

令和6年能登半島地震による2号機主変圧器への影響について

1. 事象概要

2024年1月1日16時10分、令和6年能登半島地震（以下「能登半島地震」という。）後、2024年1月1日16時43分に当該変圧器の絶縁油面の低下を示す警報発生に伴い現場確認を行ったところ、当該変圧器のNo. 11冷却器から絶縁油の漏えいを確認した。また、同日16時52分に比率差動継電器が動作し、当該変圧器が自動で予備電源変圧器に切り替わった。これらのことから、当該変圧器を使用不可能と判断した。

当該事象は、原子力発電工作物に係る電気関係報告規則第3条第1項第4号に基づく報告事象である。

当該変圧器の仕様を別紙1、外観写真および概要図を別紙2に示す。

(別紙1、2)

2. 時系列

地震発生以降に確認された当該変圧器に関連する事象の時系列を別紙3に示す。

(別紙3)

3. 実施した処置

(1) 絶縁油の回収

2024年1月1日、絶縁油が漏えいしているNo. 11冷却器下部に油吸着マットを設置した。また、翌2日にNo. 11冷却器の損傷により絶縁油が漏えいした個所の仕切弁（上部、下部）の閉止を行った。他の冷却器についても余震による損傷で絶縁油が漏えいするのを防止するため仕切弁（下部）の閉止措置を行うとともに、損傷したNo. 11冷却器への雨水の浸入を防止するための養生を実施した。

2024年1月2日から5日にかけて、約24,600ℓの漏えいした油（地下ピット内の水分も含む）※を回収した。

※当該変圧器のNo. 11冷却器上部配管接続部が損傷したことにより、当該箇所より上部にあるコンサベータ、冷却器配管および変圧器本体から絶縁油が約19,800ℓ漏えいしたと推定した。

(2) 当該変圧器の点検

2024年1月15日に実施したメーカーによる外観点検の結果、放圧板の割れおよびNo. 11冷却器上部配管接続部の損傷、冷却器配管接続部の塗装ひび割れ、変圧器本体にて配管の損傷を確認した。

2024年1月15日メーカー外観点検結果

対象部位	地震による影響	
変圧器本体	無	—
ブッシング	無	—
避雷器	無	—
タップ切替器	無	—
冷却器	有	【No. 11】 ・冷却器上部配管接続部の損傷 【No. 1～10】 ・配管接続部にて塗装ひび割れ
コンサベータ	無	—
放圧装置	有	放圧板の割れ
吸湿呼吸器	無	—
温度計	無	—
油面計	無※	※絶縁油漏油による指示値低下（正常動作）
衝撃油圧継電器	無	—
ガス検出器	無※	※ガス滞留（コンサベータと放圧管を接続 配管損傷による正常動作）
弁	無	—
配管	有	コンサベータと放圧管を接続する配管の損傷

(3) 油中ガス分析

当該変圧器の比率差動継電器が動作しており、内部故障が想定されることから油中ガス分析を実施した結果、変圧器の内部故障の兆候を示すガスが検出された。

(別紙4)

4. 確認された事象の分析

当該変圧器にて発生した以下の警報、インターロック動作及び運転操作について分析した。

(別紙5)

(1) No. 11冷却器上部配管接続部の損傷

能登半島地震の揺れに伴う応力が作用し、No. 11冷却器上部配管接続部が損傷した。

(別紙6)

(2) 本体内部ガス検出器の動作

コンサベータと放圧管を接続する配管の損傷に伴い損傷箇所から空気が流入し、本体内部ガス検出器が動作した。

(別紙7)

(3) 油面計（本体）の動作

No. 11冷却器上部配管接続部の損傷箇所から絶縁油が漏えいして油面が低下し、油面計（本体）が動作した。

(別紙8)

(4) 比率差動継電器トリップ

当該変圧器内部での電気故障により発生した差電流を検知し、比率差動継電器がトリップした。

(別紙9)

(5) 衝撃油圧継電器トリップ

当該変圧器の内部故障に伴い絶縁油が熱分解を起こしてガスが発生することで油圧が上昇し、衝撃油圧継電器がトリップした。

(別紙10)

