

伊方発電所における所内電源の一時的喪失について

(概要版)

令和2年6月4日

四国電力株式会社

1. 事象概要(1/2)

- (1) 事象発生の日時
令和2年1月25日 15時44分
(187kV母線保護継電装置動作)
- (2) 事象発生の設備
187kVガス絶縁開閉装置
- (3) 事象発生時の運転状況
1号機 廃止措置中
2号機 平成30年5月23日運転終了
(第23回定期検査中)
3号機 第15回定期検査中
- (4) 事象発生の状況

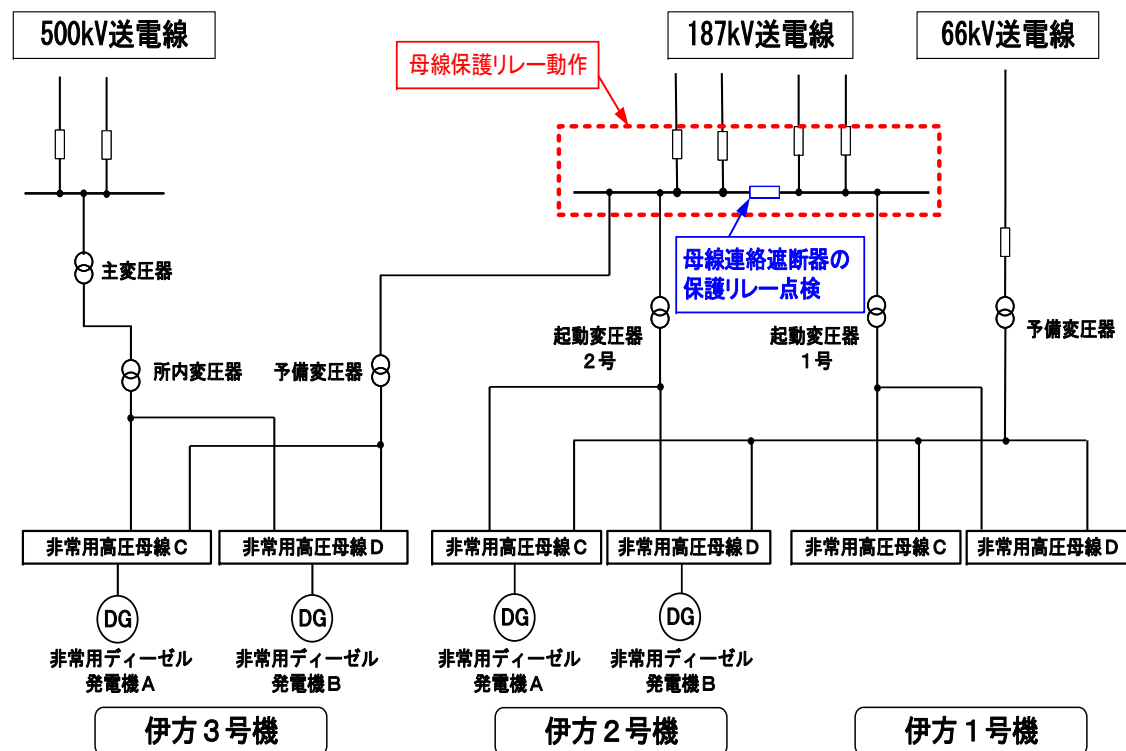


図1 所内電源系統図

1月25日15時44分、伊方発電所1、2号機の屋内開閉所（管理区域外）において、187kV母線連絡遮断器を動作させる保護継電装置（ブスタイリレー）の取替え終了後の確認作業で起動変圧器2号を系統切替えるため甲母線断路器を操作しようとしたところ、187kV母線保護継電器（以下、「187kV母線保護リレー」という。）が動作し、乙母線に接続されている187kV送電線4回線全ての遮断器が開放して受電が停止した。

このため、1、2号機は直ちに66kVの予備系統から受電した。また、3号機は直ちに起動した非常用ディーゼル発電機から受電し、その後、500kV送電線からの受電に切替えた。これにより、1、2号機および3号機ともに外部からの受電は復旧した。

1. 事象概要(2/2)

(5) 事象発生箇所の特定

事象発生後の現場確認の結果、187kV送電線4回線のうち、1回線から受電する电路の一部に設備故障があることを確認した。

このため、当該电路の切り離しを実施し、1月27日17時13分、当該电路を含む1回線を除く3回線から受電して、187kV送電線からの所内電源を確保した。

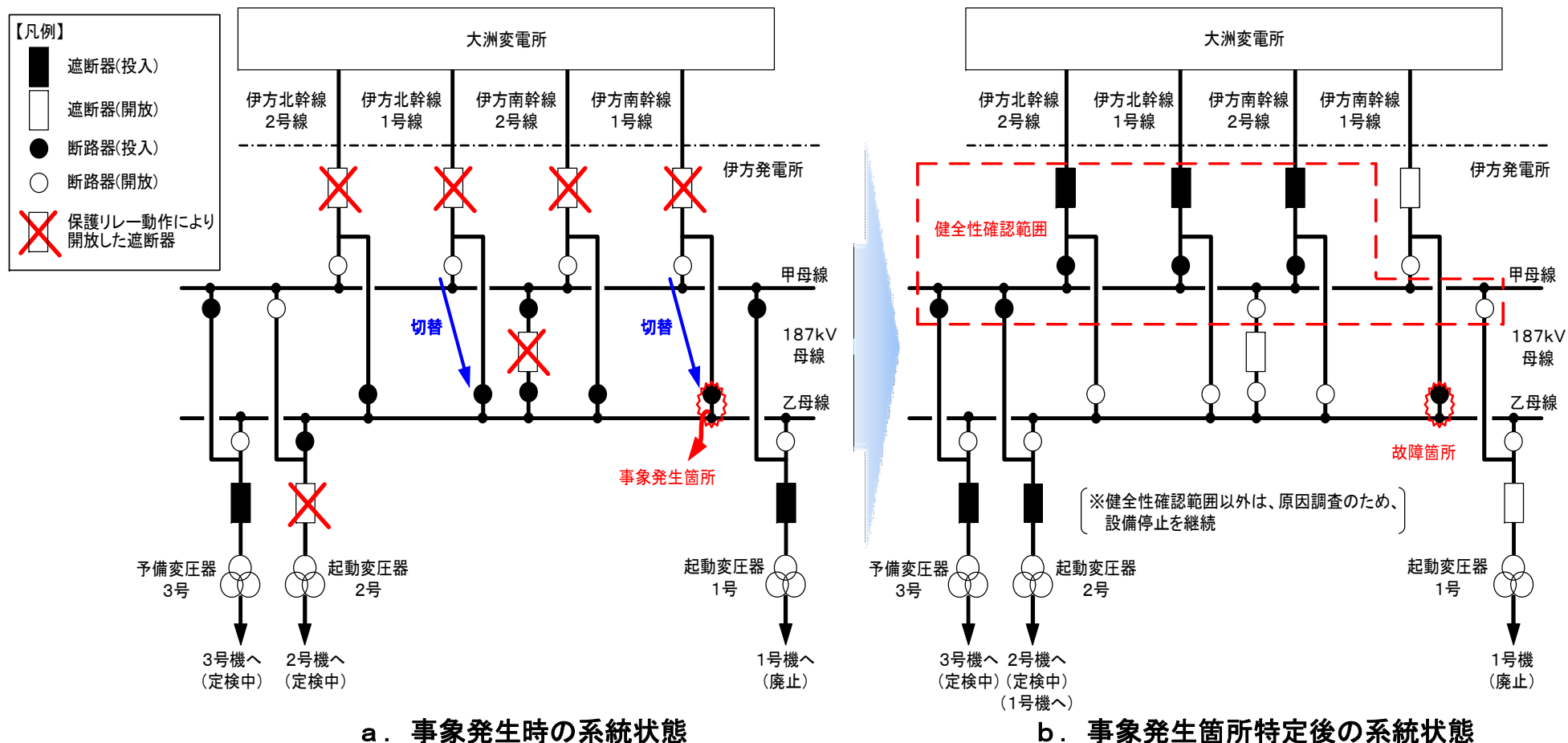


図2 事象発生前後の187kV送電系統状態

2. 事象発生時の原子炉施設への影響(1/4)

(1) 電源確保状況

事象発生時における1号機、2号機および3号機の電源確保状況について、適切に外部電源および非常用電源が確保※されており、問題がなかったことを確認した。

※常用の外部電源が喪失した場合は、自動で予備の外部電源に切替わり、予備の外部電源が使用できない場合は、非常用ディーゼル発電機から自動で受電するよう設計している。

今回、3号機については、試験のため187kVから受電していたことから、事象発生に伴いDGから自動で受電した。500kVは待機状態としていたことから、その後速やかに500kVに手動で切替えを行った。

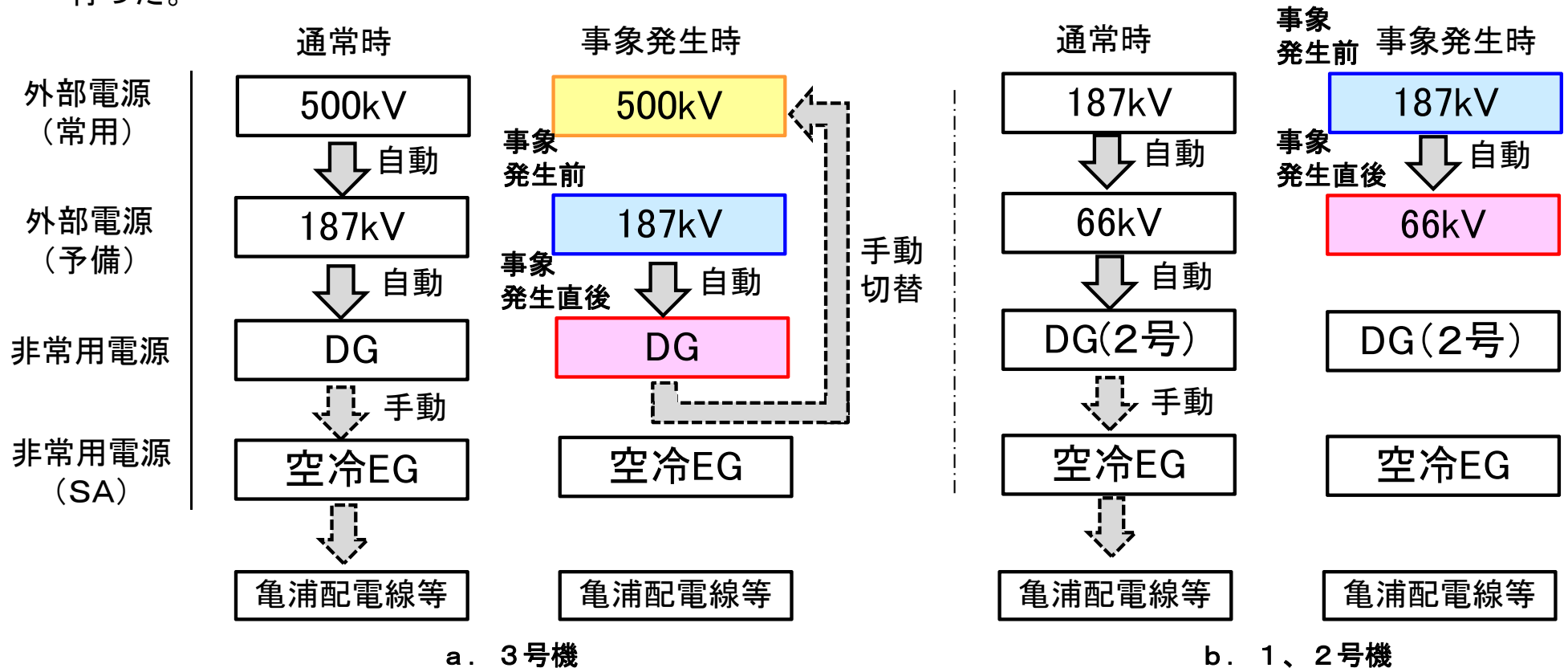
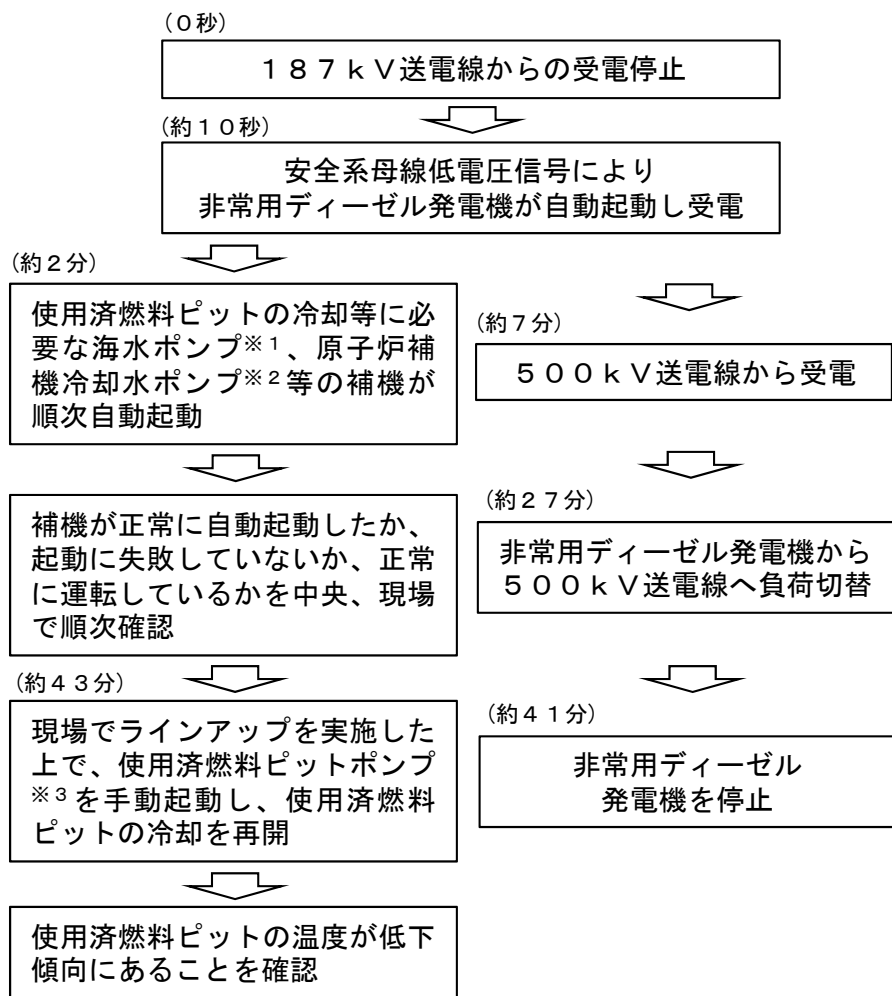


図3 事象発生時の所内電源系統状況

2. 事象発生時の原子炉施設への影響(2/4)

(2) 3号機の使用済燃料冷却再開までの対応について

事象発生後、非常用ディーゼル発電機の自動起動、受電、使用済燃料ピット冷却に必要な補機の自動起動など、設計通り動作していることを確認した後に、現場で使用済燃料ピットポンプを起動することにより使用済燃料ピットの冷却を再開しており、手順通りの対応を実施した。



連続して使用済燃料ピットの水位、温度推移を監視

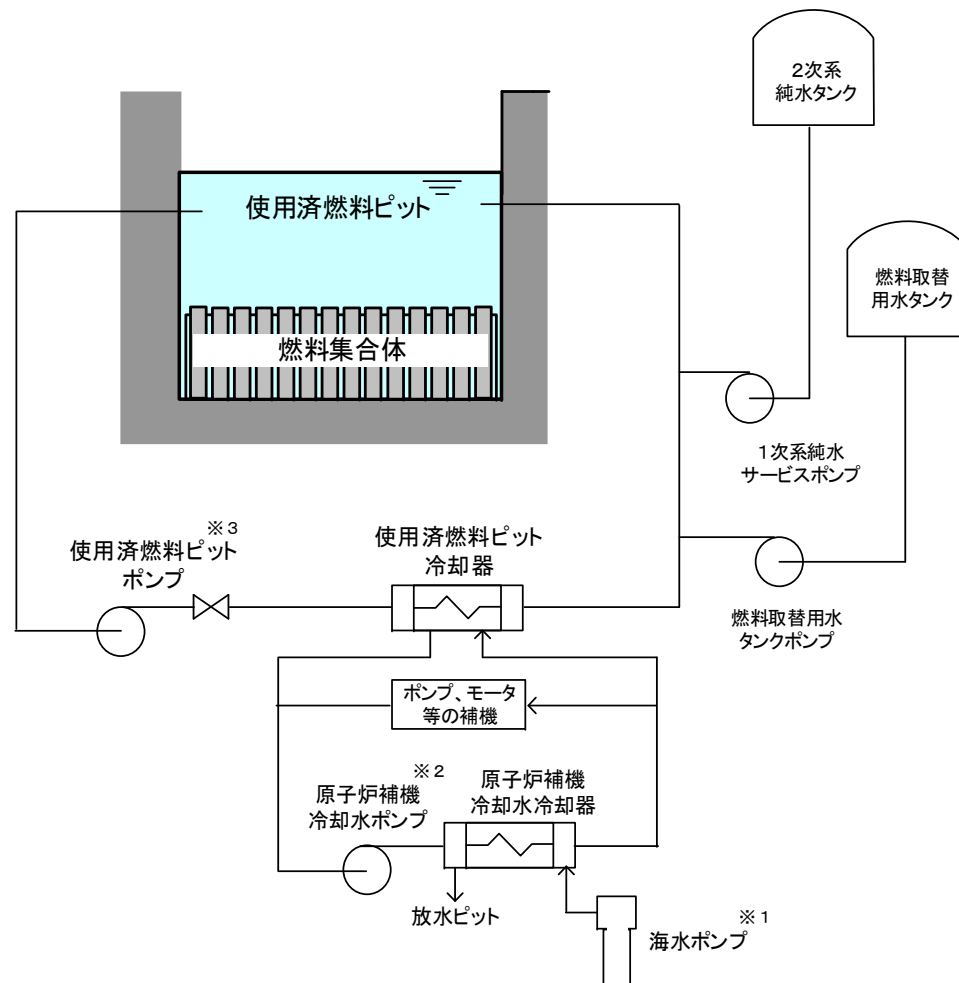


図4 事象発生から使用済燃料ピット冷却再開までの対応

図5 使用済燃料ピット水浄化冷却系等

2. 事象発生時の原子炉施設への影響(3/4)

