

伊方発電所における所内電源の一時的喪失について

令和 2 年 3 月
四国電力株式会社

1. 件名

伊方発電所における所内電源の一時的喪失について

2. 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）

3. 事象発生の設備

187kVガス絶縁開閉装置

(添付資料-1、2)

4. 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

5. 事象発生の状況

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（以下、「187kVブスタイ保護リレー」という。）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、何ら操作していない状態で、187kV母線保護継電装置（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回線すべ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、1～3号機ともに外部からの受電は復旧した。

その後の状況調査の結果、187kV送電線4回線のうち、1回線から受電する電路の一部に設備故障があることを確認した。このため、当該電路の切り離しを実施し、1月27日17時13分、当該電路を含む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。これにより、本事象に伴い受電できなくなった4回線のうち3回線が回復した。

なお、本事象による環境への放射能の影響はなかった。

(添付資料-3)

6. 事象の時系列

1月 6日

6時54分 3号機について、保安規定第88条第3項に定める保全計画等に基づき定期的に行う点検、保守として、保安規定第72条の3外部電源を運転上の制限外へ移行

1月23日～1月25日(予定)

187kVブスタイ保護リレー試験

1月25日

15時39分 187kV送電線切替え作業開始

15時44分 187kV母線保護リレーが動作し187kV送電線4回線からの受電停止

1、2号機は予備変圧器より受電

2号機非常用ディーゼル発電機2A、2B起動(無負荷運転)

3号機非常用ディーゼル発電機3B起動(3Aは点検中)、非常用高圧母線3Dに給電

15時51分 3号機非常用高圧母線3Cを外部電源(500kV送電線)より受電

16時04分 2号機非常用ディーゼル発電機2A、2B停止

16時11分 3号機非常用高圧母線3Dを非常用ディーゼル発電機3Bから外部電源(500kV送電線)に切替え

16時25分 3号機非常用ディーゼル発電機3B停止

22時40分 伊方南幹線1号線を187kV乙母線に接続する断路器を含むユニットで異常が発生したことを確認

1月27日

14時00分 187kV甲母線試充電作業開始

16時09分 187kV甲母線試充電作業終了

16時22分 3号機予備変圧器が受電の状態に復帰(187kV送電線からも受電できる待機状態へ)

保安規定第72条の3外部電源を運転上の制限外から復帰

16時56分 1、2号機予備変圧器から起動変圧器への受電に切替え開始(66kV送電線から187kV送電線に受電を切替え)

17時13分 187kV送電線3回線が受電後、1、2号機予備変圧器から起動変圧器への受電に切替え終了

7. 発電用原子炉施設への影響

本事象に伴う発電用原子炉施設への影響について、電源確保状況、燃料の冷却状況およびその他設備の状況について、異常がないことを確認した。

(添付資料－4)

8. 環境への影響

放射線モニタの記録より、本事象に伴う外部への放射能の影響はなかったことを確認した。

9. 作業状況

本事象に至るまでの関係箇所の作業状況として、中央給電指令所、伊方発電所の運転担当部署および保守担当部署の関連作業について、電源系統の状況、作業内容および手順について問題ないことを確認した。

(1) 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ならびに外部電源（500kV送電線、66kV送電線および亀浦配電線）を確保しており、外部電源（187kV送電線）系統の事故に対して電源の多様性を確保していた。

(添付資料－5)

(2) 作業内容および手順

当該試験に伴う電源系統切替え作業については、「四国電力株式会社 系統運用指針」等の社内規定に従い、関係箇所で協議の上、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、適切に実施していた。

(添付資料－6)

10. 状況調査結果

本事象では、187kV母線保護リレーが動作し、187kV送電線4回線からの受電が停止したことから、状況調査を実施した。

(1) 自動オシロ装置の測定結果

事象発生時の自動オシロ装置によって測定された187kV送電線の電圧および電流の波形を確認したところ、V相－W相間の二相短絡から二相地絡を経て三相地絡に至ったものと推定した。

(添付資料－7)

(2) ガス分析等の調査結果

187kVガス絶縁開閉装置内のガス分析を行ったところ、伊方南幹線1号線乙母線断路器ユニットにおいて、短絡および地絡の際に発生するガスの存在を確認した。それ以外の箇所について異常はなかった。

187kVガス絶縁開閉装置内のガス圧力を確認したところ、異常はなかった。

なお、伊方南幹線1号線乙母線断路器は、今回の定期検査における点検対象ではない。

(添付資料－8)

(3) 健全性確認結果

187kV甲、乙母線について、主回路の対地間および相間の絶縁抵抗を測定したところ、異常はなかった。

187kV送電線3回線（伊方北幹線1、2号線、伊方南幹線2号線）から187kV甲母線を順次試充電し、部分放電診断およびセンサによる内部異物の確認診断を実施したところ、異常はなかった。

(添付資料－9)

(4) 内部調査結果

a. 現地確認結果

ガス分析の結果、地絡の発生を推定した伊方南幹線1号線乙母線断路器ユニットのガス絶縁開閉装置を現地にて開放し、内部調査した結果、タンク内に分解ガスによるフッ素化合物（白粉）が堆積しており、断路器のV相－W相間絶縁操作軸に黒色の炭化痕跡を確認したことから、当該箇所で相間短絡が発生したと推定した。また、V相可動接触子がW相およびU相と不整合の位置であることを確認した。

b. 工場確認結果

現地確認結果を踏まえてメーカー工場にて、当該断路器を分解し内部調査を実施した結果、以下の状況を確認した。

- ・ 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に損耗を確認した。
- ・ 当該部位以外には、放電に伴うフッ素化合物の堆積や放電痕以外の異常はなかった。

(添付資料－10)

(5) 製造、点検履歴等調査結果

187kVガス絶縁開閉装置は、六フッ化硫黄（SF₆）の優れた絶縁性能により、極間、相間および対地間距離が大幅に縮小されているとともに、機器の合理的な配置により従来形ガス絶縁開閉装置に比べ、さらに縮小を図った装置であり、導電部、絶縁部、接触部等がすべてガス中に密閉され、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。

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開閉試験、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、長期的な劣化が無いことから開放点検、部分放電診断等についてはこれまで実施していない。

上記の設計および保守管理を実施している一方で、本事象が発生したことを踏まえて当該断路器に係る製造履歴、点検履歴および運転履歴について、記録等を確認した。

製造履歴については、製造時の試験記録より、電気規格調査会標準規格（以下、「JEC」という。）に基づく試験の判定基準を満足していること、点検履歴については、保全計画に従って、計画通り保守点検を実施していること、運転履歴については、メーカー動作確認回数である10,000回を十分に下回る使用状況であることを確認した。

（添付資料－11）

（6）類似事例調査結果

国内類似事例として、原子力施設情報公開ライブラリー（ニューシア）登録情報から、「ガス絶縁開閉装置」、「断路器」および「外部電源喪失（信号発信含む）に伴うディーゼル発電機起動」に係る件名から、「トラブル情報」および「保全品質情報」を抽出した結果、本事象と同様に断路器の相間短絡に起因する類似事例はないことを確認した。

また、原子力施設以外の施設については、伊方発電所の187kVガス絶縁開閉装置のメーカーに確認した結果、同一構造の断路器における類似事例はないことを確認した。

（添付資料－12）

1.1. 詳細調査結果

「1.0. 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。

（添付資料－13）

（1）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。

その結果、「電界異常」の要因となる「電界設計不良」、「製造不良」、「変形・損傷」、「異常電圧の侵入」については、製造時の試験、運転記録等により、異常は認められなかった。また、「絶縁性能異常」の要因となる「絶縁設計不良」、「絶縁材料不良」、「SF₆ガス異常」についても、製造時の試験記録、分析結果等により、異常は認められなかった。

一方、「電界異常」、「絶縁性能異常」の共通因子である「異物の付着」については、以下の状況から、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

耗により発生した異物の付着が要因となって相间短絡が発生した可能性があることを確認した。

- ・ V相-W相间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を確認した。
- ・ 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4 mm）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。
- ・ 相间短絡が発生したV相-W相间絶縁操作軸の表面汚損分析をした結果、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。

（2）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

「（1）絶縁操作軸相间短絡に係る詳細調査」において、異物発生の可能性を確認したV相-W相间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。

その結果、「機械的な摩耗」の要因となる「設計強度不足」、「製造不良による強度不足」、「組立不良による強度不足」、「操作装置（電動機）からの過大応力」については、製造時の試験記録、材料分析結果等により、異常は認められなかった。また、「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調査結果から、嵌合部周辺に異常な発熱はなかったことを確認した。

一方、「ギャップ放電の発熱」が要因となって、V相-W相间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。調査の詳細を以下に示す。

a. 機械的な摩耗

（a）設計強度の確認

i. 工場試験報告書確認

当該断路器は、JECに基づく、1,000回の連続開閉試験を実施し、合格していることを確認した。

また、メーカーとして自主的に、10,000回の開閉試験を実施し、合格していることを確認した。

ii. 設計強度評価

当該断路器の可動接触子および絶縁操作軸の埋金の嵌合部について、最大公差での隙間および実嵌合長さにおける、通常動作時および拘束時の荷重に対して、十分な設計強度を有していることを確認した。

（b）製造状態の確認

i. 製造履歴確認

製造履歴調査結果から、製造状態に異常は認められなかった。

ii. 材料分析

絶縁操作軸の上部埋金および可動接触子の材料分析を行い、設計通りの材料が使われていることを確認した。

iii. 硬度測定

硬度測定の結果、規格値以上であることを確認した。

iv. 寸法測定

寸法測定の結果から、異常は認められなかった。

(c) 組立状態の確認

i. 製造履歴確認

製造履歴調査結果から、組立状態の異常は認められなかった。

ii. 外観確認

外観を確認した結果、組立状態の異常は認められなかった。

(d) 操作装置（電動機）からの応力確認

i. 製造履歴確認

製造時の試験記録より、開閉特性に異常は見られないことを確認した。

ii. 開閉操作状況確認

当該断路器について、事象発生までの開閉操作履歴より、操作装置のモータ過電流警報発生などの異常履歴がないことを確認した。

iii. 操作装置特性確認

事象発生後の詳細調査において、開閉時間および操作電流が管理値内であること、製造時から有意な差がないことを確認した。

b. 熱による溶損

(a) 嵌合部周辺からの熱影響の確認

i. 外観確認

寸法測定の結果から、嵌合部は、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。一方、嵌合部に熱影響を与えると考えられる近隣部位には、異常はなかった。

ii. 表面観察

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ついて、電子顕微鏡（SEM）による表面観察を行ったところ、熱による金属溶融の様相を確認した。

iii. 製造履歴確認

製造履歴調査結果から、主回路抵抗値は管理値内であったことから、嵌合部付近で通電による異常な発熱はないことを確認した。

(b) ギャップ放電による発熱の確認

以下の状況から、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。

- ・当該嵌合部は、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。
- ・当該嵌合部の構造上のクリアランスにより絶縁操作軸の上部埋金と可動接触子の非接触状態が発生することを確認した。
- ・当該嵌合部で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ことで放電が発生することを実証試験にて確認した。

調査の詳細は以下に示す。

i. 嵌合部の非接触状態継続確認

設計上、嵌合部をセレクション構造としていることから、動作開始直後と動作停止直前は絶縁操作軸の上部埋金と可動接触子の嵌合部が瞬間的に非接触となる場合があるが、瞬間的な非接触では放電は発生しない。動作停止後に非接触状態が継続した場合、嵌合部の隙間で放電現象が発生する可能性があることから、当該断路器と同型式の断路器を用いて、絶縁操作軸の上部埋金と可動接触子の非接触状態の継続有無について確認した。

(i) 操作装置による非接触状態継続有無の確認（通常）

運転時同様の操作装置を用いて絶縁操作軸および可動接触子を動作させ、非接触状態の継続有無を確認する試験を1,000回実施した。試験の結果、以下に示す挙動となることを確認した。動作中は瞬間的な非接触状態が発生するが、1ms程度の瞬間的な非接触状態であることから、放電が発生することはない。

- ・絶縁操作軸の下側の嵌合部は、構造上、可動接触子が絶縁操作軸の荷重を支えていることから常に接触状態となる。このため、動作中の瞬間的な非接触状態については、各絶縁操作軸の上側の嵌合部で発生し、下側の嵌合部においては発生しない。また、同様に絶縁操作軸の荷重を可動接触子が支える（絶縁操作軸が水平方向に配置される）構造となる断路器については、非接触状態は発生しない。
- ・動作開始直後は、絶縁操作軸のみが動き出し、停止時に接していた面と逆の面に当たるまでの瞬間は、面での接触がなくなることから、各絶縁操作軸の上側の嵌合部において瞬間的な非接触状態が発生する可能性がある。
- ・開放動作時は、停止直前に絶縁操作軸の速度が徐々に低下するのに対して、可動接触子は慣性によって速度低下が遅れるため、各絶縁操作軸の上側の嵌合部の面が離れ、瞬間的な非接触が発生する。一方、投入動作

時は、停止直前に可動接触子が固定接触子と嵌合するため、可動接触子は固定接触子から反力を受け、絶縁操作軸はねじりひずみによる回転力が加わることから、絶縁操作軸の埋金と可動接触子が接触した状態で停止する

- ・前述した非接触状態はすべて瞬間的なものであり、停止後は継続しない。
- ・W相可動接触子はV相-W相間絶縁操作軸の荷重を受け、U相可動接触子はW相-U相間絶縁操作軸の荷重を受けるのに対して、V相可動接触子は、上部から絶縁操作軸の荷重がかからないことから摩擦力が小さい。このためV相-W相間絶縁操作軸の上部埋金については、他部に比べて非接触状態となる可能性がある。

(ii) 操作装置による非接触状態継続有無の確認（摩擦力調整）

「(i) 操作装置による非接触状態継続有無の確認（通常）」のとおり、摩擦力の違いによって非接触状態となる頻度が異なることから、可動接触子と導体間の摩擦力を小さくして非接触状態の有無を確認する試験を1,500回実施した。摩擦力の調整は、可動接触子と導体間に塗布するグリスの量を調整することによって行った。試験の結果、以下の挙動を確認した。

- ・V相-W相間絶縁操作軸の上側の嵌合部は、動作停止直前に非接触状態となる回数が増えることを確認し、動作停止後にも瞬間的に非接触状態となる状況を確認した。
- ・その他の嵌合部の挙動については、変化がなかった。

動作停止後の継続的な非接触状態はなかったが、停止後に瞬間的であっても非接触状態が発生することがあった。これは、V相可動接触子の摩擦力が減ったことにより、停止直前に可動接触子がチャタリングし、停止後まで継続することによるものと推定した。

(iii) 手動による非接触状態継続有無の確認

「(ii) 操作装置による非接触状態有無の確認（摩擦力調整）」の結果、摩擦力を小さくすることによって可動接触子が停止後もチャタリングする場合があることを確認したが、操作装置の停止後も非接触状態が継続することは確認できなかった。

このため、開放位置から手動で絶縁操作軸または可動接触子を微調整したところ、非接触状態が継続することを確認した。

以上のことから、可動接触子の摩擦力が小さく、停止時にチャタリングするよう場合は、停止後も非接触状態が継続する可能性があることを確認した。

ii. 嵌合部の放電有無の確認

絶縁操作軸の埋金と可動接触子の嵌合部を「i. (iii) 手動による非接触状態継続有無の確認」と同様の方法で非接触状態とした後に、主回路に187 kVを30分間連続的に印加した結果、放電（部分放電）が連続的に発生することを確認した。また、試験後、解体して絶縁操作軸の埋金と可動接触子の嵌合部を確認した結果、一部に白色化（フッ素化合物の付着）した様相を確認した。

本試験の結果から、嵌合部の部分放電の有無は、部分放電診断によって検知できるレベルであることを確認した。また、部分放電によって嵌合部が損耗している場合は、フッ素化合物が落下することから、開放点検時にフッ素化合物の有無を確認することが有用であることが分かった。

iii. 放電による溶融時間計算

絶縁操作軸の埋金と可動接触子の嵌合部に放電が継続した場合に、今回の事象と同等の損耗にかかる時間を解析した結果、200日程度であることを確認した。また、当該断路器の運転履歴を確認したところ至近に1年以上継続して開放状態となっている実績を確認した。

(添付資料-14)

12. 断路器内部確認結果

系統状態を変えずに点検可能な断路器3台について、現地で開放し内部確認を実施した。

以下に示すとおり、内部確認の結果、異常は認められなかった。

(1) 対象断路器

- ・主変圧器1号乙母線断路器
- ・起動変圧器1号乙母線断路器
- ・伊方南幹線1号線線路側断路器

(2) 確認結果

- ・外観確認の結果、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放電痕跡および損耗は認められなかった。また、導体表面やタンク底部等に放電に伴うフッ素化合物やその他異物の存在は認められなかった。
- ・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（テスターで導通を確認）であることを確認した。

(添付資料-15)

1.3. 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。

(1) 今回の試験用系統構成、手順等の評価

187kVブスタイ保護リレーの方向試験の計画にあたっては、「送電系統（原子力部門、系統運用部門）」、「所内系統（原子力部門の発電所内関係箇所）」についての検討を実施しており、その検討内容について評価した。

その結果、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のリスクの特定、分析評価を行い、試験中止条件の設定、万が一のトラブルに対する外部電源、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。

(2) 更なるリスク低減に係る検討

今回、1、2、3号機の所内負荷が数秒間同時に停電したことから、他の作業手順の可能性を踏まえ、原子力安全に係るリスクを更に低減するため、3号機所内負荷の切替え時期及び試験用負荷の使用について、更なる検討を実施した。

また、過去の同様な試験についても試験系統内の事故発生時の影響について同様に評価を実施した。

その結果、3号機の所内負荷切替時期は、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。

さらに、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（作業前のミーティング）－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、2、3号機の所内負荷が同時に停電することはなかった。

1、2、3号機の所内負荷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。

(3) 今後の対応

1、2、3号機の所内負荷が数秒間同時に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際して、3号機の所内負荷を接続しない試験系統構成（模擬負荷を使用）にて実施する。

また、187kVブスタイ保護リレー等の方向試験を実施する場合、最適な試験系統構成、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、原子力安全に係るリスクについて、試験の都度、過去の実績にとらわれることなく、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、試験計画段階の都度、今回の再分析・評価を踏まえた検討を実施することとする。また、必要に応じ、確率論的リスク評価等、その他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こととする。

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。

(添付資料－16)

1 4. 推定原因

「1 1. 詳細調査結果」および「1 2. 断路器内部確認結果」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。

- ・ 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おいて、構造上のクリアランスによる非接触状態が継続した。
- ・ 非接触状態となったV相-W相間絶縁操作軸の上部埋金とV相可動接触子の嵌合部において放電が発生し、嵌合部の隙間が拡大した。
- ・ 嵌合厚さが薄くなったことから、動作時に嵌合部の擦れによって金属くずが発生した。
- ・ 発生した金属くずが落下し、V相-W相間絶縁操作軸または導体表面に付着、高電界部に付着した金属くずを起点にV相-W相間で短絡が発生した。

(添付資料-17)

15. 対策

「14. 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（1台）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、新品に取替える。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、同一構造および使用状態が同じ断路器（13台）については、計画的に断路器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（1台）ならびに同一構造および使用状態が同じ断路器（13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。

さらに、「13. 試験用系統構成、手順等の評価」を踏まえて、1、2、3号機の電源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際しては、3号機の所内負荷を接続しない試験系統構成（模擬負荷を使用）にて実施する。また、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。

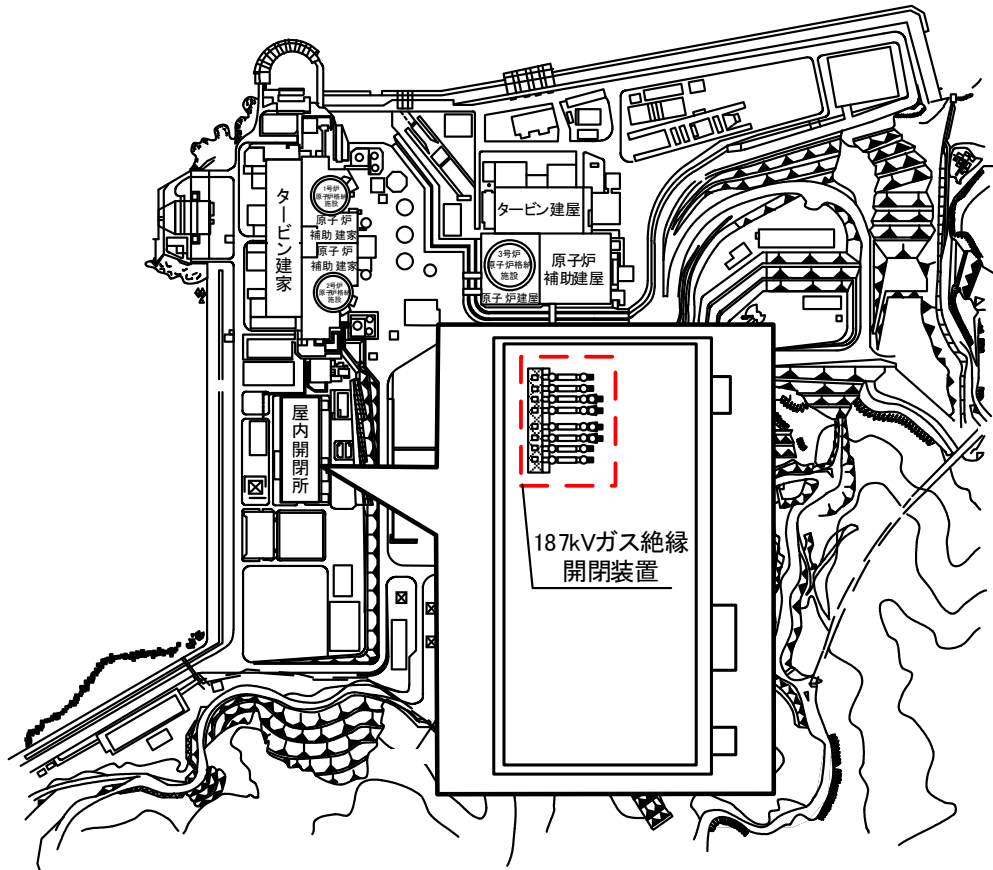
（添付資料－18）

以 上

添 付 資 料

添付資料－ 1	事象発生場所	16
添付資料－ 2	事象発生設備	17
添付資料－ 3	事象概要	20
添付資料－ 4	発電用原子炉施設への影響	22
添付資料－ 5	電源系統の状況	29
添付資料－ 6	作業内容および手順	31
添付資料－ 7	自動オシロ装置の測定結果	32
添付資料－ 8	ガス分析等の調査結果	33
添付資料－ 9	健全性確認結果	35
添付資料－ 1 0	内部調査結果	36
添付資料－ 1 1	製造、点検履歴等調査結果	41
添付資料－ 1 2	類似事例調査結果	43
添付資料－ 1 3	要因分析図	44
添付資料－ 1 4	詳細調査結果	46
添付資料－ 1 5	断路器内部確認結果	70
添付資料－ 1 6	試験用系統構成、手順等の評価	72
添付資料－ 1 7	推定メカニズム	86
添付資料－ 1 8	対策要否検討結果および対策内容	87
参考資料	用語解説	91

事象発生場所



事象発生設備

表 1 ガス絶縁開閉装置の仕様

定 格 電 圧	204kV
定 格 電 流	1200A (変圧器ユニット) 2000A (送電線ユニット)
定 格 短 時 間 耐 電 流	31.5kA
定 格 周 波 数	60Hz
定 格 ガ ス 圧 力 (2 0 ℃)	0.6MPa

表 2 断路器の仕様

定 格 電 圧	204kV
定 格 電 流	1200A (変圧器ユニット) 2000A (送電線ユニット)
定 格 短 時 間 耐 電 流	31.5kA
定 格 周 波 数	60Hz
定 格 ガ ス 圧 力 (2 0 ℃)	0.6MPa

