米国情報「電源系統の設計における脆弱性」に対する報告について

平 成　25 年　12 月
関 西 電 力 株 式 会 社

目　　次

１．はじめに
…… 1

２．米国 Byron２号機の事象の概要と米国の対応状況について
…… 1

３．各発電所の電源系の設備構成および主要な接続負荷について
…… 2

４．外部電源系の１相開放故障の発生想定箇所について
…… 3

５．報告内容
…… 4

６．まとめ
…… 6

添付資料
１．電源構成概要図
…… 7
２．各発電所の主要な負荷リスト
……１８

１．はじめに

本報告書は、米国原子力規制委員会による情報「電源系統の設計における脆弱性」（Bulletin 2012-01）に記載された Byron２号機での１相開放故障に係わる事象を受け、原子力規制委員会より平成 25 年 10 月 24 日に発出された『米国情報「電源系統の設計における脆弱性」に対する報告について』（原規技発第 1310091 号　平成 25 年 10 月 24 日）における報告事項

１．外部電源系に１相開放故障が発生した場合の検知の可否及び検知後の対応について、報告すること。

２．外部電源系における１相開放故障の状態が検知されない場合、発生すると予想される状態及び安全上の問題について、報告すること。

なお、当該報告には、電源系の設備構成及び負荷の状態についての説明を含めること。

に関して報告するものである。

２．米国 Byron２号機の事象の概要と米国の対応状況について

（１）米国 Byron２号機の事象の概要

2012 年 1 月 30 日、米国 Byron２号機において定格出力運転中、以下の事象が発生した。

①　起動用変圧器の故障（架線の碍子の破損）により、３相交流電源の１相が開放故障した状態が発生した。

②　このため、常用母線の電圧が低下し、原子炉がトリップした。

③　３相交流電源の１相開放故障が検知されなかったため、非常用母線の外部電源への接続が維持され、非常用母線各相の電圧が不平衡となった。

④　原子炉トリップ後に起動した安全系補機類が、非常用母線の電圧不平衡のために過電流によりトリップした。

⑤　運転員が１相開放故障状態に気付き、外部電源の遮断器を手動で動作させることにより、外部電源系から非常用母線が開放され、非常用ディーゼル発電機が自動起動し、電源を回復した。

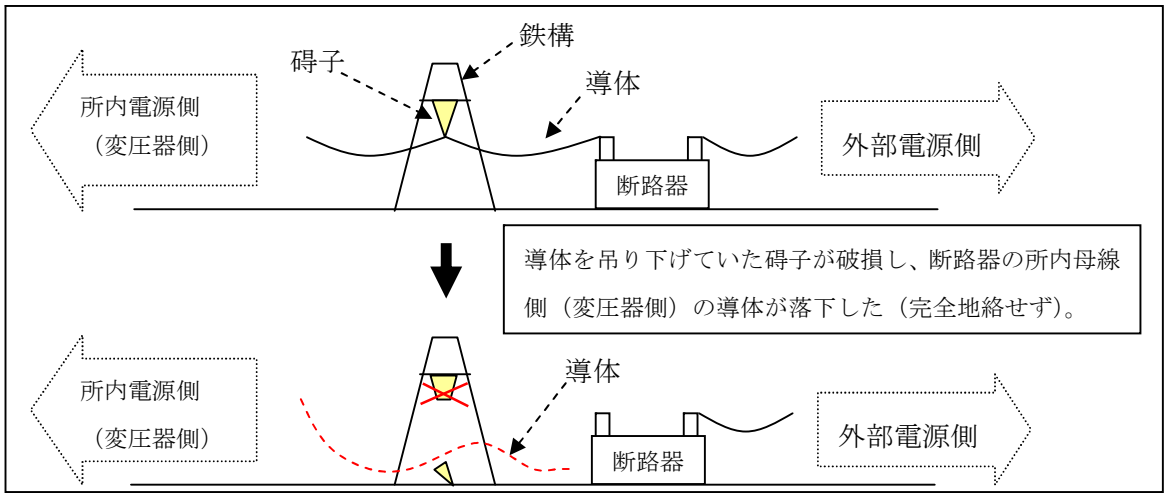


図１　米国 Byron２号機の１相開放故障の概要

（２）米国の対応状況について

米国原子力規制委員会では、所内電源における３相交流のうち１相開放故障が検知されることなく、非常用母線への給電が維持されたことを電源系統の設計の脆弱性・問題点と捉えており、米国事業者と対応を検討しているところである。

なお、米国原子力産業界は 2017 年を問題解決の期限としている。

３．各発電所の電源系の設備構成および主要な接続負荷について

各発電所の外部電源系の概要を以下に示す。また、各発電所における電源系の設備構成、および主要な接続負荷について添付資料－１、２に示す。

（添付資料－１、添付資料－２）

（１）美浜発電所（１～３号機）

美浜発電所（１～３号機）に接続する送電線は、275kV 送電線４回線（敦賀線、美浜線）77kV 送電線１回線（丹生線）で構成されている。

（２）高浜発電所（１～４号機）

高浜発電所（１～４号機）に接続する送電線は、500kV 送電線４回線（高浜線、青葉線）77kV 送電線１回線（高浜連絡線）で構成されている。

（３）大飯発電所（１～４号機）

大飯発電所（１～４号機）に接続する送電線は、500kV 送電線４回線（大飯幹線、第二大飯幹線）77kV 送電線１回線（大飯支線（大飯１，２号機））で構成されている。

４．外部電源系の１相開放故障の発生想定箇所について

発電所の所内電源系の非常用高圧母線に電源を供給するための外部電源として、以下の３つの経路が存在する。

(a) 所内変圧器からの電源
(b) 起動変圧器からの電源
(c) 予備変圧器からの電源

このうち、所内電源系の高圧母線における３相の各相には低電圧を検知する交流不足電圧継電器が設置されていることから、３相のうち１相の開放故障が発生し、保護継電器の検知電圧がある程度(約２割以上)低下すると、交流不足電圧継電器が動作し、１相開放故障を含めた電源系の異常を検知することが可能である。

加えて、所内母線の遮断器は３相の動作が機械的に連結されていることからも、１相のみの開放故障発生の可能性は極めて低い。

また(a)～(c) の各変圧器２次側（所内電源系側）の接続部位は、接地された筐体内等に収納されており、万一接続部における断線等により１相開放故障が発生したとしても、完全地絡に移行して大きな電圧低下が発生することから、交流不足電圧継電器により検知することが可能である。

よって、今回の外部電源系の１相開放故障の発生想定箇所としては、米国 Byron ２号機と同様に、外部電源から非常用母線に直接給電している変圧器の１次側を想定箇所としている。

５．報告内容

（１）外部電源系に１相開放故障が発生した場合の検知の可否及び検知後の対応について

ａ．１相開放故障が発生した場合の検知の可否について

４．の発生想定箇所（変圧器の１次側）において、米国 Byron２号機の事象のように１相開放故障が発生した場合に、所内電源系の３相の各相には、母線の低電圧を検知する交流不足電圧継電器が設置されており、変圧器１次側の１相開放故障に伴い、交流不足電圧継電器の検知電圧がある程度（約２割以上）低下した場合、当該保護継電器が動作し警報が発信することにより１相開放故障を含めた電源系の異常を検知することが可能である。

ただし、変圧器負荷が非常に少ない場合や、変圧器にΔ結線の安定巻線を含む場合、所内電源系側の交流不足電圧継電器の検知電圧が保護継電器の動作範囲まで低下せず、当該保護継電器での１相開放故障が検知できない可能性がある。（３相交流は１相のみの開放故障では変圧器鉄心に磁束の励磁が継続されるため２次側が３相不平衡になることなく、ほぼ正常な電圧が維持されるケースがある。）そのため、各発電所とも交流不足電圧継電器による変圧器１次側の１相開放故障が検知できない可能性がある。

