

令和6年能登半島地震による1号機起動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。）発生に伴い当該変圧器に関する警報が発生したため現場確認を行ったところ、当該変圧器のNo.4放熱器から絶縁油の漏えいを確認したため、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.4放熱器の仕切弁（上部、下部）の閉止を行うとともに、No.4放熱器下部に油吸着マットを設置した。また、翌2日に他の放熱器について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.4放熱器への雨水浸入を防止するための養生を実施した。

2024年1月2日、約4,200ℓの漏えいした油（地下ピット内の水分含む）※を回収した。

※当該変圧器のNo.4放熱器上部配管接続部が損傷したことにより、当該箇所よりも上部に位置するコンサベータ内の絶縁油約3,600ℓが漏えいしたと推定した。

(2) 当該変圧器の点検

2024年1月11日にメーカーによる外観点検の結果、放圧板の割れおよびNo.4放熱器上部配管接続部の損傷を確認するとともに、変圧器本体にてコンサベータ内のゴム袋が損傷した可能性があることを確認した。

2024年1月11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	—
LTC	無	—
放熱器	有	【No. 4】 ・ 上部配管接続部の損傷 ・ 補強板とフィンの溶接部にて割れ 【No. 1～3、No. 5～6】 ・ 補強板とフィンの溶接部一部ひび割れ
コンサベータ	有	コンサベータ内のゴム袋が損傷した可能性あり
放圧装置	有	放圧板の動作に伴う放圧板の割れ
吸湿呼吸器	無※	※絶縁油混入（コンサベータ内のゴム袋が損傷したことによる混入と想定）
温度計	無	—
油面計・油温計	無※	※油面調整が必要
衝撃油圧継電器	無	—
ガス検出器	無※	※ガス滞留（放圧板の動作あるいはコンサベータ内のゴム袋が損傷したことによる混入と想定）
弁	無	—
配管	無	—

(3) 油中ガス分析

当該変圧器は内部故障の兆候は確認されていないが、念のため油中ガス分析を実施した結果、有意な異常は確認されなかった。

(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および運転操作について分析した。

(別紙5)

(1) 放圧板の動作

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。

(別紙6)

(2) 本体内部ガス検出器の動作

放圧板の動作に伴い負圧域の放圧管内に空気が流入し、本体ガス検出器が動作した。

(別紙7)

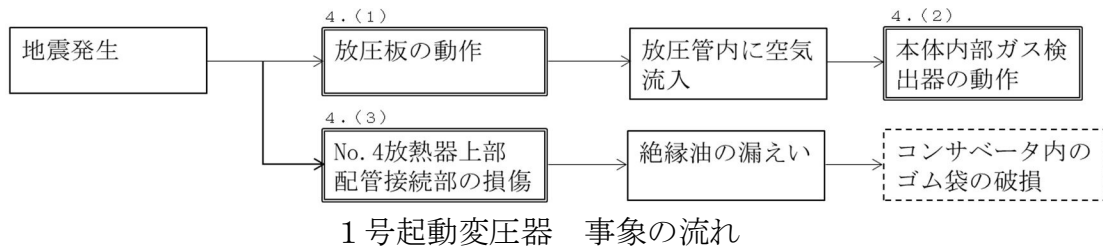
(3) No. 4放熱器上部配管接続部の損傷

能登半島地震の揺れに伴う応力が作用し、No. 4放熱器上部配管接続部が損傷した。

(別紙8)

5. 分析した結果から推定されるメカニズム

地震発生に伴い絶縁油の揺れによる力で放圧板が動作するとともに、No. 4放熱器上部配管接続部が損傷し、絶縁油が漏えいしたものと推定される。



6. 今後の対応予定

- 2024年1月末に低圧電気試験を実施。
- 放圧板およびコンサベータ内のゴム袋について、2024年2月末までに取替を実施。
- No. 4放熱器を切離して出力抑制したうえでの当該変圧器の仮復旧の可否について検討を行う。
- No. 4放熱器について、今後、取替を実施。
- No. 4放熱器上部配管接続部の損傷に関して更なる調査を行う。

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	対地間およ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	

