

関原発 第85号
2022年 5月 13日

原子力規制委員会 殿

大阪市北区中之島3丁目6番16号
関西電力株式会社
執行役社長 森本 孝

高浜発電所3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について

実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条の規定により、別紙
のとおり原因およびその対策について取り纏めましたのでご報告します。

発電用原子炉施設故障等報告書

2022年5月13日

関西電力株式会社

件名	高浜発電所3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について										
事象発生の日時	2022年3月30日 13時00分 (技術基準に適合していないと判断した日時)										
事象発生の場所	高浜発電所3号機 原子炉格納容器内										
事象発生の発電用原子炉施設名	原子炉冷却系統施設 一次冷却材の循環設備 蒸気発生器 (AおよびB)										
事象の状況	<p>1. 事象発生の状況</p> <p>高浜発電所3号機 (加圧水型軽水炉、定格電気出力87万kW、定格熱出力266万kW) は、2022年3月1日より第25回定期検査中であり、3台ある蒸気発生器 (以下「SG」という。) の伝熱管^{*1}全数について、健全性を確認するため渦流探傷試験^{*2} (以下「ECT」という。) を実施した。</p> <p>その結果、A-SGの伝熱管2本およびB-SGの伝熱管1本について、有意な信号指示^{*3}が認められた。A-SGの1本は、高温側の管板^{*4}部に管軸方向に沿った内面きずを示す信号指示が認められ、残り1本とB-SGの1本は管支持板^{*5}部付近に外面からの減肉とみられる信号指示であった。</p> <p>以上から、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則第18条並びに第56条に適合しておらず、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条に該当することを、2022年3月30日13時00分に判断した。</p> <p>なお、有意な信号指示ではないものの、A-SGの伝熱管1本について、管支持板部付近の外面に判定基準未満の微小な信号指示が認められた。</p> <p>^{*1} SGの中で一次冷却材 (1次側) と給水 (2次側) の熱交換を行う逆U字形の管群。一次冷却材は入口管板部 (高温側) から入り、給水と熱交換後に出口管板部 (低温側) へ流れる。</p> <p>^{*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 (ECT; Eddy Current Test)。全周に対して渦電流の発生と検出を別々のコイルを用いた24組のコイルで伝熱管の欠陥による渦電流の変化を信号として検出する。</p> <p>^{*3} ノイズレベル (雑音信号レベル) を超える信号であって、SG管支持板等の外部構造物あるいは伝熱管の形状等に起因する信号 (疑似信号) ではない信号指示。</p> <p>^{*4} 伝熱管が取り付けられている部品。伝熱管と管板で一次冷却材と給水の圧力障壁となる。</p> <p>^{*5} 伝熱管を支持する部品。</p> <p>2. ECT結果</p> <p>(1) 検査期間</p> <p>2022年3月16日 ~ 2022年3月30日 (定期事業者検査終了日)</p> <p>探傷検査・データ整理期間 2022年3月16日~2022年3月27日</p> <p>解析・評価検査期間 2022年3月28日~2022年3月30日</p> <p>(2) 検査範囲</p> <p>SGの施栓^{*6}済みの伝熱管を除く、全数の伝熱管についてECTを実施した。</p> <p style="text-align: right;">(単位: 本)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>SG</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>合計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>検査対象本数</td> <td>3,272</td> <td>3,247</td> <td>3,261</td> <td>9,780</td> </tr> </tbody> </table> <p>^{*6} 伝熱管の1次側出入口部分に機械式栓を用いて栓をし、供用外とすること。</p> <p>(3) 検査結果</p> <p>ECTデータを評価した結果^{*7}、3本の伝熱管に有意な信号指示を確認した。</p> <p>リサーチ表示^{*8} (信号表示) で分析した結果、有意な信号指示が認められた箇所のうち、A-SG伝熱管1本については、管板部付近に管軸方向に沿った非貫通の内面きずを示す信号指示を確認し、A-SG伝熱管の残り1本およびB-SG伝熱管の1本については、いずれも伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。</p>	SG	A	B	C	合計	検査対象本数	3,272	3,247	3,261	9,780
SG	A	B	C	合計							
検査対象本数	3,272	3,247	3,261	9,780							

<p>事 象 の 状 況</p>	<p>また、外面からの減肉とみられる有意な信号指示が認められた箇所を色調図表示^{*9}で分析した結果、管支持板部付近であった。</p> <p>今回有意な信号指示を確認した箇所について、高浜発電所3号機前回（第24回）定期検査におけるECTデータを確認した結果、有意な信号指示は認められなかったことを確認した。</p> <p>なお、有意な信号指示ではないものの、A-SGの伝熱管1本について、管支持板部付近の外面に判定基準未満の微小な信号指示を確認した。</p> <p style="text-align: right;">(単位：本)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>SG</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>合 計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>指示管本数 (微小な信号指示)</td> <td>2 (1)</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>3 (1)</td> </tr> </tbody> </table> <p>A-SG 第四管支持板 X9, Y22：減肉率 約5.7% 管板部 X9, Y2：管軸方向に沿った非貫通の内面きず (第三管支持板 X51, Y8：判定基準未満の微小な信号指示)</p> <p>B-SG 第二管支持板 X35, Y32：減肉率 約4.1%</p> <p>^{*7} 一般社団法人日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格(2012年版/2013年追補/2014年追補) JSME S NA1-2012/2013/2014 SG伝熱管に対する判定基準に従う。 ^{*8} 渦電流変化の電気信号を図で表したもの(水平成分および垂直成分を同一画面に表示)。 ^{*9} 24組分のコイルのチャートを平面状に並べ、信号振幅に応じて色調として表示させたもの。伝熱管全長についての信号指示の大きさや位置等の分析に用いる表示方法。</p>	SG	A	B	C	合 計	指示管本数 (微小な信号指示)	2 (1)	1	0	3 (1)
SG	A	B	C	合 計							
指示管本数 (微小な信号指示)	2 (1)	1	0	3 (1)							
<p>事 象 の 原 因</p>	<p>1. 原因調査 内面きずおよび外面減肉を示す信号指示があった伝熱管の原因調査を実施した。</p> <p>(1) 内面きず</p> <p>a. 信号指示の状況 色調図表示で分析した結果、伝熱管高温側管板部をローラ拡管している上端部^{*10}(2.2ピッチ)に有意な信号指示があることを確認した。 また、リサーチ表示(信号表示)並びに鳥瞰図表示^{*11}で分析した結果、いずれも伝熱管内面の軸方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。 なお、今回の定期検査までのECTで、当該管には有意な信号指示が認められていないことを確認した。</p> <p>^{*10} 管板の穴に伝熱管を挿入し、伝熱管の内面から高い圧力(水圧)で拡管した後に、管板下部から上端部に向かって機械式ローラで伝熱管を押し広げて伝熱管と管板を圧着した最終ピッチ部。 ^{*11} 信号の波形を3次元的に表したもので、信号の分布(イメージ)の詳細分析に用いる表示方法。</p> <p>b. 製造履歴調査 建設時の製造記録を調査した結果、問題となる記録がないことを確認した。また、SGの製造手順について聞き取り調査を行った結果、管板に伝熱管を通すための穴を加工した後に内面を目視で検査しているが、きずが認められた場合には専用の工具で手入れを行うことを確認した。 その後、伝熱管を管板の穴へ挿入し、伝熱管の内面から高い水圧をかけて拡管した後に、仕上げとして機械式ローラで伝熱管を更に拡管(2.2ステップ)し、伝熱管を管板に密着固定させる手順で製造されていることを確認した。</p> <p>c. 運転履歴調査 (a) 一次冷却材温度、圧力 運転開始以降、第25回定期検査開始までの間、一次冷却材温度・圧力変化の調査を行った結果、過大な応力を発生させる異常な温度・圧力の変化がないことを確認した。</p> <p>(b) 放射線監視装置 第25サイクルにおける各放射線監視装置指示値の調査を行った結果、各指示値に有意な変化はなく、SGの1次側から2次側への一次冷却材の漏えいがないことを確認した。</p>										

事 象 の 原 因

(c) 一次冷却材の水質

運転開始以降、第25回定期検査開始までの間、一次冷却材中のpH、電気伝導率、塩素イオン、溶存酸素、溶存水素の調査を行った結果、各データに有意な変化はなく基準値の範囲内で推移していたことを確認した。

d. 材料調査

当該部分における製造時のミルシートを調査した結果、材料の成分はSG製造メーカーの仕様どおりであり、伝熱管はインコネルTT600^{*12}製であることを確認した。

^{*12} ニッケルをベースとし、鉄、クロム等を含有するニッケル基合金の商標名。TTは特殊熱処理。

e. 設計図書調査

工事計画認可申請書の強度計算書を調査した結果、延性割れ^{*13}、疲労割れ^{*14}に対して、設計上考慮されていることを確認した。

^{*13} 材料に過大な応力がかかった時に発生する割れ（破壊）。

^{*14} 材料に応力が継続的に、あるいは繰り返しかかり強度が低下した時に発生する割れ。

f. 過去の知見調査

SGの伝熱管内面の損傷モードについて、過去の知見等の調査を実施した。

(a) 粒界腐食割れ^{*15}、ピitting^{*16}について

一次冷却材環境下では塩素イオン、溶存水素、溶存酸素が適切な基準値に保たれていれば、伝熱管内では沸騰による不純物濃縮が起こることはなく、かつ還元性雰囲気を持てるため、粒界腐食割れ、ピittingは発生しないことを確認した。

^{*15} 金属の結晶粒の境目（粒界）に沿って進展する腐食。

^{*16} 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。

(b) 局所変形について

局所変形の場合、ECTのリサーチ表示で位相角が0°となり、リサーチ波形の巻きも大きくなるが、今回のECT信号指示は内面さずの特徴を示す位相角を有しており、リサーチ波形に巻きが認められないことから、局所変形による信号指示でないことを確認した。

(c) エロージョン^{*17}について

SGの伝熱管材料にエロージョンが発生する場合の限界流速は非常に速い（約70m/s以上）が、これに対して当該部分の流速は十分遅い（平均約6m/s）ことから、エロージョンは発生しないことを確認した。また、伝熱管内は流体が衝突する形状でないことを確認した。

^{*17} 流体が金属表面に衝突することで生じる機械的な衝突力で材料が損傷する現象。

(d) 応力腐食割れ^{*18}について（高浜発電所の経験）

ア. 抜管調査結果

高浜4号機の第11回定期検査（平成11年4月～平成11年7月）時におけるSG伝熱管のECTで、高温側管板部のローラ抜管上端部に有意な信号指示が認められ、当該部位の抜管調査を行った結果、有意な信号指示は伝熱管内面を起点とした1次側からと考えられる軸方向に沿った粒界割れであった。その原因は、インコネルTT600製の伝熱管が高温の1次冷却材中で応力腐食割れ（以下「PWSCC」という。）の感受性を有しており、伝熱管のローラ抜管の際に局所的に生じた引張り残留応力^{*19}と運転中内圧が相まったことによりPWSCCが発生したと推定している。

また、高浜発電所3号機の第12回定期検査（平成12年2月～平成12年4月）時に、高浜発電所4号機の第11回定期検査と同じ部位に有意な信号指示が認められ、当該部位の抜管調査を行った結果、高浜発電所4号機第11回定期検査時の抜管調査と同様の結果を得ている。

^{*18} 1次系水質環境下で発生する加圧水型原子力発電所特有の応力腐食割れ（材料、環境、応力の3要素が重なって発生する割れ）。

^{*19} 伝熱管を管板と接合させた後に、伝熱管に外力が作用していないにも関わらず材料内に生じる単位面積当たりの内力。

事 象 の 原 因

イ. 抜管調査以降のECT結果

高浜発電所3号機および高浜発電所4号機では、抜管調査以降の以下の定期検査時におけるSG伝熱管のECTで、同様の箇所（高温側管板部）に軸方向のきずの特徴を有した有意な信号指示が認められているが、発生要因の調査結果では、伝熱管のローラ拡管の際に局所的に生じた引張り残留応力と運転中内圧が相まったことによりPWSCCが発生したものと推定している。

高浜発電所3号機

- ・第13回定期検査（平成13年6月～平成13年8月）
- ・第21回定期検査（平成24年2月～平成28年2月）
- ・第22回定期検査（平成28年12月～平成29年6月）
- ・第23回定期検査（平成30年8月～平成30年11月）

高浜発電所4号機

- ・第12回定期検査（平成12年9月～平成12年11月）
- ・第13回定期検査（平成14年1月～平成14年3月）
- ・第14回定期検査（平成15年4月～平成15年6月）
- ・第18回定期検査（平成20年8月～平成20年12月）
- ・第19回定期検査（平成22年2月～平成22年5月）
- ・第20回定期検査（平成23年7月～平成29年5月）
- ・第21回定期検査（平成30年5月～平成30年9月）

(e) 過去の知見調査のまとめ

インコネルTT600製のSG伝熱管のECT結果で、高温側管板部のローラ拡管部において認められた内面の軸方向に沿ったきずの特徴を有した信号指示は、伝熱管のローラ拡管の際に局所的に生じた引張り残留応力と運転中内圧が相まったことにより発生したPWSCCと推定されている。

g. ショットピーニング*20の効果

(a) これまでの知見により、SG伝熱管内面のショットピーニングがPWSCCに対する予防保全策として有効であることが確認されていることから、高浜発電所3号機の伝熱管については、第13回定期検査時（平成13年6月～平成13年8月）にショットピーニングを施工した。

インコネルTT600製のSG伝熱管のECT結果で、高温側管板部のローラ拡管部において認められた内面の軸方向に沿ったきずの特徴を有した信号指示は、伝熱管のローラ拡管の際に局所的に生じた引張り残留応力と運転中内圧が相まったことにより発生したPWSCCと推定されている。

*20 伝熱管内面にビーズ(金属微粒子)を打ち付けることにより材料表面の残留応力を改善する手法。

(b) 高浜発電所3号機では第13回定期検査時（平成13年6月～平成13年8月）にSG伝熱管内面のショットピーニングを施工した後は、SG伝熱管のECTで有意な信号指示は認められていなかったが、第21回定期検査時（平成24年2月～平成28年2月）に1本、第22回定期検査時（平成28年12月～平成29年6月）に1本の伝熱管に有意な信号指示を認めている。ショットピーニング施工以降に、伝熱管のECTで有意な信号指示を検出した理由は以下のとおりと考えられる。

伝熱管の内面に施工したショットピーニングは、圧縮応力を約0.2mmの深さまで付与することが可能である。一方、ECTでは約0.5mm以上の深さのPWSCCによる信号指示を検出することが可能である。

よって、ショットピーニングを施工した時点で、圧縮応力の付与されない範囲にECTにより信号指示の検出が不可能なPWSCCが既に存在した場合は、ショットピーニング施工後もPWSCCが進展し、顕在化する可能性があることから、伝熱管のECTで確認された有意な信号指示もそれに該当すると考えられる。

(2) 外面減肉

a. 信号指示の状況

リサーチ表示(信号表示)で分析した結果、A-SG伝熱管1本およびB-SG伝熱管1本について、いずれも伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

事 象 の 原 因

また、外面からの減肉とみられる有意な信号指示が認められた箇所を色調図表示で分析した結果、管支持板部付近であった。

今回有意な信号指示を確認した箇所について、高浜発電所3号機前回（第24回）定期検査におけるECTデータを確認した結果、有意な信号指示は認められなかったことを確認した。

なお、有意な信号指示ではないものの、A-SGの伝熱管1本について、管支持板部付近の外面に判定基準未満の微小な信号指示を確認した。

b. 高浜発電所3, 4号機におけるSG伝熱管外面の損傷事象の経緯

高浜発電所3号機では、前回（第24回）および前々回（第23回）の定期検査において、SGの伝熱管に外面からの減肉信号指示が認められており、原因は、管支持板下面に留まった異物と伝熱管が繰り返し接触したことにより摩耗減肉が発生したものと推定した。

その後、異物対策を実施した高浜発電所4号機の第23回定期検査においても、外面からの減肉信号指示（A-SGの伝熱管1本、C-SGの伝熱管3本）が認められたため、小型カメラによりSG器内を調査した結果、減肉箇所にスケール^{*21}の接触を確認するとともに、このスケールの外観観察の結果、伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位に接触痕および光沢を確認した。

このため、高浜発電所4号機の第23回定期検査においてSG器内のスケールの性状等の調査や回収スケールによる摩耗試験などを実施した結果、SG伝熱管が減肉した原因は、伝熱管表面からはく離れた稠密なスケールによるものと推定した。

これらのことから、2018年8月以降、高浜発電所3号機および高浜発電所4号機の定期検査において発生したSG伝熱管の外面減肉の原因が、スケールであった可能性が否定できないため、対策として、高浜発電所3号機の第24回定期検査においても、SG器内の薬品洗浄^{*22}を実施し、その後に回収したスケールが脆弱化していることを確認した。

^{*21} 2次系配管等に含まれる鉄イオンや鉄の微粒子が、給水系統によってSG器内に流れ集まって生成されたもの。伝熱管で生成されたものをスケール（フレーク状（板状）に剥がれ落ちたものを含む）という。

^{*22} 希薄なエチレンジアミン四酢酸（Ethylene Diamine Tetra acetic Acid: EDTA）によりスケール中の鉄を一部溶解し、スケールの粗密化によって表面積を拡大することでSG伝熱性能の回復を図る手法。

c. SG伝熱管内面（1次側）からの損傷

ECTの信号指示により、伝熱管内面（1次側）にきずがないことを確認した。

d. SG伝熱管外面（2次側）からの損傷

(a) デンティン^{*23}

ECTの信号指示を確認した結果、デンティンではないと考える。

^{*23} 管支持板の腐食およ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をいう。

(b) 粒界腐食割れ（IGA）

過去にSG2次側環境においてアルカリ環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、粒界腐食割れが発生した実績があるが、高浜発電所3号機のようなアンモニアとヒドラジンによるAVT（All Volatile Treatment）処理^{*24}を実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考える。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉であると考えことから、粒界腐食割れの可能性はないと考える。

^{*24} 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。

(c) ピッティング

過去にSG2次側環境において海水リーク等による塩化物環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、ピッティングが発生した実績があるが、高浜発電所3号機のような塩素濃度が十分低く管理され、かつ、アンモニアとヒドラジンによるAVT処理を実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考える。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉であると考えことから、ピッティングの可能性はないと考える。

事 象 の 原 因

(d) リン酸減肉

過去の2次系水処理において、リン酸を使用していたプラントでリン酸による減肉が発生した実績があるが、高浜発電所3号機のようなアンモニアとヒドラジンによるAVT処理を実施しているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考える。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉であると考えことから、リン酸減肉の可能性はないと考える。

(e) 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、疲労損傷は発生しないと考える。

(f) エロージョン

当該部流速は約3 m/sであり、かつ、インコネルTT600は耐エロージョン性が高いことから（室温条件では約70 m/s以上がエロージョン発生領域）、エロージョンの発生はないと考える。

なお、室温条件にて評価を行っているが、温度によるエロージョンへの影響は小さく、常温の知見を用いても問題ないことを評価している。

(g) 摩耗減肉

AおよびB-SGの減肉信号を確認した伝熱管について、小型カメラによる目視点検を実施した結果、機械的な影響によるものとみられる減肉を確認したため、以下の確認を実施した。

ア. 減肉伝熱管2次側からの確認結果

(ア) 伝熱管外観観察

小型カメラを用いて、減肉信号を確認した伝熱管の外観観察を実施したところ、以下のとおり摩耗痕とみられる箇所を確認した。

I. A-SG

第四管支持板低温側下面付近（減肉率：約57%）：

周方向約3 mm、軸方向1 mm以下（X9, Y22）

第三管支持板低温側下面付近（減肉率：判定基準未滿）：

周方向約5 mm、軸方向1 mm以下（X51, Y8）

II. B-SG

第二管支持板高温側下面付近（減肉率：約41%）：

周方向約3 mm、軸方向1 mm以下（X35, Y32）

(イ) ECT信号との比較

伝熱管2次側減肉部位における外観観察結果は、ECTにより得られる減肉信号指示と相違ないことを確認した。

イ. 管支持板との接触

(ア) 管支持板ベイ部^{*25}の信号

構造上、伝熱管と管支持板ベイ部は接触しない。また、運転中に伝熱管へねじれを発生させる外力は発生せず、伝熱管と管支持板ベイ部は接触しない。

^{*25} 管支持板に加工されている四ツ葉管穴のうち凹面部。

(イ) 管支持板ランド部^{*26}の信号

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に減肉が生じることになるが、目視点検の結果からは4箇所の管支持板ランド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減肉ではないと考える。

^{*26} 管支持板に加工されている四ツ葉管穴のうち凸面部。

事 象 の 原 因

ウ. SG器外発生物との接触

(ア) 過去事象を踏まえた異物混入対策

美浜発電所3号機の異物混入事象(2000年、2007年)を踏まえた従前の異物混入対策(開口部管理の徹底等)に加え、高浜発電所3号機の第23回定期検査以降の伝熱管減肉事象を踏まえた異物混入対策(機器内部に立ち入る前に、器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する等)については、高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査においても実施していることを確認した。

(イ) SG器内点検

A-SGの減肉信号を確認した伝熱管(X9, Y22)および判定基準未満の微小な減肉信号を確認した伝熱管(X51, Y8)、B-SGの減肉信号を確認した伝熱管(X35, Y32)を小型カメラにて目視点検を実施した結果、信号指示箇所にスケール等の付着物は認められなかったものの、当該伝熱管周辺の管支持板に接触痕を確認した。

また、A-SG器内の管板、流量分配板、第一～第七管支持板の上面の全ての範囲並びに第三、第四管支持板の下面の減肉信号を確認した伝熱管周辺部およびB-SG器内の管板、流量分配板、第一～第七管支持板の上面の全ての範囲並びに第二管支持板の下面の減肉信号を確認した伝熱管周辺部について、小型カメラによる目視点検を実施した結果、全体的にスケールおよびスラッジ*²⁷が残存していることを確認したが、それら以外の異物は確認できなかった。

*²⁷ スケールを形成せず粒子状となり、水中を漂うものや、スケールが砕けて小さくなったものが管支持板上等に堆積したもの。

(ウ) SG器外点検

SGブローダウン系統およびタービンサンプラインの仮設ストレーナの開放点検や弁、配管の内部点検等を実施した結果、スラッジは確認されたが、それ以外の異物は確認できなかった。

以上の調査結果から、SG器内に異物が混入している可能性はない。

エ. SG器内発生物との接触

(ア) SG内部品の脱落調査

SG内部品が脱落し、伝熱管を減肉させる可能性を設計図書により確認したところ、薄片形状として、振止め金具のキー固定板等を内部品として使用している。ただし、これらの内部品は、溶接止めされていること、もしくは、周囲を溶接止めされた構造物に囲まれており、万が一、脱落したとしても周囲の構造物の外には出ないことから、内部品が脱落した可能性はないと考える。

なお、伝熱管を減肉させる薄片形状と異なるものの、SG器内(2次側)の経年劣化事象を起因とする内部品の脱落として、流れ加速型腐食による給水内管裏当金を想定するが、高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査において、当該部のカメラによる目視点検を実施しており、給水内管裏当金の溶接部が全く損傷していなかったことから、脱落した可能性はないと考える。

(イ) スケールによる伝熱管損傷の可能性調査

これまでの経緯を踏まえ、SG伝熱管の外表面減肉の原因は、SG伝熱管から剥離した稠密なスケールの可能性が否定できないため、SG器内のスケール残存状況および回収したスケール調査を実施した。

I. SG器内のスケールの残存状況等の調査

小型カメラを用いて、AおよびB-SGの管板～第七管支持板の上面の調査を行った結果、スケールおよびスラッジが残存していることを確認した。また、C-SGについても管板～第二管支持板の上面の調査を行った結果、AおよびB-SGと同様に、スケールおよびスラッジが残存していることを確認した。

SG器内のスケールの残存状況等の調査に合わせ、伝熱管の外観観察を行った結果、ほぼ全ての伝熱管は全面的にスケールに覆われていた。また、一部の伝熱管は局所的にスケールが剥離した痕跡等も認められた。これらの状況については、高温側と低温側(水平方向)、管支持板間(上下方向)において有意な差は認められなかった。

事 象 の 原 因

II. SGから回収したスケールの性状調査

(I) 各SG内のスケール回収

A-SGの管板、第一～第三管支持板上面、並びにBおよびC-SGの管板、第一管支持板～第二管支持板上面に残存しているスケールのうち、比較的大きなものを選定し、約200個を回収した。また、今後の知見拡充のため、A、BおよびC-SGからスケールを更に約200個回収した。

(II) 回収したスケールの化学成分および形状分析結果

回収したスケールについて、化学成分分析を実施した結果、主成分はマグネタイトであり、SG器内で発生するスラッジと同成分であることを確認した。A-SGの管板、第一～第三管支持板上面、並びにBおよびC-SGの管板、第一管支持板～第二管支持板上面から取り出したスケールは、主に多角型、長尺型に分類され、長さが最大のものは、前者が長さ約17mm、幅約10mm、後者が長さ約47mm、幅約4mmであり、これらのスケールは管支持板の流路穴よりも大きく、運転中に管支持板下面の伝熱管の隙間に留まることが可能な形状であった。また、これらのスケールについては、目視確認の結果、やや湾曲した形状をしており、そのうち各SGから取り出した9個のスケールについて3次元測定器等により計測した結果、直径約22.3～22.6mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管(円筒)の外径(直径22.2mm)に近いことを確認した。

(III) 回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果

スケール120個を対象に断面観察を行った結果、稠密層(密度の高い酸化鉄の層)が主体のスケールを42個確認した。

また、スケール50個(約10mm×5mm以上)を対象に摩耗試験を行い、伝熱管とスケールの摩耗体積比^{*28}を調査した結果、伝熱管の減肉量がスケール摩減量よりも大きくなるスケールを1個確認した。

^{*28} 摩耗試験における伝熱管の減肉量とスケールの摩減量の体積比

e. 損傷以外のECT信号指示

局所的なスケールの剥離は、減肉と識別できることから、今回の信号指示は、スケールの剥離ではないと考える。

(3) 減肉メカニズムの検討

これまでの原因調査の結果、薬品洗浄後においても、稠密なスケールがSG器内に残存し、伝熱管の外表面減肉を発生させた可能性が高いことから、減肉を発生させるスケールの生成・剥離メカニズム、SG器内のスケールの挙動およびスケールが伝熱管を損傷させる可能性について、以下のとおり調査および検討を実施した。

a. スケールの生成メカニズム

(a) スケールの生成および性状の調査

これまでの水化学に関する知見から、2次系構成機器の流れ加速型腐食等で生じる鉄イオンや鉄の微粒子が、給水とともにSG2次側へ持ち込まれ、次の2つの現象が発生することでSG伝熱管表面にスケールとして付着することがわかっている。

ア. 析出付着

給水とともにSG2次側へ持ち込まれる鉄イオンは、SG2次側温度域においては、高温ほど溶解度が小さくなるため、より高温となる伝熱管下部において、溶解度の減少幅が大きく、鉄イオンがマグネタイトとして析出付着する。そのため、伝熱管の下部に付着するスケールは稠密で薄い傾向がある。

イ. 蒸発残渣

伝熱管の上部では、伝熱管表面と給水の温度差が伝熱管の下部に比べて小さく沸騰現象が顕著であることから、鉄イオンの析出付着よりも、鉄の微粒子が蒸発残渣として伝熱管表面に残留、堆積する現象が主体である。そのため、伝熱管の上部に付着するスケールは、粗密^{*28}な傾向があり、脆く摩耗に対する耐性も低いと考える。また、蒸発残渣によって残留、堆積する鉄の微粒子の方が析出付着す

る鉄イオンに比べて粒径が大きいことから、伝熱管の上部で生成するスケールの方が伝熱管の下部より粗密で厚い傾向にある。

*²⁸ スケールを形成せず粒子状となり、水中を漂うものや、スケールが砕けて小さくなったものが管支持板上等に堆積したものをスラッジという。

(b) スケール性状の実機調査

平成8年に高浜発電所3号機第9回定期検査で健全性確認を目的に伝熱管の抜管調査を実施した際、伝熱管各部位（SG上方からUベンド部、第六から第五管支持板の間、第四から第三管支持板の間、第三から第二管支持板の間、第二から第一管支持板の間）のスケールについて、断面マイクロ観察を実施している。その結果、伝熱管の上部のスケールほど粗密で厚く、伝熱管の下部ほど稠密で薄いことを確認した。

また、令和2年に高浜発電所3号機第24回定期検査および高浜発電所4号機第23回定期検査で、伝熱管の上部（第七管支持板上）および伝熱管の下部（第二から第一管支持板の間）からスケールを回収し、性状を確認した結果、伝熱管の上部（第七管支持板上）のスケールは粗密で厚く、伝熱管の下部（第二から第一管支持板の間）では稠密で薄いことを確認した。

以上の調査結果から、稠密なスケールは伝熱管の下部で発生し、粗密なスケールは伝熱管の上部で発生することを確認した。

(c) 2次系の水質管理調査

スケールは、給水とともに持ち込まれる鉄イオンおよび鉄の微粒子により、経年的に厚さが増加すると考えられることから、以下のとおり厚さの増加に関する調査を実施した。

ア. 水処理履歴

SG給水における水質管理の項目として、電気伝導率、溶存酸素濃度、アンモニア濃度およびヒドラジン濃度等がある。これらの過去の水質管理実績を確認したところ、いずれも基準値を満足しており問題はなかった。

SG器内への鉄の持ち込みに関係する項目はpHであり、2次系構成機器の流れ加速型腐食等による給水中への鉄の放出を抑制するためにはアルカリ側に水質管理を行う必要がある。そのため、これまでpH上昇によりSGへの鉄の持ち込み量低減を図るべく、AVT処理(pH9.2)、ETA*29処理(pH9.4~9.5)、高ETA処理(pH9.8)、高アンモニア処理(pH9.8)のようにpHの高い処理方法へと改善を図ってきた。

各水処理における給水中の鉄含有量は実測データ次のとおりであり、pHの低い水処理方法ほど給水中の鉄含有量が多いことが分かっている。

*²⁹ エタノールアミン。

イ. 給水中の鉄含有量

上記水処理方法での給水中の鉄含有量は次のとおりである。

水処理方法	給水中の鉄含有量
AVT処理	約5~10ppb
ETA処理	約3ppb
高ETA処理	約1ppb
高アンモニア処理	約1ppb

ウ. 運転時間

上記水処理方法での運転時間は次のとおりである。

水処理方法	運転時間
AVT処理	約9.9万時間
ETA処理	約8.3万時間
高ETA処理	約2.0万時間
高アンモニア処理	約3.0万時間

事 象 の 原 因

事 象 の 原 因

エ. 鉄の持ち込み量

上記水処理方法での運転時間における鉄の持ち込み量と、合計の鉄の持ち込み量を算出した結果は次のとおりである。

水処理方法	鉄の持ち込み量
A V T 処理	約 1, 7 0 0 k g
E T A 処理	約 7 5 0 k g
高 E T A 処理	約 7 0 k g
高アンモニア処理	約 1 3 0 k g
合計	約 2, 6 5 0 k g

以上の調査結果から、水処理方法に応じた量の鉄が経年的に持ち込まれていることを確認した。

(d) スケール厚さに関する実機調査

スケール厚さの傾向を推定するパラメータとして、主蒸気圧力や S G 伝熱抵抗係数^{*30}があり、その変化量を確認した結果、いずれも運転時間の経過とともに圧力低下や係数増加が認められ、スケール厚さは経年的に増加するものと推定される。

また、高浜発電所 3 号機第 8 回（平成 7 年）および第 1 4 回（平成 1 4 年）定期検査において、スケール厚さを把握するため、周波数 3 k H z の E C T を実施した結果、第 8 回から第 1 4 回定期検査までの 6 サイクルで増加したスケール厚さは、数十 μ m ~ 1 0 0 μ m 程度であった。

^{*30} 伝熱管の外表面に不純物が付着するなどにより、熱伝達特性を低下させる度合いを示す指標。

以上の結果から、スケール厚さは経年的に増加していくものであることを確認した。また、現在では高 E T A 処理や高アンモニア処理によって給水の p H を高く維持することで、1 サイクルあたりの鉄の持ち込み量は数十 k g / S G 程度に抑えられていることを確認した。

b. スケールの剥離

(a) 剥離メカニズムの検討

伝熱管表面に生成したスケールが主に剥離するのは、起動停止時の伝熱管の熱伸びと収縮によるものと推定される。具体的には次のア. ~ ウ. のとおりであり、スケールはプラント停止時の伝熱管の熱収縮に追従できずにフレック状（板状）に剥離したものと推定される。

ア. プラント起動時の伝熱管の熱伸びに伴い伝熱管表面のスケールに割れが生じる。

イ. プラント運転中に割れの隙間が新たに生成したスケールで埋まる。

ウ. 隙間が埋まったため、プラント停止時の熱収縮に追従できずスケールは剥離する。

また、プラント起動時および運転中においても、停止時に剥離しなかったスケールが、伝熱管の振動や S G 器内の流れの影響により剥離している可能性も否定できない。

(b) 長期停止の影響調査

東日本大震災以降、2 0 1 2 年 2 月に定期検査を開始し、その後、2 0 1 6 年 2 月に再稼働するまでの約 4 年間、プラントは長期停止状態となっていた。その間、S G 器内は腐食を防止するためヒドラジン水による満水保管状態としていたことから、この状態がスケール剥離挙動に与える影響を調査するため、スラッジ（粒の観察を容易にするため粉末状スラッジを使用）を対象にヒドラジン水による浸漬試験を 1 か月間実施した。その結果、時間の経過とともにスケールを構成する鉄粒子同士が合わさり粒径が大きくなることを確認した。これは、ヒドラジンの還元作用でスケールの鉄が一部溶解、再析出を繰り返しており、その結果、粒径が大きくなったものと推定される。

粒径が大きくなると、伝熱管との接触面積が減少し、剥離が促進される可能性がある。スケールの剥離量が増えるとスラッジランニングでのスケール回収量が大きくなる可能性があるため、高浜発電所 3 号機の長期停止前後の回収量を調査した結

事 象 の 原 因

果、長期停止前はSG 3基から約13kgのスケール等を回収したが、長期停止後の前回定期検査時には約20kgと増加していることを確認した。

以上により、長期停止後に伴い、スケールの粒径が大きくなることで伝熱管との接触面積が減少し、プラントの運転等に伴い伝熱管からスケールが多数剥離したと推定される。

c. SG器内挙動の推定およびスケールと伝熱管の接触状態の再現性確認

SG器内調査およびスケール分析結果から、今回の外面減肉はスケールによる摩耗の可能性が高いことから、剥離したスケールがSG器内で第二、第三および第四管支持板下面へ到達するまでの挙動を推定するとともに、SG 2次側の流況モックアップ試験により、実機を模擬した二相流の条件においても、推定した伝熱管へのスケールの接触状態が再現するかの確認を実施した。なお、評価に当たっては、SG器内で確認されているスケールを参考に形状を想定して評価した。

(a) 器内のスケール挙動検討

運転中のSG 2次側器内の流況下では流体抗力がスケールの落下力を上回ることから、スケールは管群内の上昇流に乗って流量分配板、各管支持板フロースロット部、および管支持板と管群外筒の隙間を通過し、減肉箇所へ到達したことが考えられる。

(b) SG 2次側の流況モックアップ試験

SG 2次側の流況を再現するモックアップ試験結果から、スケールの接触状態が実機を模擬した二相流の条件において再現できることを確認した。

d. スケールが伝熱管を損傷させる可能性の調査

(a) 高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査における薬品洗浄の実施結果

ア. 薬品洗浄効果

薬品洗浄時の条件を確認した結果、温度管理や薬品濃度管理が計画どおり実施されていたことを確認し、薬品洗浄によって、SG 1基あたり、約670kgの鉄分を除去できていたことを確認した。

また、定期検査後の運転実績を確認した結果、主蒸気圧力が向上し、SG伝熱抵抗係数が低下したことを確認した。これは、薬品洗浄の効果により伝熱管に付着したスケールが減少し、熱伝達率が改善したものと考えられる。

イ. スラッジ影響を考慮した薬品洗浄効果の確認試験結果

高浜発電所3号機の前回(第24回)定期検査において、スケールの脆弱化を目的として薬品洗浄を実施したが、今回(第25回)定期検査にて器内から回収したスケールを分析したところ、稠密層厚さが0.1mmを超えるスケールが確認されたことから、薬品洗浄効果の確認試験を行った。

確認試験は実機薬品洗浄時のSG器内環境(薬品濃度、温度等)を模擬した水槽中で実施した。また、SG器内における薬品との接液環境を模擬するため、水槽中にはスケールおよびスラッジに加え、SG器内構成部品と同材料の試験片を設置し、スケールおよびスラッジの比率やスケール周辺のスラッジ量を変化させた3パターンでの試験を実施した。その結果、スケール周辺のスラッジ量が多くなった場合は、薬品洗浄によるスケールの脆弱化効果が低減することを確認した。

