

乙第232号証

関原発 第 592 号
2021年 2月19日

原子力規制委員会 殿

大阪市北区中之島3丁目6番16号
関西電力株式会社
執行役社長 森本 孝

高浜発電所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、関原発第562号（2021年1月25日）にて提出した原因ならびにその対策を取り纏めた報告書について、別紙のとおり補正します。

発電用原子炉施設故障等報告書

2021年2月19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	2020年11月20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、2020年10月7日より第23回定期検査中であり、3台ある蒸気発生器 (以下「SG」という。) の伝熱管^{*1}全数について、健全性を確認するため渦流探傷試験^{*2} (以下「ECT」という。) を実施した。</p> <p>その結果、A-SGの伝熱管1本およびC-SGの伝熱管3本について、管支持板^{*3}部付近に、外面からの減肉とみられる有意な信号指示^{*4}が認められたことから、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則第18条並びに第56条に適合しておらず、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条に該当することを、2020年11月20日13時00分に判断した。</p> <p>^{*1} SGの中で一次冷却材 (1次側) と給水 (2次側) の熱交換を行う逆U字形の管群。一次冷却材は入口管板部 (高温側) から入り、給水と熱交換後に出口管板部 (低温側) へ流れる。</p> <p>^{*2} 高周波電流を流したコイルを伝熱管に挿入することで伝熱管に渦電流を発生させ、伝熱管の欠陥により生じる渦電流の変化を電気信号として取り出すことで欠陥を検出する試験 (ECT; Eddy Current Test)。全周に対して渦電流の発生と検出を別々のコイルを用いた24組のコイルで伝熱管の欠陥による渦電流の変化を信号として検出する。</p> <p>^{*3} 伝熱管を支持する部品。</p> <p>^{*4} 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>2020年10月24日～2020年11月20日 (定期事業者検査終了日)</p> <p>探傷検査・データ整理期間 2020年10月24日～2020年11月17日</p> <p>解析・評価検査期間 2020年11月18日～2020年11月20日</p> <p>(2) 検査範囲</p> <p>SGの施栓^{*5}済みの伝熱管を除く、全数の伝熱管についてECTを実施した。</p> <p style="text-align: right;">(単位: 本)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>SG</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>合計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>検査対象本数</td> <td>3,244</td> <td>3,247</td> <td>3,256</td> <td>9,747</td> </tr> </tbody> </table> <p>^{*5} 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^{*6}、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^{*7} (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、有意な信号指示が認められた箇所は、色調図表示^{*8}で分析した結果、管支持板部付近であった。</p> <p>なお、高浜発電所4号機前回 (第22回) の定期検査におけるECTデータを確認した結果、今回有意な信号指示を確認した伝熱管の外面に、有意な信号指示が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	3,244	3,247	3,256	9,747
SG	A	B	C	合計							
検査対象本数	3,244	3,247	3,256	9,747							

事象の状況	(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>3</td> <td>4</td> </tr> </tbody> </table> <p>A-SG 第三管支持板 X51, Y4 : 減肉率 約33%</p> <p>C-SG 第三管支持板 X55, Y3 : 減肉率 約25% 第三管支持板 X55, Y8 : 減肉率 約32% 第三管支持板 X21, Y8 : 減肉率 約36%</p> <p>*⁶ 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。 *⁷ 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)。 *⁸ 24組分のコイルのチャートを平面状に並べ、信号振幅に応じて色調として表示させたもの。伝熱管全長についての信号指示の大きさや位置等の分析に用いる表示方法。</p>	SG	A	B	C	合計	指示管本数	1	0	3
SG	A	B	C	合計						
指示管本数	1	0	3	4						
事象の原因	<p>1. 減肉伝熱管2次側からの確認結果 ECTで減肉とみられる信号指示を確認した伝熱管を調査するため、当該部位を2次側から小型カメラにて点検を実施した。なお、ECTの信号による位置およびサイズと相違はなかった。</p> <p>(1) 伝熱管外観観察 小型カメラを用いて、減肉信号を確認した伝熱管の外観観察を実施したところ、以下のとおり摩耗痕とみられる箇所を確認した。</p> <p>a. A-SG 第三管支持板下面付近(減肉率 約33%) : 周方向約4.0mm、軸方向1.0mm以下(X51, Y4)</p> <p>b. C-SG 第三管支持板下面付近(減肉率 約25%) : 周方向約2.0mm、軸方向約1.0mm(X55, Y3) 第三管支持板下面付近(減肉率 約32%) : 周方向約6.0mm、軸方向1.0mm以下(X55, Y8) 第三管支持板下面付近(減肉率 約36%) : 周方向約7.0mm、軸方向1.0mm以下(X21, Y8)</p> <p>(2) ECT信号との比較 伝熱管2次側減肉部位における外観観察結果は、ECTにより得られる減肉信号指示による位置およびサイズが当該部の外観観察結果と相違ないことを確認した。</p> <p>2. 原因調査 有意な信号指示があった伝熱管の外表面減肉の原因調査を実施した。</p> <p>(1) SG伝熱管内面(1次側)からの損傷 ECTの信号指示により、伝熱管内面(1次側)にきずがないことを確認した。</p> <p>(2) SG伝熱管外面(2次側)からの損傷</p> <p>a. デンティン⁹ ECTの信号指示を確認した結果、デンティン⁹ではないと考える。 *⁹ 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。</p> <p>b. 粒界腐食割れ(IGA)¹⁰ 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(All Volatile Treatment)¹¹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。 *¹⁰ 金属の結晶粒の境目(粒界)に沿って進展する腐食。 *¹¹ 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。</p>									

事象の原因

c. ピッチング*¹²

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。

*¹² 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。

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を実施しているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考える。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉であると考えことから、リン酸減肉の可能性はないと考える。

e. 流体振動による疲労

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

f. エロージョン*¹³

当該部流速は約3m/sであり、かつ、TT600合金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。

*¹³ 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。

g. 摩耗減肉

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、機械的な影響によるものと考え減肉を確認したため、以下の確認を実施した。

(a) 管支持板との接触

ア. 管支持板ベイ部*¹⁴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。

*¹⁴ 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*¹⁵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。

*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) SG器外発生物との接触

ア. 過去事象を踏まえた点検調査

高浜発電所4号機前回(第22回)定期検査において、以下の異物混入対策を実施しており、異物混入の可能性はないことを確認している。

(ア) 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。

(イ) 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た確認を実施した結果、異物が混入していないことを確認している。

事 象 の 原 因

- (ウ) 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。
- (エ) 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。
- (オ) 作業中に発生した保温材の切れ端等の清掃・片づけについては一作業一片づけを徹底するとともに、作業服、靴に異物が付着していないか確認することにより、異物の拡散を防止する対応を実施しており、異物が混入する可能性は極めて低い。
- (カ) 高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査でのSG伝熱管損傷事象を踏まえ、高浜発電所4号機今回(第23回)定期検査においても、念のため、SGに異物が流入する可能性のある系統で実施している全ての点検対象機器310箇所について機器の健全性及びに異物管理状況を確認した結果、異物混入の可能性はないことを確認した。
- (キ) 高浜発電所4号機前回(第22回)定期検査において、SG器内に異物が混入していたことを踏まえ、念のためSG器内の水張り、窒素噴射(バブリング)および水抜きを実施した結果、異物は回収されなかった。

イ. SG器内点検

(ア) 目視点検

AおよびC-SGの減肉指示を確認した伝熱管周辺部の管板、流量分配板、第おおよび第二管支持板の上面の全ての範囲並びに減肉が認められた伝熱管近傍の第三管支持板の下面について小型カメラによる目視点検を実施した結果、伝熱管から剥離したスケールおよびスラッジ以外^{*16}の異物は確認できなかった。

また、念のため、AおよびC-SGの第三管支持板以上の上面の全ての範囲について小型カメラによる目視点検を実施した結果、伝熱管から剥離したスケールおよびスラッジ以外の異物は確認できなかった。なお、減肉を確認していないB-SGについてもAおよびC-SGと同様の範囲を小型カメラによる目視点検を実施した結果、伝熱管から剥離したスケールおよびスラッジ以外の異物は確認できなかった。

^{*16} 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(フレイク状(板状)に剥がれ落ちたものを含む)といい、スケールを形成せず粒子状となり、水中を漂うものや、スケールが砕けて小さくなったものが管支持板上等に堆積したものをスラッジという。

(イ) スラッジランシング^{*17}による調査

AおよびC-SGのスラッジランシングを実施し、異物の有無を確認した結果、スケールおよびスラッジ以外に異物は確認できなかった。

^{*17} 管板部に堆積したスラッジ(酸化鉄(主にマグネタイト))を水圧により除去する方法。

ウ. SG器外点検

(ア) 仮設ストレーナの点検結果

過去のSG伝熱管損傷事象を踏まえ設置した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を実施したところ、SG2次側のスラッジランシング等で回収される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さびは確認したが、それ以外の異物は確認できなかった。

(イ) SGブローダウンタンク内の点検結果

SGより水抜きされた器内水は、SGブローダウンタンクに一旦貯留するため、異物が滞留する可能性があることから、開放点検を実施した結果、異物は確認できなかった。

事 象 の 原 因

(ウ) 復水器ホットウェルの点検結果

復水器回収ラインを流れるSG器内水は、復水器ホットウェルに回収されることから、ホットウェル内部の目視点検を実施したが、異物は確認できなかった。

(エ) 復水ポンプ入口ストレーナの点検結果

復水器回収ラインから復水器ホットウェルに回収されたSG器内水は、復水ポンプを通じて復水系統へ流れるため、復水ポンプの入口に設置されているストレーナの目視点検を実施したが、異物は確認できなかった。

(オ) 弁、配管の点検結果

異物が滞留しやすい構造となっている弁や配管について、開放点検を実施した結果、異物は確認できなかった。

また、SGブローダウンサンプルラインについては、圧縮空気を流し込んでフラッシングすることによって点検を実施した結果、異物は確認できなかった。

以上の調査結果から、SG器内に異物が混入している可能性はない。

(c) SG器内発生物との接触

ア. SG内部品の脱落調査

(ア) 設計評価

SG内部品が脱落し、伝熱管を減肉させる可能性を設計図書により確認したところ、薄片形状として、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4号機前回（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。

(イ) スラッジランシングによる調査

AおよびC-SGのスラッジランシングを実施し、異物の有無を確認した結果、スケールおよびスラッジ以外に異物は確認できなかった。

(d) 付着物との接触

ア. 目視点検

(ア) A-SG

減肉信号を確認した伝熱管（X51, Y4）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15mm、長さ約9mmの付着物を確認したことから回収した。

(イ) C-SG

減肉信号を確認した伝熱管3本を小型カメラにて目視点検を実施した結果、うち1本の伝熱管（X55, Y3）と第三管支持板の間に付着物を確認したことから回収を試みた。その結果、付着物が折れたため一部の回収はできたものの、残りの付着物については、粉碎し、回収できなかった。

イ. 付着物の分析結果

(ア) A-SGで回収した付着物

i. 付着物の材質

付着物の材質に関し、成分分析した結果、主成分が酸化鉄（主にマグネタイト）であることを確認した。

事 象 の 原 因

ii. 付着物の外観観察

付着物の伝熱管減肉部との接触想定部（角部）を外観観察した結果、接触痕があり、光沢を確認した。

また、付着物の形状を計測した結果、直径約22.5mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管の外径22.23mmに近い形状であることを確認した。

iii. 付着物の表面観察

付着物の伝熱管接触想定部（角部）を走査型電子顕微鏡（以下「SEM」という。）により観察した結果、筋状痕を確認した。

iv. 付着物への伝熱管成分付着確認

付着物の伝熱管との接触想定部（角部）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。）の成分を検出した。

(イ) C-SGで回収した付着物

i. 付着物の材質

付着物の材質に関し、成分分析した結果、主成分が酸化鉄（主にマグネタイト）であることを確認した。

ii. 付着物の外観観察

付着物の表面を外観観察した結果、接触痕並びに光沢は確認できなかった。また、付着物の形状を計測した結果、直径約21.9mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管の外径22.23mmに近い形状であることを確認した。

iii. 付着物の表面観察

付着物をSEMにより観察した結果、凹面の一部に接触痕はあったが、筋状痕は確認できなかった。

iv. 付着物への伝熱管成分付着確認

付着物の凹面の接触痕を成分分析した結果、伝熱管の母材の成分であるNiを僅かに検出したが、Crは検出できなかった。

(ウ) 付着物分析のまとめ

AおよびC-SGで確認した付着物は、主成分が酸化鉄（主にマグネタイト）であり、伝熱管の外径に近い形状であったことから、スケールであると推定した。

A-SGの付着物（以下「スケールA」という。）については、接触痕があり光沢が認められた。また、減肉信号を確認した伝熱管との接触想定部（角部）にNiおよびCrの成分を検出した。

C-SGの付着物（以下「スケールC1」という。）については、接触痕並びに光沢は確認できず、また、凹面の接触痕にNiの成分を僅かに検出したが、Crは検出できなかった。

(エ) 回収スケールの分析結果

i. C-SG回収スケール

C-SG伝熱管の減肉を発生させたと考える異物等を発見していないことを踏まえ、C-SGの減肉を確認した伝熱管を中心にXおよびY方向に約10列ずつを範囲として、減肉箇所下方の第二および第一管支持板上にあるスケールを約300個回収し、確認したところ、その中の二つに伝熱管と接触したと思われる痕を有する幅約18mm、長さ約10mmのスケール（以下「スケールC2」という。）、幅約23mm、長さ約11mmのスケール（以下「スケールC3」という。）および幅約11mm、長さ約3mmのスケール（以下「スケールC4」という。）を確認した。

事 象 の 原 因

(i) スケールの回収場所

スケールC 2は、減肉が認められた X55, Y8 の第三管支持板の下方である X54 と X55 の間, Y3 の第二管支持板上面で回収した。また、スケールC 3は、減肉が認められた X21, Y8 の第三管支持板の下方である X21 と X22 の間, Y12 の第一管支持板上面で回収した。スケールC 4は、減肉が認められた X55, Y3 の第三管支持板の下方である X55 と X56 の間, Y4 の第二管支持板上面で回収した。

(ii) 回収スケールの外観観察

スケールC 2については凹面の一部および側面に、スケールC 3については凸面および側面に3箇所接触痕を確認した。また、スケールC 4については角部に接触痕を確認した。

回収スケールの形状を計測した結果、スケールC 2は直径約22.3mm、スケールC 3は直径約22.6mm、スケールC 4は直径約22.2mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管の外径22.23mmに近い形状であることを確認した。

(iii) 回収スケールの表面観察

回収スケールの接触痕の表面をSEMにより観察した結果、スケールC 2については、凹面の接触痕には筋状痕が確認できなかったものの、側面の接触痕では筋状痕を確認した。スケールC 3については、凸面の接触痕には筋状痕が確認できなかったが、側面の2箇所の接触痕に筋状痕を確認した。スケールC 4については、角部の接触痕に筋状痕を確認した。

(iv) 回収スケールへの伝熱管成分付着確認

スケールC 2、スケールC 3およびスケールC 4を成分分析した結果、スケールC 2については、凹面の接触痕には管支持板の主成分であるCrが、また、側面の接触痕には伝熱管の主成分であるNiおよびCrを検出した。スケールC 3については、凸面の接触痕には管支持板の主成分であるCrが、また、側面の接触痕には伝熱管の主成分であるNiおよびCrを検出した。スケールC 4については、角部の接触痕に伝熱管の主成分であるNiおよびCrを検出した。

(v) 回収スケールの形状と減肉箇所との関係

スケールC 2の形状および筋状痕を確認した側面、スケールC 3の形状および筋状痕を確認した2箇所の接触痕の位置関係が、C-SGで確認した3箇所の減肉箇所のいずれかと合致するか確認したところ、スケールC 2についてはX55, Y8の減肉箇所やX55, Y8周辺にある第三管支持板表面の接触痕が、回収スケールの形状や接触痕と位置関係が一致することを確認した。また、スケールC 3についてはX21, Y8の減肉箇所並びにX21, Y8周辺にある第二管支持板表面および隣接管(X20, Y8)の接触痕が、回収スケールの形状や接触痕と位置関係が一致することを確認した。

スケールC 4については、角部の筋状痕、X55, Y3の減肉箇所およびX55, Y3周辺にある第三管支持板表面の接触痕を踏まえ、回収スケールは一部が欠損した形状と想定すると、減肉箇所と接触状態になることを確認した。

(3) 損傷以外のECT信号指示

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

(4) 原因調査のまとめ

スケールAについては、接触痕があり光沢が認められ、減肉信号を確認した伝熱管との接触想定部位にNiおよびCrの成分を検出したことから、スケールAが減肉を発生させたと考えられる。なお、スケールC 1は接触痕並びに光沢は確認できず、また検出されたNiの成分は僅かであるとともにCrの成分は検出されなかったため、減肉を発生させたものではないと考える。

事 象 の 原 因

減肉信号を確認した伝熱管付近から回収したスケールC2、C3およびC4については、回収したスケールに接触痕を確認し、接触想定部位にNiおよびCrの成分を検出したこと、および管支持板表面の接触痕と形状や接触痕の位置関係が一致することから、スケールC2、C3およびC4が減肉を発生させたと考えられる。

3. 減肉メカニズム

AおよびC-SGで回収したスケールを調査した結果、表面に接触痕が確認され、NiとCrを検出していることから、スケールが伝熱管減肉を発生させた可能性がある。そのため、減肉を発生させるスケールの生成、剥離メカニズムおよび伝熱管を損傷させる可能性について、以下のとおり調査および検討を実施した。

(1) スケールの生成メカニズム

a. スケールの生成および性状

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

(a) 析出付着

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

(b) 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^{*18}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。

^{*18} 密度が比較的低く、粗な状態。

b. スケール性状の実機調査

(a) 過去の調査での知見（平成8年）

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

(b) 高浜発電所4号機におけるスケール調査

高浜発電所4号機今回（第23回）定期検査において、伝熱管の上部（第七管支持板上）および伝熱管の下部（第一管支持板と第二管支持板の間）から1サンプルずつスケールを回収し、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（第一管支持板と第二管支持板の間）では稠密で薄いということを確認した。

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

c. 2次系の水質管理調査

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

事 象 の 原 因

(a) 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。

スケールの生成に関係するのはpHであり、2次系構成機器の流れ加速型腐食等による給水中への鉄の放出を抑制するためにはアルカリ側に水質管理を行う必要がある。そのため、これまでpH上昇によりSGへの鉄の持込み量低減を図るべく、AVT処理(pH9.2)、ETA^{*19}処理(pH9.4~9.5)、高ETA処理(pH9.8)、高アンモニア処理(pH9.8)と改善してきた。

各水処理における給水中の鉄含有量は実測データより、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。

*19 エタノールアミン。

処理方法	給水中鉄含有量
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

(b) 運転時間

上記水処理での運転時間は次のとおりである。

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2.4万時間

(c) 鉄の持ち込み量

上記水処理期間の鉄の持ち込み量と、合計の鉄の持ち込み量を算出した結果は次のとおりである。

処理方法	鉄の持ち込み量
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90kg
合計	約2,490kg

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

d. スケール厚さに関する実機調査

スケール厚さの傾向を推定するパラメータとして、主蒸気圧力やSG伝熱抵抗係数^{*20}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るため、スケール厚さは経年的に増加する。

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

*20 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値を高く維持することで、1サイクルあたりの鉄の持込み量は数十kg/SG程度に抑えられていることを確認した。

事 象 の 原 因

(2) スケールの剥離

a. 剥離メカニズム

伝熱管表面に生成したスケールが剥離するのは、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(a)～(c)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。

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

b. 長期停止の影響

東日本大震災以降、2011年7月に定期検査を開始し、その後、2017年5月に再稼働するまでの約6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が、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、1か月間、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)をヒドラジン水による浸漬試験を実施した。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することができた。これは、ヒドラジンの還元作用でスケールの鉄が一部溶解、再析出を繰り返しており、その結果、粒径が大きくなる。

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4号機の長期停止前後の実績を調査した結果、スケール回収量は長期停止後に増加している傾向が認められた。

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

(3) スケールにより伝熱管を損傷させる可能性

AおよびC-SGで回収したスケールが今回のSG伝熱管損傷事象を発生させた可能性を検証するため、回収したスケールの性状を確認し、以下の試験等を実施した。

a. 回収したスケールの性状

AおよびC-SGで回収したスケール(スケールA、C2、C3およびC4)については、伝熱管と接触が想定される部分に接触痕や光沢があり、また、伝熱管の主成分であるNiとCrを検出したことから、減肉を発生させる可能性があるスケール性状を把握するため、断面マイクロ観察を実施した結果、空隙率^{*21}5%以下の稠密層が形成されていることを確認した。

^{*21} スケール断面の厚さ方向を0.02mmピッチで区切った上で、各区間の空隙数をカウントし、全区間の平均値を求めて空隙率とする。

b. 回収スケールと同等性状のスケールによる伝熱管との摩耗試験

今回回収したAおよびC-SGのスケールは稠密であることから、AおよびC-SG回収スケールと同等の稠密さ(空隙率5%以下の稠密層が主体)、厚さ(約0.2～0.3mm)のスケールを3個用いて、伝熱管との摩耗試験を実施した。

その結果、伝熱管とスケールの摩耗比(体積比)は最大1:0.5となり、伝熱管の方が早く摩耗する結果が得られた。

一方、高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査の事象では、摩耗試験の結果、摩耗体積比は最大でも1:4であり、スケールの方が早く摩滅したことから、スケールが原因の可能性は低いとしていた。これは、前回の試験ではスケールの稠密さではなく厚さに着目しており、主に伝熱管の上部から回収したスケールを供試体として選定したためであり、比較的厚さの大きい約0.6～1.0mm厚さの試験体7個と約0.3～0.4mm厚さの試験体2個の合計9個を抽出して試験を実施したことによるものである。

なお、前回試験の供試体のうち、最も厚く粗密と考える最上段(第七)管支持板上面から回収したスケールでは、空隙率5%を超える領域が主体であったのに対し、今回回収したスケールは空隙率5%以下の領域が主体であったことから、以降では、空隙率5%以下の領域を稠密層と定義する。

<p>事 象 の 原 因</p>	<p>以上により、伝熱管に減肉を与える可能性があるスケール性状については、稠密さが重要であり、稠密な性状をもつスケールは、伝熱管と接触することで、減肉を発生させる可能性が高いと考える。</p> <p>上記において、AおよびC-SGで回収したスケールが伝熱管に有意な減肉を発生させるものであることを確認できたことから、次のc.～f.では、これらのスケールが、今回認められた減肉を発生させたメカニズムについて考察した。</p> <p>c. SG器内挙動の推定および接触状態の再現性確認</p> <p>A-SGで回収したスケールは第三管支持板下面で伝熱管と接触している状態で確認され、またC-SGで回収したスケール形状と接触痕については、伝熱管の減肉箇所および第三管支持板の表面の接触痕と位置関係が一致したため、剥離したスケールがSG器内で第三管支持板下面へ到達するまでの挙動を推定するとともに、SG 2次側の流況モックアップ試験により、実機を模擬した二相流の条件においても、推定した接触状態が再現するかの確認を実施した。</p> <p>(a) 器内のスケール挙動</p> <p>主にプラント停止時に伝熱管から剥離し、管板上に落下したスケールの場合には、運転中のSG 2次側器内の流況下では流体抗力がスケールの落下力を上回ることから、管群内の上昇流に乗って流量分配板および各管支持板フローサポート部を通過し、減肉箇所へ到達したことが考えられる。第一管支持板より上方では、上昇流に加え高温側から低温側への水平方向流があることから、第一管支持板および第二管支持板フローサポート部を通過したものが第三管支持板の低温側下面に至ると推定される。</p> <p>また、第一管支持板上面または第二管支持板上面に落下したスケールの場合も、落下した場所によっては、上記と同様の上昇流および水平方向流に乗って第三管支持板の低温側下面に至る可能性はあると考える。</p> <p>(b) SG 2次側の流況モックアップ試験</p> <p>SG 2次側の流況を再現するモックアップ試験装置により、スケールの接触状態が実機を模擬した二相流の条件において再現できることを確認した。</p> <p>d. 摩耗形態の推定</p> <p>スケールとの接触で伝熱管が摩耗する場合、スケールの振動により摩耗するケースと、伝熱管の振動により摩耗するケースが考えるため、次の通り各ケースで想定されるワークレート^{*22}の比較を実施した。</p> <p>^{*22} 摩耗体積を評価する一般式で用いられる摩耗を生じさせる方で、押付力と摺動速度の積で表現される。</p> <p>(a) スケール振動のケース</p> <p>本ケースではスケールの端部が拘束された片持ち梁の状態を想定する。この想定に基づきワークレートを計算すると、スケールでは流体力を受ける面積が小さいため、有意な減肉が生じるワークレートは発生しないことを確認した。</p> <p>(b) 伝熱管振動のケース</p> <p>本ケースでは、スケールが管支持板下面で保持され、接触する伝熱管のランダム振動^{*23}により伝熱管自身に減肉が発生したことが想定される。管支持板部の伝熱管の振幅は、伝熱管と管支持板BEC穴ランド部の隙間に制限されるため、隙間が確保され振幅が大きくなる伝熱管においてスケールとの接触により減肉が生じるものと推定される。本想定に基づきワークレートを試算すると、スケール振動のケースに比べて十分大きなワークレートが得られることを確認した。</p> <p>^{*23} 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。</p> <p>上記(a)、(b)から、発生した減肉は伝熱管振動によるものと推定されるため、以下では伝熱管振動により減肉が発生したものと想定して検証を実施した。</p> <p>なお、伝熱管振動のケースでは、最大減肉深さは伝熱管の振動振幅に制限されるため、減肉の進展により伝熱管を貫通することはない。また、スケールAの接触状態については、伝熱管に対して斜めに接触しており、流体力により伝熱管に押し付けられる方向の外力も作用していると考えられるため、その状態での減肉の進展性について、以下のア.～ウ.のケースを考察した結果、いずれも伝熱管の貫通には至らず、強度・耐震性も問題ないことを確認した。</p>
------------------	--

事 象 の 原 因

- ア. B E C穴2箇所支持され、支持部で固定されているケース
- イ. B E C穴2箇所支持され、支持部で固定されておらず、流体力で伝熱管へ押し付けられるが、伝熱管からの押し戻しもあるケース
- ウ. 上記イ. 項の伝熱管からの押し戻しに耐えると仮定し、スケールAが伝熱管方向に倒れ続けるケース

e. 減肉形状の再現性確認試験

上記c. およびd. で確認したスケールと伝熱管の接触状態および摩耗形態で実機の減肉形状が再現できるか確認するため、次のとおり、減肉試験を実施した。また、減肉試験で得られた減肉形状と同等の人工欠陥を与えた伝熱管のモックアップ試験体のE C T信号を取得し、実機のE C T信号と比較した。

(a) 減肉試験

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

(b) E C Tモックアップ試験

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

f. ワークレートによる摩耗体積評価

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

(4) 高浜発電所3号機および4号機の特異性

a. 当社他プラントとの鉄持込み量、薬品洗浄実績、スケール回収量の比較

鉄の持込み量について、比較のため当社他プラントの調査を実施した。また、当社他プラントでは薬品洗浄^{*24}を実施しており、スケール性状に影響を与えている可能性があることから、その実績を確認した。さらに、スケールの厚さ増加や長期停止による剥離挙動の影響は、スケール回収量に現れている可能性があることから、あわせて比較調査を実施した。

なお、高浜発電所3号機および4号機では薬品洗浄を実施していないが、伝熱性能の低下に伴う主蒸気圧力の低下はあるものの、大飯発電所3号機および4号機に比べ電気出力の定格電気出力に対する余裕があるため、大飯発電所3号機および4号機を先行して実施した。

^{*24} 希薄な化学薬液(エチレンジアミン四酢酸、濃度1%)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S G伝熱性能の回復を図る手法で、当社では大飯発電所3号機および4号機で実績がある。

(a) 鉄持込み量および薬品洗浄実績

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

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。

事 象 の 原 因

<表1：各プラントの鉄持込み量および薬品洗浄実績>

	高浜3	高浜4	大飯3	大飯4	美浜3	高浜1	高浜2
運転時間*25 (万時間)	22.3	22.2	17.0	17.2	9.0	10.9	12.5
鉄持込み量 (kg)	2,620	2,490	1,850	1,950	780	680	940
薬品洗浄 実績回数			2回	1回			
薬品洗浄 実績時間 (万時間)	—	—	16.1 (第17回) 17.0 (第18回)	16.2 (第16回)	—	—	—

*25 美浜発電所3号機、高浜発電所1号機および高浜発電所2号機については、蒸気発生器取替以降の運転時間を示す。

(b) スケール回収量

スケール回収量*26を確認した結果、高浜発電所3号機および4号機では、いずれも長期停止後にスケール回収量が増加していた。

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

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

*26 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3号機	0.01未満 (第21回)	0.41 (第22回)	0.24 (第23回)	0.36 (第24回)
高浜4号機	0.01未満 (第20回)	12.37 (第21回)	8.24 (第22回)	—
大飯3号機	0.01未満 (第16回)	0.01未満 (第17回)	0.01未満 (第18回)	—
大飯4号機	0.01未満 (第15回)	0.01未満 (第16回)	0.01未満 (第17回)	—

b. 当社他プラントとの実機スケール比較

スケールの稠密層厚さが鉄持込み量と相関するかを検証するため、当社他プラントの伝熱管下部から実機スケールを採取し、断面マイクロ観察を実施した。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、蒸気発生器取替プラント（美浜発電所3号機、高浜発電所1号機および2号機）からは、最も鉄の持込み量の大きい高浜発電所2号機を選定した。

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ため、ここでは比較対象に挙げない。

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

<表3：実機スケール観察結果>

回収場所	高浜4号機 鉄持込み量： 2,490kg	大飯4号機 鉄持込み量： 1,950kg	高浜2号機 鉄持込み量： 940kg	備考
第二管支持板 ～ 管板間	空隙率5%以下の稠密層厚さ： 最大0.18mm	空隙率5%以下の稠密層厚さ： 最大0.04mm	空隙率5%以下の稠密層厚さ：—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

事 象 の 原 因

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

c. 伝熱管の摩耗試験結果の比較

上記の調査結果を踏まえ、当社他プラントの中では比較的稠密層が厚い大飯発電所3号機および4号機で採取したスケールについて摩耗試験を実施した。大飯発電所3号機および4号機のスケールは、試験開始後にスケールが欠損するか、スケールの方が早く摩滅するという結果が得られ、伝熱管とスケールの摩耗体積比が最も大きいものでも1:1.5であった。このため、空隙率5%以下であっても稠密層が薄い場合、有意な減肉を与える可能性は低いことを確認した。

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

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

(5) スケールにより減肉した国内外事例調査

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

なお、国内外において、SGの運転時間が高浜発電所3号機および4号機で外面減肉事象が生じた運転時間以上であり、かつ薬品洗浄の実績が認められず、高浜発電所3号機および4号機と同等の伝熱管支持構造を有するプラントを調査した結果、8プラントのみであることを確認した。

4. 伝熱管の健全性

(1) 減肉伝熱管の健全性

減肉した伝熱管の強度、耐震性について以下のように評価した。

a. 強度

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

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

b. 耐震性

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

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

(2) 隣接伝熱管の健全性

SG器内において小型カメラを用いて伝熱管の目視確認を実施した際に確認した摩耗痕に隣接した伝熱管の接触痕は、有意な減肉信号指示ではない。

5. 推定原因

AおよびC-SGで回収した稠密な性状をもつスケールが、伝熱管と接触し、伝熱管を減肉させたと推定した。

6. 健全性評価

稠密な性状をもつスケールを脆弱化させるための手段として、大飯発電所3号機および4号機で実施している薬品洗浄の有効性を検討した。

(1) 薬品洗浄の概要と効果

SG器内に薬液*27を注入し、伝熱管全体を浸すことにより、伝熱管表面の鉄スケール

<p>事 象 の 原 因</p>	<p>を緩やかに溶解することで、稠密な性状のスケールを粗密化し、脆弱化させる効果があることから、高浜発電所4号機で採取した稠密な性状のスケールに薬液を浸し確認した結果、稠密層厚さが減少していることを確認した。その後の摩耗試験において、いずれのスケールも試験中に欠損または有意に摩滅することを確認した。</p> <p>また、高浜発電所3号機第24回定期検査においても薬品洗浄を実施し、薬品洗浄実施後にSG器内からスケールを採取して脆弱化の効果を確認した結果、スケールの断面マイクロ観察および摩耗試験において、いずれのスケールも稠密層厚さが0.1mm未満であり、試験片製作時にスケールが欠損、摩耗試験開始直後にスケールが欠損または有意に摩滅することを確認した。</p> <p>以上から、スケールに起因した伝熱管減肉事象の対策として有効であると考える。</p> <p>*27 希薄なエチレンジアミン四酢酸 (Ethylene Diamine Tetra acetic Acid: EDTA)。合成洗剤に使用される酸の一種で鉄、銅の溶解を促進する効果を持つ薬液。</p> <p>(2) 薬品洗浄に伴う伝熱管等への影響</p> <p>薬品洗浄を実施することで脆弱化したスケールが伝熱管から剥離するが、脆弱化したスケールがプラント運転中にSG器内の上昇流に伴って伝熱管に接触し、摩耗したとしても、脆弱化したスケールでは伝熱管を減肉させることはない。また、管板上へのスラッジの堆積量が増加すると想定されるが、スラッジでは伝熱管を減肉させることはない。</p> <p>プラント停止後は、剥離したスケールがSG器内水のブロー時にブロー水とともにSG器外に流出するが、これまで薬品洗浄を実施している大飯発電所3号機および4号機において、SGブローダウン配管等閉塞するなどの事例は認められていないことから、剥離したスケールがプラントに影響を及ぼすことはないと考える。</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>2021年3月下旬(発電機並列予定)</p>
<p>再発防止対策</p>	<p>1. 減肉伝熱管の施栓 外面減肉が認められたSG伝熱管について、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. 薬品洗浄による稠密性状スケールの脆弱化 SG器内に薬液を注入し、伝熱管全体を浸すことにより、伝熱管に付着している稠密な性状のスケールを粗密化させ、脆弱化させる。</p> <p>今後の保全指標として、毎定期検査時にスケールを回収し、スケールの稠密層厚さの確認および摩耗試験を実施する。確認および摩耗試験では、稠密層厚さ0.1mm未満および摩耗体積比0.1未満であることを確認し、それを超えた場合は薬品洗浄を実施する。</p> <p>なお、他プラントへの水平展開として、SGを取替えていない大飯発電所3号機および4号機については、2定期検査毎にSG器内のスケールを回収し、稠密層厚さおよび摩耗体積比を確認する。SGを取替えている高浜発電所1号機および2号機、美浜発電所3号機については、鉄持ち込み量が最大である高浜発電所2号機を代表として2定期検査毎にSG器内から回収可能なスケールの有無を確認する。</p> <p>また、高浜発電所3号機および4号機のSGについては、TT600合金製の伝熱管に応力腐食割れが認められていることから、本事象も踏まえ、今後も引き続き、SG取替えに係る検討を進めていく。</p>

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1月25日 提出

2021年2月19日 補正

関西電力株式会社

はじめに

2020年11月20日、蒸気発生器の伝熱管全数について、渦流探傷試験を実施した結果、A-蒸気発生器の伝熱管1本およびC-蒸気発生器の伝熱管3本について、管支持板部付近に、外面からの減肉とみられる有意な信号指示が認められたことから、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条に該当することを、2020年11月20日13時00分に判断し、原子力規制委員会へ連絡した。

また、これら本事象の内容、原因調査および対策等について、2020年11月24日「関原発第428号」、2021年1月25日「関原発第562号」をもって原子力規制委員会に報告した。

今回の報告は、2021年1月25日の報告後に高浜発電所3号機蒸気発生器にて実施した薬品洗浄によるスケール脆弱化効果の確認結果および2021年2月5日「第15回原子力施設等における事故トラブル事象への対応に関する公開会合」、2021年2月16日「第16回原子力施設等における事故トラブル事象への対応に関する公開会合」において説明した内容を踏まえて、本事象に関する原因調査等について追加・修正を行い、補正として報告するものである。

1. 件名

高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について

2. 事象発生日

2020年11月20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23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、2020年10月7日より第23回定期検査中であり、3台ある蒸気発生器（以下「SG」という。）の伝熱管*1全数について、健全性を確認するため渦流探傷試験*2（以下「ECT」という。）を実施した。

その結果、A-SGの伝熱管1本およびC-SGの伝熱管3本について、管支持板*3部付近に、外面からの減肉とみられる有意な信号指示*4が認められたことから、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則第18条並びに第56条に適合しておらず、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条に該当することを、2020年11月20日13時00分に判断した。

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

*2 高周波電流を流したコイルを伝熱管に挿入することで伝熱管に渦電流を発生させ、伝熱管の欠陥により生じる渦電流の変化を電気信号として取り出すことで欠陥を検出する試験（ECT; Eddy Current Test）。全周に対して渦電流の発生と検出を別々のコイルを用いた24組のコイルで伝熱管の欠陥による渦電流の変化を信号として検出する。

*3 伝熱管を支持する部品。

*4 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

2020年10月24日～2020年11月20日（定期事業者検査終了日）

探傷検査・データ整理期間 2020年10月24日～2020年11月17日

解析・評価検査期間 2020年11月18日～2020年11月20日

(2) 検査範囲

SGの施栓^{*5}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	3,244	3,247	3,256	9,747

^{*5} 伝熱管の1次側出入口部分に機械式栓を用いて栓をし、供用外とすること。

(3) 検査結果

(添付資料-2、3)

ECTデータを評価した結果^{*6}、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^{*7}(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、有意な信号指示が認められた箇所は、色調図表示^{*8}で分析した結果、管支持板部付近であった。

なお、高浜発電所4号機前回(第22回)の定期検査におけるECTデータを確認した結果、今回有意な信号指示を確認した伝熱管の外面に、有意な信号指示が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	3	4

A-SG

第三管支持板 X51, Y4 : 減肉率 約33%

C-SG

第三管支持板 X55, Y3 : 減肉率 約25%

第三管支持板 X55, Y8 : 減肉率 約32%

第三管支持板 X21, Y8 : 減肉率 約36%

^{*6} 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。

^{*7} 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)。

^{*8} 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24日 定期事業者検査開始(探傷検査・データ整理)

11月19日 C-SG器内のカメラによる目視点検を開始

11月20日 定期事業者検査終了

A-SG伝熱管1本(2次側)、C-SG伝熱管3本(2次側)に外面からの減肉と認められる信号指示があることを確認

- 1 1月21日 A-SG器内のカメラによる目視点検を開始
- 1 2月11日 A-SG器内のカメラによる目視点検完了
C-SG器内のカメラによる目視点検完了
- 1 2月18日 A-SGスラッジランシング完了
- 1月 7日 C-SGスラッジランシング完了

9. 減肉伝熱管2次側からの確認結果

ECTで減肉とみられる信号指示を確認した伝熱管を調査するため、当該部位を2次側から小型カメラにて点検を実施した。なお、ECTの信号による位置およびサイズと相違はなかった。

(1) 伝熱管外観観察

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

a. A-SG

第三管支持板下面付近（減肉率 約33%）：
周方向約4.0mm、軸方向1.0mm以下（X51, Y4）

b. C-SG

第三管支持板下面付近（減肉率 約25%）：
周方向約2.0mm、軸方向約1.0mm（X55, Y3）

第三管支持板下面付近（減肉率 約32%）：
周方向約6.0mm、軸方向1.0mm以下（X55, Y8）

第三管支持板下面付近（減肉率 約36%）：
周方向約7.0mm、軸方向1.0mm以下（X21, Y8）

(2) ECT信号との比較

伝熱管2次側減肉部位における外観観察結果は、ECTにより得られる減肉信号指示による位置およびサイズが当該部の外観観察結果と相違ないことを確認した。

10. 原因調査

（添付資料-4）

有意な信号指示があった伝熱管の外面減肉の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) SG伝熱管内面（1次側）からの損傷

（添付資料-5）

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。

(2) SG伝熱管外面（2次側）からの損傷

a. デンティン^{*9}

（添付資料-5）

ECTの信号指示を確認した結果、デンティン^{*9}ではないと考える。

^{*9} 管支持板の腐食およびそれに伴う腐食生成物の体積膨張による伝熱管の変形をいう。

b. 粒界腐食割れ (IGA) *¹⁰ (添付資料-6)

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 (All Volatile Treatment) *¹¹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。

*¹⁰ 金属の結晶粒の境目 (粒界) に沿って進展する腐食。

*¹¹ pH調整剤のアンモニアと酸素除去剤のヒドラジンで水質調整を行う揮発性物質処理。

c. ピッティング*¹² (添付資料-7)

過去にSG2次側環境において海水リーク等による塩化物環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、ピッティングが発生した実績があるが、高浜発電所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。

*¹² 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。

d. リン酸減肉 (添付資料-8)

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-9)

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*¹³ (添付資料-10)

当該部流速は約3m/sであり、かつ、TT600合金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。

*¹³ 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。

g. 摩耗減肉

(添付資料－11)

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、機械的な影響によるものとする減肉を確認したため、以下の確認を実施した。

(a) 管支持板との接触

ア. 管支持板ベイ部^{*14}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。

*14 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^{*15}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。

*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) SG器外発生物との接触

(添付資料－12)

ア. 過去事象を踏まえた点検調査

高浜発電所4号機前回(第22回)定期検査において、以下の異物混入対策を実施しており、異物混入の可能性はないことを確認している。

(ア) 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。

(イ) 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た確認を実施した結果、異物が混入していないことを確認している。

(ウ) 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。

(エ) ウェスを使用する場合は、新しいウェスに限るものとし、新ウェスは再使用ウェ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。

(オ) 作業中に発生した保温材の切れ端等の清掃・片づけについては一作業一片づけを徹底するとともに、作業服、靴に異物が付着していないか確

認することにより、異物の拡散を防止する対応を実施しており、異物が混入する可能性は極めて低い。

(カ) 高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査でのSG伝熱管損傷事象を踏まえ、高浜発電所4号機今回(第23回)定期検査においても、念のため、SGに異物が流入する可能性のある系統で実施している全ての点検対象機器310箇所について機器の健全性並びに異物管理状況を確認した結果、異物混入の可能性はないことを確認した。

(キ) 高浜発電所4号機前回(第22回)定期検査において、SG器内に異物が混入していたことを踏まえ、念のためSG器内の水張り、窒素噴射(バブリング)および水抜きを実施した結果、異物は回収されなかった。

イ. SG器内点検

(添付資料-13)

(ア) 目視点検

AおよびC-SGの減肉指示を確認した伝熱管周辺部の管板、流量分配板、第一および第二管支持板の上面の全ての範囲並びに減肉が認められた伝熱管近傍の第三管支持板の下面について小型カメラによる目視点検を実施した結果、伝熱管から剥離したスケールおよびスラッジ以外^{*16}の異物は確認できなかった。

また、念のため、AおよびC-SGの第三管支持板以上の上面の全ての範囲について小型カメラによる目視点検を実施した結果、伝熱管から剥離したスケールおよびスラッジ以外の異物は確認できなかった。なお、減肉を確認していないB-SGについてもAおよびC-SGと同様の範囲を小型カメラによる目視点検を実施した結果、伝熱管から剥離したスケールおよびスラッジ以外の異物は確認できなかった。

^{*16} 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)といい、スケールを形成せず粒子状となり、水中を漂うものや、スケールが砕けて小さくなったものが管支持板上等に堆積したものをスラッジという。

(イ) スラッジランシング^{*17}による調査

AおよびC-SGのスラッジランシングを実施し、異物の有無を確認した結果、スケールおよびスラッジ以外に異物は確認できなかった。

^{*17} 管板部に堆積したスラッジ(酸化鉄(主にマグネタイト))を水圧により除去する方法。

ウ. SG器外点検

(添付資料-14)

(ア) 仮設ストレーナの点検結果

過去のSG伝熱管損傷事象を踏まえ設置した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を実施したとこ

ろ、SG 2 次側のスラッジランシング等で回収される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さびは確認したが、それ以外の異物は確認できなかった。

(イ) SGブローダウンタンク内の点検結果

SGより水抜きされた器内水は、SGブローダウンタンクに一旦貯留するため、異物が滞留する可能性があることから、開放点検を実施した結果、異物は確認できなかった。

(ウ) 復水器ホットウエルの点検結果

復水器回収ラインを流れるSG器内水は、復水器ホットウエルに回収されることから、ホットウエル内部の目視点検を実施したが、異物は確認できなかった。

(エ) 復水ポンプ入口ストレーナの点検結果

復水器回収ラインから復水器ホットウエルに回収されたSG器内水は、復水ポンプを通じて復水系統へ流れるため、復水ポンプの入口に設置されているストレーナの目視点検を実施したが、異物は確認できなかった。

(オ) 弁、配管の点検結果

異物が滞留しやすい構造となっている弁や配管について、開放点検を実施した結果、異物は確認できなかった。

また、SGブローダウンサンプルラインについては、圧縮空気を流し込んでフラッシングすることによって点検を実施した結果、異物は確認できなかった。

以上の調査結果から、SG器内に異物が混入している可能性はない。

(c) SG器内発生物との接触

ア. SG内部品の脱落調査

(添付資料-15)

(ア) 設計評価

SG内部品が脱落し、伝熱管を減肉させる可能性を設計図書により確認したところ、薄片形状として、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4号機前回（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。

(イ) スラッジランシングによる調査

AおよびC-SGのスラッジランシングを実施し、異物の有無を確認した結果、スケールおよびスラッジ以外に異物は確認できなかった。

(d) 付着物との接触

ア. 目視点検

(ア) A-SG

減肉信号を確認した伝熱管(X51, Y4)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15mm、長さ約9mmの付着物を確認したことから回収した。

(イ) C-SG

減肉信号を確認した伝熱管3本を小型カメラにて目視点検を実施した結果、うち1本の伝熱管(X55, Y3)と第三管支持板の間に付着物を確認したことから回収を試みた。その結果、付着物が折れたため一部の回収はできたものの、残りの付着物については、粉碎し、回収できなかった。

イ. 付着物の分析結果

(添付資料-16)

(ア) A-SGで回収した付着物

i. 付着物の材質

付着物の材質に関し、成分分析した結果、主成分が酸化鉄（主にマグネタイト）であることを確認した。

ii. 付着物の外観観察

付着物の伝熱管減肉部との接触想定部（角部）を外観観察した結果、接触痕があり、光沢を確認した。

また、付着物の形状を計測した結果、直径約22.5mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管の外径22.23mmに近い形状であることを確認した。

iii. 付着物の表面観察

付着物の伝熱管接触想定部（角部）を走査型電子顕微鏡（以下「SEM」という。）により観察した結果、筋状痕を確認した。

iv. 付着物への伝熱管成分付着確認

付着物の伝熱管との接触想定部（角部）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。）の成分を検出した。

(イ) C-SGで回収した付着物

i. 付着物の材質

付着物の材質に関し、成分分析した結果、主成分が酸化鉄（主にマグネタイト）であることを確認した。

ii. 付着物の外観観察

付着物の表面を外観観察した結果、接触痕並びに光沢は確認できなかった。

また、付着物の形状を計測した結果、直径約21.9mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管の外径22.23mmに近い形状であることを確認した。

iii. 付着物の表面観察

付着物をSEMにより観察した結果、凹面の一部に接触痕はあったが、筋状痕は確認できなかった。

iv. 付着物への伝熱管成分付着確認

付着物の凹面の接触痕を成分分析した結果、伝熱管の母材の成分であるNiを僅かに検出したが、Crは検出できなかった。

(ウ) 付着物分析のまとめ

AおよびC-SGで確認した付着物は、主成分が酸化鉄（主にマグネタイト）であり、伝熱管の外径に近い形状であったことから、スケールであると推定した。

A-SGの付着物（以下「スケールA」という。）については、接触痕があり光沢が認められた。また、減肉信号を確認した伝熱管との接触想定部（角部）にNiおよびCrの成分を検出した。

C-SGの付着物（以下「スケールC1」という。）については、接触痕並びに光沢は確認できず、また、凹面の接触痕にNiの成分を僅かに検出したが、Crは検出できなかった。

(エ) 回収スケールの分析結果

i. C-SG回収スケール

(添付資料-17、18)

C-SG伝熱管の減肉を発生させたと考える異物等を発見していないことを踏まえ、C-SGの減肉を確認した伝熱管を中心にXおよびY方向に約10列ずつを範囲として、減肉箇所下方の第二および第一管支持板上にあるスケールを約300個回収し、確認したところ、その中の三つに伝熱管と接触したと思われる痕を有する幅約18mm、長さ約10mmのスケール（以下「スケールC2」という。）、幅約23mm、長さ約11mmのスケール（以下「スケールC3」という。）および幅約11mm、長さ約3mmのスケール（以下「スケールC4」という。）を確認した。

(i) スケールの回収場所

スケールC2は、減肉が認められたX55, Y8の第三管支持板の下方であるX54とX55の間, Y3の第二管支持板上面で回収した。また、スケールC3は、減肉が認められたX21, Y8の第三管支持板の下方であるX21とX22の間, Y12の第一管支持板上面で回収した。スケールC4は、減肉が認められたX55, Y3の第三管支持板の下方であるX55とX56の間, Y4の第二管支持板上面で回収した。

(ii) 回収スケールの外観観察

スケールC2については凹面の一部および側面に、スケールC3については凸面および側面に3箇所の接触痕を確認した。また、スケールC4については角部に接触痕を確認した。

回収スケールの形状を計測した結果、スケールC2は直径約22.3mm、スケールC3は直径約22.6mm、スケールC4は直径約22.2mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管の外径22.23mmに近い形状であることを確認した。

(iii) 回収スケールの表面観察

回収スケールの接触痕の表面をSEMにより観察した結果、スケールC2については、凹面の接触痕には筋状痕が確認できなかったものの、側面の接触痕では筋状痕を確認した。スケールC3については、凸面の接触痕には筋状痕が確認できなかったが、側面の2箇所の接触痕に筋状痕を確認した。スケールC4については、角部の接触痕に筋状痕を確認した。

(iv) 回収スケールへの伝熱管成分付着確認

スケールC 2、スケールC 3およびスケールC 4を成分分析した結果、スケールC 2については、凹面の接触痕には管支持板の主成分であるCrが、また、側面の接触痕には伝熱管の主成分であるNiおよびCrを検出した。スケールC 3については、凸面の接触痕には管支持板の主成分であるCrが、また、側面の接触痕には伝熱管の主成分であるNiおよびCrを検出した。スケールC 4については、角部の接触痕に伝熱管の主成分であるNiおよびCrを検出した。

(v) 回収スケールの形状と減肉箇所との関係

スケールC 2の形状および筋状痕を確認した側面、スケールC 3の形状および筋状痕を確認した2箇所の接触痕の位置関係が、C-SGで確認した3箇所の減肉箇所のいずれかと合致するか確認したところ、スケールC 2についてはX55, Y8の減肉箇所やX55, Y8周辺にある第三管支持板表面の接触痕が、回収スケールの形状や接触痕と位置関係が一致することを確認した。また、スケールC 3についてはX21, Y8の減肉箇所並びにX21, Y8周辺にある第三管支持板表面および隣接管(X20, Y8)の接触痕が、回収スケールの形状や接触痕と位置関係が一致することを確認した。

スケールC 4については、角部の筋状痕、X55, Y3の減肉箇所およびX55, Y3周辺にある第三管支持板表面の接触痕を踏まえ、回収スケールは一部が欠損した形状と想定すると、減肉箇所と接触状態になることを確認した。

(3) 損傷以外のECT信号指示

(添付資料-19)

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。

(4) 原因調査のまとめ

スケールAについては、接触痕があり光沢が認められ、減肉信号を確認した伝熱管との接触想定部位にNiおよびCrの成分を検出したことから、スケールAが減肉を発生させたと考ええる。なお、スケールC 1は接触痕並びに光沢は確認できず、また検出されたNiの成分は僅かであるとともにCrの成分は検出されなかったため、減肉を発生させたものではないと考える。

減肉信号を確認した伝熱管付近から回収したスケールC 2、C 3およびC 4については、回収したスケールに接触痕を確認し、接触想定部位にNiおよびCrの成分を検出したこと、および管支持板表面の接触痕と形状や接触痕の位置関係が一致することから、スケールC 2、C 3およびC 4が減肉を発生させたと考ええる。

1 1. 減肉メカニズム

AおよびC-SGで回収したスケールを調査した結果、表面に接触痕が確認され、NiとCrを検出していることから、スケールが伝熱管減肉を発生させた可能性がある。そのため、減肉を発生させるスケールの生成、剥離メカニズムおよび伝熱管を損傷させる可能性について、以下のとおり調査および検討を実施した。

(1) スケールの生成メカニズム (添付資料-20)

a. スケールの生成および性状

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

(a) 析出付着

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

(b) 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^{*18}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。

^{*18} 密度が比較的低く、粗な状態。

b. スケール性状の実機調査

(a) 過去の調査での知見 (平成8年) (添付資料-21)

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

(b) 高浜発電所4号機におけるスケール調査 (添付資料-22)

高浜発電所4号機今回(第23回)定期検査において、伝熱管の上部(第七管支持板上)および伝熱管の下部(第一管支持板と第二管支持板の間)から1サンプルずつスケールを回収し、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(第一管支持板と第二管支持板の間)では稠密で薄いということを確認した。

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

c. 2次系の水質管理調査

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

(a) 水処理履歴 (添付資料-23)

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。

スケールの生成に関係するのはpHであり、2次系構成機器の流れ加速型腐食等による給水中への鉄の放出を抑制するためにはアルカリ側に水質管理を行う必要がある。そのため、これまでpH上昇によりSGへの鉄の持込み量低減を図るべく、AVT処理(pH9.2)、ETA^{*19}処理(pH9.4~9.5)、高ETA処理(pH9.8)、高アンモニア処理(pH9.8)と改善してきた。

各水処理における給水中の鉄含有量は実測データより、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。

*19 エタノールアミン。

処理方法	給水中鉄含有量
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

(b) 運転時間

上記水処理での運転時間は次のとおりである。

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2.4万時間

(c) 鉄の持ち込み量

上記水処理期間の鉄の持ち込み量と、合計の鉄の持ち込み量を算出した結果は次のとおりである。

処理方法	鉄の持ち込み量
A V T 処理	約 1, 6 8 0 k g
E T A 処理	約 6 5 0 k g
高 E T A 処理	約 7 0 k g
高アンモニア処理	約 9 0 k g
合計	約 2, 4 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。

d. スケール厚さに関する実機調査 (添付資料-24)

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^{*20}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るため、スケール厚さは経年的に増加する。

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

^{*20} 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値を高く維持することで、1サイクルあたりの鉄の持ち込み量は数十kg/SG程度に抑えられていることを確認した。

(2) スケールの剥離 (添付資料-25)

a. 剥離メカニズム

伝熱管表面に生成したスケールが剥離するのは、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(a)~(c)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。

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

b. 長期停止の影響 (添付資料-26)

東日本大震災以降、2011年7月に定期検査を開始し、その後、2017年5月に再稼働するまでの約6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が、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、1か月間、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）をヒドラジン水による浸漬試験を実施した。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することができた。これは、ヒドラジンの還元作用でスケールの鉄が一部溶解、再析出を繰り返しており、その結果、粒径が大きくなる。

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4号機の長期停止前後の実績を調査した結果、スケール回収量は長期停止後に増加している傾向が認められた。

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

(3) スケールにより伝熱管を損傷させる可能性

AおよびC-SGで回収したスケールが今回のSG伝熱管損傷事象を発生させた可能性を検証するため、回収したスケールの性状を確認し、以下の試験等を実施した。

a. 回収したスケールの性状 (添付資料-27)

AおよびC-SGで回収したスケール（スケールA, C2, C3およびC4）については、伝熱管と接触が想定される部分に接触痕や光沢があり、また、伝熱管の主成分であるNiとCrを検出したことから、減肉を発生させる可能性があるスケール性状を把握するため、断面マイクロ観察を実施した結果、空隙率^{*21}5%以下の稠密層が形成されていることを確認した。

^{*21} スケール断面の厚さ方向を0.02mmピッチで区切った上で、各区間の空隙数をカウントし、全区間の平均値を求めて空隙率とする。

b. 回収スケールと同等性状のスケールによる伝熱管との摩耗試験

(添付資料-28、29)

今回回収したAおよびC-SGのスケールは稠密であることから、AおよびC-SG回収スケールと同等の稠密さ（空隙率5%以下の稠密層が主体）、厚さ（約0.2~0.3mm）のスケールを3個用いて、伝熱管との摩耗試験を実施した。

その結果、伝熱管とスケールの摩耗比（体積比）は最大1:0.5となり、伝熱管の方が早く摩耗する結果が得られた。

一方、高浜発電所3号機前回（第24回）定期検査の事象では、摩耗試験の結果、摩耗体積比は最大でも1：4であり、スケールの方が早く摩滅したことから、スケールが原因の可能性は低いとしていた。これは、前回の試験ではスケールの稠密さではなく厚さに着目しており、主に伝熱管の上部から回収したスケールを供試体として選定したためであり、比較的厚さの大きい約0.6～1.0mm厚さの試験体7個と約0.3～0.4mm厚さの試験体2個の合計9個を抽出して試験を実施したことによるものである。

なお、前回試験の供試体のうち、最も厚く粗密と考える最上段（第七）管支持板上面から回収したスケールでは、空隙率5%を超える領域が主体であったのに対し、今回回収したスケールは空隙率5%以下の領域が主体であったことから、以降では、空隙率5%以下の領域を稠密層と定義する。

以上により、伝熱管に減肉を与える可能性があるスケール性状については、稠密さが重要であり、稠密な性状をもつスケールは、伝熱管と接触することで、減肉を発生させる可能性が高いと考える。

上記において、AおよびC-SGで回収したスケールが伝熱管に有意な減肉を発生させるものであることを確認できたことから、次のc.～f.では、これらのスケールが、今回認められた減肉を発生させたメカニズムについて考察した。

c. SG器内挙動の推定および接触状態の再現性確認（添付資料-30）

A-SGで回収したスケールは第三管支持板下面で伝熱管と接触している状態で確認され、またC-SGで回収したスケール形状と接触痕については、伝熱管の減肉箇所および第三管支持板の表面の接触痕と位置関係が一致したため、剥離したスケールがSG器内で第三管支持板下面へ到達するまでの挙動を推定するとともに、SG2次側の流況モックアップ試験により、実機を模擬した二相流の条件においても、推定した接触状態が再現するかの確認を実施した。

