

図1 伊方発電所の所内電気系統図 (事象発生前)

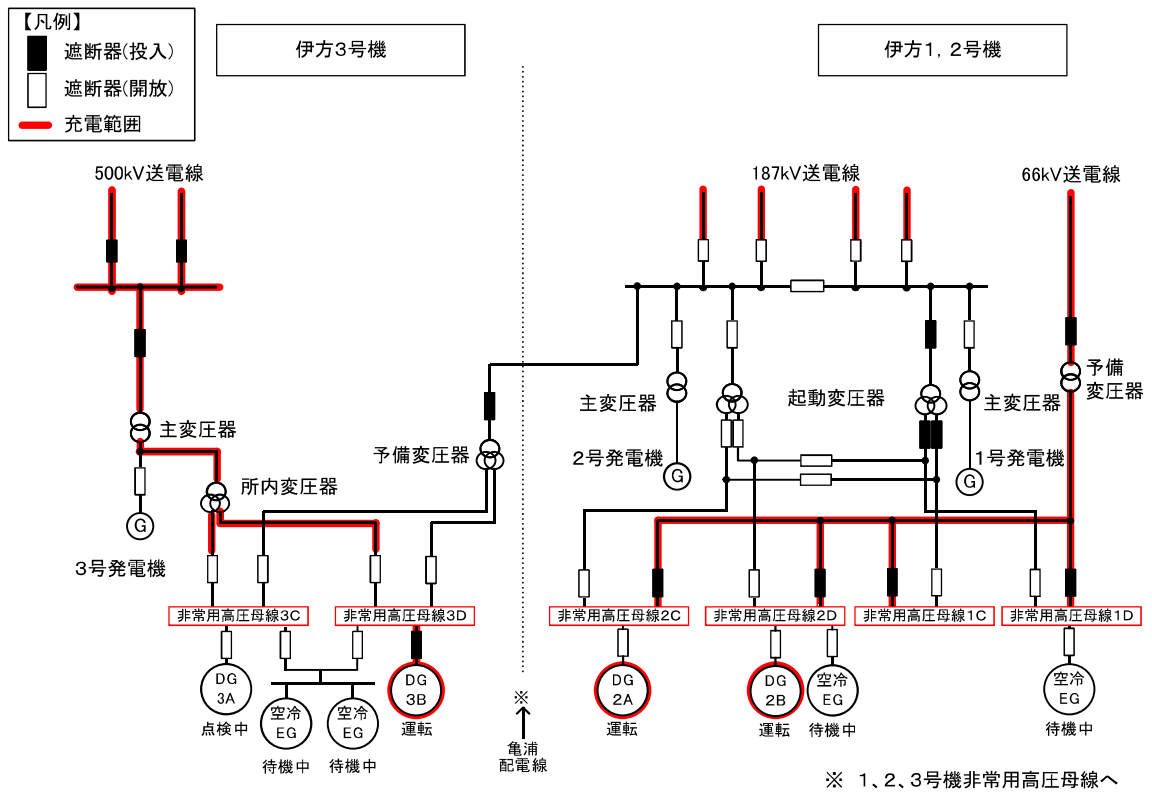


図2 伊方発電所の所内電気系統図 (事象発生後)

## 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。

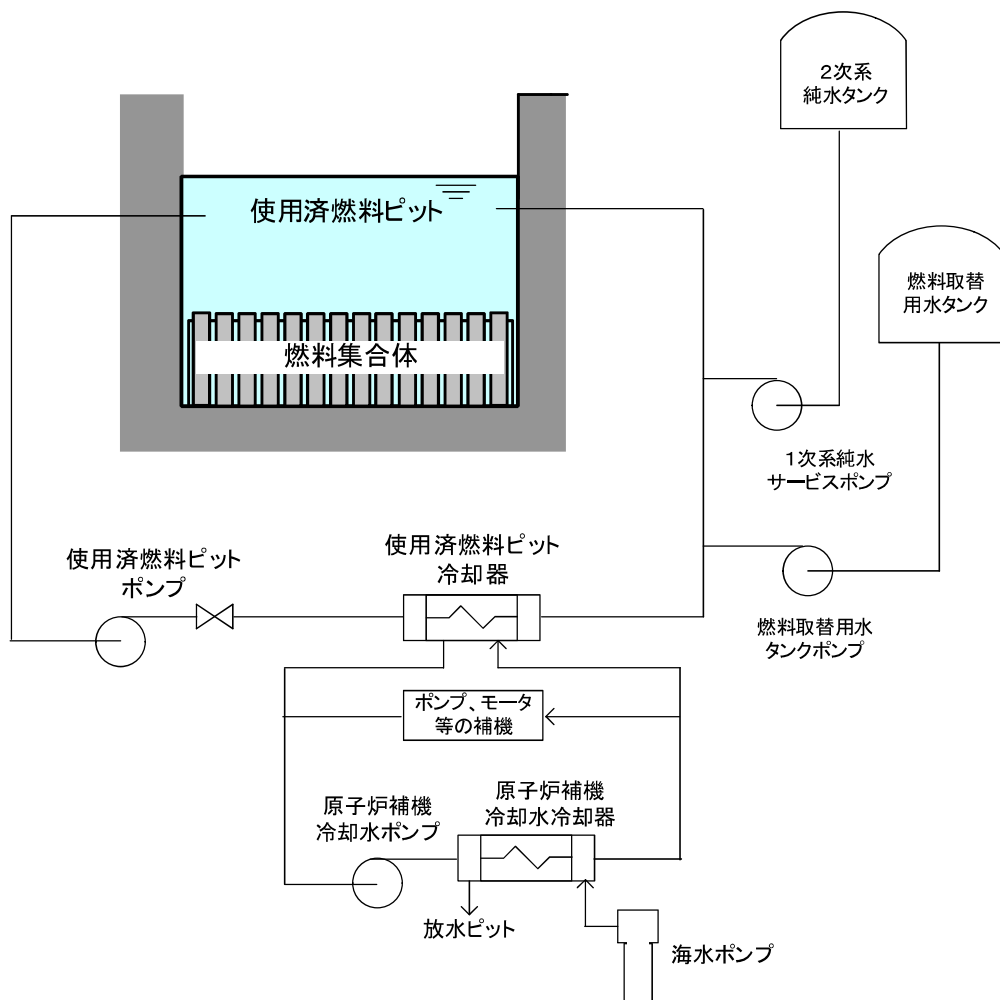


図3 使用済燃料ピット水浄化冷却系統等

(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	3号機	
	2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

