

関西電力株式会社からの高浜発電所3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2年10月9日
緊急事案対策室

1. 経緯

関西電力株式会社（以下「関西電力」という。）は、第24回定期検査中の高浜発電所3号機（以下「3号機」という。）において、3台の蒸気発生器（以下「SG」という。）の全ての伝熱管¹に対して渦流探傷試験（ECT）²を実施したところ、B-SGの伝熱管1本及びC-SGの伝熱管1本の管支持板³付近に、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2年2月18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⁶を令和2年9月7日に受けた。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SG2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2年2月19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/220000234.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で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

3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は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

3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は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

3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があるか確認した。

- 管支持板との接触により摩耗減肉が発生したのであれば、4箇所の管支持板ランド部¹³に減肉が生じるが、目視点検の結果から当該部の減肉は確認できなかったため、管支持板との接触・摩耗によって発生したものではないと判断した。
- A、C-SGの流量分配板上に金属片(SUS304相当、渦巻きガスケットの一部であるフープ材であると推定)が確認されたことから、有意な信号が認められたC-SGで確認された金属片の表面観察等の結果、伝熱管の主成分であるニッケル成分は検出されなかったが、部分的な擦れ跡、打痕、摩耗等を確認した。このため、当該金属片がC-SGの伝熱管に傷を付けた可能性は否定できないと判断した。(別紙3参照)
- SG器内、SGブローダウン系統、復水器回収ラインの目視点検を実施したところ、上記金属片及びスラッジ以外の異物は確認されなかった。また、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に損傷がないことを確認した。

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。

- 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において、スラッジが摩滅しにくいよう保守的な試験条件下でもスラッジの方が伝熱管よりも十分早く摩滅しており、判定基準を超えるような減肉が発生することは考えにくく、スラッジにより今回の事象が生じた可能性が低いと判断した。

○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、疲労限に比べ非常に小さく、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 原因調査のまとめ

2. 1. 1から2. 1. 2の調査結果から、C-SGについては、当該SG器内で確認された金属片又はSG器外から流入した異物、B-SGについては、SG器外から流入した異物により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

2. 1の調査結果を踏まえ、減肉痕の位置及び形状から、SG器外から流入したと推定される異物の形状、C-SGで確認された金属片及び当該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伝熱管との接触状態

○C-SG

C-SG伝熱管1本の第三管支持板付近に2箇所の減肉が確認されたことから、次のいずれかの接触状態で減肉が発生したと推定した。

- C-SGで確認された金属片又は異物の角部がSG伝熱管に接触、減肉し、その後減肉の進展とともに接触した状態が緩和され、2次側の流体力で安定した姿勢に変化したことにより、もう1箇所に接触、減肉した。（別紙3参照）
- C-SGで確認された金属片と異物又は2種類の異物がそれぞれ接触し、減肉した。（別紙3参照）

SG伝熱管の減肉痕の位置及び形状から、減肉を生じさせた可能性のある異物の形状は、長さ約15～25mm、幅約4～7mm、厚さ1mm以下と推定した。

OB-SG

SG伝熱管の減肉痕の位置及び形状から、減肉を生じさせた可能性のある異物の形状は、長さ約24mm、幅約5～7mm、厚さ約0.2～1mmと推定した。
(別紙4参照)

2. 2. 2 SG器内挙動の推定及び接触状態の再現性

確認された金属片又は想定される異物は、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ることから、第一管支持板及び第二管支持板フロースロット部を通過したものが第三管支持板の低温側下面に保持されたと推定した。

SG2次側の流況を再現するモックアップ試験装置により、2. 2. 1で推定した金属片等の異物の接触状態が、実機二相流相当の条件下において再現できることを確認した。

2. 2. 3 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信号と整合する状態であることを確認した。また、流動振動解析により算出した1サイクルの運転時間で発生する摩耗体積と人工欠陥の摩耗体積は整合しており、今回確認された減肉は、1サイクルで発生した可能性が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。

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。

2. 3 異物流入に関する調査

C-SGで確認された金属片及び2. 2. 1で推定した形状の異物の流入について、SG器内へ移動する可能性がある流路の範囲を調査した結果、主給水ブースタポンプ入口ストレーナ以降の主給水系統及び脱気器タンク以降のSG水張系統は、SGまでの間にストレーナ等がないため、異物が流入する可能性があるとして推定した。