以上により、高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査における薬品洗浄により鉄分が一定量除去されており、SG器内のスケールはおおむね脆弱化していたと推定されるが、SG器内にスケールとスラッジが混在していたことから、一部のスケール脆弱化効果が低減し、前回薬品洗浄後においても脆弱化できなかったスケールが一部存在していたものと推定される。

なお、高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査において薬品洗浄後にスケールのサンプル調査を実施し、脆弱化していたことを確認していたが、今回のサンプル調査では伝熱管に有意な減肉を発生させる可能性は低いものの稠密層が厚いスケールが比較的多く見つかった要因としては、前回の薬品洗浄により脆弱化されたスケールの多くはスラッジになったためと推定される。

事 象 の 原 因

(b) 摩耗形態の推定

スケールとの接触で伝熱管が摩耗する場合、スケール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るため、次のとおり各ケースで想定されるワークレート^{*31}の比較を実施した。

^{*31} 摩耗体積を評価する一般式で用いられる摩耗を生じさせる力で、押付力と摺動速度の積で表現される。

ア. スケール振動のケース

本ケースではスケールの端部が拘束された片持ち梁の状態を想定する。この想定に基づきワークレートを計算すると、スケールでは流体力を受ける面積が小さいため、有意な減肉が生じるワークレートは発生しないことを確認した。

イ. 伝熱管振動のケース

本ケースでは、スケールが管支持板下面で保持され、接触する伝熱管のランダム振動^{*32}により伝熱管自身に減肉が発生したことを想定する。管支持板部の伝熱管の振幅は、伝熱管と管支持板BEC穴ランド部の隙間に制限されるため、隙間が確保され振幅が大きくなる伝熱管においてスケールとの接触により減肉が生じるものと推定される。本推定に基づきワークレートを試算すると、スケール振動のケースに比べて十分大きなワークレートが得られることを確認した。

^{*32} 蒸気と水が伝熱管に衝突する力と、伝熱管の周りに生じる流れの乱れによって伝熱管が振動する現象。

上記ア.、イ. から、発生した減肉は伝熱管振動によるものと推定されるため、以下では伝熱管振動により減肉が発生したものと想定して検証を実施した。

なお、伝熱管振動のケースでは、最大減肉深さは伝熱管の振動振幅に制限されるため、減肉の進展により伝熱管を貫通することはない。

(c) 減肉形状の再現性確認試験

推定したスケールと伝熱管の接触状態および摩耗形態で実機の減肉形状が再現できるか確認するため、次のとおり、減肉試験を実施した。また、減肉試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体のECT信号を取得し、実機のECT信号と比較した。

ア. 減肉試験

スケールの接触状態を推定した上で、減肉の発生および減肉形状の観察を容易にするため石膏で製作した2倍スケールの模擬伝熱管を振動させ、模擬スケールの角部または一辺を接触させることにより、減肉を発生させた。

イ. ECTモックアップ試験

上記ア. で得られた減肉形状と同等の形状を有する人工欠陥を伝熱管モックアップ試験体に加え、そのECT信号を取得し、実機のECT信号と比較した結果、両者は整合することを確認した。

(d) ワークレートによる摩耗体積評価

上記(b)および(c)で推定した接触状態および摩耗形態を踏まえ、流動振動解析により算出したスケールと伝熱管の摩耗のワークレートを用いて、1サイクルの運転時間で発生する摩耗体積を計算した。算出した摩耗体積と、上記(c)で実機減肉形状と整合することを確認した人工欠陥の摩耗体積を比較した結果、両者は整合することから、今回認められた外面減肉は、スケールとの接触により1サイクルで発生した可能性があることを確認した。

e. 高浜発電所3号機および4号機の特異性

(a) 当社他プラントとの鉄持込み量、薬品洗浄実績、スケール回収量の比較

鉄の持込み量について、比較のため当社他プラントの調査を実施した。また、大飯発電所3号機および4号機では薬品洗浄を実施しており、スケール性状に影響を与えている可能性があることから、その実績を確認した。さらに、スケールの厚さ増加や長期停止による剥離挙動の影響は、スケール回収量に現れている可能性があることから、あわせて比較調査を実施した。

事 象 の 原 因

ア. 鉄持込み量および薬品洗浄実績

各プラントの鉄持込み量および薬品洗浄実績を調査した結果は表1のとおりであり、鉄持込み量は高浜発電所3号機および4号機が最も多く、続いて大飯発電所3号機および4号機であり、SG取替を実施している美浜発電所3号機並びに高浜発電所1号機および2号機が少ないことを確認した。

以上から、鉄持込み量が最大の高浜発電所3号機および4号機のスケールが、最も稠密層が厚く成長しているものと推定した。

<表1：各プラントの鉄持込み量および薬品洗浄実績>

	高浜3	高浜4	大飯3	大飯4	美浜3	高浜1	高浜2
運転時間*33 (万時間)	23.2	22.2	17.0	18.2	9.3	10.9	12.5
鉄持込み量 (kg)	2,650	2,490	1,850	1,970	810	680	940
薬品洗浄 実績回数	1回	1回	2回	1回	—	—	—
薬品洗浄時点 の運転時間 (万時間)	22.3 (第24回)	22.2 (第23回)	16.1 (第17回) 17.0 (第18回)	16.2 (第16回)	—	—	—

*33 美浜発電所3号機、高浜発電所1号機および高浜発電所2号機については、蒸気発生器取替以降の運転時間を示す。なお、運転時間については、現時点で直近の定期検査解列時点とする。

イ. スケール回収量

スケール回収量*34を確認した結果、高浜発電所3号機および4号機では、いずれも長期停止後にスケール回収量が増加していた。

一方、大飯発電所3号機および4号機では長期停止前後でスケール回収量に変化が認められなかった。

これにより、長期停止に伴うスケール剥離の増加は、スケールが厚く成長したSGほど顕著であると推定される。

*34 スラッジランシングで回収したスラッジおよびスケールのうち、スケールの回収量を表2に示す。

<表2：スケール回収量（長期停止前後比較）>

プラント	長期停止前 (kg)	長期停止後 (kg)		
		0.41 (第22回)	0.24 (第23回)	0.36 (第24回)
高浜3号機	0.01未満 (第21回)	0.41 (第22回)	0.24 (第23回)	0.36 (第24回)
高浜4号機	0.01未満 (第20回)	12.37 (第21回)	8.24 (第22回)	6.08 (第23回)
大飯3号機	0.01未満 (第16回)	0.01未満 (第17回)	0.01未満 (第18回)	—
大飯4号機	0.01未満 (第15回)	0.01未満 (第16回)	0.01未満 (第17回)	—

(b) 当社プラントとの実機スケール比較

スケールの稠密層厚さが鉄持込み量と相関するかを検証するため、当社他プラントの伝熱管下部から実機スケールを採取し、断面マイクロ観察を実施した結果を確認した。採取対象プラントは、高浜発電所3号機とスケール性状が同等であることを確認している高浜発電所4号機、大飯発電所3号機および4号機からは薬品洗浄回数の少ない大飯発電所4号機、蒸気発生器取替プラント（美浜発電所3号機、高浜発電所1号機および2号機）からは、最も鉄の持込み量の大きい高浜発電所2号機を選定した。

結果は表3のとおりであり、鉄の持込み量が大きいプラントほどスケールの稠密層（空隙率5%以下）は厚く成長していることを確認した。

＜表3：実機スケール観察結果＞

回収場所	高浜4号機 鉄持込み量： 2,490kg	大飯4号機 鉄持込み量： 1,950kg	高浜2号機 鉄持込み量： 940kg	備考
第二管支持板 ～ 管板間	空隙率5%以下の稠密層厚さ： 最大0.18mm	空隙率5%以下の稠密層厚さ： 最大0.04mm	空隙率5%以下の稠密層厚さ：1mm (伝熱管へのスケール付着がごく軽微であり、採取できるほどの厚みなし)	稠密層厚さは鉄の持込み量と関連

なお、大飯発電所4号機では第16回定期検査に薬品洗浄を適用していることから、大飯発電所4号機のスケールでは薬品洗浄1回分の粗密化効果の影響もあるものと推定される。

(c) 伝熱管の摩耗試験結果の比較

上記の調査結果を踏まえ、当社他プラントの中では比較的稠密層が厚い大飯発電所3号機および4号機で採取したスケールについて摩耗試験を実施した。大飯発電所3号機および4号機のスケールは、試験開始後にスケールが欠損するか、スケールの方が早く摩滅するという結果が得られ、伝熱管とスケールの摩耗体積比が最も大きいものでも1：15であった。このため、空隙率5%以下であっても稠密層が薄い場合、有意な減肉を与える可能性は低いことを確認した。

有意な減肉を与える稠密層厚さを検討するため、高浜発電所3号機および4号機から採取した実機スケールを摩耗試験した結果、空隙率5%以下の稠密層厚さ0.1mm未満では有意な摩耗減肉は与えられないことが分かった。

以上により、有意な減肉を発生させる可能性があるのは、空隙率5%以下の稠密層の厚さが0.1mm以上のスケールであると考えられる。

事象の原因

f. スケールにより減肉した国内外事例調査

国内外で報告されている外面減肉事象を調査した結果、国内、海外共にスケールが原因とされた事例は認められなかった。

なお、国内外において、SGの運転時間が高浜発電所3号機および4号機で外面減肉事象が生じた運転時間以上であり、かつ薬品洗浄の実績が認められず、高浜発電所3号機および4号機と同等の伝熱管支持構造を有するプラントを調査した結果、7プラントのみであることを確認した。

2. 伝熱管の健全性

(1) 減肉伝熱管の健全性

減肉した伝熱管の強度、耐震性について以下のように評価した。

a. 強度

「蒸気発生器信頼性実証試験」((財)発電用熱機関協会、昭和50年度～昭和55年度)では、局部減肉を有する伝熱管の内圧強度評価手法を確立するため、内圧による高温破壊試験を実施しており、その試験結果から運転中および事故時を包絡する内外差圧による伝熱管の破断圧力を算出した。

得られた伝熱管の破断圧力は、通常運転時および事故時の最大内外差圧に比べ、十分余裕があることから、減肉した伝熱管が通常運転時および事故時の内外差圧により破断することはない。

b. 耐震性

基準地震動S_sによる地震力および伝熱管全長モデルから、伝熱管直管部(管支持板部)に作用する力(部材力)を算出した。

保守的に一様外面減肉と仮定、伝熱管の断面積を減じた上で部材力から発生応力および疲労累積係数を算出し、許容値に対する余裕を確認した結果、十分な余裕があることから、減肉した伝熱管が地震により損壊することはない。

(2) 隣接伝熱管の健全性

今回減肉が見つかった伝熱管に隣接した伝熱管についても念のため健全性を確認した結果、有意な減肉信号指示がないことを確認した。

事象の原因	<p>3. 推定原因</p> <p>(1) 内面きず A-SG伝熱管のECTで認められた内面きずは、過去に経験した信号指示と同様に高温側管板部のローラ拡管上端部の位置で、伝熱管内面の軸方向に沿ったきずであることから、SG製造時に高温側の管板部で伝熱管を拡管する際、伝熱管内面で局所的に発生した引張り残留応力と運転時の内圧および高温の一次冷却材環境が相まって、伝熱管内面からPWSCCが進展したものと推定した。</p> <p>(2) 外面減肉 A-SG伝熱管およびB-SG伝熱管で認められた外面減肉は、これまでの運転に伴い、伝熱管表面に生成された稠密なスケールが前回定期検査時の薬品洗浄の後もSG器内に残存し、プラント運転中に管支持板下面に留まり、そのスケールに伝熱管が繰り返して接触したことで摩耗減肉が発生した可能性が高いと推定した。</p> <p>4. 薬品洗浄の条件設定 SGの器内構成部品に大きな影響を及ぼさない範囲で、SG器内のスケールの脆弱化を図る薬品洗浄条件について検討した結果、薬品濃度として3%、洗浄回数を2回とする。また、第四管支持板の下面で減肉が確認されたことも踏まえ、洗浄範囲を1回目、2回目ともにSG伝熱管全域とする。 なお、薬品洗浄の効果を高めるため、薬品洗浄実施前に小型高圧洗浄装置を用いて管支持板上も含めたSG器内の洗浄を行うことにより、SG器内に残存するスケールおよびスラッジをできる限り除去することとする。</p>
保護装置の種類及び動作状況	該当せず
放射能の影響	なし
被害者	なし
他に及ぼした障害	なし
復旧の日時	2022年7月下旬（発電機並列予定）
再発防止対策	<p>1. 内面きず 内面きずが認められたA-SG伝熱管1本について、高温側および低温側のSG管板部で施栓し、供用外とする。</p> <p>2. 外面減肉</p> <p>(1) 減肉伝熱管の施栓 外面減肉が認められたA-SG伝熱管2本、B-SG伝熱管1本について、高温側および低温側のSG管板部で施栓し、供用外とする。</p> <p>(2) 小型高圧洗浄装置による洗浄 SG器内に残存するスケールおよびスラッジを可能な限り除去するため、小型高圧洗浄装置を用いて管支持板上も含めたSG器内の洗浄を実施する。</p> <p>(3) 薬品洗浄による稠密な性状スケールの脆弱化 SG器内に薬液を注入し、伝熱管全域を薬品に浸した状態で2回洗浄を行い、伝熱管に付着している稠密なスケールを粗密化させ、脆弱化させる。</p> <p>(4) 今後のSG保全 今回取り出したスケールについては、今後、追加の3次元測定器等による計測、断面観察および摩耗試験を実施し、スケールの形状や性状に関する知見の拡充に努める。 また、毎定期検査時にスケールを回収し、スケールの稠密層厚さの確認および摩耗試験を実施する。確認および摩耗試験では、稠密層厚さ0.1mm未満および摩耗体積比0.1未満であることを確認し、それを超えた場合は薬品洗浄や小型高圧洗浄装置による洗浄を実施する。</p>

高浜発電所 3 号機
蒸気発生器伝熱管の損傷について

2022年5月

関西電力株式会社

1. 件 名

高浜発電所3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について

2. 事象発生日

2022年3月30日（技術基準に適合していないと判断した日）

3. 事象発生の発電用原子炉施設

原子炉冷却系統施設 一次冷却材の循環設備 蒸気発生器

4. 事象発生前の運転状況

第25回定期検査中

5. 事象発生の状況

（添付資料－1）

高浜発電所3号機（加圧水型軽水炉、定格電気出力87万kW、定格熱出力266万kW）は、2022年3月1日より第25回定期検査中であり、3台ある蒸気発生器（以下「SG」という。）の伝熱管^{*1}全数について、健全性を確認するため渦流探傷試験^{*2}（以下「ECT」という。）を実施した。

その結果、A-SGの伝熱管2本およびB-SGの伝熱管1本について、有意な信号指示^{*3}が認められた。A-SGの1本は、高温側の管板^{*4}部に管軸方向に沿った内面きずを示す信号指示が認められ、残り1本とB-SGの1本は管支持板^{*5}部付近に外面からの減肉とみられる信号指示であった。

以上から、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則第18条並びに第56条に適合しておらず、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条に該当することを、2022年3月30日13時00分に判断した。

なお、有意な信号指示ではないものの、A-SGの伝熱管1本について、管支持板部付近の外面に判定基準未満の微小な信号指示が認められた。

*1 SGの中で一次冷却材（1次側）と給水（2次側）の熱交換を行う逆U字形の管群。一次冷却材は入口管板部（高温側）から入り、給水と熱交換後に出口管板部（低温側）へ流れる。

*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（ECT；Eddy Current Test）。全周に対して渦電流の発生と検出を別々のコイルを用いた24組のコイルで伝熱管の欠陥による渦電流の変化を信号として検出する。

*3 ノイズレベル（雑音信号レベル）を超える信号であって、SG管支持板等の外部構造物あるいは伝熱管の形状等に起因する信号（疑似信号）ではない信号指示。

*4 伝熱管が取り付けられている部品。伝熱管と管板で一次冷却材と給水の圧力障壁となる。

*5 伝熱管を支持する部品。

6. 環境への影響

なし

7. ECT結果

(1) 検査期間

2022年3月16日～2022年3月30日（定期事業者検査終了日）

探傷検査・データ整理期間 2022年3月16日～2022年3月27日

解析・評価検査期間 2022年3月28日～2022年3月30日

(2) 検査範囲

SGの施栓^{*6}済みの伝熱管を除く、全数の伝熱管についてECTを実施した。

(単位：本)

SG	A	B	C	合計
検査対象本数	3,272	3,247	3,261	9,780

^{*6} 伝熱管の1次側出入口部分に機械式栓を用いて栓をし、供用外とすること。

(3) 検査結果

(添付資料-2～4)

ECTデータを評価した結果^{*7}、3本の伝熱管に有意な信号指示を確認した。

リサーチ表示^{*8}（信号表示）で分析した結果、有意な信号指示が認められた箇所のうち、A-SG伝熱管1本については、管板部付近に管軸方向に沿った非貫通の内面きずを示す信号指示を確認し、A-SG伝熱管の残り1本およびB-SG伝熱管の1本については、いずれも伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

また、外面からの減肉とみられる有意な信号指示が認められた箇所を色調図表示^{*9}で分析した結果、管支持板部付近であった。

今回有意な信号指示を確認した箇所について、高浜発電所3号機前回（第24回）定期検査におけるECTデータを確認した結果、有意な信号指示は認められなかったことを確認した。

なお、有意な信号指示ではないものの、A-SGの伝熱管1本について、管支持板部付近の外面に判定基準未満の微小な信号指示を確認した。

(単位：本)

SG	A	B	C	合計
指示管本数	2	1	0	3
(微小な信号指示)	(1)			(1)

A-SG

第四管支持板 X9, Y22：減肉率 約57%

管板部 X9, Y2：管軸方向に沿った非貫通の内面きず

(第三管支持板 X51, Y8：判定基準未満の微小な信号指示)

B-SG

第二管支持板 X35, Y32：減肉率 約41%

- *⁷ 一般社団法人日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格(2012年版/2013年追補/2014年追補) JSME S NA1-2012/2013/2014 SG伝熱管に対する判定基準に従う。
- *⁸ 渦電流変化の電気信号を図で表したもの(水平成分および垂直成分を同一画面に表示)。
- *⁹ 24組分のコイルのチャートを平面状に並べ、信号振幅に応じて色調として表示させたもの。伝熱管全長についての信号指示の大きさや位置等の分析に用いる表示方法。

8. 時系列

- 3月16日 定期事業者検査開始(探傷検査・データ整理)
- 3月30日 定期事業者検査終了
 A-SG伝熱管1本(2次側)、B-SG伝熱管1本(2次側)に外面からの減肉と認められる有意な信号指示があることを確認
 A-SG伝熱管1本(1次側)の管板部付近に管軸方向に沿った非貫通の内面きずを示す信号指示があることを確認
 有意な信号指示ではないものの、A-SG伝熱管1本(2次側)に外面からの減肉と認められる判定基準未満の微小な信号指示を確認
 各SG器内のカメラによる目視点検を開始
- 5月6日 SG器内のカメラによる目視点検完了

9. 原因調査

(添付資料-5)

内面きずおよび外面減肉を示す信号指示があった伝熱管の損傷原因を調査するため、要因分析図に基づき、原因調査を実施した。

(1) 内面きず

a. 信号指示の状況

(添付資料-6)

色調図表示で分析した結果、伝熱管高温側管板部をローラ拡管している上端部*¹⁰(22ピッチ)に有意な信号指示があることを確認した。

また、リサージュ表示(信号表示)並びに鳥瞰図表示*¹¹で分析した結果、いずれも伝熱管内面の軸方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

なお、今回の定期検査までのECTで、当該管には有意な信号指示が認められていないことを確認した。

*¹⁰ 管板の穴に伝熱管を挿入し、伝熱管の内面から高い圧力(水圧)で拡管した後に、管板下端部から上端部に向かって機械式ローラで伝熱管を押し広げて伝熱管と管板を圧着した最終ピッチ部。

*¹¹ 信号の波形を3次的に表したもので、信号の分布(イメージ)の詳細分析に用いる表示方法。

b. 製造履歴調査

(添付資料-7)

建設時の製造記録を調査した結果、問題となる記録がないことを確認した。また、SGの製造手順について聞き取り調査を行った結果、管板に伝熱管を通すための穴を加工した後に内面を目視で検査しているが、きずが認められた場合には専用の工具で手入れを行うことを確認した。

その後、伝熱管を管板の穴へ挿入し、伝熱管の内面から高い水圧をかけて拡管した後に、仕上げとして機械式ローラで伝熱管を更に拡管(22ステップ)し、伝熱管を管板に密着固定させる手順で製造されていることを確認した。

c. 運転履歴調査

(添付資料－ 8)

(a) 一次冷却材温度、圧力

運転開始以降、第 25 回定期検査開始までの間、一次冷却材温度・圧力変化の調査を行った結果、過大な応力を発生させる異常な温度・圧力の変化がないことを確認した。

(b) 放射線監視装置

第 25 サイクルにおける各放射線監視装置指示値の調査を行った結果、各指示値に有意な変化はなく、SG の 1 次側から 2 次側への一次冷却材の漏えいがないことを確認した。

(c) 一次冷却材の水質

運転開始以降、第 25 回定期検査開始までの間、一次冷却材中の pH、電気伝導率、塩素イオン、溶存酸素、溶存水素の調査を行った結果、各データに有意な変化はなく基準値の範囲内で推移していたことを確認した。

d. 材料調査

当該部分における製造時のミルシートを調査した結果、材料の成分は SG 製造メーカーの仕様どおりであり、伝熱管はインコネル TT 600^{*12} 製であることを確認した。

^{*12} ニッケルをベースとし、鉄、クロム等を含有するニッケル基合金の商標名。TT は特殊熱処理。

e. 設計図書調査

工事計画認可申請書の強度計算書を調査した結果、延性割れ^{*13}、疲労割れ^{*14} に対して、設計上考慮されていることを確認した。

^{*13} 材料に過大な応力がかかった時に発生する割れ（破壊）。

^{*14} 材料に応力が継続的に、あるいは繰り返しかかり強度が低下した時に発生する割れ。

f. 過去の知見調査

(添付資料－ 9、10)

SG の伝熱管内面の損傷モードについて、過去の知見等の調査を実施した。

(a) 粒界腐食割れ^{*15}、ピitting^{*16} について

一次冷却材環境下では塩素イオン、溶存水素、溶存酸素が適切な基準値に保たれていれば、伝熱管内では沸騰による不純物濃縮が起こることはなく、かつ還元性雰囲気を維持できるため、粒界腐食割れ、ピitting は発生しないことを確認した。

^{*15} 金属の結晶粒の境目（粒界）に沿って進展する腐食。

^{*16} 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。

(b) 局所変形について

局所変形の場合、ECTのリサーチ表示で位相角が 0° となり、リサーチ波形の巻きも大きくなるが、今回のECT信号指示は内面きずの特徴を示す位相角を有しており、リサーチ波形に巻きが認められないことから、局所変形による信号指示でないことを確認した。

(c) エロージョン*¹⁷について

SGの伝熱管材料にエロージョンが発生する場合の限界流速は非常に速い(約 70 m/s 以上)が、これに対して当該部分の流速は十分遅い(平均約 6 m/s)ことから、エロージョンは発生しないことを確認した。また、伝熱管内は流体が衝突する形状でないことを確認した。

*¹⁷ 流体が金属表面に衝突することで生じる機械的な衝突力で材料が損傷する現象。

(d) 応力腐食割れ*¹⁸について(高浜発電所の経験)

ア. 抜管調査結果

高浜発電所4号機の第11回定期検査(平成11年4月～平成11年7月)時におけるSG伝熱管のECTで、高温側管板部のローラ拡管上端部に有意な信号指示が認められ、当該部位の抜管調査を行った結果、有意な信号指示は伝熱管内面を起点とした1次側からと考えられる軸方向に沿った粒界割れであった。その原因は、インコネルTT600製の伝熱管が高温の1次冷却材中で応力腐食割れ(以下「PWSCC」という。)の感受性を有しており、伝熱管のローラ拡管の際に局所的に生じた引張り残留応力*¹⁹と運転中内圧が相まったことによりPWSCCが発生したと推定している。

また、高浜発電所3号機の第12回定期検査(平成12年2月～平成12年4月)時に、高浜発電所4号機の第11回定期検査と同じ部位に有意な信号指示が認められ、当該部位の抜管調査を行った結果、高浜発電所4号機第11回定期検査時の抜管調査と同様の結果を得ている。

*¹⁸ 1次系水質環境下で発生する加圧水型原子力発電所特有の応力腐食割れ(材料、環境、応力の3要素が重なって発生する割れ)。

*¹⁹ 伝熱管を管板と接合させた後に、伝熱管に外力が作用していないにも関わらず材料内に生じる単位面積当たりの内力。

イ. 抜管調査以降のECT結果

高浜発電所3号機および高浜発電所4号機では、抜管調査以降の以下の定期検査時におけるSG伝熱管のECTで、同様の箇所(高温側管板部)に軸方向のきずの特徴を有した有意な信号指示が認められているが、発生要因の調査結果では、伝熱管のローラ拡管の際に局所的に生じた引張り残留応力と運転中内圧が相まったことによりPWSCCが発生したものと推定している。

高浜発電所 3 号機

- ・第 1 3 回定期検査 (平成 1 3 年 6 月～平成 1 3 年 8 月)
- ・第 2 1 回定期検査 (平成 2 4 年 2 月～平成 2 8 年 2 月)
- ・第 2 2 回定期検査 (平成 2 8 年 1 2 月～平成 2 9 年 6 月)
- ・第 2 3 回定期検査 (平成 3 0 年 8 月～平成 3 0 年 1 1 月)

高浜発電所 4 号機

- ・第 1 2 回定期検査 (平成 1 2 年 9 月～平成 1 2 年 1 1 月)
- ・第 1 3 回定期検査 (平成 1 4 年 1 月～平成 1 4 年 3 月)
- ・第 1 4 回定期検査 (平成 1 5 年 4 月～平成 1 5 年 6 月)
- ・第 1 8 回定期検査 (平成 2 0 年 8 月～平成 2 0 年 1 2 月)
- ・第 1 9 回定期検査 (平成 2 2 年 2 月～平成 2 2 年 5 月)
- ・第 2 0 回定期検査 (平成 2 3 年 7 月～平成 2 9 年 5 月)
- ・第 2 1 回定期検査 (平成 3 0 年 5 月～平成 3 0 年 9 月)

(e) 過去の知見調査のまとめ

インコネル T T 6 0 0 製の S G 伝熱管の E C T 結果で、高温側管板部のローラ拡管部において認められた内面の軸方向に沿ったきずの特徴を有した信号指示は、伝熱管のローラ拡管の際に局所的に生じた引張り残留応力と運転中内圧が相まったことにより発生した P W S C C と推定されている。

g. ショットピーニング^{*20}の効果 (添付資料-11, 12)

(a) これまでの知見により、S G 伝熱管内面のショットピーニングが P W S C C に対する予防保全策として有効であることが確認されていることから、高浜発電所 3 号機の伝熱管については、第 1 3 回定期検査時 (平成 1 3 年 6 月～平成 1 3 年 8 月) にショットピーニングを施工した。

ショットピーニングの施工は、これまでの知見から適切な施工条件により実施した場合は、P W S C C の初期欠陥に有意な進展を生じないことが知られていることから、当該定期検査時の施工記録を調査した結果、その条件どおりに施工されていることを確認した。

^{*20} 伝熱管内面にビーズ(金属微粒子)を打ち付けることにより材料表面の残留応力を改善する手法。

(b) 高浜発電所 3 号機では第 1 3 回定期検査時 (平成 1 3 年 6 月～平成 1 3 年 8 月) に S G 伝熱管内面のショットピーニングを施工した後は、S G 伝熱管の E C T で有意な信号指示は認められていなかったが、第 2 1 回定期検査時 (平成 2 4 年 2 月～平成 2 8 年 2 月) に 1 本、第 2 2 回定期検査時 (平成 2 8 年 1 2 月～平成 2 9 年 6 月) に 1 本の伝熱管に有意な信号指示を認めている。ショットピーニング施工以降に、伝熱管の E C T で有意な信号指示を検出した理由は以下のとおりと考えられる。

伝熱管の内面に施工したショットピーニングは、圧縮応力を約 0. 2 mm の深さまで付与することが可能である。一方、E C T では約 0. 5 mm 以上の深

さのPWSCCによる信号指示を検出することが可能である。

よって、ショットピーニングを施工した時点で、圧縮応力の付与されない範囲にECTにより信号指示の検出が不可能なPWSCCが既に存在した場合は、ショットピーニング施工後もPWSCCが進展し、顕在化する可能性があることから、伝熱管のECTで確認された有意な信号指示もそれに該当すると考えられる。

(2) 外面減肉

a. 信号指示の状況 (添付資料-3)

リサーチ表示(信号表示)で分析した結果、A-SG伝熱管1本およびB-SG伝熱管1本について、いずれも伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

また、外面からの減肉とみられる有意な信号指示が認められた箇所を色調図表示で分析した結果、管支持板部付近であった。

今回有意な信号指示を確認した箇所について、高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査におけるECTデータを確認した結果、有意な信号指示は認められなかったことを確認した。

なお、有意な信号指示ではないものの、A-SGの伝熱管1本について、管支持板部付近の外面に判定基準未満の微小な信号指示を確認した。

b. 高浜発電所3, 4号機におけるSG伝熱管外面の損傷事象の経緯

(添付資料-13)

高浜発電所3号機では、前回(第24回)および前々回(第23回)の定期検査において、SGの伝熱管に外面からの減肉信号指示が認められており、原因は、管支持板下面に留まった異物と伝熱管が繰り返し接触したことにより摩耗減肉が発生したものと推定した。

その後、異物対策を実施した高浜発電所4号機の第23回定期検査においても、外面からの減肉信号指示(A-SGの伝熱管1本、C-SGの伝熱管3本)が認められたため、小型カメラによりSG器内を調査した結果、減肉箇所にスケール*²¹の接触を確認するとともに、このスケールの外観観察の結果、伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位に接触痕および光沢を確認した。

このため、高浜発電所4号機の第23回定期検査においてSG器内のスケールの性状等の調査や回収スケールによる摩耗試験などを実施した結果、SG伝熱管が減肉した原因は、伝熱管表面からはく離れた稠密なスケールによるものと推定した。

これらのことから、2018年8月以降、高浜発電所3号機および高浜発電所4号機の定期検査において発生したSG伝熱管の外面減肉の原因が、スケールであった可能性が否定できないため、対策として、高浜発電所3号機の第2

4 回定期検査においても、SG 器内の薬品洗浄^{*22}を実施し、その後に回収したスケールが脆弱化していることを確認した。

^{*21} 2 次系配管等に含まれる鉄イオンや鉄の微粒子が、給水系統によって SG 器内に流れ集まって生成されたもの。伝熱管で生成されたものをスケール（フレーク状（板状）に剥がれ落ちたものを含む）という。

^{*22} 希薄なエチレンジアミン四酢酸（Ethylene Diamine Tetra acetic Acid : EDTA）によりスケール中の鉄を一部溶解し、スケールの粗密化によって表面積を拡大することで SG 伝熱性能の回復を図る手法。

c. SG 伝熱管内面（1 次側）からの損傷（添付資料－14）
ECT の信号指示により、伝熱管内面（1 次側）にきずがないことを確認した。

d. SG 伝熱管外面（2 次側）からの損傷
(a) デンティング^{*23}（添付資料－14）

ECT の信号指示を確認した結果、デンティングではないと考える。

^{*23} 管支持板の腐食およ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をいう。

(b) 粒界腐食割れ（IGA）（添付資料－15）

過去に SG 2 次側環境においてアルカリ環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、粒界腐食割れが発生した実績があるが、高浜発電所 3 号機のようなアンモニアとヒドラジンによる AVT（All Volatile Treatment）処理^{*24}を実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考える。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉であることから、粒界腐食割れの可能性はないと考える。

^{*24} 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。

(c) ピットイング（添付資料－16）

過去に SG 2 次側環境において海水リーク等による塩化物環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、ピットイングが発生した実績があるが、高浜発電所 3 号機のような塩素濃度が十分低く管理され、かつ、アンモニアとヒドラジンによる AVT 処理を実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考える。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉であることから、ピットイングの可能性はないと考える。

(d) リン酸減肉（添付資料－17）

過去の 2 次系水処理において、リン酸を使用していたプラントでリン酸による減肉が発生した実績があるが、高浜発電所 3 号機のようなアンモニアとヒドラジンによる AVT 処理を実施しているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考える。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉であることから、リン酸減肉の可能性はないと考える。

(e) 流体振動による疲労 (添付資料－18)

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、疲労損傷は発生しないと考える。

(f) エロージョン (添付資料－19)

当該部流速は約3 m/sであり、かつ、インコネルTT600は耐エロージョン性が高いことから(室温条件では約70 m/s以上がエロージョン発生領域)、エロージョンの発生はないと考える。

なお、室温条件にて評価を行っているが、温度によるエロージョンへの影響は小さく、常温の知見を用いても問題ないことを評価している。

(g) 摩耗減肉

AおよびB-SGの減肉信号を確認した伝熱管について、小型カメラによる目視点検を実施した結果、機械的な影響によるものとみられる減肉を確認したため、以下の確認を実施した。

ア. 減肉伝熱管2次側からの確認結果 (添付資料－20)

(ア) 伝熱管外観観察

小型カメラを用いて、減肉信号を確認した伝熱管の外観観察を実施したところ、以下のとおり摩耗痕とみられる箇所を確認した。

I. A-SG

第四管支持板低温側下面付近(減肉率:約57%) :

周方向約3 mm、軸方向1 mm以下(X9, Y22)

第三管支持板低温側下面付近(減肉率:判定基準未滿) :

周方向約5 mm、軸方向1 mm以下(X51, Y8)

II. B-SG

第二管支持板高温側下面付近(減肉率:約41%) :

周方向約3 mm、軸方向1 mm以下(X35, Y32)

(イ) ECT信号との比較

伝熱管2次側減肉部位における外観観察結果は、ECTにより得られる減肉信号指示と相違ないことを確認した。

イ. 管支持板との接触 (添付資料－21)

(ア) 管支持板ベイ部^{*25}の信号

構造上、伝熱管と管支持板ベイ部は接触しない。また、運転中に伝熱管へねじれを発生させる外力は発生せず、伝熱管と管支持板ベイ部は接触しない。

*25 管支持板に加工されている四ツ葉管穴のうち凹面部。

(イ) 管支持板ランド部^{*26}の信号

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に減肉が生じることになるが、目視点検の結果からは4箇所^{*}の管支持板ランド部の減肉は確認できなかつたため、管支持板との接触・摩耗によって発生した減肉ではないと考える。

^{*26} 管支持板に加工されている四ツ葉管穴のうち凸面部。

ウ. SG器外発生物との接触

(ア) 過去事象を踏まえた異物混入対策 (添付資料-22)

美浜発電所3号機の異物混入事象(2000年、2007年)を踏まえた従前の異物混入対策(開口部管理の徹底等)に加え、高浜発電所3号機の第23回定期検査以降の伝熱管減肉事象を踏まえた異物混入対策(機器内部に立ち入る前に、器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する等)については、高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査においても実施していることを確認した。

(イ) SG器内点検

A-SGの減肉信号を確認した伝熱管(X9, Y22)および判定基準未満の微小な減肉信号を確認した伝熱管(X51, Y8)、B-SGの減肉信号を確認した伝熱管(X35, Y32)を小型カメラにて目視点検を実施した結果、信号指示箇所にスケール等の付着物は認められなかつたものの、当該伝熱管周辺の管支持板に接触痕を確認した。

また、A-SG器内の管板、流量分配板、第一～第七管支持板の上面の全ての範囲並びに第三、第四管支持板の下面の減肉信号を確認した伝熱管周辺部およびB-SG器内の管板、流量分配板、第一～第七管支持板の上面の全ての範囲並びに第二管支持板の下面の減肉信号を確認した伝熱管周辺部について、小型カメラによる目視点検を実施した結果、全体的にスケールおよびスラッジ^{*27}が残存していることを確認したが、それら以外の異物は確認できなかつた。

^{*27} スケールを形成せず粒子状となり、水中を漂うものや、スケールが砕けて小さくなったものが管支持板上等に堆積したもの。

(ウ) SG器外点検 (添付資料-23)

SGブローダウン系統およびタービンサンプラインの仮設ストレーナの開放点検や弁、配管の内部点検等を実施した結果、スラッジは確認されたが、それ以外の異物は確認できなかつた。

以上の調査結果から、SG器内に異物が混入している可能性はない。

エ. SG器内発生物との接触

(ア) SG内部品の脱落調査

SG内部品が脱落し、伝熱管を減肉させる可能性を設計図書により確認したところ、薄片形状として、振止め金具のキー固定板等を内部品として使用している。ただし、これらの内部品は、溶接止めされていること、もしくは、周囲を溶接止めされた構造物に囲まれており、万が一、脱落したとしても周囲の構造物の外には出ないことから、内部品が脱落した可能性はないと考える。

