参考２

能登半島地震に係る
発電所設備分野の検証について

原子力エネルギー協議会

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

はじめに

- ✓ 令和６年１月１日に発生した能登半島地震の原子力発電所への影響については、ATENAを中心とした事業者、メーカと連携した体制を構築し検討を進めてきた。
- ✓ 発電所設備については、「能登半島地震 発電所設備に係る知見整理SWG」を設置して、変圧器をはじめとした志賀原子力発電所における設備の故障、不具合事例について調査を実施し、自主的安全性向上に資する対策の検討を行ってきた。
- ✓ 今般、「能登半島地震 発電所設備に係る知見整理SWG」において、各種設備対策の方向性を取り纏めた。

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

検討方針

- ✓ 志賀原子力発電所で発生した発電所設備の故障・不具合事例について調査
- ✓ 調査から得られた知見や教訓をもとに、さらなる自主的安全性向上に資する対策について検討

【検討項目】

設備	故障・不具合	検討内容
変圧器	変圧器故障	発電所設備の故障・不具合事例について調査を行い、得られた知見や教訓をもとにさらなる自主的安全性向上に資する対策について検討
	変圧器油漏えい	
	変圧器放圧板動作	
非常用ディーゼル発電機（D/G）	D/G試運転中停止	
使用済燃料貯蔵プール（SFP）	SFP溢水	
	SFP冷却ポンプ停止	
	SFP内保管の検査装置落下	
構内道路	アクセスルート段差	
防潮壁	防潮壁傾き・沈下	
純水タンク等	純水タンク等の水位低下	
制御棒駆動機（CRD）ハウジング支持金具	支持金具の脱落	

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

検討結果（1/3）

✓ 発電所設備について、変圧器をはじめとした志賀原子力発電所における設備の故障、不具合事例を検証し、以下のとおり対応方針を取り纏めた。

設備	検討結果	対応方針
変圧器 【別紙１】	➢ 志賀１号機起動変圧器及び志賀２号機主変圧器について、**付属部の配管が損傷し、絶縁油が漏えい**した。また、いずれの変圧器も**放圧板が動作**した。 ➢ 変圧器は耐震Cクラス機器の設計に用いられるものを上回る加速度を考慮し設計していたが、**志賀では実際の応答加速度がそれを超えたことにより、配管損傷に至ったものであり、設計の考え方に問題はなかった**。また、外部電源の全喪失は回避できた（５回線中３回線健全）ことから、**外部電源系統の多重性が地震に対しても有効であることを改めて認識**。 ➢ 志賀２号機主変圧器は、配管損傷による漏えいによって、絶縁油の油面が低下し、絶縁破壊が発生し内部損傷に至った。内部損傷が発生した場合、部品調達、補修に長期間を要する。**外部電源の信頼性が低下した状態が長期化することは望ましくないため、それを防止する取組み**が重要。	➢ 変圧器の**耐震強化は必須としない**。 ➢ 機能喪失の長期化回避の観点から、**絶縁油漏えい時の変圧器停止手順の整備**。 ➢ **放圧板動作時の早期復旧対策**（予備品確保等）を実施する。
D/G 【別紙２】	➢ D/G試運転のため、並列操作を実施していたところ、自動停止した。今回の事象は、試運転中であったことから原子力安全への影響はなかったが、**D/G不待機期間ならびに設備ストレスの観点から、意図しない自動停止を低減すること**が重要。 ➢ D/G並列時自動停止の主要因となる運転操作に焦点をあて、**志賀の事象のみならず、他社の自動停止事象を調査し、より確実な運転操作に資する取組みを展開**する。	➢ D/G並列時の自動停止防止に関係する以下の**より確実な運転操作に資する取組みについて水平展開**を行う。 ✓ 力率低下防止（志賀の事例） ✓ 初期負荷確保および位相差０°投入のしやすさ（他社の事例）

検討結果（2/3）

設備	検討結果	対応方針
SFP 【別紙３】	➢ 志賀２号機SFP内に保管してあった**検査装置の一部がプール底部に落下**。 ➢ SFP内保管物品について、落下により燃料破損等の直接的な影響がない軽量の物品であっても、**異物混入防止の観点から、燃料へ異物が混入する可能性を低減することが重要**。	➢ 志賀で落下したSFP内保管物品と同様な構造の機器類の有無を確認するため、**SFP廻りの現場確認を実施**する。
CRD ハウジング支持金具 【別紙４】	➢ 志賀１号機**ＣＲＤハウジング支持金具の構成部品の一部が脱落**。 ➢ **落下した構成部品がルースパーツになるリスクや下部にある機器を破損させる等の影響が考えられるため、構成部品の落下を防止する**ことが重要。 ➢ BWRのうち、一部のプラントでは、**構成部品の端部がフラット**でサポートブロックに乗っているだけであり、**地震で脱落する可能性がある**ことを確認。	➢ 据付管理や構造の見直し等により**構成部品が脱落しない対策を実施**する

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

検討結果（3/3）

✓ 以下の設備については検討した結果、特段の知見は抽出されなかったことから、**新たな対策は不要**と判断した。

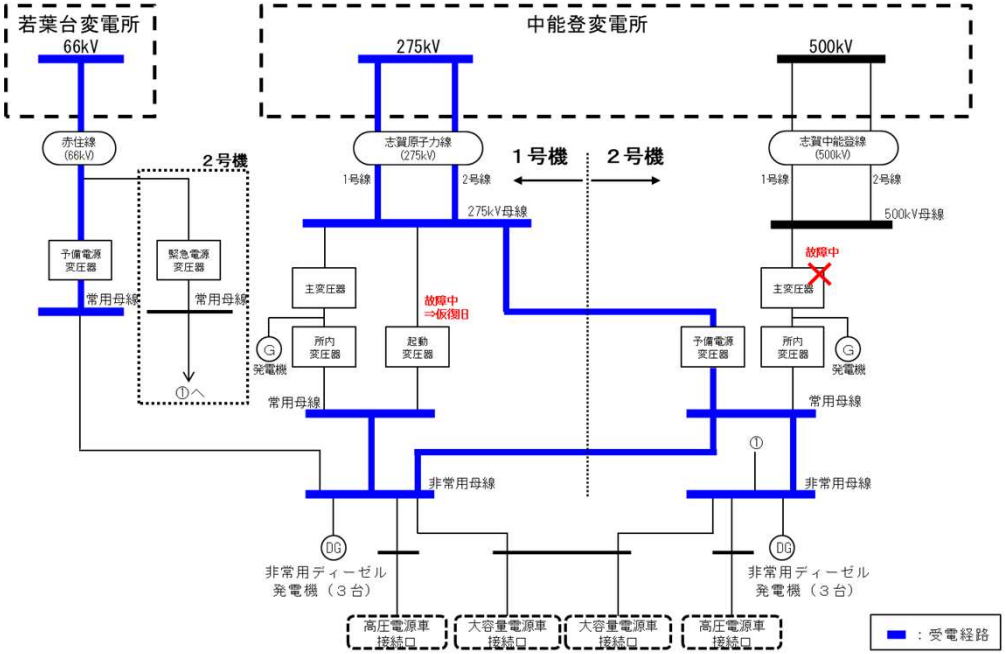
設備	発生した事象	検討結果
構内道路 【別紙５】	➢ １号機高圧電源車使用箇所付近の道路に数cm 程度段差が発生 ➢ 物揚場の埋立部において、舗装コンクリートが沈下し、段差（最大約35cm ）が発生	➢ アクセスルートについては、不当沈下、陥没等、地震時の影響を考慮した対策を実施済であり、今回の事象を踏まえた**新たな知見は抽出されなかった**。
防潮壁 【別紙６】	➢ １号機放水槽防潮壁および1 号機補機冷却排水連絡槽防潮壁基礎に数cm程度の沈下が発生	➢ 自主的な安全対策施設の損傷は、地震により想定される範囲の設備故障であり、今回は機能喪失、波及影響等の問題も生じていないことから、**新たな知見は抽出されなかった**。
純水タンク等 【別紙７】	➢ 屋外の埋設配管から純水タンクの水が漏えいしていることを確認 ➢ １号機タービン補機冷却水系サージタンクの水位低下を確認し、原子炉建屋・タービン建屋の換気空調系の冷却コイルから冷却水の漏えいを確認	➢ 耐震クラスの低い配管等からの漏えいについては、地震により想定される設備故障であり、今回は漏えい対応（漏えいの検知、現場確認、漏えい個所特定、隔離操作）にも問題はないことから、**新たな知見は抽出されなかった**。

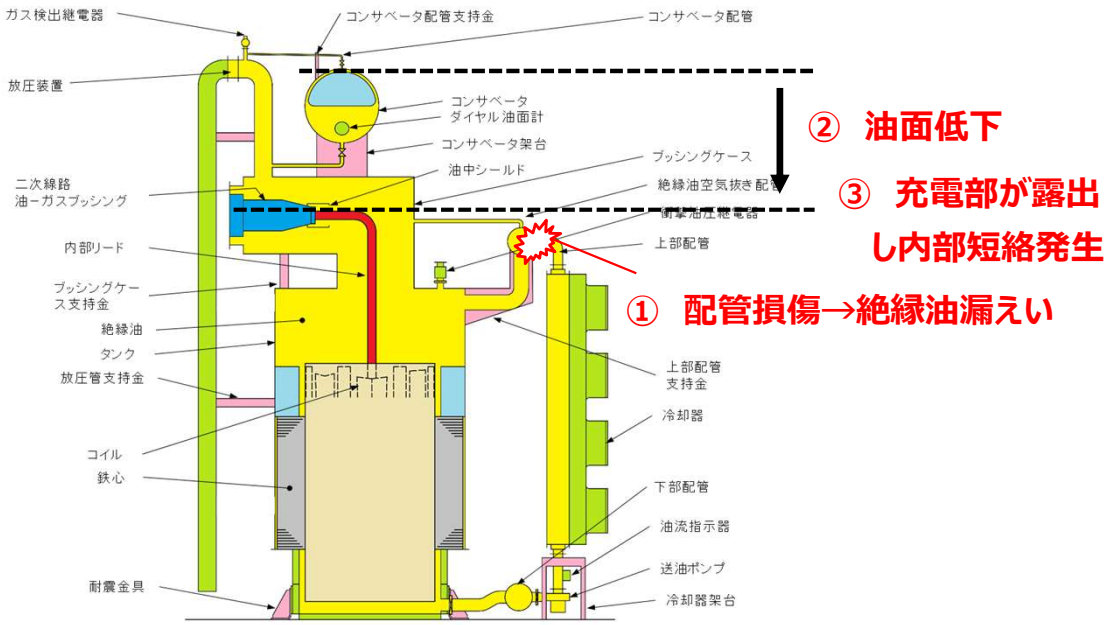
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

別紙１　変圧器（1/3）

発生した事象

- ✓ 志賀原子力発電所では、１号機起動変圧器の放熱器配管損傷及び２号機主変圧器の冷却器配管損傷により、いずれも絶縁油が漏えいした。また、いずれの変圧器も放圧板が動作したことを確認。
- ✓ ２号機主変圧器の故障により、外部電源5回線（３ルート）のうち、志賀中能登線（500kV）２回線が使用できなくなった。
- ✓ ２号機主変圧器については、損傷部からの漏えいによる絶縁油の油面低下によって発生したアークにより変圧器内部のブッシングが損傷した。





Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

別紙１　変圧器（2/3）

得られた知見・教訓

- ✓ 変圧器は耐震Cクラスに要求される地震動：1.2Ｃｉ（約0.2Ｇ）を上回る静的水平加速度0.5Ｇを考慮して設計されている。変圧器の放熱器等の付属品の共振は、それらの構造から想定されていたものであるが、志賀では実際の応答加速度が設計で考慮していたものを超えたことにより、損傷に至ったものである。この損傷により変圧器の機能喪失はあったものの、外部電源の全喪失を回避できたことから、外部電源系統の多重性が地震に対しても有効であることを改めて認識した。
- ✓ 変圧器絶縁油の漏えい後、通電状態のまま油面低下が継続した場合、絶縁破壊により変圧器内部の損傷に至り、復旧に長期間を要する（それ以外の損傷については、短期間に復旧が可能）。