しかし、当社変圧器は、一部（美浜発電所、高浜発電所の予備変圧器）を除き変圧器の１次側（外部電源系側）の接続部位は、米国 Byron２号機同様の架線による接続（図２参照）ではなく、接地された筐体・管路内に配線が収納された構造である。（図３及び図４参照）

このような構造の場合、変圧器１次側に破損が想定される架線の碍子は存在せず、また仮に導体の断線による１相開放故障が発生したとしても、２次側同様に接地された筐体・管路を通じ完全地絡となることで、保護継電器による検知が可能である。

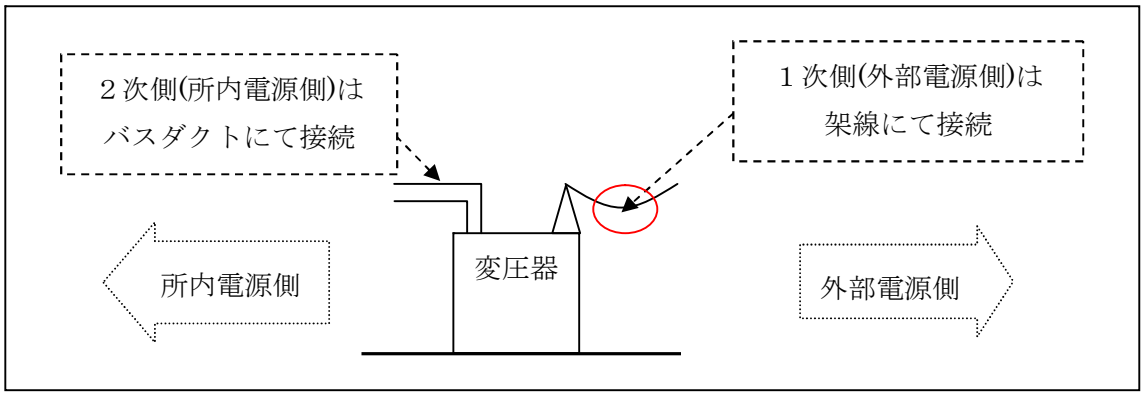


図２　変圧器１次側の接続構造例（架線接続）

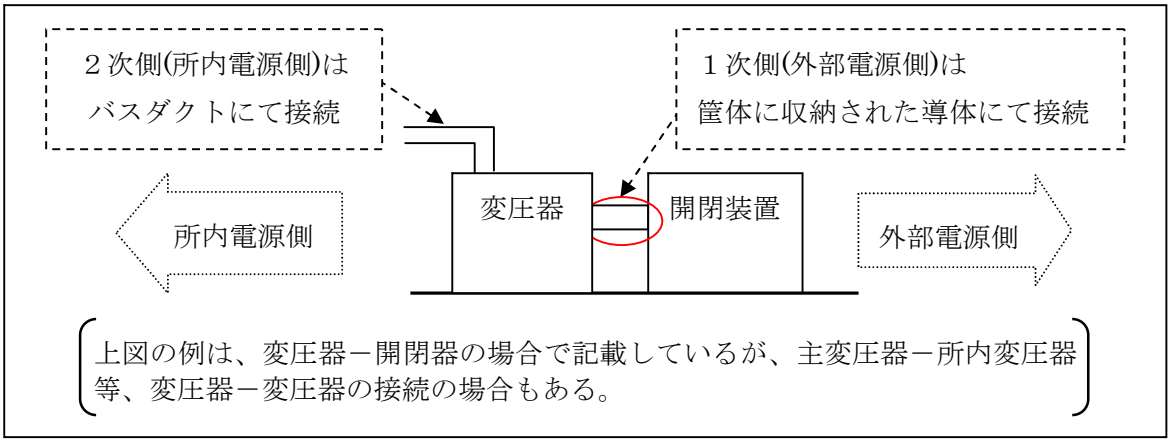


図３　変圧器１次側の接続構造例（筐体内に収納された導体で接続）

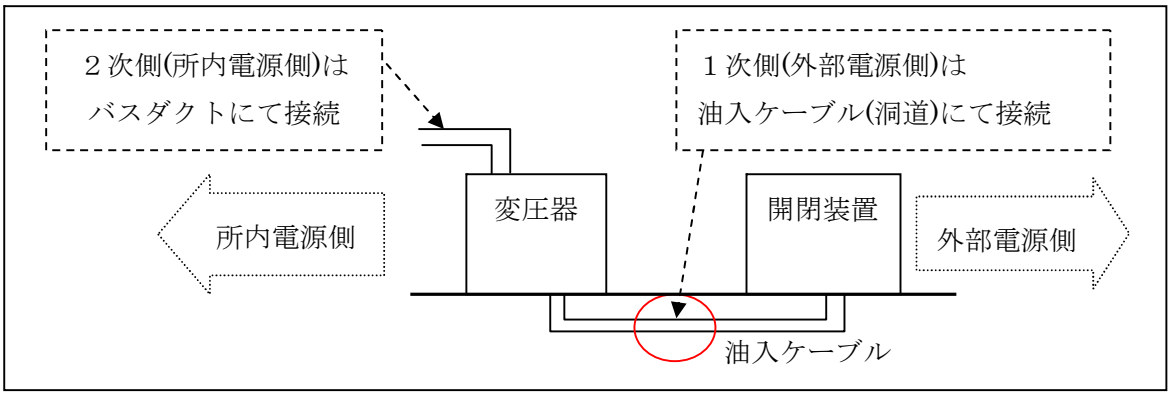


図４　変圧器１次側の接続構造例　（油入ケーブル(洞道)にて接続）

なお、当社において１次側が図２の構造になっているのは、以下２台である。

①美浜発電所の予備変圧器

・ 現在設備更新中であり、設備更新完了後（平成 26 年 3 月完了予定）は図３の構造になる。

②高浜発電所の予備変圧器

・ 当該変圧器は、１次側がΔ結線、二次側がＹ結線で安定巻線を有しない巻線構成である。当該構成の変圧器において、１次側の１相開放故障が発生すると２次側の電圧が交流不足電圧継電器が動作する範囲まで、低下することがわかっており、検知が可能であると考えられる。

また、１次側で１相開放故障が発生した場合に、当該母線から給電された電動機に異常な挙動（振動・異音）があったり、連続的に過負荷トリップする等の挙動を示す場合もあり（Byron２号機においても確認されている）、これらの事象で１相開放故障が発見される場合も考えられる。

ｂ．１相開放故障が発生した場合の検知後の対応について

非常用母線へ給電中の変圧器の１次側において１相開放故障を検知した場合、給電中の変圧器を手動にて切り離す事により、待機側の変圧器が受電可能な状態であれば、自動的に切り替わり、健全な変圧器より非常用母線に給電される。

仮に待機側の変圧器も健全な状態で無い場合や、点検や運用上の理由から、待機側変圧器が無い場合等においては、非常用ディーゼル発電機の起動により非常用母線に給電される。(また、非常用ディーゼル発電機から給電されるまでの短時間は、安全系蓄電池からの直流給電により、必要な監視・操作を継続する事ができる。)

（２）外部電源系における１相開放故障の状態が検知されない場合、発生すると予想される状態及び安全上の問題について(注)

（(注) １相開放故障の状態が検知されない場合には、検知可能な場合でも設備故障により検知されない場合を含む）

発電所の運転中にこれらの変圧器の外部電源側で、地絡を伴わない１相開放故障が発生した場合、海水ポンプ、補機冷却水ポンプなどが過負荷トリップして、待機中の機器が自動起動した場合、これらも過負荷トリップすると予想され、事象が長期化した場合には、原子炉水位や冷却材流量の低下等により、原子炉が自動停止する可能性がある。

