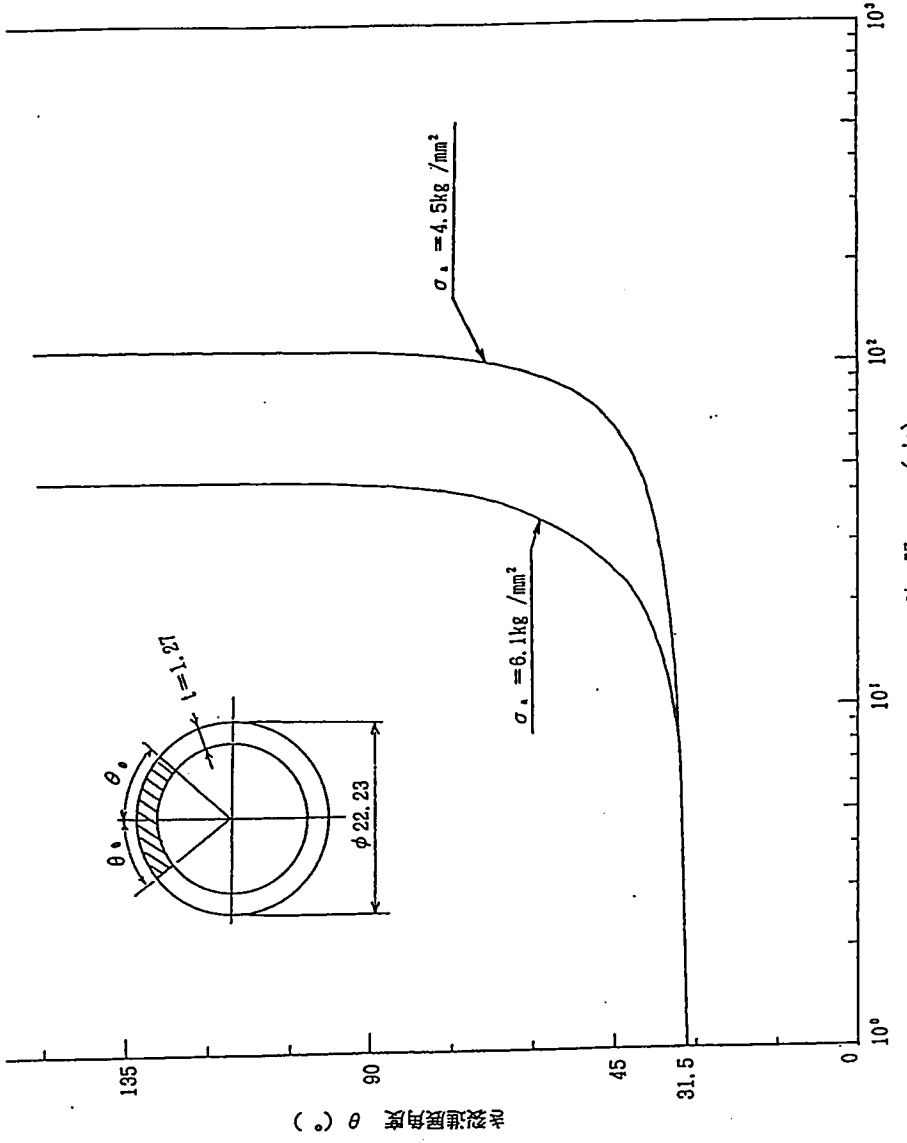


(1) 周方向き裂になるモデル

図－2 解析モデル



図－3　貫通点の成長挙動



図－4　き裂貫通から破断までの所要時間

資料－4.3.2.8

U 字 管 疲 労 破 断 試 験 結 果

1. 目的

破断管の最終破断部（ 310～ 350度付近）は主起点部の反対側である 270度に対し偏りを生じていたことから、U字管を用いた曲げ疲労試験を実施し、き裂の進展状況を確認する。

（図－1）

2. 供試材料

試験片にはインコネル６００伝熱管を用いる。伝熱管寸法は実機と同じく外径 22.23㎜、板厚1.27㎜である。

3. 試験方法

3.1 試験要領

U字管試験片は、破断管Ｘ４５－Ｙ１４の第６管支持板部より上の部分を模擬する。

伝熱管の管支持板直上位置に放電加工で初期き裂を付与する。U字管に面外荷重を繰り返し加える。ひずみゲージで荷重を、クラックゲージでき裂長さを計測する。

3.2 試験条件

試験条件は次のとおりとする。

温　　度 ： 室 温
雰 囲 気 ： 大気中
制御方法 ： 変位制御
応 力 比 ： Ｒ＝－１（両振り）
繰返し速度 ： 10～15Hz

変動応力（kg／㎟）	負荷点高さ　L（㎜）
±１０ （一部±15、±20）	L_1 ＝５１６ L_2 ＝４１６ L_3 ＝３１６ L_4 ＝２１６

試験は、曲げとねじりとの比率を変える目的で負荷点の高さを４通り変える。

試験要領を図－２に示す。

4. 試験結果と考察

4.1 疲労き裂の伝播挙動

疲労き裂伝播状況を図－３に示す。き裂は初期には破面左右（起点を90度とする時０度側と 180度側）ほぼ均等に伝播するが、０度、180 度付近以降では不均一となる場合があり、実機と同様の傾向を示すものがあった。

4.2 破断部の形状

破断管の破断面は図－４に示すとおり、 180度側は管支持板より上部に約３㎜突出し、０度側は逆に管支持板内部へ入る傾向を示している。

また、U字管の疲労試験の結果でも 180度側が突出し、０度側が低くなっている。

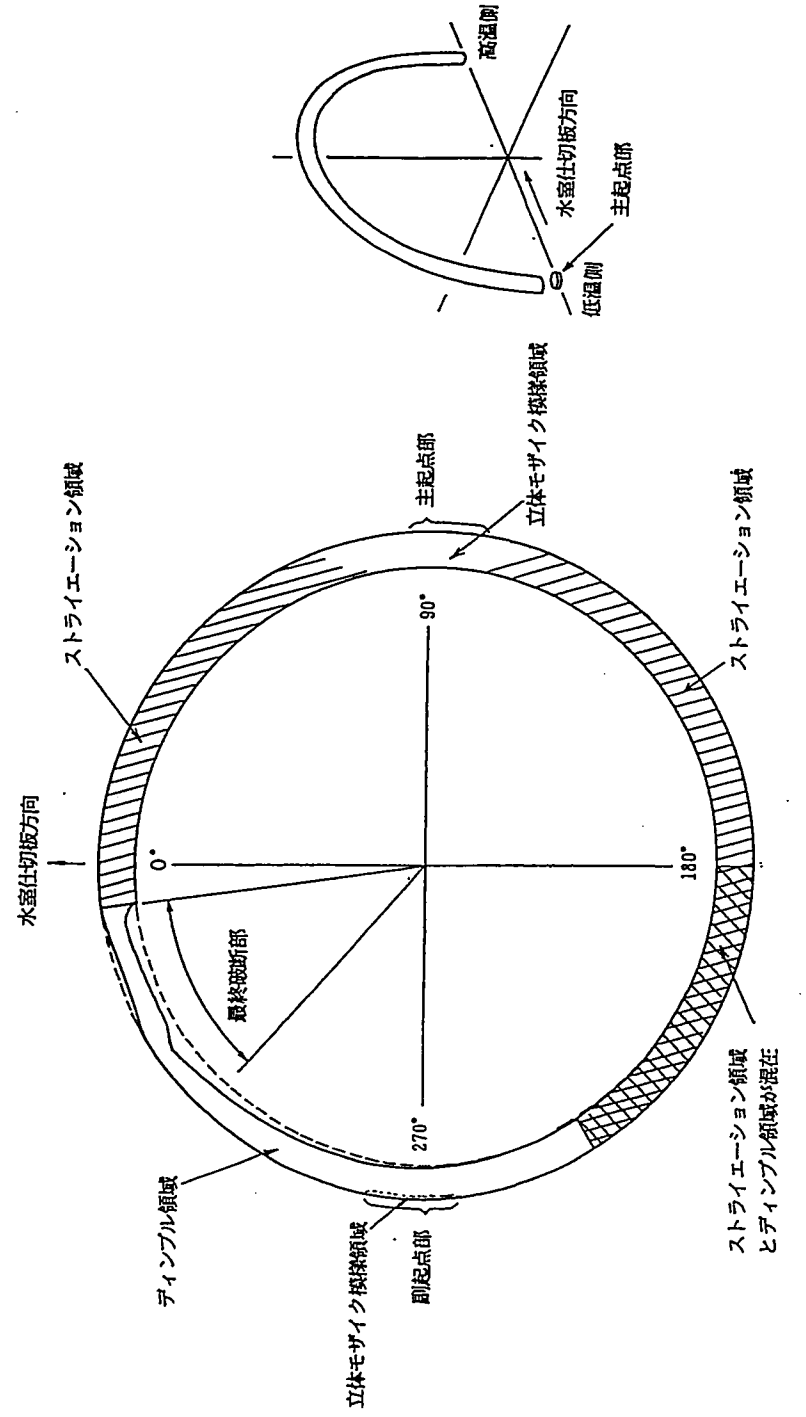
（図－５）

き裂は主応力に直角な方向に伝播するが、管支持板近くには曲げとねじりの応力が作用し、曲げとねじりが組合わさった時の主応力の方向は図－６に示すようになり、 180度側では管支持板から突出する方向に、０度側では逆に管支持板内部の入り込む方向に伝播する。

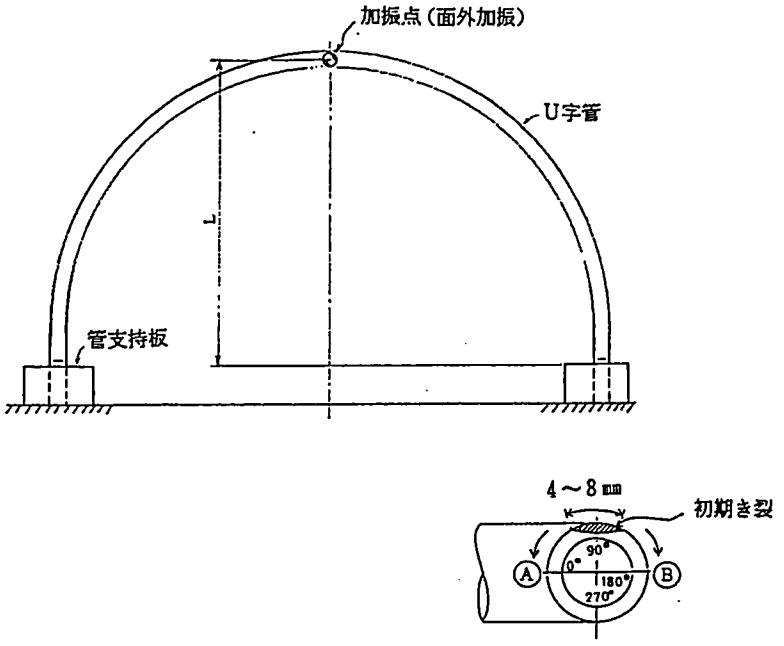
これらのことから、破断管の破断部の形状は、U字管の形状等に起因する管支持板部における応力分布によるものと推定される。

5. まとめ

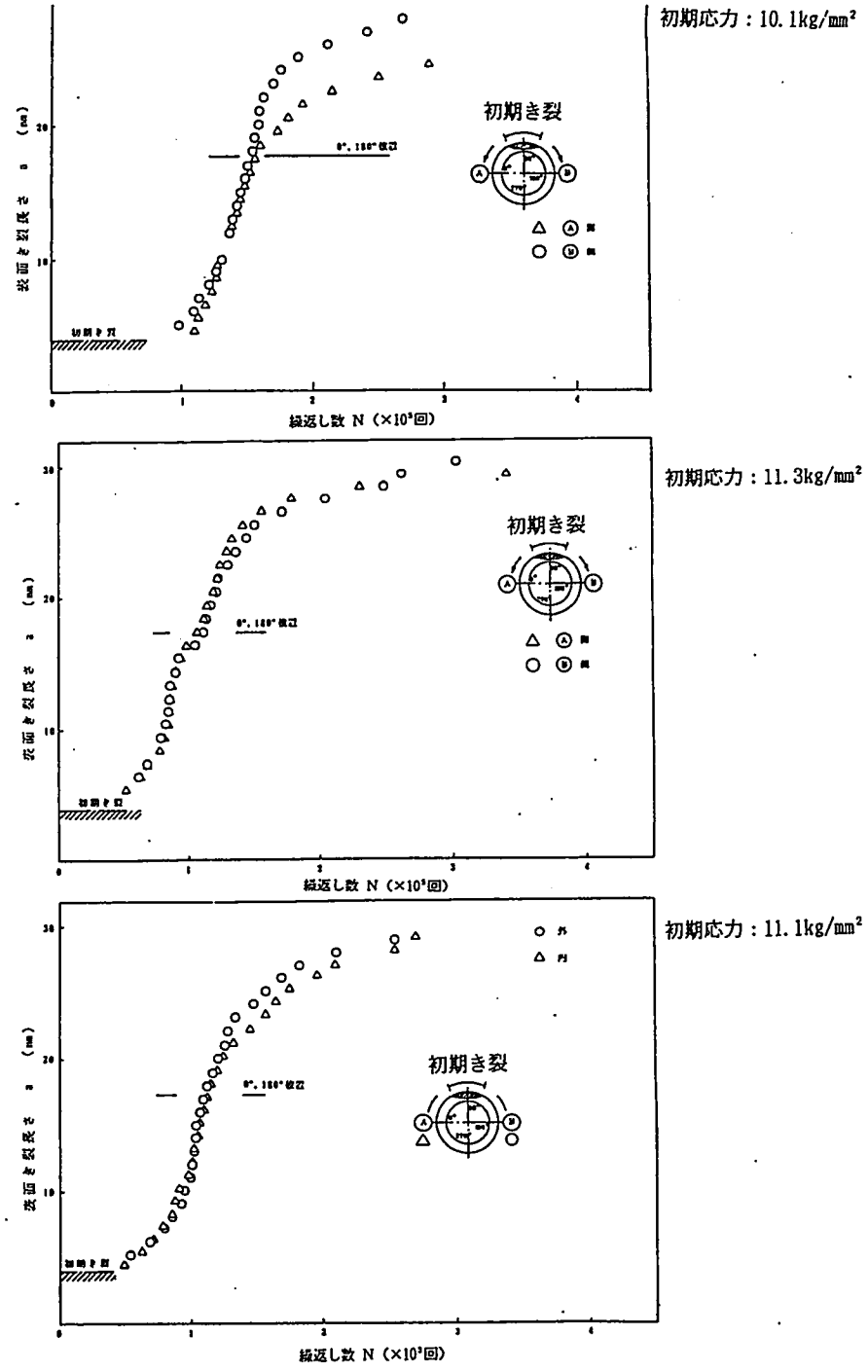
き裂が周方向に伝播する場合には、U字管の形状等に起因すると考えられるき裂伝播の非対称性により、90度付近において発生したき裂が、０度側と 180度側では異なった速度により伝播したことによるものと考えられる。



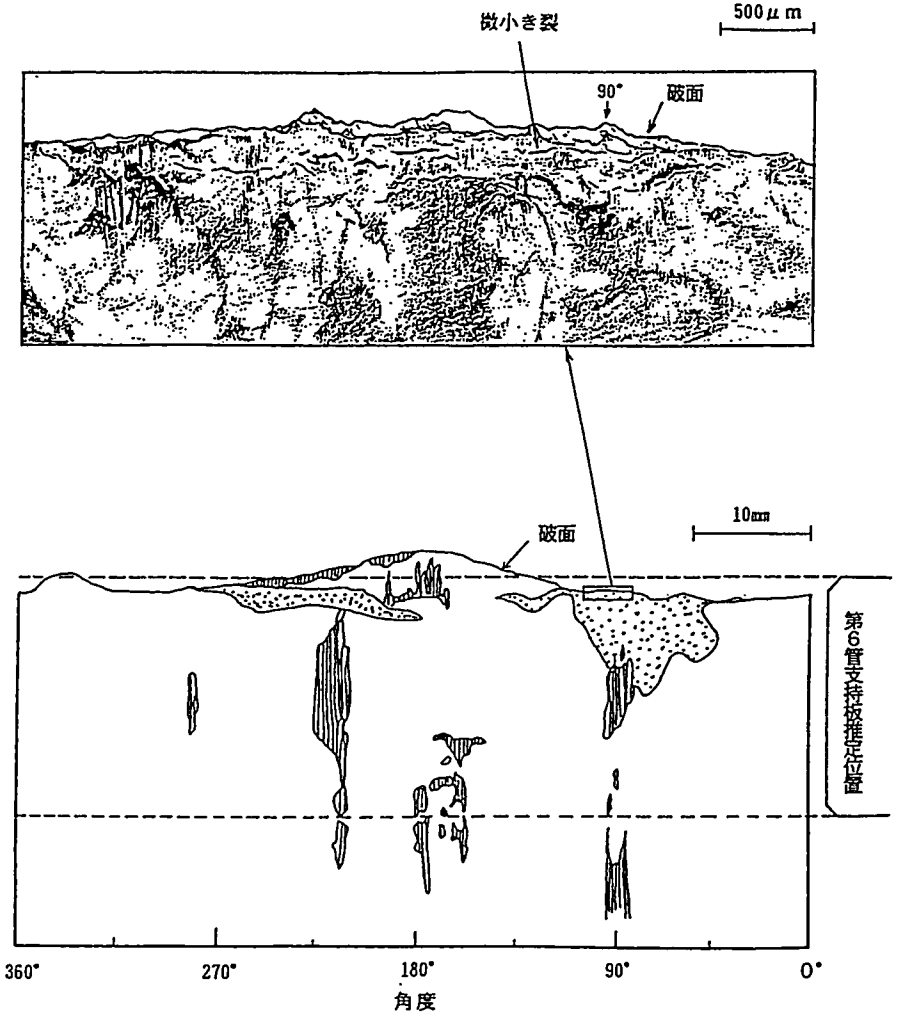
図－１　破面観察結果の概要



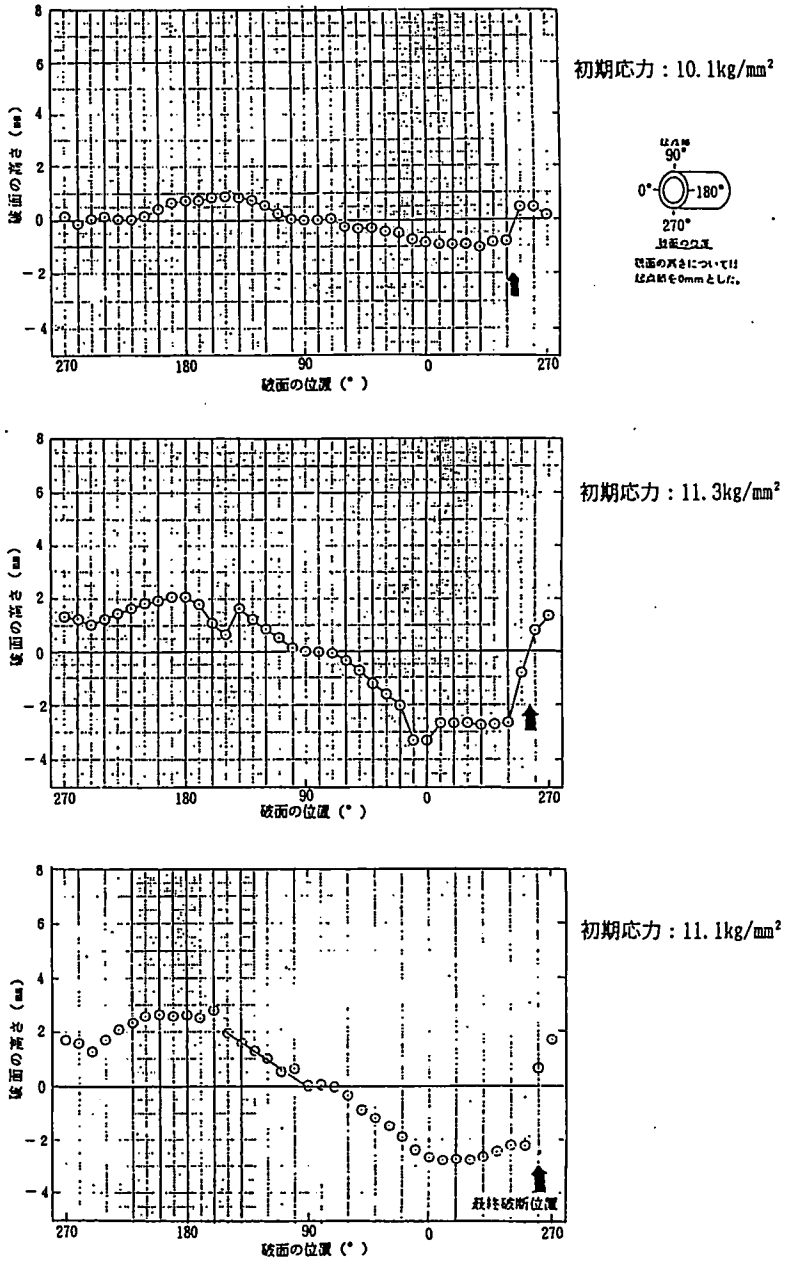
図－２　試験要領



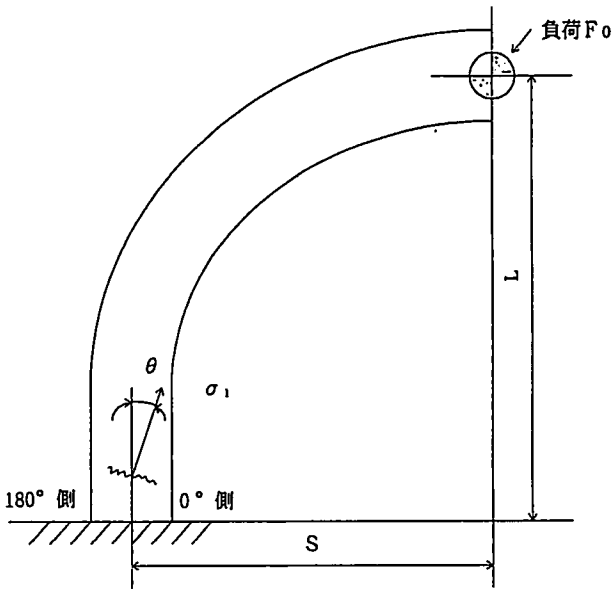
図－３　表面き裂長さの進展の状況

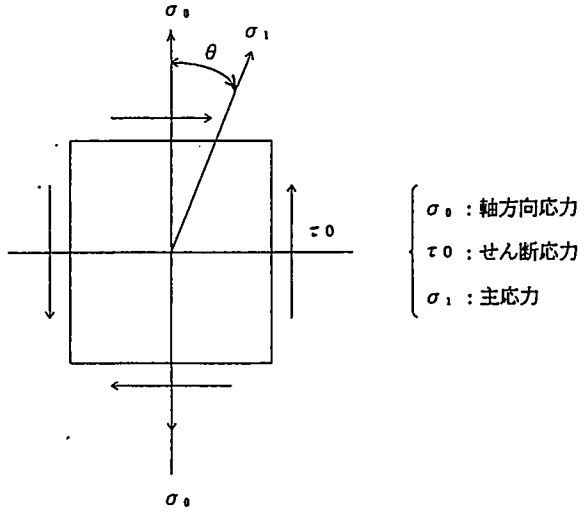


図－4　破断部の外表面観察結果（下側破面）



図－5　破面高さの計測結果例

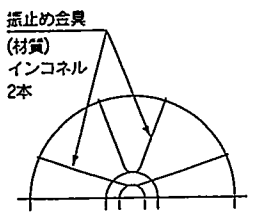
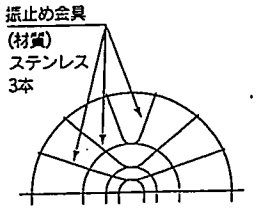
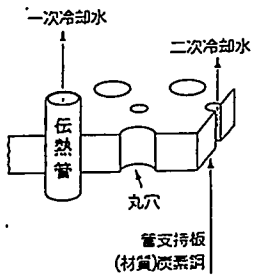
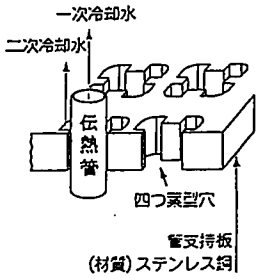


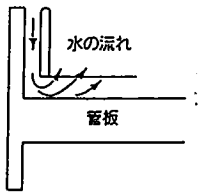
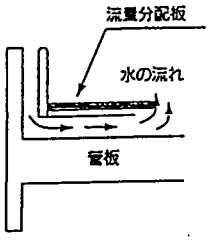
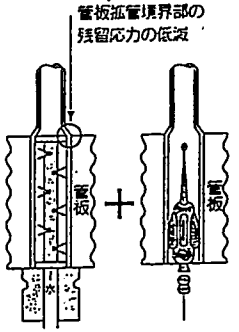


図－6　　主 応 力 方 向

資料　5

取替え新蒸気発生器の改良点について

主な改良点	従　来　型	新蒸気発生器
① 伝熱管材質の変更による ひび割れ、腐食に対する 耐久力を更に強化	インコネル６００合金	インコネル６９０合金
② 振止め金具の強化による 伝熱管の振動、摩耗の防止		
③ 管支持板の材質、形状変更による腐食、不純物堆積の防止		

主な改良点	従　来　型	新蒸気発生器
④ 流量分配板設置による管板上部の不純物堆積の抑制		
⑤ 管板部拡管方法改善による伝熱管残留応力の低減	 ローラーのみによる拡管法	 液圧とローラーを組み合わせた拡管法

資料－５．１．２

主蒸気隔離弁弁棒摺動部の保守管理の改善について

１．目的

弁棒表面手入れ後の表面粗度計測を行い、通常表面仕上げ（３．２Ｓ程度）であることを確認する。（定められた保修を行った場合、適切な表面粗度になることを確認する。）

２．改善内容

開放点検時は作業要領書に基づき実施しており、この作業要領書の改善を実施した。

［例　改善前の標準作業要領書］

作業要領（手順）

作業名：主蒸気隔離弁分解点検

No	作業手順	注意事項	機
4	手入れ （1）各部及び各部品の手入れを入念に実施する ①弁棒（グランドパッキン摺動部） ②弁箱、スタッフィングボックス内部 ③ガスケット接触部とその周囲 ④各部のボルト、ナット		治合せ 治合せ サンド エアモー エアホース
	（2）弁体、弁座の治合せは治合せ機械にて実施する。		ウエス PT器材
	（3）PT検査を実施する。 ①弁体シート面 ②弁座シート面 ③キー溝ボス部		刷毛 温度計 フェルプ
	（4）ボルト及びナットの手入れを実施し、その後、焼付き防止剤を塗布する。		
5	分解検査 （1）社内検査 ①点検、手入れは確実に実施されているか。 ②必要な計測は確実に実施されているか。		PT器 刷毛 ウエス 温度計 ノギス

［例　改善後の標準作業要領書］

弁棒を鏡面仕上げしないこと及び、表面粗度が通常表面仕上げ（３．２Ｓ程度）であることを確認する。の２項目を追加した。

作業要領（手順）

作業名：主蒸気隔離弁分解点検

No	作業手順	注意事項	機
4	手入れ （1）各部及び各部品の手入れを入念に実施する ①弁棒（グランドパッキン摺動部） ②弁箱、スタッフィングボックス内部 ③ガスケット接触部とその周囲 ④各部のボルト、ナット	・弁棒の手入れは、研削材等による鏡面仕上げを実施しないこと。	治合せ 治合せ サンド エアモー エアホース
	（2）弁体、弁座の治合せは治合せ機械にて実施する。		ウエス PT器材
	（3）PT検査を実施する。 ①弁体シート面 ②弁座シート面 ③キー溝ボス部		刷毛 温度計 フェルプ
	（4）ボルト及びナットの手入れを実施し、その後、焼付き防止剤を塗布する。		
5	分解検査 （1）社内検査 ①点検、手入れは確実に実施されているか。 ②必要な計測は確実に実施されているか。	・弁棒の表面粗度を計測し、通常表面仕上げ（3.2S程度）であることを確認する。	PT器 刷毛 ウエス 温度計 ノギス

資料－５．１．３

主蒸気隔離弁閉弁機能の改善について

１．目　的

主蒸気隔離弁の信頼性向上のため閉弁機能の向上を図る。

２．改善内容

a）グランドパッキンの種類、組合せ、段数を見直し、グランドパッキンの摺動抵抗の低減を図った。

b）バネ自由長さを長くすることにより閉弁力の増加を図った。

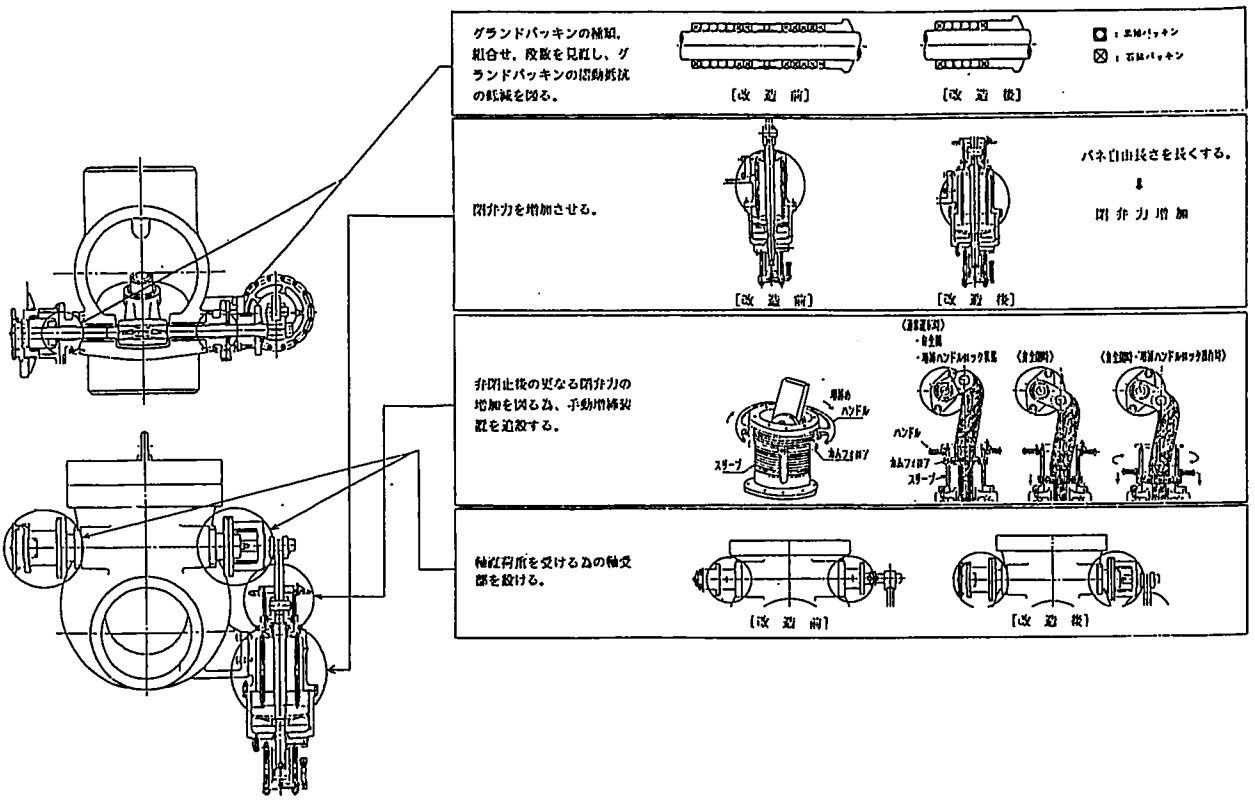
c）弁閉止後の更なる閉弁力の増加を図るため、手動増締装置を追設した。

d）軸直荷重を受けるため、軸受部を設けた。

[改善概略図]

別図参照

主蒸気隔離弁改善概略図



（別図）

資料－５．１．４

加圧器逃がし弁制御用空気系統の改善について

１．目　的

計器用空気系統を２系列にするとともに、制御用空気を供給している機器への分岐はすべて単独元弁方式とし、誤操作の防止・系統の信頼性向上を図る。

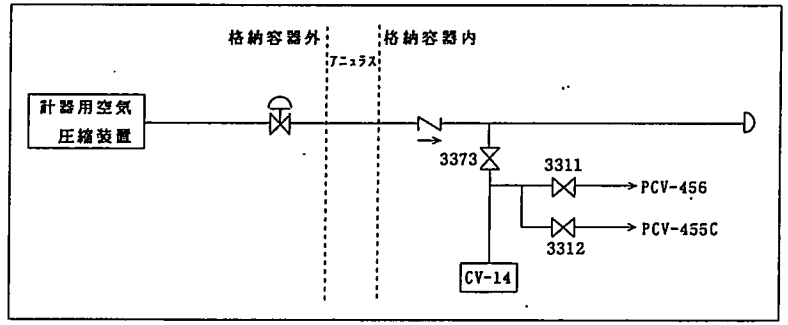
２．改善内容

(1) 計器用空気系統を２系列とした。

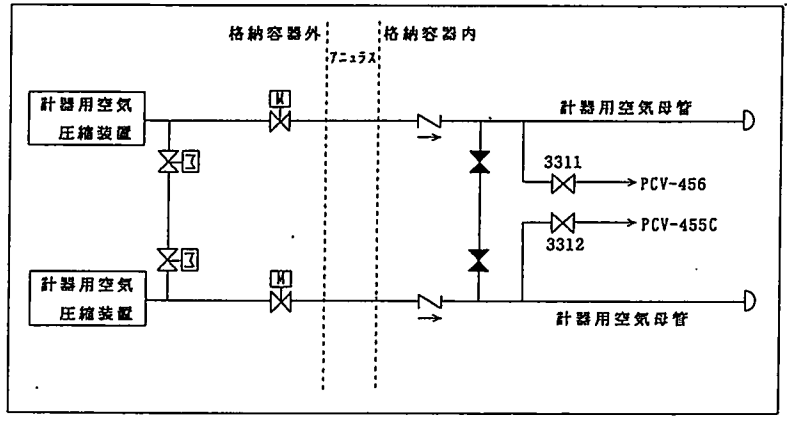
(2) ２台ある加圧器逃がし弁（ＰＣＶ－４５５Ｃ及びＰＣＶ－４５６）の作動用空気は、２重化された計器用空気母管から各々単独に分岐し、かつ、単独元弁（３３１１及び３３１２）を設置する。

［加圧器逃がし弁制御用空気系統概要］

［改造前］



［改造後］



安全機能を阻害する可能性のある制御用空気系統手動弁の配置見直しについて

1．目 的

安全機能を阻害する可能性のある制御用空気系統の手動弁の配置を見直し、不要弁を撤去する。

2．改善内容

(1) 撤去対象不要弁の撤去

単一誤操作により安全機能を阻害する可能性のある手動弁のうち、隔離等に必要でない弁を不要弁抽出の対象とした。

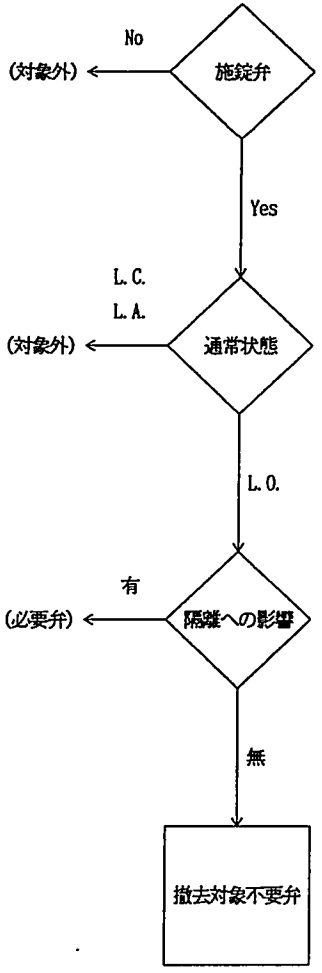
この単一誤操作により安全機能を阻害する可能性のある手動弁の考え方は、施錠管理対象弁選定の考え方に含まれることから施錠弁の中から、機器の隔離、又は制御用空気（弁、計器等）の供給先の隔離に必要でない弁を不要弁として撤去することとした。

(別紙参照)

(2) 不要弁として抽出された6台を撤去した。

以 上

<不要弁の抽出方法>



施錠管理対象弁の選定基準が安全上重要な弁を対象としており、不要弁の抽出基準と一致している。

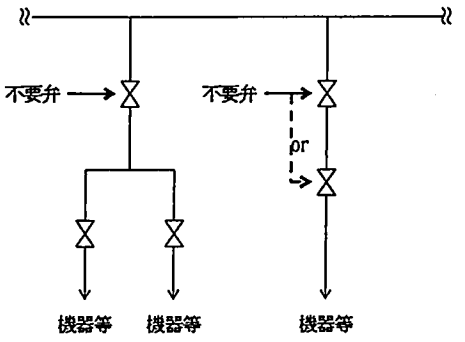
L.C.弁は閉止誤操作は起こり得ない。又、開放誤操作は供給先設備の機能喪失につながらないため対象外とした。
L.A.弁は流量調整機能を有するため、撤去対象外とした。

制御用空気の供給先（弁、計器等）の隔離又は制御用空気系統内の機器（配管は除く）の隔離に必要かどうかを評価。

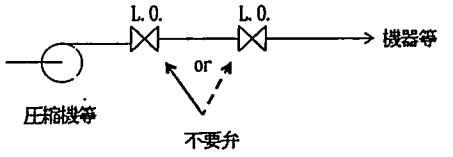
(凡例)
- L.C.・・・・・Locked Close　施錠 閉
- L.A.・・・・・Locked Adjust 施錠 調整開
- L.O.・・・・・Locked Open　施錠 開

<不要弁（例）>

①



②



手動弁の管理に係る改善について

１．目的

安全機能を阻害する可能性のある手動弁の誤操作を回避するため、手動弁の施錠管理のありかたについて見直しを行い管理を強化するとともに弁名称表示について見直しを行い明確化を図る。

２．改善内容

（１）施錠管理

誤操作した場合にプラントの安全運転に支障をきたす可能性のある手動弁、環境への影響が生じる可能性のある手動弁及びその他過去の経験等から施錠管理対象範囲を見直した。（別　紙）

（２）施錠対象弁の鍵管理

施錠対象弁の鍵管理については、社内標準に責任者を定め管理することを明記した。

（３）弁開閉状態の明示

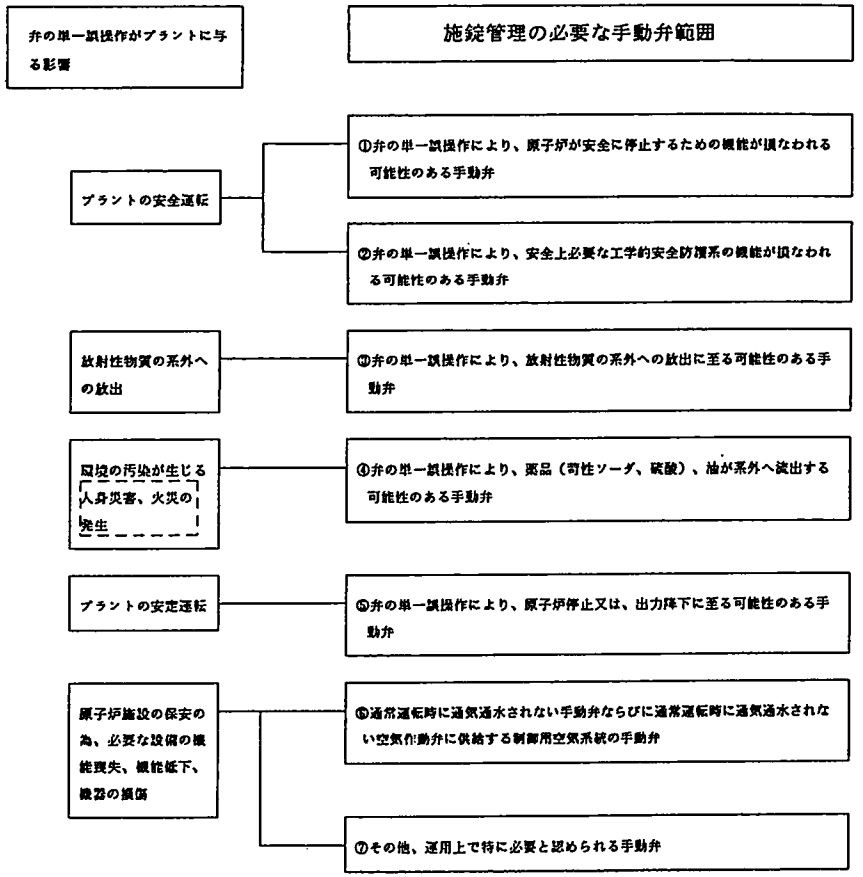
弁ハンドルについては、開閉状態毎に色別し、視覚による誤操作防止を図った。
また、系統図においても弁施錠状態及び開閉状態を明確にした。

（４）弁名称表示の明確化

弁銘板に記載されている弁名称に、点検時の誤認を招くような不適切な表現がないかどうかチェックを行い、不適切なものは取り替えた。

別　紙

対象弁選定範囲



なお、次に該当する手動弁については、施錠対象外とする。

- 高線量区域等、接近が極めて困難な所に設置されている手動弁
- 多重化されておりバックアップ可能となる計器・ラインの手動弁
- 施錠により入域できない区域内に設置された手動弁の内、運転監視により開閉状態が確認できる手動弁（原子炉格納容器内を含む）

また、次の措置をした場合は、施錠管理と同等の措置とみなし施錠対象外とする。

- ベント・ドレン弁以後の配管に閉止栓を施工した場合
  但し、格納容器隔離機能を維持する弁については除く。
- 弁ハンドルを取り外した場合
- 弁ハンドル回転防止スリーブを取り付けた場合

資料－５．１．７

プラント起動前点検に係る改善について

１．目的

プラント起動前における機器、弁等の点検に関する改善を行う。

２．改善内容

（１）　プラント起動前における機器、弁等の点検時に使用する点検チェックシートについて、以下の観点により点検範囲、点検基準を明確でわかりやすい記述とした。

ａ．点検すべき対象は明確であるか
ｂ．点検基準（どういう状態であることを点検するのか）明確であるか
ｃ．対象範囲外の点検内容が含まれていないか
ｄ．運転操作を必要とするものなのか、状態確認だけであるか
ｅ．機器の状態確認だけの点検に使用するチェックシートにはそれぞれに「機器の状態を変更しない」旨明記する。

（２）　手動弁の管理強化を図るため、安全機能を阻害する可能性のある手動弁について開閉状態の点検チェックシートを作成し、プラント起動前に役職者によるダブルチェックを実施することとした。

運転マニュアルの充実について

1．目的

加圧器逃がし弁不作動等安全上重要な機能を有する機器に異常が発生した場合の具体的な応用操作について、運転マニュアルに記載するとともに運転員が容易に判断できて操作がしやすいように運転マニュアルの表記方法を改善する。

2．改善内容

（1）蒸気発生器伝熱管漏洩事故時の応用操作の追加

a．加圧器逃がし弁不作動時の加圧器補助スプレによる1次冷却系の減圧操作を運転マニュアルに記載した。

b．主蒸気隔離弁を閉止した時は、現場で手動増し締めを実施するよう運転マニュアルに記載した。

（2）安全上重要な機能を有する機器に異常が生じた場合の対応操作の追加

安全上重要な機能を有する機器が故障した場合に、運転員が容易に判断し、適切に対応できるよう、具体的な操作手順を運転マニュアルに記載した。

（3）表記方法の改善

a．機器の操作時期、順序、条件等の表現を明確に記載した。

b．関連する運転マニュアル間のつながりを明確に記載した。

c．運転員が容易に判断できるよう操作内容を具体的に記載した。

d．運転マニュアルの適用範囲及び事故の発生から収束までが判る「フローチャート」を追加した。

蒸気発生器伝熱管の漏洩監視モニタリングシステムの改善

１．目的

今回の美浜２号機の事象に鑑み、現行のモニタリングシステムについて、更なる信頼性向上を図る。

２．改善対策

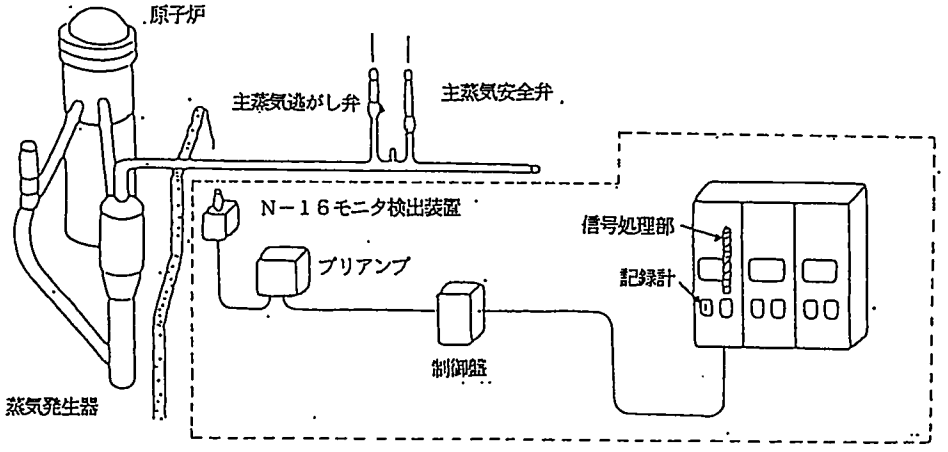
既設の復水器空気抽出器ガスモニタ及び蒸気発生器ブローダウン水モニタに加えて、新たに高感度型主蒸気管（Ｎ－１６）モニタを各主蒸気管に設置した。

（Ｎ－１６モニタの特徴）

(1) 測定核種の^{16}Nからでるガンマ線は高エネルギー（約６MeV）であり、他の放射性核種の影響がないエネルギー領域で測定ができるため検出感度が良い。
(2) 測定核種の^{16}Nは１次系内で高濃度で存在するため検出感度が良い。
(3) 主蒸気配管表面で測定できシステムとして単純。
(4) 各主蒸気配管に設置可能であるため、漏洩している蒸気発生器の特定が容易。

高感度主蒸気管モニタ（N-16）概要図

（検出器型式：シンチレーション検出器）



プラント計算機の改善対策について

1．目 的

事故後監視計（PAM）トレンドシステムに係わるプラントパラメータのコンピュータの計算能力の向上等及びアラームタイプライタ記録の記憶容量の見直しを図る。

2．改善内容

(1) PAMトレンド記録に係るソフトウェア見直し

※ 事後の評価に必要なパラメータ計算が確実に実施されるよう、プログラム処理方式を現行のシリアル処理からパラレル処理に変更。

（※ T_{HOT}MAX，T／CMAX，飽和温度，サブクール度）

(2) アラーム情報格納メモリー増強

アラーム情報を印字するまでの間、一時的に記憶するメモリー容量を異常事象発生時に想定される警報数を上回る容量とした。

(3) CRT（ECCS補機起動シーケンス）画面改善

画面リセットの確実化、補機の運転状態識別の明確化を実施。

原子炉水位計の概要について

1．概要

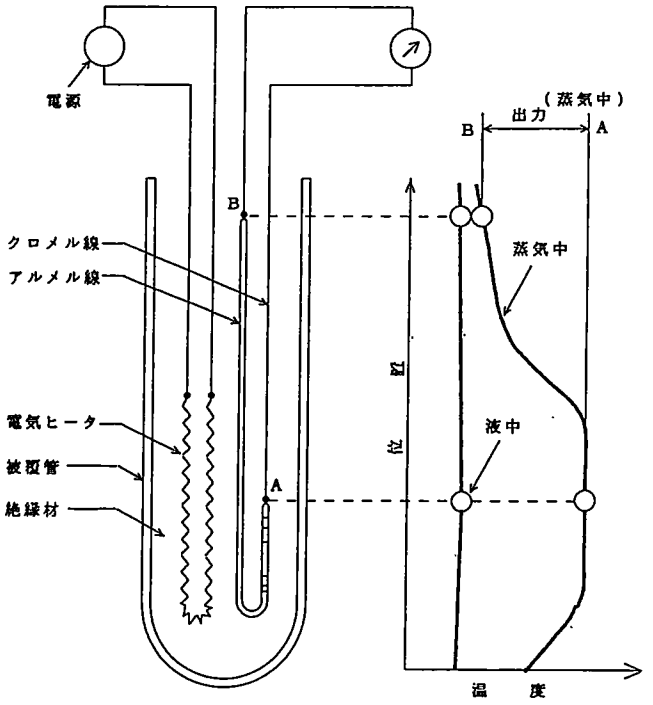
ＰＷＲプラントでは従来から１次冷却材の温度、圧力及び加圧器水位で炉心の冷却状態の監視を行うものとしてきており、更にＴＭＩ事故の教訓反映としてサブクール度計の設置、炉心出口温度計の測定レンジ拡大と事故時仕様への改善を行い、監視の多様化を図ってきている。

今回、美浜２号機蒸気発生器伝熱管損傷事故の教訓反映として、これまでのパラメータを補助し、更に監視の多様化を図るものとして温度計方式の原子炉水位計を設置した。

2．測定原理

２組の熱電対を接点間（図のＡ～Ｂ間）の温度差が出力となるように接続し１個の検出器としたもので、片方の接点（図のＡ）がヒータと接近した構造となっている。

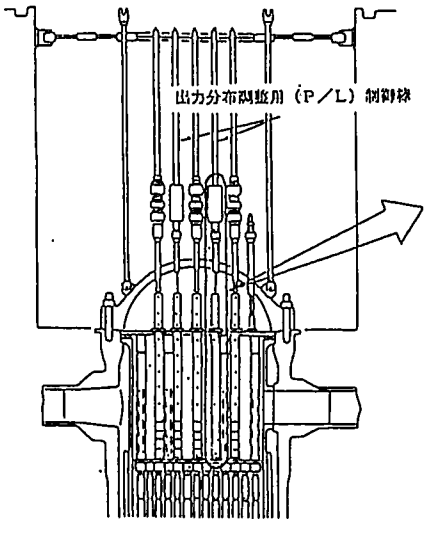
検出器が液中にあるときは周囲に熱を奪われ出力が小さくなり、逆に蒸気中にある時には出力が大きくなることを利用して、蒸気中か液中かを検出するものである。



3．設置場所

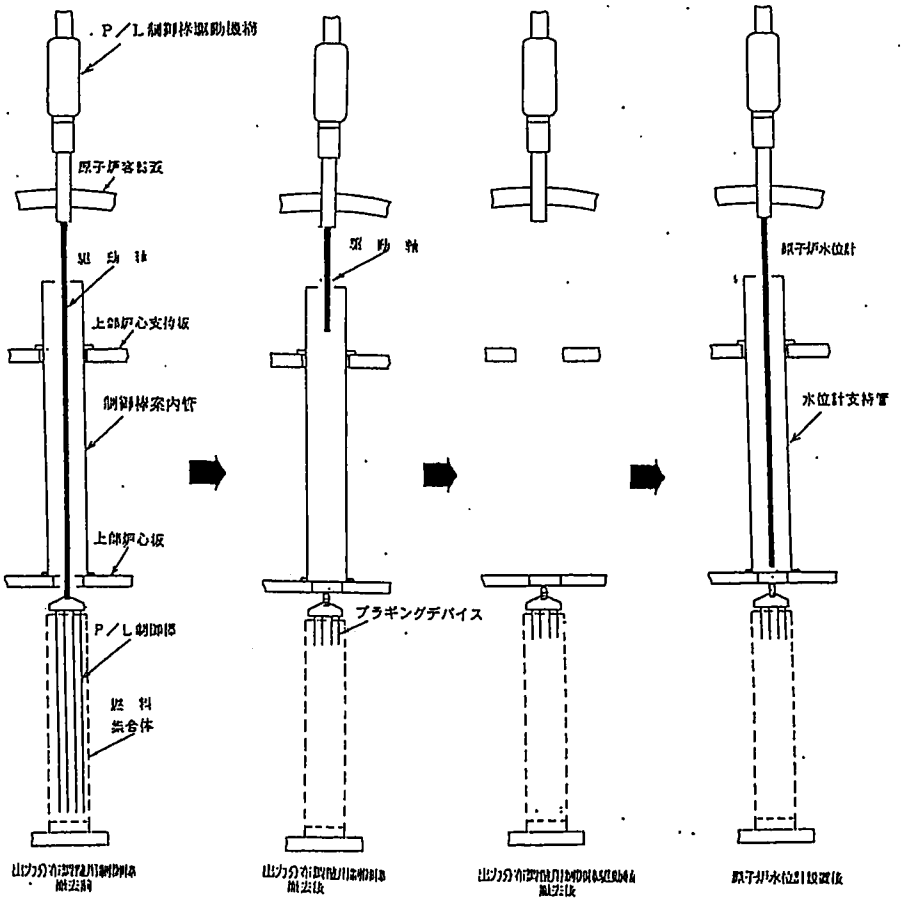
出力分布調整用制御棒撤去後の管台を使用し設置した。（別図参照）

炉心部出力分布測定用（P／L）制御棒



炉心部断面図

炉心部出力分布測定用（P／L）制御棒駆動機構 取付図



（別図）

主蒸気放射線計測装置（主蒸気管モニタ）の概要について

1．目的

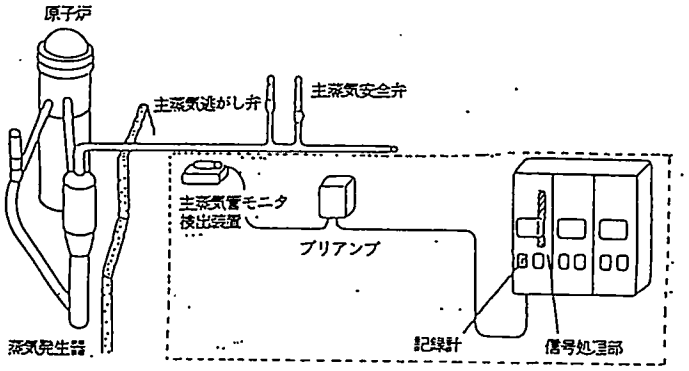
蒸気発生器伝熱管破断事故時に主蒸気管を経由して放出される放射能量を迅速かつ的確に把握する。

2．改善内容

蒸気発生器伝熱管破断事故時に主蒸気管を経由して放出される放射能量を迅速かつ的確に把握できるよう主蒸気ラインに主蒸気管モニタを設置した。

主蒸気管モニタ概要図

（検出器型式：電離箱検出器）



資料－５．１．１３

安全注入信号発信時の常用母線への給電方法の改善について

１．目的

蒸気発生器伝熱管破断事象をはじめとする安全注入信号発信時の常用母線運用に関し、外部電源が利用可能な場合には、事故収束手段の多様化を図る観点から、常用電源から給電される機器も用いることができるよう改善を図る。

２．改善内容

(1) 電源構成の変更

安全注入信号発信時の常用母線への給電方法として、起動変圧器から常用母線へ直接給電するライン構成とすると共に、常用機器の不具合が非常用母線へ波及させない回路に変更した。

(2) 常用機器の活用に伴う変更

安全注入信号発信後もタービンバイパス系、加圧器スプレイ系及び加圧器補助スプレイ系を活用するために、放射性物質の復水器への回収、充てんポンプの運転継続及び常用機器サポート系の確保（機器の冷却水の確保等）ができるよう変更した。

また、２次系の汚染を拡大する可能性のある常用機器は安全注入信号発信時に自動停止するよう変更し、事故収束操作時の運転操作の負担軽減を図った。

(3) 事象に影響を及ぼす常用機器の対策

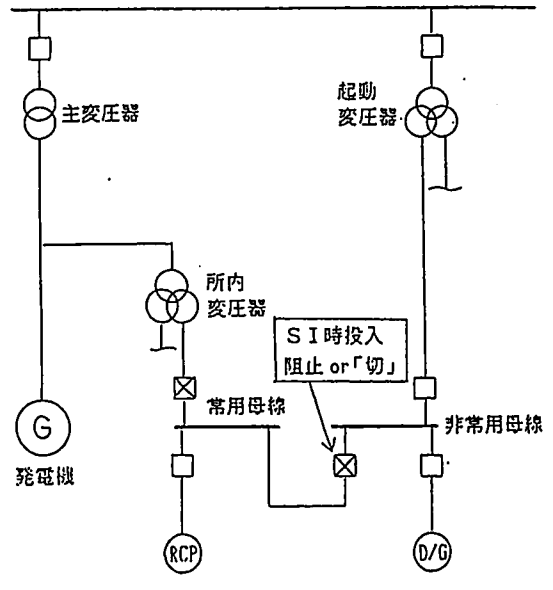
原子炉冷却材喪失（小破断）時の燃料被覆管最高温度（ＰＣＴ）上昇防止のため、安全注入信号発信時には一次冷却材ポンプ（ＲＣＰ）を従来どおり停止させるため、ＲＣＰ遮断器のロジック変更等を実施した。

また主蒸気管破断時及び２次冷却系の異常な減圧時において高濃度ほう酸水が希釈されることを防止するため、安全注入信号発信時に充てんラインを多重で隔離するよう変更した。

系統構成の見直し

現　状

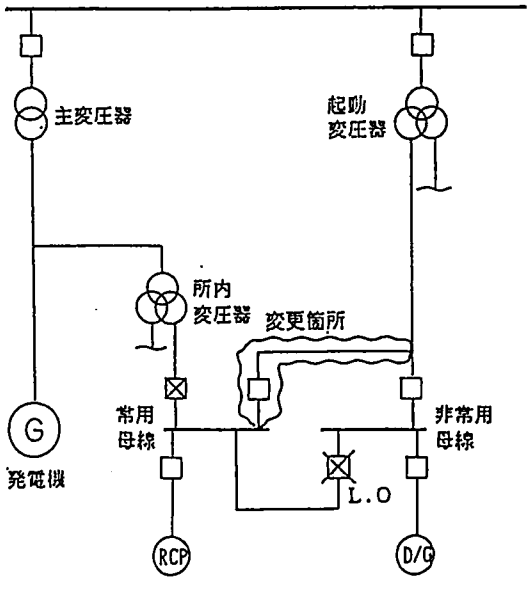
母線連絡方式



改　善　後

起動変圧器直接受電方式

現状方式では、常用機器の故障影響が非常用母線に波及する可能性があり、母線連絡方式を改め、起動変圧器直接受電方式とした。



L.O : Lock Open

資料－５．３．１

見学者の対応方法について

１．目的

発電所における異常な事象の発生時には、必要に応じ、見学の中止、見学者の誘導、見学者に対する事象の概要説明等、発電所見学者に対し迅速かつ的確な対応を行う必要があるため、以下の改善を実施している。

２．改善内容

発電所において異常事象が発生した際の、発電所見学者に対する対応方法については、要領を制定し、運用している。

（１）異常事象発生時の連絡体制

迅速な連絡を図るため連絡体制を確立している。

（２）見学の中止、見学者の誘導措置

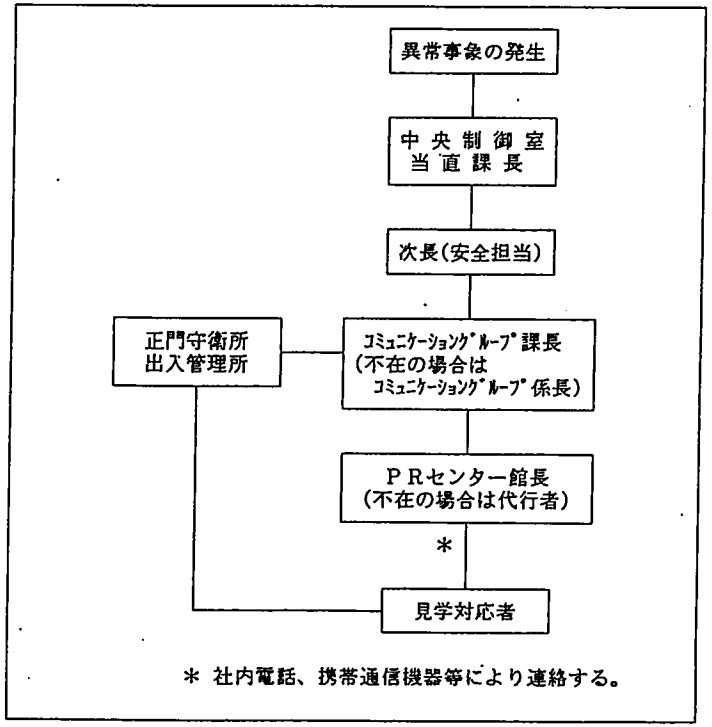
下記に示す事象が発生した場合は、直ちに見学を中止し、見学者をＰＲセンターに誘導する。

- 原子炉トリップ
- 安全注入動作
- 発電所火災
- 放射性物質の異常放出
- 地震等による建物の損壊等、上記に準じる事象

（３）見学者に対する説明

上記の事象に限らず、出力低下事象等、異常な事象が発生した場合は見学者に放射性物質の放出の有無等、状況説明を行う。

見学対応者への連絡体制



＊ 社内電話、携帯通信機器等により連絡する。

資料－５．３．２

異常な事象発生時の放出放射能量等評価システムについて

１．目的

異常な事象発生時に環境への放出放射能量等を迅速かつ正確に評価し得るようシステムの充実を図る。

２．放出放射能量等評価システム

(1) 異常な事象発生時の放出放射能量等評価システムの要件

異常な事象発生時の放出放射能量等評価システムとして、異常な事象発生直後から放出放射能量等評価までの各プロセス毎に以下の要件がある。

ａ．異常な事象発生直後～

異常な事象発生に伴う放出放射能の有無を排気筒モニタの指示値、プラントの状態等により確認及び周辺公衆への放射線影響をモニタリングポストの指示値により確認する。

ｂ．異常な事象終結後～約数時間以内

排気筒モニタ、モニタリングポストの指示値等から放出放射能量及び周辺公衆の受ける実効線量当量の概略的数値を確認する。

ｃ．異常な事象発生後～約２４時間以内

事象の経緯分析、放出経路の分析、放出核種の分析、放射線モニタの指示値等から放出放射能量及び周辺公衆の受ける実効線量当量を評価する。

ｄ．異常な事象の詳細判明後

事象の経緯、放出経路、放出核種の調査結果、放射線モニタの指示値、事象の解析結果等から放出放射能量及び周辺公衆の受ける実効線量当量を評価する。

(2) 放出放射能量等評価マニュアルの作成

a．蒸気発生器伝熱管損傷事象のマニュアルの作成

今回の事象における教訓事項を踏まえ、次に示すとおりマニュアルにすべき範囲を定め、上記（1）a～c項での評価を対象に蒸気発生器伝熱管損傷事象の放出放射能量等を算出するマニュアルを作成した。

①放射性物質の放出経路

異常な事象発生時のプラント状態、機器運転状態及びそれに基づく放出状態から、環境への放射性物質の放出経路を整理した。

②評価対象核種の選定

通常運転時、燃料リーク時等の１次冷却材中の放射性物質の量を把握し、評価に必要となる核種について放射線データを整理した。

③臨時測定制定

臨時測定の測定個所、内容及び方法を制定した。

④放出放射能量等の算出方法

プロセスモニタの指示値、サンプリング分析による濃度測定値等による放出放射能量等の算出方法を定めた。

b．他の異常な事象発生時のマニュアルの作成

蒸気発生器伝熱管損傷事象のマニュアルと同様な考え方で「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」の「事故」のうち、以下に示す環境への放射性物質の異常な放出を伴う事象を対象とした放出放射能量等評価マニュアルを作成した。

・放射性気体廃棄物処理施設の破損
・燃料集合体の落下
・原子炉冷却材喪失
・制御棒飛び出し

c．放射線モニタの増設

高感度型主蒸気管モニタ、主蒸気管モニタを設置し、放出放射能量評価の充実を図った。

(3) 異常な事象発生時の放出放射能量等評価のシステム化

異常な事象発生時の放出放射能量等評価マニュアルに従い、放出放射能量等を迅速かつ正確に計算するため、パソコンを使ってシステム化した。

資料　6

資料－6．1．1

長期停止に伴う機器の保全管理について

1．はじめに

美浜２号機は、平成３年２月９日に発生した蒸気発生器伝熱管損傷事象による原子炉自動停止により、平成３年４月１２日から第１４回定期検査を開始し、この定期検査で蒸気発生器を取り替え復旧することとした。

なお、蒸気発生器取り替え完了までの間、プラントは長期間停止となることから、機器の保全管理に万全を期すとともに各系統・機器の健全性確認を十分に行い、復旧した。

2．長期停止に伴う保全・管理の方針

（1）長期停止に伴う停止機器の保管にあたっては、各機器毎に劣化要因を考慮した保管を実施する。

また、長期停止期間が約３年半となることから、原則として通常定検の３回分の点検範囲について分解点検等を実施し異常のないことを確認する。

a．機器・配管類の保管

機器・配管類は、健全性を阻害する発錆、固着、変形等を防止するために、乾燥保管もしくは満水保管を行うとともに、必要に応じて定期的な作動・ターニング運転ならびに点検を行い健全性を確認する。

b．電気設備の保管

電気設備は、結露等による発錆、吸湿および塩分等の付着による絶縁劣化を抑制し、機器の健全性を維持するため、スペースヒータ通電、乾燥剤の挿入、乾燥ガスの封入もしくはビニールシート養生等による保管を行うとともに定期的な絶縁測定等により健全性を確認する。

c．計装品の保管

計装品のうち電子部品については、吸湿による性能低下を抑制し健全性を維持するため通電状態を維持する。また、計装配管については内面腐食防止対策として乾燥保管を行う。

d．燃料の保管

燃料については、燃料ピットでの長期的な保管を行うため、燃料棒酸化膜厚さ、外径測定および水中テレビによる外観検査を実施する。

（2）点検の内容および方法

長期停止期間中であっても使用状態あるいは待機状態にある機器については、それらを以下のとおり区分し点検を実施する。

a．使用状態にある機器

プラント停止中であっても使用状態にある廃棄物処理設備、換気空調設備等の機器については点検周期に基づき、３定検分の分解点検等を実施し、機器の健全性を確認する。

尚、起動前の平成６年には定期検査の受検等再度必要な点検を実施し、健全性を確認する。

b．待機状態にある機器

待機状態にある非常用ディーゼル発電機については、使用状態にある機器と同一の点検方法とする。

c．停止機器

停止機器は、満水または乾燥状態での保管であり、原則として点検周期に応じ、起動前の平成６年に３定検分の分解点検等を実施し、機器の健全性を確認する。

以上を図示すると以下のとおりとなる。

	H３年度	H４年度	H５年度	H６年度
１．全体点検工程	第1回点検 4 12	第１４回定検 第2回点検 8	3 1	第3回点検 10
２．運転状態による点検機器の考え方				
a．運転機器	点検	点検 (運転)	(運転)	点検
b．待機機器	点検	(待機)		点検
c．停止機器	分解および保管実施	(停止)		点検
起動試験等	長期停止期間中においても安全上重要な機器の定期試験を確実に行い、異常のないことを確認している。			

３．保全管理の結果

（１）保管・管理の結果

a．機器・配管類の保管結果

(a) １次系設備については、系統復旧段階で系統への水張り・水抜き操作を実施し、水質を確認するとともに原子炉容器を含む系統の洗浄を行い、水質に問題のないことを確認した。

原子炉容器については、機器の点検中以外は原則として原子炉容器ノズルセンターまで水張りし、循環・浄化を行っており、燃料装荷前に炉内構造物を吊り上げ内部点検を行い、異常のないことを確認した。

(b) ２次系設備については、乾燥保管を基本として実施し、実施に当たっては各系統に試験片を置き、乾燥状態の監視を行った。乾燥保管終了後、熱交換器を中心に器内調査を実施したが特に異常はなかった。

また、各ポンプについては、ローター等内部品を取り外し、別途、乾燥保管を実施した結果、異常はなかった。

b．電気設備の保管結果

電気設備については、保管中は絶縁抵抗測定等により健全性を確認するとともに、起動前の各種機能検査等で異常のないことを確認した。

c．計装品の保管結果

計装品については、原則として通電状態での保管であり、保管中、特に異常は認められなかった。

なお、主要制御盤は再発防止対策他の工事でリプレースしたものが多く、リプレースに当たっては、配線チェック、機能確認等により健全性を確認した。

また、計装配管については、起動前の計装品チェック段階で異物混入のないことを確認した。

d．燃料の保管結果

(a) 燃料酸化膜厚さ、外径測定結果については過去のデータと同等であり、異常は認められなかった。

(b) 外観については、水中カメラ、小型水中カラーテレビにより確認した結果、異常は認められなかった。

（2）点検結果

機器の点検は、機器の点検周期に応じた3定検分（第14、15、16回）の点検を3回（第1回点検：平成3年度、第2回点検：平成4年度、第3回点検：平成6年度）に分けて実施した結果、各設備について異常は認められなかった。

なお、起動前の第3回点検では系統、機器の分解または簡略点検と合わせ機能確認を行い、健全性を確認するとともに官庁検査を受検した。

また、蒸気発生器取替、再発防止対策及び信頼性向上対策工事による設備の健全性について、冷態機能試験、温態機能試験等を実施し、異常のないことを確認した。

以　上

資料－６．１．２

プラント起動にあたっての健全性確認について

１．はじめに

美浜２号機第１４回定期検査は、蒸気発生器取替完了までの間プラントが長期間停止となることから、機器の保全管理に万全を期すとともに各系統・機器の健全性確認を十分に行った。

再発防止対策工事及び蒸気発生器取替工事並びに定期検査工事については順調に進捗し、起動にあたっては通常の定期検査と同様なステップで実施したが、プラント起動後の安定安全運転に万全を期すため次の考え方に基づき点検・監視を行った。

（１）長期間停止後の起動であり、二次系統のスラッジの点検・除去及び各段階での現場パトロールによる各系統・設備の点検を十分に行う。

（２）蒸気発生器取替及び設備改善を実施した機器について、設計者を含めた総点検により性能評価等の健全性確認を十分に行う。

（３）プラントの起動にあたっては、慎重を期し、各出力段階でプラントの健全性を確認しながら出力上昇を行う。

（４）美浜２号機停止以降の起動時に発生したトラブル反映が確実に実施されていることの点検を行う。

２．起動に係る工程

起動工程については、上記の考え方を加味し、通常の定期検査に次の工程を追加した。

（１）温態機能試験の実施

蒸気発生器取替及び設備改善を実施した系統の健全性を確認するため、温態停止状態での試験を実施する期間として、一次冷却系統耐圧検査後に約２週間の期間を設定した。

なお、温態機能試験に先立ち冷態停止状態での機能試験は、一次冷却系統耐圧検査前に実施した。

（２）起動準備

温態機能試験でプラントは運転状態に近い状態となることから、現場パトロール等により、機器の健全性確認を行い、その後のプラント起動に備えるため、温態機能試験後に約２週間の起動準備期間を設けた。

（３）起動後点検停止

調整運転を行った後、二次系統のスラッジの点検・除去及び現場パトロール等による機器の健全性確認を行い、次期運転サイクルの安定安全運転を確保するため、約２週間の点検停止期間を設けた。

3．実施内容

（1）調整運転開始までの期間

a．温態機能試験（ＨＦＴ）期間

蒸気発生器取替及び設備改善を実施した系統の健全性を確認する試験項目に加え、一部の通常定期検査項目をＨＦＴ期間中に実施し、健全性を確認した。

また、現場パトロール等により、支持構造物の点検等を実施し問題のないことを確認した。

b．起動準備期間

温態機能試験後の設備状態を確認するため、蒸気発生器二次側点検を初めポンプ、弁、配管等の機器の点検を実施し問題のないことを確認した。

c．起動試験期間

通常定期検査と同様に必要な検査、試験等を実施し設備の健全性を確認した。

（2）調整運転期間

発電機並列後は通常定期検査と同様、２０%、３０%、５０%、７５%、１００%と出力を段階的に上昇しながら約２週間の調整運転を行った。

調整運転では、通常定期検査と同様の検査、試験を実施するとともに、蒸気発生器取替、設備改善機器の性能に係るパラメータの採取及び評価を行い、設備の健全性を確認した。

また、長期停止後の本格運転となることから、二次系設備を中心に各出力段階で、ポンプ、弁、配管等の機器の点検を行い問題のないことを確認した。

（3）起動後点検停止期間

長期停止の間は使用しなかった蒸気系統、運転により動作する弁、異物管理上設置した設備を中心に点検を実施し、問題のないことを確認した。

また、格納容器内等運転中には十分な巡視点検ができない機器について、現場パトロール等による点検を実施し問題のないことを確認した。

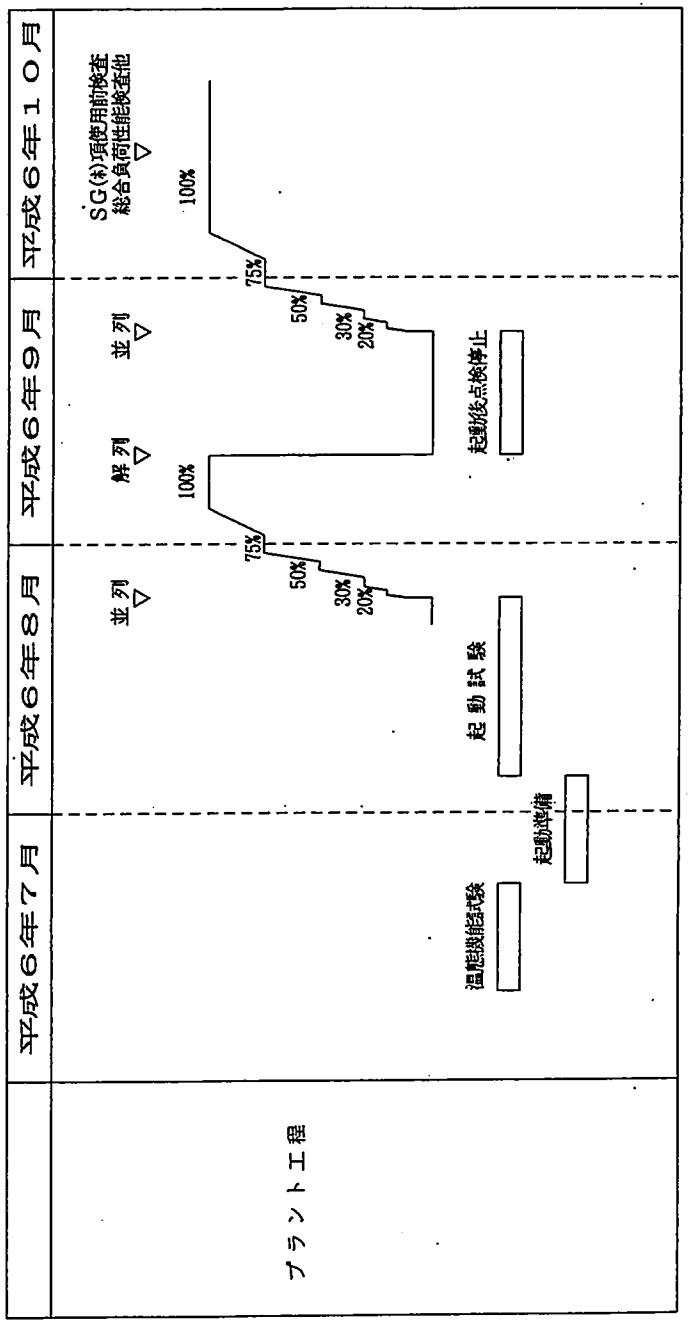
（4）最終確認（総合負荷性能検査）

起動後点検停止作業が終了後、プラントを通常の手順で１００%出力まで出力上昇を行い、１００%出力到達後プラントが安定した状態で、蒸気発生器取替及び設備改善等を実施した機器の健全性とプラントの全系統が正常であることを最終的に確認した。

以　上

添付－１：美浜２号機 起動工程

美浜２号機 起動工程

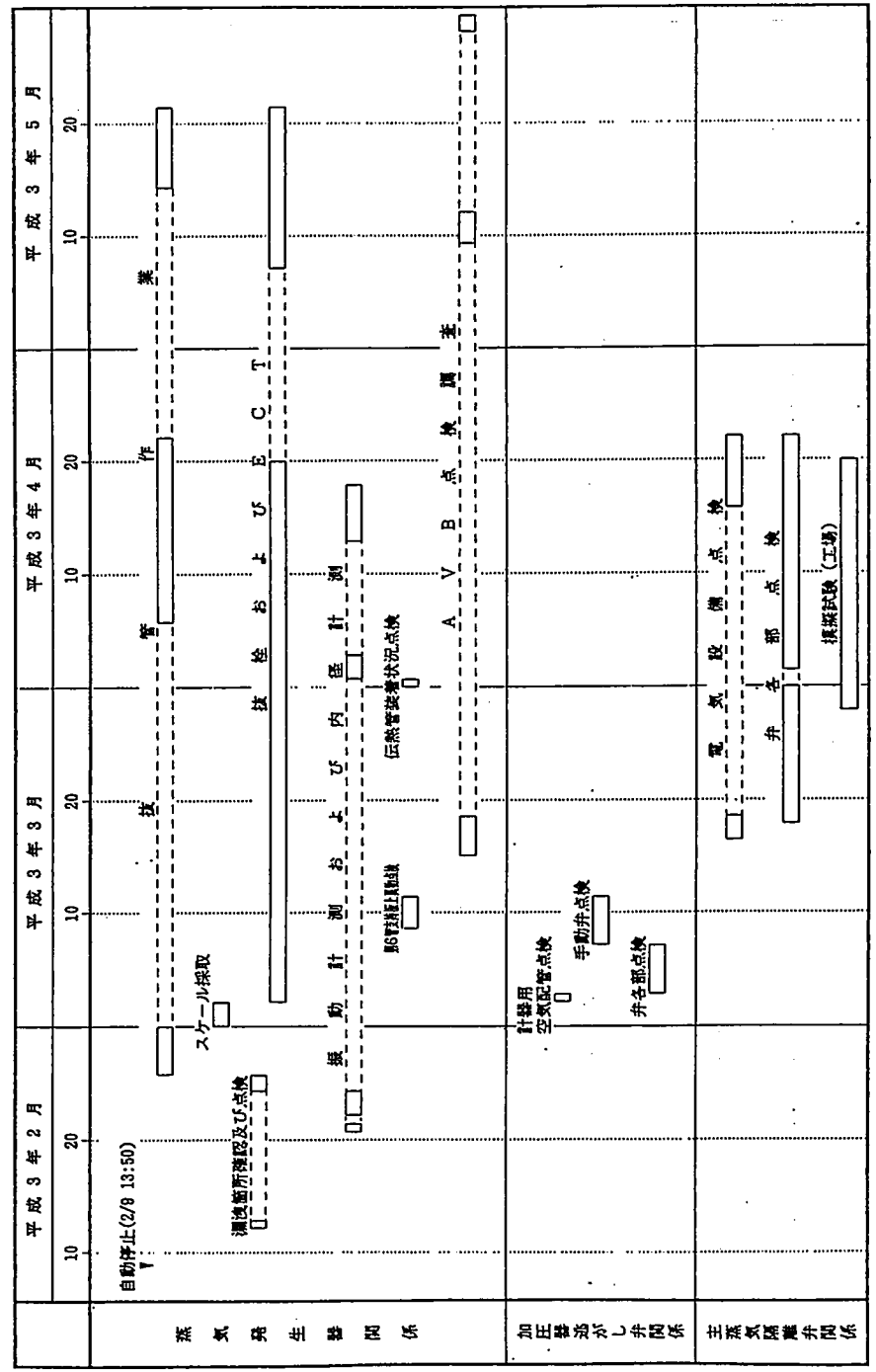


その他資料

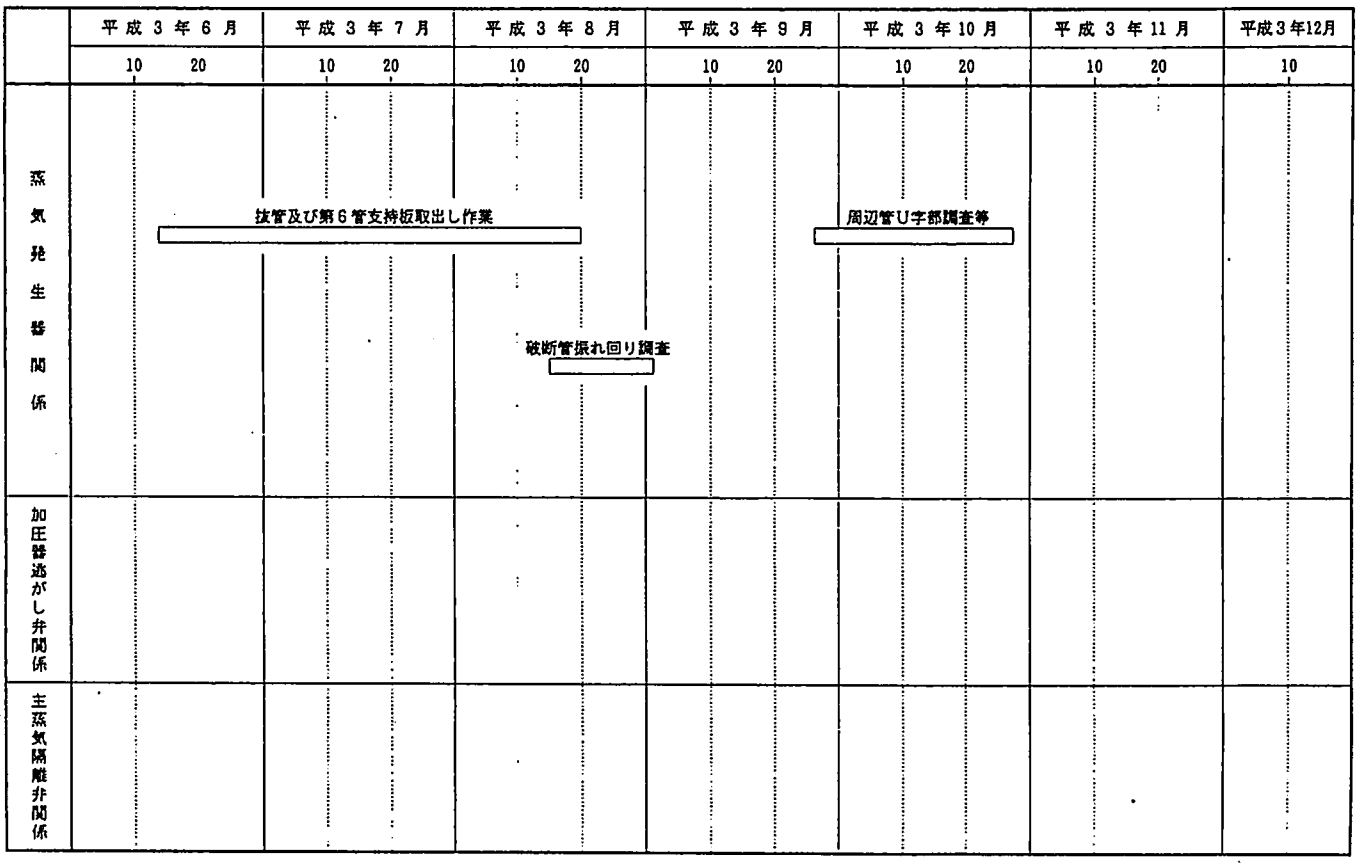
その他資料－目次

		ページ
その他資料-1	美浜２号機蒸気発生器他原因調査実績工程表	1
その他資料-2	流出した１次冷却材を含む２次系統水の処理	4
その他資料-3	見学者及び放射線業務従事者の線量当量評価結果	6
その他資料-4	原因調査作業に係る放射線業務従事者の線量当量実績	9
その他資料-5	周辺監視区域外での放射性物質の濃度に対する事象の影響について	11
その他資料-6	原子炉容器等の非破壊検査結果	15
その他資料-7	運転記録等データ集	17
その他資料-8	写真集	295

美浜２号機蒸気発生器他原因調査主要実績工程表



美浜２号機　蒸気発生器他原因調査主要実績工程表（２／２）



流出した１次冷却材を含む２次系統水の処理

１．概　要

今回の事象により、１次冷却材が２次系統へ漏洩し、２次系にもともとよりあった水と混合した。事象終結後、この事象に伴う２次系統水は法令に定められた方法で処理を実施した。

２．処理方法

ａ．　事象に伴う２次系統水のうち、損傷側蒸気発生器の器内水、同主蒸気管水、同ブローダウン配管水等は、処理前のサンプリング測定でトリチウム以外の放射性核種が確認されたため、１次系の廃液ホールドアップタンクへ移送し、他の１次系廃液と合わせて廃液蒸発装置で処理した。

ｂ．　その他の事象に伴う２次系統水の処理については、処理前にサンプリング測定し、トリチウム以外の放射性核種が検出限界以下であることが確認されたため、１次系の洗浄排水モニタタンク等で濃度を確認した後、放水口へ排水した。

上記ａ、ｂ項で処理された水は、下表のとおりであり、通常運転に伴う処理水と合わせた発電所合計でみても、保安規定に定められた放出管理目標値及び基準値を下回っている。

		ａ項の処理	ｂ項の処理	保安規定記載値
処理水量		約６５m^3 ＊1	約１，６００m^3	――――
処理期間		平成３年２月～同７月	平成３年２月～同８月	――――
放出量	全核種（トリチウムを除く）	１．５×１０^7 Ｂｑ ＊2	Ｎ．Ｄ．	［年間の放出管理目標値］ １．１×１０^{11}Ｂｑ
	トリチウム	１．７×１０^{13}Ｂｑ ＊2	うち3.3×10^{11}Bq	［年間の放出管理の基準値］ １．２×１０^{14}Ｂｑ

＊１：事象発生後に、損傷側蒸気発生器器内等に存在した汚染水の量

＊２：ａ項、ｂ項の事象に伴う２次系統水処理による放出量のほか、通常運転に伴う廃液処理による放出量を合わせて記載している。（平成２年度下期～平成３年度上期の発電所合計放出量）

その他資料－３

見学者及び放射線業務従事者の線量当量評価結果

事故に伴う線量当量評価結果について

1．見学者における線量当量評価

(1) 算出方法

今回の事象により見学者が受けたと考えられる実効線量当量の算出方法は、以下の通りである。

a. 見学者は保守的に発電所構内に２時間滞在したものとし見学ルートを考慮する。

b. 今回の事象に伴い大気へ放出された放射性物質を対象にして、放出量を次のように扱う。

・放射性希ガス排気筒放出分；4.9×10^{9} Ｂｑ（0.5MeV換算で1.1×10^{10}Ｂｑ）

・放射性希ガス地上放出分　；1.8×10^{10}Ｂｑ（0.5MeV換算で4.0×10^{10}Ｂｑ）

・放射性よう素地上放出分　；3.4×10^{9} Ｂｑ（よう素131等価換算で2.3×10^{7}Ｂｑ）

c. 事象発生時の気象データから、平均的な値として風速３m／s、大気安定度Ｄとして「緊急時モニタリング指針」に基づく空間γ線量率分布および地表よう素濃度分布を用い保守的に実効線量当量を算出する。

(2) 算出結果

大気へ放出された放射性希ガス及び放射性よう素による実効線量当量は、約 1×10^{-5} ｍＳｖであった。

(3) 評価結果

今回の事象による見学者の受けた線量当量は、約 1×10^{-5}ｍＳｖ（約0.01μＳｖ）と評価され、自然界の放射線から受ける年間線量当量（約１ｍＳｖ）に対して約１０万分の１であり、その値は年変動幅の範囲内であることから、見学者において有意な影響を与えるものではない。

2. 放射線業務従事者における線量当量評価

(1) 算出方法

今回の事象において管理区域外にいた放射線業務従事者は被ばくした可能性はほとんどないと考えられるが、測定記録等がないこと及び被ばくの可能性を完全には否定しきれない為、以下の方法により放射線業務従事者の実効線量当量の試算を行った。

a. 放射線業務従事者は保守的に放出源近傍に２時間滞在したものとする。

b. 今回の事象に伴い大気へ放出された放射性物質を対象に、放出量を全て地上放出として次のように扱う。

・放射性希ガス　；2.3×10^{10}Ｂｑ（0.5MeV換算で5.1×10^{10}Ｂｑ）

・放射性よう素　；3.4×10^{8} Ｂｑ（よう素131等価換算で2.3×10^{7}Ｂｑ）

c. 事象発生時の気象データから判断して、保守的に半径 500mの半球に放射性物質が拡散したものとし、上部半球モデルを用い実効線量当量を算出する。

(2) 算出結果

大気へ放出された放射性希ガス及び放射性よう素による実効線量当量は、約 1×10^{-4} ｍＳｖであった。

(3) 評価結果

今回の事象による放射線業務従事者の受けた実効線量当量は、約 1×10^{-4}ｍＳｖ（約0.1μＳｖ）と評価され、有意な計画外被ばくはなかった。

更に、この値は自然界の放射線から受ける年間線量当量（約１ｍＳｖ）に対して約１万分の１であり、その値は年変動幅の範囲内であることから、放射線業務従事者に有意な影響を与えるものではない。

また、一般の作業者についても同様の評価結果から影響を与えるものではない。

原因調査作業に係る放射線業務従事者の線量当量実績

原因調査作業に係る放射線業務従事者の線量当量実績

平成３年２月９日の事故発生時から平成３年４月１１日の定期検査開始迄の間に、事故原因調査の為の作業で放射線業務従事者が受けた線量当量実績は、下表のとおりである。

尚、平成３年４月１２日開始の第１４回定期検査での線量当量実績については、本定期検査終了後、「定検報告書」にて報告する。

集計期間：平成３年２月９日～平成３年４月１１日　　測定器：蓄積付デジタル線量計

放射線業務従事者の区分	線量当量分布（人）												総線量当量（人・Sv）	平均線量当量（mSv）
	5mSv以下	5mSvを超え10mSv以下	10mSvを超え15mSv以下	15mSvを超え20mSv以下	20mSvを超え25mSv以下	25mSvを超え30mSv以下	30mSvを超え35mSv以下	35mSvを超え40mSv以下	40mSvを超え45mSv以下	45mSvを超え50mSv以下	50mSvを超える	合計		
社員	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0.01	0.3
その他	277	25	3	0	0	0	0	0	0	0	0	305	0.45	1.5
合計	306	25	3	0	0	0	0	0	0	0	0	334	0.46	1.4

周辺監視区域境界外での放射性物質の濃度に対する事象の影響について

1．概要

今回の事象により放出された放射性物質が周辺監視区域外の放射能濃度（平成２年度第４四半期）に及ぼす影響について評価し、その結果問題ないことを確認した。

2．評価結果

(1)気体状の放射性物質

a．通常運転中に排気筒から放出された放射性物質

通常運転中に排気筒から放出された放射性物質による陸側の周辺監視区域外の空気中放射性物質濃度の最大地点における地上濃度を表－１に示す。

表－１　地上濃度の１～３月の平均濃度

	３カ月の平均濃度（Ｂｑ／ｃｍ^3）
希ガス	３．１×１０$^{-9}$
よう素	６．３×１０$^{-16}$
トリチウム	７．７×１０$^{-9}$

b．事象発生時に排気筒および排気筒以外から放出された放射性物質

事象発生時に排気筒および排気筒以外から放出された放射性物質による陸側の周辺監視区域外の空気中放射性物質濃度の最大地点における地上濃度を表－２に示す。

表－２　地上濃度の１～３月の平均濃度

	３カ月の平均濃度（Ｂｑ／ｃｍ^3）
希ガス	１．７×１０$^{-8}$
よう素	２．９×１０$^{-10}$
トリチウム	５．６×１０$^{-8}$

なお、濃度の評価に当たっては、放射性物質の全量が排気筒及び排気筒以外から１

時間で放出されたものとして事象発生時の気象データを用いて保守的に評価した。

・希ガス（排気筒からの放出率）：1．4×10^{6} Bq／s
・希ガス（排気筒以外からの放出率）：5．0×10^{6} Bq／s
・よう素（排気筒以外からの放出率）：9．4×10^{4} Bq／s
・トリチウム（排気筒以外からの放出率）：1．8×10^{7} Bq／s

c．通常運転中及び事象発生時に放出された放射性物質による濃度

通常運転中に排気筒を通じて放出された放射性物質から求めた濃度と事象発生時に放出された放射性物質から求めた濃度の合計値と濃度限度との比較を表－3に示す。

表－3　地上濃度の1～3月の平均値

	評価結果（Bq／cm^{3}）	濃度限度（Bq／cm^{3}）
希ガス	2．0×10^{-8}	3×10^{-4}（Kr－88）
よう素	2．9×10^{-10}	1×10^{-5}（I－131）
トリチウム	6．4×10^{-8}	5×10^{-3}

（注）濃度限度は放出された核種のうち濃度限度が最も低い値を採用した。

(2)液体状の放射性物質

a．通常運転中に排水口から放出された放射性物質

通常運転中に排水口から放出された放射性物質による排水口濃度の1～3月の平均値を表－4に示す。

表－4　排水口濃度の1～3月の平均値

	3カ月の平均濃度（Bq／cm^{3}）
全核種	2．2×10^{-9}
トリチウム	1．4×10^{-2}

b．事象発生時に排水口から放出された放射性物質

事象発生時に排水口から放出された放射性物質による排水口濃度の1～3月の平均値を表－5に示す。

表－5　排水口濃度の1～3月の平均値

	3カ月の平均濃度（Bq／cm^{3}）
全核種	1．7×10^{-8}
トリチウム	7．4×10^{-7}

c．通常運転中及び事象発生時に放出された放射性物質による濃度

通常運転中に排水口を通じて放出された放射性物質から求めた濃度と事象発生時に放出された放射性物質から求めた濃度の合計値と濃度限度との比較を表－6に示す。

表－6　排水口濃度の1～3月の平均値

	評価結果（Bq／cm^{3}）	濃度限度（Bq／cm^{3}）
全核種	1．7×10^{-8}	3×10^{-2}（Sr－90）
トリチウム	1．4×10^{-2}	6×10^{-1}

（注）濃度限度は放出された核種のうち濃度限度が最も低い値を採用した。

なお、気体及び液体廃棄物の濃度限度は、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量当量限度等を定める件（平成元年通商産業省告示131号）」の別表第2の値を適用する。

原子炉容器等の非破壊検査結果

1．概　要

今回の事象による原子炉容器等の健全性については、検討評価により問題のないことを確認しているが、その後、念のために構造物各部の非破壊検査を実施し、健全性に異常のないことを確認した。

2．検査対象部位と主な検査内容

a．原子炉容器の入口管台溶接部（超音波探傷検査(以下ＵＴという)）

b．原子炉容器の安全注入管台溶接部（ＵＴ）

c．原子炉容器の母材部及び溶接部（ＵＴ）

d．１次冷却系低温側配管の母材部及び溶接部（ＵＴ）

e．１次冷却系低温側配管の安全注入管台溶接部（液体浸透探傷検査(以下ＰＴという)）

f．１次冷却系低温側配管の充てん管台溶接部（放射線透過検査(以下ＲＴという)）

g．加圧器スプレライン用管台溶接部（ＵＴ，ＲＴ）

h．その他加圧器の胴溶接部等（ＵＴ，ＰＴ）

3．検査結果

各部とも検査結果に異常は認められず、健全であることを確認した。

運転記録等データ集

運転記録等データ集目次

1．シーケンスオブイベント記録（抜粋）（原子炉保護系監視記録を含む）．
2．アラームタイプライタ記録（抜粋）
3．ＰＡＭ（事故後監視計）トレンド記録（抜粋）
4．プラント計器記録（チャート）（抜粋）
5．当直課長引継簿
6．日誌タイプライタ記録（抜粋）
7．設定値一覧表（Ｍ－２第１３回定期検査記録の抜粋）
8．１００％運転記録（抜粋）（復水タンク－容量曲線含む）
9．ＣＲＴハードコピー（抜粋）
１０．運転日誌
１１．第１４運転期間における主要なパラメータ
１２．運転マニュアル（抜粋）
１３．美浜２号機原子炉停止条件について
１４．放射性物質の濃度の測定値（放射線管理課作業日誌（抜粋）含む）
１５．気象データ
１６．環境放射線モニタリング記録
１７．解析結果等
(1) 事象の再現解析に関する解析結果等
(2) 炉心の健全性評価に関する解析結果
(3) 安全評価と今回の事象の比較に関する解析結果
(4) 炉心の健全性に関するその他の考察に関する解析結果等
１８．ＡＪＢ点検チェックシート

注：本運転記録データ集に添付している資料は、原本からのコピーであるが、プライバシー保護の観点から個人名を示す部分については抹消の上添付している。

1．シーケンスオブイベント記録（抜粋）（原子炉保護系監視記録を含む）

```
                    TIME        50433
1351  REACTOR PROTECTION SYSTEM MONITORING
      RC LOW FLOW PERMISSIVE (P8)

      STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS
                    NC41N       NC42N       NC43N       NC44N       NC41NW
                    RESET       RESET       RESET       RESET       RESET
      STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS
 1DB                XY52RTA     XY52RTB     XY523YA     XY523Y3
                    TRIP        TRIP        OPEN        OPEN
      STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS
      VARIABLE      N41F        N42F        N43F        N44F
                    3.1935      3.1905      3.1935      3.1935
      LIMIT         <0325       <0325       <0325       <0325
                    10.0000     10.0000     10.0000     10.0000
      TIME          50466       50466       50466       50466
      STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS
                    NC41N       NC42N       NC43N       NC44N       NC41NW
                    RESET       RESET       RESET       RESET       RESET
      STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS
 2DB                XY52RTA     XY52RTB     XY523YA     XY523Y3
                    TRIP        TRIP        OPEN        OPEN
      STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS
      VARIABLE      N41F        N42F        N43F        N44F
                    2.3535      2.4140      2.3535      2.4140
      LIMIT         <0325       <0325       <0325       <0325
                    10.0000     10.0000     10.0000     10.0000
      TIME          50514       50514       50514       50514
1351  REACTOR PROTECTION SYSTEM MONITORING
      LOW PRESSURIZER PRESSURE

      STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS
                    PC455C      PC456C      PC457C      PC458A
                    TRIP        TRIP        TRIP        TRIP
      STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS
                    PC455CA     NC41NW
 1DB                TRIP        SET

                    XY52RTA     XY52RTB     XY523YA     XY523Y3
                    TRIP        TRIP        OPEN        OPEN
      STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS
      VARIABLE      P455        P456        P457        P458
                    130.1777    129.8110    129.9332    129.3517
      LIMIT         K0320       K0320       K0320       <0320
                    134.0000    134.0000    134.0000    134.0000
      TIME          50487       50487       50487       50487
      STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS
                    PC455C      PC456C      PC457C      PC458A
                    TRIP        TRIP        TRIP        TRIP
      STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS
                    PC455CW     NC41NW
 2DB                TRIP        SET

                    XY52RTA     XY52RTB     XY523YA     XY523Y3
                    TRIP        TRIP        OPEN        OPEN
      STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS
      VARIABLE      P455        P456        P457        P458
                    126.5135    125.1030    125.2253    125.1437
      LIMIT         K0320       K0320       <0320       <0320
                    134.0000    134.0000    134.0000    134.0000
      TIME          50531       50531       50531       50531

1351  SEQUENCE OF EVENTS RECORD.  FIRST EVENT AT H13 M51 S37
      PC455CW     PZR LO PRESS CAUSE RE       TRIP    C    1
      XYPTSJV     52/RTB JV COIL              TRIP    C    1
      XY9TAJV     52/RTA JV COIL              TRIP    C    1
```

