

(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


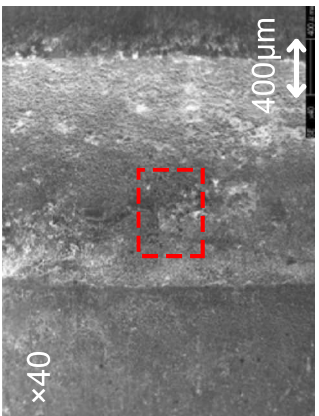
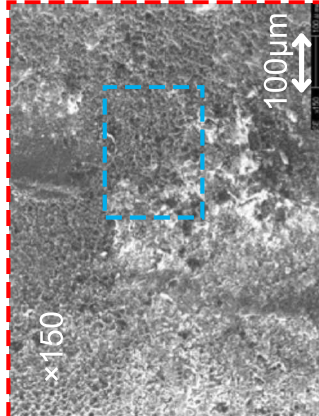
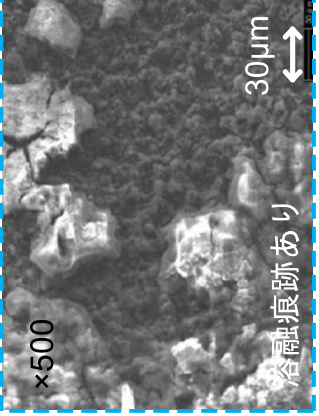
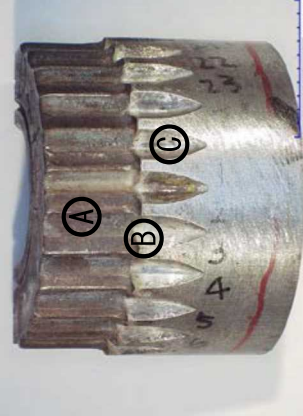
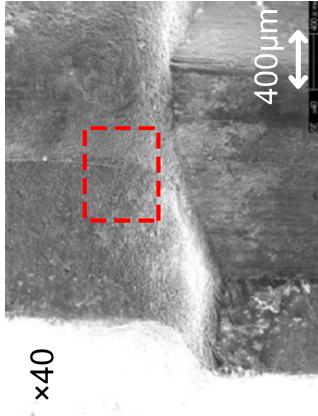
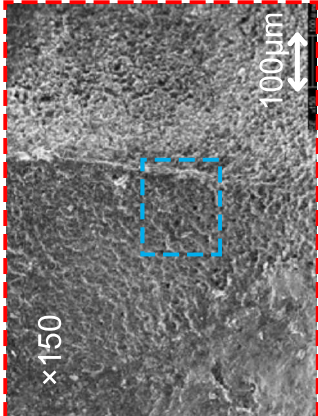
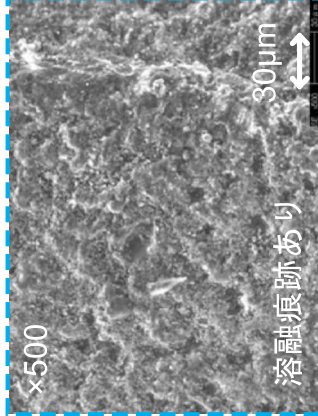
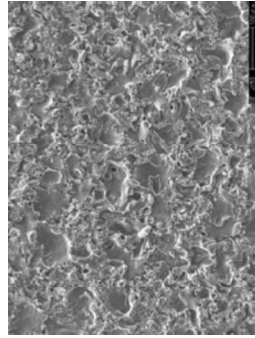
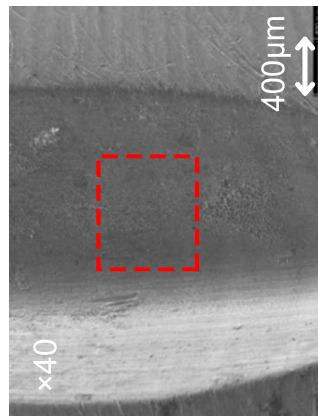
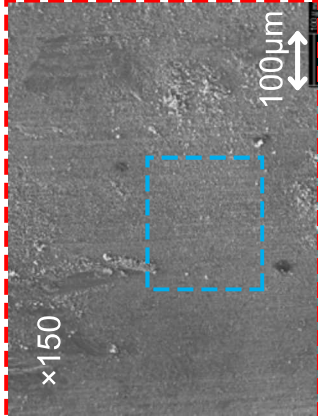
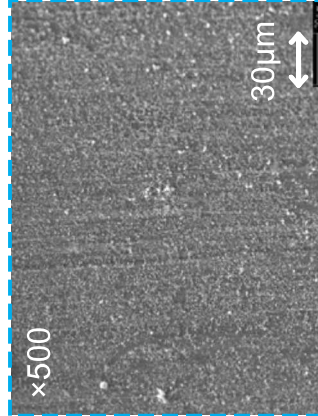