(3) 燃料冷却状況について

非常用高圧母線の停電から使用済燃料ピットの冷却を再開するまでの温度上昇は最大1.1℃（3号機Aピット）であり、通常運転における温度変化の範囲であったこと、また保安規定に定める使用済燃料ピットの温度に係る制限値65℃に対して十分な余裕※があったことから、使用済燃料の冷却状態に問題はなかった。また、2、3号機とも使用済燃料ピットの水位に有意な変動はなかった。

※評価上65℃までの到達時間は、約20時間

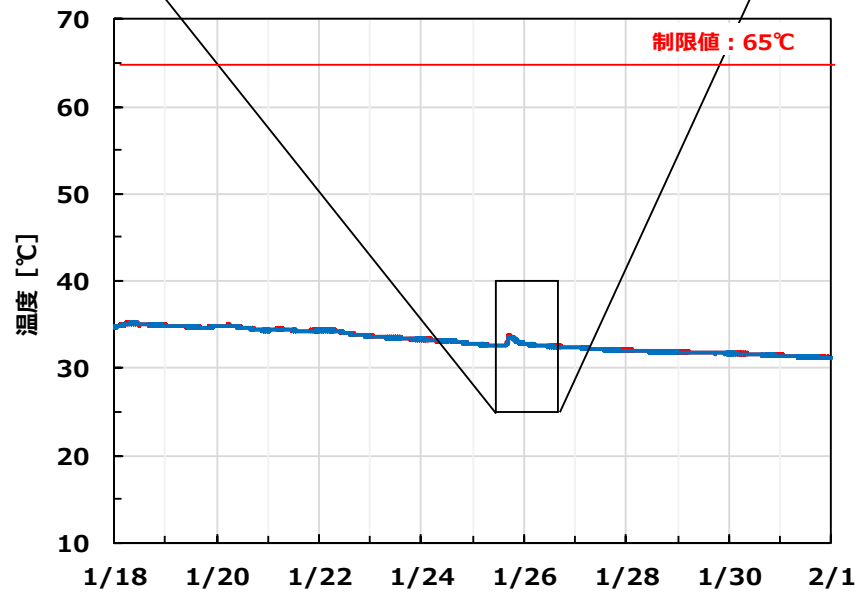
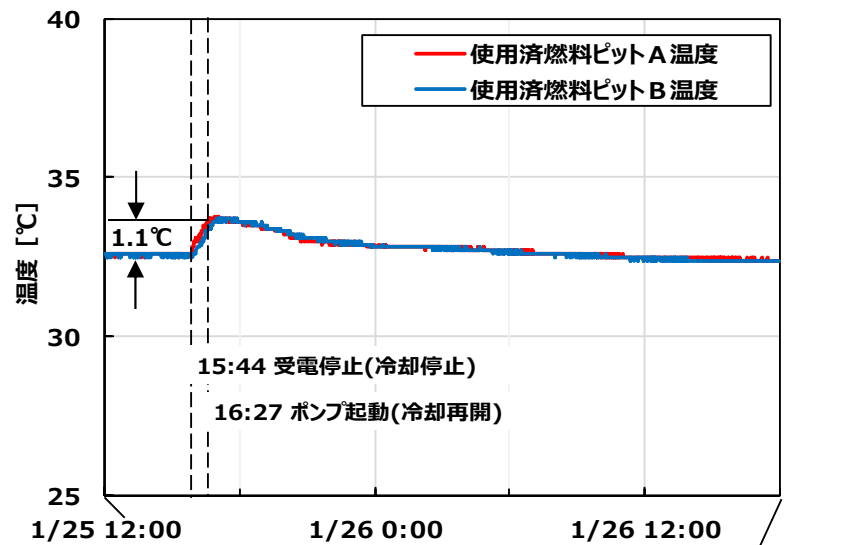
表1 使用済燃料ピットの燃料貯蔵体数 [体]

号機		1号機	2号機	3号機	
				Aピット	Bピット
燃料種別					
ウラン燃料 (照射済)		—	316	848	635
MOX 燃料	照射済	—	—	16	—
	新燃料	—	—	5	—

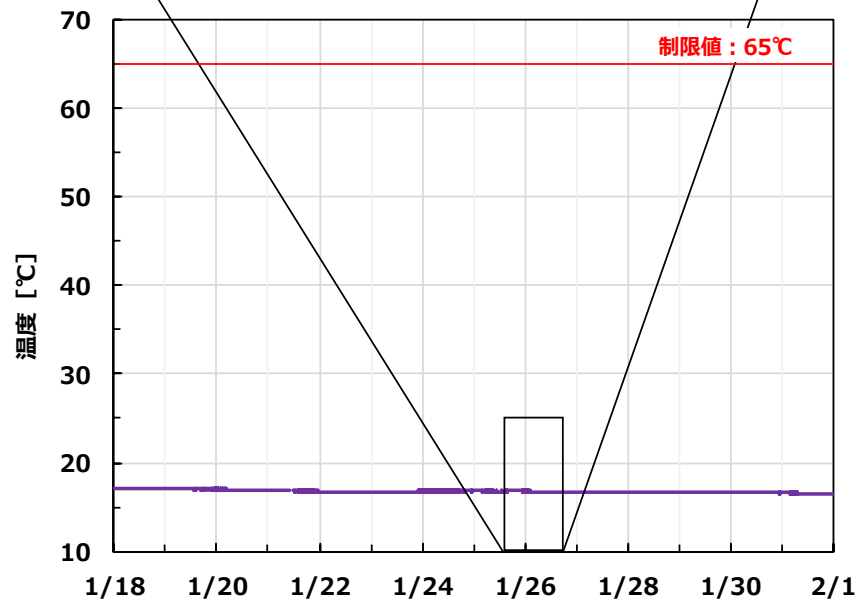
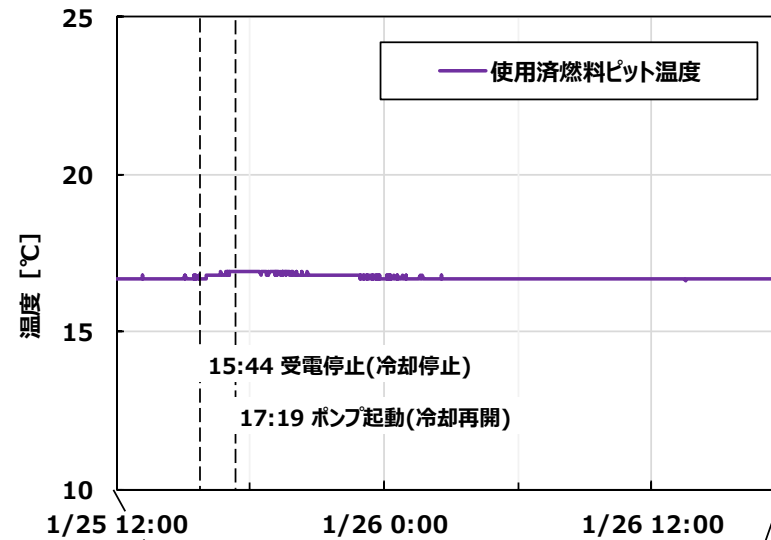
表2 事象発生時の使用済燃料ピット水温 [℃]

号機		2号機	3号機	
			Aピット	Bピット
時系列				
事象発生前 (15時時点)		16.7	33.0	32.3
事象収束後 (19時時点)		16.9	33.8	33.2
上記期間の最高値		16.9	34.1	33.3

2. 事象発生時の原子炉施設への影響(4/4)



a. 3号機



b. 2号機

図6 使用済燃料ピット温度

3. 事象発生時の作業状況(1/2)

(1) 作業内容および手順

当該試験に伴う電源系統切替作業については、「四国電力株式会社 系統運用指針」等の社内規定に従い、関係箇所にて協議の上、作業計画を策定し、一指令ごとに一操作を行い、その都度確認を行う操作指令により実施していた。

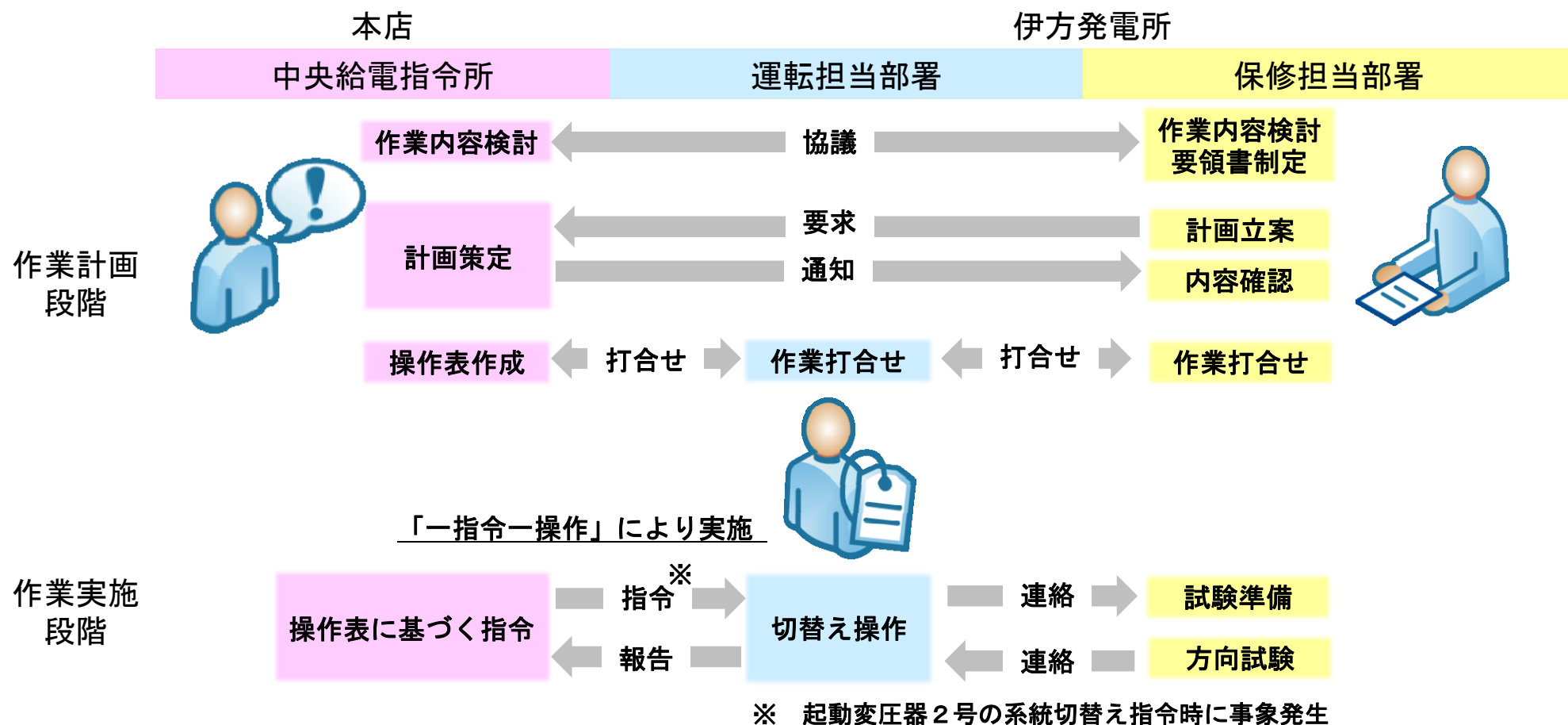


図7 系統切替作業に係る組織および作業フロー

3. 事象発生時の作業状況(2/2)

(2) 電源系統の状況

当該試験に伴う電源系統構成については、方向試験※のための制約があるなかで、各号機に必要な非常用ディーゼル発電機および空冷式非常用発電装置を確保しており、外部電源系統の事故に対して電源の多様性を確保していた。

※187kV母線連絡遮断器の保護リレー取替え後の健全性確認試験として、当該遮断器に対して一方向から所定の負荷電流を流し、保護リレーへの入力状態に問題がないことを確認する試験。
今回の試験では、廃止に伴い1、2号機の所内負荷が少なかったことから、3号機負荷も接続。

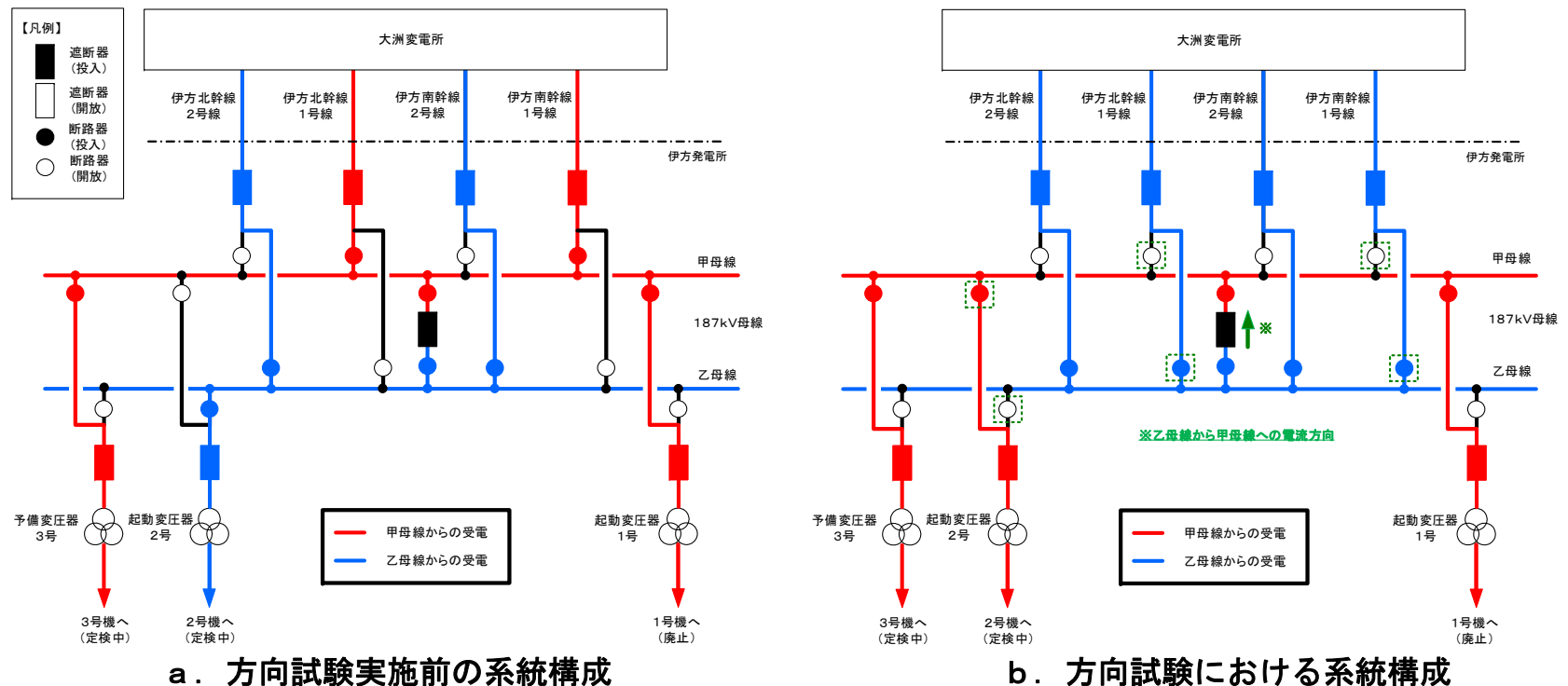
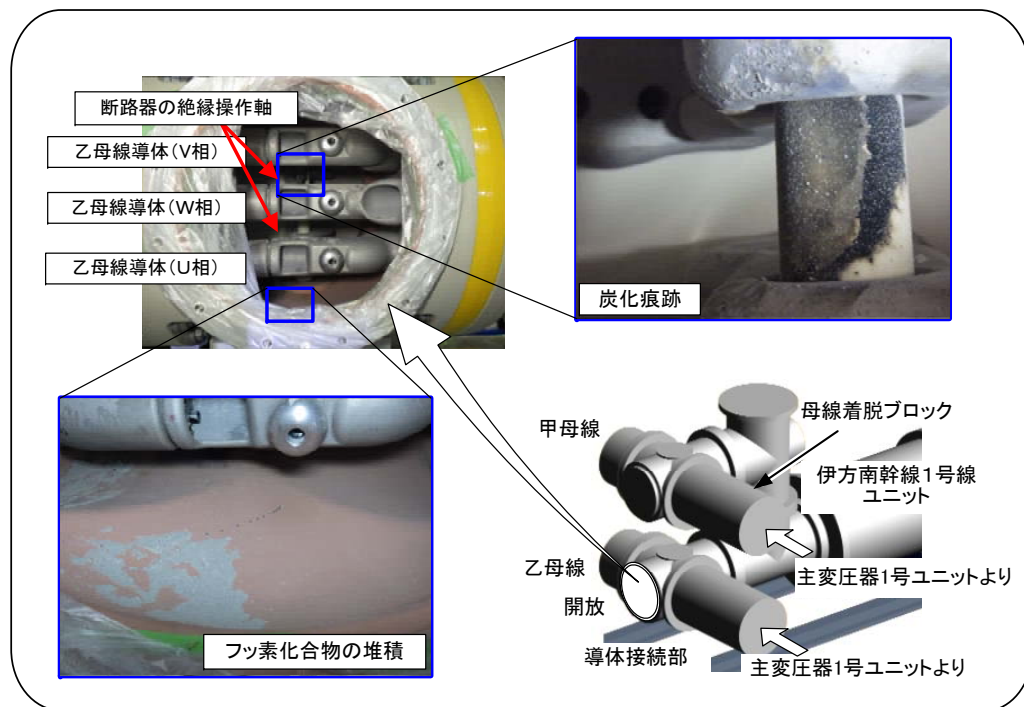