対策

- ✓ 変圧器は、耐震Cクラスに要求される地震動を上回る静的水平加速度を考慮して設計されており十分な設計上の考慮がなされていること、また、電源系統は外部電源系統の多重性や非常用D/G等の多様性によりシステム全体での頑健性が確保されていることから、変圧器の耐震強化は必須とはしない。
- ✓ しかしながら、外部電源の信頼性が低下した状態が長期間継続することは望ましくないことから、変圧器の絶縁油油面低下に伴うアーク発生による内部損傷を防止する観点から対策を行う。
  ⇒ **ブッシング損傷の防止対策として、変圧器の破損モード等を検討し，その結果を踏まえた絶縁油漏えい時の変圧器停止手順を整備する。**
- ✓ 今回の事象で放圧板が動作したこと、また過去の地震時にも放圧板が動作したプラントが複数あったことを踏まえ、放圧板に対する対策を講じる。
  ⇒ **放圧板の早期復旧対策（予備品確保、自動復帰式等）を講じる。**

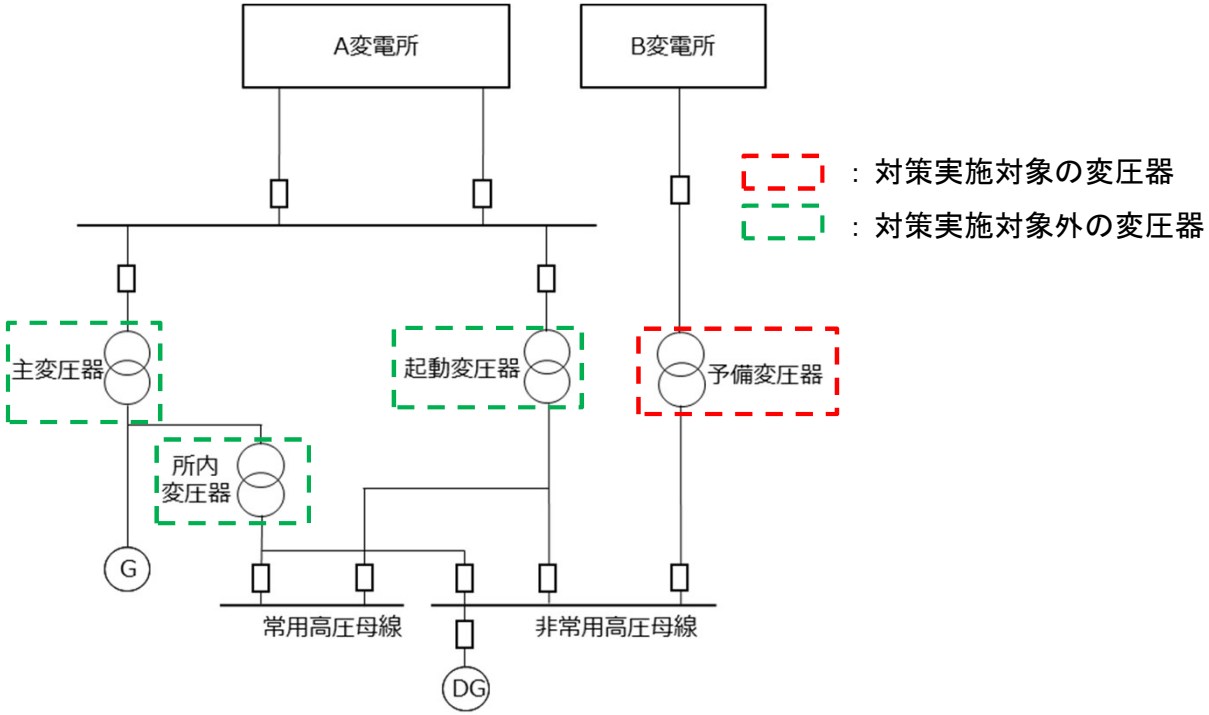
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

別紙１　変圧器（3/3）

対象

- ✓ 原子力発電所の外部電源は、複数の送電線により多重性を確保するとともに、それらの間に独立性（一つの変電所または開閉所に連系していないこと）を確保することにより、信頼性を持たせている。
- ✓ このことを踏まえ、当該の変圧器の機能喪失により、多重性または／及び独立性が失われる変圧器を対象とする。

発電所	対象変圧器
泊	１号起動変圧器、２号起動変圧器
東通	高起動変圧器
柏崎刈羽	予備電源変圧器（１～７号共用）
美浜	予備変圧器
高浜	予備変圧器（１号～４号共用）
伊方	３号主変圧器、３号所内変圧器
東海第二	予備変圧器



対策実施時期

- ✓ 再稼働済プラント：準備ができ次第、速やかに実施
- ✓ 再稼働前プラント（許認可取得済あるいは再稼働時期公表済）：1サイクル運転後の定検終了までに実施
- ✓ 再稼働前プラント（上記以外）：再稼働までに実施

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

別紙２　非常用D/G （1/4）

発生した事象

- ✓ HPCS-D/Gの試運転として、ディーゼル機関を起動し、発電機を所内電源系統に接続する並列操作をしていたところ、自動停止した（逆電力継電器動作）。
- ✓ 発生原因として母線側とHPCS-D/G側の電圧差が大きかったこと（力率低下で有効電力をとりづらい）、および所内電源構成のインピーダンスが大きかったことが重なったことによるものと推定。

得られた知見・教訓

- ✓ 北陸電力では、対策として母線側とHPCS-D/G側の電圧差をより低減した状態で並列操作することについて，明確な操作目標を運転操作手順に反映した。また，電圧差が大きい状態で並列した場合のリカバリー策として並列後直ちに力率調整操作遅れ0.8～1.0を実施しているかも重要と考えられる。

（補足）
・設計思想の違いによりPWRは逆電力継電器はついておらずトリップの心配はないが，設備ストレス低減の観点から有効
・通常と異なる電源構成（例：受電変圧器変更等）の試運転時は，より①力率低下防止を意識して並列操作することが有効

- ✓ D/G並列時トリップの主要因となる運転操作に焦点をあて，今回の事象に加え他社のトリップ事象を踏まえた運転操作を展開することで、D/G不待機期間の低減ならびに設備ストレス低減が図られる。

対策

- ✓ D/G並列時のトリップ防止に関係する運転操作①**力率低下防止（電圧差低減）および②初期負荷確保および位相差０°投入のしやすさ**について良好事例の水平展開を行う。

対象

- ✓ ①　力率低下防止（電圧差低減）：**東通、女川、柏崎刈羽、浜岡、島根**
- ✓ ②　初期負荷確保および位相差０°投入のしやすさ：**泊、東通、女川、柏崎刈羽、島根、伊方、**

対策実施時期

- ✓ 準備ができ次第、速やかに実施する。

別紙２　非常用D/G （2/4）

各社（１１社）への運転操作手順の確認結果

①力率低下防止（電圧差低減）

並列前のＡＶＲ操作により、Ｄ/Ｇ側と母線側の電圧差を低減する手順となっていることを全プラントで確認。

より明確な操作目標（〇〇〇Ｖに調整　等）を定めているという良好事例が確認されたことから、水平展開を行う。

水平展開先：東通、女川、柏崎刈羽、浜岡、島根　（志賀は当該事象の対策として実施済）

②初期負荷確保および位相差０°投入のしやすさ

並列前のガバナ操作によりＤ/Ｇ側周波数を母線側より若干速める手順となっていることを全プラントで確認。

より明確な操作目標（同期メータ指示が１０秒／周で右回りに調整　等）を定めているという良好事例が確認されたことから、水平展開を行う。

水平展開先：泊、東通、女川、柏崎刈羽、島根、伊方、玄海

③突入電流防止

並列前に位相差が低減された状態で並列操作する手順となっていることを全プラントで確認。

全社においてより明確な操作目標（位相差±１０°以内　等）が記載されていることを確認。

④力率改善

並列後にＡＶＲ操作により目標とする力率に調整する手順となっていることを全プラントで確認。

全社においてより明確な操作目標（力率0.8（遅れ）に調整　等）が記載されていることを確認。

別紙２　非常用D/G （3/4）

【参考】操作ミス防止の取り組み確認結果

〇プレアラームの設定

力率調整の逆操作によるD/G電流の増加に気付けなかったことの対策のひとつとしてD/G電流値および力率に適切なプレアラームを設定。

〇フラギング

並列操作時の目標値や指示計ー関連ＣＳをマグネットでフラギング

〇ピアチェック

指揮者が操作者のふるまいを確認

〇手順の詳細化

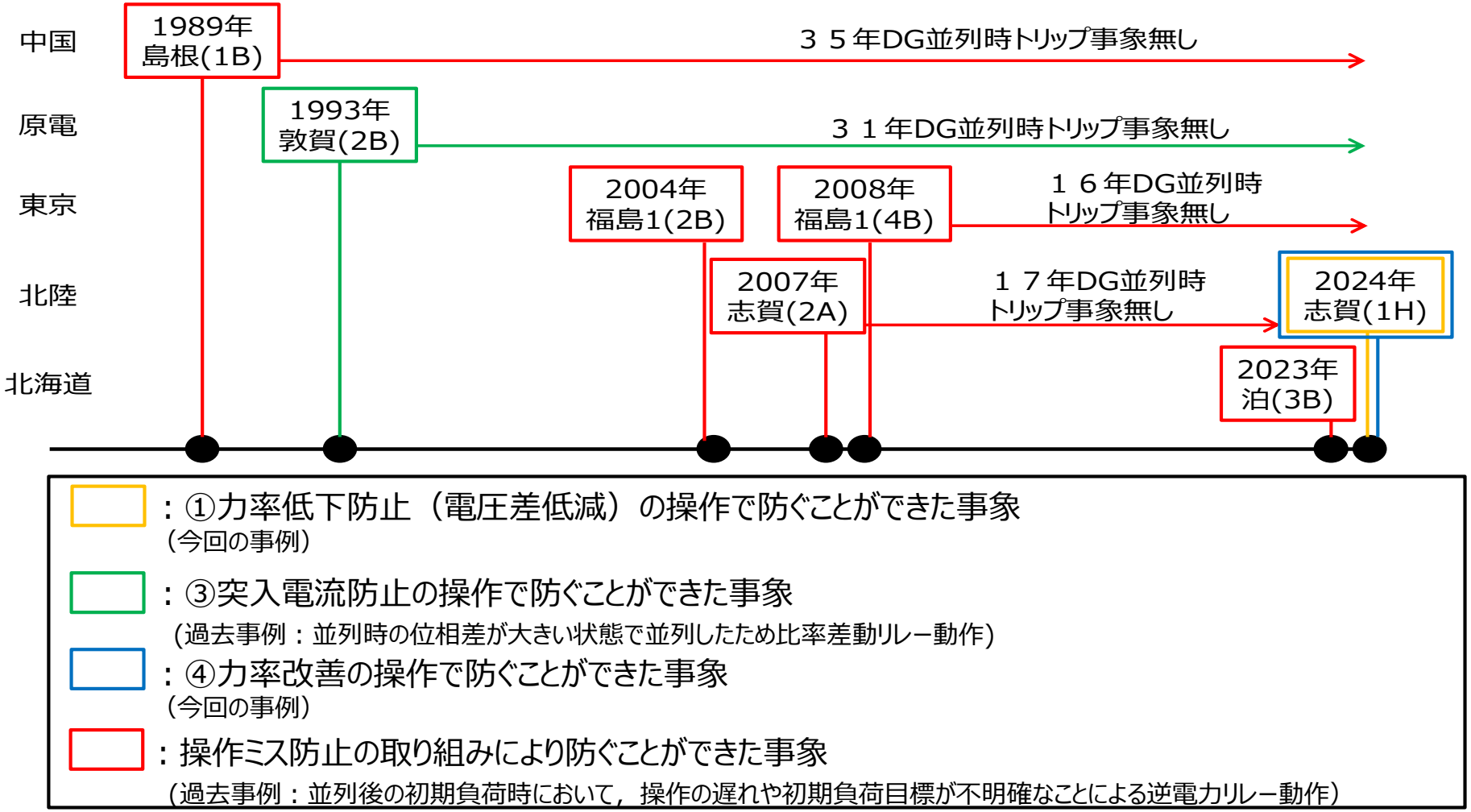
手順（解説含む）を詳細化

マグネットによるフラギング

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

別紙２　非常用D/G　（4/4）

【参考】並列時トリップ事象（ＮＵＣＩＡ情報）



※東北，中部，関西，四国，九州，原燃はDG並列時（機器不具合によるものを除く）にトリップした事象はない

<u>Ｄ／Ｇ並列時トリップ防止に重要な観点が運転操作手順に反映されていること，ならびに操作ミスを防止する取り組みによりＤ／Ｇ並列時トリップ事象が各社で頻発していないことを確認</u>

