

関原発 第438号  
2023年11月9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 望

高浜発電所3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について

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

## 発電用原子炉施設故障等報告書

2023年11月9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	2023年10月17日 11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C)										
事象の状況	<p>1. 事象発生の状況</p> <p>高浜発電所3号機 (加圧水型軽水炉、定格電気出力87万kW、定格熱出力266万KW) は、2023年9月18日より第26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<sup>*1</sup>全数について、健全性を確認するため渦流探傷試験<sup>*2</sup> (以下「ECT」という。) を実施した結果、A-SGの伝熱管1本およびC-SGの伝熱管1本について、有意な信号指示<sup>*3</sup>が認められた。</p> <p>A-SGの1本は、高温側の第二管支持板部付近に外面からの減肉とみられる信号指示が認められ、C-SGの1本は、高温側の管板部に管軸方向に沿った内面きずを示す信号指示であった。</p> <p>以上から、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則第18条ならびに第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2023年10月17日11時00分に判断した。</p> <p><sup>*1</sup> SGの中で一次冷却材 (1次側) と給水 (2次側) の熱交換を行う逆U字形の管群。一次冷却材は入口管板部 (高温側) から入り、給水と熱交換後に出口管板部 (低温側) へ流れる。</p> <p><sup>*2</sup> 高周波電流を流したコイルを伝熱管に挿入することで伝熱管に渦電流を発生させ、伝熱管の欠陥により生じる渦電流の変化を電気信号として取り出すことで欠陥を検出する試験 (ECT: Eddy Current Test)。全周に対して渦電流の発生と検出を別々のコイルを用いた24組のコイルで伝熱管の欠陥による渦電流の変化を信号として検出する。</p> <p><sup>*3</sup> ノイズレベル (雑音信号レベル) を超える信号であって、SG管支持板等の外部構造物あるいは伝熱管の形状等に起因する信号 (疑似信号) ではない信号指示。</p> <p>2. ECT結果</p> <p>(1) 検査期間</p> <p>2023年10月2日 ~ 2023年10月17日 (定期事業者検査終了日)</p> <p>探傷検査・データ整理期間 2023年10月 2日~2023年10月14日</p> <p>解析・評価検査期間 2023年10月15日~2023年10月17日</p> <p>(2) 検査範囲</p> <p>SGの施栓<sup>*4</sup>済みの伝熱管を除く、全数の伝熱管についてECTを実施した。</p> <p style="text-align: right;">(単位: 本)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>SG</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>合計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>検査対象本数</td> <td>3,269</td> <td>3,246</td> <td>3,261</td> <td>9,776</td> </tr> </tbody> </table> <p><sup>*4</sup> 伝熱管の1次側出入口部分に機械式栓を用いて栓をし、供用外とすること。</p> <p>(3) 検査結果</p> <p>ECTデータを評価した結果<sup>*5</sup>、2本の伝熱管に有意な信号指示を確認した。</p> <p>リサーチ表示<sup>*6</sup> (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、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おり、C-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た。</p> <p>また、外面からの減肉とみられる有意な信号指示が認められた箇所を色調図表示<sup>*7</sup>で分析した結果、第二管支持板部付近であった。</p> <p>今回有意な信号指示を確認した箇所について、前回の第25回定期検査におけるECTデータを確認した結果、有意な信号指示は認められなかったことを確認した。</p>	SG	A	B	C	合計	検査対象本数	3,269	3,246	3,261	9,776
SG	A	B	C	合計							
検査対象本数	3,269	3,246	3,261	9,776							

	(単位：本)									
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>SG</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>合計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>指示管本数</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	SG	A	B	C	合計	指示管本数	1	0	1
SG	A	B	C	合計						
指示管本数	1	0	1	2						
事象の状況	<p>A-SG 第二管支持板 X46, Y7：減肉率 約63%</p> <p>C-SG 管板部 X70, Y5：管軸方向に沿った非貫通の内面きず</p> <p>*5 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。</p> <p>*6 渦電流変化の電気信号を図で表したものを (水平成分および垂直成分を同一画面に表示)。</p> <p>*7 24組分のコイルのチャートを平面状に並べ、信号振幅に応じて色調として表示させたもの。伝熱管全長についての信号指示の大きさや位置等の分析に用いる表示方法。</p>									
事象の原因	<p>1. 原因調査</p> <p>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。</p> <p>(1) 内面きず</p> <p>高浜発電所3号機では、2000年2月に開始した第12回定期検査において、4本の伝熱管の高温側管板部の伝熱管の拡管上端部に内面きずとみられる有意な信号指示があり、原因は、応力腐食割れ (以下、「PWSCC」という。) によるものと推定された。また、第13回定期検査においても17本の伝熱管について同様の事例が認められたことから、予防保全対策として、伝熱管内面の応力緩和を図るため、ショットピーニング<sup>*8</sup>を実施した。</p> <p>その後も、前回の第25回定期検査までのうち、4回の定期検査において、それぞれ伝熱管1本にPWSCCが認められており、高浜発電所3号機の蒸気発生器伝熱管のPWSCCは、合計25本となっている。</p> <p>今回、1本の伝熱管に認められた内面きずとみられる有意な信号指示についても、これまでと同様の原因と推定されることから、当該伝熱管のECT波形等の調査および一次冷却材の圧力、温度や水質といった今サイクルの運転履歴の調査を実施した。加えて、伝熱管の製造履歴、材料調査、設計図書調査、施工記録調査の過去の調査結果や記録を改めて確認した。</p> <p><sup>*8</sup> 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。</p> <p>a. PWSCCに関するこれまでの知見 (高浜発電所の経験)</p> <p>(a) 抜管調査結果</p> <p>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<sup>*9</sup>製の伝熱管が高温の一次冷却材中でPWSCC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<sup>*10</sup>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。</p> <p>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。</p> <p><sup>*9</sup> 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。</p> <p><sup>*10</sup> 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。</p>									

事 象 の 原 因

(b) 抜管調査以降のPWSCCの発生とショットピーニングの効果

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。

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）
- ・第25回定期検査（2022年3月～2022年7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）

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。

なお、高浜発電所3号機では第13回定期検査時に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回定期検査時以降、伝熱管に有意な信号指示が認められている。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。

b. 今回の定期検査における確認結果

(a) ECT波形等の調査

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抜管している上端部\*<sup>11</sup>（22ピッチ）に有意な信号指示があることを確認した。

また、リサーチ表示（信号表示）並びに鳥瞰図表示\*<sup>12</sup>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。

\*<sup>11</sup> 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）で抜管した後に、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。

\*<sup>12</sup> 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) 今サイクルの運転履歴調査

ア. 一次冷却材温度、圧力

運転開始以降、今サイクルを含む第26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。

#### イ. 放射線監視装置

第26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。

#### ウ. 一次冷却材の水質

運転開始以降、今サイクルを含む第26回定期検査開始までの間、一次冷却材中のpH、電気伝導率、塩化物イオン、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。

<以降、過去の調査結果の改めての確認>

#### (c) 製造履歴調査

建設時の製造記録を確認した結果、問題となる記録はなかった。また、SGの製造手順について確認した結果、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。

#### (d) 材料調査

当該部分における製造時のミルシートを確認した結果、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製であった。

#### (e) 設計図書調査

工事計画認可申請書の強度計算書を確認した結果、延性割れ<sup>\*13</sup>、疲労割れ<sup>\*14</sup>に対して、設計上考慮されていた。

<sup>\*13</sup> 材料に過大な応力がかかった時に発生する割れ(破壊)。

<sup>\*14</sup> 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) 施工記録調査

第13回定期検査時におけるショットピーニングの施工記録を確認した結果、適切な施工条件で施工されていることを確認した。

#### c. PWSCC以外の損傷モードに対する確認結果

SGの伝熱管内面におけるPWSCC以外の損傷モードについて、念のために確認した結果は以下のとおり。

#### (a) 粒界腐食割れ<sup>\*15</sup>、ピitting<sup>\*16</sup>について

一次冷却材環境下では塩化物イオン、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。

<sup>\*15</sup> 金属の結晶粒の境目(粒界)に沿って進展する腐食。

<sup>\*16</sup> 塩化物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。

事 象 の 原 因

事 象 の 原 因

(c) エロージョン<sup>\*17</sup>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。

<sup>\*17</sup> 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。

(2) 外面減肉

高浜発電所3号機および4号機では、高浜発電所3号機第24回、第23回定期検査および高浜発電所4号機第22回定期検査において、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号機第23回定期検査においても、外面からの減肉信号指示が認められたため、小型カメラによりSG器内を調査した結果、減肉箇所スケール<sup>\*18</sup>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、SG伝熱管の外面減肉への対策として、高浜発電所3号機第24回及び高浜発電所4号機第23回定期検査にてSG器内のスケールの脆弱化を図ることを目的に、薬品洗浄<sup>\*19</sup>を実施した。その結果、高浜発電所3号機第25回定期検査、高浜発電所4号機第24回定期検査にて回収したスケールが脆弱化していることを確認した。

その後、高浜発電所3号機第25回定期検査において、スケールによるものと推定される伝熱管の外面減肉事象が再度発生したことを踏まえ、スラッジ影響を考慮した薬品洗浄効果の確認試験を行った。その結果、スケール近傍にスラッジが存在する場合はスケールの脆弱化効果が低減することを確認したため、高浜発電所3号機第25回定期検査および高浜発電所4号機第24回定期検査において実施した薬品洗浄の前に、SG器内のスケールおよびスラッジを可能な限り除去することとし、小型高圧洗浄装置を用いて管支持板上も含めたSG器内の洗浄を実施した。洗浄後、小型カメラによりSG器内の状況を確認した結果、管支持板上等のスケールおよびスラッジを大幅に低減(SG器内からのスケールおよびスラッジ回収量:(3号機)約130 kg、(4号機)約160 kg)できたことを確認した。

なお、薬品洗浄については、SG器内の構成部材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の再検討を行うとともに、工場で試験を実施した。その結果、伝熱管全域を薬品濃度3%での薬品洗浄を2回実施することにより、スケール近傍にスラッジが存在する場合でもスケールを脆弱化できることを確認できたことから、同条件(薬品濃度、回数)での洗浄を実施した。洗浄後にSG器内からの鉄除去量を評価した結果、高浜発電所3号機および4号機ともに1台あたり約1,310 kgであった。

今回、A-SGの高温側の第二管支持板下面に認められた外面からの減肉とみられる有意な信号指示についても、これまでと同様にスケールが原因と推定されることから、当該伝熱管のECT波形等の調査に加え、伝熱管表面の外観観察、付着物の分析、スケール残存状況の調査、洗浄効果の調査を実施した。また、スケール以外の要因による減肉メカニズムに対しても、調査を実施した。

<sup>\*18</sup> 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。

<sup>\*19</sup> 希薄なエチレンジアミン四酢酸(EDTA: Ethylene Diamine Tetra acetic Acid)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。

a. スケールによる外面減肉に関するこれまでの知見

過去に発生した外面減肉事象から既に得られている知見は以下のとおり。

(a) スケールによる減肉メカニズム

以下のとおり生成・剥離したスケールが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することで摩耗減肉が発生

すると推定される。

#### ア. スケールの生成メカニズム

##### (ア) 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SG 2次側へ持込まれ、次の2つの現象が発生することで伝熱管表面にスケールとして付着することが分かっている。

##### I. 析出付着

給水とともにSG 2次側へ持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、伝熱管表面の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、伝熱管表面の下部に付着するスケールは稠密で薄い傾向がある。

##### II. 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<sup>\*20</sup>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。

\*20 密度が比較的lowく、粗な状態。

## 事 象 の 原 因

##### (イ) 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、断面ミクロ観察を実施している。その結果、伝熱管の上部のスケールほど粗密で厚く、伝熱管の下部ほど稠密で薄いことを確認した。

また、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。

##### (ウ) 2次系の水質管理調査

スケールは、給水とともに持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。

##### I. 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器内への鉄の持込み量低減を図るべく、AVT<sup>\*21</sup> (All Volatile Treatment) 処理(pH9.2)、ETA<sup>\*22</sup>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の実測データは次のとおりであり、p

Hの低い水処理方法ほど給水中の鉄含有量が多いことが分かっている。

\*21 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。

\*22 エタノールアミン。

## II. 給水中の鉄含有量

上記水処理方法での給水中の鉄含有量は次のとおりである。

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

## III. 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4.0万時間

## IV. 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1,700kg
E T A処理	約750kg
高E T A処理	約70kg
高アンモニア処理	約170kg
合計	約2,690kg

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。

### (エ) 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\*23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 $\mu\text{m}$ ～100 $\mu\text{m}$ 程度であった。

\*23 伝熱管の外表面に不純物が付着するなどにより、熱伝達特性を低下させる度合いを示す指標。

以上の結果から、スケール厚さは経年的に増加していくものであることを確認した。また、現在では高E T A処理や高アンモニア処理によって給水の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約30kg／SG程度に抑えられていることを確認した。なお、1サイクルにおけるスケール稠密層生成速度は十分小さいため、過去2回の薬品洗浄により今後新たに厚みのある稠密層を有するスケールが生成される可能性は低いと考えている。

### イ. スケールの剥離

#### (ア) 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I.～III.のとおりで

事 象 の 原 因

あり、スケールはプラント停止時の伝熱管の熱収縮に追従できずにフレック状（板状）に剥離したものと推定される。

- I. 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。
- II. 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。
- III. プラント停止時に隙間の埋まったスケールは、伝熱管の熱収縮に追従できず剥離する。

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。

(イ) 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、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、長期停止後の第24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、長期停止後は、スケールの粒径が大きくなった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。

ウ. スケールによる減肉メカニズム

スケールとの接触で伝熱管が減肉するメカニズムは、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<sup>\*24</sup>により摩耗するものと推定される。

なお、最大減肉深さは管支持板部の伝熱管の振幅（伝熱管と管支持板BEC穴ランド部<sup>\*25</sup>の隙間）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。

<sup>\*24</sup> 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。

<sup>\*25</sup> 管支持板に加工されている四ツ葉管穴のうち凸面部。

(b) 高浜発電所3号機および4号機の特異性

ア. 当社他プラントとの鉄持込み量、薬品洗浄実績および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、スケールの厚さや長期停止に伴うスケールの剥離量は、スケール回収量に現れている可能性があることから、あわせて長期停止前後のスケール回収量につい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

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SGの運転時間が最も長い高浜発電所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*26 (万時間)	24.2	23.2	18.0	19.2	9.3	10.9	12.5
鉄持込み量 (kg)	2,690	2,520	1,880	2,010	810	680	940
薬品洗浄 実績回数	2回	2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)	16.2 (第16回)	—	—	—
	23.2 (第25回)	23.2 (第24回)	17.0 (第18回)				

\*26 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取替え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。

事 象 の 原 因

(イ) スケール回収量

スケール回収量\*27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は認められなかった。

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。

\*27 スラッジランシングで回収したスラッジおよびスケールのうち、スケールの回収量を表2に示す。

＜表2：スケール回収量（長期停止前後比較）＞

プラント	長期停止前 (kg)	長期停止後 (kg)			
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)	6.52 (第25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)	22.61 (第24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)	0.01未満 (第19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)	0.01未満 (第18回)	—

イ. 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と鉄持込み量に相関があるかを検証するため、当社他プラントのSG下部からスケールを採取し、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取替えプラント（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。なお、高浜発電所3号機については、高浜発電所4号機とスケール性状が同等であることを確認している。

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*28： 2,490kg	大飯発電所4号機 鉄持込み量*28： 1,950kg	高浜発電所2号機 鉄持込み量*28： 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

\*28 鉄持込み量はスケール回収時の値。

なお、大飯発電所4号機は第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。

ウ. 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\*29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、有意な摩耗減肉を与える可能性は低いことを確認した。

\*29 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。

有意な摩耗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号機から採取したスケールの摩耗試験を実施した結果、空隙率5%以下の稠密層厚さが0.1mm未満のスケール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、有意な摩耗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。

エ. スケールにより減肉した国内外事例調査

2023年10月末時点までの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、8プラントのみであることを確認した。

(c) 薬品洗浄による影響

薬品洗浄におけるSG器内の残存スケール量の違いがSG器内構成部材に与える腐食影響を評価するための試験を実施した。試験の結果、薬液能力に対してスケール量が少ない場合には、炭素鋼製の管群外筒等の腐食量が相対的に大きくなることを確認した。

b. 今回の定期検査における確認結果

(a) ECT波形等の調査結果

リサーチ表示（信号表示）で分析した結果、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、前回の第25回定期検査における

事象の原因

事 象 の 原 因

E C T 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。

また、E C T の信号指示を確認した結果から、スケールの剥離およびデンテイ  
ング\*<sup>30</sup>による指示ではないと推定した。

\*<sup>30</sup> 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) 伝熱管の外観観察

小型カメラを用いて、減肉信号を確認した伝熱管表面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。なお、伝熱管減肉部位におけ  
る外観観察結果は、E C T 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。

A-SG 第二管支持板高温側下面付近（減肉率：約63%）：

周方向約7mm、軸方向1mm以下（X46, Y7）

また、A-SGの減肉信号を確認した伝熱管（X46, Y7）を小型カメラにて目  
視点検を実施した結果、きずに接触する幅約7mm、長さ約23mmの付着物を確  
認した。

(c) 付着物の分析結果

A-SGの減肉信号を確認した伝熱管付近で回収された付着物について分析を行  
った。

ア. 外観観察

付着物の外観観察の結果、過去から認められているスケールと同様の色調（黒  
色）および伝熱管の外径に近い円筒状に沿った形状であることからスケールと断  
定した。

また、伝熱管減肉部と接触していた箇所に接触痕を確認した。

イ. 表面観察

伝熱管接触想定部の表面を走査型電子顕微鏡（以下「SEM」という。）により  
観察した結果、伝熱管と擦れたことによる筋状痕を確認した。

ウ. 伝熱管成分付着確認

伝熱管との接触想定部を成分分析した結果、表層に伝熱管の母材のニッケル  
（以下「Ni」という。）およびクロム（以下「Cr」という。）の成分を僅かに検  
出した。

エ. 断面観察結果

断面観察を実施した結果、稠密層（密度の高い酸化鉄の層）厚さが0.1mm  
であることを確認した。

(d) SG器内のスケールの残存状況等の調査

小型カメラを用いて、A-SGの管板、第一管支持板上面を調査した結果、過去  
の調査と同様にスケール及びスラッジが残存していることを確認した。

また、近傍の伝熱管表面を観察した結果、伝熱管へのスケールやスラッジの付着  
はあるものの、局所的にスケールが剥離した痕跡が認められた。なお、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（垂直方向）において有意  
な差は認められなかった。

(e) 洗浄効果の調査

前回の第25回定期検査起動前に実施した薬品洗浄及び小型高圧洗浄装置による  
洗浄の効果を調査した。

ア. 前回の第25回定期検査における薬品洗浄効果の調査

(ア) 薬品洗浄効果

前回の第25回定期検査における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、薬品中の鉄濃度から評価した結果、SG1台あたりの鉄除去量は約1,310kgであった。

(イ) 運転履歴調査

前回の第25回定期検査における薬品洗浄後の今回26サイクル運転期間中(2022年9月～2023年9月)の運転履歴を確認した結果、10サイクル運転期間程度の値に主蒸気圧力が向上、またSG伝熱抵抗係数が低下していることを確認した。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。

(ウ) SG器内スケールの性状調査

高浜発電所4号機第23回定期検査時の調査結果から、伝熱管を摩耗させる可能性のあるスケールの稠密層厚さは0.1mm以上であることが分かっている。高浜発電所3号機および4号機では、2018年以降に発生した外面減肉事象を踏まえ、これまでに270個以上のスケールをSG2次側器内より回収し、スケールの断面観察および摩耗試験を実施し、薬品洗浄1回目後のスケールは全体的に稠密層厚さが薄くなっていること、摩耗体積比が減少していることを確認した。

さらに、前回の第25回定期検査時の薬品洗浄効果によるスケール性状の傾向を過去の結果と比較するため、傾向を把握するために十分な60個のスケールを回収した。なお、回収にあたっては、厚みのある稠密層を有するスケールが多く存在すると考えられる第二管支持板以下の比較的大きなスケールを回収した。

I. 断面観察結果

スケール60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1個(約6mm×約4mm)確認した。また、第24、25回定期検査時に回収したスケールと稠密層厚さの傾向を比較したところ、今回回収したスケールはさらに稠密層厚さが薄くなっていることを確認した。

II. 摩耗試験結果

回収したスケール60個のうち、稠密層があり、かつ、摩耗試験が可能な大きさ(約10mm×約5mm以上)のスケール10個を対象に試験を実施し、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以上のスケールは確認されなかった。

また、第24、25回定期検査時に回収したスケールと摩耗試験の結果を比較したところ、摩耗体積比が減少していることを確認した。

これまでの調査からSG器内のスケールの稠密層厚さにはばらつきがあり、最大0.18mmの稠密層厚さのあるスケールも存在した。これらに関しては薬品洗浄後も稠密層厚さが0.1mmを超え、伝熱管を損傷させる可能性のあるスケールが一部残存していたと推定されるが、高浜発電所3号機第25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いること、SG器内の伝熱管表面に生成されたスケールの多くは脆弱化していることを確認している。

イ. 小型高圧洗浄装置による洗浄効果の調査

高浜発電所3号機第25回定期検査および高浜発電所4号機第24回定期検査において、小型高圧洗浄装置を用いたSG器内の洗浄を実施した。

洗浄後、小型カメラによりSG器内の状況を確認した結果、管支持板上等のスケールおよびスラッジを大幅に低減(SG器内からのスケールおよびスラッジ回収量:(3号機)約130kg、(4号機)約160kg)できたことを確認した。

事 象 の 原 因

事 象 の 原 因

c. スケールによる外面減肉事象に関する総括

外面減肉が発生した要因は、伝熱管表面に生成された稠密なスケールによるものである。外面減肉に対する予防保全策としては、これまでSG器内への鉄の持込みの抑制、SG器内に残存するスケールやスラッジの排出を目的とした小型高圧洗浄装置による洗浄、およびSG器内に残存するスケールの脆弱化を目的とした薬品洗浄を実施してきた。

(a) SG器内への鉄の持込み量の抑制について

前回の第25回定期検査以降、2次系の水質管理について調査した結果、SG給水における水質管理実績はいずれも基準値を満足しており、外面減肉事象が発生して以降の至近4サイクルと同様の水質管理を継続して行うことで、SG器内に持ち込まれる鉄イオンおよび鉄の微粒子の持込みを極力低減していることを確認した。

(b) 薬品洗浄効果について

高浜発電所3号機および4号機では、2018年以降に発生した外面減肉事象を踏まえ、これまでに270個以上のスケールをSG2次側器内より回収し、スケールの断面観察および摩耗試験を実施し、スケール性状の確認をしてきた。

これまでの調査でスケールの稠密層厚さが0.1mm以上の場合には伝熱管を摩耗させる可能性があることがわかっており、薬品洗浄や器内洗浄を実施している。今回の定期検査にて、対策の効果の確認や更なるデータ拡充を図るため、厚みのある稠密層を有するスケールが多く存在する第二管支持板以下に存在する比較的大きなスケールから、傾向を把握するのに十分な60個のスケールについて外観観察、断面観察および10個の摩耗試験を実施した。その結果、薬品洗浄を繰り返し実施したことに伴い、厚みのある稠密層を有するスケールの存在割合が更に大きく減少していることが確認できた。

なお、これまでの運転期間を通じたSG器内への鉄の持込み総量約2,690kgに対し、既に約1,980kgが薬品洗浄により回収できていることから薬品洗浄により器内に残存する鉄の量は十分低減できていると考える。また、小型高圧洗浄装置によるスケールおよびスラッジの排出量も大きく増加している。これらの分析結果を踏まえ、器内スケールの多くは排出され、また器内残存スケールも粗密化され脆弱化していると考ええる。

(c) SG器内状況及び伝熱管表面観察結果について

小型カメラを用いて、管板及び管支持板上面を観察した結果、過去の調査と同様にスケール及びスラッジが残存していることが確認できている。

また、近傍の伝熱管表面を観察した結果、伝熱管へのスケールやスラッジの付着はあるものの、局所的にスケールが剥離した痕跡が多数認められた。これらは、起動停止時の伝熱管の熱伸びと収縮に追従できず剥離したものであり、高温側と低温側(水平方向)、管支持板間(垂直方向)において有意な差は認められなかった。

(d) 今後の対応について

前回定期検査時の高浜発電所3号機および4号機における外面減肉事象を踏まえ、SG保全指標として、稠密層厚さ0.1mmを超えるスケールが確認された場合は、薬品洗浄や小型高圧洗浄装置による洗浄を実施することとした。その後、今回の事例などを踏まえ、以下の考察を行い、今後の対応について検討した。

2018年以降の伝熱管外面減肉以降の現在までの小型高圧洗浄装置による器内スケール排出や薬品洗浄については、一定程度の効果が得られていることから、有効であったと評価している。また、2001年頃より高ETA処理や高アンモニア処理といった給水のpHを高く維持することにより、SG器内に持ち込まれる鉄量も、十分抑制できていること(約30kg/サイクル)、更には、1サイクルにおけるスケール稠密層生成速度は十分小さいため、過去2回の薬品洗浄により今後新たに厚みのある稠密層を有するスケールが生成される可能性は低いと考えている。

これまでに実施してきた高浜発電所3号機および4号機での外面減肉に対する対策により、原因となったスケールの脆弱化や器内の鉄分除去を進めてきたが、伝熱

管を損傷させる可能性のあるスケールを完全に除去するには至っていない状況を踏まえ、今後実施するSG取替えまでの間は、高浜発電所3号機および4号機の定期検査時にSG器内のスケール・スラッジの状況について、更なるデータ拡充を図る観点から、引き続き、伝熱管を減肉させるような稠密なスケールが生成される伝熱管の下部を中心に、伝熱管表面のスケール付着・剥離状況等を確認していく。

d. スケール以外による外面減肉に関する確認結果

SGの伝熱管外面におけるスケール以外の損傷モードについて、念のために確認した結果は以下のとおり。

(a) スケール以外の摩耗源による減肉メカニズム

ア. 管支持板との接触

(ア) 管支持板ベイ部<sup>\*31</sup>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。

<sup>\*31</sup> 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。

イ. SG器外発生物との接触

(ア) 過去事象を踏まえた異物混入対策

美浜発電所3号機の異物混入事象（2000年、2007年）を踏まえた従前の異物混入対策（開口部管理の徹底等）に加え、高浜発電所3号機第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号機第25回定期検査においても実施していることを確認した。

(イ) SG器内外点検

SGブローダウン系統およびタービンサンプラインの仮設ストレーナの開放点検や弁、配管の内部点検等を実施した結果、スケールおよびスラッジや、2次系配管の内表面から生じたと考える鉄錆は確認したが、それ以外の異物は確認できなかった。

また、A-SG器内の管板、流量分配板、第一管支持板の上面の全ての範囲なら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。

ウ. SG器内発生物との接触

(ア) SG器内部品の脱落調査

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

なお、伝熱管を減肉させる薄片形状と異なるものの、SG器内（2次側）の経年劣化事象を起因とする内部品の脱落として、流れ加速型腐食による給水内管裏当金を想定するが、高浜発電所3号機第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。

事 象 の 原 因

事 象 の 原 因

(b) その他要因による減肉メカニズム

ア. デンティン

ECTの信号指示を確認した結果から、デンティンによる指示ではないと考える。

イ. 粒界腐食割れ

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、粒界腐食割れの可能性はないと考える。

ウ. 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。

エ. 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。

オ. 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。

カ. エロージョン

当該部流速は約 [ ] 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。

2. 推定原因

(1) 内面きず

C-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伝熱管で認められた外面減肉は、これまでの運転に伴い、過去に持込まれた鉄分により伝熱管表面に生成された稠密なスケールが前回の第25回定期検査時の器内清掃や薬品洗浄の後も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と推定した。

<p>事 象 の 原 因</p>	<p>3. 伝熱管の健全性</p> <p>(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。</p> <p>a. 強度 「蒸気発生器信頼性実証試験」((財) 発電用熱機関協会、昭和50年度～昭和55年度) の評価式を用いて、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、十分裕度があり、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と評価した。</p> <p>b. 耐震性 基準地震動 <math>S_s</math> 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、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。</p> <p>(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。</p>
<p>保護装置の種類及び動作状況</p>	<p>該当せず</p>
<p>放射能の影響</p>	<p>なし</p>
<p>被害者</p>	<p>なし</p>
<p>他に及ぼした障害</p>	<p>なし</p>
<p>復旧の日時</p>	<p>未定</p>
<p>再発防止対策</p>	<p>1. 内面きず 内面きずが認められたC-SG伝熱管1本について、高温側および低温側のSG管板部で施栓し、供用外とする。</p> <p>2. 外面減肉 (1) 減肉伝熱管の施栓 外面減肉が認められたA-SG伝熱管1本について、高温側および低温側のSG管板部で施栓し、供用外とする。</p> <p>(2) 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。 なお、今回SG器内の洗浄を強化するにあたり、以下のとおり実施する。</p> <p>a. 改良型小型高圧洗浄装置による洗浄の強化 第六管支持板から第三管支持板上面の清掃で用いる噴射ノズルの改良および水の流量(水圧)を増加させた改良型小型高圧洗浄装置を用いて、管支持板上も含めたSG器内の洗浄を強化することにより、スケールおよびスラッジを可能な限り除去する。</p> <p>b. 垂直ノズルによる洗浄の強化 第二管支持板および第一管支持板の洗浄を行う際、レーン毎の洗浄回数を1往復から2往復(1往復分追加)に増強することで、洗浄を強化する。</p> <p>(3) 今後のSG保全 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SGについては、これまでインコネルTT</p>

再発防止対策	<p>600製の伝熱管内面における応力腐食割れに対し、予防保全策としてショットピーニング施工を行ってきたが、ショットピーニング施工時点では圧縮しきれない範囲でECTでの信号検出が不可能な箇所にPWSCCが残存することの知見を踏まえ、毎定期検査全てのSG伝熱管ECTを継続し、ECTで内面きずを検出した場合は施栓により当該伝熱管を供用外にするといった保守管理をこれまで行ってきた。今後もPWSCCが顕在化する可能性は否定できないことから、ECTによる確認は継続するうえで、更なる安定・安全運転に向け長期的な信頼性を確保するという観点から、予防保全対策としてSG取替えを計画している。</p>
--------	--

高浜発電所3号機  
蒸気発生器伝熱管の損傷について

2023年11月

関西電力株式会社

## 1. 件 名

高浜発電所3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について

## 2. 事象発生日

2023年10月17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26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、2023年9月18日より第26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<sup>\*1</sup>全数について、健全性を確認するため渦流探傷試験<sup>\*2</sup>（以下「ECT」という。）を実施した結果、A-SGの伝熱管1本およびC-SGの伝熱管1本について、有意な信号指示<sup>\*3</sup>が認められた。

A-SGの1本は、高温側の第二管支持板部付近に外面からの減肉とみられる信号指示が認められ、C-SGの1本は、高温側の管板部に管軸方向に沿った内面きずを示す信号指示であった。

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条ならびに第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2023年10月17日11時00分に判断した。

<sup>\*1</sup> 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。

<sup>\*2</sup> 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。

<sup>\*3</sup> 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。

## 6. 環境への影響

なし



## 7. ECT結果

### (1) 検査期間

2023年10月2日～2023年10月17日（定期事業者検査終了日）  
探傷検査・データ整理期間 2023年10月 2日～2023年10月14日  
解析・評価検査期間 2023年10月15日～2023年10月17日

### (2) 検査範囲

SGの施栓<sup>\*4</sup>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	3,269	3,246	3,261	9,776

<sup>\*4</sup> 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－1～4)

ECTデータを評価した結果<sup>\*5</sup>、2本の伝熱管に有意な信号指示を確認した。  
リサーチ表示<sup>\*6</sup>（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、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おり、C－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<sup>\*7</sup>で分析した結果、第二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、前回の第25回定期検査におけるECTデータを評価した結果、有意な信号指示は認められなかったことを確認した。

(単位：本)

SG	A	B	C	合計
指示管本数	1	0	1	2

#### A－SG

第二管支持板 X46, Y7：減肉率 約63%

#### C－SG

管板部 X70, Y5：管軸方向に沿った非貫通の内面きず

<sup>\*5</sup> 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。

<sup>\*6</sup> 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）。

<sup>\*7</sup> 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

- 10月 2日 定期事業者検査開始（探傷検査・データ整理）  
10月 17日 定期事業者検査終了

A-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

C-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

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条ならびに第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判断

## 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

高浜発電所3号機では、2000年2月に開始した第12回定期検査において、4本の伝熱管の高温側管板部の伝熱管の拡管上端部に内面きずとみられる有意な信号指示があり、原因は、応力腐食割れ（以下、「PWSCC」という。）によるものと推定された。また、第13回定期検査においても17本の伝熱管について同様の事例が認められたことから、予防保全対策として、伝熱管内面の応力緩和を図るため、ショットピーニング<sup>\*8</sup>を実施した。

その後も、前回の第25回定期検査までのうち、4回の定期検査において、それぞれ伝熱管1本にPWSCCが認められており、高浜発電所3号機の蒸気発生器伝熱管のPWSCCは、合計25本となっている。

今回、1本の伝熱管に認められた内面きずとみられる有意な信号指示についても、これまでと同様の原因と推定されることから、当該伝熱管のECT波形等の調査および一次冷却材の圧力、温度や水質といった今サイクルの運転履歴の調査を実施した。加えて、伝熱管の製造履歴、材料調査、設計図書調査、施工記録調査の過去の調査結果や記録を改めて確認した。

<sup>\*8</sup> 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。

### a. PWSCCに関するこれまでの知見（高浜発電所の経験）

#### （a）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<sup>\*9</sup>製の伝熱管が高温の一次冷

却材中でPWSCC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\*<sup>10</sup>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。

\*<sup>9</sup> 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。

\*<sup>10</sup> 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。

## (b) 抜管調査以降のPWSCCの発生とショットピーニングの効果

(添付資料-6)

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。

### 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）
- ・第25回定期検査（2022年3月～2022年7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）

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。

なお、高浜発電所3号機では第13回定期検査時に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回定期検査時以降、伝熱管に有意な信号指示が認められている。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。

## b. 今回の定期検査における確認結果

### (a) ECT波形等の調査 (添付資料-7)

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<sup>\*11</sup> (22ピッチ) に有意な信号指示があることを確認した。

また、リサーチ表示 (信号表示) 並びに鳥瞰図表示<sup>\*12</sup> 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。

\*11 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上げて伝熱管と管板を圧着した最終ピッチ部。

\*12 信号の波形を3次的に表したもので、信号の分布 (イメージ) の詳細分析に用いる表示方法。

### (b) 今サイクルの運転履歴調査 (添付資料-8)

#### ア. 一次冷却材温度、圧力

運転開始以降、今サイクルを含む第26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。

#### イ. 放射線監視装置

第26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。

#### ウ. 一次冷却材の水質

運転開始以降、今サイクルを含む第26回定期検査開始までの間、一次冷却材中のpH、電気伝導率、塩化物イオン、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。

<以降、過去の調査結果の改めての確認>

(c) 製造履歴調査 (添付資料－9)

建設時の製造記録を確認した結果、問題となる記録はなかった。また、SGの製造手順について確認した結果、管板に伝熱管を通すための穴を加工した後、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。

(d) 材料調査

当該部分における製造時のミルシートを確認した結果、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製であった。

(e) 設計図書調査

工事計画認可申請書の強度計算書を確認した結果、延性割れ<sup>\*13</sup>、疲労割れ<sup>\*14</sup>に対して、設計上考慮されていた。

<sup>\*13</sup> 材料に過大な応力がかかった時に発生する割れ(破壊)。

<sup>\*14</sup> 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) 施工記録調査 (添付資料－10)

第13回定期検査時におけるショットピーニングの施工記録を確認した結果、適切な施工条件で施工されていることを確認した。

c. PWSCC以外の損傷モードに対する確認結果 (添付資料－11、12)

SGの伝熱管内面におけるPWSCC以外の損傷モードについて、念のため確認した結果は以下のとおり。

(a) 粒界腐食割れ<sup>\*15</sup>、ピitting<sup>\*16</sup>について

一次冷却材環境下では塩化物イオン、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。

<sup>\*15</sup> 金属の結晶粒の境目(粒界)に沿って進展する腐食。

<sup>\*16</sup> 塩化物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

ジュ波形の巻きも大きくなるが、今回のE C T信号指示は内面きずの特徴を示す位相角を有しており、リサーチジュ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\*<sup>17</sup>について

S G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。

\*<sup>17</sup> 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。

(2) 外面減肉

(添付資料-13)

高浜発電所3号機および4号機では、高浜発電所3号機第24回、第23回定期検査および高浜発電所4号機第22回定期検査において、S G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号機第23回定期検査においても、外面からの減肉信号指示が認められたため、小型カメラによりS G器内を調査した結果、減肉箇所にスケール\*<sup>18</sup>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号機第23回定期検査においてS G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、S G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、S G伝熱管の外面減肉への対策として、高浜発電所3号機第24回及び高浜発電所4号機第23回定期検査にてS G器内のスケールの脆弱化を図ることを目的に、薬品洗浄\*<sup>19</sup>を実施した。その結果、高浜発電所3号機第25回定期検査、高浜発電所4号機第24回定期検査にて回収したスケールが脆弱化していることを確認した。

その後、高浜発電所3号機第25回定期検査において、スケールによるものと推定される伝熱管の外面減肉事象が再度発生したことを踏まえ、スラッジ影響を考慮した薬品洗浄効果の確認試験を行った。その結果、スケール近傍にスラッジが存在する場合はスケールの脆弱化効果が低減することを確認したため、高浜発電所3号機第25回定期検査および高浜発電所4号機第24回定期検査において実施した薬品洗浄の前に、S G器内のスケールおよびスラッジを可能な限り除去することとし、小型高圧洗浄装置を用いて管支持板上も含めたS G器内の洗浄を実施した。洗浄後、小型カメラによりS G器内の状況を確認した結果、管支持板上等のスケールおよびスラッジを大幅に低減(S G器内からのスケールおよびスラッジ回収量：(3号機)約130 kg、(4号機)約160 kg)できたことを

確認した。

なお、薬品洗浄については、SG器内の構成部材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の再検討を行うとともに、工場で試験を実施した。その結果、伝熱管全域を薬品濃度3%での薬品洗浄を2回実施することにより、スケール近傍にスラッジが存在する場合でもスケールを脆弱化できることを確認できたことから、同条件（薬品濃度、回数）での洗浄を実施した。洗浄後にSG器内からの鉄除去量を評価した結果、高浜発電所3号機および4号機ともに1台あたり約1,310kgであった。

今回、A-SGの高温側の第二管支持板下面に認められた外面からの減肉とみられる有意な信号指示についても、これまでと同様にスケールが原因と推定されることから、当該伝熱管のECT波形等の調査に加え、伝熱管表面の外観観察、付着物の分析、スケール残存状況の調査、洗浄効果の調査を実施した。また、スケール以外の要因による減肉メカニズムに対しても、調査を実施した。

\*18 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。

\*19 希薄なエチレンジアミン四酢酸（EDTA：Ethylene Diamine Tetra acetic Acid）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。

#### a. スケールによる外面減肉に関するこれまでの知見

過去に発生した外面減肉事象から既に得られている知見は以下のとおり。

##### （a）スケールによる減肉メカニズム

以下のとおり生成・剥離したスケールが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することで摩耗減肉が発生すると推定される。

##### ア. スケールの生成メカニズム

###### （ア）スケールの生成および性状の調査 （添付資料－14）

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次側へ持込まれ、次の2つの現象が発生することで伝熱管表面にスケールとして付着することが分かっている。

##### I. 析出付着

給水とともにSG2次側へ持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、伝熱管表面の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、伝熱管表面の下部に付着するスケールは稠密で薄い傾向がある。

##### II. 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<sup>\*20</sup>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。

<sup>\*20</sup> 密度が比較的 low、粗な状態。

#### (イ) スケール性状の実機調査

(添付資料－15)

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、断面ミクロ観察を実施している。その結果、伝熱管の上部のスケールほど粗密で厚く、伝熱管の下部ほど稠密で薄いことを確認した。

また、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。

#### (ウ) 2次系の水質管理調査

スケールは、給水とともに持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。

##### I. 水処理履歴

(添付資料－16)

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器内への鉄の持込み量低減を図るべく、AVT<sup>\*21</sup>(All Volatile Treatment)処理(pH9.2)、ETA<sup>\*22</sup>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の実測データは次のとおりであり、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。

\*<sup>21</sup> 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。

\*<sup>22</sup> エタノールアミン。

## II. 給水中の鉄含有量

上記水処理方法での給水中の鉄含有量は次のとおりである。

水処理方法	給水中の鉄含有量
A V T 処理	約 5 ～ 1 0 p p b
E T A 処理	約 3 p p b
高 E T A 処理	約 1 p p b
高アンモニア処理	約 1 p p b

## III. 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 4 . 0 万時間

## IV. 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 / S G
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 7 0 k g
合計	約 2 , 6 9 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。

### (エ) スケール厚さに関する実機調査

(添付資料-17)

スケール厚さの傾向を推定するパラメータとして、主蒸気圧力やS G伝熱抵抗係数\*<sup>23</sup>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 $\mu\text{m}$ ～100 $\mu\text{m}$ 程度であった。

\*23 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約30kg/SG程度に抑えられていることを確認した。なお、1サイクルにおけるスケール稠密層生成速度は十分小さいため、過去2回の薬品洗浄により今後新たに厚みのある稠密層を有するスケールが生成される可能性は低いと考えている。

## イ. スケールの剥離

（添付資料－18）

### （ア）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Ⅰ．～Ⅲ．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。

- Ⅰ. 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。
- Ⅱ. 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。
- Ⅲ. プラント停止時に隙間の埋まったスケールは、伝熱管の熱収縮に追従できず剥離する。

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。

### （イ）長期停止の影響調査

（添付資料－19）

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、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、長期停止後の第24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、長期停止後は、スケールの粒径が大きくなった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。

#### ウ. スケールによる減肉メカニズム (添付資料-20)

スケールとの接触で伝熱管が減肉するメカニズムは、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<sup>\*24</sup>により摩耗するものと推定される。

なお、最大減肉深さは管支持板部の伝熱管の振幅（伝熱管と管支持板BEC穴ランド部<sup>\*25</sup>の隙間）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。

\*24 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。

\*25 管支持板に加工されている四ツ葉管穴のうち凸面部。

#### (b) 高浜発電所3号機および4号機の特異性

##### ア. 当社他プラントとの鉄持込み量、薬品洗浄実績および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、スケールの厚さや長期停止に伴うスケールの剥離量は、スケール回収量に現れている可能性があることから、あわせて長期停止前後のスケール回収量につい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-21)

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SGの運転時間が最も長い高浜発電所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* <sup>26</sup> (万時間)	24.2	23.2	18.0	19.2	9.3	10.9	12.5
鉄持込み量 (k g)	2,690	2,520	1,880	2,010	810	680	940
薬品洗浄 実績回数	2回	2回	2回	1回			
薬品洗浄時点 の運転時間 (万時間)	22.3 (第24回) 23.2 (第25回)	22.2 (第23回) 23.2 (第24回)	16.1 (第17回) 17.0 (第18回)	16.2 (第16回)	—	—	—

\*<sup>26</sup> 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取替え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-22)

スケール回収量\*<sup>27</sup>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は認められなかった。

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。

\*<sup>27</sup> 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)
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)	22.61 (第24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)	0.01 未満 (第19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)	0.01 未満 (第18回)	—

イ. 当社プラントとの実機スケール比較

(添付資料-23)

スケールの稠密層厚さと鉄持込み量に相関があるかを検証するため、当社他プラントのSG下部からスケールを採取し、断面マイクロ観察を実施した結果を確認した。採取対象プラントは、高浜発電所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取替えプラント（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。なお、高浜発電所3号機については、高浜発電所4号機とスケール性状が同等であることを確認している。

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*28： 2,490kg	大飯発電所4号機 鉄持込み量*28： 1,950kg	高浜発電所2号機 鉄持込み量*28： 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

\*28 鉄持込み量はスケール回収時の値。

なお、大飯発電所4号機は第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。

#### ウ．伝熱管の摩耗試験結果の比較 (添付資料-24、25)

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\*29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、有意な摩耗減肉を与える可能性は低いことを確認した。

\*29 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。

有意な摩耗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号機から採取したスケールの摩耗試験を実施した結果、空隙率5%以下の稠密層厚さが0.1mm未満のスケール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、有意な摩耗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。

エ. スケールにより減肉した国内外事例調査 (添付資料-26)

2023年10月末時点までの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、8プラントのみであることを確認した。

(c) 薬品洗浄による影響 (添付資料-27)

薬品洗浄におけるSG器内の残存スケール量の違いがSG器内構成部材に与える腐食影響を評価するための試験を実施した。試験の結果、薬液能力に対してスケール量が少ない場合には、炭素鋼製の管群外筒等の腐食量が相対的に大きくなることを確認した。

b. 今回の定期検査における確認結果

(a) ECT波形等の調査結果 (添付資料-3、28、29)

リサーチ表示(信号表示)で分析した結果、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、前回の第25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。

また、ECTの信号指示を確認した結果から、スケールの剥離およびデレンディング\*<sup>30</sup>による指示ではないと推定した。

\*<sup>30</sup> 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) 伝熱管の外観観察 (添付資料-30)

小型カメラを用いて、減肉信号を確認した伝熱管表面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。なお、伝熱管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。

A-SG 第二管支持板高温側下面付近(減肉率:約63%):

周方向約7mm、軸方向1mm以下(X46, Y7)

また、A-SGの減肉信号を確認した伝熱管(X46, Y7)を小型カメラにて目視点検を実施した結果、きずに接触する幅約7mm、長さ約23mmの付着物を確認した。

(c) 付着物の分析結果 (添付資料-31)

A-SGの減肉信号を確認した伝熱管付近で回収された付着物について分析を行った。

ア. 外観観察

付着物の外観観察の結果、過去から認められているスケールと同様の色調(黒色)および伝熱管の外径に近い円筒状に沿った形状であることからスケールと断定した。

また、伝熱管減肉部と接触していた箇所に接触痕を確認した。

イ. 表面観察

伝熱管接触想定部の表面を走査型電子顕微鏡(以下「SEM」という。)により観察した結果、伝熱管と擦れたことによる筋状痕を確認した。

ウ. 伝熱管成分付着確認

伝熱管との接触想定部を成分分析した結果、表層に伝熱管の母材のニッケル(以下「Ni」という。)およびクロム(以下「Cr」という。)の成分を僅かに検出した。

エ. 断面観察結果

断面観察を実施した結果、稠密層(密度の高い酸化鉄の層)厚さが0.1mmであることを確認した。

(d) SG器内のスケールの残存状況等の調査 (添付資料-32、33)

小型カメラを用いて、A-SGの管板、第一管支持板上面を調査した結果、過去の調査と同様にスケール及びスラッジが残存していることを確認した。

また、近傍の伝熱管表面を観察した結果、伝熱管へのスケールやスラッジの付着はあるものの、局所的にスケールが剥離した痕跡が認められた。なお、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(垂直方向)において有意な差は認められなかった。

(e) 洗浄効果の調査 (添付資料-34~36)

前回の第25回定期検査起動前に実施した薬品洗浄及び小型高圧洗浄装置による洗浄の効果を調査した。

ア. 前回の第25回定期検査における薬品洗浄効果の調査

(ア) 薬品洗浄効果

前回の第25回定期検査における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、薬品中の鉄濃度から評価した結果、SG1台あたりの鉄除去量は約1,310kgであった。