表 3 ガス絶縁開閉装置の設置時期

設 置 時 期	平成 1 6 年度
---------	-----------

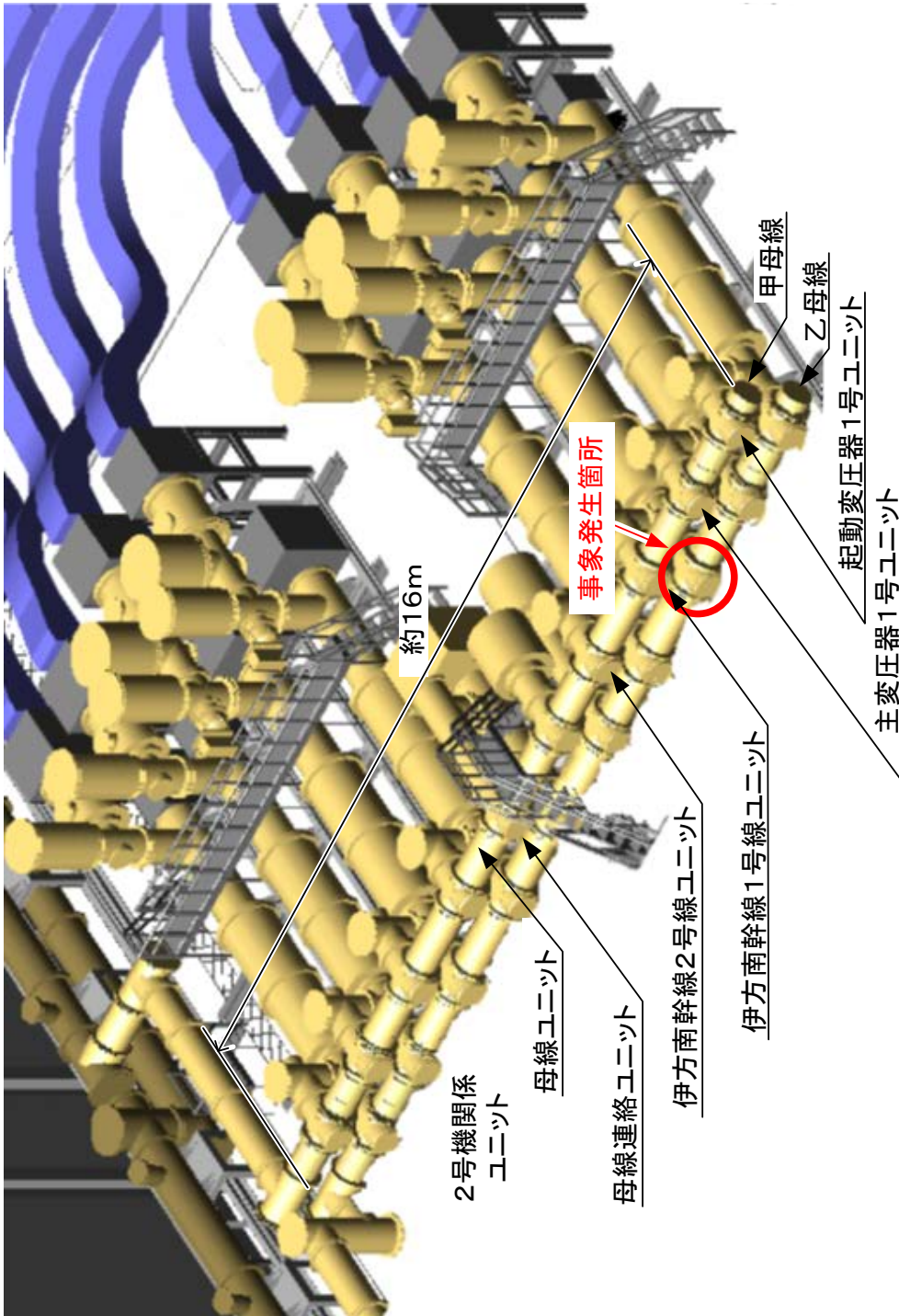


図1 187 kVガス絶縁開閉装置全体概要図

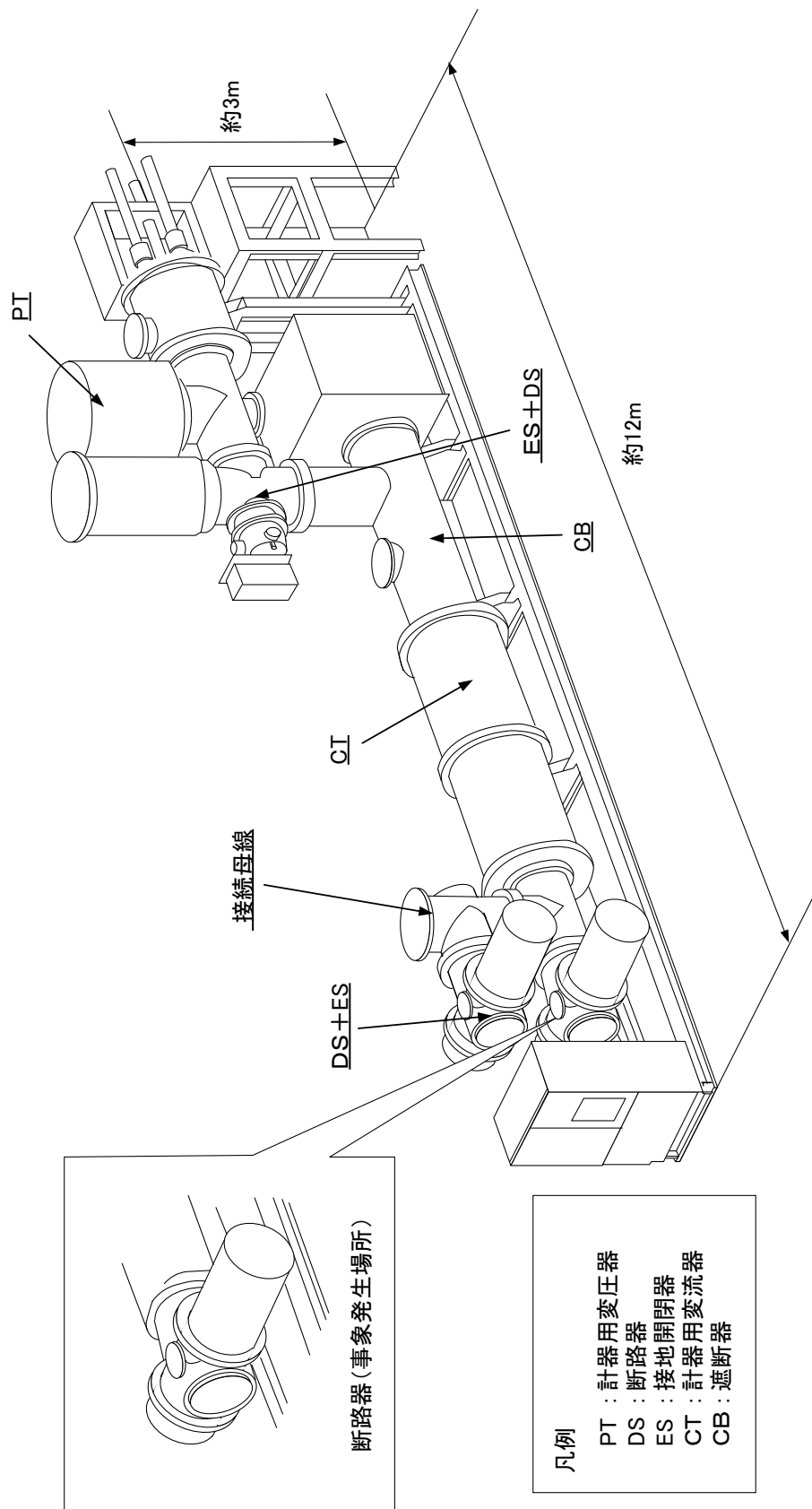


図2 ガス絶縁開閉装置概要図 (送電線ユニット)

事象概要

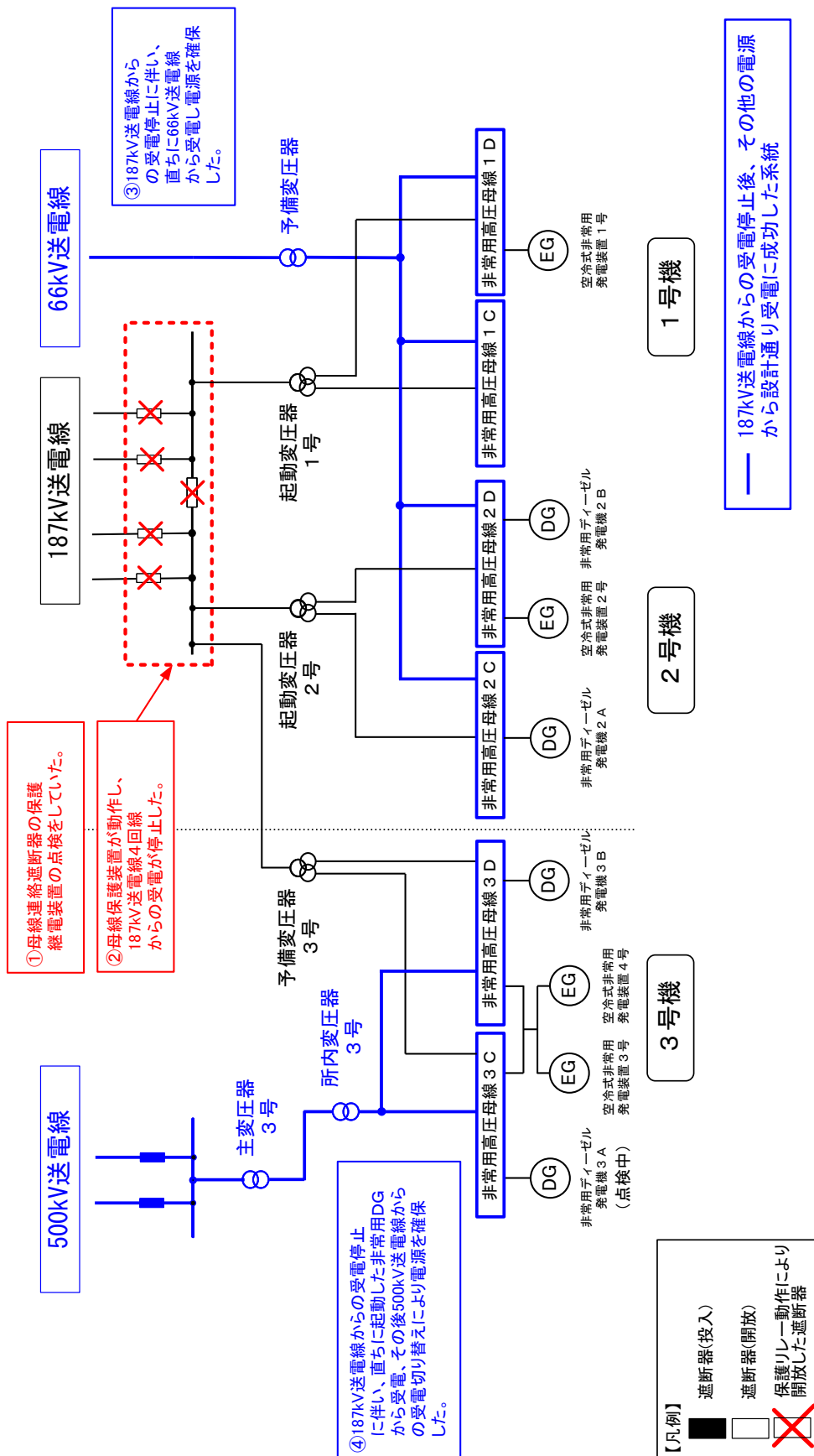


図1 事象概要図 (全体系統図)

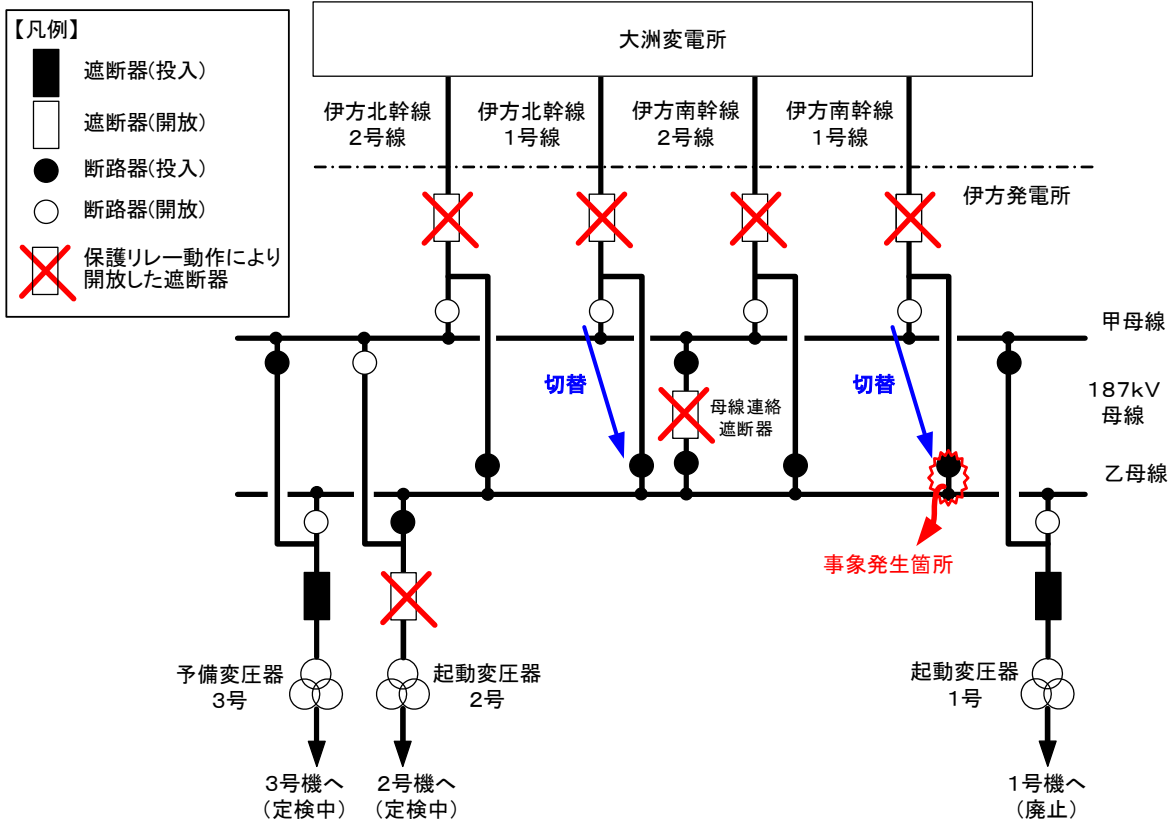


図2 事象概要図 (187kV系統図)

発電用原子炉施設への影響

事象発生時における伊方発電所 1、2号機および3号機の電源確保状況、燃料の冷却状況およびその他設備の状況を確認した結果、異常がないことを確認した。

1. 電源確保状況

(1) 1、2号機

外部電源として、表1のとおり187kV送電線4回線、66kV送電線1回および亀浦配電線（亀浦変電所からの配電線）から受電可能であり、非常用電源として、非常用ディーゼル発電機2Aおよび2Bならびに空冷式非常用発電装置1号および2号から受電可能であった。また、号機間連絡ケーブルにより、3号機の外部電源または非常用電源からの融通も可能であった。事象発生前、1号機および2号機の所内電源は187kV送電線より受電していた。

事象発生後、187kV送電線4回線からの受電が停止したため、1号機および2号機の所内電源は設計どおり66kV送電線（予備変圧器）からの受電に切替わった。また、2号機の非常用ディーゼル発電機も設計どおり10秒以内で自動起動した。

表1 1、2号機 事象発生時の所内電気系統の概要

号機	受電		外部電源	非常用電源
	通常時	事象発生時		
1号機	甲母線	乙母線	<ul style="list-style-type: none"> ・ 187kV送電線（4回線） ・ 66kV送電線（1回線） ・ 亀浦配電線 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 空冷式非常用発電装置1号
2号機	乙母線			<ul style="list-style-type: none"> ・ 非常用ディーゼル発電機2A、2B ・ 空冷式非常用発電装置2号

(2) 3号機

外部電源として、表2のとおり500kV送電線2回線、187kV送電線4回線および亀浦配電線から受電可能であり、非常用電源として、非常用ディーゼル発電機3Bおよび空冷式非常用発電装置3、4号から受電可能であった。また、号機間連絡ケーブルにより、1、2号機の外部電源または非

常用電源からの融通も可能であった。事象発生前、3号機の所内電源は、予備変圧器の点検終了後の健全性確認のため、187kV送電線より受電していた。

事象発生後、187kV送電線4回線からの受電が停止したため、設計どおり10秒以内で非常用ディーゼル発電機3Bが自動起動し、非常用高圧母線3Dは非常用ディーゼル発電機3Bから受電した。また、非常用高圧母線3Cは、非常用ディーゼル発電機3A点検中のため500kV送電線から受電した。その後、非常用高圧母線3Dを非常用ディーゼル発電機3Bから500kV送電線からの受電に切替えた。

表2 3号機 事象発生時の所内電気系統の概要

受電		外部電源	非常用電源
通常時	事象発生時		
所内変圧器 ^{※1} または 予備変圧器 ^{※2}	予備変圧器 ^{※2}	<ul style="list-style-type: none"> ・ 500kV送電線 (2回線) ・ 187kV送電線 (4回線) ・ 亀浦配電線 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 非常用ディーゼル 発電機3B^{※3} ・ 空冷式非常用発電 装置3号、4号

※1：500kV送電線より受電

※2：187kV送電線より受電

※3：非常用ディーゼル発電機3Aは点検中

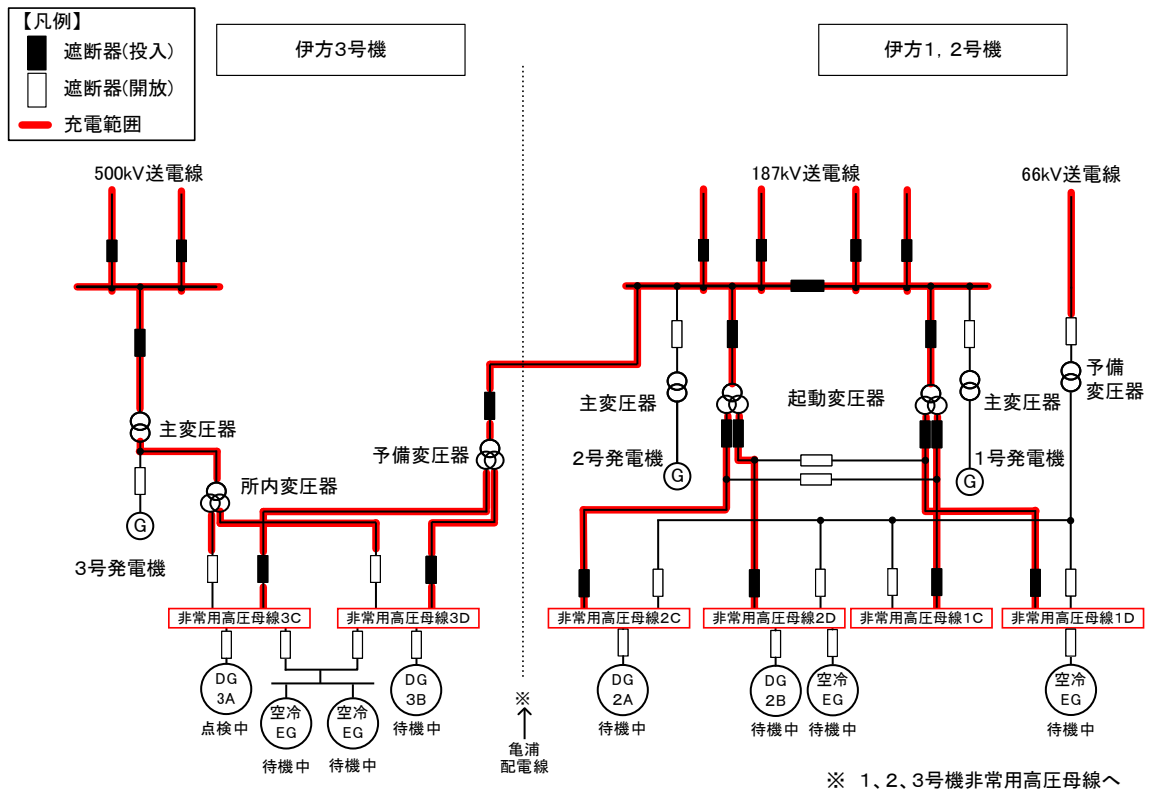


図1 伊方発電所の所内電気系統図 (事象発生前)

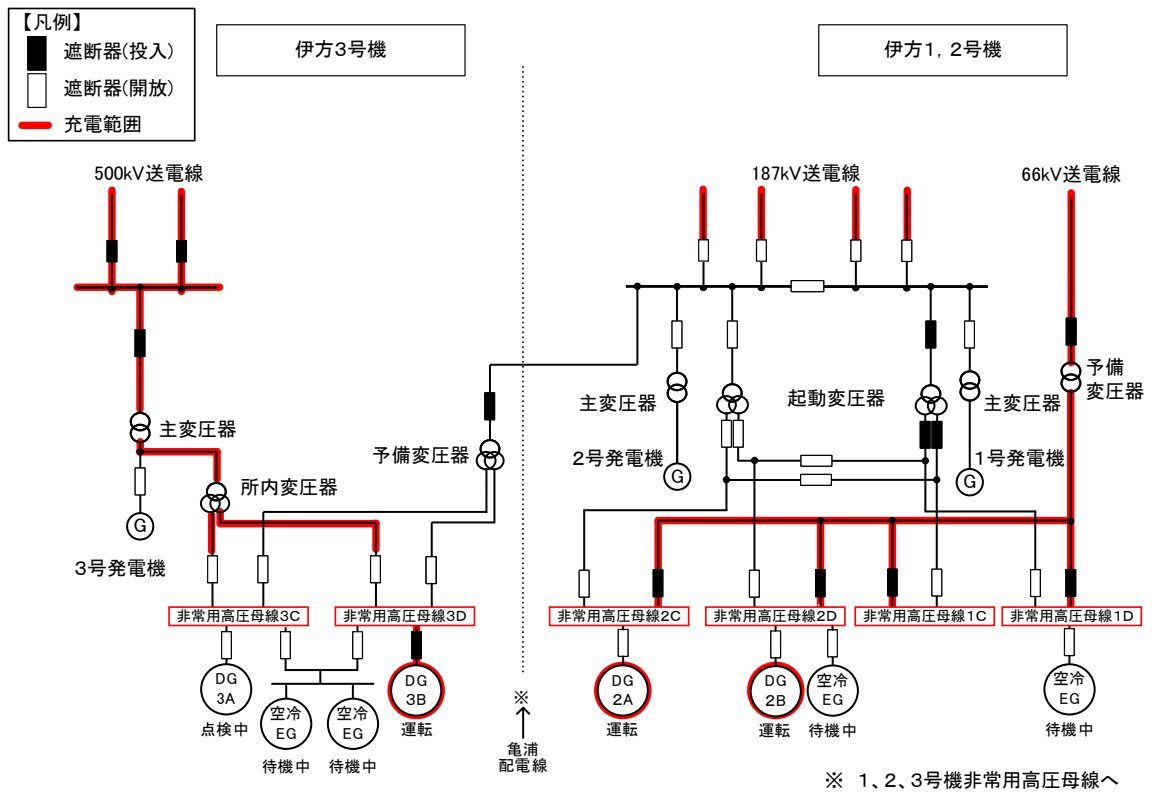


図2 伊方発電所の所内電気系統図 (事象発生後)

2. 燃料冷却状況について

(1) 燃料冷却再開までの主な時系列

令和2年

1月16日

10時16分 3号機の燃料取出完了

1月25日

15時44分 187kV送電線4回線からの受電停止

(3号機)

15時44分 非常用ディーゼル発電機3B自動起動、非常用高压母線3D受電

海水ポンプ3C、3D自動起動

原子炉補機冷却水ポンプ3C、3D自動起動

15時51分 非常用高压母線3Cを外部電源(500kV送電線)から受電

16時11分 非常用高压母線3Dを外部電源(500kV送電線)からの受電に切替え

16時27分 使用済燃料ピットポンプ3B運転、冷却再開

(2号機)

15時44分 予備変圧器より受電(非常用高压母線2C、2D受電)
海水ポンプ2A、2C自動起動

原子炉補機冷却水ポンプ2A、2C自動起動

17時19分 使用済燃料ピットポンプ2B運転、冷却再開

187kV送電線からの受電停止を受けて、中央制御室ではただちに使用済燃料ピットの温度および水位を確認し、異常がないことを確認した。

使用済燃料ピットについては十分な保有水を確保しており、冷却が一時的に停止したとしても急激には温度上昇しないことから、冷却再開までに十分な時間的余裕があった。

このため、あらかじめ定められた手順どおり、まず停電に伴う非常用ディーゼル発電機の自動起動、その後の原子炉の安全性を維持するための機器(海水ポンプ、冷却水ポンプ等)の自動起動の状態について確認を実施し、その後、現地にて使用済燃料ピットポンプを手動で起動し、冷却を再開した。

使用済燃料ピットの冷却を再開するまでの間においても、使用済燃料ピットの温度および水位については、中央制御室で連続して監視しており、有意な変化がないことを確認していた。

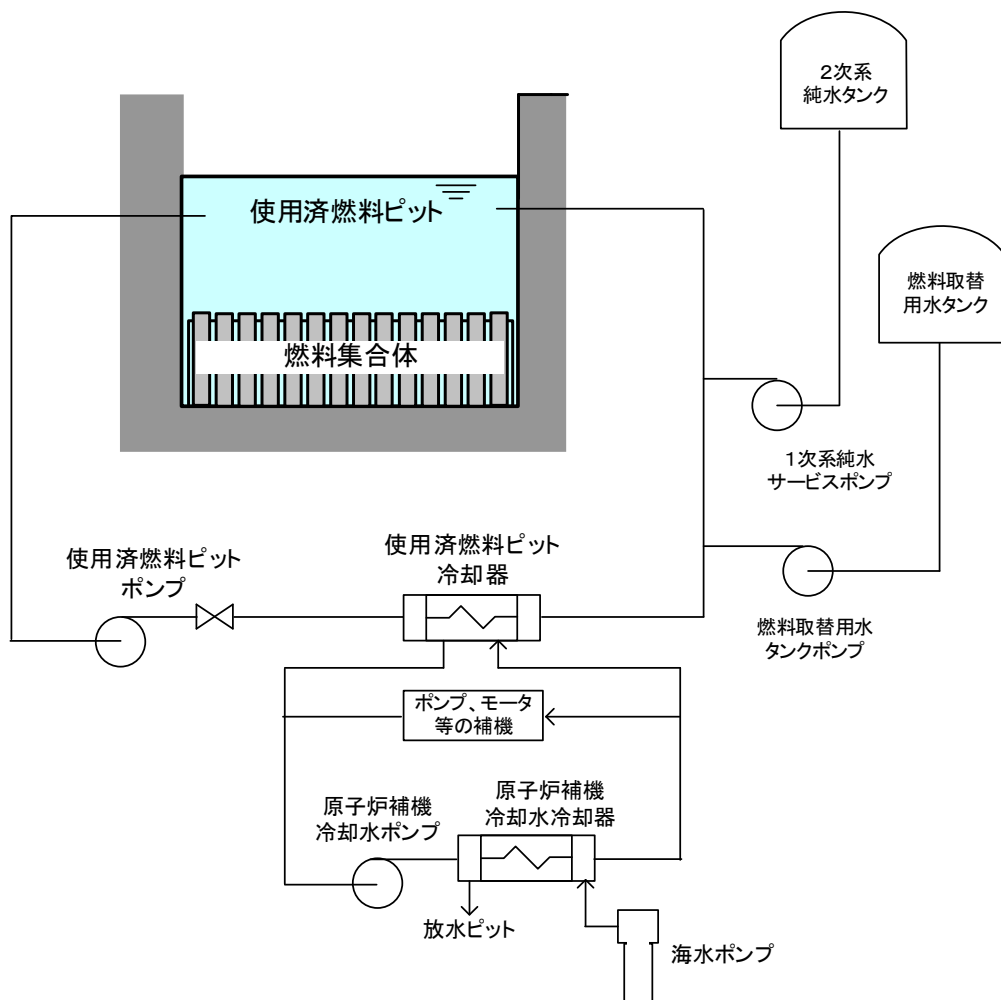


図3 使用済燃料ピット水浄化冷却系統等

(2) 使用済燃料ピットの燃料貯蔵体数および冷却状況

a. 使用済燃料ピットの燃料貯蔵体数

各号機における使用済燃料ピットの燃料貯蔵体数は下表のとおりであった。

表3 使用済燃料ピットの燃料貯蔵体数 (体)