また、当該系統範囲にある機器の内部構成部品等から異物等について以下のとおり推定した。

2. 3. 1 C-SGで確認された金属片の流入調査

C-SGで確認された金属片は、渦巻きガスケットの一部と考えられるため、当該系統範囲で渦巻きガスケットを有する機器等の調査を実施した。

調査対象として、当該範囲では約3mmと約5mmの仕様の渦巻きガスケットが用いられており、このうち約3mmの渦巻きガスケットはすべてインロータイプ¹⁵であることから、構造上流出の可能性がある約5mmの渦巻きガスケットを使用している機器（20箇所）を確認した。

当該機器の開放点検を実施した結果、全ての渦巻きガスケットが健全であり、運転中に当該ガスケットが破損し、SGに流入した可能性がないことを確認した。

定期検査関連作業に従事する作業員に対し、当該機器の渦巻きガスケット取り外し作業の状況を聞き取りしたところ、グラインダー等を用いてガスケットを切断することはないことを確認した。ただし、過去の作業においてグラインダー等を用いた渦巻きガスケットの切断作業が実施されていないことの確認は不可能であったことから、過去の点検時に混入した可能性や構外等から系統周辺に持ち込まれた可能性は否定できないと判断した。

2. 3. 2 C-SGで確認された金属片以外の異物の流入調査

3号機の作業において、想定する異物と類似する異物が発生する可能性の有無を確認したところ、保温材外装板の切削くず等が生じる作業等で発生した異物が開放点検等の作業により混入する可能性が否定できないことを確認した。

当該異物混入の可能性のある作業を調査したところ、すべての作業において開口部養生、連続監視等は適切に実施されていることを確認した。

3号機第23回（前回）定期検査時におけるSG伝熱管損傷事象の自主対策として、開放点検を実施した機器等においては目視確認が不可能となる範囲に対し小型カメラを用いて最終異物確認を実施していたが、SG水張系統については、当該定期検査において開放点検を実施した機器がなく、同様の確認を実施していなかったため、当該系統から異物が混入する可能性は否定できないことを確認した。

¹⁵ 直接接液しないような構造でガスケットパッキングが締め付けられている。このため、運転中にガスケットパッキングが破損してもSG器内へ流入する可能性はない。

3号機第22回（前々回）定期検査以前においても、目視による最終異物確認を実施していたが、第23回（前回）定期検査で実施した小型カメラを用いた最終異物確認を実施していなかったことから、開放点検を実施した機器等から系統内部に異物が混入し、当該定期検査以降にSG伝熱管を傷付けた可能性が否定できないことを確認した。

2.4 減肉したSG伝熱管の健全性

今回減肉が確認されたSG伝熱管の強度について「高浜3号機SG伝熱管の旧振止め金具による局部減肉の特殊設計施設認可申請」で用いた評価式により、最大減肉深さであったC-SGの運転中及び事故時を包絡する内外差圧による破断圧力を算出したところ、通常運転時及び事故時の最大内外差圧に対し十分な裕度があることを確認した。

また、耐震性について、基準地震動 S_s による地震力及び伝熱管全長モデルから、最大深さの減肉を有するC-SGの伝熱管直管部に作用する力を算出したところ、今回発生した減肉を考慮しても発生応力及び疲労累積係数に十分な裕度があることを確認した。

2.5 推定原因

2.1から2.4の結果から、本事象の発生原因は以下の内容と推定した。

- 3号機第22回（前々回）定期検査以前において主給水系統及びSG水張系統から、又は第23回（前回）定期検査においてSG水張系統から混入した異物が、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。
- その後SGに到達し、SG内の上昇流に乗って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、伝熱管外表面を減肉させた。

2.6 再発防止対策

本事象の発生原因が、3号機第23回（前回）定期検査以前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、3号機で実施した異物管理を継続実施するとともに、4号機第22回定期検査で実施したSGへの異物流入の可能性のある機器の点検における異物混入防止対策を徹底する。（別紙5参照）

また、上記対策の徹底のほか、SG水張系統からの異物混入対策として、SG水張ポンプ入口にストレーナを設置する。さらに、今回渦巻きガスケットの金属片がSG器内で確認されたことを踏まえ、今後機器を開放した時点で渦巻きガスケット等の金属製の消耗品に損傷を確認した場合は、工事担当者に報告することに加え、工事報告書に必要事項を記載することを調達要求文書に定める。