(a) 器内のスケール挙動

主にプラント停止時に伝熱管から剥離し、管板上に落下したスケールの場合は、運転中のSG2次側器内の流況下では流体抗力がスケールの落下力を上回ることから、管群内の上昇流に乗って流量分配板および各管支持板フローロット部を通過し、減肉箇所へ到達したことが考えられる。第一管支持板より上方では、上昇流に加え高温側から低温側への水平方向流があることから、第一管支持板および第二管支持板フローロット部を通過したものが第三管支持板の低温側下面に至ると推定される。

また、第一管支持板上面または第二管支持板上面に落下したスケールの場合も、落下した場所によっては、上記と同様の上昇流および水平方向流に乗って第三管支持板の低温側下面に至る可能性はあると考える。

(b) SG 2次側の流況モックアップ試験

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

d. 摩耗形態の推定

(添付資料-31)

スケールとの接触で伝熱管が摩耗する場合、スケールの振動により摩耗するケースと、伝熱管の振動により摩耗するケースが考えるため、次の通り各ケースで想定されるワークレート^{*22}の比較を実施した。

^{*22} 摩耗体積を評価する一般式で用いられる摩耗を生じさせる力で、押付力と摺動速度の積で表現される。

(a) スケール振動のケース

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

(b) 伝熱管振動のケース

本ケースでは、スケールが管支持板下面で保持され、接触する伝熱管のランダム振動^{*23}により伝熱管自身に減肉が発生したことが想定される。管支持板部の伝熱管の振幅は、伝熱管と管支持板BEC穴ランド部の隙間に制限されるため、隙間が確保され振幅が大きくなる伝熱管においてスケールとの接触により減肉が生じるものと推定される。本想定に基づきワークレートを試算すると、スケール振動のケースに比べて十分大きなワークレートが得られることを確認した。

^{*23} 蒸気と水が伝熱管に衝突する力と、伝熱管の周りに生じる流れの乱れによって伝熱管が振動する現象。

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

なお、伝熱管振動のケースでは、最大減肉深さは伝熱管の振動振幅に制限されるため、減肉の進展により伝熱管を貫通することはない。また、スケールAの接触状態については、伝熱管に対して斜めに接触しており、流体力により伝熱管に押し付けられる方向の外力も作用していると考えられるため、その状態での減肉の進展性について、以下のア.～ウ.のケースを考察した結果、いずれも伝熱管の貫通には至らず、強度・耐震性も問題ないことを確認した。

ア. BEC穴2箇所支持され、支持部で固定されているケース

イ. BEC穴2箇所支持され、支持部で固定されておらず、流体力で伝熱管へ押し付けられるが、伝熱管からの押し戻しもあるケース

ウ. 上記イ. 項の伝熱管からの押し戻しに耐えると仮定し、スケールAが伝熱管方向に倒れ続けるケース

e. 減肉形状の再現性確認試験

上記c. およびd. で確認したスケールと伝熱管の接触状態および摩耗形態で実機の減肉形状が再現できるか確認するため、次のとおり、減肉試験を実施した。また、減肉試験で得られた減肉形状と同等の人工欠陥を与えた伝熱管のモックアップ試験体のECT信号を取得し、実機のECT信号と比較した。

(a) 減肉試験 (添付資料-32)

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

(b) ECTモックアップ試験 (添付資料-33)

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

f. ワークレートによる摩耗体積評価 (添付資料-34)

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

(4) 高浜発電所3号機および4号機の特異性

a. 当社他プラントとの鉄持込み量、薬品洗浄実績、スケール回収量の比較

鉄の持込み量について、比較のため当社他プラントの調査を実施した。また、当社他プラントでは薬品洗浄^{*24}を実施しており、スケール性状に影響を与えている可能性があることから、その実績を確認した。さらに、スケールの厚さ増加や長期停止による剥離挙動の影響は、スケール回収量に現れている可能性があることから、あわせて比較調査を実施した。

なお、高浜発電所3号機および4号機では薬品洗浄を実施していないが、伝熱性能の低下に伴う主蒸気圧力の低下はあるものの、大飯発電所3号機および4号機に比べ電気出力の定格電気出力に対する余裕があるため、大飯発電所3号機および4号機を先行して実施した。

^{*24} 希薄な化学薬液（エチレンジアミン四酢酸、濃度1%）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で、当社では大飯発電所3号機および4号機で実績がある。

(a) 鉄持込み量および薬品洗浄実績 (添付資料-35)

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

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

<表1：各プラントの鉄持込み量および薬品洗浄実績>

	高浜3	高浜4	大飯3	大飯4	美浜3	高浜1	高浜2
運転時間*25 (万時間)	22.3	22.2	17.0	17.2	9.0	10.9	12.5
鉄持込み量 (kg)	2,620	2,490	1,850	1,950	780	680	940
薬品洗浄 実績回数			2回	1回			
薬品洗浄 実績時間 (万時間)	—	—	16.1 (第17回) 17.0 (第18回)	16.2 (第16回)	—	—	—

*25 美浜発電所3号機、高浜発電所1号機および高浜発電所2号機については、蒸気発生器取替以降の運転時間を示す。

(b) スケール回収量 (添付資料-36)

スケール回収量*26を確認した結果、高浜発電所3号機および4号機では、いずれも長期停止後にスケール回収量が増加していた。

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

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

*26 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3号機	0.01未満 (第21回)	0.41 (第22回)	0.24 (第23回)	0.36 (第24回)
高浜4号機	0.01未満 (第20回)	12.37 (第21回)	8.24 (第22回)	—
大飯3号機	0.01未満 (第16回)	0.01未満 (第17回)	0.01未満 (第18回)	—
大飯4号機	0.01未満 (第15回)	0.01未満 (第16回)	0.01未満 (第17回)	—

b. 当社他プラントとの実機スケール比較 (添付資料-37)

スケールの稠密層厚さが鉄持込み量と相関するかを検証するため、当社他プラントの伝熱管下部から実機スケールを採取し、断面マイクロ観察を実施した。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、蒸気発生器取替プラント（美浜発電所3号機、高浜発電所1号機および2号機）からは、最も鉄の持込み量の大きい高浜発電所2号機を選定した。

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ため、ここでは比較対象に挙げない。

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

<表3：実機スケール観察結果>

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

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

c. 伝熱管の摩耗試験結果の比較 (添付資料-38、39)

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

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

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

(5) スケールにより減肉した国内外事例調査 (添付資料-40)

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。

1.2. 伝熱管の健全性

(1) 減肉伝熱管の健全性 (添付資料-41)

減肉した伝熱管の強度、耐震性について以下のように評価した。

a. 強度

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

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

b. 耐震性

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

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

(2) 隣接伝熱管の健全性 (添付資料-42)

SG器内において小型カメラを用いて伝熱管の目視確認を実施した際に確認した摩耗痕に隣接した伝熱管の接触痕は、有意な減肉信号指示ではない。

1.3. 推定原因 (添付資料-43)

AおよびC-SGで回収した稠密な性状をもつスケールが、伝熱管と接触し、伝熱管を減肉させたと推定した。

1.4. 健全性評価

稠密な性状をもつスケールを脆弱化させるための手段として、大飯発電所3号機および4号機で実施している薬品洗浄の有効性を検討した。

(1) 薬品洗浄の概要と効果 (添付資料-44、45)

SG器内に薬液*27を注入し、伝熱管全体を浸すことにより、伝熱管表面の鉄スケールを緩やかに溶解することで、稠密な性状のスケールを粗密化し、脆弱化させる効果があることから、高浜発電所4号機で採取した稠密な性状のスケールに薬液を浸し確認した結果、稠密層厚さが減少していることを確認した。その後の摩耗試験において、いずれのスケールも試験中に欠損または有意に摩滅することを確認した。

また、高浜発電所3号機第24回定期検査においても薬品洗浄を実施し、薬品洗浄実施後にSG器内からスケールを採取して脆弱化の效果を確認した結果、スケールの断面マイクロ観察および摩耗試験において、いずれのスケールも稠密層厚さが0.1mm未満であり、試験片製作時にスケールが欠損、摩耗試験開始直後にスケールが欠損または有意に摩滅することを確認した。

以上から、スケールに起因した伝熱管減肉事象の対策として有効であると考えられる。

*27 希薄なエチレンジアミン四酢酸 (Ethylene Diamine Tetra acetic Acid: EDTA)。合成洗剤に使用される酸の一種で鉄、銅の溶解を促進する効果を持つ薬液。

(2) 薬品洗浄に伴う伝熱管等への影響

薬品洗浄を実施することで脆弱化したスケールが伝熱管から剥離するが、脆弱化したスケールがプラント運転中にSG器内の上昇流に伴って伝熱管に接触し、摩耗したとしても、脆弱化したスケールでは伝熱管を減肉させることはない。また、管板上へのスラッジの堆積量が増加すると想定されるが、スラッジでは伝熱管を減肉させることはない。

プラント停止後は、剥離したスケールがSG器内水のブロー時にブロー水とともにSG器外に流出するが、これまで薬品洗浄を実施している大飯発電所3号機および4号機において、SGブローダウン配管等閉塞するなどの事例は認められていないことから、剥離したスケールがプラントに影響を及ぼすことはないと考えられる。

15. 対策 (添付資料-46~49)

(1) 減肉伝熱管の施栓

外面減肉が認められたSG伝熱管について、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) 薬品洗浄による稠密性状スケールの脆弱化

SG器内に薬液を注入し、伝熱管全体を浸すことにより、伝熱管に付着している稠密な性状のスケールを粗密化させ、脆弱化させる。

今後の保全指標として、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、それを越えた場合

は薬品洗浄を実施する。

なお、他プラントへの水平展開として、SGを取替えていない大飯発電所3号機および4号機については、2定期検査毎にSG器内のスケールを回収し、稠密層厚さおよび摩耗体積比を確認する。SGを取替えている高浜発電所1号機および2号機、美浜発電所3号機については、鉄持ち込み量が最大である高浜発電所2号機を代表として2定期検査毎にSG器内から回収可能なスケールの有無を確認する。

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

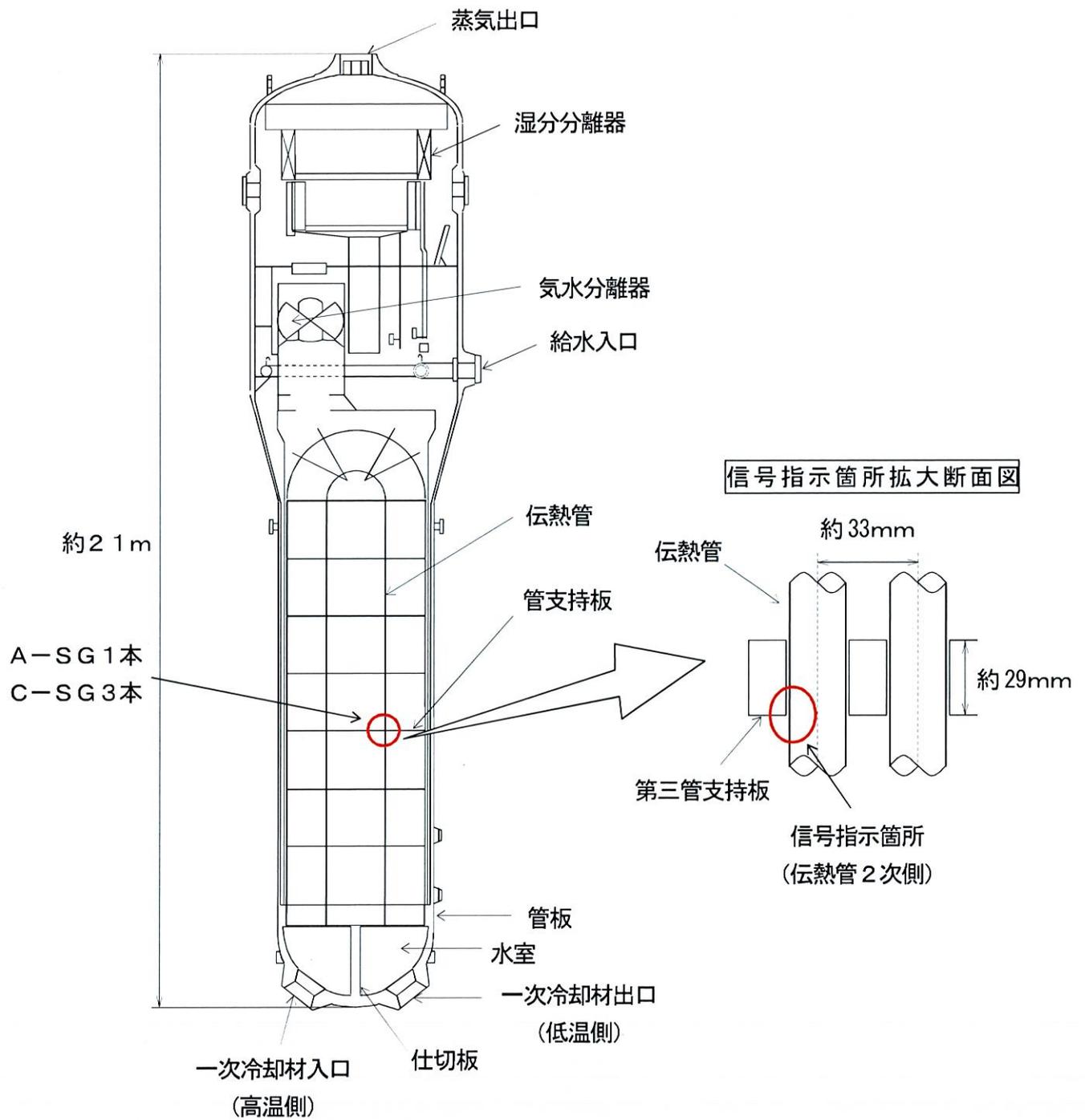
以 上

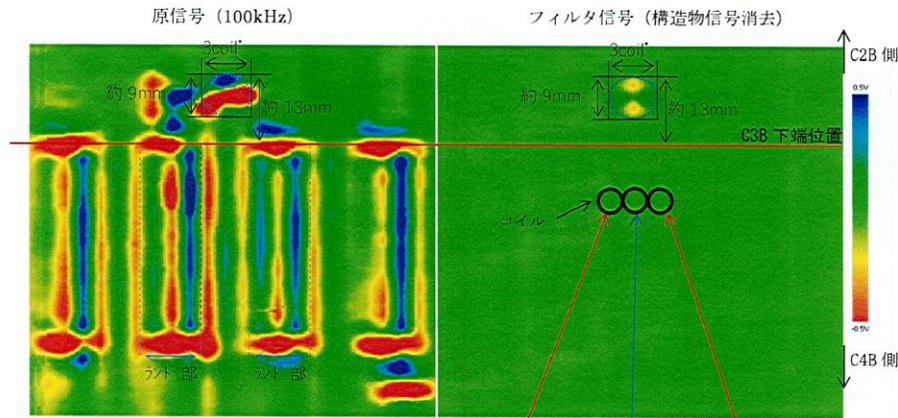
添 付 資 料

1. SG伝熱管信号指示箇所概要図
2. SG伝熱管ECT結果
3. SG伝熱管ECT信号指示位置図
4. 要因分析図
5. ECTの位相評価
6. 粒界腐食割れに関する検討結果
7. ピッチング発生に関する検討結果
8. リン酸減肉によるきずの形状
9. 流体振動による疲労評価
10. エロージョンの発生可能性評価
11. 管支持板との接触による摩耗減肉の評価
12. 過去事象を踏まえた点検調査
13. SG器内点検結果
14. SGブローダウン系統点検結果
15. SG 2次側内部品について
16. 付着物分析結果
17. C-SG回収スケール回収範囲図
18. C-SG回収スケールに関する分析結果
19. スケール剥離による減肉信号への影響
20. スケール生成メカニズム
21. スケール性状に関する過去の知見
22. 高浜発電所4号機におけるスケール調査実績
23. 2次系水処理と水化学管理の変遷
24. プラント性能指標の推移
25. スケール剥離メカニズムイメージ
26. 長期停止影響に係る考察
27. 回収スケールの断面ミクロ観察結果
28. 伝熱管とスケールの摩耗試験方法について
29. スケールによる伝熱管の減肉メカニズム調査の流れ
30. スケールのSG 2次側器内挙動の推定および流況モックアップ試験による接触状態の再現
31. 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
32. 減肉試験による実機摩耗減肉形状の確認について
33. ECTモックアップ試験による実機ECT信号との整合性確認について
34. ワークレートをを用いた摩耗体積の計算結果について
35. 鉄持込み量比較
36. 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

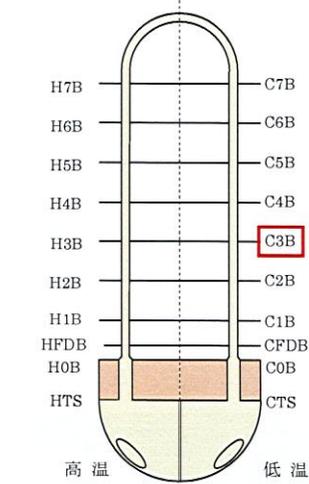
- 37. 高浜発電所3号機および4号機のスケール性状の比較について
- 38. 当社他プラントスケール摩耗試験結果
- 39. スケール性状による伝熱管減肉影響
- 40. 海外の蒸気発生器の運転履歴等調査結果
- 41. 減肉した伝熱管の評価
- 42. 隣接伝熱管の健全性
- 43. SG点検スケジュール
- 44. 薬品洗浄条件について
- 45. 実機によるスケール脆弱化効果の確認結果
- 46. SG伝熱管信号指示箇所補修概要図
- 47. 高浜発電所4号機 SG伝熱管の補修来歴
- 48. 減肉により施栓した伝熱管が隣接伝熱管へ及ぼす影響
- 49. スケールに対する保全指標について

SG伝熱管信号指示箇所概要図（SG管支持板部）





*1coil : 約3mm ※内側から見たイメージ

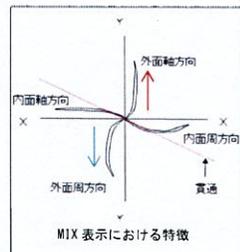


軸	C1 (1)	MIX	軸	C24 (24)	MIX	軸	C21 (21)	MIX
軸方向	0.27	0.20	0.22	0.36	0.20	0.30	0.20	0.23
周方向	0.36	0.20	0.20	0.30	0.20	0.23	0.26	0.26

【A-SG X51,Y4 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

A-SG X51,Y4 部位 : C3B

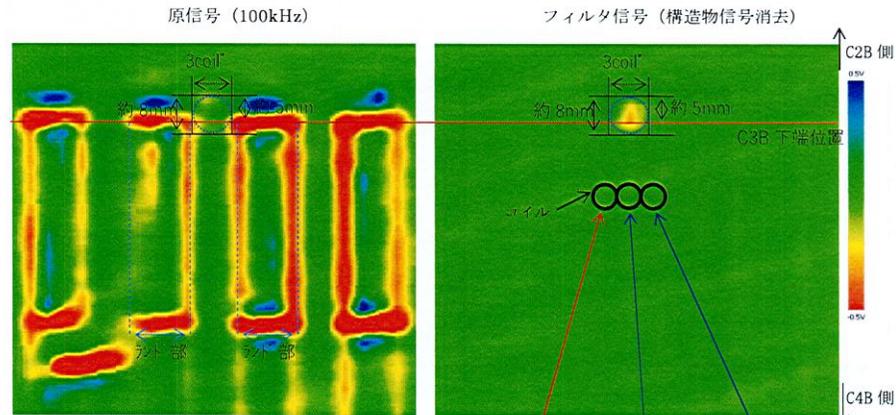
今回 フィルタ信号 (構造物信号消去) 2020/10/28 nishino 0 AS1T2 PITCH:0.40

前回 フィルタ信号 (構造物信号消去) 2019/10/03 nishino 0 AS1T3 PITCH:0.50

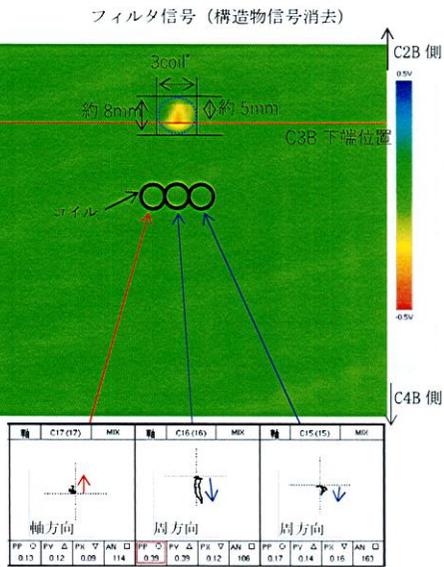
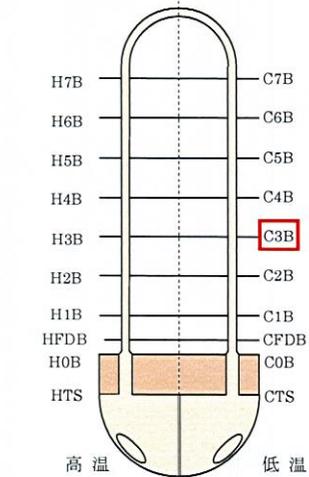
今回 原信号 (100kHz) 2020/10/28 nishino 0 AS1T2 PITCH:0.40

前回 原信号 (100kHz) 2019/10/03 nishino 0 AS1T3 PITCH:0.50

前今比較 ※特異な信号がないため任意の位置で表示。



*1coil: 約3mm ※内側から見たイメージ

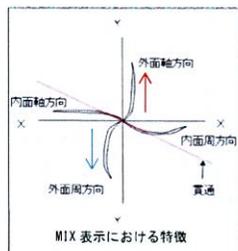


【C-SG X21.Y8 リサージュ波形】

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

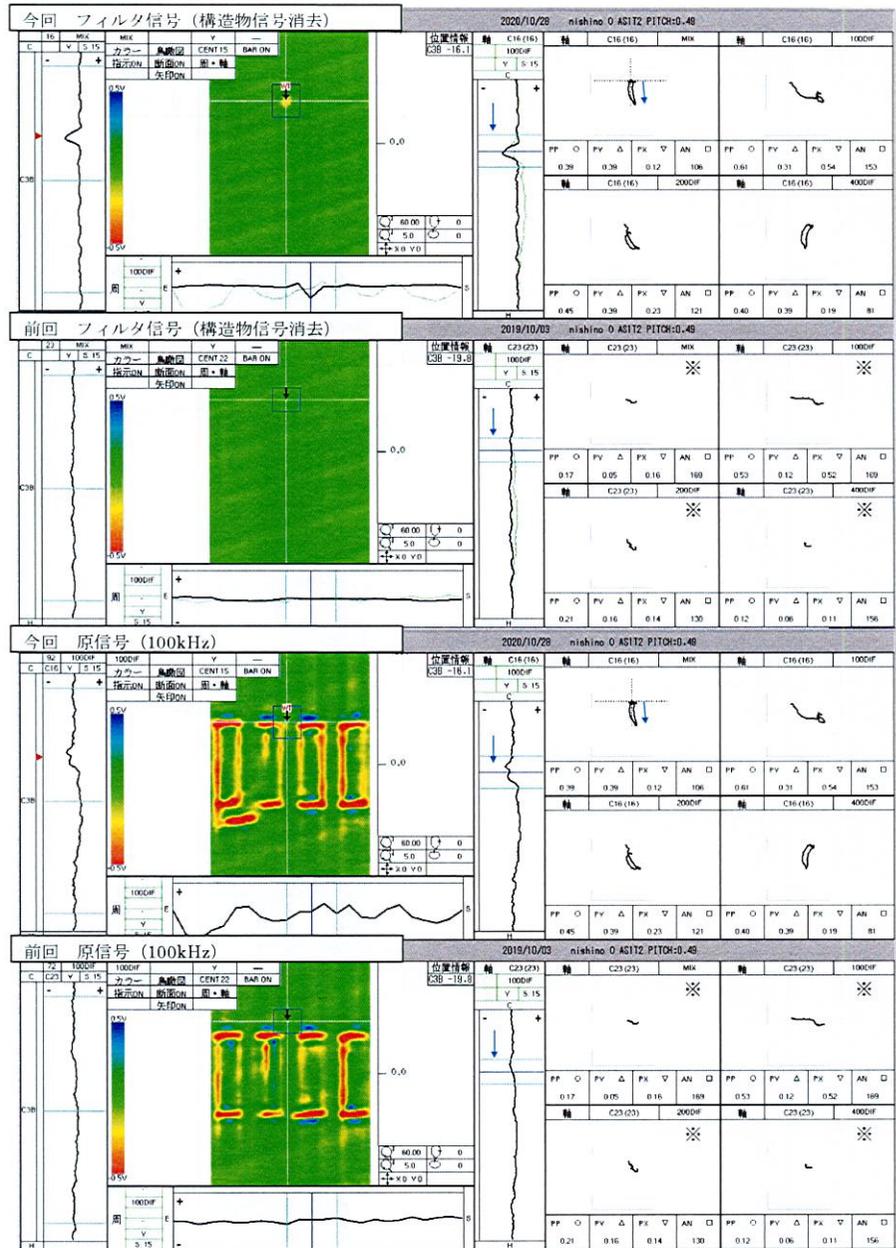
波形評価

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



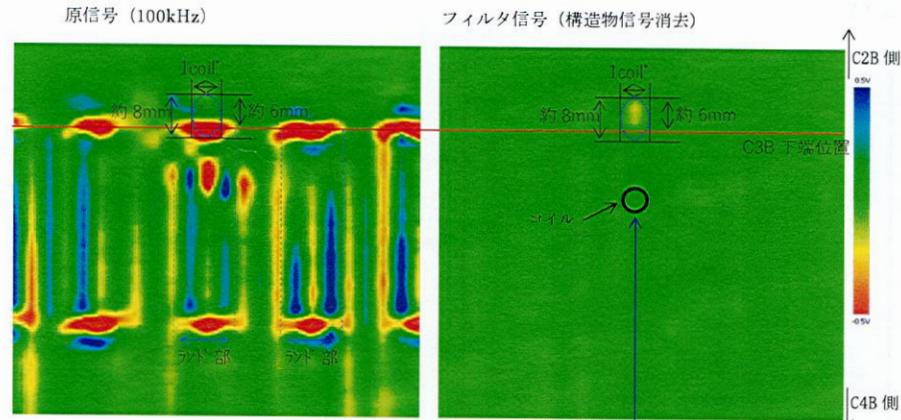
信号評価

C-SG X21, Y8 部位 : C3B

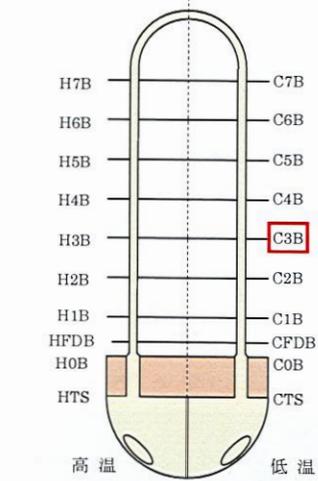


※特異な信号がないため任意の位置で表示。

前今比較



*1coil : 約 3mm ※内側から見たイメージ



【C-SG X55.Y3 リサーチ波形】
 きざ中心部の周方向成分(青色矢印)を検出

波形評価

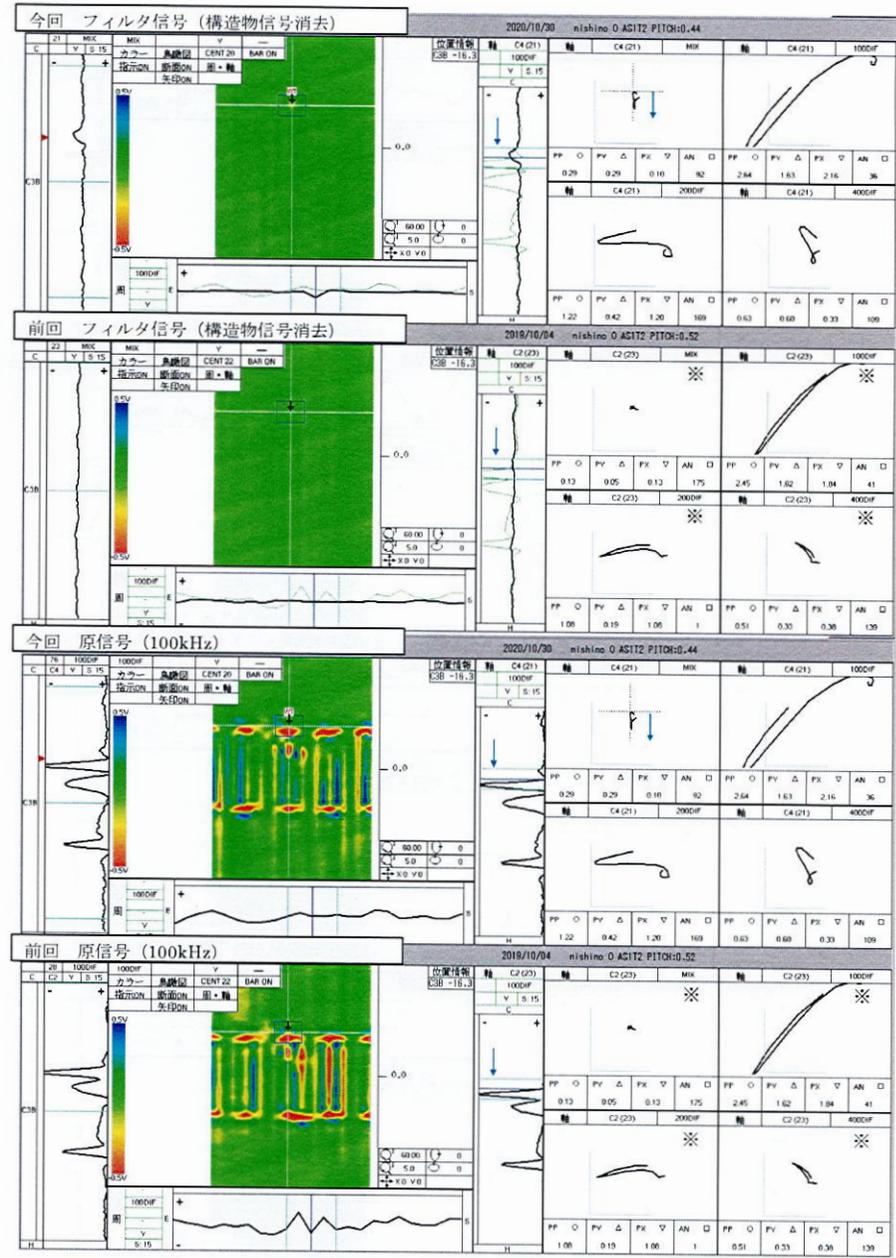
- ・位相角評価から、外面指示の特徴を持っている。
- ・指示は複数のコイルで検出されており、指示の中心部のコイルは周方向成分、両端部のコイルでは軸方向・周方向成分の特徴を持っている。

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)

MIX表示における特徴

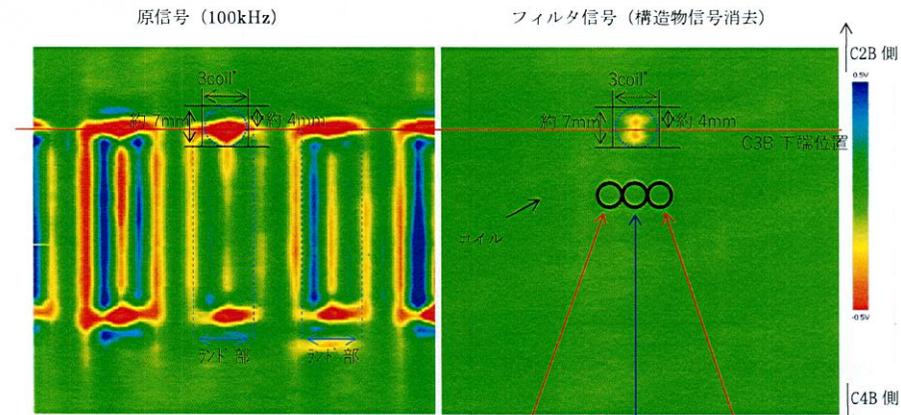
信号評価

C-SG X55, Y3 部位 : C3B

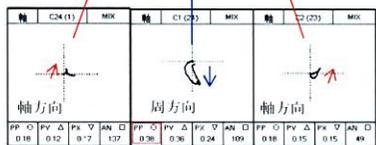
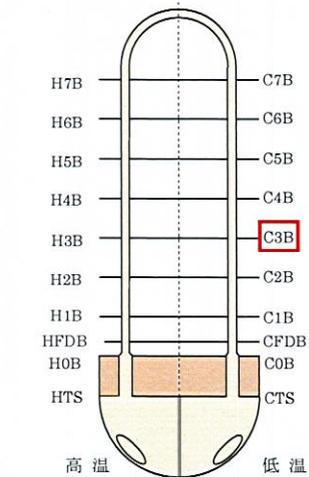


※特異な信号がないため任意の位置で表示。

前今比較



*1coil : 約 3mm ※内側から見たイメージ

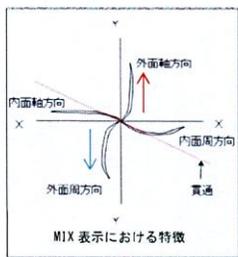


【C-SG X55, Y8 リサーチ波形】

きざ中心部の周方向成分(青色矢印)を検出

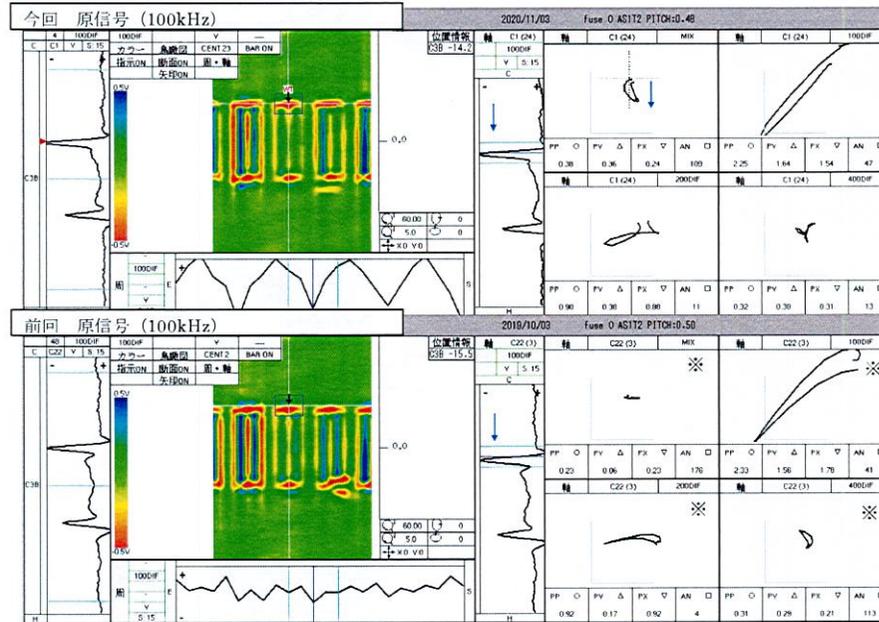
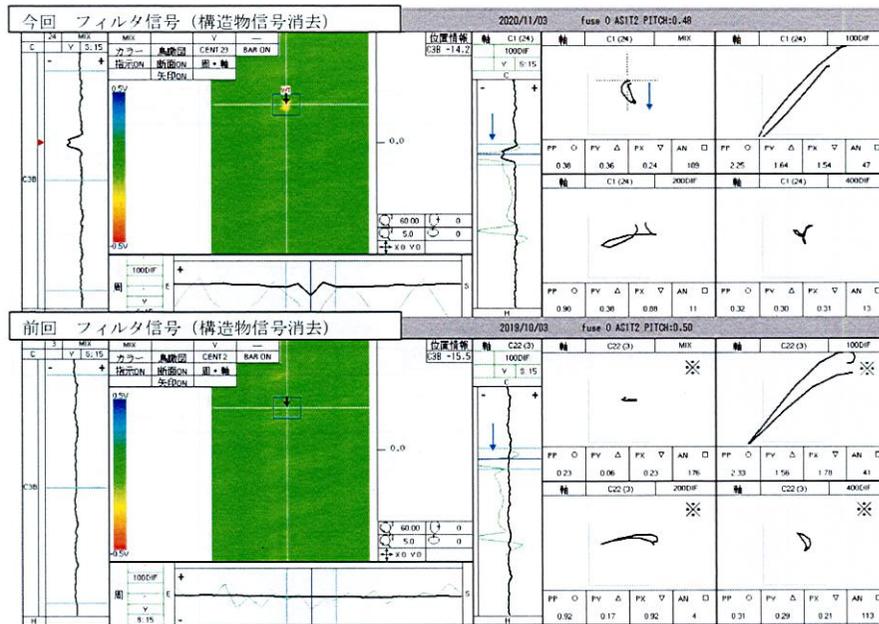
波形評価

- ・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

C-SG X55, Y8 部位 : C3B



前今比較

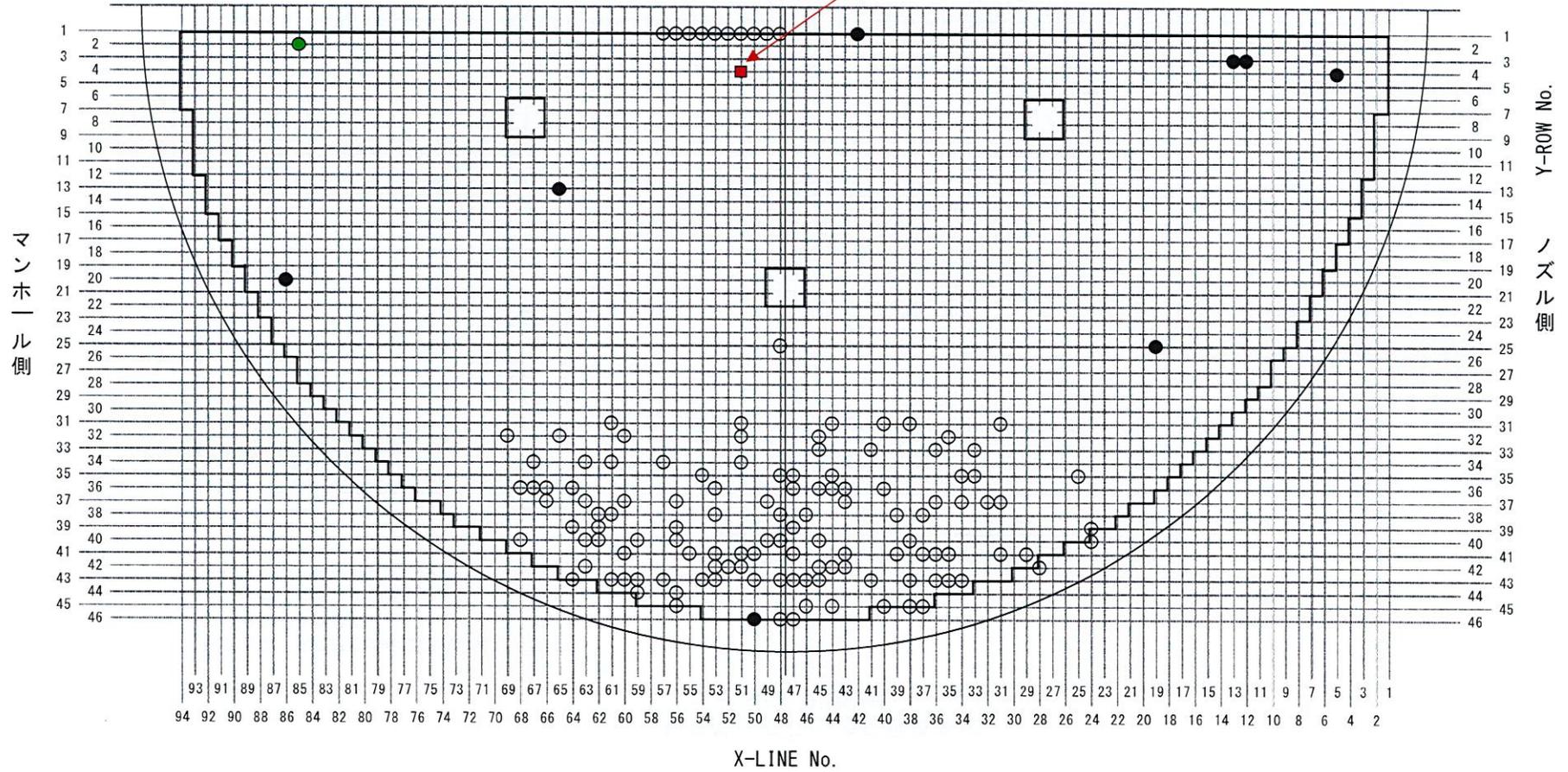
※特異な信号がないため任意の位置で表示。

SG伝熱管ECT信号指示位置図
A-SG (低温側)

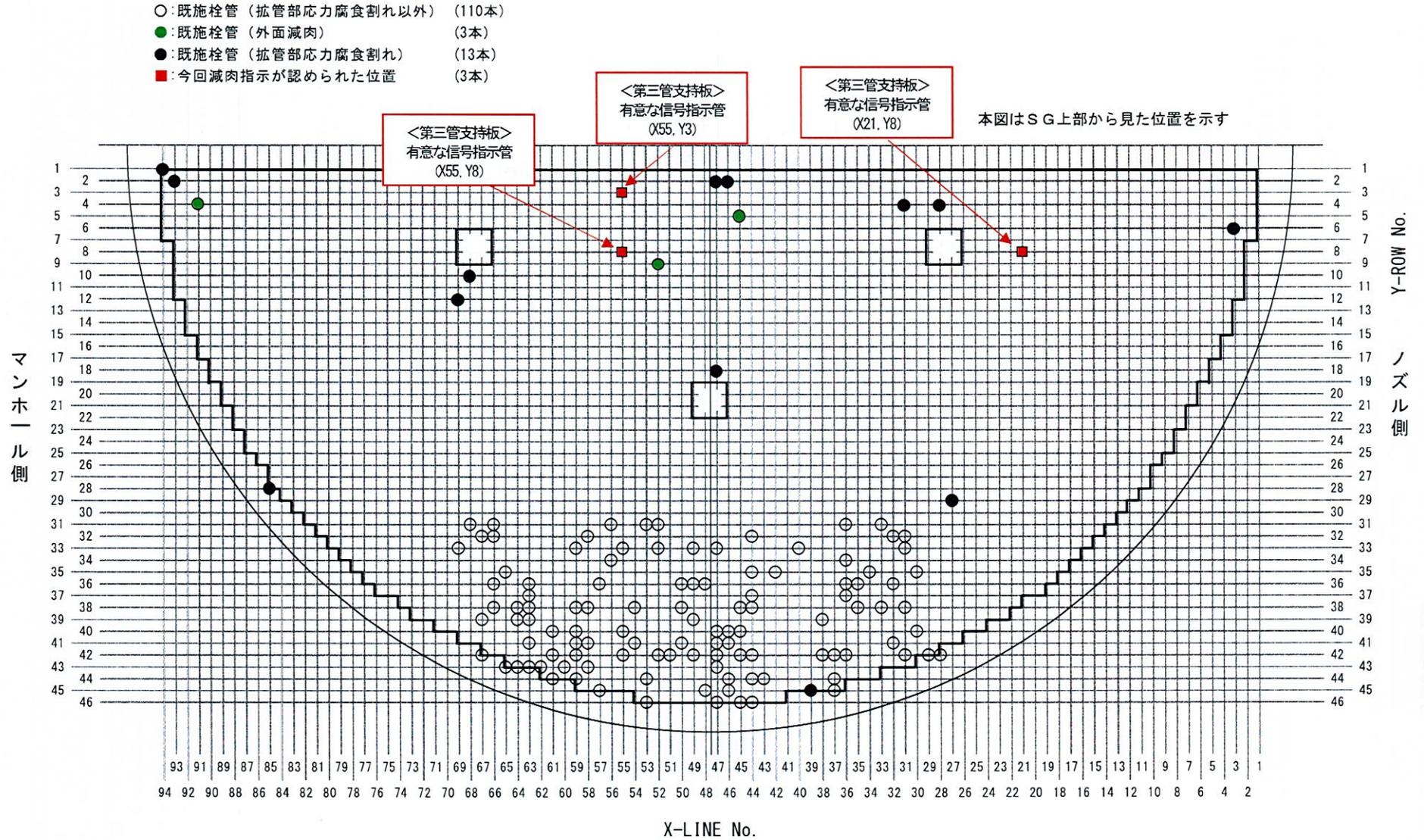
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (129本)
- : 既施栓管 (外面減肉) (1本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (8本)
- : 今回減肉指示が認められた位置 (1本)

<第三管支持板>
有意な信号指示管
(X51, Y4)

本図はSG上部から見た位置を示す



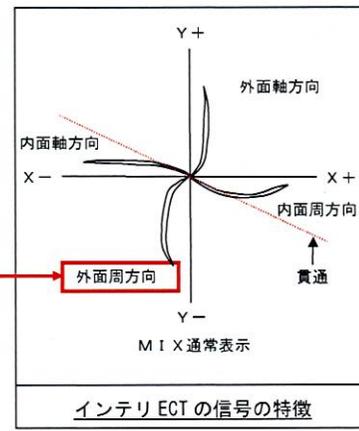
SG伝熱管ECT信号指示位置図
C-SG (低温側)



ECTの位相評価

当該管リサージュ表示 (A-SG X51-Y4)

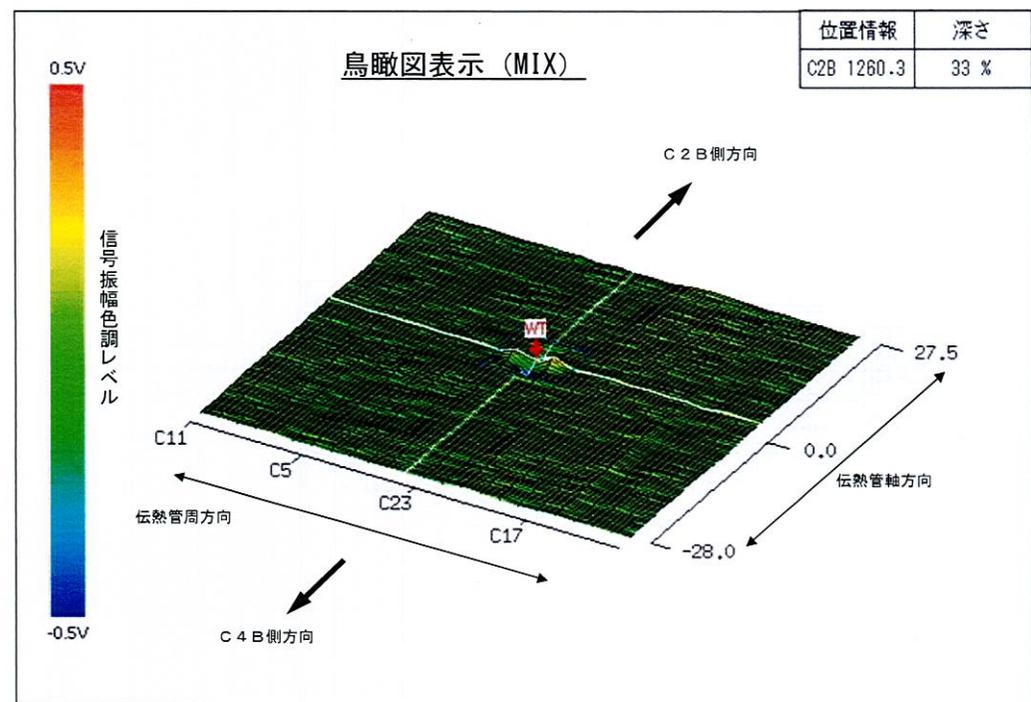
軸	C24 (24)	MIX	軸	C24 (24)	100DIF	軸	C24 (24)	200DIF	軸	C24 (24)	400DIF
PP ○	0.36		PP ○	2.46		PP ○	1.22		PP ○	0.60	
PY △	0.34		PY △	1.93		PY △	0.28		PY △	0.52	
PX ▽	0.20		PX ▽	1.61		PX ▽	1.20		PX ▽	0.33	
AN □	118		AN □	49		AN □	11		AN □	119	



(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られる。

-35-



位相角

(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

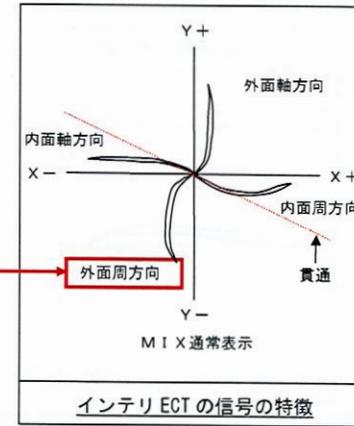
位相角

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られる。

ECTの位相評価

当該管リサージュ表示 (C-SG X21-Y8)

軸	C16 (16)	MIX	軸	C16 (16)	100DIF	軸	C16 (16)	200DIF	軸	C16 (16)	400DIF
PP ○	0.39		PP ○	0.61		PP ○	0.45		PP ○	0.40	
PY △	0.39		PY △	0.31		PY △	0.39		PY △	0.39	
PX ▽	0.12		PX ▽	0.54		PX ▽	0.23		PX ▽	0.19	
AN □	106		AN □	153		AN □	121		AN □	81	



(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られる。

位相角

インテリECTの信号の特徴

(2) デンティング(DENT)信号の特徴との比較

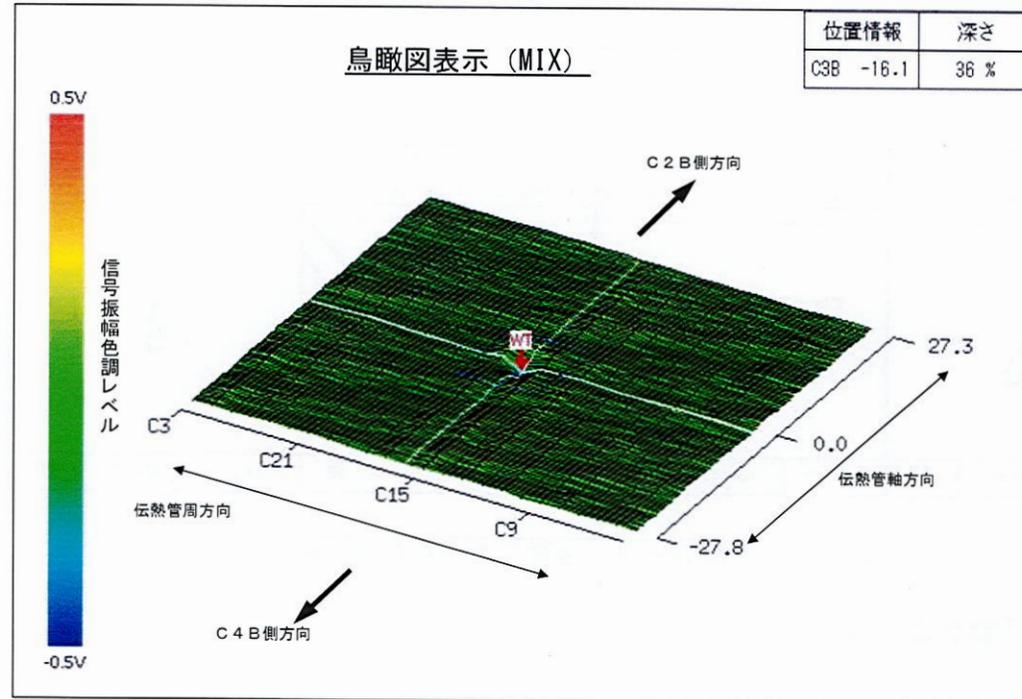
軸	C1 (1)	400DIF
PP ○	5.61	
PY △	0.91	
PX ▽	5.61	
AN □	0	

校正用試験片 DENT 信号

位相角

校正用試験片のDENT信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT信号は“全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど0°となる”という特徴を持っているが、今回の当該信号はY方向の位相を示しており、DENT信号の特徴を持たず外面周方向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られる。

—36—



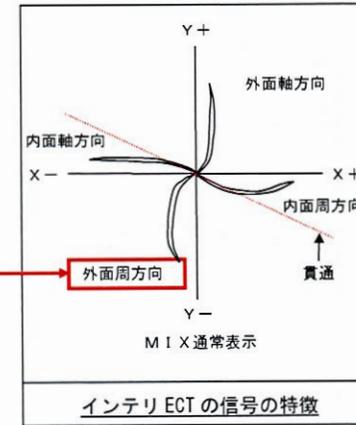
鳥瞰図表示 (MIX)

位置情報	深さ
C3B -16.1	36 %

ECTの位相評価

当該管リサーチ表示 (C-SG X55-Y3)

軸	C4 (21)	MIX	軸	C4 (21)	100DIF	軸	C4 (21)	200DIF	軸	C4 (21)	400DIF
PP ○	0.29		PP ○	2.64		PP ○	1.22		PP ○	0.63	
PV △	0.29		PV △	1.63		PV △	0.42		PV △	0.60	
PX ▽	0.10		PX ▽	2.16		PX ▽	1.20		PX ▽	0.33	
AN □	92		AN □	36		AN □	169		AN □	109	



(1) 内面軸方向信号の特徴との比較

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

位相角

(2) デンティング(DENT)信号の特徴との比較

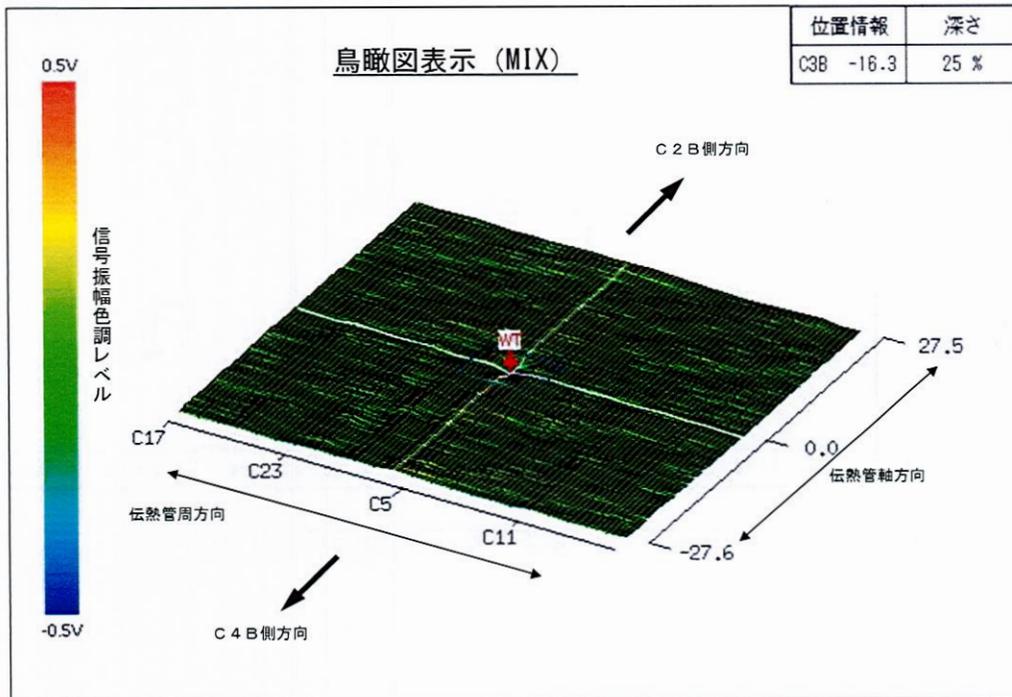
軸	C1 (1)	400DIF
PP ○	5.61	
PV △	0.91	
PX ▽	5.61	
AN □	0	

校正用試験片 DENT 信号

位相角

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

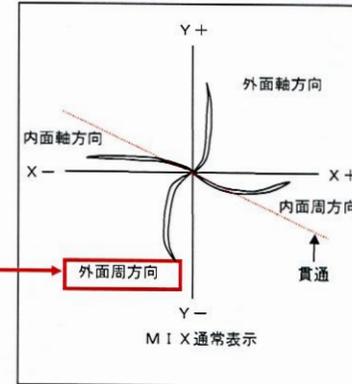
-37-



ECTの位相評価

当該管リサージュ表示 (C-SG X55-Y8)

軸	C1 (24)	MIX	軸	C1 (24)	100DIF	軸	C1 (24)	200DIF	軸	C1 (24)	400DIF
PP ○	PV △	PX ▽	AN □	PP ○	PV △	PX ▽	AN □	PP ○	PV △	PX ▽	AN □
0.38	0.36	0.24	109	2.25	1.64	1.54	47	0.90	0.38	0.88	11
											0.32
											0.30
											0.31
											AN □
											13



(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られる。

インテリ ECT の信号の特徴

位相角

(2) デンティング (DENT) 信号の特徴との比較

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

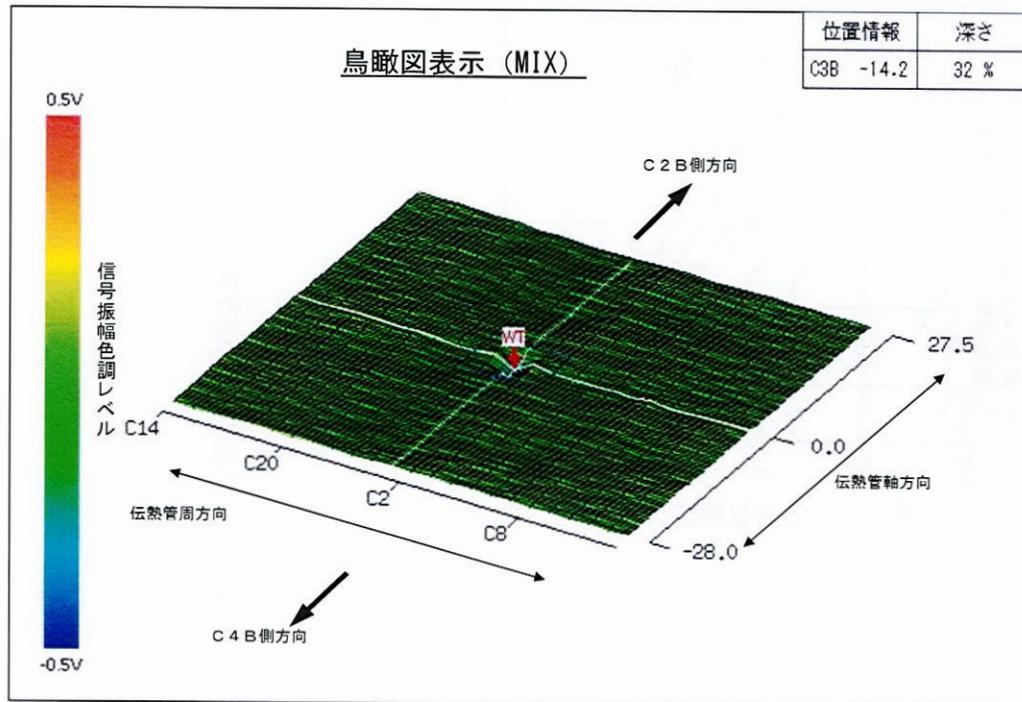
校正用試験片 DENT 信号

位相角

校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は“全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる”という特徴を持っているが、今回の当該信号は Y-方向の位相を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外周方向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られる。

