

高浜発電所4号機の定期検査状況について
(蒸気発生器伝熱管の損傷に関する原子炉施設故障等報告書の提出)

2022年8月23日

関西電力株式会社

高浜発電所4号機（加圧水型軽水炉 定格電気出力87万キロワット、定格熱出力266万キロワット）は、2022年6月8日から実施している第24回定期検査において、3台（A、B、C）ある蒸気発生器（SG）の伝熱管全数^{※1}について渦流探傷検査（ECT）^{※2}を実施しました。

その結果、A-SGの伝熱管4本、B-SGの伝熱管1本およびC-SGの伝熱管5本について、管支持板^{※3}部付近に外面（2次側）からの減肉とみられる有意な信号指示^{※4}が認められました。

これらのほか、A-SGの伝熱管1本およびB-SGの伝熱管1本について、管支持板部付近に外面（2次側）からの微小な減肉とみられる信号指示（判定基準未満）が認められました。

その後、小型カメラによる調査結果から、伝熱管の周方向に摩耗減肉とみられるきずを確認するとともに、当該伝熱管周辺の管支持板下面に接触痕を確認しました。また、SG器内にスケール^{※5}およびスラッジ^{※6}が残存していることを確認しました。

引き続き、小型カメラによるSG器内のスケールおよびスラッジの残存状況等の調査を進めるとともに、SG器内からスケールを回収し、それらの形状や性状等の調査や対策等の検討を行うこととしました。

なお、本件による環境への放射能の影響はありません。

- ※1 過去に有意な信号指示が認められ、施栓した管等を除きA-SGで3,243本、B-SGで3,247本、C-SGで3,253本、合計9,743本。
- ※2 高周波電流を流したコイルを伝熱管に接近させることで対象物に渦電流を発生させ、対象物のきず等により生じた渦電流の変化を電気信号として取り出すことできず等を検出する検査であり、伝熱管の内面（1次側）から、伝熱管の内面（1次側）と外面（2次側）の両方を検査している。
- ※3 伝熱管を支持する部品。
- ※4 割れを示す信号や20%以上の減肉を示す信号の指示。
- ※5 2次冷却水に含まれる鉄の微粒子が、給水系統によってSG内に流れ集まって伝熱管に付着したもの。
- ※6 スケールが砕けて小さくなったもの。

(2022年7月8日、22日お知らせ済み)

その後、当社は、調査結果や原因と対策を取りまとめ、本日、原子力規制委員会に原子炉施設故障等報告書を提出しました。

今後、原子力規制委員会が当該報告書の確認を行うことから、当社は、真摯に対応してまいります。

1. 外面からの信号指示があった伝熱管の調査

伝熱管の外面減肉については、高浜発電所3号機および4号機の前回定期検査（3号機：第24回、4号機：第23回）、前々回定期検査（3号機：第23回、4号機：第22回）においても同様の事例が発生しており、調査の結果、原因はスケールによるものと推定しています。

このことから、小型カメラによる損傷箇所の調査に加え、改めてSG器内のスケールの形状や性状の調査および伝熱管の外観観察等を実施しました。

また、高浜発電所3号機および4号機では、前回定期検査において、スケールの脆弱化を図るために、薬品洗浄を実施しましたが、高浜発電所3号機の今定期検査（第25回）における調査では、薬品洗浄後も稠密なスケールがSG器内に残存していたと推定されました。

このため、高浜発電所4号機においても、高浜発電所3号機と同様に、前回定期検査で実施した薬品洗浄の効果について調査しました。

(1) 信号指示が認められた箇所の外観調査

小型カメラを用いて、有意な減肉信号指示が認められた伝熱管10本および微小な減肉信号指示が認められた伝熱管2本（合計12本）の外観を観察した結果、信号指示箇所の伝熱管の周方向に摩耗減肉とみられるきずがありました。

その大きさは、幅1mm以下から約1mm、周方向に約2mmから約7mmでした。

なお、きずの周辺にはスケール等の付着物は認められなかったものの、当該伝熱管周辺の管支持板下面に接触痕がありました。

(2) SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況等の調査

小型カメラを用いて、A、B、C-SGの管板から第7管支持板上面の調査を行った結果、スケールおよびスラッジが残存していました。

(3) SGから回収したスケールの形状および性状の調査

A、B、C-SGの管板から第3管支持板上面に残存しているスケールのうち、比較的大きなものを選定し、約200個取り出しました。

(スケールの形状)

各SGから取り出したスケールは、主に多角型、長尺型に分類され、長さが最大のものは、前者が長さ約25mm、幅約13mm、後者が長さ約29mm、幅約6mmであり、大半は管支持板の流路穴よりも大きく、運転中に管支持板下面に留まる可能性のある形状でした。

これらのスケールは、目視確認の結果、やや湾曲した形状をしており、そのうち各SGから取り出した15個のスケールについて、3次元測定器により計測した結果、直径約22.3～22.5mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管（円筒）の外径（直径22.2mm）に近い形状でした。

(スケールの性状)