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、水質管理、SG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、SG伝熱管を損傷させた異物の確認はできていないが、C-SGで確認された金属片又は摩耗痕から想定した形状のその他の異物がSG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、当該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SG伝熱管2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、貫通には至らないこと及び破断等による他の伝熱管への影響もないと考えられる。

また、最大深さの減肉を有する伝熱管の破断圧力は、通常運転中の伝熱管内外差圧に対して3倍以上の裕度があることから、原子力安全に係る重要度評価に関するガイドの「附属書1 出力運転時の検査指摘事項に対する重要度評価ガイド」によれば、重要度は「緑」¹⁶となる。

以上のことから、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

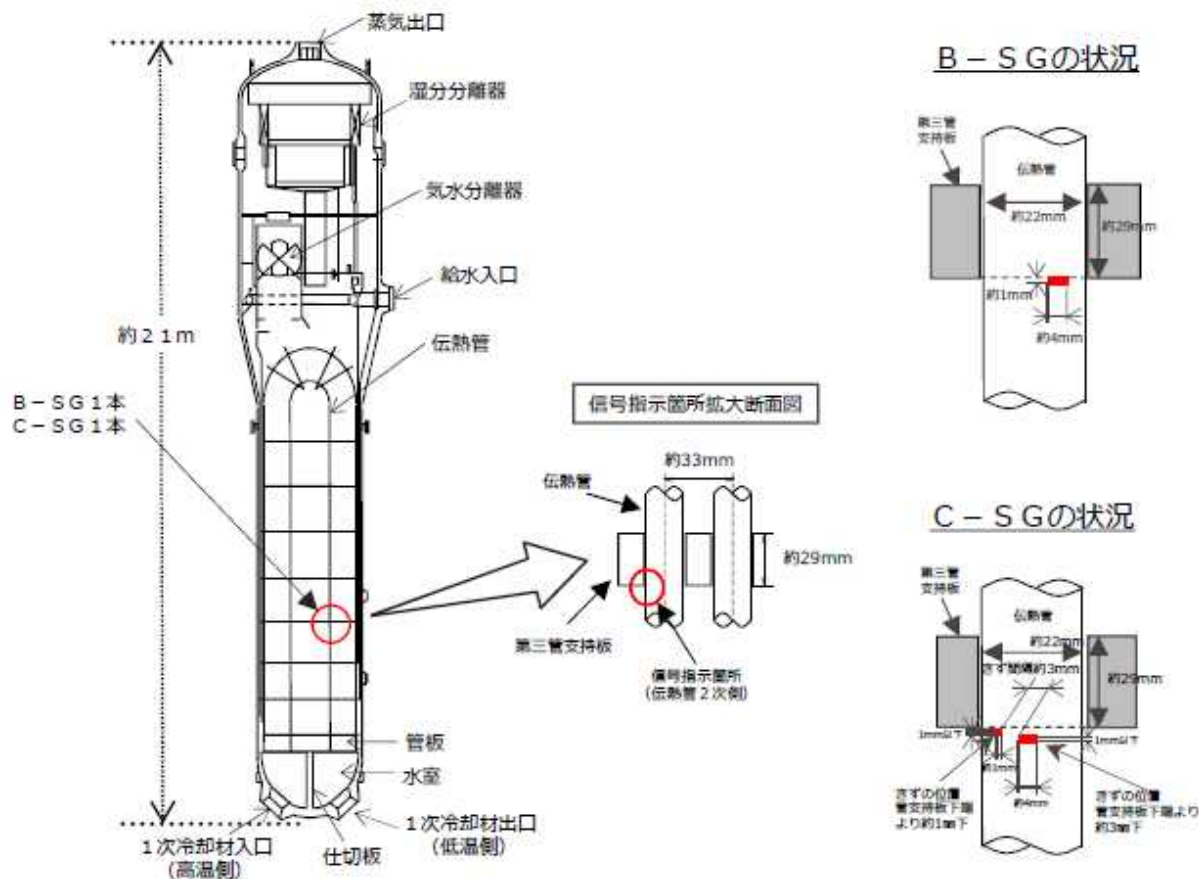
再発防止対策については、2. 6のとおり、高浜発電所4号機で採られている異物混入防止対策の徹底を行うとともに、SG水張系統からの異物混入対策として、SG水張ポンプ入口にストレーナを設置すること及びSG器内で渦巻きガスケットの金属片が確認されたことを踏まえ、当該ガスケット等の金属製の消耗品に損傷を確認した場合は、工事担当者に報告することに加え、必要事項を工事報告書に記載することとしており、推定原因を踏まえ、これらの対策は妥当であると評価する。