鳥瞰図表示 (MIX)

位置情報	深さ
C3B -14.2	32 %



粒界腐食割れに関する検討結果

高浜発電所4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 5.9 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4号機では2次系水中にアンモニアとヒドラジンを注入しており、運転中良好な還元雰囲気を維持している。

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

<クレビス部 pH 値計算結果>

	第23サイクル
pH _{300℃}	平均 5.9

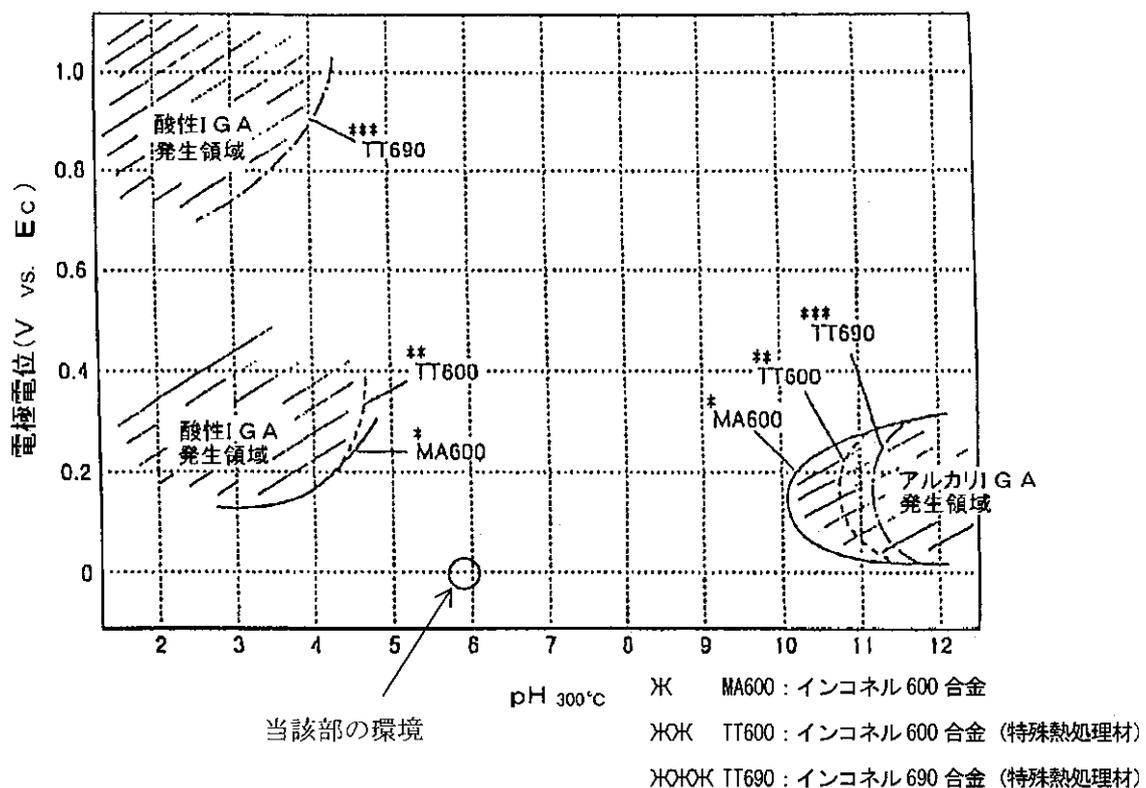
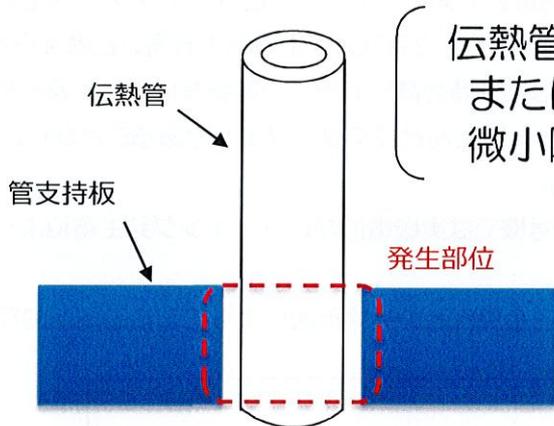
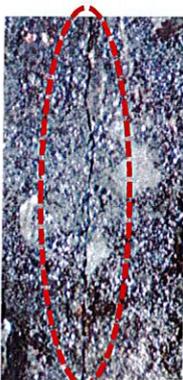


図 粒界腐食割れの発生領域

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

粒界腐食割れによるきずの形状

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

発生部位	
 <p style="text-align: center;">(試験体概略図)</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> 伝熱管と管支持板 または管板との 微小隙間で発生 </div> <p style="color: red; margin-top: 10px;">発生部位</p>
表面形状	
 <p style="color: red; font-weight: bold;">腐食による凹凸面</p>	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="font-size: 2em; margin-right: 10px;">➡</div> <div style="text-align: center;">  <p style="color: red; font-weight: bold;">割れ</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">拡大観察 (×20倍)</p>
(昭和63年度 共同研究報告書「蒸気発生器改良型伝熱管 長期腐食信頼性に関する研究」より抜粋)	

ピitting発生に関する検討結果

高浜発電所4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4号機SG器内水塩素イオン濃度至近サイクル平均値

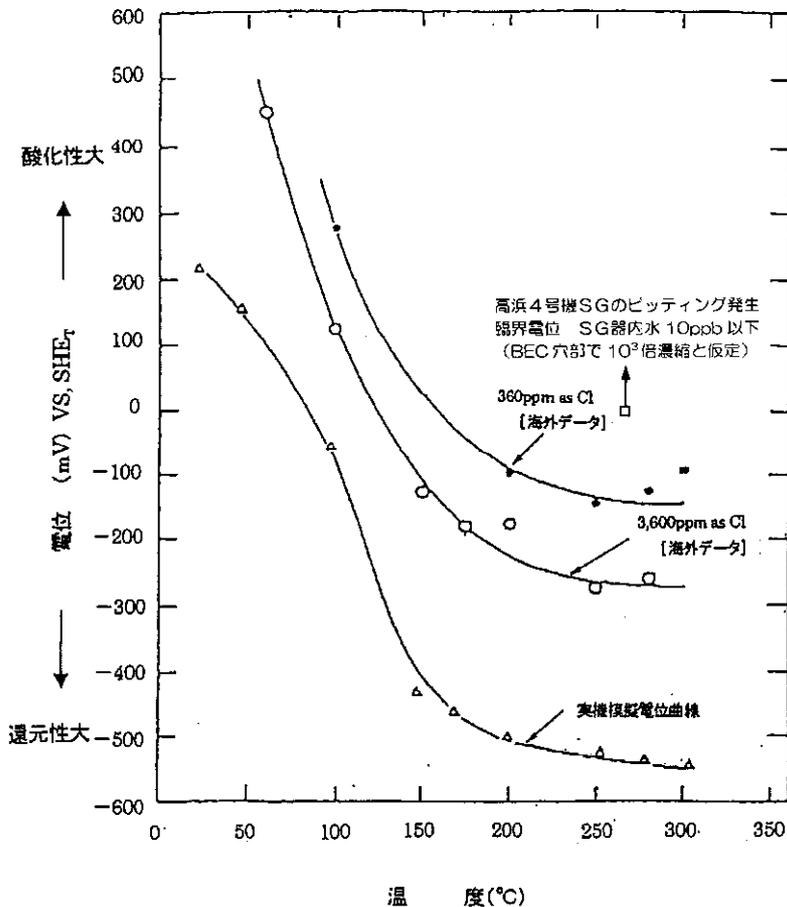
	第23サイクル
塩素イオン (ppb)	0.6

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0.6ppm程度)である。よって、ピitting*¹発生限界電位は下図の360ppmのデータの電位(-100mV以下(at 270°C))よりも十分高いと考えられる。

一方、高浜発電所4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4号機では実機電位がピitting発生電位よりも低く、ピittingの発生環境ではないと考えられる。

*¹ 塩素イオン等に起因する金属表面の被膜破壊によって起きる局所的な腐食。



(説明)

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

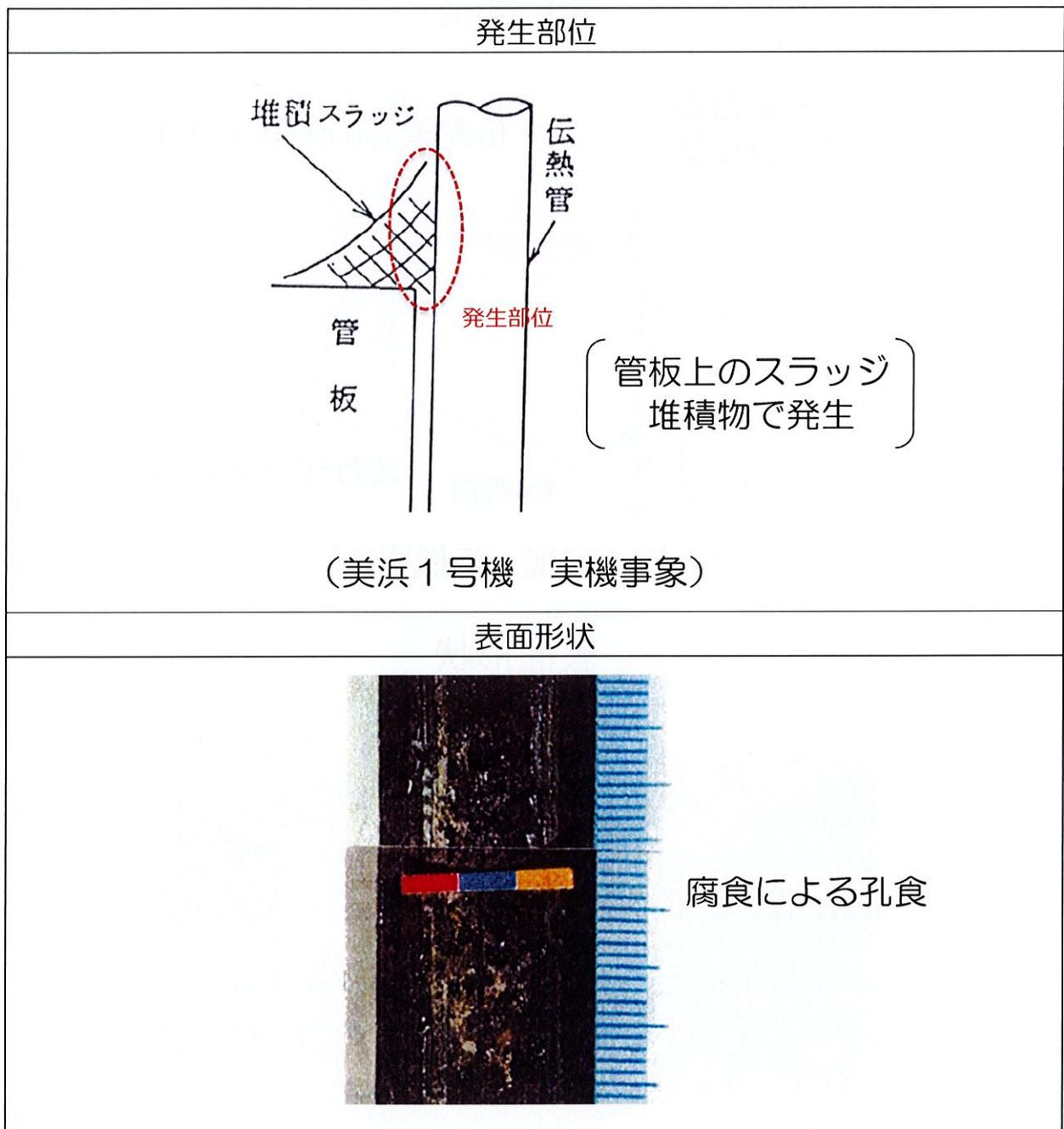
【出典

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

図 MA600合金のピitting発生電位

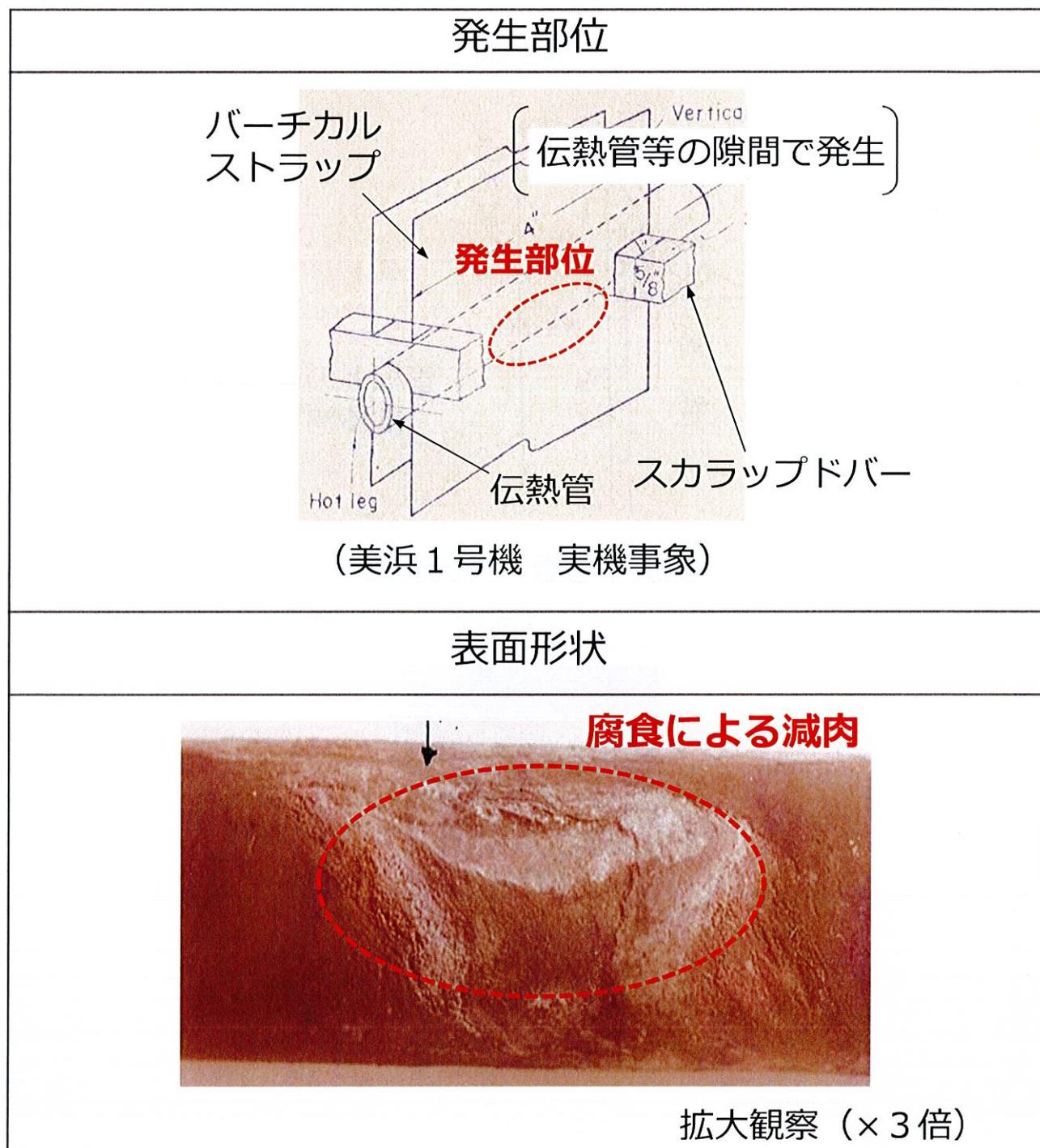
ピittingによるきずの形状

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



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られる。なお、リン酸減肉によるきずの形状例を以下に示す。



流体振動による疲労評価

第三管支持板部において、流体力によって伝熱管に発生する応力を算出し、疲労損傷が生じないことを確認した。

伝熱管に作用する流体力 F は、

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

ここで、 C_D ：抗力係数 = $\boxed{}$

ρ ：流体の密度 = $\boxed{}$ kg/mm³

V ：流速 = $\boxed{}$ mm/sec

S ：流れを受ける面積 = $\boxed{}$
= $\boxed{}$

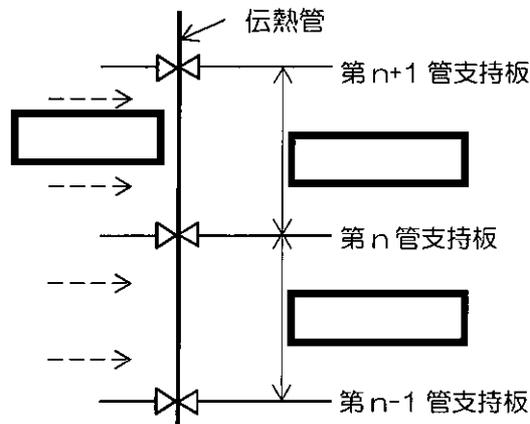


図 1 流体力を受ける伝熱管 ($n = 3$)

流体力 F による最大曲げモーメント M は、

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

ここで、 l ：管支持板間の長さ = $\boxed{}$ mm

伝熱管の断面係数 Z は

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

ここで、 d_2 ：伝熱管外径 = 22.23mm

d_1 ：伝熱管内径 = 19.69mm

よって、伝熱管に発生する最大応力 σ は、

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

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

$\boxed{}$ ：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

エロージョンの発生可能性評価

1. 目的

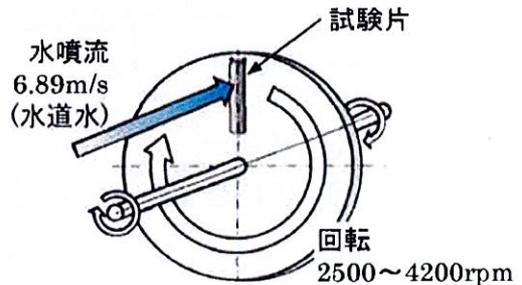
SG 伝熱管の管支持板部に周辺流体の衝突によるエロージョン*1 が発生しないことを評価する。

*1：管内外を流れる水により配管表面が摩耗する現象

2. 方法

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

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



3. 評価結果

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

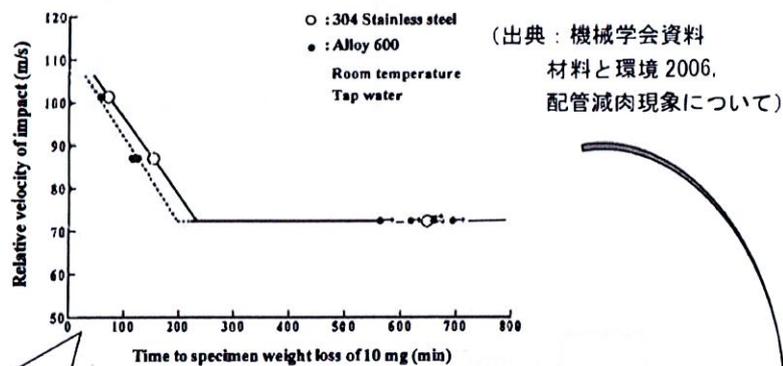


図1 ウォータージェットテストによる限界流速

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

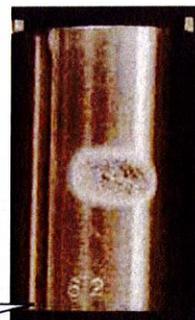


図2 ウォータージェットテスト後の外観
(700分間水噴流後の状況)

[] : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

エロージョンの限界流速の温度影響

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

● エロージョンのメカニズム

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

<流体因子（密度）>

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

<材料因子（硬さ）>

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

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

※1：材料メーカーカタログ（インコネル600合金）の単位を換算

※2：材料と環境，57，146-152(2008)，磯本ら

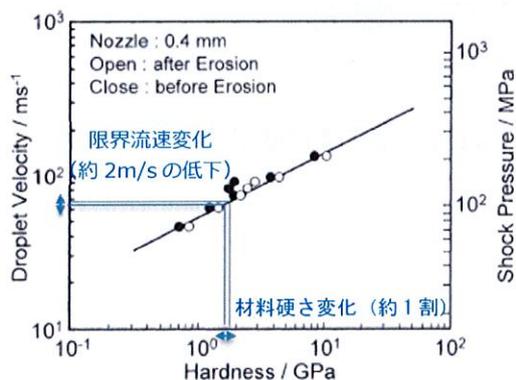


図1 限界流速と硬さの関係

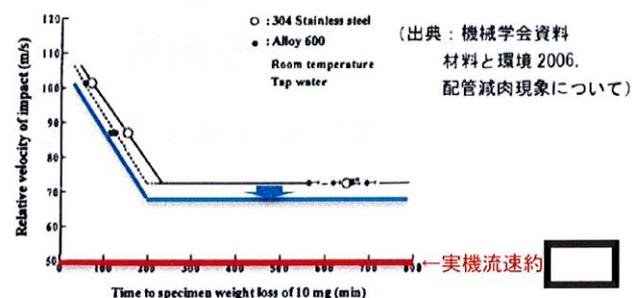


図2 ウォータージェットテストによる限界流速

温度の影響は小さく、常温の知見を用いても問題ない。

[]：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。

管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (1/3)

伝熱管は図 1 に示すとおり管支持板によって水平方向を支持しており、四つ葉型の穴によって 1 穴あたり 4 ヶ所が伝熱管と接触する構造となっている。2 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 ヶ所の接触部(ランド部^{*1})に減肉が生じることとなる。

今回、減肉指示が確認された位置の目視点検を行った結果、図 2~図 5 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、又はランド部の位置に発生していても接触部 4 ヶ所のうち 1 ヶ所しか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られる。

^{*1} 管支持板に加工されている四つ葉型管穴のうち凸面部。

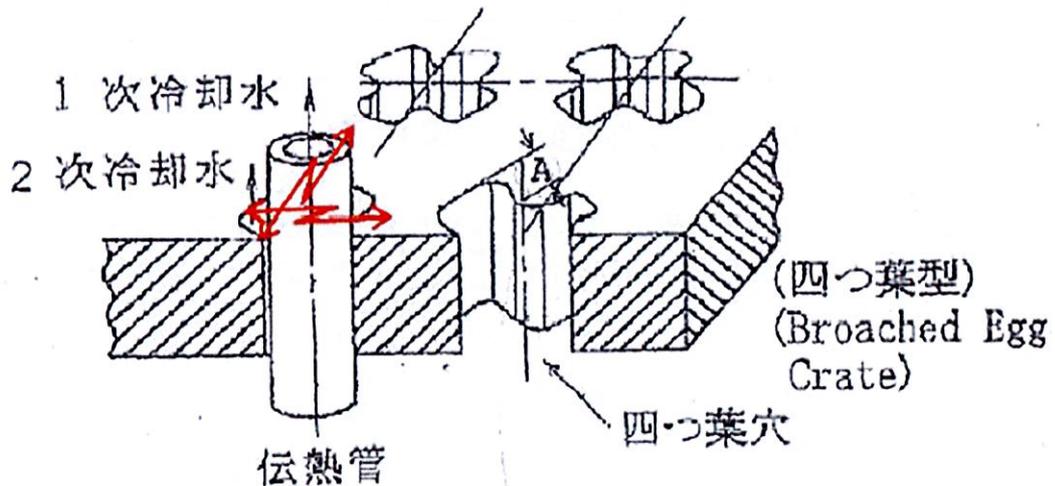


図 1 管支持板四つ葉穴 (BEC 穴) による伝熱管の支持状況

管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (2/3)

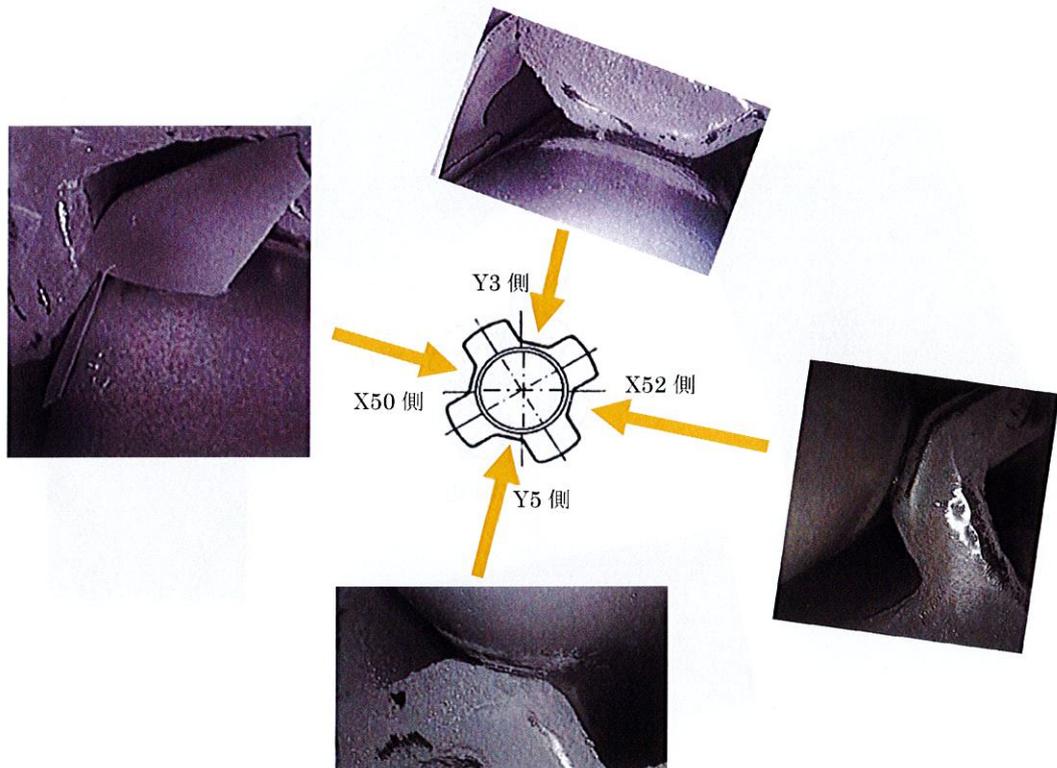


図2 減肉とランド部の位置関係(A-SG X51,Y4)

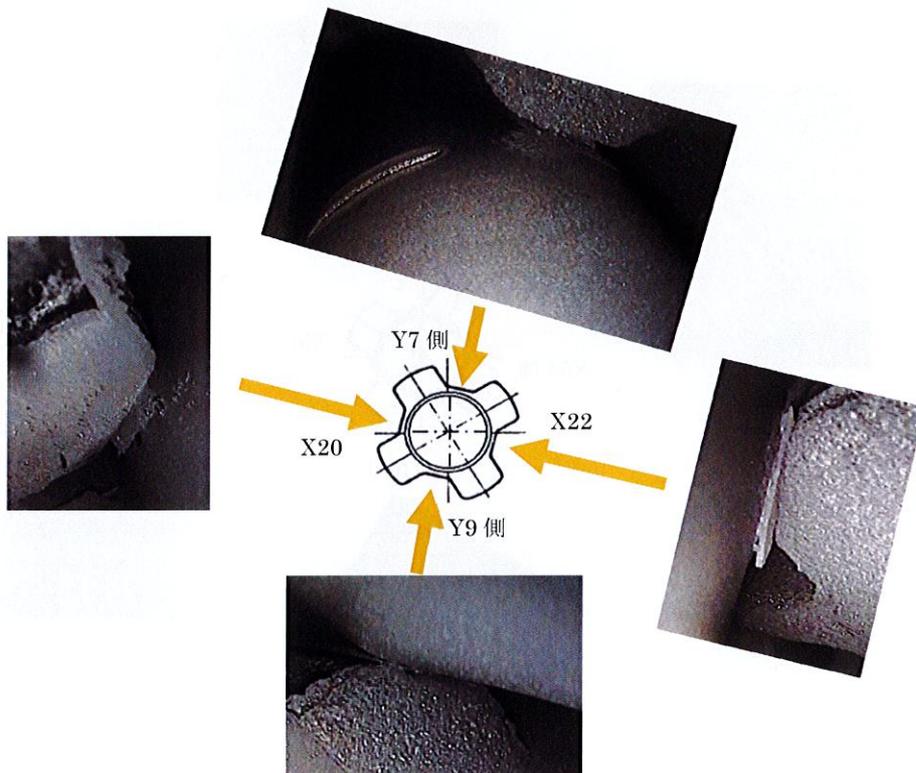


図3 減肉とランド部の位置関係(C-SG X21,Y8)

管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (3/3)

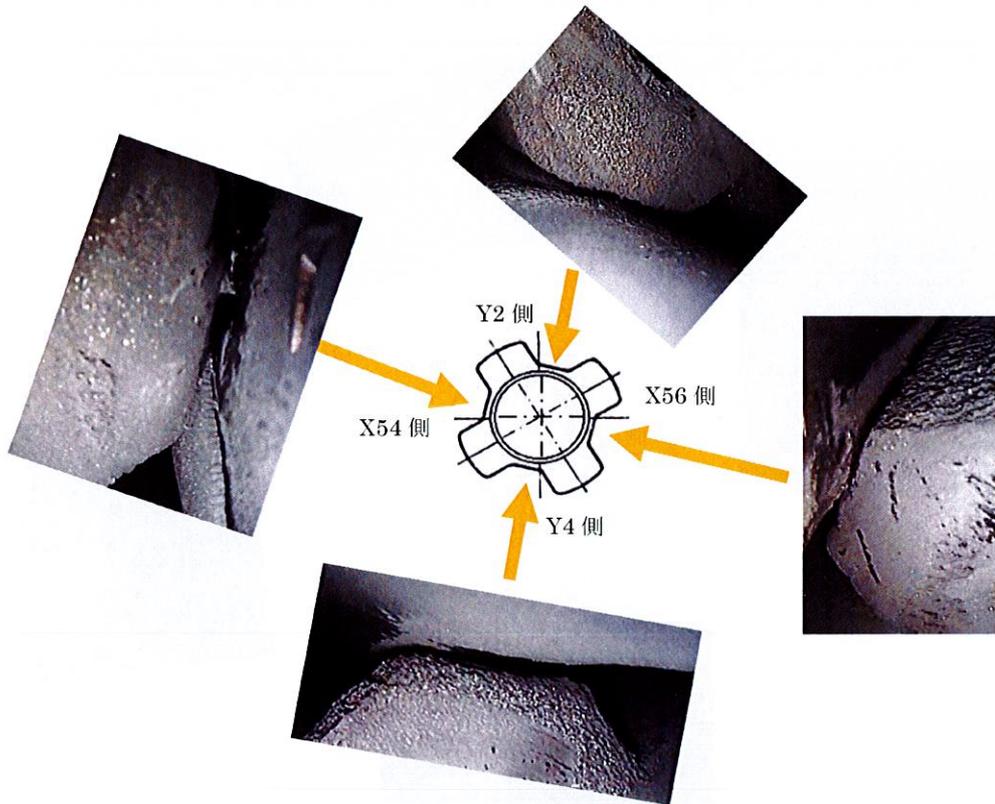


図4 減肉とランド部の位置関係(C-SG X55,Y3)

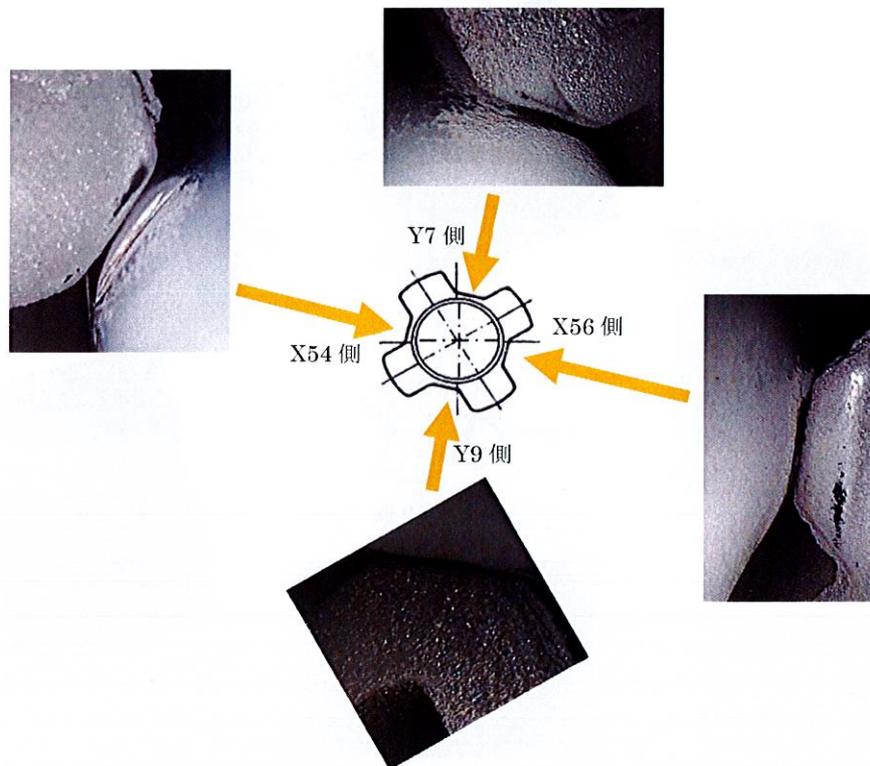


図5 減肉とランド部の位置関係(C-SG X55,Y8)

過去事象を踏まえた点検調査

高浜発電所4号機前回（第22回）定期検査において、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すること、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た確認を実施する等の異物混入対策を実施している。また、SG器内に異物が混入していたことを踏まえ、念のためSG器内の水張り、窒素噴射（バブリング）および水抜きを実施した結果、異物が回収されなかった。

	機器立入	垂直配管取付弁	その他
（前回） 高浜3号機 第24回定期検査	<ul style="list-style-type: none"> ・機器内部に立ち入る前に、器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。 ・機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。 ・開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。 	<ul style="list-style-type: none"> ・弁点検時は、弁箱内部に使用する機材（ウエス含む）に異物の付着がないことを確実に事前確認する。 ・最終異物確認時に直接目視き異物確認できない範囲は、小型カメラで確認する。 ・ウエスは、新ウエスを使用する。 ・新ウエスは再使用ウエスと区別して管理する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・保温材の切れ端等の清掃・片づけは一作業一片づけを徹底し、作業服、靴の異物付着確認を行う。 ・機器を開放した時点でうず巻きガ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。 ・SG水張ポンプ入口仮設ストレーナ設置した。
（前回） 高浜4号機 第22回定期検査	<ul style="list-style-type: none"> ・機器内部に立ち入る前に、器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。 ・機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。 ・開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。 	<ul style="list-style-type: none"> ・弁点検時は、弁箱内部に使用する機材（ウエス含む）に異物の付着がないことを確実に事前確認する。 ・最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、小型カメラで確認する。 ・ウエスは、新ウエスを使用する。 ・新ウエスは再使用ウエスと区別して管理する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・保温材の切れ端等の清掃・片づけは一作業一片づけを徹底し、作業服、靴の異物付着確認を行う。
（前々回） 高浜3号機 第23回定期検査	<ul style="list-style-type: none"> ・機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・弁点検時は、弁箱内部に使用する機材（ウエス含む）に異物の付着がないことを確実に事前確認する。 ・最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、小型カメラで確認する。【自主対応】 	-
（従前） 高浜3号機 第23回定期検査以前 高浜4号機 第21回定期検査以前	<ul style="list-style-type: none"> ・機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを確認する（本人でも可）。 	<ul style="list-style-type: none"> ・最終異物確認は直接目視にて実施（手鏡等を使用） 	-

今回、SG器内および器外点検の結果、異物は確認できなかったことから異物混入対策は有効であったと判断する。今後も引き続き高浜発電所3号機前回（第24回）定期検査と同様の異物混入対策を実施する。また、高浜発電所3号機前回（第24回）定期検査でのSG伝熱管損傷事象を踏まえ、今回、念のためSGに流入する可能性のある系統で実施している全ての開放点検等の対象機器について機器の健全性並びに異物管理状況を確認した結果、異物混入の可能性はないことを確認した。

過去事象を踏まえた点検調査

S Gに流入する可能性のある機器開放点検一覧

No.	機器名	点検対象	人の立ち入り有無	評価	
				機器の健全性 ○：異常無 ×：異常有	異物混入の可能性 ○：無 ×：有
1	Aタービン動主給水プースタポンプ(入口フランジ、ケーシングカバー)	ポンプ	無	○	○
2	Bタービン動主給水プースタポンプ(入口フランジ、ケーシングカバー)	ポンプ	無	○	○
3	電動主給水プースタポンプ(入口フランジ、ケーシングカバー)	ポンプ	無	○	○
4	脱気器タンク	容器	有	○	○
5	4 A 電動 F W B P ストレナ後弁	FW-104A	無	○	○
6	4 B 電動 F W B P ストレナ後弁	FW-104B	無	○	○
7	4 - M / D F W B P 出口フランジ	フランジ	無	○	○
8	4 A - T / D F W B P 出口フランジ	フランジ	無	○	○
9	4 B - T / D F W B P 出口フランジ	フランジ	無	○	○
10	4 - S G 水張ポンプ入口フランジ	フランジ	無	○	○
11	4 - M / D F W B P 出口流量計オリフイスフランジ	フランジ	無	○	○
12	4 A - T / D F W B P 出口流量計オリフイスフランジ	フランジ	無	○	○
13	4 B - T / D F W B P 出口流量計オリフイスフランジ	フランジ	無	○	○
14	4 - S G 水張ポンプ出口流量計オリフイスフランジ	フランジ	無	○	○
15	A 主給水制御弁 (F C V - 4 6 0) バイパス管フローノズル前管台フランジ	フランジ	無	○	○
16	A 主給水制御弁 (F C V - 4 6 0) バイパス管フローノズル後管台フランジ	フランジ	無	○	○
17	B 主給水制御弁 (F C V - 4 7 0) バイパス管フローノズル前管台フランジ	フランジ	無	○	○
18	B 主給水制御弁 (F C V - 4 7 0) バイパス管フローノズル後管台フランジ	フランジ	無	○	○
19	C 主給水制御弁 (F C V - 4 8 0) バイパス管フローノズル前管台フランジ	フランジ	無	○	○
20	C 主給水制御弁 (F C V - 4 8 0) バイパス管フローノズル後管台フランジ	フランジ	無	○	○
21	Aタービン動主給水ポンプ(ケーシングカバー)	ポンプ	無	○	○
22	Bタービン動主給水ポンプ(ケーシングカバー)	ポンプ	無	○	○
23	電動主給水ポンプ(ケーシングカバー)	ポンプ	無	○	○
24	4 S G 水張ポンプ入口弁	CW-289	無	○	○
25	4 A 主給水バイパス流量制御弁前弁	FW-505A	無	○	○
26	4 B 主給水バイパス流量制御弁前弁	FW-505B	無	○	○
27	4 C 主給水バイパス流量制御弁前弁	FW-505C	無	○	○
28	4 A 主給水バイパス流量制御弁後弁	FW-506A	無	○	○
29	4 B 主給水バイパス流量制御弁後弁	FW-506B	無	○	○
30	4 C 主給水バイパス流量制御弁後弁	FW-506C	無	○	○
31	4 S G 水張ポンプ出口逆止弁	CW298	無	○	○
32	4 S G 水張ポンプ出口弁	CW299	無	○	○
33	4 A 蒸気発生器水張制御弁前弁	FW507A	無	○	○
34	4 B 蒸気発生器水張制御弁前弁	FW507B	無	○	○
35	4 C 蒸気発生器水張制御弁前弁	FW507C	無	○	○
36	4 A 蒸気発生器水張制御弁後弁	FW-508A	無	○	○
37	4 B 蒸気発生器水張制御弁後弁	FW-508B	無	○	○
38	4 C 蒸気発生器水張制御弁後弁	FW-508C	無	○	○
39	4 脱気水 S G 供給弁	CW401	無	○	○
40	4 A 6 ヒータ入口給水逃し弁	FW-012A	無	○	○
41	4 B 6 ヒータ入口給水逃し弁	FW-012B	無	○	○
42	4 S G M P 入口ストレナフロー弁	CW311	無	○	○
43	4 S G 水張ポンプミニマムフロー弁	CW295	無	○	○
44	4 A 主給水ブロー弁	FW-543A	無	○	○
45	4 B 主給水ブロー弁	FW-543B	無	○	○
46	4 C 主給水ブロー弁	FW-543C	無	○	○
47	4 Aタービン動主給水ポンプミニマムフロー制御弁後弁	FW-150A	無	○	○
48	4 Bタービン動主給水ポンプミニマムフロー制御弁後弁	FW-150B	無	○	○
49	4 電動主給水ポンプミニマムフロー制御弁後弁	FW-151	無	○	○
50	4 A 主給水流量制御弁	FCV-460	無	○	○
51	4 B 主給水流量制御弁	FCV-470	無	○	○
52	4 C 主給水流量制御弁	FCV-480	無	○	○
53	4 A 主給水バイパス流量制御弁	FCV-461	無	○	○
54	4 B 主給水バイパス流量制御弁	FCV-471	無	○	○
55	4 C 主給水バイパス流量制御弁	FCV-481	無	○	○
56	4 電動主給水ポンプ出口制御弁	FCV-3705	無	○	○
57	4 A 蒸気発生器タービン動補助給水流量調節弁	HCV-3715	無	○	○
58	4 B 蒸気発生器タービン動補助給水流量調節弁	HCV-3725	無	○	○
59	4 C 蒸気発生器タービン動補助給水流量調節弁	HCV-3735	無	○	○
60	4 A 蒸気発生器水張制御弁	LCV-3710	無	○	○

過去事象を踏まえた点検調査

S Gに流入する可能性のある機器開放点検一覧

No.	機器名	点検対象	人の立ち入り有無	評価	
				機器の健全性 ○：異常無 ×：異常有	異物混入の可能性 ○：無 ×：有
61	4 B 蒸気発生器水張制御弁	LCV-3720	無	○	○
62	4 C 蒸気発生器水張制御弁	LCV-3730	無	○	○
63	蒸気発生器水張ポンプ(ケーシングカバー)	ポンプ	無	○	○
64	4 Aタービン動主給水ポンプ出口逆止弁	FW-001A	無	○	○
65	4 Bタービン動主給水ポンプ出口逆止弁	FW-001B	無	○	○
66	4 電動主給水ポンプ出口逆止弁	FW-002	無	○	○
67	4 Aタービン動主給水ポンプ出口弁	FW-003A	無	○	○
68	4 Bタービン動主給水ポンプ出口弁	FW-003B	無	○	○
69	4 電動主給水ポンプ出口弁	FW-004	無	○	○
70	4 A 6ヒータ給水入口弁	FW-005A	無	○	○
71	4 B 6ヒータ給水入口弁	FW-005B	無	○	○
72	4 A 6ヒータ給水出口弁	FW-006A	無	○	○
73	4 B 6ヒータ給水出口弁	FW-006B	無	○	○
74	4 A 主給水流量制御弁前弁	FW-503A	無	○	○
75	4 B 主給水流量制御弁前弁	FW-503B	無	○	○
76	4 C 主給水流量制御弁前弁	FW-503C	無	○	○
77	4 A 主給水流量制御弁後弁	FW-504A	無	○	○
78	4 B 主給水流量制御弁後弁	FW-504B	無	○	○
79	4 C 主給水流量制御弁後弁	FW-504C	無	○	○
80	4 A 主給水逆止弁	FW-519A	無	○	○
81	4 B 主給水逆止弁	FW-519B	無	○	○
82	4 C 主給水逆止弁	FW-519C	無	○	○
83	4 A 主給水隔離弁	FW-520A	無	○	○
84	4 B 主給水隔離弁	FW-520B	無	○	○
85	4 C 主給水隔離弁	FW-520C	無	○	○
86	4 A 主給水逆止弁バランス弁	FW-577A	無	○	○
87	4 B 主給水逆止弁バランス弁	FW-577B	無	○	○
88	4 C 主給水逆止弁バランス弁	FW-577C	無	○	○
89	4 A 主給水隔離弁バランス弁	FW-578A	無	○	○
90	4 B 主給水隔離弁バランス弁	FW-578B	無	○	○
91	4 C 主給水隔離弁バランス弁	FW-578C	無	○	○
92	4 A 蒸気発生器主給水流量オリフイス	フランジ	無	○	○
93	4 B 蒸気発生器主給水流量オリフイス	フランジ	無	○	○
94	4 C 蒸気発生器主給水流量オリフイス	フランジ	無	○	○
95	高圧給水加熱器後主給水ヘッド閉止フランジ	フランジ	無	○	○
96	4 B-TDFWP (d P 1 A-5 2 1 0 B) 低圧側元弁	FW-116B	無	○	○
97	4 B-TDFWP 出入口 d P 1-5 2 1 8 ⇔ 5 2 2 0 B 低圧側元弁	FW119B	無	○	○
98	4 B-TDFWP 吸込圧力計元弁 (P 1-5 2 1 6 B)	FW-202B	無	○	○
99	4 B-TDFWP ケーシングベント弁	FW-201B	無	○	○
100	4 B-TDFWP ケーシングドレン弁	FW-200B	無	○	○
101	4 B-TDFWP ウォーミング弁	FW-161B	無	○	○
102	4 B-TDFWP 出入口 d P 1-5 2 1 8 ⇔ 5 2 2 0 B 高圧側元弁	FW120B	無	○	○
103	4 B-TDFWP 出口ベント弁	FW-132B	無	○	○
104	4 B-TDFWP 入口流量計上流側元弁 (F T-5 2 2 4 B)	FW-123B	無	○	○
105	4 B-TDFWP 入口流量計下流側元弁 (F T-5 2 2 4 B)	FW-124B	無	○	○
106	4 B-TDFWP 入口流量計上流側元弁 (F T-5 2 2 6 B)	FW-125B	無	○	○
107	4 B-TDFWP 入口流量計下流側元弁 (F T-5 2 2 6 B)	FW-126B	無	○	○
108	4 B-TDFWP 吸込圧力計元弁 (P 1-5 2 3 0 B)	FW-224B	無	○	○
109	4 B-FWP バランス逆止弁	FW024B	無	○	○
110	4 B-TDFWP ケーシングドレン元弁	FW-220B	無	○	○
111	4 B-TDFWP 吐出圧力計元弁 (P 1-5 2 3 4 B L)	FW-222B	無	○	○
112	4 B-TDFWP 吐出圧力計元弁 (P 1-5 2 3 4 B)	FW-007Ba	無	○	○
113	4 B-TDFWP 吐出圧力計元弁 (P 1-5 2 3 6 B)	FW-008Ba	無	○	○
114	4 B-TDFWP ミニマムフロー FT-5 2 3 8 B 上流側元弁	FW-152Ba	無	○	○
115	4 B-TDFWP ミニマムフロー FT-5 2 3 8 B 下流側元弁	FW-153Ba	無	○	○
116	4 B-TDFWP ミニマムフロー FT-5 2 4 0 B 上流側元弁	FW-154Ba	無	○	○
117	4 B-TDFWP ミニマムフロー FT-5 2 4 0 B 下流側元弁	FW-155Ba	無	○	○
118	4 Bタービン動主給水ポンプミニマムフロー制御弁	FCV-5238B	無	○	○
119	4 B-TDFWP 出口ブロー元弁	FW-017Ba	無	○	○
120	4 FWP 出口ヘッド圧力計元弁 (P T-5 2 4 8)	FW-010a	無	○	○

過去事象を踏まえた点検調査

S Gに流入する可能性のある機器開放点検一覧

No.	機器名	点検対象	人の立ち入り有無	評価	
				機器の健全性 ○：異常無 ×：異常有	異物混入の可能性 ○：無 ×：有
121	4 FWP 出口ヘッダブロー元弁	FW-019a	無	○	○
122	4 FWPウォーミング元弁	FW-160	無	○	○
123	4 A-TDFWBP (dPIA-5210A) 低圧側元弁	FW-116A	無	○	○
124	4 A-TDFWP 出入口 dPI-5218⇔5220A 低圧側元弁	FW119A	無	○	○
125	4 A-TDFWBP 吸込圧力計元弁 (PI-5216A)	FW-202A	無	○	○
126	4 A-TDFWBP ケーシングバント弁	FW-201A	無	○	○
127	4 A-TDFWBP ケーシングドレン弁	FW-200A	無	○	○
128	4 A-TDFWPウォーミング弁	FW-161A	無	○	○
129	4 A-TDFWP 出入口 dPI-5218⇔5220A 高圧側元弁	FW120A	無	○	○
130	4 A-TDFWBP 出口バント弁	FW-132A	無	○	○
131	4 A-TDFWP 入口流量計上流側元弁 (FT-5224A)	FW-123A	無	○	○
132	4 A-TDFWP 入口流量計下流側元弁 (FT-5224A)	FW-124A	無	○	○
133	4 A-TDFWP 入口流量計上流側元弁 (FT-5226A)	FW-125A	無	○	○
134	4 A-TDFWP 入口流量計下流側元弁 (FT-5226A)	FW-126A	無	○	○
135	4 A-TDFWP 吸込圧力計元弁 (PI-5230A)	FW-224A	無	○	○
136	4 A-FWP バランス逆止弁	FW024A	無	○	○
137	4 A-TDFWP ケーシングドレン元弁	FW-220A	無	○	○
138	4 A-TDFWP 吐出圧力計元弁 (PI-5234AL)	FW-222A	無	○	○
139	4 A-TDFWP 吐出圧力計元弁 (PI-5234A)	FW-007Aa	無	○	○
140	4 A-TDFWP 吐出圧力計元弁 (PI-5236A)	FW-008Aa	無	○	○
141	4 A-TDFWP ミニマムフロー FT-5238A 上流側元弁	FW-152Aa	無	○	○
142	4 A-TDFWP ミニマムフロー FT-5238A 下流側元弁	FW-153Aa	無	○	○
143	4 A-TDFWP ミニマムフロー FT-5240A 上流側元弁	FW-154Aa	無	○	○
144	4 A-TDFWP ミニマムフロー FT-5240A 下流側元弁	FW-155Aa	無	○	○
145	4 Aタービン動主給水ポンプミニマムフロー制御弁	FCV-5238A	無	○	○
146	4 A-TDFWP 出口ブロー元弁	FW-017Aa	無	○	○
147	4 MDFWBP 吸込ストレーナ dPIA-5211 低圧側元弁	FW-118A	無	○	○
148	4 A-MDFWBP 入口ストレーナ後ブロー弁	FW-134A	無	○	○
149	4 MDFWBP 吸込ストレーナ dPIA-5212 低圧側元弁	FW-118B	無	○	○
150	4 B-MDFWBP 入口ストレーナ後ブロー弁	FW-134B	無	○	○
151	4 MDFWBP 入口圧力逃し弁	FW112	無	○	○
152	4 MDFWBP 入口圧力逃し逆止弁	FW110	無	○	○
153	4 MDFWBP 出入口差圧 dPT-5221⇔5223 低圧側元弁	FW121	無	○	○
154	4 MDFWBP 吸込圧力計元弁 (PI-5231)	FW-234	無	○	○
155	4 MDFWBP ケーシングバント弁	FW-211	無	○	○
156	4 MDFWBP ケーシングブロー弁	FW-210	無	○	○
157	4 MDFWPウォーミング弁	FW-162	無	○	○
158	4 MDFWBP 出入口差圧 dPT-5221⇔5223 高圧側元弁	FW122	無	○	○
159	4 MDFWBP 出口バント弁	FW-133	無	○	○
160	4 MDFWP 入口流量計上流側元弁 (FT-5225)	FW-127	無	○	○
161	4 MDFWP 入口流量計下流側元弁 (FT-5225)	FW-128	無	○	○
162	4 MDFWP 入口流量計上流側元弁 (FT-5227)	FW-129	無	○	○
163	4 MDFWP 入口流量計下流側元弁 (FT-5227)	FW-130	無	○	○
164	4 MDFWP 吐出圧力計元弁 (PT-5235)	FW-009A	無	○	○
165	4 MDFWP バランス逆止弁	FW026	無	○	○
166	4 MDFWP ケーシングドレン元弁	FW-230	無	○	○
167	4 MDFWP 吐出圧力計元弁 (PI-5235L)	FW-232	無	○	○
168	4 MDFWBP 吐出圧力計元弁 (PI-5217)	FW-212	無	○	○
169	4 MDFWP ミニマムフロー流量計上流側元弁 (FT-5239)	FW-156a	無	○	○
170	4 MDFWP ミニマムフロー流量計下流側元弁 (FT-5239)	FW-157a	無	○	○
171	4 MDFWP ミニマムフロー流量計上流側元弁 (FT-5241)	FW-158a	無	○	○
172	4 MDFWP ミニマムフロー流量計下流側元弁 (FT-5241)	FW-159a	無	○	○
173	4 電動主給水ポンプミニマムフロー制御弁	FCV-5239	無	○	○
174	4 MDFWP 出口ブロー元弁	FW-018a	無	○	○
175	4 A 6ヒータ入口給水ブロー元弁	FW020AA	無	○	○
176	4 A 6ヒータ出口給水バント元弁	FW021AA	無	○	○
177	4 A 6ヒータ出口給水圧力計元弁 (PI-5250A)	FW-013Aa	無	○	○
178	4 A 6ヒータ出口給水ブロー元弁	FW022AA	無	○	○
179	4 B 6ヒータ入口給水ブロー元弁	FW020BA	無	○	○
180	4 B 6ヒータ出口給水圧力計元弁 (PI-5250B)	FW-013Ba	無	○	○

過去事象を踏まえた点検調査

S Gに流入する可能性のある機器開放点検一覧

No.	機器名	点検対象	人の立ち入り有無	評価	
				機器の健全性 ○：異常無 ×：異常有	異物混入の可能性 ○：無 ×：有
181	4 B 6ヒータ出口給水バント元弁	FW021BA	無	○	○
182	4 B 6ヒータ出口給水ブロー元弁	FW022BA	無	○	○
183	4 S G M P 入口ヒドラジオン注入弁	CW292	無	○	○
184	4 S G M P 吸込圧力計元弁 (P I - 5 2 5 7)	CW312	無	○	○
185	4 S G M P ケーシングドレン元弁	FW-320	無	○	○
186	4 S G M P ケーシングバント弁	FW-322	無	○	○
187	4 S G M P 吐出圧力計元弁 (P I - 5 2 5 8)	CW377A	無	○	○
188	4 S G M P 吐出圧力計元弁 (P T - 5 2 5 8)	CW378A	無	○	○
189	4 S G M P 出口ブロー元弁	CW296A	無	○	○
190	4 S G M P 出口回収ブロー弁	CW297	無	○	○
191	4 S G M P 出口流量計上流側元弁 (F T - 5 2 5 9)	CW300A	無	○	○
192	4 S G M P 出口流量計下流側元弁 (F T - 5 2 5 9)	CW301A	無	○	○
193	4-6ヒータ出口ヘッダ給水サンプリング元弁	FW015A	無	○	○
194	4 主給水ヘッダ圧力計元弁 (P T - 5 2 5 2)	FW014A	無	○	○
195	4 主給水ヘッダ圧力発信器第1元弁 (P T - 3 7 0 0 , 3 7 0 1)	FW501	無	○	○
196	4 給水サンプリング装置行き第1元弁	FW-580	無	○	○
197	4 A 主給水流置制御弁入口配管ドレン元弁	FW-601A	無	○	○
198	4 A 主給水流置制御弁出口配管ドレン元弁	FW-603A	無	○	○
199	4 A 蒸気発生器主給水バイパス流量発信器 (仮設) 上流側第1元弁	FW-527A	無	○	○
200	4 A 蒸気発生器主給水バイパス流量発信器 (仮設) 下流側第1元弁	FW-529A	無	○	○
201	4 A 主給水バイパス流量制御弁入口配管ドレン元弁	FW-605A	無	○	○
202	4 A 主給水バイパス流量制御弁出口配管ドレン元弁	FW-607A	無	○	○
203	4 A 蒸気発生器主給水圧力発信器第1元弁 (P T - 3 7 1 2)	FW-509A	無	○	○
204	4 A 蒸気発生器水張制御弁入口配管ドレン元弁	FW609A	無	○	○
205	4 A 蒸気発生器水張制御弁出口配管ドレン元弁	FW611A	無	○	○
206	4 B 主給水流置制御弁入口配管ドレン元弁	FW-601B	無	○	○
207	4 B 主給水流置制御弁出口配管ドレン元弁	FW-603B	無	○	○
208	4 B 蒸気発生器主給水バイパス流量発信器 (仮設) 上流側第1元弁	FW-527B	無	○	○
209	4 B 蒸気発生器主給水バイパス流量発信器 (仮設) 下流側第1元弁	FW-529B	無	○	○
210	4 B 主給水バイパス流量制御弁入口配管ドレン元弁	FW-605B	無	○	○
211	4 B 主給水バイパス流量制御弁出口配管ドレン元弁	FW-607B	無	○	○
212	4 B 蒸気発生器主給水圧力発信器第1元弁 (P T - 3 7 2 2)	FW-509B	無	○	○
213	4 B 蒸気発生器水張制御弁入口配管ドレン元弁	FW609B	無	○	○
214	4 B 蒸気発生器水張制御弁出口配管ドレン元弁	FW611B	無	○	○
215	4 C 主給水流置制御弁入口配管ドレン元弁	FW-601C	無	○	○
216	4 C 主給水流置制御弁出口配管ドレン元弁	FW-603C	無	○	○
217	4 C 蒸気発生器主給水バイパス流量発信器 (仮設) 上流側第1元弁	FW-527C	無	○	○
218	4 C 蒸気発生器主給水バイパス流量発信器 (仮設) 下流側第1元弁	FW-529C	無	○	○
219	4 C 主給水バイパス流量制御弁入口配管ドレン元弁	FW-605C	無	○	○
220	4 C 主給水バイパス流量制御弁出口配管ドレン元弁	FW-607C	無	○	○
221	4 C 蒸気発生器主給水圧力発信器第1元弁 (P T - 3 7 3 2)	FW-509C	無	○	○
222	4 C 蒸気発生器水張制御弁入口配管ドレン元弁	FW609C	無	○	○
223	4 C 蒸気発生器水張制御弁出口配管ドレン元弁	FW611C	無	○	○
224	4 A 蒸気発生器主給水流置発信器上流側第1元弁 (F T - 4 6 0)	FW511A	無	○	○
225	4 A 蒸気発生器主給水流置発信器上流側第1元弁 (F T - 4 6 1)	FW513A	無	○	○
226	4 A 蒸気発生器主給水流置発信器 (仮設) 上流側第1元弁	FW523A	無	○	○
227	4 A 蒸気発生器主給水流置発信器 (仮設) 下流側第1元弁	FW525A	無	○	○
228	4 A 蒸気発生器主給水流置発信器下流側第1元弁 (F T - 4 6 1)	FW515A	無	○	○
229	4 A 蒸気発生器主給水流置発信器下流側第1元弁 (F T - 4 6 0)	FW517A	無	○	○
230	4 A 主給水ラインドレン元弁	FW-804	無	○	○
231	4 A 主給水ブローラインドレン元弁	FW824	無	○	○
232	4 B 蒸気発生器主給水流置発信器上流側第1元弁 (F T - 4 7 0)	FW511B	無	○	○
233	4 B 蒸気発生器主給水流置発信器上流側第1元弁 (F T - 4 7 1)	FW513B	無	○	○
234	4 B 蒸気発生器主給水流置発信器 (仮設) 上流側第1元弁	FW523B	無	○	○
235	4 B 蒸気発生器主給水流置発信器 (仮設) 下流側第1元弁	FW525B	無	○	○
236	4 B 蒸気発生器主給水流置発信器下流側第1元弁 (F T - 4 7 1)	FW515B	無	○	○
237	4 B 蒸気発生器主給水流置発信器下流側第1元弁 (F T - 4 7 0)	FW517B	無	○	○
238	4 B 主給水ラインドレン元弁	FW-806	無	○	○
239	4 B 主給水ブローラインドレン元弁	FW-816	無	○	○
240	4 C 蒸気発生器主給水流置発信器上流側第1元弁 (F T - 4 8 0)	FW511C	無	○	○