スケールの化学成分分析を実施した結果、主成分はマグネタイトで、SG器内で発生するスラッジと同成分であることを確認しました。

スケール120個を対象に断面観察を行った結果、稠密層（密度の高い酸化鉄の層）が主体のスケールを48個確認するとともに、スケール50個を対象（約10mm×5mm以上）に摩耗試験を行い、伝熱管とスケールの摩耗体積比を調査した結果、伝熱管の減肉量がスケール摩滅量以上のスケールを2個確認しました。

今回取り出したスケールについて、今後、追加の3次元測定器による計測、断面観察および摩耗試験を実施し、スケールの形状や性状に関する知見の拡充を図ります。

(接触痕を有するスケールの調査)

減肉が認められた伝熱管に接触していた可能性のあるスケールを調査するために、A～C—SG器内から取り出したスケールの外観を観察しました。このうち、AおよびB—SG伝熱管減肉部の下方（第2管支持板上部）に残存していたスケール各1個については、伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位に接触痕および光沢がありました。

これらのスケールの形状を計測した結果、直径約22.6mm（A—SG採取スケール）、直径約22.3mm（B—SG採取スケール）の円筒状に沿った形状であり、伝熱管（円筒）の外径（直径22.2mm）に近い形状でした。

電子顕微鏡による観察を行った結果、接触想定部位に伝熱管との摺動によりできたものと推定される筋状痕がありました。

化学成分分析の結果、主成分はマグネタイトで、SG器内で発生するスラッジと同成分であり、接触想定部位に伝熱管の主成分であるニッケルおよびクロムの成分を検出しました。

これらのスケールを切断して断面を観察した結果、スケールの厚さは約0.2mm（A—SG採取スケール）、約0.3mm（B—SG採取スケール）であり、稠密層が主体のスケールでした。

(4) SG器内の伝熱管表面の観察

SG器内のスケールの残存状況等の調査に合わせ、伝熱管の外観観察を行った結果、ほぼ全ての伝熱管は全面的にスケールに覆われていました。しかし、一部の伝熱管には局所的にスケールが剥離した痕跡等が認められました。

これらの状況については、高温側と低温側（水平方向）、管支持板間（上下方向）において有意な差は認められませんでした。

(5) SGの運転履歴調査等（前回定期検査における調査結果）

スケールの生成には、SG器内への鉄イオンや鉄微粒子の持ち込み量に関係していることから、前回定期検査において、SGの運転時間、水質管理の履歴および長期停止の影響について調査を行いました。

その結果、水質管理に問題はなかったものの、高浜発電所3号機および4号機はSGの運転時間が長いことなどから、SG器内に持ち込まれた鉄分の積算量は、他プラントに比べ多いことを確認しました。

また、福島第一原子力発電所事故後の長期停止に伴い、腐食防止のため、SG器内をヒドラジン水による満水保管にしており、その状態を模擬した試験の結果、時間の経過とともにスケールを構成する鉄粒子が結合し粒径が大きくなることを確認しました。

このため、長期停止に伴い、スケールの粒径が大きくなることで、伝熱管との接触面積が減少し、プラントの運転等に伴い伝熱管から剥離しやすくなったものと推定しました。

(6) 異物混入の可能性の調査

SG器外の系統を対象に、SGブローダウン系統およびタービンサンプラインの仮設ストレーナ等の開放点検を実施した結果、異物はありませんでした。

また、小型カメラによりSG器内の管板から第7管支持板の間の調査を行った結果、異物はありませんでした。

(7) 減肉メカニズムの検討

工場における再現試験等の結果、SG器内の2次冷却水の流れにより、スケールの形状によっては管支持板下面に留まりました。

また、伝熱管がプラント運転に伴い振動することでスケールと繰り返し接触し、摩耗減肉が発生しました。

(8) 高浜発電所3号機および4号機のこれまでのスケールへの対策

高浜発電所3号機および4号機の前回定期検査において、スケールの脆弱化を目的として2回の薬品洗浄（1回目：第3管支持板以下を薬品濃度3%、2回目：伝熱管全域を薬品濃度2%）を実施しましたが、高浜発電所3号機の今定期検査（2022年3月～8月）において、スケールによるものと推定される伝熱管の外面減肉事象が再度発生しました。

これを受けて薬品洗浄の再現試験を行ったところ、スケール近傍にスラッジが存在する場合はスケールの脆弱化効果が低減することを確認したため、薬品洗浄の前に小型高圧洗浄装置を用いてスケールおよびスラッジを可能な限り除去することとしました。

また、SG器内の構成部品に大きな影響を及ぼすことなくスケールの脆弱化を図る薬品洗浄条件について再度検討した結果、伝熱管全域を薬品濃度3%での薬品洗浄を2回実施することにより、スケール近傍にスラッジが存在する場合でもスケールを脆弱化できることを工場試験で確認しました。

そこで、高浜発電所3号機の今定期検査において、小型高圧洗浄装置を用いたスケールおよびスラッジの除去ならびに新規条件での薬品洗浄を実施したところ、管支持板上等のスケールおよびスラッジを大幅に低減でき、薬品洗浄後にSG器内からの鉄除去量を評価した結果、1基あたり約1,000kgの鉄分が除去されたことを確認しました。