¹⁶ 安全確保の機能又は性能への影響はあるが限定的かつ極めて小さなものであり、事業者の改善措置活動により改善が見込める水準

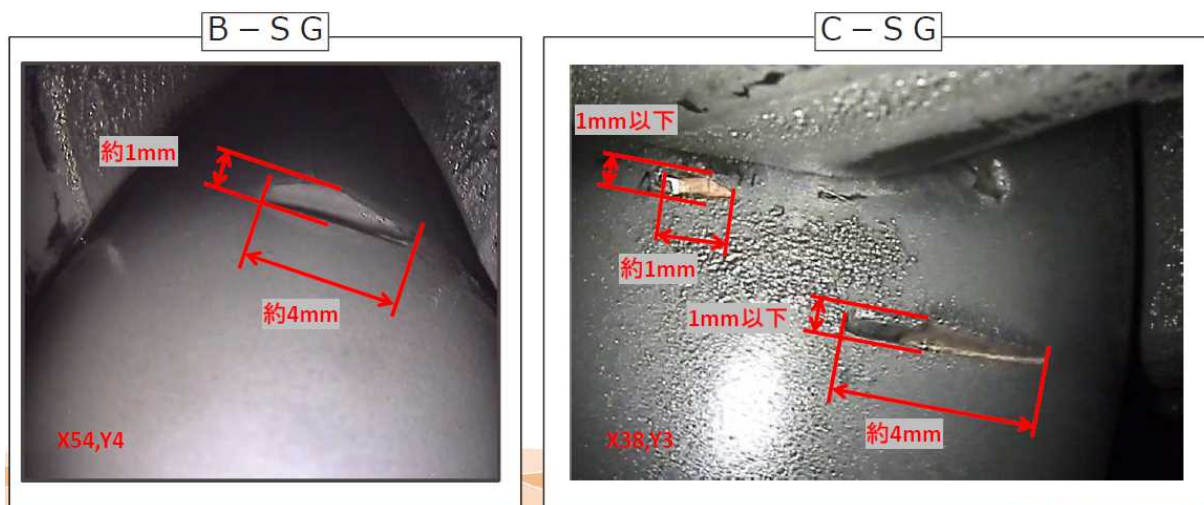
4. 今後の対応

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）の結果及び異物混入防止対策の実施状況について、原子力規制検査にて確認を行うこととする。

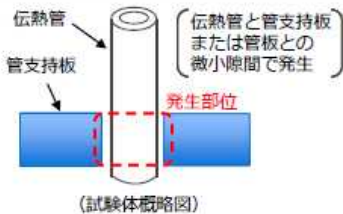
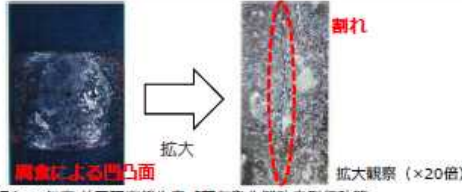
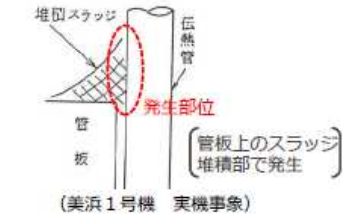