## (イ) 運転履歴調査

前回の第25回定期検査における薬品洗浄後の今回26サイクル運転期間中（2022年9月～2023年9月）の運転履歴を確認した結果、10サイクル運転期間程度の値に主蒸気圧力が向上、またSG伝熱抵抗係数が低下していることを確認した。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。

## (ウ) SG器内スケールの性状調査

高浜発電所4号機第23回定期検査時の調査結果から、伝熱管を摩耗させる可能性のあるスケールの稠密層厚さは0.1mm以上であることが分かっている。高浜発電所3号機および4号機では、2018年以降に発生した外面減肉事象を踏まえ、これまでに270個以上のスケールをSG2次側器内より回収し、スケールの断面観察および摩耗試験を実施し、薬品洗浄1回目後のスケールは全体的に稠密層厚さが薄くなっていること、摩耗体積比が減少していることを確認した。

さらに、前回の第25回定期検査時の薬品洗浄効果によるスケール性状の傾向を過去の結果と比較するため、傾向を把握するために十分な60個のスケールを回収した。なお、回収にあたっては、厚みのある稠密層を有するスケールが多く存在すると考えられる第二管支持板以下の比較的大きなスケールを回収した。

### I. 断面観察結果

スケール60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1個（約6mm×約4mm）確認した。また、第24、25回定期検査時に回収したスケールと稠密層厚さの傾向を比較したところ、今回回収したスケールはさらに稠密層厚さが薄くなっていることを確認した。

### II. 摩耗試験結果

回収したスケール60個のうち、稠密層があり、かつ、摩耗試験が可能な大きさ（約10mm×約5mm以上）のスケール10個を対象に試験を実施し、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以上のスケールは確認されなかった。

また、第24、25回定期検査時に回収したスケールと摩耗試験の結果を比較したところ、摩耗体積比が減少していることを確認した。

これまでの調査からSG器内のスケールの稠密層厚さにはばらつきがあり、最大0.18mmの稠密層厚さのあるスケールも存在した。こ



れらに関しては薬品洗浄後も稠密層厚さが0.1 mmを超え、伝熱管を損傷させる可能性のあるスケールが一部残存していたと推定されるが、高浜発電所3号機第25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いること、SG器内の伝熱管表面に生成されたスケールの多くは脆弱化していることを確認している。

#### イ. 小型高圧洗浄装置による洗浄効果の調査

高浜発電所3号機第25回定期検査および高浜発電所4号機第24回定期検査において、小型高圧洗浄装置を用いたSG器内の洗浄を実施した。

洗浄後、小型カメラによりSG器内の状況を確認した結果、管支持板上等のスケールおよびスラッジを大幅に低減（SG器内からのスケールおよびスラッジ回収量：（3号機）約130 kg、（4号機）約160 kg）できたことを確認した。

#### c. スケールによる外面減肉事象に関する総括

外面減肉が発生した要因は、伝熱管表面に生成された稠密なスケールによるものである。外面減肉に対する予防保全策としては、これまでSG器内への鉄の持込みの抑制、SG器内に残存するスケールやスラッジの排出を目的とした小型高圧洗浄装置による洗浄、およびSG器内に残存するスケールの脆弱化を目的とした薬品洗浄を実施してきた。

##### (a) SG器内への鉄の持込み量の抑制について

前回の第25回定期検査以降、2次系の水質管理について調査した結果、SG給水における水質管理実績はいずれも基準値を満足しており、外面減肉事象が発生して以降の至近4サイクルと同様の水質管理を継続して行うことで、SG器内に持ち込まれる鉄イオンおよび鉄の微粒子の持込みを極力低減していることを確認した。

##### (b) 薬品洗浄効果について

高浜発電所3号機および4号機では、2018年以降に発生した外面減肉事象を踏まえ、これまでに270個以上のスケールをSG2次側器内より回収し、スケールの断面観察および摩耗試験を実施し、スケール性状の確認をしてきた。

これまでの調査でスケールの稠密層厚さが0.1 mm以上の場合には伝熱管を摩耗させる可能性があることがわかっており、薬品洗浄や器内洗浄を実施している。今回の定期検査にて、対策の効果の確認や更なるデータ拡充を図るため、厚みのある稠密層を有するスケールが多く存在する第二管支持板以下に存在する比較的大きなスケールから、傾向を把握するのに十分な60個のスケールについて外観観察、断面観察および10個の摩耗試験を実施し

た。その結果、薬品洗浄を繰り返し実施したことに伴い、厚みのある稠密層を有するスケールの存在割合が更に大きく減少していることが確認できた。

なお、これまでの運転期間を通じたSG器内への鉄の持込み総量約2,690kgに対し、既に約1,980kgが薬品洗浄により回収できていることから薬品洗浄により器内に残存する鉄の量は十分低減できていると考える。また、小型高压洗浄装置によるスケールおよびスラッジの排出量も大きく増加している。これらの分析結果を踏まえ、器内スケールの多くは排出され、また器内残存スケールも粗密化され脆弱化していると考ええる。

#### (c) SG器内状況及び伝熱管表面観察結果について

小型カメラを用いて、管板及び管支持板上面を観察した結果、過去の調査と同様にスケール及びスラッジが残存していることが確認できている。

また、近傍の伝熱管表面を観察した結果、伝熱管へのスケールやスラッジの付着はあるものの、局所的にスケールが剥離した痕跡が認められた。これらは、起動停止時の伝熱管の熱伸びと収縮に追従できず剥離したものであり、高温側と低温側（水平方向）、管支持板間（垂直方向）において有意な差は認められなかった。

#### (d) 今後の対応について

前回定期検査時の高浜発電所3号機および4号機における外面減肉事象を踏まえ、SG保全指標として、稠密層厚さ0.1mmを超えるスケールが確認された場合は、薬品洗浄や小型高压洗浄装置による洗浄を実施することとした。その後、今回の事例などを踏まえ、以下の考察を行い、今後の対応について検討した。

2018年以降の伝熱管外面減肉以降の現在までの小型高压洗浄装置による器内スケール排出や薬品洗浄については、一定程度の効果が得られていることから、有効であったと評価している。また、2001年頃より高ETA処理や高アンモニア処理といった給水のpHを高く維持することにより、SG器内に持ち込まれる鉄量も、十分抑制できていること（約30kg/サイクル）、更には、1サイクルにおけるスケール稠密層生成速度は十分小さいため、過去2回の薬品洗浄により今後新たに厚みのある稠密層を有するスケールが生成される可能性は低いと考えている。

これまでに実施してきた高浜発電所3号機および4号機での外面減肉に対する対策により、原因となったスケールの脆弱化や器内の鉄分除去を進めてきたが、伝熱管を損傷させる可能性のあるスケールを完全に除去するには至っていない状況を踏まえ、今後実施するSG取替えまでの間は、高浜発電所

3号機および4号機の定期検査時にSG器内のスケール・スラッジの状況について、更なるデータ拡充を図る観点から、引き続き、伝熱管を減肉させるような稠密なスケールが生成される伝熱管の下部を中心に、伝熱管表面のスケール付着・剥離状況等を確認していく。

d. スケール以外による外面減肉に関する確認結果

SGの伝熱管外面におけるスケール以外の損傷モードについて、念のために確認した結果は以下のとおり。

(a) スケール以外の摩耗源による減肉メカニズム

ア. 管支持板との接触 (添付資料－37)

(ア) 管支持板ベイ部<sup>\*31</sup>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。

<sup>\*31</sup> 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。

イ. SG器外発生物との接触

(ア) 過去事象を踏まえた異物混入対策 (添付資料－38)

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号機第25回定期検査においても実施していることを確認した。

(イ) SG器内外点検

SGブローダウン系統およびタービンサンプラインの仮設ストレーナの開放点検や弁、配管の内部点検等を実施した結果、スケールおよびスラッジや、2次系配管の内表面から生じたと考える鉄錆は確認したが、それ以外の異物は確認できなかった。

また、A-SG器内の管板、流量分配板、第一管支持板の上面の全ての範囲なら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。

#### ウ. SG器内発生物との接触

##### (ア) SG器内部品の脱落調査

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

なお、伝熱管を減肉させる薄片形状と異なるものの、SG器内(2次側)の経年劣化事象を起因とする内部品の脱落として、流れ加速型腐食による給水内管裏当金を想定するが、高浜発電所3号機第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。

#### (b) その他要因による減肉メカニズム

##### ア. デンティング

E C Tの信号指示を確認した結果から、デンティングによる指示ではないと考える。

##### イ. 粒界腐食割れ

(添付資料-39)

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処理を実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考える。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉であることから、粒界腐食割れの可能性はないと考える。

##### ウ. ピットティング

(添付資料-40)

過去にSG2次側環境において海水リーク等による塩化物環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、ピット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ることから、ピッティングの可能性はないと考える。

エ. リン酸減肉 (添付資料-41)

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。

オ. 流体振動による疲労 (添付資料-42)

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。

カ. エロージョン (添付資料-43)

当該部流速は約  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。

10. 推定原因 (添付資料-44)

(1) 内面きず

C-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伝熱管で認められた外面減肉は、これまでの運転に伴い、過去に持ち込まれた鉄分により伝熱管表面に生成された稠密なスケールが前回の第25回定期検査時の器内清掃や薬品洗浄の後も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と推定した。

11. 伝熱管の健全性

(1) 減肉伝熱管の健全性 (添付資料-45)

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。

: 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。

a. 強度

「蒸気発生器信頼性実証試験」((財)発電用熱機関協会、昭和50年度～昭和55年度)の評価式を用いて、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、十分裕度があり、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と評価した。

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、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-46)

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。

12. 対策 (添付資料-47～52)

(1) 内面きず

内面きずが認められたC-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。

なお、今回SG器内の洗浄を強化するにあたり、以下のとおり実施する。

(a) 改良型小型高圧洗浄装置による洗浄の強化

第六管支持板から第三管支持板上面の清掃で用いる噴射ノズルの改良および水の流量(水圧)を増加させた改良型小型高圧洗浄装置を用いて、管支持板上も含めたSG器内の洗浄を強化することにより、スケールおよびスラッジを可能な限り除去する。

(b) 垂直ノズルによる洗浄の強化

第二管支持板および第一管支持板の洗浄を行う際、レーン毎の洗浄回数を

1往復から2往復（1往復分追加）に増強することで、洗浄を強化する。

c. 今後のSG保全

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小型高压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SGについては、これまでインコネルTT600製の伝熱管内面における応力腐食割れに対し、予防保全策としてショットピーニング施工を行ってきたが、ショットピーニング施工時点では圧縮しきれない範囲でECTでの信号検出が不可能な箇所にPWSCCが残存することの知見を踏まえ、毎定期検査全てのSG伝熱管ECTを継続し、ECTで内面きずを検出した場合は施栓により当該伝熱管を供用外にするといった保守管理をこれまで行ってきた。今後もPWSCCが顕在化する可能性は否定できないことから、ECTによる確認は継続するうえで、更なる安定・安全運転に向け長期的な信頼性を確保するという観点から、予防保全対策としてSG取替えを計画している。

以 上

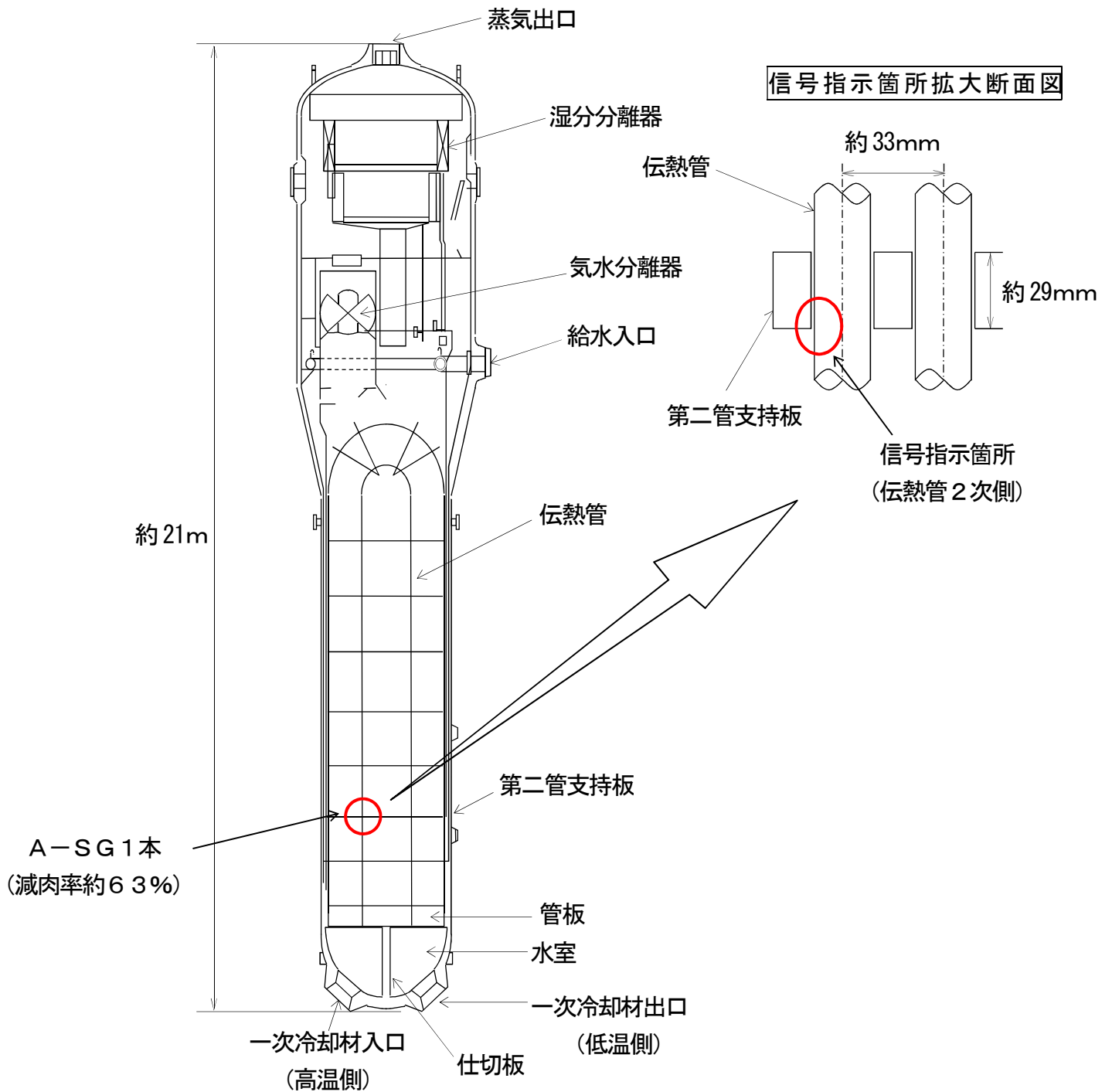
## 添 付 資 料

1. S G伝熱管信号指示箇所概要図
2. S G伝熱管E C T結果一覧
3. S G伝熱管E C T結果
4. S G伝熱管E C T信号指示位置図
5. 要因分析図
6. S G伝熱管へのショットピーニングの有効性とP W S C C検出に関する考察
7. 信号指示の記録
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. 製造履歴に関する聞き取り調査
10. 蒸気発生器伝熱管ショットピーニング工事総括報告書
11. 粒界腐食割れ、ピitting、局所変形、エロージョンについて
12. 高浜発電所3号機 第26回・第25回 定期検査時の信号指示の比較
13. 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
14. スケール生成メカニズム
15. スケール性状に関する過去の知見
16. 2次系水処理と水化学管理の変遷
17. プラント性能指標の推移
18. スケール剥離メカニズムイメージ
19. 長期停止影響に係る考察
20. 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）
21. 鉄持込み量比較
22. 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
23. 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
24. 当社他プラントスケール摩耗試験結果
25. スケール性状による伝熱管減肉影響
26. 海外のS Gの運転履歴等調査結果
27. 薬品洗浄の実施に関する検討について
28. E C Tの位相評価
29. スケール剥離による減肉信号への影響
30. S G器内点検結果
31. 減肉箇所付着スケールの分析結果
32. S G器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査
33. S G器内の伝熱管表面の観察結果
34. 伝熱管とスケールの摩耗試験方法について
35. 回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果
36. 前回の第25回定期検査における薬品洗浄の実施結果

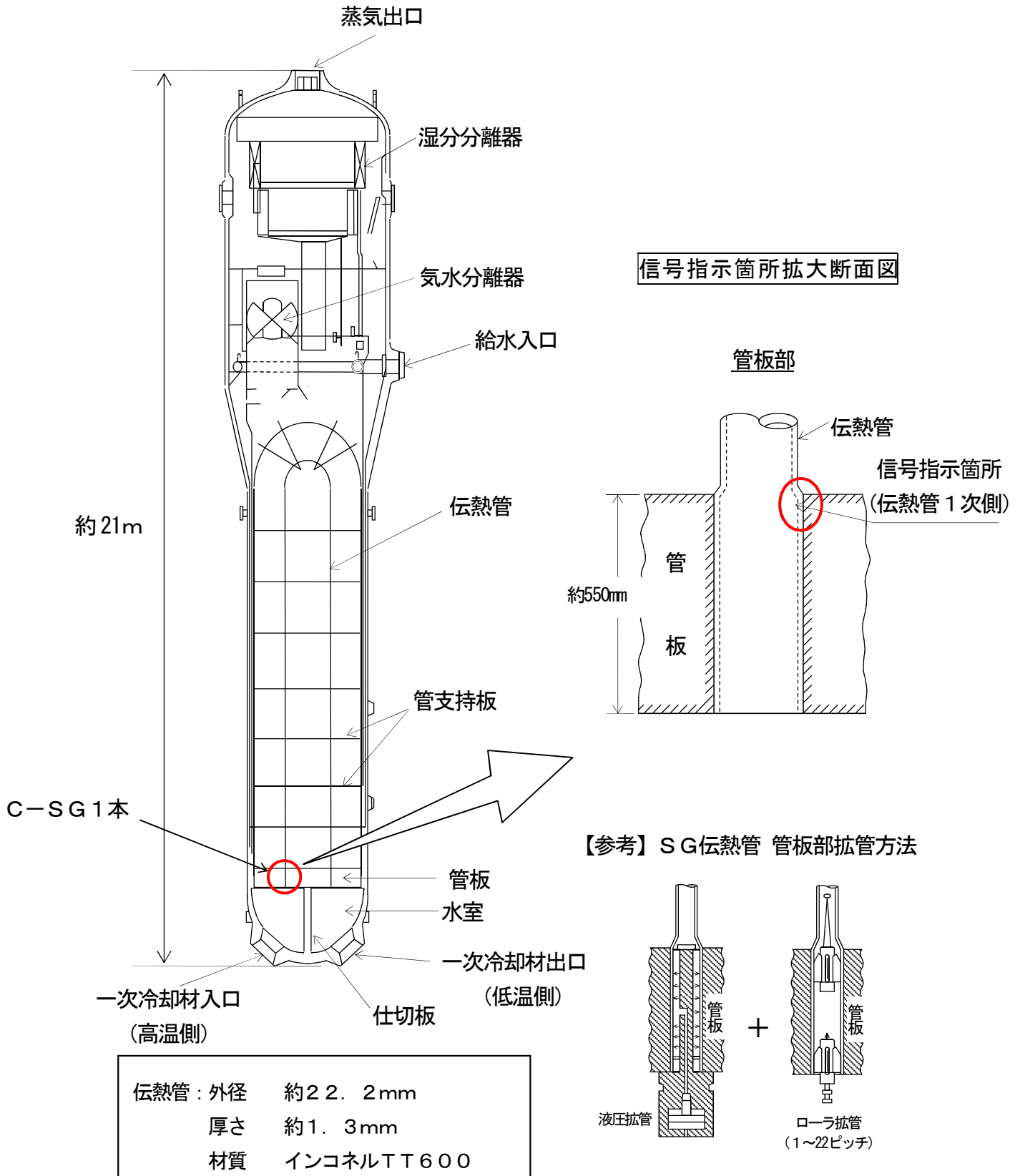


- 37. 管支持板との接触による摩耗減肉の評価
- 38. 異物混入対策について
- 39. 粒界腐食割れに関する検討結果
- 40. ピッティングに関する検討結果
- 41. リン酸減肉に関する検討結果
- 42. 流体振動による疲労評価
- 43. エロージョンに関する検討結果
- 44. SG点検スケジュール
- 45. 減肉した伝熱管の評価
- 46. 隣接伝熱管の健全性
- 47. SG伝熱管信号指示箇所補修概要図
- 48. 高浜発電所3号機 SG伝熱管の補修来歴
- 49. 減肉により施栓した伝熱管が隣接伝熱管へ及ぼす影響
- 50. 小型高圧洗浄装置による洗浄の強化について
- 51. スケールに対する保全指標について
- 52. 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管支持板部)



SG伝熱管信号指示箇所概要図 (SG管板部)



## SG伝熱管ECT結果一覧

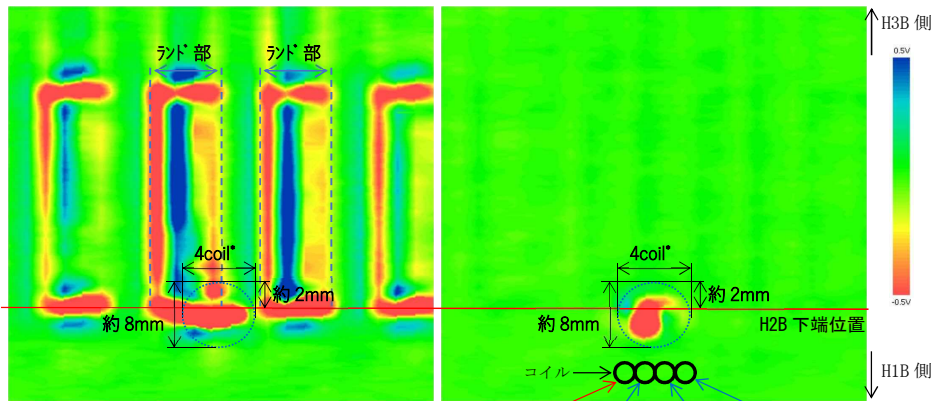
	A-SG	B-SG	C-SG	合計
設備本数	3,382	3,382	3,382	10,146
既施栓本数 (応力腐食割れによる施栓本数※)	113 (8)	136 (10)	121 (7)	370 (25)
検査対象本数	3,269	3,246	3,261	9,776
指示管本数	1	0	1	2
結果	<p>高温側伝熱管の第二管支持板部付近において、A-SG 1本に外面からの減肉とみられる有意な信号指示が認められた。</p> <p>また、高温側伝熱管の管板部のローラ拡管上端部（22ピッチ）において、C-SG 1本に有意な信号指示（管軸方向に沿った内面きずを示す信号）が認められた。</p>			
備考				

※既施栓本数の内数を示す。

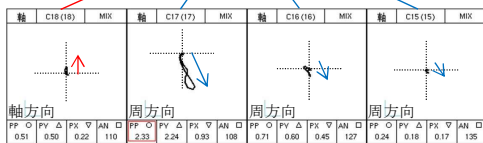
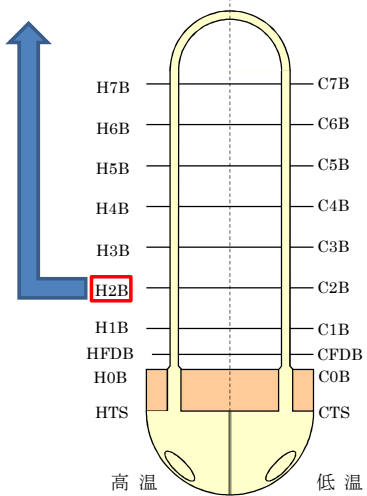
# SG伝熱管ECT結果 (1/2)

原信号 (100kHz)

フィルタ信号 (構造物信号消去)



\*1coil: 約3mm ※内側から見たイメージ

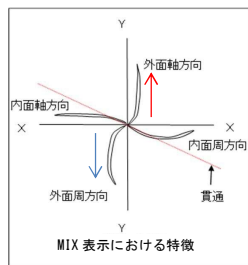


### 【A-SG X46-Y7 リサーチ波形】

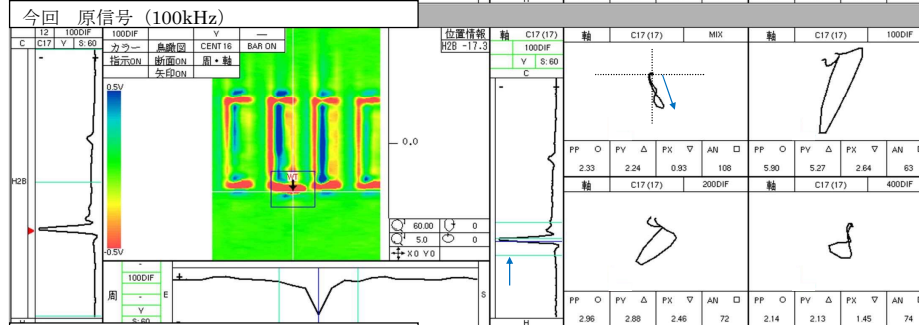
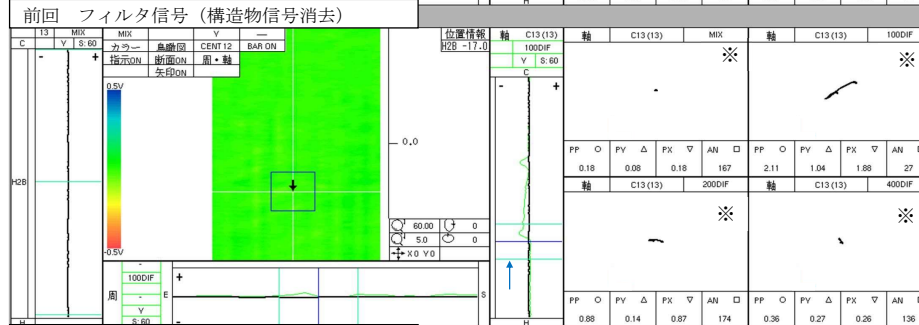
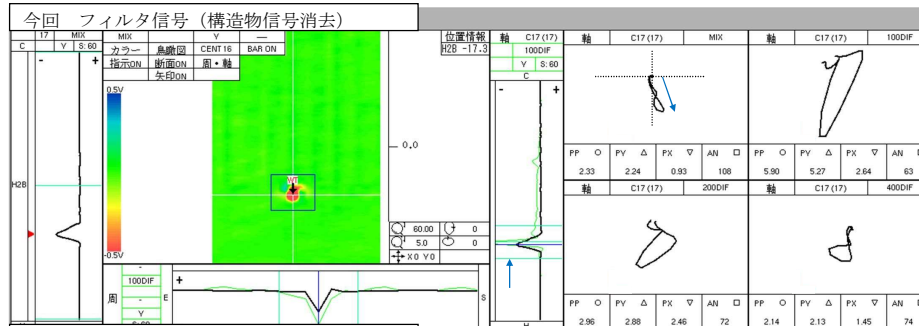
きず端部の軸方向成分(赤色矢印)を検出  
きず中心部の周方向成分(青色矢印)を検出

### 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・周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



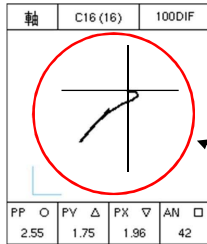
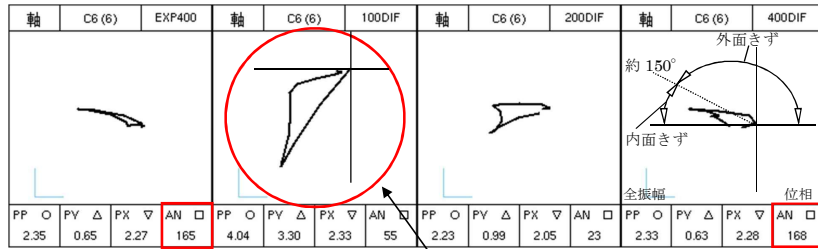
前今比較

※特異な信号がないため任意の位置で表示。

A-SG X46, Y7 部位 : H2B (深さ: 約63%)

# SG伝熱管ECT結果 (2/2)

リサージュ表示※1 (C-SG X70, Y5)



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]

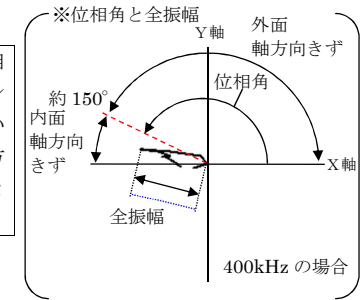
400kHz リサージュ波形の位相から内面軸方向きずパターンを示しており、100kHz において健全部と比較して、内面軸方向きずの影響を示した波形となっている。

位相角

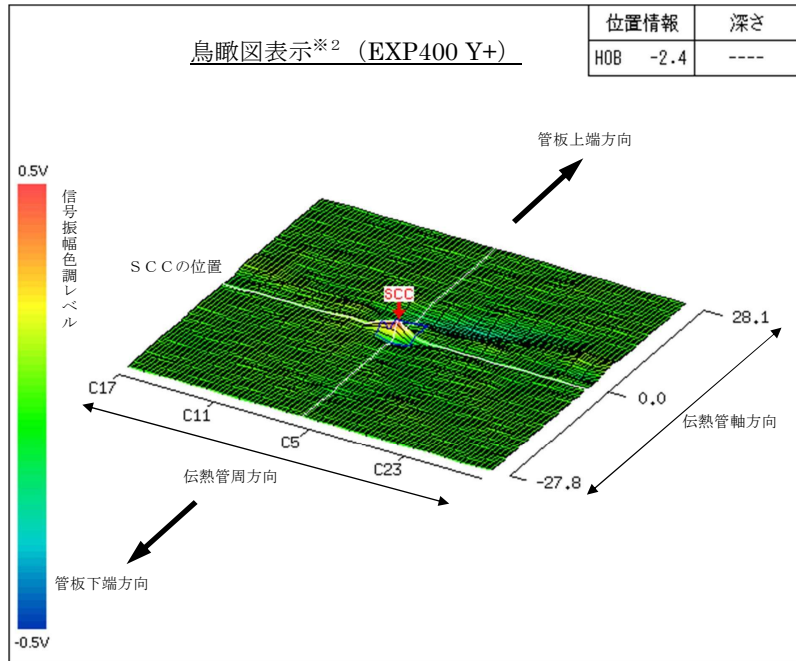
ECT信号を2次的に表示したリサージュ表示において、X軸0°からの角度をいい、内面きずか外面きずか、軸方向きずか周方向きずかを評価する。

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+)



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。

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を(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。

C-SG X70, Y5 部位：高温側管板部付近 (内面きず)

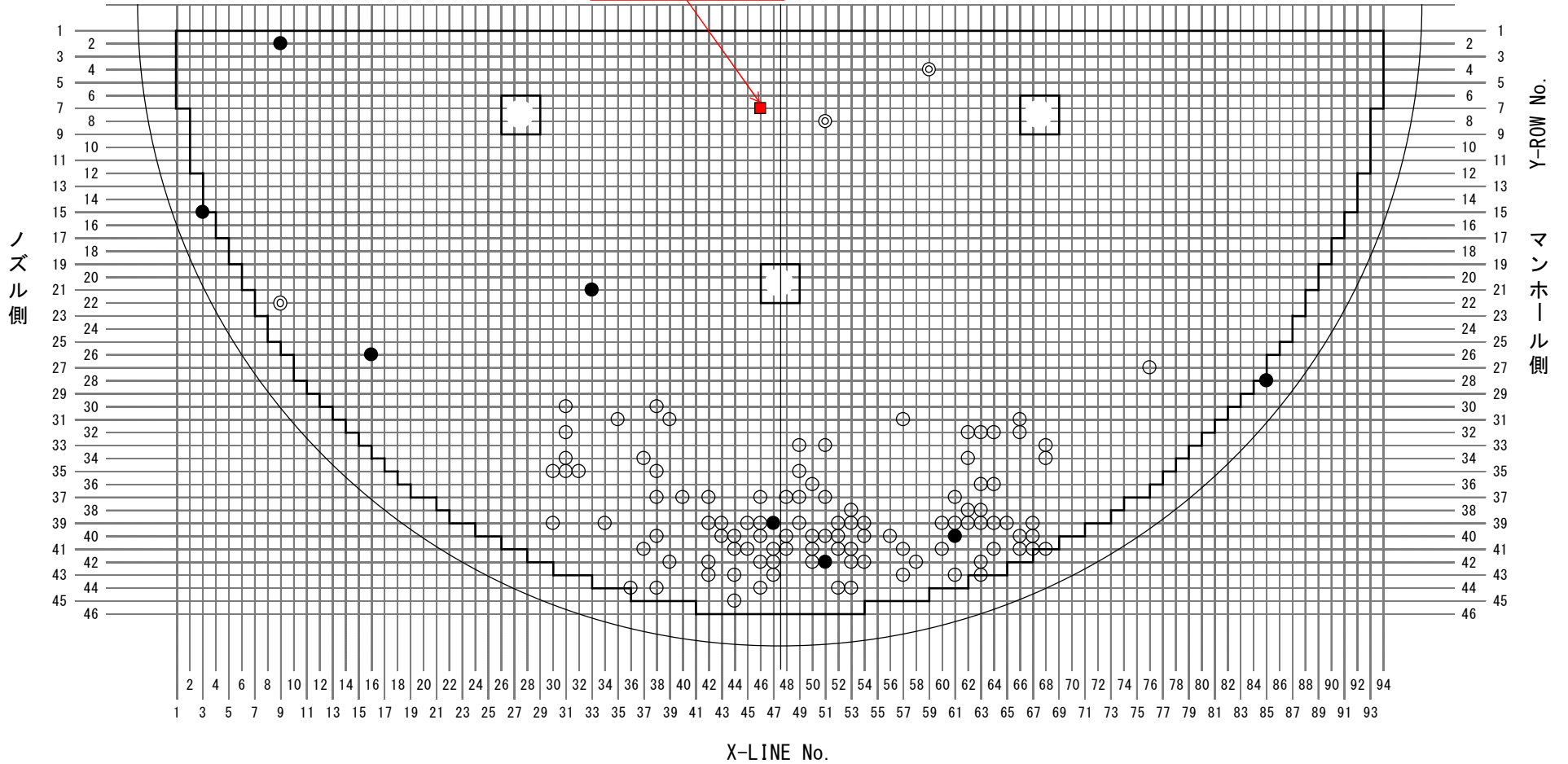
# SG伝熱管ECT信号指示位置図

## 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 (外面減肉) (3本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (8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  
 (X 46、Y 7)

本図はSG上部から見た位置を示す

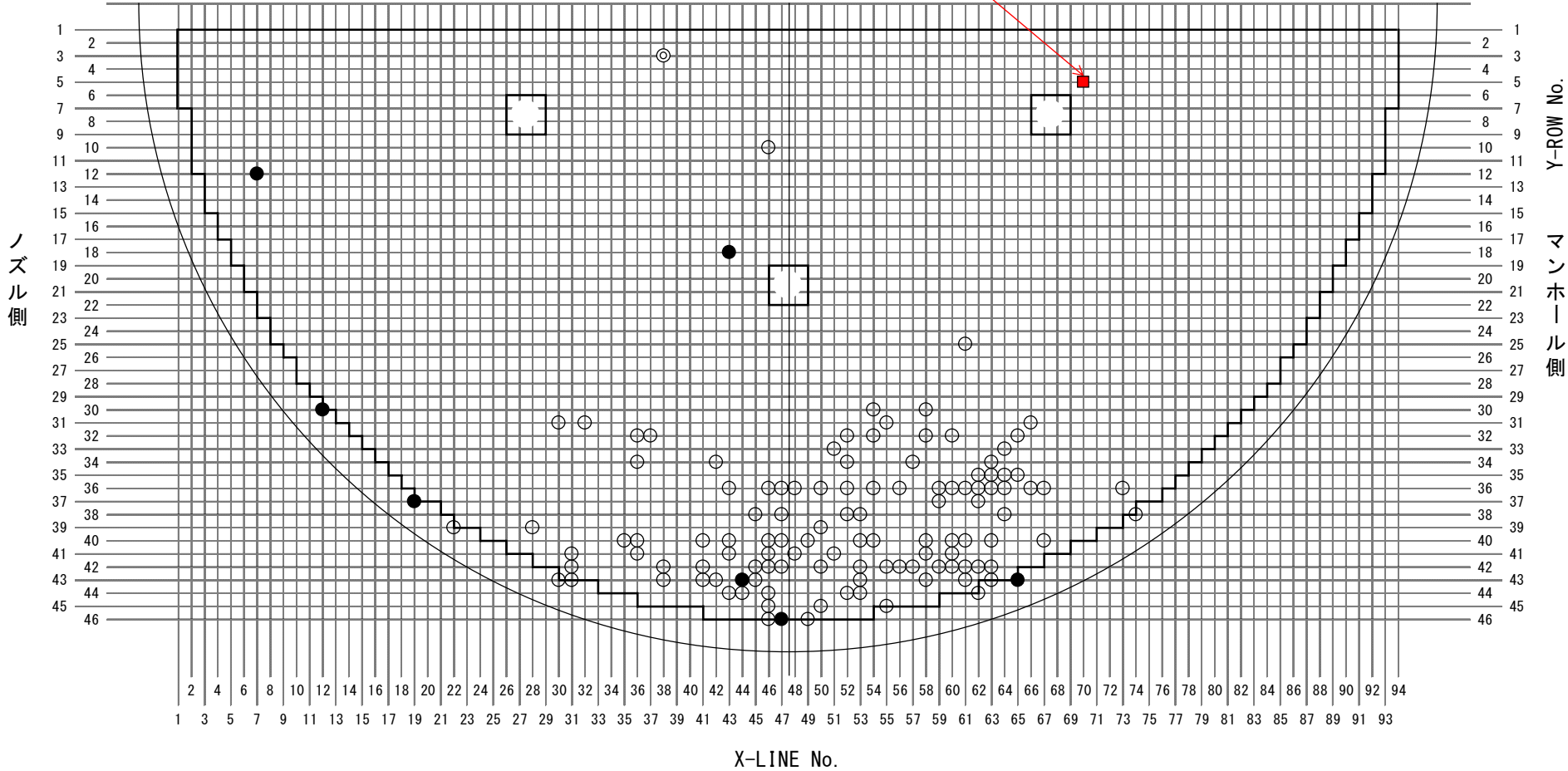


# SG伝熱管ECT信号指示位置図 C-SG (高温側)

- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (113本)
- ◎: 既施栓管 (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  
 (X70、Y5)

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			
管板拡管部で 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。	×		
		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製造メーカー仕様通りであり、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回定期検査の拡管調査結果から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。	×		
		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。	×		
	1次側からの 損傷	延性割れ	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製造メーカー仕様通りであり、インコネルTT600製であることを確認した。	×	
			疲労割れ	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。	×
ピitting		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製造メーカー仕様通りであり、インコネルTT600製であることを確認した。	×	
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。	×		
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。管板拡管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。			

×: 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		
1次側からの損傷	摩耗減肉	管支持板との接触	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(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。	×
		SG器外流入物との接触	過去の点検調査	高浜発電所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号機前々回(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(機内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25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)	SG器内点検(目視点検)	A-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、摩耗痕とみられる箇所を確認した。 A-SGの減肉信号を確認した伝熱管(X46.Y7)を小型カメラにて目視点検を実施した結果、きずに接触する幅約7mm、長さ約23mmの付着物を確認した。 きずに接触している付着物の分析を実施した結果は以下のとおりであった。 ・外観観察 付着物の外観観察の結果、過去から認められているスケールと同様の色調(黒色)および伝熱管の外径に近い円筒状に沿った形状であることからスケールと断定した。また、伝熱管減肉部と接触していた箇所に接触痕を確認した。 ・表面観察 伝熱管接触想定部の表面をSEMにより観察した結果、伝熱管と擦れたことによる筋状痕を確認した。 ・伝熱管成分付着確認 伝熱管との接触想定部を成分分析した結果、表面に伝熱管の母材のNiおよびCrの成分を僅かに検出した。 ・断面観察結果 断面観察を実施した結果、稠密層(密度の高い酸化鉄の層)厚さが0.1mmであることを確認した。 A-SG器内の管板、流量分配板、第一管支持板の上面の全ての範囲なら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器外点検(目視点検)	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、スケールおよびスラッジや、2次系配管の内表面から生じたと思われる鉄錆は確認したが、それ以外の異物は確認できなかった。	×
		SG器内発生物との接触	設計評価	SG器内発生物が脱落し、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、掘止め金具のキー固定板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、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。	×
	内部品が脱落して接触	SG器内点検(目視点検)	A-SG器内の管板、流量分配板、第一管支持板の上面の全ての範囲なら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。	×	
	スケールによる損傷	スケールによる損傷	きずに接触している付着物の分析を実施した結果は以下のとおりであった。 ・外観観察 付着物の外観観察の結果、過去から認められているスケールと同様の色調(黒色)および伝熱管の外径に近い円筒状に沿った形状であることからスケールと断定した。また、伝熱管減肉部と接触していた箇所に接触痕を確認した。 ・表面観察 伝熱管接触想定部の表面をSEMにより観察した結果、伝熱管と擦れたことによる筋状痕を確認した。 ・伝熱管成分付着確認 伝熱管との接触想定部を成分分析した結果、表面に伝熱管の母材のNiおよびCrの成分を僅かに検出した。 ・断面観察結果 断面観察を実施した結果、稠密層(密度の高い酸化鉄の層)厚さが0.1mmであることを確認した。 小型カメラを用いて、管板及び管支持板上面を観察した結果、過去の調査と同様にスケール及びスラッジが残存していることが確認できている。 また、近傍の伝熱管表面を観察した結果、伝熱管へのスケールやスラッジの付着はあるものの、局所的にスケールが剥離した痕跡が認められた。これらは、起動停止時の伝熱管の熱伸びと収縮に追従できず剥離したものであり、高温側と低温側(水平方向)、管支持板間(垂直方向)において有意な差は認められなかった。 前回の第25回定期検査時の薬品洗浄効果によるスケール性状の傾向を過去の結果と比較するため、傾向を把握するために十分な60個のスケールを回収した。なお、回収にあたっては、厚みのある稠密層を有するスケールが多く存在すると考えられる第二管支持板以下の比較的大きなスケールを回収した。 スケール60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1個(約6mm×約4mm)確認した。また、第24、25回定期検査時に回収したスケールと稠密層厚さの傾向を比較したところ、今回回収したスケールはさらに稠密層厚さが薄くなっていることを確認した。 回収したスケール60個のうち、稠密層があり、かつ、摩耗試験が可能な大きさ(約10mm×約5mm以上)のスケール10個を対象に試験を実施し、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耗量以上のスケールは確認されなかった。また、第24、25回定期検査時に回収したスケールと摩耗試験の結果を比較したところ、摩耗体積比が減少していることを確認した。	○	
	2次側からの損傷	デンチング	ECT信号	ECTの信号指示を確認した結果、デンチングではないと考える。*	×
		粒界腐食割れ(IGA)	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性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、粒界腐食割れの可能性はないと考える。*	×
		ピッチング	使用環境	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性性雰囲気を経験したプラントで、ピッチ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ることから、ピッチングの可能性はないと考える。*	×
リン酸減肉		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ることから、リン酸減肉の可能性はないと考える。*	×	
流体振動による疲労		設計評価	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。*	×	
エロージョン		設計評価	当該部流速は約 <span style="border: 1px solid black; padding: 0 2px;"> </span> 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(室温条件下では約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。*	×	
ECT探傷	損傷以外の信号	局所的な異物等の付着・剥離	ECT信号	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。	×

\*: 形状から本要因でないとは判断できる。  
○: 可能性が高い。  
×: 要因の可能性なし。

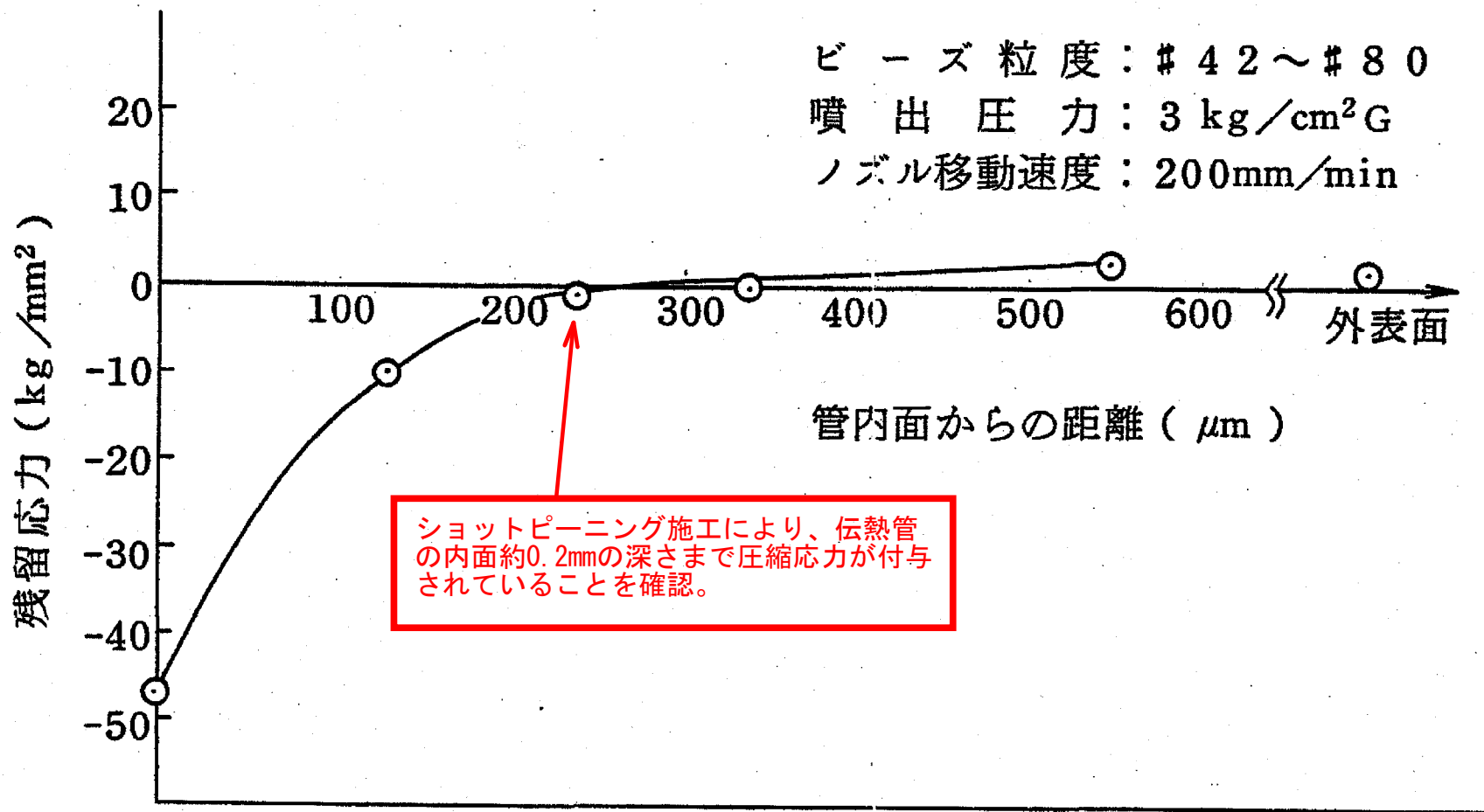
 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