2. 推定原因

SG器内の調査結果から、伝熱管の外面減肉が認められた原因は、これまでの運転に伴い、伝熱管表面に生成された稠密なスケールが前回定期検査時の薬品洗浄の後もSG器内に残存し、プラント運転中に管支持板下面に留まり、そのスケールに伝熱管が繰り返し接触したことで摩耗減肉が発生した可能性が高いと推定しました。

3. 対策

(1) 蒸気発生器器内の洗浄

高浜発電所3号機の今定期検査において実施した対策によりSG器内のスケール除去・脆弱化が効果的に実施できたこと、および高浜発電所4号機の今定期検査において採取したスケールに対しても、高浜発電所3号機の今定期検査で実施した薬品洗浄が有効に作用することを確認したことから、高浜発電所4号機の今定期検査においては以下の対策を実施します。

- ・薬品洗浄前にSG器内のスケールおよびスラッジを可能な限り除去するため、小型高圧洗浄装置を用いて管支持板の洗浄を実施します。
- ・その上で、SG器内のスケールの脆弱化を図るため、前回より薬品量を増やした条件（1回目、2回目ともに伝熱管全域を薬品濃度3%で洗浄）で薬品洗浄を実施します。

(2) 伝熱管の施栓

きずが認められた伝熱管 1 2 本については、高温側および低温側管板部で閉止栓（機械式栓）を施工し、使用しないこととします。

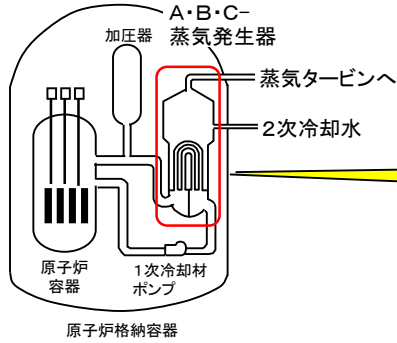
以 上

- 添付資料 1 : 外面からの信号指示があった伝熱管の調査
- 添付資料 2 : スケールの形状および伝熱管外表面の調査結果
- 添付資料 3 : 蒸気発生器器内の洗浄
- 添付資料 4 : 蒸気発生器伝熱管の施栓方法と施栓状況
- 添付資料 5 : これまでの経緯

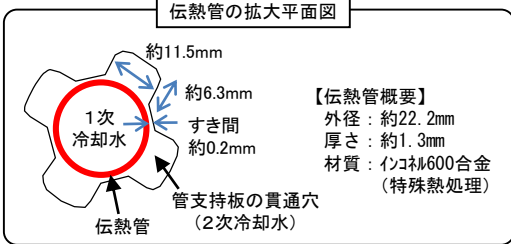
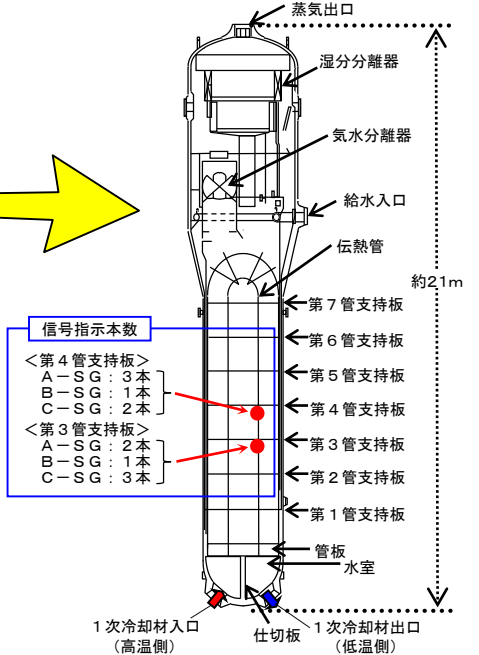
外面からの信号指示があった伝熱管の調査

発生箇所

系統概要図



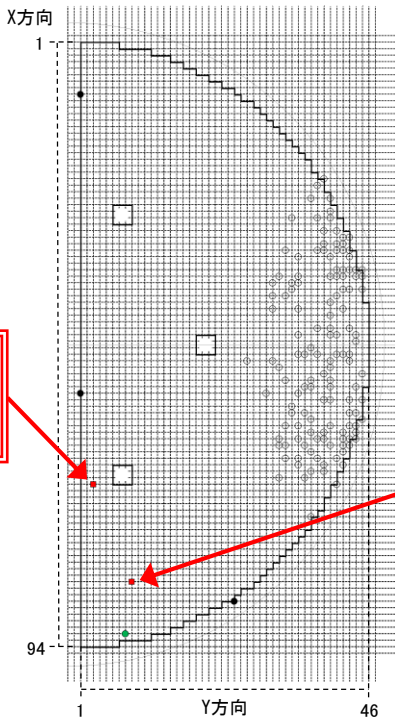
蒸気発生器の概要図



【伝熱管概要】
 外径：約22.2mm
 厚さ：約1.3mm
 材質：インコル600合金
 (特殊熱処理)

