

関原発 第546号  
2024年2月22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4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

2024年2月22日

関西電力株式会社

件名	高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について																				
事象発生の日時	2024年1月22日 13時00分 (技術基準に適合していないと判断した日時)																				
事象発生の場所	高浜発電所4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4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12月16日より第25回定期検査中であり、3台ある蒸気発生器(以下「SG」という。)の伝熱管<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2本およびC-SGの伝熱管2本について、管支持板部付近に外面からの減肉とみられる有意な信号指示<sup>*3</sup>が認められた。</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2024年1月22日13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>2024年1月7日～2024年1月22日(定期事業者検査終了日)</p> <p>探傷検査・データ整理期間 2024年1月7日～2024年1月19日</p> <p>解析・評価検査期間 2024年1月20日～2024年1月22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>(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>3,238</td><td>3,245</td><td>3,248</td><td>9,731</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>、4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、いずれも伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。</p> <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、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24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。</p> <p>(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>指示管本数</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td><td>4</td></tr></tbody></table>	SG	A	B	C	合計	検査対象本数	3,238	3,245	3,248	9,731	SG	A	B	C	合計	指示管本数	2	0	2	4
SG	A	B	C	合計																	
検査対象本数	3,238	3,245	3,248	9,731																	
SG	A	B	C	合計																	
指示管本数	2	0	2	4																	

<p>事 象 の 状 況</p>	<p>A-SG  第三管支持板 X50, Y7 : 減肉率 約38%  第六管支持板 X67, Y16 : 減肉率 約30%</p> <p>C-SG  第三管支持板 X37, Y6 : 減肉率 約36%  第六管支持板 X58, Y25 : 減肉率 約61%</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。  *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)。  *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>
<p>事 象 の 原 因</p>	<p>1. 原因調査</p> <p>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) 高浜発電所3号機および4号機におけるSG伝熱管外面損傷事象の経緯</p> <p>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23回、第24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。</p> <p>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*8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。</p> <p>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回および高浜発電所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*9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。</p> <p>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130kg、(4号機)約160kg)できたことを確認した。</p> <p>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号機では1台あたり約1,310kg、高浜発電所4号機では1台あたり約1,320kgであった。</p> <p>また、高浜発電所3号機第26回定期検査にて新たに外面減肉事象が発生した際に、改めて器内のスケールを回収し調査を実施した結果、伝熱管を傷つける可能性のある厚みのある稠密層を有するスケールの存在割合がさらに大きく減少していることを確認した。</p> <p>今回、A-SGおよびC-SG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</p>

EC T波形等の調査に加え、伝熱管表面の外観観察、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。

\*8 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。

\*9 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。

## （2）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擦減肉が発生すると推定される。

#### （a）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。

##### （ア）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。

##### （イ）蒸発残渣

伝熱管の上部では、伝熱管表面と給水の温度差が伝熱管の下部に比べて小さく沸騰現象が顕著であることから、鉄イオンの析出付着よりも、鉄の微粒子が蒸発残渣として伝熱管表面に残留、堆積する現象が主体である。そのため、伝熱管の上部に付着するスケールは、粗密<sup>\*10</sup>な傾向があり、脆く摩擦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>\*10</sup> 密度が比較的低く、粗な状態。

##### 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バンド部、第六から第五管支持板の間、第四から第三管支持板の間、第三から第二管支持板の間、第二から第一管支持板の間）のスケールについて、断面マイクロ観察を実施している。その結果、伝熱管の上部のスケールほど粗密で厚く、伝熱管の下部ほど稠密で薄いことを確認した。

また、2020年に高浜発電所3号機第24回定期検査および高浜発電所4号機第23回定期検査で、伝熱管の上部（第七管支持板上）および伝熱管の下部（第二から第一管支持板の間）からスケールを回収し、性状を確認した結果、伝熱管の上部（第七管支持板上）のスケールは粗密で厚く、伝熱管の下部（第二から第一管支持板の間）では稠密で薄いことを確認した。

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

##### 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。

##### （ア）水処理履歴

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

## 事 象 の 原 因

事 象 の 原 因

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 (All Volatile Treatment) 処理<sup>\*11</sup>(pH 9. 2)、ETA<sup>\*12</sup>処理(pH 9. 4～9. 5)、高ETA処理 (pH 9. 8)、高アンモニア処理 (pH 9. 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>\*11</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>\*12</sup> エタノールアミン。

(イ) 給水中の鉄含有量

上記水処理方法での給水中の鉄含有量は次のとおりである。

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

(ウ) 運転時間

上記水処理方法での運転時間は次のとおりである。

水処理方法	運転時間
AVT処理	約9. 8万時間
ETA処理	約8. 0万時間
高ETA処理	約2. 0万時間
高アンモニア処理	約4. 2万時間

(エ) 鉄の持込み量

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

水処理方法	鉄の持込み量/SG
AVT処理	約1, 680kg
ETA処理	約650kg
高ETA処理	約70kg
高アンモニア処理	約150kg
合計	約2, 550kg

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<sup>\*13</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μm～100μm程度であった。

<sup>\*13</sup> 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

事 象 の 原 因

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。

(b) 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(ア)～(ウ)のとおりであり、スケールはプラント停止時の伝熱管の熱収縮に追従できずにフレーク状(板状)に剥離したものと推定される。

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

(イ) プラント運転中に割れの隙間が新たに生成したスケールで埋まる。

(ウ) 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ニングでのスケール回収量が大きくなる可能性があるため、高浜発電所3号機の長期停止前後の回収量を調査した結果、長期停止前はSG3台から約13kgのスケール等を回収したが、長期停止後の第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。

(c) 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>\*14</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>\*15</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>\*14</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>\*15</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

(a) 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*16 (万時間)	24.2	24.0	18.0	19.2	10.3	10.9	12.5
鉄持込み量 (kg)	2,690	2,550	1,880	2,010	840	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)				

\*16 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

スケール回収量\*17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。

\*17 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)	0.01 未満 (第19回)

(b) 当社プラントとの実機スケール比較

スケールの稠密層厚さ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。

事 象 の 原 因

＜表3：実機スケール観察結果＞

回収場所	高浜発電所4号機 鉄持込み量*18： 2,490kg	大飯発電所4号機 鉄持込み量*18： 1,950kg	高浜発電所2号機 鉄持込み量*18： 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

\*18 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。

(c) 伝熱管の摩耗試験結果の比較

上記の調査結果を踏まえ、当社他プラントの中では比較的稠密層が厚い大飯発電所3号機および4号機で採取したスケールについて摩耗試験を実施した。大飯発電所3号機および4号機のスケールは、試験開始後にスケールが欠損するか、スケールの方が早く摩滅するという結果が得られ、伝熱管とスケールの摩耗体積比\*19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。

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。

\*19 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。

(d) 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。

(3) 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24回定期検査におけるECTデータを再確認した結果、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ンティング\*20による指示ではないと推定した。

\*20 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。

事象の原因



事 象 の 原 因

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、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

第三管支持板低温側下面付近（減肉率：約38%）：

周方向約3mm、軸方向1mm以下（X50, Y7）

第六管支持板高温側下面付近（減肉率：約30%）：

周方向約7mm、軸方向1mm以下（X67, Y16）

C-SG

第三管支持板低温側下面付近（減肉率：約36%）：

周方向約3mm、軸方向1mm以下（X37, Y6）

第六管支持板低温側下面付近（減肉率：約61%）：

周方向約5mm、軸方向1mm以下（X58, Y25）

また、信号指示箇所にスケール等の付着物は認められなかったものの、当該伝熱管周辺の管支持板に接触痕を確認した。

c. 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およびC-SGの管板、第一～第五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およ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。

d. スケールの減肉箇所への到達メカニズムの調査

SG器内調査およびスケール分析の結果、今回の外面減肉はスケールによる摩耗の可能性が高いことから、SG器内の流況について調査を行い、SG下部で剥離したスケールがSG器内で第三および第六管支持板下面へ到達するまでの挙動を推定した。

運転中のSG2次側器内の流況下では上昇流が発生し、流体抗力がスケールの落下力を上回ることが分かっており、スケールは管群内の上昇流に乗って各管支持板フロースロット部もしくは各管支持板側面と管群外筒の間を通過し、減肉箇所へ到達したと考えられる。

なお、薬品洗浄による効果によりBEC穴閉塞状況が改善されたことで、器内上昇流が大きくなり、スケールがより上昇しやすい環境が形成されていたと推定される。

e. 洗浄効果の調査

前回の第24回定期検査起動前に実施した薬品洗浄および小型高圧洗浄装置による洗浄の効果を調査した。

(a) 前回の第24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24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1,320kgであった。

イ. 運転履歴調査

前回の第24回定期検査における薬品洗浄後の今回25サイクル運転期間中（2022年12月～2023年12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。

事 象 の 原 因

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332個のスケールを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行い、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や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24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、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SG下部(第二管支持板以下)から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。また今回第六管支持板下面で減肉が発生したことを踏まえ、SG上部(第四管支持板以上)からも36個のスケールを回収した。

(ア) 断面観察結果

SG下部から回収したスケール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9mm×約7mm)確認した。同様にSG上部から回収した36個のスケールを対象に断面観察を行った結果、稠密層が主体のスケールは確認されなかった。また、第23、24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。

(イ) 摩耗試験結果

SG下部から回収したスケール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23、24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、過去には最大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4号機第24回定期検査における薬品洗浄により鉄分が一定量除去されていること、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。

(b) 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、26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号機第25回定期検査)約130kg、(3号機第26回定期検査)約130kg、(4号機第24回定期検査)約160kg)できたことを確認した。

(4) 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24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。

事 象 の 原 因

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332個のスケールを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さら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、高浜発電所4号機でも高浜発電所3号機と同様に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さら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2,550kgに対し、既に約2,000kg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られる。

c. SG器内状況および伝熱管表面観察結果について

小型カメラを用いて、管板およ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およ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

これまでの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）、さらには、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さら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。

(5) 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

(a) 管支持板との接触

ア. 管支持板ベイ部\*21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。

\*21 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。

#### (b) 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4号機第24回定期検査においても実施していることを確認した。

##### 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およびC-SG器内の管板、流量分配板、第一から第五管支持板の上面の全ての範囲ならびに第三および六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。

#### (c) SG器内発生物との接触

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4号機第22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

##### (a) デンティング

ECT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。

##### (b) 粒界腐食割れ

過去、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4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。

##### (c) ピットティング

過去、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4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

事 象 の 原 因

事象の原因	<p>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、ピッチングの可能性はないと考える。</p> <p>(d) リン酸減肉 過去の2次系水処理において、リン酸を使用していたプラントでリン酸による減肉が発生した実績があるが、高浜発電所4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。</p> <p>(e) 流体振動による疲労 管支持板部の流れによる伝熱管の管支持板部の応力は、疲労限に比べ非常に小さく、疲労損傷は発生しないと考える。</p> <p>(f) エロージョン 当該部流速は約 <span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;"> </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。</p> <p>2. 推定原因 A-SGおよびC-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24回定期検査時の器内清掃や薬品洗浄の後にもSG器内に残存し、プラント運転中に管支持板下面に溜まり、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> <p>3. 伝熱管の健全性 (1) 減肉伝熱管の健全性 減肉した伝熱管の強度、耐震性について以下のように評価した。 a. 強度 「蒸気発生器信頼性実証試験」(財)発電用熱機関協会、昭和50年度～昭和55年度)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て十分に裕度があり、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Ssによる地震力および伝熱管全長モデルから、伝熱管直管部(管支持板部)に作用する力(部材力)を算出し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>
保護装置の種類及び動作状況	該当せず
放射能の影響	なし
被害者	なし
他に及ぼした障害	なし

  : 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。

復旧の日時	未定
再発防止対策	<p>1. 減肉伝熱管の施栓          外面減肉が認められたA-SG伝熱管2本およびC-SG伝熱管2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>(1) 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>(2) 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は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、さらなる安定・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取替を計画している。</p>

高浜発電所 4 号機  
蒸気発生器伝熱管の損傷について

2024年2月

関西電力株式会社

## 1. 件 名

高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について

## 2. 事象発生日

2024年1月22日（技術基準に適合していないと判断した日）

## 3. 事象発生の発電用原子炉施設

原子炉冷却系統施設 一次冷却材の循環設備 蒸気発生器

## 4. 事象発生前の運転状況

第25回定期検査中

## 5. 事象発生の状況

（添付資料－1）

高浜発電所4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12月16日より第25回定期検査中であり、3台ある蒸気発生器（以下「SG」という。）の伝熱管<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2本およびC-SGの伝熱管2本について、管支持板付近に外面からの減肉とみられる有意な信号指示<sup>\*3</sup>が認められた。

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2024年1月22日13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

2024年1月7日～2024年1月22日（定期事業者検査終了日）  
探傷検査・データ整理期間 2024年1月7日～2024年1月19日  
解析・評価検査期間 2024年1月20日～2024年1月22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	3,238	3,245	3,248	9,731

\*<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>、4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、いずれも伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

また、外面からの減肉とみられる有意な信号指示が認められた箇所を色調図表示\*<sup>7</sup>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24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	2	0	2	4

#### A-SG

第三管支持板 X50, Y7 : 減肉率 約38%  
第六管支持板 X67, Y16 : 減肉率 約30%

#### C-SG

第三管支持板 X37, Y6 : 減肉率 約36%  
第六管支持板 X58, Y25 : 減肉率 約61%

\*<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

1月 7日 定期事業者検査開始（探傷検査・データ整理）

1月 22日 定期事業者検査終了

A-SG伝熱管2本（2次側）およびC-SG伝熱管2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  
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）

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）高浜発電所3号機および4号機におけるSG伝熱管外面損傷事象の経緯

（添付資料－6）

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23回、第24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、減肉箇所にスケール\*<sup>8</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回および高浜発電所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>9</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130kg、（4号機）約160kg）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号機では1台あたり約1,310kg、高浜発電所4号機では1台あたり約1,320kgであった。

また、高浜発電所3号機第26回定期検査にて新たに外面減肉事象が発生した際に、改めて器内のスケールを回収し調査を実施した結果、伝熱管を傷つける可能性のある厚みのある稠密層を有するスケールの存在割合がさらに大きく減少していることを確認した。

今回、A-SGおよびC-SG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、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>8</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>9</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。

## （2）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。

#### （a）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 （添付資料ー7）

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。

##### （ア）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。

#### (イ) 蒸発残渣

伝熱管の上部では、伝熱管表面と給水の温度差が伝熱管の下部に比べて小さく沸騰現象が顕著であることから、鉄イオンの析出付着よりも、鉄の微粒子が蒸発残渣として伝熱管表面に残留、堆積する現象が主体である。そのため、伝熱管の上部に付着するスケールは、粗密<sup>\*10</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>\*10</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－ 8)

1996年に高浜発電所3号機第9回定期検査で健全性確認を目的に伝熱管の抜管調査を実施した際、伝熱管各部位(SG上方からUベンド部、第六から第五管支持板の間、第四から第三管支持板の間、第三から第二管支持板の間、第二から第一管支持板の間)のスケールについて、断面マイクロ観察を実施している。その結果、伝熱管の上部のスケールほど粗密で厚く、伝熱管の下部ほど稠密で薄いことを確認した。

また、2020年に高浜発電所3号機第24回定期検査および高浜発電所4号機第23回定期検査で、伝熱管の上部(第七管支持板上)および伝熱管の下部(第二から第一管支持板の間)からスケールを回収し、性状を確認した結果、伝熱管の上部(第七管支持板上)のスケールは粗密で厚く、伝熱管の下部(第二から第一管支持板の間)では稠密で薄いことを確認した。

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

#### 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。

#### (ア) 水処理履歴

(添付資料－ 9)

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 (All Volatile Treatment) 処理<sup>\*11</sup> (pH9.2)、ETA<sup>\*12</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>\*11</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>\*12</sup> エタノールアミン。

#### (イ) 給水中の鉄含有量

上記水処理方法での給水中の鉄含有量は次のとおりである。

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

#### (ウ) 運転時間

上記水処理方法での運転時間は次のとおりである。

水処理方法	運転時間
AVT処理	約9.8万時間
ETA処理	約8.0万時間
高ETA処理	約2.0万時間
高アンモニア処理	約4.2万時間

#### (エ) 鉄の持込み量

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

水処理方法	鉄の持込み量/SG
AVT処理	約1,680kg
ETA処理	約650kg
高ETA処理	約70kg
高アンモニア処理	約150kg
合計	約2,550kg

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-10)

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<sup>\*13</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。

<sup>\*13</sup> 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。

## (b) スケールの剥離 (添付資料-11)

### 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(ア)~(ウ)のとおりであり、スケールはプラント停止時の伝熱管の熱収縮に追従できずにフレーク状(板状)に剥離したものと推定される。

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

(イ) プラント運転中に割れの隙間が新たに生成したスケールで埋まる。

(ウ) 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-12)

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。

(c) スケールによる減肉メカニズム (添付資料-13)

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>\*14</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>\*15</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。

\*14 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。

\*15 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

(a) 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-14)

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>16</sup> (万時間)	24.2	24.0	18.0	19.2	10.3	10.9	12.5
鉄持込み量 (kg)	2,690	2,550	1,880	2,010	840	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>16</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-15)

スケール回収量\*<sup>17</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>17</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 (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)	0.01 未満 (第19回)



(b) 当社プラントとの実機スケール比較 (添付資料-16)

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*18： 2, 490kg	大飯発電所4号機 鉄持込み量*18： 1, 950kg	高浜発電所2号機 鉄持込み量*18： 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

\*18 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。

(c) 伝熱管の摩耗試験結果の比較 (添付資料-17、18)

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\*19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。

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。

\*19 摩耗試験における伝熱管の減肉量とスケールの摩減量の体積比。

(d) スケールにより減肉した国内外事例調査 (添付資料-19)

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-20)

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。

(3) 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、21、22)

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24回定期検査におけるECTデータを再確認した結果、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\*20による指示ではないと推定した。

\*20 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-23)

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

第三管支持板低温側下面付近（減肉率：約38%）：

周方向約3mm、軸方向1mm以下（X50, Y7）

第六管支持板高温側下面付近（減肉率：約30%）：

周方向約7mm、軸方向1mm以下（X67, Y16）

#### C-SG

第三管支持板低温側下面付近（減肉率：約36%）：

周方向約3mm、軸方向1mm以下（X37, Y6）

第六管支持板低温側下面付近（減肉率：約61%）：

周方向約5mm、軸方向1mm以下（X58, Y25）

また、信号指示箇所にはスケール等の付着物は認められなかったものの、当該伝熱管周辺の管支持板に接触痕を確認した。

#### c. SG器内のスケールの残存状況等の調査（添付資料-24、25）

小型カメラを用いて、A-SGおよびC-SGの管板、第一～第五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およ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。

#### d. スケールの減肉箇所への到達メカニズムの調査（添付資料-26）

SG器内調査およびスケール分析の結果、今回の外面減肉はスケールによる摩耗の可能性が高いことから、SG器内の流況について調査を行い、SG下部で剥離したスケールがSG器内で第三および第六管支持板下面へ到達するまでの挙動を推定した。

運転中のSG2次側器内の流況下では上昇流が発生し、流体抗力がスケールの落下力を上回ることが分かっており、スケールは管群内の上昇流に乗って各管支持板フローロット部もしくは各管支持板側面と管群外筒の間を通過し、減肉箇所へ到達したと考えられる。

なお、薬品洗浄による効果によりBEC穴閉塞状況が改善されたことで、器内上昇流が大きくなり、スケールがより上昇しやすい環境が形成されていたと推定される。

e. 洗淨効果の調査 (添付資料-27~29)

前回の第24回定期検査起動前に実施した薬品洗淨および小型高压洗淨装置による洗淨の効果を調査した。

(a) 前回の第24回定期検査における薬品洗淨効果の調査

ア. 薬品洗淨効果

前回の第24回定期検査における薬品洗淨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1,320kgであった。

イ. 運転履歴調査

前回の第24回定期検査における薬品洗淨後の今回25サイクル運転期間中(2022年12月~2023年12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、薬品洗淨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332個のスケールを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行い、薬品洗淨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や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24回定期検査時の薬品洗淨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、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SG下部(第二管支持板以下)から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。また今回第六管支持板下面で減肉が発生したことを踏まえ、SG上部(第四管支持板以上)からも36個のスケールを回収した。

(ア) 断面観察結果

SG下部から回収したスケール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9mm×約7mm)確認した。同様にSG上部から回収した36個のスケールを対象に断面観察を行った結果、稠密層が主体のスケールは確認されなかった。また、第23、24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。

#### (イ) 摩耗試験結果

SG下部から回収したスケール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23、24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、過去には最大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4号機第24回定期検査における薬品洗浄により鉄分が一定量除去されていること、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。

#### (b) 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、26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号機第25回定期検査)約130kg、(3号機第26回定期検査)約130kg、(4号機第24回定期検査)約160kg)できたことを確認した。

#### (4) 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24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332個のスケールを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さら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、高浜発電所4号機でも高浜発電所3号機と同様に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さら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2,550kgに対し、既に約2,000kg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器内状況および伝熱管表面観察結果について

小型カメラを用いて、管板およ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およ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

これまでの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)、さらには、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さら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。

#### (5) 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

##### (a) 管支持板との接触 (添付資料-30)

##### ア. 管支持板ベイ部<sup>\*21</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>\*21</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。

##### (b) 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-31)

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4号機第24回定期検査においても実施していることを確認した。

#### 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およびC-SG器内の管板、流量分配板、第一から第五管支持板の上面の全ての範囲ならびに第三および六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。

#### (c) SG器内発生物との接触

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4号機第22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

##### (a) 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。

##### (b) 粒界腐食割れ

(添付資料-32)

過去、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4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。

(c) ピッチング (添付資料-33)

過去、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チングが発生した実績があるが、高浜発電所4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、ピッチングの可能性はないと考える。

(d) リン酸減肉 (添付資料-34)

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4号機のようなアンモニアとヒドラジンによるAVT処理を実施しているプラントでは発生していないことから発生の可能性はないと考える。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉であると考えことから、リン酸減肉の可能性はないと考える。

(e) 流体振動による疲労 (添付資料-35)

管支持板部の流れによる伝熱管の管支持板部の応力は、疲労限に比べ非常に小さく、疲労損傷は発生しないと考える。

(f) エロージョン (添付資料-36)

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-37)

A-SGおよびC-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24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擦

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

減肉が発生したと推定した。

## 1 1. 伝熱管の健全性

### (1) 減肉伝熱管の健全性 (添付資料－38)

減肉した伝熱管の強度、耐震性について以下のように評価した。

#### a. 強度

「蒸気発生器信頼性実証試験」((財)発電用熱機関協会、昭和50年度～昭和55年度)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て十分に裕度があり、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－39)

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

## 1 2. 対 策 (添付資料－40～45)

### (1) 減肉伝熱管の施栓

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

### (2) 小型高圧洗浄装置による洗浄

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

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。

### (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、さらなる安定・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取替を計画している。

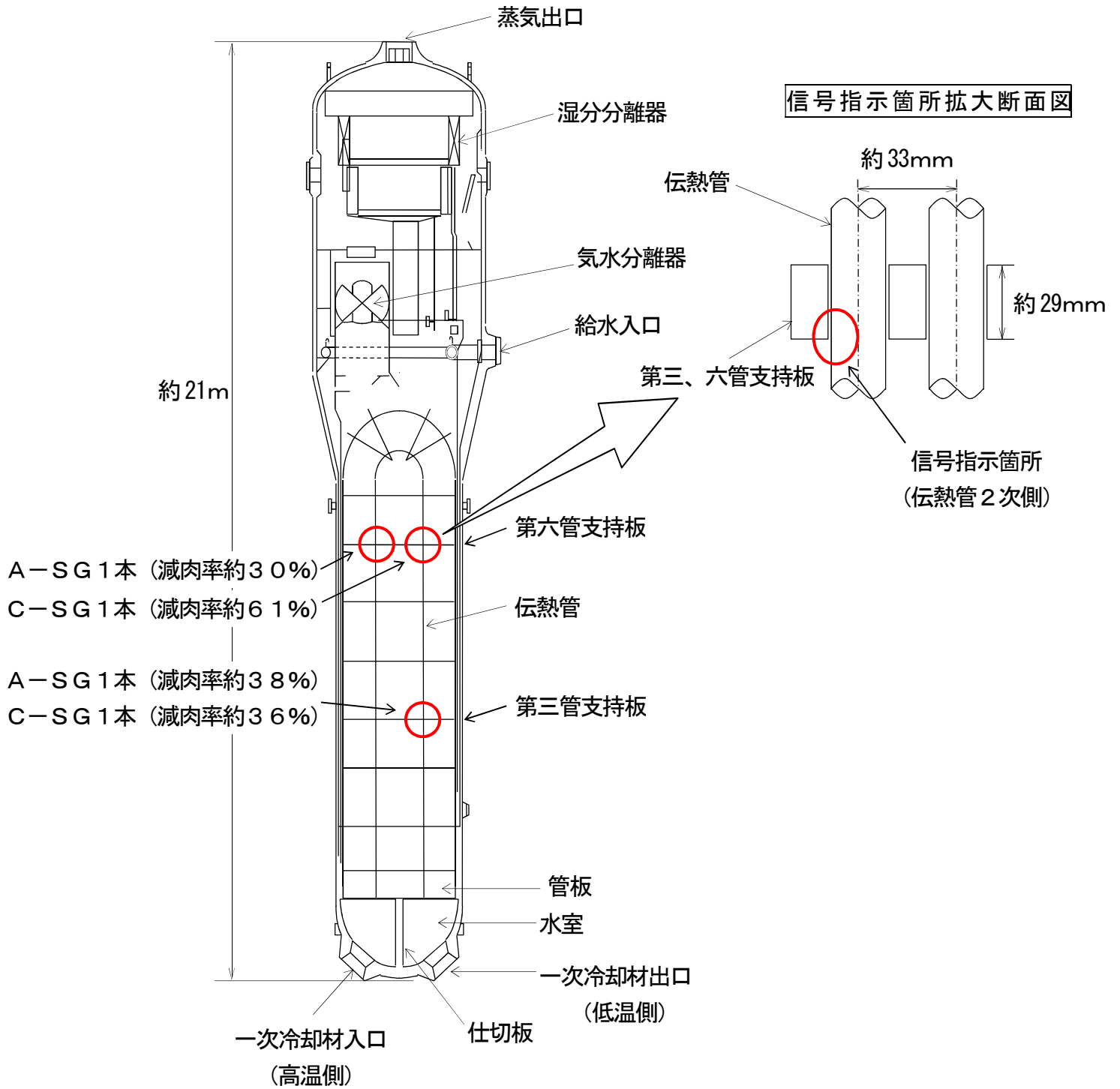
以上

## 添 付 資 料

1. SG伝熱管信号指示箇所概要図
2. SG伝熱管ECT結果一覧
3. SG伝熱管ECT結果
4. SG伝熱管ECT信号指示位置図
5. 要因分析図
6. 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
7. スケール生成メカニズム
8. スケール性状に関する過去の知見
9. 2次系水処理と水化学管理の変遷
10. プラント性能指標の推移
11. スケール剥離メカニズムイメージ
12. 長期停止影響に係る考察
13. 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)
14. 鉄持込み量比較
15. 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
16. 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
17. 当社他プラントスケール摩耗試験結果
18. スケール性状による伝熱管減肉影響
19. 海外のSGの運転履歴等調査結果
20. 薬品洗浄実施に関する検討について
21. ECTの位相評価
22. スケール剥離による減肉信号への影響
23. SG器内点検結果
24. SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査
25. SG器内の伝熱管表面の観察結果
26. スケールの2次側器内挙動の推定
27. 伝熱管とスケールの摩耗試験方法について
28. 回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果
29. 前回の第24回定期検査における薬品洗浄の実施結果
30. 管支持板との接触による摩耗減肉の評価
31. 異物混入対策について
32. 粒界腐食割れに関する検討結果
33. ピッチェングに関する検討結果
34. リン酸減肉に関する検討結果
35. 流体振動による疲労評価
36. エロージョンに関する検討結果

