

乙第233号証

関原発 第103号
2022年 5月 25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、関原
発第85号（2022年5月13日）にて提出した原因ならびにその対策を取り
纏めた報告書について、別紙のとおり補正します。

発電用原子炉施設故障等報告書

2022年5月25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	1. 事象発生の状況 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。 2. 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) <table><tr><td>SG</td><td>A</td><td>B</td><td>C</td><td>合計</td></tr><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></table> ^{*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 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	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							

事 象 の 状 況

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 (微小な信号指示)	2 (1)	1	0	3 (1)

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)

B-SG

第二管支持板 X35, Y32：減肉率 約4.1%

*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 NAI-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。

事 象 の 原 因

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。

(1) 内面きず

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}（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。

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（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

(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。

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加わった時に発生する割れ（破壊）。

^{*14} 材料に応力が継続的に、あるいは繰り返し加わ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

高浜発電所4号機の第11回定期検査（1999年4月～1999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一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（2000年2月～2000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かか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（2001年6月～2001年8月）
- ・第21回定期検査（2012年2月～2016年2月）
- ・第22回定期検査（2016年12月～2017年6月）
- ・第23回定期検査（2018年8月～2018年11月）

高浜発電所4号機

- ・第12回定期検査（2000年9月～2000年11月）
- ・第13回定期検査（2002年1月～2002年3月）
- ・第14回定期検査（2003年4月～2003年6月）
- ・第18回定期検査（2008年8月～2008年12月）
- ・第19回定期検査（2010年2月～2010年5月）
- ・第20回定期検査（2011年7月～2017年5月）
- ・第21回定期検査（2018年5月～2018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（2001年6月～2001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、PWSCC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13回定期検査時（2001年6月～2001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（2012年2月～2016年2月）に1本、第22回定期検査時（2016年12月～2017年6月）に1本、第23回定期検査時（2018年8月～2018年11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。

事 象 の 原 因

(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。

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 2 4 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 号機および 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 2 4 回) および前々回 (第 2 3 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 2 3 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 2 3 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、伝熱管表面から剥離し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 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 4 号機の第 2 3 回定期検査で実施した SG 器内の薬品洗浄*²²を、高浜発電所 3 号機の第 2 4 回定期検査においても実施し、その後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*²³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 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。

事 象 の 原 因

(c) ピッティング

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。

(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3m/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70m/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3mm、軸方向1mm以下(X9,Y22)

第三管支持板低温側下面付近(減肉率:判定基準未満):

周方向約5mm、軸方向1mm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3mm、軸方向1mm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。

事 象 の 原 因	(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。 ウ. S G 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) S G 器内点検 A－S G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－S G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－S G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－S G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) S G 器外点検 S G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、S G 器内に異物が混入している可能性はない。 エ. S G 器内発生物との接触 (ア) S G 内部品の脱落調査 S G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、S G 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、S G 伝熱管の外表面減肉の原因は、S G 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、S G 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. S G 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－S G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。
------------------	--

事 象 の 原 因

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器内のスケール回収

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×約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

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。

事 象 の 原 因

ア. 析出付着

給水とともにSG 2次側へ持ち込まれる鉄イオンは、SG 2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^{*29}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。

^{*29} 密度が比較的低く、粗な状態。

(b) スケール性状の実機調査

1996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、2020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への鉄の持込み量低減を図べく、AVT処理（pH9.2）、ETA^{*30}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。

^{*30} 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
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. 鉄の持込み量

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

水処理方法	鉄の持込み量／SG
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SG伝熱抵抗係数^{*3)}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(1995年)および第14回(2002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～100μm程度であった。

^{*3)} 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. スケールの剥離メカニズム

(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

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月に再稼動するまでの約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

事 象 の 原 因

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果、長期停止前はSG3台から約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、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

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台あたり、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

事 象 の 原 因	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 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られるため、次のとおり各ケースで想定されるワークレート^{*32}の比較を実施した。 ^{*32} 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、押付力和振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^{*33}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。 ^{*33} 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を与え、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 のとおりである。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 取替え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>

	高浜発電所		大飯発電所		美浜発電所	高浜発電所	
	3 号機	4 号機	3 号機	4 号機	3 号機	1 号機	2 号機
運転時間*34 (万時間)	23.2	22.2	17.0	18.2	9.3	10.9	12.5
鉄持込み量 (k g)	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)	—	—	—

*34 美浜発電所 3 号機、高浜発電所 1 号機および 2 号機については、SG 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*35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。

*35 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)		
高浜発電所 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)
高浜発電所 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)
大飯発電所 3 号機	0.01 未満 (第 16 回)	0.01 未満 (第 17 回)	0.01 未満 (第 18 回)	—
大飯発電所 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 SG 下部から実機スケールを採取し、断面ミ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、SG 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。

事 象 の 原 因

<表3：実機スケール観察結果>

回収場所	高浜発電所4号機 鉄持込み量： 2,490kg	大飯発電所4号機 鉄持込み量： 1,950kg	高浜発電所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： －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。

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、1975年度～1980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Ss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

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	3. 推定原因 (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。 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。
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	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 (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。 (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。 (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脆弱化させる。 (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。 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。

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13日 提出

2022年5月25日 補正

関西電力株式会社

はじめに

2022年3月30日、蒸気発生器の伝熱管全数について、渦流探傷試験を実施した結果、A－蒸気発生器の伝熱管2本およびB－蒸気発生器の伝熱管1本について、管支持板部付近に、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ことから、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、原子力規制委員会へ連絡した。

また、これら本事象の内容、原因調査および対策等について、2022年5月13日「関原発第85号」をもって原子力規制委員会に報告した。

今回の報告は、2022年5月23日「第17回原子力施設等における事故トラブル事象への対応に関する公開会合」において説明した内容を踏まえて、本事象に関する原因調査等について追加・修正を行い、補正として報告するものである。

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。

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(1999年4月～1999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一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(2000年2月～2000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（2001年6月～2001年8月）
- ・第21回定期検査（2012年2月～2016年2月）
- ・第22回定期検査（2016年12月～2017年6月）
- ・第23回定期検査（2018年8月～2018年11月）

高浜発電所4号機

- ・第12回定期検査（2000年9月～2000年11月）
- ・第13回定期検査（2002年1月～2002年3月）
- ・第14回定期検査（2003年4月～2003年6月）
- ・第18回定期検査（2008年8月～2008年12月）
- ・第19回定期検査（2010年2月～2010年5月）
- ・第20回定期検査（2011年7月～2017年5月）
- ・第21回定期検査（2018年5月～2018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 (添付資料-11, 12)

(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（2001年6月～2001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、PWSCC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13回定期検査時（2001年6月～2001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（2012年2月～2016年2月）に1本、第22回定期検査時（2016年12月～2017年6月）に1本、第23回定期検査時（2018年8月～2018年11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

(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号機および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、伝熱管表面から剥離し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4号機の第23回定期検査で実

施したSG器内の薬品洗浄^{*22}を、高浜発電所3号機の第24回定期検査においても実施し、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itting（添付資料－16）

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itting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itting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 (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：判定基準未満) :

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。

ウ. S G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) S G器内点検

A－S G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－S G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－S G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－S G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、スケールが碎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) S G器外点検 (添付資料－23)

S G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、S G器内に異物が混入している可能性はない。

エ. S G器内発生物との接触

(ア) S G内部品の脱落調査

S G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、S G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、S G伝熱管の外面減肉の原因は、S G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、S G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. S G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-S G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-S G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-S G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。

S G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. S Gから回収したスケールの性状調査

(I) 各S G器内のスケール回収

A-S Gの管板、第一～第三管支持板上面、並びにBおよびC-S G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-S G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×約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

(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^{*29}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。

^{*29} 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)

1996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、2020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。

SG器内への鉄の持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への鉄の持込み量低減を図るべく、AVT処理(pH9.2)、ETA^{*30}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。

^{*30} 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

エ. 鉄の持込み量

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

水処理方法	鉄の持込み量／SG
AVT処理	約1,700kg
ETA処理	約750kg
高ETA処理	約70kg
高アンモニア処理	約130kg
合計	約2,650kg

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^{*31}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(1995年)および第14回(2002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。

^{*31} 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. スケールの剥離メカニズム (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月に再稼動するまでの約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台から約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台あたり、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られるため、次のとおり各ケースで想定されるワークレート^{*32}の比較を実施した。

^{*32} 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^{*33}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。

^{*33} 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

(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. ECT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与え、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

(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－ 4 4)

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 のとおりである。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 取替え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>

	高浜発電所		大飯発電所		美浜発電所	高浜発電所	
	3 号機	4 号機	3 号機	4 号機	3 号機	1 号機	2 号機
運転時間* ³⁴ (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)			

*³⁴ 美浜発電所 3 号機、高浜発電所 1 号機および 2 号機については、SG 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－ 4 5)

スケール回収量*³⁵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。

*³⁵ 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)		
高浜発電所 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)
高浜発電所 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)
大飯発電所 3号機	0.01 未満 (第 16 回)	0.01 未満 (第 17 回)	0.01 未満 (第 18 回)	—
大飯発電所 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SG下部から実機スケールを採取し、断面ミ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、SG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	高浜発電所4号機 鉄持込み量： 2,490kg	大飯発電所4号機 鉄持込み量： 1,950kg	高浜発電所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： —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、1975年度～1980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。

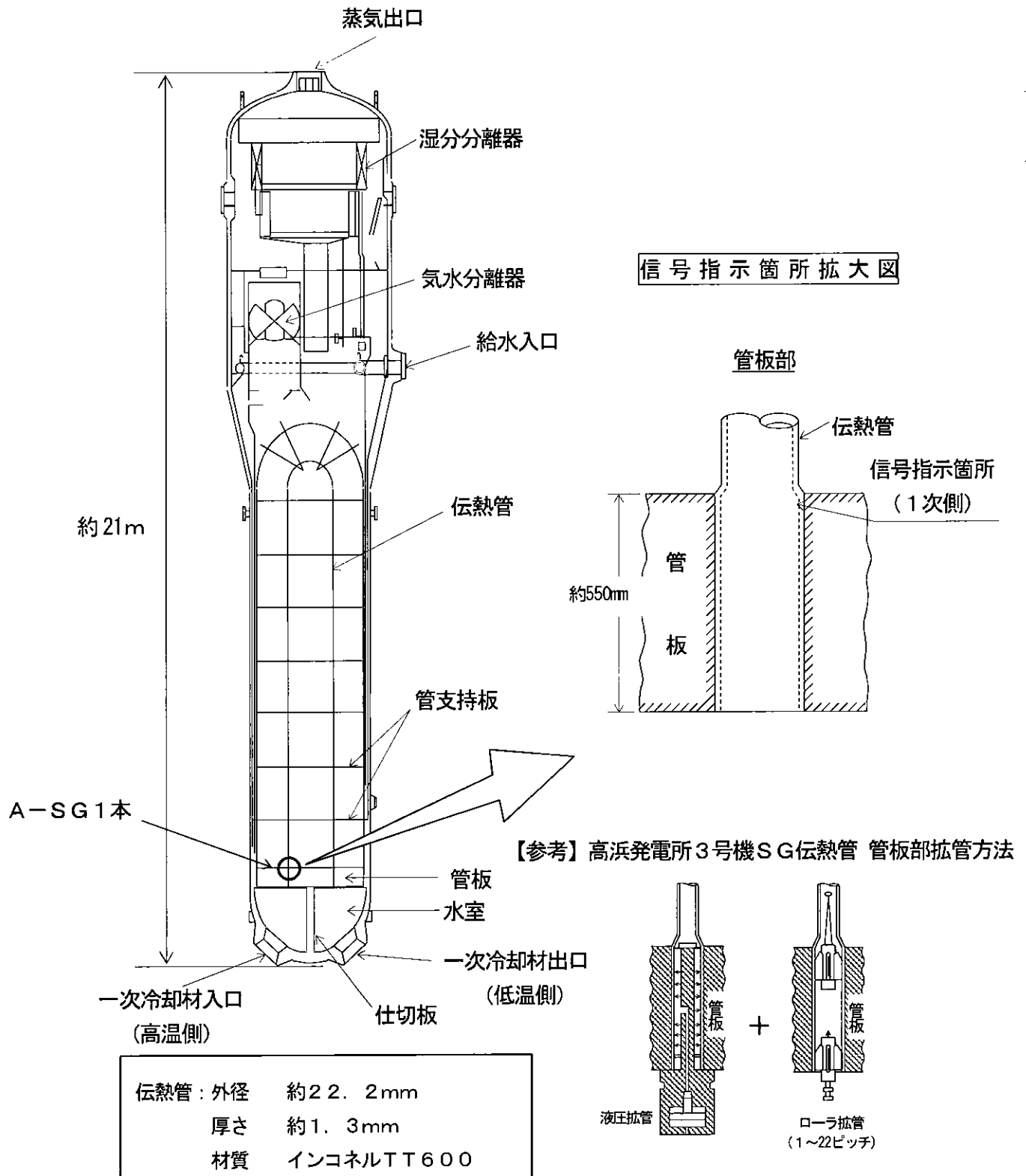
以 上

添 付 資 料

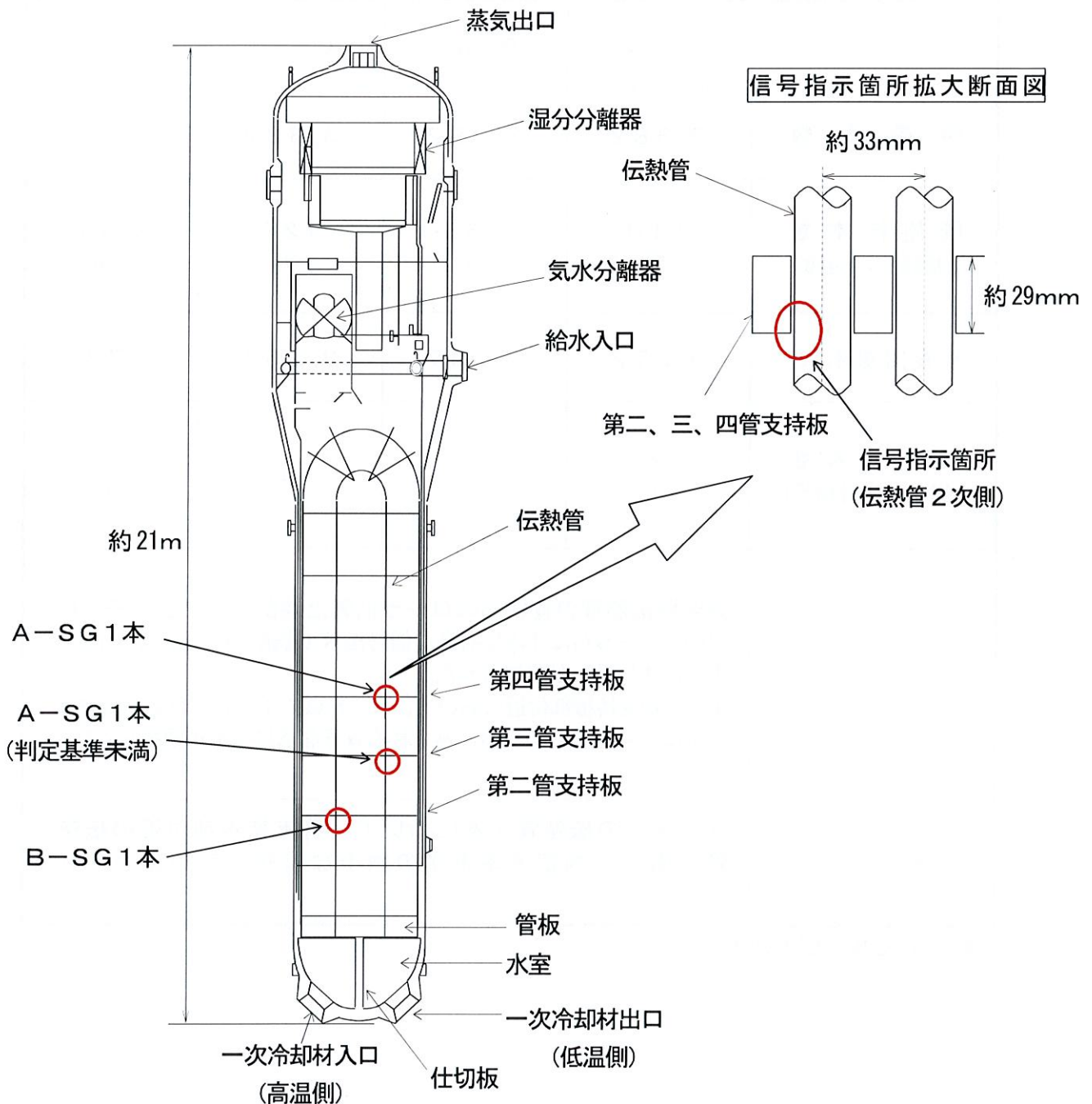
1. SG伝熱管信号指示箇所概要図
2. SG伝熱管ECT結果一覧
3. SG伝熱管ECT結果
4. SG伝熱管ECT信号指示位置図
5. 要因分析図
6. 信号指示の記録
7. 製造履歴に関する聞き取り調査
8. 運転履歴調査結果（一次冷却材温度・圧力、放射線監視装置、一次冷却材水質）
9. 粒界腐食割れ、ピitting、局所変形、エロージョンについて
10. 高浜発電所3号機 第25回・第23回 定期検査時の信号指示の比較
11. 蒸気発生器伝熱管ショットピーニング工事総括報告書
12. SG伝熱管へのショットピーニングの有効性とPWSCC検出に関する考察
13. 高浜発電所3号機および4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器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SG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）

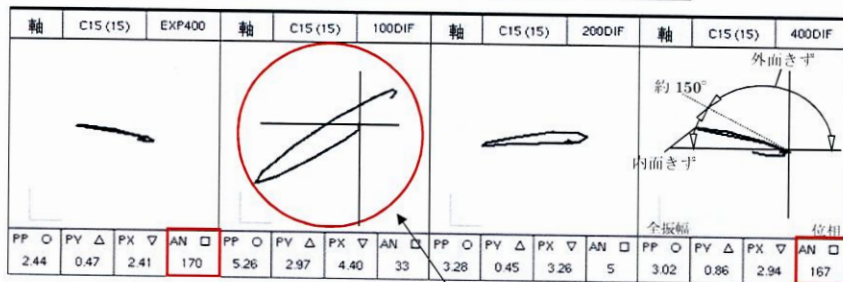


SG伝熱管ECT結果一覧

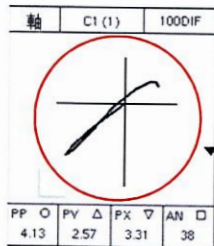
	A-SG	B-SG	C-SG	合計
設 備 本 数	3,382	3,382	3,382	10,146
既 施 栓 本 数 (応力腐食割れによる施栓本数※)	110 (7)	135 (10)	121 (7)	366 (24)
検 査 対 象 本 数	3,272	3,247	3,261	9,780
指 示 管 本 数 (微小な信号指示)	2 (1)	1	0	3 (1)
結 果	高温側伝熱管の管板部のローラ拡管上端部（22ピッチ）においてA-SGに1本に有意な信号指示（管軸方向に沿った内面きずを示す信号）が認められた。 また、管支持板部付近において、A-SGで1本およびB-SGで1本に、外部からの減肉とみられる有意な信号指示が認められた。			
備 考	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達の微小な信号指示が認められた。			

※既施栓本数の内数を示す。

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きず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 リサージュ波形の位相から内面きずパターンを示していることを確認する。

[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]

リサージュ波形に構造物、形状等のノイズ信号が複合していると認められた場合には、出来るだけノイズ成分を除いたリサージュ波形を表示し確認する。

[分析結果-3]

きず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。

[分析手順-4]

きず信号が小さく、リサージュ波形に構造物、形状等のノイズ信号が複合し位相や全振幅の確認が困難な場合は、健全部の波形と比較して内面きずの影響の有無を確認する。

[分析結果-4]

400kHz リサージュ波形の位相から内面軸方向きずパターンを示しており、100kHz において健全部と比較して、内面軸方向きずの影響を示した波形となっている。

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

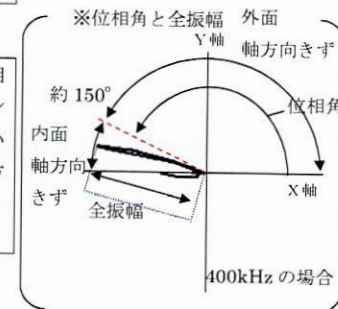
きず信号が小さく、構造物や形状等に複合し位相角や全振幅の評価が困難な場合は、分析手順により総合的に評価する。

位相角

ECT信号を2次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。

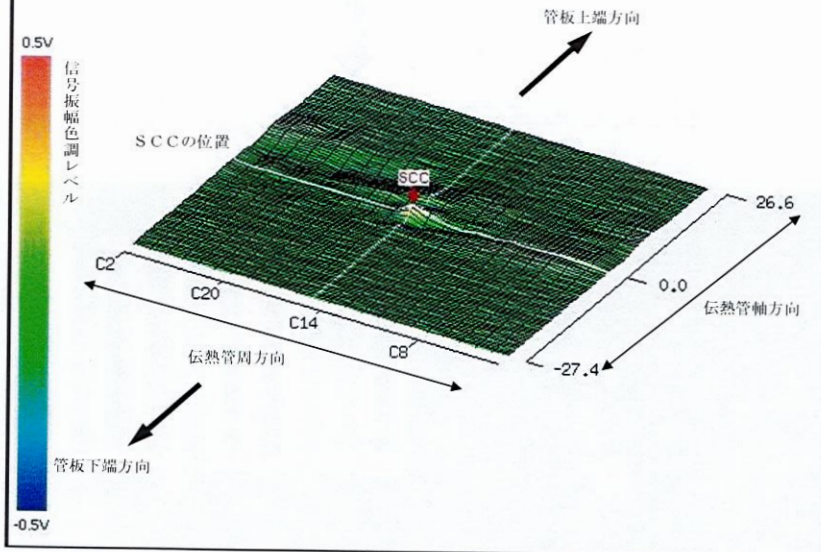
全振幅

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きずか外面きずかを判定する。



鳥瞰図表示※² (EXP400 Y+)

位置情報	深さ
HOB 0.5	----



評価

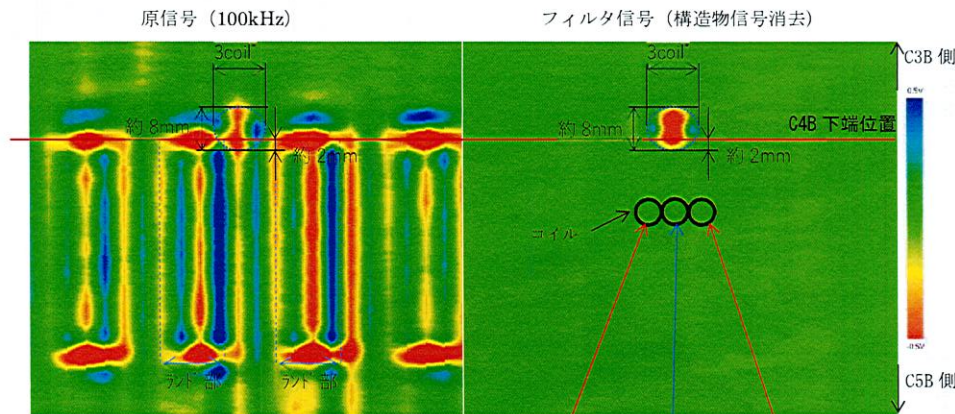
今回の有意な信号指示は高温側管板部で、伝熱管内面軸方向きずの特徴を有している。また、信号の特徴により貫通していないと評価した。

※1: 渦電流変化の電気信号を図で表したもの(水平成分および垂直成分を同一画面に表示)。

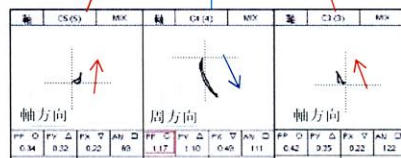
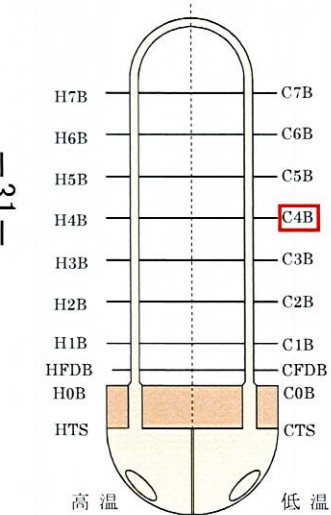
※2: 信号の波形を3次的に表したもので、信号の分布(イメージ)の詳細分析に用いる表示方法。

※3: 400kHzは原信号およびEXPフィルタを含む。

A-SG X9,Y2 部位: 高温側管板部付近 (内面きず)



*1coil : 約 3mm ※内側から見たイメージ

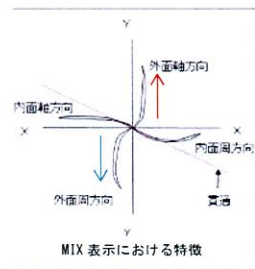


【A-SG X9, Y22 リサーチ波形】

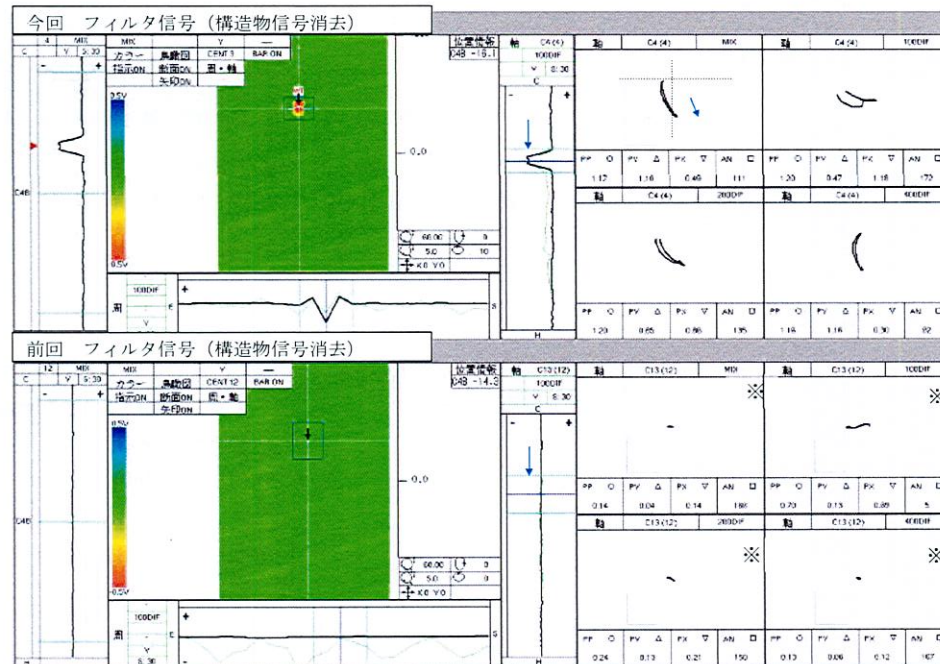
きず端部の軸方向成分(赤色矢印)を検出
きず中心部の周方向成分(青色矢印)を検出

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)



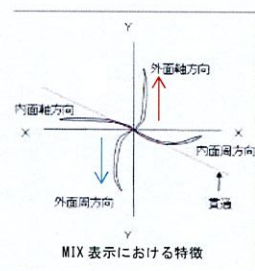
信号評価



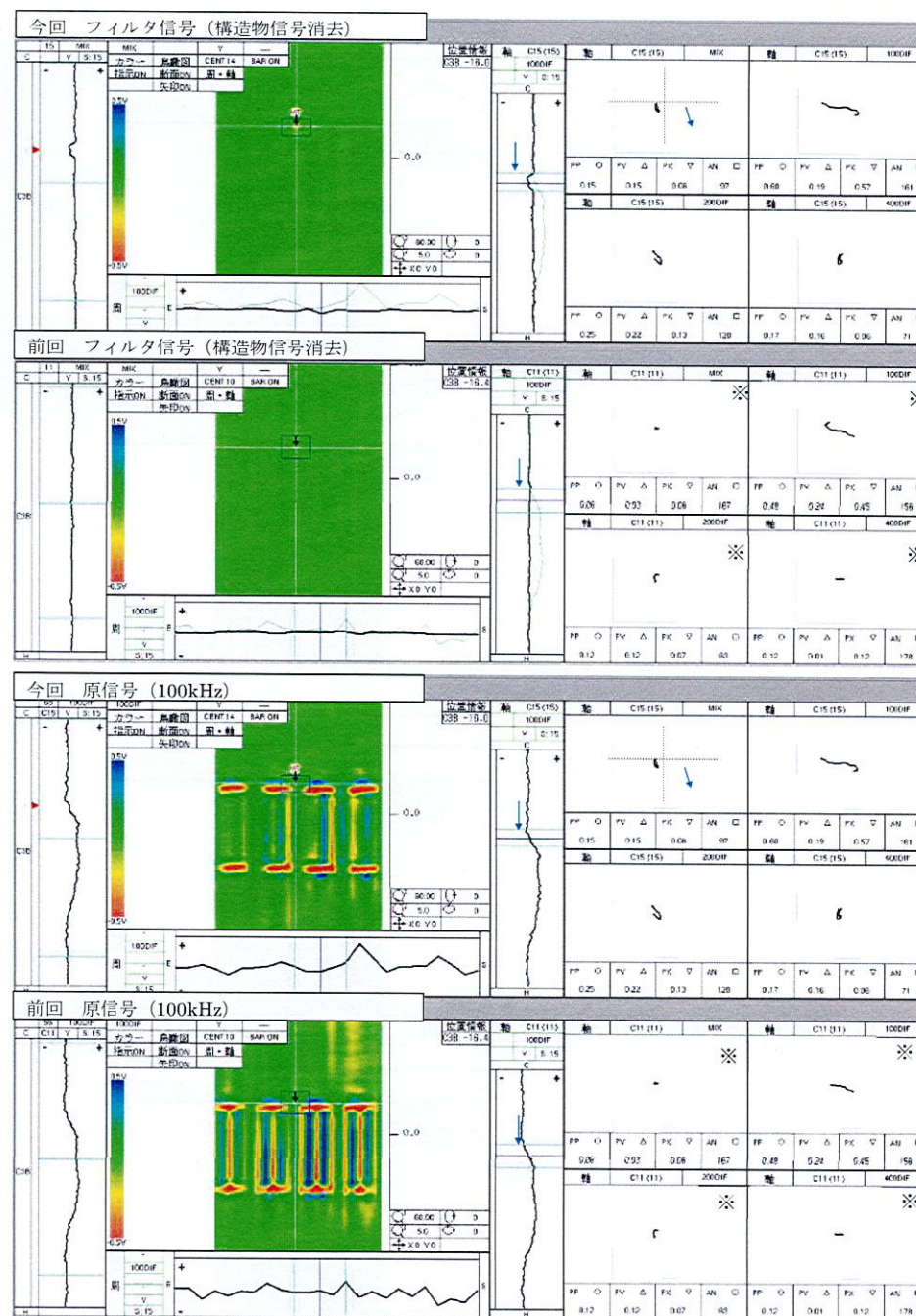
前今比較

※特異な信号がないため任意の位置で表示。

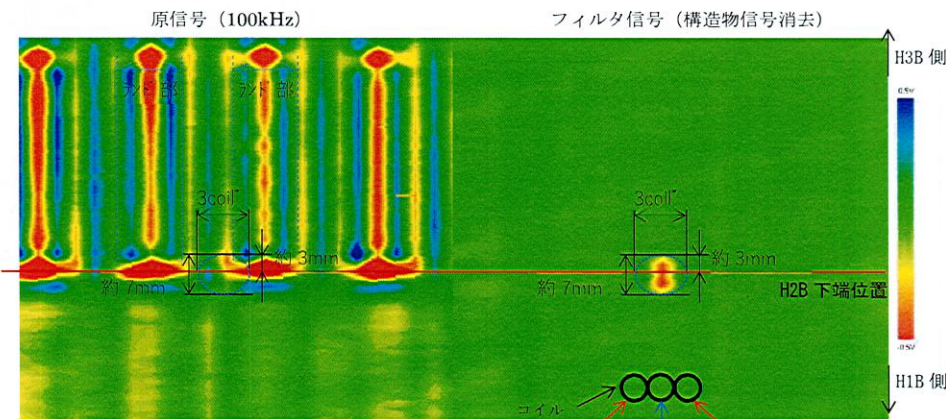
A-SG X9, Y22 部位 : C4B (減肉率 : 約 57%)



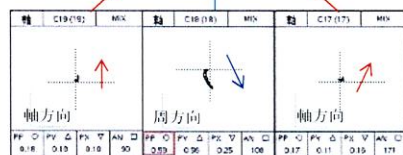
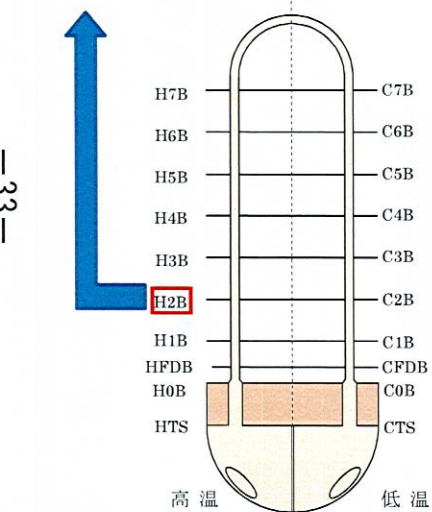
A-SG X51, Y8 部位 : C3B (減肉率 : 20%未満)



※特異な信号がないため任意の位置で表示。



*1coil : 約 3mm ※内側から見たイメージ

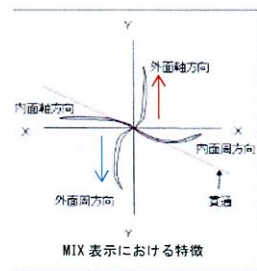


【B-SG X35, Y32 リサージュ波形】

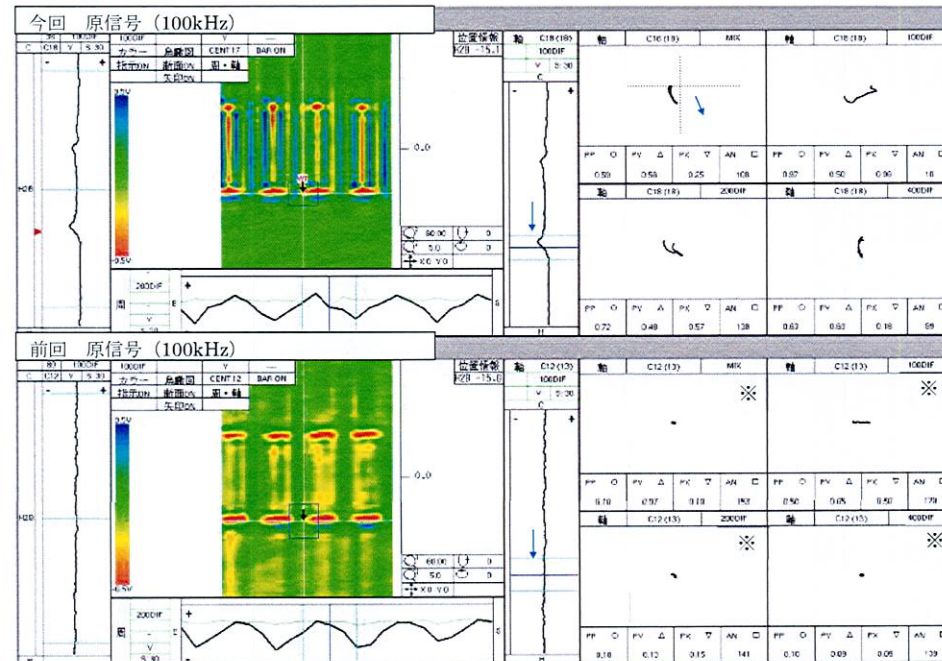
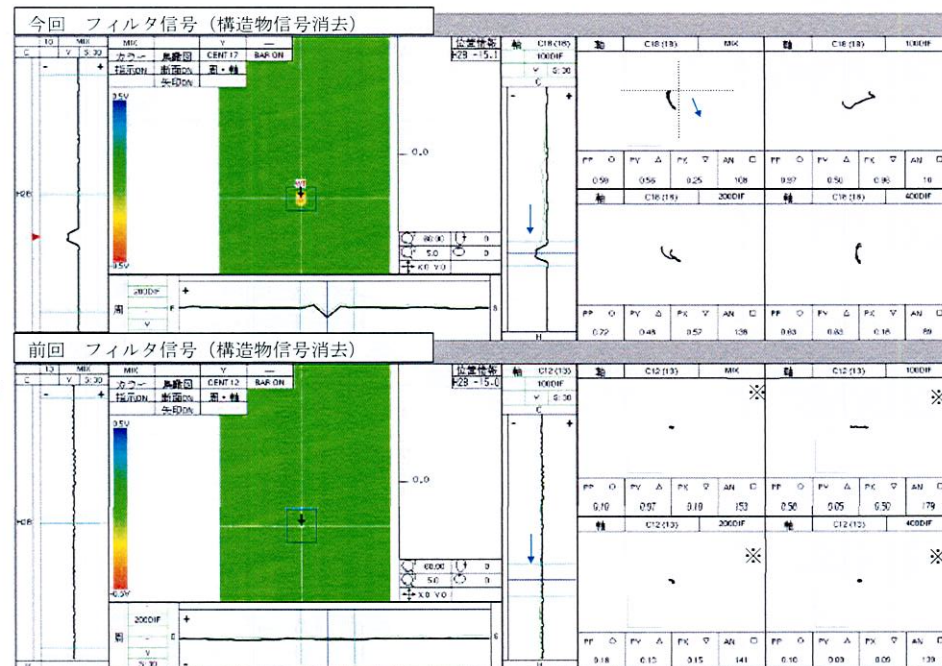
きず端部の軸方向成分(赤色矢印)を検出
きず中心部の周方向成分(青色矢印)を検出

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



前今比較

※特異な信号がないため任意の位置で表示。

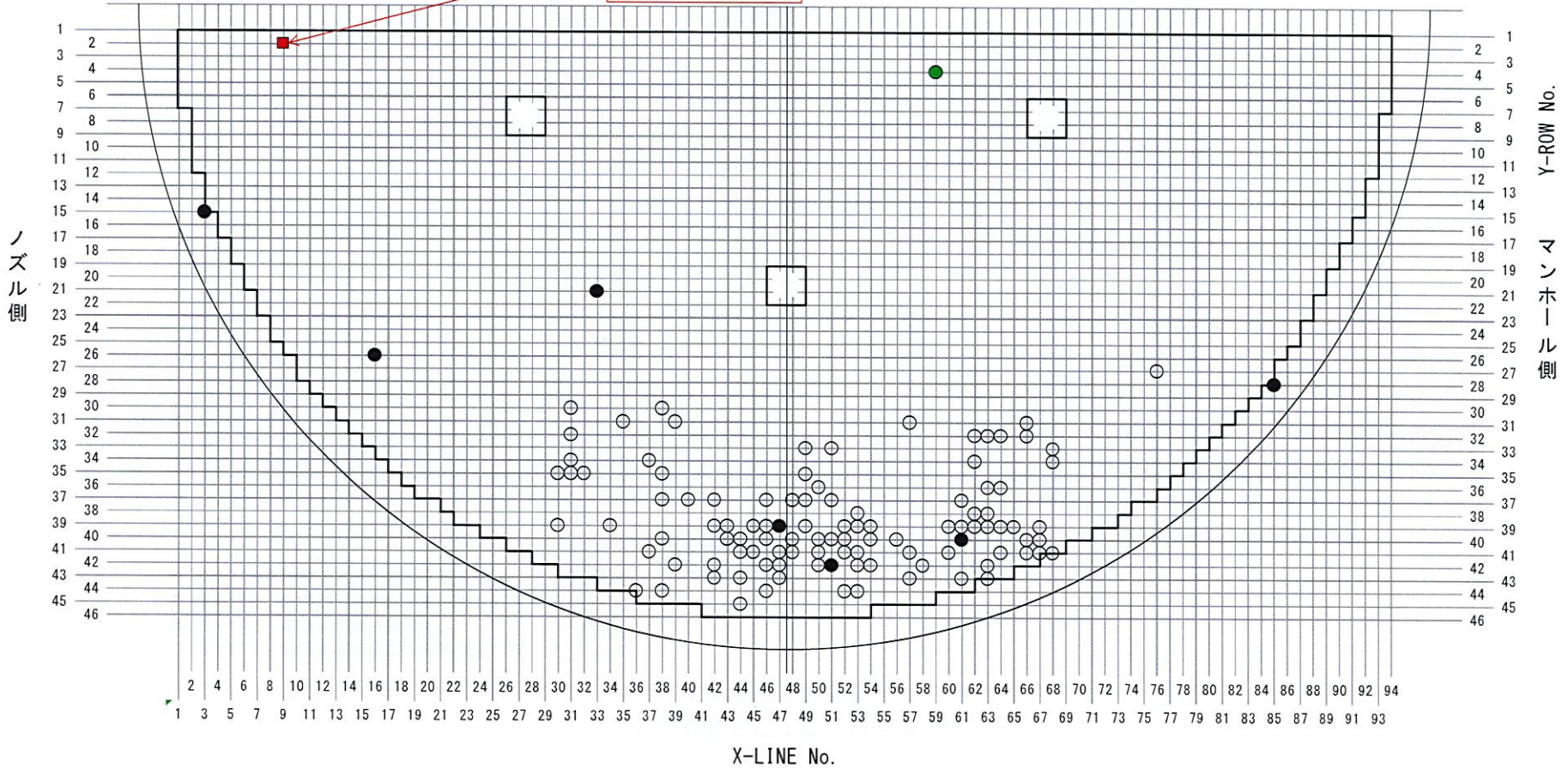
B-SG X35, Y32 部位 : H2B (減肉率 : 約 41%)

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



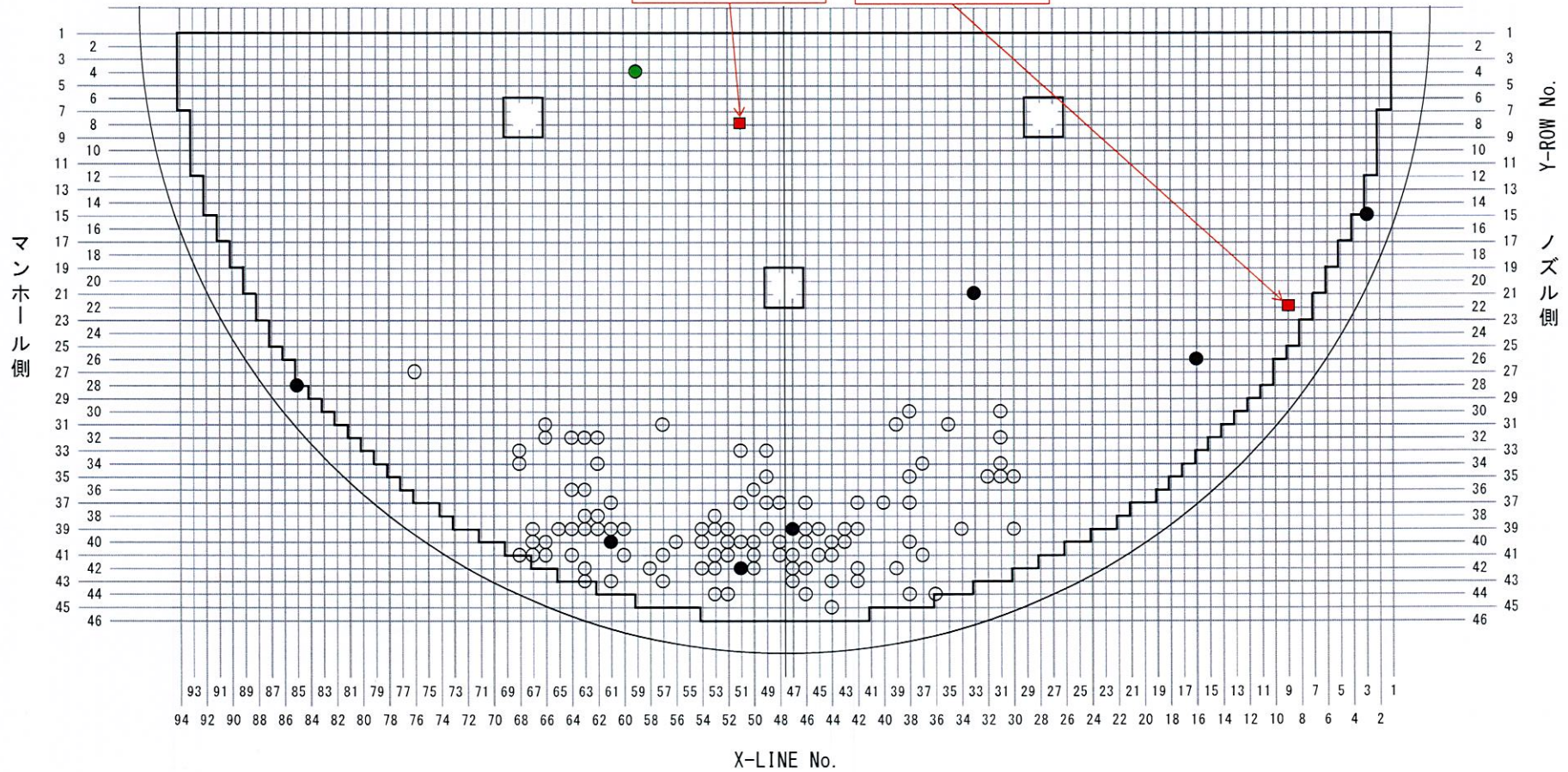
SG伝熱管ECT信号指示位置図 A-SG（低温側）

- ：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

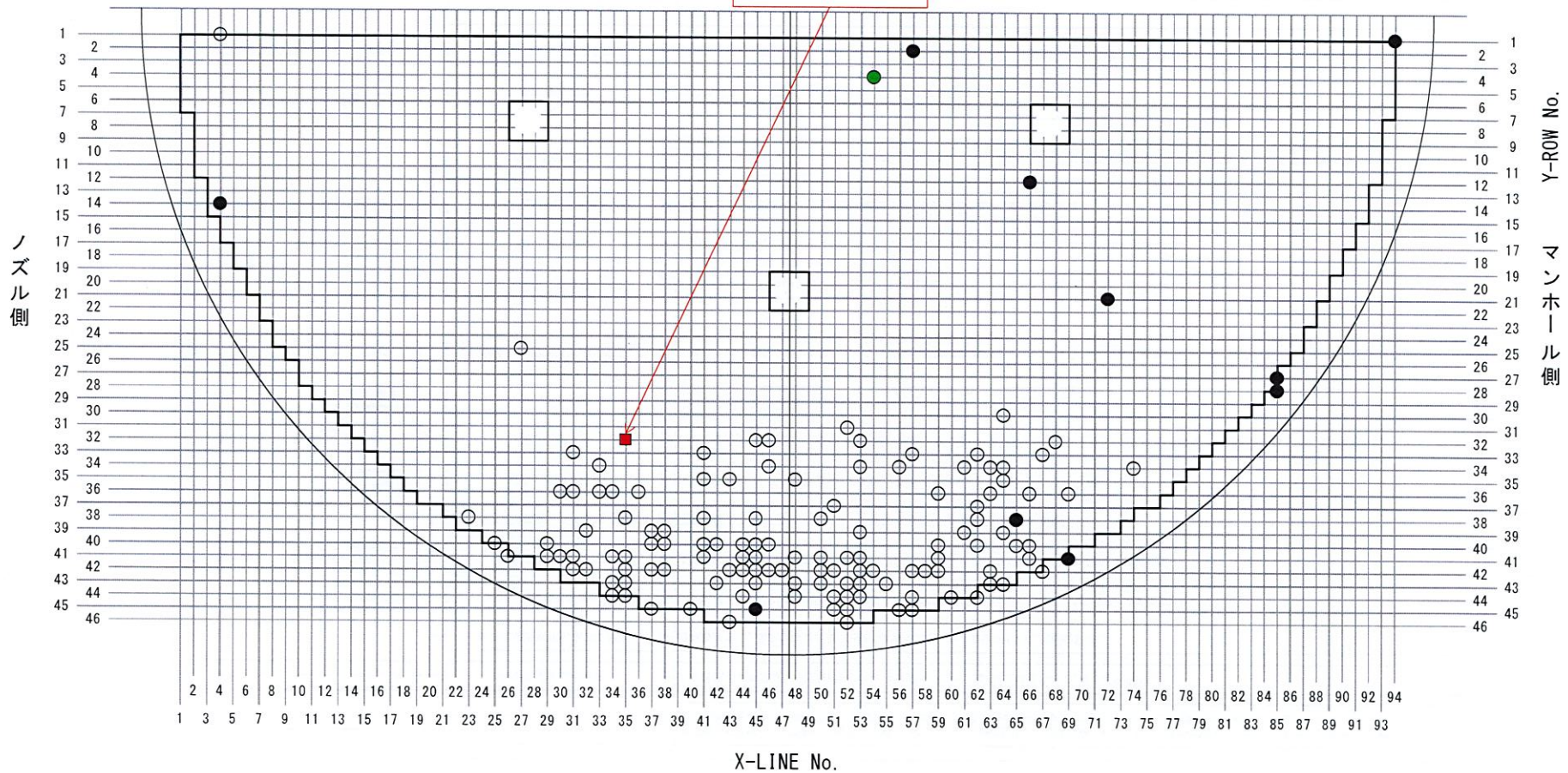


SG伝熱管ECT信号指示位置図 B-SG（高温側）

- : 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
管板拡張部で 有意な信号 指示を確認	2次側からの 損傷	ECT波形調査 信号指示をリサーチ波形にて分析した結果、400kHzは内面軸方向きずの位相を示している。100kHzでは形状等のノイズ成分の除去は困難であるが、健全部の波形との比較から内面軸方向きずの影響が示されている。以上から、内面からの信号であると推定されるため、2次側からの損傷の可能性はない。
	延性割れ	過大応力 設計図書による確認 工事計画認可申請書の強度計算書から、延性割れに対して設計上考慮されていることを確認した。
		異常な過渡変化の有無を調査 運転履歴から、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 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、インコネルTT600製であることを確認した。
		圧力・ 温度過渡 設計図書による確認 工事計画認可申請書の強度計算書から、疲労割れに対して設計上考慮されていることを確認した。
		異常な過渡変化の有無を調査 運転履歴から、疲労割れ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。
	機械的振動 流体振動	振動の有無を調査 運転履歴から、有意な振動を与えるような、異常な温度・圧力変化がないことを確認した。
		スクラッチ 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。
	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はないことを確認した。
		粒界腐食割れ (IGA) 環境 発生しうる環境であるか確認 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。更に、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は維持されている。このような環境ではインコネルTT600に粒界腐食割れ、ピitting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、インコネルTT600製であることを確認した。
		局所変形 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。
	エロージョン	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がないことを確認した。
		限界流速の調査 周辺流体の衝突によってエロージョンが発生するとされている。管板拡張部の伝熱管内の流速は平均約6m/sであり、伝熱管材料(インコネルTT600製)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。
	摩耗減肉	異物による 減肉 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。
	応力腐食割れ環境 (PWSCC)	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、インコネルTT600製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、インコネルTT600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 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 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、温度ではインコネルTT600はPWSCC感受性を有していることを確認した。
	応力	今回検出されたECT指示と 同様な部位における知見調査 高浜発電所3号機第12回定期検査および高浜発電所4号機第11回定期検査の抜管調査結果から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。
		ショ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 ショットピーニングにより圧縮応力が付与されない範囲とECTの検出限界が重なる範囲にきずが残存していた場合、PWSCCが顕在化する可能性がある。
	ショットピーニングの初期欠陥への影響	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。ショ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なかったことを確認した。
	ショ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

要因分析図

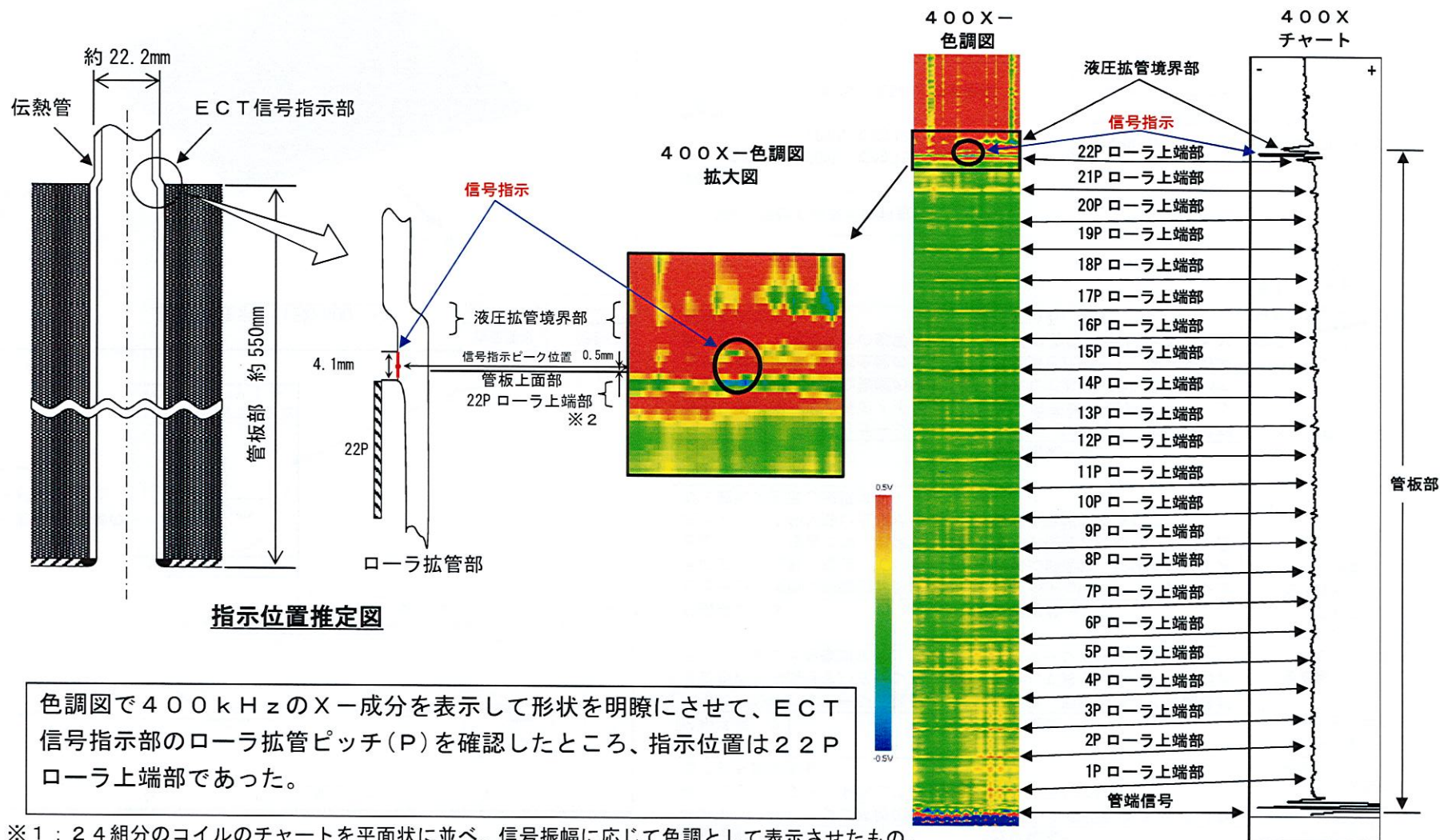
要因			調査項目	評価	
減肉指示	1次側からの情報		ECT番号	ECTの番号指示により、伝熱管内面(1次側)にきずがないことを確認した。	×
			ECT番号	ECTの番号指示を確認した結果、デンディングではないと考える。*	×
	2次側からの情報	デンディング	使用環境	過去にSG2次側環境においてアルカリ環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、酸腐食割れが発生した実績があるが、高圧発電所3号機のようなアンモニアとヒドラジンによるAVT処理を実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考える。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉であると考えることから、酸腐食割れの可能性はないと考える。*	×
		酸腐食割れ(IGA)	使用環境	過去にSG2次側環境において高水リーク等による塩化水素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ittingが発生した実績があるが、高圧発電所3号機のような塩化水素が十分に管理され、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ることから、ピittingの可能性はないと考える。*	×
		ピitting	使用環境	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、高圧発電所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ることから、リン酸減肉の可能性はないと考える。*	×
		リン酸減肉	設計評価	管支持板間の流れによる伝熱管の管支持板側の応力は、疲労層に比べ非常に小さく、疲労破壊は発生しないと考える。*	×
		流体運動による疲労	設計評価	当該部流速は約3m/sであり、かつ、インコネルT500は耐エロージョン性が高いことから(室温条件下では約70mm/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。*	×
		エロージョン	設計評価	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。	×
	2次側からの情報	管支持板との接触	過去の点検調査	高圧発電所3号機の異物混入事故(2000年、2007年)を踏まえた従前の異物混入対策(開口部管端の保護等)に加え、高圧発電所3号機の第23回定期検査以降の伝熱管減肉事故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、高圧発電所3号機(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。	×
			SG器内点検(目視点検)	AおよびB-SGの減肉箇所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。A-SGの減肉箇所を確認した伝熱管(X51Y22)およびB-SGの減肉箇所を確認した伝熱管(X51Y8)、B-SGの減肉箇所を確認した伝熱管(X35Y32)を小型カメラにて目視点検を実施した結果、後述の通り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箇所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箇所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が残存していることを確認したが、それ以外の異物は確認できなかった。	×
SG器外流入物との接触		SG器外点検(目視点検)	SGブローダウン系統およびタービンサイプラインの腐蝕ステレーナの調査点検や弁、配管の内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。	×	
		設計評価	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、薄片状として、遮止め金具のキー固定部等を内部品として使用されていることを確認した。ただし、これらの内部品は、消滅止めされていること、もしくは、潤滑を潤滑止めされた構造物に囲まれており、万一、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。	×	
2次側からの情報	SG器内発生物との接触	SG器内点検(目視点検)	AおよびB-SGの減肉箇所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。A-SGの減肉箇所を確認した伝熱管(X51Y22)およびB-SGの減肉箇所を確認した伝熱管(X51Y8)、B-SGの減肉箇所を確認した伝熱管(X35Y32)を小型カメラにて目視点検を実施した結果、後述の通り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箇所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箇所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が残存していることを確認したが、それ以外の異物は確認できなかった。	○	
		スケールによる減肉	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器内のスケールの付着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周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。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。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、主成分はマグネサイトであり、SG器内で発生するスラッジと周成分であること確認した。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、長尺型に分けられ、長さが最大のもは、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隙間より大きく、逆転時に管支持板下面の伝熱管の隙間に挟まる可能性がある形状であった。また、これらのスケールについては、目視点検の結果、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次元測定器等より計測した結果、直径約2.3〜2.6mmの円筒状に似た形状であり、伝熱管(内径)の外径(直径22.2mm)に近いことを確認した。スケール120個を対象に断面観察を行った結果、横断面(密度の高い酸化鉄の層)が主体のスケールは42個確認した。また、スケール50個(約10mm×約5mm以上)を対象に断面観察を行い、伝熱管とスケールの厚み比較を行った結果、伝熱管の減肉量がスケール厚さよりも大きくなるスケールを1個確認した。	○	
ECT設備	減肉以外の番号	局所的な異物等の付着・剥離	ECT番号	局所的なスケールの剥離は、減肉と区別できるところから、今回の番号指示は、スケールの剥離ではないと考える。	×
*：きずの形状からも本要因でない判断できる。					

※ きの形状からも本原因でない判断できる。

○ 可能性が高い。
× 要因の可能性なし。

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)



※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。

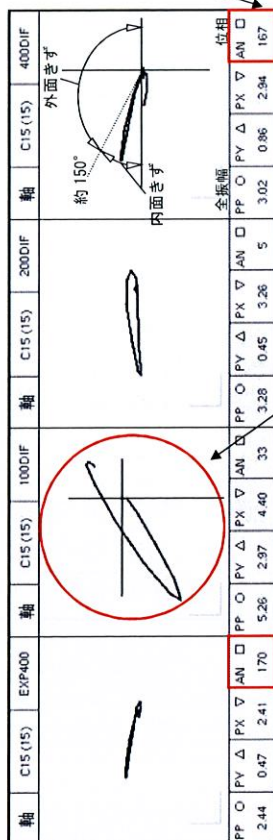
伝熱管全長についての信号指示の大きさや位置等の分析に用いる表示方法。

※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。

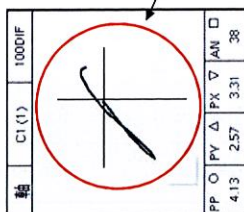
インテリジェント ECT 指示管波形

有意な信号指示のリサージ、鳥瞰図表示による分析例 (SCC)

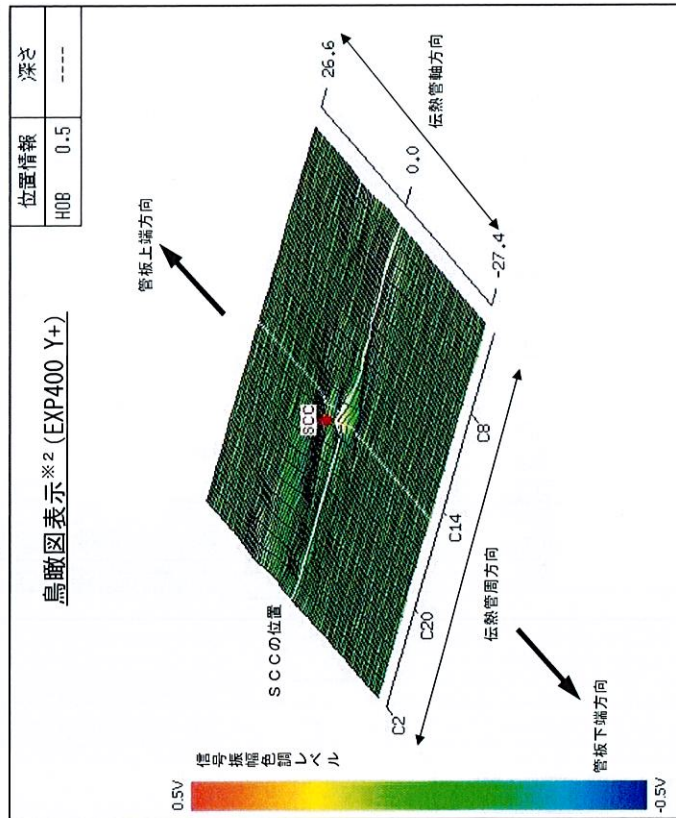
リサージ表示※1 (A-SG X9, Y2)



同一番地の伝熱管の健全と評価されるリサージ

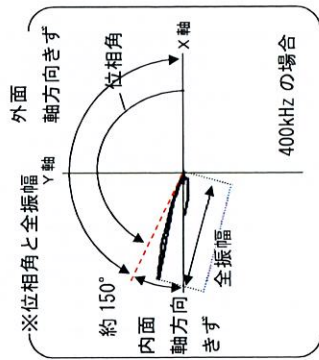


鳥瞰図表示※2 (EXP400 Y+)



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、内面向きか外面向きかを評価する。

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向きか外面向きかを判定する。



[分析手順-1]
400kHz ※3 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向き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向きパターンを示していることを確認する。

[分析結果-2]
構造物、形状等のノイズ信号が複合しており、位相から内面向き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、位相から内面向きパターンを示していることを確認する。

[分析結果-3]
リサージ信号が小さくリサージ信号が複合しており、位相や全振幅の確認ができない。

[分析手順-4]
リサージ信号が小さく、リサージ波形に構造物、形状等のノイズ信号が複合しているため、位相や全振幅の確認が困難な場合は、健全部の波形と比較して内面向きか外面向きを確認する。

[分析結果-4]
400kHz リサージ波形の位相から内面軸方向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、内面軸方向向きか外面向きを示した波形となっている。