図8 試験時の系統構成

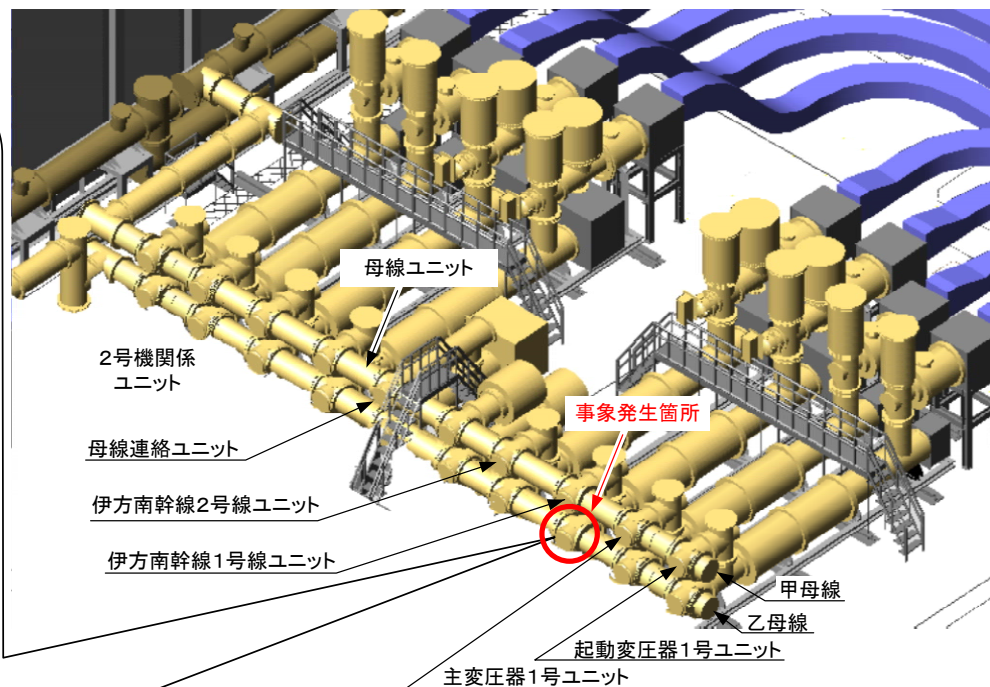
4. 現地調査結果

○発電用原子炉施設および環境への影響について、問題なかったことを確認し、現地にて断路器内部を確認した結果、以下の状況を確認した。

- ・ユニット内に分解ガスによるフッ素化合物（白粉）の堆積
- ・V相－W相間絶縁操作軸に黒色の炭化痕跡（相間短絡発生を推定）
- ・V相－W相間絶縁操作軸周辺の導体にも相間短絡による損傷
- ・相間短絡発生部位周辺の絶縁スペーサ、ユニット内、導体に相間短絡時の熔融物の飛散



伊方南幹線1号線乙母線断路器ユニット



1、2号機ガス絶縁開閉装置全体概要図

5. 製造、点検履歴等調査結果（1 / 2）

○設計思想および保守方針

当該断路器の導電部、絶縁部、接触部等は、すべてガスを封入したユニット内に密閉され、外部雰囲気の影響を遮断しているために長期間劣化せず、耐環境性に優れていることから信頼性の高い装置となっている。

これら断路器ユニットの点検については、メーカー推奨に基づき定期的に関閉試験、絶縁抵抗測定、機構部の注油等を実施している。また、断路器ユニット内部については、長期的に劣化が無いことから開放点検、部分放電等の設備診断についてはこれまで実施していない。

○調査結果

当該断路器に係る製造履歴、点検履歴および運転履歴（操作実績）について、記録等を確認した。

- ・ 製造履歴：製造時の試験記録より、電気規格調査会標準規格に基づく試験の判定基準を満足
- ・ 点検履歴：保全計画に従って、計画通り保守点検を実施しており異常はなかった
- ・ 運転履歴：メーカー動作確認回数である10,000回を十分に下回り（約350回）、直前の操作実績も問題がないことを確認

表3 断路器の製造履歴記録

項目		判定基準	試験記録
構造検査		異常のないこと	良
開閉試験	手動開閉試験	支障なく開閉できること	良
	開閉特性試験	確実に動作すること	良
	連続開閉試験	制御電圧が定格値、最高値、最低値の条件で開閉できること	良
抵抗測定試験	U相	30 $\mu\Omega$ (設計値+20%以下)	28.0 $\mu\Omega$
	V相	28 $\mu\Omega$ (設計値+20%以下)	27.0 $\mu\Omega$
	W相	26 $\mu\Omega$ (設計値+20%以下)	26.0 $\mu\Omega$
商用周波耐電圧試験		定格ガス圧値で試験電圧を印加し耐えること	良

表4 点検履歴調査結果

実施時期	断路器点検実績	断路器点検内容
平成31年度 (今回)	今回点検なし	—
平成30年度 (前回)	点検実施	<ul style="list-style-type: none"> ・外観点検 ・絶縁抵抗測定 ・ユニット外操作機構の点検、注油 ・開閉試験 他

(参考) 保全計画に基づく点検頻度: 1回/3年

5. 製造、点検履歴等調査結果 (2 / 2)

- ・ 1月22日「切」→「入」操作実施 (事象発生時と同様の操作: 「投入」操作)
 - ・ 1月23日「入」→「切」操作実施 (事象発生時と逆の操作: 「開放」操作)
 - ・ 1月25日15:42「切」→「入」操作実施 (事象発生時: 「投入」操作)
- 注) 1月25日15:44に事象発生 (断路器の操作はしていない)**

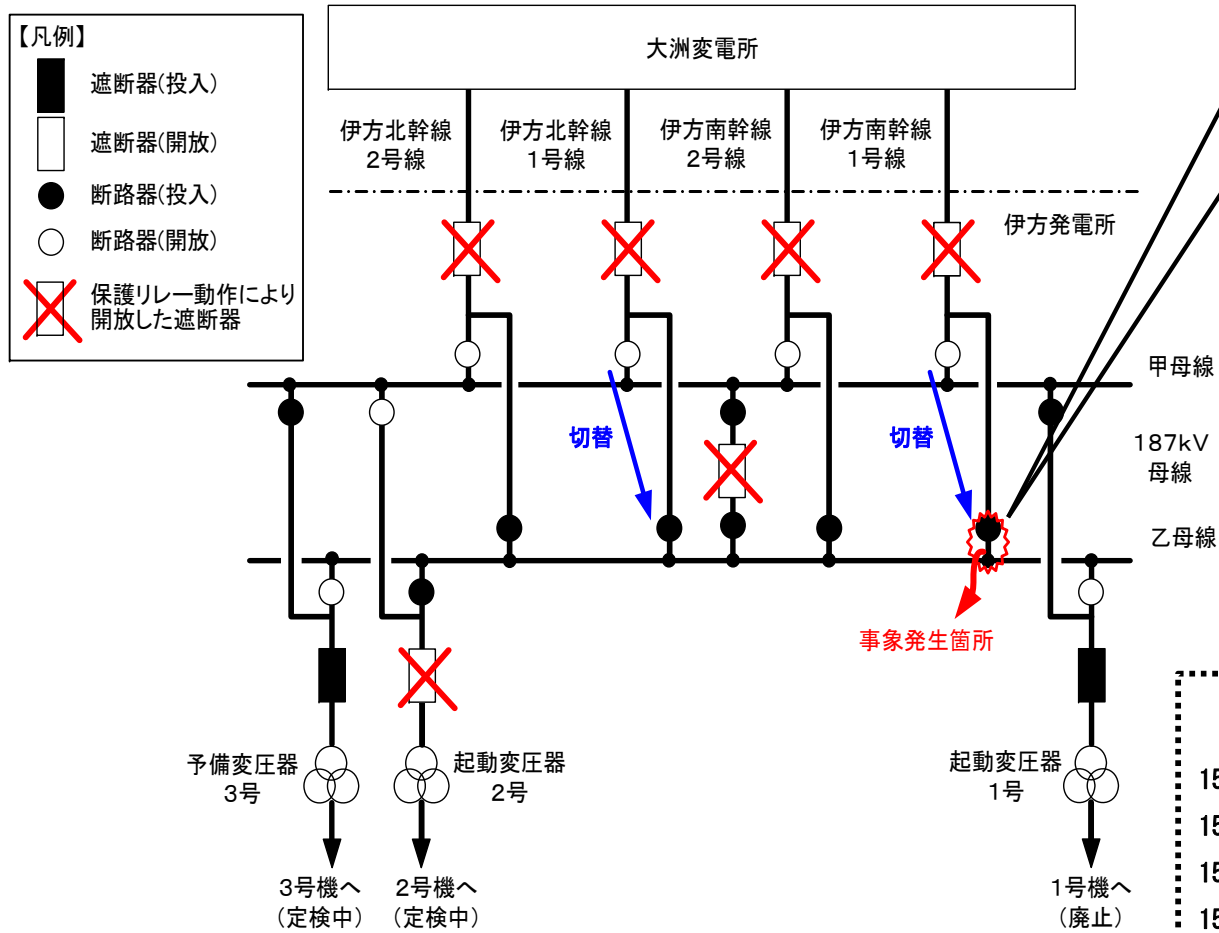


図9 断路器操作実績 (事象発生時の系統状態)

6. 調査結果（まとめ）

本事象を踏まえ、当該断路器の調査および他の断路器の内部確認を実施した。
また、試験用系統構成、手順等の評価を実施した。

「7. 当該断路器の調査」

現地および工場での状況調査結果から、本事象に至った相間短絡を発生させる要因について、要因分析図を作成し、これに基づき詳細調査を実施した。

・・・ 13 ~ 18

「8. 他の断路器の内部確認」

系統状態を変えずに点検可能な他の断路器（当該断路器以外の3台）について、現地で開放点検を実施した。

・・・ 19

「9. 試験用系統構成、手順等の評価」

本事象を踏まえて、今回の試験用系統構成、手順等の評価および更なるリスク低減に係る検討を実施した。

・・・ 20 ~ 22

7. 当該断路器の調査結果 (1 / 6)

【絶縁操作軸相間短絡に係る詳細調査】

- ・ V相-W相間絶縁操作軸相間短絡を発生させた要因となる「電界異常」「絶縁性能異常」の2つの因子について、要因分析を実施した。
- ・ V相-W相間絶縁操作軸の上部埋金とV相可動接触子の嵌合部に損耗および嵌合部の山頂部付近に、機械的な衝撃で発生する擦過痕の確認、ならびに次頁の確認結果から、「異物の付着」により相間短絡が発生した可能性があることを確認した。

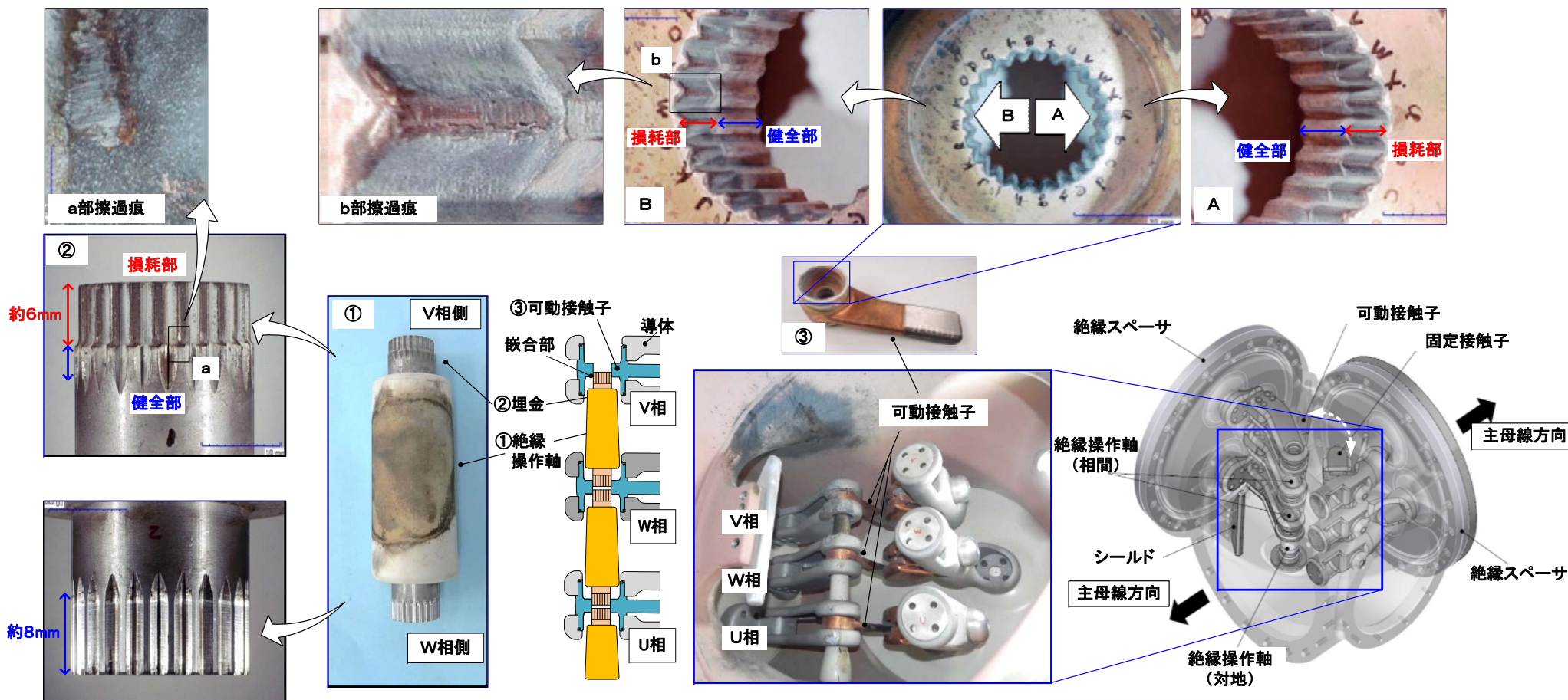


図10 断路器ユニット内部構造および確認結果

7. 当該断路器の調査結果（2／6）

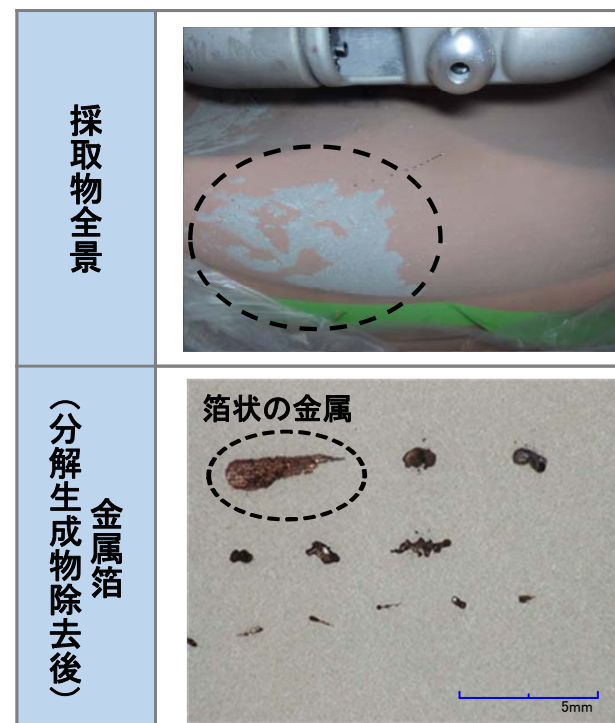
【絶縁操作軸相間短絡に係る詳細調査「異物の付着」】

- 相間短絡が発生したV相－W相間絶縁操作軸と健全なW相－U相間絶縁操作軸の表面汚損分析をした結果、V相－W相間絶縁操作軸において、絶縁操作軸の上部埋金（アルミ合金）と可動接触子（銅）の金属成分ならびにSF₆ガスの分解による成分を顕著に検出した。
- 断路器ユニット内部より採取した異物を確認した結果、放電に伴い発生する熔融金属以外の箔状の金属（最大で約4mm）を採取した。成分分析した結果、絶縁操作軸の上部埋金（アルミ合金）と可動接触子（銅）の金属成分を検出した。