- 37. SG点検スケジュール
- 38. 減肉した伝熱管の評価
- 39. 隣接伝熱管の健全性
- 40. SG伝熱管信号指示箇所補修概要図
- 41. 高浜発電所4号機 SG伝熱管の補修来歴
- 42. 減肉により施栓した伝熱管が隣接伝熱管へ及ぼす影響
- 43. 小型高圧洗浄装置による洗浄の強化について
- 44. スケールに対する保全指標について
- 45. 高浜発電所4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

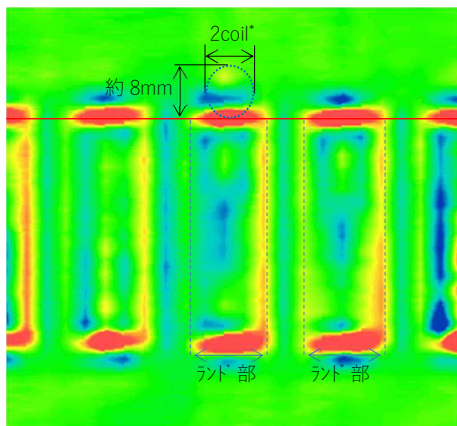


## SG伝熱管ECT結果一覧

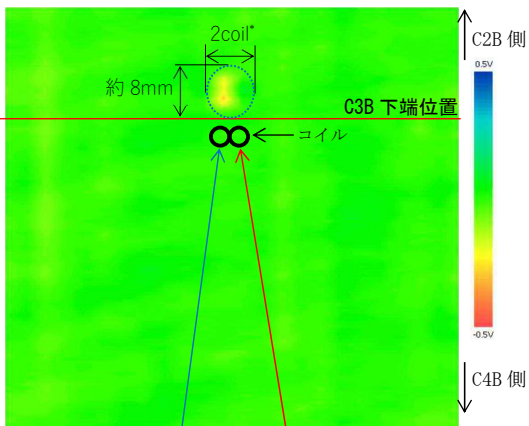
	A-SG	B-SG	C-SG	合計
設備本数	3,382	3,382	3,382	10,146
既施栓本数 (応力腐食割れによる施栓本数※)	144 (8)	137 (3)	134 (13)	415 (24)
検査対象本数	3,238	3,245	3,248	9,731
指示管本数	2	0	2	4
結果	管支持板部付近において、A-SG 2本およびC-SG 2本に外面からの減肉とみられる有意な信号指示が認められた。			
備考				

※既施栓本数の内数を示す。

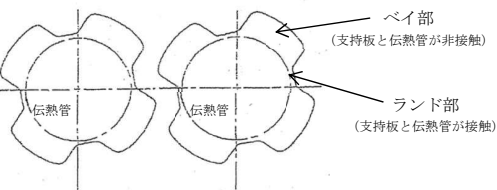
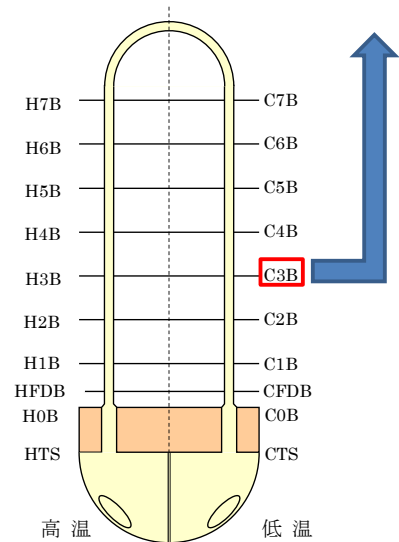
原信号 (100kHz)



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



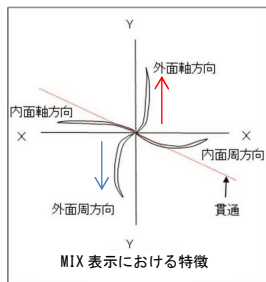
【A-SG X50-Y7 リサージ波形】

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

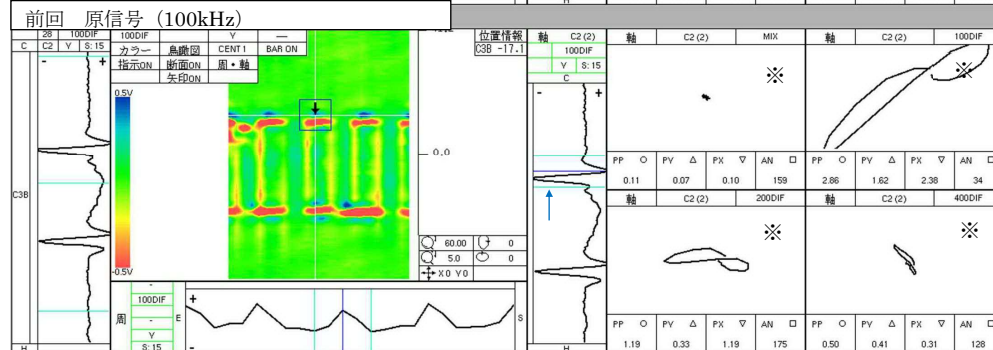
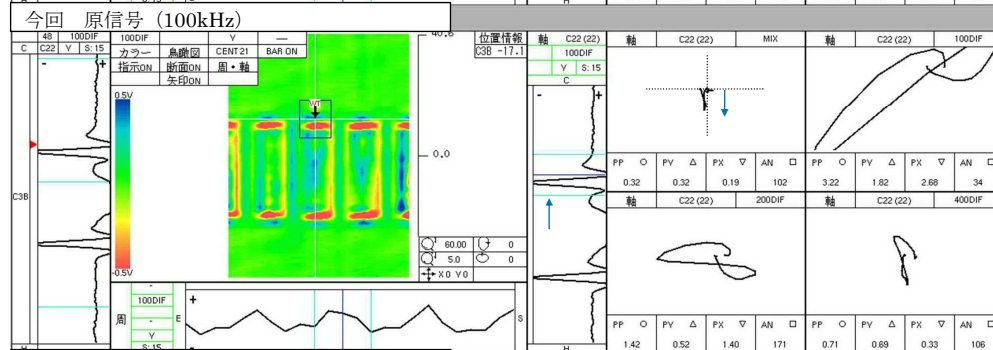
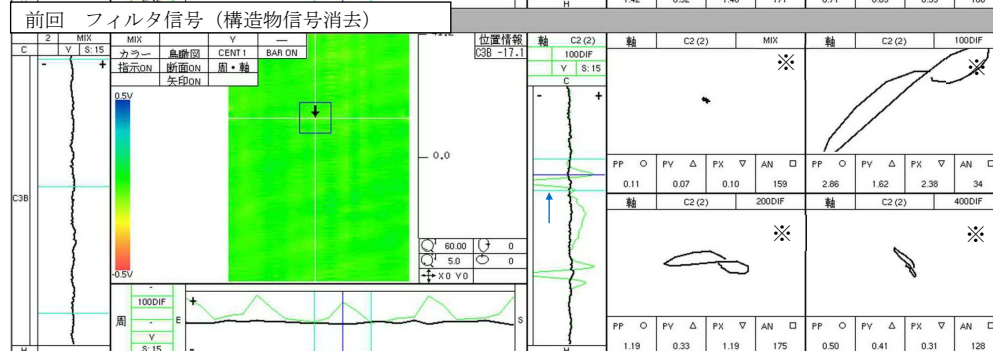
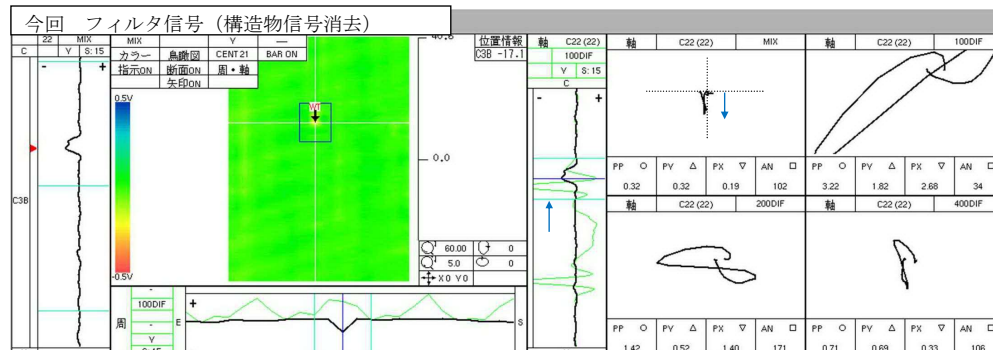
- ・位相角評価から、外面指示の特徴を持っている。
- ・指示は複数のコイルで検出されており、指示の中心部のコイルは周方向成分、端部のコイルでは軸方向成分の特徴を持っている。

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



信号評価

A-SG X50 Y7 部位 : C3B (深さ : 約 38%)

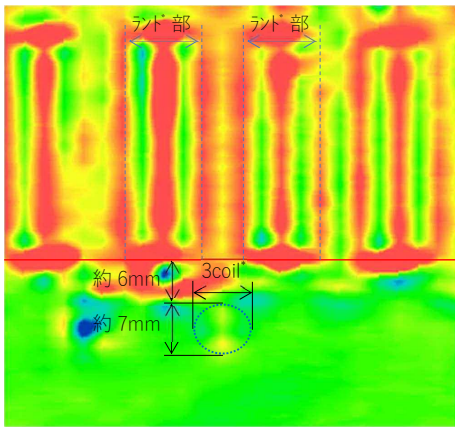


前今比較

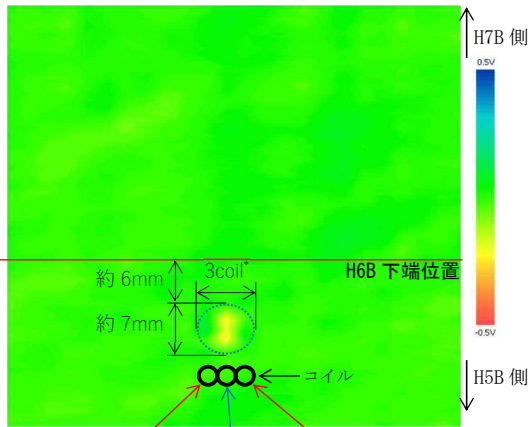
※特異な信号がないため任意の位置で表示。



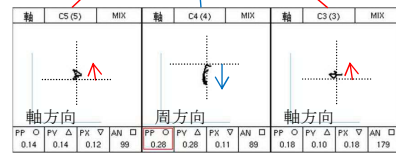
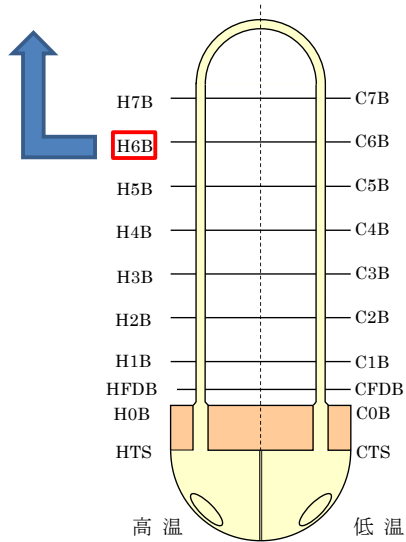
原信号 (100kHz)



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

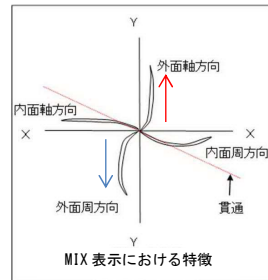


【A-SG X67-Y16 リサージュ波形】

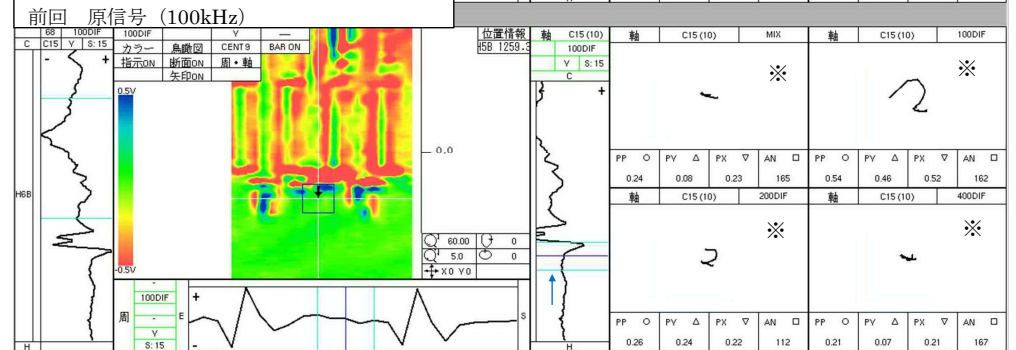
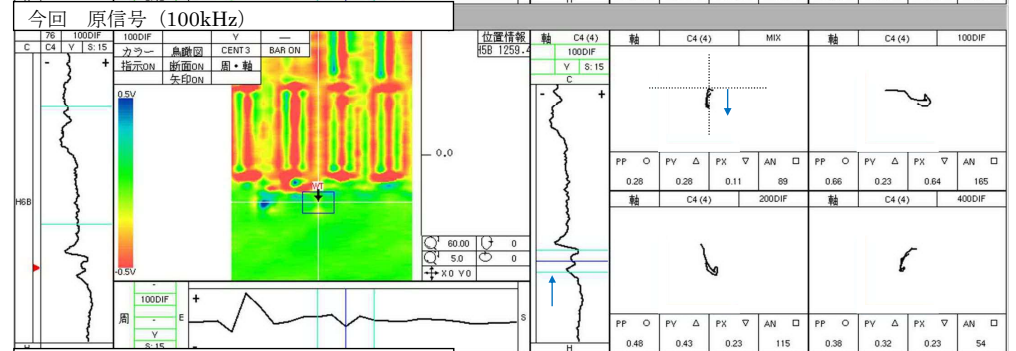
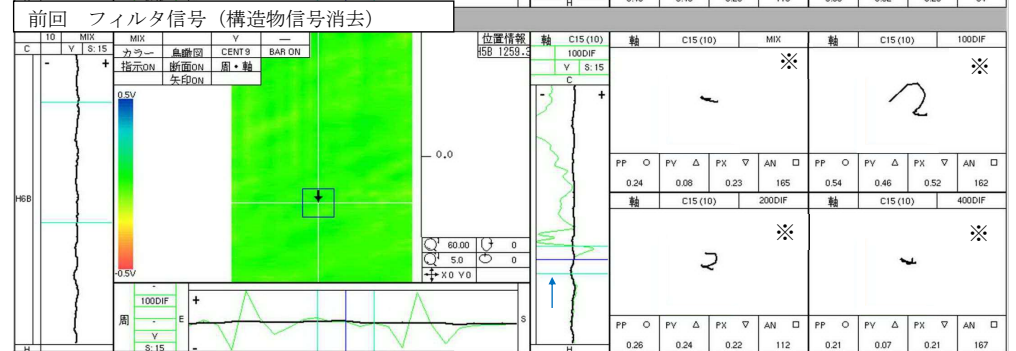
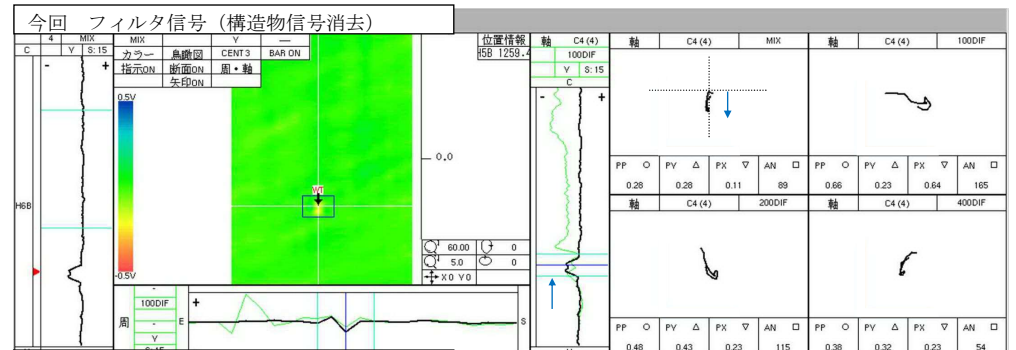
きざり端部の軸方向成分(赤色矢印)を検出  
きざり中心部の周方向成分(青色矢印)を検出

波形評価

- ・位相角評価から、外面指示の特徴を持っている。
  - ・指示は複数のコイルで検出されており、指示の中心部のコイルは周方向成分、両端部のコイルでは軸方向成分の特徴を持っている。
- 上記の通り軸方向成分及び周方向成分の両方の成分が読み取れるため、広がりを持つ減肉と評価する。(下図参照)



信号評価

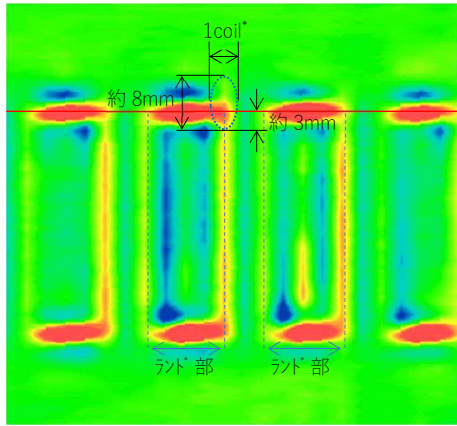


前今比較

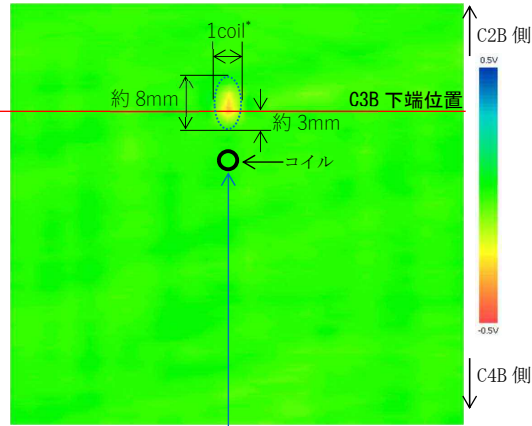
※特異な信号がないため任意の位置で表示。

A-SG X67 Y16 部位 : H6B (深さ : 約 30%)

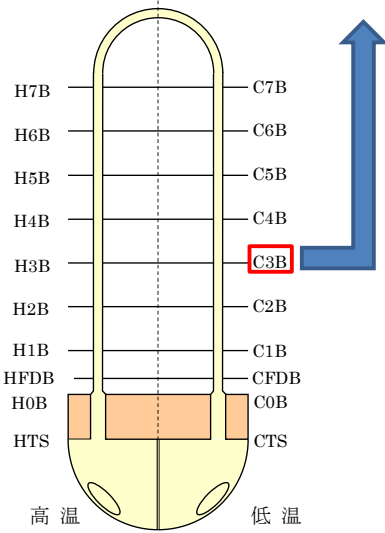
原信号 (100kHz)



フィルタ信号 (構造物信号消去)



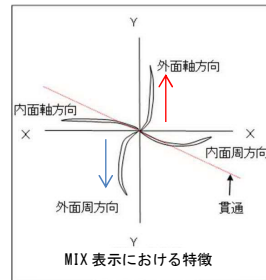
\*1coil : 約 3mm ※内側から見たイメージ



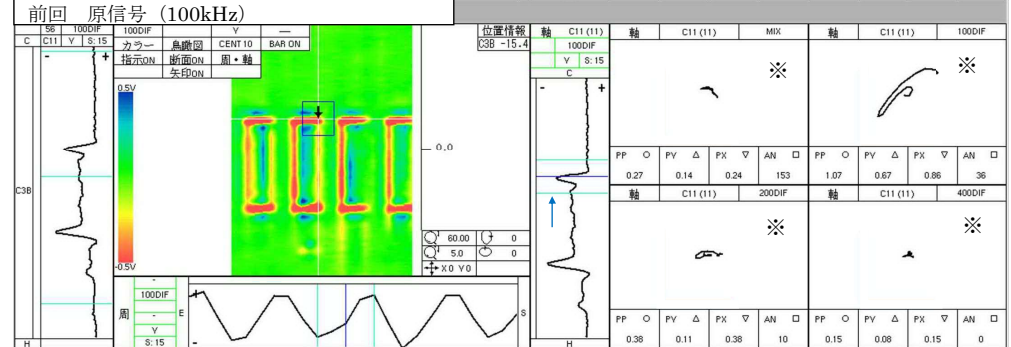
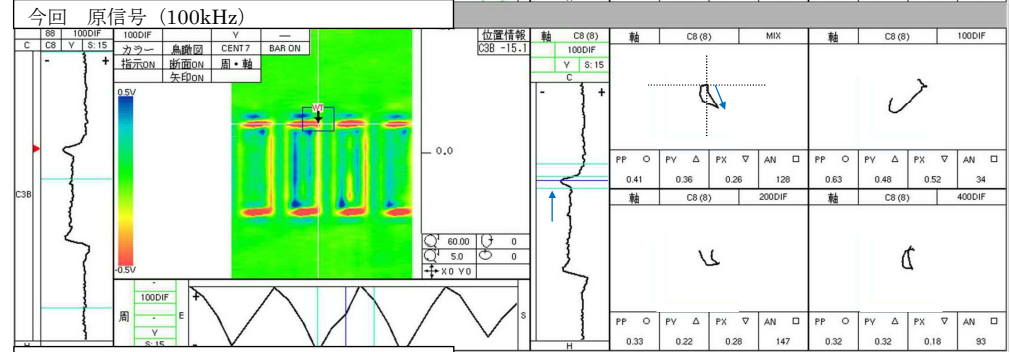
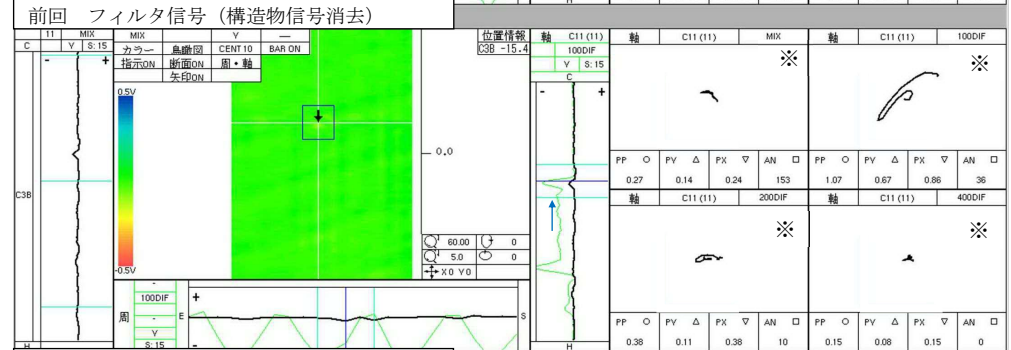
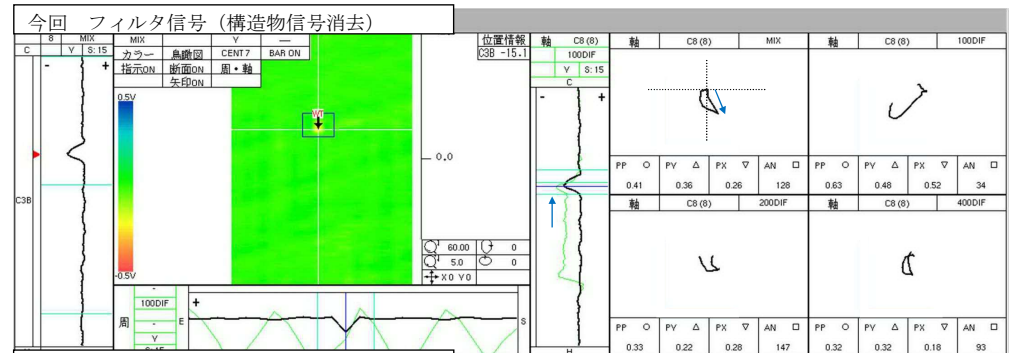
【C-SG X37-Y6 リサージュ波形】  
きざ中心部の周方向成分(青色矢印)を検出

波形評価

- ・位相角評価から、外面指示の特徴を持っている。
  - ・指示は単体のコイルで検出されており、周方向成分の特徴を持っている。
- 上記の通り周方向成分の成分が読み取れるため、周方向減肉と評価する。(下図参照)



信号評価

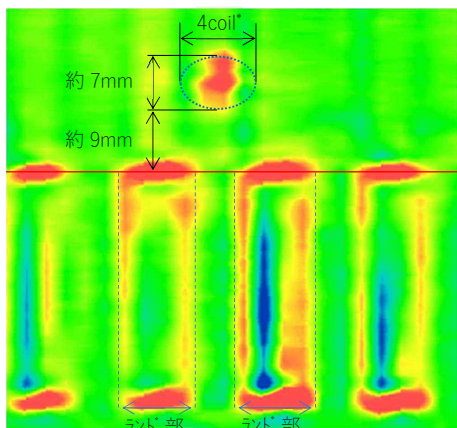


前今比較

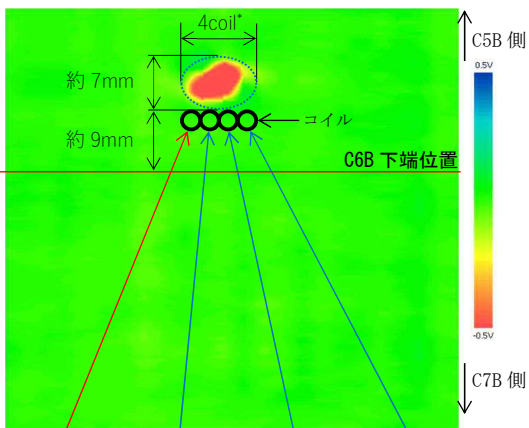
※特異な信号がないため任意の位置で表示。

C-SG X37 Y6 部位 : C3B (深さ : 約 36%)