← 13時50分39分7（加圧器圧力低原子炉トリップ）

```
      XY52RTA     A REACTOR MAIN TRIP BKR     TRIP    C    1
      XY52RTB     B REACTOR MAIN TRIP BKR     TRIP    C    1
      XYASTJ      T3 HYD OIL LO PRESS CAUSE RE TRIP   C   24
      XYTSVJ      T3 STOP VLV CL CAUSE RE     TRIP    C   69
      XYASTJ      T3 HYD OIL LO PRESS CAUSE RE RESET   C  133
      XYTSVJ      T3 STOP VLV CL CAUSE RE     RESET   C  133
      LC445AW     PZR LO PRESS + LEVEL SI CAUSE RE TRIP C 732
      XYS1C       SI SIGNAL (S1154)           SET     C  732
      XYS1D       SI SIGNAL (S1254)           SET     C  732
      FC422AW     A SG LO LEVEL + FW FLOW CAUSE RE TRIP C 1207
      FC425AW     B SG LO LEVEL + FW FLOW CAUSE RE RESET C 1332
      FC414AW     A SG LO LEVEL + FW FLOW CAUSE RE TRIP C 1447
      FC411AW     A SG LO LEVEL + FW FLOW CAUSE RE RESET C 1537
      PC455LW     PZR LO LO PRESS SI CAUSE RE TRIP C 1564
      LC42CAW     A SG LO-LO LEVEL CAUSE RE   TRIP    C 1579
      LC410AW     A SG LO-LO LEVEL CAUSE RE   TRIP    C 2375
      XY36P       GEN LOCK OUT RY (86P)       TRIP    C 3116
      UV1AW       RCP BUS UNDER VOLT CAUSE RE TRIP    C 3273
      XYRCP2A     A RCP BKR OPEN CAUSE RE     TRIP    C 3104
      CWPTP       CWP TRIP                    TRIP    C 3104
      FC410WW     RCL LO FLOW (2-LOOP) CAUSE RE TRIP  C 3105
      XYRCP2B     B RCP BKR OPEN CAUSE RE     TRIP    C 3105
      XYASTJ      T3 HYD OIL LO PRESS CAUSE RE TRIP   C 3105
      XYTSVJ      T3 STOP VLV CL CAUSE RE     TRIP    C 3105
1352  END SEQUENCE OF EVENTS RECORD

1354  SEQUENCE OF EVENTS RECORD.  FIRST EVENT AT H13 M53 S54
      FC410WW     RCL LO FLOW (2-LOOP) CAUSE RE RESET  C    0
      PC455CW     PZR LO PRESS CAUSE RE       RESET   C    0
      UV1AV       RCP BUS UNDER VOLT CAUSE RE RESET   C    0
      XYASTA      T3 HYD OIL LO PRESS CAUSE RE RESET   C    0
      XYTSVJ      T3 STOP VLV CL CAUSE RE     RESET   C    0
      LC420AW     A SG LO-LO LEVEL CAUSE RE   RESET   C 2398
      LC410AW     A SG LO-LO LEVEL CAUSE RE   RESET   C 4476
1354  END SEQUENCE OF EVENTS RECORD
1400  RPSN RETURN TO NORMAL HIGH INTERMEDIATE RANGE FLUX    RETURNED 50403  NC35F  RESET
1400  RPSN RETURN TO NORMAL HIGH POWER RANGE LOW RANGE FLUX RETURNED 50403  NC43P  RESET
1400  RPSN RETURN TO NORMAL HIGH POWER RANGE LOW RANGE FLUX RETURNED 50403  NC44P  RESET
1400  RPSN RETURN TO NORMAL HIGH INTERMEDIATE RANGE FLUX    RETURNED 50403  NC36F  RESET
1400  RPSN RETURN TO NORMAL HIGH POWER RANGE LOW RANGE FLUX RETURNED 50403  NC41P  RESET
1400  RPSN RETURN TO NORMAL HIGH POWER RANGE LOW RANGE FLUX RETURNED 50403  NC42P  RESET
1400  REACTOR PROTECTION SYSTEM MONITORING
      TURBINE TRIP

      XYAST2      TRIP        50395
      XYAST3      TRIP        50395
      XYAST1      TRIP        50396
      XYTSVA      TRIP        50398
      XYTSV3      TRIP        50398
          STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS
                    XYAST1      XYAST2      XYAST3      XYTSVA      XYTSV3
                    TRIP        TRIP        TRIP        TRIP        TRIP
          STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS
                    XYASTA      XYTSVJ      NC41NW      NC41SW
                    RESET       RESET       RESET       SET

                    XY52RTA     XY52RTB     XY523YA     XY523Y3
                    TRIP        TRIP        OPEN        OPEN
1400  REACTOR PROTECTION SYSTEM MONITORING
      LOW PRESSURIZER PRESSURE

      PC457C      TRIP        50393
      PC458A      TRIP        50401
      PC455C      TRIP        50403
          STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS
                    PC455C      PC456C      PC457C      PC458A
```

13時50分46分7（加圧器圧力低＋水位低，安全注入動作）

	BLOCK	BLOCK	BLOCK	UNBLK	UNBLK	UNBLK
	XYSN33	NC35H	NC36H			
	UNBLK	RESET	RESET			

STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS

	XY52RTA	XY52RTB	XY52BYA	XY52BY3
	TRIP	TRIP	OPEN	OPEN

STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS

VARIABLE	P455	P456	P457	N353	N368
	98.6396	98.5939	98.6396	0.0001	0.0004
LIMIT	K0324	K0324	K0324	K0357	K0358
	140.0000	140.0000	140.0000	0.0001	0.0001
TIME	02305	02305	02305	02305	02305

STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS

	PC4553	PC4563	PC457B	XY1SI31	XY1SI82	XYSN8A
	BLOCK	BLOCK	BLOCK	UNBLK	UNBLK	UNBLK
	XYSN33	NC35H	NC36H			
	UNBLK	RESET	RESET			

STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS

	XY52RTA	XY52RTB	XY52BYA	XY52BY8
	TRIP	TRIP	OPEN	OPEN

STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS

VARIABLE	P455	P456	P457	N353	N368
	98.6396	98.5939	98.6396	0.0001	0.0004
LIMIT	K0324	K0324	K0324	K0357	K0358
	140.0000	140.0000	140.0000	0.0001	0.0001
TIME	02330	02330	02330	02330	02330

1402 RPSM RETURN TO NORMAL PRZR LOW P & INT RNG P6 SI BLOCK RETURNED 02330 NC35H SET

1402 REACTOR PROTECTION SYSTEM MONITORING
SOURCE RANGE BLOCK

STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS

	NC35D	NC36D	N33A	N333
	UNBLK	BLOCK	BLOCK	BLOCK

STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS

	XY52RTA	XY52RTB	XY52BYA	XY52BY8
	TRIP	TRIP	OPEN	OPEN

STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS

VARIABLE	N31E	N32E
	0.0229	0.0224
LIMIT	K0312	K0313
	0.0001	0.0001
TIME	02547	02547

1405 RPSM RETURN TO NORMAL UNDER-VOLTAGE-RC PUMP BUS RETURNED 05189 UV2A RESET
1405 RPSM RETURN TO NORMAL UNDER-VOLTAGE-RC PUMP BUS RETURNED 05189 UV1A RESET
1405 RPSM RETURN TO NORMAL UNDER-VOLTAGE-RC PUMP BUS RETURNED 05189 UV3A RESET
1405 RPSM RETURN TO NORMAL UNDER-VOLTAGE-RC PUMP BUS RETURNED 05189 UV2B RESET
1405 RPSM RETURN TO NORMAL UNDER-VOLTAGE-RC PUMP BUS RETURNED 05189 UV1B RESET
1405 RPSM RETURN TO NORMAL UNDER-VOLTAGE-RC PUMP BUS RETURNED 05189 UV3B RESET
1405 REACTOR PROTECTION SYSTEM MONITORING
HIGH STEAM LINE DIFF PRESS

STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS

	PC4563	PC4573	PC457B	PC4538	PC4206	
	RESET	RESET	RESET	TRIP	RESET	RESET

STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS

	PC4144	PC4264	XY1SI51	XY1SI32
	RESET	RESET	UNBLK	UNBLK

	XY52RTA	XY52RTB	XY52BYA	XY52BY3
	TRIP	TRIP	OPEN	OPEN

STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS

VARIABLE	P414	P415	P416	P424	P425	P426
	36.4300	36.4300	36.4300	36.4300	36.4300	36.4300
LIMIT	K0343	K0343	K0343	K0344	K0344	K0344
	36.4300	36.4300	36.4300	36.4300	36.4300	36.4300
TIME	05499	05499	05499	05499	05499	05499

	37.0959	37.0437	37.1503	36.1250	36.0719	36.1256
LIMIT	K0343	K0343	K0343	K0344	K0344	K0344
	36.4300	36.4300	36.4300	36.4300	36.4300	36.4300
TIME	06050	06050	06050	06050	06050	06050

1406 SEQUENCE OF EVENTS RECORD, FIRST EVENT AT H14 M 5 S49
PC4263W 3 STM LINE LO PRESS SI CAUSE RE TRIP C 3
1406 END SEQUENCE OF EVENTS RECORD
1414 REACTOR PROTECTION SYSTEM MONITORING
PRZR LOW P & INT RNG P6 SI BLOCK

STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS

	PC4553	PC4563	PC457B	XY1SI31	XY1SI82	XYSN8A
	BLOCK	BLOCK	BLOCK	UNBLK	UNBLK	UNBLK
	XYSN33	NC35H	NC36H			
	UNBLK	SET	RESET			

STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS

	XY52RTA	XY52RTB	XY52BYA	XY52BY3
	TRIP	TRIP	OPEN	OPEN

STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS

VARIABLE	P455	P456	P457	N353	N368
	99.1693	98.5789	98.6396	0.0000	0.0001
LIMIT	K0324	K0324	K0324	K0357	K0358
	140.0000	140.0000	140.0000	0.0001	0.0001
TIME	14225	14225	14225	14225	14225

STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS

	PC4553	PC4563	PC457B	XY1SI31	XY1SI82	XYSN8A
	BLOCK	BLOCK	BLOCK	UNBLK	UNBLK	UNBLK
	XYSN33	NC35H	NC36H			
	UNBLK	SET	RESET			

STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS

	XY52RTA	XY52RTB	XY52BYA	XY52BY8
	TRIP	TRIP	OPEN	OPEN

STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS

VARIABLE	P455	P456	P457	N353	N368
	99.2101	98.5989	98.6804	0.0000	0.0001
LIMIT	K0324	K0324	K0324	K0357	K0358
	140.0000	140.0000	140.0000	0.0001	0.0001
TIME	14250	14250	14250	14250	14250

1415 RPSM RETURN TO NORMAL PRZR LOW P & INT RNG P6 SI BLOCK RETURNED 15206 N368 0.00 K0353 0.00

1415 SEQUENCE OF EVENTS RECORD, FIRST EVENT AT H14 M14 S27

XYSID	SI SIGNAL (S125X)	RESET	C	0
XYSIC	SI SIGNAL (S115X)	RESET	C	1
XYRTAUV	52/RTB UV COIL	RESET	C	6
XYRTAUV	52/RTA UV COIL	RESET	C	8
XYRTBE	52/RTB EVENT	RESET	C	9
XYRTAE	52/RTA EVENT	RESET	C	11

1415 END SEQUENCE OF EVENTS RECORD
1415 REACTOR PROTECTION SYSTEM MONITORING
PRZR LOW P & INT RNG P6 SI BLOCK

STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS

	PC4553	PC4563	PC457B	XY1SI31	XY1SI82	XYSN8A
	BLOCK	BLOCK	BLOCK	UNBLK	UNBLK	UNBLK
	XYSN33	NC35H	NC36H			
	UNBLK	SET	RESET			

STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS

	XY52RTA	XY52RTB	XY52BYA	XY52BY8
	TRIP	TRIP	OPEN	OPEN

STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS

VARIABLE	P455	P456	P457	N353	N368
	99.9435	99.3323	99.4545	0.0000	0.0001
LIMIT	K0324	K0324	K0324	K0357	K0356
	140.0000	140.0000	140.0000	0.0001	0.0001
TIME	15326	15326	15326	15326	15326

STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS

	PC4553	PC4565	PC4575	XY15131	XY15132	XY5A3A
	BLOCK	BLOCK	BLOCK	UNBLK	UNBLK	UNBLK
	XY5A43	MC35H	MC35H			
	UNBLK	SET	RESET			

STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS

	XY52RTA	XY52RTB	XY523YA	XY528Y3
	TRIP	TRIP	OPEN	OPEN

STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS

VARIABLE	P455	P456	P457	4353	4365
	99.9843	99.3730	99.4953	0.0000	0.0001
LIMIT	K0324	K0324	K0324	K0357	K0358
	140.0000	140.0000	140.0000	1.1301	0.0001
TIME	15353	15353	15353	15353	15353

1424 REACTOR PROTECTION SYSTEM MONITORING
LOW PRESUZER PRESS AND LEVEL(SI)

STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS

	PC4553	PC4565	PC4575	LC4653	LC4663	LC4673
	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP

STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS

	LC4653W	XY15131	XY15132	
	TRIP	UNBLK	UNBLK	
	XY52RTA	XY52RTB	XY523YA	XY528Y3
	TRIP	TRIP	OPEN	OPEN

STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS

VARIABLE	P455	P456	P457	L465	L466	L467
	102.6328	102.0216	102.1438	-4.9400	-5.1281	-5.2935
LIMIT	K0322	K0322	K0322	K0323	K0323	K0323
	128.3300	128.3300	128.3300	5.5000	5.5000	5.5000
TIME	24401	24401	24401	24401	24401	24401

STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS

	PC4553	PC4565	PC4575	LC4653	LC4663	LC4673
	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP	TRIP

STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS

	LC4653W	XY15181	XY15182
	TRIP	UNBLK	UNBLK
	XY52RTA	XY52RTB	XY523YA	XY528Y3
	TRIP	TRIP	OPEN	OPEN

STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS

VARIABLE	P455	P456	P457	L465	L466	L467
	102.6736	102.0623	102.1435	-4.9400	-5.1281	-5.1938
LIMIT	K0322	K0322	K0322	K0323	K0323	K0323
	128.3300	128.3300	128.3300	5.5000	5.5000	5.5000
TIME	24450	24450	24450	24450	24450	24450

1425 SEQUENCE OF EVENTS RECORD. FIRST EVENT AT H14 M24 S25
LC410EW A SG HI-HI LEVEL CAUSE TT TRIP C)
1425 END SEQUENCE OF EVENTS RECORD

1436	RPSM RETURN TO NORMAL LOW PRESSURER PRESS AND LEVEL(SI)	RETURNED	36118	L465	5.65	K0323	5.50
1436	RPSM RETURN TO NORMAL LOW PRESSURER PRESS AND LEVEL(SI)	RETURNED	36115	L466	5.65	K0323	5.50
1436	RPSM RETURN TO NORMAL LOW PRESSURER PRESS AND LEVEL(SI)	RETURNED	36113	L467	5.72	K0323	5.50
1436	RPSM RETURN TO NORMAL LOW PRESSURER PRESS AND LEVEL(SI)	RETURNED	36172	LC4658	RESET		
1436	RPSM RETURN TO NORMAL LOW PRESSURER PRESS AND LEVEL(SI)	RETURNED	36186	LC4668	RESET		
1436	RPSM RETURN TO NORMAL LOW PRESSURER PRESS AND LEVEL(SI)	RETURNED	36188	LC4678	RESET		

1437 SEQUENCE OF EVENTS RECORD. FIRST EVENT AT H14 M36 S13
LC4658W P2R LO PRESS + LEVEL SI CAUSE RE RESET C)
1437 END SEQUENCE OF EVENTS RECORD

1444 SEQUENCE OF EVENTS RECORD. FIRST EVENT AT H14 M43 S20

	CMPTR	CMP TRIP	RESET	C)
	LC420EW	S SG HI-HI LEVEL CAUSE TT	TRIP	C 1575

1444 END SEQUENCE OF EVENTS RECORD

	5343.0	1535.0	5343.3
	5347.0	1527.0	5347.3
	5351.0	1520.0	5351.3

1456 SEQUENCE OF EVENTS RECORD. FIRST EVENT AT H14 M55 S14
LC420EW B SG HI-HI LEVEL CAUSE TT TRIP C)
1455 END SEQUENCE OF EVENTS RECORD

1457 SEQUENCE OF EVENTS RECORD. FIRST EVENT AT H14 M56 S17
LC420EW B SG HI-HI LEVEL CAUSE TT RESET C)
1457 END SEQUENCE OF EVENTS RECORD

1457	RPSM RETURN TO NORMAL LOW REACTOR COOLANT FLOW	RETURNED	57384	XYRCP2B	RESET		
1457	RPSM RETURN TO NORMAL LOW REACTOR COOLANT FLOW	RETURNED	57545	FC420	RESET		
1457	RPSM RETURN TO NORMAL LOW REACTOR COOLANT FLOW	RETURNED	57546	FC421	RESET		
1457	RPSM RETURN TO NORMAL LOW REACTOR COOLANT FLOW	RETURNED	57546	FC422	RESET		
1458	RPSM RETURN TO NORMAL LOW REACTOR COOLANT FLOW	RETURNED	58005	F420	113.42	K0315	90.40
1458	RPSM RETURN TO NORMAL LOW REACTOR COOLANT FLOW	RETURNED	58005	F421	113.11	K0315	90.40
1458	RPSM RETURN TO NORMAL LOW REACTOR COOLANT FLOW	RETURNED	58005	F422	113.15	K0315	90.40

1458 REACTOR PROTECTION SYSTEM MONITORING
TURBIN TRIP PERMISSIVE (P9)

STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS

	MC41S	MC42S	MC43S	MC44S	CMPATR	CMPBTR
	RESET	RESET	RESET	RESET	RESET	RESET
	MC41SW	PC482A				
	RESET	SET				

STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS

	XY52RTA	XY52RTB	XY523YA	XY523Y3
	TRIP	TRIP	OPEN	OPEN

STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS

VARIABLE	N41F	N42F	N43F	N44F
	-0.0033	-0.0000	-0.0000	-0.0000
LIMIT	K0348	K0349	K0350	K0351
	10.0033	10.0030	10.0000	10.3300
TIME	58247	58247	58247	58247

1458 SEQUENCE OF EVENTS RECORD. FIRST EVENT AT H14 M57 S38

	XYRCP2B	B RCP BCR OPEN CAUSE RE	RESET	C)
	LC420EW	B SG HI-HI LEVEL CAUSE TT	TRIP	C 732
	LC420EW	B SG HI-HI LEVEL CAUSE TT	RESET	C 2153
	LC420EW	B SG HI-HI LEVEL CAUSE TT	TRIP	C 3151
	LC420EW	B SG HI-HI LEVEL CAUSE TT	RESET	C 5364

1455 END SEQUENCE OF EVENTS RECORD

```
                        BLOCK     BLOCK     BLOCK     BLOCK     BLOCK     UNBLK
                        XYSN39    NC33H     NC36H
                        UNBLK     SET       SET
      STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS
                        XY52RTA   XY52RTB   XY523YA   XY523YB
                        TRIP      TRIP      OPEN      OPEN
      STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS
      VARIABLE          P455      P456      P457      N333      N363
                        98.6396   33.5561   98.5989   0.0000    0.0001
      LIMIT             K0324     K0324     K0324     K0337     K0358
                        140.0000  141.0000  140.0000  1.0000    0.0001
      TIME              22431     22431     22431     22431     22431

1623  SEQUENCE OF EVENTS RECORD, FIRST EVENT AT H14 M22 S42
      PC4243W   B STM LINE LO PRESS SI CAUSE RE    RESET   C   0
      PC455LV   PZR LO LG PRESS SI CAUSE RE       RESET   C   0
      XYRT3E    52/RTB EVENT                      TRIP    C 1931
      XY3TAE    52/RTA EVENT                      TRIP    C 1931
      XY52RTB   B REACTOR MAIN TRIP BKR           NORMAL  C 1932
      XY52RTA   A REACTOR MAIN TRIP BKR           NORMAL  C 1932
1623  END SEQUENCE OF EVENTS RECORD
1715  RPSM RETURN TO NORMAL HIGH SOURCE RANGE FLUX          RETURNED 18305  N31E  498.19  K0323  200.00
1720  RPSM RETURN TO NORMAL HIGH SOURCE RANGE FLUX          RETURNED 20562  N32E  494.75  K0327  200.00

1725  SEQUENCE OF EVENTS RECORD, FIRST EVENT AT H17 M24 S32
      LC410EW   A SG HI-HI LEVEL CAUSE TT         RESET   C   0
1725  END SEQUENCE OF EVENTS RECORD
1821  REACTOR PROTECTION SYSTEM MONITORING
      SOURCE RANGE BLOCK

      STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS
                        NC35J     NC36J     N33A      N333
                        UNBLK     UNBLK     UNBLK     UNBLK
      STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS
                        XY52RTA   XY52RTB   XY523YA   XY523YB
                        NORMAL    NORMAL    OPEN      OPEN
      STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS
      VARIABLE          N31E      N32E
                        377.7055  419.3298
      LIMIT             K0312     K0313
                        0.0001    0.0001
      TIME              21407     21427
1823  RPSM RETURN TO NORMAL PZR LOW P & INT RMS P6 SI BLOCK RETURNED 23444  NC36H  SET
1823  REACTOR PROTECTION SYSTEM MONITORING
      PZR LOW P & INT RMS P6 SI BLOCK

      XYSN8A    BLOCK   23444
      STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS
                        PC4553    PC4569    PC4573    XY15I31   XY15I32   XYSN3A
                        BLOCK     BLOCK     BLOCK     BLOCK     BLOCK     BLOCK
                        XYSN33    NC33H     NC36H
                        BLOCK     SET       SET
      STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS
                        XY52RTA   XY52RTB   XY523YA   XY523YB
                        NORMAL    NORMAL    OPEN      OPEN
      STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS
      VARIABLE          P455      P456      P457      N333      N363
                        98.6396   33.5561   98.5989   0.0000    0.0000
      LIMIT             K0324     K0324     K0324     K0337     K0358
                        140.0000  141.0000  140.0000  1.0000    0.0001
      TIME              23450     23450     23450     23450     23450
1964  REACTOR PROTECTION SYSTEM MONITORING
      LO STM MAIN FEEDWATER FLOW

      STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS
                        PC4194    PC4174    PC4254    PC4274    LC411C    LC412C
```

```
                        TRIP      TRIP      TRIP      RESET     RESET     RESET
      STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS
                        LC413AW   LC420AW
                        TRIP      RESET

                        XY523TA   XY52RTB   XY523YA   XY523YB
                        TRIP      TRIP      OPEN      OPEN
      STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS
      VARIABLE          L410      L411      L412      L420      L421      L422
                        9.6035    9.5408    9.6661    58.4997   58.7505   58.8132
      LIMIT             K0334     K0334     K0334     K0335     K0335     K0335
                        10.0000   10.0000   10.0000   10.0000   10.0000   10.0000
      TIME              11321     11321     11321     11321     11321     11321

2012  SEQUENCE OF EVENTS RECORD, FIRST EVENT AT H20 M11 S29
      LC413AW   A SG LO-LO LEVEL CAUSE RE       TRIP    C   0
      XYRT5UV   52/RTB UV COIL                  TRIP    C   1
      XYRTAUV   52/RTA UV COIL                  TRIP    C   1
      XY52RTA   A REACTOR MAIN TRIP BKR         TRIP    C   8
      XY52RTB   B REACTOR MAIN TRIP BKR         TRIP    C   8
2012  END SEQUENCE OF EVENTS RECORD
2017  REACTOR PROTECTION SYSTEM MONITORING
      HIGH STEAM LINE DIFF PRESS

      STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS
                        PC4143    PC4153    PC416B    PC4243    PC425B    PC4263
                        RESET     RESET     RESET     TRIP      TRIP      TRIP
      STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS
                        PC4143W   PC4243W   XY15I31   XY15I32
                        RESET     RESET     BLOCK     BLOCK

                        XY52RTA   XY52RTB   XY523YA   XY523YB
                        TRIP      TRIP      OPEN      OPEN
      STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS
      VARIABLE          P414      P415      P416      P424      P425      P426
                        36.4437   36.4969   36.3906   3.9312    3.9843    3.8731
      LIMIT             K0343     K0343     K0343     K0344     K0344     K0344
                        36.4300   36.4300   36.4300   36.4300   36.4300   36.4300
      TIME              17241     17241     17241     17241     17241     17241
      STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS
                        PC4143    PC4153    PC416B    PC4243    PC425B    PC4263
                        RESET     RESET     RESET     TRIP      TRIP      TRIP
      STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS
                        PC4143W   PC4243W   XY15I31   XY15I32
                        RESET     RESET     BLOCK     BLOCK

                        XY52RTA   XY52RTB   XY523YA   XY523YB
                        TRIP      TRIP      OPEN      OPEN
      STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS
      VARIABLE          P414      P415      P416      P424      P425      P426
                        36.4437   36.4437   36.3906   3.9312    3.9843    3.8731
      LIMIT             K0343     K0343     K0343     K0344     K0344     K0344
                        36.4300   36.4300   36.4300   36.4300   36.4300   36.4300
      TIME              17239     17239     17239     17239     17299     17239
2017  REACTOR PROTECTION SYSTEM MONITORING
      HIGH STEAM LINE DIFF PRESS

      STATUS OF PARTIAL RELAYS, BLOCKS AND PERMISSIVE RELAYS
                        PC4143    PC4153    PC416B    PC4243    PC425B    PC4263
                        RESET     RESET     RESET     TRIP      TRIP      TRIP
      STATUS OF CAUSE RELAYS, BLOCKS, PERMISSIVES AND MAIN TRIP BREAKERS
                        PC4143W   PC4243W   XY15I31   XY15I32
                        RESET     RESET     BLOCK     BLOCK

                        XY52RTA   XY52RTB   XY523YA   XY523YB
                        TRIP      TRIP      OPEN      OPEN
```

STATUS OF VARIABLES AND SET POINTS

VARIABLE	F410	F411	F412	F421	F421	F422
	0.0000	1.4993	0.0000	60.3274	55.8900	59.2725
LIMIT	K3315	K3315	K3715	K3315	K3316	K3616
	90.4000	90.4000	90.4000	90.4000	90.4000	90.4000
TIME	37139	37173	37137	37173	37139	37139

3332 SEQUENCE OF EVENTS RECORD, FIRST EVENT AT 4 H55 552
XYRCP23 B RCP BKR OPEN CAUSE RE TRIP C 3
3333 END SEQUENCE OF EVENTS RECORD

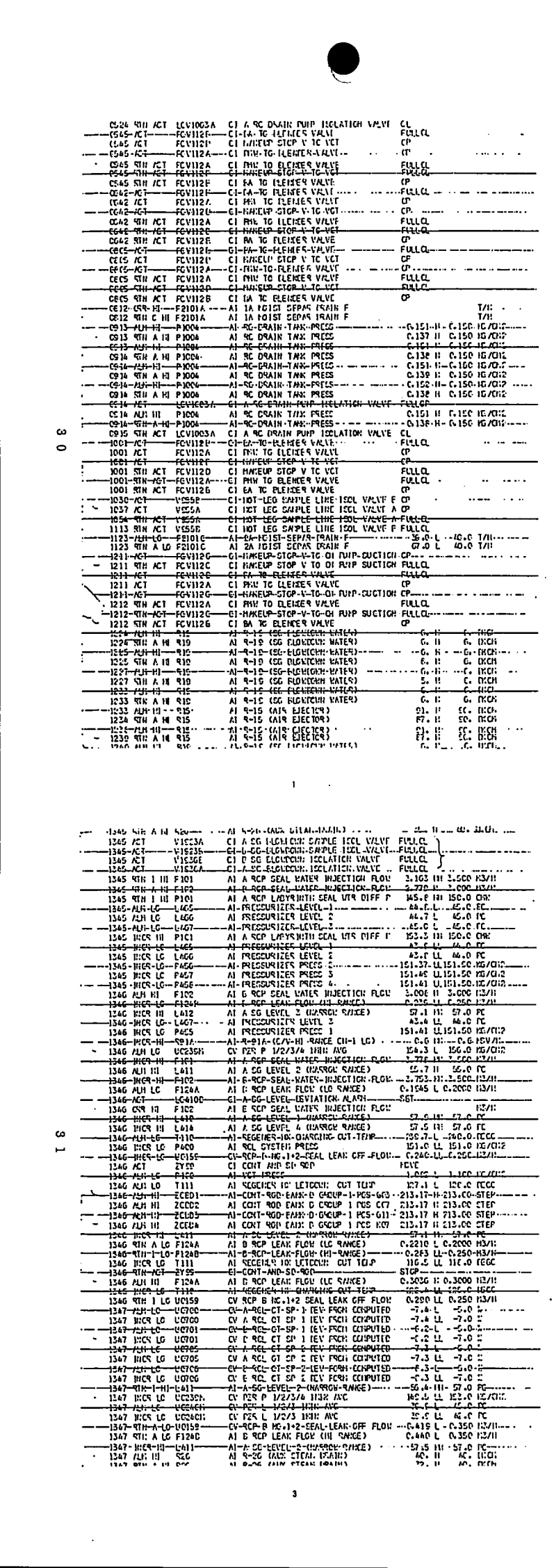
3433 SEQUENCE OF EVENTS RECORD, FIRST EVENT AT 4 H57 515
LC410EV A SG HI-HI LEVEL CAUSE TT TRIP C 3
3433 END SEQUENCE OF EVENTS RECORD

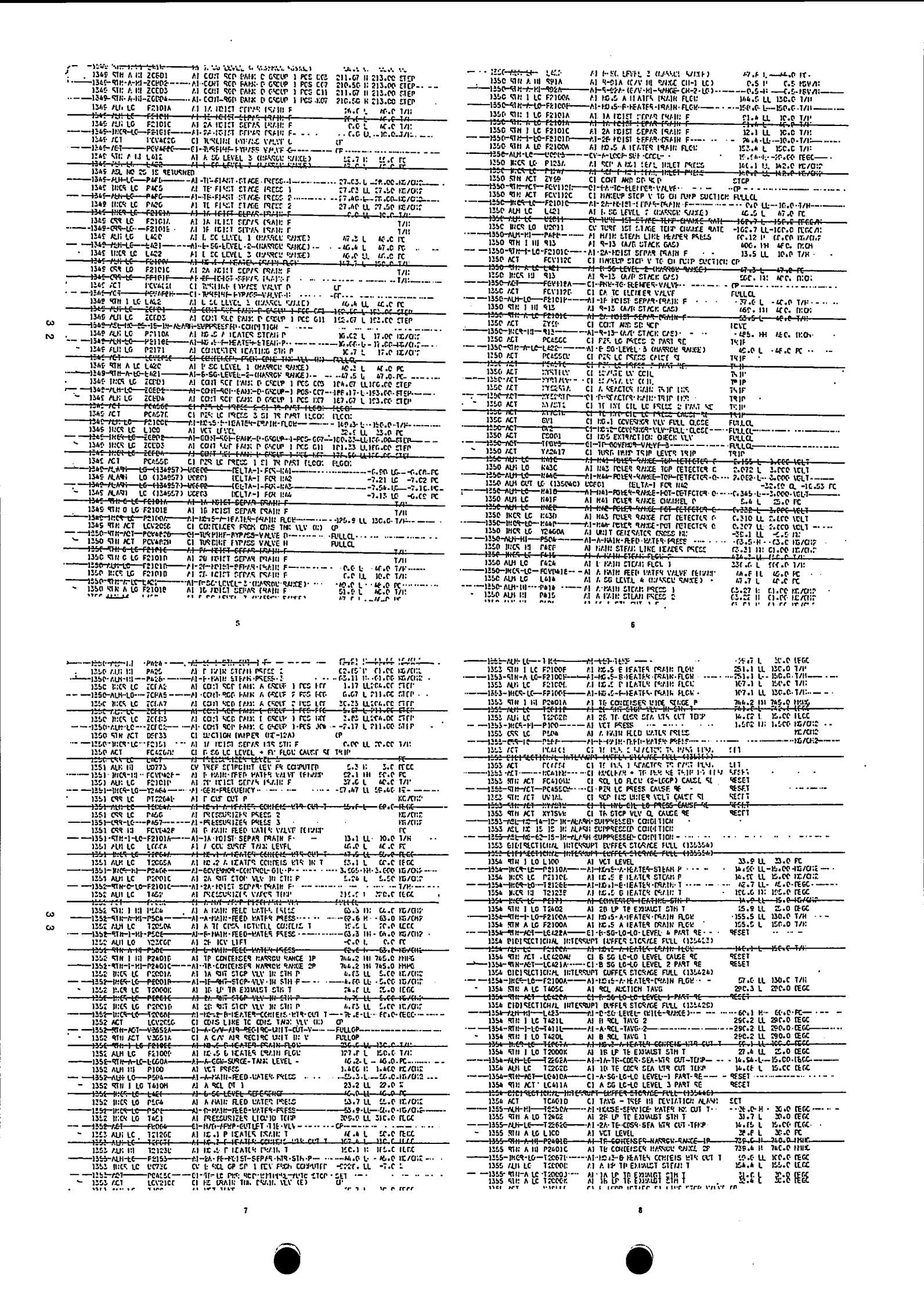
3506 SEQUENCE OF EVENTS RECORD, FIRST EVENT AT 4 5 M 5 513
LC420EV B SG HI-HI LEVEL CAUSE TT RESET C 3
3506 END SEQUENCE OF EVENTS RECORD

RCP PARAMETER MONITORING TABLE DATE 1991-03-16 TIME 37:00 SEN PWR -0.1%
RE PWR -0.0%

GENERAL PARAMETER										
RC PRESS	(KG/CM2)	I	P430	:	15.7	(------)				
RC TEMP	(DEG C)	I	T410	:	271.1	(------)	T420	:	271.2	(------)
VCT PRESS	(KG/CM2)	I	P135	:	1.756	(1.170- 1.430)				
VCT OUTLET TEMP	(DEG C)	I	T130	:	34.6	(15.)				
SEAL INJECTION FILTER DIFF PRESS	(KG/CM2)	I	P129	:	0.11	(0.70)				
CCW COOLING WTR OUTLET TEMP	(DEG C)	I	T661A	:	35.6	(34.0)	T661B	:	35.5	(34.0)

2．アラームタイプライタ記録（抜粋）





1405	RTH ACT	LCV210E	CI AB DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL
1405	RTH I LO	F2100A	AI NO.5 A HEATER DRAIN FLOW	265.1 LL 130.0 T/H
1405	RTH A LO	F2100A	AI NO.5 A HEATER DRAIN FLOW	265.1 L 150.0 T/H
1405	ACT	PC4056	CI F STM LINE LC PRESS 2 SI PAST RC TRIP	
1405	ALM LO	F2100A	AI NO.5 A HEATER DRAIN FLOW	125.6 L 150.0 T/H
1405	INCR LO	F2100A	AI NO.5 A HEATER DRAIN FLOW	125.6 LL 130.0 T/H
1406	INCR LO	T410E	AI A RCL TAVG 1	100.0 DEGC
1406	ALM HI	U0104	CV A SG WIDE RNG LEVEL CORR VLV	50.0 H 50.0 %
1406	CRS LO	T410L	AI A RCL TAVG 1	DEGC
1406	CRS LO	T411L	AI A RCL TAVG 2	DEGC
1406	INCR HI	T410C	AI PRESSURIZER RELIEF TANK LEVEL	77.1 HH 77.0 PC
1406	CRS LO	T405C	AI RCL SUCTION TAVG	DEGC
1406	ALM LO	T410H	AI A RCL DT 1	23.6 L 23.0 %
1406	INCR LO	T410H	AI A RCL DT 1	23.6 LL 22.0 %
1406	INCR LO	T411H	AI B RCL DT 2	23.6 LL 22.0 %
1406	RTH A LO	T2066A	AI NO.2 A HEATER CONDENS WTR OUT T	65.7 L 65.0 DEGC
1406	RTH ACT	AFWP2A	CI A-H/D AFWP	STOP
1406	RCL HD T	10 HI ALARM	SUPPRESSER CONDITION	
1406	ACT	LCV210C	CI NS DRAIN TNK DRAIN VLV (C)	OP
1406	ALM LO	T405	AI C-C/V-RECIRC-FAN-CUT-TEMP	15.7 L 16.0 DEGC
1406	ACT	LC422B	CI B SG HI LEVEL 3 PAST FV ISO	SET
1406	ACT	LC422E	CI E SG HI LEVEL 1 PAST FV ISO	SET
1406	ACT	LC420B	CI B SG HI LEVEL CAUSE FV ISO	SET
1406	RTH I LO	F2110B	AI NO.5 B HEATER STEAM P	15.1E LL 15.00 KG/CM2
1406	ALM LO	T2121A	AI 1A MOIST SEPAR WTR DRAIN T	239.9 L 240.0 DEGC
1406	INCR LO	L2050	AI CONDENSATE TANK LEVEL	8.2 LL 8.2 M
1406	ACT	LC421B	CI C SG HI LEVEL 2 PAST FV ISC	SET
1406	RTH ACT	LCV211B	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL
1406	RTH ACT	TC406A	CI A DT DEVIATION ALARM 1	RESET
1406	RTH ACT	TC406D	CI B DT DEVIATION ALARM 4	RESET
1406	ACT	LCV211B	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP
1406	RTH ACT	TC406E	CI E DT DEVIATION ALARM 3	RESET
1406	RTH ACT	TC406B	CI A DT DEVIATION ALARM 2	RESET
1406	RTH ACT	LCV211E	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL
1407	ACT	LCV211E	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP
1407	RTH ACT	LCV211E	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL
1407	ACT	LCV211E	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP
1407	RTH ACT	LCV211B	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL
1407	ACT	LCV211B	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP
1407	RTH ACT	LCV211B	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL
1407	ACT	TC406D	CI B DT DEVIATION ALARM 4	SET
1407	ACT	TC406E	CI E DT DEVIATION ALARM 3	SET
1407	ACT	LCV211G	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP
1407	ALM HI	T410J	AI A RCL OVERTEMP DT SETPOINT 2	140.0 H 140.0 %
1407	ALM HI	T411J	AI A RCL OVERTEMP DT SETPOINT 2	141.2 H 140.0 %
1407	INCR HI	T411J	AI A RCL OVERTEMP DT SETPOINT 2	141.2 HH 141.0 %
1407	ACT	TC406A	CI A DT DEVIATION ALARM 1	SET
1407	ACT	TC406C	CI C DT DEVIATION ALARM 2	SET
1407	RTH ACT	LCV211B	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL
1407	RTH I HI	T412F	AI CONVERTER DRAIN T	177.6 HH 180.0 DEGC
1407	ALM LO	T2121C	AI 2A MOIST SEPAR WTR DRAIN T	239.3 L 240.0 DEGC
1407	RTH ACT	XYLCV1	CI C/V ISOLATION SIGNAL (C13X)	RESET
1407	RTH ACT	XYACV1	CI C/V ISOLATION SIGNAL (C13X)	RESET
1407	RTH ACT	TC405C	CI B-RCL TAVG DEVIATION ALARM 3	RESET
1407	ACT	LCV211B	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP
1407	INCR HI	T410J	AI A RCL OVERTEMP DT SETPOINT 1	142.F HH 141.0 %
1407	RTH ACT	TC405D	CI D RCL TAVG DEVIATION ALARM 4	RESET
1407	RTH I HI	T410J	AI A RCL OVERTEMP DT SETPOINT 1	135.2 HH 141.0 %
1407	RTH A HI	T410J	AI A RCL OVERTEMP DT SETPOINT 1	139.2 H 140.0 %
1407	RTH I HI	T411J	AI A RCL OVERTEMP DT SETPOINT 2	139.3 HH 141.0 %
1407	RTH A HI	T411J	AI A RCL OVERTEMP DT SETPOINT 2	139.3 H 140.0 %
1407	RTH I LO	T411H	AI A RCL DT 2	23.1 LL 22.0 %
1407	RTH A LO	T411H	AI A RCL DT 2	23.1 L 23.0 %
1407	RTH ACT	LCV211E	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL

1407	RTH ACT	LCV211E	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL
1407	ACT	LCV211E	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP
1407	ALM LO	T40C	AI B C/V RECIRC FAN CUT TEMP	15.7 L 16.0 DEGC
1407	ALM LC	T40C	AI C C/V RECIRC FAN CUT TEMP	15.5 L 16.0 DEGC
1407	RTH ACT	V3323	CI INST AIR CONP DISCH ISOL VALVE	OP
1407	RTH I LO	T410H	AI A RCL DT 1	23.7 LL 22.0 %
1407	RTH A LO	T410H	AI A RCL DT 1	23.7 L 23.0 %
1407	RTH ACT	LCV211B	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL
1407	ACT	LCV211E	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP
1407	ALM LO	P2423A	AI A IAS AIR RECEIVER PRESS	7.4 L 7.4 KG/CM2
1407	RTH ACT	IAC2A	CI A INST AIR COMPRESSOR	RUN
1407	ALM HI	F2423B	AI B IAS AIR DRIER OUT FLOW	337.3 H 300.0 NM3/H
1407	ALM LO	F2161E	AI 1B REHEAT SEPAR DRAIN F	16.2 L 16.0 T/H
1407	RTH A HI	F2423B	AI B IAS AIR DRIER OUT FLOW	320.1 H 300.0 NM3/H
1407	ALM LO	T410H	AI A RCL DT 1	22.4 L 23.0 %
1407	ALM LO	T411H	AI A RCL DT 2	22.2 L 23.0 %
1407	INCR LO	T454	AI PRESSURIZER SPRAY WATER A IN T	251.9 LL 252.0 DEGC
1407	INCR LO	T410H	AI A RCL DT 1	21.4 LL 22.0 %
1407	INCR LO	T411H	AI A RCL DT 2	21.1 LL 23.0 %
1407	RTH A LO	P2423A	AI A IAS AIR RECEIVER PRESS	7.4 L 7.4 KG/CM2
1407	RTH ACT	CHPTR	CI CHARGING PUMP TRIP	RESET
1408	ALM LO	UC210H	CV RCL D DT MAIN AVG	12.1 L 20.0 %
1408	INCR LO	UC210H	CV RCL B DT MAIN AVG	12.1 LL 19.0 %
1408	STM ACT	LCV465	CI LETDOWN LINE ISOLATION VALVE	FULLCL
1408	RTH ACT	TC406C	CI C DT DEVIATION ALARM 3	RESET
1408	RTH ACT	TC406B	CI A DT DEVIATION ALARM 2	RESET
1408	RTH ACT	TC406A	CI A DT DEVIATION ALARM 1	RESET
1408	ACT	LCV465	CI LETDOWN LINE ISOLATION VALVE	CL
1408	RTH ACT	LE410B	CI A SG LEVEL DEVIATION ALARM	RESET
1408	RTH ACT	TC406D	CI B DT DEVIATION ALARM 4	RESET
1408	RTH A LO	U0103	CV A LOOP SUB COOL	29.6 L 20.0 DEGC
1408	RTH ACT	LCV211B	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL
1408	ACT	LCV211E	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP
1408	RTH ACT	LCV210E	CI NS DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL
1408	ACT	LCV210E	CI NS DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP
1408	RTH ACT	LCV211B	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL
1408	INCR LO	P2401C	AI TB CONDENSER NARROW RANGE IP	727.8 LL 730.0 MMHG
1408	ALM LO	T235201	AI H2 COOLER INLET GAS T(25)	46.9 L 45.0 DEGC
1408	INCR LO	P2110B	AI NO.5 B HEATER STEAM P	14.9C LL 15.00 KG/CM2
1408	STM 1 LO	T2066B	AI NO.2 B HEATER CONDENS WTR OUT T	80.6 LL 80.0 DEGC
1408	ACT	LCV211E	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP
1408	RTH ACT	LCV211B	CI A LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL
1408	RTH ACT	LCV210C	CI NS DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL
1408	ACT	LCV21CE	CI NS DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP
1408	INCR LO	F2161A	AI 1A MOIST SEPAR DRAIN F	6.6 LL 10.0 T/H
1408	RTH ACT	LCV210E	CI NS DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL
1408	INCR LO	F2161E	AI 2A MOIST SEPAR DRAIN F	6.6 LL 10.0 T/H
1408	STM 1 LO	T451	AI PRESSURIZER LIQUID TEMP	310.E LL 310.0 DEGC
1408	ALM LO	T2121B	AI 1B MOIST SEPAR WTR DRAIN T	239.0 L 240.0 DEGC
1409	RTH ACT	CP2A	CI A CHARGING PUMP	RUN
1409	RTH I LO	F2101A	AI 1A MOIST SEPAR DRAIN F	11.3 LL 10.0 T/H
1409	RTH ACT	CP2B	CI B CHARGING PUMP	RUN
1409	RTH ACT	CP2C	CI C CHARGING PUMP	RUN
1409	ALM HI	T2069B	AI NO.5 B HEATER FEED WATER IN T	165.3 H 165.0 DEGC
1409	INCR LO	P2171	AI CONVERTER HEATING STM P	14.0 LL 15.0 KG/CM2
1409	RTH ACT	LC421B	CI B SG HI LEVEL 2 PAST FV ISO	RESET
1409	RTH ACT	LC420B	CI B SG HI LEVEL 1 PART FW ISO	RESET
1409	RTH ACT	LC420W	CI B SG HI LEVEL CAUSE FW ISC	RESET
1410	ALM LO	UE100A	CV NO.5 A HEATER DRAIN F ICHIN AVG	10.3 L 170.0 T/H
1410	INCR LO	U2100A	CV NO.5 A HEATER DRAIN F ICHIN AVG	10.3 LL 120.0 T/H
1410	ALM LO	UE100E	CV NO.5 B HEATER DRAIN F ICHIN AVG	0.0 L 120.0 T/H
1410	INCR LO	U2100B	CV NO.5 B HEATER DRAIN F ICHIN AVG	0.0 LL 150.0 T/H
1410	RTH ACT	LE422B	CI B SG HI LEVEL 3 PART FW ISC	RESET
1410	INCR LO	P2401B	AI TB CONDENSER NARROW RANGE IP	720.0 LL 720.0 MMHG
1410	ALM LO	T235202	AI H2 COOLER INLET GAS T(25)	46.0 L 45.0 DEGC
1410	ALM HI	T411J	AI A RCL OVERTEMP DT SETPOINT 2	140.0 H 140.0 %
1410	RTH A HI	T2127	AI CONVERTER DRAIN T	167.4 H 170.0 DEGC

1410	RTH A LO	T100	AI VCT TEMP	30.6 L 30.0 DEGC
1410	ALM LO	T2124B	AI NO.3 B HEATER DRAIN T	75.6 L 70.0 DEGC
1410	RTH I LO	F2101C	AI 2A MOIST SEPAR DRAIN F	33.3 LL 10.0 T/H
1410	INCR LO	F2101A	AI 1A MOIST SEPAR DRAIN F	8.4 LL 10.0 T/H
1410	INCR LO	F2101C	AI 2A MOIST SEPAR DRAIN F	8.4 LL 10.0 T/H
1411	RTH ACT	CEPER	CI A CONDENS WTR PMP CNTL	RUN
1411	RTH I LO	F110	AI CHARGING PUMP OUT FLOW	4.3E LL 4.00 M3/H
1411	RTH A LO	F110	AI CHARGING PUMP OUT FLOW	14.42 L 4.50 M3/H
1411	ALM HI	F110	AI CHARGING PUMP OUT FLOW	14.42 H 6.00 M3/H
1411	INCR HI	F110	AI CHARGING PUMP OUT FLOW	14.42 HH 6.50 M3/H
1411	ALM LO	L100	AI VCT LEVEL	37.E L 30.0 PC
1411	RTH I LO	P182	AI E RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	190.E LL 60.0 PSI
1411	ALM HI	U0104	CV B LOOP SUB COOL	46.57 H 40.00 DEGC
1411	RTH A LO	P102	AI B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	112.9 L 102.0 PSI
1411	INCR LO	L000	AI WST LEVEL	54.5 L 54.5 PC
1411	ALM LO	T2063	AI NO.1 HEATER CONDENS WTR IN T	15.7 L 20.0 DEGC
1411	STM I LO	L000	AI WST LEVEL	54.6 LL 54.5 PC
1411	RTH I HI	P100	AI VCT PRESS	1.48C HH 1.500 KG/CM2
1411	ACT	FCV112C	CI MAKEUP STOP V TO CH PUMP SUCTION CP	
1411	ACT	FCV110A	CI RHR TO BLENDER VALVE	CP
1411	INCR LO	L000	AI WST LEVEL	54.4 LL 54.5 PC
1411	ACT	FCV110E	CI CA TO BLENDER VALVE	FULLCL
1411	STM I LO	L412	AI A SG LEVEL 3 (NARROW RANGE)	43.3 LL 43.0 PC
1411	RTH I LO	L000	AI WST LEVEL	54.6 LL 54.5 PC
1412	INCR LO	L000	AI WST LEVEL	54.5 LL 54.5 PC
1412	ACT	LE410B	CI A SG LEVEL DEVIATION ALARM	SET
1412	INCR LC	L100	AI VCT LEVEL	32.7 LL 33.0 PC
1412	RTH A HI	P100	AI VCT PRESS	1.393 H 1.400 KG/CM2
1412	STM I LO	L000	AI WST LEVEL	54.6 LL 54.5 PC
1412	INCR LO	L000	AI WST LEVEL	54.5 LL 54.5 PC
1412	ALM LO	T2066A	AI NO.2 A HEATER CONDENS WTR OUT T	64.5 L 65.0 DEGC
1412	RTH I LO	F2101C	AI 2A MOIST SEPAR DRAIN F	16.5 LL 10.0 T/H
1412	STM A LO	L412	AI A SG LEVEL 3 (NARROW RANGE)	45.3 L 45.0 PC
1412	RTH I LO	L411	AI A SG LEVEL 2 (NARROW RANGE)	45.3 LL 45.0 PC
1413	STM I LO	L414	AI A SG LEVEL 4 (NARROW RANGE)	46.2 LL 46.0 PC
1413	ALM HI	U0103	CV A LOOP SUB COOL	48.67 H 46.00 DEGC
1413	STM I LO	L410	AI A SG LEVEL 1 (NARROW RANGE)	46.3 LL 46.0 PC
1413	RTH I LO	F2101A	AI 1A MOIST SEPAR DRAIN F	28.2 LL 10.0 T/H
1413	INCR LO	F2101C	AI 2A MOIST SEPAR DRAIN F	8.4 LL 10.0 T/H
1413	STM I LO	T452	AI PRESSURIZER VAPOR TEMP	310.9 LL 310.0 DEGC
1413	ALM HI	U0151	CV B SG BLOW DOWN FLOW	20.5 H 20.5 T/H
1413	INCR HI	U0104	CV B LOOP SUB COOL	50.27 HH 50.00 DEGC
1413	STM I LO	T454	AI PRESSURIZER SPRAY WATER A IN T	252.7 LL 252.0 DEGC
1413	INCR LO	F2101A	AI 1A MOIST SEPAR DRAIN F	8.4 LL 10.0 T/H
1413	STM A LO	L411	AI A SG LEVEL 2 (NARROW RANGE)	47.3 L 47.0 PC
1413	INCR LO	T2066A	AI NO.2 A HEATER CONDENS WTR OUT T	72.3 LL 80.0 DEGC
1413	INCR LO	T2066B	AI NO.2 B HEATER CONDENS WTR OUT T	77.E LL 80.0 DEGC
1413	STM A LO	T2262A	AI 1A TB EDGE SEA WTR OUT TEMP	15.2E L 15.00 DEGC
1413	STM A LO	L414	AI A SG LEVEL 4 (NARROW RANGE)	48.2 L 48.0 PC
1414	STM A LO	L410	AI A SG LEVEL 1 (NARROW RANGE)	48.3 L 48.0 PC
1414	STM A LO	T2063	AI NO.1 HEATER CONDENS WTR IN T	21.3 L 20.0 DEGC
1414	ALM HI	T2050B	AI DEAERATOR CONDENS WATER IN T	150.0 H 150.0 DEGC
1414	STM ACT	XYS1D	CI SI SIGNAL (S12X)	RESET
1414	STM ACT	XYS1C	CI SI SIGNAL (S12X)	RESET
1414	STM ACT	XYS1S02	CI SI SECUENCE START (3-17.1E)	RESET
1414	STM ACT	XYS1S01	CI SI SECUENCE START (2-7.8)	RESET
1414	STM ACT	XYRTBUV	CI S2/RTB UV COIL	RESET
1414	STM ACT	XYRTAUV	CI S2/RTA UV COIL	RESET
1414	STM ACT	XYRTBE	CI S2/RTB EVENT	RESET
1414	STM ACT	XYRTAE	CI S2/RTA EVENT	RESET
1414	ALM LC	P100	AI VCT PRESS	1.099 L 1.100 KG/CM2
1414	INCR LC	T453	AI PRESSURIZER SPRAY WATER B IN T	252.0 LL 252.0 DEGC
1414	INCR LO	T2121A	AI 1A MOIST SEPAR WTR DRAIN T	239.4 LL 240.0 DEGC
1414	INCR LO	T2121C	AI 2A MOIST SEPAR WTR DRAIN T	239.6 LL 240.0 DEGC
1415	STM I HI	L2055	AI TB CONDENSER HOTWELL LEVEL	162.4 HH 155.0 H

1415	INCR HI	L2055	AI TB CONDENSER HOTWELL LEVEL	156.3 HH 155.0 H
1415	STM I HI	L2055	AI TB CONDENSER HOTWELL LEVEL	156.6 HH 155.0 H
1415	CRS LC	T2066A	AI NO.2 A HEATER CONDENS WTR OUT T	DEGC
1415	STM A LO	T454	AI PRESSURIZER SPRAY WATER A IN T	252.9 L 252.0 DEGC
1415	RTH A LO	P100	AI VCT PRESS	1.111 L 1.100 KG/CM2
1415	ACT	FW51	CI F H/P FEED DISCHARGE VLV	FULLCL
1415	RTH I HI	T2050A	AI HOUSE SERVICE WATER HX OUT T	36.6 HH 36.0 DEGC
1415	RTH A HI	T2050A	AI HOUSE SERVICE WATER HX OUT T	36.0 H 36.0 DEGC
1415	INCR LO	T2121C	AI 2A MOIST SEPAR WTR DRAIN T	239.7 LL 240.0 DEGC
1416	STM I LO	L2055	AI TB CONDENSER HOTWELL LEVEL	117.7 H 125.0 MM
1416	RTH I HI	L420	AI B SG LEVEL 4 (NARROW RANGE)	56.7 HH 57.0 PC
1416	STM I HI	L421	AI B SG LEVEL 2 (NARROW RANGE)	56.7 HH 57.0 PC
1416	STM I HI	L422	AI B SG LEVEL 3 (NARROW RANGE)	56.7 HH 57.0 PC
1416	STM I HI	L424	AI B SG LEVEL 4 (NARROW RANGE)	56.1 HH 57.0 PC
1416	STM I LO	L2060	AI CONDENSATE TANK LEVEL	6.3 LL 6.2 M
1416	INCR HI	U0103	CV A LOOP SUB COOL	50.01 HH 50.00 DEGC
1416	ALM LO	P102	AI B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	101.6 L 102.0 PSI
1416	INCR LO	T451	AI PRESSURIZER LIQUID TEMP	309.5 LL 310.0 DEGC
1416	ALM HI	L414	AI A SG LEVEL 4 (NARROW RANGE)	55.1 H 55.0 PC
1416	STM A HI	L420	AI C SG LEVEL 1 (NARROW RANGE)	54.7 H 55.0 PC
1416	STM A HI	L424	AI B SG LEVEL 4 (NARROW RANGE)	54.7 H 55.0 PC
1416	STM A HI	L421	AI B SG LEVEL 2 (NARROW RANGE)	54.7 H 55.0 PC
1416	ALM HI	L412	AI A SG LEVEL 3 (NARROW RANGE)	55.2 H 55.0 PC
1416	ALM HI	P2057	AI C H/D AUX FW PUMP CUT PRESS	110.3 H 110.0 KG/CM2
1416	ALM HI	L410	AI A SG LEVEL 1 (NARROW RANGE)	55.2 H 55.0 PC
1416	ALM HI	L411	AI A SG LEVEL 2 (NARROW RANGE)	55.2 H 55.0 PC
1417	ALM LO	T2050A	AI HOUSE SERVICE WATER HX OUT T	35.1 L 36.0 DEGC
1417	STM A HI	T2050B	AI DEAERATOR CONDENS WATER IN T	122.2 H 150.0 DEGC
1417	STM A LO	L2060	AI CONDENSATE TANK LEVEL	6.0 L 6.3 M
1417	ACT	V530	CI PZR RELIEF ISOLATION VALVE	CL
1417	ALM LO	L104	AI VCT LEVEL (WIDE)	5.C L 10.0 PC
1417	STM I LO	P2101C	AI 2A MOIST SEPAR DRAIN F	20.2 LL 10.0 T/H
1417	ALM HI	L421	AI B SG LEVEL 2 (NARROW RANGE)	55.1 H 55.0 PC
1417	ALM HI	L424	AI B SG LEVEL 4 (NARROW RANGE)	55.1 H 55.0 PC
1417	INCR LO	F2101E	AI 2A MOIST SEPAR DRAIN F	8.4 LL 10.0 T/H
1417	RTH ACT	PCV402B	CI ATM REL VALVE OPEN ALARM	RESET
1417	INCR HI	L414	AI A SG LEVEL 4 (NARROW RANGE)	57.1 HH 57.0 PC
1417	ACT	ICV420A	CI P AFW FLOW H/C VALVE	FULLCL
1417	INCR HI	L418	AI A SG LEVEL 3 (NARROW RANGE)	57.2 HH 57.0 PC
1417	INCR HI	L410	AI A SG LEVEL 1 (NARROW RANGE)	57.1 HH 57.0 PC
1417	INCR HI	L411	AI A SG LEVEL 2 (NARROW RANGE)	57.1 HH 57.0 PC
1417	ALM HI	T454	AI PRESSURIZER SPRAY WATER A IN T	290.6 H 290.0 DEGC
1418	CRS LO	T2066E	AI NO.2 B HEATER CONDENS WTR OUT T	DEGC
1418	INCR LC	P2401A	AI TB CONDENSER WIDE RANGE P	728.0 LL 728.0 MMHG
1418	INCR LO	T2050C	AI HOUSE SERVICE WATER HX OUT T	33.5 LL 34.0 DEGC
1418	ALM LO	T2050B	AI DEAERATOR CONDENS WATER IN T	100.7 L 110.0 DEGC
1418	ALM HI	T416J	AI A RCL OVERTEMP DT SETPOINT 1	140.0 H 140.0 %
1418	STM ACT	V530	CI PZR RELIEF ISOLATION VALVE	FULLOP
1418	ACT	V526	CI PZR RELIEF ISOLATION VALVE	CL
1418	ALM HI	T411J	AI A RCL OVERTEMP DT SETPOINT 2	140.0 H 140.0 %
1418	STM I HI	P2051	AI DEAERATOR PRESS	8.29 HH 8.50 KG/CM2
1418	STM I HI	T2123B	AI NO.5 B HEATER DRAIN T	194.1 HH 195.0 DEGC
1418	ACT	LEV100B	CI EMERGENCY MAKEUP VALVE	CP
1418	INCR LO	L104	AI VCT LEVEL (WIDE)	3.C LL 3.0 PC
1418	ACT	LCV100C	CI VCT DVT STOP VALVE	CL
1418	ALM HI	T412J	AI B RCL OVERTEMP DT SETPOINT 1	140.0 H 140.0 %
1418	ACT	PCV402A	CI ATM REL VALVE OPEN ALARM	RESET
1418	ALM HI	T411J	AI A RCL OVERTEMP DT SETPOINT 2	141.C H 140.0 %
1418	INCR HI	T454	AI PRESSURIZER SPRAY WATER A IN T	290.2 HH 290.0 DEGC
1418	RTH ACT	PCV402A	CI ATM REL VALVE OPEN ALARM	RESET
1419	STM A HI	P2051	AI DEAERATOR PRESS	7.62 H 8.00 KG/CM2
1419	INCR LO	T2124B	AI NO.3 B HEATER DRAIN T	68.9 LL 70.0 DEGC
1419	STM A LO	T407	AI B G/V RECIRC FAN CUT TEMP	16.E L 16.0 DEGC
1420	INCR LO	T2050E	AI DEAERATOR CONDENS WATER IN T	100.0 LL 100.0 DEGC
1420	ALM HI	L420C	AI CONDENSATE TANK LEVEL	6.C H 6.0 M
1420	ALM HI	L420	AI B SG LEVEL 1 (NARROW RANGE)	55.1 H 55.0 PC
1420	INCR HI	L417	AI A SG LEVEL (WIDE RANGE)	70.C H 70.C PC

1420	RTH ACT	CQP2B	CI B CONDENS WTR PMP DISC	RUN	
1420	RTH A HI	L2066	AI CONDENSATE TANK LEVEL	8.6 H	8.9 H
1420	RTH ACT	P2057	CI B H/D AFWP DISCHARGE VLV	OP	
1420	RTH A HI	P2057	AI B H/D AUX FW PUMP OUT PRESS	99.5 H	110.0 KG/CM2
1421	RTH I LO	P101	AI A RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	97.8 LL	97.0 CMH
1421	RTH A LO	P102	AI B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	104.6 L	102.0 CMH
1421	RTH A LO	P101	AI A RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	109.6 L	102.0 CMH
1421	ACT	LCV2110	CI HD3B HEATER DRAIN VLV (E)	OP	
1421	RTH ACT	LCV2110	CI HD3B HEATER DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1421	ALM LO	T426A	AI B MAIN FEED WATER TEMP	165.5 L	160.0 DEGC
1421	ACT	LCV2110	CI HD3B HEATER DRAIN VLV (C)	OP	
1421	RTH ACT	V536	CI P2R RELIEF ISOLATION VALVE	FULLOP	
1421	RTH ACT	LCV2110	CI HD3B HEATER DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1421	ACT	LCV2110	CI HD3B HEATER DRAIN VLV (E)	OP	
1421	ALM LC	L2055	AI TB CONDENSER ICTWELL LEVEL	-127.1 L	-125.0 MM
1421	RTH ACT	LCV2110	CI HD3B HEATER DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1421	ACT	LCV2110	CI HD3B HEATER DRAIN VLV (E)	OP	
1421	ACT	LCV2112	CI HD3A HEATER DRAIN VLV (E)	OP	
1422	INCR LO	L2055	AI TB CONDENSER ICTWELL LEVEL	-157.5 LL	-155.0 MM
1422	RTH I LO	F2101A	AI 1A FDIST SEPAR DRAIN F	12.1 LL	10.0 T/H
1422	RTH ACT	LCV2110	CI HD3B HEATER DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1422	INCR LO	F2101A	AI 1A FDIST SEPAR DRAIN F	8.4 LL	10.0 T/H
1422	ACT	LCV2110	CI HD3E HEATER DRAIN VLV (E)	OP	
1422	RTH ACT	LCV2110	CI HD3E HEATER DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1422	ACT	LCV2110	CI HD3E HEATER DRAIN VLV (E)	OP	
1422	RTH ACT	LCV2112	CI HD3A HEATER DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1422	RTH ACT	LCV2110	CI HD3B HEATER DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1422	INCR LO	T2121C	AI 2A FDIST SEPAR HTR DRAIN T	229.7 LL	230.0 DEGC
1422	ACT	LCV2112	CI HD3A HEATER DRAIN VLV (E)	OP	
1422	ACT	LC410E	CI 1 A SG HI LEVEL 1 PART FW ISC	SET	
1422	ACT	LC410CH	CI A SG HI LEVEL CAUSE FW ISG	SET	
1422	ACT	LC412E	CI A SG HI LEVEL 2 PART FW ISC	SET	
1422	RTH ACT	LCV2112	CI HD3A HEATER DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1422	ACT	LCV2112	CI HD3A HEATER DRAIN VLV (E)	OP	
1422	ALM LO	P2051	AI CONDENSATE PRESS	5.45 L	5.50 KG/CM2
1422	RTH ACT	LCV2112	CI HD3A HEATER DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1423	ACT	LCV2112	CI HD3A HEATER DRAIN VLV (E)	OP	
1423	ACT	LC410E	CI 1 A SG HI LEVEL 1 PART FW ISC	SET	
1423	RTH A LO	T2262C	AI 2A TB COND SEA WTR OUT TEMP	15.5E L	15.00 DEGC
1424	RTH I LO	F2101C	AI 2A FDIST SEPAR DRAIN F	12.1 LL	10.0 T/H
1424	INCR HI	L422	AI B SG LEVEL 3 (NARROW RANGE)	57.1 HI	57.0 PC
1424	INCR LO	F2101C	AI 2A FDIST SEPAR DRAIN F	9.4 LL	10.0 T/H
1424	INCR HI	L421	AI B SG LEVEL 2 (NARROW RANGE)	57.1 HI	57.0 PC
1424	INCR HI	L424	AI C SG LEVEL 4 (NARROW RANGE)	57.1 HI	57.0 PC
1424	ACT	LC410E	CI A SG HI-HI LEVEL 1 PART TT	TRIP	
1424	ACT	LC412E	CI A SG HI-HI LEVEL 4 PART TT	TRIP	
1424	ACT	LC410EH	CI A SG HI-HI LEVEL CAUSE TT	TRIP	
1424	ACT	LC411E	CI A SG HI-HI LEVEL 3 PART TT	TRIP	
1424	INCR HI	L420	AI B SG LEVEL 1 (NARROW RANGE)	57.1 HI	57.0 PC
1424	RTH O LO	L465	AI PRESSURIZER LEVEL 1		PC
1425	CRR LO	T2128A	AI MS-3 A HEATER DRAIN T		DEGC
1425	ACT	V3223	CI INST AIR CONT DISCH ISOL VALVE	FULLCL	
1425	RTH O LO	L466	AI PRESSURIZER LEVEL 2		PC
1425	RTH O LO	L467	AI PRESSURIZER LEVEL 3		PC
1425	INCR LO	T2050C	AI B FW IN FEED WATER T	120.6 HI	120.0 DEGC
1425	ALM HI	L2060	AI CONDENSATE TANK LEVEL	8.8 H	8.9 H
1426	RTH ACT	HE60B	CI B A/E EXHAUST FAN	RUN	

1426	RTH ACT	HE60B	CI B A/E EXHAUST FAN	RUN	
1426	ALM LC	T2050F	AI C FW IN FEED WATER T	139.1 L	140.0 DEGC
1426	RTH ACT	RHRP2A	CI A RHR PUMP	STOP	
1426	ASL NO	5 IS IN ALARM	SUPPRESSED CONDITION		
1426	ASL NO	5-IS-REMARMED			
1427	ACT	V555E	CI HOT LEG SAMPLE LINE ISOL VALVE L	OP	
1427	RTH A HI	FG71A	AI A RCP SEAL WTR OUT FLOW	42.5 H	45.0 M3/H
1427	RTH A HI	FG71E	AI B RCP SEAL WTR OUT FLOW	44.4 H	45.0 M3/H
1427	ALM LO	F123E	AI A-RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.548 L	0.550 M3/H
1427	RTH ACT	RHRP2B	CI B RHR PUMP	STOP	
1427	ASL NO	5-IS-HI ALARM	SUPPRESSED CONDITION		
1427	ALM LO	U015C	CV RCP A TC 1+2 SEAL LEAK OFF FLOW	0.548 L	0.550 M3/H
1427	RTH ACT	V555E	CI HOT LEG SAMPLE LINE ISOL VALVE B	FULLCL	
1427	INCR HI	T410J	AI A RCL OVERTEMP DT SETPOINT 1	141.1 HI	141.0 C
1427	CRR LO	P5001E	AI 1E RHR STOP VLV IN STM P		KG/CM2
1427	INCR HI	P102	AI B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	150.5 HI	150.0 CMH
1427	RTH ACT	LCV465	CI LETDOWN LINE ISOLATION VALVE	FULLOP	
1427	ACT	LCV465	CI LETDOWN LINE ISOLATION VALVE	CL	
1428	INCR HI	L2056	AI DEAERATOR LEVEL	3.702 HI	3.700 M
1428	CRR LO	P5001D	AI 2D RHR STOP VLV IN STM P		KG/CM2
1428	RTH I HI	L2056	AI DEAERATOR LEVEL	3.694 HI	3.700 M
1428	INCR HI	L2056	AI DEAERATOR LEVEL	3.702 HI	3.700 M
1428	INCR HI	LC146	CV A SG HIGH RNG LEVEL CORR VLV	50.0 HI	50.0 %
1428	INCR LO	T2050F	AI C FW IN FEED WATER T	128.6 LL	130.0 DEGC
1428	INCR LO	T4396A	AI GEN SEAL OIL TEMP	35.6 LL	35.6 DEGC
1428	RTH ACT	SWP2B	CI B SEA WTR PUMP BKR	RUN	
1428	RTH I HI	L2056	AI DEAERATOR LEVEL	3.694 HI	3.700 M
1429	INCR HI	L2056	AI DEAERATOR LEVEL	3.702 HI	3.700 M
1429	ACT	PCV482A	CI ATH REL VALVE OPEN ALARM	SET	
1429	RTH I HI	L2056	AI DEAERATOR LEVEL	3.694 HI	3.700 M
1429	ACT	PCV482A	CI ATH REL VALVE OPEN ALARM	RESET	
1429	INCR HI	L2056	AI DEAERATOR LEVEL	3.702 HI	3.700 M
1429	RTH I HI	P101	AI A RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	146.0 HI	145.0 CMH
1429	INCR HI	P102	AI B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	154.0 HI	150.0 CMH
1429	CRR HI	F110	AI CHARGING PUMP OUT FLOW		M3/H
1430	ACT	HE10A	CI A A/E CHARCOAL FAN	STOP	
1430	RTH ACT	LCV2116	CI C LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1430	RTH ACT	LCV465	CI LETDOWN LINE ISOLATION VALVE	FULLOP	
1430	ACT	LCV465	CI LETDOWN LINE ISOLATION VALVE	CL	
1430	ALM HI	R16	AI R-16 (C/V STACK GAS)	55. H	50. DICI
1430	RTH A HI	R16	AI R-16 (C/V STACK GAS)	85. H	50. DICI
1430	ALM LO	T407	AI B C/V RECIRC FAN OUT TEMP	15.7 L	16.0 DEGC
1430	CRR LO	PF501A	AI 1A RHR STOP VLV IN STM P		KG/CM2
1430	RTH A HI	L2060	AI CONDENSATE TANK LEVEL	8.9 H	8.9 M
1431	RTH ACT	XYME6V	CI A D/G VOLTAGE ESTABLISHED	RESET	
1431	RTH ACT	DGEN2A	CI A D/G START	OFF	
1431	CRR LO	P5001E	AI 2A RHR STOP VLV IN STM P		KG/CM2
1431	INCR LO	T420A	AI B MAIN FEED WATER TEMP	170.4 LL	180.0 DEGC
1431	RTH ACT	PE467	CI RCP B OIL LIFT PUMP PRESS	NORMAL	
1432	ALM LO	T2050D	AI A FW IN FEED WATER T	130.6 L	140.0 DEGC
1432	RTH A HI	T2123E	AI MS-3 B HEATER DRAIN T	183.8 H	185.0 DEGC
1432	ALM LO	T2401E	AI B DISCHARGE SEA WTR TEMP	12.6 L	13.0 DEGC
1433	ALM LO	T2113A	AI MS-3 A EXTRACTION STM T	134.6 L	135.0 DEGC
1433	RTH ACT	SUPTP	CI SEA WATER PUMP TRIP	RESET	
1433	ACT	SUPTP	CI SEA WATER PUMP TRIP	TRIP	
1433	ALM LO	P957	AI C/V PRESS (NARROW)	0.005 L	0.005 KG/CM2
1433	RTH ACT	XYME6V	CI B D/G VOLTAGE ESTABLISHED	RESET	
1433	RTH ACT	DGEN2B	CI B D/G START	OFF	
1433	RTH ACT	SUPTP	CI SEA WATER PUMP TRIP	RESET	
1434	ACT	V202	CI PZR AUXILARY SPRAY VALVE	OP	
1434	RTH I HI	T410J	AI A RCL OVERTEMP DT SETPOINT 1	139.8 HI	141.0 C
1434	RTH A HI	T410J	AI A RCL OVERTEMP DT SETPOINT 1	139.8 HI	140.0 C
1434	CRR LO	P8106F	AI 1F HP TURB EXHAUST STEAM P		KG/CM2
1434	RTH A HI	T421J	AI D RCL OVERTEMP DT SETPOINT 2	137.8 HI	140.0 C
1434	RTH A HI	T420J	AI B RCL OVERTEMP DT SETPOINT 1	137.8 HI	140.0 C
1435	RTH ACT	V1622	CI RC DRAIN TANK ISOLATION VALVE	OP	

1435	RTH C HI	F101	AI A RCP SEAL WATER INJECTION FLOW		M3/H
1435	RTH I HI	P101	AI A RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	147.5 HI	150.0 CMH
1435	RTH O HI	F110	AI CHARGING PUMP OUT FLOW		M3/H
1435	RTH A HI	P101	AI A RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	135.6 HI	145.0 CMH
1435	RTH I HI	P102	AI B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	146.7 HI	150.0 CMH
1435	RTH A HI	P102	AI B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	143.1 HI	145.0 CMH
1435	INCR LO	T452	AI PRESSURIZER VAPOR TEMP	310.0 LL	310.0 DEGC
1435	RTH ACT	HS60A	CI T/B AFWP STEAM THROTTLE VLV A	FULLCL	
1435	RTH ACT	CVSX	CI AUX FW PUMP STM IN VALVE	RUN	
1435	RTH ACT	HS60B	CI T/B AFWP STEAM THROTTLE VLV B	FULLCL	
1436	ACT	V3510	CI CV AIR SAMPLE LINE ISC V(IN)	OP	
1436	RTH I HI	T454	AI PRESSURIZER SPRAY WATER A IN T	289.3 HI	290.0 DEGC
1436	ACT	V3511A	CI CV AIR SAMPLE LINE ISC V(OUT)	OP	
1436	ACT	VP511E	CI CV AIR LINE ISC V	OP	
1436	RTH ACT	LC465E	CI PZR LO LEVEL 1 SI PART RE	RESET	
1436	RTH ACT	LC466B	CI PZR LO LEVEL 2 SI PART RE	RESET	
1436	RTH ACT	LC465H	CI PZR LO LEVEL 1 SI CAUSE RE	RESET	
1436	RTH ACT	LC467E	CI PZR LO LEVEL 3 SI PART RE	RESET	
1436	INCR LO	T2050D	AI A FW IN FEED WATER T	128.7 LL	130.0 DEGC
1437	RTH ACT	SIP2A	GI A SI PUMP	STOP	
1437	RTH ACT	SIP2C	CI B SI PUMP	STOP	
1437	ASL NO	5-IS-HI ALARM	SUPPRESSED CONDITION		
1438	RTH A HI	T454	AI PRESSURIZER SPRAY WATER A IN T	289.1 H	290.0 DEGC
1438	CRR LO	PE167A	AI 1A HP TURB EXHAUST STEAM P		KG/CM2
1438	ACT	ACP2A	CI AUXILIARY OIL PUMP AUTO	NOTUSE	
1438	ACT	ACPER	CI AUXILIARY OIL PUMP RUN	RUN	
1438	RTH ACT	ACP2A	CI AUXILIARY OIL PUMP AUTO	USE	
1438	RTH I LO	P2406	AI GOVERNOR CONTROL OIL P	4.266 LL	2.700 KG/CM2
1438	RTH A LO	P2406	AI GOVERNOR CONTROL OIL P	4.266 L	2.800 KG/CM2
1438	ALM HI	PF465	AI GOVERNOR CONTROL OIL P	7.261 H	7.500 KG/CM2
1438	INCR HI	P2406	AI GOVERNOR CONTROL OIL P	4.266 HI	3.000 KG/CM2
1438	RTH I HI	P531	AI BORON INJECTION TANK PRESS	5.5 HI	11.0 KG/CM2
1438	RTH A HI	P531	AI BORON INJECTION TANK PRESS	5.5 H	10.0 KG/CM2
1438	ACT	PCV455E	CI PRESSURIZER SPRAY VALVE E	OP	
1438	ACT	ECP2A	CI EMERGENCY OIL PUMP AUTO	NOTUSE	
1438	RTH ACT	ECPER	CI EMERGENCY OIL PUMP RUN	STOP	
1438	RTH ACT	EGP2A	CI EMERGENCY OIL PUMP AUTO	USE	
1438	RTH ACT	PCV455C	CI PRESSURIZER SPRAY VALVE C	FULLCL	
1439	ALM LO	P455H	AI PZR SPRAY CONTROL B SETPOINT	-15.7 L	-15.0 PC
1439	ACT	PCV482A	CI ATH REL VALVE OPEN ALARM	SET	
1439	ALM LO	P455G	AI PZR SPRAY CONTROL A SETPOINT	-20.2 L	-15.0 PC
1439	RTH I HI	P415	AI A MAIN STEAM PRESS 2	61.76 HI	62.00 KG/CM2
1439	RTH I HI	P414	AI A MAIN STEAM PRESS 1	61.84 HI	62.00 KG/CM2
1439	RTH I HI	P416	AI A MAIN STEAM PRESS 3	61.68 HI	62.00 KG/CM2
1439	RTH ACT	PCV482A	CI ATH REL VALVE OPEN ALARM	RESET	
1439	INCR HI	P414	AI A MAIN STEAM PRESS 1	62.05 HI	62.00 KG/CM2
1439	INCR HI	P416	AI A MAIN STEAM PRESS 3	62.10 HI	62.00 KG/CM2
1439	INCR HI	P415	AI A MAIN STEAM PRESS 2	62.16 HI	62.00 KG/CM2
1439	RTH I LO	T2250A	AI HOUSE SERVICE WATER TK OUT T	26.2 LL	24.0 DEGC
1440	ALM HI	R16	AI R-16 (C/V STACK GAS)	50. H	50. DICI
1440	RTH A HI	R16	AI R-16 (C/V STACK GAS)	81. H	50. DICI
1440	ALM LO	LG70A	AI A DGP CCW SURGE TANK LEVEL	46.0 L	46.0 PC
1440	RTH I HI	U0582	CV A LOOP SUP COOL	46.35 HI	50.00 DEGC
1440	ACT	LC420F	CI C SG HI LEVEL 1 PART FW ISG	SET	
1440	ACT	LC420EH	CI C SG HI LEVEL CAUSE FW ISG	SET	
1441	CRR LO	T2121C	AI 1B FDIST SEPAR HTR DRAIN T		DEGC
1441	ACT	LC421E	CI B SG HI LEVEL 2 PART FW ISG	SET	
1441	RTH I LO	T2050B	AI DEAERATOR CONDENS WATER IN T	101.6 LL	100.0 DEGC
1441	RTH A LO	LG70A	AI A DGP CCW SURGE TANK LEVEL	46.2 L	46.0 PC
1441	ALM LO	LG70A	AI A DGP CCW SURGE TANK LEVEL	46.2 L	46.0 PC
1441	RTH A LO	LG70A	AI A DGP CCW SURGE TANK LEVEL	46.2 L	46.0 PC
1442	ACT	PCV482F	CI ATH REL VALVE OPEN ALARM	SET	
1442	RTH I HI	U0582	CV A LOOP SUP COOL	46.28 HI	50.00 DEGC
1443	RTH A LO	T342B	AI B DISCHARGE SEA WTR TEMP	13.6 L	13.0 DEGC

1443	RTH ACT	CWP1P	CI CW PUMP	RESET	
1443	ALM LO	T454	AI PRESSURIZER SPRAY WATER A IN T	289.8 L	290.0 DEGC
1443	ACT	LC420E	CI C SG HI-HI LEVEL 4 PART TT	TRIP	
1443	ACT	LC422E	CI C SG HI-HI LEVEL 1 PART TT	TRIP	
1443	ACT	LC420EH	CI C SG HI-HI LEVEL CAUSE TT	TRIP	
1443	ACT	LC421E	CI C SG HI-HI LEVEL 2 PART TT	TRIP	
1443	ACT	FL051	CI C H/D AFWP DISCHARGE VLV	FULLCL	
1444	RTH ACT	FL051	CI B H/D AFWP DISCHARGE VLV	OP	
1444	RTH ACT	LG420E	CI PZR LO LC HTR	RESET	
1444	RTH ACT	LG465C	CI PZR LO LC HTR OFF LTDN ISO V CP	RESET	
1444	RTH ACT	LG466B	CI PZR LO LC HTR OFF LTDN ISO V CP	RESET	
1444	RTH A HI	U0503	CV A LOOP SUP COOL	30.54 H	40.00 DEGC
1444	INCR LO	T2050A	AI REMOTE FEEDWATER IN CUT T	21.7 LL	21.0 DEGC
1445	ALM LO	LG70A	AI A DGP CCW SURGE TANK LEVEL	45.9 L	46.0 PC
1445	RTH A LO	LG70A	AI A DGP CCW SURGE TANK LEVEL	46.2 L	46.0 PC
1445	INCR LO	T454	AI PRESSURIZER SPRAY WATER A IN T	251.0 LL	252.0 DEGC
1446	ACT	LG465E	CI PZR HI-LEVEL BACKUP HEATER CH	SET	
1446	RTH A LO	T2050B	AI DEAERATOR CONDENS WATER IN T	111.2 L	110.0 DEGC
1446	ACT	LG465C	CI PZR LEVEL CONT CHARGING LC F	SET	
1447	ALM LO	LG70A	AI A DGP CCW SURGE TANK LEVEL	46.0 L	46.0 PC
1447	ACT	V555B	CI HOT LEG SAMPLE LINE ISOL VALVE B	OP	
1447	RTH A HI	U0904	CV B LOOP SUP COOL	39.36 H	40.00 DEGC
1448	RTH A LO	LG70A	AI A DGP CCW SURGE TANK LEVEL	46.2 L	46.0 PC
1448	RTH I LO	L465	AI PRESSURIZER LEVEL 1	44.0 LL	44.0 PC
1448	RTH I LO	L466	AI PRESSURIZER LEVEL 2	44.3 LL	44.0 PC
1448	RTH I LO	L467	AI PRESSURIZER LEVEL 3	44.7 LL	44.0 PC
1448	ALM LO	T2126E	AI B LP HEATER DRAIN PUMP OUT T	55.6 L	60.0 DEGC
1448	RTH A LO	L465	AI PRESSURIZER LEVEL 1	45.6 L	45.0 PC
1448	RTH A LO	L467	AI PRESSURIZER LEVEL 3	45.6 L	45.0 PC
1448	RTH A LO	L466	AI PRESSURIZER LEVEL 2	45.6 L	45.0 PC
1448	ACT	FL051	CI C H/D AFWP DISCHARGE VLV	FULLCL	
1448	RTH ACT	V202	CI PZR AUXILIARY SPRAY VALVE	FULLCL	
1448	RTH ACT	LCV465	CI LETDOWN LINE ISOLATION VALVE	FULLCL	
1448	ALM HI	P102	AI B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	152.0 H	145.0 CMH
1448	INCR HI	P102	AI B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	152.6 HI	150.0 CMH
1449	RTH I LO	UC240H	CV PZR L 1/2/3 HIGH AVG	44.6 LL	42.0 PC
1449	ALM HI	P101	AI A RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	146.2 H	145.0 CMH
1449	INCR LO	F123D	AI A RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.440 LL	0.450 M3/H
1449	ALM LO	LG70A	AI A DGP CCW SURGE TANK LEVEL	46.0 L	46.0 PC
1449	ALM LO	T2111B	AI MS-3 B EXTRACTION STM T	134.6 L	135.0 DEGC
1449	RTH ACT	V200A	CI LETDOWN ORIFICE STOP VALVE A	OP	
1449	RTH A LO	LG70A	AI A DGP CCW SURGE TANK LEVEL	46.2 L	46.0 PC
1450	RTH A LO	UC240H	CV PZR L 1/2/3 HIGH AVG	47.8 L	45.0 PC
1450	RTH ACT	V209	CI LETDOWN LINE C/V ISC VALVE	OP	
1450	ACT	V200A	CI LETDOWN ORIFICE STOP VALVE A	FULLCL	
1450	RTH ACT	PCV113	CI LETDOWN LINE PRESS CONTROL VALVE	OP	
1450	ACT	V555A	CI HOT LEG SAMPLE LINE ISOL VALVE A	OP	
1450	ALM LO	LG70A	AI A DGP CCW SURGE TANK LEVEL	46.0 L	46.0 PC
1450	ALM HI	UC56A	CV F LOOP SUP COOL	46.12 H	40.00 DEGC
1450	RTH ACT	V200A	CI LETDOWN ORIFICE STOP VALVE A	OP	
1450	INCR LO	T115	AI NON REGEN HX OUT LTDN LINE T	30.7 LL	31.0 DEGC
1450	POST TRIP REVIEW	INITIATED 1113 H30 S38.4			
1451	RTH ACT	LC421E	CI B SG HI-HI LEVEL 2 PART TT	RESET	
1451	CRR LO	Y2425A	AI A CHP IMPELLER POSITION		PC
1451	ALM LO	Y2425F	AI B CHP IMPELLER POSITION	25.7 L	25.0 PC
1451	ALM LO	T2401E	AI B DISCHARGE SEA WTR TEMP	13.0 L	13.0 DEGC
1451	RTH I LO	L104	AI VCT LEVEL (WIDE)	4.5 LL	5.0 PC
1451	ALM LO	T113	AI NON REGEN HX LETDOWN OUT TEMP	29.6 L	30.0 DEGC
1451	RTH ACT	LC422E	CI B SG HI-HI LEVEL 1 PART TT	RESET	
1451	RTH ACT	LC420EH	CI B SG HI-HI LEVEL CAUSE TT	RESET	
1451	RTH ACT	LC420E	CI B SG HI-HI LEVEL 4 PART TT	RESET	
1451	RTH I LO	P113	AI NON REGEN HX LETDOWN OUT PRESS	17.69 LL	16.00 KG/CM2
1452	RTH A LO	P113	AI NON REGEN HX LETDOWN OUT PRESS	19.61 L	18.00 KG/CM2
1452	RTH I HI	P102	AI B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	138.4 HI	150.0 CMH
1452	RTH A HI	P102	AI B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	138.4 H	145.0 CMH

1452	ALM LC	P101	A1 A-RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	100.5	L	96.0	PSIG
1452	INCR LC	P101	A1 A RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	97.0	LL	97.0	PSI
1452	ALM LC	P102	A1 B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	98.5	LL	97.0	PSI
1452	INCR LC	P102	A1 B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	98.5	LL	97.0	PSI
1452	INCR LO	F113	A1 NON REGENER HX LETDOWN CUT TEMP	24.4	LL	25.0	DEGC
1453	RTN A LO	LG70A	A1 A BOP CCW SURGE TANK LEVEL	46.2	L	46.0	PC
1453	ALM LO	LG70A	A1 A BOP CCW SURGE TANK LEVEL	46.2	L	46.0	PC
1454	ALM HI	P113	A1 NON REGENER HX LETDOWN CUT PRESS	29.01	H	28.00	KG/CM2
1454	RTN 1 LO	F113	A1 NON REGENER HX LETDOWN CUT FLOW	12.09	LL	7.50	M3/H
1454	RTN A LO	F113	A1 NON REGENER HX LETDOWN CUT FLOW	12.09	L	8.00	M3/H
1454	ALM HI	F113	A1 NON REGENER HX LETDOWN CUT FLOW	12.09	HH	12.00	M3/H
1454	RTN A HI	P113	A1 NON REGENER HX LETDOWN CUT PRESS	19.64	H	20.00	KG/CM2
1454	ACT	V200C	C1 LETDOWN ORIFICE STOP VALVE C	OP			
1454	INCR HI	F113	A1 NON REGENER HX LETDOWN CUT FLOW	13.62	HH	12.50	M3/H
1454	ALM LO	P113	A1 NON REGENER HX LETDOWN CUT PRESS	7.69	LL	10.00	KG/CM2
1454	INCR LO	P113	A1 NON REGENER HX LETDOWN CUT PRESS	7.69	LL	10.00	KG/CM2
1454	RTN ACT	V200B	C1 LETDOWN ORIFICE STOP VALVE B	FULLCL			
1454	RTN 1 HI	F113	A1 NON REGENER HX LETDOWN OUT FLOW	7.44	HH	12.50	M3/H
1454	RTN A HI	F113	A1 NON REGENER HX LETDOWN OUT FLOW	7.44	H	12.00	M3/H
1454	ALM LO	F113	A1 NON REGENER HX LETDOWN OUT FLOW	7.44	L	7.00	M3/H
1454	INCR LO	F113	A1 NON REGENER HX LETDOWN OUT FLOW	7.44	LL	7.50	M3/H
1455	RTN A LO	L100	A1 VCT LEVEL (WIDE)	11.4	L	10.0	PC
1455	RTN 1 HI	V0147	CV B SG WIDE RNG LEVEL CORR VLV	69.0	HH	99.0	%
1455	RTN 1 LO	P113	A1 NON REGENER HX LETDOWN OUT PRESS	16.40	LL	16.00	KG/CM2
1455	ACT	LC420E	C1 B SG HI-HI LEVEL 4 PART TT	TRIP			
1455	ACT	LC422E	C1 B SG HI-HI LEVEL 1 PART TT	TRIP			
1455	ACT	LC420EW	C1 B SG HI-HI LEVEL CAUSE TT	TRIP			
1455	ACT	LC421E	C1 B SG HI-HI LEVEL 2 PART TT	TRIP			
1455	ALM HI	P100	A1 VCT PRESS	1.403	H	1.400	KG/CM2
1455	RTN A LO	P113	A1 NON REGENER HX LETDOWN OUT PRESS	18.29	L	18.00	KG/CM2
1455	ACT	CHPATC	C1 A CHP CNTL CLOSE RE TRIP PERM	RESET			
1455	ACT	MC415I	C1 TC RC TK PB PERM	RESET			
1455	RTN ACT	CHPBA	C1 A MP-DKR	RUN			
1455	RTN ACT	V855A	C1 IST LEG SAMPLE LINE ISOL VALVE A	FULLCL			
1456	RTN ACT	LC421E	C1 B SG HI-HI LEVEL 2 PART TT	RESET			
1456	RTN ACT	LC422E	C1 B SG HI-HI LEVEL 1 PART TT	RESET			
1456	RTN ACT	LC420EW	C1 B SG HI-HI LEVEL CAUSE TT	RESET			
1456	RTN 1 HI	F110	A1 CHARGING PUMP OUT FLOW	7.64	HH	8.50	M3/H
1456	RTN A HI	F110	A1 CHARGING PUMP OUT FLOW	7.64	H	8.00	M3/H
1456	RTN ACT	LC420E	C1 B SG HI-HI LEVEL A PART TT	RESET			
1456	RTN C LO	PT226A	A1 A CHP OUT P				KG/CM2
1456	CRR LO	L2055	A1 TB CONDENSER HOTWELL LEVEL				MM
1456	RTN C LO	L2055	A1 TB CONDENSER HOTWELL LEVEL				MM
1456	RTN A HI	U0504	CV B LOOP SUB COOL	39.58	H	40.00	DEGC
1457	RTN 1 LO	P2401C	A1 TB CONDENSER NARROW RANGE 2P	720.2	LL	728.0	MMHG
1457	ALM LO	PT226A	A1 A CHP OUT P	0.056	LL	0.056	KG/CM2
1457	INCR LO	PT226A	A1 A CHP OUT P	0.060	LL	0.060	KG/CM2
1457	INCR HI	P100	A1 VCT PRESS	1.502	HH	1.500	KG/CM2
1457	ASL NO 2 IS RETURNED						
1457	ALM LO	F102	A1 B RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	1.761	L	1.650	M3/H
1457	ALM LO	T122	A1 B RCP LOWER SEAL WATER BEARING T	38.5	L	45.0	DEGC
1457	INCR LO	T122	A1 B RCP LOWER SEAL WATER BEARING T	38.5	LL	40.0	DEGC
1457	ALM LO	F420	A1 B RCL FLOW 1	0.0	L	97.0	PC
1457	ALM LO	F420	A1 B RCL FLOW 1	0.0	LL	93.0	PC
1457	ALM LO	F421	A1 B RCL FLOW 2	0.0	L	97.0	PC
1457	INCR LO	F421	A1 B RCL FLOW 2	0.0	LL	93.0	PC
1457	ALM LO	F422	A1 B RCL FLOW 3	0.0	L	97.0	PC
1457	INCR LO	F422	A1 B RCL FLOW 3	0.0	LL	93.0	PC
1457	RTN 1 LO	F1236	A1 A-RCP-LEAK-FLOW-(HI-RANGE)	0.459	LL	0.450	M3/H
1457	RTN 1 HI	U0902	CV SUB COOL (MIN)	39.2	HH	50.0	DEGC
1457	RTN A HI	U05CE	CV SUB-COOL-(MIN)	39.2	H	40.0	DEGC
1457	ACT	LC422E	C1 B SG HI-HI LEVEL 1 PART TT	TRIP			
1457	ACT	LC420E	C1 B SG HI-HI LEVEL 4 PART TT	TRIP			
1457	ACT	LC420EW	C1 B SG HI-HI LEVEL CAUSE TT	TRIP			
1457	ACT	LC421E	C1 B SG HI-HI LEVEL 2 PART TT	TRIP			
1457	RTN 1 LO	P102	A1 B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	124.7	LL	97.0	PSI
1457	RTN A LO	P102	A1 B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	124.7	L	102.0	PSI

1457	RTN A LO	P102	A1 B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	124.7	L	102.0	PSI
1457	RTN 1 LO	F420	A1 B RCL FLOW 1	113.4	LL	93.0	PC
1457	RTN A LO	F420	A1 B RCL FLOW 1	113.4	L	97.0	PC
1457	ALM HI	F420	A1 B RCL FLOW 1	113.4	H	103.0	PC
1457	INCR HI	F420	A1 B RCL FLOW 1	113.4	HH	107.0	PC
1457	RTN 1 LO	F421	A1 B RCL FLOW 2	113.1	LL	93.0	PC
1457	RTN A LO	F421	A1 B RCL FLOW 2	113.1	L	97.0	PC
1457	ALM HI	F421	A1 B RCL FLOW 2	112.1	H	103.0	PC
1457	INCR HI	F421	A1 B RCL FLOW 2	113.1	HH	107.0	PC
1457	RTN 1 LO	F422	A1 B RCL FLOW 3	113.1	LL	93.0	PC
1457	RTN A LO	F422	A1 B RCL FLOW 3	113.1	L	97.0	PC
1457	ALM HI	F422	A1 B RCL FLOW 3	113.1	H	103.0	PC
1457	INCR HI	F422	A1 B RCL FLOW 3	113.1	HH	107.0	PC
1457	RTN ACT	LC422E	C1 B SG HI-HI LEVEL 1 PART TT	RESET			
1458	RTN ACT	LC421E	C1 B SG HI-HI LEVEL 2 PART TT	RESET			
1458	RTN ACT	LC420EW	C1 B SG HI-HI LEVEL CAUSE TT	RESET			
1458	RTN ACT	LC420E	C1 B SG HI-HI LEVEL A PART TT	RESET			
1458	INCR LO	F123D	A1 A RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.445	LL	0.450	M3/H
1458	ALM LO	T1	A1 IN CORE T/C C07	232.6	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T2	A1 IN CORE T/C C03	232.3	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T3	A1 IN CORE T/C C11	232.6	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T4	A1 IN CORE T/C C11	233.6	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T5	A1 IN CORE T/C G07	233.1	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T7	A1 IN CORE T/C F09	233.6	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T8	A1 IN CORE T/C H08	233.6	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T12	A1 IN CORE T/C H11	231.3	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T13	A1 IN CORE T/C J09	233.6	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T14	A1 IN CORE T/C J07	235.5	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T15	A1 IN CORE T/C K10	231.6	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T16	A1 IN CORE T/C J05	233.5	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T17	A1 IN CORE T/C K03	232.3	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T18	A1 IN CORE T/C L07	232.2	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T19	A1 IN CORE T/C B05	233.5	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T21	A1 IN CORE T/C C09	235.6	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T22	A1 IN CORE T/C D05	232.6	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T23	A1 IN CORE T/C D09	234.6	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T24	A1 IN CORE T/C E10	234.6	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T27	A1 IN CORE T/C F12	235.6	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T28	A1 IN CORE T/C G01	231.3	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T31	A1 IN CORE T/C H10	233.0	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T32	A1 IN CORE T/C K11	232.3	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T33	A1 IN CORE T/C I06	231.6	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T37	A1 IN CORE T/C K11	231.6	L	200.5	DEGC
1458	ALM LO	T38	A1 IN CORE T/C L10	231.3	L	200.5	DEGC
1458	RTN A HI	U0151	CV B SG WIDE RNG LEVEL	20.2	H	20.5	%
1458	ALM HI	U05CA	CV C LOOP SUB COOL	40.24	H	40.00	DEGC
1458	CRR LO	TE181A	A1 A-MIST-SEPAR-HTR-DRAIN-T				DEGC
1458	RTN 1 LO	P2401B	A1 TB CONDENSER NARROW RANGE 1P	728.8	LL	728.0	MMHG
1458	RTN A LO	P2401C	A1 TB CONDENSER NARROW RANGE 2P	734.0	L	733.0	MMHG
1458	RTN 1 LO	P2401A	A1 TB CONDENSER WIDE RENGE P	730.8	LL	728.0	MMHG
1458	ACT	LC420E	C1 B SG HI-HI LEVEL 4 PART TT	TRIP			
1458	ACT	LC422E	C1 B SG HI-HI LEVEL A PART TT	TRIP			
1458	ACT	LC420EW	C1 B SG HI-HI LEVEL CAUSE TT	TRIP			
1458	ALM LO	F123D	A1 D RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.342	L	0.350	M3/H
1458	ACT	LC421E	C1 B SG HI-HI LEVEL 2 PART TT	TRIP			
1458	ALM LO	U0159	CV RCP B NO.1+2 SEAL LEAK OFF FLOW	0.343	L	0.350	M3/H
1458	ALM HI	U05CC	CV SUB-COOL-(MIN)	42.1	H	40.0	DEGC
1458	RTN A LO	F123B	A1 B RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.359	L	0.350	M3/H
1458	ALM LO	F123B	A1 B-RCP-LEAK-FLOW-(HI-RANGE)	0.346	L	0.350	M3/H
1458	ACT	CHPCTR	C1 B CHP DKR CLOSE RE TRIP PERM	RESET			
1458	RTN ACT	CHP2B	C1 B MP-DKR	RUN			
1458	RTN 1 LO	F123B	A1 A RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.457	LL	0.450	M3/H
1458	RTN A LO	U0159	CV RCP B NO.1+2 SEAL LEAK OFF FLOW	0.361	L	0.350	M3/H
1458	INCR LO	F123B	A1 A RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.445	LL	0.450	M3/H
1458	RTN ACT	LC421E	C1 B SG HI-HI LEVEL 2 PART TT	RESET			
1458	RTN 0 LO	PT226D	A1 B CHP OUT P				KG/CM2
1458	RTN A LO	P2401A	A1 TB CONDENSER WIDE RENGE P	733.7	L	733.0	MMHG

