
1 相開放故障事象（OPC）に対する 原子力発電所の対応について

2020年8月5日

原子力エネルギー協議会

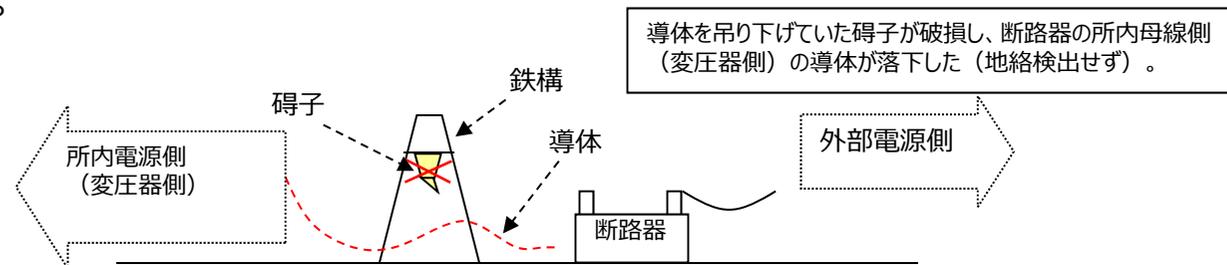
目次

1. 1相開放故障事象（OPC）の概要について	1
2. 国内のOPC対応状況と事業者の認識	2
3. 国内におけるこれまでの取組みと今後の計画	3
4. OPC自動検知システムの設置対象変圧器の選定	4
5. 外部電源受電ライン構成及び検知システム設置対象変圧器	5
6. OPC自動検知システムの運用方針	
(1) システムの運用方法	15
(2) 誤検知への対応	16
7. 各社の設置計画	17
8. 米国におけるOPC対応状況	19
9. まとめ	21

1. 1相開放故障事象（OPC）の概要について

OPC（Open Phase Condition）の概要（米国におけるOPC発生事例より）

- ・2012年1月30日、米国Byron 2号機において定格出力運転中、以下の事象が発生した。
 1. 起動用変圧器につながる架線の碍子の破損により、3相交流電源の1相が開放状態となり、起動用変圧器から給電されていた常用母線のRCPが低電圧リレー動作でトリップ、さらに原子炉がトリップした。
 2. 一方、当該起動変圧器から同時に給電されていた非常用母線については、低電圧リレーが動作せず、3相交流電圧が不平衡のまま外部電源への接続が維持された。
 3. 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に起因する過電流等により連続的にトリップしたが、運転員は事象発生当初、その原因を特定することができなかった。
 4. その後、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。



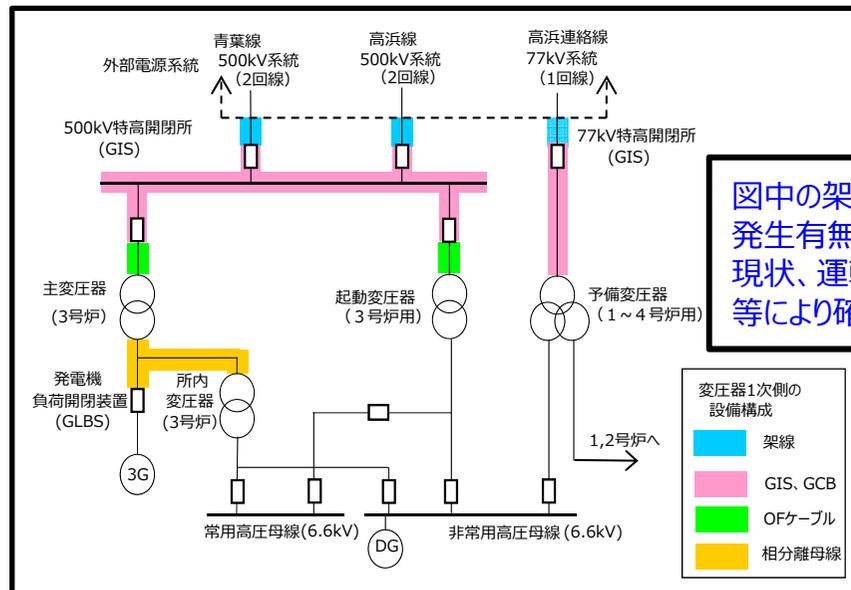
米国Byron 2号機の1相開放故障の概要

- ・上記のようにOPCは主に架線部で発生し、地絡を伴わない場合や非常用母線の電圧・電流低下が小さい場合は、既設の保護リレー等で検出できない事象である。設備の構造や設置環境から、架線部以外ではOPCの発生は考えにくく、仮に発生しても、地絡を伴うため、検知可能である。 ⇨ 参考1・2

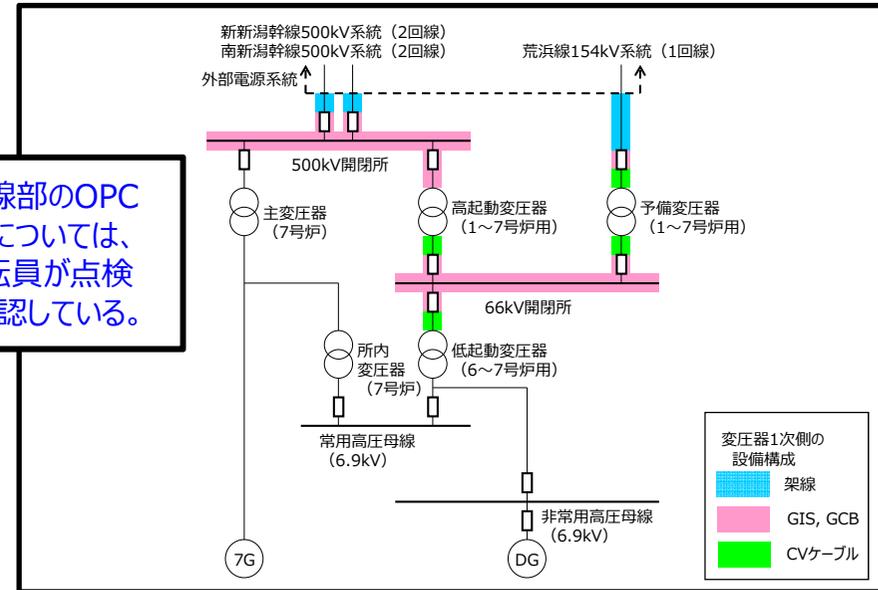
2. 国内のOPC対応状況と事業者の認識

- OPCへの対応については、設置許可基準規則33条に基づき、既設の保護リレー等で検知できない箇所について、運転員の巡視点検や受電ライン切替前後の点検等により事象を検知する運用としており、また、OPC発生時の兆候及びその対応を運転員に教育し、手順として定める等、OPCによるプラント影響を防止できる体制を構築している。したがって、仮に常時外部電源を受電している起動変圧器のラインでOPCが発生したとしても、非常用高圧母線の電動機が連続的に過電流トリップする等の兆候にて、速やかに非常用ディーゼル発電機等の健全な電源に切り替えることが可能であり、リスク上喫緊の問題はないと考えている。
- ただし、非常用高圧母線への外部電源受電ラインに架線を含む場合で、OPCを既設の保護リレー等で検知できない変圧器については、事象発生から把握までにタイムラグがあることから、更なる改善が必要と認識。

PWRの外部電源受電ライン構成（高浜の例）



BWRの外部電源受電ライン構成（柏崎刈羽の例）

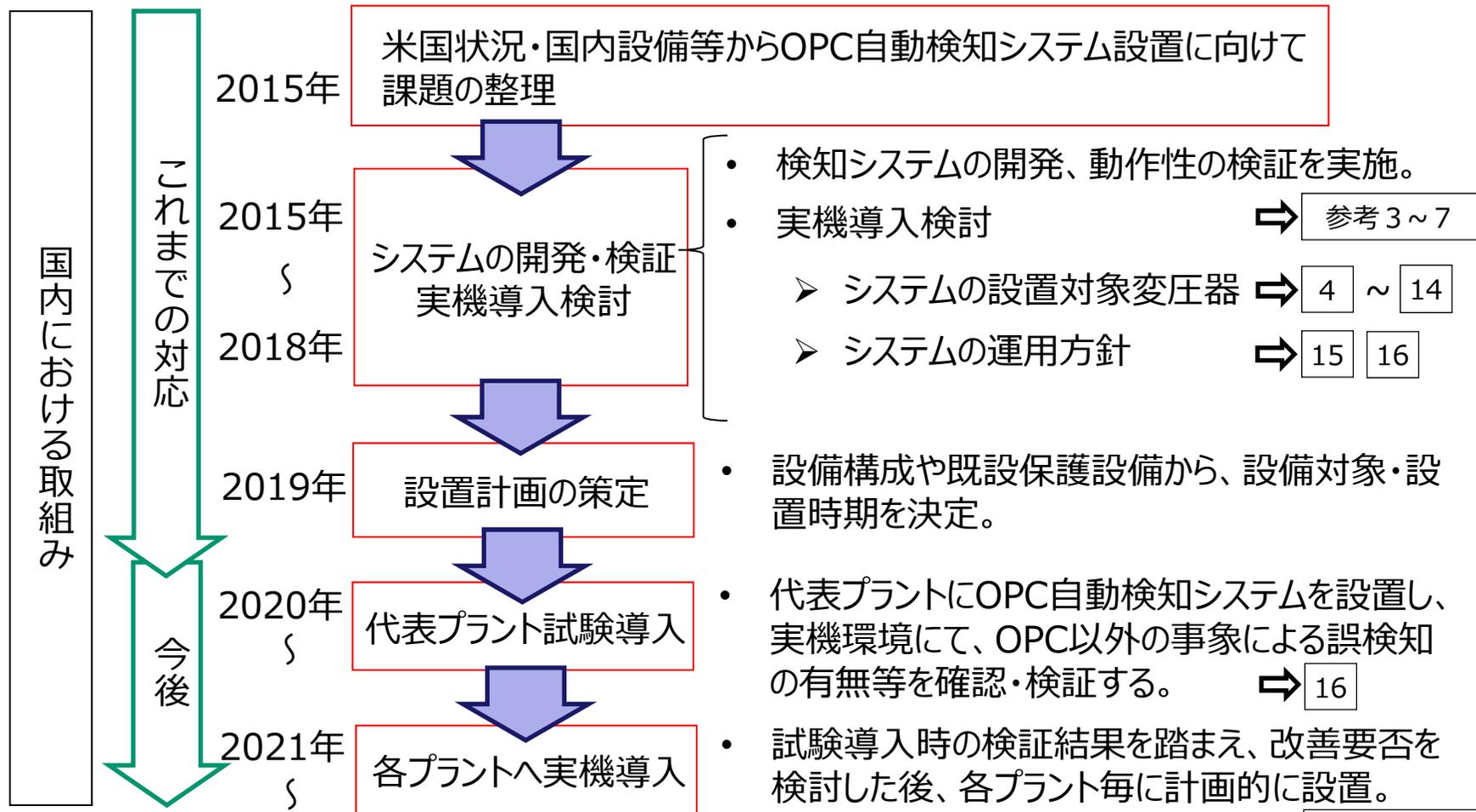


図中の架線部のOPC発生有無については、現状、運転員が点検等により確認している。

※他プラントを含めたすべての構成パターン ⇨ 5 ~ 14

3. 国内におけるこれまでの取組みと今後の計画

- 国内では、これまで海外情報等の収集も行いながら、OPC自動検知システムの開発・検証を行い、実機導入に向けて検討・準備を進めてきた。⇒ 参考3～7
- その結果、実機導入の目途が立ってきたため、今後、代表プラントにて試運用を開始し、早期の本格導入を目指す。

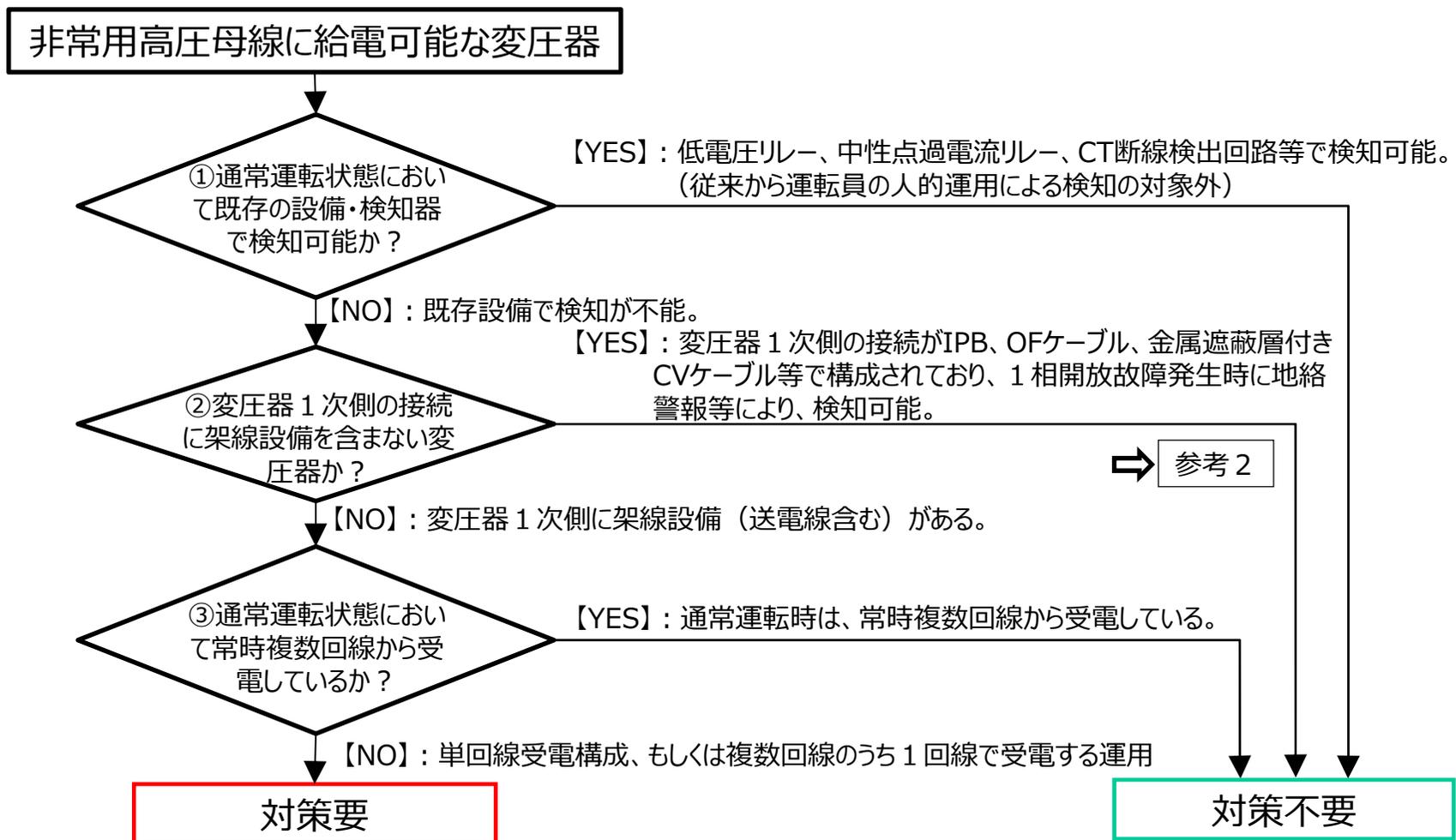


⇒ 参考8～13

4. OPC自動検知システムの設置対象変圧器の選定

設置対象として、1相開放故障を人的運用によって検知する必要がある変圧器を以下のフローにより選定。PWR / BWR 共に主に通常運転中は待機状態の予備変圧器が対象になる。⇒ 5 ~ 14

