

関西電力株式会社からの高浜発電所 4 号機 蒸気発生器伝熱管の損傷に係る報告に対する 評価及び今後の対応について（案）

令和元年 12 月 25 日
原子力規制委員会

1. 経緯

関西電力株式会社（以下「関西電力」という。）は、令和元年 9 月 18 日から第 22 回定期検査中の高浜発電所 4 号機（以下「高浜 4 号機」という。）において、3 台の蒸気発生器（以下「SG」という。）に対して全ての伝熱管¹について渦流探傷試験（ECT）²を実施したところ、A-SG の伝熱管 1 本、B-SG の伝熱管 1 本及び C-SG の伝熱管 3 本の管支持板³の下部に、外面（2 次側）からの減肉とみられる有意な信号指示が認められた。なお、本事象に伴う外部への放射能の影響はなかった。

関西電力は、令和元年 10 月 17 日、本事象が実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第 134 条第 3 号に定める報告事項⁴に該当すると判断し、原子力規制委員会に報告した⁵。

2. 事業者からの報告内容

原子力規制委員会は、関西電力から上記 1. の事象の原因と対策に関する報告を令和元年 11 月 28 日（補正を同年 12 月 23 日）に受けた⁶。その概要は以下のとおりである。

2. 1 事象に係る原因調査

ECT で減肉とみられる信号指示が認められた SG 伝熱管について、2 次側から小型カメラによる外観観察を行ったところ、当該信号指示が認められた箇所に摩耗痕が確認された。（別紙 1 参照）

このため、当該事象を踏まえた要因分析表を作成し、調査を行った。

2. 1. 1 使用環境等における調査

過去に SG 2 次側において、他プラントで粒界腐食割れ⁷、ピitting⁸、リン酸減肉⁹が発生していることから、その可能性について確認した。

¹ 材料はニッケル基合金（インコネル 600 合金）を使用している。

² 高周波電流を流したコイルを伝熱管に挿入することで伝熱管に渦電流を発生させ、伝熱管の欠陥により生じる渦電流の変化を電気信号として取り出すことで欠陥を検出する試験。

³ 伝熱管を支持する部品。

⁴ 「実用発電用原子炉及びその附属設備の技術基準に関する規則第 18 条及び第 56 条に適合していないと認められたとき」に該当すると判断。

⁵ 令和元年 10 月 23 日原子力規制委員会「原子力施設等におけるトピックス」参照。

⁶ 報告の詳細は「<https://www.nsr.go.jp/activity/bousai/trouble/houkoku/220000181.html>」を参照。

⁷ 金属の結晶粒の境目（粒界）に沿って進展する腐食。

⁸ 塩素イオン等に起因する金属表面の被膜破壊によって起きる局所的な腐食

⁹ 二次系の水処理に使用されたリン酸ソーダが SG 伝熱管と支持板の間隙部に局所的に濃縮固着されることによって起きる腐食

○粒界腐食割れ

高浜4号機のようなアンモニアとヒドラジンの注入により良好な還元性雰囲気¹⁰が維持されているプラントでは発生していないこと、また表面形状も異なることから、粒界腐食割れではないと判断した。(別紙2参照)

○ピitting

高浜4号機のような塩素濃度が十分低く管理され、アンモニアとヒドラジンの注入により良好な還元性雰囲気¹⁰が維持されているプラントでは発生していないこと、また表面形状も異なることから、ピittingではないと判断した。(別紙2参照)

○リン酸減肉

高浜4号機のようなアンモニアとヒドラジンの注入によるAVT (All Volatile Treatment)¹⁰を実施しているプラントでは発生していないこと、また表面形状も異なることから、リン酸減肉ではないと判断した。(別紙2参照)