表5 表面汚損分析の主な結果

試験項目	試料		V相－W相間 絶縁操作軸	W相－U相間 絶縁操作軸	
pH			4.28	4.28	
電導度	(μs/cm)		11.94		5.50
等価塩分汚損密度	(mg/cm ²)		0.0061	0.0015	
F ⁻	(μg/cm ²)		4.04	0.81	
Cu ²⁺	(μg/cm ²)		3.22	0.21	
Al ³⁺	(μg/cm ²)		6.72	0.60	

表6 採取物の拡大観察結果

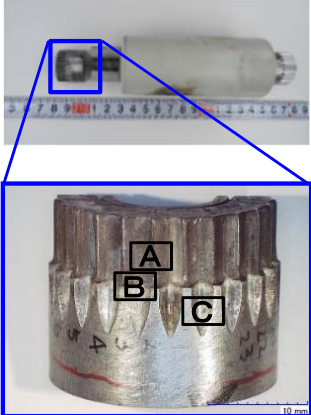
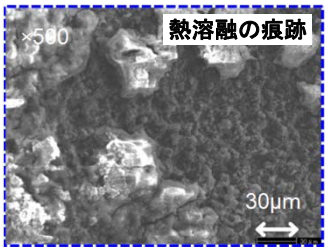
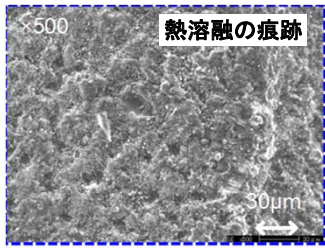
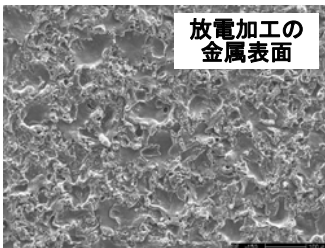


7. 当該断路器の調査結果（3／6）

【絶縁操作軸の埋金と可動接触子の嵌合部損耗に係る詳細調査（まとめ）】

- ・異物発生の可能性を確認した「V相－W相間絶縁操作軸の上部埋金とV相可動接触子の嵌合部損耗」の要因となる「機械的な摩耗」「熱による溶損」の2つの因子について、更なる要因分析を実施した。
- ・「機械的な摩耗」および「熱による溶損」の要因となる「嵌合部周辺からの熱影響」については、外観確認および製造履歴確認等から、異常がないことを確認した。一方、表7のとおり、「ギャップ放電の発熱」が要因となって、V相－W相間絶縁操作軸の上部埋金とV相可動接触子の嵌合部損耗（溶損）が発生した可能性があることを確認した。

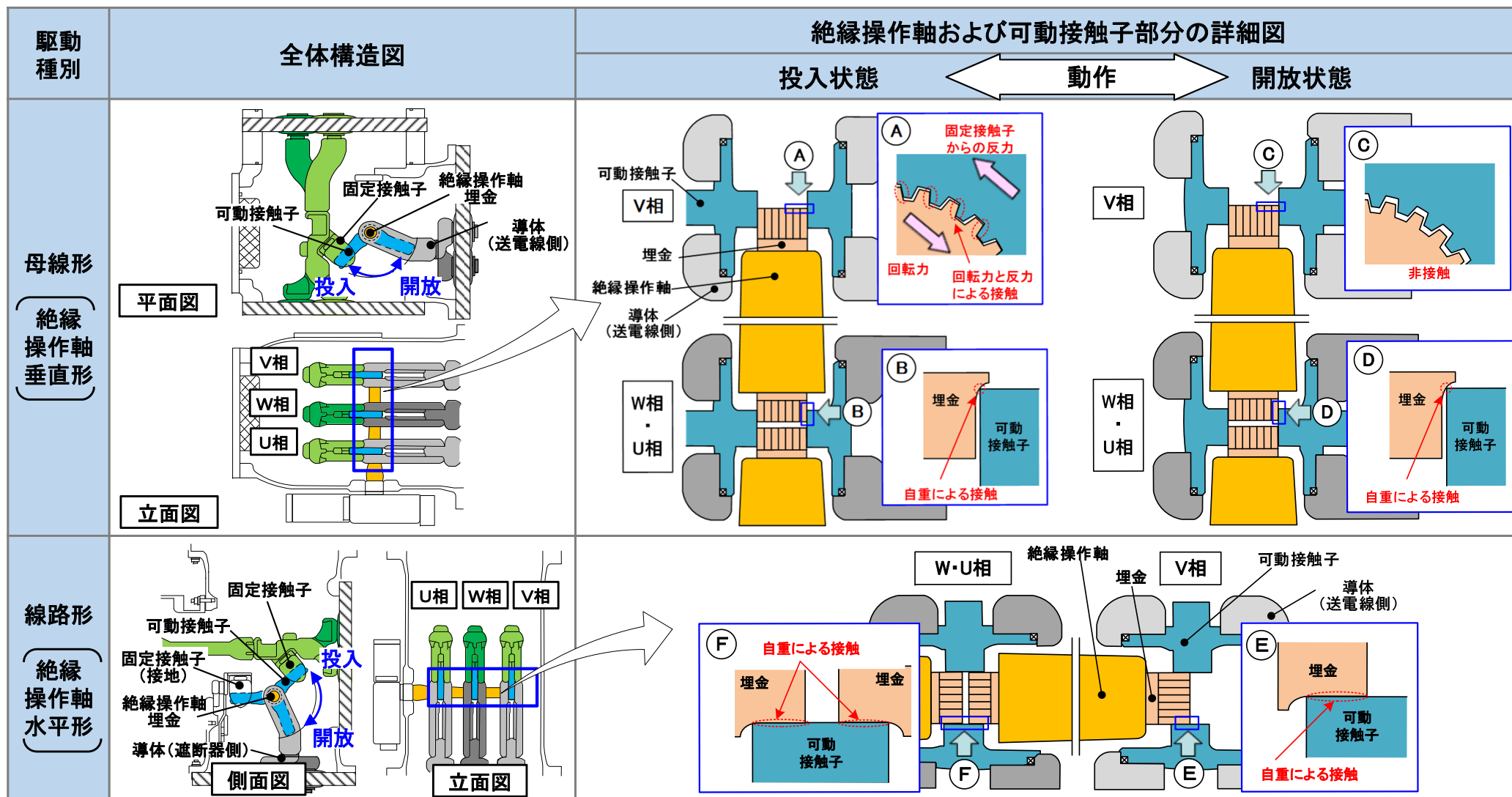
表7 V相－W相間絶縁操作軸の上部埋金の表面観察

V相－W相間絶縁操作軸の上部埋金		観察結果		
観察箇所	電子顕微鏡(SEM)画像			
上部埋金切断箇所 表面観察点 	A (損耗部)		C (健全部)	<ul style="list-style-type: none"> ・V相－W相間絶縁操作軸の上部埋金は、機械的に損傷しない谷間（全24箇所）を含め均一に損耗しており、山径、谷径ともに健全部より小さくなっていることを確認した。 ・電子顕微鏡（SEM）にて上部埋金の損耗部の金属表面を確認した結果、熱影響により表面が溶融していることを確認した。 ・V相可動接触子の表面観察結果においても、同様に熱溶融による痕跡を確認したため、嵌合部における「ギャップ放電の発熱」より損耗（溶損）が発生した可能性があることを確認した。
	B (境界部)		参考 	

7. 当該断路器の調査結果 (4 / 6)

【絶縁操作軸の埋金と可動接触子の嵌合部損耗に係る詳細調査「ギャップ放電の発熱①」】

- ・ 嵌合部の非接触状態継続有無の確認を実施し、開放状態において、絶縁操作軸の上部埋金と可動接触子の非接触状態が継続する可能性を確認した (下図 © 部)。



7. 当該断路器の調査結果 (5 / 6)

【絶縁操作軸の埋金と可動接触子の嵌合部損耗に係る詳細調査「ギャップ放電の発熱②」】

- ・ 絶縁操作軸と可動接触子間が非接触状態となり、隙間で放電現象が発生する可能性について、当該断路器と同型式の断路器を用いた実動作試験によって検証した。
- ・ 検証の結果、可動接触子の摩擦力が小さい場合に瞬時的な非接触状態が多数回発生し、開放動作終了後において非接触状態が継続する可能性があることを確認した。
- ・ 操作装置による通常開放操作では継続的な非接触状態を確認できなかったが、手動での微調整によって、継続的な非接触状態が再現することを確認した。

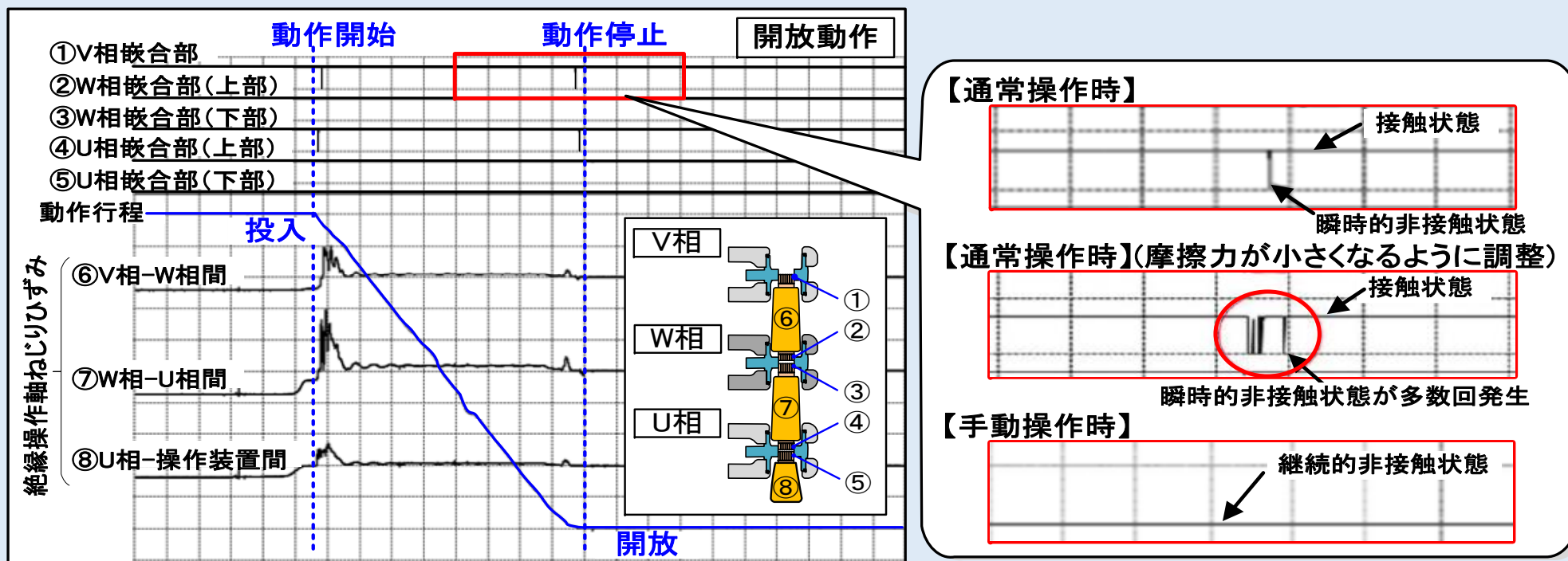


図 1 1 嵌合部の非接触状態の継続確認結果

7. 当該断路器の調査結果 (6 / 6)

【絶縁操作軸の埋金と可動接触子の嵌合部損耗に係る詳細調査「ギャップ放電の発熱③」】

- ・ 当該断路器と同型式の供試体の絶縁操作軸の上部埋金と可動接触子を手動により非接触状態とし、主回路に187kVを印加した結果、部分放電が発生することを確認した。
- ・ 課電した状態で部分放電が継続することを確認し、放電後の嵌合部状態を観察した結果、一部白色化（フッ素化合物の付着）していることを確認した。
- ・ 可動接触子と絶縁操作軸の埋金の嵌合部に放電が継続した場合に、本事象と同等の損耗にかかる時間を算出した結果、200日程度であることを確認した。

部分放電に対する状態監視方法

- ・ 通常状態の断路器表面において部分放電診断することで状態監視可能
- ・ 断路器開放点検時にフッ素化合物の有無を目視確認することで状態監視可能

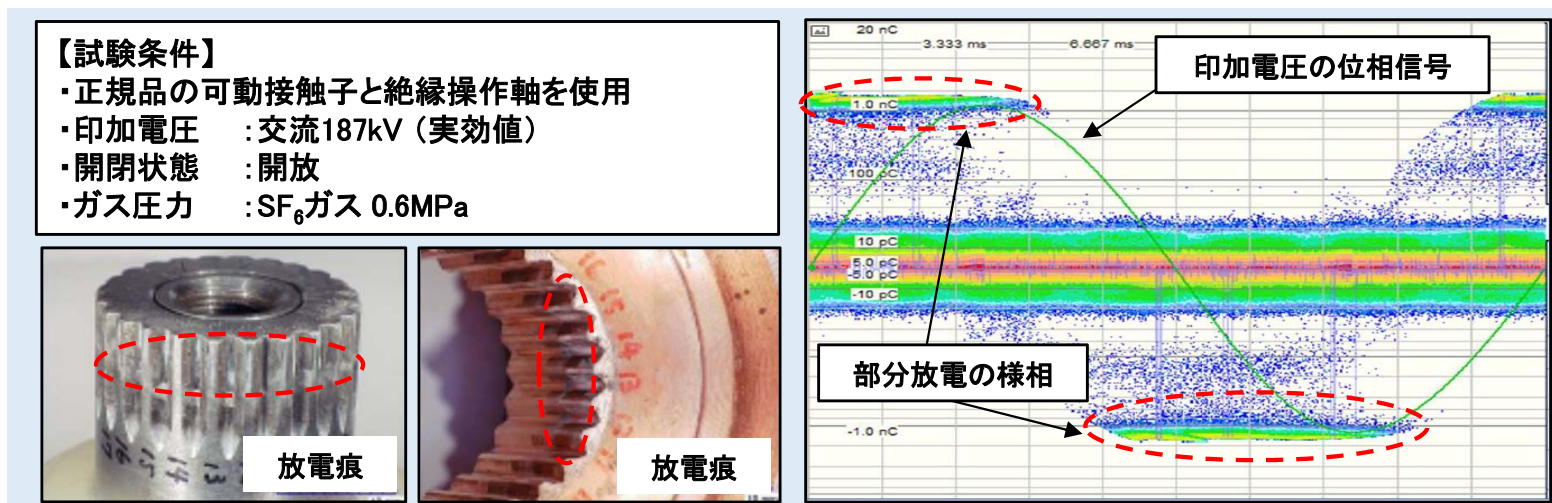


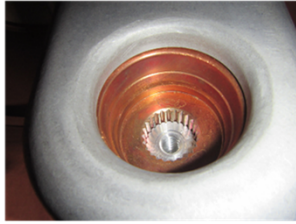
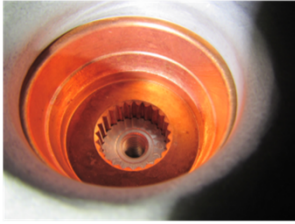