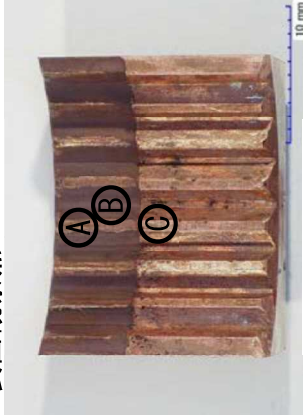
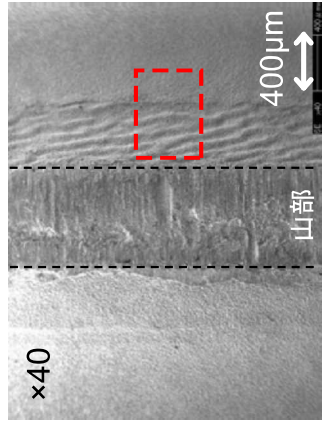
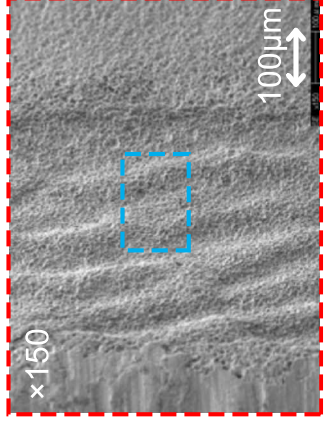
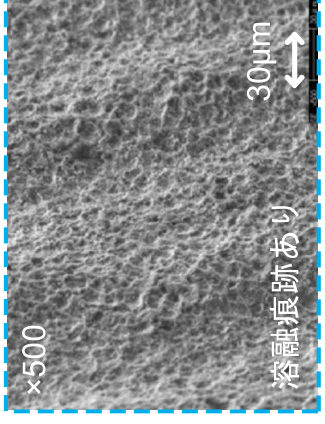
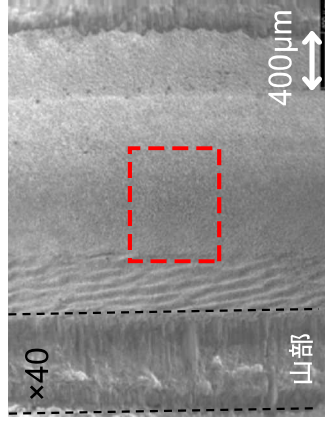
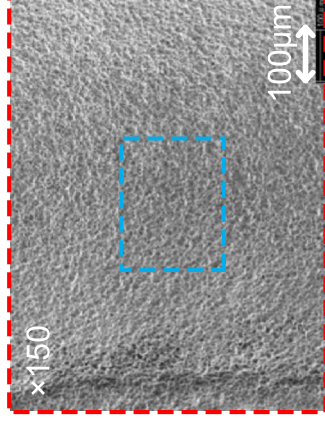
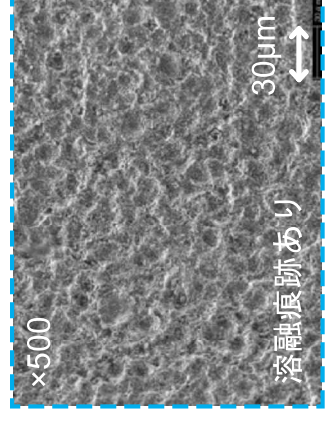
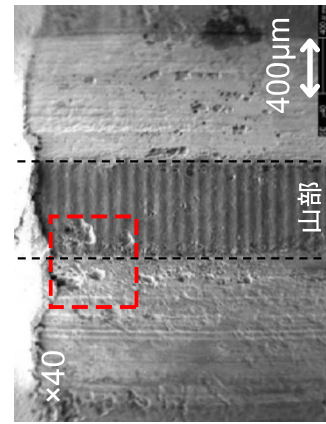
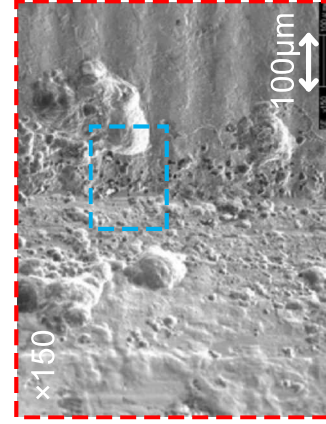
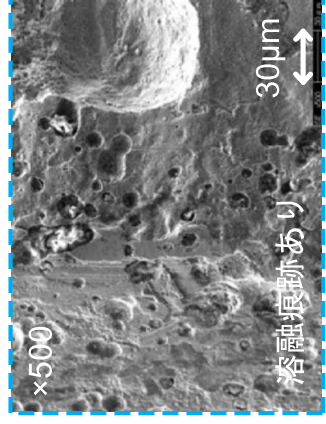
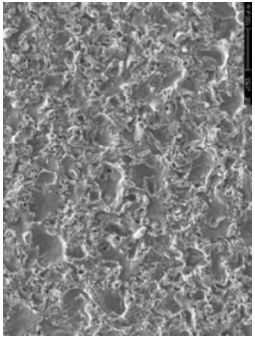
| 観察箇所 | 電子顕微鏡 (SEM) 画像 | | | | | | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>V相側埋金切断箇所</p>  | <p>x40</p>  | <p>x150</p>  | <p>x500</p>  | <p>表面観察点</p>  | <p>x40</p>  | <p>x150</p>  | <p>x500</p>  | <p>(参考) 放電加工の金属表面</p>  | <p>x40</p>  | <p>x150</p>  | <p>x500</p>  |
| A部 (損耗部) | B部 (損耗部) | C部 (健全部) | | | | | | | | | |

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。

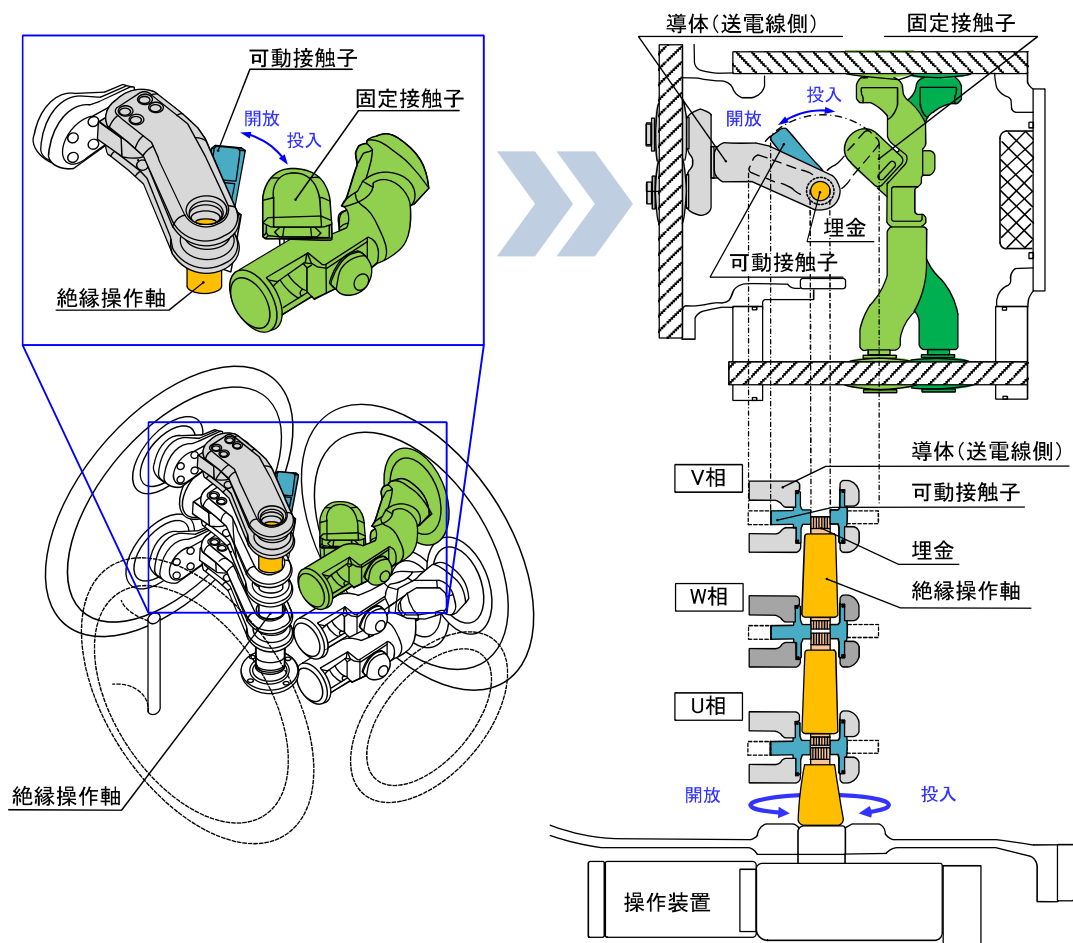
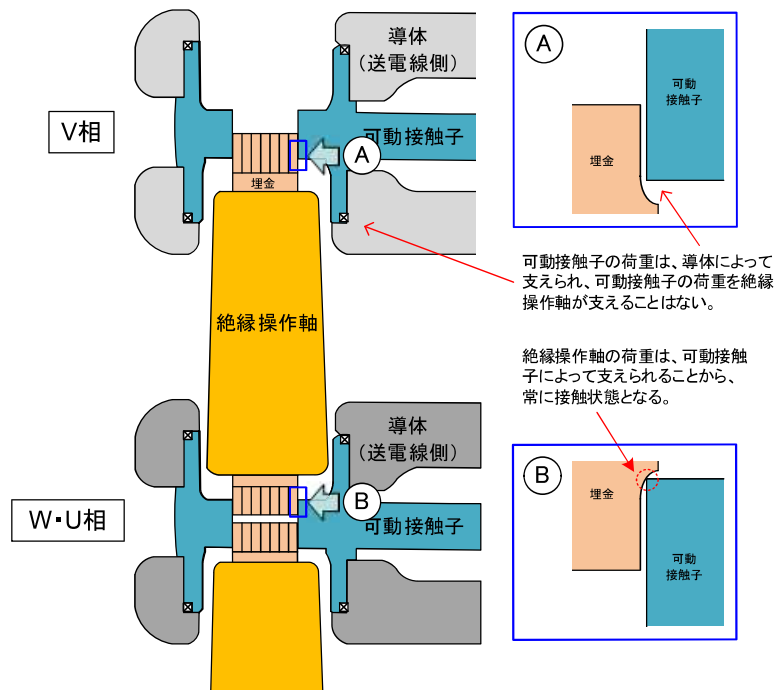