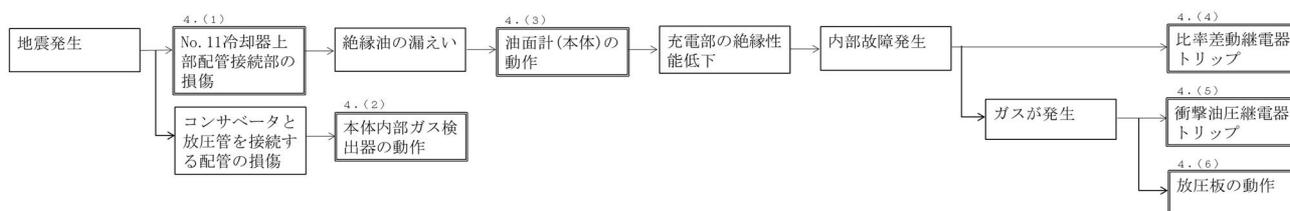
(6) 放圧板の動作

当該変圧器の内部故障に伴い絶縁油が熱分解を起こしてガスが発生することで変圧器内部の圧力が上昇し、放圧板が動作した。

(別紙11)

5. 分析した結果から推定されるメカニズム

地震発生後に伴いNo. 11冷却器上部配管接続部が損傷したことにより絶縁油の漏えいが始まり、その後、油面がコンサーバタ下限を下回ったことで油面低下の警報が発報し、以降も油面低下が継続した結果、当該変圧器の充電部において絶縁性能低下を招くレベルまで油面が低下したことで短絡等が発生し、比率差動継電器等が動作したものと推定される。



2号機主変圧器 事象の流れ

6. 今後の対応

- 当該変圧器は比率差動継電器が動作していることに加え、油中ガス分析にて変圧器の内部故障の兆候が確認されたことから、2024年1月末までに低圧電気試験、2月中旬に内部点検を実施し、その結果から放圧板を含め変圧器の修理方法について検討する。
- No. 11冷却器上部配管接続部の損傷に関して更なる調査を行う。

- 2号機主変圧器の処置完了までの期間、2号機の外部電源については複数回線（志賀原子力線（275kV 2回線））から受電しており、原子力安全への影響はない。

今後の点検予定

項目		内容	実施予定
低圧電気試験	絶縁抵抗測定	対地間及び巻線間絶縁の異常有無を確認	1月末
	変圧比測定	巻線の巻き数の異常有無を確認	
	低電圧励磁電流測定	巻線内部で短絡の有無を確認	
内部点検※	油中ブッシング部確認	油中ブッシング部の異常有無を確認	2月中旬
	内部巻線確認	巻線の異常有無を確認	
	本体内部点検	内面の異常有無を確認	

※抜油が必要となるため、資機材準備及び手続等を実施中。

【別紙】

- 別紙1 2号機主変圧器 仕様
- 別紙2 2号機主変圧器外観写真、概要図
- 別紙3 2号機主変圧器に関連する事象の時系列
- 別紙4 2号機主変圧器 油中ガス分析結果
- 別紙5 能登半島地震発生後における2号機主変圧器の時系列
- 別紙6 2号機主変圧器 No. 11冷却器上部配管接続部の損傷に関する事象分析図
- 別紙7 2号機主変圧器 本体内部ガス検出器の動作に関する事象分析図
- 別紙8 2号機主変圧器 油面計（本体）の動作に関する事象分析図
- 別紙9 2号機主変圧器 比率差動継電器トリップに関する事象分析図
- 別紙10 2号機主変圧器 衝撃油圧継電器トリップに関する事象分析図
- 別紙11 2号機主変圧器 放圧板の動作に関する事象分析図
- 別紙12 2号機主変圧器 放圧板動作について

以上

2号機主変圧器 仕様

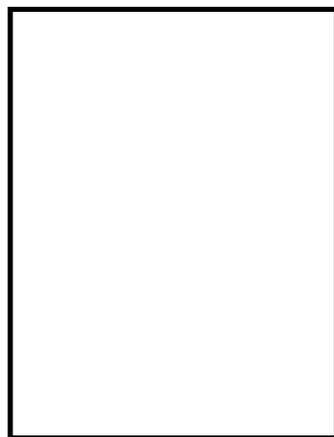
項目	仕様
台数	1
容量	1,480,000kVA
電圧	23.7kV／525.0－515.0－505.0kV
相数	3
周波数	60Hz
冷却法	導油風冷式

2号主変圧器外観写真、概要図

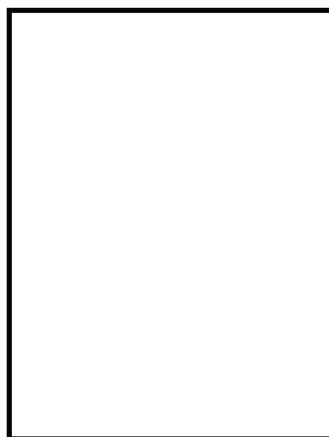


2号機主変圧器 (東面)