# SG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	<p>伝熱管厚さ 約1.3mm</p> <p>圧縮応力範囲*1 約0.2mm</p> <p>ECT**2検出可能 約0.5mm以上</p> <p>※1: 伝熱管は薄肉管であることから、外面に大きな引張り残留応力を残留させずに、圧縮応力を付与できる範囲が小さい</p> <p>※2: 高浜発電所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)</p>	<p>管台溶接部厚さ約80mm</p> <p>圧縮応力範囲 約1mm</p> <p>ECT検出可能 約0.5mm以上</p>
施工前確認時の対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 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)</li> <li>➢ 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)</li> <li>➢ 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)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 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)</li> <li>➢ 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)</li> <li>➢ 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)</li> </ul>
有効性評価	<p>ショットピーニングを施工した時点で、圧縮応力の付与されない範囲にECTにより検出不可能なPWSCC(約0.2mm～約0.5mmの深さのPWSCC)が存在したとすると、ショットピーニング施工後もPWSCCが進展し、顕在化する可能性がある。</p>	<p>WJPを施工した時点で、圧縮応力の付与される範囲とECTの検出能力の関係から、圧縮応力の付与されない範囲にPWSCCが存在する可能性はなく、WJP等の施工後にPWSCCが進展し、顕在化することはない。</p>

WJP: ウォータージェットピーニング  
USP: ウルトラ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

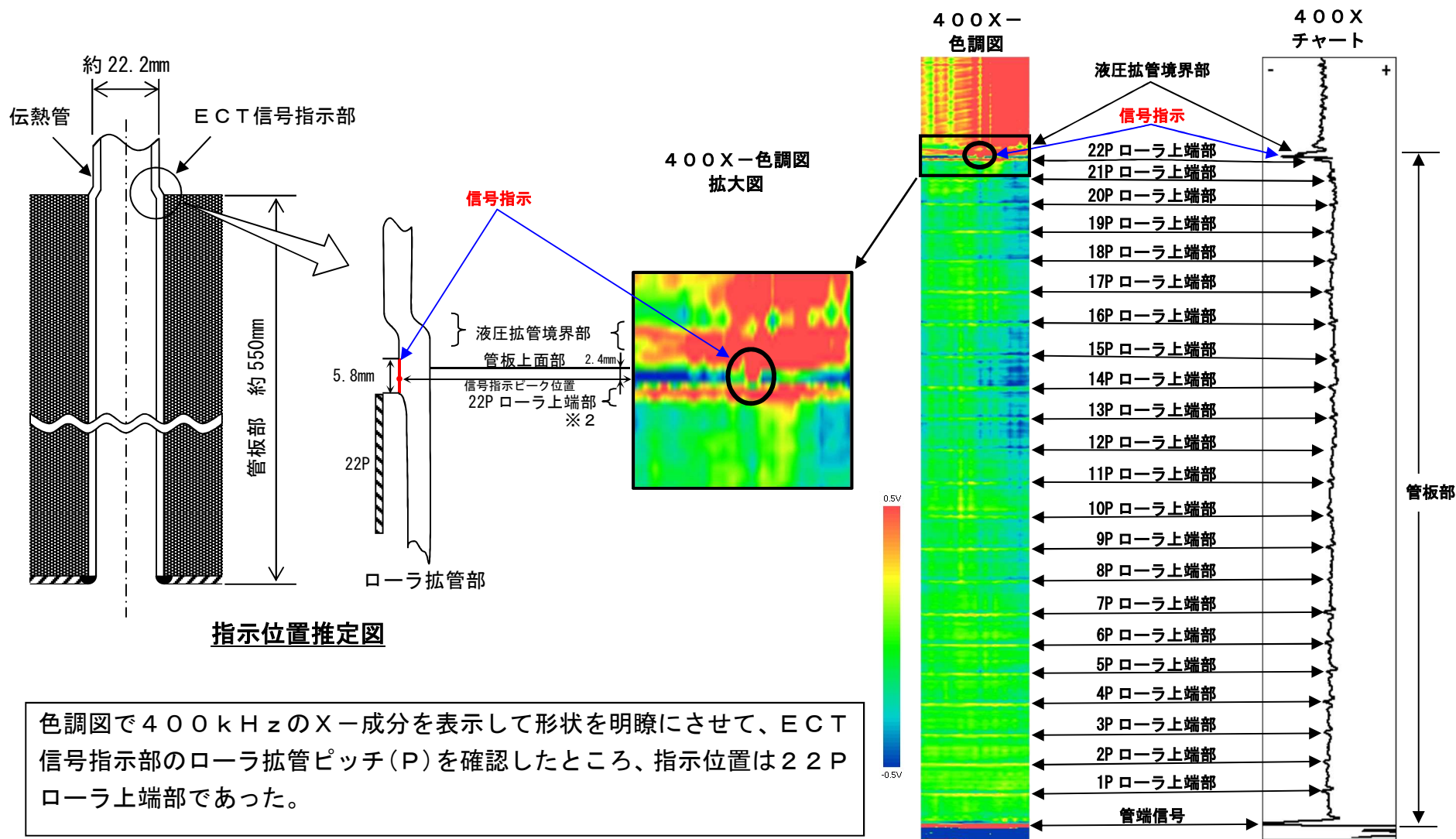


ショットピーニング施工により、伝熱管の内面約0.2mmの深さまで圧縮応力が付与されていることを確認。

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」

信号指示の記録

# 色調図表示<sup>※1</sup>による管板部指示管の指示位置推定 (C-SG X70, Y5)



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

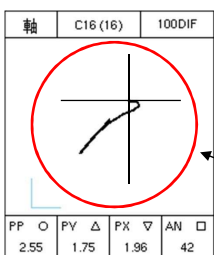
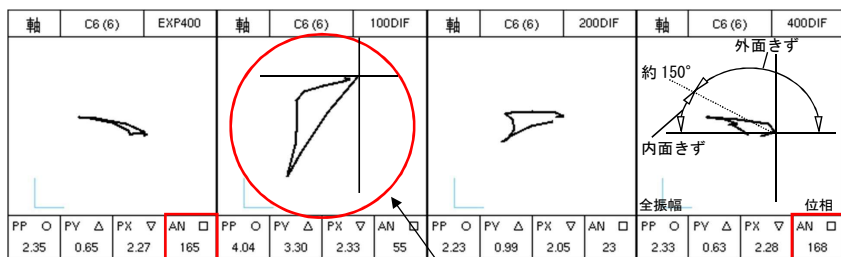
- ※1：24組分のコイルのチャートを平面状に並べ、信号振幅に応じて色調として表示させたもの。伝熱管全長についての信号指示の大きさや位置等の分析に用いる表示方法。
- ※2：管板の穴に伝熱管を挿入し、伝熱管の内面から高い圧力(水圧)で拡管した後、管板下端部から上端部に向かって機械式ローラで伝熱管を押し広げて伝熱管と管板を圧着した最終ピッチ部。

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チ、鳥瞰図表示による分析例 (SCC)

## リサーチ表示※<sup>1</sup> (C-SG X70, Y5)



同一番地の伝熱管の健全と評価されるリサーチ

### [分析手順-1]

400kHz ※<sup>3</sup> リサーチ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 リサーチ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]

リサーチ波形に構造物、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チ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チ波形に構造物、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、リサーチ波形に構造物、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]

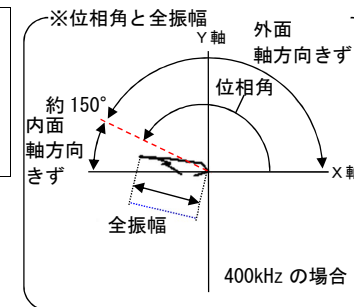
400kHz リサーチ波形の位相から内面軸方向きずパターンを示しており、100kHzにおいて健全部と比較して、内面軸方向きずの影響を示した波形となっている。

### 位相角

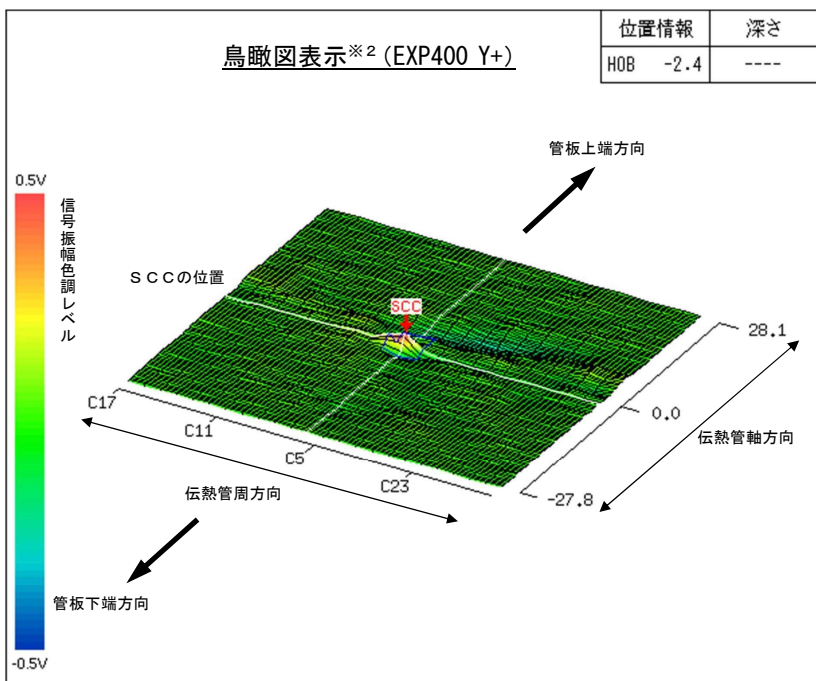
ECT信号を2次元的に表示したリサーチ表示において、X軸0°からの角度をいい、内面きずか外面きずか、軸方向きずか周方向きずかを評価する。

### 全振幅

リサーチ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※<sup>2</sup> (EXP400 Y+)



### 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。

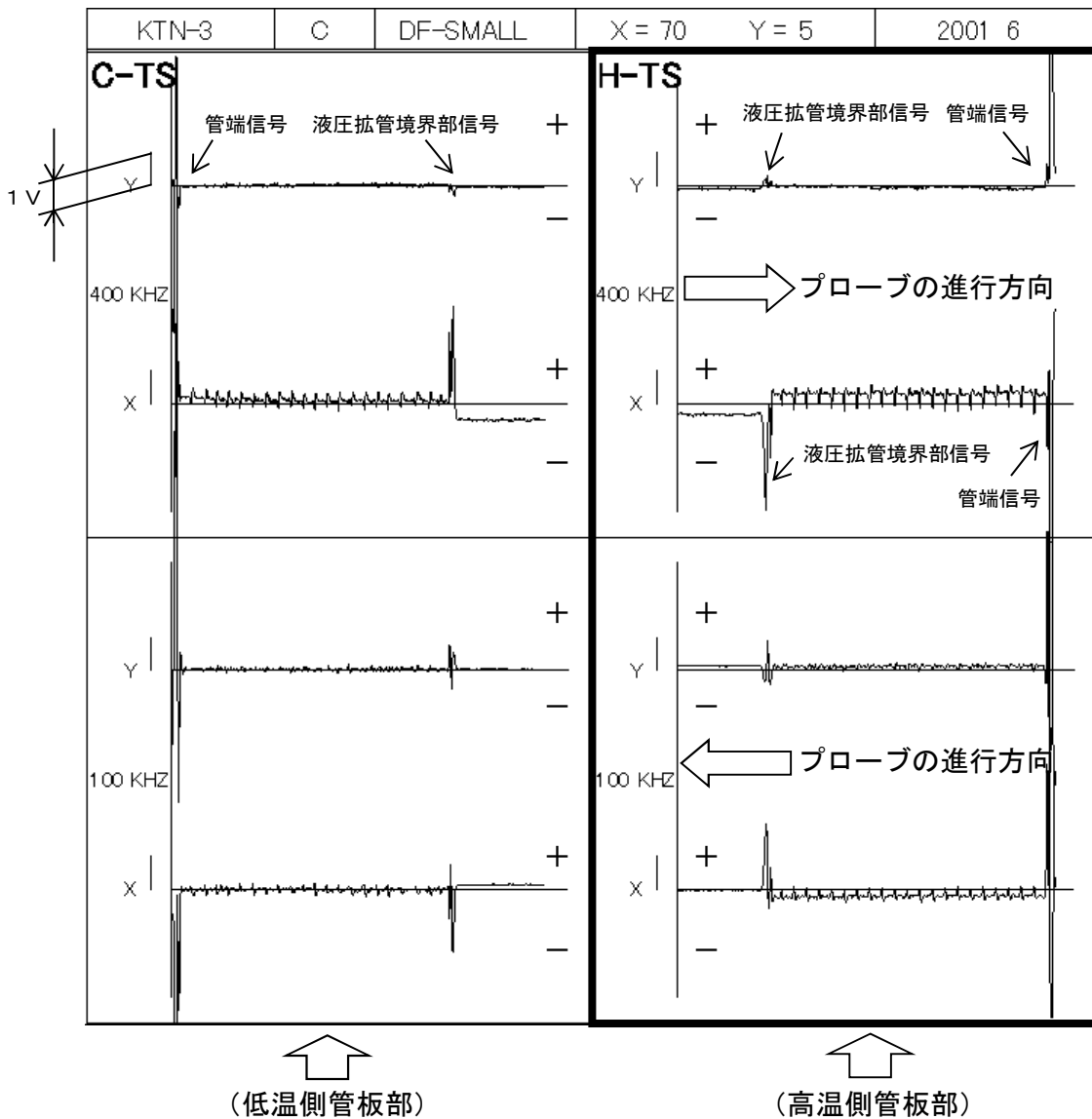
### 評価

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（C-SG X70, Y5）

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（C-SG X70, Y5）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、

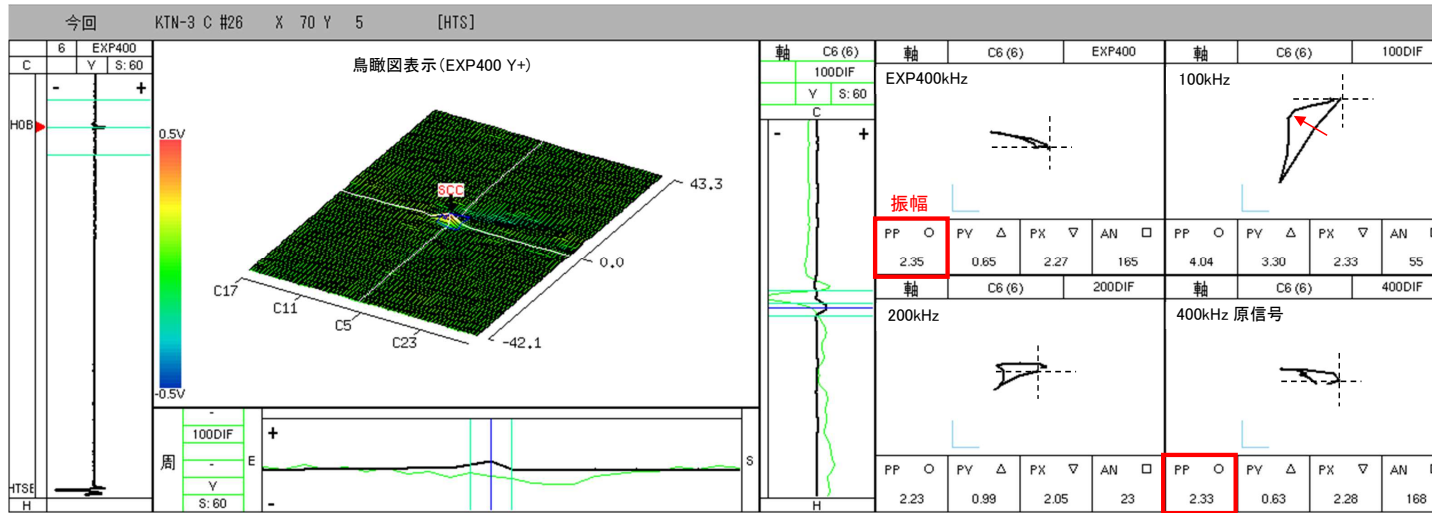
- ・ 400kHz/100kHz の Y 信号がともにプローブの進行方向に対して「+→-」へ変動する
- ・ 400kHz の Y 振幅が 0.5V 以上

※：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<sup>※1</sup>の探傷データ(1/5)  
 (高温側管板部の経年波形 C-SG X70,Y5)

第 2 6  
 回定期  
 検査



分析 評価

【400kHz】<sup>※2</sup>

EXP400のリサージュ波形の振幅において、#25と比較すると振幅が1.36Vから2.35V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。

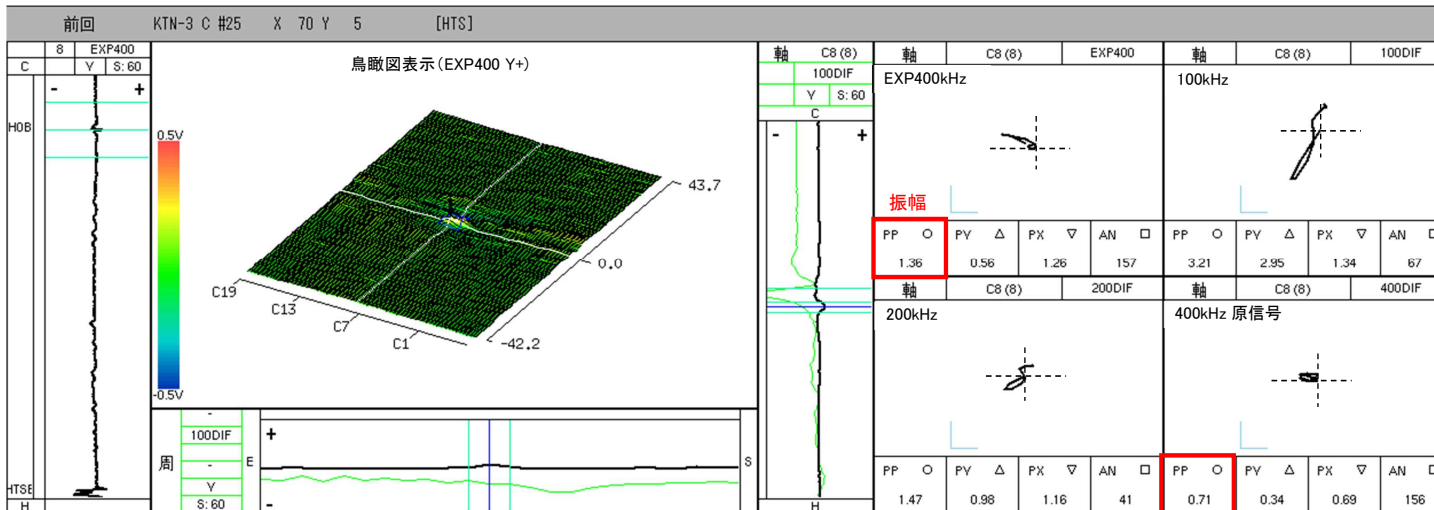
加えて400DIFのリサージュ波形の振幅を見ても同様の変化を示している。

【100kHz】

管板上端信号との区別が困難ではあるが、#25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 5  
 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。

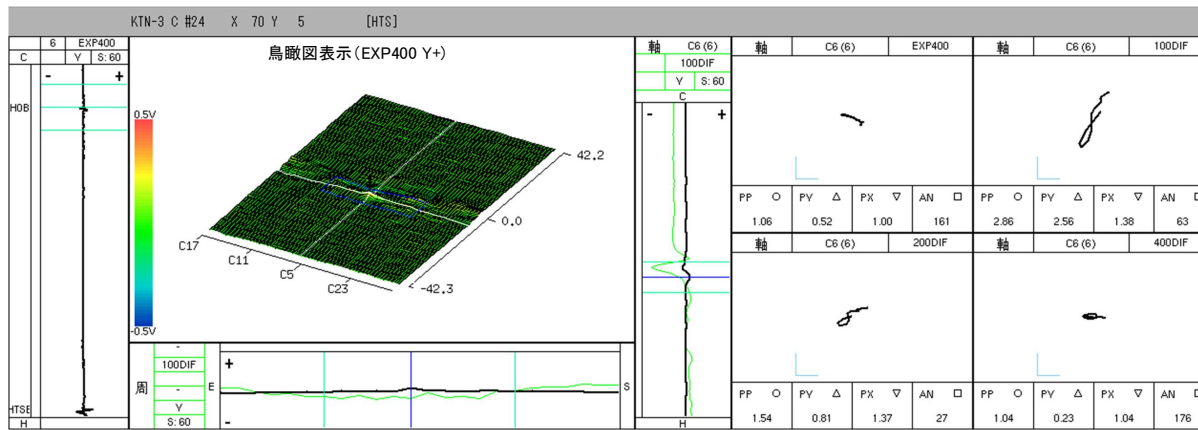
以上から、きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。

※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(2/5)  
 (高温側管板部の経年波形 C-SG X70,Y5)

第 2 4  
 回定期  
 検査



分析 評価

【400kHz】

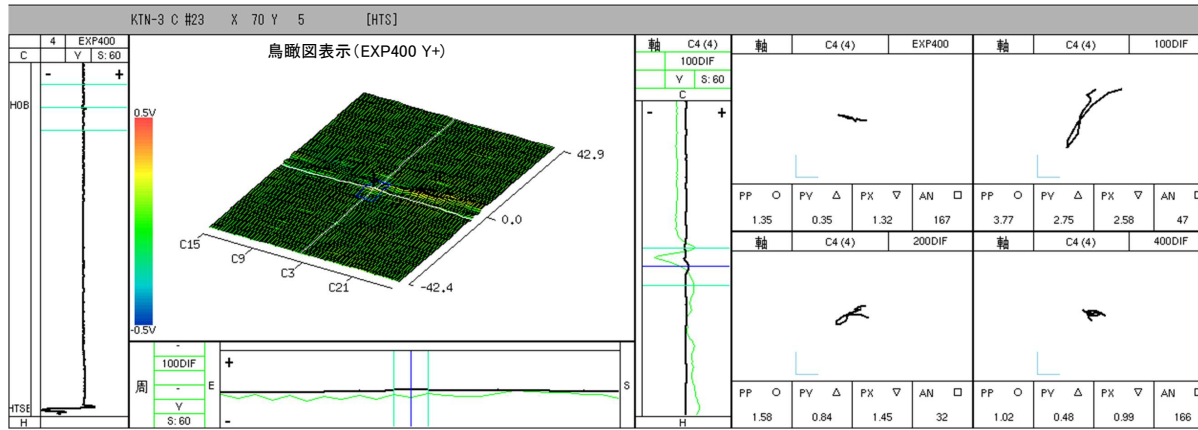
管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

【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 3  
 回定期  
 検査



分析 評価

【400kHz】

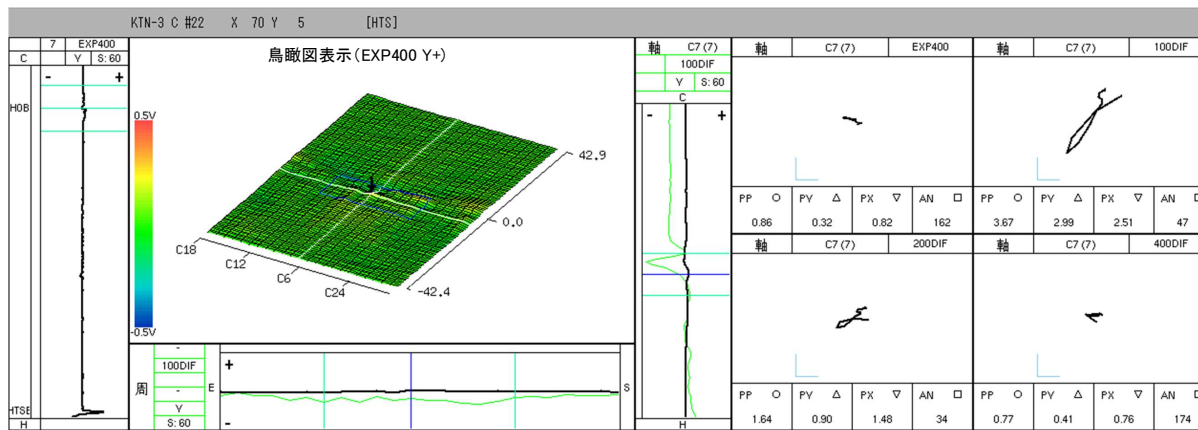
管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

【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。

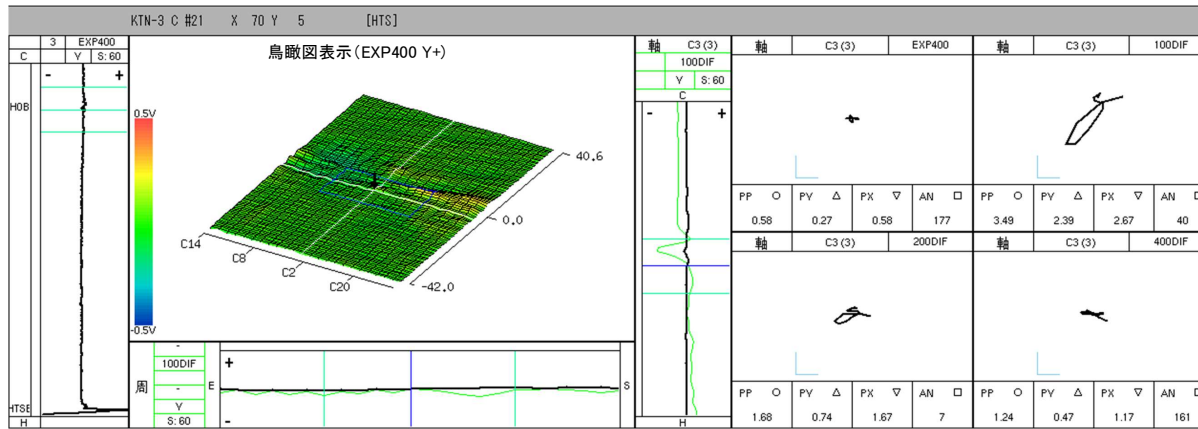
【100kHz】

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。

インテリジェント ECT の探傷データ(3/5)  
 (高温側管板部の経年波形 C-SG X70,Y5)

第 2 1  
 回定期  
 検査



分析 評価

【400kHz】

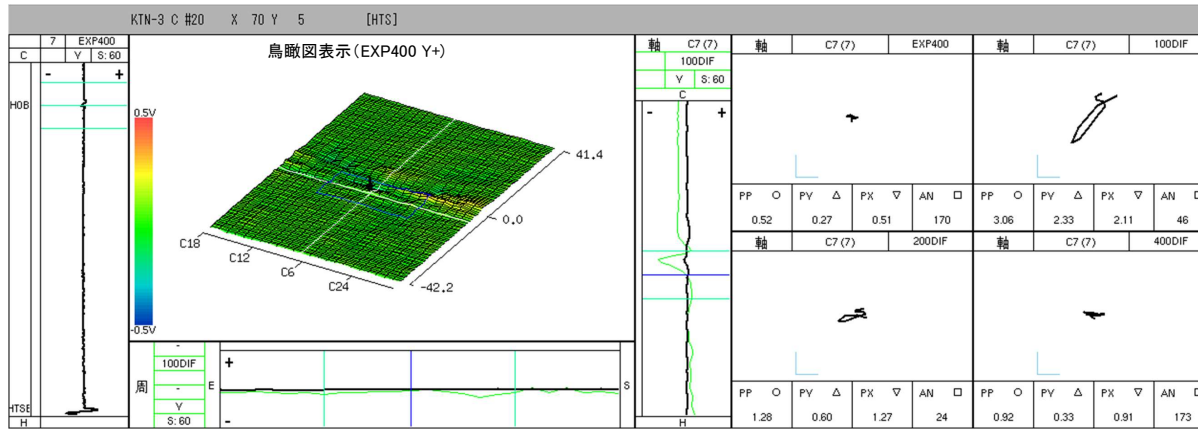
管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

【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。

第 2 0  
 回定期  
 検査



分析 評価

【400kHz】

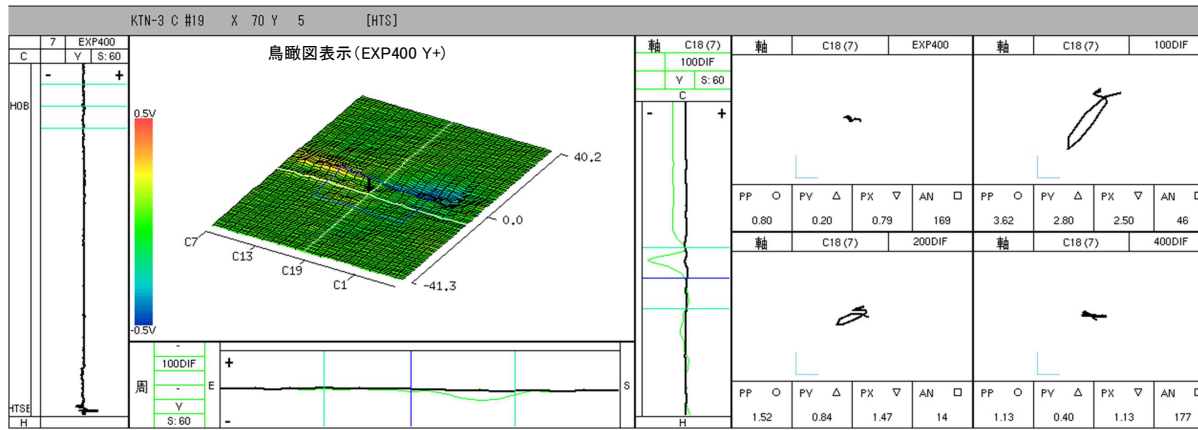
管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

【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 1 9  
 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。

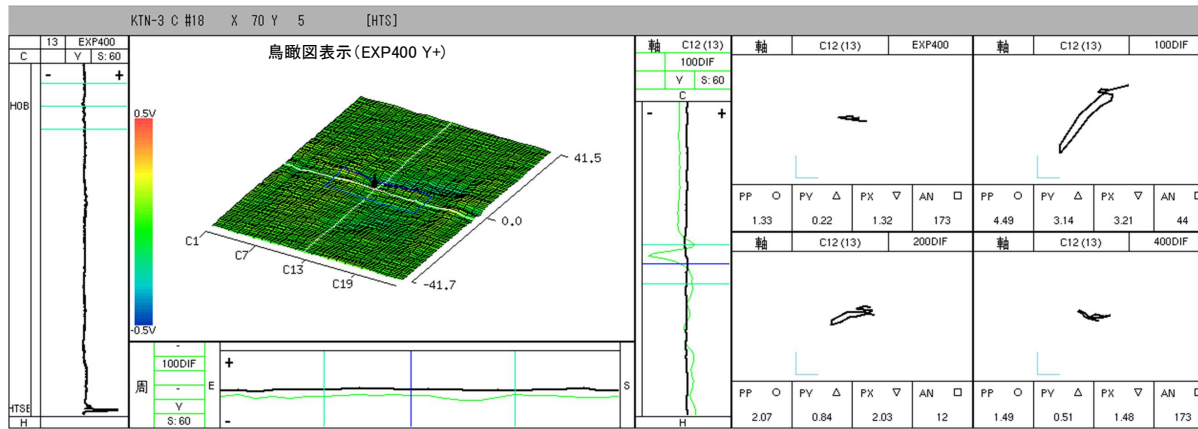
【100kHz】

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(4/5)  
 (高温側管板部の経年波形 C-SG X70,Y5)

第 18  
 回定期  
 検査



分析 評価

【400kHz】

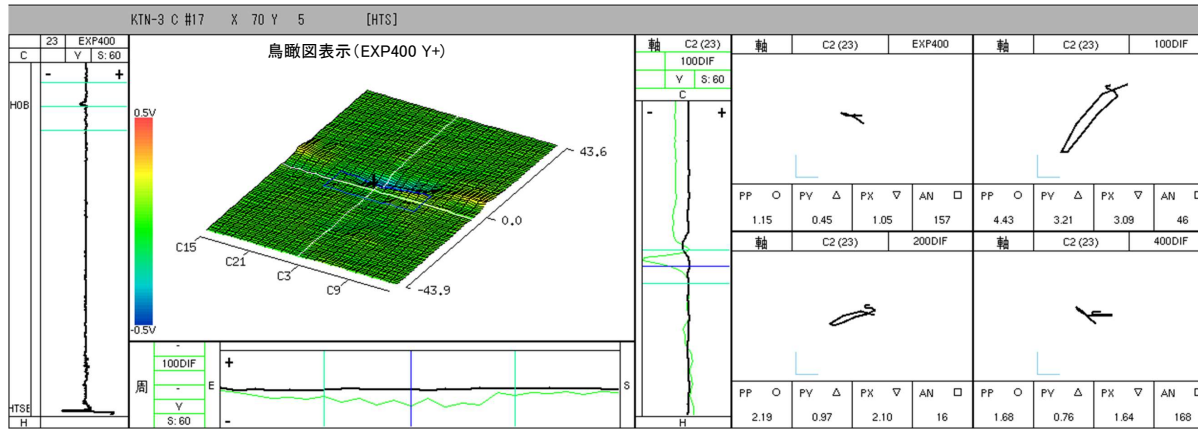
管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

【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 17  
 回定期  
 検査



分析 評価

【400kHz】

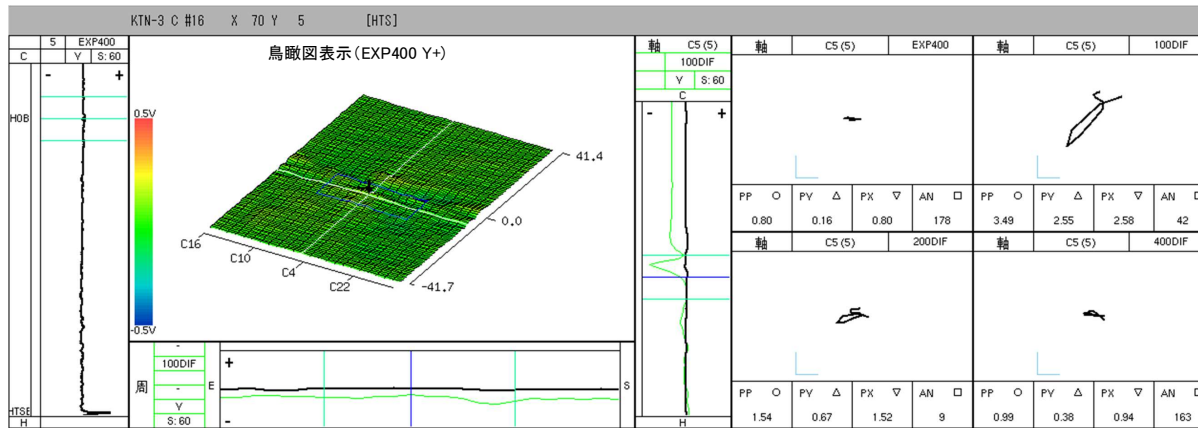
管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

【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。

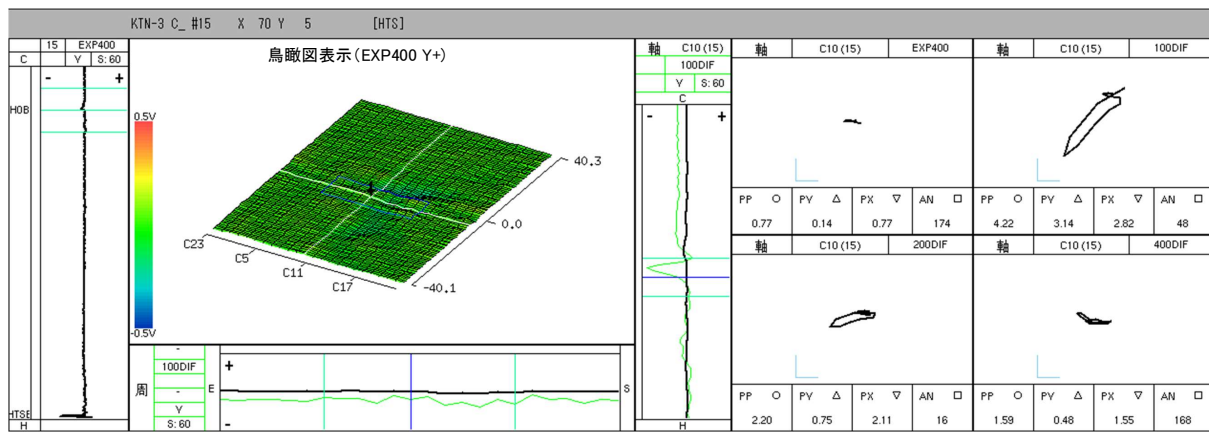
【100kHz】

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。

インテリジェント ECT の探傷データ(5/5)  
 (高温側管板部の経年波形 C-SG X70,Y5)

第 1 5  
 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】

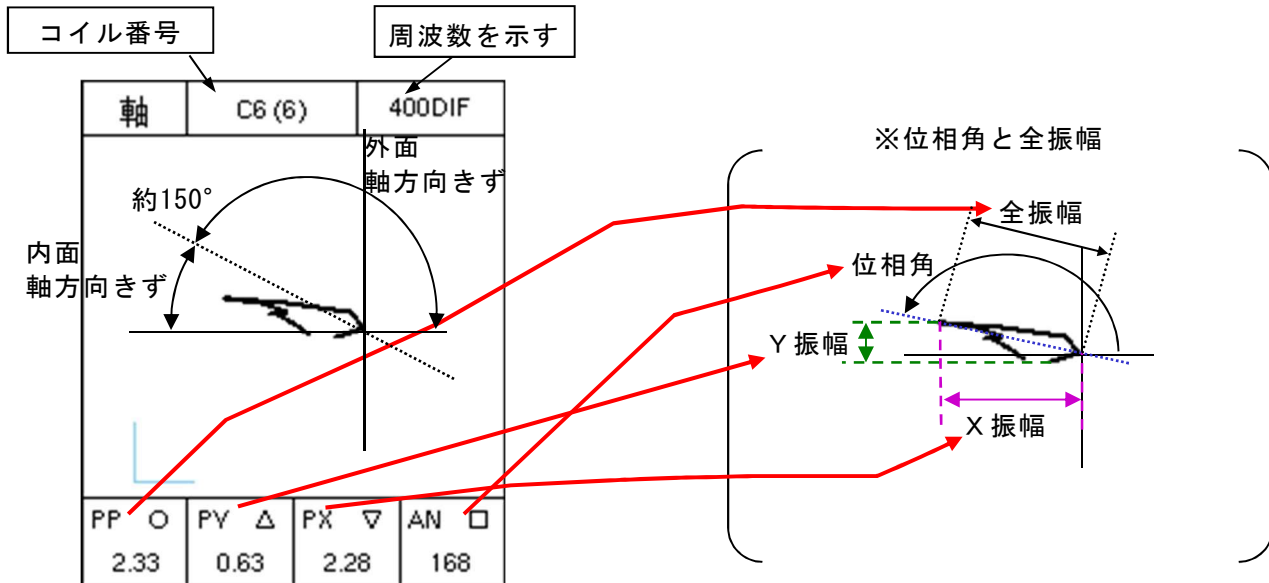
健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。

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

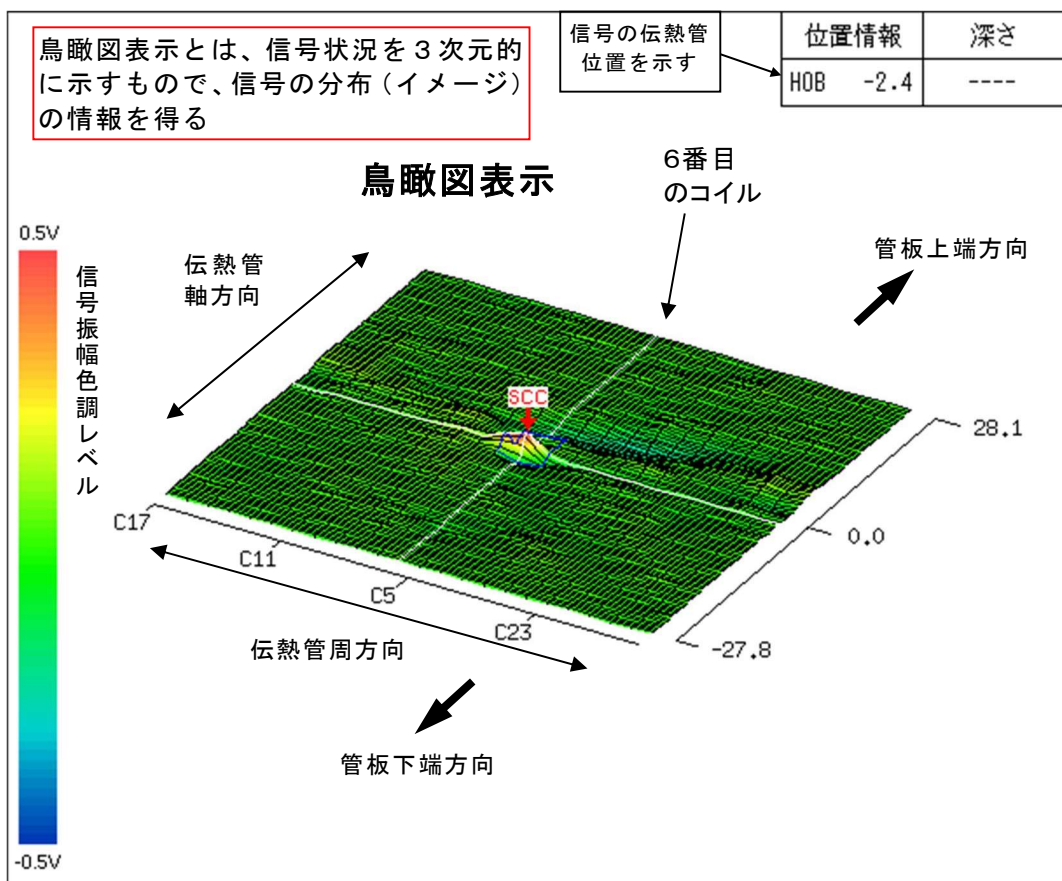
— インテリジェントECT信号波形の見方（リサーチ、鳥瞰図表示） —



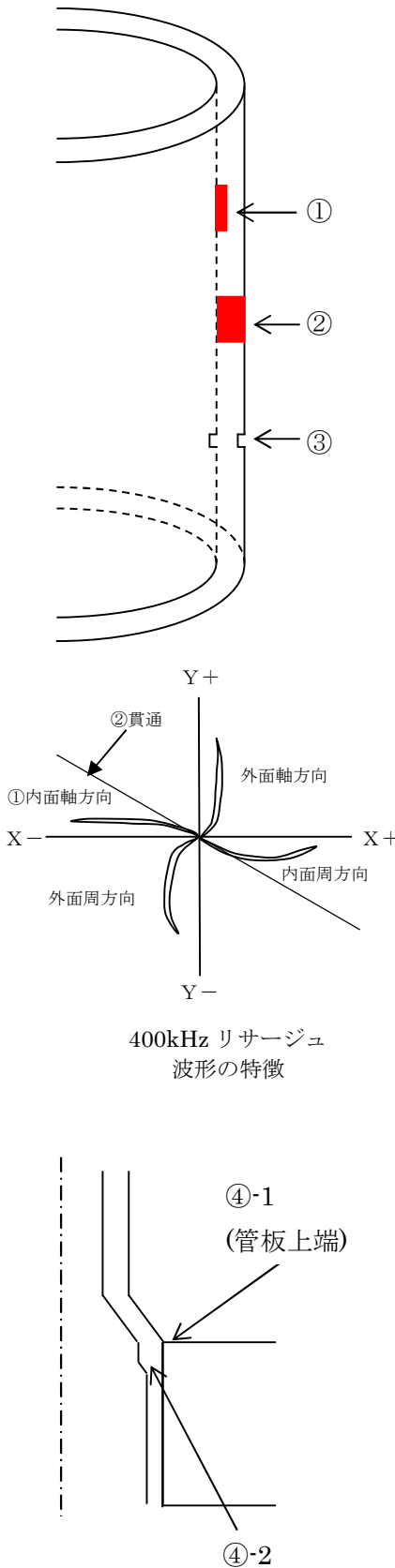
内面軸方向きずの場合、位相角は400kHzの場合約150°以上に、100kHzの場合約170°以上にある。  
また、全振幅は400kHzの方が100kHzより大きい。

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。

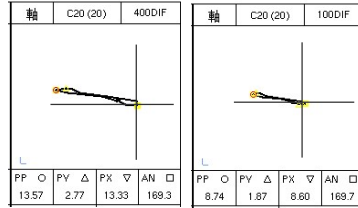
リサーチ表示とは、ECT信号を2次的に示し、周波数の異なるECT信号から、きずが内外面および周軸方向のどちら側か等の情報を得る



## インテリジェント ECT における信号の特徴について



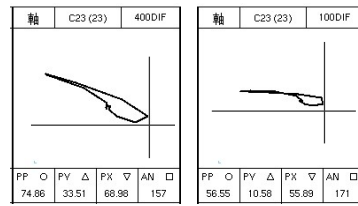
### ①内面軸方向きず



(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。

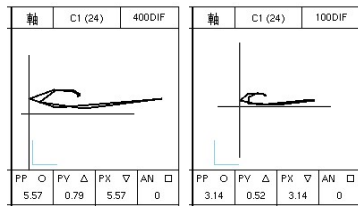
### ②貫通軸方向きず



(特徴)

- ・位相角：100kHz ≥ 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。

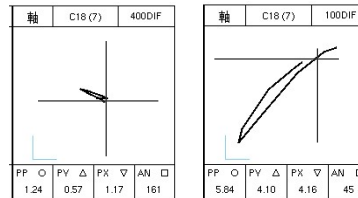
### ③局所変形信号 (打痕)



(特徴)

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

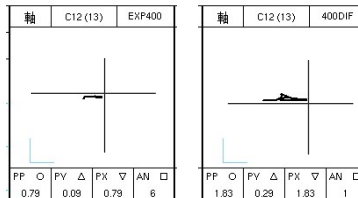
### ④-1 (管板上端信号)



(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)



(特徴)