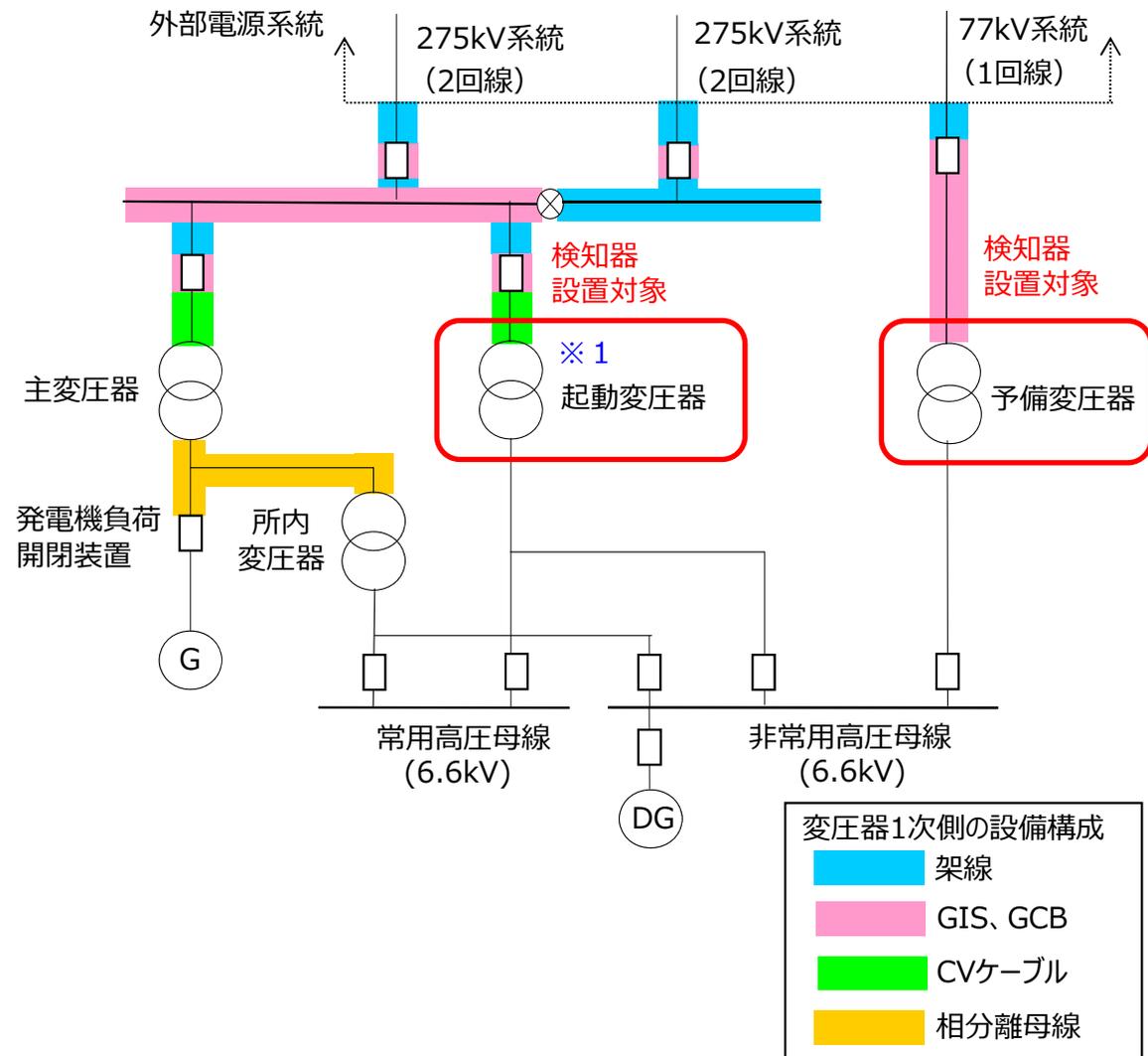
設置対象変圧器の選定フロー



5. 外部電源受電ライン構成及び検知システム設置対象変圧器 (PWR1/6)

PWR電源構成例①

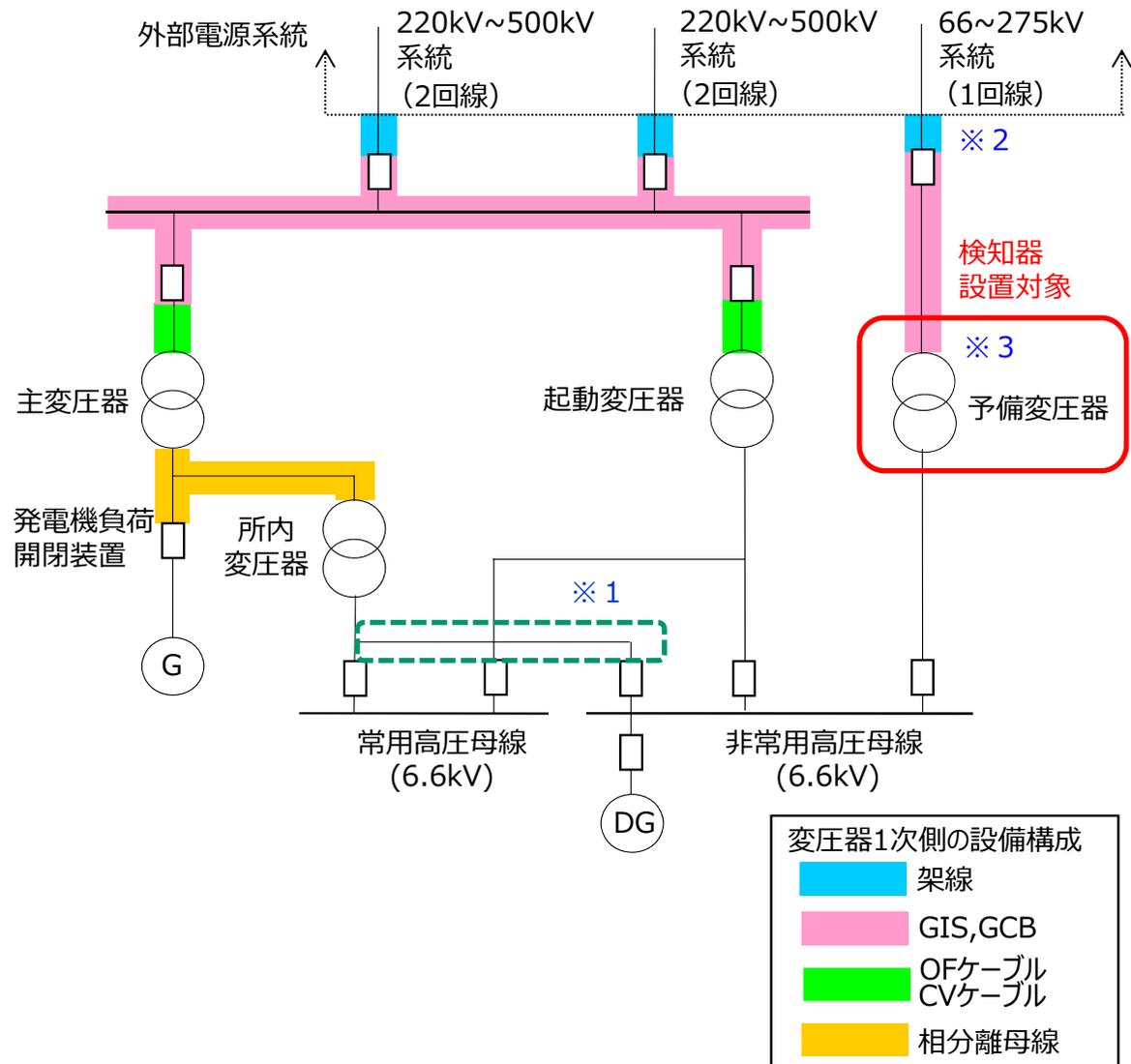
対象プラント	美浜3号	
特徴	主変圧器+起動変圧器 +予備変圧器 構成	
個別プラントにおける相違点	美浜3号機	※1) 美浜3号機のNo.2起動変圧器については、275kV系統からの受電ラインに一部架線があるため、 検知器設置対象 としている。



5. 外部電源受電ライン構成及び検知システム設置対象変圧器 (PWR2/6)

PWR電源構成例②

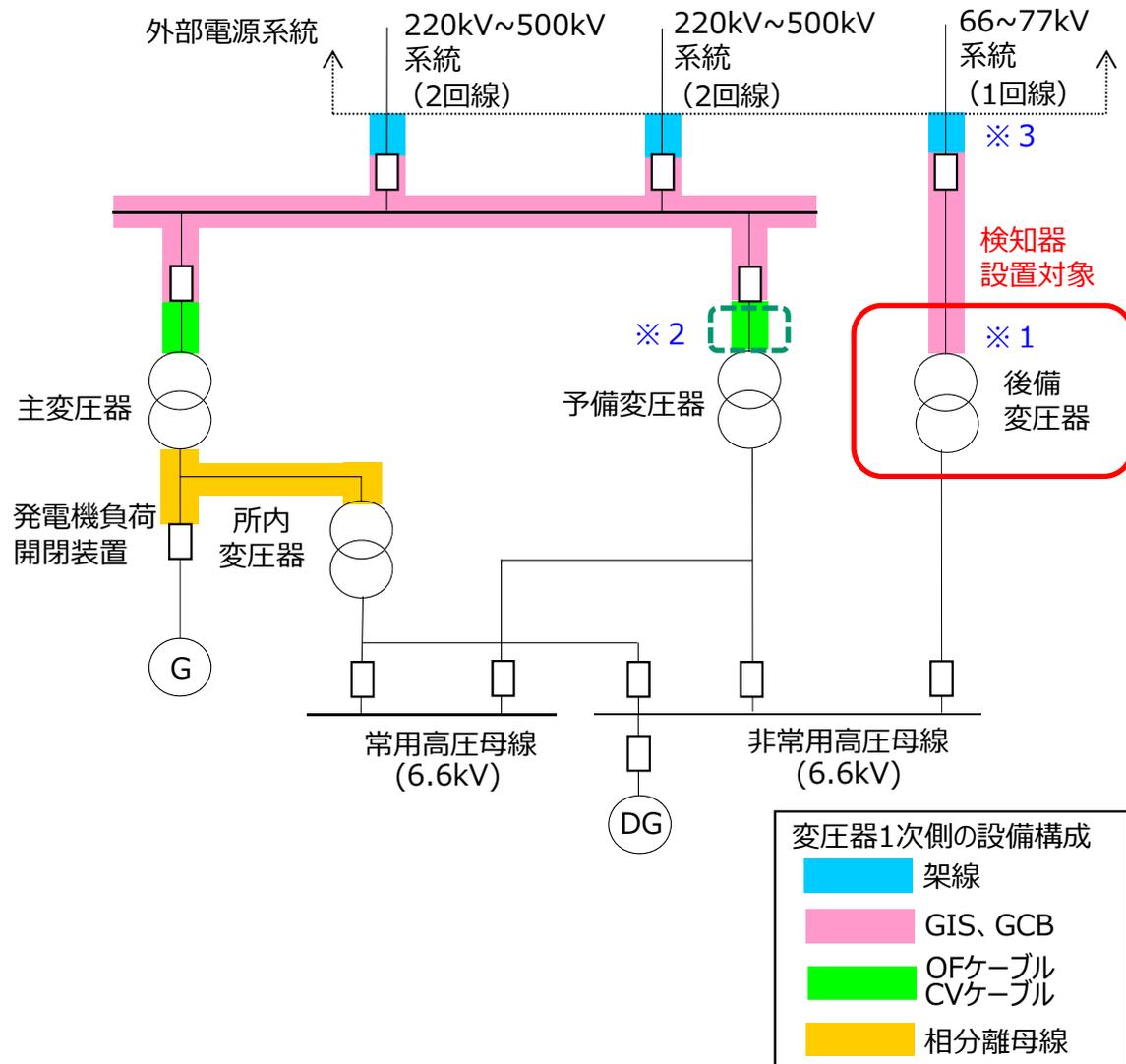
対象プラント	泊1号、泊2号、高浜1号、高浜2号、高浜3号、高浜4号、敦賀2号 (発電機負荷開閉装置の有無の差は割愛している。また、廃止措置予定プラントは除く)	
特徴	主変圧器 + 起動変圧器 + 予備変圧器 構成	
個別プラントにおける相違点	泊1,2号機	<p>※1) 主変圧器、所内変圧器から非常用高圧母線へ接続するラインはない。</p> <p>※2) 予備変圧器に接続する66kV系統は2回線構成となっているが、常時1回線受電のため、検知器設置対象としている。</p>
	敦賀2号機	<p>※1) 主変圧器、所内変圧器から非常用高圧母線へ接続するラインはない。</p> <p>※2) 予備変圧器に接続する275kV系統は2回線構成となっているが、常時2回線受電ではないため、検知器設置対象としている。</p> <p>※3) 予備変圧器に加えて、今後新設する予定の後備変圧器についても、検知器設置対象としている。</p>



5. 外部電源受電ライン構成及び検知システム設置対象変圧器 (PWR3/6)

PWR電源構成例③

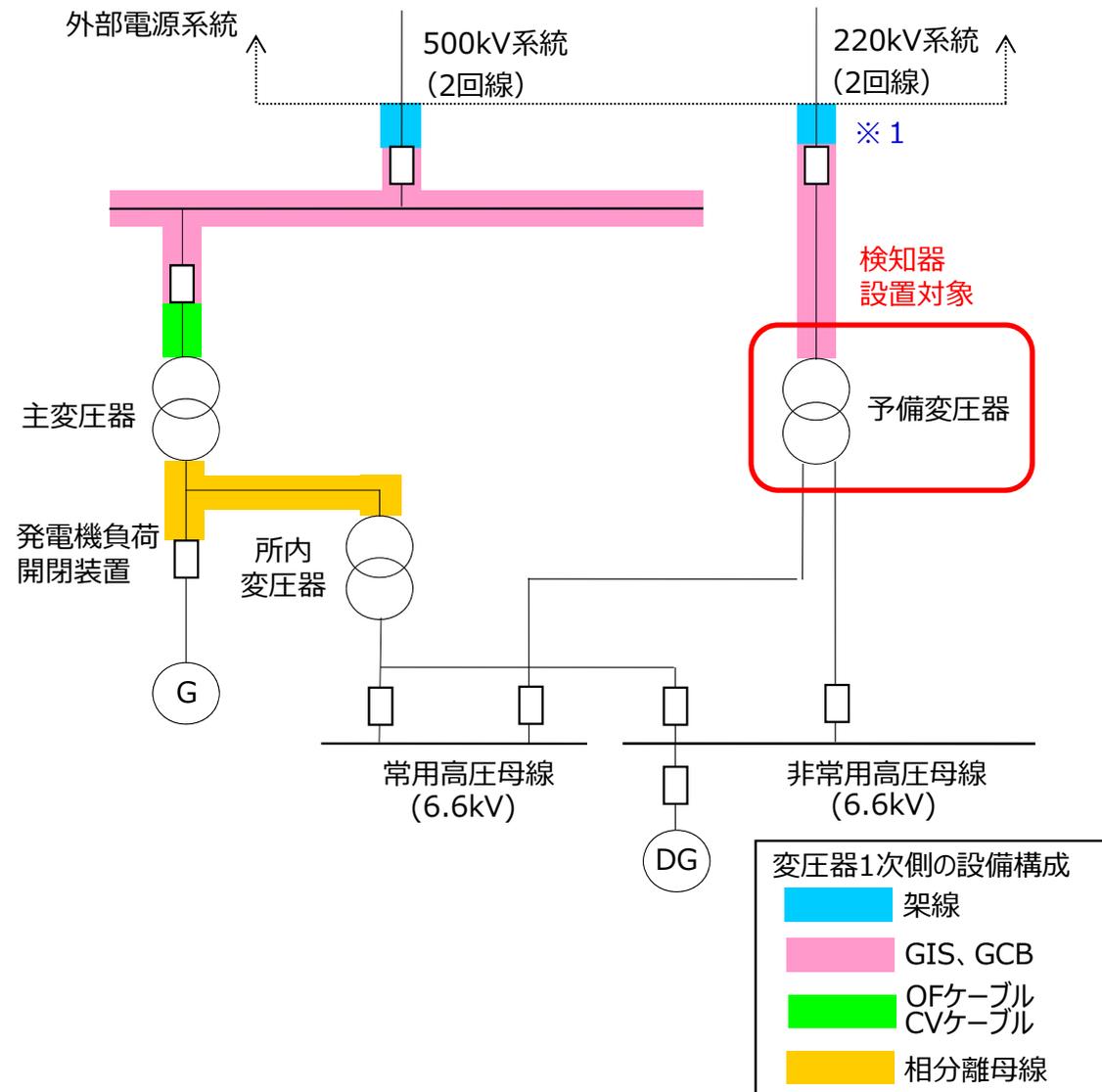
対象プラント	泊3号、大飯3号、大飯4号 (発電機負荷開閉装置の有無の差は割愛している。また、廃止措置予定プラントは除く)	
特徴	主変圧器 + 予備変圧器 + 後備変圧器 構成	
個別プラントにおける相違点	大飯3,4号機	※1) 後備変圧器として、77kV系統のNo.1予備変圧器が設置されている。
	泊3号機	※2) 当該ラインはGIS設備となっている。 ※3) 今後新設する予定の後備変圧器は、接続する66kV系統が2回線構成となっているが、常時1回線受電のため、検知器設置対象としている。



5. 外部電源受電ライン構成及び検知システム設置対象変圧器 (PWR4/6)