No. 11 冷却器損傷箇所

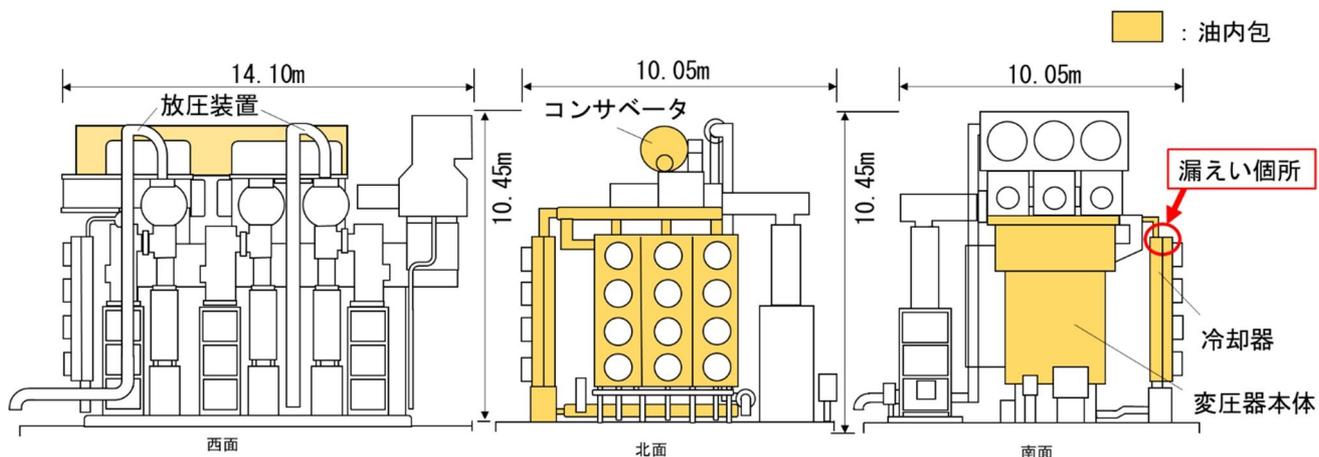


放圧装置



放圧板動作状況

2号機主変圧器 外観写真



2号機主変圧器 概要図

枠囲みの内容は機密事項の観点から公開できません。

2号機主変圧器に関連する事象の時系列

時系列	備考
<p>1月1日(月)</p> <p>16時43分 2号機「主変圧器本体油面低下」警報が発生。</p> <p>16時44分 「主変圧器本体油面低下」信号により噴霧消火設備が自動起動。</p> <p>16時45分 現場にて油の匂いを焦げ臭いと感じ、その旨、中央制御室に報告。当直長は、噴霧消火設備が起動していることもあり火災の可能性があると判断し、公設消防へ火災発生と119番通報。</p> <p>16時52分 「主変圧器本体放圧装置動作」警報、「主変圧器比率作動継電器トリップ」警報及び「主変圧器衝撃油圧継電器トリップ」警報が発生。</p> <p>16時52分 現場にて2号機主変圧器の放圧板が動作したことを確認。</p> <p>16時52分 2号機の外部電源が500kVから275kVへ自動切替。</p> <p>16時52分 2号機「115V常用(B)直流地絡」警報発生。</p> <p>17時24分 噴霧消火設備を手動停止。</p> <p>17時29分 化学消防隊と共に現場再確認の結果、焦げ臭いと感じた匂いは油の匂いであり、火災の発生がないと判断。</p> <p>18時20分 現場にて、2号機主変圧器からの油漏れ継続を確認。</p> <p>18時30分 公設消防へ火災ではないことを直通電話で通報。</p> <p>19時48分 現場にて2号機主変圧器の油漏れを確認(冷却ファンNo.11より約2cmの幅で連続的に漏えいおよび放圧板動作に伴う導油管からの油漏えい)。</p> <p>20時00分 当直長が油漏れについて119番通報。</p> <p>20時08分 2号機115V直流分電盤(B3)にて主変圧器冷却器制御盤の電源を切とし、2号機「115V常用(B)直流地絡」警報がクリア。</p> <p>21時30分 現場にて油漏れの停止を確認。(絶縁油が約3,500リットル漏えいしたものと推定)</p>	
<p>1月2日(火)</p> <p>14時00分 2号機主変圧器の本体から油の回収を開始。</p> <p>14時15分 2号機主変圧器の地下タンクからの油の回収を開始。</p> <p>16時30分 2号機主変圧器の本体から油の回収を完了(約1,800リットル)。</p> <p>以降、変圧器の点検方法、復旧方法等についてメーカーと検討中。</p>	