なお、伝熱管を減肉させる薄片形状と異なるものの、SG器内(2次側)の経年劣化事象を起因とする内部品の脱落として、流れ加速型腐食による給水内管裏当金を想定するが、高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査において、当該部のカメラによる目視点検を実施しており、給水内管裏当金の溶接部が全く損傷していなかったことから、脱落した可能性はないと考える。

(イ) スケールによる伝熱管損傷の可能性調査

これまでの経緯を踏まえ、SG伝熱管の外面減肉の原因は、SG伝熱管から剥離した稠密なスケールの可能性が否定できないため、SG器内のスケール残存状況および回収したスケール調査を実施した。

I. SG器内のスケールの残存状況等の調査(添付資料-24、25)

小型カメラを用いて、AおよびB-SGの管板～第七管支持板の上面の調査を行った結果、スケールおよびスラッジが残存していることを確認した。また、C-SGについても管板～第二管支持板の上面の調査を行った結果、AおよびB-SGと同様に、スケールおよびスラッジが残存していることを確認した。

SG器内のスケールの残存状況等の調査に合わせ、伝熱管の外観観察を行った結果、ほぼ全ての伝熱管は全面的にスケールに覆われていた。また、一部の伝熱管は局所的にスケールが剥離した痕跡等も認められた。これらの状況については、高温側と低温側(水平方向)、管支持板間(上下方向)において有意な差は認められなかった。

II. SGから回収したスケールの性状調査

(I) 各SG内のスケール回収

A-SGの管板、第一～第三管支持板上部、並びにBおよびC-SGの管板、第一管支持板～第二管支持板上部に残存しているスケールのうち、比較的大きなものを選定し、約200個を回収した。また、今後の知見拡充のため、A、BおよびC-SGからスケールを更に約200個回収した。

(II) 回収したスケールの化学成分および形状分析結果

(添付資料－26)

回収したスケールについて、化学成分分析を実施した結果、主成分はマグネタイトであり、SG器内で発生するスラッジと同成分であることを確認した。A-SGの管板、第一～第三管支持板上面、並びにBおよびC-SGの管板、第一管支持板～第二管支持板上面から取り出したスケールは、主に多角型、長尺型に分類され、長さが最大のもものは、前者が長さ約17mm、幅約10mm、後者が長さ約47mm、幅約4mmであり、これらのスケールは管支持板の流路穴よりも大きく、運転中に管支持板下面の伝熱管の隙間に留まることが可能な形状であった。また、これらのスケールについては、目視確認の結果、やや湾曲した形状をしており、そのうち各SGから取り出した9個のスケールについて3次元測定器等により計測した結果、直径約22.3～22.6mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管(円筒)の外径(直径22.2mm)に近いことを確認した。

(III) 回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果

(添付資料－27、28)

スケール120個を対象に断面観察を行った結果、稠密層(密度の高い酸化鉄の層)が主体のスケールを42個確認した。

また、スケール50個(約10mm×5mm以上)を対象に摩耗試験を行い、伝熱管とスケールの摩耗体積比^{*28}を調査した結果、伝熱管の減肉量がスケール摩滅量よりも大きくなるスケールを1個確認した。

^{*28} 摩耗試験における伝熱管の減肉量とスケールの摩滅量の体積比

e. 損傷以外のECT信号指示 (添付資料－29)

局所的なスケールの剥離は、減肉と識別できることから、今回の信号指示は、スケールの剥離ではないと考える。

(3) 減肉メカニズムの検討

これまでの原因調査の結果、薬品洗浄後においても、稠密なスケールがSG器内に残存し、伝熱管の外表面減肉を発生させた可能性が高いことから、減肉を発生させるスケールの生成・剥離メカニズム、SG器内のスケールの挙動およびスケールが伝熱管を損傷させる可能性について、以下のとおり調査および検討を実施した。

a. スケールの生成メカニズム (添付資料－30)

(a) スケールの生成および性状の調査

これまでの水化学に関する知見から、2次系構成機器の流れ加速型腐食等で生じる鉄イオンや鉄の微粒子が、給水とともにSG2次側へ持ち込まれ、次の2つの現象が発生することでSG伝熱管表面にスケールとして付着することがわかっている。

ア. 析出付着

給水とともにSG2次側へ持ち込まれる鉄イオンは、SG2次側温度域においては、高温ほど溶解度が小さくなるため、より高温となる伝熱管下部において、溶解度の減少幅が大きく、鉄イオンがマグネタイトとして析出付着する。そのため、伝熱管の下部に付着するスケールは稠密で薄い傾向がある。

イ. 蒸発残渣

伝熱管の上部では、伝熱管表面と給水の温度差が伝熱管の下部に比べて小さく沸騰現象が顕著であることから、鉄イオンの析出付着よりも、鉄の微粒子が蒸発残渣として伝熱管表面に残留、堆積する現象が主体である。そのため、伝熱管の上部に付着するスケールは、粗密^{*28}な傾向があり、脆く摩耗に対する耐性も低いと考える。また、蒸発残渣によって残留、堆積する鉄の微粒子の方が析出付着する鉄イオンに比べて粒径が大きいことから、伝熱管の上部で生成するスケールの方が伝熱管の下部より粗密で厚い傾向にある。

^{*28} 密度が比較的低く、粗な状態。

(b) スケール性状の実機調査 (添付資料-31)

平成8年に高浜発電所3号機第9回定期検査で健全性確認を目的に伝熱管の抜管調査を実施した際、伝熱管各部位（SG上方からUベンド部、第六から第五管支持板の間、第四から第三管支持板の間、第三から第二管支持板の間、第二から第一管支持板の間）のスケールについて、断面ミクロ観察を実施している。その結果、伝熱管の上部のスケールほど粗密で厚く、伝熱管の下部ほど稠密で薄いことを確認した。

また、令和2年に高浜発電所3号機第24回定期検査および高浜発電所4号機第23回定期検査で、伝熱管の上部（第七管支持板上）および伝熱管の下部（第二から第一管支持板の間）からスケールを回収し、性状を確認した結果、伝熱管の上部（第七管支持板上）のスケールは粗密で厚く、伝熱管の下部（第二から第一管支持板の間）では稠密で薄いことを確認した。

以上の調査結果から、稠密なスケールは伝熱管の下部で発生し、粗密なスケールは伝熱管の上部で発生することを確認した。

(c) 2次系の水質管理調査

スケールは、給水とともに持ち込まれる鉄イオンおよび鉄の微粒子により、経年的に厚さが増加すると考えられることから、以下のとおり厚さの増加に関する調査を実施した。

ア. 水処理履歴 (添付資料-32)

SG給水における水質管理の項目として、電気伝導率、溶存酸素濃度、アンモニア濃度およびヒドラジン濃度等がある。これらの過去の水質管理実

績を確認したところ、いずれも基準値を満足しており問題はなかった。

S G器内への鉄の持ち込みに関係する項目はp Hであり、2次系構成機器の流れ加速型腐食等による給水中への鉄の放出を抑制するためにはアルカリ側に水質管理を行う必要がある。そのため、これまでp H上昇によりS Gへの鉄の持ち込み量低減を図るべく、A V T処理(p H 9. 2)、E T A^{*29}処理(p H 9. 4～9. 5)、高E T A処理(p H 9. 8)、高アンモニア処理(p H 9. 8)のようにp Hの高い処理方法へと改善を図ってきた。

各水処理における給水中の鉄含有量は実測データ次のおりであり、p Hの低い水処理方法ほど給水中の鉄含有量が多いことが分かっている。

*29 エタノールアミン。

イ. 給水中の鉄含有量

上記水処理方法での給水中の鉄含有量は次のとおりである。

水処理方法	給水中の鉄含有量
A V T処理	約5～10 p p b
E T A処理	約3 p p b
高E T A処理	約1 p p b
高アンモニア処理	約1 p p b

ウ. 運転時間

上記水処理方法での運転時間は次のとおりである。

水処理方法	運転時間
A V T処理	約9. 9万時間
E T A処理	約8. 3万時間
高E T A処理	約2. 0万時間
高アンモニア処理	約3. 0万時間

エ. 鉄の持ち込み量

上記水処理方法での運転時間における鉄の持ち込み量と、合計の鉄の持ち込み量を算出した結果は次のとおりである。

水処理方法	鉄の持ち込み量
A V T処理	約1, 700 k g
E T A処理	約750 k g
高E T A処理	約70 k g
高アンモニア処理	約130 k g
合計	約2, 650 k g

以上の調査結果から、水処理方法に応じた量の鉄が経年的に持ち込まれていることを確認した。

(d) スケール厚さに関する実機調査 (添付資料-33)

スケール厚さの傾向を推定するパラメータとして、主蒸気圧力やSG伝熱抵抗係数^{*30}があり、その変化量を確認した結果、いずれも運転時間の経過とともに圧力低下や係数増加が認められ、スケール厚さは経年的に増加するものと推定される。

また、高浜発電所3号機第8回(平成7年)および第14回(平成14年)定期検査において、スケール厚さを把握するため、周波数3kHzのECTを実施した結果、第8回から第14回定期検査までの6サイクルで増加したスケール厚さは、数十 μm ~100 μm 程度であった。

^{*30} 伝熱管の外表面に不純物が付着するなどにより、熱伝達特性を低下させる度合いを示す指標。

以上の結果から、スケール厚さは経年的に増加していくものであることを確認した。また、現在では高ETA処理や高アンモニア処理によって給水のpHを高く維持することで、1サイクルあたりの鉄の持込み量は数十kg/SG程度に抑えられていることを確認した。

b. スケールの剥離 (添付資料-34)

(a) 剥離メカニズムの検討

伝熱管表面に生成したスケールが主に剥離するのは、起動停止時の伝熱管の熱伸びと収縮によるものと推定される。具体的には次のア.~ウ.のとおりであり、スケールはプラント停止時の伝熱管の熱収縮に追従できずにフレーク状(板状)に剥離したものと推定される。

ア. プラント起動時の伝熱管の熱伸びに伴い伝熱管表面のスケールに割れが生じる。

イ. プラント運転中に割れの隙間が新たに生成したスケールで埋まる。

ウ. 隙間が埋まったため、プラント停止時の熱収縮に追従できずスケールは剥離する。

また、プラント起動時および運転中においても、停止時に剥離しなかったスケールが、伝熱管の振動やSG器内の流れの影響により剥離する可能性も否定できない。

(b) 長期停止の影響調査 (添付資料-35)

東日本大震災以降、2012年2月に定期検査を開始し、その後、2016年2月に再稼働するまでの約4年間、プラントは長期停止状態となっていた。その間、SG器内は腐食を防止するためヒドラジン水による満水保管状態としていたことから、この状態がスケール剥離挙動に与える影響を調査するため、スラッジ(粒の観察を容易にするため粉末状スラッジを使用)を対象にヒドラジン水による浸漬試験を1か月間実施した。その結果、時間の経過とともにスケールを構成する鉄粒子同士が合わさり粒径が大きくなることを確認

した。これは、ヒドラジンの還元作用でスケールの鉄が一部溶解、再析出を繰り返しており、その結果、粒径が大きくなったものと推定される。

粒径が大きくなると、伝熱管との接触面積が減少し、剥離が促進される可能性がある。スケールの剥離量が増えるとスラッジランシングでのスケール回収量が大きくなる可能性があるため、高浜発電所3号機の長期停止前後の回収量を調査した結果、長期停止前はSG3基から約13kgのスケール等を回収したが、長期停止後の前回定期検査時には約20kgと増加していることを確認した。

以上により、長期停止後に伴い、スケールの粒径が大きくなることで伝熱管との接触面積が減少し、プラントの運転等に伴い伝熱管からスケールが多数剥離したと推定される。

c. SG器内挙動の推定およびスケールと伝熱管の接触状態の再現性確認

(添付資料-36)

SG器内調査およびスケール分析結果から、今回の外面減肉はスケールによる摩耗の可能性が高いことから、剥離したスケールがSG器内で第二、第三および第四管支持板下面へ到達するまでの挙動を推定するとともに、SG2次側の流況モックアップ試験により、実機を模擬した二相流の条件においても、推定した伝熱管へのスケールの接触状態が再現するかの確認を実施した。なお、評価に当たっては、SG器内で確認されているスケールを参考に形状を想定して評価した。

(a) 器内のスケール挙動検討

運転中のSG2次側器内の流況下では流体抗力がスケールの落下力を上回ることから、スケールは管群内の上昇流に乗って流量分配板、各管支持板フロースロット部、および管支持板と管群外筒の隙間を通過し、減肉箇所へ到達したことが考えられる。

(b) SG2次側の流況モックアップ試験

SG2次側の流況を再現するモックアップ試験結果から、スケールの接触状態が実機を模擬した二相流の条件において再現できることを確認した。

d. スケールが伝熱管を損傷させる可能性の調査

(a) 高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査における薬品洗浄の実施結果

(添付資料-37、38)

ア. 薬品洗浄効果

薬品洗浄時の条件を確認した結果、温度管理や薬品濃度管理が計画どおり実施されていたことを確認し、薬品洗浄によって、SG1基あたり、約670kgの鉄分を除去できていたことを確認した。

また、定期検査後の運転実績を確認した結果、主蒸気圧力が向上し、SG

伝熱抵抗係数が低下したことを確認した。これは、薬品洗浄の効果により伝熱管に付着したスケールが減少し、熱伝達率が改善したものと考えられる。

イ. スラッジ影響を考慮した薬品洗浄効果の確認試験結果

高浜発電所3号機の前回(第24回)定期検査において、スケールの脆弱化を目的として薬品洗浄を実施したが、今回(第25回)定期検査にて器内から回収したスケールを分析したところ、稠密層厚さが0.1mmを超えるスケールが確認されたことから、薬品洗浄効果の確認試験を行った。

確認試験は実機薬品洗浄時のSG器内環境(薬品濃度、温度等)を模擬した水槽中で実施した。また、SG器内における薬品との接液環境を模擬するため、水槽中にはスケールおよびスラッジに加え、SG器内構成部品と同材料の試験片を設置し、スケールおよびスラッジの比率やスケール周辺のスラッジ量を変化させた3パターンの試験を実施した。その結果、スケール周辺のスラッジ量が多くなった場合は、薬品洗浄によるスケールの脆弱化効果が低減することを確認した。

以上により、高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査における薬品洗浄により鉄分が一定量除去されており、SG器内のスケールはおおむね脆弱化していたと推定されるが、SG器内にスケールとスラッジが混在していたことから、一部のスケール脆弱化効果が低減し、前回薬品洗浄後においても脆弱化できなかったスケールが一部存在していたものと推定される。

なお、高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査において薬品洗浄後にスケールのサンプル調査を実施し、脆弱化していたことを確認していたが、今回のサンプル調査では伝熱管に有意な減肉を発生させる可能性は低いものの稠密層が厚いスケールが比較的多く見つかった要因としては、前回の薬品洗浄により脆弱化されたスケールの多くはスラッジになったためと推定される。

(b) 摩耗形態の推定 (添付資料-39、40)

スケールとの接触で伝熱管が摩耗する場合、スケール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るため、次のとおり各ケースで想定されるワークレート^{*31}の比較を実施した。

^{*31} 摩耗体積を評価する一般式で用いられる摩耗を生じさせる力で、押付力と摺動速度の積で表現される。

ア. スケール振動のケース

本ケースではスケールの端部が拘束された片持ち梁の状態を想定する。この想定に基づきワークレートを計算すると、スケールでは流体力を受ける面積が小さいため、有意な減肉が生じるワークレートは発生しないことを確認した。

イ. 伝熱管振動のケース

本ケースでは、スケールが管支持板下面で保持され、接触する伝熱管のランダム振動*³²により伝熱管自身に減肉が発生したことを想定する。管支持板部の伝熱管の振幅は、伝熱管と管支持板B E C穴ランド部の隙間に制限されるため、隙間が確保され振幅が大きくなる伝熱管においてスケールとの接触により減肉が生じるものと推定される。本推定に基づきワークレートを試算すると、スケール振動のケースに比べて十分大きなワークレートが得られることを確認した。

*³² 蒸気と水が伝熱管に衝突する力と、伝熱管の周りに生じる流れの乱れによって伝熱管が振動する現象。

上記ア.、イ. から、発生した減肉は伝熱管振動によるものと推定されるため、以下では伝熱管振動により減肉が発生したものと想定して検証を実施した。

なお、伝熱管振動のケースでは、最大減肉深さは伝熱管の振動振幅に制限されるため、減肉の進展により伝熱管を貫通することはない。

(c) 減肉形状の再現性確認試験

推定したスケールと伝熱管の接触状態および摩耗形態で実機の減肉形状が再現できるか確認するため、次のとおり、減肉試験を実施した。また、減肉試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体のE C T信号を取得し、実機のE C T信号と比較した。

ア. 減肉試験

(添付資料-41)

スケールの接触状態を推定した上で、減肉の発生および減肉形状の観察を容易にするため石膏で製作した2倍スケールの模擬伝熱管を振動させ、模擬スケールの角部または一辺を接触させることにより、減肉を発生させた。

イ. E C Tモックアップ試験

(添付資料-42)

上記ア. で得られた減肉形状と同等の形状を有する人工欠陥を伝熱管モックアップ試験体に加え、そのE C T信号を取得し、実機のE C T信号と比較した結果、両者は整合することを確認した。

(d) ワークレートによる摩耗体積評価

(添付資料-43)

上記(b)および(c)で推定した接触状態および摩耗形態を踏まえ、流動振動解析により算出したスケールと伝熱管の摩耗のワークレートを用いて、1サイクルの運転時間で発生する摩耗体積を計算した。算出した摩耗体積と、上記(c)で実機減肉形状と整合することを確認した人工欠陥の摩耗体積を比較した結果、両者は整合することから、今回認められた外面減肉は、スケールとの接触により1サイクルで発生した可能性があることを確認した。

e. 高浜発電所3号機および4号機の特異性

(a) 当社他プラントとの鉄持込み量、薬品洗浄実績、スケール回収量の比較

鉄の持込み量について、比較のため当社他プラントの調査を実施した。また、大飯発電所3号機および4号機では薬品洗浄を実施しており、スケール性状に影響を与えている可能性があることから、その実績を確認した。さらに、スケールの厚さ増加や長期停止による剥離挙動の影響は、スケール回収量に現れている可能性があることから、あわせて比較調査を実施した。

ア. 鉄持込み量および薬品洗浄実績 (添付資料-44)

各プラントの鉄持込み量および薬品洗浄実績を調査した結果は表1のとおりであり、鉄持込み量は高浜発電所3号機および4号機が最も多く、続いて大飯発電所3号機および4号機であり、SG取替を実施している美浜発電所3号機並びに高浜発電所1号機および2号機が少ないことを確認した。

以上から、鉄持込み量が最大の高浜発電所3号機および4号機のスケールが、最も稠密層が厚く成長しているものと推定した。

<表1：各プラントの鉄持込み量および薬品洗浄実績>

	高浜3	高浜4	大飯3	大飯4	美浜3	高浜1	高浜2
運転時間* ³³ (万時間)	23.2	22.2	17.0	18.2	9.3	10.9	12.5
鉄持込み量 (kg)	2,650	2,490	1,850	1,970	810	680	940
薬品洗浄 実績回数	1回	1回	2回	1回			
薬品洗浄時点 の運転時間 (万時間)	22.3 (第24回)	22.2 (第23回)	16.1 (第17回) 17.0 (第18回)	16.2 (第16回)	—	—	—

*³³ 美浜発電所3号機、高浜発電所1号機および高浜発電所2号機については、蒸気発生器取替以降の運転時間を示す。なお、運転時間については、現時点で直近の定期検査解列時点とする。

イ. スケール回収量 (添付資料-45)

スケール回収量*³⁴を確認した結果、高浜発電所3号機および4号機では、いずれも長期停止後にスケール回収量が増加していた。

一方、大飯発電所3号機および4号機では長期停止前後でスケール回収量に変化が認められなかった。

これにより、長期停止に伴うスケール剥離の増加は、スケールが厚く成長したSGほど顕著であると推定される。

*³⁴ スラッジランシングで回収したスラッジおよびスケールのうち、スケールの回収量を表2に示す。

<表 2 : スケール回収量 (長期停止前後比較) >

プラント	長期停止前 (k g)	長期停止後 (k g)		
高浜 3 号機	0.01 未満 (第 21 回)	0.41 (第 22 回)	0.24 (第 23 回)	0.36 (第 24 回)
高浜 4 号機	0.01 未満 (第 20 回)	12.37 (第 21 回)	8.24 (第 22 回)	6.08 (第 23 回)
大飯 3 号機	0.01 未満 (第 16 回)	0.01 未満 (第 17 回)	0.01 未満 (第 18 回)	—
大飯 4 号機	0.01 未満 (第 15 回)	0.01 未満 (第 16 回)	0.01 未満 (第 17 回)	—

(b) 当社プラントとの実機スケール比較 (添付資料-46)

スケールの稠密層厚さが鉄持込み量と相関するかを検証するため、当社他プラントの伝熱管下部から実機スケールを採取し、断面マイクロ観察を実施した結果を確認した。採取対象プラントは、高浜発電所 3 号機とスケール性状が同等であることを確認している高浜発電所 4 号機、大飯発電所 3 号機および 4 号機からは薬品洗浄回数のない大飯発電所 4 号機、蒸気発生器取替プラント (美浜発電所 3 号機、高浜発電所 1 号機および 2 号機) からは、最も鉄の持込み量の大きい高浜発電所 2 号機を選定した。

結果は表 3 のとおりであり、鉄の持込み量が大きいプラントほどスケールの稠密層 (空隙率 5 % 以下) は厚く成長していることを確認した。

<表 3 : 実機スケール観察結果>

回収場所	高浜 4 号機 鉄持込み量： 2, 490 k g	大飯 4 号機 鉄持込み量： 1, 950 k g	高浜 2 号機 鉄持込み量： 940 k g	備考
第二管支持板 ～ 管板間	空隙率 5 % 以下の稠密層厚さ： 最大 0.18 mm	空隙率 5 % 以下の稠密層厚さ： 最大 0.04 mm	空隙率 5 % 以下の稠密層厚さ： — mm (伝熱管へのスケール付着がごく軽微であり、採取できるほどの厚みなし)	稠密層厚さは鉄の持込み量と相関

なお、大飯発電所 4 号機では第 16 回定期検査に薬品洗浄を適用していることから、大飯発電所 4 号機のスケールでは薬品洗浄 1 回分の粗密化効果の影響もあるものと推定される。

(c) 伝熱管の摩耗試験結果の比較 (添付資料-47、48)

上記の調査結果を踏まえ、当社他プラントの中では比較的稠密層が厚い大飯発電所 3 号機および 4 号機で採取したスケールについて摩耗試験を実施した。大飯発電所 3 号機および 4 号機のスケールは、試験開始後にスケールが

欠損するか、スケールの方が早く摩滅するという結果が得られ、伝熱管とスケールの摩耗体積比が最も大きいものでも1：15であった。このため、空隙率5%以下であっても稠密層が薄い場合、有意な減肉を与える可能性は低いことを確認した。

有意な減肉を与える稠密層厚さを検討するため、高浜発電所3号機および4号機から採取した実機スケールを摩耗試験した結果、空隙率5%以下の稠密層厚さ0.1mm未満では有意な摩耗減肉は与えられないことが分かった。

以上により、有意な減肉を発生させる可能性があるのは、空隙率5%以下の稠密層の厚さが0.1mm以上のスケールであると考ええる。

f. スケールにより減肉した国内外事例調査 (添付資料-49)

国内外で報告されている外面減肉事象を調査した結果、国内、海外共にスケールが原因とされた事例は認められなかった。

なお、国内外において、SGの運転時間が高浜発電所3号機および4号機で外面減肉事象が生じた運転時間以上であり、かつ薬品洗浄の実績が認められず、高浜発電所3号機および4号機と同等の伝熱管支持構造を有するプラントを調査した結果、7プラントのみであることを確認した。

10. 伝熱管の健全性

(1) 減肉伝熱管の健全性 (添付資料-50)

減肉した伝熱管の強度、耐震性について以下のように評価した。

a. 強度

「蒸気発生器信頼性実証試験」((財)発電用熱機関協会、昭和50年度～昭和55年度)では、局部減肉を有する伝熱管の内圧強度評価手法を確立するため、内圧による高温破壊試験を実施しており、その試験結果から運転中および事故時を包絡する内外差圧による伝熱管の破断圧力を算出した。

得られた伝熱管の破断圧力は、通常運転時および事故時の最大内外差圧に比べ、十分裕度があることから、減肉した伝熱管が通常運転時および事故時の内外差圧により破断することはない。

b. 耐震性

基準地震動 S_s による地震力および伝熱管全長モデルから、伝熱管直管部(管支持板部)に作用する力(部材力)を算出した。

保守的に一様外面減肉と仮定、伝熱管の断面積を減じた上で部材力から発生応力および疲労累積係数を算出し、許容値に対する裕度を確認した結果、十分な裕度があることから、減肉した伝熱管が地震により損壊することはない。

(2) 隣接伝熱管の健全性 (添付資料－5 1)

今回減肉が見つかった伝熱管に隣接した伝熱管についても念のため健全性を確認した結果、有意な減肉信号指示がないことを確認した。

1 1. 推定原因 (添付資料－5 2、5 3)

(1) 内面きず

A－SG伝熱管のECTで認められた内面きずは、過去に経験した信号指示と同様に高温側管板部のローラ拡管上端部の位置で、伝熱管内面の軸方向に沿ったきずであることから、SG製造時に高温側の管板部で伝熱管を拡管する際、伝熱管内面で局所的に発生した引張り残留応力と運転時の内圧および高温の一次冷却材環境が相まって、伝熱管内面からPWSCCが進展したものと推定した。

(2) 外面減肉

A－SG伝熱管およびB－SG伝熱管で認められた外面減肉は、これまでの運転に伴い、伝熱管表面に生成された稠密なスケールが前回定期検査時の薬品洗浄の後もSG器内に残存し、プラント運転中に管支持板下面に留まり、そのスケールに伝熱管が繰り返し接触したことで摩耗減肉が発生した可能性が高いと推定した。

1 2. 薬品洗浄の条件設定 (添付資料－5 4)

SGの器内構成部品に大きな影響を及ぼさない範囲で、SG器内のスケールの脆弱化を図る薬品洗浄条件について検討した結果、薬品濃度として3%、洗浄回数を2回とする。また、第四管支持板の下面で減肉が確認されたことも踏まえ、洗浄範囲を1回目、2回目ともにSG伝熱管全域とする。

なお、薬品洗浄の効果を高めるため、薬品洗浄実施前に小型高圧洗浄装置を用いて管支持板上も含めたSG器内の洗浄を行うことにより、SG器内に残存するスケールおよびスラッジをできる限り除去することとする。

1 3. 対 策 (添付資料－5 5～6 1)

(1) 内面きず

内面きずが認められたA－SG伝熱管1本について、高温側および低温側のSG管板部で施栓し、供用外とする。

(2) 外面減肉

a. 減肉伝熱管の施栓

外面減肉が認められたA－SG伝熱管2本、B－SG伝熱管1本について、高温側および低温側のSG管板部で施栓し、供用外とする。

b. 小型高圧洗浄装置による洗浄

SG器内に残存するスケールおよびスラッジを可能な限り除去するため、小型高圧洗浄装置を用いて管支持板上も含めたSG器内の洗浄を実施する。

c. 薬品洗浄による稠密な性状スケールの脆弱化

SG器内に薬液を注入し、伝熱管全域を薬品に浸した状態で2回洗浄を行い、伝熱管に付着している稠密なスケールを粗密化させ、脆弱化させる。

d. 今後のSG保全

今回取り出したスケールについては、今後、追加の3次元測定器等による計測、断面観察および摩耗試験を実施し、スケールの形状や性状に関する知見の拡充に努める。

また、毎定期検査時にスケールを回収し、スケールの稠密層厚さの確認および摩耗試験を実施する。確認および摩耗試験では、稠密層厚さ0.1mm未満および摩耗体積比0.1未満であることを確認し、それを超えた場合は薬品洗浄や小型高圧洗浄装置による洗浄を実施する。

さらに、高浜発電所3号機および4号機のSGについては、インコネルTT600製の伝熱管に応力腐食割れが認められていることから、本事象も踏まえ、今後も引き続き、SG取替えに係る検討を進めていく。

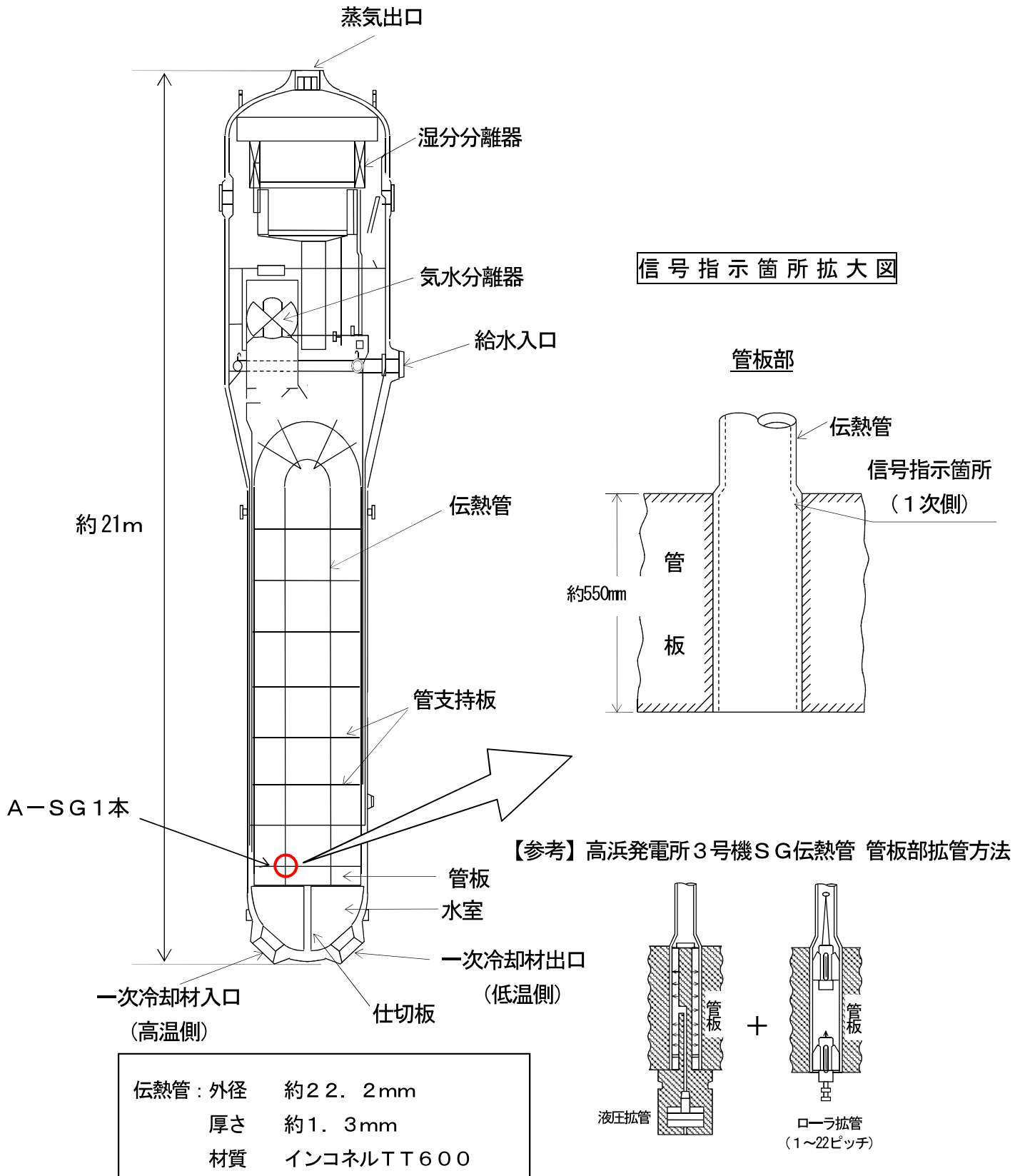
以上

添 付 資 料

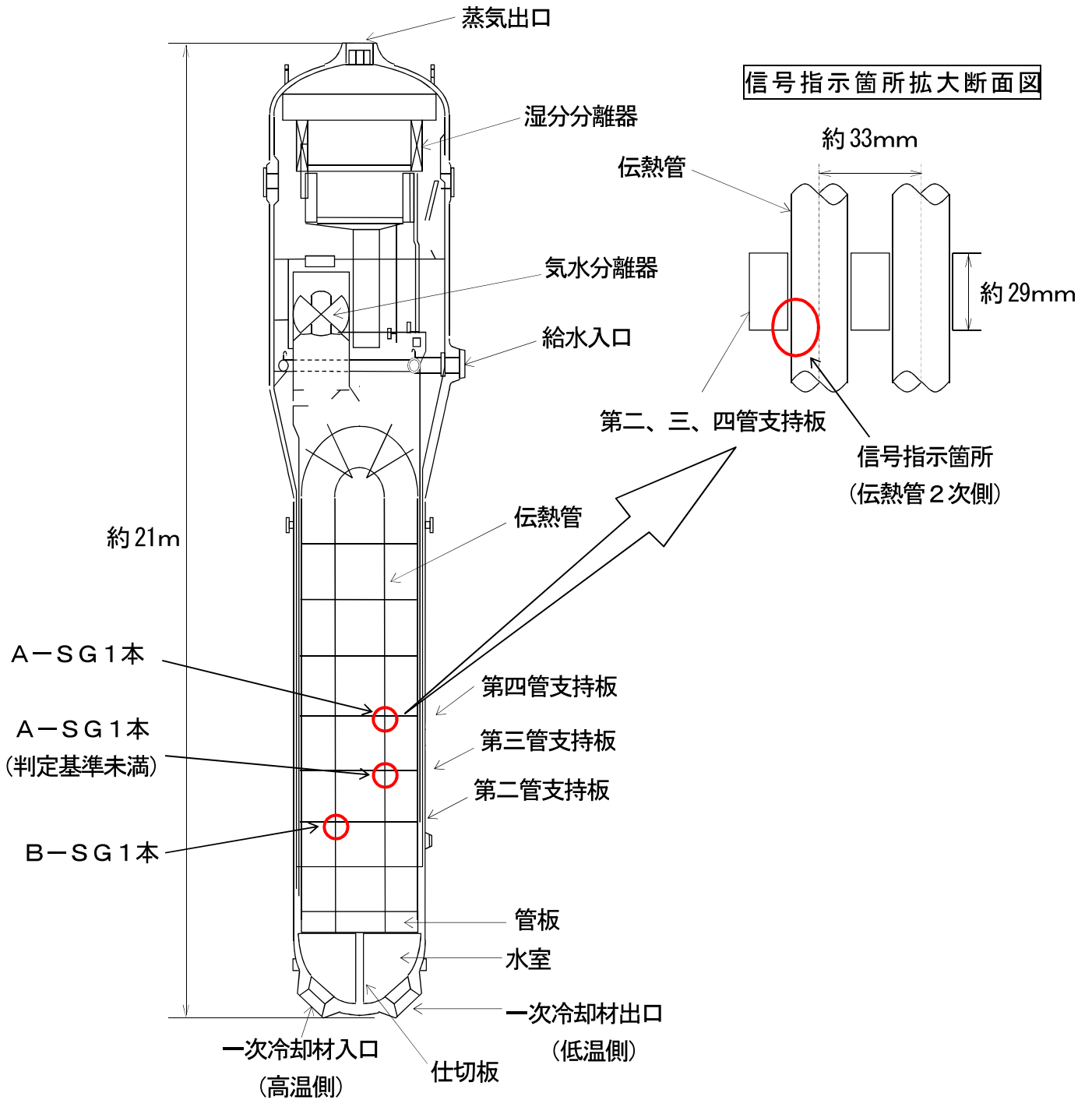
1. SG伝熱管信号指示箇所概要図
2. SG伝熱管ECT結果一覧
3. SG伝熱管ECT結果
4. SG伝熱管ECT信号指示位置図
5. 要因分析図
6. 信号指示の記録
7. 製造履歴に関する聞き取り調査
8. 運転履歴調査結果（一次冷却材温度・圧力、放射線監視装置、一次冷却材水質）
9. 粒界腐食割れ、ピitting、局所変形、エロージョンについて
10. 高浜発電所3号機 第25回・第23回 定期検査時の信号指示の比較
11. 蒸気発生器伝熱管ショットピーニング工事総括報告書
12. SG伝熱管へのショットピーニングの有効性とPWSCC検出に関する考察
13. 高浜発電所3, 4号機におけるSG伝熱管外面の損傷事象の経緯
14. ECTの位相評価
15. 粒界腐食割れに関する検討結果
16. ピitting発生に関する検討結果
17. リン酸減肉によるきずの形状
18. 流体振動による疲労評価
19. エロージョンの発生可能性評価
20. SG器内点検結果
21. 管支持板との接触による摩耗減肉の評価
22. 異物混入対策について
23. SGブローダウン系統点検結果
24. SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査
25. SG内の伝熱管表面の観察結果
26. 回収したスケールの化学分析および形状確認結果
27. 伝熱管とスケールの摩耗試験方法について
28. 回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果
29. スケール剥離による減肉信号への影響
30. スケール生成メカニズム
31. スケール性状に関する過去の知見
32. 2次系水処理と水化学管理の変遷
33. プラント性能指標の推移
34. スケール剥離メカニズムイメージ
35. 長期停止影響に係る考察
36. スケールのSG2次側器内挙動の推定および流況モックアップ試験による接触状態の再現