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

b. 使用済燃料ピットの冷却状況

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。

表4 使用済燃料ピット水温（℃）

時系列	号機 2号機	3号機	
		Aピット	Bピット
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
上記期間の最大値	16.9	34.1	33.3

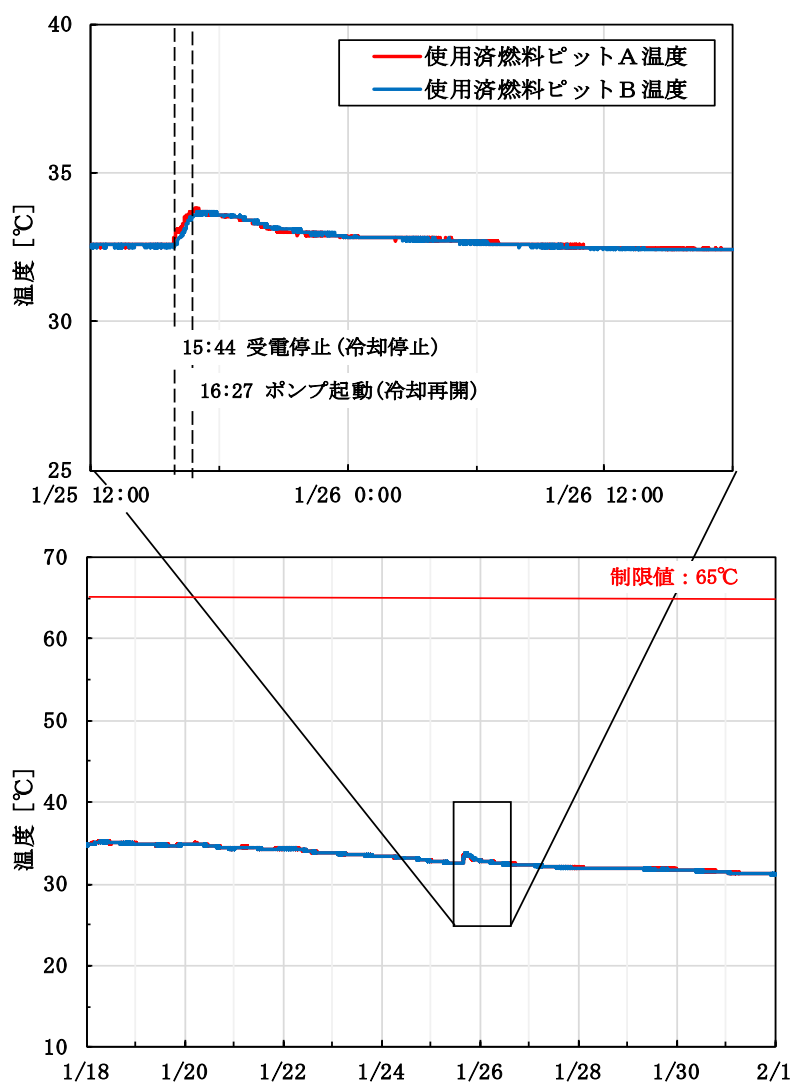


図4 3号機使用済燃料ピット温度

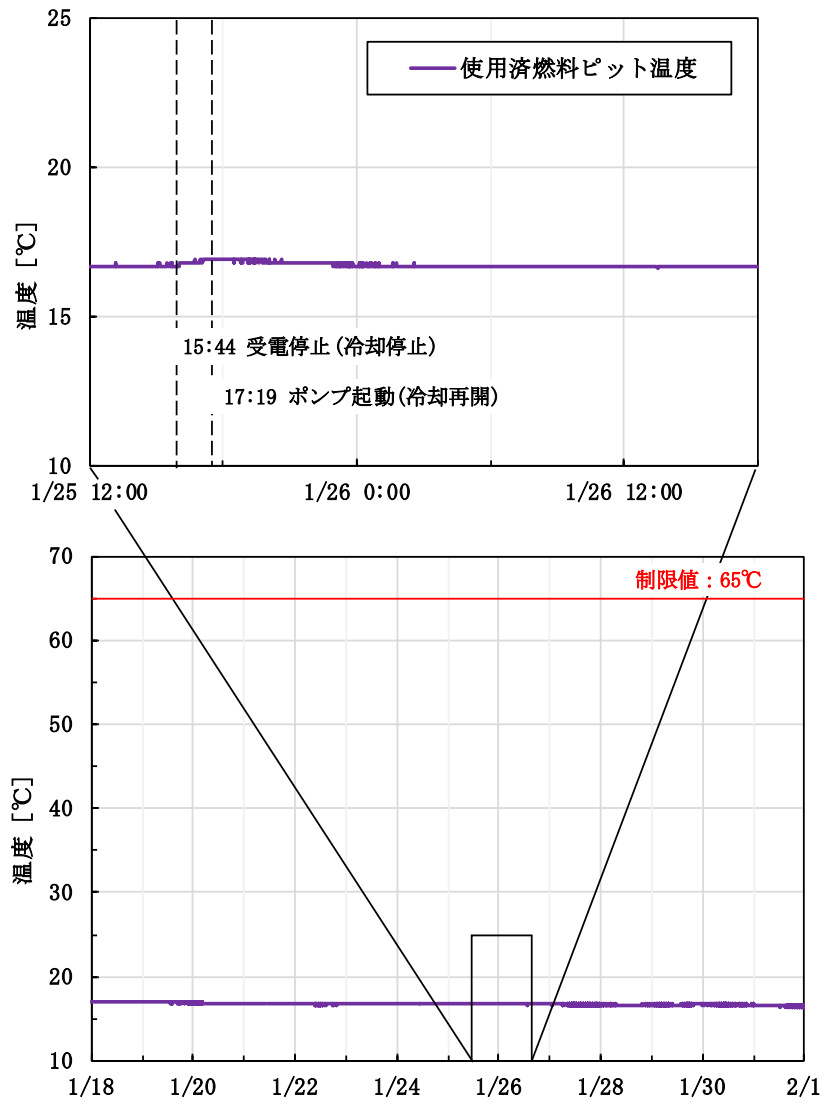


図5 2号機使用済燃料ピット温度

3. その他設備の状況

事象発生後の巡視点検および中央パラメータから、異常がないことを確認した。

電源系統の状況

1. 方向試験

187 kV母線連絡遮断器について、保護リレーを取替えたことから、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、通電状態に問題がないことを確認する必要があった。

2. 作業計画

方向試験前の電源系統構成について、1号機は187 kV甲母線、2号機は187 kV乙母線からそれぞれ受電する系統構成であった。

当該試験に必要な負荷電流を流すために、電力負荷を確保する必要があるが、1、2号機のみ在所内負荷では不足するため、3号機在所内電源について、500 kV送電線から187 kV送電線に切替えることで、当該試験に必要な電力負荷を確保する計画であった。

また、当該遮断器に対して一方向から所定の負荷電流を流すために、通常時は187 kV送電線から2回線ずつ受電している母線の系統構成を、どちらか片方の母線で受電するよう切替える必要があったため、乙母線で187 kV送電線4回線を受電することとし、甲母線で所内負荷である起動変圧器1、2号および予備変圧器3号を接続するよう計画した。

方向試験の実施にあたっては、試験のため通常時のような187 kV母線の多重性が確保できない制約のなかで、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するとともに他の外部電源（500 kV送電線2回線、66 kV送電線1回線および亀浦配電線）も確保しており、外部電源（187 kV送電線）系統の事故に対して電源の多様性を確保するよう計画していた。

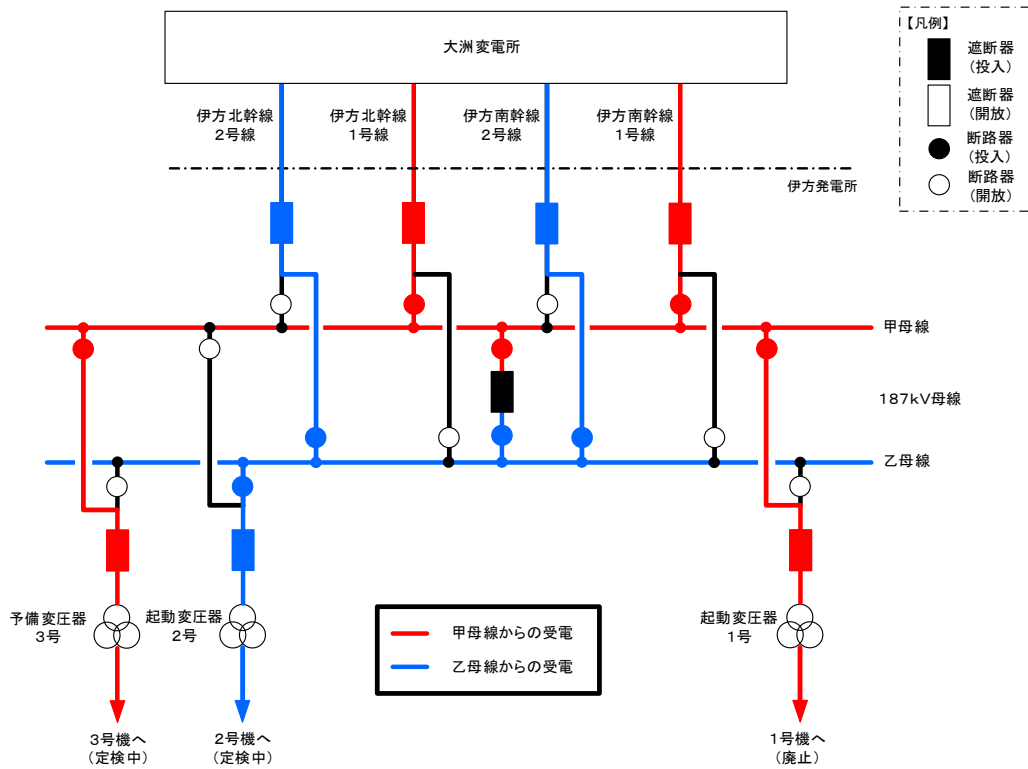


図1 方向試験実施前の系統構成

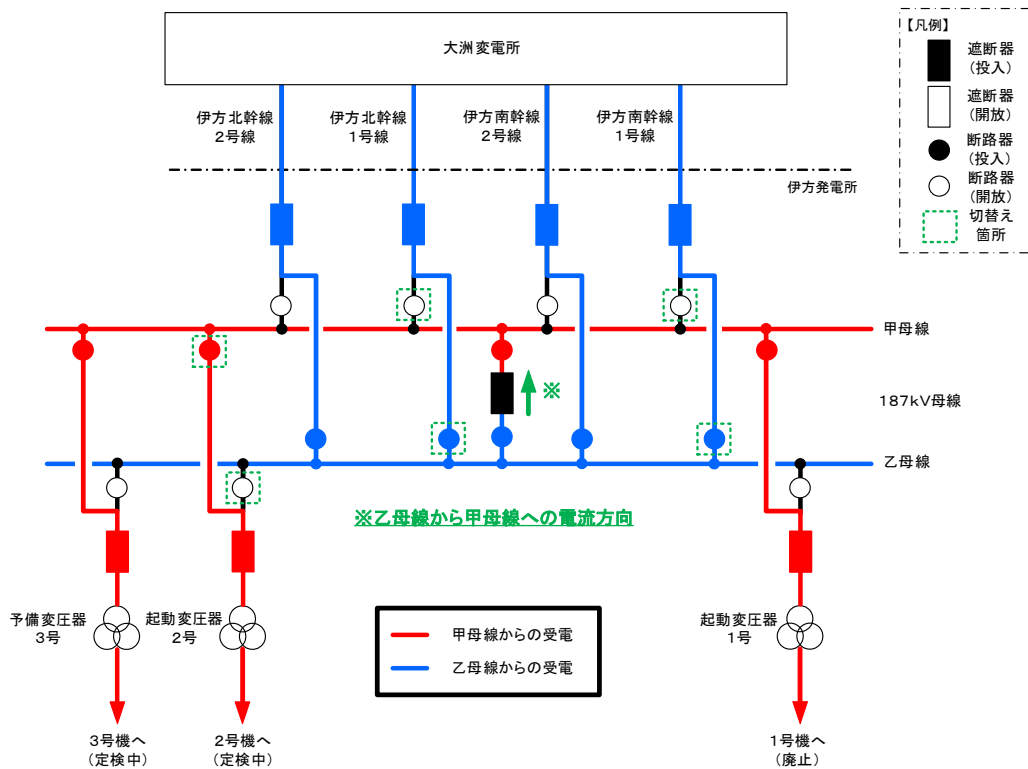
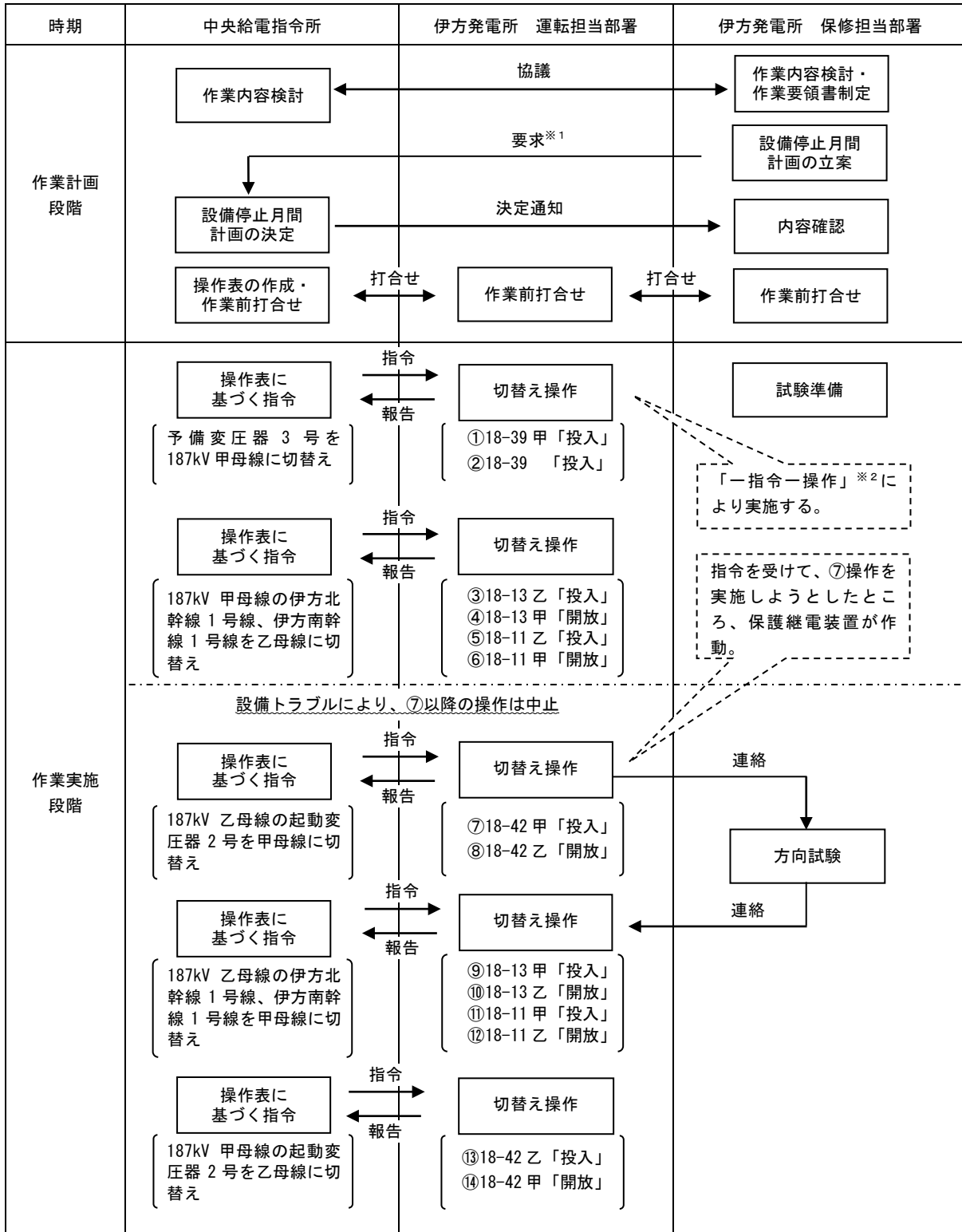


図2 方向試験における系統構成

作業内容および手順

「四国電力株式会社 系統運用指針」等の社内規定に基づき、作業が行われていることを確認した。



※¹ 工程管理の担当課より、担当部長の承認後に本店経由で提出
 ※² 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

自動オシロ装置の測定結果

事象発生時の自動オシロ装置によって測定された187kV送電線の電圧および電流の波形を確認したところ、V相－W相間の二相短絡（図1の①）から二相地絡（図1の②）を経て三相地絡（図1の③）に至ったものと推定した。事故電流測定結果は表1のとおり。

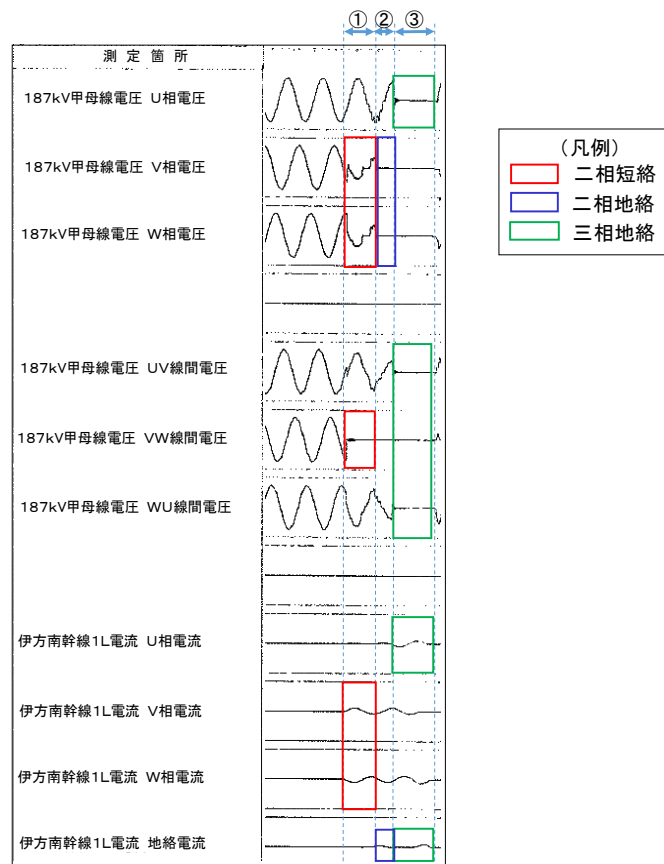


図1 自動オシロ装置の測定結果

表1 事象発生時の事故電流

対象	伊方北幹線 1号線	伊方北幹線 2号線	伊方南幹線 1号線	伊方南幹線 2号線	合計
U相電流	2 6 4 A	3 2 2 A	2 4 4 A	3 2 4 A	1, 1 5 4 A
V相電流	2, 2 4 8 A	2, 1 5 7 A	2, 3 1 7 A	2, 2 1 1 A	8, 9 3 3 A
W相電流	2, 1 6 5 A	1, 8 6 1 A	2, 2 2 2 A	1, 9 1 7 A	8, 1 6 5 A
地絡電流	4 2 8 A	4 4 2 A	4 7 9 A	4 9 2 A	1, 8 4 1 A

ガス分析等の調査結果

自動オシロ装置の状況より、短絡および地絡の発生が推定されたことから、地絡等の発生個所を特定するため、ガス分析等の調査を行った。

1. ガス分析結果

図1に示すガス区分ごとにガス分析^{※1}を実施した。その結果、伊方南幹線1号線乙母線断路器ユニットのガス区分(図1の③)にて検知剤の色が変わり、SO₂およびHFガスの存在が確認された(図2)。その他のガス区分では、変色はなかった。これらは、地絡等によって発生するガスであることから、当該ガス区分において、地絡等が発生したものと推定した。

※1：ガス絶縁開閉装置内に絶縁体として封入されているガスを採取し、地絡等によって発生するガスの有無を確認することによって、地絡等の発生の有無を確認することができる。

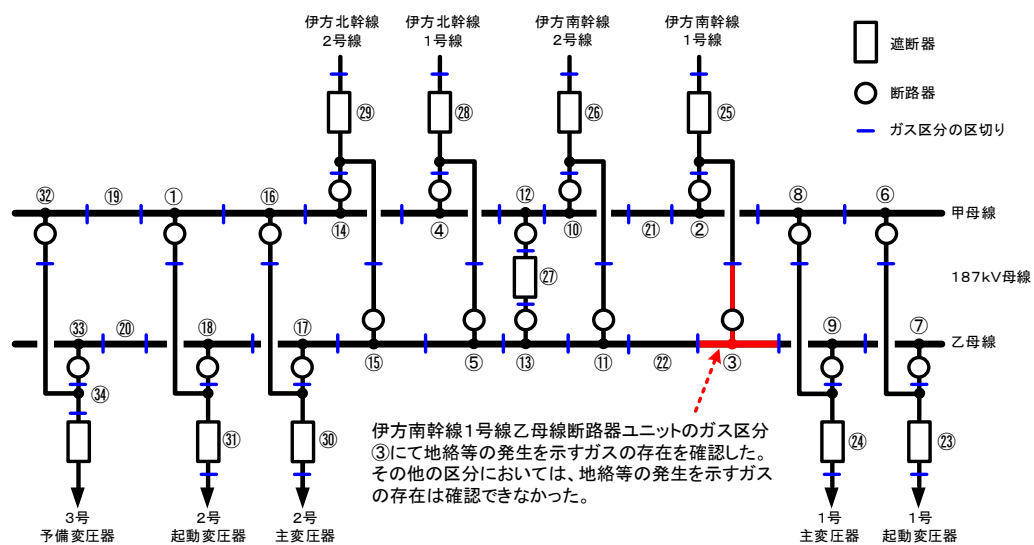


図1 187kV母線ガス区分

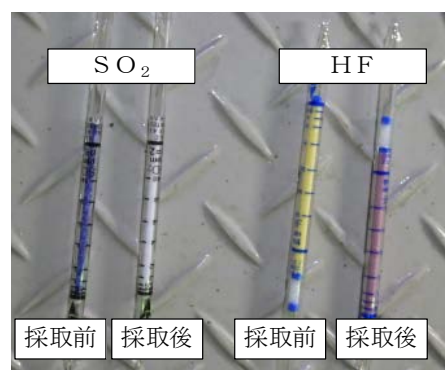


図2 伊方南幹線1号線乙母線断路器ユニットのガス分析結果

2. ガス圧力の確認

図1のガス区分ごとに設置されているガス圧力計によって確認した結果、すべて管理値以上であり、異常はなかった。確認結果を表1に示す。

表1 ガス圧力確認結果

ガス区分	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
ガス圧力(MPa)	0.63	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.62	0.62	0.64	0.63	0.62
管理値(MPa)	0.60以上											

ガス区分	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲	⑳	㉑	㉒	㉓
ガス圧力(MPa)	0.61	0.64	0.64	0.62	0.62	0.64	0.63	0.64	0.62	0.62	0.62
管理値(MPa)	0.60以上										

ガス区分	㉔	㉕	㉖	㉗	㉘	㉙	㉚	㉛	㉜	㉝	㉞	
ガス圧力(MPa)	0.64	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.63	0.63	0.39	0.38	0.40	
管理値(MPa)	0.60以上								0.38以上 [※]			

※測定時の外気温(9℃)で換算した値

健全性確認結果

187kV甲、乙母線の健全性確認のため、187kV甲、乙母線の絶縁抵抗測定を実施し、主回路の対地間および相間に異常がないことを確認した。

187kV送電線3回線（伊方北幹線1、2号線、伊方南幹線2号線）の試充電、部分放電診断および内部異物診断を実施し、表1のとおり異常がないことを確認した。

表1 187kV甲母線の健全性確認結果

調査項目	結果
試充電 ^{※1}	異常なし
部分放電診断 ^{※2}	異常なし
内部異物診断 ^{※3}	異常なし

- ※1 伊方北幹線2号線、伊方北幹線1号線、伊方南幹線2号線、予備変圧器3号、起動変圧器2号、母線連絡、起動変圧器1号の順に試充電を実施。
- ※2 ガス絶縁開閉装置表面に取り付けたアンテナにより、部分放電により発生した電磁波を検出することで絶縁体の劣化状態を確認する。
- ※3 ガス絶縁開閉装置表面に取り付けたセンサにより、ガス絶縁開閉装置内の異物挙動による微小な超音波振動を検出することで内部異物の有無を確認する。

内部調査結果

伊方南幹線 1 号線乙母線断路器ユニットについて、開放して内部調査を実施した結果を示す。

1. 現地確認結果

ガス分析の結果、伊方南幹線 1 号線乙母線断路器ユニットのガス区分において地絡が発生したと推定されたことから、当該区分のガス絶縁開閉装置の開放を行い、内部の確認を行った。内部の写真を図 1 に示す。

確認した結果、タンク内に分解ガスによるフッ素化合物（白粉）が堆積しており、断路器の V 相－W 相間絶縁操作軸に黒色の炭化痕跡が見られたことから当該箇所では相間短絡が発生したと推定した。V 相－W 相間の短絡については、自動オシロ装置の記録と一致している。また、V 相可動接触子が W 相および U 相と不整合の位置であることを確認した。伊方南幹線 1 号線乙母線断路器ユニットの外観図および内部構造図を図 2 から図 5 に示す。