PWR電源構成例④

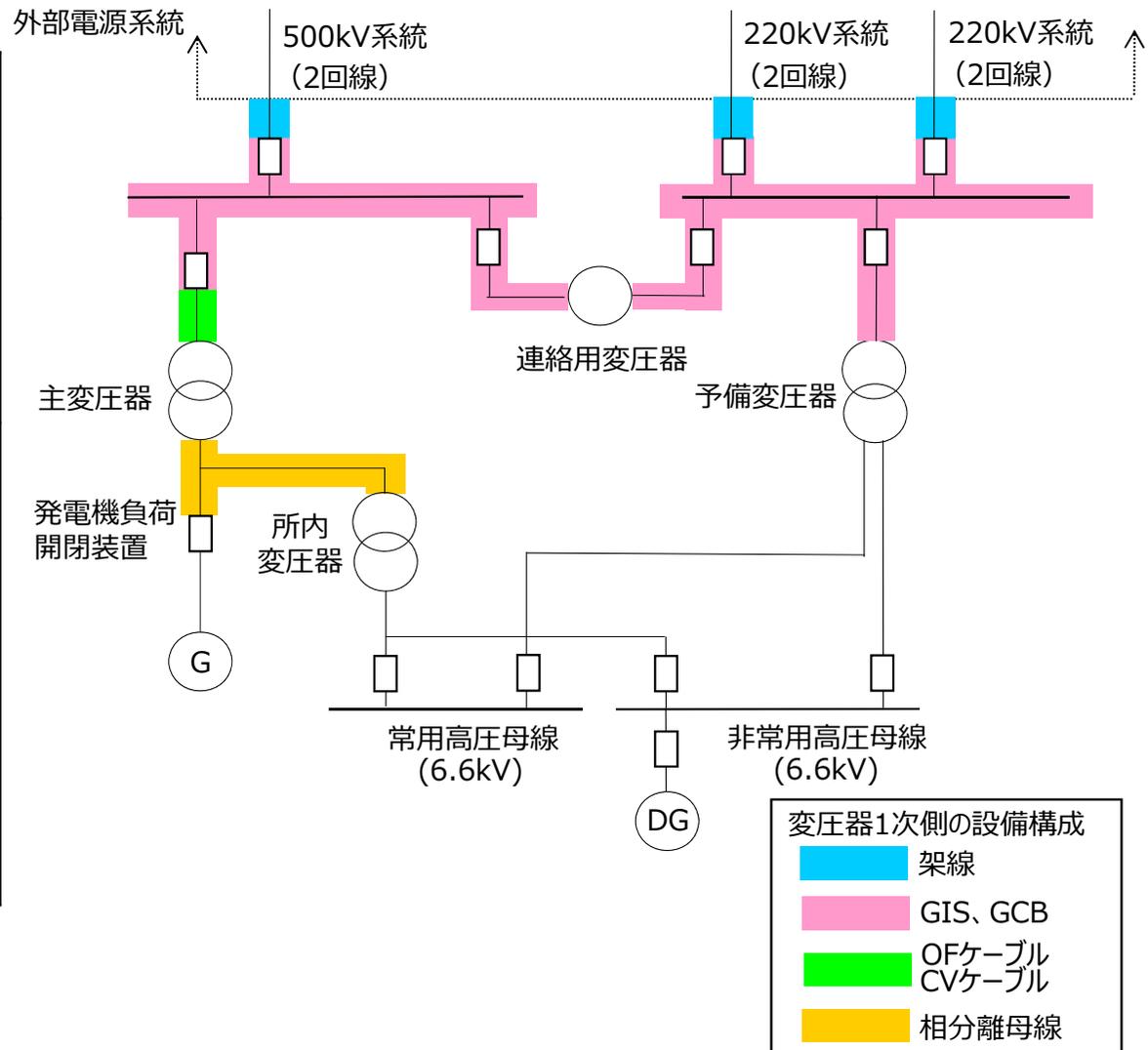
対象プラント	玄海3号、玄海4号	
特徴	主変圧器 + 予備変圧器 構成	
個別プラントにおける相違点	玄海3,4号機	※1) 予備変圧器に接続する220kV系統は2回線構成となっているが、常時2回線受電ではないため、検知器設置対象としている。



5. 外部電源受電ライン構成及び検知システム設置対象変圧器 (PWR5/6)

PWR電源構成例⑤

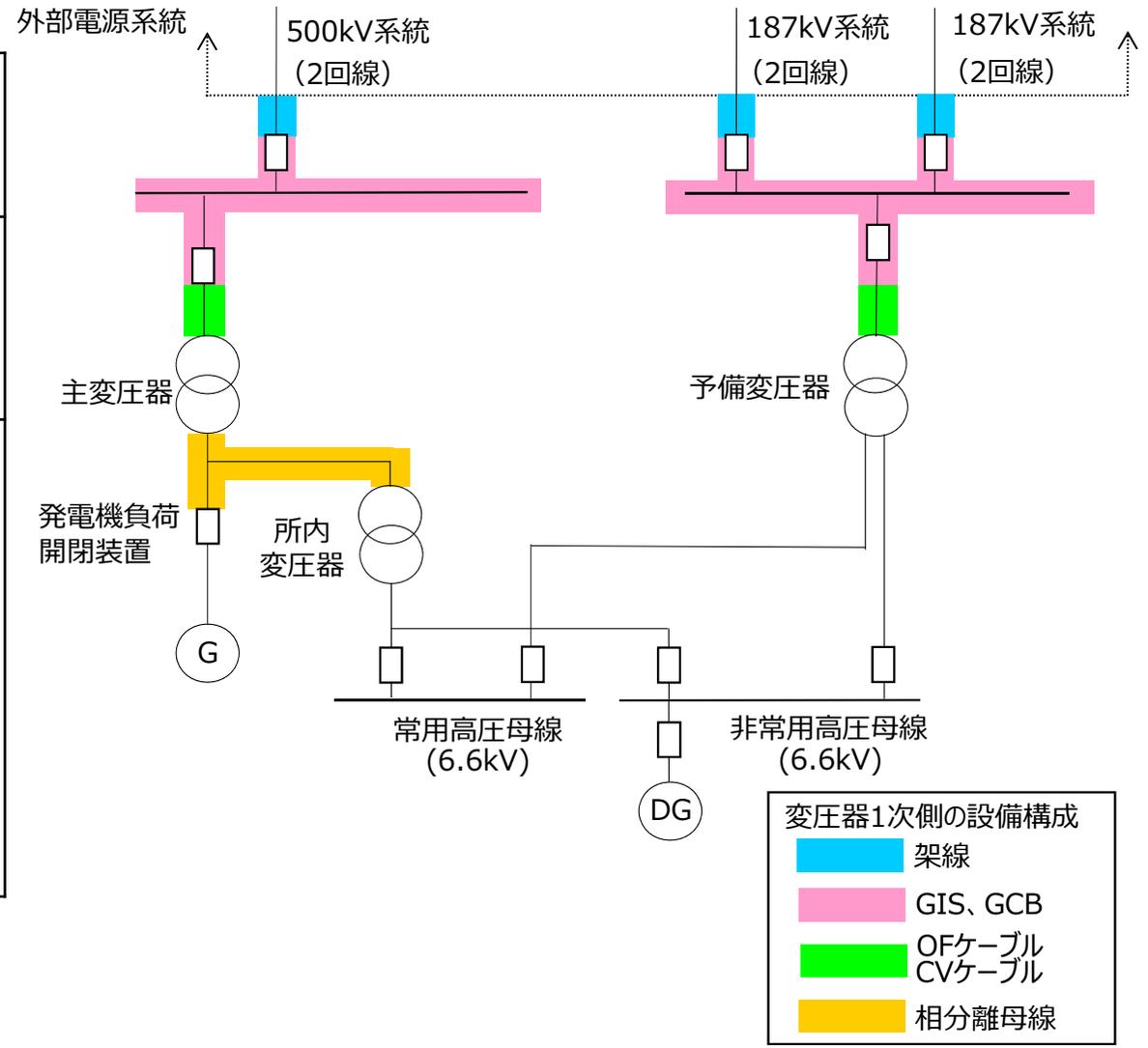
対象プラント	川内1号、川内2号	
特徴	主変圧器+予備変圧器 構成 (複数回線受電、連絡用変圧器あり)	
個別プラントにおける相違点	川内1,2号機	予備変圧器については、 常時複数回線から受電する構成であることから、検知器設置対象外 としている。



5. 外部電源受電ライン構成及び検知システム設置対象変圧器 (PWR6/6)

PWR電源構成例⑥

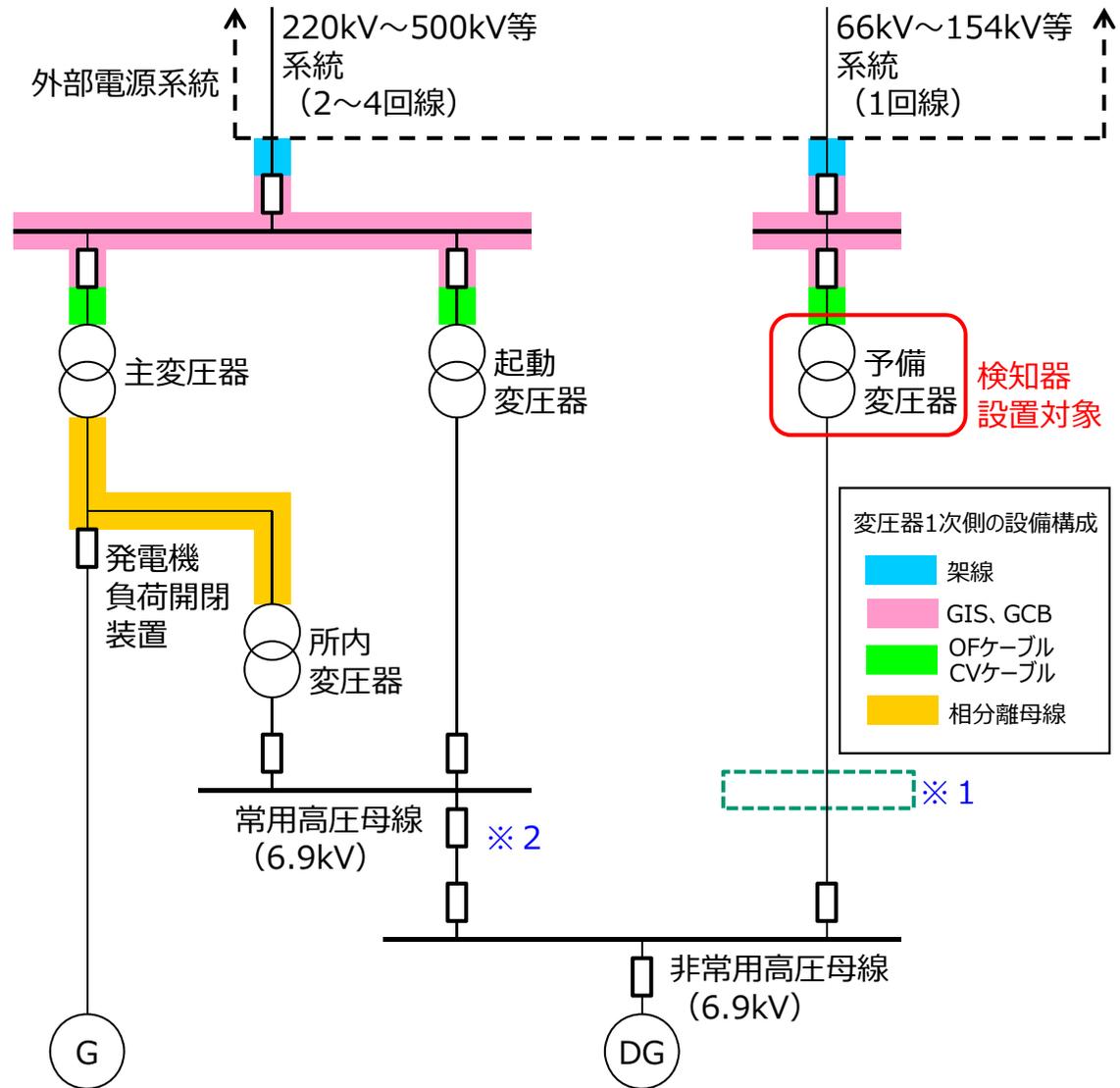
対象プラント	伊方3号	
特徴	主変圧器+予備変圧器 構成 (複数回線受電)	
個別プラントにおける相違点	伊方3号機	予備変圧器については、常時複数回線から受電する構成であることから、検知器設置対象外としている。



5. 外部電源受電ライン構成及び検知システム設置対象変圧器 (BWR1/4)

BWR電源構成例①

対象プラント	女川2 / 3号、志賀1号、島根2号、東海第二、大間 (発電機負荷開閉装置の有無の差は割愛している。また、廃止措置予定プラントは除く)	
特徴	主変圧器 + 起動変圧器 + 予備変圧器 構成 (主変圧器・起動変圧器を同一母線から受電。予備変圧器を別母線から受電。)	
個別プラントにおける相違点	志賀1号機	※1) 予備変圧器については、非常用高圧母線との間に専用の常用高圧母線があり、既存設備(低電圧リレー)で検知可能であることから、検知器設置対象外としている。
	女川3号機、大間	※2) 起動変圧器から直接、非常用高圧母線に給電。

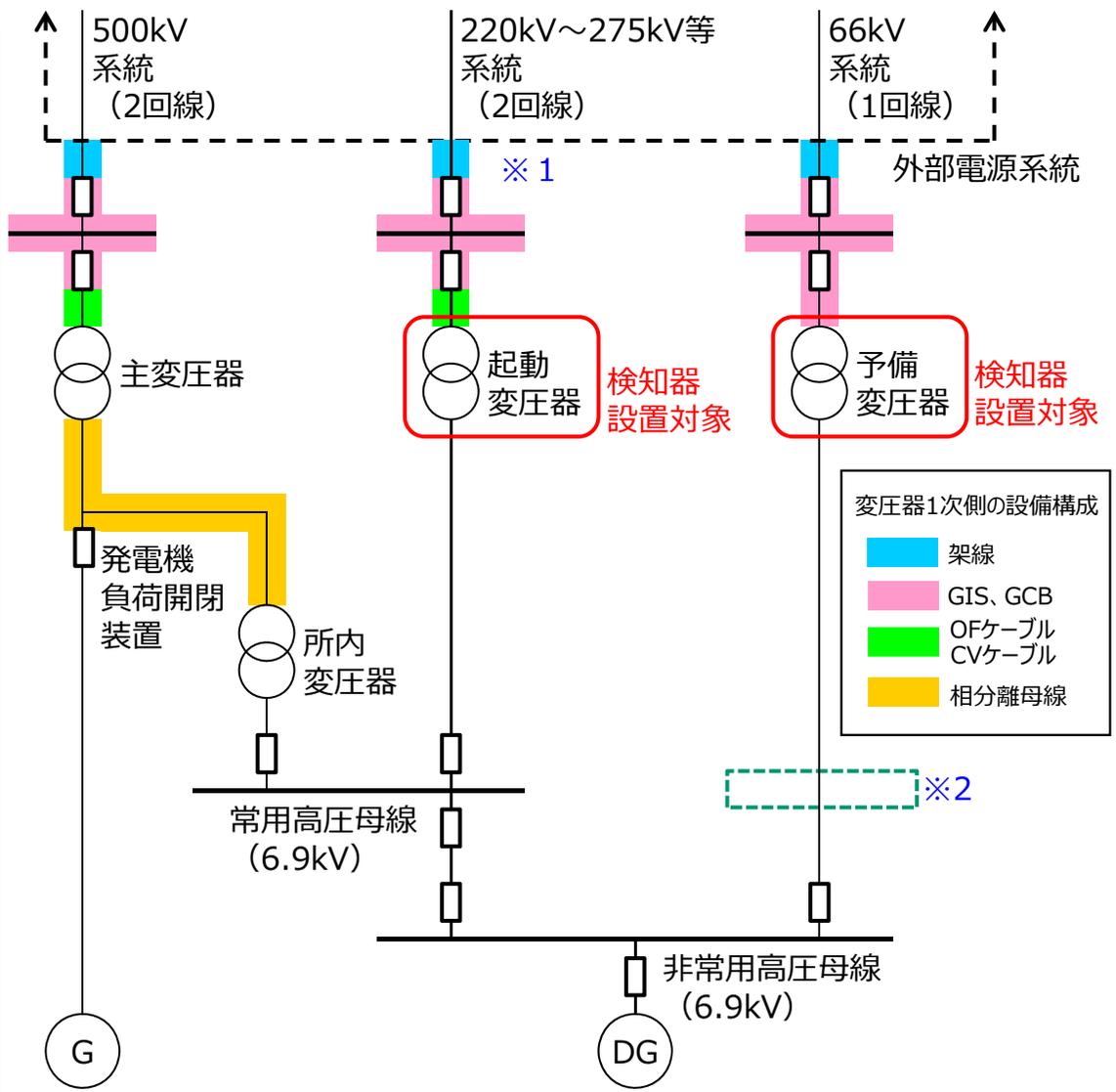


注) 電源構成図に記載の各変圧器の名称はプラントにより異なる場合がある。

5. 外部電源受電ライン構成及び検知システム設置対象変圧器 (BWR2/4)