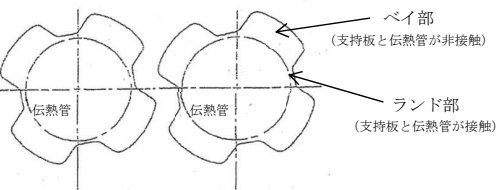
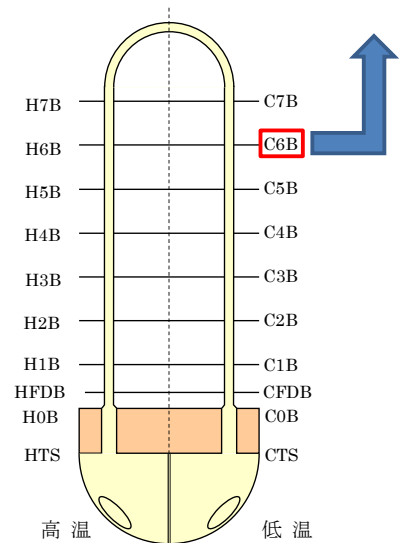
原信号 (100kHz)



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



軸	C11 (11)	MIX	軸	C10 (10)	MIX	軸	C9 (9)	MIX	軸	C8 (8)	MIX	
軸方向	PP 0.18	PV 0.18	PX 0.16	AN 0.155	PP 1.22	PV 1.13	PX 0.50	AN 1.13	PP 1.57	PV 1.47	PX 0.71	AN 1.16
周方向												

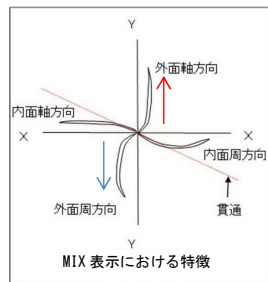
【C-SG X58-Y25 リサージ波形】

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

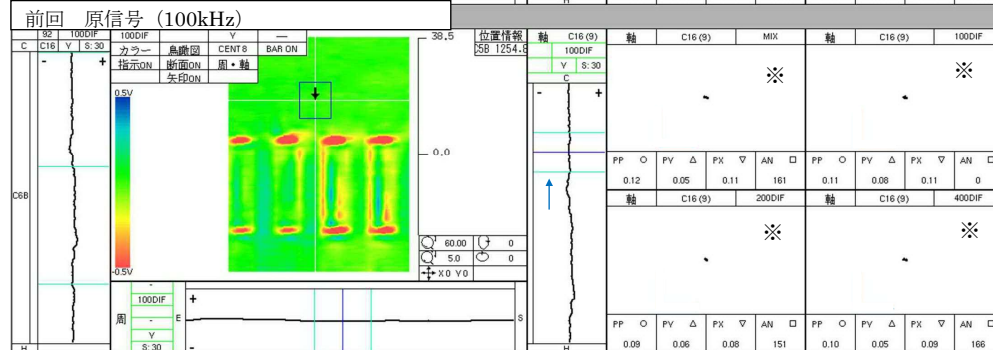
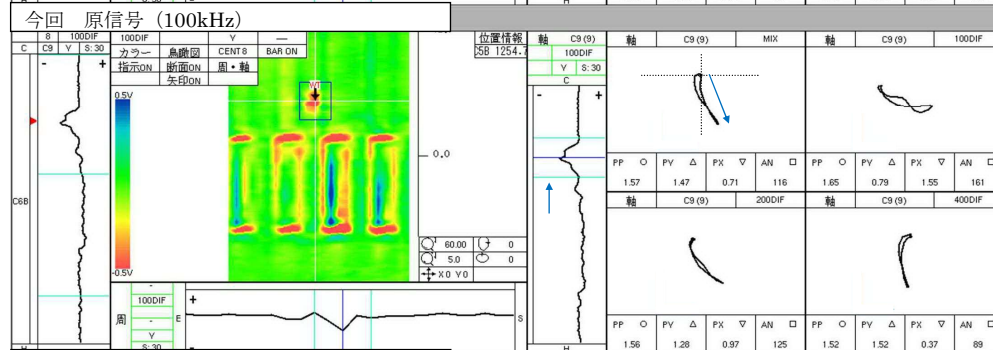
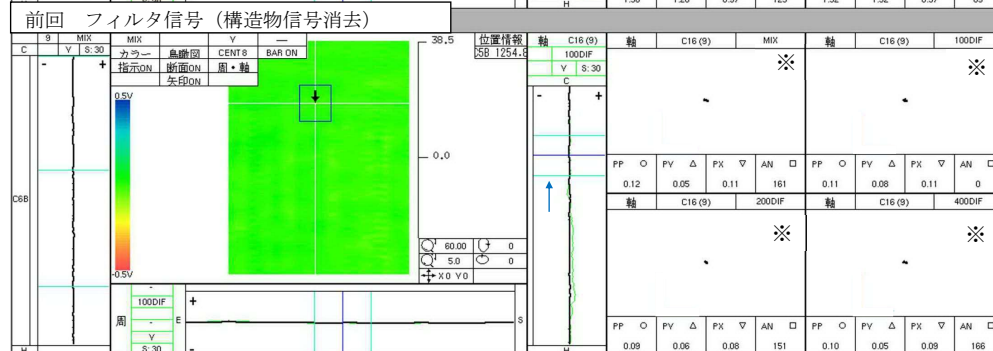
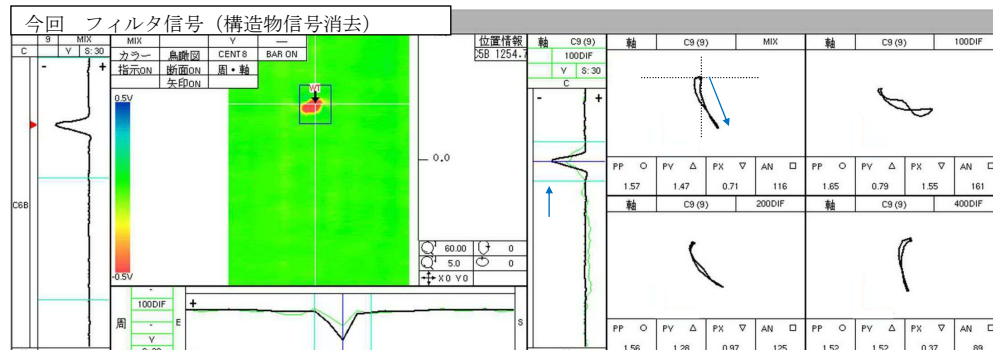
波形評価

- ・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。

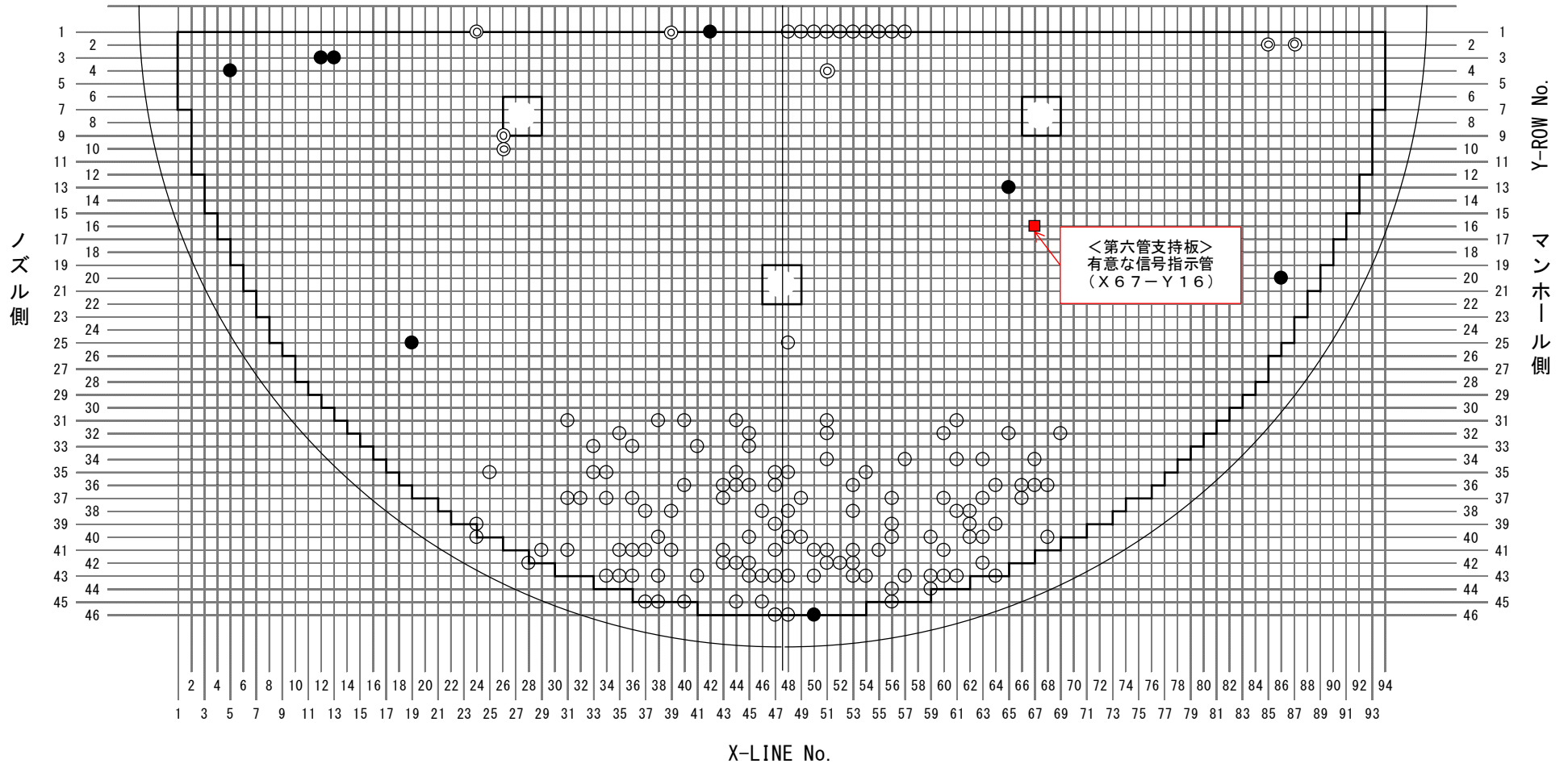
C-SG X58 Y25 部位 : C6B (深さ : 約 61%)

# SG伝熱管ECT信号指示位置図

## A-SG (高温側)

- : 今回減肉指示が認められた位置 (1本)
- ◎: 既施栓管 (外面減肉) (7本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (8本)
- : 既施栓管 (上記以外) (129本)

本図はSG上部から見た位置を示す

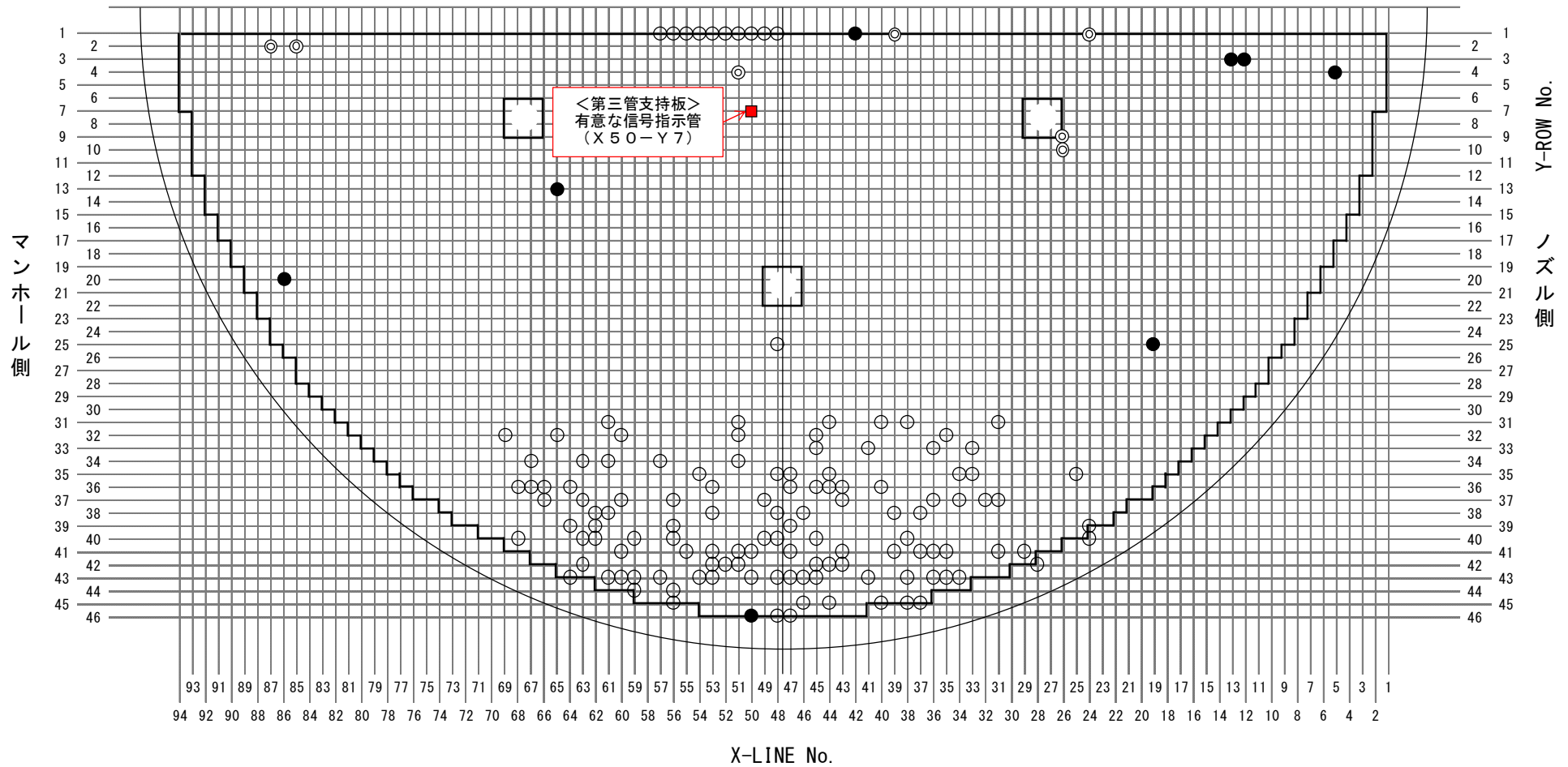


# SG伝熱管ECT信号指示位置図

## A-SG (低温側)

- : 今回減肉指示が認められた位置 (1本)
- ◎: 既施栓管 (外面減肉) (7本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (8本)
- : 既施栓管 (上記以外) (129本)

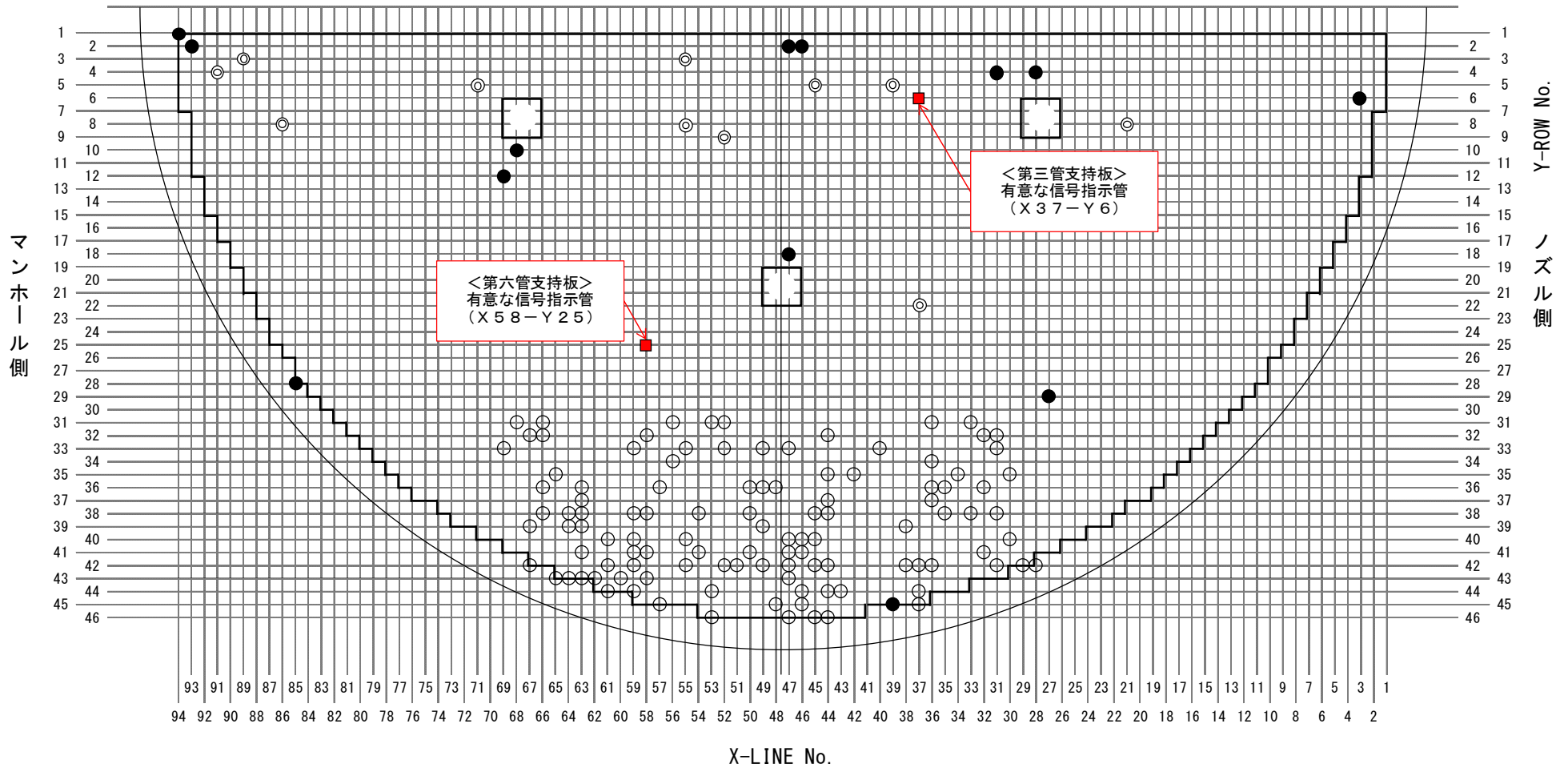
本図はSG上部から見た位置を示す



# SG伝熱管ECT信号指示位置図 C-SG (低温側)

- :今回減肉指示が認められた位置 (2本)
- ◎:既施栓管 (外面減肉) (11本)
- :既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (13本)
- :既施栓管 (上記以外) (110本)

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			
1次側からの損傷	1次側からの損傷	1次側からの損傷	ECT信号	ECTの信号指示により、伝熱管内面(1次側)にきずがないことを確認した。	×		
			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。	×	
				過去の点検調査	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4号機前回(第24回)定期検査においても実施していることを確認した。	×	
			SG器外流入物との接触	SG器内点検(目視点検)	AおよびC-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およびC-SGの減肉信号を確認した伝熱管について小型カメラにて目視点検を実施した結果、信号指示箇所スケール等の付着物は認められなかったものの、当該伝熱管周辺の管支持板に接触痕を確認した。AおよびC-SG器内の管板、流量分配板、第一から第五管支持板の上面の全ての範囲ならびに第三、六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ナーの開放点検や弁、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	内部品が脱落して接触	設計評価	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。	×
					SG器内点検(目視点検)	AおよびC-SG器内の管板、流量分配板、第一から第五管支持板の上面の全ての範囲ならびに第三および六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器内発生物との接触	内部品が脱落して接触	スケールによる損傷	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24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9mm×約7mm)確認した。また、第23、24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滅量以上のスケールは確認されなかった。また、第23、24回定期検査時に回収したスケールと摩滅試験の結果を比較したところ、摩滅体積比が減少していることを確認した。	○
					スケールによる損傷	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24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9mm×約7mm)確認した。また、第23、24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滅量以上のスケールは確認されなかった。また、第23、24回定期検査時に回収したスケールと摩滅試験の結果を比較したところ、摩滅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	デンティング	ECT信号	ECTの信号指示を確認した結果、デンティングではないと考える。*	×
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4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。*		×			
ピitting	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化性雰囲気を経験したプラントで、ピittingが発生した実績があるが、高浜発電所4号機のような塩素濃度が十分低く管理され、かつ、アンモニアとヒドラジンによるAVT処理を実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考える。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉であると考えことから、ピittingの可能性はないと考える。*		×			
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4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。*		×			
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[ ]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。*		×			
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。	×	

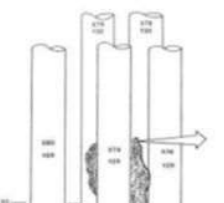
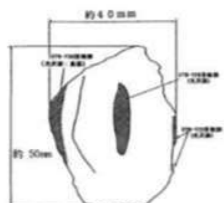
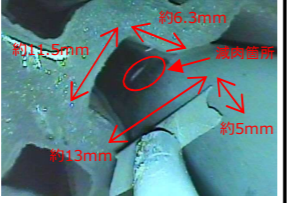
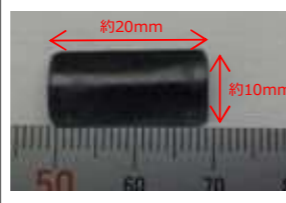
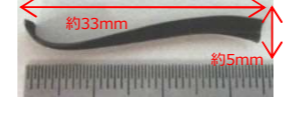
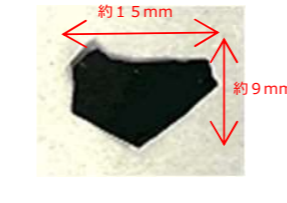
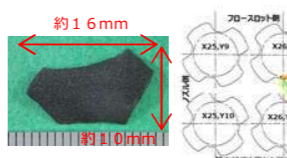
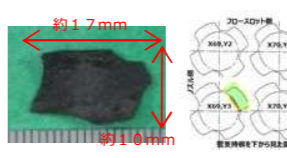

\*:きずの形状からも本要因でない判断できる。

○: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。

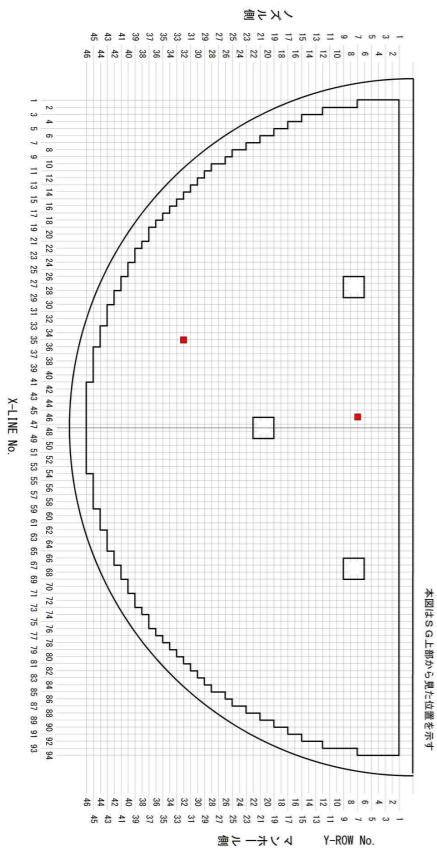
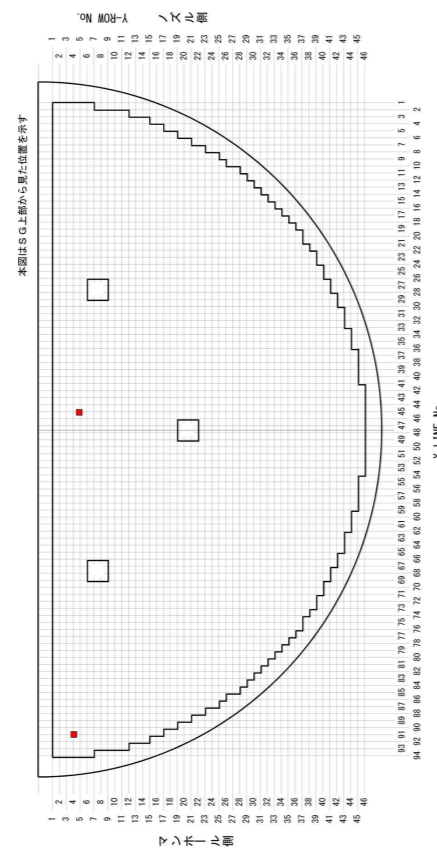
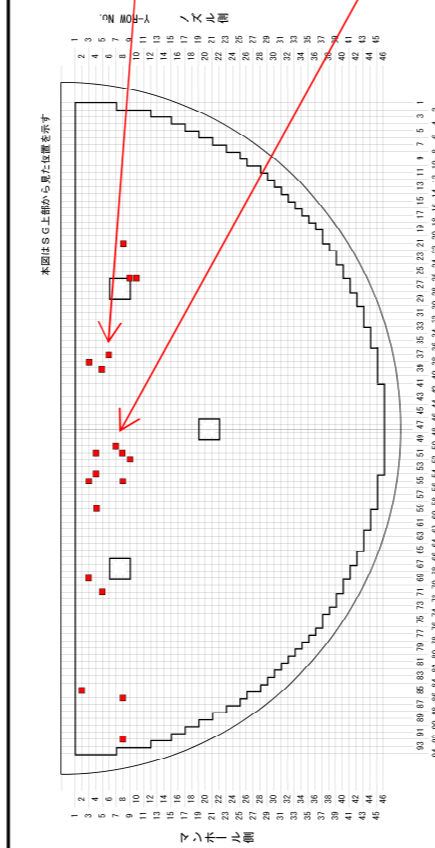
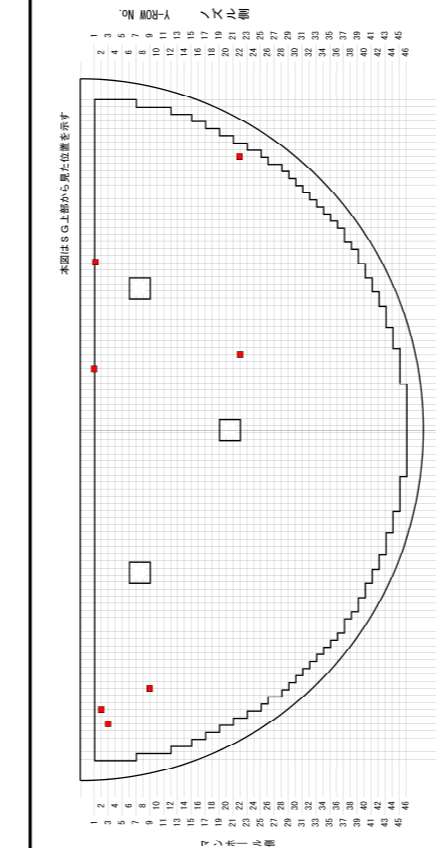
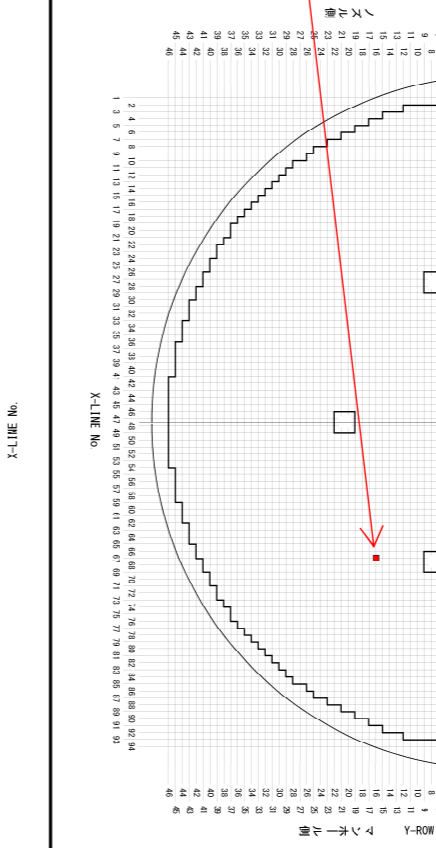
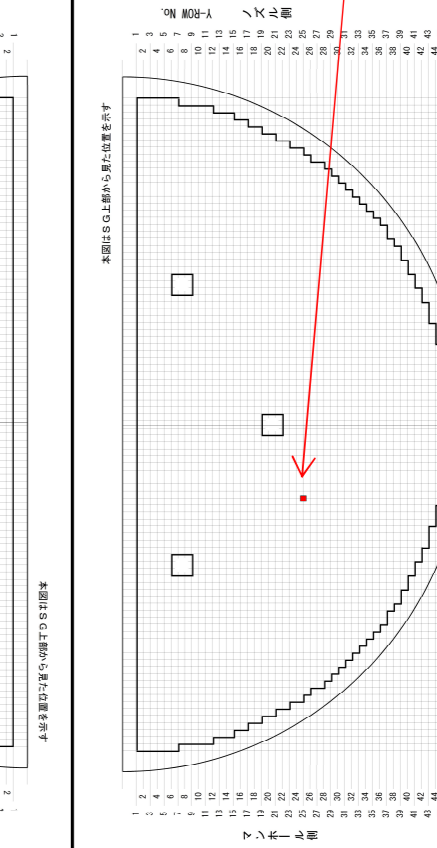
# 高浜発電所3号機および4号機におけるSG伝熱管外面の損傷事象の経緯