伝熱管内面軸方向向きの特徴

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

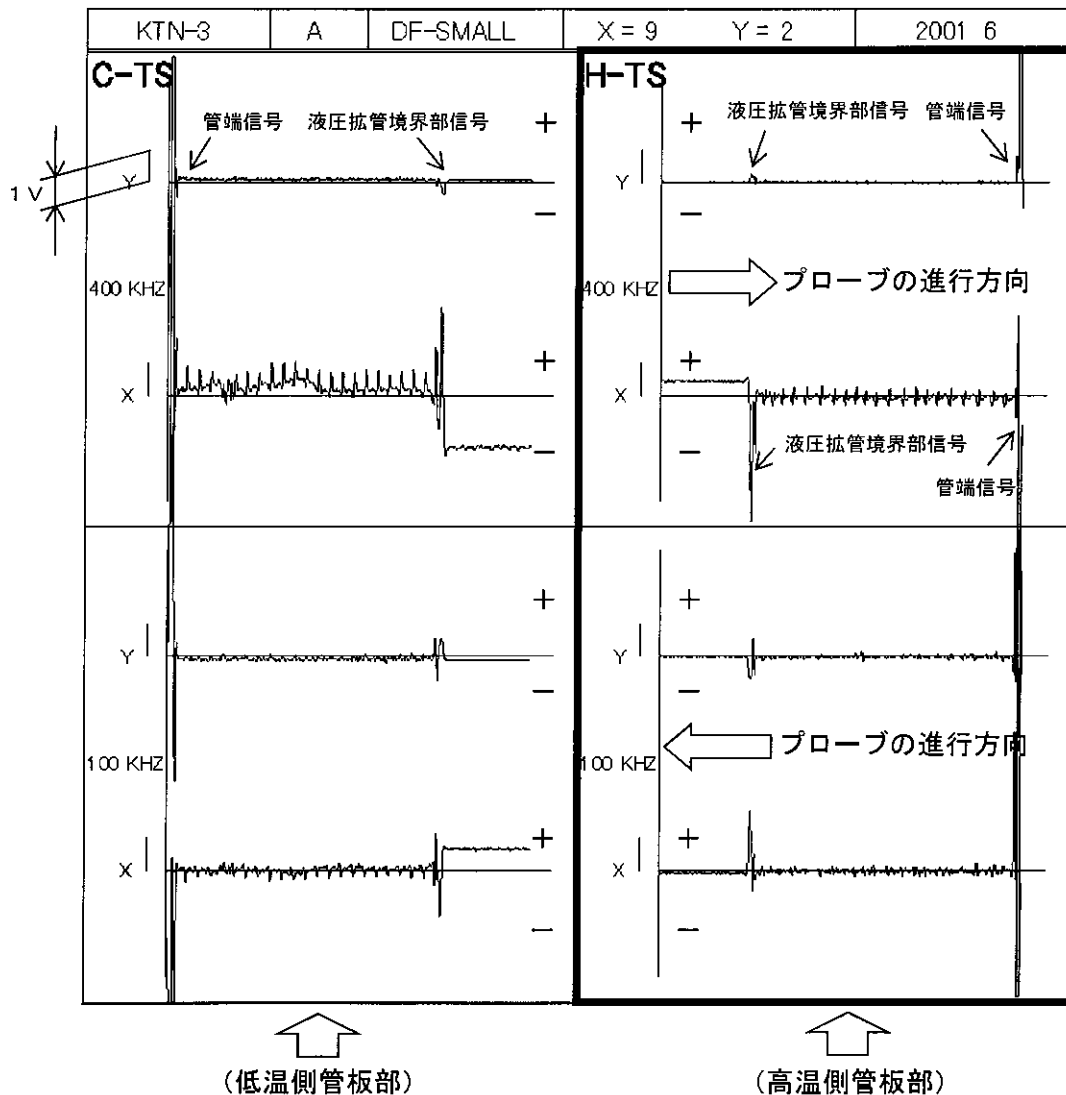
評価

今回の有意な信号指示は高温側管板部で、伝熱管内面軸方向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。

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。



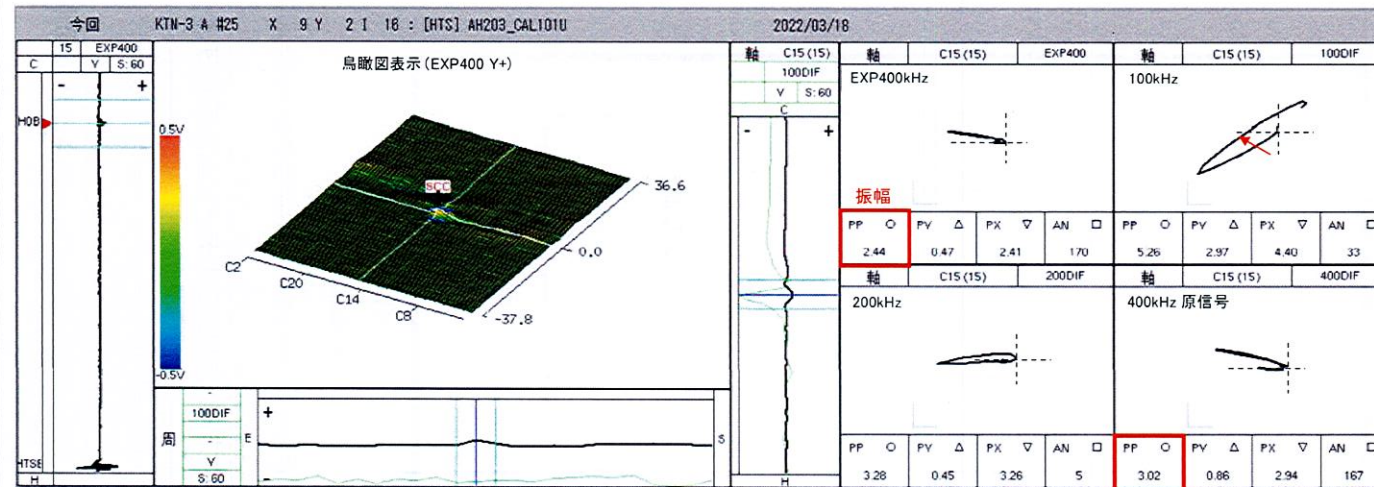
管板部の有意信号とは、

- ・ 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)

第 2 5 回定期検査



分 析 評 価

【400kHz】※2

EXP400のリサージュ波形の振幅において、#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。

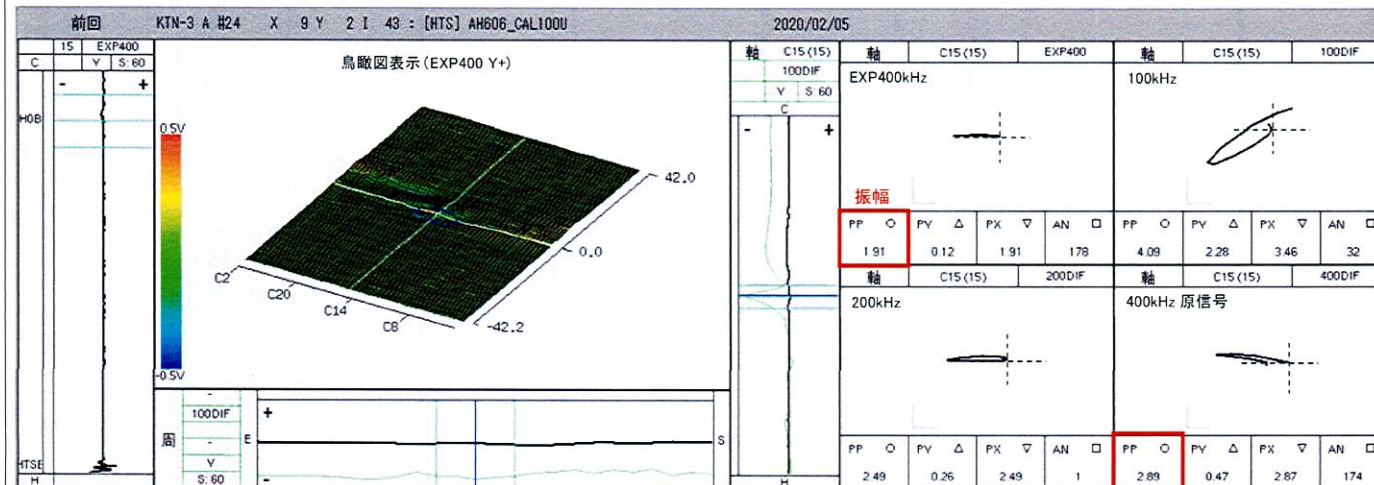
加えて400DIFのリサージュ波形の振幅を見ても同様の変化を示している。

【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。

第 2 4 回定期検査



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、リサージュ波形の振幅を見ても#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。

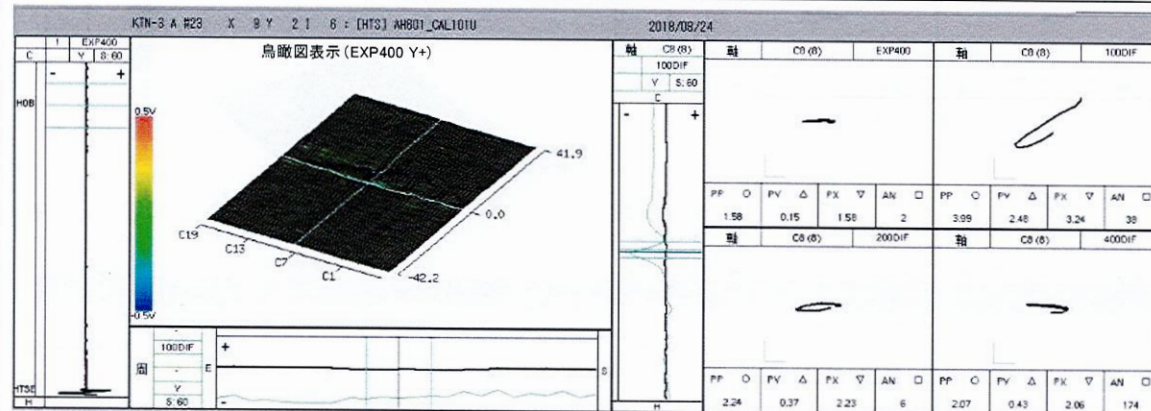
以上から、きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。

※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試験

※2: 400kHz は、原信号及び EXP フィルタ(拡管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)

第 2 3 回定期検査



分析評価

【400kHz】

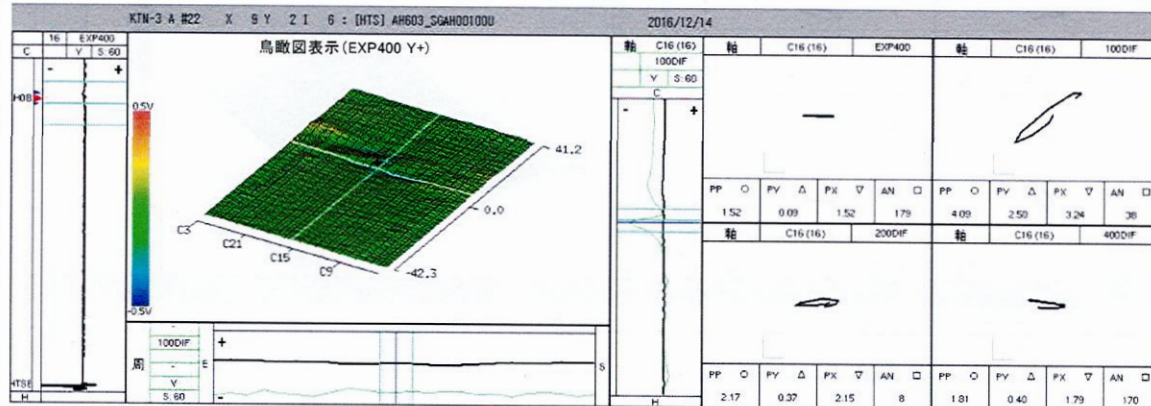
管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

【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。

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。

第 2 2 回定期検査



分析評価

【400kHz】

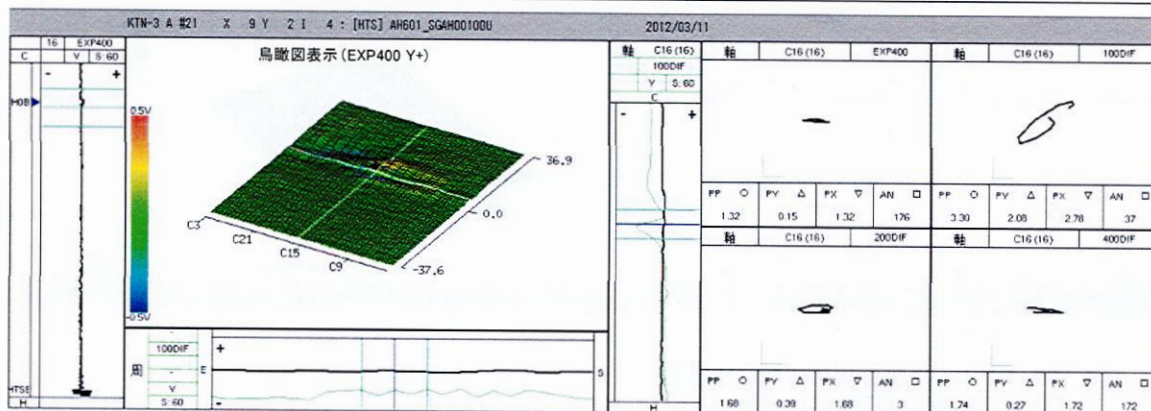
管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

【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。

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。

第 2 1 回定期検査



分析評価

【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。

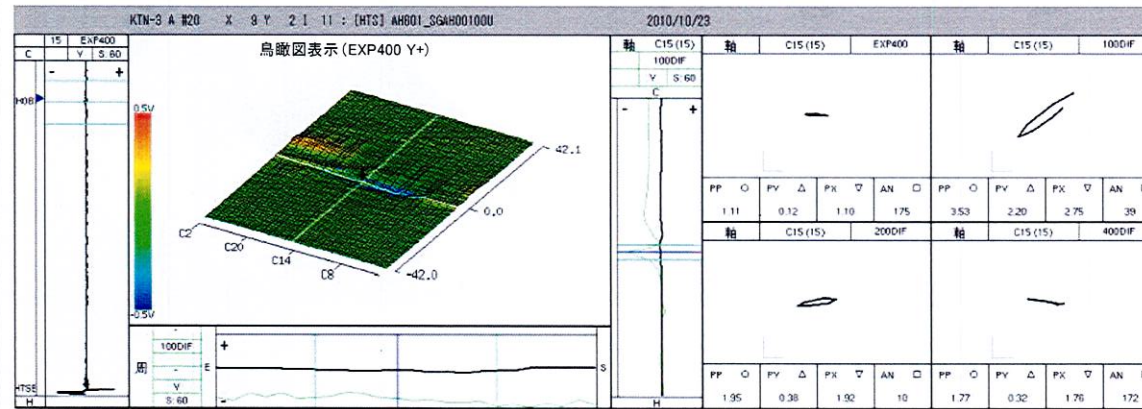
【100kHz】

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。

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。

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)

第 20 回定期検査



分 析 評 価

【400kHz】

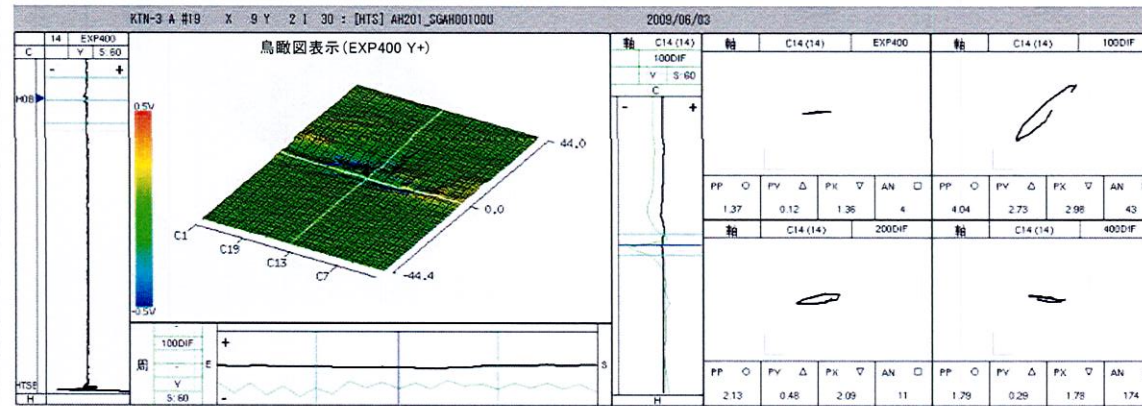
管板内の形状信号やブローの揺動信号との区別が困難な信号である。

【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。

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。

第 19 回定期検査



分 析 評 価

【400kHz】

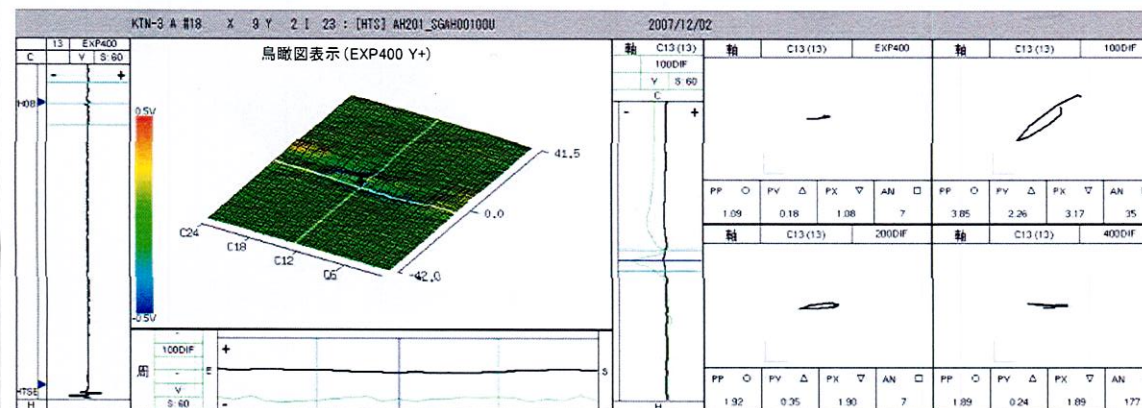
管板内の形状信号やブローの揺動信号との区別が困難な信号である。

【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。

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。

第 18 回定期検査



分 析 評 価

【400kHz】

管板内の形状信号やブローの揺動信号との区別が困難な信号である。

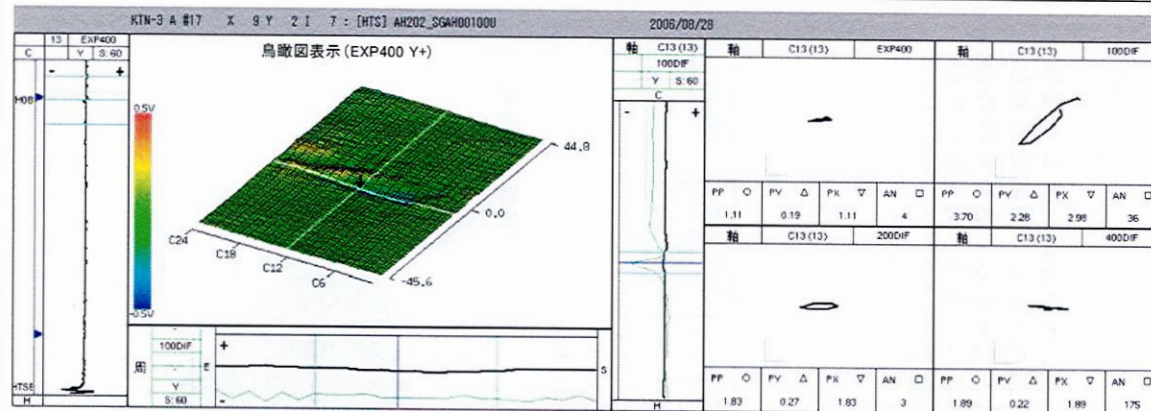
【100kHz】

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。

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。

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)

第 17 回定期検査



分析評価

【400kHz】

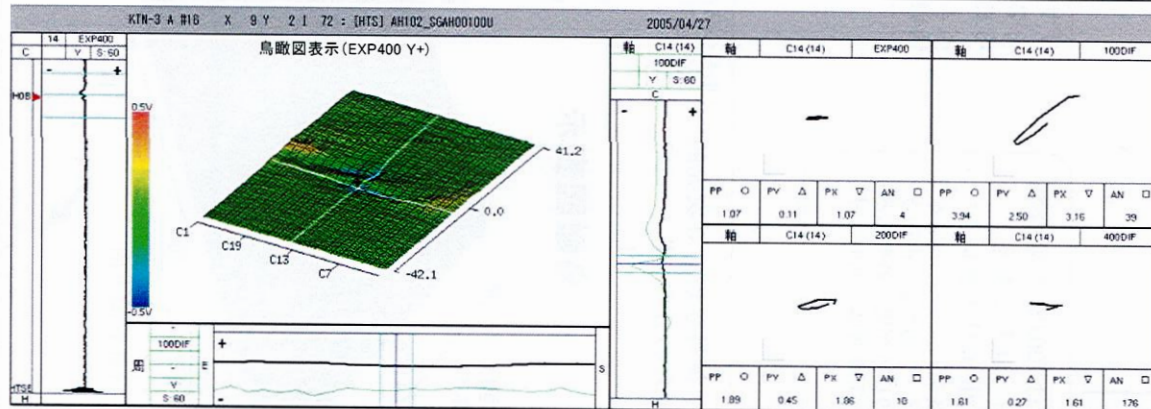
管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

【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。

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。

第 16 回定期検査



分析評価

【400kHz】

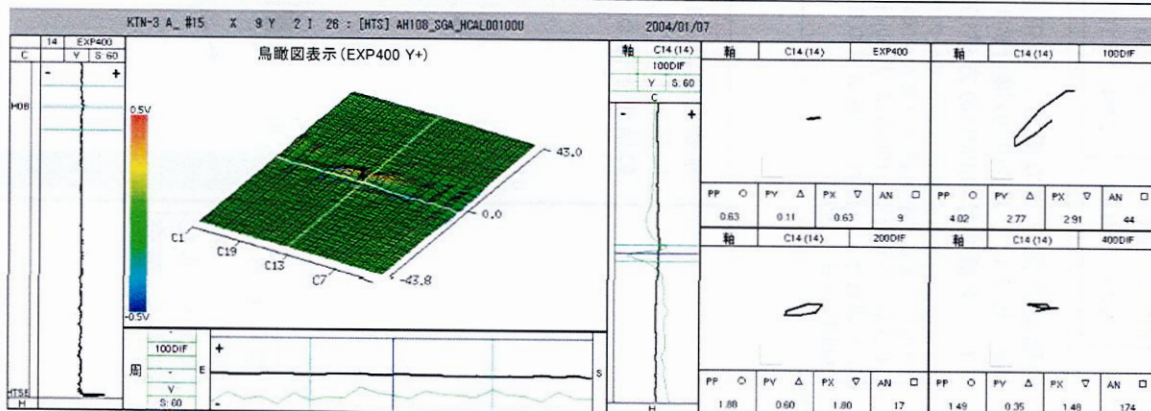
管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

【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。

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。

第 15 回定期検査



分析評価

【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。

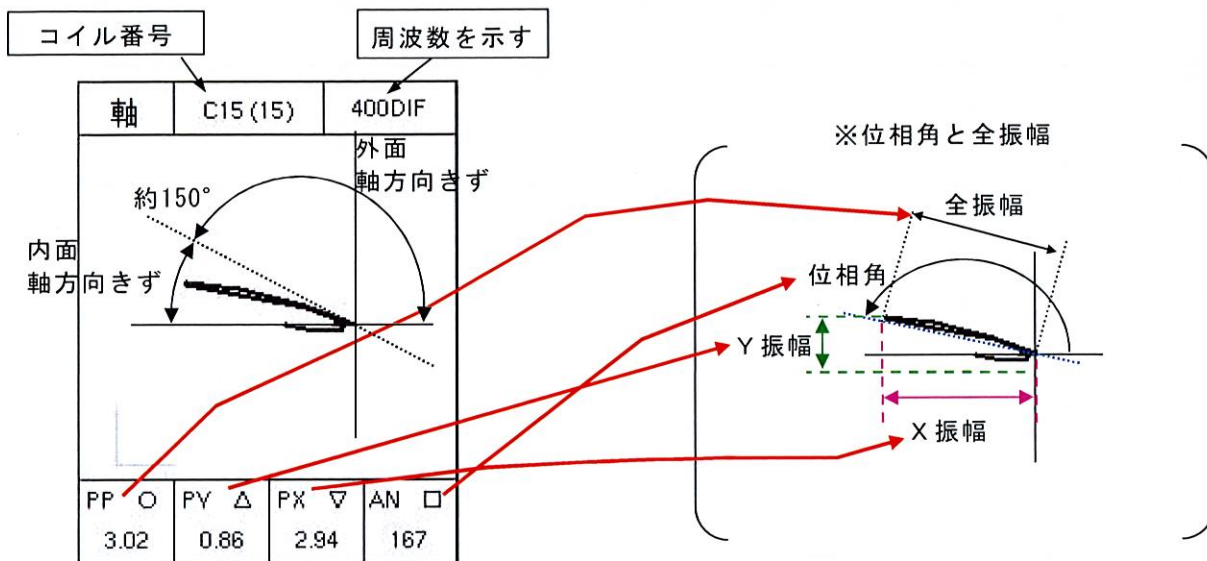
【100kHz】

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。

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。

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。

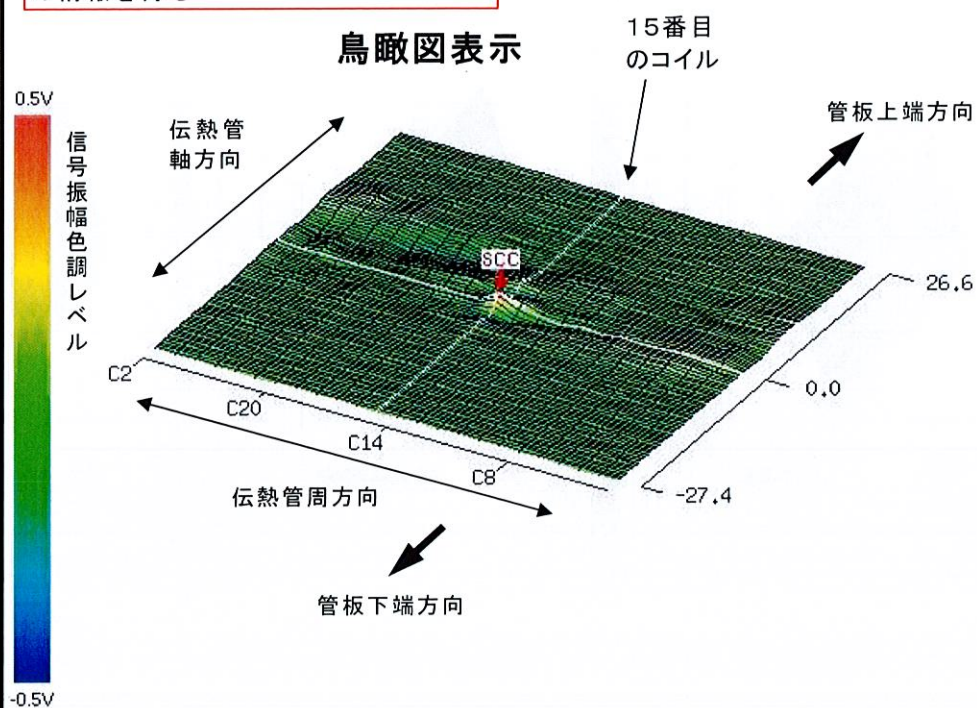
リサーチ表示とは、ECT 信号を2次的に示し、周波数の異なる ECT 信号から、きずが内外面および周軸方向のどちら側か等の情報を得る

鳥瞰図表示とは、信号状況を3次的に示すもので、信号の分布（イメージ）の情報を得る

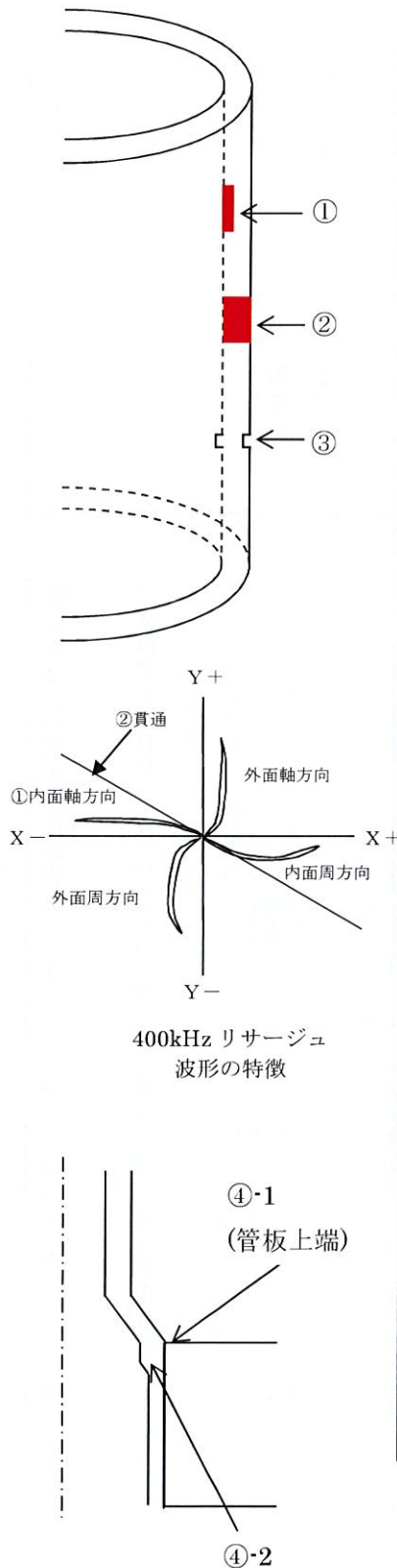
信号の伝熱管位置を示す

位置情報	深さ
H08 -0.5	----

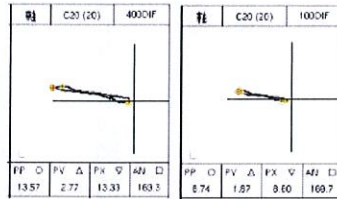
信号レベルが大きいほど赤く（または青く）なる



インテリジェント ECT における信号の特徴について



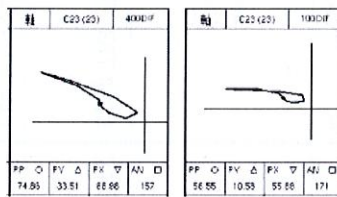
①内面軸方向きず



(特徴)

- ・位相角：400kHz で約 150° 以上 100kHz で約 170° 以上
- ・振幅：100kHz < 400kHz
- ・400kHz の信号が X－, Y+ 方向に軌跡を描く。

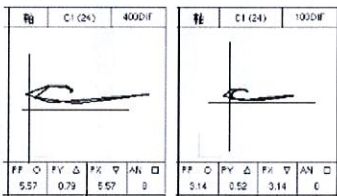
②貫通軸方向きず



(特徴)

- ・位相角：100kHz $\geq$ 400kHz
- ・振幅：100kHz < 400kHz
- ・400kHz の信号が X－, Y+ 方向に軌跡を描く
- ・400kHz 信号の位相が約 150° となり、100kHz 信号の位相が約 170° となる。

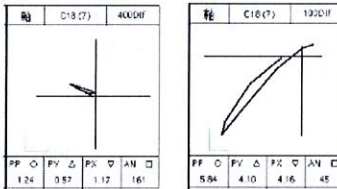
③局所変形信号 (打痕)



(特徴)

- ・位相角：100kHz $\approx$ 400kHz、ほぼ水平
- ・振幅：100kHz < 400kHz
- ・信号に巻きが大きい傾向がある。

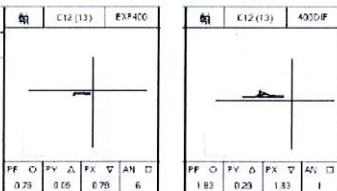
④-1 (管板上端信号)



(特徴)

- ・400kHz の信号が X－, Y+ 方向に軌跡を描く。
- ・100kHz の信号が X－, Y－方向に軌跡を描く。
- ・振幅：100kHz > 400kHz (伝熱管外側の構造物であるため、低周波の振幅が高周波の振幅より大きくなる)

④-2 (形状及び揺動信号)



(揺動信号)

(形状信号)

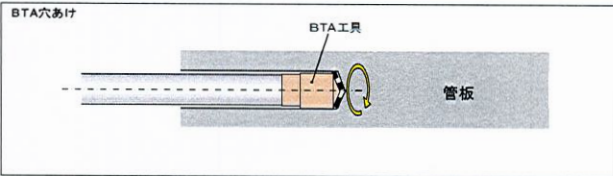
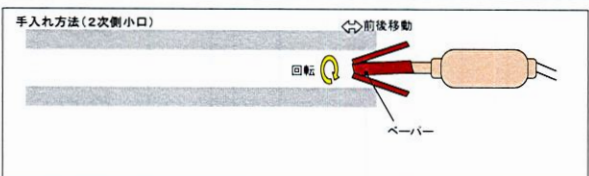
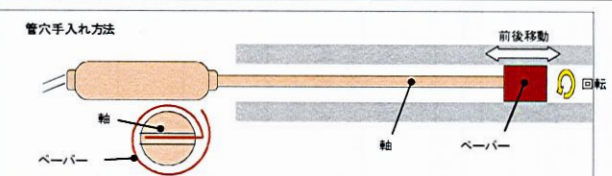
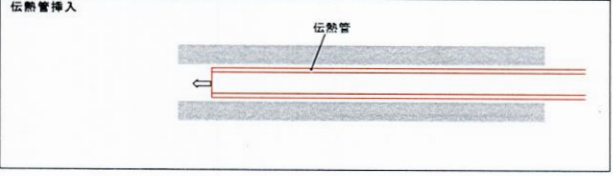
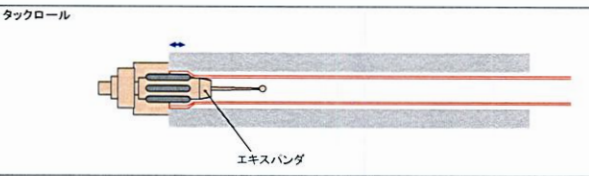
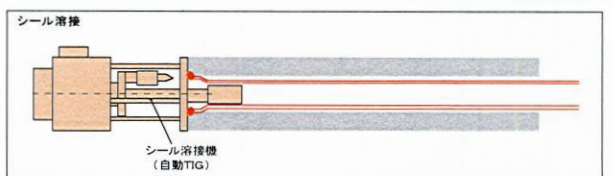
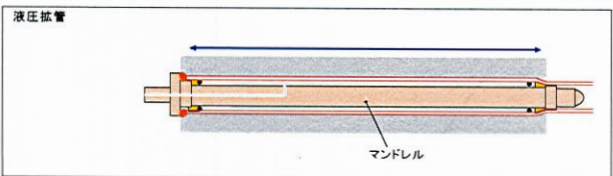
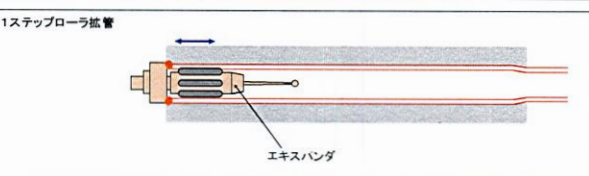
(特徴)

- ・400kHz では、位相がほぼ水平である。

(拡張境界部：形状および揺動信号が生じる箇所)

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。

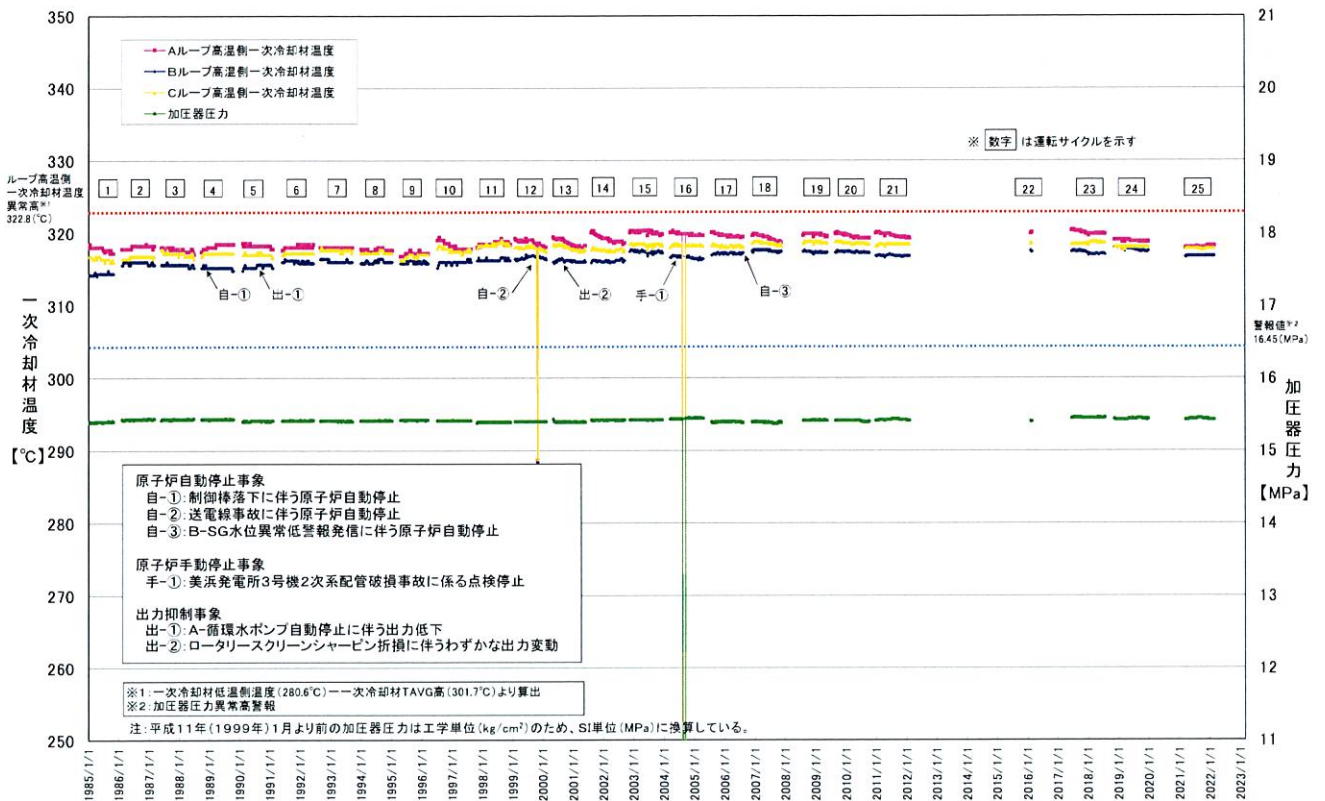
1. 管穴加工  BTA 工具*1により管板の管穴加工を行う。	1' 管穴 2 次側端部のカエリ取り  管穴加工後, 2次側端部のカエリ取りを全穴実施。 【検査】管穴内径確認, 内面外観目視	1'' 管穴内面手入れ  管穴加工後に目視で内面を検査し、きずが確認された場合は、紙やすり(P240程度)を取付けた回転工具を用いて手入れを行うことがある。 【検査】(手入れ後)内面外観目視
2. 伝熱管挿入  管支持板および管板管穴に伝熱管を挿入。	3. 仮拡管  ローラ拡管工具(エキスパンダ)にて伝熱管端部を仮拡管。 【検査】(仮拡管後)開先合せ検査	4. シール溶接  自動 TIG 溶接機で伝熱管端部をシール溶接。 【検査】(シール溶接後)溶接部 He リーク試験, PT*2
5. 液圧拡管  1700kgf/cm²(166.71MPa)の圧力で管板全厚の液圧拡管を行う。 【検査】(液圧拡管後)境界部内径確認, 内面外観目視	6. 22 ステップローラ拡管  100kgf・cm のトルクで 22 ステップローラ拡管を行う。 【検査】(ローラ拡管後)境界部内径確認, 内面外観目視	【調査結果】 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。

*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

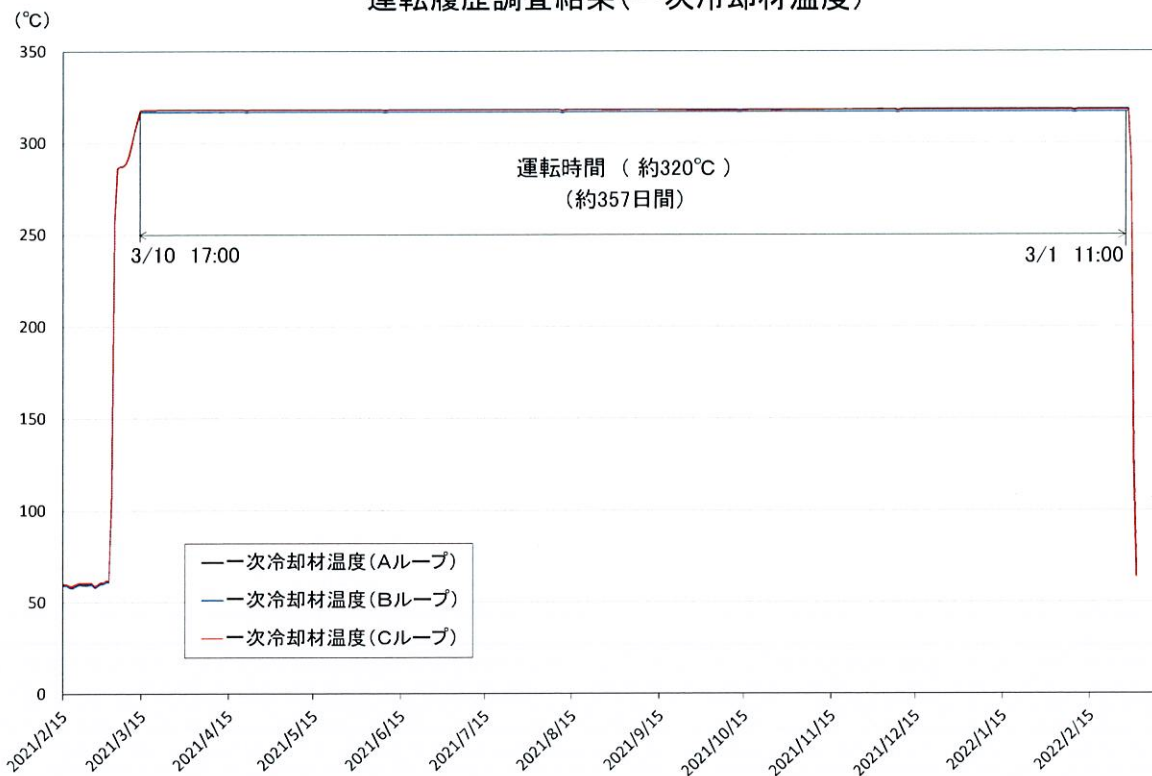
*2: 浸透探傷試験

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）

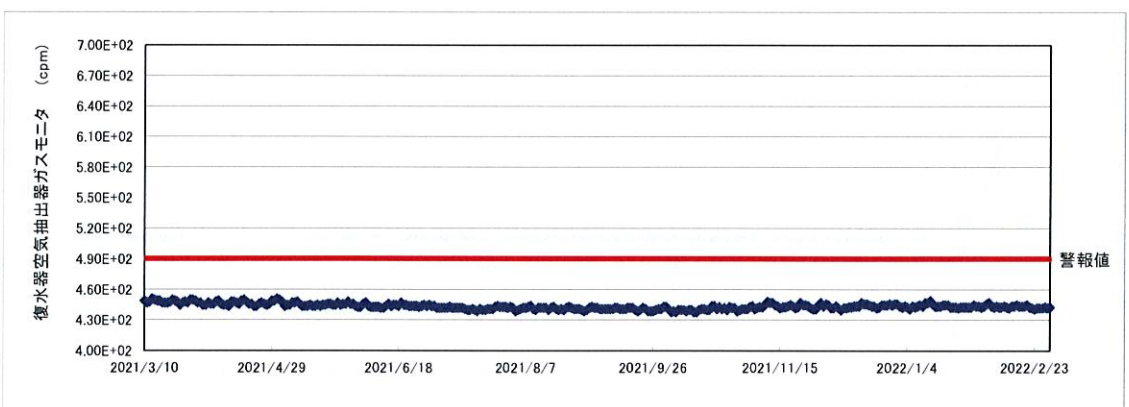
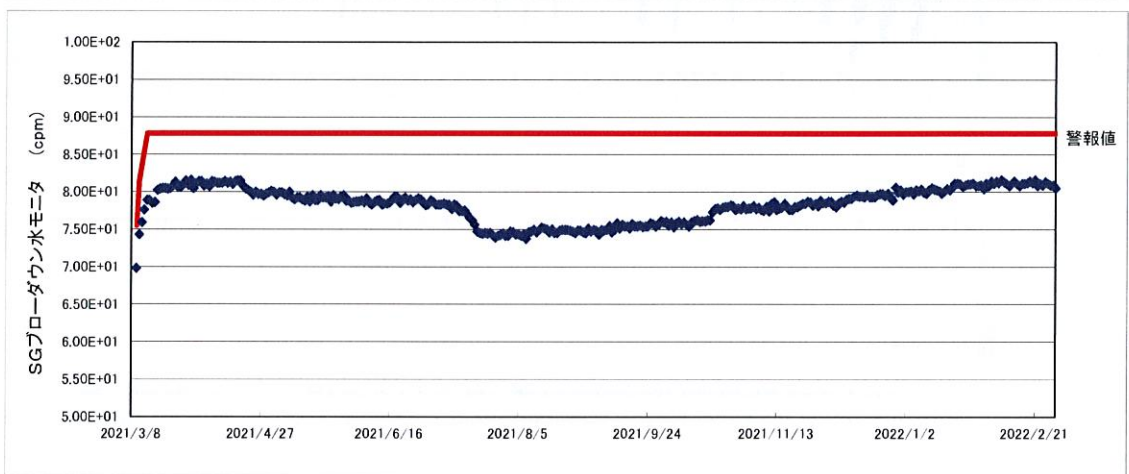
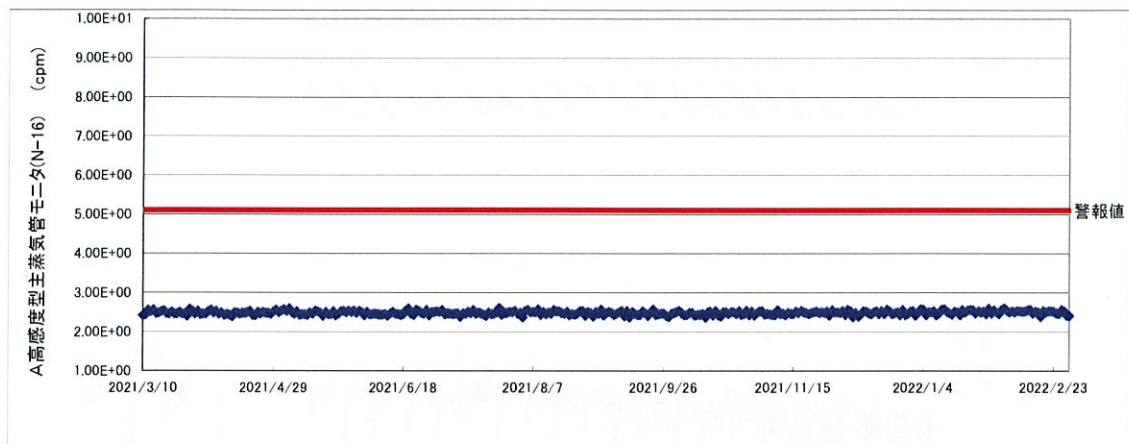
運転履歴調査結果（一次冷却材温度・圧力）



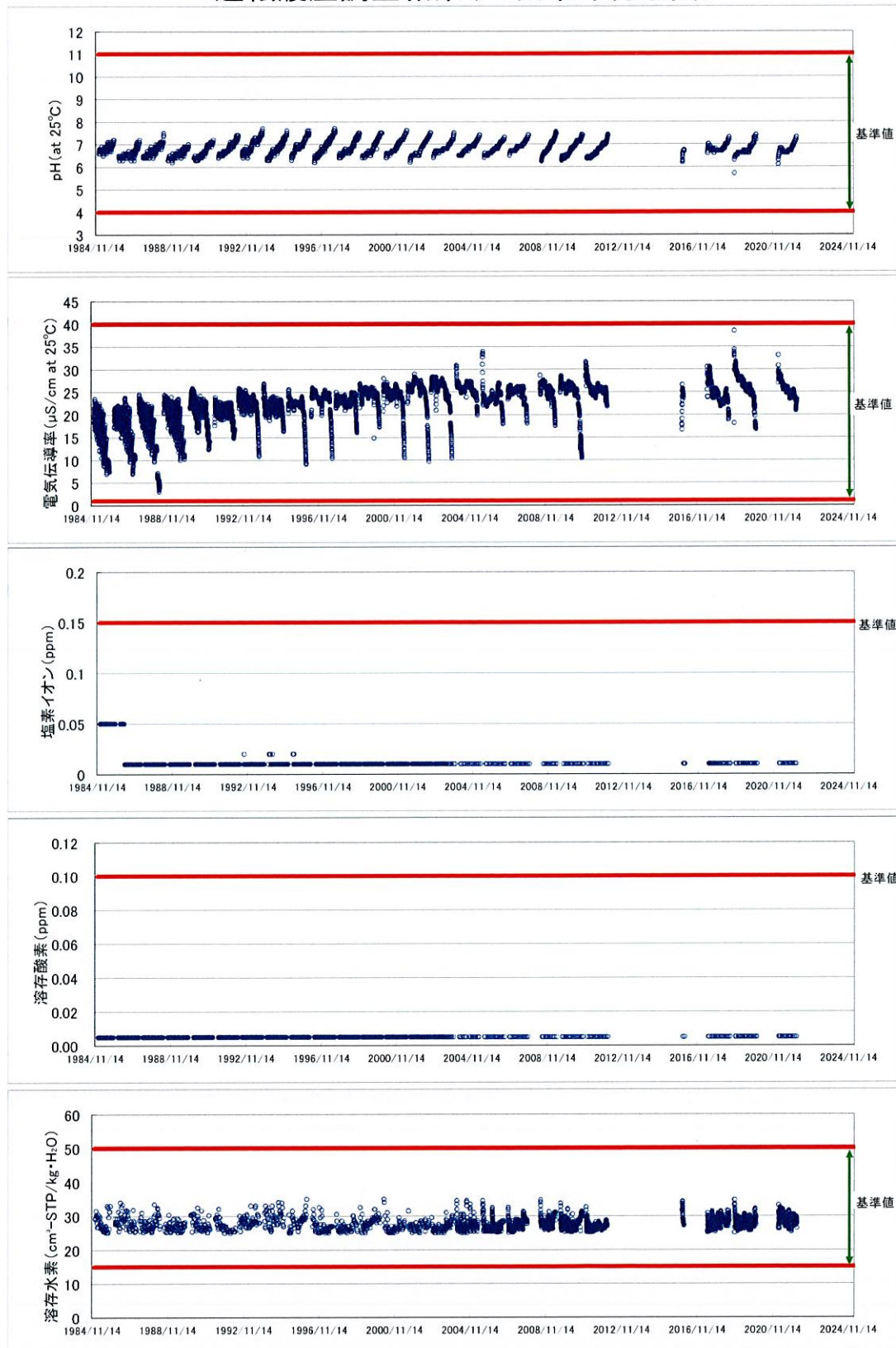
運転履歴調査結果（一次冷却材温度）



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が維持されている。

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

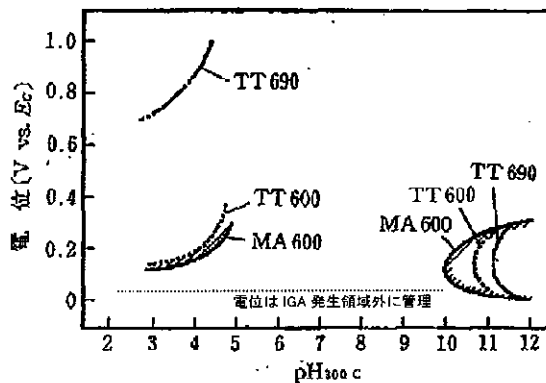
一次冷却材は加圧されているので、伝熱管内では沸騰による不純物濃縮が起こることなく、かつ還元性雰囲気を維持。

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。

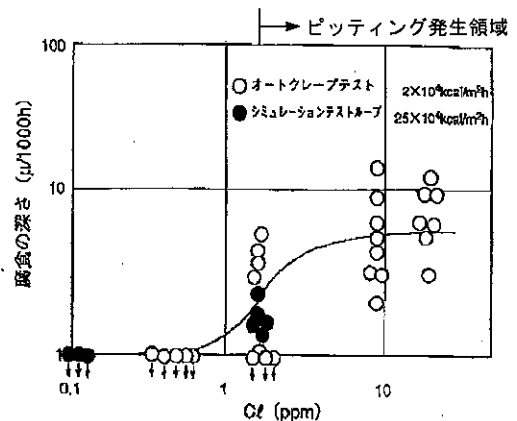
- ・ 粒界腐食割れ^{※1}（IGA）
- ・ ピitting^{※2}

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))



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)

※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

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。

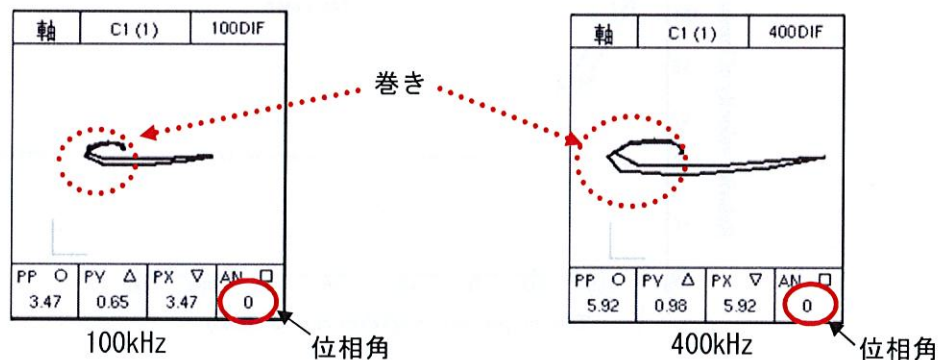
したがって、位相角が 100kHz、400kHz とも 0° 近くでないことおよび巻きのないことを確認する。

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。

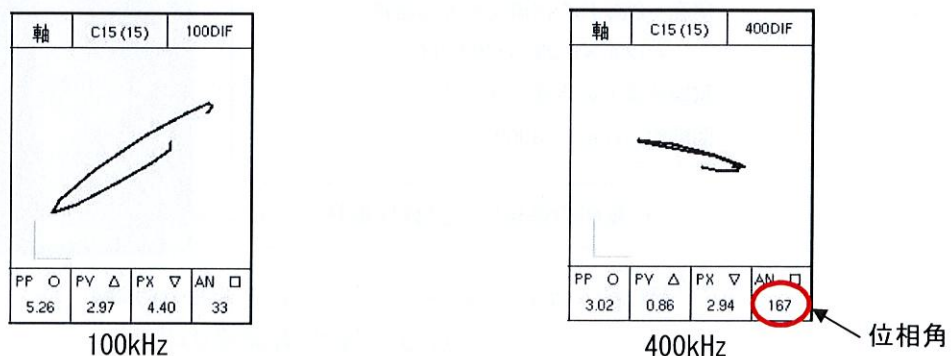
(局所変形の信号)

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

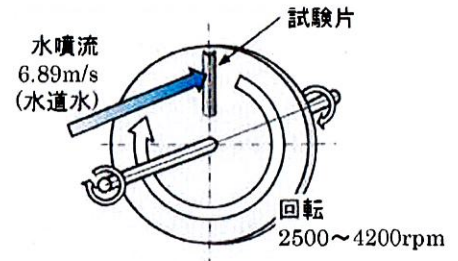
1. 目的

S G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

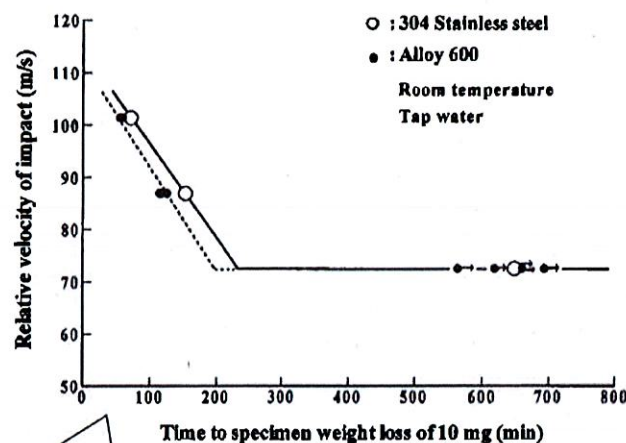
ウォータージェットテスト（常温）によりエロージョン発生限界流速を求め、実機流速と比較する。

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

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

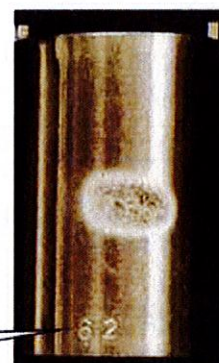


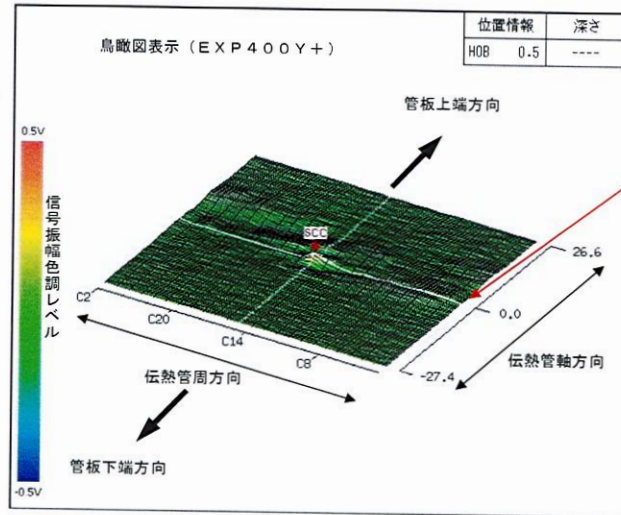
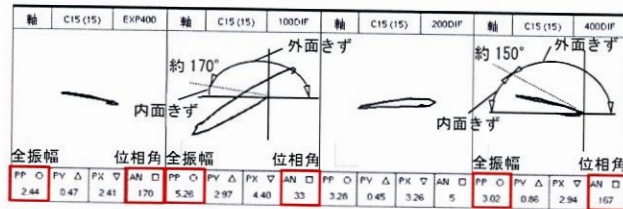
図2 ウォータージェットテスト後の外観
（700分間水噴流後の状況）

*1：管内外を流れる水により配管表面が磨耗する現象

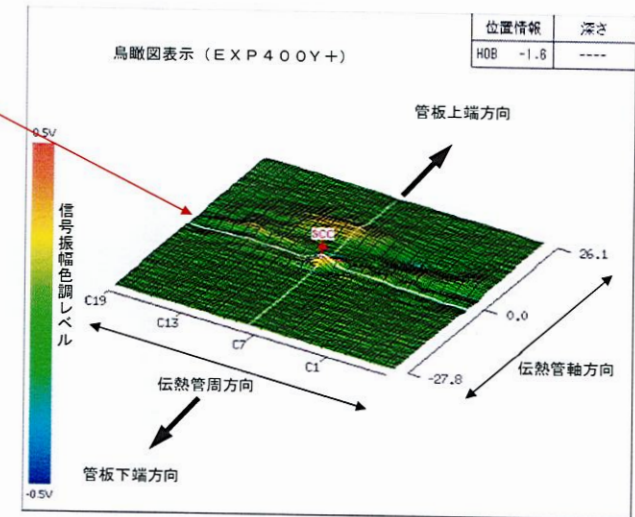
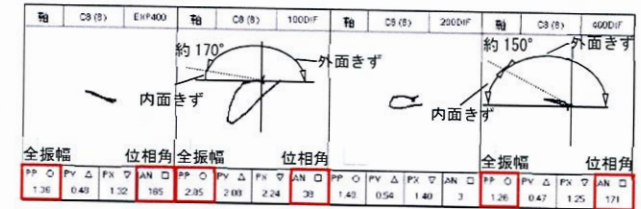
[]：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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

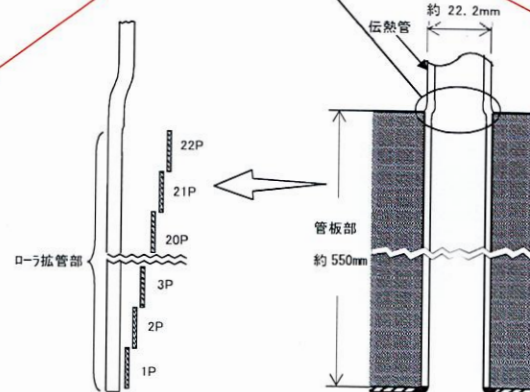
高浜発電所3号機 第25回定期検査時
リサージュ波形 (A-SG X9, Y2)



高浜発電所3号機 第23回定期検査時
リサージュ波形 (C-SG X43, Y18)



ECT信号指示部



有意な信号指示をリサージュ (信号表示)、鳥瞰図表示で分析した結果、400kHz^{※1}において伝熱管内面軸方向きずの特徴を有していた。また、部位は高温側伝熱管のローラ拡管上端部 (22ピッチ) であり、高浜発電所3号機 第23回定期検査で認められたものと同様である。

〔 位 相 : 位相角が400kHzで約150°以上、100kHzで約170°以上 ^{※2}
全振幅 : 100kHzの全振幅<400kHzの全振幅 ^{※3} 〕

※1 400kHzは原信号及びEXPフィルタを含む。

※2 管板上端信号と複合し100kHzにおける位相の比較は困難だが、内面軸方向きず信号の方向に波形が歪んでいる。

※3 管板上端信号と複合しているため、全振幅の比較は困難である。

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	課長	係長	係
先			

関西電力(株)高浜発電所 3 号機

第 1 3 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	作	放	機	燃	計	検	作				控	関連資料図書番号			改訂
配布先	先	務	管	器	料	装	査	責					—			—
	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	— 頁			アイテム		照合者		原子力保安技術部 技術課								
図表	— 枚			2322924		H . .		課長 係長								
表紙共	194 枚	関西電力(株)		0100												
備考	原紙保管	高浜発電所				H . .		作成 平成 13 年 7 月 31 日								
	原保技課	号機						出書 平成 13 年 7 月 31 日								
配布先													RCS-010011			改訂
																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			
	B	9	4						0.32	0.32	0.32	良		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			
	B	10	4						0.32	0.31	0.32	良		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			
	B	47	18						0.32	0.31	0.32	良		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			
	B	48	18						0.32	0.31	0.32	良		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			
	B	48	19						0.32	0.31	0.32	良		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			
	B	47	19						0.32	0.31	0.32	良		6:04:27			

今回番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

出荷日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。

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

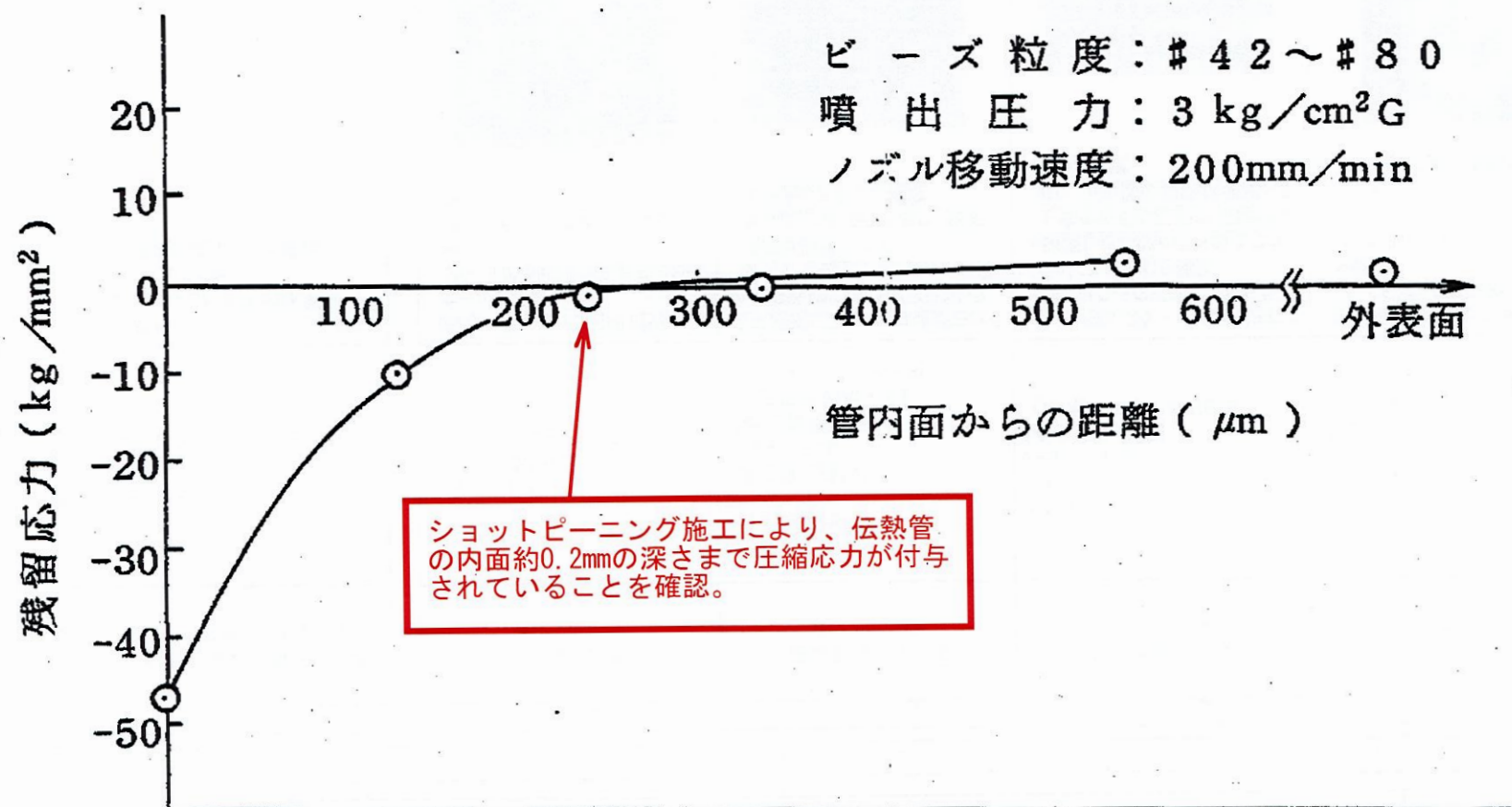
検 査 項 目	測 定 値	規 格
見掛密度 (g/cm ³)	4.54	
流動度 (g/50g)	16.8	
粒度分布 + 4 2 5 μ m (%)	0.0	2.0 以下
粒度分布 + 3 5 5 μ m (%)	14.3	
粒度分布 + 3 0 0 μ m (%)	18.8	
粒度分布 + 2 5 0 μ m (%)	30.9	
粒度分布 + 1 8 0 μ m (%)	33.4	
粒度分布 - 1 8 0 μ m (%)	2.6	5.0 以下
ニッケル量 [Ni] (%)	BAL.	BAL.
クロム量 [Cr] (%)	14.3	13.0 ~ 16.0
ボロン量 [B] (%)	3.26	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