過去事象を踏まえた点検調査

S Gに流入する可能性のある機器開放点検一覧

No.	機器名	点検対象	人の立ち入り有無	評価	
				機器の健全性 ○：異常無 ×：異常有	異物混入の可能性 ○：無 ×：有
241	4C蒸気発生器主給水流量発信器上流側第1元弁 (FT-481)	FW513C	無	○	○
242	4C蒸気発生器主給水流量発信器 (仮設) 上流側第1元弁	FW523C	無	○	○
243	4C蒸気発生器主給水流量発信器 (仮設) 下流側第1元弁	FW525C	無	○	○
244	4C蒸気発生器主給水流量発信器下流側第1元弁 (FT-481)	FW515C	無	○	○
245	4C蒸気発生器主給水流量発信器下流側第1元弁 (FT-480)	FW517C	無	○	○
246	4C主給水ラインドレン元弁	FW-808	無	○	○
247	4A主給水ブローライン元弁	FW-826	無	○	○
248	4C主給水ブローラインドレン元弁	FW-820	無	○	○
249	4B-TDFWP吐出圧力計弁 (PI-5234B)	FW-007Bb	無	○	○
250	4B-TDFWP吐出圧力計弁 (PI-5236B)	FW-008Bb	無	○	○
251	4B-TDFWPミニマムフロ-FT-5238B上流側弁	FW152Bb	無	○	○
252	4B-TDFWPミニマムフロ-FT-5238B下流側弁	FW153Bb	無	○	○
253	4B-TDFWPミニマムフロ-FT-5240B上流側弁	FW154Bb	無	○	○
254	4B-TDFWPミニマムフロ-FT-5240B下流側弁	FW155Bb	無	○	○
255	4B-TDFWPミニマムフロ-ブロー元弁	FW-166Ba	無	○	○
256	4FWP出口ヘッダ圧力計弁 (PT-5248)	FW-010b	無	○	○
257	4A-TDFWP吐出圧力計弁 (PI-5234A)	FW-007Ab	無	○	○
258	4A-TDFWP吐出圧力計弁 (PI-5236A)	FW-008Ab	無	○	○
259	4A-TDFWPミニマムフロ-FT-5238A上流側弁	FW152Ab	無	○	○
260	4A-TDFWPミニマムフロ-FT-5238A下流側弁	FW153Ab	無	○	○
261	4A-TDFWPミニマムフロ-FT-5240A上流側弁	FW154Ab	無	○	○
262	4A-TDFWPミニマムフロ-FT-5240A下流側弁	FW155Ab	無	○	○
263	4A-TDFWPミニマムフロ-ブロー元弁	FW-166Aa	無	○	○
264	4MDFWP吐出圧力計弁 (PI-5235L)	FW233	無	○	○
265	4MDFWPミニマムフロ-流量計上流側弁 (FT-5239)	FW-156b	無	○	○
266	4MDFWPミニマムフロ-流量計下流側弁 (FT-5239)	FW-157b	無	○	○
267	4MDFWPミニマムフロ-流量計上流側弁 (FT-5241)	FW-158b	無	○	○
268	4MDFWPミニマムフロ-流量計下流側弁 (FT-5241)	FW-159b	無	○	○
269	4MDFWPミニマムフロ-ブロー元弁	FW-167A	無	○	○
270	4Aヒータ入口給水ブロー弁	FW020AB	無	○	○
271	4Aヒータ出口給水ブロー弁	FW022AB	無	○	○
272	4Aヒータ出口給水圧力計弁 (PI-5250A)	FW-013Ab	無	○	○
273	4Bヒータ入口給水ブロー弁	FW020BB	無	○	○
274	4Bヒータ出口給水圧力計弁 (PI-5250B)	FW-013Bb	無	○	○
275	4Bヒータ出口給水ブロー弁	FW022BB	無	○	○
276	4SGMP吐出圧力計弁 (PI-5258)	CW377B	無	○	○
277	4SGMP吐出圧力計弁 (PT-2528)	CW378B	無	○	○
278	4SGMP出口流量計上流側弁 (FT-5259)	CW300B	無	○	○
279	4SGMP出口流量計下流側弁 (FT-5259)	CW301B	無	○	○
280	4-ヒータ出口ヘッダ給水サンプリング弁	FW015B	無	○	○
281	4主給水ヘッダ圧力発信器第2元弁 (PT-3700, 3701)	FW502	無	○	○
282	4給水サンプリング装置行き第2元弁	FW581	無	○	○
283	4A蒸気発生器主給水圧力発信器第2元弁 (PT-3712)	FW510A	無	○	○
284	4B蒸気発生器主給水圧力発信器第2元弁 (PT-3722)	FW510B	無	○	○
285	4C蒸気発生器主給水圧力発信器第2元弁 (PT-3732)	FW510C	無	○	○
286	4A蒸気発生器主給水流量発信器上流側第2元弁 (FT-460)	FW-512A	無	○	○
287	4A蒸気発生器主給水流量発信器上流側第2元弁 (FT-461)	FW-514A	無	○	○
288	4A蒸気発生器主給水流量発信器 (仮設) 上流側第2元弁	FW524A	無	○	○
289	4A蒸気発生器主給水流量発信器 (仮設) 下流側第2元弁	FW526A	無	○	○
290	4A蒸気発生器主給水流量発信器下流側第2元弁 (FT-461)	FW-516A	無	○	○
291	4A蒸気発生器主給水流量発信器下流側第2元弁 (FT-460)	FW-518A	無	○	○
292	4B蒸気発生器主給水流量発信器上流側第2元弁 (FT-470)	FW-512B	無	○	○
293	4B蒸気発生器主給水流量発信器上流側第2元弁 (FT-471)	FW-514B	無	○	○
294	4B蒸気発生器主給水流量発信器 (仮設) 上流側第2元弁	FW524B	無	○	○
295	4B蒸気発生器主給水流量発信器 (仮設) 下流側第2元弁	FW526B	無	○	○
296	4B蒸気発生器主給水流量発信器下流側第2元弁 (FT-471)	FW-516B	無	○	○
297	4B蒸気発生器主給水流量発信器下流側第2元弁 (FT-470)	FW-518B	無	○	○
298	4C蒸気発生器主給水流量発信器上流側第2元弁 (FT-480)	FW-512C	無	○	○
299	4C蒸気発生器主給水流量発信器上流側第2元弁 (FT-481)	FW-514C	無	○	○
300	4C蒸気発生器主給水流量発信器 (仮設) 上流側第2元弁	FW524C	無	○	○

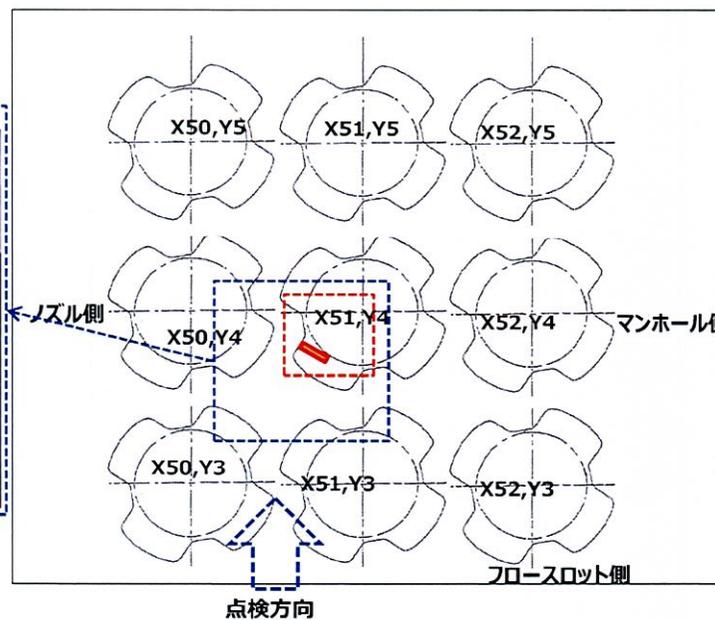
過去事象を踏まえた点検調査

S Gに流入する可能性のある機器開放点検一覧

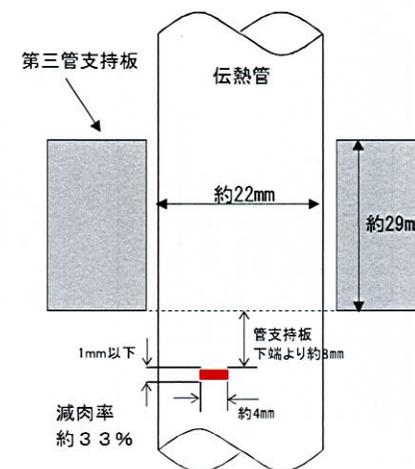
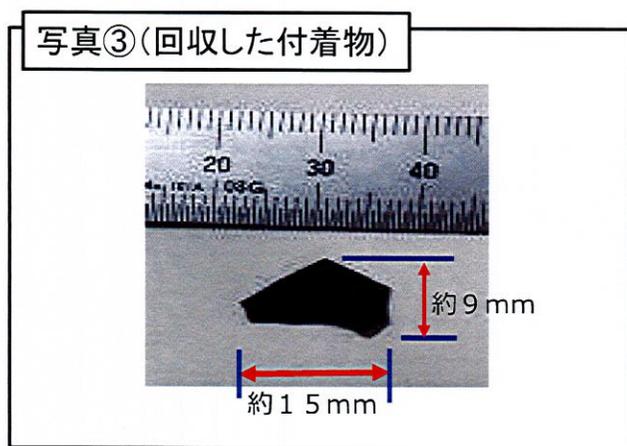
No.	機器名	点検対象	人の立ち入り有無	評価	
				機器の健全性 ○：異常無 ×：異常有	異物混入の可能性 ○：無 ×：有
301	4 C 蒸気発生器主給水流量発信器 (仮設) 下流側第 2 元弁	FW526C	無	○	○
302	4 C 蒸気発生器主給水流量発信器下流側第 2 元弁 (F T - 4 8 1)	FW-516C	無	○	○
303	4 C 蒸気発生器主給水流量発信器下流側第 2 元弁 (F T - 4 8 0)	FW-518C	無	○	○
304	A タービン動主給水ブースターポンプ入口ストレーナ	ストレーナ	有	○	○
305	B タービン動主給水ブースターポンプ入口ストレーナ	ストレーナ	有	○	○
306	A, B 電動主給水ブースターポンプ入口ストレーナ	ストレーナ	有	○	○
307	主給水ライン配管修繕箇所 (ストレーナ含む)	-	無	○	○
308	4-M/D FWP ミニマムフロー流量計オリフイスフランジ	フランジ	無	○	○
309	4-A-T/D FWP ミニマムフロー流量計オリフイスフランジ	フランジ	無	○	○
310	4-B-T/D FWP ミニマムフロー流量計オリフイスフランジ	フランジ	無	○	○

SG伝熱管 2次側表面写真

対象：A-SG 第三管支持板下面 伝熱管 X51,Y4 @Cold



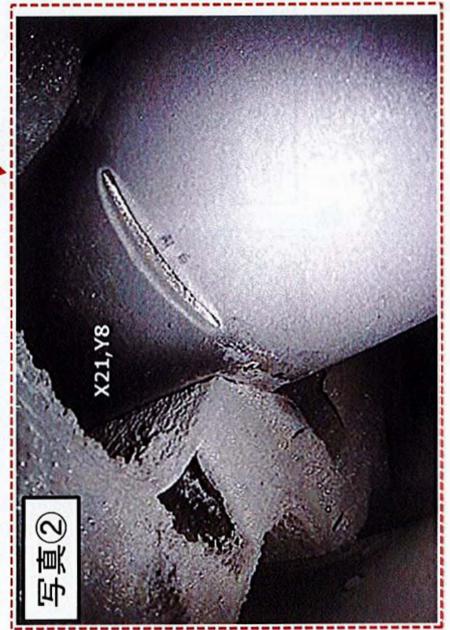
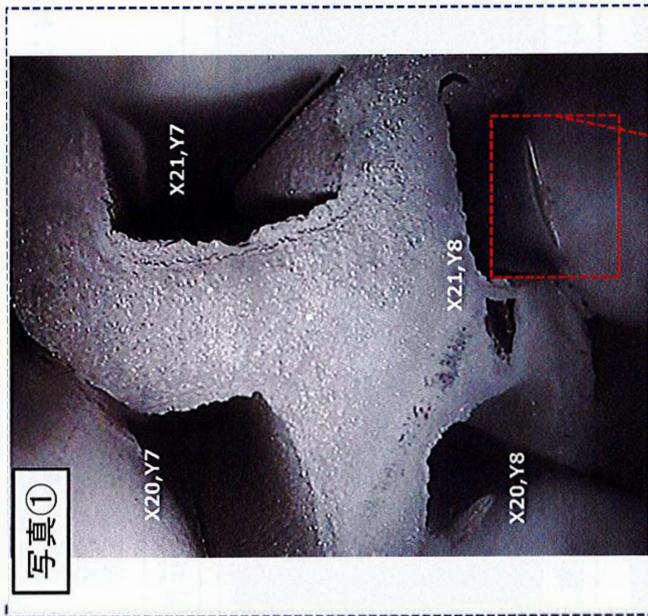
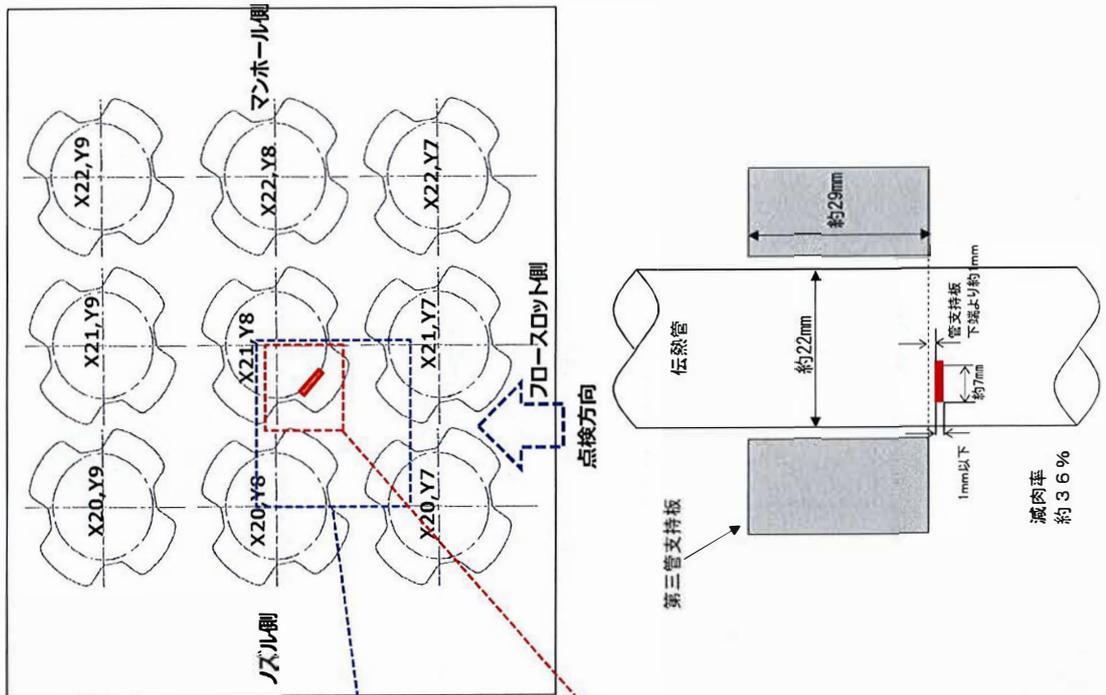
SG器内点検結果



SG器内点検結果

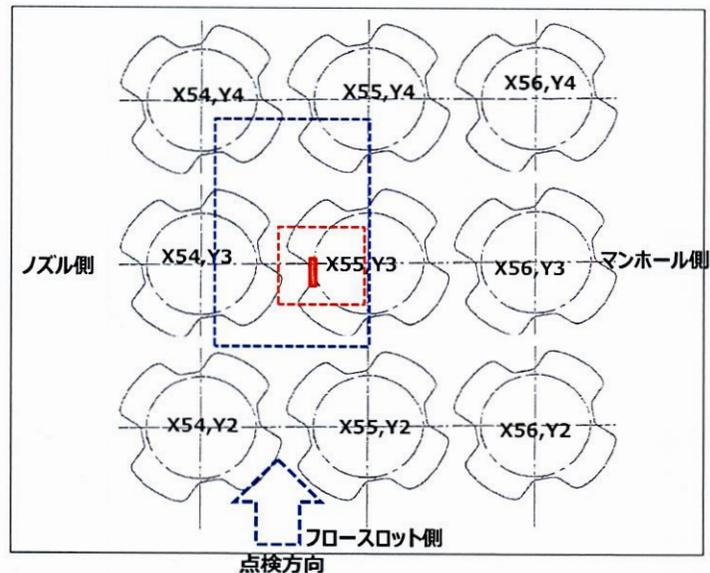
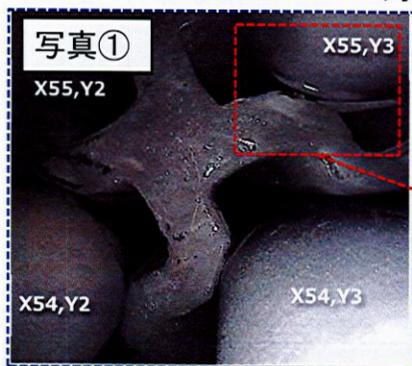
SG伝熱管2次側表面写真

対象：C-SG 第三管支持板下面 伝熱管 X21, Y8 @Cold

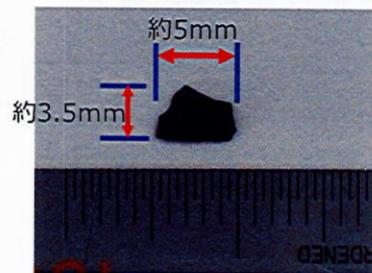


SG伝熱管 2次側表面写真

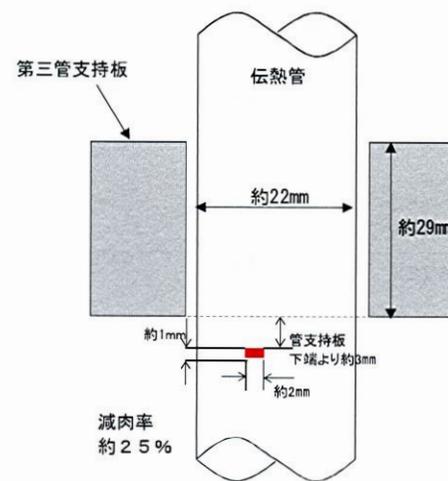
対象：C-SG 第三管支持板下面 伝熱管 X55, Y3 @Cold



写真⑤ (回収した付着物の一部)



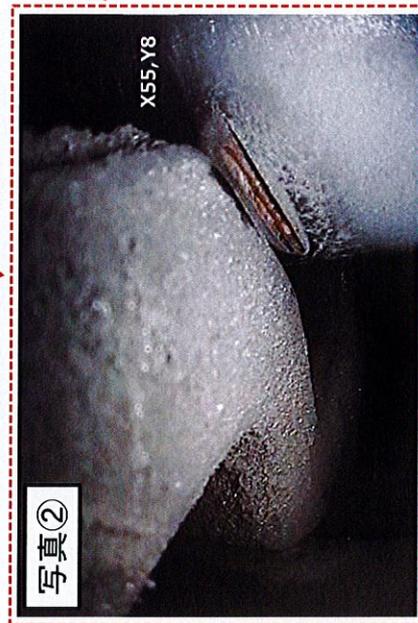
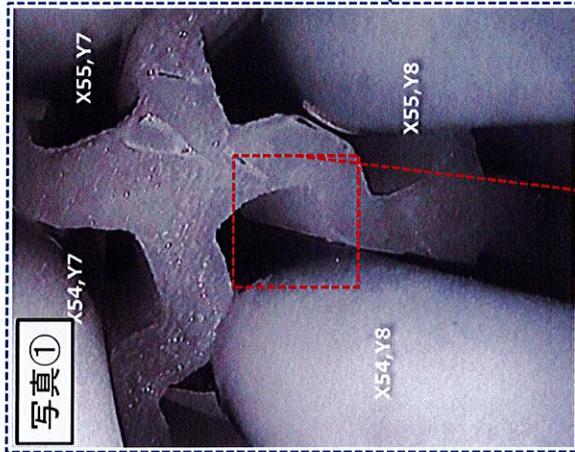
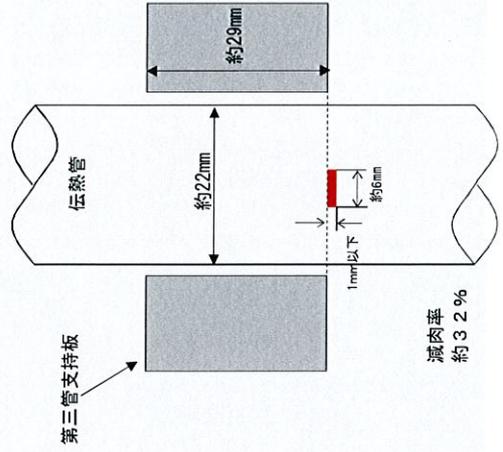
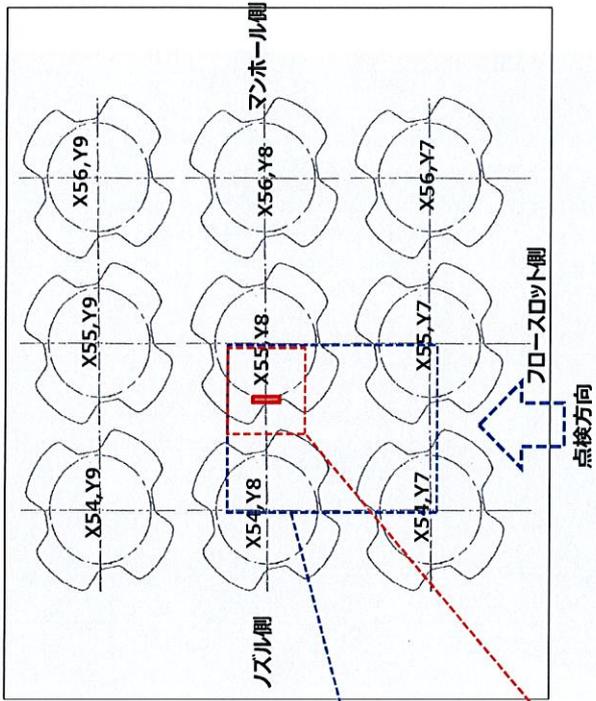
- 回収の結果、付着物が折れ、一部回収した。
- 残りの付着物については、粉碎し、回収することができなかった。



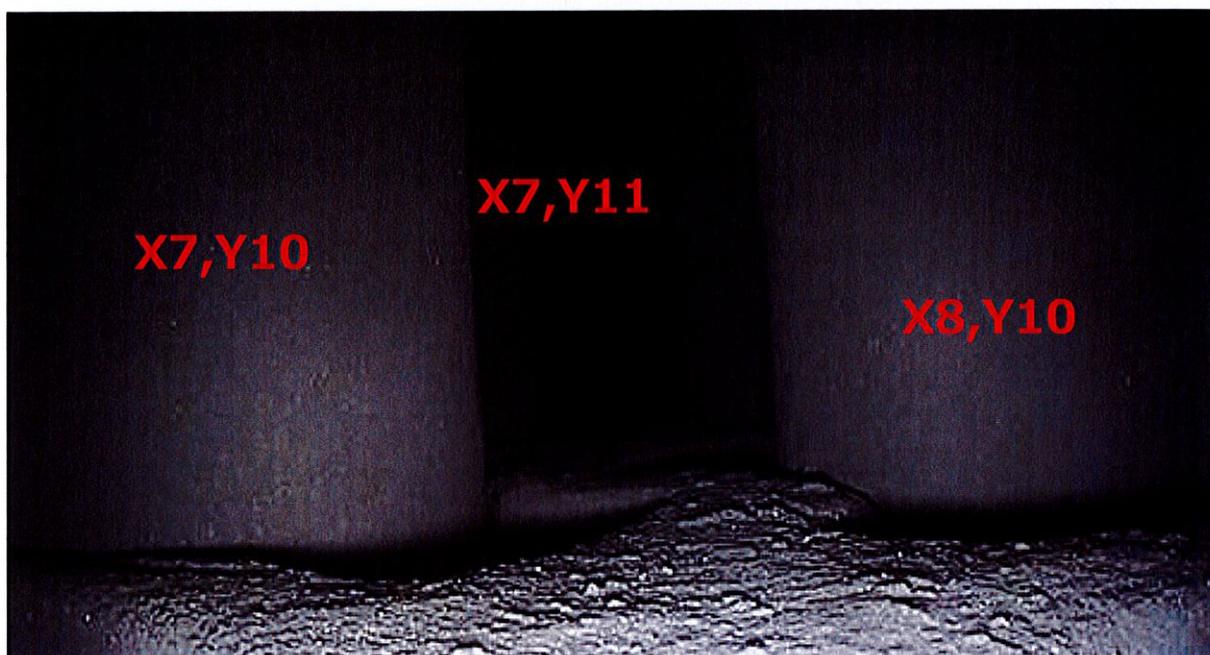
SG器内点検結果

SG器内点検結果

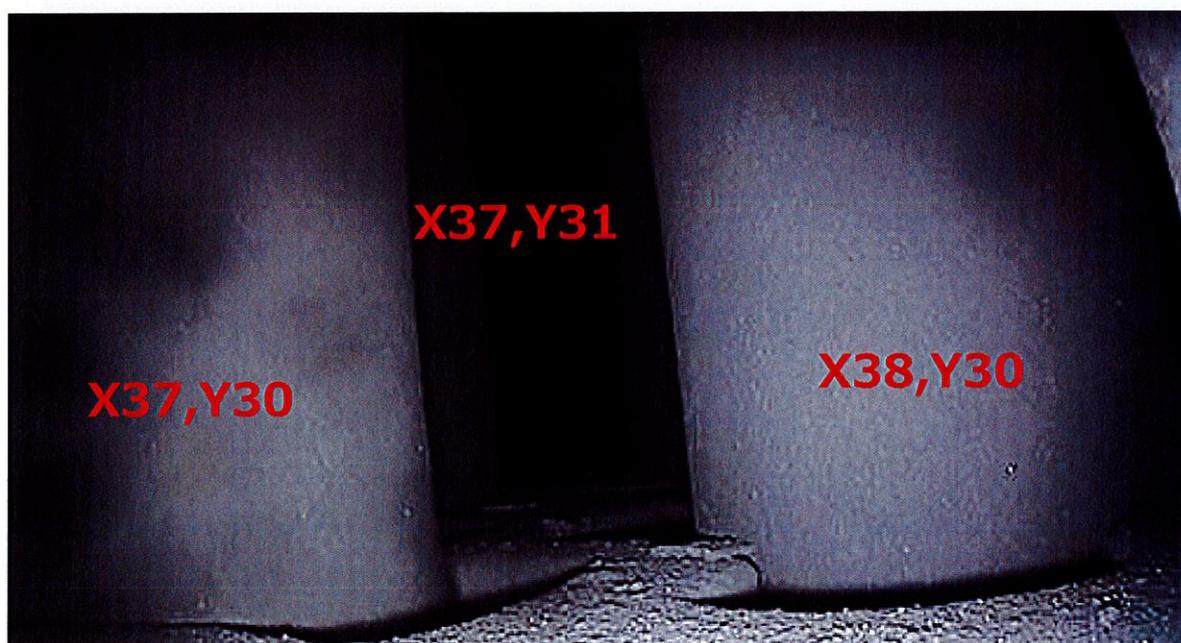
SG伝熱管二次側表面写真
 対象：C-SG 第三管支持板下面 伝熱管 X55, Y8 @Cold



SG器内点検結果
A-SG 第一管支持板上写真



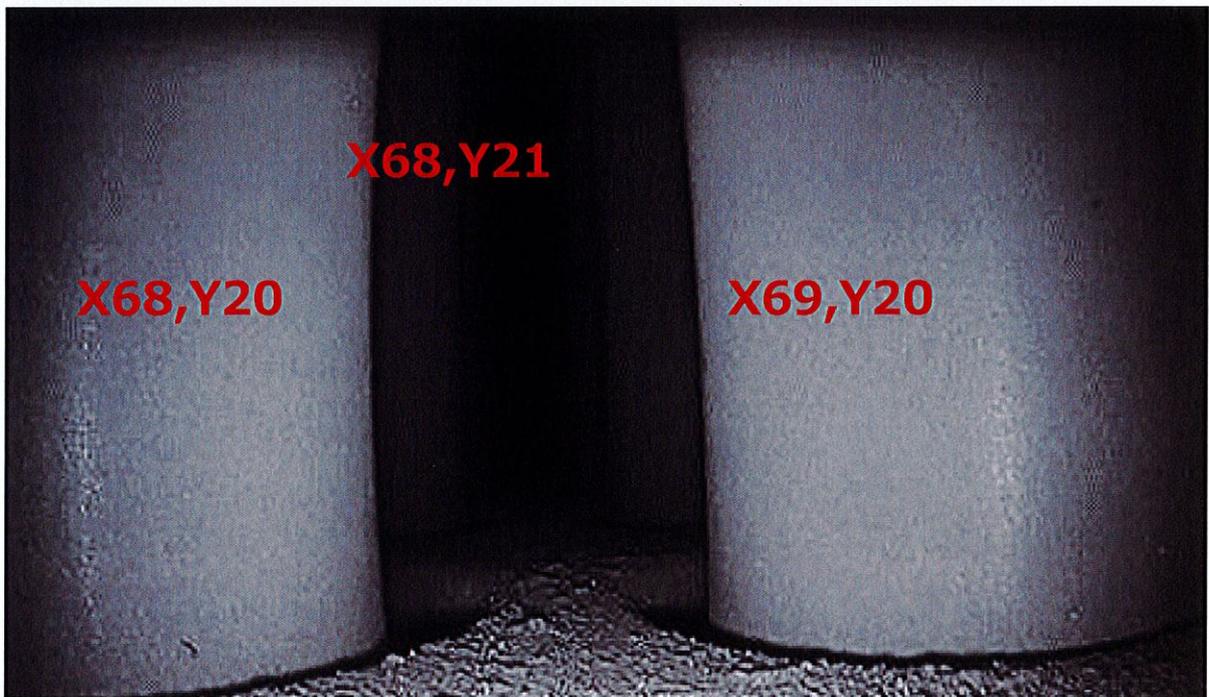
A-SG 第二管支持板上写真



SG器内点検結果
A-SG 管板上写真



A-SG 流量分配板上写真



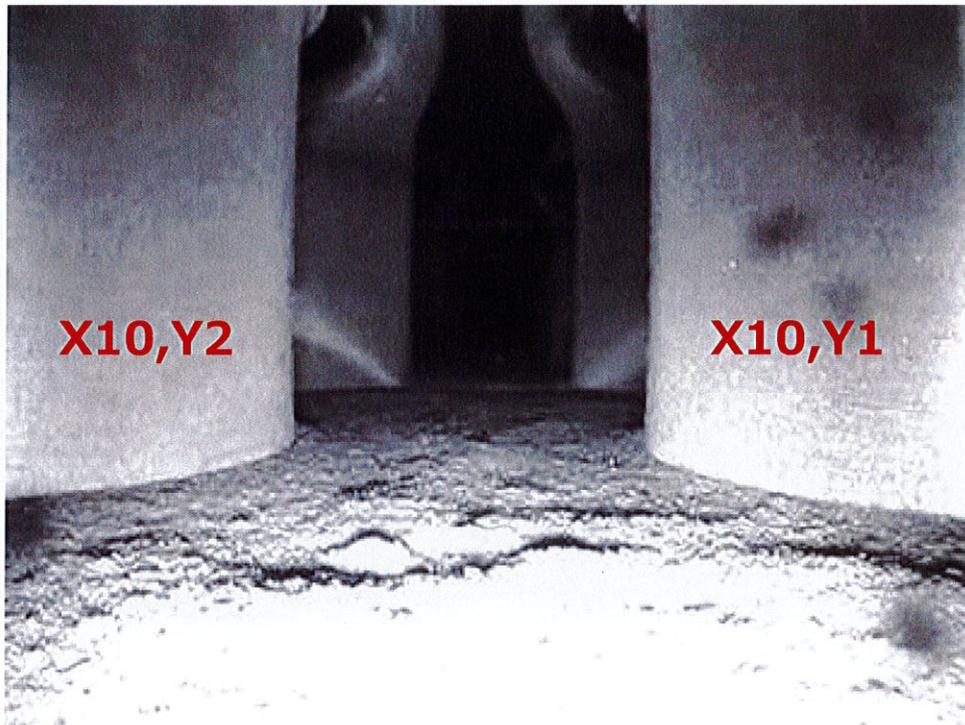
SG器内点検結果
C-SG 第一管支持板上写真



C-SG 第二管支持板上写真



SG器内点検結果
C-SG 管板上写真

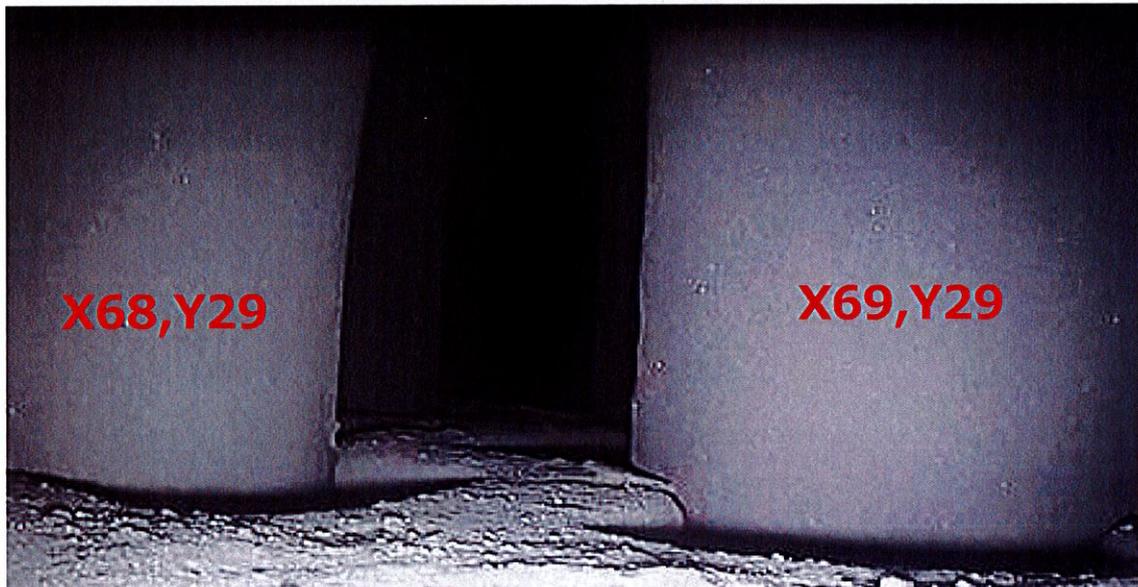


東京工業大学工学部 2014年

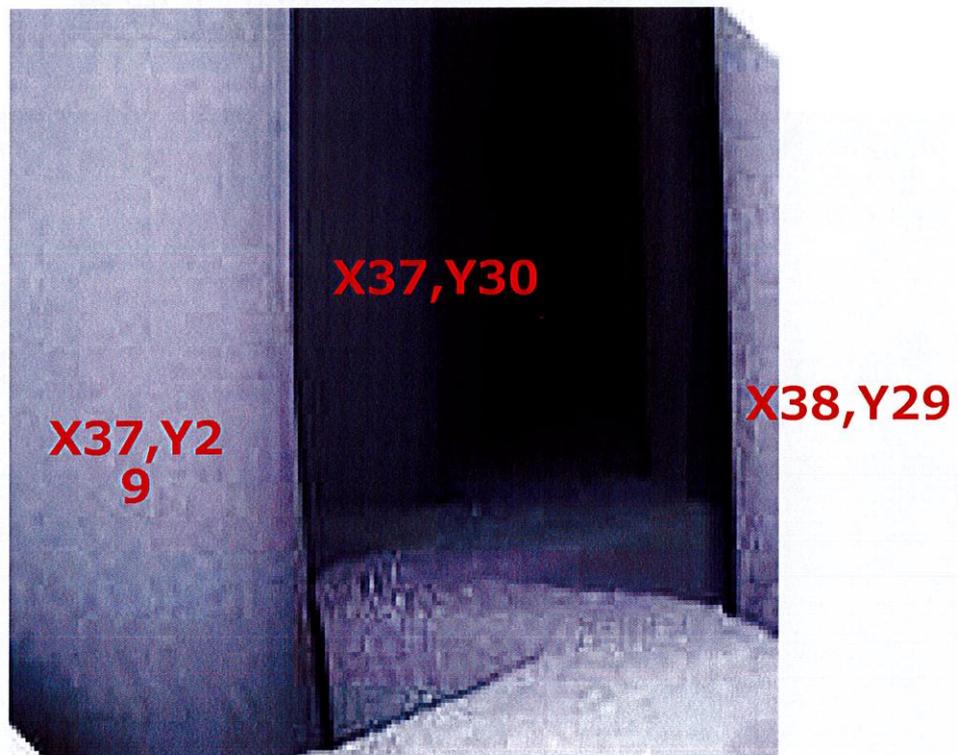
C-SG 流量分配板上写真



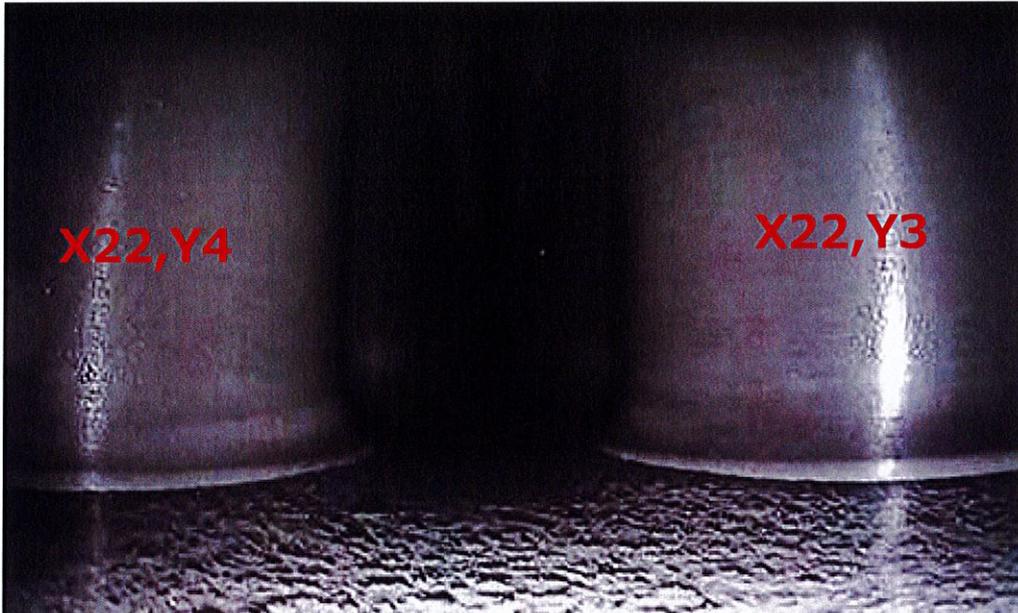
SG器内点検結果
B-SG 第一管支持板上写真



B-SG 第二管支持板上写真



SG器内点検結果
B-SG 管板上写真

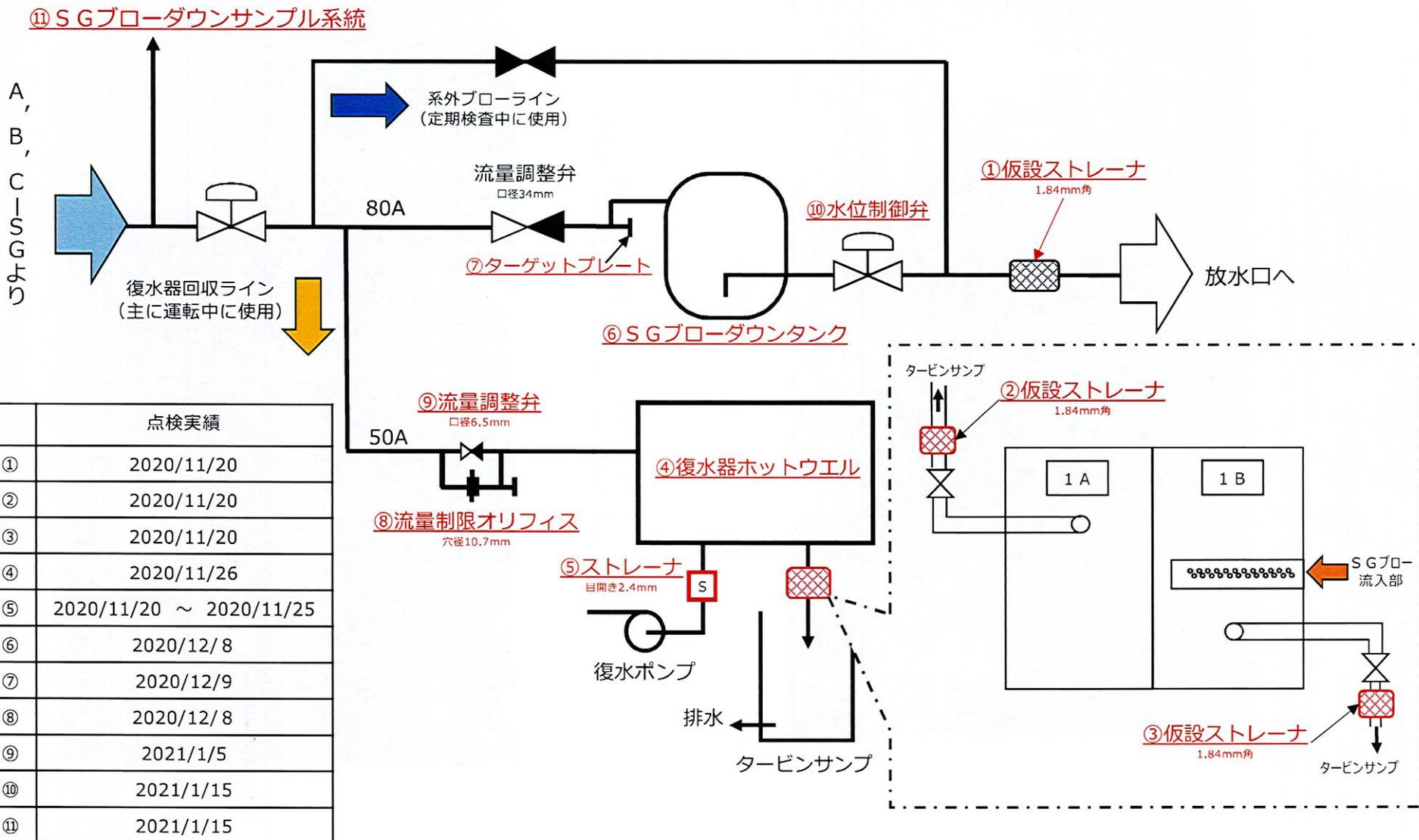


B-SG 流量分配板上写真



SGブローダウン系統点検結果 (1 / 15)

SGブローダウン系統の点検概略図

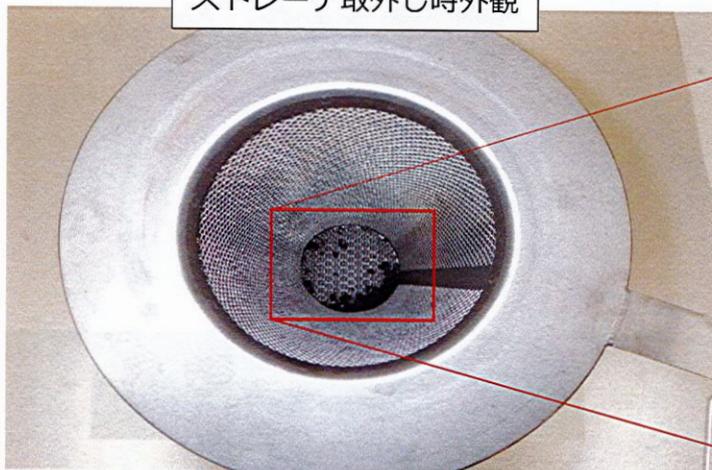


点検実績	
①	2020/11/20
②	2020/11/20
③	2020/11/20
④	2020/11/26
⑤	2020/11/20 ~ 2020/11/25
⑥	2020/12/8
⑦	2020/12/9
⑧	2020/12/8
⑨	2021/1/5
⑩	2021/1/15
⑪	2021/1/15

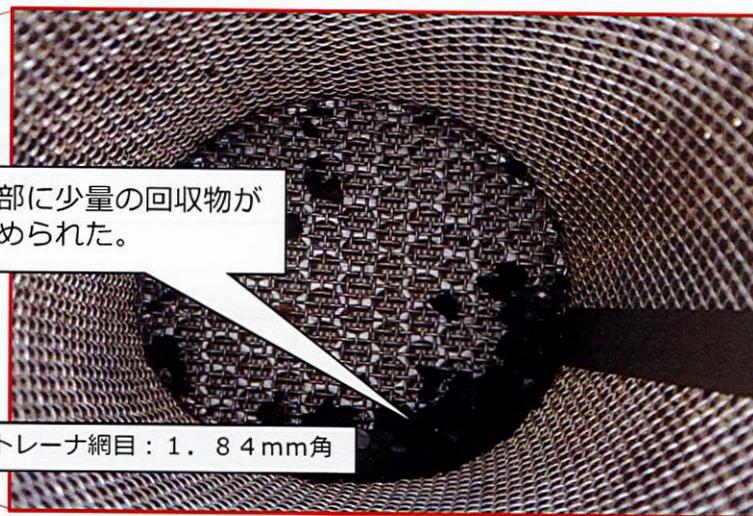
SGブローダウン系統点検結果 (2 / 15)

① SGブローダウン海水放出管仮設ストレーナ

ストレーナ取外し時外観



内部に少量の回収物が認められた。



ストレーナ網目：1.84mm角

回収物拡大



回収物の大きさ

最大：約6.5mm×約5.0mm×厚さ約1.0mm

回収量：約7.0g

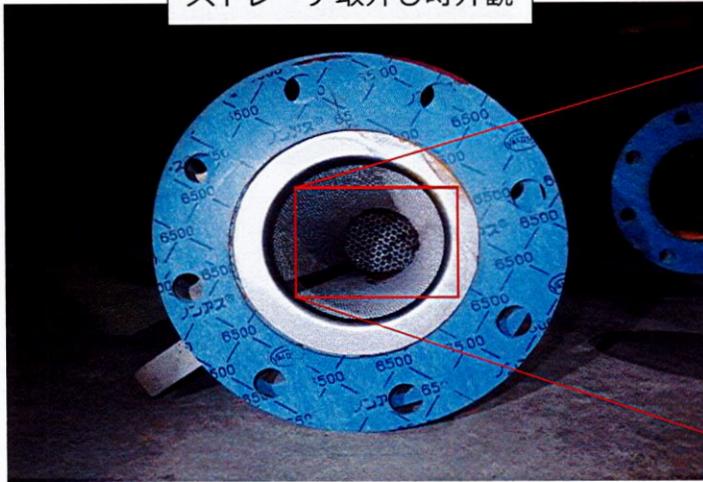
【回収物に対する見解】

回収物はスケールおよびスラッジであり、これまで当該ストレーナで回収されたものと同様である。

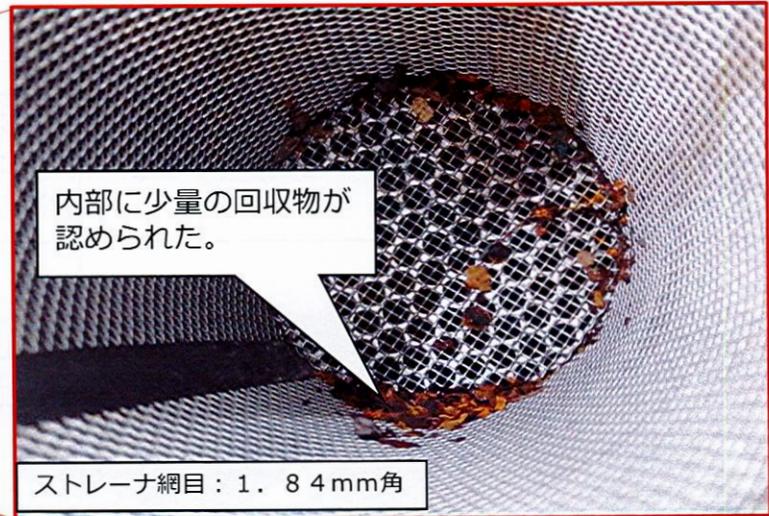
SGブローダウン系統点検結果 (3 / 15)

②復水器ホットウェル (1A) ブロー配管仮設ストレーナ

ストレーナ取外し時外観



内部に少量の回収物が認められた。



ストレーナ網目：1.84mm角

回収物拡大



回収物の大きさ

最大：約6.0mm×約6.0mm×厚さ約2.0mm

回収量：約2.9g

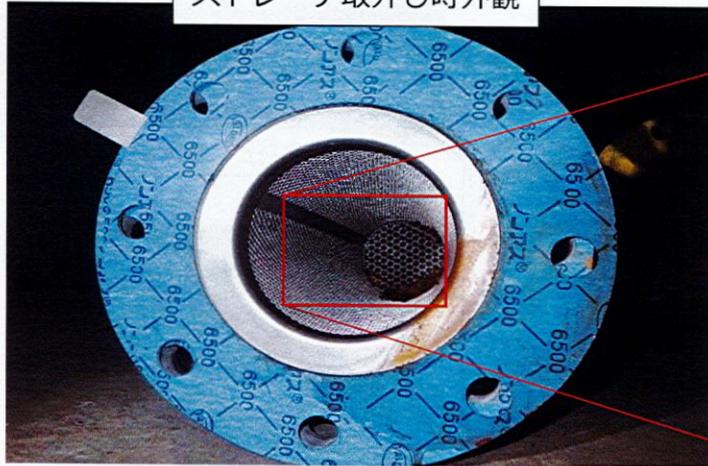
【回収物に対する見解】

回収物は鉄さびであり、2次系配管内で発生したものである。

SGブローダウン系統点検結果 (4 / 15)

③復水器ホットウェル (1 B) ブロー配管仮設ストレーナ

ストレーナ取外し時外観



内部に少量の回収物が認められた。

ストレーナ網目：1.84mm角



回収物拡大

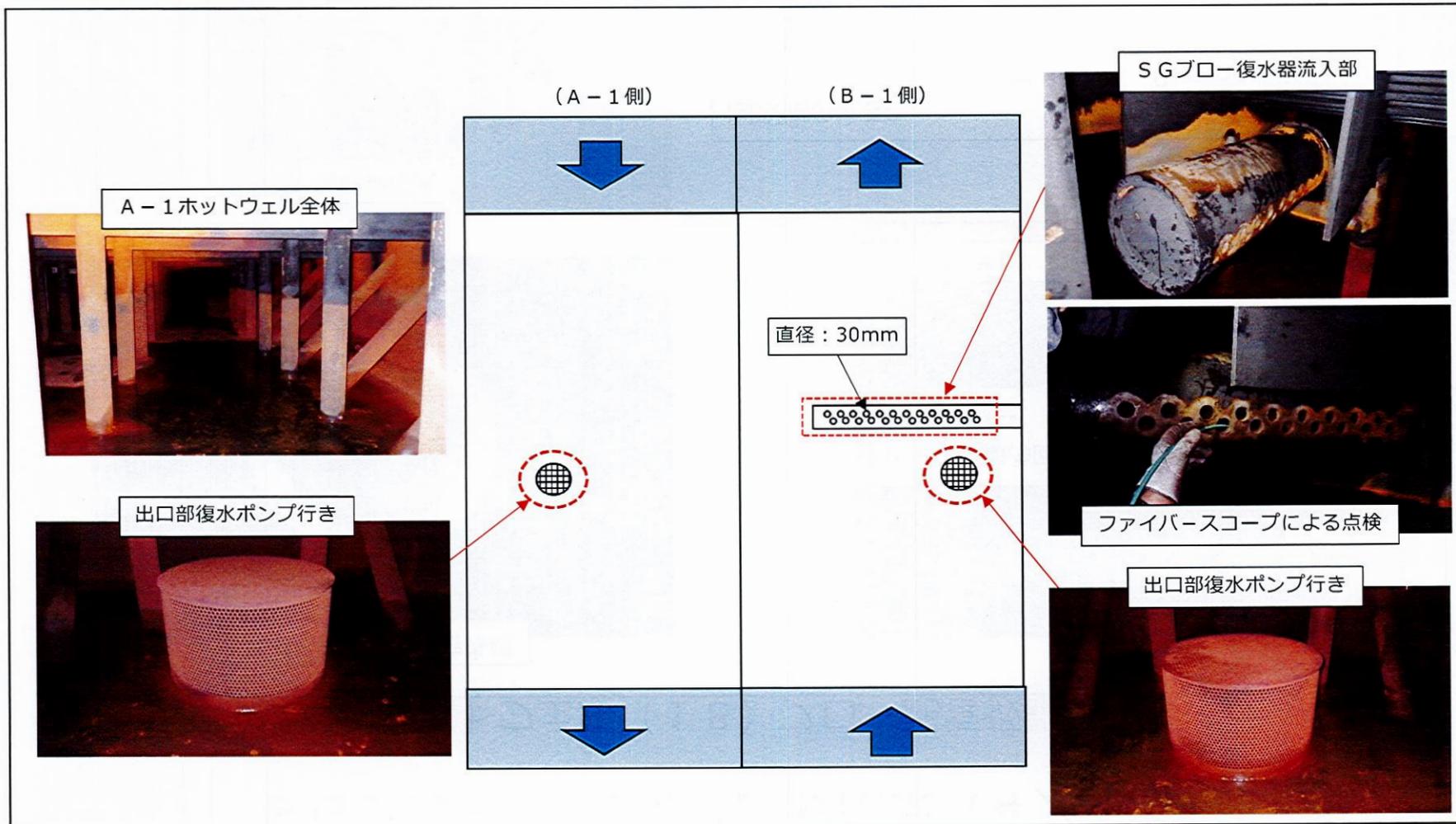


回収物の大きさ
最大：約10.0mm×約7.0mm×厚さ約1.0mm
回収量：約18.9g

【回収物に対する見解】
回収物は鉄さびであり、2次系配管内で発生したものである。

SGブローダウンシステム点検結果 (5 / 15)

④復水器ホットウェルNo. 1 (異物なし)



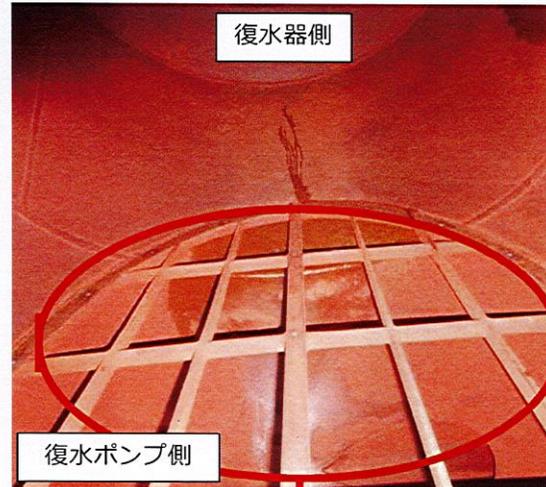
SGブローダウン系統点検結果 (6 / 15)

⑤復水ポンプ入口ストレーナ (異物なし)