- ・400kHz では、位相がほぼ水平である。

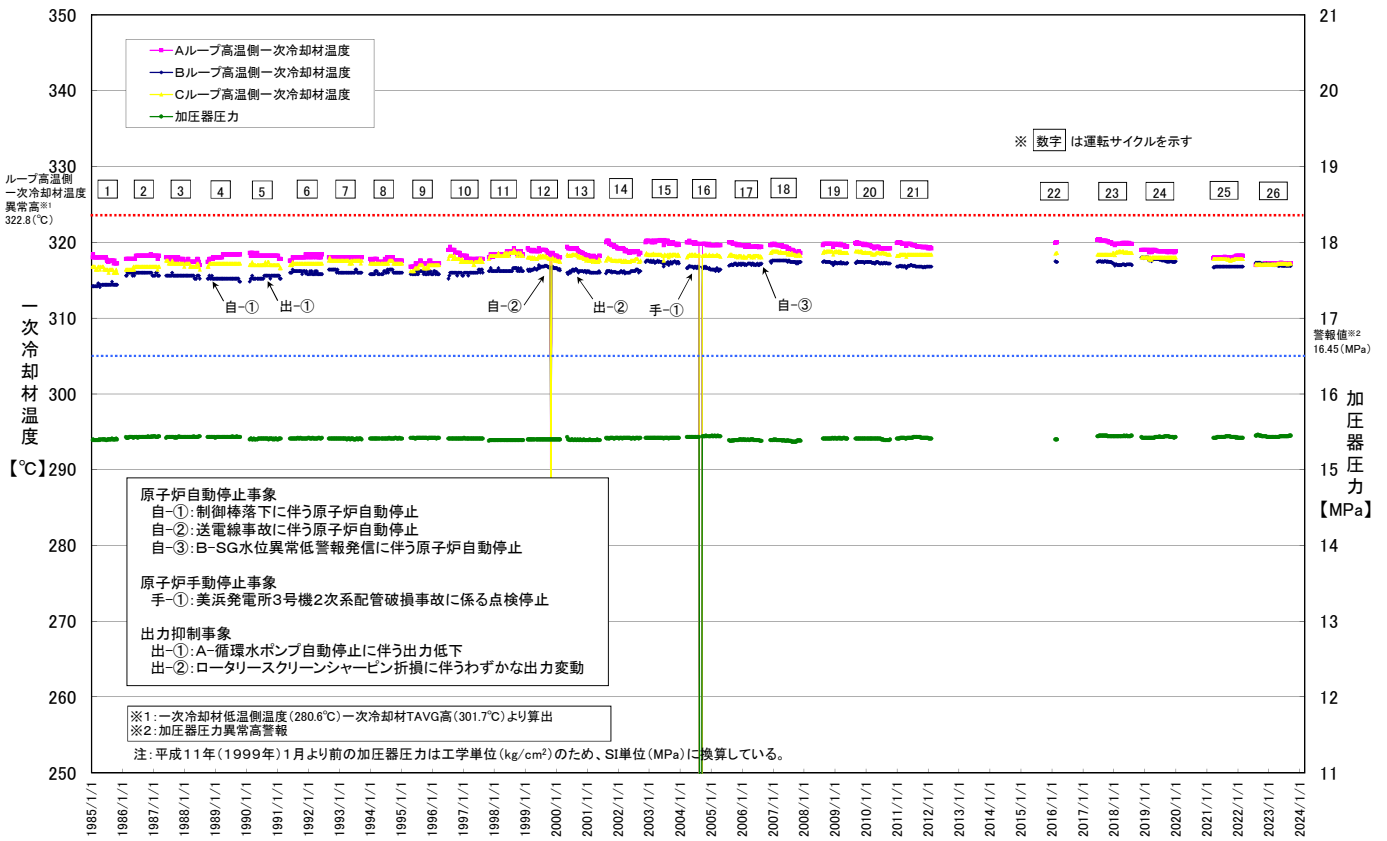
(④-2 揺動信号) (④-2 形状信号)

(拡管境界部：形状および揺動信号が生じる箇所)

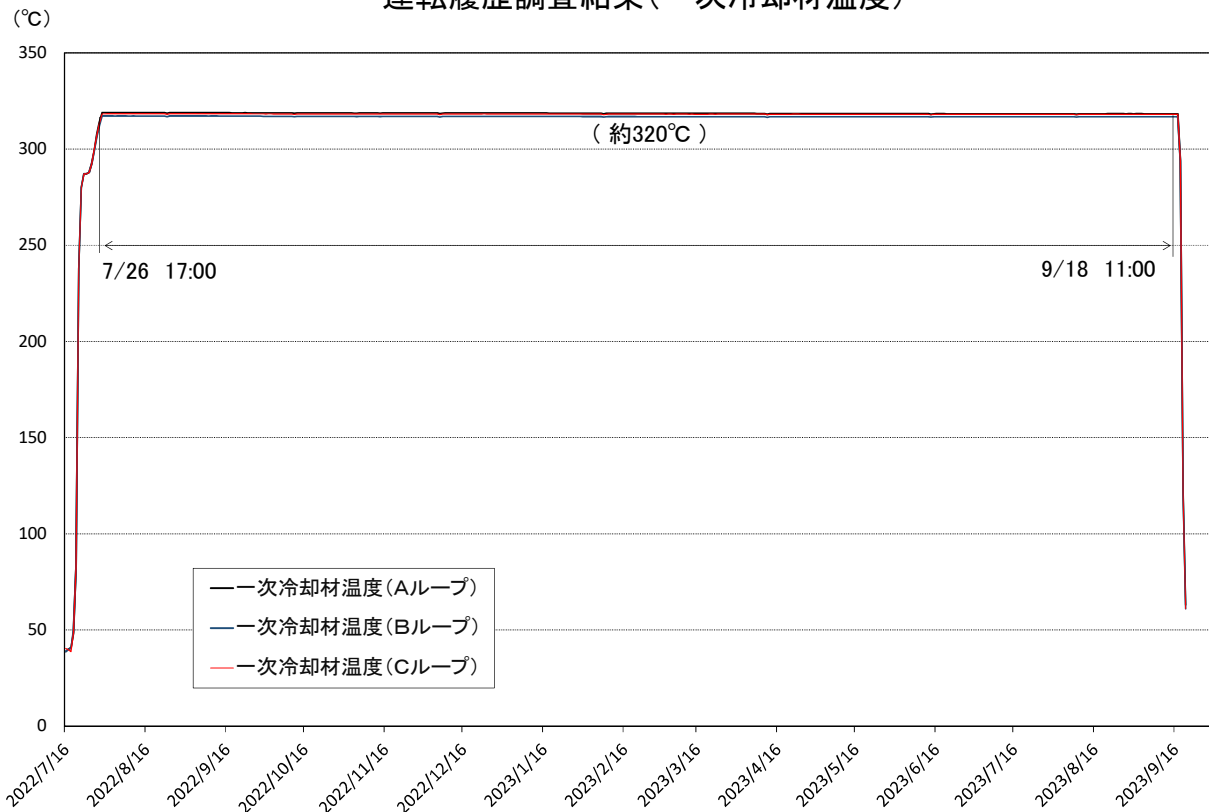
運転履歴調査結果（一次冷却材温度・圧力、放射線監視装置、一次冷却材水質）



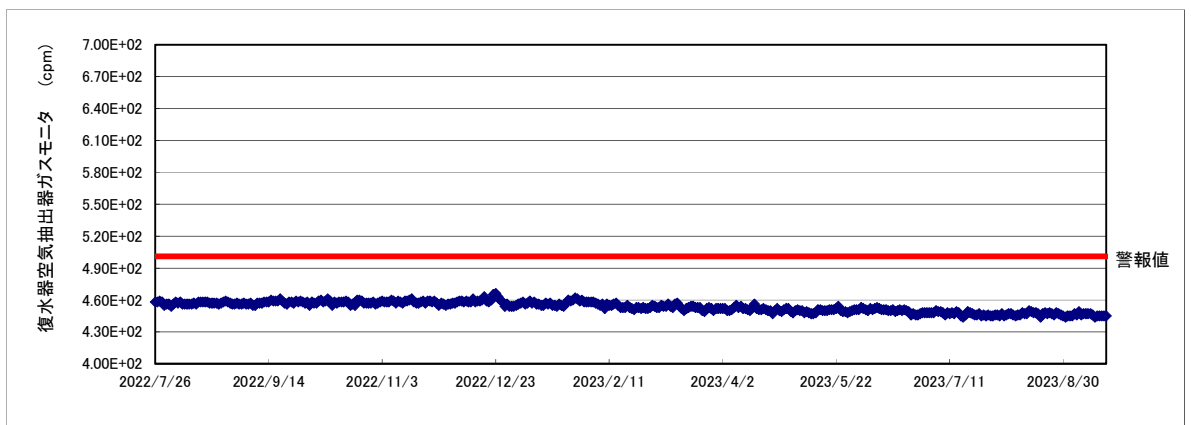
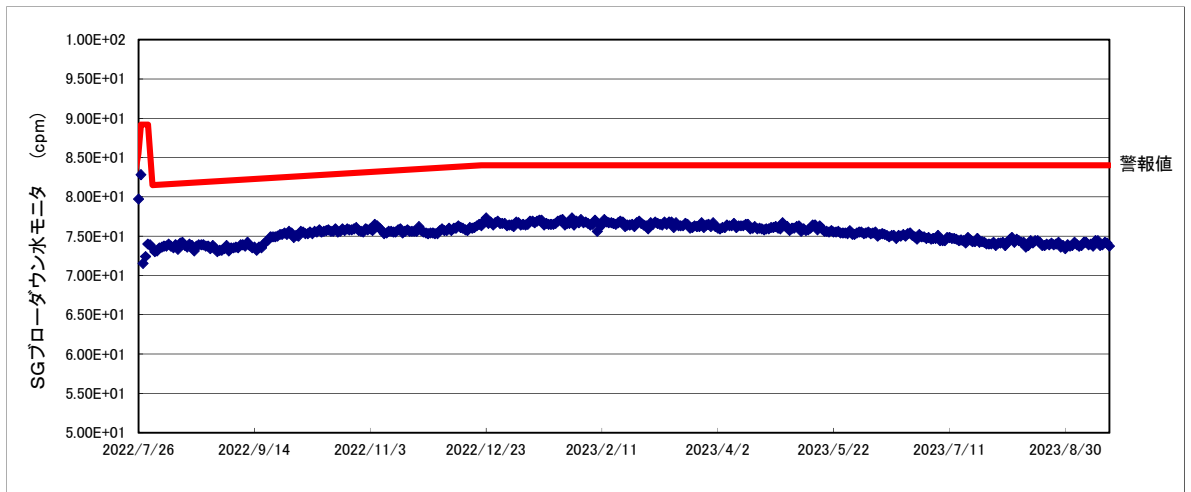
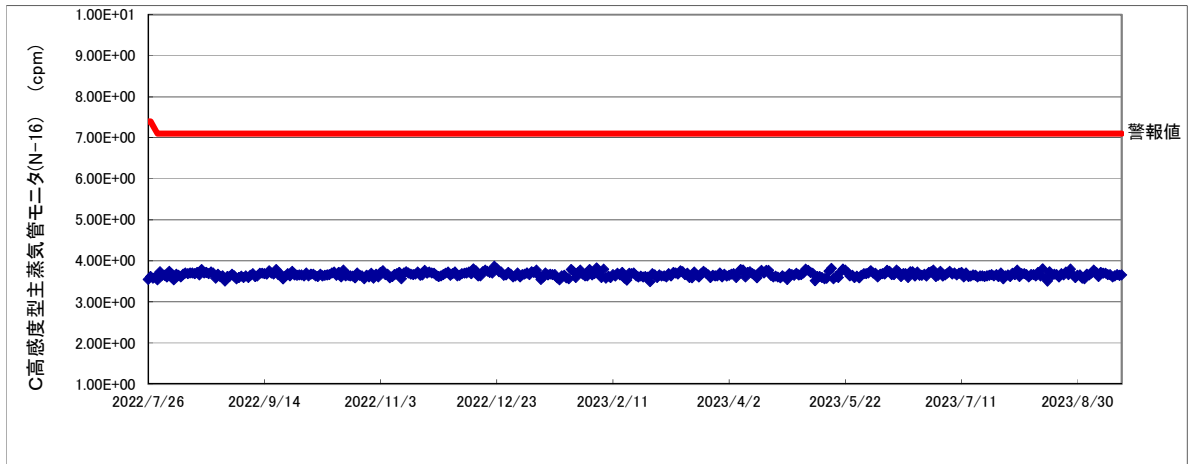
運転履歴調査結果 (一次冷却材温度・圧力)



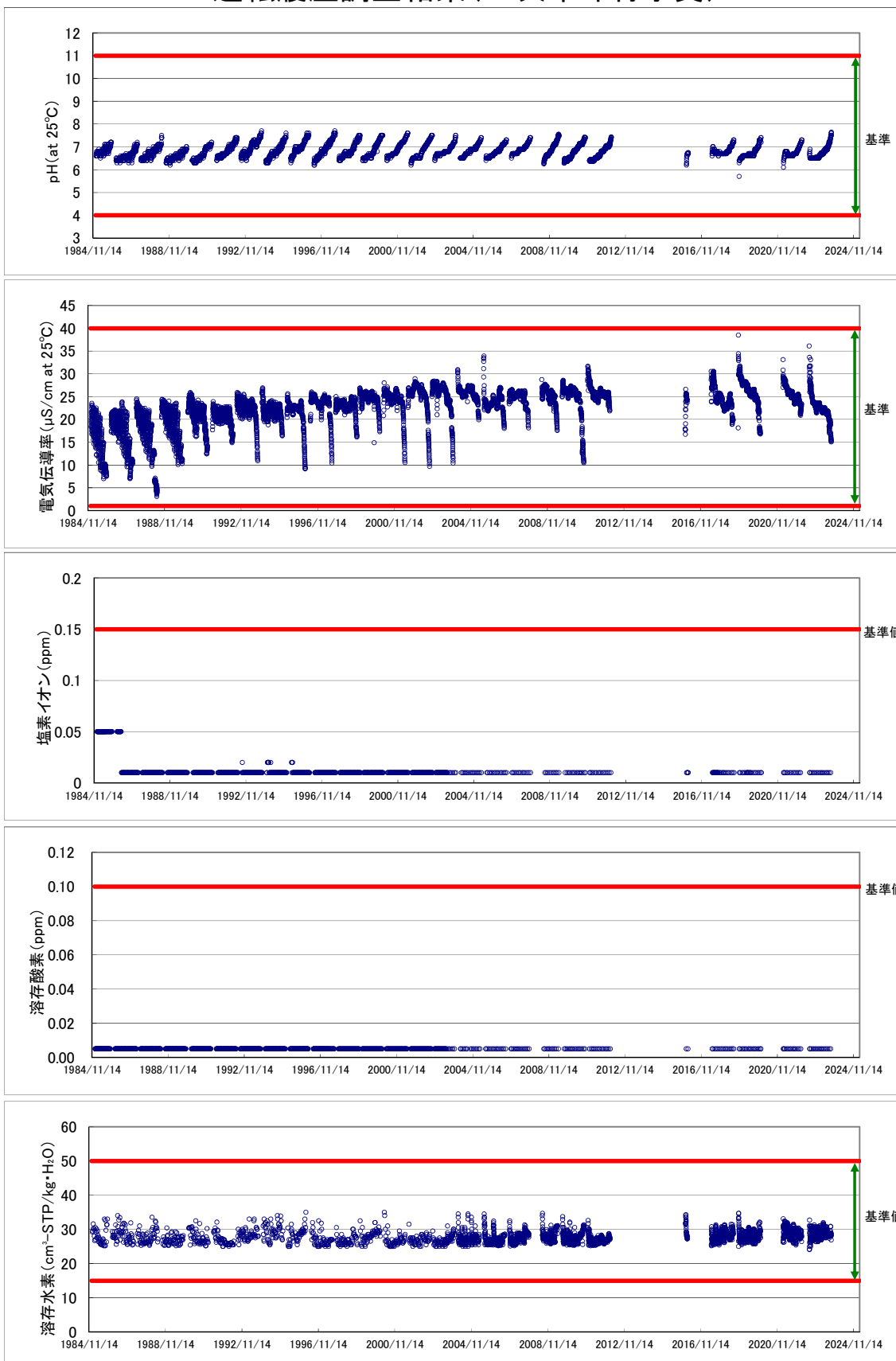
運転履歴調査結果 (一次冷却材温度)



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)

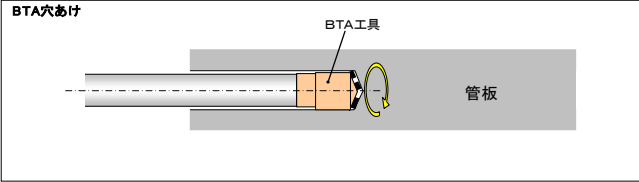

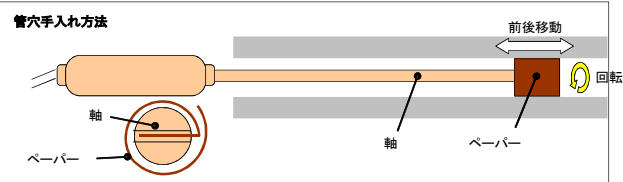
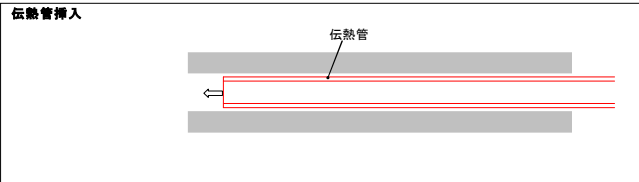
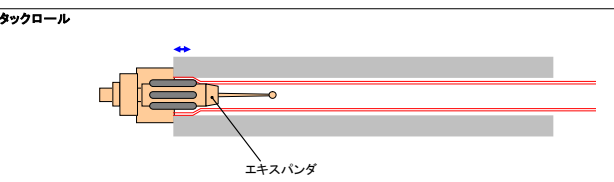
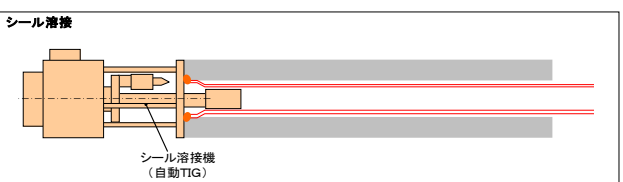
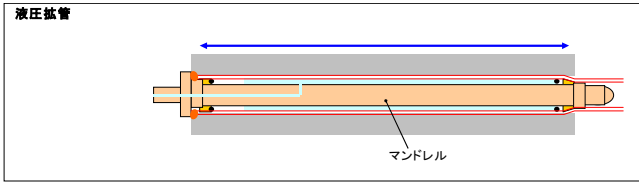
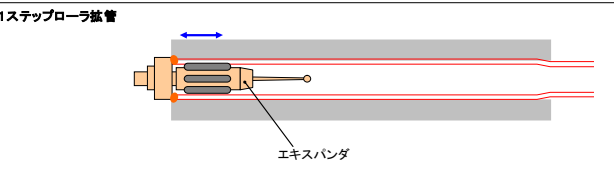


保安規定第19条に定める一次冷却材の水質基準値

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 <sup>3</sup> -STP/kg・H <sub>2</sub> O

## 製造履歴に関する聞き取り調査

製造手順, 要領について関係者への聞き取りにより調査を行った。

<p>1. 管穴加工</p>  <p>BTA 工具*1により管板の管穴加工を行う。</p>	<p>1'. 管穴 2 次側端部のカエリ取り</p>  <p>管穴加工後, 2次側端部のカエリ取りを全穴実施。</p> <p>【検査】管穴内径確認, 内面外観目視</p>	<p>1". 管穴内面手入れ</p>  <p>管穴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。</p> <p>【検査】(手入れ後)内面外観目視</p>
<p>2. 伝熱管挿入</p>  <p>管支持板および管板管穴に伝熱管を挿入。</p>	<p>3. 仮拡管</p>  <p>ローラ拡管工具(エキスパンダ*)にて伝熱管端部を仮拡管。</p> <p>【検査】(仮拡管後)開先合せ検査</p>	<p>4. シール溶接</p>  <p>自動 TIG 溶接機で伝熱管端部をシール溶接。</p> <p>【検査】(シール溶接後)溶接部 He リーク試験, PT*2</p>
<p>5. 液圧拡管</p>  <p>1700kgf/cm<sup>2</sup>(166.71MPa)の圧力で管板全厚の液圧拡管を行う。</p> <p>【検査】(液圧拡管後)境界部内径確認, 内面外観目視</p>	<p>6. 22 ステップローラ拡管</p>  <p>100kgf・cm のトルクで 22 ステップローラ拡管を行う。</p> <p>【検査】(ローラ拡管後)境界部内径確認, 内面外観目視</p>	<p>[調査結果]</p> <p>全 SG において1. ~6. の手順で製造・検査されていることを確認した。</p>

\*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

蒸気発生器伝熱管ショットピーニング工事総括報告書



客先	課長	係長	A クラス
			係

関西電力(株)高浜発電所 3号機

第13回定検

蒸気発生器伝熱管ショットピーニング工事

総括報告書

三菱重工原子力技術資料：クラスB

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

【C-S/G HOT側】 ショットピーニング施工チェックシート【自動】

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)			ピーズ噴出圧力 判定基準 (0.2~0.4MPa)			ピーズ供給確認	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	
1	A	66	15	350	250	281	272	277	0.33	0.33	0.33	良	7月6日	20:23:14	[REDACTED]	[REDACTED]	アルメンゲージテスト
	B	64	15			280	273	276	0.33	0.33	0.33						
2	A	66	8	730	630	282	275	278	0.34	0.34	0.34	良	7月6日	21:05:37	[REDACTED]	[REDACTED]	アルメンゲージテスト
	B	64	8			282	275	278	0.34	0.34	0.35						
3	A	66	7	730	630	281	273	277	0.35	0.34	0.35	良	7月6日	21:10:49	[REDACTED]	[REDACTED]	
	B	64	7			281	273	277	0.35	0.34	0.35						
4	A	65	6	730	630	282	273	278	0.35	0.34	0.35	良	7月6日	21:23:35	[REDACTED]	[REDACTED]	
	B	64	6			282	273	278	0.35	0.34	0.35						
5	A	65	6	730	630	282	273	278	0.35	0.34	0.35	良	7月6日	21:28:51	[REDACTED]	[REDACTED]	
	B	63	6			282	273	278	0.35	0.34	0.35						
6	A	65	7	730	630	282	274	278	0.35	0.34	0.35	良	7月6日	21:34:02	[REDACTED]	[REDACTED]	
	B	63	7			282	274	278	0.35	0.35	0.35						
7	A	65	8	730	630	282	268	277	0.35	0.34	0.35	良	7月6日	21:38:39	[REDACTED]	[REDACTED]	
	B	63	8			282	268	277	0.35	0.35	0.35						
8	A	65	5	730	630	282	271	278	0.35	0.34	0.35	良	7月6日	21:43:49	[REDACTED]	[REDACTED]	
	B	63	5			282	271	278	0.35	0.35	0.35						
9	A	66	5	730	630	285	274	278	0.35	0.35	0.35	良	7月6日	21:45:28	[REDACTED]	[REDACTED]	
	B	64	5			285	274	278	0.35	0.35	0.35						
10	A	71	5	730	630	284	273	278	0.35	0.34	0.35	良	7月6日	21:50:06	[REDACTED]	[REDACTED]	
	B	69	5			284	273	278	0.35	0.35	0.35						
11	A	72	5	730	630	284	273	278	0.35	0.34	0.35	良	7月6日	21:55:19	[REDACTED]	[REDACTED]	
	B	70	5			284	273	278	0.35	0.35	0.35						
12	A	72	6	730	630	280	270	275	0.35	0.34	0.35	良	7月6日	21:57:42	[REDACTED]	[REDACTED]	
	B	70	6			280	270	275	0.35	0.35	0.35						

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







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 <sup>3</sup> -STP/kg・H <sub>2</sub> O
溶存酸素	0.1ppm以下

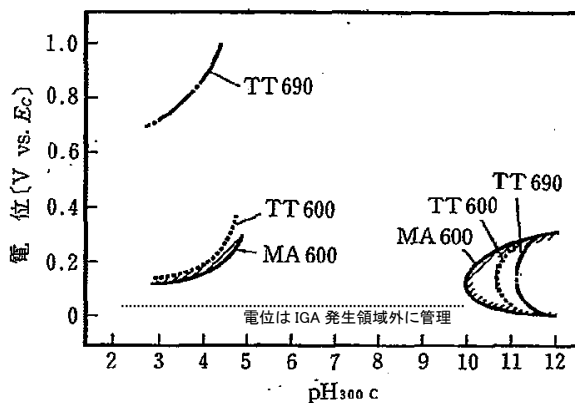
一次冷却材は加圧されているので、伝熱管内では沸騰による不純物濃縮が起こることはなく、かつ還元性雰囲気を維持。

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

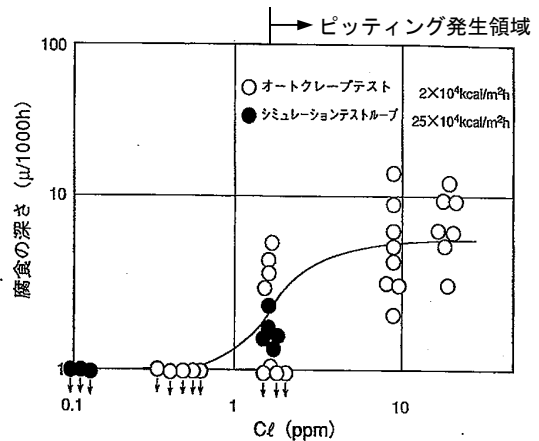
- { 粒界腐食割れ<sup>※1</sup> (IGA)
- { ピットニング<sup>※2</sup>

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  $0^{\circ}$  となり、リサージュ波形の巻きも大きくなる傾向がある。

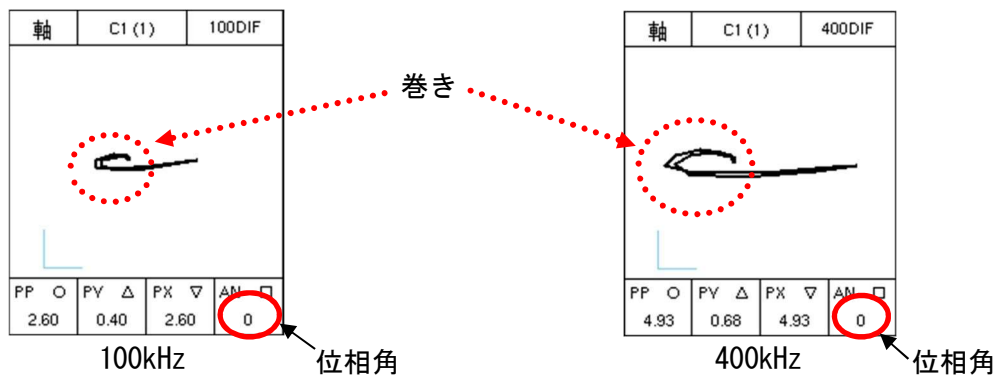
したがって、位相角が 100kHz, 400kHz とも  $0^{\circ}$  近くでないことおよび巻きのないことを確認する。

### 3. C-SG (X70, Y5) の評価結果

今回検出された C-SG (X70, Y5) 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。

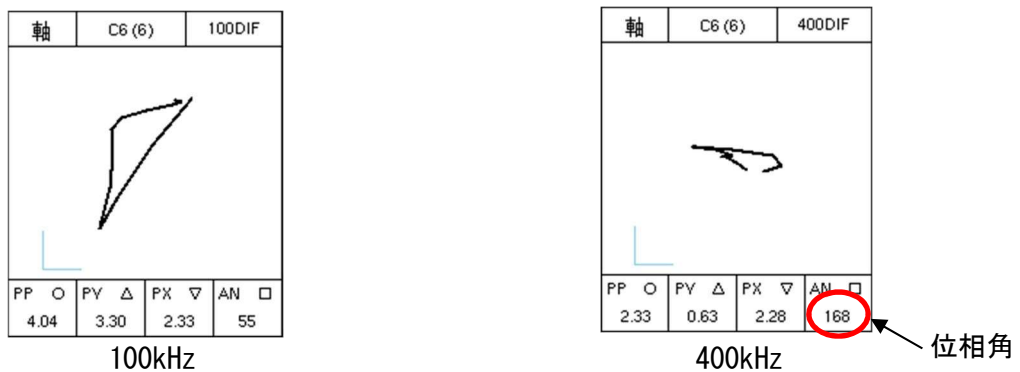
(局所変形の信号)

100kHz, 400kHz とも、全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど  $0^{\circ}$  となる。



(今回の信号 C-SG X70, Y5)

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



## エロージョン\*1の発生可能性評価

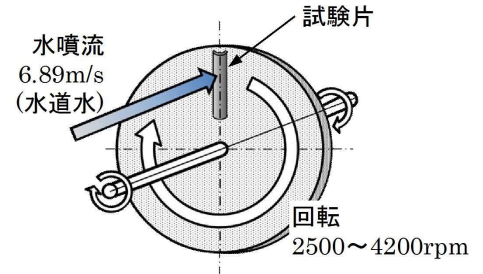
### 1. 目的

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

### 2. 方法

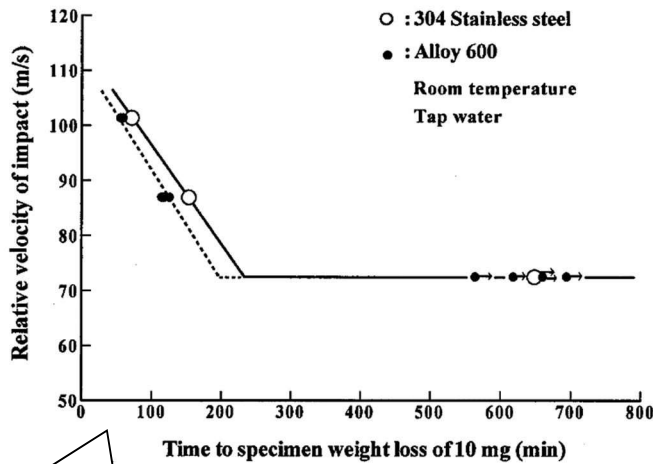
ウォータージェットテスト(常温)によりエロージョン発生限界流速を求め、実機流速と比較する。

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



### 3. 評価結果

インコネルTT600製伝熱管のエロージョンが発生する限界流速は約70m/s以上であり、拡管部の実機流速は平均約6m/sであることからエロージョンの発生可能性は小さい。



(出典：機械学会資料  
材料と環境 2006,  
配管減肉現象について)

図1 ウォータージェットテストによる限界流速

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

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

表面の番号は、試験片番号

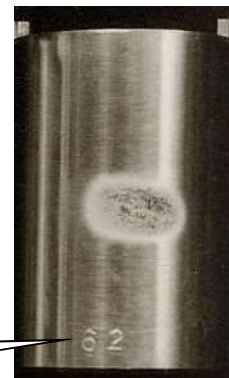
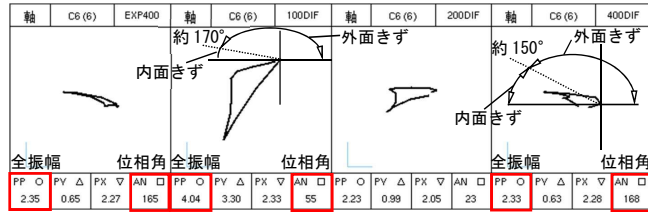


図2 ウォータージェットテスト後の外観  
(700分間水噴流後の状況)

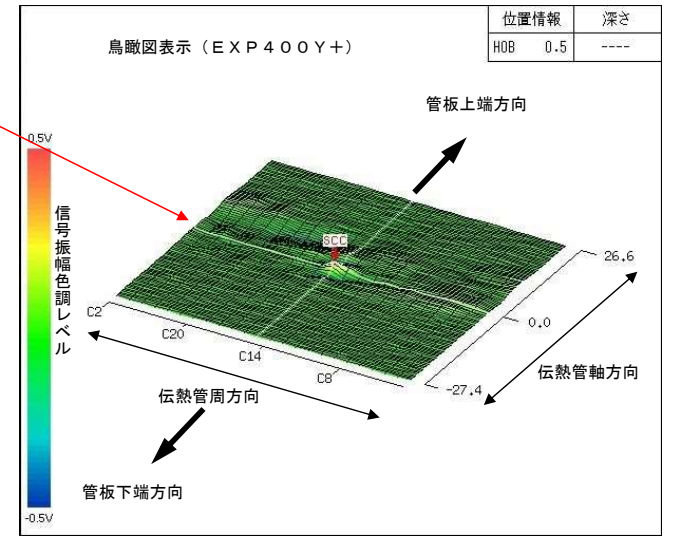
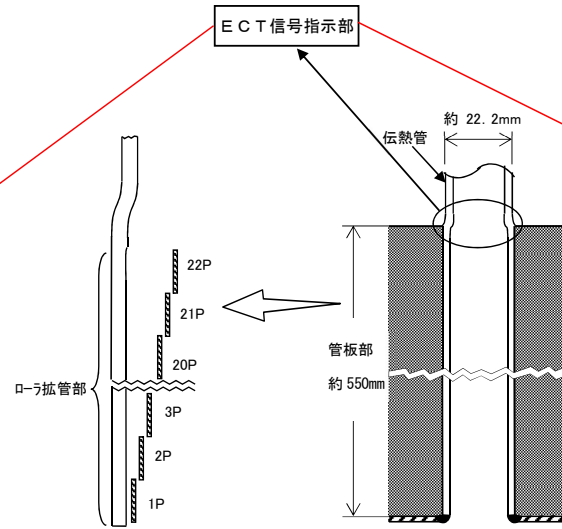
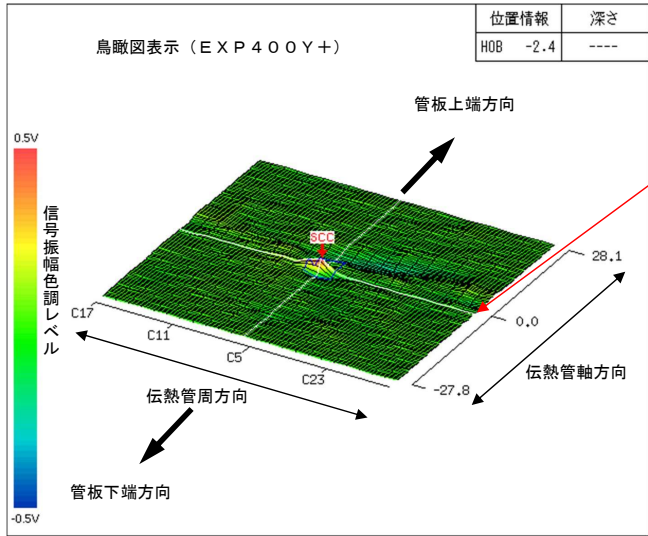
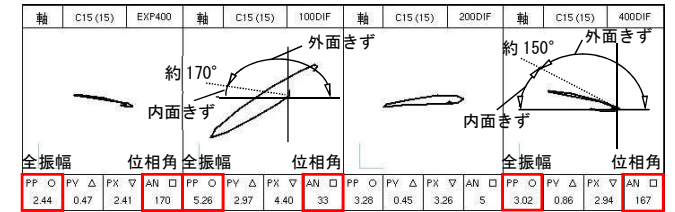
\*1：管内外を流れる水により配管表面が磨耗する現象

高浜発電所3号機 第26回・第25回 定期検査時の信号指示の比較

高浜発電所3号機 第26回定期検査時  
リサーチ波形 (C-SG X70, Y5)



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



有意な信号指示をリサーチ (信号表示)、鳥瞰図表示で分析した結果、400kHz<sup>※1</sup>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部 (22ピッチ) であり、高浜発電所3号機 第25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 <sup>※2</sup>  
全振幅 : 100kHzの全振幅<400kHzの全振幅 <sup>※3</sup> )

※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。

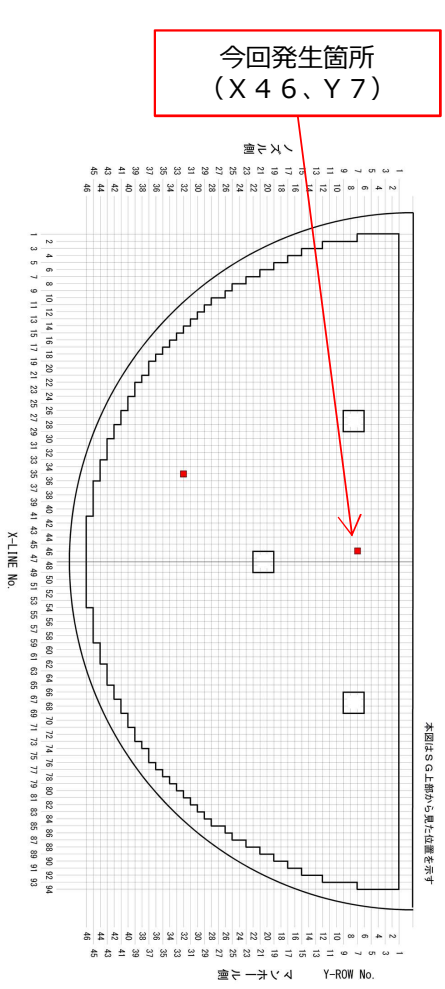
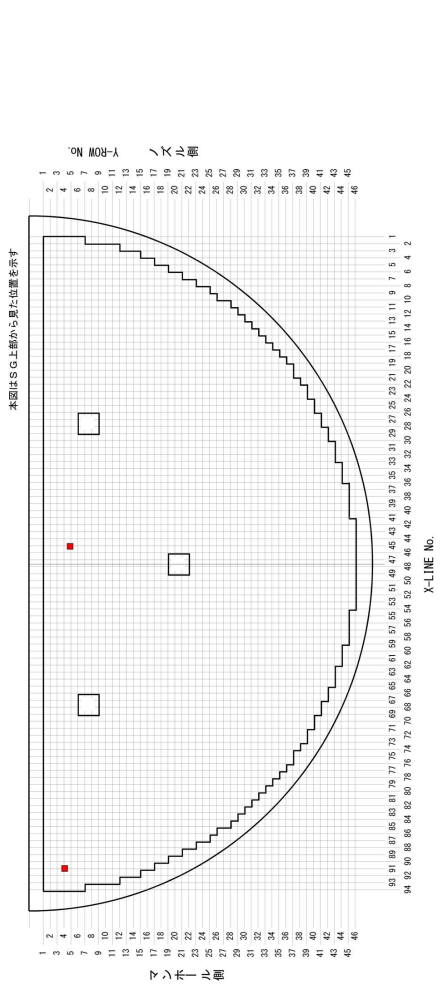
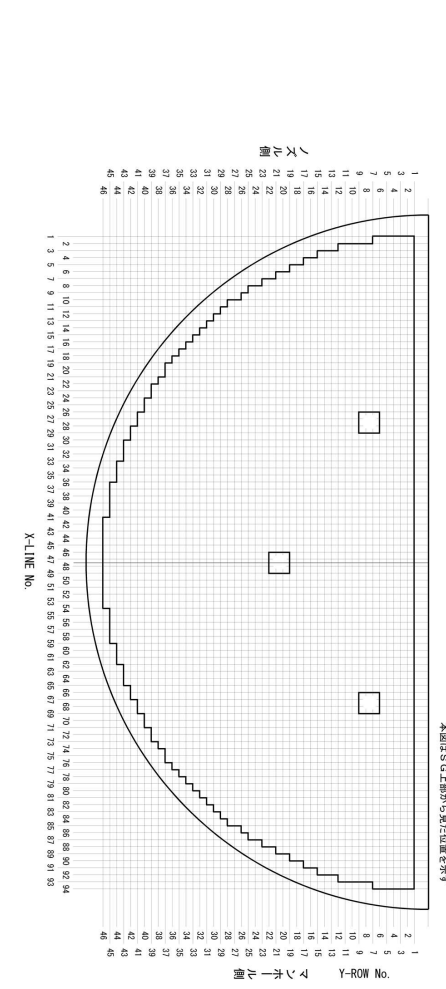
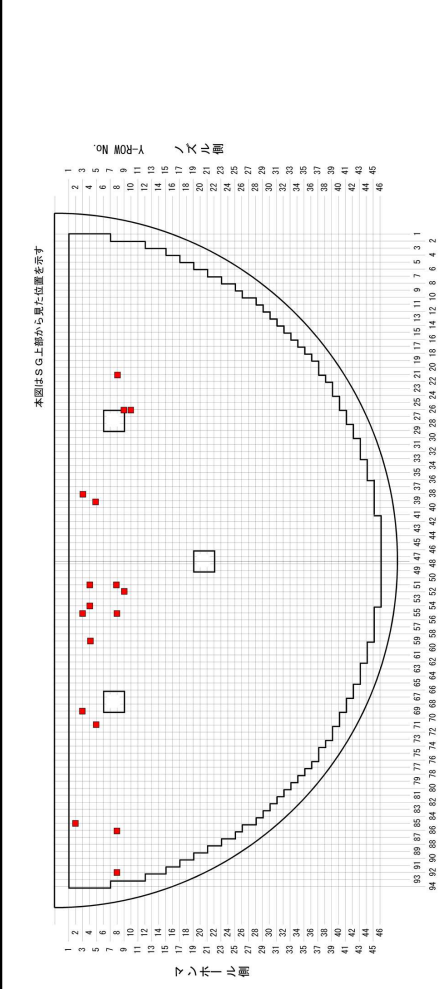
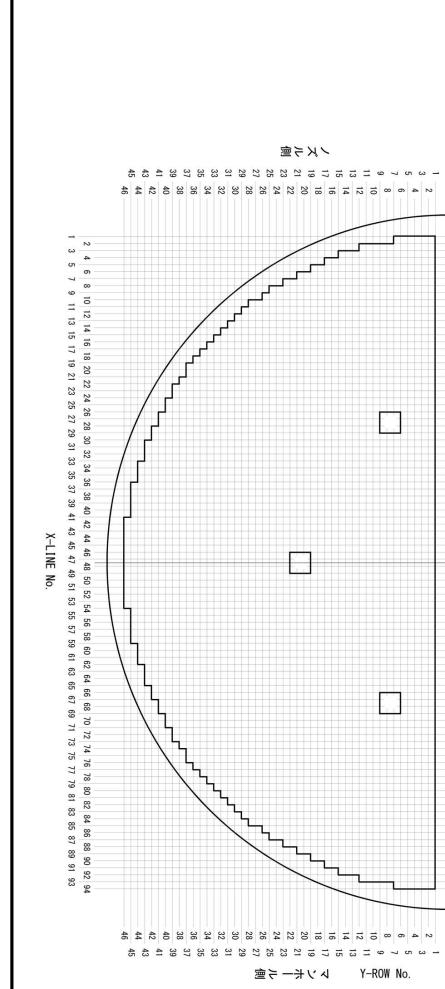
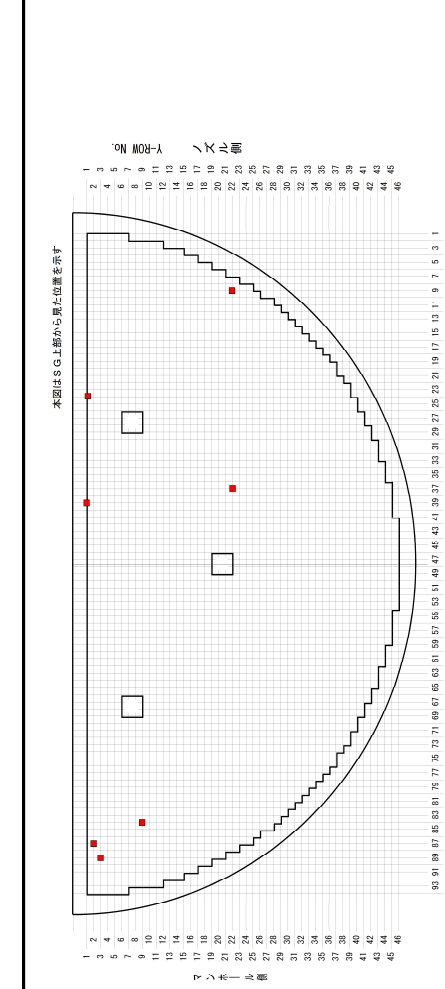
# 高浜発電所 3号機および 4号機における S G 伝熱管外面の損傷事象の経緯

	~2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年
3号機 定期検査	第2 1回	第2 2回	第2 3回	第2 4回	第2 5回			
4号機 定期検査		第2 0回	第2 1回	第2 2回	第2 3回	第2 4回	第2 5回	第2 6回

定期検査	(参考) 美浜発電所3号機 第18回定期検査 (2000年)	高浜発電所3号機 第23回定期検査 (2018.8.3~ 2018.11.9)	高浜発電所4号機 第22回定期検査 (2019.9.18~ 2020.2.1)	高浜発電所3号機 第24回定期検査 (2020.1.6~ 2021.3.10)	高浜発電所4号機 第23回定期検査 (2020.10.7~ 2021.4.15)	高浜発電所3号機 第25回定期検査 (2022.3.1~ 2022.7.26)	高浜発電所4号機 第24回定期検査 (2022.6.8~ 2022.11.6)
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%)	A-SG : 2本 【第三管支持板1本、 第四管支持板1本】 B-SG : 1本 【第二管支持板】 (最大減肉率:約57%)	A-SG : 5本 【第三管支持板2本、 第四管支持板3本】 B-SG : 2本 【第三管支持板1本、 第四管支持板1本】 C-SG : 5本 【第三管支持板3本、 第四管支持板2本】 (最大減肉率:約49%)
推定原因	<p>・溶接作業時に発生した2次生成物(ノコ)が主給水管から流入したものと推定 ⇒<b>異物による減肉と推定</b></p> <p>確認された異物</p>	<p>・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 ⇒<b>スケール以外の異物による減肉と推定</b></p> <p>確認されたスケール</p>	<p>・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 ⇒<b>異物による減肉であり、異物は流出したものと推定</b></p> <p>確認された異物(ステンレス薄片)</p>	<p>・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 ⇒<b>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</b></p> <p>確認された異物(ガスケットフープ材)</p>	<p>・減肉指示のあった1本の伝熱管(A-SG)の減肉箇所スケールを確認 ・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 ⇒<b>スケールによる減肉と推定</b></p> <p>確認されたスケール</p>	<p>・きず近傍にスケールは確認されず ・近傍の管支持板上から、摩耗痕のあるスケールは回収できず ⇒<b>各SGから採取したスケールの性状および摩耗試験等の調査の結果から、スケールによる減肉と推定</b></p> <p>A-SGから回収したスケール B-SGから回収したスケール</p>	



## 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 (SG外面減肉事象発生箇所集約結果)

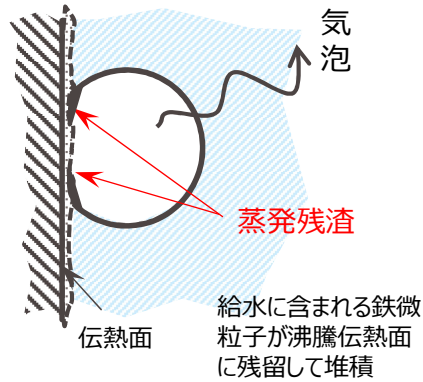
第二管支持板下面		第三管支持板下面		第四管支持板下面	
高温側	低温側	高温側	低温側	高温側	低温側
 <p style="text-align: center;">今回発生箇所 (X46、Y7)</p> <p style="text-align: center;">最大減肉率：63% 発生本数：2本</p>	 <p style="text-align: center;">最大減肉率：63% 発生本数：2本</p>	 <p style="text-align: center;">発生なし</p>	 <p style="text-align: center;">最大減肉率：61% 発生本数：17本</p>	 <p style="text-align: center;">発生なし</p>	 <p style="text-align: center;">最大減肉率：57% 発生本数：7本</p>

外面減肉は、第三管支持板下面（低温側）、また、SG中心付近であるY1～10列の範囲で多く発生している。また、最大減肉率については、発生場所に関係なく、約60%である。