【別紙】

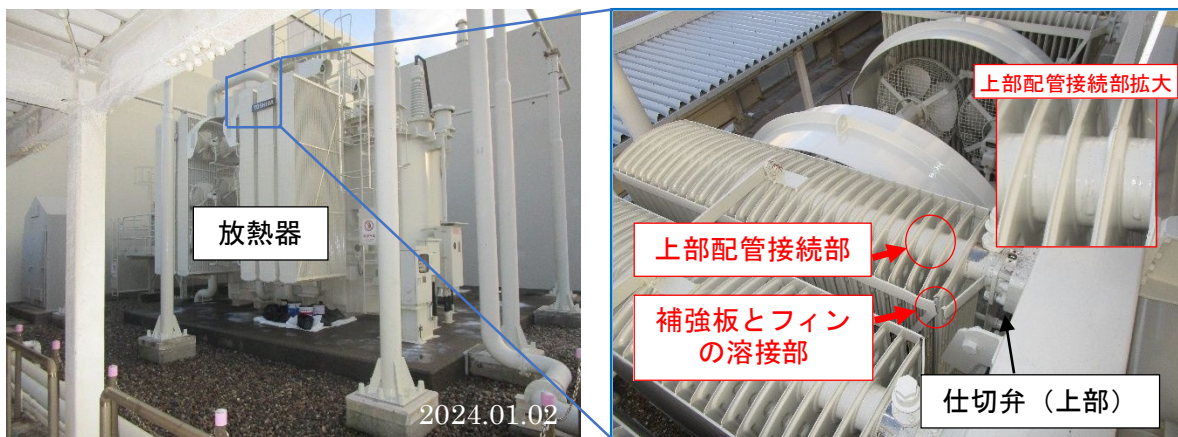
- 別紙 1 1号機起動変圧器 仕様
- 別紙 2 1号機起動変圧器外観写真、概要図
- 別紙 3 1号機起動変圧器に関連する事象の時系列
- 別紙 4 1号機起動変圧器 油中ガス分析結果
- 別紙 5 能登半島地震発生後における1号機起動変圧器の時系列
- 別紙 6 1号機起動変圧器 放圧板の動作に関する事象分析図
- 別紙 7 1号機起動変圧器 本体内部ガス検出器の動作に関する事象分析図
- 別紙 8 1号機起動変圧器 No. 4放熱器上部配管接続部の損傷に関する事象分析図
- 別紙 9 1号機起動変圧器 放圧板動作について

以 上

1号機起動変圧器 仕様

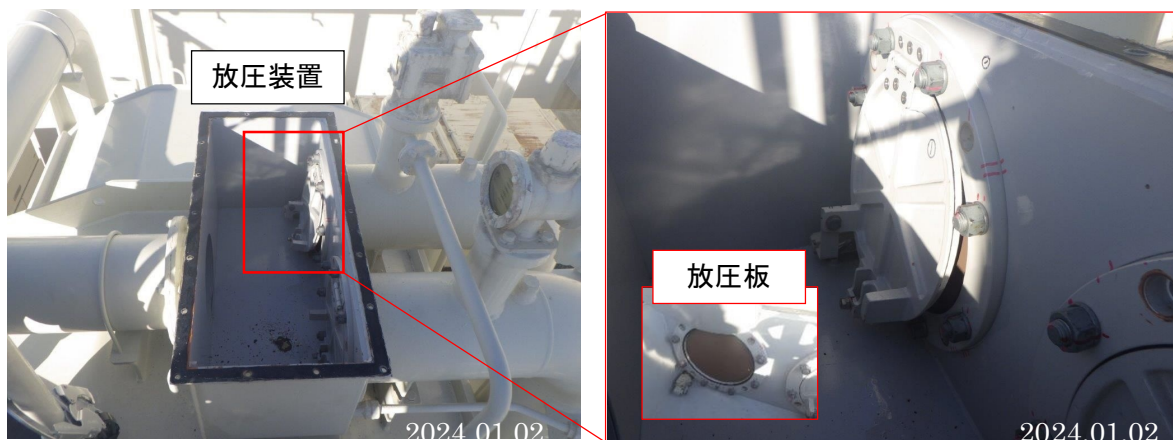
項目	仕様
台数	1
容量	50,000kVA
電圧	295.0—275.0—255.0kV／6.9kV
相数	3
周波数	60Hz
冷却法	油入風冷式

1号起動変圧器外観写真、概要図



1号機起動変圧器 (西面)