ただし、これらの事象が発生した後、運転員は電源系の異常と判断して、待機側の電源系への切替や、非常用ディーゼル発電機の起動等、５．（１）－ｂ．における、“検知が可能である場合”と同様の対処により、安全上の問題に至る前に、事象を収束する事が可能である。

６．まとめ

今回想定した変圧器１次側の１相開放故障事象は、通常発生する確率は非常に低く、過去国内においても、当該事象の発生事例はない。また、当社の対象変圧器においては、上記のとおり、事象を把握する事が可能であると考えられる。

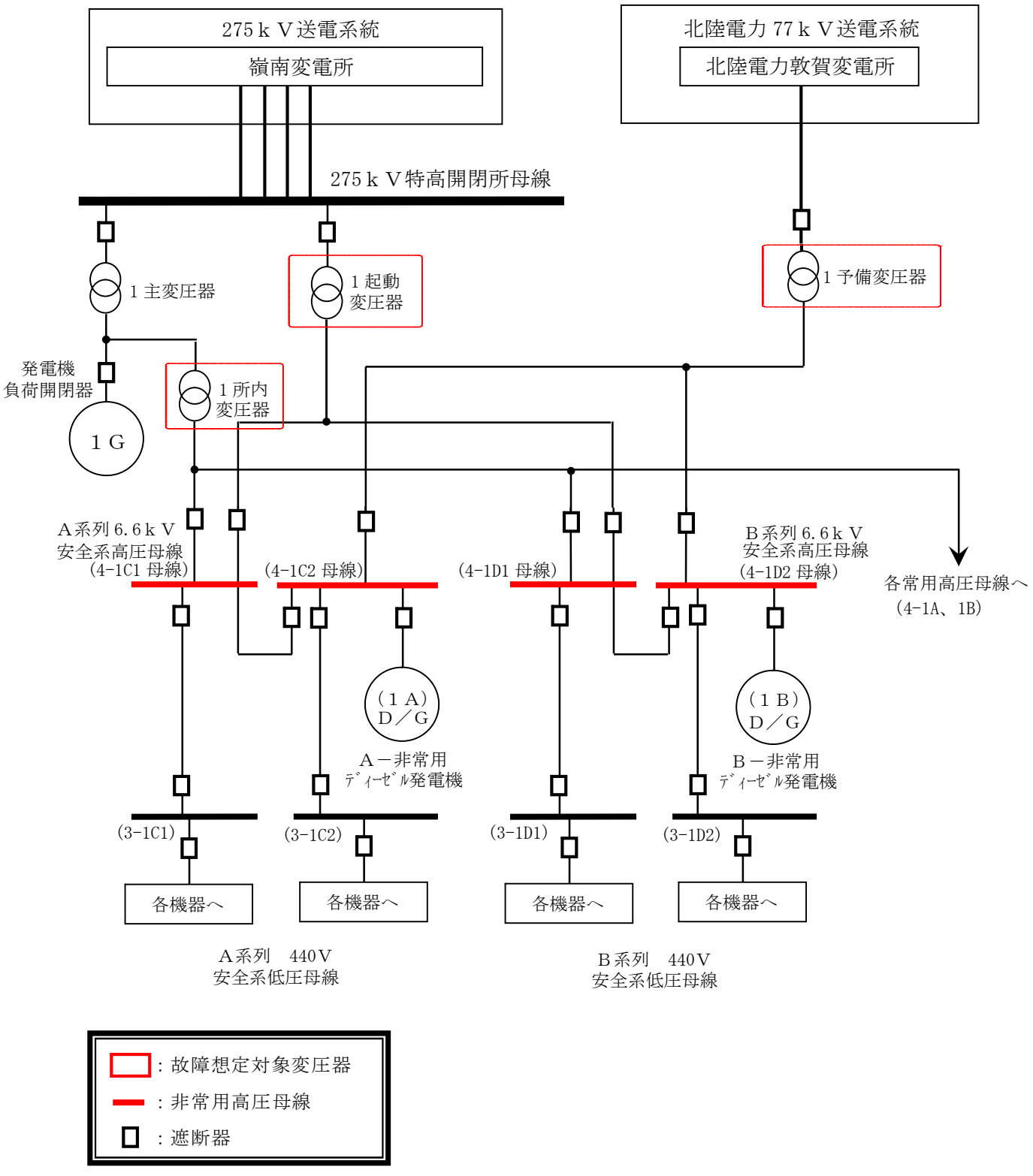
なお、仮に発生した場合にも、待機側の電源系への切替や、非常用ディーゼル発電機の起動により、安全上の問題に至る前に、事象を収束することが可能である。

しかし、１相開放故障が発生した際に、運転員が当該事象に対して知見がない場合、対応が遅くなる事が考えられるため、当社は当該事象の内容及びその対応方法について、運転員に周知・教育を行っており、運転員の運転・監視業務に関する規定類に反映予定である。また、毎日実施している変圧器の巡視点検時にも気を配り、早期の異常発見に努めている。

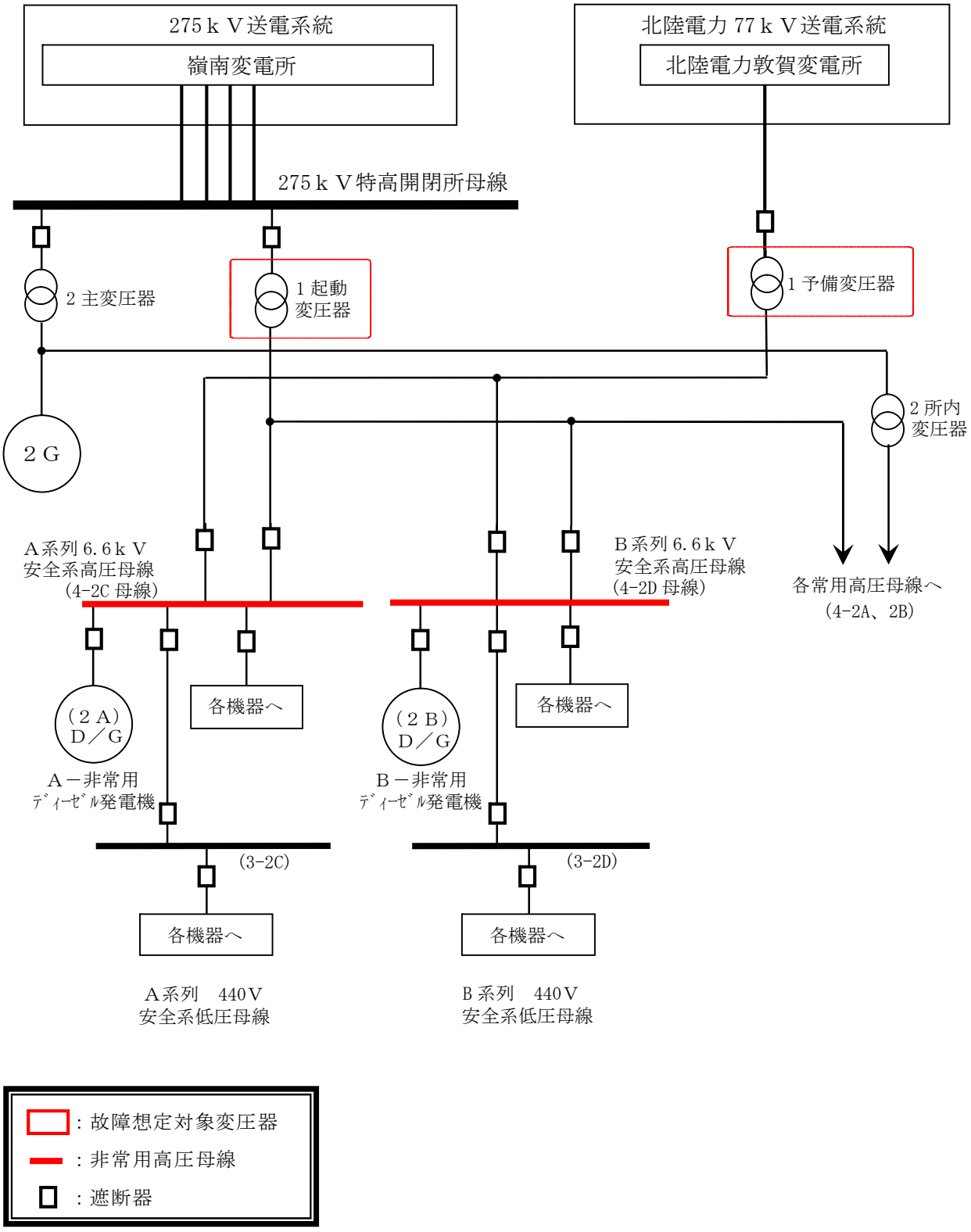
今後、米国原子力規制委員会及び米国原子力産業界において検討/研究中である内容動向を注視しながら、必要により設備面の追加対策についてもその要否を含め検討を続ける。