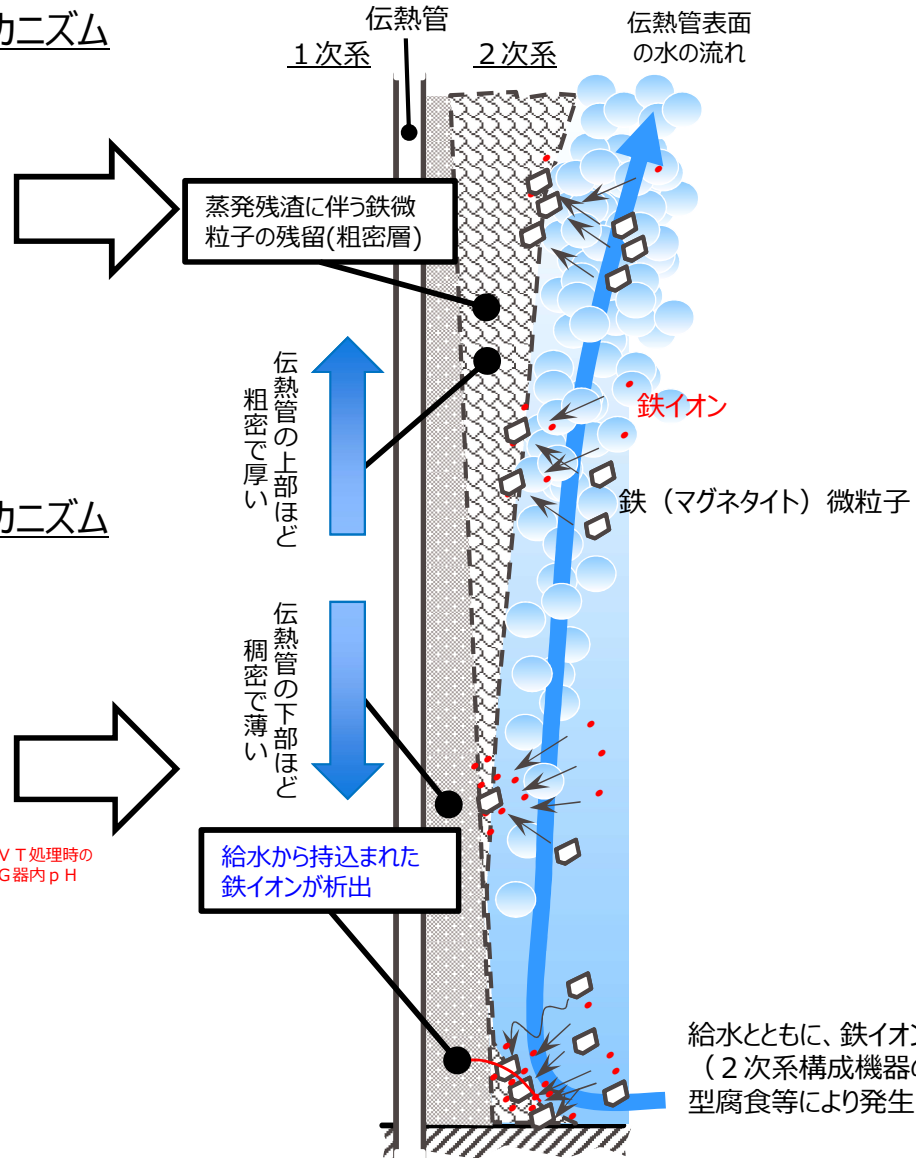
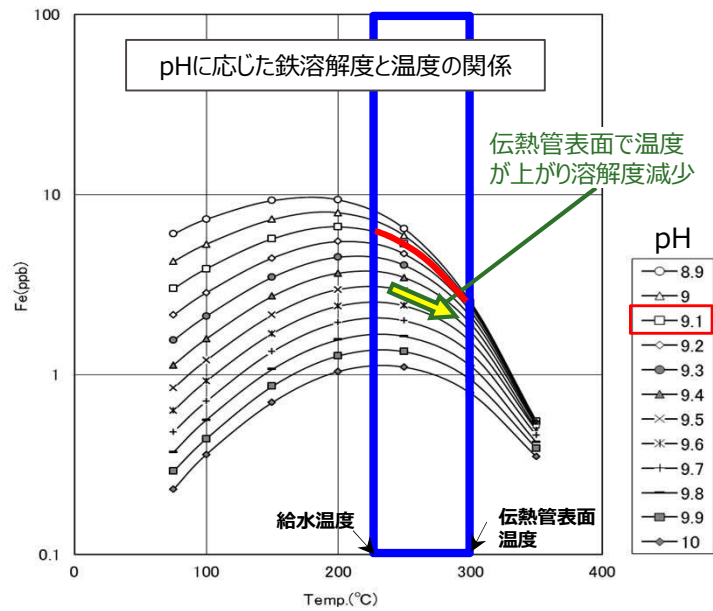
# スケール生成メカニズム

(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



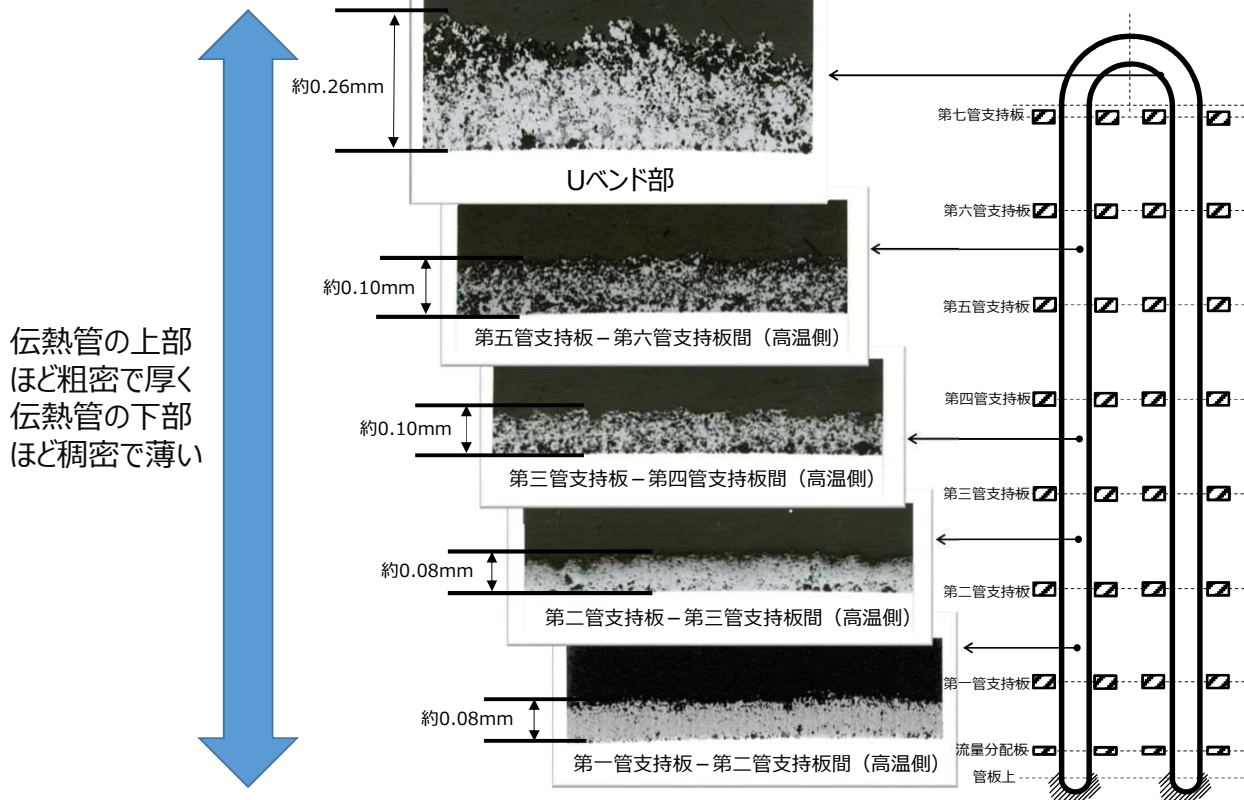
※出典：PWR 5 電力委託調査「2次系機器のスケール付着挙動評価に係る調査」(平成 15 年) 他

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19日) より引用



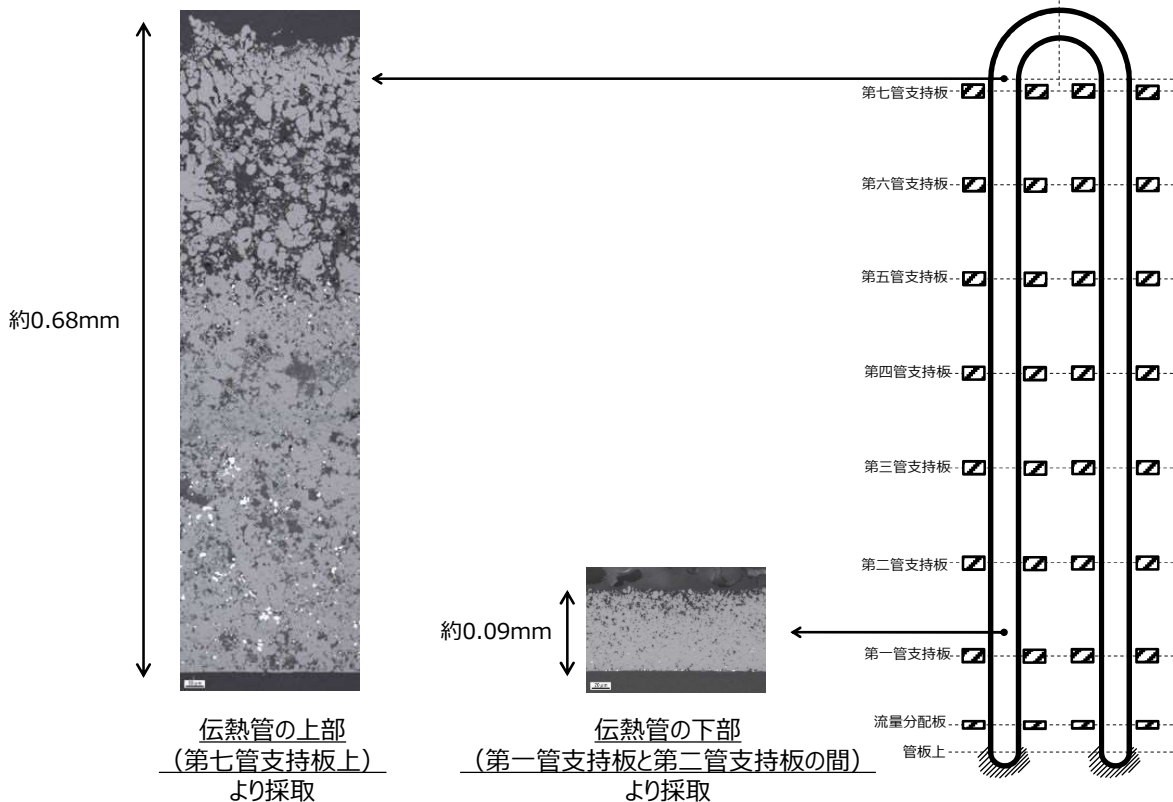
○高浜発電所3号機 平成8年調査時

(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

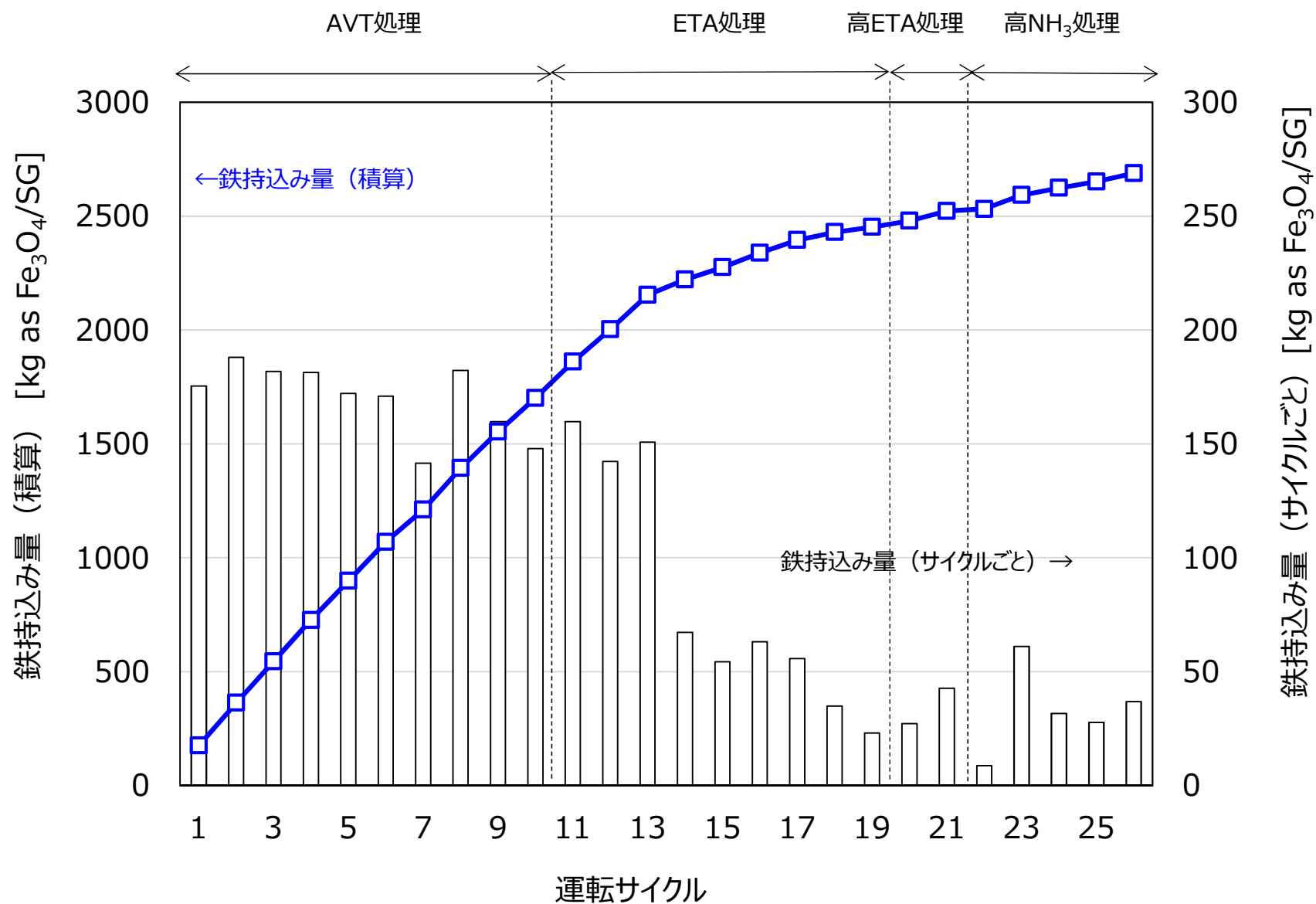
伝熱管の上部のスケールは粗密で厚く、伝熱管の下部のスケールは稠密で薄いことを確認した。



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



# 2次系水処理と水化学管理の変遷（鉄の持ち込み量の推移）



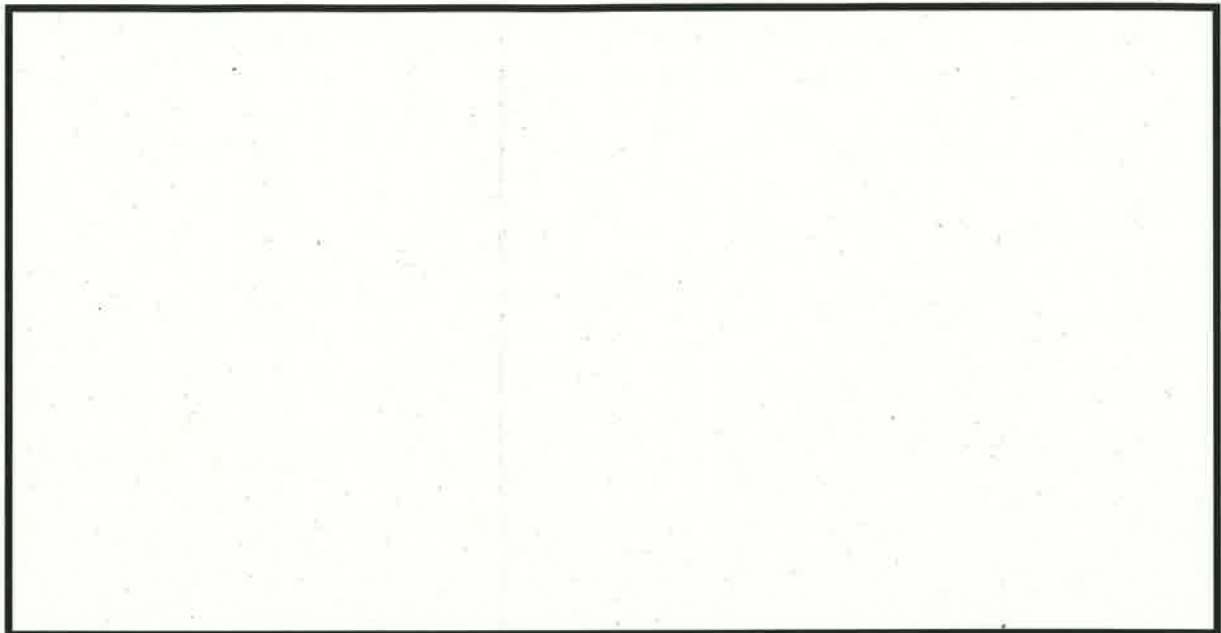
高浜発電所 3号機 鉄持ち込み量の推移

## 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]



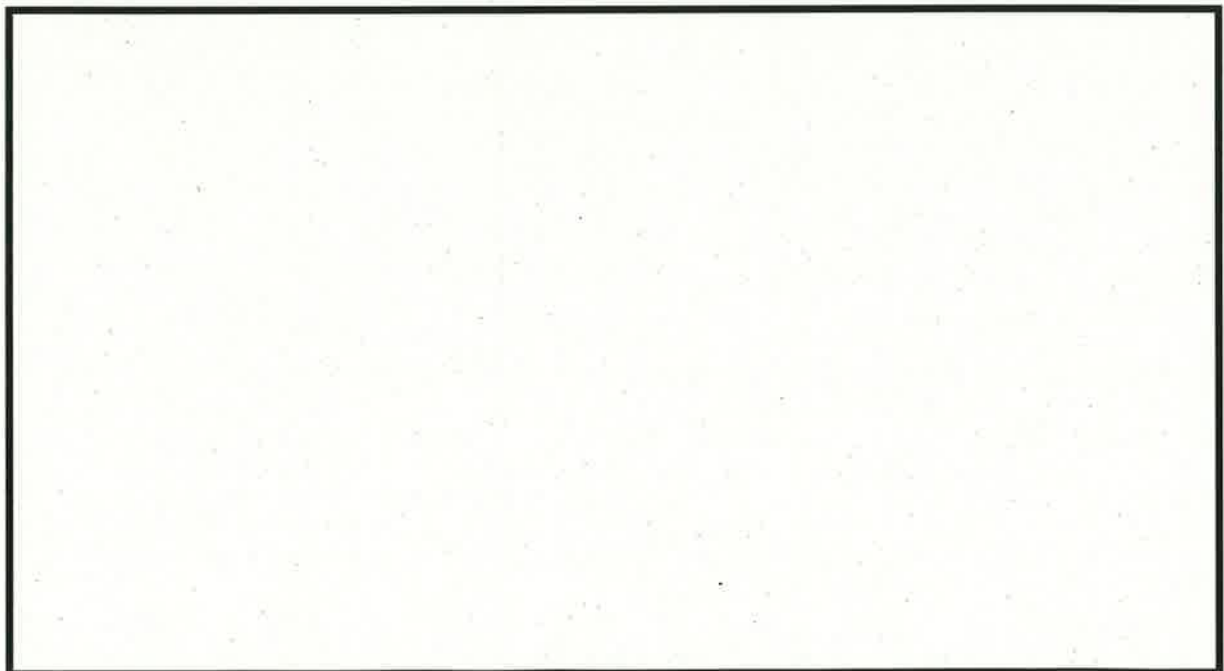
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26

運転サイクル

**SG 伝熱抵抗係数**

伝熱管表面のスケール成長に伴い、SG 伝熱抵抗係数は徐々に上昇

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

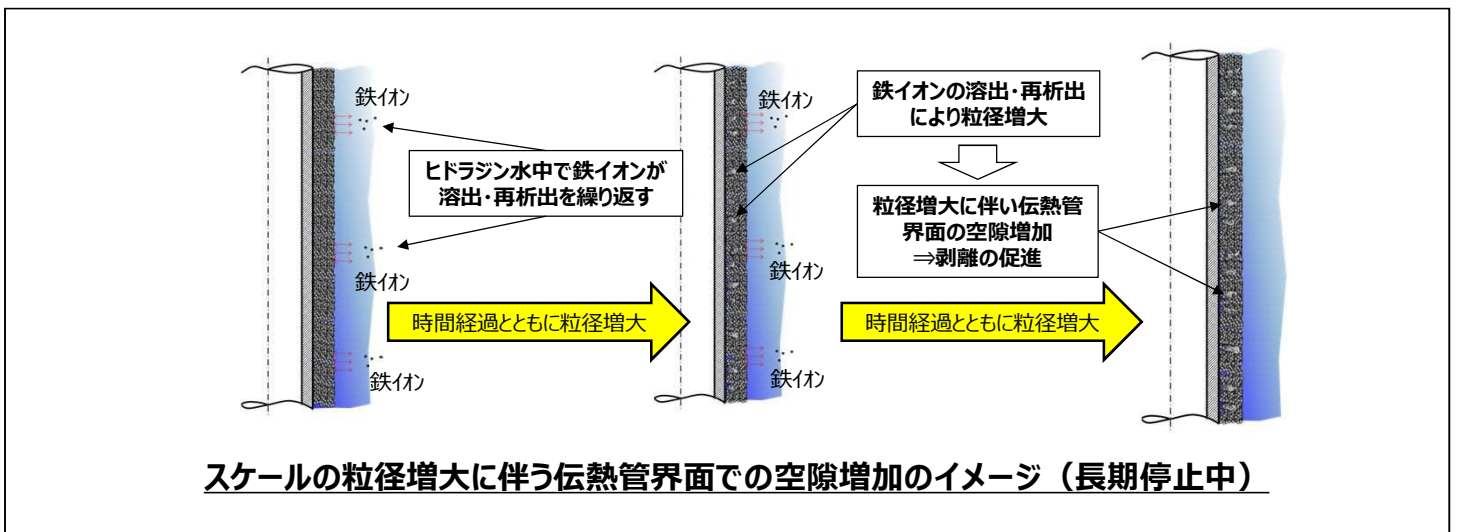
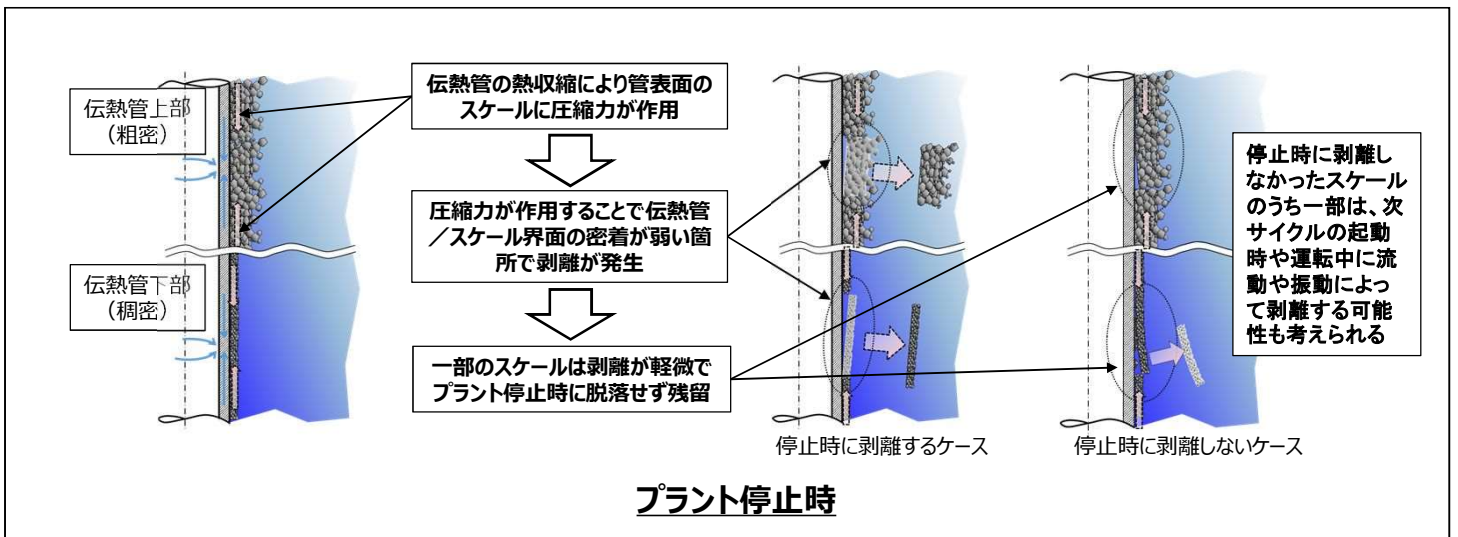
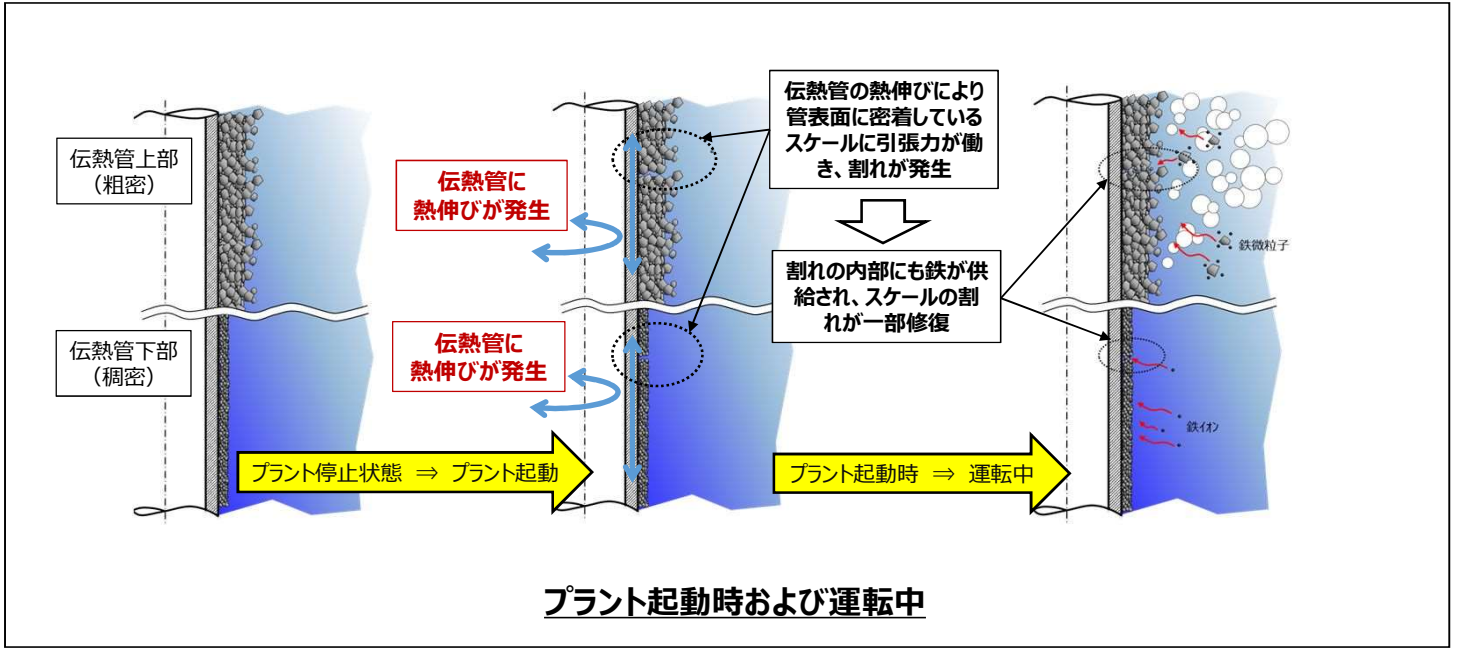


1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26

運転サイクル



# スケール剥離メカニズムイメージ

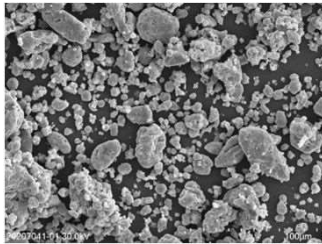


発電用原子炉施設故障等報告書  
(高浜発電所3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について)  
(2022年5月25日) より引用

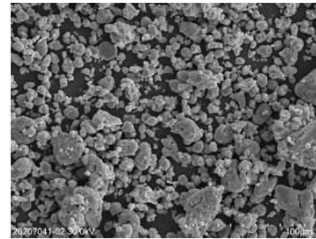


・スケールの粒径増大化を実験で検証すべく、実機（ヒドラジン水による満水保管）と同条件にて、スラッジ（粒の観察を容易にするため粉末状スラッジを使用）をヒドラジン水に浸漬させた試験を1か月間実施した。

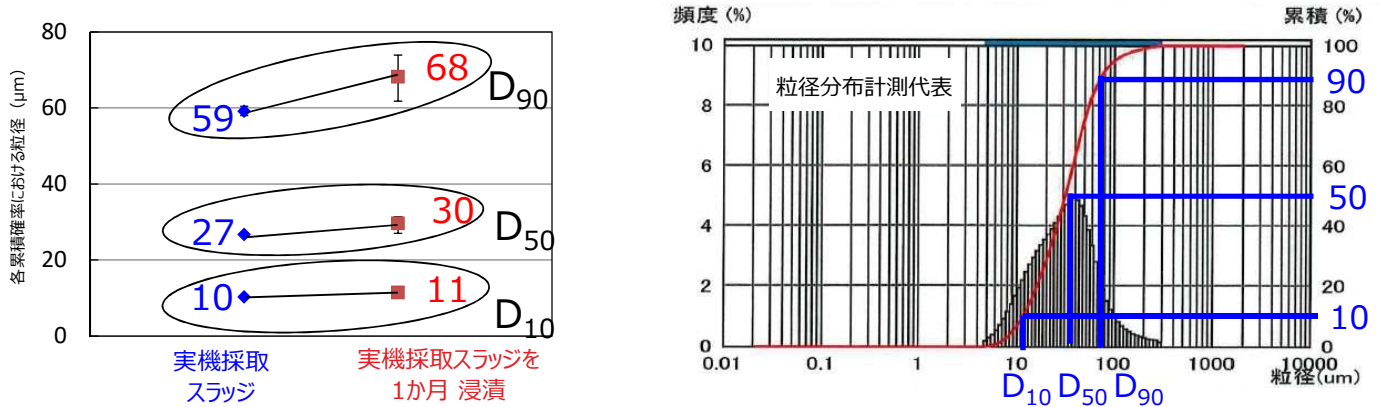
(1) 走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察  
実機採取スラッジ



実機採取スラッジを1か月 浸漬後



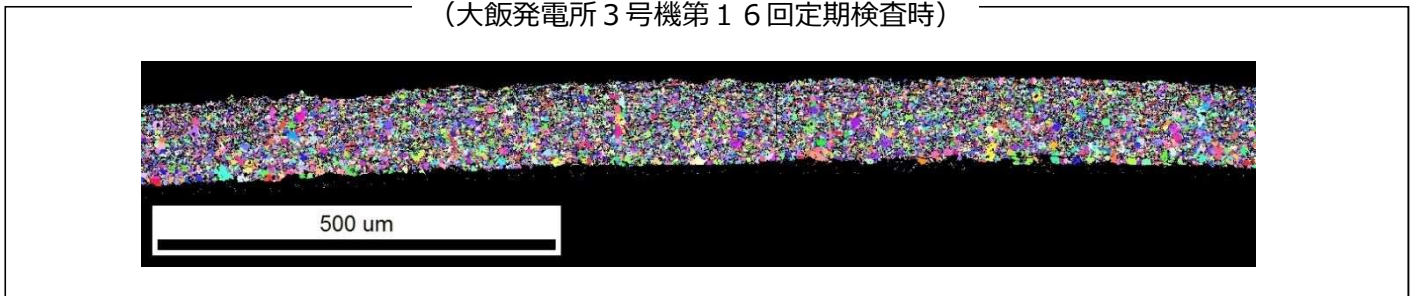
(2) 粒径分布計測 (プロット: 3回繰り返し計測平均値, エラー: 3回計測の最大値, 最小値)



・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、長期停止により、粒径が大きくなることを推定した。

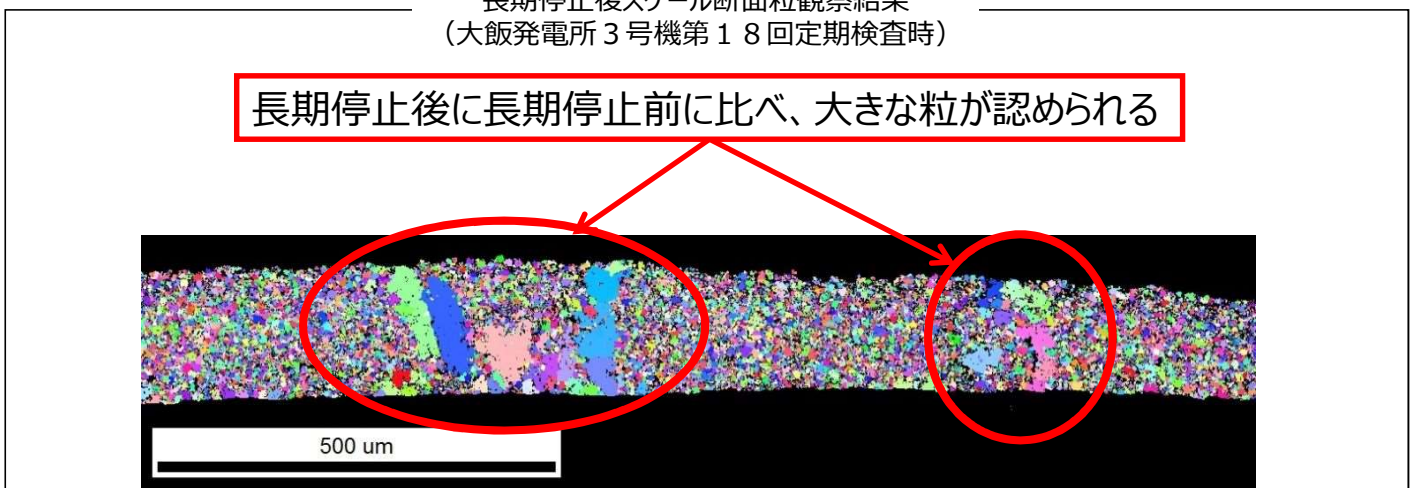
・電子線後方散乱回折法 (EBSD)※により長期停止前後のスケール断面を観察した結果は以下のとおりである。

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。

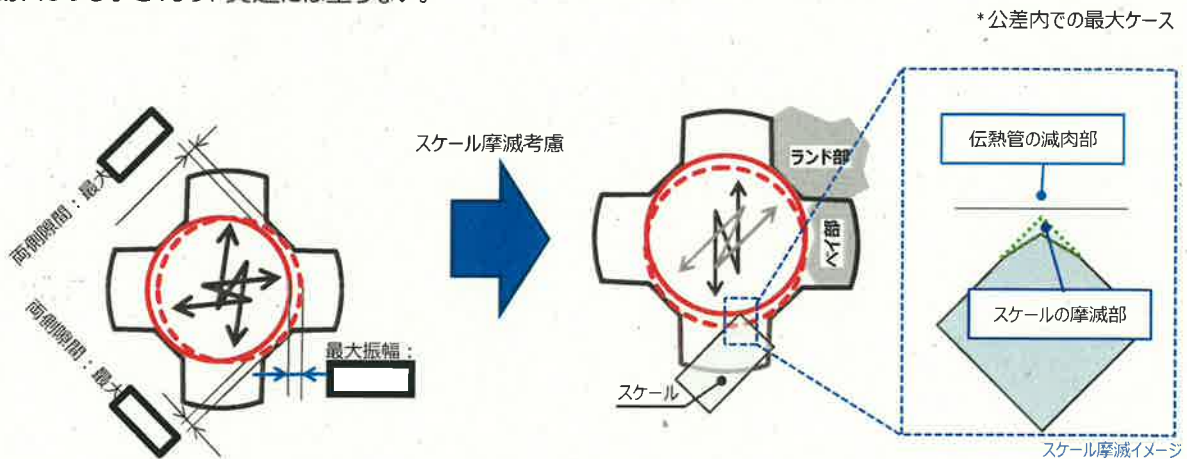
## スケールと伝熱管の接触時における摩耗形態の推定について (スケールによる最大減肉深さに係る考察)

### <スケールと異物の減肉メカニズムの考察>

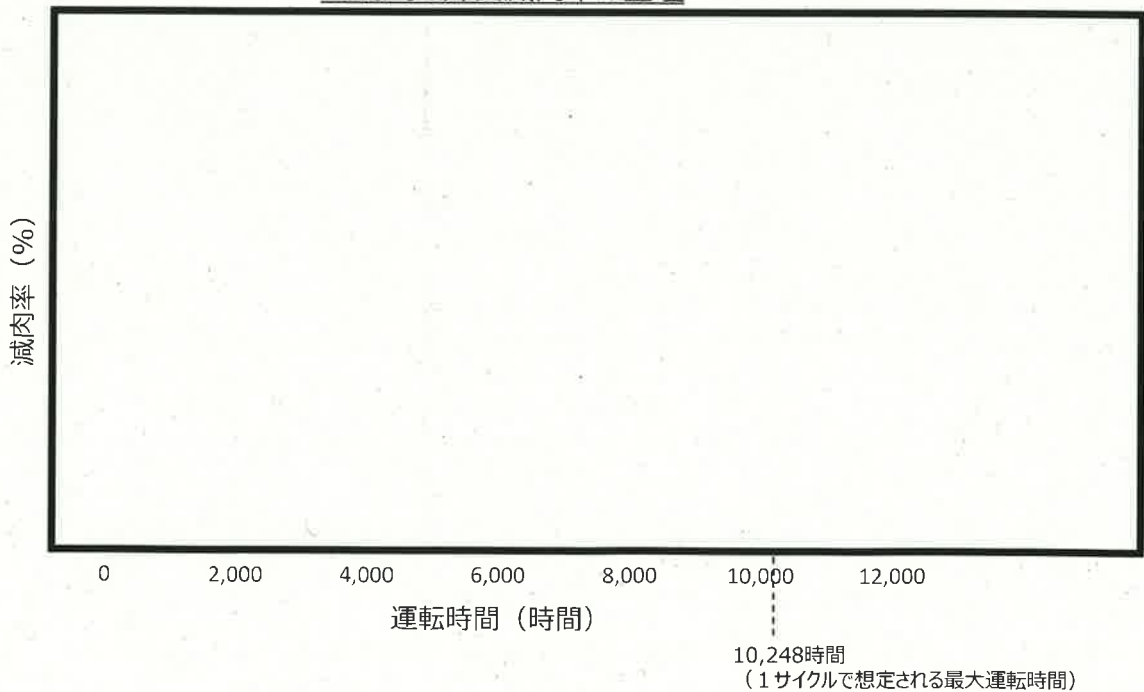
- スケールが伝熱管に摩耗減肉を与えるメカニズムは、次のとおりであり、異物の場合と同じである。
  - ・流体力で振動する伝熱管が、上昇流で管支持板下面に押付けられたスケールに接触すると、接触部で伝熱管は撓動
  - ・このとき、スケールが伝熱管との撓動で破損しなければ、撓動は継続し、伝熱管には摩耗減肉が発生
  - ・比摩耗量についても、スケールと異物（SU304で $6.6 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ ）は同等
- ただし、同じ比摩耗量、同じワークレートで撓動し続けたとしても、最終的な摩耗減肉量は異物の場合より小さい。
  - ・スケールは微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。



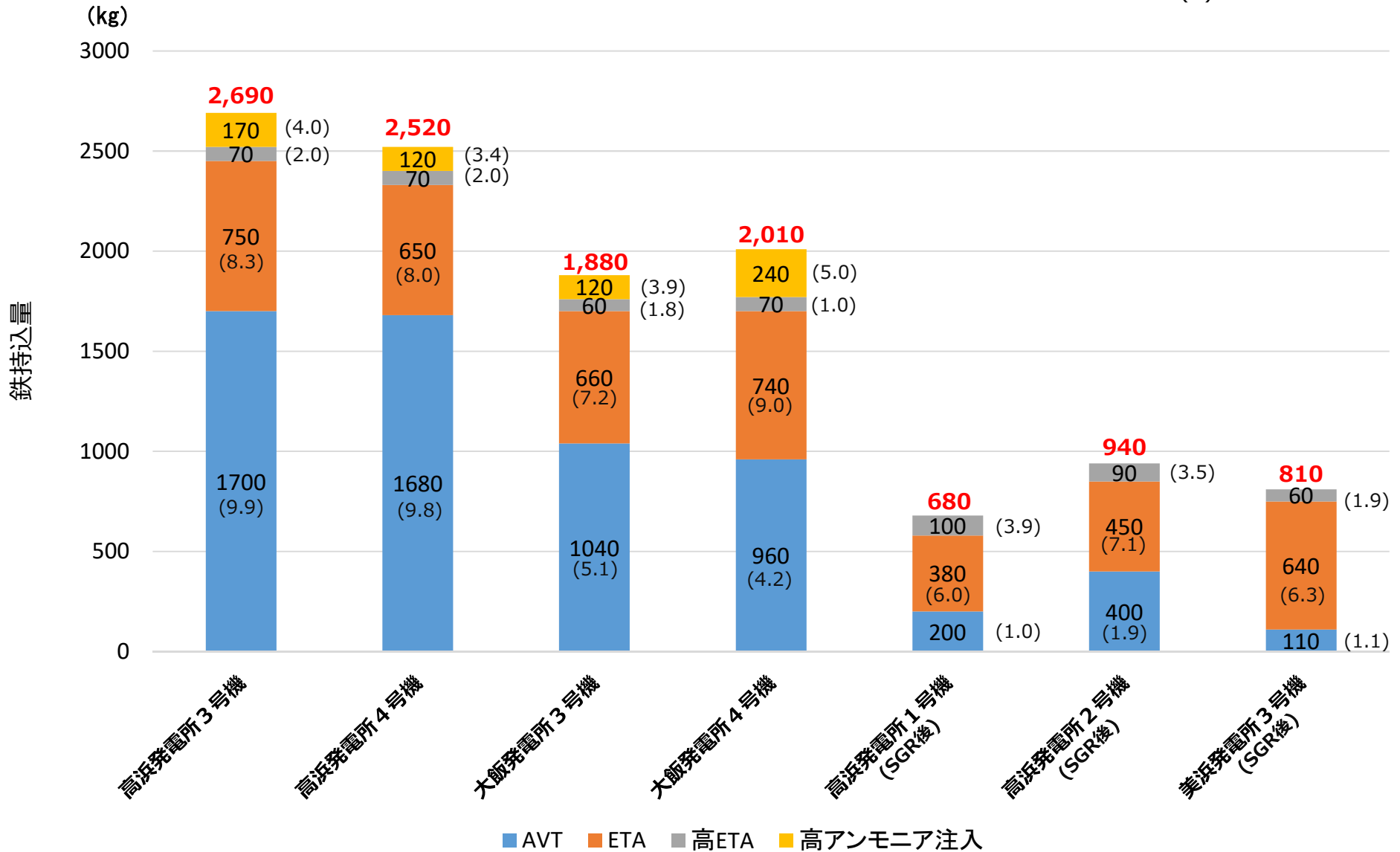
これまでの外面減肉率の整理



  : 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。

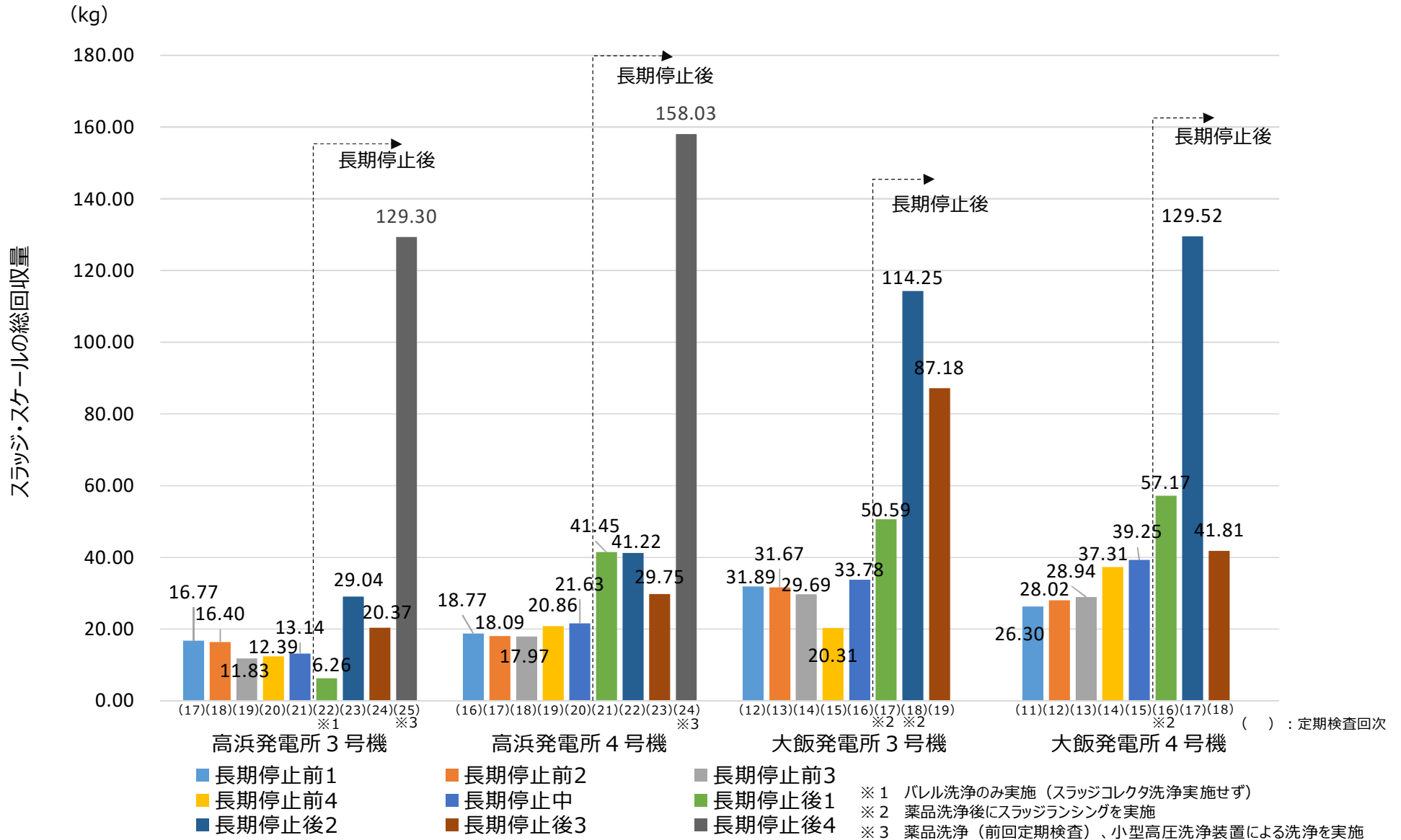
# 鉄持込み量比較

( ) : 運転時間 (万時間)