図 1 伊方南幹線 1 号線乙母線断路器ユニットの開放写真

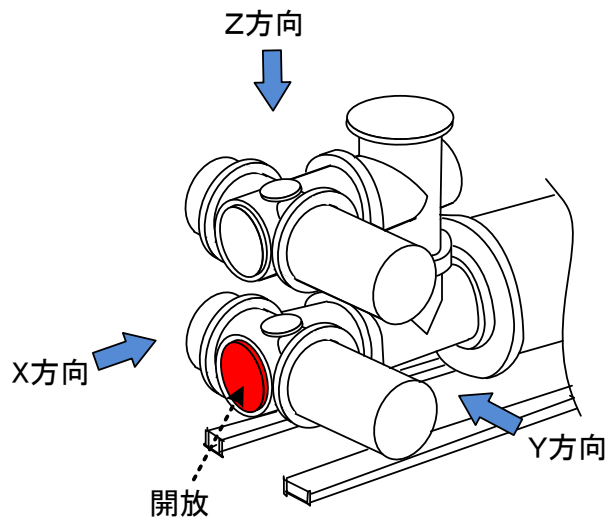


図2 断路器ユニット外観図

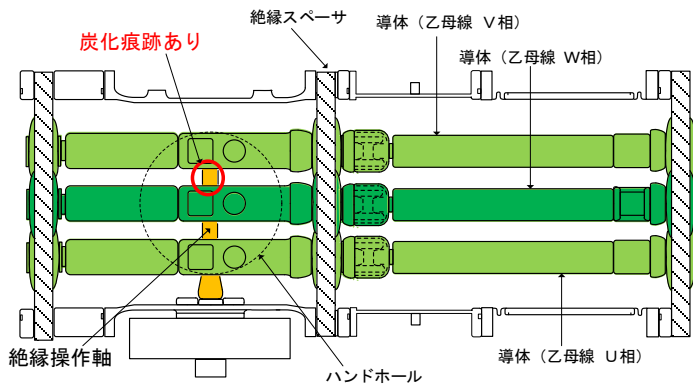


図3 断路器ユニット内部構造図 (X方向)

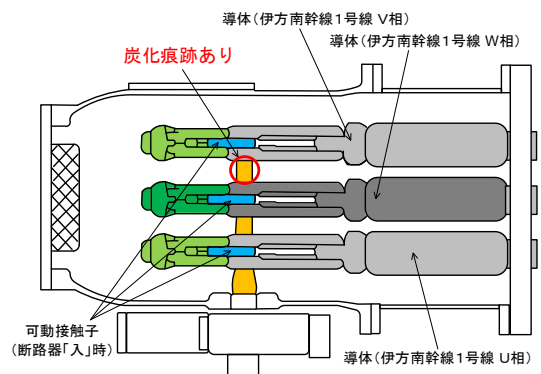


図4 断路器ユニット内部構造図 (Y方向)

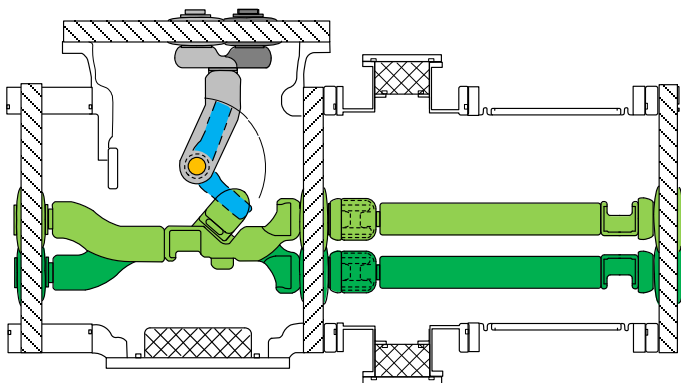


図5 断路器ユニット内部構造図 (Z方向)

2. 工場確認結果

(1) 絶縁操作軸と可動接触子嵌合部の状況

メーカー工場にて当該断路器を分解し内部調査を実施した結果、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が見られた。

(図6)

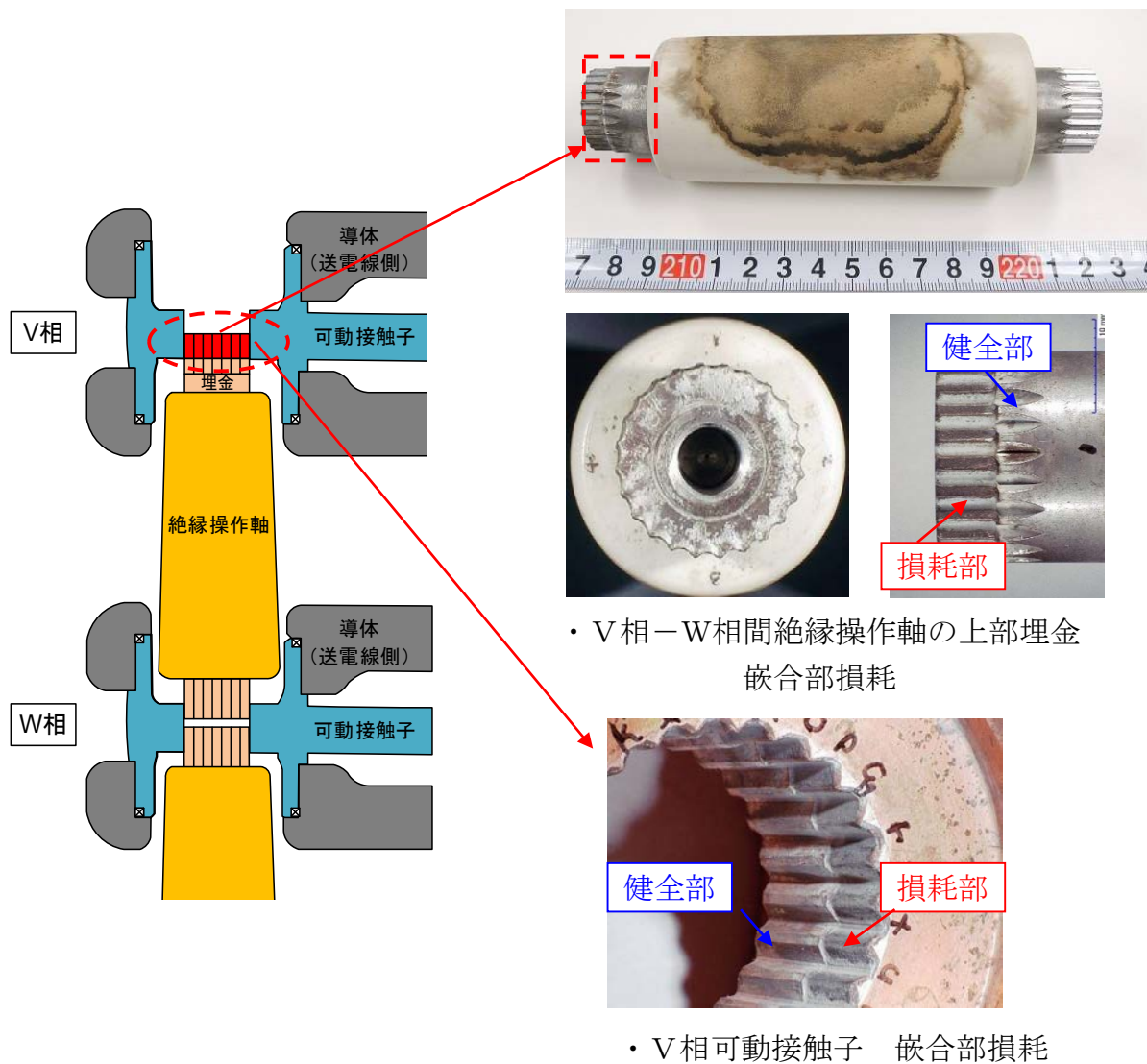


図6 嵌合部の損耗状況

(2) V相－W相間絶縁操作軸の状況

放電痕跡を確認した結果、絶縁操作軸の上下に向かう放電進展が見られることを確認した。(図7、8)

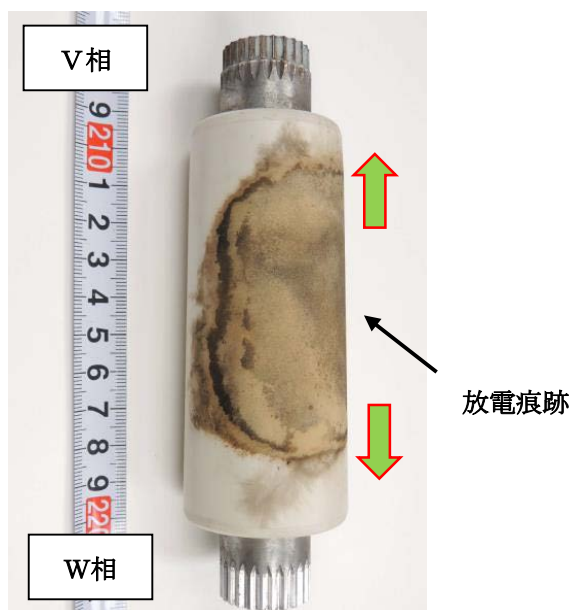


図7 絶縁操作軸放電痕跡

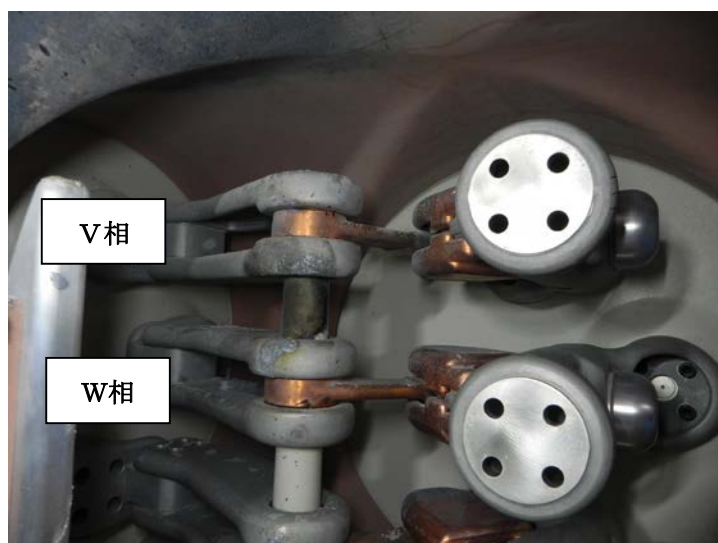


図8 解体前状況

(3) その他内部確認結果

断路器の各部品を解体し、外観確認等を実施した結果、タンク内の絶縁スペーサ部、導体表面等への分解ガスによるフッ素化合物（白粉）の堆積や放電痕は見られたものの、前述の（1）および（2）を除き、その他異常は見られなかった。

製造、点検履歴等調査結果

187kVガス絶縁開閉装置は、六フッ化硫黄（SF₆）の優れた絶縁性能により、極間、相間および対地間距離が大幅に縮小されているとともに、機器の合理的な配置により従来形ガス絶縁開閉装置より、さらに縮小を図った装置であり、導電部、絶縁部、接触部等がすべてガス中に密閉され、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が高い装置となっている。

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、長期的な劣化が無いことから、開放点検および部分放電等の設備診断についてこれまで実施していない。

上記の設計および保守管理を実施している一方で、本事象が発生したことを踏まえて当該断路器に係る製造履歴、点検履歴および運転履歴について、記録等を確認した。確認結果を以下に示す。

1. 製造履歴調査結果

当該断路器に関し、製造履歴を確認した結果、表1のとおり、電気規格調査会標準規格（JEC）の判定基準を満足していることを確認した。

表1 断路器の製造履歴

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、最低値の条件で支障なく開閉できること	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、異状なく耐えること	良

2. 保守履歴調査結果

当該断路器の点検実績を確認した結果、表2のとおり、前回の点検は平成30年度に外観点検、絶縁抵抗測定等を実施していることを確認した。

当該断路器の点検については、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おり、これまで異常は認められていない。

表2 保守履歴調査結果

実施時期	断路器点検実績	断路器点検内容
平成31年度	(今回点検なし)	-
平成30年度	点検実施	・外観点検 ・絶縁抵抗測定 ・タンク外操作機構の点検、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

3. 運転履歴調査結果

当該断路器に動作回数カウンタが設置されていないことから、伊方南幹線1号線の遮断器と同程度の動作回数とした場合、約250回となる。ここに工場製作や据付時の試験等における動作回数(約100回)を加味しても約350回程度であり、メーカー動作確認回数である10,000回を十分に下回る使用状況であることを確認した。

類似事例調査結果

No.	ユニット名	件名	事象発生箇所	事象発生日
1	志賀発電所 1号	志賀原子力発電所1号機 275kV 志賀原子力線1号線の断路器不具合について	送受電系統	平成16年 6月 3日
2	伊方発電所 1, 2号	ガス絶縁開閉装置 (GIS) の不具合について	送受電系統	平成16年 6月 3日
3	泊発電所	テレメータ伝送データの欠測 (北海道胆振東部地震)	送受電系統	平成30年 9月 6日
4	女川発電所 1号	275kV母線保護装置更新工事における女川原子力発電所1号機所内電源の停電の発生について	所内交流電源系	平成27年 9月 29日
5	東通発電所 1号	【東日本大震災関連】東北地方太平洋沖地震 (余震) による外部電源喪失に伴う運転上の制限逸脱	送受電系統	平成23年 4月 7日
6	東通発電所 1号	【東日本大震災関連】東北地方太平洋沖地震による外部電源喪失に伴う運転上の制限逸脱他	送受電系統	平成23年 3月 11日
7	志賀発電所 1号	能登半島地震に伴う外部電源喪失時の運転上の制限逸脱について	送受電系統	平成19年 3月 25日
8	敦賀発電所 1号	送電線事故に伴う一時的な受電停止について	送受電系統	平成17年 12月 22日
9	大飯発電所 1, 2, 3, 4号	送電系統事故に伴う大飯1, 2号機原子炉停止及び大飯3, 4号機所内単独運転について	送受電系統	平成17年 12月 22日
10	敦賀発電所 1号	送電線事故に伴う一時的な受電停止について	送受電系統	平成17年 12月 15日
11	美浜発電所 3号	4-3C母線電圧低信号発信に伴うAディーゼル発電機の自動起動について	所内交流電源系	平成17年 4月 6日
12	東海第二 発電所	定期検査中の所内電源の一部停電について	所内交流電源系	平成16年 2月 10日
13	敦賀発電所 2号	6.9kVメタクラ2A母線低電圧による非常用ディーゼル発電機2Aの起動・給電について	所内交流電源系	平成10年 9月 24日

※原子力施設情報公開ライブラリー (ニューシア) 登録情報から、「ガス絶縁開閉装置」、「断路器」および「外部電源喪失 (信号含む)」に伴うディーゼル発電機起動に係る件名から、「トラブル情報」および「保全品質情報」を抽出

要因分析図

X：不具合要因の可能性が考えられないもの
 △：不具合要因の可能性は否定できないもの
 ○：不具合要因の可能性が考えられるもの

事象	要因	発生する現象	調査項目	調査・検討結果	判定	添付資料1.4	
絶縁操作軸 相間短絡	電界異常	絶縁設計不良	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 に至る可能性がある。	<ul style="list-style-type: none"> 電界/絶縁設計確認 工場試験報告書確認 	×	1. (1) a. (a) 1. (1) a. (b)	
		製造不良	構成部品に製造上の形状異常が あると、電界異常となり、相間 短絡に至る可能性がある。	<ul style="list-style-type: none"> 寸法測定 	×	1. (1) b. (a)	
	絶縁性能異常	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、相間短絡に至 る可能性がある。	<ul style="list-style-type: none"> 外観確認 寸法測定 	<ul style="list-style-type: none"> 絶縁操作軸の理金と可動接軸子の嵌合部に損耗及び機械的な損傷（擦過痕）が 見られたが、電界設計に影響を及ぼすような損傷でないことを確認した。 部品の寸法測定を実施し、寸法公差内であることを確認した。 	×	1. (1) c. (a) 1. (1) c. (b)
		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、相間短絡に至る可能 性がある。	<ul style="list-style-type: none"> 雷撃履歴確認 	<ul style="list-style-type: none"> 事故時のオシロ、避雷器の動作状況を確認し、雷サージ等の異常電圧の侵入が なかったことを確認した。 	×	1. (1) d. (a)
絶縁材料不良	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、相間短絡に至る 可能性がある。	<ul style="list-style-type: none"> 外観確認 表面汚損分析 採取異物の分析 	<ul style="list-style-type: none"> 絶縁操作軸の理金と可動接軸子の嵌合部に損耗及び機械的な損傷（擦過痕）が 見られた。 短絡が発生した絶縁操作軸の表面汚損分析をした結果、絶縁操作軸の理金と可動接 軸子に使用されている金属成分（アルミニウム合金、銅）が検出された。 タンク内の採取物から短絡による溶融金属以外に箔状の金属が採取された。分析し た結果、アルミニウム合金、銅が検出された。 	△	1. (1) e. (a) 1. (2) a. (a) 1. (1) e. (b) 1. (2) a. (b) 1. (1) e. (c) 1. (2) a. (c)
		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 短絡に至る可能性がある。	<ul style="list-style-type: none"> 電界/絶縁設計確認 工場試験報告書確認 	<ul style="list-style-type: none"> 電界計算により電界/絶縁設計の妥当性を確認した。 JECIに基づいた耐電圧性能検証試験に合格していることを確認した。 	×	1. (2) b. (a) 1. (2) b. (b)
	SF ₆ ガス異常	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 絡に至る可能性がある。	<ul style="list-style-type: none"> 寸法測定 外観確認 	<ul style="list-style-type: none"> 絶縁操作軸の寸法測定を実施し、寸法公差内であることを確認した。 絶縁操作軸の外観確認を実施した結果、絶縁操作軸表面で短絡が発生しており、 内部短絡によって発生する亀裂がないことから、材料の絶縁不良による短絡は 発生していないことを確認した。 	×	1. (2) c. (a) 1. (2) c. (b)
			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に至る可 能性がある。	<ul style="list-style-type: none"> ガス圧力確認 ガス純度測定 ガス中水分測定 	<ul style="list-style-type: none"> 現地開放前にガス圧力を確認したところ、規定値以上であることを確認した。 現地にて採取したサンプリングガス結果を分析した結果、SF6ガス純度は99.1%で 管理値(97%以上)を満足することを確認した。 現地にて採取したサンプリングガスを分析した結果、SF6ガスの水分量は127ppmで 管理値(150ppm以下)を満足することを確認した。 	×	1. (2) d. (a) 1. (2) d. (b) 1. (2) d. (c)

図1 絶縁操作軸相間短絡 要因分析図

×：不具合要因の可能性が考えられないもの
 △：不具合要因の可能性は否定できないもの
 ○：不具合要因の可能性が考えられるもの

事象	要因	発生する現象	調査項目	調査・検討結果	判定	添付資料1.4
絶縁操作軸の埋金と可動接触子の嵌合部損耗	機械的な摩擦	設計強度不足	工場試験報告書確認 設計強度評価	<ul style="list-style-type: none"> JECの試験方法に基づき10,000回連続開閉試験に合格しており、設計上の繰返し角度に問題がないことを確認した。 絶縁操作軸の機械強度は、最大公差での隙間、埋金長さにおいても通常動作時および拘束時に想定される荷重に対して十分な設計強度を有していることを確認した。 	×	2. (1) a. (a) 2. (1) a. (b)
		製造不良による強度不足	製造履歴確認 材料分析 硬度測定 寸法測定	<ul style="list-style-type: none"> 製造時の加工寸法は寸法公差内であることを確認した。 絶縁操作軸の上部埋金および可動接触子の材料分析を行い、設計通りの材料が使われていることを確認した。 絶縁操作軸の埋金および可動接触子の硬度測定の結果、規格値以上であることを確認した。 絶縁操作軸の上部埋金のセレーション加工寸法を測定した結果、問題がないことを確認した。 	×	2. (1) b. (a) 2. (1) b. (b) 2. (1) b. (c) 2. (1) b. (d)
熱による溶損	操作装置（電動機）からの過大応力	組立不良による強度不足	製造履歴確認 外観確認	<ul style="list-style-type: none"> 製造履歴を確認した結果、組立状態の異常は認められなかった。 外観を確認し、組立状態の異常は認められなかった。 	×	2. (1) c. (a) 2. (1) c. (b)
		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、嵌合部が損傷に至る可能性がある。	製造履歴確認 開閉操作状況確認 操作装置特性確認	<ul style="list-style-type: none"> 製造履歴を確認した結果、製造時の異常は認められなかった。 当該断路器について、事象発生までの操作履歴を確認した結果、操作装置のモータ過電流警報発生等の異常履歴がないことを確認した。 操作装置を取付けて開閉特性を測定した結果、動作時間および操作電流が管理値内であることを確認した。 	×	2. (1) d. (a) 2. (1) d. (b) 2. (1) d. (c)
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、溶損する可能性がある。	外観確認 表面観察 製造履歴確認	<ul style="list-style-type: none"> 嵌合部は、機械的に損傷しない谷間（全24か所）を含め均一に損耗しており、山径、谷径とともに健全部より小さくなくっていることを確認した。また、嵌合部に熱的影響を与えると考えられる近隣部位には、異常は認められなかった。 電子顕微鏡（SEM）を用いて損耗部を確認したところ、金属溶融している様相が確認された。 製造履歴を確認した結果、主回路抵抗値は管理値内であったことから、嵌合部付近で通電による異常な発熱はないことを確認した。 	×	2. (2) a. (a) 2. (2) a. (b) 2. (2) a. (c)
		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嵌合部で放電が発生して溶損する可能性がある。	外観確認 表面観察 嵌合部の非接触状態継続有無確認 嵌合部の放電有無の確認 放電による溶融時間計算	<ul style="list-style-type: none"> 嵌合部は、機械的に損傷しない谷間（全24か所）を含め均一に損耗しており、山径、谷径とともに健全部より小さくなくっていることを確認した。また、金属溶融している様相が確認された。 操作装置によって駆動したところ、設計上考慮していない停止後の非接触状態が発生することを確認した。また、手で絶縁操作軸及び可動接触子を動かすことによって、非接触状態を継続させることができることを確認した。 嵌合部を非接触にした状態で運転電圧をかけたところ、嵌合部で部分放電の発生が確認された。 放電が継続した場合に、今回の事象と同等の損耗にかかる時間を解析した結果、2.000日程度であった。 	△	2. (2) b. (a) 2. (2) b. (b) 2. (2) b. (c) 2. (2) b. (d) 2. (2) b. (e)

図2 絶縁操作軸の埋金と可動接触子の嵌合部損耗 要因分析図

詳細調査結果

1. 絶縁操作軸相間短絡

(1) 電界異常

a. 電界設計不良

(a) 電界・絶縁設計確認

V相－W相間絶縁操作軸近傍（絶縁物沿面）の電界設計が、設計基準電界を下回っており、電界・絶縁設計が妥当であることを確認した。

表1 絶縁操作軸近傍（絶縁物沿面）の電界解析結果

電界値 (kV/mm)	2.1
設計基準電界 (kV/mm)	2.5

(b) 工場試験報告書確認

当該断路器について、製作時にJECに基づく耐電圧試験を実施し、合格していることを確認した。

表2 工場試験結果

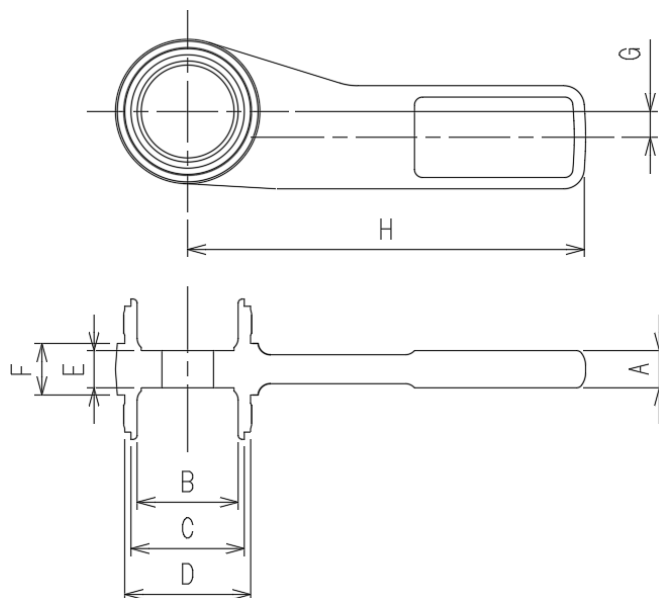
試験項目	結果
商用周波耐電圧試験 〔 短時間商用周波耐電圧試験 長時間商用周波耐電圧試験 〕	良
雷インパルス耐電圧試験	良

b. 製造不良

可動接触子および絶縁操作軸の寸法測定を実施し、寸法公差内であることを確認した。

(a) 寸法測定

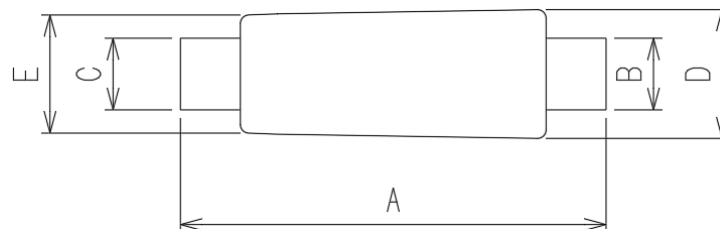
・可動接触子



(単位：mm)

符号	A	ϕB	ϕC	ϕD	E	F	G	H
図面寸法 (公差)	± 0.3	± 0.8	0 -0.08	0 -0.1	± 0.2	± 0.1	± 0.5	± 1.2
相								
U 相	0	0.25	0	-0.05	0.07	0.05	0.33	-1.20
V 相	0.05	0.04	-0.05	-0.05	0.05	0.05	-0.11	-1.18
W 相	-0.05	0.28	-0.05	-0.05	0.02	-0.05	0.48	-1.20

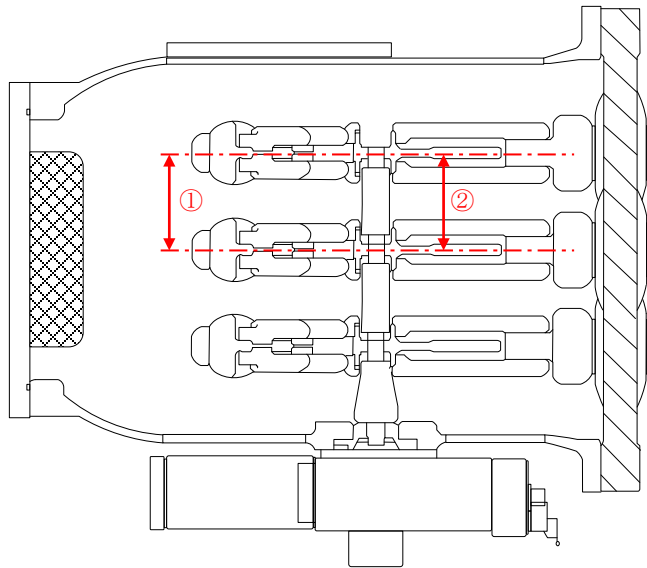
・絶縁操作軸 (相間)