以　上

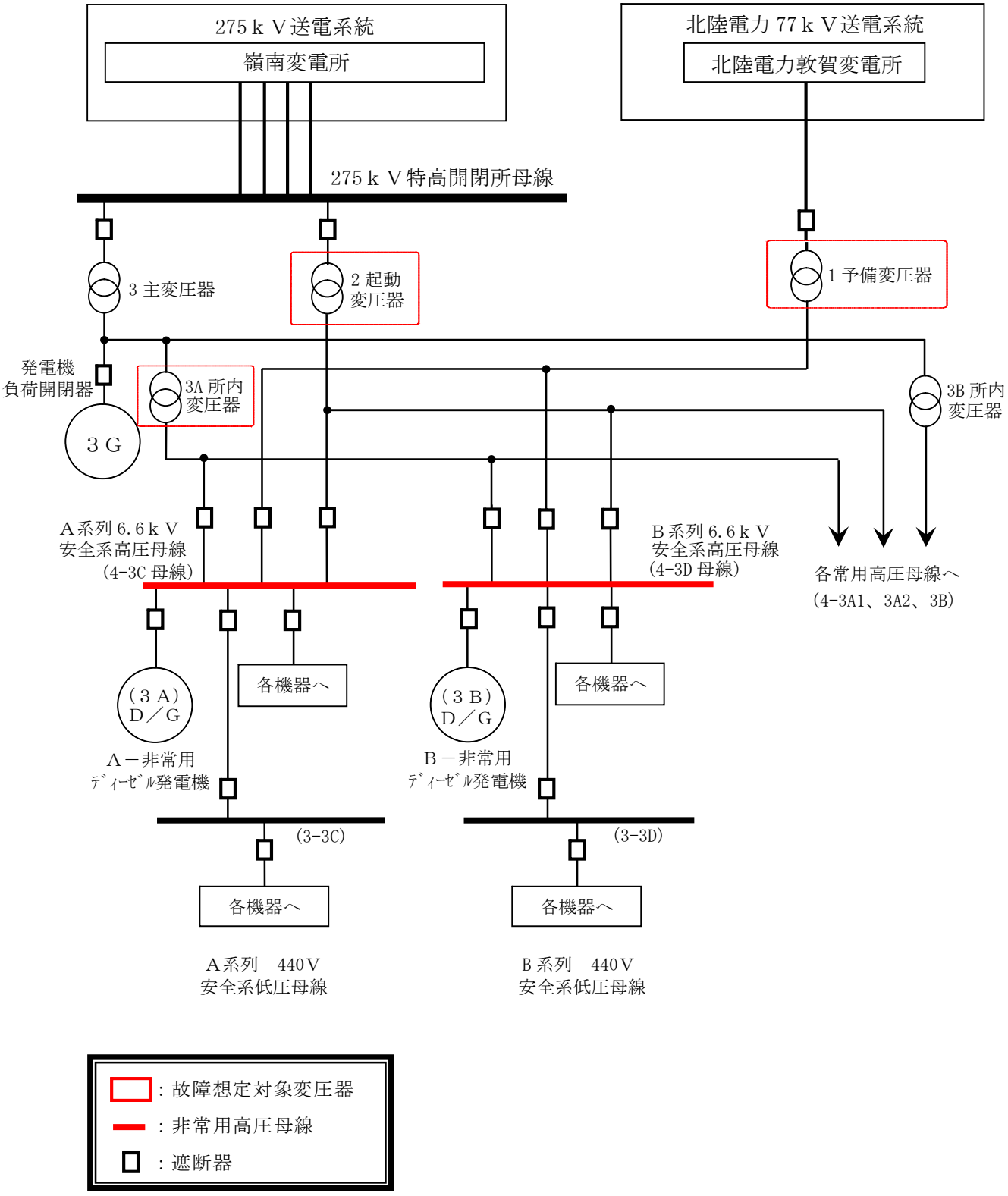
美浜発電所　１号機　電源構成概要図



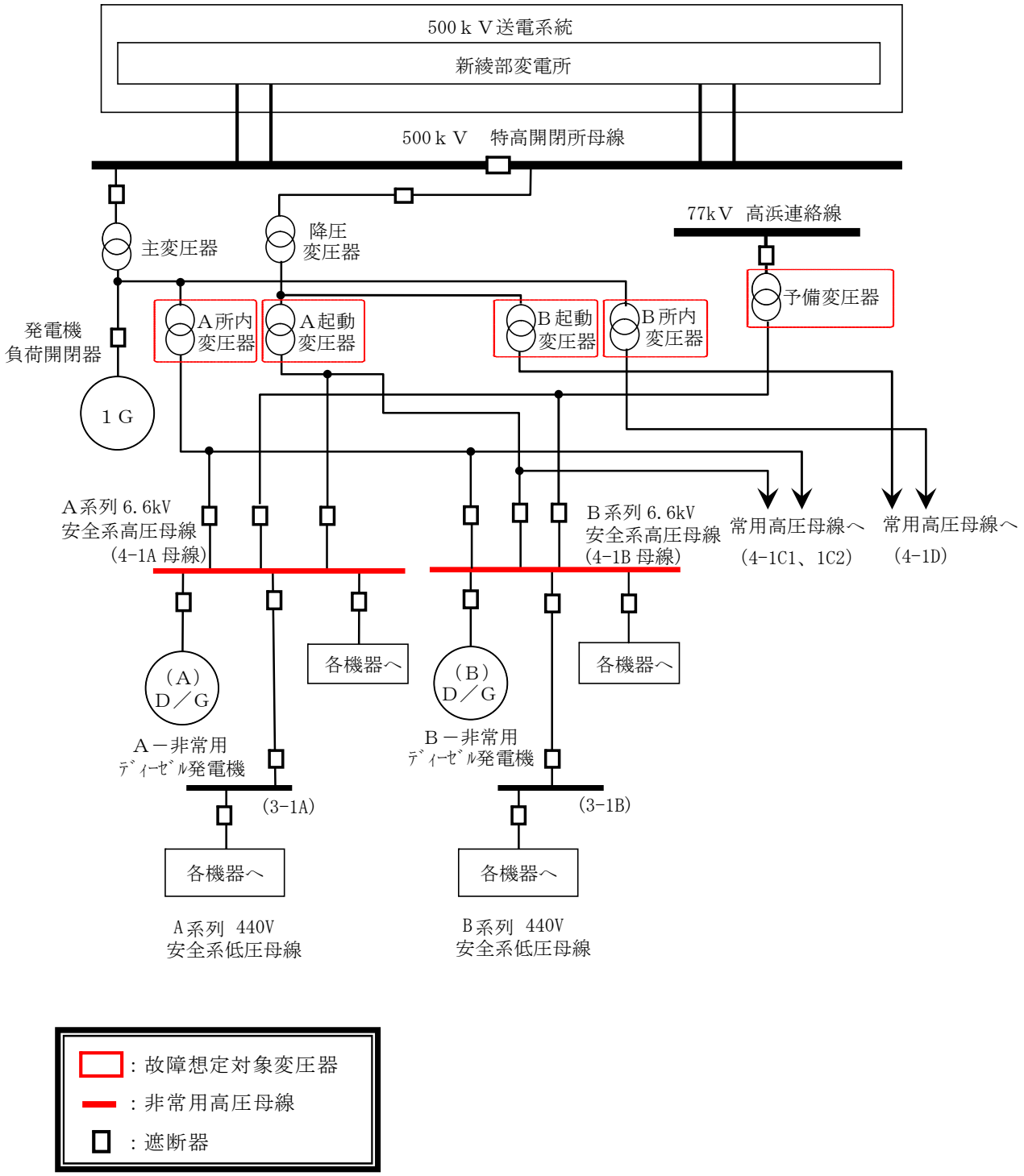
美浜発電所　２号機　　電源構成概要図



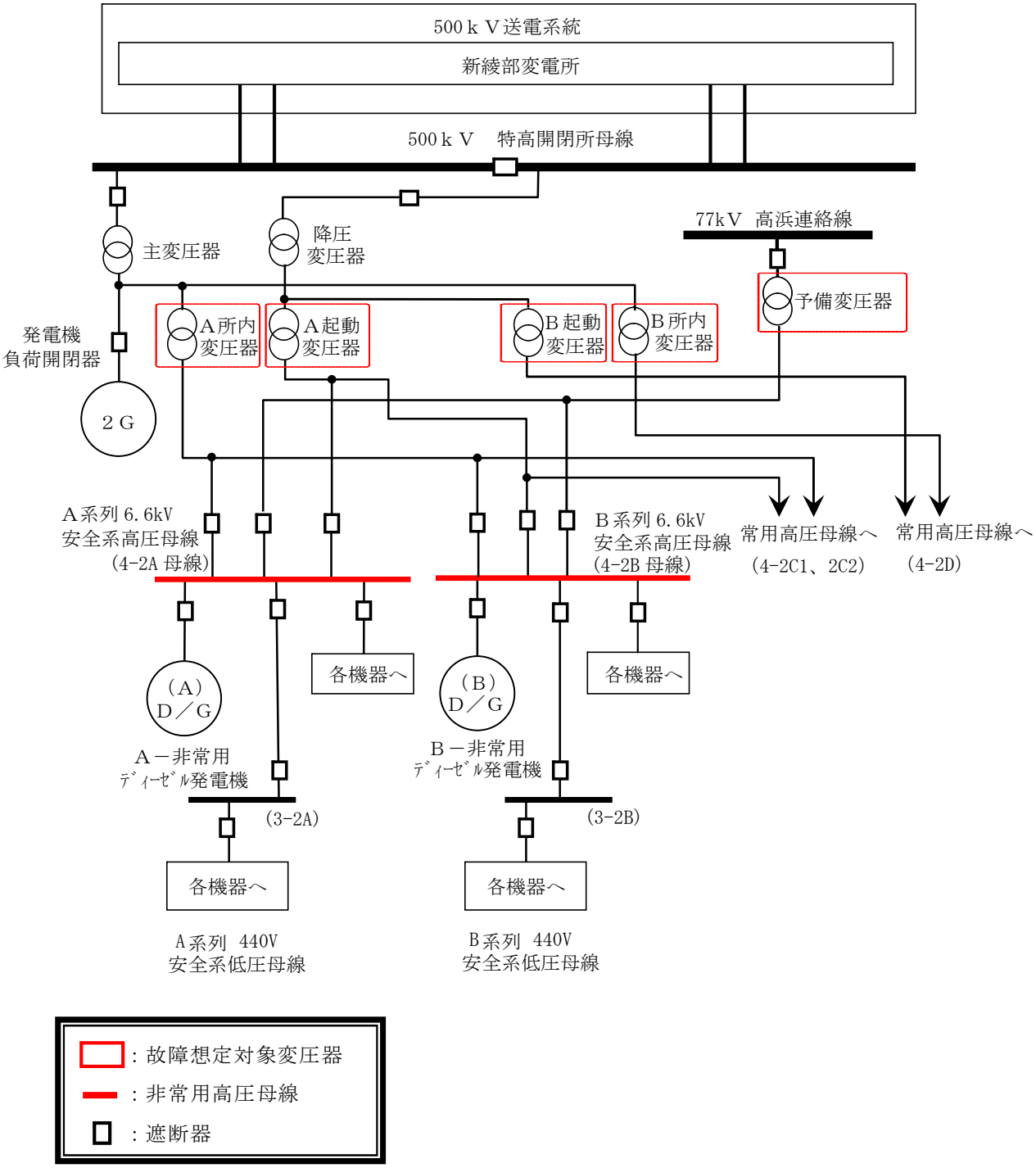
美浜発電所　３号機　電源構成概要図



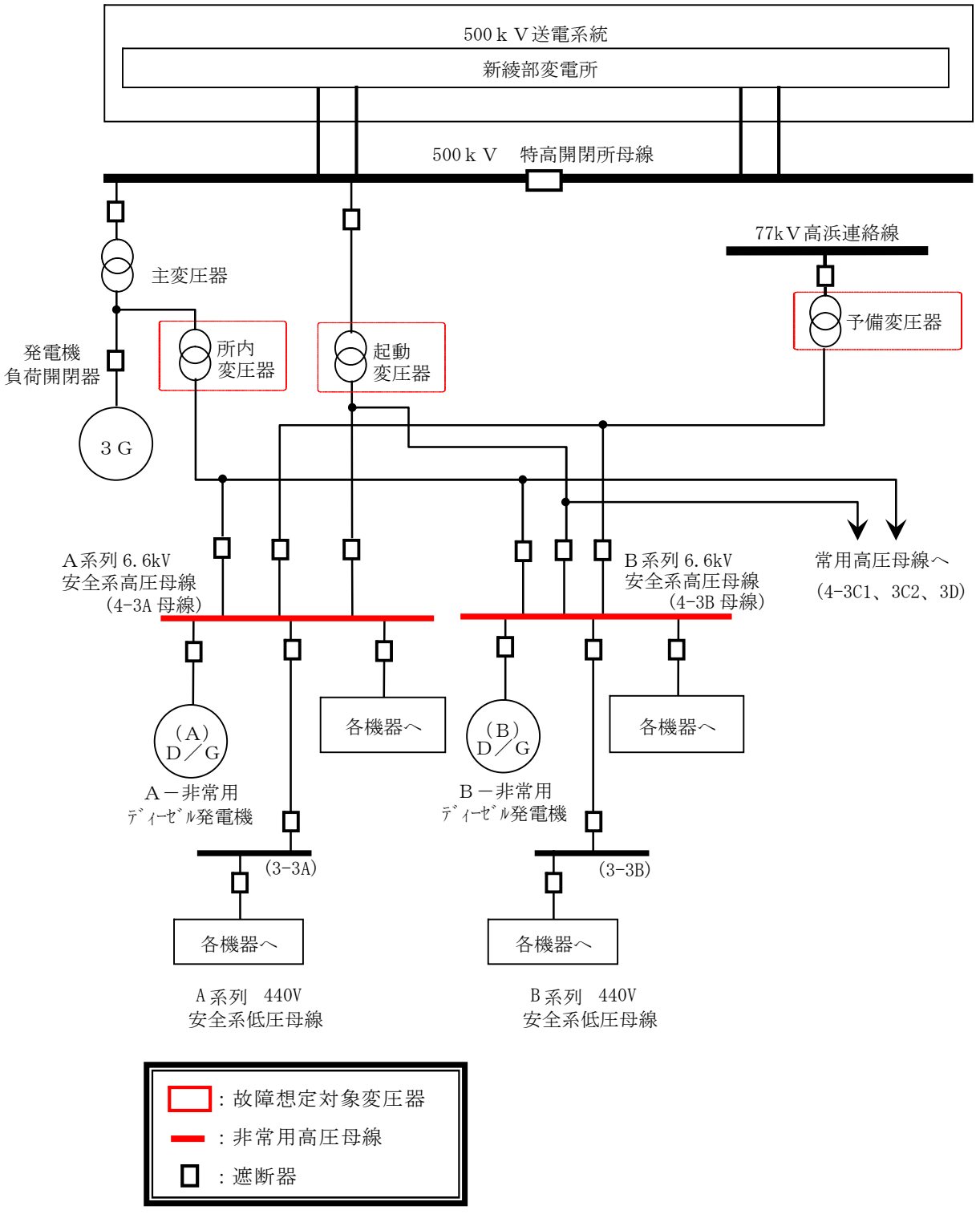
高浜発電所　１号機　　電源構成概要図



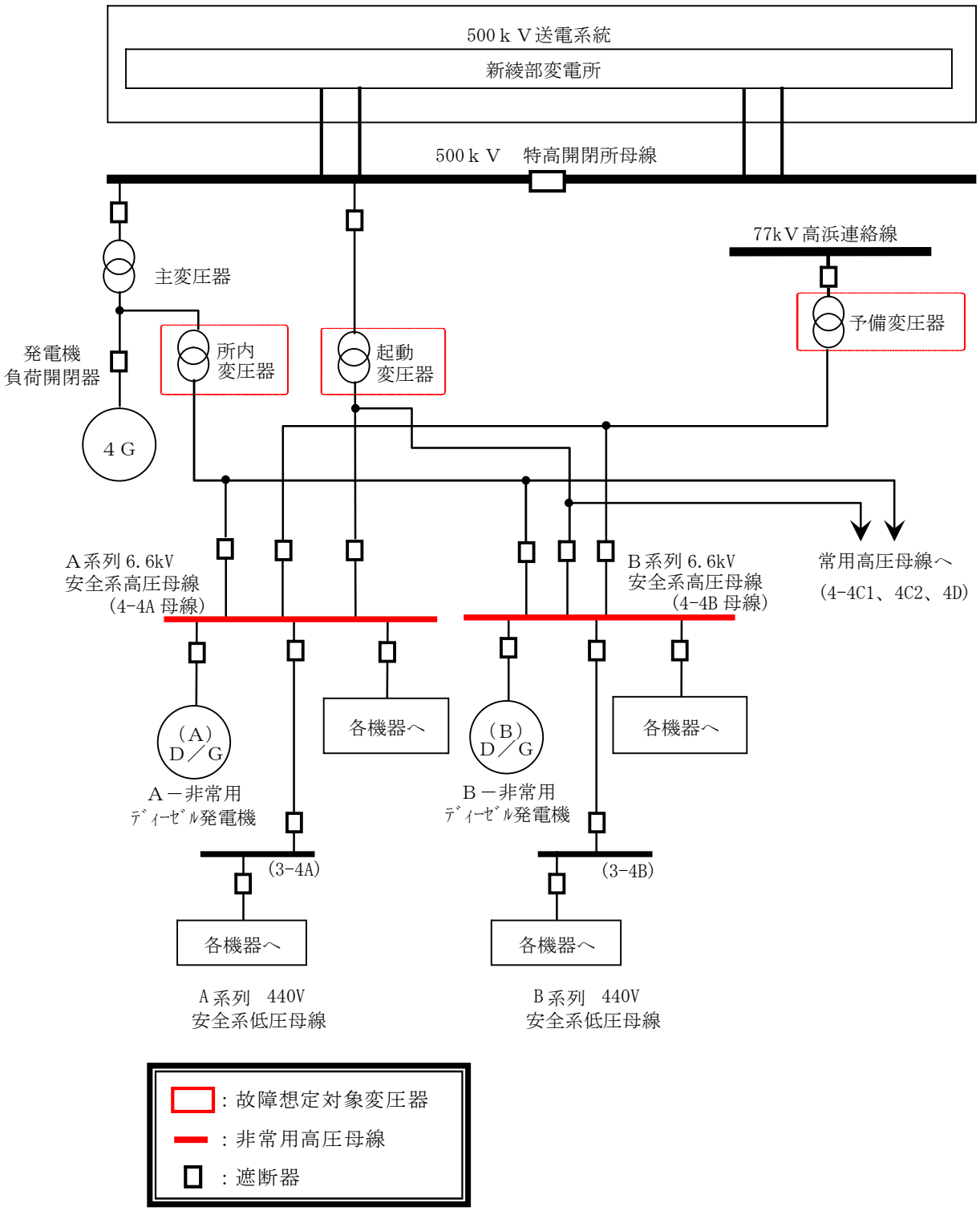
高浜発電所　２号機　電源構成概要図