BWR電源構成例②

対象プラント	志賀2号、島根3号	
特徴	主変圧器 + 起動変圧器 + 予備変圧器 構成 (主変圧器・起動変圧器・予備変圧器をそれぞれ別母線から受電。)	
個別プラントにおける相違点	志賀2号機 島根3号機	※1) 起動変圧器に接続する系統は2回線構成となっているが、常時2回線受電ではないため、検知器設置対象としている。
	志賀2号機	※2) 予備変圧器(志賀2号機は緊急電源変圧器)については、非常用高圧母線との間に専用の常用高圧母線があり、既存設備(低電圧リレー)で検知可能であることから、検知器設置対象外としている。

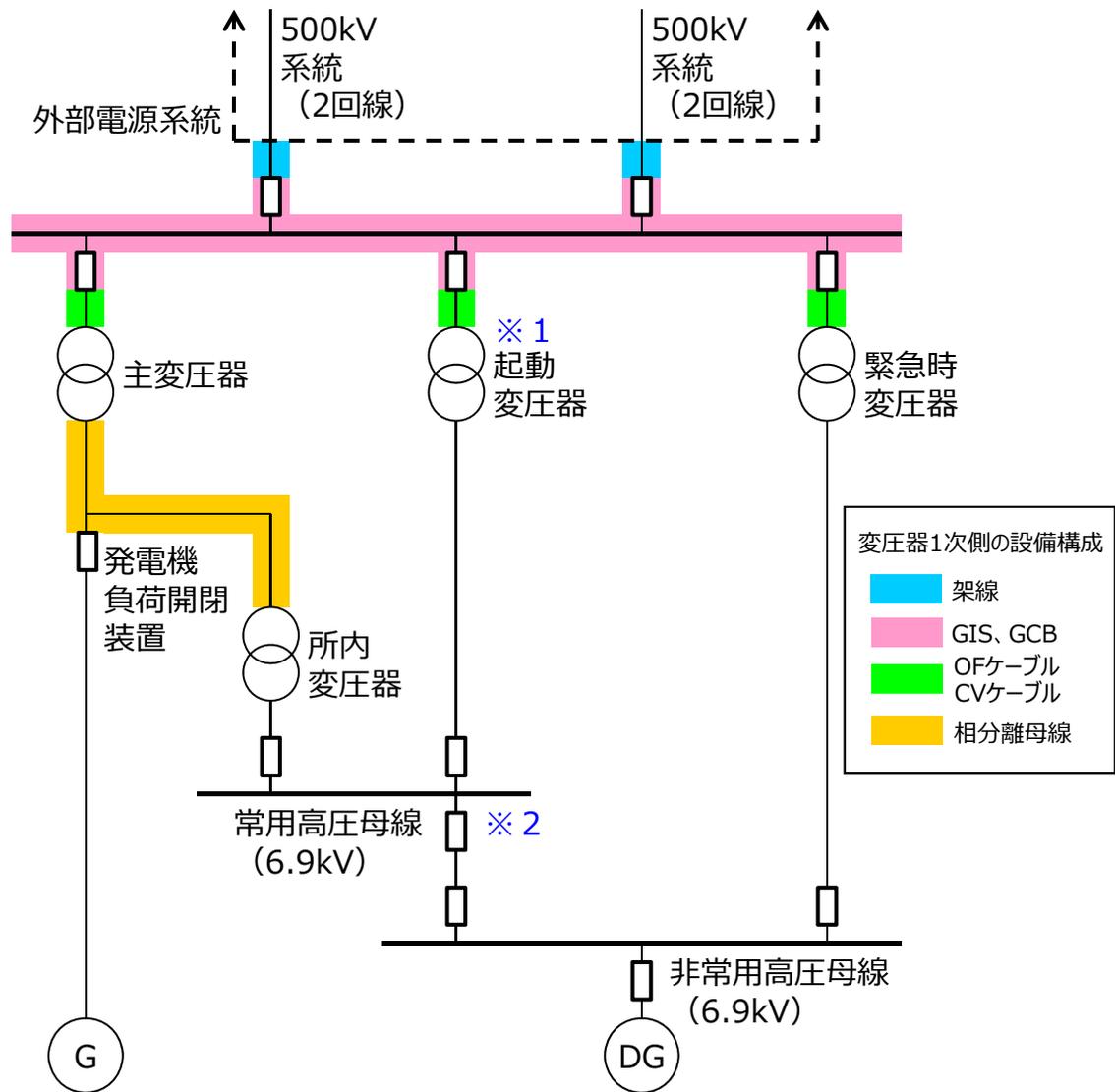


注) 電源構成図に記載の各変圧器の名称はプラントにより異なる場合がある。

5. 外部電源受電ライン構成及び検知システム設置対象変圧器 (BWR3/4)

BWR電源構成例③

対象プラント	浜岡3号、4号、5号 (発電機負荷開閉装置の有無の差は割愛している。また、廃止措置予定プラントは除く)	
特徴	主変圧器+起動変圧器 +緊急時変圧器 構成 (主変圧器・起動変圧器・緊急時変圧器を同一母線から受電。)	
個別プラントにおける相違点	浜岡3,4,5号機	主変圧器、起動変圧器、緊急時変圧器は、同一の母線に接続しており、 既存設備 (CT断線検出等) で検知可能であることから、 検知器設置対象外 としている。
	浜岡5号機	※1) 起動変圧器を補助変圧器に読み替え。 ※2) 補助変圧器から直接、非常用高圧母線に給電。

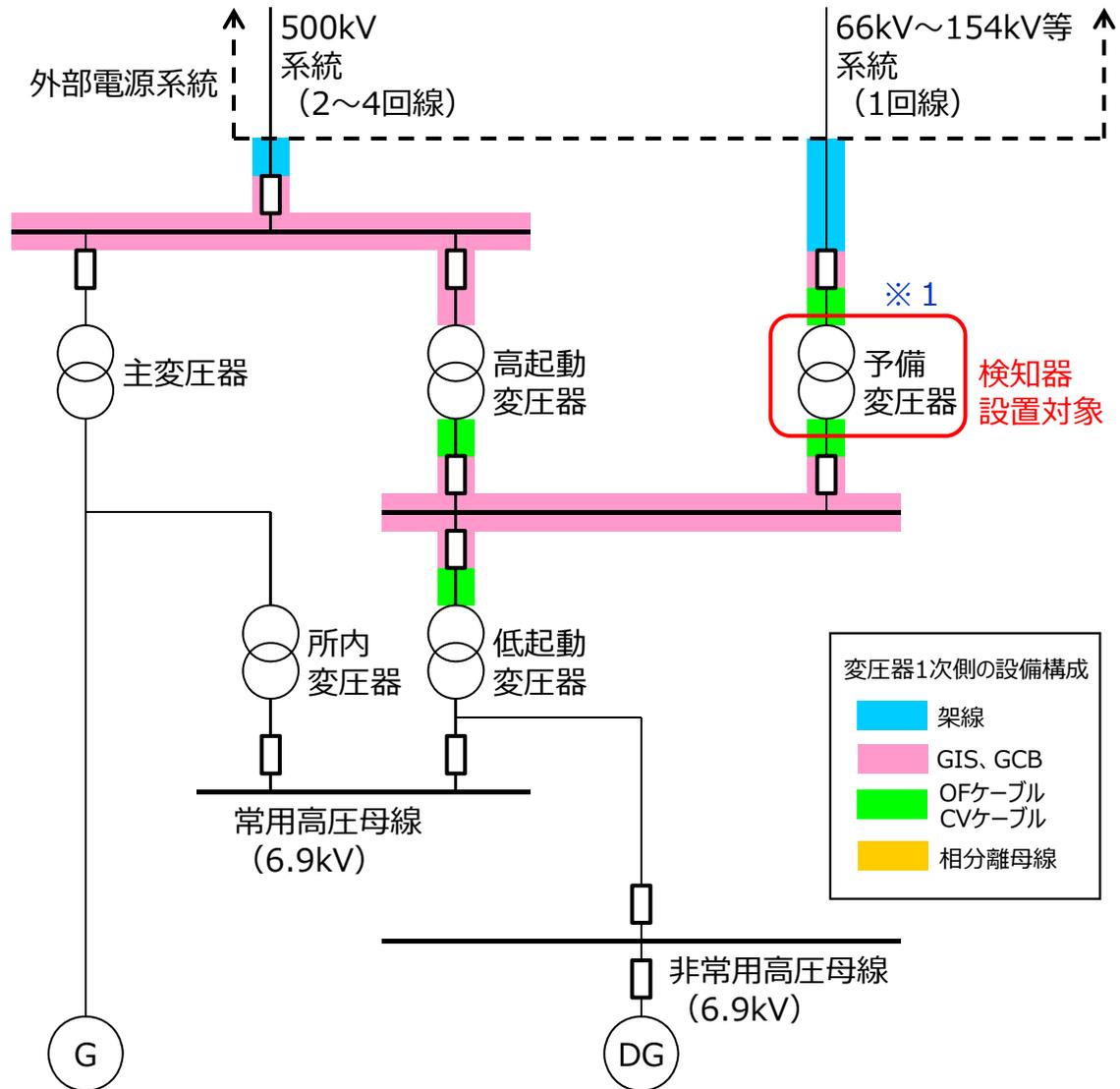


注) 電源構成図に記載の各変圧器の名称はプラントにより異なる場合がある。

5. 外部電源受電ライン構成及び検知システム設置対象変圧器 (BWR4/4)

BWR電源構成例④

対象プラント	東通1号、 柏崎刈羽1号、2号、3号、4号、5号、 6号、7号 (廃止措置予定プラントは除く)	
特徴	高起動変圧器+低起動変圧器 +予備変圧器 構成 (高圧起動変圧器と予備変圧器は別母線から受電。高起動変圧器⇒低起動変圧器を介して安全系を受電。)	
個別プラントにおける相違点	東通1号機	※1) 予備変圧器がなく、母線が66kV東北白糠線に直接接続されている。低起動変圧器は、既存設備(低電圧リレー等)で検知可能であることから、検知器設置対象外としている。



注) 電源構成図に記載の各変圧器の名称はプラントにより異なる場合がある。

6. OPC自動検知システムの運用方針（1 / 2）

（1）システムの運用方法

以下の点より、OPC自動検知システムは、警報発信用としての使用を考えている。
（警報発信運用による設置で十分な効果が得られると考えている。）

①警報発信（自動的な検知）による効果

現状、1相開放故障の機械的検知（低電圧リレーの動作、中性点過電流リレーの動作、CT断線検出回路等）ができない外部電源受電ラインは、運転員の巡視点検や受電ライン切替前後の点検等により1相開放故障を検知する運用のため、事象発生から把握までにタイムラグがあるが、OPC自動検知システムの設置により、即時の警報発信が可能となり、従来より、早く、確実な検知が行える。

（電源系の手動切替操作は、非常に容易な操作で中央から実施可能である）

⇒ 参考15・16

仮に誤検知によって警報が発信しても、運転員はOPC検知器における検知状態の継続有無、3相の電圧・電流計指示値のバランス状況、安全系補機の運転状態や現場架線設備の健全性を確認した上で、最終的に遮断器の開放操作を行うことから誤検知による悪影響はない。また、OPC警報発信中にSI信号が発信した場合は、誤検知が否かに関わらず即座に遮断器を開放する運用とする。

②検知後の自動インターロック化による懸念

1相開放故障発生と至急注水を行うべき事象（大LOCA等）が重畳して発生した場合、短時間で炉心注入を実施する観点では、OPC自動検知システムの信号を遮断器切替のインターロックに組み込むことは有効である。

しかし、OPC自動検知システムの動作しきい値は、事象の早期把握の観点で保守的な（動作しやすい）設定とする必要があることから、自動化インターロックを組み込んだ場合、システムの誤動作で健全な電源が自動的に系統から切り離され、非常用電源系の冗長性が不要に失われる可能性があることも併せて考慮する必要がある。

6. OPC自動検知システムの運用方針（2 / 2）

（2）誤検知への対応

誤検知とは、実際の設備でOPCが発生していない状況において、OPC検知器の誤動作でOPC検知信号が出力される状態をいう。米国では誤検知による遮断器自動開放（不要動作）が問題となっているため、国内においてもその対応を検討したものである。

- 米国では、①変圧器中性点注入方式（PSSTec）、②巻線CT+デジタルリレー（PCS2000）、③巻線CT+デジタルリレー（SEL）、④磁界による光の偏向を利用した方式（光CT方式）、⑤Class1Eの既設低電圧リレー（既設UVリレー）が採用されているが、現状、①PSSTec、②PCS2000、③SELにて、誤検知があったとの情報を入手している。なお、米国においては誤検知を考慮し、多くのプラントが、モニタリング期間中である。
- NEI加盟プラントのうちの4割が採用している①PSSTecは、EPRIが開発した変圧器の高圧側中性点に探查電流（周波数、電流値可変）を注入し、欠相発生による零相電流の変化を監視するものであるが、誤検知の発生が確認されている。これについては、実機に応じた探查電流の設定と欠相判断のしきい値設定に苦慮しているものと考えられる。（なお、当該検知器は高圧側中性点がない変圧器には適用できない検出方式である。）
- また、②PCS2000を採用する一部のプラントにおいては、試運用期間中（モニタリング期間中）でも、運転員の弊害になるほど誤検知があり、検知発信をバイパスする電力も確認されている。これについては、採用されているデジタルリレーは実績があるものだが、巻線CTから入力される微弱な電流変化から、欠相を判断するしきい値設定に苦慮しているものと考えられる。
- 国内では、変圧器の型式に左右されない汎用性と高い検知信頼性の確保を目標に、米国の状況も踏まえて誤検知に配慮した検知器開発、具体的には、2メーカーがノイズ影響を受けにくく、電流検出精度が高い光CT方式（米国の④光CT方式に類似）を、1メーカーが巻線CTからの信号入力部高精度化などOPC検知用に改良したデジタルリレーを採用した検知器開発を実施している。なお、OPC検知の有効性については電中研の実証試験にて確認している。 ⇒ 参考3
- ただし、実機適用にあたっては十分な現地検証が必要と認識しており、まずは代表プラント（高浜の予備変圧器）に設置し、国内メーカーが検知器開発にあたり、事業者と協議しながら開発の前提としてきた実機環境（落雷、大型ポンプの起動・停止、変圧器の受電・停止等）に大きな相違がないこと、ならびに現地での誤検知有無等を確認するために検証期間を約1年設けることとしている。 ⇒ 17 18 参考8～13

7. 各社の設置計画 (1 / 2)

PWR電力工程概要

電力	2019年度 (平成31年度)			2020年度			2021年度			2022年度			2023年度			2024年度																			
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
北海道電力													泊共用 後備変圧器 ※ ※ 後備変圧器の設置時にOPC設備対策を実施する。 泊1/2号機共用 予備変圧器																						
関西電力	高浜P/S 共用号機 予備変圧器			美浜P/S 共用号機 予備変圧器			美浜P/S 3号機 No2起動変圧器			大飯P/S 共用号機 予備変圧器 (No1)																									
四国電力	(伊方は既存設備で対応可能であり、追加対策なし)																																		
九州電力													玄海3/4号機共用 予備変圧器 (川内は外部電源設備の改造により対応可能であり、追加対策なし)																						
日本原電													敦賀P/S 2号機 予備変圧器 敦賀P/S 2号機 後備変圧器																						

〔 凡例 :契約上の工程 :現地工事着手 :設置完了(試運用の開始) 〕



7. 各社の設置計画 (2 / 2)

BWR電力工程概要

電力	2019年度 (平成31年度)			2020年度			2021年度			2022年度			2023年度			2024年度																			
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
東北電力							女川P/S 共用号機 予備変圧器			▲			★																						
	(東通は既存設備により対応可能であり、追加対策なし)																																		
東京電力 ホールディングス							柏崎刈羽P/S 共用号機 予備変圧器			▲			★																						
中部電力	(浜岡は既存設備により対応可能であり、追加対策なし)																																		
北陸電力													志賀P/S 2号予備電源変圧器			▲			★																
中国電力							島根P/S 共用号機 予備変圧器			▲			★						島根P/S 3号機 補助変圧器 ※			※ 2025年度着工予定													
													島根P/S 共用号機 第2予備変圧器			▲			★																
日本原電							東海第二P/S 予備変圧器			▲			★																						
電源開発							(建設中に実施) 大間P/S 予備変圧器																												