	～2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年
3号機 定期検査	第21回	第22回	第23回	第24回	第25回	第26回	第27回	第28回	第29回
4号機 定期検査	第20回	第21回	第22回	第23回	第24回	第25回	第26回	第27回	第28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)	高浜発電所3号機 第26回定期検査 (2023.9.18～ 2023.12.25)
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%)	A-SG : 1本 【第二管支持板】 (最大減肉率:約63%)
推定 原因	<ul style="list-style-type: none"> <li>溶接作業時に発生した2次生成物(ノロ)が主給水管から流入したものと推定</li> <li>⇒異物による減肉と推定</li> </ul>   確認された異物	<ul style="list-style-type: none"> <li>減肉指示のあった箇所付近にスケールを確認</li> <li>スケールの回収を試みたものの破損</li> <li>⇒スケール以外の異物による減肉と推定</li> </ul>  確認されたスケール	<ul style="list-style-type: none"> <li>きず近傍にスケールは確認されず</li> <li>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</li> <li>⇒異物による減肉であり、異物は流出したものと推定</li> </ul>  確認された異物(ステンレス薄片)	<ul style="list-style-type: none"> <li>きず近傍にスケールは確認されず</li> <li>AおよびC-SG器内に異物(ガスケットフープ材)を確認</li> <li>⇒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</li> </ul>  確認された異物(ガスケットフープ材)	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>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</li> <li>⇒スケールによる減肉と推定</li> </ul>  確認されたスケール	<ul style="list-style-type: none"> <li>きず近傍にスケールは確認されず</li> <li>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</li> <li>⇒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</li> </ul>  A-SGから回収したスケール	<ul style="list-style-type: none"> <li>きず近傍にスケールは確認されず</li> <li>近傍の管支持板上から、摩耗痕のあるスケールを回収</li> <li>⇒スケールによる減肉と推定</li> </ul>  B-SGから回収したスケール	<ul style="list-style-type: none"> <li>減肉指示のあった伝熱管の減肉箇所にスケールを確認</li> <li>⇒スケールによる減肉と推定</li> </ul>  確認されたスケール



## 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)

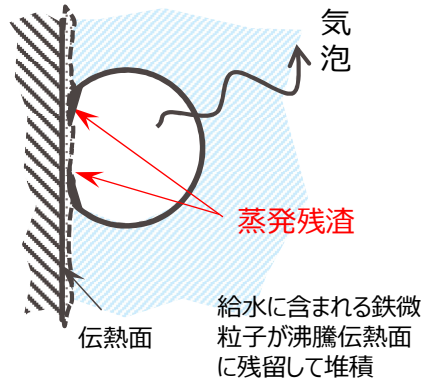
第二管支持板下面		第三管支持板下面	第四管支持板下面	第六管支持板下面	
高温側	低温側	低温側	低温側	高温側	低温側
 <p style="text-align: center;">最大減肉率：63% 発生本数：2本</p>	 <p style="text-align: center;">最大減肉率：63% 発生本数：2本</p>	<div style="border: 1px solid red; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">今回発生箇所 (X37、Y6)</div> <div style="border: 1px solid red; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">今回発生箇所 (X50、Y7)</div>  <p style="text-align: center;">最大減肉率：61% 発生本数：19本</p>	 <p style="text-align: center;">最大減肉率：57% 発生本数：7本</p>	<div style="border: 1px solid red; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">今回発生箇所 (X67、Y16)</div>  <p style="text-align: center;">最大減肉率：30% 発生本数：1本</p>	<div style="border: 1px solid red; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">今回発生箇所 (X58、Y25)</div>  <p style="text-align: center;">最大減肉率：61% 発生本数：1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。

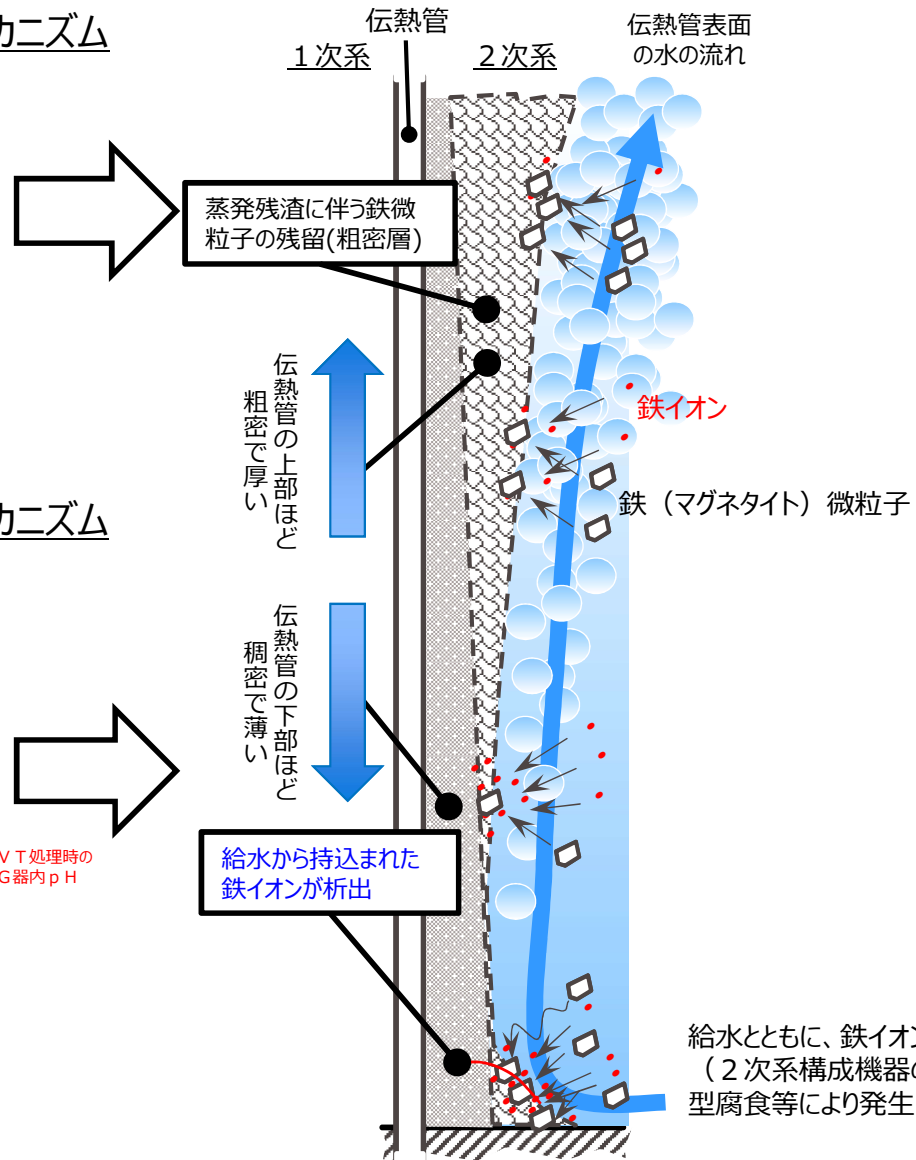
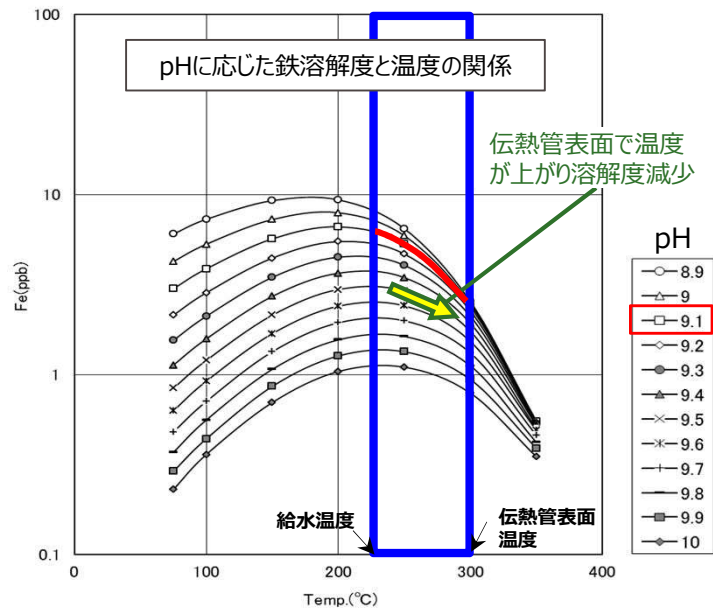
# スケール生成メカニズム

(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

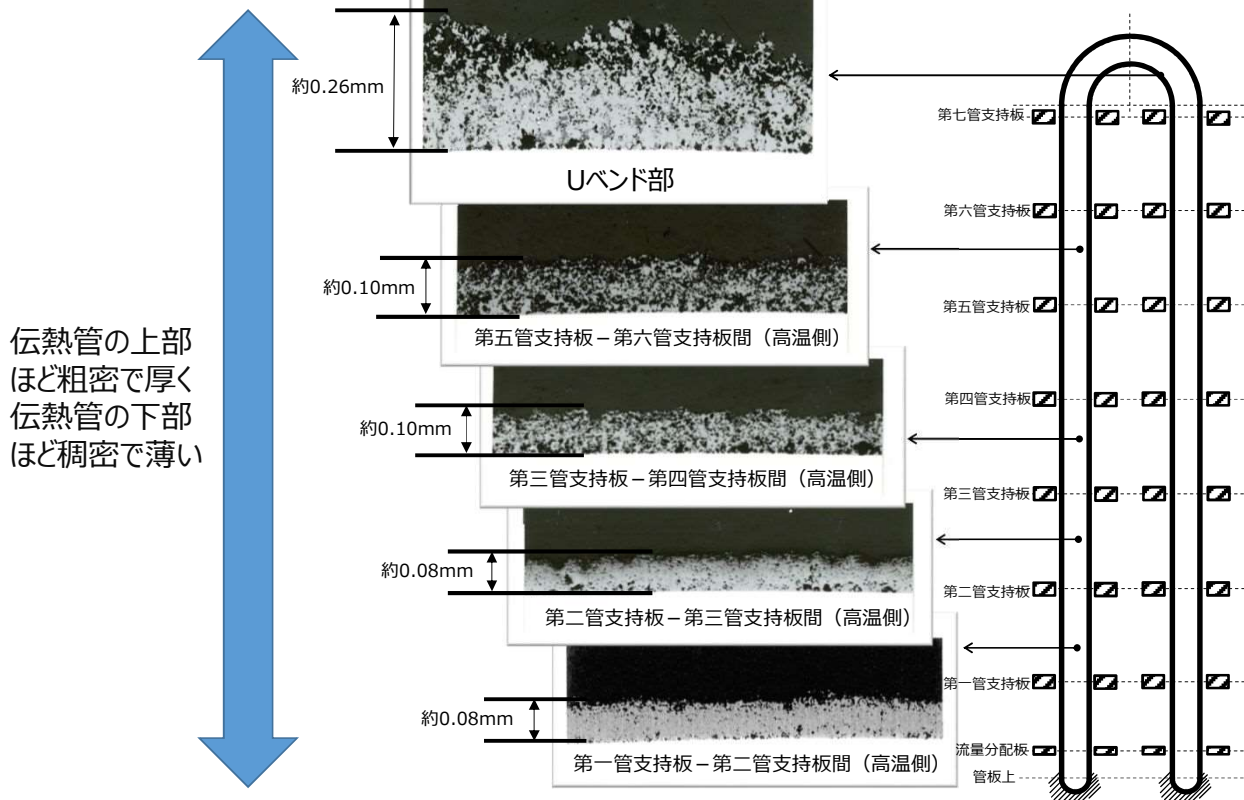


※出典：PWR 5 電力委託調査「2次系機器のスケール付着挙動評価に係る調査」(平成 15 年) 他

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

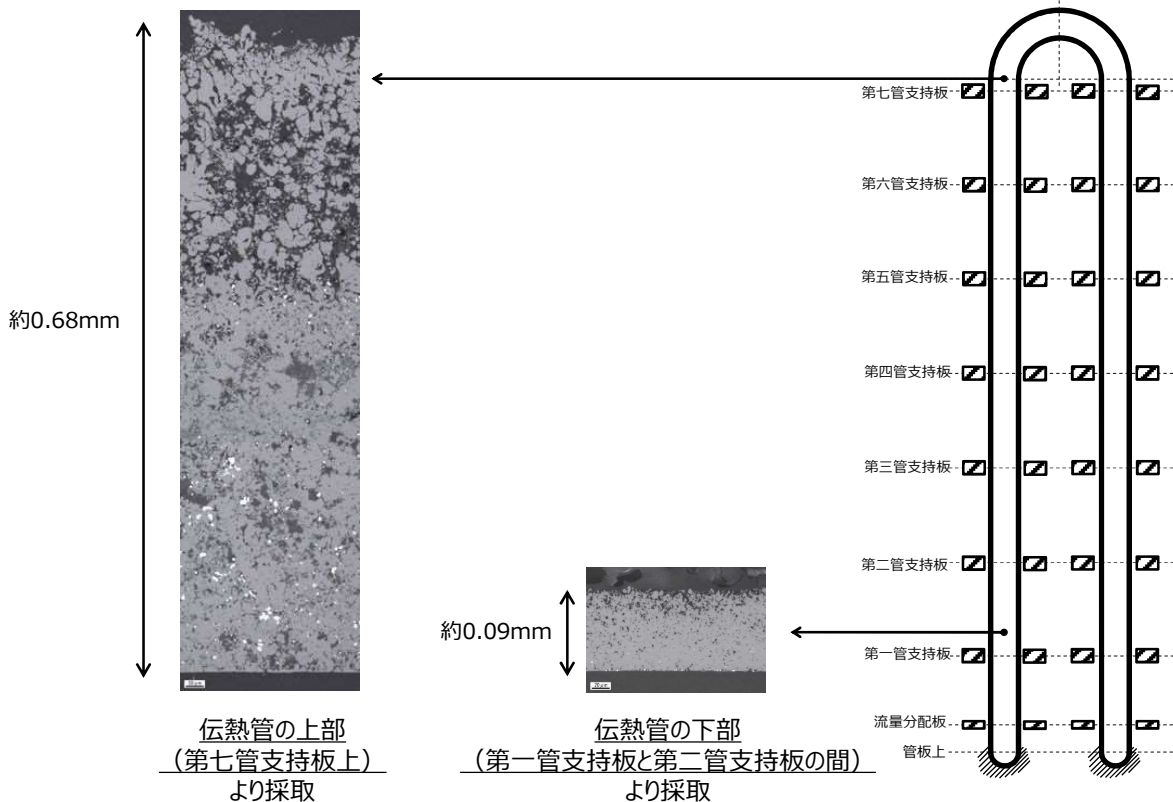
○高浜発電所3号機 平成8年調査時

(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

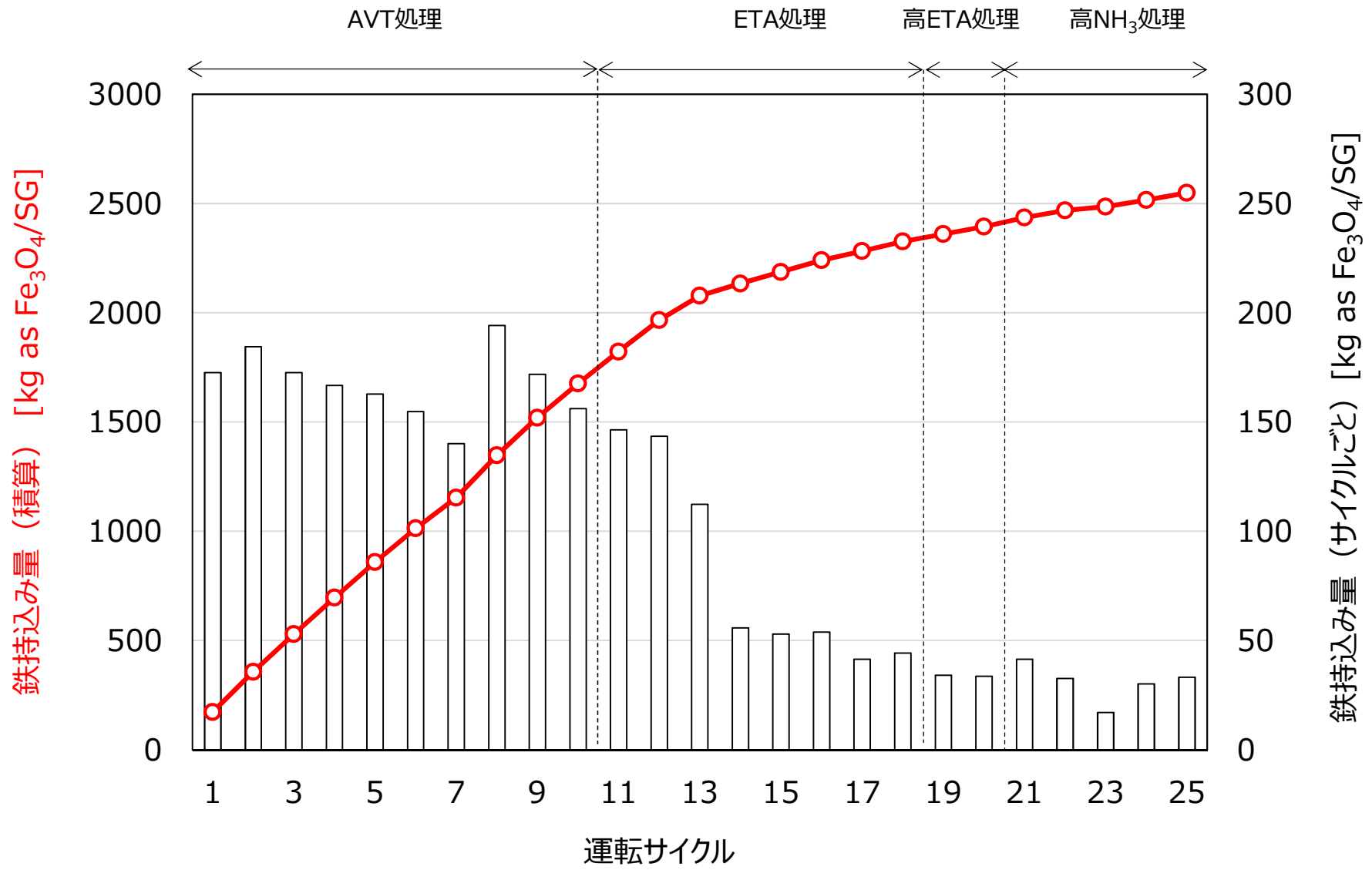
伝熱管の上部のスケールは粗密で厚く、伝熱管の下部のスケールは稠密で薄いことを確認した。