B-蒸気発生器の調査

B-蒸気発生器上部から見た
伝熱管位置を示す図



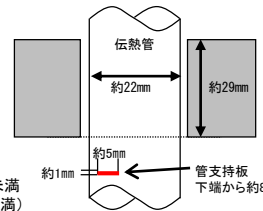
<第3管支持板>
 微小な信号
 指示管
 (X69-Y3)

<第4管支持板>
 有意な信号
 指示管
 (X84-Y9)

- : 今回外面減肉が認められた位置 (2本)
- : 既設栓箇所(外面減肉) (1本)
- : 既設栓管(拡管部応力腐食割れ) (3本)
- : 既設栓管(拡管部応力腐食割れ以外) (131本)

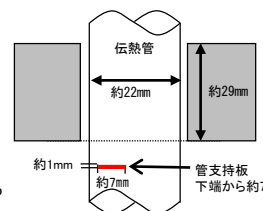
小型カメラで確認したきずの状況

第3管支持板 (X69-Y3)



きずの深さ※：減肉率20%未満
 (判定基準未滿)

第4管支持板 (X84-Y9)



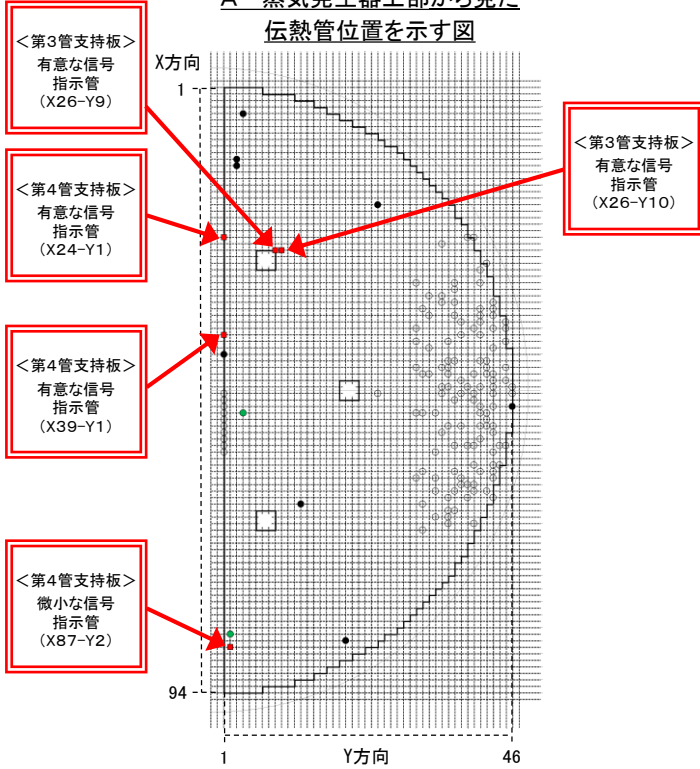
きずの深さ※：減肉率約49%

※：渦流探傷検査(ECT)結果による

A-蒸気発生器の調査

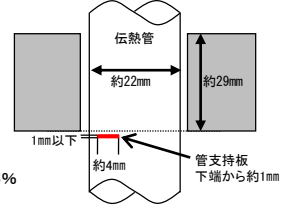
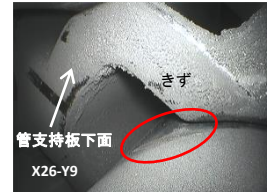
小型カメラで確認したきずの状況

A-蒸気発生器上部から見た
伝熱管位置を示す図



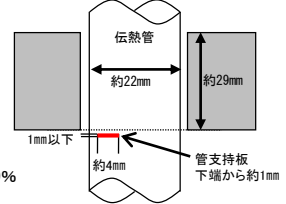
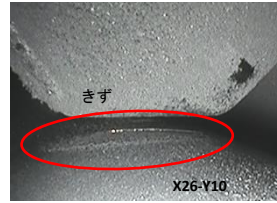
- : 今回外面減肉が認められた位置 (5本)
- : 既施栓箇所(外面減肉) (2本)
- : 既施栓管(拡管部応力腐食割れ) (8本)
- : 既施栓管(拡管部応力腐食割れ以外) (129本)

第3管支持板 (X26-Y9)



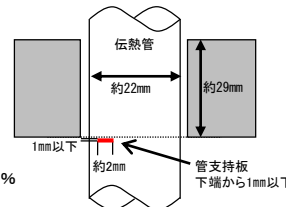
きずの深さ※: 減肉率約33%

第3管支持板 (X26-Y10)



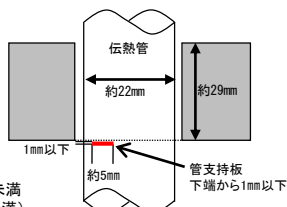
きずの深さ※: 減肉率約40%

第4管支持板 (X24-Y1)



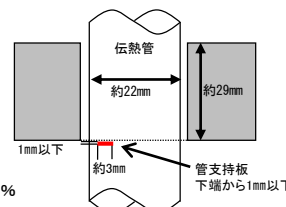
きずの深さ※: 減肉率約25%

第4管支持板 (X87-Y2)



きずの深さ※: 減肉率20%未満
(判定基準未満)

第4管支持板 (X39-Y1)