1458	RTN A LO	P2401A	A1 TB CONDENSER WIDE RENGE P	733.7	L	733.0	MMHG
1458	ALM HI	PT226B	A1 B CHP OUT P	0.796	H	0.760	KG/CM2
1458	RTN ACT	LC420EW	C1 B SG HI-HI LEVEL CAUSE TT	RESET			
1458	RTN ACT	LC422E	C1 B SG HI-HI LEVEL 1 PART TT	RESET			
1458	RTN ACT	LC420E	C1 B SG HI-HI LEVEL 4 PART TT	RESET			
1458	ALM HI	U01G1	CV B RCP NO.2 STAND PIPE FLOW	35.0	H	15.0	L/M
1458	RTN A LO	F124E	A1 C RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.364	L	0.350	M3/H
1459	RTN 1 LO	F123B	A1 A RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.461	LL	0.450	M3/H
1459	RTN A LO	P455H	A1 PZR SPRAY CONTROL B SETPOINT	2.5	L	2.5	PC
1459	RTN 1 LO	U0210H	CV RCL B UNCORR FLOW 1MIN AVG	113.0	LL	94.0	PC
1459	RTN A LO	U0210H	CV RCL B UNCORR FLOW 1MIN AVG	113.0	L	95.0	PC
1459	CRR LO	PT226C	A1 C CHP OUT P				KG/CM2
1459	RTN A LO	P2401B	A1 TB CONDENSER NARROW RANGE 1P	733.7	L	732.0	MMHG
1459	ALM HI	P455H	A1 PZR SPRAY CONTROL B SETPOINT	10.7	H	10.0	PC
1459	ACT	PCV455E	C1 PRESSURIZER SPRAY VALVE B	OP			
1459	RTN A HI	P455H	A1 PZR SPRAY CONTROL B SETPOINT	9.2	H	10.0	PC
1459	RTN ACT	LC421E	C1 B SG HI-HI LEVEL 2 PART TT ISC	RESET			
1459	RTN ACT	LC422E	C1 B SG HI-HI LEVEL 3 PART TT ISC	RESET			
1459	RTN ACT	LC420EW	C1 B SG HI-HI LEVEL CAUSE TT ISC	RESET			
1459	ALM HI	P2401C	A1 TB CONDENSER NARROW RANGE 2P	741.7	H	740.0	MMHG
1459	RTN ACT	LC420F	C1 B SG HI-HI LEVEL 1 PART TT ISC	RESET			
1459	ALM LO	P102	A1 B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	99.2	L	102.0	PSI
1459	RTN A HI	U0161	CV B RCP NO.2 STAND PIPE FLOW	9.8	H	15.0	L/M
1459	ALM LO	F110	A1 CHARGING PUMP OUT FLOW	2.31	L	4.50	M3/H
1459	INCR LO	F110	A1 CHARGING PUMP OUT FLOW	2.31	LL	4.00	M3/H
1459	INCR LO	P102	A1 B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	95.6	LL	97.0	PSI
1459	INCR LO	F102	A1 B RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	1.335	LL	1.350	M3/H
1459	ALM LO	L46G	A1 PRESSURIZER LEVEL 2	45.0	L	45.0	PC
1500	RTN 1 HI	U0229H	CV SG A STM P 1MIN AVG	62.4	HH	65.0	KG/CM2
1500	ALM LO	T265CA	A1 A TE CORE-OUTLET CONTENT T	15.1	L	15.6	DEGC
1500	ALM LO	L46S	A1 PRESSURIZER LEVEL 1	44.9	L	45.0	PC
1500	ALM LO	L46T	A1 PRESSURIZER LEVEL 3	44.6	L	45.0	PC
1500	RTN A HI	U09C2	CV SUB COOL (MIN)	39.5	H	40.0	DEGC
1500	RTN A HI	U0904	CV B LOOP SUB COOL	39.49	H	40.00	DEGC
1500	ALM LO	T226C	A1 2A TE CORE SEA WTR OUT TEMP	14.91	L	15.00	DEGC
1500	ALM LO	T266A	A1 TE CORE-OUTLET CONTENT T	15.62	L	15.60	DEGC
1500	INCR LO	F123D	A1 A RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.445	LL	0.450	M3/H
1500	ALM LO	F124B	A1 B RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.346	L	0.350	M3/H
1500	INCR LO	L46G	A1 PRESSURIZER LEVEL 2	44.8	LL	44.0	PC
1500	RTN A LO	F124B	A1 B-RCP-LEAK-FLOW-(HI-RANGE)	0.359	L	0.350	M3/H
1500	INCR LO	L46S	A1 PRESSURIZER LEVEL 1	43.9	LL	44.0	PC
1500	INCR LO	L46T	A1 PRESSURIZER LEVEL 3	43.5	LL	44.0	PC
1500	ALM LO	F124D	A1 D RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.346	L	0.350	M3/H
1500	ALM HI	P2401A	A1 TB CONDENSER WIDE RENGE P	740.0	H	740.0	MMHG
1500	ALM LO	T226CA	A1 2A TB CORE SEA WTR OUT TEMP	14.77	L	15.00	DEGC
1500	RTN ACT	N33A	C1 SOURCE RNG HI-G TRIP 1 BLOCK	UNBLK			
1500	RTN ACT	N33B	C1 SOURCE RNG HI G TRIP 2 BLOCK	UNBLK			
1500	ASL NO 4 IS RETURNED						
1500	ASL NO 16 IS RETURNED						
1500	ASL NO 17 IS RETURNED						
1500	ACT	NC32A	C1 N32 HI FLUX ALARM RESET	SET			
1500	ALM LO	U0159	CV RCP B NO.1+2 SEAL LEAK OFF FLOW	0.340	L	0.350	M3/H
1500	RTN 0 LO	N31E	A1 N31 SOURCE RANGE DETECTOR E				CPS
1500	RTN C LO	N32E	A1 N32 SOURCE RANGE DETECTOR E				CPS
1500	RTN 0 LO	N31EV	A1 N31E VOLT				
1500	RTN C LO	N32EV	A1 N32E VOLT				
1500	RTN A LO	U0159	CV RCP B NO.1+2 SEAL LEAK OFF FLOW	0.360	L	0.350	M3/H
1501	ALM LO	U0204H	CV PZR L 1/2/3 1MIN AVG	46.2	L	46.0	PC
1501	ALM LO	U0159	CV RCP B NO.1+2 SEAL LEAK OFF FLOW	0.342	L	0.350	M3/H
1501	ALM HI	P2401B	A1 TB CONDENSER NARROW RANGE 1P	740.1	H	740.0	MMHG
1501	ALM LO	T226CB	A1 2B TB CORE SEA WTR OUT TEMP	14.94	L	15.00	DEGC
1501	ALM LO	T226CB	A1 1B TB CORE SEA WTR OUT TEMP	14.62	L	15.00	DEGC
1503	INCR LO	U0204H	CV PZR L 1/2/3 1MIN AVG	41.3	LL	42.0	PC
1503	INCR HI	P2401A	A1 TB CONDENSER WIDE RENGE P	745.1	HH	745.0	MMHG
1503	RTN 1 LO	L100	A1 VCT LEVEL	33.8	LL	33.0	PC
1503	INCR LO	P2061	A1 DEAERATOR PRESS	4.58	LL	5.00	KG/CM2

1503	INCR LO	P2061	A1 DEAERATOR PRESS	4.58	LL	5.00	KG/CM2
1504	RTN 1 HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.687	HH	3.700	M
1504	INCR HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.707	HH	3.700	M
1504	RTN 1 HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.687	HH	3.700	M
1504	INCR HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.706	HH	3.700	M
1504	RTN 1 HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.679	HH	3.700	M
1504	INCR HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.717	HH	3.700	M
1504	RTN 1 HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.679	HH	3.700	M
1504	INCR HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.716	HH	3.700	M
1504	RTN 1 HI	L420	A1 C SG LEVEL 1 (NARROW RANGE)	56.8	HH	57.0	PC
1504	RTN 1 HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.681	HH	3.700	M
1504	RTN 1 HI	L421	A1 D SG LEVEL 2 (NARROW RANGE)	56.8	HH	57.0	PC
1504	RTN 1 HI	L424	A1 C SG LEVEL 4 (NARROW RANGE)	56.7	HH	57.0	PC
1504	INCR HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.712	HH	3.700	M
1504	ALM LO	T205OE	A1 DEAERATOR CONTEIG WATER IN T	10.3	L	110.0	DEGC
1504	INCR LO	T205OE	A1 DEAERATOR CONTEIG WATER IN T	10.3	LL	100.0	DEGC
1504	RTN ACT	LCV100C	C1 VCT OUT STOP VALVE	FULLOP			
1504	RTN 1 HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.687	HH	3.700	M
1504	RTN 1 HI	L422	A1 C SG LEVEL 3 (NARROW RANGE)	56.6	HH	57.0	PC
1504	INCR HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.717	HH	3.700	M
1504	RTN 1 HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.680	HH	3.700	M
1504	INCR HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.712	HH	3.700	M
1504	RTN 1 HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.681	HH	3.700	M
1504	INCR HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.706	HH	3.700	M
1504	RTN 1 LO	F102	A1 B RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	1.324	LL	1.350	M3/H
1504	RTN 1 LO	F110	A1 CHARGING PUMP OUT FLOW	4.92	LL	4.00	M3/H
1504	RTN A LO	F110	A1 CHARGING PUMP OUT FLOW	4.92	L	4.50	M3/H
1504	INCR LO	L100	A1 VCT LEVEL	32.6	LL	32.0	PC
1504	RTN 1 HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.689	HH	3.700	M
1504	RTN 1 LO	P102	A1 B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	115.9	LL	97.0	PSI
1504	RTN A LO	P102	A1 B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	115.9	L	102.0	PSI
1504	RTN A LO	F102	A1 B RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	1.971	L	1.650	M3/H
1504	RTN 1 LO	T111	A1 REGENER HX LETDOWN OUT TEMP	120.1	LL	110.0	DEGC
1504	ALM LO	F102	A1 B RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	1.606	L	1.650	M3/H
1505	RTN 1 LO	T205OE	A1 DEAERATOR CONTEIG WATER IN T	132.7	LL	100.0	DEGC
1505	RTN A LO	T205OE	A1 DEAERATOR CONTEIG WATER IN T	132.7	L	110.0	DEGC
1505	INCR LO	T111	A1 REGENER HX LETDOWN OUT TEMP	115.2	L	110.0	DEGC
1505	RTN A LO	L070A	A1 A BOP CCW SURGE TANK LEVEL	46.2	L	46.0	PC
1505	RTN A LO	F102	A1 B RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	1.682	L	1.650	M3/H
1505	RTN A HI	L424	A1 B SG LEVEL 4 (NARROW RANGE)	56.7	H	55.0	PC
1505	RTN ACT	LCV100B	C1 EMERGENCY MAKEUP VALVE	FULLCL			
1505	RTN A HI	L420	A1 D SG LEVEL 1 (NARROW RANGE)	56.7	H	55.0	PC
1505	RTN A LO	F102	A1 B RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	1.604	L	1.650	M3/H
1505	RTN A HI	L421	A1 B SG LEVEL 2 (NARROW RANGE)	56.7	H	55.0	PC
1505	RTN A HI	L422	A1 B-SG-LEVEL-3 (NARROW RANGE)	56.7	H	55.0	PC
1505	RTN A LO	F102	A1 B RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	1.526	L	1.650	M3/H
1505	RTN A LO	T3401B	A1 B-DISCHARGE-SEA-WTR-TEMP	13.6	L	13.0	DEGC
1505	RTN 1 LO	F123D	A1 A RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.457	LL	0.450	M3/H
1505	INCR LO	F123C	A1 A RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.449	LL	0.450	M3/H
1505	ALM LO	F102	A1 D RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	1.612	L	1.650	M3/H
1505	RTN A LO	F102	A1 B RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	1.530	L	1.650	M3/H
1506	INCR HI	P2401C	A1 TB CONDENSER NARROW RANGE 2P	745.0	HH	745.0	MMHG
1506	ALM HI	T205OE	A1 DEAERATOR CONTEIG WATER IN T	154.2	H	150.0	DEGC
1506	INCR LO	T111	A1 REGENER HX LETDOWN OUT TEMP	117.5	LL	110.0	DEGC
1506	ALM LO	F102	A1 C RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	1.644	L	1.650	M3/H
1506	INCR HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.704	HH	3.700	M
1506	RTN A LO	F102	A1 B RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	1.586	L	1.650	M3/H
1506	RTN 1 HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.689	HH	3.700	M
1506	INCR HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.706	HH	3.700	M
1506	RTN 1 HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.692	HH	3.700	M
1506	INCR HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.717	HH	3.700	M
1506	RTN 1 HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.692	HH	3.700	M
1506	INCR HI	L2056	A1 DEAERATOR LEVEL	3.709	HH	3.700	M
1506	RTN 0 LO	Y2425A	A1 A CHP IMPELLER POSITION				PC
1506	RTN 1 LO	T3230A	A1 CCW SEAL OIL TEMP	39.1	LL	39.0	DEGC
1506	ALM LO	F102	A1 C RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	1.616	L	1.650	M3/H

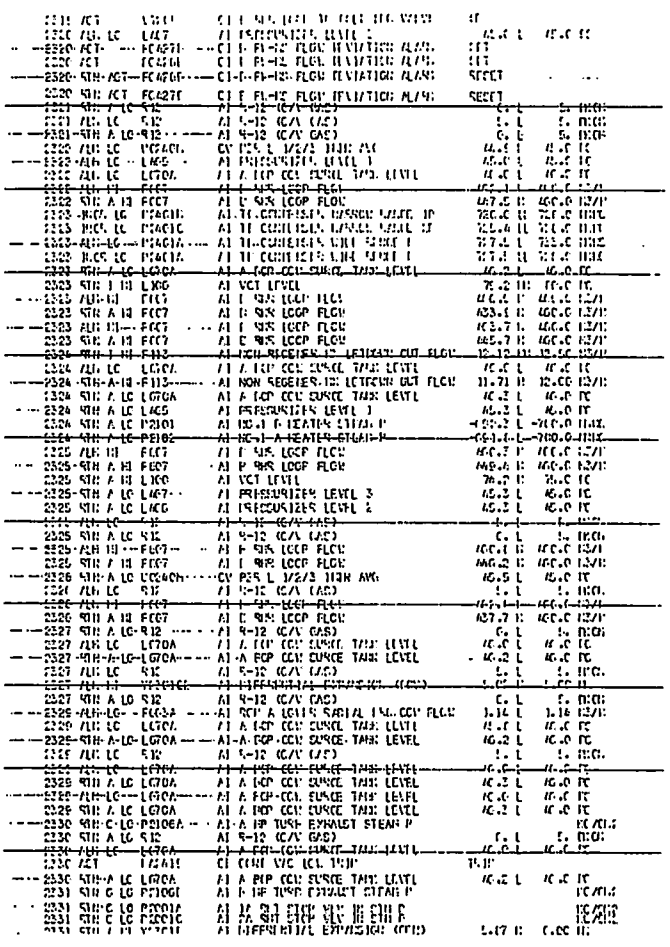
1511	RTH A LC	F102	AI B RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	2.032 L	1.650 M3/H
1511	ALH LC	F102	AI C RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	1.905 L	1.650 M3/H
1511	RTH A LC	F102	AI D RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	1.905 L	1.650 M3/H
1511	RTH A LC	P122G45	AI E CVCS CUT-R	0.093 L	0.050 KG/CM2
1512	RTH I HI	L423	AI B SG LEVEL (WIDE RANGE)	60.0 HI	70.0 PC
1512	ALH LC	F102	AI C RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	1.143 L	1.650 M3/H
1512	RTH A LC	F102	AI D RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	2.003 L	1.650 M3/H
1512	RTH ACT	V1923A	CI A SG BLOWDOWN SAMPLE ISOL VALVE	OP	
1512	RTH ACT	V1923A	CI A SG BLOWDOWN SAMPLE ISOL VALVE	OP	
1512	RTH ACT	V1923B	CI B SG BLOWDOWN SAMPLE ISOL VALVE	OP	
1512	ACT	V1923B	CI B SG BLOWDOWN SAMPLE ISOL VALVE	FULLCL	
1512	RTH ACT	V1923C	CI C SG BLOWDOWN SAMPLE ISOL VALVE	OP	
1512	ACT	V1923C	CI C SG BLOWDOWN SAMPLE ISOL VALVE	FULLCL	
1513	ACT	PCV462C	CI TURBINE BYPASS VALVE C	CP	
1513	ACT	V1923A	CI A SG BLOWDOWN SAMPLE ISOL VALVE	OP	
1513	ACT	V1923A	CI A SG BLOWDOWN SAMPLE ISOL VALVE	FULLCL	
1513	ACT	PCV462C	CI TURBINE BYPASS VALVE G	CP	
1513	RTH I LG	T220GA	AI A TC CORE ISOTHERM CONTROL T	15.6 LL	15.0 DEGC
1513	CRR HI	S10	AI 9-10 CCC FLOWRATE WATER)		TKGH
1513	RTH I HI	P2461C	AI TE CONTAINER-NARROW-RANGE-PR	763.9-HI	765.0-HIHI
1513	RTH A LG	L670A	AI A DCP CCW SURGE TANK LEVEL	46.2 L	46.0 PC
1513	ALH LC	T100	AI VCT TEMP	20.0 L	20.0 DEGC
1513	ALH LG	LG70A	AI A DCP CCW SURGE TANK LEVEL	46.0 L	46.0 PC
1514	RTH ACT	PCV462C	CI TURBINE REL VALVE GREN ALARM	RESET	
1514	RTH ACT	V1923A	CI A SG BLOWDOWN SAMPLE ISOL VALVE	OP	
1514	RTH ACT	V1923B	CI B SG BLOWDOWN SAMPLE ISOL VALVE	OP	
1514	ACT	V1923A	CI A SG BLOWDOWN SAMPLE ISOL VALVE	FULLCL	
1514	ACT	V1923B	CI B SG BLOWDOWN SAMPLE ISOL VALVE	FULLCL	
1514	ACT	LC4200D	CI D SG LEVEL DEVIATION ALARM	SET	
1514	ALH LC	F102	AI E RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	1.626 L	1.650 M3/H
1514	RTH A LC	F102	AI B RCP SEAL WATER INJECTION FLOW	2.060 L	1.650 M3/H
1514	RTH A LG	LG70A	AI A DCP CCW SURGE TANK LEVEL	46.2 L	46.0 PC
1515	ALH LC	T200DR	AI 1B LP TB EXHAUST STH T	28.7 L	30.0 DEGC
1515	ALH LG	T200D2	AI 2B LP TB EXHAUST STH T	27.0 L	30.0 DEGC
1515	RTH I LG	T2061A	AI TH COOR ISOTHELL CONTENS WTR T	15.0 LL	15.00 DEGC
1515	ALH LG	LG70A	AI A DCP CCW SURGE TANK LEVEL	46.2 L	46.0 PC
1515	INCR LG	T2402	AI 2B LP TB EXHAUST STH T	28.0 LL	25.0 DEGC
1516	RTH A HI	U0147	CV B-SG WIDE RNG LEVEL CORR VLV	76.5 HI	60.0
1516	ALH LG	T200DJ	AI 1A LP TB EXHAUST STH T	28.5 L	30.0 DEGC
1516	INCR LG	T200GH	AI 1B LP TB EXHAUST STH T	24.6 LL	25.0 DEGC
1516	ALH LG	T2A01A	AI A DISCHARGE SEA WTR TEMP	12.0 L	15.0 DEGC
1516	RTH A LC	T100	AI VCT TEMP	30.6 L	30.0 DEGC
1516	ALH LG	F1900B	AI B SG BLOW DOWN FLOW	5.0 L	5.0 M3/H
1516	ALH LG	U0151	CV B SG BLOW DOWN FLOW	4.1 L	5.0 T/H
1516	INCR LG	U0151	CV B SG BLOW DOWN FLOW	2.8 LL	3.0 T/H
1516	INCR LG	T200DJ	AI 1A LP TB EXHAUST STH T	24.4 LL	25.0 DEGC
1518	RTH ACT	FN051	CI B H/D AFWP DISCHARGE VLV	OP	
1518	RTH LG	F1900C	AI B SG BLOW DOWN FLOW		M3/H
1518	RTH ACT	ME16B	CI B A/D CHARCOAL FAN	RUN	
1518	ALH LG	R7	AI AREA-R-7 (G/M IN-CORE-IONITOR)	0.005 L	0.005 MSV/H
1519	ALH LG	T2000A	AI THROTTLE VLV IN STEAM T	254.9 L	255.0 DEGC
1519	RTH I LG	L100	AI VCT LEVEL	33.8 LL	33.0 PC
1520	INCR HI	P455H	AI PZR SPRAY CONTROL B SETPOINT	2248 HI	2250 PC
1520	ACT	LC442C	CI B SG LG LEVEL C PART RE	TRIP	
1520	RTH A HI	PA15	AI A MAIN STEAM PRESS 2	60.03 H	61.00 KG/CM2
1520	ACT	LC441C	CI B-SG-HI-LEVEL-1-PART-RE	TRIP	
1521	ACT	TOP2A	CI TURNING GEAR OIL PUMP AUTO	NOTUSE	
1521	ACT	TOP2B	CI TURNING GEAR OIL PUMP RUN	RUN	
1521	RTH ACT	TOP2A	CI TURNING GEAR OIL PUMP AUTO	USE	
1521	RTH A HI	PA14	AI A MAIN STEAM PRESS 1	60.03 H	61.00 KG/CM2
1521	RTH A HI	PA16	AI A MAIN STEAM PRESS 3	60.03 H	61.00 KG/CM2
1521	ACT	AOP2A	CI AUXILIARY OIL PUMP AUTO	NOTUSE	
1521	RTH ACT	AOP2B	CI AUXILIARY OIL PUMP RUN	STOP	
1521	ACT	AOP2A	CI AUXILIARY OIL PUMP AUTO	USE	
1522	STH I HI	P240G	AI GOVERNOR CONTROL OIL P	0.003 HI	2.000 KG/CM2

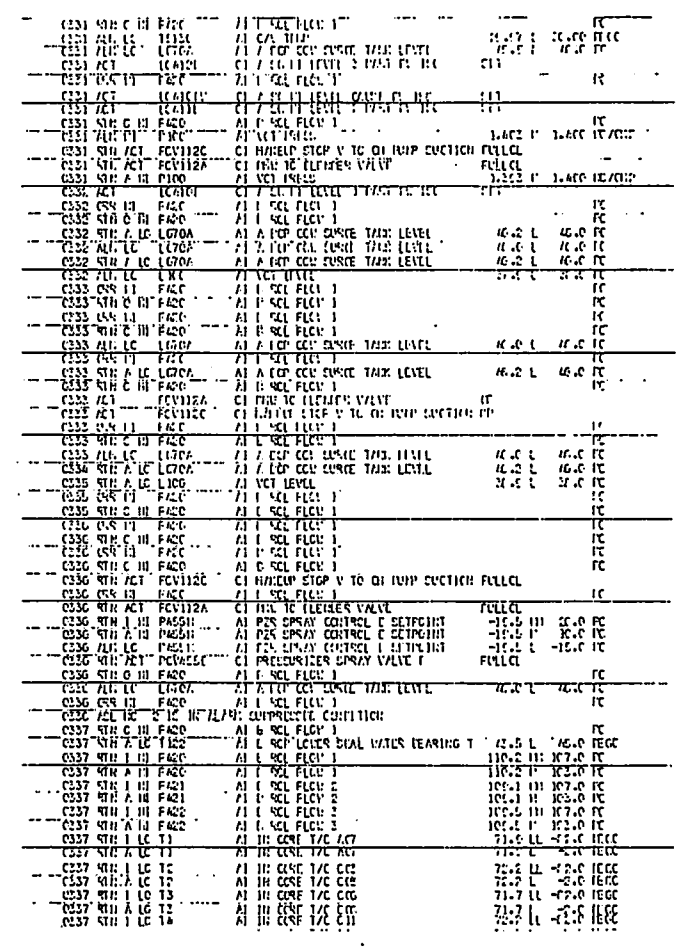
1553	RTH A LC	P102	AI D RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	102.5 L	102.0 KPA
1554	INCR LC	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	3.60 LL	4.00 M3/H
1554	ALH LC	P102	AI B-RCP-LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	99.1 L	102.0 KPA
1554	RTH I LC	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	4.14 LL	4.00 M3/H
1554	RTH A LC	P102	AI E-RCP-LABYRINTH-SEAL-WTR-DIFF-P	103.0 L	102.0 KPA
1554	INCR LC	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	3.60 LL	4.00 M3/H
1554	RTH I LC	P102	AI C RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	101.1 L	102.0 KPA
1554	ACT	VCC5A	CI VCT LEG SAMPLE LINE ISOL VALVE A	CP	
1554	RTH I LG	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	4.32 LL	4.00 M3/H
1554	INCR LC	F102	AI E RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	55.3 LL	57.0 KPA
1554	RTH A LG	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	4.73 L	4.50 M3/H
1554	RTH I LC	P102	AI B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	106.0 L	57.0 KPA
1554	RTH A LC	P102	AI B-RCP-LABYRINTH-SEAL-WTR-DIFF-P	106.0 L	102.0 KPA
1554	ALH LC	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	4.14 L	4.50 M3/H
1554	CHR LG	T2121H	AI PR-HOIST SERFS-WTR-TRAIN-T		DEGC
1554	INCR LC	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	3.60 LL	4.00 M3/H
1554	RTH ACT	V294	CI SEAL-WTR-RETURN-LINE-C/V-ISO-VLV	CP	
1554	RTH I LG	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	4.00 L	4.00 M3/H
1554	RTH I LC	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	4.60 L	4.50 M3/H
1554	RTH I LC	F123D	AI A RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.511 LL	0.450 M3/H
1554	RTH A LG	F124E	AI B-P-RCP LEAK-FLOW (HI RANGE)	0.376 L	0.350 M3/H
1554	RTH I HI	P10E	AI EXCESS LETDOWN HX OUT PRESS	3.38 HI	3.50 KG/CM2
1554	RTH A HI	P10F	AI EXCESS LETDOWN HX OUT PRESS	3.38 HI	3.50 KG/CM2
1554	RTH A LG	U0159	CV RCP B NO.1+2 SEAL LEAK CFF FLOW	0.360 L	0.350 M3/H
1554	ALH LC	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	4.46 L	4.50 M3/H
1554	ALH LG	P102	AI D RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	99.0 L	102.0 KPA
1554	INCR LC	P102	AI B-RCP-LABYRINTH-SEAL-WTR-DIFF-P	99.0 LL	97.0 KPA
1554	RTH I LC	P102	AI B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	108.7 LL	57.0 KPA
1554	RTH A LC	P102	AI B-RCP-LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	108.7 L	102.0 KPA
1554	INCR LC	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	3.96 LL	4.00 M3/H
1554	ALH LC	T402	AI C/V TEMP (4.0M HE-20M IN T)	29.4 L	30.0 DEGC
1555	RTH I LG	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	4.14 LL	4.00 M3/H
1555	ALH LG	P102	AI D RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	101.3 L	102.0 KPA
1555	INCR LC	T402	AI C RCP SEAL LATES INJECTION FLOW	1.346 LL	1.350 M3/H
1555	RTH A LC	T402	AI C/V TEMP (4.0M HE-20M IN T)	30.0 L	30.0 DEGC
1555	INCR LG	P102	AI E RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	55.0 LL	57.0 KPA
1555	RTH I LC	P102	AI E-RCP-SEAL-WATER-INJECTION-FLOW	1.431 LL	1.350 M3/H
1555	RTH A LC	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	4.06 L	4.50 M3/H
1555	ALH LG	T402	AI C/V TEMP (4.0M HE-20M IN T)	29.6 L	30.0 DEGC
1555	RTH I LG	P102	AI B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	58.9 LL	57.0 KPA
1555	ALH LC	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	4.14 L	4.50 M3/H
1555	RTH A LG	P102	AI D RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	100.6 L	102.0 KPA
1555	RTH A LC	T402	AI C/V TEMP (4.0M HE-20M IN T)	30.0 L	30.0 DEGC
1555	RTH A LC	P102	AI B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	55.6 L	102.0 KPA
1555	INCR LC	P102	AI B-RCP-LABYRINTH-SEAL-WTR-DIFF-P	99.6 LL	97.0 KPA
1555	RTH I HI	S22	AI S-22 (DEWATERING PIT)	62.1 HI	65.0 INCH
1555	RTH I LG	P102	AI B-RCP-LABYRINTH-SEAL-WTR-DIFF-P	56.3 LL	57.0 KPA
1555	RTH A LG	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	4.73 L	4.50 M3/H
1555	INCR LC	P102	AI E RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	57.6 LL	57.0 KPA
1555	ALH LC	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	4.43 L	4.50 M3/H
1555	RTH I LG	P102	AI B-RCP-LABYRINTH-SEAL-WTR-DIFF-P	101.0 LL	97.0 KPA
1555	ALH HI	S22	AI S-22 (DEWATERING PIT)	62.1 HI	65.0 INCH
1555	INCR LC	P125	AI SEAL-INJECTION-FILTER-DIFF-PRESS		KG/CM2
1555	RTH A LC	P102	AI B RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	100.6 L	102.0 KPA
1555	RTH HI	LC442	CV A LOOP SUM COOL	46.17 HI	46.00 DEGC
1555	ALH LG	P102	AI D RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	97.9 L	102.0 KPA
1555	ACT	FCV112C	CI MAKEUP STOP V TO CI PUMP SUCTION	CP	
1555	INCR LG	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	3.60 LL	4.00 M3/H
1556	RTH I LG	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	4.36 LL	4.00 M3/H
1556	ALH HI	P031	AI PZR PORV INJECTION TANK PRESS	16.0 H	16.0 KG/CM2
1556	RTH C LG	P125	AI SEAL INJECTION FILTER DIFF PRESS		KG/CM2
1556	INCR LC	P102	AI E RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	55.7 LL	57.0 KPA
1556	RTH A LG	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	4.06 L	4.50 M3/H
1556	RTH I LC	P102	AI D RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	105.2 LL	57.0 KPA
1556	RTH A LC	P102	AI C RCP LABYRINTH SEAL WTR DIFF P	102.6 L	102.0 KPA
1556	ALH LG	F110	AI CHARGING PUMP CUT FLOW	4.17 L	4.50 M3/H

1611	INCR LC	T2400I	AI LCC TI CLIN HEATING OIL T	35.5 LL	35.0 DEGC
1611	ACT	LCV211G	CI B LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP	
1611	RTH ACT	LCV8116	CI B-LP-DRAIN-TNK-DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1611	RTH A LC	F124D	AI B RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.363 L	0.350 M3/H
1611	RTH ACT	XY66P	CI GEN-LOCK-OUT-RY-(86P)	RESET	
1611	RTH A LG	U0159	CV RCP B NO.1+2 SEAL LEAK CFF FLOW	0.359 L	0.350 M3/H
1611	INCR LC	T2400I	AI LCC TI CLIN HEATING OIL T	34.9 LL	35.0 DEGC
1611	ALH LG	F124E	AI B RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.345 L	0.350 M3/H
1611	ALH LG	U0159	CV-RCP-B-NO.1+2-SEAL-LEAK-OFF-FLOW	0.345 L	0.350 M3/H
1612	ACT	LC4200D	CI D SG LEVEL DEVIATION ALARM	SET	
1612	RTH A LC	F124B	AI B-RCP-LEAK-FLOW-(HI-RANGE)	0.359 L	0.350 M3/H
1612	RTH A LG	U0159	CV RCP B NO.1+2 SEAL LEAK CFF FLOW	0.359 L	0.350 M3/H
1612	INCR LC	T2400H	AI LCC TI CLIN HEATING OIL T	34.6 LL	35.0 DEGC
1612	ALH LC	F124E	AI C RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.347 L	0.350 M3/H
1613	ALH LC	U0159	CV-RCP-B-NO.1+2-SEAL-LEAK-OFF-FLOW	0.346 L	0.350 M3/H
1613	RTH A LG	T402	AI C/V TEMP (4.0M HE-20C IN T)	30.0 L	30.0 DEGC
1613	ALH LC	T212EA	AI A LP HEATER DRAIN PUMP CUT-T	55.6 L	60.0 DEGC
1613	ALH LC	T111	AI REGEIER IN LETDOWN CUT TEMP	107.0 L	107.0 DEGC
1613	RTH A LC	LG70A	AI A DCP CCW SURGE TANK LEVEL	46.2 L	46.0 PC
1614	ALH LG	T402	AI C/V TEMP (4.0M HE-20C IN T)	29.6 L	30.0 DEGC
1614	RTH A LG	T402	AI C/V TEMP (4.0M HE-20M IN T)	30.0 L	30.0 DEGC
1614	ALH LG	LC70A	AI A DCP CCW SURGE TANK LEVEL	46.0 L	46.0 PC
1614	RTH A LC	F124B	AI B-RCP-LEAK-FLOW-(HI RANGE)	0.359 L	0.350 M3/H
1614	ALH LC	F124D	AI D RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.346 L	0.350 M3/H
1614	RTH A LG	U0159	CV-RCP-B-NO.1+2-SEAL-LEAK-OFF-FLOW	0.359 L	0.350 M3/H
1614	RTH I LG	L421	AI B SG LEVEL 2 (NARROW RANGE)	46.3 LL	46.0 PC
1614	RTH A LC	L424	AI B-SG-LEVEL-4-(NARROW RANGE)	46.3 L	46.0 PC
1614	ALH LG	T402	AI C/V TEMP (4.0M HE-20C IN T)	29.6 L	30.0 DEGC
1614	ALH LG	U0159	CV-RCP-B-NO.1+2-SEAL-LEAK-OFF-FLOW	0.346 L	0.350 M3/H
1614	ALH HI	P455H	AI PZR SPRAY CONTROL B SETPOINT	11.0 H	10.0 PC
1614	ACT	PCV455B	CI PRESSURIZER SPRAY VALVE C	OP	
1614	RTH A HI	P455H	AI PZR SPRAY CONTROL B SETPOINT	4.5 H	10.0 PC
1614	RTH A LC	T402	AI C/V TEMP (4.0M HE-20M IN T)	30.6 L	30.0 DEGC
1614	INCR LC	T2400I	AI LCC TI CLIN HEATING OIL T	34.9 LL	35.0 DEGC
1615	ALH LC	T402	AI C/V TEMP (4.0M HE-20M IN T)	29.8 L	30.0 DEGC
1616	ALH LG	T2411E	AI TE TISSUE REF SLEEVE NTL T	30.0 L	40.0 DEGC
1616	RTH A LC	F124E	AI B RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.359 L	0.350 M3/H
1616	ALH LC	F124B	AI D RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.347 L	0.350 M3/H
1616	RTH A LC	U0159	CV-RCP-B-NO.1+2-SEAL-LEAK-OFF-FLOW	0.360 L	0.350 M3/H
1617	ALH LC	U0159	CV RCP B NO.1+2 SEAL LEAK CFF FLOW	0.347 L	0.350 M3/H
1617	RTH A LC	F124E	AI B-RCP-LEAK-FLOW-(HI-RANGE)	0.361 L	0.350 M3/H
1617	ALH LG	F124E	AI C RCP LEAK FLOW (HI RANGE)	0.342 L	0.350 M3/H
1617	INCR LC	T111	AI REGEIER IN LETDOWN CUT TEMP	111.2 LL	110.0 DEGC
1617	RTH A LG	U0159	CV RCP B NO.1+2 SEAL LEAK CFF FLOW	0.361 L	0.350 M3/H
1617	ALH LG	U0159	CV-RCP-B-NO.1+2-SEAL-LEAK-OFF-FLOW	0.345 L	0.350 M3/H
1617	RTH ACT	FCV112C	CI MAKEUP STOP V TO CI PUMP SUCTION	FULLCL	
1617	RTH A HI	P031	AI PORPH INJECTION TANK PRESS	9.6 H	10.0 KG/CM2
1618	INCR LG	T2113A	AI NO.5 A HEATER STH IN T	170.9 LL	170.0 DEGC
1618	ACT	LCV211E	CI E LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP	
1618	RTH ACT	LCV2116	CI B LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1618	ACT	FCV112B	CI BA-TO-ELEMDER VALVE	FULLCL	
1618	ACT	LCV211G	CI B LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP	
1618	RTH ACT	LCV2116	CI B-LP-DRAIN-TNK-DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1618	ACT	FCV112A	CI BAU TO ELEMDER VALVE	OP	
1618	ACT	FCV112C	CI MAKEUP STOP V TO CI PUMP SUCTION	OP	
1618	ACT	LCV211G	CI B LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP	
1618	RTH ACT	LCV2116	CI B-LP-DRAIN-TNK-DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1618	ACT	LCV211G	CI E LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP	
1618	RTH ACT	LCV2116	CI B LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1618	ACT	FCV112A	CI BAU TO ELEMDER VALVE	FULLCL	
1618	RTH ACT	LCV2116	CI B LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1618	ACT	LCV211G	CI E LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP	
1618	RTH ACT	LCV2116	CI B LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1618	ACT	LCV211G	CI E LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP	

1618	INCR LC	T2112L	AI NO.5 E HEATER STH IN T	170.6 LL	170.0 DEGC
1618	RTH ACT	LCV211G	CI B LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1618	ACT	LCV2116	CI B LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP	
1618	RTH ACT	LCV211G	CI D LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1618	RTH ACT	FCV112C	CI BA-TO-ELEMDER-VALVE	OP	
1618	ACT	LCV211C	CI E LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP	
1618	RTH ACT	LCV2116	CI E LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1618	ACT	LCV211G	CI F LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP	
1618	RTH ACT	LCV2116	CI B LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1618	ACT	LCV211C	CI D LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP	
1618	RTH ACT	LCV2116	CI B LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1618	ACT	LCV211G	CI B LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP	
1618	RTH ACT	LCV2116	CI B LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1618	ACT	LCV211G	CI E LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP	
1618	RTH ACT	LCV2116	CI B LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1618	ACT	LCV211G	CI F LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	OP	
1618	RTH ACT	LCV2116	CI B LP DRAIN TNK DRAIN VLV (E)	FULLCL	
1618	ACT	LCV211G	CI B

```
1549 ALH LO  F110      A1 CHARGING PUMP OUT FLOW          4.50 L   4.50 M3/H
1550 AUX LC  ZCV1      A1 CV "CV" FAIL A CMD# 1 FOR LO2   111.00 L 111.00 CMD
1551 NTH A HI F3706    A1 B C/V COOLING HX OUT FLOW       705.5 H  750.0 M3/H
1552 ASL NO 25 IS RETURNED
1553 ASL NO 25 IS NOT ALARM, SUPPRESSED CONDITION
1553 /CT     CVC0177A  C1 2 C/V COOLING WATER VALVE       STOP
1554 NTH A LO T167     A1 C C/V HEATING FAIL OUT TEMP     30.0 L   30.0 DEGC
```





3．ＰＡＭ（事故後監視計）トレンド記録（抜粋）

KMN-2　　PAMデータトレンド表示仕様選択　　1991年 03月 27日 17：50　発電機出力 -0.4 MWE　原子炉出力 -0.0 %

PAMデータトレンドブロック表示

ブロックNO	タイプ	ブロック名称
1	正規	加圧器水位，RCS圧力

カラムNO	点番号	点番号名称	スケール
1	L465	加圧器水位	上限値 100.0 下限値 0.0
2	L466	加圧器水位	上限値 100.0 下限値 0.0
3	P400	RCS圧力	上限値 200.0 下限値 0.0
4			

点番号 =**********　　開始／停止
データ1= 1　　データ2= 1　　データ3=**********　　データ4=**********

▶操作ガイド： データ3にカラムNOを入力して下さい．

KMN-2　　PAMデータトレンド表示仕様選択　　1991年 03月 27日 17：52　発電機出力 -0.4 MWE　原子炉出力 -0.0 %

PAMデータトレンドブロック表示

ブロックNO	タイプ	ブロック名称
2	正規	炉心出口温度，サブクール度

カラムNO	点番号	点番号名称	スケール
1	U1596	炉心出口温度	上限値 400.0 下限値 0.0
2	U0900	サブクール度	上限値 60.0 下限値 0.0
3	U0901	飽和温度	上限値 400.0 下限値 0.0
4	U0122	1次冷却材高温側温度最大値	上限値 400.0 下限値 0.0

点番号 =**********　　開始／停止
データ1= 1　　データ2= 2　　データ3=**********　　データ4=**********

▶操作ガイド： データ3にカラムNOを入力して下さい．

KMN-2　　PAMデータトレンド表示仕様選択　　1991年 03月 27日 17：53　発電機出力 -0.4 MWE　原子炉出力 -0.0 %

PAMデータトレンドブロック表示

ブロックNO	タイプ	ブロック名称
3	正規	1次冷却材温度

カラムNO	点番号	点番号名称	スケール
1	T415A	1次冷却材高温側温度 (Aループ)	上限値 400.0 下限値 0.0
2	T425A	1次冷却材高温側温度 (Bループ)	上限値 400.0 下限値 0.0
3	T415B	1次冷却材低温側温度 (Aループ)	上限値 400.0 下限値 0.0
4	T425B	1次冷却材低温側温度 (Bループ)	上限値 400.0 下限値 0.0

点番号 =**********　　開始／停止
データ1= 1　　データ2= 3　　データ3=**********　　データ4=**********

▶操作ガイド： データ3にカラムNOを入力して下さい.

KMN-2　　PAMデータトレンド表示仕様選択　　1991年 03月 27日 17：54　発電機出力 -0.4 MWE　原子炉出力 -0.0 %

PAMデータトレンドブロック表示

ブロックNO	タイプ	ブロック名称
4	正規	S／G水位（狭域）

カラムNO	点番号	点番号名称	スケール
1	L410	S／G水位（狭域） (A-SG)	上限値 100.0 下限値 0.0
2	L411	S／G水位（狭域） (〃)	上限値 100.0 下限値 0.0
3	L420	S／G水位（狭域） (B-SG)	上限値 100.0 下限値 0.0
4	L421	S／G水位（狭域） (〃)	上限値 100.0 下限値 0.0

点番号 =**********　　開始／停止
データ1= 1　　データ2= 4　　データ3=**********　　データ4=**********

▶操作ガイド： データ3にカラムNOを入力して下さい.

KMN-2　　PAMデータトレンド表示仕様選択　　1991年 03月 27日 17：56　発電機出力 -0.4 MWE　原子炉出力 -0.0 %

PAMデータトレンドブロック表示

ブロックNO	タイプ	ブロック名称
5	正規	S／G圧力

カラムNO	点番号	点番号名称	スケール
1	P414	S／G圧力 （A-SG）	上限値 200.00 下限値 0.00
2	P415	S／G圧力 （ 〃 ）	上限値 200.00 下限値 0.00
3	P424	S／G圧力 （B-SG）	上限値 200.00 下限値 0.00
4	P425	S／G圧力 （ 〃 ）	上限値 200.00 下限値 0.00

点番号 ＝**********　　開始／停止
データ1＝ 1　　データ2＝ 5　　データ3＝**********　　データ4＝**********

▶操作ガイド： データ3にカラムNOを入力して下さい．

KMN-2　　PAMデータトレンド表示仕様選択　　1991年 03月 27日 17：57　発電機出力 -0.4 MWE　原子炉出力 -0.0 %

PAMデータトレンドブロック表示

ブロックNO	タイプ	ブロック名称
6	正規	S／G水位（広域），補助給水流量

カラムNO	点番号	点番号名称	スケール
1	L413	S／G水位（広域） （A-SG）	上限値 100.0 下限値 0.0
2	L423	S／G水位（広域） （B-SG）	上限値 100.0 下限値 0.0
3	F2231	補助給水流量 （A-SG）	上限値 240.0 下限値 0.0
4	F2233	補助給水流量 （B-SG）	上限値 240.0 下限値 0.0

点番号 ＝**********　　開始／停止
データ1＝ 1　　データ2＝ 6　　データ3＝**********　　データ4＝**********

▶操作ガイド： データ3にカラムNOを入力して下さい．

PAMデータトレンドブロック表示

ブロックNO.	タイプ	ブロック名称
9	正規	高圧注入ライン流量

カラムNO	点番号	点番号名称	スケール
1	F929	高圧注入ライン流量	上限値 300.0 下限値 0.0
2			
3	F930	高圧注入ライン流量	上限値 300.0 下限値 0.0
4			

点番号 =**********　　開始／停止

データ1＝ 1　　データ2＝ 9　　データ3＝*********　　データ4＝**********

▶操作ガイド： データ3にカラムNOを入力して下さい.

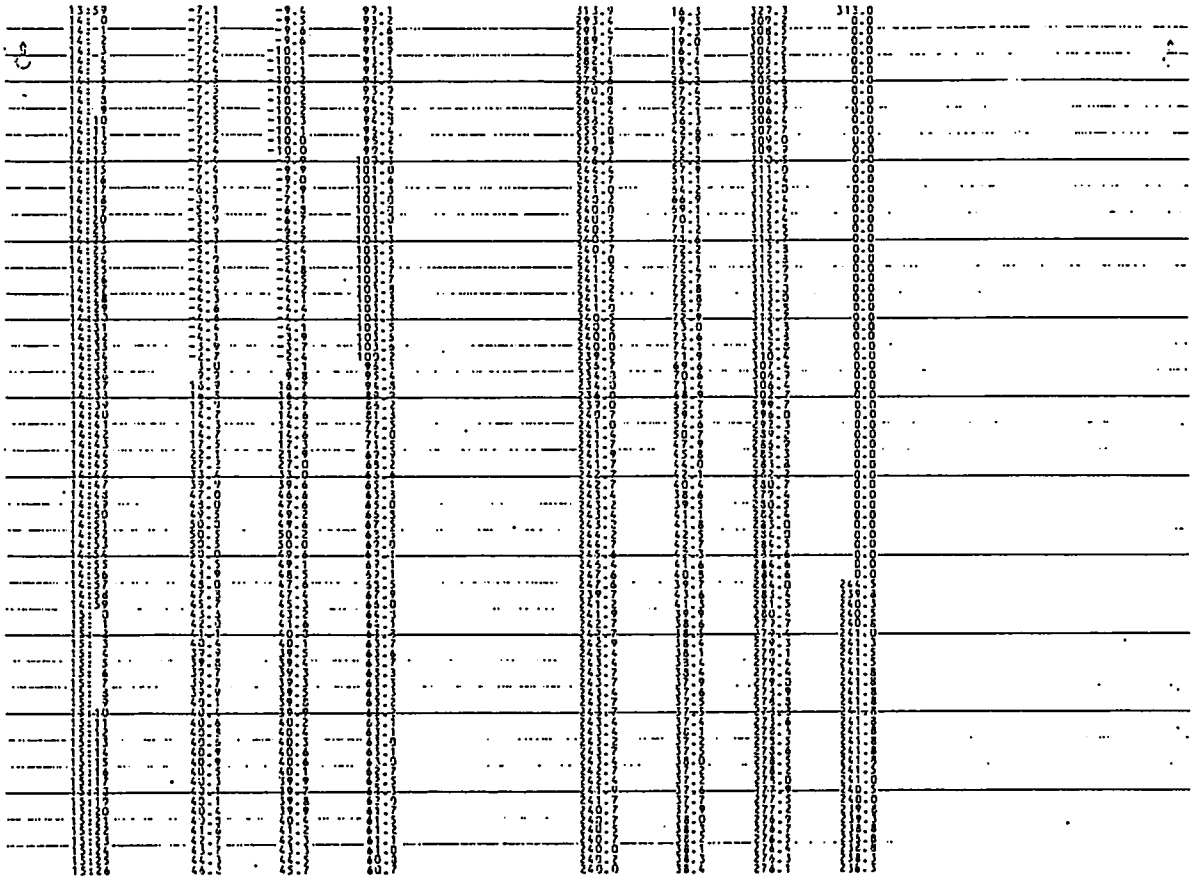
PAM-DATA-TREND-REVIEW　　TREND-BLOCK-1-/--2　　UNIT NO-2

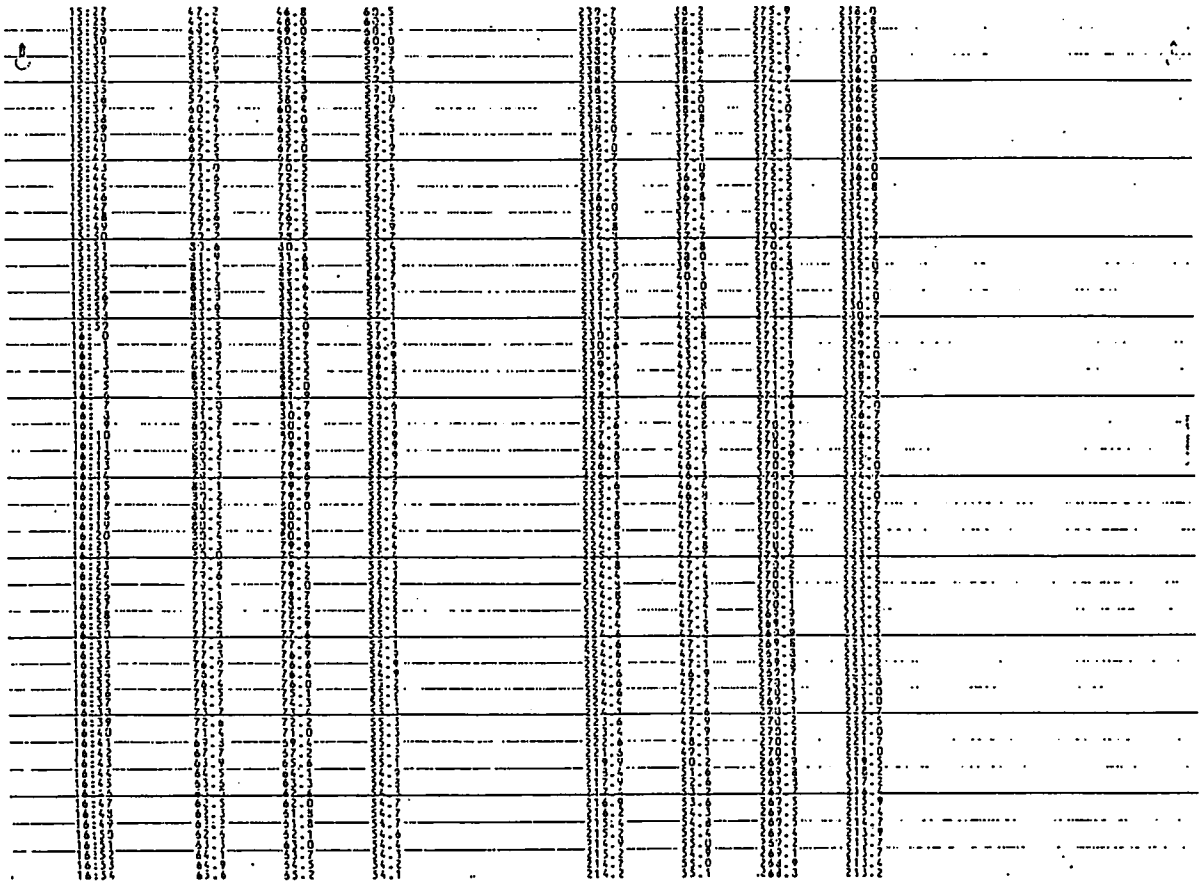
REQUESTED PARAMETER　START TIME 2 /..9 13 : 50

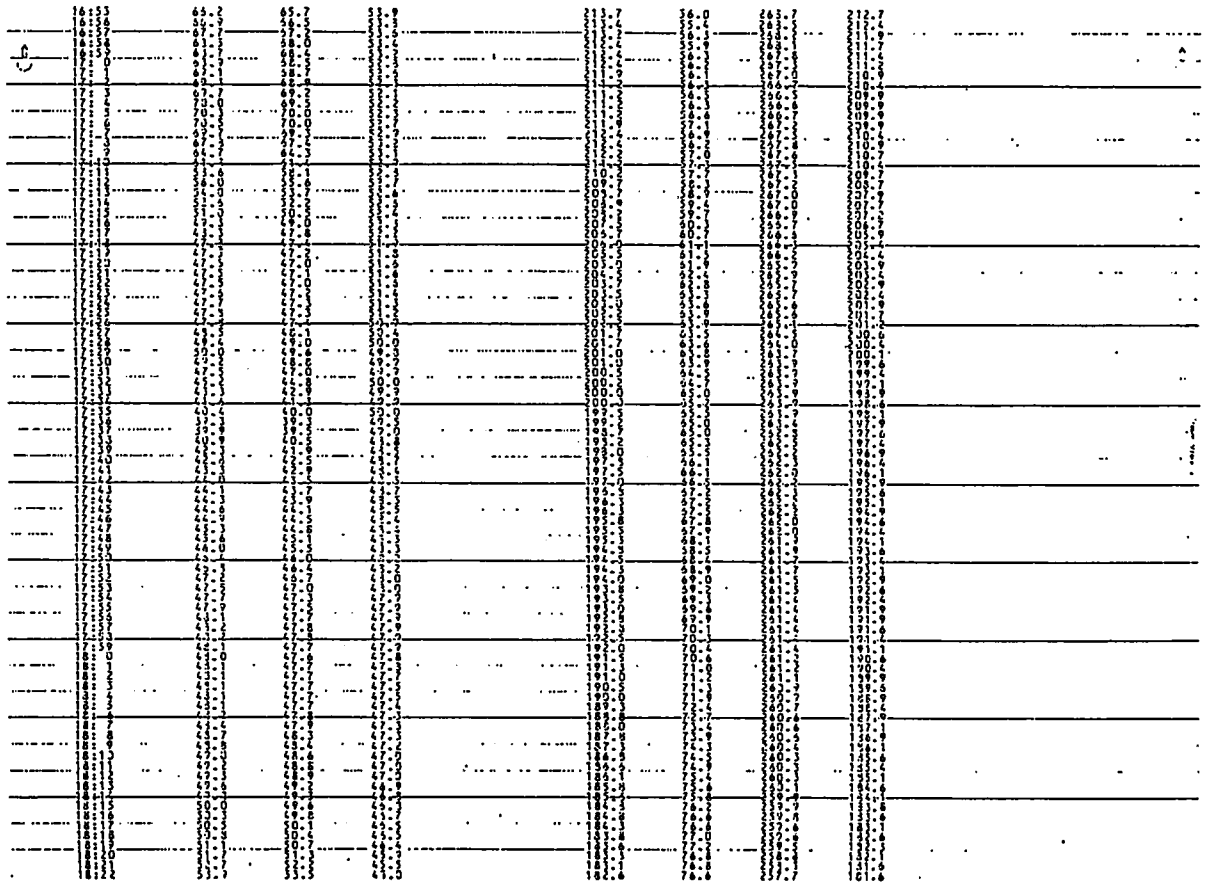
CYCLE TIME 1 MIN

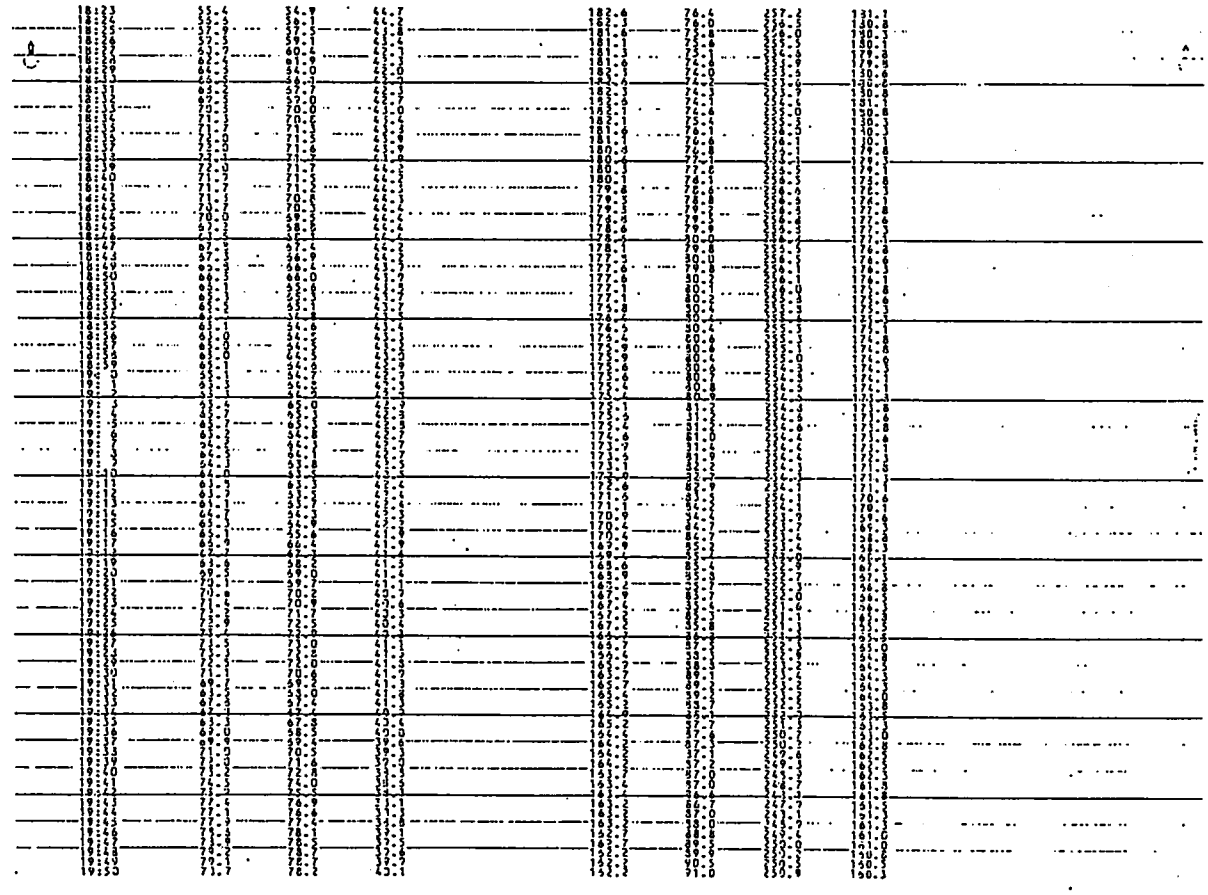
PRINT TIME 24 HOUR

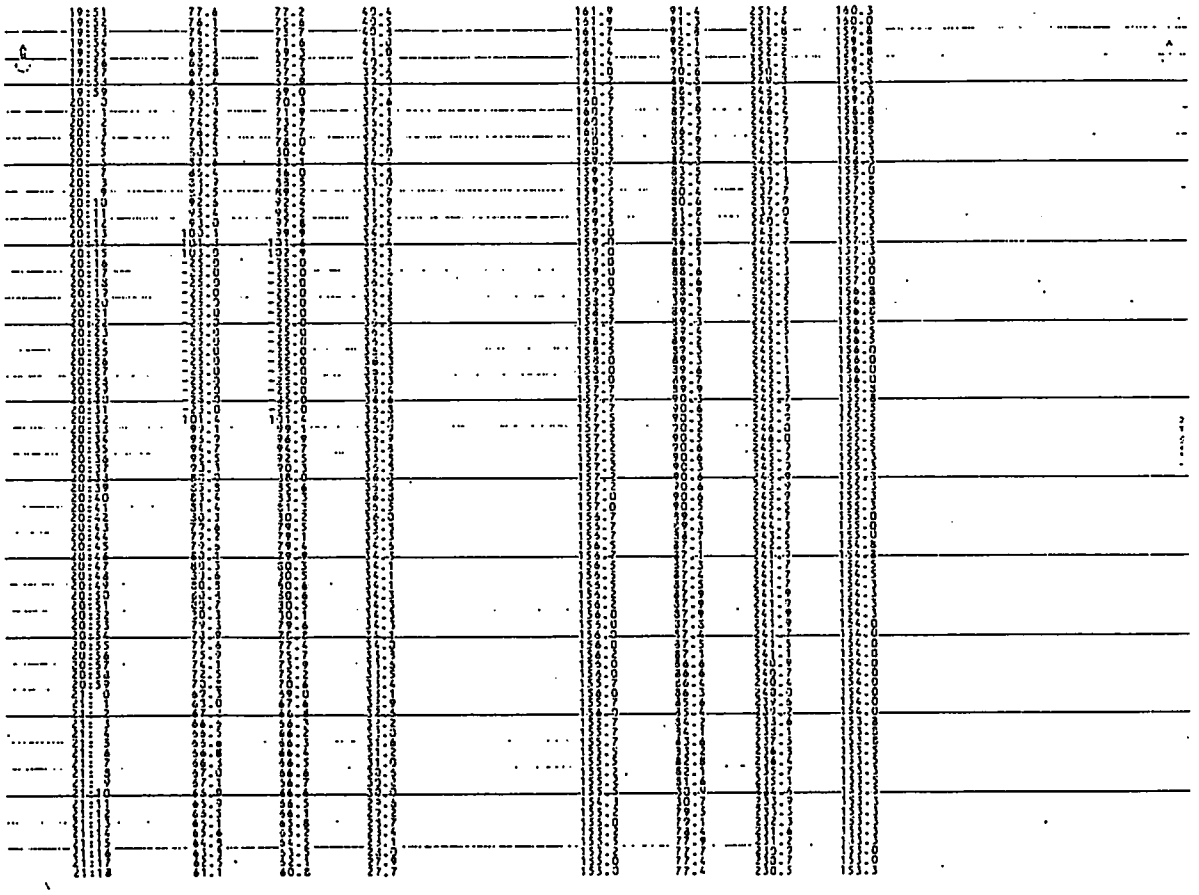
BLOCK-NO-1				BLOCK-NO-2			
TIME	L463	L466	P403	U1596	U0930	U0901	U0122
13:50	-5.7	-5.4	121.8	311.8	16.1	322.1	313.0
13:51	-5.9	-7.5	105.6	311.9	16.1	322.1	313.0
13:52	-6.5	-8.5	99.2	311.9	16.1	322.1	313.0
13:53	-6.7	-8.8	99.1	311.9	16.1	322.1	313.0
13:54	-6.8	-9.0	97.7	311.9	16.1	322.1	313.0
13:55	-6.9	-9.1	97.1	311.9	16.1	322.1	313.0
13:56	-7.0	-9.2	96.8	311.9	16.1	322.1	313.0
13:57	-7.0	-9.3	96.5	311.9	16.1	322.1	313.0
13:58	-7.0	-9.3	96.2	311.9	16.1	322.1	313.0

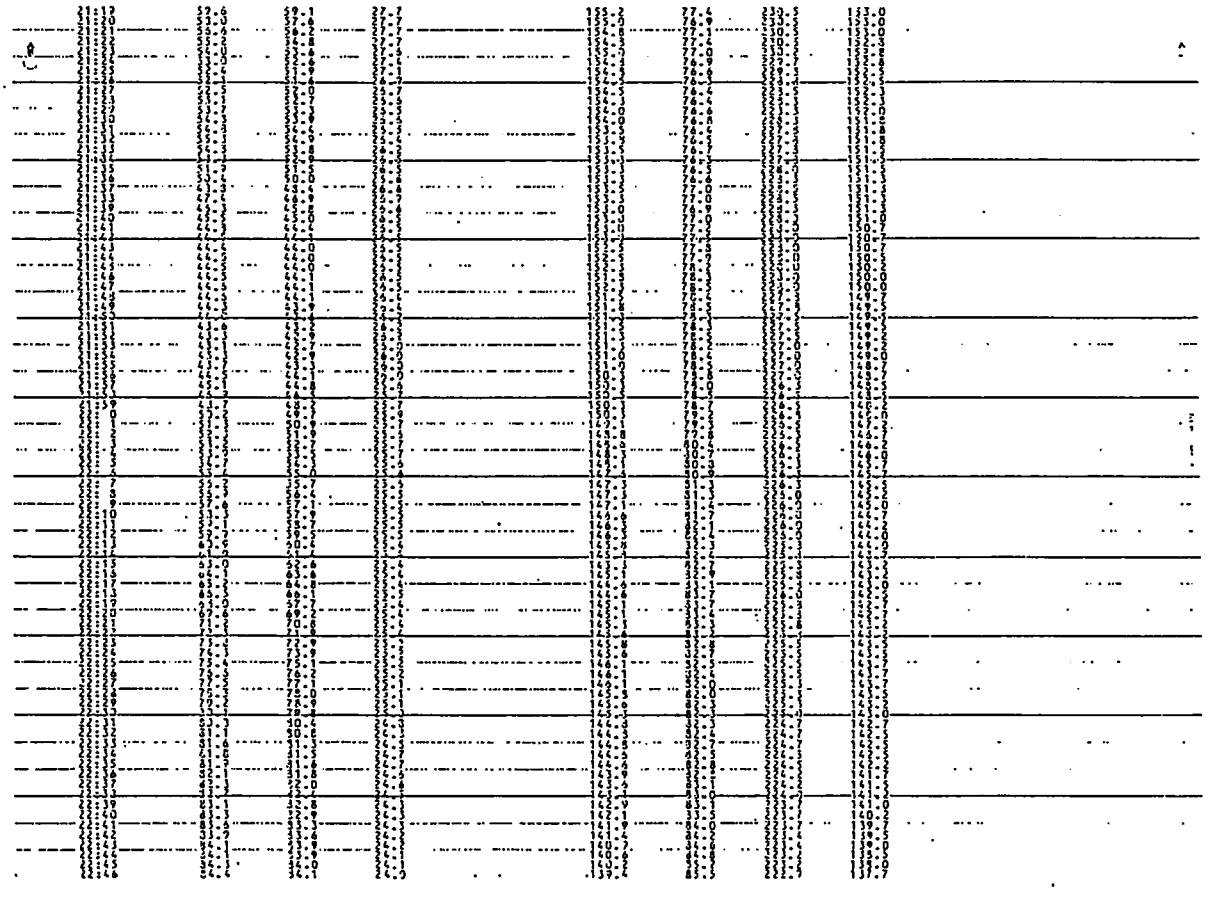


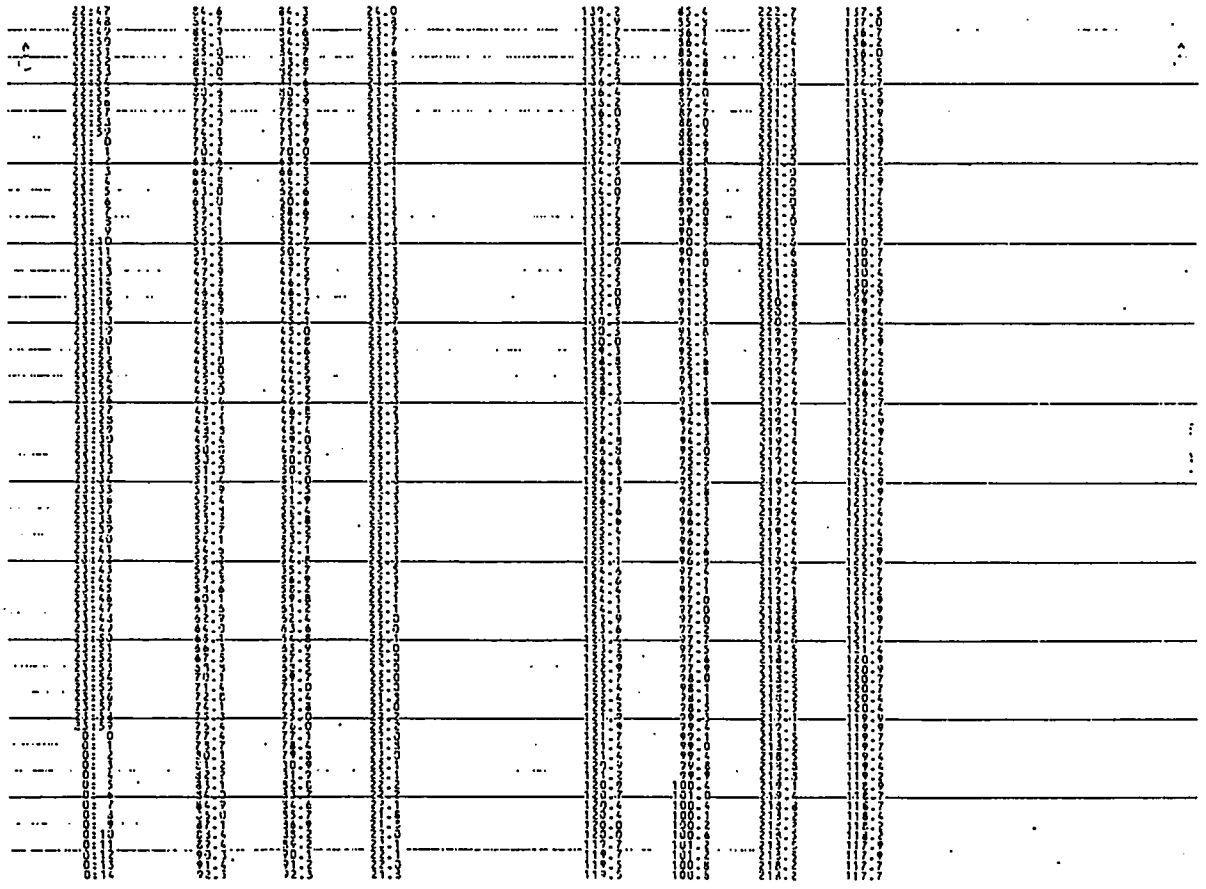


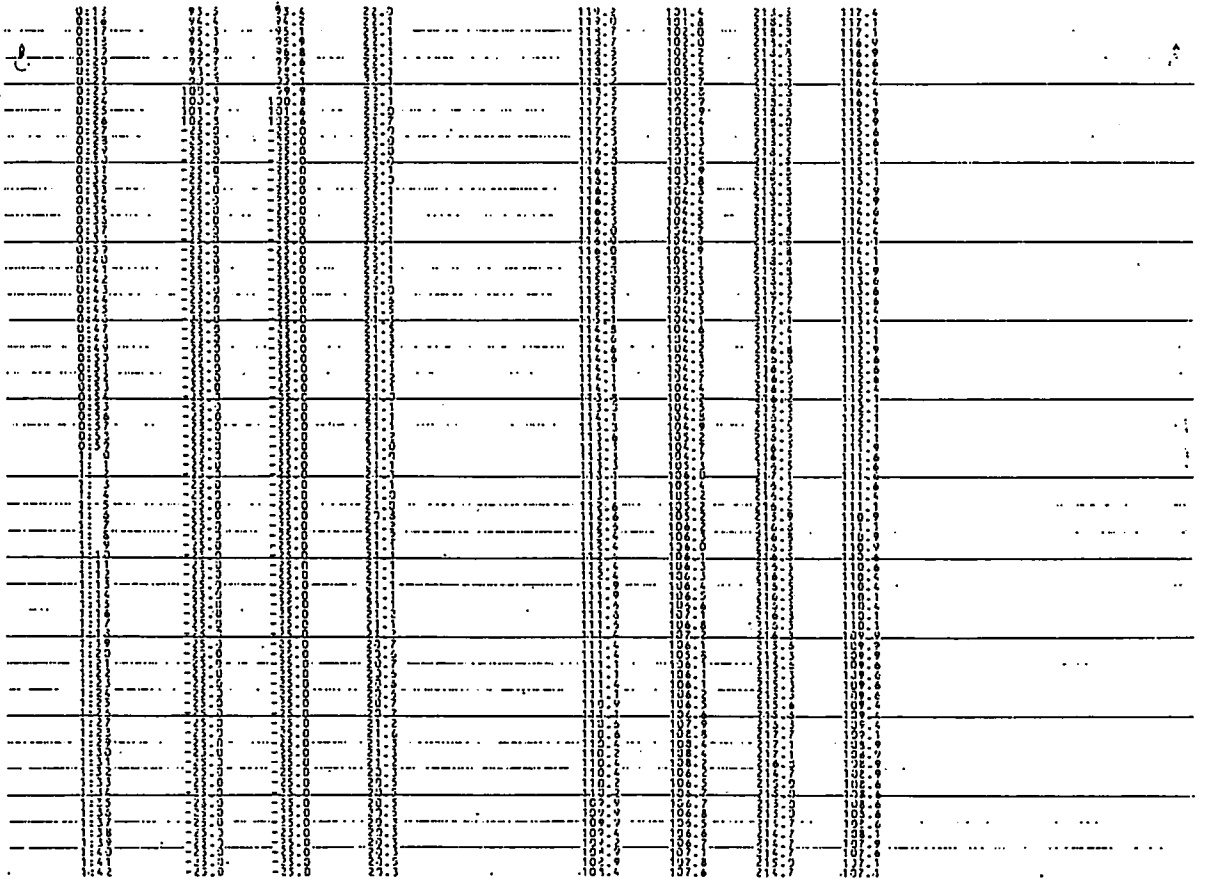


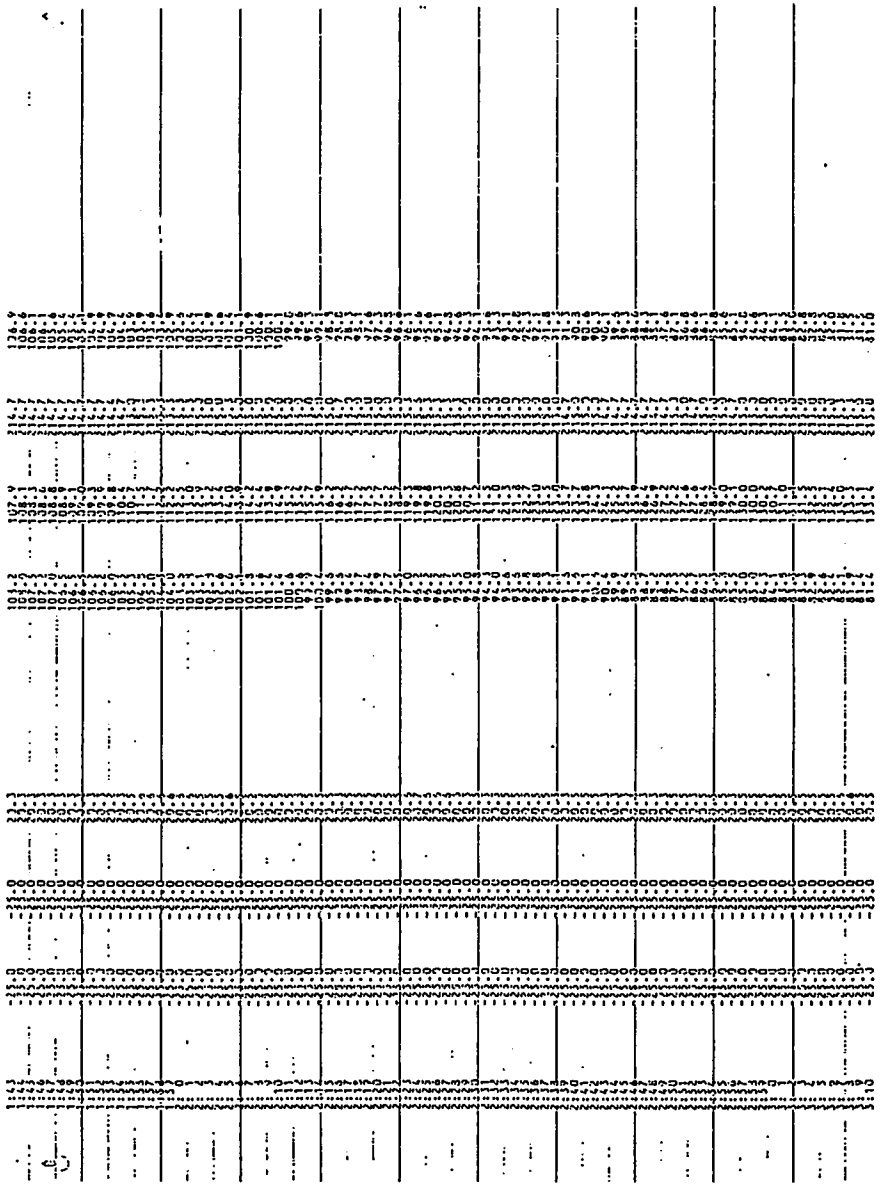


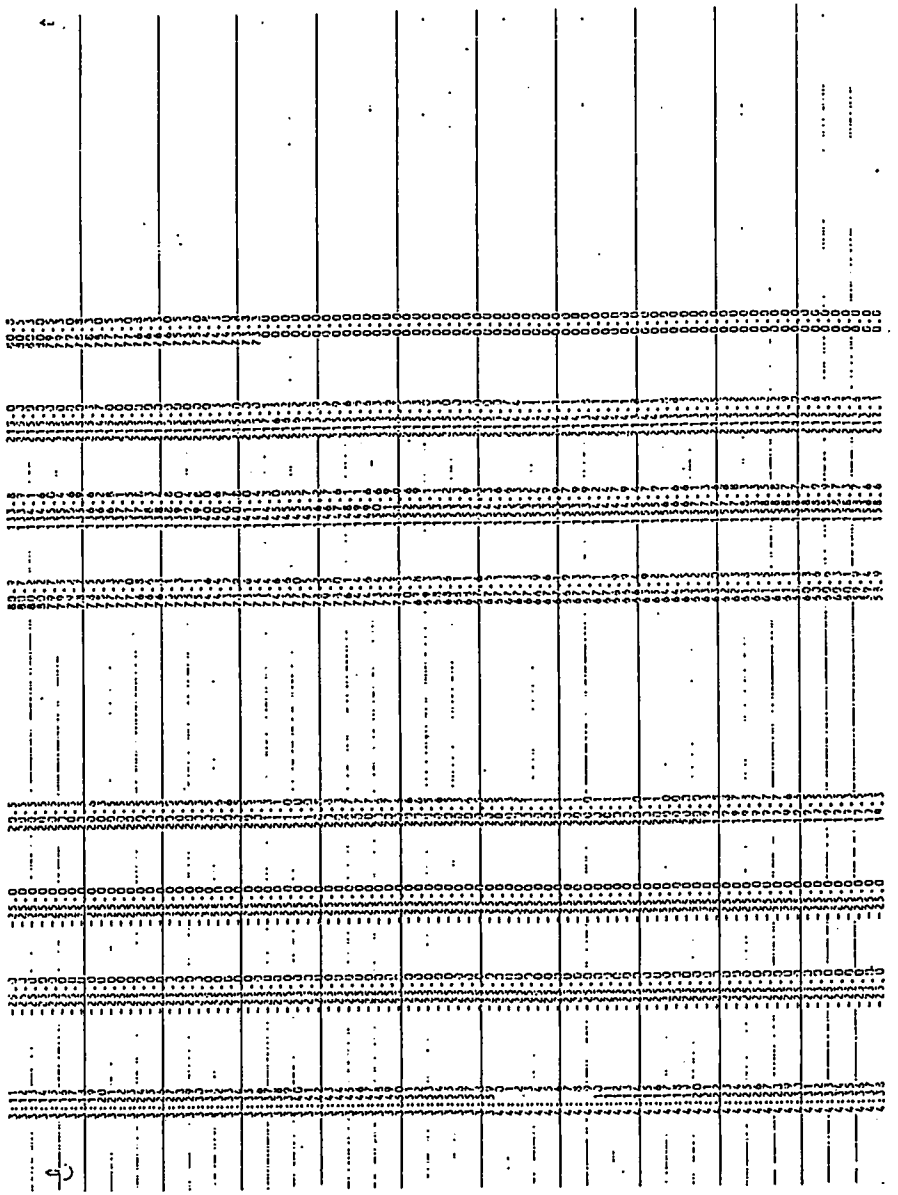


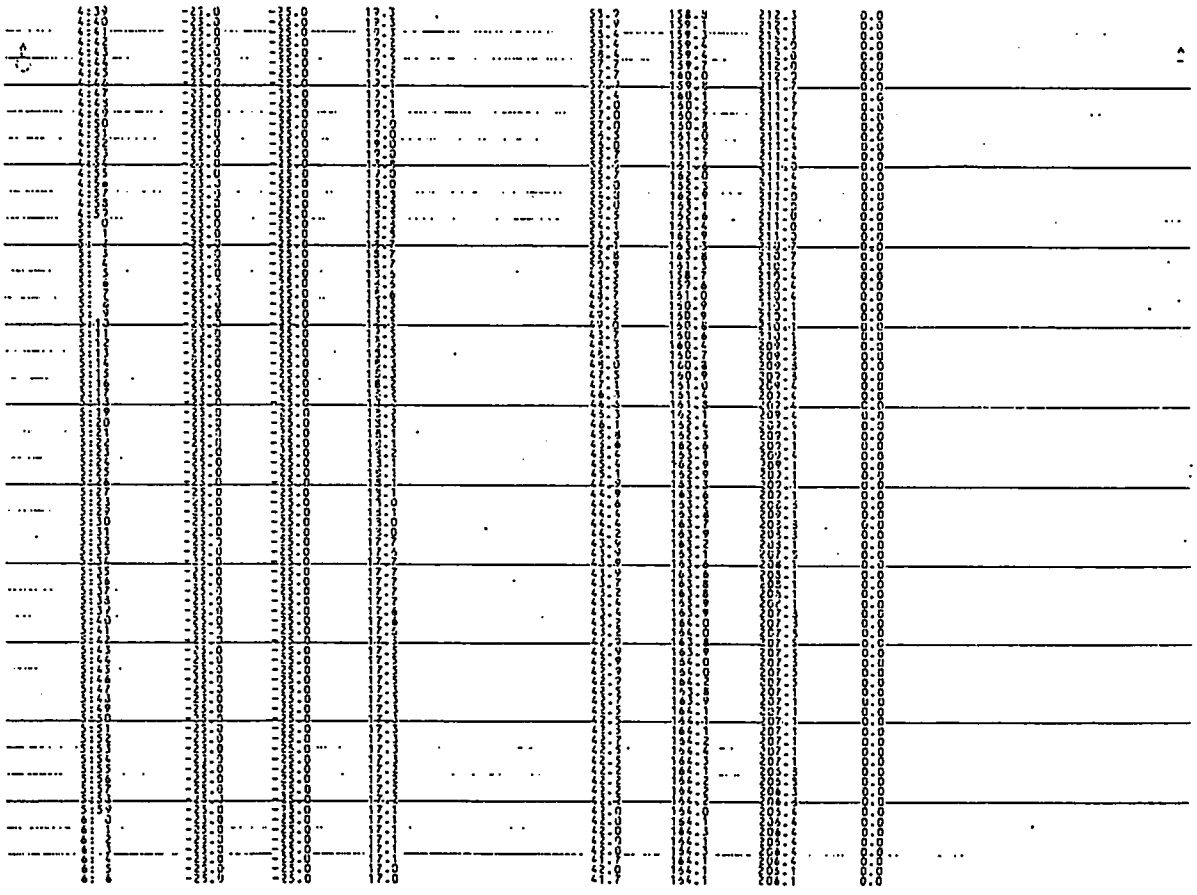


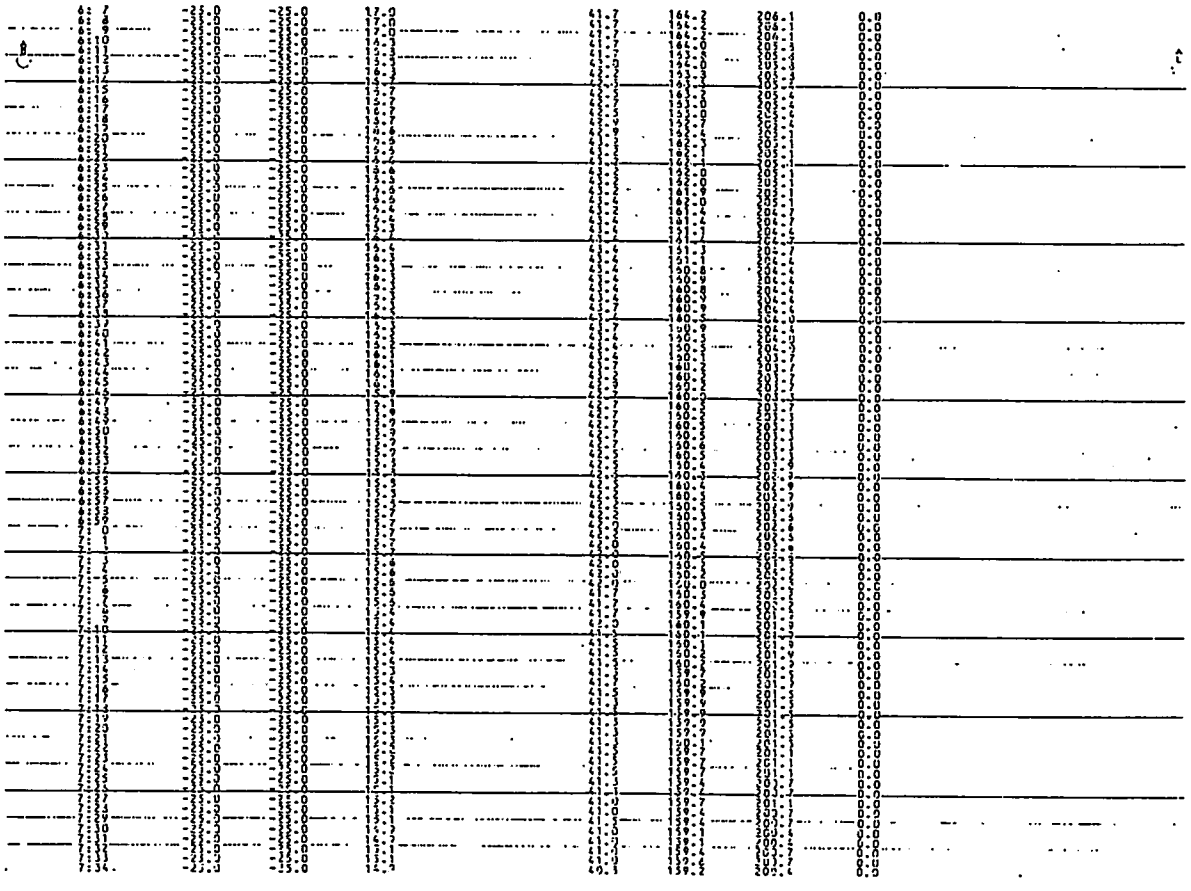












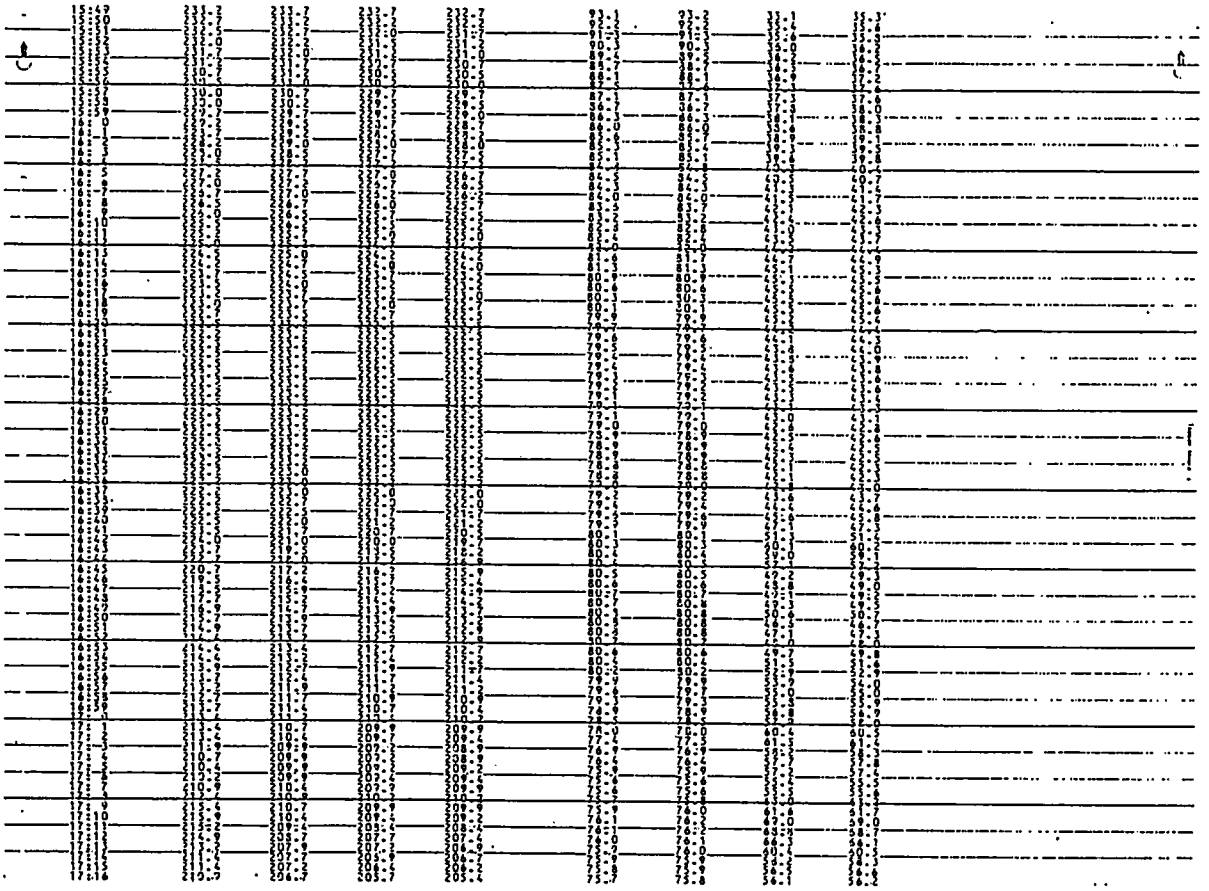
PAM DATA TREND REVIEW TREND BLOCK 3 / 4 UNIT NO 2

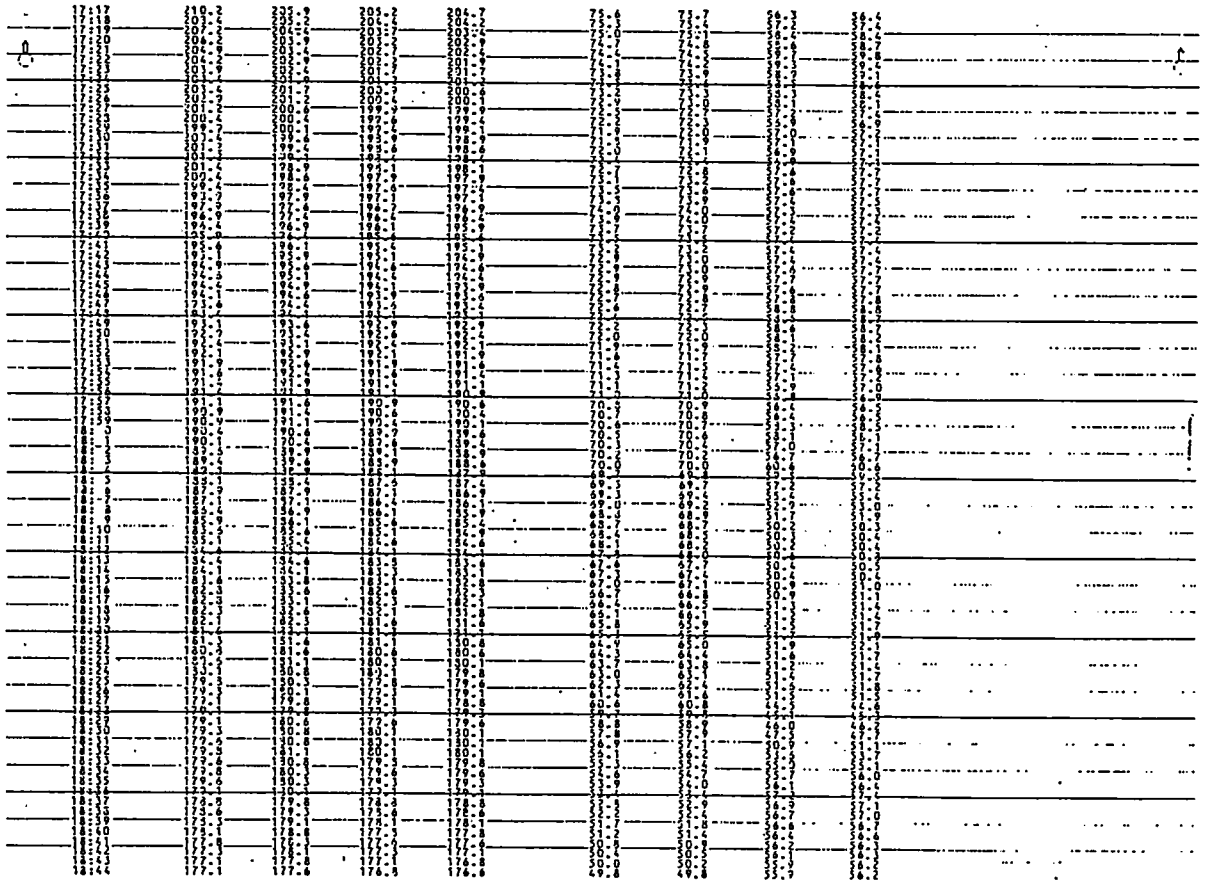
REQUESTED PARAMETER START TIME 2 / 9 13 : 50