2. 1. 2 機械的な接触における調査

管支持板等との接触による摩耗減肉、デンティング¹¹、流体振動による疲労、エロージョン¹²の可能性について検討した。

○管支持板等との接触による摩耗減肉

以下の内容に関する機械的な影響による減肉の可能性¹³があるか確認した。

- 管支持板の影響について検討した結果、当該箇所との接触により摩耗減肉が発生したのであれば、4か所の管支持板ランド部¹³に減肉が生じるが、ECT等の結果から周方向1か所しか減肉指示が確認されていないことから、発生の可能性はないと判断した。
- SG内外における発生物との接触を検討した結果、A-SGの第一管支持板に金属片(SUS304相当)が確認されたが、金属片の表面観察の結果、伝熱管との接触に伴う摺動痕がないことを確認した。そのほか、SG内からはスラッジ以外の異物は確認されなかった。なお、SG内部品の経年劣化に起因した脱落については、給水内管裏当金の溶接部等に損傷がないことを確認した。
- スラッジによる減肉の可能性について検討した結果、スラッジによる伝熱管摩耗試験では、伝熱管に軽微な傷は付くものの、スラッジ先端

¹⁰ pH調整剤のアンモニアと酸素除去剤のヒドラジンで水質調整を行う揮発性物質処理。

¹¹ 管支持板の腐食及びそれに伴う腐食生成物の体積膨張による伝熱管の変形。

¹² 管内外を流れる水により配管表面が摩耗する現象。

¹³ 管支持板に加工されている四ツ葉型管穴のうち凸面部。

部は摩滅しており、スラッジと伝熱管の接触によって摩耗減肉する可能性は低いと判断した。

○デンティング

表面形状が異なることから、デンティングではないと判断した。（別紙2参照）

○流体振動による疲労

管支持板部の流れによる伝熱管の管支持板部の応力は、疲労限に比べ十分小さく、また表面形状も異なることから、疲労損傷ではないと判断した。（別紙2参照）

○エロージョン

事象が発生した箇所の流速はインコネル600製伝熱管のエロージョンが発生する限界流速に比べて十分小さく、また表面形状も異なることから、エロージョンではないと判断した。（別紙2参照）

2. 1. 3 国内外における事例調査

国内外で報告されている異物によるSG伝熱管外面減肉事象を調査した結果、国内では3件、海外では多数の事例があることを確認した。

国内では、1975年に九州電力株式会社玄海原子力発電所1号機で発生した鋼製巻尺による減肉事象（1本）、2000年に関西電力美浜発電所3号機で発生した溶断作業で発生した2次生成物による減肉事象（3本）のほか、昨年度に法令報告対象事象ではないが、高浜3号機でステンレス鋼等の金属片によると思われる減肉事象（1本）が発生していることを確認した。

海外では、ガスケット片やワイヤ等の異物により、複数のSG伝熱管の外面において減肉した事例が多数報告されていることを確認した。（別紙2参照）

2. 1. 4 原因調査のまとめ

2. 1. 1から2. 1. 3の調査結果から、SG器外から流入した異物による摩耗減肉が発生した可能性が高いと判断した。

2. 2 事象の推定メカニズム

前項の調査結果を踏まえ、摩耗痕の位置及び形状から、減肉を生じさせた異物の形状、SG内流入後の異物の挙動及び減肉メカニズムを以下のとおり推定した。

2. 2. 1 想定される異物の形状及び挙動

SG伝熱管の摩耗痕の位置及び形状から、減肉を生じさせた異物の形状は、長さ約18～24mm、幅約6～8mm、厚さ1mm以下と推定した。

想定される当該異物は、SG内流入後管板上へ到達し、伝熱管群内の上昇流に乗って管支持板フロースロット部を通過したと考えられる。また、第一管支持板より上方では、上昇流に加え高温側から低温側への水平方向流があり、水平方向の移動量とフロースロット部の開口幅と比較した結果、第三管支持板以上には上昇せず第二管支持板または第三管支持板の低温側下面に保持されたと推定した。

2. 2. 2 減肉メカニズム

異物との接触により伝熱管が摩耗する場合、異物の振動により摩耗するケースと伝熱管の振動により摩耗するケースが考えられる。

異物の振動により摩耗するケースについては、異物の端部が管支持板の穴に挟まり拘束された状態が想定されるが、この状態では異物が流体力を受ける面積が小さいため、ワークレート¹⁴は小さく、有意な減肉が発生しないことを確認した。