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



# 高浜4号機 鉄の持ち込み量の推移

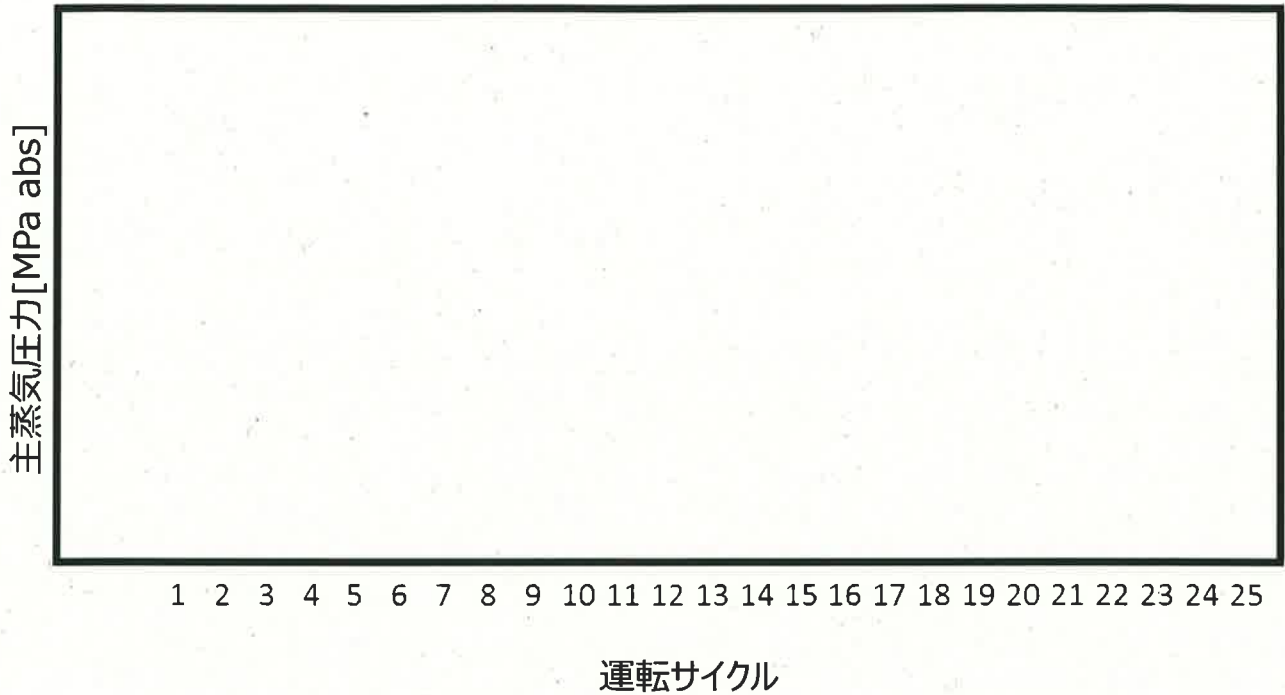


高浜4号機 鉄持込み量の推移

## プラント性能指標の推移

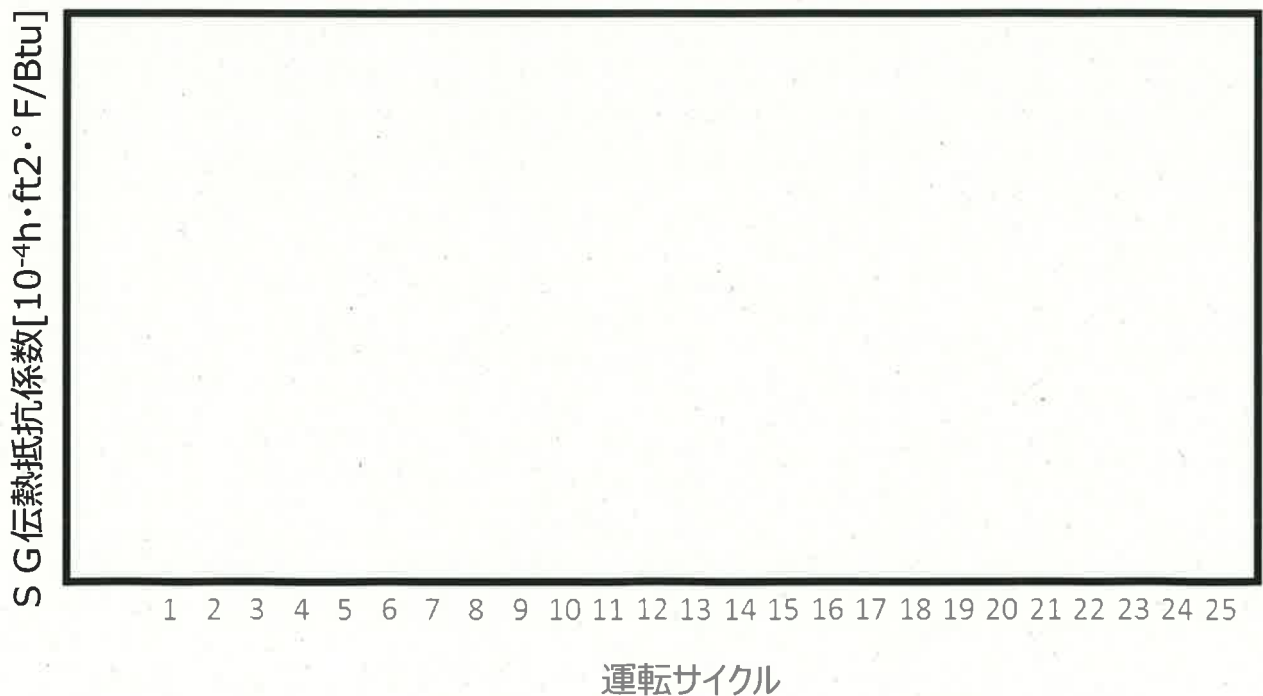
### 主蒸気圧力

伝熱管表面のスケール成長に伴い、主蒸気圧力は徐々に低下



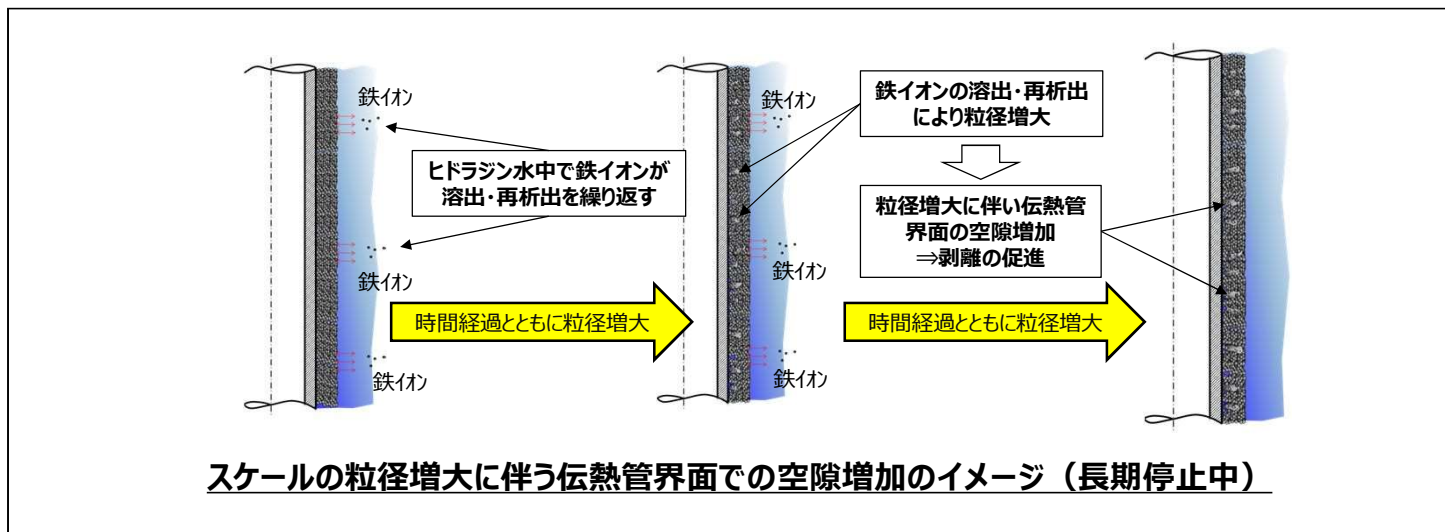
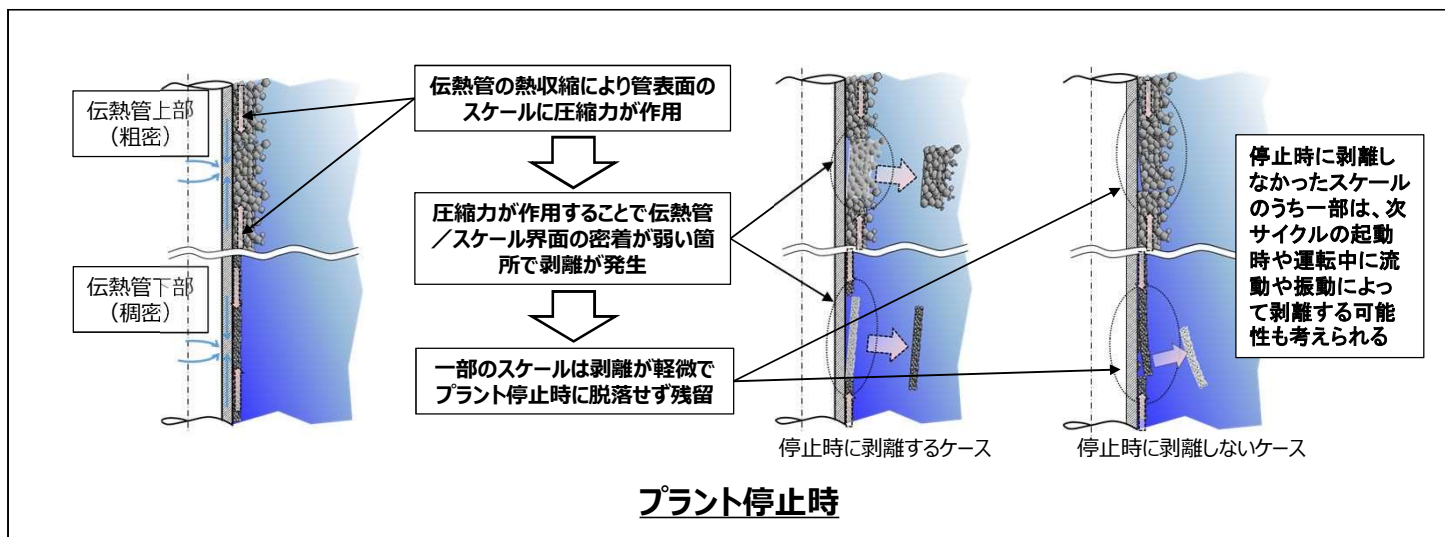
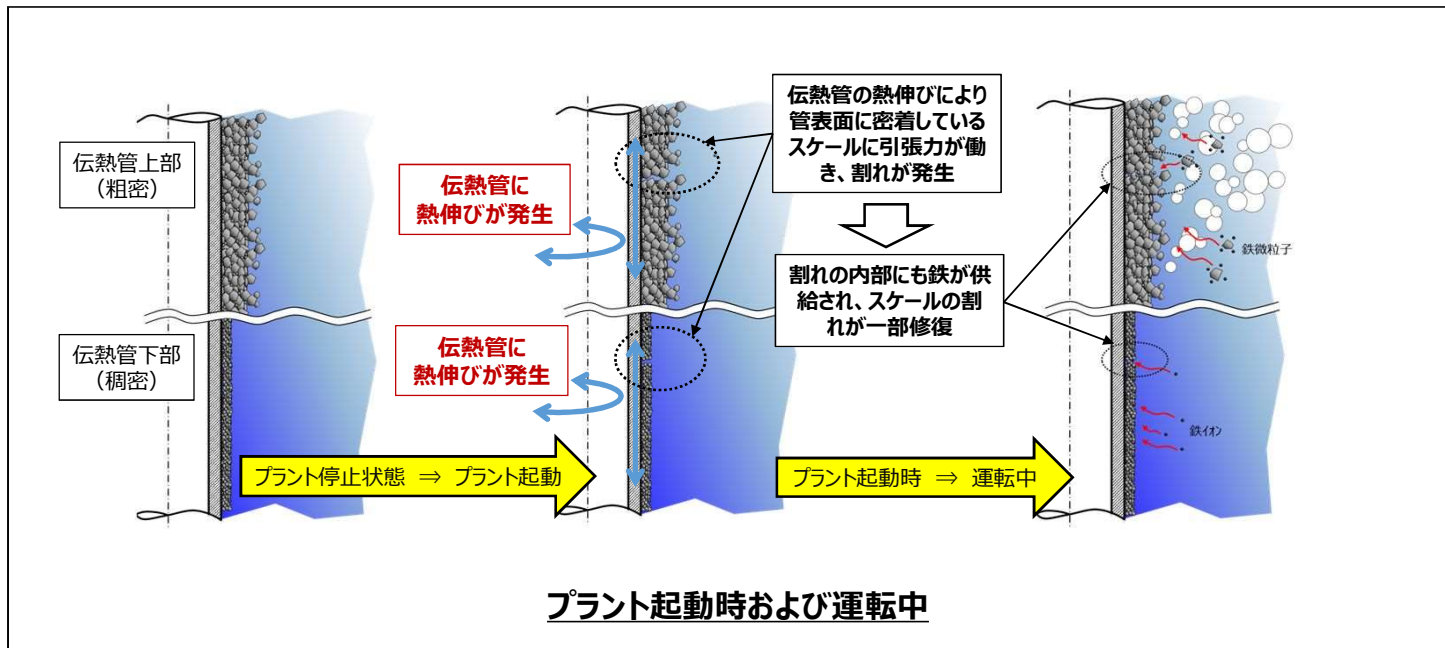
### S G 伝熱抵抗係数

伝熱管表面のスケール成長に伴い、S G 伝熱抵抗係数は徐々に上昇



枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

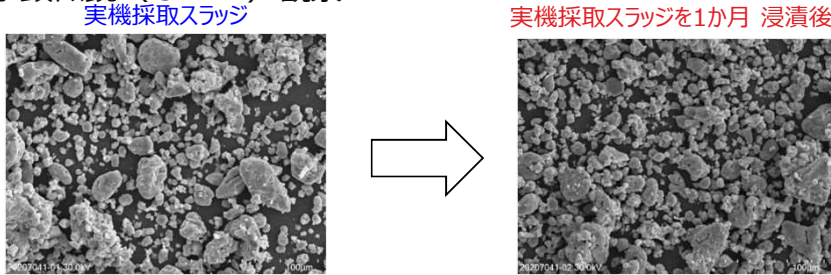
# スケール剥離メカニズムイメージ



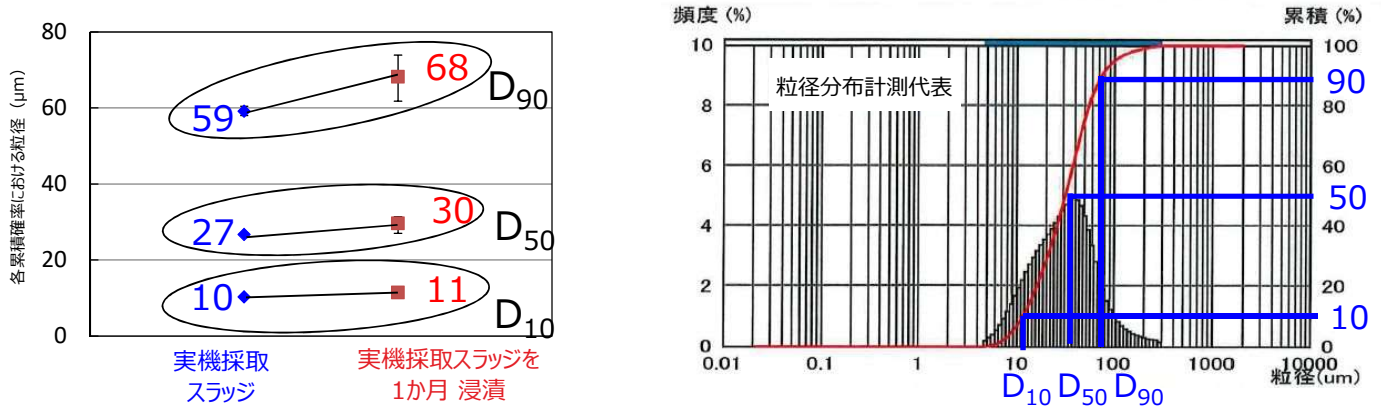
発電用原子炉施設故障等報告書  
(高浜発電所3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について)  
(2022年5月25日) より引用

・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



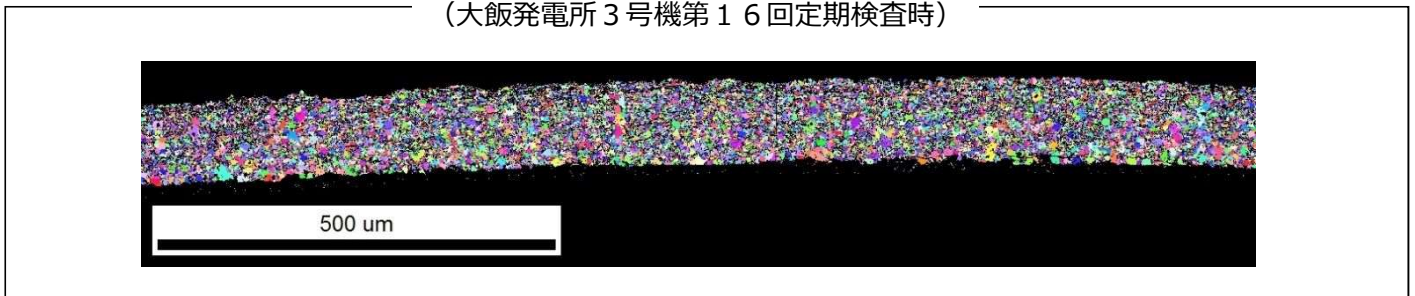
(2) 粒径分布計測 (プロット: 3回繰り返し計測平均値, エラー: 3回計測の最大値, 最小値)



・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。

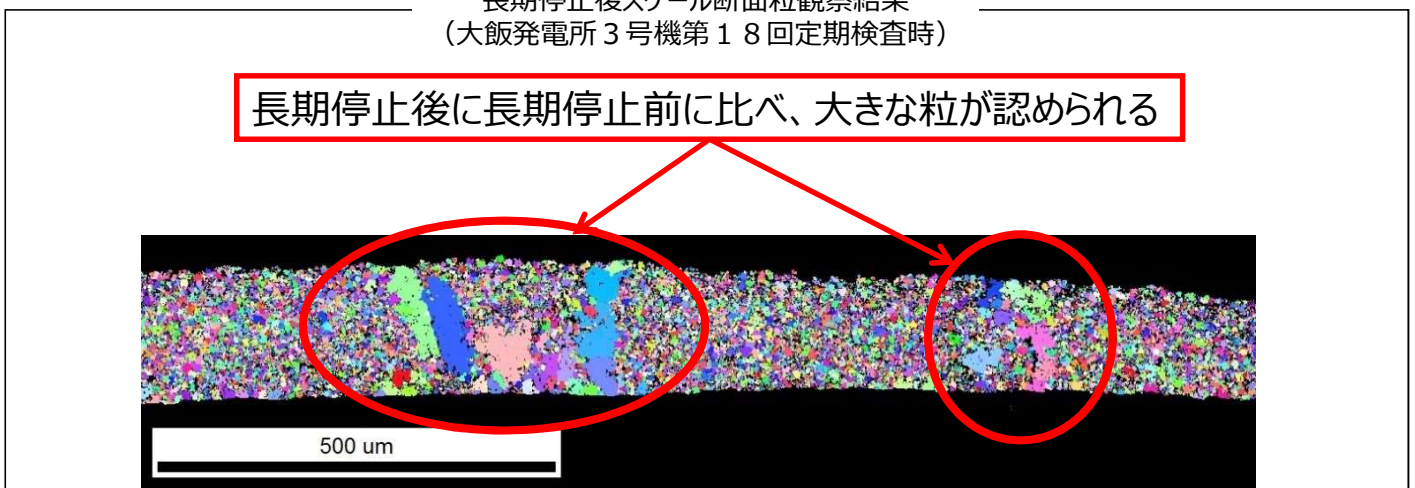
・電子線後方散乱回折法 (EBSD)※により長期停止前後のスケール断面を観察した結果は以下のとおりである。

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。



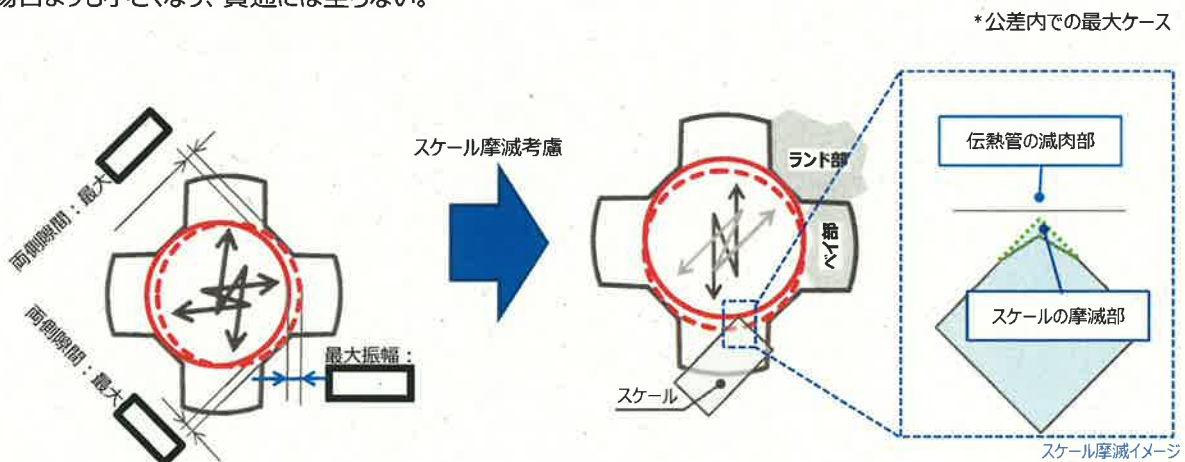
## スケールと伝熱管の接触時における摩耗形態の推定について (スケールによる最大減肉深さに係る考察)

### <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

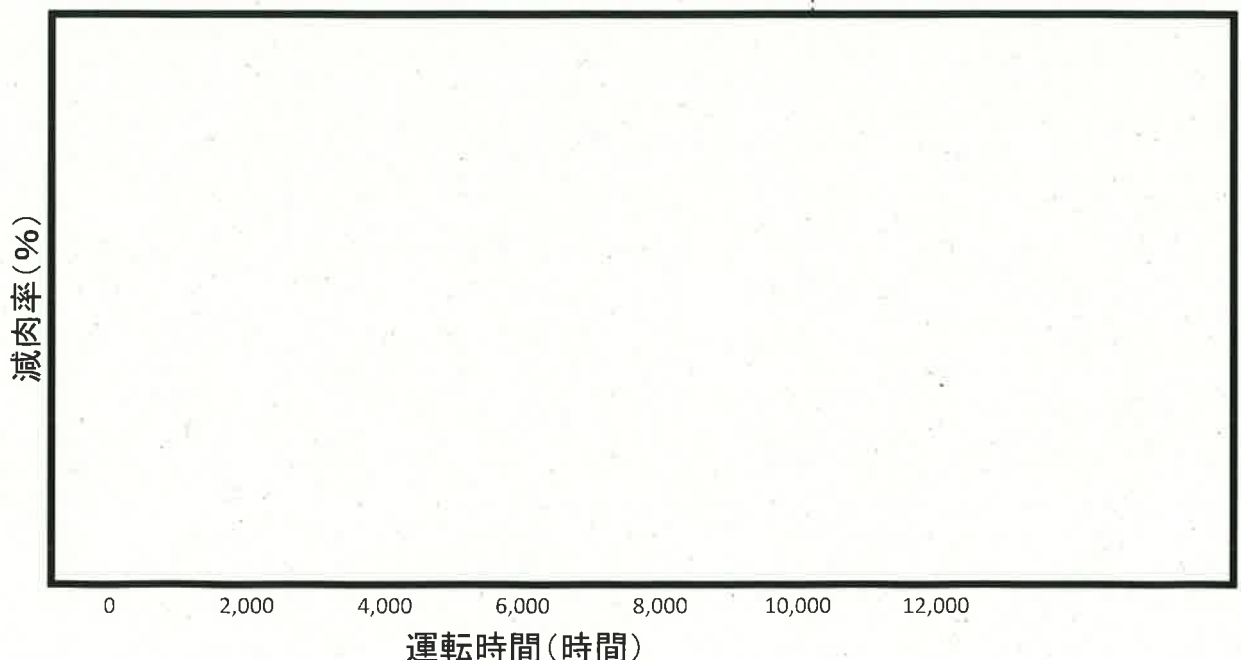
### <最大減肉深さの考察>

- 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

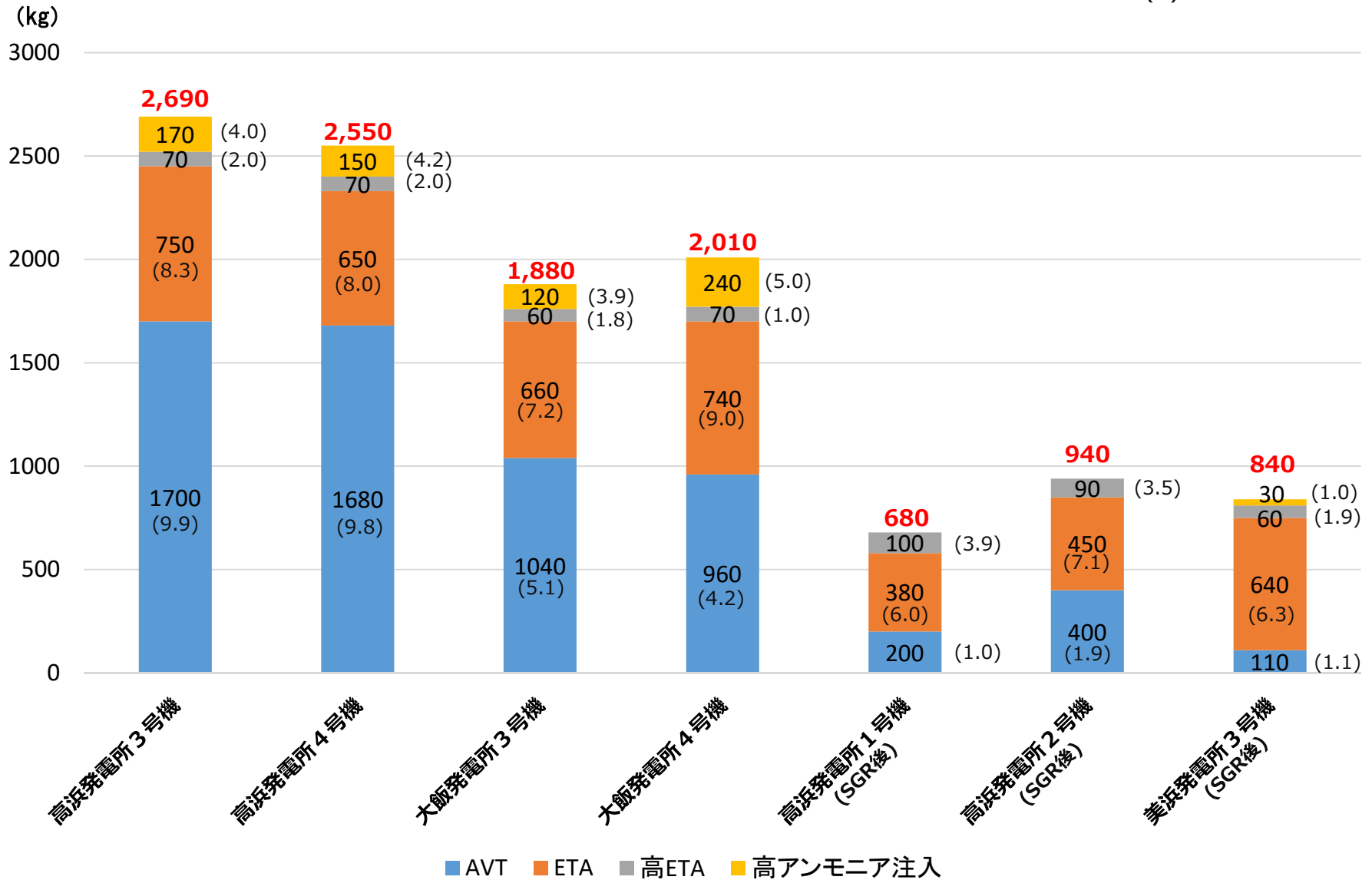
10,248時間  
(1サイクルで想定される最大運転時間)



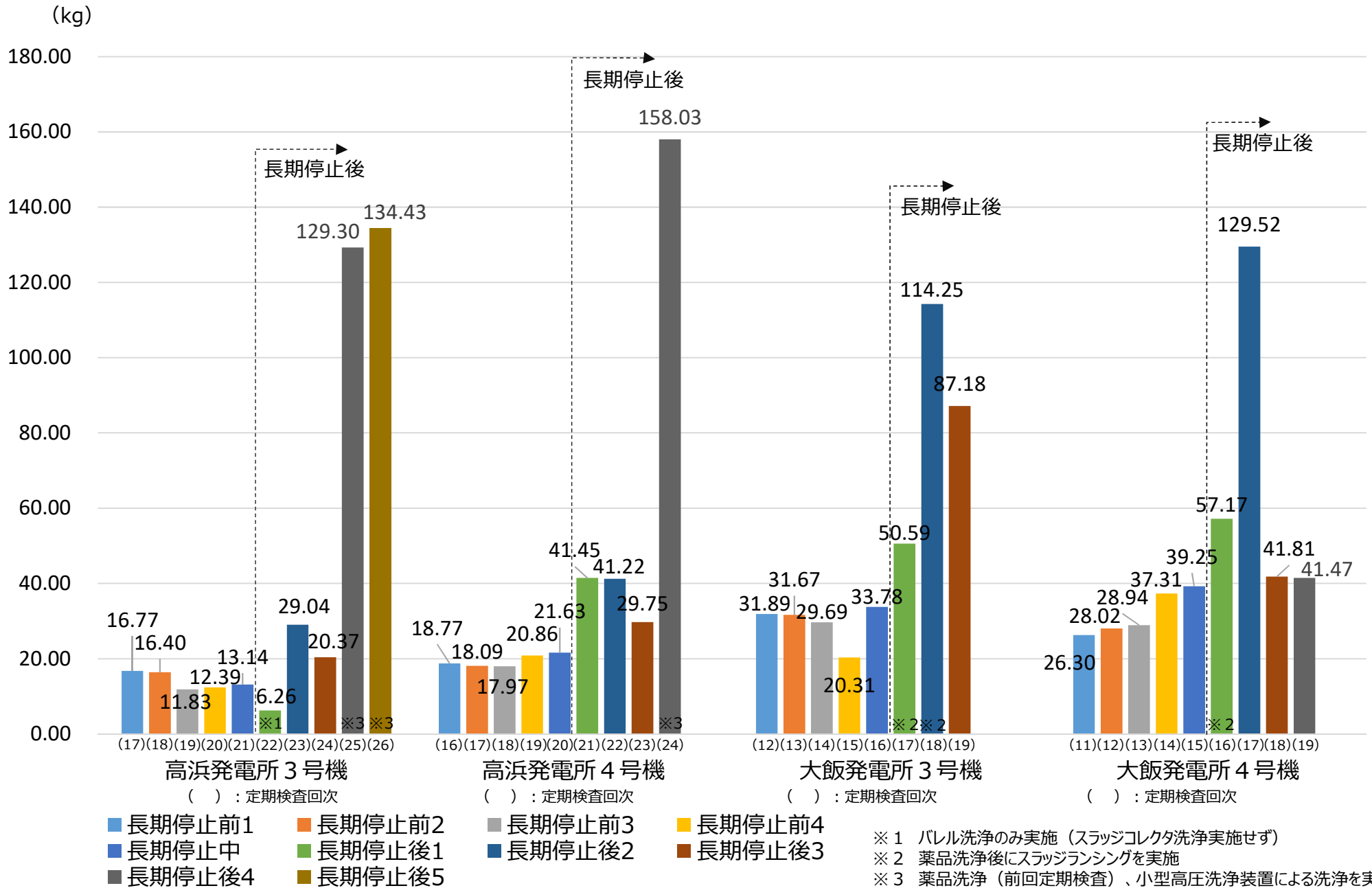
: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

# 鉄持込み量比較

( ) : 運転時間 (万時間)