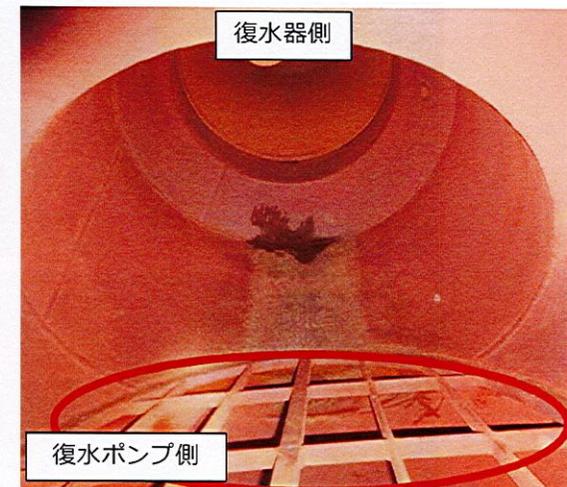
4 A - 復水ポンプ入口ストレーナ



4 B - 復水ポンプ入口ストレーナ



4 C - 復水ポンプ入口ストレーナ



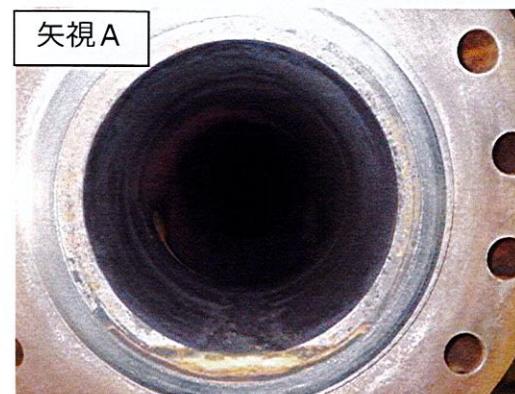
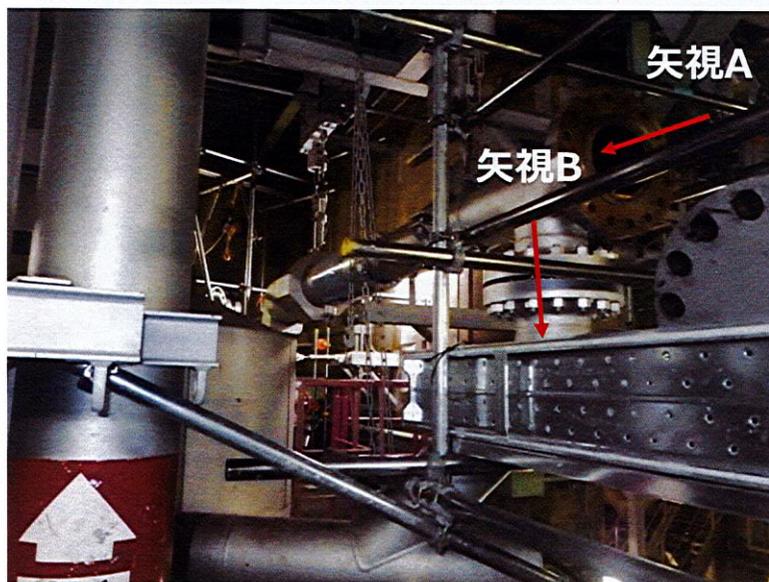
SGブローダウン系統点検結果 (7 / 15)

⑥ SGブローダウンタンク (異物なし)



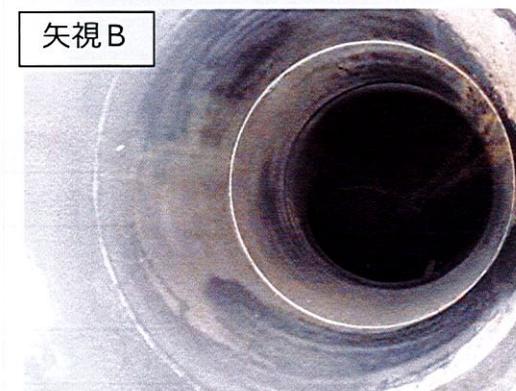
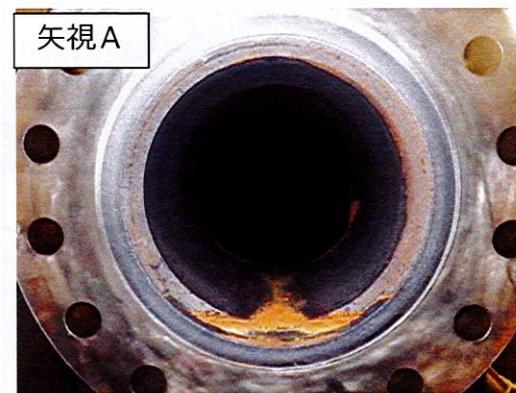
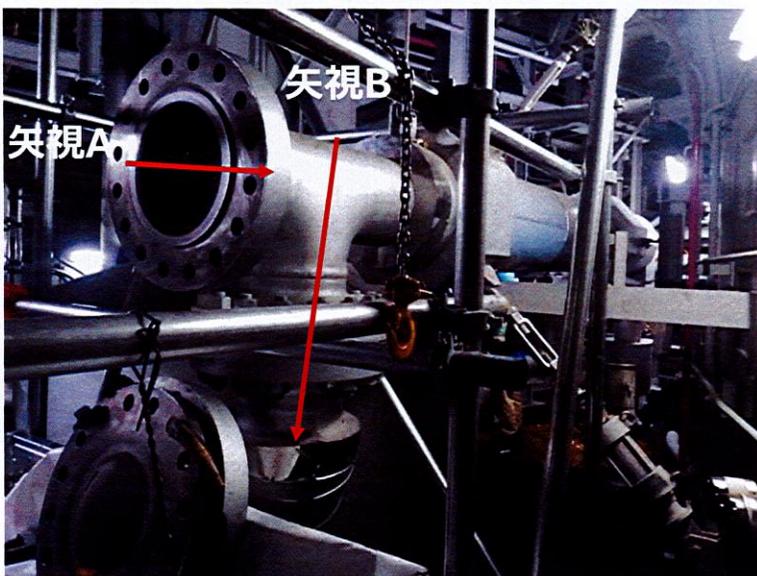
SGブローダウン系統点検結果（8 / 15）

⑦-1 A-SGブローダウン系統 ターゲットプレート（異物なし）



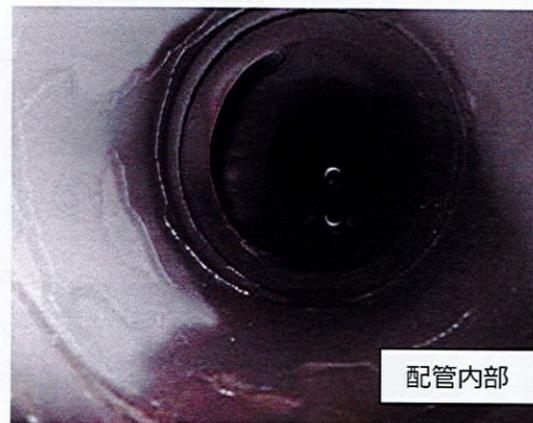
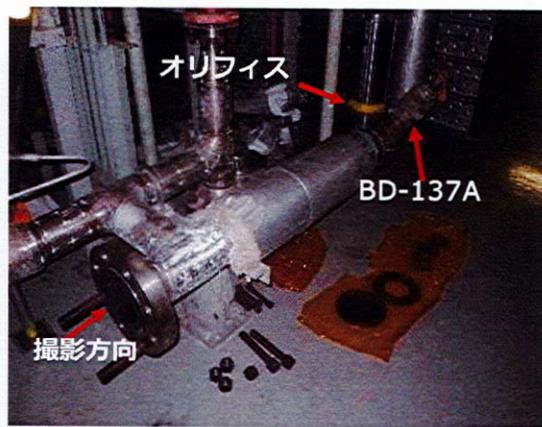
SGブローダウン系統点検結果 (9 / 15)

⑦-2 C-SGブローダウン系統 ターゲットプレート (異物なし)

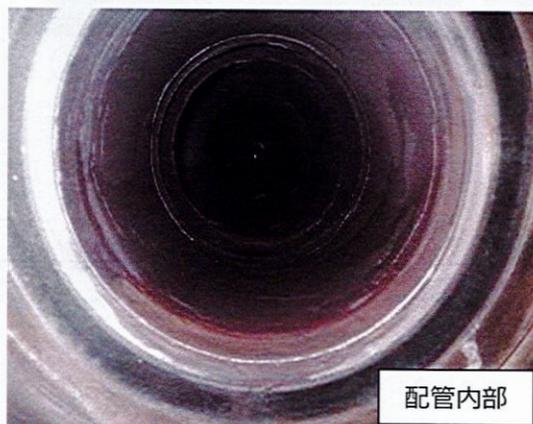
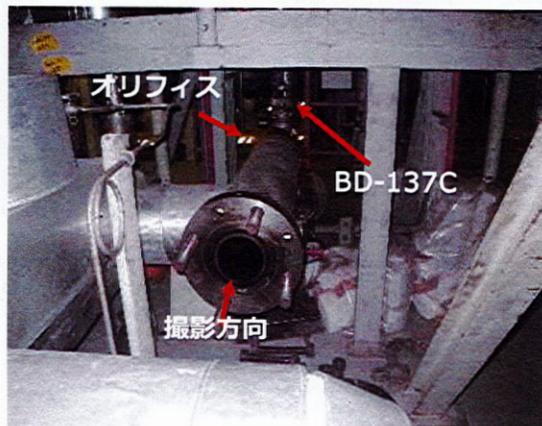


SGブローダウン系統点検結果 (10/15)

⑧-1 A-SG 流量制限オリフィス (異物なし)

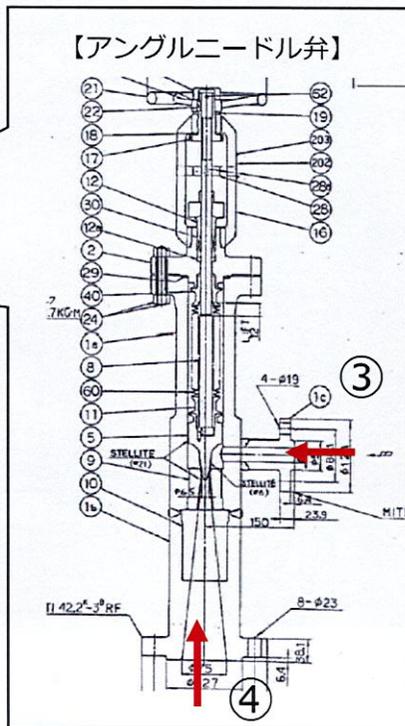
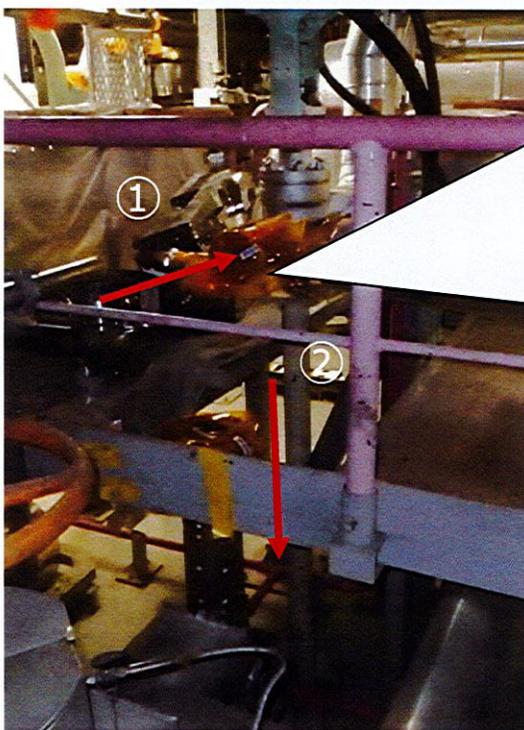


⑧-2 C-SG 流量制限オリフィス (異物なし)



SGブローダウン系統点検結果 (12/15)

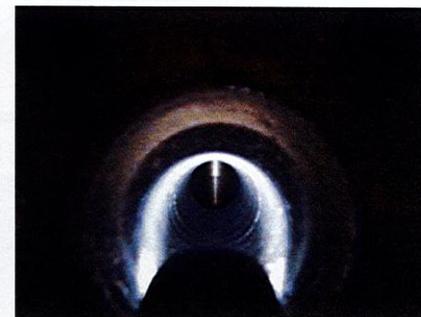
⑨-2 流量調整弁 (BD-123C) (異物なし)



① 入口配管



③ 弁入口管



② 出口配管

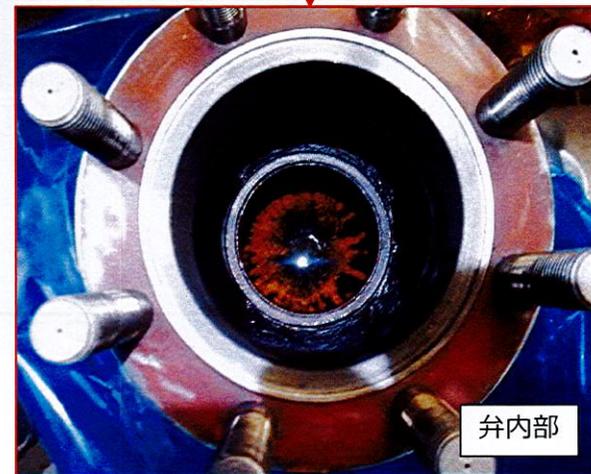
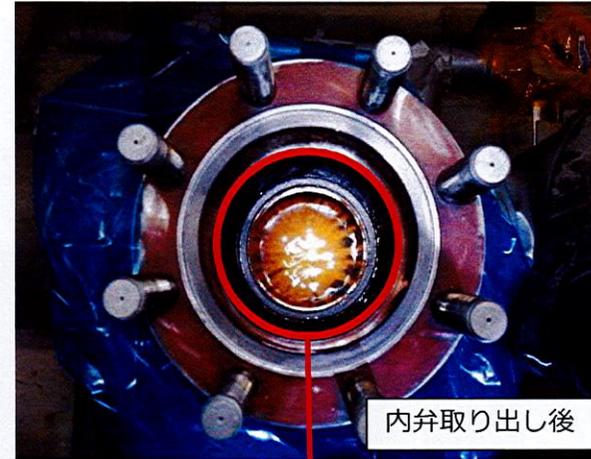
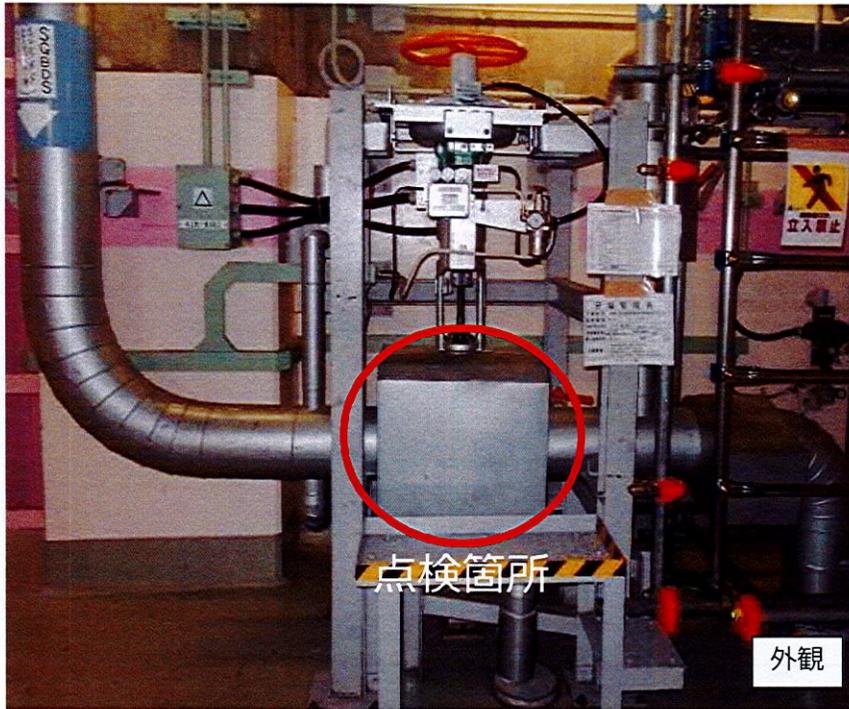


④ 弁出口管



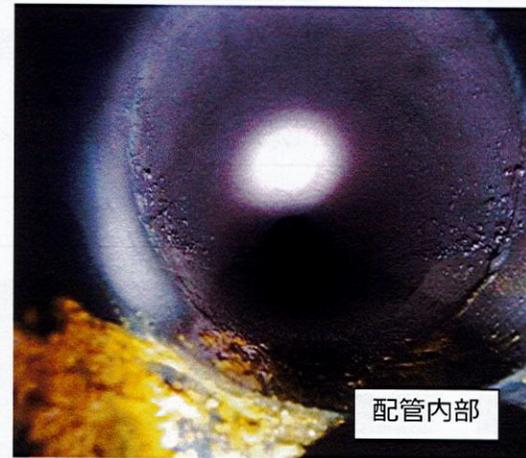
SGブローダウン系統点検結果 (13/15)

⑩-1 水位制御弁 弁内部 (異物なし)



SGブローダウン系統点検結果 (14 / 15)

⑩ - 2 水位制御弁 1次側配管内部 (異物なし)



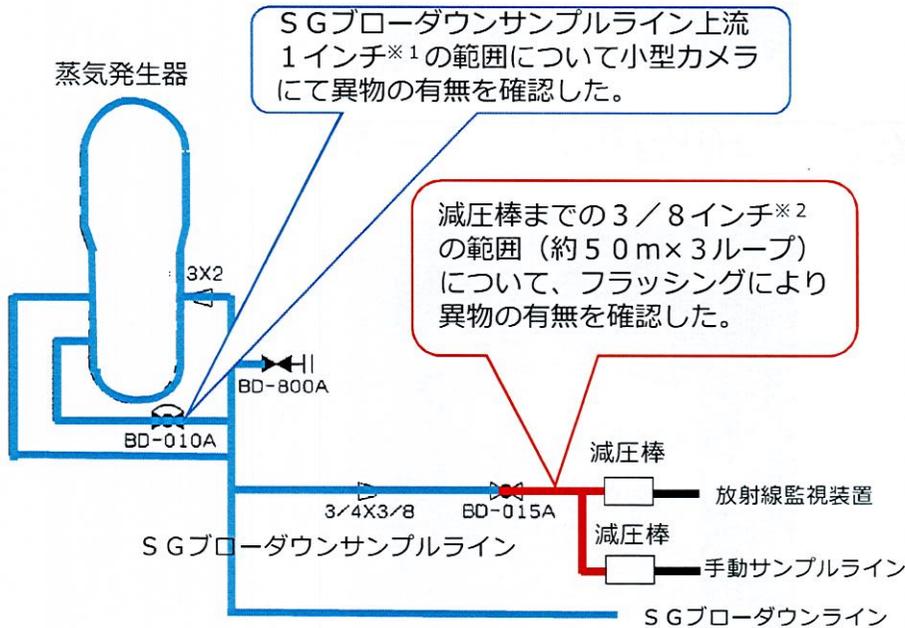
⑩ - 3 水位制御弁 2次側配管内部 (異物なし)



SGブローダウン系統点検結果（15 / 15）

⑪ SGブローダウンサンプル系統の点検結果

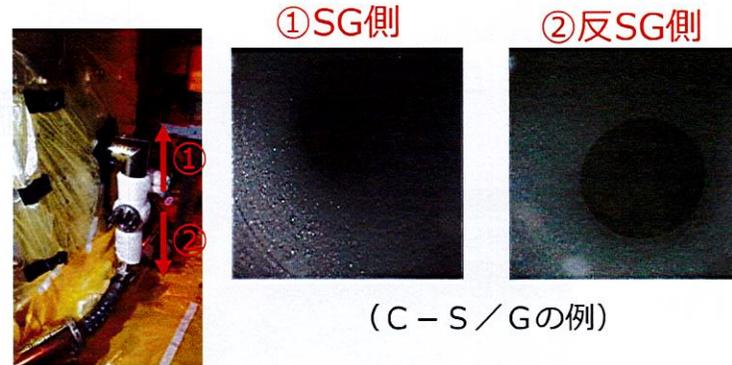
SGブローダウンサンプル系統の点検概略図



※1：外径34.0mm、内径27.2mmの配管
 ※2：外径9.53mm、内径6.23mmの配管

小型カメラを用いた点検結果

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



フラッシング結果

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



SG 2 次側内部品について

(1) SG 内部品と薄片サイズとの整合性（添付 1）

SG 2 次側内部品で使用されている部品サイズと薄片との整合性を確認したところ、薄片サイズに整合する部品はない。（図 1）

薄片サイズに比較的類似しているものとしては、板厚 1.0 mm 以下の内部品構成部品として、振止め金具キー固定板等が抽出される（表 1）が、これらについては、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、SG 器内からの異物の可能性はないと考えられる。

(2) SG 内部品の経年劣化による脱落の可能性（添付 2）

SG 2 次側使用部品そのもので薄片サイズに整合するものはないが、経年劣化により異物化する可能性のある部品がないかを検討した。

SG 2 次側の内部品の経年劣化としては、高経年化技術評価で対象としている以下の事象が考えられる。

- ・内張り部の割れ（下層部の割れ・応力腐食割れ）
- ・疲労（給水入口管台のみ）
- ・腐食
- ・流れ加速型腐食

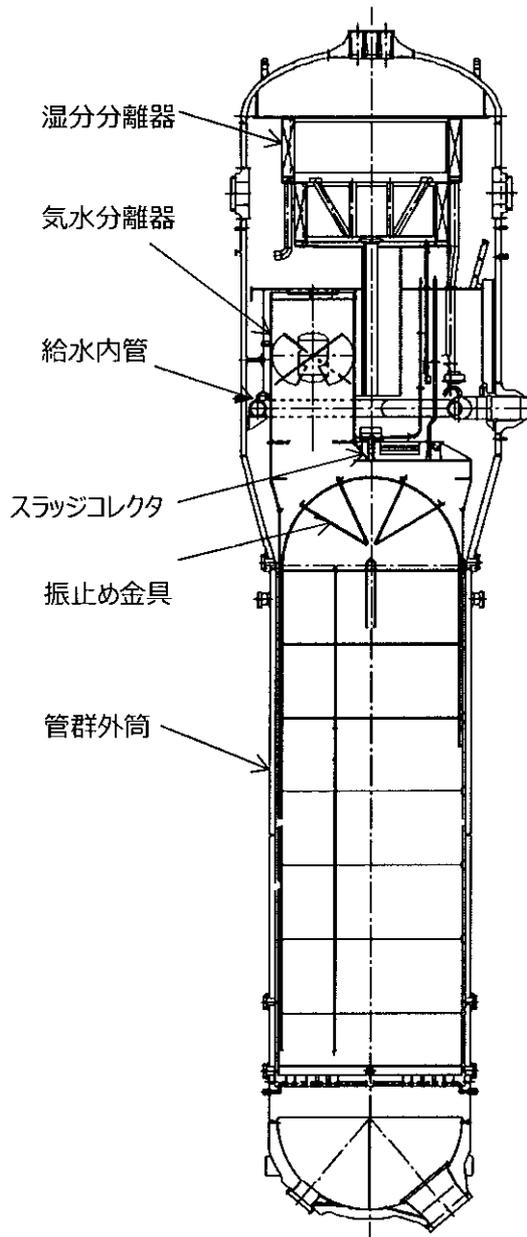
上記のうち、伝熱管群を通過するサイズの異物を発生させる可能性のある事象は、流れ加速型腐食による以下の炭素鋼部品の脱落である。

- ・給水リング（給水内管裏当金 / 給水内管 T 継手部およびレデューサ）
- ・サーマルスリーブ

このうち、給水内管 T 継手/レデューサ、サーマルスリーブについては、流れ加速型腐食が発生しても管内面が摩滅していくのみであり、異物が発生することはないと考えられる。一方、給水内管裏当金については、溶接部が減肉、外れることで異物となりうるが、前回（第 2 2 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。

SG 2次側内部品について

添付1 SG 内部品構成部品の調査



SG 2次側 内部品	材料	最小板厚 (mm)
湿水分離器		
気水分離器		
給水内管		
スラッジコレクタ		
振止め金具		
管群外筒		

図1 SG 2次側 内部品について

: 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。

SG2次側内部品について

表1 SG2次側 内部品のスクリーニング

内部品	部品名	サイズ(mm)	
		板厚	長さ／幅
振止め金具	キー固定板		
振止め金具	板ばね		

: 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。

SG2次側内部品について

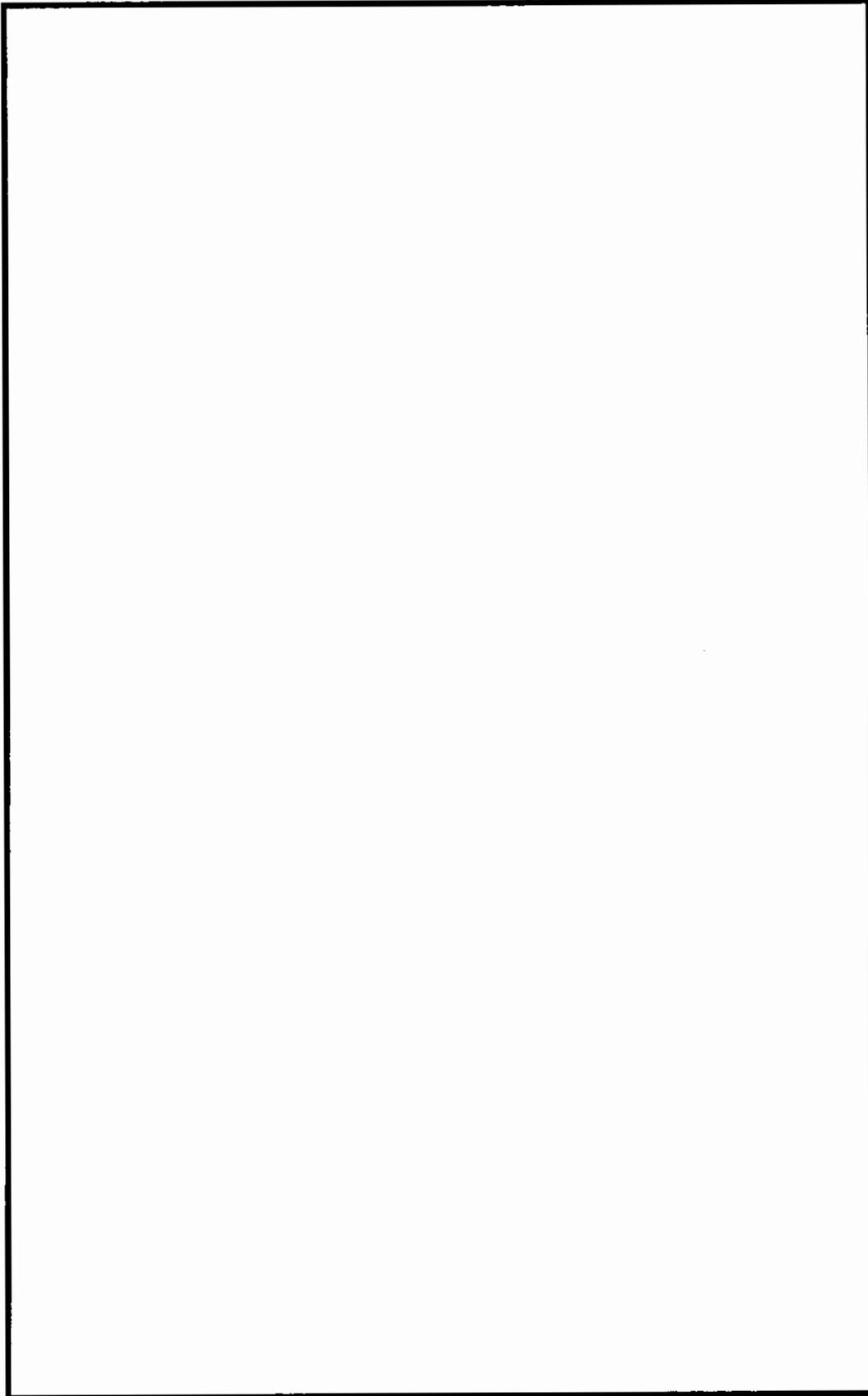


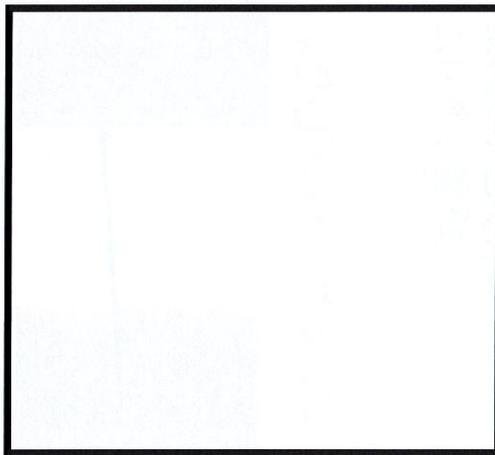
図2 振止め金具 (AVB) 構造図

 : 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。

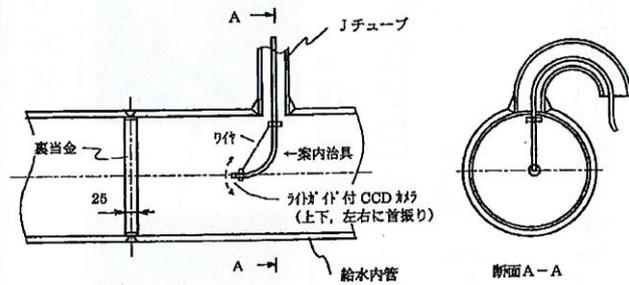
SG2次側内部品について

添付2 給水内管点検範囲/点検方法

点検対象 SG	A,B,C-SG
裏当金点検箇所数	各 3 箇所



(a)点検箇所



(b)点検方法

図1 SG 内部品点検対象および点検方法

給水内管裏当金部点検結果(例)

目視点検の結果、給水内管内部全周にわたり裏当金が脱落せずに設置されている様子が確認できた。また、隅肉溶接も剥離等がない様子が確認できた。(B-SG：前回定期検査において損傷なし)



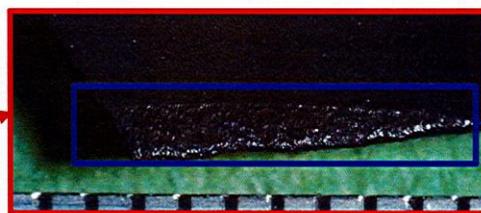
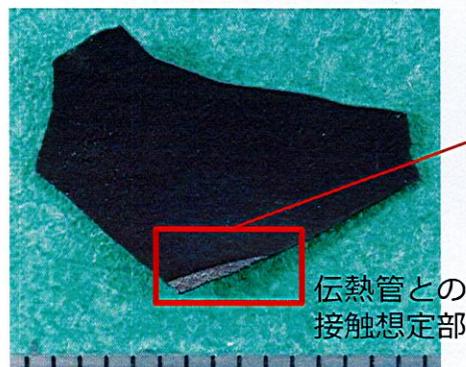
□ : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

付着物分析結果（1 / 5）

< A - S Gで確認した付着物【スケールA】（X51, Y4 第三管支持板下面） >

① 外観観察結果

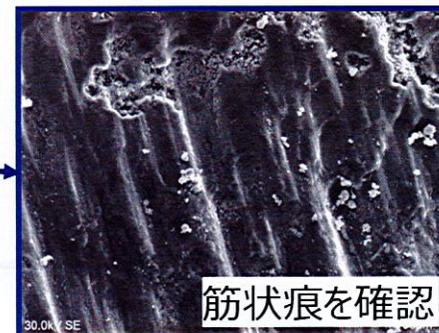
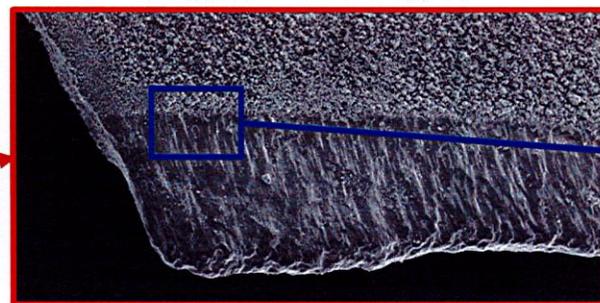
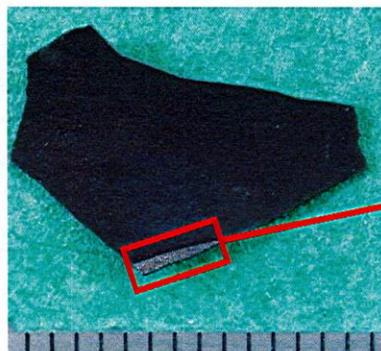
- 伝熱管減肉部と付着物の接触想定部（角部）には、接触痕があり、光沢が認められた。
- 形状（R形状）を計測した結果、直径約22.5mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。



大きさ：約15mm×約9mm
厚さ：約0.2～0.3mm
質量：約0.1g

② SEM観察結果

- 接触想定部（角部）を拡大観察した結果、筋状痕を確認した。

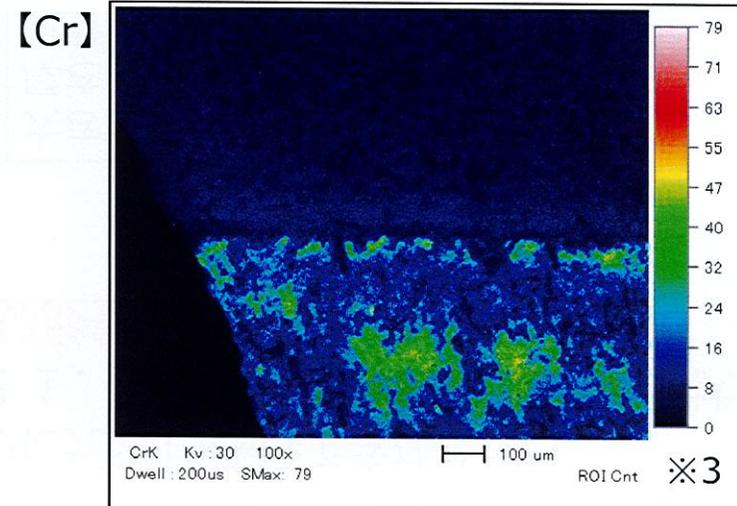
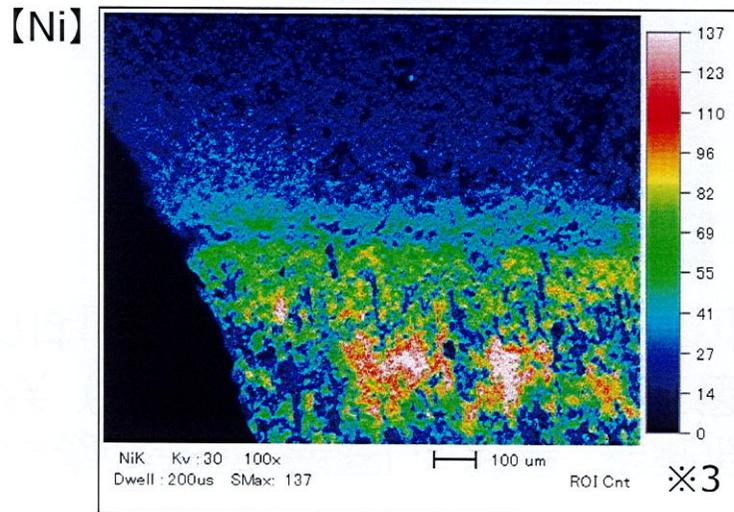


付着物分析結果（2 / 5）

< A - S Gで確認した付着物【スケールA】（X51,Y4 第三管支持板下面） >

③ 成分分析（X線回折※1、EDS※2）

- 表面の化学成分分析を実施した結果、中央部の主成分が酸化鉄（主にマグネタイト）であったことから、スケールであると推定した。
- 接触想定部（角部）の成分分析した結果、伝熱管の母材のNiおよびCrの成分を検出した。



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

※2：エネルギー分散型X線分析（Energy Dispersive X-ray Spectroscopy）のこと。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

※3：分析した成分のX線の反射強度での、1秒当たりのX線カウント数（含有元素の濃度が高いほど大きくなる）

付着物分析結果（3 / 5）

< C - S Gで確認した付着物【スケールC1】（X55,Y3 第三管支持板下面） >

① 外観観察結果

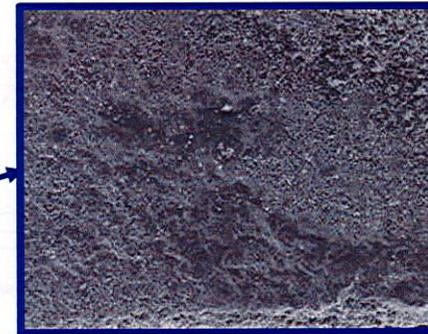
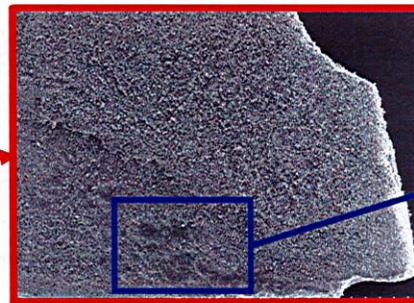
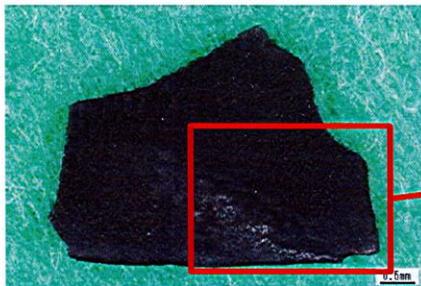
- 付着物の表面を観察した結果、接触痕並びに光沢は確認できなかった。
- 形状（R形状）を計測した結果、直径約21.9mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。



大きさ：約5mm×約3mm
厚さ：約0.4mm
質量：約0.02g

② SEM観察結果

- 拡大観察した結果、凹面の一部に接触痕はあったが、筋状痕は確認できなかった。



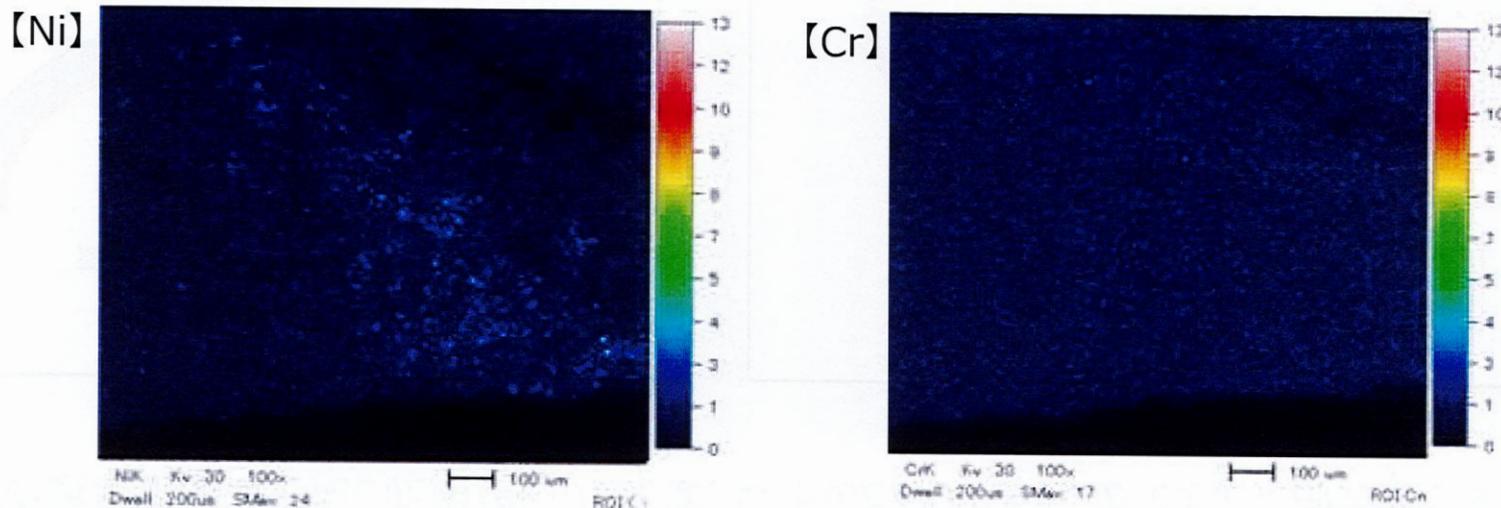
付着物分析結果（4 / 5）

< C - S Gで確認した付着物【スケールC1】（X55,Y3 第三管支持板下面） >

③ 成分分析（X線回折、EDS）

- 表面の化学成分分析を実施した結果、中央部の主成分が酸化鉄（主にマグネタイト）であったことから、スケールであると推定した。
- 凹面の接触痕を成分分析した結果、伝熱管の母材のNiを僅かに検出したが、Crは検出できなかった。※1。

※1：Ni成分は3%以下、Cr成分は検出限界以下



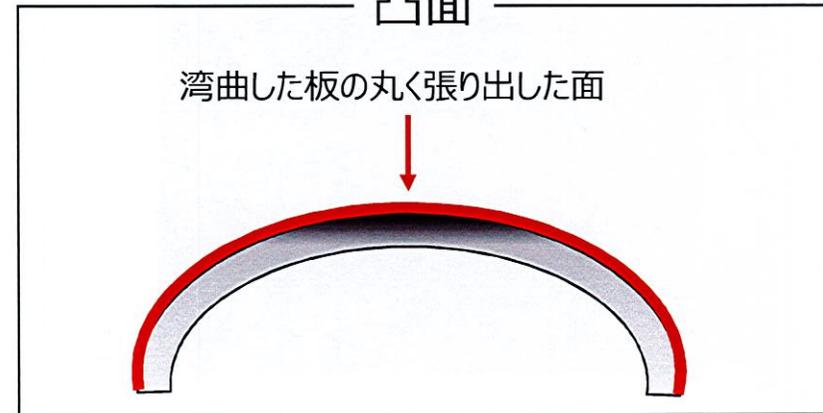
付着物分析結果（5 / 5）

回収物の観察結果等で用いた用語については、以下のとおりであり、赤で示した部分を示す。

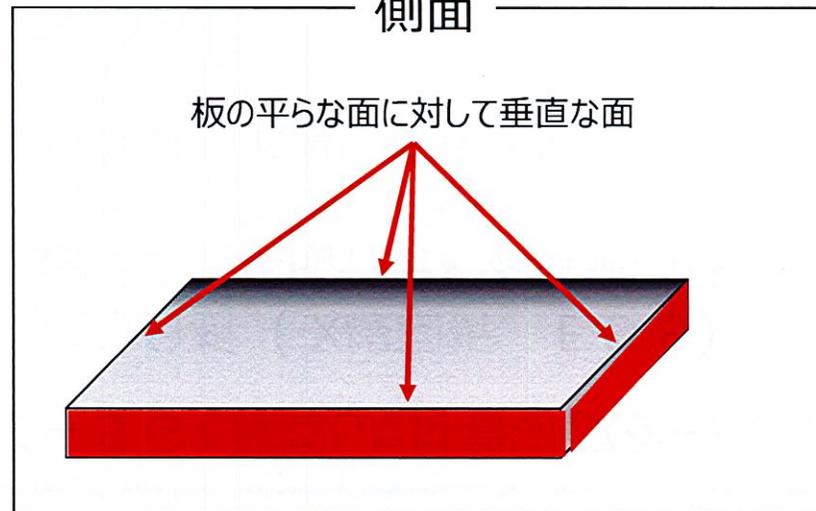
凹面



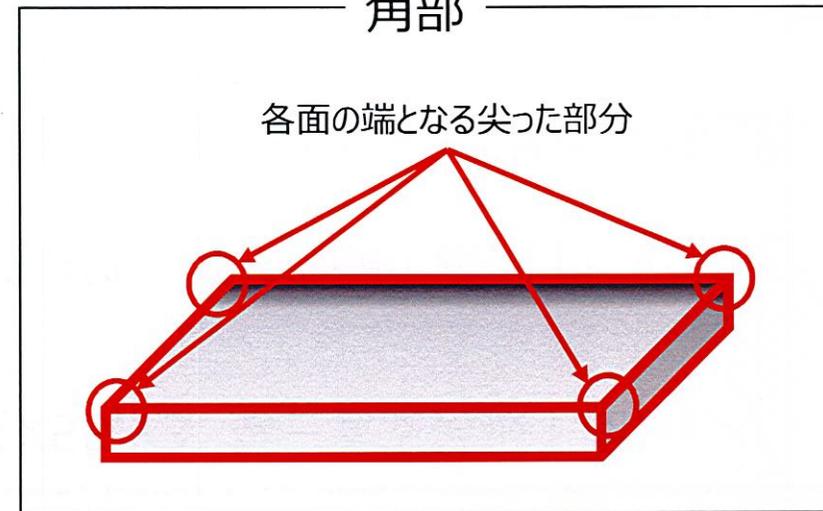
凸面



側面



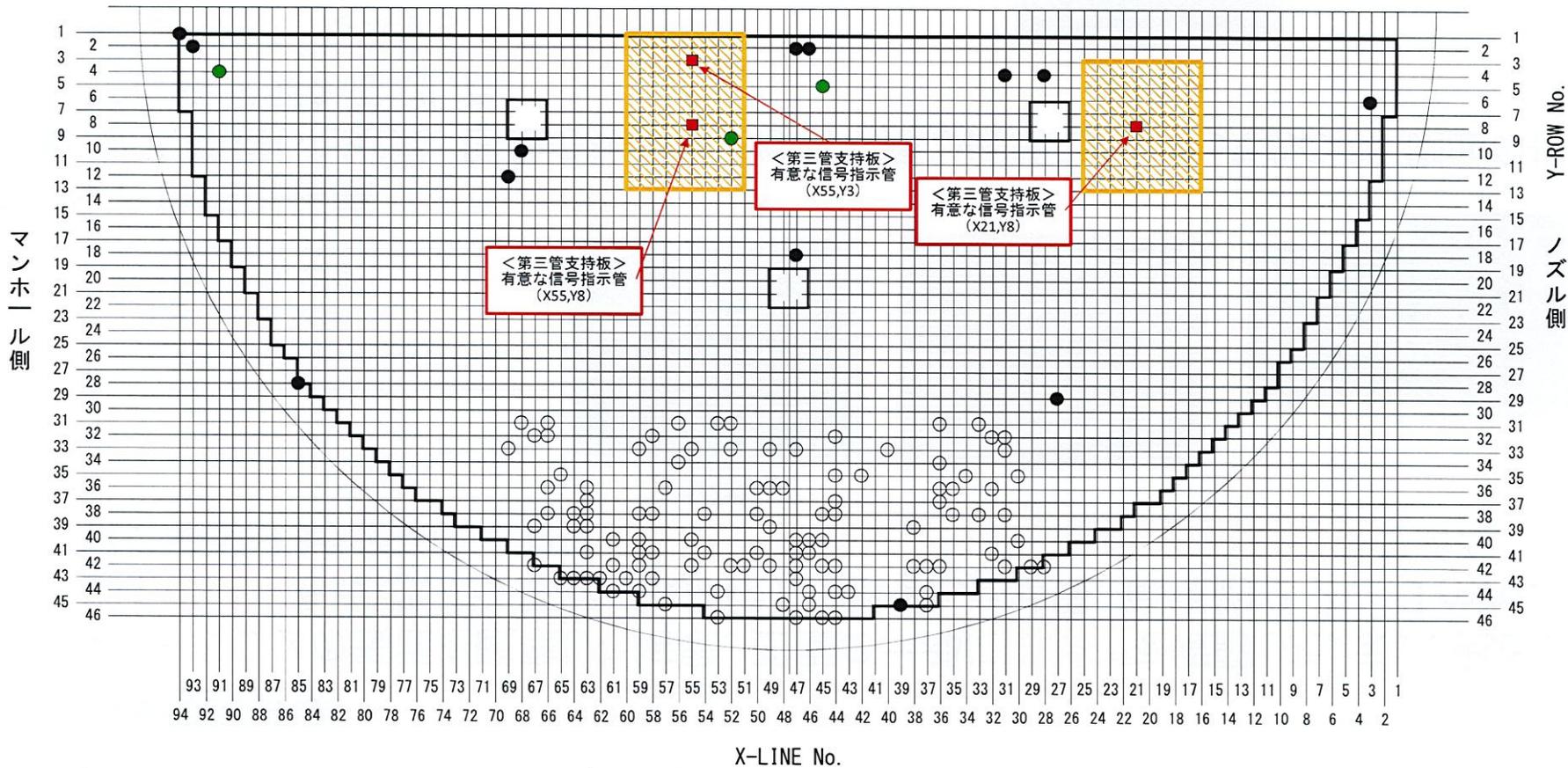
角部



C-SG回収スケール回収範囲図
C-SG (低温側)

- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (110本)
- : 既施栓管 (外面減肉) (3本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (13本)
- : 今回減肉指示が認められた位置 (3本)
- : スケール回収範囲 (第一および第二管支持板 (上面) とともに同一範囲)

本図はSG上部から見た位置を示す



C - S G回収スケールに関する分析結果 (1 / 9)

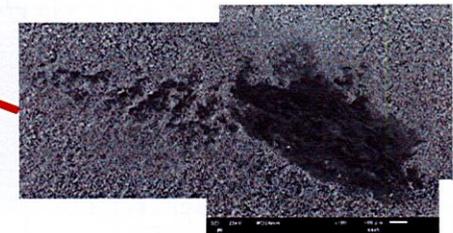
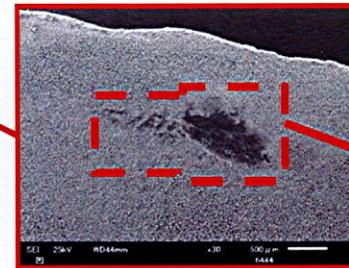
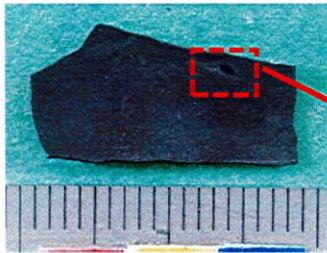
減肉が認められたX55,Y8の第三管支持板部の下方、X54-55,Y3第二管支持板上面で回収したスケールC 2 を分析した結果は、次のとおりである。

① 外観観察結果

- スケールC 2の表面を観察した結果、凹面の一部に接触痕を確認した。また、側面にも一部に接触痕を確認した。形状 (R形状) を計測した結果、直径約 22.3 mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径 22.23 mmに近い形状である。

<凹面>

大きさ：約18mm×約10mm
厚さ：約0.3mm
質量：約0.19g

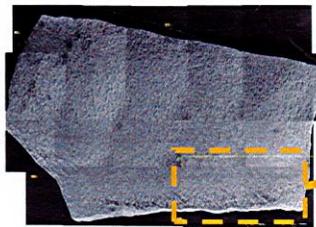


② SEM観察結果

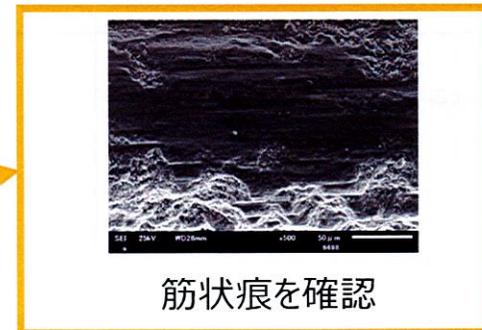
- 拡大観察した結果、凹面の接触痕には筋状痕が確認できなかったものの、側面の接触痕では筋状痕を確認した。

<側面>

<凸面>



側面を観察

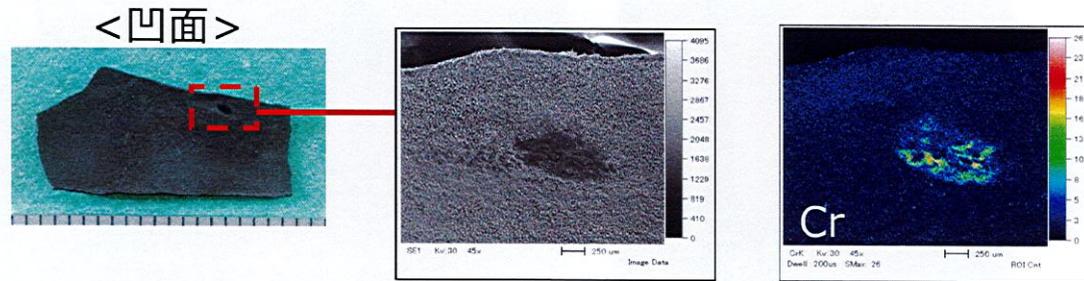


筋状痕を確認

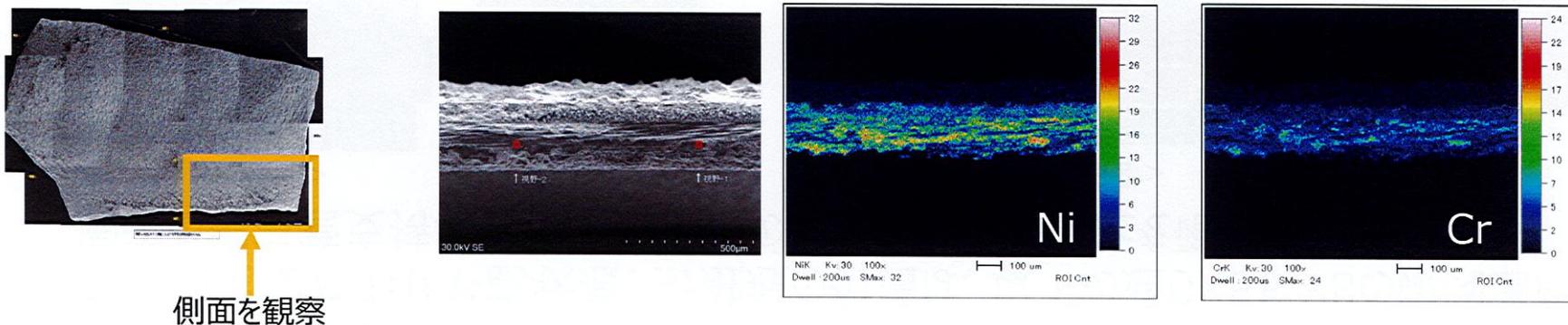
C-SG回収スケールに関する分析結果（2 / 9）

③ 成分分析（X線回折、EDS）

- スケールC 2凹面の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析を実施した結果、管支持板（SUS405）の主成分であるCr成分が検出された。



- スケールC 2側面の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析の結果、伝熱管（インコネル600）の主成分であるNi成分とCr成分を検出した。



スケールC 2は、管支持板下面と接触しながら、伝熱管に減肉を与えた可能性があると推定した。

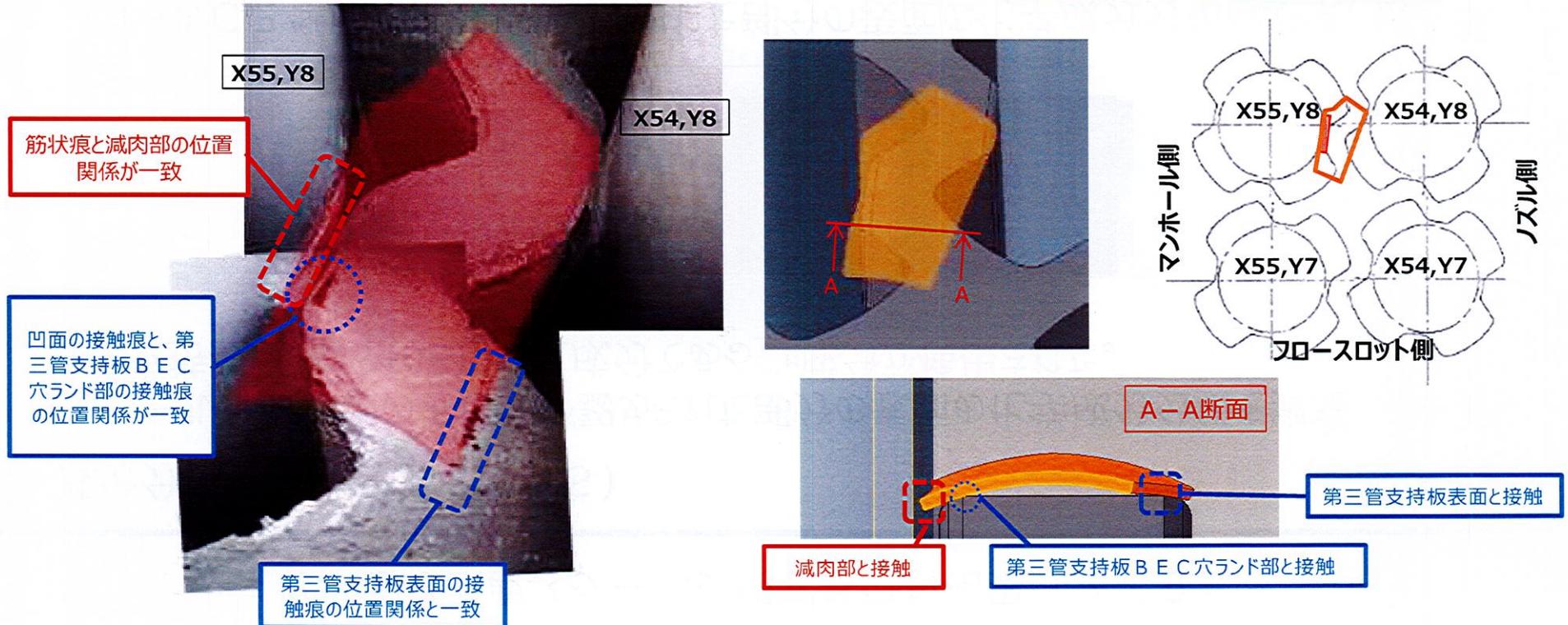
C-SG回収スケールに関する分析結果 (3/9)

④ 減肉箇所との関係

- スケールC 2の形状や筋状痕、接触痕の位置は、以下の通りX55,Y8の減肉箇所や周辺の第三管支持板表面の接触痕の位置と一致することを確認した。



—95—



C-SG回収スケールに関する分析結果（4/9）

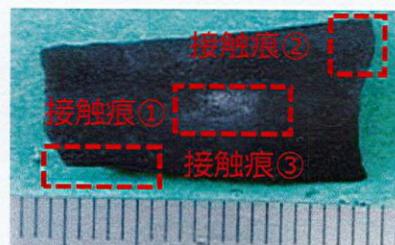
減肉が認められたX21,Y8の第三管支持板部の下方、X21-22,Y12第一管支持板上面で回収したスケールC3を分析した結果は、次のとおりである。

① 外観観察結果

- スケールC3の表面を観察した結果、凸面および側面に接触痕を確認した。また、形状（R形状）を計測した結果、直径約22.6mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。

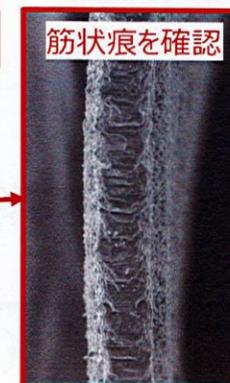
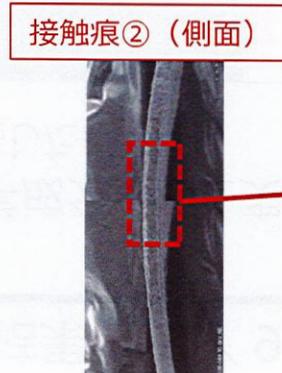
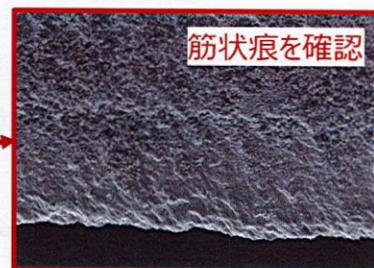
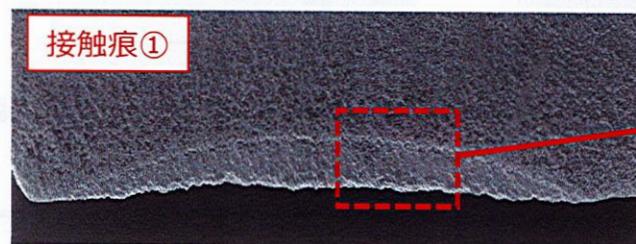
<凸面>