伝熱管の振動により摩耗するケースについては、異物が流体力により管支持板下面に保持された場合、流動振動解析により十分なワークレートが得られることを確認した。

異物と伝熱管の接触状態については、異物と伝熱管の接触状態に応じた減肉形状を実験で確認するとともに、実験で得られた減肉形状と同等の人工欠陥を与えた伝熱管のモックアップ試験にてECT信号を取得したところ、実機のECT信号とほぼ一致する状態であることを確認した。

以上のことから、2. 2. 1で想定した形状の異物が、SG内流入後、第二または第三管支持板低温側下面へ移動するとともに、流体力により当該下面で保持されて伝熱管へ摩耗減肉を与えた可能性があるかと推定した。

2. 3 異物流入に関する調査

2. 2. 1で想定した形状の異物及び通常運転中の流速を勘案して、想定される異物が系統水の流れに乗って移動する可能性がある範囲を調査した結果、主給水系統及びSG水張系統から異物が流入する可能性があるかと推定した。

当該系統において、2次系機器の内部構成部品が脱落し、異物となってSGへ流入する可能性について検討したところ、2. 2. 1で想定した形状の異物と類似形状を持つ構成部品はなかったことから、機器内部構成部品が脱落して異物となった可能性はないと判断した。

外部から流入した異物が減肉の原因である場合、異物混入の可能性がある作業は、前回定期検査（第21回：平成30年5月18日～平成30年9月28日）¹⁵時に当該系統範囲内で開放点検等を実施した作業である可能性が高いことから、当

¹⁴ 摩耗を生じさせる仕事率のこと。押付力と摺動速度の積で表現される。

¹⁵ 前回定期検査では、ECTの結果、伝熱管の外表面減肉は確認されていない。

該作業実績を確認したところストレーナ、脱気器タンクの開放点検作業を含む12件の作業において、最終異物確認時に目視確認が困難な箇所が存在し、異物が混入する可能性を完全には否定できないことが確認された。

また、当該12件の作業について、開放点検等の開口部のある期間中の周辺作業実績を確認した結果、2.2.1で想定した形状と類似した形状となる配管の切削くず等が生じる作業を3件実施していることを確認した。

2.4 推定原因

2.1から2.3の結果から、本事象の発生原因は以下の内容と推定した。

- 前回定期検査における機器の開放点検作業中に混入した異物が、最終異物確認時に目視確認が困難となる範囲に残留した。
- 前回定期検査における原子炉起動後、残留した異物は主給水系統を通じてSGに到達し、SG内の上昇流に乗って第二、第三管支持板下面に到達し伝熱管と接触した。
- 伝熱管と接触した異物は、運転中に生じる伝熱管の振動によって、伝熱管外表面を摩耗させ、伝熱管外面に傷をつけた。
- 今回の定期検査（第22回）における原子炉停止後、SG内の上昇流が喪失したことにより異物は落下し、SGブローダウン系統から海水管に放出された。

2.5 再発防止対策

本事象の発生原因が、前回定期検査における機器の開放点検作業中に異物が混入したと推定されるため、SGへの異物流入の可能性がある機器の点検における異物混入防止対策の徹底のため、以下の内容を作業手順書等に追加するとともに、現場パトロール等の実施による管理強化を図る。更に、当該対策については、必要に応じて見直しを行う。（別紙3参照）

- 機器内部に立ち入る前の作業服の着替え、靴カバーの着用
- 開口部に周辺作業と隔離したエリアを設置
- 垂直配管に取り付けた弁等の点検において、直接目視で異物確認できない範囲は、ファイバースコープで確認する。
- ウエスは、新ウエスを使用し、再使用ウエスと区別して管理する。

また、上記の対策は、美浜発電所及び大飯発電所に対しても水平展開していく。

なお、摩耗減肉が認められたSG伝熱管については、高温側及び低温側のSG管板部で施栓し、供用外とする。

3. 原子力規制委員会の評価及び考察

3.1 原因調査結果等について

SG伝熱管の損傷に至った原因については、2.1のとおり、想定される原因が

網羅的に抽出されており、水質管理、S G伝熱管の減肉状況及び粒界腐食割れ等の表面形状との比較から、異物による摩耗減肉と考えることは妥当であると評価する。

また、異物は確認できていないが、摩耗痕から想定した形状の異物がS G内で移動し減肉を発生させることをモックアップ及び解析等により確認しており、想定した形状の異物が管支持板下面で保持され、伝熱管の振動により摩耗したと推定することは妥当であると評価する。