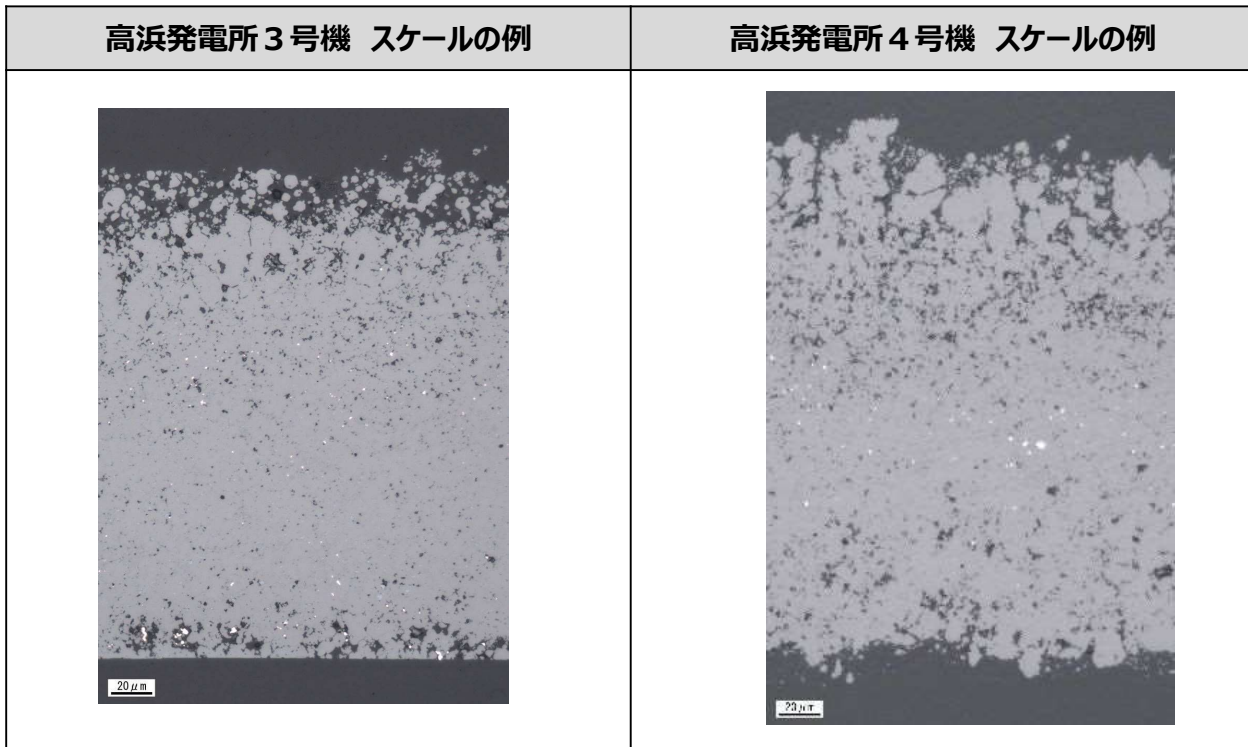


# スラッジランシングによるスラッジ・スケールの総回収量

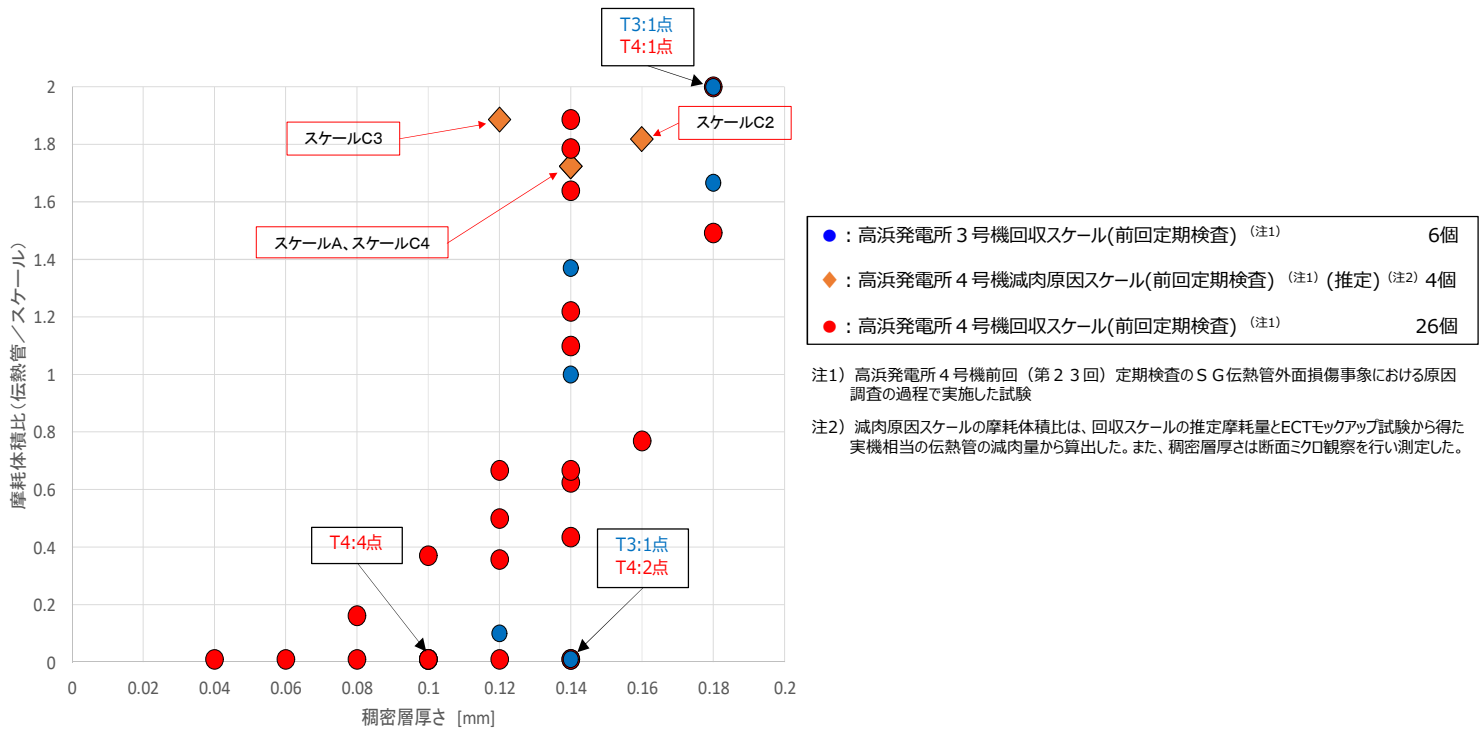


高浜発電所 3 号機および 4 号機のスケール性状の比較について

- 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 号機前回（第 2 3 回）定期検査の S G 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 号機前回（第 2 3 回）定期検査の S G 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

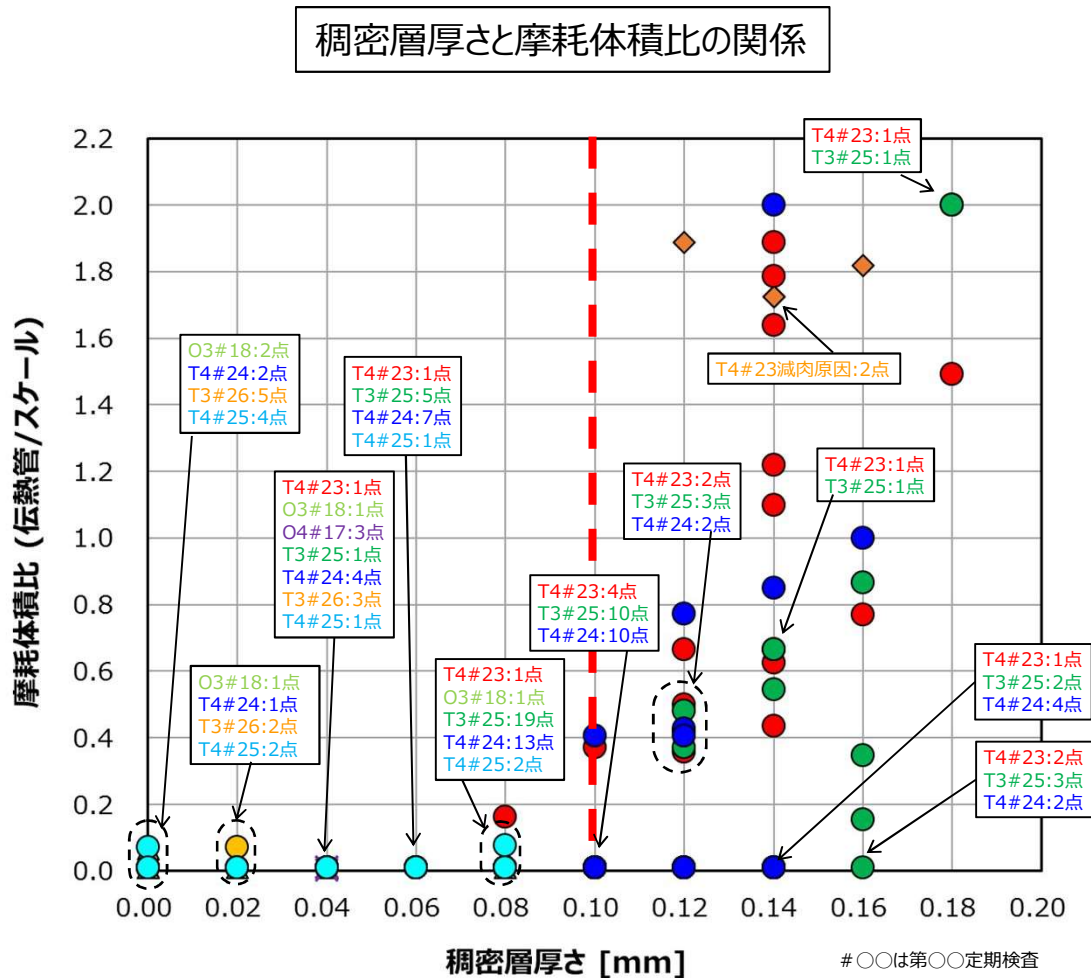
スケール回収場所	スケール厚さ (mm)	伝熱管摩耗体積 (mm <sup>3</sup> )	スケール摩耗体積 (mm <sup>3</sup> )	摩耗体積比 (伝熱管：スケール)
大飯発電所 3号機 管板上	約0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約0.2	約0.013	約0.19	1：15
	約0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約0.2	—	試験開始後に欠損	—
	約0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約0.2	—	試験開始後に欠損	—
大飯発電所 4号機 管板上	約0.2	約0.001	約0.41	1：410
	約0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約0.1	—	試験開始後に欠損	—

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。



● (Cyan)	高浜4号機回収スケール(#25)(今回)	10個
● (Yellow)	高浜3号機回収スケール(#26)	10個
● (Blue)	高浜4号機回収スケール(#24)	50個
● (Green)	高浜3号機回収スケール(#25)	50個
◆ (Orange)	高浜4号機減肉原因スケール(#23) <sup>(注1,2)</sup>	4個
● (Red)	高浜4号機回収スケール(#23) <sup>(注1)</sup>	26個
▲ (Green)	大飯3号機回収スケール(#18) <sup>(注1)</sup>	6個
× (Purple)	大飯4号機回収スケール(#17) <sup>(注1)</sup>	3個

注1) 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

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ECMモックアップ試験から得た実機相当の伝熱管の減肉量から算出した。また、稠密層厚さは断面マイクロ観察を行い測定した。

## 海外のＳＧの運転履歴等調査結果

## １．調査方法について

## （１）運転履歴

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

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

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

## &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4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

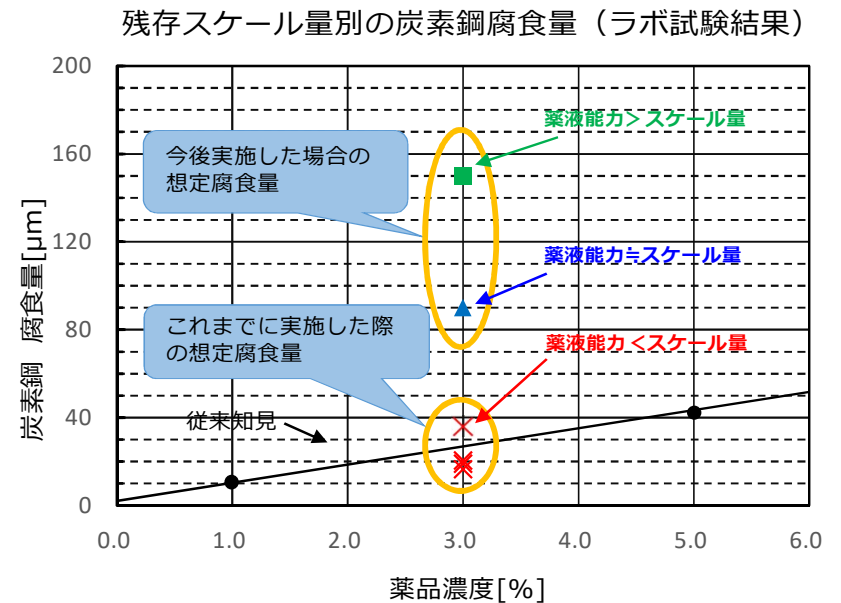
# 薬品洗浄の実施に関する検討について

薬品洗浄時に懸念されるS G器内構成部材への腐食影響について、器内の残存スケール量を考慮した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大きくなるという知見が得られた。

第23回および第24回定期検査で実施した薬品洗浄により、高浜4号機SG器内の推定残存スケール量は約2,550 kg → 約550 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S G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、S G器内スケールが脆弱化していることを確認している。



# 薬品洗浄の実施に関する検討について

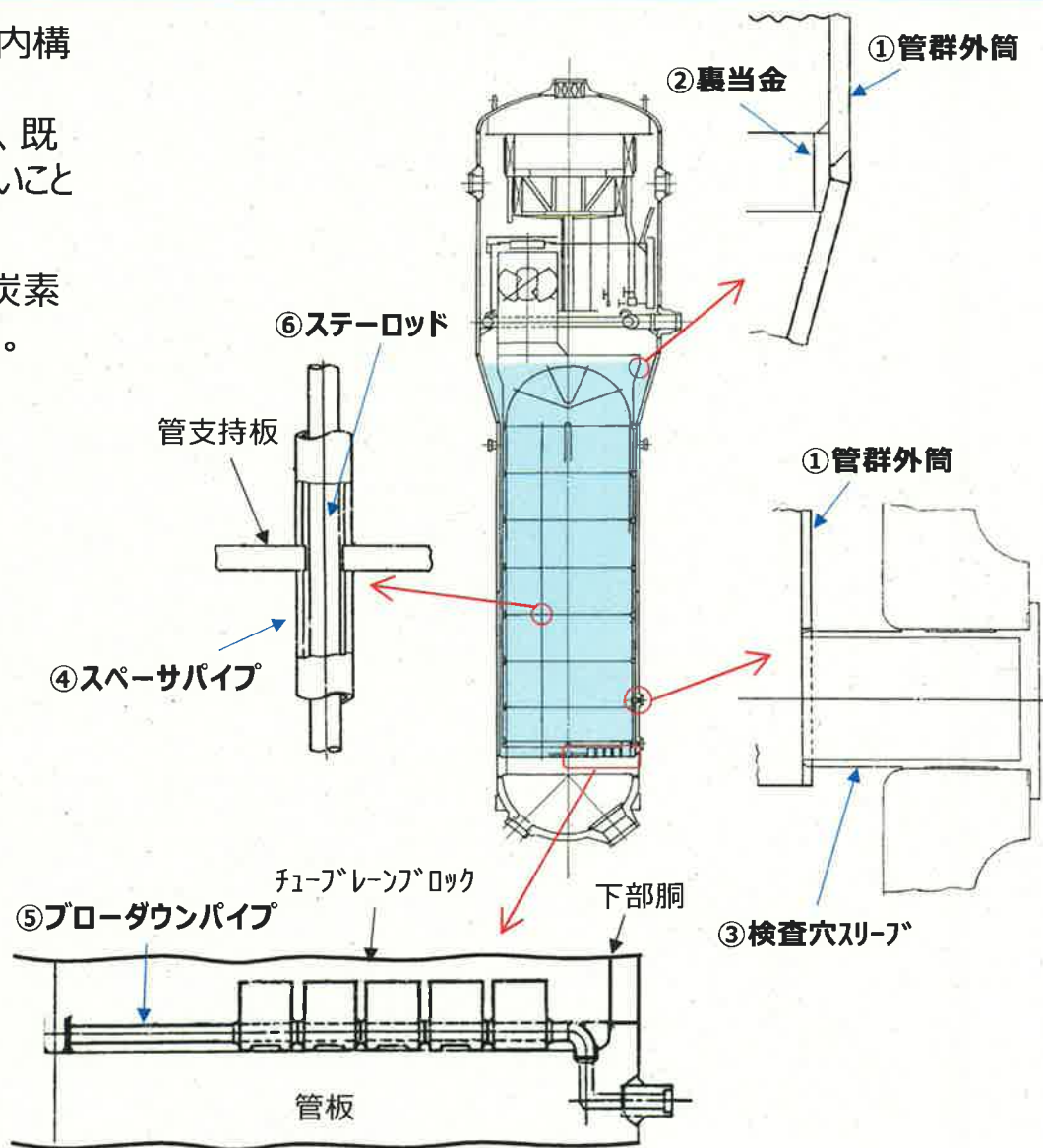
薬品洗浄を実施すると、副次的な作用として、器内構成部材の腐食も発生する。

腐食量はS G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4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	

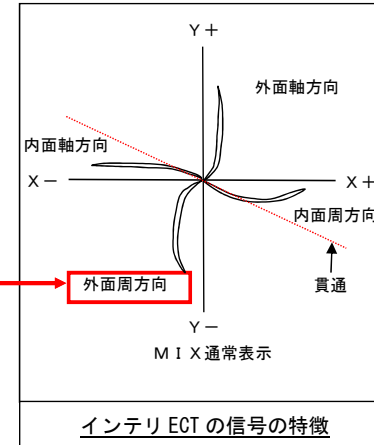
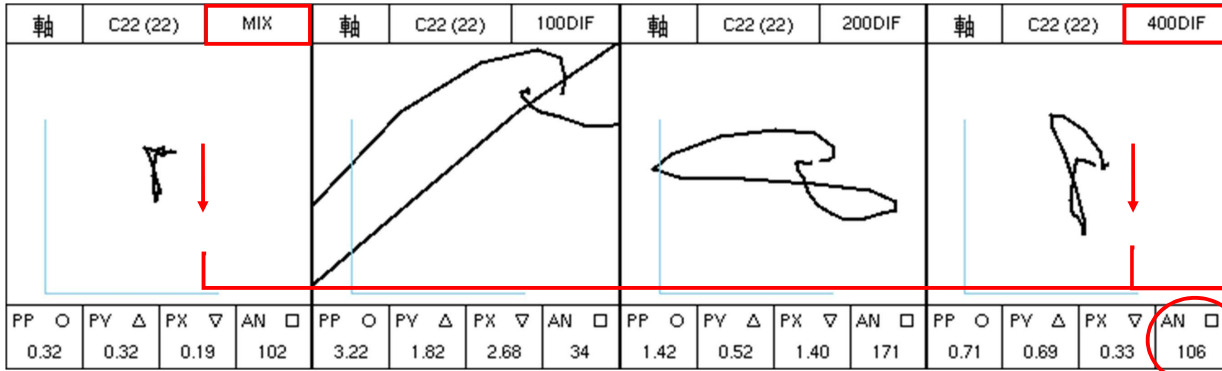
\*平成13年 蒸気発生器二次側化学洗浄の実機適用性評価 (SG化学洗浄検討会最終報告書)



□ : 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 X50, Y7)



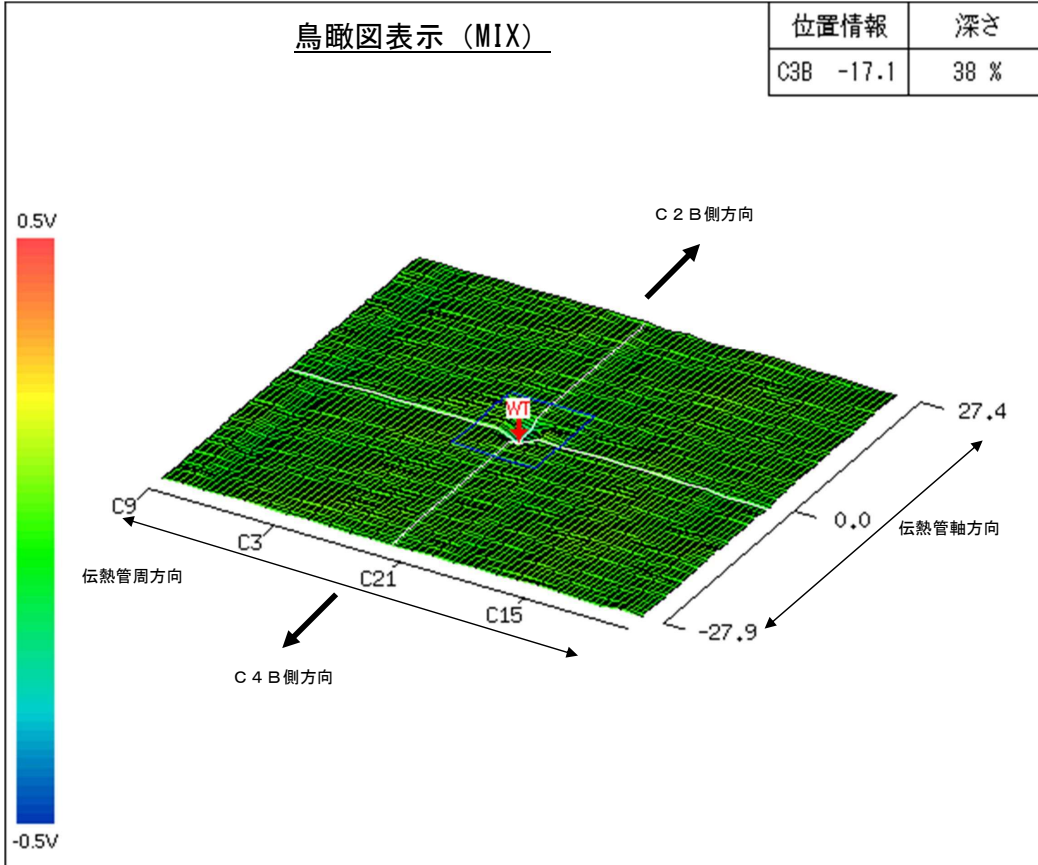
(1) 内面軸方向信号の特徴との比較

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。

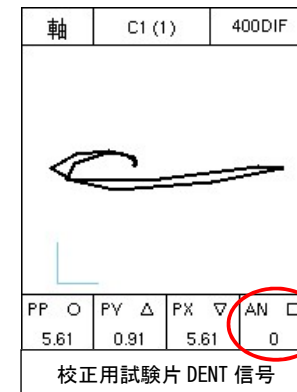
位相角

鳥瞰図表示 (MIX)

位置情報	深さ
C3B -17.1	38 %



(2) デンティング(DENT)信号の特徴との比較



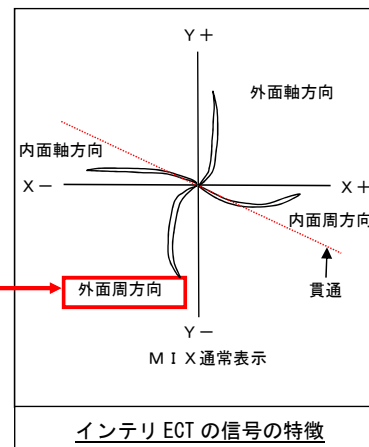
位相角

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

# ECTの位相評価

当該管リサージュ表示 (A-SG X67, Y16)

軸	C4 (4)	MIX	軸	C4 (4)	100DIF	軸	C4 (4)	200DIF	軸	C4 (4)	400DIF
PP ○	0.28		PP ○	0.66		PP ○	0.48		PP ○	0.38	
PY △	0.28		PY △	0.23		PY △	0.43		PY △	0.32	
PX ▽	0.11		PX ▽	0.64		PX ▽	0.23		PX ▽	0.23	
AN □	89		AN □	165		AN □	115		AN □	54	

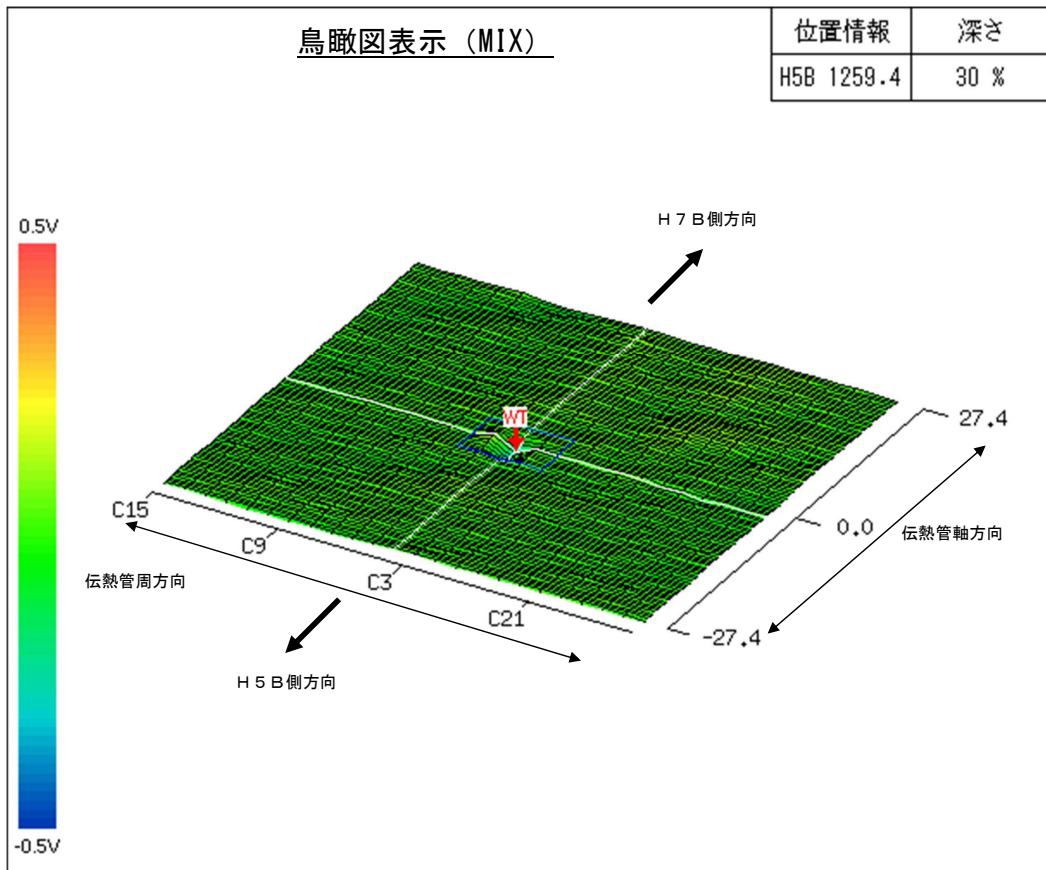


(1) 内面軸方向信号の特徴との比較

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。

位置情報  
H5B 1259.4  
深さ 30 %

鳥瞰図表示 (MIX)