ATENA Atomic Energy Association
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

別紙３　使用済燃料貯蔵プール（SFP）　（1/2）

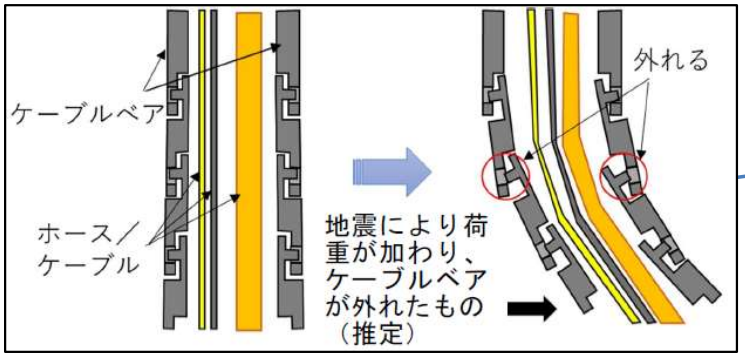
発生した事象

- ✓ 1号機、2号機使用済燃料貯蔵プール水が波打ち現象(スロッシング)により床面に飛散したが、飛散した量はわずかであり、プール水位への影響および外部への放射能の影響はない。

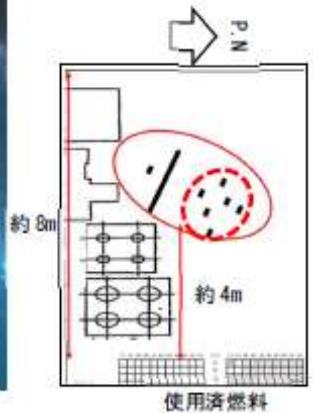
  （参考）飛散量

  ・1号機（保有水量1,250m³）：約 95ﾘｯﾄﾙ（プール水位低下量 0.8mm相当）、放射能量 約17,100 Bq

  ・2号機（保有水量2,310m³）：約 326ﾘｯﾄﾙ（プール水位低下量 1.3mm相当）、放射能量 約4,600Bq
- ✓ 志賀1号機のスキマサージタンク内のスロッシングにより水位検出器が水位低下を検知し、燃料プール冷却浄化系（FPC）ポンプが停止したが、速やかに（約40分）復旧した。この間、プール水温（29.5℃）に変化はなかった。
- ✓ 志賀2号機SFP内に保管してあった原子炉冷却材再循環ポンプの検査装置の一部（ケーブルベア）がプール底部に落下していることを確認した。
- ✓ 落下物は軽量（ポリエステル製）であり使用済燃料貯蔵プール床面への影響はなく、また、燃料から離れた位置（約４ｍ）に落下したことから使用済燃料への影響はなく、原子力安全確保の観点から問題はない。



原子炉冷却材再循環ポンプ
検査装置の一部（ケーブルベア）



別紙３　使用済燃料貯蔵プール（SFP）　（2/2）

得られた知見・教訓

- ✓ スロッシングによりプール水位はほとんど変化しておらず、使用済燃料の冷却等の原子力安全確保の観点から問題はなく、新たな知見は抽出されなかった。
- ✓ 志賀1号機のFPCポンプは一時的に停止したが、速やかに（約40分）復旧しており原子力安全の確保に影響はなく、新たな知見は抽出されなかった。なお、スキマサージタンク水位低下によるFPCポンプ停止は設計どおりにインターロックが作動したものであった。
- ✓ SFP内保管物品について、落下による影響がない軽量の物品であっても、燃料への異物混入防止の観点から、燃料へ異物が混入する可能性を低減することが重要。

対策

- ✓ 各社において、志賀で落下したケーブルベアと同様な構造の機器類の有無を確認するため、SFP廻りの現場確認を実施する。
- ✓ 対象機器があった場合は、各社にて燃料への異物混入防止対策を検討し、必要な対策を実施する。

対象

- ✓ 全社実施

対策実施時期

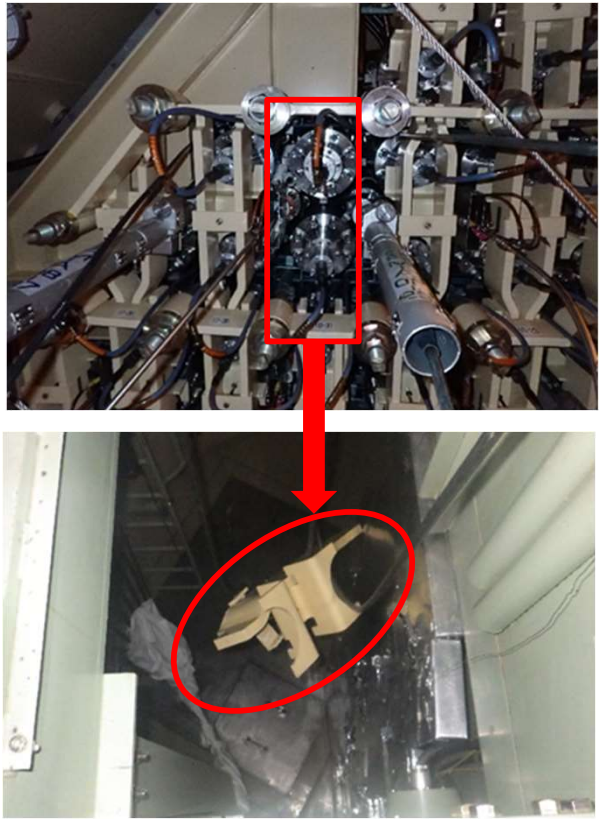
- ✓ 準備ができ次第、速やかに実施する。

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

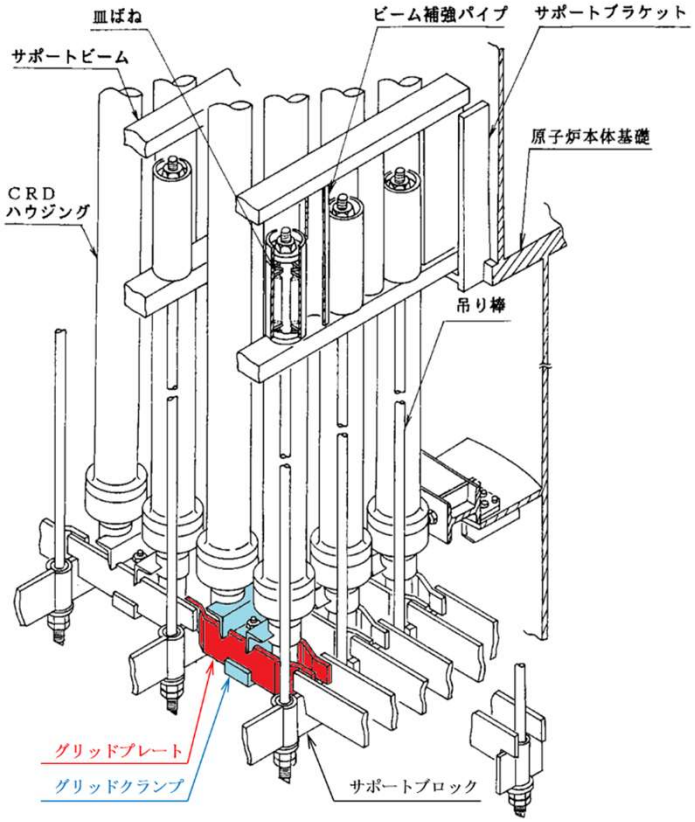
別紙４　ＣＲＤハウジング支持金具（1/3）

発生した事象

- ✓ 志賀１号機制御棒駆動機構（ＣＲＤ）ハウジング支持金具の構成部品の一部が脱落。
- ✓ ＣＲＤハウジング支持金具は、地震以外の原因（応力腐食割れ等）によりＣＲＤハウジングが破損して落下した場合にこれを支持し、制御棒引き抜けを防止するために設けられた機器であり、耐震ＳクラスのＣＲＤハウジングは、地震に対して破損して落下しないため原子炉停止機能に影響はなく、原子力安全確保の観点から問題はない。



脱落した支持金具の構成部品



ＣＲＤハウジング支持金具

ATENA Atomic Energy Association
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

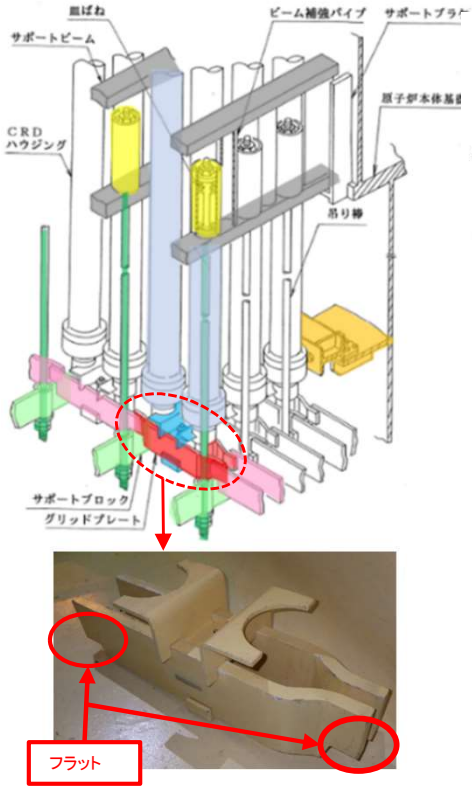
別紙４　ＣＲＤハウジング支持金具（2/3）

得られた知見・教訓

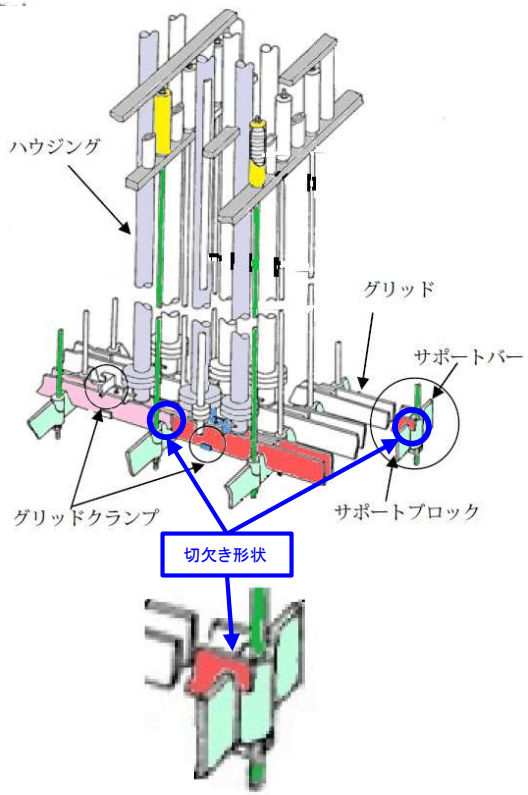
- ✓ ABWRやPWRでは、制御棒引き抜けの防止を別の構造等で担保しており、CRDハウジング支持金具が設置されていないため、発生のおそれはない。
- ✓ BWRのうち、一部のプラント（日立GEプラント）では構成部品の端部がフラットでサポートブロックに乗っているだけであり、地震で脱落する可能性がある。
- ✓ 志賀では発生していないものの、落下した構成部品がルースパーツになるリスクや下部にある機器を破損させる等の影響が考えられるため、構成部品の落下を防止することが望ましい。

	BWR（日立GEプラント）	BWR（東芝・GEプラント）	ABWR	PWR
サイト	北陸：志賀1 東京：柏崎刈羽4,5 中国：島根2	東北：女川2,3 東北：東通1 東京：柏崎刈羽1,2,3 中部：浜岡3,4 原電：東海第二	（省略）	（省略）
CRDハウジング支持金具の有無	あり	あり	無し※1	無し
構成部品の構造	**端部がフラットで**サポートブロックに**乗っているだけ**であり，地震で脱落する可能性がある。	**端部が切欠き形状で**サポートブロックに**引っ掛かっており**，地震で脱落する可能性は低い。	－	－
水平展開要否	○	×	×	×