(単位：mm)

符号	A	ϕB	ϕC	ϕD	ϕE
図面寸法 (公差)	± 0.5	-0.040 -0.092	-0.040 -0.092	± 0.5	± 0.5
相					
U 相-W 相	-0.48	-0.07	-0.07	0.30	0.10
W 相-V 相	-0.50	-0.07	-0.07	0.10	0

• 相間寸法



(単位：mm)

	測定箇所	公差	測定値
①	固定側相間寸法 (V-W間)	±3	-0.03
②	可動側相間寸法 (V-W間)	±3	+0.8

c. 変形・損傷

(a) 外観確認

外観確認を行った結果、以下の構成品に変形・損傷があることを確認した。また、これ以外の構成品については、異常は認められなかった。

・可動接触子

V相可動接触子の嵌合部（24山）の状態を観察した結果、V相-W相間絶縁操作軸挿入側の全箇所において、山径、谷径ともに健全部より損耗している様相を確認した。また、一部の山について、擦過痕を確認した。

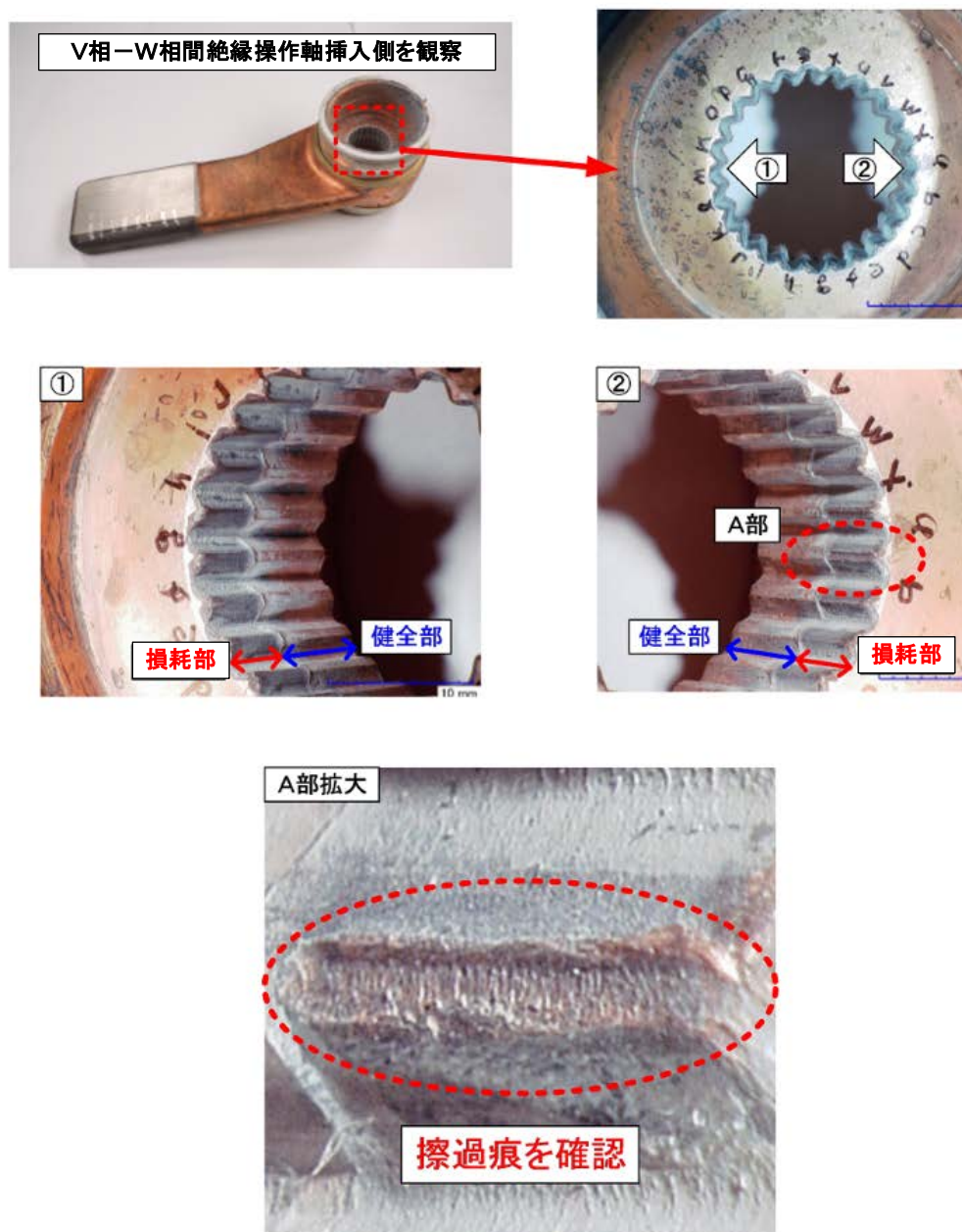


図1 可動接触子の外観確認結果

• 絶縁操作軸

V相-W相間絶縁操作軸の上部埋金の嵌合部（24山）の状態を観察した結果、全箇所において、山径、谷径とも健全部より損耗している様相を確認した。また、絶縁体材料部には短絡痕跡が見られたが、亀裂等の異常は認められなかった。

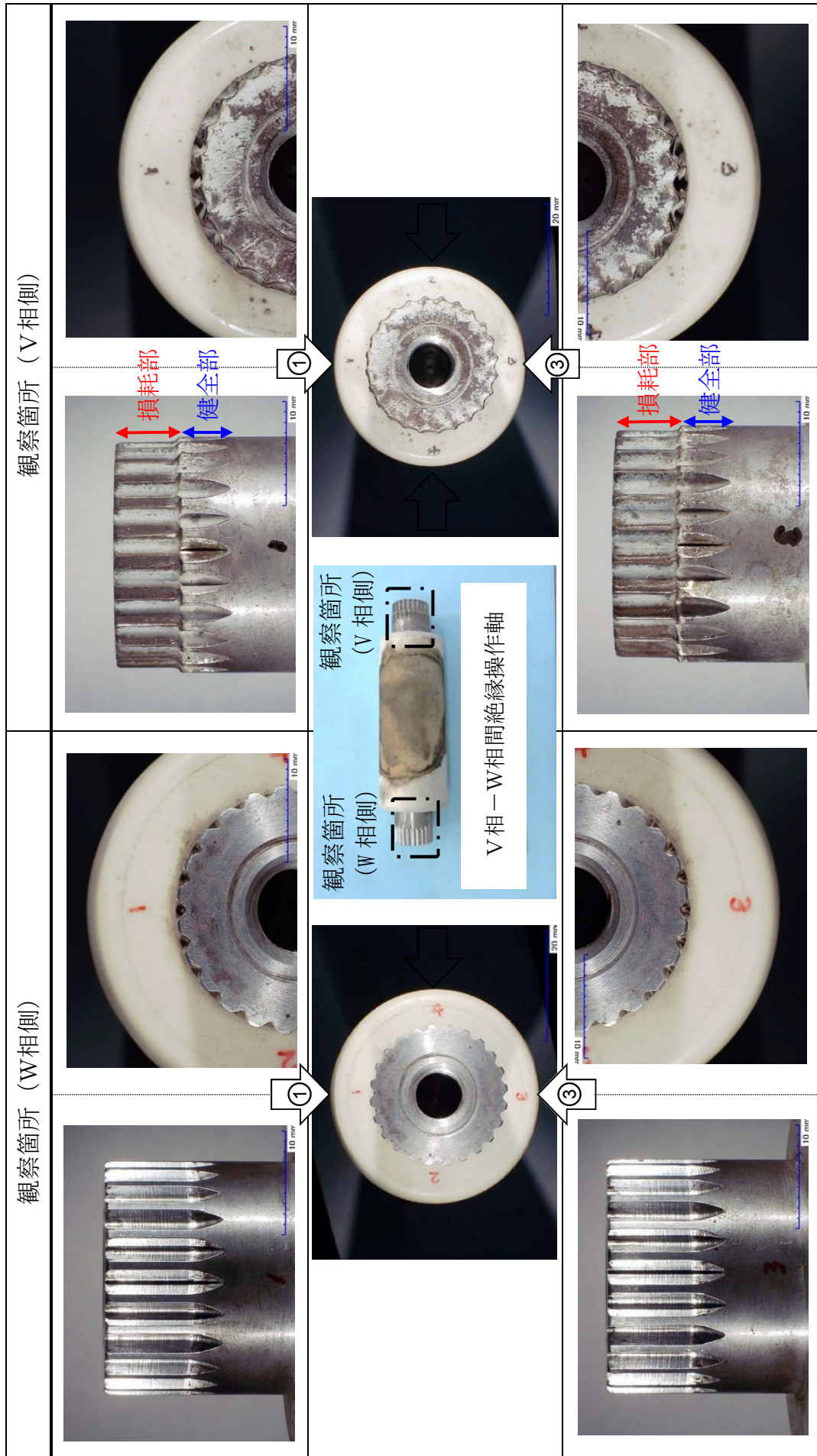
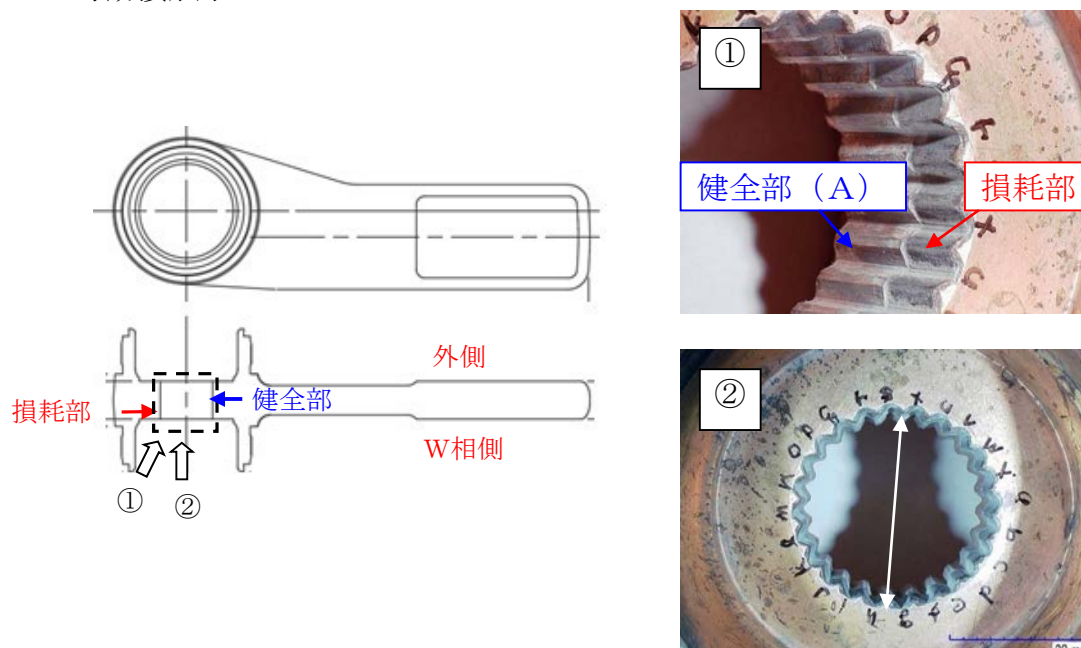


図2 絶縁操作軸埋金の外観確認結果

(b) 寸法測定

外観確認にて異常のあったV相可動接触子およびV相-W相間絶縁操作軸の埋金について、健全な嵌合部（写真①のA部）のセレーション加工寸法を測定した結果、寸法公差内であることを確認した。

・可動接触子

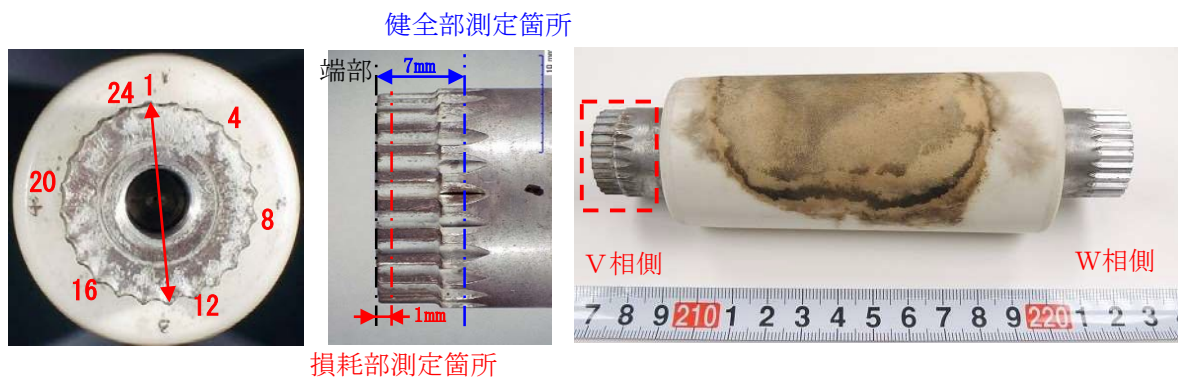


測定箇所	公差 (mm)	測定結果 (mm)	
		健全部 ※1	損耗部 ※2
a-m	+0.088/+0.046	+0.084	+0.494
f-r		+0.064	+0.474

※1：外側端部より 1mm 内側を測定

※2：W相側端部より 1mm 内側を測定

・絶縁操作軸



測定部	山—山間			谷—谷間		
	公差 (mm)	測定結果 (mm)		公差 (mm)	測定結果 (mm)	
		健全部 ^{※1}	損耗部 ^{※2}		健全部 ^{※1}	損耗部 ^{※2}
1-13	+0/-0.1	-0.07	-1.21	±0.5	0.02	-0.60
2-14		-0.08	-1.16		0.00	-0.62
3-15		-0.07	-1.10		-0.01	-0.62
4-16		-0.07	-1.11		0.00	-0.55
5-17		-0.07	-1.12		0.00	-0.52
6-18		-0.08	-1.11		-0.01	-0.51
7-19		-0.04	-1.12		-0.01	-0.54
8-20		-0.07	-1.11		-0.01	-0.52
9-21		-0.07	-1.14		-0.01	-0.49
10-22		-0.07	-1.18		-0.01	-0.47
11-23		-0.05	-1.12		0.00	-0.45
12-24		-0.07	-1.22		0.00	-0.52

※1：端部より7mm内側を測定

※2：端部より1mm内側を測定

d. 異常電圧の侵入

(a) 雷撃履歴確認

相間短絡発生時の電圧波形について確認し、自動オシロ装置の測定結果から、雷撃によるサージ電圧は確認されなかった。また、ガス絶縁開閉装置避雷器の動作も確認されなかった。

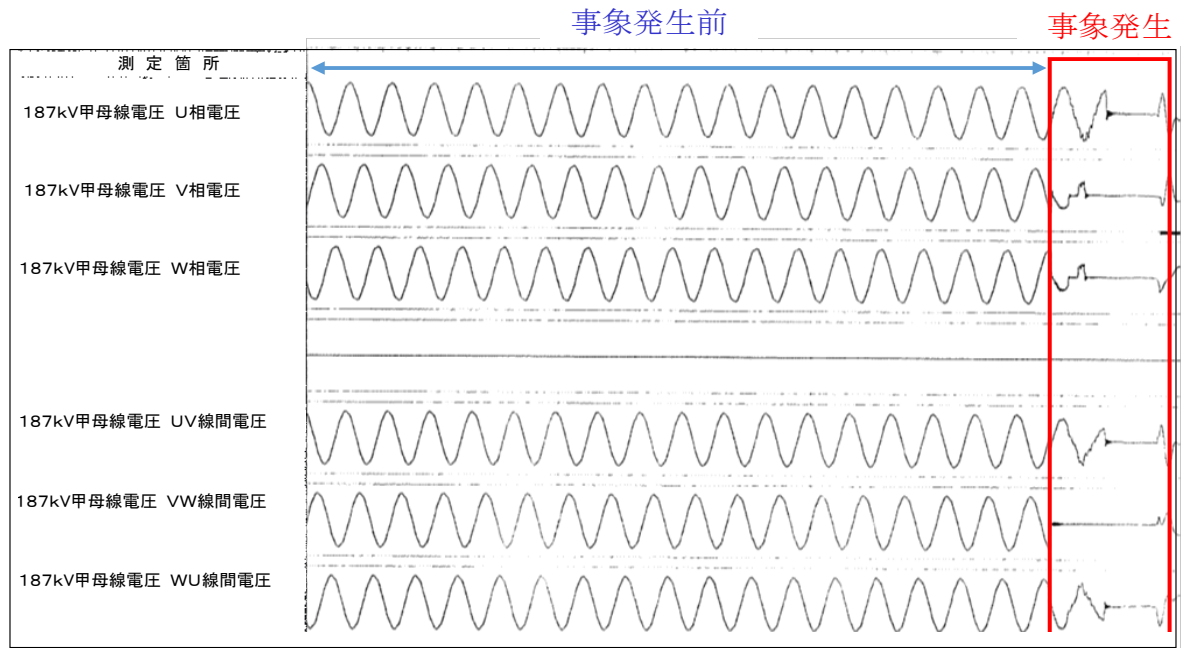


図3 自動オシロ装置測定結果

e. 異物の付着

(a) 外観確認

「1. (1) c. (a) 外観確認」のとおり、問題なかった。

(b) 表面汚損分析

絶縁操作軸の表面汚損分析を行った結果を表3に示す。短絡があったV相-W相間絶縁操作軸については、W相-U相間絶縁操作軸に比べて絶縁操作軸の埋金と可動接触子に使用されている金属成分であるAlおよびCuならびにSF₆ガスの分解によって発生するFの成分を顕著に検出した。

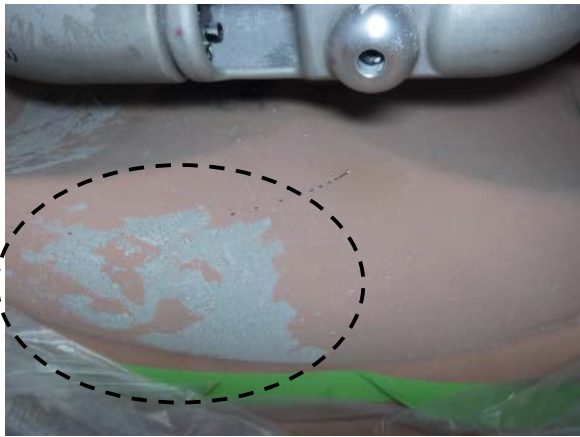

表3 表面汚損分析結果

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	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	11.94	5.50
等価塩分汚損密度	(mg/cm^2)	0.0061	0.0015
F ⁻	($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	4.04	0.81
Cl ⁻	($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	0.06	0.08
NO ₃ ⁻	($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	0.02	0.01
SO ₄ ²⁻	($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	0.11	0.02
Fe ^{2+, 3+}	($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	0.01	<0.01
Cu ²⁺	($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	3.22	0.21
Zn ²⁺	($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	0.06	0.01
Ca ²⁺	($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	0.21	0.06
Mg ²⁺	($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	0.12	0.02
Al ³⁺	($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	6.72	0.60
Si ^{2+, 4+}	($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	0.03	0.01
Ag ⁺	($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	<0.02	<0.01
Mn ²⁺	($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	0.03	<0.01
W ⁶⁺	($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	0.08	<0.01
Na ⁺	($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	0.07	0.03
K ⁺	($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	0.07	0.03

(c) 採取異物の分析

タンク内の採取物から、短絡による溶融金属以外に箔状の金属が採取された。当該金属を分析した結果、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（アルミ合金、銅）であった。

表4 採取物の観察結果

採取物全景	フッ素化合物を除去した採取物
	

(2) 絶縁性能異常

a. 異物の付着

(a) 外観確認

「1. (1) e. (a) 外観確認」のとおり、問題なかった。

(b) 表面汚損分析

「1. (1) e. (b) 表面汚損分析」のとおり、絶縁操作軸の埋金および可動接触子に使用されているA lおよびC uならびにS F₆ガスの分解によって発生するFの成分が顕著に検出された。

(c) 採取異物の分析

「1. (1) e. (c) 採取異物の分析」のとおり、タンク内の採取物から、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（アルミ合金、銅）が採取された。

b. 絶縁設計不良

(a) 電界・絶縁設計

「1. (1) a. (a) 電界・絶縁設計確認」のとおり、問題なかった。

(b) 工場試験報告書確認

「1. (1) a. (b) 工場試験報告書確認」のとおり、問題なかった。

c. 絶縁材料不良

(a) 寸法測定

「1. (1) b. (a) 寸法測定」のとおり、問題なかった。

(b) 外観確認

「1. (1) c. (a) 外観確認」のとおり、絶縁操作軸に亀裂等は発生しておらず絶縁材料に異常は認められなかった。

d. S F₆ガス異常

(a) ガス圧力確認

添付資料－8「2. ガス圧力の確認」のとおり、全て管理値以上であり、異常はなかった。

(b) ガス純度測定

現地にて採取したサンプリングガスを分析した結果、S F₆ガス純度は、99.1%であり、規定値（97%以上）を満足することを確認した。

(c) ガス中水分測定

現地にて採取したサンプリングガスを分析した結果、S F₆ガスの水分量は127ppmであり、管理値（150ppm以下）を満足することを確認した。

2. 絶縁操作軸の埋金と可動接触子の嵌合部損耗

(1) 機械的な摩耗

a. 設計強度の確認

(a) 工場試験報告書確認

当該断路器について、JECに基づく、1,000回の連続開閉試験を実施し、合格していることを確認した。

また、メーカーとして自主的に10,000回の開閉試験を実施し、合格していることを確認した。

表5 連続開閉試験

操作方式	制御電圧の条件	開閉回数	判定
電気操作	定格値	900回	良
	最高値	50回	良
	最低値	50回	良

(b) 設計強度評価

当該断路器の絶縁操作軸の埋金および可動接触子の嵌合部について、最大公差での隙間および実嵌合長さにおける、通常動作時および拘束時に想定される荷重に対して、十分な設計強度を有していることを確認した。

表6 最大公差での隙間および実嵌合長さでの強度評価結果

部位 動作	可動接触子			絶縁操作軸の埋金		
	曲げ破壊 応力 (MPa)	発生曲げ 応力 (MPa)	裕度 [※]	曲げ破壊 応力 (MPa)	発生曲げ 応力 (MPa)	裕度 [※]
通常動作時	235	12.1	19.4	456	12.1	37.7
拘束時		56.6	4.2		56.6	8.1

※曲げ破壊応力の発生曲げ応力に対する裕度

b. 製造状態の確認

(a) 製造履歴確認

添付資料-11「1. 製造履歴調査結果」から、製造状態の異常は認められなかった。

(b) 材料分析

絶縁操作軸の上部埋金および可動接触子の材料分析を行い、設計通りの材料が使われていることを確認した。

(c) 硬度測定

硬度測定の結果、規格値（絶縁操作軸の埋金：74.8HRB、可動接触子：43HRB）以上であることを確認した。

(d) 寸法測定

「1. (1) c. (b) 寸法測定」のとおり、製造状態の異常は認められなかった。

c. 組立状態の確認

(a) 製造履歴確認

添付資料－1 1 「1. 製造履歴調査結果」から、組立状態の異常は認められなかった。

(b) 外観確認

外観を確認した結果、組立状態の異常は認められなかった。

d. 操作装置（電動機）からの応力確認

(a) 製造履歴確認

添付資料－1 1 「1. 製造履歴調査結果」から、製造履歴の異常は認められなかった。

(b) 開閉操作状況確認

当該断路器について、事象発生までの開閉操作履歴を確認した結果、操作装置のモータ過電流警報発生などの異常履歴がないことを確認した。

(c) 操作装置特性確認

事象発生後の詳細調査において、開閉時間および操作電流が管理値内であること、製造時から有意な差がないことを確認した。

(2) 熱による溶損

a. 嵌合部周辺からの熱影響の確認

(a) 外観確認

「1. (1) c. (b) 寸法測定」のとおり、嵌合部は、機械的に損傷しない谷間（全24か所）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。また、嵌合部に熱影響を与えると考えられる近隣部位には、異常は見られなかった。

(b) 表面観察

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ついて、電子顕微鏡（SEM）による表面観察を行ったところ、熱による金属溶融の様相を確認した。観察結果を表7に示す。

(c) 製造履歴確認

添付資料-11「1. 製造履歴調査結果」より、主回路抵抗値は管理値内であり、嵌合部付近で通電による異常な発熱はないことを確認した。

b. ギャップ放電による発熱の確認

(a) 外観確認

「1. (1) c. (b) 寸法測定」のとおり、嵌合部は、機械的に損傷しない谷間（全24か所）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。