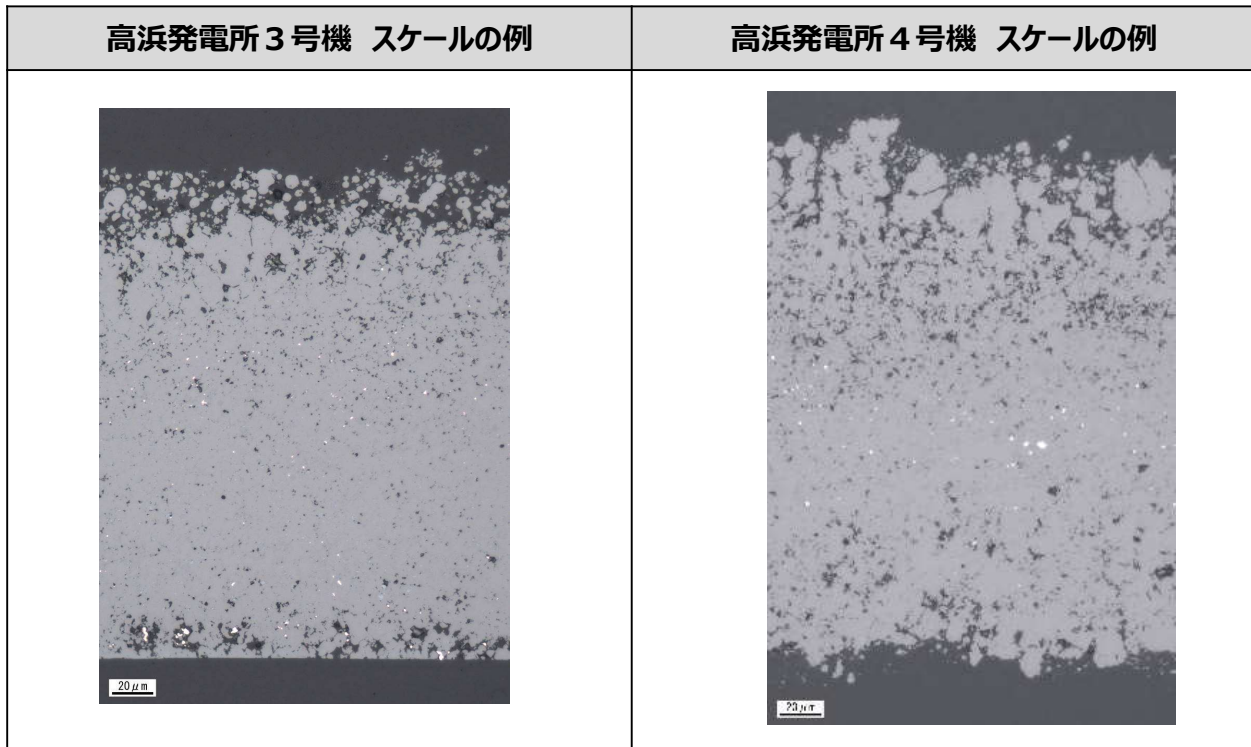




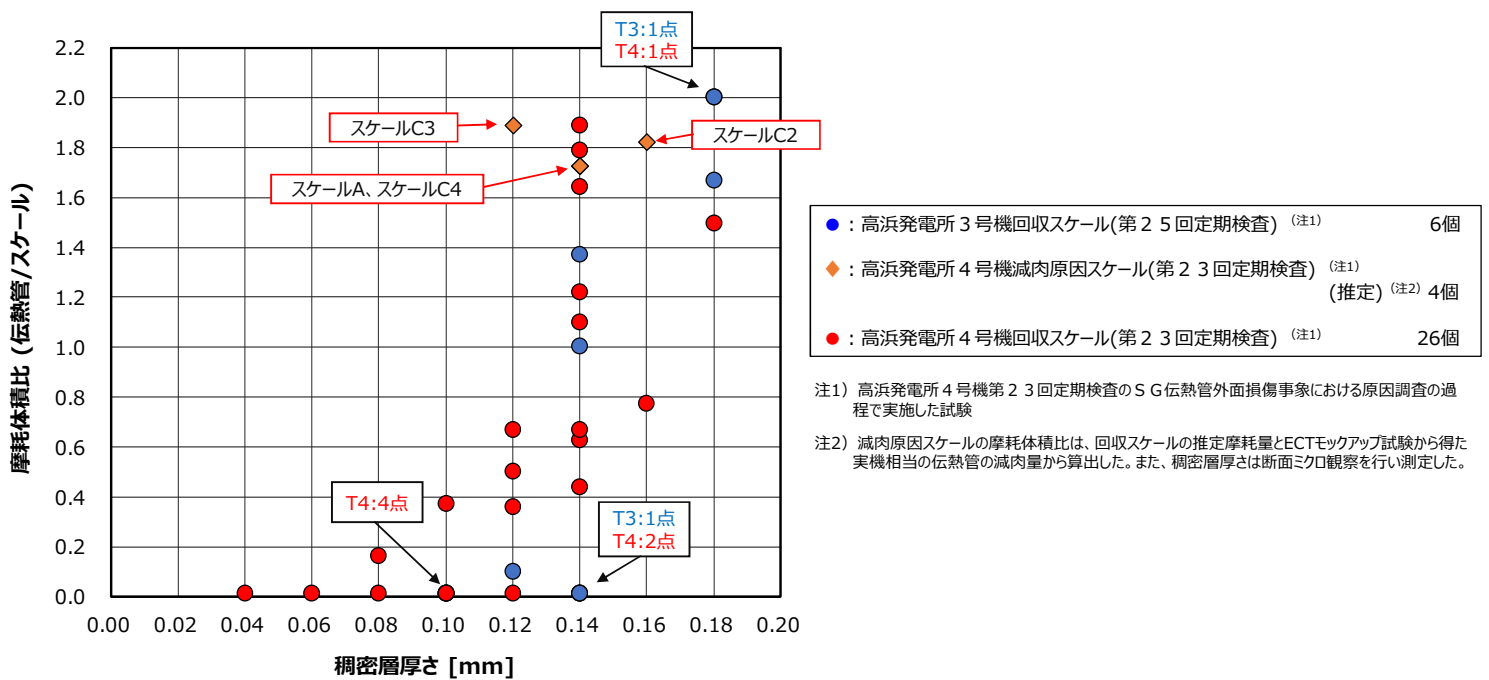
# スラッジランシングによるスラッジ・スケールの総回収量



- 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マイ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号機第23回定期検査のSG伝熱管外面損傷事象における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号機第23回定期検査のSG伝熱管外面損傷事象における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および摩耗体積比の関係は同等であることを確認

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

## 当社他プラントスケール摩耗試験結果

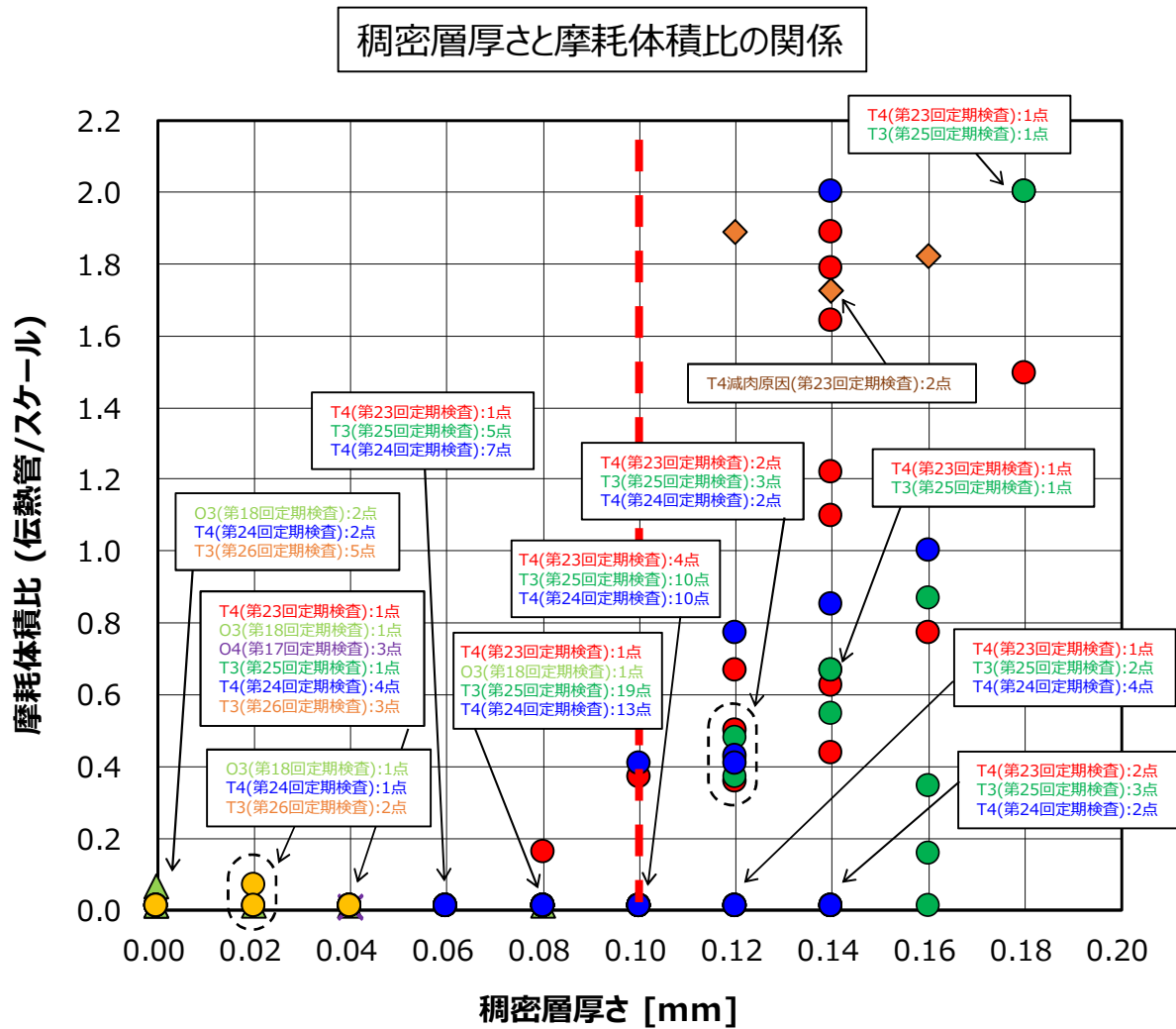
スケール回収場所	スケール厚さ (mm)	伝熱管摩耗体積 (mm <sup>3</sup> )	スケール摩耗体積 (mm <sup>3</sup> )	摩耗体積比 (伝熱管：スケール)
大飯発電所 3号機 管板上	約0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約0.2	約0.013	約0.19	1：15
	約0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約0.2	—	試験開始後に欠損	—
	約0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約0.2	—	試験開始後に欠損	—
大飯発電所 4号機 管板上	約0.2	約0.001	約0.41	1：410
	約0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約0.1	—	試験開始後に欠損	—

注) 本試験結果は高浜発電所4号機のSG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。



● (Yellow)	高浜発電所 3号機回収スケール(第 26 回定期検査時) (今回)	10 個
● (Blue)	高浜発電所 4号機回収スケール(第 24 回定期検査時)	50 個
● (Green)	高浜発電所 3号機回収スケール(第 25 回定期検査時)	50 個
◆ (Orange)	高浜発電所 4号機減肉原因スケール(第 23 回定期検査時) <sup>(注1、2)</sup>	4 個
● (Red)	高浜発電所 4号機回収スケール(第 23 回定期検査時) <sup>(注1)</sup>	26 個
▲ (Green)	大飯発電所 3号機回収スケール(第 18 回定期検査時) <sup>(注1)</sup>	6 個
× (Purple)	大飯発電所 4号機回収スケール(第 17 回定期検査時) <sup>(注1)</sup>	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、稠密層厚さは断面ミ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。

## &lt;抽出条件&gt;

- ・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<sup>※１</sup>２３<sup>※２</sup>以上）<sup>※３</sup>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<sup>※４</sup>

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

※２：高浜発電所３号機および４号機において外面減肉事象が確認された際の最小の運転時間（高浜３号機第２３回定期検査（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、至近の定期検査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および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のとおりであり、全数の約２６０基に対し８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取替え日	現行SGEFPY
プラントA	1972. 12. 14	1982. 4. 1	32. 9 (2023. 4. 8 時点)
プラントB	1973. 9. 1	1983. 5. 1	31. 3 (2022. 3. 14 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	1978. 6. 1	1993. 4. 1	26. 7 (2022. 9. 11 時点)
プラントF	1986. 7. 18	—	26. 0 (2019. 1. 10 時点)
プラントG	1990. 6. 7	—	24. 7 (2019. 2. 16 時点)
プラントH	1980. 12. 1	1995. 6. 1	23. 9 (2022. 3. 6 時点)

## (2) スケールによる減肉経験の有無

EPR I SGMP 専用のデータベース、EPR I レポート<sup>※6</sup>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、EPR I および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。

※6 EPR I SGMP 専用レポート“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のとおり整理した。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、EPR I 等の各種レポートを確認するとともに、EPR I および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※ <sup>7</sup>
BEC穴閉塞	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ECTおよび目視による閉塞率管理</li> <li>・ 機械式洗浄による閉塞回復</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ECTや目視、SG 2次側水位による閉塞率管理</li> <li>・ 薬品洗浄による閉塞回復</li> </ul>
管板直上の腐食環境生成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ スラッジランシング（定期検査毎）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ スラッジランシング</li> <li>・ 薬品洗浄</li> </ul>
伝熱性能低下	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 薬品洗浄（ASCA洗浄）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 薬品洗浄（ASCA洗浄他）</li> </ul>

※<sup>7</sup> E P R I S G M P 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、E P R I の S G M P 等を通じて海外の P W R 事業者へ情報発信を行っていく。

以上

# 薬品洗浄の実施に関する検討について

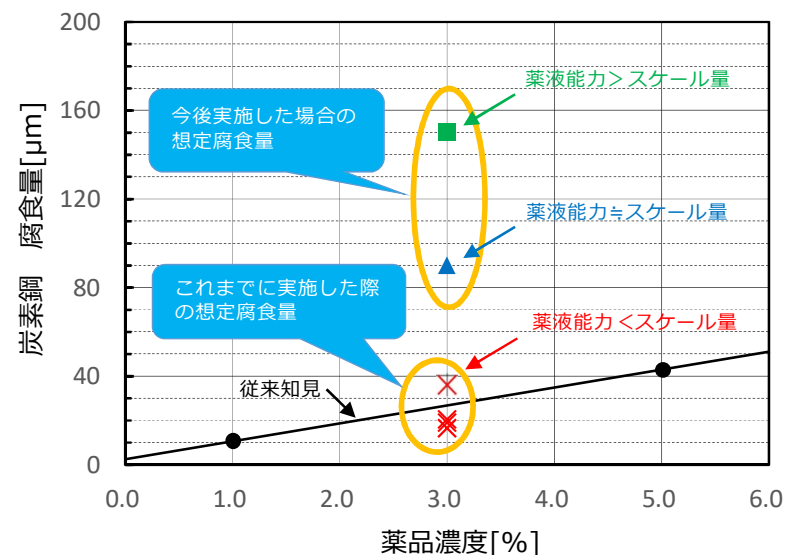
薬品洗浄時に懸念されるSG器内構成部材への腐食影響について、ラボ試験の結果から、薬品能力に対して残存スケール量が少ない場合、器内構成部材の腐食量が相対的に大きくなるという知見が得られた。

第24回および第25回定期検査で実施した薬品洗浄により、高浜3号機SG器内の推定残存スケール量は約 2,690 kg → 約 710 kg/SG に減少している。

これらの状況より、再度の薬品洗浄を実施した場合、過去に薬品洗浄を実施した際よりもSG器内構成部材の腐食量が大きくなると推定される。

また、回収したスケールの断面観察結果から、前回までの薬品洗浄によって伝熱管を減肉させる可能性のある稠密層厚さ0.1mm以上のスケールの割合が低下し、SG器内スケールが脆弱化していることを確認している。

残存スケール量別の炭素鋼腐食量（ラボ試験結果）





# 薬品洗浄の実施に関する検討について

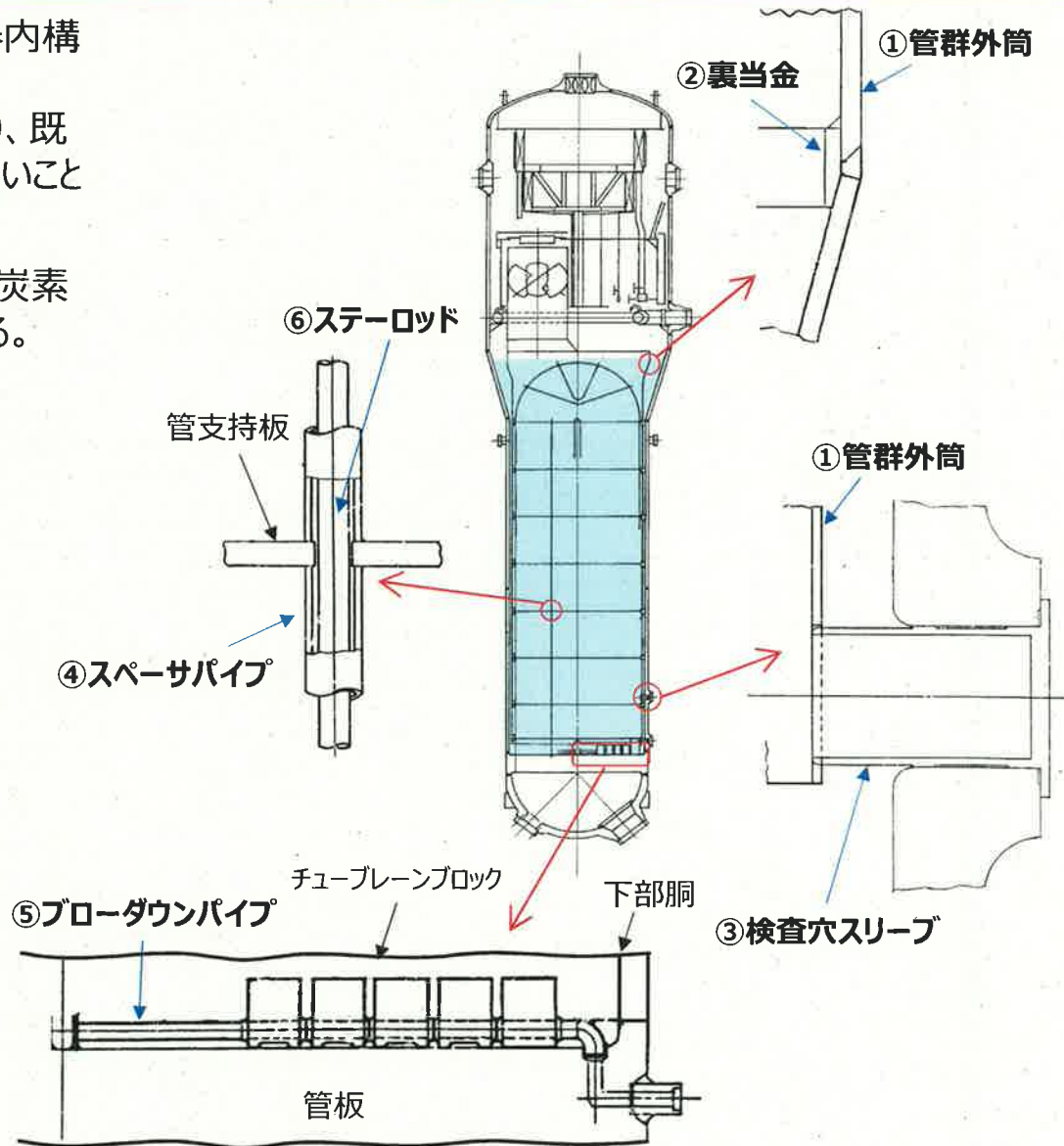
薬品洗浄を実施すると、副次的な作用として、器内構成部材の腐食も発生する。

腐食量はSG器内構成部材の材質により異なり、既往研究※の結果から炭素鋼は比較的腐食しやすいことがわかっている。

高浜3号機 SG接液部の器内構成部材のうち炭素鋼が使用されているものは、主に下記の通りである。

部材	材料
① 管群外筒	
② 裏当金	
③ 検査穴スリーブ	
④ スペーサパイプ	
⑤ ブローダウンパイプ	
⑥ ステーロッド	

※平成13年 蒸気発生器二次側化学洗浄の実機適用性評価 (SG化学洗浄検討会最終報告書)

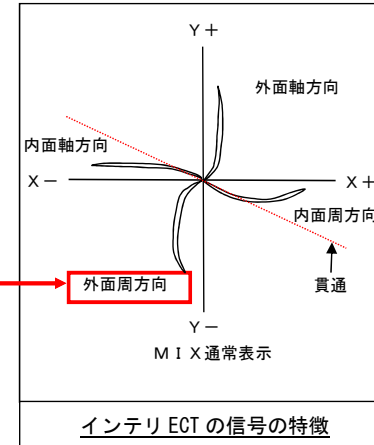


□ : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

# ECTの位相評価

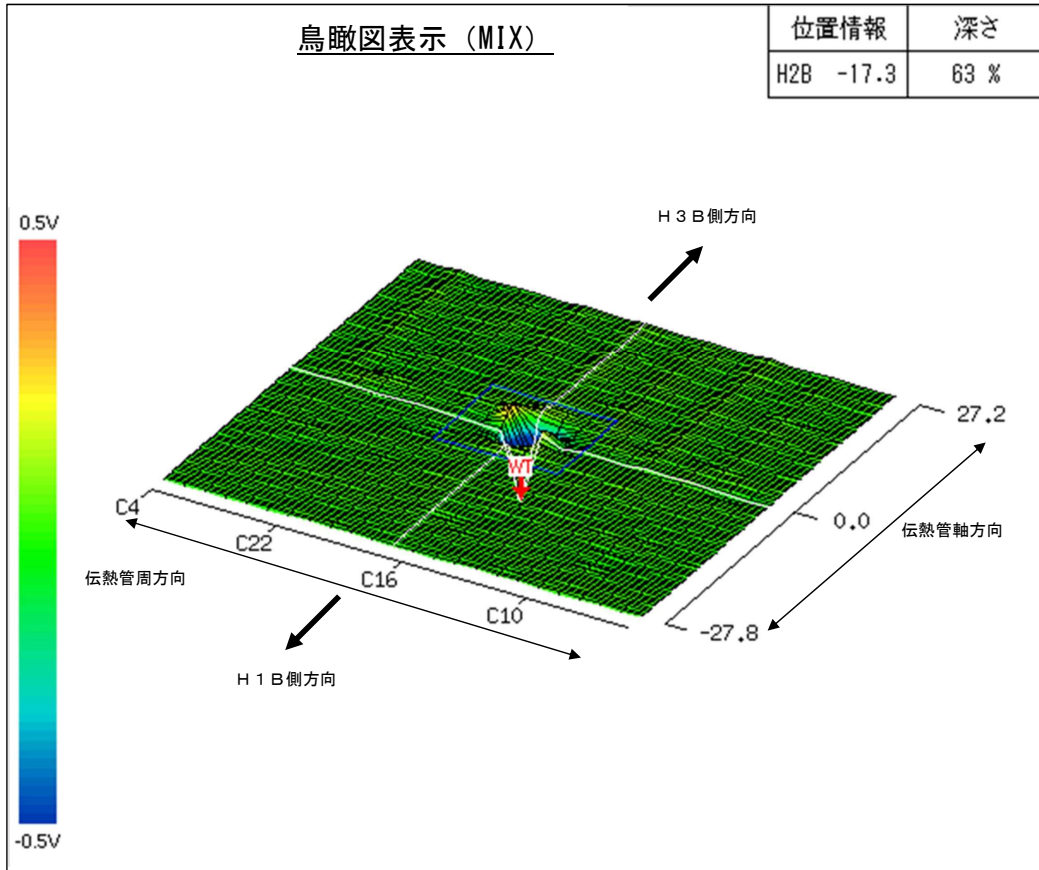
当該管リサージュ表示 (A-SG X46, Y7)

軸	C17 (17)	MIX	軸	C17 (17)	100DIF	軸	C17 (17)	200DIF	軸	C17 (17)	400DIF
PP ○	PV △	PX ▽	AN □	PP ○	PV △	PX ▽	AN □	PP ○	PV △	PX ▽	AN □
2.33	2.24	0.93	108	5.90	5.27	2.64	63	2.96	2.88	2.46	72
											74



(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。



(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

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。

## 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。

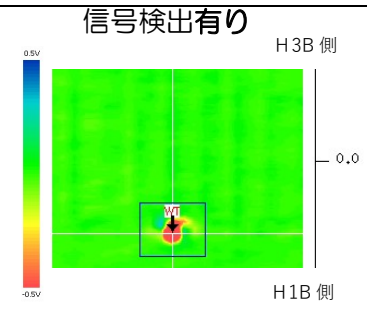
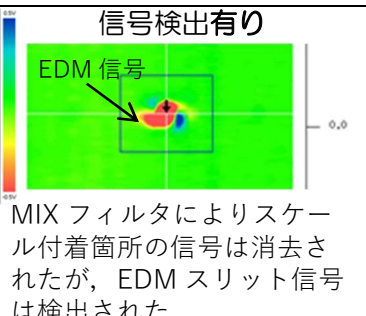
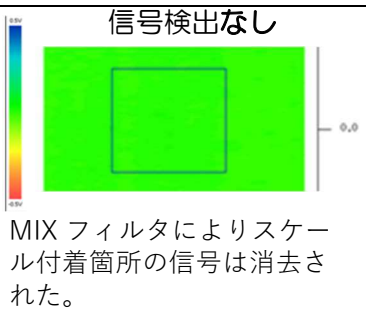
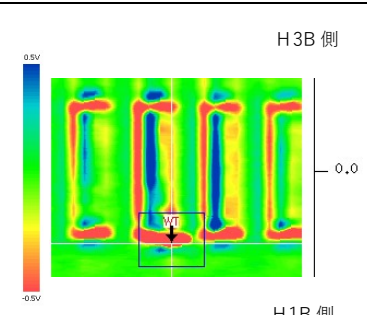
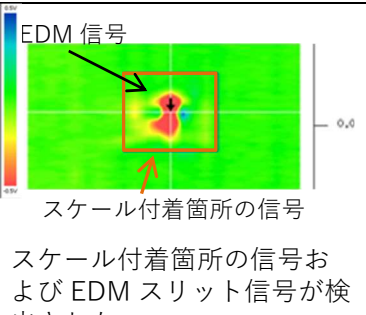
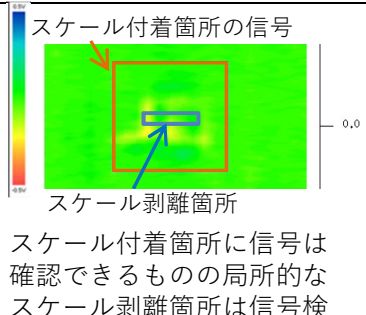
## 2.2 スケール付着・剥離（EDMスリット無し）の試験片データ

伝熱管外面に四酸化三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 X46,Y7) 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
<p>信号検出有り</p>  <p>H3B側 H1B側</p>	<p>信号検出有り</p>  <p>EDM信号</p> <p>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。</p>	<p>信号検出なし</p>  <p>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。</p>
実機波形 (A-SG X46,Y7) 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
 <p>H3B側 H1B側</p>	 <p>EDM信号</p> <p>スケール付着箇所の信号</p> <p>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。</p>	 <p>スケール付着箇所の信号</p> <p>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。</p>

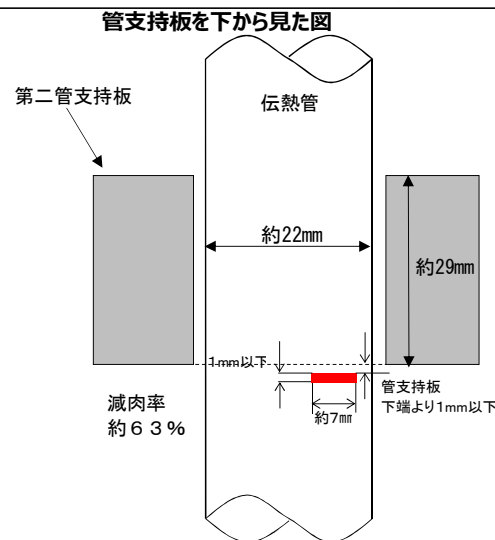
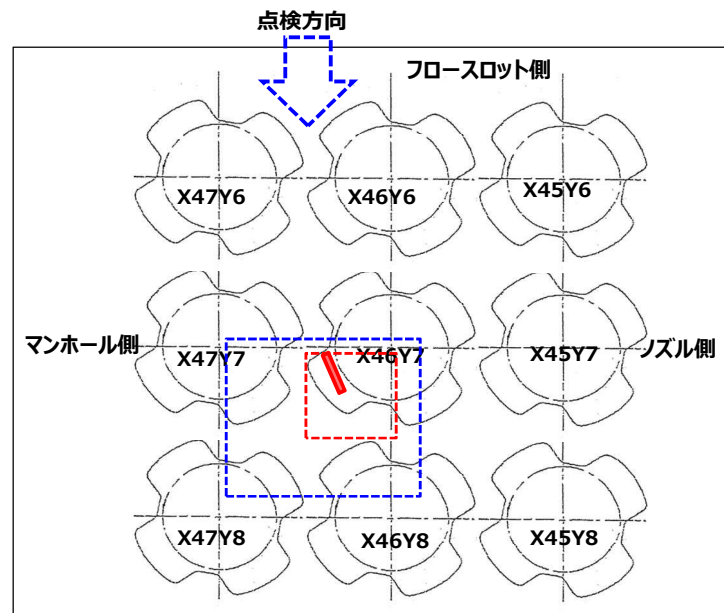
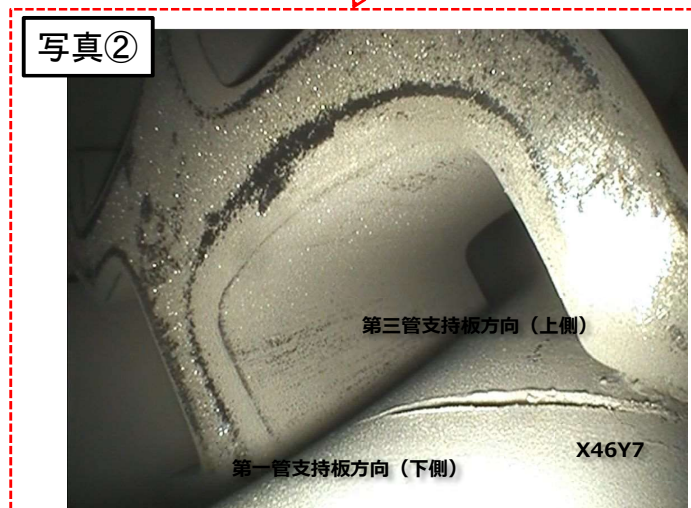
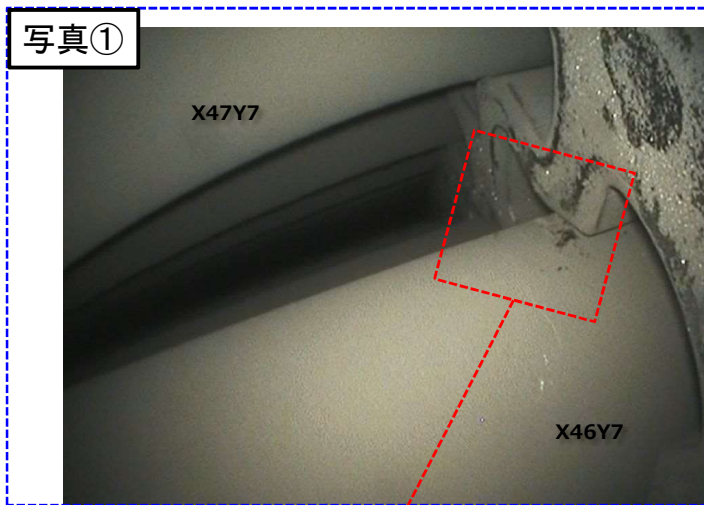
## 4. まとめ

- 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

# SG器内点検結果 (SG伝熱管2次側表面写真)

対象：A-SG 第二管支持板下面 伝熱管 X46, Y7 高温側





# 減肉箇所付着スケールの分析結果（1 / 3）

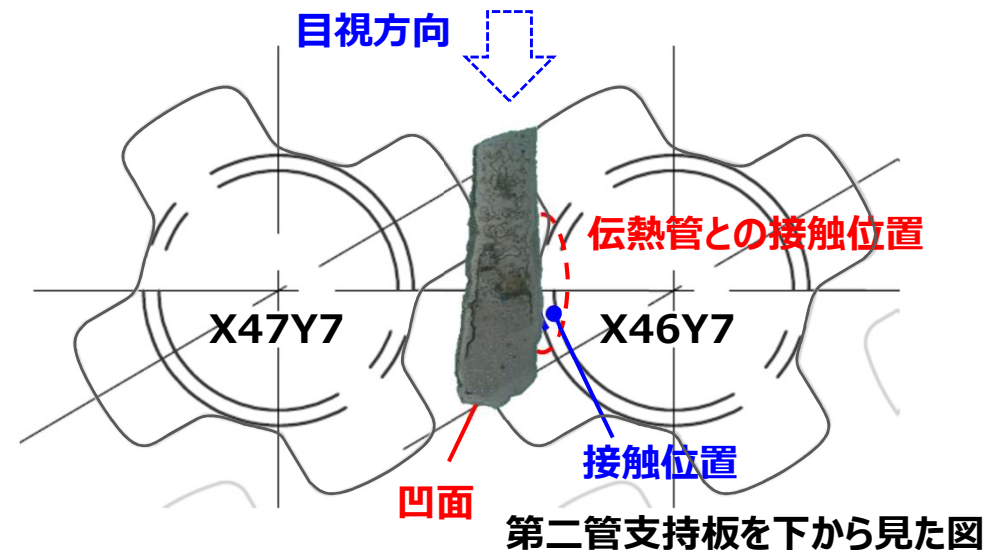
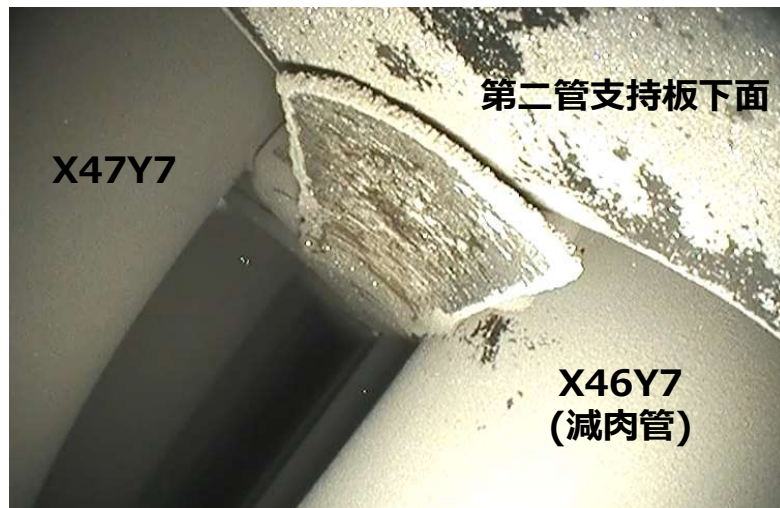
## ① 外観観察結果と伝熱管との接触位置推定

- スケールの形状は円筒状に沿った形状であり、伝熱管の外径に近い形状であった。サイズおよび質量は以下のとおり。



大きさ：約23mm×約7mm  
厚さ：約0.4mm  
質量：約0.2g

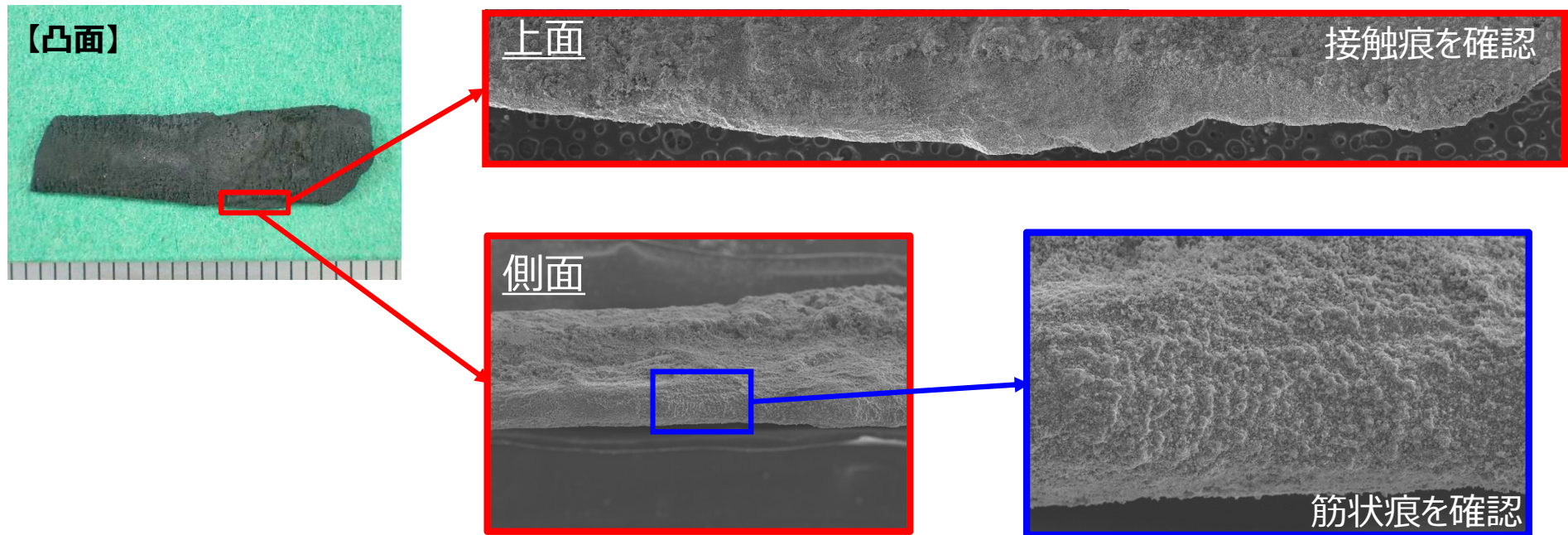
- スケールは、下図のとおり減肉管X46Y7と接触していたことを確認しており、その目視結果から伝熱管との接触位置を推定した。



## 減肉箇所付着スケールの分析結果（2 / 3）

### ② スケール接触部のSEM観察

- 伝熱管減肉部と接触していた箇所に接触痕が認められた。
- 接触した箇所を拡大観察した結果、伝熱管と擦れたことによる筋状痕を確認した。



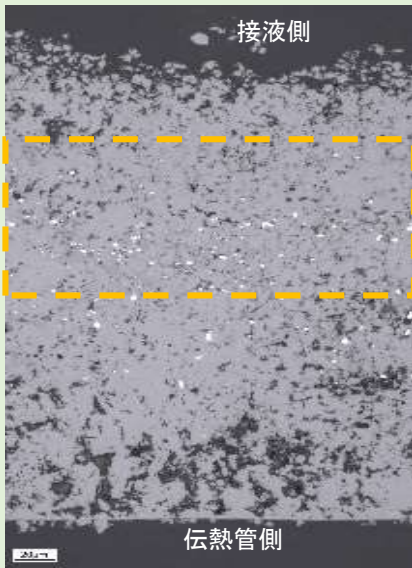
### ③ 成分分析（EDS※1）

- 伝熱管との接触部の表面化学成分を分析した結果、伝熱管(インコネルTT600)の主成分であるNi、Crの成分を僅かに検出した。

※1：電子線照射により発生する特性X線のエネルギーと強度から構成元素を分析する装置

# 減肉箇所付着スケールの分析結果（3 / 3）

## ④ 断面ミクロ観察結果

回収位置	A-SG 1B上(高温側) X46-47,Y7
断面ミクロ画像	
スケール厚さ(※2)(mm)	約0.4
稠密層厚さ(mm)	0.10

※2：2箇所の計測値の平均値

[ ]：稠密層を示す

⇒ スケールの稠密層厚さは0.1mmであり、保全指標（0.1mm以上）に該当するものであった。

## SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

A-SG 第二管支持板上写真



A-SG 第一管支持板上写真



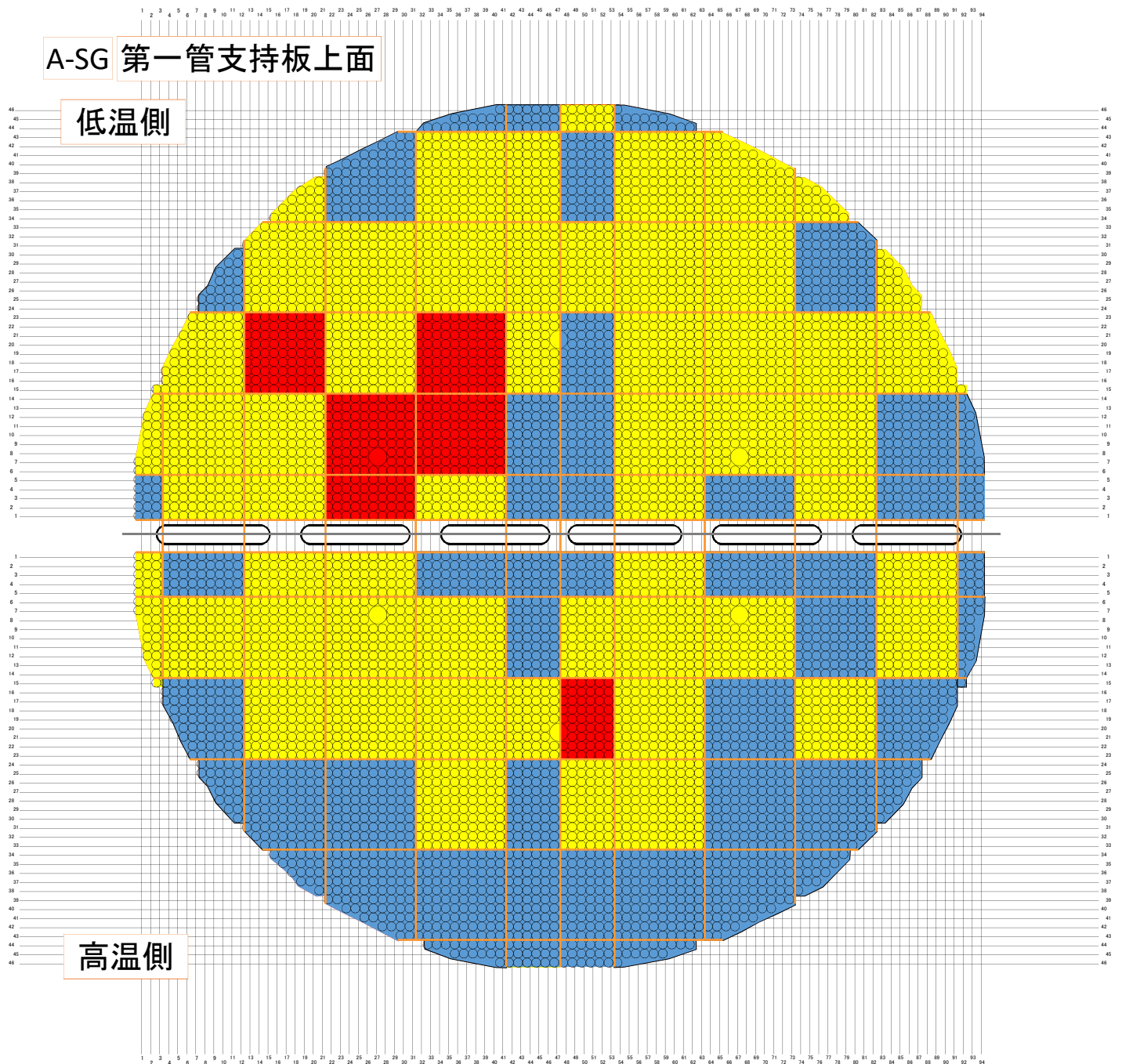
A-SG 管板上写真



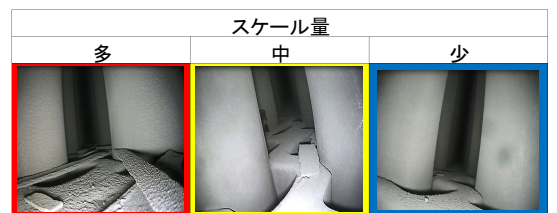


SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況(第一管支持板)

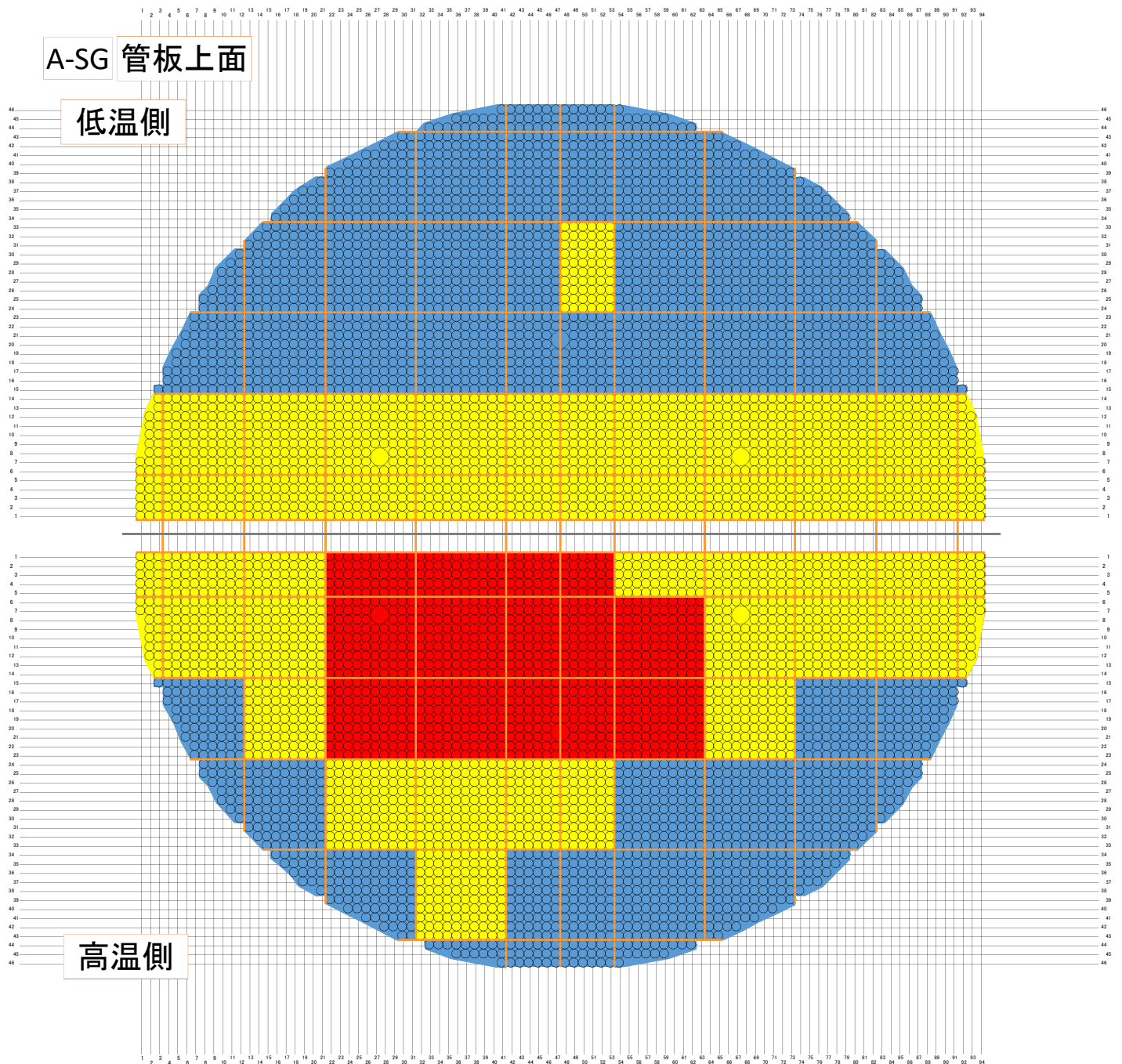


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。

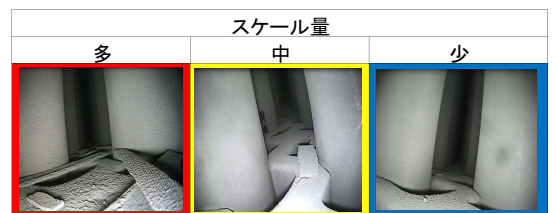


SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況(管板)