[凡例  : 契約上の工程  : 現地工事着手  : 設置完了(試運用の開始)]

8. 米国におけるOPC対応状況（1 / 2）

- Byron2号機の事象後、NEIはOPC対応内容を計画し、NEI-initiativeとして宣言した。NRCは事業者のOPC対応状況が、当該宣言内容に合致しているかについて、2018年に代表4プラントで短期検査を実施済。（Temporary Instruction）

評価項目	River Bend (BWR : Entergy社)	Palo Verde (PWR : APS社)	St. Lucie (PWR : FPL社)	Byron (PWR : Exelon社)
対象変圧器／母線	安全系に給電する変圧器。	安全系に給電する変圧器で以下の変圧器が対象。 ・既存の検知器で検知できないもの ・架線設備を含むもの	安全系に給電する変圧器で以下の変圧器が対象。 ・既存の検知器で検知できないもの ・架線設備を含むもの	安全系に給電する変圧器で以下の変圧器が対象。 ・既存の検知器で検知できないもの ・架線設備を含むもの
OPC検出場所	受電変圧器高圧側	受電変圧器高圧側	受電変圧器高圧側	受電変圧器高圧側
OPC検出方式	PCS2000 (デジタルリレー)	PSSTec (デジタルリレー)	光CT方式 (デジタルリレー)	SEL (デジタルリレー)

- NRCは事業者の対応が概ね妥当と評価している。また、[NEIはNEI-initiativeに基づく産業界の自主対応で解決していくことをNRCに提案しており、NRCはこの提案を基本的に容認している。](#)

8. 米国におけるOPC対応状況（2 / 2）

（前頁の続き）

- ・NRCとNEIは、OPC関連で、2019年に複数回の公開会議を実施しており、[OPC検知器（OPIS）による遮断器自動トリップ機能を必須とするか否かについて議論](#)を行っている。
- ・NEIは、OPISで誤動作が発生していることを踏まえて、[自動トリップ機能の要否についてはプラント毎に「定性的」「定量的」にリスクを評価し、設計内容を決定すべきと提案した](#)。
- ・NEIは、NEI-initiativeにおいてOPISの仕様は、検知 + 自動トリップ機能を標準仕様としていたが、[自動トリップ機能については、プラント状況次第では、リスクを増大させる可能性もある](#)ため、リスク評価に基づき自動トリップ機能なし（警報機能のみでトリップは手動で担保）を可能とするガイドラインを整備し、NRCに承認を求めている。
- ・NRCは、8プラントに対して、OPIS自動トリップ機能のリスク低減効果を評価した報告書を2020年1月付で公表しており、[OPIS自動トリップ機能による安全性の向上は高くないと結論付けている](#)。

米国における誤検知情報と国内事例 ⇨ [参考17~19](#)

9. まとめ

○OPC自動検知システム設置の目的

- ・1相開放故障を既設リレー等で検知することが困難な変圧器を対象に、OPC自動検知システムを設置する。OPC自動検知システムは、人的運用の信頼性を向上するものとして導入することとし、事業者として現在の技術基準解釈の中で自主的・計画的に取り組んでいく。

⇒ 参考20・21

○設置対象変圧器

- ・非常用高圧母線に給電可能な変圧器のうち以下を除く変圧器を対象とする。

【対策不要な対象】

- 変圧器1次側の接続に架線設備を含まない変圧器
(例：変圧器1次側の接続がIPB、OFケーブル、金属遮蔽層付きのCVケーブル等で構成されており、一相開放故障発生時に地絡警報等により、検知可能。)
- 通常運転状態において常時複数回線から受電している変圧器

○システムの運用方法

- ・OPC自動検知システムは運転員に対する警報発信用として使用する。

(1相開放故障検知後は運転員による容易な中央操作で電源系の切替が可能。システムは、1相開放故障に対する運転員の初動信頼性を高める用途に使用する。)

○OPC自動検知システムの設置計画 (代表プラントの試験導入～各プラントの本格運用)

- ・2020年度内に代表プラント(高浜の予備変圧器)に試験導入・実機環境での誤検知の有無等の検証を開始し、その後、試運用の状況を踏まえて各社が計画的に設置していく。

以下、参考資料

発電所構内における開閉所設備構成の米国設備との違い

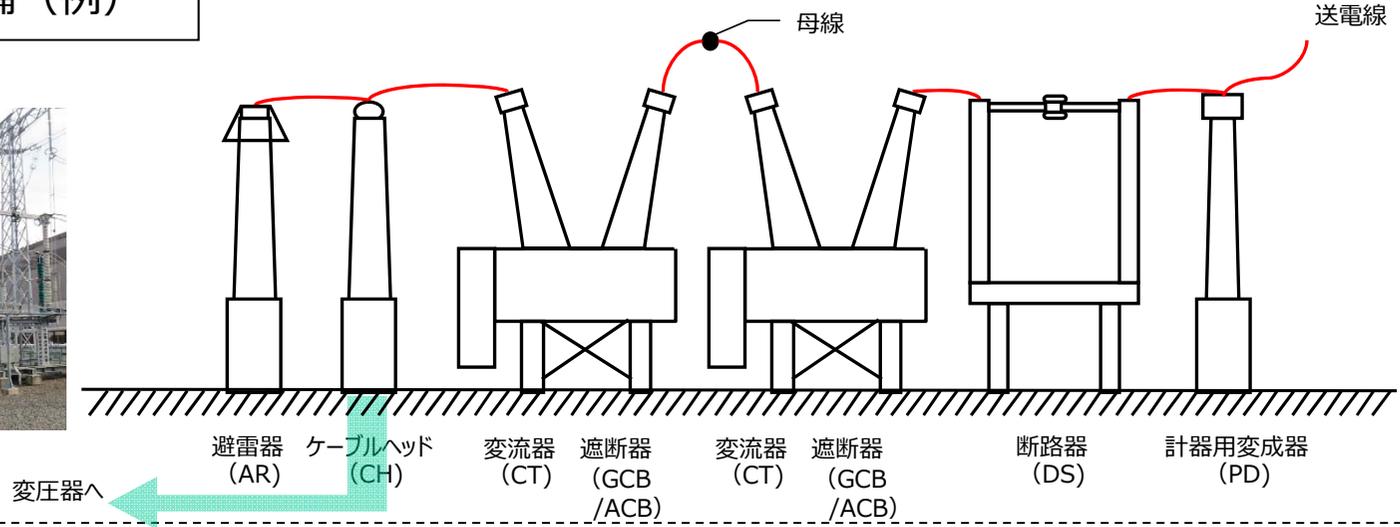
参考 1

(2019年 4月15日面談時資料から抜粋再掲)

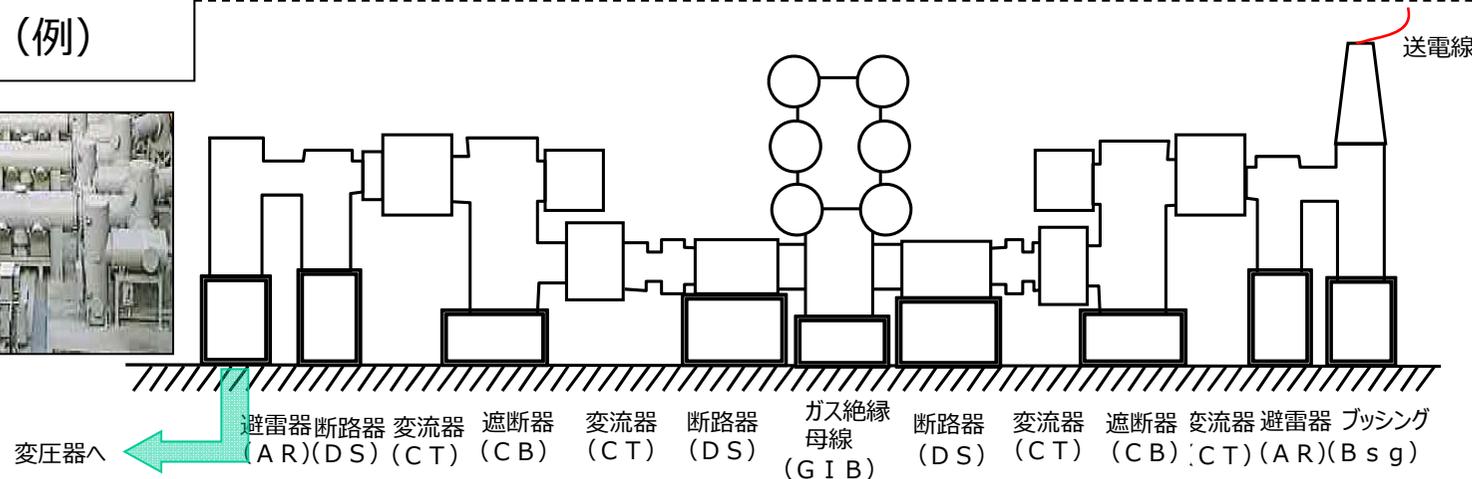
発電所構内に架線設備を多く有する米国設備に比べ、国内における発電所構内の開閉所設備の多くは、引込線以降はGIS設備になっており設備構造的に1相開放故障が発生する可能性は非常に小さい。

凡例：
 架線電路部 
 埋設電路部 

気中（架線）設備（例）



GIS設備（例）

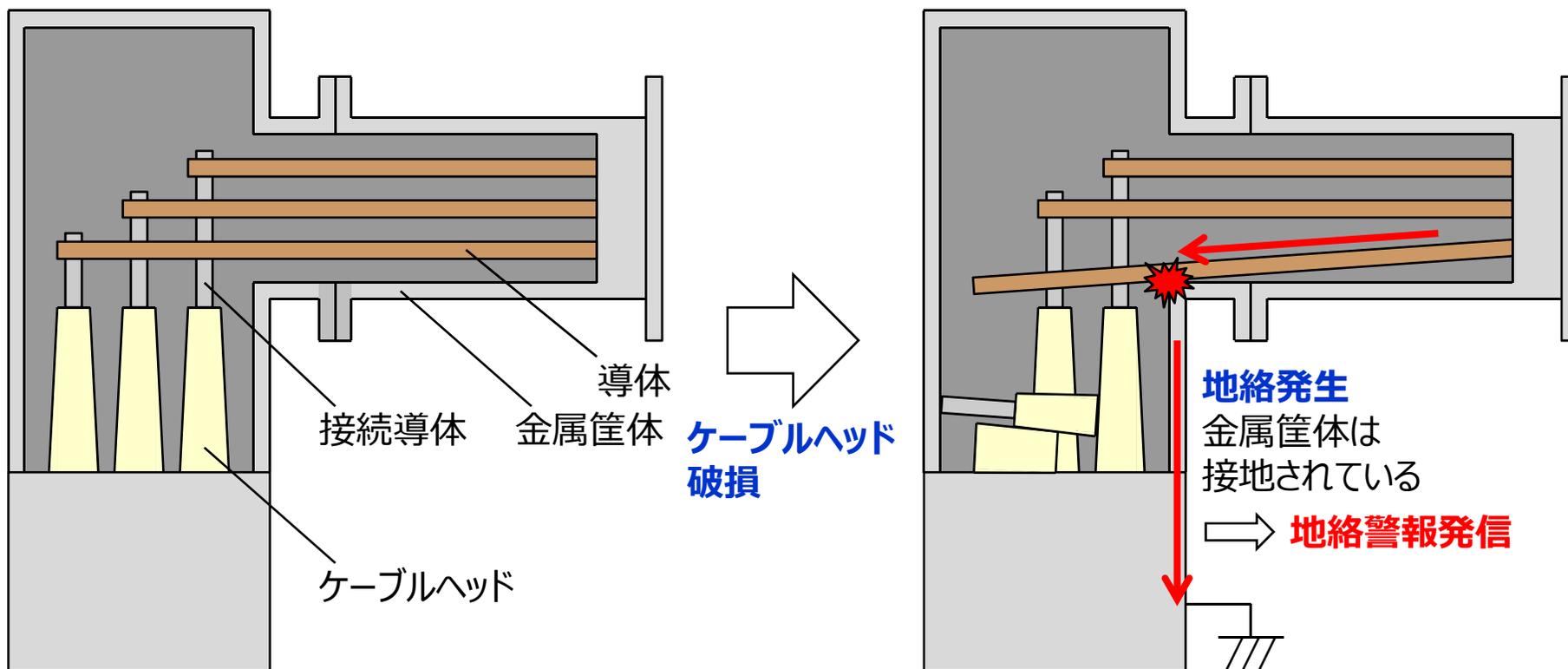


GISの構造上、内部の導体が切断するようなモードは想定しにくい、内部で1相開放故障が発生することは考えにくい。

仮にケーブルヘッド部の破損等により接続部が脱落するようなモードを仮定した場合、導体は周囲の接地された金属筐体に接触し、地絡を伴う故障となることから、異常の検知が可能である。

なお、GCB内部も同様の構造であるため、異常の検知が可能である。

GIS内部にてケーブルヘッド破損を想定した場合の故障検知例



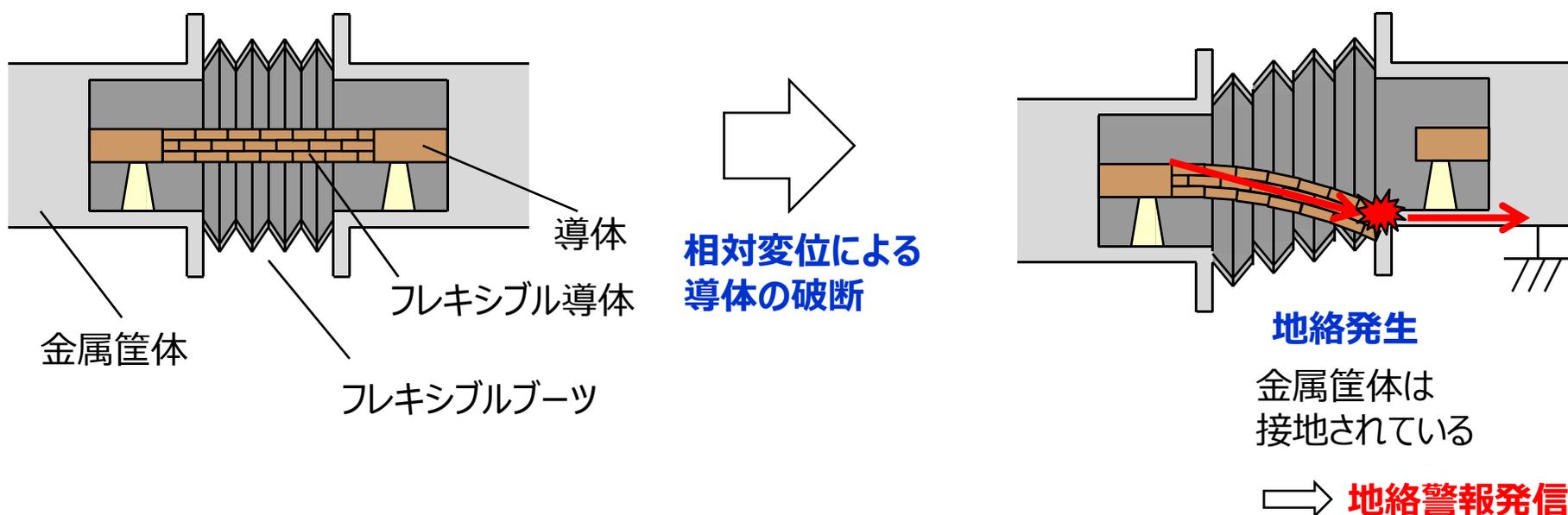
設備構成と故障検知の例（2 / 3） 相分離母線

参考 2-2

相分離母線の構造上、内部の導体が切断するようなモードは想定しにくいいため、内部で1相開放故障が発生することは考えにくい。

仮に建屋取合部等にあるフレキシブル導体部やその接続部が、相対変位等による外力の影響で破断するようなモードを仮定した場合、導体は周囲の接地された金属筐体に接触することで、地絡を伴う故障となることから、異常の検知が可能である。