37. 前回の定期検査における薬品洗浄の実施結果
38. スラッジ影響を考慮した薬品洗浄工場試験結果
39. スケールによる伝熱管の減肉メカニズム調査の流れ
40. スケールと伝熱管の接触時における摩耗形態の推定について
41. 減肉試験による実機摩耗減肉形状の確認について
42. ECTモックアップ試験による実機ECT信号との整合性確認について
43. ワークレートをを用いた摩耗体積の計算結果について
44. 鉄持込み量比較
45. これまでのスラッジランシングによるスラッジ・スケールの総回収量
46. 高浜発電所3号機および4号機のスケール性状の比較について
47. 当社他プラントスケール摩耗試験結果
48. スケール性状による伝熱管減肉影響
49. 海外の蒸気発生器の運転履歴等調査結果
50. 減肉した伝熱管の評価
51. 隣接伝熱管の健全性
52. SG点検スケジュール
53. 高浜発電所4号機 第23回定期検査における伝熱管外面減肉事象に係る調査・対策内容からの主な変更点
54. 薬品洗浄条件について
55. SG伝熱管信号指示箇所補修概要図
56. 高浜発電所3号機 SG伝熱管の補修来歴
57. 高浜発電所3号炉 高経年化技術評価書（抜粋）
58. 減肉により施栓した伝熱管が隣接伝熱管へ及ぼす影響
59. 小型高圧洗浄装置による洗浄について
60. スケールに対する保全指標について
61. 高浜発電所3号機SG器内のスケールに対する対策の変遷

SG伝熱管信号指示箇所概要図 (SG管板部)



S G伝熱管信号指示箇所概要図 (S G管支持板部)



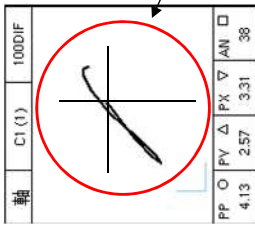
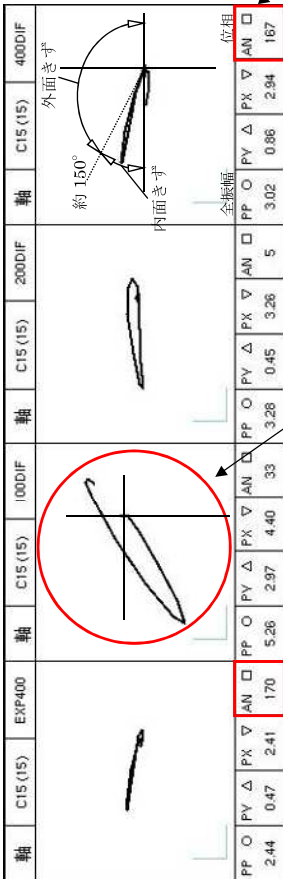
SG伝熱管ECT結果一覧

	A-SG	B-SG	C-SG	合計
設備本数	3,382	3,382	3,382	10,146
既施栓本数 (応力腐食割れによる施栓本数※)	110 (7)	135 (10)	121 (7)	366 (24)
検査対象本数	3,272	3,247	3,261	9,780
指示管本数 (微小な信号指示)	2 (1)	1	0	3 (1)
結果	<p>高温側伝熱管の管板部のローラ拡管上端部（22ピッチ）においてA-SGに1本に有意な信号指示（管軸方向に沿った内面きずを示す信号）が認められた。</p> <p>また、管支持板部付近において、A-SGで1本およびB-SGで1本に、外部からの減肉とみられる有意な信号指示が認められた。</p>			
備考	<p>A-SGの伝熱管1本について、管支持板部付近の伝熱管外面にて判定基準未満の微小な信号指示が認められた。</p>			

※既施栓本数の内数を示す。

SG伝熱管ECT結果

リサージュ表示※1 (A-SG X9,Y2)



同一番地の伝熱管の健全と評価されるリサージュ

[分析手順-1]
400kHz ※3 リサージュ波形の位相から向きを示していることを確認する。

[分析手順-2]
同様に 100kHz リサージュ波形の位相から向きを示していることを確認する。

[分析手順-3]
リサージュ波形に構造物、形状等のノイズ信号が複合していることを確認する。

[分析手順-4]
信号が小さく、リサージュ波形に構造物、形状等のノイズ信号が複合していることを確認する。

[分析結果-1]
位相から内面軸向きパターンを示している。

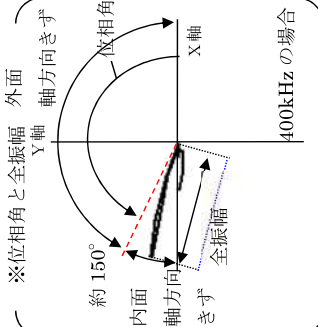
[分析結果-2]
構造物、形状等のノイズ信号が複合しており、位相から内面向きパターンを確認できない。

[分析結果-3]
信号が小さくリサージュ波形に構造物、形状等のノイズ信号が複合しており、位相や全振幅の確認ができない。

[分析結果-4]
400kHz リサージュ波形の位相から内面軸向きパターンを示しており、100kHz において健全部と比較して、内面軸向きが影響を示した波形となっている。

位相角
ECT信号を2次元的に表示したリサージュ表示において、X軸0°からの角度をいい、内面向きか外面向きかを評価する。

全振幅
リサージュ表示の最大長さをいい、周波数の異なるそれぞれの全振幅の大きさを比較することにより内面向きか外面向きかを判定する。



伝熱管内面軸向きの特徴

位相角
位相角が 400kHz で約 150° 以上
100kHz で約 170° 以上

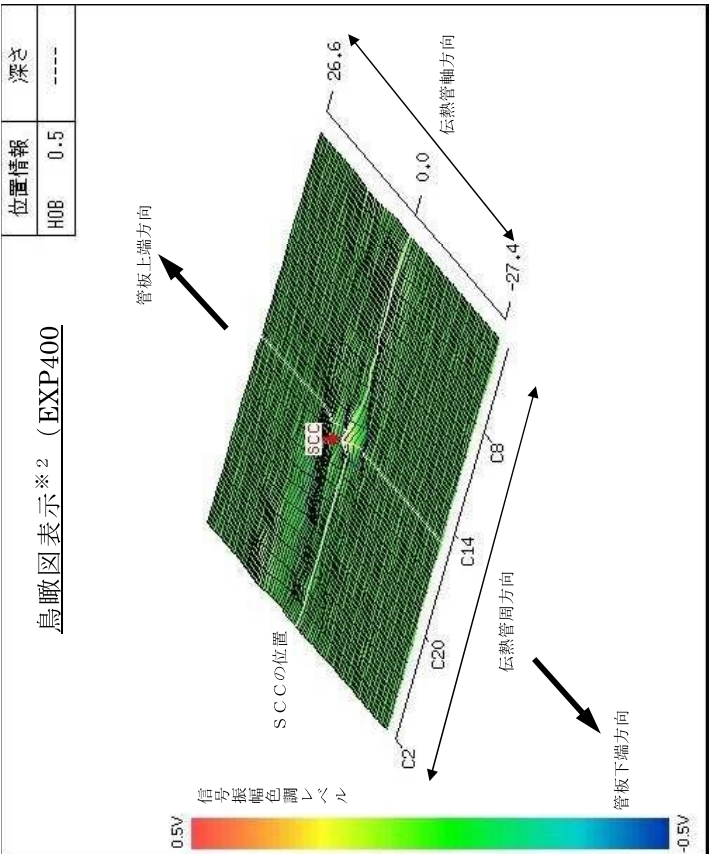
全振幅
100kHz の全振幅 < 400kHz の全振幅



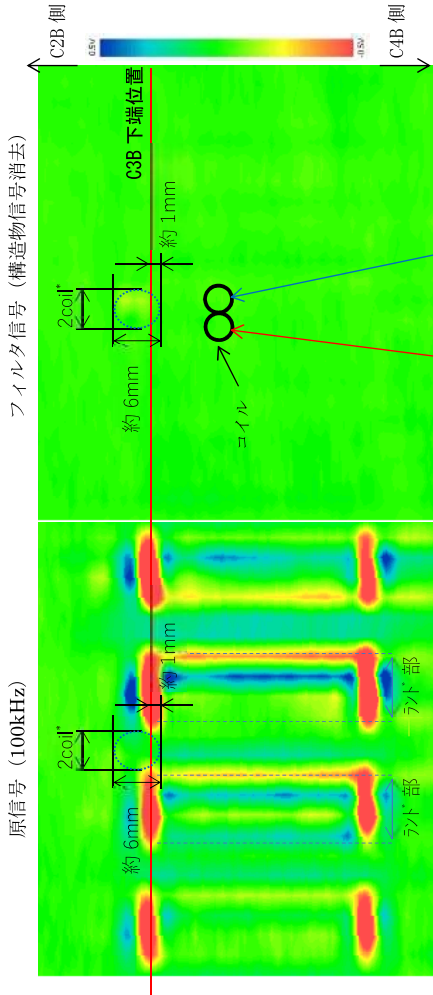
評価

今回の有意な信号指示は高温側管板部で、伝熱管内面軸向きの特徴を有している。また、信号の特徴により貫通していないと評価した。

※1：渦電流変化の電気信号を図で表したものの(水平成分および垂直成分を同一画面に表示)。
 ※2：信号の波形を3次元的に表したもので、信号の分布(イメージ)の詳細分析に用いる表示方法。
 ※3：400kHz は原信号およびEXPフィルタを含む。

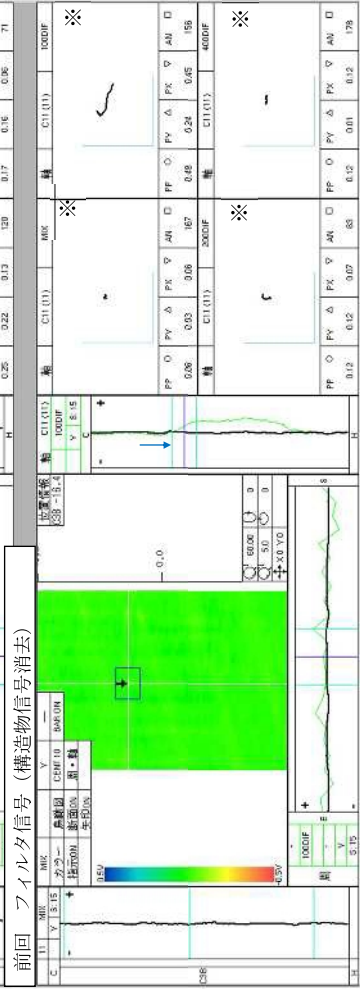
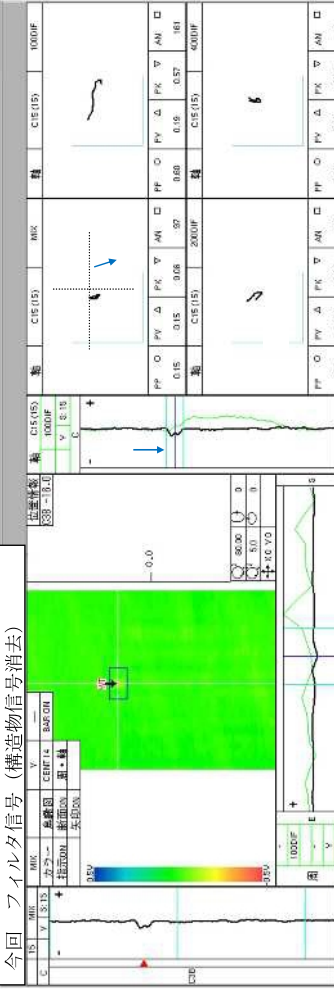


SG伝熱管ECT結果



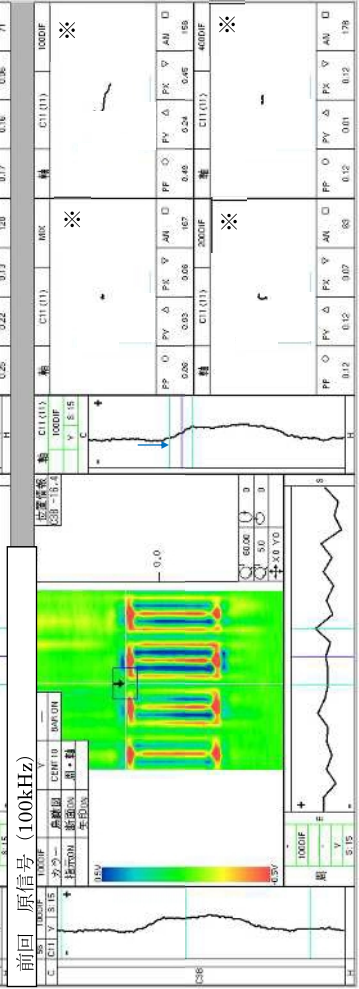
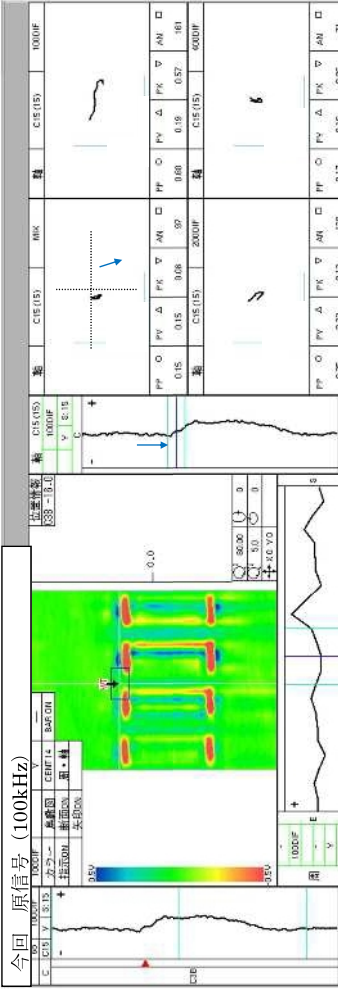
今回 フィルタ信号 (構造物信号消去)

前回 フィルタ信号 (構造物信号消去)



今回 原信号 (100kHz)

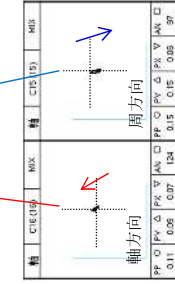
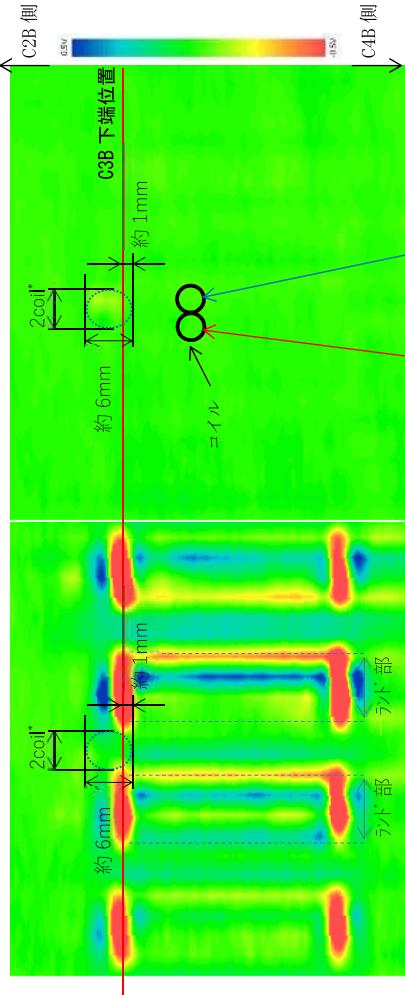
前回 原信号 (100kHz)



前今比較

※特異な信号がないため任意の位置で表示。

フィルタ信号 (構造物信号消去)



【A-SG X51, Y8 リサージェ波形】

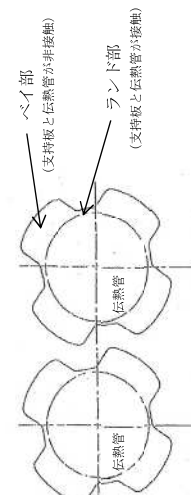
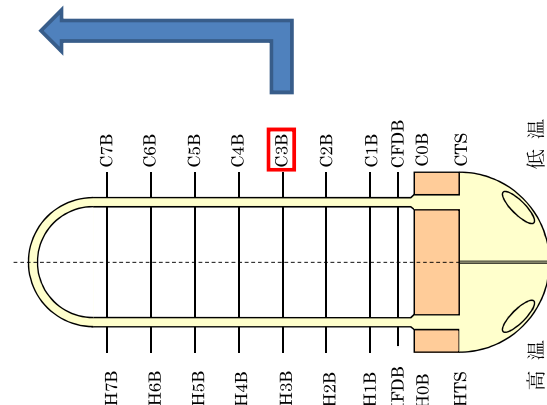
きず端部の軸方向成分(赤色矢印)を検出
ます中心部の周方向成分(青色矢印)を検出

波形評価

- 位相角評価から、外面指示の特徴を持っている。
- 指示は複数の軸方向成分で検出されており、指示の中心部のコイルは周方向成分、両端部のコイルでは軸方向成分の特徴を持っている。

上記の通り軸方向成分及び周方向成分の両方の成分が読み取れるため、広がりを持つ減肉と評価する。(下図参照)

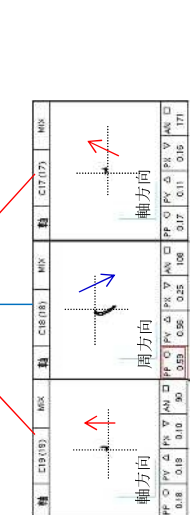
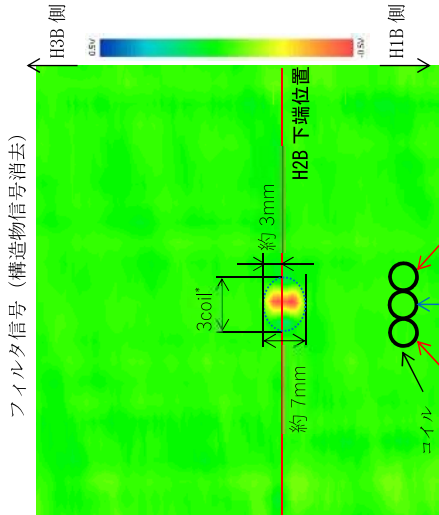
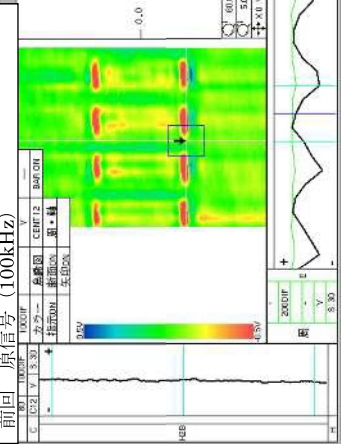
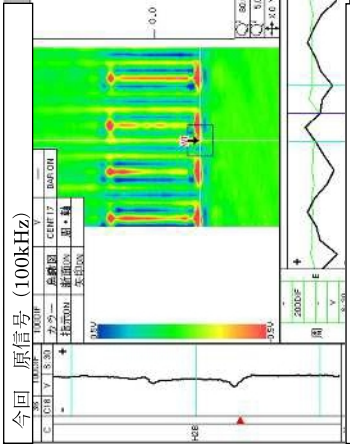
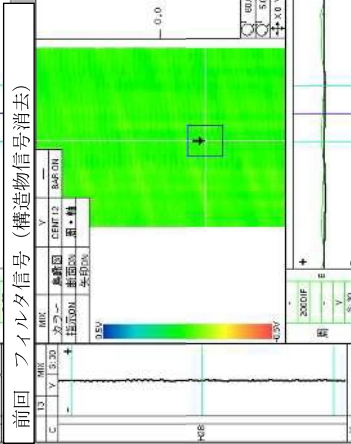
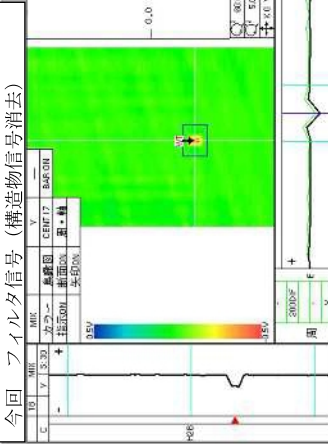
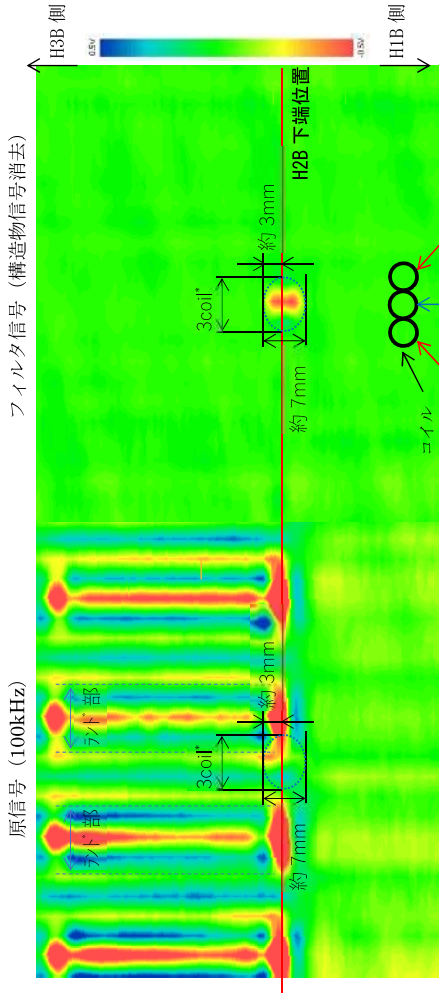
*lcoil : 約3mm ※内側から見たイメージ



信号評価

A-SG X51, Y8 部位 : C3B (減肉率 : 20%未満)

SG伝熱管ECT結果



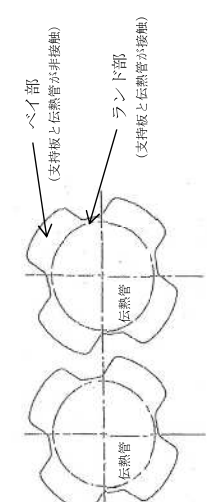
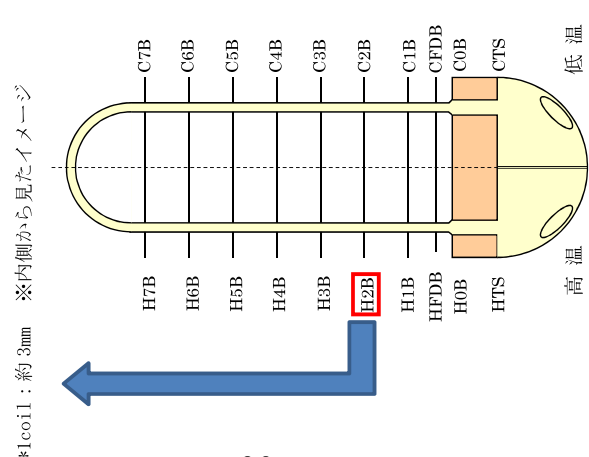
【B-SG X35, Y32 リサージェ波形】

きず端部の軸方向成分(赤色矢印)を検出
ます中心部の周方向成分(青色矢印)を検出

波形評価

- 位相角評価から、外面指示の特徴を持っている。
- 指示は複数のコイルで検出されており、指示の中心部のコイルは周方向成分、両端部のコイルでは軸方向成分の特徴を持っている。

上記の通り軸方向成分及び周方向成分の両方の成分が読み取れるため、広がりを持つ減肉と評価する。(下図参照)



信号評価

B-SG X35, Y32 部位: H2B (減肉率: 約 41%)

前今比較

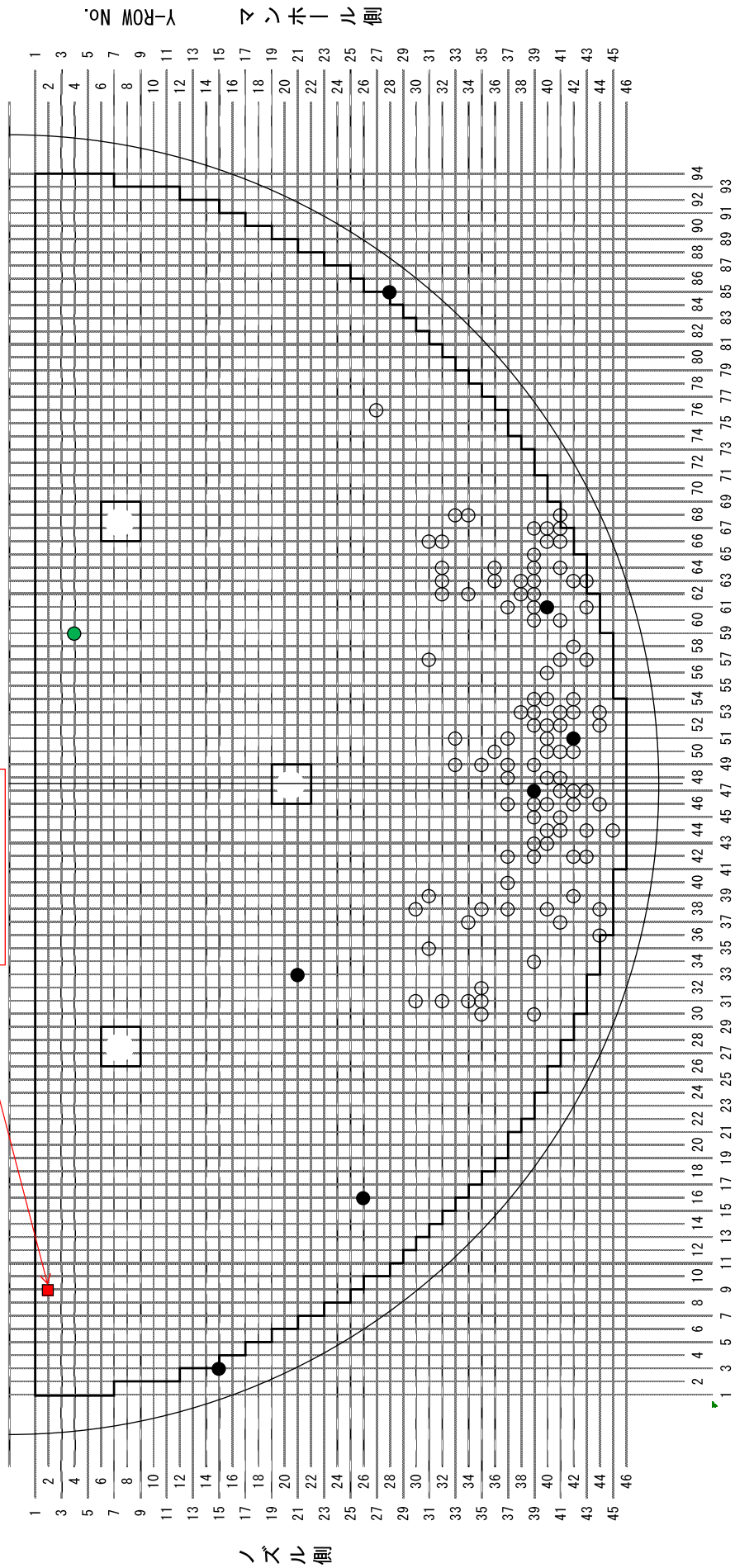
※特異な信号がないため任意の位置で表示。

SG伝熱管ECT信号指示位置図
A-SG (高温側)

- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (102本)
- : 既施栓管 (低温側管支持板部外面減肉) (1本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (7本)
- : 今回内面に指示が認められた位置 (1本)

<管板>
 有意な信号指示管
 (X9, Y2)

本図はSG上部から見た位置を示す



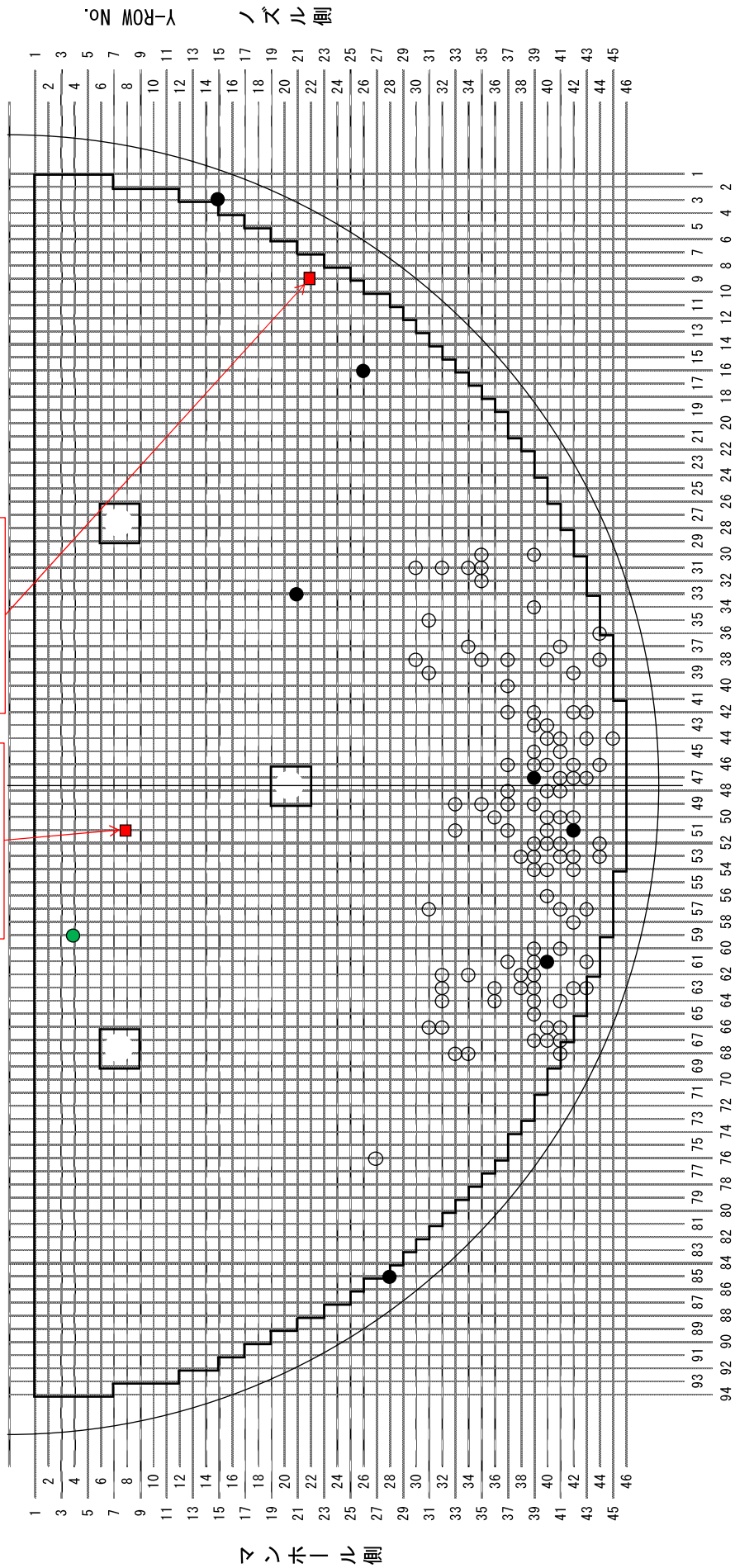
SG伝熱管ECT信号指示位置図
A-SG (低温側)

- : 既施栓管 (高温側拡管部応力腐食割れ以外) (102本)
- : 既施栓管 (管支持板部外面減肉) (1本)
- : 既施栓管 (高温側拡管部応力腐食割れ) (7本)
- : 今回外面減肉指示が認められた位置 (2本)

＜第三管支持板＞
微小な信号指示管
(X51, Y8)

＜第四管支持板＞
有意な信号指示管
(X9, Y22)

本図はSG上部から見た位置を示す

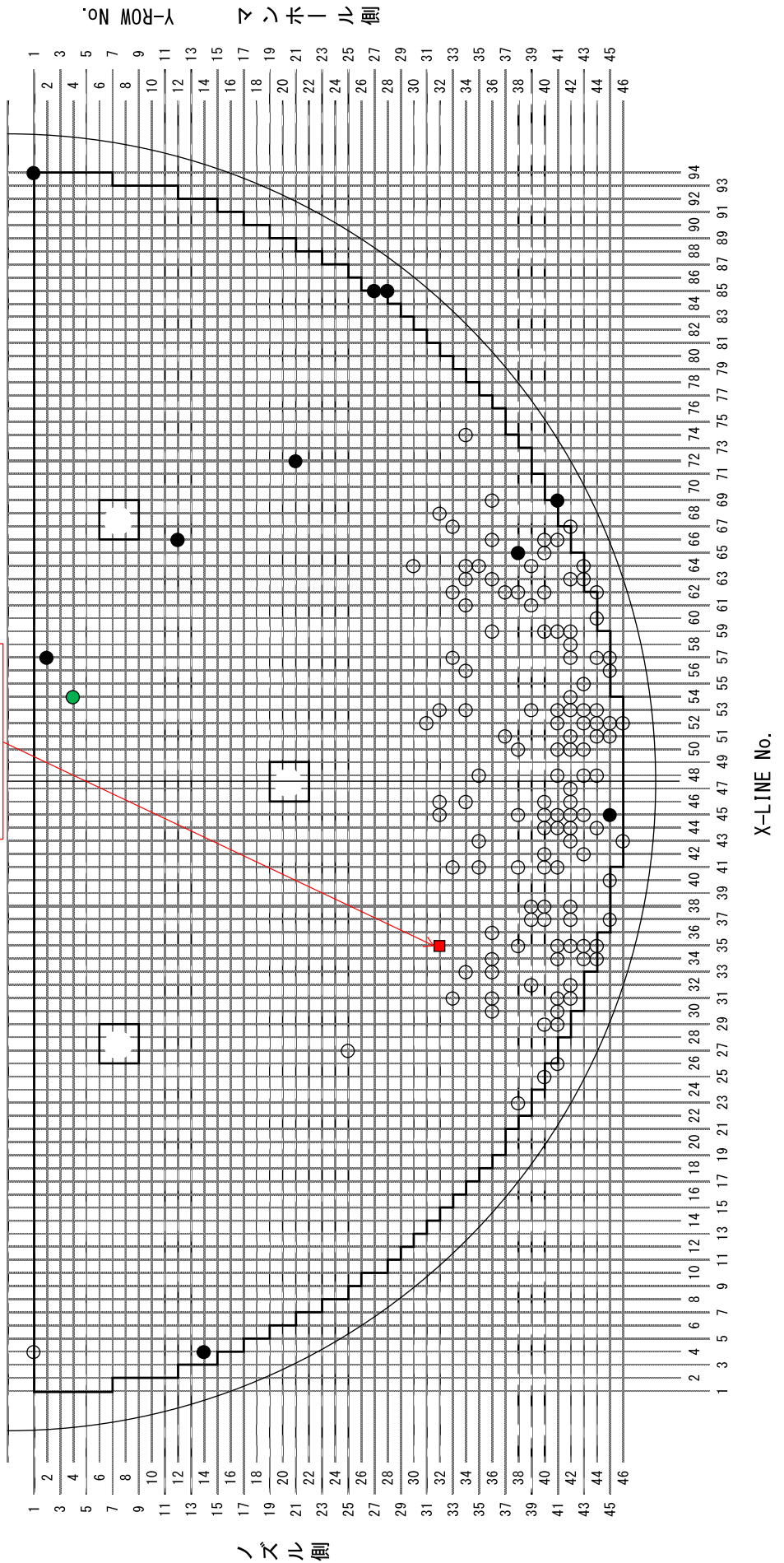


SG伝熱管ECT信号指示位置図
B-SG (高温側)

- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (124本)
- : 既施栓管 (低温側管支持板部外面減肉) (1本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (10本)
- : 今回外面減肉指示が認められた位置 (1本)

<第二管支持板>
有意な信号指示管
(X35, Y32)