2号機主変圧器に関連する事象の時系列

時系列	備考
<p>1月3日（水） 絶縁油中ガス分析により、変圧器内部に短絡等の異常が発生していることを確認。</p> <p>1月5日（金） 11時55分 2号機主変圧器の地下タンクの絶縁油回収完了（それまでの雨水等を含め回収量は約24,600リットル、そのうち2号機主変圧器からの油の量は19,800リットルと推定）。 回収した絶縁油が入っているドラム缶を発電所敷地内に保管。</p> <p>1月15日（木） メーカーによる変圧器の目視点検の結果、冷却器につながる配管の割れ及びコンサベータにつながる配管の割れを確認。</p>	

2号機主変圧器 油中ガス分析結果

1. 目的

絶縁油に含まれるガスを分析することにより、変圧器内部での異常を示すガスの有無を診断する。

2. 結果

以下のとおりガスが検出され、判定基準を逸脱する等、異常兆候が確認された。

(単位：ppm)

		判定基準	分析結果*
ガス 総量	油中ガス総量	—	28,576
	酸素	—	2,309
	窒素	—	25,260
	二酸化炭素	—	681.1
	一酸化炭素※	300 以下	59.7
	水素※	400 以下	20.8
	メタン※	150 以下	53.6
	アセチレン※	0.5 以下	21.8
	エチレン※	10 以下	54.4
	エタン※	150 以下	115.6
	可燃性ガス総量 (※総量)	500 以下	325.9

※2024年1月2日採油。

以上

能登半島地震発生後における 2 号機主変圧器の時系列

1 月 1 日 (月) 16 時 10 分 志賀町で震度 7 の地震発生

[警報]：警報発報 [INN]：インターロック動作 [運転]：運転操作 MCR：中央制御室制御盤 現場：現場盤

時間 (2024 年 1 月 1 日)	警報発報／インターロック動作／運転操作		事象分析
	事象分析の対象	事象分析の対象外	
16 時 10 分	—	[警報] MCR 主変圧器地震計動作※	—
	[警報] MCR 主変圧器本体内部ガス検出		【事象分析 2-②】本体内部ガス検出器の動作
16 時 43 分	[警報] MCR 主変圧器本体油面低下	—	【事象分析 2-③】油面計(本体)の動作
16 時 44 分	[INN]噴霧消火設備自動起動		
16 時 45 分	—	[運転]公設消防へ火災発生と 119 番通報	—
16 時 52 分	[警報] MCR 主変圧器比率差動継電器トリップ [INN]主変圧器用遮断器 5572 開 [INN]予備電源変圧器受電遮断器 52E 閉	—	【事象分析 2-④】比率差動継電器トリップ
	[警報] MCR 主変圧器衝撃油圧継電器トリップ	—	【事象分析 2-⑤】衝撃油圧継電器トリップ
	[警報] MCR 主変圧器本体放圧装置動作	—	【事象分析 2-⑥】放圧板の動作
17 時 24 分	—	[運転]噴霧消火設備を手動停止	—
17 時 29 分	—	[運転]化学消防隊と共に現場確認を行い、火災発生がないと判断	—
18 時 30 分	—	[運転]公設消防へ火災ではないことを電話で通報	—
19 時 48 分	[運転]No. 11 冷却器上部配管接続部からの絶縁油漏えいを確認	[運転]放圧板動作に伴う導油管からの絶縁油の漏えいを確認	【事象分析 2-①】No. 11 冷却器上部配管接続部の損傷
20 時 00 分	—	[運転]絶縁油漏えいについて公設消防へ 119 番通報	—
21 時 30 分	—	[運転]絶縁油の漏えい停止を確認	—