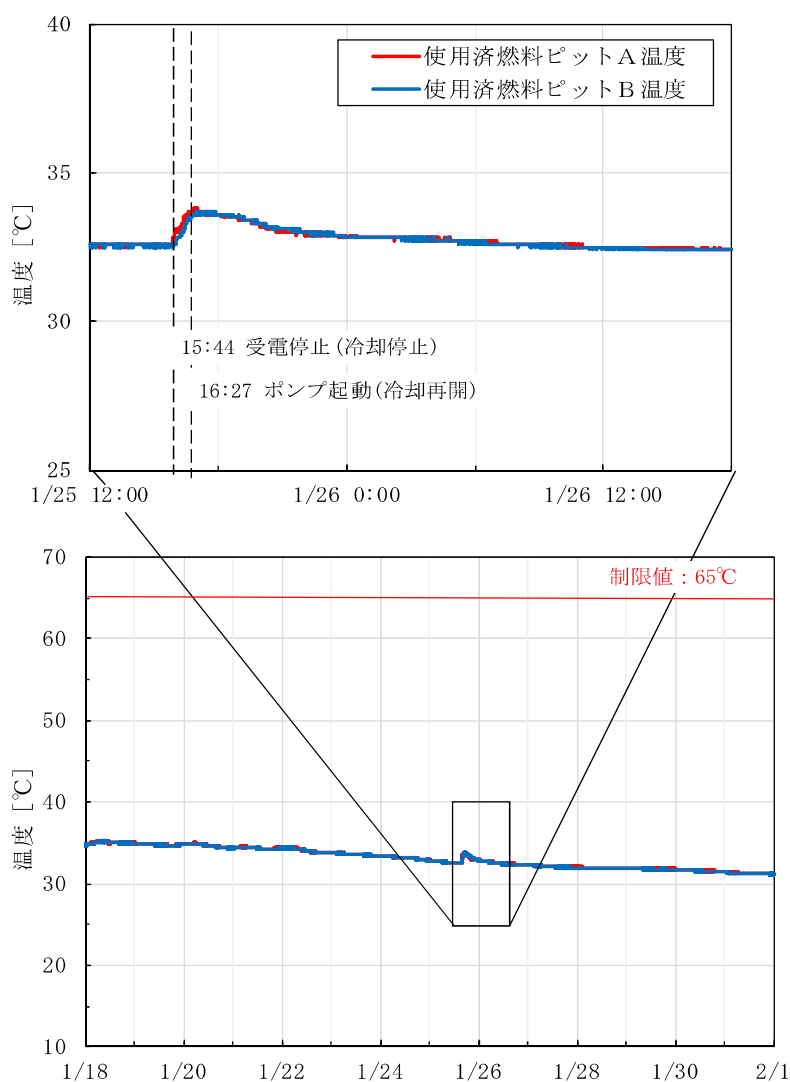


図4 3号機使用済燃料ピット温度

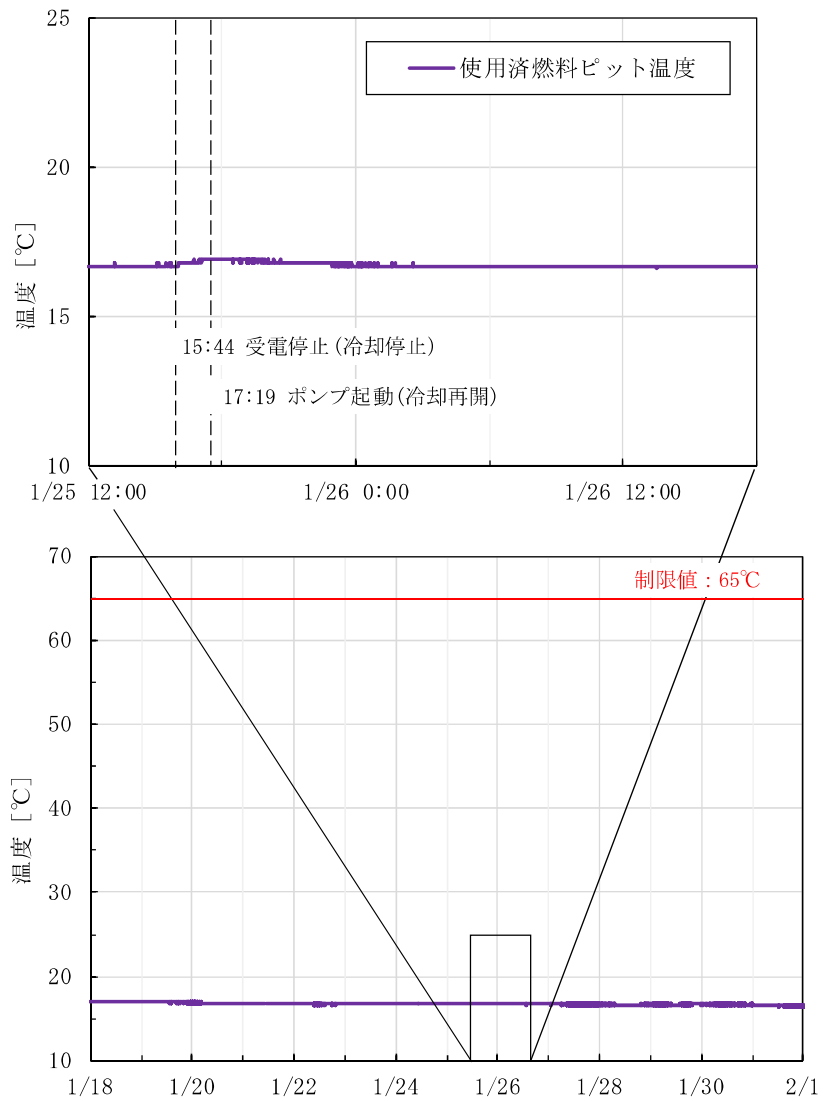


図5 2号機使用済燃料ピット温度

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

187kV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187kV甲母線、2号機は187kV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、500kV送電線から187kV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187kV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187kV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187kV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（500kV送電線2回線、66kV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（187kV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。