本図はSG上部から見た位置を示す



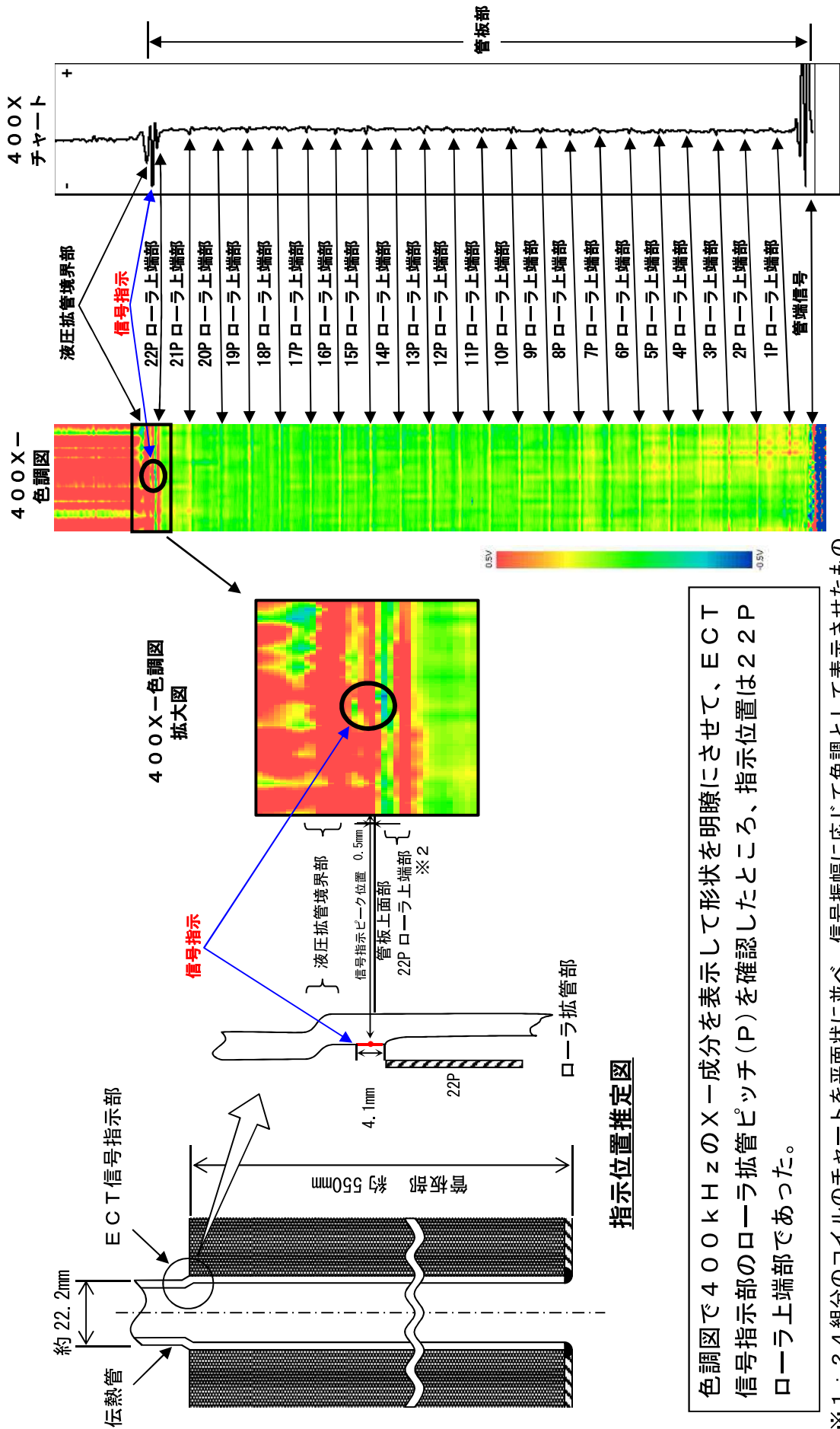
要因分析図

要因		調査項目		評価		
2次側からの 揺動	管板管部で 有意な異常 指示を確認	延座割れ	過大応力	設計図書による確認	×	
			異常な過渡変化の有無を調査	設計図書から、過大な応力を発生させる異常な温度・圧力変化がないことを確認した。	×	
			材料不良	ミルシートにより材質を確認	×	
		疲労割れ	圧力・ 温度過渡	設計図書による確認	異常な過渡変化の有無を調査	×
			機械的振動 流体振動	振動の有無を調査	運転履歴から、有意な振動を与えない、異常な温度・圧力変化がないことを確認した。	×
			製造中に発生	製造履歴調査	検査記録および作業員への聞き取り調査の結果、手順通り作業は行われており、作業においてきずのないことを確認していることを確認した。	×
		スクラッチ	定期検査作業 中に発生	ECT波形調査	ECTの波形から、過去の定期検査中に発生したものでないことを確認した。	×
			環境	発生しうる環境であるか確認	一次冷却材は加工されて凍結せず、かつ構造上隙間部が存在せず、ドライ&ウェット現象が発生しないので、不純物濃縮による濃縮の変化はない、更に、一次冷却材には溶解性酸化物のため水素が注入され、良好な還元性雰囲気は維持されている。このような環境ではTT600合金に粒界腐食割れ、ピッチャング等の腐食の可能性はない。	×
			材料	ミルシートにより材料を確認	ミルシートから、材料の成分はSG製造メーカ仕様通りであり、TT600合金であることを確認した。	×
		ピッチャング	管板腐食	ECT波形調査	ECTの波形から、当該指示は内面きずの信号であり、局所変形による信号ではないことを確認した。	×
			過大流速	異常な過渡変化の有無を調査	運転履歴から、管内での過大流速が発生するような過渡はないことを確認した。	×
			限界流速の調査	限界流速の調査	管内流体の衝突によってエロージョンが発生するとされており、管板管部の伝熱管内の流速は平均約6m/sであり、伝熱管材料(TT600合金)にエロージョンが発生する限界流速(約70m/s以上)に比べて十分遅く、かつ、当該部の伝熱管内は流体が衝突する形状ではないことから、エロージョン発生の可能性はない。	×
		腐食による 減肉	材料	ECT波形調査	ECTの波形から、減肉によるものではないことを確認した。	×
			材料	ミルシートにより材料を確認	ミルシートから、材料の成分はSG製造メーカ仕様通りであり、TT600合金であることを確認した。	○
			材料のPWSCCの感受性調査	過去の知見から、TT600合金はPWSCC感受性を有していることを確認した。	○	
環境	一次冷却材の水質調査	一次冷却材の水質調査	運転履歴から、塩素イオン等の有害な成分について管理されていることを確認した。	○		
	一次冷却材環境、 温度の調査	一次冷却材環境、 温度の調査	過去の知見から、定格熱出力一定運転中の一次冷却材の環境、温度ではTT600合金はPWSCC感受性を有していることを確認した。	○		
	今回検出されたECT指示と 同様な部位における知見調査	今回検出されたECT指示と 同様な部位における知見調査	3月12回、4月11回定期検査の抜取調査結果からPWSCCによる損傷によるきずが認められたことから、加速試験を行った結果、PWSCCが発生することを確認している。	○		
シヨットピーニングの初期欠陥への影響	施工記録	施工記録	シヨットピーニング施工後にECT指示が確認されたメカニズムの調査	×		
	シヨットピーニングの初期欠陥への影響	シヨットピーニングの初期欠陥への影響	予め確認されている施工条件通り施工されていることを施工記録により確認した。シヨットピーニングの施工により初期欠陥は有意に進展していったことを確認した。	×		
	シヨットピーニングの施工による欠陥	施工記録	予め確認されている施工条件通り施工されていることを施工記録により確認した。	×		

×: 要因の可能性なし、○: 要因の可能性あり

信号指示の記録

色調図表示※1による管板部指示管の指示位置推定 (A-SG X9, Y2)



色調図で400kHzのX成分を表示して形状を明瞭にさせて、ECT信号指示部のローラ拡張ピッチ(P)を確認したところ、指示位置は22Pローラ上端部であった。

※1：24組分のコイルのチャートを平面状に並べ、信号振幅に応じて色調として表示させたもの。
 伝熱管全長についての信号指示の大きさや位置等の分析に用いる表示方法。
 ※2：管板の穴に伝熱管を挿入し、伝熱管の内面から高い圧力(水圧)で拡張した後、管板下端部から上端部に向かって機械式ローラで伝熱管を押し広げて伝熱管と管板を圧着した最終ピッチ部。

有意な信号指示のリサージ、鳥瞰図表示による分析例 (SCC)

リサージ表示 ※1 (A-SG X9, Y2)

軸	C15 (15)	EXP400	軸	C15 (15)	100DIF	軸	C15 (15)	200DIF	軸	C15 (15)	400DIF
PP	0.47	2.41	FX	2.41	170	AN	2.44	0.47	PV	2.97	4.40
PP	5.26	2.97	PY	3.28	33	AN	3.02	0.86	PV	3.26	5
PP	3.28	3.28	FX	3.26	5	AN	3.02	0.86	PV	3.26	5
PP	3.26	3.26	PV	3.26	5	AN	3.02	0.86	PV	3.26	5
PP	3.02	3.02	FX	3.02	5	AN	3.02	0.86	PV	3.02	5
PP	3.02	3.02	PV	3.02	5	AN	3.02	0.86	PV	3.02	5
PP	0.86	0.86	FX	0.86	2.94	AN	1.67		FX	2.94	1.67
PP	0.86	0.86	PV	0.86	2.94	AN	1.67		PV	0.86	2.94
PP	2.94	2.94	FX	2.94	1.67	AN	1.67		FX	2.94	1.67
PP	2.94	2.94	PV	2.94	1.67	AN	1.67		PV	2.94	1.67

軸	C1 (1)	100DIF
PP	4.13	2.57
PP	3.31	3.31
PP	3.31	3.31
PP	3.31	3.31
PP	3.31	3.31
PP	3.31	3.31
PP	3.31	3.31
PP	3.31	3.31
PP	3.31	3.31

同一番地の伝熱管の健全と評価されるリサージ

[分析手順-1]
400kHz リサージ波形の位相からリサージパターンを示していることを確認する。

↑

[分析結果-1]
位相から内面軸方向きずパターンを示している。

↑

[分析手順-2]
同様に 100kHz リサージ波形の位相から内面きずパターンを確認する。

↑

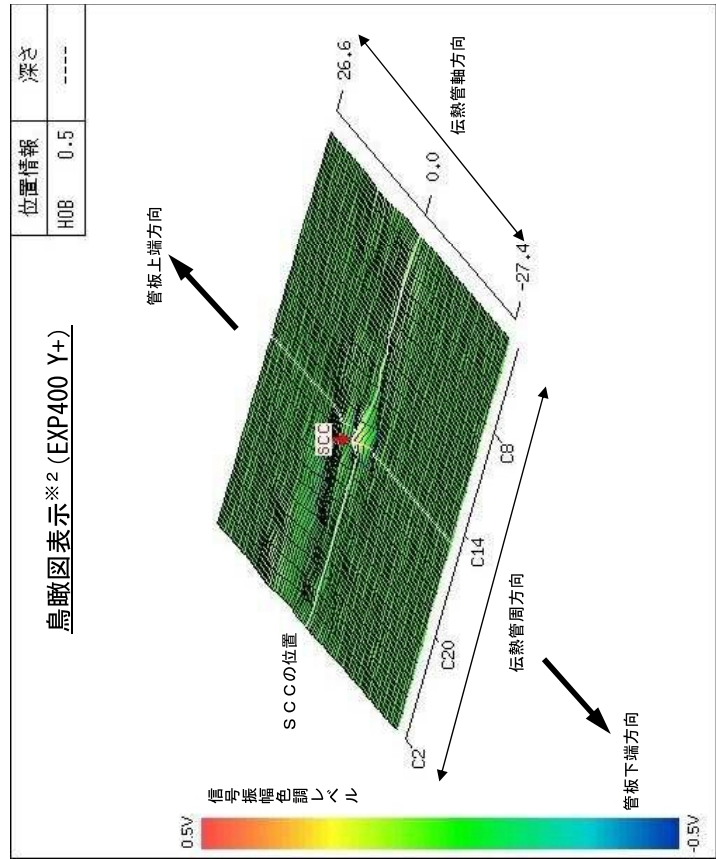
[分析結果-2]
構造物、形状等のノイズ信号が複合しており、位相から内面きずパターンを確認できない。

↑

[分析手順-3]
リサージ波形に構造物、形状等のノイズ信号が複合しているため、認められた場合は、出来るだけノイズ成分を除いたリサージ波形を表示し確認する。

↑

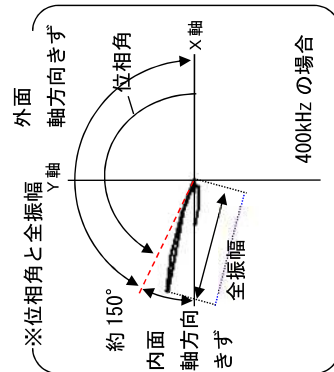
[分析結果-3]
信号が小さくリサージ波形に構造物、形状等のノイズ信号が複合しており、位相や全振幅の確認ができない。



位置情報	深さ
HOB	0.5

位相角
ECT信号を2次元的に表示したリサージ表示において、X軸0°からの角度をいい、内面きずか外面きずか、軸方向きずか周方向きずかを評価する。

全振幅
リサージ表示の最大長さをいい、周波数の異なるそれぞれの全振幅の大きさを比較することにより内面きずか外面きずかを判定する。



伝熱管内面軸方向きずの特徴

位相角
位相角が400kHzで約150°以上
100kHzで約170°以上

全振幅
100kHzの全振幅<400kHzの全振幅

※信号が小さく、構造物や形状等に複合し位相角や全振幅の評価が困難な場合は、分析手順により総合的に評価する。

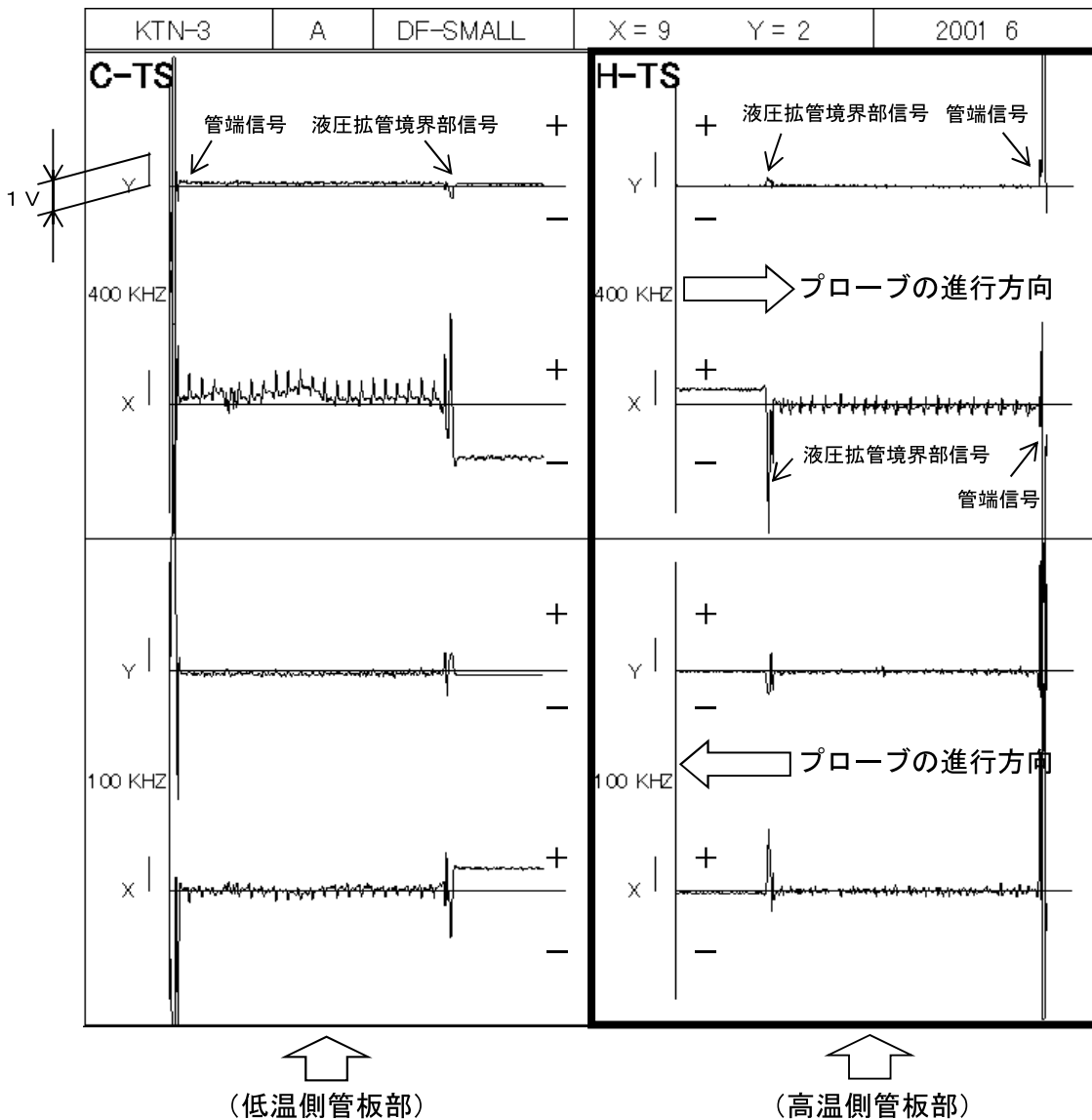
評価

今回の有意な信号指示は高温側管板部で、伝熱管内面軸方向きずの特徴を有している。また、信号の特徴により貫通していないと評価した。

※1：渦電流変化の電気信号を図で表したものの(水平成分および垂直成分を同一画面に表示)。
 ※2：信号の波形を3次元的に表したもので、信号の分布(イメージ)の詳細分析に用いる表示方法。
 ※3：400kHzは原信号およびEXPフィルタを含む。

当該管のショットピーニング施工前のDF-ECT※波形 (A-SG X9, Y2)

第13回定期検査にショットピーニング施工する前に実施したDF-ECTの波形を確認したところ、当該伝熱管 (A-SG X9, Y2) の高温側管板部には有意な信号指示は確認されなかった。



管板部の有意信号とは、

- 400kHz/100kHz の Y 信号がともにプローブの進行方向に対して「+→-」へ変動する
- 400kHz の Y 振幅が 0.5V 以上

※：全周に対して渦電流の発生と検出に同じコイルを用いた1組 (2個) のコイルで伝熱管の欠陥による渦電流の変化を信号として検出する試験

インテリジェント ECT※1の探傷データ(1/4)
 (高温側管板部の経年波形 A-SG X9,Y2)

今回	2022/03/18	前回	2020/02/05
KTN-3 A #25 X 9 Y 2 I 18 : [HTS] AH203_CAL101U 鳥瞰図表示 (EXP400 Y+) 	EXP400kHz 軸 C15(15) 1000DIF Y S:60 C H 15 EXP400 C Y I S:60 H0B HTS6 H	KTN-3 A #24 X 9 Y 2 I 43 : [HTS] AH606_CAL100U 鳥瞰図表示 (EXP400 Y+) 	EXP400kHz 軸 C15(15) 1000DIF Y I S:60 C H 15 EXP400 C Y I S:60 H0B HTS6 H
#25 分析評価 【400kHz】※2 EXP400のリサーージュ波の振幅において、#24と比較すると振幅が1.91Vから2.44Vと大きくなっており、内面軸方向きずパターンを示している。 加えて400DIFのリサーージュ波の振幅を見ても同様の変化を示している。 【100kHz】 管板上端信号との区別が困難ではあるが、#24と比較すると、内面きず信号方向に波形の歪みが認められる。 以上から、内面軸方向きずが考えられる。	100kHz 軸 C15(15) 1000DIF Y S:60 C H 15 EXP400 C Y I S:60 H0B HTS6 H	100kHz 軸 C15(15) 1000DIF Y S:60 C H 15 EXP400 C Y I S:60 H0B HTS6 H	100kHz 軸 C15(15) 1000DIF Y S:60 C H 15 EXP400 C Y I S:60 H0B HTS6 H
#24 分析評価 【400kHz】 位相がほぼ水平で、管板内の形状信号やプローブの揺動信号と類似している。また、リサーージュ波の振幅を見ても#23から有意な増加が認められない。 【100kHz】 健全部にみられる管板上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。 以上から、きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。	100kHz 軸 C15(15) 1000DIF Y S:60 C H 15 EXP400 C Y I S:60 H0B HTS6 H	100kHz 軸 C15(15) 1000DIF Y S:60 C H 15 EXP400 C Y I S:60 H0B HTS6 H	100kHz 軸 C15(15) 1000DIF Y S:60 C H 15 EXP400 C Y I S:60 H0B HTS6 H

※1: 全周に対して渦電流の発生と検出を別々のコイルを用いた24線のコイルで伝熱管の欠陥による渦電流の変化を信号として検出する試験
 ※2: 400kHzは、原信号及びEXPフィルタ(拡張境界部ノイズ信号を低減させるフィルタ)を含む

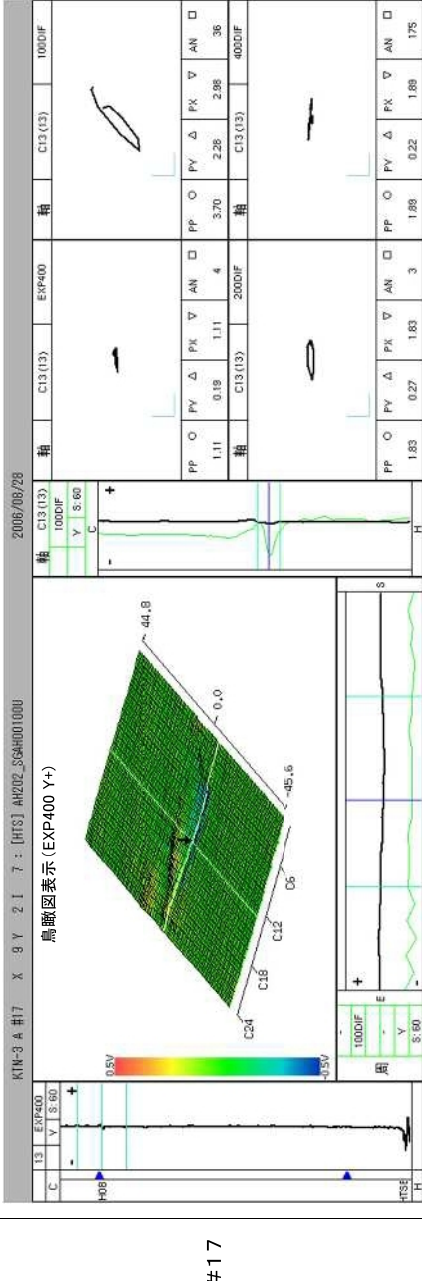
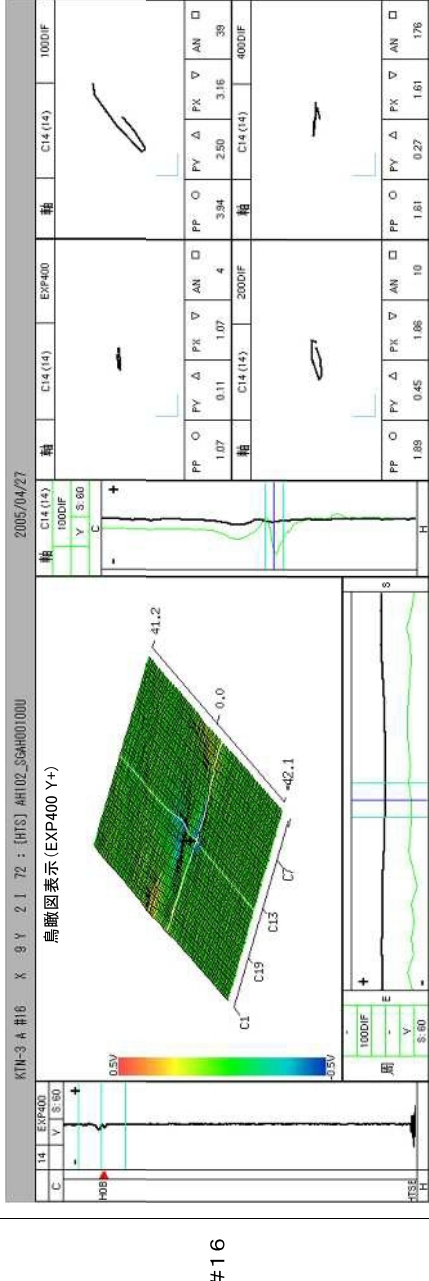
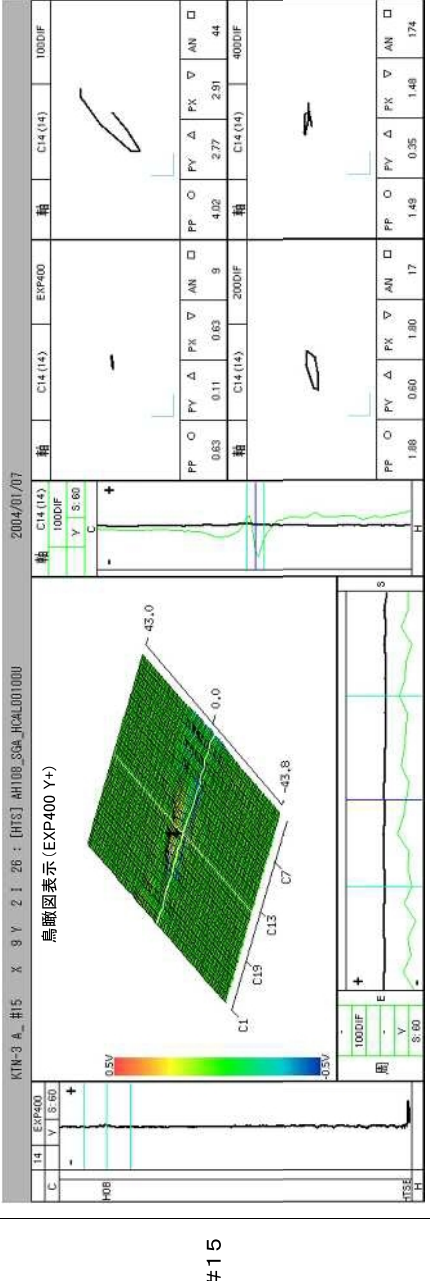
インテリジェント ECT の探傷データ(2/4)
 (高温側管板部の経年波形 A-SG X9,Y2)

<p>#23</p>		<p>分析評価</p> <p>【400kHz】 管板内の形状信号やブロープの揺動信号との区別が困難な信号である。</p> <p>【100kHz】 健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。</p> <p>以上から、<u>きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。</u></p>
<p>#22</p>		<p>分析評価</p> <p>【400kHz】 管板内の形状信号やブロープの揺動信号との区別が困難な信号である。</p> <p>【100kHz】 健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。</p> <p>以上から、<u>きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。</u></p>
<p>#21</p>		<p>分析評価</p> <p>【400kHz】 管板内の形状信号やブロープの揺動信号との区別が困難な信号である。</p> <p>【100kHz】 健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。</p> <p>以上から、<u>きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。</u></p>

インテリジェント ECT の探傷データ(3/4)
 (高温側管板部の経年波形 A-SG X9,Y2)

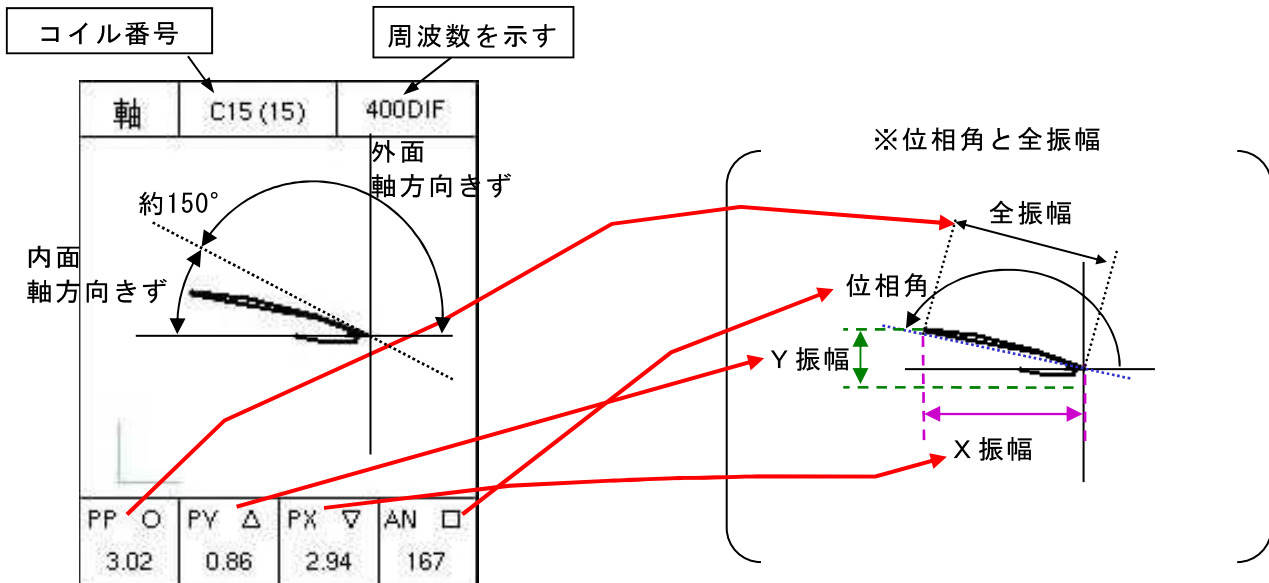
<p>#20</p>	<p>分析評価</p> <p>【400kHz】 管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。</p> <p>【100kHz】 健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。</p> <p>以上から、<u>きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。</u></p>
<p>#19</p>	<p>分析評価</p> <p>【400kHz】 管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。</p> <p>【100kHz】 健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合しているため評価できない。</p> <p>以上から、<u>きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。</u></p>
<p>#18</p>	<p>分析評価</p> <p>【400kHz】 管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。</p> <p>【100kHz】 健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合しているため評価できない。</p> <p>以上から、<u>きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。</u></p>

インテリジェント ECT の探傷データ(4/4)
 (高温側管板部の経年波形 A-SG X9,Y2)

<p>#17</p>  <table border="1" data-bbox="183 828 606 2105"> <thead> <tr> <th colspan="2">軸</th> <th>C13(13)</th> <th>軸</th> <th>C13(13)</th> <th>EXP400</th> <th>軸</th> <th>C13(13)</th> <th>1000DF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PY</td> <td>△</td> <td>PK</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> <td>PK</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> </tr> <tr> <td>1.11</td> <td>0.19</td> <td>1.11</td> <td>4</td> <td>3.70</td> <td>2.26</td> <td>2.98</td> <td>36</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">軸</td> <td>C13(13)</td> <td>2000DF</td> <td>軸</td> <td>C13(13)</td> <td>4000DF</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PY</td> <td>△</td> <td>PK</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> <td>PK</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> </tr> <tr> <td>1.83</td> <td>0.27</td> <td>1.83</td> <td>3</td> <td>1.89</td> <td>0.22</td> <td>1.89</td> <td>175</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	軸		C13(13)	軸	C13(13)	EXP400	軸	C13(13)	1000DF	PP	○	PY	△	PK	▽	AN	□	PK	▽	AN	□	1.11	0.19	1.11	4	3.70	2.26	2.98	36				軸		C13(13)	2000DF	軸	C13(13)	4000DF					PP	○	PY	△	PK	▽	AN	□	PK	▽	AN	□	1.83	0.27	1.83	3	1.89	0.22	1.89	175				<p>分析評価</p> <p>【400kHz】 管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。</p> <p>【100kHz】 健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。</p> <p>以上から、<u>きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。</u></p>
軸		C13(13)	軸	C13(13)	EXP400	軸	C13(13)	1000DF																																																											
PP	○	PY	△	PK	▽	AN	□	PK	▽	AN	□																																																								
1.11	0.19	1.11	4	3.70	2.26	2.98	36																																																												
軸		C13(13)	2000DF	軸	C13(13)	4000DF																																																													
PP	○	PY	△	PK	▽	AN	□	PK	▽	AN	□																																																								
1.83	0.27	1.83	3	1.89	0.22	1.89	175																																																												
<p>#16</p>  <table border="1" data-bbox="630 828 1061 2105"> <thead> <tr> <th colspan="2">軸</th> <th>C14(14)</th> <th>軸</th> <th>C14(14)</th> <th>EXP400</th> <th>軸</th> <th>C14(14)</th> <th>1000DF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PY</td> <td>△</td> <td>PK</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> <td>PK</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> </tr> <tr> <td>1.07</td> <td>0.11</td> <td>1.07</td> <td>4</td> <td>3.94</td> <td>2.50</td> <td>3.16</td> <td>39</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">軸</td> <td>C14(14)</td> <td>2000DF</td> <td>軸</td> <td>C14(14)</td> <td>4000DF</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PY</td> <td>△</td> <td>PK</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> <td>PK</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> </tr> <tr> <td>1.89</td> <td>0.45</td> <td>1.86</td> <td>10</td> <td>1.61</td> <td>0.27</td> <td>1.61</td> <td>176</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	軸		C14(14)	軸	C14(14)	EXP400	軸	C14(14)	1000DF	PP	○	PY	△	PK	▽	AN	□	PK	▽	AN	□	1.07	0.11	1.07	4	3.94	2.50	3.16	39				軸		C14(14)	2000DF	軸	C14(14)	4000DF					PP	○	PY	△	PK	▽	AN	□	PK	▽	AN	□	1.89	0.45	1.86	10	1.61	0.27	1.61	176				<p>分析評価</p> <p>【400kHz】 管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。</p> <p>【100kHz】 健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。</p> <p>以上から、<u>きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。</u></p>
軸		C14(14)	軸	C14(14)	EXP400	軸	C14(14)	1000DF																																																											
PP	○	PY	△	PK	▽	AN	□	PK	▽	AN	□																																																								
1.07	0.11	1.07	4	3.94	2.50	3.16	39																																																												
軸		C14(14)	2000DF	軸	C14(14)	4000DF																																																													
PP	○	PY	△	PK	▽	AN	□	PK	▽	AN	□																																																								
1.89	0.45	1.86	10	1.61	0.27	1.61	176																																																												
<p>#15</p>  <table border="1" data-bbox="1085 828 1516 2105"> <thead> <tr> <th colspan="2">軸</th> <th>C14(14)</th> <th>軸</th> <th>C14(14)</th> <th>EXP400</th> <th>軸</th> <th>C14(14)</th> <th>1000DF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PY</td> <td>△</td> <td>PK</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> <td>PK</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> </tr> <tr> <td>0.63</td> <td>0.11</td> <td>0.63</td> <td>9</td> <td>4.02</td> <td>2.77</td> <td>2.91</td> <td>44</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">軸</td> <td>C14(14)</td> <td>2000DF</td> <td>軸</td> <td>C14(14)</td> <td>4000DF</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PY</td> <td>△</td> <td>PK</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> <td>PK</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> </tr> <tr> <td>1.89</td> <td>0.80</td> <td>1.80</td> <td>17</td> <td>1.49</td> <td>0.35</td> <td>1.48</td> <td>174</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	軸		C14(14)	軸	C14(14)	EXP400	軸	C14(14)	1000DF	PP	○	PY	△	PK	▽	AN	□	PK	▽	AN	□	0.63	0.11	0.63	9	4.02	2.77	2.91	44				軸		C14(14)	2000DF	軸	C14(14)	4000DF					PP	○	PY	△	PK	▽	AN	□	PK	▽	AN	□	1.89	0.80	1.80	17	1.49	0.35	1.48	174				<p>分析評価</p> <p>【400kHz】 管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。</p> <p>【100kHz】 健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。</p> <p>以上から、<u>きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。</u></p>
軸		C14(14)	軸	C14(14)	EXP400	軸	C14(14)	1000DF																																																											
PP	○	PY	△	PK	▽	AN	□	PK	▽	AN	□																																																								
0.63	0.11	0.63	9	4.02	2.77	2.91	44																																																												
軸		C14(14)	2000DF	軸	C14(14)	4000DF																																																													
PP	○	PY	△	PK	▽	AN	□	PK	▽	AN	□																																																								
1.89	0.80	1.80	17	1.49	0.35	1.48	174																																																												