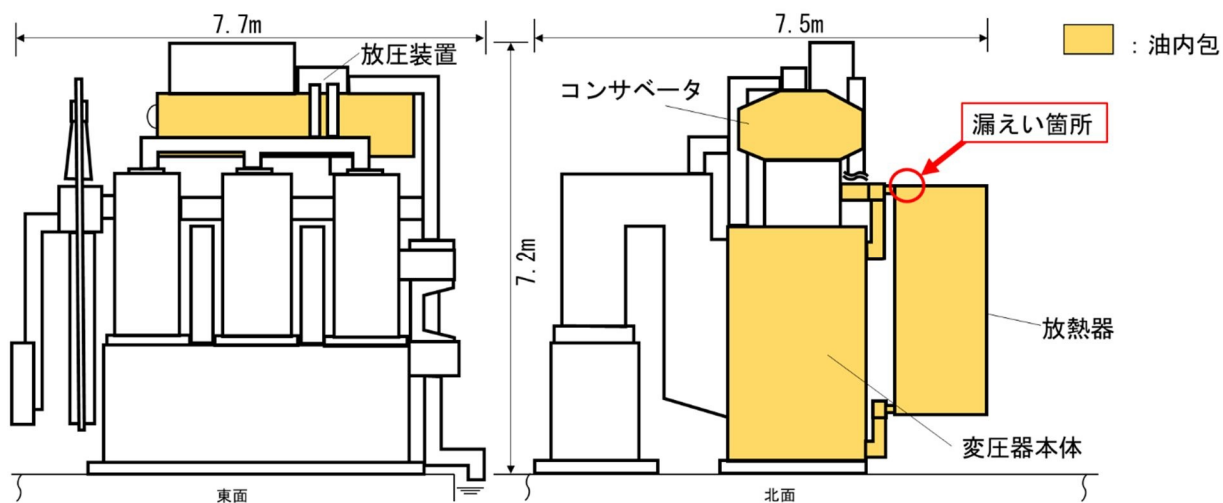
No. 4 放熱器損傷箇所



変圧器上面

放圧板動作状態

1号機起動変圧器 外観写真



1号機起動変圧器 概要図

1号機起動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10分 1号機「起動変圧器制御盤異常」警報発生。</p> <p>17時42分 現場制御盤にて「放圧装置動作」の警報発生及び油漏れを確認。</p> <p>17時48分 油漏れについて公設消防へ119番通報。</p> <p>18時47分 噴霧消火設備を手動起動（出火を確認していないが、念のため起動したもの）。</p> <p>18時52分 噴霧消火設備を手動停止。</p> <p>19時13分 外部電源を275kVから66kVへ手動で切替。</p> <p>22時20分 油漏れの停止を確認。（絶縁油が約3,600リットル漏えいしたものと推定）</p>	
<p>1月2日（火）</p> <p>雨水等を含め約4,200リットル回収。</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>	
<p>1月3日（水）</p> <p>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ないことを確認。</p>	
<p>1月11日（木）</p> <p>メーカーによる変圧器の目視点検の結果、放熱器に割れがあること、放熱器と補強板の接続部に割れがあること、及び、コンサベータ内のゴム袋が損傷している可能性があることを確認。</p>	

1号機起動変圧器 油中ガス分析結果

1. 目的

絶縁油中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、異常兆候は確認されなかった。

(単位：ppm)

		判定基準	分析結果※
ガス 総量	油中ガス総量	—	40,002
	酸素	—	2,371
	窒素	—	36,745
	二酸化炭素	—	779.6
	一酸化炭素※	300 以下	65.5
	水素※	400 以下	11.3
	メタン※	150 以下	11.4
	アセチレン※	0.5 以下	検出されず
	エチレン※	10 以下	1.4
	エタン※	150 以下	16.8
	可燃性ガス総量 (※総量)	500 以下	106.4