図4 断路器の動作機構

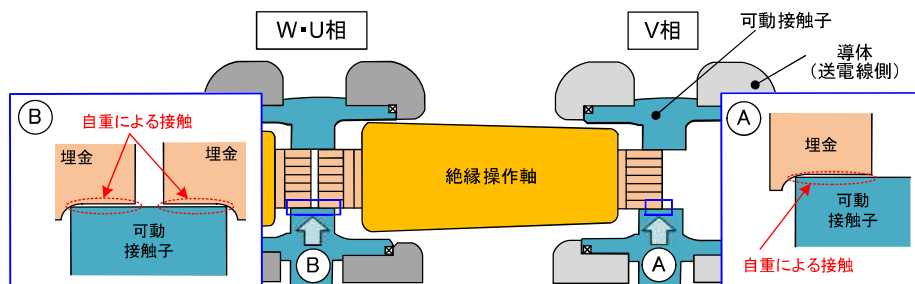
i. 操作装置による非接触状態継続有無の確認（通常）

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。

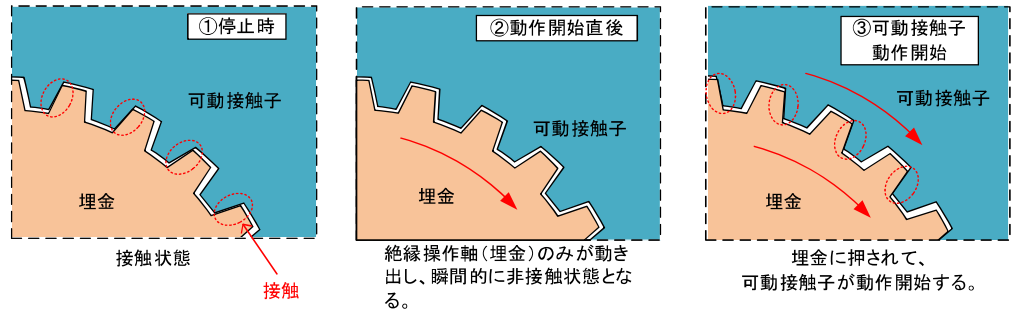
- 絶縁操作軸の下側の嵌合部は、構造上、可動接触子が絶縁操作軸の荷重を支えていることから常に接触状態となる。このため、動作中の瞬間的な非接触状態については、各絶縁操作軸の上側の嵌合部で発生し、下側の嵌合部においては発生しない。



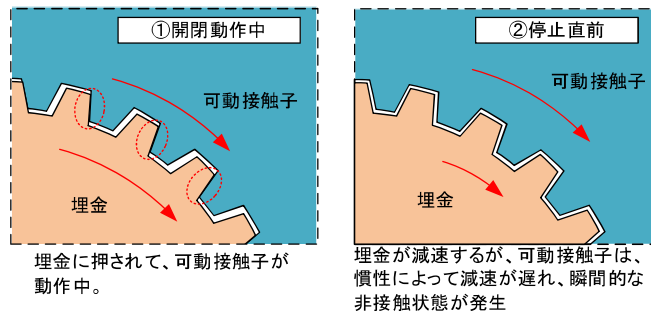
- 同様に絶縁操作軸の荷重を可動接触子が支える（絶縁操作軸が水平方向に配置される）構造となる断路器については、非接触状態は発生しない。



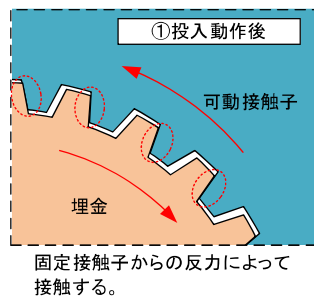
- 動作開始直後は、絶縁操作軸のみが動き出し、停止時に接していた面と逆の面に当たるまでの瞬間は、面での接触がなくなることから、各絶縁操作軸の上側の嵌合部において瞬間的な非接触状態が発生する可能性がある。(図5中のA)