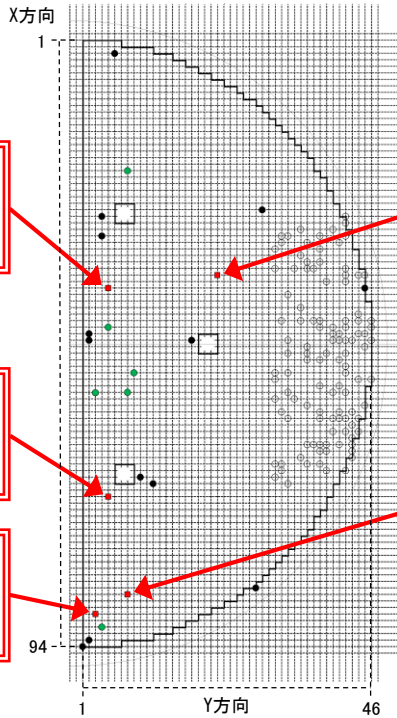
きずの深さ※: 減肉率約47%

※: 渦流探傷検査(ECT)結果による

C-蒸気発生器の調査

小型カメラで確認したきずの状況

C-蒸気発生器上部から見た
伝熱管位置を示す図



<第3管支持板>
有意な信号
指示管
(X39-Y5)

<第4管支持板>
有意な信号
指示管
(X37-Y22)

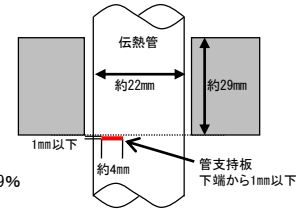
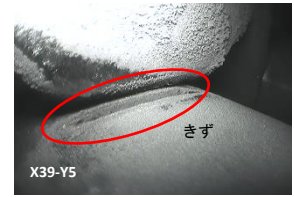
<第3管支持板>
有意な信号
指示管
(X71-Y5)

<第3管支持板>
有意な信号
指示管
(X86-Y8)

<第4管支持板>
有意な信号
指示管
(X89-Y3)

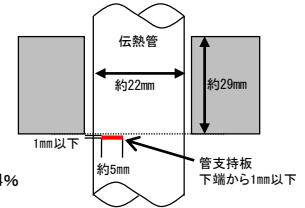
- :今回外面減肉が認められた位置 (5本)
- :既施栓箇所(外面減肉) (6本)
- :既施栓管(拡管部応力腐食割れ) (13本)
- :既施栓管(拡管部応力腐食割れ以外) (110本)

第3管支持板 (X39-Y5)



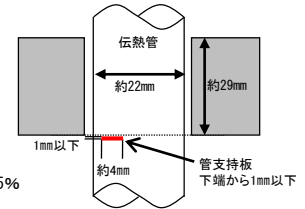
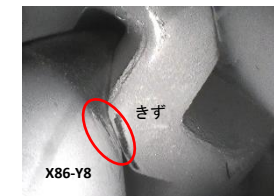
きずの深さ※: 減肉率約49%

第3管支持板 (X71-Y5)



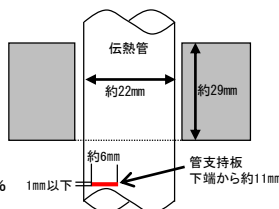
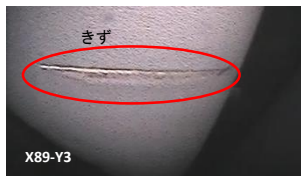
きずの深さ※: 減肉率約34%

第3管支持板 (X86-Y8)



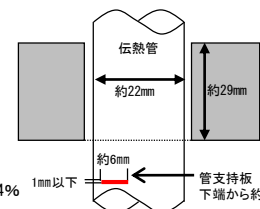
きずの深さ※: 減肉率約35%

第4管支持板 (X89-Y3)



きずの深さ※: 減肉率約31%

第4管支持板 (X37-Y22)