大きさ：約23mm×約11mm
厚さ：約0.3mm
質量：約0.25g



② SEM観察結果

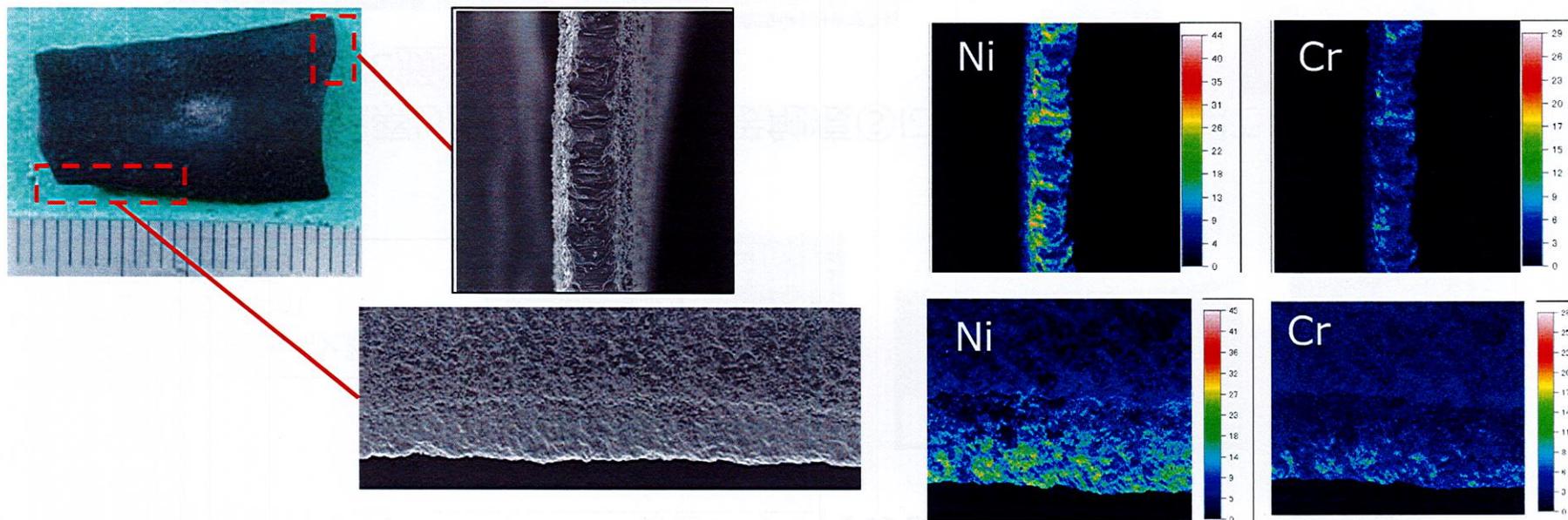
- 接触痕を拡大観察した結果、凸面の接触痕③には筋状痕が確認できなかったが、側面の接触痕①、②に筋状痕を確認した。



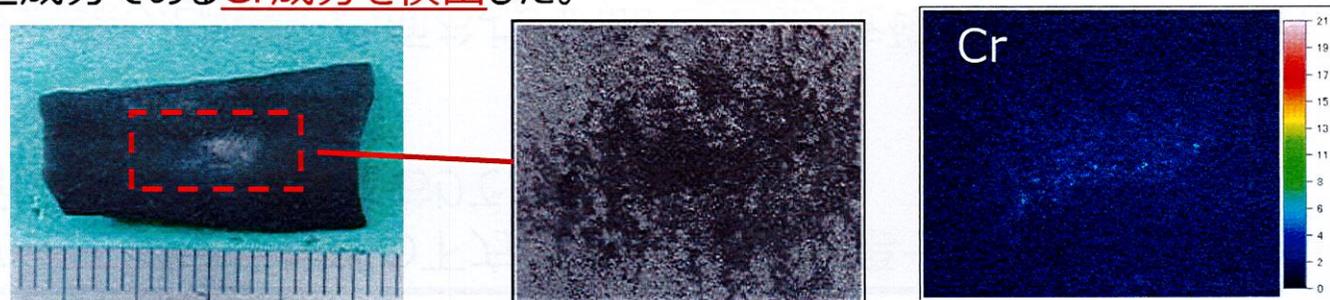
C-SG回収スケールに関する分析結果 (5/9)

③ 成分分析 (X線回折、EDS)

- スケールC 3 側面の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析を実施した結果、伝熱管 (インコネル600) の主成分であるNi成分とCr成分を検出した。



- スケールC 3 の凸面の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析を実施した結果、管支持板 (SUS405) の主成分であるCr成分を検出した。

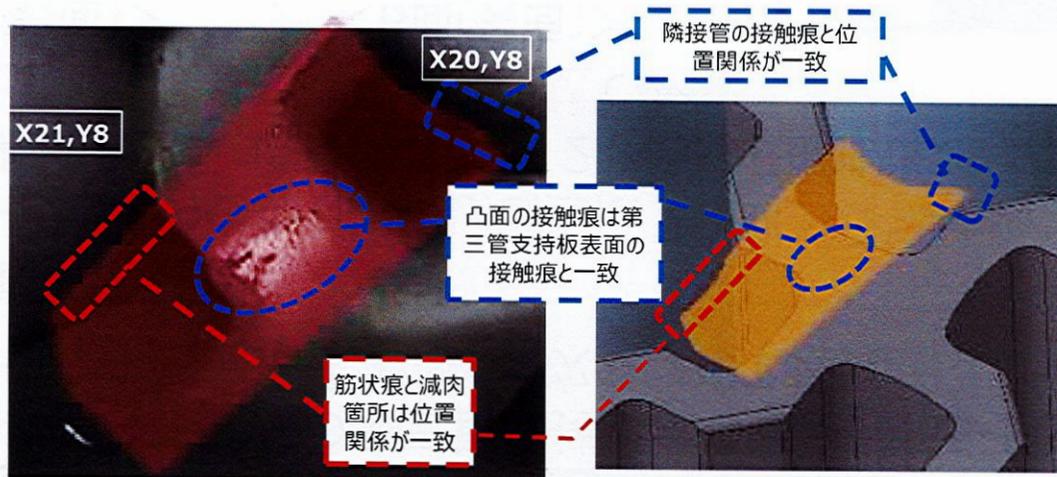
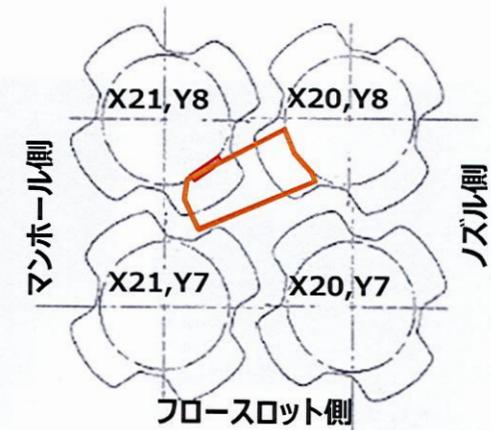
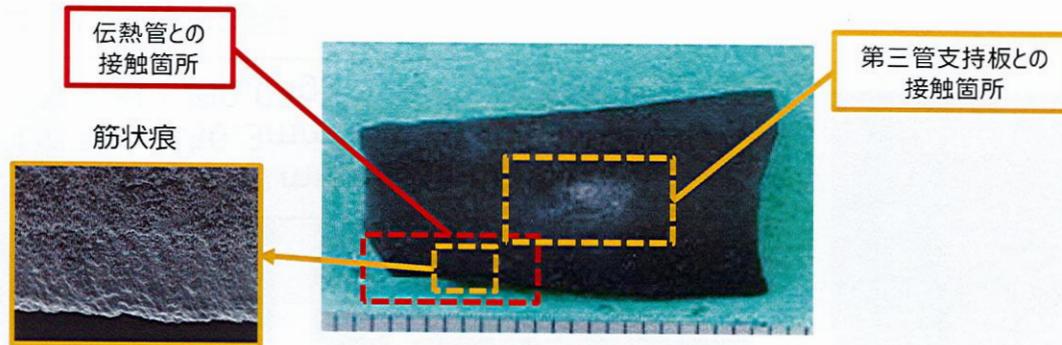


スケールC 3は、管支持板下面と接触しながら、伝熱管に減肉を与えた可能性があると推定した。

C-SG回収スケールに関する分析結果 (6/9)

④ 減肉箇所との関係

- スケールC 3の形状や筋状痕、接触痕の位置は、以下の通りX21,Y8の減肉箇所および周辺の第三管支持板表面並びに隣接管 (X20,Y8) の接触痕の位置と一致することを確認した。



C-SG回収スケールに関する分析結果 (7/9)

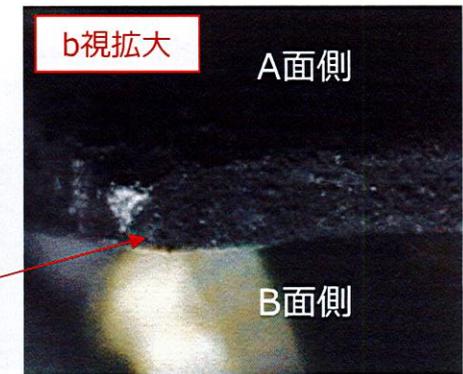
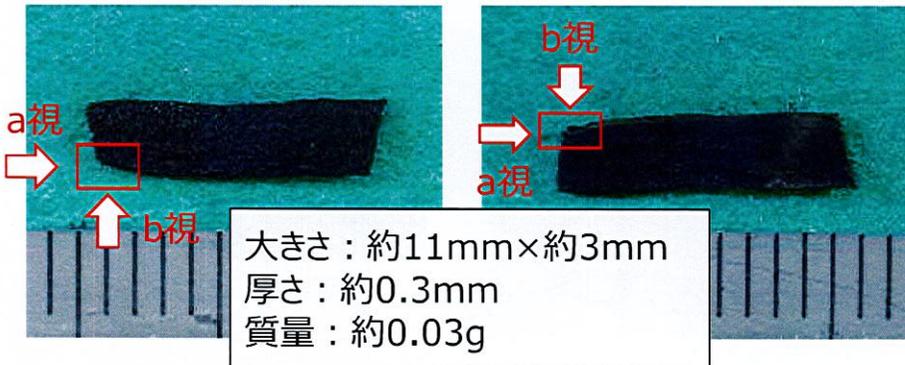
減肉が認められたX55,Y3の第三管支持板部の下方、X55-56,Y4第二管支持板上面で回収したスケールC4を分析した結果は、次のとおりである。

① 外観観察結果

- スケールC4の表面を観察した結果、角部に接触痕を確認した。また、形状 (R形状) を計測した結果、直径約22.2mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。

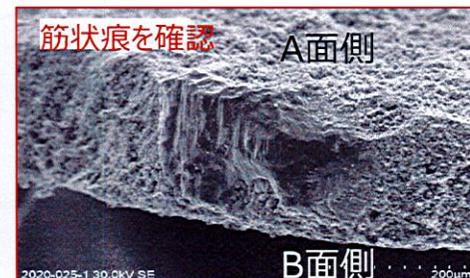
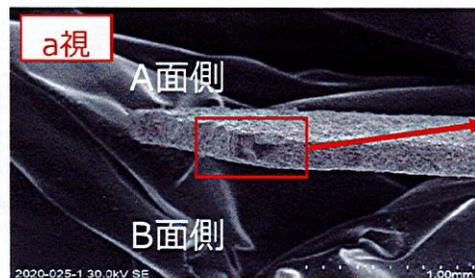
<A面(表面)>

<B面(裏面)>



② SEM観察結果

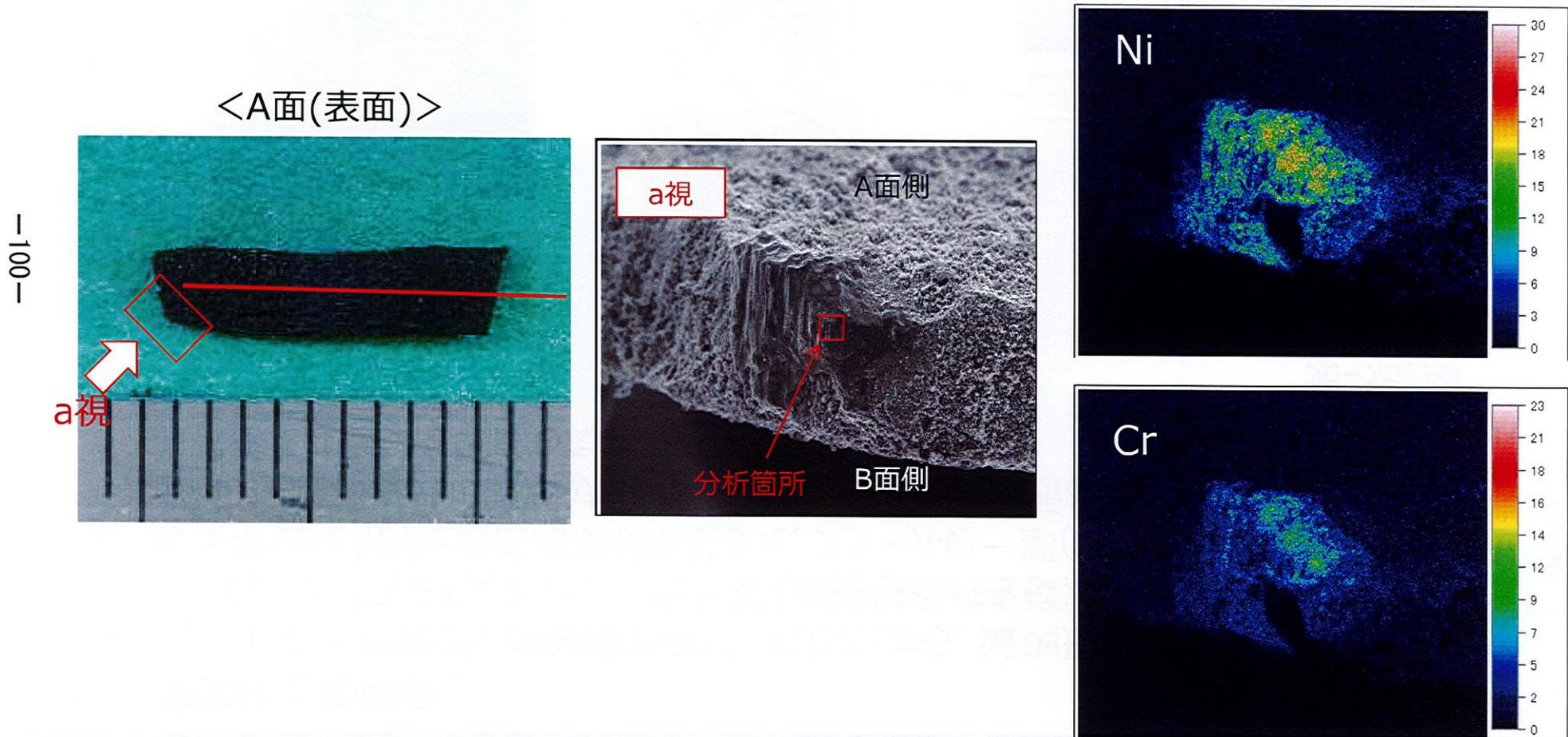
- 接触痕を拡大観察した結果、筋状痕を確認した。



C-SG回収スケールに関する分析結果 (8/9)

③ 成分分析 (X線回折、EDS)

- スケールC 4角部の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析を実施した結果、伝熱管 (インコネル600) の主成分であるNi成分とCr成分を検出した。

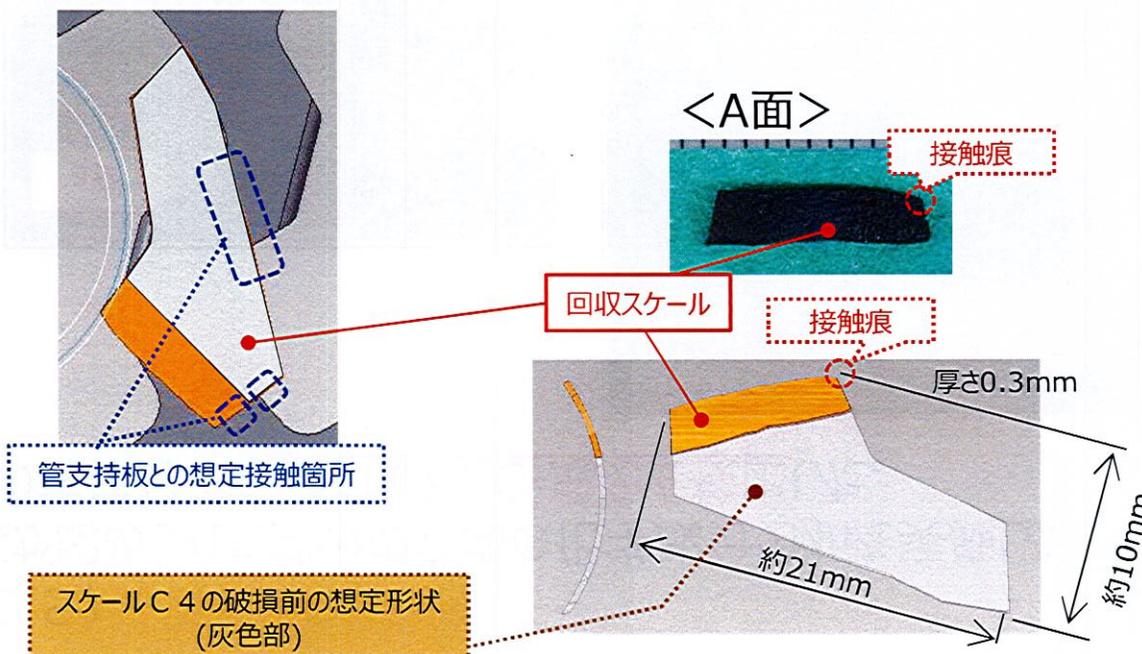
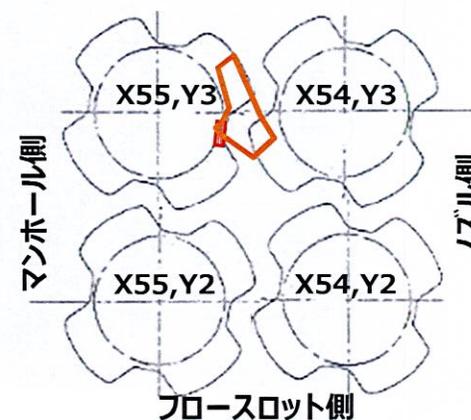


スケールC 4は、管支持板下面と接触しながら、伝熱管に減肉を与えた可能性があるかと推定した。

C-SG回収スケールに関する分析結果 (9/9)

④ 減肉箇所との関係

- スケールC 4の角部に接触痕が確認されたことから、減肉形状が三角型と推定されるX55,Y3伝熱管との接触条件を検討。
- 管支持板接触痕との位置関係を踏まえ、スケールの一部(伝熱管との接触部以外の箇所)が破損したとすると、減肉箇所と接触状態になることを確認した。



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

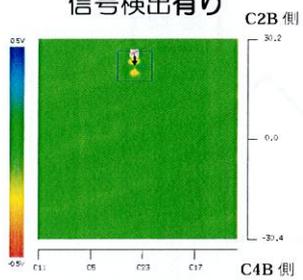
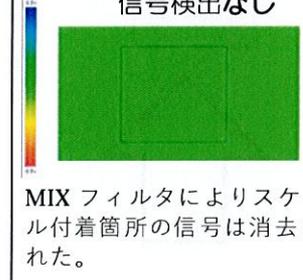
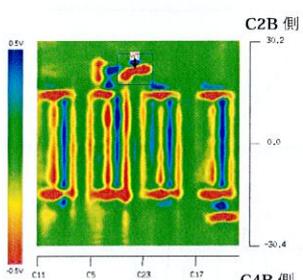
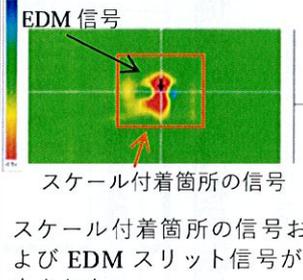
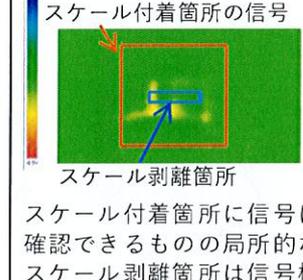
2.2 スケール付着・剥離（EDMスリット無し）の試験片データ

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

3. 結果

取得したデータを表1に示す。

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

実機波形 (A-SG X51 Y4) MIX	スケール付着・剥離 (EDMスリット有り) MIX	スケール付着・剥離 (EDMスリット無し) MIX
信号検出有り 	信号検出有り  <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>	信号検出なし  <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 X51 Y4) 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>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

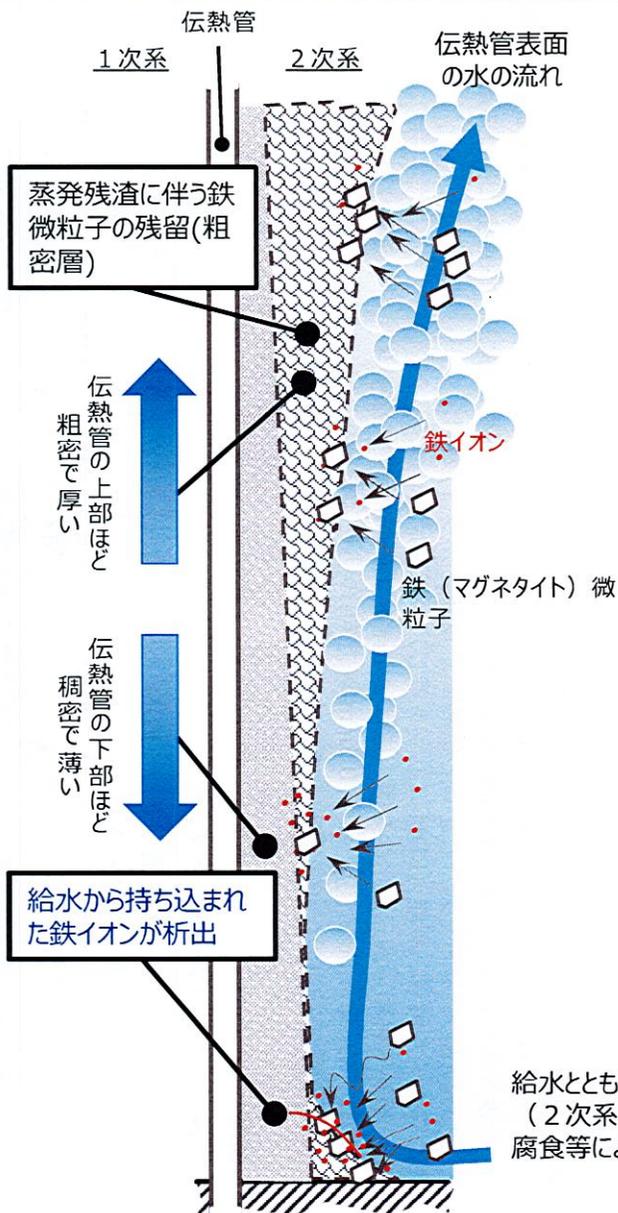
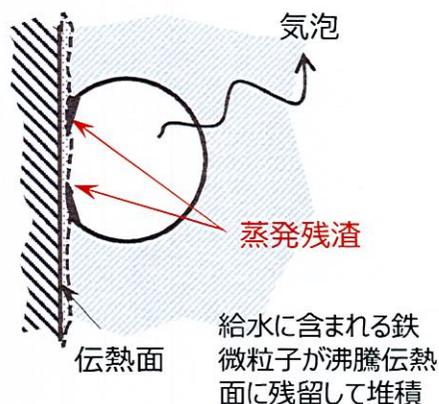
- スケール付着・剥離（EDMスリット有り）の試験片を用いた検証結果より、スケール付着箇所の信号はMIXフィルタにより消去されるが、EDMスリットの信号は消去されず、有意な信号として検出される。
 - スケール付着・剥離（EDMスリット無し）の試験片を用いた検証結果より、局所的なスケール剥離箇所では信号が検出されない。
- ⇒実機波形はMIXフィルタを適用しても有意な信号が検出されていることから、スケール付着や局所的なスケール剥離の信号ではなく、減肉信号と考えられる。

以上

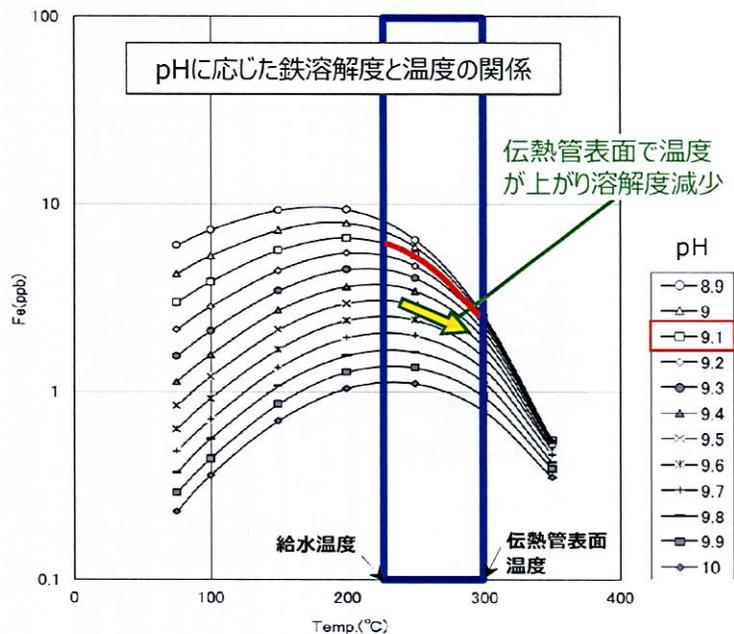
スケール生成メカニズム

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

伝熱管の上部で支配的なスケール生成メカニズム



伝熱管の下部で支配的なスケール生成メカニズム



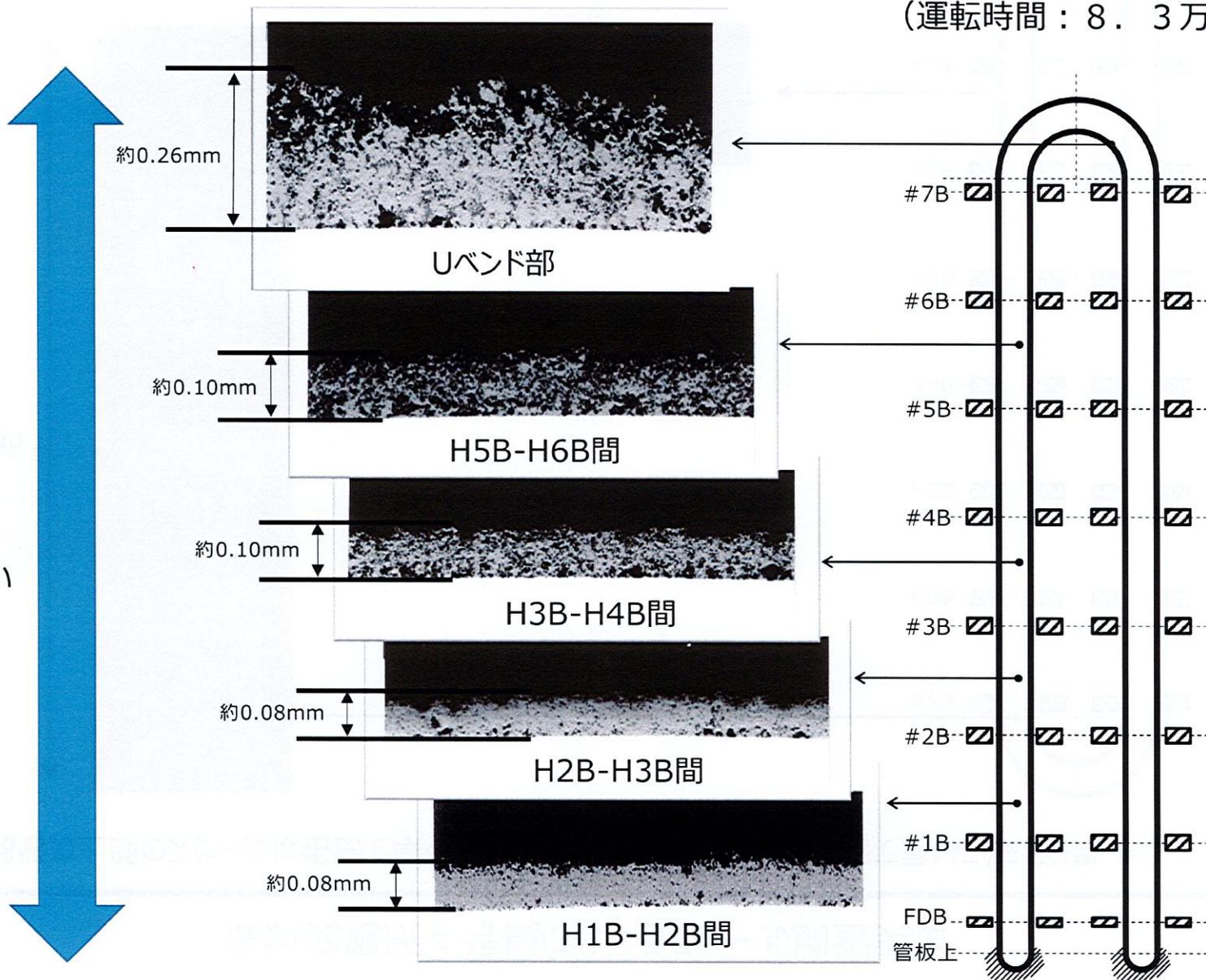
※出典：PWR 5 電力委託調査「2次系機器のスケール付着挙動評価に係る調査」(平成 1 5 年) 他

スケール性状に関する過去の知見（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）

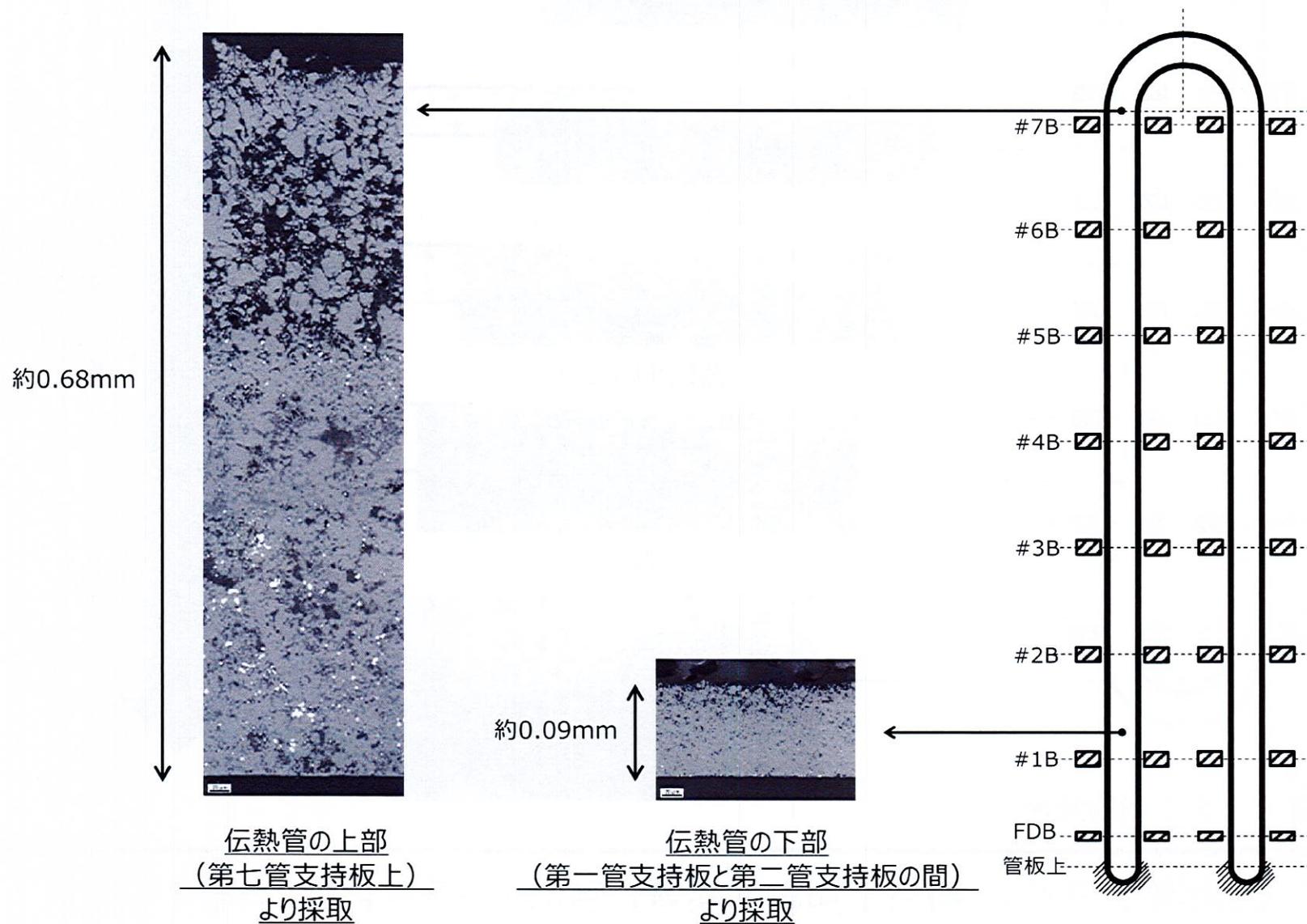
-104-

伝熱管の上部
ほど粗密で厚く
伝熱管の下部
ほど稠密で薄い



高浜発電所 4 号機におけるスケール調査実績

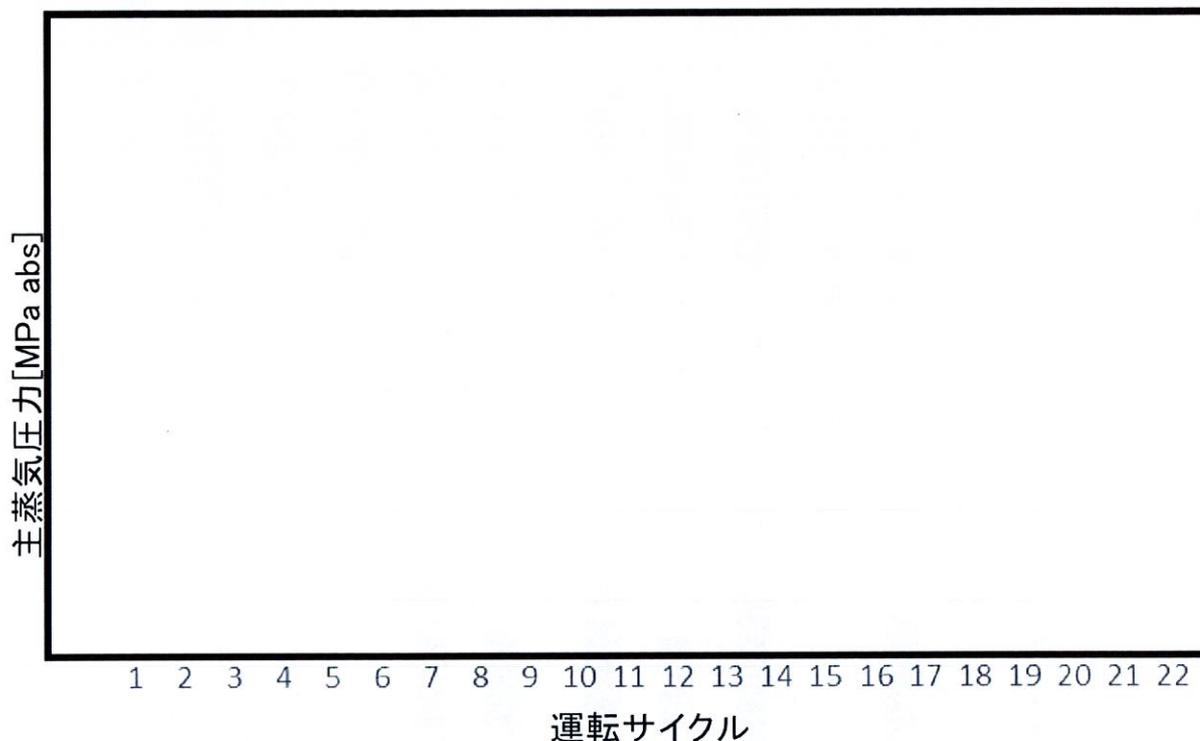
伝熱管の上部のスケールは粗密で厚く、伝熱管の下部のスケールは稠密で薄いことを確認した。



プラント性能指標の推移

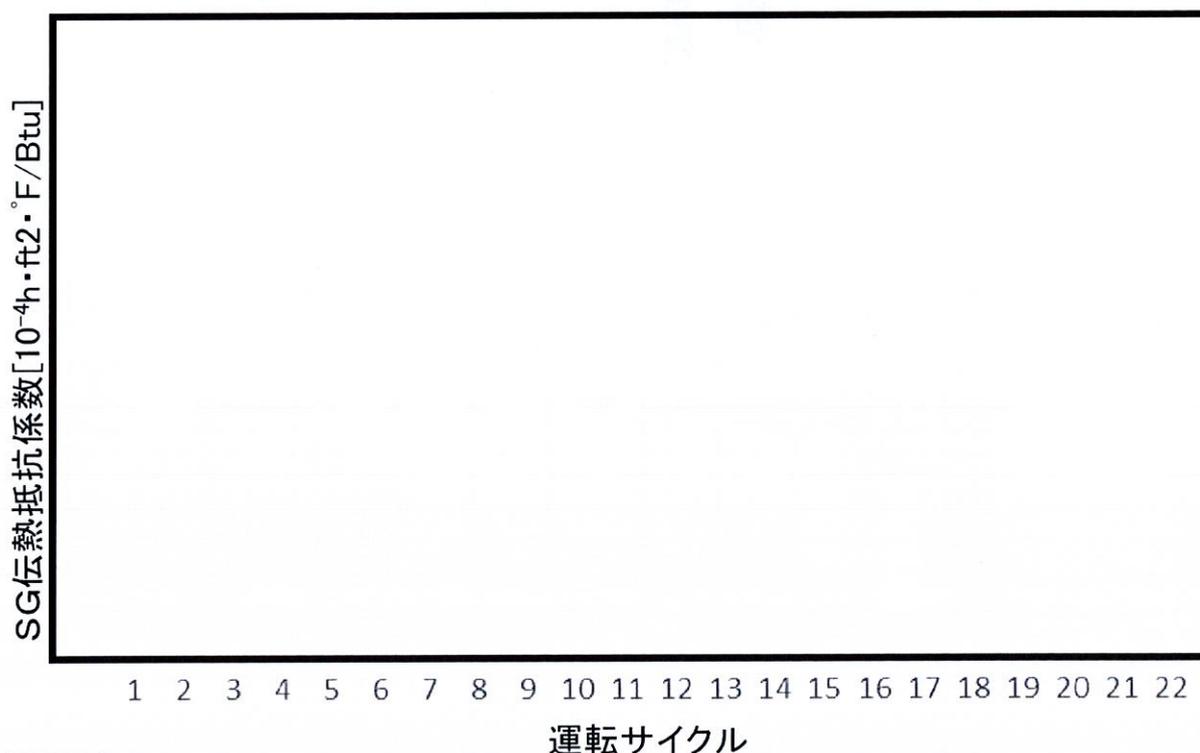
主蒸気圧力

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



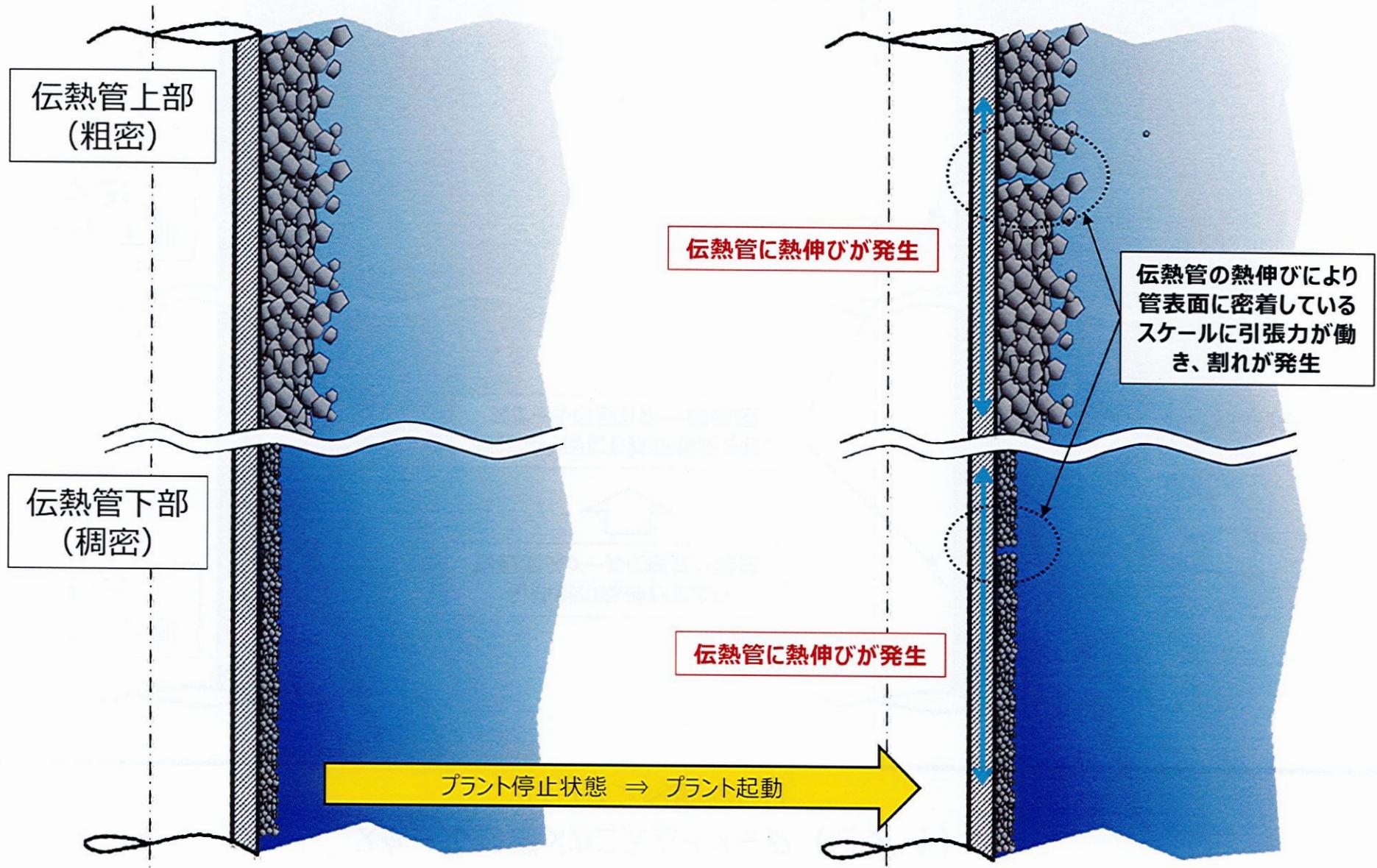
SG 伝熱抵抗係数

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



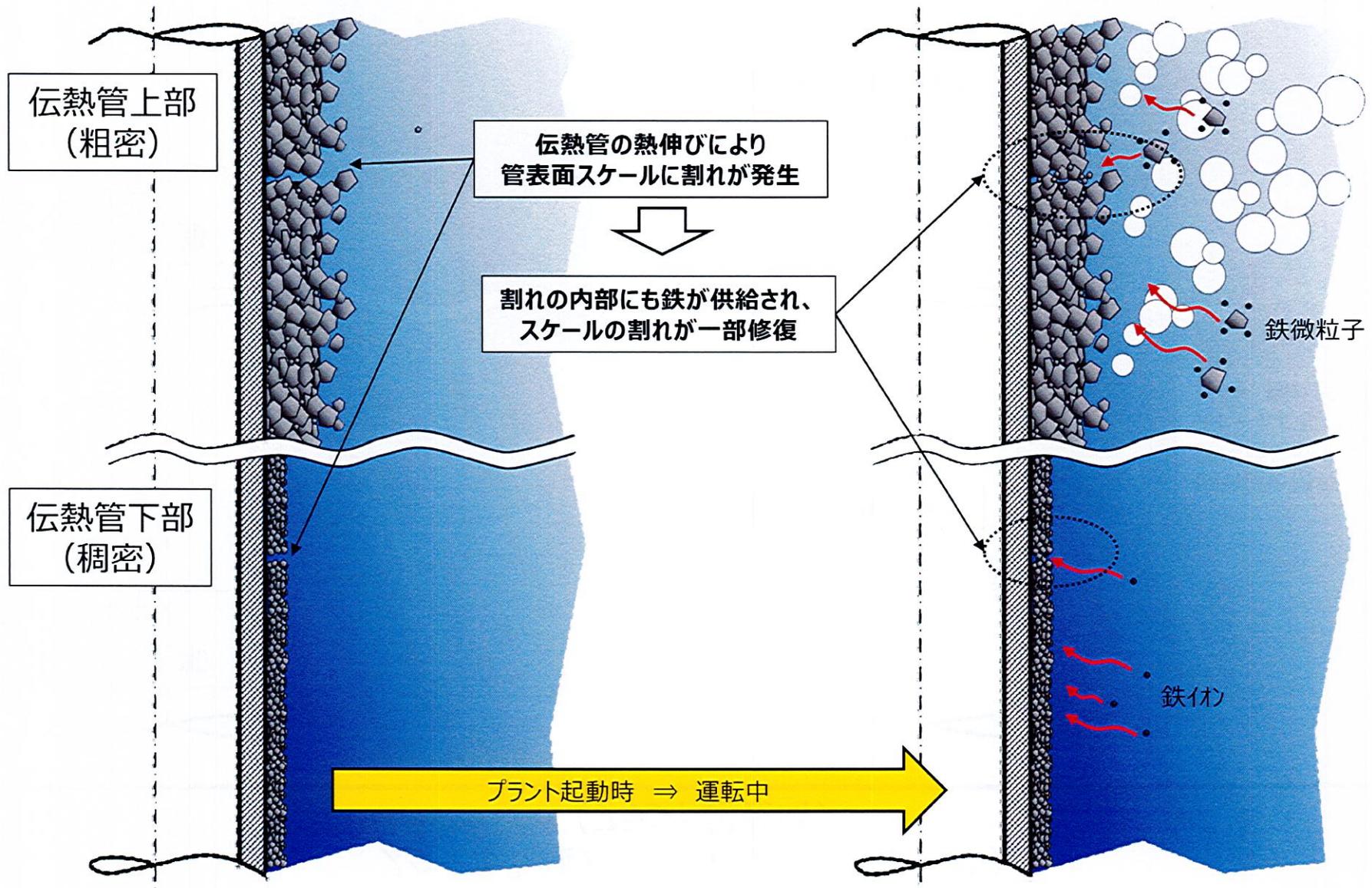
: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

スケール剥離メカニズムイメージ (1 / 4) (プラント起動時)

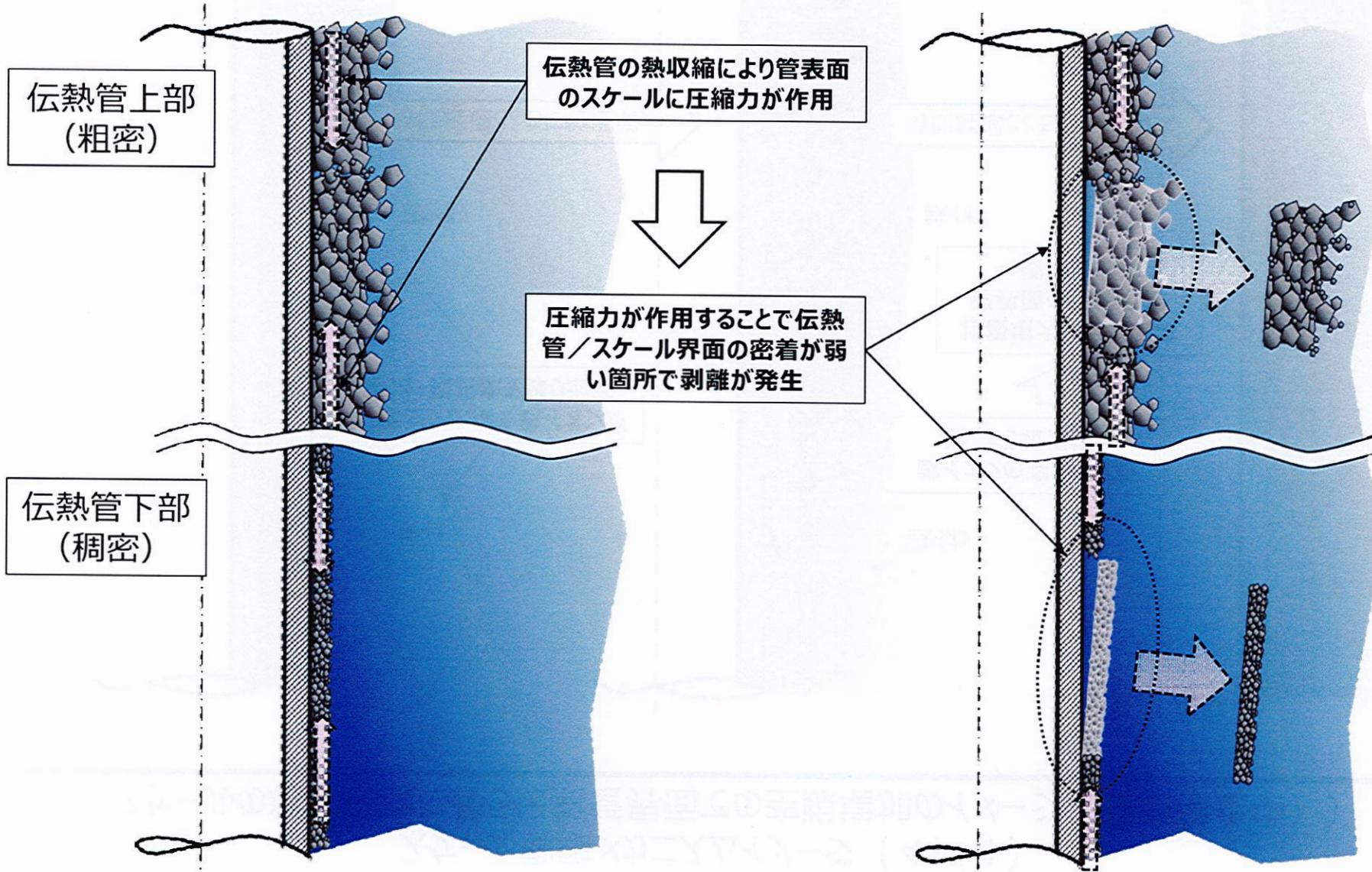


スケール剥離メカニズムイメージ (2 / 4) (プラント運転中)

-109-

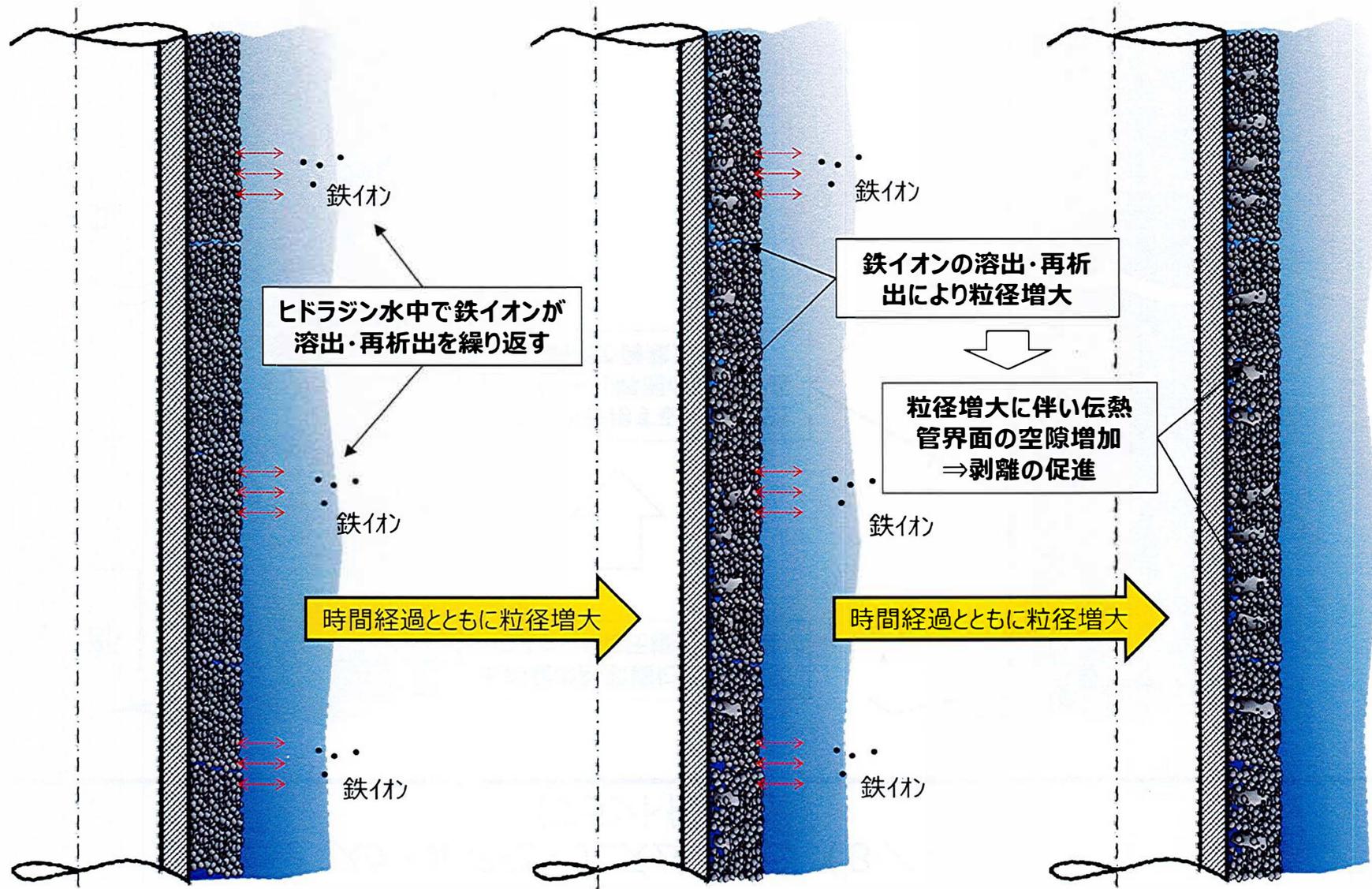


スケール剥離メカニズムイメージ (3 / 4) (プラント停止時)



スケール剥離メカニズムイメージ (4 / 4)

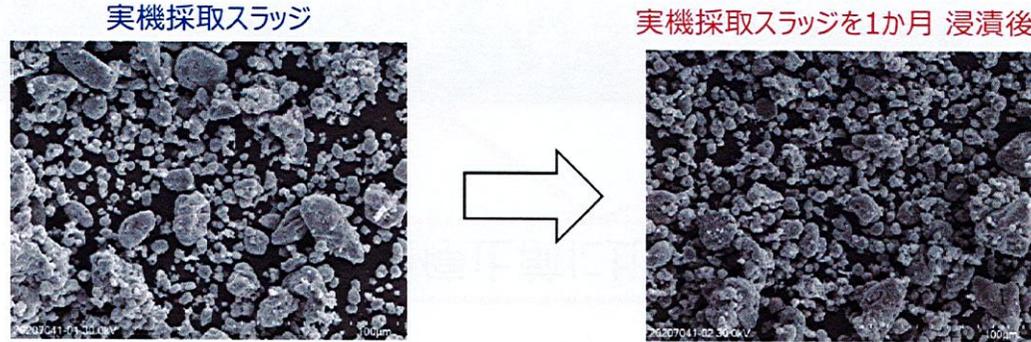
(スケールの粒径増大に伴う伝熱管界面での空隙増加のイメージ (長期停止中))



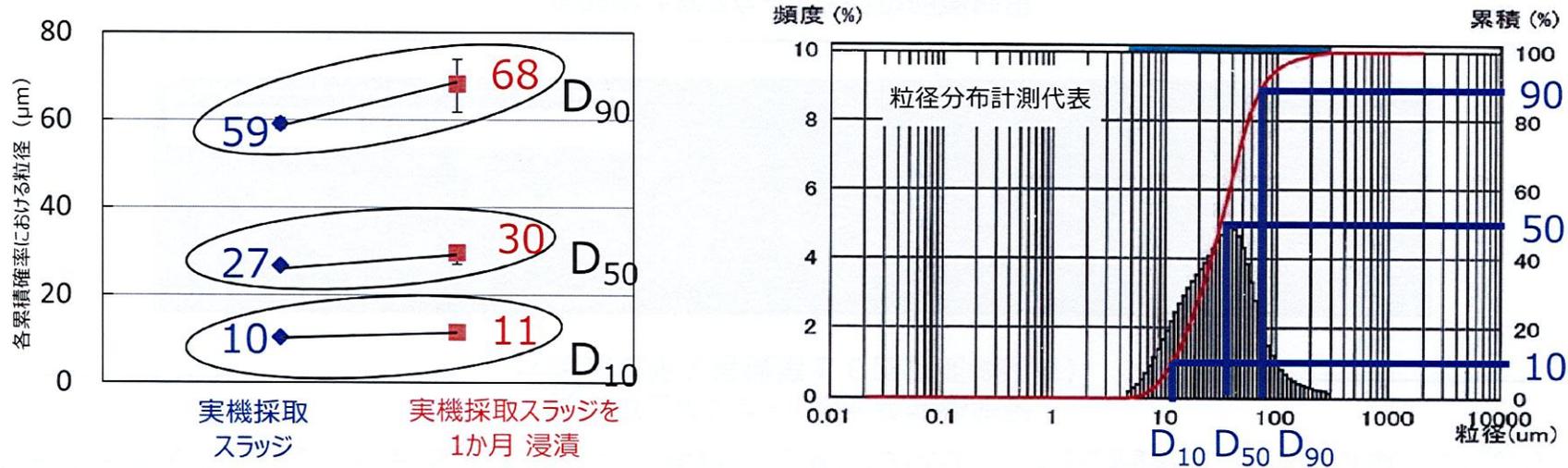
長期停止影響に係る考察 (1 / 2)