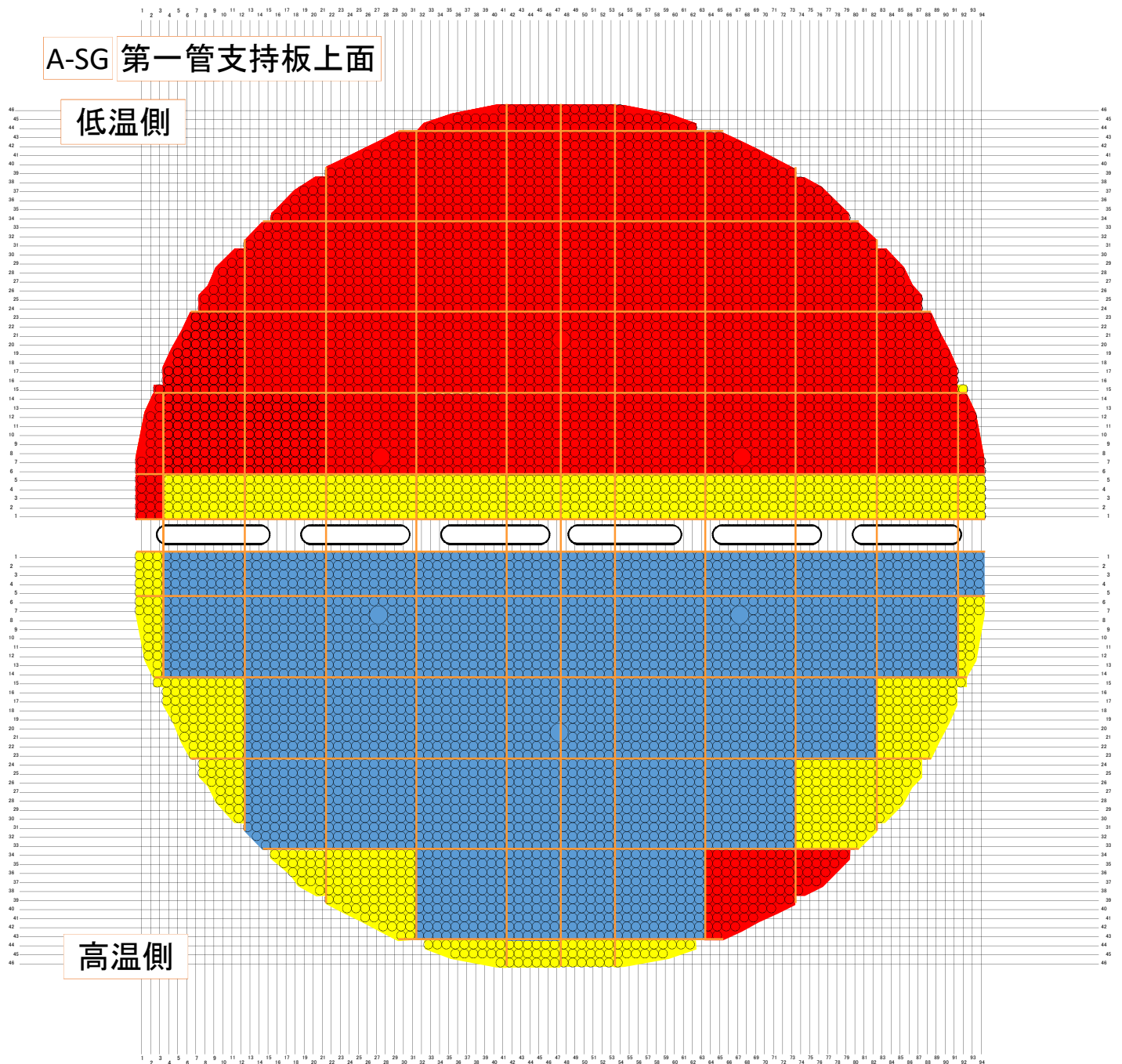


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。

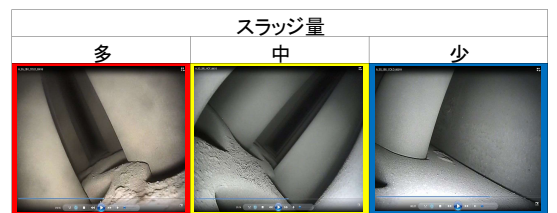


SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スラッジの分布状況(第一管支持板)



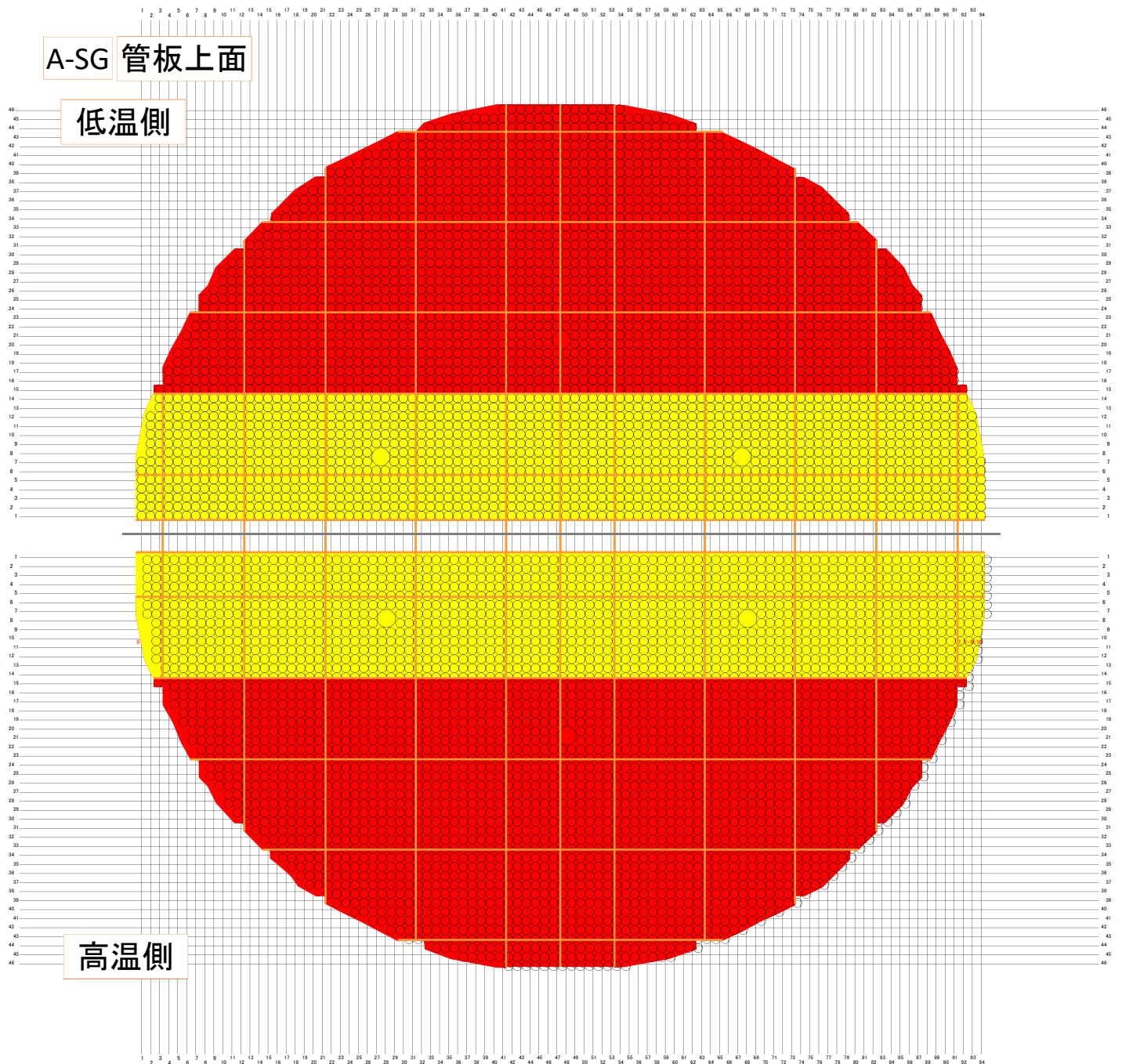
管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多””中””少”に色分けした。



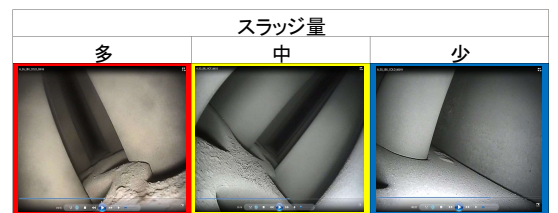


SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スラッジの分布状況(管板)



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”に色分けした。



# S G器内の伝熱管表面の観察結果

- ▶ 小型カメラを用いたS G器内のスケールの残存状況等の調査に合わせて、近傍の伝熱管表面を観察した結果、伝熱管へのスケールやスラッジの付着はあるものの、局所的にスケールが剥離した痕跡が認められた。
- ▶ 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（垂直方向）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



## 伝熱管とスケールの摩耗試験方法について

以下のとお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。

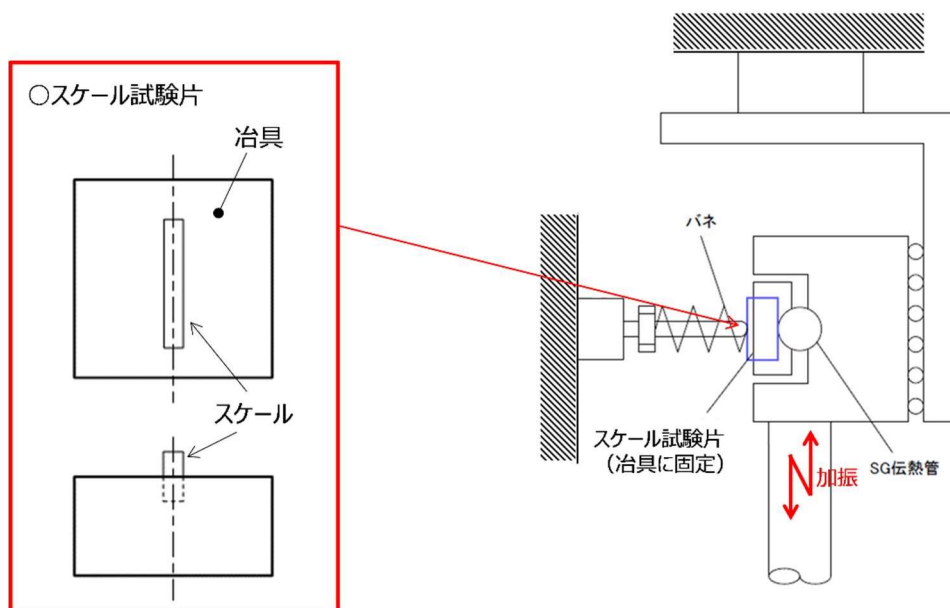


図1 加振装置概念図

## 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のとおり設定した。

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1 N	熱流動解析結果より設定
	振動数	約8 Hz	振動応答解析結果より設定
	振幅	約0.4 mm	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する。スケールおよび伝熱管の試験前後の外観の一例を図2および3に示す。

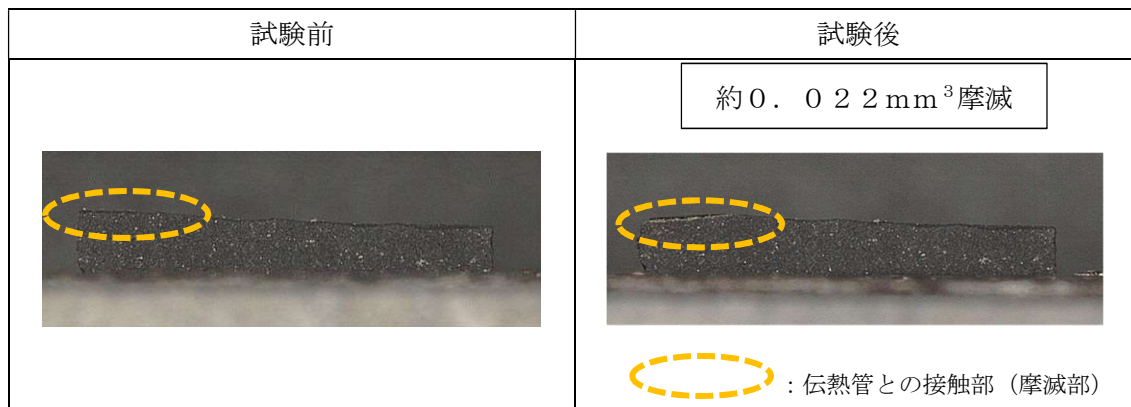


図2 摩耗試験前後のスケール試験片外観（一例）



図3 摩耗試験前後の伝熱管試験片外観（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 / 7）

スケール60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1個確認した。  
 <断面観察結果（1/6）>

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 (低温側)	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第二管支持板上 (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0.3	約0.3	約0.1	約0.3	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.02	0.00	0.04	0.00	0.04
摩耗体積比 ※1 (伝熱管/スケール)	0.07	0.01	0.01	0.01	0.01

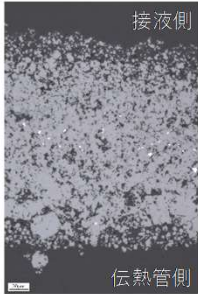

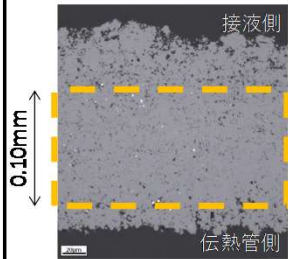
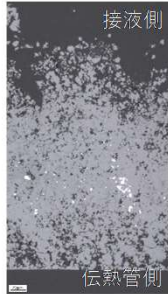
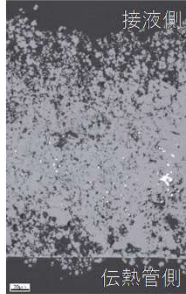
回収位置	C-SG 第二管支持板上 (高温側)	C-SG 第二管支持板上 (低温側)	A-SG 管板上 (高温側)	B-SG 管板上 (高温側)	C-SG 管板上 (高温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.3	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.04	0.00	0.02	0.00	0.00
摩耗体積比 ※1 (伝熱管/スケール)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

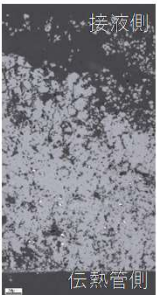
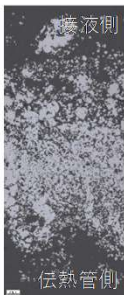

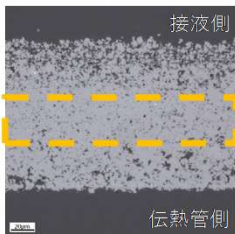
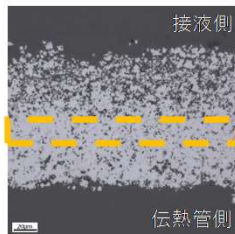
※1: 摩耗体積比については小数第3位を四捨五入した値



# 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 / 7）

## <断面観察結果（2/6）>

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)	B-SG 第一管支持板上 (低温側)	B-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0.4	約0.2	約0.3	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.00	0.00	0.10 ※2	0.00	0.00
摩耗体積比 ※1 (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 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (低温側)	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	C-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0.1	約0.1
稠密層厚さ(mm)	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02
摩耗体積比 ※1 (伝熱管/スケール)	—	—	—	—	—

※1: 摩耗体積比については小数第3位を四捨五入した値

※2: スケールの大きさ 約6mm × 約4mm

# 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 / 7）

## <断面観察結果（3/6）>

スケール回収位置	C-SG 第一管支持板上 (高温側)	C-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)	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0.3	約0.3	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
摩耗体積比 ※1 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-

スケール回収位置	C-SG 第二管支持板上 (高温側)	C-SG 第二管支持板上 (高温側)	C-SG 第二管支持板上 (高温側)	C-SG 第二管支持板上 (高温側)	C-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)	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
摩耗体積比 ※1 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-

※1: 摩耗体積比については小数第3位を四捨五入した値



# 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 / 7）

## <断面観察結果（4/6）>

スケール回収位置	B-SG 第一管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (低温側)	B-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0.3	約0.1	約0.1
稠密層厚さ(mm)	0.00	0.00	0.04	0.04	0.02
摩耗体積比 ※1 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-

スケール回収位置	A-SG 管板上 (高温側)	A-SG 管板上 (高温側)	A-SG 管板上 (低温側)	B-SG 管板上 (高温側)	B-SG 管板上 (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0.3	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.02	0.00	0.06	0.02	0.02
摩耗体積比 ※1 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-

※1: 摩耗体積比については小数第3位を四捨五入した値

# 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 / 7）

## <断面観察結果（5/6）>

スケール回収位置	B-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 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0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.00	0.02	0.06	0.00	0.06
摩耗体積比 ※1 (伝熱管/スケール)	—	—	—	—	—

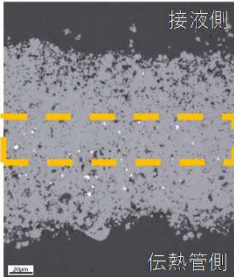
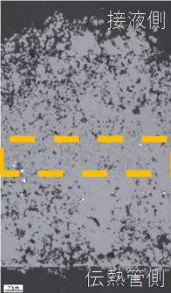
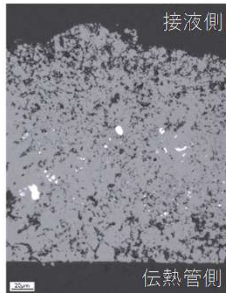

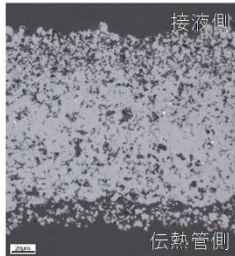
スケール回収位置	C-SG 第一管支持板上 (高温側)	C-SG 第一管支持板上 (低温側)	C-SG 第一管支持板上 (低温側)	C-SG 第一管支持板上 (低温側)	C-SG 第一管支持板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.1	約0.2	約0.2	約0.2	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.04	0.06	0.00	0.00	0.00
摩耗体積比 ※1 (伝熱管/スケール)	—	—	—	—	—

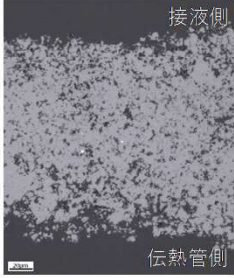
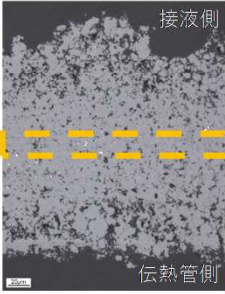

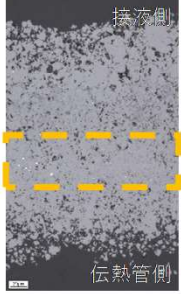
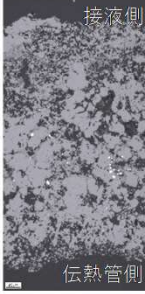
※1: 摩耗体積比については小数第3位を四捨五入した値



# 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 / 7）

## <断面観察結果（6/6）>

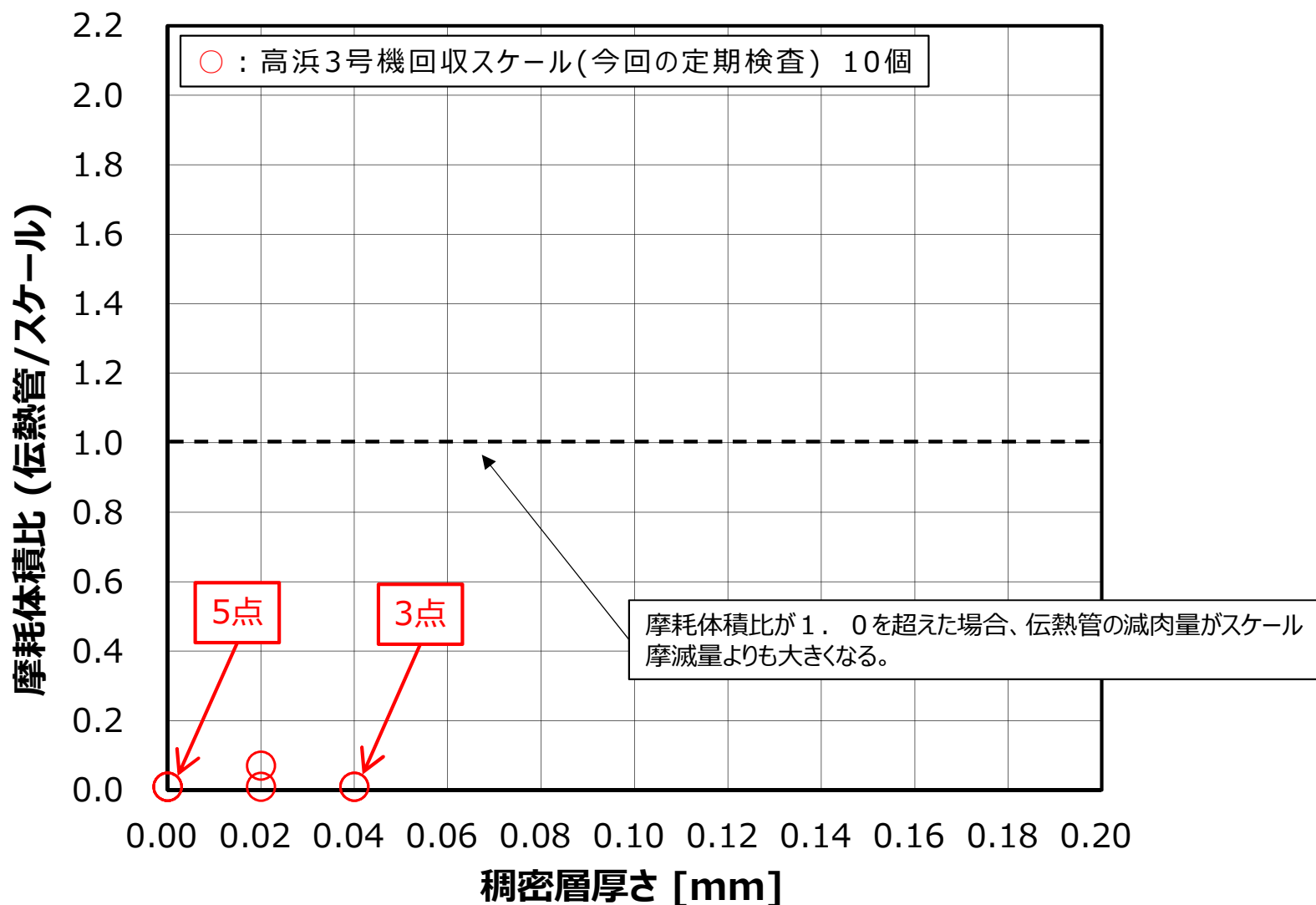
スケール回収位置	A-SG 管板上 (高温側)	B-SG 管板上 (高温側)	C-SG 管板上 (高温側)	A-SG 第二管支持板上 (高温側)	A-SG 第二管支持板上 (高温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.3	約0.3	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00
摩耗体積比 ※1 (伝熱管/スケール)	—	—	—	—	—

スケール回収位置	A-SG 第二管支持板上 (高温側)	A-SG 第二管支持板上 (高温側)	A-SG 第二管支持板上 (高温側)	A-SG 第二管支持板上 (高温側)	A-SG 第二管支持板上 (高温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.3	約0.3	約0.3	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.00	0.02	0.04	0.06	0.00
摩耗体積比 ※1 (伝熱管/スケール)	—	—	—	—	—

※1: 摩耗体積比については小数第3位を四捨五入した値

## 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 / 7）

比較的大きなスケール 10 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<sup>※3</sup>を調査した結果、伝熱管の減肉量がスケール摩滅量以上のスケールは確認されなかった。

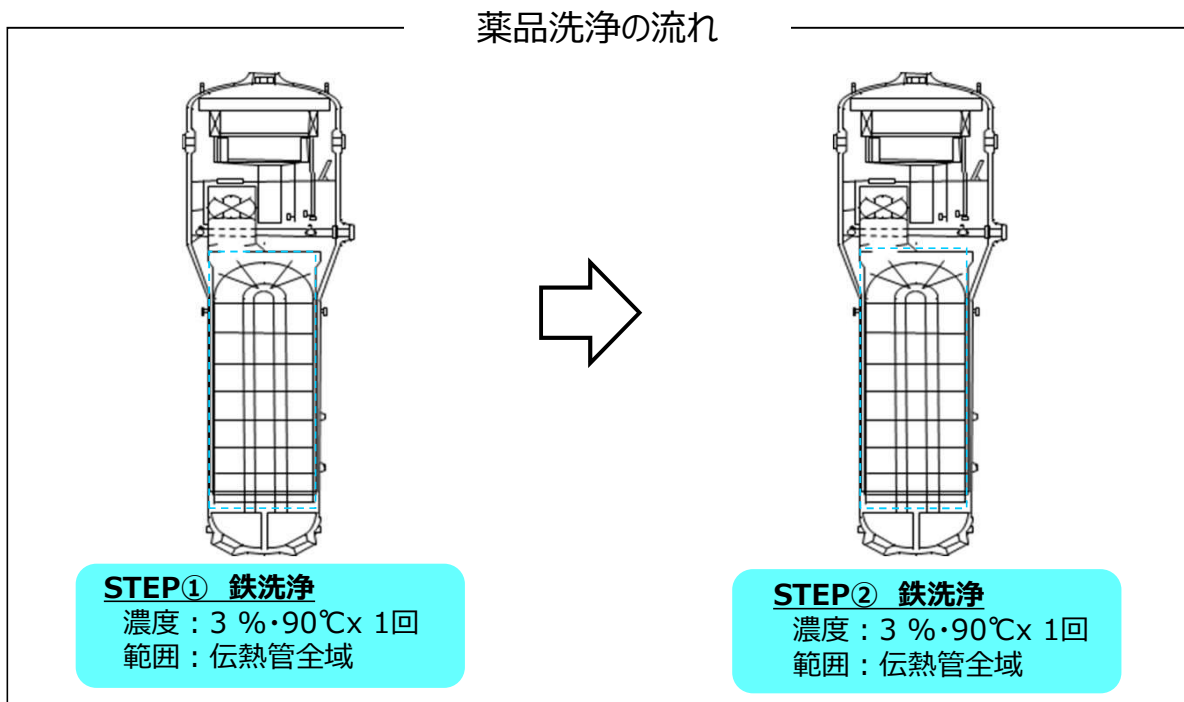


※3 : 摩耗体積比 (伝熱管/スケール) : 摩耗試験における伝熱管の減肉量とスケールの摩滅量の体積比

前回の第25回定期検査における薬品洗浄の実施結果 (1/3)

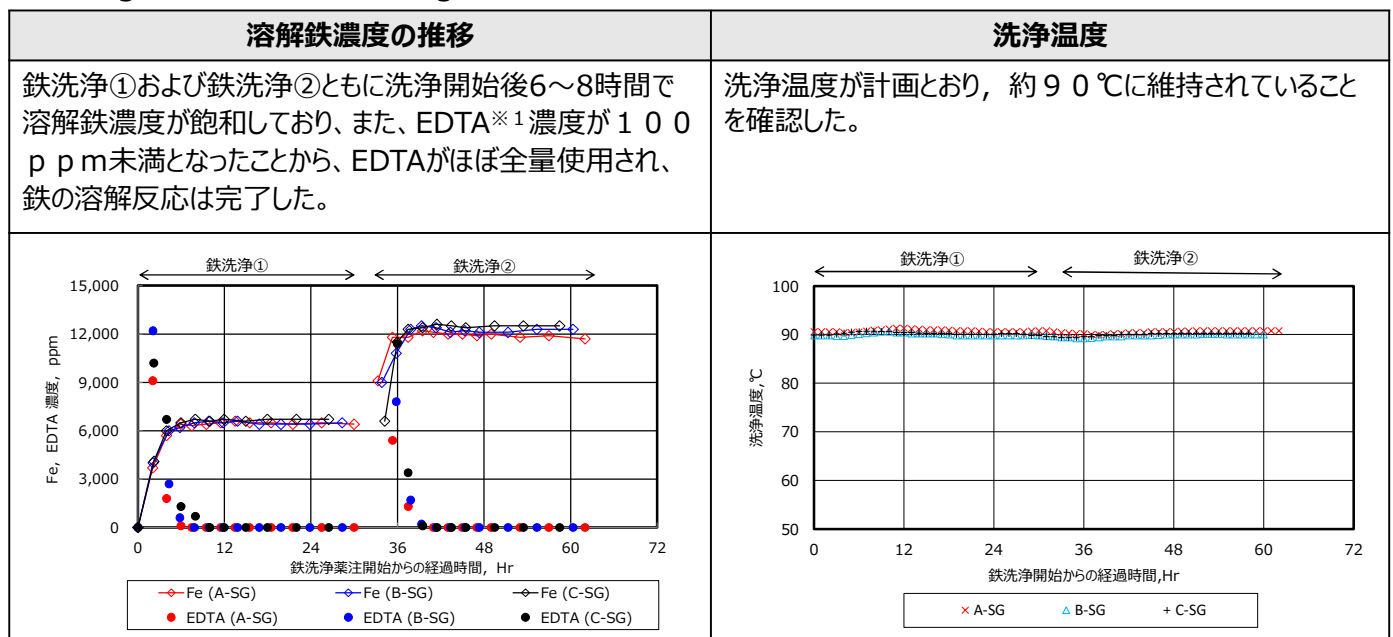
<前回の第25回定期検査における薬品洗浄の実施方法>

- 洗浄条件については、薬品濃度は3%、洗浄温度は90℃とした。
- 洗浄範囲については管群全体を対象とし、2回洗浄とした。
- 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。



<薬品洗浄の実施結果>

- 以下の水質挙動から、鉄洗浄結果は良好であり、鉄溶解効果は十分得られていると考えられる。
- 洗浄中のSG器内水の鉄濃度と洗浄水位から算出した鉄除去量は、約1,310kg（鉄洗浄①で約640kg、鉄洗浄②で約670kg）であることを確認した。

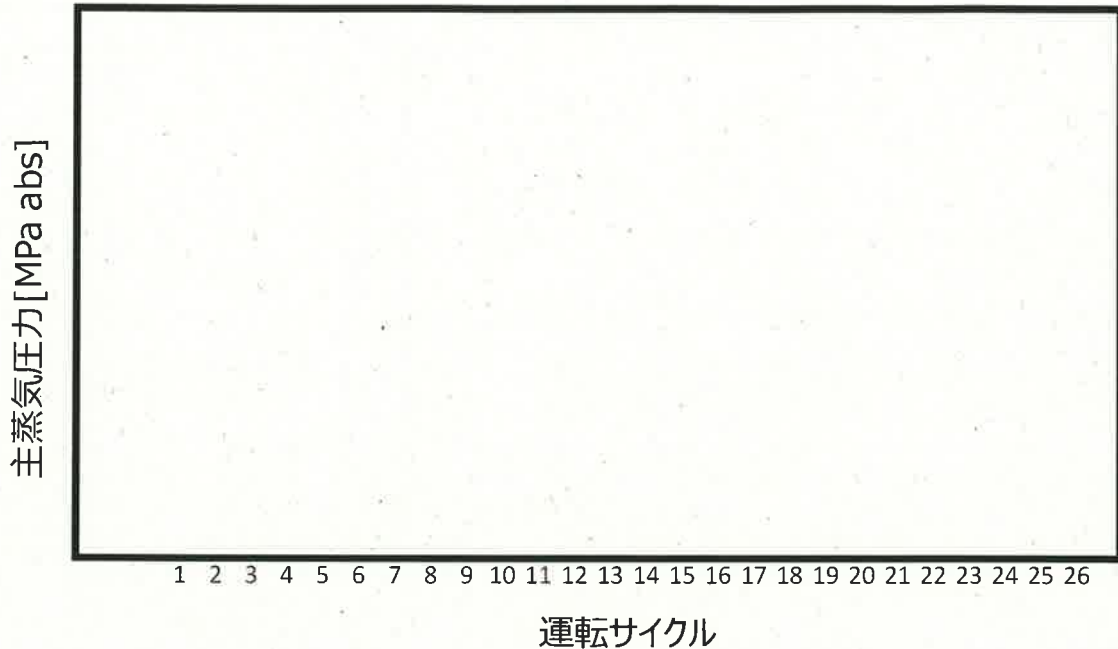


※1：エチレンジアミン四酢酸

## 前回の第25回定期検査における薬品洗浄の実施結果 (2/3)

## ＜主蒸気圧力の向上＞

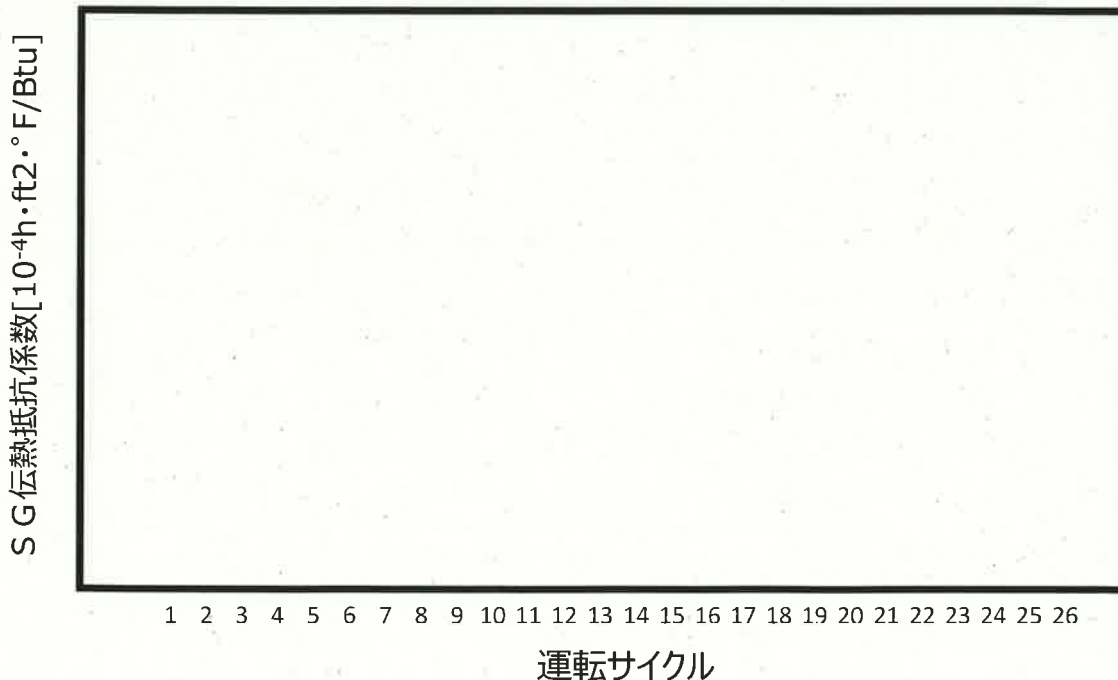
○前回定期検査後の運転実績を確認した結果、主蒸気圧力が向上したことを確認した。薬品洗浄の効果により伝熱管に付着したスケールが減少し、熱伝達率が改善したものと考えられる。



## ＜蒸気発生器伝熱抵抗係数の低下＞

○蒸気発生器伝熱抵抗係数について、第26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、蒸気発生器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。





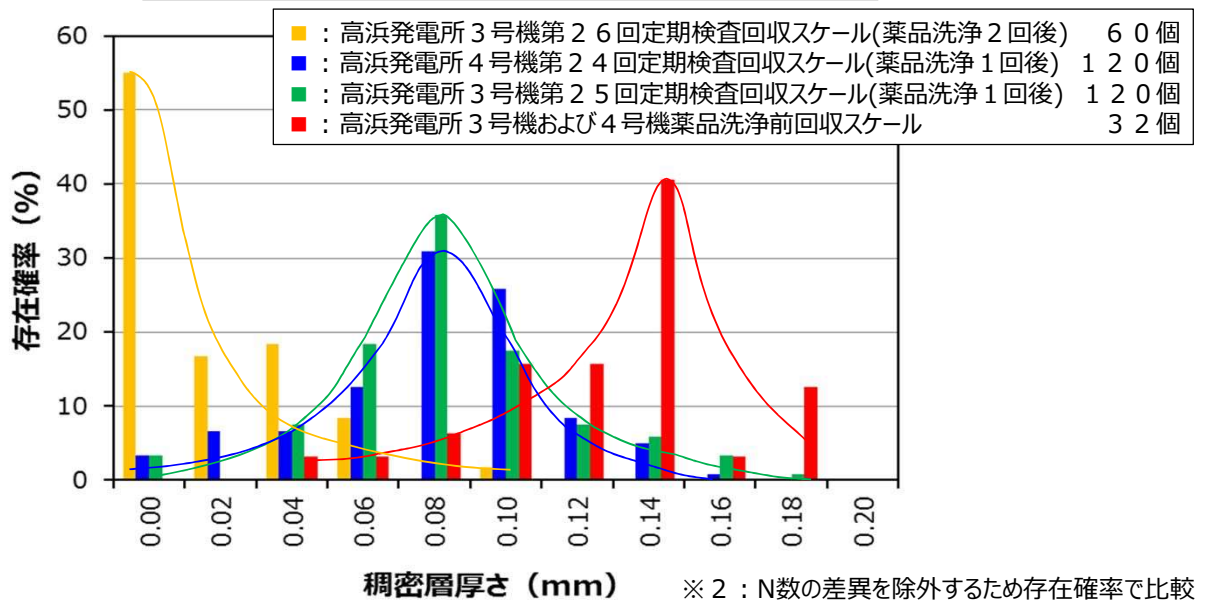
前回の第25回定期検査における薬品洗浄の実施結果（3／3）

<薬品洗浄効果（スケールの脆弱化傾向）>

○SG器内から回収したスケールの断面観察結果について、薬品洗浄の実施前後を比較した。

評価の結果、薬品洗浄の実施に伴い、稠密層が薄くなる傾向を確認し、伝熱管を損傷させる可能性のある稠密層厚さ0.1mm以上のスケールの割合も大幅に低下した。

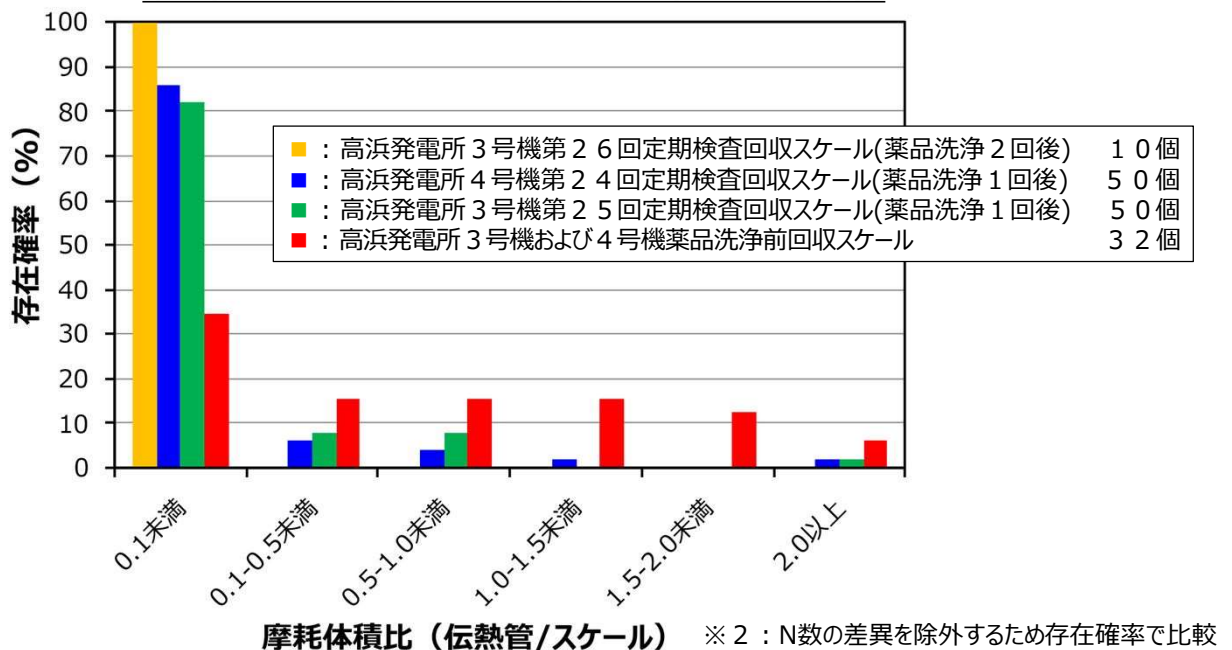
稠密層厚さのヒストグラム※2（薬品洗浄前後の比較）



○SG器内から回収したスケールの摩耗試験について、薬品洗浄の実施前後を比較した。

評価の結果、薬品洗浄の実施に伴い、摩耗体積比が小さくなる傾向を確認し、伝熱管を損傷する可能性のあるスケールの割合が低下していることを確認した。

摩耗体積比のヒストグラム※2（薬品洗浄前後の比較）



## 管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (1/2)

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<sup>\*1</sup>)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 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。

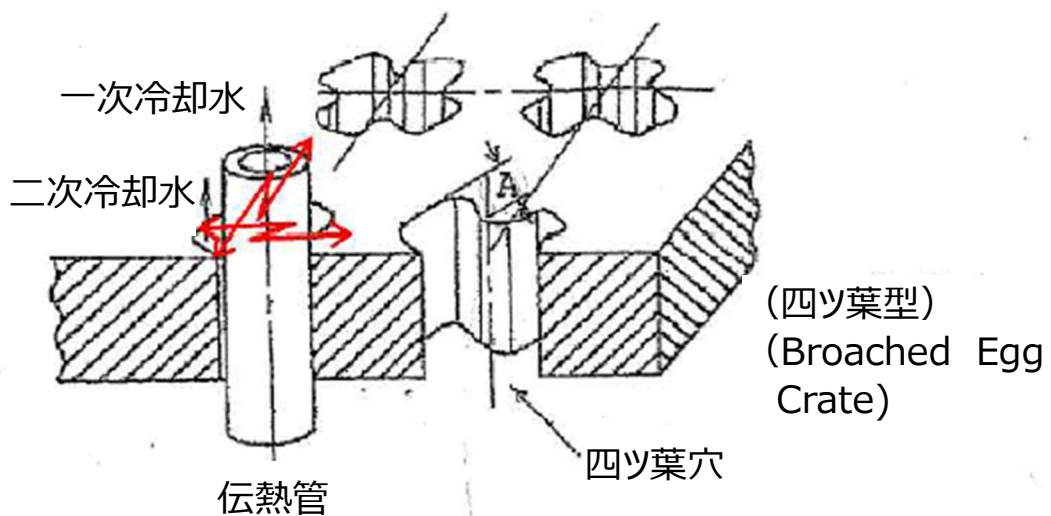


図 1 管支持板四ツ葉穴 (BEC 穴) による伝熱管の支持状況

管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (2/2)

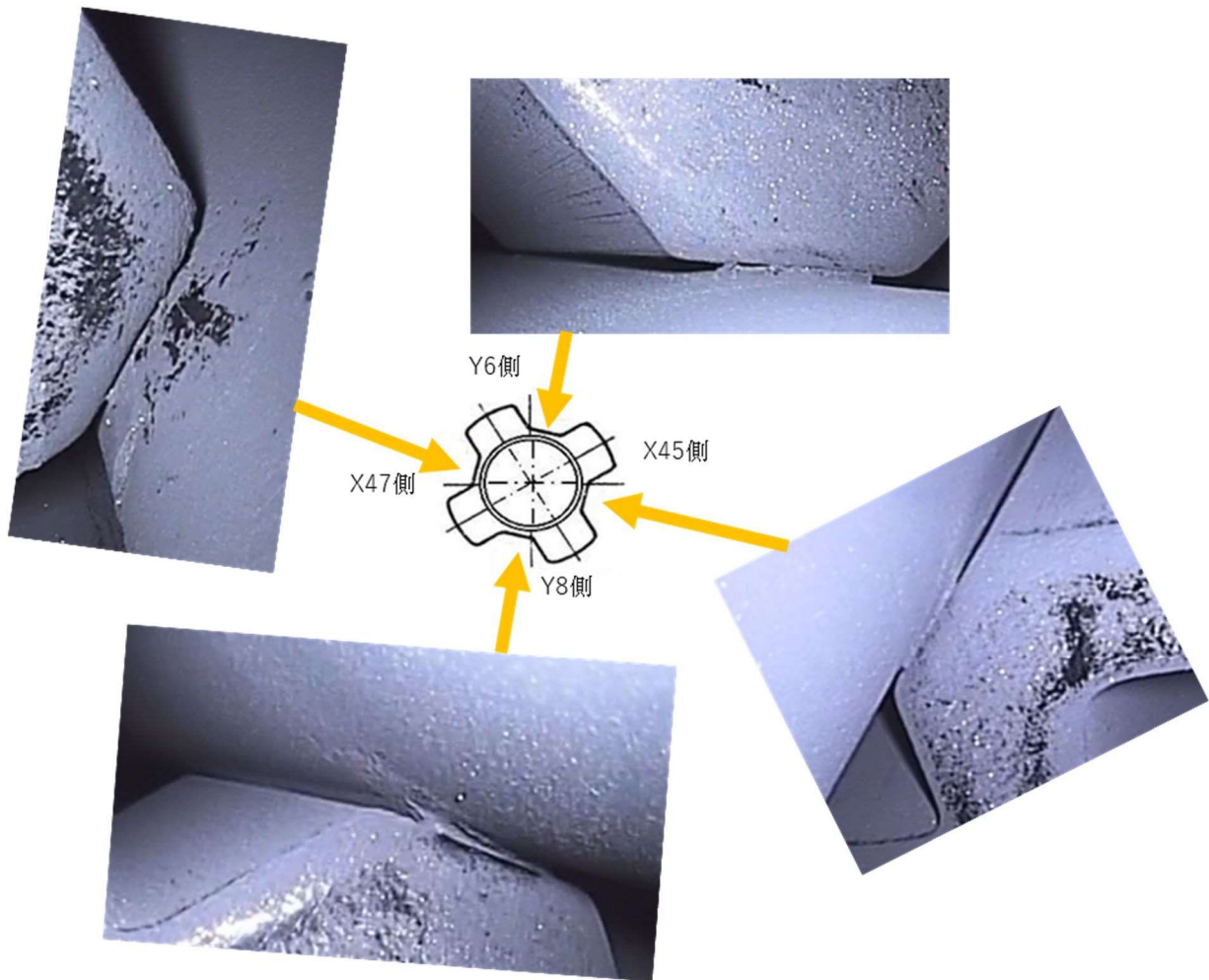


図2 減肉とランド部の位置関係(A-SG X46, Y7)

## 異物混入対策について（1 / 2）

高浜発電所3号機前回（第25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。

- 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で異物の拡散防止を図っており、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。

発電用原子炉施設故障等報告書  
（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25日）より引用

# 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
高浜発電所 3号機 第 2 4 回定期検査以降 および 高浜発電所 4号機 第 2 3 回定期検査以降	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・ウエスは、新ウエスを使用する。</li> <li>・新ウエスは再使用ウエスと区別して管理する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・機器を開放した時点でうず巻きガasket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。</li> <li>・S G 水張ポンプ入口仮設ストレーナを設置した。</li> </ul>
高浜発電所 4号機 第 2 2 回定期検査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・ウエスは、新ウエスを使用する。</li> <li>・新ウエスは再使用ウエスと区別して管理する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> </ul>
高浜発電所 3号機 第 2 3 回定期検査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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】</li> </ul>	—
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	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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）。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・最終異物確認は直接目視にて実施（手鏡等を使用）</li> </ul>	<p>美浜 3号機での異物混入事象（2000年、2007年）を踏まえた対策についても実施</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・機器開口部周辺の管理徹底する。</li> <li>・異物確認者の作業服や作業靴などの清掃等。</li> </ul>