(2) デンティング(DENT)信号の特徴との比較

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

校正用試験片 DENT 信号

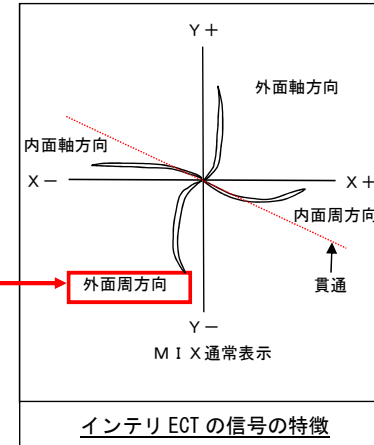
位置情報  
H5B 1259.4  
深さ 30 %

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。

# ECTの位相評価

当該管リサージュ表示 (C-SG X 37, Y 6)

軸	C8 (8)	MIX	軸	C8 (8)	100DIF	軸	C8 (8)	200DIF	軸	C8 (8)	400DIF																				
PP ○	0.41	PV △	0.36	PX ▽	0.26	AN □	128	PP ○	0.63	PV △	0.48	PX ▽	0.52	AN □	34	PP ○	0.33	PV △	0.22	PX ▽	0.28	AN □	147	PP ○	0.32	PV △	0.32	PX ▽	0.18	AN □	93

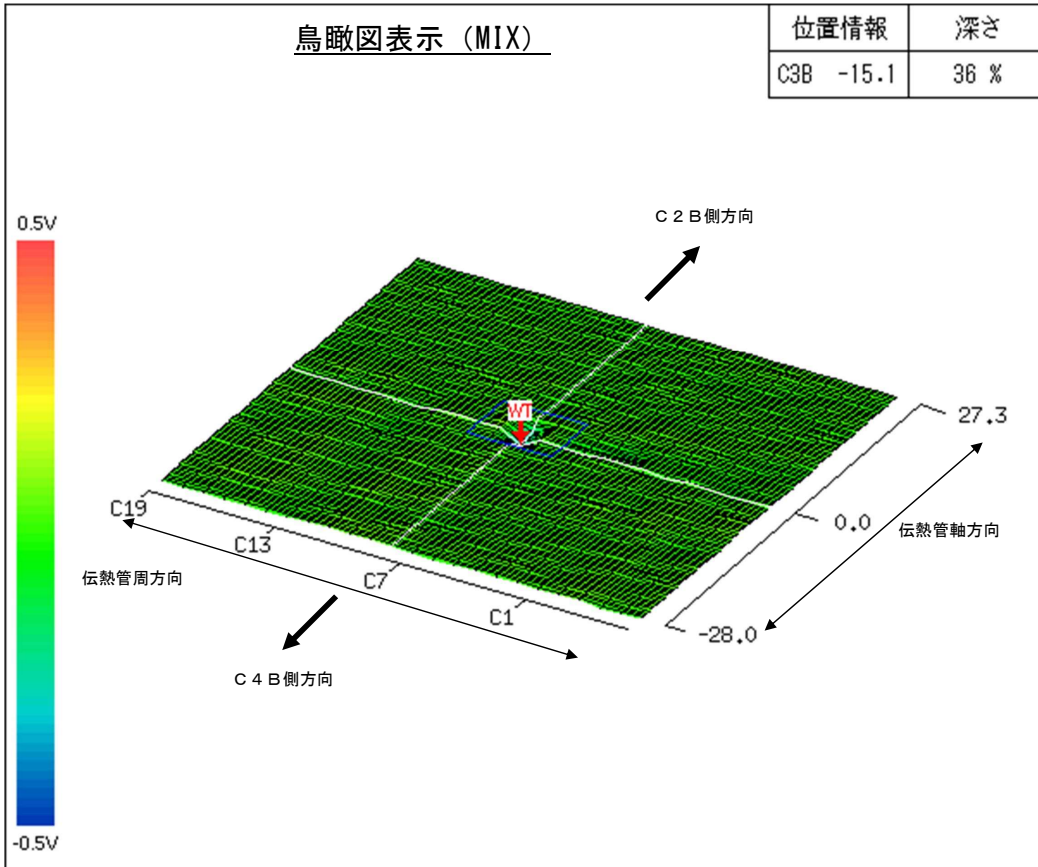


(1) 内面軸方向信号の特徴との比較

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

位置情報	深さ
C3B -15.1	36 %

鳥瞰図表示 (MIX)



(2) デンティング(DENT)信号の特徴との比較

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

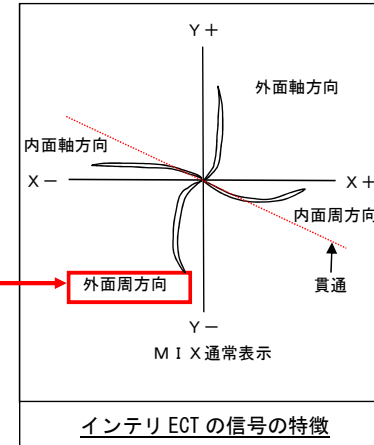
校正用試験片 DENT 信号

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。

# ECTの位相評価

当該管リサージュ表示 (C-SG X58, Y25)

軸	C9 (9)	MIX	軸	C9 (9)	100DIF	軸	C9 (9)	200DIF	軸	C9 (9)	400DIF																				
PP ○	1.57	PV △	1.47	PX ▽	0.71	AN □	116	PP ○	1.65	PV △	0.79	PX ▽	1.55	AN □	161	PP ○	1.56	PV △	1.28	PX ▽	0.97	AN □	125	PP ○	1.52	PV △	1.52	PX ▽	0.37	AN □	89

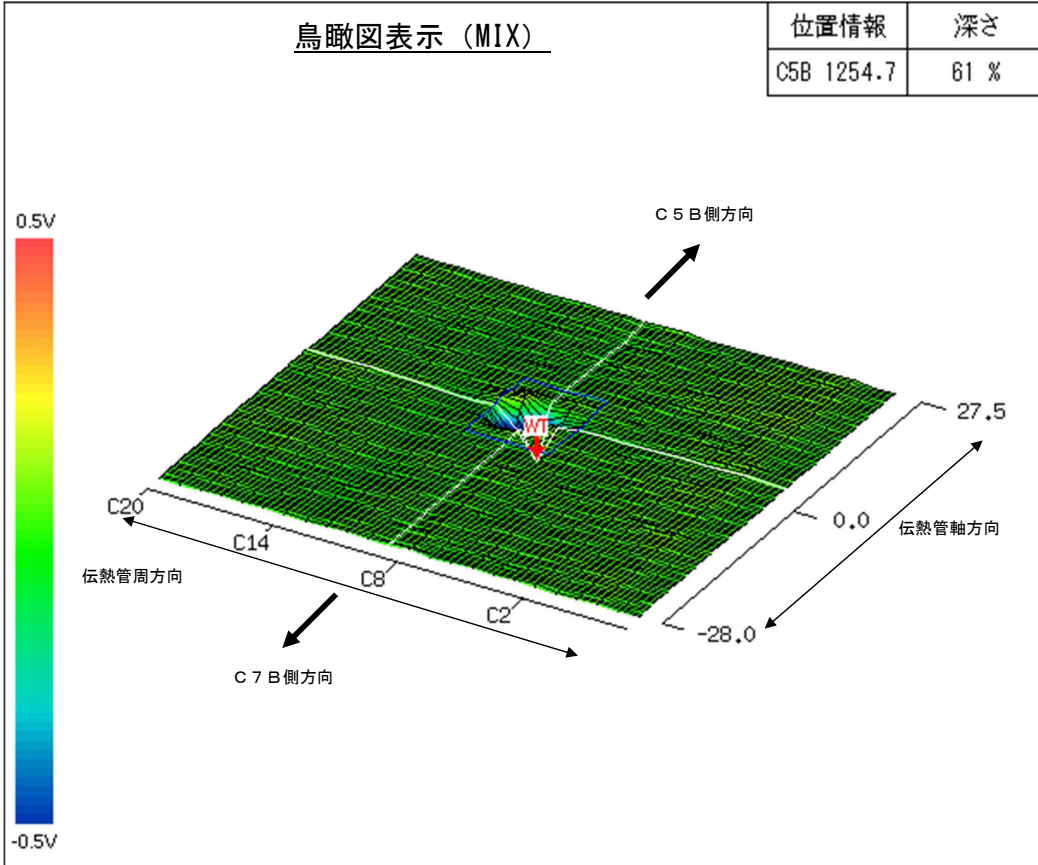


(1) 内面軸方向信号の特徴との比較

インテリジェントECTの信号の特徴と今回の当該信号を比較したところ、今回の当該信号は400kHzおよびMIXの位相角でY-方向の外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。

鳥瞰図表示 (MIX)

位置情報	深さ
C5B 1254.7	61 %



(2) デンティング(DENT)信号の特徴との比較

軸	C1 (1)	400DIF					
PP ○	5.61	PV △	0.91	PX ▽	5.61	AN □	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附着信号は、周波数間の振幅・位相の相関関係が異なるため、スケール附着箇所の信号は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、スケール附着・剥離（EDMスリット有り）およびスケール附着・剥離（EDMスリット無し）の信号を比較し、スケール附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 スケール附着・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、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。

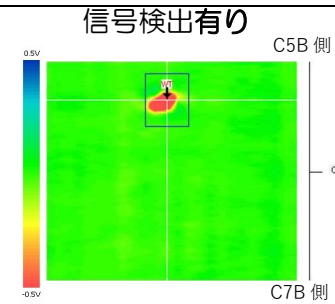
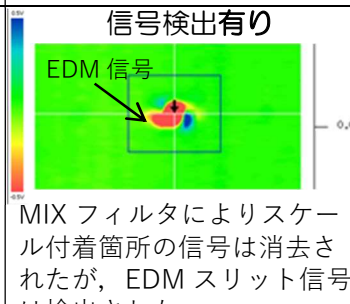
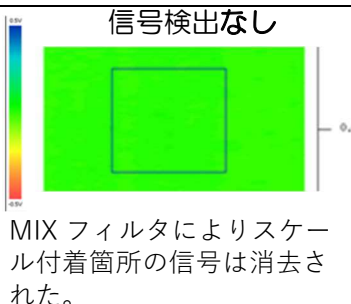
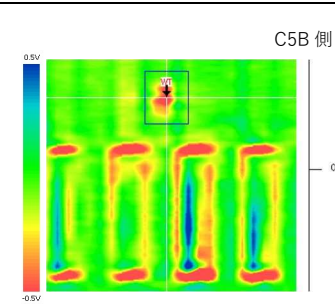
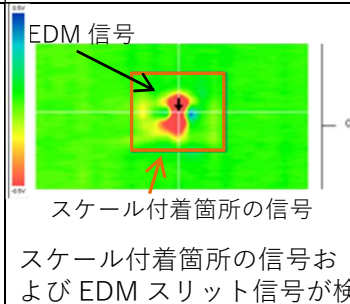
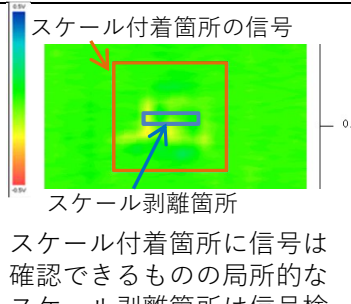
## 2.2 スケール附着・剥離（EDMスリット無し）の試験片データ

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附着・剥離（EDMスリット有り）、スケール附着・剥離（EDMスリット無し）比較

実機波形 (C-SG X58,Y25) MIX	スケール附着・剥離 (EDMスリット有り) MIX	スケール附着・剥離 (EDMスリット無し) MIX
<p>信号検出有り</p>  <p>C5B側 C7B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附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附着箇所の信号は消去された。</p>
<p>実機波形 (C-SG X58,Y25) 100kHz</p>  <p>C5B側 C7B側</p>	<p>スケール附着・剥離 (EDMスリット有り) 100kHz</p>  <p>EDM信号</p> <p>スケール附着箇所の信号</p> <p>スケール附着箇所の信号およびEDMスリット信号が検出された。</p>	<p>スケール附着・剥離 (EDMスリット無し) 100kHz</p>  <p>スケール附着箇所の信号</p> <p>スケール剥離箇所</p> <p>スケール附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

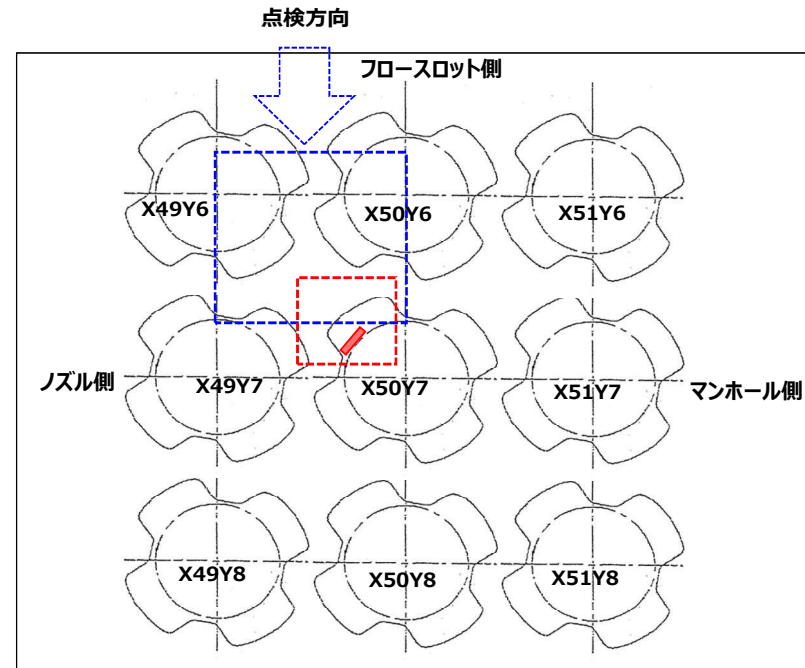
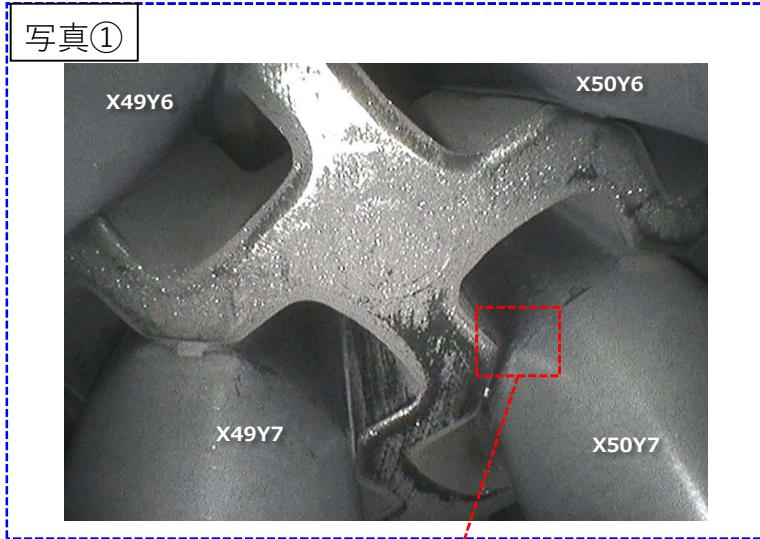
- スケール附着・剥離（EDMスリット有り）の試験片を用いた検証結果より、スケール附着箇所の信号はMIXフィルタにより消去されるが、EDMスリットの信号は消去されず、有意な信号として検出される。
  - スケール附着・剥離（EDMスリット無し）の試験片を用いた検証結果より、局所的なスケール剥離箇所では信号が検出されない。
- ⇒実機波形はMIXフィルタを適用しても有意な信号が検出されていることから、スケール附着や局所的なスケール剥離の信号ではなく、減肉信号と考えられる。

以上

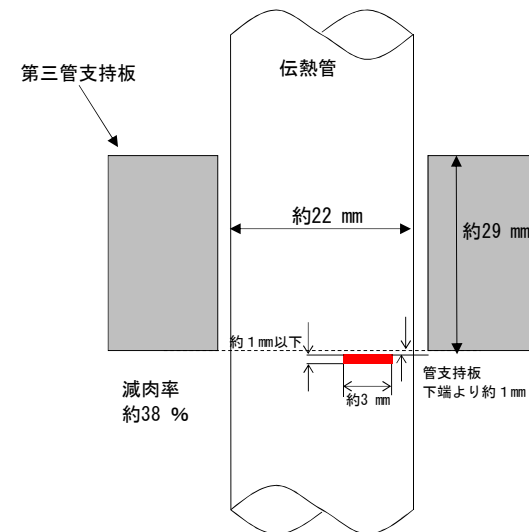


SG器内点検結果 (SG伝熱管2次側表面写真)

対象：A-SG 第三管支持板下面 伝熱管 X50, Y7 低温側



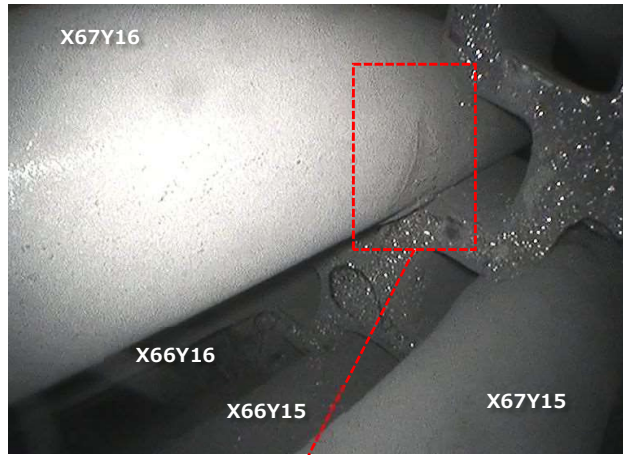
管支持板を下から見た図



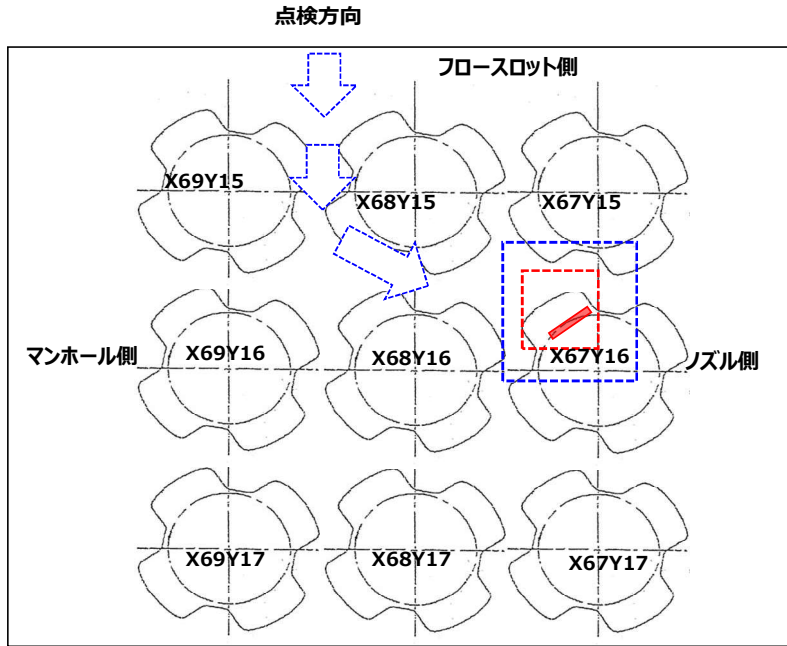
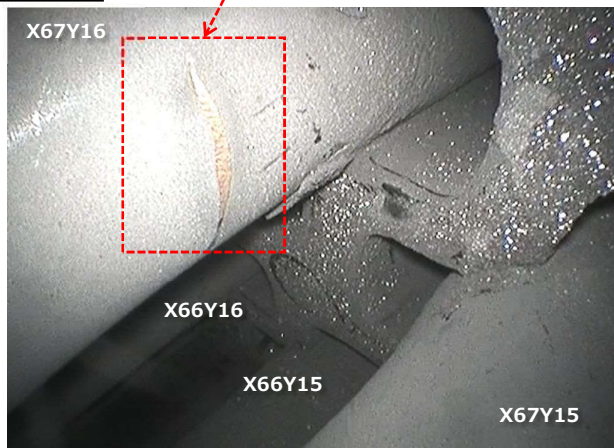
SG器内点検結果 (SG伝熱管2次側表面写真)

対象 : A-SG 第六管支持板下面 伝熱管 X67, Y16 高温側

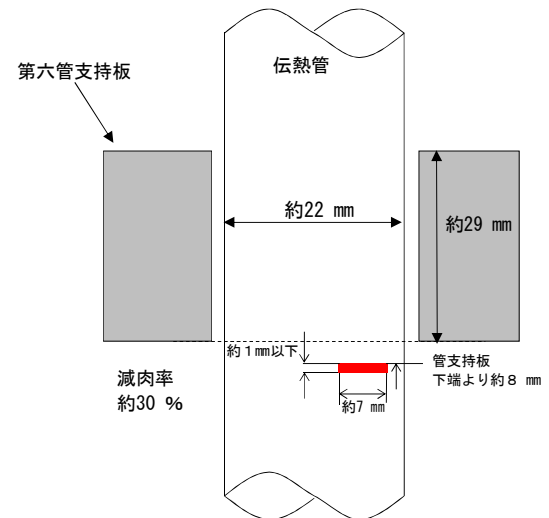
写真①



写真②



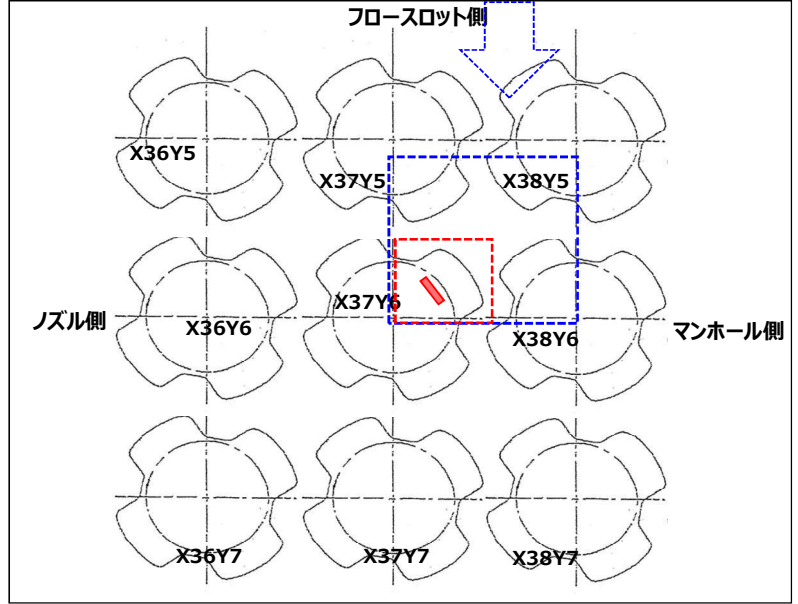
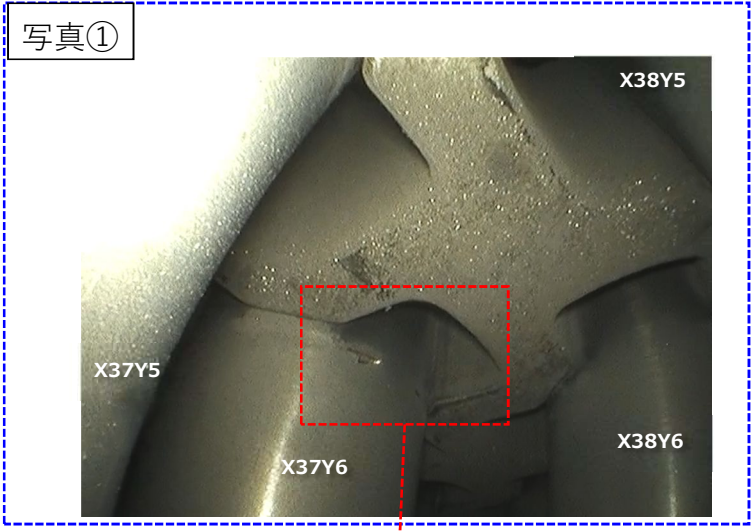
管支持板を下から見た図



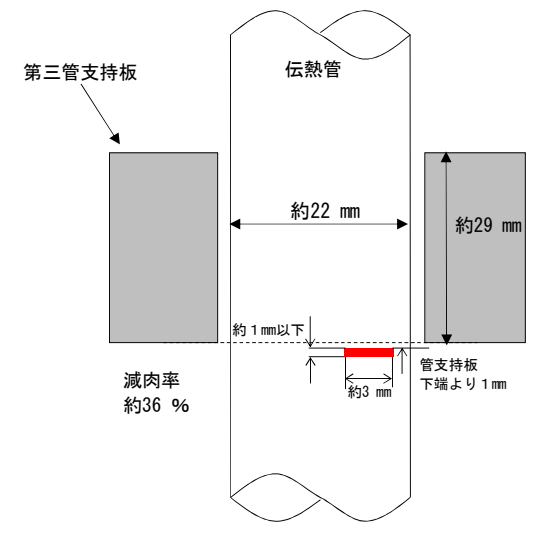
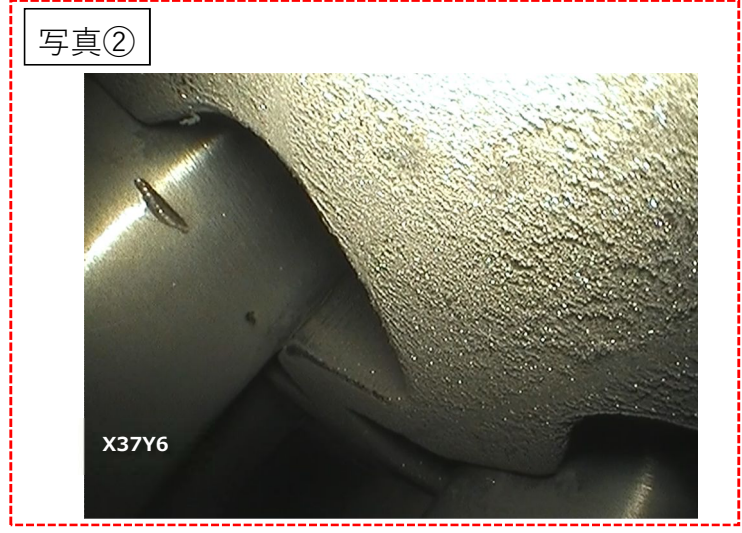
SG器内点検結果 (SG伝熱管 2次側表面写真)