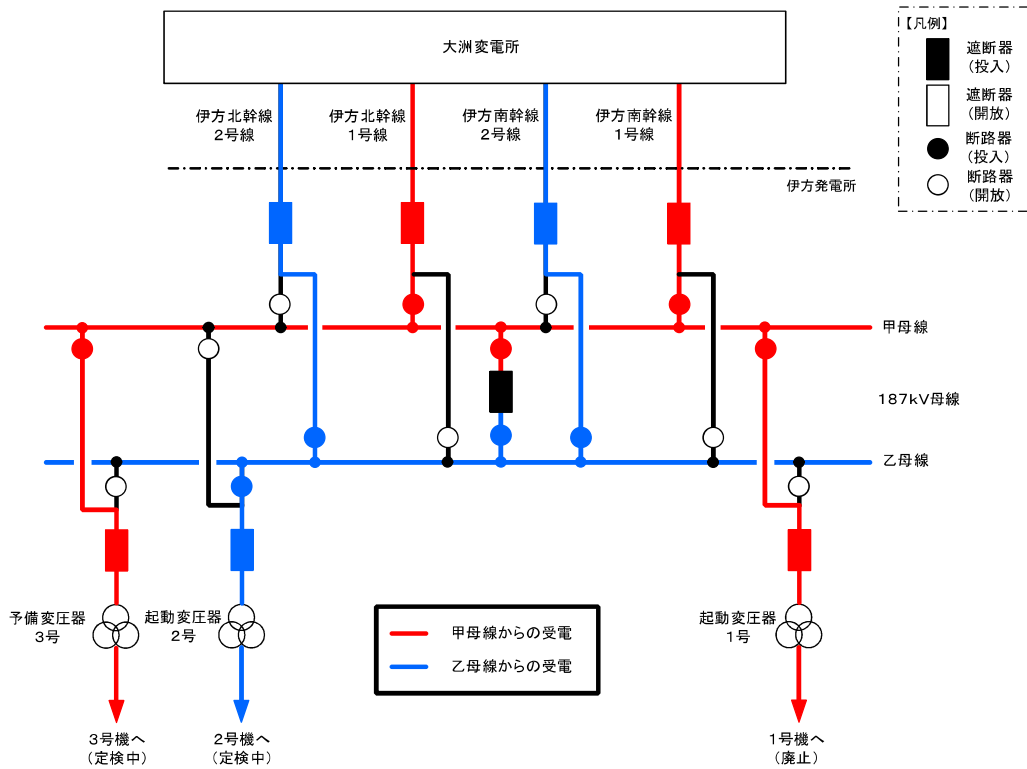


図1 方向試験実施前の系統構成

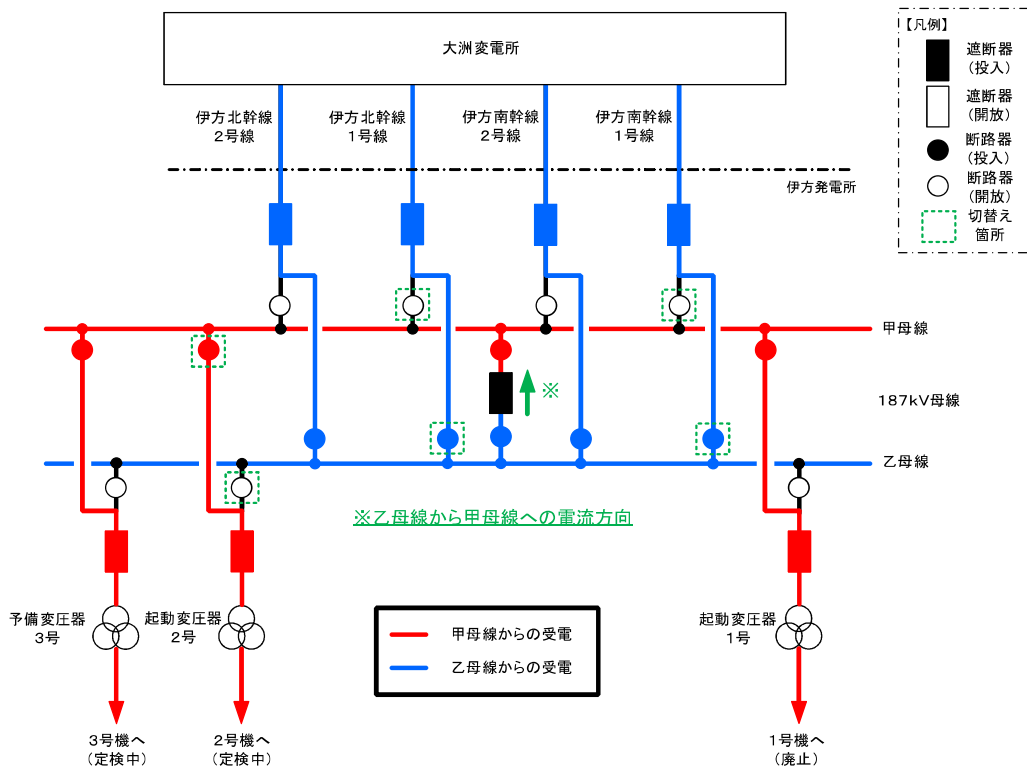
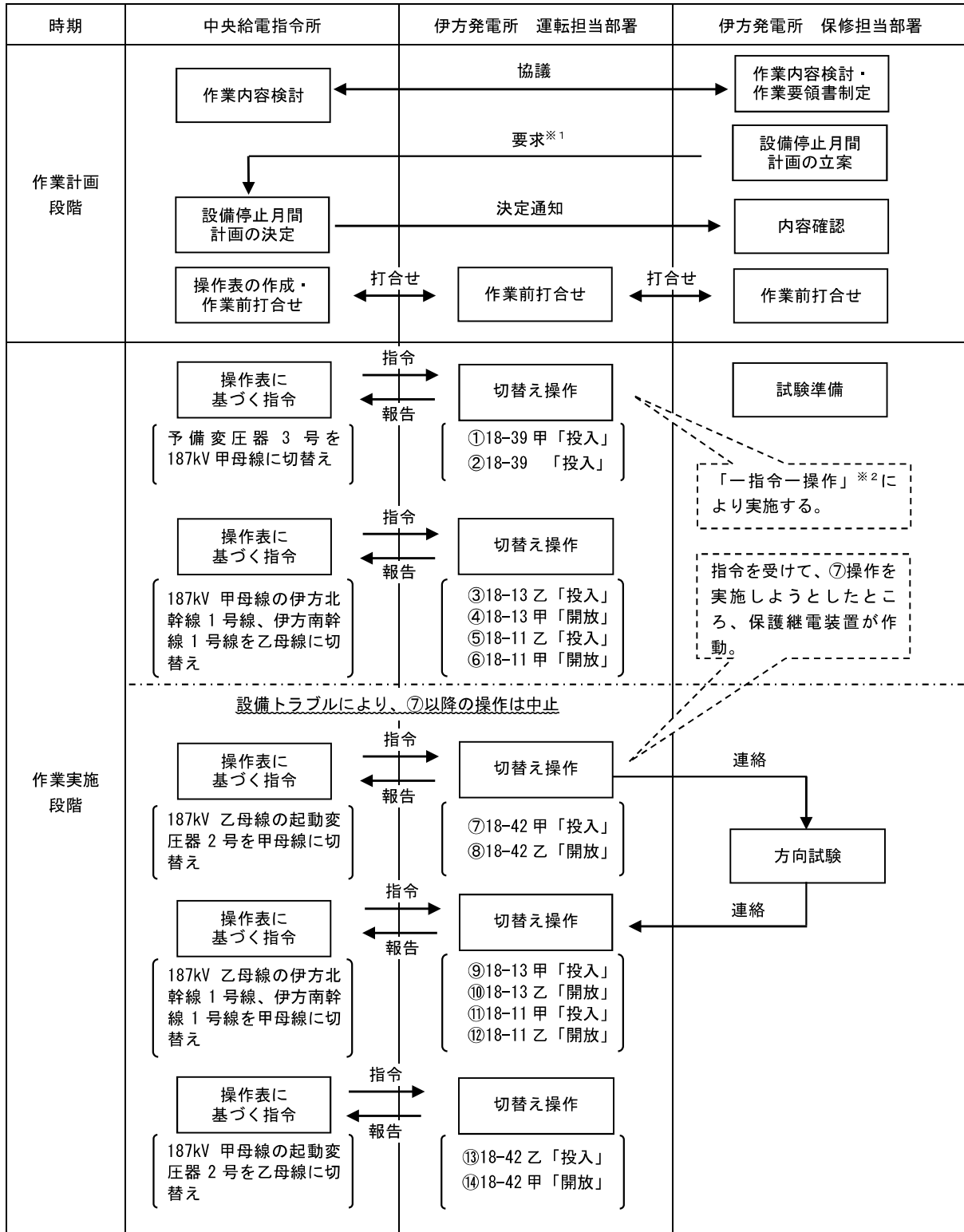


図2 方向試験における系統構成

### 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。

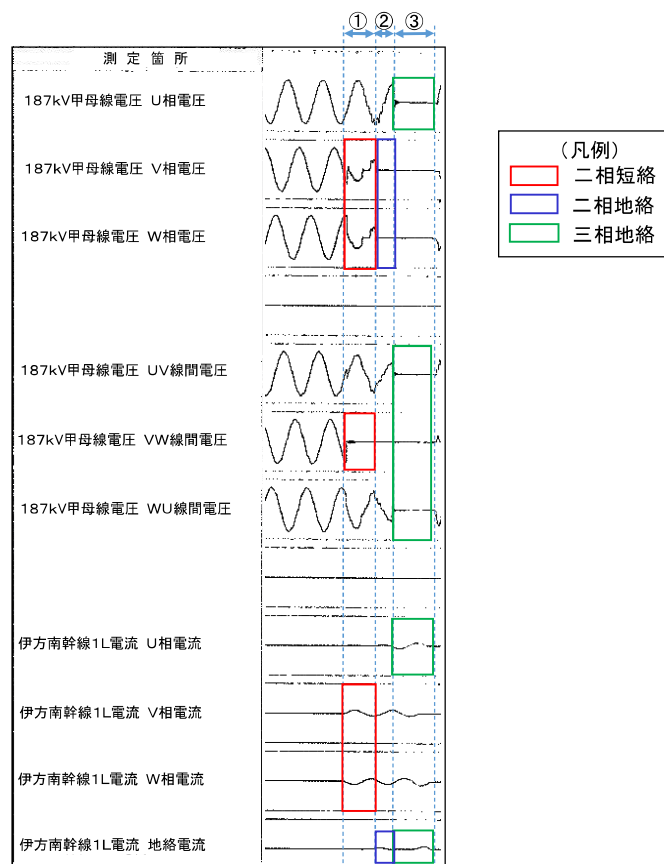


図1 自動オシロ装置の測定結果

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<sup>※1</sup>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、SO<sub>2</sub>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。