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）をヒドラジン水による浸漬試験を1か月間実施した。

(1) SEM観察



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

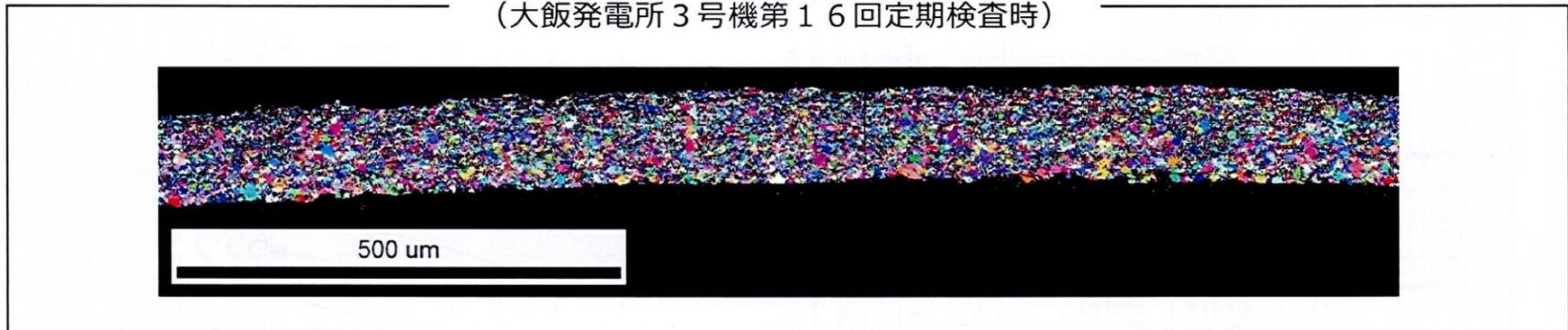


浸漬試験後に粒径の分布計測を行った結果、有意な粒径増加が認められたことから、長期停止がスケール性状に及ぼす影響は、粒が大きくなることであると推定した。

長期停止影響に係る考察（2 / 2）

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

長期停止前スケール断面粒観察結果
（大飯発電所3号機第16回定期検査時）



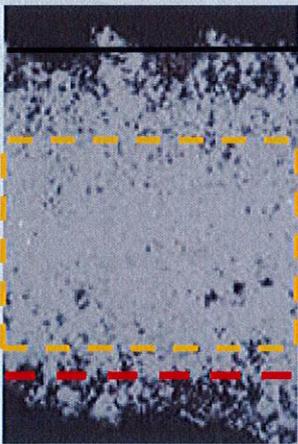
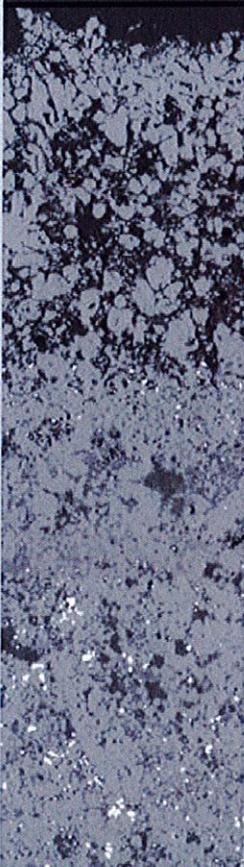
長期停止後スケール断面粒観察結果
（大飯発電所3号機第18回定期検査時）

長期停止後に長期停止前に比べ、大きな粒が認められる

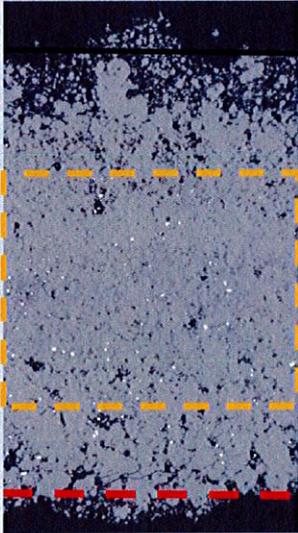
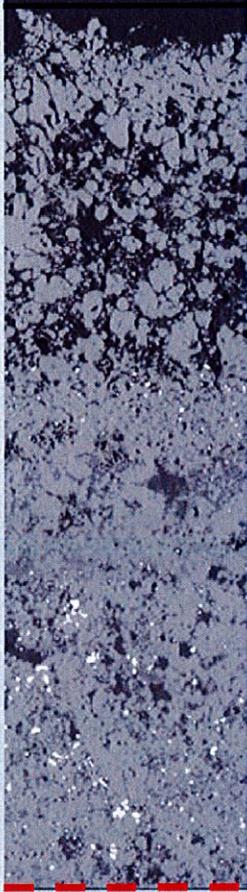


※：結晶粒サイズ等の情報を取得できる分析手法であり、結晶面が向いている方向によって、異なる色で示すことで、同色の一塊が結晶粒であると識別することができる。

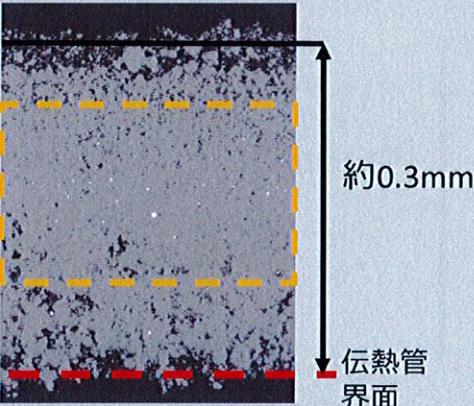
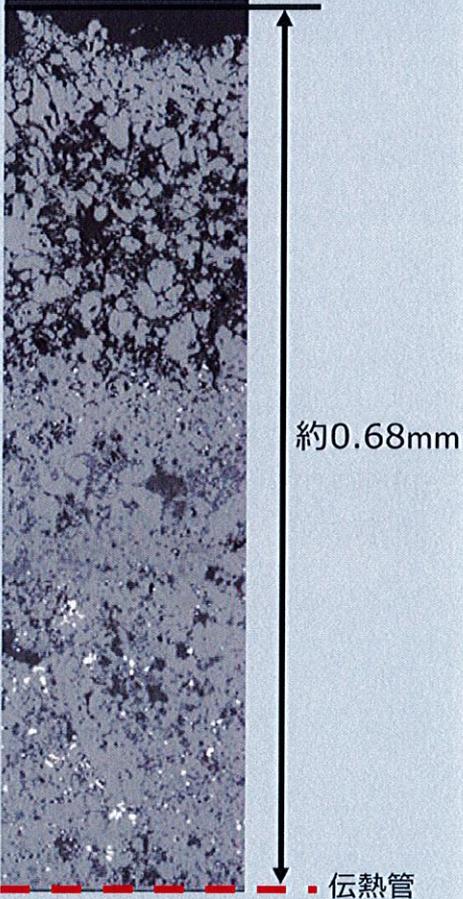
回収スケールの断面マイクロ観察結果（A－SG）

回収場所	A-SG 回収スケール 第三管支持板下部	【参考】B-SG 第七管支持板上
断面マイクロ 観察結果	 <p> ┌───┐ 空隙率5%以下の └───┘ 稠密層の範囲 </p> <p>約0.2～0.3mm</p> <p>┌───┐ └───┘ 伝熱管 界面</p>	 <p>約0.68mm</p> <p>┌───┐ └───┘ 伝熱管 界面</p>
性状	稠密層が主体	粗密層が主体
厚さ	約0.2～0.3mm	約0.68mm
伝熱管を きず付ける 可能性	あり	なし
運転時間	22.2万時間	

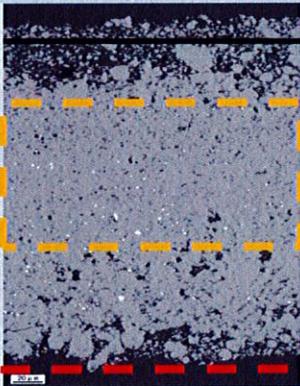
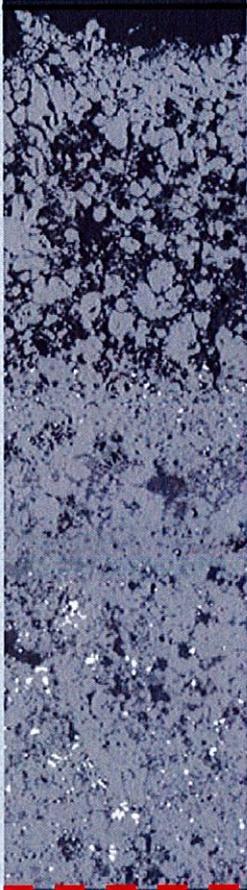
回収スケールの断面マイクロ観察結果 (C-SG)

回収場所	C-SG 回収スケール(C2) 第二管支持板上	【参考】B-SG 第七管支持板上
断面マイクロ観察結果	<p>  </p> <p>  </p> <p>  </p>	
性状	稠密層が主体	粗密層が主体
厚さ	約0.3mm	約0.68mm
伝熱管を きず付ける可能性	あり	なし
運転時間	22.2万時間	

回収スケールの断面マイクロ観察結果（C－SG）

回収場所	C-SG 回収スケール(C3) 第一管支持板上	【参考】B-SG 第七管支持板上
断面マイクロ 観察結果	 <p>空隙率5%以下の 稠密層の範囲</p> <p>約0.3mm</p> <p>伝熱管 界面</p>	 <p>約0.68mm</p> <p>伝熱管 界面</p>
性状	稠密層が主体	粗密層が主体
厚さ	約0.3mm	約0.68mm
伝熱管を きず付ける可能性	あり	なし
運転時間	22.2万時間	

回収スケールの断面ミクロ観察結果（C－SG）

回収場所	C-SG 回収スケール(C4) 第二管支持板上	【参考】B-SG 第七管支持板上
断面ミクロ 観察結果	 <p> ┌──┐ 空隙率5%以下の └──┘ 稠密層の範囲 </p> <p>約0.3mm</p> <p>伝熱管 界面</p>	 <p>約0.68mm</p> <p>伝熱管 界面</p>
性状	稠密層が主体	粗密層が主体
厚さ	約0.3mm	約0.68mm
伝熱管を きず付ける可能性	あり	なし
運転時間	22.2万時間	

伝熱管とスケールの摩耗試験方法について

今回、A、C-SGで伝熱管に有意な減肉を与えたと推定されるスケールを回収したため、以下の通り伝熱管とスケールの摩耗試験を実施し、スケールで有意な減肉が生じる可能性を検証した。

1. 試験概要

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

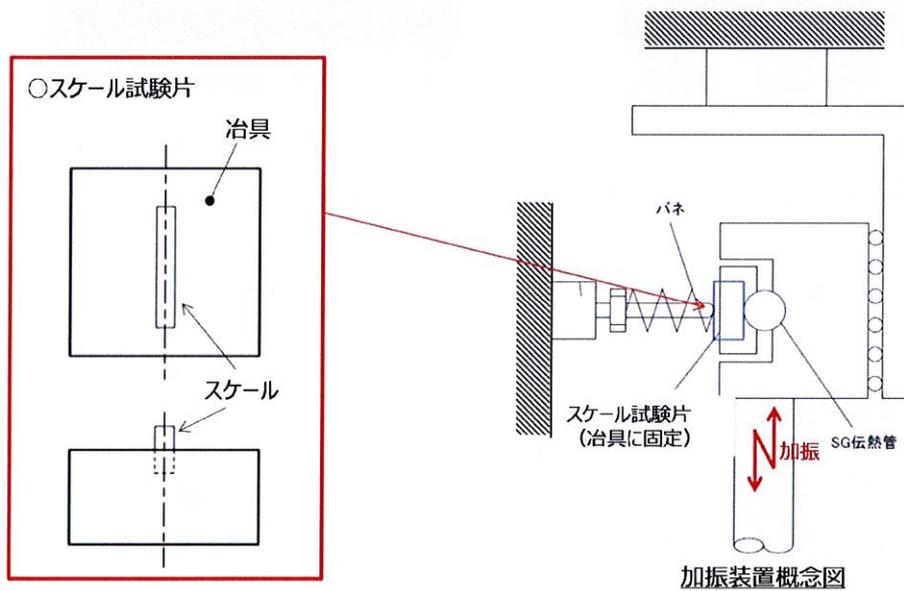


図1 加振装置概念図

2. 試験条件

高浜3号機第24回定検時と同様に、実機条件を模擬した流動振動解析結果から摩耗試験条件を表1の通り設定した。

表1 摩耗試験条件

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

3. 摩耗試験結果の整理方法

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

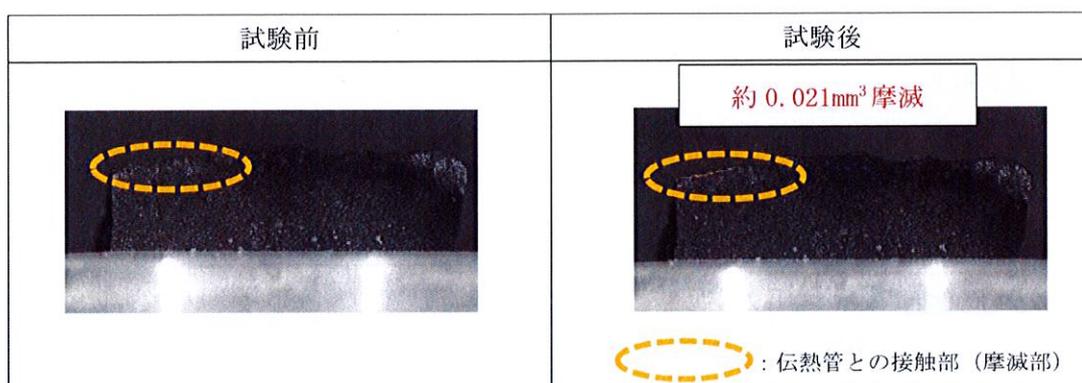


図2 摩耗試験前後のスケール試験片外観 (高浜4号機回収スケールの一例)

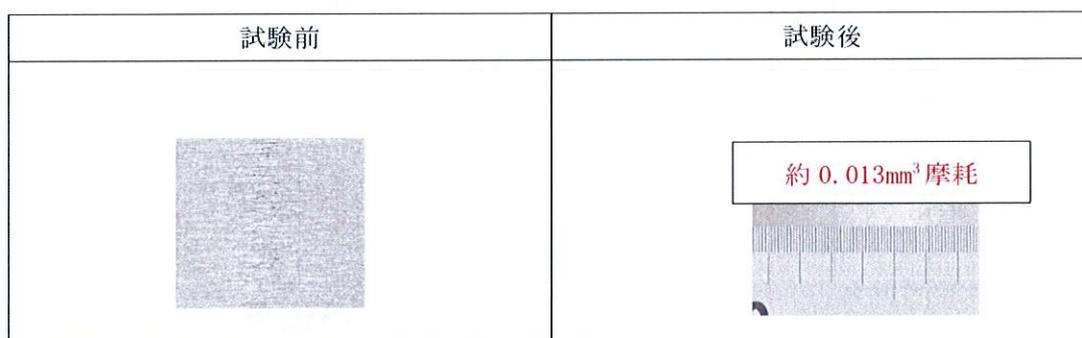


図3 摩耗試験前後の伝熱管試験片外観 (高浜4号機回収スケールの一例)

4. 摩耗試験結果

(1) 今回原因のスケールと同等性状のスケールの試験結果 (高浜4号機)

今回原因と考えられるA, C-SGで回収したスケールと同等の稠密さ (空隙率5%以下の稠密層が主体)、厚さのスケールを高浜4号機から回収し、摩耗試験を実施した。その結果を表2に示す。

この結果、試験片によってはスケールよりも伝熱管の方が先に摩耗したことから、空隙率5%以下の稠密層が主体のスケールは伝熱管に有意な減肉を与える可能性があることを確認した。

表 2 今回原因と同等性状のスケールによる摩耗試験結果一覧

試験片	全厚 (mm)	稠密層厚さ (mm)	伝熱管 摩耗体積 (mm ³)	スケール片 摩耗体積 (mm ³)	摩耗体積比 (伝熱管： スケール)	試験時間 (hr)
ケース 1	約 0.2	約 0.18	約 0.009	約 0.006	1 : 0.7	約 116
ケース 2	約 0.2	約 0.18	約 0.004	約 0.002	1 : 0.5	約 94
ケース 3	約 0.3	約 0.14	約 0.023	約 0.014	1 : 0.6	約 90

(2) 稠密層厚さと摩耗試験結果の関係整理に係るデータ充実 (高浜 4 号機)

稠密層厚さと摩耗試験結果の関係整理にあたり、データを充実させる観点から、表 3 の通り高浜 4 号機回収スケールについて、摩耗試験サンプル数を追加した。

得られた結果については、別途稠密層厚さと摩耗試験結果の関係として整理した。

表3 高浜4号機回収スケールによる摩耗試験結果一覧(表2除く)

試験片	全厚 (mm)	稠密層 厚さ (mm)	伝熱管 摩耗体積 (mm ³)	スケール片 摩耗体積 (mm ³)	摩耗体積比 (伝熱管: スケール)	試験時 間 (hr)
ケース4	約0.3	約0.14	約0.013	約0.021	1:1.6	約68
ケース5	約0.3	約0.14	約0.014	約0.021	1:1.5	約68
ケース6	約0.2	約0.06	—	試験開始直後に欠損	1:100以上	—
ケース7	約0.2	約0.10	—	試験開始直後に欠損	1:100以上	—
ケース8	約0.2	約0.14	—	試験中に欠損	1:100以上	約49
ケース9	約0.2	約0.04	—	試験開始直後に欠損	1:100以上	—
ケース10	約0.2	約0.12	約0.005	約0.010	1:2.0	約99
ケース11	約0.2	約0.16	約0.018	約0.024	1:1.3	約90
ケース12	約0.2	約0.14	約0.009	約0.005	1:0.6	約99
ケース13	約0.2	約0.08	約0.015	約0.093	1:6.2	約100
ケース14	約0.3	約0.10	—	試験中に欠損	1:100以上	約17
ケース15	約0.3	約0.12	約0.012	約0.018	1:1.5	約91
ケース16	約0.2	約0.14	約0.011	約0.010	1:0.9	約89
ケース17	約0.3	約0.14	約0.012	約0.028	1:2.3	約89
ケース18	約0.3	約0.12	約0.016	約0.044	1:2.8	約88
ケース19	約0.2	約0.14	約0.015	約0.008	1:0.5	約91
ケース20	約0.2	約0.12	—	試験中に欠損	1:100以上	約23
ケース21	約0.2	約0.14	約0.017	約0.014	1:0.8	約90
ケース22	約0.2	約0.14	—	試験中に欠損	1:100以上	約66
ケース23	約0.2	約0.08	—	試験中に欠損	1:100以上	約15
ケース24	約0.2	約0.10	約0.006	約0.016	1:2.7	約20
ケース25	約0.2	約0.10	—	試験中に欠損	1:100以上	約1
ケース26	約0.2	約0.10	—	試験開始直後に欠損	1:100以上	—

以上

スケールによる伝熱管の減肉メカニズム調査の流れ

- 以下の試験および解析により、回収したスケールA、C 2～4が伝熱管に有意な減肉を与えたメカニズムを調査した。
- 各試験および解析については、実機条件を模擬して行った。

①減肉痕との接触状態の推定

- ・スケールAの接触状態は実機観察結果の通り（添付資料－16）
- ・スケールC 2～4は、添付資料－18にて接触状態を推定



②減肉痕との接触状態の再現

- ・実機二相流相当のモックアップ試験により、①で推定した接触状態の再現性を確認
- ・再現性が確認できた場合は、以下の解析および試験を実施



③摩耗形態の推定

- ・スケールと伝熱管のどちらの振動で今回の摩耗減肉が生じたかを解析を用いて確認
- ・推定にあたっては、両者の摩耗の仕事率（ワークレート）を算出、比較し、実機の摩耗減肉量が得られるのはどちらになるかを確認

<試験>

④－1 減肉試験

- ・伝熱管、スケールを模擬した装置により摩耗減肉を発生させることで摩耗減肉形状を推定

④－2 ECTモックアップ試験

- ・減肉試験により得られた摩耗減肉形状と同等の人工欠陥を与えた伝熱管のECT信号を取得し、実機ECT信号と比較
- ⇒①で確認または推定した接触状態で今回の摩耗減肉形状が得られることを確認

⑤摩耗体積の評価

- ・③のワークレートを用いて算出した摩耗体積と、④－2の人工欠陥の体積との比較を実施
- ⇒①で確認または推定した接触状態により今回の摩耗量が1サイクルで発生し得ることを確認

スケールのSG 2次側器内挙動の推定および流況モックアップ試験による接触状態の再現

熱流動解析によりSG 2次側器内で管支持板下面に到達するまでのスケール挙動を推定するとともに、SG 2次側の流況モックアップ試験により、推定したスケールの接触状態が実機二相流相当条件においても再現するか確認を行った。

1. SG器内でのスケール挙動の推定

図1にSG 2次側下部の器内流況および想定されるスケールの挙動を示す。

運転中のSG 2次側器内の流況下では、流体抗力がスケールの落下力を上回ることから、管板直上で発生したスケールの場合、管群内の上昇流に乗って流量分配板および各管支持板フローロット部を通過し、減肉箇所へ到達したことが考えられる。第一管支持板より上方では、管群の高温側と低温側の圧力損失差から、高温側から低温側への水平方向流があることから、第一管支持板および第二管支持板フローロット部を通過したものが第三管支持板の低温側下面に至ったものと推定される。

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

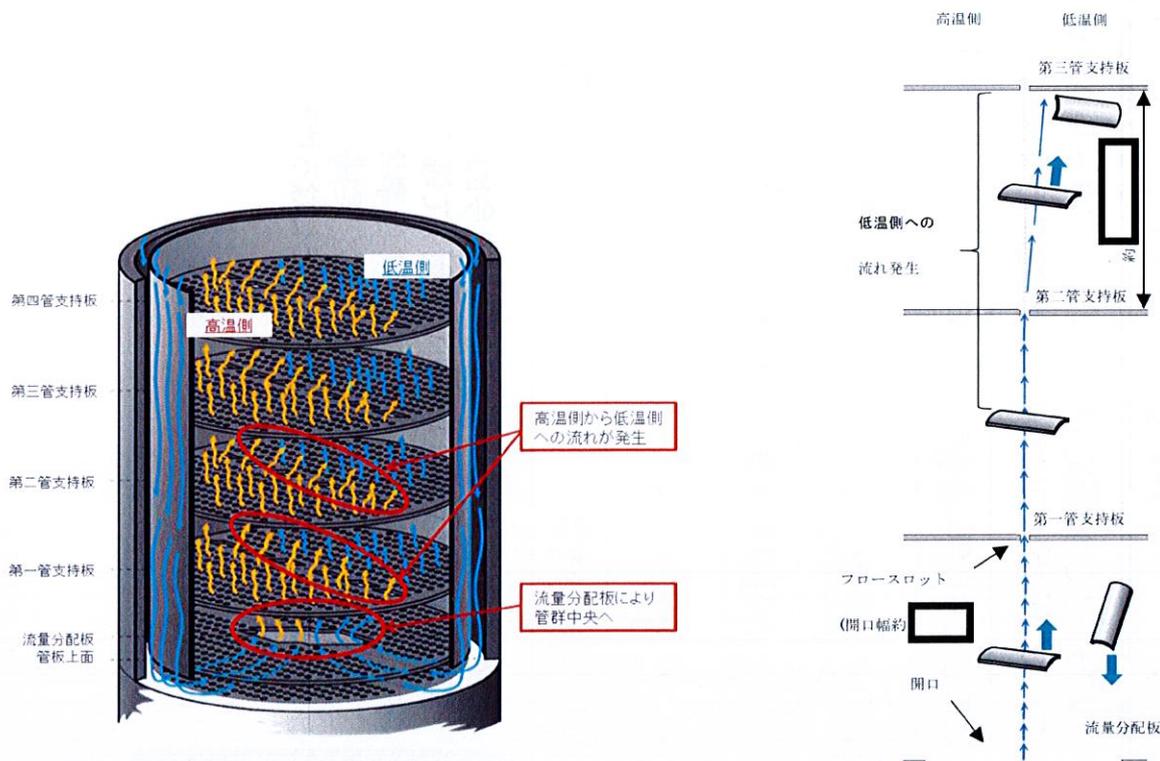


図1 SG 2次側下部の器内流況およびスケール挙動

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

□ : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

2. 流況モックアップ試験による接触状態の再現

(1) 試験方法

3次元熱流動解析で得られるSG2次側流況を再現する水空気試験装置を用いて、C2、C3、C4スケールの各模擬スケール片について、推定した接触状態が実機二相流相当条件下において管支持板下面で維持されるか確認を行った（図2参照）。

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

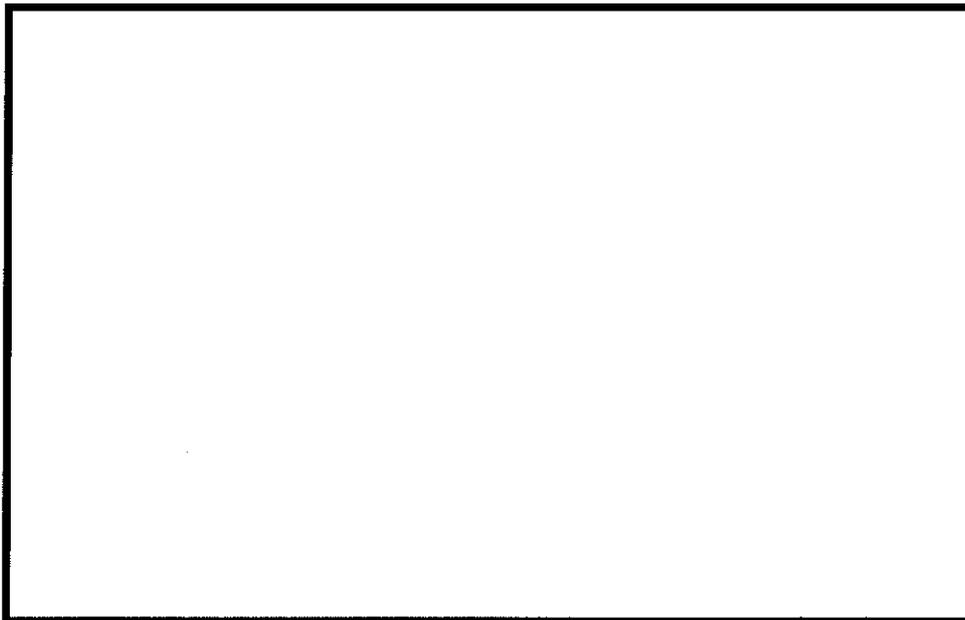


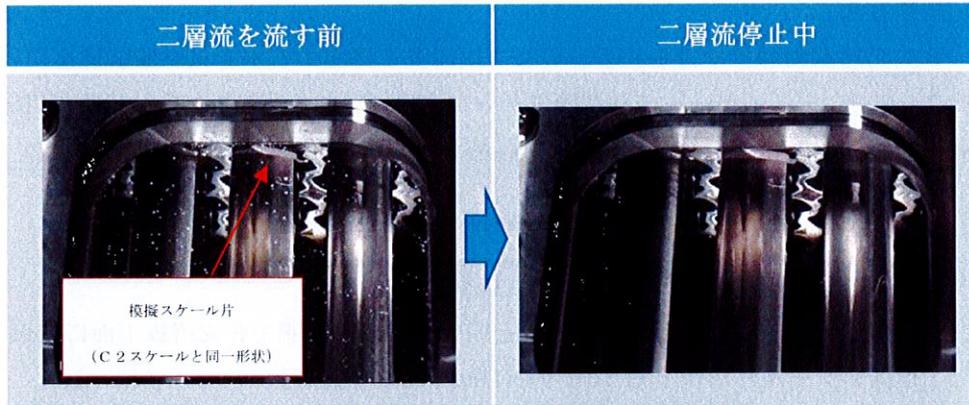
図2 水空気試験装置概要

(2) 試験結果

試験装置内の水－空気二相流中で、模擬スケール片はいずれも管支持板下面で推定した接触状態が維持されたことから、スケール片は凹面・凸面のいずれであっても管支持板下面で保持されうることを確認した（図3参照）。

：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

< C 2スケールと伝熱管 X 5 5, Y 8との接触状態を想定 >



< C 3スケールと伝熱管 X 2 1, Y 8との接触状態を想定 >



< C 4スケールと伝熱管 X 5 5, Y 3との接触状態を想定 >



図3 水空気試験結果

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

以上

スケールと伝熱管の接触時における摩耗形態の推定について

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

1. スケール振動のケース

スケールが振動するには、端部が固定された状態で流体力を受けて振動する必要があるため、本ケースではスケールの端部が拘束された片持ち梁の状態を想定する。この想定に基づき図1の通り計算モデル*1を設定し、ワークレート*2の計算を行った。

*1 片端が固定されたスケール片が流体力により1次モードで振動

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

<Archardの式>

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

V : 摩耗体積

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

W_R : ワークレート (下記参照)

T : 運転時間

<ワークレート計算式>

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

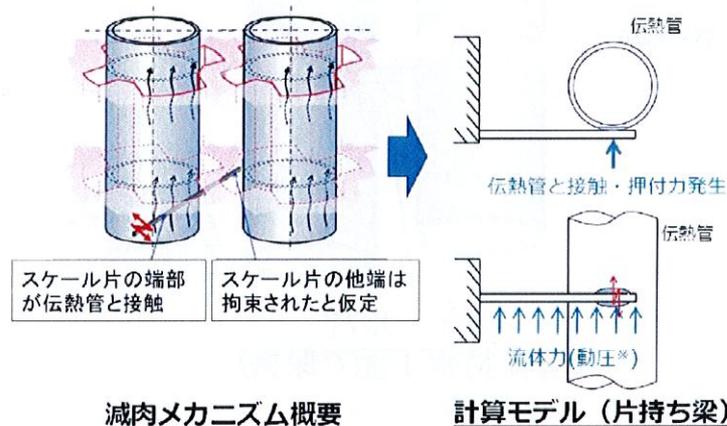
W_R : ワークレート [W]

F : 押付力 [N]

L : 静的振幅 [m]

ζ : 接触物の減衰比 [%]

f : 固有振動数 [Hz]



* 3次元熱流動解析により算出

図1 スケールの接触状態の計算モデル化概要 (スケール振動ケース)

この結果、今回の原因のスケール（A、C2、C3、C4）ではいずれも流体力を受ける面積が小さく、有意なワークレートは発生しないことを確認した。ワークレート計算結果を表1に示す。

表1 スケール振動のワークレート計算結果

スケール	スケール形状 (mm)	押付力 (N)	ワークレート (mW)	実機減肉量再現可能性	備考
A	約15×約9× 約0.2~0.3	1	<0.01	×	実機減肉量を再現するには1mWオーダーのワークレートが必要
C2	約18×約10× 約0.3	1	<0.01	×	実機減肉量を再現するには1mWオーダーのワークレートが必要
C3	約23×約11× 約0.3	1	<0.01	×	実機減肉量を再現するには1mWオーダーのワークレートが必要
C4	約21×約10× 約0.3	1	<0.01	×	実機減肉量を再現するには1mWオーダーのワークレートが必要

2. 伝熱管振動のケース

本ケースでは、スケールが流体力によって管支持板下面で保持され、接触する伝熱管のランダム振動*3により伝熱管自身に減肉が発生したことを想定する。本想定下では、管支持板部の伝熱管の振幅は、伝熱管と管支持板BEC穴ランド部*4の隙間の範囲に制限される（図2参照）。

*3 蒸気と水が伝熱管に衝突する力と、伝熱管の周りに生じる乱流の力で伝熱管が振動する現象

*4 管支持板に加工されている四つ葉型管穴のうち凸面部

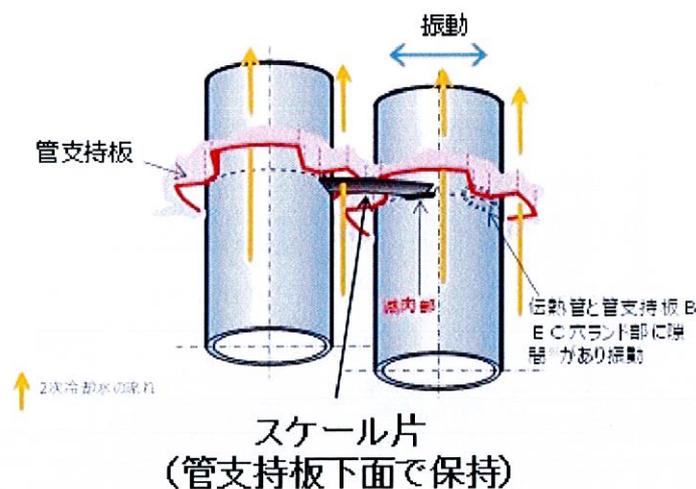


図2 スケール片の接触状態の想定（伝熱管振動ケース）

そこで、本想定の実機との整合性を確認するため、減肉が認められた伝熱管について、第三管支持板のB E C穴ランド部との隙間を目視にて確認した結果、一定の隙間が認められた (図 3 参照)。

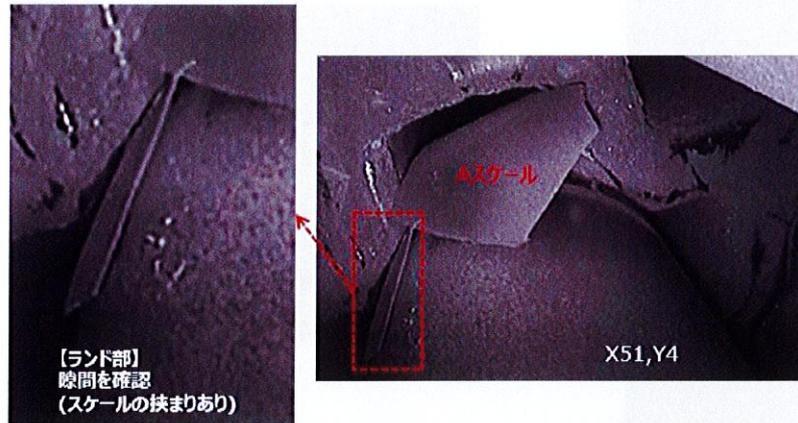


図 3 - 1 伝熱管とランド部の隙間確認結果 (A - S G : X 5 1 , Y 4)

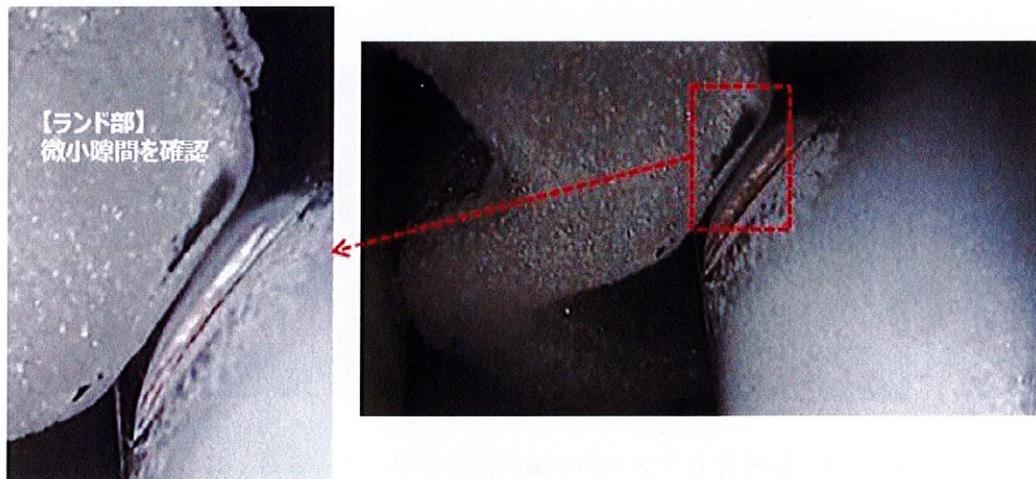


図 3 - 2 伝熱管とランド部の隙間確認結果 (C - S G : X 5 5 , Y 8)

【ランド部】
隙間を確認
(スケールの挟まりあり)

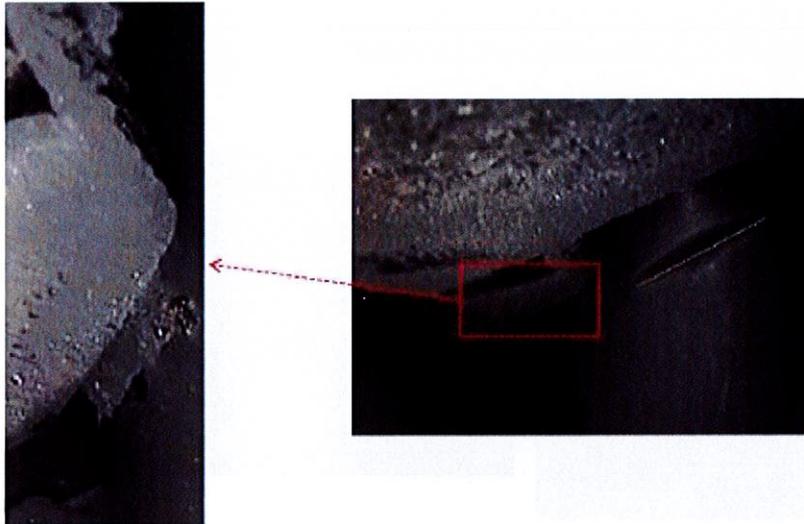


図3-3 伝熱管とランド部の隙間確認結果（C-SG：X21，Y8）

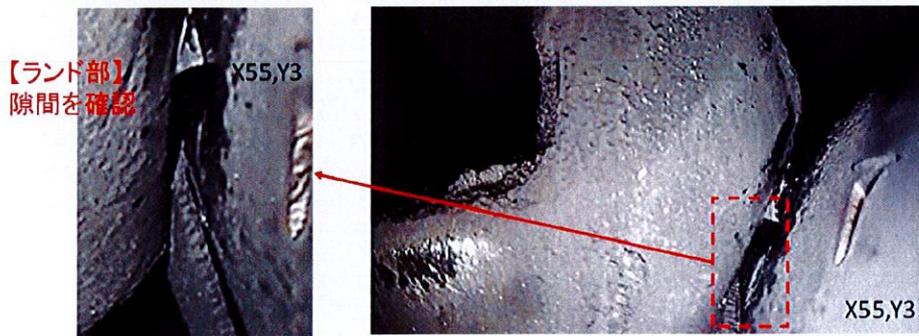


図3-4 伝熱管とランド部の隙間確認結果（C-SG：X55，Y3）

この確認結果より、本想定は実機と整合しているものとし、今回外面減肉が見つかった4本の伝熱管についてワークレートの試算*5を行った（表2参照）。その結果、伝熱管振動の場合はスケール片振動のケースに比べて十分大きなワークレートが得られることを確認した。

表2 伝熱管振動のワークレート試計算結果

評価伝熱管	押付力 (N)	ワークレート (mW)	実機減肉量 再現可能性
A-SG X51, Y4	約 1	約 3	○
C-SG X55, Y8		約 2	
C-SG X21, Y8		約 2	
C-SG X55, Y3		約 3	

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

3. 結論

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

<参考1>

流動振動解析によるワークレートの算出方法について、以下にA-SG (X51, Y4) の場合を例に概要を示す。

参1-1. ワークレート計算の考え方 (図4参照)

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

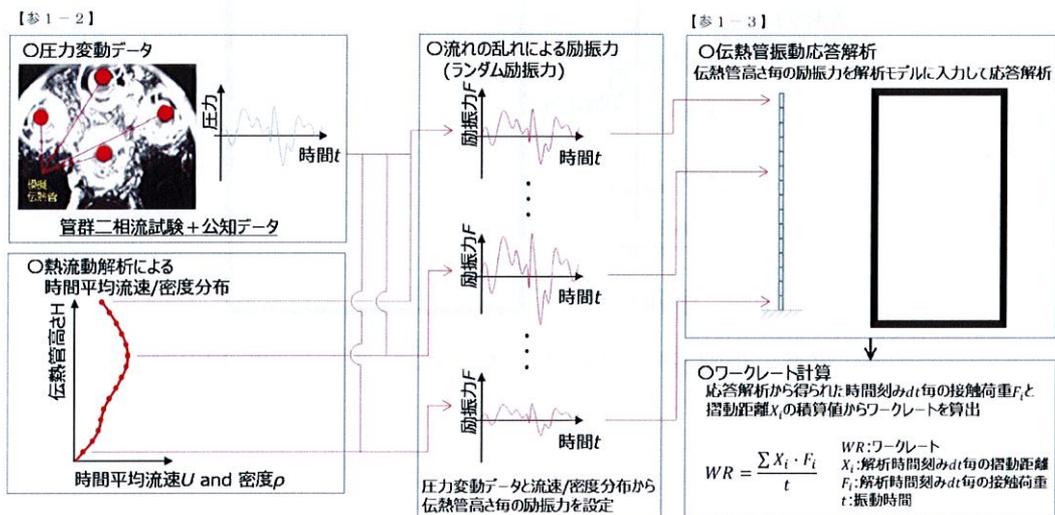


図4 ワークレート算出の流れ (伝熱管振動ケース)

□: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

参1-2. 熱流動解析（図5参照）

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

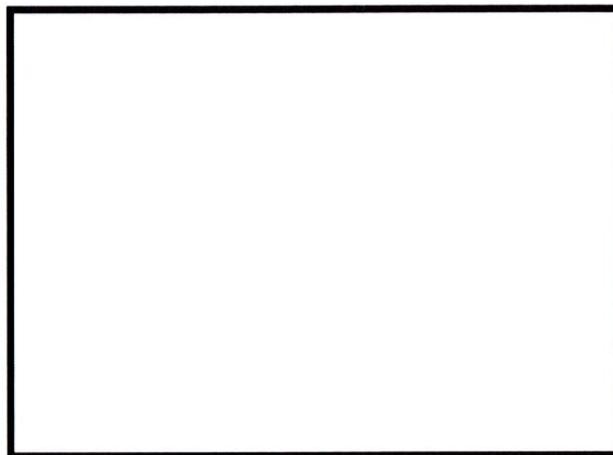


図5 熱流動解析結果（A-SG：X51，Y4）

参1-3. 振動応答解析（図6参照）

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

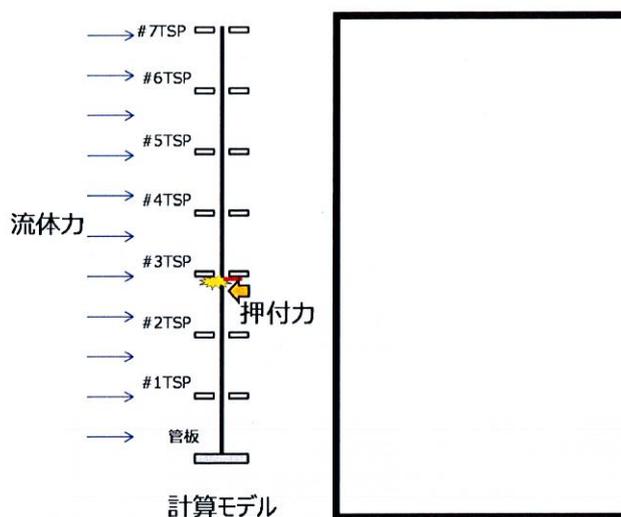


図6 振動応答解析結果（A-SG：X51，Y4）

：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。

スケールによる最大減肉深さに係る考察

<スケールと異物の減肉メカニズムの考察>

○スケールが伝熱管に摩耗減肉を与えるメカニズムは、次の通りであり、異物の場合と同じである。

- ・流体力で振動する伝熱管が、上昇流で管支持板下面に押付けられたスケールに接触すると、接触部で伝熱管は撓動
- ・このとき、スケールが伝熱管との撓動で破損しなければ、撓動は継続し、伝熱管には摩耗減肉が発生
- ・比摩耗量についても、スケールと異物（S U S 3 0 4 で $6.6 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ ）は同等

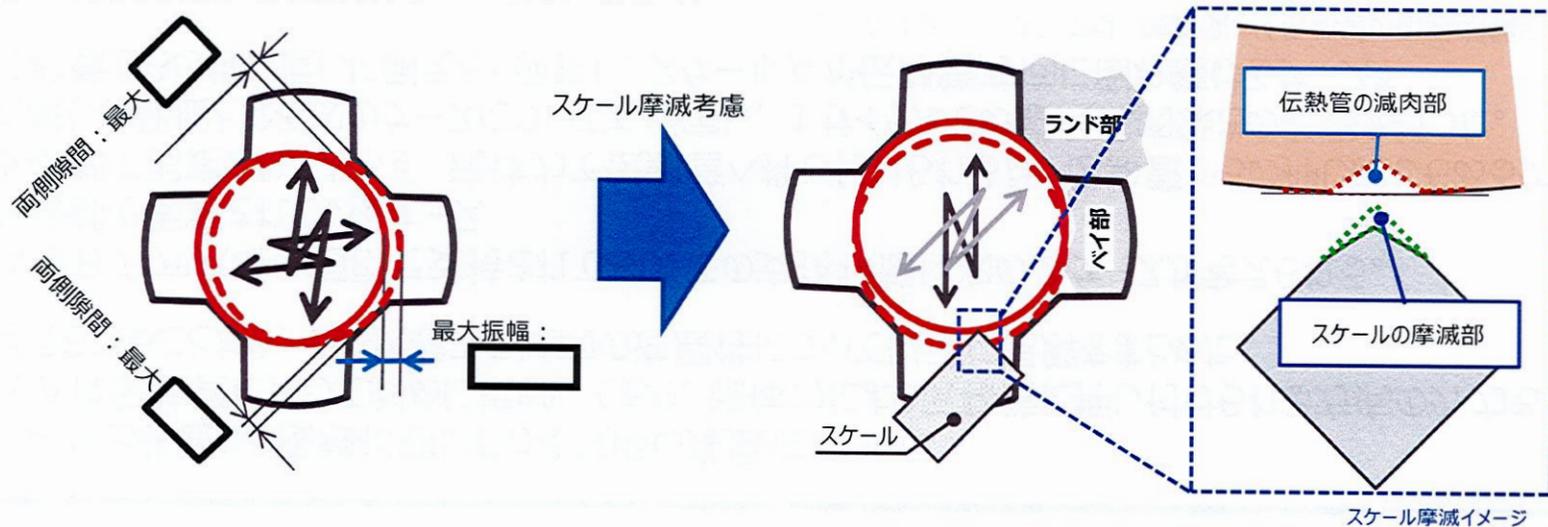
○ただし、同じ比摩耗量、同じワークレートで撓動し続けたとしても、最終的な摩耗減肉量は異物の場合より小さい。

- ・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 \square ※となるが、スケールの場合は自身も摩滅するため、最大減肉深さは異物の場合よりも小さくなり、貫通には至らない。 ※公差内での最大ケース



□：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Aの接触状態における減肉の進展性について (1/3)

○スケールAの伝熱管との接触状態における減肉の進展性について

スケールAは伝熱管に対して斜めに接触しており、流体力により伝熱管に押し付けられる方向の外力も作用していると考えられることから、その状態での減肉の進展性について以下に見解をまとめた。

スケールAはB穴穴の2箇所支持されており、その支持状態は次の2ケースが考えられる。

(1) 支持部で固定されているケース

(2) 支持部で固定されておらず、流体力で伝熱管へ押し付けられるが、伝熱管からの押し戻しもあるケース※

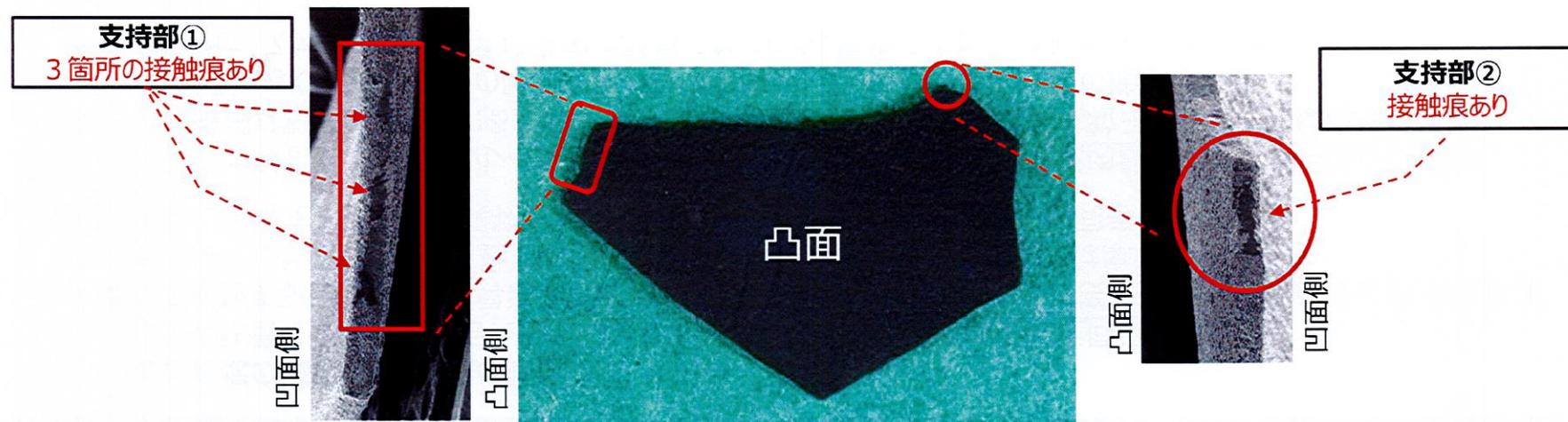
また、最も厳しい評価となる次のケースについても仮定し、1サイクルでの最大減肉深さの考察を行った。

(3) 伝熱管からの押し返しに耐えると仮定し、スケールAが伝熱管方向に倒れ続けるケース※

※：ケース(2)(3)では、減肉深さは伝熱管の振動振幅によらない

(1) 支持部で固定されているケース

スケールAのB E C穴での支持部については、2箇所とも接触痕が認められ、かつ支持部①においては、3箇所の接触痕が認められたことから、実際には計4箇所の支持点で固定されていたことが考えられる。



本ケースでは、スケールは動くことなく固定された状態を想定するため、減肉の進展は、他のスケールC 2～C 4と同様に、伝熱管の振動振幅範囲内に制限される。

スケールAの接触状態における減肉の進展性について (2/3)

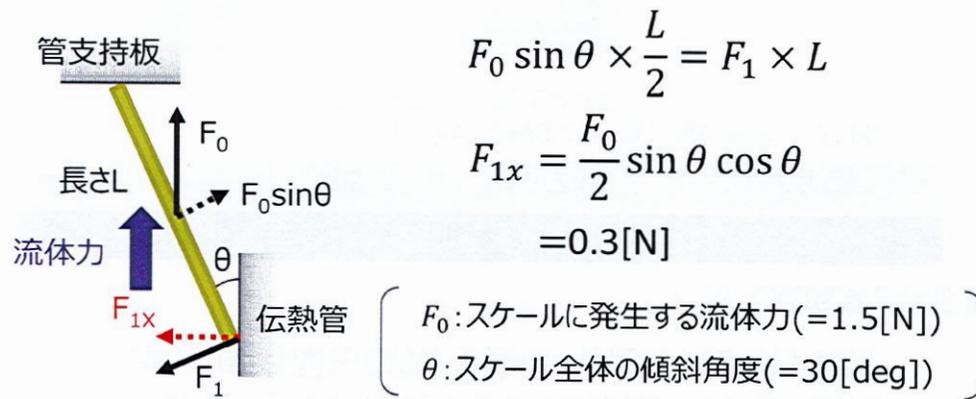
(2) 支持部で固定されておらず、流体力で伝熱管へ押し付けられるが、伝熱管からの押し戻しもあるケース
 本ケースでは、スケールAはB E C穴縁部の2点で支持されるが、固定はされず、流体力に伴う外力または伝熱管からの押付力の作用により、支持部を支点に動く状態が想定される。

この状態ではスケールAは不安定なため、伝熱管からの押付力によりスケールAは押し戻されることとなり、伝熱管とスケールAの間に発生する押付力は、スケールが受ける流体力によるものとなる。

ここでは、流体力に伴う押付力、ワークレートおよび摩耗体積を算出し、ケース(1)との比較を行った。

<流体力に伴う押付力計算結果>

スケールAに発生する流体力と、流体力により伝熱管との間に発生する押付力による回転モーメントが釣り合うとして評価



$$F_0 \sin \theta \times \frac{L}{2} = F_1 \times L$$

$$F_{1x} = \frac{F_0}{2} \sin \theta \cos \theta$$

$$= 0.3 \text{ [N]}$$

F_0 : スケールに発生する流体力 (= 1.5 [N])
 θ : スケール全体の傾斜角度 (= 30 [deg])

<ワークレート・摩耗体積計算結果>

ケース	押付力 [N]	ワークレート [mW]	摩耗体積 [mm ³]
本ケース	約0.3	約1	約0.2 ^{※1}
ケース(1) ^{※2}	約1	約3	約0.5 ^{※3}
【参考】 スケール振動のケース ^{※4}	1	<0.01	—

※1: 今回サイクル (約5,800hr) を想定した評価結果

※2: 添付資料-33より

※3: ECTモックアップ試験で確認した実機相当寸法では約0.3mm³

※4: 本ケース以外でスケール自身が動くケースとして、スケール自身の振動でワークレートを発生させるケースを参考併記 (添付資料-31より)

本ケースでは、ケース(1)に比べて押付力は1/3程度となり、ワークレートおよび摩耗体積も1/3程度となる。

したがって、実機において、いずれのケースであっても、貫通することはない。

スケールAの接触状態における減肉の進展性について (3 / 3)

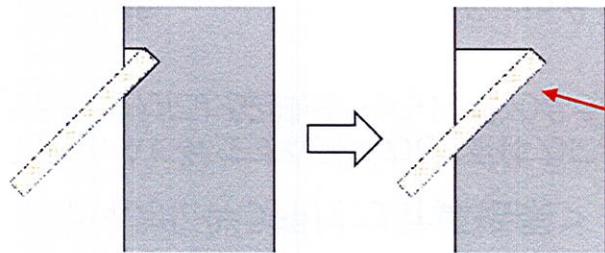
(3) 伝熱管からの押し返しに耐えると仮定し、スケールAが伝熱管方向に倒れ続けるケース

本ケースでは、スケールAの支持条件は無視し、スケールAが伝熱管に倒れ続け、伝熱管との摺動が振動振幅の制限によらず継続するものと仮定した。この仮定における1サイクルでの最大減肉深さを評価するとともに、最大減肉深さにおける強度・耐震評価を行った。

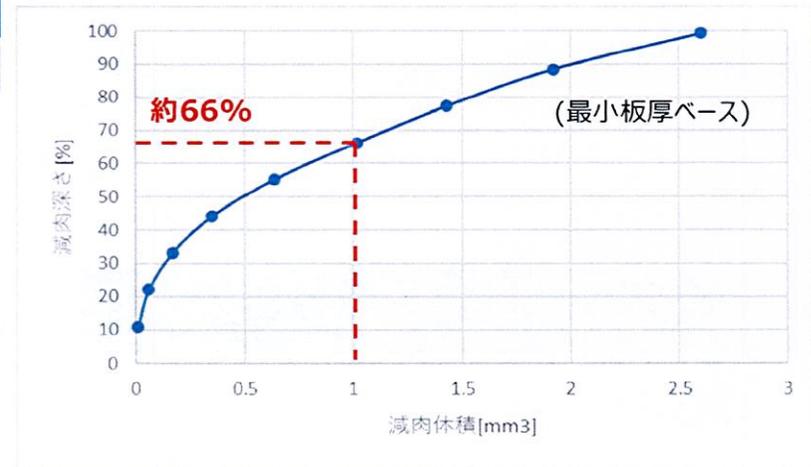
<最大減肉深さ評価結果>

ケース	ワークレート[mW]	運転時間[hr]	摩耗体積[mm ³]
ケース(3)	約3	10,248* ¹	1.0* ²

※1 : 1サイクルで想定される最大運転時間 (427日)
 ※2 : 保守的に切り上げ評価



立てかかった姿勢のため、減肉の進展に伴い、摩耗体積は大きくなるが、深さの進展は緩和



<強度評価結果※>

減肉深さ [%]	破断圧力P _B [MPa]	許容値 [MPa]	裕度
66	27.14		

※評価方法は2 / 5 公開会合資料の通り

<耐震評価結果※>

応力分類	発生応力 および疲労累積係数	許容値	裕度
一次一般膜応力	292 MPa	334 MPa	1.1
膜応力 + 曲想応力	296 MPa	430 MPa	1.4
一次 + 二次応力	221 MPa	492 MPa	2.2
疲労累積係数	0.05	1	-

評価の結果、最大減肉深さは約66%となり、1サイクルでは貫通せず、強度・耐震上も問題ないことを確認した。

減肉試験による実機摩耗減肉形状の確認について

以下の通り減肉試験を行い、添付資料－16、18で推定したスケールの接触状態により伝熱管に生じると考えられる摩耗減肉形状を再現した。

1. 減肉試験の方法

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

- ・円柱形状の石膏で伝熱管を模擬し、スケールを模擬したステンレス片との振動接触により減肉を発生させる。
- ・石膏の減肉形状は試験後の破面観察で確認を行う。
なお、形状把握のため、実機2倍のスケールモデルとする。
- ・ステンレス片の厚みについても、スケールA、C2、C3およびC4の2倍のスケールモデルとし、スケールAについては0.4mm、スケールC2～4は0.6mmと設定する。
- ・円柱とステンレス片の接触角度については、接線方向を接触角度①、軸方向を接触角度②、接線方向の傾きを接触角度③とし、添付資料－16、18で推定した接触状態を基に設定した。