(b) 表面観察

「2. (2) a. (b) 表面観察」のとおり、熱による金属溶融の様相を確認した。

表 7 (1 / 2) V相-W相間絶縁操作軸の上部埋金の表面観察

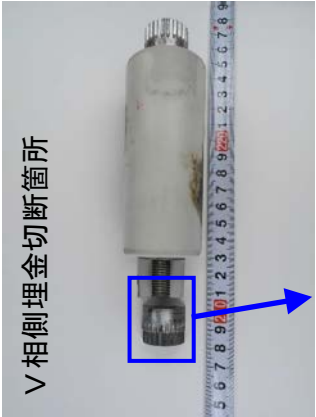
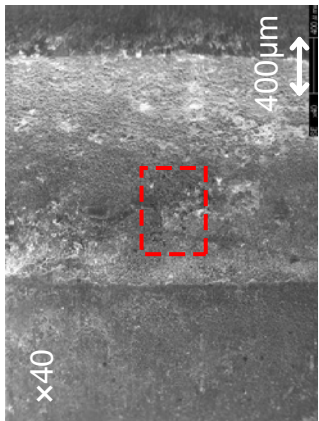
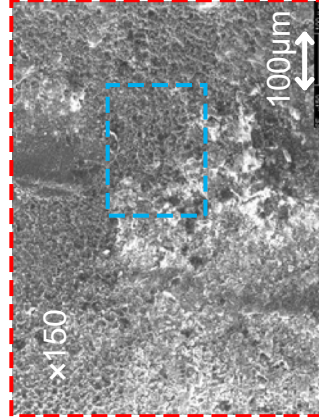
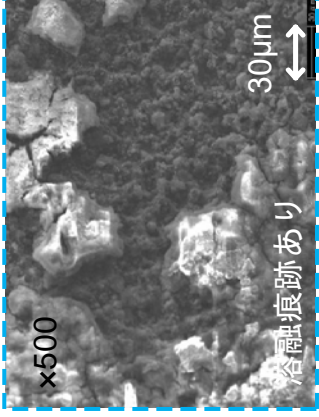
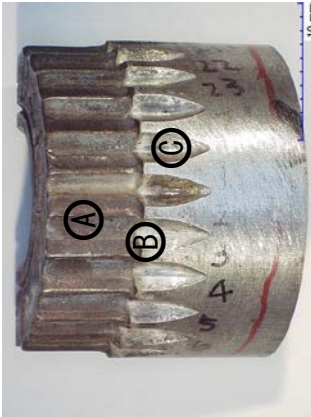
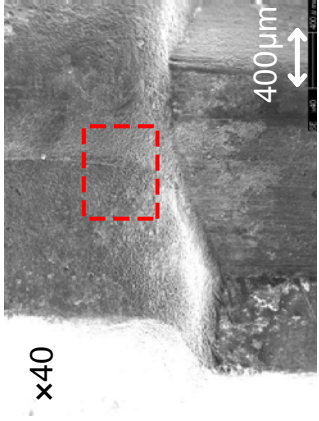
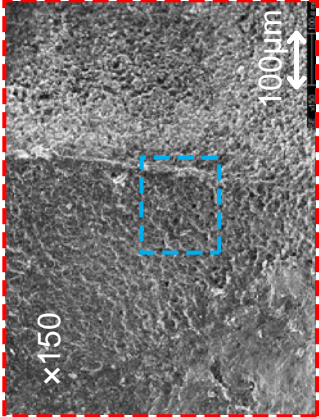
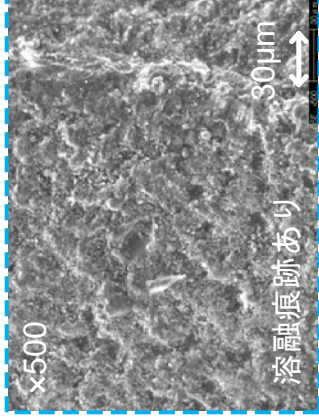
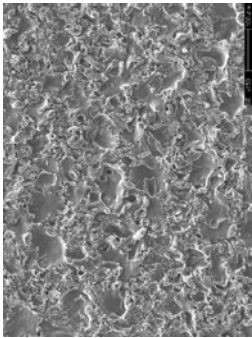
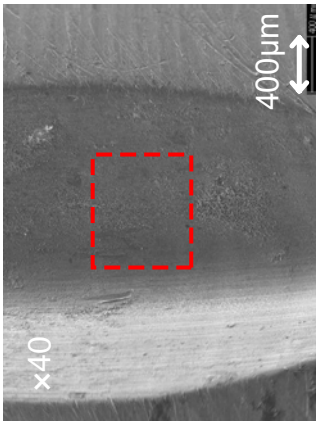
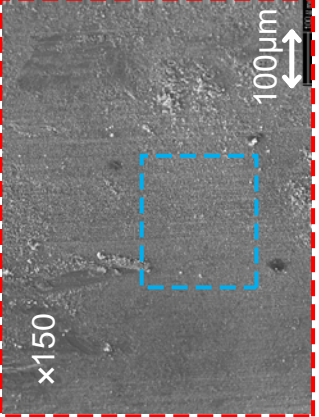
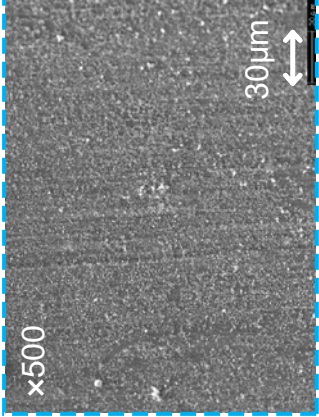

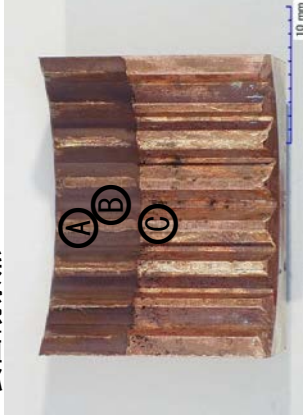
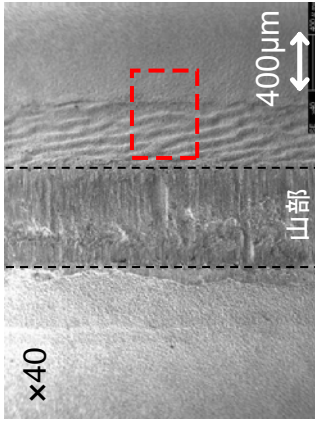
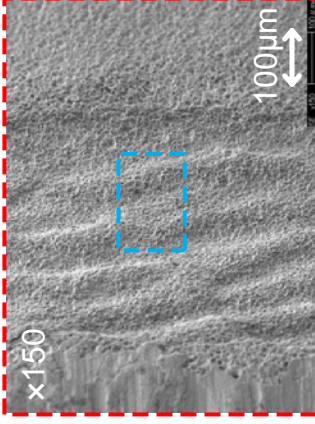
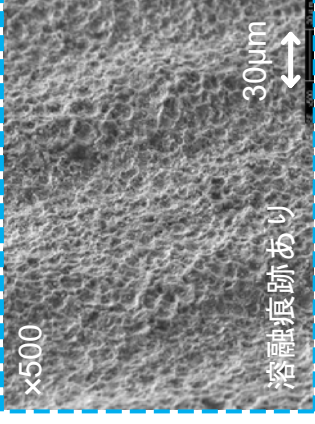
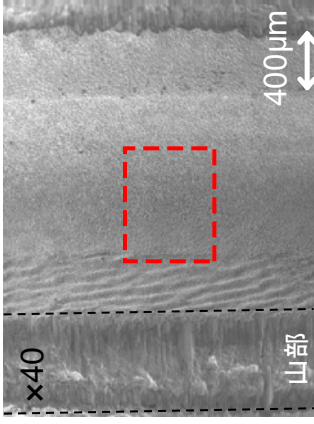
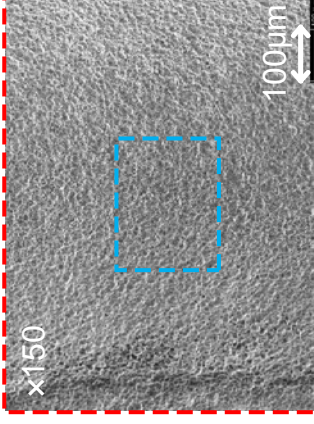
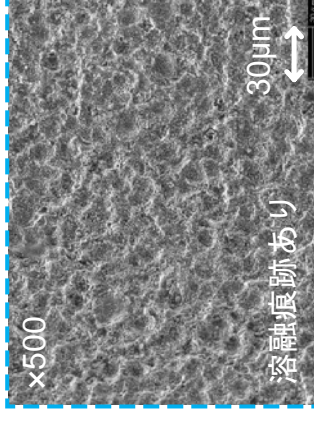
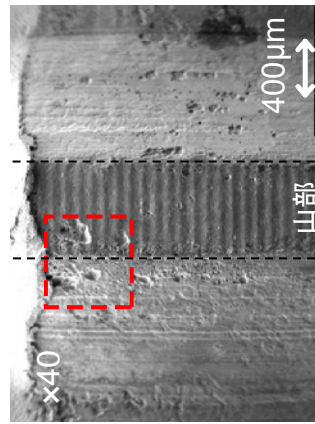
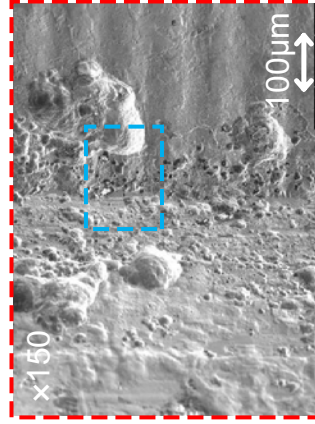
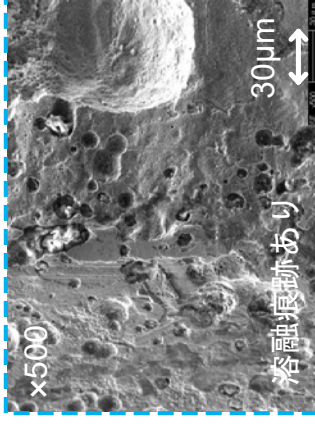
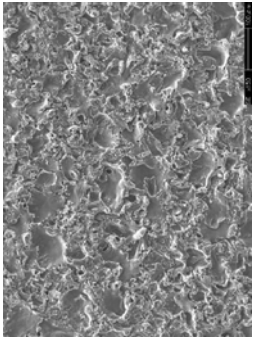
観察箇所	電子顕微鏡 (SEM) 画像						
<p>V相側埋金切断箇所</p> 	<p>x40</p>  <p>400μm</p>	<p>x150</p>  <p>100μm</p>	<p>x500</p>  <p>30μm</p> <p>熔融痕跡あり</p>	<p>表面観察点</p> 	<p>x40</p>  <p>400μm</p>	<p>x150</p>  <p>100μm</p>	<p>x500</p>  <p>30μm</p> <p>熔融痕跡あり</p>
<p>(参考) 放電加工の金属表面</p> 	<p>x40</p>  <p>400μm</p>	<p>x150</p>  <p>100μm</p>	<p>x500</p>  <p>30μm</p>				

表 7 (2 / 2) V相可動接触子の表面観察

観察箇所	電子顕微鏡 (SEM) 画像											
<p>可動側接触子切出箇所</p>  <p>表面観察点</p> 	A部 (異常部)				B部 (異常部)				C部 (健全部)			
<p>(参考) 放電加工の金属表面</p> 												

(c) 嵌合部の非接触状態継続有無確認

設計上、嵌合部をセレーション構造としていることから、動作開始直後と動作停止直前は絶縁操作軸の上部埋金と可動接触子の嵌合部が瞬間的に非接触となる場合があるが、瞬間的な非接触では放電は発生しない。動作停止後に非接触状態が継続した場合、嵌合部の隙間で放電現象が発生する可能性があることから、当該断路器と同型式の断路器を用いて、絶縁操作軸の上部埋金と可動接触子の非接触状態の継続有無について確認した。断路器の投入、開放動作機構について図4に示す。

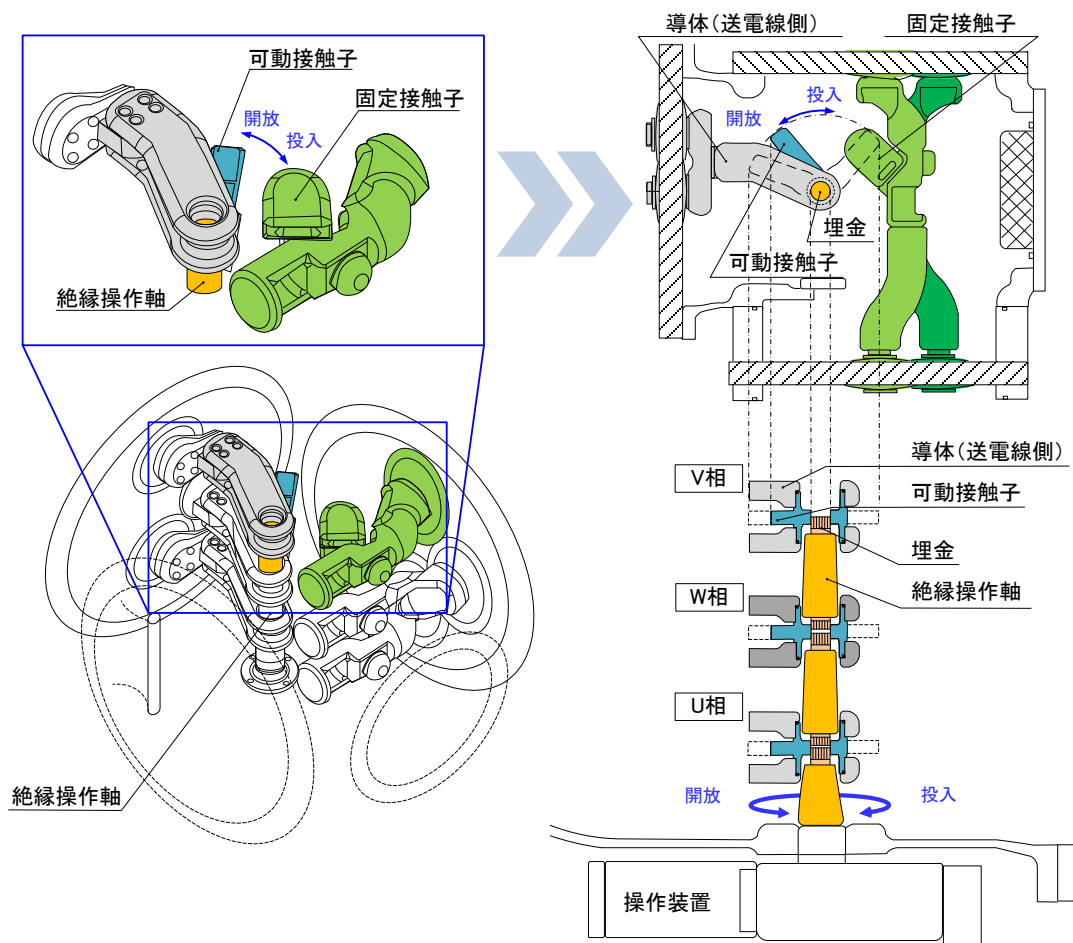
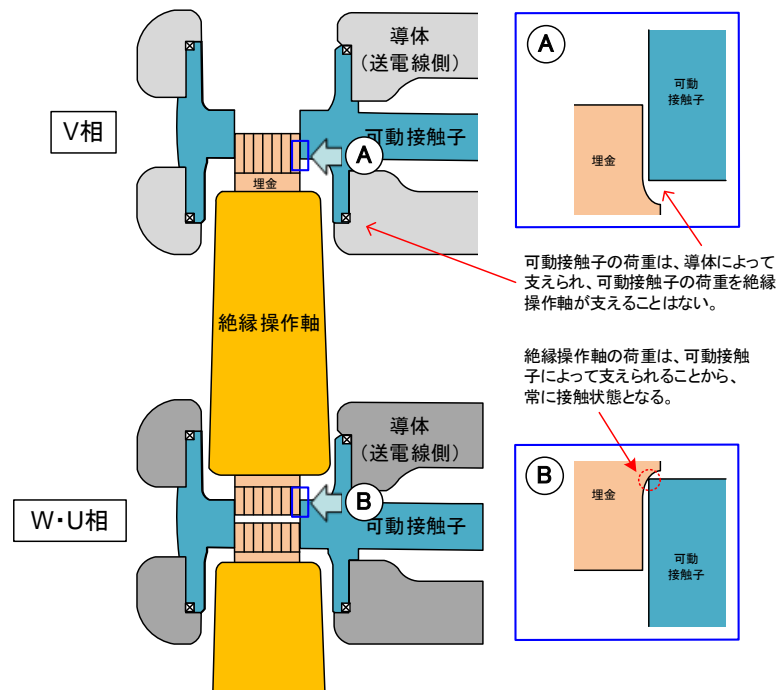


図4 断路器の動作機構

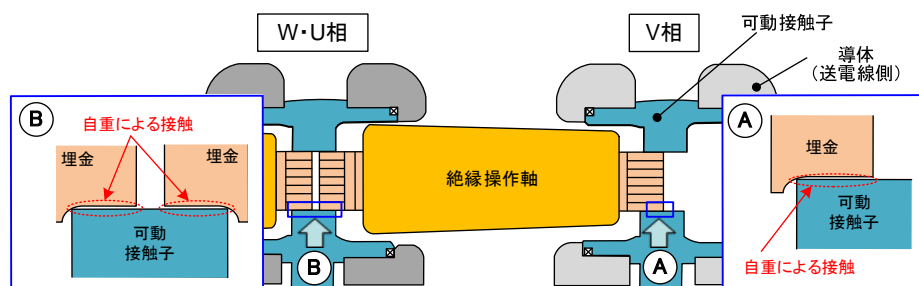
i. 操作装置による非接触状態継続有無の確認（通常）

運転時同様の操作装置を用いて絶縁操作軸および可動接触子を動作させ、非接触状態の継続有無を確認する試験を1,000回実施した。試験の結果、以下に示す挙動となることを確認した。その結果の一例を図5に示す。動作中は瞬間的な非接触状態が発生するが、1ms程度の瞬間的な非接触状態であることから、放電が発生することはない。

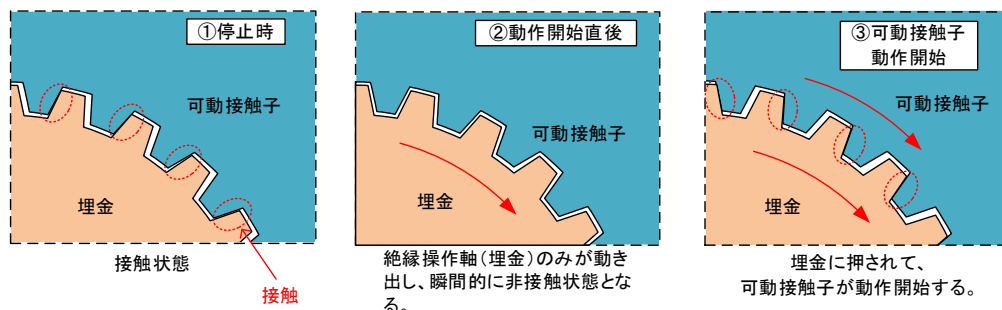
- 絶縁操作軸の下側の嵌合部は、構造上、可動接触子が絶縁操作軸の荷重を支えていることから常に接触状態となる。このため、動作中の瞬間的な非接触状態については、各絶縁操作軸の上側の嵌合部で発生し、下側の嵌合部においては発生しない。



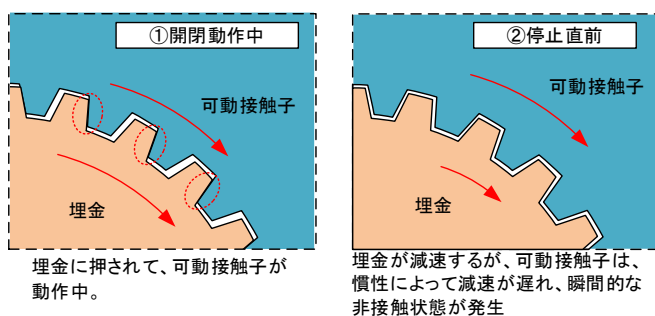
- 同様に絶縁操作軸の荷重を可動接触子が支える（絶縁操作軸が水平方向に配置される）構造となる断路器については、非接触状態は発生しない。



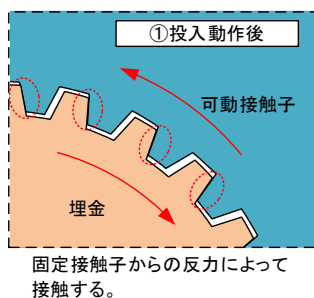
- ・動作開始直後は、絶縁操作軸のみが動き出し、停止時に接していた面と逆の面に当たるまでの瞬間は、面での接触がなくなることから、各絶縁操作軸の上側の嵌合部において瞬間的な非接触状態が発生する可能性がある。(図5中のA)



- ・開放動作時は、動作停止直前に絶縁操作軸の速度が徐々に低下するのに対して、可動接触子は慣性によって速度低下が遅れるため、各絶縁操作軸の上側の嵌合部の面が離れ、瞬間的な非接触が発生する。(図5中のB)



- ・一方、投入動作時は、停止直前に可動接触子が固定接触子と嵌合するため、可動接触子は固定接触子から反力を受け、絶縁操作軸はねじりひずみによる回転力が加わることから、絶縁操作軸の埋金と可動接触子が接触した状態で停止する。(図5中のC)



- ・前述した非接触状態は瞬間的なものであり、停止後は継続しない。
- ・W相可動接触子はV相-W相間絶縁操作軸の荷重を受け、U相可動接触子はW相-U相間絶縁操作軸の荷重を受けるのに対して、V相可動接触子は、上部から絶縁操作軸の荷重がかからないことから摩擦力が小さい。このためV相の嵌合部については、他部に比べて非接触状態となる可能性がある。

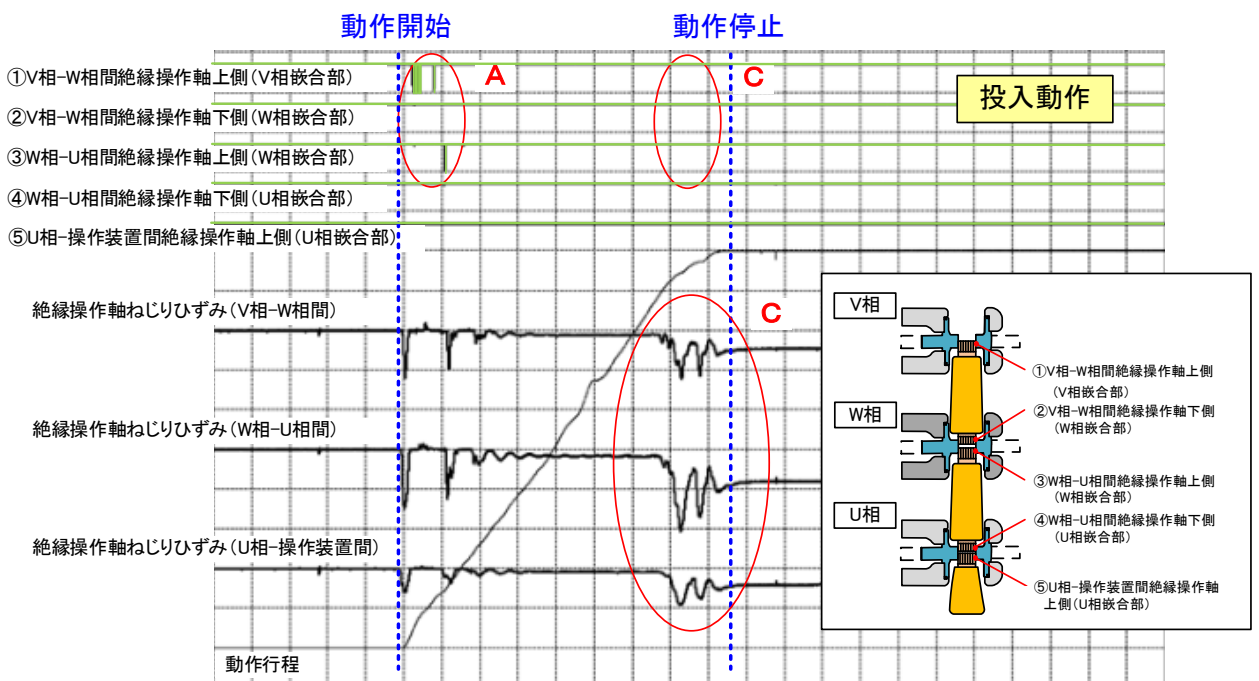
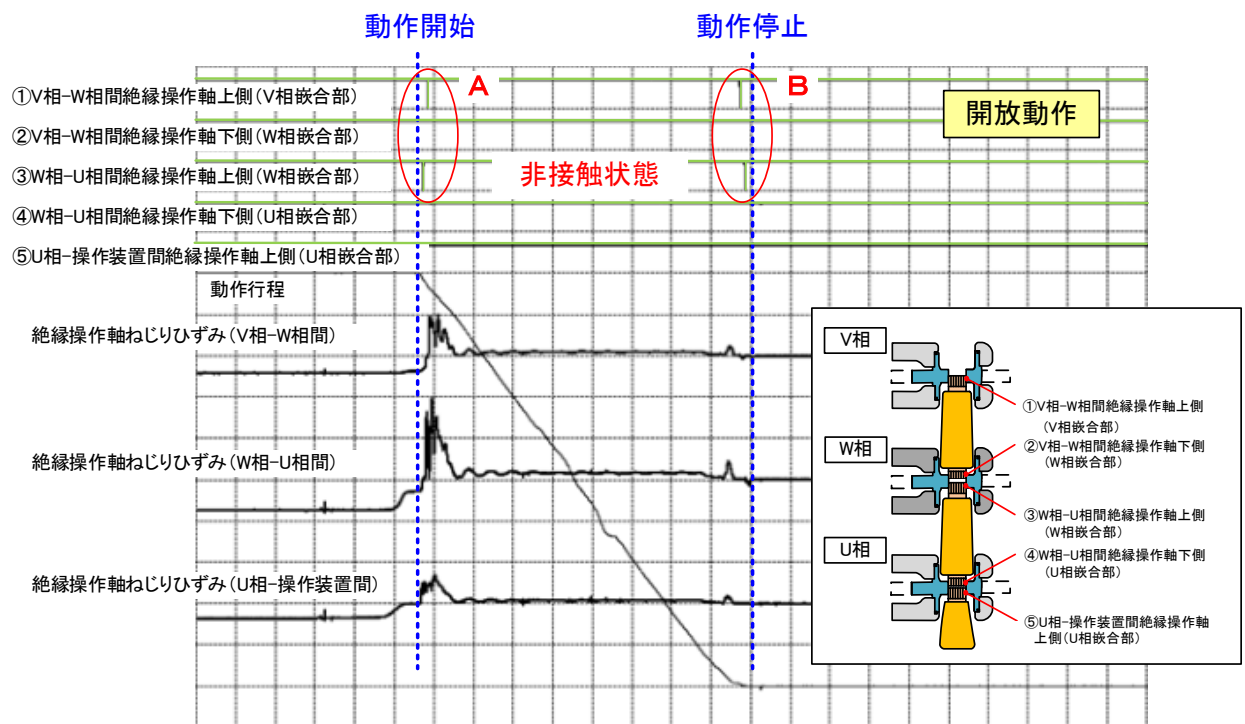