※1：CRDアウターチューブの先端部が炉内側の制御棒案内管下端と勘合する構造になっており，CRDフランジのボルトが全数切れた場合やハウジングが破断した場合でも，制御棒案内管(CRGT)がハウジング上端に引っかかり，CRDアウターチューブ先端が制御棒案内管（CRGT）下端に引っかかるためCRDも落下しないようになっていることから，ABWRにはCRDハウジング支持金具が設置されていない。



BWR（日立GEプラント）の構造



BWR（東芝・GEプラント）の構造

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

別紙４　ＣＲＤハウジング支持金具（3/3）

対策

✓ 据付管理や構造の見直し等により構成部品が脱落しない対策を実施する。

対象

構成部品の端部がフラットな形状となっているプラント

✓ **志賀１号機**
✓ **柏崎刈羽４，５号機**
✓ **島根２号機**

対策実施時期

✓ 再稼働前のプラントのうち、再稼働が近いプラント（各種許認可取得または再稼働時期を公表）については、再稼働し１サイクル運転後の定検終了までに実施し、そうでないプラントについては再稼働までに対策を実施する。

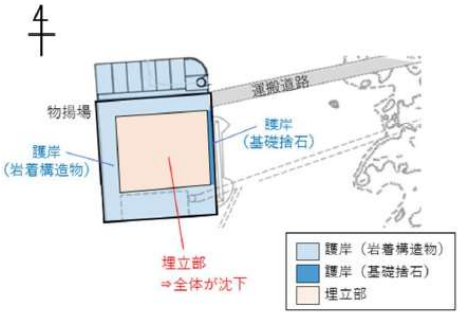
ATENA Atomic Energy Association
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

別紙５　構内道路

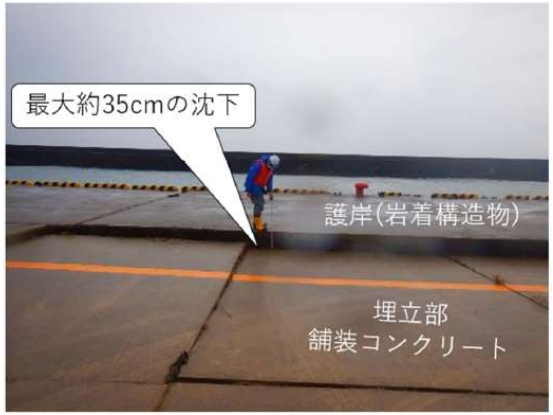
発生した事象

✓　１号機高圧電源車使用箇所付近の道路に数cm 程度段差が発生した。

✓　構内道路（アクセスルート）ではないが、物揚場の埋立部において、舗装コンクリートが沈下し、段差（最大約35cm ）が発生した。物揚げ場本体構造物の異常は認められておらず，使用に支障はない。



平面図

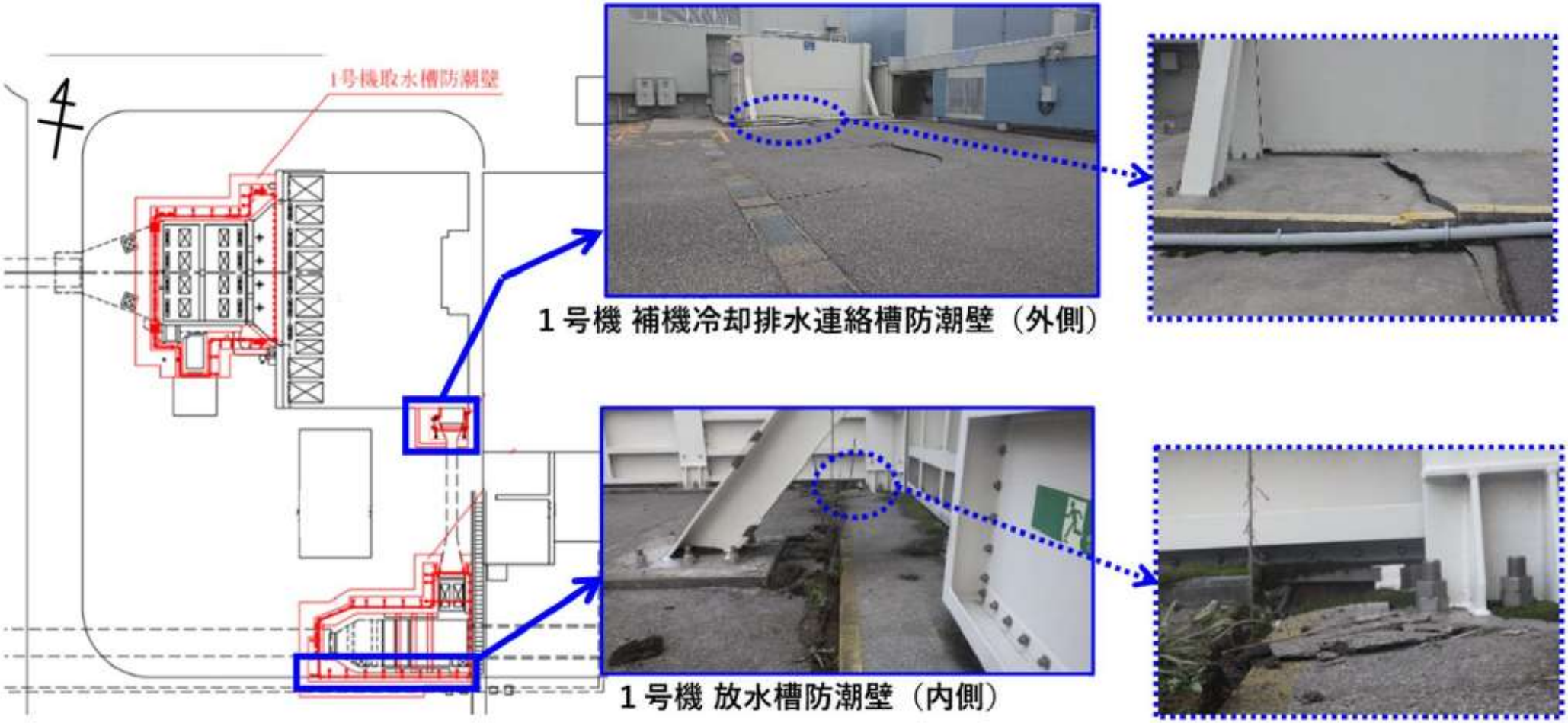


別紙６　防潮壁

発生した事象

✓　１号機放水槽防潮壁※および1 号機補機冷却排水連絡槽防潮壁※基礎に数cm程度の沈下が発生した。

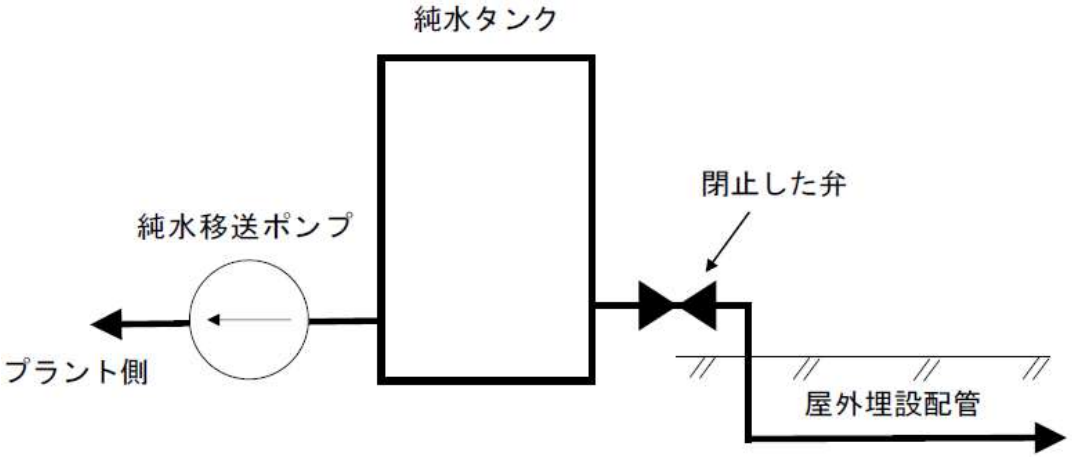
※：福島第一原子力発電所の事故を受けた更なる安全強化策として北陸電力が自主的に設置したもの



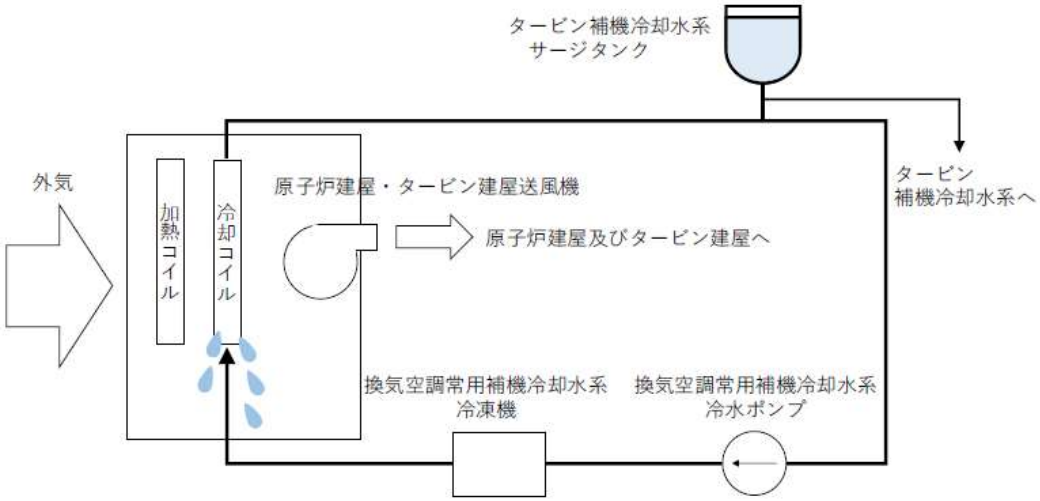
別紙７　純水タンク等

発生した事象

✓ 屋外の埋設配管から純水タンクの水が漏えいしていることを確認した。屋外の埋設配管につながる弁を閉止し、純水タンクの水位低下は停止した。



✓ １号機タービン補機冷却水系サージタンクの水位低下を確認し、原子炉建屋・タービン建屋の換気空調系の冷却コイルから冷却水の漏えいを確認した。漏えい個所を特定し、弁等を閉止することにより漏えい停止した。



【参考】変圧器（故障・不具合事例の調査）

故障・不具合事例の調査

＜事例調査の条件・対象＞

【調査事例】地震で変圧器の部位が損傷し機能喪失した事例を抽出
【対象期間】原子力発電所各プラントの建設以降に発生した事例
【対象設備】志賀原子力発電所において機能喪失した変圧器と同様の油内包変圧器

＜事例調査の結果＞

調査の結果、**10件が確認された**。

発電所名	発生日時	事象概要	故障部位・状態	備　考
柏崎刈羽	2007年7月16日 （新潟県中越沖地震）	地震動により以下の変圧器において、損傷あり（コイルずれ・変形、鉄心ずれ・変形等） ・1～5号主変圧器 ・4号所内変圧器A・B ・5号所内変圧器A・B　**計9件**	【部位】コイル、鉄心 【状態】ずれ・変形	・震度6強 ・地震後の内部点検で判明した損傷事例
		変圧器付近の不等沈下によりダクトがブッシングに衝突し、ブッシング碍管が破損し漏油が発生 加えて接触により三相地絡・短絡を引き起こし、漏えいした絶縁油に火花が引火し、変圧器火災が発生 ・３号所内変圧器 B　**１件**	【部位】ブッシング碍管 【状態】損傷、その後火災により一部焼損	震度６強

故障部位は、志賀原子力発電所と異なる部位であり、地震時に損傷しやすい部位の特定に係る知見なし

ATENA Atomic Energy Association
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