- 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。

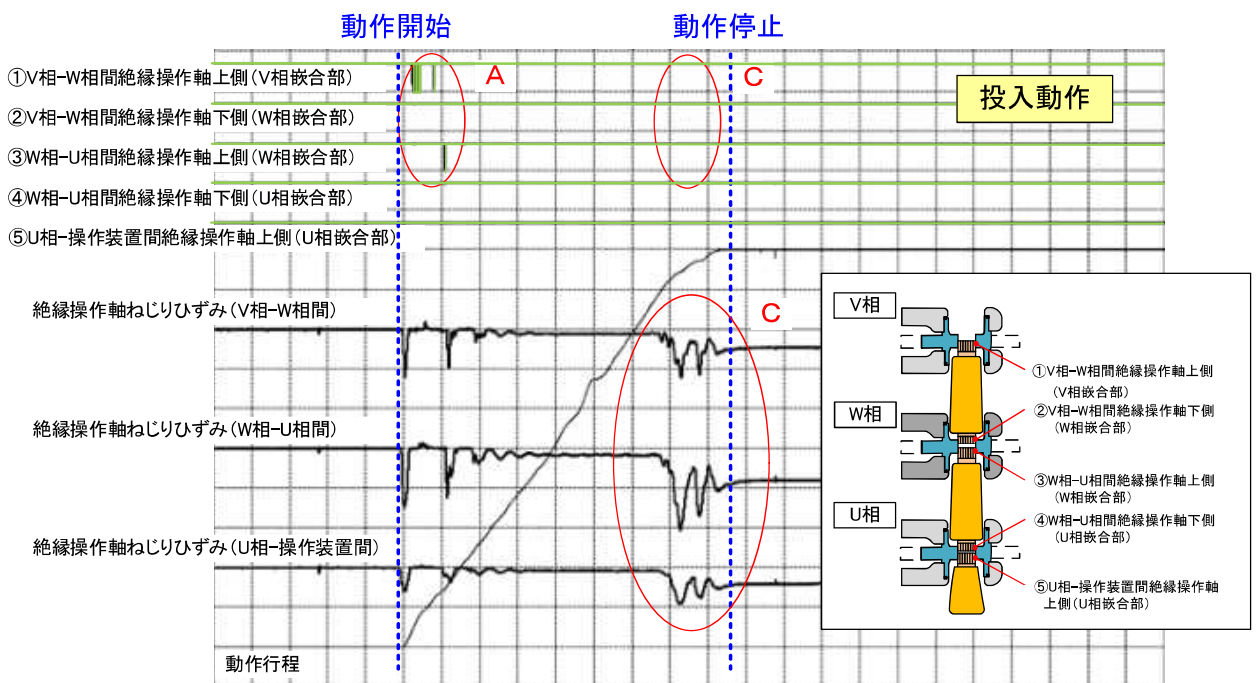
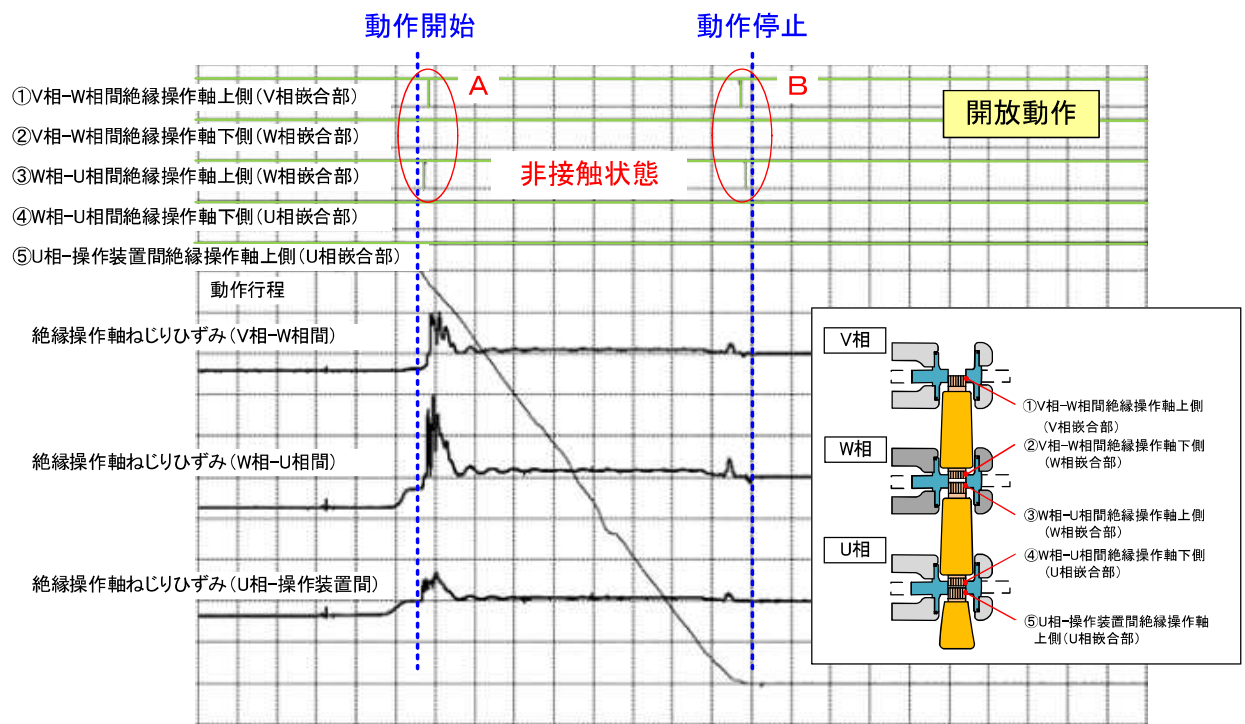


図5 操作装置による非接触状態継続有無の確認 (通常)

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多くなることが確認され、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。