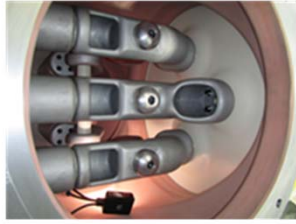


図 1 2 嵌合部の放電有無検証試験結果

8. 他の断路器の内部確認結果

○系統状態を変えずに点検可能な断路器3台について、現地にて開放点検を実施し、内部確認した結果、以下のとおり異常はなかった。

- ・ V相可動接触子上部の嵌合部に放電痕跡、損耗はなかった。
- ・ V相-W相間絶縁操作軸の上部埋金とV相可動接触子とは接触状態（テスターによる導通確認）であることを確認した。
- ・ 導体表面やユニット底部等にフッ素化合物やその他異物の存在はなかった。

表 8 断路器内部確認結果

	①主変圧器1号 乙母線断路器	②起動変圧器1号 乙母線断路器	③伊方南幹線1号線 線路側断路器
V相可動接触子の嵌合部			
断路器ユニット内部			

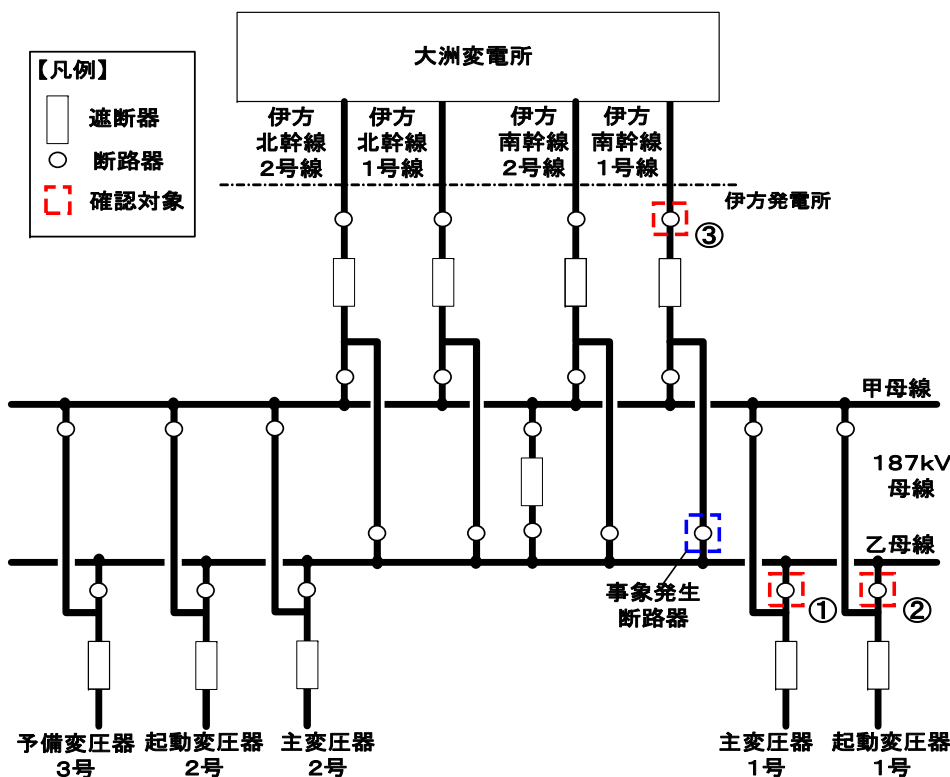


図 1 3 断路器内部確認対象断路器

9. 試験用系統構成、手順等の評価（1 / 3）

○今回の試験系統構成、手順等の評価結果

今回の方向試験の計画にあたっては、関係部門において必要な系統構成の立案を行うとともに、原子力安全に係るリスクを最小化するために実施時期の選定、天候条件の考慮など、想定されるリスクの特定、分析評価を行い、試験中止条件の設定、万が一のトラブルを想定した外部電源、非常用電源の電源確保対策など、リスクを緩和するための必要な措置を講じていた。

更なるリスク低減に係る検討結果

○3号機所内負荷の切替時期および試験用負荷の使用に係る更なるリスク検討

- ・ 3号機所内負荷の切替時期は、187kV片母線接続前後のいずれにおいても、機器故障発生確率の観点では定性的に有意な差はなく、故障発生時の影響度の観点でも、故障の発生箇所によっては、それぞれ一長一短あり、一概にどちらが有用とは言えない。
- ・ 試験用負荷について、仮設備（模擬負荷）の使用を検討した結果、ケーブル敷設・接続作業等に伴う電気事故・作業安全上のリスクを伴うものの、TBM（作業前ミーティング）－KY（危険予知）の充実等によるリスク低減を図ることにより、有効な手段のひとつである。
- ・ 今回の187kVブスタイ保護リレーの方向試験において、例えば仮設備（模擬負荷）を使用する等により、3号機所内負荷を試験系統構成から切り離すことで、1～3号機所内電源が同時に停電することはなかった。
- ・ 1～3号機所内電源の同時停電を回避する手段の検討など、過去の実績にとらわれることなく、試験の都度、原子力安全に係るリスクについて、より幅広い観点から特定、分析評価することが重要である。

9. 試験用系統構成、手順等の評価（2 / 3）

表9 3号機所内負荷切替時期による試験系統の影響評価※

評価項目		系統状態	3号機所内負荷切替時期	
			187kV4回線片母線へ接続前に切替え (今回のケース)	187kV4回線片母線へ接続後に切替え
故障確率	187kV片母線受電時間による故障確率		○ 試験時のみ	△ 試験時に加え3号機所内負荷を 187kV側へ切替える時間を含む
	方向試験時の機器故障率		○ 方向試験に要する時間は同じ	○ 方向試験に要する時間は同じ
	一連の操作を踏まえた機器故障発生確率		○ 最小限の操作回数	○ 最小限の操作回数
故障発生時の影響度	保護対策	事故範囲の局所化	○ 保護リレーによる適切な保護対策	○ 保護リレーによる適切な保護対策
		バックアップ電源	○ 外部電源、非常用電源	○ 外部電源、非常用電源
	187kV乙母線事故 (送電線はすべて乙母線接続)	1、2号機	× 187kV母線停止	× 187kV母線停止
		3号機	× 187kV母線停止	○ 500kV送電線より受電継続
	187kV送電線2回線事故 (送電線はすべて乙母線接続)	1、2号機	○ 187kV送電線残りの2回線維持	○ 187kV送電線残りの2回線維持
		3号機	○ 187kV送電線残りの2回線維持	○ 500kV送電線より受電継続
	500kV母線事故 または 送電線2回線事故	1、2号機	○ 187kV送電線より受電継続	○ 187kV送電線より受電継続
		3号機	○ 187kV送電線より受電継続	× 500kV母線または送電線2回線停止

※系統内の送電線、母線、断路器等の機器故障率は、一定との前提で評価を実施
 故障発生時の影響度は、所内負荷停電（＝使用済燃料冷却設備の停止）の有無で評価

9. 試験用系統構成、手順等の評価（3 / 3）

○リスク低減への対応

- ・ 本事象において、1～3号機所内電源が数秒間同時停電したことを踏まえ、今回の187kVブスタイ保護リレーの試験再開にあたっては、模擬負荷を使用し、3号機の所内負荷を接続しない試験系統構成にて実施する。
- ・ また、保護リレーの方向試験を実施する場合、最適な系統構成、負荷の状況は、各プラント状態に大きく依存することから、過去の方向試験の状況と必ずしも同じとは限らない。
- ・ 従って、過去の実績にとらわれることなく、試験の都度、原子力安全に係るリスクについて、より幅広い観点から、特定、分析評価することが重要である。
- ・ 今後実施する保護リレーの方向試験においては、試験の都度、今回の再分析・評価を踏まえたより幅広い観点から検討を実施する。また、必要に応じ、確率論的リスク評価等のリスク情報を活用するとともに、関係する主任技術者も含めた意思決定を行う。
- ・ なお、現在当社では、発電所のマネジメントに対し、今回の事例のようにリスク情報を活用した意思決定を導入するための活動を推進している。

10. 推定原因

○調査結果から本事象に至った相間短絡を発生させる要因分析を実施した結果、以下のメカニズムにより本事象に至ったものと推定した。

	①非接触状態の継続／嵌合部の隙間拡大	②金属くずの発生	③金属くずの付着	④相間短絡	
推定メカニズム	<ul style="list-style-type: none"> ・断路器の開放位置において、絶縁操作軸の埋金と可動接触子の嵌合部が非接触となる状態が継続 	<ul style="list-style-type: none"> ・数カ月間以上、絶縁操作軸の埋金と可動接触子の嵌合部の非接触状態が継続し、放電溶融により損耗し、嵌合部隙間が拡大 	<ul style="list-style-type: none"> ・嵌合厚さが薄くなったことから動作時の嵌合部の擦れによって金属くずが発生 	<ul style="list-style-type: none"> ・発生した金属くずが絶縁操作軸または導體表面に付着 	<ul style="list-style-type: none"> ・高電界部に付着した金属くずを起点にV相-W相間で短絡が発生
概要図					
観察事実	<ul style="list-style-type: none"> ・絶縁操作軸の埋金と可動接触子の嵌合部が損耗 ・電子顕微鏡観察によって、金属溶融の様相を確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・損耗した嵌合部の山頂部に擦過痕を確認 ・ユニット内から絶縁操作軸埋金および可動接触子に使用されている金属の箔状の異物を採取 	<ul style="list-style-type: none"> ・絶縁操作軸の表面汚損分析の結果、絶縁操作軸の埋金および可動接触子に使用されている金属成分が他の絶縁操作軸に比べて多いことを確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・絶縁操作軸表面の炭化痕跡を確認 	

11. 対策

○推定原因を踏まえて、伊方南幹線1号線乙母線断路器の相間短絡事象に対する伊方発電所における再発防止対策および他の断路器に対する対策を以下のとおり実施する。

- ・当該断路器の絶縁操作軸、可動接触子等の損傷（溶損）した部品については、新品に取り替えた。なお、187kVガス絶縁開閉装置のすべての断路器については、ギャップ放電の発熱による溶融が進展していないことを、内部ガス分析、部分放電診断および内部異物診断により確認した。さらに、構造が異なる3号機のガス絶縁開閉装置（500kV、187kV）の断路器についても、部分放電診断および内部異物診断を行い、異常がないことを確認した。
- ・本事象を踏まえて、同一構造および使用状態が同じ断路器13台（うち1台は確認済）について計画的に断路器ユニットの内部開放点検を行い異常がないことを確認する。
- ・当該断路器ならびに同一構造および使用状態が同じ断路器（計14台）について、今後も引き続き部分放電診断、内部異物診断を定期的 to 実施し状態監視を強化する。断路器については、恒常的な対策について検討していく。

○「9. 試験用系統構成、手順等の評価」を踏まえて、1～3号機の所内負荷が数秒間同時に停電したことから、今回の187kVブスタイ保護リレーの試験再開にあたっては、3号機の所内負荷を接続しない試験系統構成（模擬負荷使用）にて実施する。

○今後実施する保護リレーの方向試験においては、リスク低減に係る取り組みを実施する。

12. 具体的な対策内容（1 / 2）

○対策対象範囲

187kVガス絶縁開閉装置のうち、断路器（接地開閉器等を含む）について、当該断路器と同一構造等であるものを対策対象範囲とする。

○現状確認

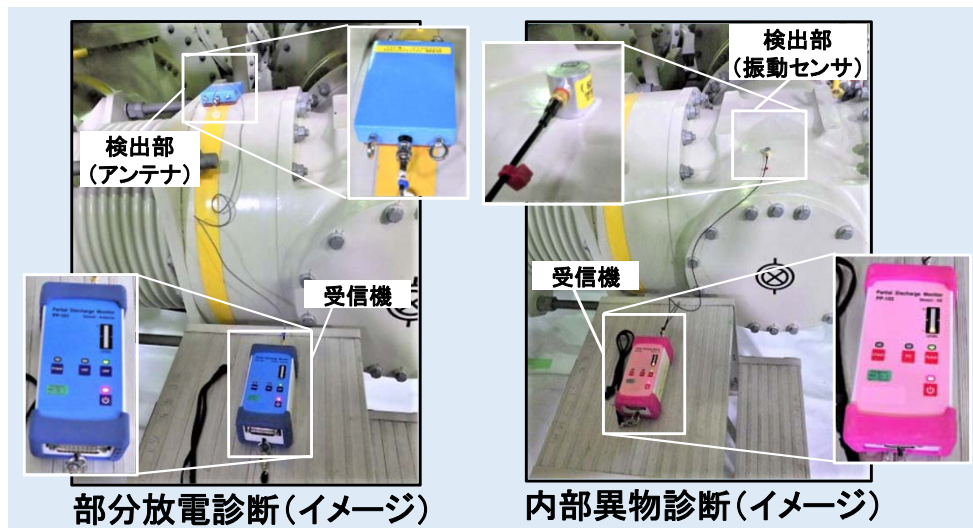
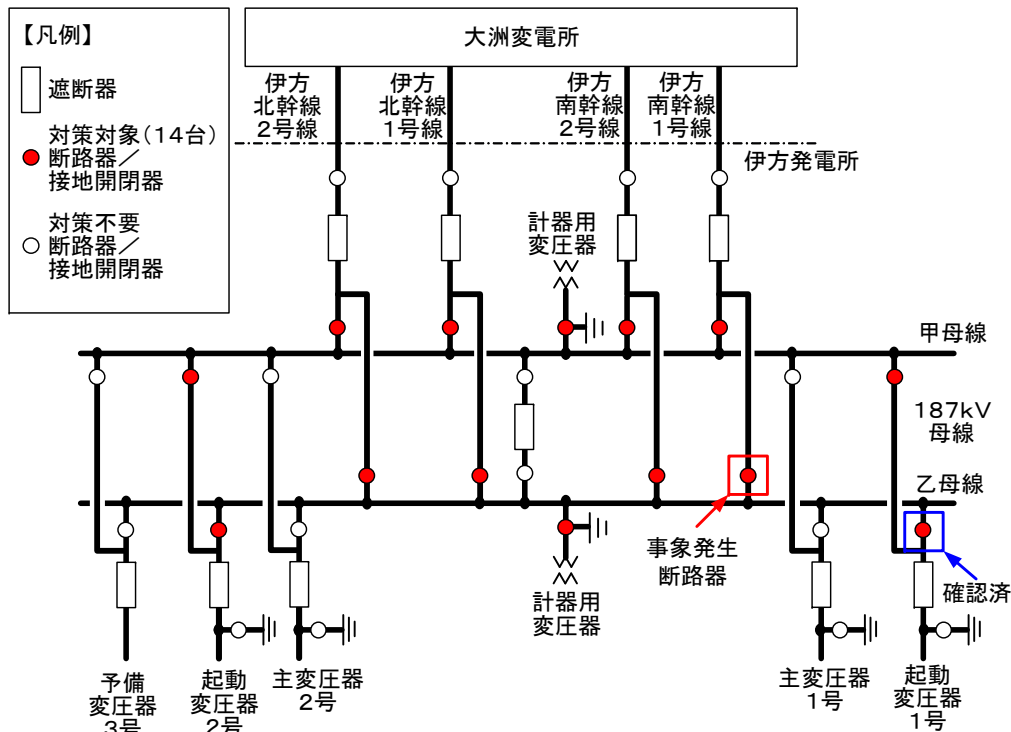
現状に異常がないことを確認するため、内部確認対象の断路器（13台）について、計画的に断路器の内部開放点検を行い、嵌合部の外観およびフッ素化合物の有無を確認する。