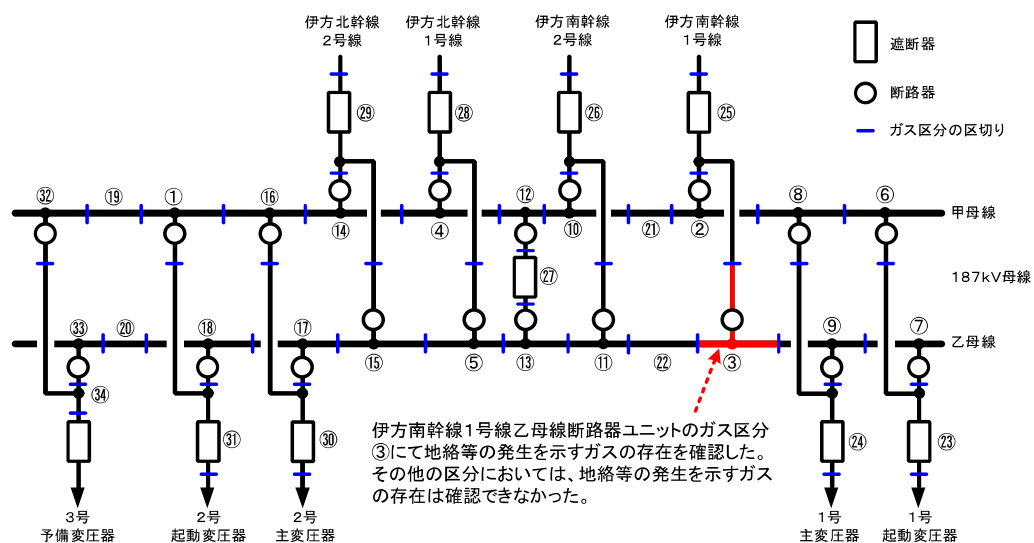


図1 187kV母線ガス区分

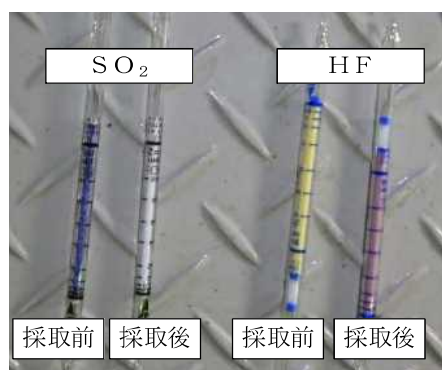


図2 伊方南幹線1号線乙母線断路器ユニットのガス分析結果

## 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 <sup>※</sup>			

※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 <sup>※1</sup>	異常なし
部分放電診断 <sup>※2</sup>	異常なし
内部異物診断 <sup>※3</sup>	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

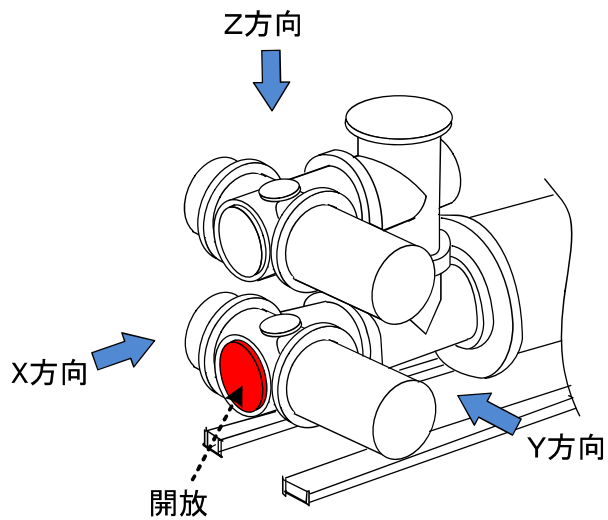


図2 断路器ユニット外観図

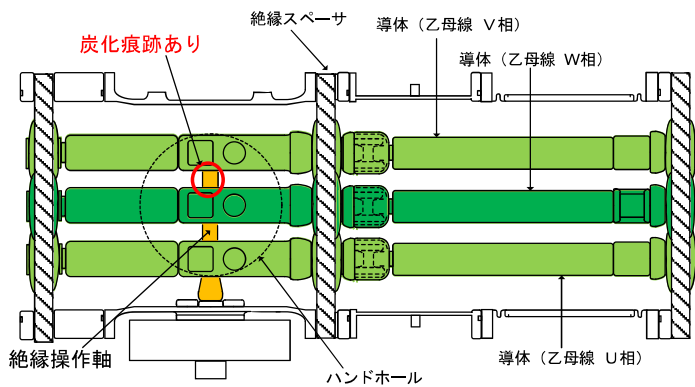


図3 断路器ユニット内部構造図 (X方向)

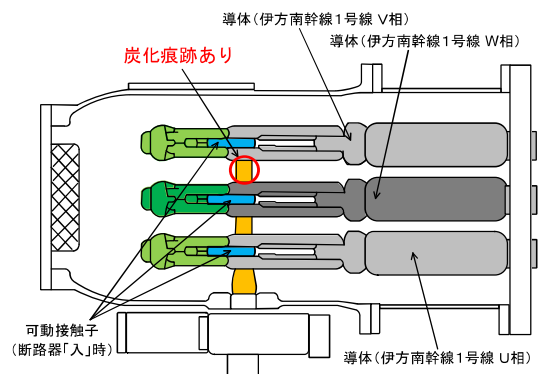


図4 断路器ユニット内部構造図 (Y方向)

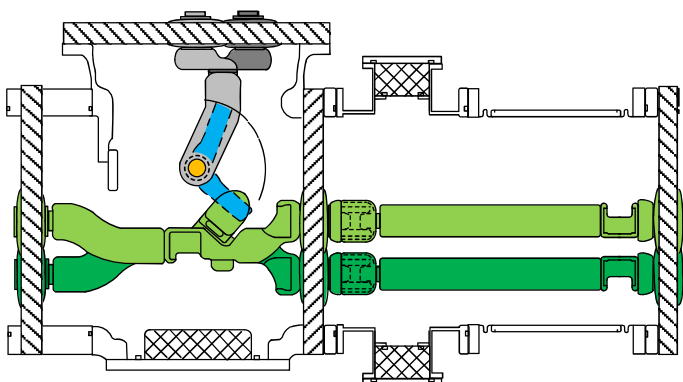


図5 断路器ユニット内部構造図 (Z方向)