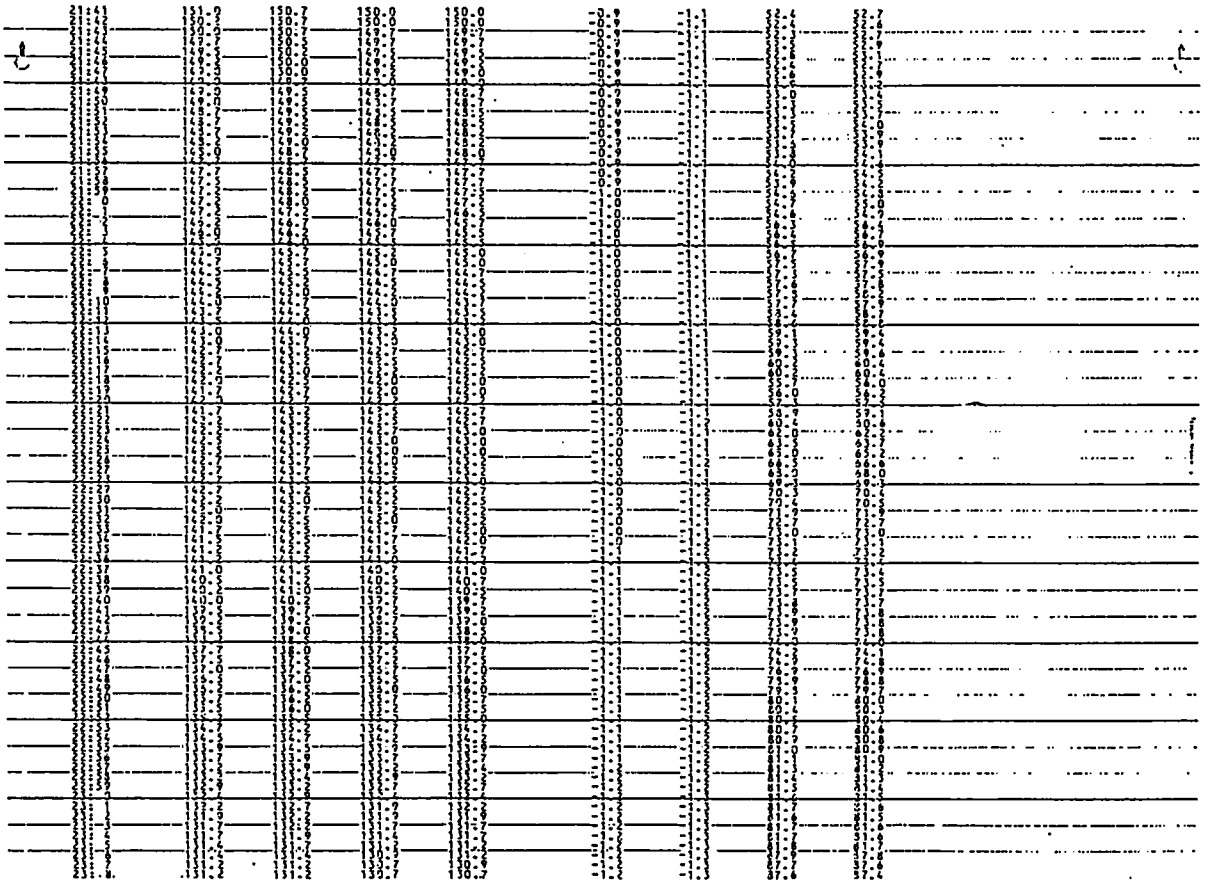
CYCLE TIME 1 MIN

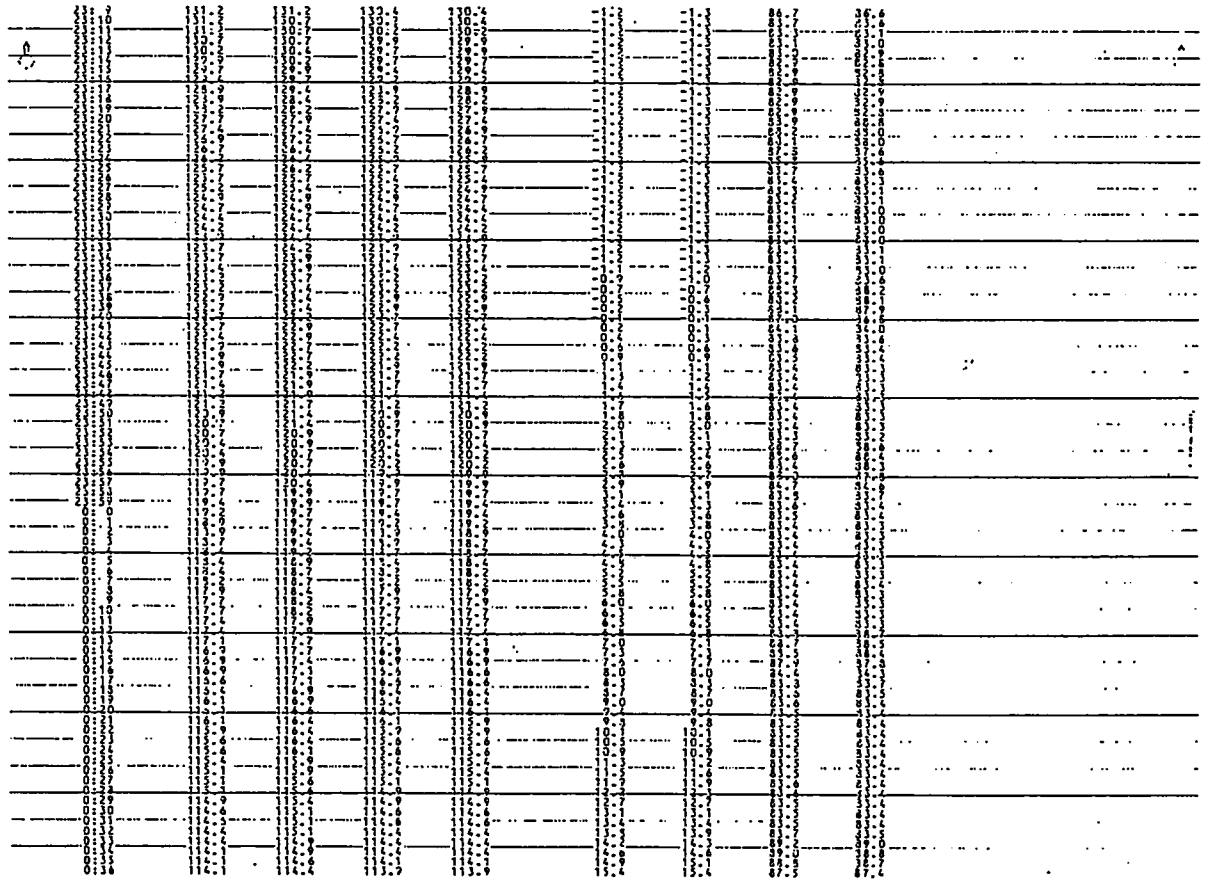
PRINT-TIME 24-HOUR

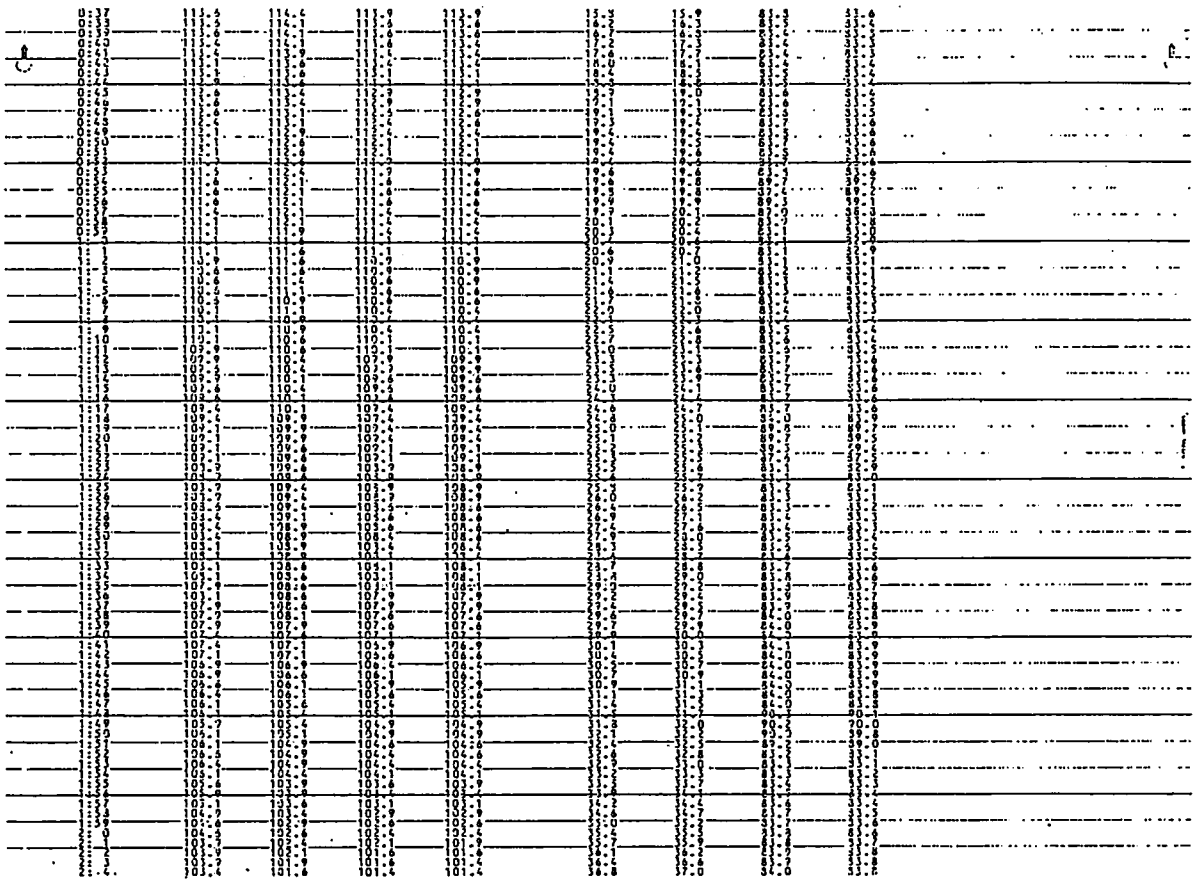
	BLOCK NO 3				BLOCK NO 4			
TIME	T4155A	T4255A	T4155	T4255B	L410	L411	L420	L421
13:50	312.2	313.0	285.4	288.7	41.8	42.6	40.4	38.9
13:51	291.7	291.7	285.4	288.2	3.3	5.0	1.9	2.2
13:52	291.4	291.7	284.6	288.2	7.5	7.5	8.5	7.2
13:53	291.4	291.7	284.6	288.2	9.2	8.9	8.5	9.6
13:54	300.7	295.9	284.1	284.1	11.0	10.9	11.9	12.1
13:55	304.7	297.4	283.9	283.4	12.2	12.1	14.8	15.1
13:56	291.7	295.4	283.4	283.4	13.1	13.1	17.2	17.4
13:57	295.4	295.4	283.4	280.1	14.4	14.3	19.7	19.9
13:58	293.7	294.4	283.1	279.1	15.9	15.8	22.3	22.4
13:59	293.9	293.4	282.9	278.6	18.1	18.0	25.1	25.1
14: 0	302.5	292.4	282.6	275.9	20.1	19.9	28.0	28.2
14: 1	301.5	291.2	281.9	276.1	21.9	21.8	30.8	31.0
14: 2	295.4	289.2	281.6	276.1	23.1	23.1	33.7	33.8
14: 3	303.5	288.2	280.6	274.1	24.1	24.1	36.6	36.6
14: 4	301.5	285.7	280.1	273.6	25.4	25.4	39.4	39.4
14: 5	287.2	284.1	279.4	273.6	26.4	26.4	42.3	42.3
14: 6	292.5	284.1	279.4	273.6	27.0	27.0	45.2	45.2
14: 7	285.7	278.4	278.6	268.8	27.6	27.6	48.0	48.0
14: 8	278.4	276.9	277.6	266.8	28.1	28.1	50.9	50.9
14: 9	278.4	276.9	277.6	266.8	28.5	28.5	53.8	53.8
14:10	278.1	269.7	276.8	266.8	28.8	28.8	56.6	56.6
14:11	271.9	269.7	276.8	266.8	29.0	29.0	59.5	59.5
14:12	271.9	264.3	276.1	266.8	29.2	29.2	62.4	62.4
14:13	266.8	264.3	276.1	266.8	29.3	29.3	65.2	65.2
14:14	266.6	264.8	276.1	266.8	29.4	29.4	68.1	68.1
14:15	263.3	260.3	275.9	266.8	29.5	29.5	71.0	71.0
14:16	260.3	260.3	275.9	266.8	29.6	29.6	73.8	73.8
14:17	257.1	258.0	275.9	266.8	29.7	29.7	76.7	76.7
14:18	258.6	258.0	275.9	266.8	29.8	29.8	79.6	79.6
14:19	255.8	255.8	275.9	266.8	29.8	29.8	82.4	82.4
14:20	255.8	255.8	275.9	266.8	29.9	29.9	85.3	85.3
14:21	254.6	253.0	275.9	266.8	29.9	29.9	88.2	88.2
14:22	253.8	253.0	275.9	266.8	29.9	29.9	91.0	91.0
14:23	253.3	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	93.9	93.9
14:24	253.5	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	96.8	96.8
14:25	252.8	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	99.6	99.6
14:26	252.8	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	102.5	102.5
14:27	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	105.4	105.4
14:28	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	108.2	108.2
14:29	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	111.1	111.1
14:30	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	114.0	114.0
14:31	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	116.8	116.8
14:32	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	119.7	119.7
14:33	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	122.6	122.6
14:34	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	125.4	125.4
14:35	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	128.3	128.3
14:36	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	131.2	131.2
14:37	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	134.0	134.0
14:38	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	136.9	136.9
14:39	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	139.8	139.8
14:40	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	142.6	142.6
14:41	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	145.5	145.5
14:42	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	148.4	148.4
14:43	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	151.2	151.2
14:44	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	154.1	154.1
14:45	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	157.0	157.0
14:46	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	159.8	159.8
14:47	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	162.7	162.7
14:48	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	165.6	165.6
14:49	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	168.4	168.4
14:50	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	171.3	171.3
14:51	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	174.2	174.2
14:52	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	177.0	177.0
14:53	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	179.9	179.9
14:54	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	182.8	182.8
14:55	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	185.6	185.6
14:56	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	188.5	188.5
14:57	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	191.4	191.4
14:58	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	194.2	194.2
14:59	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	197.1	197.1
15: 0	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	200.0	200.0
15: 1	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	202.8	202.8
15: 2	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	205.7	205.7
15: 3	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	208.6	208.6
15: 4	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	211.4	211.4
15: 5	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	214.3	214.3
15: 6	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	217.2	217.2
15: 7	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	220.0	220.0
15: 8	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	222.9	222.9
15: 9	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	225.8	225.8
15:10	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	228.6	228.6
15:11	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	231.5	231.5
15:12	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	234.4	234.4
15:13	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	237.2	237.2
15:14	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	240.1	240.1
15:15	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	243.0	243.0
15:16	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	245.8	245.8
15:17	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	248.7	248.7
15:18	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	251.6	251.6
15:19	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	254.4	254.4
15:20	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	257.3	257.3
15:21	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	260.2	260.2
15:22	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	263.0	263.0
15:23	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	265.9	265.9
15:24	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	268.8	268.8
15:25	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	271.6	271.6
15:26	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	274.5	274.5
15:27	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	277.4	277.4
15:28	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	280.2	280.2
15:29	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	283.1	283.1
15:30	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	286.0	286.0
15:31	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	288.8	288.8
15:32	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	291.7	291.7
15:33	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	294.6	294.6
15:34	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	297.4	297.4
15:35	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	300.3	300.3
15:36	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	303.2	303.2
15:37	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	306.0	306.0
15:38	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	308.9	308.9
15:39	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	311.8	311.8
15:40	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	314.6	314.6
15:41	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	317.5	317.5
15:42	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	320.4	320.4
15:43	252.1	252.8	275.9	266.8	29.9	29.9	323.2	323.2

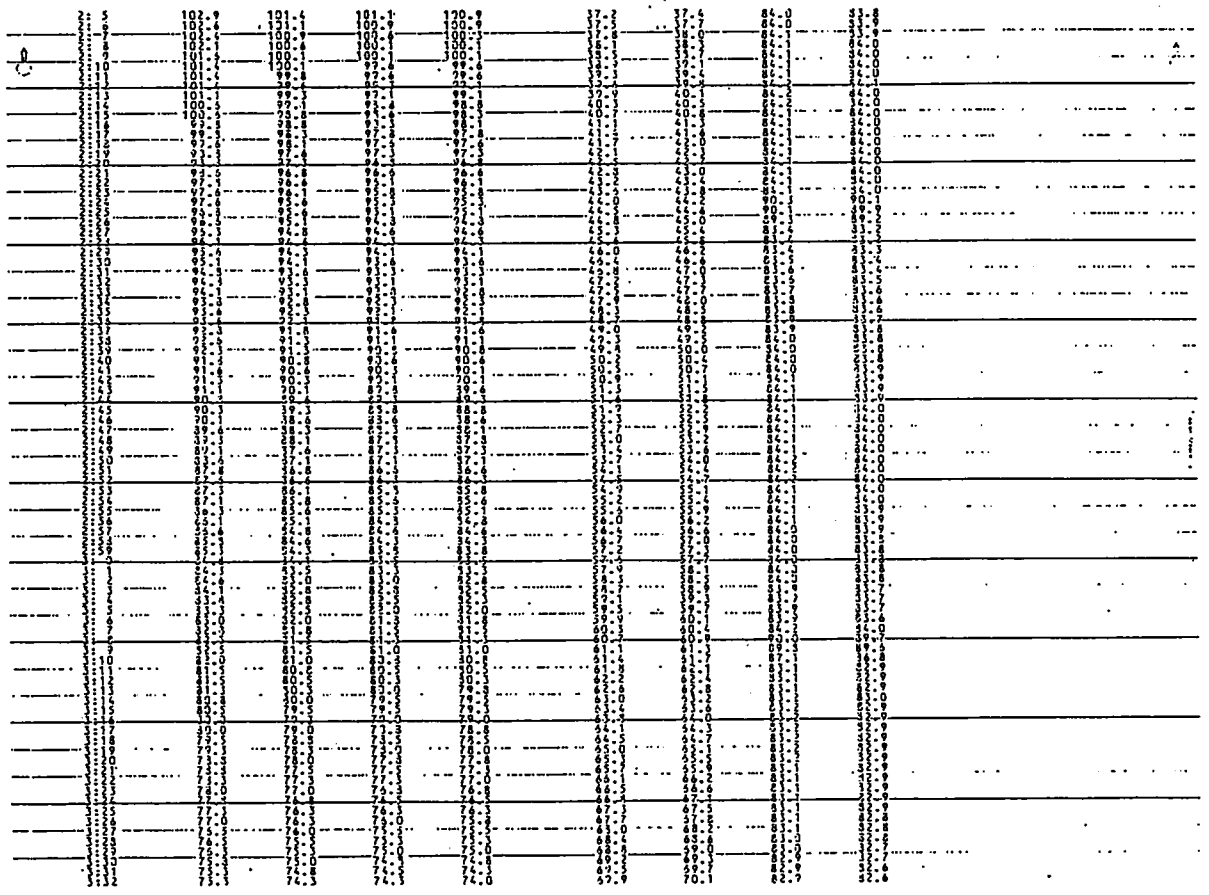


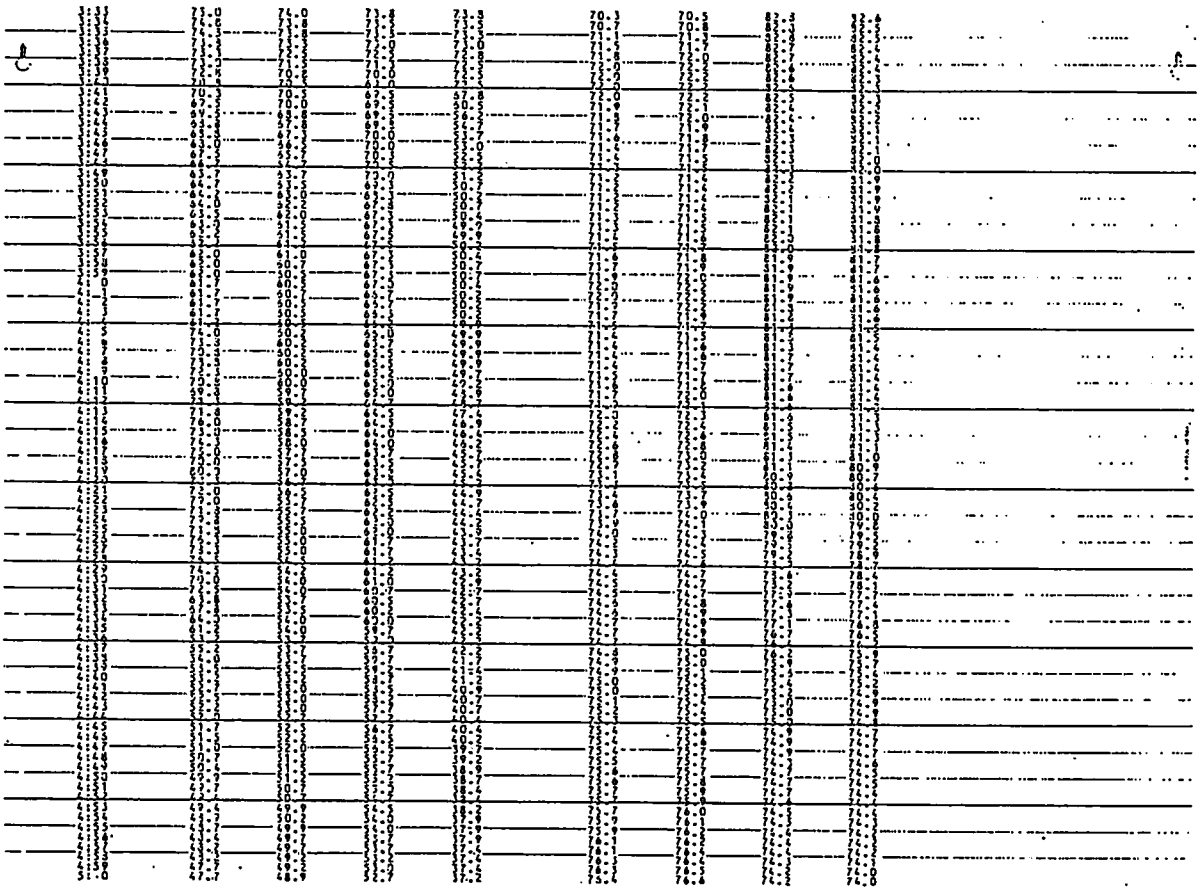


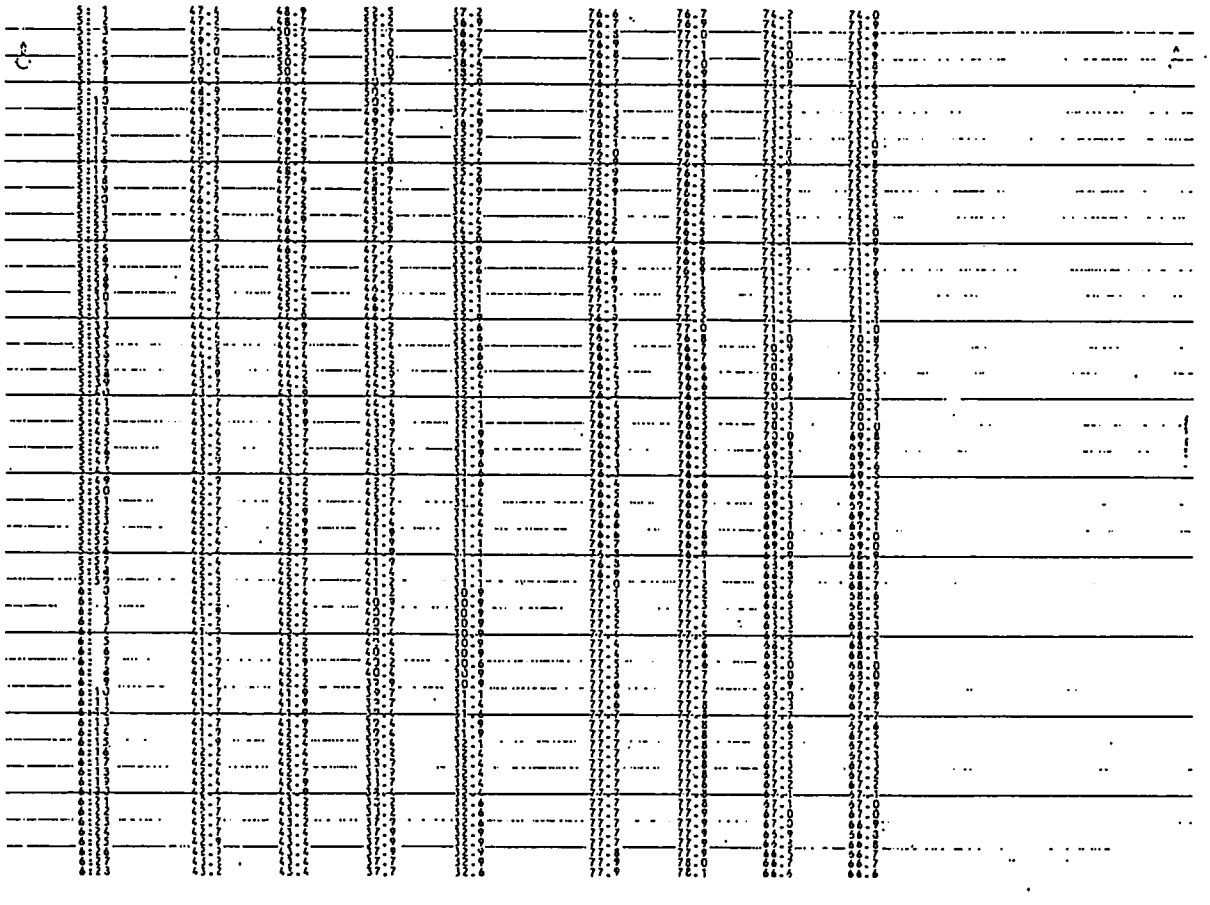


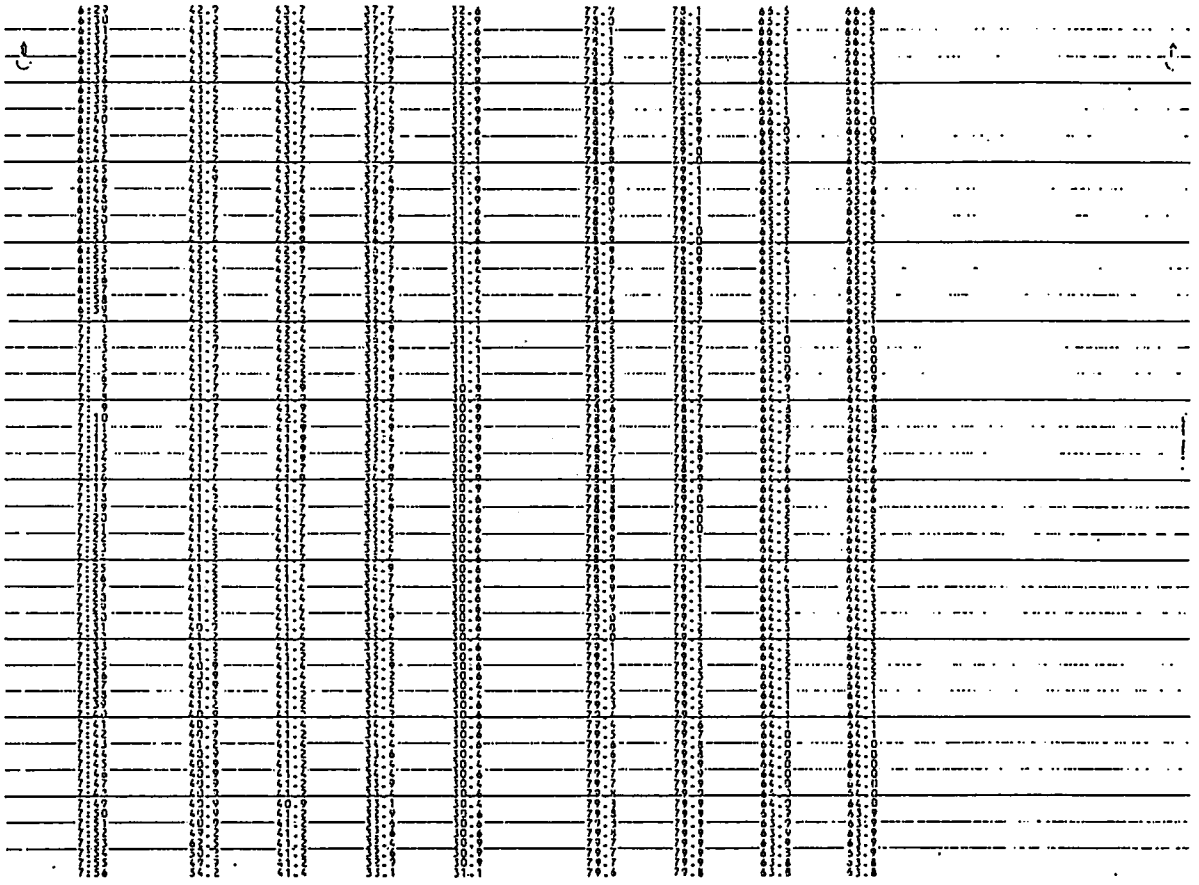












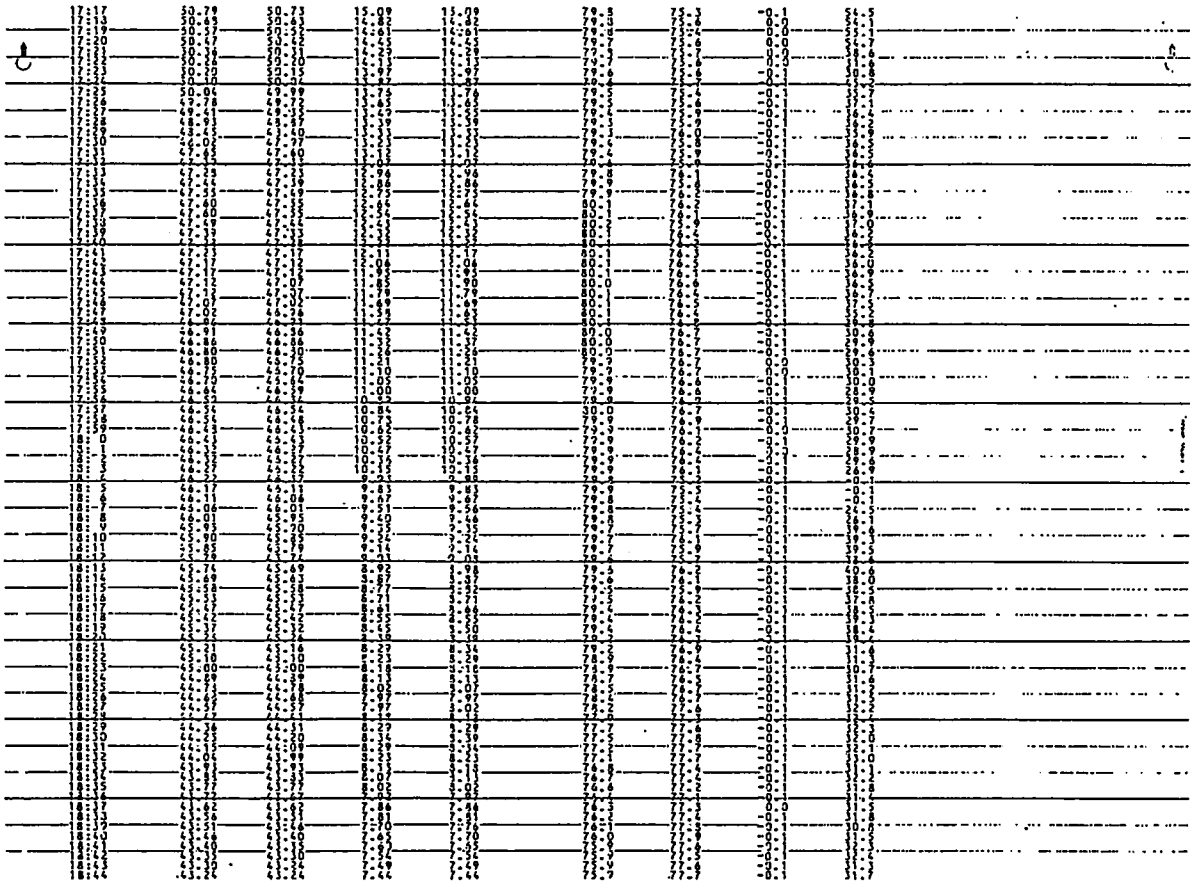
PAH DATA TREND REVIEW TREND BLOCK 5 / 6 UNIT NO.2

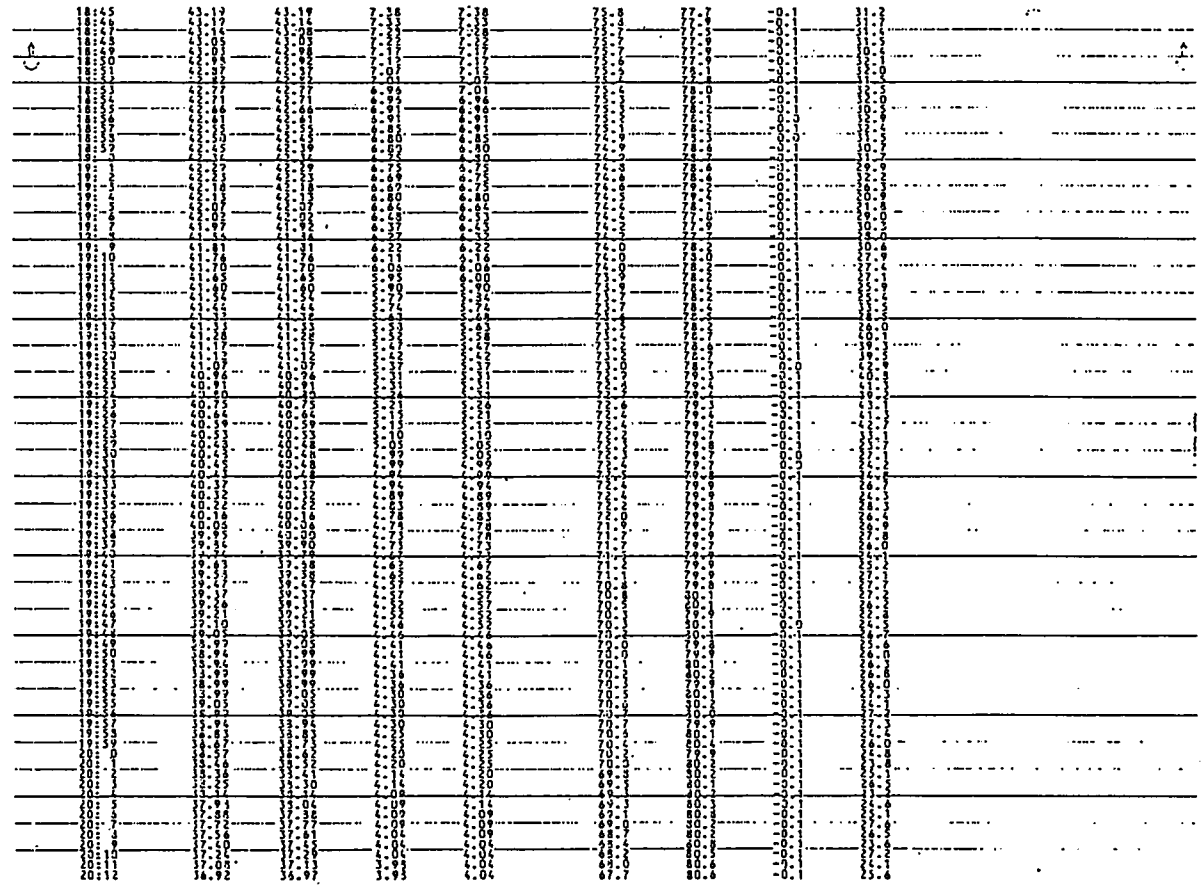
REQUESTED PARAMETER START TIME 2 / 9 13 : 50

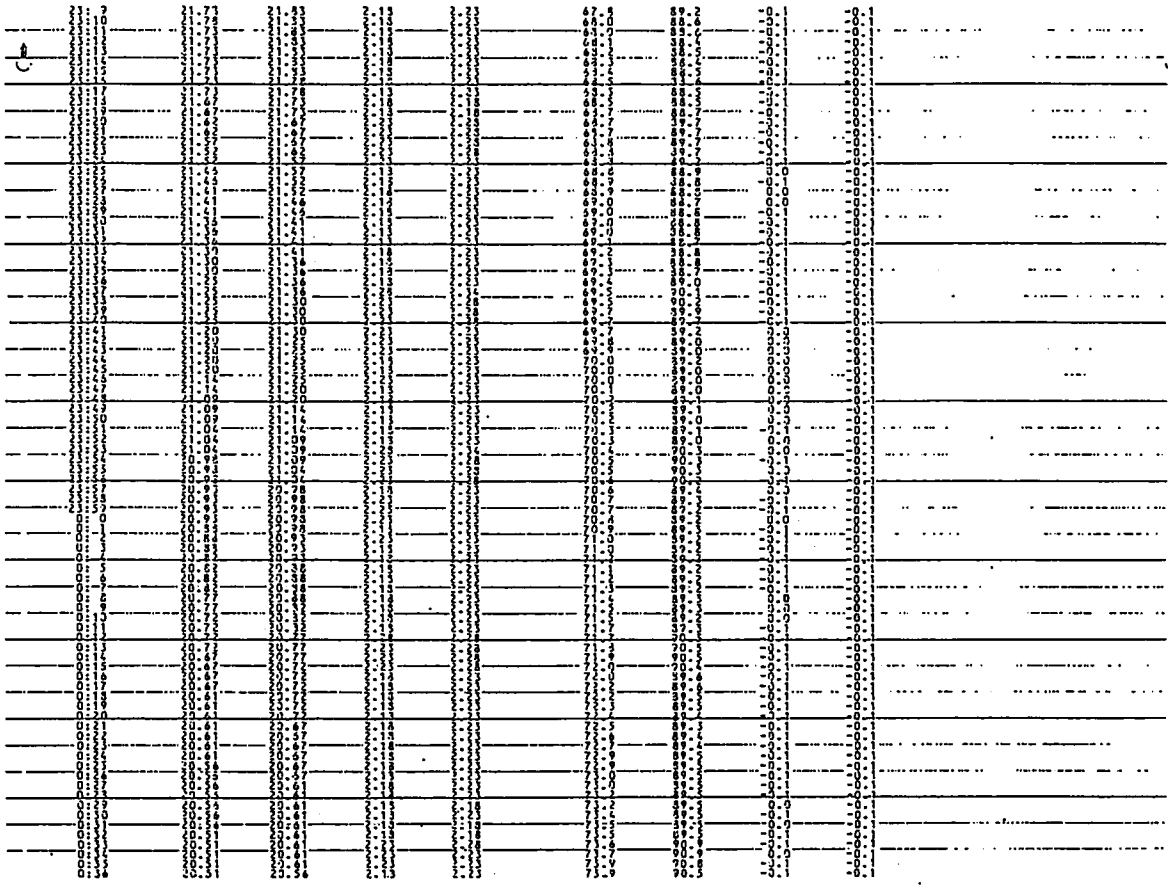
CYCLE TIME 1 MIN

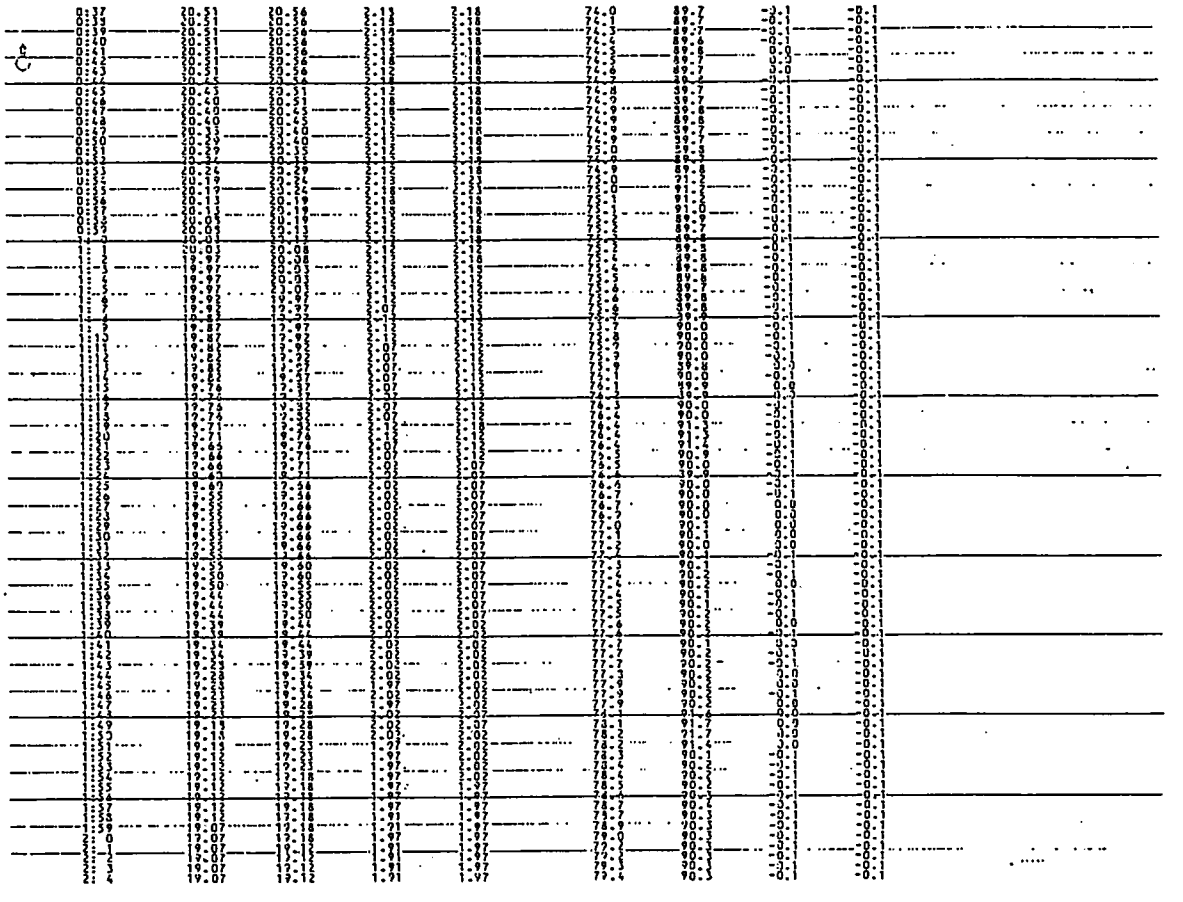
PRINT-TIME 24-HOUR

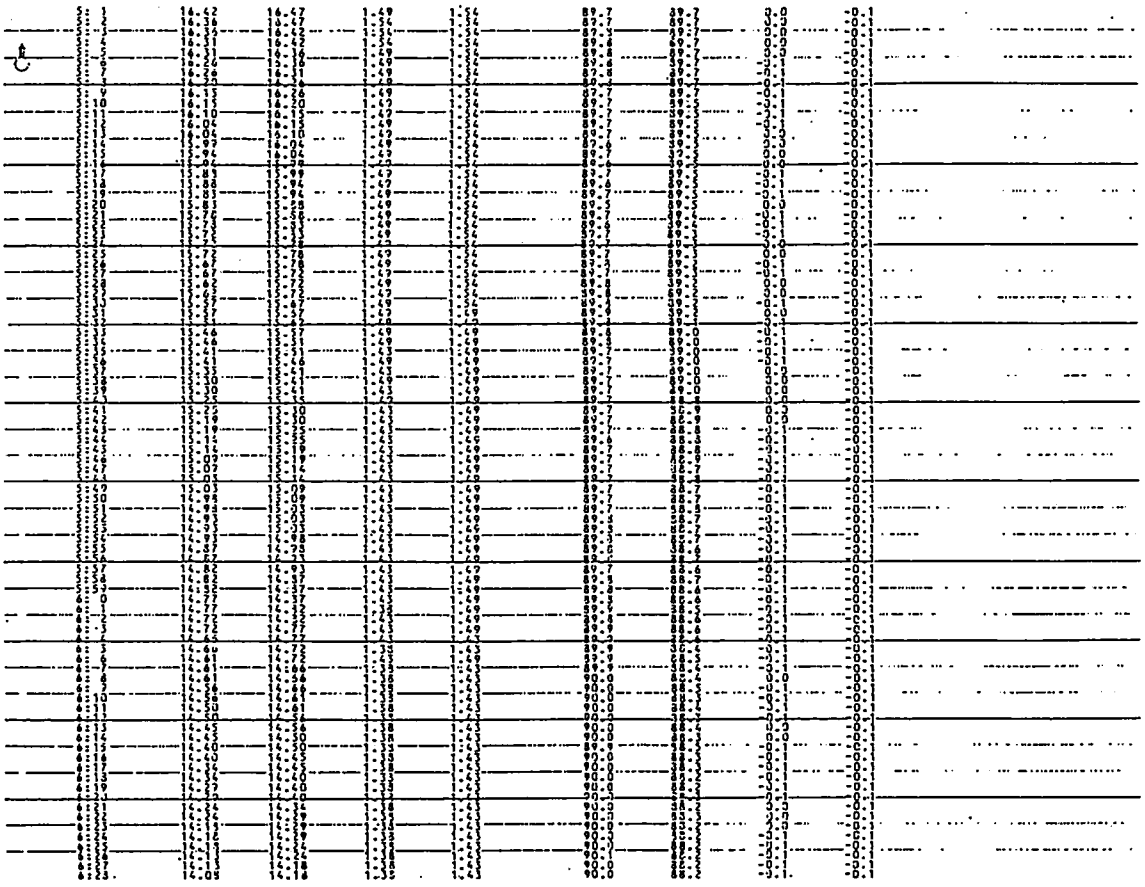
	BLOCK NO. 5					BLOCK NO. 6			
TIME	P414	P415	P424	P425	L433	L423	F2231	F2233	
13:50	64.71	64.65	64.60	64.66	51.1	51.7	0.0	-0.1	
13:51	63.32	63.21	63.21	63.05	56.1	55.9	90.1	113.4	
13:52	63.58	63.48	63.43	63.32	57.2	57.0	-0.1	106.1	
13:53	63.58	63.48	63.43	63.27	57.2	57.4	-0.1	117.6	
13:54	63.16	63.11	63.03	62.89	56.6	56.4	-0.1	119.5	
13:55	62.89	62.84	62.77	62.65	56.2	56.2	-0.1	119.6	
13:56	62.32	62.27	62.21	62.05	55.7	55.8	-0.1	113.1	
13:57	62.36	62.31	62.28	62.10	59.0	66.0	-0.1	119.4	
13:58	66.67	66.57	66.57	66.35	59.6	68.0	-0.1	111.2	
13:59	65.93	65.92	65.83	65.61	59.8	69.4	-0.1	110.8	
14: 0	65.24	65.18	65.13	64.97	60.1	70.7	-0.1	110.3	
14: 1	64.71	64.65	64.65	64.44	60.6	72.0	-0.1	110.9	
14: 2	64.60	64.59	64.16	63.90	60.9	73.4	0.0	114.1	
14: 3	65.87	65.82	65.46	65.25	61.5	75.0	0.0	116.6	
14: 4	66.97	66.92	66.58	66.35	61.8	75.7	0.0	115.5	
14: 5	66.97	66.83	66.97	66.82	62.4	73.0	0.0	138.1	
14: 6	67.62	67.56	67.95	67.89	63.1	73.7	0.0	139.1	
14: 7	67.32	67.27	67.09	67.09	63.3	73.6	0.0	140.2	
14: 8	65.32	65.21	65.71	65.65	63.7	73.6	0.0	136.9	
14: 9	68.16	68.06	67.11	67.11	64.3	73.9	0.0	139.2	
14:10	69.37	69.26	67.41	67.32	64.9	74.1	-0.1	141.9	
14:11	69.65	69.55	66.30	66.20	65.2	74.1	-0.1	59.5	
14:12	70.12	70.02	65.07	65.07	65.4	74.4	-0.1	59.6	
14:13	70.60	70.50	65.96	65.91	66.1	75.1	-0.1	59.9	
14:14	71.08	71.03	66.90	66.84	66.8	75.8	-0.1	60.4	
14:15	71.56	71.45	66.26	66.26	67.3	76.3	-0.1	56.9	
14:16	72.04	71.93	66.90	66.90	67.9	76.4	-0.1	58.1	
14:17	72.52	72.41	66.80	66.80	68.5	76.2	-0.1	-0.1	
14:18	72.99	72.89	66.87	66.88	69.0	76.0	-0.1	-0.1	
14:19	66.24	66.23	64.81	64.81	69.3	75.7	-0.1	-0.1	
14:20	65.72	65.61	25.18	25.13	70.2	75.7	-0.1	-0.1	

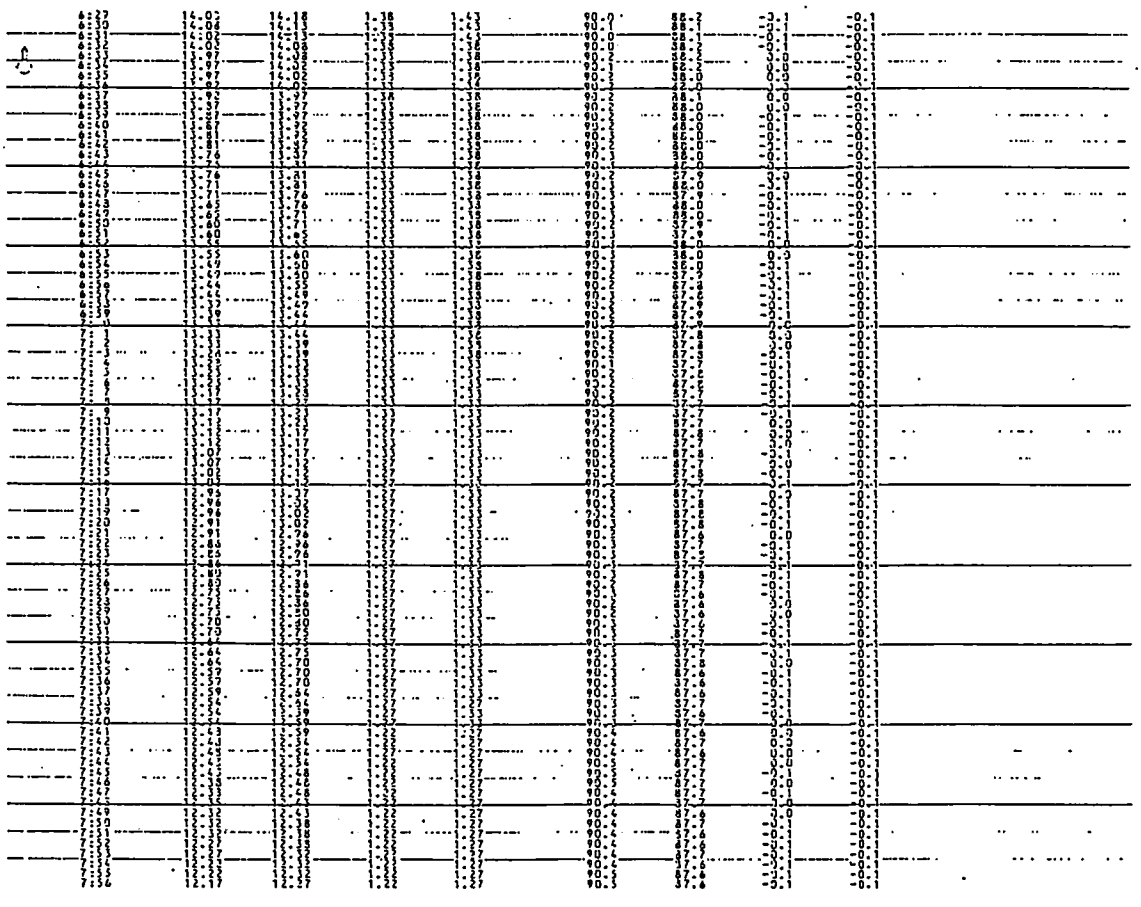












PAR DATA TREND REVIEW TREND BLOCK 9,/,10 UNIT NO.2

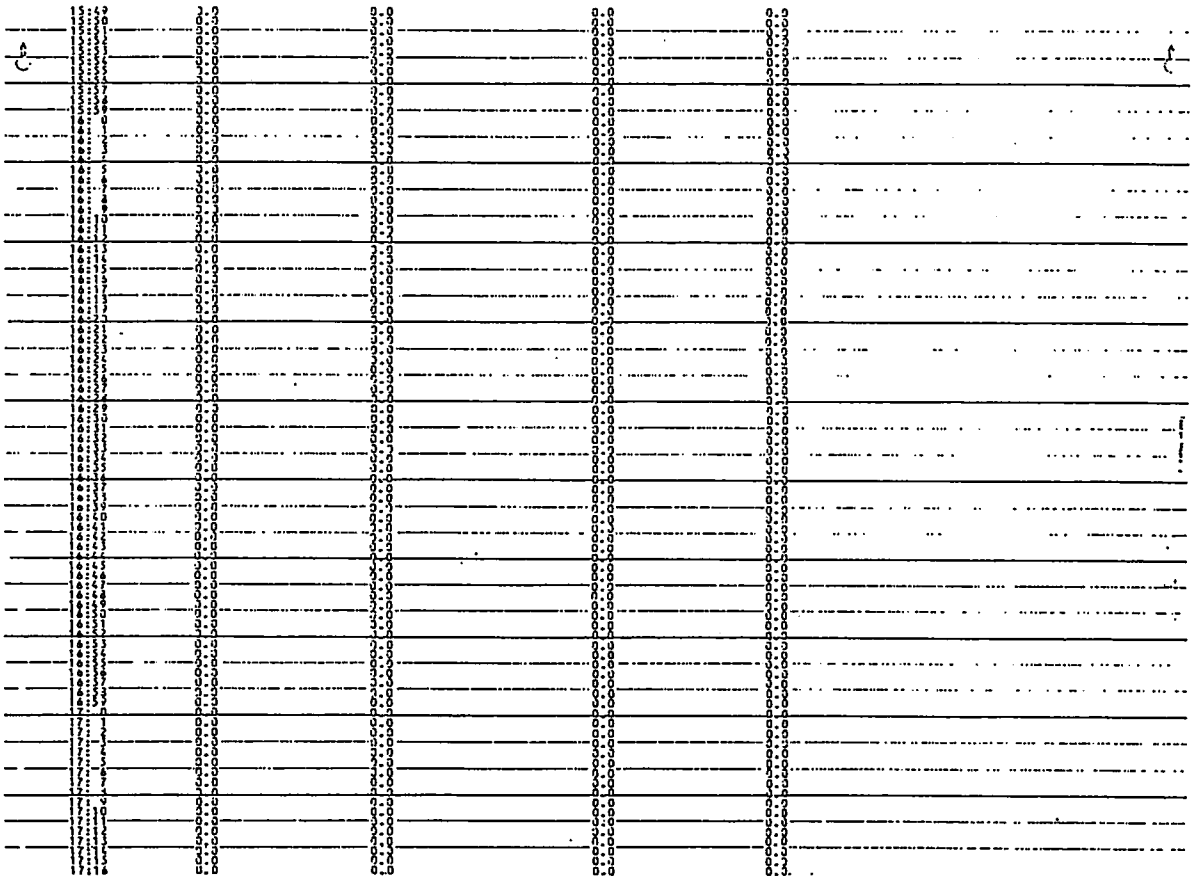
REQUESTED PARAMETER START TIME 2 / 9 13 : 50

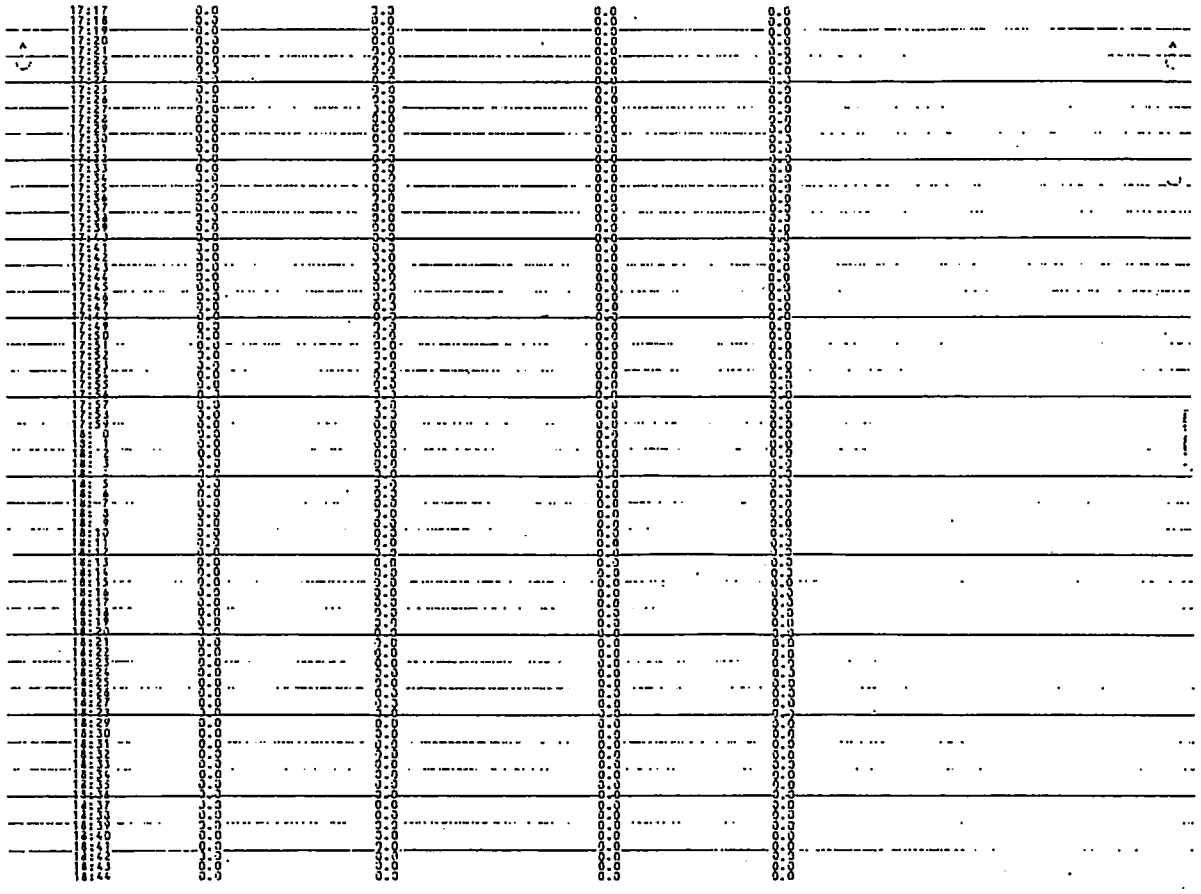
CYCLE TIME 1 MIN

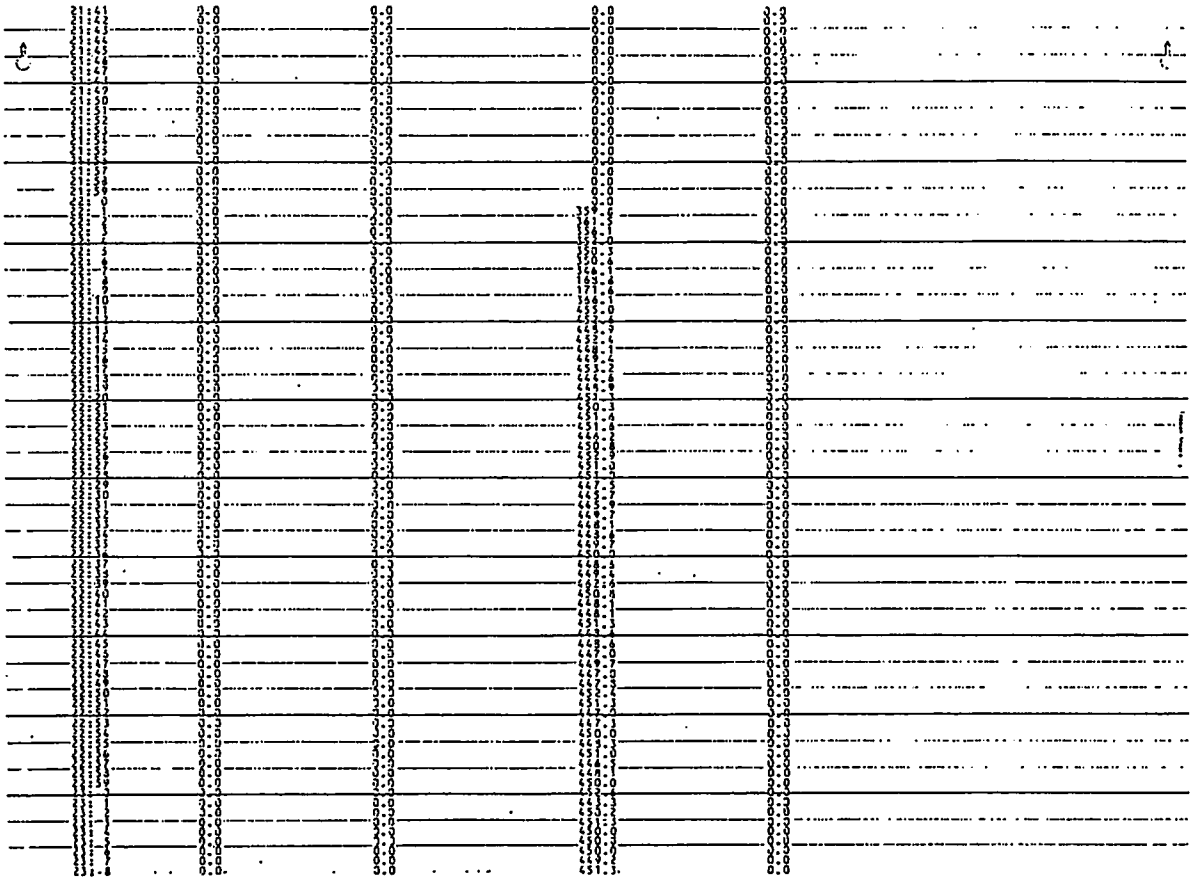
PRINT TIME 24-HOUR

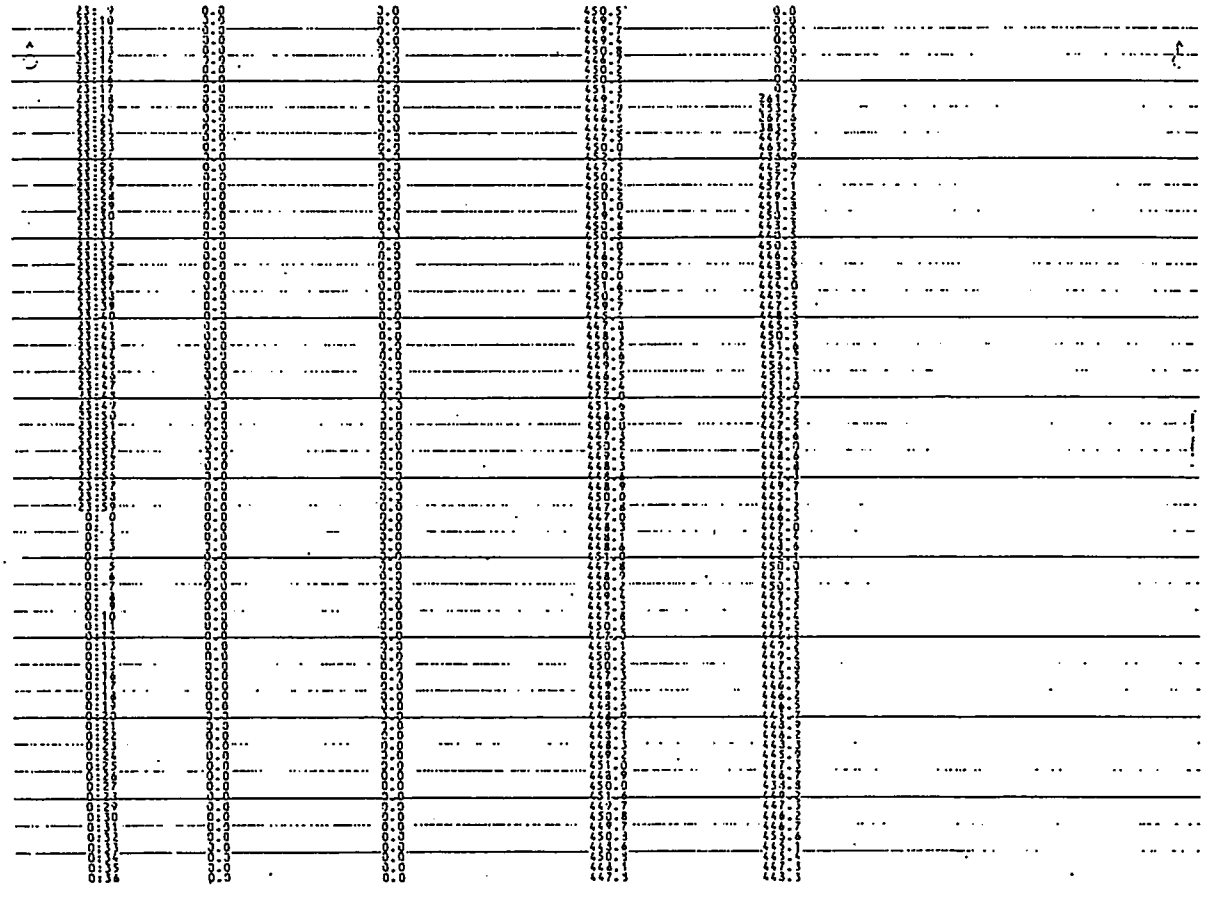
TIME	BLOCK NO 9 F929	F930	BLOCK NO 10 F506	F507
13:50	0.0	0.0	0.0	0.0
13:51	0.0	0.0	54.2	63.0
13:52	41.2	0.0	54.2	64.6
13:53	44.5	0.0	54.2	26.5
13:54	42.0	0.0	54.2	63.0
13:55	36.7	0.0	54.2	26.5
13:56	17.4	17.5	54.2	26.5
13:57	11.9	35.9	54.2	26.5
13:58	11.2	35.9	54.2	63.0
13:59	10.5	51.4	54.2	63.0
14: 0	14.3	34.0	54.2	63.0
14: 1	15.4	33.1	54.2	63.0
14: 2	20.4	33.5	54.2	63.0
14: 3	31.5	49.3	54.2	63.0
14: 4	28.5	49.1	54.2	63.0
14: 5	44.3	48.9	54.2	63.0
14: 6	43.3	48.5	54.2	64.6
14: 7	47.0	47.9	54.2	63.0
14: 8	44.4	48.9	54.2	64.6
14: 9	43.8	47.5	54.2	64.6
14:10	45.6	46.3	54.2	63.0
14:11	40.7	47.1	54.2	63.0
14:12	34.3	47.1	54.2	64.6
14:13	31.3	37.1	54.2	63.0
14:14	30.2	28.6	54.2	63.0
14:15	29.7	28.6	54.2	63.0
14:16	29.0	28.6	54.2	64.6
14:17	27.4	28.6	54.2	63.0
14:18	23.5	28.6	54.2	63.0
14:19	19.9	23.2	54.2	64.6
14:20	21.1	20.8	54.4	63.0

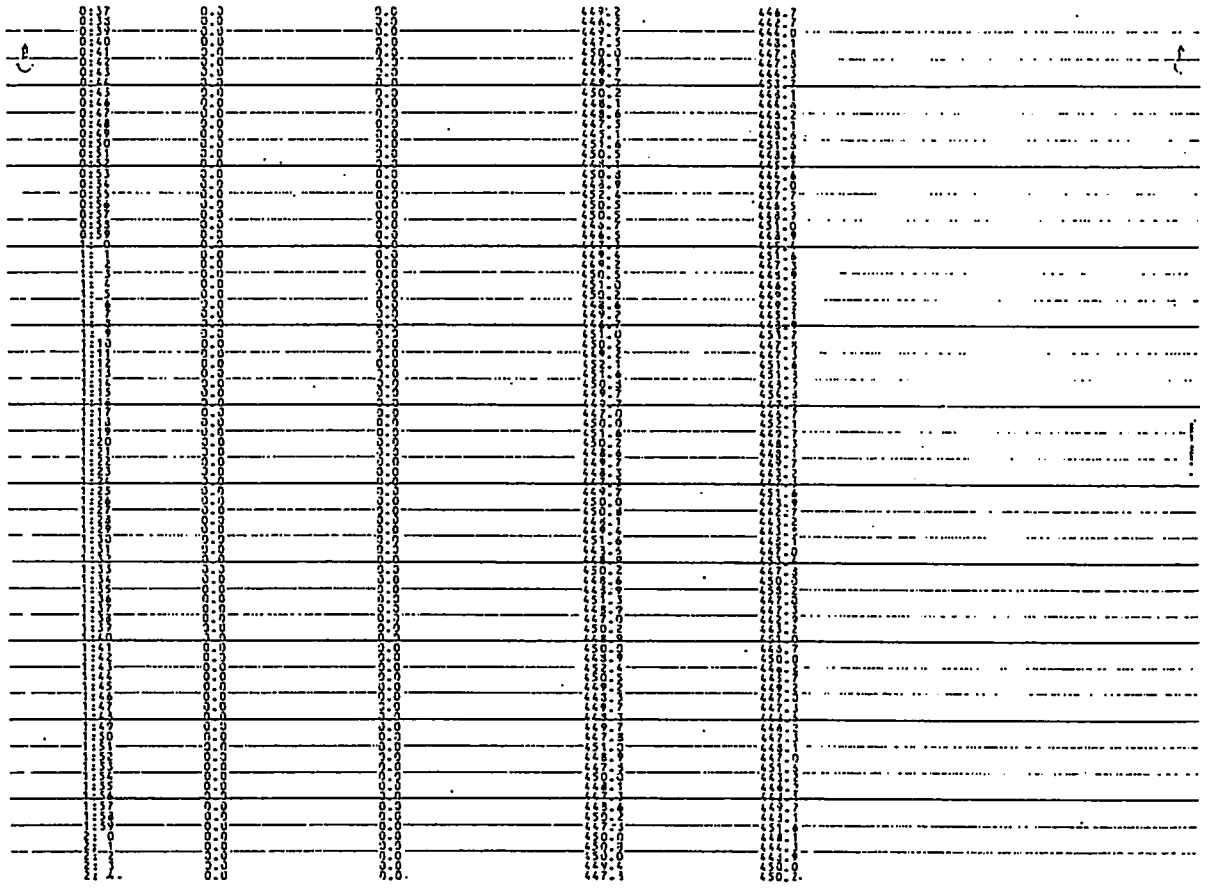
14:21	19.3	13.2	54.4	63.0
14:22	13.6	14.2	54.2	63.0
14:23	17.5	14.2	54.2	63.0
14:24	17.5	14.2	54.2	64.6
14:25	17.2	14.5	54.2	64.6
14:26	17.2	14.0	54.2	63.0
14:27	15.0	0.0	0.0	0.0
14:28	0.0	0.0	0.0	0.0
14:29	13.6	17.5	0.0	0.0
14:30	13.8	14.2	0.0	0.0
14:31	13.6	14.2	0.0	0.0
14:32	17.9	0.0	0.0	0.0
14:33	19.5	0.0	0.0	0.0
14:34	31.6	27.7	0.0	0.0
14:35	41.0	38.9	0.0	0.0
14:36	25.6	27.0	0.0	0.0
14:37	25.3	27.1	0.0	0.0
14:38	0.0	0.0	0.0	0.0
14:39	0.0	0.0	0.0	0.0
14:40	0.0	0.0	0.0	0.0
14:41	0.0	0.0	0.0	0.0
14:42	0.0	0.0	0.0	0.0
14:43	0.0	0.0	0.0	0.0
14:44	0.0	0.0	0.0	0.0
14:45	0.0	0.0	0.0	0.0
14:46	0.0	0.0	0.0	0.0
14:47	0.0	0.0	0.0	0.0
14:48	0.0	0.0	0.0	0.0
14:49	0.0	0.0	0.0	0.0
14:50	0.0	0.0	0.0	0.0
14:51	0.0	0.0	0.0	0.0
14:52	0.0	0.0	0.0	0.0
14:53	0.0	0.0	0.0	0.0
14:54	0.0	0.0	0.0	0.0
14:55	0.0	0.0	0.0	0.0
14:56	0.0	0.0	0.0	0.0
14:57	0.0	0.0	0.0	0.0
14:58	0.0	0.0	0.0	0.0
14:59	0.0	0.0	0.0	0.0
15: 0	0.0	0.0	0.0	0.0
15: 1	0.0	0.0	0.0	0.0
15: 2	0.0	0.0	0.0	0.0
15: 3	0.0	0.0	0.0	0.0
15: 4	0.0	0.0	0.0	0.0
15: 5	0.0	0.0	0.0	0.0
15: 6	0.0	0.0	0.0	0.0
15: 7	0.0	0.0	0.0	0.0
15: 8	0.0	0.0	0.0	0.0
15: 9	0.0	0.0	0.0	0.0
15:10	0.0	0.0	0.0	0.0
15:11	0.0	0.0	0.0	0.0
15:12	0.0	0.0	0.0	0.0
15:13	0.0	0.0	0.0	0.0
15:14	0.0	0.0	0.0	0.0
15:15	0.0	0.0	0.0	0.0
15:16	0.0	0.0	0.0	0.0
15:17	0.0	0.0	0.0	0.0
15:18	0.0	0.0	0.0	0.0
15:19	0.0	0.0	0.0	0.0
15:20	0.0	0.0	0.0	0.0
15:21	0.0	0.0	0.0	0.0
15:22	0.0	0.0	0.0	0.0
15:23	0.0	0.0	0.0	0.0
15:24	0.0	0.0	0.0	0.0
15:25	0.0	0.0	0.0	0.0
15:26	0.0	0.0	0.0	0.0
15:27	0.0	0.0	0.0	0.0
15:28	0.0	0.0	0.0	0.0
15:29	0.0	0.0	0.0	0.0
15:30	0.0	0.0	0.0	0.0
15:31	0.0	0.0	0.0	0.0
15:32	0.0	0.0	0.0	0.0
15:33	0.0	0.0	0.0	0.0
15:34	0.0	0.0	0.0	0.0
15:35	0.0	0.0	0.0	0.0
15:36	0.0	0.0	0.0	0.0
15:37	0.0	0.0	0.0	0.0
15:38	0.0	0.0	0.0	0.0
15:39	0.0	0.0	0.0	0.0
15:40	0.0	0.0	0.0	0.0
15:41	0.0	0.0	0.0	0.0
15:42	0.0	0.0	0.0	0.0
15:43	0.0	0.0	0.0	0.0
15:44	0.0	0.0	0.0	0.0
15:45	0.0	0.0	0.0	0.0
15:46	0.0	0.0	0.0	0.0
15:47	0.0	0.0	0.0	0.0
15:48	0.0	0.0	0.0	0.0

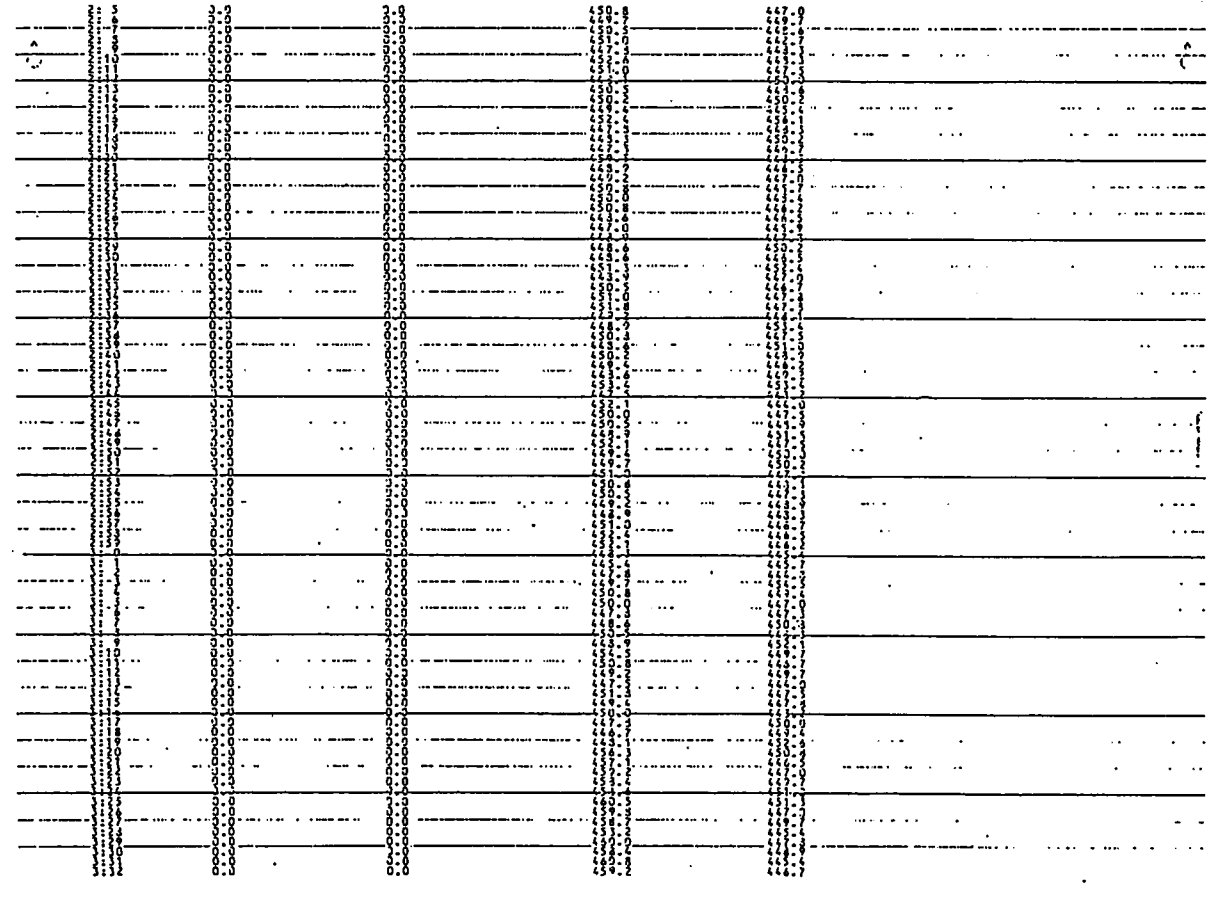


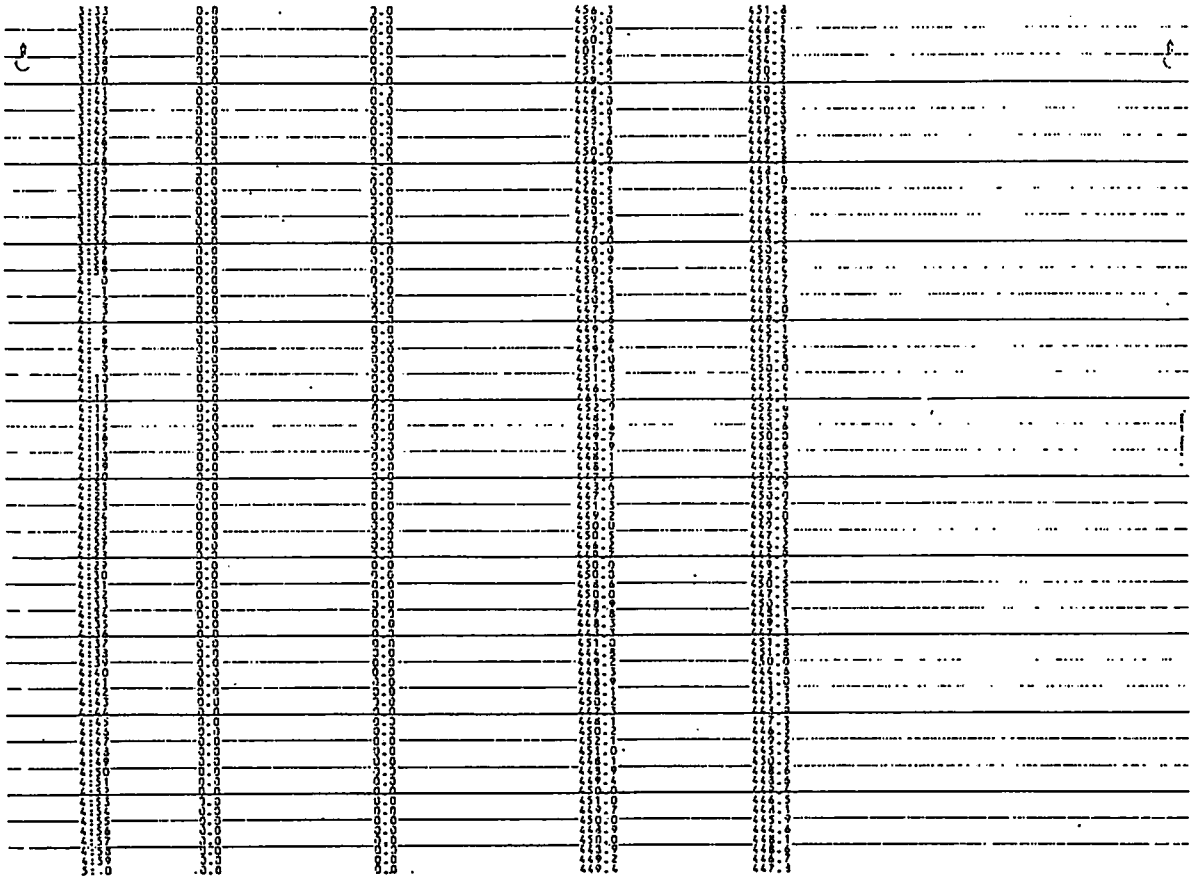


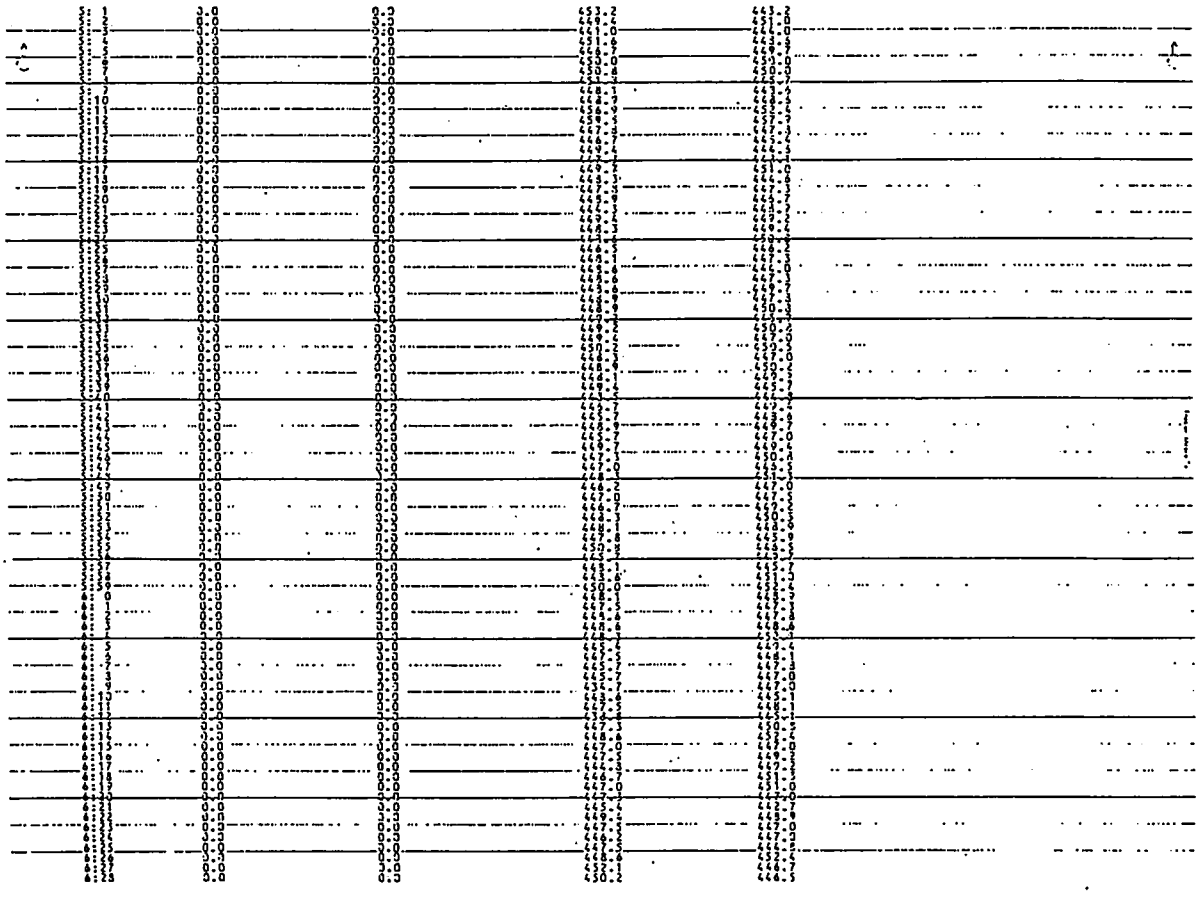


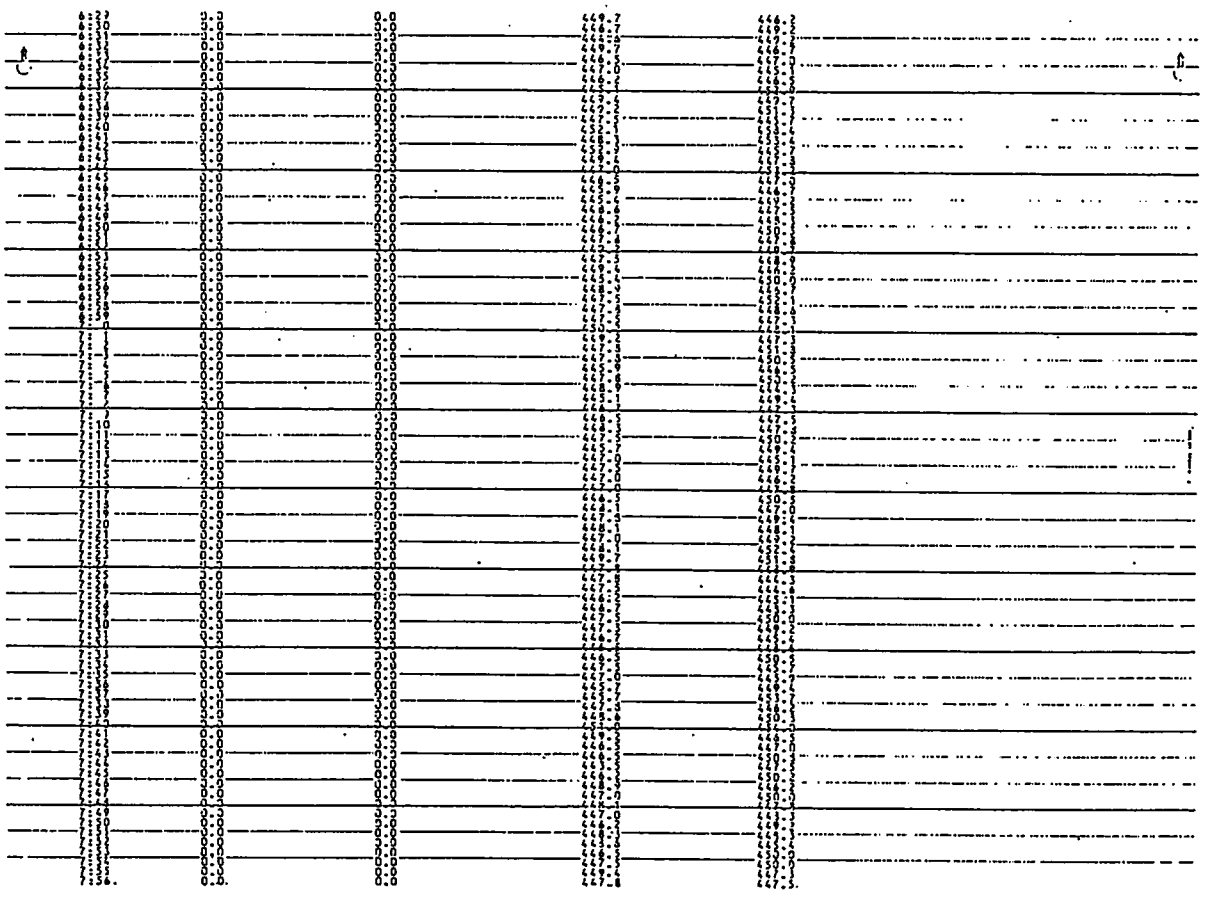








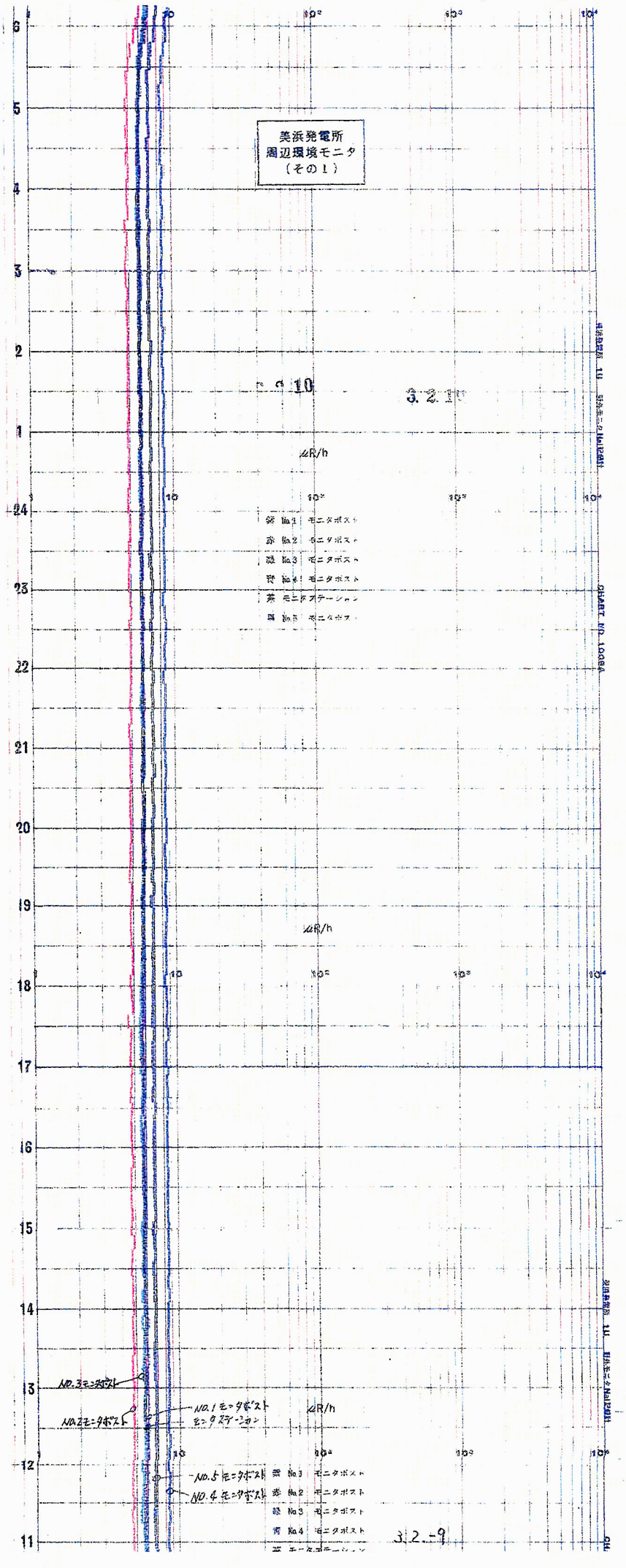


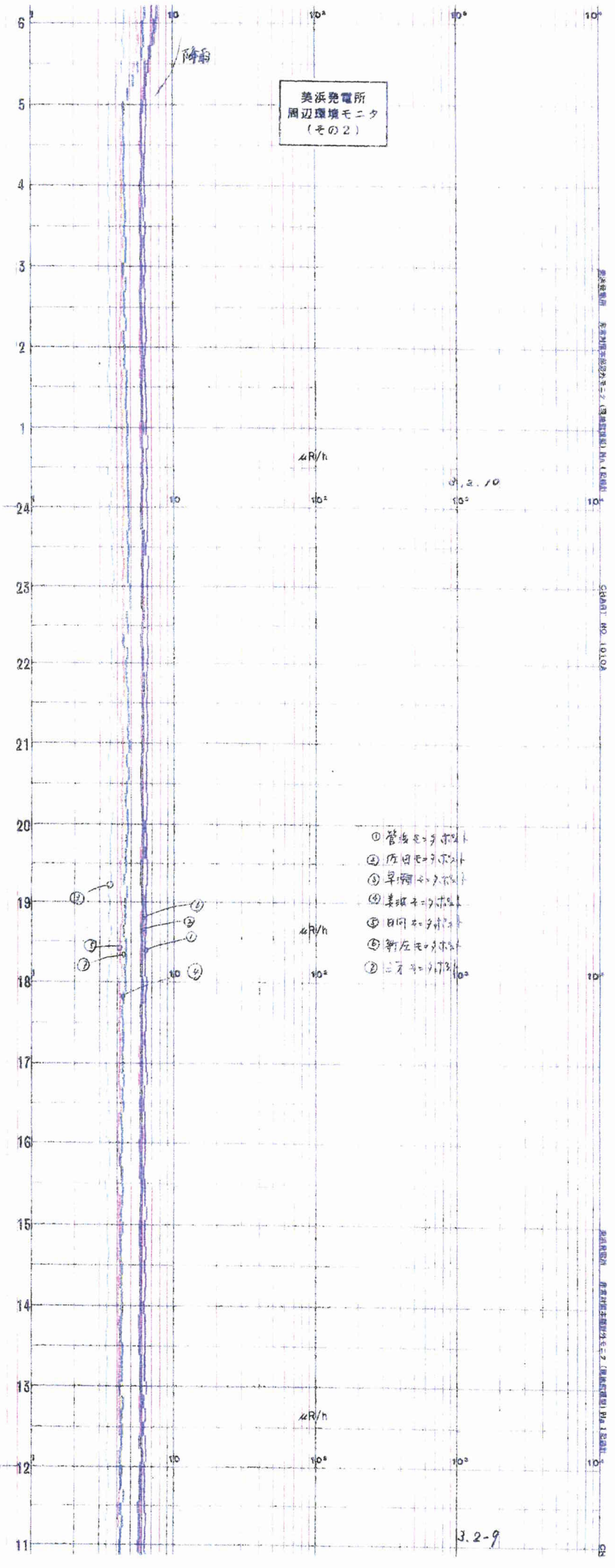


4．プラント計器記録（チャート）（抜粋）

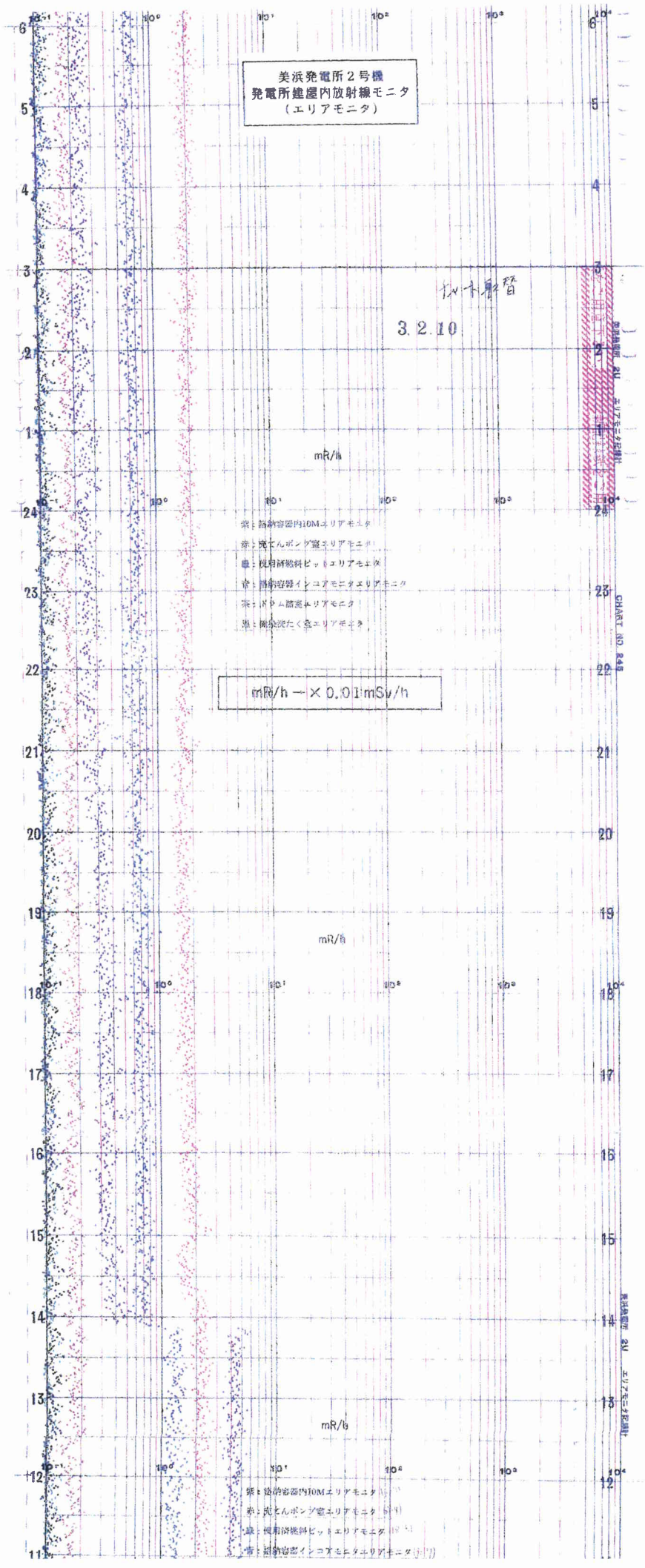
資料リスト

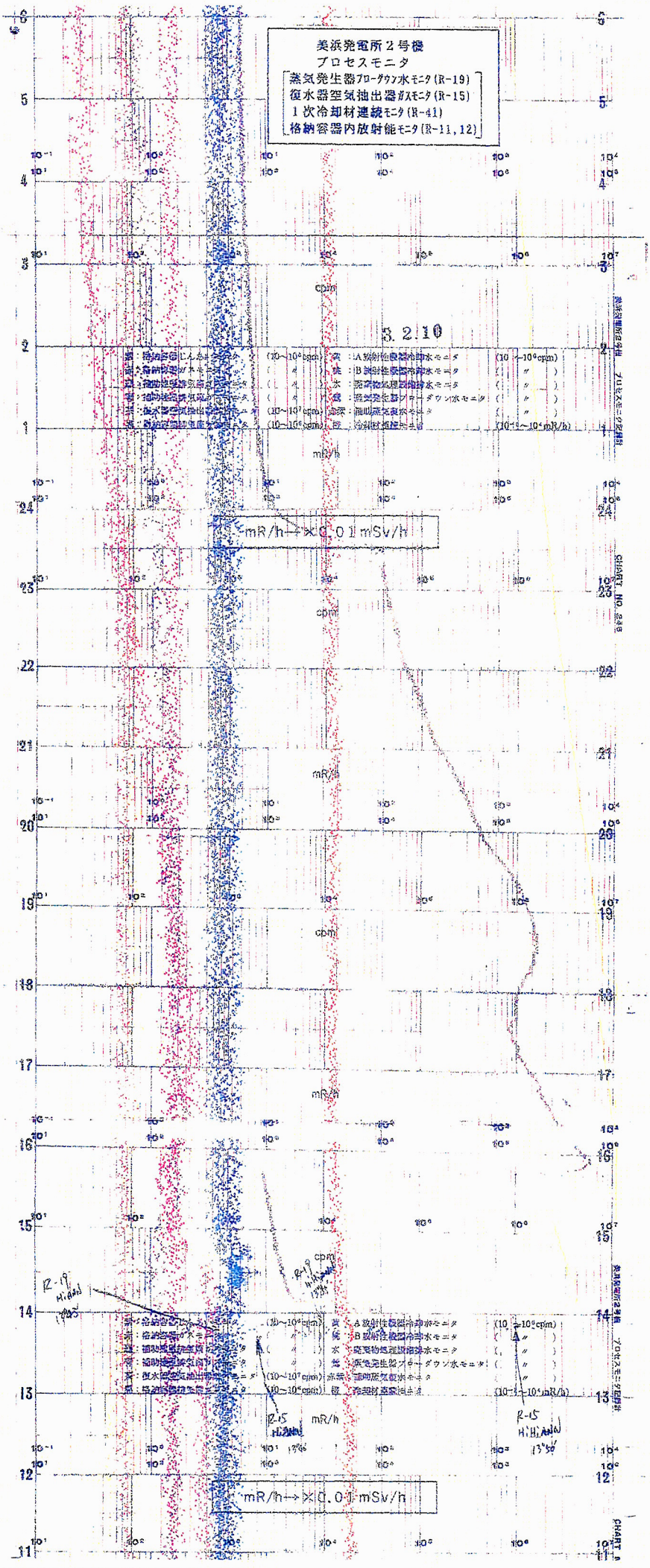
１．美浜発電所　周辺環境モニタ（その１）
２．美浜発電所　周辺環境モニタ（その２）
３．美浜発電所２号機　発電所建屋内放射線モニタ
４．美浜発電所２号機　プロセスモニタ
５．美浜発電所２号機　格納容器内空間線量率モニタ
６．美浜発電所１号機　プロセスモニタ
７．美浜発電所２号機　発電機出力
８．美浜発電所２号機　蒸気加減弁開度
９．美浜発電所２号機　原子炉炉外中性子束
１０．美浜発電所２号機　１次冷却材系統(RCS)圧力
１１．美浜発電所２号機　加圧器水位
１２．美浜発電所２号機　１次冷却材系統(RCS)高温側温度及び飽和温度
１３．美浜発電所２号機　１次冷却材系統(RCS)低温側温度
１４．美浜発電所２号機　安全注入流量
１５．美浜発電所２号機　Ａ蒸気発生器主蒸気・主給水流量及び水位
１６．美浜発電所２号機　Ｂ蒸気発生器主蒸気・主給水流量及び水位
１７．美浜発電所２号機　蒸気発生器水位（広域）
１８．美浜発電所２号機　補助給水流量
１９．美浜発電所２号機　２次系冷却水温度
２０．美浜発電所２号機　余熱除去流量
２１．美浜発電所２号機　復水器真空度
２２．美浜発電所２号機　１次冷却材平均温度

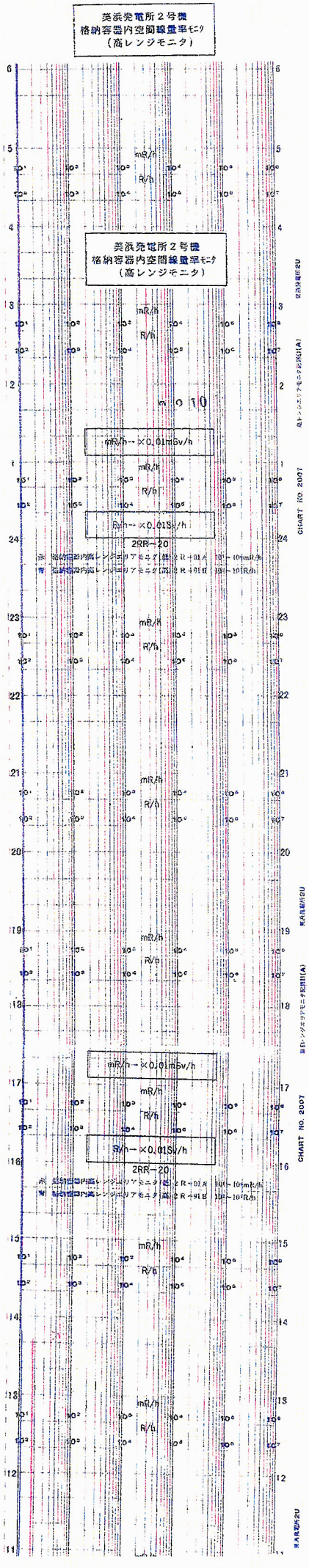

美浜発電所
周辺環境モニタ
（その1）
μR/h
緑 No.1 モニタポスト
赤 No.2 モニタポスト
緑 No.3 モニタポスト
青 No.4 モニタポスト
黒 モニタステーション
黄 No.5 モニタポスト
μR/h
NO.3モニタポスト
NO.2モニタポスト
NO.1モニタポスト
モニタステーション
NO.5モニタポスト
NO.4モニタポスト
μR/h
黒 No.1 モニタポスト
赤 No.2 モニタポスト
緑 No.3 モニタポスト
青 No.4 モニタポスト