※2024年1月2日採油。

以上

能登半島地震発生後における 1 号機起動変圧器の時系列

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]起動変圧器制御盤異常 (現場)放圧装置動作)	—	【事象分析 1-①】放圧板の動作
	[警報][MCR]起動変圧器制御盤異常 (現場)ガス検出)	—	【事象分析 1-②】本体内部ガス検出器の動作
	—	[警報][MCR]起動変圧器制御盤異常 (現場)地震計動作) ※	—
17時42分	[運転]No. 4 放熱器上部配管接続部からの絶縁油漏えいを確認。	—	【事象分析 1-③】No. 4 放熱器上部配管接続部の損傷
17時48分	—	[運転]絶縁油漏えいについて公設消防へ119番通報	—
18時47分	—	[運転]起動変圧器噴霧消火設備を手動起動。	—
18時52分	—	[運転]起動変圧器噴霧消火設備を手動停止。	—
19時13分	—	[運転]外部電源を手動切替 (275kV ⇒ 66kV)。	—
22時20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1-①】 1号機起動変圧器 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の発生は確認されていない。	×
		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	能登半島地震発生同時刻に放圧板が動作していることを示す警報が発生しており、地震にて発生した絶縁油の揺れに伴う力により、放圧板が動作したと考えられる。	△
放圧板の誤動作	放圧板の誤動作	保護カバーの単独開放	地震により放圧板の保護カバーが単独で開いたことで警報が発生した。	・外観確認	放圧板が破れていることから、保護カバーは単独で開いていない。	×
		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。	×

【事象分析1-②】 1号機起動変圧器 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動作	本体内部でガス発生	変圧器内部故障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。	・油中ガス分析	変圧器の内部故障の兆候を示すガスの発生は確認されなかった。	×	
	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	吸湿呼吸器への絶縁油の侵入を確認したことから、コンサベータ内のゴム袋が損傷した可能性がある。今後の点検で確認する。	△
		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。	・放圧板の確認	放圧板が動作していることを確認した。	○
	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1-③】 1号機起動変圧器 No.4放熱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.4放熱器 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	地震の揺れに伴う応力が作用し、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損傷しており、地震の揺れによる応力が作用して損傷したものと推定した。 今後、放熱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、放熱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	衝撃油圧継電器は動作していない。 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。	×

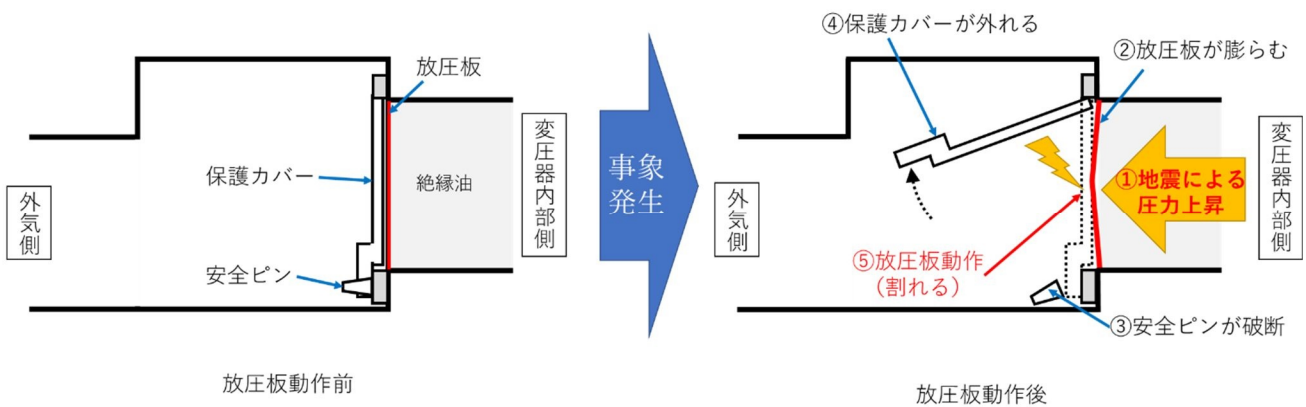
1号機起動変圧器 放圧板動作について

放圧板^{*}は、変圧器の内部短絡事故による発生ガスなどでタンク内の圧力が規定圧力以上に上昇したときに、ガスを排出することで事故の拡大を防止する目的の装置である。

また、放圧板はその仕組み上、地震により 250～gal 程度の加速度が加わった場合に油の衝撃圧の影響で動作する可能性がある。具体的な動作原理は、変圧器内は絶縁油で満たされているため、地震の揺れが絶縁油の運動エネルギー（衝撃圧）となり、放圧板に圧力がかかることにより、放圧板が膨らみ保護カバーを押し上げる。その後、保護カバーを押し上げる力が一定程度を超過すると、安全ピンが破断することで保護カバーが開き、放圧板がさらに膨らみ、放圧板が割れる状況に至る。（図1 参照）

今回の地震（1号機原子炉建屋地下2階 399.3gal（合成方向））により、上記状況に至り、放圧板の動作に至ったと推定している。

※材質



放圧板動作概要図

以上