	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)	(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)
ECT検出可能範囲と 圧縮応力付与範囲の 関係	① ② ③ 圧縮応力範囲※1 約0.2mm ECT※2検出可能 約0.5mm以上 伝熱管厚さ 約1.3mm ※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 ※2: 高浜発電所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)	① ② ③ 圧縮応力範囲 約1mm ECT検出可能 約0.5mm以上 管台溶接部厚さ約80mm
施工前確認時の対応	➤ 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) ➤ 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) ➤ 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)	➤ 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) ➤ 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) ➤ 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)
有効性評価	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。	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。

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

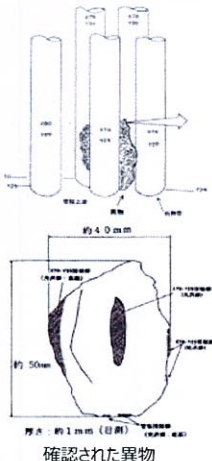
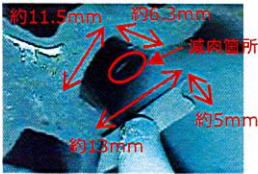
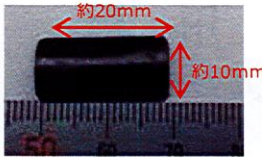
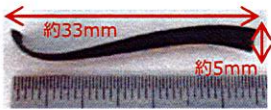
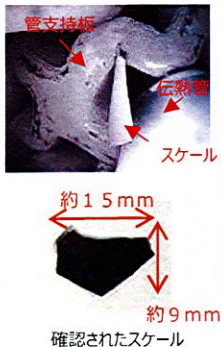
ショットピーニング施工管の周方向残留応力の管肉厚方向分布



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

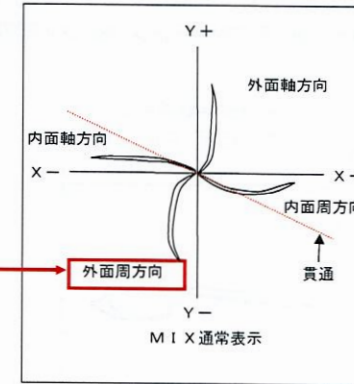
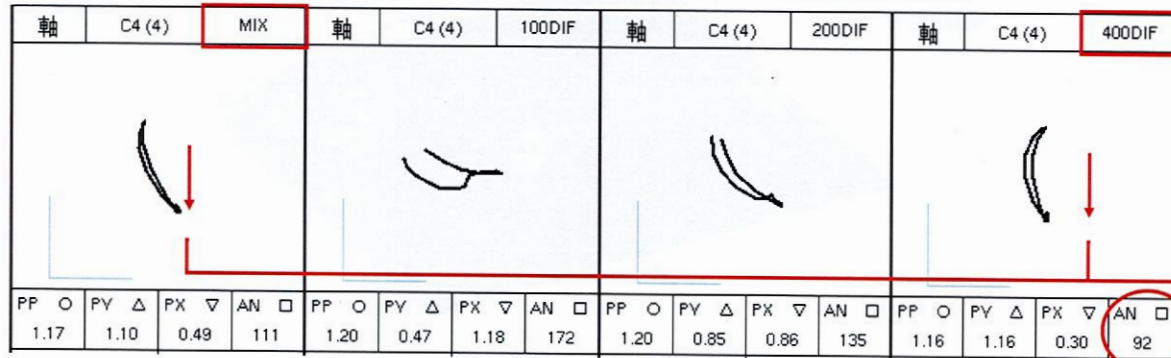
高浜発電所 3 号機および 4 号機における S G 伝熱管外面の損傷事象の経緯

	～2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
3号機 定期検査	第 2 1 回	第 2 2 回		第 2 3 回		第 2 4 回	
4号機 定期検査	第 2 0 回		第 2 1 回	第 2 2 回	第 2 3 回		

定期 検査	(参考) 美浜発電所3号機 第18回定検 (2000年)	高浜発電所3号機 第23回定検	高浜発電所4号機 第22回定検	高浜発電所3号機 第24回定検	高浜発電所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 【第三管支持板】 (最大減肉率20%未満)	A-SG : 1本 【第三管支持板】 B-SG : 1本 【第三管支持板】 C-SG : 3本 【第二管支持板2本、 第三管支持板1本】 (最大減肉率：約63%)	B-SG : 1本 【第三管支持板】 C-SG : 1本 【第三管支持板】 (最大減肉率：約56%)	A-SG : 1本 【第三管支持板】 C-SG : 3本 【第三管支持板】 (最大減肉率：約36%)
推定 原因	・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 ⇒<u>異物による減肉と推定</u>  確認された異物	・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 ⇒<u>スケール以外の異物による減肉と推定</u>  確認されたスケール	・きず近傍にスケールは確認されず ・A-SG器内に異物 (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 ⇒<u>異物による減肉であり、異物は流出したものと推定</u>  確認された異物 (ステンレス薄片)	・きず近傍にスケールは確認されず ・AおよびC-SG器内に異物(ガスケットフープ材)を確認 ⇒<u>確認した異物のうちの1つが、1本のきずの原因の可能性があり、その他の異物は流出したものと推定</u>  確認された異物 (ガスケットフープ材)	・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 3 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 ⇒<u>スケールによる減肉と推定</u>  確認されたスケール

ECTの位相評価

当該管リサージュ表示 (A-SG X9, Y22)

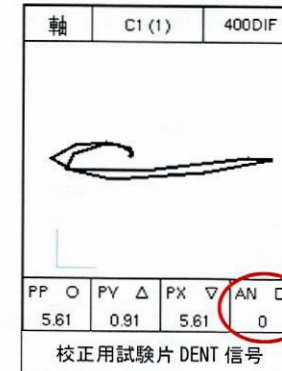


(1) 内面軸方向信号の特徴との比較

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。

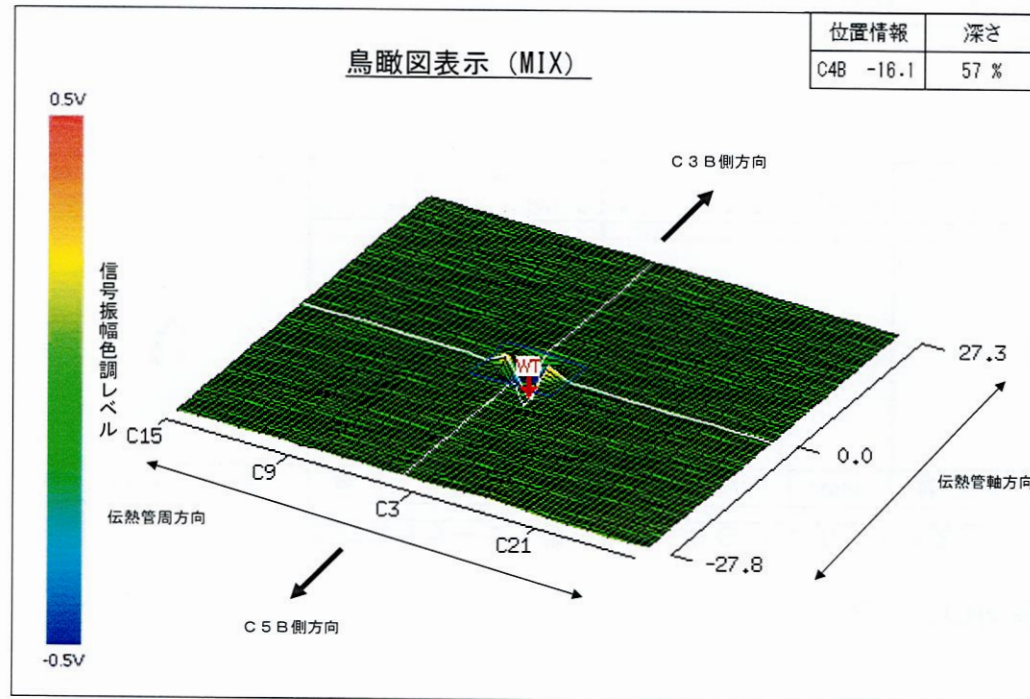
インテリジェント ECT の信号の特徴

(2) デンティンク (DENT) 信号の特徴との比較



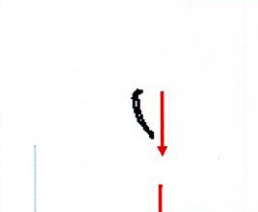
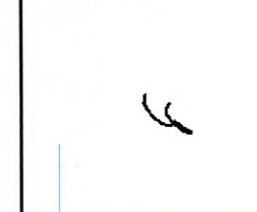
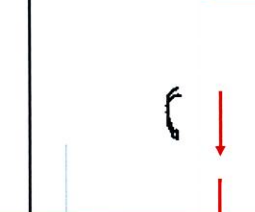
位相角

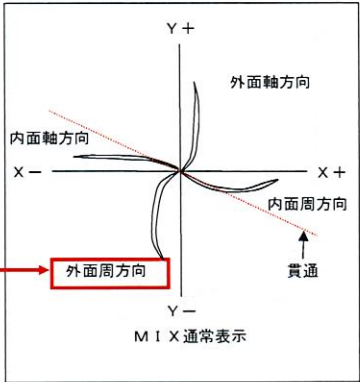
校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は“全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる”という特徴を持っているが、今回の当該信号は Y-方向の位相を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外周周方向きずの特徴を持っていると言える。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考える。



ECTの位相評価

当該管リサージュ表示 (B-SG X35, Y32)

軸	C18 (18)	MIX	軸	C18 (18)	100DIF	軸	C18 (18)	200DIF	軸	C18 (18)	400DIF				
															
PP ○	PY △	PX ▽	AN □	PP ○	PY △	PX ▽	AN □	PP ○	PY △	PX ▽	AN □				
0.59	0.56	0.25	108	0.97	0.50	0.96	10	0.72	0.48	0.57	138	0.63	0.63	0.18	89



(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。

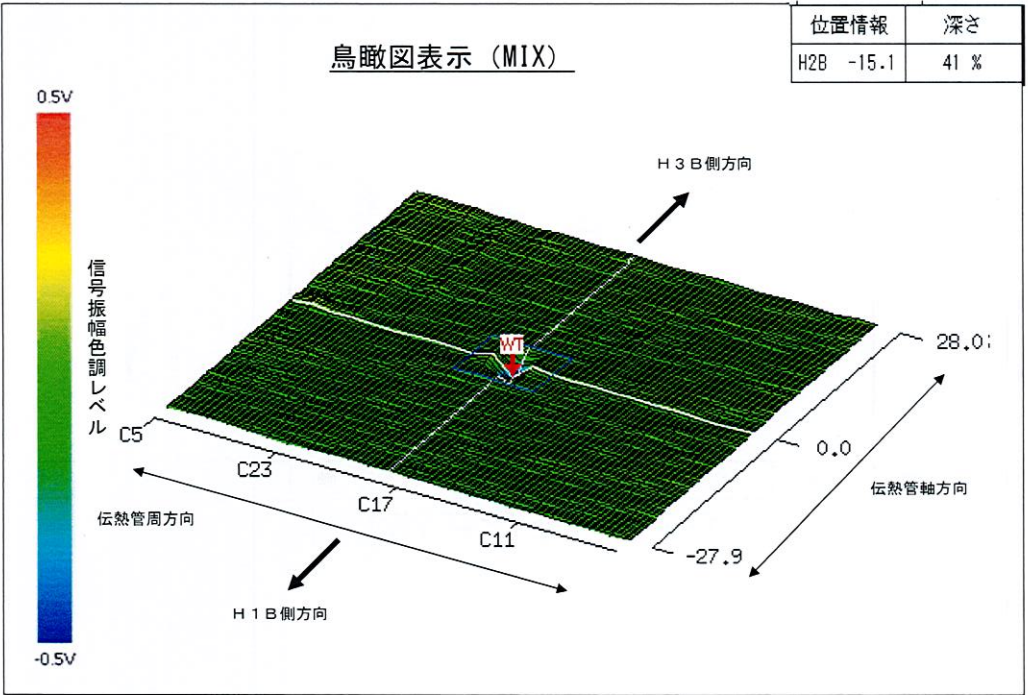
インテリジェント ECT の信号の特徴

(2) デンティング (DENT) 信号の特徴との比較

軸	C1 (1)	400DIF	
			
PP ○	PV △	PX ▽	AN □
5.61	0.91	5.61	0
校正用試験片 DENT 信号			

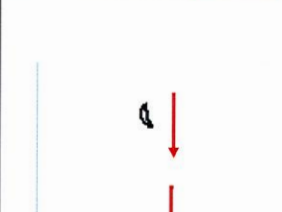
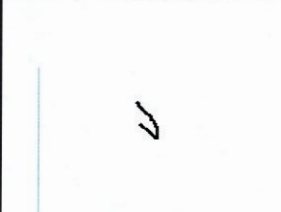
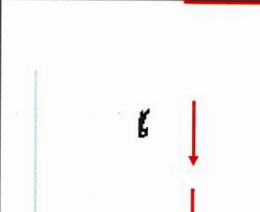
位相角

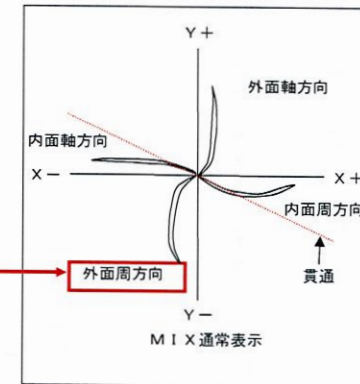
校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は“全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる”という特徴を持っているが、今回の当該信号は Y 方向の位相を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外周方向きずの特徴を持っていると言える。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考える。



ECTの位相評価

当該管リサージュ表示 (A-SG X51, Y8)

軸	C15 (15)	MIX	軸	C15 (15)	100DIF	軸	C15 (15)	200DIF	軸	C15 (15)	400DIF				
															
PP ○	PV △	PX ▽	AN □	PP ○	PV △	PX ▽	AN □	PP ○	PV △	PX ▽	AN □	PP ○	PV △	PX ▽	AN □
0.15	0.15	0.06	97	0.60	0.19	0.57	161	0.25	0.22	0.13	120	0.17	0.16	0.06	71



(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-方向の外面周方向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。

インテリジェント ECT の信号の特徴

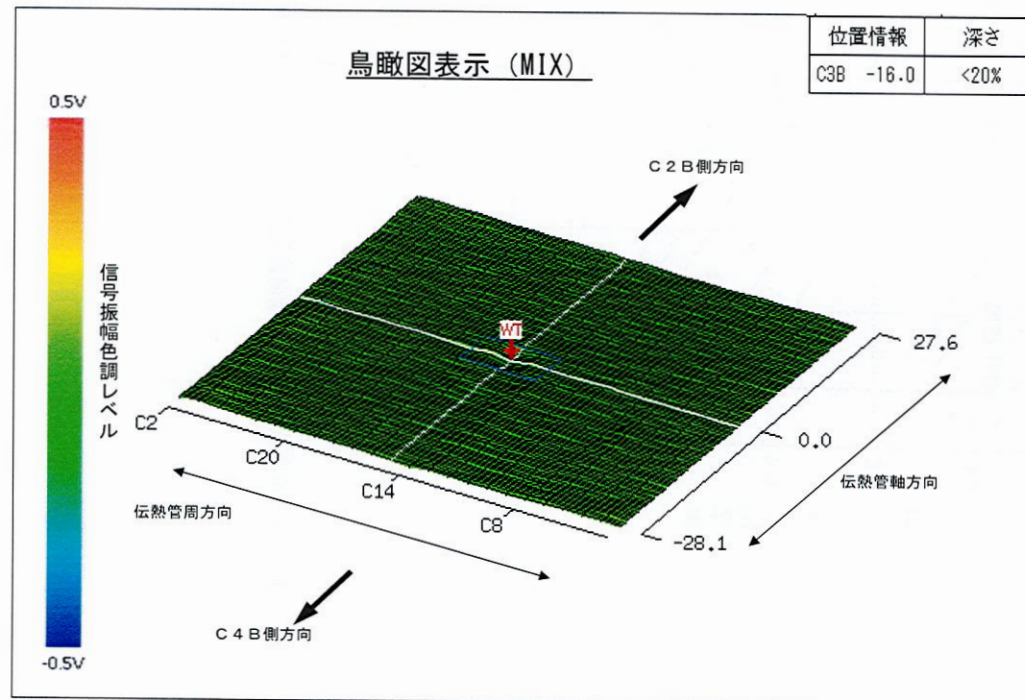
(2) デンティング (DENT) 信号の特徴との比較

軸	C1 (1)	400DIF	
			
PP ○	PV △	PX ▽	AN □
5.61	0.91	5.61	0

校正用試験片 DENT 信号

位相角

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面周方向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。

インコネル TT600 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

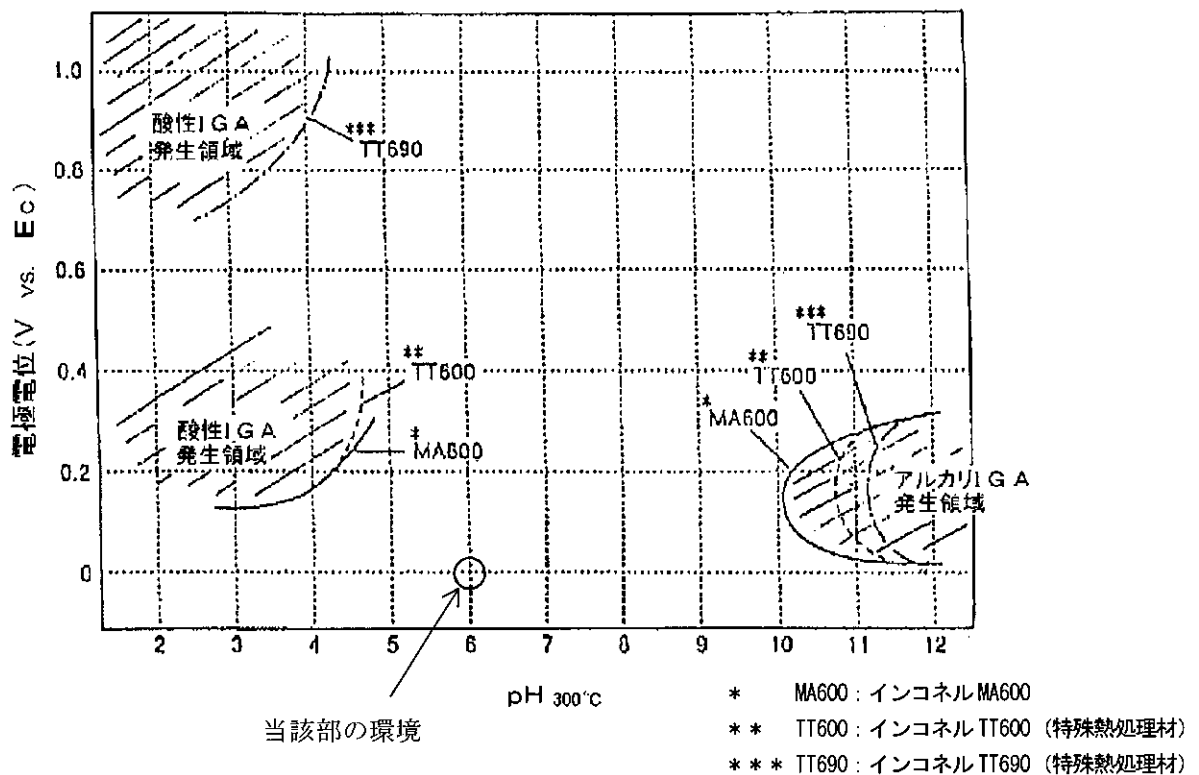


図 粒界腐食割れの発生領域

[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。

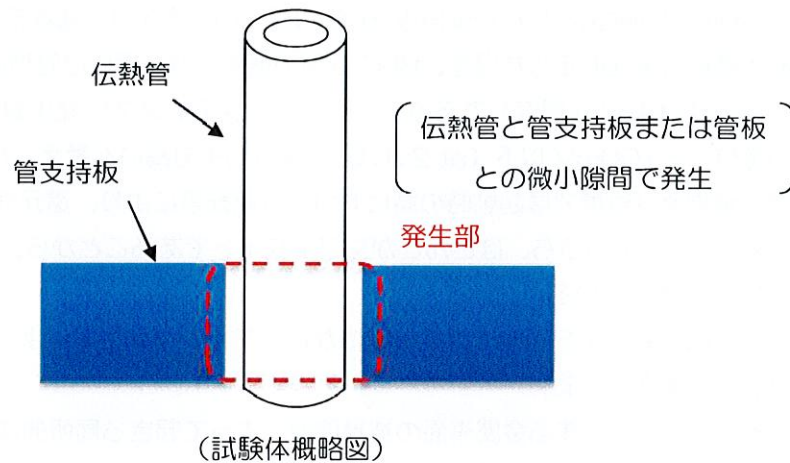
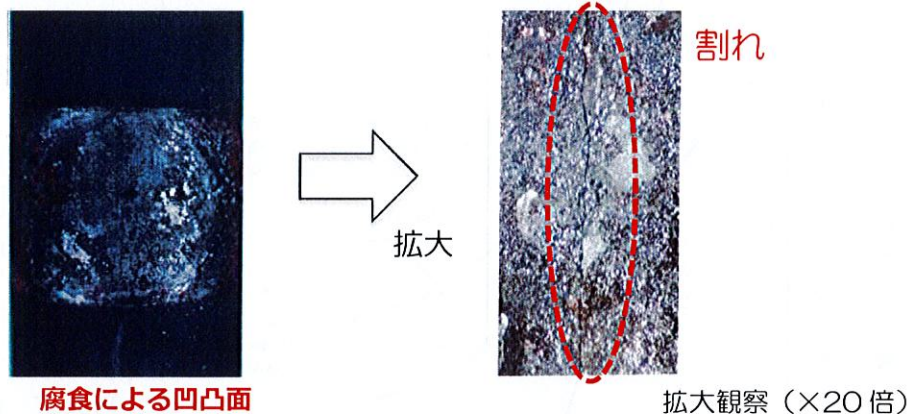


図 1 発生部位



（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

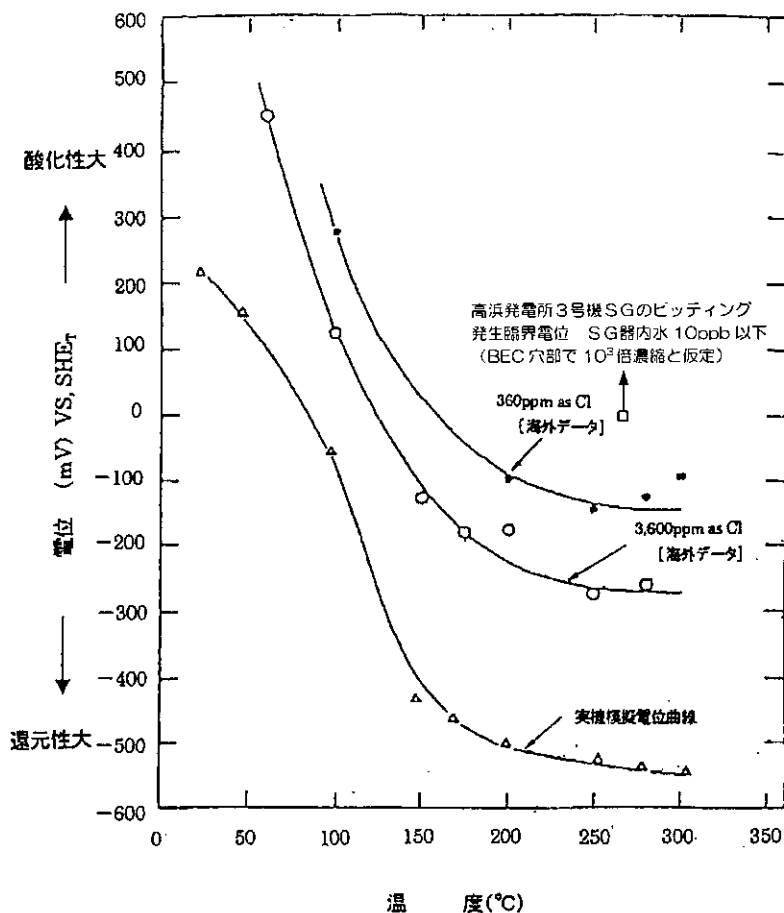
	第25サイクル
塩素イオン (ppb)	0.4

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℃））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℃）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。
- ・インコネル TT600 のピittingに対する耐食性は、インコネル MA600 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 インコネル MA600 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。

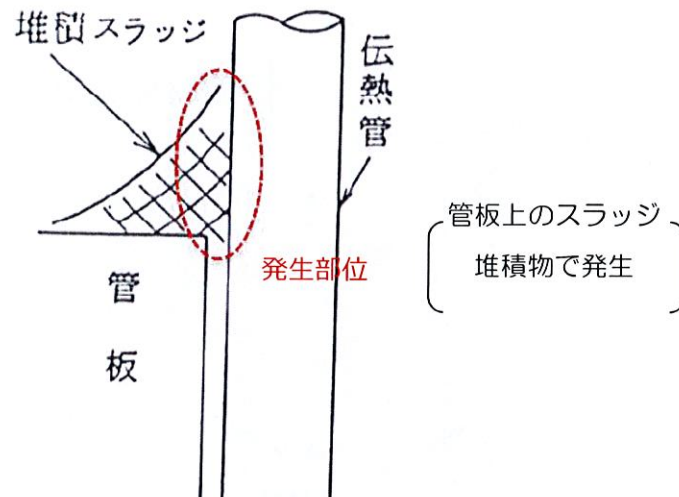


図２ 発生部位



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。

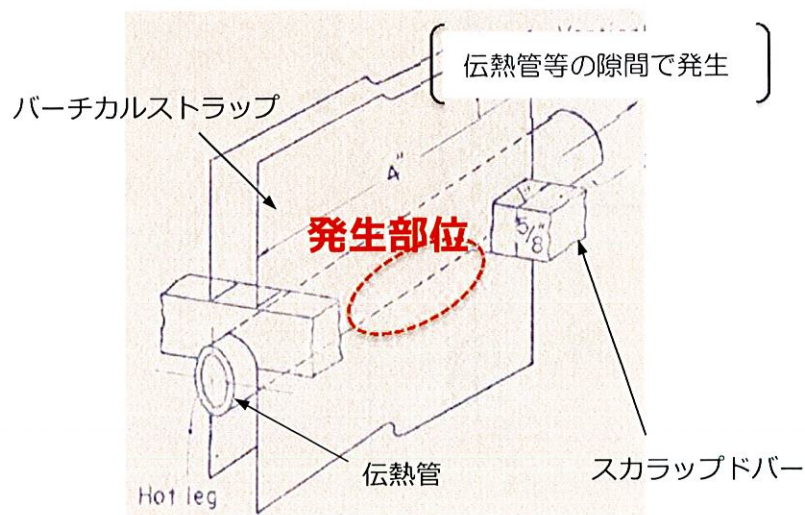
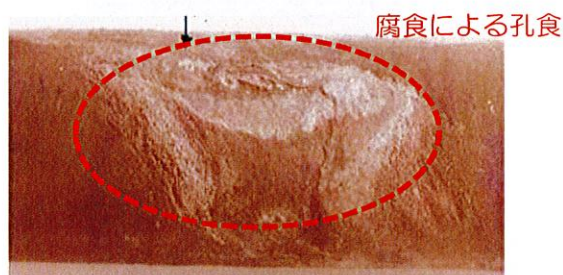


図１ 発生部位



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

流体振動による疲労評価

第二～第四管支持板部において、流体力によって伝熱管に発生する応力を算出し、疲労損傷が生じないことを確認した。

伝熱管に作用する流体力 F は、

$$F = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S = \boxed{}$$

ここで、 C_D ：抗力係数 = $\boxed{}$

ρ ：流体の密度 = $\boxed{}$ kg/mm³

V ：流速 = $\boxed{}$ nm/sec

S ：流れを受ける面積 = $\boxed{}$
 $\boxed{}$

流体力 F による最大曲げモーメント M は、

$$M = (F/2l) \cdot l^2/8 = \boxed{} \text{ N} \cdot \text{mm}$$

ここで、 l ：管支持板間の長さ = $\boxed{}$ nm

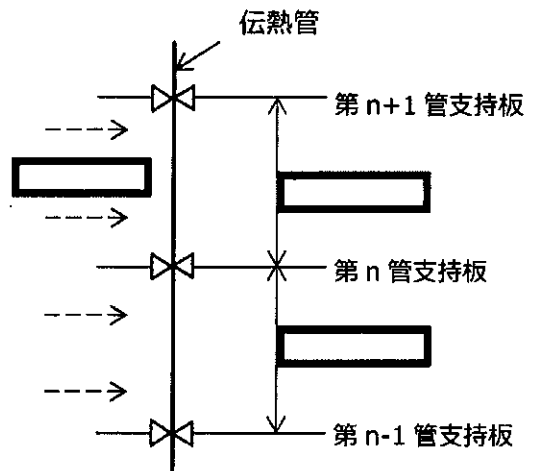


図 1 流体力を受ける伝熱管 ($n = 2, 3, 4$)

伝熱管の断面係数 Z は

$$Z = \frac{\pi(d_2^4 - d_1^4)}{32d_2} = 414.7 \text{ mm}^3$$

ここで、 d_2 ：伝熱管外径 = 22.23mm

d_1 ：伝熱管内径 = 19.69mm

よって、伝熱管に発生する最大応力 σ は、

$$\sigma = M/Z = 0.053 \text{ N/mm}^2$$

以上より、流体力によって伝熱管に発生する応力 0.053 N/mm^2 は、疲労限 94 N/mm^2 に比べて非常に小さく、疲労損傷は発生しないと考えられる。

$\boxed{}$ ：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

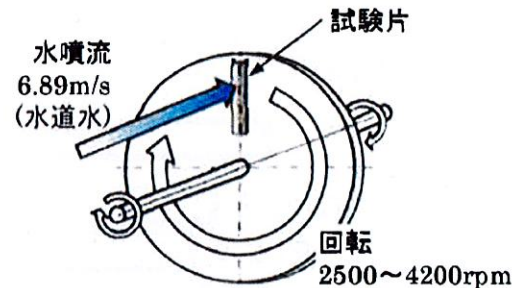
SG 伝熱管の管支持板部に周辺流体の衝突によるエロージョン*¹が発生しないことを評価する。

*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

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、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。

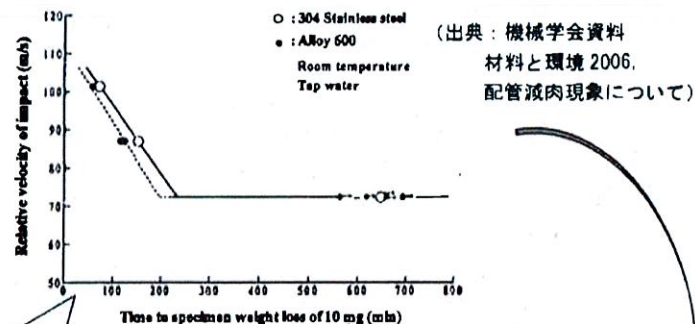


図１ ウォータージェットテストによる限界流速

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

$$\text{周速} = \text{試験片の円周長さ} \times \text{回転数}$$

$$= (2\pi \times 0.23) \times (3000/60)$$
 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

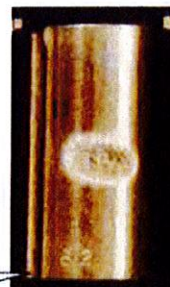


図２ ウォータージェットテスト後の外観
(700分間水噴流後の状況)

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：材料メカカタログ（インコネルT600）の単位を換算

※2：材料と環境、57、146-152(2008)、磯本ら

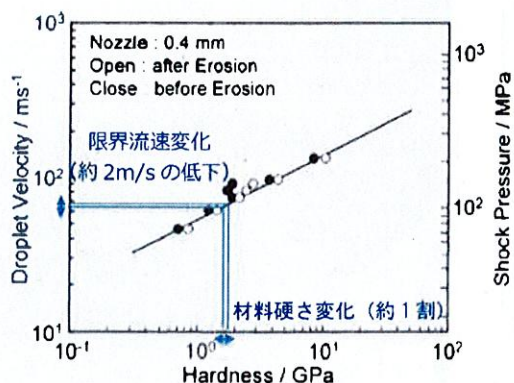


図1 限界流速と硬さの関係

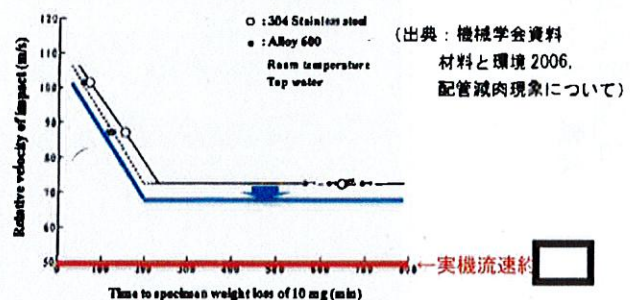


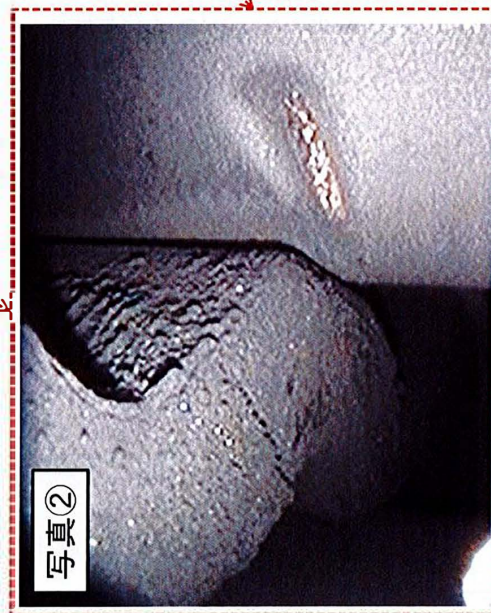
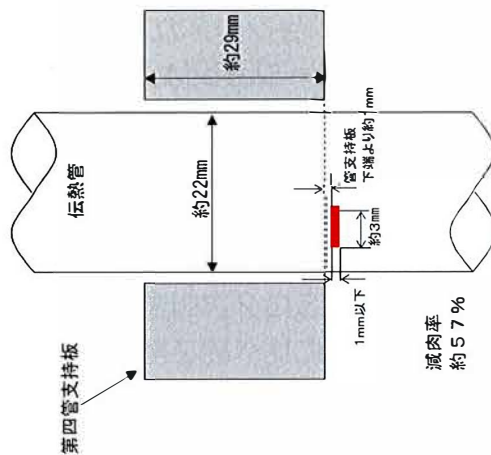
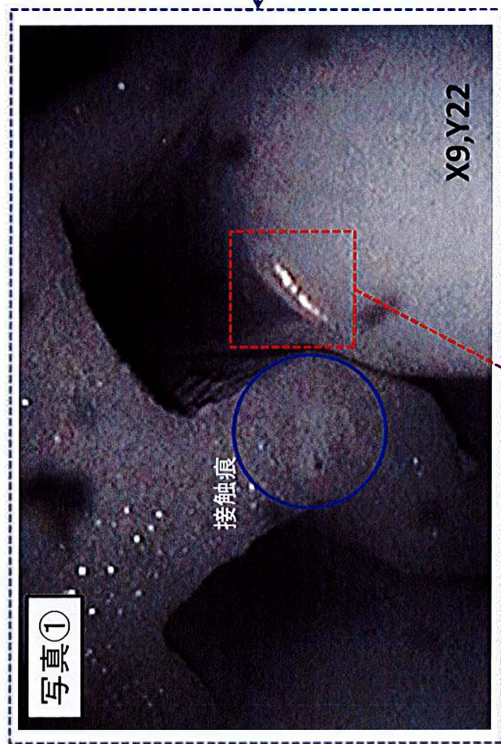
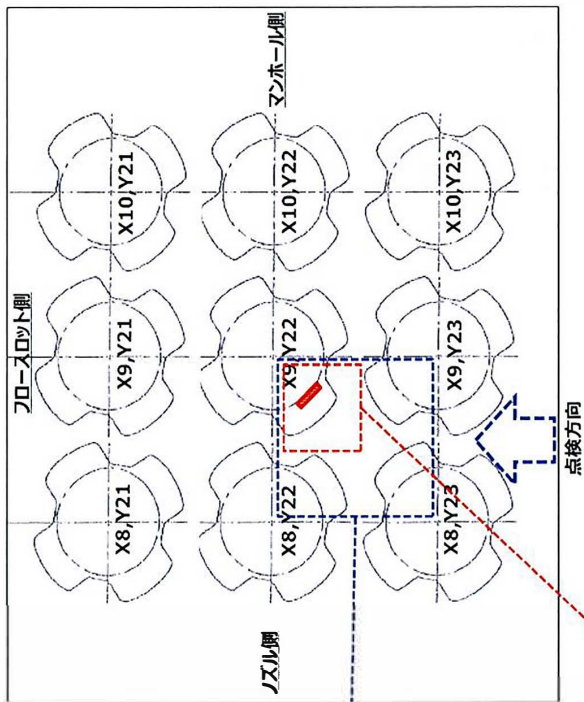
図2 ウォータージェットテストによる限界流速

温度の影響は小さく、常温の知見を用いても問題ない。

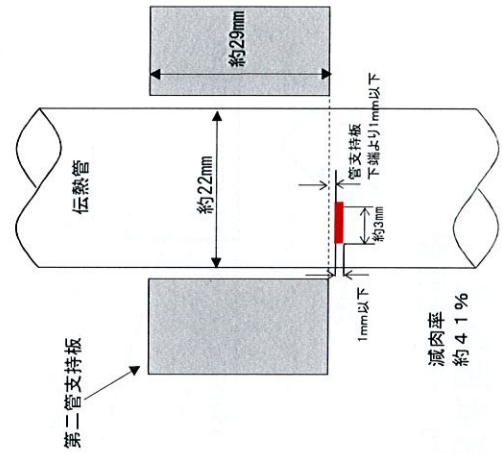
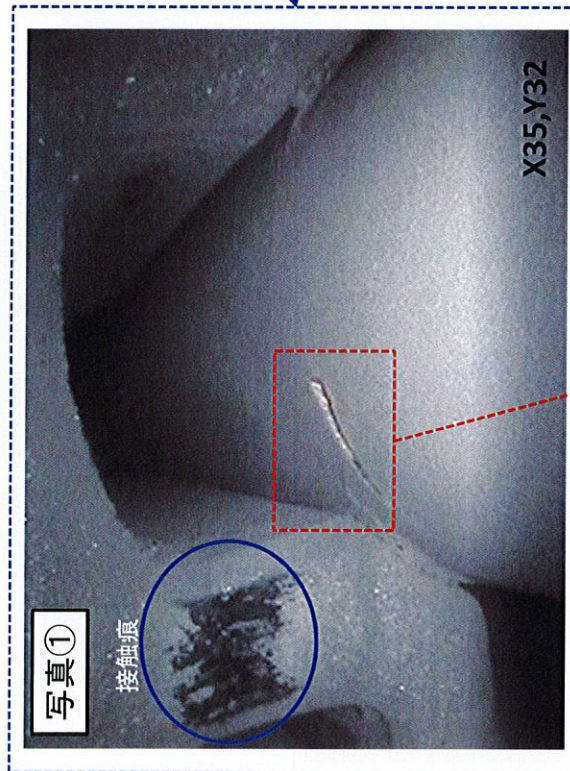
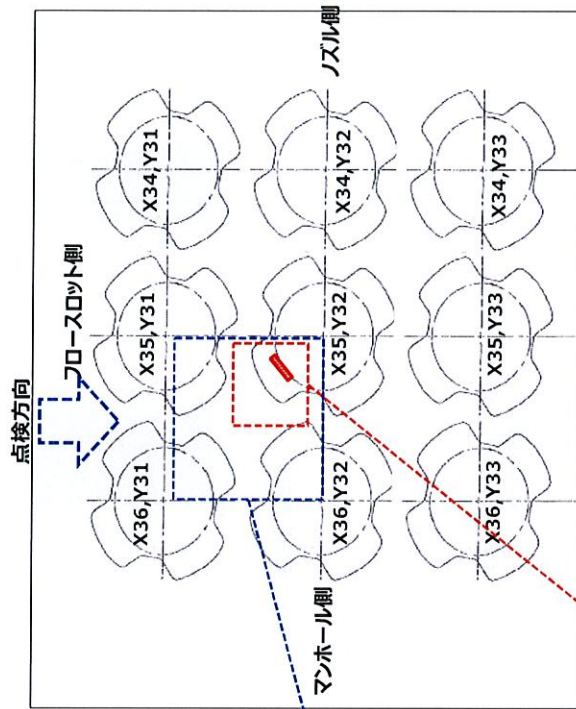
発電用原子炉施設故障等報告書
(高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について)
(2021年2月19日) より引用

[] : 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。

対象：A－S G 第四管支持板下面 伝熱管 X9, Y22 低温側

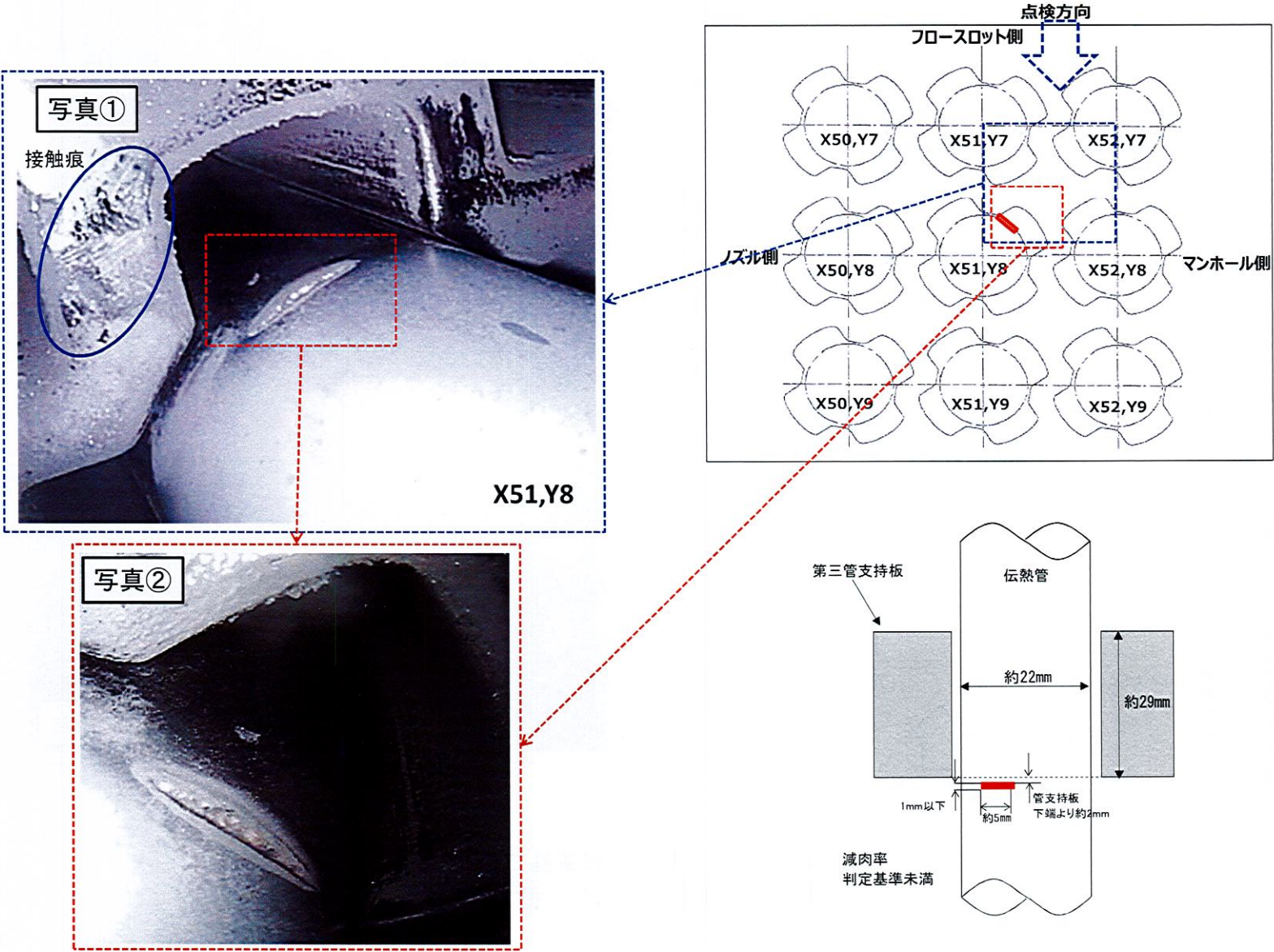


SG器内点検結果（SG伝熱管2次側表面写真）
対象：B－SG 第二管支持板下面 伝熱管 X35, Y32 高温側



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。

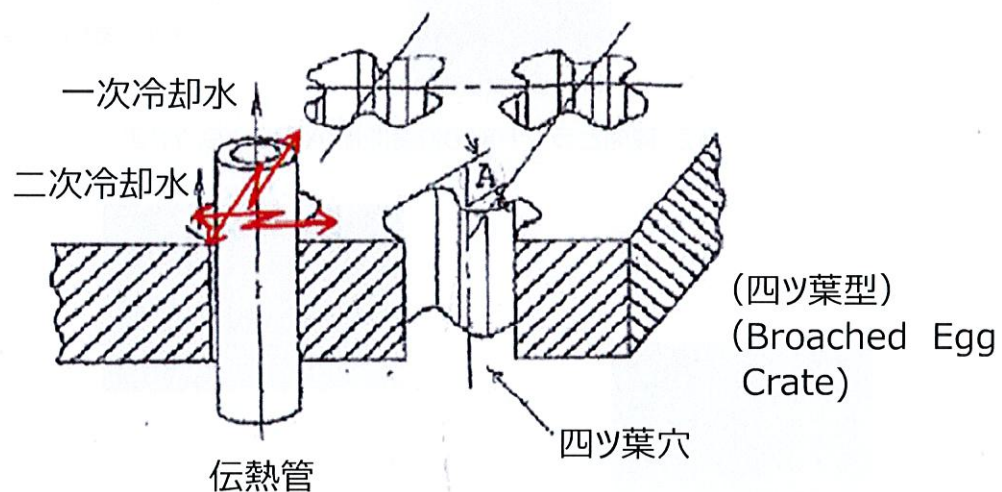


図 1 管支持板四ツ葉穴（BEC 穴）による伝熱管の支持状況

管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (2/3)

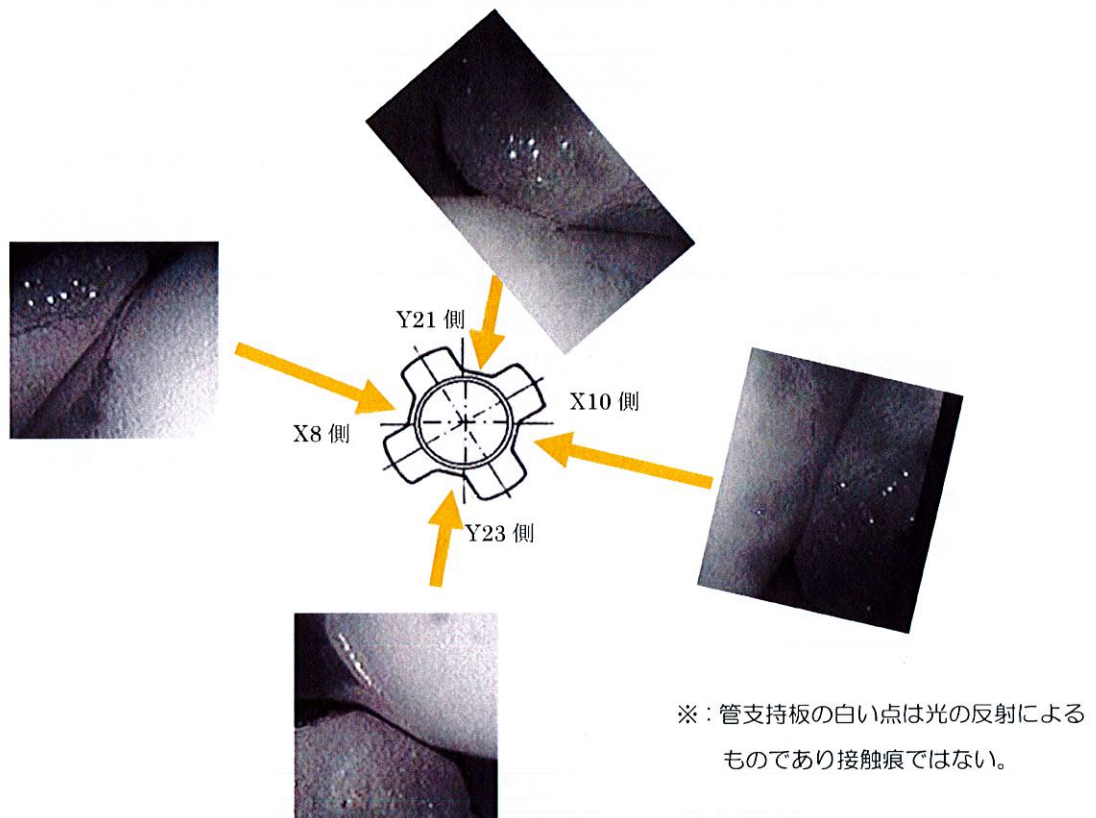


図2 減肉とランド部の位置関係(A-SG X9, Y22)

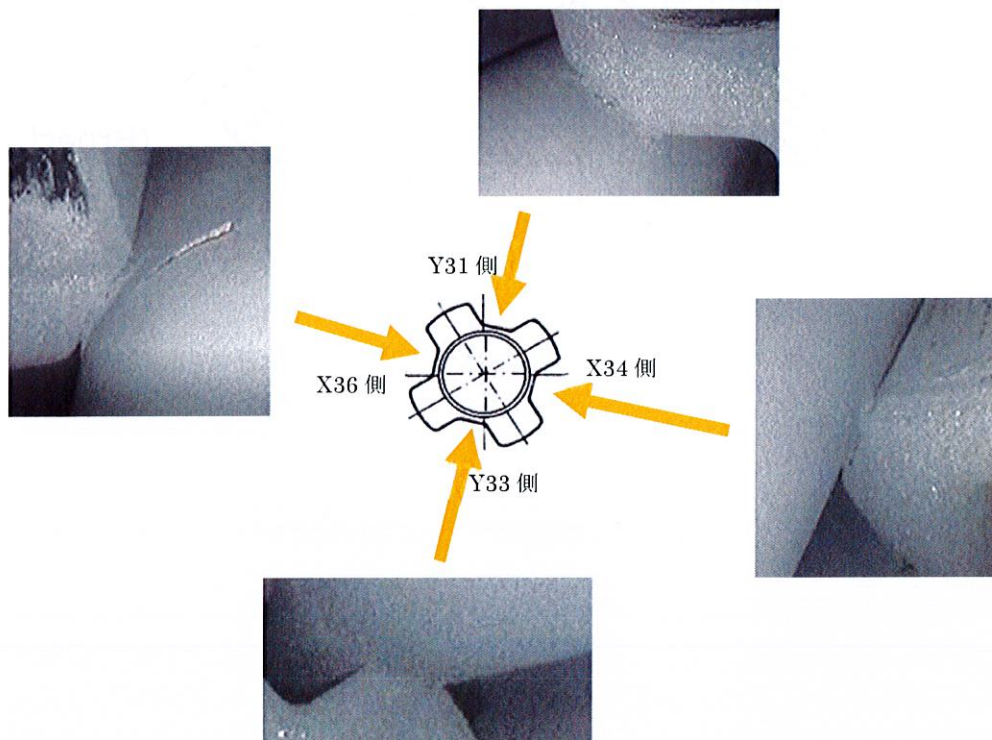


図3 減肉とランド部の位置関係(B-SG X35, Y32)

管支持板との接触による摩耗減肉の評価（3／3）

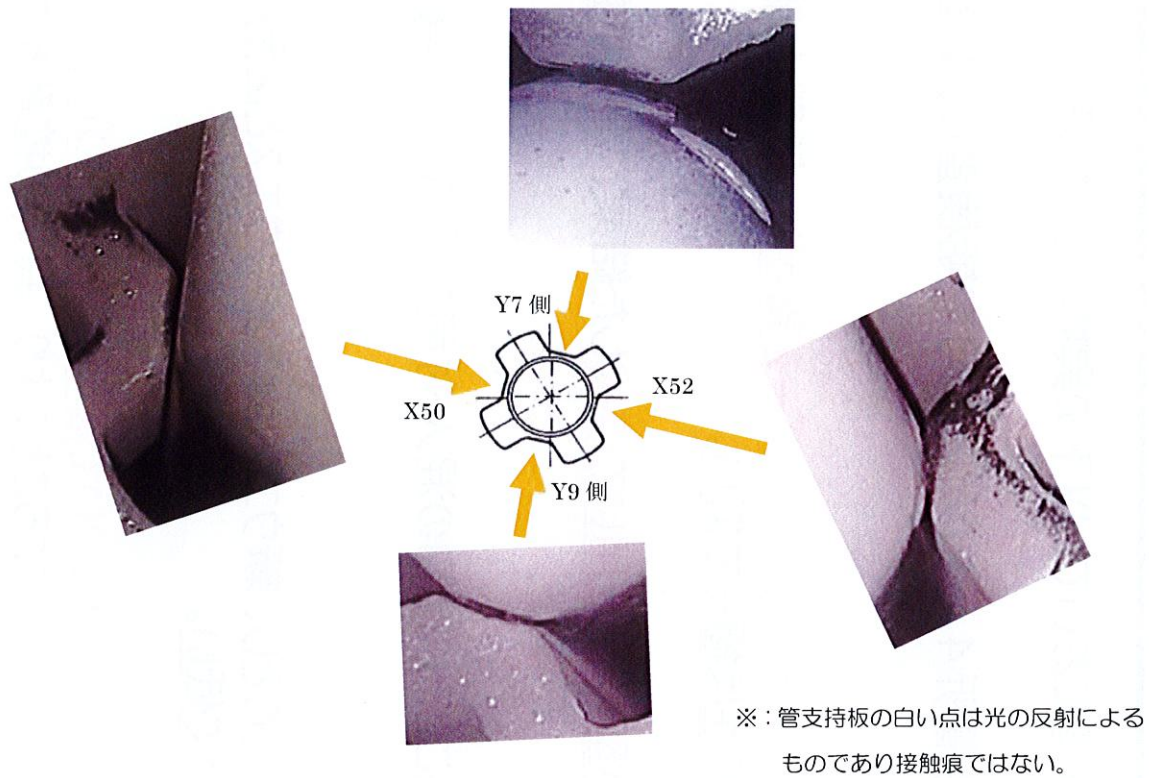


図 4 減肉とランド部の位置関係(A-SG X51, Y8)

異物混入対策について（１／２）

高浜発電所３号機前回（第２４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２３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）

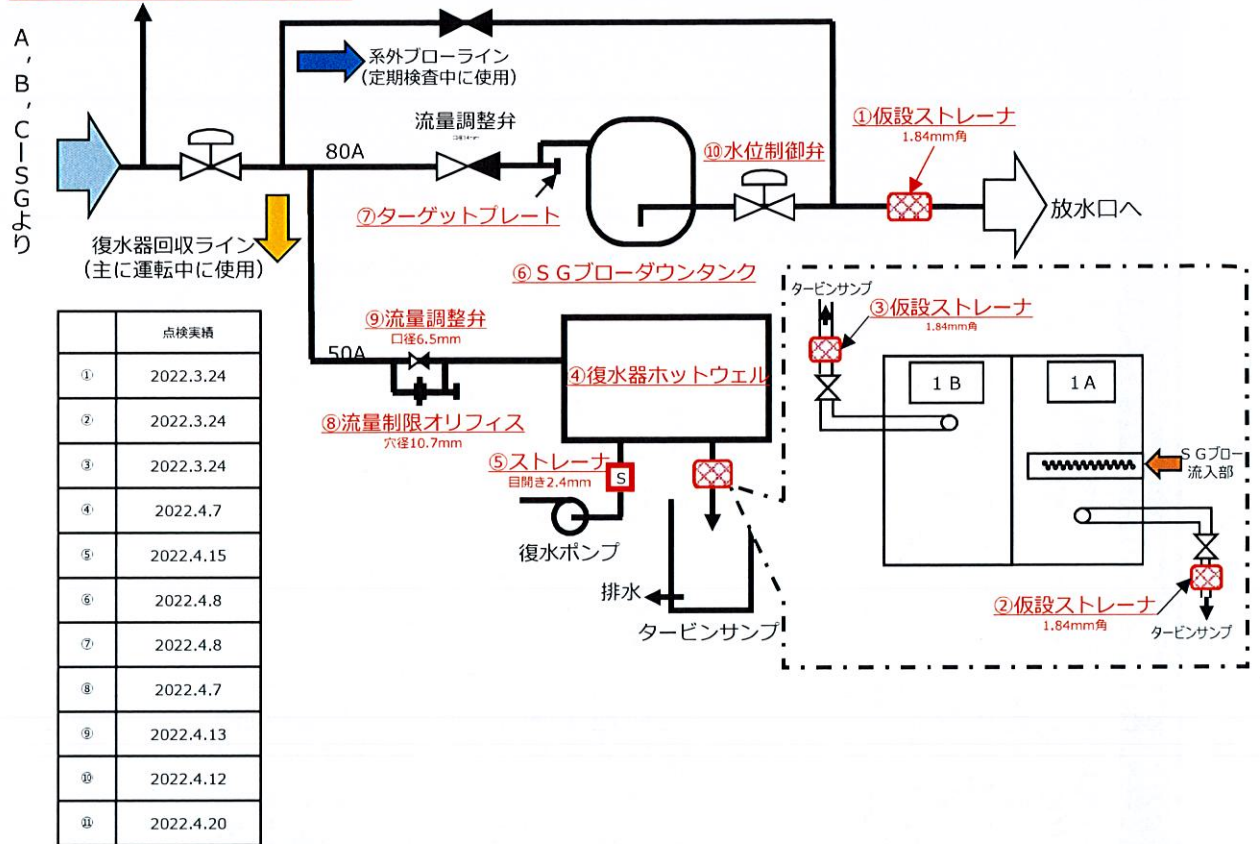
	機器立入	垂直配管取付弁	その他
（前回） 高浜発電所 3 号機 第 2 4 回定期検査 および 高浜発電所 4 号機 第 2 3 回定期検査	・機器内部に立ち入る前に、器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。 ・機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。 ・開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。	・弁点検時は、弁箱内部に使用する機材（ウエス含む）に異物の付着がないことを確実に事前確認する。 ・最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、小型カメラで確認する。 ・ウエスは、新ウエスを使用する。 ・新ウエスは再使用ウエスと区別して管理する。	・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うず巻きガスケット等の金属製の消耗品に損傷を確認した場合は、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。 ・S G 水張ポンプ入口仮設ストレーナ設置した。
（前々回） 高浜発電所 4 号機 第 2 2 回定期検査	・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。	・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。	・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。
（前々々回） 高浜発電所 3 号機 第 2 3 回定期検査	・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。	・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】	—
（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	・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）。	・最終異物確認は直接目視にて実施（手鏡等を使用）	美浜発電所 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 ・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、S G 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。

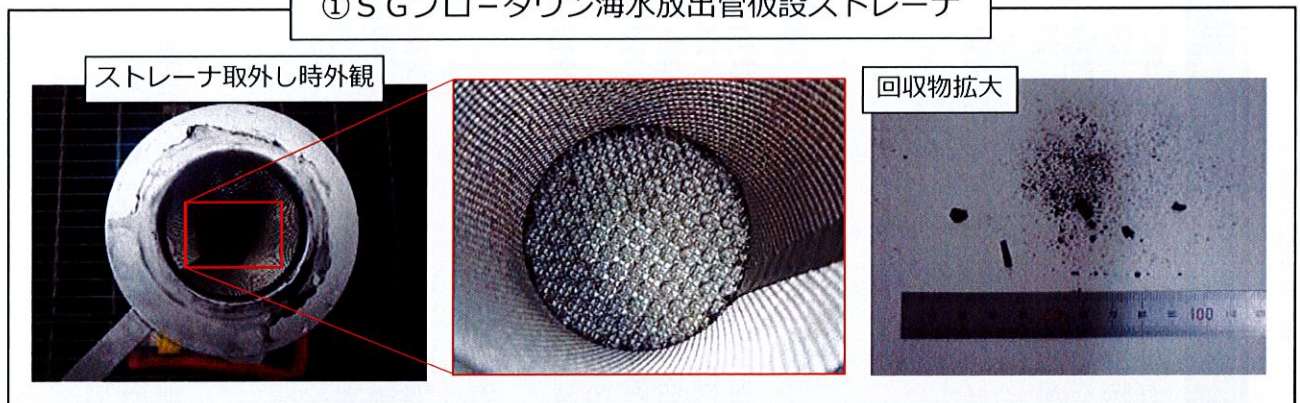
S Gブローダウン系統点検結果（１／７）

S Gブローダウン系統の点検概略図

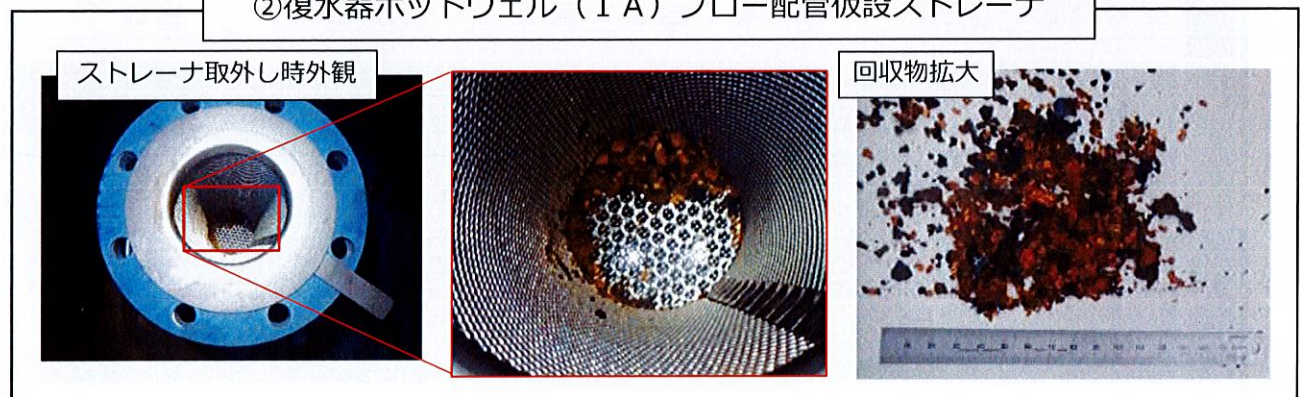
⑪ S Gブローダウンサンプル系統



① S Gブローダウン海水放出管仮設ストレーナ



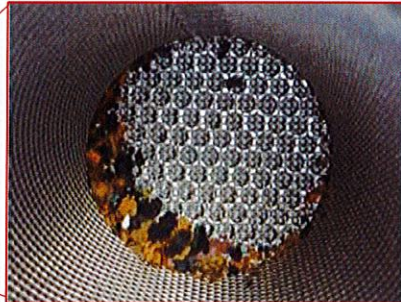
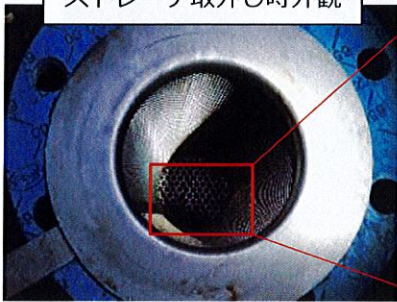
② 復水器ホットウェル（１Ａ）ブロー配管仮設ストレーナ



SGブローダウン系統点検結果（２／７）

③復水器ホットウェル（１Ｂ）ブロー配管仮設ストレーナ

ストレーナ取外し時外観



回収物拡大



④復水器ホットウェルNo. 1

B-1 ホットウェル全体

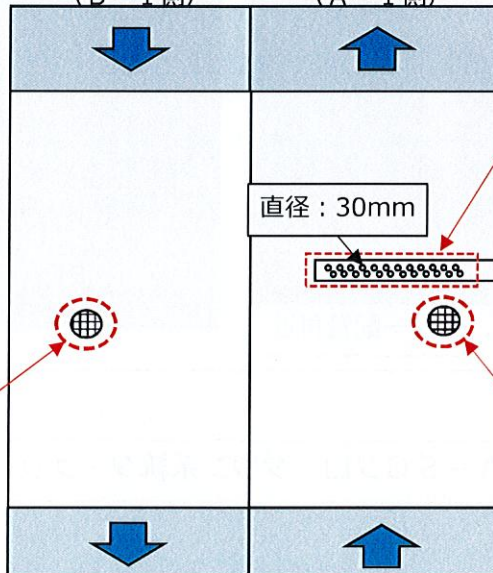


出口部復水ポンプ行き



(B-1側)

(A-1側)



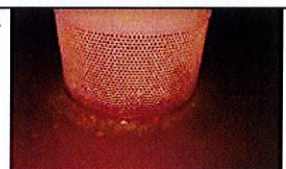
SGブロー復水器流入部



ファイバースコープによる点検



出口部復水ポンプ行き

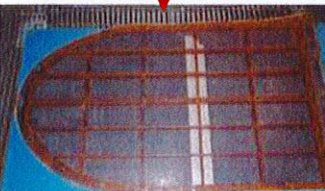
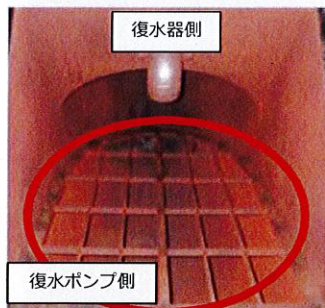