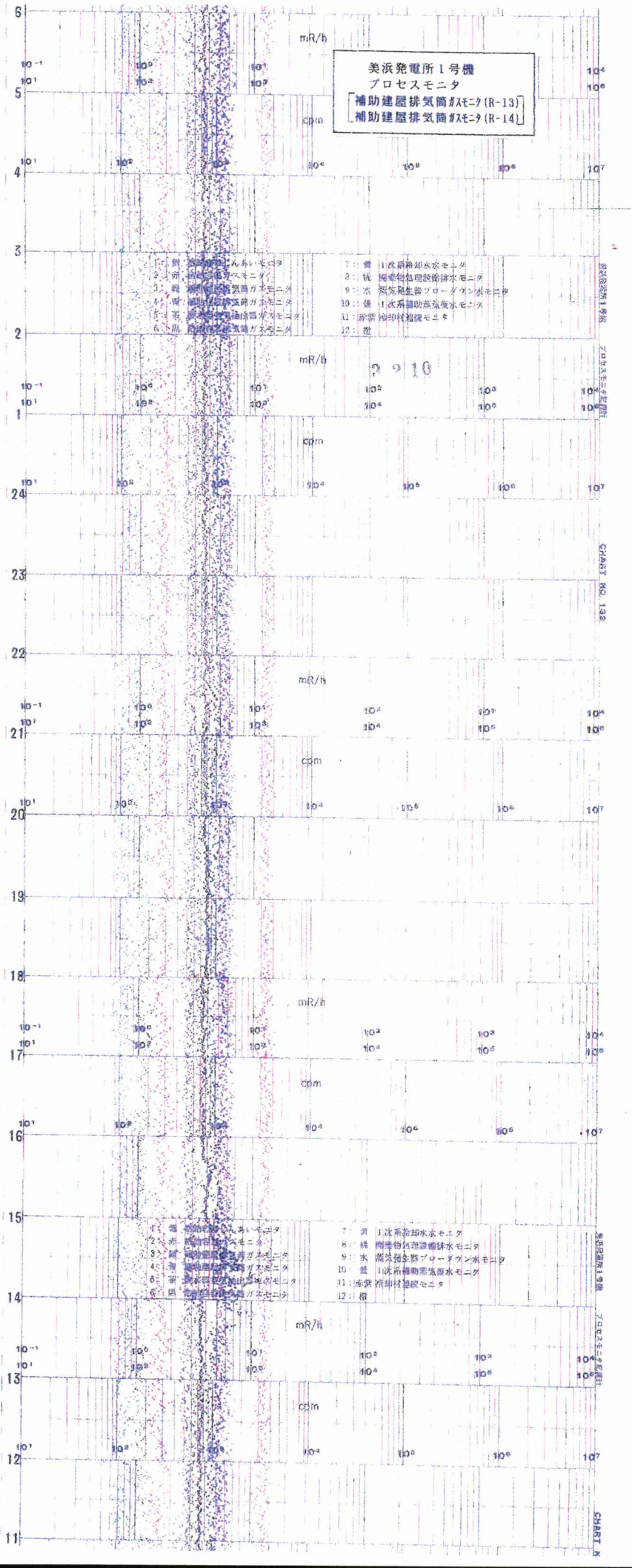

美浜発電所
周辺環境モニタ
（その2）
降雨
μR/h
μR/h
μR/h
μR/h
① 管理モニタポスト
② 原田モニタポスト
③ 早瀬モニタポスト
④ 美浜モニタポスト
⑤ 日向モニタポスト
⑥ 新庄モニタポスト
⑦ ニアモニタリング

3.2-9

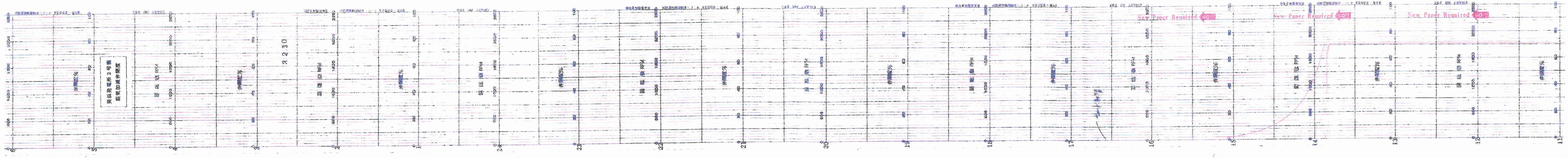

美浜発電所２号機
発電所建屋内放射線モニタ
（エリアモニタ）
3.2.10
mR/h
緑：固体廃棄物貯蔵庫エリアモニタ
赤：海水ポンプ室エリアモニタ
青：使用済燃料ピットエリアモニタ
黄：固体廃棄物貯蔵庫インコアモニタエリアモニタ
茶：ドラム詰室エリアモニタ
黒：機器搬出入口エリアモニタ
mR/h ― × 0.01mSv/h
CHART NO. 24B
mR/h
mR/h
緑：固体廃棄物貯蔵庫エリアモニタ
赤：海水ポンプ室エリアモニタ
青：使用済燃料ピットエリアモニタ
黄：固体廃棄物貯蔵庫インコアモニタエリアモニタ

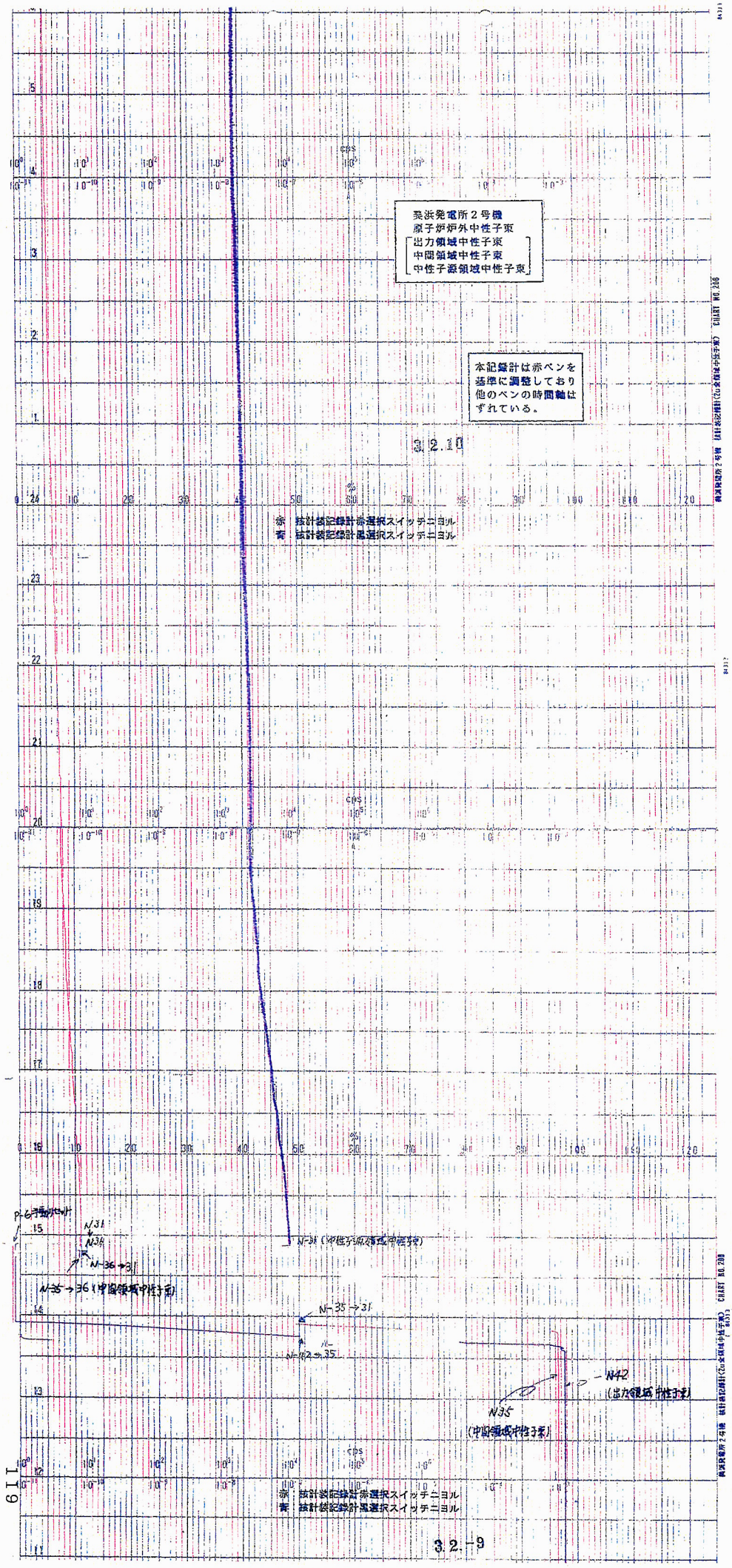

美浜発電所２号機
プロセスモニタ
蒸気発生器ブローダウン水モニタ(R-19)
復水器空気抽出器ガスモニタ(R-15)
１次冷却材連続モニタ(R-41)
格納容器内放射能モニタ(R-11,12)
5.2.10
mR/h→×0.01mSv/h
cpm
mR/h
R-19
R-15
R-41
R-11,12
CHART NO. 2418

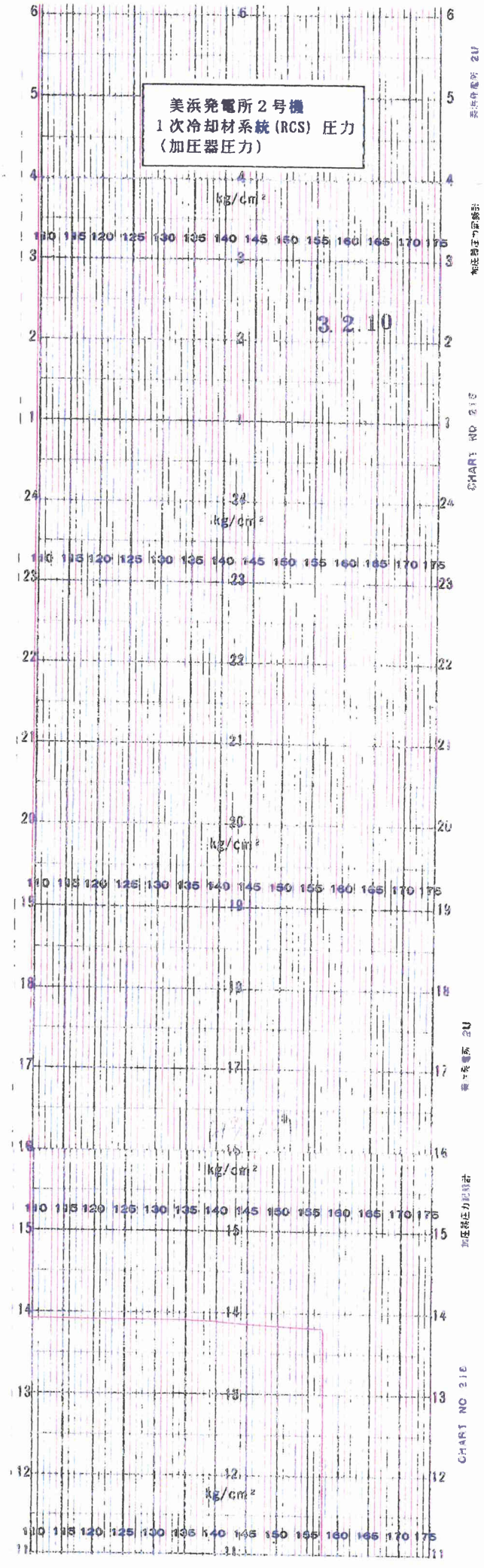

美浜発電所２号機
格納容器内空間線量率モニタ
（高レンジモニタ）
mR/h
R/h
mR/h→×0.01mSv/h
R/h→×0.01Sv/h
2RR-20
CHART NO. 2007

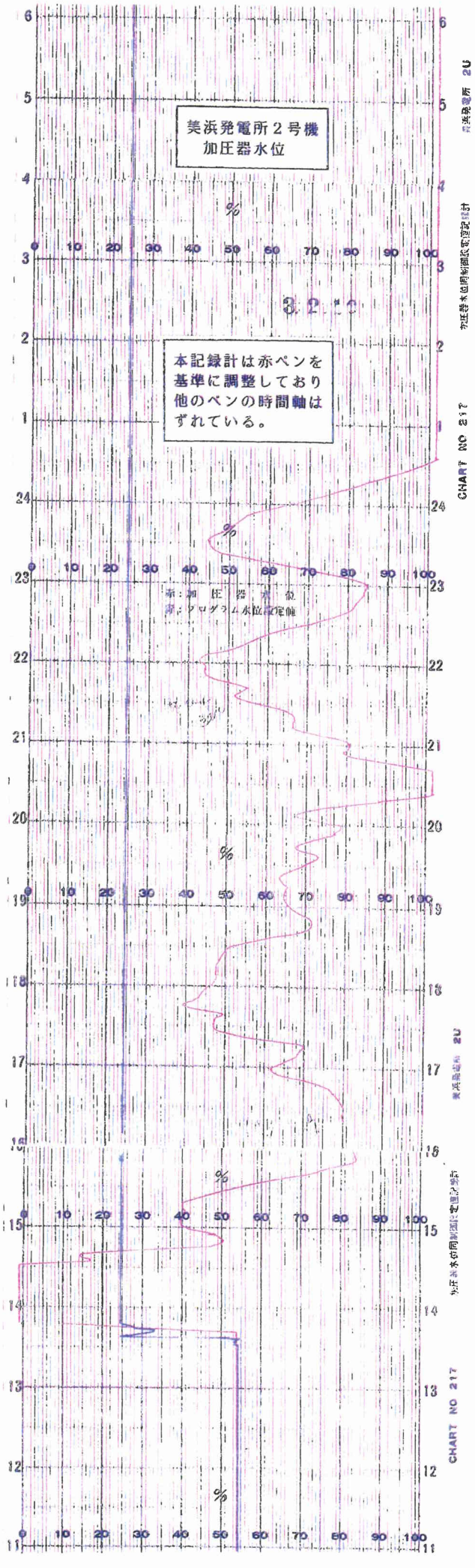

美浜発電所1号機
プロセスモニタ
補助建屋排気筒ガスモニタ(R-13)
補助建屋排気筒ガスモニタ(R-14)
mR/h
cpm
CHART NO. 136

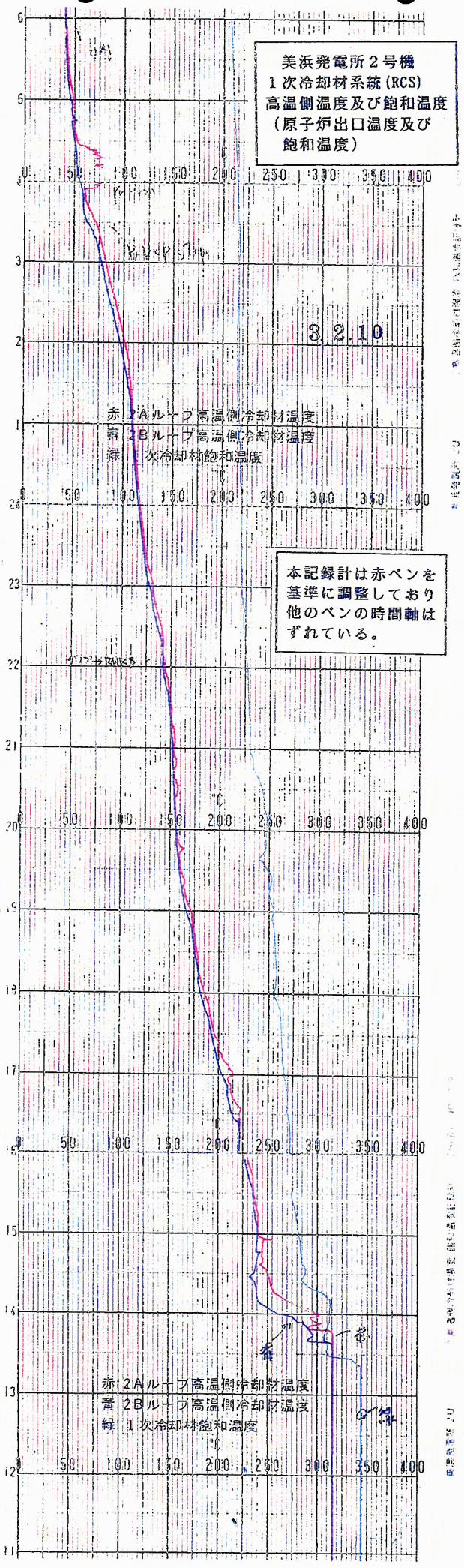
美浜発電所２号機
発電機出力
MW
0
100
200
300
400
500
600
3210
CHART NO 263

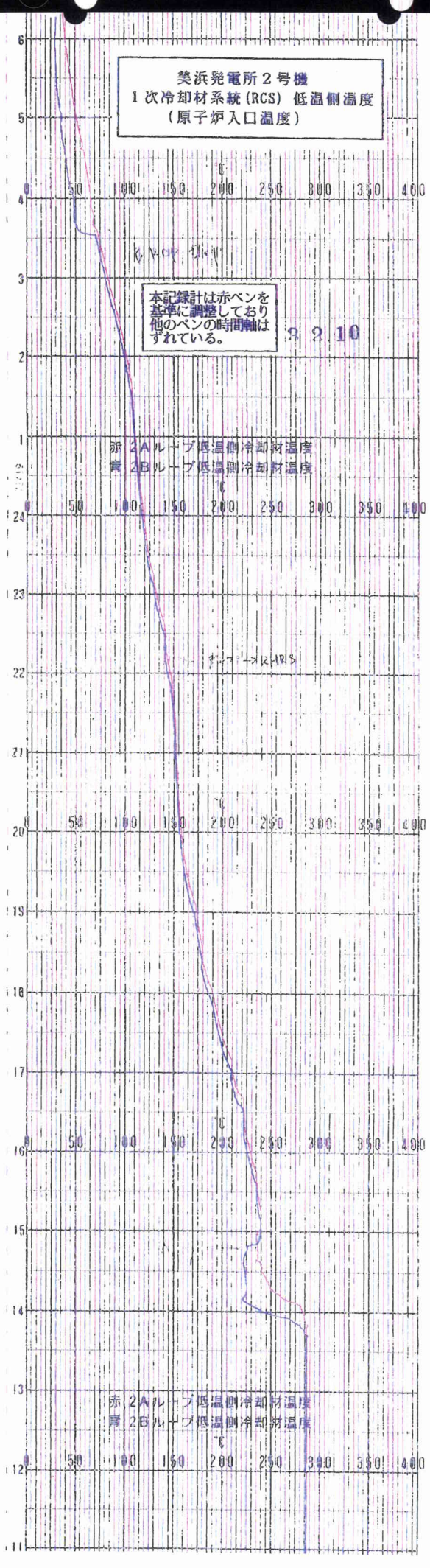

R230
New Paper Required
New Paper Required
New Paper Required

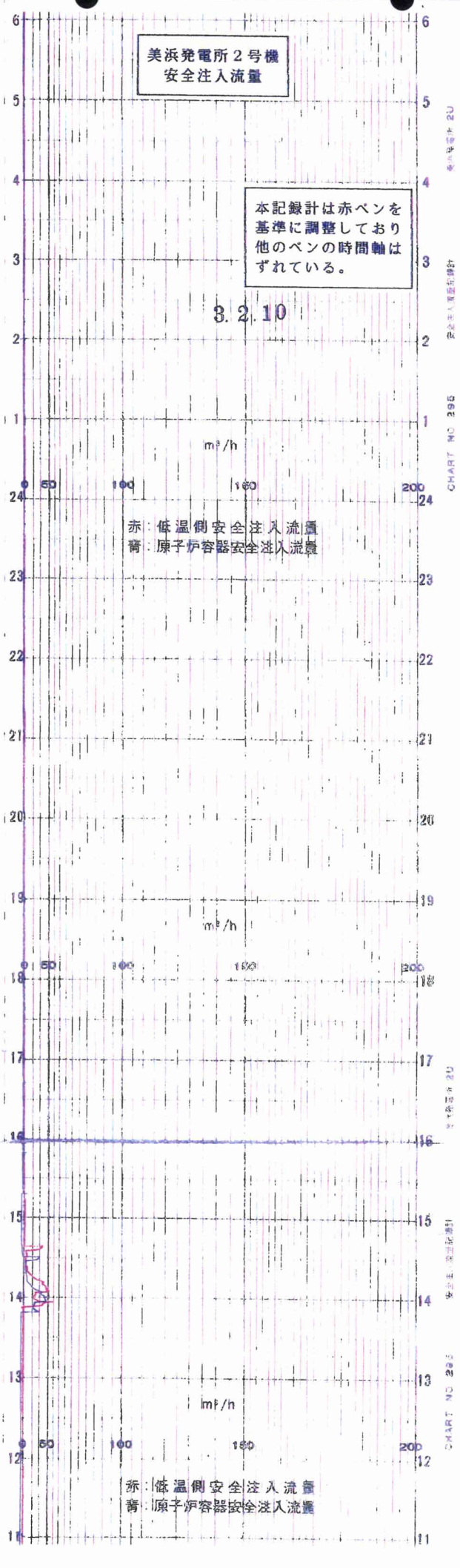

美浜発電所２号機
原子炉炉外中性子束
出力領域中性子束
中間領域中性子束
中性子源領域中性子束
本記録計は赤ペンを基準に調整しており他のペンの時間軸はずれている。
赤：核計装記録計赤選択スイッチニヨル
青：核計装記録計黒選択スイッチニヨル
N-31（中性子源領域中性子束）
N-36→31
N-35→36（中間領域中性子束）
N-35→31
N-42→35
N-42
（出力領域中性子束）
N35
（中間領域中性子束）
3.2-9

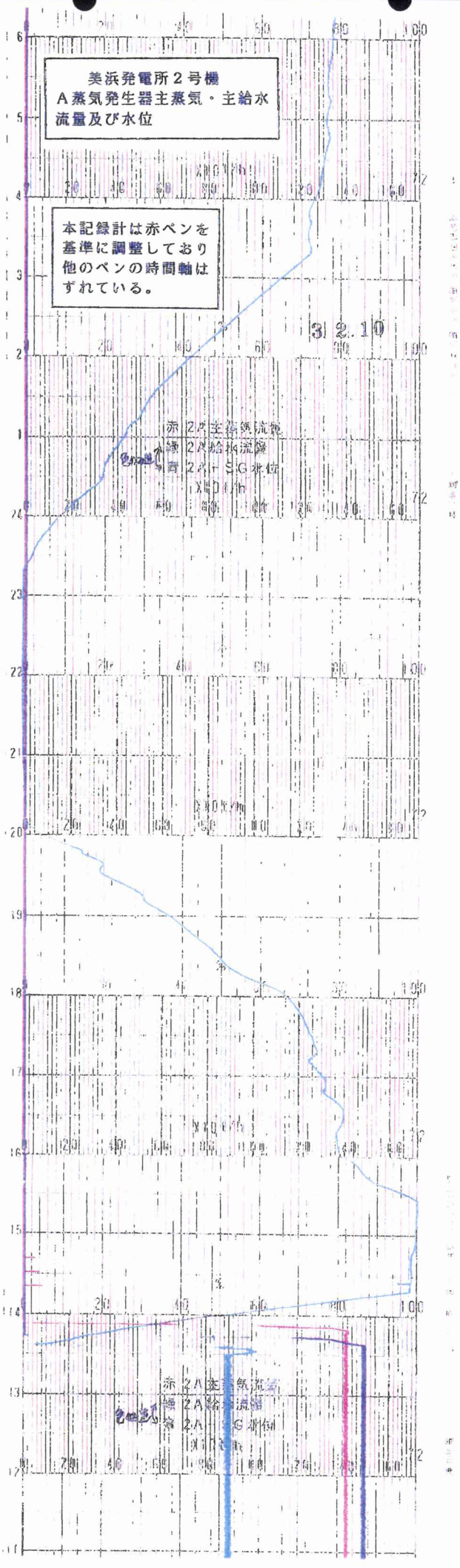

美浜発電所２号機
１次冷却材系統（RCS）圧力
（加圧器圧力）
3.2.10
kg/cm²
110 115 120 125 130 135 140 145 150 155 160 165 170 175

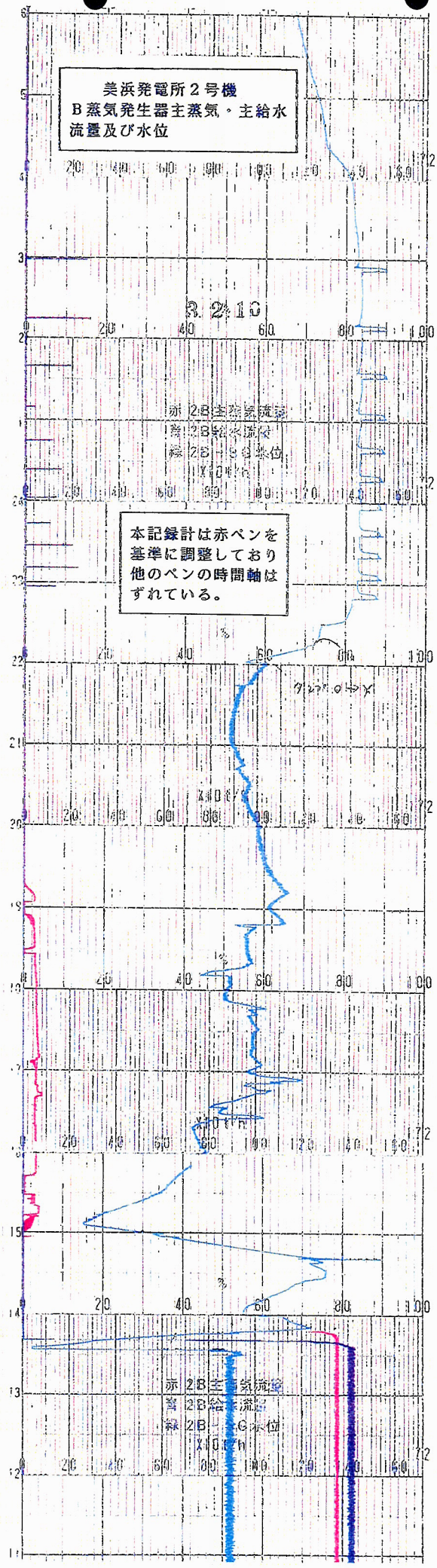

美浜発電所２号機
加圧器水位
本記録計は赤ペンを基準に調整しており他のペンの時間軸はずれている。
CHART NO 217
CHART NO 217

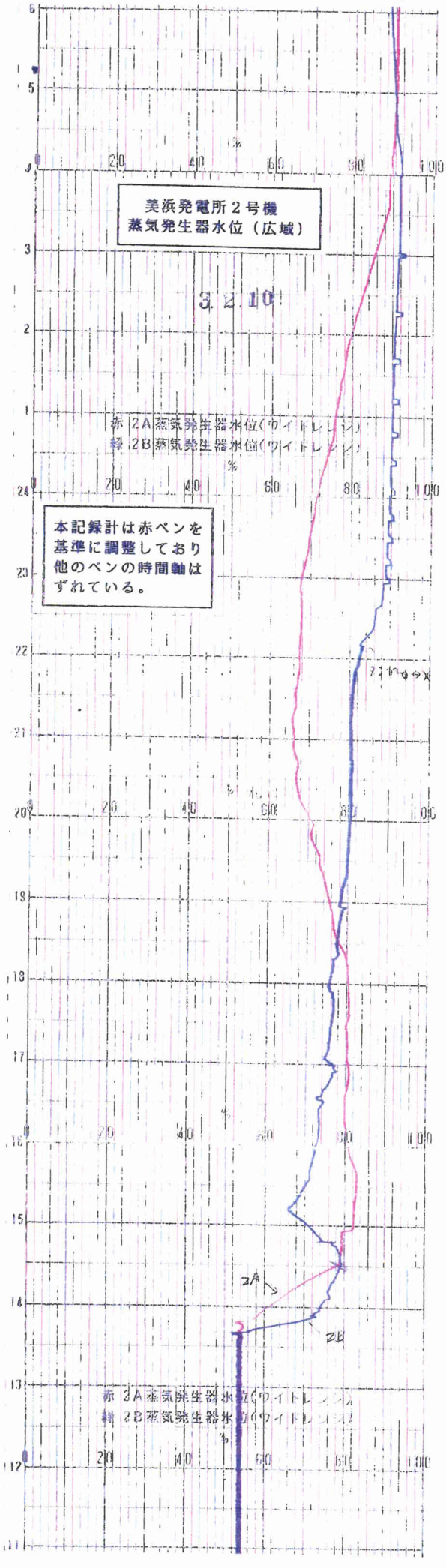

美浜発電所２号機
１次冷却材系統(RCS)
高温側温度及び飽和温度
（原子炉出口温度及び
飽和温度）
3 2 10
赤 2Aループ高温側冷却材温度
青 2Bループ高温側冷却材温度
緑 1次冷却材飽和温度
本記録計は赤ペンを
基準に調整しており
他のペンの時間軸は
ずれている。
赤 2Aループ高温側冷却材温度
青 2Bループ高温側冷却材温度
緑 1次冷却材飽和温度

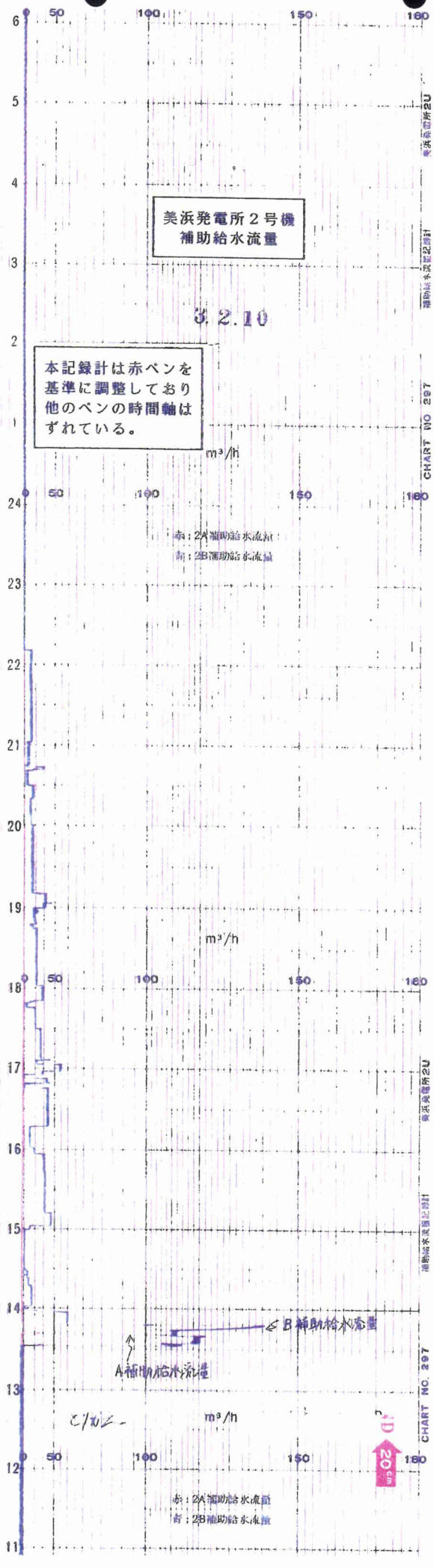

美浜発電所２号機
１次冷却材系統（RCS）低温側温度
（原子炉入口温度）
本記録計は赤ペンを基準に調整しており他のペンの時間軸はずれている。
赤 2Aループ低温側冷却材温度
青 2Bループ低温側冷却材温度
赤 2Aループ低温側冷却材温度
青 2Bループ低温側冷却材温度

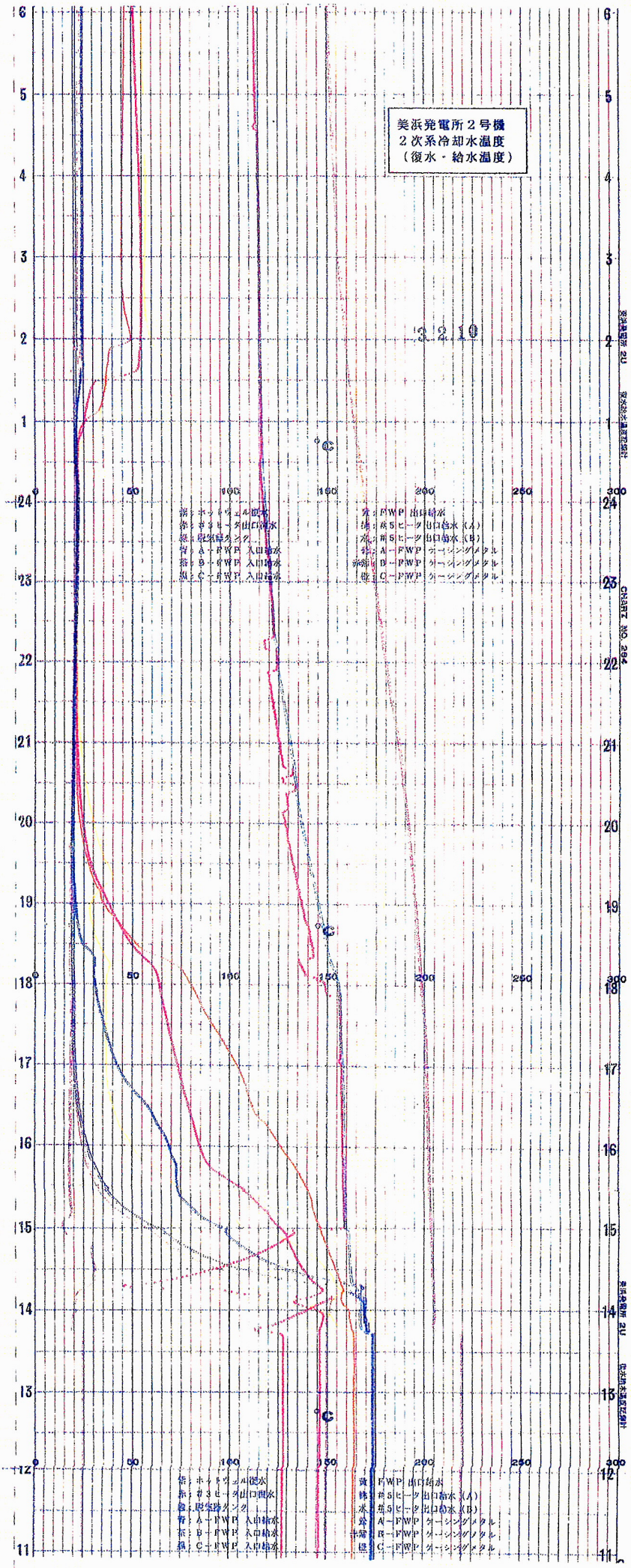

美浜発電所２号機
安全注入流量
本記録計は赤ペンを基準に調整しており他のペンの時間軸はずれている。
3. 2. 10
m³/h
0 50 100 150 200
赤：低温側安全注入流量
青：原子炉容器安全注入流量
m³/h
0 50 100 150 200
m³/h
0 50 100 150 200
赤：低温側安全注入流量
青：原子炉容器安全注入流量

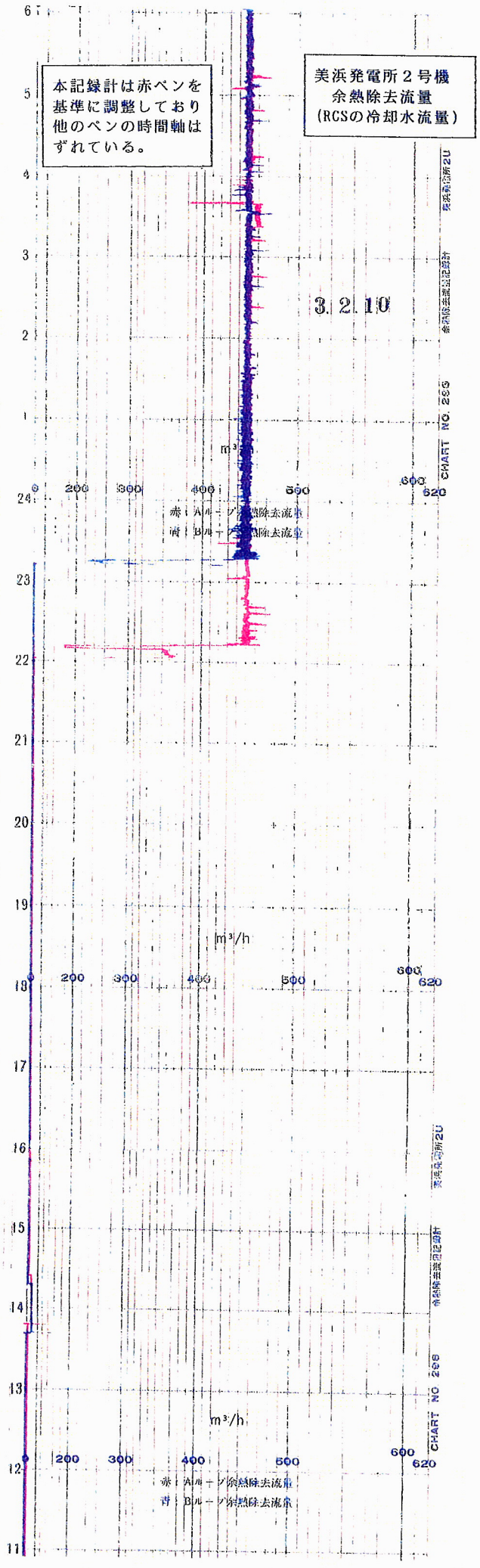

美浜発電所２号機
Ａ蒸気発生器主蒸気・主給水
流量及び水位
本記録計は赤ペンを
基準に調整してお り
他のペンの時間軸は
ずれている。
3 2.10
赤 2A 主蒸気流量
緑 2A 給水流量
青 2A-SG 水位
赤 2A 主蒸気流
緑 2A 給水流量
青 2A SG 水位

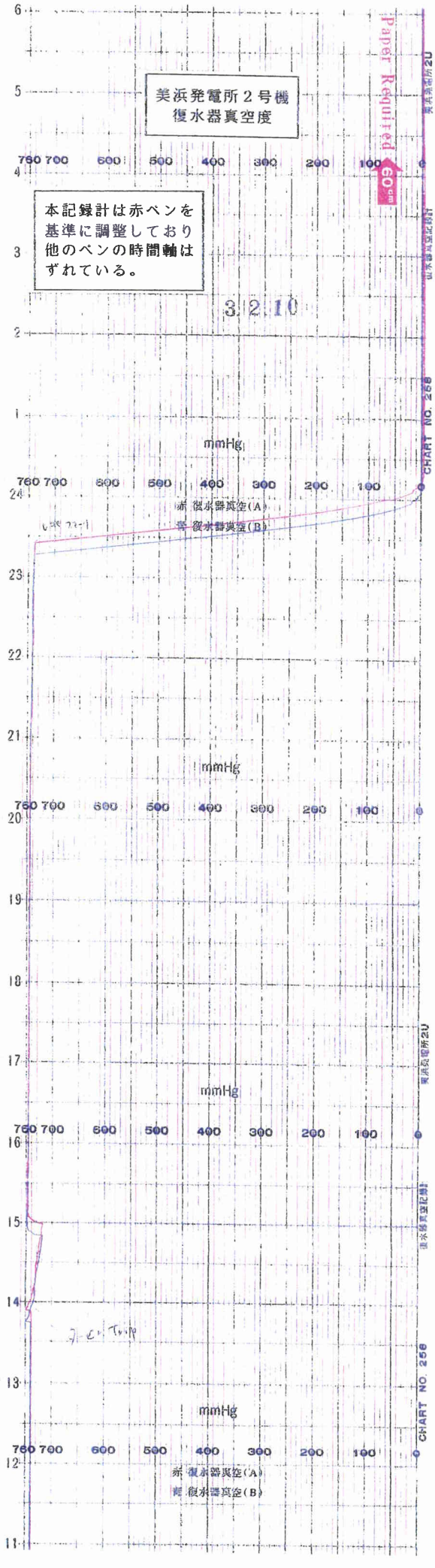

美浜発電所２号機
Ｂ蒸気発生器主蒸気・主給水
流量及び水位
本記録計は赤ペンを
基準に調整しており
他のペンの時間軸は
ずれている。

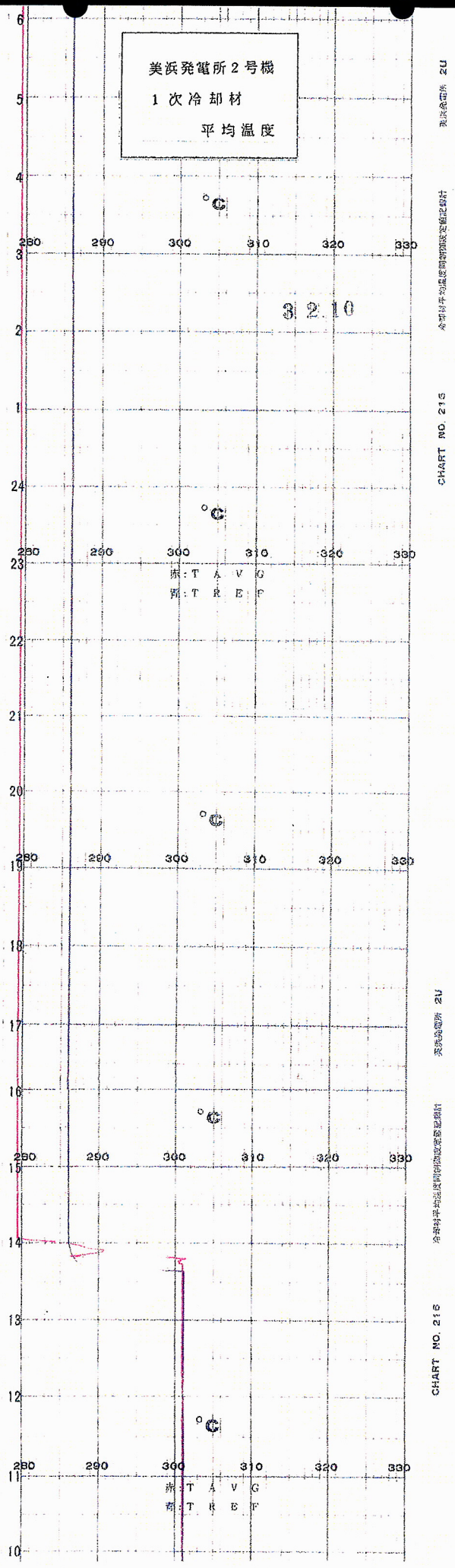

美浜発電所２号機
蒸気発生器水位（広域）
3.2.10
赤 2A蒸気発生器水位(ワイドレンジ)
緑 2B蒸気発生器水位(ワイドレンジ)
本記録計は赤ペンを基準に調整しており他のペンの時間軸はずれている。
2A
2B


美浜発電所２号機
補助給水流量
3.2.10
本記録計は赤ペンを基準に調整しており他のペンの時間軸はずれている。
m³/h
赤：2A補助給水流量
青：2B補助給水流量
CHART NO 297
m³/h
B補助給水流量
A補助給水流量
m³/h
赤：2A補助給水流量
青：2B補助給水流量
CHART NO. 297


美浜発電所２号機
２次系冷却水温度
（復水・給水温度）
CHART NO. 294


本記録計は赤ペンを基準に調整しており他のペンの時間軸はずれている。
美浜発電所２号機
余熱除去流量
(RCSの冷却水流量)
3.2.10
m³
200
300
400
500
600
620
赤：Aループ余熱除去流量
青：Bループ余熱除去流量
m³/h
CHART NO. 285
CHART NO 286


美浜発電所２号機
復水器真空度
本記録計は赤ペンを基準に調整しており他のペンの時間軸はずれている。
Paper Required 60cm
CHART NO. 258
mmHg
760 700 600 500 400 300 200 100 0
赤 復水器真空(A)
青 復水器真空(B)
3 2 10


美浜発電所２号機
１次冷却材
平均温度
°C
280
290
300
310
320
330
3 2 10
赤：T A V G
青：T R E F
CHART NO. 216
CHART NO. 216

5．当直課長引継簿

㊦ 美浜発電所1.2号機当直課長引継簿

㊦ 美浜発電所1.2号機当直課長引継簿

(正) 美浜発電所1.2号機当直課長引継簿

美浜発電所1.2号機当直課長引継簿

平成 3 年 2 月 9 日 土 曜日

1・2・3直	A直	B直	C直	D直	E直
A・B・C・D・E直	当直長				
	当直主任				
	班長				

班	氏名	時刻
当直長		
当直主任		
班長		

1号機	2号機
発電端出力 MW 原子炉出力 %	発電端出力 MW 原子炉出力 %
蒸気発生器圧力 kg/cm² SG出力 MW	蒸気発生器圧力 kg/cm² SG出力 MW
給水温度 ℃ 制御棒バンク D ステップ	給水温度 ℃ 制御棒バンク D ステップ
SGブローダウン流量 ルp系 ボロン濃度(ループ) ppm	SGブローダウン流量 ルA系 ボロン濃度(ループ) ppm
CVCF真試値 A / B % RCS漏洩量 l/m	CVCF真試値 A / B % RCS漏洩量 l/m
1次系純水タンク水位 1840 mm 1次系純水タンク水位	1次系純水タンク水位 mm 1次系純水タンク水位
燃料ピット水位 NWL −6.0 cm 温度	燃料ピット水位 NWL cm 温度
C/VRCDT水位上昇率 — l/m	C/VRCDT水位上昇率 l/m
1 定検中	1 定検中
2 2次系給水駆動 3U → 1.2U	2
3 補助蒸気供給 12h → 3h 停止 19:00	3
以下余白	以下余白
4 固体焼却設備 起動 9:58 停止 14:35	4
以下余白	以下余白

1号機	2号機
特記事項なし	特記事項なし

1号機	2号機
特記事項なし	特記事項なし

1号機	2号機
特記事項なし	特記事項なし

1号機	2号機
特記事項なし	特記事項なし

天候 晴

1号機	2号機
1 出力運転中	1 定検中
以下余白	以下余白

1号機	2号機
1 定検中	1 定検中
2 2次系給水駆動 3U → 1.2U	2
3 補助蒸気供給 12h → 3h 停止 19:00	3
以下余白	以下余白
4 固体焼却設備 起動 9:58 停止 14:35	4
以下余白	以下余白

1号機	2号機
1 A-補助ボイラ起動 14:05	1
2 VS-14 A,B 停止 08:50	2
3 VS-16 A,C 停止 08:50	3
4 VS-14 A,B 起動 13:35	4
5 VS-16 A,C 起動 13:35	5
以下余白	以下余白

1号機	2号機
特記事項なし	特記事項なし

1号機	2号機
特記事項なし	特記事項なし

1号機	2号機
1 補助蒸気供給ヘッダ切替ボイラ停止準備 8:50～	1
以下余白	以下余白

1号機	2号機
特記事項なし	特記事項なし

1号機	2号機
1 定検中	1 定検中
2 2次系給水駆動 3U → 1.2U	2
3 補助蒸気供給 12h → 3h 停止 19:00	3
以下余白	以下余白
4 固体焼却設備 起動 9:58 停止 14:35	4
以下余白	以下余白

1号機	2号機
1 A-補助ボイラ起動 14:05	1
2 VS-14 A,B 停止 08:50	2
3 VS-16 A,C 停止 08:50	3
4 VS-14 A,B 起動 13:35	4
5 VS-16 A,C 起動 13:35	5
以下余白	以下余白

1号機	2号機
特記事項なし	特記事項なし

1号機	2号機
特記事項なし	特記事項なし

1号機	2号機
1 補助蒸気供給ヘッダ切替ボイラ停止準備 8:50～	1
以下余白	以下余白

1号機	2号機
特記事項なし	特記事項なし

6．日誌タイプライタ記録（抜粋）

美浜発電所２号機

原本箇所	期間	種別	分類
美一技	10	月年	運転記録 P-1

日付 01年 2月 0日 (SAT 12)

原子炉主任技術者	技術	区長	係長	安全管理課長	副長	保安課長	運転室	室長	副室長	乙	甲	3直直長
										3直運転員	3直運転員	

運転時間 運転	運転時間 休転	発電電力量	送電電力量	所内電力量 運転時	所内電力量 休転時	所内比率	負荷率	利用率	効率 発電端	効率 送電端	平均発電電力 運転時間比	平均発電電力 停止時間比	原子炉熱出力
H	H	MWH	MWH	MWH	MWH	%	%	%	%	%	MW	MW	MWH
13.85	10.15	6919.9	6443.5	361.00	14.10	6.67	57.62	57.67	34.59	32.22	499.63	288.33	20004.8
U3310	U3311	U3310	U3311	U3307	U3308	U3900	U3901	U3902	U3904	U3906	U3907	U3908	U1228

特記事項

A-50 5G T.R にてユニット停止

－以下余白－

92.2.9

時刻	発電電力量 発電端	発電電力量 送電端	負荷 発電端	負荷 送電端	無効電力量 遅相	無効電力量 進相	力率	所内電力量 運転時	所内電力量 休転時	熱出力 蒸気発生器	熱出力 原子炉	原子炉出力	効率 発電端	効率 送電端	タービン熱消費率	アナロググループ 室氏 1.時間 3.3分	循環水量 原水槽	循環水量 コンパータ給水タンク	循環水量 2次系冷却水タンク
	MWH	MWH	MW	MW	MVARH	MVARH	%	MWH	MWH	MWH	MWH	%	%	%	Kcal/KWH		TON	TON	TON
	1時間積算値		1分間平均値		1時間積算値		瞬時値	1時間 積算値				1分間平均	1時間平均値				1時間積算値		
0100	500.2	474.0	499.4	473.0	0.0	182.6	93.9	26.1	0.0	1434.5	1429.2	98.0	35.0	33.3	2437.2	3	46.1	4.4	0.0
0200	500.4	474.2	499.8	474.0	0.0	180.5	94.1	26.0	0.0	1434.4	1429.0	98.0	35.0	33.4	2438.3	3	46.1	4.7	0.0
0300	500.2	474.0	498.9	472.5	0.0	184.1	93.8	26.1	0.0	1434.0	1428.5	98.0	35.0	33.4	2437.8	3	46.1	4.5	0.0
0400	500.1	473.9	499.5	473.1	0.0	185.3	93.8	26.1	0.0	1434.2	1428.8	98.0	35.0	33.3	2438.6	3	45.6	4.6	0.0
0500	500.0	473.8	499.2	472.8	0.0	184.8	93.8	26.0	0.0	1433.5	1428.2	97.9	35.0	33.3	2435.6	3	46.3	4.5	0.0
0600	499.8	473.6	499.0	472.6	0.0	185.4	93.8	26.1	0.0	1433.1	1427.6	97.9	35.0	33.3	2439.6	3	46.2	4.7	0.0
0700	499.8	473.6	499.3	473.5	0.0	186.8	93.7	26.0	0.0	1433.5	1428.2	98.0	35.0	33.3	2435.8	3	46.0	4.5	0.0
0800	499.8	473.7	499.1	472.7	0.0	189.6	93.5	26.1	0.0	1435.0	1429.8	98.0	35.0	33.3	2439.3	3	45.8	4.7	0.0
0900	499.9	473.8	499.1	473.3	0.0	190.5	93.4	26.0	0.0	1434.8	1428.9	98.0	35.0	33.3	2437.4	3	46.3	4.5	0.0
1000	499.9	473.7	498.9	473.1	0.0	201.1	92.8	26.1	0.0	1434.9	1429.1	98.0	35.0	33.3	2439.4	3	45.7	4.3	0.0
1100	499.9	473.7	499.4	473.0	0.0	200.9	92.8	26.1	0.0	1434.7	1429.3	98.0	35.0	33.3	2438.9	3	46.0	4.1	0.0
1200	500.1	474.0	499.3	472.9	0.0	197.5	93.0	26.0	0.0	1434.7	1429.3	98.0	35.0	33.3	2438.7	3	45.7	4.4	0.0
1300	499.8	473.6	499.2	472.8	0.0	192.4	93.3	26.1	0.0	1434.2	1428.8	97.9	35.0	33.3	2440.1	3	45.9	4.4	0.0
1400	420.0	397.1	0.0	-3.6	0.0	166.4	93.0	22.2	0.7	1435.8	1430.2	0.0	29.4	28.0	2817.2	3	37.8	3.4	0.0
1500	0.0	-5.4	-0.4	-10.6	0.0	0.0	H584.0	0.0	5.4*	0.0	0.0	0.0	H84.0	H84.0	H7584.0	2	0.0	1.4	0.0
1600	0.0	-11.9	-0.4	-12.4	0.0	0.0	H584.0	0.0	12.0*	0.0	0.0	0.0	H84.0	H84.0	H7584.0	2	0.0	0.0	0.0
1700	0.0	-12.5	-0.4	-13.6	0.0	0.0	H564.0	0.0	12.5*	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	H7584.0	2	0.0	0.0	0.0
1800	0.0	-12.3	-0.4	-12.4	0.0	0.0	H584.0	0.0	12.3*	0.0	0.0	0.0	H84.0	H84.0	H7584.0	2	0.0	0.0	0.0
1900	0.0	-11.8	-0.4	-12.4	0.0	0.0	H584.0	0.0	11.9*	0.0	0.0	0.0	H84.0	H84.0	H7584.0	2	0.0	0.0	0.0
2000	0.0	-12.0	-0.4	-11.8	0.0	0.0	H584.0	0.0	12.0*	0.0	0.0	0.0	H84.0	H84.0	H7584.0	2	0.0	0.0	0.0
2100	0.0	-12.0	-0.4	-12.4	0.0	0.0	H564.0	0.0	12.0*	0.0	0.0	0.0	H84.0	H84.0	H7584.0	2	0.0	0.0	0.0
2200	0.0	-11.8	-0.4	-11.8	0.0	0.0	H584.0	0.0	11.8*	0.0	0.0	0.0	H84.0	H84.0	H7584.0	2	0.0	0.0	0.0
2300	0.0	-11.7	-0.4	-12.4	0.0	0.0	H584.0	0.0	11.7*	0.0	0.0	0.0	H84.0	H84.0	H7584.0	2	0.0	0.0	0.0
2400	0.0	-11.8	-0.4	-13.0	0.0	0.0	H584.0	0.0	11.8*	0.0	0.0	0.0	H84.0	H84.0	H7584.0	2	0.0	0.0	0.0
SUM	6919.9	6443.5			0.0	2627.3		361.0	114.1	20080.4	20004.8						635.3	63.2	0.0
AVE			270.3	251.0			93.9						34.6	32.2					
MAX	500.4	474.2	499.8	474.0	0.0	201.1	94.1	26.1	12.5	1435.8	1430.2	98.0	35.0	33.4	2817.2		46.3	4.7	0.0
MIN	0.0	-12.5	-0.4	-13.6	0.0	0.0	H584.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.0	H84.0	H84.0	H7584.0		0.0	0.0	0.0
	U3303	U3304	U2500	U3312	U3043	U3044	U3045	U3305	U3306	U1225	U1227	U1400	U2903	U2905	U2901	U4016	U2310	U2470	U2751

H3. 2. 9

時刻	炉内 最高温度T/C 位置	炉内 最高温度T/C 温度	炉内 T/C 平均温度	炉内 径方向合体 最大偏対出力 位置	炉内 径方向合体 最大偏対出力 出力	炉内 四分割径方向合体出力ヒストグラム 1	2	3	4	炉内 制御棒パンク位置 制御グループ A	B	C	D	炉内 停止グループ A	B	冷却材 ボロン濃度	ゼノン濃度	停止余裕	冷却材 PH	原子炉外 出力領域中性子束偏差 N41	N42	N43	N44
		℃	℃							STEPS	STEPS	STEPS	STEPS	STEPS	STEPS	ppm	%	%		%			
	時	値		点	所	計	算	値		時			値			点	所	計	算	値	1	分	間	平	均	値	
1	0100	18	319.2	314.4	10	1.174	0.996	0.997	1.001	1.006	225	225	225	210	225	225	568	2.611	1.78	8.03	-2.05	-2.44	-2.30	-2.18
2	0200	18	319.2	314.4	10	1.170	0.996	0.997	1.001	1.006	225	225	225	210	225	225	568	2.611	1.78	8.03	-1.99	-2.54	-2.35	-2.18
3	0300	18	319.2	314.3	10	1.167	0.997	0.998	1.000	1.006	225	225	225	210	225	225	568	2.611	1.78	8.03	-1.99	-2.33	-2.59	-2.13
4	0400	21	319.2	314.3	10	1.173	0.997	0.997	1.003	1.003	225	225	225	210	225	225	569	2.611	1.78	8.03	-1.79	-2.44	-2.45	-2.03
5	0500	21	319.4	314.3	10	1.170	0.997	0.997	1.000	1.006	225	225	225	210	225	225	569	2.611	1.78	8.03	-1.99	-2.23	-2.65	-1.88
6	0600	21	319.2	314.3	10	1.168	0.999	0.997	1.000	1.004	225	225	225	210	225	225	569	2.611	1.78	8.03	-1.84	-2.13	-2.25	-2.08
7	0700	18	319.2	314.3	10	1.172	0.999	0.996	1.001	1.004	225	225	225	210	225	225	568	2.611	1.78	8.03	-1.94	-2.33	-2.50	-1.98
8	0800	21	319.4	314.3	10	1.167	0.997	0.997	1.001	1.005	225	225	225	210	225	225	568	2.611	1.78	8.03	-1.69	-2.44	-2.60	-1.68
9	0900	21	319.6	314.4	10	1.167	0.995	1.000	1.000	1.004	225	225	225	210	225	225	568	2.611	1.78	8.03	-1.64	-2.33	-2.20	-2.08
10	1000	21	319.6	314.3	10	1.169	0.996	0.998	1.001	1.004	225	225	225	210	225	225	568	2.611	1.78	8.03	-1.74	-2.13	-2.50	-1.78
11	1100	18	319.2	314.3	10	1.168	0.996	0.998	1.001	1.007	225	225	225	210	225	225	568	2.611	1.78	8.03	-1.94	-2.33	-2.40	-2.06
12	1200	21	319.4	314.4	10	1.171	0.997	0.998	1.001	1.005	225	225	225	210	225	225	568	2.610	1.78	8.03	-1.94	-2.33	-2.55	-2.23
13	1300	18	318.9	314.2	10	1.170	0.999	0.998	1.000	1.005	225	225	225	210	225	225	568	2.610	1.78	8.03	-1.89	-2.28	-2.40	-1.98
14	1400	21	314.1	310.2	1	4.000	6.000	1.000	6.000	4.000	0	1	1	1	0	0	568	2.611	1.78	7.20	-0.20	-0.25	-0.25	-0.30
15	1500	21	241.7	0.0	1	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1	1	1	1	0	0	586	2.773	2.73	7.18	0.00	0.00	0.05	-0.05
16	1600	21	231.3	0.0	1	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1	1	1	1	0	0	614	3.143	2.32	7.67	0.00	0.05	0.05	-0.05
17	1700	21	212.4	0.0	1	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	6	6	6	6	228	228	718	3.468	1.01	7.51	0.05	0.05	0.10	-0.05
18	1800	19	192.0	0.0	1	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	6	6	6	6	228	228	882	3.635	0.20	7.32	0.00	0.00	0.00	0.05
19	1900	21	176.1	0.0	1	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	6	6	6	6	228	228	1079	3.652	1.41	7.14	0.00	0.05	0.00	-0.05
20	2000	21	161.4	0.0	1	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	6	6	6	6	228	228	1156	3.615	2.93	7.01	0.05	0.00	0.10	0.00
21	2100	21	156.0	0.0	1	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0	0	0	0	0	0	1178	3.523	2.65	6.99	0.00	-0.05	0.00	0.05
22	2200	31	150.3	0.0	1	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0	0	0	0	0	0	1181	3.512	2.64	6.97	0.00	-0.05	0.00	0.05
23	2300	23	135.5	0.0	1	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0	0	0	0	0	0	1222	3.451	2.92	6.87	0.05	0.05	0.05	0.05
24	2400	23	121.9	0.0	1	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0	0	0	0	0	0	1261	3.382	2.89	6.79	0.00	-0.05	0.00	0.05
25																								
26																								
27																								
28																								
29																								
30																								
31	MAX	31	319.6	314.4		4.000	6.000	1.000	1.003	4.000	225	225	225	210	228	228	1261	3.652	2.93	8.03	0.05	0.05	0.10	0.05
32	MIN	18	121.9	0.0		0.000	0.995	0.996	0.998	1.000	0	0	0	0	0	0	568	2.610	1.78	6.79	-2.05	-2.54	-2.65	-2.23
		U1594	U1592	U1593	U1591	U1590	U1581	U1582	U1583	U1584	I2CBA	I2CBB	I2CBC	I2CBD	I2SBA	I2SBB	U1800	U1913	U1901	U1810	U0600	U0601	U0602	U0603

H3. 2. 9

時刻	A ループ 冷却材 平均温度	ΔT	低温側温度	高温側温度	流量	A ループ 蒸気発生器 給水温度	給水圧力	給水流量	蒸気圧力	蒸気流量	熱出力	B ループ 冷却材 平均温度	ΔT	低温側温度	高温側温度	流量	B ループ 蒸気発生器 給水温度	給水圧力	給水流量	蒸気圧力	蒸気流量	熱出力
	℃	%	℃	℃	%	℃	kg/cm²	T/H	kg/cm²	T/H	MW	℃	%	℃	℃	%	℃	kg/cm²	T/H	kg/cm²	T/H	MW
						1	分	間														
1	0100	300.8	97.8	266.4	315.2	99	219.9	57.2	1449	54.9	1411	301.0	97.8	267.0	315.0	99	219.7	57.9	1360	54.9	1348	696.3
2	0200	300.8	97.9	266.4	315.2	99	219.9	57.2	1453	54.8	1409	301.0	97.8	267.0	315.0	99	219.7	57.9	1378	54.9	1348	695.9
3	0300	300.8	97.9	266.4	315.2	99	219.9	57.2	1454	54.8	1408	301.0	97.8	266.9	315.0	99	219.7	57.9	1378	54.9	1344	696.7
4	0400	300.7	97.7	266.4	315.1	99	219.9	57.2	1457	54.8	1410	300.9	97.5	266.9	314.9	99	219.7	57.9	1380	54.9	1354	698.2
5	0500	300.7	97.8	266.4	315.1	99	219.9	57.2	1454	54.8	1417	300.9	97.6	266.9	314.9	99	219.7	57.9	1369	54.8	1348	700.5
6	0600	300.7	97.8	266.4	315.1	99	219.9	57.1	1453	54.8	1413	735.7	300.9	97.7	266.9	314.9	99	219.6	57.9	1365	54.9	1348	700.8
7	0700	300.7	97.8	266.4	315.1	99	219.9	57.1	1451	54.8	1410	734.8	300.9	97.6	266.9	314.9	99	219.7	57.9	1376	54.9	1350	696.1
8	0800	300.7	97.8	266.4	315.1	99	219.9	57.2	1453	54.8	1413	735.6	300.9	97.7	266.9	314.9	99	219.7	57.9	1381	54.9	1350	698.6
9	0900	300.7	97.7	266.4	315.1	99	219.9	57.2	1451	54.8	1413	734.6	301.0	97.6	266.9	315.0	99	219.7	57.9	1378	54.9	1347	697.1
10	1000	300.7	97.8	266.4	315.1	99	219.9	57.2	1451	54.8	1406	734.9	300.9	97.5	266.9	314.9	99	219.7	57.9	1386	54.9	1347	700.9
11	1100	300.7	97.9	266.4	315.1	99	219.9	57.2	1458	54.8	1410	736.2	300.9	97.6	266.9	315.0	99	219.7	57.9	1389	54.8	1346	702.5
12	1200	300.7	97.8	266.4	315.1	99	219.9	57.2	1458	54.8	1407	738.3	300.9	97.6	266.9	314.9	99	219.7	57.9	1386	54.9	1346	700.9
13	1300	300.7	97.8	266.4	315.1	99	219.8	57.2	1456	54.8	1411	737.3	300.9	97.6	266.9	314.9	99	219.7	57.9	1365	54.9	1344	700.3
14	1400	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	1007	0.0	H308	747.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	1059	64.6	H044	785.9
15	1500	*271.1	3.3	237.7	*71.6	9	200.5	*17.1	* 0	62.4	0	*	C.0	*271.1	4.2	237.1	*71.7	113	149.4	*17.8	* 0	31.2	0	* C.0
16	1600	*271.1	3.3	229.2	*71.6	5	154.4	*16.9	* 0	55.9	0	*	0.0	*271.0	4.2	229.1	*71.6	114	116.7	*17.3	* 0	25.6	0	* 0.0
17	1700	*271.1	3.3	210.7	*71.6	8	169.4	*16.8	* 0	52.2	0	*	C.0	*271.0	4.2	210.5	*71.6	115	*100.8	*18.8	* 0	17.4	0	* C.0
18	1800	*271.1	3.3	190.4	*71.6	13	184.5	*15.2	* 0	46.5	0	*	0.0	*271.0	4.2	190.2	*71.6	117	141.4	*12.0	* 0	10.6	0	* 0.0
19	1900	*271.1	3.3	173.8	*71.6	13	180.7	*13.8	* 0	42.4	0	*	0.0	*271.0	4.2	173.5	*71.6	118	171.5	*8.2	* 0	6.8	0	* 0.0
20	2000	*271.1	3.3	158.3	*71.6	15	176.9	*12.4	* 0	38.7	0	*	0.0	*271.0	4.2	158.3	*71.6	119	157.7	*5.4	* 0	4.2	0	* 0.0
21	2100	*271.1	3.3	153.1	*71.6	19	173.3	*11.0	* 0	32.1	0	*	0.0	*271.0	4.2	153.0	*71.6	119	152.5	* 4.7	* 0	3.5	0	* 0.0
22	2200	*271.1	3.3	147.5	*71.6	19	170.0	* 9.4	* 0	24.9	0	*	0.0	*271.0	4.2	147.5	*71.6	119	147.2	* 4.0	* 0	2.8	0	* 0.0
23	2300	*271.1	3.3	132.7	*71.6	16	166.5	* 8.2	* 0	22.0	0	*	0.0	*271.0	4.2	132.8	*71.6	120	147.2	* 4.0	* 0	2.1	0	* 0.0
24	2400	*271.1	3.3	119.6	*71.6	17	164.0	* 7.0	* 0	20.5	0	*	0.0	*271.0	4.2	119.5	*71.6	120	145.8	* 3.8	* 0	2.2	0	* 0.0
25																								
26																								
27																								
28																								
29																								
30																								
31	MAX	300.8	97.9	266.4	315.2	99	219.9	57.2	1458	62.4	1417	747.6	301.0	97.8	267.0	315.0	120	219.7	57.9	1369	64.6	1354	785.9
32	MIN	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	H308	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0	2.1	H044	0.0
		U0213M	U0213M	T415BM	U0133N	U0090M	T418AM	P504M	U1231	U0229M	U1235	U1205	U0214M	U0218M	T425BM	U0133M	U0090M	T428AM	P508M	U1232	U0230M	U1236	U1206

H3. 2. 9

	時刻	原子炉冷却材 平均 TAVG	原子炉冷却材 Tref	原子炉冷却材 Tref 偏差	原子炉冷却材 平均 ΔT	加圧器 圧力	加圧器 水位	加圧器 水位設定値	加圧器 水位設定値偏差	加圧器 蒸気温度	加圧器 気相温度	化学体積制御系 充填水量	化学体積制御系 抽出水量	原子炉補給水量 ほう酸	原子炉補給水量 純水	蒸気発生器 給水温度 (A+B)/2	蒸気発生器 給水量 (A+B)	蒸気発生器 蒸気量 (A+B)	蒸気発生器 給水温度偏差	格納容器内圧力
		℃	℃	℃	%	kg/cm²	%	%	%	℃	℃	m³	m³	m³	m³	℃	TON	TON	TON	kg/cm²
				1分間平均値								1時間積算値								
1	0100	300.9	301.0	0.1	97.7	157.1	54.0	54.1	-0.1	343.3	343.6	7.1	10.5	0.001	0.051	219.6	2834.6	2757.6	-36.9	0.012
2	0200	300.9	301.0	0.0	97.6	157.1	54.0	54.1	-0.1	343.6	343.6	7.0	10.6	0.000	0.000	219.6	2834.3	2758.0	-36.2	0.013
3	0300	300.9	301.0	0.0	97.7	157.1	54.0	54.1	-0.1	343.3	343.6	7.1	10.6	0.000	0.000	219.6	2833.3	2758.4	-34.8	0.014
4	0400	300.8	301.0	0.1	97.6	157.1	54.0	54.0	-0.1	343.2	343.6	7.0	10.6	0.003	0.050	219.6	2833.6	2757.7	-36.0	0.013
5	0500	300.8	301.0	0.1	97.7	157.1	53.9	54.0	-0.1	343.6	343.6	7.1	10.0	0.000	0.000	219.6	2832.3	2756.9	-35.8	0.014
6	0600	300.8	301.0	0.1	97.7	157.1	53.8	54.0	-0.2	343.1	343.6	7.1	10.6	0.000	0.051	219.5	2831.4	2755.5	-35.9	0.014
7	0700	300.8	301.0	0.1	97.7	157.1	53.9	54.0	-0.2	344.1	343.6	7.0	10.5	0.000	0.051	219.6	2832.3	2755.7	-36.5	0.014
8	0800	300.8	301.0	0.1	97.7	157.1	53.9	54.0	-0.2	343.5	343.6	7.1	10.6	0.000	0.000	219.6	2835.2	2756.2	-39.1	0.014
9	0900	300.8	301.0	0.1	97.7	157.1	53.9	54.1	-0.2	344.1	343.6	7.1	10.6	0.000	0.050	219.6	2834.0	2757.1	-37.0	0.015
10	1000	300.8	301.0	0.0	97.7	157.1	53.9	54.0	-0.2	343.7	343.7	7.0	10.6	0.000	0.000	219.6	2834.4	2757.4	-37.0	0.016
11	1100	300.8	301.0	0.1	97.8	157.2	53.9	54.0	-0.2	344.0	343.7	7.1	10.6	0.000	0.051	219.6	2834.8	2757.2	-37.6	0.016
12	1200	300.8	301.0	0.1	97.7	157.1	54.0	54.0	-0.2	343.6	343.6	7.1	10.6	0.000	0.000	219.6	2835.0	2758.6	-36.4	0.020
13	1300	300.8	301.0	0.1	97.7	157.1	53.9	54.0	-0.2	343.6	343.7	7.0	10.5	0.001	0.051	219.7	2833.9	2756.6	-37.3	0.022
14	1400	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-21.8	0.0	0.0	6.2	8.7	0.035	1.013	0.0	2690.4	2306.5	-30.5	0.000
15	1500	271.1	286.0	0.2	3.7	98.6	46.2	24.4	0.4	243.1	284.2	13.0	1.0	0.092	1.502	174.9	0.1	0.0	0.0	0.002
16	1600	271.0	286.0	0.3	3.7	98.6	83.3	24.4	0.4	246.9	270.0	6.0	10.3	0.128	0.266	155.6	0.1	0.0	0.0	-0.003
17	1700	271.0	286.0	0.3	3.7	96.6	68.6	24.0	0.4	265.1	265.7	12.0	15.2	0.503	0.614	145.1	0.1	0.0	0.0	-0.005
18	1800	271.0	286.0	0.3	3.7	98.6	47.5	24.4	0.4	259.6	259.2	7.5	13.0	0.823	0.000	163.1	0.1	0.0	0.0	0.000
19	1900	271.0	286.0	0.3	3.7	98.6	64.6	24.5	0.5	253.2	252.7	5.0	12.2	1.143	0.052	176.3	0.1	3.0	0.0	0.001
20	2000	271.0	286.0	0.3	3.7	98.6	68.5	24.4	0.5	247.6	246.6	5.1	13.9	0.783	0.052	167.3	0.1	0.1	0.0	0.001
21	2100	271.0	286.0	0.3	3.7	98.6	71.3	24.4	0.5	239.9	238.9	3.7	13.7	0.000	0.000	162.9	0.1	0.1	0.0	0.002
22	2200	271.0	286.0	0.3	3.7	98.6	47.8	24.4	0.4	226.4	226.6	8.6	13.1	0.020	0.226	158.6	0.1	0.1	0.0	0.002
23	2300	271.0	286.0	0.3	3.7	98.6	74.6	24.4	0.4	172.9	219.0	11.7	10.9	0.643	5.135	157.1	0.1	0.1	0.0	0.003
24	2400	271.0	286.1	0.0	3.7	98.6	75.8	24.4	0.4	135.1	217.0	14.8	12.5	0.463	5.407	154.9	0.1	0.1	0.0	0.003
25																				
26																				
27																				
28																				
29	SUM											185.4	262.0	4.442	15.022		39530.6	38152.4	-507	
30																				
31	MAX	300.9	301.0	0.3	97.8	157.2	83.3	54.1	0.5	344.1	343.7	14.8	15.2	1.143	5.407	219.7	2835.2	2758.6	0.0	0.022
32	MIN	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-21.8	0.0	0.0	3.7	1.0	0.000	0.000	0.0	0.0	0.0	-39.1	-0.005
		U0241M	T409DM	U0773	U0242M	U0239M	U0240M	IL45NM	U0775	T451M	T452M	U3106	U3107	U3104	U3105	U1260	U1248	U1258	U1265	P957M

7．設定値一覧表（Ｍ－２第１３回定期検査記録の抜粋）

（設定値一覧表）

２．設定値確認検査記録

検査年月日　平成２年５月25日

検査官

検査立会者

モニタ名称	設定場所	設定値(cpm)		許容範囲(cpm)		確認事項				結果	備考
		計数率注意	計数率高	計数率注意	計数率高	指示値(cpm)		警報	表示灯		
						計数率注意	計数率高				
R-11	格納容器内じんあい	－	3×10^4	－	2.4×10^4-3.7×10^4	－	3.0×10^4	計数率高	点灯	良	
R-12	格納容器内ガス	－	6×10^3	－	4.8×10^3-7.5×10^3	－	6.0×10^3	計数率高	点灯	良	
R-13	補助建屋排気筒ガス	－	1×10^4	－	8.0×10^3-1.2×10^4	－	1.0×10^4	計数率高	点灯	良	
R-14	補助建屋排気筒ガス	－	1×10^4	－	8.0×10^3-1.2×10^4	－	1.0×10^4	計数率高	点灯	良	
R-15	復水器空気抽出器ガス	2×10^3	1×10^6	1.6×10^3-2.6×10^3	7.6×10^5-1.3×10^6	2.0×10^3	1.0×10^6	計数率注意 計数率高	点灯	良	
R-16	格納容器排気筒ガス	－	1×10^5	－	8.0×10^4-1.2×10^5	－	1.0×10^5	計数率高	点灯	良	
R-17A	放射性機器冷却水	－	7×10^2	－	5.6×10^2-8.8×10^2	－	7.0×10^2	計数率高	点灯	良	
R-17B	放射性機器冷却水	－	7×10^2	－	5.6×10^2-8.8×10^2	－	6.8×10^2	計数率高	点灯	良	
R-18	廃棄物処理設備排水	－	7×10^4	－	5.6×10^4-8.8×10^4	－	7.0×10^4	計数率高	点灯	良	
R-19	蒸気発生器ブローダウン水	4×10^2	－	3.2×10^2-5.0×10^2	－	4.0×10^2	－	計数率注意	点灯	良	
R-22	原子炉基礎注水	－	2×10^3	－	1.6×10^3-2.5×10^3	－	2.0×10^3	計数率高	点灯	良	
R-26	補助蒸気復水	－	1×10^3	－	8.0×10^2-1.2×10^3	－	1.0×10^3	計数率高	点灯	良	
R-30	タービンオイル水	－	2×10^3	－	1.6×10^3-2.5×10^3	－	2.1×10^3	計数率高	点灯	良	

2. プロセスモニタ設定値確認検査記録

モニタ名称	測定対象	設定値(cpm)		許容範囲(cpm)		確認事項				結果	備考
						表示値(cpm)		警報	表示灯		
		計数率注意	計数率高	計数率注意	計数率高	計数率注意	計数率高				
R−11	格納容器じんあい	1×10^3	−	8.0×10^2 ~1.2×10^3	−	1.0×10^3	−	計数率注意	点灯	良	
R−12	格納容器ガス	1×10^3	−	8.0×10^2 ~1.2×10^3	−	1.0×10^3	−	計数率注意	点灯	良	
R−13	補助建屋排気筒ガス	2×10^3	−	1.6×10^3 ~2.5×10^3	−	2.0×10^3	−	計数率注意	点灯	良	
R−14	補助建屋排気筒ガス	2×10^3	−	1.6×10^3 ~2.5×10^3	−	2.0×10^3	−	計数率注意	点灯	良	
R−16	格納容器排気筒ガス	2×10^3	−	1.6×10^3 ~2.5×10^3	−	2.0×10^3	−	計数率注意	点灯	良	
R−18	廃棄物処理設備排水	3×10^3	−	2.4×10^3 ~3.7×10^3	−	3.0×10^3	−	計数率注意	点灯	良	
R−19	蒸気発生器ブローダウン水	−	3×10^3	−	2.4×10^3 ~3.7×10^3	−	3.0×10^3	計数率高	点灯	良	
R−22	原子炉基礎冷水	6×10^2	−	4.8×10^2 ~7.5×10^2	−	6.0×10^2	−	計数率注意	点灯	良	
R−41	冷却材連続		※ 2×10^3	−	1.6×10^3 ~2.5×10^3	−	2.0×10^3	計数率高	点灯	良	

※ 単位はmR/h
mR/h → ×0.01 mSv/h

1次系制御装置設定値検査記録

検査年月日 平成2年4月17日~
平成2年5月23日

検査立会者

検査項目	計器番号	設定値		許容誤差		動作値	結果
		工学値	電圧値	工学値	電圧値	電圧値(mV)	
Aループ TAVG 高警報(チャンネル I)	2TC-410A	303.8℃	290.4mV	±0.25℃	±2mV	290.3	良
Aループ TAVG 高警報(チャンネル II)	2TC-411A	303.8℃	290.4mV	±0.25℃	±2mV	290.5	良
Bループ TAVG 高警報(チャンネル III)	2TC-420A	303.8℃	290.4mV	±0.25℃	±2mV	290.2	良
Bループ TAVG 高警報(チャンネル IV)	2TC-421A	303.8℃	290.4mV	±0.25℃	±2mV	290.5	良
Aループ TAVG 偏差警報(チャンネル I)	2TC-405A	+2℃	+16.0mV	±0.25℃	±2mV	16.3	良

検査項目	計器番号	設定値		許容誤差		動作値	結果
		工学値	電圧値	工学値	電圧値	電圧値	
加圧器圧力低警報	2PC-456F	154.0 kg/cm²	3.708V	±0.32 kg/cm²	±0.02V	3.706	良
加圧器圧力低逃がし弁 (PCV-456)動作阻止及び警報	2PC-457E	154.0 kg/cm²	370.8mV	±0.32 kg/cm²	±2mV	370.8	良
加圧器圧力低逃がし弁 (PCV-455C)動作阻止及び警報	2PC-458B	154.0 kg/cm²	370.8mV	±0.32 kg/cm²	±2mV	370.9	良
加圧器圧力低逃がし弁 スプレー弁インターロック	2PC-458D	154.0 kg/cm²	370.8mV	±0.32 kg/cm²	±2mV	370.7	良
加圧器圧力高警報	2PC-455I	163.0 kg/cm²	416.0mV	±0.1 kg/cm²	±2mV	416.0	良
加圧器圧力低バックアップヒータインターロック	2PC-455J	155.0 kg/cm²	256.0mV	±0.1 kg/cm²	±2mV	255.7	良

検査項目	計器番号	設定値		許容誤差		動作値	結果
		工学値	電圧値	工学値	電圧値	電圧値	
加圧器圧力低バックアップヒータインターロック	2PC-455J	155.5 kg/cm²	266.0mV	±0.1 kg/cm²	±2mV	265.6	良
加圧器水位高警報	2LC-466C	70%	3.800V	±0.5%	±0.02V	3.799	良
加圧器水位低警報及び ヒータインターロック	2LC-465C	20%	1.800V	±0.5%	±0.02V	1.801	良
加圧器水位低ヒータ及び抽出ライン 隔離弁インターロック	2LC-466D	20%	1.800V	±0.5%	±0.02V	1.801	良
加圧器水位偏差高警報及び ヒータインターロック	2LC-465E	+5%	20mV	±0.5%	±2mV	20.2	良
加圧器水位偏差低警報	2LC-465F	-5%	-20mV	±0.5%	±2mV	−20.2	良

検査項目	計器番号	設定値		許容誤差		動作値	結果
		工学値	電圧値	工学値	電圧値	電圧値(mV)	
加圧器圧力高安全注入アンブロック（チャンネル III）	2PC-457B	140 kg/cm²	284.6mV	±0.33 kg/cm²	±2mV	284.8	良
原子炉格納容器圧力高復水器排気インターロック（チャンネル I）	2PC-951C	0.24 kg/cm²	132.0mV	±0.02 kg/cm²	±2mV	131.8	良
原子炉格納容器圧力高復水器排気インターロック（チャンネル II）	2PC-952C	0.24 kg/cm²	132.0mV	±0.02 kg/cm²	±2mV	132.2	良
原子炉格納容器圧力高復水器排気インターロック（チャンネル III）	2PC-953C	0.24 kg/cm²	132.0mV	±0.02 kg/cm²	±2mV	132.1	良
1次冷却材飽和温度注意警報	2TC-402	-11℃	11.0mV	±2℃	±2mV	11.0	良
A蒸気発生器水位異常高タービントリップ及び給水隔離インターロック（チャンネル I）	2LC-410E	75%	400.0mV	±0.5%	±2mV	400.3	良

検査項目	計器番号	設定値		許容誤差		動作値	結果
		工学値	電圧値	工学値	電圧値	電圧値(mV)	
A蒸気発生器水位異常高タービントリップ及び給水隔離インターロック（チャンネル III）	2LC-411E	75%	400.0mV	±0.5%	±2mV	400.1	良
A蒸気発生器水位異常高タービントリップ及び給水隔離インターロック（チャンネル IV）	2LC-412E	75%	400.0mV	±0.5%	±2mV	400.1	良
B蒸気発生器水位異常高タービントリップ及び給水隔離インターロック（チャンネル I）	2LC-422E	75%	400.0mV	±0.5%	±2mV	400.0	良
B蒸気発生器水位異常高タービントリップ及び給水隔離インターロック（チャンネル II）	2LC-421E	75%	400.0mV	±0.5%	±2mV	400.2	良
B蒸気発生器水位異常高タービントリップ及び給水隔離インターロック（チャンネル IV）	2LC-420E	75%	400.0mV	±0.5%	±2mV	400.1	良

検査項目	計器番号	設定値		許容誤差		動作値	結果
		工学値	電圧値	工学値	電圧値	電圧値(mV)	
体積制御タンク水位高インターロック	2LC-100C	84%	436.0mV	±0.5%	±2mV	436.3	良
体積制御タンク水位高インターロック	2LC-100C	80%	420.0mV	±0.5%	±2mV	420.0	良
体積制御タンク水位低インターロック	2LC-100E	35%	240.0mV	±0.5%	±2mV	240.3	良
体積制御タンク水位低インターロック	2LC-100E	41%	264.0mV	±0.5%	±2mV	264.3	良
体積制御タンク水位異常低インターロック及び警報	2LC-100D	4%	116.0mV	±0.5%	±2mV	116.0	良
体積制御タンク水位異常低インターロック及び警報	2LC-103D	4%	116.0mV	±0.5%	±2mV	115.9	良

主蒸気逃がし弁

弁動作方向	設定値 工学値 kg/cm²	設定値 電圧値 mV	許容範囲 工学値 kg/cm²	許容範囲 電圧値 mV
「閉」から「開」	73.8	447.2	± 0.59 (73.21~74.39)	± 2.8 (444.4~450.0)
「開」から「閉」	71.8	437.9	± 0.59 (71.21~72.39)	± 2.8 (435.1~440.7)

2．トリップ開閉検査

弁番号	TAG NO	確認事項				結果	備考
		動作値		復帰値			
		判定基準	測定値	判定基準	測定値		
PCV−482A	PC−414D	447.2 ± 2.8mV	447.2 mV	437.9 ± 2.8mV	437.5 mV	良	
	PC−415D	447.2 ± 2.8mV	447.2 mV	437.9 ± 2.8mV	437.8 mV	良	
	PC−416D	447.2 ± 2.8mV	446.4 mV	437.9 ± 2.8mV	436.9 mV	良	
PCV−482B	PC−424D	447.2 ± 2.8mV	447.1 mV	437.9 ± 2.8mV	437.6 mV	良	
	PC−425D	447.2 ± 2.8mV	447.1 mV	437.9 ± 2.8mV	438.3 mV	良	
	PC−426D	447.2 ± 2.8mV	447.3 mV	437.9 ± 2.8mV	438.3 mV	良	

1．設定値確認検査記録

検査年月日 平成 2 年 5 月 25日
検 査 官
検査立会者

〔チャンネルⅠ〕

No.	ループ名	検査項目		バイステーブルNo.	セット値 工学値	セット値 電圧値(mV)	許容誤差 工学値	許容誤差 電圧値(mV)	動作値 電圧値(mV)	結果
1	原子炉圧力	(1)	「原子炉圧力高」原子炉トリップ	PC-455A	167.67 kg/cm²	454.8	±0.32 kg/cm²	±2.0	454.9	良
		(2)	「原子炉圧力低」原子炉トリップ	PC-455C	134.33 kg/cm²	249.8	±0.32 kg/cm²	±2.0	249.5	良
		(3)	「原子炉圧力低」安全注入	PC-455D	128.33 kg/cm²	212.8	±0.32 kg/cm²	±2.0	212.5	良
		(4)	「原子炉圧力異常低」安全注入	PC-455L	121.33 kg/cm²	169.8	±0.32 kg/cm²	±2.0	169.8	良
2	加圧器水位	(1)	「加圧器水位高」原子炉トリップ	LC-465A	90%	460.0	±0.5%	±2.0	459.6	良
		(2)	「加圧器水位低」安全注入	LC-465B	5.5%	122.0	±0.5%	±2.0	122.4	良
3	ΔT、TAVG	(1)	「過大温度ΔT(ΔTsp1)」制御棒引抜き阻止	TC-410E	ΔTsp1−ΔT=3%	8.0	±0.75%	±2.0	7.2	良

〔チャンネルⅠ〕

No.	ループ名	検査項目		バイステーブルNo.	セット値 工学値	セット値 電圧値(mV)	許容誤差 工学値	許容誤差 電圧値(mV)	動作値 電圧値(mV)	結果
	ΔT、TAVG	(2)	「過大温度ΔT(ΔTsp1)」原子炉トリップ	TC-410F	ΔTsp1-ΔT=0%	0.0	±0.75%	±2.0	-0.1	良
		(3)	「過出力ΔT(ΔTsp2)」制御棒引抜阻止	TC-410C	ΔTsp2-ΔT=3%	8.0	±0.75%	±2.0	7.8	良
		(4)	「過出力ΔT(ΔTsp2)」原子炉トリップ	TC-410D	ΔTsp2-ΔT=0%	0.0	±0.75%	±2.0	0.4	良
		(5)	「1次冷却材平均温度異常低」主蒸気ライン隔離	TC-410B	284.0℃	132.0	±0.25℃	±2.0	132.0	良
4	Aループ蒸気発生器水位	(1)	「Aループ蒸気発生器水位異常低」原子炉トリップ	LC-410A	10%	140.0	±0.5%	±2.0	140.2	良
5	Bループ蒸気発生器水位	(1)	「Bループ蒸気発生器水位異常低」原子炉トリップ	LC-422A	10%	140.0	±0.5%	±2.0	139.8	良
		(2)	「Bループ蒸気発生器水位低」原子炉トリップ	LC-422C	20%	180.0	±0.5%	±2.0	180.5	良

〔チャンネルⅡ〕

No.	ループ名	検査項目		バイステーブルNo.	セット値 工学値	セット値 電圧値(mV)	許容誤差 工学値	許容誤差 電圧値(mV)	動作値 電圧値(mV)	結果
1	原子炉圧力	(1)	「原子炉圧力高」原子炉トリップ	PC-456A	167.67 kg/cm²	454.8	±0.32 kg/cm²	±2.0	455.0	良
		(2)	「原子炉圧力低」原子炉トリップ	PC-456C	134.33 kg/cm²	249.8	±0.32 kg/cm²	±2.0	249.9	良
		(3)	「原子炉圧力低」安全注入	PC-456D	128.33 kg/cm²	212.8	±0.32 kg/cm²	±2.0	213.1	良
		(4)	「原子炉圧力異常低」安全注入	PC-456G	121.33 kg/cm²	169.8	±0.32 kg/cm²	±2.0	170.1	良
2	加圧器水位	(1)	「加圧器水位高」原子炉トリップ	LC-466A	90%	460.0	±0.5%	±2.0	459.8	良
		(2)	「加圧器水位低」安全注入	LC-466B	5.5%	122.0	±0.5%	±2.0	122.4	良
3	ΔT、TAVG	(1)	「過大温度ΔT(ΔTsp1)」制御棒引抜き阻止	TC-411E	ΔTsp1-ΔT=3%	8.0	±0.75%	±2.0	8.1	良
		(2)	「過大温度ΔT(ΔTsp1)」原子炉トリップ	TC-411F	ΔTsp1-ΔT=0%	0.0	±0.75%	±2.0	0.1	良
		(3)	「過出力ΔT(ΔTsp2)」制御棒引抜き阻止	TC-411C	ΔTsp2-ΔT=3%	8.0	±0.75%	±2.0	8.3	良

〔チャンネルII〕

No.	ループ名	検査項目		バイステーブルNo.	セット値 工学値	セット値 電圧値(mV)	許容誤差 工学値	許容誤差 電圧値(mV)	動作値 電圧値(mV)	結果
		(4)	「過出力ΔT(ΔTsp2)」原子炉トリップ	TC-411D	ΔTsp2-ΔT=0%	0.0	±0.75%	±2.0	0.5	良
		(5)	「1次冷却材平均温度異常低」主蒸気ライン隔離	TC-411B	284.0℃	132.0	±0.25℃	±2.0	131.5	良
4	Bループ蒸気発生器水位	(1)	「Bループ蒸気発生器水位異常低」原子炉トリップ	LC-421A	10%	140.0	±0.5%	±2.0	140.0	良
		(2)	「Bループ蒸気発生器水位低」原子炉トリップ	LC-421C	20%	180.0	±0.5%	±2.0	180.1	良
5	Aループ蒸気／給水流量	(1)	「Aループ蒸気-給水流量差大」原子炉トリップ	FC-417A	SF-FWF=2.85×10^5 kg/h	66.2	$\pm8.6\times10^3$ kg/h	±2.0	65.8	良
		(2)	「Aループ主蒸気圧力異常低」安全注入	PC-415B	36.43 kg/cm²	271.5	±0.42 kg/cm²	±2.0	271.2	良
6	Aループ主蒸気流量	(1)	「主蒸気流量高」主蒸気ライン隔離	FC-415A	2.85×10^5 kg/h	108.8	$\pm3.5\times10^4$ kg/h	±2.0	108.9	良
		(2)	「主蒸気流量異常高」主蒸気ライン隔離	FC-415B	1.713×10^6 kg/h	500.0	$\pm5.0\times10^3$ kg/h	±2.0	499.7	良

159

〔チャンネルIII〕

No.	ループ名	検査項目		バイステーブルNo.	セット値 工学値	セット値 電圧値(mV)	許容誤差 工学値	許容誤差 電圧値(mV)	動作値 電圧値(mV)	結果
1	原子炉圧力	(1)	「原子炉圧力高」原子炉トリップ	PC-457A	167.67 kg/cm²	454.8	±0.32 kg/cm²	±2.0	454.9	良
		(2)	「原子炉圧力低」原子炉トリップ	PC-457C	134.33 kg/cm²	249.8	±0.32 kg/cm²	±2.0	249.6	良
		(3)	「原子炉圧力低」安全注入	PC-457D	128.33 kg/cm²	212.8	±0.32 kg/cm²	±2.0	213.1	良
		(4)	「原子炉圧力異常低」安全注入	PC-457F	121.33 kg/cm²	169.8	±0.32 kg/cm²	±2.0	168.7	良
2	加圧器水位	(1)	「加圧器水位高」原子炉トリップ	LC-467A	90 %	460.0	±0.5 %	±2.0	460.1	良
		(2)	「加圧器水位低」安全注入	LC-467B	5.5 %	122.0	±0.5 %	±2.0	122.2	良
3	ΔT、TAVG	(1)	「過大温度ΔT(ΔTsp1)」制御棒引抜き阻止	TC-420E	ΔTsp1-ΔT=3%	8.0	±0.75%	±2.0	8.2	良
		(2)	「過大温度ΔT(ΔTsp1)」原子炉トリップ	TC-420F	ΔTsp1-ΔT=0%	0.0	±0.75%	±2.0	-0.2	良

160

〔チャンネルIII〕

No	ループ名	検査項目		バイステーブルNo	セット値 工学値	セット値 電圧値(mV)	許容誤差 工学値	許容誤差 電圧値(mV)	動作値 電圧値(mV)	結果
	ΔT、TAVG	(3)	「過出力ΔT(ΔTsp2)」制御棒引抜き阻止	TC-420C	ΔTsp2-ΔT=3%	8.0	±0.75%	±2.0	8.2	良
		(4)	「過出力ΔT(ΔTsp2)」原子炉トリップ	TC-420D	ΔTsp2-ΔT=0%	0.0	±0.75%	±2.0	-0.1	良
		(5)	「1次冷却材平均温度異常低」主蒸気ライン隔離	TC-420B	284.0℃	132.0	±0.25℃	±2.0	132.5	良
4	Aループ蒸気発生器水位	(1)	「Aループ蒸気発生器水位異常低」原子炉トリップ	LC-411A	10 %	140.0	±0.5 %	±2.0	140.1	良
		(2)	「Aループ蒸気発生器水位低」原子炉トリップ	LC-411C	20 %	180.0	±0.5 %	±2.0	180.3	良
5	Aループ蒸気／給水流量	(1)	「Aループ主蒸気圧力異常低」安全注入	PC-416B	36.43 kg/cm²	271.5	±0.42 kg/cm²	±2.0	272.1	良
6	Bループ蒸気／給水流量	(1)	「Bループ蒸気-給水流量差大」原子炉トリップ	FC-426A	SF-FWF=2.85×10⁵ kg/h	66.2	±8.6×10³ kg/h	±2.0	65.9	良
		(2)	「Bループ主蒸気圧力異常低」安全注入	PC-424B	36.43 kg/cm²	271.5	±0.42 kg/cm²	±2.0	271.6	良

〔チャンネルIV〕

No	ループ名	検査項目		バイステーブルNo	セット値 工学値	セット値 電圧値(mV)	許容誤差 工学値	許容誤差 電圧値(mV)	動作値 電圧値(mV)	結果
1	原子炉圧力	(1)	「原子炉圧力低」原子炉トリップ	PC-458A	134.33 kg/cm²	249.8	±0.32 kg/cm²	±2.0	249.5	良
		(2)	「原子炉圧力異常低」安全注入	PC-458C	121.33 kg/cm²	169.8	±0.32 kg/cm²	±2.0	170.2	良
2	ΔT、TAVG	(1)	「過大温度ΔT(ΔTsp1)」制御棒引抜き阻止	TC-421E	ΔTsp1-ΔT=3%	8.0	±0.75%	±2.0	8.1	良
		(2)	「過大温度ΔT(ΔTsp1)」原子炉トリップ	TC-421F	ΔTsp1-ΔT=0%	0.0	±0.75%	±2.0	-0.2	良
		(3)	「過出力ΔT(ΔTsp2)」制御棒引抜き阻止	TC-421C	ΔTsp2-ΔT=3%	8.0	±0.75%	±2.0	8.0	良
		(4)	「過出力ΔT(ΔTsp2)」原子炉トリップ	TC-421D	ΔTsp2-ΔT=0%	0.0	±0.75%	±2.0	-0.1	良
		(5)	「1次冷却材平均温度異常低」主蒸気ライン隔離	TC-421B	284.0℃	132.0	±0.25℃	±2.0	132.1	良
3	Aループ蒸気発生器水位	(1)	「Aループ蒸気発生器水位異常低」原子炉トリップ	LC-412A	10 %	140.0	±0.5 %	±2.0	140.3	良
		(2)	「Aループ蒸気発生器水位低」原子炉トリップ	LC-412C	20 %	180.0	±0.5 %	±2.0	180.3	良

〔チャンネルⅣ〕

No	ループ名	検査項目		バイステーブルNo	セット値 工学値	セット値 電圧値(mV)	許容誤差 工学値	許容誤差 電圧値(mV)	動作値 電圧値(mV)	結果
4	Bループ 蒸気発生器水位	(1)	「Bループ 蒸気発生器水位異常低」原子炉トリップ	LC-420A	10 %	140.0	±0.5 %	±2.0	139.8	良
5	Bループ 蒸気／給水流量	(1)	「Bループ 蒸気-給水流量差大」原子炉トリップ	FC-427A	SF-FWF= 2.85×10^5 kg/h	66.2	$\pm8.6\times10^3$ kg/h	±2.0	66.0	良
		(2)	「Bループ 主蒸気圧力異常低」安全注入	PC-425B	36.43 kg/cm²	271.5	±0.42 kg/cm²	±2.0	271.7	良
6	Bループ 主蒸気流量	(1)	「主蒸気流量高」主蒸気ライン隔離	FC-425A	2.85×10^5 kg/h	108.8	$\pm3.5\times10^4$ kg/h	±2.0	109.3	良
		(2)	「主蒸気流量異常高」主蒸気ライン隔離	FC-425B	1.713×10^6 kg/h	500.0	$\pm5.0\times10^3$ kg/h	±2.0	499.8	良
7	原子炉格納容器圧力	(1)	「原子炉格納容器圧力異常高」格納容器スプレ作動	PC-956B	1.205 kg/cm²	260.6	±0.015 kg/cm²	±2.0	260.5	良
		(2)	「原子炉格納容器圧力異常高」主蒸気ライン隔離	PC-956A	0.80 kg/cm²	206.6	±0.015 kg/cm²	±2.0	207.0	良

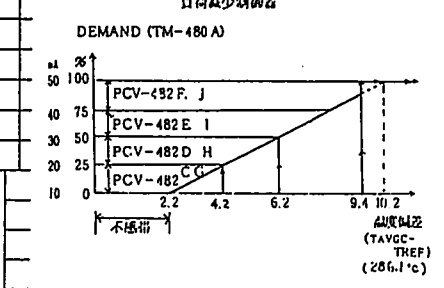
調整後

ユニット番号 2 ラックNo. 3. 4 **原子炉保護制御ラックループ試験成績表** 美浜発電所 SP-24 SH 2/4

CH 蒸気ダンプ 制御 目盛仕様 TAVG, TREF : 280-330 ℃ , 10-50 mA
LOOP TM-480A : 2.2-10.2 ℃ , 10-50 mA
TM-480B : 0-16.67 ℃ , 10-50 mA