図5 操作装置による非接触状態継続有無の確認 (通常)

ii. 操作装置による非接触状態継続有無の確認（摩擦力調整）

「i. 操作装置による非接触状態継続有無の確認（通常）」のとおり、摩擦力の違いによって非接触状態となる頻度が異なることから、可動接触子と導体間の摩擦力を小さくして非接触状態の有無を確認する試験を1, 500回実施した。摩擦力の調整は、可動接触子と導体間に塗布するグリスの量を調整することによって行った。その結果の一例を図6に示す。

試験の結果、以下の挙動が見られた。

- ・ V相-W相間絶縁操作軸の上側の嵌合部は、動作停止直前に非接触状態となる回数が増えることが確認され、動作停止後にも瞬間的に非接触状態となる状況が確認された。
- ・ その他の嵌合部の挙動については、変化がなかった。

動作停止後の継続的な非接触状態はなかったが、動作停止後に瞬間的であっても非接触状態が発生することがあった。これは、V相可動接触子が動作停止直前にチャタリングし、動作停止後まで継続することによるものと推定した。

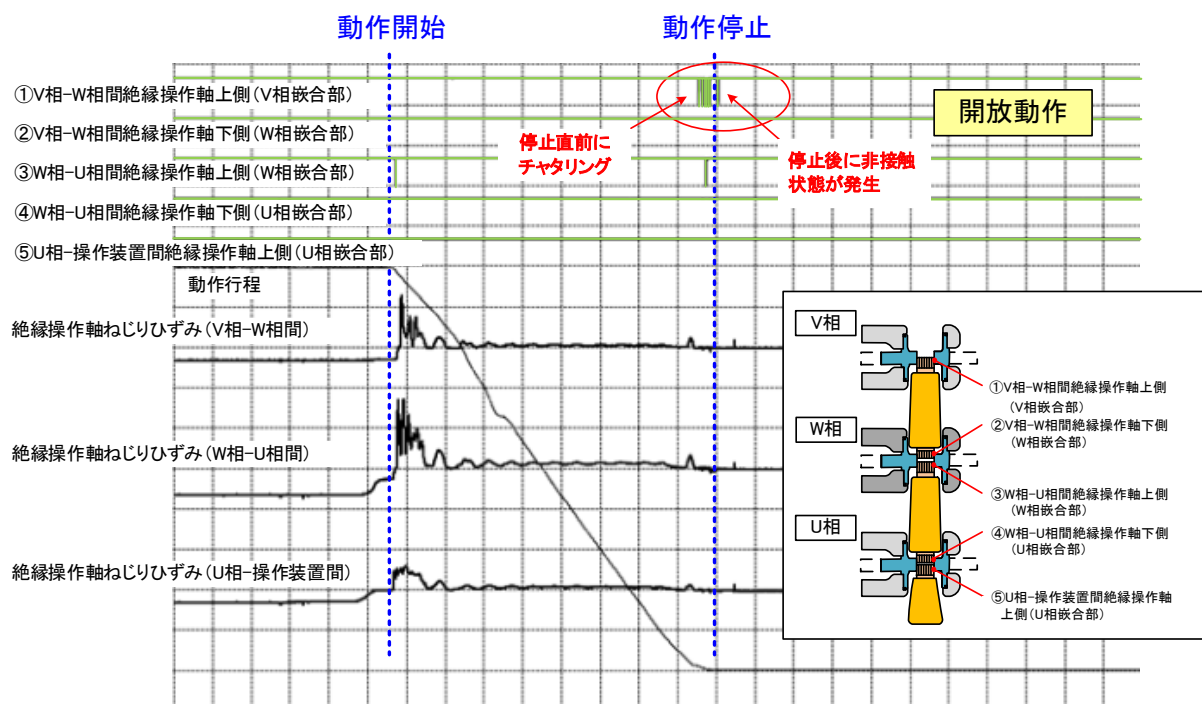


図6 操作装置による非接触状態継続有無の確認（摩擦力調整）

iii. 手動による非接触状態継続有無の確認

「ii. 操作装置による非接触状態継続有無の確認（摩擦力調整）」の結果、摩擦力を小さくすることによって可動接触子が動作停止後もチャタリングする場合があることを確認したが、操作装置の動作停止後も非接触状態が継続することは確認できなかった。

このため、開放位置から手動で絶縁操作軸または可動接触子を微調整したところ、非接触状態が継続することが確認された。

以上のことから、可動接触子が動作停止時にチャタリングするような場合は、動作停止後も非接触状態が継続する可能性があることを確認した。

(d) 嵌合部の放電有無の確認

絶縁操作軸の埋金と可動接触子の嵌合部を「iii. 手動による非接触状態継続有無の確認」と同様の方法で非接触状態とした後に、主回路に187 kVを30分間連続的に印加した結果、放電（部分放電）が連続的に発生することを確認した。また、試験後に解体し、可動接触子と絶縁操作軸の埋金の嵌合部を確認した結果、一部に白色化（フッ素化合物の付着）した様相を確認した。

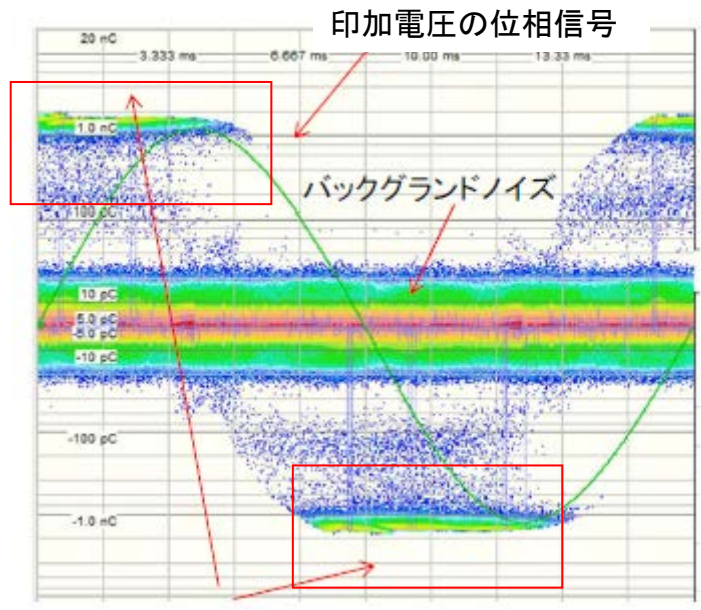
嵌合部に隙間があった場合、当該嵌合部の電位差（波高値）は8 kVであり、一方で平等電界におけるSF₆ガスの火花電圧は7 kVであるため、理論上も放電は発生する。

また、本試験の結果から、嵌合部の部分放電の有無は、部分放電診断によって検知できるレベルであることを確認した。また、部分放電によって嵌合部が損耗している場合は、フッ素化合物が落下することから、開放点検時にフッ素化合物の有無を確認することが有用であることが分かった。

表8 部分放電の試験条件

項目	条件
印加電圧	交流187 kV r m s [※]
断路器状態	開放
ガス圧力	SF ₆ ガス0.6 MP a

※ r m s : 実効値



部分放電の様相

図7 187kV部分放電測定データ



図8 放電試験後 解体品の確認結果

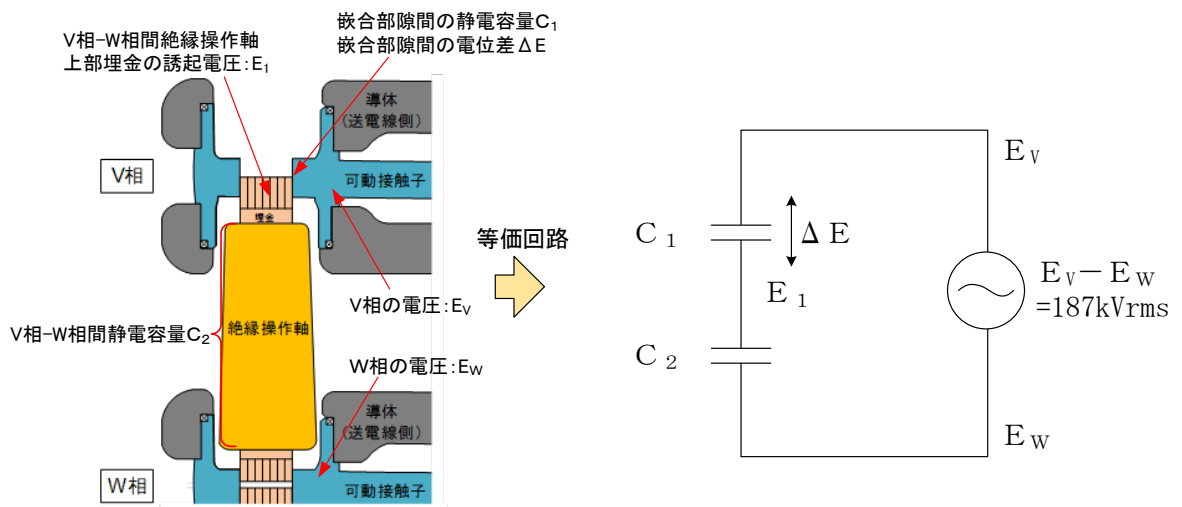


図9 等価回路

(e) 放電による溶融時間計算

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、今回の事象と同等の損耗にかかる時間を推定した結果、200日程度であることが確認された。また、当該断路器の運転履歴を確認したところ至近に1年以上連続で開放状態となっている実績を確認した。

断路器内部確認結果

系統状態を変えずに点検可能な断路器3台（主変圧器1号乙母線断路器、起動変圧器1号乙母線断路器および伊方南幹線1号線線路側断路器）について、現地で開放し内部を確認した。内部の確認結果は以下に示すとおり、異常は認められなかった。

1. 外観確認結果

外観確認の結果、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放電痕跡、損耗は見られなかった。また、断路器内部を目視にて確認した結果、導体表面やタンク底部等にフッ素化合物やその他異物の存在は認められなかった。

2. 通電状態確認結果

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（テスターで導通を確認）であることを確認した。

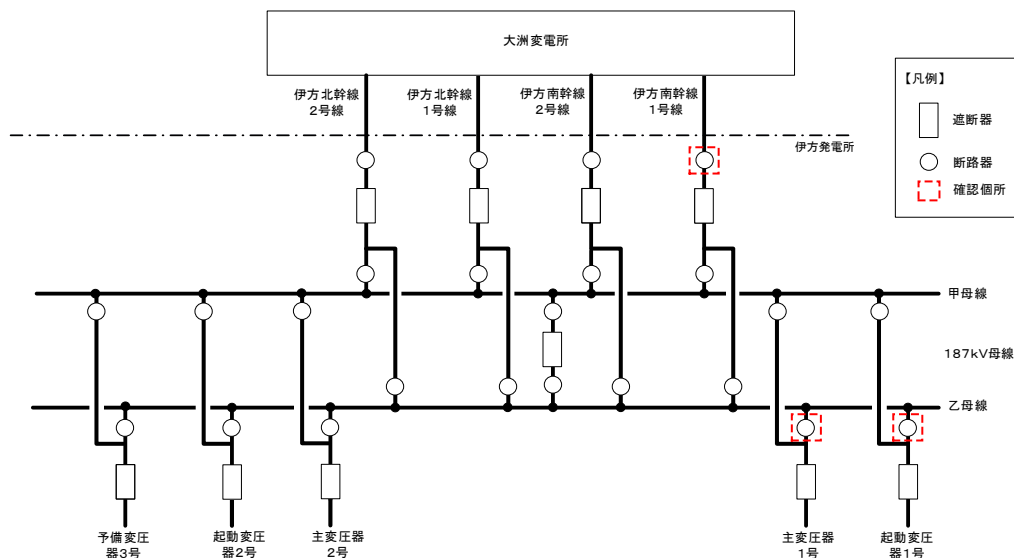

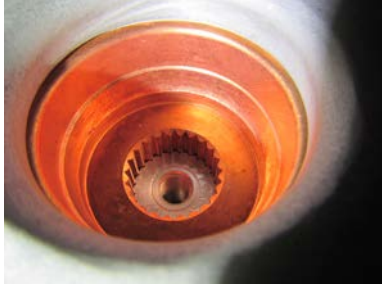






図1 断路器内部確認箇所

表1 断路器内部確認結果

	主変圧器1号 乙母線断路器	起動変圧器1号 乙母線断路器	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			
断路器内部			

試験用系統構成、手順等の評価

1. 今回の試験系統構成、手順等の評価

今回の187kVブスタイ保護リレーの方向試験の計画に当たっては、以下の検討を実施しており、その検討内容について評価した。

(1) 送電系統についての検討（原子力部門、系統運用部門）

「四国電力株式会社 系統運用指針」に従い、原子力部門にて今回の試験におけるリスクおよびその対策について検討し、系統運用部門とも協議のうえ試験系統構成等を計画した。

a. 187kVブスタイ保護リレーの方向試験に伴う187kV系統構成検討

過去に実施した同様の方向試験の実績を参考として、今回の試験における変電所側や送電線側の現場状況等も踏まえ、187kVブスタイ保護リレーの方向試験に必要な設備の利用範囲および負荷条件の電流等の検討を行い、系統構成を決定した。

具体的には、

- ・方向試験では、母線連絡遮断器に電流を流すため、甲母線に所内負荷、乙母線に電源（送電線）を接続、または甲母線に電源（送電線）、乙母線に所内負荷を接続する必要があること
- ・方向試験は、実際に使用する187kV送電線、母線、遮断器等を使用して確認する試験のため、仮設備ではなく実系統での試験を実施する必要があること

から、方向試験の系統構成として、甲母線に所内負荷（1号起動変圧器、2号起動変圧器、3号予備変圧器）、乙母線に電源（送電線：伊方北幹線1L・2L、伊方南幹線1L・2L）を接続することとした。

b. 電気事故を局所化するための保護対策の検討

送電線事故や母線事故が発生した際に、事故範囲を局所化できるよう、保護リレーの保護する範囲を調整する場合もあるが、今回試験対象の187kVブスタイ保護リレーについては、常時作動しない運用（ロック運用）のため、試験時も通常時と保護リレーの状態が変わらないことから、特段の保護範囲の調整が不要であることを確認した。

c. 実施時期の検討

重負荷期や雷・雪・台風などの災害が予想される時期の回避など、天候条件を考慮して、試験の実施時期を計画した。

d. 天候条件の考慮

試験においては、天候条件を考慮した試験計画とした。

- ・雷や台風等の悪天候の場合には、試験の中止、延期を検討する。
- ・試験中に、天候の状況が悪化した場合には、試験を中止する。

(2) 所内系統についての検討（原子力部門の発電所内関係箇所）

a. 試験の実施時期

原子力安全に係るリスクを考慮し、3号機のプラント停止時期を選定し、その中でも燃料取出後の十分冷却され、所内負荷も少ない運転モード外（キャビティ全ブロー中）の時期での実施を計画した。

b. 電源の確保（外部電源、非常用電源）

試験中に送電線事故等が発生した場合でも、電源供給に支障のないように、試験に用いる外部電源以外の電源（外部電源、非常用電源）を複数確保するよう計画した。

○ 試験に用いる外部電源以外の外部電源

- ・500kV送電線
- ・平ばえ支線（66kV）
- ・亀浦変電所からの給電（6.6kV）

○ 非常用電源

- ・非常用ディーゼル発電機3B 1基（3Aは点検中）
- ・非常用ディーゼル発電機2号 2基
- ・空冷式非常用発電装置 4台

c. 試験用負荷の検討

187kVブスタイ保護リレーの方向試験においては、方向試験で使用する測定装置が検知できる電流（約7MWに相当する電流）を母線連絡遮断器に流す必要があった。今回、1、2号機は廃止決定しており所内負荷が少なく、1、2号機の所内負荷（約4MW）だけでは試験に必要な電流を確保することができないことから、試験に必要な電流を確保するため、過去に実施した同様の方向試験の実績も踏まえ、1、2号機に加え既設設備の実負荷である3号機の所内負荷（約3MW）を使用した。

d. 系統構成のための操作回数・順序の評価

通常、伊方発電所の187kV送電線、負荷は1甲2乙^{※2}の接続となるよう運用している。

このため、方向試験の系統構成のための操作においては、不要な操作が生じないように、送電線を乙母線に、負荷を甲母線に接続することとした。また、上流の送電線側を切替えた後に下流の負荷側を切替える一般的な順序であることから、送電線側を切替えた後に、負荷側を切替えることとした。

- ※2 甲母線：1号負荷、伊方北幹線1号線、伊方南幹線1号線
- 乙母線：2号負荷、伊方北幹線2号線、伊方南幹線2号線
- 3号負荷は甲母線に接続

e. 3号機所内負荷の切替え時期の評価

方向試験では、3号機所内負荷を使用することとしており、187kV送電線から3号機所内負荷を給電するには、点検していた予備変圧器3号を復旧する必要があった。

このため、方向試験に必要な系統構成とする前に予備変圧器3号を無負荷受電し、その後、所内電源を切替え、負荷運転により予備変圧器3号の健全性を確認した後に187kV送電線の系統切替えを行うこととした。予備変圧器3号の健全性を確認した直後に187kV送電線の系統切替えを実施することは、187kV送電線の片母線接続時間を最小限にすることができ、また、点検後のインサービスのための確認行為としては一般的であった。

(3) 今回の試験系統構成、手順等の評価結果（まとめ）

(1)、(2)に示す通り、今回の方向試験の計画に当たっては、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。

2. 更なるリスク低減に係る検討

今回、1、2、3号機の所内負荷が数秒間同時に停電したことから、他の作業手順の可能性を踏まえ、原子力安全に係るリスクを更に低減するため、3号機所内負荷の切替え時期および試験用負荷の使用について、更なる検討を実施した。

また、過去の同様な試験についても試験系統内の事故発生時の影響について同様に評価を実施した。

(1) 3号機所内負荷の切替え時期の再評価

ここでは、「ケース① 3号所内負荷を187kV側に切替え後に送電線4回線を片母線へ接続する場合（今回のケース）」と「ケース② 送電線4回線を片母線へ接続した後に3号所内負荷を187kV側に切替える場合」について評価した。

a. 送電線および母線事故時の停電評価

(a) 187kV送電線および母線事故時の停電評価

187kV送電線事故および母線事故が発生した場合、停電となる範囲について、評価した結果を表2に示す。

送電線事故の場合、2回線事故を想定しても、所内負荷が停電となることはない。

1母線事故の場合、ケース①（今回のケース）では、1、2、3号機の所内負荷が停電となる。ケース②では、1、2号機の所内負荷は停電となるが、3号機所内負荷は、500kV送電線から受電している状態を継続することから停電せず、1、2、3号機の所内負荷が同時停電することはない。

表2 187kV事故時の停電評価^{※1}

事故種別 受電状態	送電線事故		1母線（乙母線） 事故
	1回線事故 （全4回線）	2回線事故 （全4回線）	
ケース① （今回のケース）	○ 影響なし 〔187kV送電線残り3回線より受電継続〕	○ 影響なし 〔187kV送電線残り2回線より受電継続〕	× ^{※2} 1、2、3号機 所内負荷停電 〔187kV母線停止〕
ケース②	○ 影響なし 〔187kV送電線残り3回線より受電継続〕	○ 影響なし 〔187kV送電線残り2回線より受電継続〕	× ^{※3} 1、2号機 所内負荷停電 〔187kV母線停止〕
			○ ^{※3} 3号機 影響なし 〔500kV送電線より受電継続〕

※1 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

※2 1、2、3号機所内負荷は甲母線に接続し、187kV送電線は4回線全て乙母線に接続とする。

※3 3号機所内負荷は500kV送電線から受電。それ以外は※1に同じ。

(b) 500kV送電線および母線事故時の停電評価

今回の事故は、187kV送電線が遮断される事故であったものの、仮に今回の試験系統において500kV送電線または母線の事故が発生した場合の停電範囲について評価を実施した。結果を表3に示す。

送電線1回線事故の場合、1、2、3号機の所内負荷が停電となることはない。

送電線2回線事故または母線事故の場合、ケース①（今回のケース）では、1、2、3号機いずれも187kV送電線から受電している状態を継続することから所内負荷は停電しない。ケース②では、187kV送電線からの受電継続により、1、2号機所内負荷は停電することはないが、500kV送電線から3号機所内負荷を受電時に、500kV送電線2回線または母線事故の発生により、3号機所内負荷は数秒間停電する。

表3 500kV事故時の停電評価※

事故種別 受電状態	送電線事故		母線事故
	1回線事故 (全2回線)	2回線事故 (全2回線)	
ケース① (今回のケース)	○ 影響なし 〔187kV送電線より受電継続〕	○ 1、2、3号機所内負荷影響なし 〔187kV送電線より受電継続〕	○ 1、2、3号機所内負荷影響なし 〔187kV送電線より受電継続〕
ケース②	○ 影響なし 〔1、2号機 187kV送電線より受電継続〕 〔3号機 500kV送電線より受電継続〕	○ 1、2号機所内負荷影響なし 〔187kV送電線より受電継続〕	○ 1、2号機所内負荷影響なし 〔187kV送電線より受電継続〕
		× 3号機所内負荷停電 〔500kV送電線より受電時、500kV送電線2回線停止〕	× 3号機所内負荷停電 〔500kV送電線より受電時、500kV母線停止〕

※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

b. 系統故障率の評価

次に、「ケース① 3号所内負荷を187kV側に切替え後に送電線4回線を片母線へ接続する場合（今回のケース）」と「ケース② 送電線4回線を片母線へ接続した後に3号所内負荷を187kV側に切替える場合」において、系統の故障について故障率の観点から、定性的な評価を実施した。結果を表4に示す。なお、本評価では、試験系統内の送電線、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した。

図1に示すとおり、ケース②はケース①に比べて3号機所内負荷を187kV側へ切替える時間が含まれるため、送電線片母線接続となる時間が長くなり、系統全体としての故障率は上昇する。

ケース①およびケース②とも、操作対象、操作回数が同じことから、設備操作に係る故障率は同じである。

表4 系統故障率の評価※

	ケース① (今回のケース)	ケース②
187kV送電線4回線を乙母線接続時の機器故障率	○	△
	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ため 時間故障率は同じ	
一連の操作回数を踏まえた機器故障率	○	○
	機器操作回数を最小限にすることで故障率を抑えている。	機器操作回数を最小限にすることで故障率を抑えている。

※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

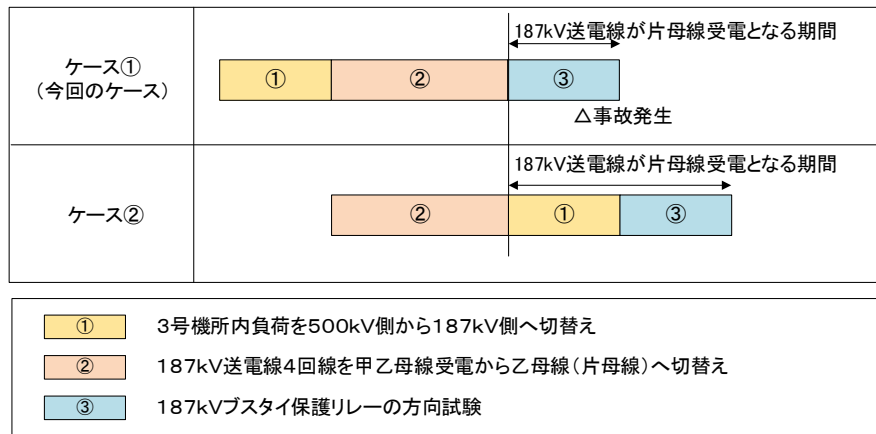


図1 各ケースでの操作順序 (イメージ)

(2) 試験用負荷の検討

今回の187kVブスタイ保護リレーの方向試験においては、方向試験で使用する測定装置が検知できる電流(約7MWに相当する電流)を母線連絡遮断器に流す必要があった。ただし、1、2号機は廃止決定しており所内負荷が少なく、1、2号機の所内負荷(約4MW)だけでは試験に必要な電流を確保することができないことから、1、2号機に加え既設設備の実負荷である3号機の所内負荷(約3MW)を使用した。

今回の方向試験では、試験に必要な負荷が3MW程度であり、仮設備(模擬負荷)の使用が可能であると考えられることから適用可能性について検討を行った。

仮設備(模擬負荷)の使用は、仮設のケーブル敷設・接続作業等を伴うことから、既存の常設設備を使用する場合と比べて電気事故、作業安全上のリスクを伴う。一方、TBM(作業前のミーティング)－KY(危険予知)の充実等により、作業安全上のリスク低減対策を講じれば、仮設備(模擬負荷)も有用な手段のひとつである。一方で、試験用負荷に仮設備(模擬負荷)を使用した場合でも、500kV母線事故が発生した場合には、500kV送電線から受電している3号機所内負荷は停電する。

今回の方向試験においては、3号機所内負荷の代わりに仮設備(模擬負荷)を使用した場合、3号機所内負荷への影響はなく、1、2、3号機の所内負荷が同時に停電することはなかった。

(3) 過去の試験系統の評価

今回の事象との比較として、今回方向試験を行った187kVブスタイ保護リレーの前回方向試験および電源構成が現在と概ね同じとなっている平成23年3月以降の187kV母線関係の方向試験を抽出し、それぞれの試験における運転プラントへ電源供給停止等の影響を比較した。比較結果を表5に示す。

確認した結果、過去の試験については、一部の試験において、1、2、3号機所内電源の全てが供給停止となる可能性が否定できない系統構成であったことを確認した。

表 5 過去の方向試験の比較

対象工事	日時	試験対象	試験用 負荷	プラント状態			停電の影響 (試験系統内の事故時)			系統構成図
				3号機	2号機	1号機	3号機	2号機	1号機	
187kV 母線連絡保護リレー更新	平成 7 年 5 月 27 日	母線連絡保護リレー	2号機 発電電力	運転中	運転中	定検中 (1-15 定検)	無し	影響あり	無し (定検中)	図 2-1
3号機発電機 変圧器保護盤更新	平成 29 年 10 月 24 日	予備変圧器 3 号 保護リレー	3号機所内 負荷	定検中	定検中 (長期停止中)	廃止措置中	影響あり	無し	無し	図 2-2
187kV 母線保護リレー更新	平成 29 年 12 月 15 日	母線保護リレー	1、2、3 号機 所内負荷	定検中	定検中 (長期停止中)	廃止措置中	影響あり	影響あり (定検中)	影響あり (廃止中)	図 2-3
【今回】 187kV 母線連絡保護リレー更新	令和 2 年 1 月 25 日	母線連絡保護リレー	1、2、3 号機 所内負荷	定検中	定検中 (長期停止中)	廃止措置中 (使用済燃料 取出済)	影響あり	影響あり (定検中)	影響あり (廃止中)	-