⑤復水ポンプ入ロストレーナ

3 A-復水ポンプ入ロストレーナ



3 B-復水ポンプ入ロストレーナ



3 C-復水ポンプ入ロストレーナ



S Gブローダウン系統点検結果（ 3 ／ 7 ）

⑥ S Gブローダウンタンク



タンク A 系入口配管内部



タンク底部

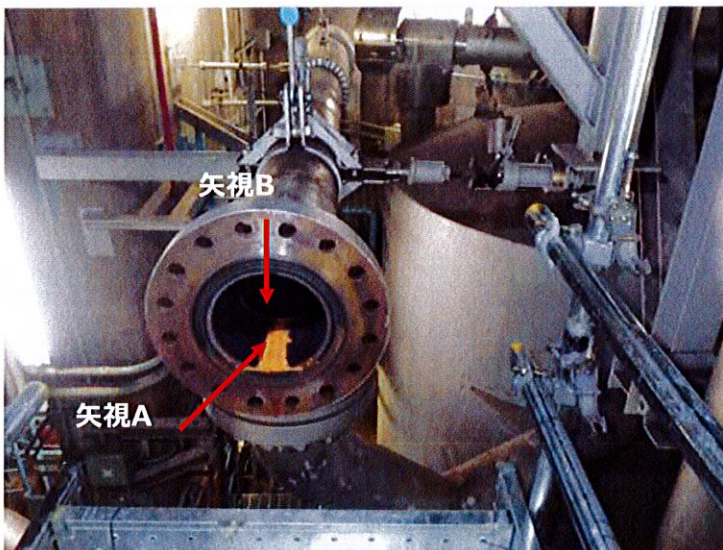


タンク出口配管、ブロー配管付近

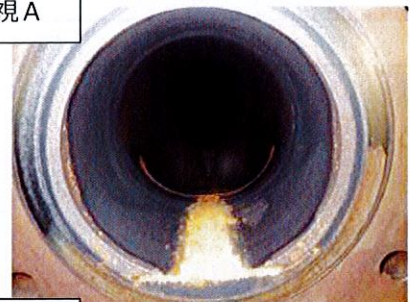


タンク底部拡大

⑦－ 1 A－ S Gブローダウン系統ターゲットプレート



矢視 A

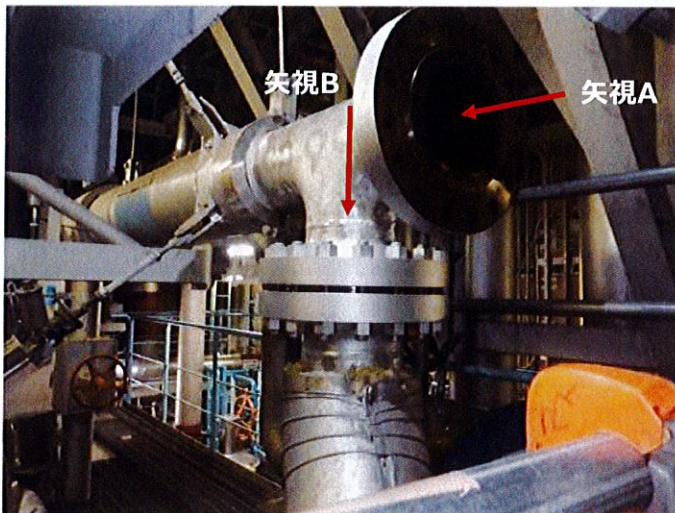


矢視 B

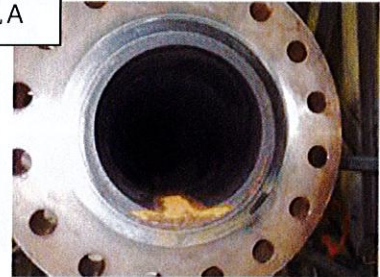


SGブローダウン系統点検結果（４／７）

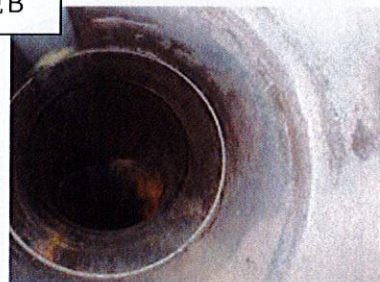
⑦－２ B－SGブローダウン系統ターゲットプレート



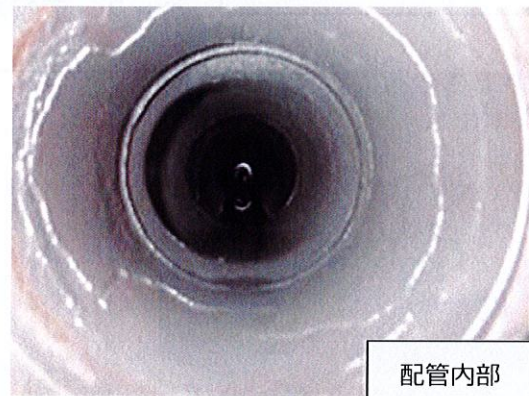
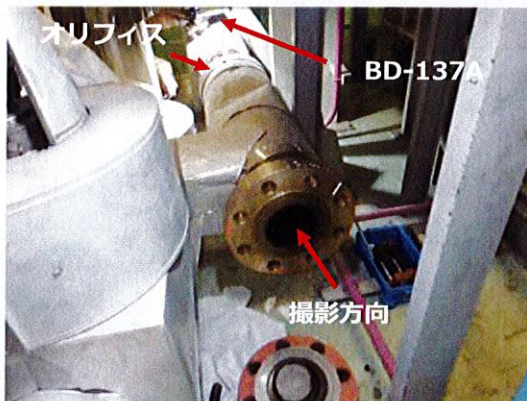
矢視A



矢視B

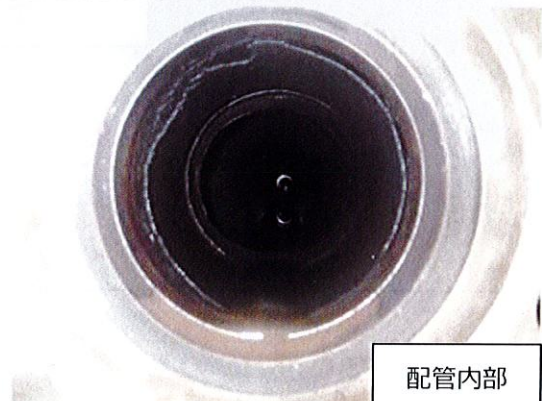


⑧－１ A－SG 流量制限オリフィス



配管内部

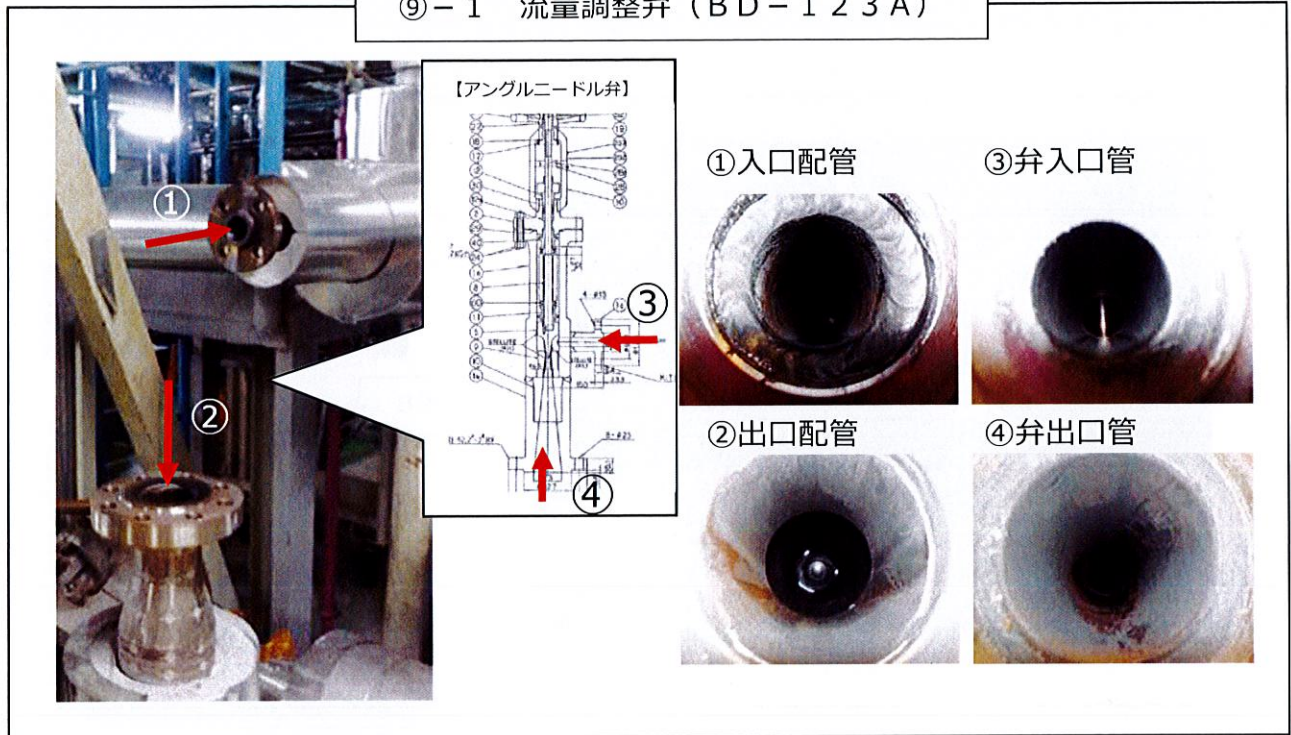
⑧－２ B－SG 流量制限オリフィス



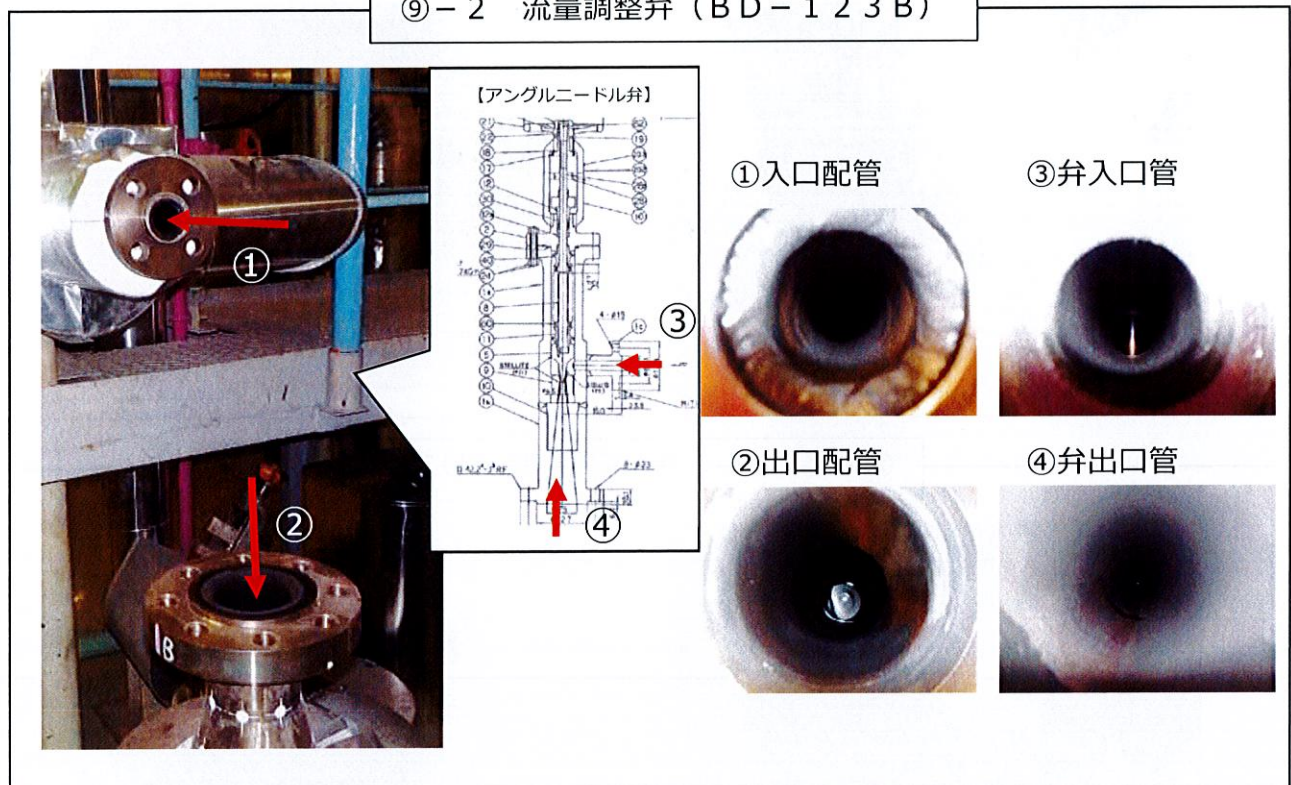
配管内部

S G ブローダウン系統点検結果 （ 5 ／ 7 ）

⑨－ 1 流量調整弁（ B D－ 1 2 3 A ）

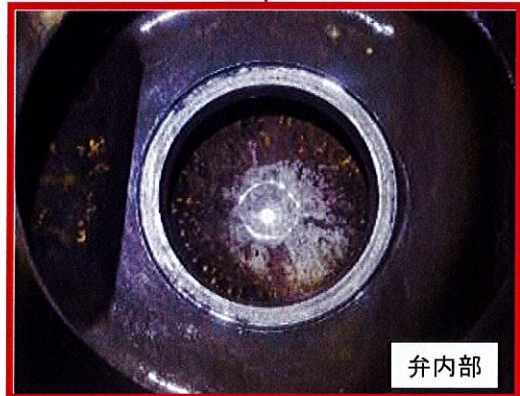
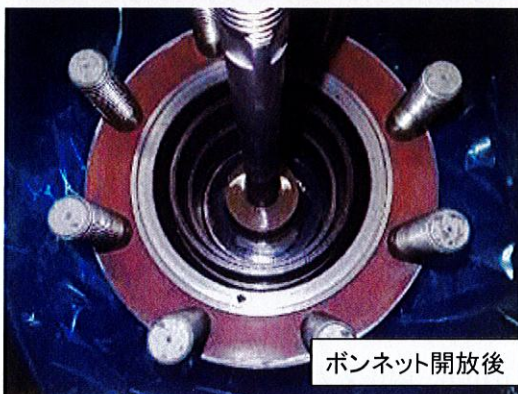
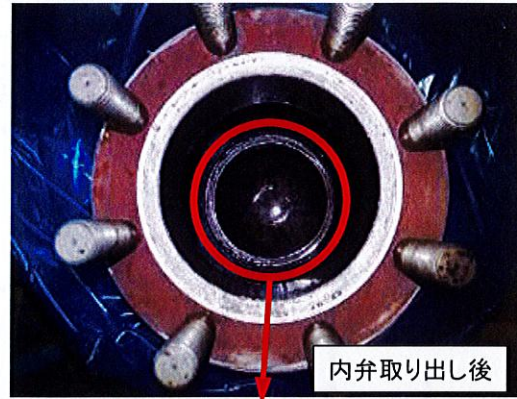


⑨－ 2 流量調整弁（ B D－ 1 2 3 B ）



SGブローダウン系統点検結果（６／７）

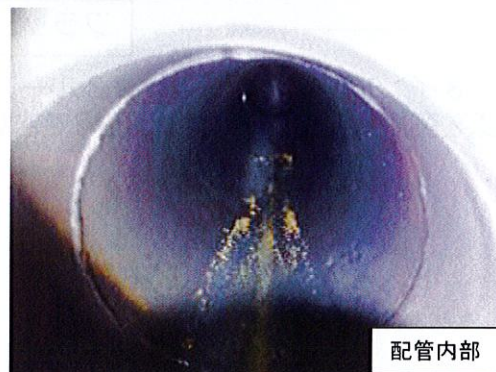
⑩－１ 水位制御弁 弁内部



⑩－２ 水位制御弁 １次側配管内部



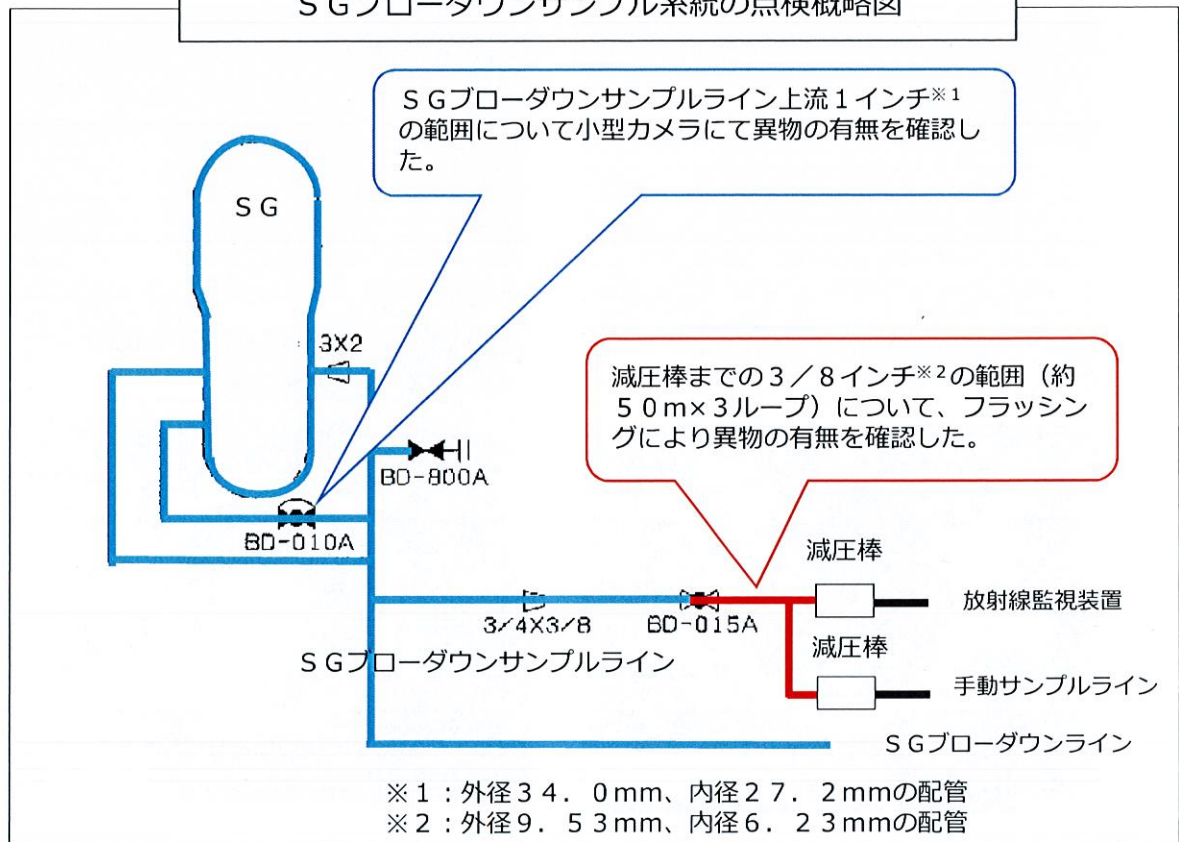
⑩－３ 水位制御弁 ２次側配管内部



SGブローダウン系統点検結果（7／7）

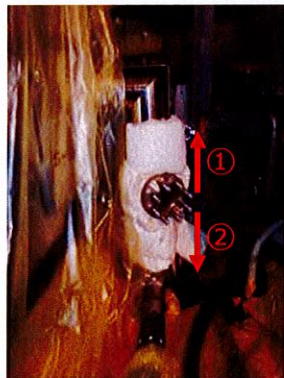
① SGブローダウンサンプル系統

SGブローダウンサンプル系統の点検概略図



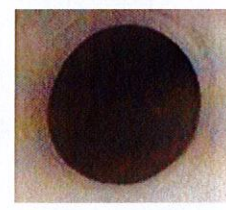
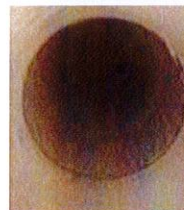
小型カメラを用いた点検結果

1インチ範囲における小型カメラでの点検を実施した結果、異物は確認できなかった。



①SG側

②反SG側



（A－S／Gの例）

フラッシング結果

3／8インチ配管（約50m×3ループ）について、空気でのフラッシングによる確認を実施した結果、異物は確認できなかった。



（フラッシングの様子）



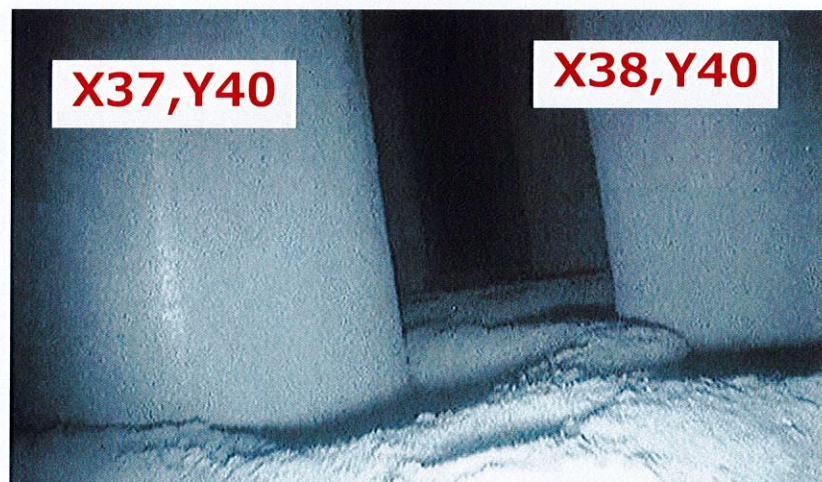
（フラッシング後のフィルタ）

S G 器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

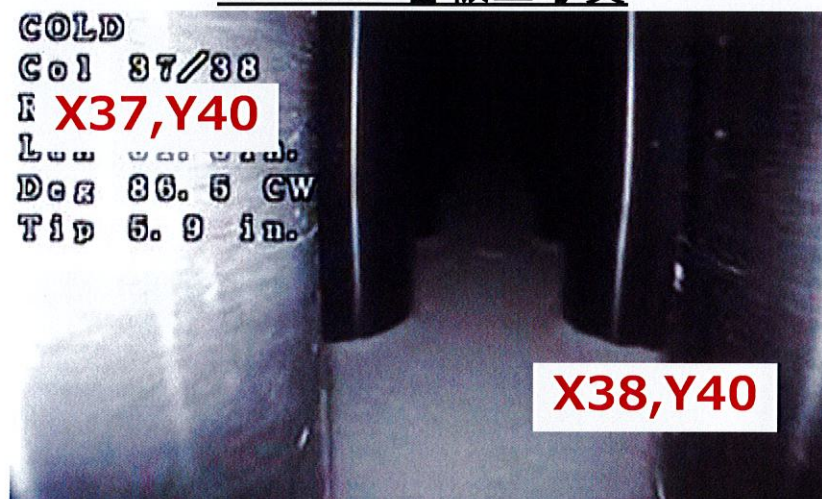
A-S G 第二管支持板上写真



A-S G 第一管支持板上写真

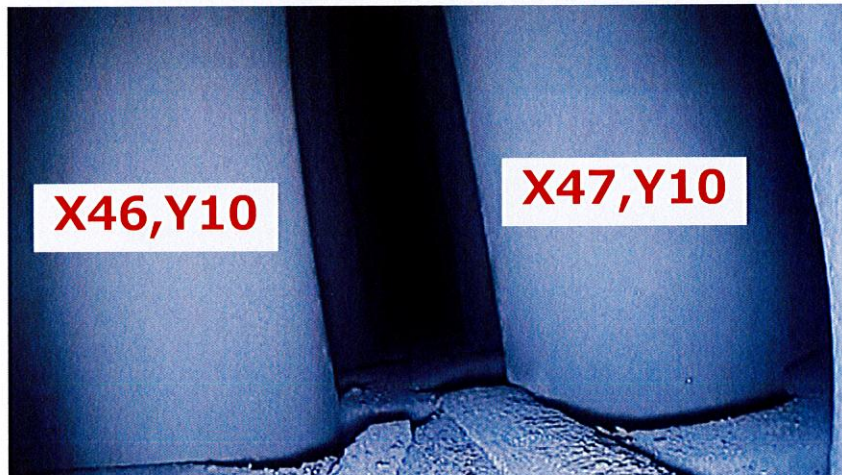


A-S G 管板上写真

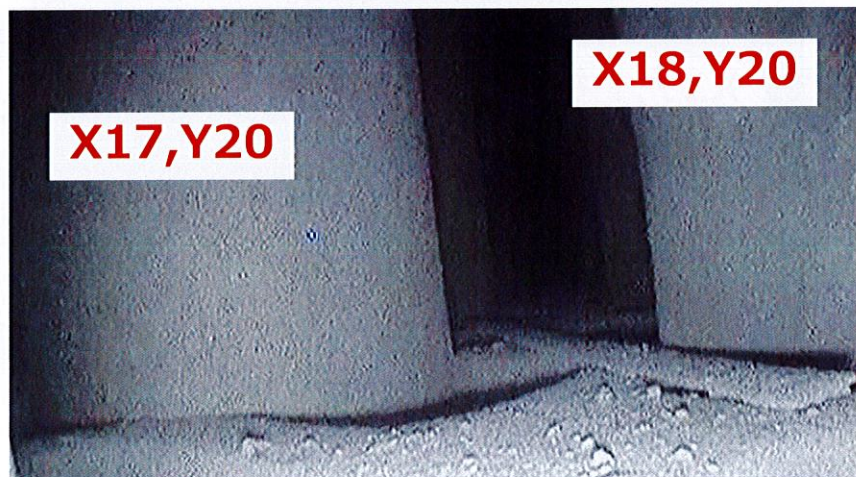


S G 器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

B-S G 第二管支持板上写真



B-S G 第一管支持板上写真

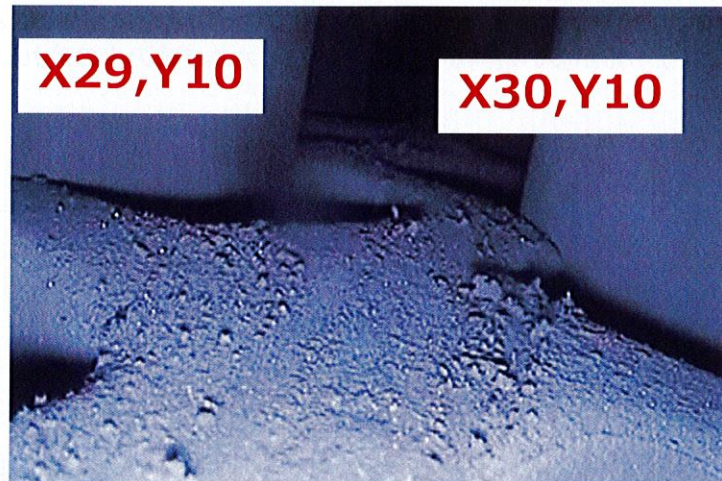


B-S G 管板上写真

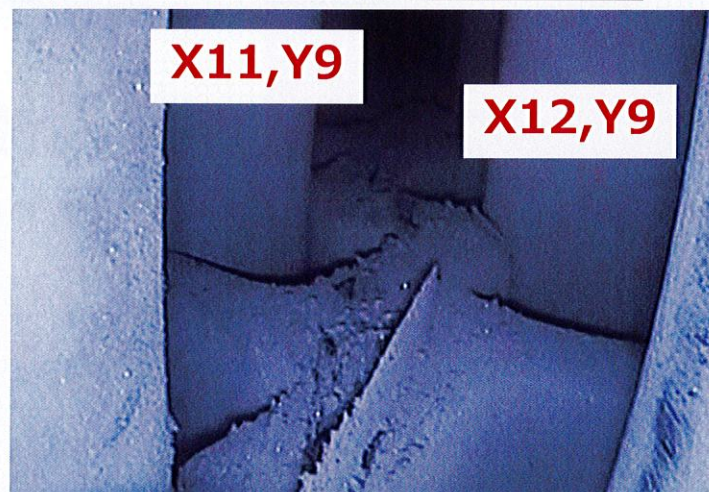


S G 器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

C-S G 第二管支持板上写真



C-S G 第一管支持板上写真



C-S G 管板上写真



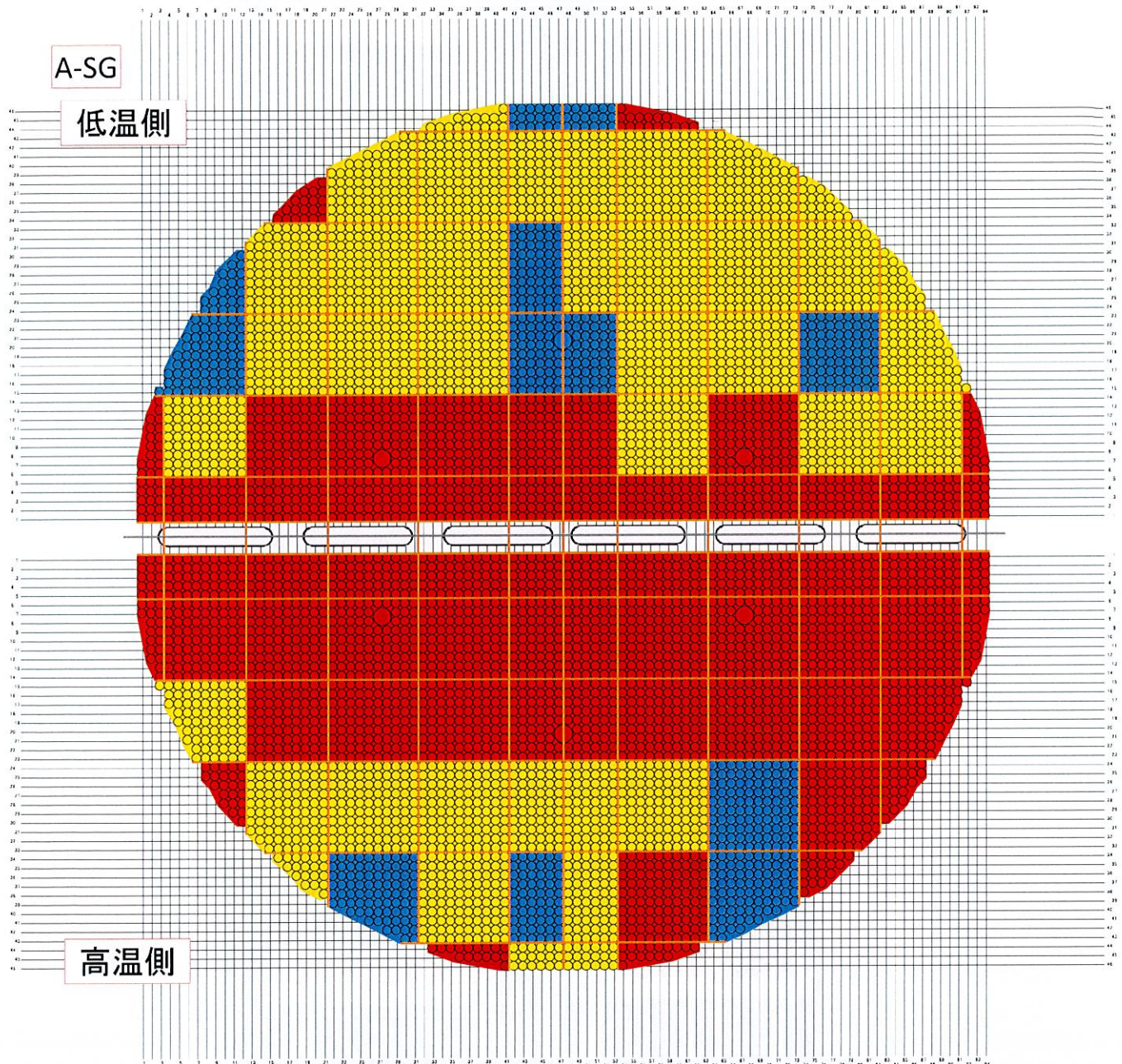
SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況（第三管支持板）

全体的にスケールが残存していることを確認した。

高温側と低温側（水平方向）および管支持板間（上下方向）において、有意な差が無いことを確認した。

フロースロット部の近傍にスケールが多い傾向が見られるが、SG水抜き時の水の流れによるものと考えられる。



管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を“多”“中”“少”に色分けした。



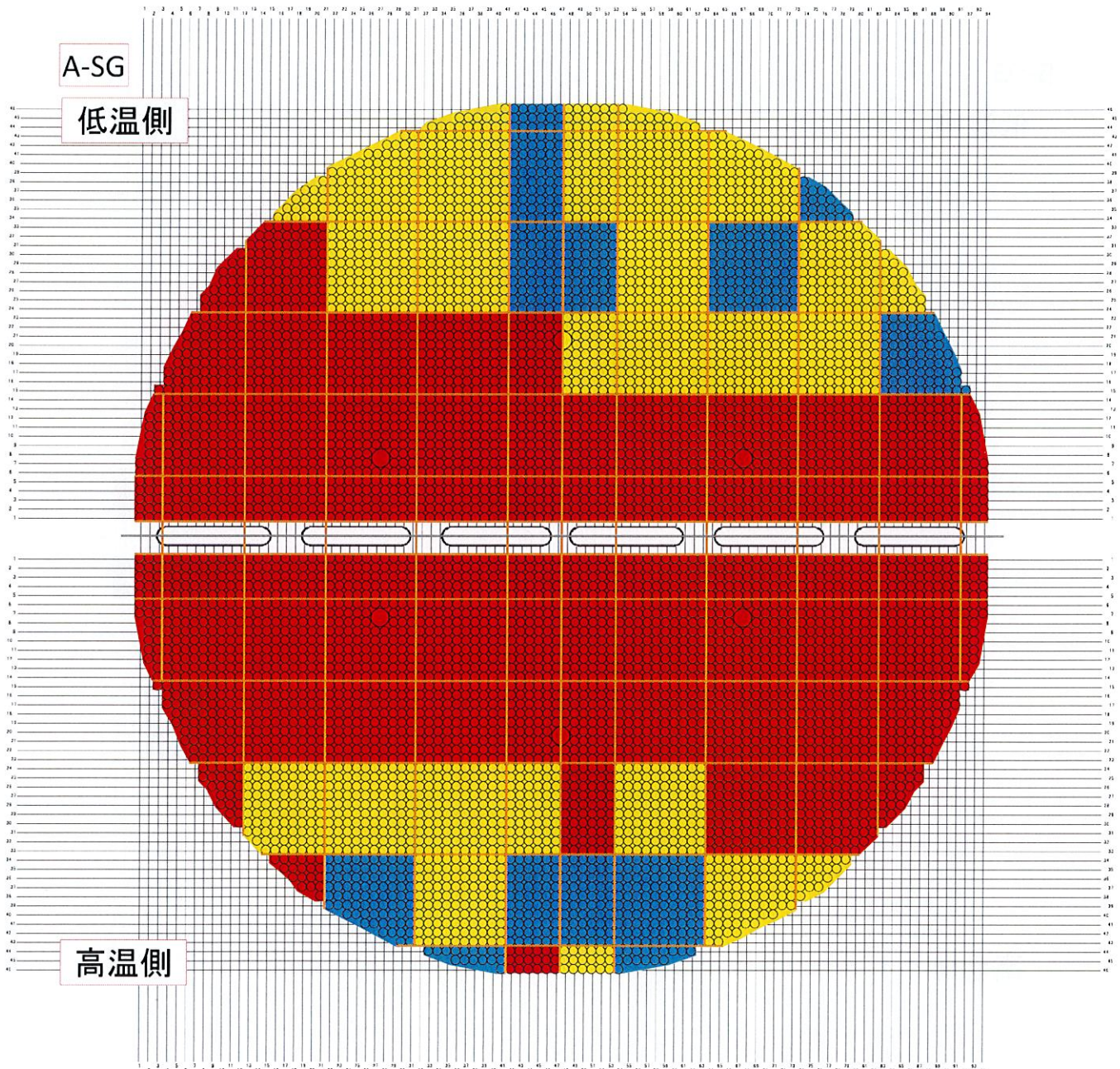
SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況（第二管支持板）

全体的にスケールが残存していることを確認した。

高温側と低温側（水平方向）および管支持板間（上下方向）において、有意な差が無いことを確認した。

フローズット部の近傍にスケールが多い傾向が見られるが、SG水抜き時の水の流れによるものと考えられる。



管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



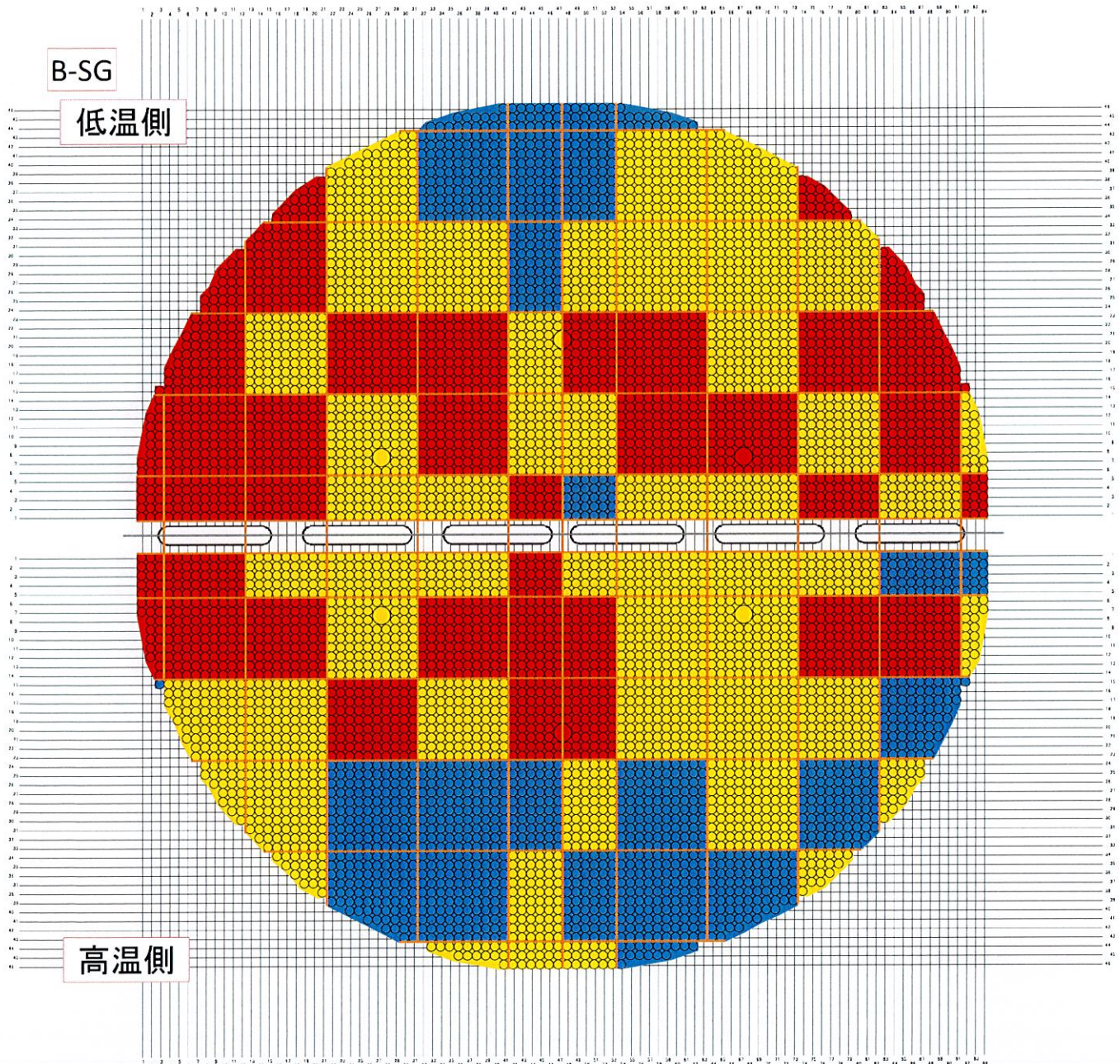
SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況（第一管支持板）

全体的にスケールが残存していることを確認した。

高温側と低温側（水平方向）および管支持板間（上下方向）において、有意な差が無いことを確認した。

フロースロット部の近傍にスケールが多い傾向が見られるが、SG水抜き時の水の流れによるものと考えられる。



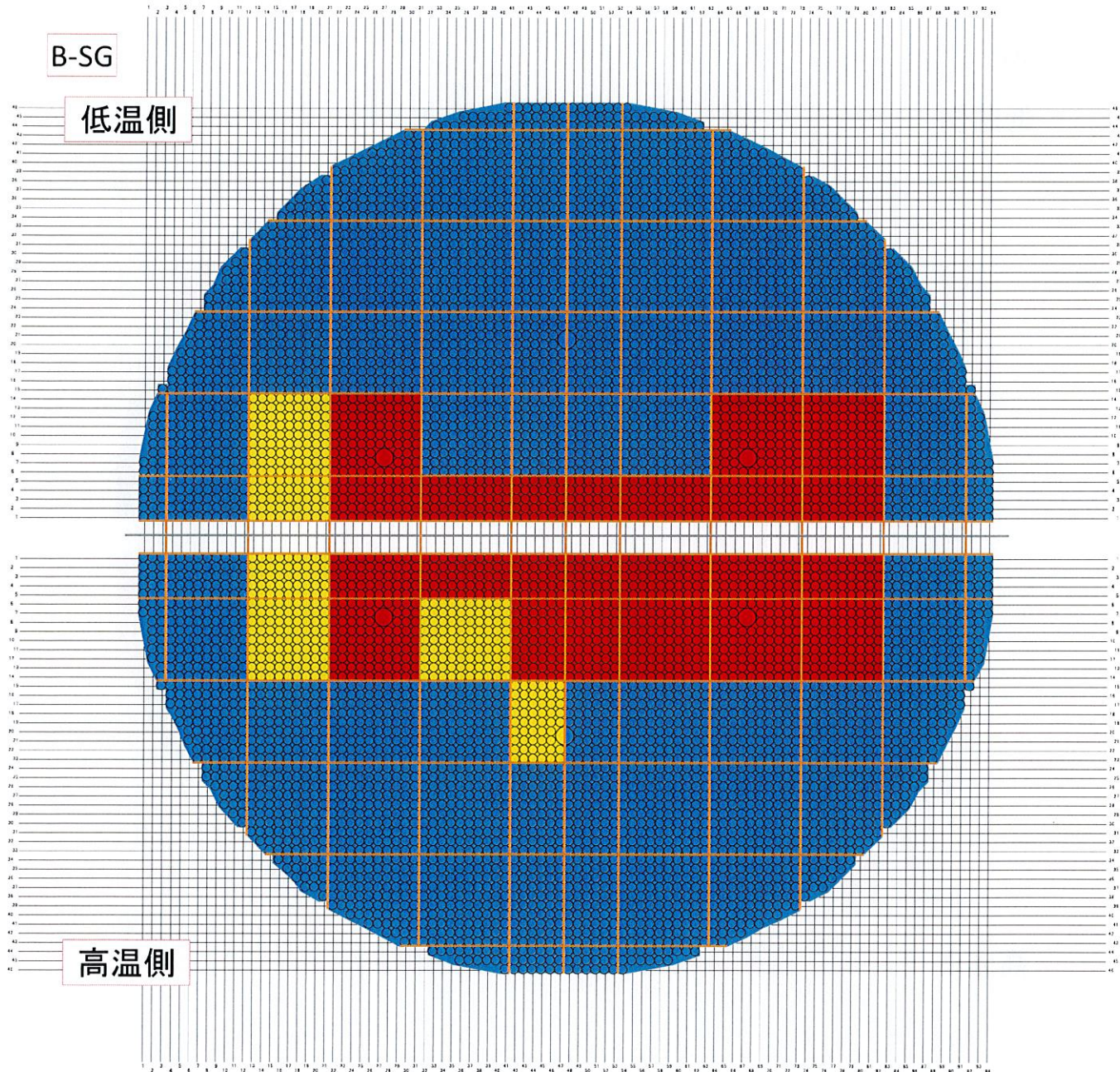
管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況（管板）

全体的にスケールが残存していることを確認した。
高温側と低温側（水平方向）および管支持板間（上下方向）において、有意な差が無いことを確認した。
中央にスケールが多い傾向が見られるが、SG水抜き時の水の流れによるものと考えられる。



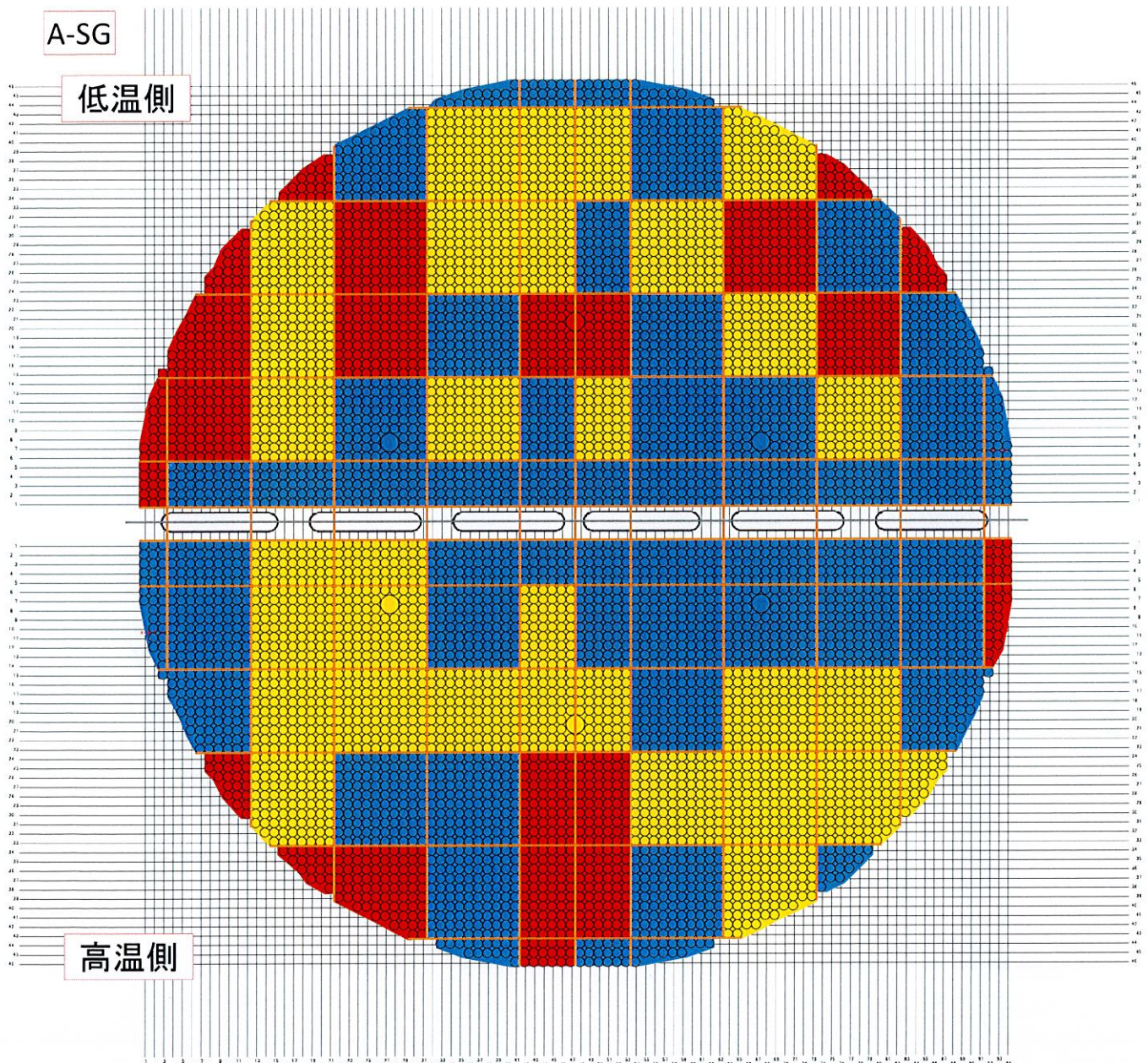
管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



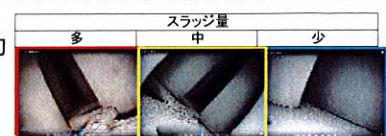
SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スラッジの分布状況（第三管支持板）

全体的にスラッジが残存していることを確認した。



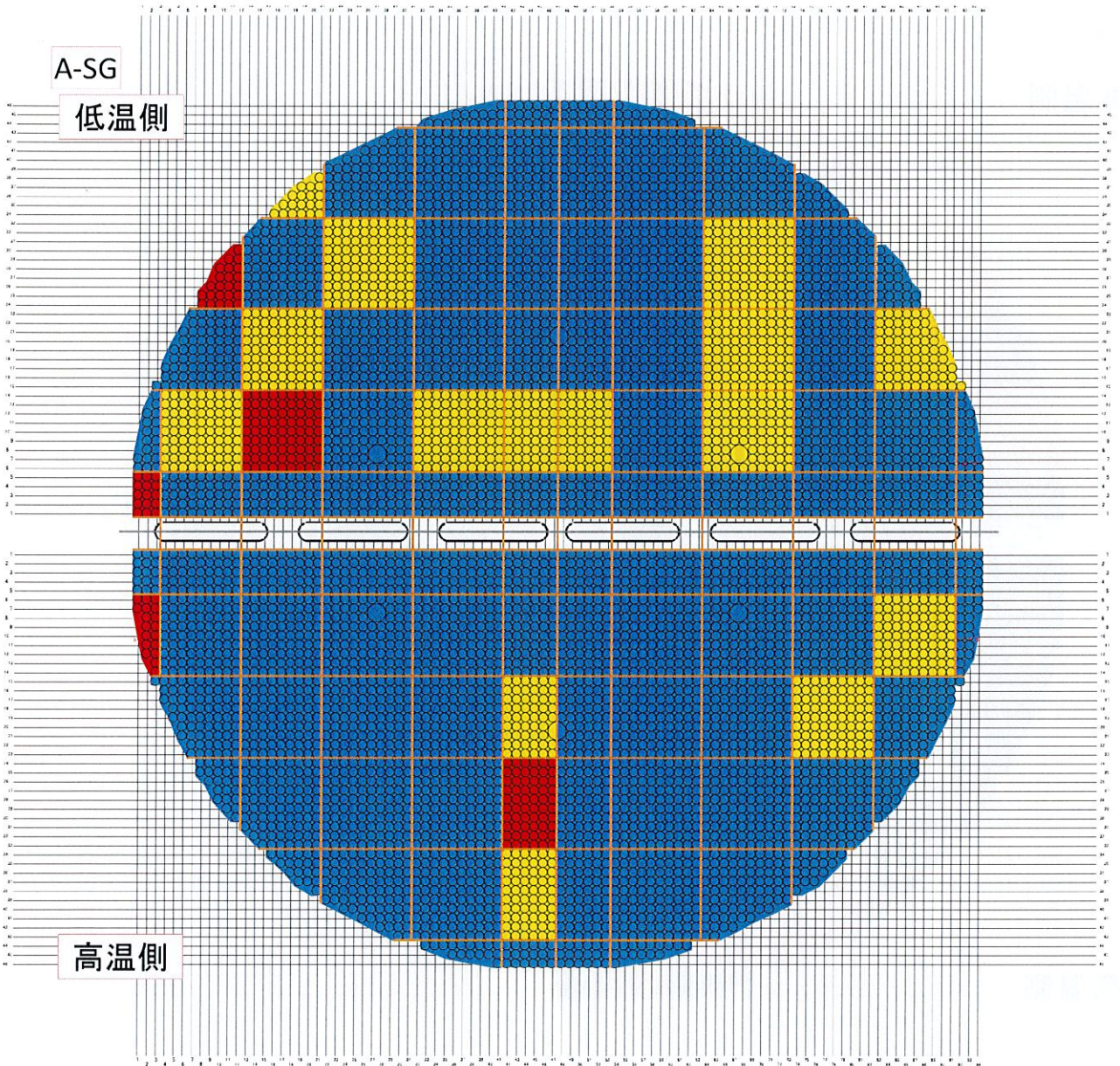
- ・管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を"多""中""少"に大別。
- ・それぞれ、多＝赤、中＝黄色、少＝青色に染めることにより、支持板上スラッジの量的分布を概略的に示した。



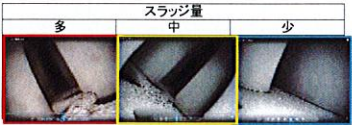
SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スラッジの分布状況（第二管支持板）

全体的にスラッジが残存していることを確認した。
低温側の方がスラッジが多い傾向が見られ、SG器内の高温側から低温側への水平方向の水の流れによるものと考えられる。



・管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を“多”“中”“少”に大別。
・それぞれ、多＝赤、中＝黄色、少＝青色に染めることにより、支持板上スラッジの量的分布を概略的に示した。

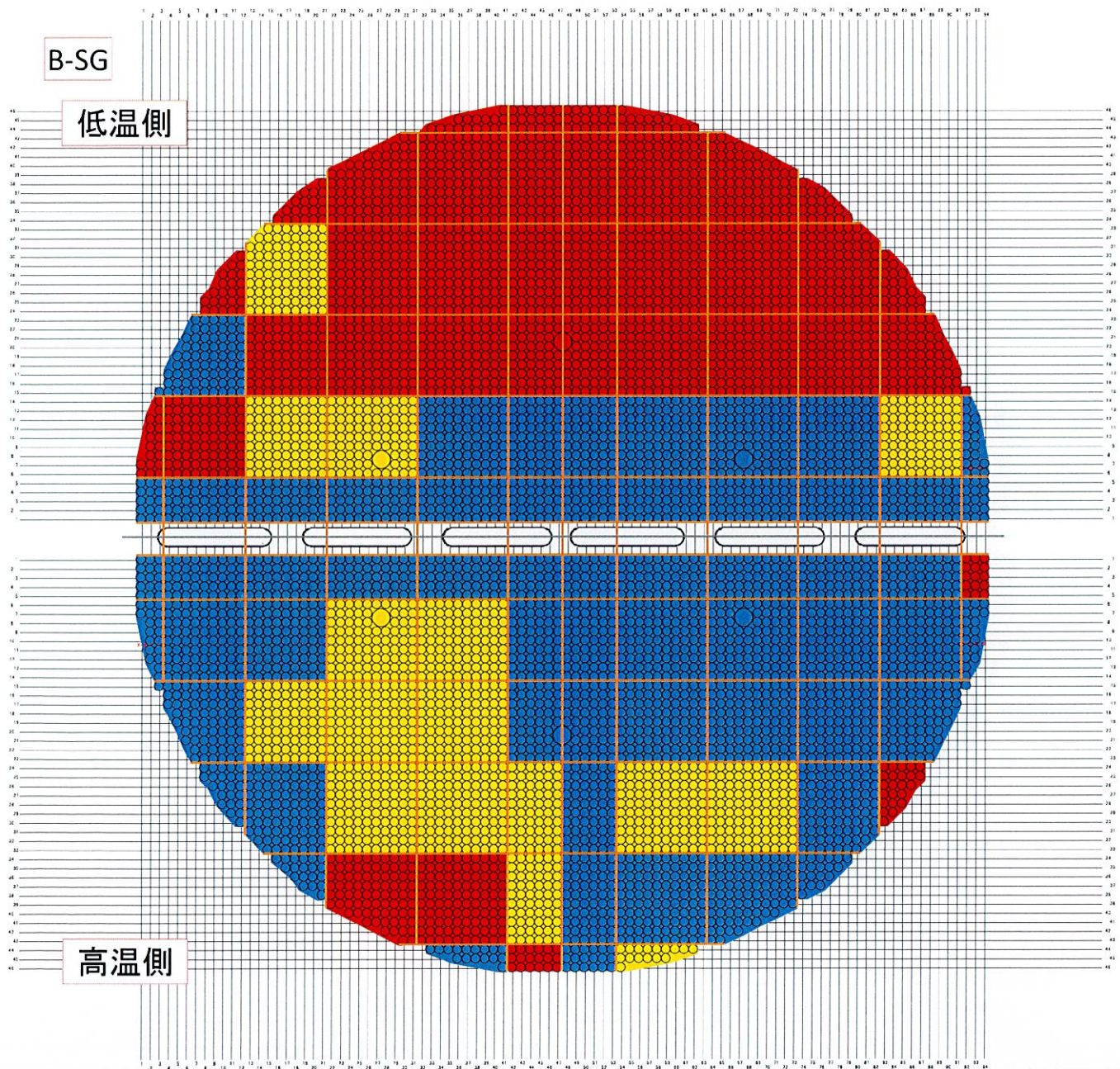


SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

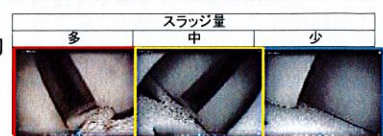
スラッジの分布状況（第一管支持板）

全体的にスラッジが残存していることを確認した。

低温側の方がスラッジが多い傾向が見られ、SG器内の高温側から低温側への水平方向の水の流れによるものと考えられる。



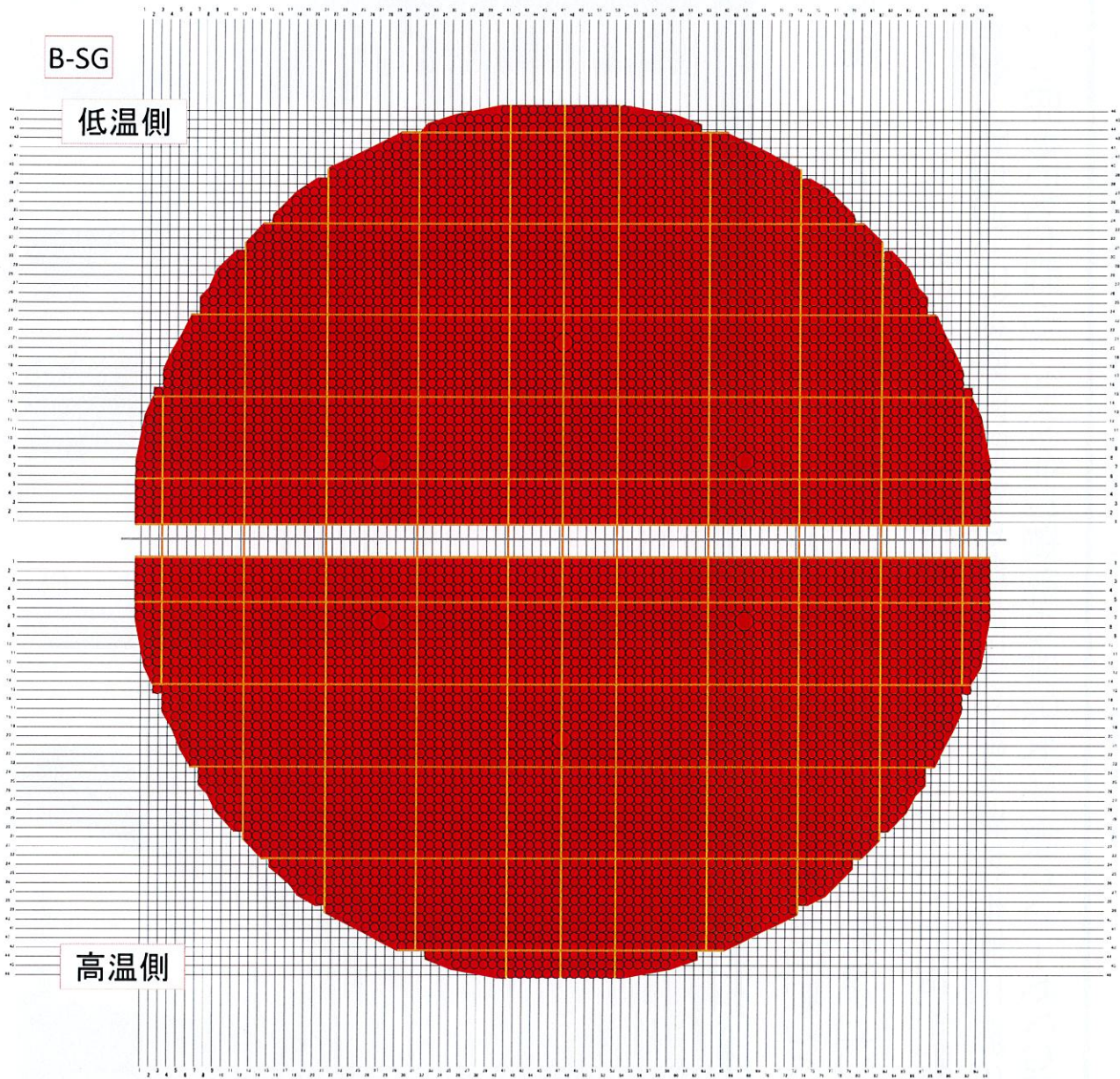
・管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を“多”“中”“少”に大別。
 ・それぞれ、多＝赤、中＝黄色、少＝青色に染めることにより、支持板上スラッジの量的分布を概略的に示した。



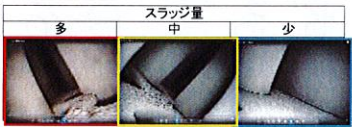
SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スラッジの分布状況（管板）

全体的にスラッジが残存していることを確認した。
プラント停止時及びSG器内の水抜き時において、器内全体のスラッジが下側に集まり、全体として多く堆積したものと考えられる。



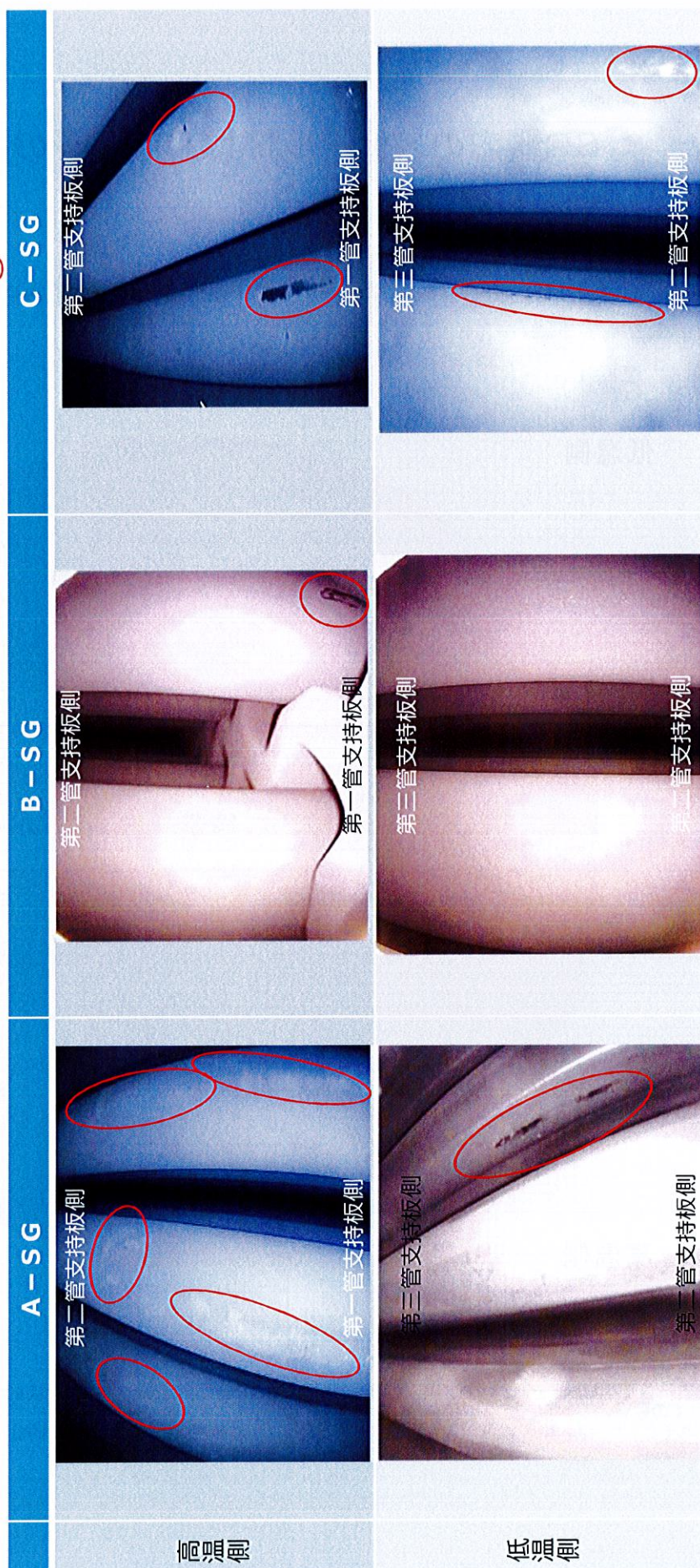
・管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多””中””少”に大別。
・それぞれ、多＝赤、中＝黄色、少＝青色に染めることにより、支持板上スラッジの量的分布を概略的に示した。



S G器内の伝熱管表面の観察結果

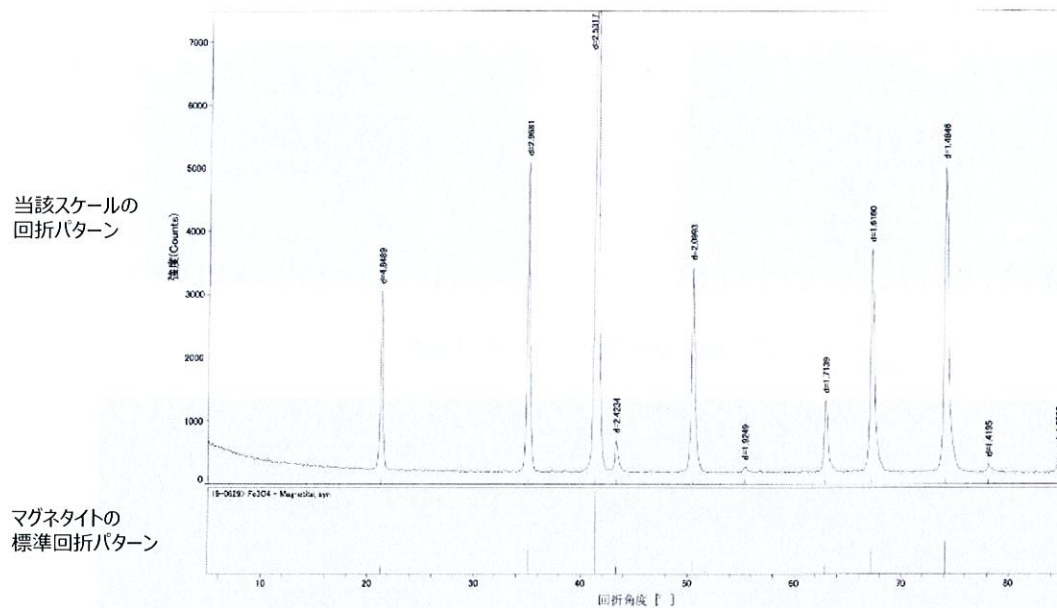
- S G器内のスケールの残存状況等の調査に合わせ、小型カメラを用いて、A、B、C－S Gの管板から第三管支持板の間の伝熱管の外観観察を行った結果、全面的にスケールに覆われており、局所的にスケールが剥離した痕跡等が認められた。
- 伝熱管のこれらの状況については、高温側と低温側（水平方向）、管支持板間（上下方向）において有意な差は認められなかった。