3. 2 安全上の影響について

本事象において、異物によりS G伝熱管5本が減肉したが、3. 1で妥当と評価した伝熱管の振動による減肉においては、伝熱管と管支持板との隙間により振幅が制限されるため、これ以上の当該減肉部の進展はなく、破断等による他の伝熱管への影響はないと考えられる。

また、当該伝熱管の強度は、通常運転時及び事故時の内外圧差に対して裕度があることから、発電用原子炉施設の安全機能は確保されていたものと評価する。

3. 3 再発防止対策について

再発防止対策については、2. 5のとおり、周辺作業との隔離エリアの設置、作業服の着替え、ファイバースコープによる異物確認等の異物混入防止対策を徹底するとともに、これらの対策については、関西電力自らが異物確認に立ち会うことに加え、定期的な現場パトロール等により管理強化を行うとしており、推定原因から妥当であると評価する。

4. 今後の対応

当委員会としては、今後も関西電力が行う定期事業者検査（蒸気発生器伝熱管体積検査）の結果について確認するとともに、異物混入防止対策及び現場パトロール等の実施状況について、原子力運転検査官が現場にて確認を行うこととする。

5. I N E S（国際原子力・放射線事象評価尺度）評価

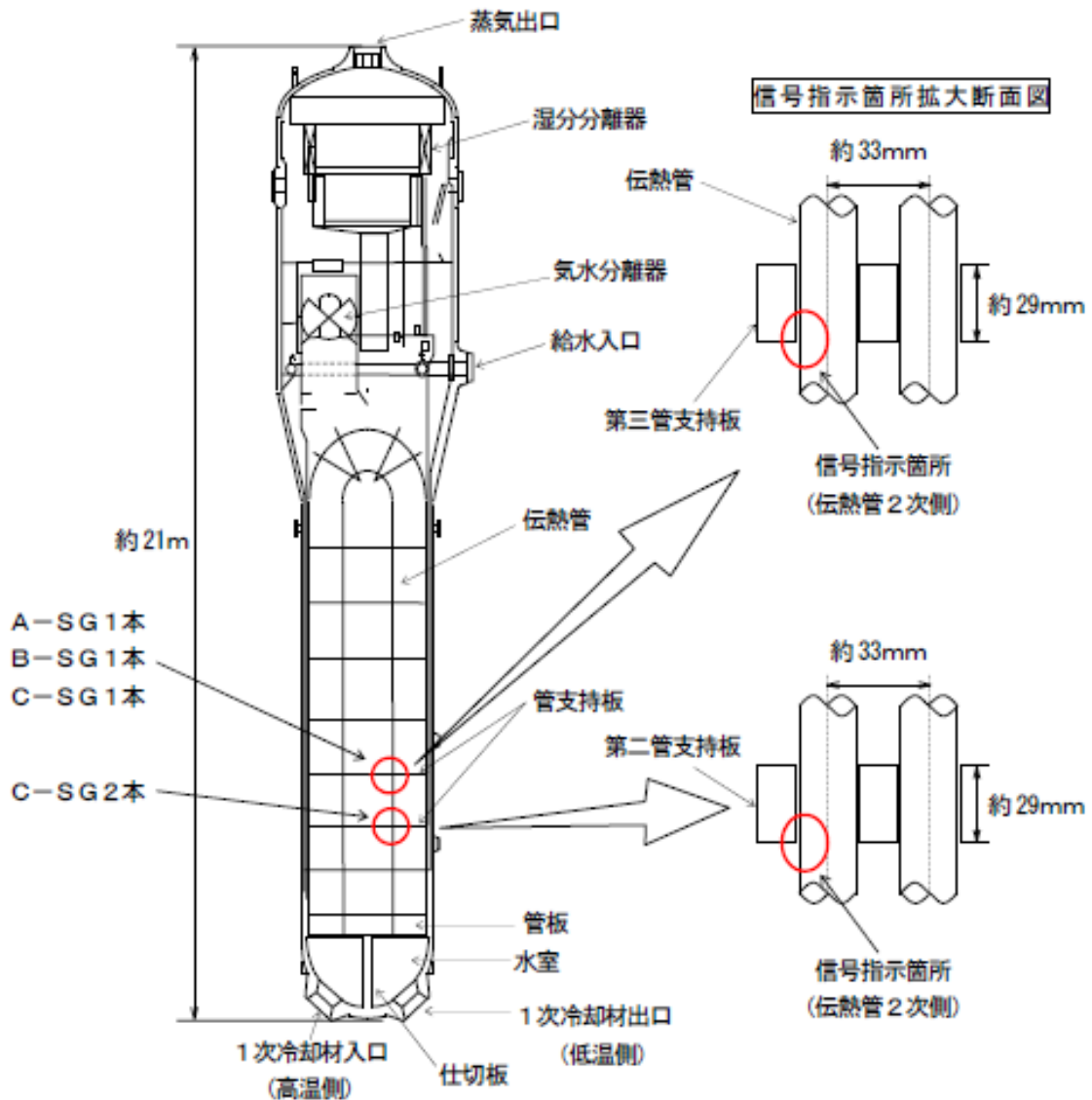
当該事故・故障等に係るI N E S評価について、以下のとおり確定する。

最終評価：0

判断根拠： 本件は、定期検査のため原子炉を停止した状態で、渦流探傷試験を実施したところ、蒸気発生器の伝熱管に有意な信号指示を確認したものであり、原子炉施設の安全に影響を与えない事象であるので、I N E Sレベル0の「安全上重要でない事象」と評価する。

※ I N E S ナショナルオフィサーは、長官官房総務課事故対処室長

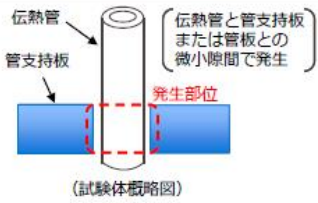
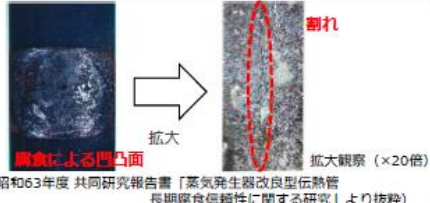
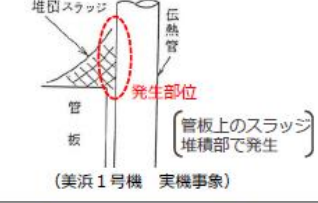



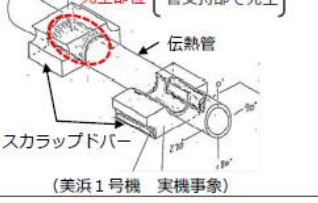

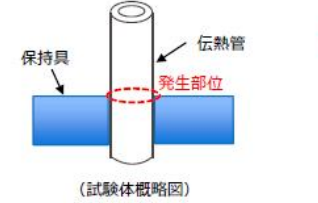

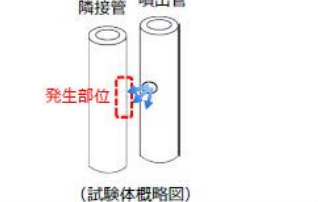
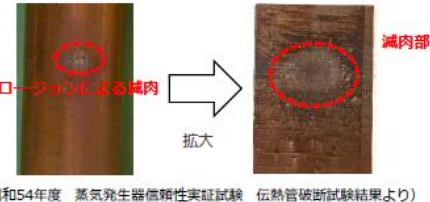
SG伝熱管信号指示箇所概要図 (SG管支持板部)