相分離母線に相対変位によるフレキシブル導体部の破断を想定した場合の故障検知例



設備構成と故障検知の例 (3 / 3) ケーブル

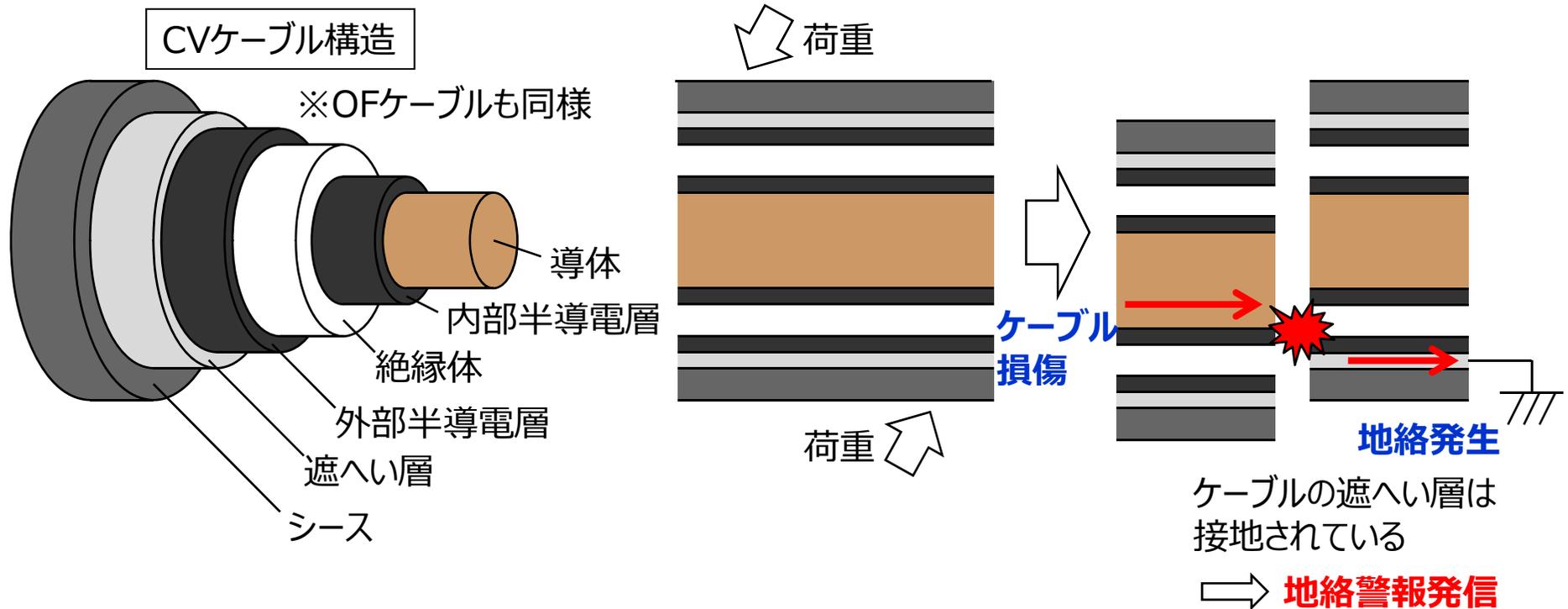
参考 2-3

高圧ケーブルの構造上、完全断線するようなモードは想定しにくいいため、ケーブルで1相開放故障が発生することは考えにくい。

仮にケーブルに想定を超える大きな荷重が加わり、断線に至るようなモードを仮定した場合、導体だけでなく周囲の各層（絶縁体、遮へい層等）にも損傷が生じ、その際に接地された遮へい層と導体が接触する、または、アークが発生することにより導通し、地絡を伴う故障となることから、異常の検知が可能である。

なお、OFケーブルについては油圧異常等によっても検知が可能である。

ケーブルに荷重が加わり損傷した場合の故障検知例



OPC自動検知システムの検証試験結果

(2019年4月15日面談時資料から抜粋再掲)

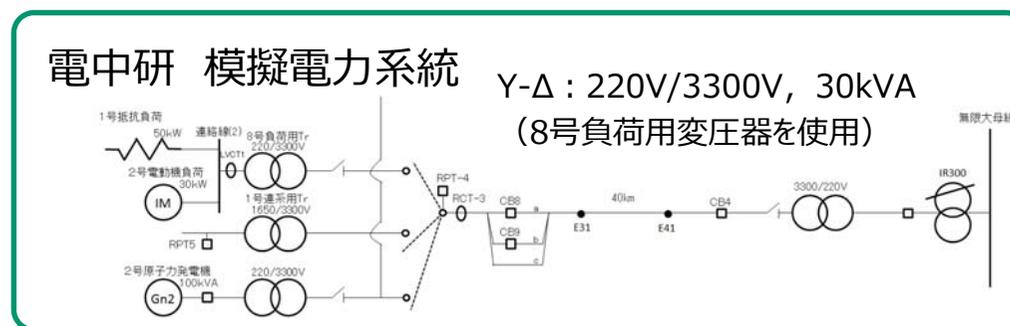
○以下、2017年度に実施した検証試験概要

- 3メーカー（日立GE、東芝ESS、三菱電機）とも電中研の模擬電力系統にて実際に欠相を模擬、検知器による検証可否を確認した結果、ロジックどおりの検知が可能との検証結果を得た。
- 2017年度の第1Q（4月～6月）にて、既存改造/新規検知器による、1相開放故障事象の検出性についてP/B全電力共同委託にて、検証試験を実施完了。
- 現地適用時には、模擬電力系統で確認した検知ロジックどおりに、各実プラント構成にてにおいても動作可能である事の確認や、検知器の動作しきい値、プラント毎の時限設定等のために、個別の電気解析等にて確認する事が必要となる。

検証結果	
三菱電機製品	検知率 100% (128/128)
日立GE製品	検知率 100% (128/128)
東芝ESS製品	検知率 100% (128/128)

(試験概要)

- 1相、2相欠相において、事故点・接地方式・負荷状況等を変化し128ケースを実施
- 試験は実系統（模擬）において、検知器がメーカーの社内における試験内容と同様の挙動を示すかを、代表例で確認する位置づけで実施。



各メーカー製品のOPC検出アルゴリズム

	三菱電機製	日立GE製	東芝ESS製
検出箇所			
電流検出用設備	微小な電流の検出が可能な光CT※ ¹ を新規に設置	微小な電流の検出が可能な光CT※ ¹ を新規に設置	既設の変流器の精度※ ² を評価し、適用可能な場合、既設の変流器を使用
検出アルゴリズム	電流がしきい値以下の場合 1 相開放故障と判定 $\min(I_a , I_b , I_c) < \text{しきい値 (相電流)}$	3 相の電流の偏差以上の場合 1 相開放故障と判定 $\max(I_a , I_b , I_c) - \min(I_a , I_b , I_c) > \text{しきい値 (電流偏差)}$	電流がしきい値以下の場合 1 相開放故障と判定 $\min(I_a , I_b , I_c) < \text{しきい値 (相電流)}$

※ 1 .光CT : 既設の変流器は巻線型であり、一次側に流れる大電流を二次側接続機器に応じた小電流に変成する方式である。従って、一次通電電流が微小なケースでは二次電流が更に小さくなるが、光CTは、ファラデー効果による光の偏波を電気量に変換する方式のため、一次通電電流を一律に変成するのではなく、二次側接続機器に必要な電流情報に変換して伝達することができる。

※ 2 .精度 : 電流が流れているか流れていないかを判定できることであり、具体的には、励磁電流（変圧器定格電流の約0.1%の電流値）の有無を判別可能なことを要求精度としている。

(2019年5月29日面談資料より抜粋再掲)

(1) 三菱電機製品概要

【欠相検知システム概要】

<検知方法>

本システムは、変圧器高圧側電流及び対称成分の大きさから欠相を検知。

<機器構成>

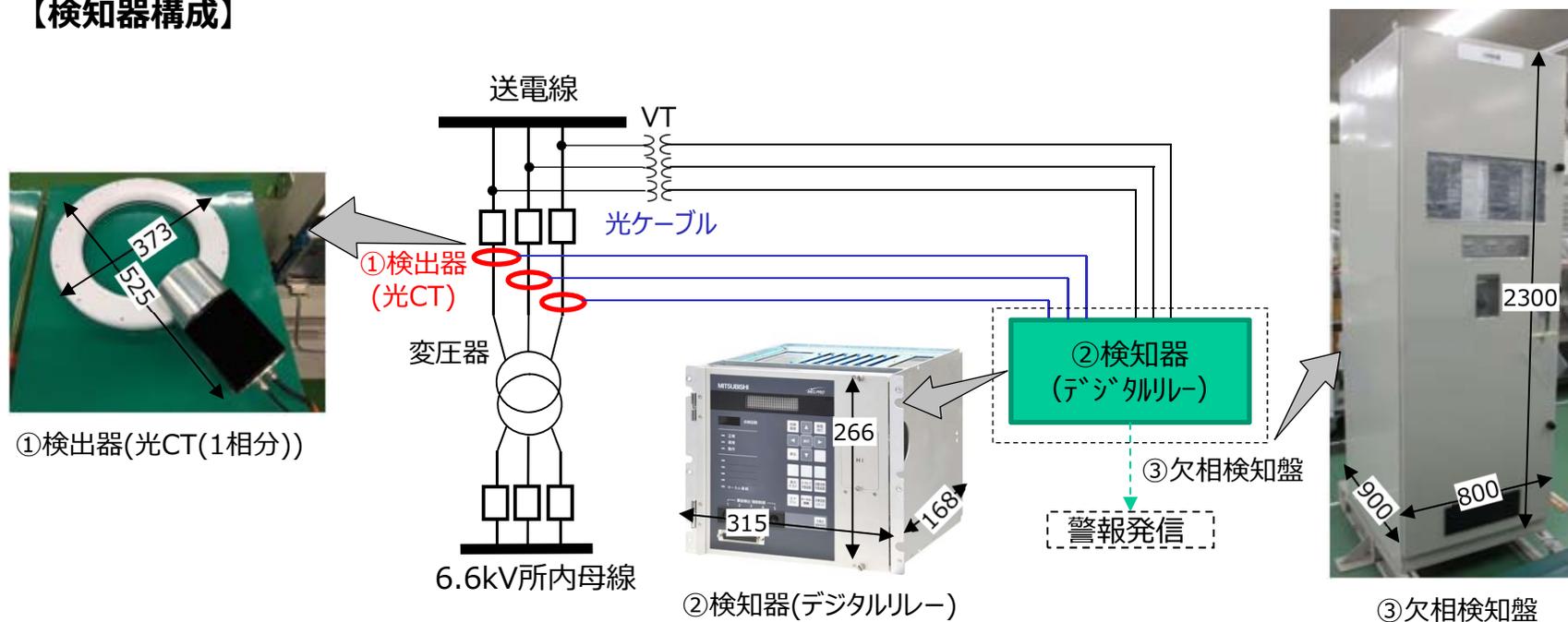
検出器：変圧器励磁電流(約0.1A)を測定可能な光CTを採用。

検知器：光信号を入力可能なデジタルリレーを採用

<発信信号>

検出器からの信号を検知器に入力し、検知器から欠相検知・警報信号等を発信。

【検知器構成】



(2019年5月29日面談資料より抜粋)

(2) 日立GE製品概要

【欠相検知システム概要】

<検知方法>

本システムは、変圧器高圧側電流、所内側電圧の3相偏差およびその挙動変化から欠相を検知する。

<機器構成>

検出器：変圧器励磁電流(約50mA以上)を計測可能。

主機の改造無く取付可能なケーブル型光電流センサを使用。

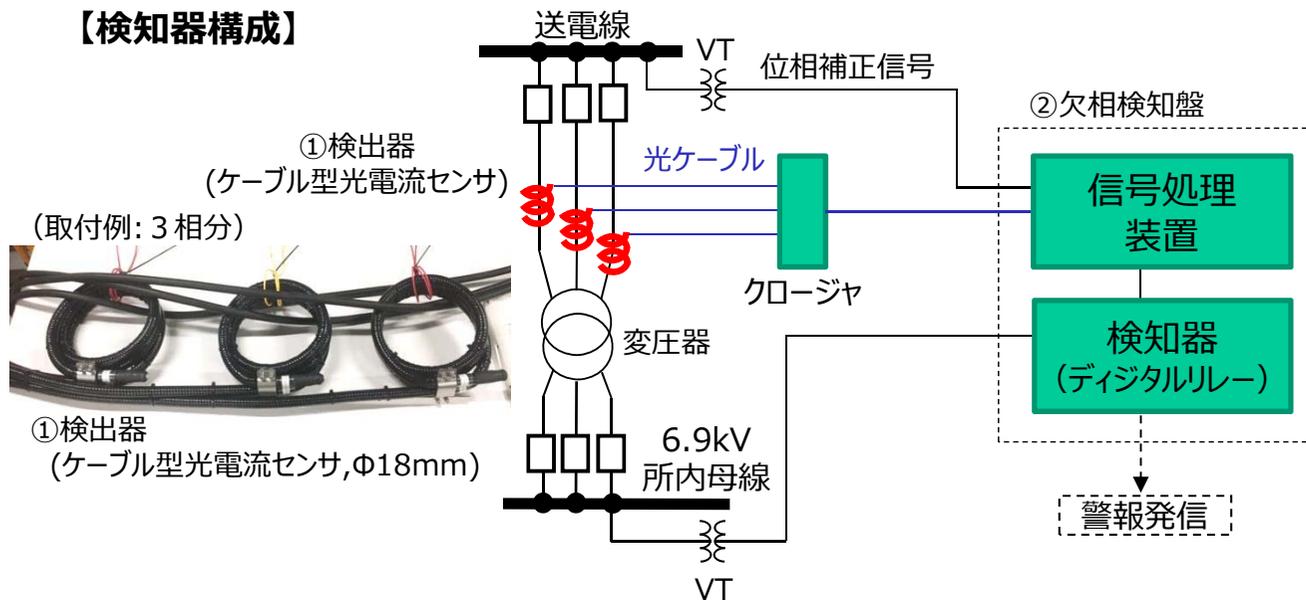
同径にてセンサ部多重化対応可能。

検知器：事象判定ロジックを装荷したデジタルリレーを使用。

<発信信号>

検出器からの信号を欠相検知盤に入力し、欠相検知盤から欠相検知・警報信号等を発信。

【検知器構成】



②欠相検知ラック (試作品)
(W700×H2200×D1000)

(2019年5月29日面談資料より抜粋)

(3) 東芝ESS製品概要

(1) 検知方法

3相の電圧、電流を監視し、欠相した相で生じる電圧または電流変動により欠相を検知する。

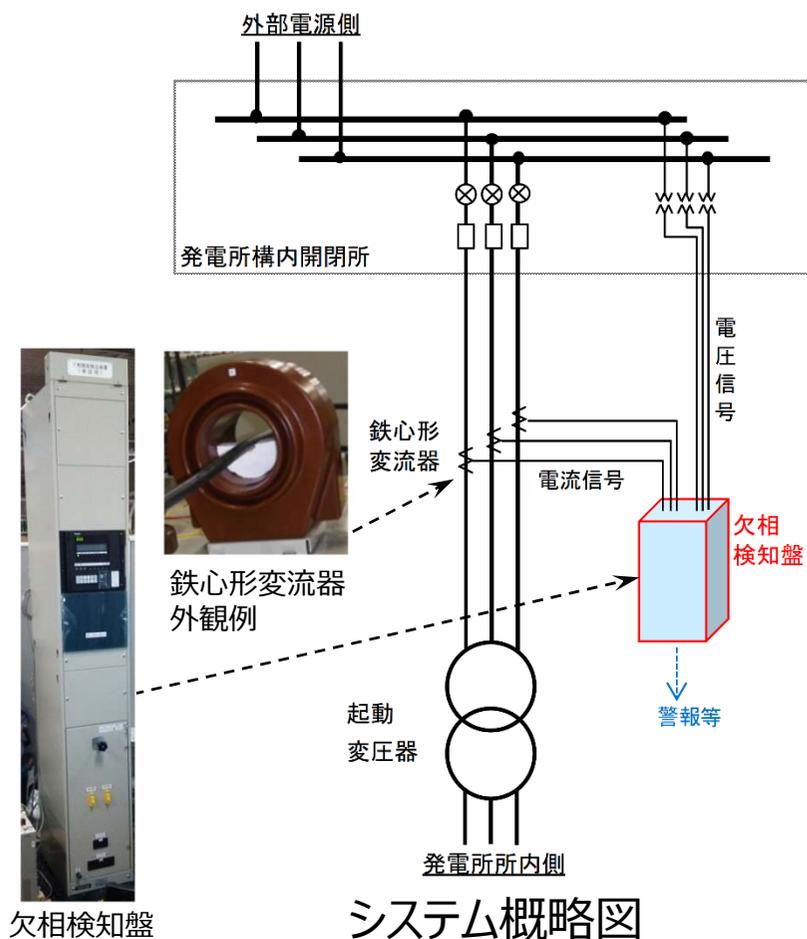
(2) 検知システム構成

- 変流器

検知対象変圧器が無負荷時などの微小電流においても、鉄心形変流器を用いて欠相検知が可能。そのため、既設変流器の特性や設置位置等の条件によっては、既設変流器を使用できる可能性がある。