## 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)

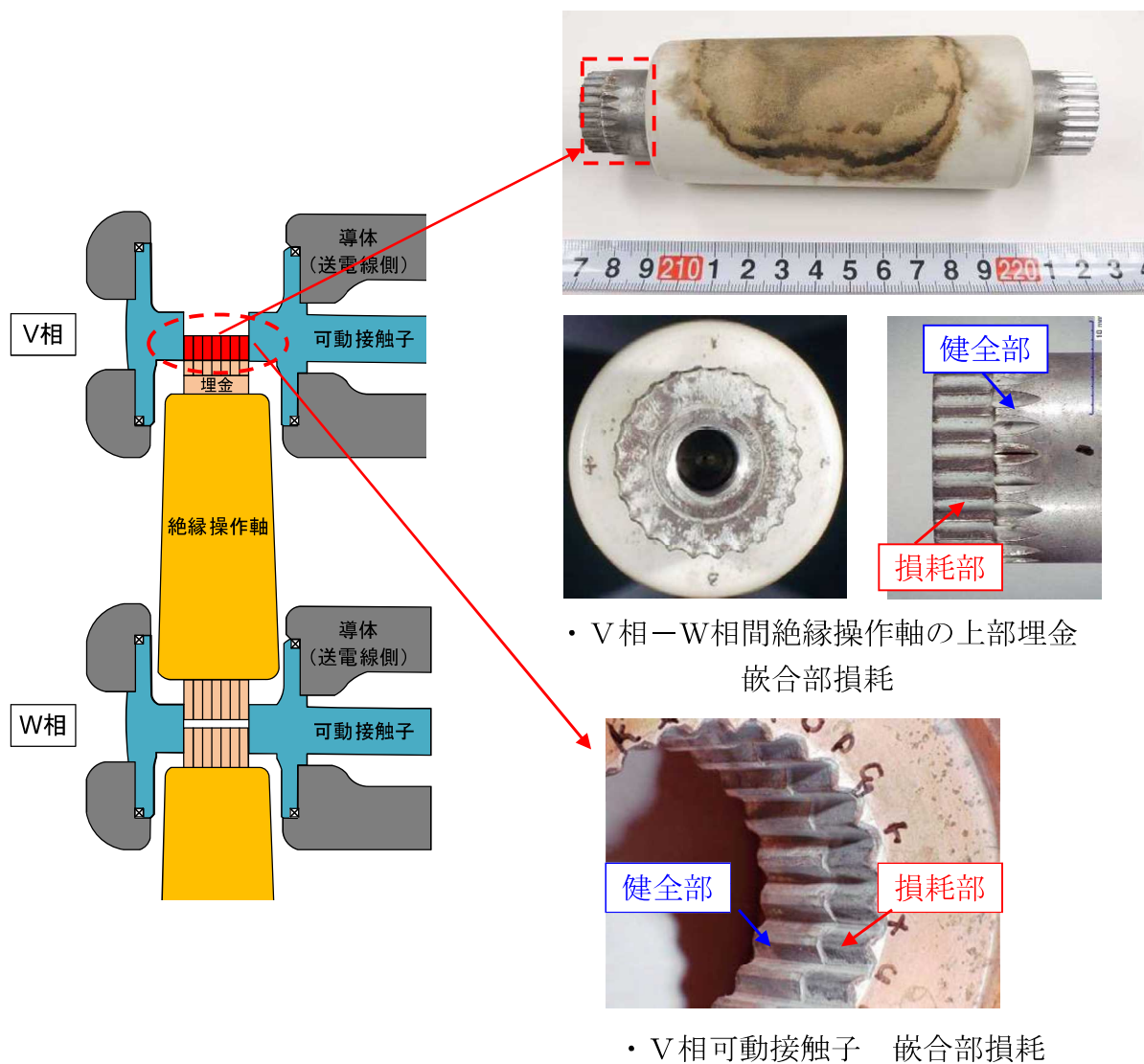


図6 嵌合部の損耗状況

(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)

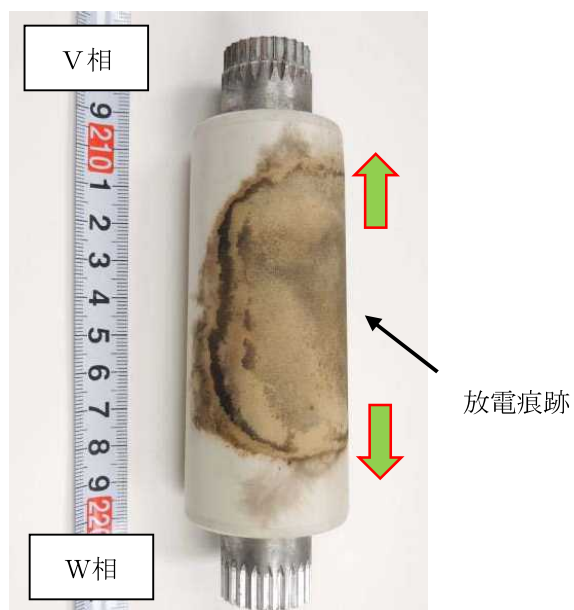


図7 絶縁操作軸放電痕跡

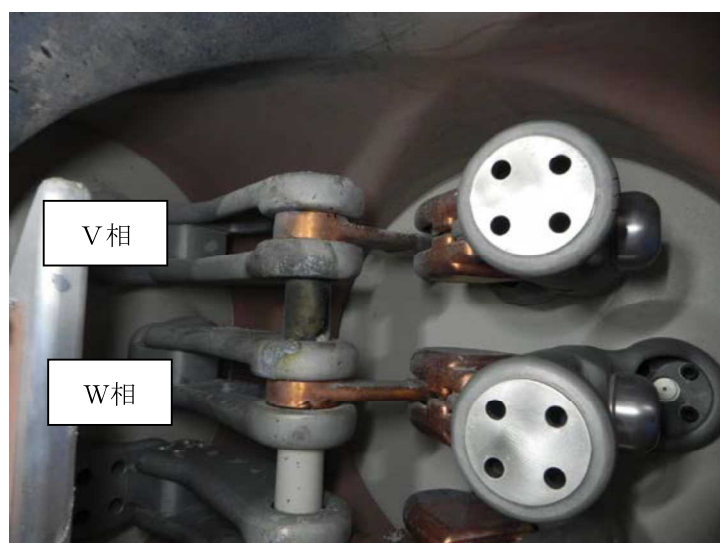


図8 解体前状況



(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（SF<sub>6</sub>）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	<ul style="list-style-type: none"><li>・外観点検</li><li>・絶縁抵抗測定</li><li>・タンク外操作機構の点検、注油</li><li>・開閉試験 他</li></ul>