※：以降の余震に伴う地震計動作は省略。

【事象分析 2 - ①】 2号機主変圧器 No.11冷却器上部配管接続部の損傷に関する事象分析図

事象	要因		要因説明	調査内容	調査結果	判定
No. 11冷却器 上部配管接 続部の損傷	損傷箇所へ の応力の印 加	地震の揺れ	地震の揺れによる応力が作用し、配管接続部が損傷した。	・外観確認 ・パトロール記録確認(地震前)	地震発生前に異常が確認されていない箇所が破損しており、地震の揺れによる応力が作用して破損したものと推定した。 今後、冷却器の損傷に関して更に調査を行う。	△
		外部からの 衝撃	配管接続部に対する外部からの衝突物による衝撃にて配管接続部が損傷した。	・外観確認	配管接続部に外部からの衝突物による傷、変形は確認されていない。	×
		内部圧力の 上昇	変圧器内部の圧力が上昇し、冷却器の内部から応力が印加され、配管接続部が損傷した。	・警報記録確認	衝撃油圧継電器の動作は油面計(本体)の動作後であるため、配管接続部は内部圧力上昇前に損傷していたものと推定する。 また、変圧器内部の圧力上昇時は放圧板が動作する。	×
	配管接続部 の劣化	腐食	配管接続部が腐食し減肉することで配管接続部が損傷した。	・外観確認	損傷箇所を目視で確認した結果、腐食は認められなかった。	×

【事象分析2-②】 2号機主変圧器 本体内部ガス検出器の動作に関する事象分析図

事象	要因	要因説明	調査内容	調査結果	判定	
本体内部ガス検出器の動作	本体内部でガス発生	変圧器内部事故にて絶縁油が熱分解を起こしてガスが発生し、検出器が動作した。	・警報記録確認	当該検出器動作時は、ガスが発生するような変圧器内部故障を示す警報は発報していない。	×	
	外部からガス流入	変圧器管体の損傷	変圧器の損傷に伴い損傷個所から空気が流入し、検出器が動作した。	・外観確認	コンサベータと放圧管を接続する配管が損傷しており、空気の流入経路となることを確認した。	○
		放圧板の動作	放圧板の動作時に負圧域の放圧管内に空気が侵入し、検出器が動作した。	・警報記録確認	当該検出器動作時は、放圧板が動作していない。	×
	検出器の誤動作	外部からの衝撃	外部からの衝撃により検出器が誤作動した。	・外観点検	外部からの衝突による傷、変形は確認されていない。	×

【事象分析2-③】 2号機主変圧器 油面計（本体）の動作に関する事象分析図

事象	要因	要因説明	調査内容	調査結果	判定	
油面計（本体）の動作	絶縁油の漏えい	変圧器管体の損傷	変圧器本体の損傷箇所から絶縁油が漏えいして油面が低下し、油面計が動作した。	・外観確認	変圧器本体からの絶縁油の漏えいは確認されていない。	×
		冷却器の損傷	冷却器の損傷箇所から絶縁油が漏えいして油面が低下し、油面計が動作した。	・外観確認	No. 11冷却器上部配管接続部から絶縁油が漏えいしていることを確認した。	○
		放圧板の動作	放圧板が動作することで、放圧管を経由して絶縁油が漏えいして油面が低下し、油面計が動作した。	・警報記録確認	当該警報発生時に放圧板が動作していたことは確認されていない。	×
	油面計の誤動作	外部からの衝撃	外部からの衝撃により継電器が誤作動した。	・外観確認	外部からの衝突による傷、変形は確認されていない。	×
		地震	地震の揺れに伴い油面計のフロートが上下に揺れて油面低下を検知した。	・警報記録確認	16時43分に当該警報が発生しており、地震に伴う絶縁油の揺れは収まっていたものと考えられる。	×

【事象分析2-④】 2号機主変圧器 比率差動継電器トリップに関する事象分析図

事象	要因	要因説明	調査内容	調査結果	判定
比率差動継電器の動作	変圧器内部での電気故障	変圧器内部の電気故障により発生した差電流を検知し、継電器が動作した。	・油中ガス分析	変圧器内部故障(地絡、短絡)の兆候を示すガスを検出した。	○
	変圧器外部での電気故障	変圧器周辺の設備(GIS、OFケーブル、IPB等)での電気故障により発生した差電流を検知し、継電器が動作した。	・パトロール記録(地震後)確認 ・警報記録確認	地震後パトロール結果では、変圧器周辺設備に異常は確認されていない。また、警報記録確認の結果、当該設備の異常を示す警報は発報していないことを確認した。	×
	継電器の誤動作	整定値誤り	比率作動継電器の整定値に誤りがあり、通常の変動範囲の電流で継電器が誤動作した。	・整定値確認	整定値に誤りは確認できなかった。