○：スケールの剥離痕



回収したスケールの化学分析および形状確認結果（ 1 ／ 5 ）

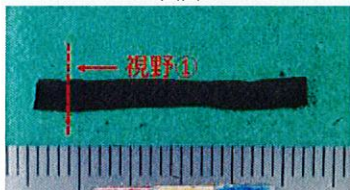
- 回収したスケールについて、X線回折※を用いた表面の化学成分分析を実施した結果、主成分はマグネタイトであり、S G 器内で発生するスラッジと同成分であることを確認した。



※：試料にX線を照射し、X線の散乱・干渉を解析することで、構成成分の同定をする分析方法

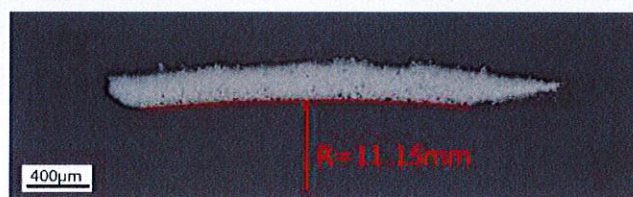
- A－S Gの管板、第一管支持板から第三管支持板上面、並びにBおよびC－S Gの管板、第一管支持板から第二管支持板上面に残存しているスケールのうち、比較的大きなものを選定し取り出したスケールは、主に多角型、長尺型に分類され、長さが最大のものは、前者が長さ約 1 7 mm、幅約 1 0 mm、後者が長さ約 4 7 mm、幅約 4 mmであり、これらのスケールは管支持板の流路穴よりも大きく、運転中に管支持板下面の伝熱管の隙間に留まることが可能な形状であった。
- また、これらのスケールについては、目視確認の結果、やや湾曲した形状をしており、そのうち各 S G から取り出した 9 個のスケールについて 3 次元測定器等により計測した結果、直径約 2 2 . 3 ～ 2 2 . 6 mm の円筒状に沿った形状であり、伝熱管（円筒）の外径（直径 2 2 . 2 mm）に近いことを確認した。

A－S G 第一管支持板上面（高温側）から回収した長尺型スケール
<凸面> <凹面>



<視野①>

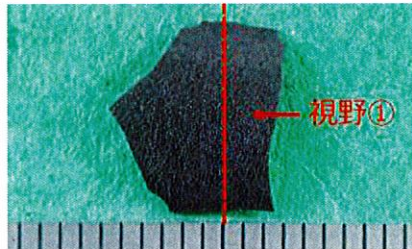
断面画像解析で計測した結果



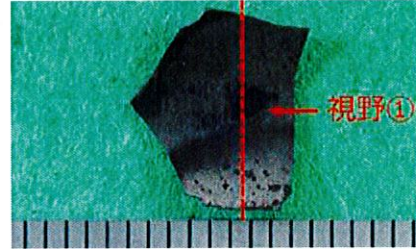
回収したスケールの化学分析および形状確認結果（ 2 ／ 5 ）

A－S G 第二管支持板上面（低温側）から回収したスケール

<凸面>

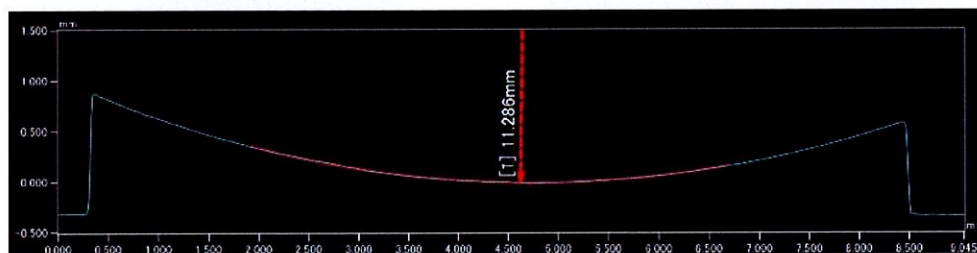


<凹面>



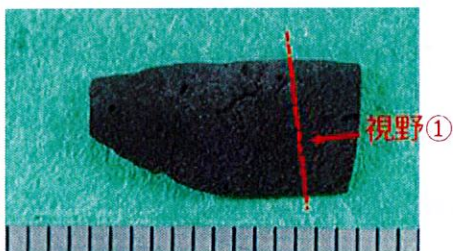
スケールを 3 次元測定器で計測した結果

<視野①>

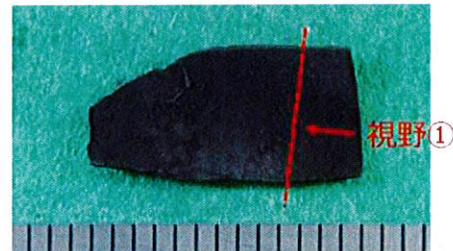


A－S G 第二管支持板上面（低温側）から回収したスケール

<凸面>

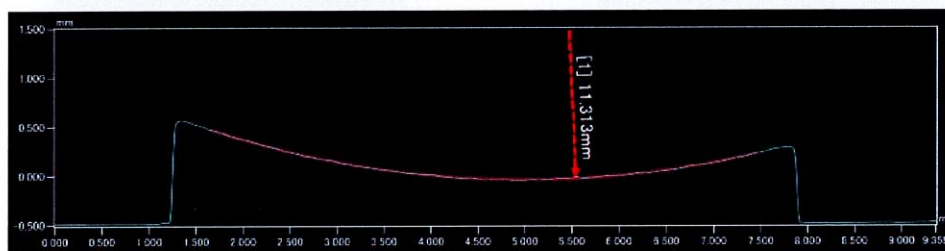


<凹面>



スケールを 3 次元測定器で計測した結果

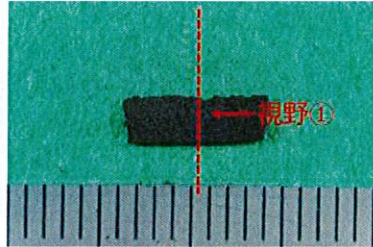
<視野①>



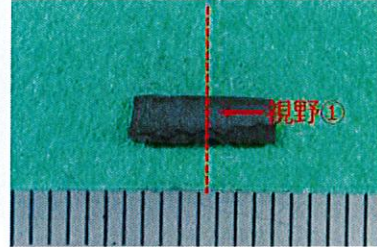
回収したスケールの化学分析および形状確認結果（ 3 ／ 5 ）

A－S G 第三管支持板上面（低温側）から回収したスケール

<凸面>

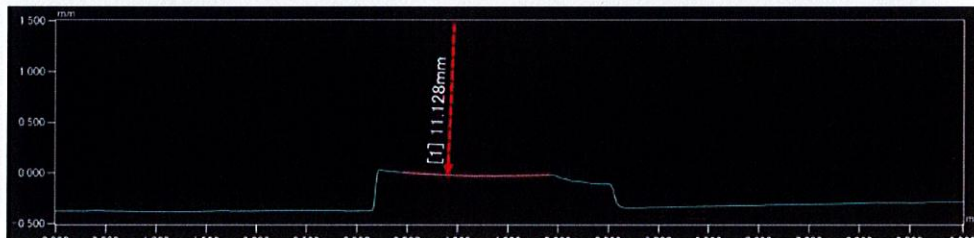


<凹面>



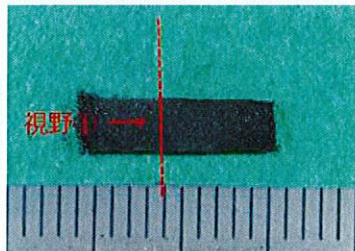
スケールを 3 次元測定器で計測した結果

<視野①>

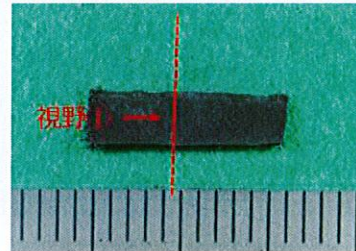


A－S G 第三管支持板上面（低温側）から回収したスケール

<凸面>

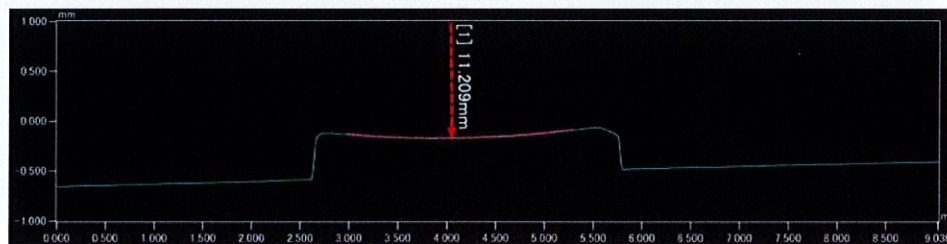


<凹面>



スケールを 3 次元測定器で計測した結果

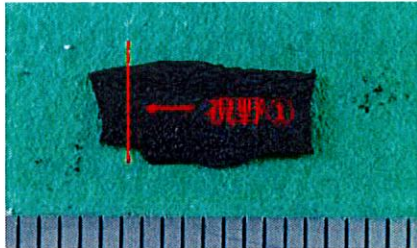
<視野①>



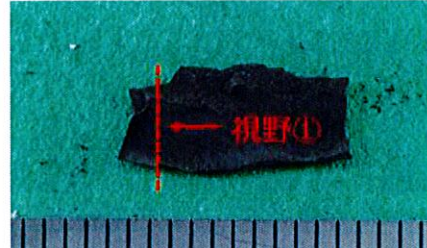
回収したスケールの化学分析および形状確認結果（4／5）

B－SG 第一管支持板上面（高温側）から回収したスケール

<凸面>

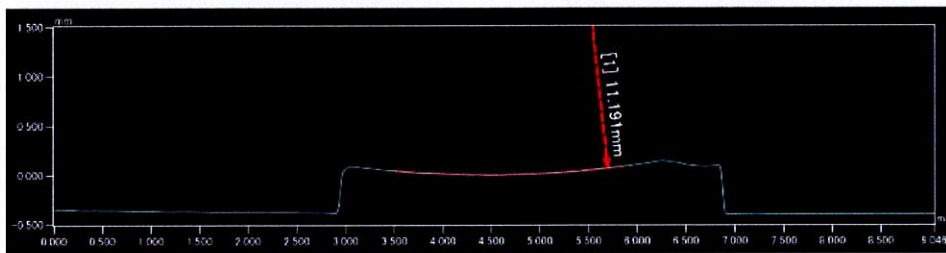


<凹面>



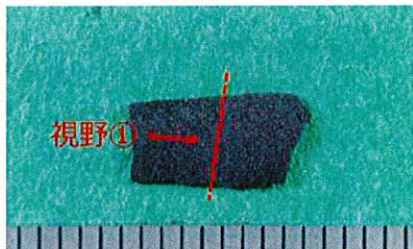
スケールを3次元測定器で計測した結果

<視野①>

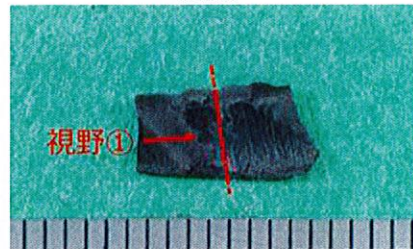


B－SG 第一管支持板上面（高温側）から回収したスケール

<凸面>

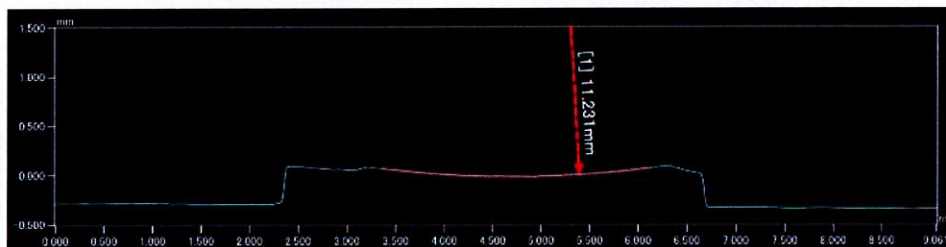


<凹面>



スケールを3次元測定器で計測した結果

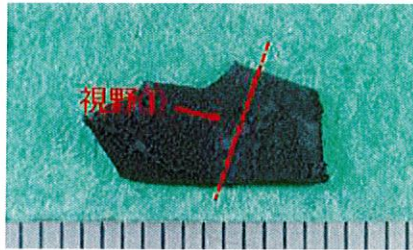
<視野①>



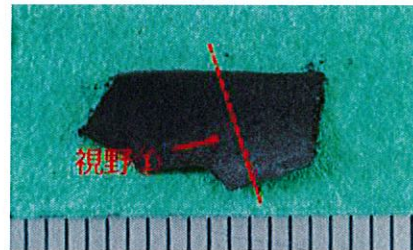
回収したスケールの化学分析および形状確認結果（ 5 ／ 5 ）

C－S G 第二管支持板上面（低温側）から回収したスケール

<凸面>

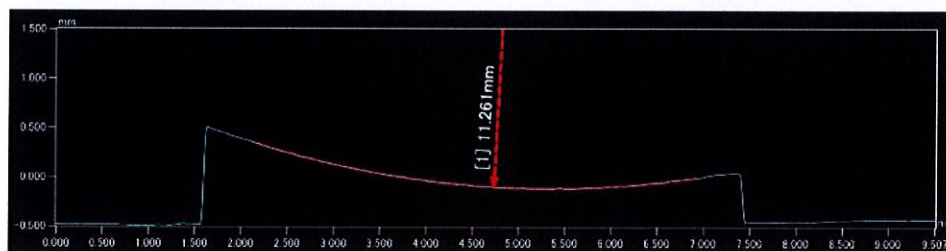


<凹面>



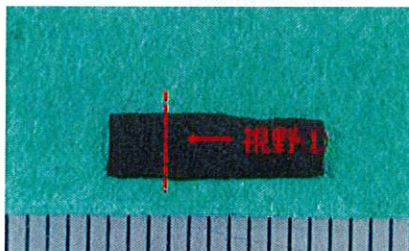
スケールを 3 次元測定器で計測した結果

<視野①>

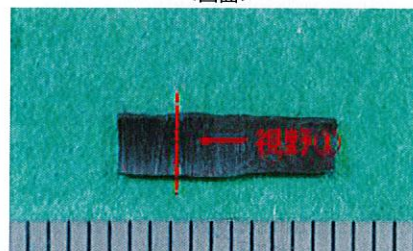


C－S G 第一管支持板上面（低温側）から回収したスケール

<凸面>

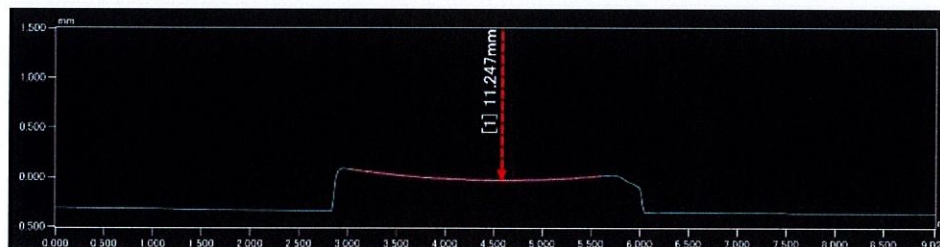


<凹面>



スケールを 3 次元測定器で計測した結果

<視野①>



伝熱管とスケールの摩耗試験方法について

以下の通り伝熱管とスケールの摩耗試験を実施し、スケールで有意な減肉が生じる可能性を検証した。

１．試験概要

加振装置（図１参照）により、伝熱管をスケールに接触させた状態で加振し、スケールの摺動による伝熱管の減肉発生状況を確認する。

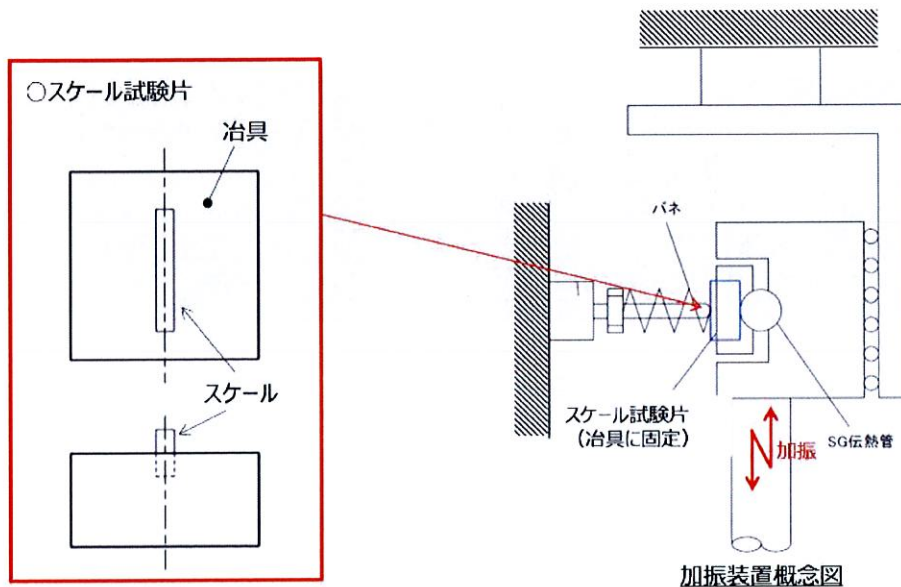


図１ 加振装置概念図

２．試験条件

実機条件を模擬した流動振動解析結果から摩耗試験条件を表１の通り設定した。

表１ 摩耗試験条件

項目		条件	備考
伝熱管 摺動条件	押付力	約 1N	熱流動解析結果より設定
	振動数	約 8Hz	振動応答解析結果より設定
	振幅	約 0.4mm	BEC穴ランド部寸法より設定

3. 摩耗試験結果の整理方法

試験後の伝熱管の減肉量とスケールの摩滅量を測定した後、体積比をとって結果を整理した。スケール及び伝熱管の試験前後の外観を図 2 及び 3 に示す。

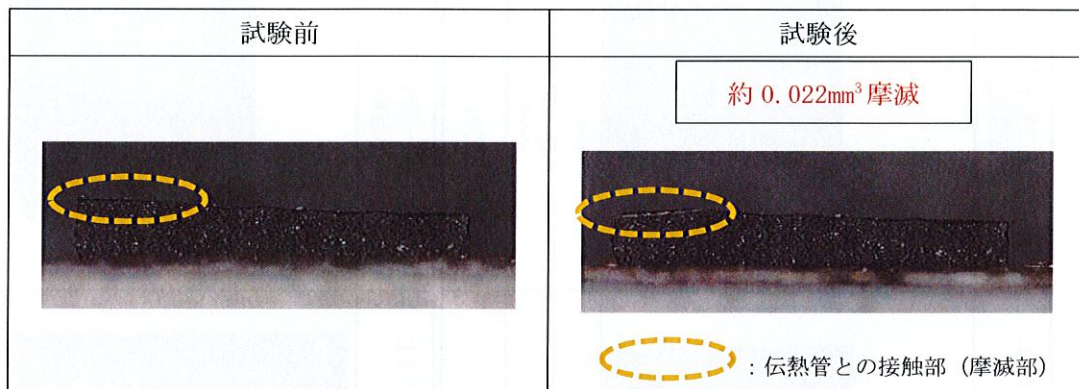


図 2 摩耗試験前後のスケール試験片外観（回収スケールの一例）

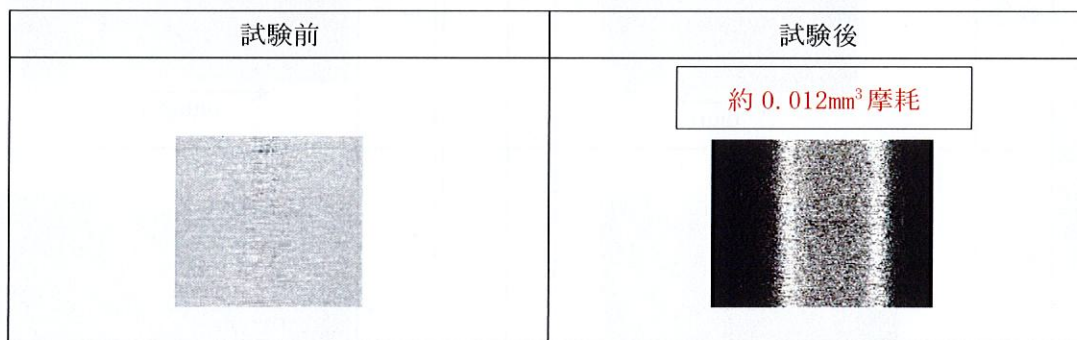


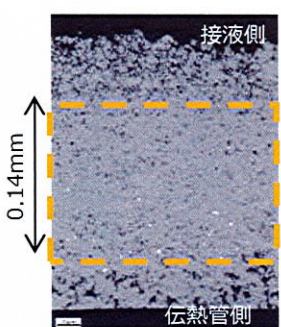
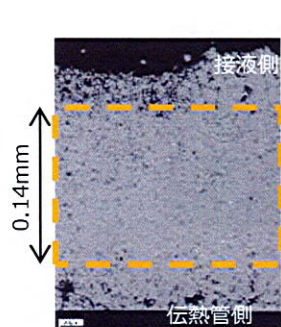
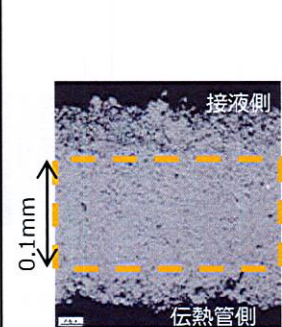
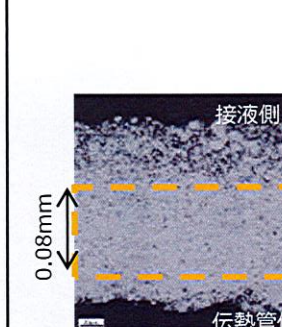
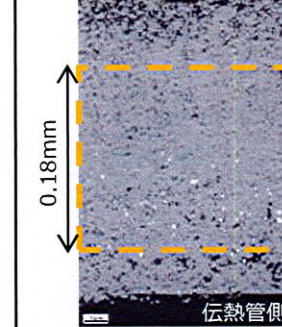
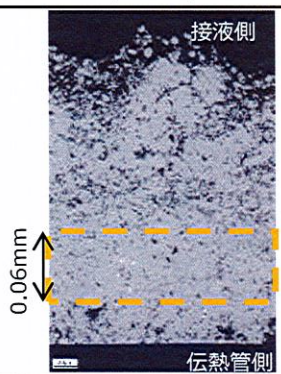
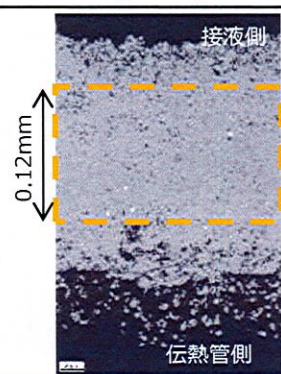
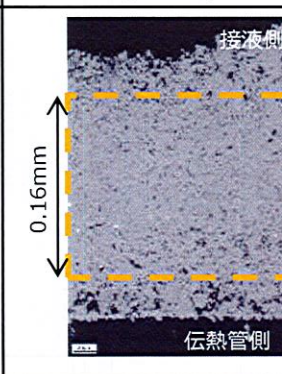
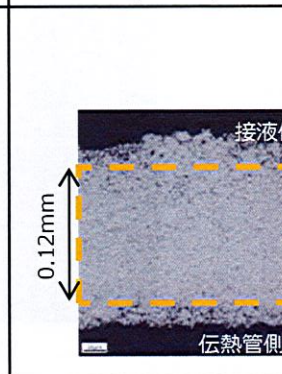
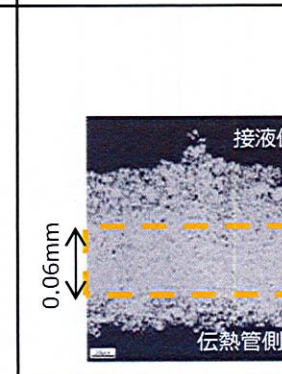
図 3 摩耗試験前後の伝熱管試験片外観（回収スケールの一例）

以 上

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（1 / 13）

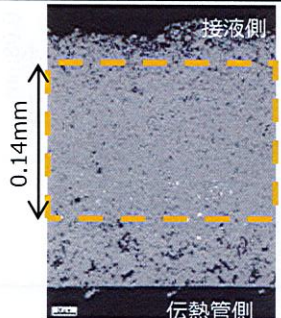
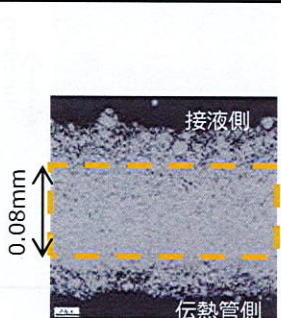
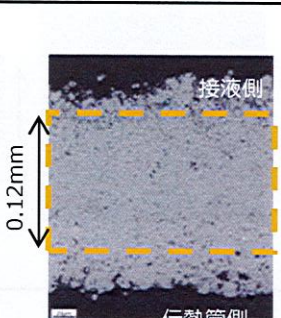
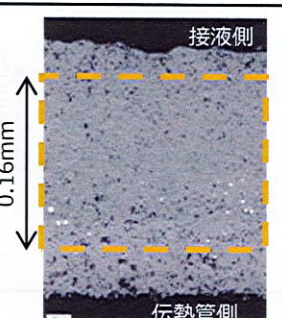
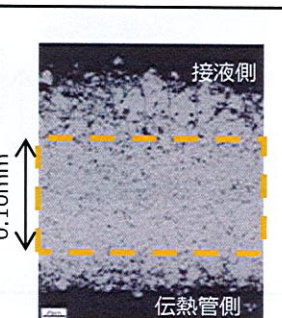
スケール 120 個を対象に断面観察を行った結果、稠密層（密度の高い酸化鉄の層）厚さが0.1mm以上のスケールを42個確認した。

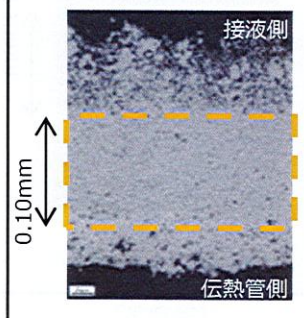
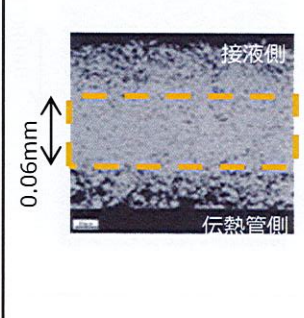
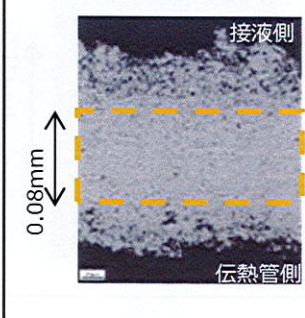
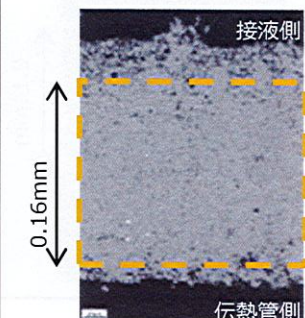
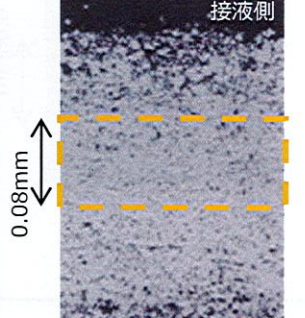
＜断面観察結果（1/12）＞

スケール回収位置	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第二管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (高温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.3	約0.3	約0.2	約0.2	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.14	0.14	0.10	0.08	0.18
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.5	0.0	0.0	0.0	2.0
スケール回収位置	A-SG 第一管支持板上 (低温側)	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.3	約0.3	約0.3	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.06	0.12	0.16	0.12	0.06
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（2 / 1 3）

<断面観察結果（2/12）>

スケール回収位置	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.3	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.14	0.08	0.12	0.16	0.10
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	0.0	0.0	0.5	0.3	0.0

スケール回収位置	A-SG 第一管支持板上 (低温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	A-SG 第一管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ (mm)	約0.2	約0.1	約0.3	約0.3	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.10	0.06	0.08	0.16	0.08
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（3 / 13）

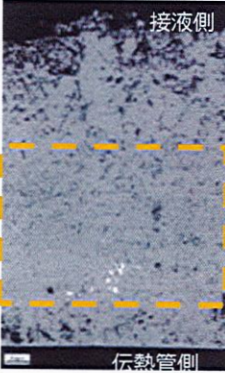
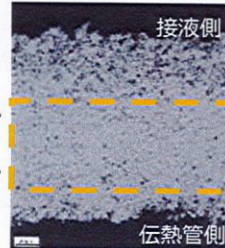
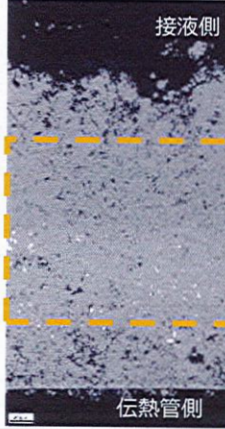
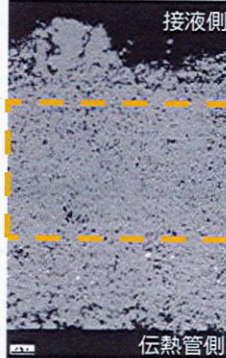
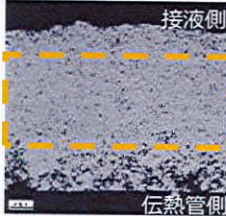
<断面観察結果（3/12）>

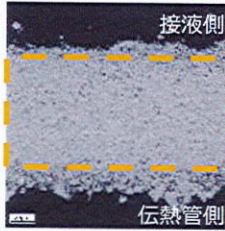
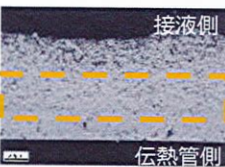
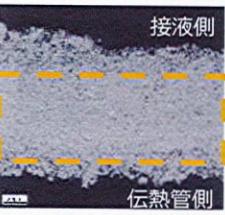
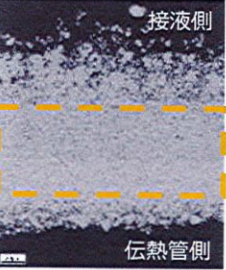
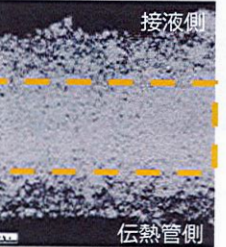
スケール回収位置	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.10	0.08	0.12	0.14	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	C-SG 第一管支持板上 (高温側)	C-SG 第一管支持板上 (高温側)	C-SG 第一管支持板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.1
稠密層厚さ(mm)	0.08	0.08	0.10	0.10	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（4 / 1 3）

<断面観察結果（4/12）>

スケール回収位置	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.3	約0.2	約0.3	約0.3	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.14	0.08	0.16	0.12	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.7	0.0	0.2	0.4	0.0

スケール回収位置	C-SG 第一管支持板上 (低温側)	C-SG 第一管支持板上 (高温側)	C-SG 第二管支持板上 (低温側)	C-SG 第一管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.1	約0.1	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.10	0.04	0.08	0.08	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（5 / 13）

<断面観察結果（5/12）>

スケール回収位置	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (低温側)	A-SG 第一管支持板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.10	0.08	0.08	0.06	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.08	0.10	0.10	0.08	0.06
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（6 / 1 3）

<断面観察結果（6/12）>

スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.1	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.04	0.08	0.08	0.08	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-

スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.3	約0.3	約0.3	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.06	0.10	0.00	0.12	0.04
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（7 / 13）

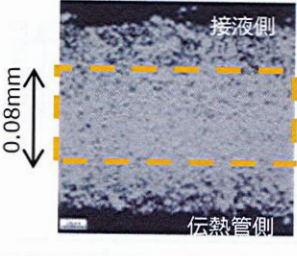
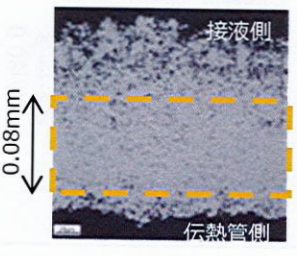
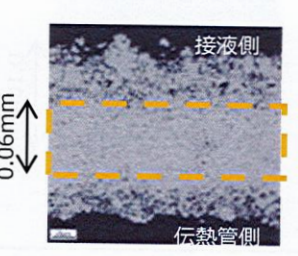
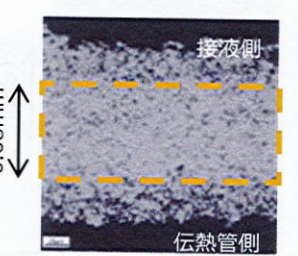
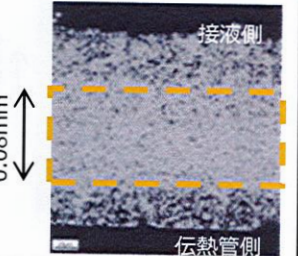
<断面観察結果（7/12）>

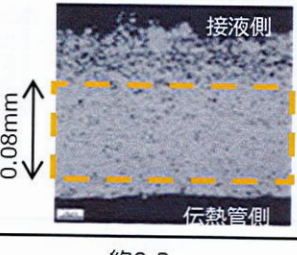
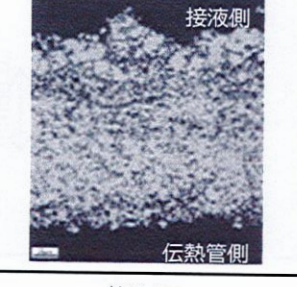
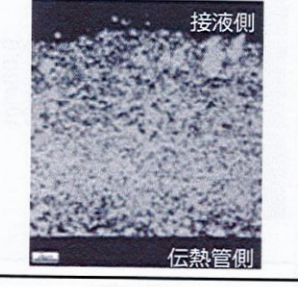
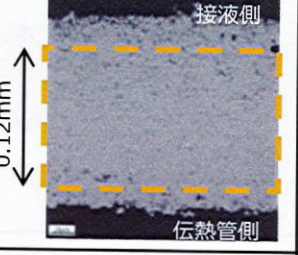
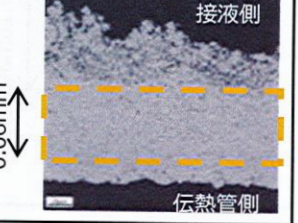
スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.1	約0.1	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.04	0.06	0.06	0.08	0.04
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	—	—	—	—	—

スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.06	0.08	0.06	0.06	0.04
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	—	—	—	—	—

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（8 / 13）

＜断面観察結果（8/12）＞

スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.08	0.08	0.06	0.08	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	—	—	—	—	—

スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.08	0.00	0.00	0.12	0.06
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	—	—	—	—	—

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（9 / 13）

<断面観察結果（9/12）>

スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.10	0.08	0.08	0.10	0.10
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	—	—	—	—	—

スケール回収位置	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	A-SG 第二管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.1
稠密層厚さ(mm)	0.08	0.08	0.10	0.08	0.06
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	—	—	—	—	—

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（10／13）

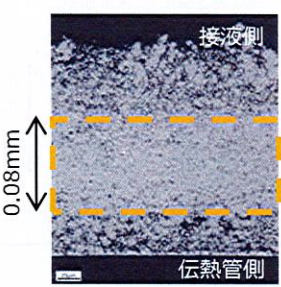
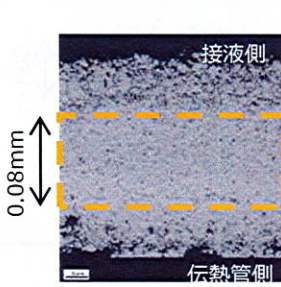
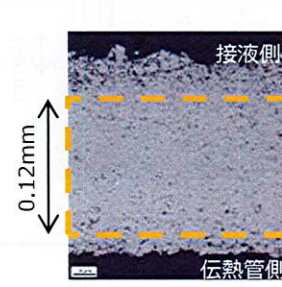
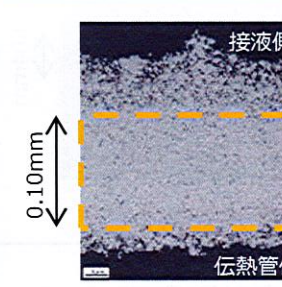
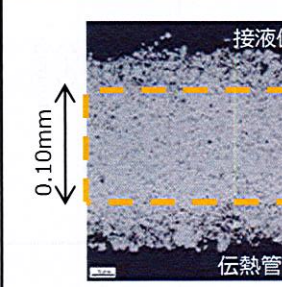
<断面観察結果（10/12）>

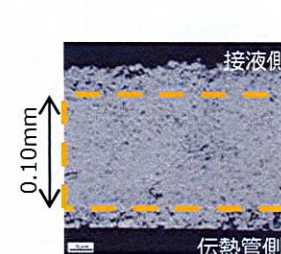
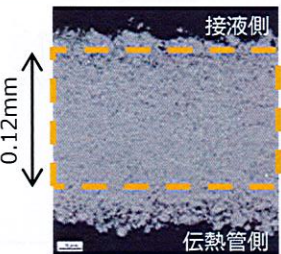
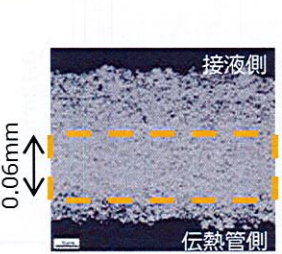
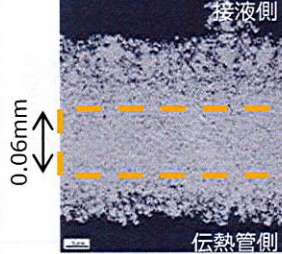
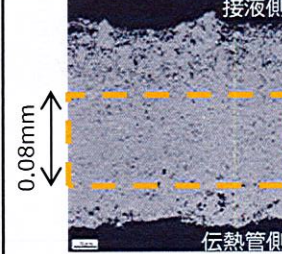
スケール回収位置	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.04	0.06	0.10	0.08	0.06
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	—	—	—	—	—

スケール回収位置	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.1	約0.1	約0.1	約0.1
稠密層厚さ(mm)	0.10	0.06	0.04	0.04	0.06
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	—	—	—	—	—

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（11／13）

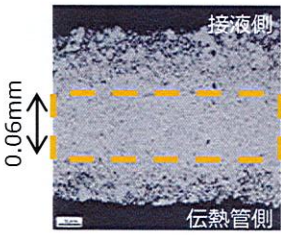
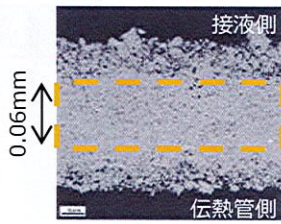
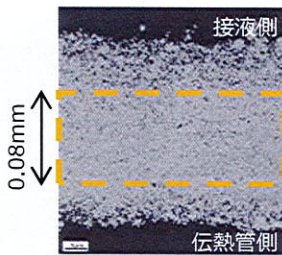
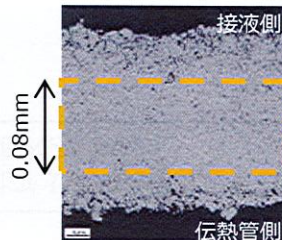
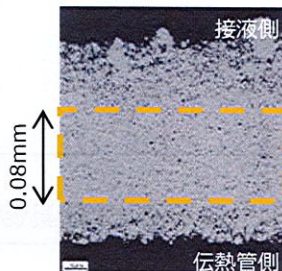
<断面観察結果（11/12）>

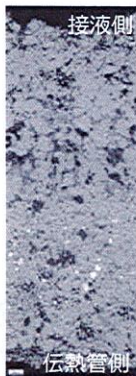
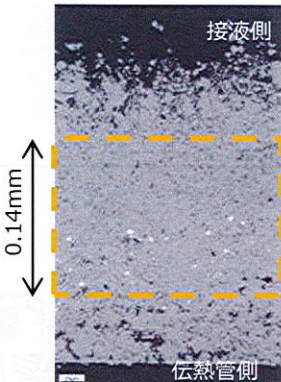
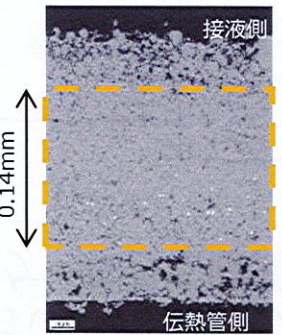
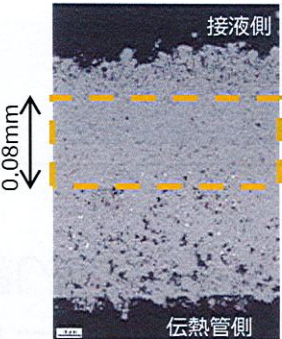
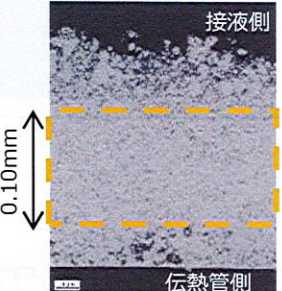
スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.08	0.08	0.12	0.10	0.10
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	—	—	—	—	—

スケール回収位置	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.1	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.10	0.12	0.06	0.06	0.08
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	—	—	—	—	—

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（12／13）

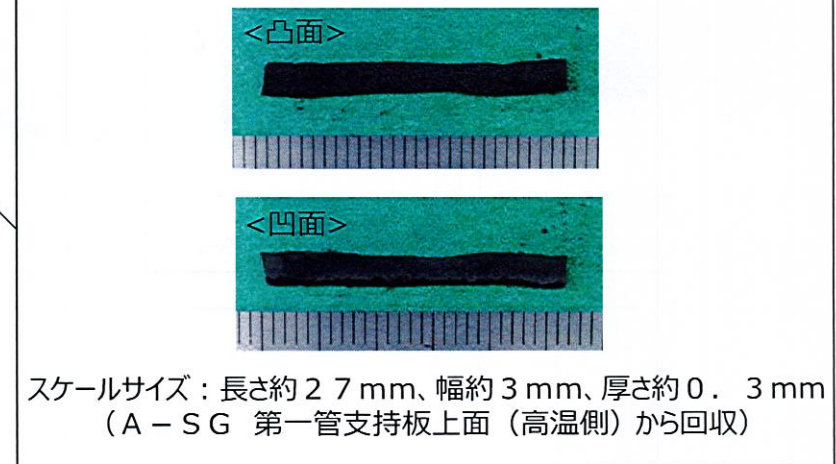
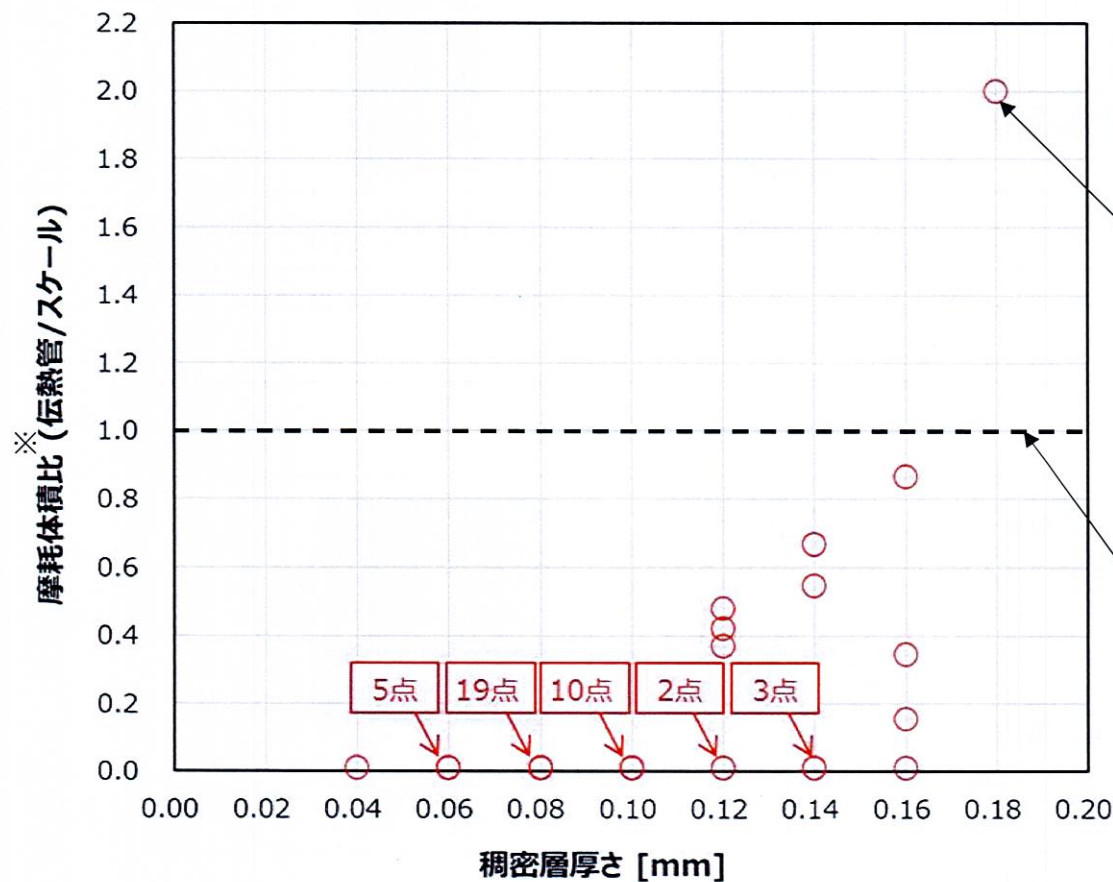
<断面観察結果（12/12）>

スケール回収位置	C-SG 管板上 (高温側)	C-SG 管板上 (高温側)	C-SG 管板上 (高温側)	C-SG 管板上 (高温側)	C-SG 管板上 (高温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.06	0.06	0.08	0.08	0.08
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	—	—	—	—	—

スケール回収位置	A-SG 第三管支持板上 (低温側)	A-SG 第三管支持板上 (低温側)	A-SG 第三管支持板上 (低温側)	A-SG 第三管支持板上 (低温側)	A-SG 第三管支持板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.6	約0.3	約0.3	約0.3	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.00	0.14	0.14	0.08	0.10
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	—	—	—	—	—

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（13 / 13）

比較的大きなスケール50個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。



摩耗体積比が1.0を超えた場合、伝熱管の減肉量がスケール摩滅量よりも大きくなる。

※ 摩耗体積比（伝熱管/スケール）：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

スケール剥離による減肉信号への影響

1. 概要

減肉信号とスケール付着信号は、周波数間の振幅・位相の相関関係が異なるため、スケール付着箇所の信号は MIX フィルタを適用することで消去されるが、減肉信号は消去されない。そこで、実機で検出された信号と、スケール付着・剥離（EDM スリット有り）およびスケール付着・剥離（EDM スリット無し）の信号を比較し、スケール付着箇所の信号と減肉信号の違いを実験的に示した。また、局所的なスケール剥離について、ECT での信号検出性を確認した。

2. 試験方法

2.1 スケール付着・剥離（EDM スリット有り）の試験片データ

深さ 59%，長さ 5mm，幅 0.4mm の外面周方向矩形 EDM スリットが付与された伝熱管外面に四三酸化鉄を薄く延ばした厚さ 1.0mm 程度の模擬スケールを貼り付け、スリット直上に当たる部分に、スリット同様の切れ目を入れた。この伝熱管で ECT データを取得した。

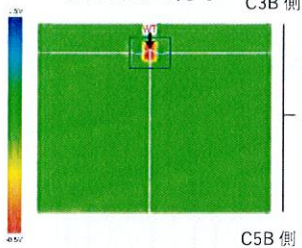
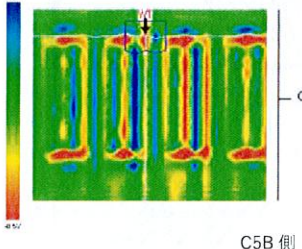
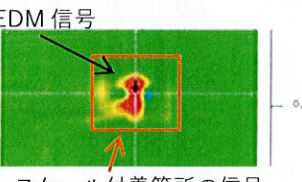
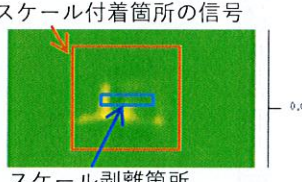
2.2 スケール付着・剥離（EDM スリット無し）の試験片データ

伝熱管外面に四三酸化鉄を薄く延ばした厚さ 1.0mm 程度の模擬スケールを貼り付け、模擬スケールに長さ約 4mm(周方向)、幅約 0.5mm(軸方向)の切れ目を入れ、局所的なスケール剥離を模擬した。この伝熱管で ECT データを取得した。

3. 結果

取得したデータを表 1 に示す。

表 1 実機波形とスケール付着・剥離（EDM スリット有り）、スケール付着・剥離（EDM スリット無し）比較

実機波形 (A-SG X9,Y22) MIX	スケール付着・剥離 (EDM スリット有り) MIX	スケール付着・剥離 (EDM スリット無し) MIX
信号検出有り C3B 側  C5B 側	信号検出有り  MIX フィルタによりスケール付着箇所の信号は消去されたが、EDM スリット信号は検出された。	信号検出なし  MIX フィルタによりスケール付着箇所の信号は消去された。
実機波形 (A-SG X9,Y22) 100kHz	スケール付着・剥離 (EDM スリット有り) 100kHz	スケール付着・剥離 (EDM スリット無し) 100kHz
 C3B 側 C5B 側	EDM 信号  スケール付着箇所の信号 スケール付着箇所の信号および EDM スリット信号が検出された。	スケール付着箇所の信号  スケール剥離箇所 スケール付着箇所に信号は確認できるものの局所的なスケール剥離箇所は信号検出されず。

4. まとめ

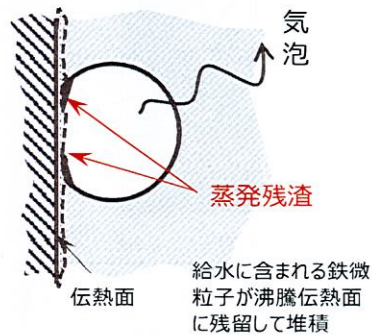
- ・スケール付着・剥離（EDM スリット有り）の試験片を用いた検証結果より、スケール付着箇所の信号は MIX フィルタにより消去されるが、EDM スリットの信号は消去されず、有意な信号として検出される。
 - ・スケール付着・剥離（EDM スリット無し）の試験片を用いた検証結果より、局所的なスケール剥離箇所では信号が検出されない。
- ⇒実機波形は MIX フィルタを適用しても有意な信号が検出されていることから、スケール付着や局所的なスケール剥離の信号ではなく、減肉信号と考えられる。

以上

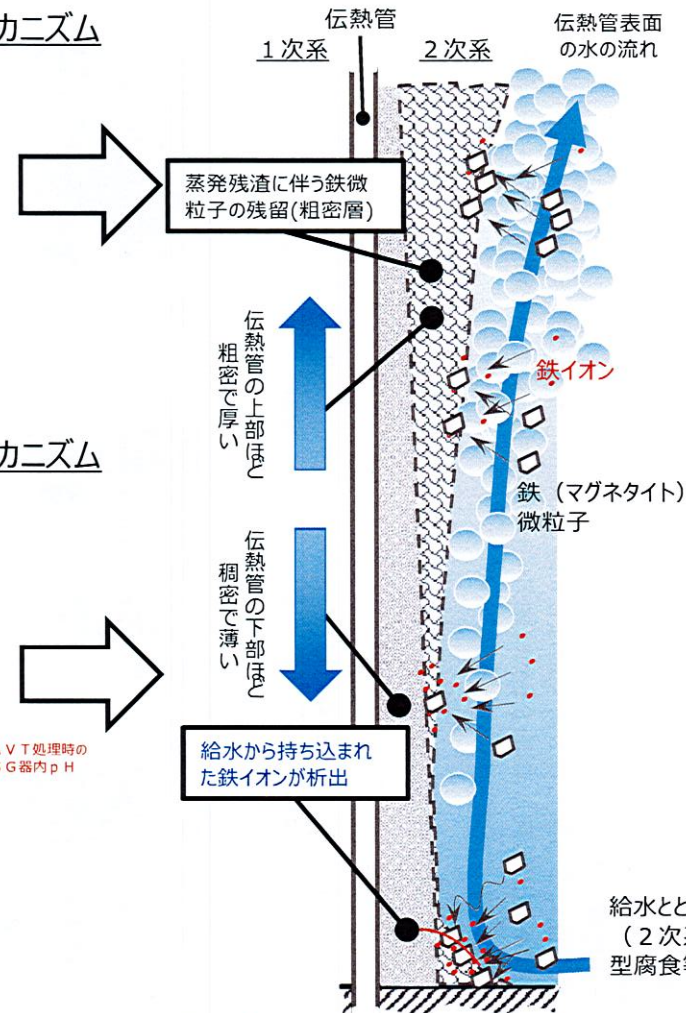
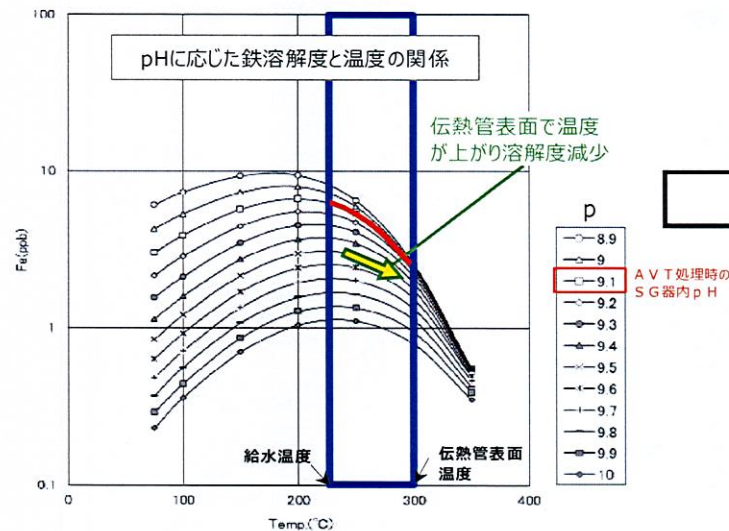
スケール生成メカニズム

(平成 8 年 高浜発電所 3 号機 蒸気発生器伝熱管調査報告書の知見を踏まえたイメージ)

伝熱管の上部で支配的なスケール生成メカニズム



伝熱管の下部で支配的なスケール生成メカニズム

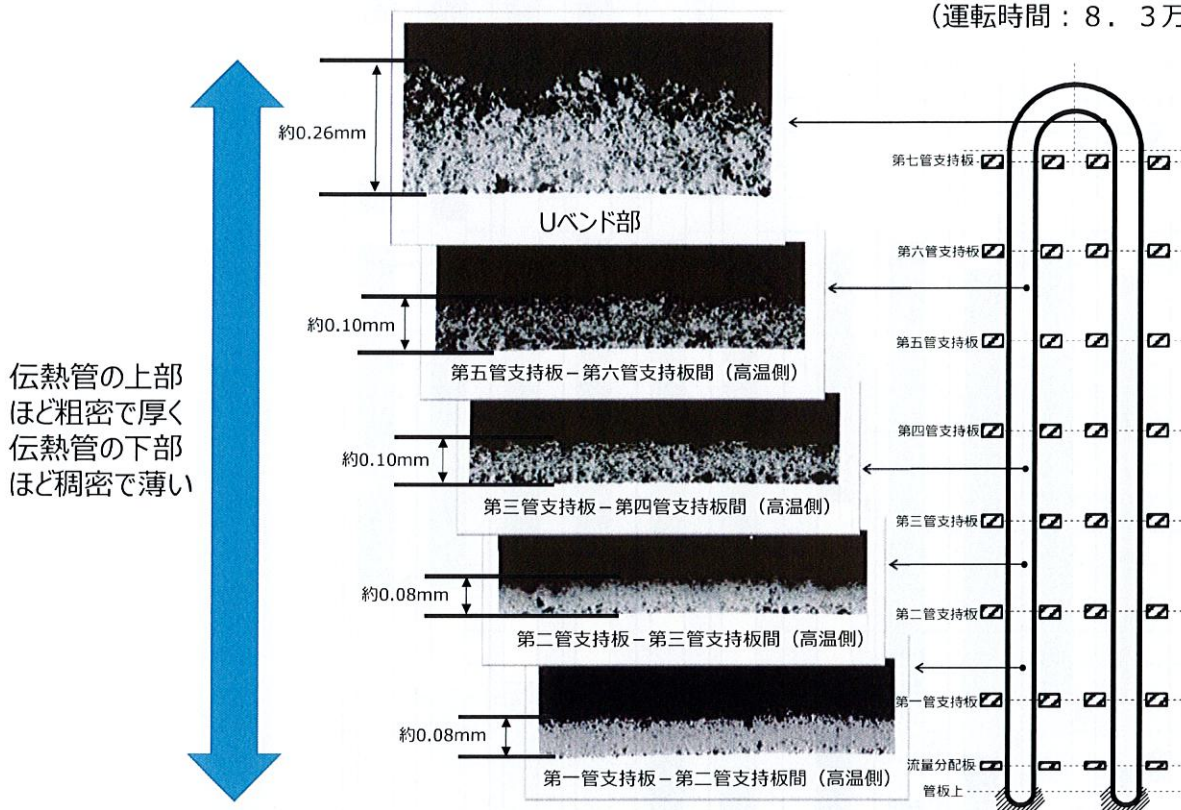


※出典：PWR 5 電力委託調査「2 次系機器のスケール付着挙動評価に係る調査」(平成 1 5 年) 他

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 1 9 日) より引用

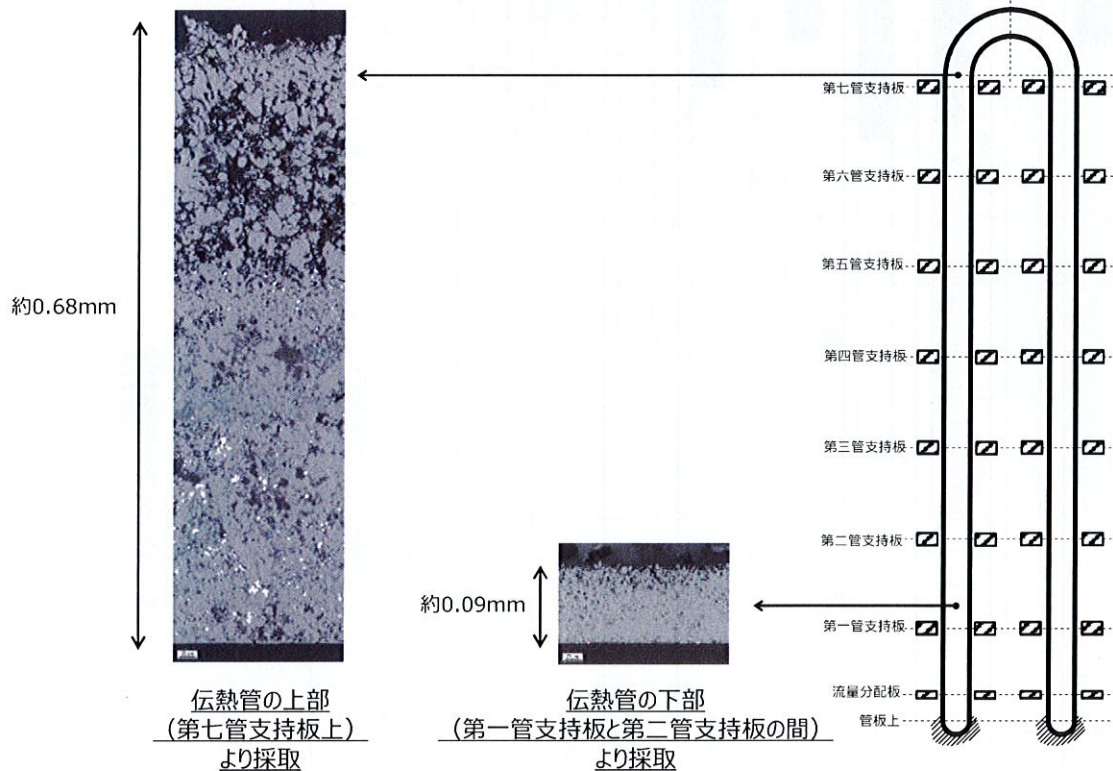
○高浜発電所 3 号機 平成 8 年調査時

(運転時間：8.3 万時間時点)



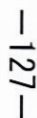
○高浜発電所 4 号機におけるスケール調査実績

伝熱管の上部のスケールは粗密で厚く、伝熱管の下部のスケールは稠密で薄いことを確認した。

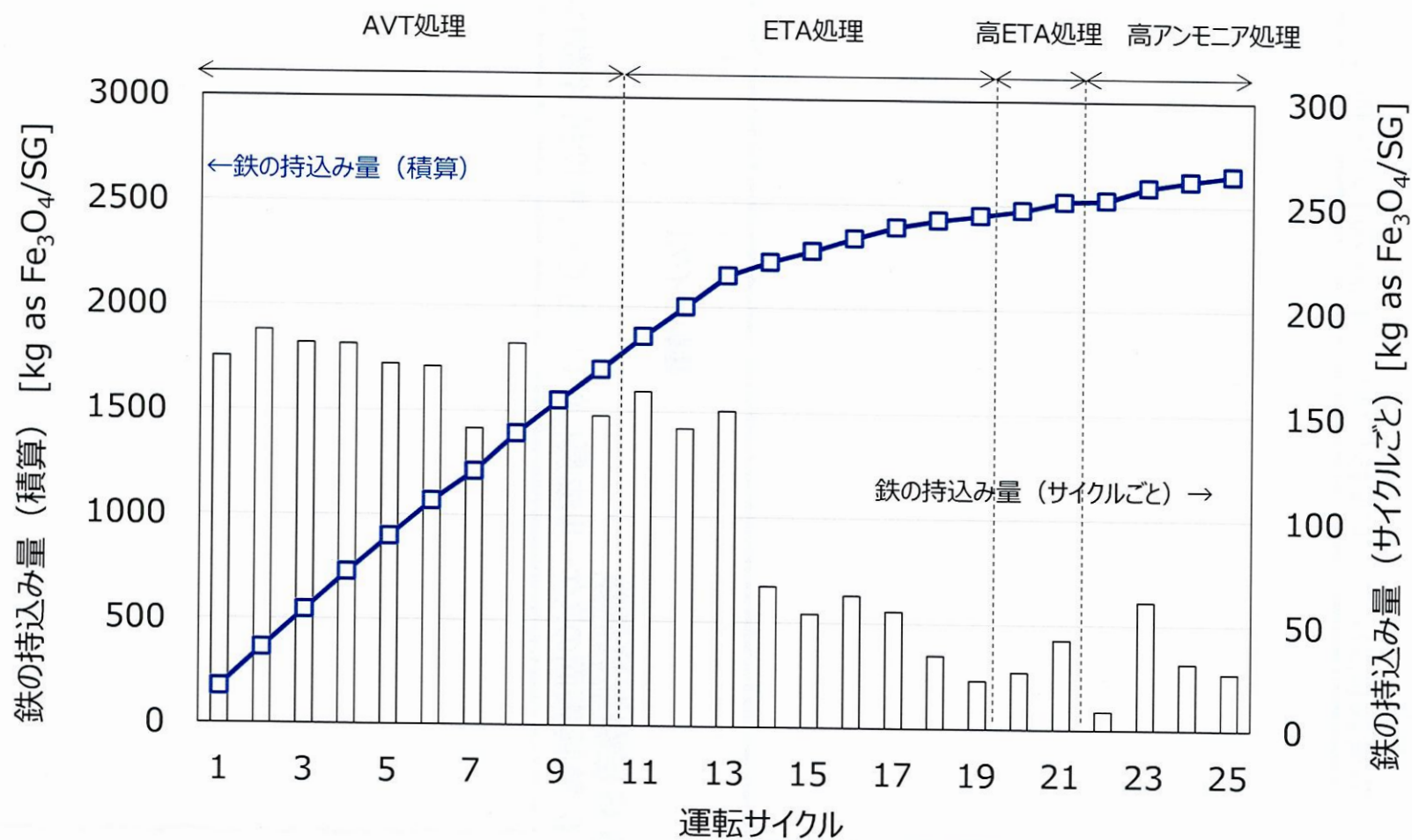


発電用原子炉施設故障等報告書
(高浜発電所 4 号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について)
(2021 年 2 月 19 日) より引用

添付資料-32 (1/2)