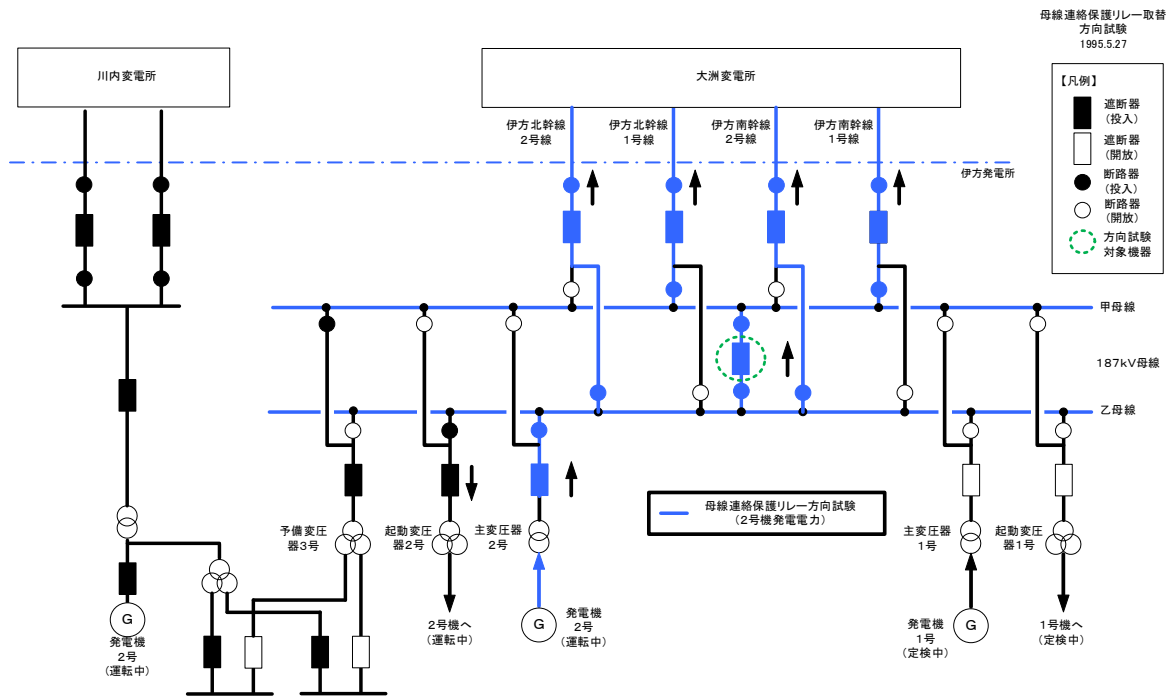


図 2 - 1 試験時系統構成 (187kV母線連絡保護リレー更新)

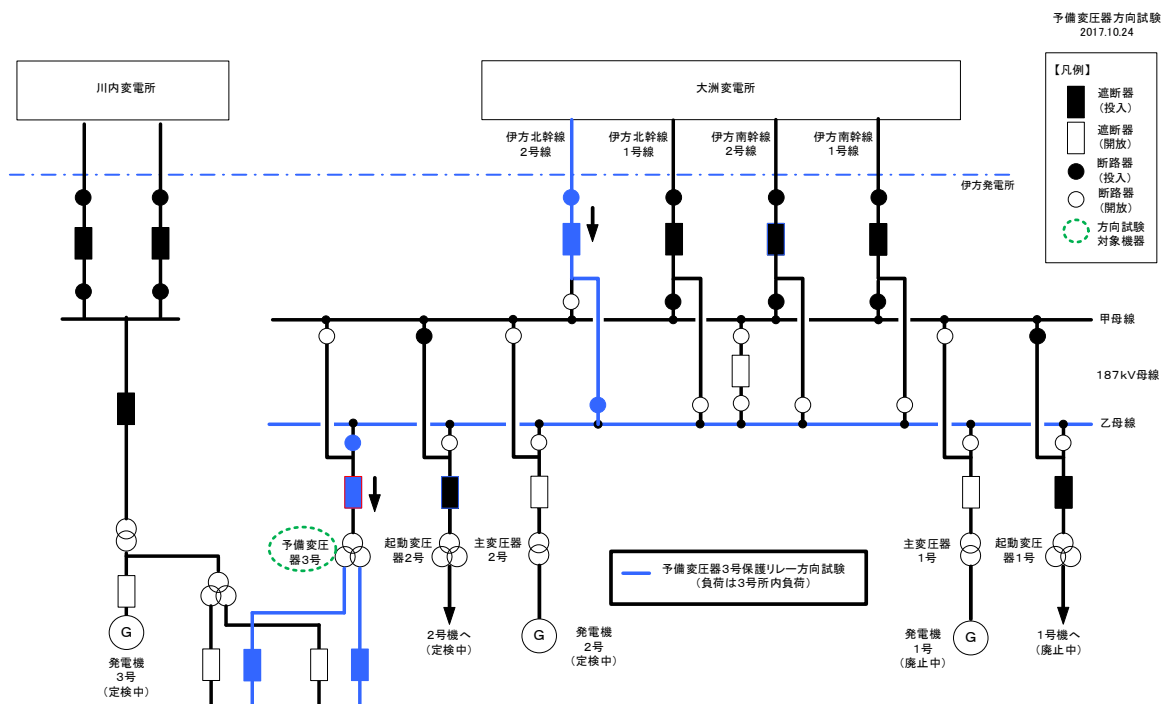


図 2 - 2 試験時系統構成 (3号発電機変圧器保護盤更新)

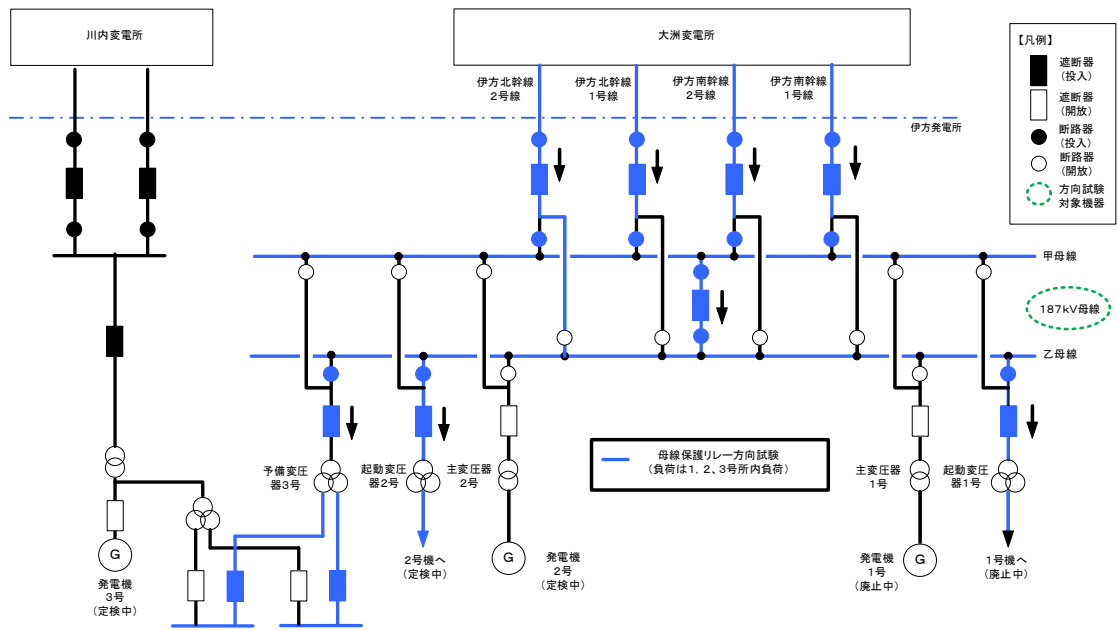


図 2 - 3 試験時系統構成 (187kV母線保護リレー更新)

(4) 更なるリスク低減に係る検討結果

2. (1) で実施した、3号機所内負荷の切替え時期による試験系統の影響評価結果について表6にまとめた。

表6のとおり、3号機の所内負荷切替時期は、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。

また、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-KY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。

今回のブスタイ保護リレー方向試験において、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、2、3号機の所内負荷が同時に停電することはなかった。

1、2、3号機所内負荷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。

表6 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 (送電線は全 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 (送電線は全 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

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

影響評価 大:× 中:△ 小:○

3. 今後の対応

今回1、2、3号機所内負荷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際しては、3号機所内負荷を接続しない試験系統構成（模擬負荷を使用）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こととする。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。

推定メカニズム

	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相间短絡
<p>概要図</p>	<p>嵌合部の非接触状態が継続</p> <p>可動接触子</p> <p>埋金</p> <p>絶縁操作軸</p> <p>V相</p> <p>導体 (送電線側)</p> <p>可動接触子</p> <p>嵌合部損耗</p> <p>絶縁操作軸</p> <p>V相</p> <p>導体 (送電線側)</p> <p>可動接触子</p> <p>絶縁操作軸</p> <p>金属くず</p> <p>埋金</p>	<p>金属くずが発生</p> <p>金属くずが発生</p> <p>埋金</p> <p>絶縁操作軸</p> <p>V相</p> <p>導体 (送電線側)</p> <p>可動接触子</p> <p>絶縁操作軸</p> <p>V相</p> <p>導体 (送電線側)</p> <p>可動接触子</p> <p>絶縁操作軸</p> <p>金属くずが付着</p> <p>埋金</p>	<p>金属くずの付着</p> <p>金属くずが付着</p> <p>埋金</p> <p>絶縁操作軸</p> <p>V相</p> <p>導体 (送電線側)</p> <p>可動接触子</p> <p>絶縁操作軸</p> <p>V相</p> <p>導体 (送電線側)</p> <p>可動接触子</p> <p>絶縁操作軸</p> <p>金属くずが付着</p> <p>埋金</p>	<p>相间短絡</p> <p>相间で短絡が発生</p> <p>埋金</p> <p>絶縁操作軸</p> <p>V相</p> <p>導体 (送電線側)</p> <p>可動接触子</p> <p>絶縁操作軸</p> <p>V相</p> <p>導体 (送電線側)</p> <p>可動接触子</p> <p>絶縁操作軸</p> <p>金属くずが付着</p> <p>埋金</p>
<p>観察事実</p>	<ul style="list-style-type: none"> 絶縁操作軸と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 タンク内から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を実施した結果、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
<p>推定メカニズム</p>	<ul style="list-style-type: none"> 断路器の開放位置において、絶縁操作軸の上部埋金と可動接触子の嵌合部の非接触状態が継続し、放電によって、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体表面に付着 	<ul style="list-style-type: none"> 高電界部に付着した金属くずを起点にV-W相間で短絡が発生
<p>検証</p>	<ul style="list-style-type: none"> 嵌合部の非接触状態継続の確認 放電有無の確認 	<p>—</p>	<p>—</p>	<p>—</p>

対策要否検討結果および対策内容

1. 対策要否検討結果

伊方1、2、3号機の高圧絶縁開閉装置について、対策要否を検討した。

その結果、伊方3号機の高圧絶縁開閉装置（500kV、187kV）の断路器については、同様のセレーション構造でないことから同様の事象は発生せず、対策は不要である。

さらに、伊方3号機の高圧絶縁開閉装置（500kV、187kV）については、これまでの定期点検結果に異常がないこと、現在の使用状態においてガス圧等が正常であることを確認するとともに、内部診断（部分放電診断および内部異物診断）を実施し異常がないことを確認した。

一方、伊方1、2号機の高圧絶縁開閉装置（187kV、66kV）の断路器については、図1の①～⑳の断路器について、同様のセレーション構造を有することから、その対策要否を表1のとおり検討した。

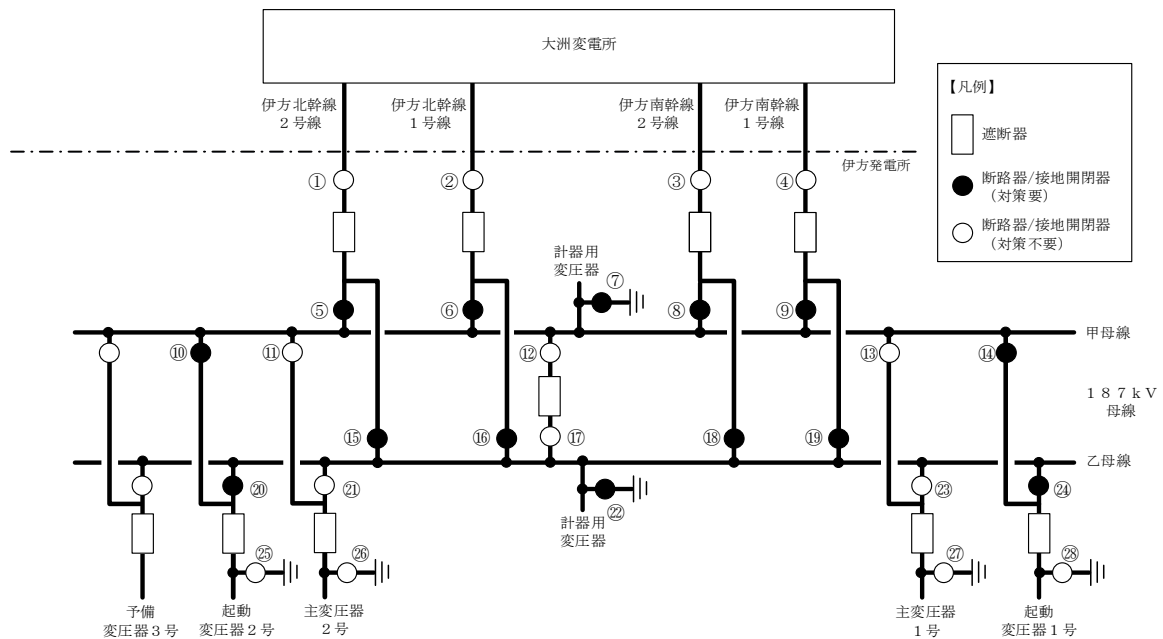


図1 対策要否検討結果 概要図

表 1 対策要否検討結果

○：対象、×対象外

番号	名 称	(1)絶縁操作軸が垂直配置 ^{※1}	(2)開放状態時に嵌合部に電圧が課電 ^{※2}	対策対象 ^{※3}	備 考
①	伊方北幹線 2 号線線路側断路器	×	—	×	
②	伊方北幹線 1 号線線路側断路器	×	—	×	
③	伊方南幹線 2 号線線路側断路器	×	—	×	
④	伊方南幹線 1 号線断路器	×	—	×	
⑤	伊方北幹線 2 号線甲母線断路器	○	○	○	
⑥	伊方北幹線 1 号線甲母線断路器	○	○	○	
⑦	計器用変圧器甲母線接地開閉器	○	○	○	
⑧	伊方南幹線 2 号線甲母線断路器	○	○	○	
⑨	伊方南幹線 1 号線甲母線断路器	○	○	○	
⑩	起動変圧器 2 号甲母線断路器	○	○	○	
⑪	主変圧器 2 号甲母線断路器	○	×	×	※ 4
⑫	母線連絡甲母線断路器	○	×	×	
⑬	主変圧器 1 号甲母線断路器	○	×	×	※ 4
⑭	起動変圧器 1 号甲母線断路器	○	○	○	
⑮	伊方北幹線 2 号線乙母線断路器	○	○	○	
⑯	伊方北幹線 1 号線乙母線断路器	○	○	○	
⑰	母線連絡乙母線断路器	○	×	×	
⑱	伊方南幹線 2 号線乙母線断路器	○	○	○	
⑲	伊方南幹線 1 号線乙母線断路器	○	○	○	当該品
⑳	起動変圧器 2 号乙母線断路器	○	○	○	
㉑	主変圧器 2 号乙母線断路器	○	×	×	※ 4
㉒	計器用変圧器乙母線接地開閉器	○	○	○	
㉓	主変圧器 1 号乙母線断路器	○	×	×	※ 4
㉔	起動変圧器 1 号乙母線断路器	○	○	○	
㉕	起動変圧器 2 号接地開閉器	×	—	×	
㉖	主変圧器 2 号接地開閉器	×	—	×	
㉗	起動変圧器 1 号接地開閉器	×	—	×	
㉘	主変圧器 1 号接地開閉器	×	—	×	

※ 1：絶縁操作軸が水平配置であれば、絶縁操作軸の荷重を嵌合部で支えるため非接触状態となることはない。

※ 2：嵌合部の非接触状態が発生するのは、構造上、断路器が開放状態のときだけであり、開放状態で電圧がかからなければ放電は発生しない。

※ 3：⑲の当該品 1 台を除き、対策対象は 1 3 台。

※ 4：1、2 号機の廃止に伴い主変圧器を使用することはなく、嵌合部に電圧がかかることはない。

2. 対策内容

(1) 内部開放点検

現状に異常がないことを確認するため、「1. 対策要否検討結果」で対象として選定された同一構造および使用状態が同じ断路器（13台）については、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。

(2) 部分放電診断および内部異物診断

放電の発生有無を監視するため、当該断路器（1台）および同一構造および使用状態が同じ断路器（13台）について部分放電診断による監視強化を行う。部分放電診断については、内部開放点検の終了までは週に1回の測定を行い、内部開放点検終了後は、点検結果を踏まえて診断の頻度を決定する。さらに、内部異物診断を行うことによって、嵌合部の損傷に伴い発生する内部異物の有無を確認する。

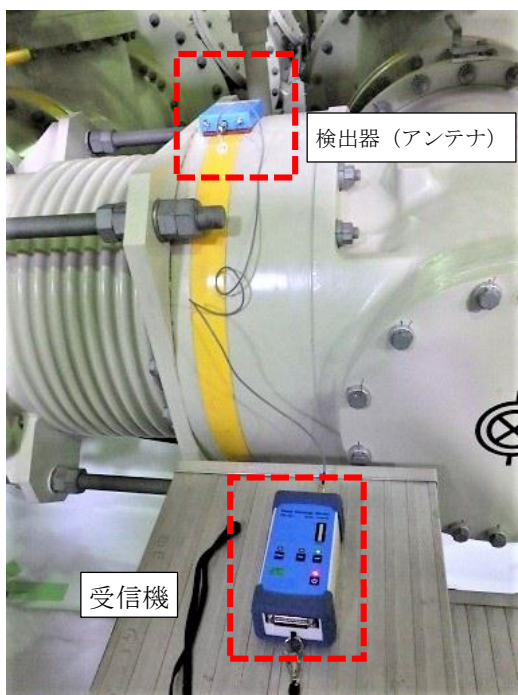


図2 部分放電診断（イメージ）

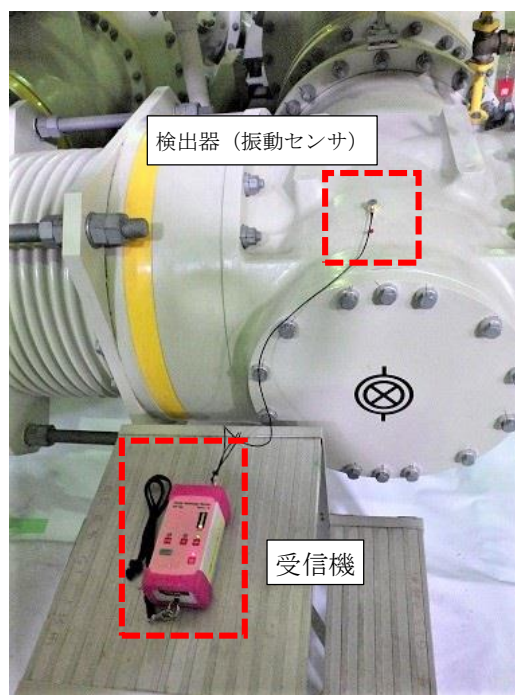


図3 内部異物診断（イメージ）

3. ブスタイ保護リレー試験

1、2、3号機の電源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際しては、3号機の所内負荷を接続しない試験系統構成（模擬負荷を使用）にて実施する。

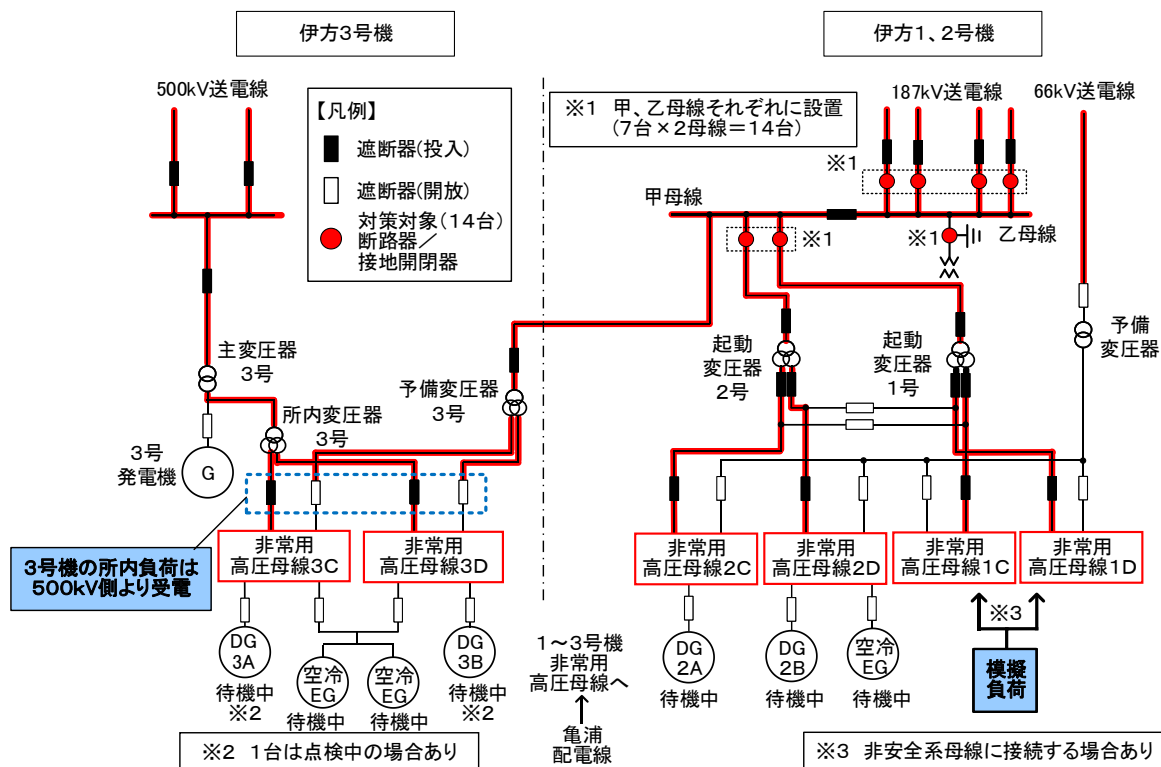


図4 保護リレー試験時の系統構成（改善策）

用語解説

○ガス絶縁開閉装置

絶縁特性に優れたSF₆（六フッ化硫黄）ガスを用いて、遮断器、断路器等を一体に収納した開閉装置。

○保護継電装置（保護リレー）

電力系統で発生した地絡や短絡などの電気事故を検出し、事故が発生した箇所を切り離す信号を発信する装置。

○遮断器

電力系統で地絡や短絡などの電気事故が発生した場合に電流を遮断する装置。

○母線連絡遮断器

2つの母線を選択・区分するために設けられている遮断器。

○断路器

回路を選択・区分するための装置。

○187kV母線保護リレー

187kV母線内で発生した地絡や短絡などの電気事故を検出し、187kV母線を保護するため、遮断器へ事故が発生した箇所を切り離す信号を発信する装置。

○母線連絡保護リレー

187kV母線から送電線を含む区間で発生した地絡や短絡などの電気事故を検出し、当該区間を保護するため、遮断器へ事故が発生した箇所を切り離す信号を発信する装置。

○断路器ユニット

ガス絶縁開閉装置のうち断路器および導体を内包した箇所。

○自動オシロ装置

電気事故時における電圧・電流波形をモニタするための装置。

○短絡

電位差のある2点間が導通状態になること。なお、U相、V相、W相のいずれか二相で起きる短絡を二相短絡、三相すべてで起きる短絡を三相短絡という。

○地絡

電気回路と大地が導通状態になること。

○試充電

負荷のない状態で電圧を印加して、受電状態に異常がないことを確認すること。

○方向試験

電力潮流により、方向性、極性などが正常であることの確認を目的として、試験対象の保護リレーをロック（隔離）した状態で実際の電気システムを使用し、試験装置にて電圧および電流の位相差を確認する試験のこと。

○SEM（Scanning Electron Microscope、走査型電子顕微鏡）

電子線を試料に照射して表面を観察する装置。

○セレーション

軸のまわりに山と谷を、のこぎり歯状に等間隔につけたもの。

○フッ素化合物

フッ素（F）とアルミニウム（Al）や銅（Cu）が化合してできた物質。

○主変圧器

3号：発電機から500kV送電線へ電力を供給するための変圧器

発電機停止中は500kV送電線より受電し、所内へ電力を供給する。

1、2号：発電機から187kV送電線へ電力を供給するための変圧器、運転終了に伴い使用していない。

○所内変圧器

3号：所内へ電力を供給するための変圧器。

発電機停止中は主変圧器より電源を受電している。

1、2号：運転終了に伴い使用していない。

○予備変圧器

3号：所内変圧器が使用できない場合、187kV送電線から受電し所内へ電力を供給する変圧器。

所内変圧器が使用できる場合は基本的に待機状態となっている。

1、2号：起動変圧器が使用できない場合、66kV送電線から受電し所内へ電力を供給する変圧器。

起動変圧器が使用できる場合は基本的に待機状態となっている。

○起動変圧器

1、2号：187kV送電線から受電し、1、2号機所内へ電力を供給する変圧器。

○所内電源

伊方発電所内の設備に必要な電源。

以 上