○状態監視強化

放電の発生有無を監視するため、当該断路器および対策対象断路器（計14台）について、部分放電診断および内部異物診断※による内部診断を行い、監視強化を行う。

- ・ 内部開放点検終了まで：1回／週
- ・ 内部開放点検終了後：点検結果により策定

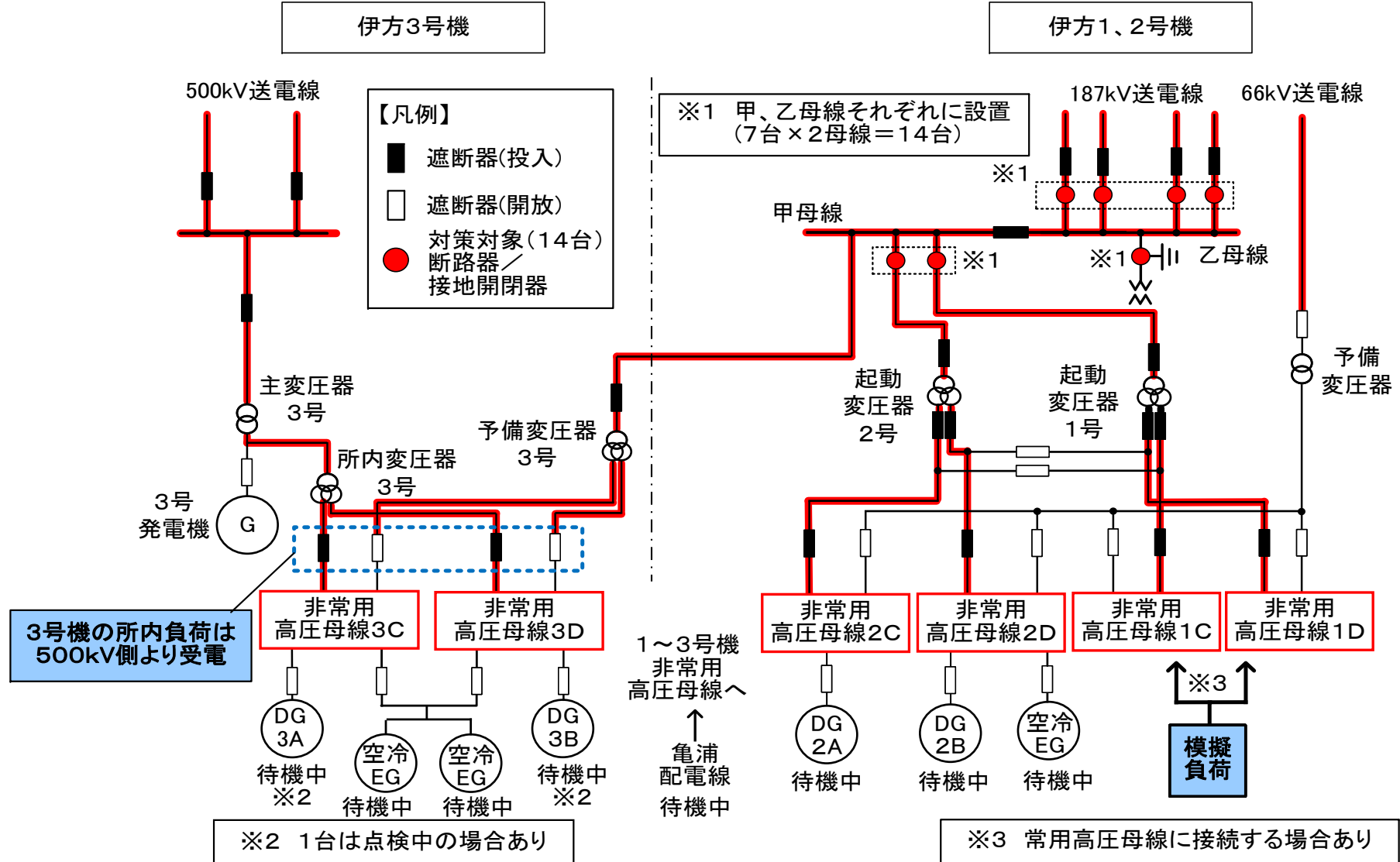
※ 部分放電診断：嵌合部のギャップ放電の有無を確認
 内部異物診断：嵌合部の損傷に伴い発生する金属異物の有無を確認



12. 具体的な対策内容 (2 / 2)

○ 187kVブスタイ保護リレー試験

今回の187kVブスタイ保護リレーの試験再開にあたっては、模擬負荷を使用し、3号機の所内負荷を接続しない試験系統構成にて実施する。



13. 対象断路器の内部確認状況（1 / 3）

○実施状況

5月20日時点、対策対象である断路器（当該断路器を除く）13台のうち11台の内部確認が終了した。

その結果、伊方南幹線2号線乙母線断路器（下図中⑱）※1のV相嵌合部および可動接触子等に微量の粉を確認した（図14）ため、詳細確認を実施した。

また、伊方北幹線1号線乙母線断路器（下図中⑯）のU相導体表面等に微量の粉を確認したため、同様に詳細確認を実施中である。

その他の断路器9台については異常は無かった。

※1

伊方南幹線2号線停止前に実施した内部診断（3月30日実施）において、本断路器（下図中⑱）は部分放電信号を検知していた。

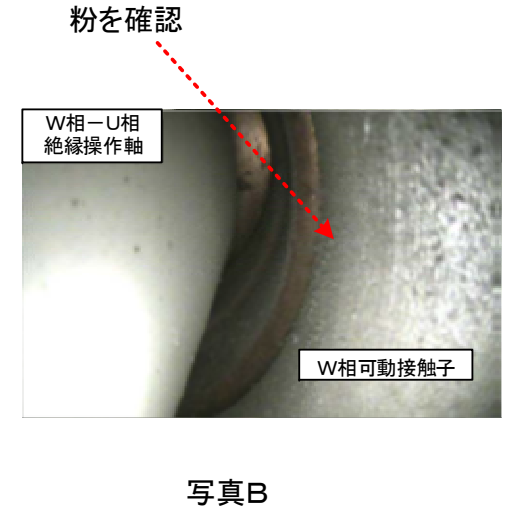
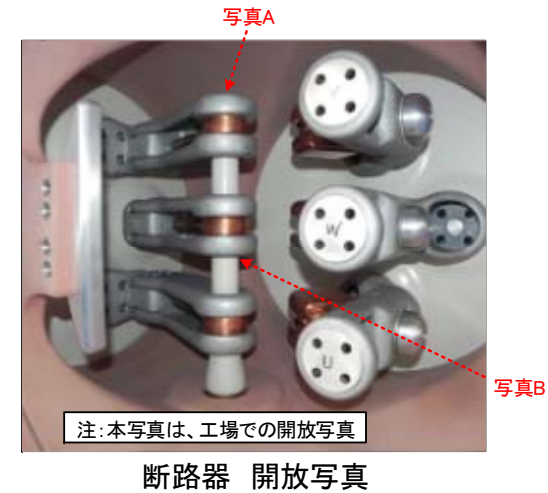
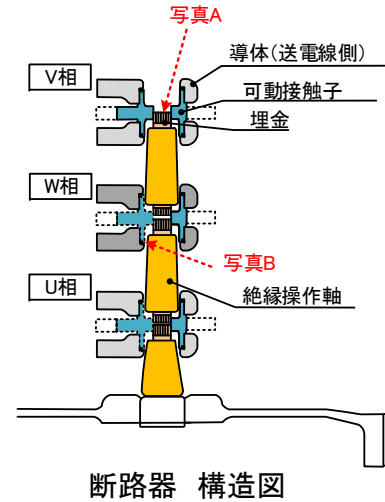
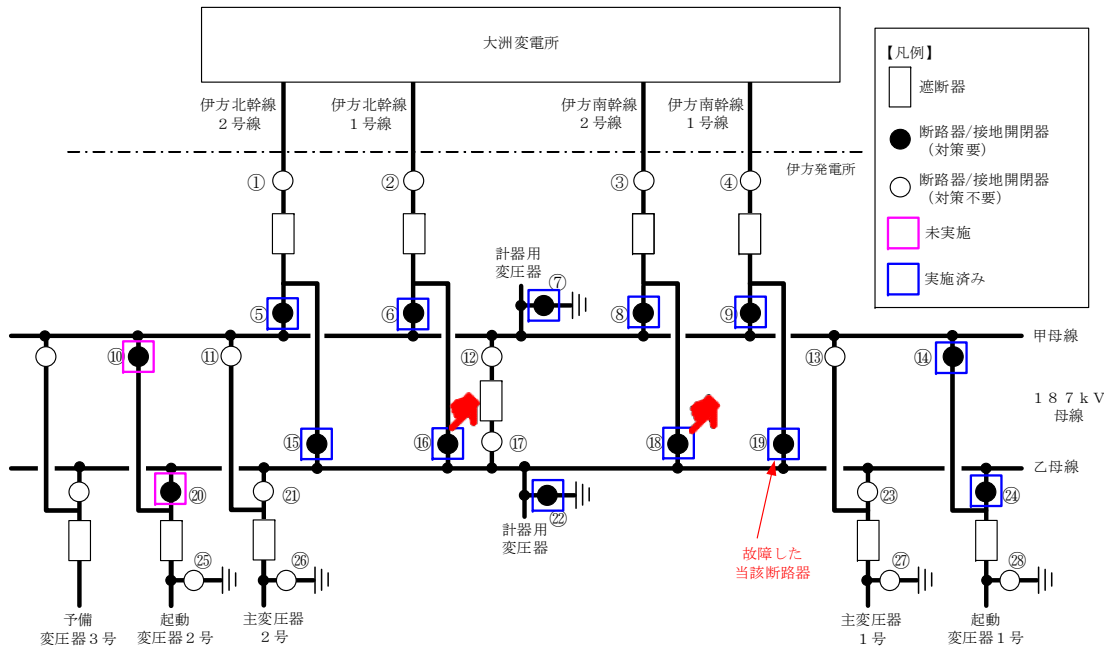
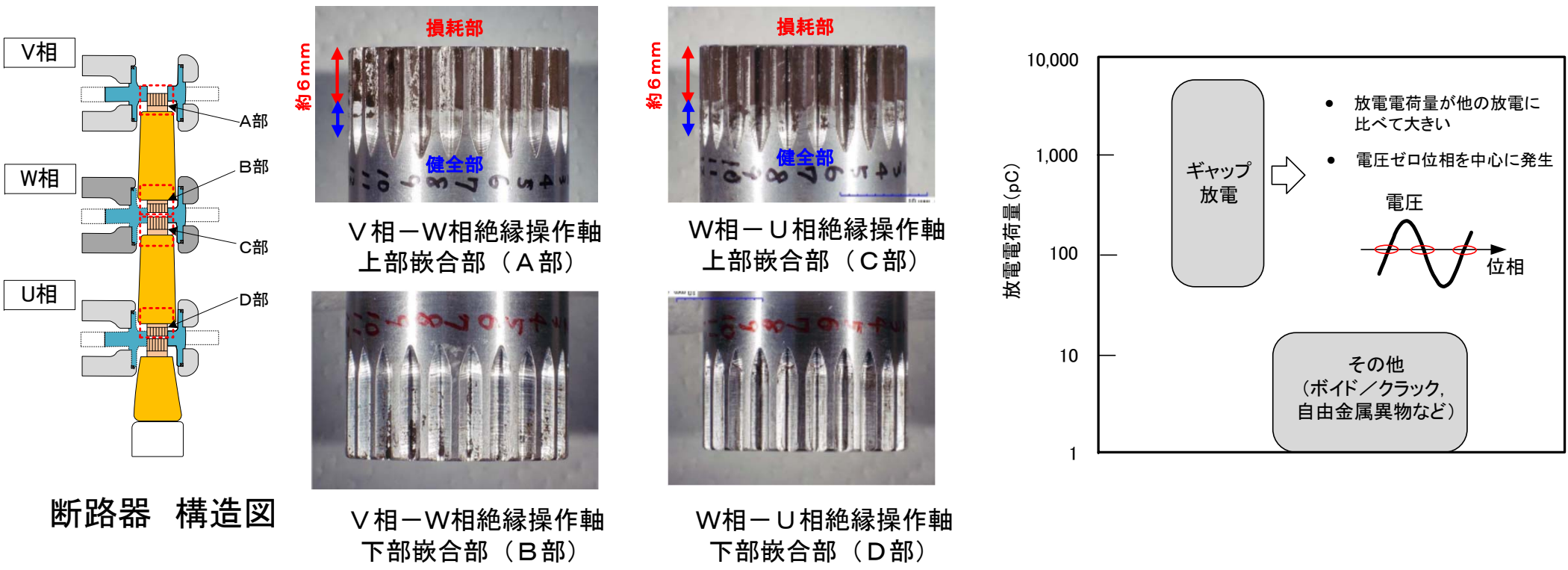


図14 伊方南幹線2号線乙母線断路器 内部確認結果

13. 対象断路器の内部確認状況（2 / 3）

○伊方南幹線 2 号線乙母線断路器の詳細確認結果等

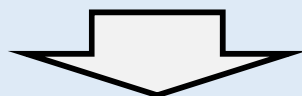
- ・工場にて伊方南幹線 2 号線乙母線断路器を分解した結果、V相-W相絶縁操作軸およびW相-U相絶縁操作軸の上部嵌合部に粉（成分分析結果：放電に伴い発生するフッ素化合物）を確認した。寸法測定の結果全て公差内であったが健全部と比べ微量の損耗（山部：約0.02mm）を確認した。
- ・また、伊方南幹線 2 号線停止前に検知された部分放電信号を分析した結果、ギャップ放電に伴う放電の様相（放電電荷量が多く、電圧ゼロ位相付近で放電）を示すものであることを確認した。
- ・以上より、故障した当該断路器と同様に嵌合部で非接触状態が継続したことによって放電が発生していたことを確認した。また、損耗量より数日程度の放電による損耗であると推定した。
- ・伊方南幹線 2 号線乙母線断路器については、損耗が見られた絶縁操作軸等の部品交換を行った。



13. 対象断路器の内部確認状況（3 / 3）

○内部確認状況等（まとめ）

- ・ 現地の内部確認により、伊方南幹線 2 号線乙母線断路器の嵌合部等で微量の粉を確認するとともに、成分分析により、ギャップ放電に伴い発生するフッ化物であることを確認した。嵌合部の損耗は微量であり、寸法も公差内であった。
- ・ 伊方南幹線 2 号線乙母線断路器については、内部開放点検前の部分放電診断にて信号を検知するとともに、検知した信号の分析によりギャップ放電による信号であることを確認した。



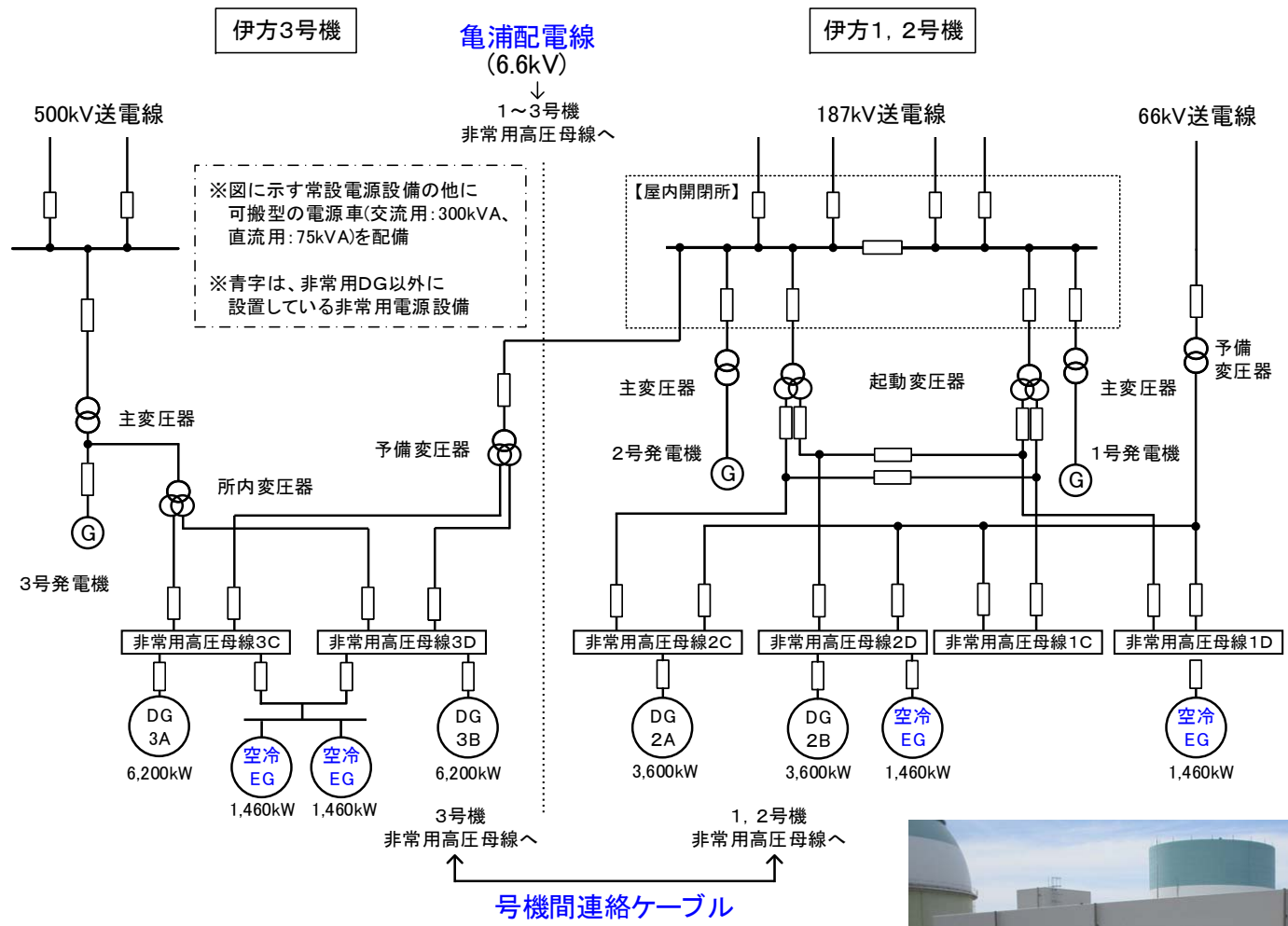
- ・ 伊方北幹線 1 号線乙母線断路器においても、導体表面等で微量の粉を確認したため、断路器を分解し詳細確認を実施するとともに、部品交換を行う。
- ・ 内部確認未実施の残り 2 台の断路器について、現地内部確認を迅速かつ確実に進めていく。