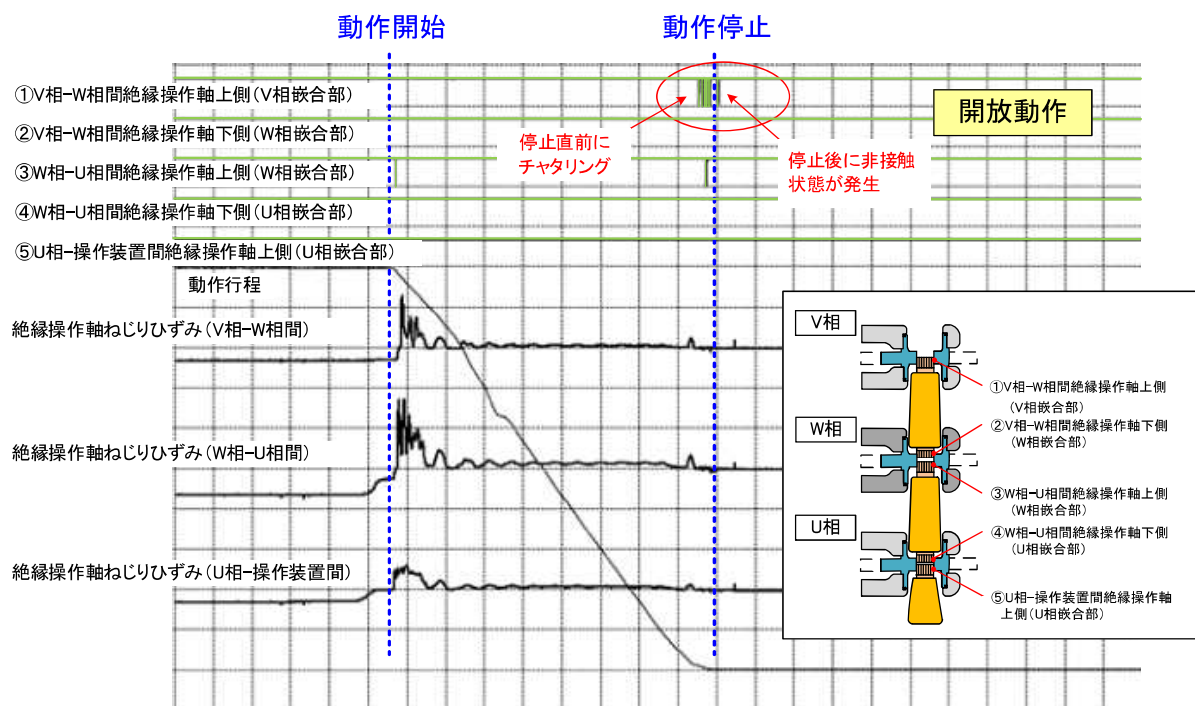


図6 操作装置による非接触状態継続有無の確認（摩擦力調整）

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。

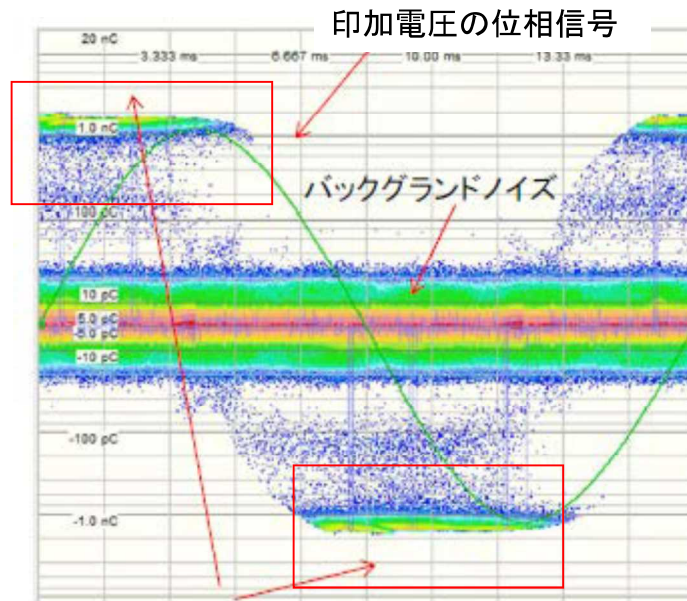
嵌合部に隙間があった場合、当該嵌合部の電位差（波高値）は8 kVであり、一方で平等電界におけるSF₆ガスの火花電圧は7 kVであるため、理論上も放電は発生する。