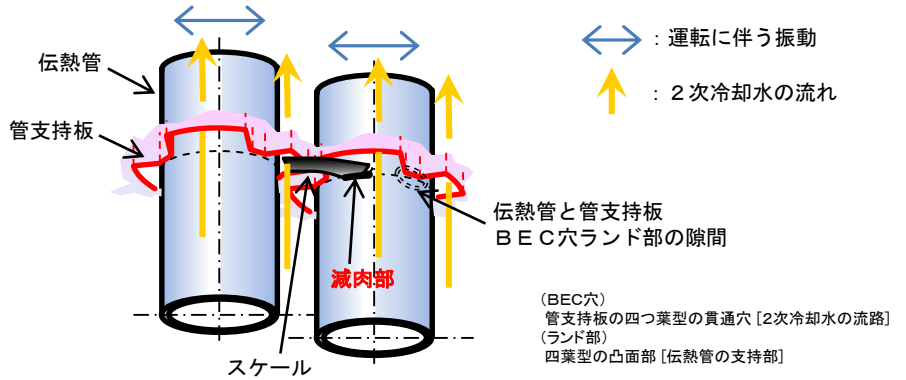
きずの深さ※: 減肉率約34%

※: 渦流探傷検査(ECT)結果による

スケールの形状および伝熱管外表面の調査結果

管支持板下面での減肉のメカニズム

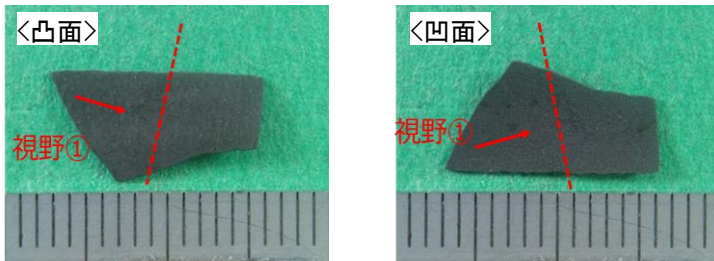
工場における再現試験等の結果、蒸気発生器内の水・蒸気の流れにより管支持板下面に留まったスケールに伝熱管が繰り返し接触することにより、摩耗減肉が発生することを確認しました。



スケールの形状調査結果

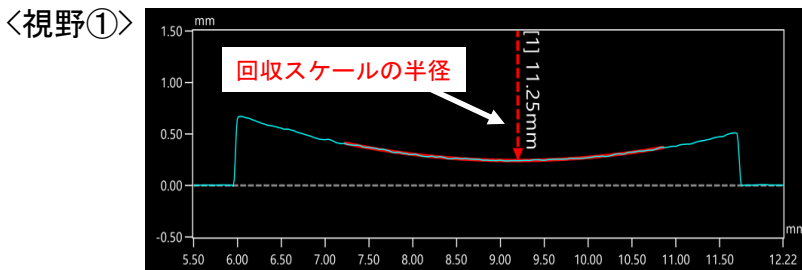
A、B、C蒸気発生器の管板、第1管支持板、第2管支持板および第3管支持板上等に残存しているスケールのうち、比較的大きなものを選定し、約200個を取り出したものの中から、スケールの形状調査を行いました。

A蒸気発生器 管板上 (高温側) から回収したスケール



形状：主に多角型と長尺型
 寸法：多角型で長さ最大のものは、長さ約25mm、幅約13mm
 長尺型で長さ最大のものは、長さ約29mm、幅約6mm

スケールを3次元測定器で計測した結果



直径約22.3~22.5mmの円筒状に沿った形状で、伝熱管(円筒)の外周(直径22.2mm)に近い形状

伝熱管外表面の観察結果

○: スケールの剥離痕

A蒸気発生器 (第3管支持板、低温側)

第4管支持板側



第2管支持板側

B蒸気発生器 (第1管支持板、低温側)

第2管支持板側



管板側

C蒸気発生器 (第2管支持板、低温側)

第3管支持板側



第1管支持板側

A、B、C蒸気発生器のほぼ全ての伝熱管は全面的にスケールに覆われていました。また、一部の伝熱管は局所的にスケールが剥離した痕跡等も認められました。

蒸気発生器器内の洗浄

① 小型高圧洗浄装置による洗浄(スケール等の回収)

洗浄箇所:

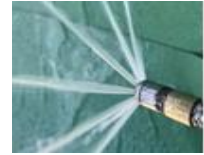
(管板および第1管支持板から第7管支持板上)

STEP1: 第7～第3管支持板の洗浄

第7管支持板上ハンドホール(A)から装置を挿入し、高圧水を噴射することにより、上層の第7管支持板上から順に第3管支持板上までのスケール等を下層の管支持板へ落下させる。



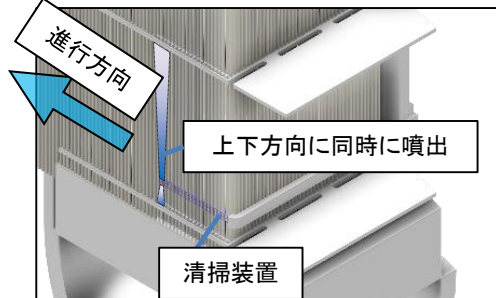
第7管支持板用



第3～6管支持板用

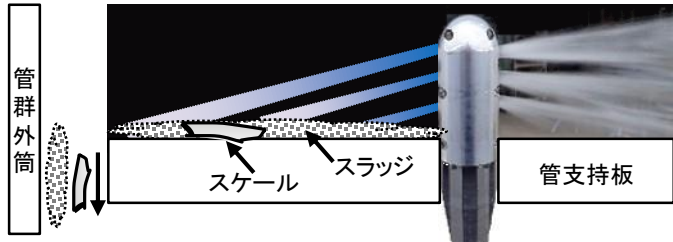
STEP2-1: 第2, 1管支持板の洗浄(垂直ノズルによる洗浄)