試験年月日	2年 05月 08日	試験者	松浦	立会者	鶴原殿	試験器	自動試験装置

ポイント	標準入力		2TM-405F L/L 2TP/405F		2TM-480A P 2TP/480A			2TM-480B P 2TP/480B			
	TAVG		up	down	標準値	up	down	標準値	up	down	
No.	℃	mA	mA	mA	%	mA	mA	mA	%	mA	mA	mA
1	286.1	14.88	14.92	14.91	0	10.00	0.00	0.00	0.0	10.00	10.03	10.03
2	288.3	16.64	16.64	16.66	0	10.00	9.89	9.94	13.2	15.28	15.22	15.27
3	290.3	18.24	18.26	18.27	25	20.00	19.77	19.84	25.2	20.08	20.01	20.07
4	292.3	19.84	19.87	19.86	50	30.00	29.90	29.74	37.2	24.88	24.88	24.84
5	294.3	21.44	21.47	21.48	75	40.00	39.83	39.89	49.2	29.68	29.66	29.71
6	296.3	23.04	23.08	23.05	100	50.00	50.01	49.78	61.2	34.48	34.53	34.44
7	298.6	24.88	24.90	24.90					75.0	40.00	39.99	40.00
8	302.8	28.22	28.23	28.23					100.0	50.00	49.99	49.98
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												



備考
TM-480A SP 8.8% PB 16.0%
TM-480B SP 12.2% PB 33.3%
※ Tref=286.1 ℃ 一定

計器名	管理基準値(%)	誤差 大	誤差 小

8．１００％運転記録（抜粋）（復水タンク一容量曲線含む）

美浜2号機　　１００％記録評価結果

系統名：放射線監視装置　　定検回数：13　記録回数：03

ページ	項目名	計器番号	単位	標準値 計算値	管理幅 残差管理値	今回の データ	差	不具合点	処置：対策	結果
10-02/04	ＡＲＭ除染洗濯室ＮＣＢ	RI-9	mSv/h	.0013	.0003	0.0015				
10-02/04	ＡＲＭ除染洗濯室ＲＭＳ	RI-9	mSv/h	.0013	.0003	0.0015				
10-02/04	ＡＲＭ除染洗濯室レコダ	RI-9	mSv/h	.0013	.0003	0.0015				
10-02/04	ＡＲＭ除染洗濯室現地	RI-9	mSv/h	.0013	.0003	0.0015				
10-02/04	ＰＲＭ　Ｒ１１　ＮＣＢ	RI-11	cpm	150	50	150				
10-02/04	ＰＲＭ　Ｒ１１　ＲＭＳ	RI-11	cpm	150	50	150				
10-02/04	ＰＲＭ　Ｒ１１　レコダ	RI-11	cpm	150	50	150				
10-02/04	ＰＲＭ　Ｒ１２　ＮＣＢ	RI-12	cpm	230	120	250				
10-02/04	ＰＲＭ　Ｒ１２　ＲＭＳ	RI-12	cpm	230	120	250				
10-02/04	ＰＲＭ　Ｒ１２　レコダ	RI-12	cpm	230	120	250				
10-02/04	ＰＲＭ　Ｒ１３　ＮＣＢ	RI-13	cpm	350	50	400				
10-02/04	ＰＲＭ　Ｒ１３　ＲＭＳ	RI-13	cpm	350	50	400				
10-02/04	ＰＲＭ　Ｒ１３　レコダ	RI-13	cpm	350	50	400				
10-02/04	ＰＲＭ　Ｒ１４　ＮＣＢ	RI-14	cpm	350	50	350				
10-02/04	ＰＲＭ　Ｒ１４　ＲＭＳ	RI-14	cpm	350	50	350				
10-02/04	ＰＲＭ　Ｒ１４　レコダ	RI-14	cpm	350	50	350				
10-02/04	ＰＲＭ　Ｒ１５　ＮＣＢ	RI-15	cpm	800	80	850				
10-02/04	ＰＲＭ　Ｒ１５　ＲＭＳ	RI-15	cpm	800	80	790				
10-02/04	ＰＲＭ　Ｒ１５　レコダ	RI-15	cpm	800	80	800				
10-02/04	ＰＲＭ　Ｒ１６　ＮＣＢ	RI-16	cpm	500	50	450				

美浜2号機　　１００％記録評価結果

系統名：放射線監視装置　　定検回数：13　記録回数：03

ページ	項目名	計器番号	単位	標準値 計算値	管理幅 残差管理値	今回の データ	差	不具合点	処置：対策	結果
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ１６　ＲＭＳ	RI-16	cpm	500	50	450				
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ１６　レコダ	RI-16	cpm	500	50	400	-100			
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ１７Ａ　ＮＣＢ	RI-17A	cpm	75	10	70				
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ１７Ａ　ＲＭＳ	RI-17A	cpm	75	10	70				
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ１７Ａ　レコダ	RI-17A	cpm	75	10	70				
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ１７Ｂ　ＮＣＢ	RI-17B	cpm	75	10	60				
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ１７Ｂ　ＲＭＳ	RI-17B	cpm	75	10	60				
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ１７Ｂ　レコダ	RI-17B	cpm	75	10	60				
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ１８　ＮＣＢ	RI-18	cpm	450	150	500				
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ１８　ＲＭＳ	RI-18	cpm	450	150	500				
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ１８　レコダ	RI-18	cpm	450	150	500				
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ１９　ＮＣＢ	RI-19	cpm	35	10	35				
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ１９　ＲＭＳ	RI-19	cpm	35	10	35				
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ１９　レコダ	RI-19	cpm	35	10	35				
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ２２　ＮＣＢ	RI-22	cpm	500	100	650	150			
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ２２　ＲＭＳ	RI-22	cpm	500	100	673	173			
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ２２　レコダ	RI-22	cpm	500	100	700	200			
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ２６　ＮＣＢ	RI-26	cpm	160	40	150				
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ２６　ＲＭＳ	RI-26	cpm	160	40	150				
10-03/04	ＰＲＭ　Ｒ２６　レコダ	RI-26	cpm	160	40	150				

美浜2号機　　１００％記録評価結果

系統名：原子炉冷却水系統　　定検回数：13　記録回数：03

ページ	項目名	計器番号	単位	標準値 計算値	管理幅 残差管理値	今回の データ	差	不具合点	処置：対策	結果
01-04/07	過出ΔＴ設定ＡルＣＨ１	T410C	％	107.0	1	107.5				
01-04/07	過出ΔＴ設定ＡルＣＨ２	T411C	％	107.0	1	108.0				
01-04/07	過出ΔＴ設定ＢルＣＨ３	T420C	％	107.0	1	108.0				
01-04/07	過出ΔＴ設定ＢルＣＨ４	T421C	％	107.0	1	108.0				
01-04/07	原子炉冷却材圧力	PI400	kg/cm2	158	1	159				
01-04/07	加圧器圧力ＣＨ１	PI455	kg/cm2	157.2	.5	157.5				
01-04/07	加圧器圧力ＣＨ２	PI456	kg/cm2	157.2	.5	157.5				
01-04/07	加圧器圧力ＣＨ３	PI457	kg/cm2	157.2	.5	157.5				
01-04/07	加圧器圧力ＣＨ４	PI458	kg/cm2	157.2	.5	157.5				
01-04/07	加圧器水位設定値	LR465	％	54	1	54.0				
01-04/07	加圧器水位ＣＨ１	LI465	％	54	1	54.0				
01-04/07	加圧器水位ＣＨ２	LI466	％	54	1	54.5				
01-04/07	加圧器水位ＣＨ３	LI467	％	54	1	54.0				
01-04/07	加圧器水位ワイド	LI468	％	36	1.5	34.0	-2			
01-04/07	Ｐｚ液相部温度	TI451	℃	343	3	346				
01-04/07	Ｐｚ気相部温度	TI452	℃	343	3	346				
01-04/07	Ｐｚサージライン温度	TI450	℃	333	2	333				
01-04/07	Ｐｚスプレライン温度Ａ	TI454	℃	275	4	270	-5			
01-04/07	Ｐｚスプレライン温度Ｂ	TI453	℃	275	4	275				
01-04/07	Ｐｚ逃がし弁出口温度	TI463	℃	37	8	35				

美浜2号機　　１００％記録評価結果

系統名：原子炉冷却水系統　　定検回数：13　記録回数：03

ページ	項目名	計器番号	単位	標準値 計算値	管理幅 残差管理値	今回の データ	差	不具合点	処置：対策	結果
01-02/07	Ｓ／Ｇ水位ＡルＣＨ１	LI410	％	51.5	1.5	52.0				
01-02/07	Ｓ／Ｇ水位ＡルＣＨ２	LI411	％	51.5	1.5	52.0				
01-02/07	Ｓ／Ｇ水位ＡルＣＨ３	LI412	％	51.5	1.5	52.0				
01-02/07	Ｓ／Ｇ水位Ａル制御用	LI414	％	51.5	1.5	52.0				
01-02/07	Ｓ／Ｇ水位ＢルＣＨ１	LI420	％	51.5	1.5	51.5				
01-02/07	Ｓ／Ｇ水位ＢルＣＨ２	LI411	％	51.5	1.5	51.5				
01-02/07	Ｓ／Ｇ水位ＢルＣＨ３	LI412	％	51.5	1.5	52.0				
01-02/07	Ｓ／Ｇ水位Ｂル制御用	LI424	％	51.5	1.5	52.0				
01-02/07	Ｓ／Ｇ水位Ａル　ワイド	LR413	％	51.5	1.5	53.0				
01-02/07	Ｓ／Ｇ水位Ｂル　ワイド	LR413	％	51.5	1.5	53.0				
01-02/07	主給水流量制御器出力Ａ	HFC418	％	72	4	65.0	-7			
01-02/07	主給水流量制御器出力Ｂ	HFC428	％	72	4	62.0	-10			
01-02/07	主給水制御弁要求信号Ａ		％	67.5	1.5	66.0				
01-02/07	主給水制御弁開度Ａ		％	67.5	1.5	68.0				
01-02/07	主給水制御弁要求信号Ｂ		％	67.5	1.5	64.0	-3.5			
01-02/07	主給水制御弁開度Ｂ		％	67.5	1.5	66.0				
01-02/07	主給水制御弁開度現地Ａ	FCV418	％	67.5	1.5	68.0				
01-02/07	主給水制御弁開度現地Ｂ	FCV428	％	67.5	1.5	67.0				
01-02/07	主蒸気ヘッダ圧力Ａ	PI2023	kg/cm2	56	1.0	55.0				
01-02/07	主蒸気ヘッダ圧力Ｂ	PI2097	kg/cm2	56	1.0	55.5				

美浜2号機　　１００％記録評価結果

系統名：原子炉冷却水系統　　定検回数：13　記録回数：03

ページ	項目名	計器番号	単位	標準値 計算値	管理幅 残差管理値	今回の データ	差	不具合点	処置：対策	結果
01-06/07	A－ＲＣＰフレム振動Ｙ	YR416	MiL	0.7	0.5	0.2				
01-06/07	A－ＲＣＰフレム振動Ｘ	YR416	MiL	0.8	0.5	0.4				
01-06/07	B－ＲＣＰ軸振動Ｙ方向	YR426	MiL	2.6	0.6	2.4				
01-06/07	B－ＲＣＰ軸振動Ｘ方向	YR426	MiL	2.6	0.6	3.2				
01-06/07	B－ＲＣＰフレム振動Ｙ	YR426	MiL	1.2	.4	1.1				
01-06/07	B－ＲＣＰフレム振動Ｘ	YR426	MiL	1.2	0.4	1.4				
01-06/07	Ｐｚ圧力制御器出力	PC455E	%	48	1	49				
01-06/07	Ｐｚ水位制御器出力	LC465H	%	55	1	56				
01-06/07	Ｐｚスプレ制御器出力Ａ	PC455G	%	0	0	0				
01-06/07	Ｐｚスプレ制御器出力Ｂ	PC455H	%	0	0	0				
01-06/07	高温側冷却材温度Ａ	TR425	℃	316	1	316				
01-06/07	高温側冷却材温度Ｂ	TR425	℃	316	1	316				
01-06/07	冷却材飽和温度	TR425	℃	343	1	343				
01-06/07	ＲＣＰ電流Ａ		A	405	5	407				
01-06/07	ＲＣＰ電流Ｂ		A	395	5	400				
01-06/07	ノイズモニタＲＣＰ　Ａ	YNM1-1	VU	-4.5	1.5	-10.0	-5.5			
01-06/07	ノイズモニタＲＣＰ　Ｂ	YNM1-2	VU	-4.5	1	-2.0	2.5			
01-06/07	ノイズモニタＣＲＤＭ北	YNM1-3	VU	-6	1	-8.0	-2			
01-06/07	ノイズモニタＣＲＤＭ南	YNM1-4	VU	-6	1	-7.0				
01-06/07	ノイズモニＰｚ安全弁Ａ	YNM1-5	VU	-9	1	-9.0				

美浜2号機　　１００％記録評価結果

系統名：原子炉冷却水系統　　定検回数：13　記録回数：03

ページ	項目名	計器番号	単位	標準値 計算値	管理幅 残差管理値	今回の データ	差	不具合点	処置：対策	結果
01-01/07	主蒸気流量ＡルＣＨ１	FI414	t/h	1440	20	1430				
01-01/07	主蒸気流量ＡルＣＨ２	FI415	t/h	1440	20	1430				
01-01/07	主蒸気流量ＢルＣＨ１	FI424	t/h	1395	35	1350	-45			
01-01/07	主蒸気流量ＢルＣＨ２	FI425	t/h	1395	35	1370				
01-01/07	主給水流量ＡルＣＨ１	FI416	t/h	1480	40	1490				
01-01/07	主給水流量ＡルＣＨ２	FI417	t/h	1480	40	1490				
01-01/07	主給水流量ＢルＣＨ１	FI426	t/h	1425	35	1420				
01-01/07	主給水流量ＢルＣＨ２	FI427	t/h	1425	35	1430				
01-01/07	主蒸気ヘッダ入圧Ａル１	PI414	kg/cm2	55.75	0.75	56.0				
01-01/07	主蒸気ヘッダ入圧Ａル２	PI415	kg/cm2	55.75	0.75	56.0				
01-01/07	主蒸気ヘッダ入圧Ａル３	PI416	kg/cm2	55.75	0.75	55.5				
01-01/07	主蒸気ヘッダ入圧Ｂル１	PI424	kg/cm2	55.75	0.75	56.0				
01-01/07	主蒸気ヘッダ入圧Ｂル２	PI425	kg/cm2	55.75	0.75	56.0				
01-01/07	主蒸気ヘッダ入圧Ｂル３	PI426	kg/cm2	55.75	0.75	56.0				
01-01/07	主蒸気連絡管圧力	PI488	kg/cm2	54.5	.5	55.0				
01-01/07	タービン第１段圧力１	PI485	kg/cm2	38	.5	38.0				
01-01/07	タービン第１段圧力２	PI486	kg/cm2	38	.5	38.5				
01-01/07	主蒸気ダンプ要求信号	TI480	%	0	0	0				
01-01/07	蒸気発生器水位設定値Ａ	LI418	%	51.5	1.5	52.0				
01-01/07	蒸気発生器水位設定値Ｂ	LI428	%	51.5	1.5	51.5				

美浜発電所 2 号機 運転記録

安全注入系統

記録項目	発電機出力	格納容器圧力									格納容器スプレイ流量	格納容器スプレイポンプ出口圧力		ほう素濃度	ほう酸注入タンク				充てんポンプ出口圧力		充てんポンプ吸込圧力		燃料取替用水タンク水位		(5/6日) アキュームレータ水位 (ワイドレンジ)	
		ch I	ch II	ch III	ch IV	ch V	ch VI	ch VII-1	ch VII-2			A	B	充てん前	圧力	液位	流量	圧力	充てん前	圧力	A	B	A	B
計器番号		PT-931	PT-932	PT-933	PT-934	PT-935	PT-936	PT-937	PT-938	PT-943	PT-939	PT-934	PT-935	PT-939	PT-931	PT-932	PT-933	PT-934	PT-939	PT-940	PT-931	PT-932	LT-931	LT-932	LT-933	LT-934
単位	MW	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	%	×10²	×10²	ppm	×10²	%	×10²	℃	℃	×10²	×10²	×10²	%	%	%	%
標準値	100	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	4~6	17~30	17~30	1.0	1900~2000	1.0	2.0	1.0	70~74.1	70~74.1	0	100~110	5.8	5.8	82~87	88~89	88~89
ランク		B	B	B	B	B	B	B	C	B	C	C		B	B	B	C	B	B	B	B	B	B	B	B	B
記録紙巾		0.01 ~0.05	0.01 ~0.05	0.01 ~0.05	0.01 ~0.05	0.01 ~0.05	0.01 ~0.05	0.01 ~0.05		0				77 ~83	0.9 ~1.1	1.3 ~2.3		71 ~77	71 ~77	0	0	2.7 ~6.3	5.7 ~6.3	96 ~97	97.0 ~98.0	97.0 ~98.0
備考																										
H2.3.5 05:20	300	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.019		0				2800	1.0	2.0		22.0	21.9	0	0	1.90	停止中	96.3	99 98.5	99 98.5
H2.3.11 05:40	500	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.028		0				2870	1.0	2.0		22.0	21.6	0	0	停止中 1.82	3.70	96.8	99 97.7	99 98.0

美浜発電所 2 号機 運転記録

主給水系統 (ワンパス型)

記録項目	発電機出力	主蒸気圧力										蒸気発生器水位	給水コントロール弁	蒸気発生器水位	蒸気発生器水位	給水ポンプ吐出圧力			給水ポンプ吸込圧力	給水ポンプ水位	脱気器		復水器真空	給水温度	
		主蒸気弁前	主蒸気弁後	主蒸気弁前	主蒸気ヘッダ前	レヒートスチーム弁前 A	レヒートスチーム弁前 B	主給水弁前	主給水弁後	主給水ポンプ出口		高圧	低圧			蒸気発生器入口					圧力	水位	計	計	
計器番号		PT-911	PT-912	PT-913	PT-917	PT-911	PT-912	PT-913	PT-914	PT-915	PT-916	PT-917	PT-918	PT-919	PT-920	PT-911	PT-912	PT-913	PT-914	PT-915	PT-916	LT-916	PT-917	PT-918	PT-919
単位	MW	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	×10²	%	×10²	×10²	×10²
標準値	FM	56.5	37.5	24.0	8.25	2.8	2.8	1.53	-40	-540	0.30	0.33	12.9	50						90	90	90	90	2.6	2.9
ランク		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C	A	A	A	A	C	A	A	A	A
記録紙巾		53 ~56	320 ~390	22.5 ~24.5	8.1 ~8.9	2.0 ~2.1	2.0 ~2.1	1.49 ~1.56	-55 ~-35	-565 ~-515	0.25 ~0.43	0.28 ~0.43	12.9 ~13.1							89 ~91	89 ~91	89 ~91	96 ~90	2.6 ~2.7	2.9 ~3.1
備考																									
H3.10.4	500	51.5	38.1	21.5	8.25	2.05	2.10	1.53	-40	-540	0.30	0.33	12.9							11	91	停止中	87	2.7	3.05
H3.1.21	600	53.5	37.5	23.5	8.30	2.05	2.10	1.52	-50	-555	0.31	0.28	13.1							系統中	91	91	90	2.7	3.07
H3.3.7	500	53.5	37.5	23.5	8.25	2.05	2.10	1.53	-45	-560	0.31	0.28	13.0							91	停止中	91	90	2.7	3.06
H3.7.14	600	53.5	37.5	23.0	8.25	2.10	2.00	1.55	-30	-525	0.33	0.33	13.1							90	90	停止中	88	2.7	3.05
H3.10.3	500	53.5	37.5	23.2	8.90	2.10	2.00	1.52	-40	-540	0.33	0.33	13.0							系統中	90	89	88	2.7	3.05
H3.1.4	500	54.0	37.5	23.3	8.90	2.10	2.00	1.53	-55	-555	0.33	0.33	13.3							90.5	停止中	91.0	18.0	2.6	3.00

美浜2号機　　１００％記録評価結果

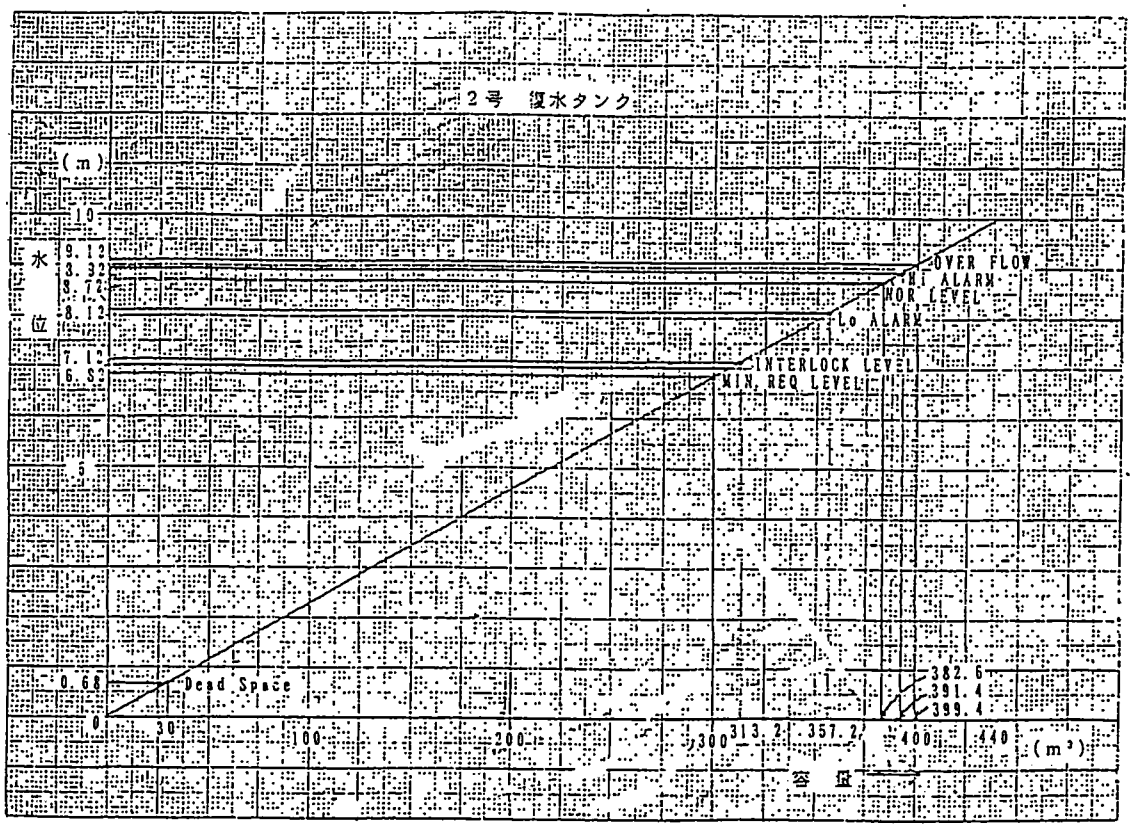
系統名：化学体積制御系統　　定検回数：13　記録回数：03

ページ	項目名	計器番号	単位	標準値 計算値	管理幅 残差管理値	今回のデータ	差	不具合点	処置：対策	結果
02-01/02	再生クラ出口抽出水温	TI111	℃	147	5	148				
02-01/02	再生クラ出口充てん水温	TI110	℃	251	7	251				
02-01/02	抽出水流量	FI113	m3/h	10.2	.3	10.2				
02-01/02	抽出水圧力	PI113	kg/cm2	23	2	24.0				
02-01/02	非再生クラ出口抽出水温	TI115	℃	39.5	.5	40.0				
02-01/02	ｃｈｐ速度制御器出力Ａ	HSC465A	%	45	5					
02-01/02	ｃｈｐ速度制御器出力Ｂ	HSC465B	%	45	5	48				
02-01/02	ｃｈｐ速度制御器出力Ｃ	HSC465C	%	45	5	48				
02-01/02	充てん流量	FI110	m3/h	6.5	.3	6.8				
02-01/02	ＲＣＰラビリンス差圧Ａ	PI101A	CmH2o	127	20	117				
02-01/02	ＲＣＰラビリンス差圧Ｂ	PI102A	CmH2o	127	20	135				
02-01/02	ＲＣＰ封水流量ワイドＡ	FR123B	m3/h	.72	.1	0.73				
02-01/02	ＲＣＰ封水流量ワイドＢ	FR123B	m3/h	.58	.1	0.51				
02-01/02	ＲＣＰ＃２リーク流量Ａ	U0160	l/h	999	999	27.1				
02-01/02	ＲＣＰ＃２リーク流量Ｂ	U0161	l/h	999	999	0.2				
02-01/02	ＲＣＰ下部軸受温度Ａ	TR121	℃	52.5	1.5	52.0				
02-01/02	ＲＣＰ下部軸受温度Ｂ	TR122	℃	54	3	56.5				
02-01/02	ＲＣＰ封水温度Ａ	TR121	℃	64.5	3	63.5				
02-01/02	ＲＣＰ封水温度Ｂ	TR122	℃	67	3	70.0				
02-01/02				0	0					

美浜1号機　　１００％記録評価結果

系統名：放射線監視装置　　定検回数：11　記録回数：04

ページ	項目名	計器番号	単位	標準値 計算値	管理幅 残差管理値	今回のデータ	差	不具合点	処置：対策	結果
09-02/06	ＡＲＭ　ＣＶ内現地	RI7	mR/h	0.46	0.08					
09-02/06	ＡＲＭドラム詰室ＮＣＢ	RI8	mSv/h	0.003	0.001	0.0025				
09-02/06	ＡＲＭドラム詰室ＲＭＳ	RI8	mSv/h	0.003	0.001	0.0025				
09-02/06	ＡＲＭドラム詰室現地	RI8	mSv/h	0.003	0.001	0.0022				
09-02/06	ＰＲＭ　Ｒ１１　ＮＣＢ	RI11	cpm	325	75	380				
09-02/06	ＰＲＭ　Ｒ１１　ＲＭＳ	RI11	cpm	325	75	380				
09-02/06	ＰＲＭ　Ｒ１１　レコダ	PR2-1	cpm	325	75	380				
09-02/06	ＰＲＭ　Ｒ１２　ＮＣＢ	RI12	cpm	170	50	180				
09-02/06	ＰＲＭ　Ｒ１２　ＲＭＳ	RI12	cpm	170	50	180				
09-02/06	ＰＲＭ　Ｒ１２　レコダ	RR2-2	cpm	170	50	180				
09-02/06	ＰＲＭ　Ｒ１３　ＮＣＢ	RI13	cpm	400	50	450				
09-02/06	ＰＲＭ　Ｒ１３　ＲＭＳ	RI13	cpm	400	50	450				
09-02/06	ＰＲＭ　Ｒ１３　レコダ	PR2-3	cpm	400	50	450				
09-02/06	ＰＲＭ　Ｒ１３　ＷＤＰ	RI13	cpm	400	50	450				
09-02/06	ＰＲＭ　Ｒ１４　ＮＣＢ	RI14	cpm	550	50	600				
09-02/06	ＰＲＭ　Ｒ１４　ＲＭＳ	RI14	cpm	550	50	600				
09-02/06	ＰＲＭ　Ｒ１４　レコダ	PR2-4	cpm	550	50	550				
09-02/06	ＰＲＭ　Ｒ１４　ＷＤＰ	RI14	cpm	550	50	550				
09-02/06	ＰＲＭ　Ｒ１５　ＮＣＢ	RI15	cpm	720	30	750				
09-02/06	ＰＲＭ　Ｒ１５　ＲＭＳ	RI15	cpm	720	30	720				


２号　復水タンク
水位（m）
10
9.12
8.92
8.72
8.12
7.12
6.82
5
0.68
0
OVER FLOW
HI ALARM
NOR LEVEL
Lo ALARM
INTERLOCK LEVEL
MIN. REQ LEVEL
Dead Space
382.6
391.4
399.4
30
100
200
300
313.2
357.2
400
440
（m³）
容　量

9．ＣＲＴハードコピー（抜粋）

KMN-2 PS-19 工学的安全施設動作時補機起動シーケンス 1991年 2月 9日 15:40 GEN PWR -0.4 MWE REAC PWR -0.0 %

SI FIRST EVENT

BLACK OUT
/ H M S

ECCS

	2C	2D
D/G 電圧		
D/G しゃ断器	開	開
SI シーケンス		

	4-2C		4-2D		TIMER(SEC)
非放射性機器冷却水ポンプA·B	RUN	0.0	RUN	0.0	0
高圧注入ポンプA·B	RUN	5.2	RUN	5.2	5
余熱除去ポンプA·B	RUN	10.1	RUN	10.0	10
放射性機器冷却水ポンプA·B	RUN	12.0			12
海水ポンプA·C			RUN	17.1	17
格納容器冷却水ポンプA·B	RUN	19.0			19
格納容器循環ファンA·B	RUN	24.1	RUN	6201.	24
C·D	RUN	6251.	RUN	6296.	34
電動補助給水ポンプA·B	RUN	44.2	RUN	44.2	44
内部スプレポンプA·B					49

D/G自動起動時間 A SEC

B SEC

１０．運転日誌

美浜発電所　2号機

運転日誌

年月日　3.2.-9

本・非	当直箇所	班長	機長	分類
非	英一技	10	13 班 / 班	運転記録 P-1

項目	単位	基準値	時刻 1	9	17	計器番号
復水器真空度	mmHg	23.2	24	24	24	PI-113
充てん水再生クーラ出口温度	℃	250~260	251	251	251	TI-110
抽出水再生クーラ出口温度	℃	<60	40	40	40	TI-115
ほう酸タンク水位 A	%	63~95	88.5	88.5	88.5	LI-118A
ほう酸タンク水位 B	%	63~95	97.5	97.5	97.5	LI-118B
廃棄物処理タンク 水位	%	35~65	61.0	61.5	61.5	LI-100
廃棄物処理タンク 圧力	kg/cm²g	1.05~4.21	1.25	1.25	1.25	PI-100
廃棄物処理タンク 温度	℃	<55	38.5	38.5	38.5	TI-100
放射性廃棄物冷却水クーラ出口温度	℃	<40.5	14.5	14.5	14.5	TI-6655-B
非放射性廃棄冷却水クーラ出口温度	℃	<37	13.0	13.0	13.0	TI-671A ④
格納容器内温度	℃	<49.0	39.5	39.5	39.5	TI-5000
海水ポンプ出口ヘッダ圧力	kg/cm²g	4.0	4.40	4.40	4.40	PI-2252
海水ポンプ出口ヘッダ圧力	kg/cm²g	4.0	4.35	4.35	4.35	PI-2253
ろう気除去装置タンク水位	%	47~90	78.0	78.0	78.0	LI-949
3Bホウ酸ポンプ出口ヘッダ圧力	kg/cm²g	70~75	74.0	74.0	74.0	PI-470
燃料取扱用水タンク水位	%	95~96.5	98.0	98.0	98.0	LI-690
放射性廃棄冷却水タンク水位	%	45.5~54.5	47.0	47.0	47.0	LI-660A
非放射性廃棄冷却水タンク水位	%	45.5~54.5	47.0	47.0	47.0	LI-670A
1次系純水タンク水位	%	170~302	230	230	230	LI-2902B
格納容器サンプA水位	%	0.8~2.6	2.23	2.23	2.23	LI-1000
格納容器サンプB水位	%	0.85~2.55	1.77	1.80	1.77	LI-1009
燃料ピット水位	m	NWL=-0.60	-0.60	/	/	LI-651
アキュムレータ A 水位	%	60~95	65.0	65.0	65.0	LI-934
アキュムレータ A 圧力	kg/cm²g	50.0~52.5	51.0	51.0	51.0	PI-934
アキュムレータ B 水位	%	60~95	68.0	68.0	68.0	LI-938
アキュムレータ B 圧力	kg/cm²g	50.0~52.5	51.5	51.5	51.5	PI-938

運転開始時刻（制御用制御棒引抜）	2年6月30日22時00分
臨界時刻	2年7月1日809時00分
運転切替時刻	2年7月4日816時00分 定検・解列
停止時刻（制御用制御棒挿入完了）	3年2月9日13時50分
原子炉トリップ時刻および原因	3年2月9日13時50分 A-SG給水流量喪失
格納容器内作業（ほう素濃度・制御棒位置）	1605 Item Bank C/D 233/174 Steps

格納容器運転状況

	起動	停止	起動	停止
格納容器循環空調装置 A	1/31	17:38		
格納容器循環空調装置 B	連続			
格納容器循環空調装置 C	連続			
格納容器循環空調装置 D	連続			
冷却材ポンプ A	連続	13:50		
冷却材ポンプ B	連続	13:50	16:57	
放射性廃棄物冷却水ポンプ A	連続			
放射性廃棄物冷却水ポンプ B	連続			
非放射性廃棄物冷却水ポンプ A	連続			
非放射性廃棄物冷却水ポンプ B	連続			
非放射性廃棄物冷却水ポンプ C				
格納容器冷却水ポンプ A				
格納容器冷却水ポンプ B	連続			

		起動	停止	起動	停止
ほう酸ポンプ	A				
	B				
	C				
1次系純水ポンプ	A				
	B				
余熱除去ポンプ	A				
	B				
充てんポンプ	A	連続			
	B	待機			
	C	連続			
冷却材カチオン塔					
脱ほう充填塔	A				
	B				
冷却材脱塩塔	A	連続			
	B				

SG		変更時刻	連続	停止		
ブロー量 (t/h)	A	20	0			
	B	20	0			

1次系補給水量

	純水補給量(m³)×10	ほう酸補給量 (l)
24	37450	20636
0	35823	16071
差	1627	4565

特記事項

1. A-SG 細管ふんにょうキャビテレンプ・安全注入動作 13:50
一以下余白一

3直当直調長	2直当直調長	1直当直調長	3直当直副長	3直運転員	2直運転員	1直運転員	3直運転員

美浜発電所　2号機

運転日誌

年月日　3.2.-9

本・非	当直箇所	班長	機長	分類
非	英一技	10	13 班 / 班	運転記録 P-1

項目	単位	基準値	時刻 1	9	17	計器番号
タービン主油ポンド出口圧力	kg/cm²g	26.5	24.1	24.1	24.1	PI-2402-2
蒸気圧力 5段	kg/cm²g	24.0	23.2	23.2	23.2	PI-2100-8
蒸気圧力 3段	kg/cm²g	1.5	1.52	1.52	1.52	PI-2100-6
蒸気圧力 2段	mHg	−40	−70	−70	−70	PI-2100-5
蒸気圧力 1段	mHg	−540	−575	−575	−575	PI-2100-4
蒸気弁	kg/cm²g	7.6	7.6	7.6	7.6	PI-2051
2次系冷却水圧力	kg/cm²g	4.0	4.25	4.25	4.25	PI-2250
復水タンク水位	%	13%~	82	82	82	LI-2060
制御油圧力 タービン制御	kg/cm²g	4.5~5.5	5.05	5.05	5.05	PI-2375A
制御油圧力 動証装置制御	kg/cm²g	4.5~5.5	5.00	5.00	5.00	PI-2375B

		起動	停止	起動	停止
2次系冷却水ポンプ	A	連続	13:50	13:51	
	B	連続	13:50	13:51	16:30
	C				
グランドコンデンサ蒸気ファン	A				
	B	連続	13:50	16:00	
タービン油ポンプ					
補助油ポンプ					
計器用コンプレッサ	A				
	B	連続			
空気抽出ポンプ	A	連続			
	B				
	C				

		起動	停止	起動	停止
循水ポンプ	A	連続			
	B	連続			
	C				
海水ポンプ	A	連続			
	B				
	C				
	D	連続			
給水ポンプ	A	連続			
	B				
	C	連続			

（コンピュータ停止時採取）

項目	単位	基準値	時刻 1	9	17	計器番号
主蒸止弁前蒸気圧力	kg/cm²g	56.5				PI-2100-12
第1段後蒸気圧力	kg/cm²g	37.5				PI-2100-11
高圧タービン前蒸気圧力	kg/cm²g	8.5				PI-2100-7
レートストップ弁前	kg/cm²g	7.6				PI-2100-9
蒸気圧力	kg/cm²g	7.6				PI-2100-10
主蒸止弁入口蒸気温度	℃	271				TR-2000A-11
低圧タービン入口 LP1	℃	252				TR-2000A-17
蒸気温度 LP2	℃	252				TR-2000A-18
復水器真空度	mHg	722				PI-2401
負荷制限値	kg/cm²g	3.1				PI-2404
主ガバナ弁	kg/cm²g	3.30				PI-2403
タービン記録計 #1 軸方向	mm	<10				YR-2301A-11
タービン記録計 #2 軸方向	mm	<10				YR-2301A-12
タービン記録計 #3 軸方向	mm	<10				YR-2301A-13
タービン記録計 #4 軸方向	mm	<10				YR-2301B-11
タービン記録計 #5 軸方向	mm	<10				YR-2301B-12
タービン記録計 #6 軸方向	mm	<10				YR-2301B-13
タービン記録計 #7 軸方向	mm	<10				YR-2301C-11
タービン記録計 #8 軸方向	mm	<10				YR-2301C-12
タービン記録計 #9 軸方向	mm	<10				YR-2301C-13
振動 #1	mm	9.7				YR-2301D-11
伸び差 ガバナ側	mm					YR-2301D-12
伸び差 発電機側	mm					YR-2301D-13

項目		単位	基準値	時刻 1	9	17	計器番号
タービン軸受油温度	#1	℃	<70				TR-2400A11
	#2	℃	<70				TR-2400A12
	#3	℃	<70				TR-2400A13
	#4	℃	<70				TR-2400A14
	#5	℃	<70				TR-2400A15
	#6	℃	<70				TR-2400A16
	#7	℃	<70				TR-2400A17
	#8	℃	<70				TR-2400A18
	#9	℃	<70				TR-2400A19
スラスト	前	℃	<70				TR-2400A20
軸受油	後	℃	<70				TR-2400A01
軸受油圧		kg/cm²g	1.6				PI-2402-4
循環水ポンプ	A	%	100				YI-2400A
真空度	B	%	100				YI-2400B

（記録計停止時採取）

項目		単位	基準値	時刻 1	9	17	計器番号
発電機出力		MW	500				
低圧排気温度 (Gen側)	LP1	℃	35				TI-2401B
	LP2	℃	35				TI-2402B
復水器水位		m	2.9				LI-2056

特記事項

1. SG 細管破損モニタ・ユニット 2/4 13:50
一以下余白一

3直当直調長	2直当直調長	1直当直調長	3直当直副長	3直運転員	2直運転員	1直運転員	3直運転員

１１．第１４運転期間における主要なパラメータ

第１４運転期間における主要なパラメータ（1／2）

	出典	7/4 16時	7/6 11時	7/7 11時	7/10 11時	7/12 24時	8/1 24時	8/15 8時	8/15 11時	8/15 17時	9/1 24時	9/26 8時	9/26 11時	9/26 17時	10/1 24時	10/11 8時	10/11 11時	10/11 17時	11/1 24時	11/8 11時	11/8 14時	11/8 20時
発電機出力 MW	(ログシート)	0.2	250.3	375.1	375.7	500.0	497.4	496.1	413.1	492.8	497.3	499.9	419.6	499.7	500.0	500.2	427.2	500.5	500.1	500.0	428.2	500.0
１次冷却系の圧力 kg/cm²	(ログシート)	156.8	156.8	156.8	156.8	156.8	156.8	156.9	157.0	156.8	156.9	156.8	156.9	156.8	157.2	157.2	157.2	157.2	157.2	157.2	157.2	157.2
加圧器水位 %	(ログシート)	42.5	39.5	45.1	46.2	54.3	54.6	54.2	49.4	55.2	54.8	54.6	48.8	54.1	54.3	54.0	49.2	54.1	54.2	53.8	48.7	54.3
飽和温度 ℃	(ログシート)［換算値］	344.6	344.6	344.6	344.6	344.6	344.6	344.7	344.7	344.6	344.7	344.6	344.7	344.6	344.8	344.8	344.8	344.8	344.8	344.8	344.8	344.8
Aループの高温側冷却材温度 ℃	(ログシート)	289.2	301.7	307.6	308.0	315.2	315.6	315.4	310.9	315.8	315.7	315.6	310.7	315.4	315.4	315.3	310.9	315.3	315.3	315.1	310.7	315.3
Bループの高温側冷却材温度 ℃	(ログシート)	289.2	301.6	307.4	307.8	315.0	315.3	315.1	310.7	315.6	315.4	315.3	310.5	315.1	315.2	315.0	310.7	315.0	315.1	314.9	310.5	315.1
Ａ－蒸気発生器水位（広域） %	(チャート)	63	55	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
Ｂ－蒸気発生器水位（広域） %	(チャート)	63	56	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
Ａ－蒸気発生器２次側の圧力 kg/cm²	(ログシート)	67.9	60.2	57.0	57.5	54.4	54.6	54.6	57.1	55.1	54.8	54.9	56.8	54.5	54.9	54.8	56.8	54.9	55.0	54.9	56.6	55.0
Ｂ－蒸気発生器２次側の圧力 kg/cm²	(ログシート)	66.8	60.1	57.0	57.5	54.4	54.7	54.7	57.1	55.2	55.0	55.0	56.9	54.7	54.9	54.9	56.9	55.0	55.1	55.1	56.7	55.2
Ｒ－１５記録計指示値 cpm	当直課長引継簿:7時の値	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
Ｒ－１９記録計指示値 cpm	当直課長引継簿:7時の値	35	35	40	40	40	40	40	40	40	40	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35

第１４運転期間における主要なパラメータ（2／2）

	出典	12/1 24時	12/13 11時	12/13 14時	12/13 20時	1/1 24時	1/16 11時	1/16 14時	1/16 20時	2/1 24時	2/8 24時
発電機出力 MW	(ログシート)	499.9	500.1	429.6	500.1	500.1	500.0	428.2	500.5	500.2	500.1
１次冷却系の圧力 kg/cm²	(ログシート)	157.2	157.1	157.3	157.1	157.2	157.1	157.2	157.2	157.1	157.1
加圧器水位 %	(ログシート)	54.1	54.0	49.6	54.8	53.9	53.8	49.9	54.0	53.9	54.0
飽和温度 ℃	(ログシート)［換算値］	344.8	344.8	344.8	344.8	344.8	344.8	344.8	344.8	344.8	344.8
Aループの高温側冷却材温度 ℃	(ログシート)	315.2	315.2	311.2	315.4	315.1	315.0	311.2	315.2	315.0	315.2
Bループの高温側冷却材温度 ℃	(ログシート)	315.0	315.0	311.0	315.0	314.9	314.9	311.1	315.0	314.8	315.0
Ａ－蒸気発生器水位（広域） %	(チャート)	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
Ｂ－蒸気発生器水位（広域） %	(チャート)	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
Ａ－蒸気発生器２次側の圧力 kg/cm²	(ログシート)	54.9	55.0	57.0	55.1	54.9	54.7	57.0	54.8	54.8	54.9
Ｂ－蒸気発生器２次側の圧力 kg/cm²	(ログシート)	55.1	55.1	57.1	55.2	55.1	54.9	57.1	54.9	54.8	54.9
Ｒ－１５記録計指示値 cpm	当直課長引継簿:7時の値	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
Ｒ－１９記録計指示値 cpm	当直課長引継簿:7時の値	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35

１２．運転マニュアル（抜粋）

D－2－(1)　安全注入自動動作

原因	1. 冷却材喪失　(冷却材配管破断) 2. 2次側水喪失　(2次系配管破断) 3. 蒸気発生器細管もれ (蒸気発生器細管破断) 4. 加圧器逃がし弁あるいは安全弁故障による開固着 安全注入動作信号 (1) 加圧器水位低 (5.5 %) と加圧器圧力低 (128.33 kg/cm²g) の一致 (2) 加圧器圧力異常低 (121.33 kg/cm²g) (3) 安全注入信号アンブロック中 (加圧器圧力 140 kg/cm²g 以上) の主蒸気圧力低下 (36.43 kg/cm²g) (4) 格納容器圧力高 (0.225 kg/cm²g) (5) 手　動
故障	( )内は原因を示す 1. 加圧器圧力低下　(1·2·3·4) 2. 加圧器水位低下　(1·2·3) 3. Tavg 急降下　(1·2) 4. 充てん流量増加　(1·2·3) 5. 体積制御タンク水位低下　(1·2·3) 6. 格納容器圧力上昇　(1·2) 7. 格納容器内放射性物質濃度上昇 (R－2·7·11·12)　(1) 8. 格納容器サンプAおよびBの水位上昇　(1·2) 9. 主蒸気圧力低下　(1·2) 10. 蒸気発生器水位低下　(2) 11. 蒸気流量－給水流量偏差発生　(2·3) (2の場合で主蒸気管破断の時 FS > FW 給水管破断および蒸気発生器ブローダウン管破断の時は FS < FW 3の場合　FS > FW) 12. 蒸気抽出器出口放射性物質濃度上昇 (R－15)　(3) 13. 蒸気発生器ブローライン放射性物質濃度上昇 (R－19)　(3) 14. 加圧器逃がしタンク水位、圧力上昇　(4)

処　置

順序	担　当	操　作	注　意
		〔ただちに行う操作〕	
1	制御員	安全注入動作を当直課長に報告する。	
2	当直課長	運転室長へ報告するとともにページングにて所内放送し、全運転員に処置を指示する。	事故一斉放送の動作を確認する。
3	全　員	原子炉トリップ、タービントリップおよび発電機トリップを確認し、その処置を行う。	(1) 「D－1 原子炉トリップ」「C－1 タービントリップ」および「B－1 発電機トリップ」の項参照 (2) 自動トリップしない場合は、当直課長の指示により手動でトリップさせる。
4	班長 制御員 主機員	安全注入信号の発信および安全注入信号による次の動作を確認する。 (1) 非安全防護母線 (4－2A·2B、3－2A および 3－2B) の電源分離動作	自動動作不能時は、当直課長の指示により手動にて機器の「起動」「停止」および弁の「開」「閉」を行う。 母線連絡しゃ断器 (4－2ACT·2BDT) は投入ロックされる。
		(2) 4－2C·2D 母線および 3－2C·2D 母線の各機器のトリップ	(1) 6.6 KV 母線でトリップする機器 a. B 海水ポンプ b. D　〃 (2) 440 V 母線でトリップする機器 a. A 加圧器ヒータ (制御用) b. B·C 加圧器ヒータ (バックアップ) c. A·B·C 充てんポンプ d. C 非放射性機器冷却水ポンプ
		(3) 安全注入信号により瞬時に動作する機器の動作	付表－1 参照
		(4) ディーゼル発電機の起動	(1) 外部電源が健全でも安全注入信号をリセットするまでは、運転を継続する。 (2) 自動起動しなければ、当直課長の指示で手動起動を試みる。

順序	担　当	操　作	注　意
5	制御員 主機員	主給水が隔離されたことを確認する。 (1) 主給水ポンプ全台トリップ	(1) 付表－4 参照 (2) 「全閉」しなければ手動で閉じる。
		(2) 主給水制御弁、同バイパス制御弁「閉」	
6	制御員	格納容器隔離信号が動作し、全格納容器隔離弁が閉じたことを確認する。	(1) 付表－2 参照 (2) 原子炉盤「格納容器隔離」警報発信 (3) モニタライト「明灯」を確認する。
7	制御員	格納容器換気系隔離信号が動作し、換気系が隔離されたことを確認する。	(1) 付表－3 参照 (2) 原子炉盤「格納容器換気系隔離」警報発信
8	全　員	4－2C·2D の母線の電圧確立を条件に安全注入シーケンスがあらかじめ設定された通りに動作していることを確認する。 (1) 自動起動しない機器があれば、当直課長の指示で手動起動を試みる。	(1) 外部電源喪失時は、2台のディーゼル発電機が起動し 4－2AEG·2BEG が投入される。 (2) 外部電源喪失時にディーゼル発電機が1台しか起動しなかった場合、起動しなかった方の母線は停電となり、機器のシーケンシャル起動はロックされる。 (3) 安全注入シーケンスは付表－1 参照
		(2) 自動起動した機器については、所定の機能が達成されるまではその運転を継続する。	
9	制御員	中央制御室隔離信号が動作し、中央制御室換気空調装置の外気取入系が隔離されたことおよび非常用フィルタファンの動作を確認する。	(1) 付表－6 参照 (2) 通常時、外気選択スイッチは「外気零」位置 (3) 換気空調盤「中央制御室隔離」警報発信

順序	担　当	操　作	注　意
10	制御員	(1) 「格納容器圧力異常高」(0.80 kg/cm²g) になれば、両方の主蒸気隔離弁が閉じることを確認する。 自動動作条件になっても作動しなかった場合は、当直課長の指示で手動主蒸気隔離を行う。	付表－4 参照
		(2) 「安全注入信号」と「主蒸気流量高＋Tavg 異常低」または「安全注入信号」と「主蒸気流量異常高」のどちらかの場合、事故のあったループの主蒸気隔離弁が閉じることを確認する。	(1) 格納容器圧力計　PI－951～956 主蒸気流量計　FI－414·415·424·425 Tavg 計　TI－410D·411D 420D·421D (2) 原子炉盤「主蒸気隔離」警報発信
11	制御員	「格納容器圧力異常高」(1.205 kg/cm²g) になれば、2A·2B 内部スプレポンプが起動し内部スプレが行われることを確認する。 また、内部スプレ信号による隔離弁の動作を確認する。 自動動作条件になっても作動しなかった場合は、当直課長の指示で手動内部スプレを行う。	(1) 付表－5 参照 (2) 内部スプレポンプは安全注入信号発信後、49 秒の時限と「格納容器圧力異常高」との一致で起動する。 また、A·B 冷却材ポンプ放射性機器冷却水出入口弁 MOV－827A～F も閉じる。 (3) 格納容器圧力計　PI－951～956 (4) 内部スプレ流量計 FI－946A·B (5) 原子炉盤「内部スプレ動作」警報発信
12	制御員	低圧および高圧安全注入水があることを流量計、および流量記録計で確認する。 注入されていない場合は手動で注入する。	(1) 安全注入流量計 (高圧)、記録計 FI－924～927·929·930 FR－929 余熱除去系流量計 (低圧)、記録計 FI－606·607、FR－606 (2) 少なくとも低圧、高圧注入とも1トレンが確保されている。
13	制御員	補助給水が蒸気発生器に給水されていることを確認する。 給水されていない場合は手動で給水する。	(1) 補助給水流量計、記録計 FI－2231·2233、FR－2231 (2) 少なくとも1トレンの補助給水が確保されている。

順序	担当	操作	注意
		(13) 余熱除去系流量指示計、記録計	FI−606・607、FR−606
		(14) 安全注入流量指示計、記録計	FI−924～927・929・930 FR−929
		(15) 内部スプレ流量指示計	FI−946A・B
		(16) 補助給水流量指示計、記録計	FI−2231・2233、FR−2231
		(17) 放射線モニタ指示計、記録計	R−2・7・11・12・15・19・野外モニタ
		(18) 炉心出口サーモカップル温度計	
2	制御員	すべての加圧器スプレ弁および加圧器逃がし弁が閉じていることを確認する。 閉じていない場合は手動で閉じる。	
3	全員	自動起動、停止した機器の操作スイッチを運転状態に合わせる。	格納容器循環ファン系フィルタ切替スイッチを「開」とする。
4	制御員	アニュラス内部が負圧に維持されていることを確認する。	アニュラス圧力計 PI−5010
5	当直課長	各計器の指示および警報動作の状況から事故の内容を判定する。	(1) 1つのパラメータにより決定せず総合的に判定する。 (2) 添付の参考資料−1「事故の特徴および復旧操作の目的」、参考資料−2「事故内容の判定」参照
6	当直課長	事故内容に従って処置するよう全運転員に指示する。	
7	全員	以後の操作は事故の内容によりそれぞれ 「D−2−(1)−a 冷却材喪失(大破断)」 「D−2−(1)−b 冷却材喪失(小破断)」 「D−2−(1)−d 2次側水喪失」 「D−2−(1)−f 蒸気発生器細管破損(安全注入動作)」 「D−2−(3) 安全注入誤動作時の復旧」 に従く。	

順序	担当	操作	注意
14	制御員	原子炉冷却系統の圧力がアキュームレータ圧力以下になれば、アキュームレータからの放出が始まることを確認する。	(1) 約50 kg/cm²g以下で注入が始まる。 (2) 原子炉冷却系統圧力計 PI−400 アキュームレータ圧力計 PI−934・935・938・939 アキュームレータ水位計 LI−934・935・937・939
(引続いて行う操作)			
1	制御員	原子炉冷却系統の状況を把握するために、各計器の指示および警報動作を確認し、当直課長に報告する。	次の計器を重点的に確認する。
		(1) 加圧器圧力指示計、記録計	PI−455～458、PR−455
		(2) 加圧器水位指示計、記録計	LI−465・466・467、LR−465
		(3) 原子炉冷却系統圧力指示計	PI−400
		(4) 高温側冷却材温度、飽和温度記録計 低温側冷却材温度記録計	TR−425 TR−415
		(5) A蒸気発生器圧力指示計 B 〃	PI−414・415・416 PI−424・425・426
		(6) A蒸気発生器水位指示計 B 〃 蒸気発生器水位記録計	LI−410・411・412・414 LI−420・421・422・424 LR−413、FR−418・428
		(7) 格納容器圧力指示計	PI−951～957
		(8) 燃料取換用水タンク水位指示計	LI−690
		(9) ほう酸タンク水位指示計	LI−118A・B
		(10) 格納容器サンプB水位指示計	LI−1009
		(11) 格納容器再循環サンプ水位指示計	LI−642・643
		(12) 復水タンク水位指示計	LI−2060

D−2−(1)−e 蒸気発生器細管もれ(小リークの場合)

原因	蒸気発生器細管損傷
徴候	1. 復水器空気抽出器ガスモニタ(R−15)の指示上昇 2. 蒸気発生器ブローダウン水モニタ(R−19)の指示上昇 (R−15・19のどちらが先に上昇するかは一概に判断できない。また、指示値が急に上昇する場合、あるいは非常にゆっくり上昇する場合があるので注意を要する。) 3. 加圧器水位、圧力の低下 4. 充てん流量の増加 5. 体積制御タンク自動補給の増加

処置

順序	担当	操作	注意
		(ただちに行う操作)	
1	制御員	復水器空気抽出器ガスモニタ(R−15)または蒸気発生器ブローダウン水モニタ(R−19)の指示値に変化が認められれば、当直課長に報告する。	
2	当直課長	関係各所に連絡する。	R−15・19の指示が上昇傾向、あるいは原因不明の不規則な動作をした時点から、放射線管理課、電気保修課計測係と充分連絡をとり原因の究明に努める。
3	制御員	A・B−S/Gサンプル隔離弁AOV−1923A・Bを交互に開閉し、どちらの蒸気発生器細管に漏えいが生じているか、S/Gブローダウン水モニタ(R−19)の指示により確認する。	(1) A・B−S/G 2次側水の試料採取によっても左記のことは確認できるが、放射線管理課での測定とは別にプロセスモニタによっても確認し、漏えいS/Gの発見に努める。 (2) 放射線管理課と充分連絡をとる。

順序	担当	操作	注意
4	当直課長	蒸気発生器細管の漏えいが確実であると判断されれば、2次系の汚染防止操作を行うよう指示する。	
	主機員	(1) A(B)-S/Gブローダウン流量調整弁V−1937A、V−1947A(V−1937B、V−1947B)を閉じる。 必要により放出先を海水管側(LCV−1903)から廃液ホールドアップタンク側(V−1943)へ切替える。	(1) 「S/G細管漏えい時弁確認表」参照 (2) 廃液ホールドアップタンク側への切替えは、放射線管理課と連絡をとり、液体廃棄物の量を最少限に押える。
		(2) 2次系冷却水タンク補給水流量計前弁(CW−046)を閉じ、2次系冷却水タンク補給水2次系純水元弁(DW−012)を開く。	「S/G細管漏えい時弁確認表」参照
		(3) 1・2(3)u補助蒸気連絡弁AS−194(AS−082)を開く。	(1) 補助蒸気系統が汚染されていないことを確認する。 (2) 「S/G細管漏えい時弁確認表」参照 (3) 1uからの補助蒸気供給ができない時、3u連絡弁(AS−082)を開く。
	補機員	(4) 補助ボイラを起動する。	補助蒸気量に余裕がない場合に起動する。
	主機員 補機員	(5) スチームコンバータを停止する。	停止前に補助ボイラが運転されているか、あるいは1u(3u)から補助蒸気の供給が可能な状態になっている。
	制御員 補機員	(6) タービンサンプ水モニタ(R−30)の指示に異常がないか確認するとともに、タービン室サンプポンプのスイッチを「自動」から「切」とする。	(1) サンプ水の排水は放射線管理課の連絡によって行うとともに、別途用紙に排水状況を記録する。 (2) 2uタービン室サンプ寸法 2,030 × 2,700 × 2,300 mm 高さ (3) Aポンプ ON−OFF 水位差 600 mm 1回排水量 約 3.3 m³

順序	担当	操作	注意
	制御員	(7) 放水口水モニタ(R−20)の指示に異常がないか確認する。	通常値 500 ～ 800 cpm
	補機員	(8) サンプリングラックの連続サンプル水通水ブロー中のものはすべて停止する。	放射線管理課と充分連絡をとる。
		(9) タービン動補助給水ポンプ起動弁バイパス弁MS−082を閉じる。	漏えいS/G側蒸気元弁が閉じられれば、ウォーミングを再開する。
		(10) 復水器ホットウェル水質監視装置盤のホットウェルサンプリングポンプを停止する。	(1) 4台 (2) Na計出口がタービンサンプ行になっているため。
		(11) S/G水質監視装置のA・B-S/Gブローダウン水サンプル入口手動弁(V−1953A・B)を閉止する。	「S/G細管漏えい時弁確認表」参照
5	制御員	「プロセスモニタ計数率注意」の警報が発信すれば、当直課長に報告するとともに各機器の動作を確認する。	R−15計数率注意設定値 2,000 cpm R−19 〃 400 cpm
	制御員 主機員	(1) 復水器空気抽出器ガスモニタ(R−15)または蒸気発生器ブローダウン水モニタ(R−19)計数率注意動作時は脱気器ベント弁が「大気側」から「復水器側」に、空気抽出ポンプ排気弁が「大気側」から「フィルタ側」に次の順序で自動切替したことを確認する。 a. 脱気器ベント 2RMV−15D(大気側) 「閉」 2RMV−15E(復水器側) 「開」 b. 空気抽出ポンプ排気 2RMV−15B(フィルタ側) 「開」 RMV−15C(ダクト入口) 「開」 2RMV−15A(大気側) 「閉」	(1) R−15またはR−19の指示上昇が確認されれば、状況により脱気器ベント弁および空気抽出ポンプ排気弁は手動で左記の状態とする。 (2) 1号出入管理室排気ファンME−7が1台以上運転中である。

順序	担　当	操　　作	注　　意
	補機員	(2)　空気抽出ポンプ排気弁が切替われば空気抽出ポンプの運転状況を点検する。	モータ電流、温度、ポンプ振動、グランドもれ、その他各部からの空気もれ
	制御員	(3)　補助蒸気復水モニタ(R－26)、野外モニタの指示に異常がないか確認する。	
	制御員 主機員	(4)　蒸気発生器ブローダウン水モニタ(R－19)計数率注意動作時は、脱気器ベント弁、空気抽出ポンプ排気が切替わるとともに、下記弁が自動で「全開」したことを確認する。 a. A-S/Gブローダウン隔離弁 AOV－1936A　「開」 b. B-SG/ブローダウン隔離弁 AOV－1936B　「開」 c. A-S/Gブローダウンサンプル隔離弁 AOV－1923A　「開」 d. B-S/Gブローダウンサンプル隔離弁 AOV－1923B　「開」 e. S/Gブローダウンタンク水位制御弁 LCV－1903　「閉」	(1)　R－19の指示上昇が確認されれば状況により左記弁は手動で左記状態とする。 (2)　「S/G細管漏えい時弁確認表」参照
	補機員	(5)　蒸気発生器ブローダウン水モニタ(R－19)計数率注意動作時は、S/G水質監視装置サンプリング排水弁が自動切替したことを確認する。 S/G水質監視装置ドレン切替弁(タービンサンプ側) RCV－019b「開」 S/G水質監視装置ドレン切替弁(放射化学室側) RCV－019a「開」	(1)　R－19計数率注意設定値　400 cpm (2)　R－19の指示上昇が確認されれば状況により左記弁は手動で切替える。

順序	担　当	操　　作	注　　意
6	制御員	「プロセスモニタ計数率高」の警報が発信すれば、当直課長に報告するとともに各機器の動作を確認する。	R－15計数率高設定値　1×10^6 cpm
	制御員 主機員	(1)　復水器空気抽出器ガスモニタ(R－15)計数率高動作時は、空気抽出ポンプの運転モードが「ホールディング」から「リーケージ」に、排気弁が「フィルタ側」から「格納容器側」に、次の順序で自動切替し、脱気器ベント弁が「復水器側」になっていることを確認する。 a. 空気抽出ポンプ運転モード 2RMV－15HA・B・C(大気側)「閉」 2RMV－15IA・B・C(循環側)「閉」 b. 空気抽出ポンプ排気 (a) 2－5901(格納容器側)　「開」 2－5902(　〃　)　「開」 (b) 2RMV－15B(フィルタ側)「閉」 (c) RMV－15C(ダクト入口)「閉」 c. 脱気器ベント弁 2RMV－15D(大気側)　「閉」 2RMV－15E(復水器側)　「開」	格納容器圧力に注意する。 格納容器圧力　PI－951～956 (1)　格納容器圧力高(0.24 kg/cm²g)あるいはいずれかの空気抽出ポンプシール水タンク圧力高(0.20 kg/cm²g)となれば、空気抽出ポンプ排気弁は自動でフィルタ側へ切替わり、リーケージモードからホールディングモードに切替わる。 (2)　空気抽出ポンプシール水タンク圧力が0.21 kg/cm²gとなれば、3秒後にその空気抽出ポンプはトリップする。
	補機員	(2)　復水器空気抽出器ガスモニタ(R－15)計数率高動作時には、空気抽出ポンプリーケージモード運転状況を点検する。 2RMV－15HA・B・C(大気側)　「閉」 2RMV－15IA・B・C(循環側)　「開」	(1)　モータ電流、温度、ポンプ振動、グランドもれ、その他各部からの空気もれ等点検する。 (2)　空気抽出ポンプシール水タンク圧力高(0.20 kg/cm²g)となれば「リーケージモード」から「ホールディングモード」運転となる。 (3)　空気抽出ポンプシール水タンク圧力が0.21 kg/cm²gとなれば、3秒後にその空気抽出ポンプはトリップする。

順序	担当	操作	注意
	制御員	(3) 加圧器水位圧力および充てんポンプ速度に注意し、必要に応じ手動運転中の充てんポンプ速度を上昇し、必要であれば予備充てんポンプを追加起動する。	(1) 冷却材ポンプラビリンスシール差圧を調整する。 107～148 mmH$_2$O (2) 加圧器水位、圧力 LI－465・466・467 PI－455・456・457・458 (3) 充てんポンプ速度 HSC－465A・B・C
	補機員	(4) 充てんポンプ運転状況を点検する。	
	制御員	(5) 蒸気発生器の給水流量の変化に注意し、漏えいS/Gの発見に努める。	
〔引続いて行う操作〕			
			A・B-S/Gどちらかでのもれが確定した場合(両方のもれが生じることも考えられる。)
1	当直課長	中央給電指令所に負荷降下、解列の連絡を行う。	
2	全員	当直課長の指示によってユニット停止操作を行う。 (1) 復水器空気抽出器ガスモニタ(R－15)または蒸気発生器ブローダウン水モニタ(R－19)計数率注意動作の場合 a. 負荷降下率 0.5%/分	「I－5 発電機停止」「II－3－(1) タービン停止」「III－3 原子炉停止」の項参照
		(2) 復水器空気抽出器ガスモニタ(R－15)計数率高動作の場合 a. 負荷降下率 5%/分 b. 負荷25%になれば、原子炉手動トリップによりユニット停止を行う。	(1) 「B－1 発電機トリップ」「C－1 タービントリップ」「D－1 原子炉トリップ」の項参照 (2) 主蒸気安全弁および主蒸気逃がし弁を動作させてはならない。 (3) 脱気器加熱蒸気は通気しない。 (4) 復水ポンプ入口ストレーナ逆洗等ブローを行う操作は行わない。

順序	担当	操作	注意
3	主機員 補機員	漏えいS/Gが判定されれば、その方のタービン動補助給水ポンプ蒸気元弁を閉じウォーミングを再開する。	
4	主機員	グランド蒸気を主蒸気から補助蒸気に切替える。	
5	制御員	解列後ただちに漏えいS/G側の主蒸気隔離弁を閉じる。	(1) 「S/G細管漏えい時弁確認表」参照 (2) 漏えい側S/G水位は可能な範囲に低く保持し、液体廃棄物量を少なくするとともに、漏えい量増大に備える。
6	補機員	(1) 解列後、脱気器高水位調整弁入口弁CW－026・083を閉じる。	「S/G細管漏えい時弁確認表」参照
		(2) 薬注装置補給水の復水系統元弁CW－063を閉じる。	
		(3) スチームコンバータ補給水弁(復水側)AS－107を閉じる。	
7	主機員 補機員	給水ポンプが停止されればただちに隔離する。	(1) 隔離は機器操作票によって行う。(ベントブローは実施しない。) (2) 2次系水の漏えいをできるだけ抑える。
8	全員	冷態停止操作を開始する。	(1) 「温態停止から冷態停止」の項参照 (2) 漏えいS/G側冷却材ポンプも連続運転する。 (3) 必要により緊急濃縮を使用する。 (4) RCS脱ガス操作を行う。
	制御員	(1) クールダウンは健全S/G側の主蒸気ダンプ弁によって行う。	(1) 原則としてA・B主蒸気逃がし弁は使用してはならない。 (2) ダンプ弁が使用できない場合は、健全系統の主蒸気逃がし弁を使用する。

順序	担　当	操　　作	注　　意
	制御員	(2)　A・B主蒸気逃がし弁制御器 PC－416 C・426Cを「手動閉」とする。	「S/G細管漏えい時弁確認表」参照
		(3)　細管漏えい量が大きく、体積制御タンク水位維持困難な時は、非常用ほう酸水補給弁 LCV－100Bを使用する。	体積制御タンク水位計 LI－100・103
		(4)　加圧器水位が充てんポンプ全出力運転でも維持困難な時は、高圧注入ポンプを必要に応じて運転する。	原子炉冷却材系統の圧力が約 105 kg/cm²g以上の時は、高圧注入ポンプを運転しても原子炉冷却材系統に注入できない。 加圧器水位計 LI－465・466・467 原子炉冷却系統圧力計 PI－400
		(5)　漏えいS/G側の2次側圧力が隔離されたため上昇し、安全弁が動作する恐れがある場合には、隔離S/G側の主蒸気隔離弁、あるいは主蒸気隔離バイパス弁および主蒸気ダンプ弁を開き減圧する。	(1)　減圧は必要最少量とする。 (2)　RHRS使用開始までは主蒸気ダンプ弁制御器は1台のため、隔離側S/G主蒸気ダンプ弁も開いている。
		(6)　クールダウンが余熱除去系統に切替われば、主蒸気ダンプ弁を閉じる。	
		(7)　健全S/G側の主蒸気隔離弁を閉じる。	「S/G細管漏えい時弁確認表」参照
9	主機員 補機員	クールダウンが余熱除去系統に切替わり、主蒸気ダンプ弁を使用しなくなれば復水器の真空を破壊する。	(1)　脱気器ベント切替スイッチを「自動」→「復水器側」とし、脱気器空気復水器入口弁(EA－202)を閉じる。 (2)　グランド蒸気を停止すれば復水ポンプも全台停止とする。 (3)　循環水ポンプは連続運転とする。
10	補機員	廃液ホールドアップタンクに受入余裕を持たせるため、必要に応じて1u側への移送あるいは廃液蒸発装置の運転を始める。	補助蒸気量に余裕のない場合は、運転をさし控える。

順序	担　当	操　　作	注　　意
11	当直課長	汚染拡大防止対策を放射線管理課へ依頼するとともに、主機員、補機員に汚染状況の把握を指示する。	
12	補機員	2次側漏えいによる床面の水たまり箇所をチョーク等によってマーキングする。	マーキング箇所については別途一覧表を作成し、放射線管理課に提出し、汚染サーベイを依頼する。

別紙－1

S/G 細管漏えい事故時チェック項目

No.	操　作　内　容	実施日時・氏名
1	関係各所への連絡 (運転室長他)	
2	空気抽出ポンプ排気切替確認「大気」→「フィルタ」あるいは「フィルタ」→「格納容器」	
3	脱気器ベント切替確認「大気」→「復水器」	
4	補助蒸気ドレンモニタ、野外モニタ、放水口水モニタ確認	
5	タービン室サンプポンプスイッチ「自動」→「切」	
6	S/G ブローの停止、ブローダウンタンク排水切替「海水側」→「WHUT」	
7	2次系冷却水タンク補給水切替「復水」→「2次系純水」	
8	薬注装置補給水の復水系統元弁 CW－063 を閉じる。	
9	1・2(3)u 補助蒸気連絡 (弁確認表参照)	
10	スチームコンバータ停止、S/C 補給水「復水」→「2次系純水」	
11	補助ボイラ起動	
12	S/G 水質監視盤サンプル水排水「2次系」→「1次系」切替	
13	ホットウェルサンプリングポンプ停止 (4台)	
14	2次系水漏えい箇所マーキング (2階面以上)	
15	2次系水漏えい箇所マーキング (1階面)	
16	漏えい S/G 側隔離 (弁確認表参照)	
17	A・B・(C) 部分復水循環ポンプを停止し、部分復水脱塩塔を隔離する。 (弁確認表参照)	

S/G 細管漏えい時弁確認表

○「開」　×「閉」　△開度調整

弁番号	弁名称	運転中	S/G 漏えい時	解列後	確認	備考
V－2021	A 主蒸気管ドレントラップ元弁	○	○	×		A-S/G 漏えい時閉じる。
MS－069	タービン動補助給水ポンプ蒸気元弁	○	○	×		
V－2118	A 主蒸気ヘッダドレントラップ元弁	○	○	×		
V－2001	A 主蒸気隔離弁	○	○	×		
V－2125	A 主蒸気隔離弁バイパス弁	×	×	×		
V－2211	A-S/G 主給水止弁	○	○	×		
V－2229	A-S/G 補助給水入口弁	○	○	×		
MOV－2008	A 主蒸気逃がし弁入口弁	○	○	×		
PC－416C	A 主蒸気逃がし弁制御器	自動	自動	手動 ×		
V－2120	B 主蒸気管ドレントラップ元弁	○	○	×		B-S/G 漏えい時閉じる。
MS－870	タービン動補助給水ポンプ蒸気元弁	○	○	×		
V－2042	B 主蒸気ヘッダドレントラップ元弁	○	○	×		
V－2002	B 主蒸気隔離弁	○	○	×		
V－2126	B 主蒸気隔離弁バイパス弁	×	×	×		
V－2228	B-S/G 主給水止弁	○	○	×		
V－2230	B-S/G 補助給水入口弁	○	○	×		
MOV－2093	B 主蒸気逃がし弁入口弁	○	○	×		
PC－426C	B 主蒸気逃がし弁制御器	自動	自動	手動 ×		
AOV－1936A	A-S/G ブローダウン隔離弁	○	×	×		R－19「注意」で自動閉止
V－1937A	A-S/G ブローダウン流量調整弁	×	×	×		
V－1947A	A- 〃	△	×	×		
AOV－1923A	A-S/G ブローダウンサンプル隔離弁	○	×	×		R－19「注意」で自動閉止
V－1927A	A-S/G 電導度計セル入口弁	○	×	×		
V－1931A	A-S/G 放射線モニタ入口弁	○	×	×		
AOV－1936B	B-S/G ブローダウン隔離弁	○	×	×		R－19「注意」で自動閉止
V－1937B	B-S/G ブローダウン流量調整弁	×	×	×		
V－1947B	B 〃	△	×	×		
AOV－1923B	B-S/G ブローダウンサンプル隔離弁	○	×	×		R－19「注意」で自動閉止
V－1927B	B-S/G 電導度計セル入口弁	×	×	×		
V－1931B	B-S/G 放射線モニタ入口弁	×	×	×		
LCV－1903	S/G ブローダウンタンク水位制御弁	○	×	×		R－19「注意」で自動閉止
V－1956	S/G ブローダウンタンク出口手動弁 (海水側)	○	×	×		

弁番号	弁名称	運転中	S/G漏えい時	解列後	確認	備考
V−1943	S/Gブローダウンタンク出口手動弁 (WHUT側)	×	○	○		必要により
V−1938	S/Gブローダウンタンク冷却用原水入口弁	○	×	×		
2RMV−15D	脱気器ベント弁(大気側)	○	×	×		R−15「注意」または R−19「注意」で自動切替
2RMV−15E	脱気器ベント弁(復水器側)	×	○	○		
2RMV−15A	抽出空気排気弁(大気側)	○	×	×		R−15「高」時自動閉止
2RMV−15B	抽出空気切替弁(排気筒側)	×	○	○		R−15「高」時自動切替
RMV−15C	1u抽出空気ダクト入口弁(排気筒側)	×	○	○		
AOV−5901	復水器排気格納容器入口弁(T/B側)	×	○	○		
AOV−5902	復水器排気格納容器出口弁(C/V側)	×	○	○		
CW−046	2次系冷却水タンク補給水弁(復水側)	○	×	×		
DW−012	2次系冷却水タンク補給水弁(純水側)	×	○	○		
AS−194	1・2u 補助蒸気連絡弁	×	○	○		
AS−082	2・3u 〃	×	○	○		1uからの供給が不能の時
CW−026	脱気器高水位制御弁入口弁(常用)	○	○	×		
CW−083	脱気器高水位制御弁入口弁(非常用)	○	○	×		
CW−063	薬注装置補給水元弁(復水ポンプ出口)	○	×	×		
MS−082	タービン動補助給水ポンプ起動弁バイパス弁	△	×	×		
RCV−019b	S/G水質監視装置ドレン切替弁 (タービンサンプ側)	○	×	×		R−19「注意」で自動切替
RCV−019a	S/G水質監視装置ドレン切替弁 (放射化学室側)	×	○	○		
RMV−15HA	A空気抽出ポンプモーティブエア切替弁(大気側)	○	×	−		R−15「高」で自動切替
RMV−15HB	B空気抽出ポンプモーティブエア切替弁(大気側)	○	×	−		
RMV−15HC	C空気抽出ポンプモーティブエア切替弁(大気側)	○	×	−		
RMV−15IA	A空気抽出ポンプモーティブエア切替弁(循環側)	×	○	−		
RMV−15IB	B空気抽出ポンプモーティブエア切替弁(循環側)	×	○	−		
RMV−15IC	C空気抽出ポンプモーティブエア切替弁(循環側)	×	○	−		
DW−07	スチームコンバータ補給水弁(復水)	○	×	×		

弁番号	弁名称	運転中	S/G漏えい時	解列後	確認	備考
DW−05	スチームコンバータ補給水弁 (2次系純水)	×	○	○		
V−1953A	S/G水質監視装置行A-S/G ブローダウン水サンプル入口弁	○	×	×		
V−1953B	S/G水質監視装置行B-S/G ブローダウン水サンプル入口弁	○	×	×		
CW−231A	A部分復水脱塩塔入口弁(復水側)	○	×	×		
CW−231B	B 〃 (〃)	○	×	×		
CW−234A	A部分復水脱塩塔出口弁(復水側)	○	×	×		
CW−234B	B 〃 (〃)	○	×	×		

D－2－(1)－f　蒸気発生器細管破損(安全注入動作の場合)

原因	蒸気発生器細管破損 「D－2－(1) 安全注入自動動作」の項参照
徴候	1. 徴候および判定については「D－2－(1) 安全注入自動動作」の項参照 2. 蒸気発生器細管破損時の独特の徴候 (1) 冷却材平均温度が正常で加圧器圧力低下、加圧器水位低下 (2) 充てん流量増加 (3) 蒸気流量－給水流量偏差発生 (FS＞FW) (4) 復水器空気抽出器ガスモニタ (R－15)指示上昇 (5) 蒸気発生器ブローダウン水モニタ (R－19)指示上昇

処　置

順序	担当	操作	注意
〔ただちに行う操作〕			
			「D－2－(1) 安全注入自動動作」から続く。
1	当直課長	全運転直員に蒸気発生器細管破損時の処置を行うよう指示する。	
2	制御員	高圧注入ポンプおよび余熱除去ポンプが起動し、燃料取換用水タンクよりほう酸水が注入されていることを確認する。	(1) 原子炉冷却系統圧力は、最大でも約70 kg/cm²gまでしか低下しないので低圧注入水は入らない。 (2) 安全注入流量計(高圧)、記録計 FI－924～927・929・930 FR－929 余熱除去流量計(低圧)、記録計 FI－606・607、FR－606
3	制御員	原子炉冷却系統の無負荷温度が保持できれば、蒸気発生器の最低水位を保持するよう、必要に応じて補助給水流量を調整する。	補助給水流量計、記録計 FI－2231・2233、FR－2231 蒸気発生器水位計 LI－410～412・414 LI－420～422・424

順序	担当	操作	注意
4	制御員 主機員	復水器空気抽出器ガスモニタ (R－15) または蒸気発生器ブローダウン水モニタ (R－19) の「計数率注意」および「計数率高」による脱気器ベント弁、空気抽出ポンプ排気弁の切替動作をしないので、下記操作を実施する。 (1) 脱気器ベントRMV－15D(大気側)手動ハンドルにより閉じる。	(1) CWP 2台停止により脱気器ベント切替えせず。 (2) RMV－15A・B電源喪失により、空気抽出ポンプ排気切替はしない。 (3) 空気抽出ポンプ電源喪失により停止する。 (4) 「D－2－(1)－e 蒸気発生器細管もれ(小リークの場合)」の「S/G細管漏えい時弁確認表」参照
		(2) RMV－15A(大気側)手動ハンドルにより閉じ、電源を「開放」する。	
		(3) RMV－15B(フィルタ側)「閉」を確認し、電源を「開放」する。	
		(4) RMV－15C(ダクト入口)「閉」を確認し、電源を「開放」する。	
		(5) AOV－5901・5902のDC電源を「開放」し、強制閉止する。	
5	制御員 補機員	蒸気発生器ブローダウン水モニタ「計数率注意」動作時は、下記弁が自動で動作したことを確認する。 (1) S/Gブローダウンタンク水位制御弁 LCV－1903 「閉」	「D－2－(1)－c蒸気発生器細管もれ(小リークの場合)」の「S/G細管漏えい時弁確認表」参照
		(2) S/G水質監視装置ドレン切替弁(タービンサンプ側) RCV－019b 「閉」	
		(3) S/G水質監視装置ドレン切替弁(放射化学室側) RCV－019a 「閉」	
〔引続いて行う操作〕			
1	制御員	蒸気発生器の水位、圧力の異常な上昇から破損した蒸気発生器を判断し、当直課長に報告する。	補助給水を減少または停止しても、破損した蒸気発生器水位は異常に上昇する。

順序	担　当	操　　作	注　　意
2	制御員	健全な蒸気発生器の補助給水量を調整して、通常水位に回復、維持する。 なお、健全な蒸気発生器への補助給水を確保するため、必要に応じて電動補助給水ポンプ出口連絡電動弁 FW－064 を開く。	蒸気発生器水位計、記録計 LI－410～412・414、FR－418 LI－420～422・424、FR－428 LI－413
3	制御員	当直課長の指示で破損した蒸気発生器を隔離する。 (1)　主給水、補助給水の停止	「D－2－(1)－e 蒸気発生器細管もれ(小リークの場合)」の「S/G 細管漏えい時弁確認表」参照
		(2)　主蒸気隔離弁およびバイパス弁の閉止	
		(3)　タービン動補助給水ポンプ蒸気元弁の閉止	
4	制御員	破損蒸気発生器が判定され隔離された後、健全側主蒸気逃がし弁を使用して、健全ループの高温側冷却材温度を 258.2℃(無負荷温度－27.8℃) 以下を目標に原子炉冷却系統を急速に冷却する。	(1)　最大許容冷却率を越えても止むを得ない。 (参考) 電力共同研究所解析結果では約 330℃/h である。 (2)　高温側冷却材/飽和温度記録計 TR－425
5	制御員	当直課長の指示で格納容器隔離信号をリセットした後、計器用空気格納容器隔離弁を開く。	他の隔離弁が保持されていることを確認する。
6	制御員	原子炉冷却系統の健全側ループの高温側冷却材温度が約 280℃ まで冷却されたら、すべての充てんポンプを起動して、充てん流量を再確立する。	(1)　高温側冷却材/飽和温度記録計 TR－425 (2)　安全注入停止条件を早く達成するため、抽出を再開してはならない。 (3)　体積制御タンクのカバーガスを N_2 に切替えるよう補機員に指示する。

順序	担　当	操　　作	注　　意
7	制御員	原子炉冷却系統への充てん流量が確認されたら、ただちに1台の加圧器逃がし弁を使用して、原子炉冷却系統圧力を破損蒸気発生器2次側圧力に等しくなるように減圧を開始する。	(1)　加圧器逃がしタンクの温度、水位圧力に注意する。 加圧器逃がしタンク温度、水位、圧力計 TI－470、LI－470、PI－470 (2)　原子炉冷却系統圧力計 PI－400 蒸気発生器圧力計 PI－414～416・424～426 充てん水流量計 FI－110
8	制御員	原子炉冷却系統を減圧中、下記条件で加圧器逃がし弁を閉じて減圧を停止する。 (1)　加圧器水位が、加圧器水位高、原子炉トリップ設定点(90%)以上に上昇した。	
		(2)　原子炉冷却系統圧力が、破断蒸気発生器2次側圧力に等しくなった。	
9	制御員	加圧器逃がし弁が確実に閉止できたことを確認する。加圧器逃がしタンクの温度、水位、圧力を監視し、加圧器逃がし弁の漏えいが確認されたら、加圧器逃がし弁元弁を閉止する。	(1)　加圧器逃がしタンクへは、冷却材ポンプ封水戻り系統の安全弁からも流入している。 (2)　加圧器水位計、記録計 LI－465～467、LR－465
10	全　員	蒸気発生器細管もれ発生時の処置を行う。	「D－2－(1)－e 蒸気発生器細管もれ(小リークの場合)」の項参照
	制御員	(1)　野外モニタ指示に異常がないか確認する。	
	主機員	(2)　A(B)-S/G ブロー流量調整弁 V－1937A(B)、V－1947A(B) を開じる。必要により放出先を海水管側(LCV－1903)から廃液ホールドアップタンク側(V－1943)へ切替える。	(1)　「D－2－(1)－e 蒸気発生器細管もれ(小リークの場合)」の「S/G 細管漏えい時弁確認表」参照 (2)　廃液ホールドアップタンク側への切替えは放射線管理課と連絡をとり液体廃棄物の量を最少限に抑える。

順序	担 当	操 作	注 意
	主機員	(3) 2次系冷却水タンク補給水流量計前弁(CW−046)を閉じ、2次系冷却水タンク補給水2次系純水元弁(DW−012)を開く。	「D−2−(1)−e 蒸気発生器細管もれ(小リークの場合)」の「S/G細管漏えい時弁確認表」参照
		(4) 1・2(3)u 補助蒸気連絡弁 AS−194(082)を開く。	(1) 補助蒸気系統が汚染されていないことを確認する。 (2) 「D−2−(1)−e蒸気発生器細管もれ(小リークの場合)」の「S/G細管漏えい時弁確認表」参照 (3) 1uからの補助蒸気供給ができない時は、3u連絡弁(AS−082)を開く。
	補機員	(5) 補助ボイラを起動する。	補助蒸気量に余裕がない場合に起動する。
	主機員 補機員	(6) スチームコンバータを停止する。	
	補機員	(7) タービン室サンプポンプのスイッチを「自動」から「切」とし、出口をAPIから放水口に切替えるとともに、タービンサンプ水モニタ(R−30)指示に異常がないか確認する。	(1) サンプ水の排水は放射線管理課の連絡によって行うとともに、別途用紙に排水状況を記録する。 2uタービン室サンプ寸法 (高さ) 2,030 × 2,700 × 2,300 mm Aポンプ使用時 ON−OFF水位差 600 mm 排水量 ≃ 3.3 m^3 (2) タービン室サンプポンプの運転は所内コントロールセンタの復旧が必要
		(8) 放水口水モニタ(R−20)指示に異常がないか確認する。	通常値 500～800 cpm
		(9) サンプリングラックの連続サンプル水通水ブロー中のものはすべて停止する。	放射線管理課と充分連絡をとる。

順序	担 当	操 作	注 意
	主機員	(10) グランド蒸気を主蒸気から補助蒸気に切替える。	
11	制御員	安全注入シーケンスが完了し、下記の条件がすべて満足された場合には、当直課長の指示で安全注入信号をリセットし、安全注入機器を順次1系列ずつ手動停止する。 〔安全注入停止条件〕 (1) 加圧器逃がし弁閉止の確認後、原子炉冷却系統圧力が少なくとも5 kg/cm^2g 上昇した。	(1) 加圧器水位だけでなく、圧力や他の主要なパラメータに基づいて分析し、プラントの状態を判断する。 (2) 原子炉容器安全注入弁 MOV−1855 A・B「全開」がシーケンスの完了を示す。 (3) 安全注入信号は発信100秒後にはリセット可能である。 (4) バーミッシブ表示灯「安全注入リセット」点灯確認 (5) 格納容器隔離信号、格納容器換気隔離信号が保持されていることを確認する。 原子炉冷却系統圧力計 PI−400
		(2) 加圧器水位が水位計の範囲内に回復した。	加圧器水位計、記録計 LI−465～467、LR−465
		(3) 原子炉冷却系統健全側ループはサブクール状態である。 (サブクール度は20℃以上とする。)	(1) 原子炉冷却系統圧力および高温側冷却材/飽和温度記録計の指示値により確認する。 (2) 原子炉冷却系統圧力計 PI−400 高温側冷却材/飽和温度記録計 TR−425 (3) 図−3「RCS飽和温度−圧力曲線」参照

順序	担 当	操 作	注 意
		〔安全注入再起動条件〕 安全注入系の停止に当っては停止後、下記の(1)～(2)条件のいずれか満たされなくなった場合には、手動で安全注入系を再起動させる。 (1) 加圧器水位が20％を維持できない。 （ただし、加圧器水位が0％以上であり、充分回復傾向にある場合は除く。）	
		(2) 原子炉冷却系統のサブクール度が10℃以下となった。	
		(3) 原子炉冷却系統の圧力が余熱除去ポンプの締切圧力(10 kg/cm²g)以上あれば、余熱除去系統の過熱を防止するため余熱除去ポンプを停止する。	(1) ミニマムフローによる運転は1時間以内とする。 (2) 原子炉冷却系統圧力計 PI－400
		(4) 高圧注入系統の弁を順次閉じていき、高圧注入ポンプを全台停止する。	高圧注入ポンプを停止しても、順序11項の〔安全注入停止条件〕を満足する。
		(5) その他、当直課長の指示により状況に応じて運転機器の追加、減少等を行う。	
12	制御員	抽出系統を確立して、適時充てん抽出量を調整する。	(1) 冷却材補給水制御を2,000 ppmほう素濃度に設定する。 (2) 加圧器水位を運転範囲に維持する。
13	制御員	冷却材ポンプの封水戻り系統を復旧する。	
14	制御員	冷却材圧力を維持するため、加圧器ヒータを投入する。	
＜外部電源使用可能なとき＞			
1	当直課長	非安全防護母線を復旧し、ディーゼル発電機の停止を指示する。	ディーゼル発電機は無負荷の状態で1時間以上運転しない。

順序	担 当	操 作	注 意
2	班 長 主機員 補機員	非安全防護母線を復旧した後、ディーゼル発電機を停止し、自動待機状態にする。	(1) 「B－3－(1)－1 外部電源喪失」の項参照 (2) ディーゼル発電機停止は1台ずつ実施する。 (3) ほう酸タンクヒータの電源が投入されていることを確認する。
3	当直課長	次の条件が満足できれば、健全な蒸気発生器側の冷却材ポンプの再起動を指示する。 〔冷却材ポンプ再起動条件〕 (1) 冷却材ポンプが運転可能な条件にある。 a. 通常の冷却材ポンプ運転条件が成立している。 b. 原子炉冷却材系統の圧力が「圧力－温度」曲線の制限内である。 c. 加圧器に気相部が生成されている。 d. 格納容器内部スプレが作動していない。	運転操作所則「Ⅲ－13 冷却材ポンプ」の項参照 NPSH要求を満足させる。 加圧器水位計、記録計 LI－465～467、LR－465
		(2) 事象発生直後の激しい過度変化が終わり、原子炉冷却系統の主要パラメータ(温度、圧力および加圧器水位)が安定している。 また、蒸気発生器2次側での除熱が確保されている。	(1) 補助給水系統が正常に作動して、電動補助給水ポンプ設計流量の2台分(120 m³/h)以上で給水されているか、または健全な蒸気発生器の水位が狭域水位計の下端以上であることを確認する。 (2) 主蒸気逃がし弁の機能が確保されていることを確認する。
		(3) 安全注入系停止条件が成立し、安全注入機器が停止している。	
		(4) 再起動によりプラント主要パラメータに過度の変動がないよう、下記の状態を確認する。 a. 加圧器水位は無負荷規定水位(24％)以上、90％以下の範囲にある。	加圧器水位計、記録計 LI－465～467、LR－465

順序	担当	操作	注意
4	制御員	健全な蒸気発生器側の冷却材ポンプを起動する。	振動値が許容値内であることを確認する。
5	主機員 補機員	循環水ポンプ、復水ポンプ、空気抽出ポンプを起動して、復水器の真空を再確立する。	
6	制御員	主蒸気ダンプ弁が使用可能となれば、冷却を主蒸気逃がし弁から主蒸気ダンプ弁に切替える。	
7	当直課長	原子炉冷却系統の圧力、温度が安定すれば、運転操作所則「温態停止から冷態停止」に従って冷却を開始するよう指示する。	
8	制御員	原子炉冷却系統の冷却を開始する。 (1) 原子炉冷却系統のほう素濃度を 2,000 ppmまで濃縮する。	(1) 最大許容冷却率 原子炉冷却系統 55℃/h 加圧器 110℃/h (2) 原子炉冷却系統降圧中、漏えいS/G 2次側圧力に注意し、常に原子炉冷却系統圧力を漏えいS/G-2次側圧力より高めに保持する。 (原子炉冷却系統の希釈防止) (3) 原子炉冷却系統のほう素濃度を適時確認する。 (4) 「D−2−(1)−e 蒸気発生器細管もれ(小リークの場合)」の項参照
		(2) 原子炉冷却系統の冷却は、主蒸気ダンプ弁を使用して、健全側蒸気発生器により行う。	
9	制御員	当直課長の指示で「中央制御室隔離」信号をリセットし、中央制御室空調装置を通常状態に復旧する。	

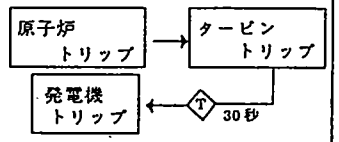
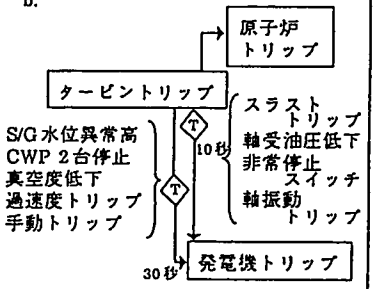
順序	担当	操作	注意
＜外部電源使用不能なとき＞			
1	制御員	健全な蒸気発生器の主蒸気逃がし弁を使用して、原子炉冷却系統を約 27.8℃/h で冷却する。	
2	全員	外部電源が復旧すれば、通常の運転操作によって冷態停止を行う。	外部電源が復旧すれば、D−2−(1)−fの＜外部電源使用可能なとき＞の項による。
3	全員	外部電源が長時間にわたり使用不可能なときは、外部電源喪失時の処置を行う。	「B−3−(1)−1 外部電源喪失」の項参照

Ⅲ－21－(1)　安全注入系統
(高圧注入ポンプ、ほう酸注入タンク、燃料取換用水タンク)

1. 次の各系統が運転中であることを確認する。
   (1) 所内電源系統
   (2) 計器用空気系統
   (3) 窒素供給系統
   (4) 放射性機器冷却水系統
   (5) 非放射性機器冷却水系統

2. 主要確認および注意事項
   (1) 燃料取換用水タンクは規定水位(95％ 1,150 m³)、規定温度(30℃)および規定ほう素濃度(2,000 ppm)以上である。また、ほう素濃度は1回/週サンプリングにより確認する。
   (2) ほう酸タンクは規定ほう素濃度(20,400～22,200 ppmB)の溶液が規定量(82％)以上あり、ほう酸ポンプが待機中である。
   (3) ほう酸タンク温度はタンクヒータが運転され、規定温度(63℃)以上である。
   (4) ディーゼル発電機が待機中である。
   (5) 高圧注入ポンプは定期点検所則により、1回/月以上定期運転を実施する。
   (6) トレースヒータが運転され、配管が規定温度(60℃)以上である。
   (7) 高圧注入ポンプの手動ターニングは行わない。
   (8) 電動弁のうち、通常「開」待機状態の弁は注意札「手動で閉めるときには閉めすぎるな！必要に応じ電動"開"可能を確認せよ！」をよく理解し操作する。
   (9) 当直課長は安全注入系、格納容器冷却系、格納容器隔離が試験等によらず自動起動した場合は、慎重にその原因を究明し、誤動作であることが確認できた時以外は、機能の途中でこれを停止または解除する指示をしてはならない。また、事故の発生により自動起動した場合、当直課長は慎重にその機能が完了したことを確認して、所要の操作を指示するものとする。
   (10) 当直課長は安全注入系、格納容器冷却系、格納容器隔離が自動起動する条件になったにもかかわらず自動起動しない場合は、ただちに手動で機器を起動させなければならない。
   (11) 冷却材温度が93％以上177℃未満のときは、高圧注入ポンプの少なくとも1系列が自動または手動で運転可能な状態とする。
   (12) 冷却材温度が177℃以上のときは、高圧注入ポンプが2系列とも自動起動できる状態とする。
   (13) クールダウンが完了し、燃料取替停止条件を確認後の定検中作業の扱いについては次の通りとする。
      a. 冷却材温度が177℃以上となる場合、高圧注入ポンプが2系列とも自動起動できる状態とする。これに合わせて起変系または予備変系による非常用母線2系統およびディーゼル発電機2台を運転可能状態とする。
      b. 冷却材温度が93℃以上、177℃未満の間は、少なくとも1系列の高圧注入ポンプを中央制御室より手動起動できる状態とする。(自動待機にしてはならない。)
      これに合わせて起変系または予備変系による非常用母線1系統以上およびディーゼル発電機1台以上を運転可能状態とする。

処　置

順序	担　当	操　　作	注　　意
		〔ただちに行う操作〕	
1	班　長	発電機トリップを確認する。	(1) タービンおよび原子炉トリップについては「C－1 タービントリップ」および「D－1 原子炉トリップ」の項参照 (2) 発電機水素緊急放出押ボタンスイッチ(PB2)発電機非常停止スイッチ(5E)操作によるトリップの場合は「A－8－(2) 発電機火災」の項参照 (3) ユニットトリップ時限 a.  b.  (4) 電源制限装置43 W使用時に電制動作すれば、所内単独となる。
2	主機員	タービントリップを確認する。	
3	制御員	原子炉トリップを確認する。	
4	班　長	発電機トリップによるタービンおよび原子炉のトリップを当直課長に報告する。 (以下ユニットトリップと総称する。)	
5	当直課長	ユニットトリップしたことを全運転直員および中央給電指令所に連絡する。	

１３．美浜２号機原子炉停止条件について

平成 3 年 7 月 9 日

美浜２号機原子炉停止条件について

記

1．停止条件

(1) 制御棒位置　CB－A:0　CB－B:0　CB－C:0　CB－D:0
　　S／D：225

(2) ボロン濃度　1283 ppm以上　(S/G全滞の場合 999 ppm以上)

(3) 冷却材温度　冷態

(4) 主要機器の運転条件：充てんラインによるボロン添加が常に可能であること。

2．ボロン濃度算出根拠

(1) 所要ボロン濃度（HZP，NoXe，CB全挿入）		558.8 ppm
(2) 停止反応度	(冷態) -3000.0 (pcm)/-8.3 (pcm/ppm)	361.4 ppm
(3) 温態から冷態移行時の反応度（冷態停止のみ）		363.1 ppm
(4) 停止ボロン濃度　1＋2＋3		1283.3 ppm

3．停止中の注意事項

中性子源領域炉計装指示が急に２倍以上に増加した場合は直ちに安全管理課長に連絡のこと。更に計数率が引続き増加傾向にある時は、緊急ほう酸注入を行うこと。

以　上

備考

2号機の反応度停止余裕は 2%Δρ 以上 あることが条件であることから、1%Δρ 余裕を加え 3%Δρ (3000pcm) の停止余裕を持って停止条件ボロン濃度を決定している。

１４．放射性物質の濃度の測定値（放射線管理課作業日誌（抜粋）含む）

放射線管理課化学係

試料採取日時	試料名	採取者 測定者	計数 (カウント)	測定時間	試料量 (cm³)	計数率	B G	正味計数率	放射能濃度 (Bq/cm³)	検出限界値 (Bq/cm³)	計測器	計数効率 (%)	測定時刻
2/6 9:00				分 秒		cpm cps	cpm cps	cps			Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)		
〃				分 秒		cpm cps	cpm cps	cps			Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)		
2/7 9:00	2A		2336	200 秒	1000	1X.18 cpm cps	1X.X cpm cps	— cps	ND	1.50×10^{-3}	Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	X6.6	
〃	2B		2792	〃	〃	13.96 cpm cps	〃 cpm cps	— cps	ND	〃	Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	〃	
〃	2 S/L		1675	〃	〃	13.38 cpm cps	〃 cpm cps	— cps	ND	〃	Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	〃	
				分 秒		cpm cps	cpm cps	cps			Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)		
				分 秒		cpm cps	cpm cps	cps			Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)		
2/8 9:00	1A		1826	200 秒	1000	1X.13 cpm cps	1X.X cpm cps	— cps	ND	2.89×10^{-3}	Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	X6.6	
〃	1B		2816	〃	〃	14.08 cpm cps	〃 cpm cps	— cps	ND	〃	Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	〃	
				分 秒		cpm cps	cpm cps	cps			Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)		
				分 秒		cpm cps	cpm cps	cps			Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)		
2/9 13:00	2A		3278	200 秒	100	16.39 cpm cps	13.60 cpm cps	2.79 cps	6.00×10^{-3}	2.42×10^{-3}	Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	46.6	
〃	2B		2853	〃	〃	14.27 cpm cps	〃 cpm cps	0.67 cps	ND	〃	Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	〃	
13:45	2A		84940	200 秒	1	423.7 cpm cps	〃 cpm cps	410.1 cps	5.80×10^{-1}		Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)		
〃	2B		1367	60 秒	1	22.78 cpm cps	〃 cpm cps	9.18 cps	1.97×10^{-2}		Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)		
14:00	2A		51155	1 分	0	511.55 cpm cps	cpm cps	511.4 cps	1.10×10^{-2}		Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)		
14:05	2B		7422	60 秒	〃	123.7 cpm cps	cpm cps	110.1 cps	2.36×10^{-1}		Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)		