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

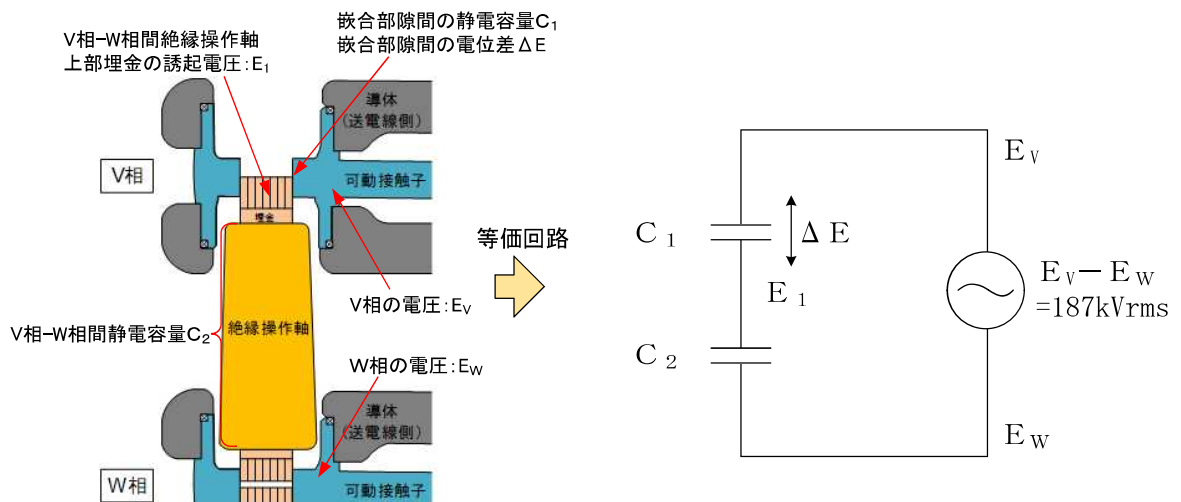


図9 等価回路

(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。

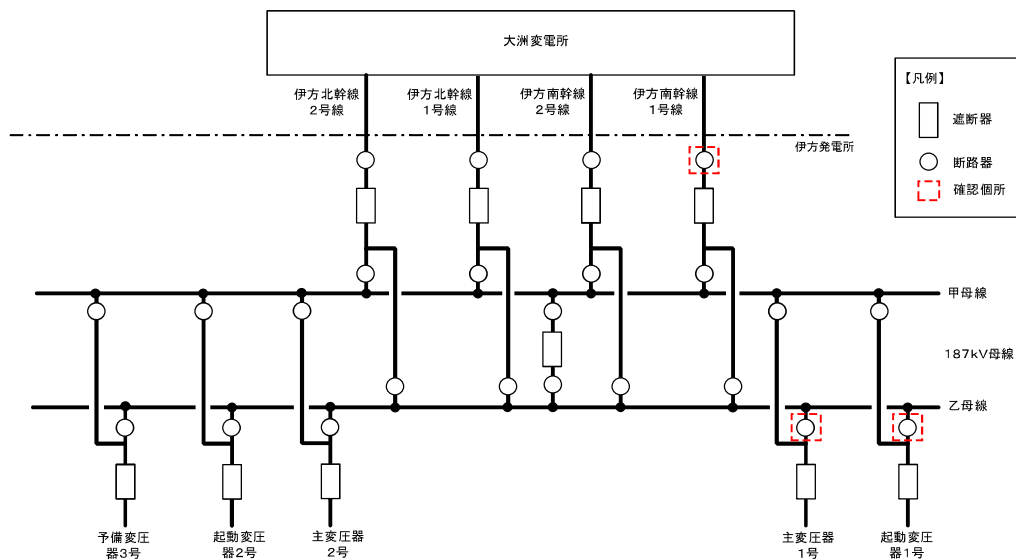

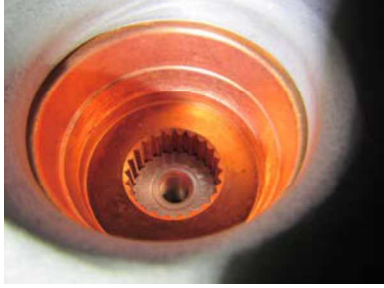

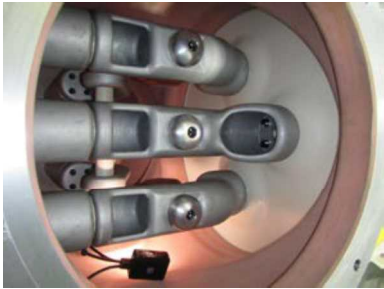




図 1 断路器内部確認箇所

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) 500 kV送電線および母線事故時の停電評価

今回の事故は、187 kV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500 kV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187 kV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、187 kV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、500 kV送電線から3号機所内負荷を受電時に、500 kV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3 500 kV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 〔187 kV送電線より受電継続〕 | ○ 1、2、3号機所内 負荷影響なし 〔187 kV送電線より受電継続〕 | ○ 1、2、3号機所内 負荷影響なし 〔187 kV送電線より受電継続〕 |
| ケース② | ○ 影響なし 〔1、2号機 187 kV送電線より受電継続〕 〔3号機 500 kV送電線より受電継続〕 | ○ 1、2号機所内負荷 影響なし 〔187 kV送電線より受電継続〕 | ○ 1、2号機所内負荷 影響なし 〔187 kV送電線より受電継続〕 |
| | | × 3号機所内負荷停電 〔500 kV送電線より受電時、500 kV送電線2回線停止〕 | × 3号機所内負荷停電 〔500 kV送電線より受電時、500 kV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

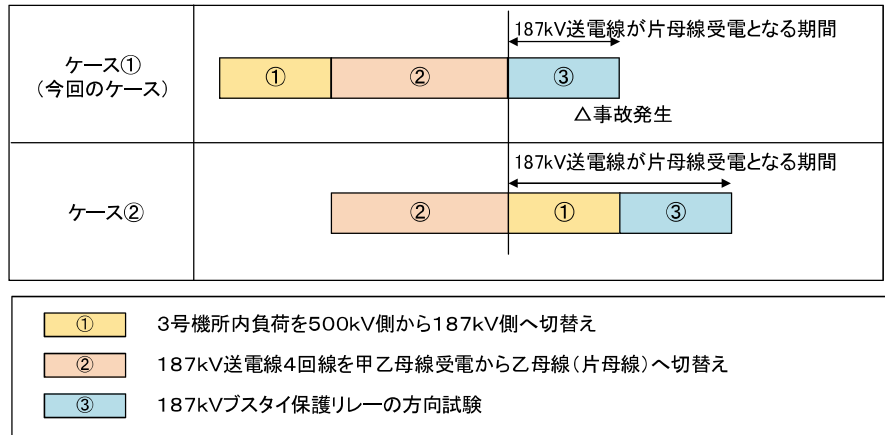


図1 各ケースでの操作順序 (イメージ)

(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)ー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) | - |

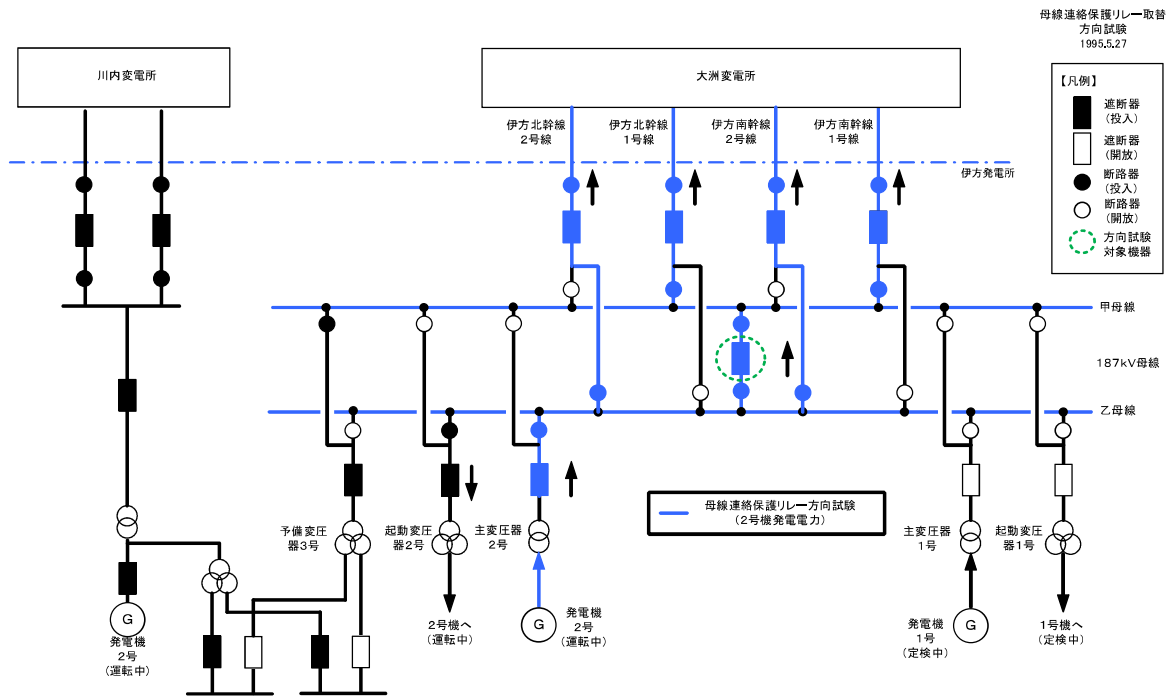


図 2-1 試験時系統構成 (187kV 母線連絡保護リレー更新)