(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

×：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	電界/絶縁設計確認 ・工場試験報告書確認	・電界計算により電界/絶縁設計の妥当性を確認した。 ・JEC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. (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。	・寸法測定	・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) 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。	外観確認 ・寸法測定	・絶縁操作軸の理金と可動接触子の嵌合部に損耗及び機械的な損傷（擦動痕）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。	・雷撃履歴確認	・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)
	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。	外観確認 ・表面汚損分析 ・採取異物の分析	・絶縁操作軸の理金と可動接触子の嵌合部に損耗及び機械的な損傷（擦動痕）が見られた。 ・短絡が発生している金属成分（アルミ合金、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、絶縁が破綻され、相間短絡に至る可能性がある。	電界/絶縁設計確認 ・工場試験報告書確認	・電界計算により電界/絶縁設計の妥当性を確認した。 ・JEC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)	
	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。	寸法測定 ・外観確認	・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)	
	SF <sub>6</sub> ガス異常	ガス圧力・純度が低下、規定値以上の水分が混入すると、絶縁性能が低下し相間短絡に至る可能性がある。	ガス圧力確認 ・ガス純度測定 ・ガス中水分測定	・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	<ul style="list-style-type: none"> <li>工場試験報告書確認</li> <li>設計強度評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>JRC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、設計上の機械強度に問題がないことを確認した。</li> <li>嵌合部の機械強度は、最大公差での隙間・半嵌合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。</li> </ul>	×	2. (1) a. (a) 2. (1) a. (b)
		製造不良による強度不足	<ul style="list-style-type: none"> <li>製造履歴確認</li> <li>材料分析</li> <li>硬度測定</li> <li>寸法測定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>製造時の加工寸法は寸法公差内であることを確認した。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	×	2. (1) b. (a) 2. (1) b. (b) 2. (1) b. (c) 2. (1) b. (d)
熱による溶損	嵌合部周辺からの熱影響	組立不良による強度不足	<ul style="list-style-type: none"> <li>製造履歴確認</li> <li>外観確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>外観を確認し、組立状態の異常は認められなかった。</li> </ul>	×	2. (1) c. (a) 2. (1) c. (b)
		操作装置（電動機）からの過大応力	<ul style="list-style-type: none"> <li>製造履歴確認</li> <li>閉閉操作状況確認</li> <li>操作装置特性確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>当該閉閉装置について、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。</li> <li>操作装置を取付け閉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。</li> </ul>	×	2. (1) d. (a) 2. (1) d. (b) 2. (1) d. (c)
ギヤップ放電による発熱	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で放電が上昇し、溶損する可能性がある。	<ul style="list-style-type: none"> <li>外観確認</li> <li>表面観察</li> <li>製造履歴確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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、山後、谷後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らるると考えられる近隣部位には、異常は認められなかった。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	×	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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>外観確認</li> <li>表面観察</li> <li>嵌合部の非接触状態継続有無確認</li> <li>嵌合部の放電有無の確認</li> <li>放電による溶融時間計算</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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、山後、谷後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、嵌合部が電子顕微鏡（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。</li> <li>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り、非接触状態を継続させることができることを確認した。</li> <li>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。</li> <li>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、2.00日程度であった。</li> </ul>	△	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

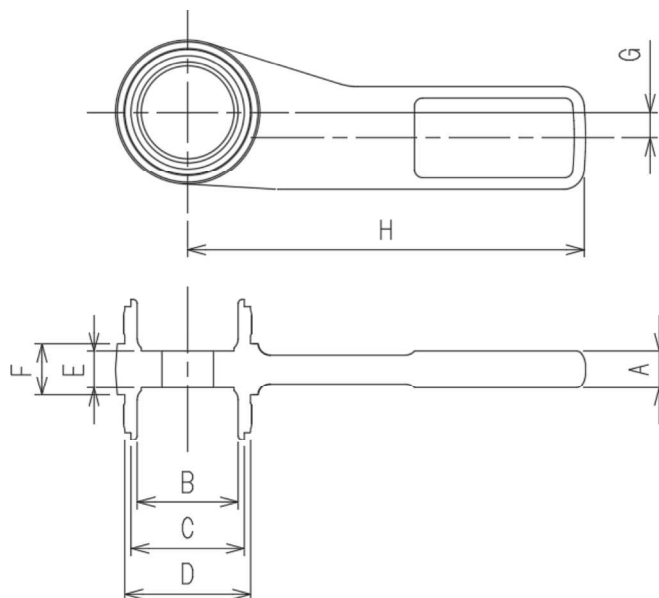
試験項目	結果
商用周波耐電圧試験 〔 短時間商用周波耐電圧試験 長時間商用周波耐電圧試験 〕	良
雷インパルス耐電圧試験	良

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

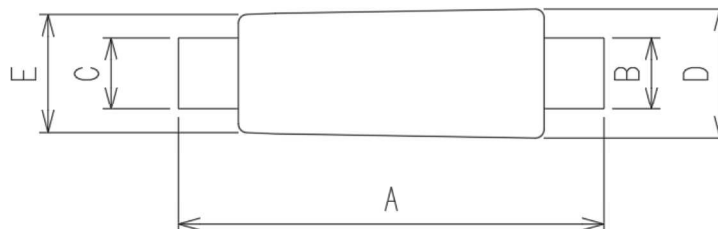
- ・可動接触子



(単位：mm)

符号	A	$\phi B$	$\phi C$	$\phi D$	E	F	G	H
図面寸法 (公差)	$\pm 0.3$	$\pm 0.8$	0 -0.08	0 -0.1	$\pm 0.2$	$\pm 0.1$	$\pm 0.5$	$\pm 1.2$
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)

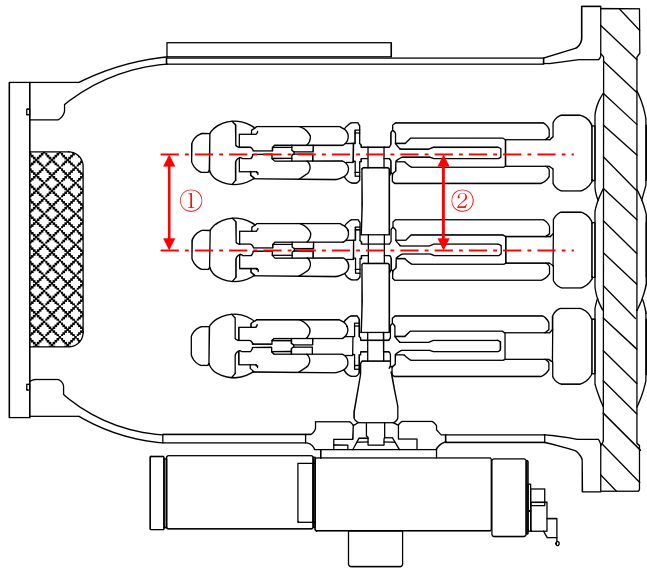


(単位：mm)

符号	A	$\phi B$	$\phi C$	$\phi D$	$\phi E$
図面寸法 (公差)	$\pm 0.5$	-0.040 -0.092	-0.040 -0.092	$\pm 0.5$	$\pm 0.5$
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。