第1管支持板上ハンドホール(B)から装置を挿入し、上下方向に高圧水を噴射することで、管支持板と伝熱管との隙間を清掃し、スケール等を管支持板上へ移動させる。



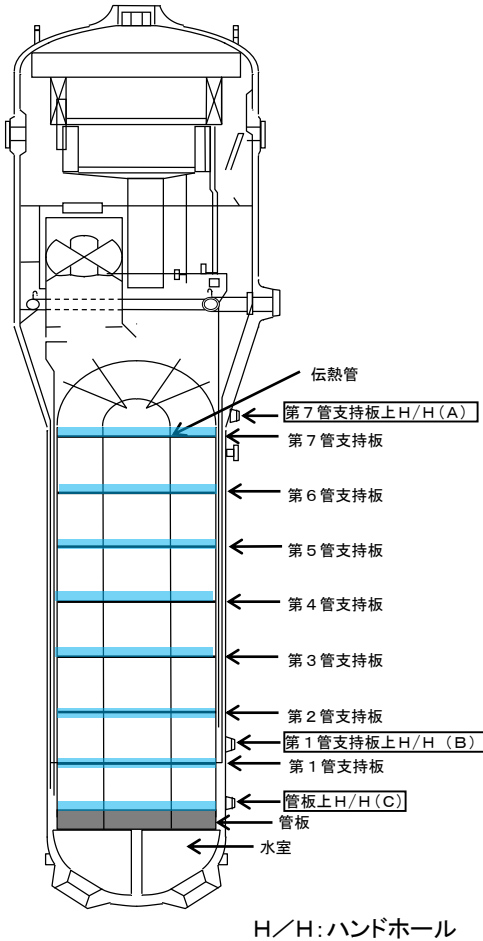
STEP2-2: 第2, 1管支持板の洗浄(水平ノズルによる洗浄)

STEP2-1により管支持板上に移動させたスケール等を押し流し、管板上に落下させる。

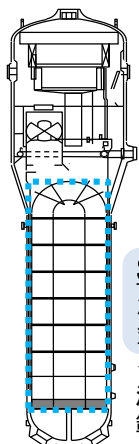


STEP3: 管板上の洗浄

定期検査毎に実施している高圧水による管板上の洗浄により、管板上ハンドホール(C)からスケール等を回収する。

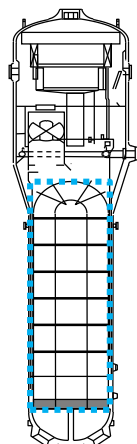


② 薬品による洗浄(スケール全体の脆弱化)



STEP 1 鉄洗浄

濃度: 3%
範囲: 伝熱管全体
<前回>
濃度: 3%
範囲: 第3管支持板以下



STEP 2 鉄洗浄

濃度: 3%
範囲: 伝熱管全体
<前回>
濃度: 2%
範囲: 伝熱管全体

洗浄箇所:

スケール排出
(回収)

STEP 3

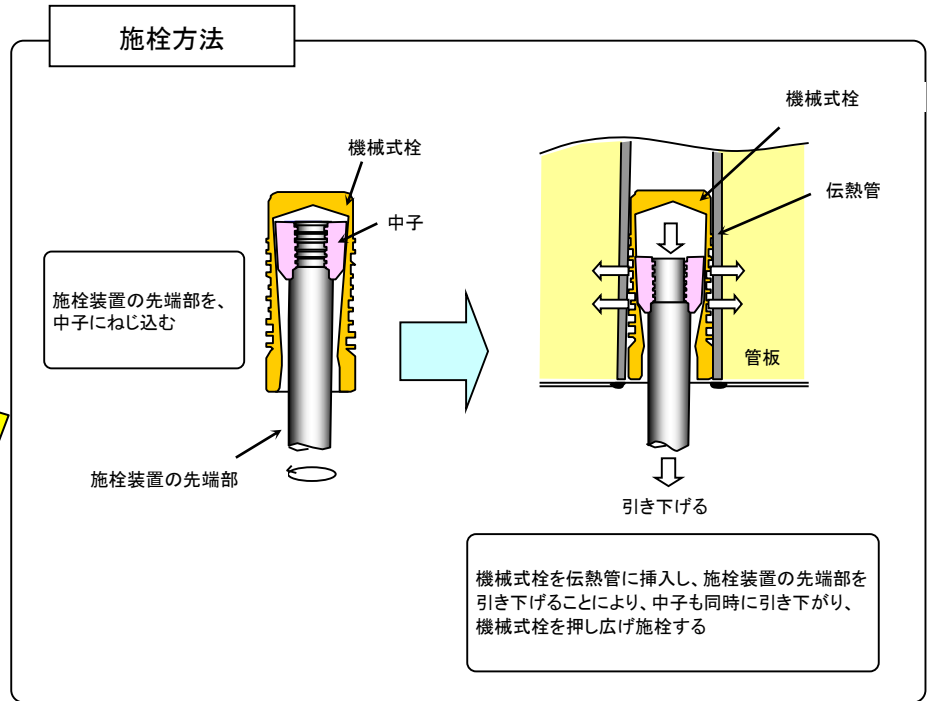
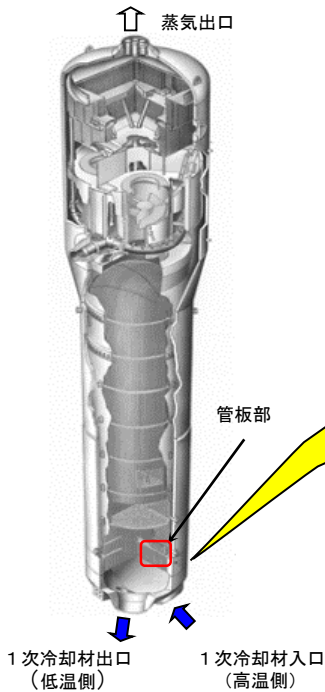
純水による洗浄