【参考】変圧器（故障・不具合事例の調査）

原子力発電所のその他事例（機能喪失に至っていない事例）：63件

発電所名	発生日時	事象概要	故障部位・状態	備　考
女川	2011年3月11日 （東北地方太平洋沖地震）	地震動により以下の変圧器において、放圧板が動作。 ・1，２，３号主変圧器 ・1，２号起動変圧器 ・2号所内変圧器（A） ・2号補助ボイラー用変圧器（A），（B） **計8件**	【部位】避圧弁 【状態】動作	震度６弱
	2011年4月7日 （宮城県沖地震）	以下の放圧板が動作。 ・1，２，３号主変圧器 ・２号起動変圧器 ・1号所内変圧器（B） ・2号所内変圧器（A） ・3号所内変圧器（B） ・2号補助ボイラー用変圧器（A），（B） ・2号励磁電源変圧器 **計10件**		震度６弱
	2021年2月13日 （福島県沖地震）	以下の放圧板が動作。 ・1，２，３号主変圧器 ・２号起動変圧器 ・2号補助ボイラー用変圧器（A），（B） **計6件**		震度6強

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

【参考】変圧器（故障・不具合事例の調査）

前頁からの続き

発電所名	発生日時	事象概要	故障部位・状態	備　考
女川	2021年3月20日 （宮城県沖地震）	地震動により以下の変圧器において、放圧板が動作。 ・２，３号主変圧器 ・2号補助ボイラー用変圧器（A），（B） **計４件**	【部位】避圧弁 【状態】動作	震度5強
	2021年5月1日 （宮城県沖地震）	以下の放圧板が動作。 ・２，３号主変圧器 ・２号起動変圧器 ・2号補助ボイラー用変圧器（A），（B） **計5件**		震度５強
	2022年3月16日 （福島県沖地震）	以下の放圧板が動作。 ・２，３号主変圧器 ・１，２号起動変圧器 ・2号補助ボイラー用変圧器（A），（B） **計6件**		震度6強
	2011年4月7日 （宮城県沖地震）	地震による振動で、以下変圧器の放熱器の一部にひび（油滲み）が発生。 ・２号起動変圧器　**１件**	【部位】放熱器フィン 【状態】ひび	震度６弱
	2021年2月13日 （福島県沖地震）	地震による振動で、以下変圧器の放熱器の一部にひび（油滲み）が発生。 ・３号起動変圧器　**１件**	【部位】放熱器フィン 【状態】ひび	震度６強

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

【参考】変圧器（故障・不具合事例の調査）

前頁からの続き

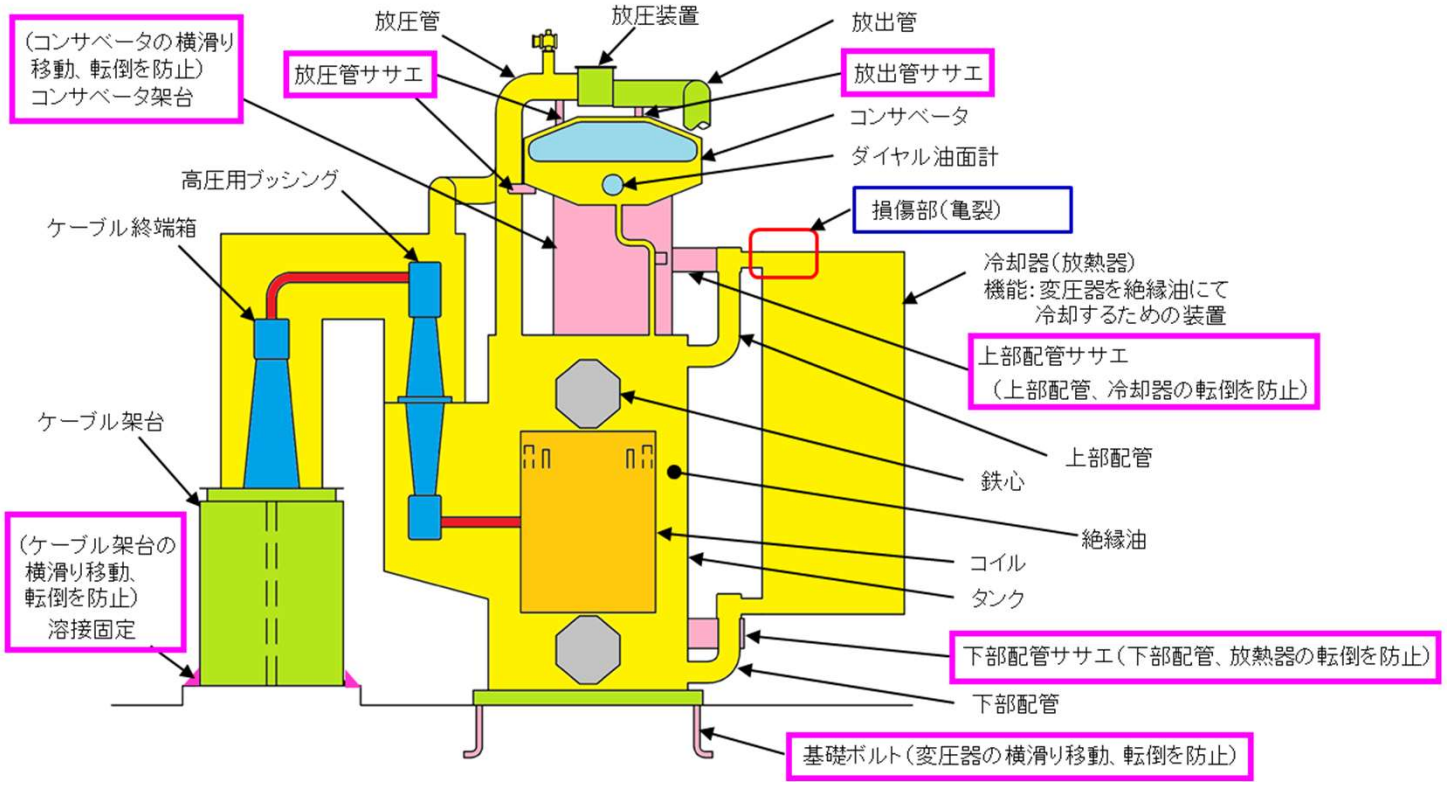
発電所名	発生日時	事象概要	故障部位・状態	備　考
柏崎刈羽	2007年7月16日 （新潟県中越沖地震）	地震動により以下の変圧器において、放圧板が動作したことから、変圧器を手動停止（機能性能に係る損傷なし） ・No.1高起動変圧器 ・低起動変圧器3SB、6SB　**計３件**	【部位】放圧板 【状態】動作	震度6強
		地震動により以下の変圧器において、放圧板が動作 ・１～７号主変圧器 ・１,2号所内変圧器A・B ・３号所内変圧器A ・予備変圧器 ・ボイラ変圧器3A　**計14件**	【部位】放圧板 【状態】動作	
志賀	2007年3月25日 （能登半島地震）	地震動により以下の変圧器において、放圧板が動作 ・1、2号主変圧器　**計２件**	【部位】放圧板 【状態】動作	震度５弱
東海第二	2011年3月11日 （東北地方太平洋沖地震）	地震動により以下の変圧器において、放圧板が動作 ・主変圧器 ・2A、2B起動主変圧器　**計３件**	【部位】放圧板 【状態】動作	震度６弱

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

【参考】変圧器（詳細構造、設計情報の収集）

詳細構造・設計情報の調査

＜志賀原子力発電所 １号機起動用変圧器の耐震設計について＞



・変圧器本体に対しては、JEAG5003にて「変圧器本体を基礎に固定するアンカーボルトの強度を十分に確保しうる施工上の注意が必要」の要求があることを考慮し、JEAG5003規定の変圧器本体の設計地震力「静的水平加速度0.5G」で転倒しないような、強度を持つ基礎ボルトを適用している。
（基礎ボルトの引張応力及びせん断応力が許容値以下であることをJEAG5003に基づき計算）。

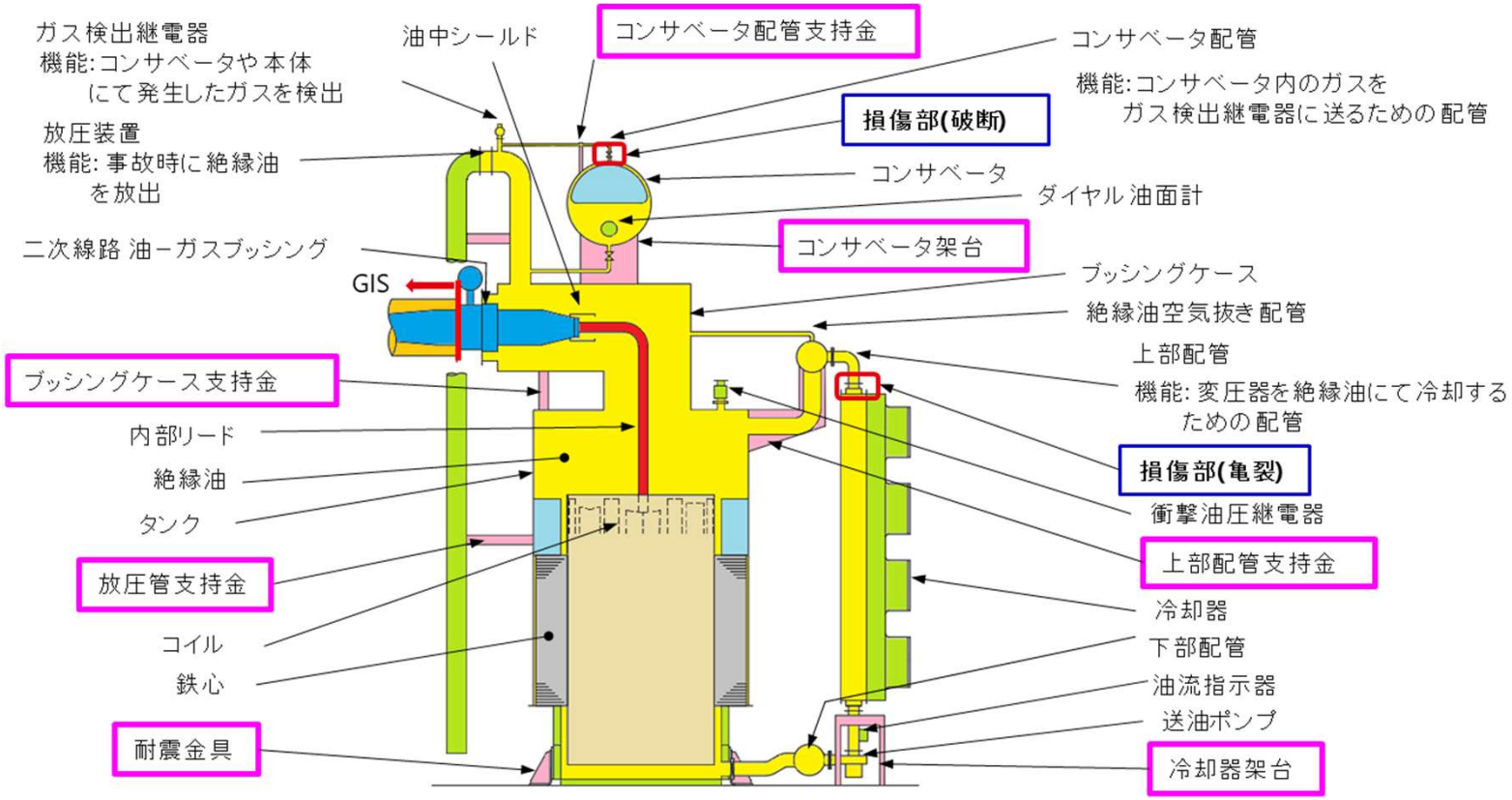
・また、JEAG5003にて「配管等については地震時破損等を生じないよう配慮する必要がある」の要求があることを考慮し、静的水平加速度0.5Gによって配管部などが塑性変形しないよう要所をササエで補強する設計としている。
※基礎ボルト及び配管部のササエ取付けイメージを上図 ▭ 枠部に示す。（志賀１号起動用変圧器（油入風冷式）（JEAG5003-1980）の例）