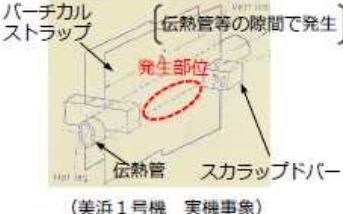

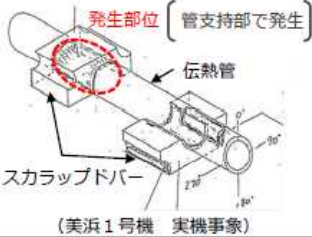

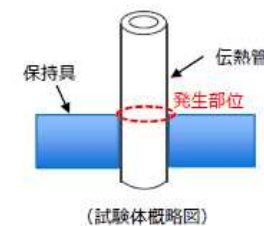


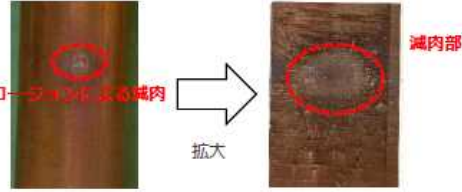
S G 伝熱管信号指示箇所概要図



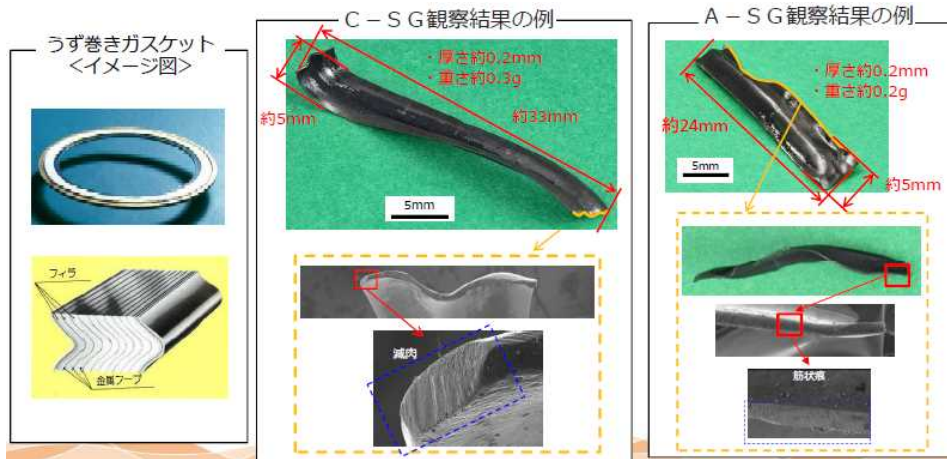
第14回原子力施設等における事故トラブル事象への対応に関する公開会合 資料1-1 抜粋



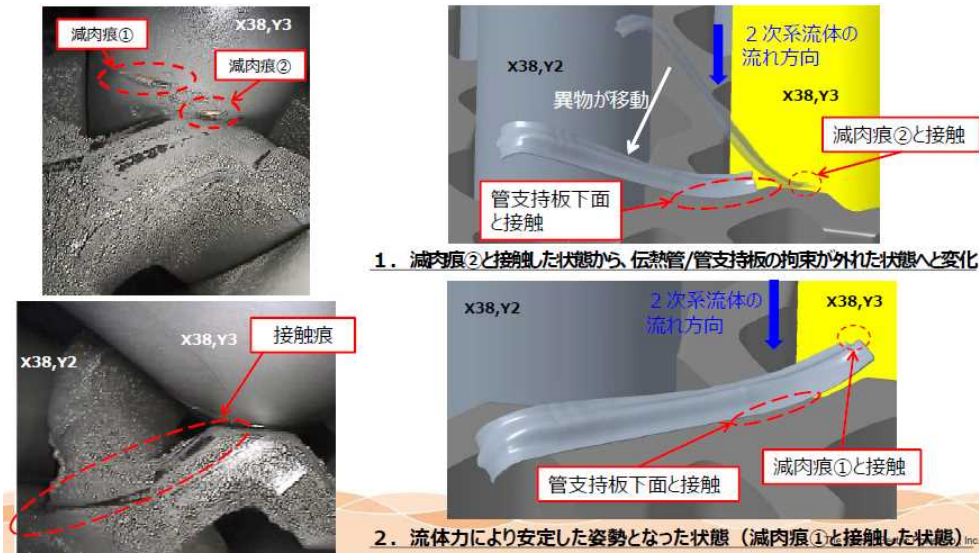
第14回原子力施設等における事故トラブル事象への対応に関する公開会合 資料1-1 抜粋