蒸気発生器伝熱管の施栓方法と施栓状況

蒸気発生器伝熱管の施栓方法

損傷が認められた蒸気発生器伝熱管12本については、高温側および低温側管板部で閉止栓（機械式栓）を施工し、使用しないこととします。

蒸気発生器の概要図



高浜発電所4号機の蒸気発生器伝熱管の施栓状況

| | A蒸気発生器 (3,382本) | B蒸気発生器 (3,382本) | C蒸気発生器 (3,382本) | 合計 (10,146本) |
|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 検査対象本数 | 3,243 | 3,247 | 3,253 | 9,743 |
| 今回施栓予定 | 5 | 2 | 5 | 12 |
| 累積施栓本数 (応力腐食割れによる施栓本数) | 144 (8) | 137 (3) | 134 (13) | 415 (24) |
| (外面減肉による施栓本数) | (7) | (3) | (11) | (21) |
| 〔施栓率〕 | 〔4.3%〕 | 〔4.1%〕 | 〔4.0%〕 | 〔4.1%〕 |

○蒸気発生器1基あたりの伝熱管本数:3,382本

○安全解析施栓率は10%

(伝熱管の施栓率が10%の状態において、プラントの安全性に問題がないことが確認されている)

これまでの経緯(高浜発電所3、4号機における蒸気発生器伝熱管外面の損傷事例)

| 定期検査 | 蒸気発生器伝熱管外面の損傷本数 | 調査結果概要 | | スケールに対する対策 |
|--|--|--|--|-------------------------------------|
| 3号機 第23回 (2018年8月～) | A-蒸気発生器:1本 (第3管支持板) 【減肉率:20%未満】 | 減肉指示のあった箇所付近にスケールを確認。スケールの回収中に破損したため、スケール以外の異物による減肉と推定。異物は流出したものと推定。 |  | — |
| 4号機 第22回 (2019年9月～) | A-蒸気発生器:1本 (第3管支持板) B-蒸気発生器:1本 (第3管支持板) C-蒸気発生器:3本 (第2管支持板2本、 第3管支持板1本) 【最大減肉率:63%】 | A-蒸気発生器内にステンレス薄片を確認したが、摩耗痕が確認されなかったため、原因となった異物は前回の定期検査時に混入していたものと推定。なお、異物は流出したものと推定。 | | |
| 3号機 第24回 (2020年1月～) | B-蒸気発生器:1本 (第3管支持板) C-蒸気発生器:1本 (第3管支持板) 【最大減肉率:56%】 | AおよびC-蒸気発生器内にガジェットフープ材を確認。C-蒸気発生器伝熱管の損傷原因を異物と推定。B-蒸気発生器伝熱管の損傷原因となった異物は流出したものと推定。 | | 薬品洗浄を実施 |
| 4号機 第23回 (2020年10月～) | A-蒸気発生器:1本 (第3管支持板) C-蒸気発生器:3本 (第3管支持板) 【最大減肉率:36%】 | A-蒸気発生器の減肉箇所にスケールが残存。C-蒸気発生器の減肉箇所近傍から回収したスケール3個にも接触痕を確認し、原因は、スケールによる減肉と推定。 |  | |
| <ul style="list-style-type: none"> 4号機第23回定期検査において、蒸気発生器器内から回収したスケールの性状調査や摩耗試験などを実施した結果、蒸気発生器伝熱管表面からはく離れた稠密なスケールによるものと原因を推定。 上記の蒸気発生器伝熱管の外面減肉の原因が、スケールの可能性も否定できないことから、対策として、3号機第24回および4号機第23回定期検査において、蒸気発生器器内の薬品洗浄を実施。 | | | | |
| 3号機 第25回 (2022年3月～) | A-蒸気発生器:2本 (第3管支持板1本、 第4管支持板1本) B-蒸気発生器:1本 (第2管支持板) 【最大減肉率:57%】 | 摩耗痕のあるスケールは回収できなかったが、各蒸気発生器から採取したスケールの性状、摩耗試験等の調査の結果、スケールによる減肉と推定。 | | 薬品洗浄の前に小型高圧洗浄装置による洗浄を実施し、薬品洗浄を実施。 |
| 4号機 第24回 (今回) | A-蒸気発生器:5本 (第3管支持板2本、 第4管支持板3本) B-蒸気発生器:2本 (第3管支持板1本、 第4管支持板1本) C-蒸気発生器:5本 (第3管支持板3本、 第4管支持板2本) 【最大減肉率:49%】 | 小型カメラによる損傷個所の調査に加え、蒸気発生器器内のスケールの形状や性状および伝熱管の外観観察等の調査を実施した結果、スケールによる減肉と推定。なお、A-蒸気発生器およびB-蒸気発生器より回収したスケール各1個に接触痕を確認。 | | 薬品洗浄の前に小型高圧洗浄装置による洗浄を実施し、薬品洗浄を実施予定。 |