高浜発電所 3 号機 鉄の持込み量の推移



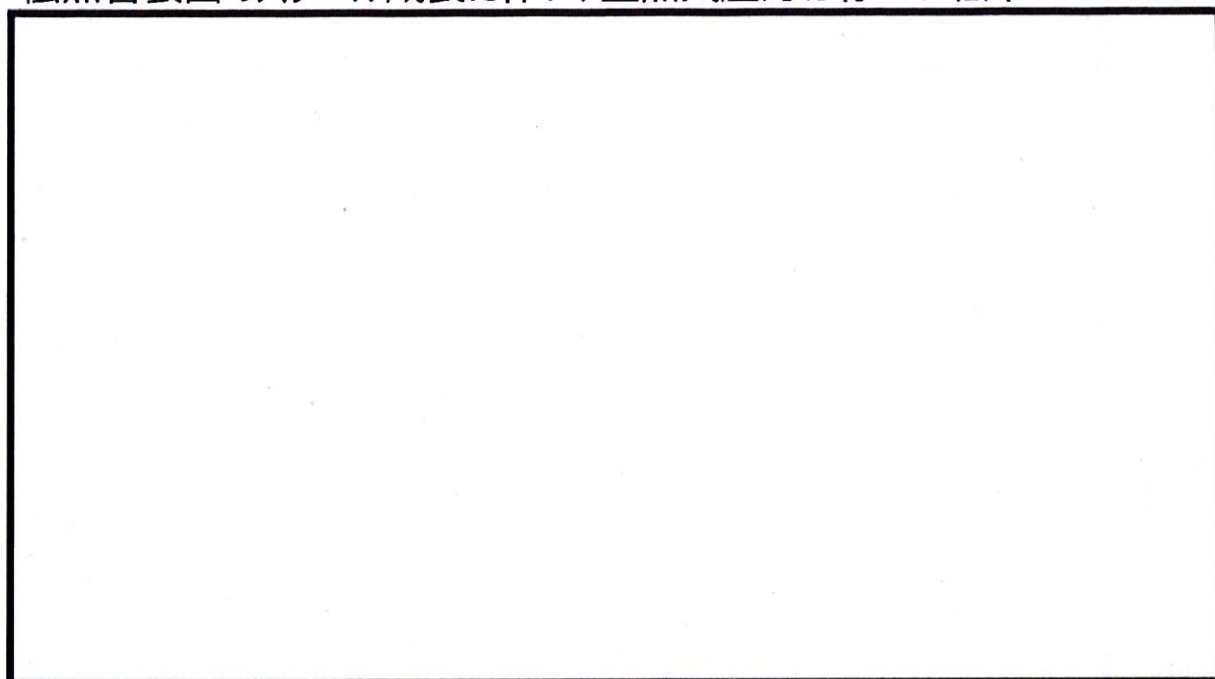
高浜発電所 3 号機 鉄の持込み量の推移

プラント性能指標の推移

主蒸気圧力

伝熱管表面のスケール成長に伴い、主蒸気圧力は徐々に低下

主蒸気圧力[MPa abs]



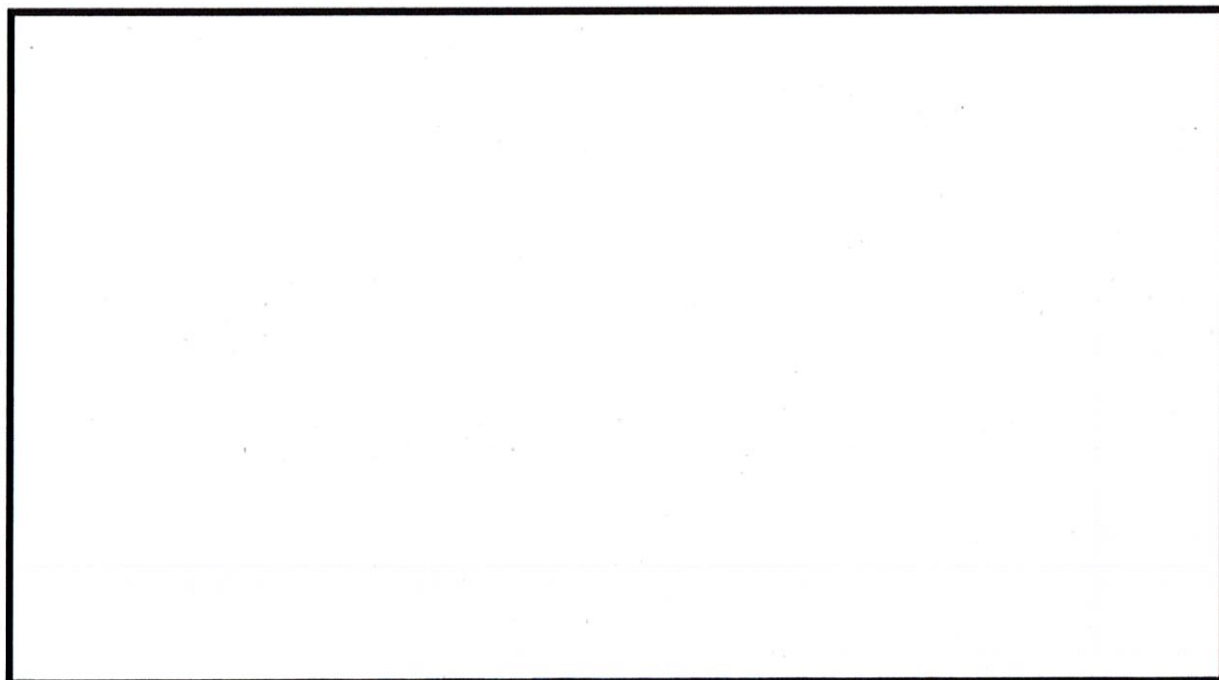
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25

運転サイクル

S G 伝熱抵抗係数

伝熱管表面のスケール成長に伴い、S G 伝熱抵抗係数は徐々に上昇

S G 伝熱抵抗係数[$10^{-4} \text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ \text{F} / \text{Btu}$]



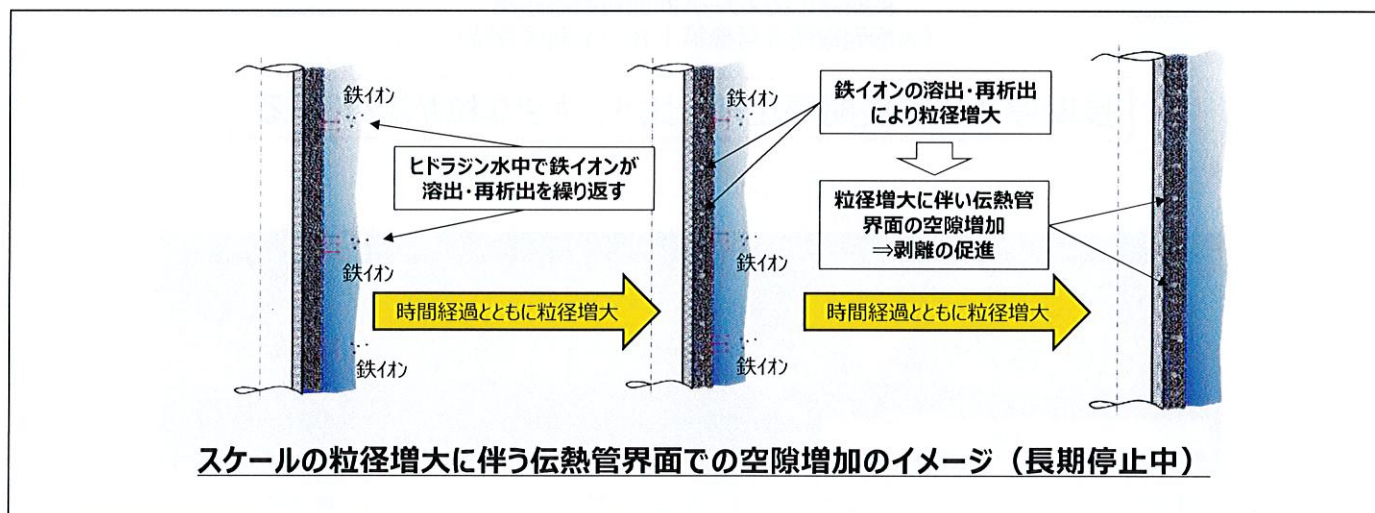
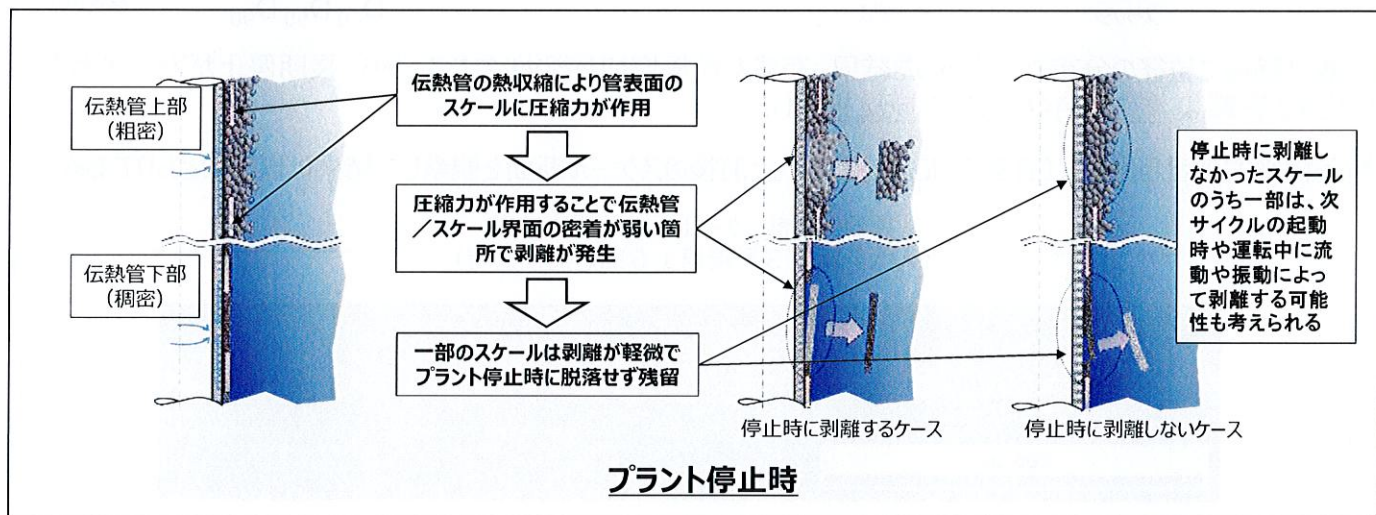
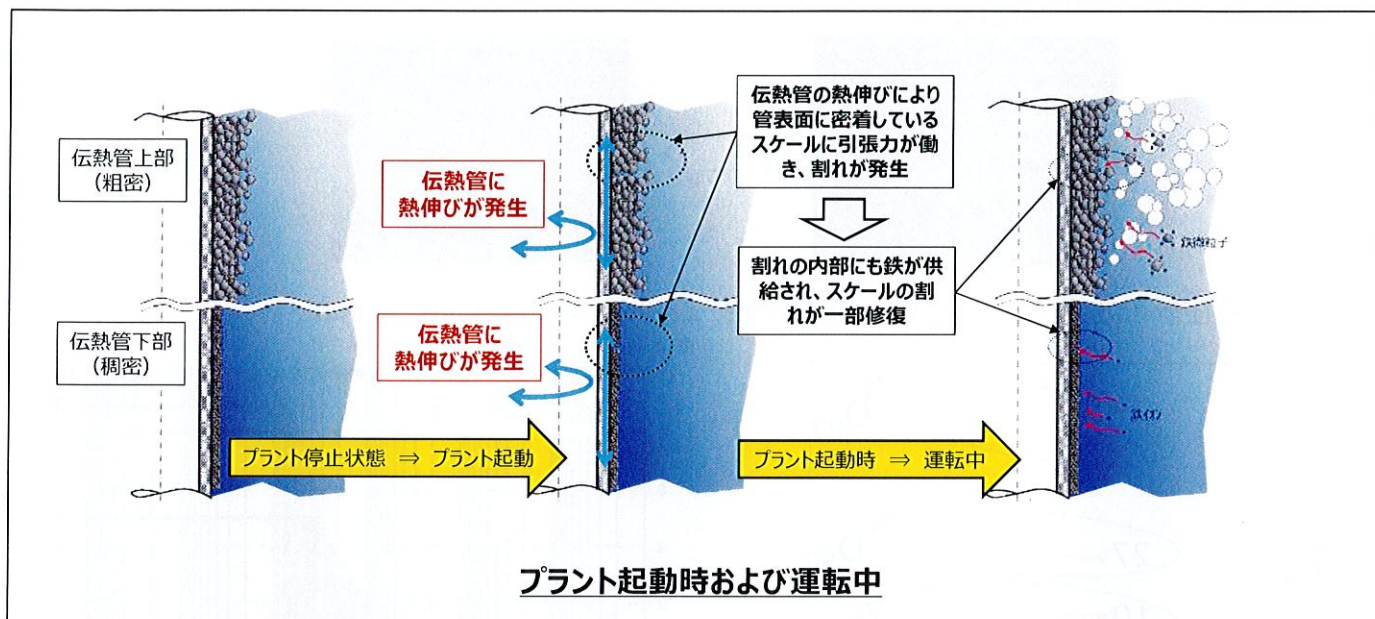
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25

運転サイクル



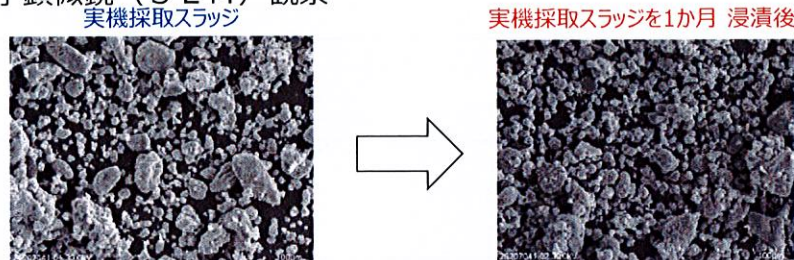
: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

スケール剥離メカニズムイメージ

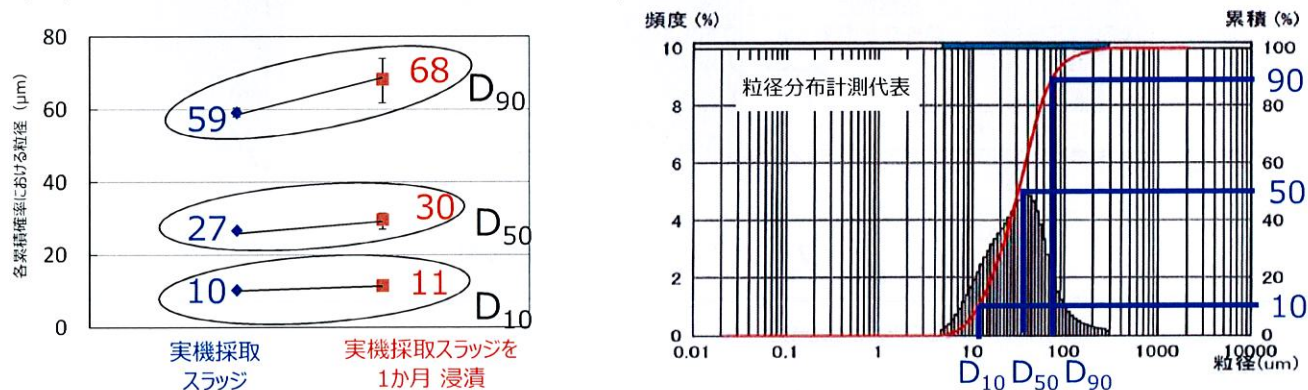


・スケールの粒径増大化を実験で検証すべく、実機（ヒドラジン水による満水保管）と同条件にて、スラッジ（粒の観察を容易にするため粉末状スラッジを使用）をヒドラジン水に浸漬させた試験を1か月間実施した。

(1) 走査型電子顕微鏡（SEM）観察



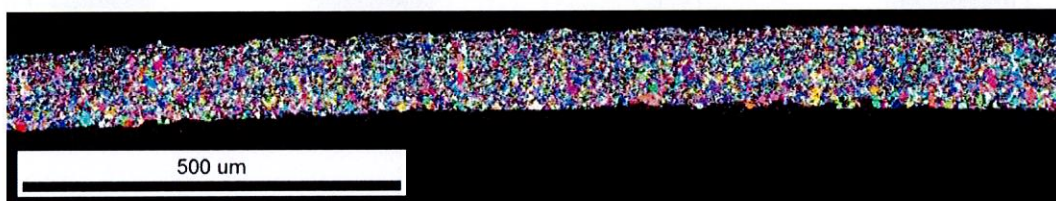
(2) 粒径分布計測（プロット：3回繰り返し計測平均値，エラーバー：3回計測の最大値，最小値）



・浸漬試験後に粒径の分布計測を行った結果、有意な粒径増加が認められたことから、長期停止がスケール性状に及ぼす影響は、粒が大きくなることであると推定した。

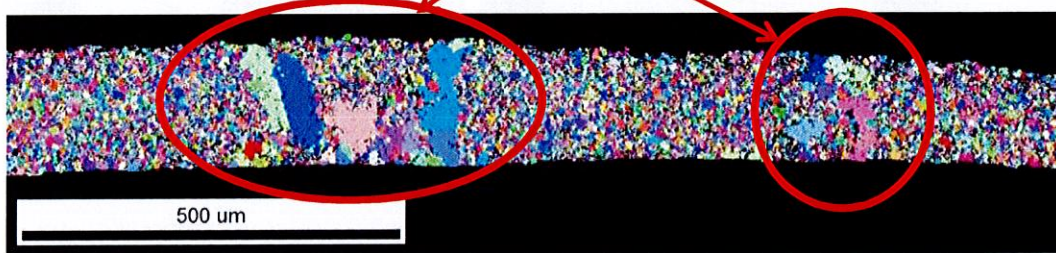
・電子線後方散乱回析法(EBSD)※により長期停止前後のスケール断面を観察した結果は以下のとおりである。

長期停止前スケール断面粒観察結果
(大飯発電所 3号機第 16 回定期検査時)



長期停止後スケール断面粒観察結果
(大飯発電所 3号機第 18 回定期検査時)

長期停止後に長期停止前に比べ、大きな粒が認められる



※：結晶粒サイズ等の情報を取得できる分析手法であり、結晶面が向いている方向によって、異なる色で示すことで、同色の一塊が結晶粒であると識別することができる。

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

スケールのSG 2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

熱流動解析によりSG 2次側器内で管支持板下面に到達するまでのスケール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、推定したスケールの接触状態が実機二相流相当条件においても再現するか検討を行った。

1. SG器内でのスケール挙動の推定

(1) 第三管支持板下面（低温側）

図1にSG 2次側下部の器内流況および想定されるスケールの挙動を示す。

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、管板直上で発生したスケールの場合、管群内の上昇流に乗って流量分配板および各管支持板フロースロット部を通過し、減肉箇所へ到達したことが考えられる。第一管支持板より上方では、管群の高温側と低温側の圧力損失差から、高温側から低温側への水平方向流があることから、第一管支持板および第二管支持板フロースロット部を通過したものが第三管支持板の低温側下面に至ったものと推定される。

なお、第一管支持板上方または第二管支持板上方で発生したスケールを想定した場合においても、発生したアドレスによっては、同様に管群内の上昇流および高温側から低温側への水平方向流に乗り、フロースロット部を通過し、第三管支持板の低温側下面に至る可能性はあると考えられる。

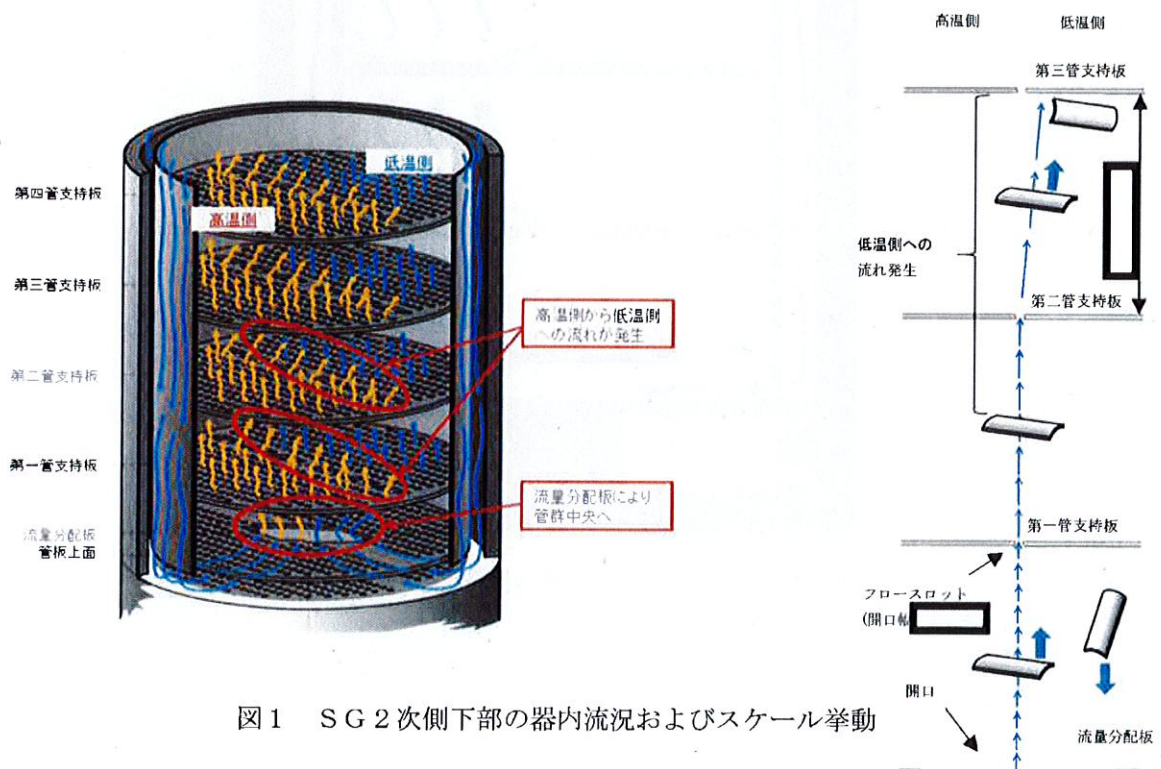


図1 SG 2次側下部の器内流況およびスケール挙動

流れ方向は、管支持板間の平均的な水平方向流速と上昇方向流速を合成して図示した。

□：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。

(２) 第四管支持板下面に到達するまでのスケール挙動の推定

図２に第四管支持板下面に到達するスケールの推定される挙動を示す。

運転中のＳＧ器内２次側の鉛直方向の流体抗力はスケールの重力による落下力より大きい。また、管支持板側面と管群外筒の間にある幅 の隙間があり、図３に示すように第三管支持板上では、外周部から管群内部に向かう流れがあることを流動解析によって確認していることから、上昇流に乗ったスケールが第三管支持板側面と管群外筒の間を通過した後、管群内を上昇しながら内側に向かう水平流れの影響を受けて当該部へ到達したと考えられる。

なお、第一管支持板上方または第二管支持板上方で発生したスケールを想定した場合においても、発生したアドレスによっては、上昇流に乗り、支持板側面と管群外筒を通過し、第四管支持板下面に至る可能性はあると考えられる。

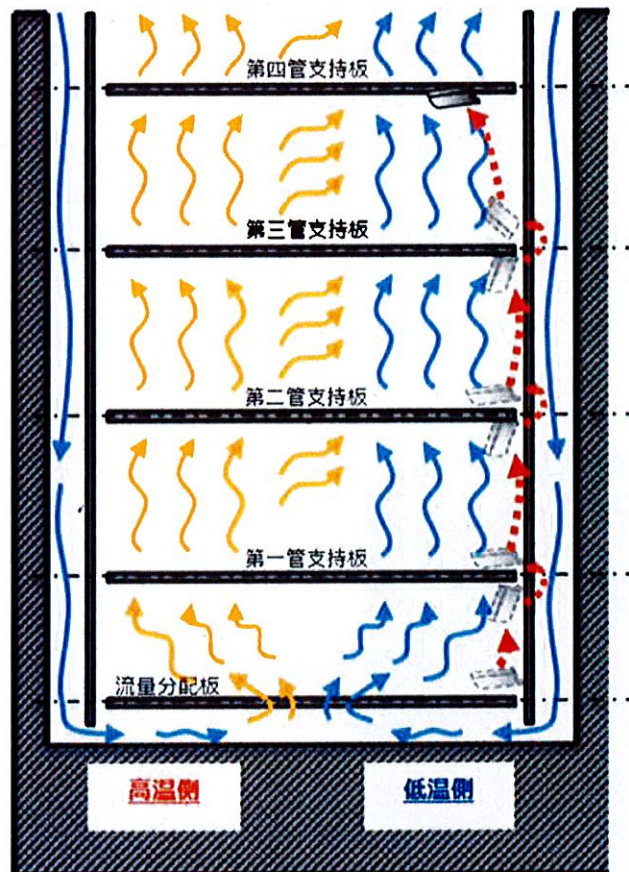


図２ ＳＧ２次側下部の器内流況およびスケール挙動

 : 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。

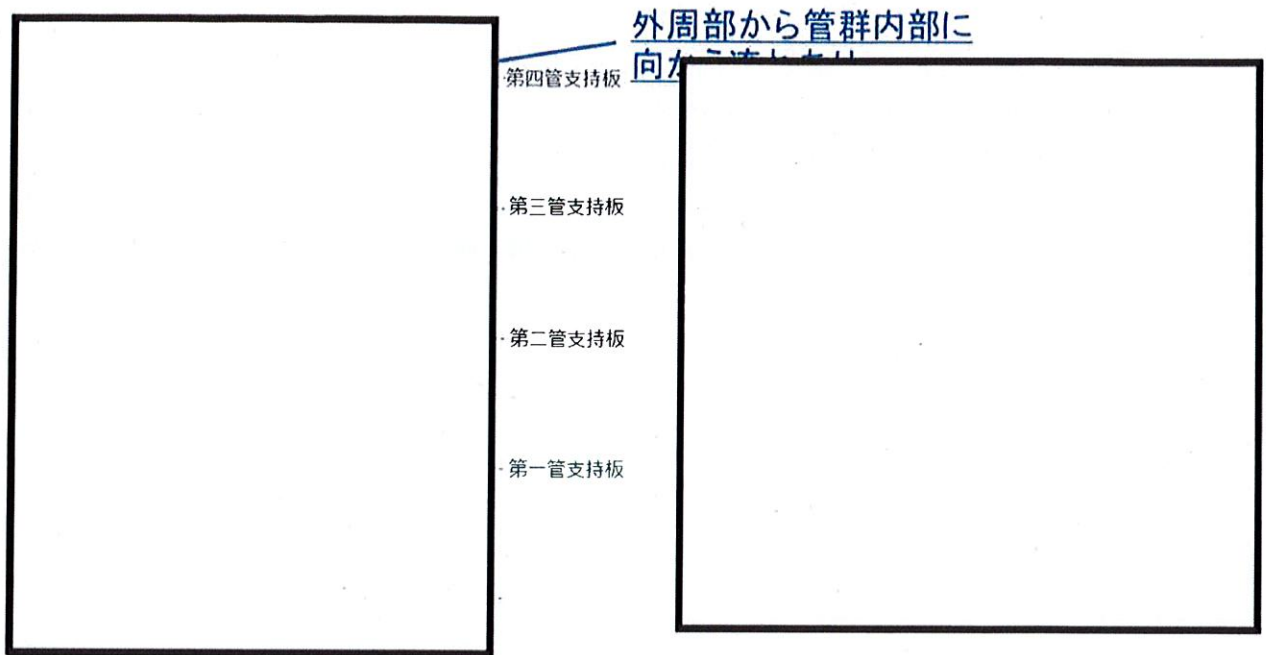


図 3 減肉発生箇所における流動解析結果

(3) 第二管支持板高温側下面に到達するまでのスケール挙動の推定

図 4 に第二管支持板下面に到達するスケールの推定される挙動を示す。

当該部直下近傍の第一管支持板上に残存していたスケールが運転中の上昇流に乗って当該部の管支持板下面に到達したと考えられる。

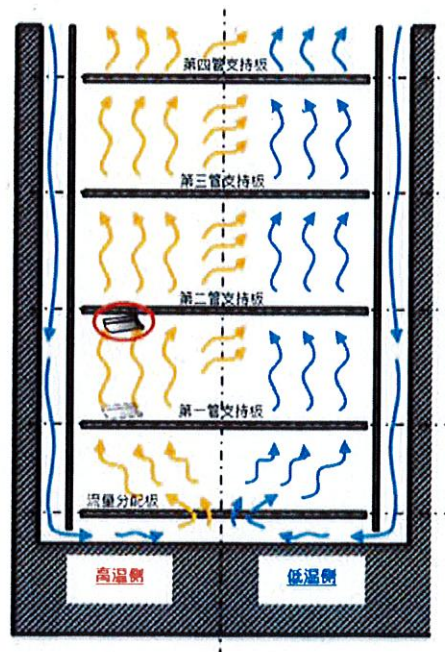


図 4 SG 2 次側下部の器内流況およびスケール挙動

□ : 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。

２．流況モックアップ試験結果を踏まえた検討

高浜発電所４号機第２３回定期検査で実施した流況モックアップ試験の試験流速は実機条件と同等の流体力が発生する流速として設定した。

今回定期検査で確認された減肉箇所における、熱流動解析により求めた流速はいずれも流況モックアップ試験流速と比較して大きいため、スケールはそれぞれの管支持板下面に到達し、伝熱管との接触状態が実機二層流においても維持された可能性があるものと推定した。

< 参考 >

高浜発電所４号機第２３回定期検査における流況モックアップ試験による接触状態の再現

(１) 試験方法

３次元熱流動解析で得られるＳＧ２次側流況を再現する水空気試験装置を用いて、Ｃ２、Ｃ３およびＣ４スケールの各模擬スケール片について、推定した接触状態が実機二相流相当条件下において管支持板下面で維持されるか確認を行った（図１参照）。

- ・試験流速：
- ・模擬スケール片形状：約 18mm×約 10mm×約 0.3mm
(Ｃ２スケールと同一形状、凹面側で管支持板下面に拘束)
- ・模擬スケール片形状：約 23mm×約 11mm×約 0.3mm
(Ｃ３スケールと同一形状、凸面側で管支持板下面に拘束)
- ・模擬スケール片形状：約 21mm×約 10mm×約 0.3mm
(Ｃ４スケールの破損前想定形状と同一形状、凹面側で管支持板下面に拘束)

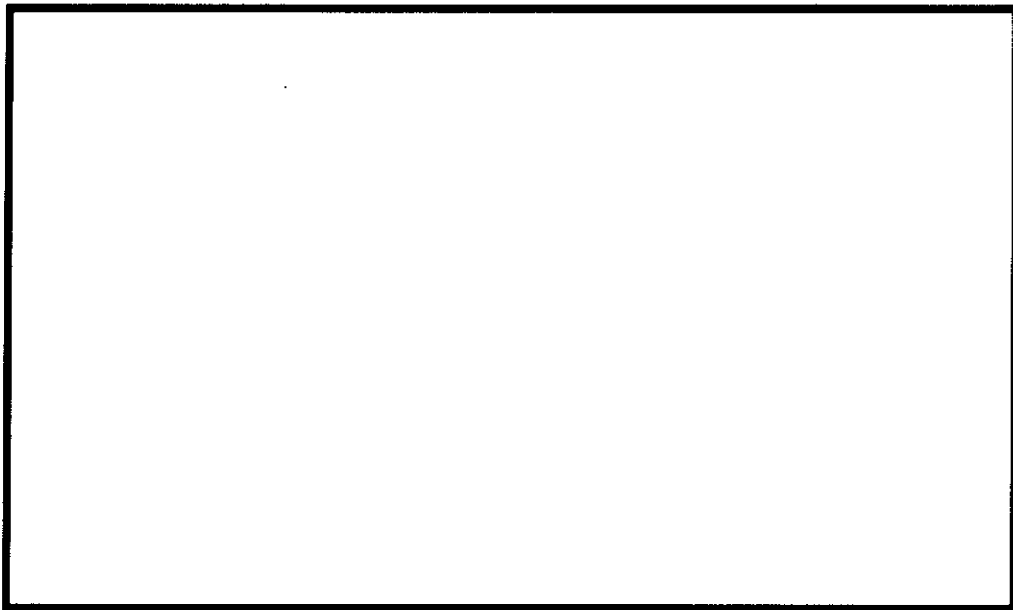


図１ 水空気試験装置概要

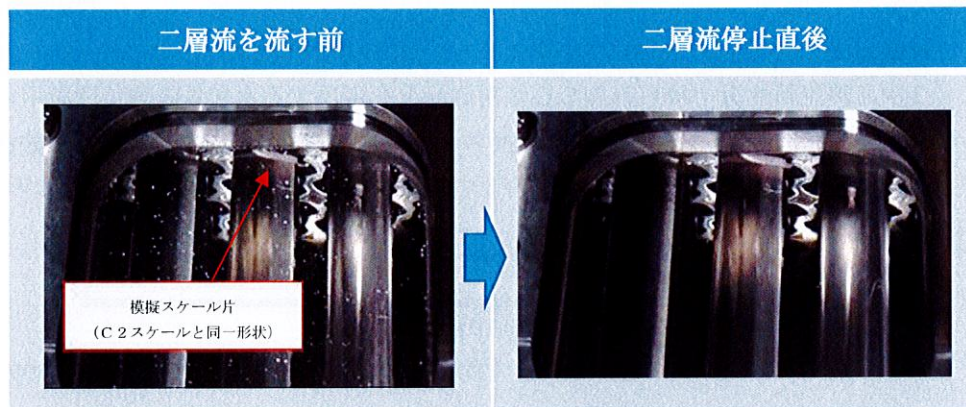
(２) 試験結果

試験装置内の水－空気二相流中で、模擬スケール片はいずれも管支持板下面で推定した接触状態が維持されたことから、スケール片は凹面・凸面のいずれであっても管支持板下面で保持されうることを確認した（図２参照）。

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。

< C 2 スケールと伝熱管 X 5 5, Y 8 との接触状態を想定 >



< C 3 スケールと伝熱管 X 2 1, Y 8 との接触状態を想定 >



< C 4 スケールと伝熱管 X 5 5, Y 3 との接触状態を想定 >



図 2 水空気試験結果

以上の結果から、今回の原因と考えられるスケールは、S G 器内で伝熱管から剥離後に管群内の上昇流および高温側から低温側への水平方向流に乗って第三管支持板低温側下面に到達し、伝熱管との接触状態が実機二相流中においても維持された可能性があるものと推定した。

以 上

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

前回の定期検査における薬品洗浄の実施結果（ 1 ／ 3 ）

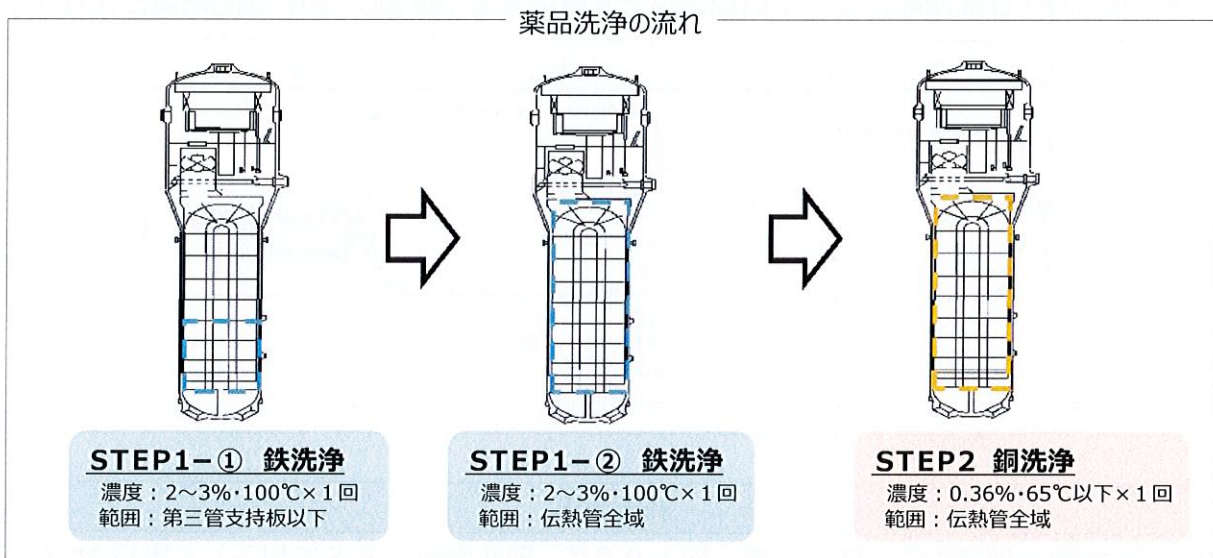
＜前回の定期検査における薬品洗浄の実施方法＞

○鉄洗浄の条件については、洗浄試験の結果から、薬品濃度は 2 % ～ 3 %、洗浄温度は 1 0 0 ℃とした。

○洗浄範囲については、伝熱管全域を対象とした。なお、今後のプラント運転に更なる万全を期すため、スケールの生成メカニズムから、スケールは下部ほど稠密で薄く、上部ほど粗密で厚いことが分かっていることから、第三管支持板以下については、更に 1 回追加洗浄を行った。

○なお、鉄洗浄後に併せて銅洗浄を実施しているが、これは伝熱管の外面減肉対策ではなく、伝熱管の腐食防止のための予防保全※¹の位置づけである。

○その他の洗浄に係る諸条件は、これまでの国内施工実績と同様とした。



※ 1：運転中の S G 器内は、ヒドラジンで脱酸素しており還元性雰囲気を維持しているため、S G 器内に残留したスケール中の銅は溶出することなく、金属銅のまま安定的に存在し、伝熱管の腐食を引き起こす可能性はない。しかしながら、何らかの理由によりスケール中の金属銅が溶出した場合でも、腐食（粒界腐食割れやピitting）要因となる電位が上昇することを防止するため、念のため銅洗浄を実施し、除去したものである。

前回の定期検査における薬品洗浄の実施結果（ 2 ／ 3 ）

<薬品洗浄の実施結果>

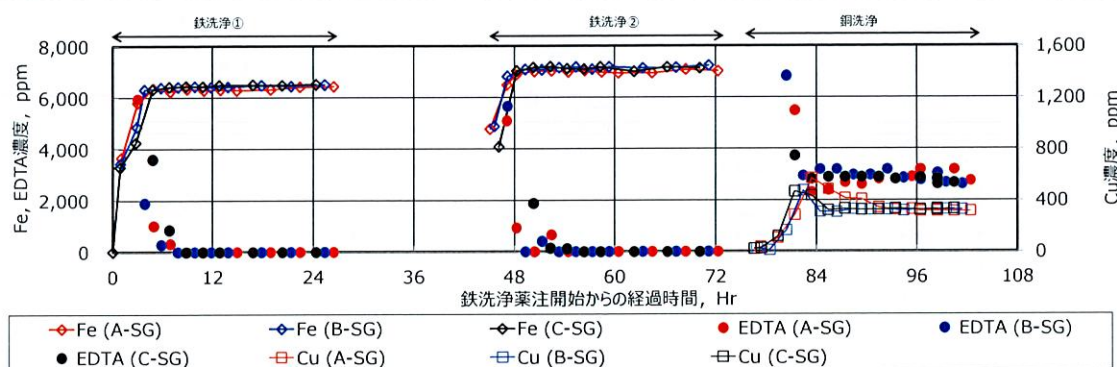
○以下の水質挙動から、薬品洗浄が適切に実施できていることを確認した。

○洗浄中の S G 器内水の鉄濃度と洗浄水位から算出した鉄除去量は、約 6 7 0 k g / S G（STEP1-①鉄洗浄で約 1 9 0 k g / S G、STEP1-②鉄洗浄で約 4 8 0 k g / S G）であることを確認した。（S G 器内の鉄持込み量は約 2 , 6 5 0 k g / S G）

○また、洗浄中のSG器内水の銅濃度と洗浄水位から算出した銅除去量は、約 2 4 k g / S Gであることを確認したことから、S G 器内の銅はほぼ除去できたと考えられる。（S G 器内の銅持込み量は約 2 9 k g / S G）

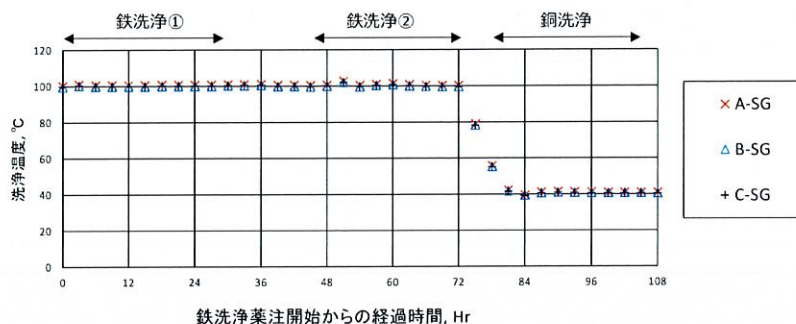
溶解鉄濃度および銅濃度の推移

STEP1-①鉄洗浄およびSTEP1-②鉄洗浄ともに洗浄開始後 4 ～ 5 時間で溶解鉄濃度が飽和しており、EDTA※²濃度が 1 0 0 p p m 未満となったことから、EDTAがほぼ全量使用され、鉄の溶解反応は完了した。また、STEP2 銅洗浄では洗浄開始後 1 7 時間程度で溶解銅濃度が飽和しており、銅の溶解反応は完了した。



洗浄温度

洗浄温度が計画通り、所定の値（鉄洗浄時：約 1 0 0 ℃、銅洗浄時：6 5 ℃以下）に維持されていることを確認した。

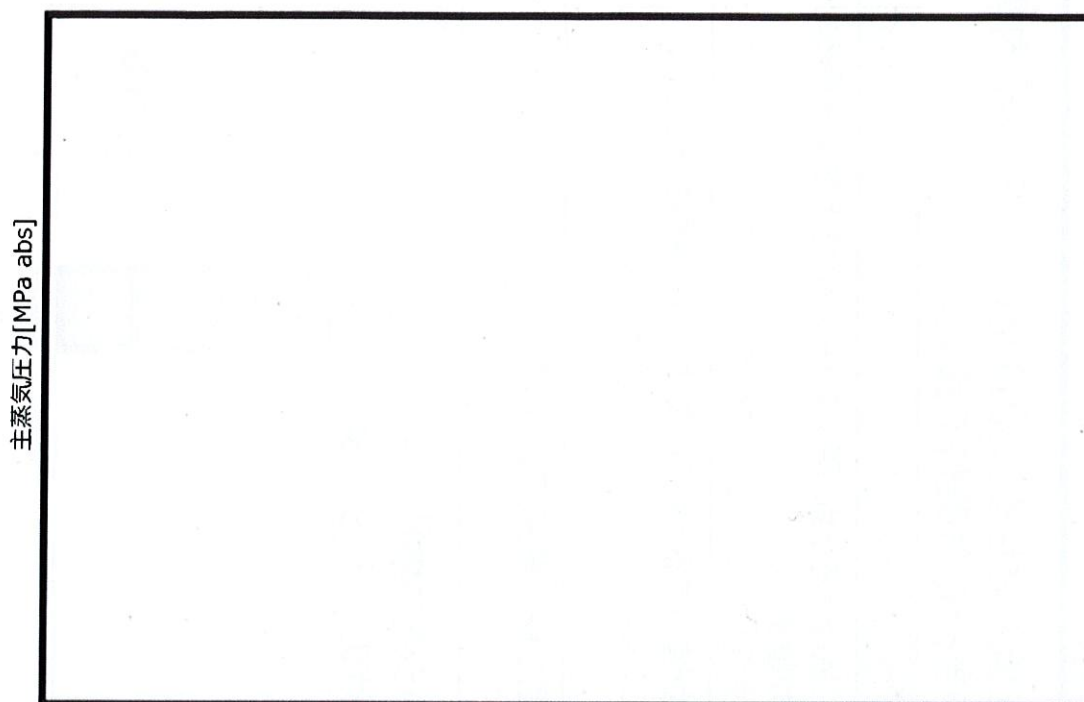


※ 2 : エチレンジアミン四酢酸

前回の定期検査における薬品洗浄の実施結果（ 3 ／ 3 ）

<主蒸気圧力の向上>

○前回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たことを確認した。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。



<S G 伝熱抵抗係数の低下>

○S G 伝熱抵抗係数について、第 2 5 運転サイクル初期の評価を実施した。

評価の結果、従来はサイクルを重ねる度に伝熱管表面のスケールが成長し、S G 伝熱抵抗係数は徐々に上昇する傾向であったが、今サイクルは、前サイクルに比べ低下を確認した。

運転サイクル	S G 伝熱抵抗係数 ($10^{-4} \text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ \text{F} / \text{Btu}$) 運転サイクル初期
2 5 サイクル (今回評価)	<u>1.33</u>
2 4 サイクル	1.81
2 3 サイクル	1.77

: 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。

1. 前回の薬品洗浄条件設定の考え方

- 稠密スケールの一部を溶解して稠密層厚さを低減させること目的として、S G 器内構造物への影響が少なく、スケール脆弱化効果が期待できる洗浄条件を設定した。

	設定条件	根拠
EDTA※濃度	～ 3 %	- 鉄の溶解量はEDTA濃度に依存するため、高いスケール脆弱化効果を得るためには、洗浄液中のEDTA濃度は高いほうが望ましい。 → S G 器内構造物への影響を考慮して、国内実機適用実績の最大濃度3 %を上限に設定
温度	100 ℃	- 温度が高いほど鉄との反応が進行するため 80 ℃よりも高温側が望ましい。 → 洗浄時のSG器内が均一になること、および、作業安全の観点から沸騰しない温度として、100℃を上限に設定
時間	24 時間	- 薬品洗浄実績から、24時間で鉄溶解完了している。 → 洗浄時間は24時間で設定

- ラボ試験では、スケールのみでS G 器内スラッジを模擬しており、実機に存在する反応面積が大きい粉末状のスラッジを実際に共存させた試験は実施していなかった

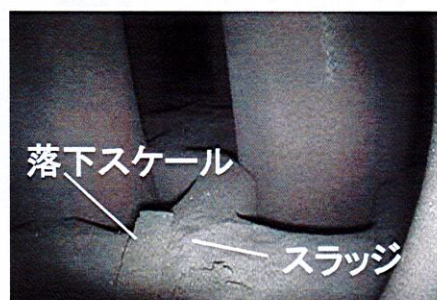


図1 スケール回収画像 (C-SG 第一管支持板)
(高浜発電所4号機前回(第23回)定期検査の薬品洗浄前)

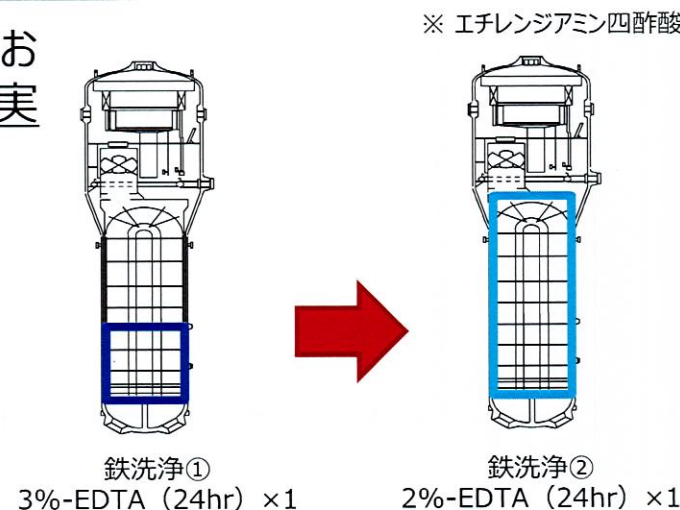


図2 実機での前回薬品洗浄のステップ

2. SG器内スラッジの影響確認試験

- SG器内スラッジ量は、SG器内全体の鉄量に比べ、大きな割合を占めるものではないが、表面積が大きいスラッジが共存することにより、スケールの脆弱化効果を低減する可能性が考えられる。
- そこで、スラッジ共存環境下における洗浄効果に対する影響を確認するため、前回の薬品洗浄条件（EDTA3%+2%）でスラッジを共存させた試験を実施した。

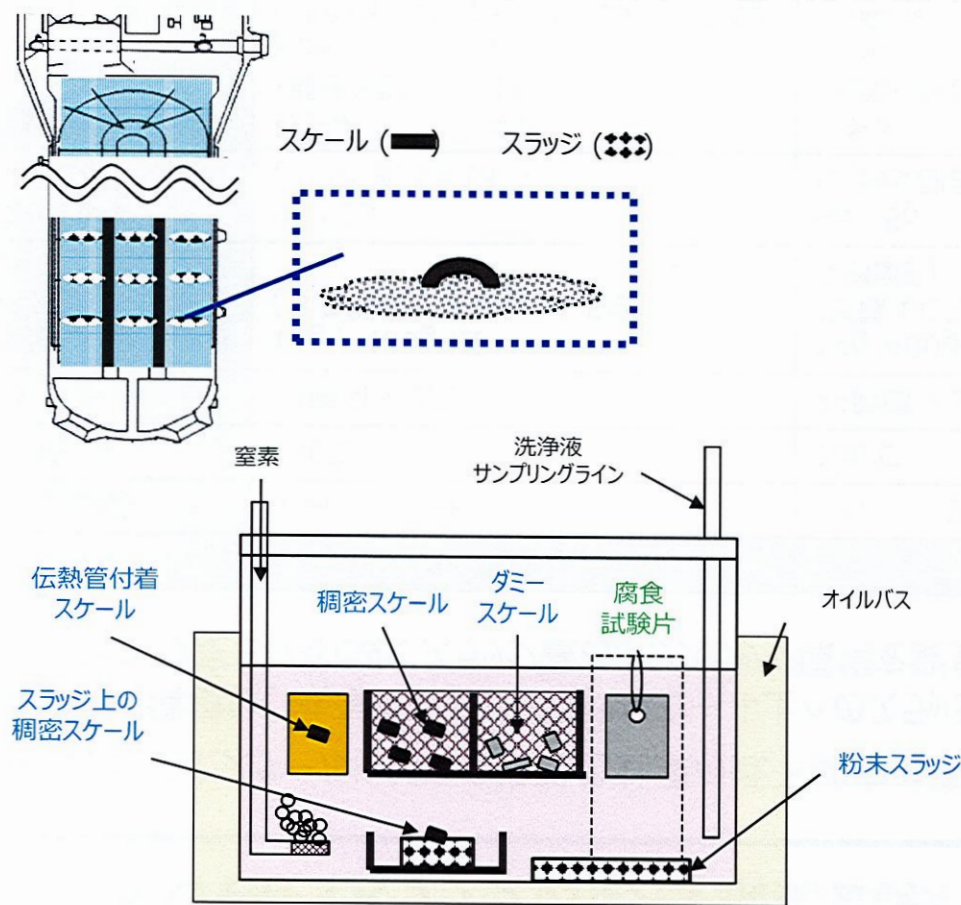
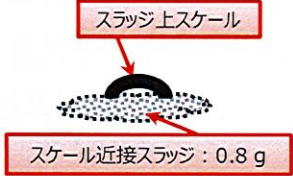
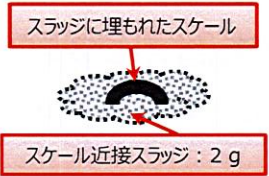
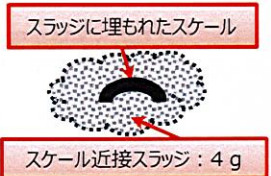


図3 試験装置の概略図

項目	目的
伝熱管付着スケール	伝熱管に付着したスケールを模擬した、スケールの片側からの洗浄効果を確認するための試験片
稠密スケール	洗浄前後のスケール減量や稠密層の変化を評価するための試験片
ダミースケール	試験容器内の洗浄液/スケール量を調整するためのスケール（洗浄前後の固体を区別しない）
スラッジ上の稠密スケール	スラッジ上に落下したスケールに対する洗浄効果を確認するための試験片
粉末スラッジ	試験容器内の洗浄液/スラッジ量を調整するためのスラッジ
腐食試験片	実機の構成材料の腐食量を評価する試験片。接液面積比は実機を模擬。

3. S G 器内スラッジの影響確認試験 ー 試験条件ー

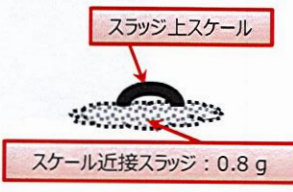
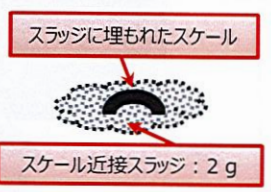
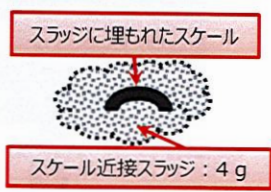
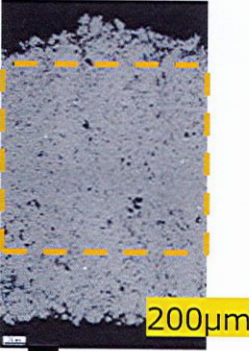
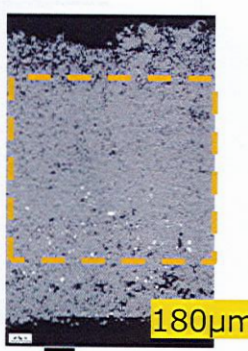
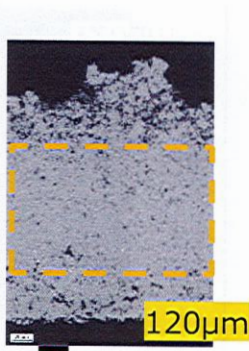
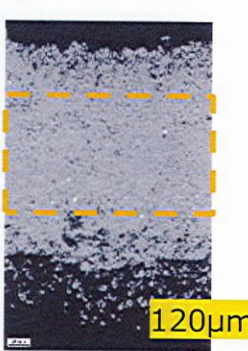
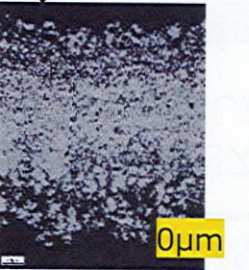
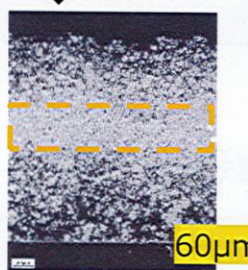
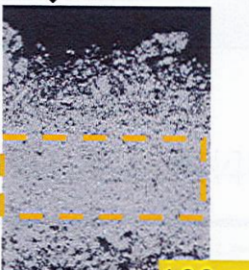
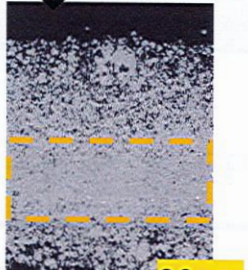
- スラッジ上スケールに対する脆弱化効果の低下傾向は確認（試験①）
- 実機環境は、共存するスラッジ量やスケール上へのスラッジ堆積状況が多種多様であり、洗浄効果が異なることが想定されるため、スラッジ量およびスラッジ環境を変更した影響確認試験を実施（試験②，③）

	試験①	試験②	試験③
EDTA濃度	3 % → 2 %	3 % → 2 %	3 % → 2 %
温度	100℃	100℃	100℃
時間	24時間 x 2回	24時間 x 2回	24時間 x 2回
スケール・スラッジ量 ／液量	11g / 400g-液 (S G 器内想定鉄量の1.5倍)	14g/400g-液 (試験①にスケール量を合わせ、スラッジを増量)	11g / 400g-液 (試験①に鉄量を合わせ、スラッジを増量)
スケール量： スラッジ量	9g : 2g (スラッジ割合=18 %)	9g : 5g (スラッジ割合=36 %)	7g : 4g (スラッジ割合=36 %)
想定鉄量内訳	・スケール 9 g ・稠密(個体) 1枚 ・スラッジ 2 g (粉末スラッジ : 1.2g + スケール近接スラッジ : 0.8g) ・スラッジ上スケール 1枚 ・伝熱管スケール 1枚	・スケール 9 g ・稠密(個体) 1枚 ・スラッジ 5 g (粉末スラッジ : 3g + スケール近接スラッジ : 2g) ・スラッジ上スケール 1枚 ・伝熱管スケール 1枚	・スケール 7 g ・スラッジ 4 g (粉末スラッジ : 0g + スケール近接スラッジ : 4g) ・スラッジ上スケール 1枚
試験環境			

4. S G器内スラッジの影響確認試験

－試験結果－

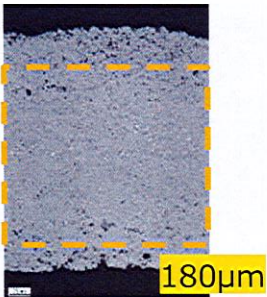
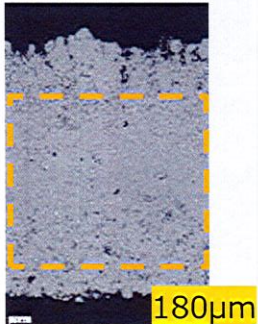
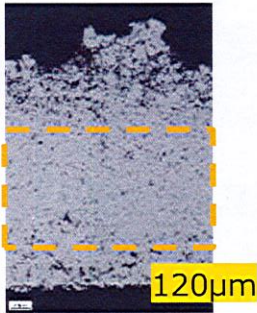
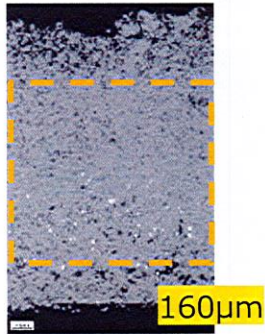
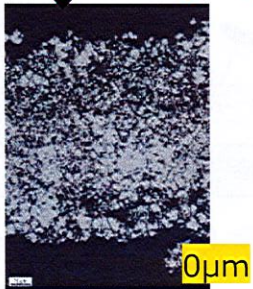
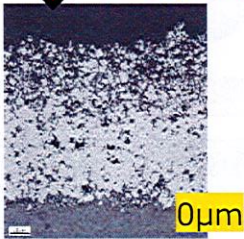
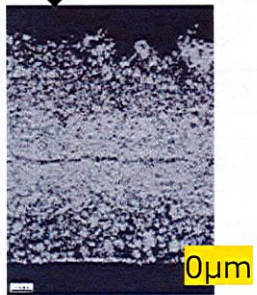
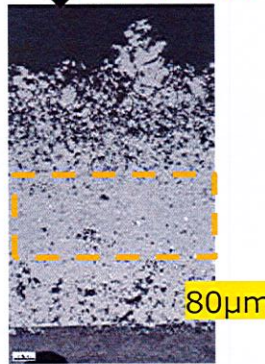
- 試験の結果、スラッジとスケールが接していなければ十分な脆弱化効果があるが、スラッジと接していると脆弱化効果が低減することを確認した。
- また、スケール上にスラッジが堆積しているような状況では、さらに効果が低減する傾向を確認した。

	過去試験結果 (T4#23)	試験①	試験②	試験③
スラッジの添加状況	 スケールのみ	 スラッジ上スケール スケール近接スラッジ：0.8 g	 スラッジに埋もれたスケール スケール近接スラッジ：2 g	 スラッジに埋もれたスケール スケール近接スラッジ：4 g
洗浄前	 200μm	 180μm	 120μm	 120μm
洗浄後	 0μm 200μm減	 60μm 120μm減	 100μm 20μm減	 80μm 40μm減

【参考】S G器内スラッジの影響確認試験

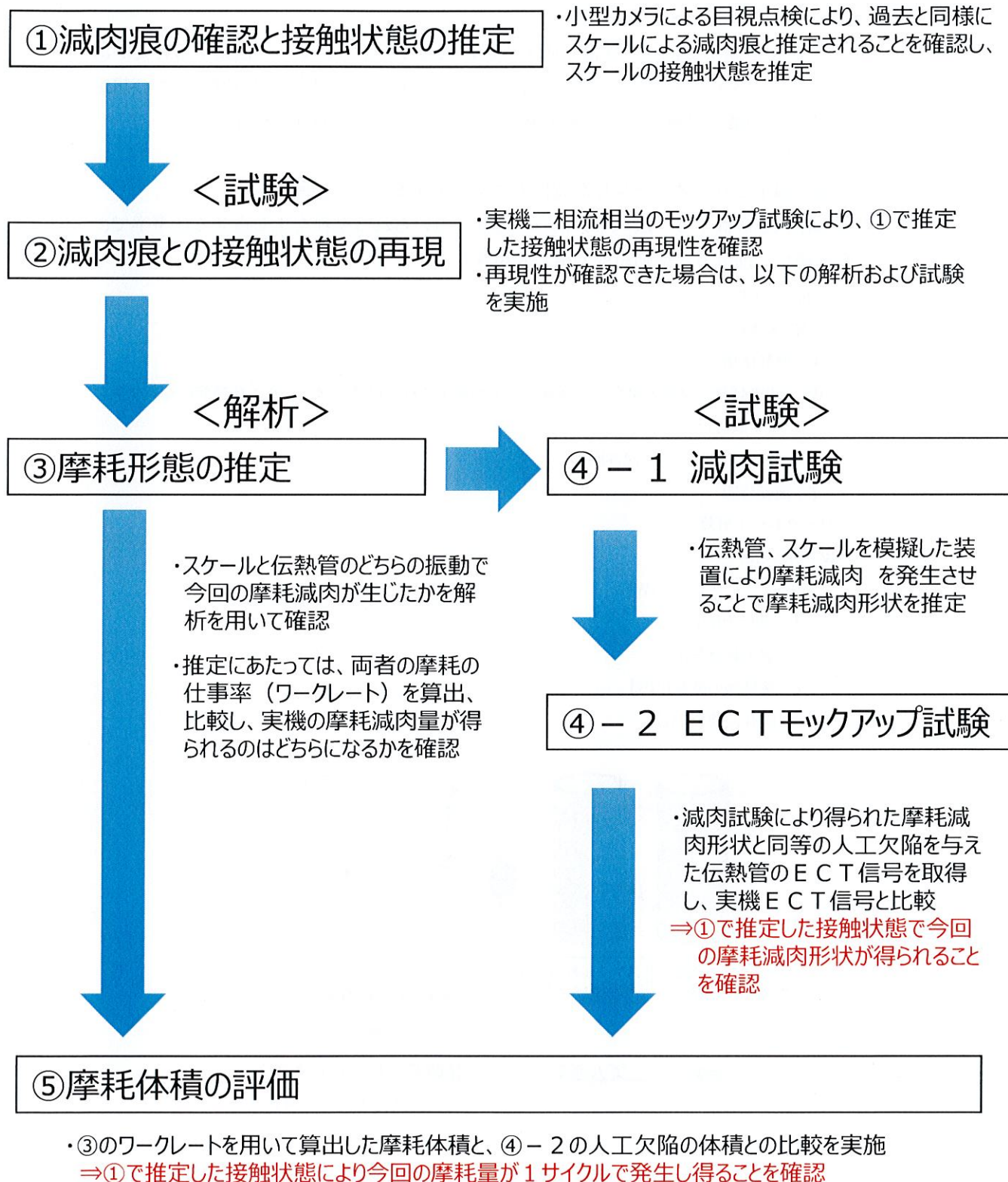
－試験結果－

- 試験①、②において設置した、「稠密スケール（スラッジ非接触）」および「伝熱管付着スケール」についても、スケールが脆弱化していることを確認した。

	試験① 稠密スケール (スラッジ非接触)	試験① 伝熱管付着スケール	試験② 稠密スケール (スラッジ非接触)	試験② 伝熱管付着スケール
洗浄前	 180μm	 180μm	 120μm	 160μm
洗浄後	 0μm 稠密層厚さ	 0μm	 0μm	 80μm

スケールによる伝熱管の減肉メカニズム調査の流れ

- 以下の試験および解析により、回収したスケールが伝熱管に有意な減肉を与えるメカニズムを調査した。
- 各試験および解析については、実機条件を模擬して行った。



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

スケールとの接触で伝熱管が摩耗する場合、スケール片の振動により摩耗するケースと伝熱管の振動により摩耗するケースが考えられるため、両ケースの可能性について検討した。

１．スケール振動のケース

スケールが振動するには、端部が固定された状態で流体力を受けて振動する必要があるため、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。この想定に基づき図１の通り計算モデル*１を設定し、ワークレート*２の計算を行った。

*１ 片端が固定されたスケール片が流体力により１次モードで振動

*２ 摩耗体積を評価する一般式 (Archard の式) で用いられる摩耗を生じさせる仕事率で、次の通り、押付力と撓動速度の積で表現される。

<Archard の式>

$$V = W_S \times W_R \times T$$

V : 摩耗体積

W_S : 比摩耗量 (材質の組合せと摩耗モードで決まる材料係数 : スケールと伝熱管の摩耗試験により取得)

W_R : ワークレート (下記参照)

T : 運転時間

<ワークレート計算式>

$$W_R = F \times 2L / \zeta \times f$$

W_R : ワークレート [W]

F : 押付力 [N]

L : 静的振幅 [m]

ζ : 接触物の減衰比 [%]

f : 固有振動数 [Hz]

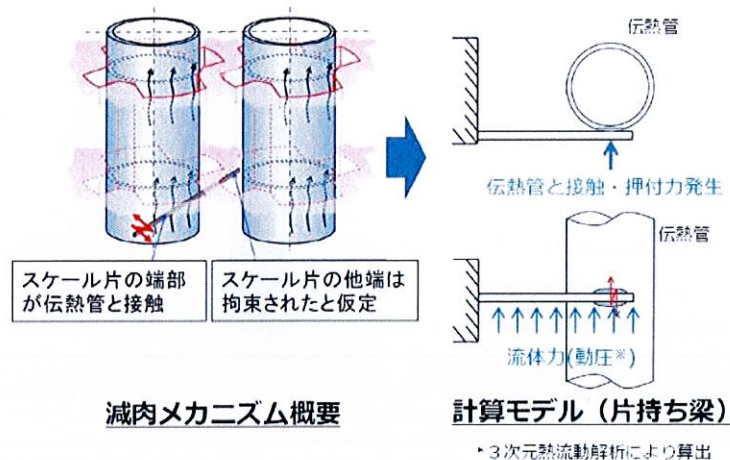


図１ スケールの接触状態の計算モデル化概要 (スケール振動ケース)