有意な信号指示のリサーチ、鳥瞰図表示による分析例

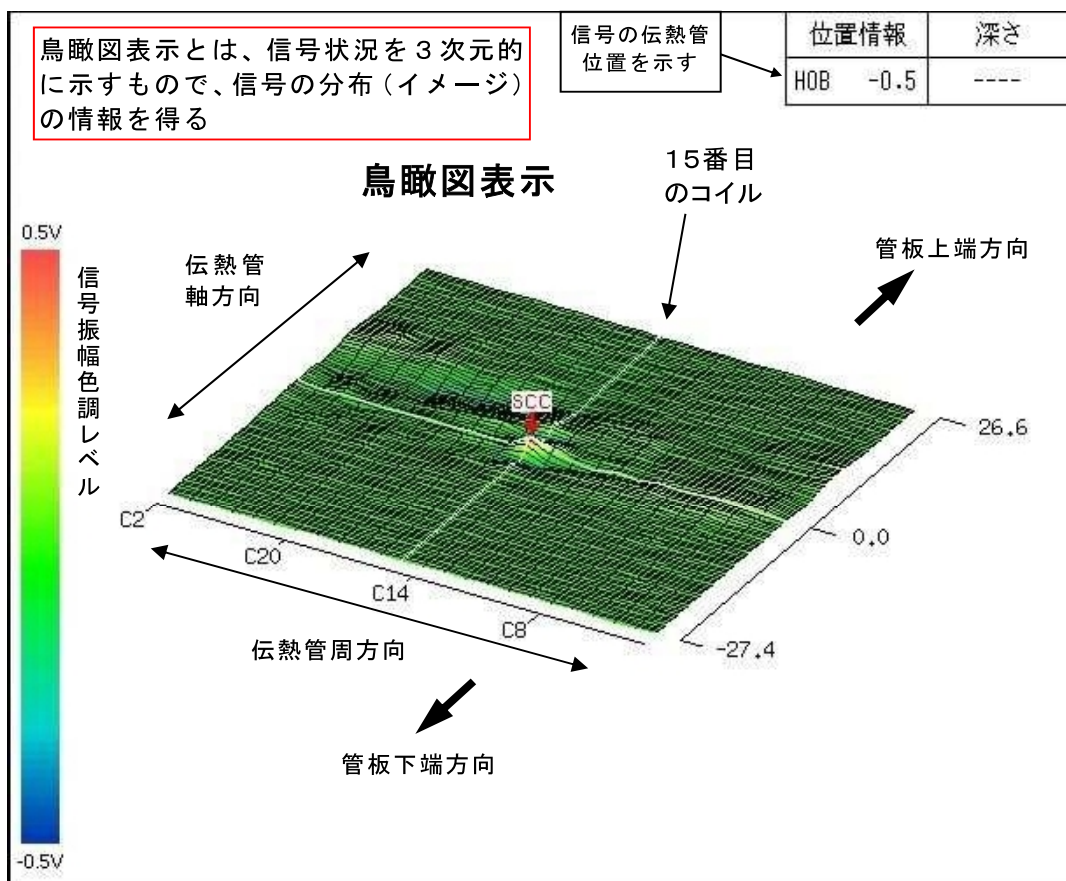
— インテリジェントECT信号波形の見方（リサーチ、鳥瞰図表示） —



内面軸方向きずの場合、位相角は400kHzの場合約150°以上に、100kHzの場合約170°以上にある。また、全振幅は400kHzの方が100kHzより大きい。

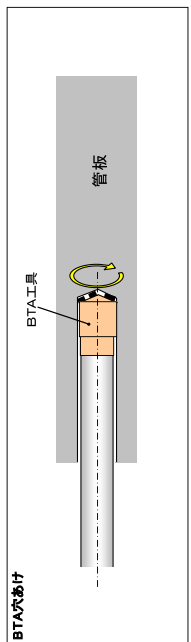
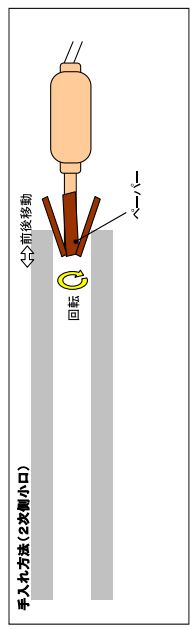
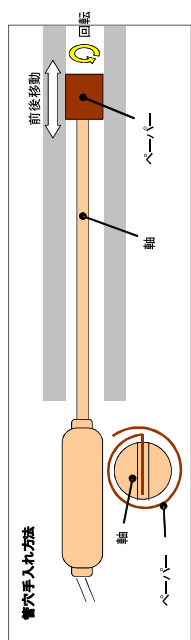
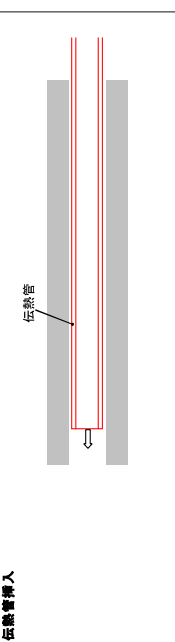
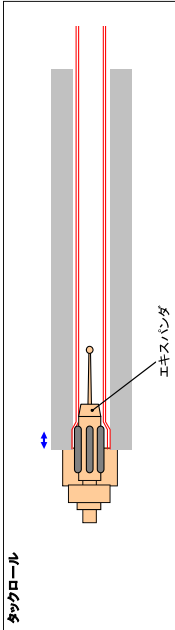
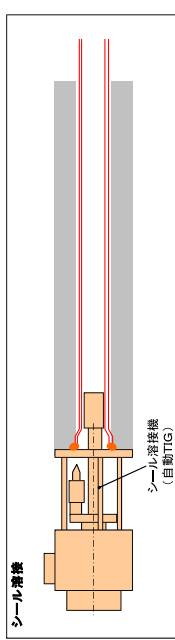
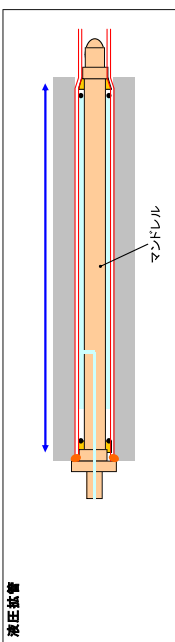
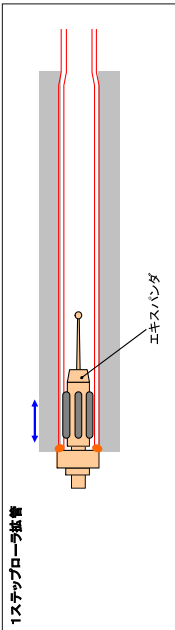
渦電流は周波数が高いほど伝熱管内面を流れやすく、周波数が低いほど伝熱管外面まで電流が流れる。このため、内面きずがあった場合は、100kHzより400kHzのほうが電流の変化として現れやすいため、内面きずのECT信号は100kHzより400kHzのほうが大きい。

リサーチ表示とは、ECT信号を2次的に示し、周波数の異なるECT信号から、きずが内外面および周軸方向のどちら側か等の情報を得る



製造履歴に関する聞き取り調査

製造手順、要領について関係者への聞き取りにより調査を行った。

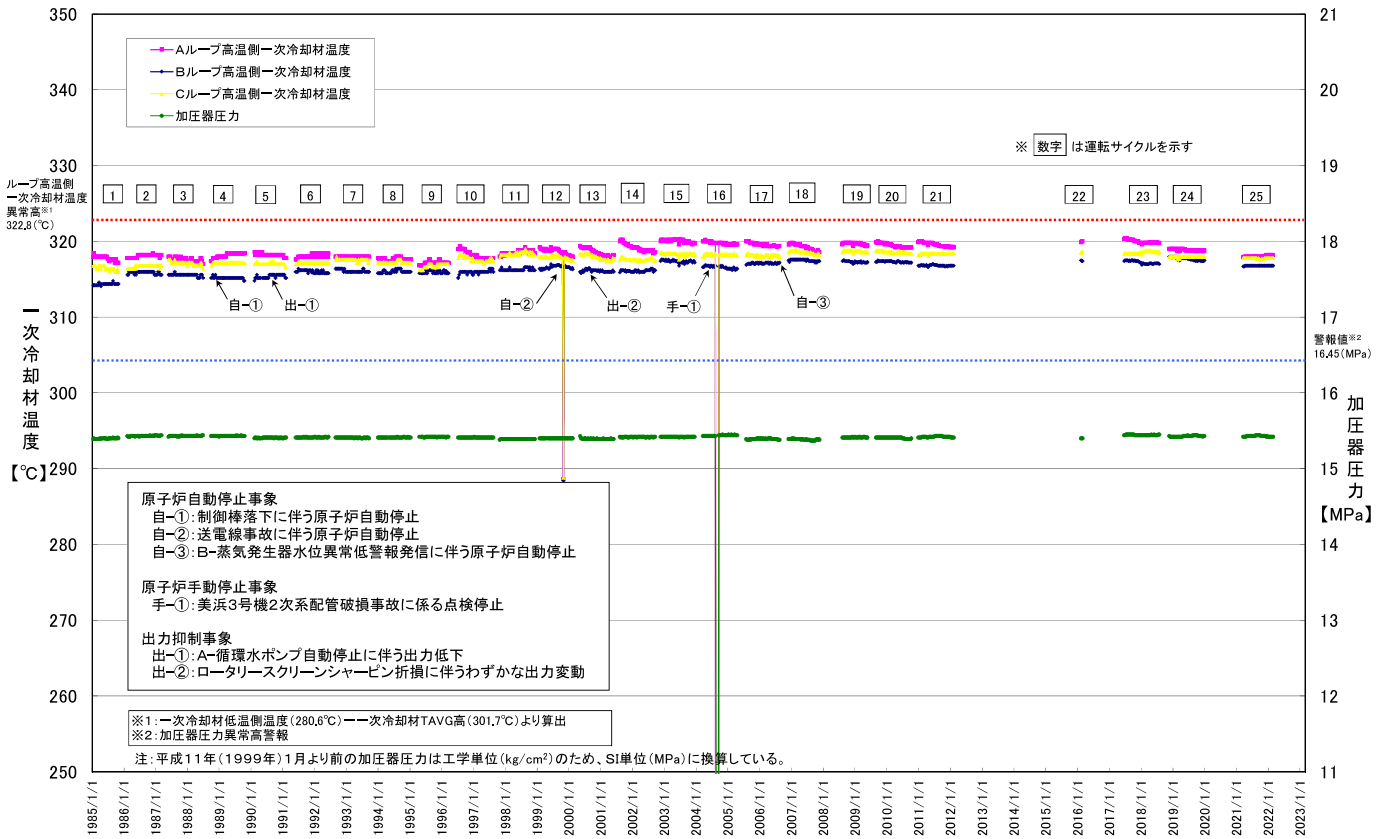
<p>1. 管穴加工</p>  <p>BTA工具 管板</p> <p>BTA 工具*1 により管板の管穴加工を行う。</p>	<p>1' 管穴 2 次側端部のカエリ取り</p>  <p>手入れ方法 (2次側小口) 回転 前後移動 ペーパー</p> <p>管穴加工後、2次側端部のカエリ取りを全穴実施。</p> <p>【検査】管穴内径確認、内面外観目視</p>	<p>1'' 管穴内面手入れ</p>  <p>管穴手入れ方法 軸 ペーパー 前後移動 回転</p> <p>管穴加工後に目視で内面を検査し、さすがが確認された場合は、紙やすり (P240程度) を取付けた回転工具を用いて手入れを行うことがある。</p> <p>【検査】(手入れ後)内面外観目視</p>
<p>2. 伝熱管挿入</p>  <p>伝熱管挿入 伝熱管</p> <p>管支持板および管板管穴に伝熱管を挿入。</p>	<p>3. 仮拡張</p>  <p>タックロール エキスパンダ</p> <p>ローラ拡張工具 (エキスパンダ) にて伝熱管端部を仮拡張。</p> <p>【検査】(仮拡張後)開先合せ検査</p>	<p>4. シール溶接</p>  <p>シール溶接 シール溶接機 (自動TIG)</p> <p>自動 TIG 溶接機で伝熱管端部をシール溶接。</p> <p>【検査】(シール溶接後)溶接部 He リーク試験、PT*2</p> <p>【調査結果】</p> <p>全 SG において1. ~6. の手順で製造・検査されていることを確認した。</p>
<p>5. 液圧拡張</p>  <p>液圧拡張 マントレル</p> <p>1700kgf/cm² (166.71MPa) の圧力で管板全厚の液圧拡張を行う。</p> <p>【検査】(液圧拡張後)境界部内径確認、内面外観目視</p>	<p>6. 22 ステップローラ拡張</p>  <p>1ステップローラ拡張 エキスパンダ</p> <p>100kgf・cm のトルクで 22 ステップローラ拡張を行う。</p> <p>【検査】(ローラ拡張後)境界部内径確認、内面外観目視</p>	

*1: 深さ方向に穴加工をしながら穴の内面を仕上げる工具

*2: 浸透探傷試験

運転履歴調査結果（一次冷却材温度・圧力、放射線監視装置、一次冷却材水質）

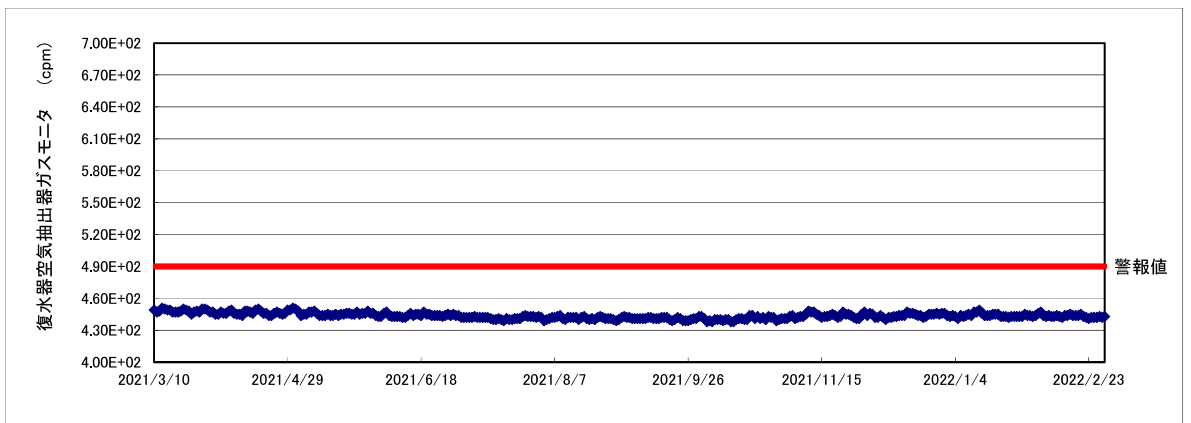
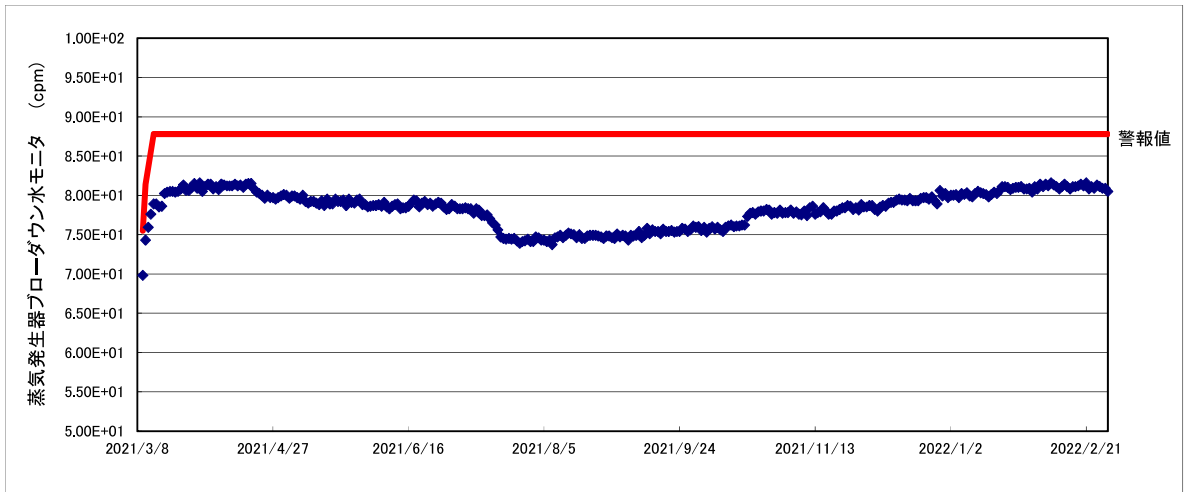
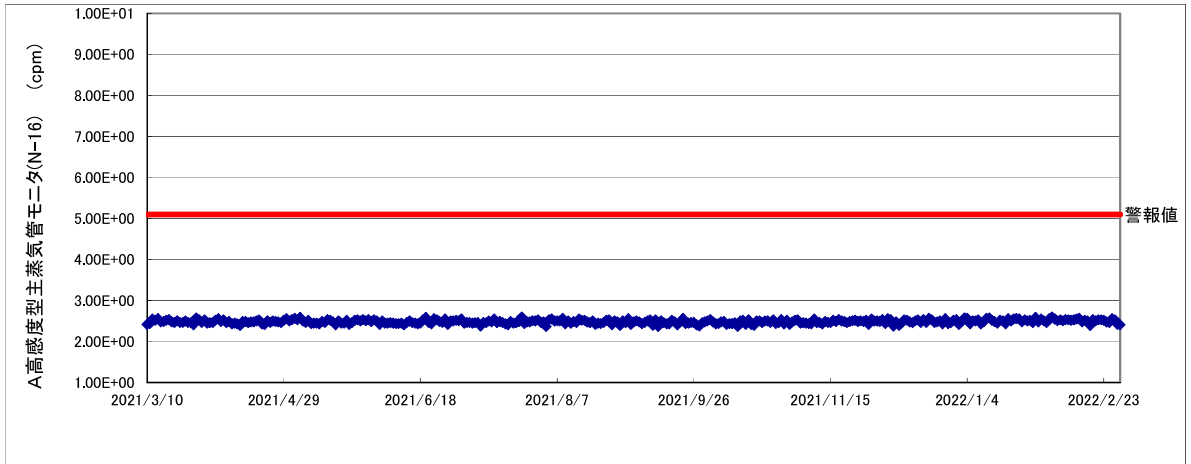
運転履歴調査結果 (一次冷却材温度・圧力)



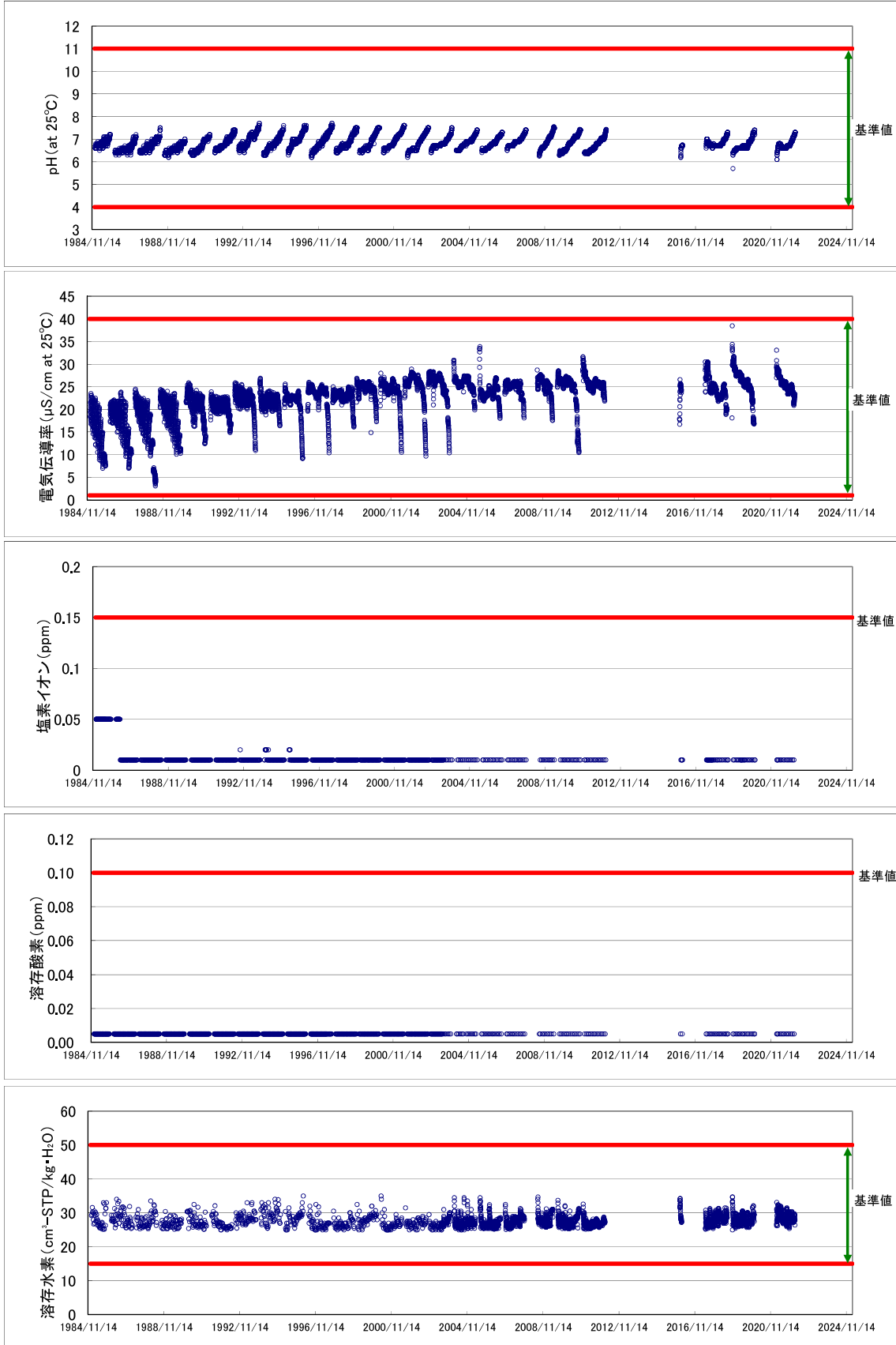
運転履歴調査結果 (一次冷却材温度)



運転履歴調査結果(放射線監視装置)



運転履歴調査結果(一次冷却材水質)



保安規定第19条に定める一次冷却材の水質基準値

項目	基準値
pH	4～11 (at25°C)
電気伝導率	1～40 μS/cm(at25°C)
塩素イオン	0.15 ppm以下
溶存酸素	0.1 ppm以下
溶存水素	15～50 cm ³ -STP/kg+H ₂ O

粒界腐食割れ、ピitting、局所変形、エロージョンについて

腐食損傷の発生可能性評価

一次冷却材は加圧されて沸騰せず、かつ構造上隙間部が存在せずドライ&ウェット現象が発生しないので、不純物濃縮による環境の変化はない。

項目	基準値
塩化物イオン	0.15ppm以下

ドライ&ウェット現象：

伝熱管隙間部で熱負荷により沸騰が生じる場合、局部的に乾湿が繰返される現象

一次冷却材には溶存酸素低減のため水素が注入され、良好な還元性雰囲気維持されている。

項目	基準値
溶存水素	15～50cm ³ -STP/kg・H ₂ O
溶存酸素	0.1ppm以下



一次冷却材は加圧されているので、伝熱管内では沸騰による不純物濃縮が起こることはなく、かつ還元性雰囲気を維持。

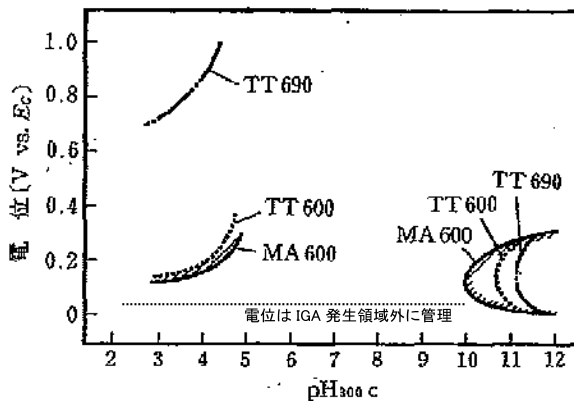


伝熱管内で不純物の濃縮および酸化剤による電位上昇による腐食損傷が発生する可能性はない。

- ※1
- ・ 粒界腐食割れ (IGA)
- ・ ピitting
- ※2

一次冷却材は溶存水素、溶存酸素を管理しており、還元性環境が維持されているので、電位上昇しない。

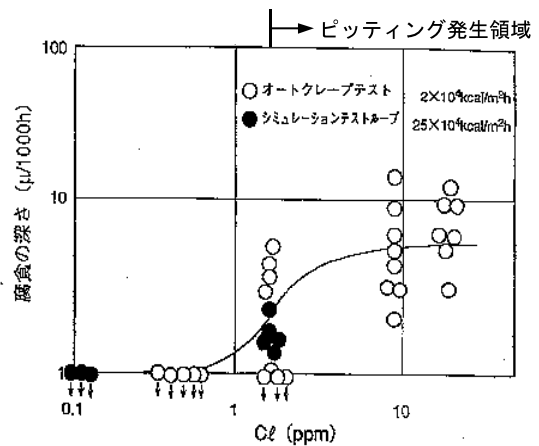
一次冷却材の塩化物イオン濃度は、十分低く管理されている。



SG 伝熱管材料の IGA 発生環境のまとめ
(出典：八島清爾, 原子力工業, 41, 4, p62(1995))

※ 1 : 金属の結晶粒の境目(粒界)に沿って進展する腐食

※ 2 : 塩素イオンなど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



インコネル600材の腐食に及ぼす塩素イオンの影響
(出典：日本原子力学会 原子炉水化学ハンドブック)

局所変形の発生可能性評価

1. 目的

局所的な変形の有無を今回の E C T 信号により評価する。

2. 方法

インテリジェント E C T が用いている 100kHz および 400kHz の周波数の信号は、局所変形の場合、リサージュ表示で位相角が 0° となり、リサージュ波形の巻きも大きくなる傾向がある。

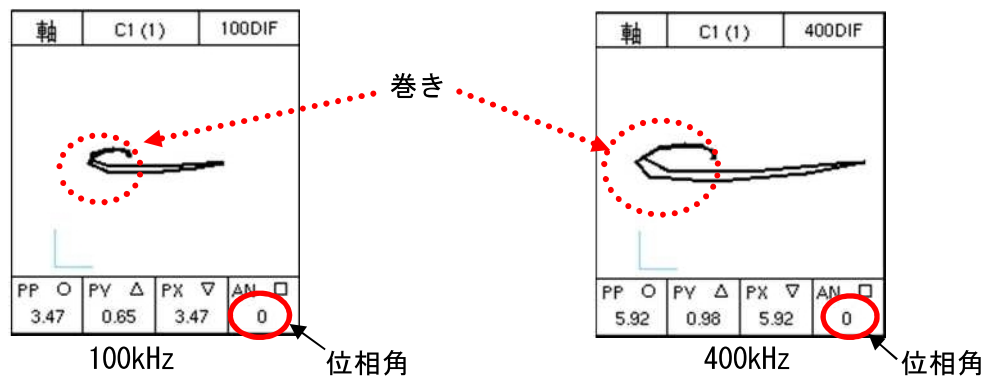
したがって、位相角が 100kHz, 400kHz とも 0° 近くでないことおよび巻きのないことを確認する。

3. A-SG (X9, Y2) の評価結果

今回検出された A-SG (X9, Y2) の E C T 信号は、400kHz において内面きずの特徴を示す位相角を有している。また、100kHz リサージュ波形は、局所変形の信号の特徴と明らかに異なる。以上から、局所変形と見られるような信号は認められなかった。

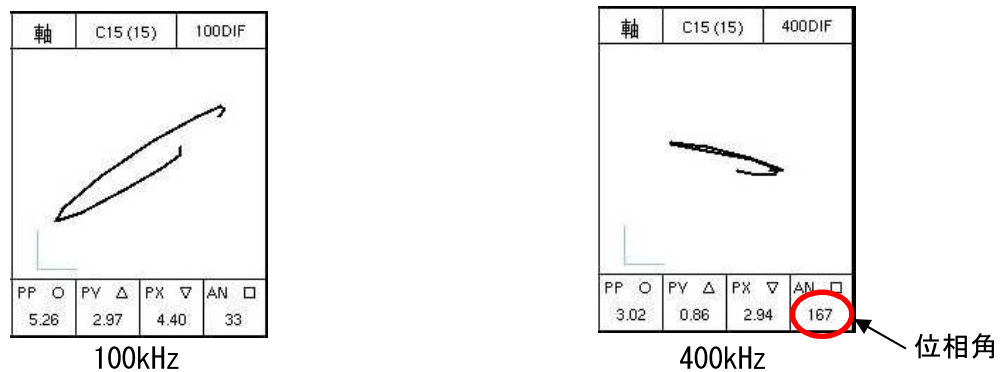
(局所変形の信号)

100kHz, 400kHz とも、全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる。



(今回の信号 A-SG X9, Y2)

100kHz にて管板上端信号に内面きず信号の影響が示されており、400kHz にて内面きずの特徴を示す位相角を有している。



エロージョン*1の発生可能性評価

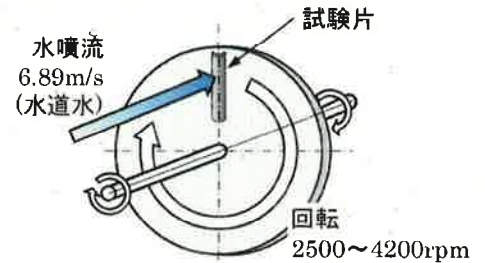
1. 目的

SG伝熱管拡管部に周辺流体の衝突によるエロージョン(侵食)が発生しないことを評価する。

2. 方法

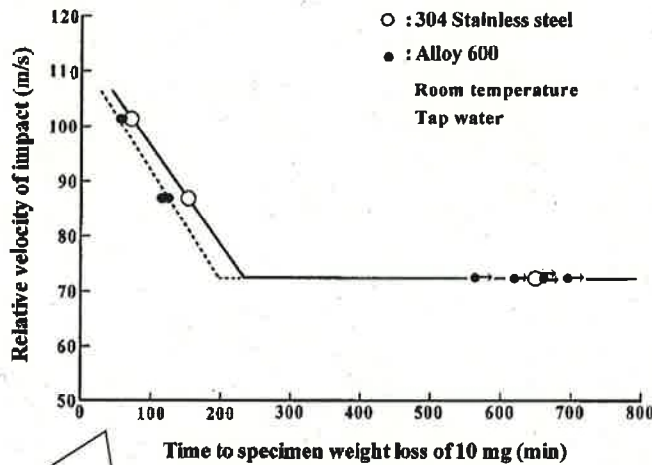
ウォータージェットテスト(常温)によりエロージョン発生限界流速を求め、実機流速と比較する。

エロージョンの評価においては管内外に差異はないため、管内外に正面から噴流を衝突させた試験結果を基に評価する。



3. 評価結果

インコネルTT600製伝熱管のエロージョンが発生する限界流速は約70m/s以上であり、拡管部の実機流速は平均 であることからエロージョンの発生可能性は小さい。



(出典：機械学会資料
材料と環境 2006,
配管減肉現象について)

図1 ウォータージェットテストによる限界流速

$$\text{相対速度} = \sqrt{(\text{水噴流速})^2 + (\text{試験片の周速})^2}$$
 試験例の場合 水噴流速=6.89m/s
 試験片の周速=72.22m/s
 周速=試験片の円周長さ×回転数

$$= (2\pi \times 0.23) \times (3000/60)$$
 試験片までの半径 (m) : 0.23
 回転数 (rpm) : 3000

表面の番号は、試験片番号



図2 ウォータージェットテスト後の外観
(700分間水噴流後の状況)

*1：管内外を流れる水により配管表面が磨耗する現象

：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

蒸気発生器伝熱管ショットピーニング工事総括報告書



A クラス

客先	課長	係長		係

関西電力(株)高浜発電所 3号機

第13回定検

蒸気発生器伝熱管ショットピーニング工事

総括報告書

三菱重工原子力技術資料：クラスB

発行	三菱重工株式会社神戸造船所				高浜定検作業所				作成	平成13年 7月 31日			
作業所図書番号		改訂											
KT3 - 13 - D112		0											
現地	客先	作業所	放管	機器	燃料	計装	検査	作責		控	関連資料図書番号		改訂
配布先	1	1								1	-		-
内容		注文主		工事番号		年月日		三菱重工株式会社神戸造船所					
本文	1頁			アイテム		照合者		原子力保全技術部 技術課					
図表	1枚			2322924		H . .		課長 係長					
表紙共	194枚	関西電力(株)		0100		H . .							
備考	原紙保管 原保技課	高浜発電所 3号機						作成 平成13年 7月 31日 出書 平成13年 7月 31日					
配布先								控	図書番号	RCS-010011		改訂	
								1				0	

No.	工具	施工アドレス		送り寸法	施工範囲 判定基準 (600+30mm)	送り速度 判定基準 (200~300mm/min)			ビーズ噴出圧力 判定基準 (0.2~0.4MPa)			ビーズ供給確認	施工月日	施工時間 (終了時間)	確認者		備考
		X	Y			MAX	MIN	AVE	MAX	MIN	AVE				三菱重工	関西電力	
26	A	9	2	730	630	291	270	282	0.32	0.31	0.31	良	7月2日	5:10:07	[Redacted]	[Redacted]	
	B	9	4						0.32	0.32	0.32			5:14:44			
27	A	10	2	730	630	291	276	283	0.32	0.31	0.32	良	7月2日	5:15:20	[Redacted]	[Redacted]	
	B	10	4						0.32	0.31	0.32			5:19:56			
28	A	47	16	730	630	288	279	282	0.32	0.31	0.31	良	7月2日	5:44:07	[Redacted]	[Redacted]	
	B	47	18						0.32	0.31	0.32			5:48:43			
29	A	48	16	730	630	294	275	283	0.32	0.31	0.31	良	7月2日	5:40:22	[Redacted]	[Redacted]	
	B	48	18						0.32	0.31	0.32			5:53:58			
30	A	48	17	730	630	284	278	281	0.32	0.31	0.31	良	7月2日	5:54:39	[Redacted]	[Redacted]	
	B	48	19						0.32	0.31	0.32			5:59:16			
31	A	47	17	730	630	292	278	284	0.32	0.31	0.31	良	7月2日	5:59:51	[Redacted]	[Redacted]	
	B	47	19						0.32	0.31	0.32			6:04:27			

今回信号指示が検出された伝熱管に対して、適切な条件（送り速度、ビーズ噴出圧力、ビーズ粒度）でショットピーニングが施工されたことを確認。

製品検査成績表

発行No 9634

三菱重工業株式会社 御中

発行日2001年05月25日

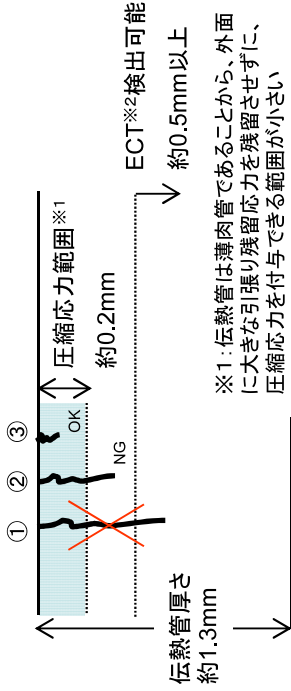
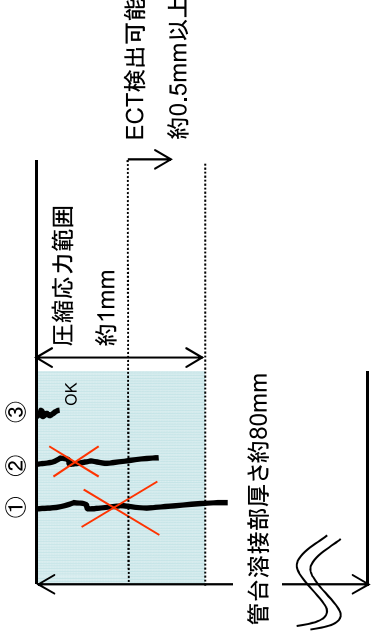
既往試験で使用したビーズ粒度 (#42~#80) と同じであることを確認。