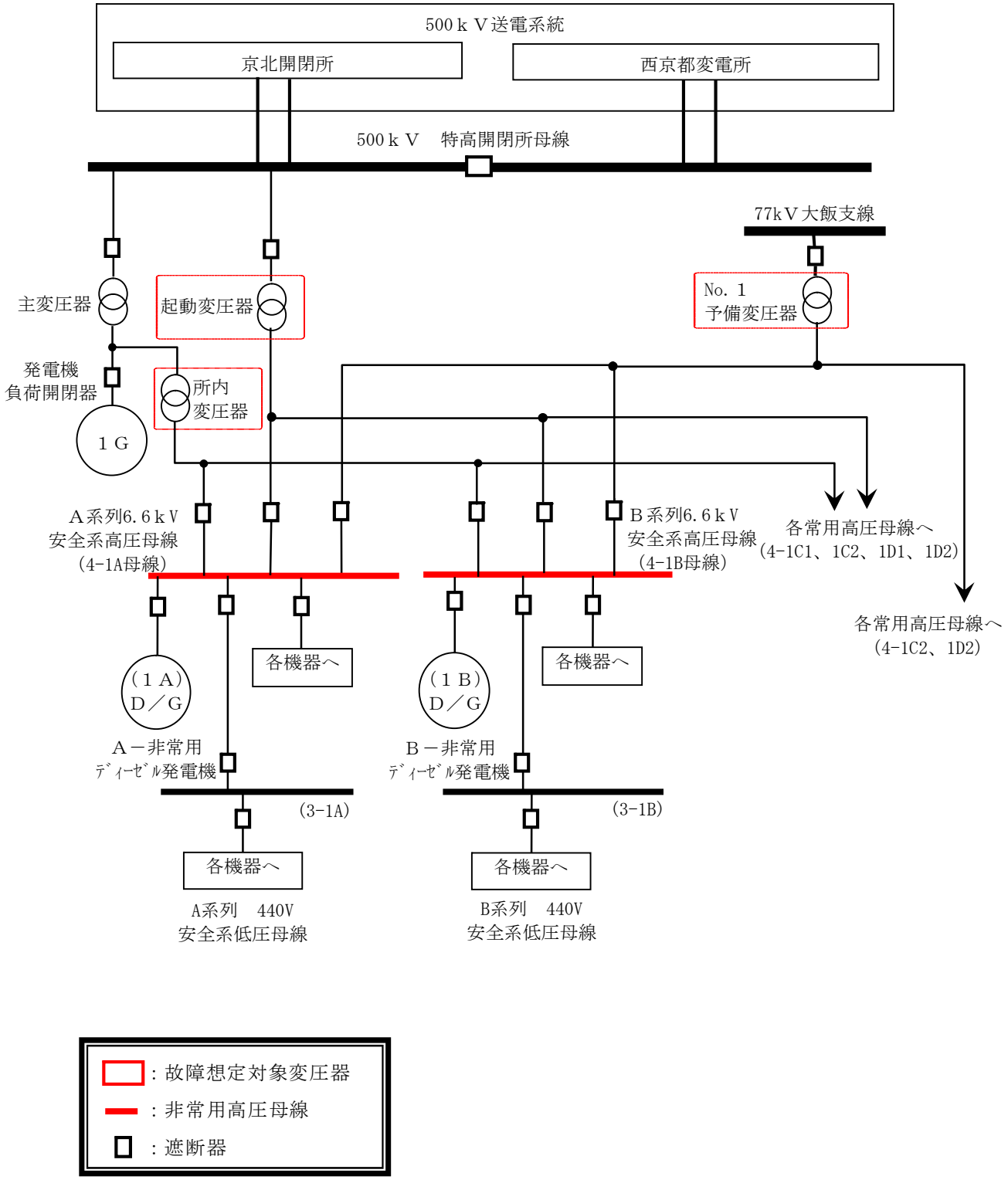
高浜発電所　３号機　電源構成概要図



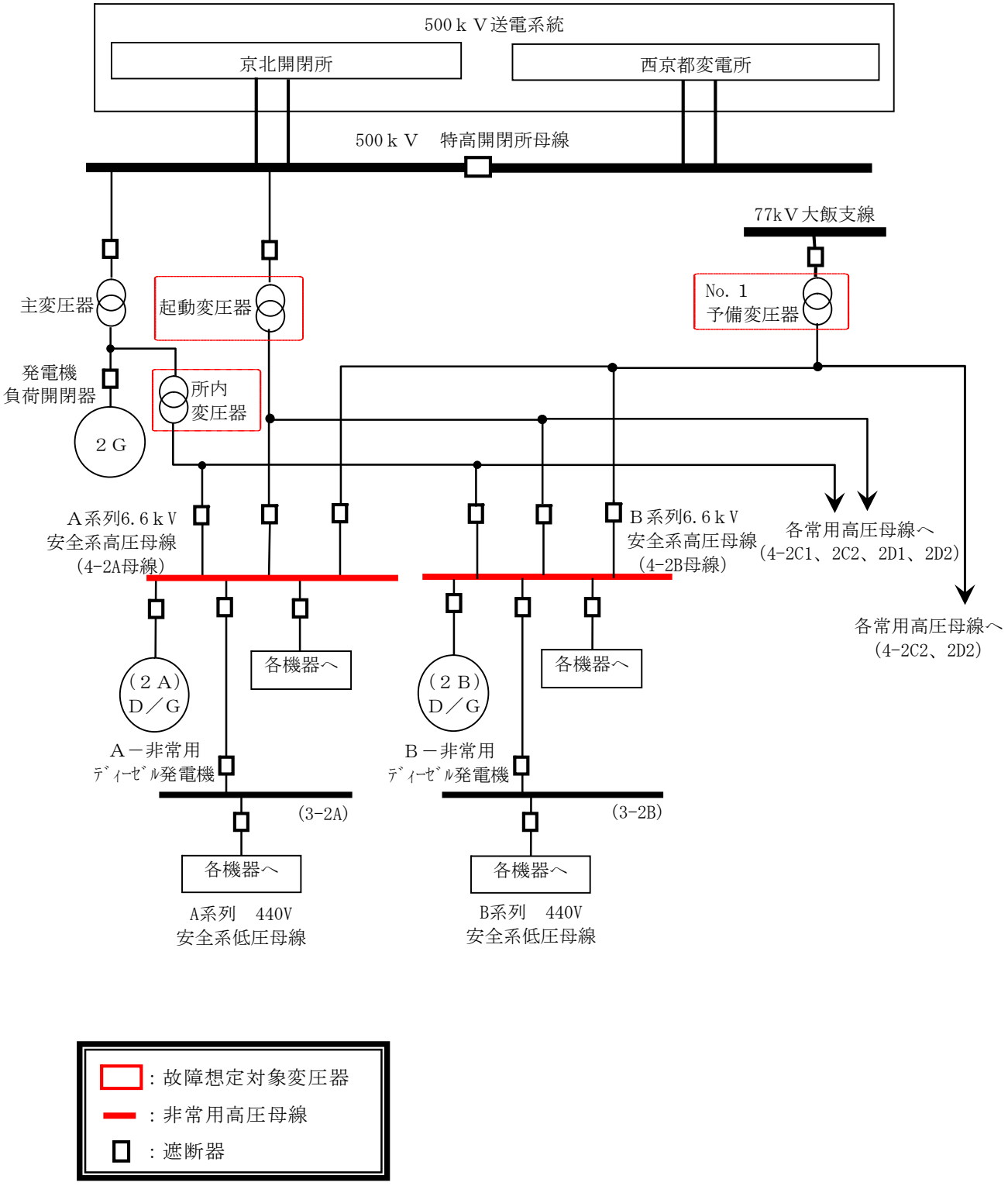
高浜発電所　４号機　　電源構成概要図



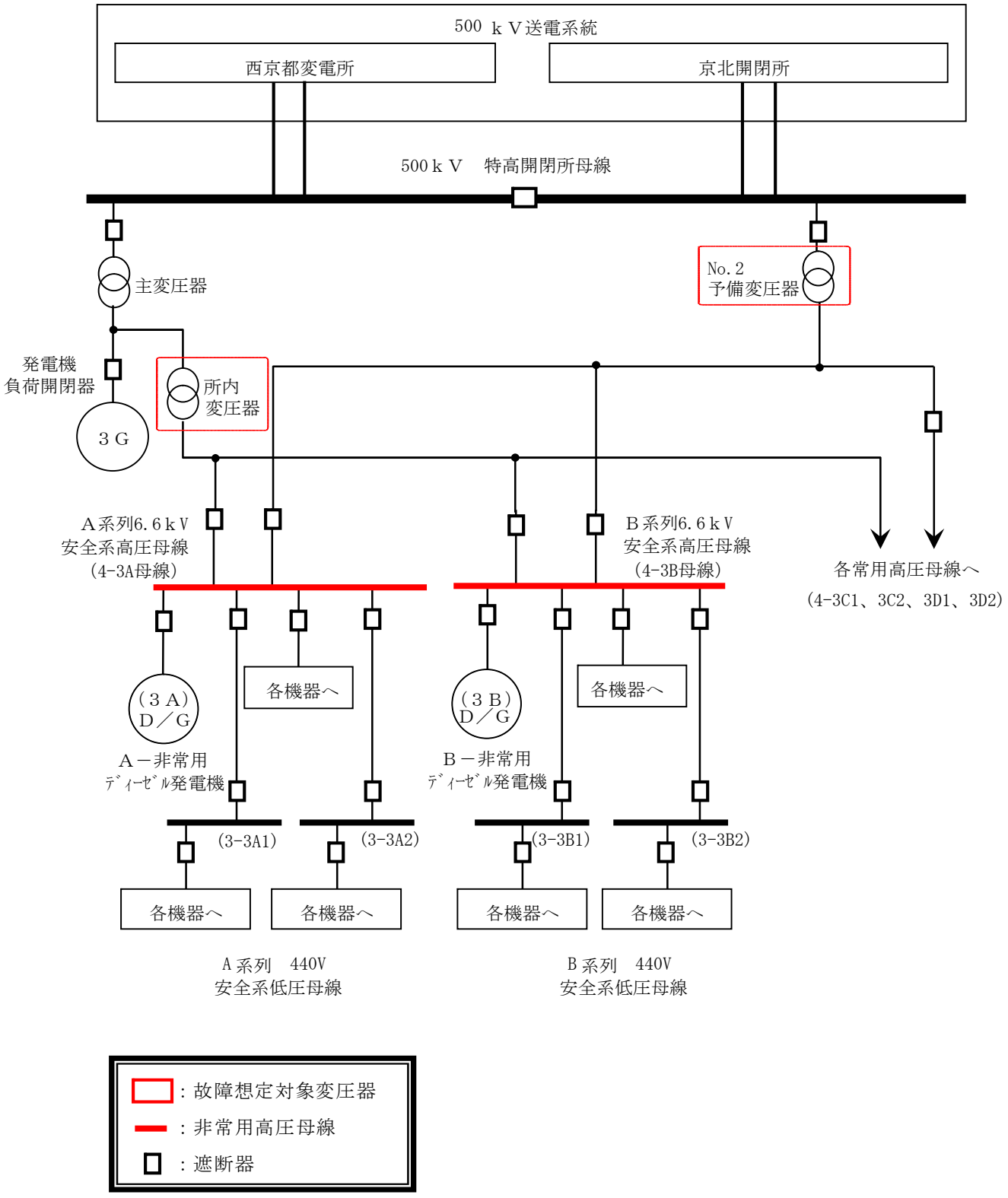
大飯発電所　１号機　電源構成概要図



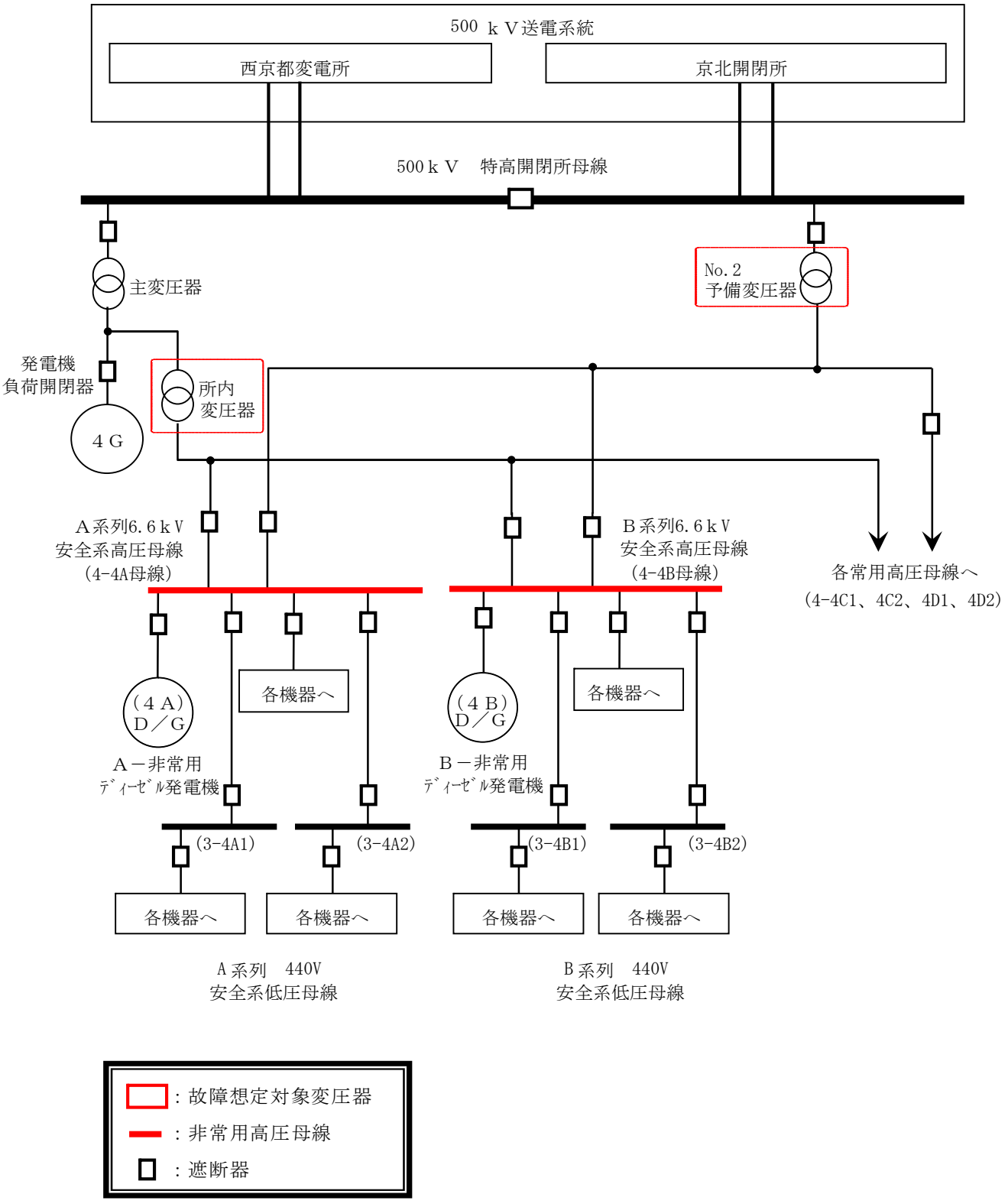
大飯発電所　２号機　電源構成概要図



大飯発電所　３号機　電源構成概要図



大飯発電所　４号機　電源構成概要図



添付資料－２

各発電所の主要な負荷リスト

発電所		所内電源系統		各母線の主要な負荷