第9回原子力施設等における事故トラブル事象への対応に関する公開会合 (令和元年12月6日) 資料1-2抜粋



第9回原子力施設等における事故トラブル事象への対応に関する公開会合 (令和元年12月6日) 資料1-1抜粋

	発生部位	表面形状
粒界腐食割れ (IGA)	 <p>伝熱管 管支持板 発生部位 (試験体概略図) 伝熱管と管支持板 または管板との 微小隙間で発生</p>	 <p>腐食による凹凸面 拡大 割れ 拡大観察 (×20倍) (昭和63年度 共同研究報告書「蒸気発生器改良型伝熱管 長期腐食信頼性に関する研究」より抜粋)</p>
ピitting	 <p>堆積スラッジ 伝熱管 管板 発生部位 (管板上のスラッジ 堆積部で発生) (美浜1号機 実機事象)</p>	 <p>腐食による孔食</p>
リン酸減肉	 <p>パーティクル ストラップ 発生部位 (伝熱管等の隙間で発生) 伝熱管 スクラップドバー (美浜1号機 実機事象)</p>	 <p>腐食による減肉 拡大観察 (×3倍)</p>
デンティング	 <p>発生部位 (管支持部で発生) 伝熱管 スクラップドバー (美浜1号機 実機事象)</p>	 <p>伝熱管圧迫による変形</p>
流体振動による疲労	 <p>保持具 伝熱管 発生部位 (試験体概略図)</p>	 <p>疲労による割れ 拡大観察 (×10倍) (平成9年度「溶接部熱影響部信頼性実証試験に関する 事業報告書 (発電設備技術検査協会)」より抜粋)</p>
エロージョン	 <p>隣接管 噴出管 発生部位 (試験体概略図)</p>	 <p>エロージョンによる減肉 拡大 減肉部 (昭和54年度 蒸気発生器信頼性実証試験 伝熱管破断試験結果より)</p>

第10回原子力施設等における事故トラブル事象への対応に関する公開会合 (令和元年12月19日) 資料1抜粋



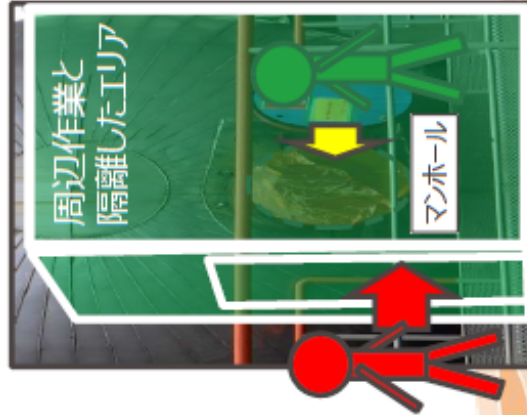
海外 (米国) における異物によるSG伝熱管外面減肉事象
(ガスケット片による減肉)

第9回原子力施設等における事故トラブル事象への対応に関する公開会合
(令和元年12月6日) 資料1-1抜粋

対策イメージ

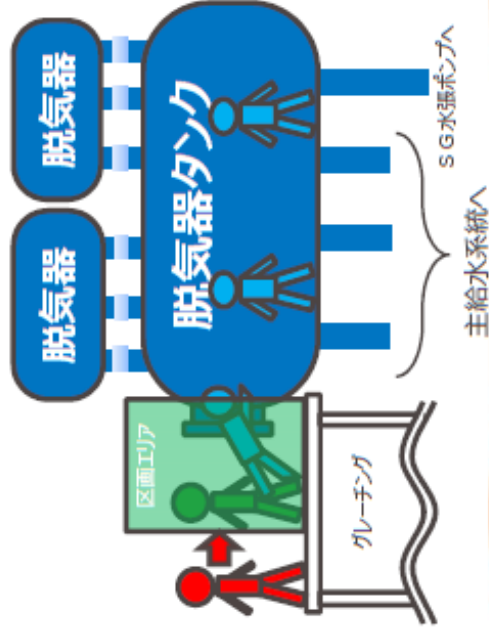
・作業員の立ち入る機器の点検

機器の開口部に周辺作業と隔離した区画エリアを設けることで、異物の混入防止を図る。



(脱気器タンクの例)

機器内部へ立ち入る直前に器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。



(主給水ブースタポンプ入ロストレーナの例)

機器内部へ立ち入る直前に器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。