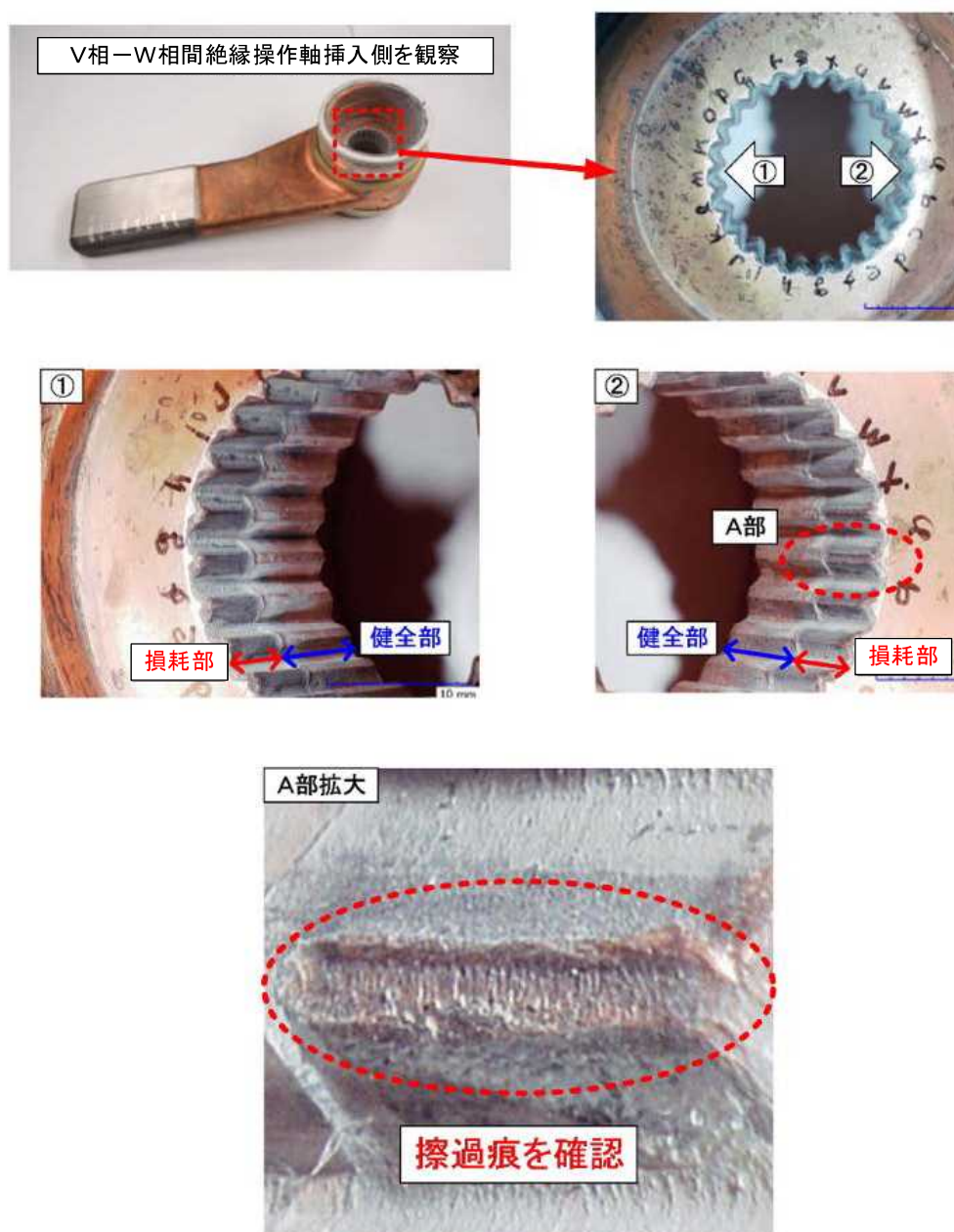


図1 可動接触子の外観確認結果

• 絶縁操作軸

V相-W相間絶縁操作軸の上部埋金の嵌合部（2・4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。

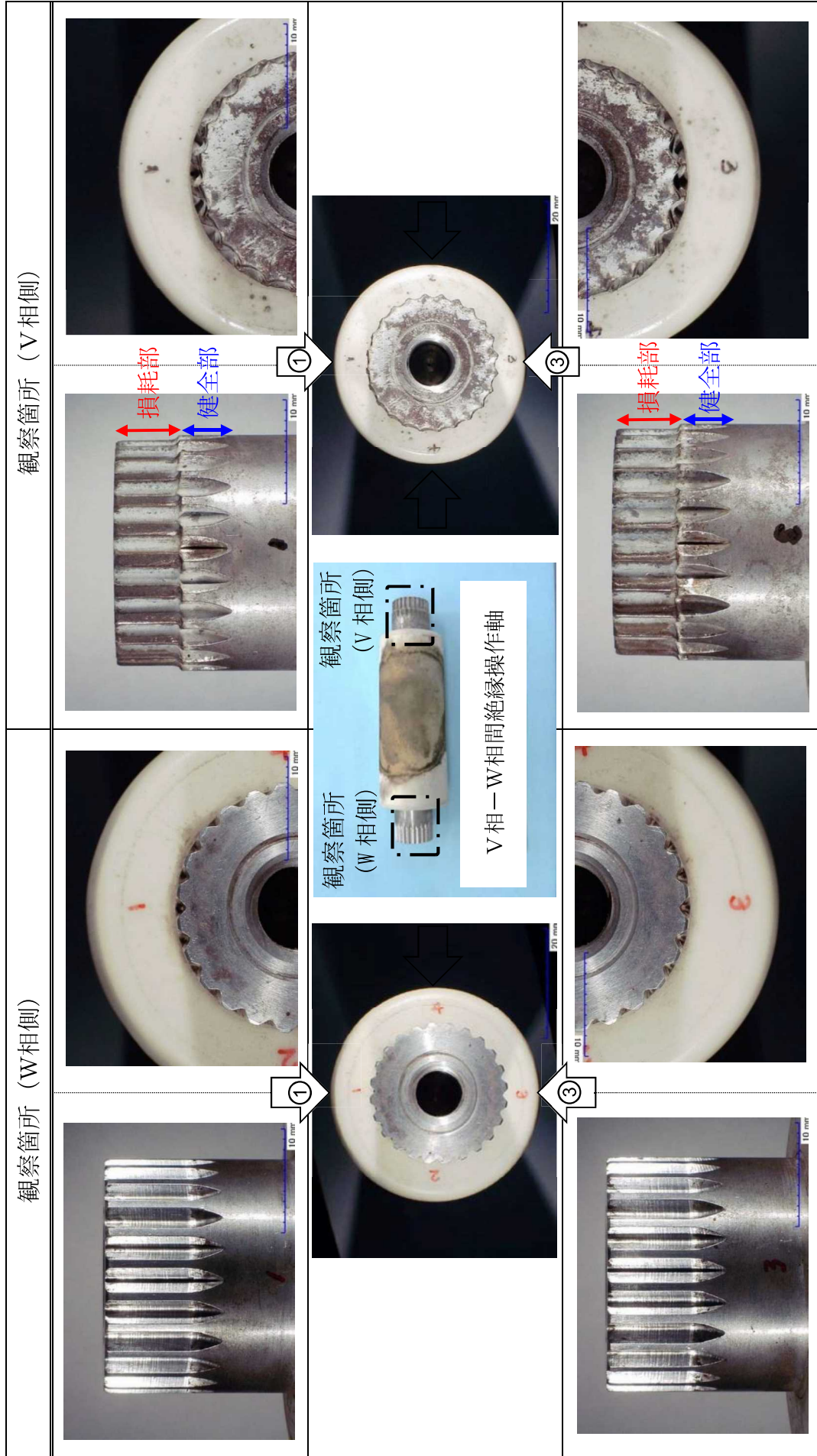
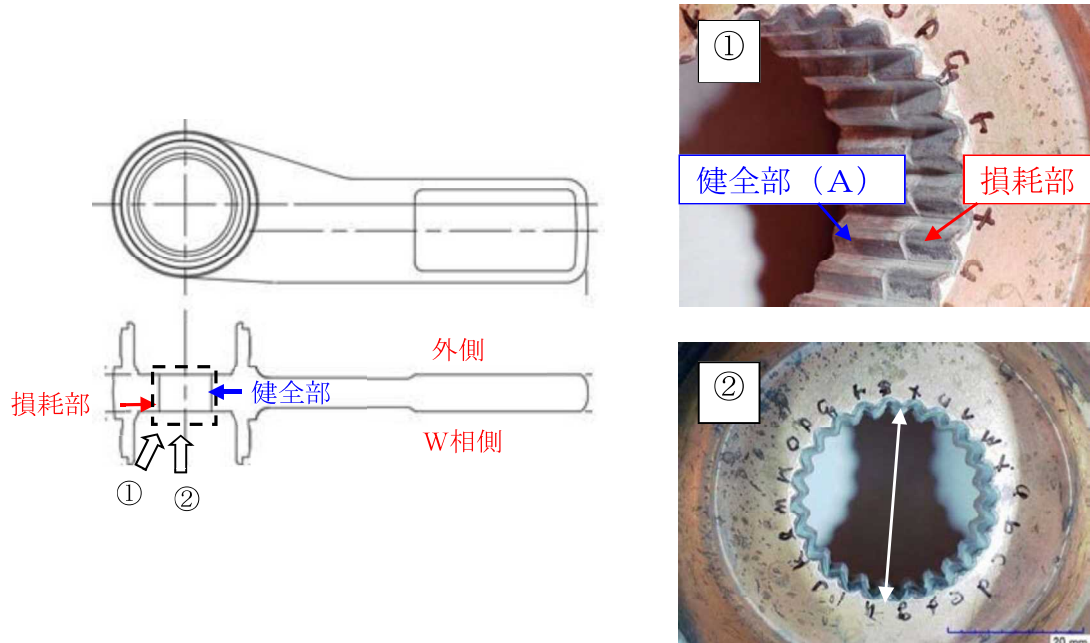