美浜発電所	１号機	安全系	3-1C1、3-1C2、3-1D1、3-1D2	海水ポンプ、高圧注入ポンプ、電動補助給水ポンプ、余熱除去ポンプ、内部スプレイポンプ
		常用系	4-1A、4-1B	一次冷却材ポンプ、給水ポンプ、循環水ポンプ
	２号機	安全系	4-2C、4-2D	海水ポンプ、高圧注入ポンプ、電動補助給水ポンプ
		常用系	4-2A、4-2B	一次冷却材ポンプ、給水ポンプ、循環水ポンプ、復水ポンプ
	３号機	安全系	4-3C、4-3D	海水ポンプ、充てん／高圧注入ポンプ、補助給水ポンプ、余熱除去ポンプ、内部スプレイポンプ
		常用系	4-3A1、4-3A2、4-3B	一次冷却材ポンプ、給水ポンプ、循環水ポンプ、復水ポンプ
高浜発電所	１、（２）号機	安全系	4-1(2)A、4-1(2)B	海水ポンプ、充てん高圧注入ポンプ、電動補助給水ポンプ、余熱除去ポンプ、内部スプレイポンプ
		常用系	4-1(2)C1、1(2)C2、4-1(2)D	一次冷却材ポンプ、給水ポンプ、循環水ポンプ、復水ポンプ
	３、（４）号機	安全系	4-3(4)A、4-3(4)B	海水ポンプ、充てん高圧注入ポンプ、電動補助給水ポンプ、余熱除去ポンプ、格納容器スプレイポンプ、原子炉補機冷却水ポンプ
		常用系	4-3(4)C1、4-3(4)C2、4-3(4)D	一次冷却材ポンプ、電動主給水ポンプ、循環水ポンプ、復水ポンプ

発電所		所内電源系統		各母線の主要な負荷
大飯発電所	1、(2)号機	安全系	4-1(2)A、4-1(2)B	海水ポンプ、高圧注入ポンプ、充てん高圧注入ポンプ、電動補助給水ポンプ、余熱除去ポンプ、内部スプレイポンプ、放射性機器冷却水ポンプ、非放射性機器冷却水ポンプ
		常用系	4-1(2)C1、4-1(2)C2、4-1(2)D1、4-1(2)D2	一次冷却材ポンプ、電動主給水ポンプ、循環水ポンプ、復水ポンプ
	3、(4)号機	安全系	4-3(4)A、4-3(4)B	海水ポンプ、高圧注入ポンプ、電動補助給水ポンプ、余熱除去ポンプ、格納容器スプレイポンプ、原子炉補機冷却水ポンプ
		常用系	4-3(4)C1、4-3(4)C2、4-3(4)D1、4-3(4)D2	一次冷却材ポンプ、電動主給水ポンプ、循環水ポンプ、復水ポンプ