【事象分析 2-⑤】 2号機主変圧器 衝撃油圧継電器トリップに関する事象分析図

事象	要因	要因説明	調査内容	調査結果	判定	
衝撃油圧継電器のトリップ	変圧器内部の油圧上昇	ガスの発生	変圧器内部故障に伴い絶縁油が熱分解を起こしてガスが発生することで油圧が上昇し、継電器が動作した。	・油中ガス分析	変圧器内部故障の兆候が認められたため、変圧器内部でガスが急激に発生し、油圧が急激に上昇したものと想定される。	△
		絶縁油の衝撃圧力	地震の揺れに伴う絶縁油の衝撃圧力が継電器に伝達して、継電器が動作した。	・警報記録確認	16時52分に当該警報が発生しており、地震に伴う絶縁油の揺れは収まっていたものと考えられる。	×
	継電器の誤動作	外部からの衝撃	外部からの衝撃により継電器が誤作動した。	・外観確認	外部からの衝突による傷、変形は確認されていない。	×

【事象分析2-⑥】 2号機主変圧器 放圧板の動作に関する事象分析図

事象	要因	要因説明	調査内容	調査結果	判定	
放圧板の動作	変圧器内部 圧力の上昇	ガスの発生	変圧器内部故障に伴い絶縁油が熱分解を起こしてガスが発生することで内部圧力が上昇し、放圧板が動作した。	・油中ガス分析	内部故障を示すガスが発生している。	○
		絶縁油の揺れに伴う力	能登半島地震時、絶縁油の揺れに伴う力により放圧板が動作した。	・警報記録確認	16時52分に当該警報が発生しており、地震に伴う絶縁油の揺れは収まっていたものと考えられる。	×
放圧板の誤動作	放圧板の誤動作	引き外し軸の抜け落ち	地震により引き外し軸が作動軸から離れることで作動軸が作用して放圧板が動作した。	・警報記録確認	16時52分に当該警報が発生しており、地震により引き外し軸が作動軸から離れたことによる放圧板の動作ではない。	×
		腐食	放圧板に腐食による劣化が生じていたところに地震により放圧板が動作した。	・外観確認	放圧板に腐食は確認されていない。	×
		外部からの衝撃	放圧板に対する外部からの衝突物による衝撃にて放圧板が動作した。	・外観確認	放圧板について外部からの衝突を示す傷、変形は確認されていない。	×

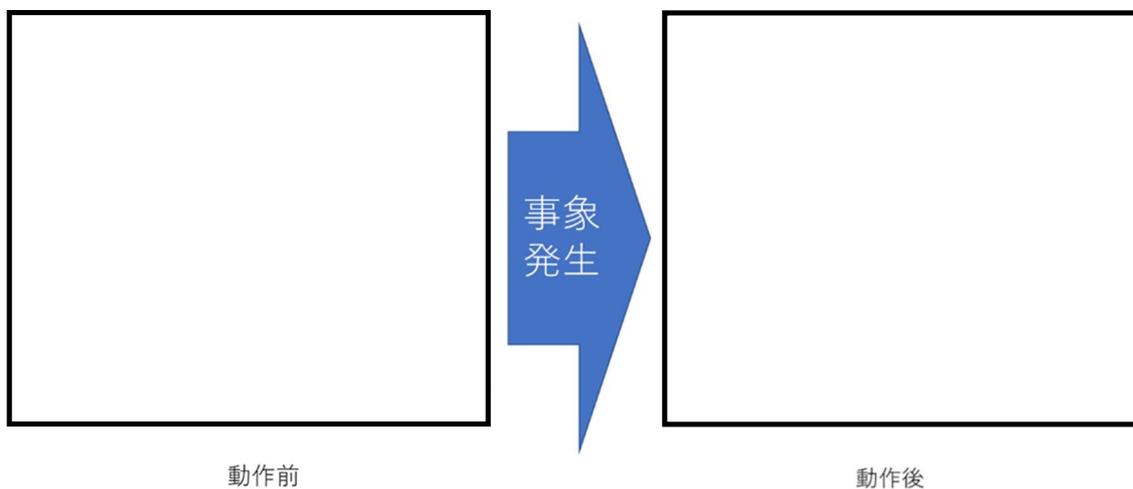
2号機主変圧器 放圧板動作について

変圧器の内部故障を示す継電器（比率作動継電器、衝撃油圧継電器）の動作及び油中ガス分析にて変圧器内部故障の兆候を示すガスが検出されたことから、変圧器内部故障に伴い絶縁油が熱分解を起こしてガスが発生し、変圧器内部が圧力上昇したため放圧板※が動作した。

なお、

と推定している。

※材質



放圧装置動作概要図

設計としている。

設計としている。

以上