○更なる監視強化

- ・ 1 週間に 1 回の断続的な内部診断に加え、更なる監視強化として、ギャップ放電の発生有無をトレースできるよう、部分放電診断については常時計測・常時記録に計測方法を変更している。
- ・ 更に、対象断路器 1 3 台全ての内部確認終了後も、引き続き部分放電信号を常時計測することにより、ギャップ放電有無を早期に発見し、適切に対処していく。

参 考 资 料

参考 1. 伊方発電所 所内電源系統概要図



伊方発電所 所内電源系統 概要図

※概要図に非常用電源設備に加え、非常用ガスタービン発電機 (4,800kW)の設置工事を実施中



非常用ディーゼル発電機 (DG)



空冷式非常用発電装置 (空冷EG)

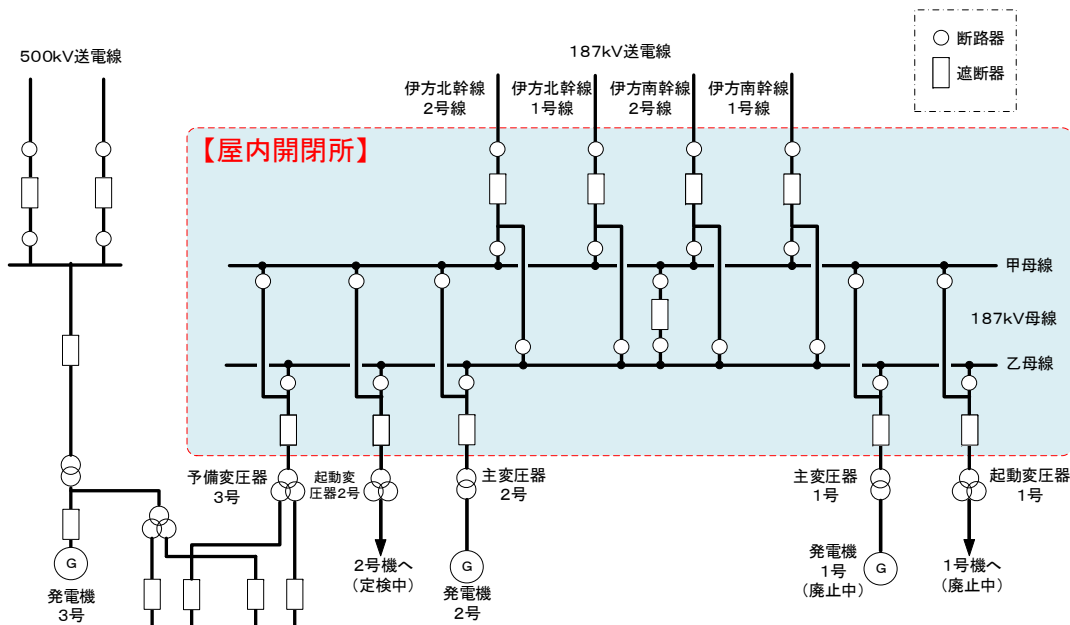


非常用ガスタービン発電機建屋

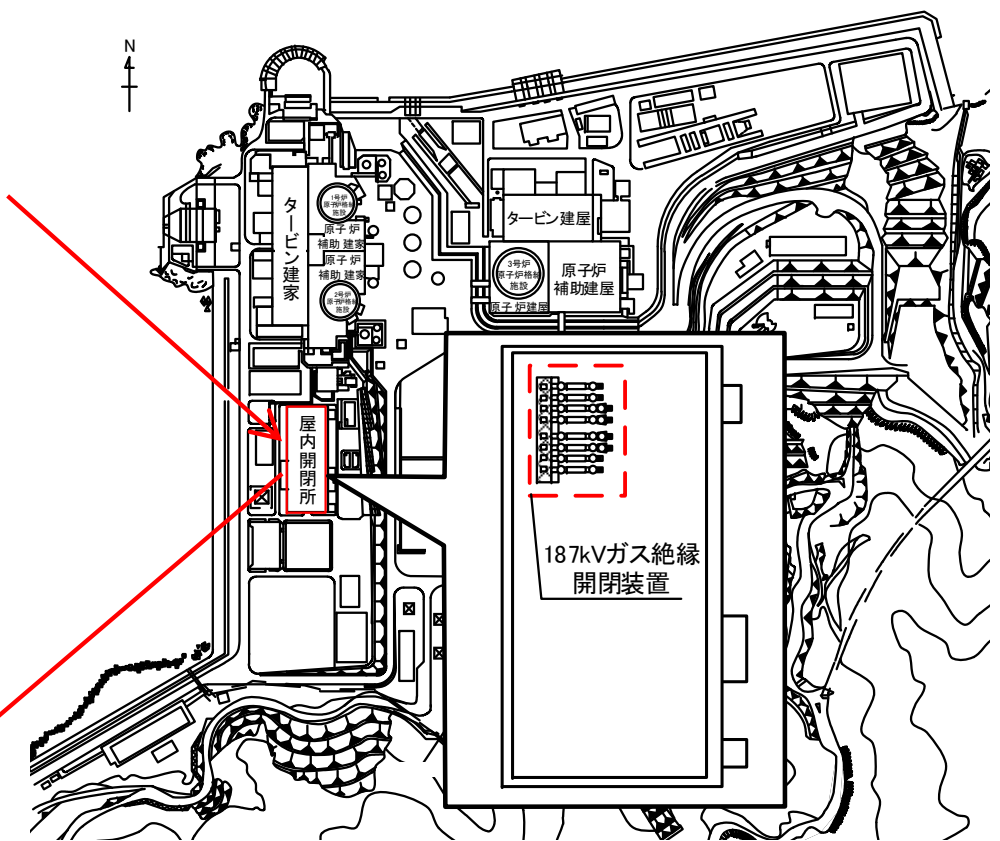


亀浦配電線

参考2. 屋内開閉所（187kV母線設置場所） 概要図



伊方発電所 所内電源系統 概要図

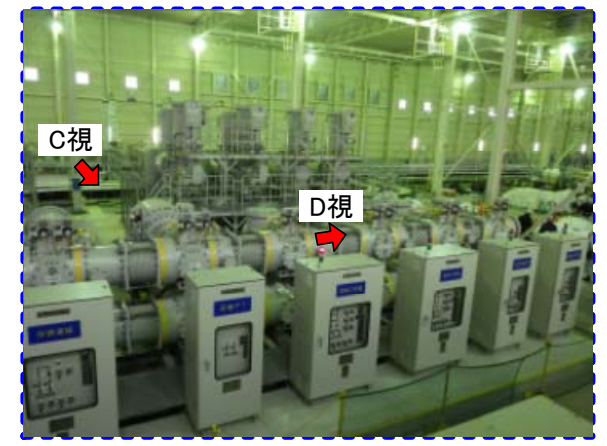
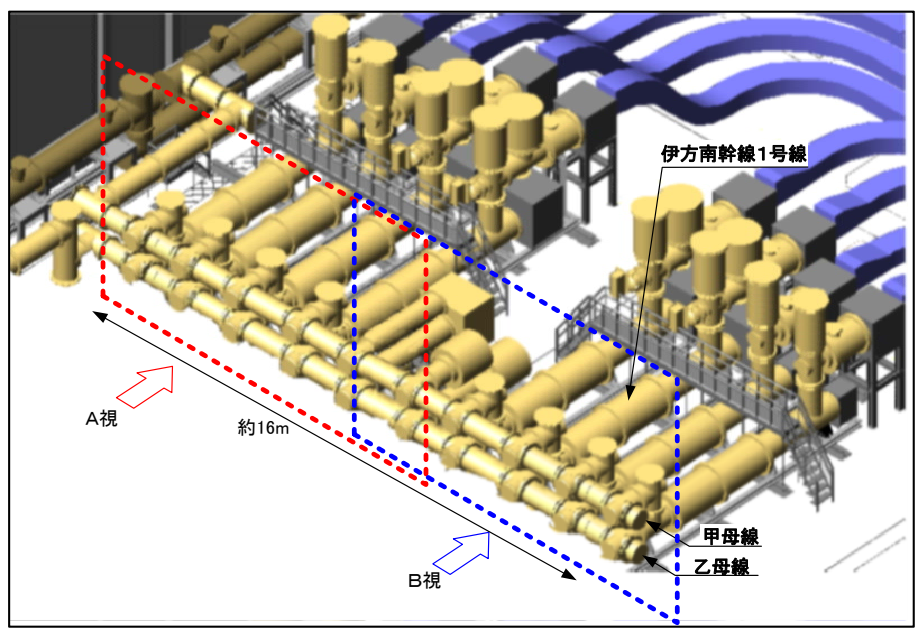


伊方発電所 平面図

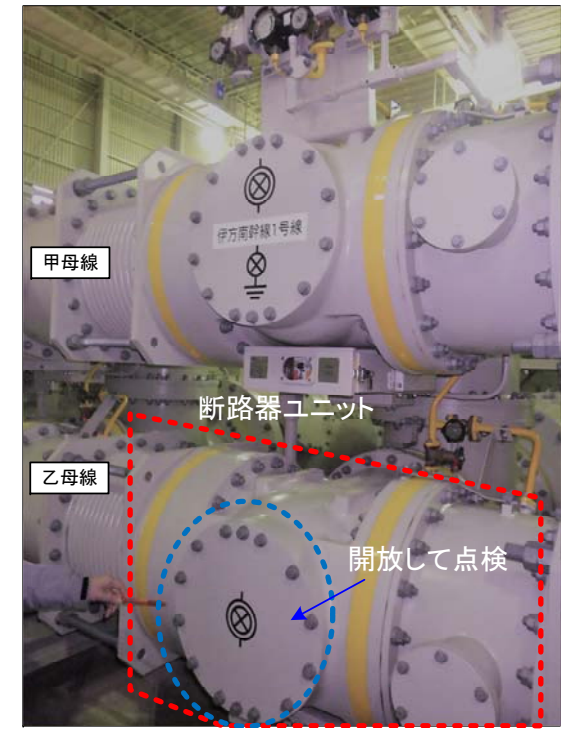
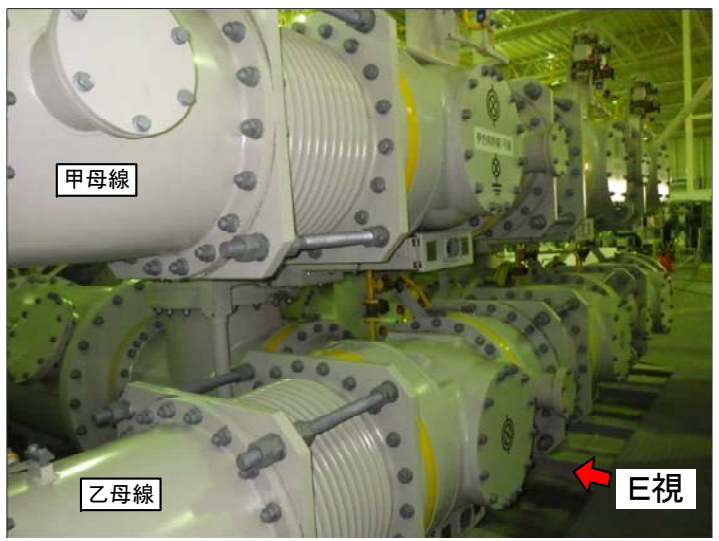


屋内開閉所の位置

参考 3. 屋内開閉所内 概要図



屋内開閉所内 ガス絶縁開閉装置 配置 (イメージ)



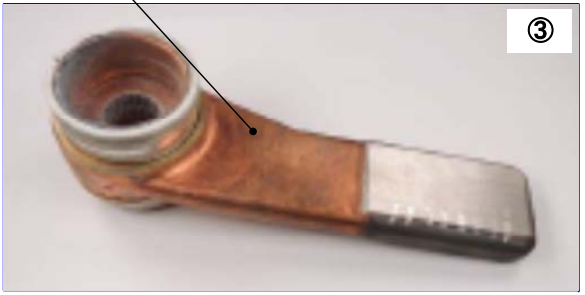
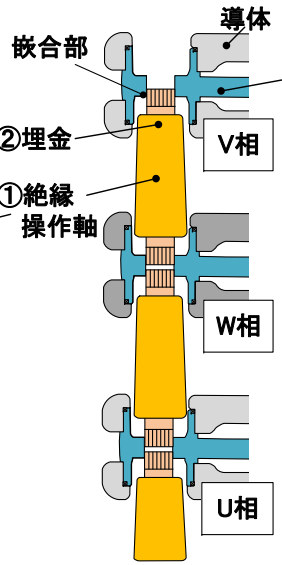
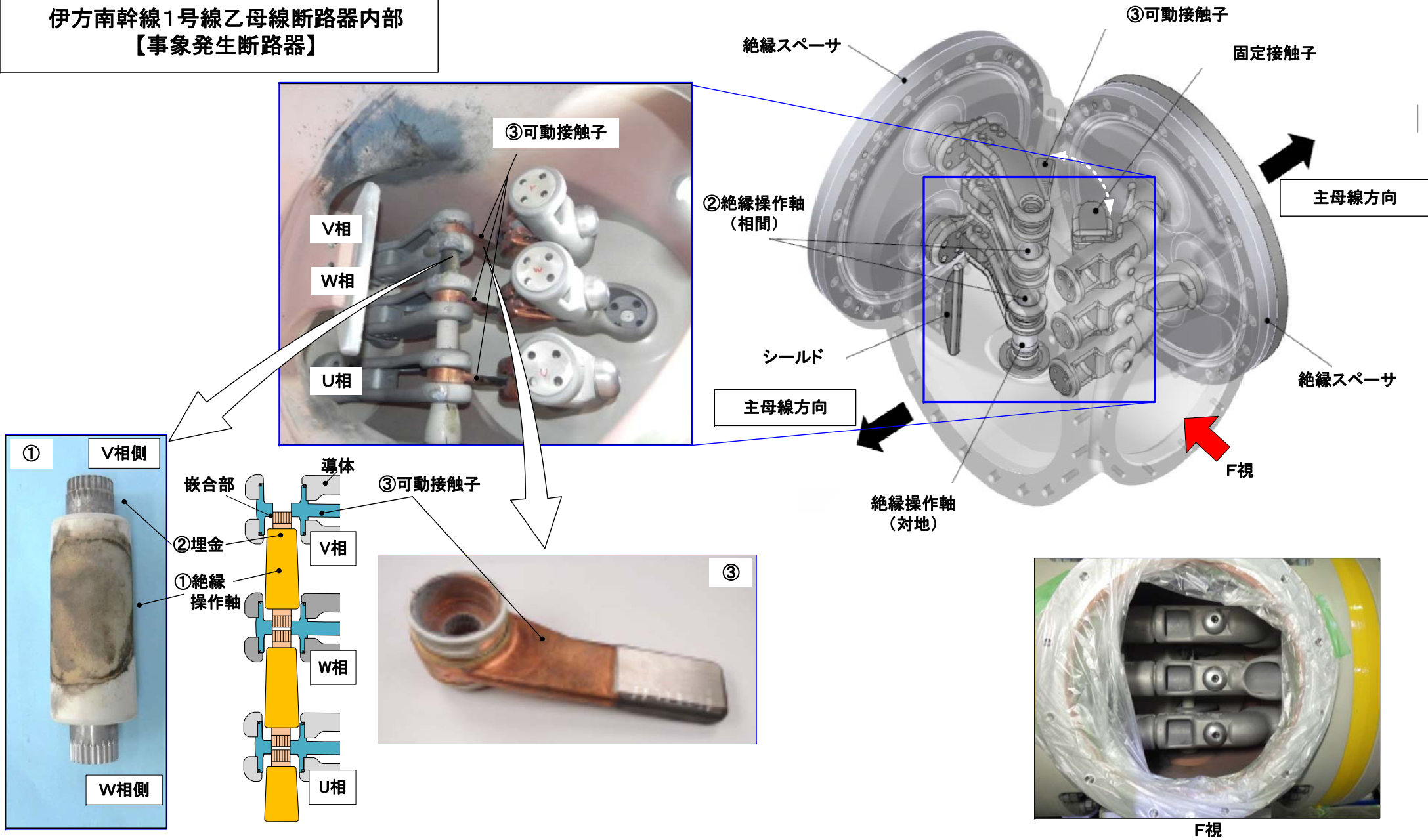
C 視