- 欠相検知盤

開閉所の系統保護盤等で使用実績があるデジタルリレーを搭載。欠相検知時には、盤面や中操への警報信号を出力する。



欠相検知盤

（2019年11月14日面談時資料から抜粋再掲）

三菱電機製品概要

（1）目的

OPC検知システムは開発検証が完了し、今後はプラント個別に所内回路を模擬したシミュレーションで整定値の検討を実施することで計画している。

- 但し、米国での誤検知等の状況を踏まえ、実プラントでのフィールド試験を行い、そこで新たな知見が得られる場合は、OPC検知システムへフィードバックさせることが、より確実なOPS検知システムを構築するうえで望ましいことから、現地検証を行う。

（2）検証内容概要

- ①対象回路 : 発電所 変圧器
- ②導入機器 : OPCリレー盤(保護リレー、光変換器)、光CT、記録用デバイス
- ③システム : 既設警報回路への組込みは行わず、スタンドアローンのシステムとする
(但し、直流電源の引込み、GIS信号取込み等の改造は発生)
- ④検証内容 : 通常プラント操作、欠相以外の事故、外的要因(振動、外部ノイズ)によりリレーが不要動作しないこと(整定値の妥当性)を確認する(次頁参照)
 - リレー動作した場合は、保護リレーが記録した動作時の波形データ、プラント運転状態から要因を特定
- ⑤実施期間 : 以下2ケースのいずれかで対応
 - ・最長 プラント起動～停止の運転1サイクル
 - ・最短 OPCシステム導入後の現地試験にて完結
 - 不要動作有無を確認する上では、運転1サイクルの中で試運転することが望ましい。
(なお、製品性能の確認は現地試験で完結するため、1サイクルの期間は必須でない)

国内のOPC自動検知システムの試験導入時の現地検証計画（2/6）

参考9

（2019年11月14日面談時資料から抜粋再掲）

三菱電機製品概要

（3）確認項目

No.	項目	内容	確認時期		備考
			運転中	現地試験	
1	補機起動・停止動作時におけるOPCリレー動作有無確認	通常、待機状態にある予変に対して、現在停止中の高浜1/2号機のいずれかの母線を利用し、補機の起動・停止操作を実施し、OPCリレー不要動作有無を確認	○	○	
2	動変励磁突入電流流入時のOPCリレー不要動作有無確認	現在停止中の高浜1/2号機のいずれかの母線を利用し、無電圧の動変に電圧印加し、励磁突入電流を発生させ、OPCリレー不要動作有無を確認	○	○	実施方法・時期はユーザー側（電力）との調整結果による
3	落雷時の再開路によるOPC動作有無確認	落雷による再開路を模擬した瞬時遮断器開閉操作を実施し、OPCリレー動作有無を確認	—	○	
4	その他電気事故の影響によるOPCリレー動作有無確認	予変受電時における短絡、地絡等電気事故の影響でOPCリレーが不要動作しないかを確認	※	—	※：電気事故は偶発的な自然現象のため意図的な模擬・確認は不可

（4）補足

フィールド試験では、保護リレー動作時の要因特定のためプラント運転状態のデータを用いる必要がある。
➤ 補機運転状態や電源構成等の各種必要なパラメータについては、ユーザー側（電力）より情報提示する。

（2019年11月14日面談時資料から抜粋再掲）

日立GE製品概要

（1）目的

- O P C 発生時に、確実に検知できることを確認する。（期間内に発生した場合）
- 系統擾乱発生時等、O P C 以外の事象で本機器が誤動作しないことを確認する。
- 設計時の想定条件と実機適用時の条件（想定外を含む）による本機器への影響有無を確認する。
- その他、初期不良の有無等、機器の不具合発生状況をモニタリングし、本運用前に改善を図る。

（2）検証内容概要

- 試験期間は、季節による系統条件の変動、季節要因事象の検証、屋外機器に対する環境条件の影響
- 評価を考慮して、最低 1 年間を前提とする。
- 対象プラントは、系統条件や環境条件が各プラントで異なり、この間の試験結果をもとに、運用前の改善を図ることを本試験の目的としていることから、メーカーとしては全プラント対象を基本とする。

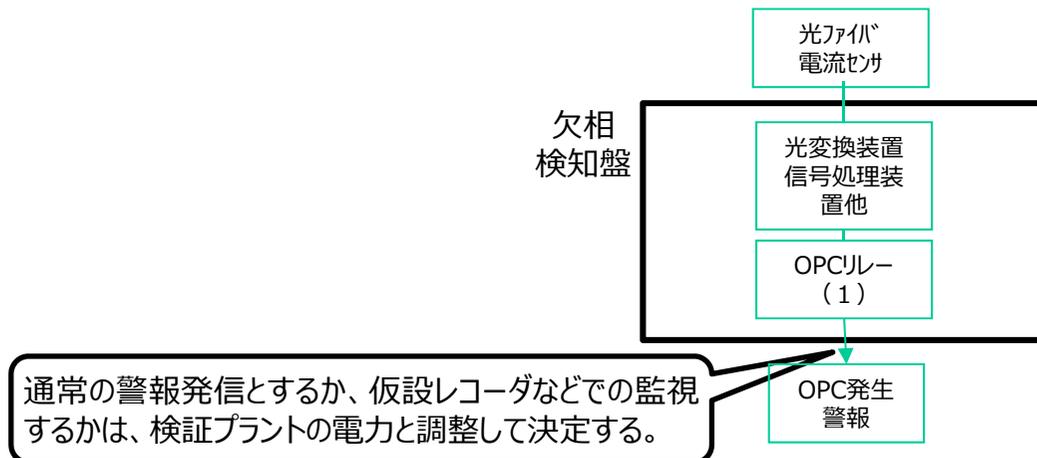


図1 回路構成

（2019年11月14日面談時資料から抜粋再掲）

日立GE製品概要

（3）確認項目

項目	内容
<p><u>リレー健全性確認</u></p>	<p>OPC検知システムには複数の誤動作防止ロジックを組み込んでおり、基本的にはシステムの過渡的事象によって影響を受けることは無いが、本ロジックがいかなる条件においても適切に動作し、誤動作しないことを確認するため、以下の試験を実施する。</p> <p>【検証項目】</p> <p>（短期試験）</p> <ul style="list-style-type: none"> ①励磁突入電流による影響評価のため、変圧器遮断器の開閉を実施 ②開閉サージによる影響評価のため、系統側の遮断器及び断路器の開閉を実施 ③負荷変動による影響評価のため、大型電動機の始動、負荷遮断を実施 <p>（長期試験）</p> <ul style="list-style-type: none"> ①系統の静電容量等による影響評価のため、環境条件の季節変動等考慮し、1年以上設置運用する。 ②プラント通常運転時における負荷変動による影響評価のため、定検間隔以上の期間（約1年）設置運用する。 <p>誤動作した際は、原因を検討したうえで、改善案を検討・整定値の見直し等を実施する。</p>
<p><u>光変換装置からのデータの分析</u></p>	<p>本試験期間中に光変換装置からのデータを収集し、内部の各リレー要素の動作を検証する。ロジックを見直すことで、更なる誤動作の防止と精度の向上を見込むことが可能であれば、改善案を検討し、ロジックや整定値の見直し等を実施する。</p>

（2019年11月14日面談時資料から抜粋再掲）

東芝ESS製品概要

（1）目的

- OPC 検知システムの開発検証は完了し、今後の実機導入における各プラント個別検討は解析および工場試験により検討・確認を行う。ただし、検知対象として新規性があるOPCを扱うことから、電源系統で生じる想定事象によるシステムへの影響をフィールドレベルで検証する。

（2）検証内容概要

- 電源系統の運用時には、以下に示すような電氣的な過渡事象が想定されることから、OPC 検知システムはこれら事象による不要動作を防止する構成としている。そのフィールドレベルでの確認として、システムを実際に導入したうえで一定期間の試運用により不要動作が生じないことを確認する。

①想定事象

- 落雷
- 送電系統または発電所構内の地絡、短絡事故
- 系統変動（電圧変動、周波数変動、高調波）
- 変圧器受電時（励磁突入電流）
- 開閉サージ
- 負荷電動機始動、停止時（始動電流）
- 周囲設備からの誘導ノイズ など

②試運用期間

上記の想定事象がプラント運用、系統側電力潮流および季節変動に起因する部分もあることを考慮し、試運用期間はプラント運転期間 1 サイクル分を目安として、電力側との協議により決定する。

（2019年11月14日面談時資料から抜粋再掲）

東芝ESS製品概要

（3）確認項目

- ①想定事象のうち、人為的に再現可能な、変圧器受電時、線路遮断器開閉時および電動機始動・停止時の影響に関し、試験による確認についても実施する。

No.	試験項目	内容
1	変圧器受電時の不要動作確認	検知対象変圧器に運転電圧を印加し、通常運用時の変圧器受電時に発生する励磁突入電流に対し、OPC検知リレーが不要動作しないことを確認する。
2	遮断器開閉サージによる不要動作確認	送電線事故時の再閉路による開閉サージを想定し、遮断器を開閉し、不要動作しないことを確認する。
3	電動機始動・停止時の不要動作確認	検知対象変圧器から二次側母線へ給電している状況で、当該母線に接続される電動機を始動・停止させ、その際の電流変動に対して、OPC検知リレーが不要動作しないことを確認する。

通常運転状態において外部電源から受電している非常用母線負荷について

(美浜 3 号機起動変圧器の例)

起動変圧器 容量 : 45MVA

非常用母線負荷名称	1 台あたり 容量 (kW)	設置台数		通常運転台数 (最大)	合計負荷 容量 (kW)
		A 系	B 系		
1 次系冷却水ポンプ	2 4 5	2	2	2	4 9 0
2 次系冷却水ポンプ	2 5 0	1	1	2	5 0 0
チラーユニット	2 1 8	1	1	1	2 1 8
海水ポンプ	3 9 0	2	2	3	1 1 7 0
充てん／高圧注入ポンプ	7 8 0	1 (+Y1B1)	1 (+Y1B1)	1	7 8 0
安全系パワーセンタ (下流の原子炉コントロール センタを含む)	—	1	2	2	1 5 2 2
常用系パワーセンタ	—	0	1	1	
				合計	4 6 8 0

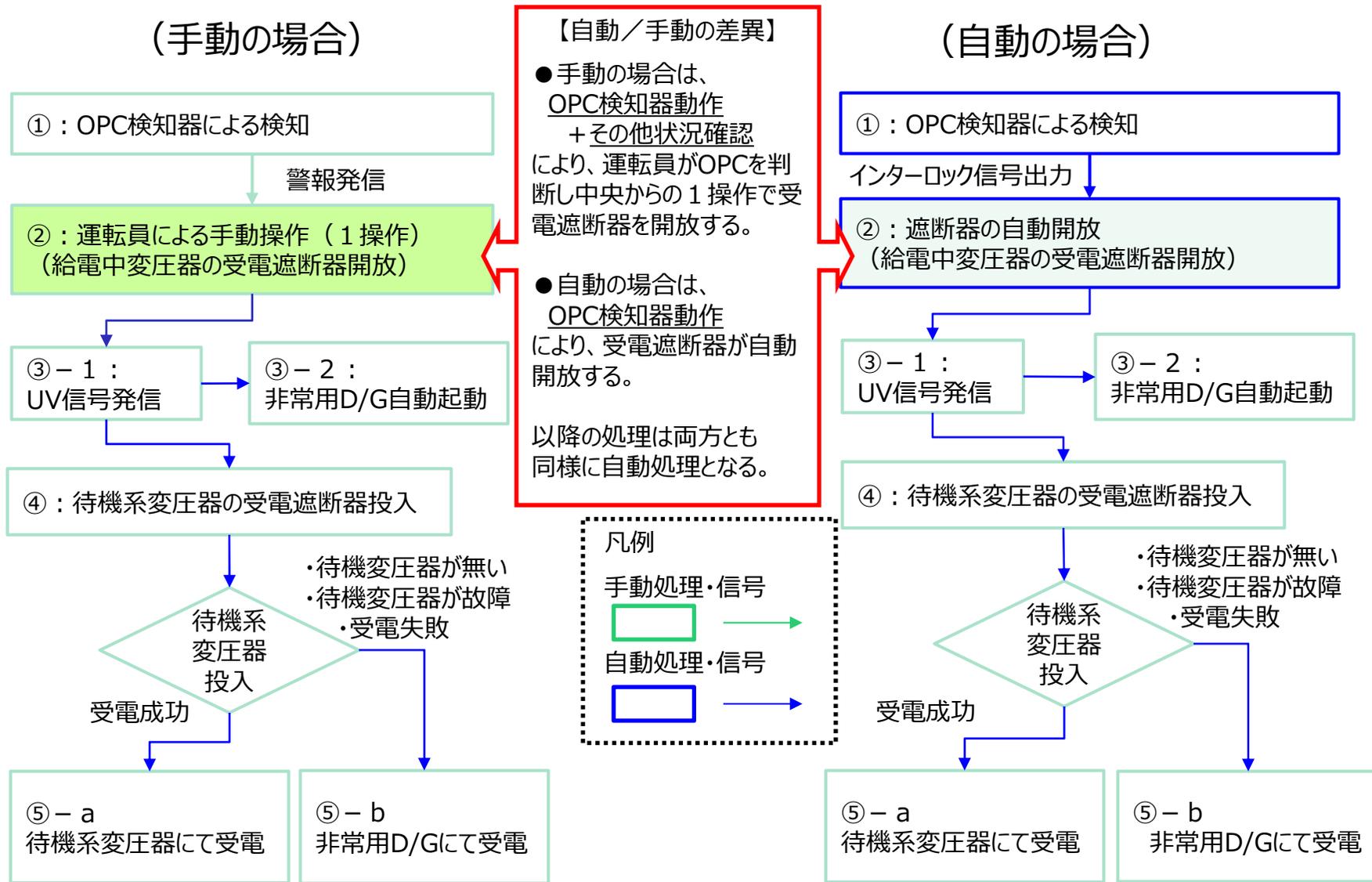
(カ率0.8とした場合、5. 8 5 MVA)

起動変圧器については、通常運転状態において、**負荷率は約 1 3 %**である。

なお、起動変圧器と共にOPC自動検知システムを設置する予備変圧器については、通常待機状態にあり、変圧器 1 次側には励磁電流相当しか流れていない。

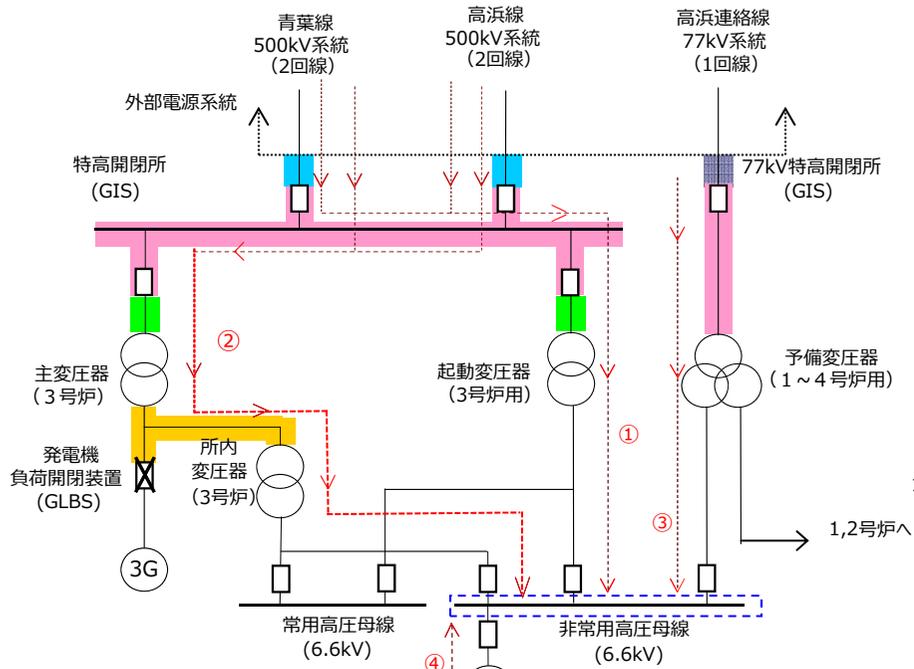
OPC検知時の自動隔離有無（自動／手動）による運転操作の差異

(2019年5月29日面談資料より抜粋再掲)



外部電源受電ラインの構成、遮断器自動切替順番 (PWR) の例

(高浜発電所3/4の受電順番)