出荷日2001年05月25日

品名	FP-6 42-80
Lot No	104202
出荷数量	200.00 kg

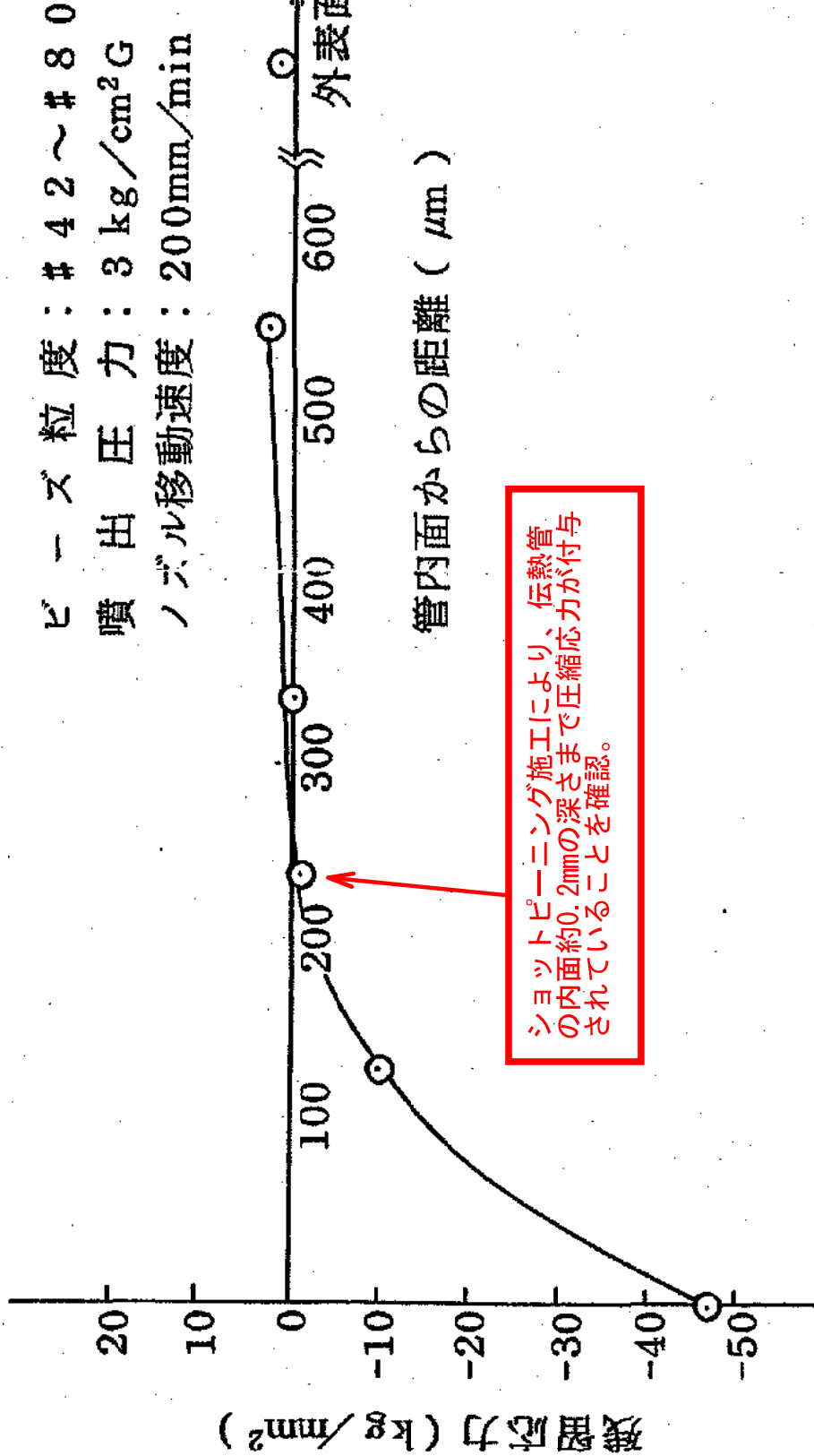
検査項目	測定値	規格
見掛密度 (g/cm ³)	4.54	
流動度 (s/50g)	16.8	
粒度分布 + 425 μm (%)	0.0	2.0 以下
粒度分布 + 355 μm (%)	14.3	
粒度分布 + 300 μm (%)	18.8	
粒度分布 + 250 μm (%)	30.9	
粒度分布 + 180 μm (%)	33.4	
粒度分布 - 180 μm (%)	2.6	5.0 以下
ニッケル量 [Ni] (%)	BAL.	BAL.
クロム量 [Cr] (%)	14.3	13.0 ~ 16.0
ボロン量 [B] (%)	3.26	2.50 ~ 3.50
シリコン量 [Si] (%)	4.49	3.70 ~ 4.70
鉄量 [Fe] (%)	3.14	5.00 以下
カーボン量 [C] (%)	0.65	0.50 ~ 0.70
コバルト量 [Co] (%)	0.02	
タンタル量 [Ta] (%)	0.005	
備考		

SG伝熱管へのショットピーニングの有効性とPWSCC検出に関する考察

	<p>SG伝熱管ショットピーニング(SP) (ECTにより施工前の表面状態を確認)</p>  <p>伝熱管厚さ 約1.3mm</p> <p>圧縮応力範囲※1 約0.2mm</p> <p>ECT※2検出可能 約0.5mm以上</p> <p>※1: 伝熱管は薄肉管であることから、外面に大きな引張り残留応力を残留させずに、圧縮応力を付与できる範囲が小さい</p> <p>※2: 高浜4号機でショットピーニング施工時に実施したDF-ECTの場合(現在適用しているインテリジェントECTでもほぼ同様)</p>	<p>(参考) 原子炉容器管台WJP/SG管台USP (ECTにより施工前の表面状態を確認)</p>  <p>管台溶接部厚さ約80mm</p> <p>圧縮応力範囲 約1mm</p> <p>ECT検出可能 約0.5mm以上</p>
<p>ECT検出可能範囲と 圧縮応力付与範囲の 関係</p>	<p>圧縮応力の付与されない範囲で、ECTで検出可能であったPWSCCについては、当該管を施栓し、供用外としている。(①)</p> <p>圧縮応力の付与されない範囲で、ECTにより検出されないPWSCCが存在した状態でSPを施工した可能性は否定できない。(②)</p> <p>圧縮応力の付与される範囲にECT検出限界未満のPWSCCが存在したとしても、進展は停止するものと考えられる。(③)</p>	<p>圧縮応力の付与されない範囲で、ECTで検出可能であったPWSCCについては、除去したうえでWJP等を施工している。(①)</p> <p>圧縮応力の付与される範囲で、ECTにより検出可能であったPWSCCについては、除去したうえでWJP等を施工している。(②)</p> <p>圧縮応力の付与される範囲にECT検出限界未満のPWSCCが存在したとしても、進展は停止するものと考えられる。(③)</p>
<p>有効性評価</p>	<p>ショットピーニングを施工した時点で、圧縮応力の付与されない範囲にECTにより検出不可能なPWSCC(約0.2mm～約0.5mmの深さのPWSCC)が既に存在したとすると、ショットピーニング施工後もPWSCCが進展し、顕在化する可能性がある。</p>	<p>WJPを施工した時点で、圧縮応力の付与される範囲とECTの検出能力の関係から、圧縮応力の付与されない範囲にPWSCCが存在する可能性はなく、WJP等の施工後にPWSCCが進展し、顕在化することはない。</p>

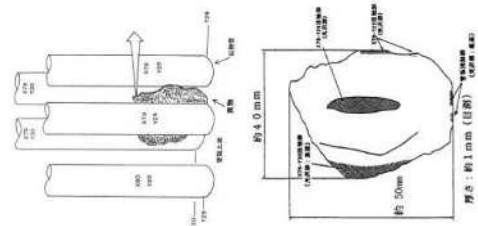

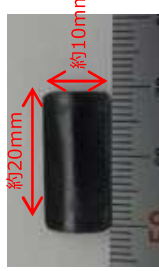
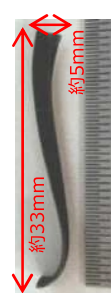
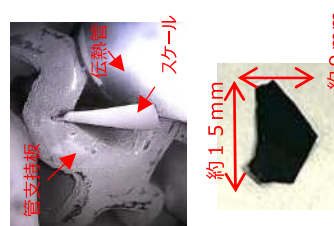
WJP: ウォータージェットピーニング
USP: ウルトラスニックショットピーニング

ショットピーニング施工管の周方向残留応力の管肉厚方向分布



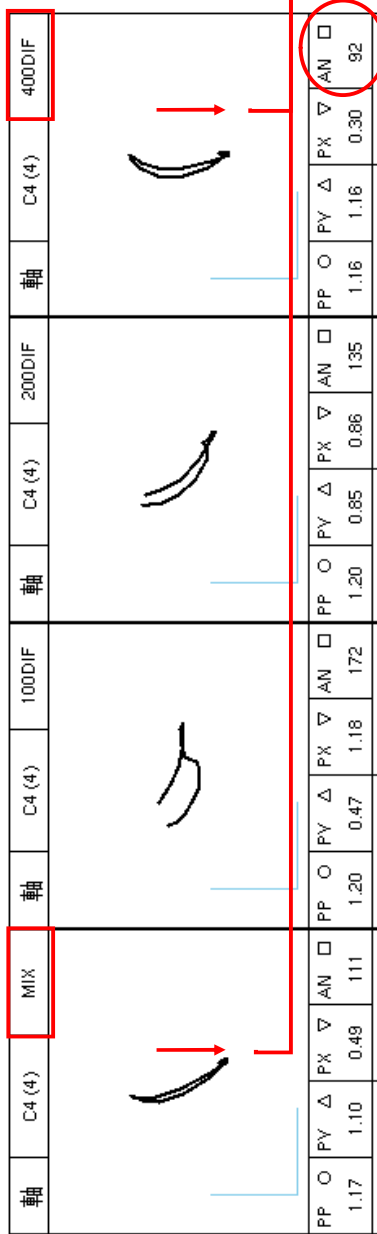
出典：昭和61年通産省顧問会審議資料「蒸気発生器 周辺部伝熱管クレスレ部リロール工法及びショットピーニング工法について」

高浜発電所3, 4号機におけるSG伝熱管外面の損傷事象の経緯

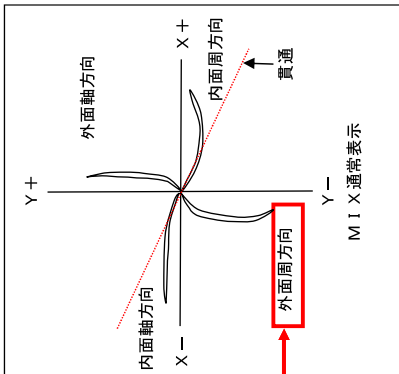
		2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
3号機定検		第21回	第22回	第23回	第22回	第24回	第24回	
4号機定検		第20回	第21回	第22回	第23回	第22回	第23回	
定検	(参考) 美浜3号機 第18回定検 (2000年)		高浜3号機 第23回定検	高浜4号機 第22回定検	高浜4号機 第22回定検	高浜3号機 第24回定検	高浜4号機 第23回定検	
損傷本数	A-SG: 3本 【管板上面】 (最大減肉率: 約48%)	A-SG: 1本 【第3管支持板】 (最大減肉率20%未満)	A-SG: 1本 【第3管支持板】 B-SG: 1本 【第3管支持板】 C-SG: 3本 【第2管支持板2本、 第3管支持板1本】 (最大減肉率: 約63%)	A-SG: 1本 【第3管支持板】 B-SG: 1本 【第3管支持板】 C-SG: 1本 【第3管支持板】 (最大減肉率: 約56%)	B-SG: 1本 【第3管支持板】 C-SG: 1本 【第3管支持板】 (最大減肉率: 約36%)			
推定原因	<ul style="list-style-type: none"> 溶接作業時に発生した2次生成物(ノロ)が主給水管から流入したものと推定 ⇒異物による減肉と推定 	<ul style="list-style-type: none"> 減肉指示のあった箇所付近にスケールを確認 スケールの回収を試みたものの破損 ⇒スケール以外の異物による減肉と推定 	<ul style="list-style-type: none"> スケールによる減肉であり、異物は流出したものと推定 	<ul style="list-style-type: none"> スケールは確認されず A-SG内に異物(ステンレス薄片)が確認されたものの、摩耗痕は確認されず ⇒異物による減肉であり、異物は流出したものと推定 	<ul style="list-style-type: none"> 減肉指示のあった1本の伝熱管(A-SG)の減肉箇所にスケールを確認 その他2本の伝熱管についても、近傍の管支持板上で摩耗痕のあるスケールを回収 ⇒スケールによる減肉と推定 			

ECTの位相評価

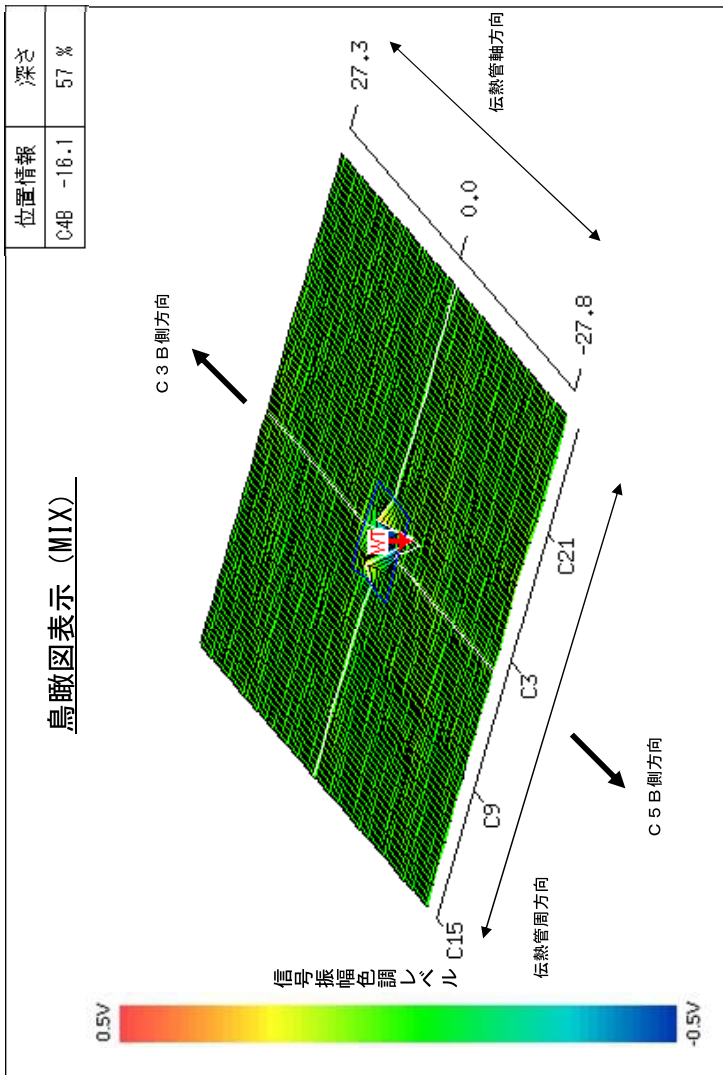
当該管リサージュ表示 (A-SG X9, Y22)



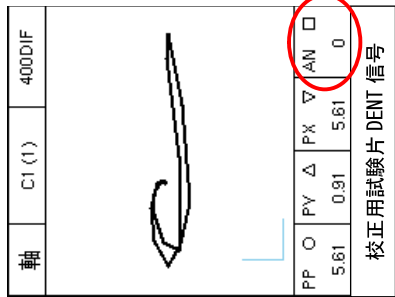
(1)内面軸方向信号の特徴との比較
 インテリジェント ECT の信号の特徴と今回の当該信号を比較したところ、今回の当該信号は 400kHz および MIX の位相角で Y-方向の外周方向きずの特徴を示している。そのため、伝熱管内面 (1 次側) からの損傷ではないと考える。



インテリ ECT の信号の特徴



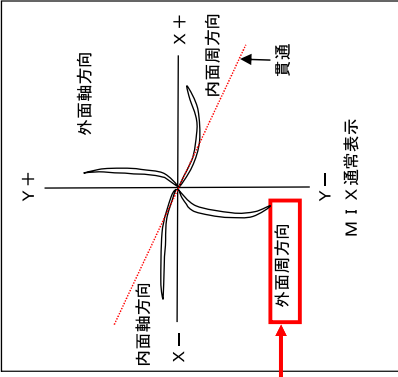
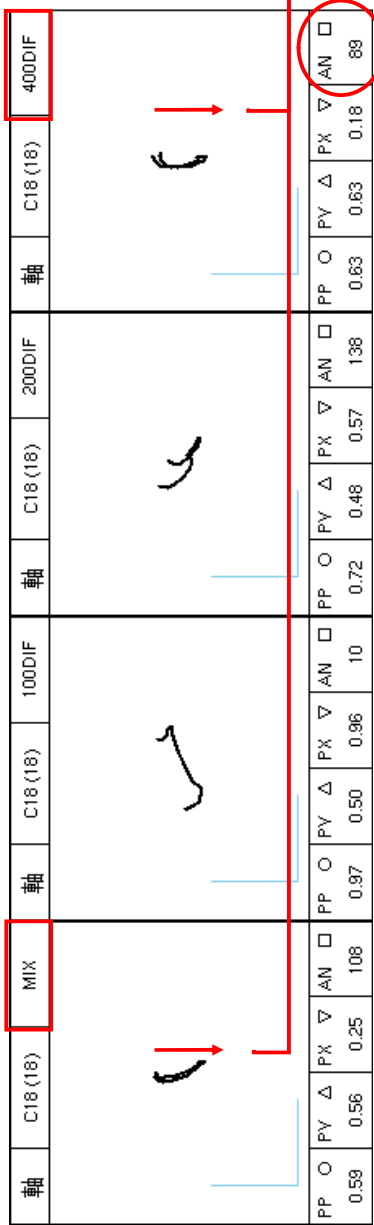
(2) デンティンダ (DENT) 信号の特徴との比較



校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は“全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる”という特徴を持っているが、今回の当該信号は Y-方向の位相を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外周方向きずの特徴を持っていると言える。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考える。

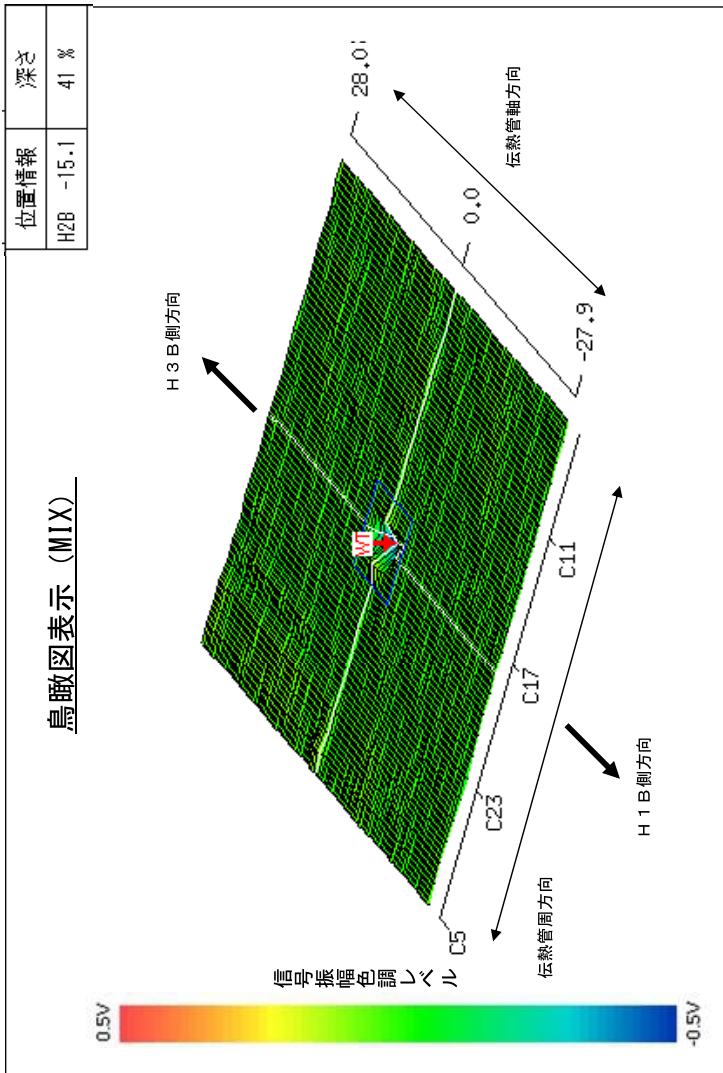
ECTの位相評価

当該管リサージュ表示 (B-SG X35, Y32)

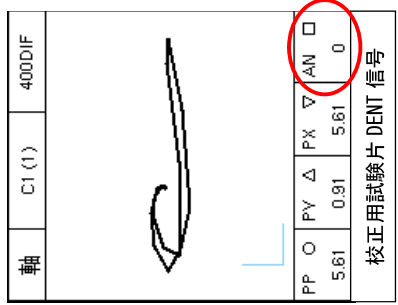


(1)内面軸方向信号の特徴との比較
 インテリジェント ECT の信号の特徴と今回の当該信号を比較したところ、今回の当該信号は 400kHz および MIX の位相角で Y-方向の外周方向きずの特徴を示している。そのため、伝熱管内面 (1 次側) からの損傷ではないと考える。

インテリ ECT の信号の特徴



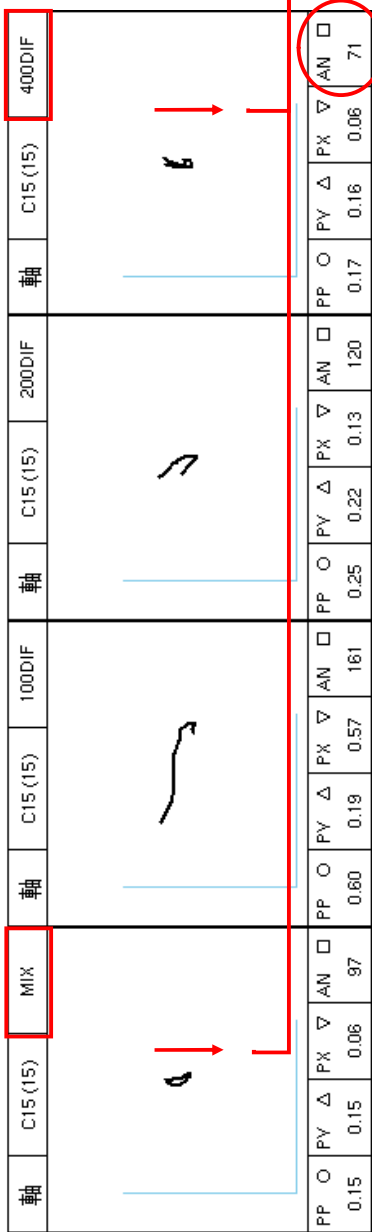
(2) デンティンダ (DENT) 信号の特徴との比較



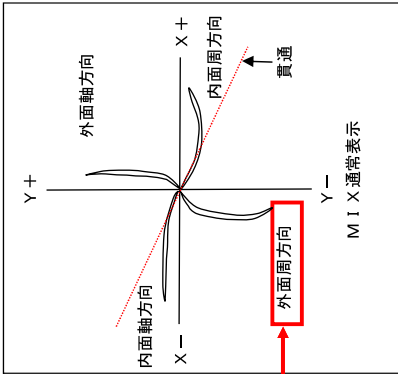
校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は“全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる”という特徴を持っているが、今回の当該信号は Y-方向の位相角を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外面周方向きずの特徴を持っていると言える。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考える。

ECT の位相評価

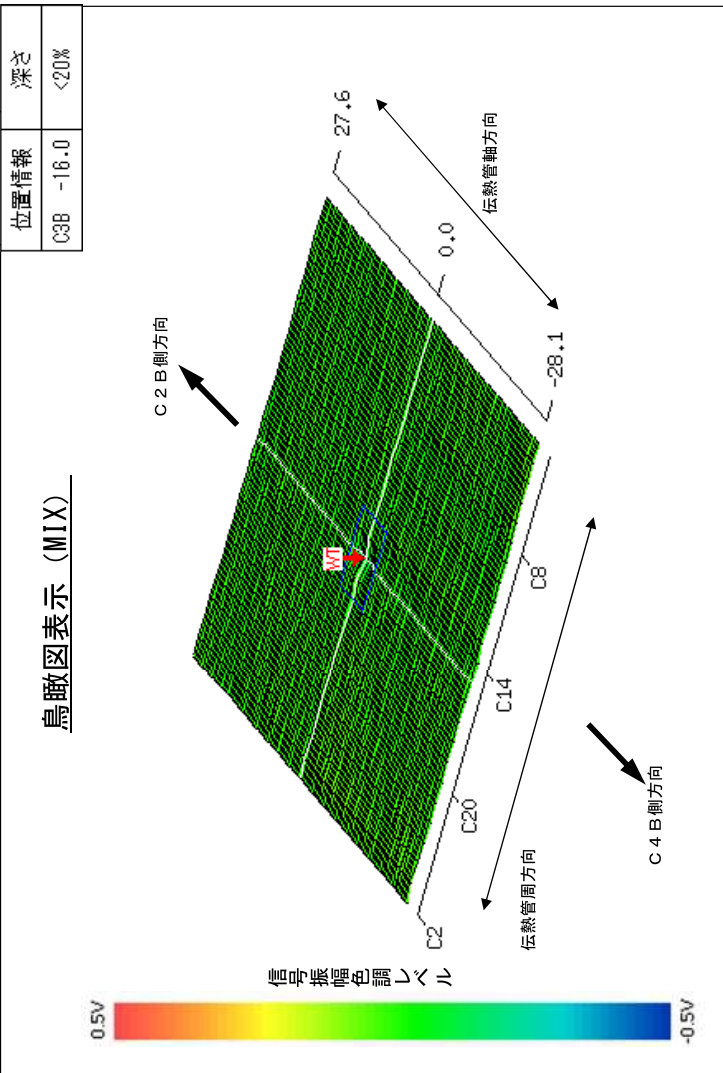
当該管リサージェ表示 (A - S G X 5 1 , Y 8)



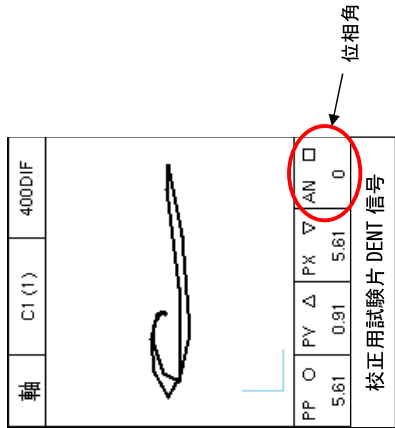
(1)内面軸方向信号の特徴との比較
 インテリジェント ECT の信号の特徴と今回の当該信号を比較したところ、今回の当該信号は 400kHz および MIX の位相角で Y-方向の外周方向きずの特徴を示している。そのため、伝熱管内面 (1 次側) からの損傷ではないと考える。



インテリ ECT の信号の特徴



(2) デンティンダ (DENT) 信号の特徴との比較



校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は “全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる” という特徴を持っているが、今回の当該信号は Y-方向の位相角を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外周方向きずの特徴を持っていると言える。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考える。

粒界腐食割れに関する検討結果

高浜発電所3号機 SG の至近サイクルについて、通常運転中の SG 器内水質（バルク水の水質）を用いたクレビス部 pH 計算の結果、クレビス部での pH は平均6.0と、高温での中性点（pH：5.5）近傍の値であった。

ここでは、伝熱管と異物との隙間内での濃縮倍率として、 10^3 と安全側に仮定した。

また、高浜発電所3号機では2次系水中にアンモニアとヒドラジンを注入しており、運転中良好な還元雰囲気を維持している。

TT600 合金の粒界腐食割れ（IGA）の感受性領域を下図に示すが、IGA が発生する環境になく、IGA 発生の可能性はないものと考えられる。

<クレビス部 pH 値計算結果>

	第25サイクル
pH _{300℃}	平均6.0

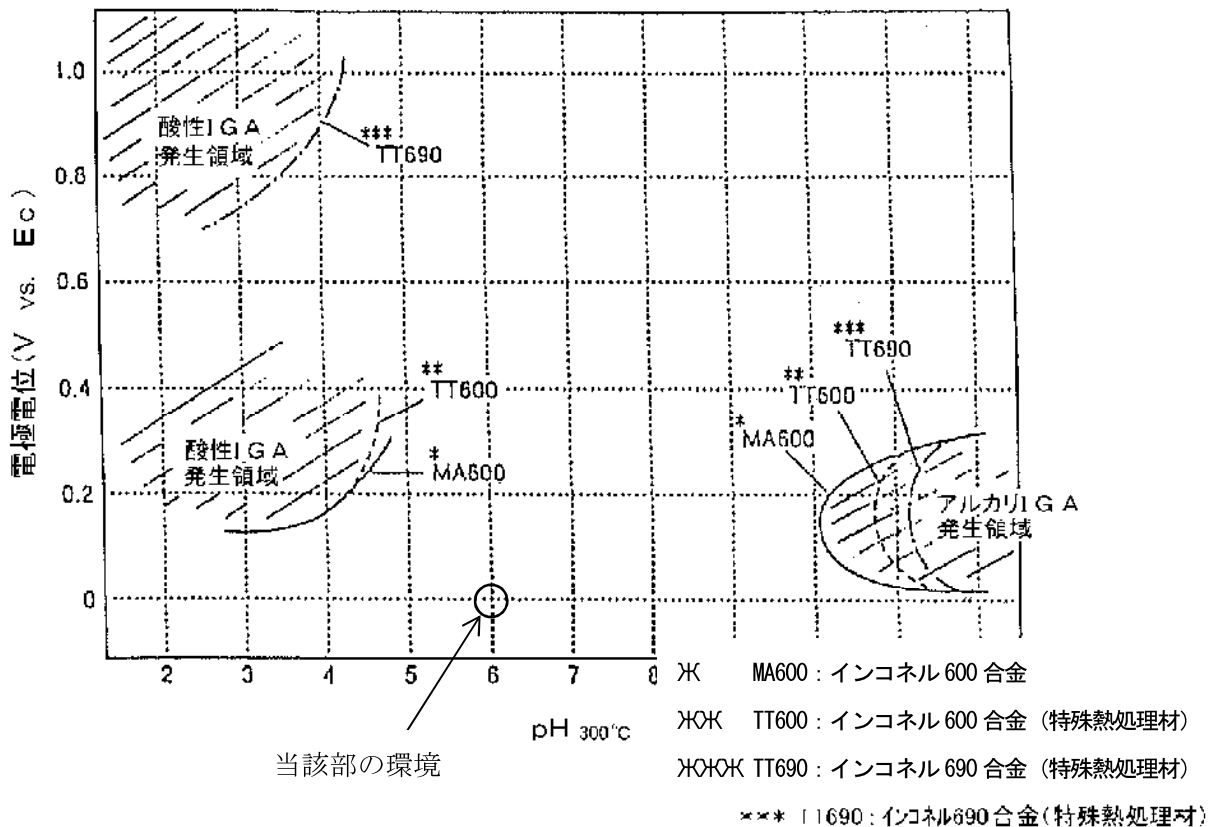
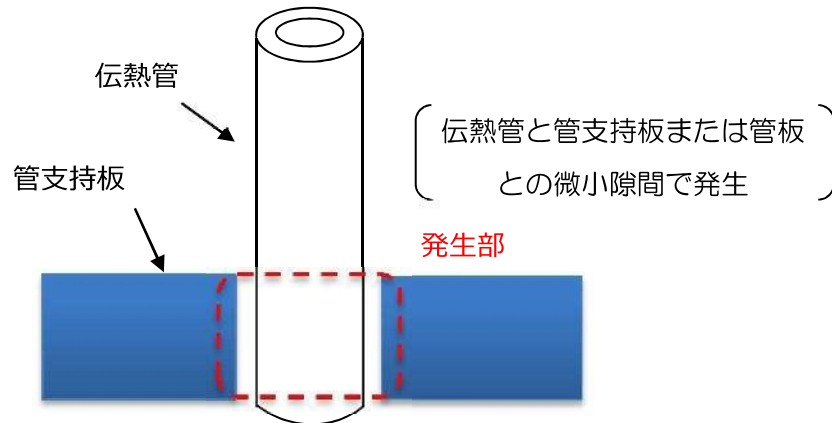


図 粒界腐食割れの発生領域

[出典：(財)発電設備技術検査協会「第7回 報告と講演の会 報告成果スライド集(平成6年10月28日)」]

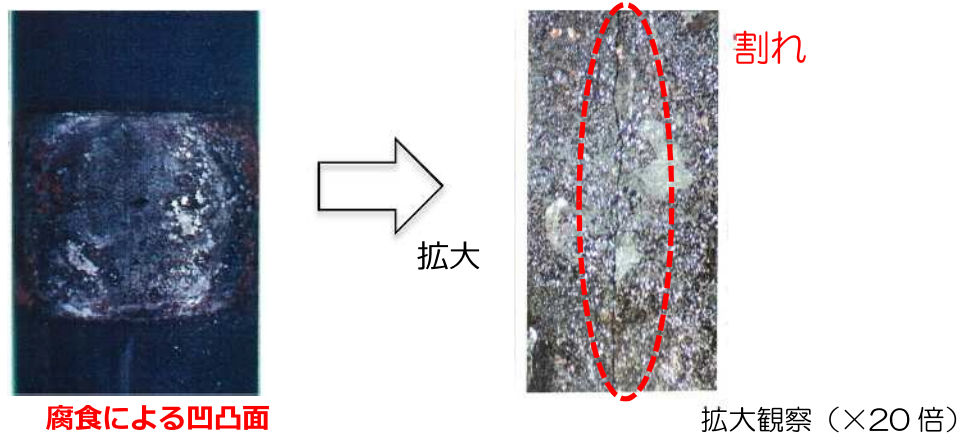
粒界腐食割れによるきずの形状

プラントメーカーの材料研究部門の有識者を含め検討した結果、今回確認したきずが摩耗減肉であると判断している。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉と考えられ、粒界腐食割れの可能性はないと考えられる。なお、粒界腐食割れによるきずの形状例を以下に示す。



（試験体概略図）

図1 発生部位



（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）

図2 表面形状

発電用原子炉施設故障等報告書
 （高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について）
 （2021年2月19日）より引用

ピitting発生に関する検討結果

高浜発電所3号機の通常運転時のSG2次側器内水塩素濃度の管理値は10ppbである。参考として、至近サイクルの塩素濃度は下表に示すが、実際に管理値を十分下回っていることを確認している。

高浜発電所3号機 SG 器内水塩素イオン濃度至近サイクル平均値

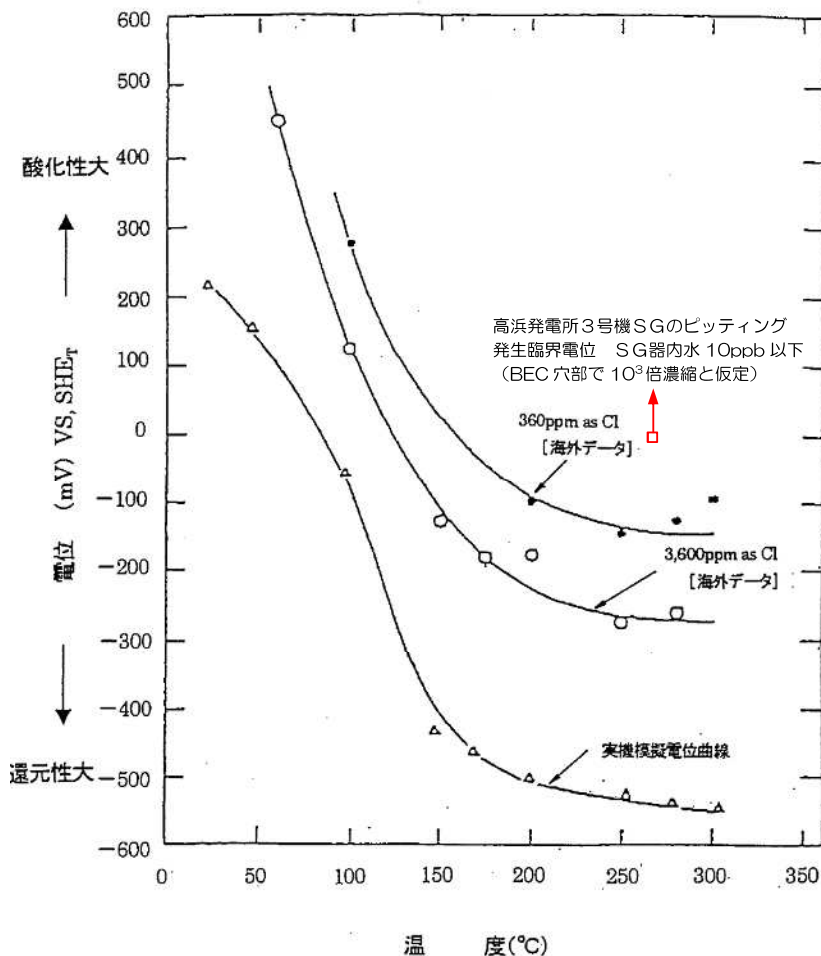
	第25サイクル
塩素イオン (ppb)	0.4

ここで、今回信号が検出された管支持板 BEC 穴部での塩素イオン濃縮倍率は最大 10^3 程度であり、安全側に最大濃縮倍率を仮定した場合、BEC 穴部の塩素イオン濃度は管理値最大でも 10ppm 以下（至近サイクルは 0.4ppm 程度）である。よって、ピitting*¹発生限界電位は下図の 360ppm のデータの電位（-100mV 以下（at 270°C））よりも十分高いと考えられる。

一方、高浜発電所3号機では起動時の高ヒドラジン運転等により、還元性を良好に維持しており、SG 器内のスラッジ成分のうち、ほとんどがマグネタイトであることから、実機の電位（at 270°C）は約 -540mV と評価している。