この結果、今回、外面減肉が見つかった伝熱管付近において、高浜発電所４号機（第２３回定期検査）にて伝熱管を減肉させたと推定されたスケールのうち最大のものをスケール形状として想定した場合、いずれも流体力を受ける面積が小さく、有意なワークレートは発生しないことを確認した。ワークレート計算結果を表１に示す。

表１ スケール振動のワークレート計算結果

評価伝熱管	スケール形状 (mm)	押付力 (N)	ワークレート (mW)	実機減肉量 再現可能性	備考
A－SG X9Y22	$23 \times 11 \times 0.3^{*3}$	1	< 0.01	×	実機減肉量を再現するには 1mW オーダーのワークレートが必要
A－SG X51Y8	$23 \times 11 \times 0.3^{*3}$	1	< 0.01	×	実機減肉量を再現するには 1mW オーダーのワークレートが必要
B－SG X35Y32	$23 \times 11 \times 0.3^{*3}$	1	< 0.01	×	実機減肉量を再現するには 1mW オーダーのワークレートが必要

*³ 高浜発電所４号機（第２３回定期検査）にて伝熱管を減肉させたと推定されたスケールのうち最大のもの

２．伝熱管振動のケース

本ケースでは、スケールが流体力によって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*⁴により伝熱管自身に減肉が発生したことを想定する。本想定下では、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*⁵の隙間の範囲に制限される（図２参照）。

*⁴ 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乱流の力で伝熱管が振動する現象

*⁵ 管支持板に加工されている四ツ葉型管穴のうち凸面部

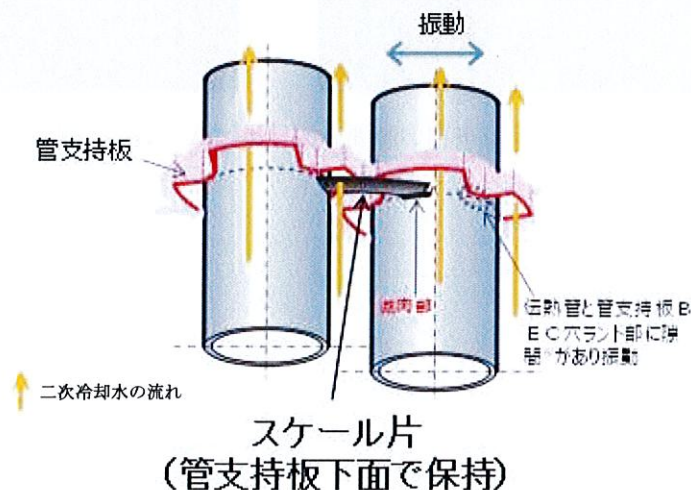


図２ スケール片の接触状態の想定（伝熱管振動ケース）

そこで、本想定の実機との整合性を確認するため、減肉が認められた伝熱管について、管支持板のＢＥＣ穴ランド部との隙間を目視にて確認した結果、一定の隙間が認められた（図３参照）。

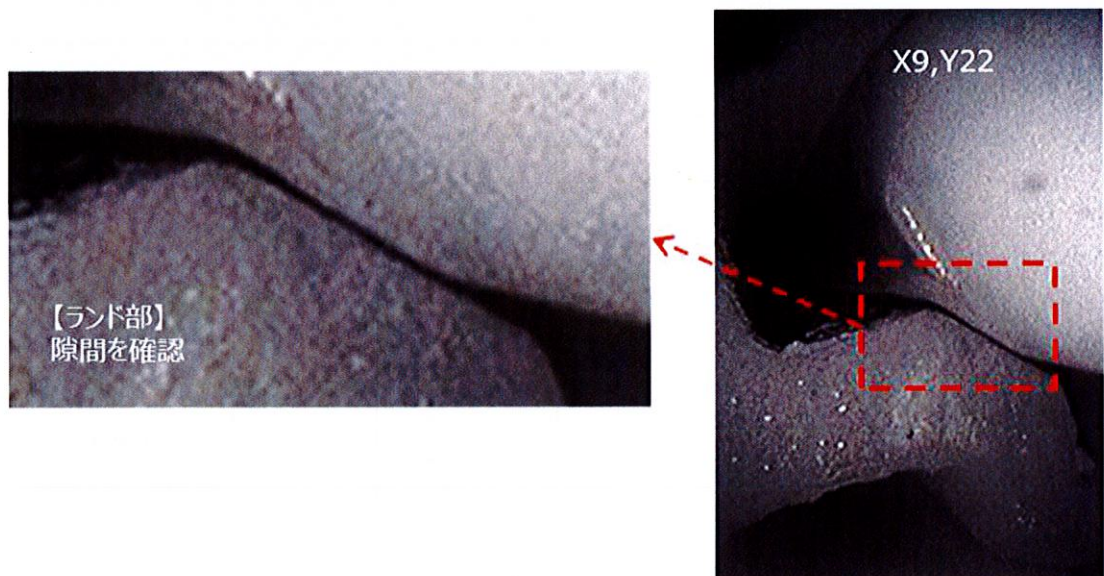


図３－１ 伝熱管とランド部の隙間確認結果（Ａ－ＳＧ：Ｘ９，Ｙ２２）

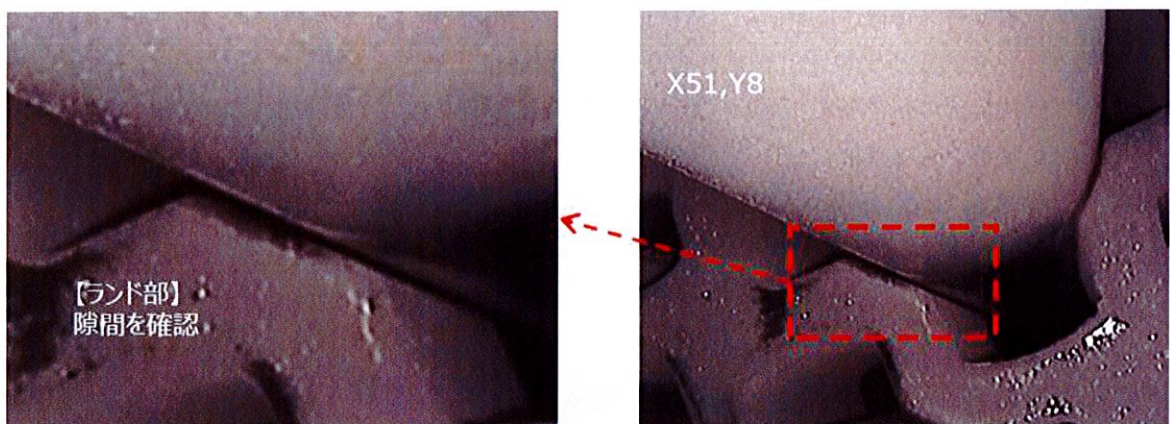


図３－２ 伝熱管とランド部の隙間確認結果（Ａ－ＳＧ：Ｘ５１，Ｙ８）

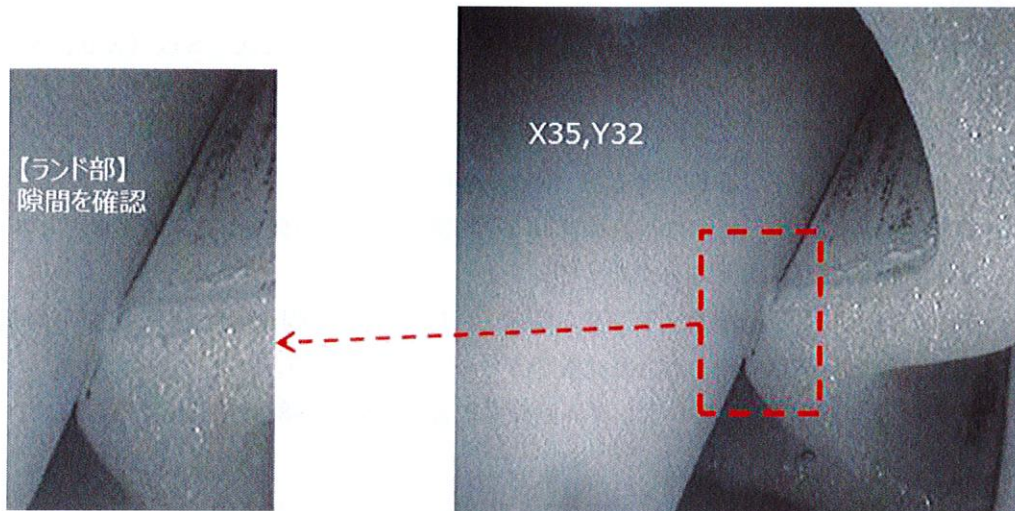


図３－３ 伝熱管とランド部の隙間確認結果（Ｂ－ＳＧ：Ｘ３５，Ｙ３２）

この確認結果より、本想定は実機と整合しているものとし、今回外面減肉が見つかった３本の伝熱管についてワークレートの試算*⁶を行った（表２参照）。その結果、伝熱管振動の場合はスケール片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。

表２ 伝熱管振動のワークレート試算結果

評価伝熱管	押付力 (N)	ワークレート (mW)	実機減肉量 再現可能性
A-SG X9, Y22	約 1	約 3	○
A-SG X51, Y8		約 3	
B-SG X35, Y32		約 2	

*⁶ 伝熱管振動の場合は、流動振動解析を用いてワークレートを算出する（算出方法の概要は「参考」参照）。

３．結論

以上の通り、スケール片振動では有意なワークレートは発生しないが、伝熱管振動では有意なワークレートが発生することを確認したため、今回の減肉事象は伝熱管振動によるものと推定した。

<参考>

流動振動解析によるワークレートの算出方法について、以下にA-SG（X9，Y22）の場合を例に概要を示す。

参1-1. ワークレート計算の考え方（図4参照）

- ・伝熱管は蒸気－水二相流の流れの乱れ（平均流速に対する変動）により振動し、スケールとの接触部が減肉すると想定する。
- ・流れの乱れによる励振力（ランダム励振力）は、熱流動解析で得られた時間平均流速・密度分布と、試験で得られた圧力変動データから設定する。
- ・伝熱管全体をモデル化し、ランダム励振力による振動応答解析を実施することで、ワークレートを算出する。

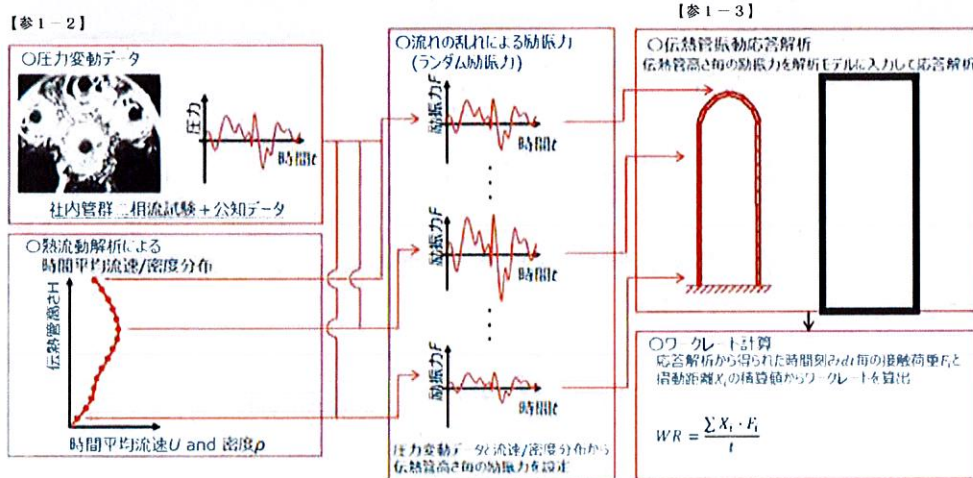


図4 ワークレート計算の考え方

参1-2. 熱流動解析（図5参照）

- ・熱流動解析にて当該伝熱管の直管部全長の流速・密度分布を算出する。
- ・熱流動解析より得られた流速・密度分布及び既知の圧力変動データ（管群二相流試験等）から、振動応答解析（参1-3. 項参照）の入力条件となる励振力を算出する。

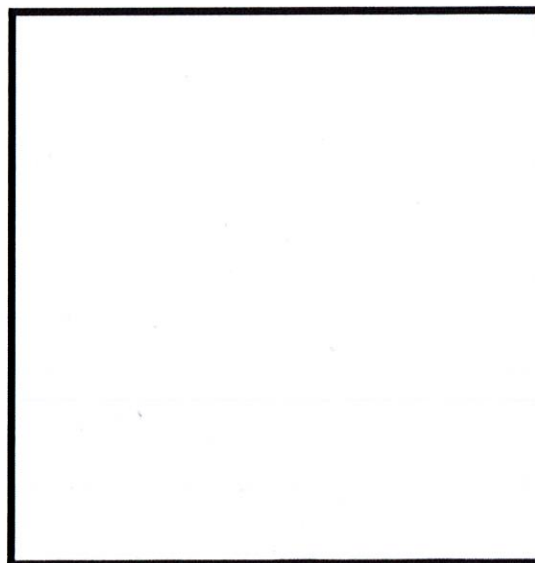


図5 熱流動解析結果（A-SG：X9，Y22）

□：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。

参 1－3．振動応答解析（図 6 参照）

- ・振動応答解析の計算モデルには、スケールの接触・摺動を考慮し、管支持板下面の位置でスケール片から押付力を受けるものとする。
- ・参 1－2．項で算出した励振力を入力して振動応答解析を行い、時間とともに変化する摺動距離、押付力を算出し、それらを積算することでワークレート算出する。

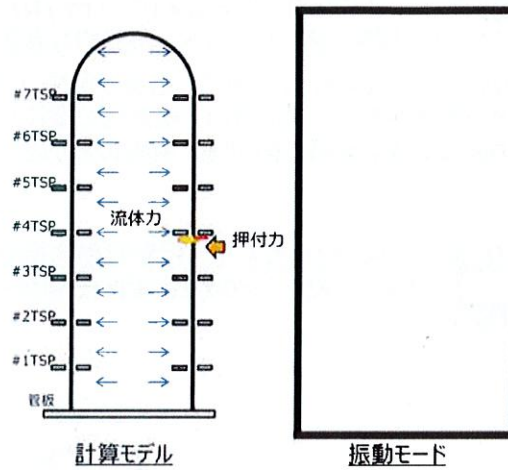


図 6 振動応答解析結果（A－SG：X 9，Y 2 2）

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 (スケールによる最大減肉深さに係る考察)

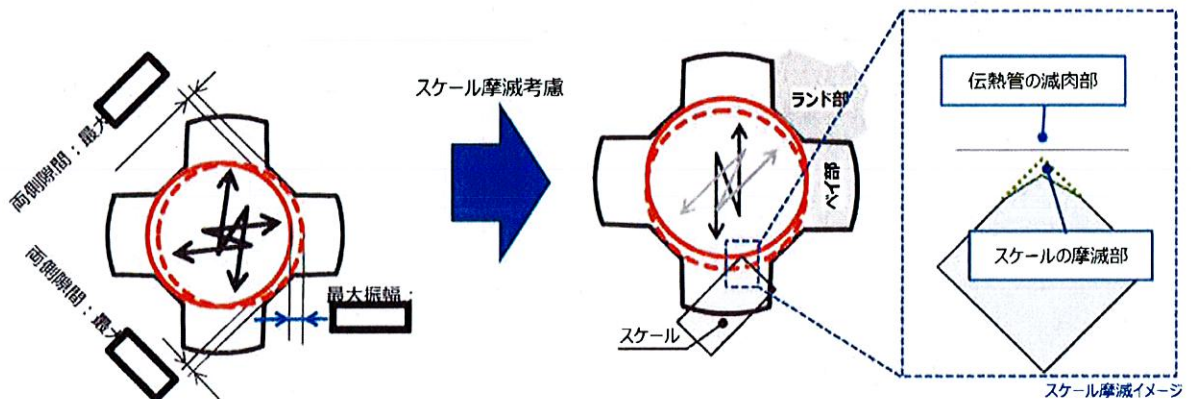
<スケールと異物の減肉メカニズムの考察>

- スケールが伝熱管に摩耗減肉を与えるメカニズムは、次の通りであり、異物の場合と同じである。
 - ・流体力で振動する伝熱管が、上昇流で管支持板下面に押付けられたスケールに接触すると、接触部で伝熱管は撓動
 - ・このとき、スケールが伝熱管との撓動で破損しなければ、撓動は継続し、伝熱管には摩耗減肉が発生
 - ・比摩耗量についても、スケールと異物（SUS304で $6.6 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ ）は同等
- ただし、同じ比摩耗量、同じワークレートで撓動し続けたとしても、最終的な摩耗減肉量は異物の場合より小さい。
 - ・スケールは微細な粒子で構成されるため、伝熱管との撓動で、自身が摩滅（構成粒子が脱落、又は微細な折損）
 - ・伝熱管と接触しなくなるまで自身の摩滅が進むと、その時点で伝熱管の摩耗減肉の進展は停止
 - ・異物の場合は、スケールのような摩滅現象は顕著でないため、異物の方が最終的な摩耗減肉量は大きくなる

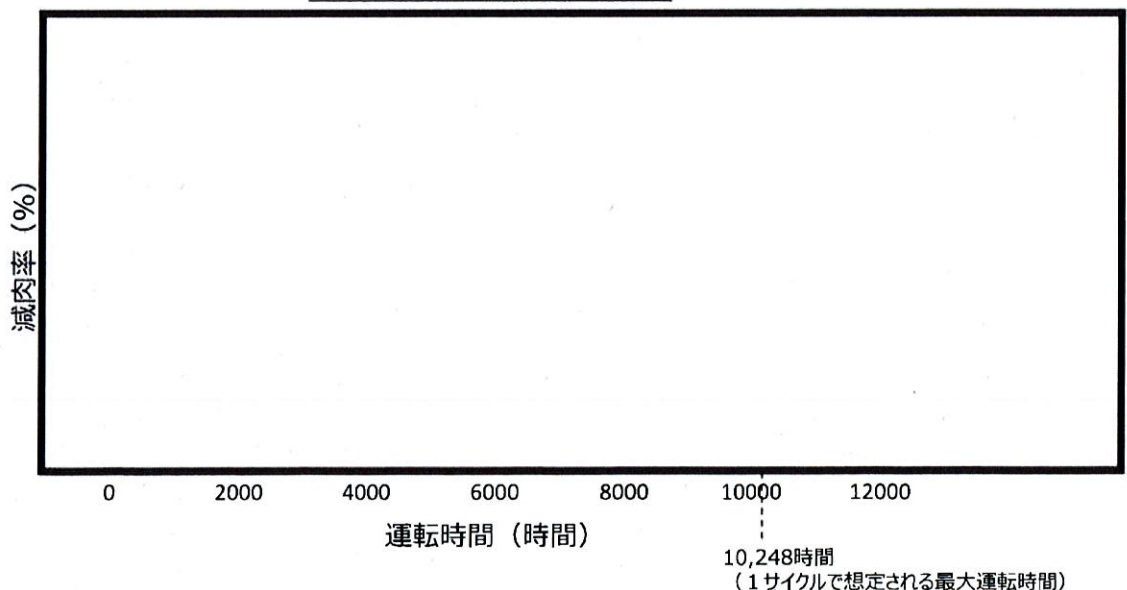
<最大減肉深さの考察>

- 減肉メカニズムは異物と同じであり、最大減肉深さの考え方（伝熱管最大振幅に制限）も同じである。
- 異物の場合の最大減肉深さは ※となるが、スケールの場合は自身も摩滅するため、最大減肉深さは異物の場合よりも小さくなり、貫通には至らない。

※公差内での最大ケース



これまでの外面減肉率の整理



: 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。

減肉試験による実機摩耗減肉形状の確認について

スケールの接触状態を推定した上で、減肉試験を行い、推定したスケールの接触状態により伝熱管に生じると考えられる摩耗減肉形状を再現した。

１．スケールの接触状態の推定

伝熱管の減肉位置や減肉形状から、スケールの接触状態を図１－１～３のように推定した。

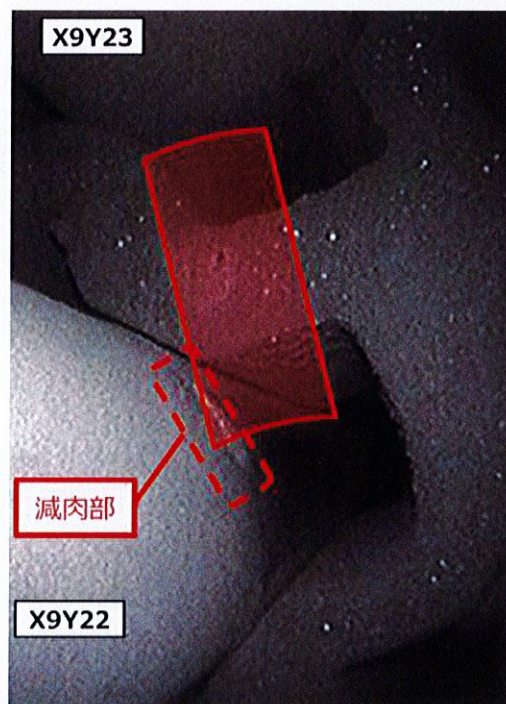


図１－１ スケールの接触状態の推定（A－SG：X9，Y22）

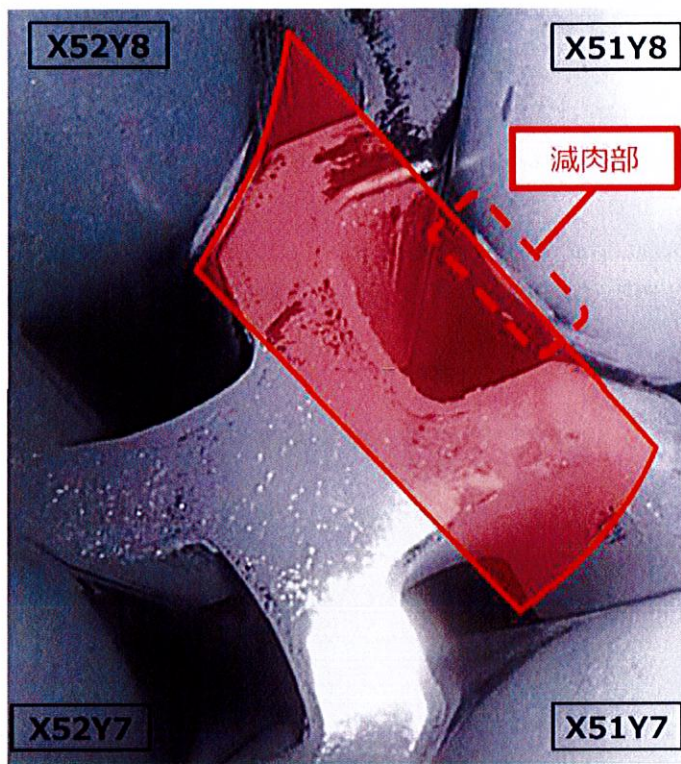


図１－２ スケールの接触状態の推定（A－SG：X 5 1，Y 8）

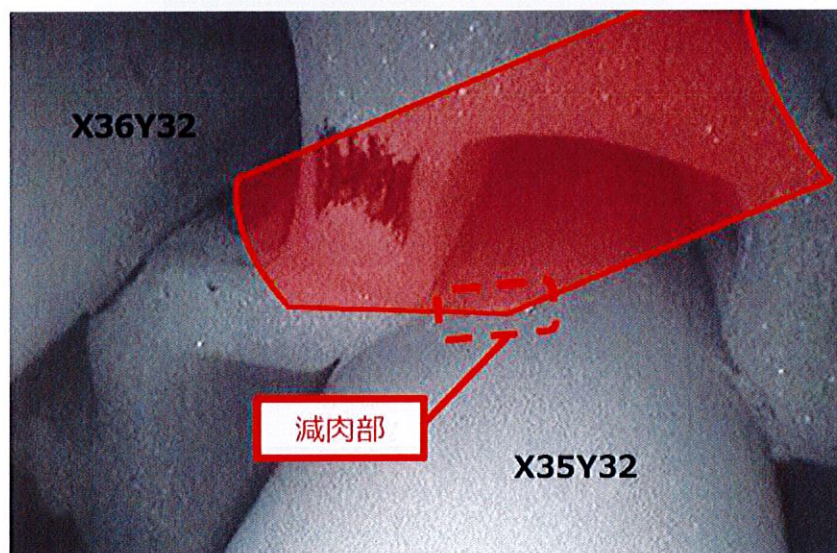


図１－３ スケールの接触状態の推定（B－SG：X 3 5，Y 3 2）

２．減肉試験の方法

（１）スケール接触状態で伝熱管振動により発生する減肉形状を確認するため、減肉試験を次の通り実施した。

- ・円柱形状の石膏で伝熱管を模擬し、スケールを模擬したステンレス片との振動接触により減肉を発生させる。
- ・石膏の減肉形状は試験後の破面観察で確認を行う。
なお、形状把握のため、実機２倍のスケールモデルとする。
- ・ステンレス片の厚みについては、0.6mmと設定する。
- ・円柱とステンレス片の接触角度については、接線方向を接触角度①を変化させ、摩耗減肉形状を模擬した。
- ・試験条件一覧を表２－１、試験装置概要を図２－１に示す。

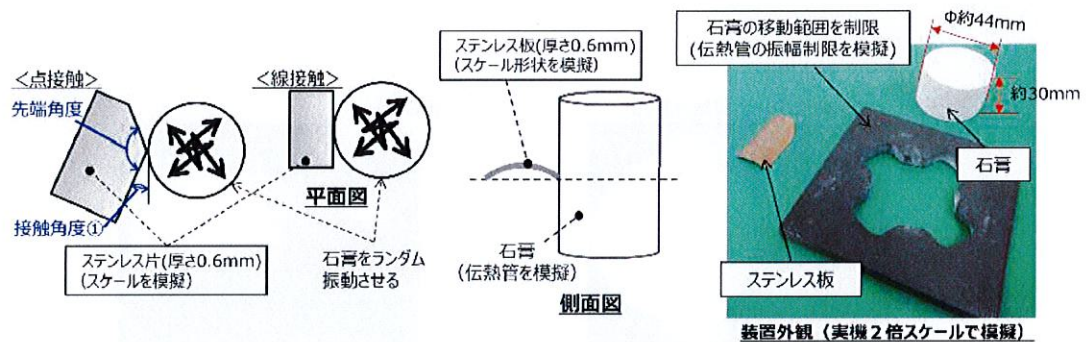


図２－１ 試験装置概要図

表２－１ 試験条件一覧

対象伝熱管	振動モード	接触条件	接触角度 ①	ステンレス片先端角度	振動振幅 (２倍スケール)
A－SG：X 9，Y 2 2	伝熱管振動	点接触	10°	90°	
A－SG：X 5 1，Y 8		線接触	0°	180°	
B－SG：X 3 5，Y 3 2		点接触	10°	150°	

３．減肉試験の結果

減肉試験によって得られた、A－SG（X 9，Y 2 2およびX 5 1，Y 8）およびB－SG（X 3 5，Y 3 2）の各減肉形状をそれぞれ図３－１、図３－２および図３－３に示す。また、それぞれ取得した減肉形状の寸法を実機相当に補正し整理した結果を表３－１に示す。

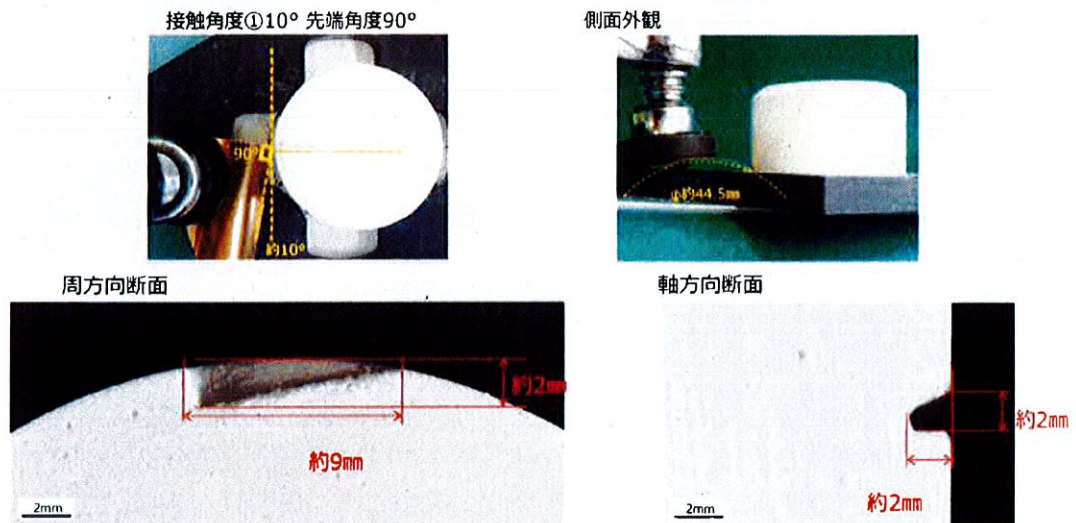


図３－１ 減肉試験で取得した減肉形状（A－SG（X 9，Y 2 2））

：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。

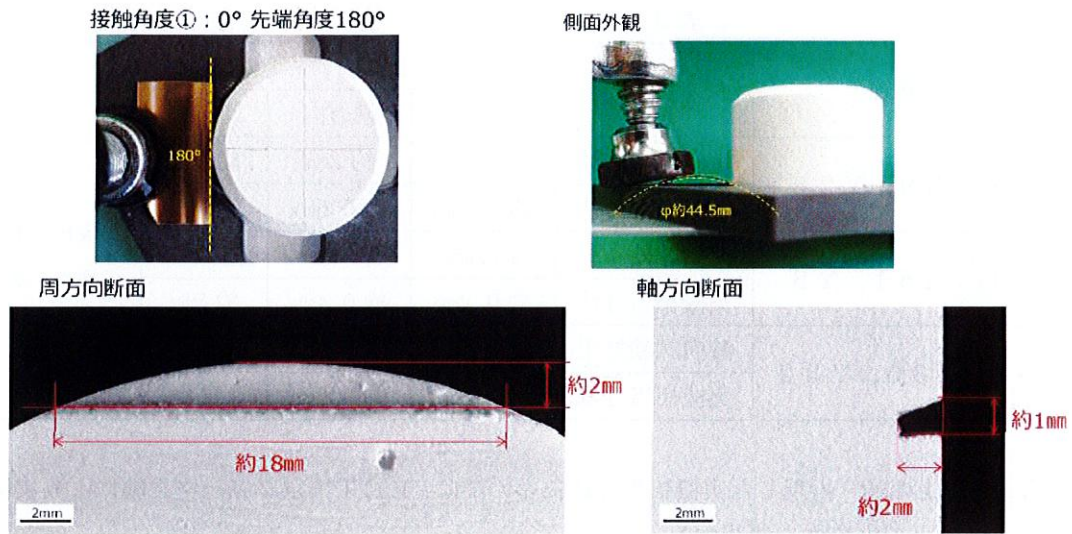


図 3－ 2 減肉試験で取得した減肉形状（A－SG：X 5 1， Y 8）

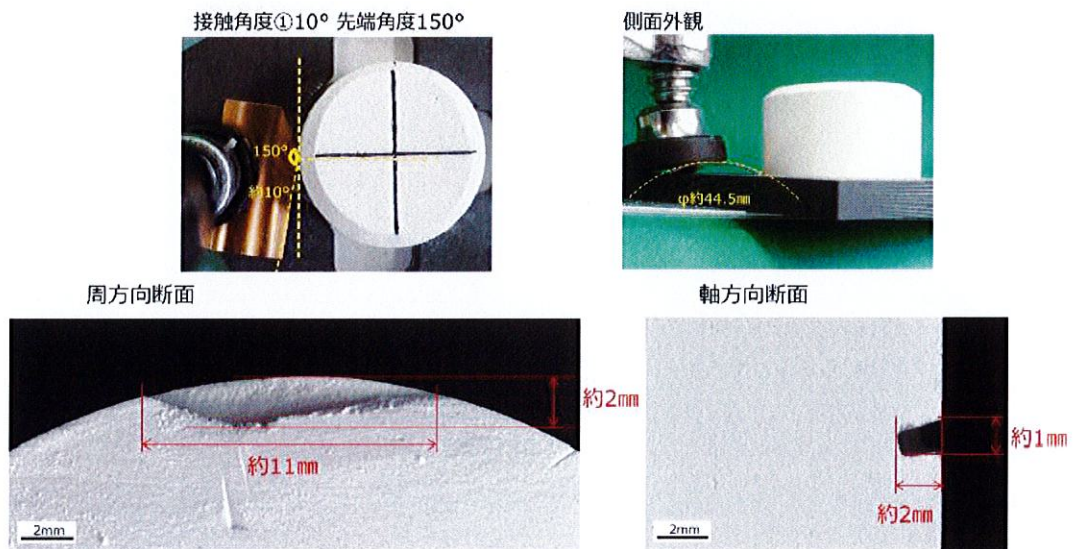


図 3－ 3 減肉試験で取得した減肉形状（B－SG：X 3 5， Y 3 2）

表３－１ 減肉形状寸法一覧

対象伝熱管	減肉形状寸法				備考
		深さ	軸方向	周方向	
A－SG：X 9，Y 2 2	減肉試験結果	約 2mm	約 2mm	約 9mm	実機 E C T 信号 の深さを基準に 補正
	実機相当寸法	約 0.7mm	約 0.6mm	約 3mm	
A－SG：X 5 1，Y 8	減肉試験結果	約 2mm	約 1mm	約 18mm	
	実機相当寸法	約 0.2mm	約 0.4mm	約 5mm	
B－SG：X 3 5，Y 3 2	減肉試験結果	約 2mm	約 1mm	約 11mm	
	実機相当寸法	約 0.5mm	約 0.5mm	約 3mm	

なお、以上の通り再現した実機相当寸法については、E C T モックアップ試験により実機 E C T 信号との整合性を確認する。

以 上

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

減肉試験で再現した減肉形状（実機相当寸法）と同等形状の人工欠陥を与えた伝熱管モックアップ（インコネルＴＴ６００製）のECT信号を取得し、実機ECT信号との整合性を確認した。

１．ECTモックアップ試験の条件

ECTモックアップ試験に用いる人工欠陥寸法を表１に示す。

表１ ECTモックアップ試験に用いる人工欠陥寸法

対象伝熱管	人工欠陥寸法			備考
	深さ	軸方向長さ	周方向長さ	
A－SG：X 9，Y 2 2	約 0.7mm	約 0.6mm	約 3mm	減肉試験結果（実機相当寸法）より設定
A－SG：X 5 1，Y 8	約 0.2mm	約 0.4mm	約 5mm	
B－SG：X 3 5，Y 3 2	約 0.5mm	約 0.5mm	約 3mm	

２．ECTモックアップ試験の結果

１．項の人工欠陥の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。図１～３に試験結果を示す。この結果より、スケールが実機で確認または推定した姿勢で伝熱管と摺動すれば、今回認められた減肉を発生させる可能性があると推定された。ただし、１サイクルで今回の減肉に至った可能性（時間的因子）については、別途流動振動解析を用いた計算により検証する。

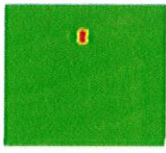
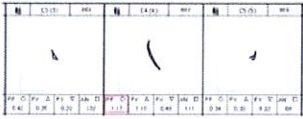
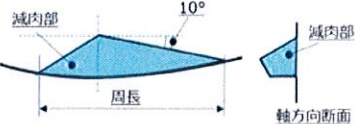
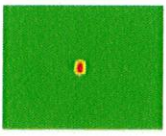
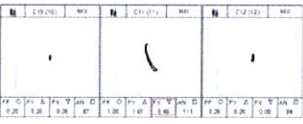
	MIX 色調図	MIX リサージュ	実機信号 整合性
実機 A X9,Y22 周長(目視): 約3mm  ECT減肉指示深さ: 57%	振幅: 1.17 V 位相: 111° 		—
モックアップ[60%減肉] 周長: 約3mm 軸長: 約0.6mm 	振幅: 1.08 V 位相: 111° 		○

図１ ECTモックアップ試験結果（A－SG：X 9，Y 2 2）

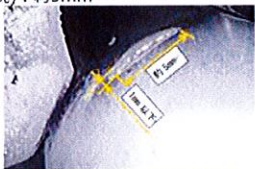
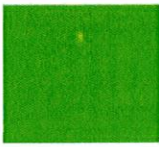
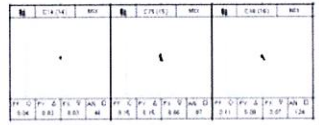
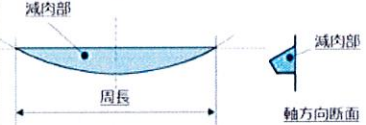
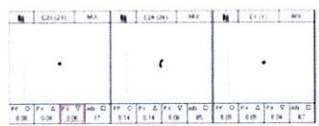
	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性
実機 A X51,Y8 周長(目視): 約5mm  ECT減肉指示: 深さ: 判定基準未満	振幅: 0.15 V 位相: 97° 		—
モックアップ [18%減肉] 周長: 約5mm 軸長: 約0.4mm  減肉部 周長 軸方向断面	振幅: 0.14 V 位相: 85° 		○

図２ ECTモックアップ試験結果（A－SG：X51，Y8）

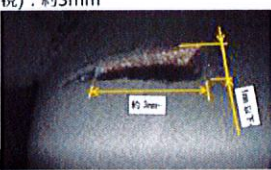
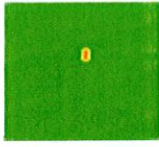
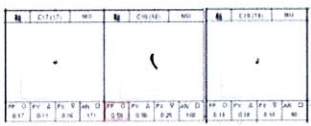
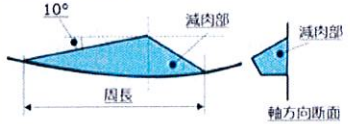
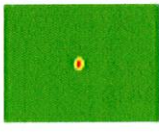
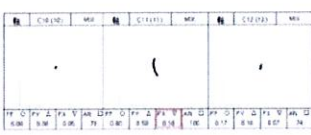
	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性
実機 B X35,Y32 周長(目視): 約3mm  ECT減肉指示: 深さ: 41%	振幅: 0.59 V 位相: 108° 		—
モックアップ [45%減肉] 周長: 約3mm 軸長: 約0.5mm  10° 減肉部 周長 軸方向断面	振幅: 0.60 V 位相: 100° 		○

図３ ECTモックアップ試験結果（B－SG：X35，Y32）

以上

ワークレートをを用いた摩耗体積の計算結果について

流動振動解析によりスケールと伝熱管の摩耗のワークレートを算出し、比摩耗量および１サイクルの運転時間を乗じて、スケールとの接触により１サイクルで発生する摩耗体積を計算した。また、ECTモックアップ試験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との比較評価を行った。その結果を表１に示す。

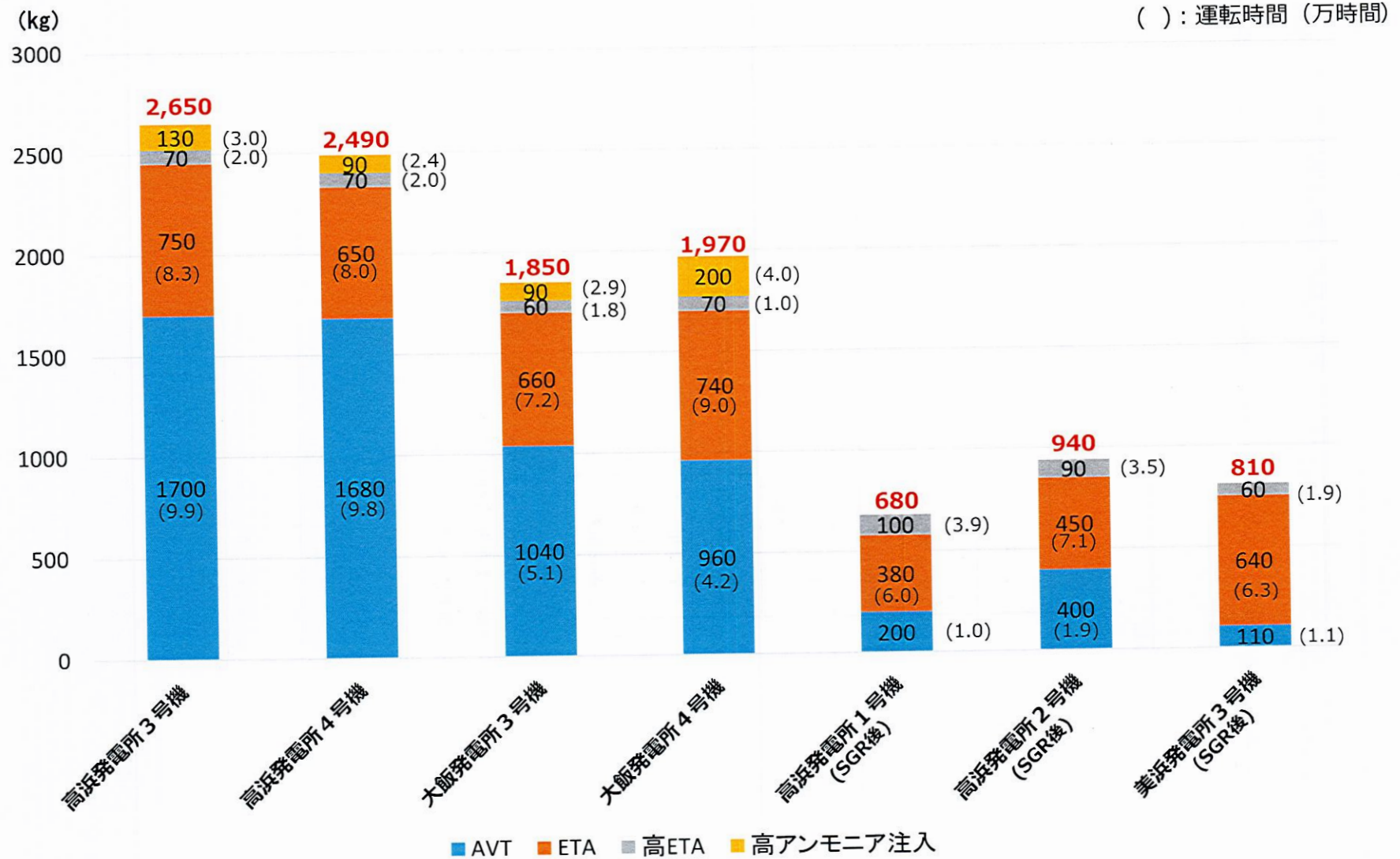
表１ 摩耗体積の比較評価結果

対象 伝熱管	評価手法	比摩耗量	ワーク レート	運転時間	摩耗体積
A－SG： X 9，Y 2 2	ECTモック アップ試験	—	—	—	約 0.5mm ³
	流動振動解析	$1 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$	約 3mW	約 8,500hr	約 0.8mm ³
A－SG： X 5 1，Y 8	ECTモック アップ試験	—	—	—	約 0.2mm ³
	流動振動解析	$1 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$	約 3mW	約 8,500hr	約 0.8mm ³
B－SG： X 3 5，Y 3 2	ECTモック アップ試験	—	—	—	約 0.4mm ³
	流動振動解析	$1 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$	約 2mW	約 8,500hr	約 0.7mm ³

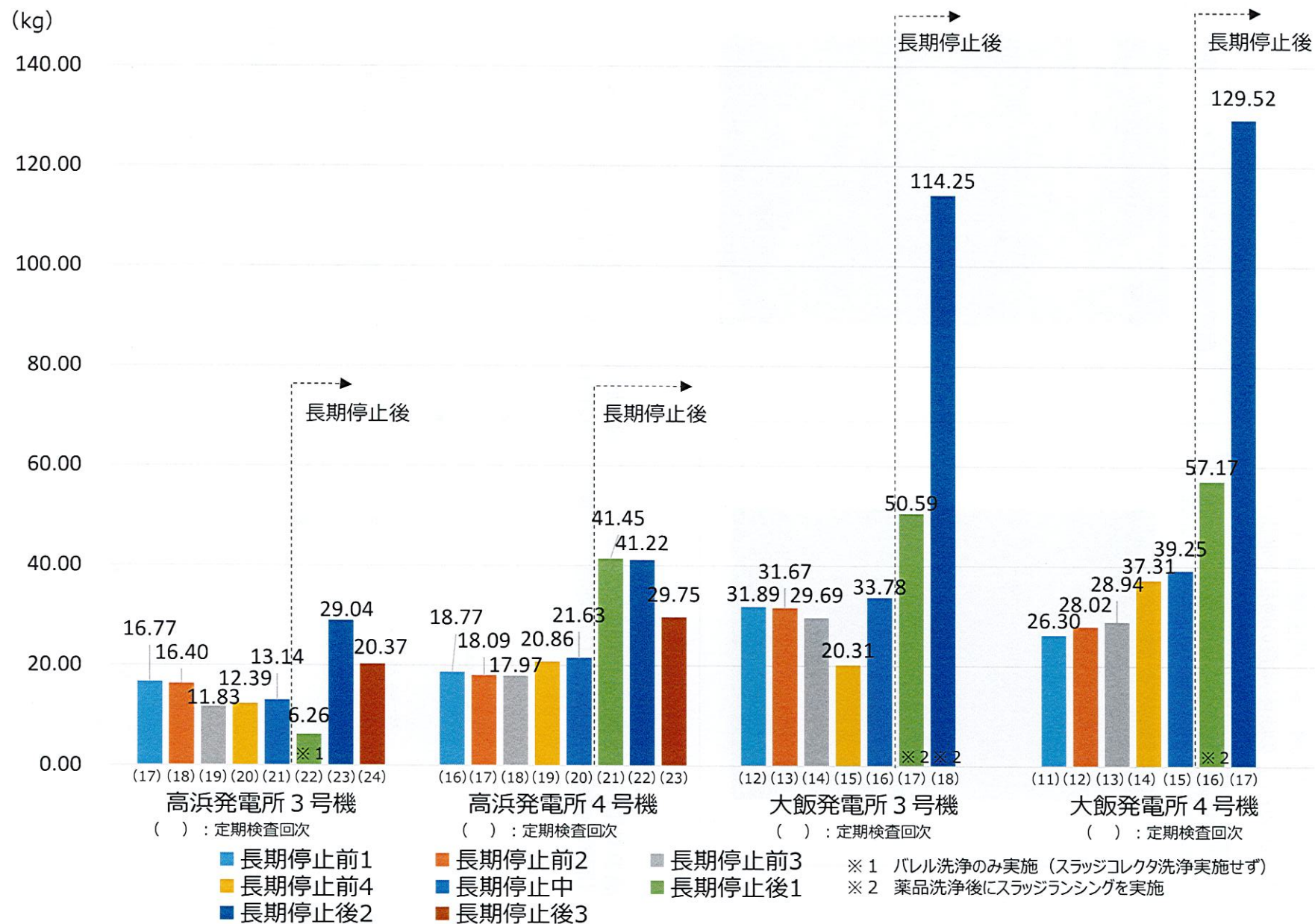
この結果より、ワークレートをを用いて計算した１サイクルで発生する摩耗体積は、ECTモックアップ試験で実機整合性を確認した人工欠陥の摩耗体積とほぼ一致することから、今回認められた減肉痕はスケールとの接触により１サイクルで発生した可能性があることを確認した。

以上

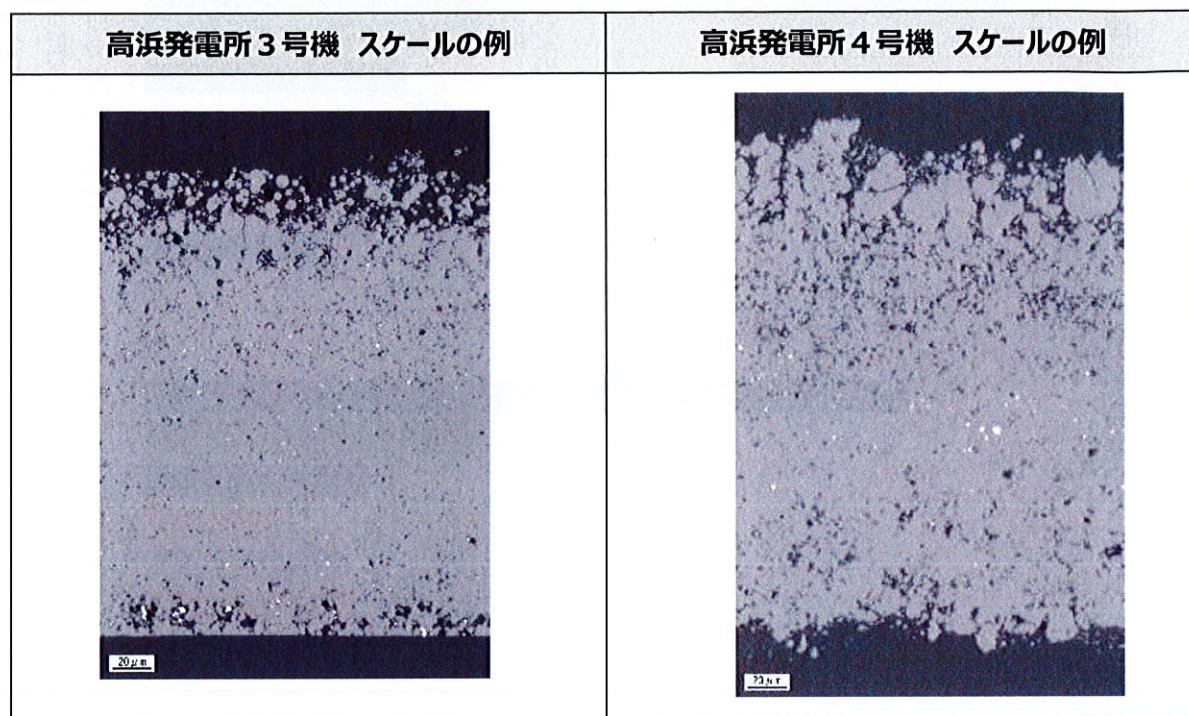
鉄持込み量比較



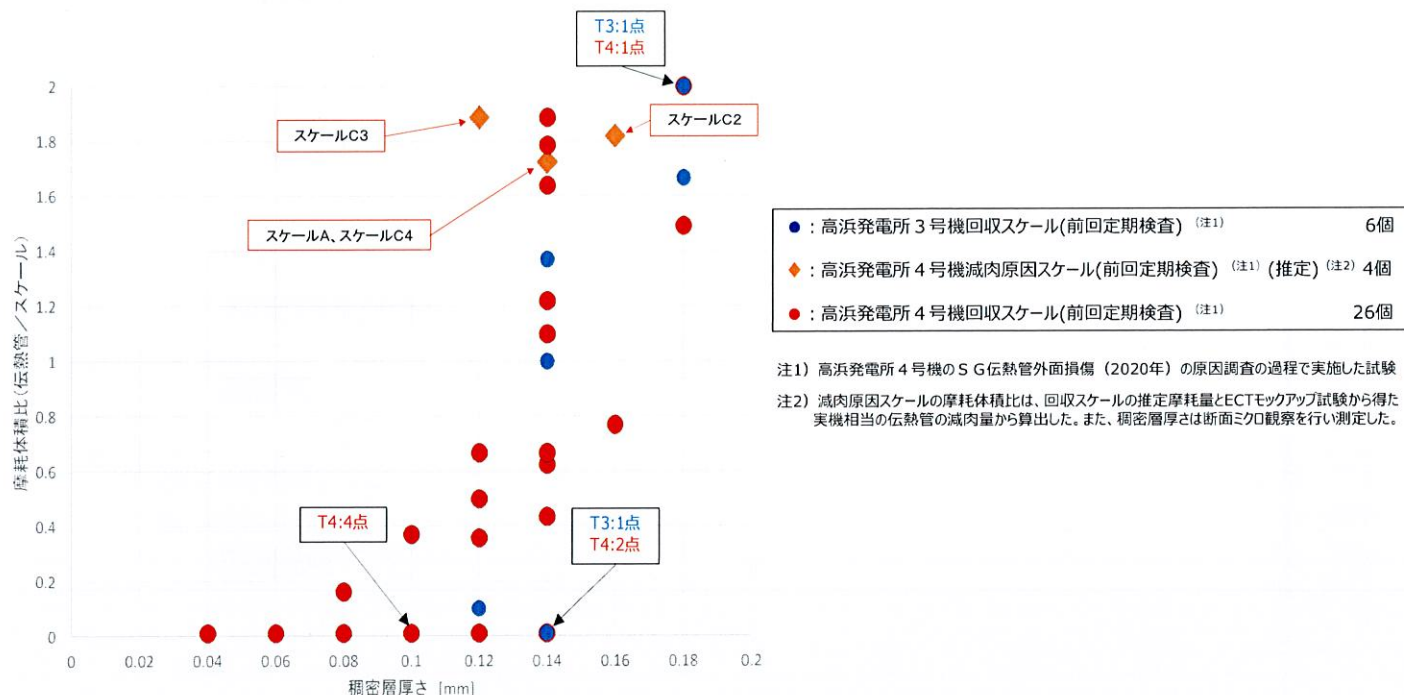
これまでのスラッジランシングによるスラッジ・スケールの総回収量



○高浜発電所 3 号機および 4 号機の第二管支持板上面から回収したスケールの断面ミクロ観察を行った結果、両者の性状は同等であり、稠密層が主体であることを確認した。（高浜発電所 4 号機の S G 伝熱管外面損傷（2020 年）の原因調査の過程で確認）



○高浜発電所 3 号機と 4 号機のスケールについて、稠密層厚さと摩耗体積比の関係を比較した。（高浜発電所 4 号機の S G 伝熱管外面損傷（2020 年）の原因調査の過程で確認）



・高浜発電所 3 号機と 4 号機のスケールの稠密層厚さ及び摩耗体積比の関係は同等であることを確認

当社他プラントスケール摩耗試験結果

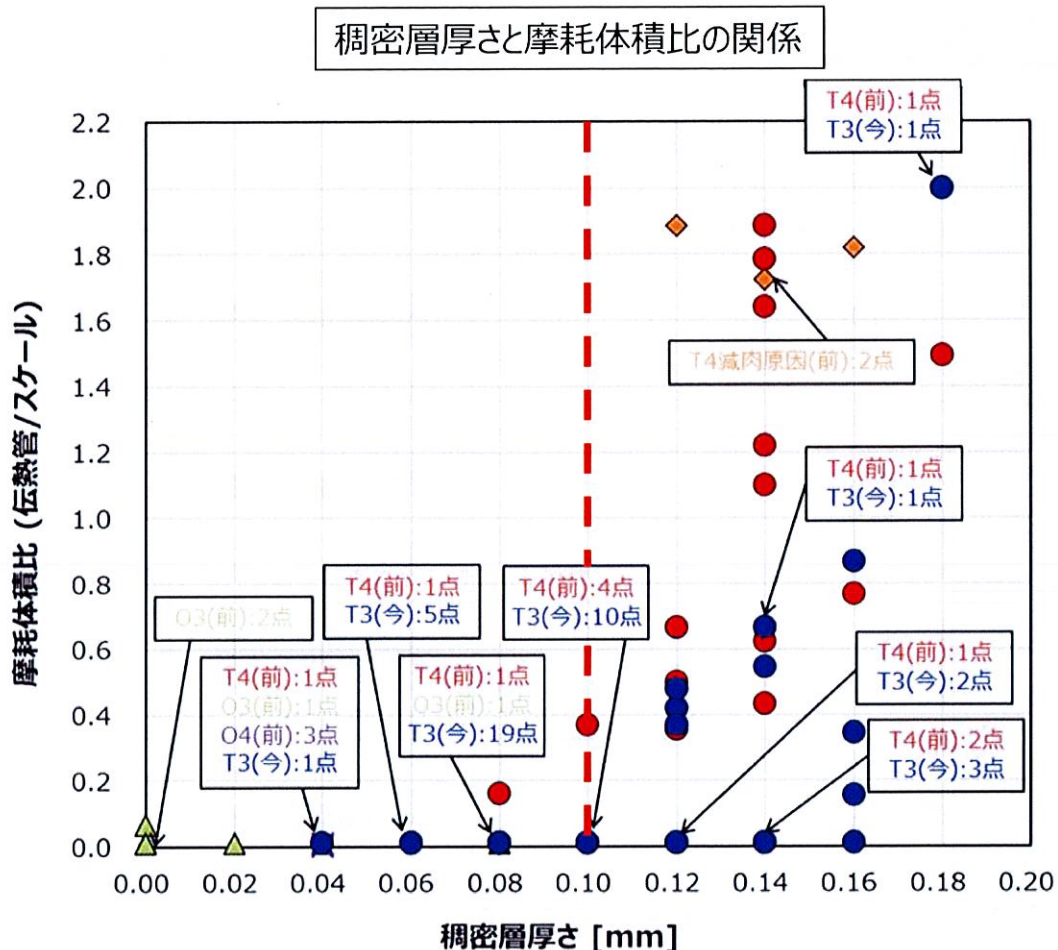
スケール 回収場所	スケール厚さ (mm)	伝熱管摩耗体積 (mm ³)	スケール摩耗体積 (mm ³)	摩耗体積比 (伝熱管：スケール)
大飯発電所 3号機 管板上	約 0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約 0.2	約 0.013	約 0.19	1 : 15
	約 0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約 0.2	—	試験開始後に欠損	—
	約 0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約 0.2	—	試験開始後に欠損	—
大飯発電所 4号機 管板上	約 0.2	約 0.001	約 0.41	1 : 410
	約 0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約 0.1	—	試験開始後に欠損	—

注) 本試験結果は高浜発電所 4 号機の S G 伝熱管外面損傷 (2020 年) の原因調査の過程で実施した試験の結果である。

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

スケール性状による伝熱管減肉影響

- 摩耗に寄与していると考えられる稠密層厚さと摩耗体積比の相関を確認した。
- 空隙率の大きい多孔質化層は、摩耗能力に影響しないとし、「厚さ」としてカウントする稠密層を空隙率5%以下とする。



●	高浜発電所 3 号機回収スケール(今回定期検査)	50個
◆	高浜発電所 4 号機減肉原因スケール(前回定期検査) ^(注1) (推定) ^(注2)	4個
●	高浜発電所 4 号機回収スケール(前回定期検査) ^(注1)	26個
▲	大飯発電所 3 号機回収スケール(前回定期検査) ^(注1)	6個
×	大飯発電所 4 号機回収スケール(前回定期検査) ^(注1)	3個

注1) 高浜発電所 4 号機の S G 伝熱管外面損傷（2020 年）の原因調査の過程で実施した試験

注2) 減肉原因スケールの摩耗体積比は、回収スケールの推定摩耗量と E C T モックアップ試験から得た実機相当の伝熱管の減肉量から算出した。また、稠密層厚さは断面マイクロ観察を行い測定した。

海外のＳＧの運転履歴等調査結果

１．調査方法について

（１）運転履歴

海外のＳＧの運転履歴について、米国電力研究所（ＥＰＲＩ）のＳＧ管理プログラム（ＳＧＭＰ）専有のデータベース等を用いて調査した。

ＥＰＲＩ ＳＧＭＰ専有のデータベースに登録されている世界のプラント総数は約２６０基であるが、この中から、高浜発電所３号機および４号機と同条件と考えられるＳＧを抽出するため、次の条件に合致するプラントを調査した。

なお、広く抽出するため、ＳＧの設計仕様や運転パラメータが大きく異なるプラントであっても、下記条件に合致していれば対象として抽出を行った。

<抽出条件>

- ・ＳＧの運転時間が高浜発電所３号機および４号機で伝熱管外面減肉事象が生じた運転時間以上（ＥＦＰＹ※^１２３※^２以上）※^３のプラント
- ・薬品洗浄実績が確認されなかったプラント
- ・管支持板が平板状構造であるプラント※^４

※１：定格負荷相当年数（運転後累積発電電力量（ＭＷｈ）÷８７０（ＭＷ）÷２４（時／日）÷３６５（日／年）により算出する）

※２：高浜発電所３号機第２３回定期検査（ＥＦＰＹ２４．０）、高浜発電所３号機第２４回定期検査（ＥＦＰＹ２５．２）、高浜発電所３号機第２５回定期検査（ＥＦＰＹ２６．２）、高浜発電所４号機第２２回定期検査（ＥＦＰＹ２４．３）、高浜発電所４号機第２３回定期検査（ＥＦＰＹ２５．０）のうち最小の運転時間（ＥＦＰＹ２４．０）に対し更に抽出範囲を広げるため、－ＥＦＰＹ１．０を追加考慮

※３ ＥＰＲＩ ＳＧＭＰ専有データベースでは、至近定検までの運転時間が登録されている。

※４ エッグクレート型管支持板のような、薄板を格子状に配列した支持板構造を持つＳＧは除外（スケールが伝熱管と接触した状態で保持されないため）

（２）スケールによる減肉経験の有無

海外においてスケールによる減肉が発生した事例の有無を調査するため、上記のＥＰＲＩ ＳＧＭＰ専有のデータベースの他、ＥＰＲＩの各種レポート（伝熱管の摩耗減肉損傷に関するもの）を確認するとともに、ＥＰＲＩ及びＥＤＦへの問合せを行った。

２．調査結果について

（１）運転履歴

調査の結果、抽出されたプラントは表１の通りであり、全数の約２６０基に対し７基のみと非常に少ないことを確認した。

表１ 海外プラント抽出結果

プラント名	運開日	ＳＧ取替日	現行ＳＧＥＦＰＹ
プラントＡ	1972. 12. 14	1982. 4. 1	31. 5 (2021. 10. 4 時点)
プラントＢ	1973. 9. 1	1983. 5. 1	30. 0 (2020. 10. 5 時点)
プラントＣ	1986. 4. 11	—	26. 9 (2019. 1. 5 時点)
プラントＤ	1985. 12. 4	—	25. 3 (2018. 4. 7 時点)
プラントＥ	1986. 7. 18	—	26. 0 (2019. 1. 10 時点)
プラントＦ	1978. 6. 1	1993. 4. 1	25. 5 (2021. 3. 14 時点)
プラントＧ	1990. 6. 7	—	24. 7 (2019. 2. 16 時点)

(２) スケールによる減肉経験の有無

ＥＰＲＩ ＳＧＭＰ専有のデータベース、ＥＰＲＩレポート※５では、海外でのスケールによる伝熱管損傷事象は確認されなかった。また、ＥＰＲＩ及びＥＤＦへの問合せの結果、スケールによる伝熱管損傷の事例は報告されていないことを確認した。

※５ ＥＰＲＩ ＳＧＭＰ専有レポート“Foreign Object Handbook R1(3002007858)”より

３．当社と海外におけるスケールマネジメントの考え方の違い

上記の調査において、海外では多くのプラントで薬品洗浄が行われていたことから、薬品洗浄をはじめとするスケールマネジメント方法の主な違いについて、表２の通り整理した。整理にあたっては、主要国である米国と仏国の状況を調査するため、ＥＰＲＩ等の各種レポートを確認するとともに、ＥＰＲＩ及びＥＤＦへの問合せを行った。

表２ スケールマネジメントにおける当社と海外（米国・仏国）の主な違い

項目	当社	海外※６
ＢＥＣ穴閉塞	・ ＥＣＴ及び目視による閉塞率管理 ・ 機械式洗浄による閉塞回復	・ ＥＣＴや目視、ＳＧ２次側水位による閉塞率管理 ・ 薬品洗浄による閉塞回復
管板直上の腐食環境生成	・ スラッジランシング（毎定検）	・ スラッジランシング ・ 薬品洗浄
伝熱性能低下	・ 薬品洗浄（ＡＳＣＡ洗浄）	・ 薬品洗浄（ＡＳＣＡ洗浄他）

※６ ＥＰＲＩ ＳＧＭＰ専有レポート“Deposit Removal Strategies Sourcebook (3002005090)”より

この結果、当社において薬品洗浄で対応するのは伝熱性能の低下のみであるが、海外においては、主にＢＥＣ穴閉塞対応で薬品洗浄を用いている他、必要に応じて管板直上に堆積したスラッジ除去においても活用を行っている。従って、海外においては、薬品洗浄はスケールマネジメントにおける主要な対策と位置付けられていると推察され、結果、多くのプラントが薬品洗浄を経験しているものと考えられる。

４．メーカーへの確認結果

スケールによる伝熱管の摩耗減肉に関する知見について、メーカーへの確認を行った結果、上記と同様に、知見はないとの見解を得た。

５．海外への情報発信

今回高浜発電所３号機で認められたスケールによる伝熱管摩耗減肉事象の原因調査で得られた知見については、今後、海外へもフィードバックを行うべく、ＥＰＲＩのＳＧＭＰ等を通じて海外のＰＷＲ事業者へ情報発信を行っていく。

以上

減肉した伝熱管の評価

減肉した伝熱管について、以下のとおり、強度および耐震性の観点から破損しないことを確認した。

1. 強度

国P J「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いる。その試験結果から導出された内圧破断評価式を用いて、運転中および事故時を包絡する内外差圧による破断圧力を算出した。

得られた破断圧力について、通常運転時および事故時の最大内外差圧に対する裕度を確認することにより、減肉管の強度を評価した。

その結果、破断圧力は29.82MPaであり、通常運転時および事故時の最大内外差圧 に対し、十分な裕度があることを確認した。

本評価式は、過去の高浜発電所3号機および4号機 蒸気発生器伝熱管の旧振止め金具による局部減肉の特殊設計施設認可申請においても用いられており、下式にて表される。

$$P_B = \sigma_f \frac{t}{R} \left(\frac{1 - a/t}{1 - a/t \cdot 1/m} \right)$$

<計算条件>

P_B : 局部減肉を有する伝熱管の破断圧力 (MPa)

σ_f : インコネルTT600の流動応力=343.8MPa (@361.3℃)

t : 板厚=

R : 平均半径=

a : 減肉深さ= (= × 0.57)

m : Foliasのバルジ係数 (= $(1 + 1.05 \cdot c^2/R/t)^{1/2}$)