図2 絶縁操作軸埋金の外観確認結果

(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

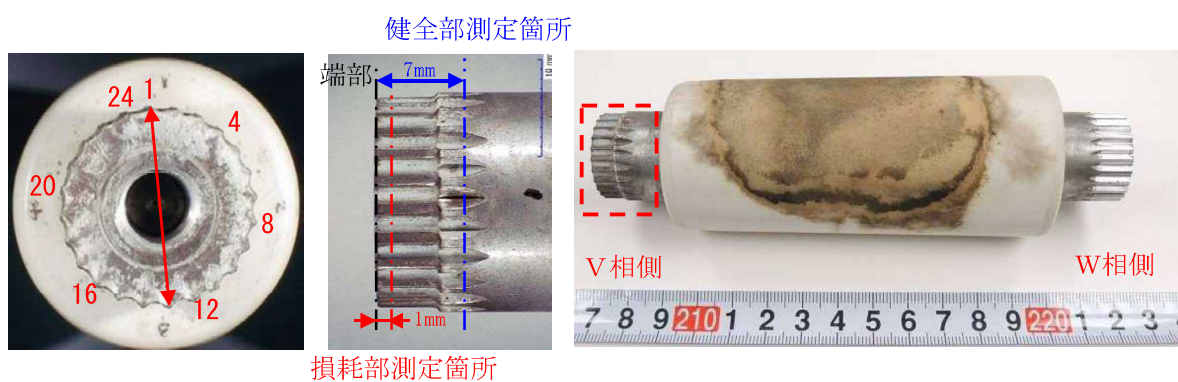


測定箇所	公差 (mm)	測定結果 (mm)	
		健全部 ※1	損耗部 ※2
a-m	+0.088/+0.046	+0.084	+0.494
f-r		+0.064	+0.474

※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 <sup>※1</sup>	損耗部 <sup>※2</sup>		健全部 <sup>※1</sup>	損耗部 <sup>※2</sup>
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。

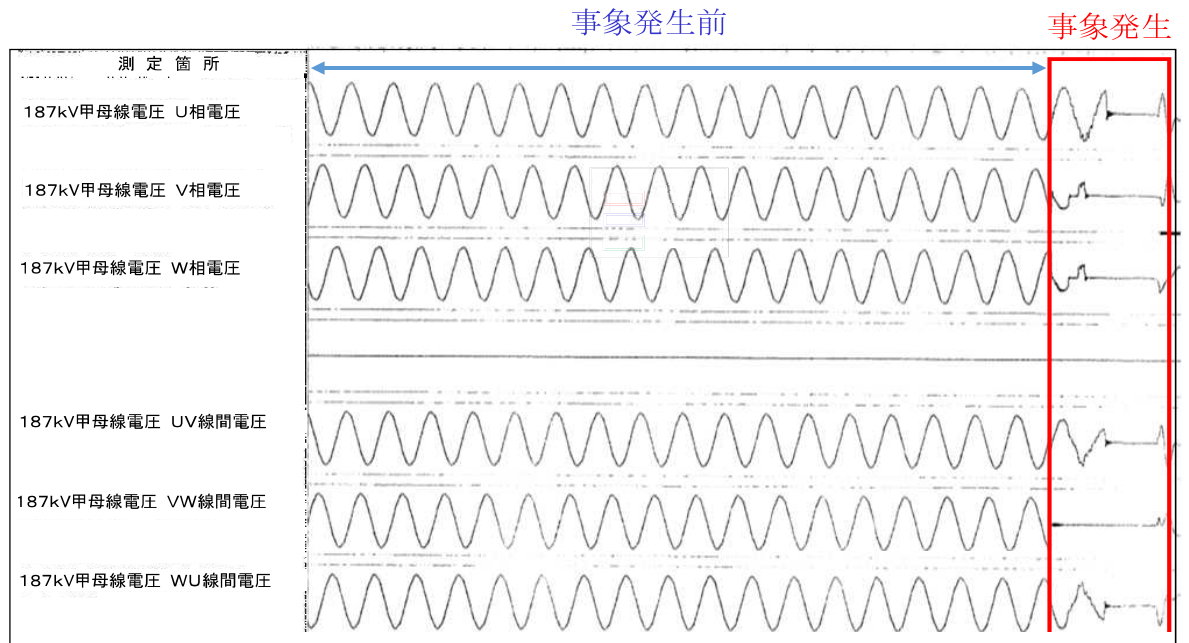


図3 自動オシロ装置測定結果

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SF<sub>6</sub>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。

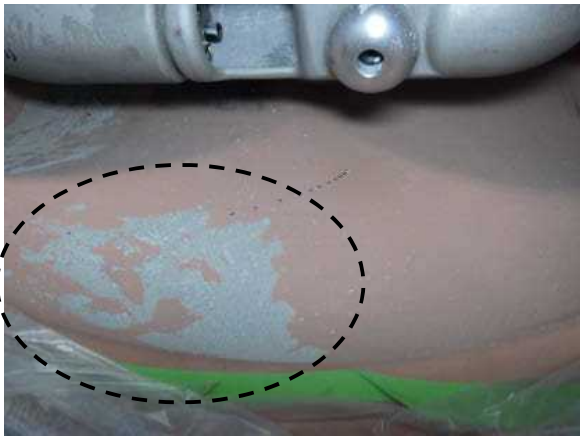

表3 表面汚損分析結果

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	( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	0.0061	0.0015
F <sup>-</sup>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	4.04	0.81
Cl <sup>-</sup>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	0.06	0.08
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	0.02	0.01
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	0.11	0.02
Fe <sup>2+, 3+</sup>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	0.01	<0.01
Cu <sup>2+</sup>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	3.22	0.21
Zn <sup>2+</sup>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	0.06	0.01
Ca <sup>2+</sup>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	0.21	0.06
Mg <sup>2+</sup>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	0.12	0.02
Al <sup>3+</sup>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	6.72	0.60
Si <sup>2+, 4+</sup>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	0.03	0.01
Ag <sup>+</sup>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	<0.02	<0.01
Mn <sup>2+</sup>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	0.03	<0.01
W <sup>6+</sup>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	0.08	<0.01
Na <sup>+</sup>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	0.07	0.03
K <sup>+</sup>	( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	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 F<sub>6</sub>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 F<sub>6</sub>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 F<sub>6</sub>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 F<sub>6</sub>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、J E Cに基づく、1, 0 0 0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1 0, 0 0 0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 <sup>※</sup>	曲げ破壊 応力 (MPa)	発生曲げ 応力 (MPa)	裕度 <sup>※</sup>
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。