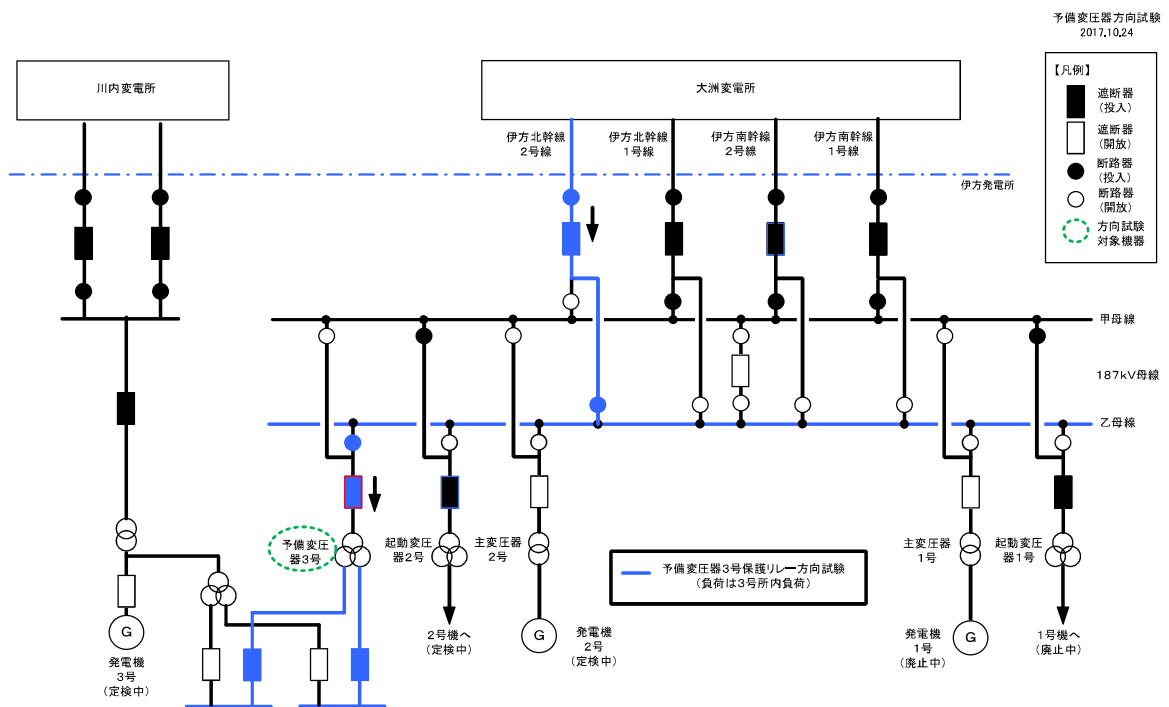


図 2-2 試験時系統構成 (3号発電機変圧器保護盤更新)

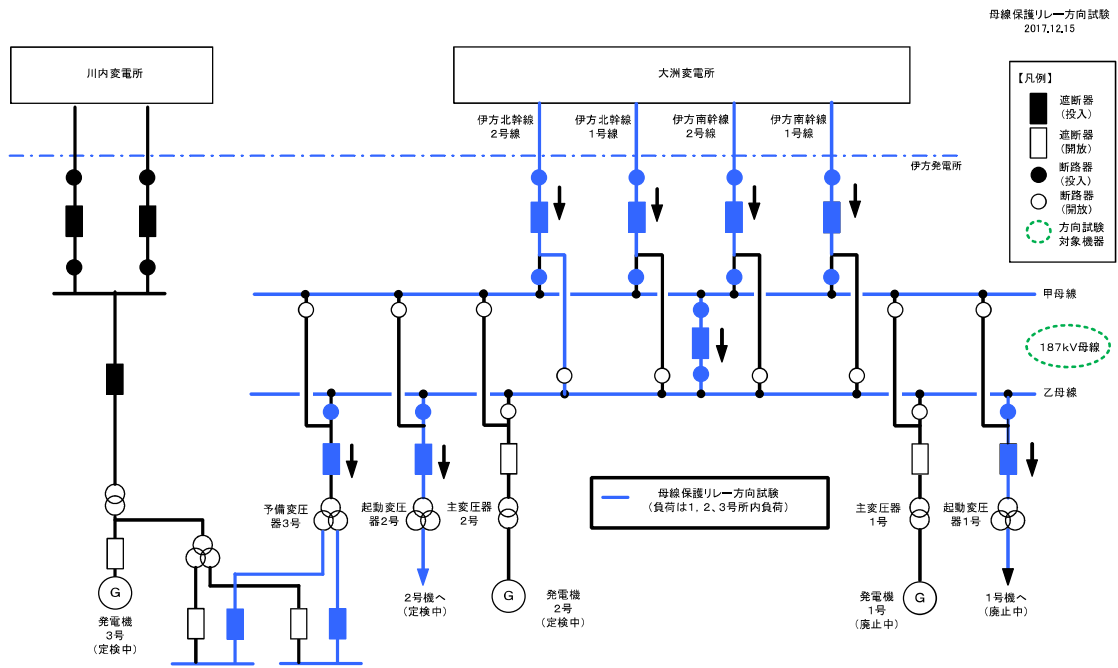


図2-3 試験時系統構成 (187kV母線保護リレー更新)

(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>放電溶融により消耗し、隙間が拡大</p> | <p>金属くずが発生</p> | <p>金属くずが付着</p> | <p>相间で短絡が発生</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となる状態が継続 | <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相间で短絡が発生 |
| <p>検証</p> | <ul style="list-style-type: none"> 嵌合部の非接触状態継続の確認 | <ul style="list-style-type: none"> 放電有無の確認 | <ul style="list-style-type: none"> 放電有無の確認 | <ul style="list-style-type: none"> 放電有無の確認 |