D 視

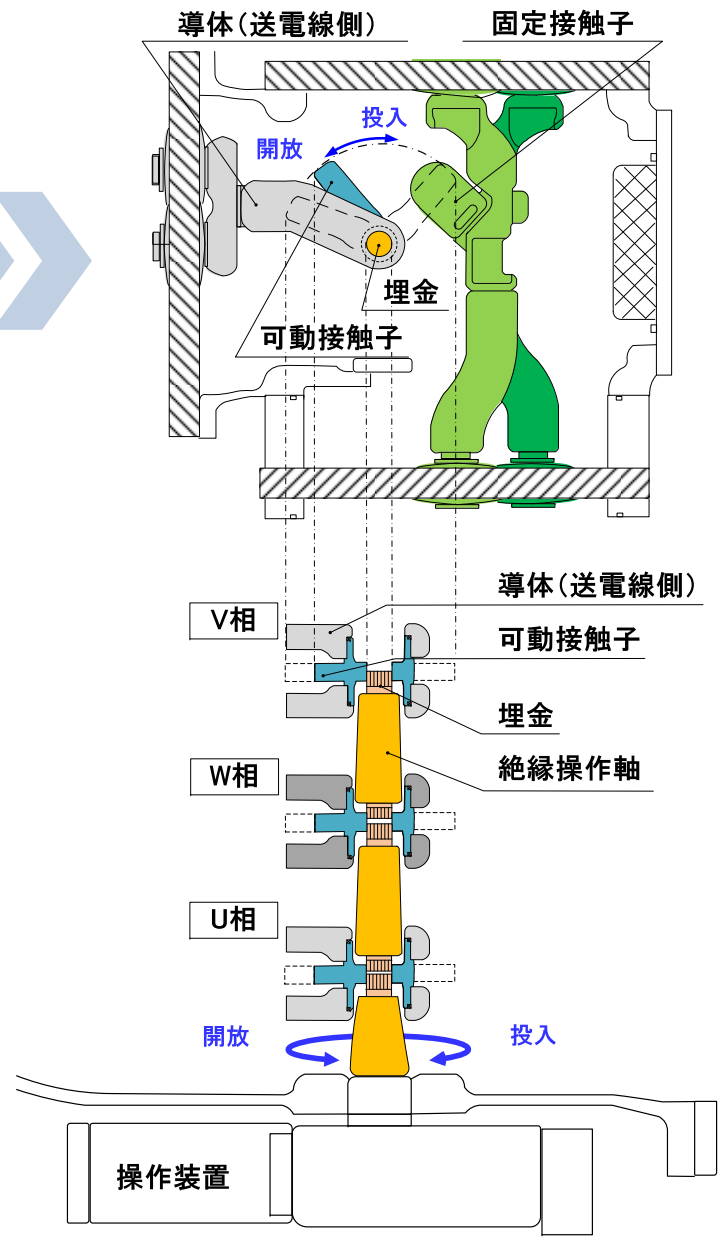
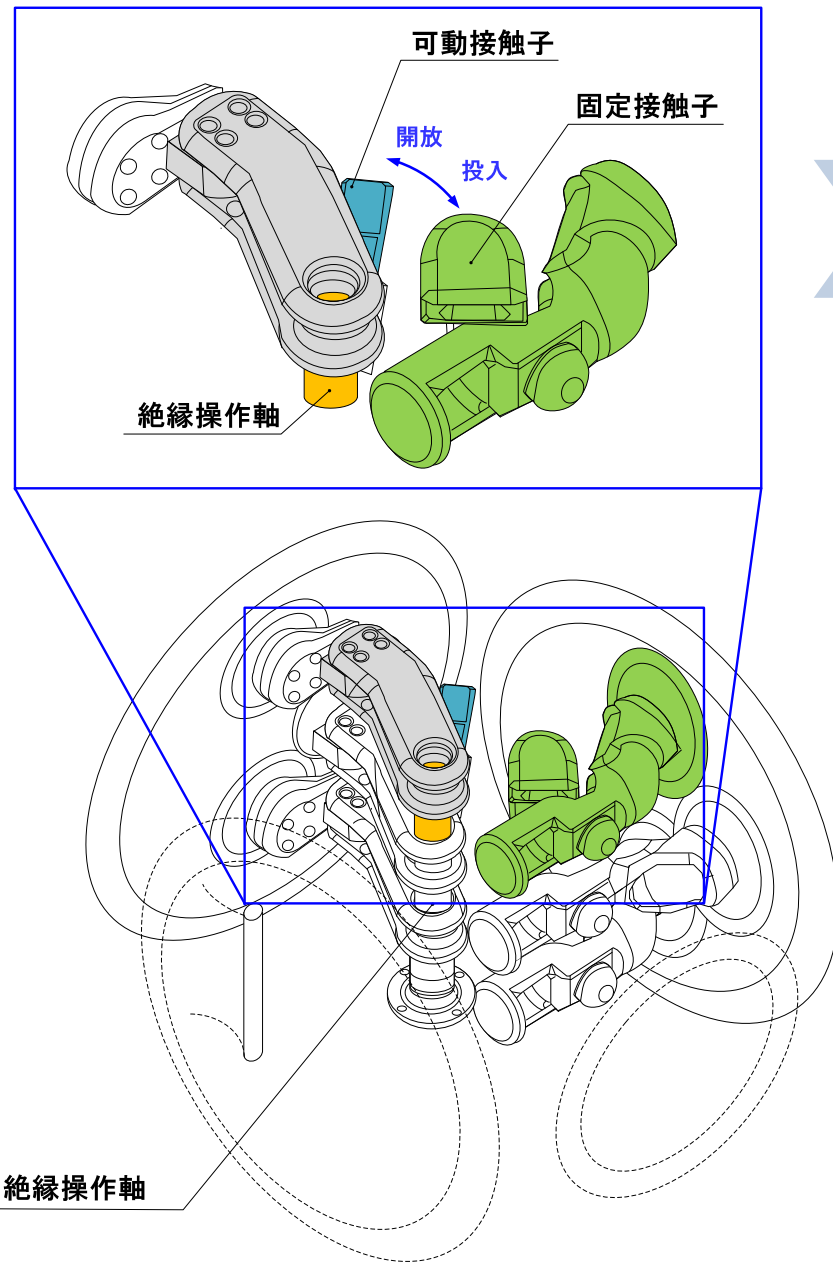
E 視

参考4. 断路器の構造概要

伊方南幹線1号線乙母線断路器内部
【事象発生断路器】



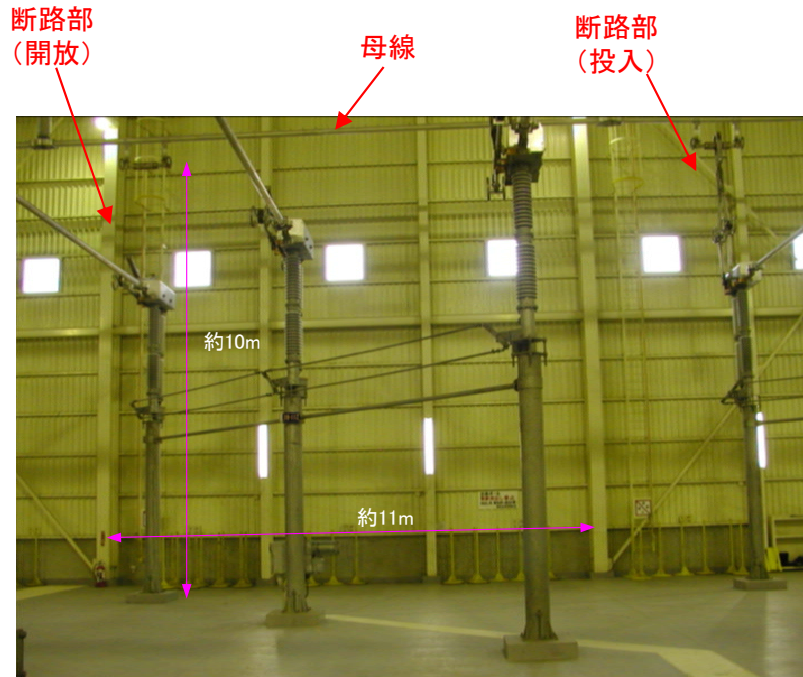
参考5. 断路器の動作概要



参考 6. 断路器の比較

気中断路器

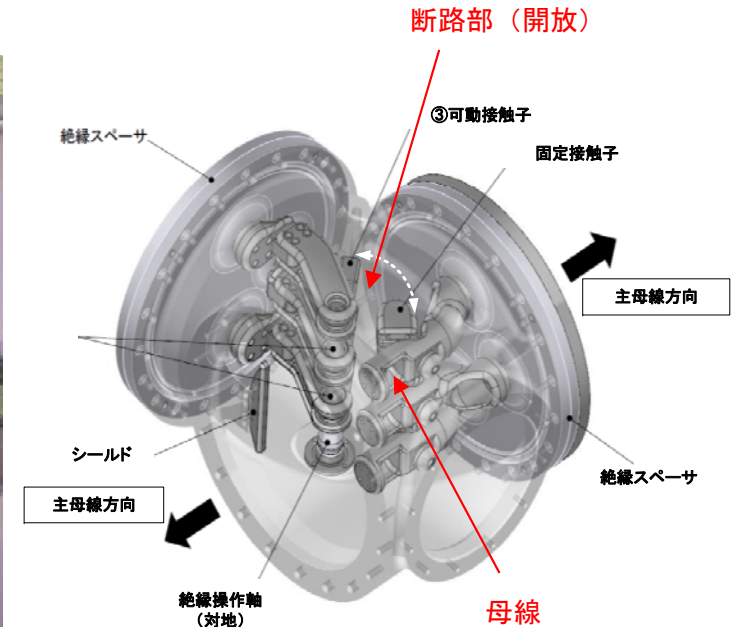
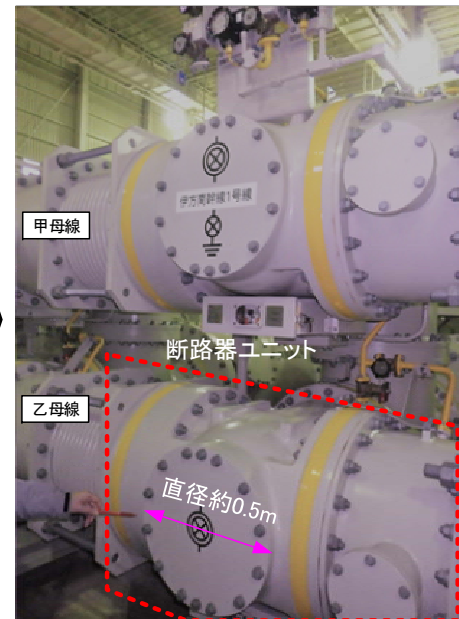
- 母線、断路部が気中にあり、環境影響を受けやすい。
- ガス絶縁開閉装置の断路器と比べサイズ、スペースとも大。
- 定期的に碍子の清掃等保守が必要。
- 充電部が露出しており、作業性も悪い。



気中断路器（パンタグラフ形）

ガス絶縁開閉装置 断路器

- 母線、断路部が六フッ化硫黄(SF₆)ガスを封入したタンク内に密閉され、外部雰囲気の影響を受けない。
- 気中断路器と比べ省スペース化。
- 内部機器については開放点検は不要。
- 充電部の露出なしで安全。



⇒ 気中断路器と比べ信頼性が高い装置

参考7. 要因分析図 (1 / 2)

現地および工場確認結果から絶縁操作軸相間短絡至った相間短絡を発生させた要因となる「電界異常」「絶縁性能異常」の2つの因子について、要因分析を実施した。

事象	要因	要因の可能性となる現象	調査項目	判定	
絶縁操作軸 相間短絡	電界異常	電界設計不良	断路器の電界設計に不備があると、電界異常となり相間短絡が発生	・電界／絶縁設計確認 ・工場試験報告書確認	×
		製造不良	構成部品に製造上の形状不良があると、電界異常となり相間短絡が発生	・寸法測定	×
		変形・損傷	断路器の構成部品に過大な外力が加わり、変形・損傷すると、電界異常となり、相間短絡が発生	・外観確認 ・寸法測定	×
		異常電圧の侵入	雷などの過大な異常電圧の侵入があると、相間短絡が発生	・雷撃履歴確認	×
	絶縁性能異常	異物の付着	異物が付着して絶縁操作軸などに付着すると電界異常、絶縁性能異常となり、相間短絡が発生	・外観確認 ・表面汚損分析 ・採取異物の分析	△
		絶縁設計不良	絶縁操作軸の絶縁設計に不備があると、絶縁が破壊され、相間短絡が発生	・電界／絶縁設計確認 ・工場試験報告書確認	×
		絶縁材料不良	絶縁操作軸に材料不良があると、絶縁性能が低下し、相間短絡が発生	・寸法測定 ・外観確認	×
		SF ₆ ガス異常	ガス圧力、純度が低下、規定値以上の水分が混入すると、絶縁性能が低下し相間短絡が発生	・ガス圧力確認 ・ガス純度測定 ・ガス中水分測定	×

参考図1 絶縁操作軸の相間短絡に対する要因分析図

参考 8. 要因分析図 (2 / 2)

絶縁操作軸相間短絡に対する要因分析において、異物の付着の可能性を確認し、その発生要因となる「機械的な摩耗」「熱による溶損」の2つの因子について、更なる要因分析を実施した。

事 象	要 因	要因の可能性となる現象	調査項目	判定	
絶縁操作軸の埋金と可動接触子嵌合部損耗	機械的な摩耗	設計強度不足	絶縁操作軸または可動接触子の嵌合部に設計的な強度不足があれば、動作時の荷重により嵌合部が損傷	・工場試験報告書確認 ・設計強度評価	×
		製造不良による強度不足	絶縁操作軸または可動接触子の加工・材料不良があれば、動作荷重に対する嵌合部の強度が不足となり損傷	・製造履歴確認 ・材料分析 ・硬度測定、寸法測定	×
		組立不良による強度不足	絶縁操作軸と可動接触子の部品間違い、取付方向間違い、取付位置不良があれば、動作時の荷重の増大、嵌合部の強度不足となり損傷	・製造履歴確認 ・外観確認	×
		操作装置(電動機)からの過大応力	電動機から通常の操作荷重を超える異常操作荷重が印加されると、嵌合部が損傷	・製造履歴確認 ・開閉操作状況確認 ・操作装置特性確認	×
	熱による溶損	嵌合部周辺からの熱影響	他の部位の発熱により、絶縁操作軸と可動接触子の嵌合部の温度が上昇し溶損	・外観確認 ・表面観察 ・製造履歴確認	×
		ギャップ放電による発熱	絶縁操作軸埋金と可動接触子の嵌合部が、非接触状態となり、その状態が継続すると絶縁操作軸の埋金と可動接触子の嵌合部で放電が発生し溶損	・外観確認、表面観察 ・非接触状態の継続確認 ・嵌合部の放電確認 ・溶融時間計算	△

参考図 2 絶縁操作軸の埋金と可動接触子嵌合部損耗に対する要因分析図

参考 9. 伊方南幹線 2 号線乙母線断路器の部分放電診断状況

○伊方南幹線 2 号線乙母線断路器の部分放電診断状況

- ・ 事象発生後の 1 月 25 日以降 3 月 25 日までの間、計 7 回の部分放電診断を実施していたが、その間、部分放電の発生を示す信号は検知されなかった。
- ・ 3 月 30 日内部開放点検前に部分放電診断を実施したところ、部分放電を示す信号を検知した。1 月 25 日から 3 月 30 日まで断路器を操作していないことから、部分放電状況が変化した原因について工場にて調査を実施した。

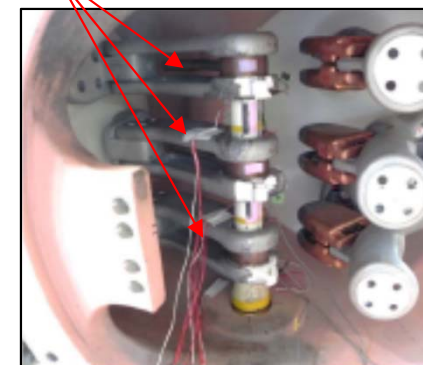
○工場調査結果

- ・ 伊方南幹線 2 号線乙母線断路器（嵌合部にフッ素化合物が付着状態）について、絶縁操作軸および可動接触子に外力（ゴムハンマーによる衝撃）を与えた結果、工具等が接触した程度の外力（約 1 G、瞬時）で、嵌合部の非接触状態が継続することを確認した。
- ・ 健全な断路器にて検証した結果、固定接触子からの反力を受ける断路器投入状態では非接触状態とはならず、可動接触子が固定されていない断路器開放状態では瞬間的には非接触状態となることを確認した（非接触状態の継続は無し）。
- ・ 以上のことから、故障した断路器と同一構造および使用状態が同じ伊方南幹線 2 号線乙母線断路器については、過去に数日程度の部分放電が発生し、可動接触子と絶縁操作軸の嵌合部にフッ素化合物が付着していたことから、3 月 25 日以降に振動等によって嵌合部が非接触状態となり、その状態が継続したことでギャップ放電が生じ、部分放電信号が検知されたものと推定した。

ゴムハンマーで外力を与えた



各相に加わる外力および非接触状態の有無を測定



断路器	断路器の状態	非接触状態継続の有無
健全な断路器	投入	無し (1~30Gの外力で確認)
	開放	無し(瞬間的な非接触有り) (1~30Gの外力で確認)
伊方南幹線 2 号線 乙母線断路器	開放	有り (約1G程度の外力で継続)

図 外力による非接触状態の継続有無調査結果