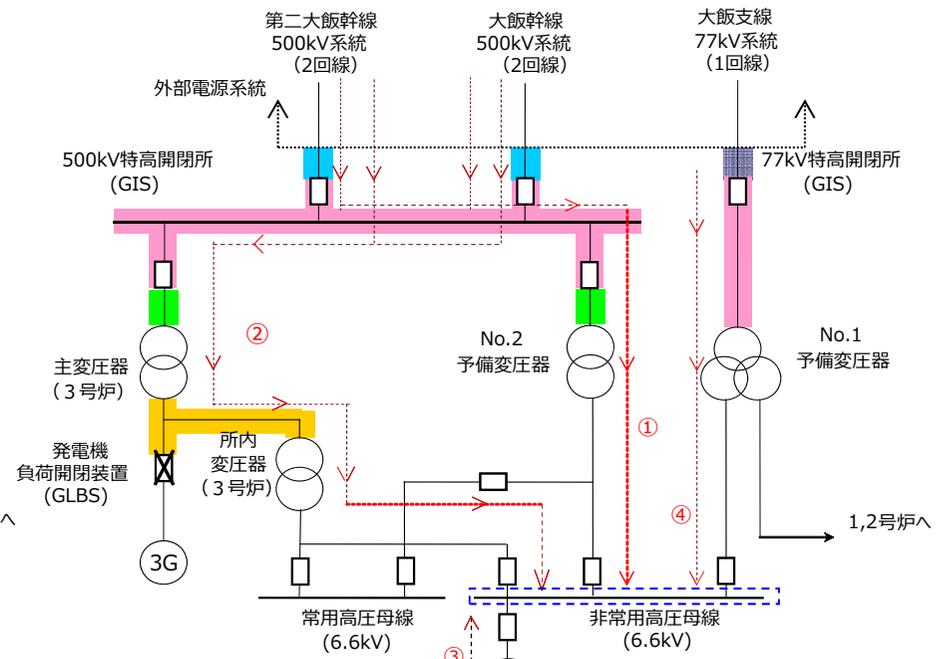


受電優先順位①⇒②⇒③⇒④
 通常時：①で受電
 ②～④：自動電源切替
 ----->：電源受電の流れ

不足電圧継電器(27)が動作した場合BOシーケンスに基づき切替え

変圧器1次側の設備構成
 ■ 架線
 ■ 地中線
 ■ GIS
 ■ OFケーブル
 ■ 相分離母線

(大飯発電所3/4の受電順番)



受電優先順位①⇒②⇒③⇒④
 通常時：①で受電
 ②～③：自動電源切替
 ④：手動電源切替
 ----->：電源受電の流れ

不足電圧継電器(27)が動作した場合BOシーケンスにもとづき切替え

変圧器1次側の設備構成
 ■ 架線
 ■ 地中線
 ■ GIS
 ■ OFケーブル
 ■ 相分離母線

名称 (例)	① 予備変圧器	② 起動変圧器	③ 主変 - 所変
用途・備考	<ul style="list-style-type: none"> ・非常時用の待機用途。(②が無い場合は通常時受電) ・単回線構成の場合が多い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・通常運転時、安全系母線への給電用途。 ・送電線は③と同様。 	<ul style="list-style-type: none"> ・発電時の送電用途 ・GLBSが設置されている場合、定検時等に安全系への受電が可能。

GLBS : Generator Line Breaker Switchの略で、事故電流を遮断する容量はないが、定格負荷電流は遮断できる発電機主回路上の開閉装置である。

米国におけるOPC最新情報（1 / 2）

参考17

（1）米国各プラントの定期監査（instruction状況）：最新レポートの概要

- NRCはNEIの現行のOPCの対応計画が合致しているかについて2018年、代表4プラント（River Bend(BWR：Entergy社)、Palo Verde(PWR：APS社)、St. Lucie(PWR：FPL社)、Byron(PWR：Exelon社)）で短期検査を実施している。
- その後、NRCが実施した代表プラント以外の8プラントに対する検査を実施し、その報告書を2019年度に発行している。
以下、8プラントのレポート内容

評価項目	Grand Gulf (BWR:Entergy)	Wolf Creek (PWR:WCNOC)	Arkansas (PWR:Entergy)	Robinson (PWR:Duke)
運用状況	モニタリング期間	モニタリング期間	運用中	モニタリング期間
対象変圧器／母線	変圧器 ・サービス変圧器 ・ESF変圧器	変圧器 ・起動変圧器他	変圧器 ・起動変圧器	変圧器 起動変圧器
OPC検出場所	受電変圧器高圧側	受電変圧器高圧側	受電変圧器高圧側	受電変圧器高圧側
OPC検出方式	PCS2000 (デジタルリレー)	PSSTec (デジタルリレー)	PCS2000 (デジタルリレー)	SEL (デジタルリレー)
誤警報の有無	度重なる誤警報で警報をバイパス	記載なし	記載なし	記載なし
システムの設計	常用系	常用系	常用系	常用系

評価項目	Catawba (PWR:Duke)	Quad Cities (BWR:Exelon)	Farley (PWR:SNOC)	South Texas (PWR:STP)
運用状況	モニタリング期間	モニタリング期間	モニタリング期間	運用中
対象変圧器／母線	変圧器 ・主変圧器:昇圧変圧器	変圧器 ・予備変圧器 (RAT)	変圧器 ・起動変圧器	母線 ・3つの高圧非常用母線
OPC検出場所	受電変圧器高圧側	受電変圧器高圧側	受電変圧器高圧側	非常用母線
OPC検出方式	PSSTec (デジタルリレー)	SEL (デジタルリレー)	PSSTec (デジタルリレー)	既設UVリレー (アナログリレー)
誤警報の有無	記載なし	記載なし	度重なる誤警報で警報をバイパス	誤警報無し
システムの設計	常用系	常用系	常用系	安全系

非常用母線の既設UVリレーで検知できるため、OPC検知器は設置せず

（2）米国におけるOPC検知器の運用状況等、誤検知に関連する情報

各レポートから、OPC誤検知の運用状況等、誤検知に関連する記載がいくつか確認できた。（以下、一部抜粋）

(a) Grand Gulf 検査レポート

- ・PCS2000を採用しているが、「[中央制御室への警報出力も度重なる誤警報発信により、負担軽減の観点で、バイパスしている](#)」との記載があり、誤信号の対応に苦慮している。

(b) South Texas 検査レポート

- ・South Texas Projectでは、安全系の従来の保護を用いて、OPC検出と保護が可能としている。（解析評価結果をベース）

(c) Wolf Creek 検査レポート

- ・5つの変圧器がOPCによる影響を受ける可能性があるが、実際OPC検出器を設置しているのは、2つの変圧器としており、その理由は、残りの3つの変圧器を用いた電源供給ルートはほとんど使用されておらず（25年のうち積算で47.5日間のみ）、また、開閉所から変圧器への接続距離も150ヤードと短いためとしている。

(d) Arkansas 検査レポート

- ・PCS2000を採用しているが、特に誤検知の対応については記載なし。

(e) Catawba 検査レポート

- ・[発電機遮断器か断路器が開放されている時のみOPCの検出回路が動作](#)。
（発電機が動作していないときにOPC検出装置を活かしている。発電機動作時には発電機保護での対応と考察される。）

(f) Quad Cities 検査レポート

- ・回路には[時限リレーを使用し、誤動作防止](#)が可能としている。

(g) Farley 検査レポート

- ・EPRIのPSSTecを使用したOPC検出リレーを採用しているが、検査時にはモニタリング期間でありながら、[あまりにも多くの誤警報発信の為、警報発信自体を変圧器盤でブロック](#)している模様。
- ・OPCの警報ブロックを解除する時期やモニタリング期間の終了時期は記載なし。

(h) Robinson 検査レポート

- ・SELを使用した変圧器高圧側のOPC検出リレーと低圧非常用母線にABB 60Qを用いたOPC検出リレーのハイブリッドを採用している。（検査時はモニタリング期間中）

国内においてOPC検知器を先行設置し、誤検知が発生した事例

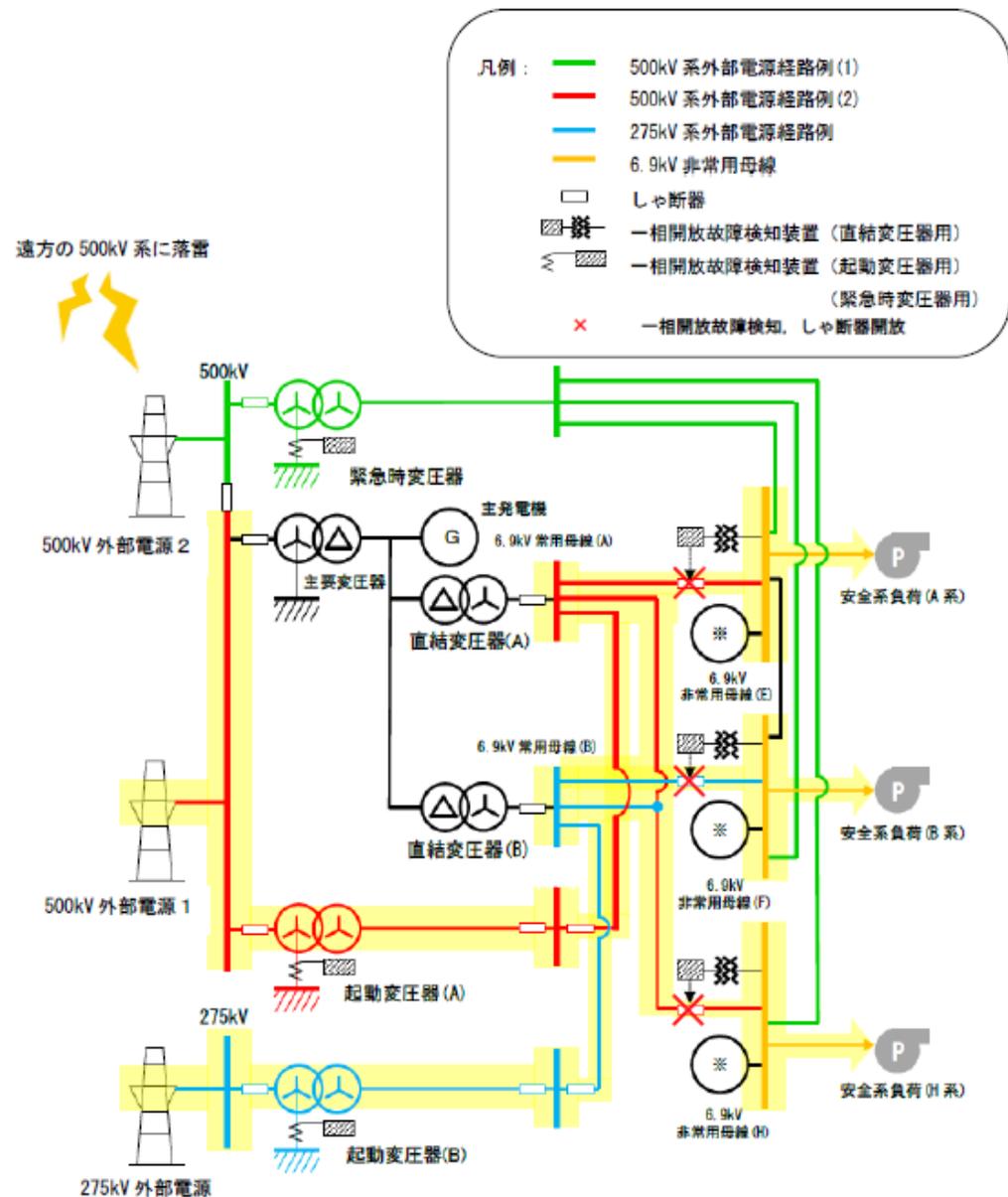
浜岡発電所 4号機の事例 (ニューシア情報2017-中部-S002より)

2017年7月14日7時59分、落雷の影響により、愛岐幹線(500kV送電線)1号線、2号線をルート遮断し、中速再開路する事象が発生した。その影響を受け、浜岡原子力発電所の所内電源の電圧が瞬時低下した。浜岡4号機6.9kV非常用母線(E),(F),(H)については、その電圧低下を一相開放事象対策※1として設置した検出器が検知し、常用と非常用母線間に設置された遮断器が開放し、6.9kV非常用母線

(E),(F),(H)が停電した。これにより非常用ディーゼル発電機(A),(B)が自動起動し、6.9kV非常用母線母線(E),(F)は受電された。非常用ディーゼル発電機(H)については、非常用ディーゼル発電機(H)関連の作業により、安全措置として停止としていたため、6.9kV非常用母線(H)は停電状態が継続した。

なお、3,5号機については、一相開放事象対策が未実施であることから非常用母線の停電には至らなかった。

※1 外部電源に直接接続している変圧器の一次側において3相のうち一相の電路の開放が生じた場合に、安全施設への電力の供給が不安定になったことを検知し、故障個所の隔離又は非常用母線の接続変更その他の異常の拡大を防止する対策。



現行の技術基準における位置付け（1 / 2）

現状、規則の解釈は、以下のとおりである。OPC自動検知システムを人的運用の信頼性を向上・補完するものとし、現在解釈の中で、事業者として計画的に取り組んでいく。

○実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈（抜粋） 1/2

実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則	実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈
<p>(保安電源設備)</p> <p>第四十五条 発電用原子炉施設には、電線路及び当該発電用原子炉施設において常時使用される発電機からの電力の供給が停止した場合において発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な装置の機能を維持するため、内燃機関を原動力とする発電設備又はこれと同等以上の機能を有する非常用電源設備を施設しなければならない。</p> <p>2 設計基準対象施設の安全性を確保する上で特に必要な設備には、無停電電源装置又はこれと同等以上の機能を有する装置を施設しなければならない。</p> <p>3 保安電源設備（安全施設へ電力を供給するための設備をいう。）には、第一項の電線路、当該発電用原子炉施設において常時使用される発電機及び非常用電源設備から発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な装置への電力の供給が停止することがないよう、次に掲げる措置を講じなければならない。</p> <p>一 高エネルギーのアーク放電による電気盤の損壊の拡大を防止するために必要な措置</p>	<p>第45条（保安電源設備）</p> <p>1 第1項に規定する「発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な装置」とは、以下の装置をいう。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・第2条第2項第9号ホに規定される装置 ・燃料プール補給水系 ・第34条第1項第6号に規定する事故時監視計器 ・原子炉制御室外からの原子炉停止装置 ・PWRの加圧器逃がし弁（手動開閉機能）及び同元弁 ・非常用電源設備の機能を達成するための燃料系 <p>2 第2項に規定する「特に必要な設備」とは、非常用炉心冷却系の計測制御用電源設備等をいう。</p> <p>「同等以上の機能を有する装置」とは、直流電源装置をいい、第16条に規定する蓄電池を兼ねて設置してもよい。</p> <p>3 第3項に規定する「常時使用される」とは、主発電機又は非常用電源設備から電気が供給されている状態をいう。</p> <p>4 第3項第1号に規定する「高エネルギーのアーク放電による電気盤の損壊の拡大を防止するために必要な措置」とは、重要安全施設</p>

現行の技術基準における位置付け（2 / 2）

○実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈（抜粋） 2/2

実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則	実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈
	<p>（設置許可基準規則第2条第2項第9号に規定する重要安全施設をいう。以下同じ。）への電力供給に係る電気盤及び当該電気盤に影響を与えるおそれのある電気盤（安全施設（重要安全施設を除く。）への電力供給に係るものに限る。）について、遮断器の遮断時間の適切な設定等により、高エネルギーのアーキ放電によるこれらの電気盤の損壊の拡大を防止することができることをいう。</p>
<p>二 前号に掲げるもののほか、機器の損壊、故障その他の異常を検知し、及びその拡大を防止するために必要な措置</p>	<p>5 第3項第2号に規定する「異常を検知し、及びその拡大を防止するために必要な措置」とは、短絡、地絡、母線の低電圧又は過電流などを検知し、遮断器等により故障箇所を隔離し、保安を確保するために必要な装置への影響を限定できる設計及び外部電源に直接接続している変圧器の一次側において3相のうちの1相の電路の開放が生じた場合に、安全施設への電力の供給が不安定になったことを検知し、故障箇所の隔離又は非常用母線の接続変更その他の異常の拡大を防止する対策（手動操作による対策を含む。）を行うことによつて、安全施設への電力の供給が停止することがないように、電力供給の安定性を回復できる設計とすることをいう。</p>
<p>4 設計基準対象施設に接続する第一項の電線路のうち少なくとも二回線は、それぞれ互いに独立したものであって、当該設計基準対象施設において受電可能なものであって、使用電圧が六万ボルトを超える特別高圧のものであり、かつ、それにより当該設計基準対象施設を電力系統に連系するように施設しなければならない</p>	<p>6 第4項に規定する「少なくとも二回線」とは、送受電可能な回線又は受電専用の回線の組み合わせにより、電力系統と非常用所内配電設備とを接続する外部電源受電回路を2つ以上設けることにより達成されることをいう。</p> <p>7 第4項に規定する「互いに独立したもの」とは、2回線以上の電</p>