対象: C-SG 第三管支持板下面 伝熱管 X37, Y6 低温側

点検方向

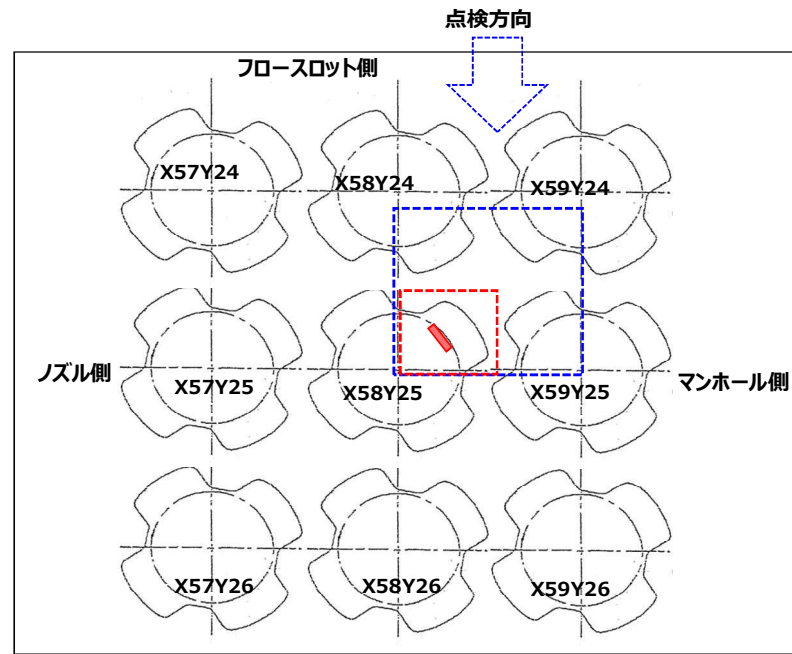


管支持板を下から見た図

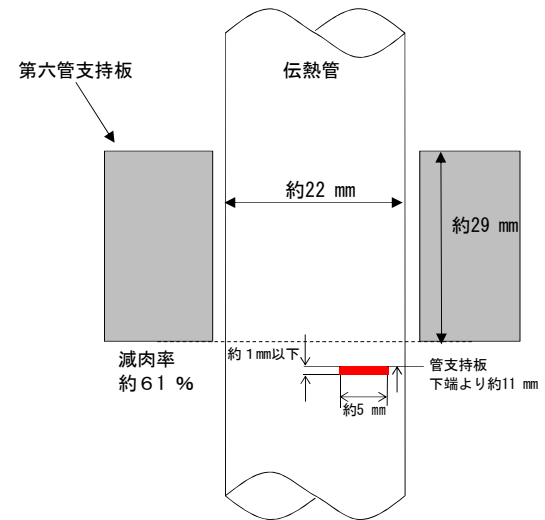


SG器内点検結果 (SG伝熱管2次側表面写真)

対象: C-SG 第六管支持板下面 伝熱管 X58, Y25 低温側

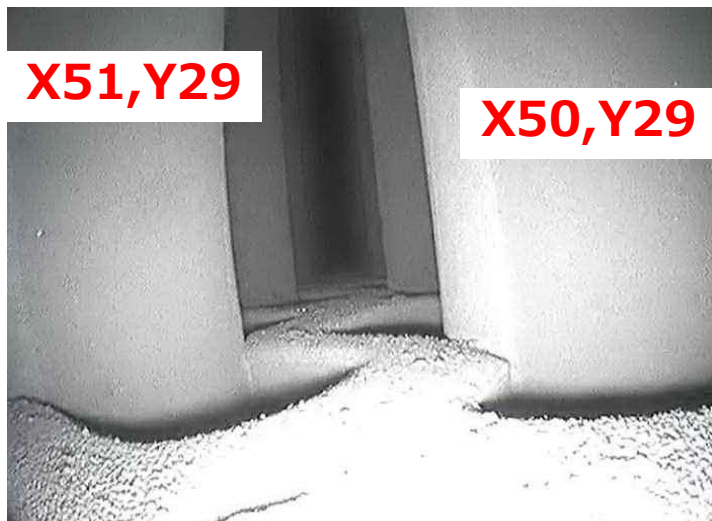


管支持板を下から見た図

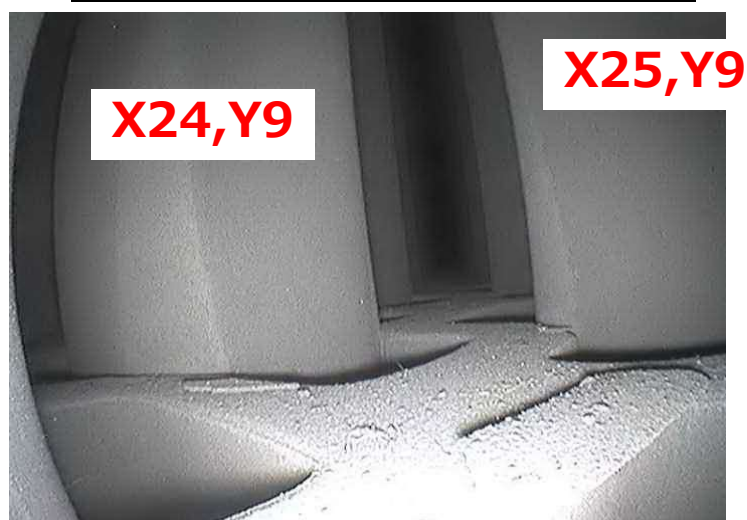


### SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

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

A-SG 第五管支持板上写真



A-SG 第四管支持板上写真

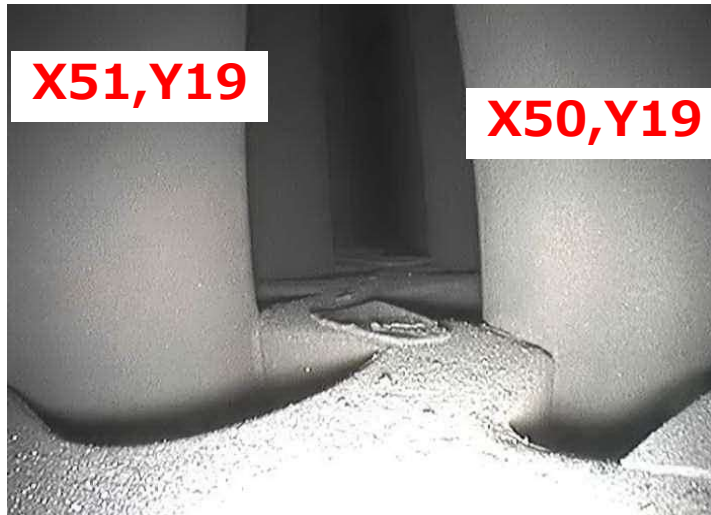


A-SG 第三管支持板上写真



# SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

C-SG 第二管支持板上写真



C-SG 第一管支持板上写真

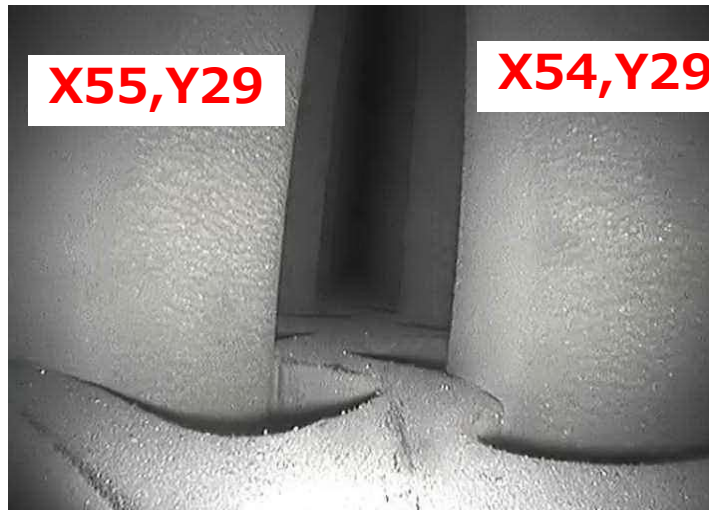


C-SG 管板上写真



## S G 器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

C-S G 第五管支持板上写真



C-S G 第四管支持板上写真



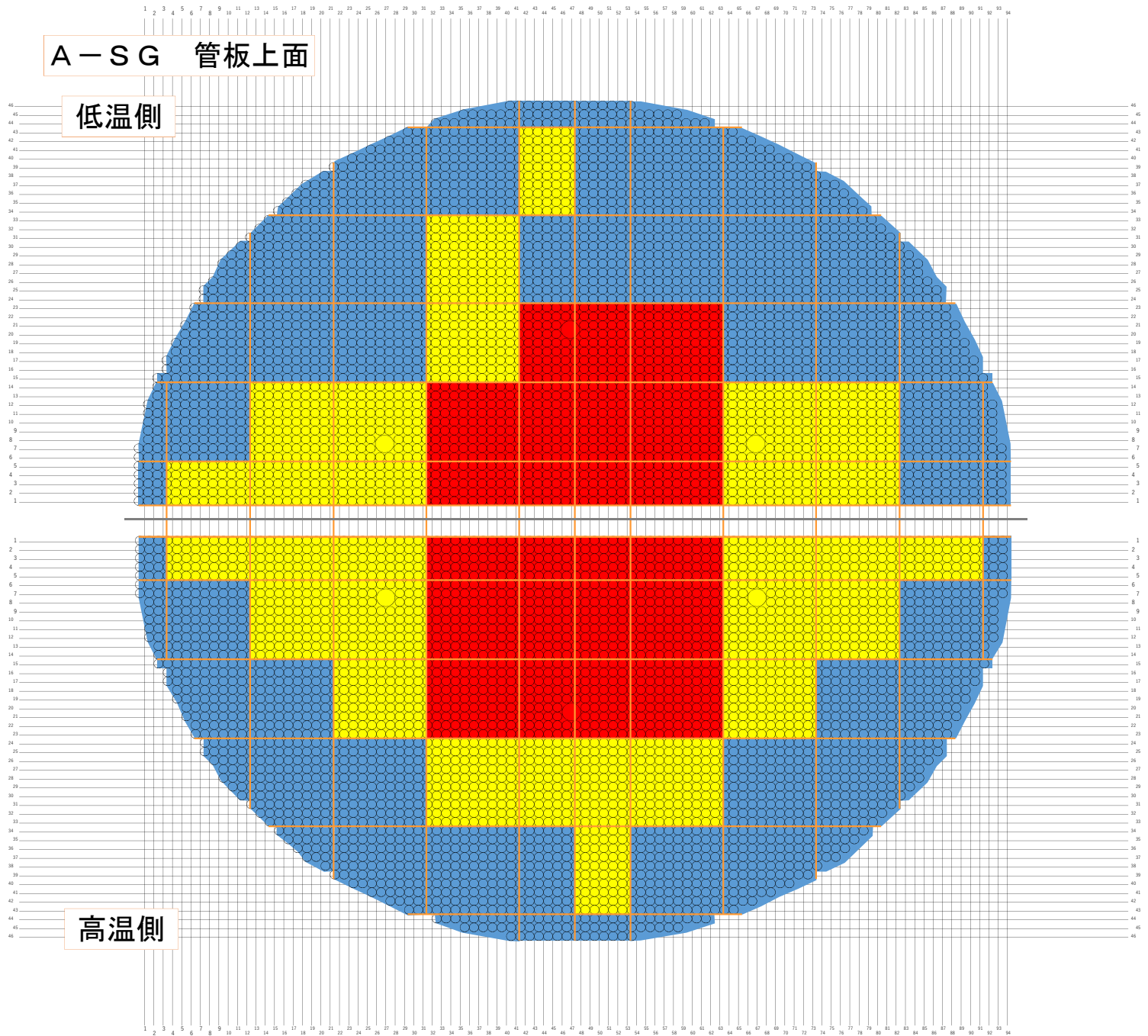
C-S G 第三管支持板上写真





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 (管板)

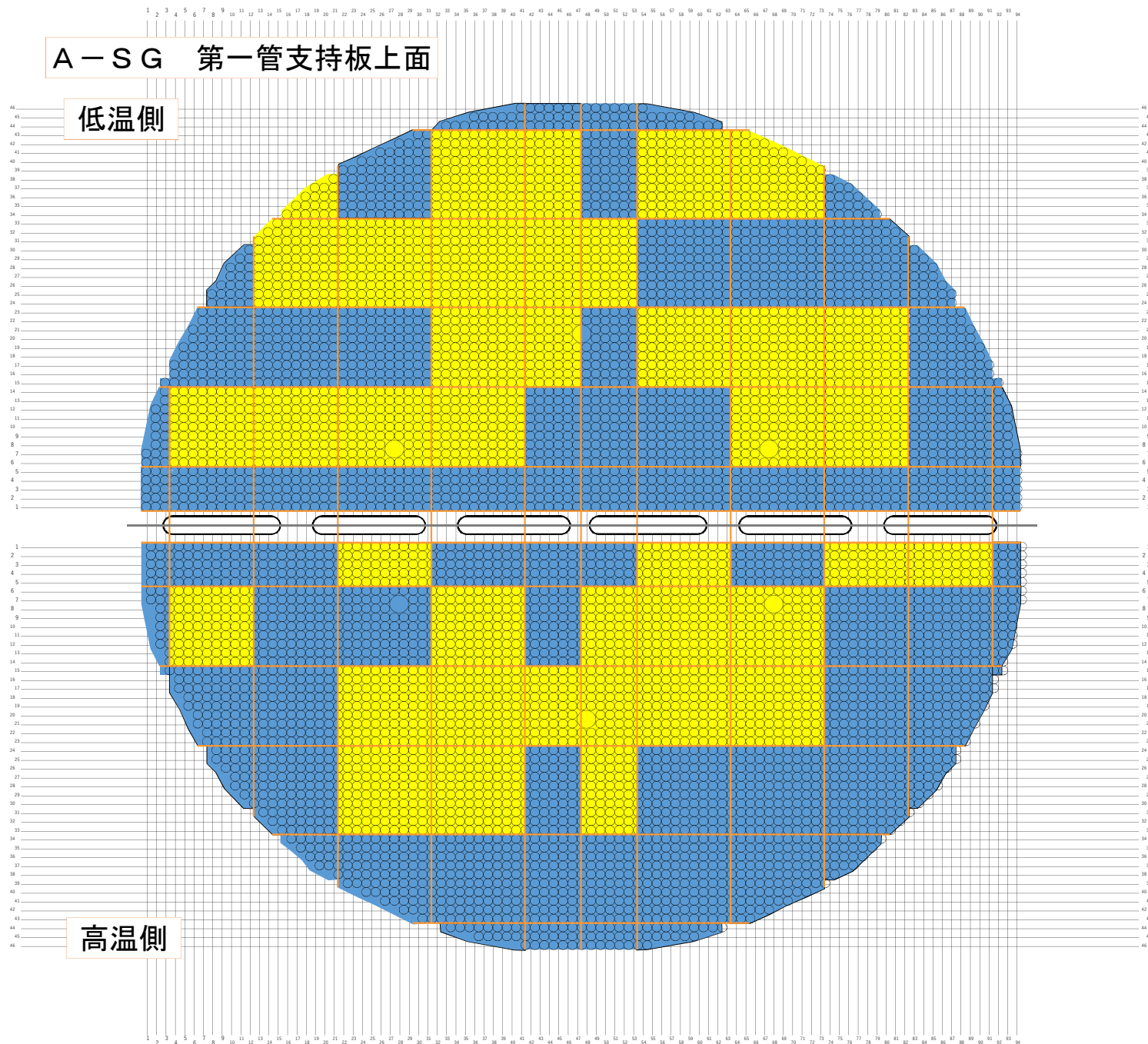


管板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を“多” “中” “少” に色分けした。

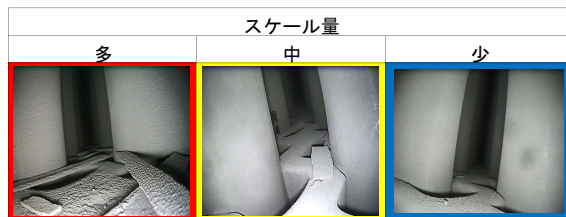


SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況 (第一管支持板)

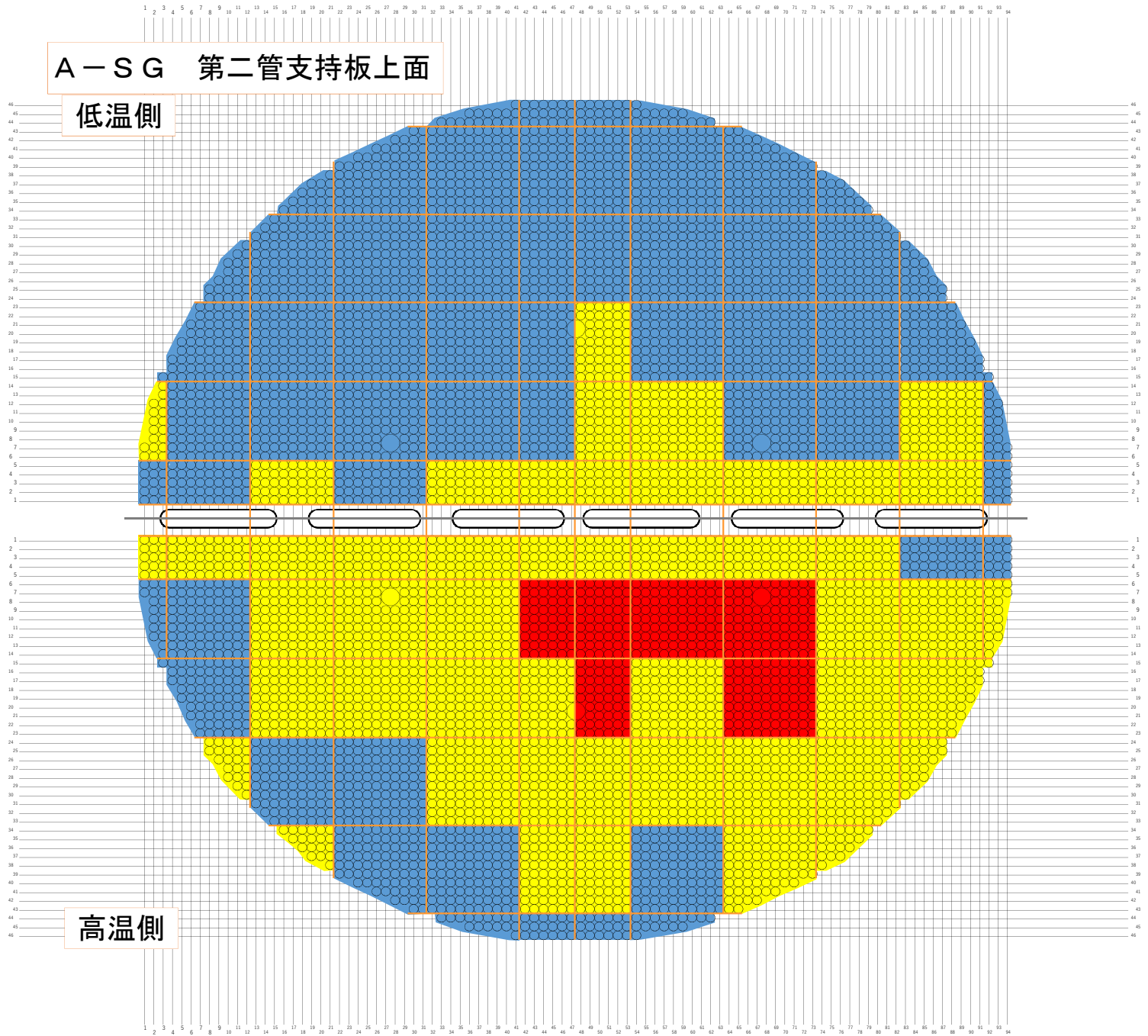


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況 (第二管支持板)

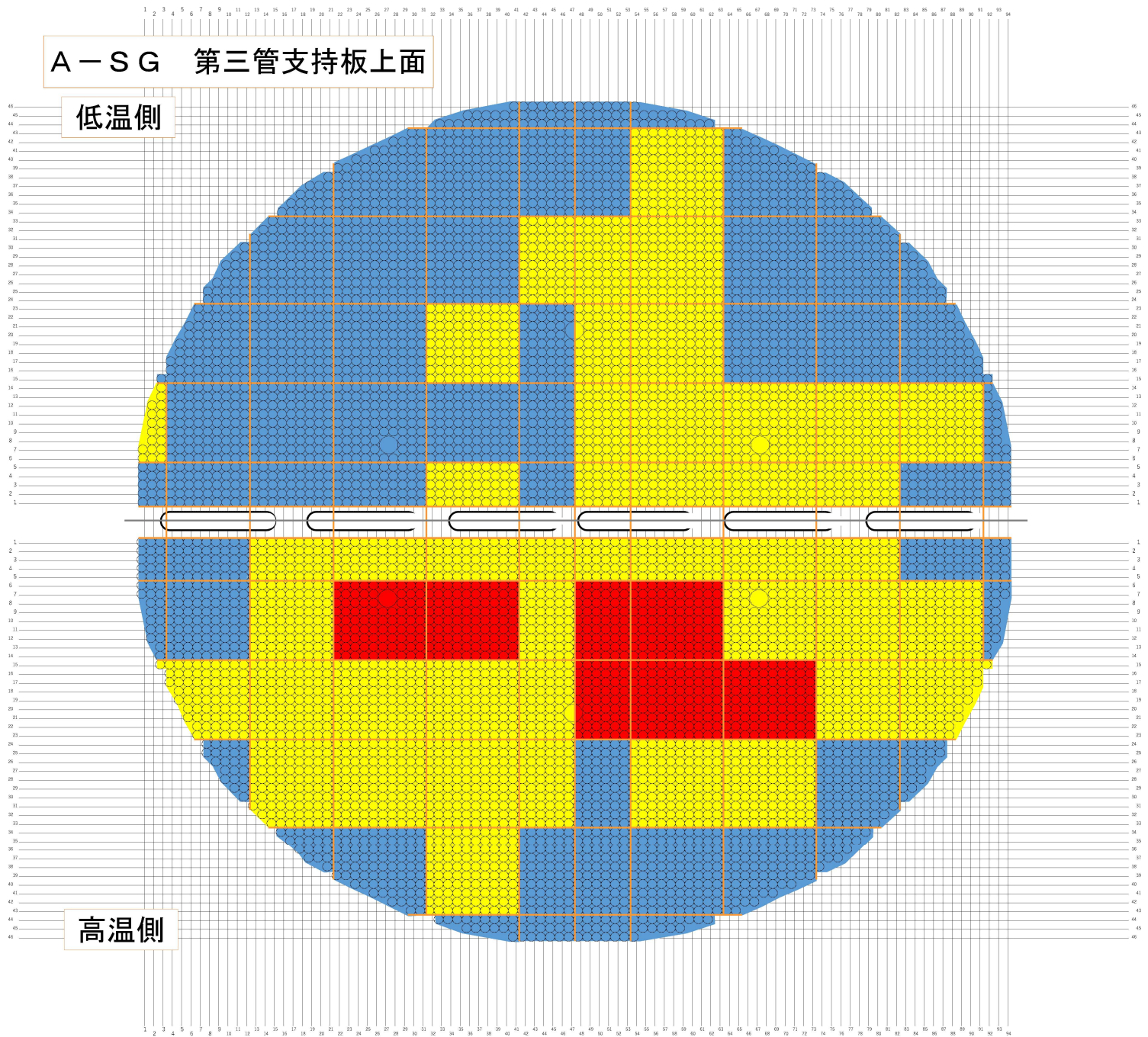


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況 (第三管支持板)

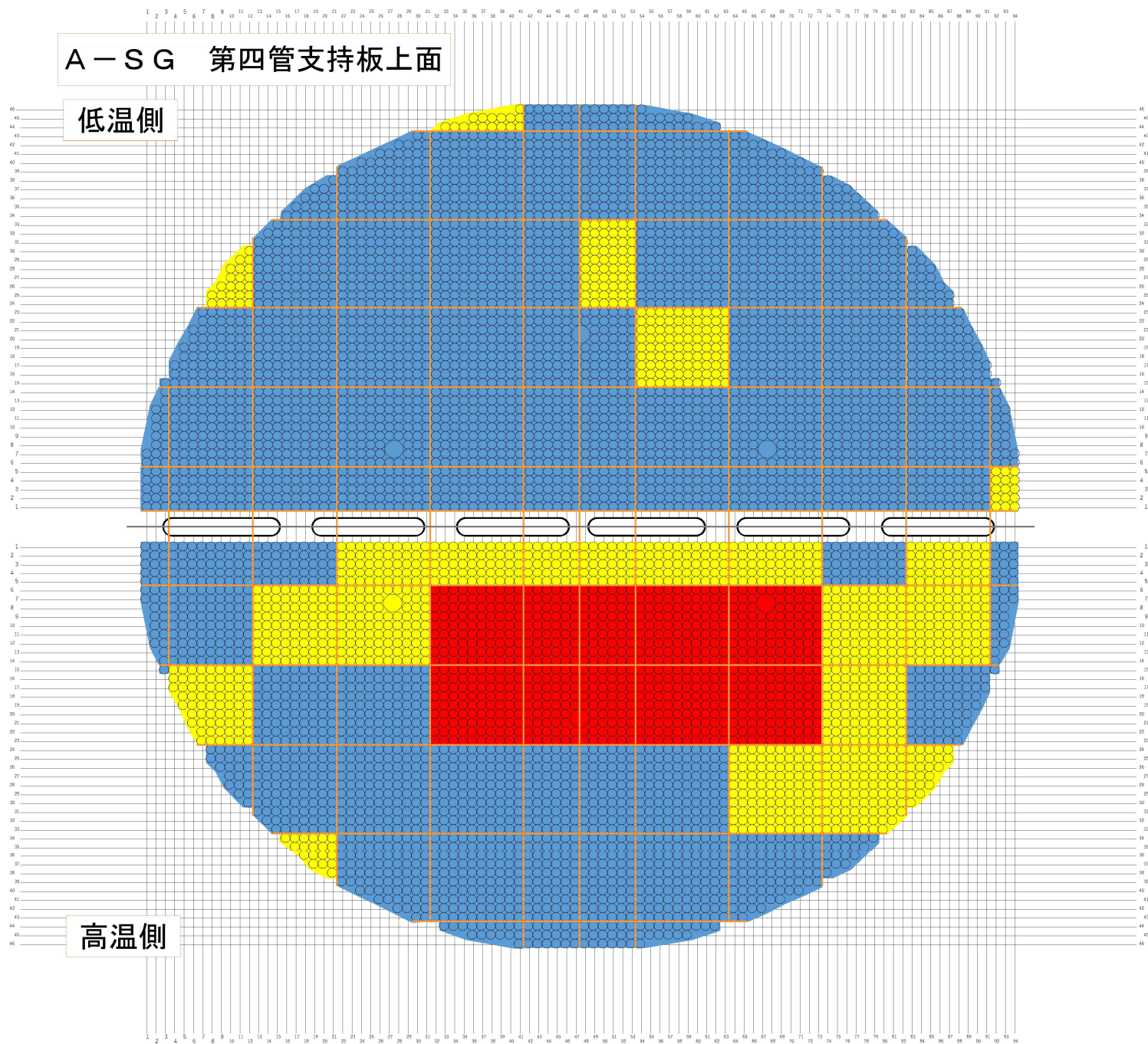


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



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 (第四管支持板)



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。