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

【参考】変圧器（詳細構造、設計情報の収集）

詳細構造・設計情報の調査

＜志賀原子力発電所 ２号機主変圧器の耐震設計について＞



・変圧器本体に対しては、JEAG5003にて「変圧器本体を基礎に固定するアンカーボルトの強度を十分に確保しうる施工上の注意が必要」の要求があることを考慮し、JEAG5003規定の変圧器本体の設計地震力「静的水平加速度0.5G」で転倒しないような、強度を持つ耐震金具の構造としている（基礎ボルトのせん断応力が許容値以下であることをJEAG5003に基づき計算）。

・また、JEAG5003にて「配管等については地震時破損等を生じないよう配慮する必要がある」の要求があることを考慮し、静的水平加速度0.5Gによって配管部などが塑性変形しないよう要所を支持金で補強する設計としている。

※基礎部の耐震金具及び配管部の補強支持金の取付けイメージを上図 ▭ 枠部に示す。（志賀2号主変圧器(導油風冷式)（JEAG5003-1998）の例）

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

【参考】変圧器（詳細構造、設計情報の収集）

詳細構造・設計情報の調査

＜変圧器の耐震設計について＞

- 原子力発電所に設置されている変圧器は耐震Cクラス機器に属するが、**JEAG5003を用い、本体を耐震Cクラスに要求される地震動　（1.2Ci（約0.2G））を上回る静的水平加速度0.5Gを考慮して設計**している。

耐震Cクラス	技術基準	JEAG4601	JEAG5003
機器の地震力	・静的地震力 水平地震力は、地震層せん断力Ciを20%増しした震度より求めること 地震層せん断力係数Ciは、標準せん断力Coを0.2以上とし、地盤の種類等を考慮して求められる値とすること	・静的水平加速度 約2m/s^2　（一例、設置場所により異なる） 耐震Ｃクラスの地震力（地震層せん断力係数C_iの1.2倍） $1.2C_i = 1.2 \times Z \times R_t' \times A_i \times C_o$ $= 1.2 \times 1.0 \times 0.8 \times 1.0 \times 0.2$ $= 0.192G$（≒2m/s^2） 地震地域係数Ｚ＝ 1.0 振動特性係数R_t'＝ 0.8 地震層せん断力係数の高さ方向の分布係数A_i＝ 1.0※ 標準せん断力係数C_o＝ 0.2 ※　：地表面条件のため、高さ方向の増幅を考慮せず	・静的水平加速度 5m/s^2
許容応力	おおむね弾性状態に留まる範囲で耐えること （適用可能な規格等） ・JEAC4601 ・設計・建設規格	鋼材の降伏点、またはそれと同等の許容応力 ※：日本機械学会　設計・建設規格、同　材料規格などを準用。設備や応力分類ごとに許容応力を設定。なおJEAG4601-1987では告示501号を引用し、JEAC4601-2008以降では告示501号がもとになった日本機械学会規格を引用。	鋼材の降伏点と引張強さの70%のうち小さい値 ※：日本建築学会　鋼構造設計規準の準用を推奨

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

【参考】変圧器（保守・管理方法に係る情報の収集）

保守・管理方法に係る情報の収集

＜変圧器の保守管理＞

- 変圧器の保守管理として、各社メーカ推奨の点検内容を参考に、定期的に点検を実施している。

志賀原子力発電所の保守管理の例

赤字：冷却器(放熱器)の点検

点検項目	頻度	主な内容
巡視点検	１回／月※1	・外観の損傷、漏油等の異常がないことを確認 ・各種パラメータ採取(油面、油温等)
定期点検	１回／サイクル※2	・各部の損傷、漏油、汚損、塗装の状態(発錆の有無)等の確認 ・取付ボルトの締付け状態の確認 ・絶縁抵抗測定 ・油中ガス分析 ・その他変圧器構成部品(計器、継電器等)点検
開放点検	１／約２０年	・全量抜油のうえ、変圧器の内部点検 ・消耗品(パッキン等)の取替

※１：別に運転員による巡視点検を毎日実施

※２：長期停止期間中においては、油中ガス分析により劣化状況を確認

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

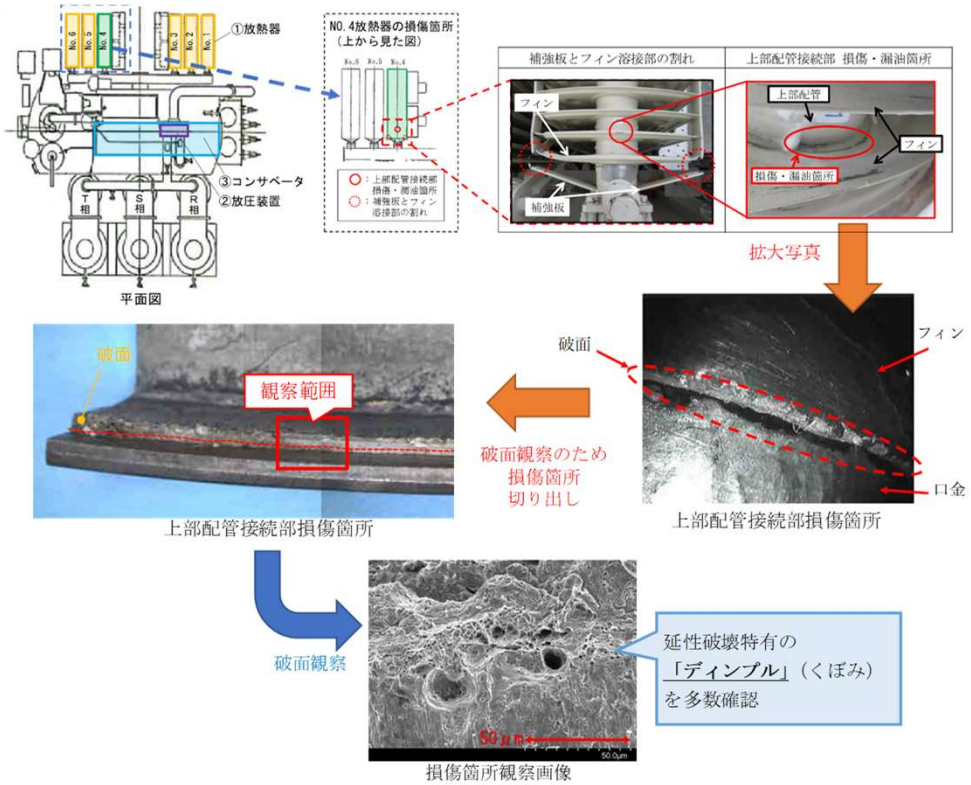
【参考】変圧器（北陸事故報告）

故障原因　志賀１号起動変圧器

- ✓ 絶縁油の漏えいが確認されたNo.4放熱器について上部配管接続部の損傷（約60mm）及び補強板とフィン溶接部の割れを確認。これらについて、破面観察及び構造解析を実施。
- ✓ 損傷した原因は、放熱器が地震動と共振したため、放熱器上部配管接続部に対して設計時に考慮した水平加速度0.5Gを上回る加速度が発生し、部材に許容値を超える過大な応力が発生したことによるものと推定

＜破面観察結果＞

No.4放熱器上部配管及び補強板において、延性のある金属材料が過大な荷重を受けた時に発生するディンプルと呼ばれるくぼみを多数確認。



Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

【参考】変圧器（北陸事故報告）

故障原因　志賀１号起動変圧器

＜構造解析結果＞

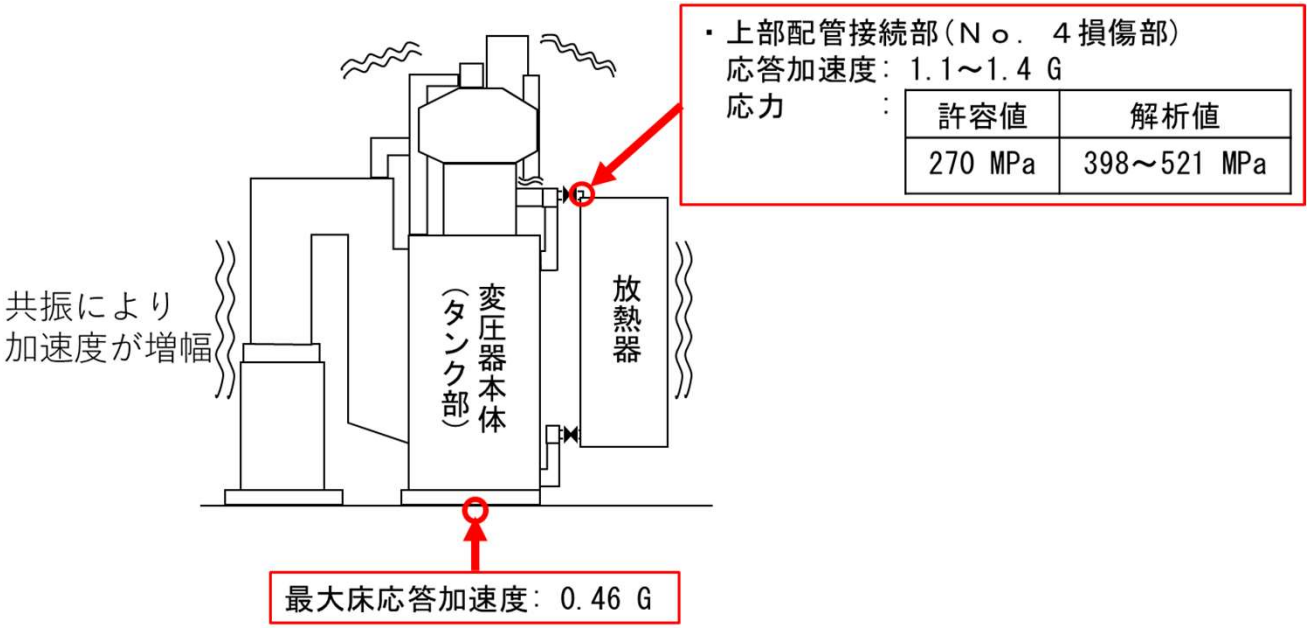
（１）固有値解析

- 変圧器本体（タンク部）が剛構造であることを確認
- 放熱器が共振しやすい構造であることを確認

（２）動的解析

- 損傷箇所に静的水平加速度0.5Gを上回る加速度が発生したことを確認
- 損傷箇所に許容値を上回る応力が発生したことを確認

＜動的解析の結果（概要）＞



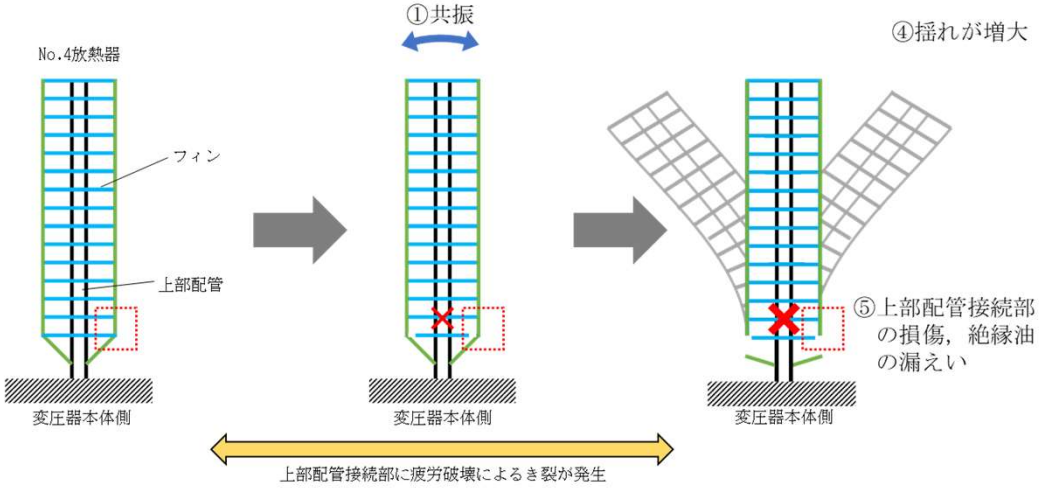
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