放射線管理課化学係

試料採取日時	試料名	採取者 測定者	計数 (カウント)	測定時間	試料量 (cm³)	計数率	B G	正味計数率	放射能濃度 (Bq/cm³)	検出限界値 (Bq/cm³)	計測器	計数効率 (%)	測定時刻
16:15	1w ターピンサブ		67412	200 分 秒	800	33.71 cpm cps	13.6 cpm cps	20.1 cps	5.39×10^{-2}	2.42×10^{-3}	Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	X6.6	
16:15	2w ターピンサブ		217941	200 分 秒	1000	139.71 cpm cps	〃 cpm cps	126.11 cps	2.71×10^{-1}		Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	〃	
16:50	2w Dua		109264	200 分 秒	1000	546.32 cpm cps	〃 cpm cps	533.92 cps	1.14×10^{0}		Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	〃	
17:20	H.W		101228	200 分 秒	1000	506.14 cpm cps	〃 cpm cps	493.54 cps	1.06×10^{0}		Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	〃	
15:30	2A		53389	100 分 秒	1	533.89 cpm cps	〃 cpm cps	520.29 cps	9.34×10^{2}		Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	55.7	
15:30	2B		2956	200 分 秒	100	14.78 cpm cps	1.18 cpm cps	1.18 cps	2.12×10^{-2}	2.03^{-2}	Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	〃	
18:15	2w ターピンサブ		29734	200 分 秒	1000	148.67 cpm cps	〃 cpm cps	135.07 cps	2.90×10^{-1}	2.42^{-3}	Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	46.6	
18:40	復水タンク		10288	200 分 秒	1000	51.44 cpm cps	〃 cpm cps	37.84 cps	8.12×10^{-2}	〃	Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	〃	
18:55	2A		32729	100 分 秒	1	327.29 cpm cps	〃 cpm cps	313.69 cps	5.63×10^{2}		Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	55.7	
18:55	2B		6263	200 分 秒	100	31.32 cpm cps	〃 cpm cps	17.72 cps	3.18×10^{-1}	2.03^{-2}	Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	〃	
19:55	2A		26275	100 分 秒	1	262.75 cpm cps	〃 cpm cps	249.15 cps	4.47×10^{2}		Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	〃	
〃	2B		6486	200 分 秒	100	32.43 cpm cps	〃 cpm cps	18.83 cps	3.38×10^{-1}	2.03^{-2}	Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	〃	
20:00	1w ターピンサブ		5479	200 分 秒	1000	27.40 cpm cps	〃 cpm cps	13.80 cps	2.96×10^{-2}	2.42^{-3}	Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	46.6	
21:00	2A		24004	100 分 秒	1	240.09 cpm cps	〃 cpm cps	226.99 cps	4.07×10^{2}		Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	55.7	
〃	2B		6174	200 分 秒	100	30.87 cpm cps	〃 cpm cps	17.27 cps	3.10×10^{-1}		Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	55.7	
21:00	1w R-30		4807	200 分 秒	1000	24.04 cpm cps	〃 cpm cps	10.44 cps	2.29×10^{-2}		Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	46.6	
21:45	2w ターピンサブ		5339	200 分 秒	1000	26.70 cpm cps	〃 cpm cps	13.10 cps	2.81×10^{-2}	2.42^{-3}	Loop,LD-GM NaI,Ge(Li)	46.6	

別表９－２　　水質測定最小項目および頻度（二次系統水）

試料 / 項目	二次系補給水	復水	脱気器入口水	給水	蒸気発生器器内水	復水処理装置出口水
ｐＨ				D	D	
導電率	D					D
酸導電率		D			D	
ナトリウムイオン	W				D	W
塩素イオン	W				3／W	W
硫酸イオン	W				3／W	
モル比	W				☆	W
シリカ	W				W	
溶存酸素		3／W	D (*-1)	3／W (*-2)		
全鉄	W			W		
全銅				W		
全ニッケル				W		
ヒドラジン				D		
全放射能（全γ：Cs^{137}換算）					W	

〔備考〕

D　：日１回

3／W：週３回

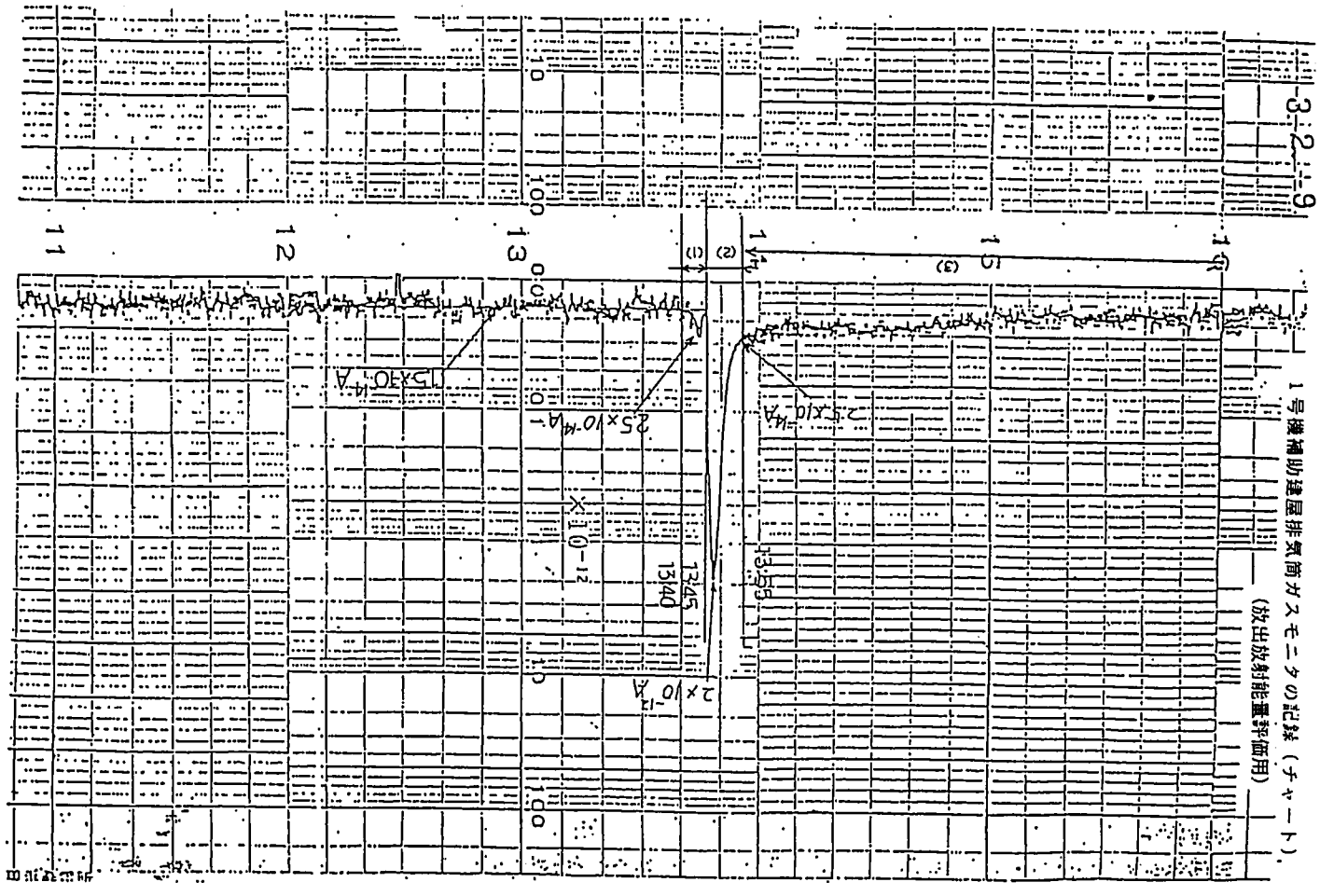
W　：週１回

☆　：蒸気発生器器内水のナトリウムイオン濃度が 0.6 ppb を超えた場合

（＊－１）　大飯１，２号機は除く。

（＊－２）　大飯１，２号機はＤ（日１回）とする。

原子力発電所化学放射化学管理要綱から抜粋



関西電力株式会社
美浜発電所

2／5　10：55　1次冷却材の放射性希ガスの核種分析結果

核種分析結果報告書（希ガス）

1. ユニット：2u　　2. 試料名：LOOP　　3. 測定者：

4. 試料採取日時：1991年　2月　5日　10時　55分　　5. 試料番号：L29120SGAS

6. 試料測定日時：1991年　2月　5日　11時　34分

7. 試料量：5 cm3　　8. 化学収率：26.39 %　　9. 形状：10mlガラスビン

10. 測定時間：1000 秒　　11. 減衰時間：39 分　　12. 検出器：No.5

13. 核種分析結果

核種名	放射能濃度 検出限界値 (Bq/cm3)	濃度誤差 正味計数 (Bq/cm3,cnt)	総計数 BG計数 (cnt)	計数効率 γ一放出率 (%)	ピークチャンネル 減衰補正 (ch,-)
Kr-85m	1.40E+01	6.71E-01	1791	8.470	302.3
	1.60E+00	1055	736	76.100	1.13
Kr-87	2.25E+01	2.44E+00	770	3.440	805.6
	6.62E+00	321	449	48.300	1.54
Kr-88	2.36E+01	1.67E+00	1212	6.660	392.6
	4.25E+00	597	615	35.000	1.22
Xe-133	1.04E+02	2.02E+00	4182	7.400	162.0
	3.17E+00	3538	644	35.000	1.00
Xe-135	1.10E+02	1.49E+00	7504	5.340	499.6
	2.05E+00	6693	811	92.000	1.06
Ar-41	1.33E+03	1.09E+01	15305	1.180	2586.7
	4.28E+00	15208	97	99.120	1.35

全希ガス　濃度合計　　1.05E+03 Bq/cm3
（Xe-133換算）

関西電力株式会社
美浜発電所

2／8　10：10　1次冷却材の放射性よう素の核種分析結果

核種分析結果報告書（Loopヨウ素）

2号機

1. ユニット：2u　　2. 試料名：Loop　　3. 測定者：

4. 試料採取日時：1991年　2月　8日　10時　10分　　5. 試料番号：L2912081LO

6. 試料測定日時：1991年　2月　8日　14時　52分

7. 試料量：100 cm3　　8. 化学収率：65.98 %　　9. 形状：25mmφろ紙，試料皿

10. 測定時間：1000 秒　　11. 減衰時間：282 分　　12. 検出器：No.5

13. 核種分析結果

核種名	放射能濃度 検出限界値 (Bq/cm3)	濃度誤差 正味計数 (Bq/cm3,cnt)	総計数 BG計数 (cnt)	計数効率 γ一放出率 (%)	ピークチャンネル 減衰補正 (ch,-)
I-131	3.88E+00	5.97E-02	17986	4.970	729.2
	1.39E-01	10247	7739	82.000	1.02
I-132	9.14E+01	5.50E-01	41798	2.750	1335.9
	8.06E-01	37346	4452	98.000	4.36
I-133	4.40E+01	1.98E-01	93818	3.440	1061.0
	3.47E-01	73959	19859	87.000	1.18
I-135	9.91E+01	8.47E-01	18478	1.470	2520.5
	1.13E+00	16875	1603	29.100	1.66

I-131/I-133 = 0.63

2／9　14：00　損傷側蒸気発生器の放射性希ガスの核種分析結果

核種分析結果報告書　(SGモニタリング)

1. ユニット：2u　　2. 試料名：A-SG　　3. 測定者：

4. 試料採取日時：1991年　2月　9日　14時　0分　　5. 試料番号：L291209A01

6. 試料測定日時：1991年　2月　9日　17時　44分

7. 試料量：100 cm3　　8. 化学収率：100 %　　9. 形状：100mlポリエチレンビン

10. 測定時間：1000 秒　　11. 減衰時間：224 分　　12. 検出器：No.1

13. 核種分析結果

核種名	放射能濃度 検出限界値 (Bq/cm3)	濃度誤差 正味計数 (Bq/cm3,cnt)	総計数 BG計数 (cnt)	計数効率 γ一放出率 (%)	ピークチャンネル 減衰補正 (ch,-)
Na-24	3.00E+01	1.51E-01	16695	0.630	2737.6
	2.67E-01	15722	973	100.000	1.20
Co-58	4.50E+01	1.00E+00	47422	0.980	1622.5
	3.34E-01	43766	3656	99.440	1.00
Co-60	2.31E-01	6.18E-01	739	0.640	2665.4
	1.65E-01	148	591	100.000	1.00
I-131	1.10E+00	3.79E-01	16216	1.940	730.2
	3.04E-01	1718	14498	82.000	1.01
I-133	1.20E+01	8.66E-02	19103	1.410	1060.0
	3.04E-01	12912	6192	87.000	1.14
I-135	2.48E+01	6.02E-02	3914	0.670	2521.4
	8.45E-01	3224	690	29.100	1.50
Cs-134	N.D	1.09E-01	1819	1.000	1591.0
	2.04E-01	42	1777	88.000	1.00
Cs-137	N.D	6.14E-01	3419	1.170	1323.0
	2.65E-01	0	3894	85.100	1.00

その他核種の有無：有（別紙参照）

その他核種 核種名	放射能濃度 検出限界値 (Bq/cm3)	濃度誤差 正味計数 (Bq/cm3,cnt)	総計数 BG計数 (cnt)	計数効率 γ一放出率 (%)	ピークチャンネル 減衰補正 (ch,-)
○ Xe-135	6.14E+00	1.51E-01	43603	2.670	500.7
	4.21E-01	11226	32377	92.000	1.35
Cr-51	5.85E+00	1.00E+00	28960	2.160	641.3
	2.98E+00	1287	27673	10.200	1.00
Ru-106	2.32E+00	6.18E-01	3572	1.230	1244.5
	1.85E+00	279	3294	9.760	1.00
I-132	2.32E+01	3.79E-01	13162	1.160	1336.5
	8.27E-01	8080	4667	98.000	3.26
Zr-97	7.38E-01	8.66E-02	3078	1.050	1487.5
	2.50E-01	620	2459	93.300	1.17
Nb-95	4.30E-01	6.02E-02	2225	1.030	1532.7
	1.74E-01	436	1789	99.000	1.00
Ag-110m	1.56E+00	1.09E-01	2703	0.910	1769.4
	2.99E-01	1062	1641	74.700	1.00
K-40	1.24E+01	6.14E-01	1240	0.590	2915.7
	1.37E+00	810	430	11.000	1.00
Ni-65	4.35E+00	5.26E-01	551	0.590	2963.7
	1.41E+00	229	322	25.700	2.86
Sb-124	5.21E-01	8.98E-02	339	0.520	3382.2
	2.50E-01	124	214	45.700	1.00

関西電力株式会社
美浜発電所

2／9　14：05　健全側蒸気発生器の放射性よう素の核種分析結果

核種分析結果報告書（SGモニタリング）

1. ユニット：2u　　2. 試料名：B-SG　　3. 測定者：

4. 試料採取日時：1991年　2月　9日　14時　5分　　5. 試料番号：L291209B01

6. 試料測定日時：1991年　2月　9日　17時　46分

7. 試料量：100 cm3　　8. 化学収率：100 %　　9. 形状：100mlポリエチレンビン

10. 測定時間：2000 秒　　11. 減衰時間：221 分　　12. 検出器：No.2

13. 核種分析結果

核種名	放射能濃度 検出限界値 (Bq/cm3)	濃度誤差 正味計数 (Bq/cm3,cnt)	総計数 BG計数 (cnt)	計数効率 γ一放出率 (%)	ピークチャンネル 減衰補正 (ch,-)
Na-24	N.D	0.00E+00	0	0.370	2737.0
	1.44E-02	0	0	100.000	1.20
Co-58	N.D	1.59E-03	1	0.590	1622.0
	1.08E-02	0	3	99.440	1.00
Co-60	N.D	2.95E-03	5	0.380	2665.0
	1.49E-02	2	3	100.000	1.00
I-131	N.D	1.30E-03	3	1.170	729.0
	7.09E-03	0	4	82.000	1.01
I-133	N.D	1.65E-03	3	0.850	1060.0
	8.95E-03	1	2	87.000	1.14
I-135	N.D	8.24E-03	0	0.400	2521.0
	7.54E-02	0	2	29.100	1.51
Cs-134	N.D	0.00E+00	0	0.600	1592.0
	8.57E-03	0	0	88.000	1.00
Cs-137	N.D	1.36E-03	1	0.700	1324.0
	9.76E-03	0	3	85.100	1.00

その他核種の有無：無

2／9　14：00　損傷側蒸気発生器の放射性よう素の核種分析結果

核種分析結果報告書（SGモニタリング）

1. ユニット：2u　　2. 試料名：A-SG　　3. 測定者：

4. 試料採取日時：1991年　2月　9日　14時　0分　　5. 試料番号：L291209A01

6. 試料測定日時：1991年　2月　9日　17時　44分

7. 試料量：100 cm3　　8. 化学収率：100 %　　9. 形状：100mlポリエチレンビン

10. 測定時間：1000 秒　　11. 減衰時間：224 分　　12. 検出器：No.1

13. 核種分析結果

核種名	放射能濃度 検出限界値 (Bq/cm3)	濃度誤差 正味計数 (Bq/cm3,cnt)	総計数 BG計数 (cnt)	計数効率 γ一放出率 (%)	ピークチャンネル 減衰補正 (ch,-)
Na-24	3.00E+01	1.51E-01	16695	0.630	2737.6
	2.67E-01	15722	973	100.000	1.20
Co-58	4.50E+01	1.00E+00	47422	0.980	1622.5
	3.34E-01	43766	3656	99.440	1.00
Co-60	2.31E-01	6.18E-01	739	0.640	2665.4
	1.65E-01	148	591	100.000	1.00
○ I-131	1.10E+00	3.79E-01	16216	1.940	730.2
	3.04E-01	1718	14498	82.000	1.01
○ I-133	1.20E+01	8.66E-02	19103	1.410	1060.0
	3.04E-01	12912	6192	87.000	1.14
○ I-135	2.48E+01	6.02E-02	3914	0.670	2521.4
	8.45E-01	3224	690	29.100	1.50
Cs-134	N.D	1.09E-01	1819	1.000	1591.0
	2.04E-01	42	1777	88.000	1.00
Cs-137	N.D	6.14E-01	3419	1.170	1323.0
	2.65E-01	0	3894	85.100	1.00

その他核種の有無：有（別紙参照）

その他核種 核種名	放射能濃度 検出限界値 (Bq/cm3)	濃度誤差 正味計数 (Bq/cm3,cnt)	総計数 BG計数 (cnt)	計数効率 γ一放出率 (%)	ピークチャンネル 減衰補正 (ch,-)
Xe-135	6.14E+00	1.51E-01	43603	2.670	500.7
	4.21E-01	11226	32377	92.000	1.35
Cr-51	5.85E+00	1.00E+00	28960	2.160	641.3
	2.98E+00	1287	27673	10.200	1.00
Ru-106	2.32E+00	6.18E-01	3572	1.230	1244.5
	1.85E+00	279	3294	9.760	1.00
○ I-132	2.32E+01	3.79E-01	13162	1.160	1336.5
	8.27E-01	8080	4667	98.000	3.26
Zr-97	7.38E-01	8.66E-02	3078	1.050	1487.5
	2.50E-01	620	2459	93.300	1.17
Nb-95	4.30E-01	6.02E-02	2225	1.030	1532.7
	1.74E-01	436	1789	99.000	1.00
Ag-110m	1.56E+00	1.09E-01	2703	0.910	1769.4
	2.99E-01	1062	1641	74.700	1.00
K-40	1.24E+01	6.14E-01	1240	0.590	2915.7
	1.37E+00	810	430	11.000	1.00
Ni-65	4.35E+00	5.26E-01	551	0.590	2963.7
	1.41E+00	229	322	25.700	2.86
Sb-124	5.21E-01	8.98E-02	339	0.520	3382.2
	2.50E-01	124	214	45.700	1.00

2／9　15：30　損傷側蒸気発生器の放射性よう素の核種分析結果

核種分析結果報告書（SGモニタリング）

1. ユニット：2u　　2. 試料名：A-SG　　3. 測定者：

4. 試料採取日時：1991年　2月　9日　15時　30分　　5. 試料番号：L291209A02

6. 試料測定日時：1991年　2月　9日　18時　51分

7. 試料量：100 cm3　　8. 化学収率：100 %　　9. 形状：100mlポリエチレンビン

10. 測定時間：1000 秒　　11. 減衰時間：201 分　　12. 検出器：No.1

13. 核種分析結果

核種名	放射能濃度 検出限界値 (Bq/cm3)	濃度誤差 正味計数 (Bq/cm3,cnt)	総計数 BG計数 (cnt)	計数効率 γ一放出率 (%)	ピークチャンネル 減衰補正 (ch,-)
Na-24	4.57E+01	3.42E-01	26124	0.630	2737.7
	3.57E-01	24320	1804	100.000	1.18
Co-58	5.84E+01	8.88E-02	63861	0.980	1622.6
	3.90E-01	56760	7101	99.440	1.00
Co-60	2.43E-01	1.58E-01	948	0.640	2664.0
	1.89E-01	156	792	100.000	1.00
○ I-131	1.78E+00	5.48E-01	26221	1.940	730.4
	4.07E-01	2788	23433	82.000	1.01
○ I-133	1.93E+01	2.43E-01	30129	1.410	1060.0
	3.63E-01	21070	9059	87.000	1.12
○ I-135	3.27E+01	1.09E+00	6176	0.670	2521.5
	1.37E+00	4423	1753	29.100	1.44
Cs-134	N.D	4.01E-01	3242	1.000	1591.0
	2.78E-01	0	3342	88.000	1.00
Cs-137	N.D	1.97E-01	5383	1.170	1323.0
	3.27E-01	0	5970	85.100	1.00

その他核種の有無：有（別紙参照）

その他核種 核種名	放射能濃度 検出限界値 (Bq/cm3)	濃度誤差 正味計数 (Bq/cm3,cnt)	総計数 BG計数 (cnt)	計数効率 γ一放出率 (%)	ピークチャンネル 減衰補正 (ch,-)
Xe-133	2.72E+01	3.42E-01	80787	3.280	162.8
	9.19E-01	30618	50169	35.000	1.02
Tc-99m	6.55E-01	8.88E-02	34010	4.330	281.8
	2.64E-01	1705	32305	90.000	1.50
Kr-85m	2.11E+00	1.58E-01	47382	4.100	303.5
	4.66E-01	3824	43558	76.100	1.72
Kr-88	4.03E+00	5.48E-01	41359	3.280	393.6
	1.63E+00	1968	39891	35.000	2.38
Xe-135	3.41E+01	2.43E-01	113228	2.670	500.8
	6.09E-01	64070	49158	92.000	1.31
Cr-51	5.88E+00	1.09E+00	34113	2.160	641.5
	3.24E+00	1293	32820	10.200	1.00
Ba-140	2.09E+00	4.01E-01	9334	1.390	1075.8
	1.19E+00	684	8650	23.650	1.01
As-76	7.26E-01	1.97E-01	5573	1.340	1119.6
	5.92E-01	365	5316	41.000	1.10
○ I-132	2.72E+01	4.30E-01	19286	1.160	1336.6
	1.03E+00	10618	8668	98.000	2.90
Zr-97	5.35E-01	9.84E-02	3798	1.050	1488.0
	2.91E-01	457	3341	93.300	1.15
Zr-95	7.12E-01	1.67E-01	4634	1.040	1514.7
	4.96E-01	403	4231	54.600	1.00
Nb-95	7.47E-01	8.94E-02	4267	1.030	1532.6
	2.60E-01	761	3506	99.000	1.00
Ag-110m	1.51E+00	1.15E-01	3917	0.910	1769.3
	3.21E-01	1027	2890	74.700	1.00
Sr-91	3.29E+00	3.80E-01	3878	0.800	2048.8
	1.10E+00	688	3190	33.400	1.28
Ar-41	1.52E+02	1.04E+00	29333	0.660	2587.6
	1.24E+00	26180	2103	99.120	3.77
Sr-92	1.63E+00	2.16E-01	1463	0.620	2768.2
	6.17E-01	373	1091	90.100	2.45
K-40	1.76E+01	1.03E+00	2442	0.590	2915.6
	2.75E+00	1149	1293	11.000	1.00

関西電力株式会社
美浜発電所

2／9 14：05 健全側蒸気発生器の放射性よう素の核種分析結果

核種分析結果報告書 (SGモニタリング)

1. ユニット：2u　　2. 試料名：B-SG　　3. 測定者：

4. 試料採取日時：1991年 2月 9日 14時 5分　　5. 試料番号：L291209B01

6. 試料測定日時：1991年 2月 9日 17時 46分

7. 試料量：100 cm3　　8. 化学収率：100 %　　9. 形状：100mlポリエチレンビン

10. 測定時間：2000 秒　　11. 減衰時間：221 分　　12. 検出器：No.2

13. 核種分析結果

核種名	放射能濃度 検出限界値 (Bq/cm3)	濃度誤差 正味計数 (Bq/cm3,cnt)	総計数 BG計数 (cnt)	計数効率 γ一放出率 (%)	ピークチャンネル 減衰補正 (ch,-)
Na-24	N.D	0.00E+00	0	0.370	2737.0
	1.44E-02	0	0	100.000	1.20
Co-58	N.D	1.59E-03	1	0.590	1622.0
	1.08E-02	0	3	99.440	1.00
Co-60	N.D	2.95E-03	5	0.380	2665.0
	1.49E-02	2	3	100.000	1.00
○ I-131	N.D	1.30E-03	3	1.170	729.0
	7.09E-03	0	4	82.000	1.01
○ I-133	N.D	1.65E-03	3	0.850	1060.0
	8.95E-03	1	2	87.000	1.14
○ I-135	N.D	8.24E-03	0	0.400	2521.0
	7.54E-02	0	2	29.100	1.51
Cs-134	N.D	0.00E+00	0	0.600	1592.0
	8.57E-03	0	0	88.000	1.00
Cs-137	N.D	1.36E-03	1	0.700	1324.0
	9.76E-03	0	3	85.100	1.00

その他核種の有無：無

関西電力株式会社
美浜発電所

2／9　15：30　健全側蒸気発生器の放射性よう素の核種分析結果

核種分析結果報告書（SGモニタリング）

1. ユニット：2u　　2. 試料名：B-SG　　3. 測定者

4. 試料採取日時：1991年　2月　9日　15時　30分　　5. 試料番号：L291209B02

6. 試料測定日時：1991年　2月　9日　18時　27分

7. 試料量：100 cm3　　8. 化学収率：100 %　　9. 形状：100mlポリエチレンビン

10. 測定時間：2000 秒　　11. 減衰時間：177 分　　12. 検出器：No.2

13. 核種分析結果

核種名	放射能濃度 検出限界値 (Bq/cm3)	濃度誤差 正味計数 (Bq/cm3,cnt)	総計数 BG計数 (cnt)	計数効率 γ一放出率 (%)	ピークチャンネル 減衰補正 (ch,-)
Na-24	N.D	1.55E-03	1	0.370	2737.0
	1.39E-02	1	0	100.000	1.16
Co-58	N.D	1.44E-03	2	0.590	1622.0
	8.97E-03	1	1	99.440	1.00
Co-60	N.D	2.65E-03	4	0.380	2665.0
	1.49E-02	1	3	100.000	1.00
○ I-131	N.D	1.16E-03	1	1.170	729.0
	7.50E-03	0	4	82.000	1.01
○ I-133	N.D	1.81E-03	5	0.850	1060.0
	7.87E-03	4	1	87.000	1.11
○ I-135	N.D	0.00E+00	0	0.400	2521.0
	5.40E-02	0	0	29.100	1.40
Cs-134	N.D	1.48E-03	0	0.600	1592.0
	1.20E-02	0	3	88.000	1.00
Cs-137	N.D	1.42E-03	2	0.700	1324.0
	9.48E-03	0	2	85.100	1.00

その他核種の有無：無

関西電力株式会社
美浜発電所

2/7 09:25～2/13 09:30 1号機補助建屋排気筒の放射性よう素の核種分析結果

美浜発電所　1u　A／B排気筒

1号機

サンプルパッケージ週報告書（2月第 2週）

採取開始 1991/02/07 09:25
採取終了 1991/02/13 09:30

採取時間 8645分
欠測時間 0分　　排気運転時間 8645 分
採取体積 1.246E+09(cm3)　　排気運転中体積 1.246E+09(cm3)

採取者 _____

種類		濃度 (Bq/cm3)	検出感度 (Bq/cm3)	測定日時	測定者	測定器
ダスト試料	ダストβ	N.D	1.89E-09	1991/02/13 09:45		2πガスフロー計数装置
	Cr-51	N.D	3.84E-09	1991/02/13 10:06		NAIG-Ge
	Mn-54	N.D	8.94E-10			
	Co-58	N.D	1.16E-09			
	Fe-59	N.D	2.13E-09			
	Co-60	N.D	1.38E-09			
	Cs-134	N.D	9.68E-10			
	CS-137	N.D	8.80E-10			
ヨウ素試料	I-131	N.D	1.23E-09	1991/02/13 09:43		NAIG-Ge
	I-132	N.D	8.65E-08			
	I-133	N.D	6.25E-09			
	I-135	N.D	1.54E-07			
	As-76	N.D	1.12E-08			
	Br-82	N.D	5.57E-09			
H-3		7.57E-04	3.93E-06	1991/02/13 09:50		液体シンチ計数装置
その他核種		別紙参照なし				
備考						

１５．気象データ

周辺公衆の受ける実効線量当量の算出に用いた気象データ

（正時前１０分間平均値）

2／9 （時）		12	13	14	15	16
山頂	風向	WSW	NNW	NNW	NNW	NNW
	風速 (m/s)	1．6	2．7	4．1	3．8	1．8
地上	風向	WNW	NNW	NNW	NNW	ENE
	風速 (m/s)	2．6	3．4	4．1	2．9	2．0
大気安定度		B	BC	CD	C	D

１６．環境放射線モニタリング記録

表－１　空間線量率連続測定結果［関西電力］（２月９日～１０日）

１．２月９日

（１時間平均値）　（単位：nGy/h）（注１）

モニタリングポスト名 / 時刻	モニタリングステーション	No.１モニタリングポスト	No.２モニタリングポスト	No.３モニタリングポスト	No.４モニタリングポスト	No.５モニタリングポスト	音浜モニタリングポスト（注２）	佐田モニタリングポスト（注２）
前年度平均値（変動幅）	54.4（±13.2）	53.9（±13.5）	44.8（±13.5）	50.8（±12.0）	74.8（±12.0）	62.1（±16.5）	55.8（±11.7）	52.1（±10.8）
２月９日 01:00	50.1	52.5	41.0	48.9	73.2	58.5	54.3	50.7
02:00	50.4	52.2	40.7	48.6	73.1	58.7	54.1	50.5
03:00	50.0	52.4	41.3	48.2	73.1	58.2	54.0	50.7
04:00	49.8	52.7	41.2	47.6	74.0	58.7	54.3	50.7
05:00	50.4	52.8	41.1	48.2	74.4	58.8	54.3	50.7
06:00	49.8	53.2	41.2	48.3	73.1	58.2	54.3	50.4
07:00	50.3	52.6	41.7	48.1	73.2	58.5	54.5	50.8
08:00	50.3	52.5	41.7	48.7	74.2	58.6	55.0	50.8
09:00	50.2	52.8	41.4	49.0	73.6	58.6	54.9	50.7
10:00	50.1	52.5	40.9	49.0	73.1	59.1	55.4	50.8
11:00	50.5	52.4	41.4	49.4	73.9	59.3	55.1	50.3
12:00	51.0	52.1	41.0	48.4	74.1	58.9	54.6	50.5
13:00	50.4	52.4	41.1	49.2	73.4	58.8	54.3	50.6
14:00	50.7	52.2	41.1	48.8	73.8	58.8	54.8	50.5
15:00	50.3	51.0	41.0	49.2	74.2	58.4	54.6	50.6
16:00	50.4	49.9	41.0	49.3	73.8	58.7	54.4	50.7
17:00	50.8	50.4	41.1	48.8	74.3	59.0	54.4	50.7
18:00	50.8	50.7	41.4	48.6	74.4	59.0	54.9	50.6
19:00	51.3	51.9	42.2	50.5	74.4	59.4	54.8	51.3
20:00	51.9	52.2	41.9	51.4	74.2	59.7	55.6	51.4
21:00	52.1	52.1	41.9	52.0	74.2	60.5	55.6	51.9
22:00	52.6	52.4	42.3	51.0	74.4	60.4	56.3	51.8
23:00	52.4	52.2	42.6	51.5	75.0	60.4	56.6	52.3
24:00	51.8	52.8	42.5	51.5	75.0	60.1	56.4	51.5

（注１）　１nGy/h≒０．１１５μR/h
（注２）　参考のため、音浜、佐田のモニタリングポストの指示値についても掲載した。

２．２月１０日

（１時間平均値）　（単位：nGy/h）（注１）

モニタリングポスト名 / 時刻	モニタリングステーション	No.１モニタリングポスト	No.２モニタリングポスト	No.３モニタリングポスト	No.４モニタリングポスト	No.５モニタリングポスト	音浜モニタリングポスト（注２）	佐田モニタリングポスト（注２）
前年度平均値（変動幅）	54.4（±13.2）	53.9（±13.5）	44.8（±13.5）	50.8（±12.0）	74.8（±12.0）	62.1（±16.5）	55.8（±11.7）	52.1（±10.8）
２月１０日 01:00	51.9	52.8	42.3	51.1	75.1	60.3	56.5	51.8
02:00	51.3	52.1	42.3	51.6	74.8	60.4	55.4	51.7
03:00	51.2	52.3	41.8	51.3	74.0	59.6	55.3	51.0
04:00	51.0	52.1	42.2	50.8	74.6	59.8	54.9	50.9
05:00	51.5	52.2	42.6	51.1	74.7	59.7	55.3	51.5
06:00	54.9	54.9	45.6	53.6	77.5	63.1	58.5	56.3
07:00＊	64.6	63.5	56.1	60.4	85.9	74.9	63.5	61.4
08:00＊	66.1	63.3	57.5	63.0	87.2	75.6	66.3	62.5
09:00＊	59.9	58.6	50.7	58.6	82.8	68.3	66.0	60.9
10:00＊	58.5	57.1	50.1	56.7	81.5	66.7	65.5	60.9
11:00＊	56.5	55.8	47.0	55.7	79.7	63.9	59.4	55.2
12:00＊	57.7	56.1	48.4	56.4	80.2	64.8	60.0	53.9
13:00＊	56.6	54.9	47.4	56.4	78.6	64.6	58.7	53.1
14:00＊	59.2	56.3	50.6	60.0	79.6	68.3	59.4	56.2
15:00＊	66.4	62.5	57.9	66.1	86.0	77.7	62.2	56.5
16:00＊	70.3	67.3	61.2	68.2	88.3	81.7	64.5	57.6
17:00＊	57.9	57.4	49.0	57.5	79.3	67.5	58.7	53.8
18:00	53.2	53.4	43.5	53.9	76.3	61.5	56.7	53.2
19:00	51.7	52.2	41.6	51.2	74.1	59.4	54.8	52.4
20:00	51.6	52.3	41.7	50.3	74.4	59.7	55.7	51.7
21:00	52.4	52.4	42.9	50.4	75.7	60.6	57.9	53.6
22:00	51.8	51.9	41.4	49.6	74.3	59.7	55.5	52.6
23:00	50.9	52.0	41.1	49.6	73.8	59.6	54.7	52.1
24:00	50.6	51.7	40.7	49.2	73.7	59.2	55.2	51.3

＊降水（感雨も含む）有り。
（注１）　１nGy/h≒０．１１５μR/h
（注２）　参考のため、音浜、佐田のモニタリングポストの指示値についても掲載した。

表－２　空間線量率連続測定結果［福井県］（２月９日～１０日）

（１時間平均値）　（単位：nGy/h）（注１）

モニタリングポスト名 / 時刻	丹生		竹波	
前年１２月の月間平均値（±標準偏差）	64.0（± 3.8）		68.8（± 4.4）	
日時	９日	１０日	９日	１０日
01:00	59.9	61.2	66.4＊	67.3
02:00	60.2	60.8	65.9＊	67.1
03:00	59.9	60.8	65.6	67.4
04:00	59.9	60.9	66.5	67.4
05:00	59.7	60.4	66.6	67.4
06:00	60.0	63.7＊	65.9	70.7＊
07:00	60.0	71.2＊	66.6	78.0＊
08:00	60.6	73.2＊	66.7	79.8＊
09:00	60.8	68.4	66.9	76.7＊
10:00	60.9	67.9	66.8	75.3＊
11:00	61.5	67.4＊	67.0	72.4＊
12:00	62.1	68.2＊	66.4	73.8＊
13:00	61.9	68.2＊	66.6	72.1＊
14:00	62.0	71.0＊	67.0	73.4＊
15:00	62.2	76.6＊	66.7	80.0＊
16:00	62.4	78.8＊	66.6	81.6＊
17:00	62.3	68.9＊	66.7	72.3＊
18:00	63.0	64.3	67.2	68.4＊
19:00	63.6	62.7＊	67.8	66.9＊
20:00	63.2	62.4＊	67.3	66.7＊
21:00	62.0	63.6	67.4	67.9＊
22:00	61.2	62.0	67.3	66.9
23:00	61.3	61.7＊	67.6	67.0＊
24:00	60.7	61.3	67.5	66.8

＊降水（感雨も含む）有り。
（注１）　１nGy/h≒０．１１５μR/h
出典：美浜発電所周辺の環境放射能調査報告（平成３年３月１４日　福井県）

表－３　各種環境試料の放射性物質濃度分析結果［関西電力］　（１／５）

①　放射性物質濃度分析結果はゲルマニウム半導体波高分析装置を用いた核種分析により実施した。
②　－は検出限界値以下、／は対象外を示す。（以下の各表同じ）

１．大気・浮遊じん

（１）浮遊じん

単位：mBq/m³

採取地点	採取期間	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
丹生	2/ 4 10:55 ～2/18 10:25	――	――	――	――	――	――
	2/18 10:25 ～3/ 4 10:15	――	――	――	――	――	――

（２）ガス状よう素

単位：mBq/m³

採取地点	採取期間	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
丹生	2/ 4 10:55 ～2/18 10:25	／	／	／	――	／	／
	2/18 10:25 ～3/ 4 10:15	／	／	／	――	／	／

2. 降下物

単位： Bq/m²

採取地点	採取期間	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
丹生（合宿）	2/4 10:45 ～2/18 10:20	———	———	———	———	———	———
	2/18 10:20 ～3/4 10:00	———	———	———	———	———	———

3. 陸水

単位：Bq／l

採取地点	採取日時	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
落合川河川水	2/14 14:00	———	———	———	———	———	———
	2/26 10:45	———	———	———	———	———	———

4. 植物（松葉）

単位：Bq／kg生

採取地点	採取日時	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
丹生（農業公園）	2/13 13:50	———	———	———	———	———	———
	2/19 14:30	———	———	———	———	———	———
	2/26 11:00	———	———	———	———	———	———
	3/5 10:00	———	———	———	———	———	———

5. 海水

(1) 通常測定 (注)

単位：mBq/l

採取地点	採取日時	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
1，2号放水口	2/10 17:28	———	———	———	/	———	———
	2/10 17:58	———	———	———	/	———	———
	2/10 18:28	———	———	———	/	———	———
	2/10 18:58	———	———	———	/	———	———
	2/10 19:28	———	———	———	/	———	———
	2/10 20:28	———	———	———	/	———	6.1
	2/11 15:40	———	———	———	/	———	———
	2/15 15:00	———	———	———	/	———	———
	2/19 15:00	———	———	———	/	———	5.7
	2/22 13:50	———	———	———	/	———	4.4
	2/26 11:30	———	———	———	/	———	———
	3/1 16:15	———	———	———	/	———	———
	3/5 9:30	———	———	———	/	———	———
	3/8 10:40	———	———	———	/	———	4.6

(注) 海水の通常測定は２０１の海水を用いたリンモリブデン酸アンモン（AMP）及び二酸化マンガン（MnO_2）への吸着法であるため ^{131}I は測定対象外。

[参考] ^{137}Csの核実験影響レベル(1987 ～1989年度の福井県内の検出実績)	1.9～6.7mBq/l

6. 海底土

単位：Bq／kg乾土

採取地点	採取日時	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
1，2号放水口	2/15 12:00	———	———	———	———	———	———
	2/19 9:30	———	———	———	———	———	———
	2/26 9:00	———	———	———	———	———	———
	3/5 9:10	———	———	———	———	———	———
1，2号放水口沖	2/26 9:15	———	———	———	———	———	———

7. 海産生物

(1) 魚 類

単位：Bq／kg生

試料・採取地点	採取日時	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
ｸﾛﾀﾞｲ（肉） 1，2号放水口	2/18 19:00	———	———	———	———	———	———
ｼﾏｲｻｷ （全身） 1，2号放水口	2/18 19:00	———	———	———	———	———	0.23

[参考] ^{137}Csの核実験影響レベル(1987 ～1989年度の福井県内の検出実績)	0.1～0.6 Bq/kg

(2) 貝 類

単位：Bq／kg生

試料・採取地点	採取日時	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
サザエ（除殻） 1，2号放水口	2/15 12:00	———	———	———	———	———	———
サザエ（除殻） 1，2号放水口	3/5 9:10	———	———	———	———	———	———

8. 指標海産生物（ホンダワラ）

単位：Bq／kg生

採取地点	採取日時	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
1，2号放水口	2/11 15:30	———	———	———	———	———	———
	2/15 12:00	———	———	———	———	———	0.18
	2/19 9:30	———	———	———	———	———	———
	2/26 9:00	———	———	———	———	———	———
	3/5 9:10	———	———	———	———	———	———
丹生大島西	2/11 16:10	———	———	———	———	———	———

[参考] ^{137}Csの核実験影響レベル(1987 ～1989年度の福井県内の検出実績)	0.1～0.6 Bq/kg

表－４　各種環境試料の放射性物質濃度分析結果［福井県］　（１／５）

① 放射性物質濃度分析結果はゲルマニウム半導体波高分析装置を用いた核種分析により実施した。
② －は検出限界値以下、／は対象外を示す。（以下の各表同じ）
③ 出典：美浜発電所周辺の環境放射能調査報告（平成３年３月１４日　福井県）

１．大気・浮遊じん

(1) 浮遊じん

単位：mBq/m³

採取地点	採取期間	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
竹波	2/6 9:30 ～2/12 14:00	―	―	―	―	―	―
	2/12 14:00 ～3/6 9:30	―	―	―	―	―	―

(2) ガス状よう素

単位：mBq/m³

採取地点	採取期間	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
竹波	2/6 9:30 ～2/12 14:00	／	／	／	―	／	／
	2/12 14:00 ～3/6 9:30	／	／	／	―	／	／

（２／５）

２．降下物

単位：Bq/m²

採取地点	採取期間	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
竹波	2/6 9:30 ～2/18 11:40	―	―	―	―	―	―
	2/18 11:40 ～3/6 9:20	―	―	―	―	―	―

３．陸水

単位：Bq/l

採取地点	採取日時	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
丹生漁業センター水道水	2/14 10:30	―	―	―	―	―	―
	3/6 8:30	―	―	―	―	―	―

４．植物（松葉）

単位：Bq/kg生

採取地点	採取日時	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
竹波	2/14 11:40	―	―	―	―	―	―
	2/27 11:50	―	―	―	―	―	―

（３／５）

５．海水

(1) 直接測定……２１、マリネリビーカ直接２４時間測定

単位：Bq/l

採取地点	採取日時	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
1，2号放水口	2/10 17:20	―	―	―	―	―	―
	2/11 15:30	―	―	―	―	―	―
	2/14 11:20	―	―	―	―	―	―
	2/18 11:00	―	―	―	―	―	―
	2/27 11:30	―	―	―	―	―	―
	3/6 8:50	―	―	―	―	―	―

(2) 通常測定　(注)

単位：mBq/l

採取地点	採取日時	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
1，2号放水口	2/10 17:20	―	―	―	／	―	2.6
	2/11 15:30	―	―	―	／	―	3.5

(注) 海水の通常測定は２０１の海水を用いたリンモリブデン酸アンモン（AMP）及び二酸化マンガン（MnO_2）への吸着法であるため ^{131}Iは測定対象外。

［参考］ ^{137}Csの核実験影響レベル(1987 ～1989年度の福井県内の検出実績)	1.9～6.7mBq/l

（４／５）

６．海産生物

(1) 魚　類

単位：Bq/kg生

試料・採取地点	採取日時	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
ﾏｻﾊﾞﾚｲ（全身）丹生周辺	2/14	―	―	―	―	―	―
ｱｶﾌｼﾞ（全身）丹生周辺	2/14	―	―	―	―	―	―
ｷｽ(全身)３号放水口北１km	3/8	―	―	―	―	―	0.20
ﾏｽ（肉）３号放水口北１km	3/8	―	―	―	―	―	0.56

［参考］ ^{137}Csの核実験影響レベル(1987 ～1989年度の福井県内の検出実績)	0.1～0.6 Bq/kg

(2) 藻　類

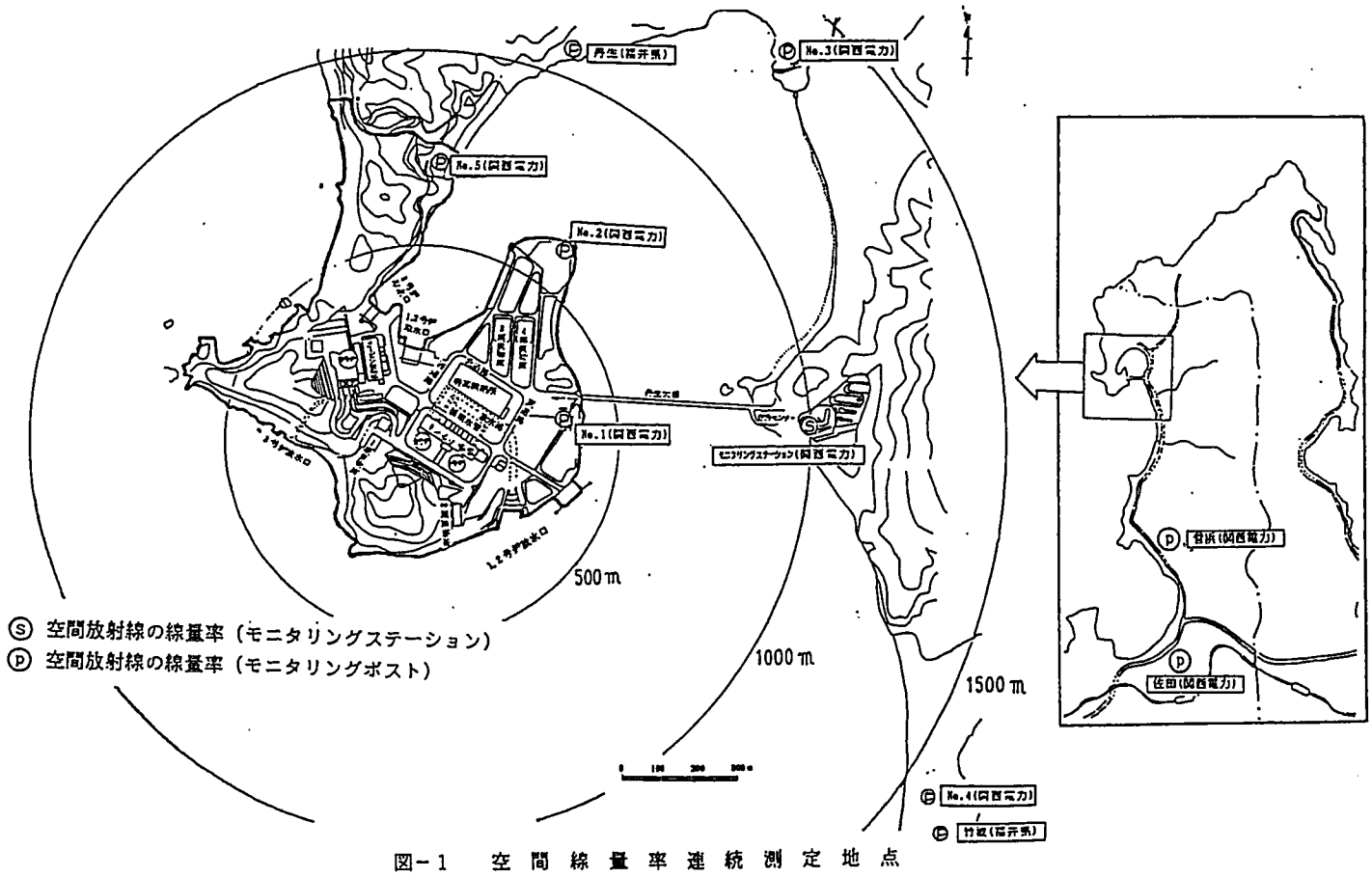
単位：Bq/kg生

試料・採取地点	採取期間	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
ﾜｶﾒ(除根)1，2号放水口南 0.8km	3/8	―	―	―	―	―	―

7．指標海産生物（ホンダワラ）　　（5／5）

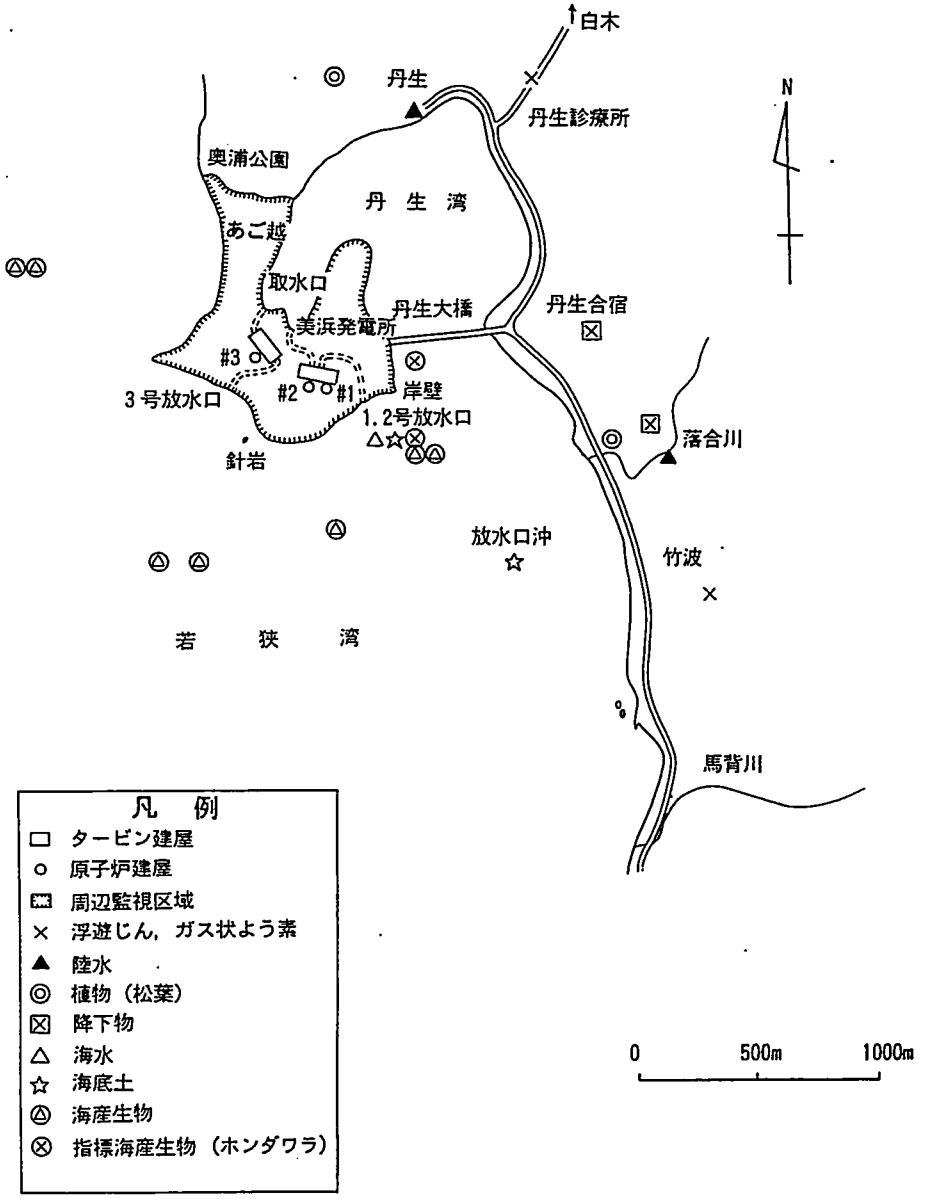
単位：Bq／kg生

採取地点	採取日時	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
1，2号放水口	2/11 15:30	——	——	——	——	——	——
丹生大橋西	2/11 15:30	——	——	——	——	——	——
	2/14 11:30	——	——	——	——	——	——
	2/18 11:20	——	——	——	——	——	——
	2/27 11:40	——	——	——	——	——	——
	3/6 9:00	——	——	——	——	——	——



Ⓢ 空間放射線の線量率（モニタリングステーション）
Ⓟ 空間放射線の線量率（モニタリングポスト）

図－1　空間線量率連続測定地点



図－２　各種環境試料の放射能調査地点

１７．解析結果等

（１）事象の再現解析に関する解析結果等

（ａ）事象の再現解析に関する解析結果

・図-3.1.1-(1)　１次冷却系の圧力
・図-3.1.1-(2)　加圧器水位
・図-3.1.1-(3)　損傷側蒸気発生器２次側の圧力
・図-3.1.1-(4)　健全側蒸気発生器２次側の圧力
・図-3.1.1-(5)　損傷側蒸気発生器水位（狭域）
・図-3.1.1-(6)　健全側蒸気発生器水位（狭域）
・図-3.1.1-(7)　損傷側ループの高温側冷却材温度
・図-3.1.1-(8)　健全側ループの高温側冷却材温度
・損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量（図-3.4.1　安全解析の解析結果と今回の事象の再現解析の解析結果との比較における今回の事象の再現解析の解析結果の１次冷却材流出量と同じ）
・損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁からの蒸気放出量
・図-3.1.2-(1)　１次冷却系低温側配管への安全注入流量
・図-3.1.2-(2)　原子炉容器上部プレナム部への安全注入流量

（ｂ）図-3.1.3　高圧注入ポンプの注入特性

・使用前検査データに基づいた注入特性
(a)１次冷却系低温側配管への注入、高圧注入ポンプ２台
(b)１次冷却系低温側配管及び上部プレナム部への注入、高圧注入ポンプ２台
・美浜２号機に係る原子炉設置変更許可時（平成２年９月１７日許可）の原子炉施設の安全評価のための解析での注入特性
(1)１次冷却材喪失事象（小破断）
（１次冷却系低温側配管への注入、高圧注入ポンプ１台）
(2)蒸気発生器伝熱管損傷事象
（１次冷却系低温側配管及び上部プレナム部への注入、高圧注入ポンプ２台）

（２）炉心の健全性評価に関する解析結果

（ａ）図-3.2.2　最小ＤＮＢＲの解析結果

・最小ＤＮＢＲ

（３）安全評価と今回の事象との比較に関する解析結果

（ａ）図-3.4.1　安全解析の解析結果と今回の事象の再現解析の解析結果との比較

・今回の事象の再現解析の解析結果の原子炉出力

（４）炉心の健全性に関するその他の考察に関する解析結果等

（ａ）図-3.6.1　燃料中心温度及び燃料被覆管表面温度の解析結果

・燃料中心温度
・燃料被覆管表面温度

（ｂ）図-3.6.2　１次冷却材中のよう素１３１濃度の推移（美浜２号機第１４運転期間）

・よう素１３１濃度

（ｃ）図-3.6.3　炉心上端部の１次冷却材の温度、局所ボイド率及び熱流束の解析結果

・炉心上端部の１次冷却材の温度
・局所ボイド率
・熱流束
・飽和温度（１３時４０分から１３時４９分の間の１次冷却系の圧力（プラント計器記録）からの換算値及び１３時５０分から１３時５９分の間の１次冷却系の圧力（ＰＡＭトレンド記録）からの換算値（図-3.6.4-(1),(2)における飽和温度（１３時５０分から１３時５９分の間の１次冷却系の圧力からの換算値と同じ））

（ｄ）図-3.6.5　１次冷却材の流量の解析結果

・損傷側ループの１次冷却材の流量
・健全側ループの１次冷却材の流量

（ｅ）図-3.6.6　原子炉容器頂部におけるボイド量の解析結果

・飽和温度
・原子炉容器頂部温度
・損傷側ループの高温側冷却材温度
・健全側ループの高温側冷却材温度
・ボイド量

（ｆ）表-3.6.1　１次冷却系への水の注入量及び損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量の推移

・安全注入量
・充てん量
・加圧器補助スプレ量
・抽出量
・注入量計
・１次冷却材流出量
・水収支

(1) 事象の再現解析に関する解析結果等

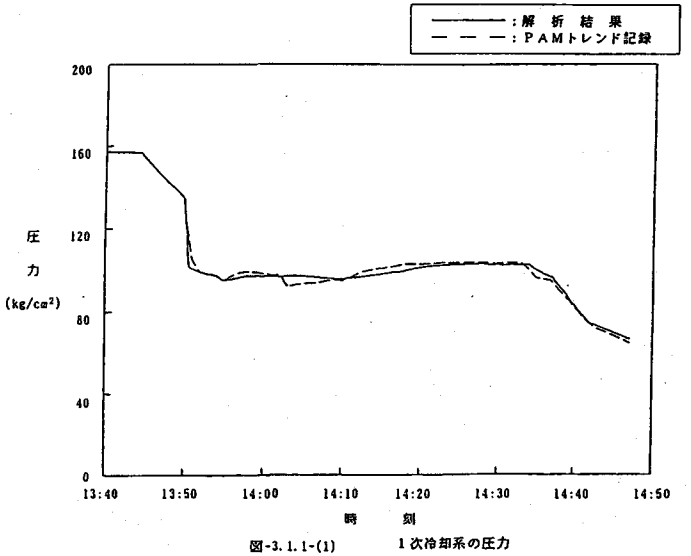


図-3.1.1-(1) 1次冷却系の圧力

（13時40分から13時49分までの間は解析結果のみを記載している。
（以下、図-3.1.1-(8)まで同じ。）

1次冷却系の圧力

	圧力（kg/cm²）
13:40	157.1
13:41	157.0
13:42	157.0
13:43	156.9
13:44	156.8
13:45	154.1
13:46	150.0
13:47	145.9
13:48	142.1
13:49	138.6
13:50	133.6
13:51	100.9
13:52	99.1
13:53	98.1
13:54	96.9
13:55	95.1
13:56	95.7
13:57	96.4
13:58	97.0
13:59	97.1
14: 0	97.0
14: 1	96.8
14: 2	96.7
14: 3	97.0
14: 4	97.2
14: 5	97.0
14: 6	96.6
14: 7	96.4
14: 8	96.1
14: 9	95.9
14:10	95.9
14:11	96.1
14:12	96.4
14:13	96.8
14:14	97.4
14:15	97.9
14:16	98.5
14:17	99.0
14:18	99.5
14:19	100.5
14:20	101.2
14:21	101.7
14:22	102.1
14:23	102.3
14:24	102.5
14:25	102.6
14:26	102.7
14:27	102.8
14:28	102.9
14:29	102.5
14:30	102.4
14:31	102.4
14:32	102.4
14:33	102.5
14:34	102.6
14:35	100.0
14:36	97.9
14:37	96.5
14:38	93.2
14:39	87.7
14:40	82.9
14:41	78.6
14:42	74.6
14:43	73.0
14:44	71.4
14:45	69.8
14:46	68.2
14:47	66.8

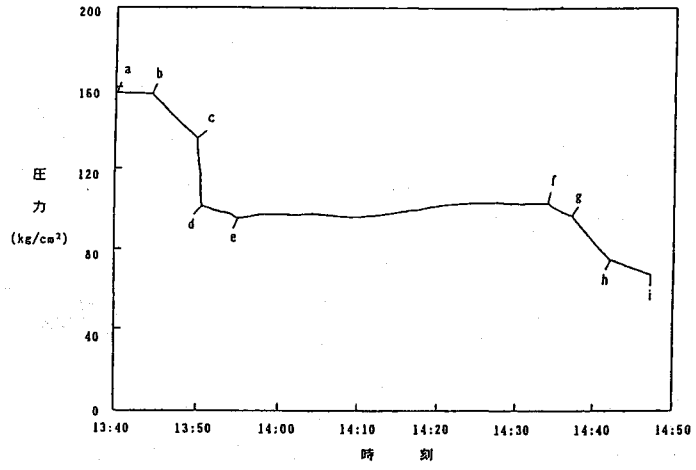


図-3.1.1-(1)　1次冷却系の圧力

1次冷却系の圧力

	圧 力(kg/cm²)
a	157.1
b	156.8
c	134.9
d	103.2
e	95.0
f	102.6
g	95.9
h	74.6
i	66.8

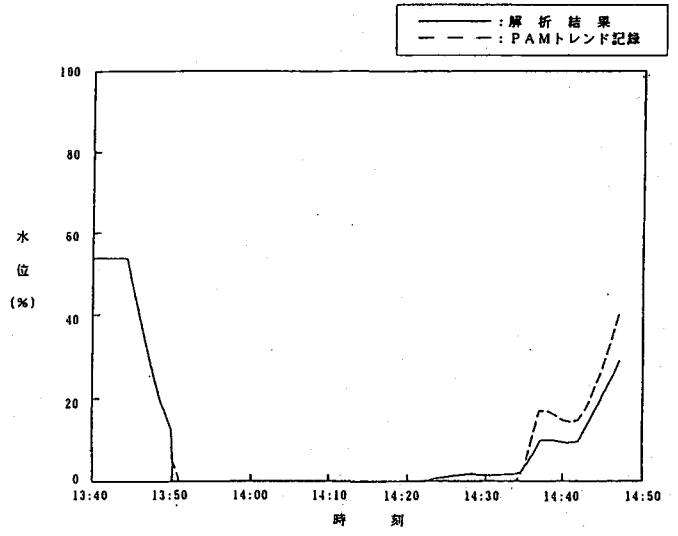


図-3.1.1-(2)　加圧器水位

加圧器水位

	水位（%）
13:40	53.9
13:41	53.9
13:42	53.8
13:43	53.7
13:44	53.5
13:45	48.0
13:46	39.2
13:47	31.1
13:48	23.4
13:49	17.3
13:50	11.5
13:51	0.0
13:52	0.0
13:53	0.0
13:54	0.0
13:55	0.0
13:56	0.0
13:57	0.0
13:58	0.0
13:59	0.0
14: 0	0.0
14: 1	0.0
14: 2	0.0
14: 3	0.0
14: 4	0.0
14: 5	0.0
14: 6	0.0
14: 7	0.0
14: 8	0.0
14: 9	0.0
14:10	0.0
14:11	0.0
14:12	0.0
14:13	0.0
14:14	0.0
14:15	0.0
14:16	0.0
14:17	0.0
14:18	0.0
14:19	0.0
14:20	0.0
14:21	0.0
14:22	0.0
14:23	0.4
14:24	0.8
14:25	1.0
14:26	1.2
14:27	1.4
14:28	1.6
14:29	1.4
14:30	1.4
14:31	1.4
14:32	1.5
14:33	1.6
14:34	1.7
14:35	3.1
14:36	5.7
14:37	9.2
14:38	9.8
14:39	9.7
14:40	9.4
14:41	9.3
14:42	9.6
14:43	13.1
14:44	16.7
14:45	20.4
14:46	24.3
14:47	28.5

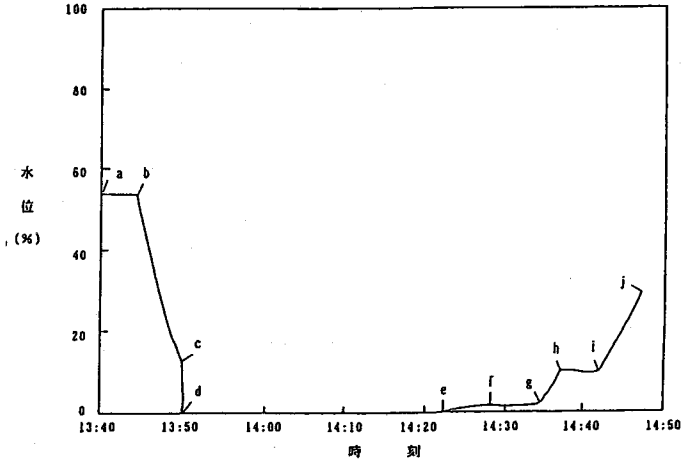


図-3.1.1-(2)　　加圧器水位

加圧器水位

	水 位 (%)
a	53.9
b	53.5
c	12.5
d	0.0
e	0.0
f	1.6
g	1.7
h	9.9
i	9.6
j	28.5

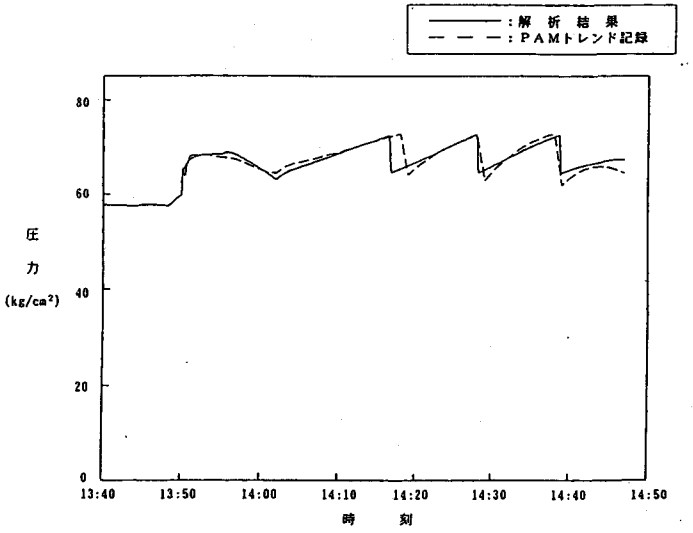


図-3.1.1-(3)　　損傷側蒸気発生器２次側の圧力

損傷側蒸気発生器２次側の圧力

	圧力 (kg/cm²)
13:40	57.8
13:41	57.8
13:42	57.7
13:43	57.7
13:44	57.6
13:45	57.8
13:46	57.8
13:47	57.8
13:48	57.6
13:49	58.5
13:50	62.8
13:51	67.5
13:52	68.3
13:53	68.6
13:54	68.6
13:55	68.7
13:56	69.0
13:57	68.3
13:58	67.4
13:59	66.4
14: 0	65.4
14: 1	64.3
14: 2	63.2
14: 3	64.5
14: 4	65.3
14: 5	65.9
14: 6	66.4
14: 7	67.0
14: 8	67.6
14: 9	68.3
14:10	68.9
14:11	69.5
14:12	70.0
14:13	70.6
14:14	71.2
14:15	71.8
14:16	72.3
14:17	64.8
14:18	65.5
14:19	66.2
14:20	66.9
14:21	67.7
14:22	68.4
14:23	69.2
14:24	69.9
14:25	70.6
14:26	71.3
14:27	72.0
14:28	71.1
14:29	65.3
14:30	66.1
14:31	66.9
14:32	67.8
14:33	68.6
14:34	69.4
14:35	70.2
14:36	70.9
14:37	71.6
14:38	72.3
14:39	64.7
14:40	65.3
14:41	65.9
14:42	66.3
14:42	66.7
14:44	67.0
14:45	67.3
14:46	67.5
14:47	67.5

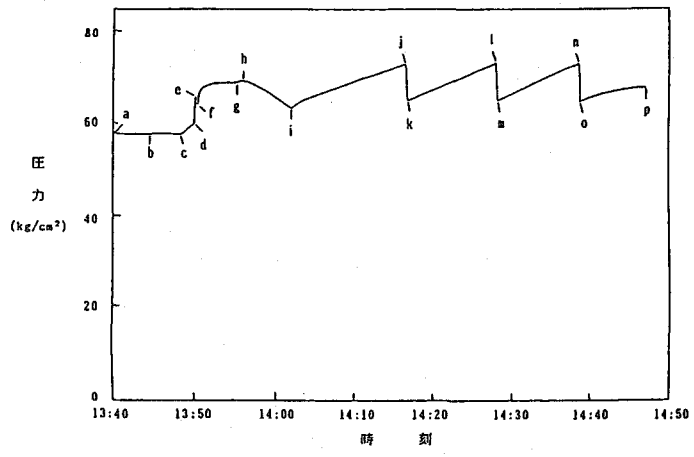


図-3.1.1-(3)　損傷側蒸気発生器２次側の圧力

損傷側蒸気発生器２次側の圧力

	圧 力(kg/cd)
a	57.8
b	57.6
c	57.6
d	59.9
e	65.6
f	64.0
g	68.7
h	69.0
i	63.2
j	72.7
k	64.7
l	72.7
m	64.7
n	72.7
o	64.6
p	67.5

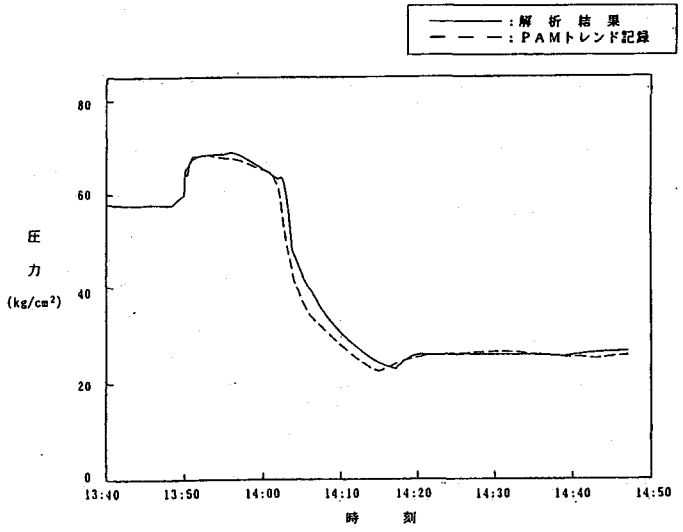


図-3.1.1-(4)　健全側蒸気発生器２次側の圧力

健全側蒸気発生器２次側の圧力

	圧力（kg/cm²）
13:40	57.8
13:41	57.8
13:42	57.7
13:43	57.7
13:44	57.6
13:45	57.7
13:46	57.8
13:47	57.7
13:48	57.6
13:49	58.5
13:50	62.8
13:51	67.5
13:52	68.3
13:53	68.6
13:54	68.6
13:55	68.7
13:56	69.0
13:57	68.4
13:58	67.4
13:59	66.4
14: 0	65.4
14: 1	64.3
14: 2	63.2
14: 3	59.6
14: 4	46.9
14: 5	42.7
14: 6	39.5
14: 7	36.7
14: 8	34.1
14: 9	32.0
14:10	30.2
14:11	28.7
14:12	27.3
14:13	26.1
14:14	24.9
14:15	24.0
14:16	23.3
14:17	22.8
14:18	24.0
14:19	25.2
14:20	25.7
14:21	25.7
14:22	25.6
14:23	25.6
14:24	25.6
14:25	25.6
14:26	25.7
14:27	25.7
14:28	25.7
14:29	25.7
14:30	25.7
14:31	25.7
14:32	25.7
14:33	25.6
14:34	25.6
14:35	25.6
14:36	25.6
14:37	25.5
14:38	25.4
14:39	25.5
14:40	25.6
14:41	25.8
14:42	25.0
14:43	26.1
14:44	26.2
14:45	26.3
14:46	26.3
14:47	26.4

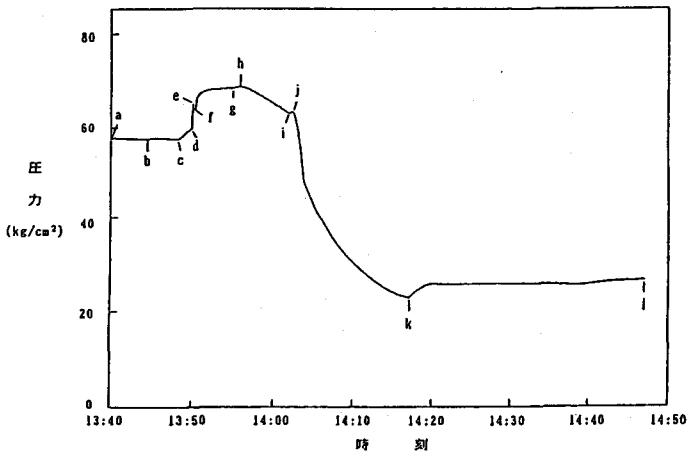


図-3.1.1-(4)　健全側蒸気発生器２次側の圧力

健全側蒸気発生器２次側の圧力

	圧　力(kg/cm²)
a	57.8
b	57.6
c	57.6
d	59.8
e	65.6
f	64.0
g	68.7
h	69.1
i	63.2
j	63.6
k	22.7
l	26.4

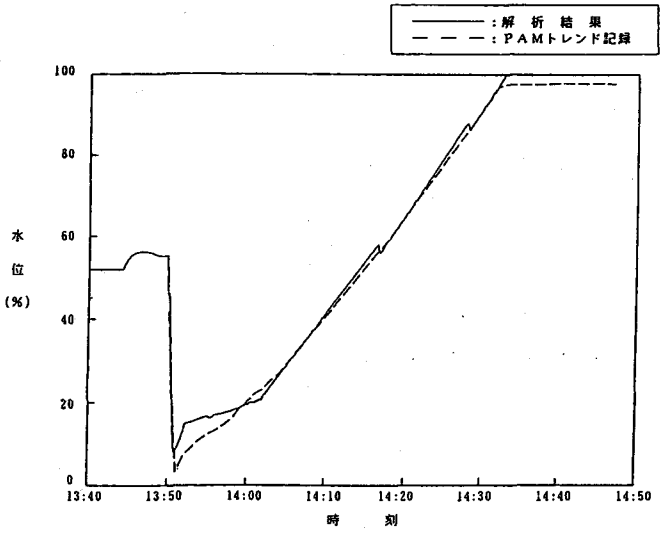


図-3.1.1-(5)　損傷側蒸気発生器水位（狭域）

損傷側蒸気発生器水位（狭域）

	水位（％）
13:40	52.0
13:41	52.0
13:42	52.0
13:43	52.0
13:44	52.0
13:45	54.3
13:46	56.0
13:47	56.3
13:48	55.9
13:49	55.2
13:50	47.1
13:51	8.3
13:52	13.8
13:53	15.3
13:54	16.0
13:55	16.6
13:56	17.0
13:57	17.4
13:58	18.0
13:59	18.4
14: 0	19.5
14: 1	20.1
14: 2	21.1
14: 3	23.6
14: 4	26.1
14: 5	28.6
14: 6	31.0
14: 7	33.5
14: 8	35.0
14: 9	38.8
14:10	41.1
14:11	43.6
14:12	46.2
14:13	48.7
14:14	51.3
14:15	53.8
14:16	56.4
14:17	56.1
14:18	59.0
14:19	62.0
14:20	64.9
14:21	67.8
14:22	70.7
14:23	73.7
14:24	76.7
14:25	79.6
14:26	82.5
14:27	85.4
14:28	87.6
14:29	88.4
14:30	91.4
14:31	94.3
14:32	97.2
14:33	100.0
14:34	100.0
14:35	100.0
14:36	100.0
14:37	100.0
14:38	100.0
14:39	100.0
14:40	100.0
14:41	100.0
14:42	100.0
14:43	100.0
14:44	100.0
14:45	100.0
14:46	100.0
14:47	100.0

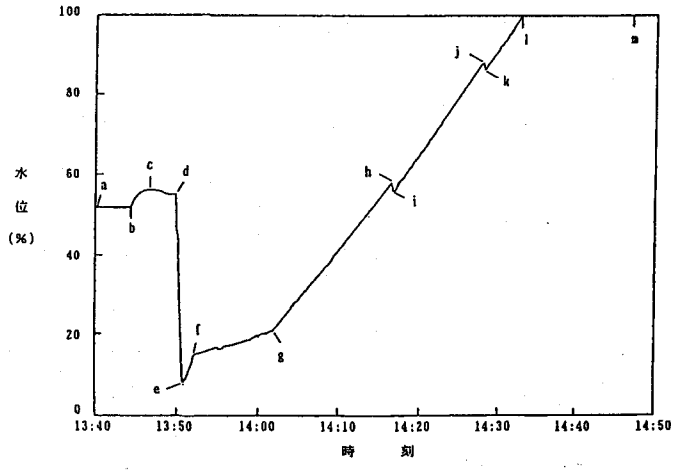


図-3.1.1-(5)　損傷側蒸気発生器水位（狭域）

損傷側蒸気発生器水位（狭域）

	水　位（%）
a	52.0
b	52.0
c	56.3
d	55.3
e	7.8
f	14.6
g	21.1
h	58.0
i	55.7
j	87.9
k	85.9
l	100.0
m	100.0

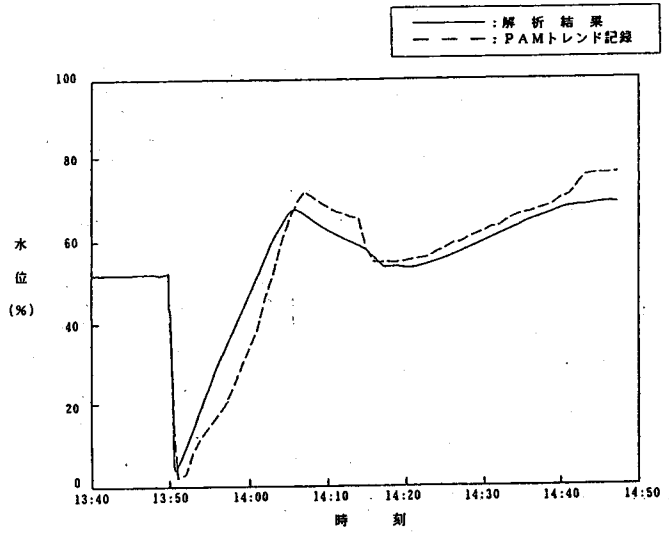


図-3.1.1-(6)　健全側蒸気発生器水位（狭域）

健全側蒸気発生器水位（狭域）

	水位（%）
13:40	52.0
13:41	52.0
13:42	52.0
13:43	52.0
13:44	52.0
13:45	52.0
13:46	52.1
13:47	52.2
13:48	52.1
13:49	51.9
13:50	44.4
13:51	4.6
13:52	9.0
13:53	13.8
13:54	18.9
13:55	24.2
13:56	29.4
13:57	33.8
13:58	38.2
13:59	42.5
14: 0	46.8
14: 1	51.2
14: 2	55.7
14: 3	60.0
14: 4	62.5
14: 5	66.5
14: 6	67.4
14: 7	66.3
14: 8	65.0
14: 9	63.8
14:10	62.6
14:11	61.5
14:12	60.5
14:13	59.6
14:14	58.7
14:15	57.6
14:16	56.0
14:17	52.9
14:18	53.6
14:19	53.6
14:20	53.3
14:21	53.3
14:22	53.7
14:23	54.3
14:24	54.9
14:25	55.6
14:26	56.4
14:27	57.1
14:28	57.9
14:29	58.7
14:30	59.5
14:31	60.4
14:32	61.2
14:33	62.1
14:34	63.0
14:35	63.9
14:36	64.8
14:37	65.2
14:38	65.8
14:39	66.5
14:40	67.3
14:41	67.7
14:42	68.0
14:43	68.1
14:44	68.3
14:45	68.5
14:46	68.7
14:47	68.6

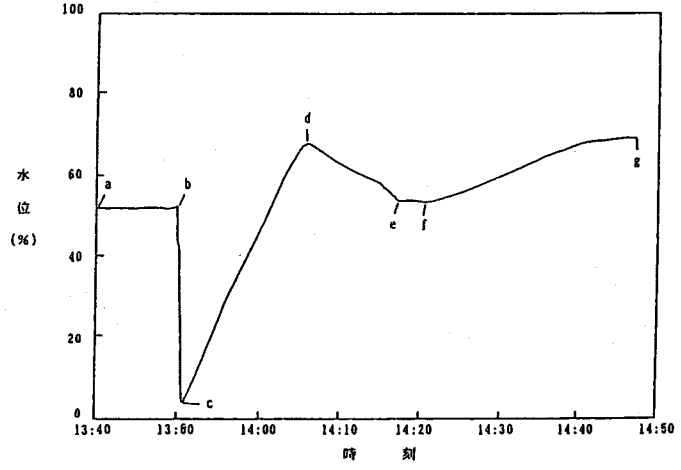


図-3.1.1-(6)　健全側蒸気発生器水位（狭域）

健全側蒸気発生器水位（狭域）

	水位（%）
a	52.0
b	52.5
c	3.9
d	67.5
e	53.5
f	53.2
g	68.6

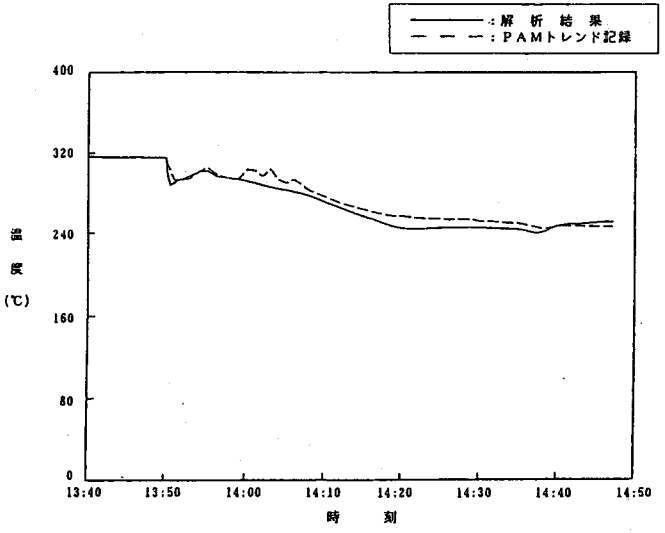


図-3.1.1-(7)　損傷側ループの高温側冷却材温度

損傷側ループの高温側冷却材温度

	温度（℃）
13:40	316.0
13:41	315.9
13:42	315.9
13:43	315.8
13:44	315.8
13:45	315.9
13:46	315.8
13:47	315.6
13:48	315.4
13:49	315.3
13:50	313.2
13:51	288.8
13:52	292.7
13:53	296.3
13:54	299.4
13:55	301.0
13:56	296.4
13:57	294.1
13:58	293.1
13:59	291.9
14: 0	290.4
14: 1	288.6
14: 2	286.7
14: 3	284.9
14: 4	283.3
14: 5	281.9
14: 6	280.2
14: 7	278.1
14: 8	275.7
14: 9	272.9
14:10	269.9
14:11	266.9
14:12	264.0
14:13	261.0
14:14	258.2
14:15	255.5
14:16	253.2
14:17	250.6
14:18	247.9
14:19	245.5
14:20	243.8
14:21	243.1
14:22	243.0
14:23	243.3
14:24	243.7
14:25	244.0
14:26	244.2
14:27	244.4
14:28	244.4
14:29	244.5
14:30	244.1
14:31	243.8
14:32	243.4
14:33	243.1
14:34	242.9
14:35	242.4
14:36	240.8
14:37	239.0
14:38	239.9
14:39	242.8
14:40	246.1
14:41	247.8
14:42	248.3
14:43	248.2
14:44	248.8
14:45	249.3
14:46	249.8
14:47	250.0

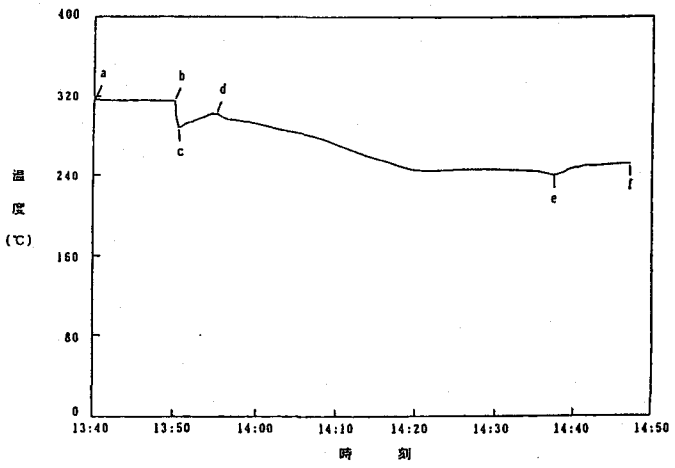


図-3.1.1-(7)　損傷側ループの高温側冷却材温度

損傷側ループの高温側冷却材温度

	温　度 (℃)
a	316.0
b	314.8
c	286.3
d	301.2
e	238.6
f	250.0

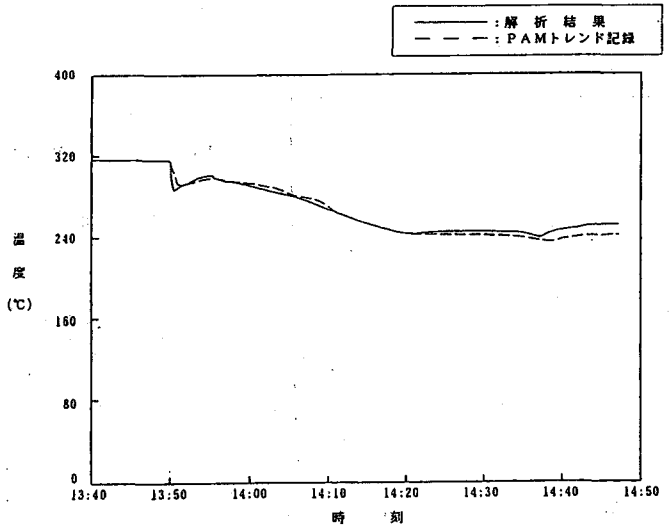


図-3.1.1-(8)　健全側ループの高温側冷却材温度

健全側ループの高温側冷却材温度

	温度 (℃)
13:40	316.0
13:41	315.9
13:42	315.9
13:43	315.8
13:44	315.8
13:45	315.7
13:46	315.6
13:47	315.5
13:48	315.3
13:49	315.3
13:50	312.6
13:51	288.3
13:52	292.5
13:53	296.1
13:54	299.0
13:55	300.5
13:56	296.4
13:57	294.1
13:58	293.0
13:59	291.7
14: 0	289.8
14: 1	287.7
14: 2	285.6
14: 3	283.6
14: 4	281.8
14: 5	280.1
14: 6	278.0
14: 7	275.4
14: 8	272.4
14: 9	269.4
14:10	266.4
14:11	263.4
14:12	260.5
14:13	257.6
14:14	254.9
14:15	252.3
14:16	249.8
14:17	247.4
14:18	245.1
14:19	243.2
14:20	242.4
14:21	242.3
14:22	242.7
14:23	243.2
14:24	243.6
14:25	243.9
14:26	244.1
14:27	244.1
14:28	244.2
14:29	244.0
14:30	243.7
14:31	243.4
14:32	243.1
14:33	242.9
14:34	242.7
14:35	241.8
14:36	240.0
14:37	238.0
14:38	240.6
14:39	243.5
14:40	245.3
14:41	246.4
14:42	247.2
14:43	249.1
14:44	249.9
14:45	250.4
14:46	250.6
14:47	250.7

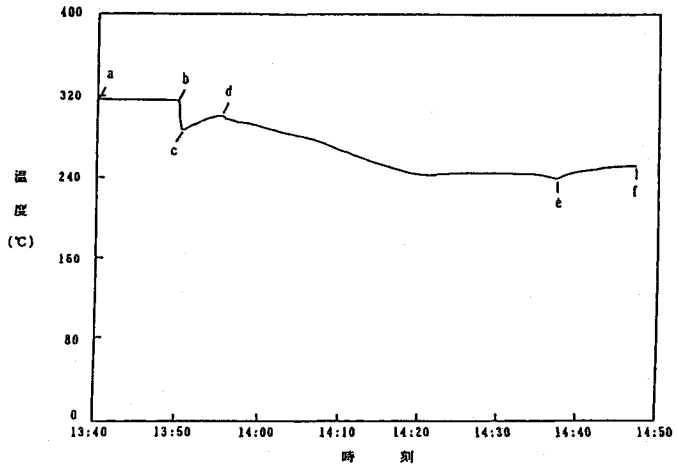


図-3.1.1-(8)　健全側ループの高温側冷却材温度

健全側ループの高温側冷却材温度

	温度（℃）
a	316.0
b	314.7
c	286.1
d	300.5
e	237.6
f	250.7

損傷側蒸気発生器２次側への１次冷却材流出量

	流出量（トン）
13:40	0.0
13:41	0.0
13:42	0.0
13:43	0.0
13:44	0.0
13:45	0.8
13:46	2.1
13:47	3.3
13:48	4.5
13:49	5.7
13:50	6.8
13:51	7.8
13:52	8.7
13:53	9.6
13:54	10.5
13:55	11.3
13:56	12.2
13:57	13.0
13:58	13.9
13:59	14.8
14: 0	15.7
14: 1	16.7
14: 2	17.6
14: 3	18.6
14: 4	19.5
14: 5	20.4
14: 6	21.3
14: 7	22.2
14: 8	23.1
14: 9	24.0
14:10	24.9
14:11	25.7
14:12	26.6
14:13	27.5
14:14	28.3
14:15	29.2
14:16	30.0
14:17	30.9
14:18	31.9
14:19	32.9
14:20	33.9
14:21	34.9
14:22	35.8
14:23	36.8
14:24	37.8
14:25	38.7
14:26	39.7
14:27	40.6
14:28	41.5
14:29	42.6
14:30	43.6
14:31	44.6
14:32	45.6
14:33	46.6
14:34	47.5
14:35	48.5
14:36	49.3
:37	50.2
14:38	50.9
14:39	51.6
14:40	52.4
14:41	53.0
14:42	53.5
14:43	53.9
14:44	54.3
14:45	54.6
14:46	54.8
14:47	54.8

（図-3.4.1　安全解析の解析結果と今回の事象の再現解析の解析結果との比較における今回の事象の再現解析の解析結果の１次冷却材流出量と同じ）

損傷側蒸気発生器の主蒸気逃がし弁からの蒸気放出量

	放出量（1回当り）（トン）	積算（トン）
1回目	0.5	0.5
2回目	0.4	0.9
3回目	0.4	1.3

1次冷却系低温側配管への安全注入流量

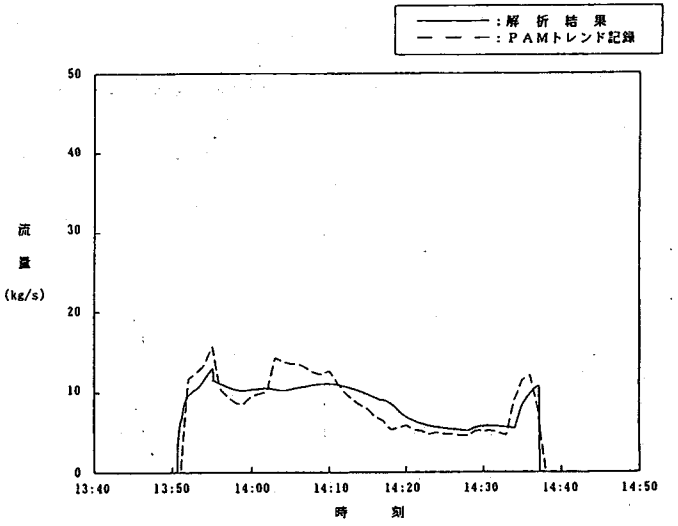


図-3.1.2-(1) 1次冷却系低温側配管への安全注入流量

（15.8m³/h（約4.4kg/s）以下の安全注入流量の計測値は、PAMトレンド記録上はローカット処理され0と記録されている。）

時刻	流量（kg/s）
13:40	0.0
13:41	0.0
13:42	0.0
13:43	0.0
13:44	0.0
13:45	0.0
13:46	0.0
13:47	0.0
13:48	0.0
13:49	0.0
13:50	0.0
13:51	5.2
13:52	9.6
13:53	10.5
13:54	11.6
13:55	12.0
13:56	11.1
13:57	10.7
13:58	10.4
13:59	10.3
14: 0	10.4
14: 1	10.5
14: 2	10.6
14: 3	10.4
14: 4	10.3
14: 5	10.4
14: 6	10.6
14: 7	10.8
14: 8	11.0
14: 9	11.1
14:10	11.1
14:11	11.0
14:12	10.8
14:13	10.5
14:14	10.1
14:15	9.7
14:16	9.3
14:17	9.0
14:18	8.6
14:19	7.7
14:20	6.9
14:21	6.4
14:22	6.0
14:23	5.8
14:24	5.6
14:25	5.5
14:26	5.4
14:27	5.3
14:28	5.2
14:29	5.6
14:30	5.7
14:31	5.7
14:32	5.7
14:33	5.6
14:34	5.5
14:35	8.2
14:36	9.8
14:37	10.7
14:38	0.0
14:39	0.0
14:40	0.0
14:41	0.0
14:42	0.0
14:43	0.0
14:44	0.0
14:45	0.0
14:46	0.0
14:47	0.0

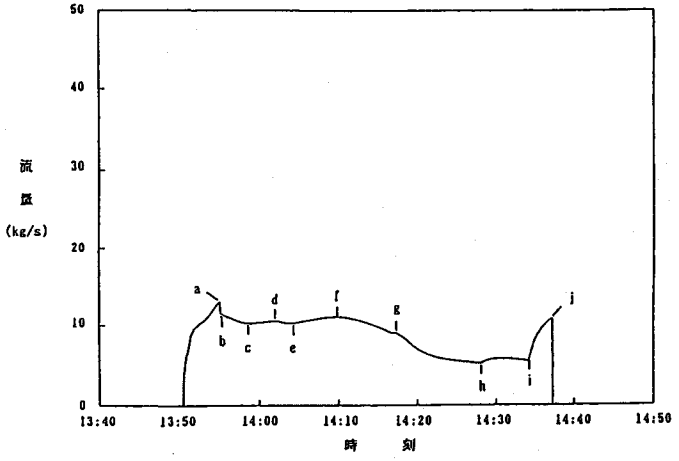


図-3.1.2-(1)　1次冷却系低温側配管への安全注入流量

1次冷却系低温側配管への安全注入流量

	流量 (kg/s)
a	13.1
b	11.5
c	10.3
d	10.6
e	10.3
f	11.1
g	9.0
h	5.2
i	5.5
j	10.8

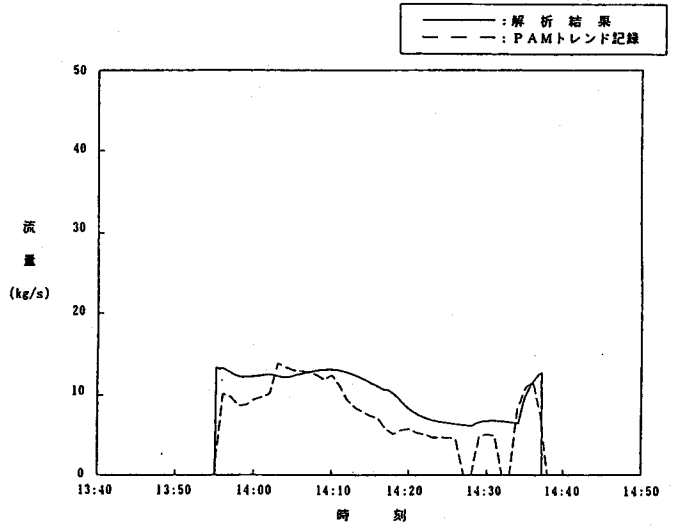


図-3.1.2-(2)　原子炉容器上部プレナム部への安全注入流量

（15.8m³/h（約4.4kg/s）以下の安全注入流量の計測値は、PAMトレンド記録上はローカット処理され0と記録されている。）

	流量 (kg/s)
13:40	0.0
13:41	0.0
13:42	0.0
13:43	0.0
13:44	0.0
13:45	0.0
13:46	0.0
13:47	0.0
13:48	0.0
13:49	0.0
13:50	0.0
13:51	0.0
13:52	0.0
13:53	0.0
13:54	0.0
13:55	0.0
13:56	13.2
13:57	12.7
13:58	12.3
13:59	12.3
14: 0	12.3
14: 1	12.4
14: 2	12.5
14: 3	12.3
14: 4	12.2
14: 5	12.3
14: 6	12.6
14: 7	12.8
14: 8	13.0
14: 9	13.1
14:10	13.1
14:11	13.0
14:12	12.7
14:13	12.4
14:14	12.0
14:15	11.5
14:16	11.0
14:17	10.6
14:18	10.2
14:19	9.2
14:20	8.2
14:21	7.6
14:22	7.1
14:23	6.9
14:24	6.7
14:25	6.5
14:26	6.4
14:27	6.3
14:28	6.1
14:29	6.6
14:30	6.8
14:31	6.8
14:32	6.7
14:33	6.6
14:34	6.5
14:35	9.8
14:36	11.6
14:37	12.7
14:38	0.0
14:39	0.0
14:40	0.0
14:41	0.0
14:42	0.0
14:43	0.0
14:44	0.0
14:45	0.0
14:46	0.0
14:47	0.0

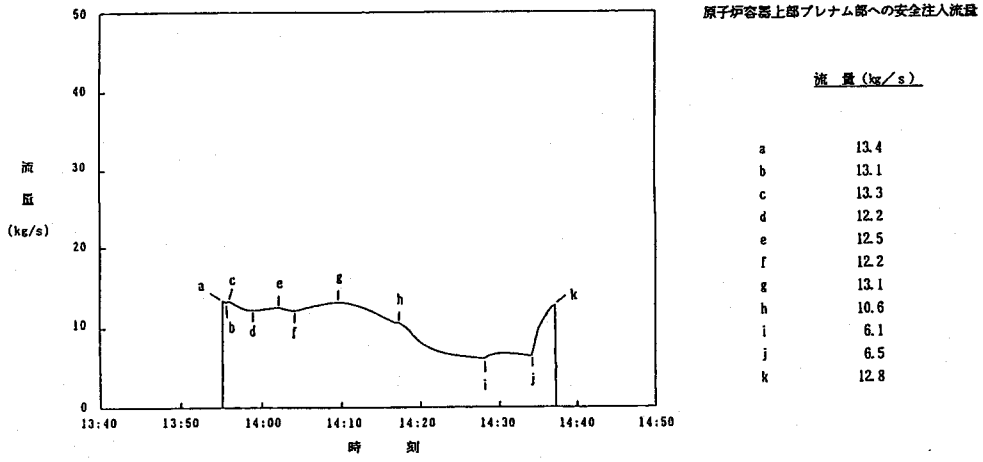
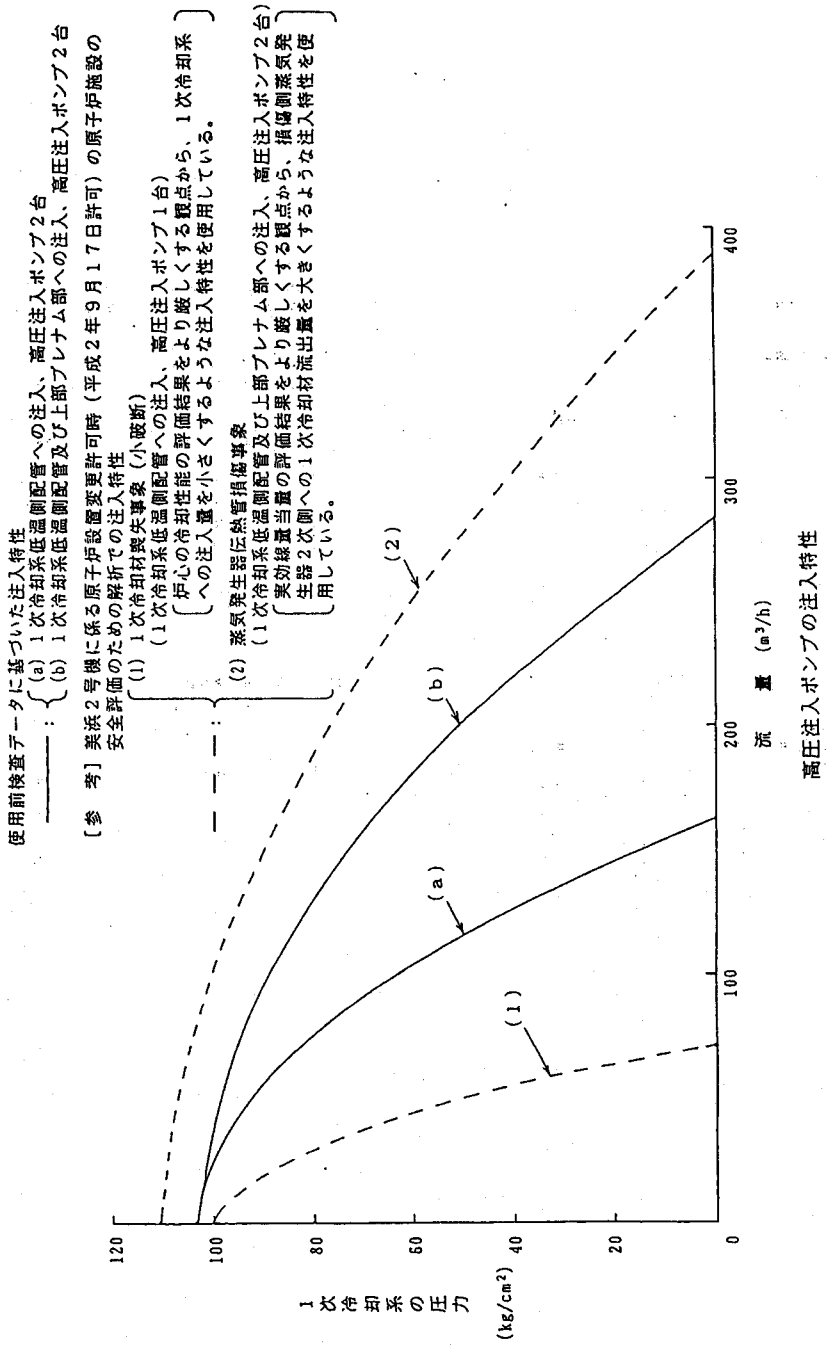