	発生部位	表面形状
粒界腐食割れ (IGA)	 <p>伝熱管 管支持板</p> <p>(伝熱管と管支持板 または管板との 微小隙間で発生)</p> <p>発生部位</p> <p>(試験体概略図)</p>	 <p>腐食による凹凸面</p> <p>拡大</p> <p>割れ</p> <p>拡大観察 (×20倍)</p> <p>(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</p> <p>伝熱管</p> <p>管 板</p> <p>発生部位</p> <p>(管板上のスラッジ 堆積部で発生)</p> <p>(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</p> <p>発生部位</p> <p>(伝熱管等の隙間で発生)</p> <p>伝熱管</p> <p>スカルップドバー</p> <p>(美浜1号機 実機事象)</p>	 <p>腐食による減肉</p> <p>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)</p> <p>伝熱管</p> <p>スカルップドバー</p> <p>(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</p> <p>伝熱管</p> <p>発生部位</p> <p>(試験体概略図)</p>	 <p>疲労による割れ</p> <p>拡大観察 (×10倍)</p> <p>(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</p> <p>噴出管</p> <p>発生部位</p> <p>(試験体概略図)</p>	 <p>エロージョンによる減肉</p> <p>拡大</p> <p>減肉部</p> <p>(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 資料1引用



A、C-SGで発見された金属片

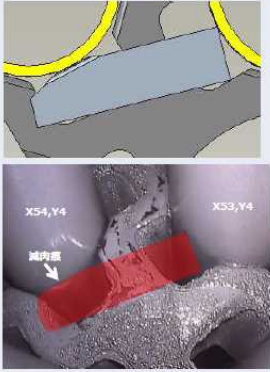
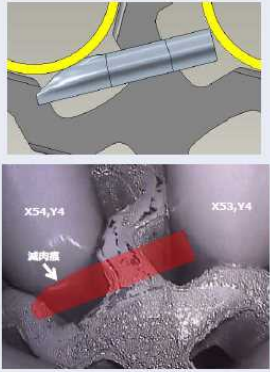


C-SG：金属片が2箇所の減肉痕と接触

	パターン1		パターン2		パターン3		パターン4	
減肉痕	①	②	①	②	①	②	①	②
異物	想定異物1*	金属片	金属片	想定異物2*	想定異物3*	想定異物1*	想定異物2*	
外観								
形状	想定異物1：約25mm×約4mm×1mm以下 想定異物2：約15mm×約7mm×1mm以下		想定異物2：約16mm×約6mm×1mm以下 (参考) 金属片：約33mm×約5mm×約0.2mm					

※管支持板表面の接触痕等と整合するよう異物の形状・位置を想定

C-SG：金属片と想定異物がそれぞれの減肉痕と接触

	パターン1	パターン2
異物	想定異物4※1	想定異物5※1※2
外観		
形状	想定異物4：約24mm×約7mm×1mm以下	想定異物5：約24mm×約5mm×約0.2mm

※1：管支持板表面の接触痕等と整合するよう異物の形状・位置を想定
 ※2：C-SGの金属片と類似のガスケット片を想定

B-SG：想定異物が減肉痕と接触

第14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 資料1-1 抜粋

	従前の対策 (高浜3号機第22回定検以前) (高浜4号機第21回定検以前)	前回 (高浜3号機第23回定検) 対策	前回 (高浜4号機第22回定検) 対策
機器立入対策	<ul style="list-style-type: none"> ● 機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを確認する(本人でも可)。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。 ● 機器内部に立ち入る前に、<u>器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。</u> ● <u>開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。</u>
垂直配管取付弁	<ul style="list-style-type: none"> ● 最終異物確認は直接目視にて実施(手鏡等を使用) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 弁点検時は、弁箱内部に使用する機材(ウエス含む)に異物の付着がないことを確実に事前確認する。 ● 最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、小型カメラで確認する。【自主対応】 	<ul style="list-style-type: none"> ● 弁点検時は、弁箱内部に使用する機材(ウエス含む)に異物の付着がないことを確実に事前確認する。 ● 最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、小型カメラで確認する。 ● ウエスは、新ウエスを使用する。 ● 新ウエスは再使用ウエスと区別して管理する。
その他	—	—	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>保温材の切れ端等の清掃・片づけは、作業一片づけを徹底し、作業服、靴の異物付着確認を行う。</u> ● <u>異物混入防止対策が作業手順書通りに実施されていることを、現場パトロール等で管理強化する。</u>