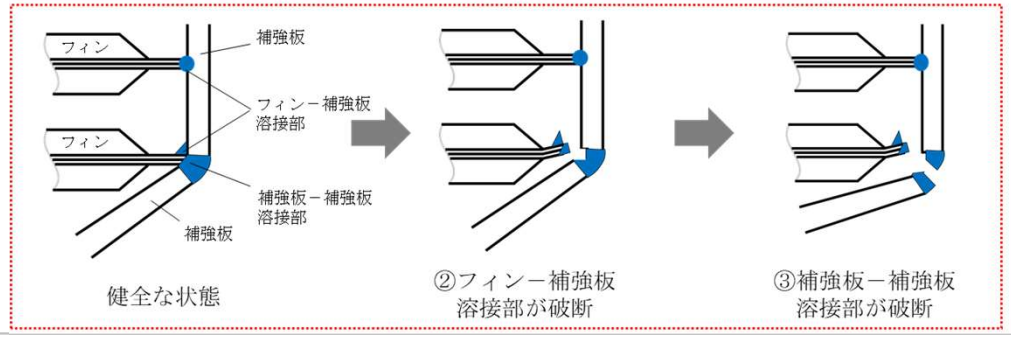
【参考】変圧器（北陸事故報告）

故障原因　志賀１号起動変圧器

＜事象進展メカニズム＞

① 地震発生に伴い、放熱器が共振
② フィンー補強板溶接部の応力が許容値を超過し破断
③ No.4放熱器の補強板ー補強板溶接部にき裂が進展し破断
④ No.4放熱器の補強板が破断することにより放熱器の揺れが増大
⑤ No.4放熱器の上部配管接続部の応力が許容値を超過し損傷





Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

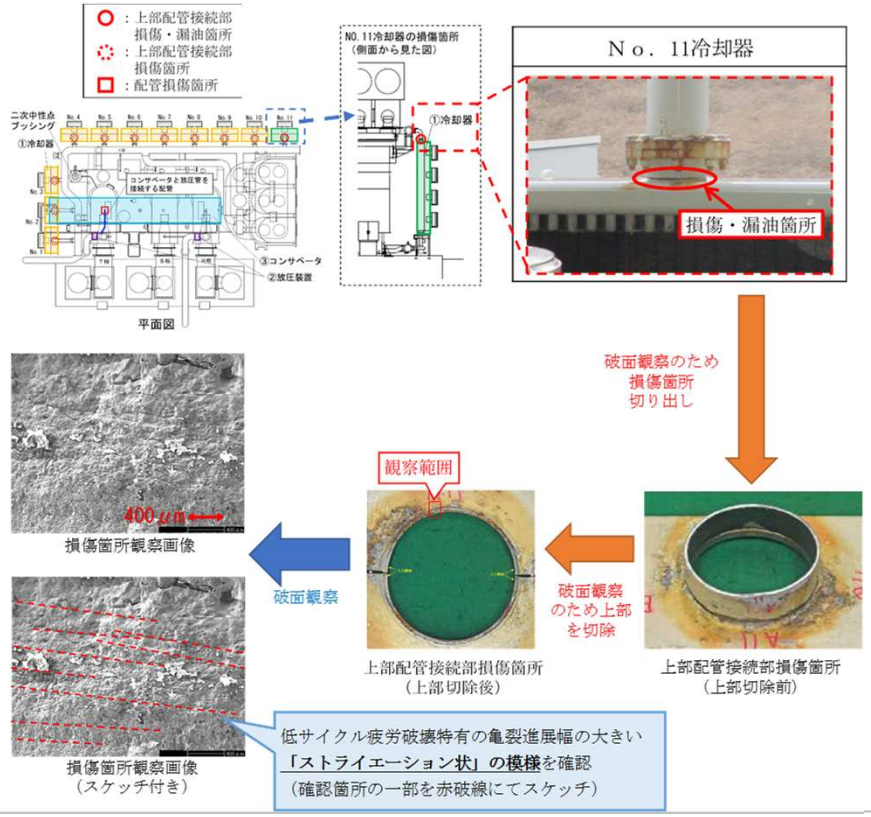
【参考】変圧器（北陸事故報告）

故障原因　志賀２号主変圧器

- ✓ 絶縁油の漏えいが確認されたNo.11冷却器について上部配管接続部の損傷（約130mm）を確認。これらについて、破面観察及び構造解析を実施。
- ✓ 損傷した原因は、冷却器が地震動と共振したため、冷却器上部配管接続部に対して設計時に考慮した水平加速度0.5Gを上回る加速度が発生し、部材に許容値を超える繰り返し応力が発生したことによるものと推定。

＜破面観察結果＞

上部配管接続部において、低サイクルの疲労破壊時に発生する亀裂進展幅の大きいストライエーション状の模様を確認。



Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

【参考】変圧器（北陸事故報告）

故障原因　志賀２号主変圧器

＜構造解析結果＞

（１）固有値解析

- 変圧器全体で共振しやすい構造であることを確認

（２）動的解析

- 損傷箇所に静的水平加速度0.5Gを上回る加速度が発生したことを確認
- 損傷箇所に許容値を上回る応力が発生したことを確認
- 繰返し応力の回数が許容値（地震動の波形から評価）を超過したことを確認

＜動的解析の結果（概要）＞

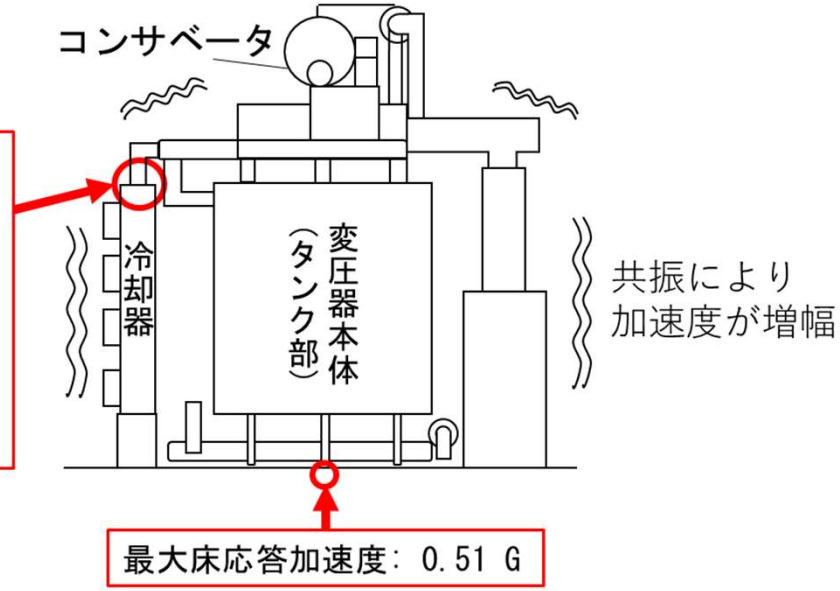
・冷却器上部配管（Ｎｏ．11損傷部）
応答加速度：2.9～4.6 G

応力：

許容値	解析値
268 MPa	579～974 MPa

繰返し回数：

許容値	解析値
12 回	56 回



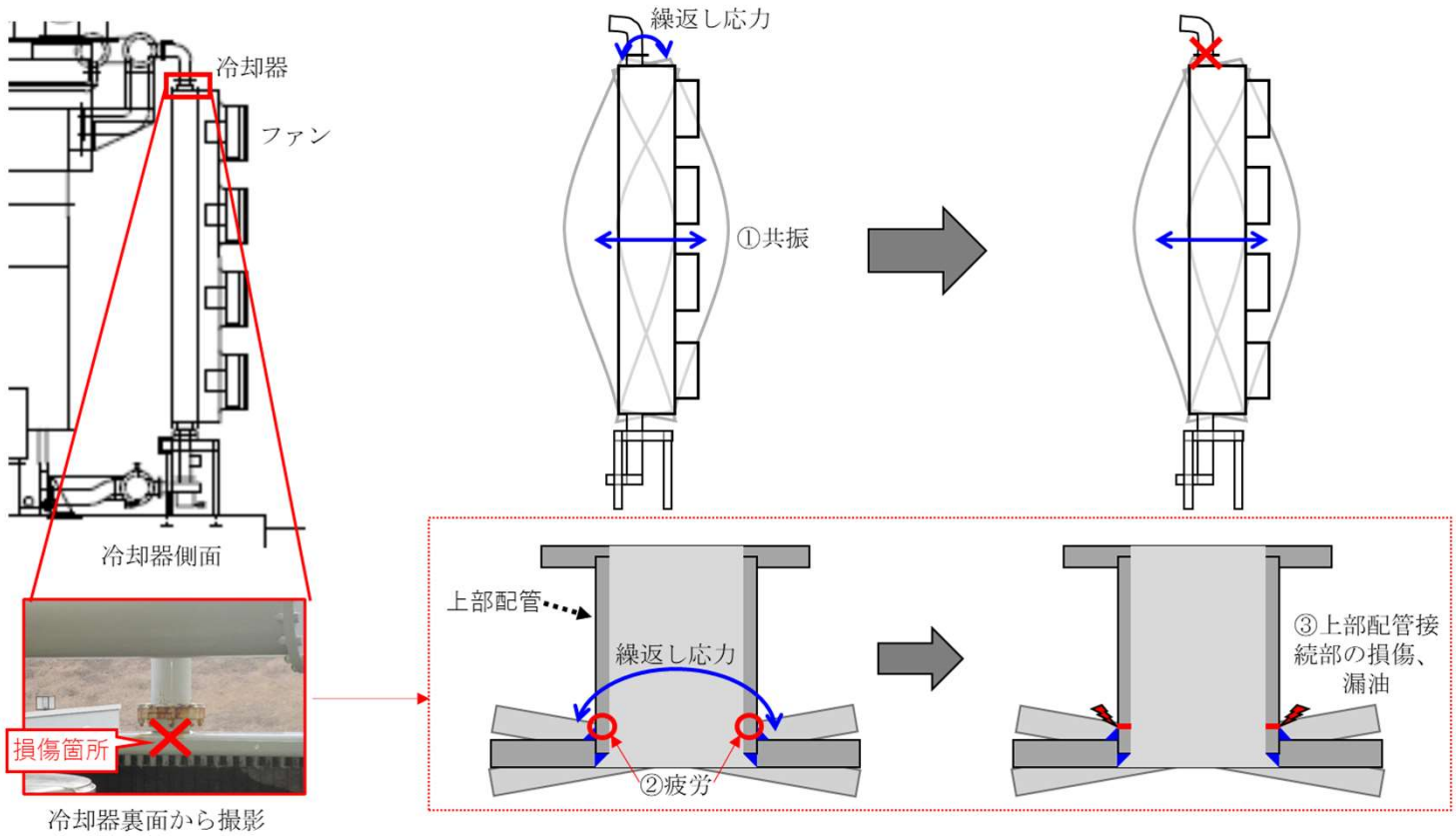
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

【参考】変圧器（北陸事故報告）

故障原因　志賀２号主変圧器

＜事象進展メカニズム＞

① 地震発生に伴い、冷却器が共振
② 共振状態が継続し、上部配管接続部に繰返し応力が発生
③ No.11冷却器上部配管接続部に繰返し応力の回数が許容値を超えたことにより疲労破壊が発生し損傷



Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

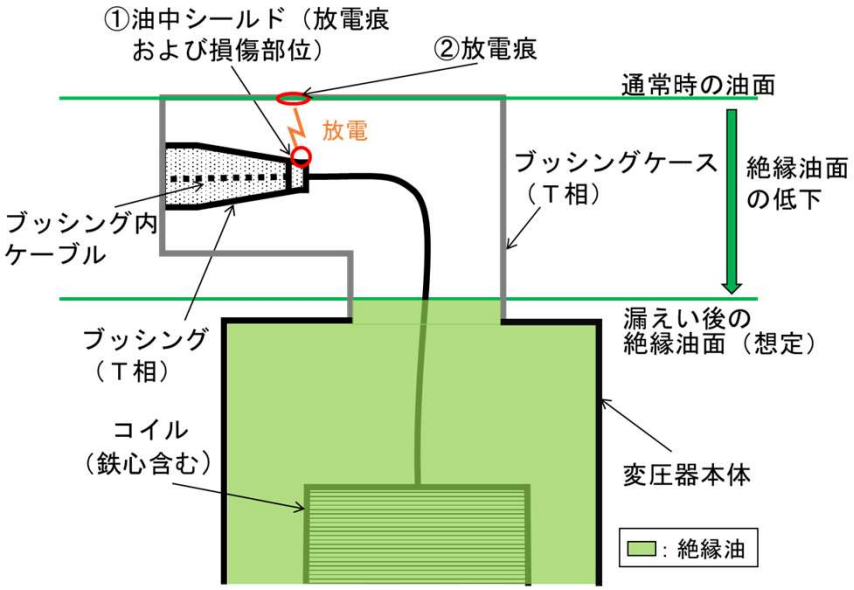
【参考】変圧器（北陸事故報告）

故障原因　志賀２号主変圧器

＜変圧器内部にて放電が発生した推定原因＞

内部点検の結果※から、放電が発生した原因を以下と推定

- 冷却器上部配管接続部が損傷して絶縁油面が低下したことにより、絶縁油で絶縁性能を確保していた充電部の一部が気中に露出し、T相のブッシングで放電現象が発生した。
- 放電現象の衝撃によりT相のブッシングの一部が損傷したと推定した。
- 放電現象発生時に絶縁油が熱分解することによりカーボンが生成したと推定した。