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。

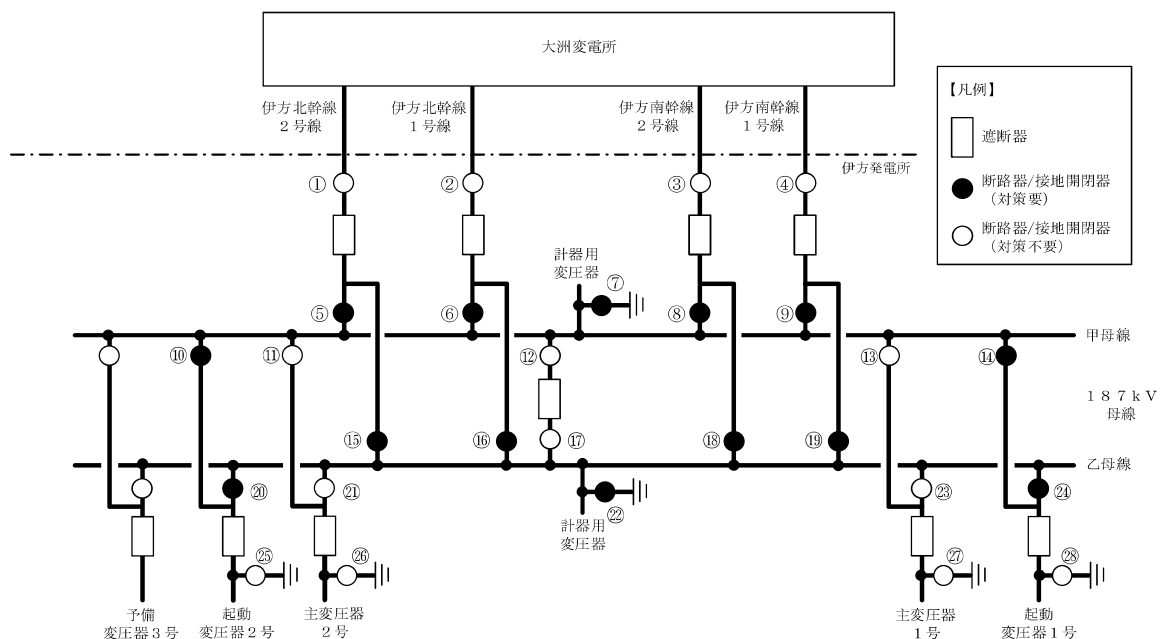


図1 対策要否検討結果 概要図

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13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。

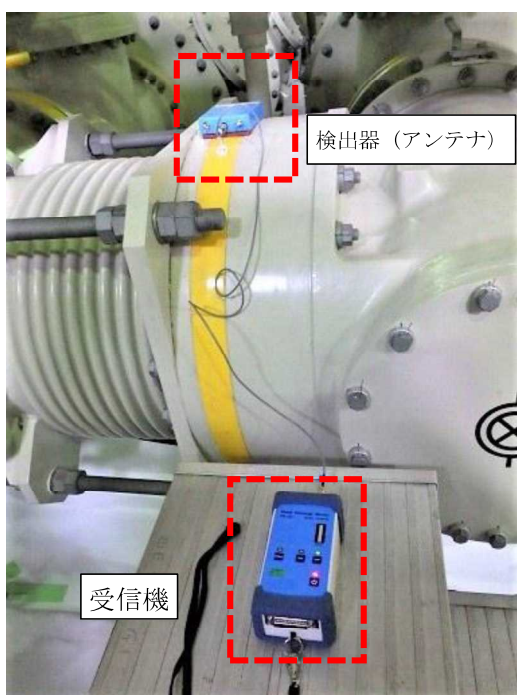


図2 部分放電診断（イメージ）

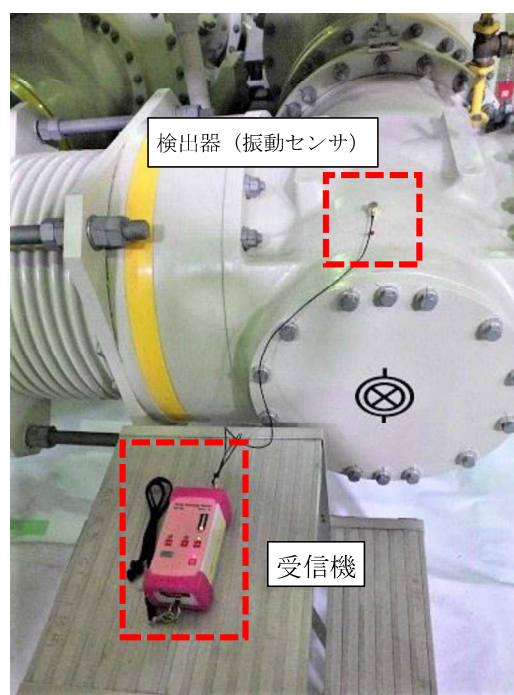


図3 内部異物診断（イメージ）

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。

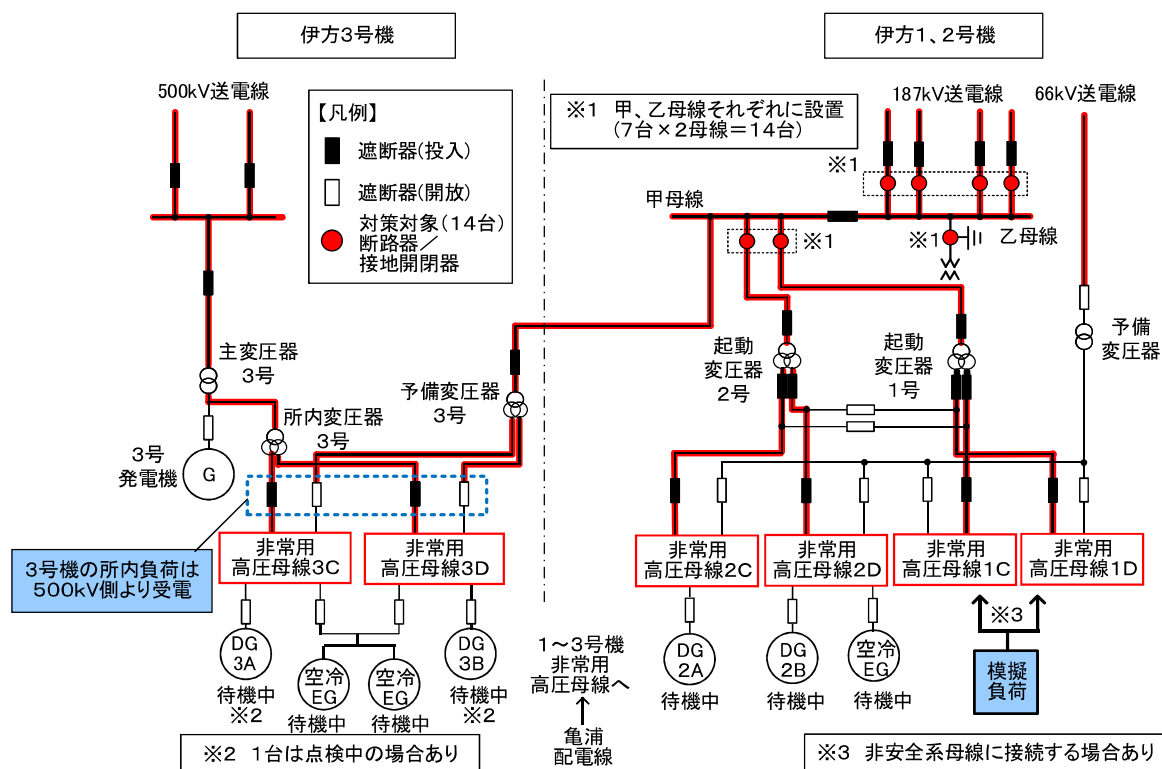


図4 保護リレー試験時の系統構成（改善策）

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