$2c$: 減肉幅=5mm

表 減肉した伝熱管の強度評価結果

減肉深さ (%) *1	破断圧力 P_B (MPa)	事故時を包絡 する作用内外差圧 (MPa) *2	裕度
57	29.82		

*1 最大減肉深さのA-SG (X9, Y22) で代表

*2 設計基準事故時および重大事故等時を包絡する内外差圧

: 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。

２．耐震性

減肉を有する伝熱管の耐震性について、次のとおり評価した。

- ・既工認^{*3}の基準地震動 S_s による地震力および伝熱管全長モデル（施栓管の評価と同様）^{*4}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
- ・保守的に一様外面減肉と仮定し、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

^{*3} 既工認添付資料 13-17-3-2-2「蒸気発生器内部構造物の耐震計算書」

（原規規発第 1508041 号、平成 27 年 8 月 4 日認可）

^{*4} 高浜発電所 3 号機既工認（新規制基準工認）補足説明資料「高浜発電所 3 号機耐震性に関する説明書に係る補足説明資料 蒸気発生器伝熱管の評価について 関西電力株式会社 平成 27 年 7 月」

その結果、今回認められた減肉を考慮しても、発生応力および疲労累積係数に十分な裕度があること確認した。

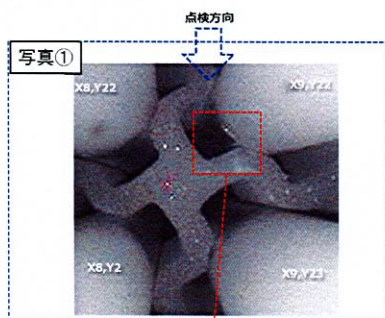
表 減肉した伝熱管の耐震性評価結果

応力分類	発生応力 ^{*5} および疲労累積係数	許容値	裕度
一次一般膜応力	230 MPa	334 MPa	1.4
膜応力＋曲げ応力	245 MPa	434 MPa	1.7
一次＋二次応力	247 MPa	492 MPa	1.9
疲労累積係数	0.072	1	-

^{*5} 最大減肉深さの A-SG（X 9，Y 2 2）で代表

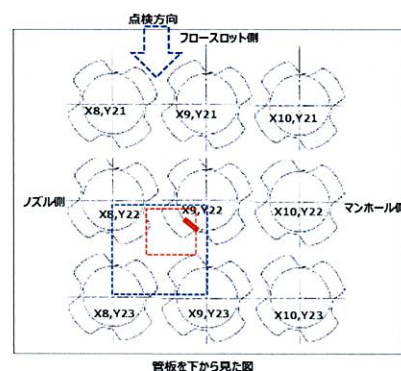
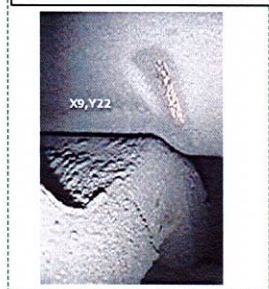
以 上

隣接伝熱管の健全性 (A-SG 低温側第四管支持板下面 伝熱管 X9, Y22)

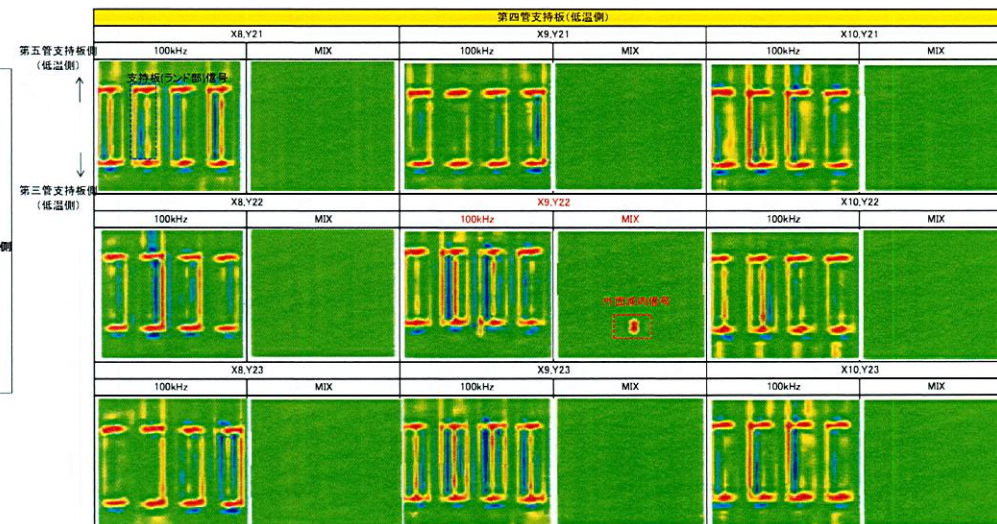
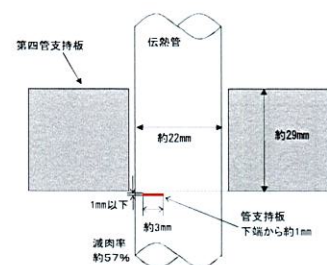


右記波形データにおける
外面減肉信号と推定
される部位

写真③(写真②を側面から確認)



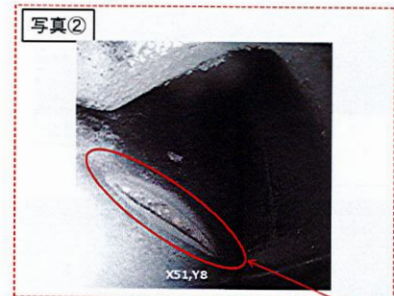
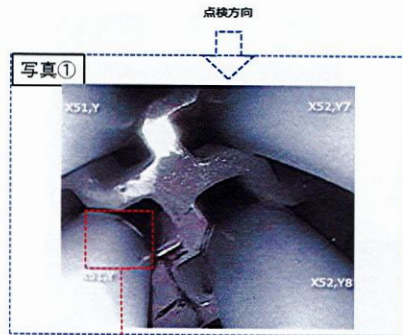
管板下から見た図



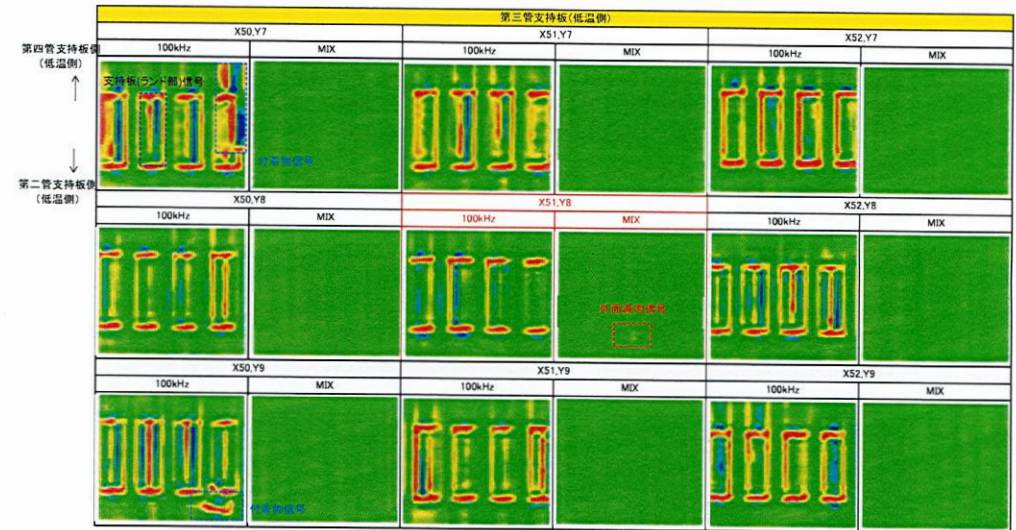
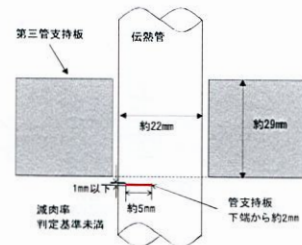
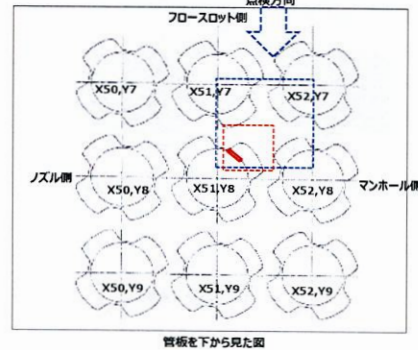
波形上の評価

- ・外面減肉信号は、X9,Y22にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
- ・その他のアドレスでは、支持板(ランド部)信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。
- ＊なお、ECT信号は信号源の実長さより長くなるため、上記のランド部信号範囲は実範囲より広いと考えられる。

隣接伝熱管の健全性 (A-S G 低温側第三管支持板下面 伝熱管 X51, Y8)



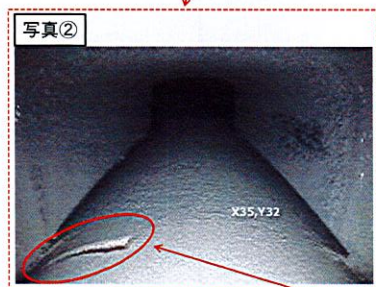
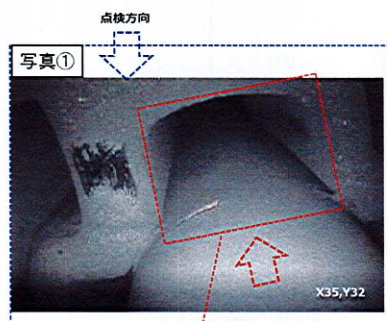
右記波形データにおける
外面減肉信号と推定
される部位



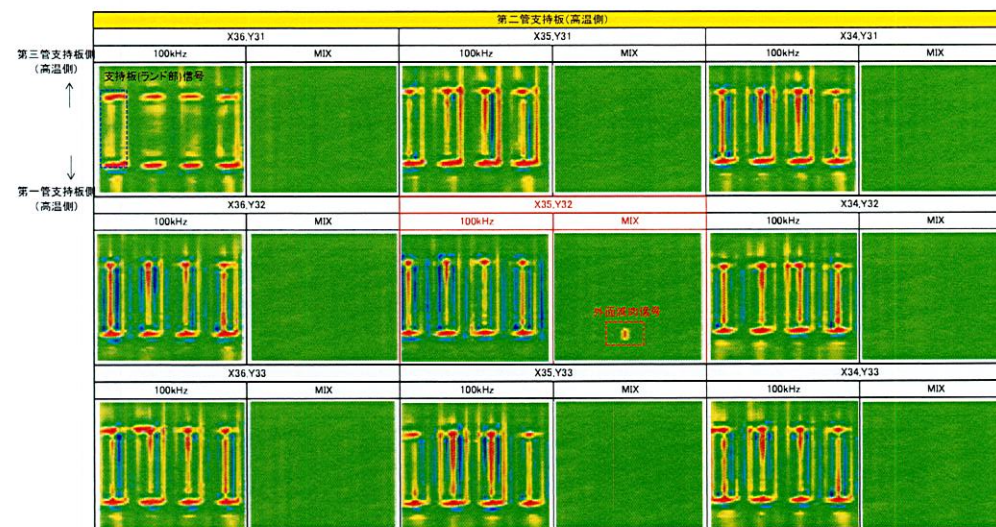
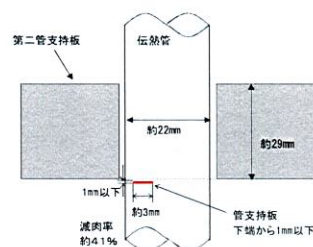
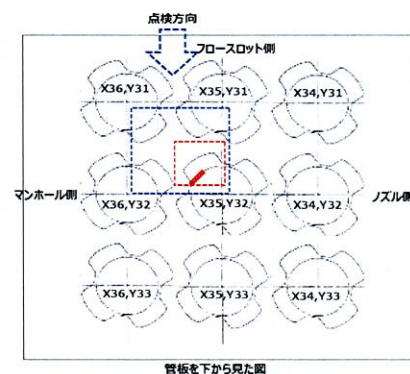
波形上の評価

- ・外面減肉信号は、X51, Y8にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
- ・その他のアドレスでは、付着物信号および支持板(ランド部)信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。
- ＊なお、ECT信号は信号源の実長さより長くなるため、上記のランド部信号範囲は実範囲より広いと考えられる。

隣接伝熱管の健全性 (B-SG 高温側第二管支持板下面 伝熱管 X35, Y32)



右記波形データにおける
外面減肉信号と推定
される部位



波形上の評価

- ・外面減肉信号は、X35, Y32にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
- ・その他のアドレスでは、支持板(ランド部)信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。
- ＊なお、ECT信号は信号源の実長さより長くなるため、上記のランド部信号範囲は実範囲より広いと考えられる。

SG点検スケジュール

2022.03								2022.04																								2022.05																		
24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金
ECT解析 (定事検)																																																		
完了																																																		
▼指示伝熱管撮影日																																																		
第三管支持板以下当該部 目視確認等																																																		
完了																																																		
A～C－SG 第一・第二管支持板上部、A-SG 第三管支持板上部、流量分配板上、管板上 異物調査、スケール採取																																																		
完了																																																		
▼指示伝熱管撮影日																																																		
第四管支持板以下当該部 目視確認等																																																		
完了																																																		
第四管支持板上部の管支持板上部 異物調査																																																		
完了																																																		
仮設ストレナ点検																																																		
▼																																																		
SGBD系統 (弁、配管他) 点検																																																		
完了																																																		
スケール分析等 (工場)																																																		
スケール分析 (摩耗試験・稠密層性状観察)																																																		
完了																																																		

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

項目 (調査・対策)		今回 高浜発電所３号機 第２５回定期検査	前回 高浜発電所４号機 第２３回定期検査
調査	ＳＧ器内調査	・信号指示が認められた箇所の外観調査 ・ＳＧ器内のスケールの残存状況等の調査 ・ＳＧから回収したスケールの形状および性状の調査（摩耗試験数５０個） ・ＳＧ器内の伝熱管表面の観察	・信号指示が認められた箇所の外観調査 ・ＳＧ器内のスケールの残存状況等の調査 ・ＳＧから回収したスケールの性状の調査（摩耗試験数２６個）
	スケールの ＳＧ器内挙動	前回推定したスケールのＳＧ器内挙動に加えて、管群外筒を通過する可能性もあると推定。	管板、第一管支持板、第二管支持板上方で発生したスケールが、管群内の上昇流に乗って流量分配板および管支持板フロースロット部を通過し、減肉箇所まで移動したと推定。
	スケールの 剥離メカニズム	スケールの剥離は主にはプラント停止時だが、前回薬品洗浄により剥離しなかったスケールがプラント起動時・運転中にも剥離する可能性は否定できない。	スケールの剥離はプラント停止時と推定。
	薬品洗浄時の スラッジ影響考慮	スケールとスラッジが混在する条件で新たに工場試験を実施した結果、スケール近傍にスラッジが存在する場合は脆弱化効果が低減することを確認した。	工場試験ではスラッジの存在を考慮せず。（すべてスケールとして模擬）
対策	管支持板上の洗浄	管支持板上等のスケールおよびスラッジを可能な限り除去するため、小型高圧洗浄装置により管支持板の洗浄を実施する。	未実施
	薬品洗浄条件 (洗浄範囲、薬品濃度)	１回目：伝熱管全域、薬品濃度３％ ２回目：伝熱管全域、薬品濃度３％	１回目：第三管支持板以下、薬品濃度３％ ２回目：伝熱管全域、薬品濃度２％

1. 薬品洗浄の方法について

(1) 薬品洗浄方法の選定

- 薬品洗浄については、薬品の種類や濃度、洗浄温度等の条件に応じて、複数の種類があるが、主に下表1-1の通り、高濃度の薬品を用いる本格化学洗浄と、比較的低濃度の薬品を用いる希薄薬品洗浄に分かれる。

表1-1 主な薬品洗浄方法（各洗浄条件は基本的なケースを示す）

		本格化学洗浄		希薄薬品洗浄	
		KWU法 (Simens法)	EPRI法	ASCA※1	DMT
鉄洗浄 条件	薬品濃度	40% EDTA※2	20% EDTA※2	1%※3 EDTA※2	1% シュウ酸
	洗浄温度	160～175℃	93～121℃	80℃	60～88℃
	洗浄時間	4～10hr	30～40hr	24hr	4～24hr
洗浄効果		S G器内スケールをほぼ全量除去	同左	スケールの粗密化（脆弱化）	同左
S G器内構造物に対する腐食影響		影響の可能性あり	同左	影響はごく軽微	同左
国内実績 (現行S G)		実績なし	実績なし	多数実績あり	実績なし

※1 Advance Scale Conditioning Agent

※2 エチレンジアミン四酢酸

※3 国内では3%まで実績あり

- 本格化学洗浄については、S G器内スケールのほぼ全量が除去可能であり、洗浄効果は非常に高いものの、高濃度薬品によりS G器内構造物への腐食影響の可能性がある。
- A S C A洗浄に代表される希薄薬品洗浄は、S G器内構造物への影響はほぼ無視できる程度であり、スケールを粗密化（脆弱化）する効果がある。
- S G器内構造物への影響の観点から、現在は海外においても後者が主流であり、国内ではA S C A洗浄が十分な適用実績があることから、今回の対策として、A S C A洗浄法を適用することとする。

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

1. 薬品洗浄の方法について

(2) A S C A 洗浄の方法（基本的なケースを示す）

a. A S C A 洗浄の目的及びメカニズム

プラント停止時に酸の一種である E D T A を加え、比較的低温、アルカリ環境下で緩やかにスケール中の鉄と反応させ、スケールを粗密化し表面積を拡大することで、S G 伝熱性能の回復を図るもの。

A S C A 洗浄は鉄洗浄、銅洗浄の 2 ステップからなり、それぞれ内容は次の通りであり、スケールの粗密化（脆弱化）効果をもたらすのは鉄洗浄。

(a) 鉄洗浄

・スケールを一部溶解させ、粗密化させる目的で実施する。

- ① S G 器内を高濃度のヒドラジン水（1, 0 0 0 p p m）で浸漬し、還元性雰囲気を生成する。
- ② スケール中には空隙が存在することから、高濃度ヒドラジン水はスケール内部まで浸入し、還元性環境下でスケール（マグネタイト： Fe_3O_4 ）中の Fe^{3+} は Fe^{2+} として溶出することで、スケールの粗密化が進む。
- ③ 溶出した Fe^{2+} は E D T A と結合して安定な化合物（キレート錯体）を作る。

(b) 銅洗浄

- ・鉄洗浄によりスケール中に含まれていた銅（金属銅）が分離するが、銅が残留すると S G 器内で酸化（酸化銅）し、伝熱管の腐食性雰囲気生成に繋がるおそれがあるため、銅洗浄により除去する。
- ① 空気注入による酸化性雰囲気中で金属銅（C u）を Cu^{2+} として溶解する。
 - ② 溶出した Cu^{2+} は E D T A と結合して安定な化合物（キレート錯体）を作る。

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

1. 薬品洗浄の方法について

表1-2 A S C A 洗浄条件一覧（各洗浄条件は基本的なケースを示す）

項目	鉄洗浄	備考	銅洗浄	備考
EDTA	1～3% (10,000～30,000ppm)	国内実績値	0.36% (高浜発電所3号機実績)	Cu含有量の2倍
その他薬品	・アンモニア ・ヒドラジン (1,000ppm)	pH調整 還元性雰囲気	・アンモニア ・重碳酸アンモニウム	pH調整 EDTA触媒
温度	80℃	—	40～65℃	—
pH	9	アンモニアで調整	10	アンモニアで調整
洗浄雰囲気	還元性雰囲気	N ₂ バブリング	酸化性雰囲気	エアバブリング
洗浄時間	24hr	反応飽和目安	24hr	反応飽和目安

1. 薬品洗浄の方法について

b. A S C A 洗浄の工事概要（基本的なケースを示す）

S Gブローダウン系統等に仮設系統（図1-1参照）を接続し、表1-2の条件で薬品注入並びに鉄洗浄及び銅洗浄を行った後は、S Gブローダウン系統及び仮設系統を経由して排水し、器内のリンスを行う。

廃液については、廃液処理装置（図1-2参照）にて濃縮処理及び乾燥固化処理を行い減容し、最終的には、発電所内の焼却設備で焼却処分を行う。

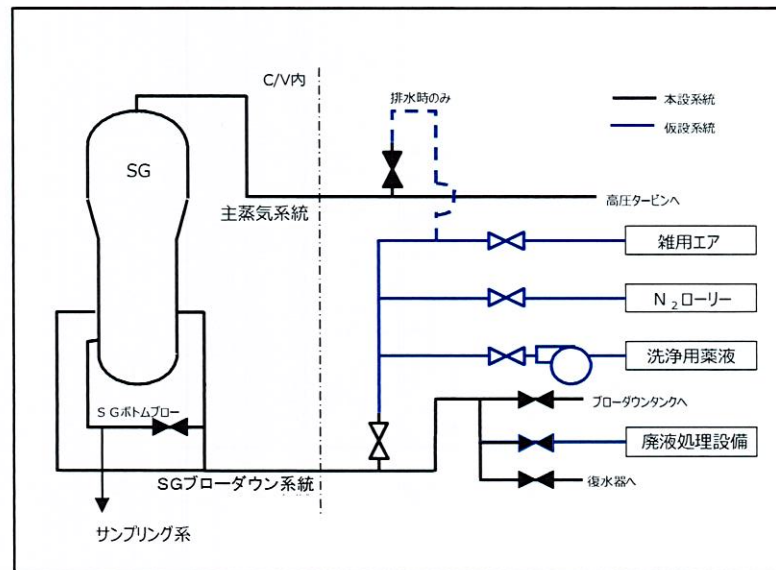


図1-1 洗浄用仮設系統概略図

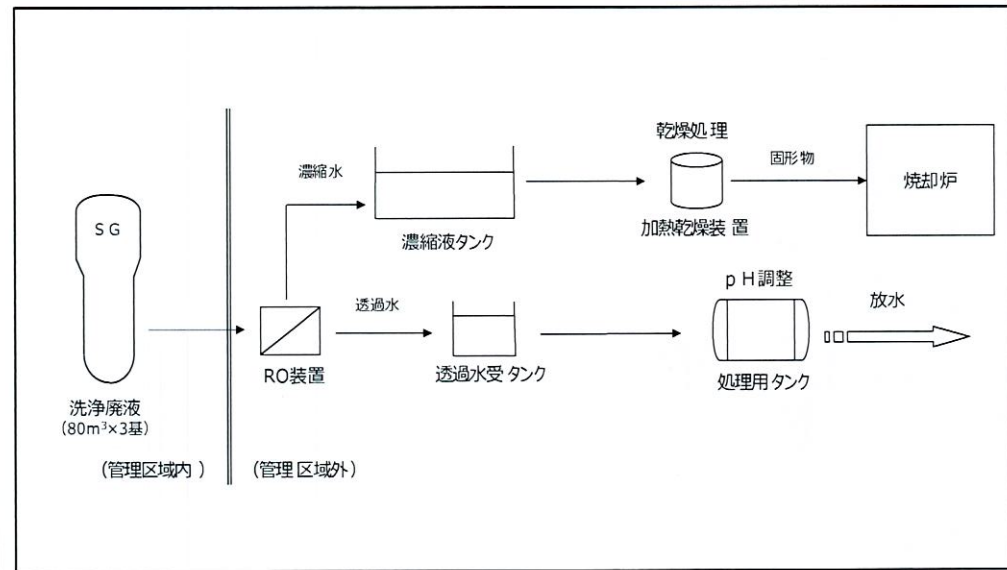


図1-2 廃液処理装置概略図

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

2. SG器内スラッジの影響について

- SG器内スラッジ量は、SG器内全体の鉄量に比べ、大きな割合を占めるものではないが、表面積が大きいスラッジが共存することにより、スケールの脆弱化効果を低減する可能性が考えられる。
- そこで、スラッジ共存環境下における洗浄効果に対する影響を確認するため、今回実施する薬品洗浄条件（EDTA3%×2回）でスラッジを共存させた試験を実施した。

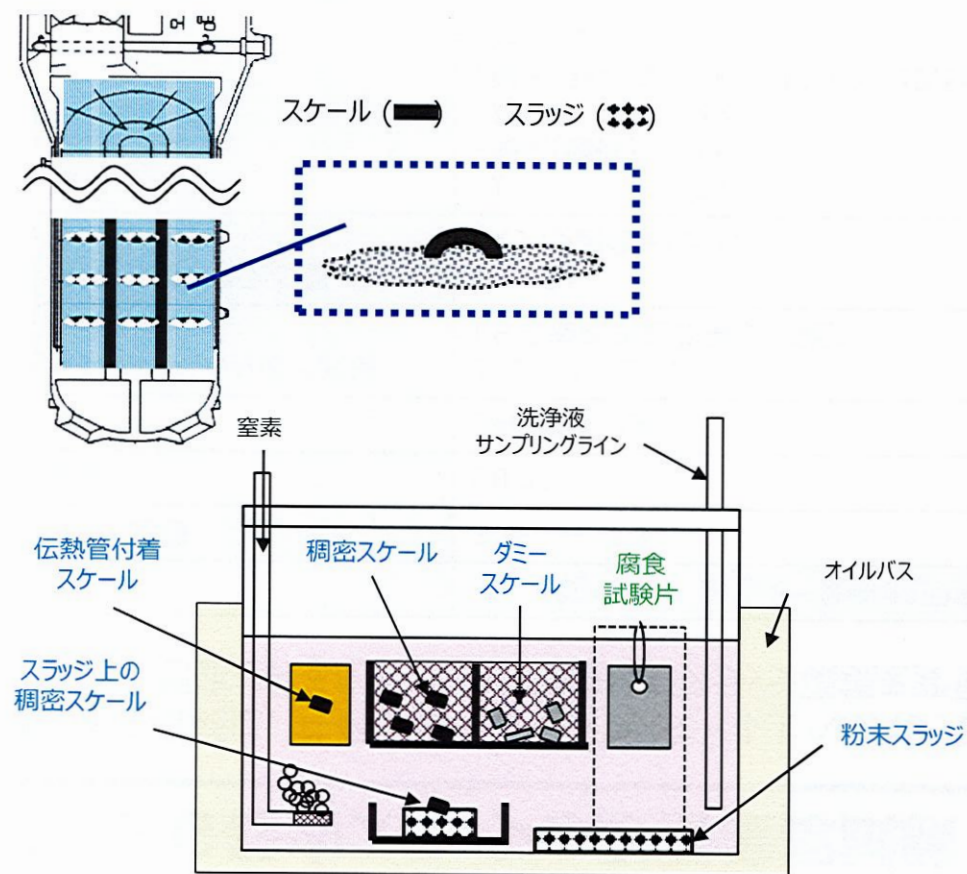
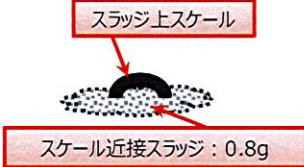
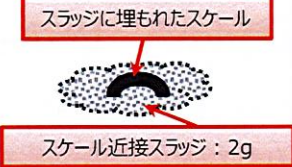


図 2 - 1 試験装置の概略図

項目	目的
伝熱管付着スケール	伝熱管に付着したスケールを模擬した、スケールの片側からの洗浄効果を確認するための試験片
稠密スケール	洗浄前後のスケール減量や稠密層の変化を評価するための試験片
ダミースケール	試験容器内の洗浄液/スケール量を調整するためのスケール（洗浄前後の固体を区別しない）
スラッジ上の稠密スケール	スラッジ上に落下したスケールに対する洗浄効果を確認するための試験片
粉末スラッジ	試験容器内の洗浄液/スラッジ量を調整するためのスラッジ
腐食試験片	実機の構成材料の腐食量を評価する試験片。接液面積比は実機を模擬。

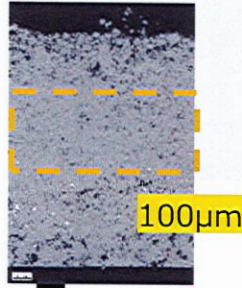
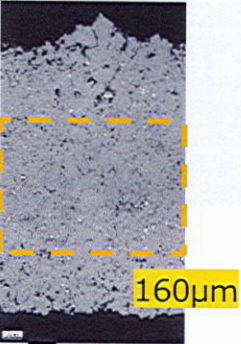
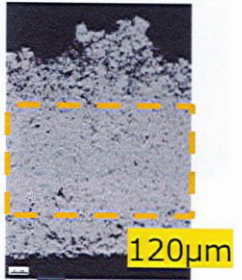
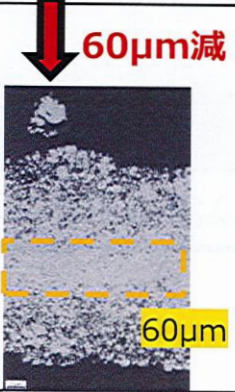
2. S G器内スラッジの影響確認試験 – 試験条件–

- 実機環境は、共存するスラッジ量やスケール上へのスラッジ堆積状況が多種多様であり、洗浄効果が異なることが想定されるため、スラッジ量およびスラッジ環境を変更した影響確認試験を実施

	試験①- 1、2（同一条件で2回実施）	試験②
EDTA濃度	3 % → 3 %	3 % → 3 %
温度	90 ℃	90 ℃
時間	24時間 x 2回	24時間 x 2回
スケール・スラッジ量／液量	11g / 400g-液 (S G器内想定鉄量の1.5倍)	14g/400g-液 (試験①にスケール量を合わせ、スラッジを増量)
スケール量：スラッジ量	9g：2g (スラッジ割合=18 %)	9g：5g (スラッジ割合=36 %)
想定鉄量内訳	・スケール 9 g ・稠密(個体) 1枚 ・スラッジ 2 g (粉末スラッジ：1.2g+スケール下スラッジ：0.8g) ・スラッジ上スケール 1枚	・スケール 9 g ・稠密(個体) 1枚 ・スラッジ 5 g (粉末スラッジ：3g+スケール下スラッジ：2g) ・スラッジ上スケール 1枚 ・伝熱管スケール 1枚
試験環境		

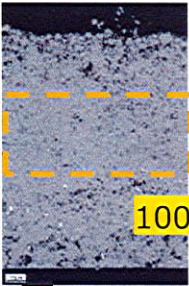
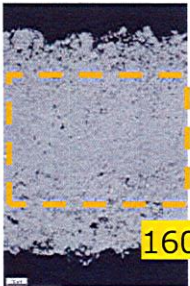
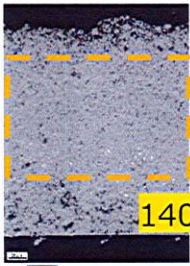
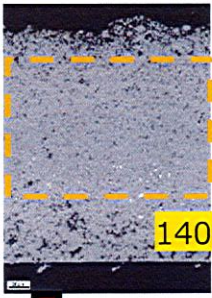
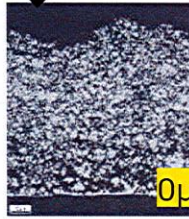
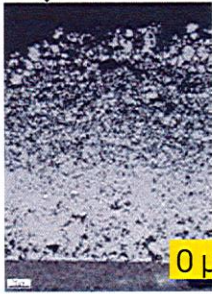
2. スラッジ共存環境における洗浄効果確認 – 試験結果 –

- 試験②の条件ではスラッジ上スケールに対して稠密層を完全に脆弱化することはできなかったものの、前回の薬品洗浄試験条件（3%→2%）に比べると一定の脆弱化効果を確認できた。

	試験①－1	試験①－2	試験②
スラッジの添加状況	 スラッジ上スケール スケール近接スラッジ：0.8g	 スラッジ上スケール スケール近接スラッジ：0.8g	 スラッジに埋もれたスケール スケール近接スラッジ：2g
洗浄前	 稠密層厚さ 100µm	 160µm	 120µm
洗浄後	 100µm減 0µm	 160µm減 0µm	 60µm減 60µm

2. スラッジ共存環境における洗浄効果確認 – 試験結果 –

- スラッジ上スケール以外のスケールに対する試験結果は以下のとおりであり、十分な脆弱化効果を確認できた。

	試験①－1 稠密スケール (スラッジ非接触)	試験①－2 稠密スケール (スラッジ非接触)	試験② 稠密スケール (スラッジ非接触)	試験② 伝熱管付着スケール (片面溶解)
洗浄前	 100μm	 160μm	 140μm	 140μm
洗浄後	 0μm 稠密層厚さ	 0μm	 0μm	 0μm

3. 薬品洗浄によるS G器内構造物の腐食量

- 試験①および②の腐食試験片（炭素鋼および低合金鋼）の腐食量を確認した結果、今回の薬品洗浄（EDTA3%+3%）では、腐食量は炭素鋼30μm程度、低合金鋼40μm程度であることを確認した。

表3-1 3%×2回（90℃）における炭素鋼および低合金鋼の腐食量確認結果^注

試験No.	炭素鋼 [μm]	低合金鋼 [μm]
1	33	38
2	30	40

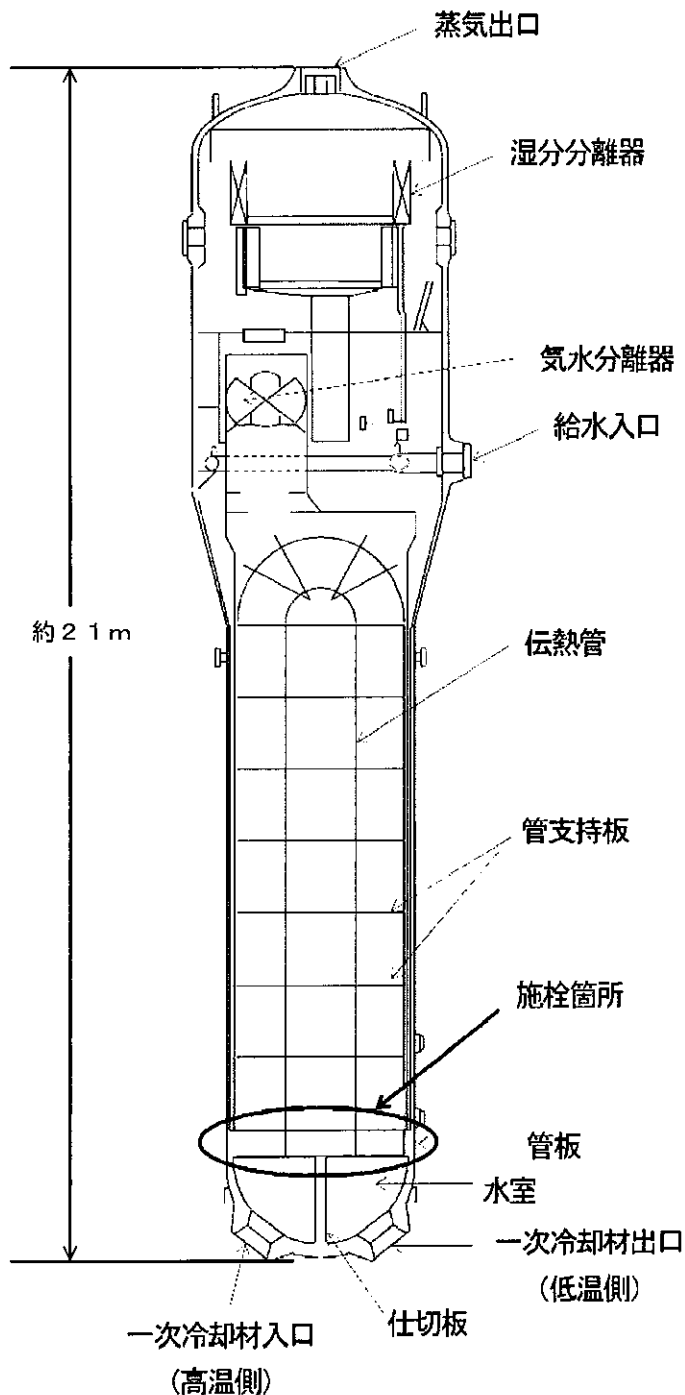
注) 腐食量は腐食試験片2枚の平均重量減量より算出

- 前回の薬品洗浄(EDTA3%+2%)における炭素鋼／低合金鋼の腐食量は約50μmと推定される。また、ステンレス鋼、インコネルの腐食量はごく軽微(0.1μm以下)と推定される。
- 今回の薬品洗浄(EDTA3%+3%)における腐食量は前回とほぼ同等で、炭素鋼／低合金鋼の腐食量は前回薬品洗浄との積算で約100μmになると推定される。
- 上記腐食量に対し、SG耐圧部(管板/胴部：低合金鋼)の許容腐食量は1mmと十分な裕度がある。



上記の検討結果を踏まえ、S G器内の構成部品に大きな影響を及ぼすことなく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3%でS G伝熱管全域を2回に設定した。

SG 伝熱管信号指示箇所補修概要図



	ステップ 1	ステップ 2
概略図		
説明	機械式栓内の中子にマンドレルをねじ込む。	機械式栓を伝熱管に挿入し、マンドレルを介して中子を引き下げることで、機械式栓を押し広げる。

機械式栓の取付要領

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

高浜発電所3号機 SG伝熱管の補修来歴

	A-SG (3,382本)	B-SG (3,382本)	C-SG (3,382本)	合計 (10,146本)	施 栓 理 由 ()内は、実施した対策
使用前	0	0	1	1	製作時の傷
第4回定期検査 (1989.10～1990.1)	7	12	4	23	振止め金具部の摩耗減肉
第5回定期検査 (1991.2～5)	1	1	0	2	振止め金具部の摩耗減肉 (改良型振止め金具へ取替え)
第9回定期検査 (1996.3～6)	0	1	1	2	健全管の抜管調査
第12回定期検査 (2000.2～4)	1	3	0	4	管板拵管部応力腐食割れ
第13回定期検査 (2001.6～8)	5	7	5	17	管板拵管部応力腐食割れ (ショットピーニング施工)
第15回定期検査 (2003.12～2004.3)	94	110	107	311	旧振止め金具部の摩耗減肉検出 (新型のECT装置を適用)
第21回定期検査 (2012.2～2016.2)	0	0	1	1	管板拵管部応力腐食割れ
第22回定期検査 (2016.12～2017.6)	1	0	0	1	管板拵管部応力腐食割れ
第23回定期検査 (2018.8～2018.11)	1	0	1	2	C: 管板拵管部応力腐食割れ A: 微小な減肉信号
第24回定期検査 (2020.1～2021.3)	0	1	1	2	外面からの摩耗減肉
第25回定期検査 (2022.3～)	3	1	0	4	A1本: 管板拵管部応力腐食割れ A1本・B: 外面からの摩耗減肉 A1本: 微小な減肉信号
累積施栓本数	113	136	121	370	
〔施栓率〕	〔3. 4%〕	〔4. 1%〕	〔3. 6%〕	〔3. 7%〕	

○SG1台あたりの伝熱管本数:3, 382本

○定期検査回数下部に記載しているカッコ内の年月は、解列～並列

○安全解析施栓率は10%

(伝熱管の施栓率が10%の状態において、プラントの安全性に問題がないことが確認されている)

高浜発電所3号炉 高経年化技術評価書【平成26年1月（平成27年10月一部変更）】より抜粋

資料6-1 高浜発電所3号炉 高経年化技術評価に基づく長期保守管理方針（1／3）

機種名	機器名	経年劣化 事象	健全性評価結果	現状保全	総合評価	長期保全計画		長期保守管理方針		
						高経年化への対応	実施 時期	No.	保守管理の項目	実施 時期
熱交換器	蒸気発生器	伝熱管の損傷	管板拡管部および拡管境界部応力腐食割れ等については、改善策を講じることによって有意なき裂の発生は著しく低下している。万一有意なき裂が生じた場合、検出限界の大きさのき裂が構造上許容されるき裂深さに達するまでの時間を評価し、適切な間隔で点検を実施することにより健全性を確保できると考える。	損傷形態、部位に応じた適切な渦流探傷プローブにより、定期的に全数渦流探傷検査を実施し、健全性を確認している。	管板拡管部および拡管境界部応力腐食割れ等については発生が否定できないことから、潜在している可能性のある応力腐食割れが進展した場合であっても構造上許容されるき裂の深さに達していないことを確認する必要がある。応力腐食割れの進展が構造上許容されるき裂の深さに達していないことは定期的な全数渦流探傷検査にて検知可能であり、点検手法として適切である。	伝熱管材料は600系ニッケル基合金であり、管板拡管部の応力腐食割れ等の発生が否定できないことから蒸気発生器取替を含めた保全方法を検討していく。	中長期	1	蒸気発生器の伝熱管の損傷については、蒸気発生器取替を含めた保全方法を検討する。	中長期
容器	原子炉容器	胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化	関連温度の上昇について、第4回までの監視試験結果を用いた評価により、運転開始後60年時点でも脆性破壊は起こらないと評価した。上部棚吸収エネルギーの低下については、運転開始後60年時点でも十分な上部棚吸収エネルギーがあると評価した。	定期的に超音波探傷試験を実施し、有意な欠陥がないことを確認している。JEAC4201に基づいて、計画的に監視試験を実施し、将来の破壊靱性の変化を先行把握している。JEAC4206に基づき、運転管理上の制限として加熱・冷却運転時に許容しうる温度・圧力の範囲（加熱冷却時制限曲線）および耐圧漏えい試験温度を設けて運用している。	健全性評価結果から判断して、胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化が機器の健全性に影響を与える可能性はないと考える。ただし、胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化に対しては、今後も計画的に監視試験を実施して健全性評価の妥当性を確認する必要がある。胴部（炉心領域部）材料の機械的性質の予測は監視試験により把握可能であり、また有意な欠陥のないことも超音波探傷検査により確認していることから、保全内容として適切である。	胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化に対しては、JEAC4201に基づき計画的に監視試験を実施して健全性評価の妥当性を確認するとともに、定期的に超音波探傷検査を実施していく。また、監視試験結果から、JEAC4206に基づき、運転管理上の制限として加熱・冷却運転時に許容しうる温度・圧力の範囲（加熱冷却時制限曲線）および耐圧漏えい試験温度を設けて運用していく。なお、健全性評価の結果から胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化が原子炉の安全性に影響を及ぼす可能性はないと考えるが、健全性評価の妥当性を確認するため、今後の原子炉の運転時間・照射量を勘案して第5回監視試験の実施計画を策定する。	中長期	2	原子炉容器の胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化については、原子炉の運転時間および照射量を勘案し、第5回監視試験の実施計画を策定する。	中長期

短期：平成27年1月17日からの5年間、中長期：平成27年1月17日からの10年間

減肉により施栓した伝熱管が隣接伝熱管へ及ぼす影響

減肉により施栓した伝熱管については、以下のとおり、伝熱管の減肉の進展性、強度および耐震性の観点から破損しないことを確認しており、他の健全伝熱管へ影響を及ぼすことはない。

１．減肉の進展性

対策として実施する薬品洗浄により伝熱管に付着している稠密なスケールは脆弱化するため、伝熱管を有意に減肉させることはなく、減肉の進展性はない。

２．強度

施栓後の伝熱管内は大気圧となるため、運転中および事故時には外圧（２次側から１次側への圧力）が作用する。この状態下で減肉伝熱管が耐えられる限界圧力を算出した結果、通常運転時および事故時のＳＧ２次側最大圧力に対して裕度があることを確認したことから、減肉により施栓した伝熱管が外圧で損壊することはない。

（評価内容）

国ＰＪ「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外圧強度評価手法を確立するため、外圧による高温圧壊試験を実施している。その試験結果から導出された外圧圧壊評価式を用いて、施栓後の外圧による圧壊圧力を算出した。

得られた圧壊圧力について、通常運転時および事故時の最大外圧に対する裕度を確認することにより、施栓された減肉管の強度を評価した。

その結果、圧壊圧力は 19.1MPa であり、通常運転時および事故時の最大外圧

□□□□ に対し、十分な裕度があることを確認した。

本評価式は、過去の高浜発電所３号機および４号機 蒸気発生器伝熱管の旧振止め金具による局部減肉の特殊設計施設認可申請においても用いられており、下式にて表される。

$$P_c = 0.9 S_y \cdot t / R (1.0 - a/t (-0.539 + 0.236 \sqrt{2c \cdot 0.0103 \cdot 2c}))$$

< 今回の計算条件 >

P_c : 局部減肉を有する伝熱管の圧壊圧力 (MPa)

S_y : インコネルＴＴ６００の設計降伏点=188.7MPa (@344℃)

t : 板厚=□□□□mm

R : 平均半径=□□□□mm

a : 減肉深さ=□□□□mm (=□□□□mm×0.57)

$2c$: 減肉幅=5mm

□□□□ : 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。

表１ 減肉を有する施栓後の伝熱管の強度評価結果

減肉深さ (%) * ¹	圧壊圧力 Pc (MPa)	事故時を包絡 する作用外圧 (MPa) * ²	裕度
57	19.1		

*¹ 最大減肉深さのA－SG（X 9，Y 2 2）で代表

*² 設計基準事故時および重大事故等時を包絡する２次側圧力

３．耐震性

基準地震動 S s 条件で減肉伝熱管の耐震評価を行った結果、許容値に対して裕度があることを確認したことから、減肉伝熱管が地震で損壊することはない。

（評価内容）

減肉を有する伝熱管の耐震性について、次のとおり評価した。

- ・ 既工認*³の基準地震動 Ss による地震力および伝熱管全長モデル（右図）*⁴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
- ・ 保守的に一様外面減肉と仮定し、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

*³ 既工認添付資料 13-17-3-2-2「蒸気発生器内部構造物の耐震計算書」（原規規発第 1508041 号、平成 27 年 8 月 4 日認可）

*⁴ 高浜発電所 3 号機既工認（新規制基準工認）補足説明資料「高浜発電所 3 号機 耐震性に関する説明書に係る補足説明資料 蒸気発生器伝熱管の評価について 関西電力株式会社 平成 27 年 7 月」

図 伝熱管地震応答解析モデル

その結果、今回認められた減肉を考慮しても、発生応力および疲労累積係数に十分な裕度があることを確認した。

：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。

表２ 減肉を有する施栓後の伝熱管の耐震性評価結果

応力分類	発生応力* ⁵ および疲労累積係数	許容値	裕度
一次一般膜応力	169MPa	334 MPa	1.9
膜応力+曲げ応力	210 MPa	434 MPa	2.0
一次+二次応力	247 MPa	492 MPa	1.9
疲労累積係数	0.070	1	-

*⁵ 最大減肉深さのA-S G (X 9, Y 2 2) で代表

4. 減肉した伝熱管の破断を想定した場合の影響

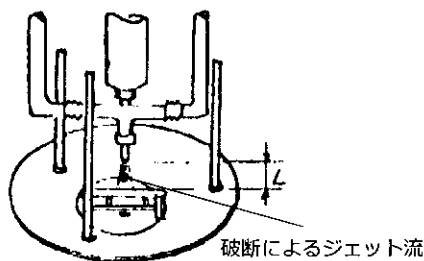
1. ～ 3. で述べた通り、減肉により施栓した伝熱管については、減肉の進展性、強度および耐震性の観点から破損しないことを確認しており、他の健全伝熱管へ影響を及ぼすことはないが、ここでは仮に減肉した施栓管が破断した場合の影響を検討する。

「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」の検討において、伝熱管 1 本が破断しても隣接管へ有意な影響を与えないことが確認されている。

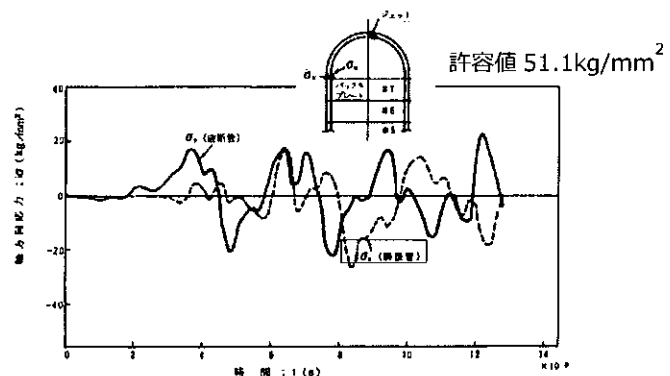
その検討において根拠とされた実験は「蒸気発生器信頼性実証試験」(昭和 50～55 年度：発電用熱機関協会)によるものであり、その中では、次の実験および解析により、伝熱管が破断しジェット反力によって隣接管へ衝突しても、隣接管に発生する応力は許容値以下であるため、有意な影響がないことを確認している。

また、今回減肉により施栓した伝熱管については、その内部に 1 次系系統圧力がかかっておらず、破断時にジェット反力は生じないため、隣接管への影響はない。

実験：破断時のジェット反力を取得



解析：破断管の隣接管への衝突による発生応力を評価



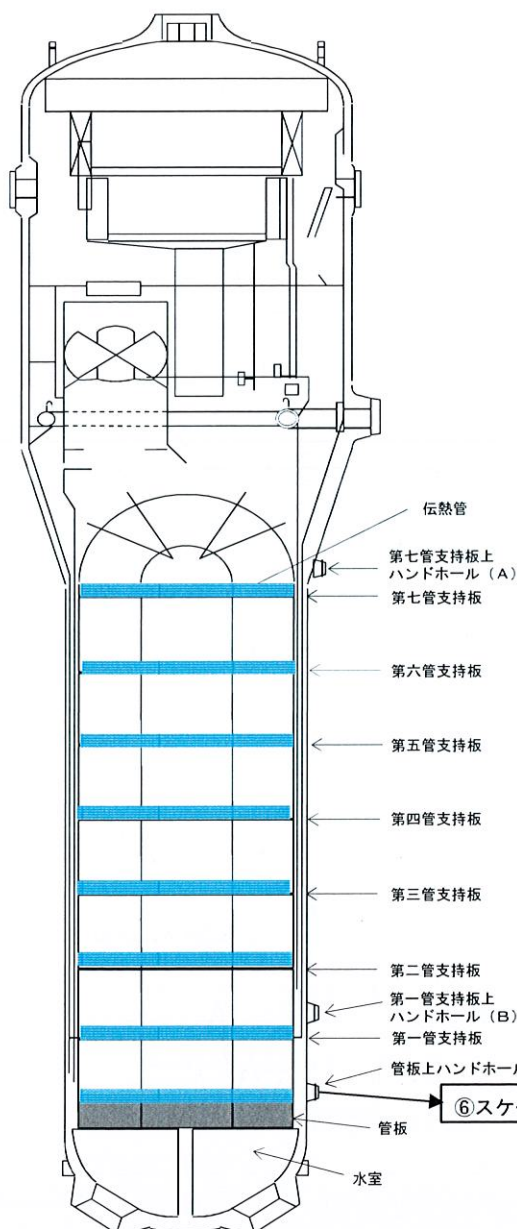
小型高圧洗浄装置による洗浄について

SG器内に残存するスケール等を回収するため、小型高圧洗浄装置を用いてSG器内の洗浄を実施する。

清掃は上層の支持板から順に下層の支持板にスケール等を落下させていき、最終的に管板の洗浄とともに回収する。

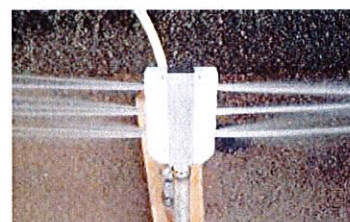
洗浄箇所：

(管板および第一管支持板から第七管支持板上)



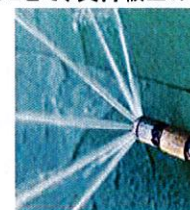
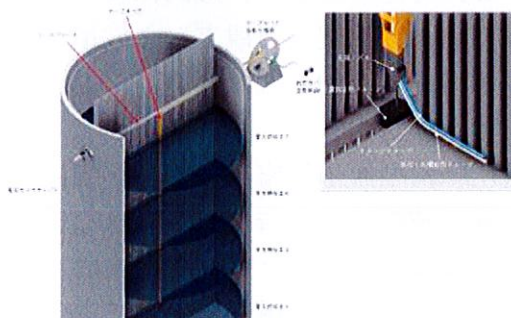
①「水平ノズル(樹脂ヘッド)」による第七管支持板の洗浄

第七管支持板上ハンドホール(A)より第七管支持板に装置を挿入し、フロースロット上を走査させながら洗浄水を噴射することで、支持板上のスケール等を押し流し下層の支持板に落下させる。



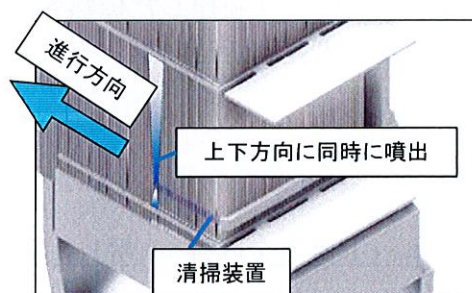
②「管支持板上走査ノズル」による第六～第三管支持板の洗浄

第七管支持板上ハンドホール(A)より上層の支持板から順に装置を吊り下ろし、支持板上を走査させながら洗浄水を噴射することで、支持板上のスケール等を下層の支持板に落下させる。



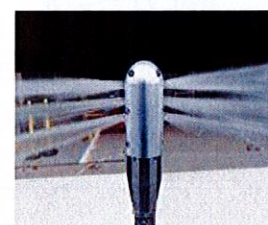
③「垂直ノズル」による第二及び第一管支持板の洗浄

第一管支持板上ハンドホール(B)より第二管支持板と第一管支持板の間に装置を挿入し、支持板間を走査させながら上下方向に洗浄水を噴射することで、両支持板の伝熱管と支持板の隙間を清掃し、スケール等を支持板及び管板上に移動させる。



④「水平ノズル(楕円ヘッド)」による第二管支持板の洗浄

第一管支持板上ハンドホール(B)より第二管支持板フロースロットに装置を挿入し、フロースロットを移動させながら洗浄水を噴射することで、支持板上のスケール等を押し流し下層の支持板に落下させる。



⑤「水平ノズル(樹脂ヘッド)」による第一管支持板の洗浄

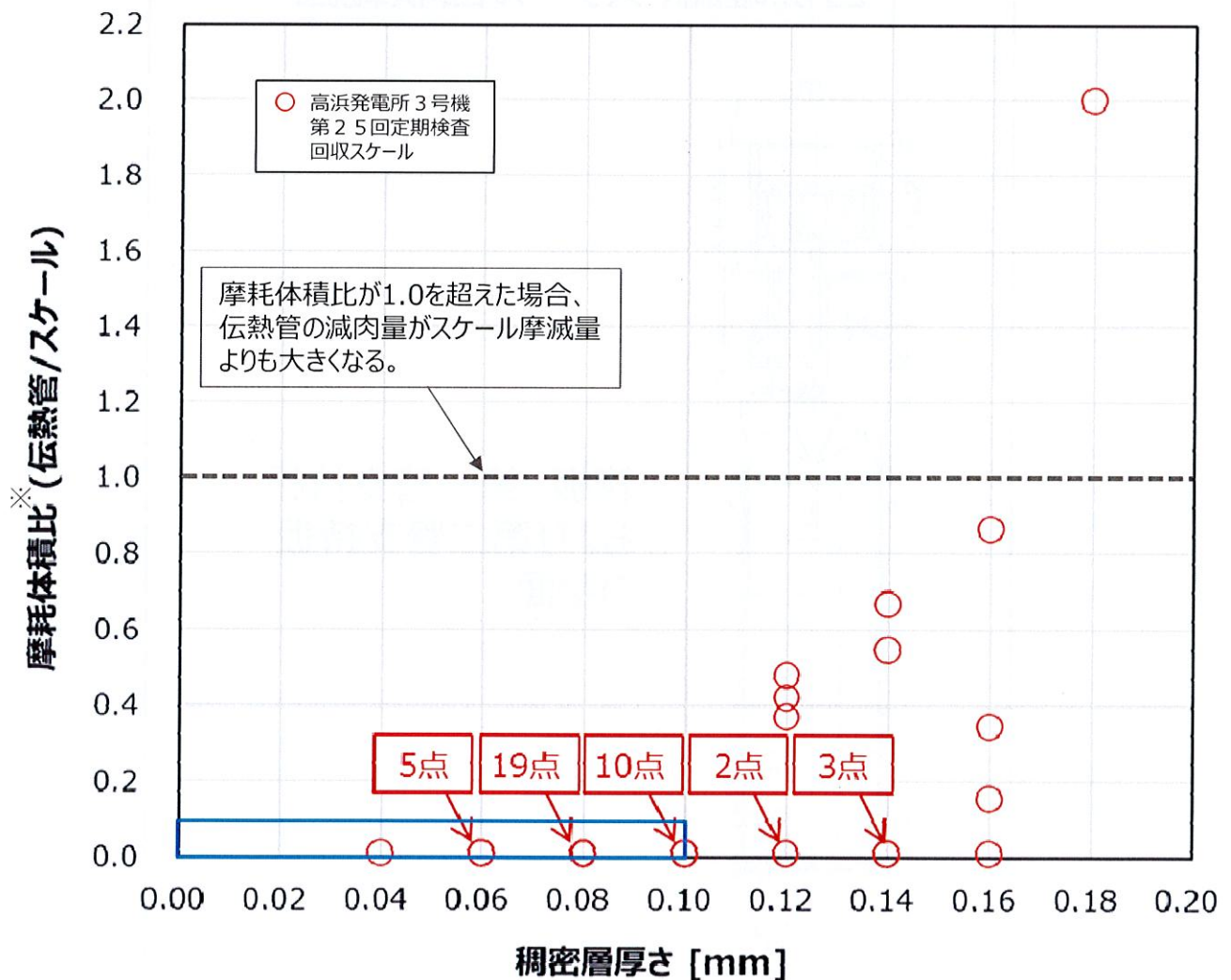
第一管支持板上ハンドホール(B)より第一管支持板に装置(①と同様)を挿入し、フロースロット上を移動させながら洗浄水を噴射することで支持板上のスケール等を押し流し、管板に落下させる。

⑥「ランシング装置」による管板の洗浄とスケール等の回収

ランシング装置を用いた管板の洗浄(従来より定期検査毎に実施)を行うとともに、上層の各支持板から落下させたスケール等を管板上ハンドホール(C)から回収する。

スケールに対する保全指標について（1／3）

- 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、S G伝熱管に付着するスケールに対し、薬品洗浄の頻度に関する保全指標については、以下のとおり。
- 高浜発電所3号機および4号機については、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行う。
- 稠密層厚さ0.1 mm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。
- なお、高浜発電所3号機および4号機のS G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、S G取替え（以下、S G R）に係る検討を進めていく。



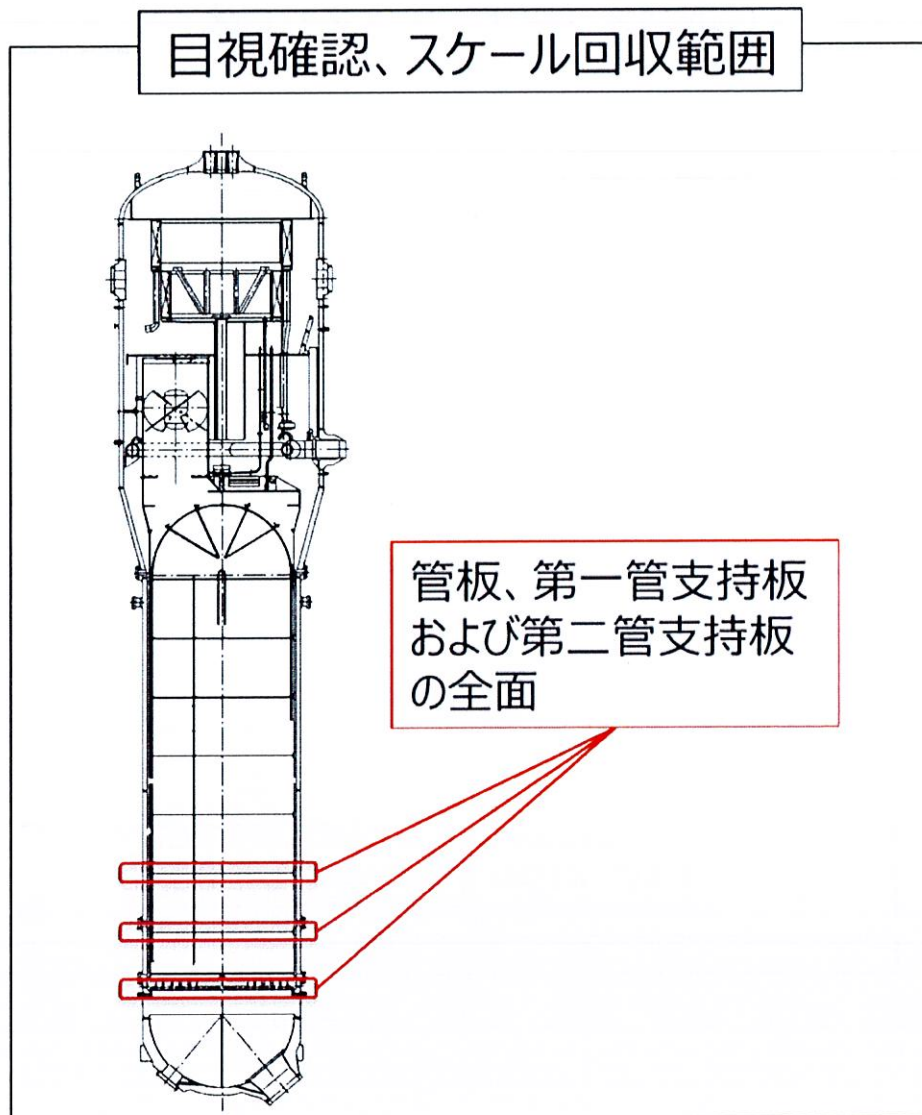
※ 摩耗体積比（伝熱管/スケール）：摩耗試験における伝熱管の減肉量とスケールの摩滅量の体積比

スケールに対する保全指標について（2／3）

○スケール選定の考え方について

伝熱管を減肉させるような稠密で薄いスケール(板厚0.2～0.3mm)は、伝熱管の下部で生成されと考えられるため、稠密層本体のスケールが一番多く堆積していると考えられるエリア（蒸気発生器の管板、第一管支持板および第二管支持板）の全面を目視確認し、各板あたり20個程度のスケールを採取し、稠密層厚さの確認を実施する。

次に、採取したスケールから0.2～0.3mmのもの、かつ比較的大きいもの（長さ10mm程度）を10個程度選定し、摩耗試験を実施する。



スケールに対する保全指標について（３／３）

- 他プラントについては、代表プラントでスケールを回収し、いずれも稠密層厚さが 0. 1mm未満であることおよび摩耗体積比が十分小さいこと(0. 1未満)を確認している。
- また、現在の鉄持込み量は約 3 0 k g / サイクルと十分低く抑えられている。
- 従って、至近で薬品洗浄を行う必要はないと考えているが、高浜発電所 3 号機および 4 号機の水平展開として、以下のとおり、実機スケールによる監視を行っていく。

＜スケール監視方法＞

プラント		鉄持込み量 ※	頻度	確認内容	備考
S G R 未実施 プラント	大飯発電所 3号機	1,850kg	2 定検毎	稠密層厚さ及 び摩耗体積比 を確認	薬品洗浄を実施済みであり、 高浜発電所 3 号機およ び 4 号機と同等の鉄持 込み量まで計算上10定 検以上となるが、実機ス ケールを確認し確実に発 生を防止するとともに、 データの蓄積を図る。
	大飯発電所 4号機	1,970kg	同上	同上	
S G R プラント	高浜発電所 1号機	680kg	－	－	S G Rプラントで鉄持込 み量が最大の高浜発電 所 2 号機について、今回 採取できるスケールはない 状況であったが、念のため、 高浜発電所 2 号機を代 表プラントとしてスケールの 確認を行う。
	高浜発電所 2号機	940kg	2 定検毎	スケールの有無 を確認	
	美浜発電所 3号機	810kg	－	－	

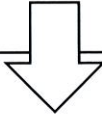
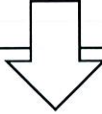
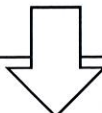
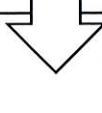
※高浜発電所 3 号機および 4 号機の最初の外面減肉発生時の鉄持込み量は約2,400kg

＜薬品洗浄実施時期＞

- 薬品洗浄については、蓄積したデータの傾向を踏まえ、従来の電気出力維持の観点に加え、摩耗減肉に対する予防保全の観点で、適切なタイミングで行うこととする。

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

高浜発電所 3 号機 S G 器内のスケールに対する対策の変遷

時期	目的	対策
前回以前 	S G への鉄の持込み量を低減 (B E C 穴閉塞対策 および伝熱管への スケール付着抑制)	・ 運転開始以降、2 次系統水の水質管理として、A V T 処理 (ヒドラジン、アンモニア) を実施していたが、1998 年より、抽気・ドレン系からの鉄持込み抑制のため E T A 処理を採用 ・ その後、2005 年～2006 年に給水加熱器など銅系材料機器の取替えを実施し、2009 年より給水高 p H 処理を採用
前回 (第 2 4 回定期検査) 	スケールの脆弱化	S G 器内の薬品洗浄 (条件) 1 回目：第三管支持板以下、薬品濃度 3 % 2 回目：伝熱管全域、薬品濃度 2 %
今回 (第 2 5 回定期検査) 	S G 器内に残存するスケール等を可能な限り除去	小型高圧洗浄装置による洗浄 範囲：第一管支持板～第七管支持板 および管板
	スケールの脆弱化	S G 器内の薬品洗浄 (条件) 伝熱管全域、薬品濃度 3 % × 2 回
今後の対応 	・ スケールの性状確認 ・ スケール影響除去	今後の S G 保全 ・ 毎定期検査時にスケールを回収し、稠密層厚さの確認、摩耗試験を実施 ・ 稠密層厚さの確認、摩耗試験にて、稠密層厚さ 0.1mm 未満および摩耗体積比 0.1 未満を超えた場合は、薬品洗浄や小型高圧洗浄装置による洗浄を実施 ・ S G 取替えに係る検討