※　内部点検の結果
（T相のブッシングケース内の確認状況）
(1) 二次線路　油ーガスブッシングの損傷及びカーボン付着
(2) 油中シールドの損傷及びカーボン付着
(3) ブッシングケースに放電痕及びカーボン付着

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

【参考】変圧器（変圧器停止手順）

北陸電力では、2号主変圧器が待機除外（故障中），2号予備電源変圧器（以下，予備変）から所内電源へ給電中における暫定手順として，以下のとおり運用中。

＜絶縁油漏えい時の変圧器停止手順の例：志賀２号機 予備電源変圧器＞

地震により2号予備変**コンサベータの連続的な油面低下※を確認した場合**は，2号機の**非常用M/C母線を停電し，D/Gの自動起動により受電する。**その後，**予備変を停止**する。

なお，上記**対応中に予備変の「油面低下」警報が発生した場合は直ちに予備変を停止**する。

※連続的な油面低下：地震による油面の揺れ，放圧板動作による一時的な油面低下によるものではないことを見極めるため、数分間油面を監視して判断

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

【参考】非常用D/G （故障・不具合事例の調査） （1/3）

過去の非常用D/Gにおける定期検査等時のトリップ事例（運転側操作によるもの）

発電所名	D/G 号機	発生 日時	事象概要	原因	対応／対策
福島第二原子力発電所２号機	D/G(B)	2004/10/17	発電機並列後の初期負荷時に力率調整を実施中に，ガバナ操作が遅れて逆電力リレーによりトリップ	運転員のガバナ操作の遅れによるもの	手順書（福島第二）に以下を記載 ①「注意事項欄」へ逆電力トリップについての注意喚起を追記する。 ②当時の手順は「ＡＶＲとガバナ操作」が同一項目に記載されていたため、誤解を招かぬよう「ＡＶＲとガバナ操作」を個々の項目へ分別し記載する。
泊発電所３号機	B	2023/6/13	定期試験を実施していたところ，運転員の操作誤りにより，当該ディーゼル発電機に通常より大きい電流が流れる状態となり保護機能が働き自動停止した。	並列後，力率を改善するために運転員は電圧調節器を「減」側へ操作すべきところ，誤って「増」側へ操作したことで，過電流となったことから，過電流保護が動作した。	・運転要領に「非常用ディーゼル発電機の力率操作イメージ図および電流値に対する注意事項」を追記し，力率調整の運転操作方法を具体化する。 ・電流値および力率に適切なプレアラームを設定し，不測の事態が生じた際に速やかに気付けるようにする。
志賀原子力発電所２号機	D/G(A)	2007/4/11	定期検査中の志賀原子力発電所２号機において、４月１１日１０時１０分頃、定例試験のため起動した非常用ディーゼル発電機Ａ号機（以下、「非常用Ｄ／Ｇ（Ａ）」という。）を所内電源系統に並列したところ、非常用Ｄ／Ｇ（Ａ）が自動停止した。 このため、同日１０時１０分に原子炉施設保安規定に定める運転上の制限を満足しない状態であると判断し、原子炉施設保安規定に基づく必要な措置を実施した。 その後、非常用Ｄ／Ｇ（Ａ）の機能確認を実施し、設備に異常がないことを確認した後、同日１８時１７分に運転上の制限の逸脱から復帰した。	非常用Ｄ／Ｇ（Ａ）が自動停止した原因は，常用Ｄ／Ｇ（Ａ）を所内電源系統へ並列した後、最初の負荷出力調整において出力の増加操作が不足し、逆電力リレーが動作したことによるもの。	非常用Ｄ／Ｇ並列後の出力が不足しないよう出力上昇の手順を改善し、確実に実施する。

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

【参考】非常用D/G （故障・不具合事例の調査） （2/3）

過去の非常用D/Gにおける定期検査等時のトリップ事例（運転側操作によるもの）

発電所名	D/G号機	発生日時	事象概要	原因	対応／対策
志賀原子力発電所１号機	D/G(H)	2024/1/17	志賀原子力発電所１号機において、１月16日18時42分に発生した志賀町震度５弱（１号機原子炉建屋地下２階 震度２、24.5ガル）の地震後の保安確認措置のため、１月17日16時58分に非常用ディーゼル発電機の一つである高圧炉心スプレイディーゼル発電機（以下、ＨＰＣＳディーゼル発電機）の試運転として、ディーゼル機関を起動し、発電機を所内電源系統に接続する操作（以下、並列）をしていたところ、同日17時13分に自動停止した。 その後、ＨＰＣＳディーゼル発電機の外観目視点検、計器等の点検および試運転等を実施したところ、設備に異常は認められなかった。	１月17日の試運転時の所内電源構成等を確認したところ、以下のとおり、ＨＰＣＳディーゼル発電機が出力を上昇させにくい状態であったことから、逆電力継電器を動作させないための設定時間内に、必要な出力を上昇できず自動停止したものと推定した。 ・試運転時の所内電源構成におけるインピーダンスが、ＨＰＣＳディーゼル発電機の負荷を取りにくい状態であったこと。 ・試運転の並列時において、ＨＰＣＳディーゼル発電機の電圧が所内電源系統の電圧よりも通常と比較して高めとなっていたことから、並列直後はＨＰＣＳディーゼル発電機の出力を上げにくい制御状態であったこと。 なお、外部電源喪失時には自動的に起動・並列するため、このような状態によりディーゼル発電機の出力が上昇しにくい事象は発生しない。	・ＨＰＣＳディーゼル発電機の試運転時には、負荷が取りやすい所内電源構成の状態で行うことを手順書に反映する。 ・並列時にＨＰＣＳディーゼル発電機の電圧を調整する際、従来並列時に確認していた専用の計器に加え発電機電圧と母線電圧も確認するよう手順書に反映する。 以上の対策を行ったうえで改めて試運転を行い、１月29日22時37分にＨＰＣＳディーゼル発電機を待機とした。 なお、今後逆電力継電器を動作させないための設定時間の見直しを検討する。
島根原子力発電所1号機	D/G(B)	1989/2/23	定格出力運転中（４６０ＭＷｅ），定期試験として１Ｂ－非常用ディーゼル発電機手動起動試験（１回／月）を実施していた。１Ｂ－非常用ディーゼル発電機を並列した後，「Ｂ－ディーゼルトリップ」警報が発生するとともに，１Ｂ－非常用ディーゼル発電機が自動停止した。	自動停止要因を確認したところ，１Ｂ－非常用ディーゼル発電機逆電力保護機能作動によるものであった。 １Ｂ－非常用ディーゼル発電機並列直後のガバナＣＳのインチング操作による負荷上昇時，発電機出力等の各種パラメータの確認に慎重になり過ぎ，時間を費やしたことにより，５秒以内に２００ｋＷ以上の負荷が取れなかったため，逆電力保護機能が作動したものと推定される。 なお，この逆電力リレーの作動は，所内電源停電の際には非常用ディーゼル発電機の自動停止の要因にはならない。	（１）定期試験要領書に「低負荷（２００ｋＷ以下）で５秒以上経過すると，逆電力保護機能が作動する可能性があるので注意する」旨記載しているが，該当操作箇所にも同様に注意事項を追記するとともに，運転員に再度周知徹底した。 （２）運転操作余裕を確保するため，逆電力タイマーの設定値を５秒から１０秒程度に変更する。

【参考】非常用D/G （故障・不具合事例の調査） （3/3）

過去の非常用D/Gにおける定期検査等時のトリップ事例（運転側操作によるもの）

発電所名	D/G号機	発生日時	事象概要	原因	対応／対策
敦賀発電所２号機	D/G(B)	1993/2/8	定格出力１，１６０ＭＷｅにて運転中の平成５年２月８日１４時０４分、定期試験（１００％負荷試験：１回／月）のため（Ｂ）非常用ディーゼル発電機を併入したところ、中央制御室に「Ｂ－ＤＧ系統併入」及び「Ｂ－ＤＧトリップ」警報が発報し、当該ディーゼル発電機が自動停止した。 この時、（Ｂ）非常用ディーゼル発電機制御室の運転員は、制御盤に「発電機内部故障」警報が発報し、比率差動継電器（８７ＥＧ）の第二相及び第三相が動作したことを示す表示が出ていることを確認した。	当該ディーゼル発電機が自動停止した原因は、発電機併入時、同期検定器にしゃ断器の投入範囲が表示されていなかったこと等から、しゃ断器の投入タイミングがずれ、所内電源系統と発電機の位相差が約２５度を超えて投入されたため、８７ＥＧが動作したものと推定される。	(1) （Ａ）・（Ｂ）非常用ディーゼル発電機（中央制御室及び（Ａ）・（Ｂ）非常用ディーゼル発電機制御室）の同期検定器について、発電機併入時の位相差の目標範囲（－１０度～０度）を表示した。 (2) 運転手順書に発電機併入時のしゃ断器の投入タイミング等を明記し周知した。
東海発電所	１号，２号DG	1999/9/20	東海発電所は、営業運転停止（平成１０年３月３１日）後の第２８回定期検査中（平成１１年９月６日開始）のところ、平成１１年９月２０日１９時００分から計画的に所内電源切替（１５４ｋＶから６６ｋＶ）を行っていた。 その後、電源切替えに使用していた非常用ディーゼル発電機の解列準備のため、１９時４０分、２号原子炉ディーゼル配電盤受電用しゃ断器５２Ｒ２の同期栓を「ＯＮ」にしたところ、１号及び２号非常用ディーゼル発電機制御盤（現場盤）の「ＢＵＳ　ＦＡＵＬＴ」、中央制御室の「ＤＩＥＳＥＬ－１　ＴＲＩＰ」，「ＤＩＥＳＥＬ－２　ＴＲＩＰ」警報が発報し、投入されていた１号及び２号原子炉ディーゼル配電盤のしゃ断器（５２Ｇ１，５２Ｇ２，５２Ｉ２）が開放するとともに、１号及び２号非常用ディーゼル発電機が自動停止した。	調査の結果、１号及び２号非常用ディーゼル発電機が同時に自動停止した原因は、以下のとおりと推定される。 （１）管理面の不備により同期栓が中央制御室に３個保有されており、複数個同時に使用可能な状態であった。 （２）操作指揮者及び操作担当者とも、同期栓の同時操作に対する問題意識がなかったことから、原子炉ディーゼル配電盤受電用しゃ断器５２Ｒ１の同期栓と、２号原子炉ディーゼル配電盤受電用しゃ断器５２Ｒ２の同期栓とをほぼ同時に「ＯＮ」にした。 （３）１号及び２号原子炉ディーゼル配電盤の同期検出用計器用変圧器２次側回路がつながった状態になり、「不足電圧継電器」が動作した。当該継電器が動作したことから、１号及び２号原子炉ディーゼル配電盤のしゃ断器（５２Ｇ１，５２Ｇ２，５２Ｉ２）が開放したため配電盤が停電するとともに、１号及び２号非常用ディーゼル発電機が自動停止した。	（１）中央制御室では原子炉ディーゼル配電盤系統の受電用しゃ断器の同期栓を、予備を含め３個保有しているが、同期検定器に同時に２つの同期栓を使用することのないように、中央制御室に保管する同期栓は１個に限定し、発電長管理とする旨、要領書に明記する。 （２）同期栓を使用する場合は１個で操作する旨、手順書に明記する。 （３）今回の事象の状況及び原因について、運転員に対し周知を図るとともに教育を実施し再発防止を徹底する。