したがって、高浜発電所3号機では実機電位がピitting発生電位よりも低く、ピittingの発生環境ではないと考えられる。

*¹ 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。



(説明)

- ピittingは、ピitting発生限界電位により実機電位が超過した場合に発生。
- TT600合金のピittingに対する耐食性は、MA600合金と同等。

出典

Proc.of 2nd Inter. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, P.456(1985)

図1 MA600合金のピitting発生電位

ピittingによるきずの形状

プラントメーカーの材料研究部門の有識者を含め検討した結果、今回確認したきずが摩耗減肉であると判断している。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉と考えられ、ピittingの可能性はないと考えられる。なお、ピittingによるきずの形状例を以下に示す。

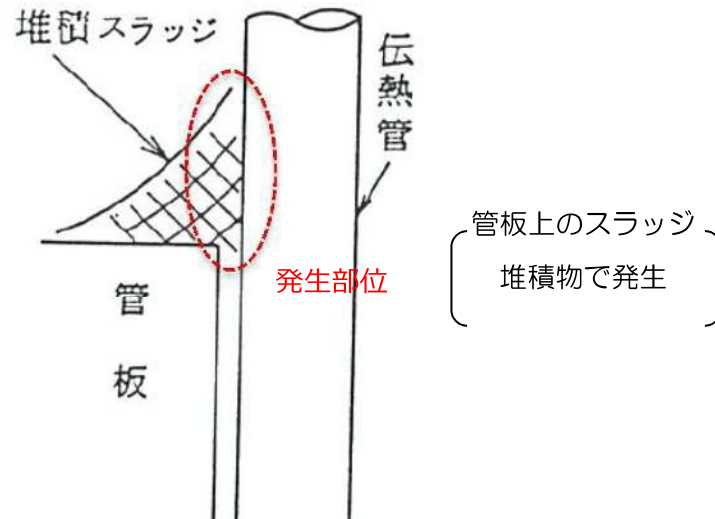


図2 発生部位

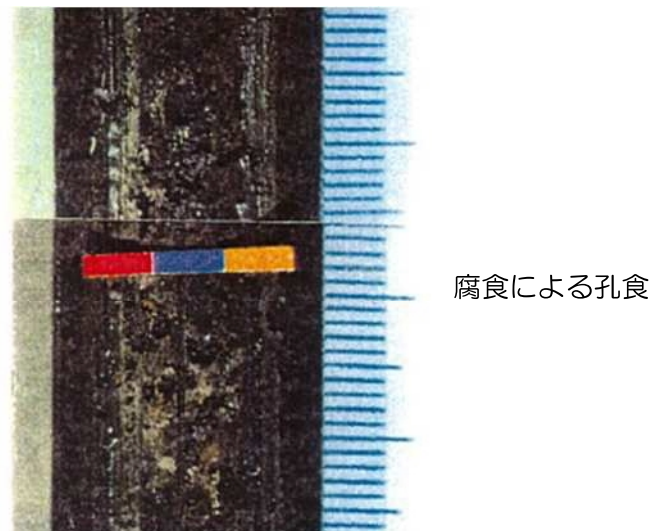


図3 表面形状

発電用原子炉施設故障等報告書
 (高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について)
 (2021年2月19日)より引用

リン酸減肉によるきずの形状

プラントメーカーの材料研究部門の有識者を含め検討した結果、今回確認したきずが摩耗減肉であると判断している。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉と考えられ、リン酸減肉の可能性はないと考える。なお、リン酸減肉によるきずの形状例を以下に示す。

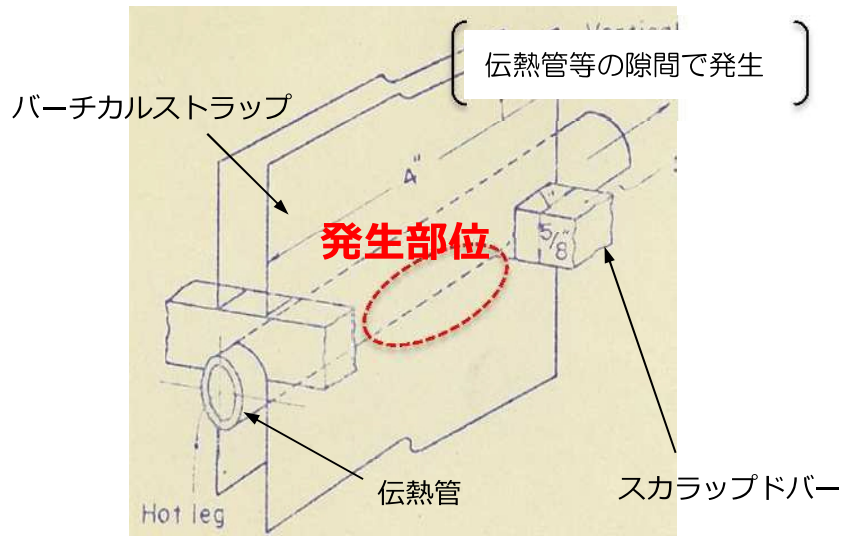
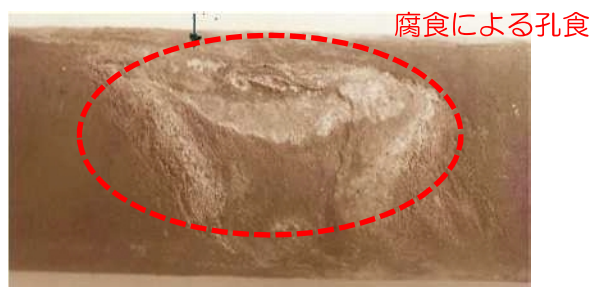


図1 発生部位



拡大観察 (×3倍)

図2 表面形状

発電用原子炉施設故障等報告書
 (高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について)
 (2021年2月19日)より引用

エロージョンの発生可能性評価

1. 目的

SG 伝熱管の管支持板部に周辺流体の衝突によるエロージョン*1 が発生しないことを評価する。

*1：管内外を流れる水により配管表面が摩耗する現象

2. 方法

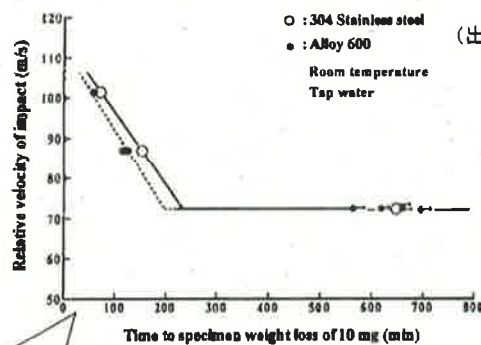
ウォータージェットテスト（室温）によりエロージョン発生限界流速を求め、実機流速と比較する。

エロージョンの評価においては管内外に差異はないため、管外面に正面から噴流を衝突させた試験結果を基に評価する。



3. 評価結果

TT600 製伝熱管のエロージョンが発生する限界流速は約 70m/s 以上であり、当該部の実機流速は [] 以下であることからエロージョンの発生可能性はない。



(出典：機械学会資料
材料と環境 2006,
配管減肉現象について)

図1 ウォータージェットテストによる限界流速

相対速度 = $\sqrt{(\text{水噴流速})^2 + (\text{試験片の周速})^2}$
 試験例の場合 水噴流速 = 6.89 m/s
 試験片の周速 = 72.22 m/s
 周速 = 試験片の円周長さ × 回転数
 $= (2\pi \times 0.23) \times (3000/60)$
 試験片までの半径 (m) : 0.23
 回転数 (rpm) : 3000

表面の番号は、試験片番号



図2 ウォータージェットテスト後の外観
(700分間水噴流後の状況)

発電用原子炉施設故障等報告書
 (高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について)
 (2021年2月19日) より引用

[] : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

エロージョンの限界流速の温度影響

エロージョンが発生する限界流速の知見として、常温での試験結果を用いているが、限界流速の温度影響について、以下に説明する。

● エロージョンのメカニズム

- ✓ エロージョンは、流体が金属表面に衝突することで生じる機械的な衝撃力で材料が損傷する現象である。
- ✓ 温度は流体因子のうち密度、材料因子のうち硬さに影響する。

<流体因子（密度）>

- ✓ SG2次側温度269℃での水の密度は769 kg/m³であり、常温（20℃）に比べ約2割小さい。
- ✓ 密度が低下するとエロージョンが生じにくくなる。（限界流速は上昇する。）

<材料因子（硬さ）>

- ✓ 実機伝熱管温度約300℃での硬さは約1.59 GPaであり、常温に比べ約1割小さい*1。
- ✓ 硬さが低下するとエロージョンが生じやすくなる。（硬さが約1割低下すると、限界流速は約2m/s低下する。）（図1）*2

⇒ 保守的に材料因子（硬さ）の温度影響のみを考慮しても、限界流速は約68m/sであり、SG2次側器内流速約[]に対して十分余裕がある。（図2）

※1：材料メーカーカタログ（インコネル600合金）の単位を換算

※2：材料と環境，57，146-152(2008)，機本ら

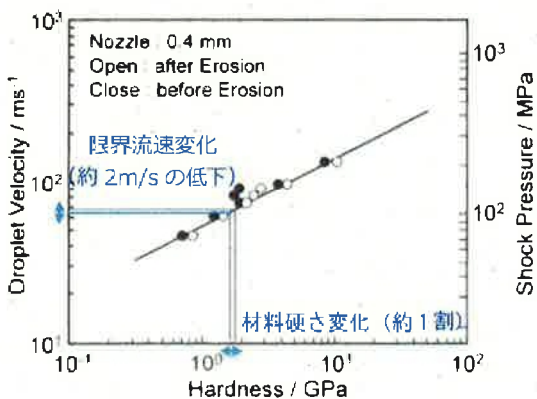


図1 限界流速と硬さの関係

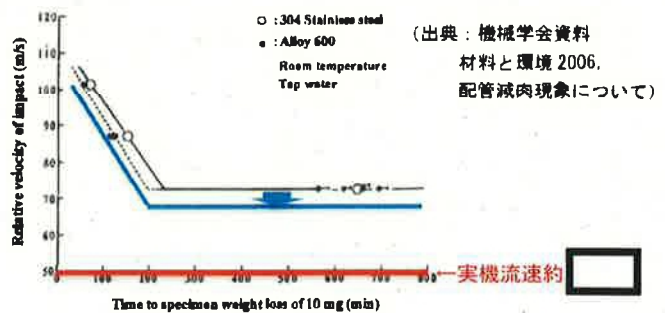


図2 ウォータージェットテストによる限界流速

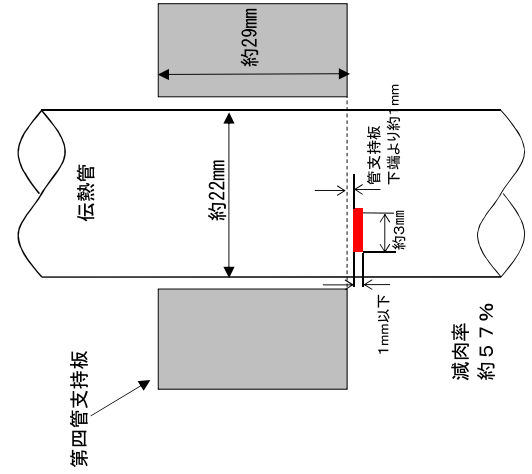
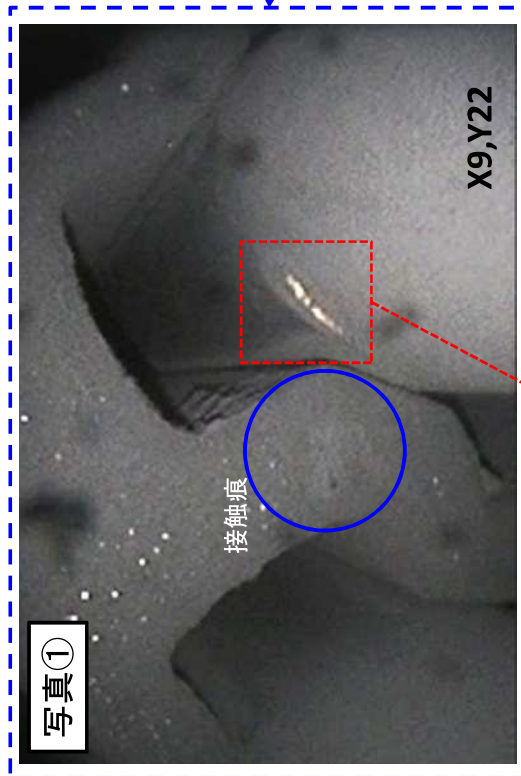
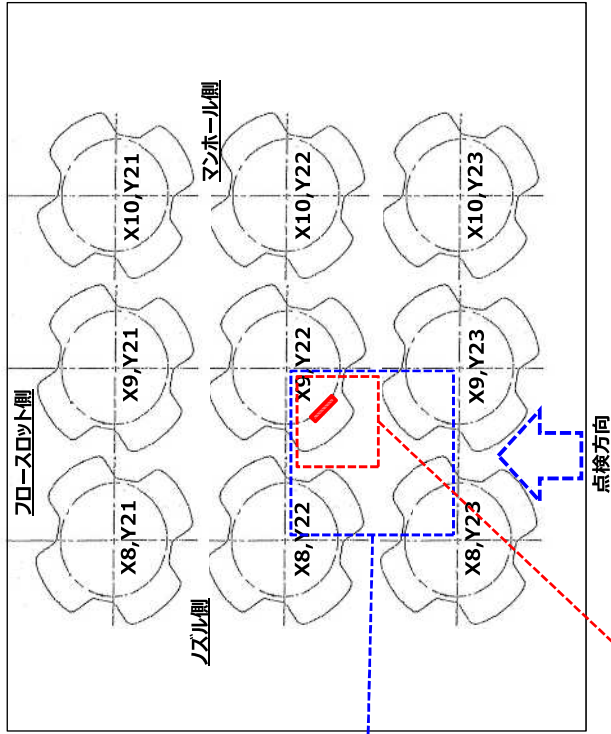
温度の影響は小さく、常温の知見を用いても問題ない。

発電用原子炉施設故障等報告書
 (高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について)
 (2021年2月19日)より引用

[] : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

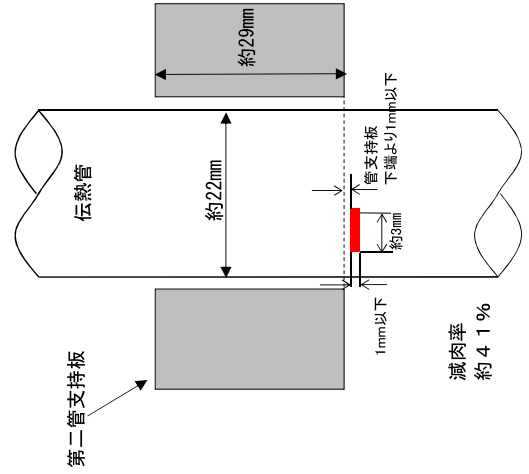
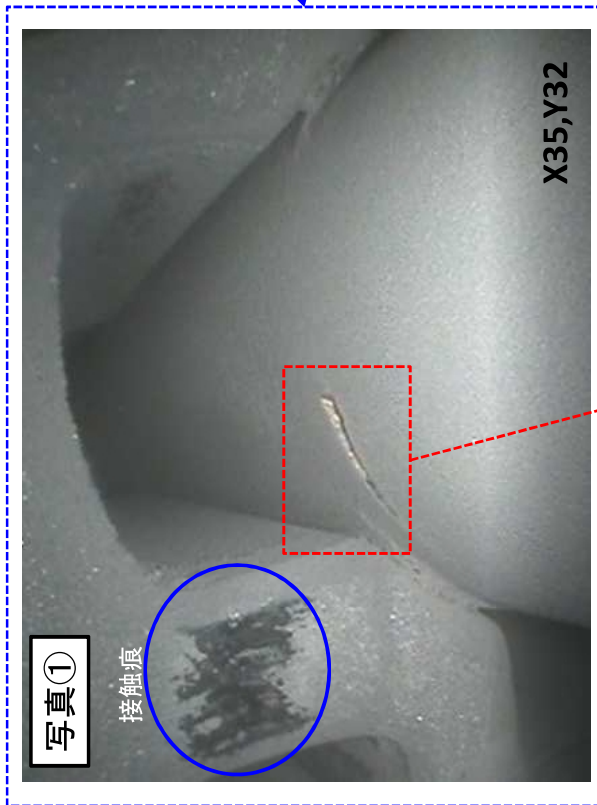
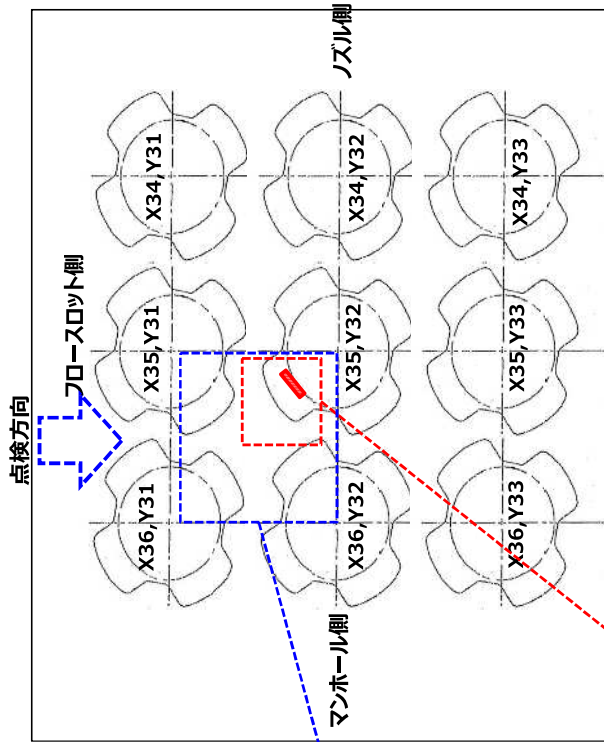
SG器内点検結果 (SG伝熱管2次側表面写真)

対象：A-SG 第四管支持板下面 伝熱管 X9, Y22 低温側



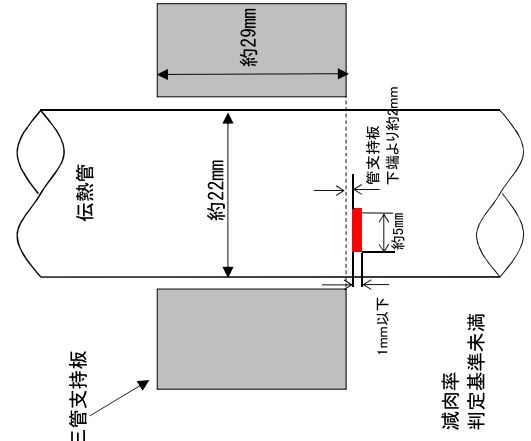
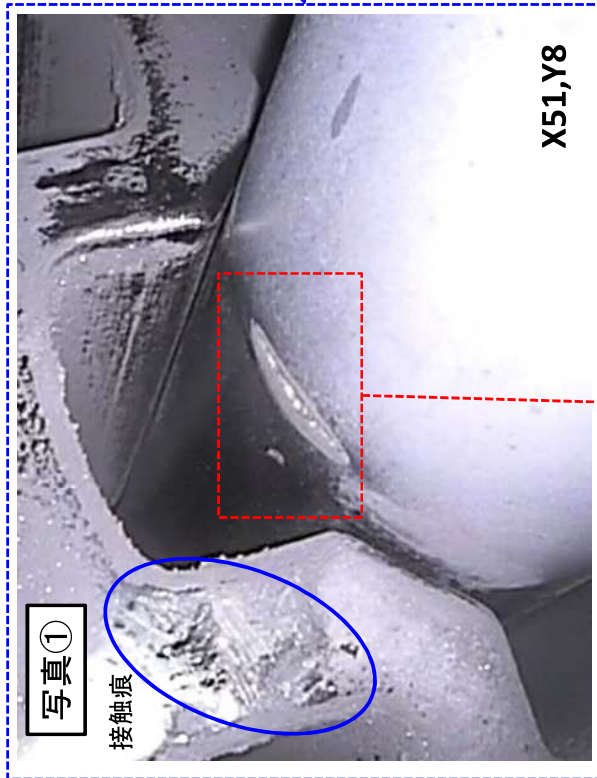
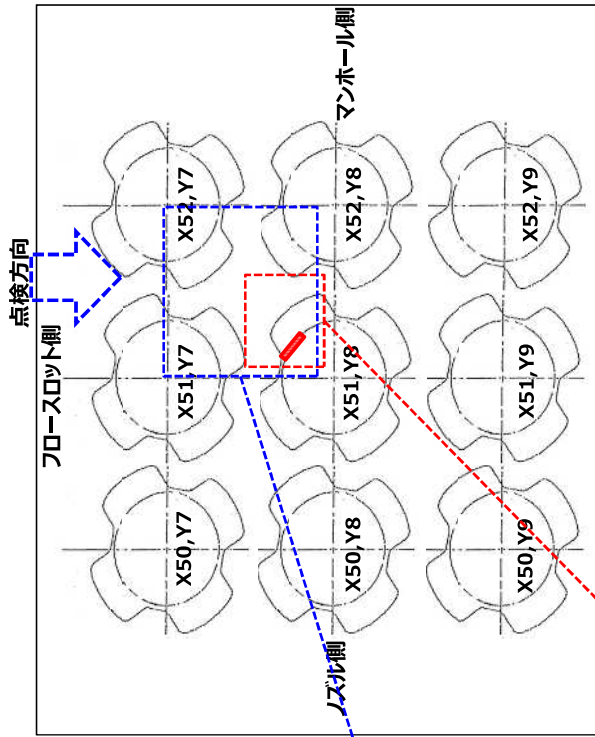
SG器内点検結果 (SG伝熱管2次側表面写真)

対象：B-SG 第二管支持板下面 伝熱管 X35, Y32 高温側



SG器内点検結果 (SG伝熱管2次側表面写真)

対象：A-SG 第三管支持板下面 伝熱管 X51, Y8 低温側



管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (1 / 3)

伝熱管は図 1 に示すとおり管支持板によって水平方向を支持しており、四ツ葉型の穴によって 1 穴あたり 4 箇所が伝熱管と接触する構造となっている。二次冷却水によって伝熱管に振動が生じた場合、伝熱管は水平全方向にランダムに振動するため、管支持板との接触による摩耗減肉が顕著化する場合は 4 箇所の接触部(ランド部^{*1})に減肉が生じることとなる。

今回、減肉指示が確認された位置の目視点検を行った結果、図 2～図 4 に示すとおり、減肉は管支持板下端位置にしか発生していない、かつ、ランド部の位置に発生していないことから、前述の傾向とは異なり、減肉が管支持板との接触・摩耗によって発生した可能性はないと考える。

^{*1} 管支持板に加工されている四ツ葉型管穴のうち凸面部。

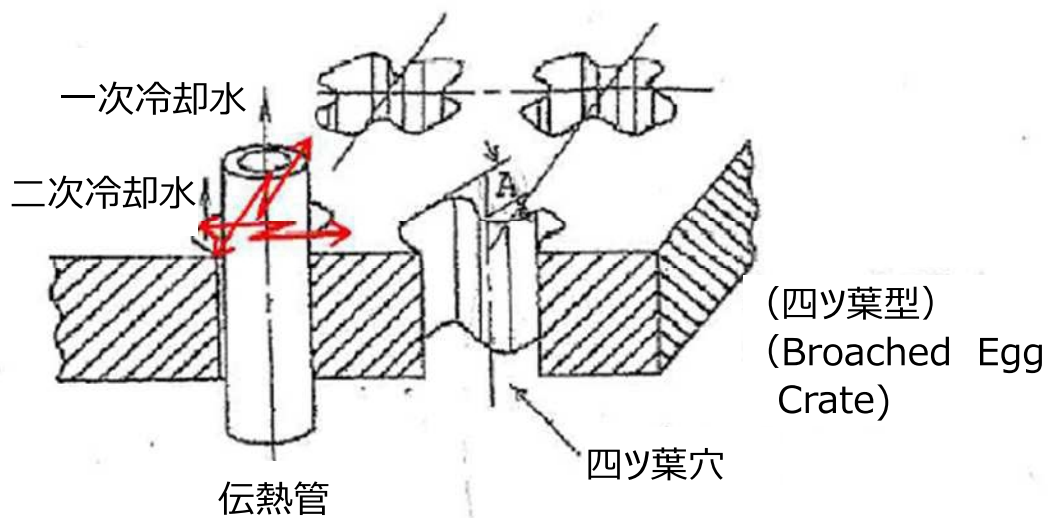


図 1 管支持板四ツ葉穴 (BEC 穴) による伝熱管の支持状況

管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (2 / 3)

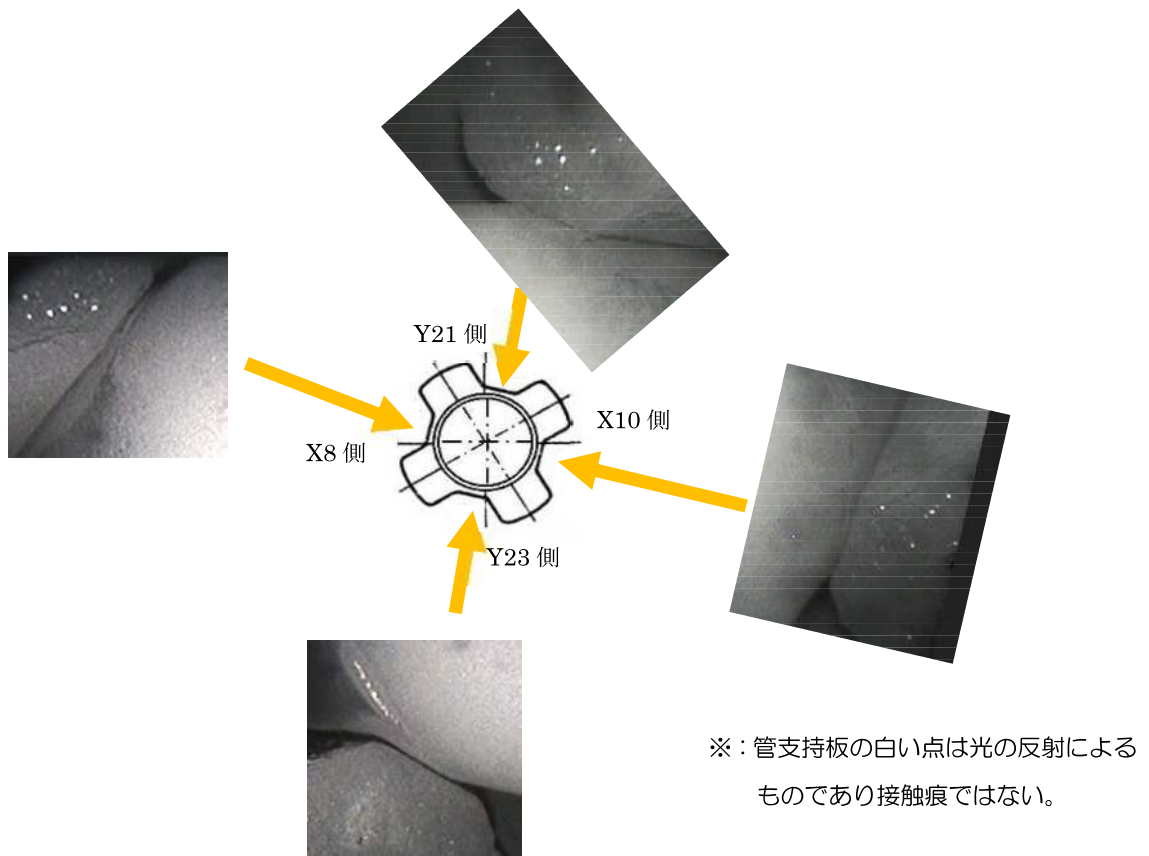


図2 減肉とランド部の位置関係(A-SG X9, Y22)

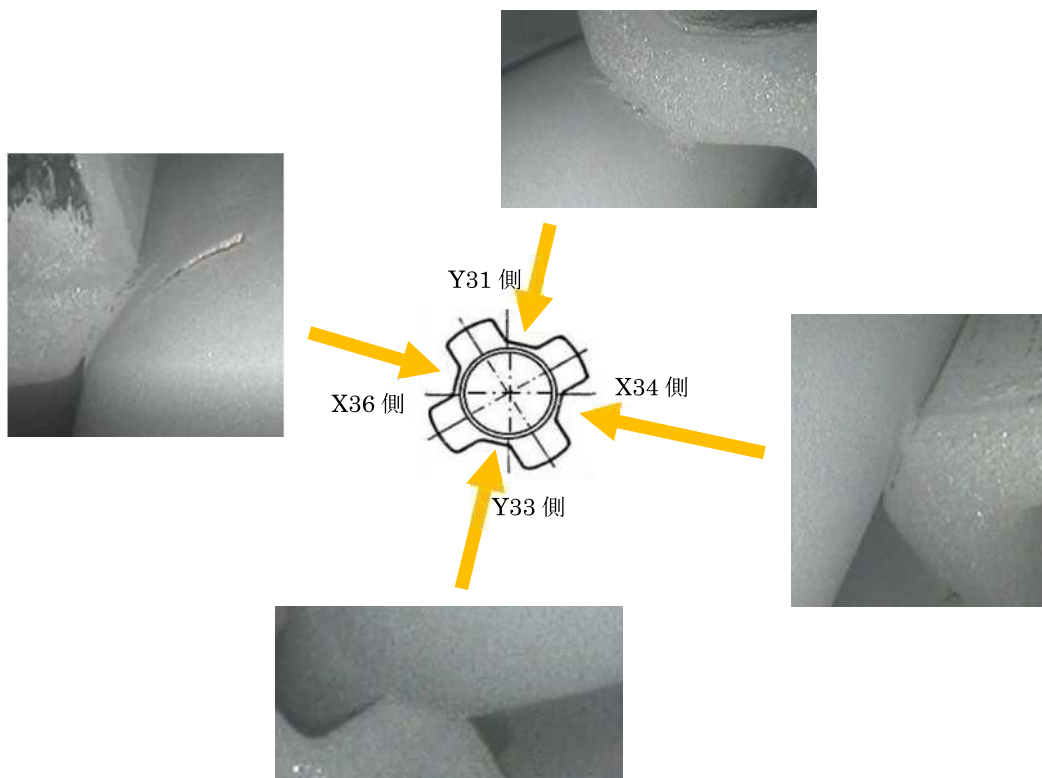


図3 減肉とランド部の位置関係(B-SG X35, Y32)

管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (3 / 3)

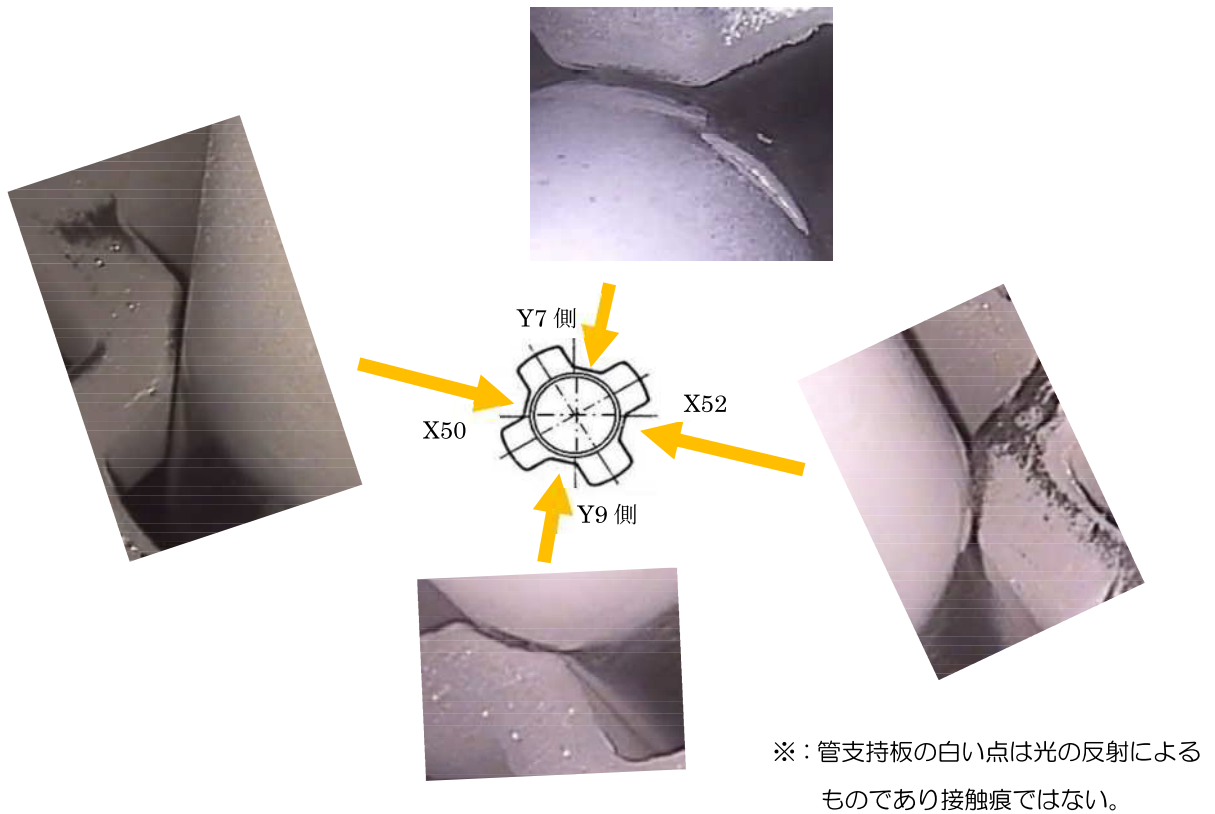


図 4 減肉とランド部の位置関係(A-SG X51, Y8)

異物混入対策について（1 / 2）

高浜発電所 3 号機前回（第 2 4 回）定期検査において、以下の異物混入対策を実施していることを確認した。

なお、異物混入対策の内容については、高浜発電所 4 号機第 2 3 回定期検査における異物混入対策と同等の実施内容である。

- 機器内部へ立ち入る作業では直前に作業服の着替えや靴カバーを着用し、機器内部へ立ち入っていることから、異物が混入する可能性は極めて低い。
- 直接目視にて異物確認ができない範囲は小型カメラを用いて点検した結果、異物が混入していないことを確認している。
- 開口部に周辺作業と隔離したエリアを設けることで、異物の混入対策を図っており、異物が混入する可能性は極めて低い。
- ウエスを使用する場合は、新しいウエスに限るものとし、新ウエスは再使用ウエスと区別して管理しており、異物が混入する可能性は極めて低い。
- 作業中に発生した保温材の切れ端等の清掃・片づけについては一作業一片づけを徹底するとともに、作業服、靴に異物が付着していないか確認することにより、異物の拡散を防止する対応を実施しており、異物が混入する可能性は極めて低い。

各異物混入対策の詳細は次ページのとおり。

異物混入対策について（2/2）

	機器立入	垂直配管取付弁	その他
<p>(前回) 高浜発電所 3 号機 第 2 4 回定期検査 および 高浜発電所 4 号機 第 2 3 回定期検査</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・機器内部に立ち入る前に、器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。 ・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。 ・開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。 	<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。 	<ul style="list-style-type: none"> ・保温材の切れ端等の清掃・片づけは一作業一片づけを徹底し、作業服、靴の異物付着確認を行う。 ・機器を開放した時点でウエス巻きガスクット等の金属製の消耗品に損傷を確認した場合は、当社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。 ・SG水張ポンプ入口仮設ストレーナ設置した。
<p>(前々回) 高浜発電所 4 号機 第 2 2 回定期検査</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・機器内部に立ち入る前に、器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。 ・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。 ・開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。 	<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。 	<ul style="list-style-type: none"> ・保温材の切れ端等の清掃・片づけは一作業一片づけを徹底し、作業服、靴の異物付着確認を行う。
<p>(前々々回) 高浜発電所 3 号機 第 2 3 回定期検査</p>	<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"> ・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】 ・最終異物確認は直接目視にて実施（手鏡等を使用） 	<p>—</p>
<p>(従前) 高浜発電所 3 号機 第 2 3 回定期検査以前 高浜発電所 4 号機 第 2 1 回定期検査以前</p>	<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"> ・最終異物確認は直接目視にて実施（手鏡等を使用） 	<p>美浜 3 号機での異物混入事象（2000年、2007年）を踏まえた対策についても実施</p> <ul style="list-style-type: none"> ・機器開口部周辺の管理徹底 ・異物確認者の作業服や作業靴などの清掃等

今回、SG器内および器外点検の結果、異物は確認できなかったことから異物混入対策は有効であったと判断する。今後も引き続き同様の異物混入対策を実施する。