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。

発電用原子炉施設故障等報告書  
（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25日）より引用

## 粒界腐食割れに関する検討結果 (1/2)

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 6.4 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26サイクル
pH <sub>300°C</sub>	平均 6.4

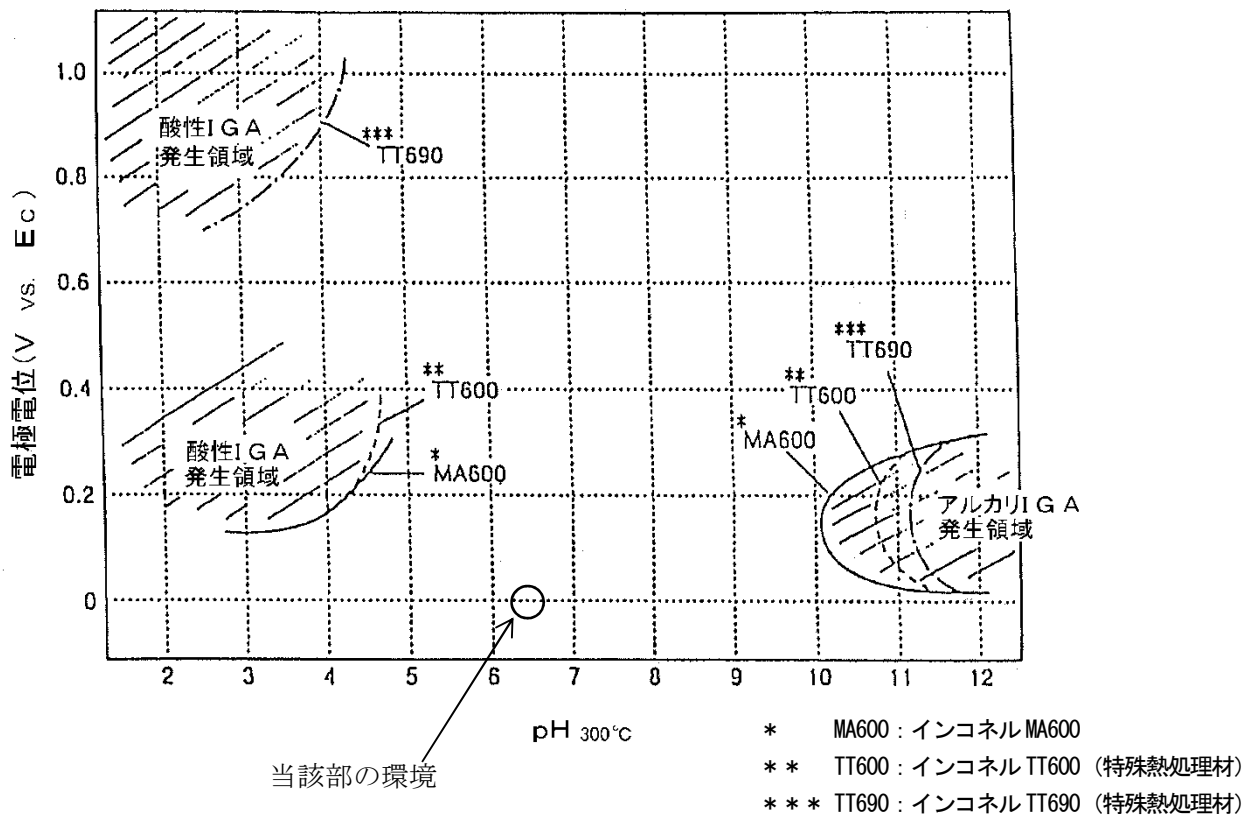


図1 粒界腐食割れの発生領域

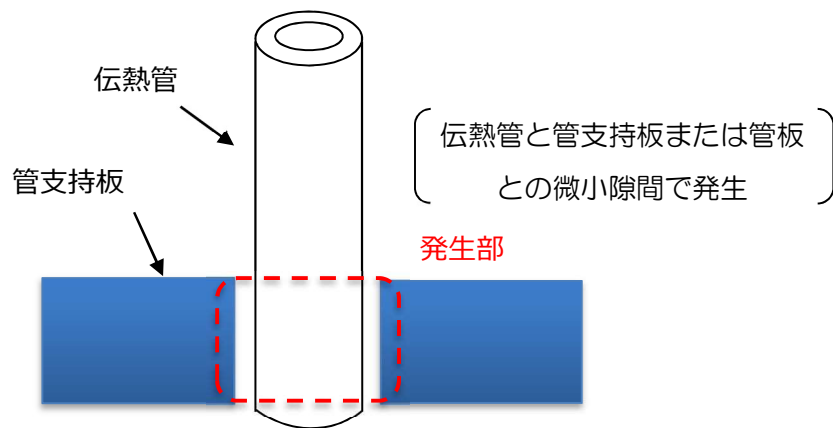
[出典：(財)発電設備技術検査協会「第7回 報告と講演の会 報告成果スライド集(平成6年10月28日)」]



## 粒界腐食割れに関する検討結果（2／2）

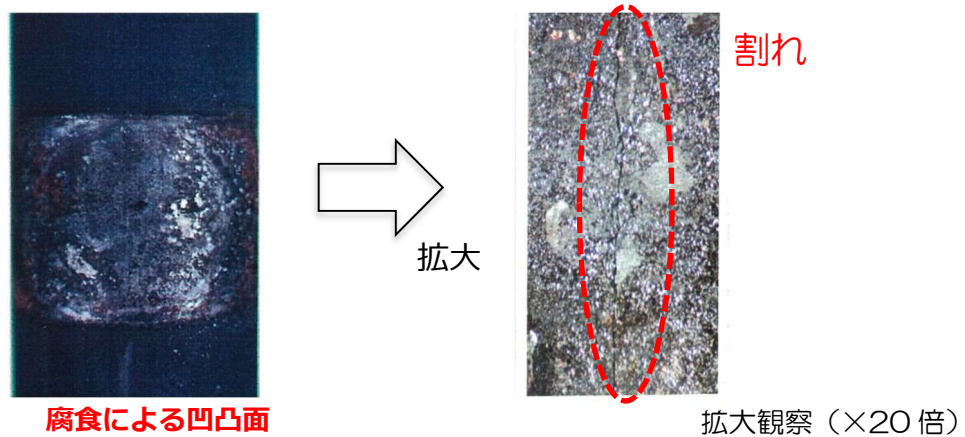
（粒界腐食割れによるきずの形状）

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



（試験体概略図）

図2 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

## ピittingに関する検討結果 (1/2)

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

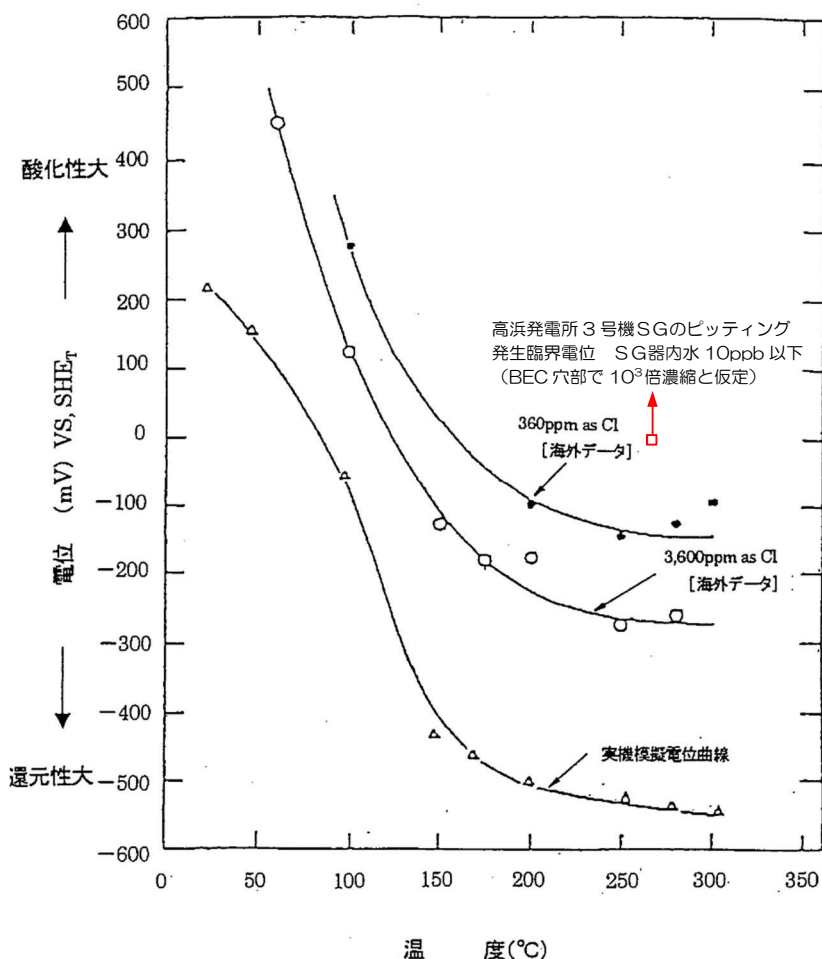
	第26サイクル
塩素イオン (ppb)	0.4

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\*<sup>1</sup>発生限界電位は下図の 360ppm のデータの電位（-100mV 以下 (at 270°C)）よりも十分高いと考えられる。

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

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

\*<sup>1</sup> 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発生臨界電位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に関する検討結果（２／２）

（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。

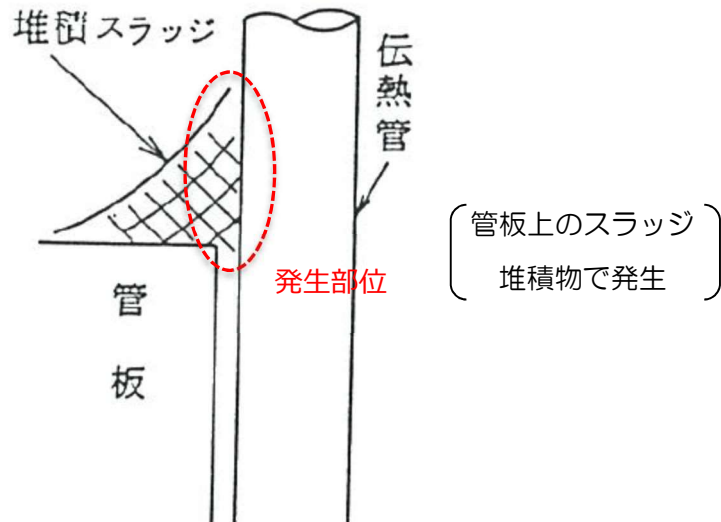


図２ 発生部位

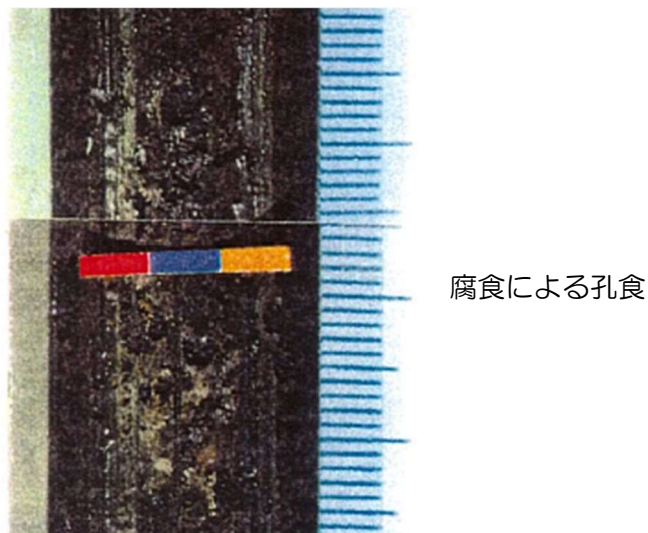


図３ 表面形状

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

## リン酸減肉に関する検討結果

(リン酸減肉によるきずの形状)

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

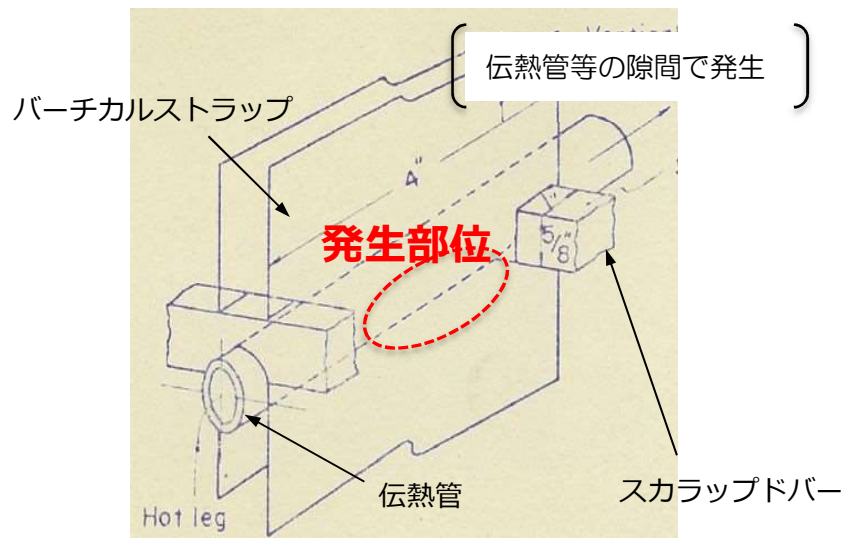
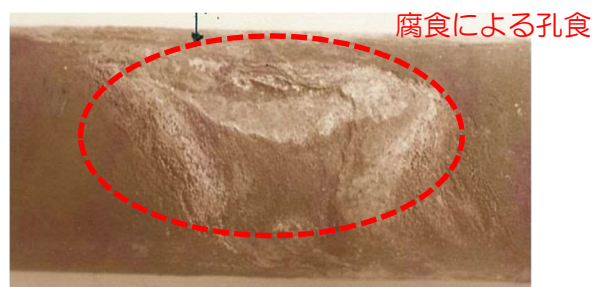


図 1 発生部位



拡大観察 (× 3 倍)

図 2 表面形状

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



## エロージョンに関する検討結果 (1/2)

### 1. 目的

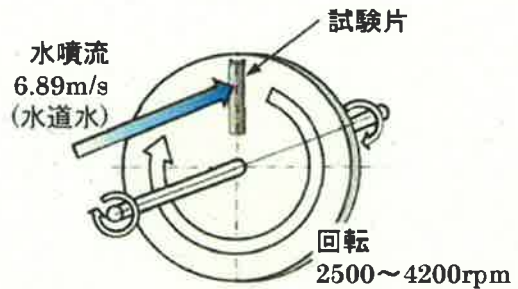
SG 伝熱管の管支持板部に周辺流体の衝突によるエロージョン\*1 が発生しないことを評価する。

\*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。

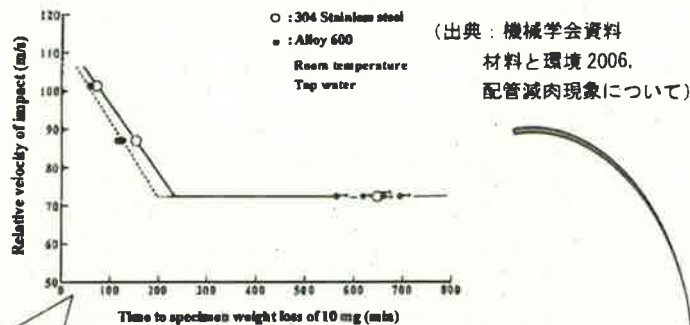


図1 ウォータージェットテストによる限界流速

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



表面の番号は、試験片番号

図2 ウォータージェットテスト後の外観  
(700分間水噴流後の状況)

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。

エロージョンに関する検討結果 (2/2)

(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/m<sup>3</sup>であり、常温(20℃)に比べ約2割小さい。
- ✓ 密度が低下するとエロージョンが生じにくくなる。(限界流速は上昇する。)

<材料因子(硬さ)>

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

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

※1：材料メーカーカタログ(インコネルTT600)の単位を換算  
 ※2：材料と環境, 57, 146-152(2008), 磯本ら

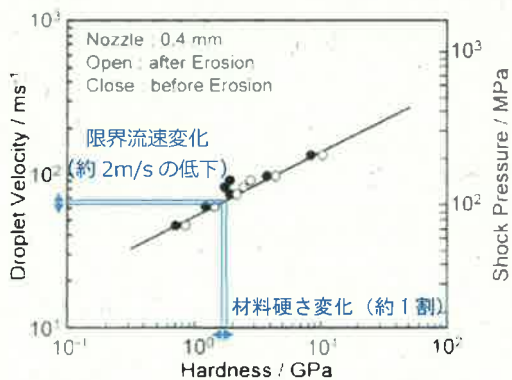


図1 限界流速と硬さの関係

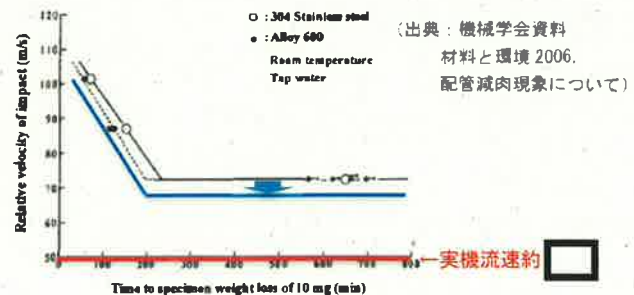


図2 ウォータージェットテストによる限界流速

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。

# S G点検スケジュール

		2023年10月																																		
		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	31				
		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				
S G器内 スケール採取 および 目視確認 (カメラ点検)	ECT解析 (定事検)																																			
	完了																																			
	A-S G器内スケール採取 (第一、二支持板上面、管板上面)																																			
	完了																																			
	A-S G器内点検 (第一支持板上面、管板上面の異物調査)																																			
	完了																																			
	B-S G器内スケール採取 (第一、二支持板上面、管板上面)																																			
	完了																																			
	B-S G器内スケール採取 (第一、二支持板上面、管板上面)																																			
	完了																																			
S G 器外点検	S G B D系統・復水系統 (弁、配管)																																			
	完了																																			
スケール分析等 (工場)	完了																																			

: 予定、
  : 実績



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28.17MPaであり、通常運転時および事故時の最大内外差圧  MPa 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SG伝熱管の旧振止め金具による局部減肉の特殊設計施設認可申請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)

$\sigma_f$ : インコネルTT600の流動応力=343.8MPa (@361.3°C)

$t$ : 板厚=mm

$R$ : 平均半径=mm

$a$ : 減肉深さ=mm (= mm × 0.63)

$m$ : Foliasのバルジ係数 (= (1+1.05 · c<sup>2</sup>/R/t)<sup>1/2</sup>)

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
63	28.17	<input type="text"/>	<input type="text"/>

\*1 A-SG (X46, Y7)

\*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<sup>\*3</sup>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）<sup>\*4</sup>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

<sup>\*3</sup> 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）

<sup>\*4</sup> 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。

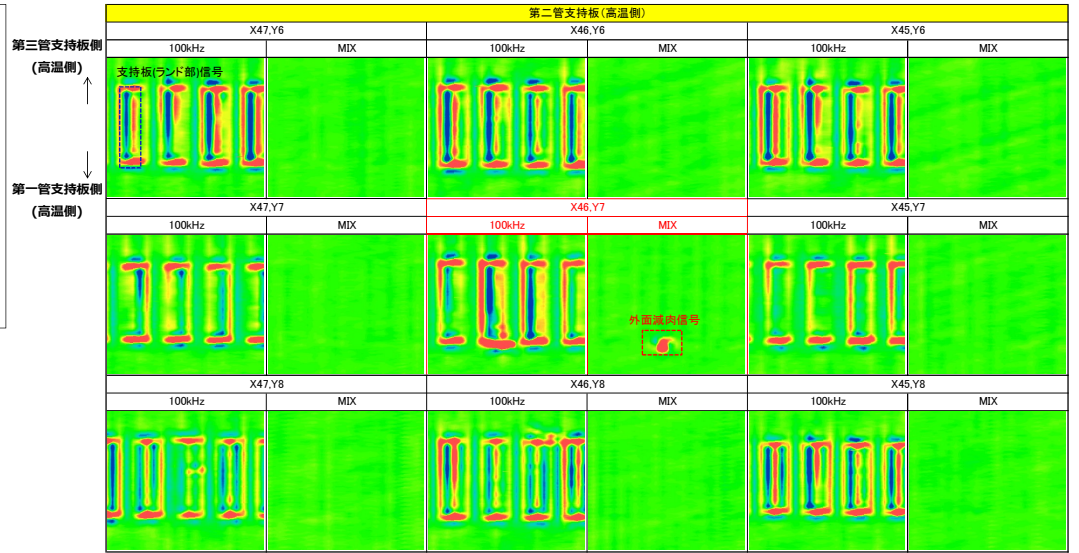
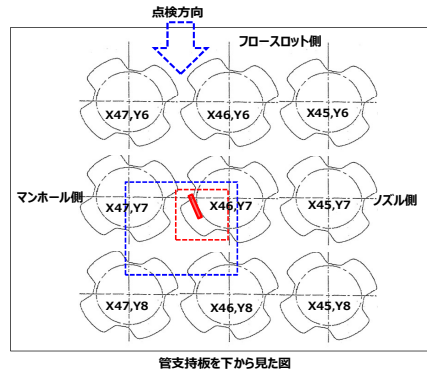
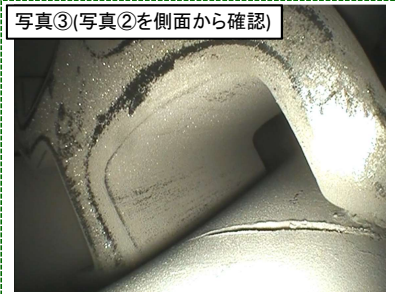
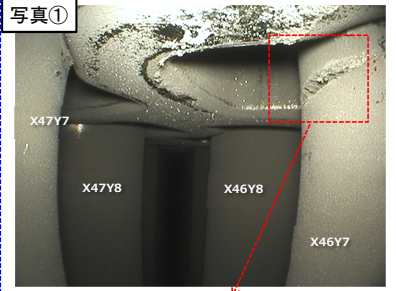
表 減肉した伝熱管の耐震性評価結果

応力分類	発生応力 <sup>*5</sup> および疲労累積係数	許容値	裕度
一次一般膜応力	267 MPa	334 MPa	1.2
膜応力＋曲げ応力	271 MPa	434 MPa	1.6
一次＋二次応力	202 MPa	492 MPa	2.4
疲労累積係数	0.033	1	-

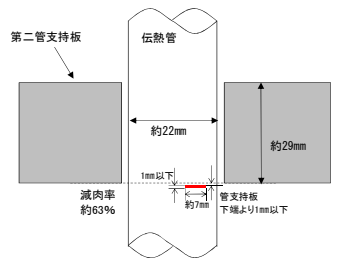
<sup>\*5</sup> A-SG (X46, Y7)

以 上

隣接伝熱管の健全性 (A-SG 高温側第二支持板下面 伝熱管 X46, Y7)



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

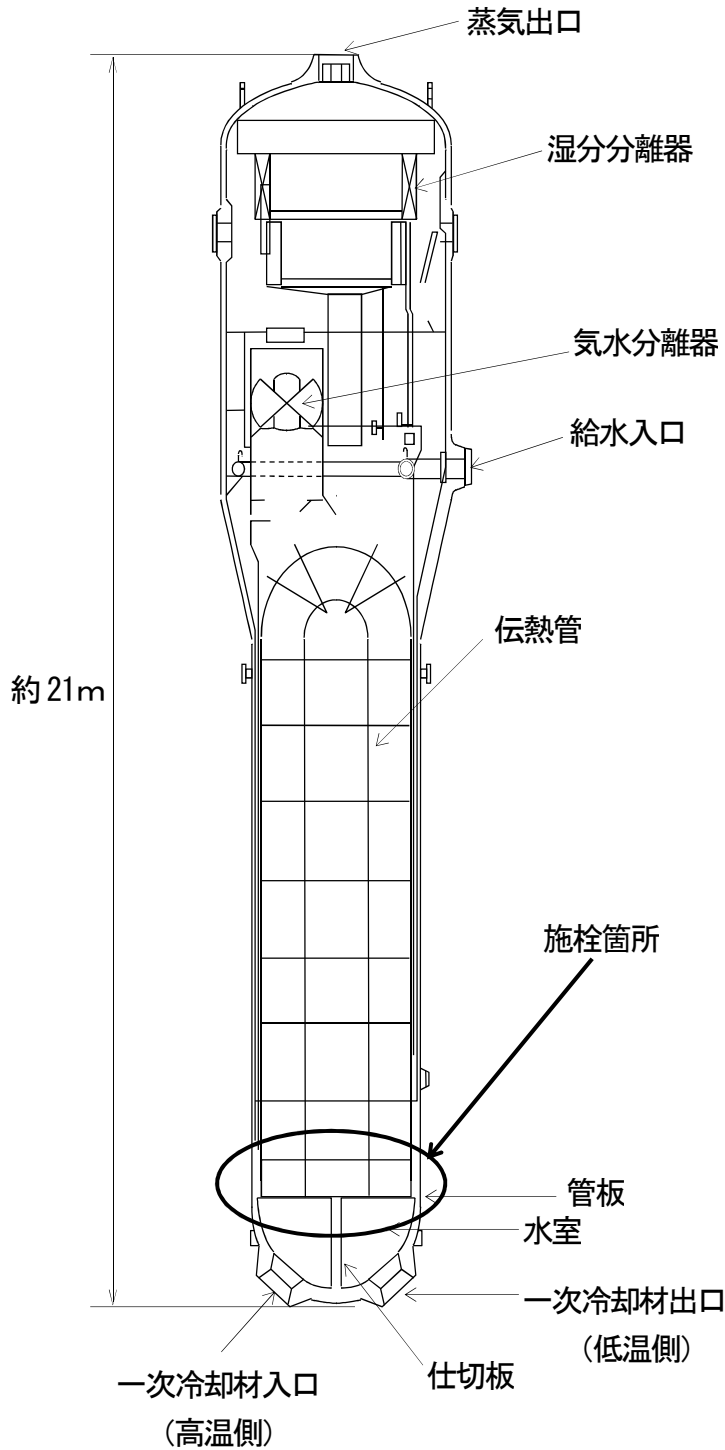


波形上の評価

- ・外面減肉信号は、X46,Y7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	<p>機械式栓内の中子にマンドレルをねじ込む。</p>	<p>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により、機械式栓を押し広げる。</p>

機械式栓の取付要領

## 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	管板拡管部応力腐食割れ
第13回定期検査 (2001.6～8)	5	7	5	17	管板拡管部応力腐食割れ (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	管板拡管部応力腐食割れ
第22回定期検査 (2016.12～2017.6)	1	0	0	1	管板拡管部応力腐食割れ
第23回定期検査 (2018.8～2018.11)	1	0	1	2	C: 管板拡管部応力腐食割れ 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 (2022.3～2022.7)	3	1	0	4	A1本: 管板拡管部応力腐食割れ A1本・B: 外面からの摩耗減肉 A1本: 微小な減肉信号
第26回定期検査 (2023.9～)	1	0	1	2	A: 外面からの摩耗減肉 C: 管板拡管部応力腐食割れ
累積施栓本数 [施栓率]	114 [3.4%]	136 [4.0%]	122 [3.6%]	372 [3.7%]	

○蒸気発生器1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)

## 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SG 2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19.2MPaであり、通常運転時および事故時の最大外圧  MPa 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 SG伝熱管の旧振止め金具による局部減肉の特殊設計施設認可申請においても用いられており、下式にて表される。

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

<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 × 0.63)

$2c$ : 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 (%) * <sup>1</sup>	圧壊圧力 Pc (MPa)	事故時を包絡 する作用外圧 (MPa) * <sup>2</sup>	裕度
63	19.2	<input type="text"/>	<input type="text"/>

\*<sup>1</sup> A-SG (X46, Y7)

\*<sup>2</sup> 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<sub>s</sub> 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\*<sup>3</sup>の基準地震動 S<sub>s</sub> による地震力および伝熱管全長モデル(右図)\*<sup>4</sup>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

\*<sup>3</sup> 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)

\*<sup>4</sup> 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* <sup>5</sup> および疲労累積係数	許容値	裕度
一次一般膜応力	195 MPa	334 MPa	1.7
膜応力+曲げ応力	198 MPa	434 MPa	2.1
一次+二次応力	202 MPa	492 MPa	2.4
疲労累積係数	0.033	1	-

\*<sup>5</sup> A-SG (X46, Y7)

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。

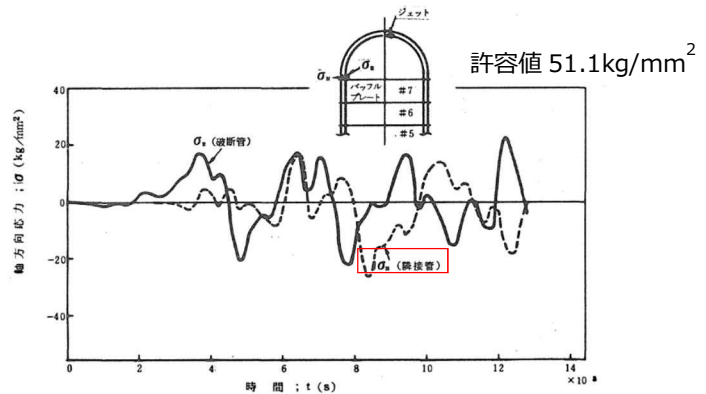
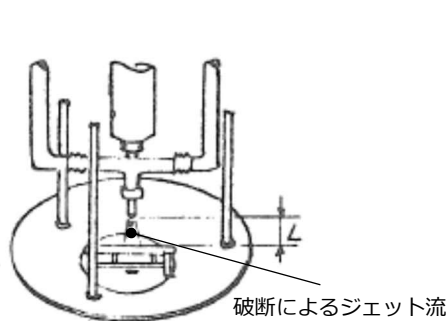
「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」の検討において、伝熱管1本が破断しても隣接管へ有意な影響を与えないことが確認されている。

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

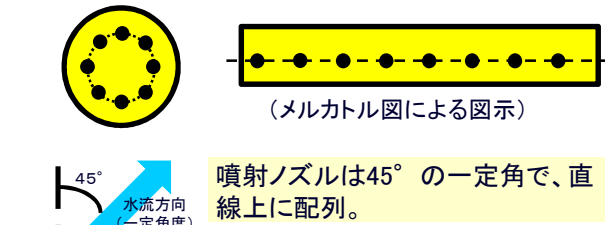


## 小型高圧洗浄装置による洗浄の強化について(1/2)

### ①「管支持板上噴射ノズル(第六～第三管支持板清掃用ノズル)」の改良

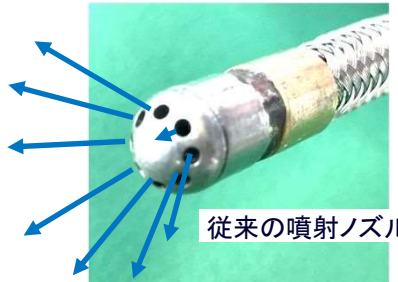
第六管支持板から第三管支持板上面の清掃で用いる噴射ノズルの改良および水の流量(水圧)の増加により、洗浄を強化。

**前回**



(メルカトル図による図示)

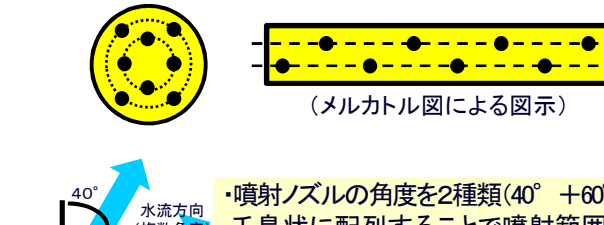
噴射ノズルは45°の一定角で、直線上に配列。



従来の噴射ノズル

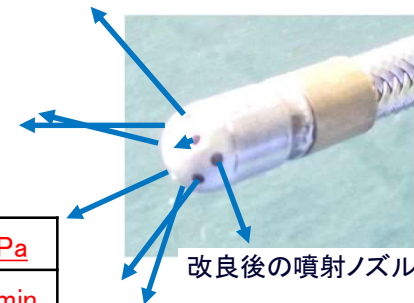
吐出圧	約2.0MPa
流量	約3.9L/min

**今回(改良ノズル)**



(メルカトル図による図示)

- ・噴射ノズルの角度を2種類(40° + 60°)とし、千鳥状に配列することで噴射範囲を拡大。
- ・噴射ノズルの改良に伴い、高流量時のノズルのブレを低減でき、水の流量(水圧)を更に増加。



改良後の噴射ノズル

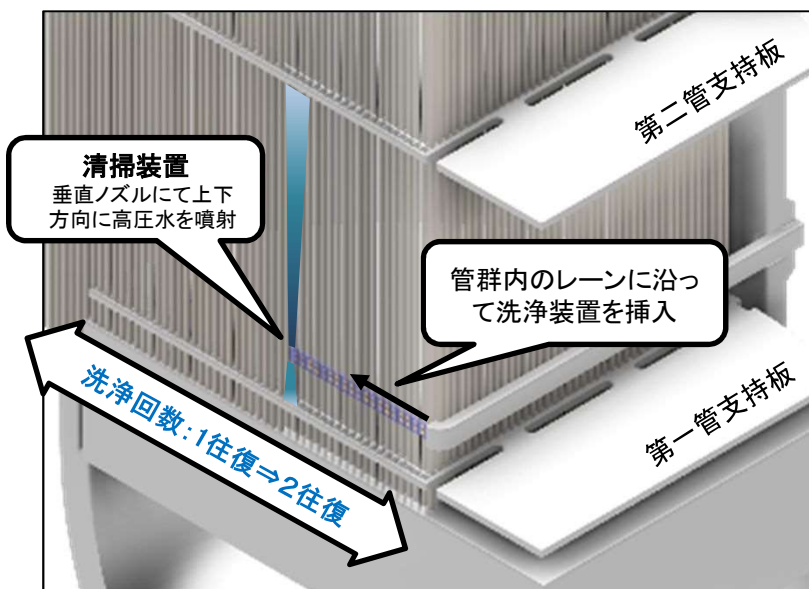
吐出圧	約5.0MPa
流量	約7.3L/min

改良

### ②「垂直ノズル」による第二および第一管支持板の洗浄の強化

管群の各レーンに清掃装置を挿入し洗浄を行う際、レーン毎(総数93レーン)の洗浄回数を1往復から2往復(1往復分追加)に増強することで、洗浄を強化。

洗浄イメージ



噴射状況



吐出圧	約5.0MPa
流量	約10.0L/min

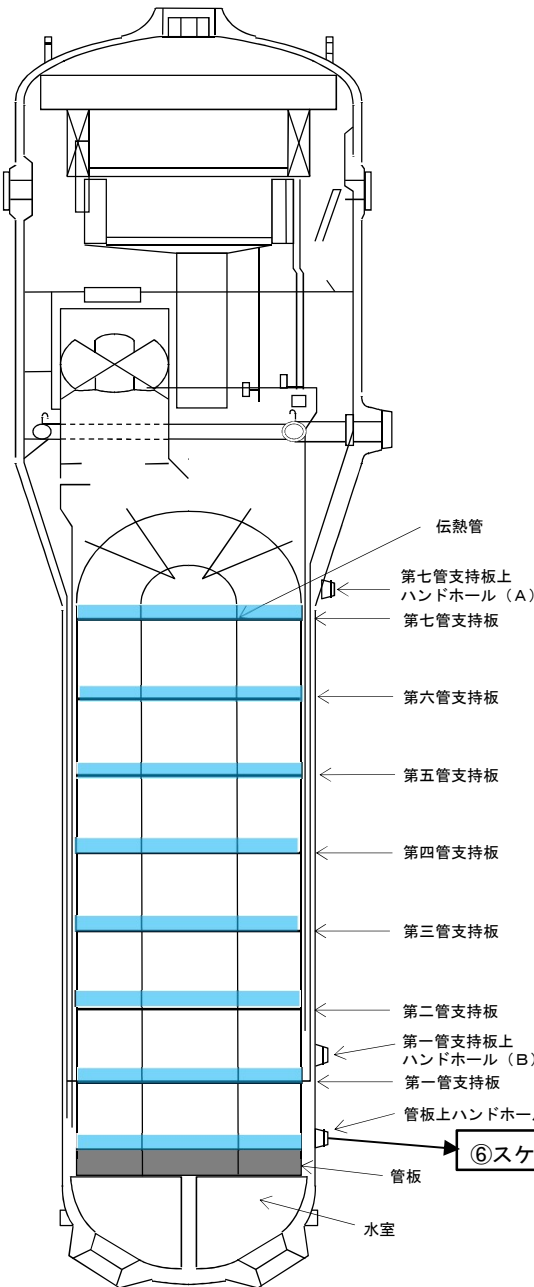
小型高圧洗浄装置による洗浄の強化について(2/2)

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。

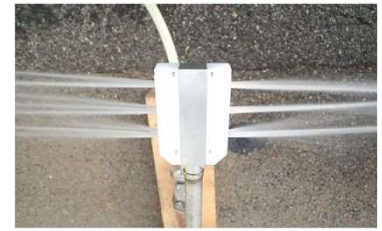
洗浄箇所:

(管板および第一管支持板から第七管支持板上)



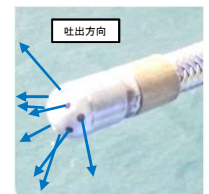
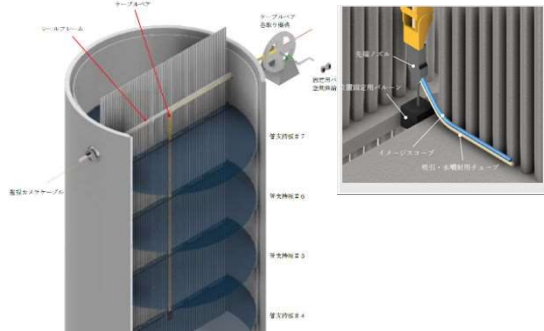
①「水平ノズル(樹脂ヘッド)」による第七管支持板の洗浄

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。



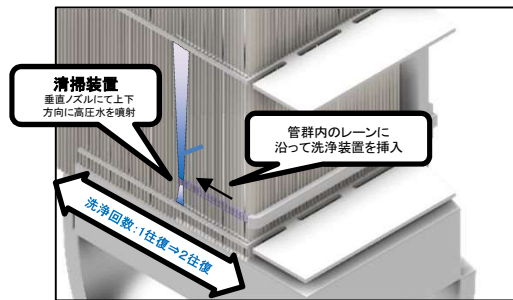
②「管支持板上走査ノズル」による第六～第三管支持板の洗浄

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。

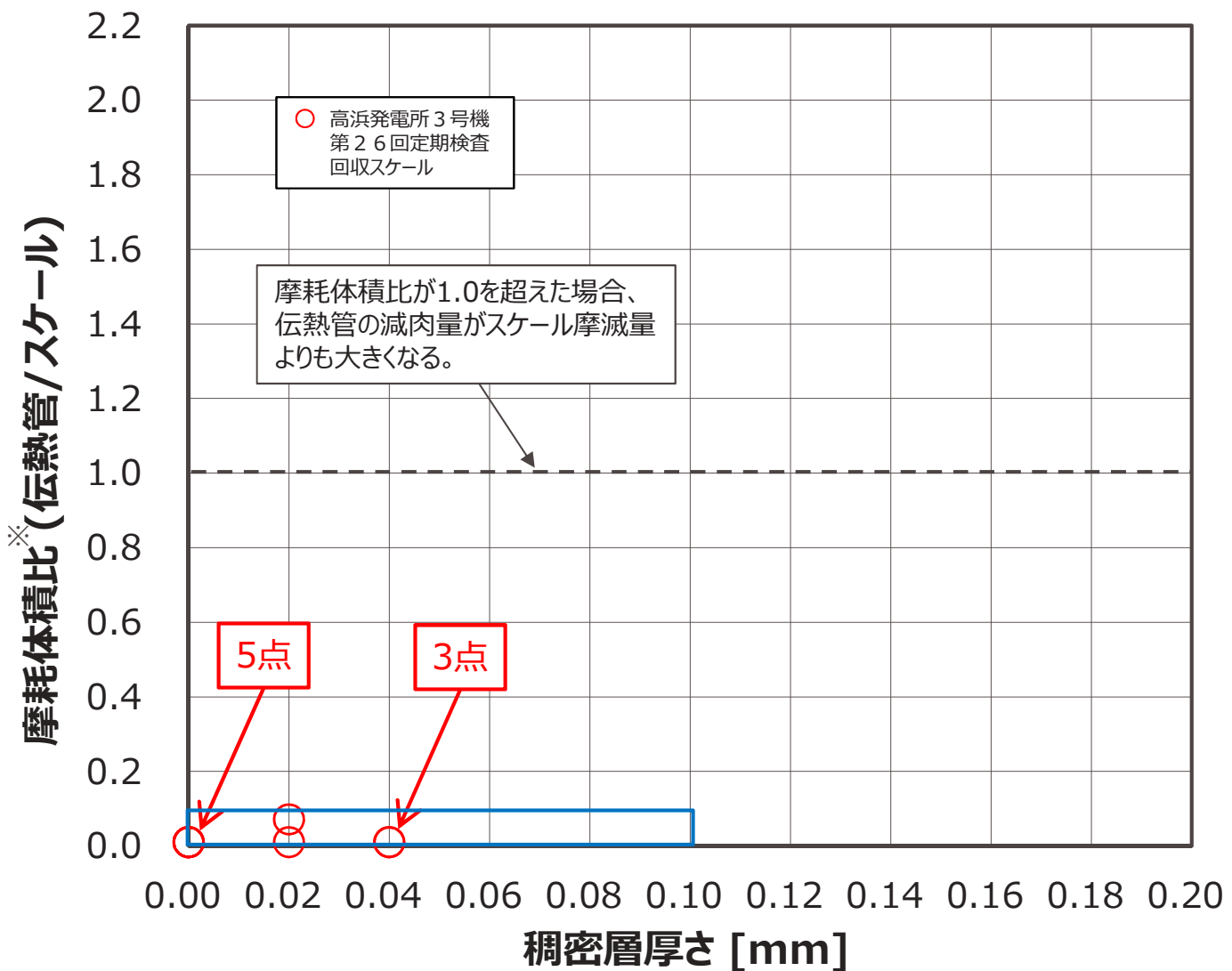
⑥「ランシング装置」による管板の洗浄とスケール等の回収

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）

- S G伝熱管に付着するスケールに対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0.1mm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、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、本事象も踏まえ更なる安定・安全運転に向け長期的な信頼性を確保するという観点から、予防保全対策として高浜発電所3号機は第28回定期検査、高浜発電所4号機は第27回定期検査でのS G取替え（以下、S G R）を計画している。



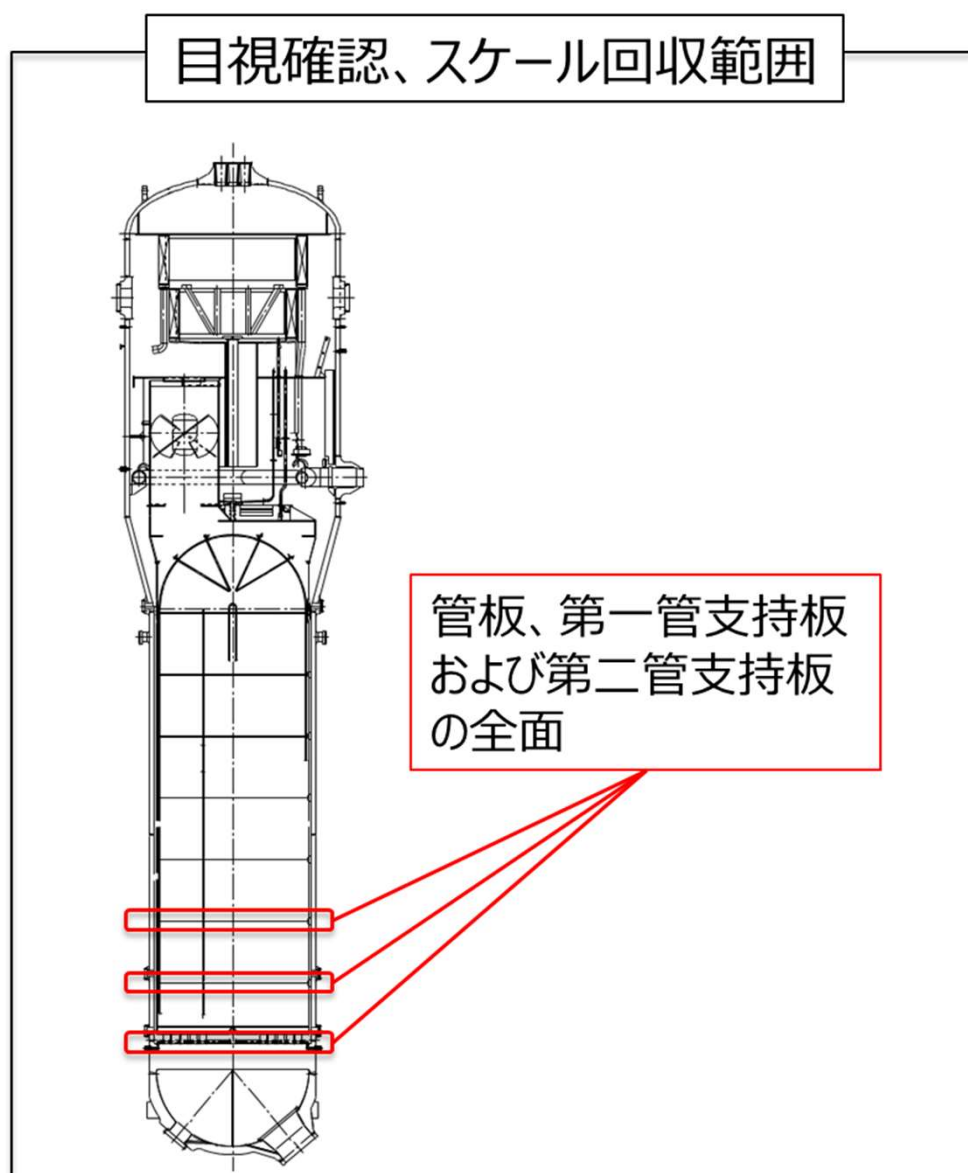
※ 摩耗体積比（伝熱管/スケール）：摩耗試験における伝熱管の減肉量とスケールの摩滅量の体積比

## 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ると考えられるため、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（S G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板厚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30kg／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。

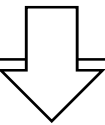
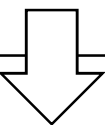
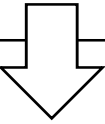
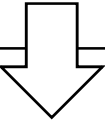
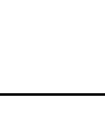
## ＜スケール監視方法＞

プラント		鉄持込み量※	頻度	確認内容	備考
SGR未実施プラント	大飯発電所3号機	1,880kg	2 定期検査毎	稠密層厚さおよ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サイクル以上となるが、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	2,010kg	同上	同上	
SGRプラント	高浜発電所1号機	680kg	—	—	SGR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 定期検査毎	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



## 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
前々回以前 	S G への鉄の持ち込み量を低減  ( B E C 穴閉塞対策 および伝熱管への スケール付着抑制 )	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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ち込み抑制のため E T A 処理を採用</li> <li>・ 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 pH 処理を採用</li> </ul>
前々回 (第24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%
前回 (第25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
今回 (第26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	清掃力を強化した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
今後の対応 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ スケールの性状確認</li> <li>・ スケール影響除去</li> </ul>	<b>今後の S G 保全</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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</li> <li>・ 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、小型高圧洗浄装置による洗浄を実施</li> <li>・ S G 取替え</li> </ul>