図-3.1.2-(2) 原子炉容器上部プレナム部への安全注入流量



高圧注入ポンプの注入特性

使用前検査データに基づいた注入特性

(a) 1次冷却系低温側配管への注入、高圧注入ポンプ2台

1次冷却系の圧力 (kg/cm²)	流量 (m³/h)
0	163
20	146
40	127
60	105
80	77.5
100	32.5
103	0

(b) 1次冷却系低温側配管及び上部プレナム部への注入、高圧注入ポンプ2台

1次冷却系の圧力 (kg/cm²)	流量 (m³/h)
0	284
20	254
40	221
60	182
80	132
100	52
103	0

美浜2号機に係る原子炉設置変更許可時（平成2年9月17日許可）の
原子炉施設の安全評価のための解析での注入特性

(1) 1次冷却材喪失事象（小破断）

（1次冷却系低温側配管への注入、高圧注入ポンプ1台）

1次冷却系の圧力 (kg/cm²)	流量 (m³/h)
0	73
30	60
50	50
70	38
90	20
100	0

(2) 蒸気発生器伝熱管損傷事象

（1次冷却系低温側配管及び上部プレナム部への注入、高圧注入ポンプ2台）

1次冷却系の圧力 (kg/cm²)	流量 (m³/h)
0	389
25	339
50	283
70	227
90	156
100	103
111	0

(2) 炉心の健全性評価に関する解析結果

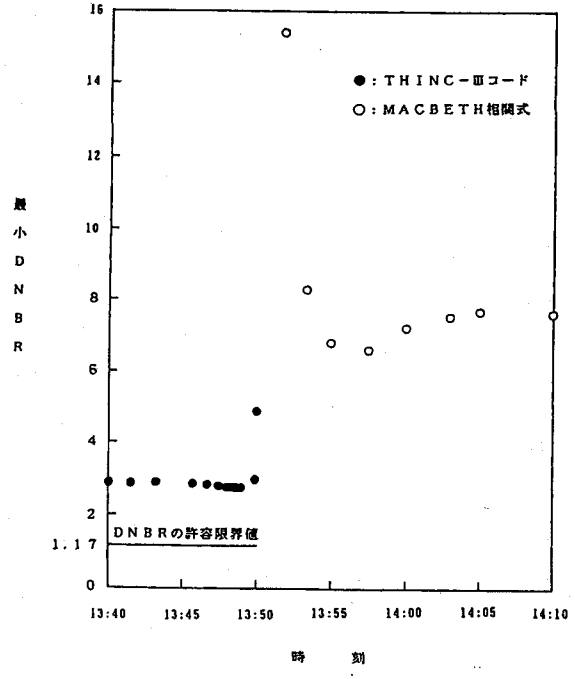


図-3.2.2　最小ＤＮＢＲの解析結果

最小ＤＮＢＲの解析結果

		DNBR
13:40	0	2.89
	100	2.89
	200	2.89
	350	2.86
	400	2.83
	450	2.80
	480	2.77
	500	2.76
	516	2.76
	520	2.76
	540	2.77
	598	2.98
	600	4.87
	700	15.42
	800	8.29
	900	6.79
	1050	6.63
	1200	7.21
	1375	7.53
	1500	7.67
	1800	7.60

(3)安全評価と今回の事象との比較に関する解析結果

今回の事象の再現解析の解析結果の原子炉出力

原子炉出力（％）

13:40	97.9
13:41	97.8
13:42	97.8
13:43	97.8
13:44	97.8
13:45	97.3
13:46	97.1
13:47	97.0
13:48	97.0
13:49	95.2
13:50	9.6
13:51	3.9
13:52	3.1
13:53	2.9
13:54	2.7
13:55	2.6
13:56	2.5
13:57	2.5
13:58	2.4
13:59	2.3
14: 0	2.3
14: 1	2.2
14: 2	2.2
14: 3	2.1
14: 4	2.1
14: 5	2.1
14: 6	2.0
14: 7	2.0
14: 8	2.0
14: 9	1.9
14:10	1.9
14:11	1.9
14:12	1.9
14:13	1.9
14:14	1.8
14:15	1.8
14:16	1.8
14:17	1.8
14:18	1.8
14:19	1.8
14:20	1.7
14:21	1.7
14:22	1.7
14:23	1.7
14:24	1.7
14:25	1.7
14:26	1.7
14:27	1.6
14:28	1.6
14:29	1.6
14:30	1.6
14:31	1.6
14:32	1.6
14:33	1.6
14:34	1.6
14:35	1.6
14:36	1.6
14:37	1.5
14:38	1.5
14:39	1.5
14:40	1.5
14:41	1.5
14:42	1.5
14:43	1.5
14:44	1.5
14:45	1.5
14:46	1.5
14:47	1.5

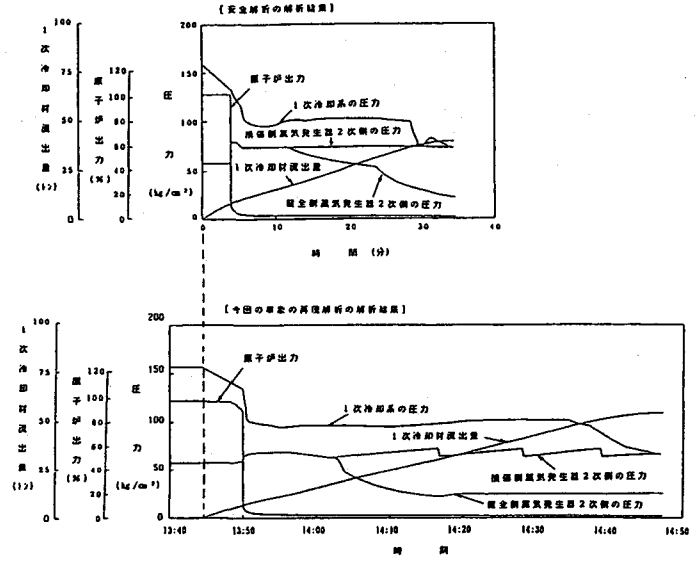


図-3.4.1　安全解析の解析結果と今回の事象の再現解析の解析結果との比較

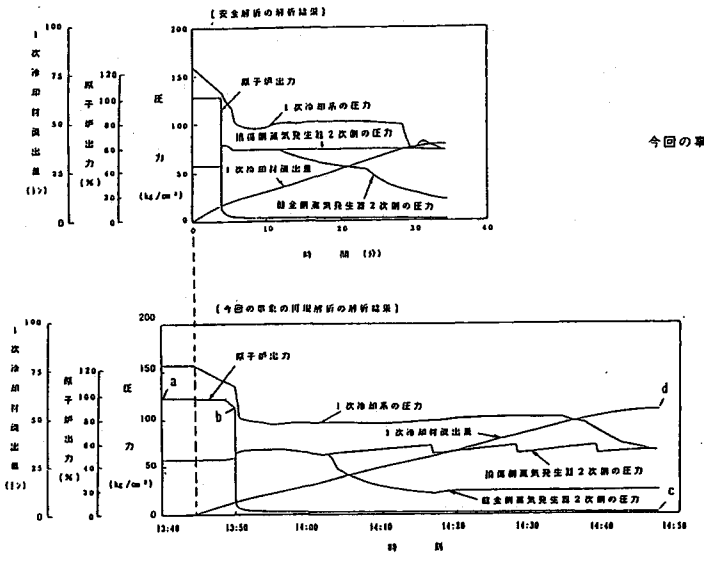


図-3.4.1　安全解析の解析結果と今回の事象の再現解析の解析結果との比較

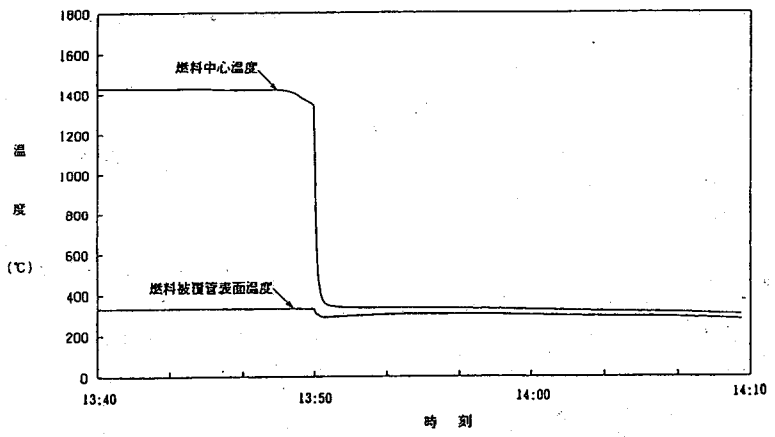
今回の事象の再現解析の解析結果の原子炉出力

	原子炉出力（％）
a	97.9
b	90.1
c	1.5

	1次冷却材流出量（トン）
d	54.8

(4) 炉心の健全性に関するその他の考察に関する解析結果等

燃料中心温度及び燃料被覆管表面温度の解析結果



	燃料中心温度（℃）	被覆管表面温度（℃）
13:40	1429.7	332.2
13:41	1429.2	332.2
13:42	1428.6	332.1
13:43	1428.1	332.0
13:44	1427.3	332.0
13:45	1426.4	331.9
13:46	1421.4	331.8
13:47	1420.9	331.7
13:48	1421.0	331.5
13:49	1405.2	331.4
13:50	1121.8	317.8
13:51	340.8	292.4
13:52	335.5	297.2
13:53	335.3	301.2
13:54	335.6	303.4
13:55	334.8	304.1
13:56	333.7	304.2
13:57	332.5	304.0
13:58	330.7	302.9
13:59	328.1	301.0
14: 0	325.4	299.2
14: 1	322.9	297.2
14: 2	320.4	295.2
14: 3	318.0	293.4
14: 4	315.7	291.7
14: 5	313.6	290.1
14: 6	311.6	288.4
14: 7	309.5	286.7
14: 8	305.3	283.0
14: 9	301.6	279.4

図-3.6.1　燃料中心温度及び燃料被覆管表面温度の解析結果

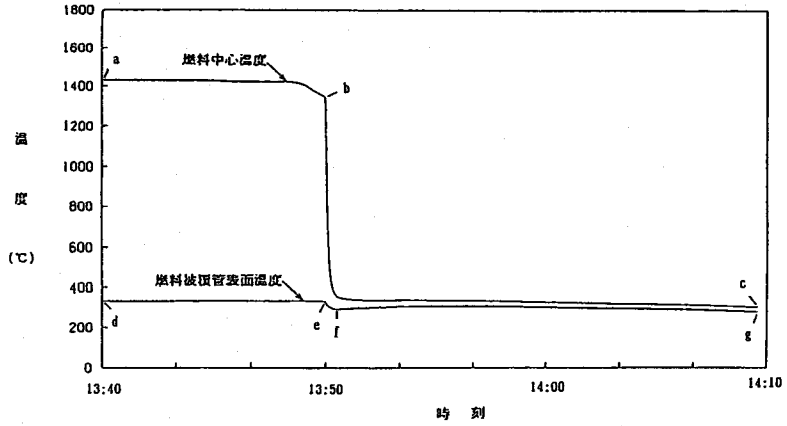


図-3.6.1 燃料中心温度及び燃料被覆管表面温度の解析結果

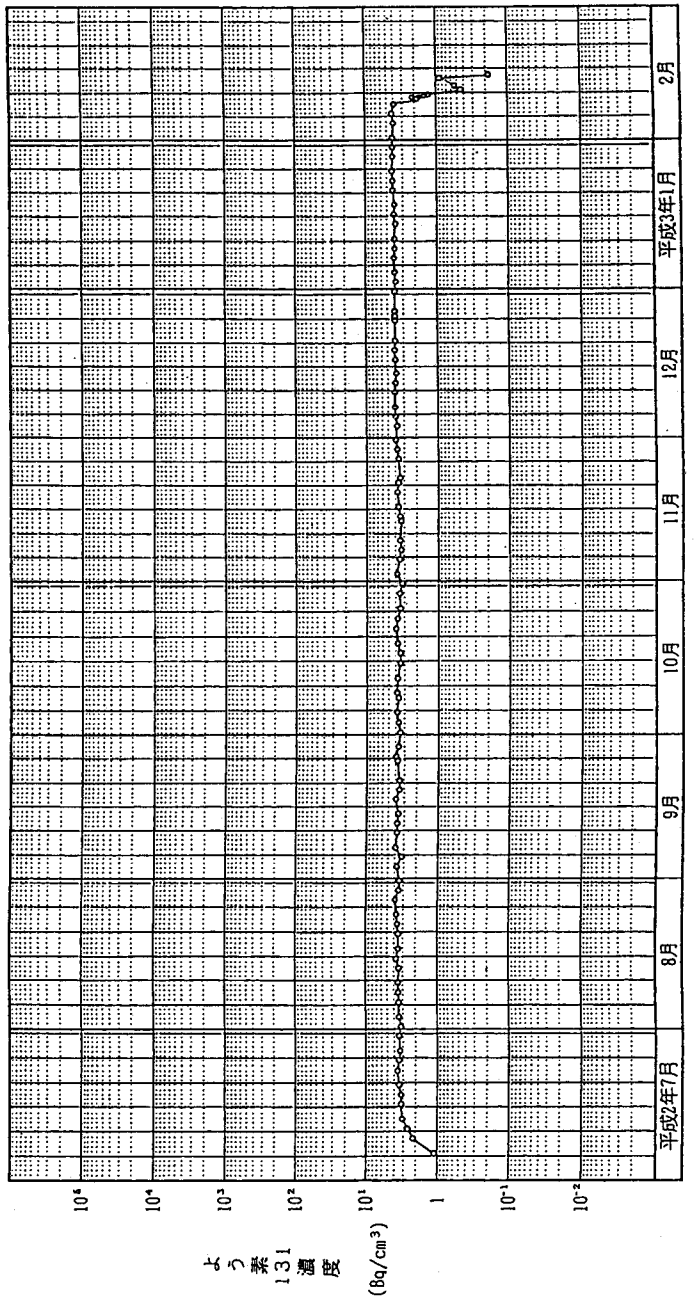
燃料中心温度の解析結果

	温度(℃)
a	1429.7
b	1343.6
c	299.5

燃料被覆管表面温度の解析結果

	温度(℃)
d	332.2
e	330.0
f	289.0
g	277.0

図-3.6.2



1次冷却材中のよう素131濃度の推移（美浜2号機　第14運転期間）

１次冷却材中のよう素１３１濃度の推移（美浜２号機　第１４運転期間）

平成２年７月	
日	I-131 (Bq/cm³)
6	1．1×10⁰
9	2．2×10⁰
11	2．6×10⁰
13	3．1×10⁰
16	3．2×10⁰
18	3．2×10⁰
20	3．4×10⁰
23	3．6×10⁰
25	3．4×10⁰
27	3．3×10⁰
30	3．4×10⁰

平成２年８月	
日	I-131 (Bq/cm³)
1	3．2×10⁰
3	3．4×10⁰
6	3．4×10⁰
8	3．5×10⁰
10	3．5×10⁰
13	3．4×10⁰
15	3．7×10⁰
17	3．5×10⁰
20	3．5×10⁰
22	3．6×10⁰
24	3．7×10⁰
27	3．9×10⁰
29	3．5×10⁰
31	3．4×10⁰

平成２年９月	
日	I-131 (Bq/cm³)
3	3．7×10⁰
5	3．2×10⁰
7	3．9×10⁰
10	3．7×10⁰
12	3．7×10⁰
14	3．6×10⁰
17	3．9×10⁰
19	3．5×10⁰
21	3．5×10⁰
25	3．7×10⁰
26	3．9×10⁰
28	3．6×10⁰

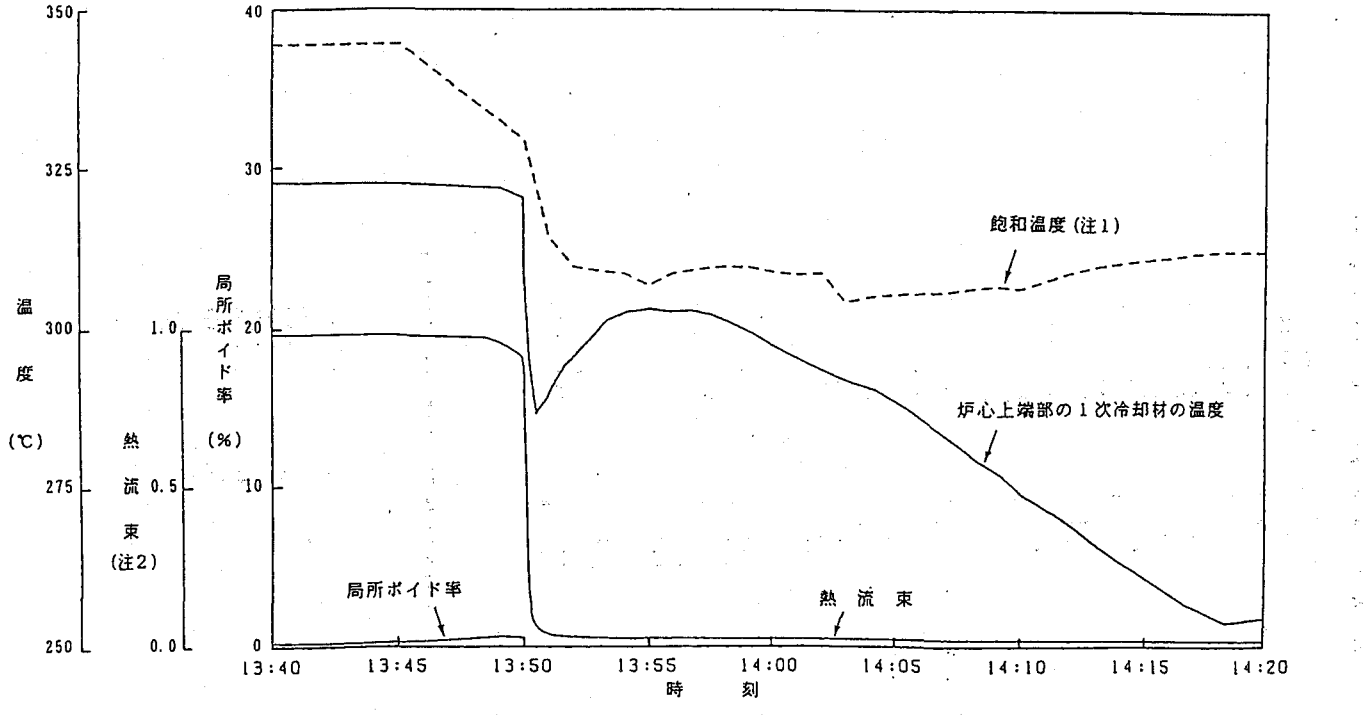
平成２年１０月	
日	I-131 (Bq/cm³)
1	3．4×10⁰
3	3．6×10⁰
5	3．8×10⁰
8	3．6×10⁰
9	3．8×10⁰
12	3．7×10⁰
15	3．4×10⁰
17	3．4×10⁰
19	3．7×10⁰
22	3．9×10⁰
24	3．7×10⁰
26	3．4×10⁰
29	3．5×10⁰
31	3．2×10⁰

平成２年１１月	
日	I-131 (Bq/cm³)
2	3．8×10⁰
5	3．5×10⁰
7	3．3×10⁰
9	3．4×10⁰
13	3．3×10⁰
14	3．4×10⁰
16	3．6×10⁰
19	3．7×10⁰
21	3．6×10⁰
22	3．4×10⁰
26	3．6×10⁰
28	3．7×10⁰
30	3．9×10⁰

平成２年１２月	
日	I-131 (Bq/cm³)
3	3．7×10⁰
5	3．9×10⁰
7	4．0×10⁰
10	4．0×10⁰
12	3．9×10⁰
14	3．8×10⁰
17	3．9×10⁰
19	4．0×10⁰
21	3．9×10⁰
25	3．9×10⁰
26	3．9×10⁰
27	3．9×10⁰
31	3．9×10⁰

平成３年１月	
日	I-131 (Bq/cm³)
2	3．8×10⁰
4	3．9×10⁰
7	4．0×10⁰
9	3．9×10⁰
11	3．9×10⁰
14	3．8×10⁰
16	4．0×10⁰
18	3．9×10⁰
21	4．1×10⁰
23	4．1×10⁰
25	4．2×10⁰
28	4．1×10⁰
30	4．1×10⁰

平成３年２月	
日	I-131 (Bq/cm³)
1	4．1×10⁰
4	4．0×10⁰
6	4．2×10⁰
8	3．9×10⁰
9	1.9×10⁰ 14:50
9	2.3×10⁰ 16:50
9	2.2×10⁰ 18:00
9	1.9×10⁰ 19:00
9	1.9×10⁰ 20:00
9	1.9×10⁰ 21:00
9	1.9×10⁰ 21:15
9	1.8×10⁰ 23:15
10	1.5×10⁰ 01:15
10	1.3×10⁰ 02:30
11	4．3×10⁻¹
12	5．7×10⁻¹
13	8．7×10⁻¹
14	1．8×10⁻¹



（注１）１３時４０分から１３時４９分の間：１次冷却系の圧力（プラント計器記録）からの換算値
１３時５０分から１３時５９分の間：１次冷却系の圧力（ＰＡＭトレンド記録）からの換算値、
１４時０分以降：ＰＡＭトレンド記録
（注２）定格出力運転中の値に対する相対値

炉心上端部の１次冷却材の温度、局所ボイド率及び熱流束の解析結果

図-3.6.3

炉心上端部の１次冷却材の温度、局所ボイド率及び熱流束の解析結果（１／４）

	（秒）	炉心上端部の１次冷却材の温度（℃）
13:40	0.0	322.6
	100.0	322.6
	200.0	322.5
	350.0	322.3
	400.0	322.1
	450.0	322.0
	480.0	321.9
	500.0	321.9
	516.0	321.8
	520.0	321.8
	540.0	321.7
	598.0	320.2
	600.0	310.1
	610.0	296.0
	625.0	286.9
	650.0	289.1
	675.0	292.0
	700.0	294.4
	800.0	301.2
	850.0	302.6
	900.0	303.0
	950.0	302.6
	1000.0	302.8
	1050.0	302.1
	1100.0	300.7
	1150.0	299.2
	1200.0	297.3
	1250.0	295.7
	1300.0	294.1
	1350.0	292.6
	1400.0	291.3
	1450.0	290.3
	1500.0	288.4
	1550.0	286.3
	1600.0	283.9
	1650.0	281.4
	1700.0	278.8
	1750.0	276.8
	1800.0	273.8
	1900.0	269.8
	2000.0	264.9
	2100.0	260.6
	2200.0	256.6
	2300.0	253.7
	2400.0	254.4

炉心上端部の１次冷却材の温度、局所ボイド率及び熱流束の解析結果（２／４）

	（秒）	局所ボイド率（％）
13:40	0.0	0.269
	100.0	0.268
	200.0	0.265
	350.0	0.356
	400.0	0.418
	450.0	0.490
	480.0	0.538
	500.0	0.573
	516.0	0.594
	520.0	0.600
	540.0	0.630
	598.0	0.584
	600.0	0.000

炉心上端部の１次冷却材の温度、局所ボイド率及び熱流束の解析結果（３／４）

	熱流束（％）
13:40	97.9
13:41	97.8
13:42	97.8
13:43	97.8
13:44	97.8
13:45	97.4
13:46	97.1
13:47	97.0
13:48	97.0
13:49	95.5
13:50	59.6
13:51	3.9
13:52	3.1
13:53	2.8
13:54	2.7
13:55	2.6
13:56	2.5
13:57	2.5
13:58	2.4
13:59	2.4
14: 0	2.3
14: 1	2.3
14: 2	2.2
14: 3	2.2
14: 4	2.1
14: 5	2.1
14: 6	2.1
14: 7	2.1
14: 8	2.1
14: 9	2.0
14:10	2.0
14:11	2.0
14:12	2.0
14:13	1.9
14:14	1.9
14:15	1.9
14:16	1.9
14:17	1.8
14:18	1.8
14:19	1.8
14:20	1.7

炉心上端部の１次冷却材の温度、局所ボイド率及び熱流束の解析結果（４／４）

	（秒）	飽和温度（℃）
13:40	0.0	344.8
	300.0	344.8
	480.0	335.5
	600.0	329.3
	660.0	314.2
	720.0	309.7
	780.0	309.0
	840.0	308.6
	900.0	308.7
	960.0	308.3
	1020.0	309.3
	1080.0	309.7
	1140.0	309.6

（１３時４０分から１３時４９分の間の１次冷却系の圧力（プラント計器記録）からの換算値及び１３時５０分から１３時５９分の間の１次冷却系の圧力（ＰＡＭトレンド記録）からの換算値（図-3.6.4-(1),(2)における飽和温度（１３時５０分から１３時５９分の間の１次冷却系の圧力からの換算値と同じ））

1次冷却材の流量の解析結果

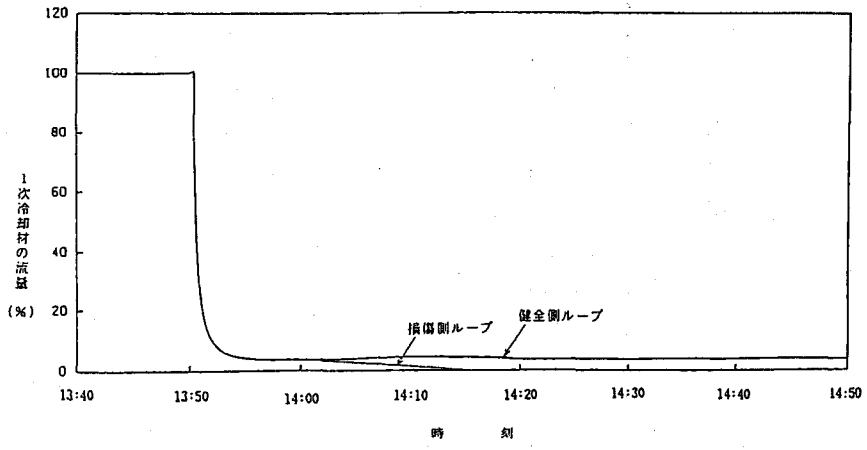


図-3.6.5　1次冷却材の流量の解析結果

	損傷側ループ (%)	健全側ループ (%)
13:40	100.0	100.0
13:41	99.9	99.9
13:42	99.9	99.9
13:43	99.9	99.9
13:44	99.9	99.9
13:45	99.9	99.9
13:46	99.9	99.9
13:47	99.9	99.9
13:48	99.9	99.9
13:49	99.9	99.9
13:50	100.2	100.3
13:51	26.1	26.1
13:52	10.7	10.7
13:53	6.4	6.4
13:54	4.9	4.8
13:55	4.2	4.2
13:56	3.9	3.9
13:57	3.6	3.8
13:58	3.6	3.9
13:59	3.5	3.9
14: 0	3.5	3.9
14: 1	3.4	3.9
14: 2	3.3	3.9
14: 3	3.2	3.8
14: 4	2.9	3.9
14: 5	2.7	4.0
14: 6	2.5	4.2
14: 7	2.2	4.3
14: 8	1.9	4.3
14: 9	1.6	4.4
14:10	1.3	4.4
14:11	1.0	4.4
14:12	0.8	4.4
14:13	0.5	4.4
14:14	0.3	4.3
14:15	0.1	4.3
14:16	0.0	4.2
14:17	0.0	4.2
14:18	0.0	4.1
14:19	0.0	3.8
14:20	0.0	3.5
14:21	0.0	3.5
14:22	0.0	3.5
14:23	0.0	3.5
14:24	0.0	3.5
14:25	0.0	3.5
14:26	0.0	3.6
14:27	0.0	3.6
14:28	0.0	3.6
14:29	0.0	3.5
14:30	0.0	3.5
14:31	0.0	3.6
14:32	0.0	3.6
14:33	0.0	3.5
14:34	0.0	3.5
14:35	0.0	3.5
14:36	0.0	3.5
14:37	0.0	3.5
14:38	0.0	3.3
14:39	0.0	3.4
14:40	0.0	3.5
14:41	0.0	3.6
14:42	0.0	3.5
14:43	0.0	3.7
14:44	0.0	3.7
14:45	0.0	3.7
14:46	0.0	3.8
14:47	0.0	3.8
14:48	0.0	3.8
14:49	0.0	3.8
14:50	0.0	3.8

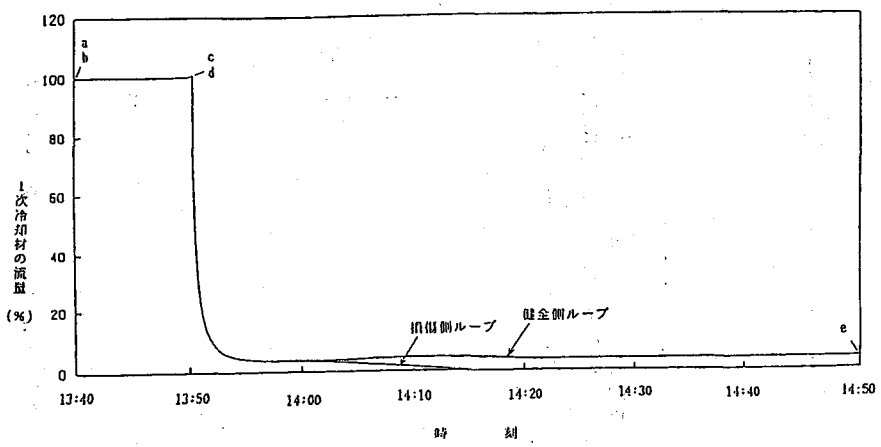


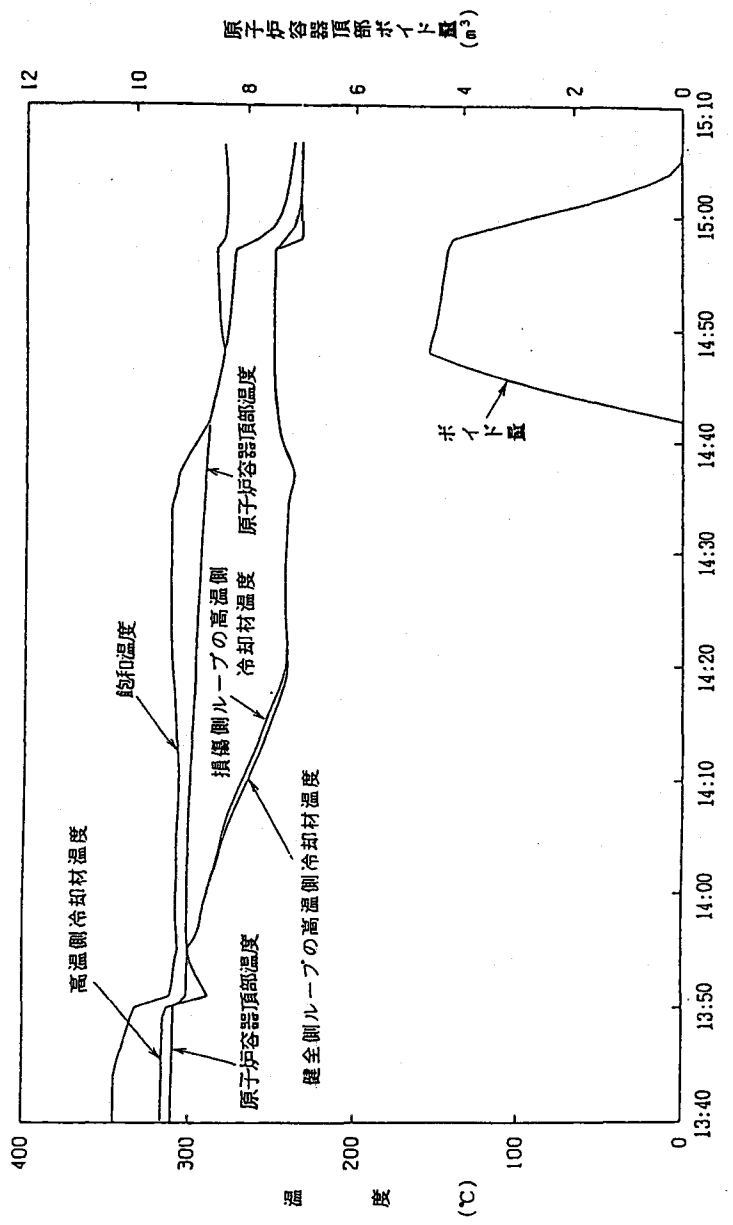
図-3.6.5　1次冷却材の流量の解析結果

1次冷却材の流量の解析結果

1次冷却材の流量（%）

a 損傷側ループ	100.0
b 健全側ループ	100.0
c 損傷側ループ	100.8
d 健全側ループ	100.6
e 健全側ループ	3.8

図-3.6.6



原子炉容器頂部におけるボイド量の解析結果

原子炉容器頂部におけるボイド量の解析結果

時刻	飽和温度 (℃)	原子炉容器頂部温度 (℃)	高温側温度 Aループ (℃)	高温側温度 Bループ (℃)	ボイド量 (m³)
13:40	344.8	310.0	316.0	316.0	0.0
41	344.7	310.0	315.9	315.9	0.0
42	344.7	310.0	315.9	315.9	0.0
43	344.7	309.9	315.8	315.8	0.0
44	344.7	309.9	315.8	315.8	0.0
45	343.3	309.8	315.9	315.7	0.0
46	341.1	309.6	315.8	315.6	0.0
47	338.9	309.5	315.6	315.5	0.0
48	336.8	309.4	315.4	315.3	0.0
49	334.9	309.3	315.3	315.3	0.0
50	332.0	309.2	313.2	312.6	0.0
51	310.9	301.4	288.8	288.3	0.0
52	309.6	301.0	292.7	292.5	0.0
53	308.8	301.0	296.3	296.1	0.0
54	307.9	301.0	299.4	299.0	0.0
55	306.6	301.0	301.0	300.5	0.0
56	307.1	301.1	296.4	296.4	0.0
57	307.6	301.2	294.1	294.1	0.0
58	308.1	301.3	293.1	293.0	0.0
59	308.1	301.4	291.9	291.7	0.0
14:00	308.1	301.4	290.4	289.8	0.0
01	307.9	301.5	288.6	287.7	0.0
02	307.8	301.4	286.7	285.6	0.0
03	308.1	301.4	284.9	283.6	0.0
04	308.2	301.4	283.3	281.8	0.0
05	308.0	301.3	281.9	280.1	0.0
06	307.8	301.2	280.2	278.0	0.0
07	307.6	301.1	278.1	275.4	0.0
08	307.4	301.0	275.7	272.4	0.0
09	307.2	300.8	272.9	269.4	0.0
10	307.2	300.6	269.9	266.4	0.0
11	307.4	300.3	266.9	263.4	0.0
12	307.6	300.0	264.0	260.5	0.0
13	307.9	299.7	261.0	257.6	0.0
14	308.3	299.3	258.2	254.9	0.0
15	308.7	298.9	255.5	252.3	0.0
16	309.2	298.6	253.2	249.8	0.0
17	309.5	298.2	250.6	247.4	0.0
18	309.9	297.9	247.8	245.1	0.0
19	310.6	297.7	245.5	243.3	0.0
20	311.2	297.5	243.8	242.4	0.0
21	311.5	297.3	243.1	242.3	0.0
22	311.8	297.1	243.0	242.7	0.0
23	311.9	296.8	243.3	243.2	0.0
24	312.0	296.4	243.7	243.6	0.0
25	312.1	296.1	244.0	243.9	0.0
26	312.2	295.8	244.2	244.1	0.0
27	312.3	295.5	244.4	244.1	0.0
28	312.3	295.1	244.4	244.2	0.0
29	312.1	294.8	244.5	244.0	0.0
30	312.0	294.4	244.1	243.7	0.0
31	312.0	294.1	243.8	243.4	0.0
32	312.0	293.7	243.4	243.1	0.0
33	312.1	293.4	243.1	242.9	0.0
34	312.1	293.0	242.9	242.7	0.0
35	310.3	292.6	242.4	241.8	0.0
36	308.7	292.2	240.8	240.0	0.0
37	307.7	291.8	239.0	238.0	0.0

時刻	飽和温度 (℃)	原子炉容器頂部温度 (℃)	高温側温度 Aループ (℃)	高温側温度 Bループ (℃)	ボイド量 (m³)
38	304.5	291.3	239.9	240.6	0.0
39	300.9	290.9	242.8	243.5	0.0
40	297.0	290.5	246.1	245.3	0.0
41	293.3	290.1	247.8	246.4	0.0
42	289.7	289.6	248.3	247.3	0.0
43	288.2	288.2	248.2	249.1	0.9
44	286.6	286.6	248.8	249.9	1.8
45	285.3	285.3	249.3	250.4	2.7
46	283.7	283.7	249.8	250.6	3.4
47	282.3	282.3	250.0	250.7	4.1
48	281.1	281.1	250.1	250.7	4.6
49	282.4	279.6	250.3	250.5	4.6
50	283.4	278.6	250.4	250.4	4.5
51	283.8	277.9	250.5	250.3	4.5
52	284.1	277.2	250.5	250.1	4.5
53	284.4	276.5	250.4	250.0	4.4
54	284.7	275.9	250.3	249.9	4.4
55	285.0	275.3	250.2	249.8	4.4
56	285.2	274.7	250.1	249.7	4.3
57	285.4	274.2	250.0	249.6	4.3
58	280.6	259.7	244.0	233.4	4.2
59	279.9	251.2	238.6	233.3	3.5
15:00	279.0	246.9	236.0	233.7	2.7
01	278.9	244.5	234.7	233.8	1.9
02	279.0	243.0	234.0	233.9	1.2
03	279.1	241.9	233.6	233.9	0.6
04	279.5	240.9	233.3	233.8	0.2
05	280.0	239.8	233.0	233.7	0.0
06	280.6	238.9	232.8	233.6	0.0

表-3.6.1

1次冷却系への水の注入量及び損傷側蒸気発生器2次側への1次冷却材流出量の推移

［単位：トン］

安全注入開始からの経過時間	安全注入量 a	充てんポンプからの注入量 充てん量 b	充てんポンプからの注入量 加圧器補助スプレ量 c	抽出量 d	注入量計 (A)= a+b+c-d	1次冷却材流出量 (B)	水収支 (A)-(B)
～0分（注1）	—	1.5	—	1.1	0.4	7.4	−7.0
0～5分	3.4	—	—	—	3.4	4.4	−1.0
5～10分	6.9	—	—	—	6.9	4.5	2.5
10～15分	6.8	—	—	—	6.8	4.7	2.1
15～20分	7.2	—	—	—	7.2	4.4	2.8
20～25分	6.8	0.6	—	—	7.4	4.3	3.1
25～30分	5.4	1.4	—	—	6.8	4.8	2.0
30～35分	3.8	1.6	—	—	5.4	4.8	0.6
35～40分	3.6	1.6	—	—	5.2	4.9	0.3
40～45分	4.1	1.5	0.1	—	5.7	4.8	0.9
45～50分	2.1	1.2	0.4	—	3.7	3.8	−0.1
50～55分	—	1.2	0.4	—	1.6	2.0	−0.4
55～57分	—	0.6	0.2	—	0.8	0.1	0.7
合　計	50.1	11.3	1.1	1.1	61.4	54.8	6.6

（注1）解析開始時点から安全注入開始時点までを示す。
（注2）四捨五入のため個々の数値の集計値と合計欄及び水収支の欄の合計数値は必ずしも一致しない。

1次冷却系への水の注入量及び損傷側蒸気発生器2次側への1次冷却材流出量の推移

（単位：トン）

安全注入開始からの経過時間（分）	安全注入量 a	5分間	充てんポンプからの注入量 充てん量 b	5分間	充てんポンプからの注入量 加圧器補助スプレ量 c	5分間	抽出量 d	5分間	注入量計 A=a+b+c-d	5分間	1次冷却材流出量 B	5分間	水収支 A-B	5分間
-10	0.00		0.07	0.1	0.00	0.0	0.07	0.1	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
-9	0.00		0.13		0.00		0.13		0.00		0.00		0.00	
-8	0.00		0.13		0.00		0.13		0.00		0.00		0.00	
-7	0.00		0.13		0.00		0.13		0.00		0.00		0.00	
-6	0.00		0.13		0.00		0.13		0.00		0.22		-0.22	
-5	0.00	0.0	0.14	0.7	0.00	0.0	0.13	0.7	0.01	0.0	1.29	1.5	-1.28	-1.5
-4	0.00		0.16		0.00		0.13		0.03		1.25		-1.22	
-3	0.00		0.17		0.00		0.13		0.04		1.22		-1.17	
-2	0.00		0.17		0.00		0.13		0.04		1.18		-1.14	
-1	0.00		0.17		0.00		0.01		0.15		1.14		-0.98	
0	0.00	0.0	0.10	0.8	0.00	0.0	0.00	0.4	0.10	0.4	1.06	5.9	-0.96	-5.5
1	0.37		0.00		0.00		0.00		0.37		0.95		-0.58	
2	0.58		0.00		0.00		0.00		0.58		0.92		-0.34	
3	0.63		0.00		0.00		0.00		0.63		0.89		-0.25	
4	0.70		0.00		0.00		0.00		0.70		0.86		-0.16	
5	1.10	3.4	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	1.10	3.4	0.82	4.4	0.28	-1.0
6	1.46		0.00		0.00		0.00		1.46		0.85		0.61	
7	1.40		0.00		0.00		0.00		1.40		0.87		0.53	
8	1.36		0.00		0.00		0.00		1.36		0.89		0.47	
9	1.35		0.00		0.00		0.00		1.35		0.91		0.44	
10	1.36	6.9	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	1.36	6.9	0.93	4.5	0.44	2.5
11	1.38		0.00		0.00		0.00		1.38		0.94		0.43	
12	1.38		0.00		0.00		0.00		1.38		0.95		0.43	
13	1.36		0.00		0.00		0.00		1.36		0.94		0.42	
14	1.35		0.00		0.00		0.00		1.35		0.93		0.42	
15	1.37	6.8	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	1.37	6.8	0.92	4.7	0.45	2.1
16	1.39		0.00		0.00		0.00		1.39		0.91		0.48	
17	1.42		0.00		0.00		0.00		1.42		0.90		0.52	
18	1.44		0.00		0.00		0.00		1.44		0.88		0.55	
19	1.45		0.00		0.00		0.00		1.45		0.87		0.58	
20	1.45	7.2	0.03	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	1.48	7.2	0.87	4.4	0.61	2.8
21	1.43		0.06		0.00		0.00		1.50		0.86		0.63	
22	1.41		0.09		0.00		0.00		1.50		0.86		0.64	
23	1.37		0.13		0.00		0.00		1.50		0.86		0.64	
24	1.33		0.16		0.00		0.00		1.48		0.86		0.63	
25	1.27	6.8	0.19	0.6	0.00	0.0	0.00	0.0	1.46	7.4	0.86	4.3	0.60	3.1
26	1.22		0.22		0.00		0.00		1.44		0.86		0.58	
27	1.17		0.25		0.00		0.00		1.43		0.96		0.46	
28	1.12		0.29		0.00		0.00		1.40		0.98		0.42	
29	1.01		0.32		0.00		0.00		1.32		0.98		0.34	
30	0.90	5.4	0.32	1.4	0.00	0.0	0.00	0.0	1.23	6.8	0.99	4.8	0.24	2.0
31	0.84		0.32		0.00		0.00		1.16		0.98		0.18	
32	0.79		0.32		0.00		0.00		1.11		0.97		0.14	
33	0.76		0.32		0.00		0.00		1.08		0.97		0.11	
34	0.73		0.32		0.00		0.00		1.06		0.96		0.10	
35	0.72	3.8	0.32	1.6	0.00	0.0	0.00	0.0	1.04	5.4	0.95	4.8	0.09	0.6
36	0.71		0.32		0.00		0.00		1.03		0.94		0.09	
37	0.69		0.32		0.00		0.00		1.01		0.93		0.08	
38	0.69		0.32		0.00		0.00		1.01		0.98		0.03	
39	0.73		0.32		0.00		0.00		1.05		1.02		0.03	
40	0.75	3.6	0.32	1.6	0.00	0.0	0.00	0.0	1.07	5.2	1.01	4.9	0.06	0.3
41	0.75		0.32		0.00		0.00		1.07		1.00		0.08	
42	0.74		0.32		0.00		0.00		1.06		0.98		0.08	
43	0.73		0.32		0.00		0.00		1.05		0.97		0.08	
44	0.76		0.29		0.03		0.00		1.09		0.95		0.13	
45	1.08	4.1	0.24	1.5	0.08	0.1	0.00	0.0	1.41	5.7	0.90	4.8	0.51	0.9
46	1.29		0.24		0.08		0.00		1.61		0.85		0.76	
47	0.83		0.24		0.08		0.00		1.16		0.81		0.35	
48	0.00		0.24		0.08		0.00		0.32		0.72		-0.39	
49	0.00		0.24		0.08		0.00		0.32		0.74		-0.41	
50	0.00	2.1	0.24	1.2	0.08	0.4	0.00	0.0	0.32	3.7	0.66	3.8	-0.34	-0.1
51	0.00		0.24		0.08		0.00		0.32		0.56		-0.23	
52	0.00		0.24		0.08		0.00		0.32		0.45		-0.13	
53	0.00		0.24		0.08		0.00		0.32		0.39		-0.06	
54	0.00		0.24		0.08		0.00		0.32		0.32		0.00	
55	0.00	0.0	0.24	1.2	0.08	0.4	0.00	0.0	0.32	1.6	0.24	2.0	0.09	-0.4
56	0.00		0.24		0.08		0.00		0.32		0.11		0.21	
57	0.00		0.24		0.08		0.00		0.32		0.00		0.32	
～評価終了時点	0.00	0.0	0.10	0.6	0.03	0.2	0.00	0.0	0.13	0.8	0.00	0.1	0.13	0.7
合　計		50.1		11.3		1.1		1.1		61.4		54.8		6.6

（注）四捨五入のため個々の数値の集計値と合計欄及び水収支の欄の合計数値は必ずしも一致しない。

１８．ＡＪＢ点検チェックシート

2 号 機

原非	原本箇所	期間	選実	分類
	美浜発電所 運転室	3	年 年	事故防止計画

室長	当直課長	主任	重責

実施日　平成 2 年 6 月 22 日

Ⅷ－10
AJBの点検整備

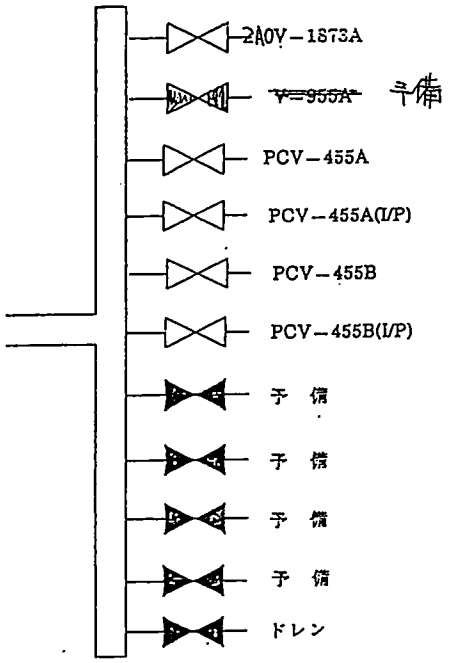
1. 実施時期
定検末期

2. 主要確認および注意事項
(1) AJBリストにより弁開閉状況をチェックし異常の有無を点検し不具合箇所があれば記入する。
(2) AJBリストも同時に提出する。
(3) Ⅷ－8注意札の点検・整備のうちのAJB表示札.注意札の点検・整備も実施する。
(4) ループ室内のAJB;CV-6 CV-12 (CV-14) は予備で空気元弁は閉止する。

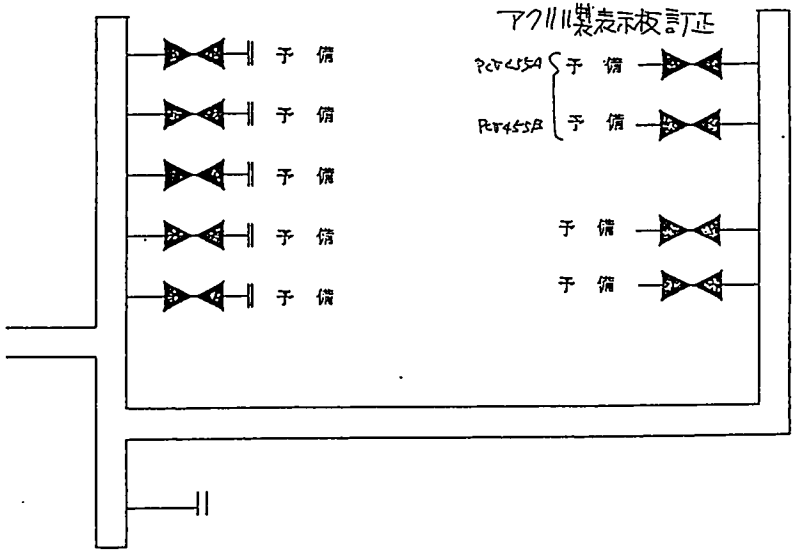
No.	系統	結果	処置	確認者	備考
1	原紙訂正依頼	(リスト内朱記入済)	業務係へ		
		ページ Ⅲ 10→3.4.5.7.8.9			
		10.11.12 13.15 18.22			
		23.28.34.35.37.38.40			
		41.44.46.48.50 52			
		53.54.55.56			
2	弁名板訂正依頼	(AJB内ミニ五ア弁)	計測係へ		
		ページ Ⅲ 10-5.7.9.10			
		12 15.49.56			
3	アクリル製表示板訂正	ページ Ⅲ 10-5.10.13.23.30	計測係へ		
	(整面.査察)	39			

※ 計測係への不具合については業務連絡発行.

2号機　AJB－CV－13



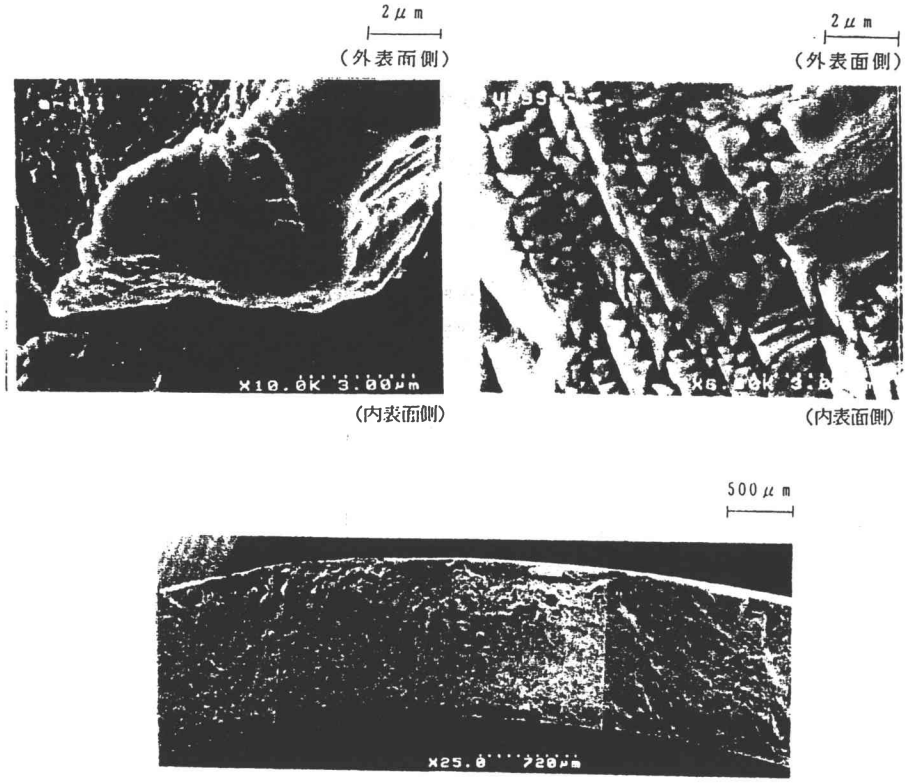
2号機　AJB－CV－14(A.LooP室内予備)



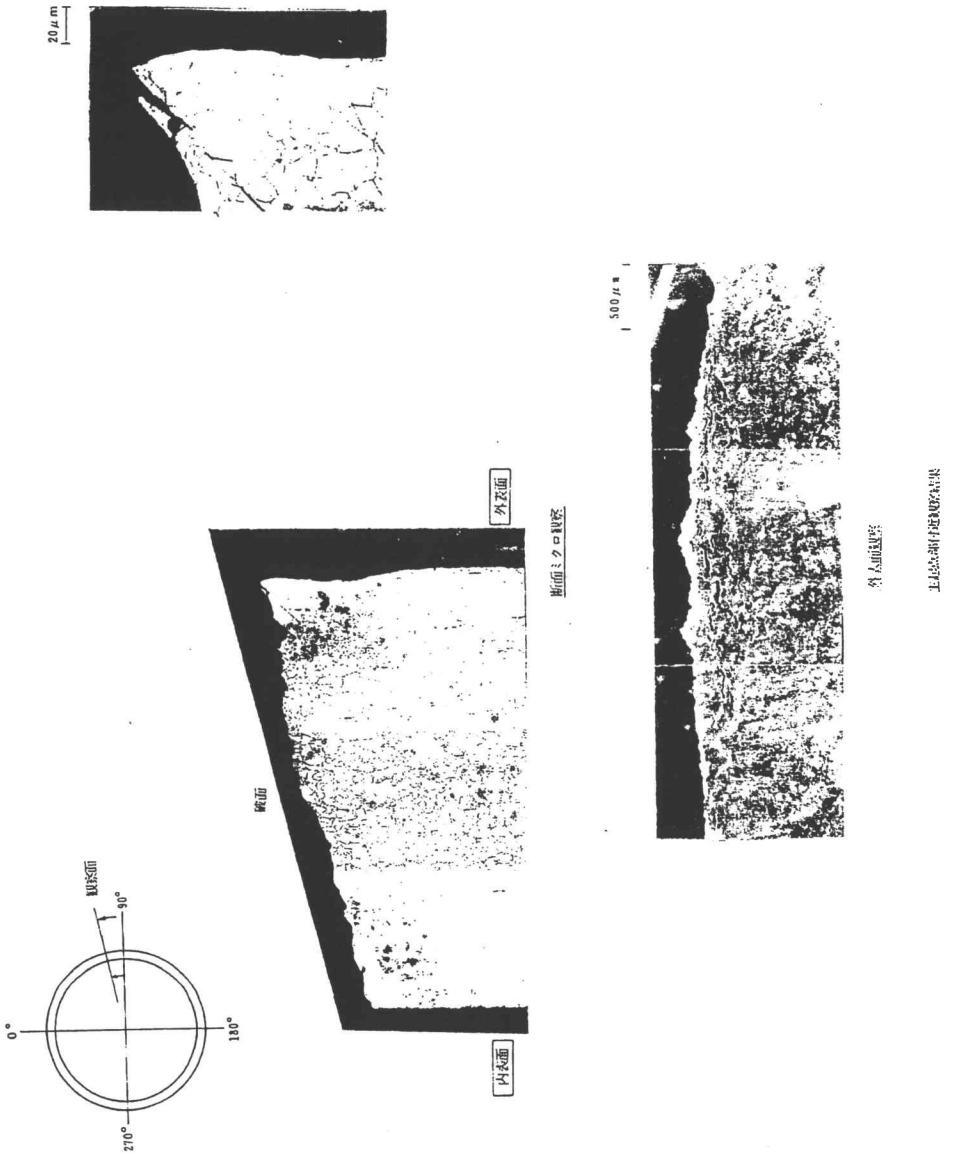
写　真　集

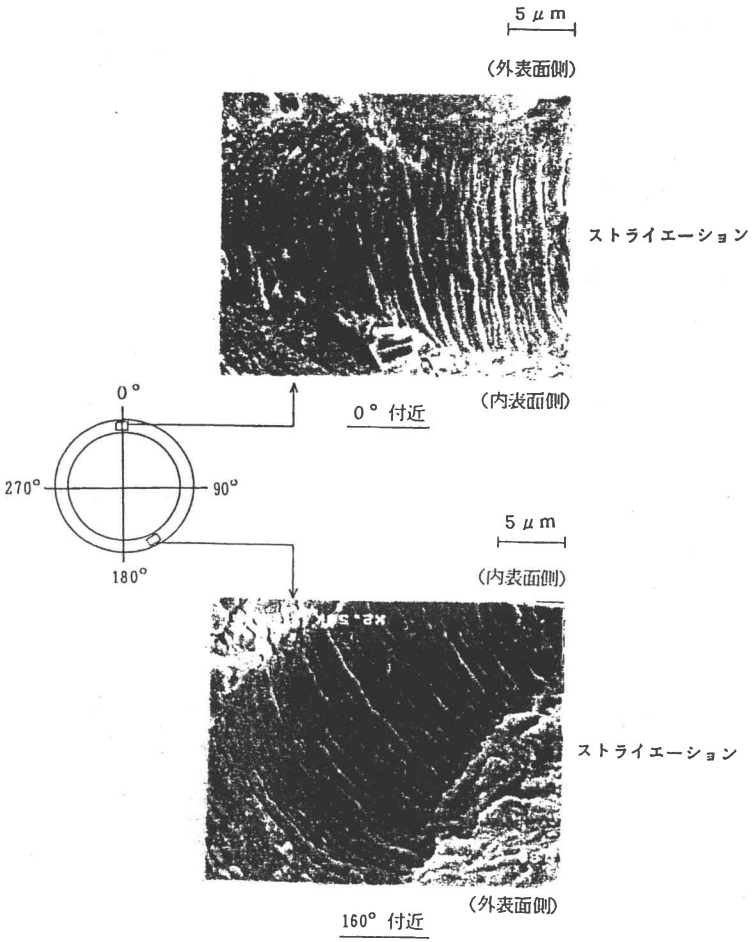
目　次

1. 破面主起点部付近観察結果（下側破面）（図-4.1.2）
2. 主起点部付近の断面ミクロ観察結果（下側破面）（図-4.1.3）
   破断部の外表面観察結果（下側破面）（図-4.1.6）
3. き裂伝播部破面観察結果（下側破面）（図-4.1.4）
4. 破面観察結果（下側破面）（図-4.1.5）
5. 破面観察結果（上側破面）（図-4.1.5）
6. 低温側第6管支持板部の摩擦減肉状況観察結果（図-4.1.9）
   X45-Y15 低温側第6管支持板部
7. 低温側第6管支持板部の摩擦減肉状況観察結果（図-4.1.9）
   X45-Y15 低温側第6管支持板部
8. 低温側第6管支持板部の摩擦減肉状況観察結果（図-4.1.9）
   X45-Y19 低温側第6管支持板部
9. 低温側第6管支持板部の摩擦減肉状況観察結果（図-4.1.9）
   X45-Y15 低温側第6管支持板部摩耗減肉部
10. 第6管支持板の水平断面ミクロ観察結果（管支持板板厚中央）（図-4.1.10）
    X45－Y14低温側、X45－Y15高温側
11. フレッチング疲労試験片と破断管の外表面観察結果（図-4.3.6）
12. フレッチング疲労試験片と破断管の断面及び破面の詳細観察結果（図-4.3.7）
13. ＣＣＤカメラ点検図
14. 美浜発電所2号機Ａ－蒸気発生器伝熱管
    破断管（X45－Y14）破面観察結果（速報）
15. 破面の観察結果
16. 破断管（X45－Y14）破面観察結果
17. 破断管（X45－Y14）主起点部付近観察結果及び試験片との比較
18. 周辺管管支持板部の損傷状況観察結果
    第6管支持板の水平断面ミクロ観察結果

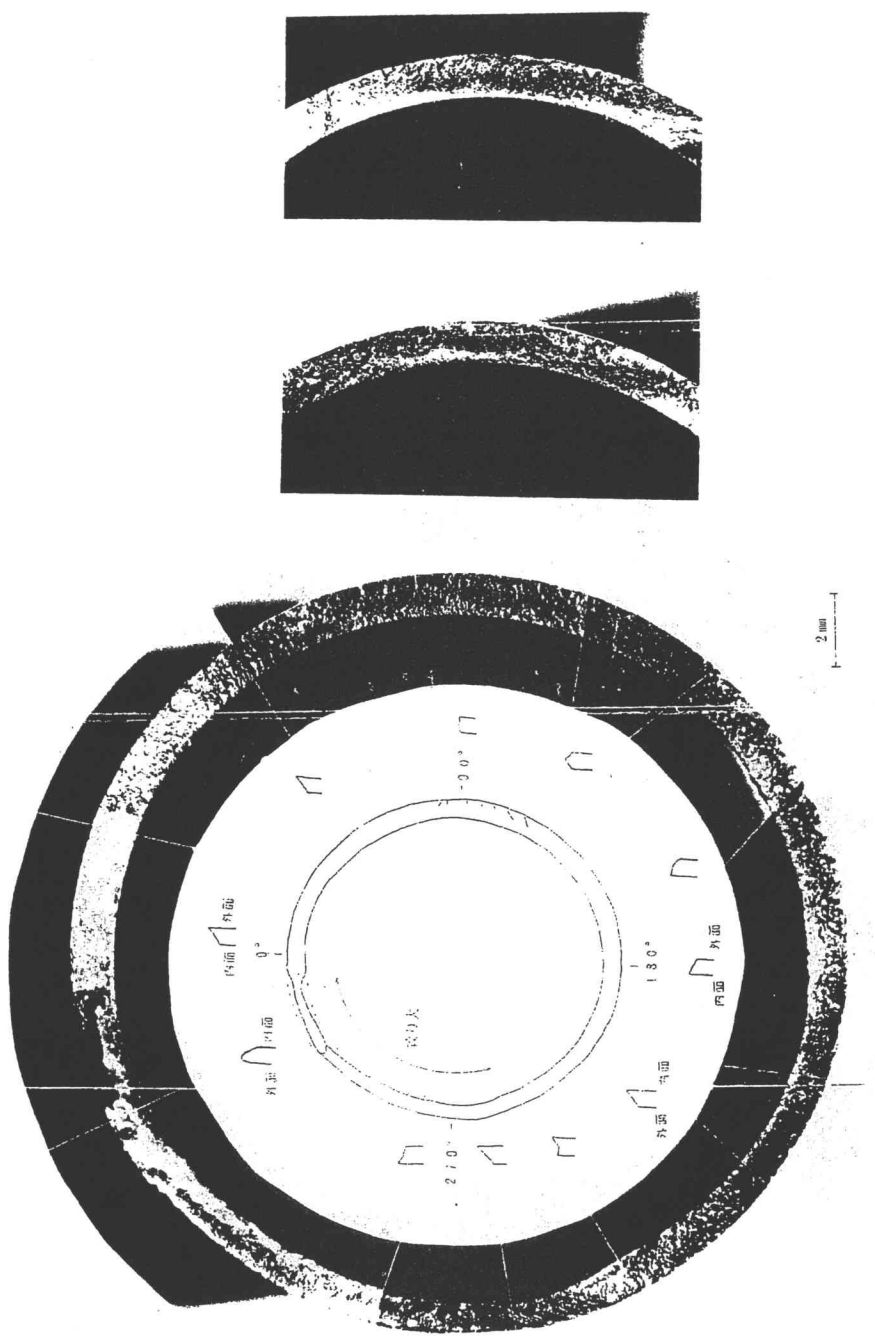


破面主起点部付近観察結果（下側破面）

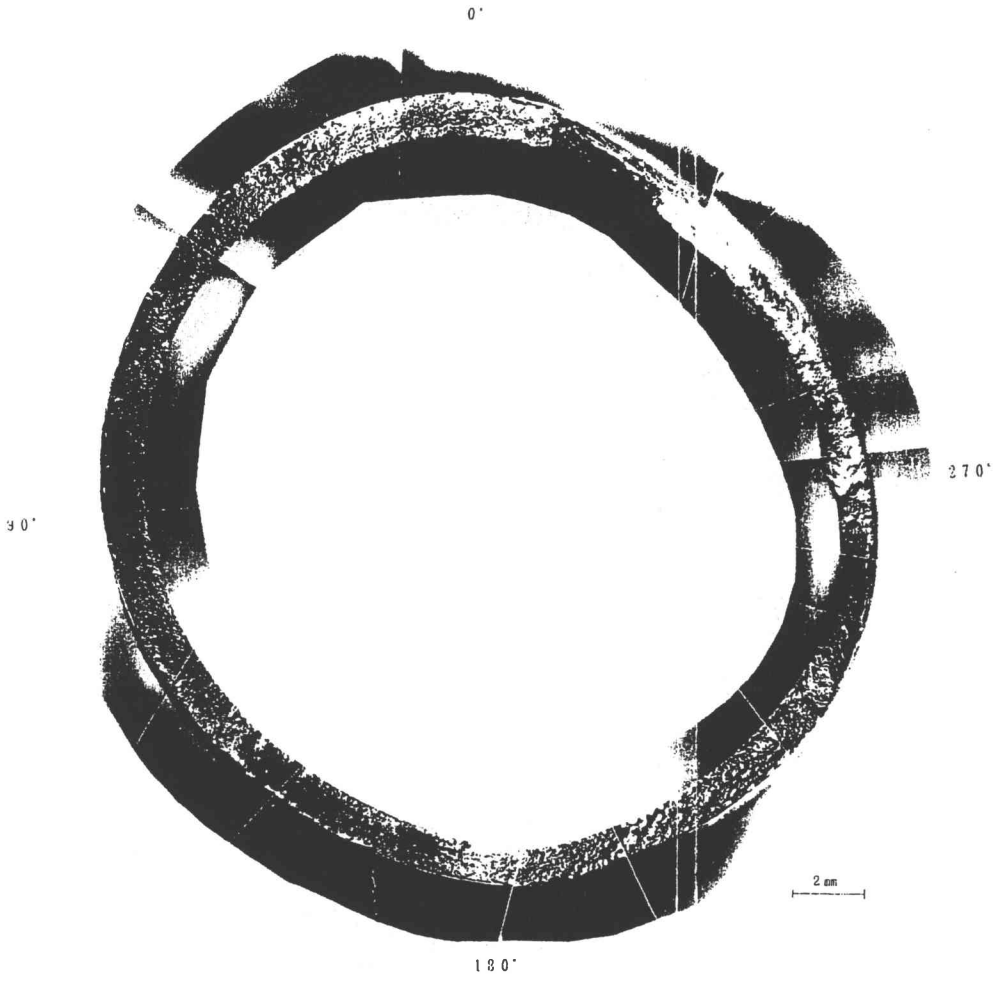




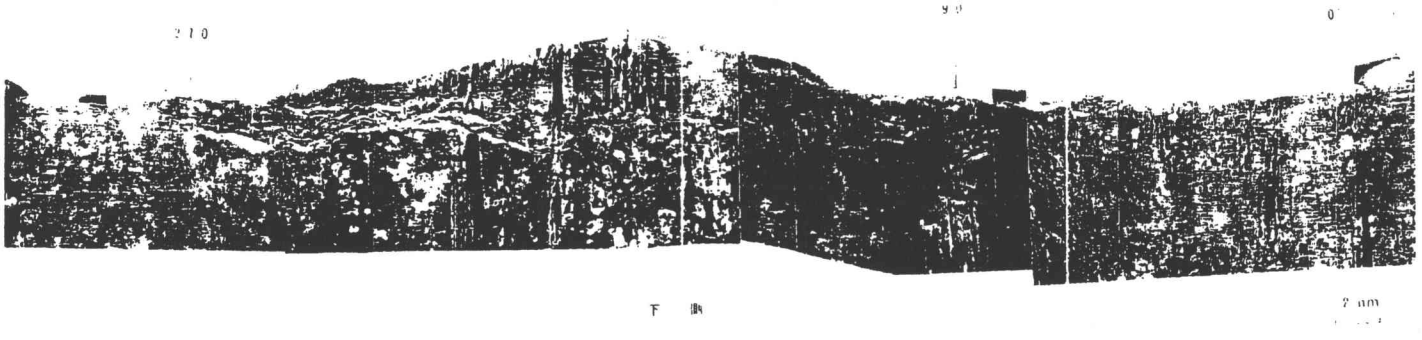
き裂伝播部破面観察結果（下側破面）



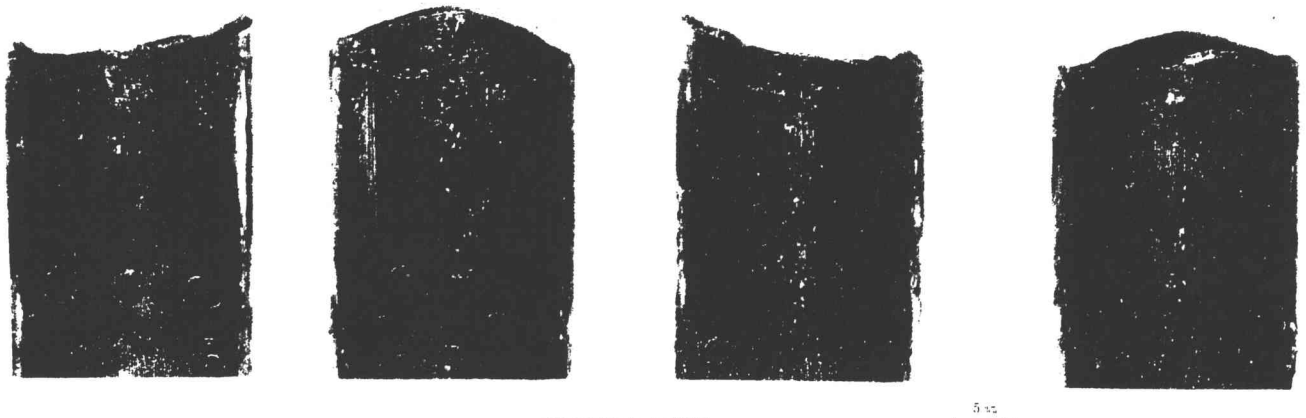
X45・Y14伝熱管低温側第6番支持板部割破面外観（下側破面）



X45－Y14伝熱管U字部側破面外観（上側破面）（×10）



低温側第6管支持板部 270°　低温側第6管支持板部 180°　低温側第6管支持板部 90°　低温側第6管支持板部 0°



破断部下側の外観観察結果

303



135°



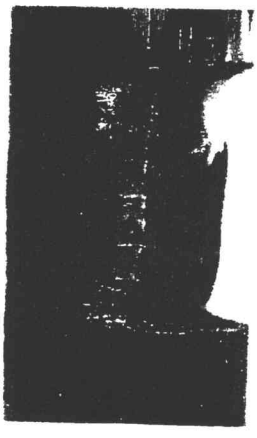
90°



0°

X45－Y15低温側第6管支持板部の摩耗減肉状況観察結果

304



135°

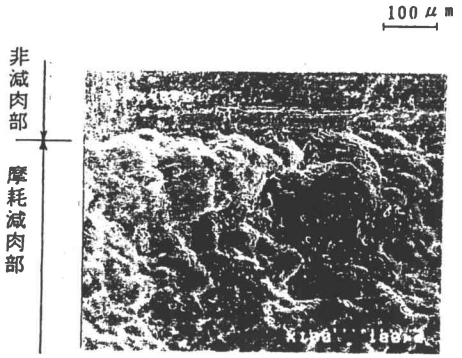


45°

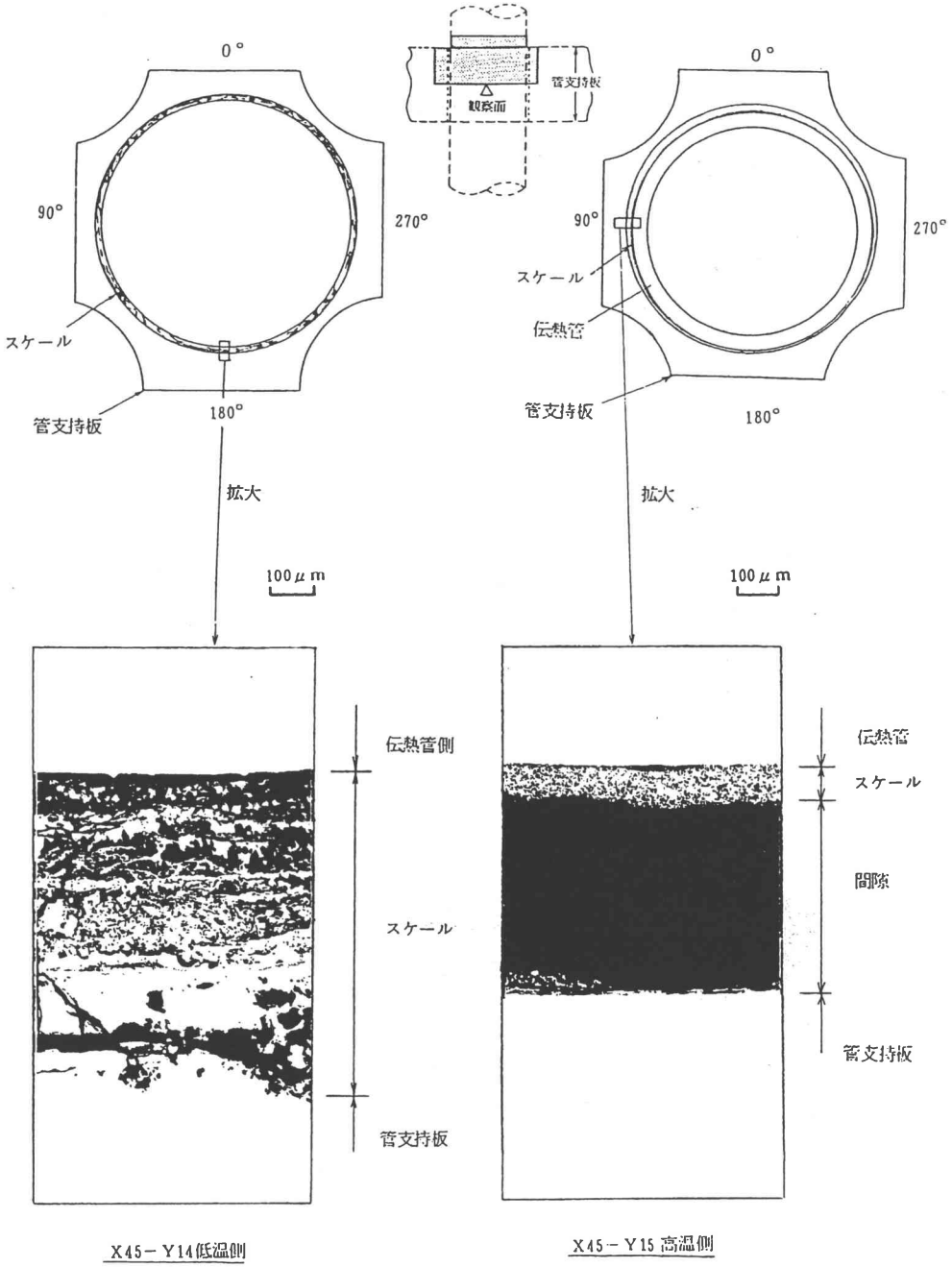


315°

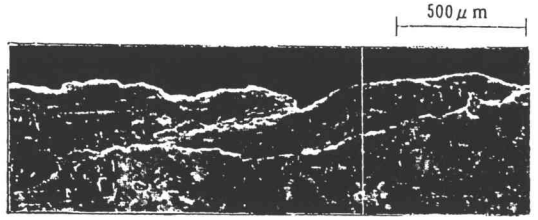
X45－Y19低温側第6管支持板部の摩耗減肉状況観察結果



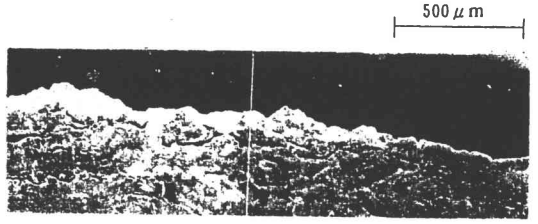
X45－Y15低温側第６管支持板部の減肉部詳細観察結果



第６管支持板の水平断面ミクロ調査結果（管支持板板厚中央）

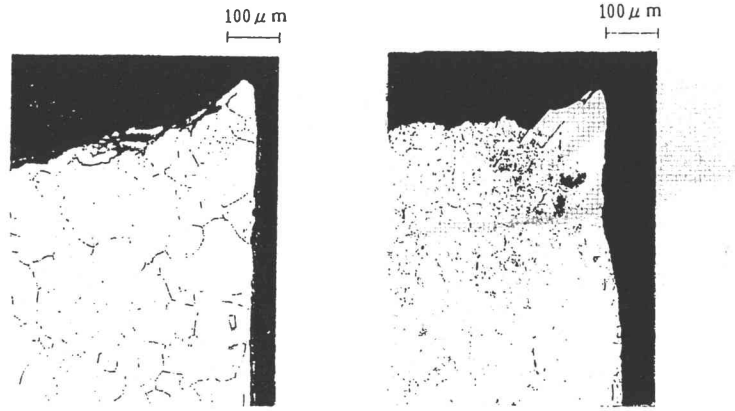


試験片



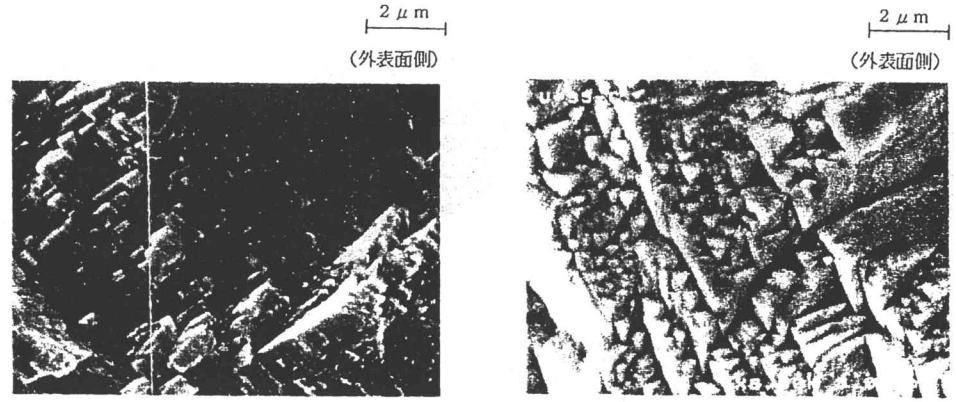
破断管

フレッチング疲労強度試験片と破断管の外表面の観察結果



（試験片）　（破断管）

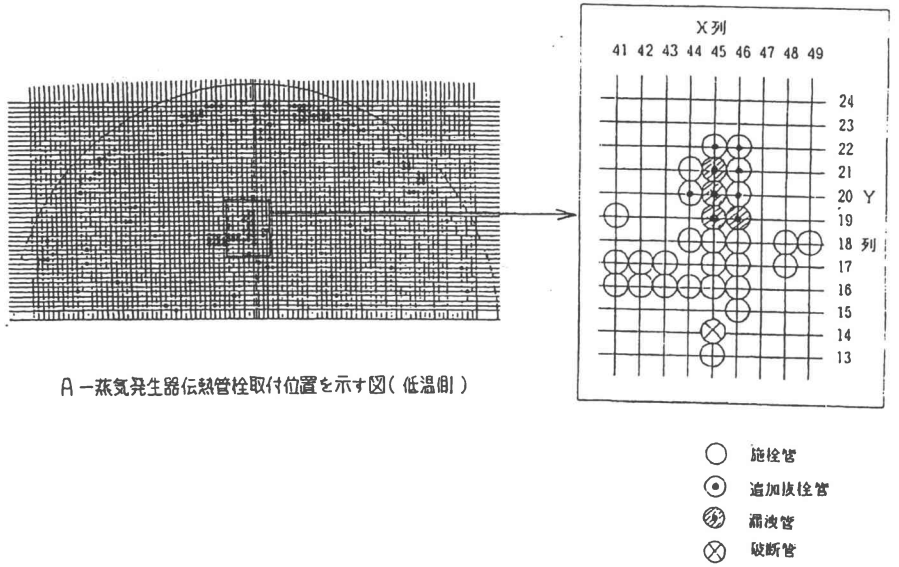
断面ミクロ観察



（試験片）　（破断管）

破面観察

フレッチング疲労強度試験片と破断管の断面と破面の詳細観察結果



A－蒸気発生器伝熱管栓取付位置を示す図（低温側）

図１．追加抜栓管位置図

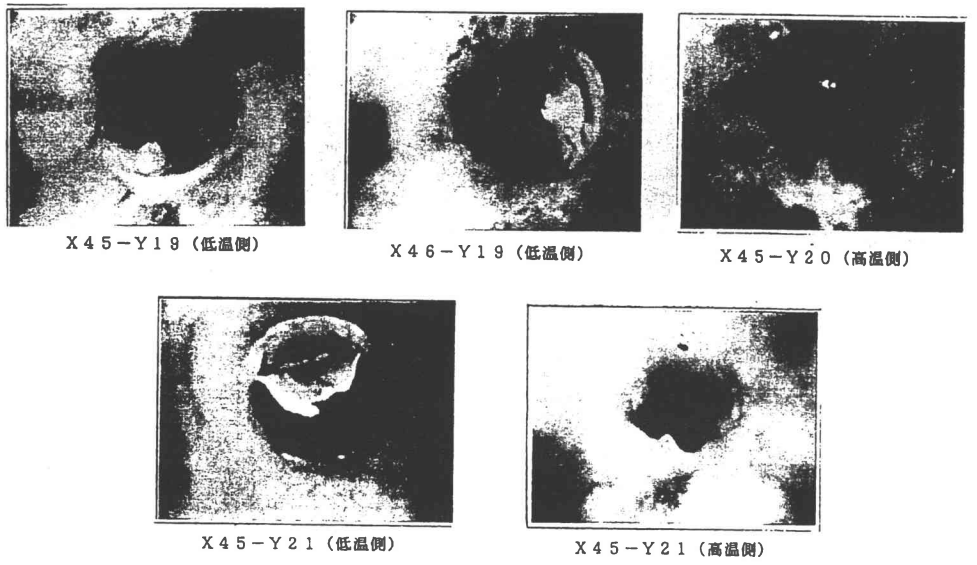
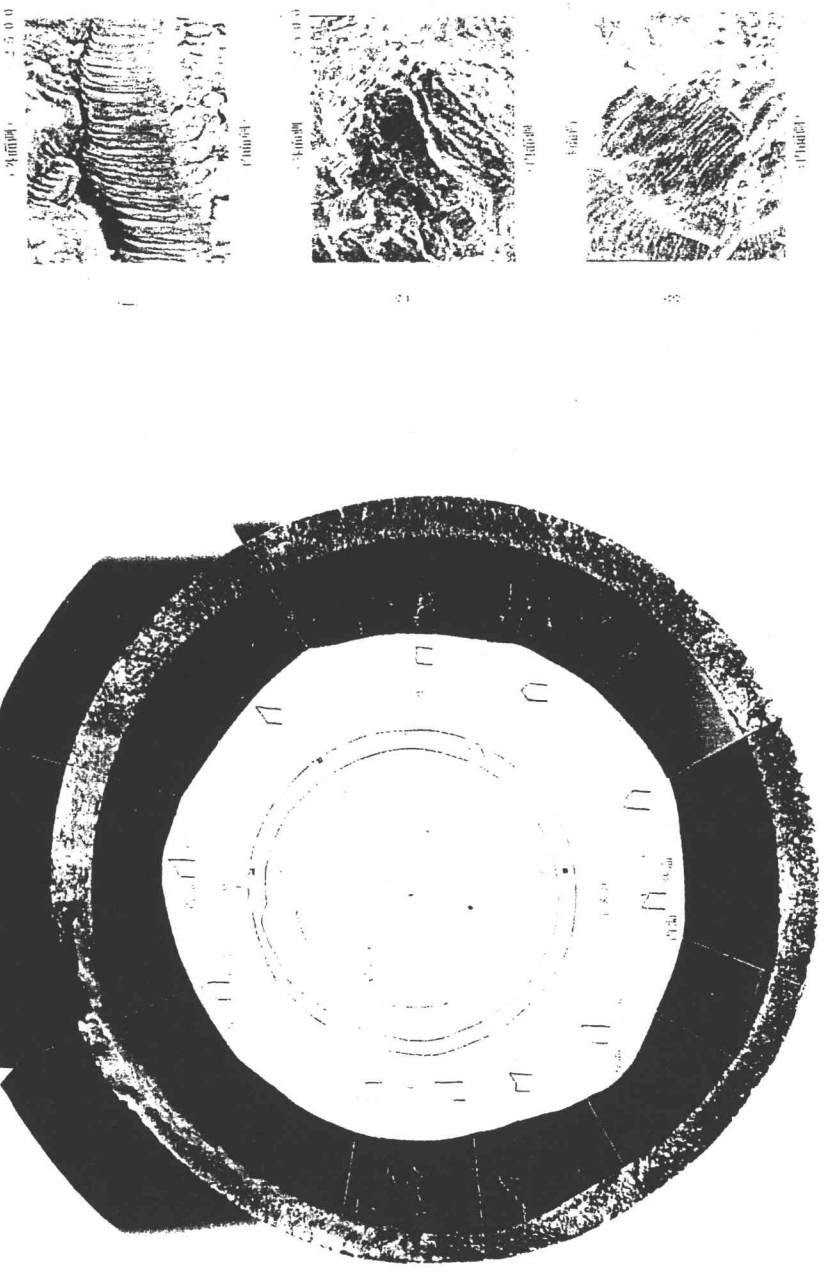
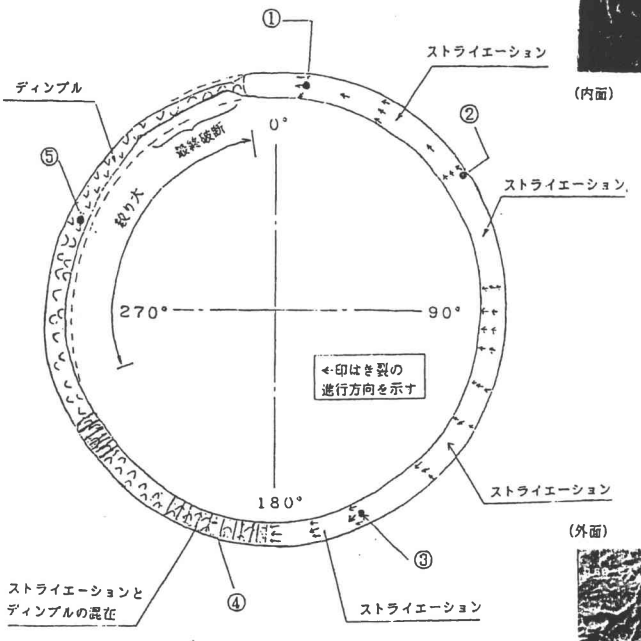


図２．ＣＣＤカメラ点検図



破面の観察結果

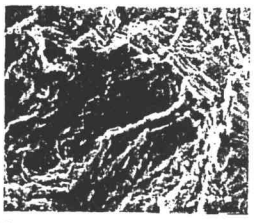


①
(外面) ×2500



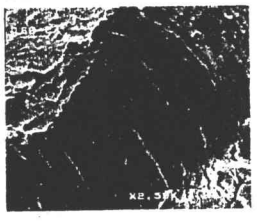
(内面)

②
(外面) ×2500



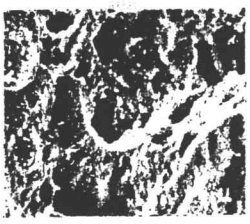
(内面)

③
(外面) ×2500



(内面)

⑤
(外面) ×2500



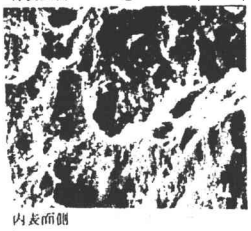
(内面)

④
(外面) ×2500

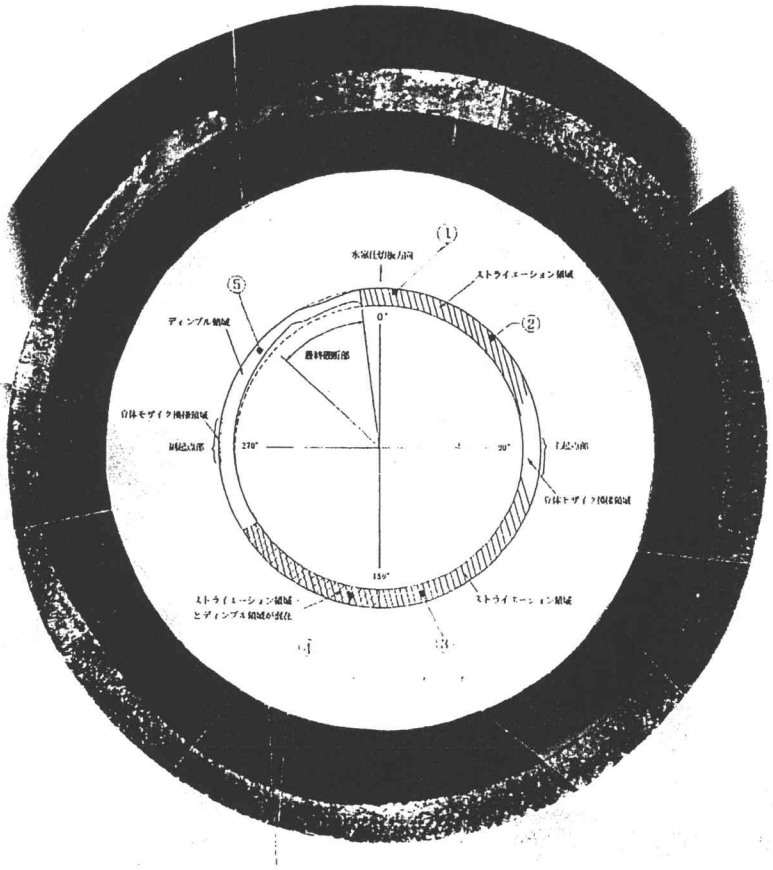


(内面)

外表面側 ⑤ 5μm



内表面側

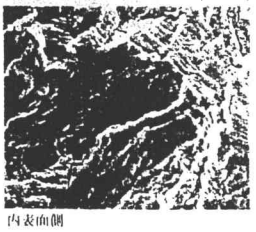


外表面側 ① 5μm



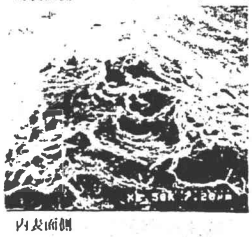
内表面側

外表面側 ② 5μm



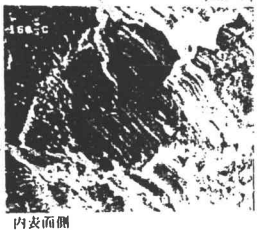
内表面側

外表面側 ④ 5μm



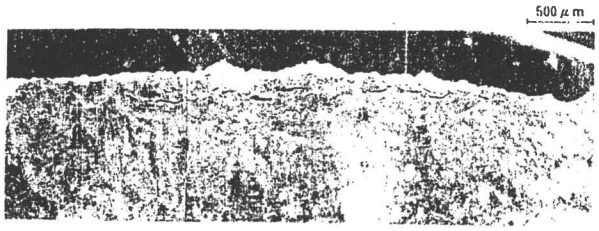
内表面側

外表面側 ③ 5μm



内表面側

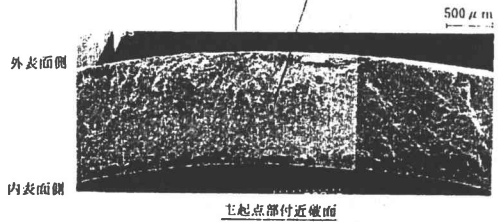
破断管（X45－Y14）破面観察結果



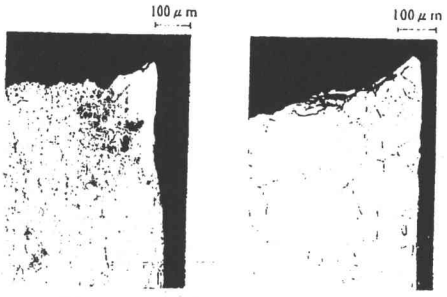
外表面観察
（こすれ跡とその中に認められる微小き裂）



立体モザイク模様と
その中に見られるタイヤトラック

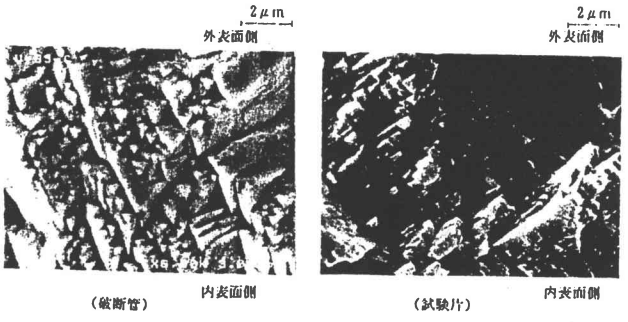


主起点部付近破面



（破断管）　（試験片）

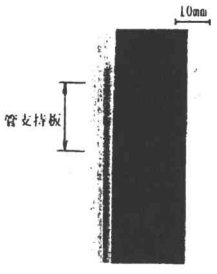
断面ミクロ観察
（管軸方向に対して傾斜したき裂起点部）



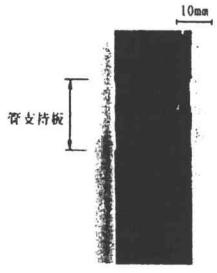
（破断管）　（試験片）

立体モザイク模様
（インコネル材の低速度伝播疲労破面）

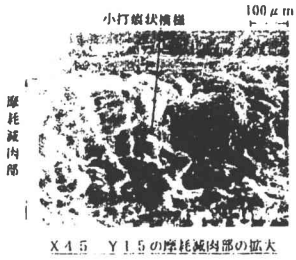
破断管（Ｘ４５－Ｙ１４）主起点部付近観察結果及び試験片との比較



Ｘ４５－Ｙ１５低温側第６管支持板部
（周方向の摺動痕を伴う軽微な摩耗減肉）



Ｘ４５－Ｙ１９低温側第６管支持板部
（板厚を貫通した摩耗減肉）

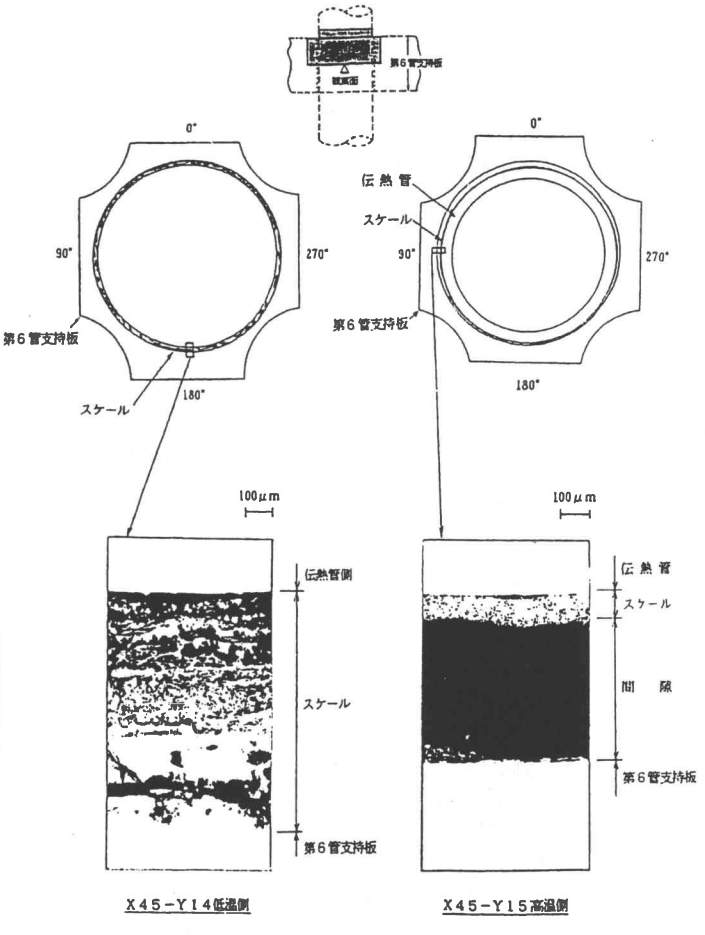


Ｘ４５　Ｙ１５の摩耗減肉部の拡大

Ｘ４５列伝熱管の損傷原因調査結果の概要

		X45-Y11	X45-Y12	X45-Y13	X45-Y14（破断管）	X45-Y15	X45-Y16 / X45-Y22
伝熱管の使用状態		使用管		補修管	使用管		施栓管
第６管支持板部での支持状態		拡管支持		隙間支持	拡管支持	隙間支持	
流力弾性振動解析による安定比の最大値		1未満		1以上			
金属調査結果	微小き裂の有無	無し			有り	無し	
	摩耗減肉の有無	無し				有り	
流力弾性振動発生に対する評価		発生せず		発生した可能性小	発生した		

周辺管管支持板部の損傷状況観察結果



Ｘ４５－Ｙ１４低温側　Ｘ４５－Ｙ１５高温側

第６管支持板の水平断面ミクロ観察結果（管支持板板厚中央）