・試験条件一覧を表1-1、試験装置概要を図1-1、図1-2に示す。

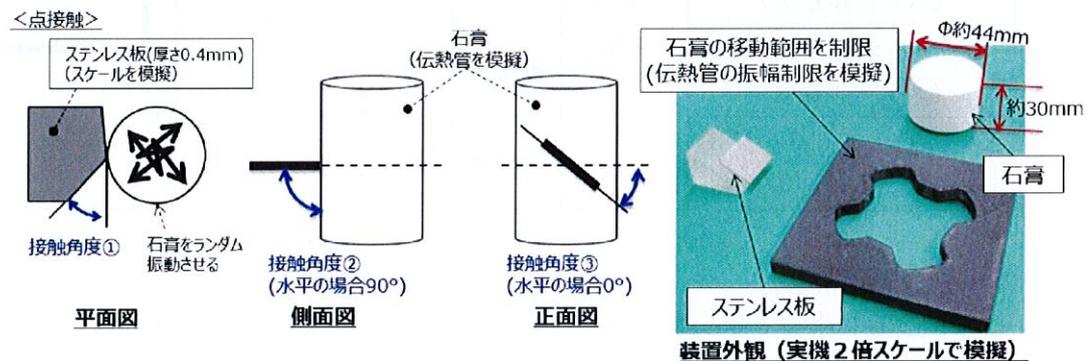


図1-1 試験装置概要図 (スケールAの場合)

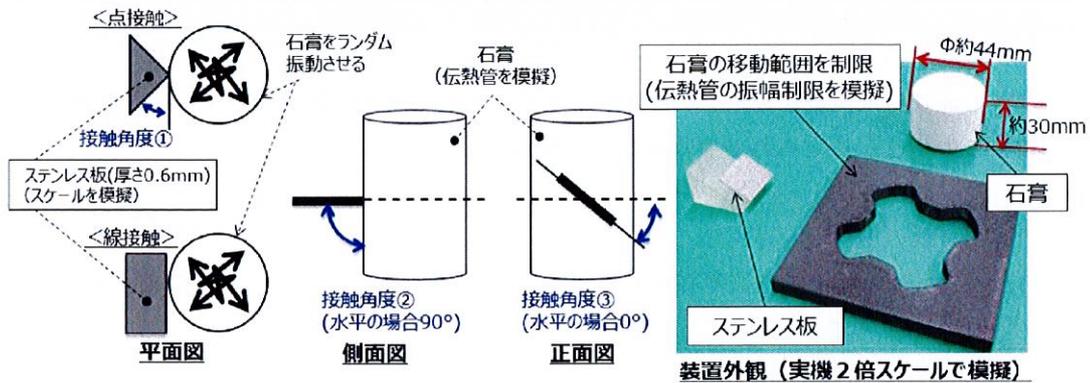


図1-2 試験装置概要図（スケールC 2～4の場合）

表1-1 試験条件一覧

対象伝熱管	振動モード	接触条件	接触角度①	接触角度②	接触角度③	振動振幅 (2倍スケール)
A-SG : X 5 1, Y 4 (スケールA)	伝熱管 振動	点接触	45°	135°	40°	<div style="border: 2px solid black; width: 100px; height: 40px; margin: 0 auto;"></div>
C-SG : X 5 5, Y 8 (スケールC 2)		線接触	0°	90°	0°	
C-SG : X 2 1, Y 8 (スケールC 3)		線接触	0°	90°	0°	
C-SG : X 5 5, Y 3 (スケールC 4)		点接触	0°	90°	0°	

2. 減肉試験の結果

減肉試験によって得られた、A-SG (X 5 1, Y 4) 並びにC-SG (X 5 5, Y 8、X 2 1, Y 8、およびX 5 5, Y 3) の各減肉形状をそれぞれ図1-3、図1-4、および図1-5に示す。

なお、C-SGのX 5 5, Y 8及びX 2 1, Y 8の減肉形状は、ともにスケールが線接触したことに伴う蒲鋒形であることから、図1-4にまとめて示す。また、それぞれ取得した減肉形状の寸法を実機相当に補正し整理した結果を表1-2に示す。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

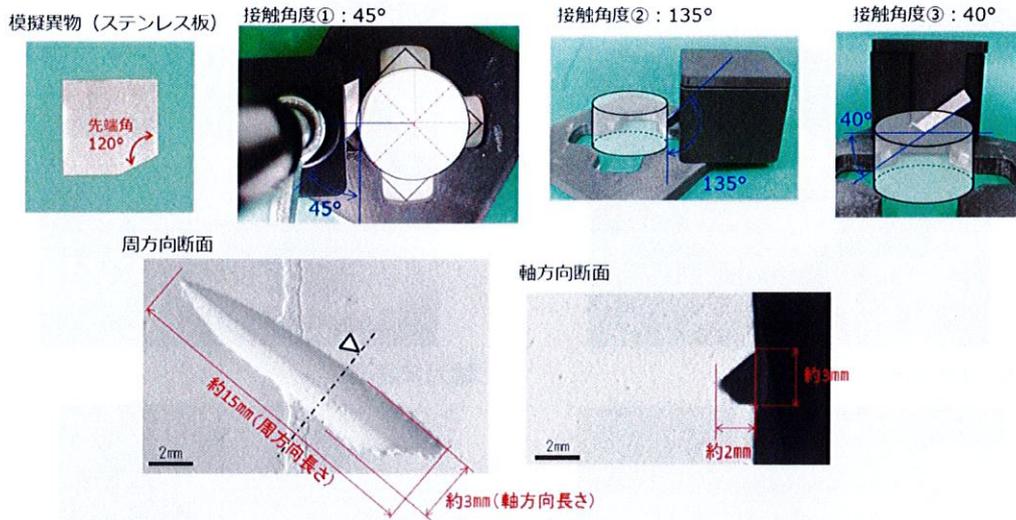


図1-3 減肉試験で取得した減肉形状 (A-SG (X51, Y4))
(スケールA)

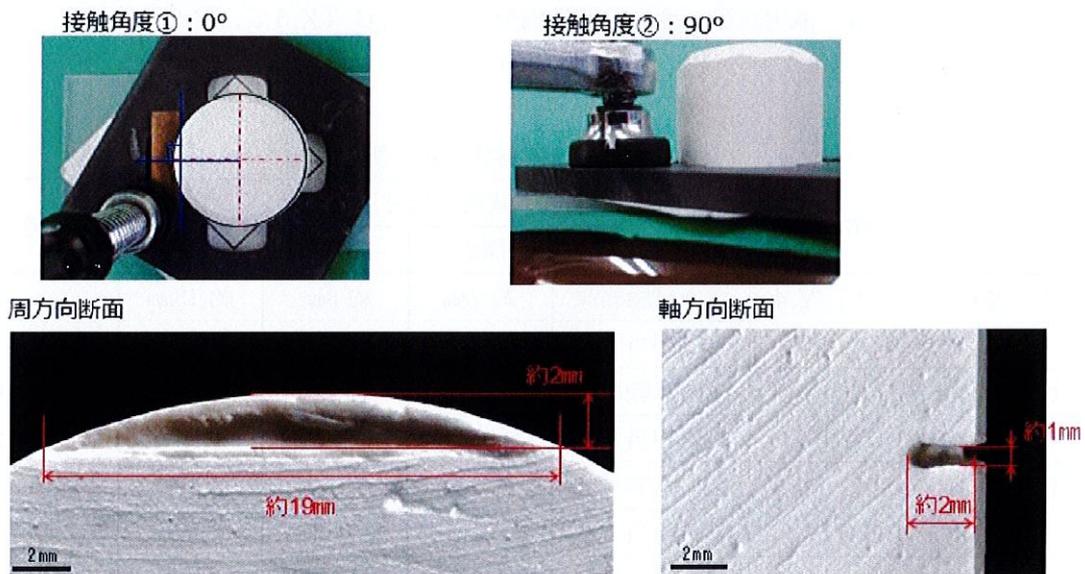
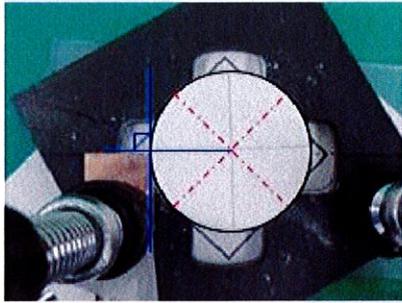
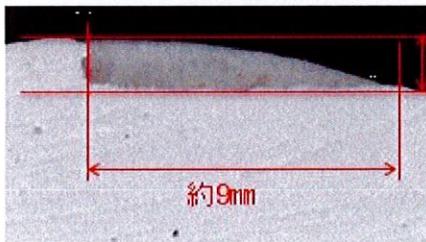


図1-4 減肉試験で取得した減肉形状 (C-SG (X55, Y8, X21, Y8))
(スケールC2、C3)

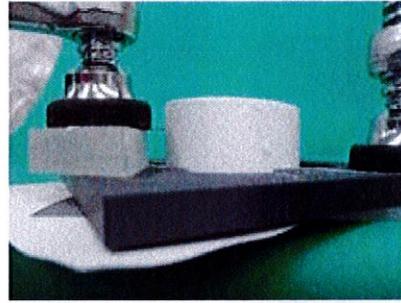
接触角度① : 0°



周方向断面



接触角度② : 90°



軸方向断面

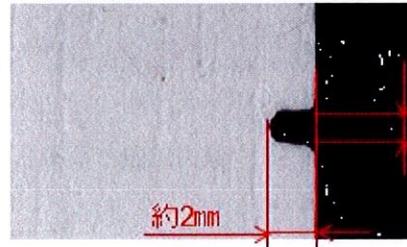


図 1 - 5 減肉試験で取得した減肉形状 (C - S G (X 5 5 , Y 3))
(スケール C 4)

表 1 - 2 減肉形状寸法一覧

対象伝熱管	減肉形状寸法			備考	
	減肉試験結果	深さ	軸方向		周方向
A - S G : X 5 1 , Y 4 (スケール A)	減肉試験結果	約 2mm	約 3mm	約 15mm	実機 E C T 信号の深さを基準に補 正
	実機相当寸法	約 0.4mm	約 0.7mm	約 3mm	
C - S G : X 5 5 , Y 8 (スケール C 2)	減肉試験結果	約 2mm	約 1mm	約 19mm	
	実機相当寸法	約 0.4mm	約 0.3mm	約 6mm	
C - S G : X 2 1 , Y 8 (スケール C 3)	減肉試験結果	約 2mm	約 1mm	約 19mm	
	実機相当寸法	約 0.5mm	約 0.3mm	約 6mm	
C - S G : X 5 5 , Y 3 (スケール C 4)	減肉試験結果	約 2mm	約 1mm	約 9mm	
	実機相当寸法	約 0.3mm	約 0.3mm	約 3mm	

なお、以上の通り再現した実機相当寸法については、E C Tモックアップ試験 (添付資料 - 3 3) により実機 E C T信号との整合性を確認する。

以上

ECTモックアップ試験による実機ECT信号との整合性確認について

減肉試験で再現した減肉形状（実機相当寸法）と同等形状の人工欠陥を与えた伝熱管モックアップ（インコネル600合金製）のECT信号を取得し、実機ECT信号との整合性を確認した。

1. ECTモックアップ試験の条件

ECTモックアップ試験に用いる人工欠陥寸法を表1に示す。

表1 ECTモックアップ試験に用いる人工欠陥寸法

対象伝熱管	人工欠陥寸法			備考
	深さ	軸方向長さ	周方向長さ	
A-SG : X 5 1, Y 4	約 0.4mm	約 0.7mm	約 3mm	減肉試験結果（実機相当寸法）より設定
C-SG : X 5 5, Y 8	約 0.4mm	約 0.3mm	約 6mm	
C-SG : X 2 1, Y 8	約 0.5mm	約 0.3mm	約 6mm	
C-SG : X 5 5, Y 3	約 0.3mm	約 0.3mm	約 3mm	

2. ECTモックアップ試験の結果

1. 項の人工欠陥のECT信号を取得し、実機のECT信号と比較した結果、両者は整合することを確認した。図1～4に試験結果を示す。この結果より、スケールが実機で確認または推定した姿勢で伝熱管と摺動すれば、今回認められた減肉を発生させる可能性があると推定された。ただし、1サイクルで今回の減肉に至った可能性（時間的因子）については、別途流動振動解析を用いた計算により検証する。

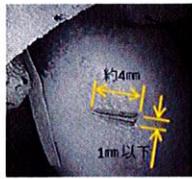
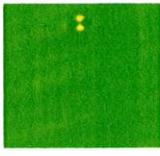
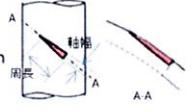
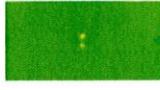
	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性
<p>実機 A X51Y4 周方向長さ(目視): 約4mm </p> <p>ECT減肉指示深さ: 33%</p>	<p>振幅: 0.36 V 位相: 118° </p>	<p></p>	—
<p>モックアップ [33%減肉] 周方向長さ: 約3mm 軸方向長さ: 約0.7mm </p>	<p>振幅: 0.26 V 位相: 105° </p>	<p></p>	○

図1 ECTモックアップ試験結果 (A-SG: X51, Y4)

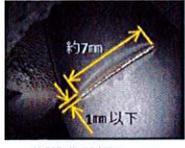
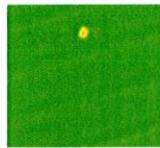
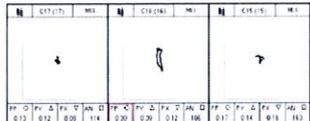
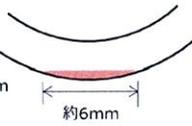
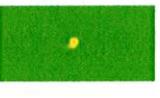
	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性
<p>実機 C X21Y8 周方向長さ(目視): 約7mm </p> <p>ECT減肉指示深さ: 36%</p>	<p>振幅: 0.39 V 位相: 106° </p>	<p></p>	—
<p>モックアップ [31%減肉] 周方向長さ: 約6mm 軸方向長さ: 約0.3mm </p>	<p>振幅: 0.38 V 位相: 101° </p>	<p></p>	○

図2 ECTモックアップ試験結果 (C-SG: X55, Y8)

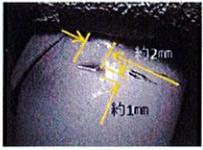
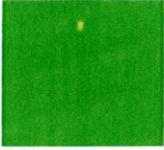
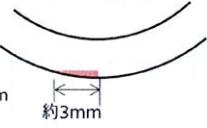
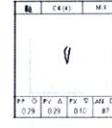
	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性
<p>実機 C X55Y3 周方向長さ(目視): 約2mm</p>  <p>ECT減肉指示深さ: 25%</p>	<p>振幅: 0.29 V 位相: 92°</p> 		—
<p>モックアップ [31%減肉] 周方向長さ: 約3mm 軸方向長さ: 約0.3mm</p> 	<p>振幅: 0.29 V 位相: 87°</p> 		○

図3 ECTモックアップ試験結果 (C-SG: X21, Y8)

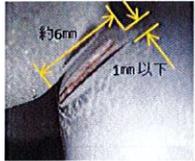
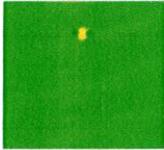
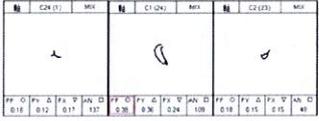
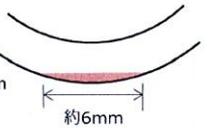
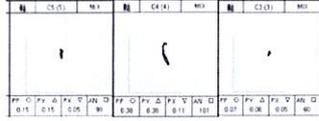
	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性
<p>実機 C X55Y8 周方向長さ(目視): 約6mm</p>  <p>ECT減肉指示深さ: 32%</p>	<p>振幅: 0.38 V 位相: 109°</p> 		—
<p>モックアップ [31%減肉] 周方向長さ: 約6mm 軸方向長さ: 約0.3mm</p> 	<p>振幅: 0.38 V 位相: 101°</p> 		○

図4 ECTモックアップ試験結果 (C-SG: X55, Y3)

以上

ワークレートをを用いた摩耗体積の計算結果について

流動振動解析によりスケールと伝熱管の摩耗のワークレートを算出し、比摩耗量および1サイクルの運転時間を乗じて、スケールとの接触により1サイクルで発生する摩耗体積を計算した。また、ECTモックアップ試験で実機減肉形状と整合することを確認した人工欠陥の摩耗体積との比較評価を行った。その結果を表1に示す。

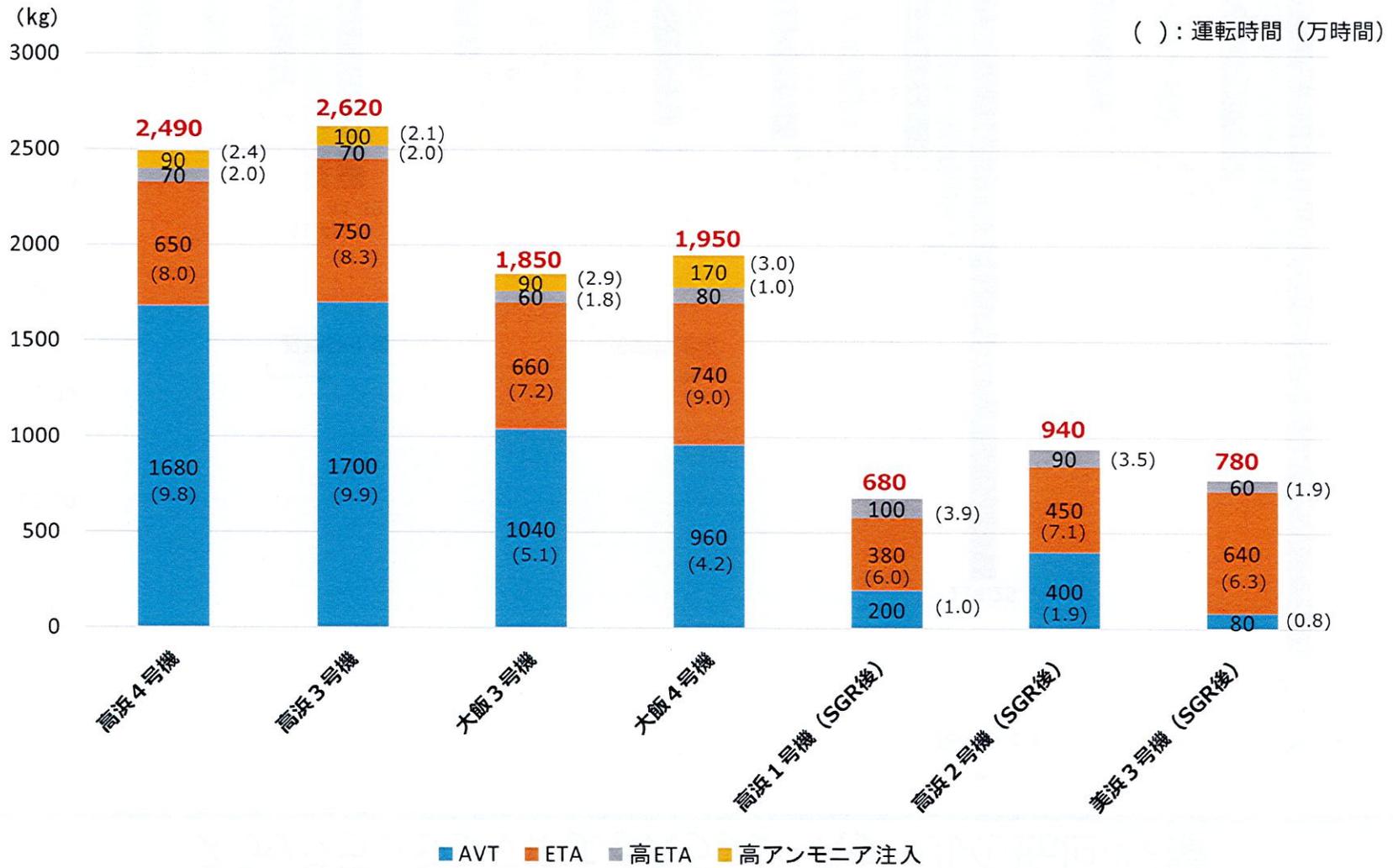
表1 摩耗体積の比較評価結果

対象 伝熱管	評価手法	比摩耗量	ワーク レート	運転時間	摩耗体積
A-SG : X51, Y4	ECTモック アップ試験	—	—	—	約0.3mm ³
	流動振動解析	$1 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$	約3mW	約5,800hr	約0.5mm ³
C-SG : X55, Y8	ECTモック アップ試験	—	—	—	約0.5mm ³
	流動振動解析	$1 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$	約2mW	約5,800hr	約0.5mm ³
C-SG : X21, Y8	ECTモック アップ試験	—	—	—	約0.5mm ³
	流動振動解析	$1 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$	約2mW	約5,800hr	約0.5mm ³
C-SG : X55, Y3	ECTモック アップ試験	—	—	—	約0.2mm ³
	流動振動解析	$1 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$	約3mW	約5,800hr	約0.5mm ³

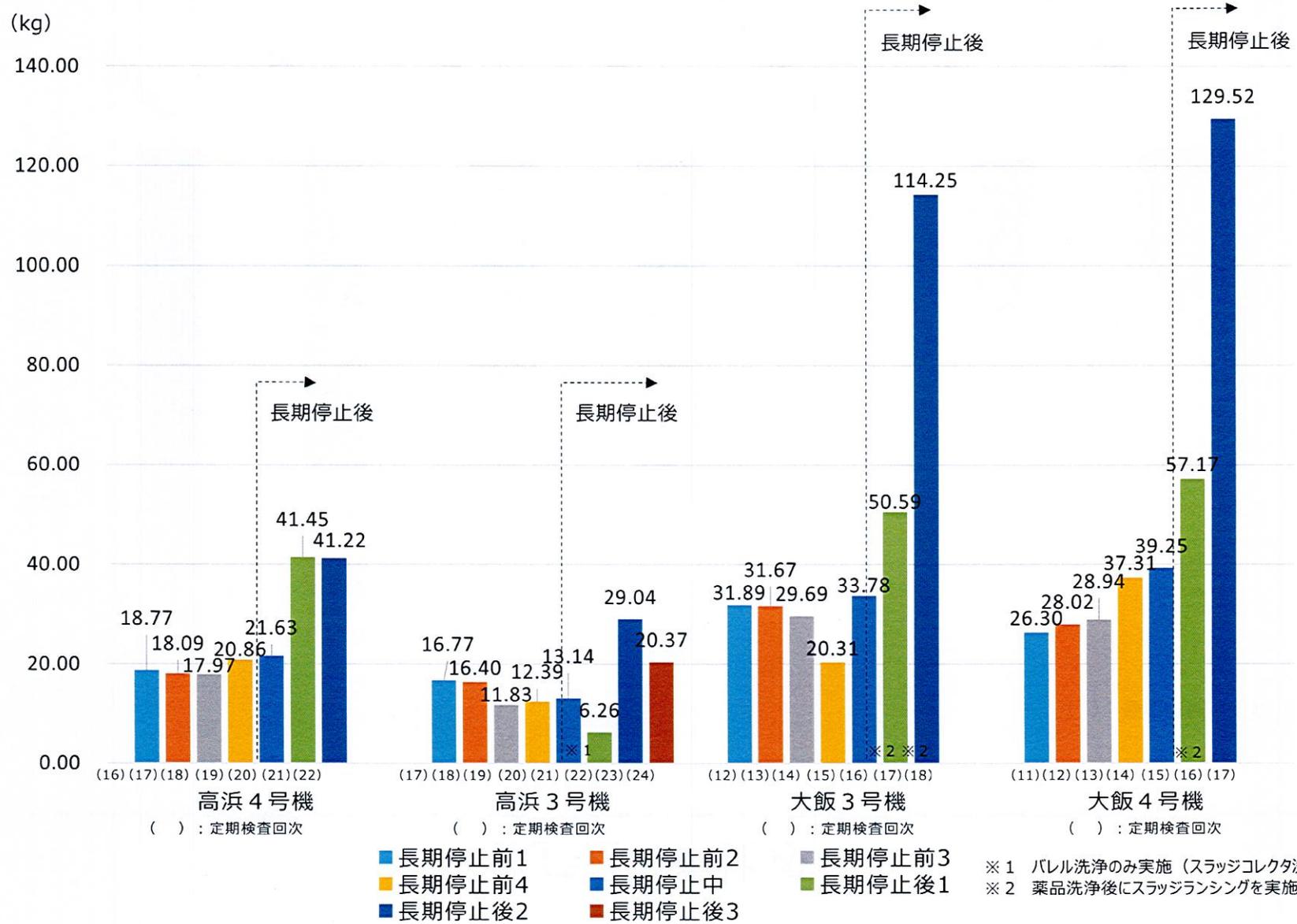
この結果より、ワークレートをを用いて計算した1サイクルで発生する摩耗体積は、ECTモックアップ試験で実機整合性を確認した人工欠陥の摩耗体積とほぼ一致することから、今回認められた減肉痕はスケールとの接触により1サイクルで発生した可能性があることを確認した。

以上

鉄持込み量比較



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



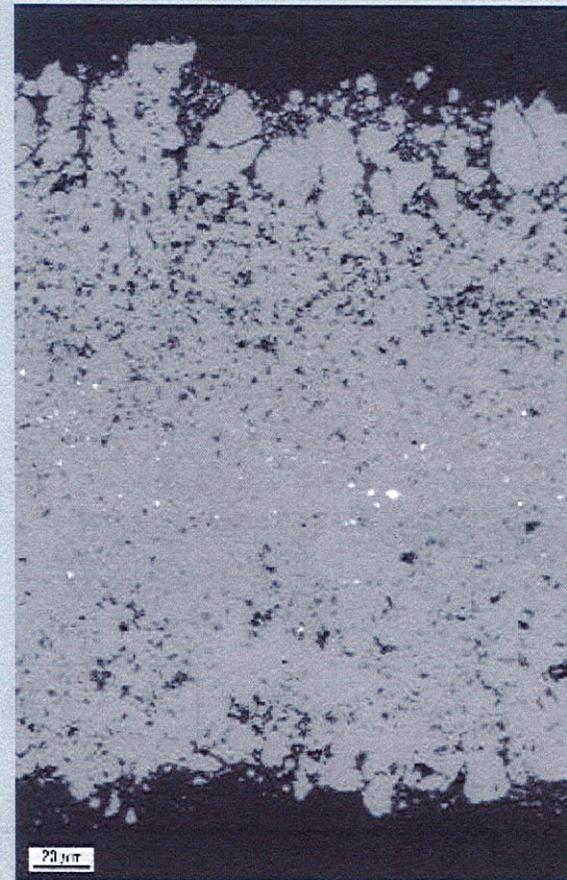
高浜発電所 3号機および 4号機のスケール性状の比較について (1 / 3)

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 3号機 スケールの例



高浜 4号機 スケールの例



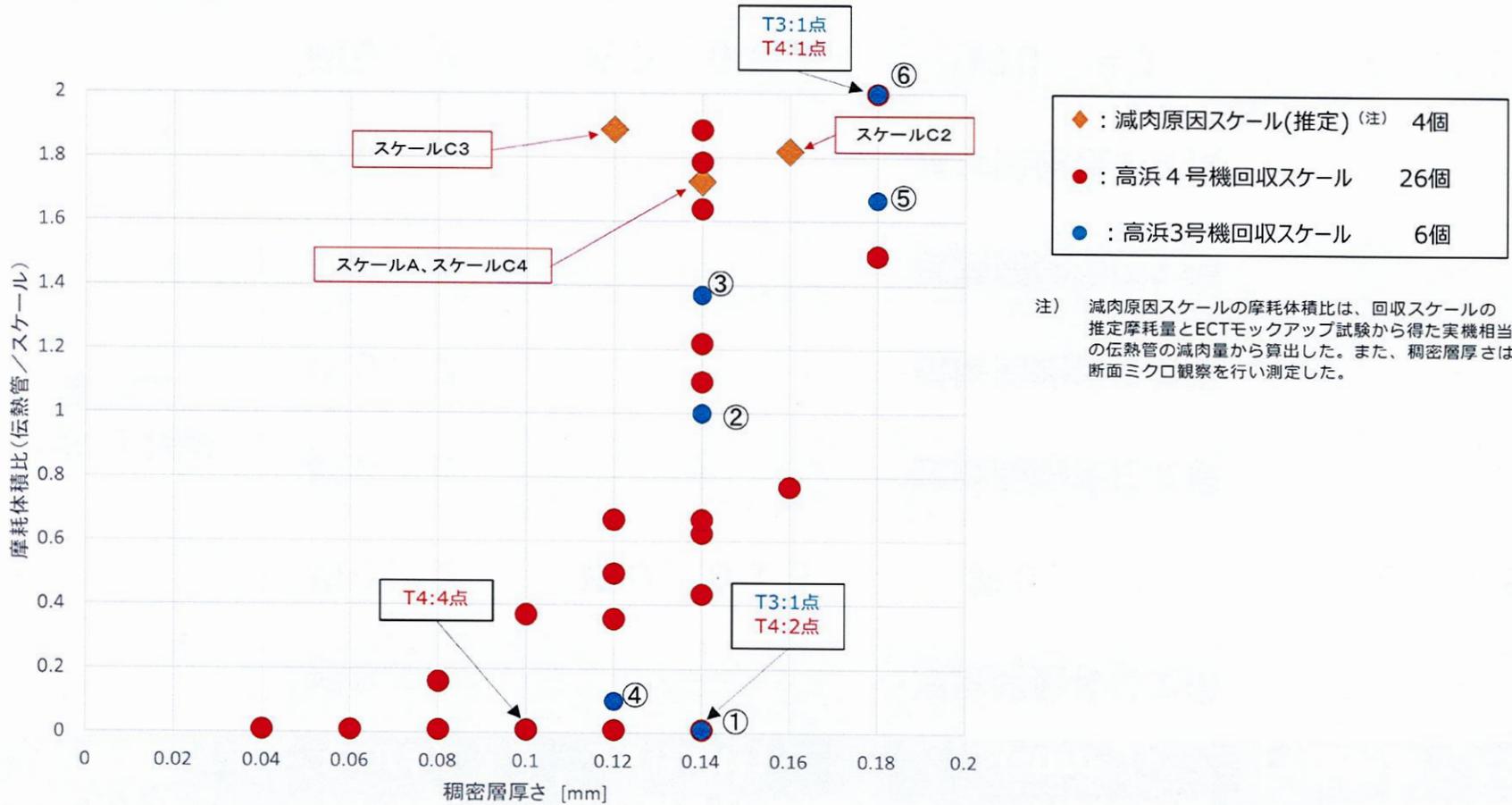
高浜発電所 3号機および 4号機のスケール性状の比較について (2 / 3)

高浜3号機スケール一覧

スケール 番号	回収場所	試験時間 [h]	全板厚 [mm]	最小空隙率 [% , 0.1mm平均]	伝熱管/スケール 摩耗体積比 (逆数) [-]	稠密層厚さ [mm]
①	2B	70	0.3	1.6	0.010	0.14
②	1B	94	0.3	3	1.000	0.14
③	2B	90	0.3	1.5	1.370	0.14
④	1B	29	0.3	3.3	0.100	0.12
⑤	1B	90	0.4	2.1	1.667	0.18
⑥	1B	90	0.3	1.5	2.000	0.18

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 (3 / 3)

○高浜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。
 (稠密層厚さが大きいもの(0.1mm超)における比較)



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

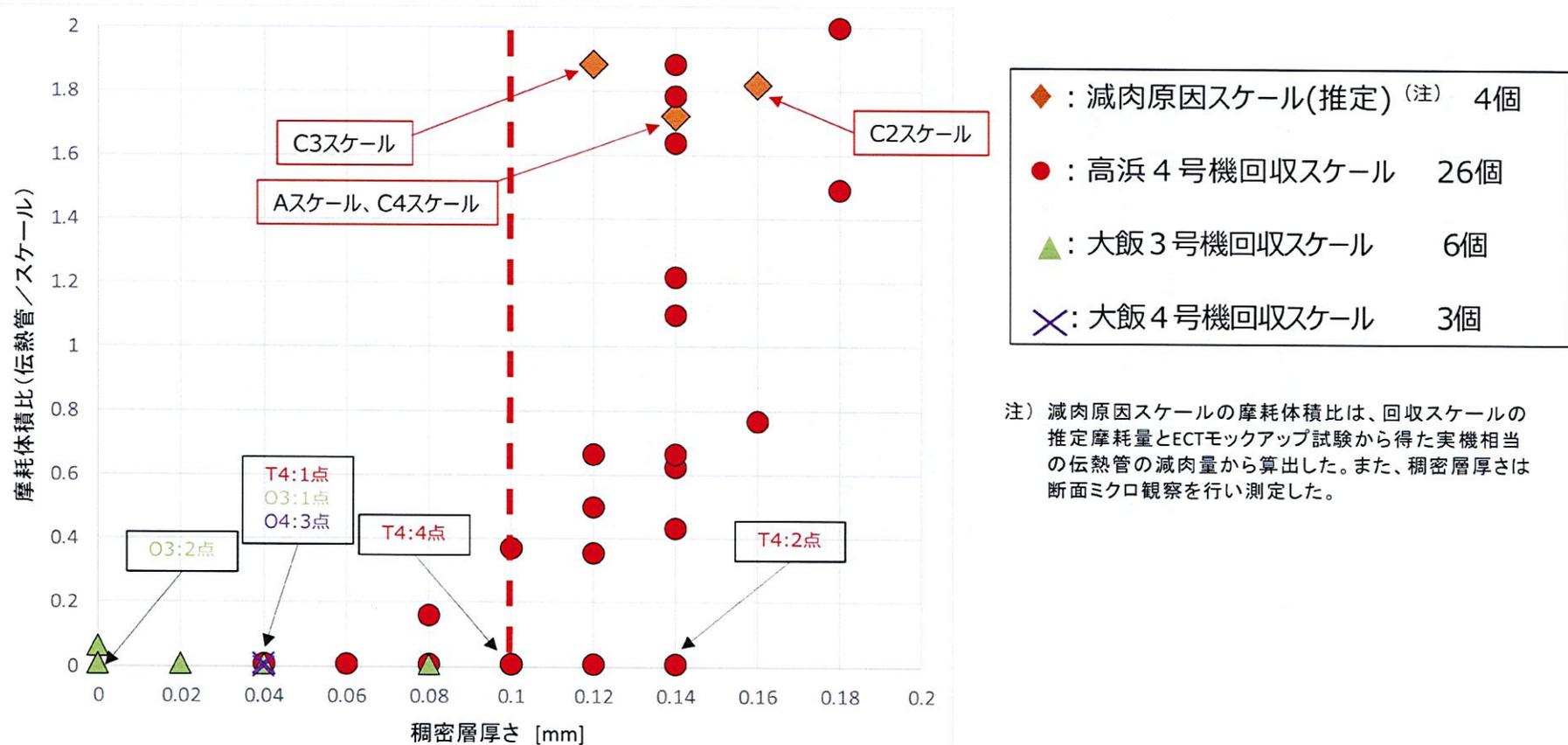
当社他プラントスケール摩耗試験結果

スケール 回収場所	スケール厚さ (mm)	伝熱管摩耗体積 (mm ³)	スケール摩耗体積 (mm ³)	摩耗体積比 (伝熱管：スケール)
大飯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	—

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。

稠密層厚さと摩耗体積比の関係



注) 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ECT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。

海外の蒸気発生器の運転履歴等調査結果

１．調査方法について

（１）運転履歴

海外の蒸気発生器の運転履歴について、米国電力研究所（E P R I）の蒸気発生器管理プログラム（S G M P）専有のデータベース等を用いて調査した。

E P R I S G M P 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 2 6 0 基であるが、この中から、高浜 3，4 号機と同条件と考えられる蒸気発生器を抽出するため、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、S G の設計仕様や運転パラメータが大きく異なるプラントであっても、下記条件に合致していれば対象として抽出を行った。

<抽出条件>

- ・ S G の運転時間が高浜 3，4 号機で伝熱管外面減肉事象が生じた運転時間以上（E F P Y^{※1} 2 3^{※2}以上）^{※3}のプラント
- ・ 薬品洗浄実績が確認されなかったプラント
- ・ 管支持板が平板状構造であるプラント^{※4}

※1：定格負荷相当年数（運転後累積発電電力量（M W h）÷ 8 7 0（M W）÷ 2 4（時／日）÷ 3 6 5（日／年）により算出する）

※2：高浜 3 号機第 2 3 回定期検査（E F P Y 2 4． 0）、高浜 3 号機第 2 4 回定期検査（E F P Y 2 5． 2）、高浜 4 号機第 2 2 回定期検査（E F P Y 2 4． 3）、高浜 4 号機第 2 3 回定期検査（E F P Y 2 5． 0）のうち最小の運転時間（E F P Y 2 4． 0）に対し更に抽出範囲を広げるため、－E F P Y 1． 0 を追加考慮

※3 E P R I S G M P 専有データベースでは、至近定検までの運転時間が登録されている。

※4 エッグクレート型管支持板のような、薄板を格子状に配列した支持板構造を持つ S G 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 E P R I S G M P 専有のデータベースの他、E P R I 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、E P R I 及び E D F への問合せを行った。

２．調査結果について

（１）運転履歴

調査の結果、抽出されたプラントは表 1 の通りであり、全数の約 2 6 0 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取替日	現行SGEFPY
プラントA	1986. 8. 1	—	28. 5 (2019. 9. 14 時点)
プラントB	1972. 12. 14	1982. 4. 1	30. 2 (2020. 3. 30 時点)
プラントC	1973. 9. 1	1983. 5. 1	30. 0 (2020. 10. 3 時点)
プラントD	1986. 4. 11	—	26. 9 (2019. 1. 5 時点)
プラントE	1985. 12. 4	—	25. 3 (2018. 4. 7 時点)
プラントF	1986. 7. 18	—	26. 0 (2019. 1. 10 時点)
プラントG	1978. 6. 1	1993. 4. 1	24. 1 (2019. 9. 8 時点)
プラントH	1990. 6. 7	—	24. 7 (2019. 2. 16 時点)

(2) スケールによる減肉経験の有無

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

※5 EPR I SGMP専有レポート“Foreign Object Handbook RI(3002007858)”より

3. 当社と海外におけるスケールマネジメントの考え方の違い

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

表２ スケールマネジメントにおける当社と海外（米国・仏国）の主な違い

項目	当社	海外 ^{※6}
BEC穴閉塞	<ul style="list-style-type: none"> ・ECT及び目視による閉塞率管理 ・機械式洗浄による閉塞回復 	<ul style="list-style-type: none"> ・ECTや目視、SG二次側水位による閉塞率管理 ・薬品洗浄による閉塞回復
管板直上の腐食環境生成	<ul style="list-style-type: none"> ・スラッジランシング（毎定検） 	<ul style="list-style-type: none"> ・スラッジランシング ・薬品洗浄
伝熱性能低下	<ul style="list-style-type: none"> ・薬品洗浄（ASCA洗浄） 	<ul style="list-style-type: none"> ・薬品洗浄（ASCA洗浄他）

※6 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

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33.81MPa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3, 4号機 蒸気発生器伝熱管の旧振止め金具による局部減肉の特殊設計施設認可申請においても用いられており、下式にて表される。

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

<計算条件>

P_B : 局部減肉を有する伝熱管の破断圧力 (MPa)

σ_f : インコネル600合金の流動応力=343.8MPa (@361.3°C)

t : 板厚 = mm

R : 平均半径 = mm

a : 減肉深さ = mm (= mm × 0.36)

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

$2c$: 減肉幅 = 5mm

表 減肉した伝熱管の強度評価結果

減肉深さ (%) *1	破断圧力 P_B (MPa)	事故時を包絡 する作用内外差圧 (MPa) *2	裕度
36	33.81	<input type="text"/>	<input type="text"/>

*1 最大減肉深さのC-SG (X21, Y8) で代表

*2 設計基準事故時および重大事故等時を包絡する内外差圧

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

２．耐震性

減肉を有する伝熱管の耐震性について、次のとおり評価した。

- ・既工認^{*3}の基準地震動 S_s による地震力および伝熱管全長モデル（施栓管の評価と同様）^{*4}から、伝熱管直管部（管支持板部）に作用する力（部材力）を算出
- ・保守的に一様外面減肉と仮定し、伝熱管の断面積を減じた上で部材力から発生応力および疲労累積係数を算出し、許容値に対する裕度を確認

^{*3} 既工認添付資料 13-17-3-2-2「蒸気発生器内部構造物の耐震計算書」
（原規規発第 1510091 号、平成 27 年 10 月 9 日認可）

^{*4} 高浜 4 号機既工認（新規制基準工認）補足説明資料「高浜発電所 4 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 9 月」

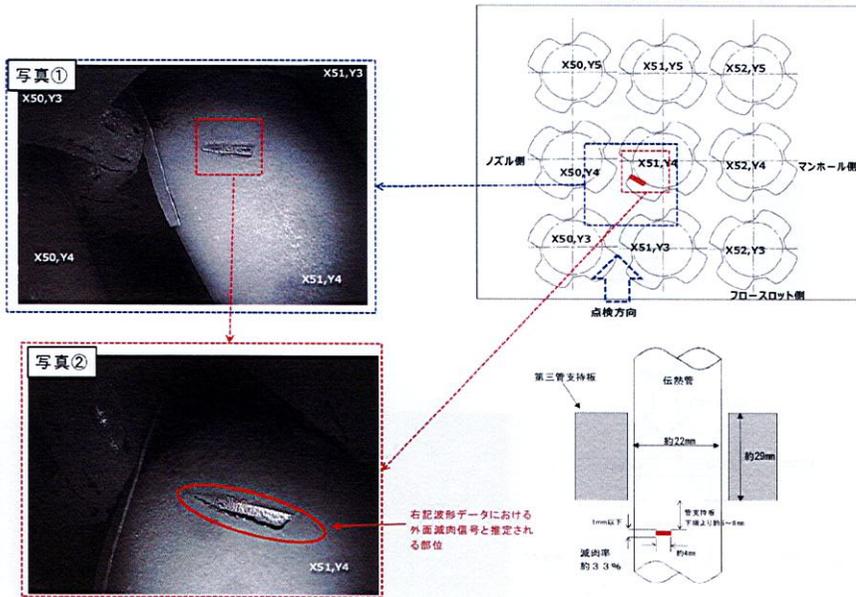
その結果、今回認められた減肉を考慮しても、発生応力および疲労累積係数に十分な裕度があること確認した。

表 減肉した伝熱管の耐震性評価結果

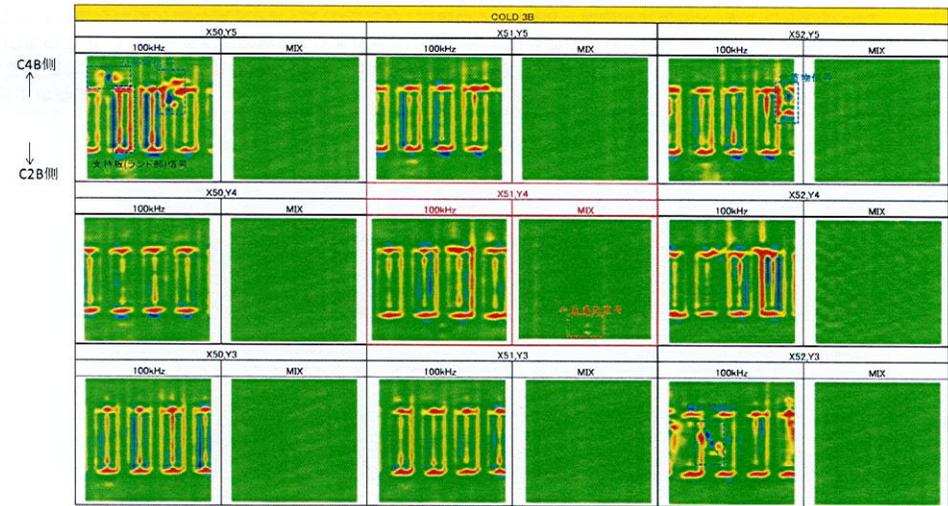
応力分類	発生応力 ^{*5} および疲労累積係数	許容値	裕度
一次一般膜応力	157 MPa	334 MPa	2.1
膜応力＋曲げ応力	158 MPa	437 MPa	2.7
一次＋二次応力	115 MPa	492 MPa	4.2
疲労累積係数	0.003	1	-

^{*5} 最大減肉深さの C-SG (X21, Y8) で代表

隣接伝熱管の健全性 (A-SG Cold側第三支持板下面 伝熱管 X51, Y4)



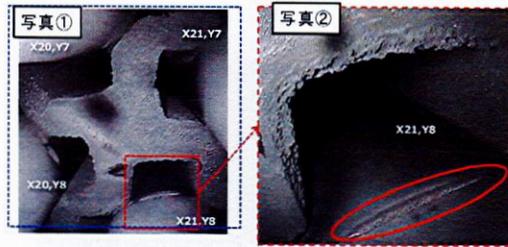
右記波形データにおける
外面減肉信号と推定され
る部位



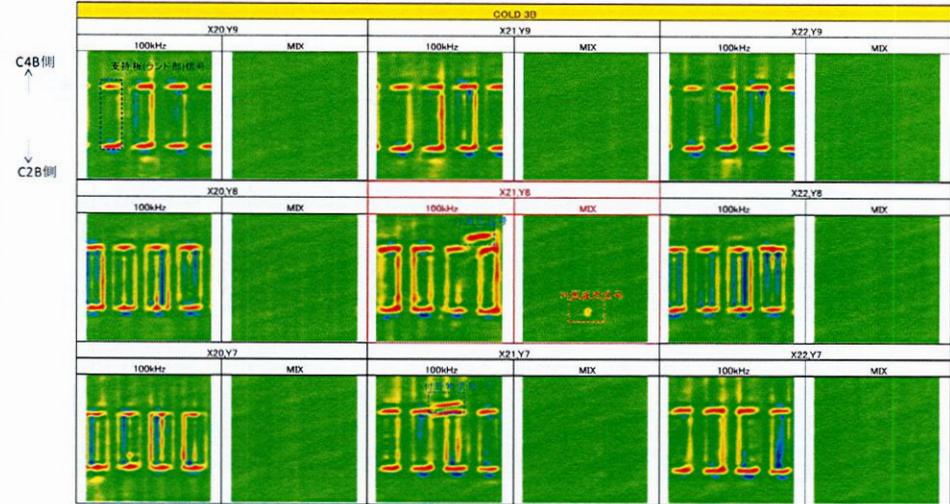
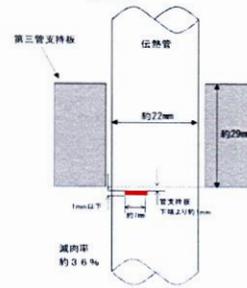
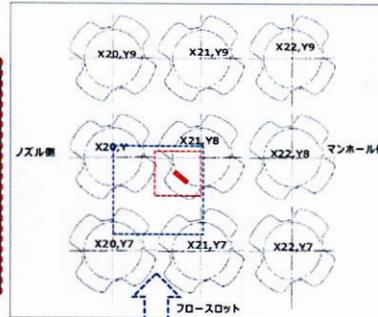
波形上の評価

- ・外面減肉信号は、X51,Y4にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
- ・その他のアドレスでは、付着物信号および支持板(ランド部)信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。
- ・* なお、ECT信号は信号源の実長さより長くなるため、上記のランド部信号範囲は実範囲より広いと考えられる。

隣接伝熱管の健全性 (C-SG Cold側第三支持板下面 伝熱管 X21, Y8)

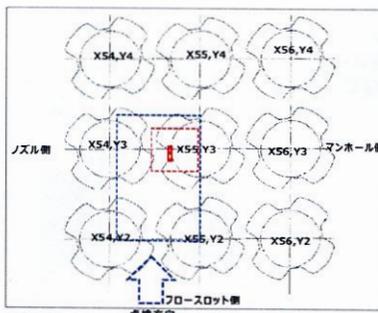
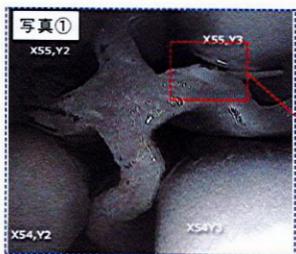


右記波形データにおける外面減肉信号と推定される部位



波形上の評価
 ・外面減肉信号は、X21, Y8にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
 ・その他のアドレスでは、付着物信号および支持板(ランド部)信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。
 * なお、ECT信号は信号源の実長さより長くなるため、上記のランド部信号範囲は実範囲より広いと考えられる。

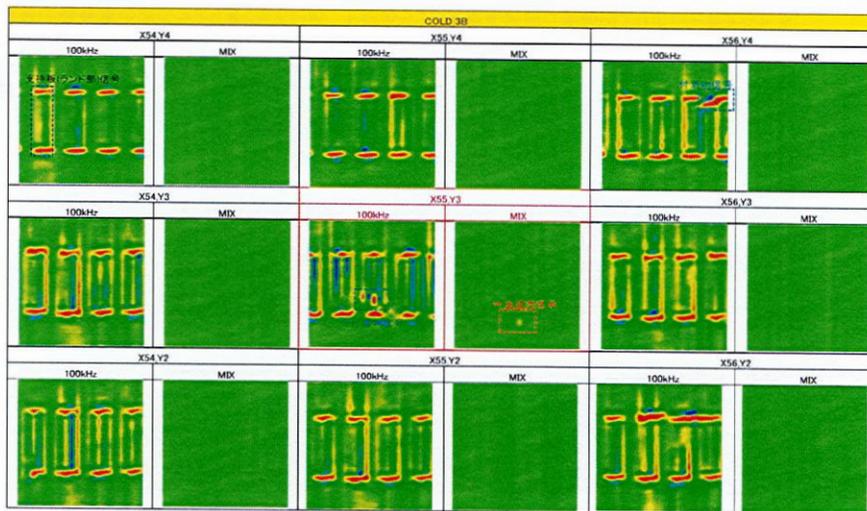
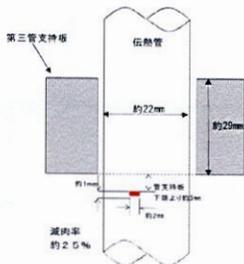
隣接伝熱管の健全性 (C-SG Cold側第三支持板下面 伝熱管 X55, Y3)



写真③(写真②を側面から確認)



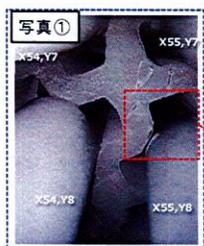
右記波形データにおける外面減肉信号と推定される部位



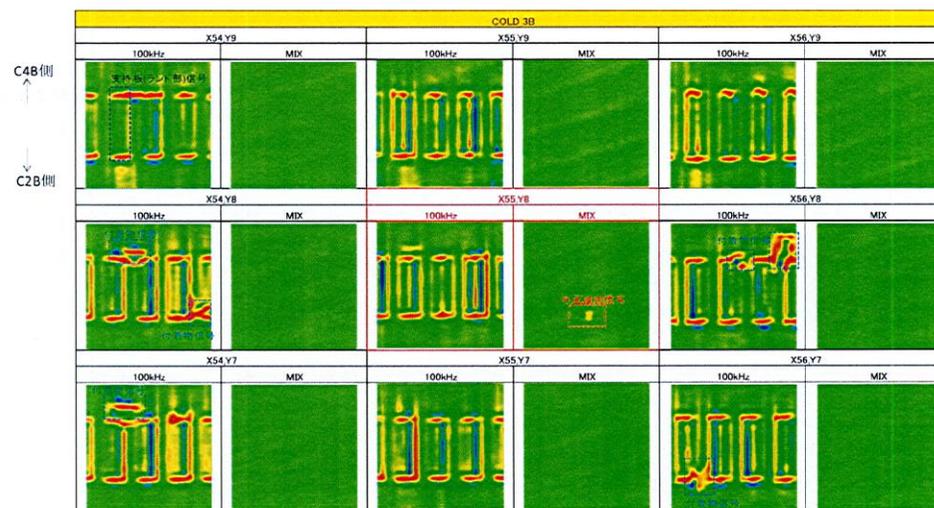
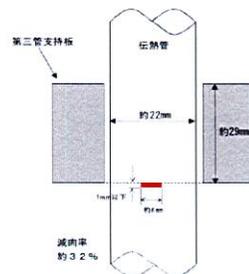
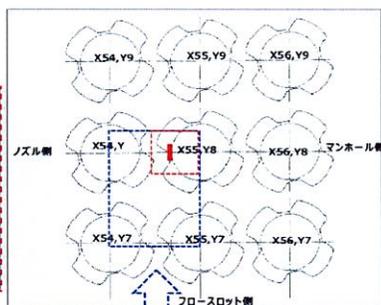
波形上の評価

- ・外面減肉信号は、X55, Y3にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
- ・その他のアドレスでは、付着物信号および支持板(ランド部)信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。
- ・* なお、ECT信号は信号源の実長さより長くなるため、上記のランド部信号範囲は実範囲より広いと考えられる。

隣接伝熱管の健全性 (C-SG Cold側第三支持板下面 伝熱管 X55, Y8)



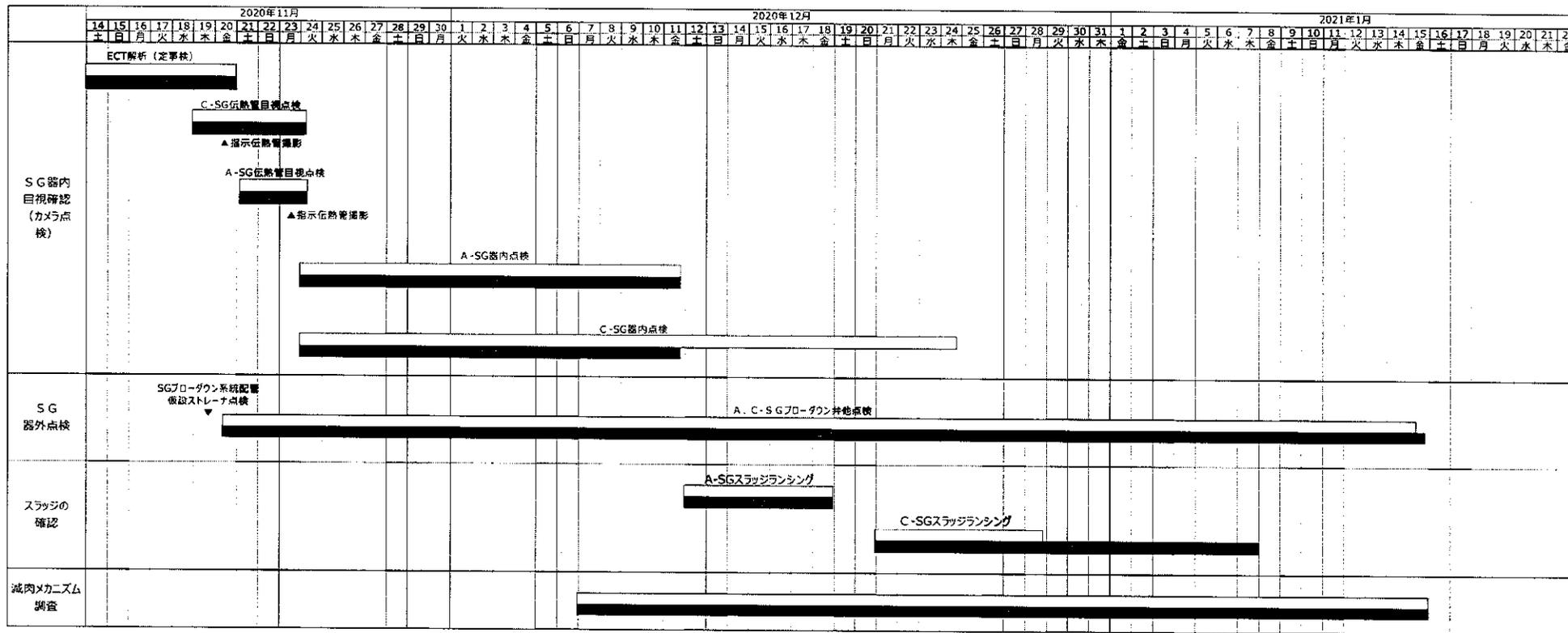
上記波形データにおける外面減肉信号と推定される部位



波形上の評価

- ・外面減肉信号は、X55, Y8にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
- ・その他のアドレスでは、付着物信号および支持板(ランド部)信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。
- * なお、ECT信号は信号源の実長さより長くなるため、上記のランド部信号範囲は実範囲より広いと考えられる。

S G点検スケジュール



□ : 予定 ■ : 実績

薬品洗浄条件について

1. 薬品洗浄の方法について

(1) 薬品洗浄方法の選定

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

表1 主な薬品洗浄方法（各洗浄条件は基本的なケースを示す）

		本格化学洗浄		希薄薬品洗浄	
		KWU 法 (Simens 法)	EPR1 法	ASCA ^{*1}	DMT
鉄洗浄 条件	薬品濃度	40% EDTA ^{*2}	20% EDTA ^{*2}	1% ^{*3} EDTA ^{*2}	1% シュウ酸
	洗浄温度	160～175℃	93～121℃	80℃	60～88℃
	洗浄時間	4～10hr	30～40hr	24hr	4～24hr
洗浄効果		SG器内スケールをほぼ全量除去	同左	スケールの粗密化（脆弱化）	同左
SG器内構造物に対する腐食影響		影響の可能性あり	同左	影響はごく軽微	同左
国内実績 (現行SG)		実績なし	実績なし	多数実績あり	実績なし

※1 Advance Scale Conditioning Agent

※2 エチレンジアミン四酢酸

※3 国内では3%まで実績あり

このうち、本格化学洗浄については、SG器内スケールのほぼ全量が除去可能であり、洗浄効果は非常に高いものの、高濃度薬品によりSG器内構造物への腐食影響の可能性はある。一方、ASCA洗浄に代表される希薄薬品洗浄は、SG器内構造物への影響はほぼ無視できる程度であり、スケールを粗密化（脆弱化）する効果がある。SG器内構造物への影響の観点から、現在は海外においても後者が主流であり、また、このうち国内ではASCA洗浄が十分な適用実績があることから、今回の対策として、ASCA洗浄法を適用することとする。

(2) ASCA洗浄の方法

a. ASCA洗浄の目的及びメカニズム

従来より国内で適用してきたASCA洗浄は、プラント停止時に酸の一種であるEDTAを加え、比較的低温、アルカリ環境下で緩やかにスケール中の鉄と反応させ、ス

ケールを粗密化し表面積を拡大することで、SG伝熱性能の回復を図るものである。

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

(a) 鉄洗浄

- ・スケールを一部溶解させ、粗密化させる目的で実施する。
- ・鉄洗浄によるスケール粗密化のメカニズムは次の通り。
 - ① SG器内を高濃度のヒドラジン水（1,000ppm）で浸漬し、還元性雰囲気を作成する。
 - ② スケール中には空隙が存在することから、高濃度ヒドラジン水はスケール内部まで浸入し、還元性環境下でスケール（マグネタイト： Fe_3O_4 ）中の Fe^{3+} は Fe^{2+} として溶出することで、スケールの粗密化が進む。
 - ③ 溶出した Fe^{2+} はEDTAと結合して安定な化合物（キレート錯体）を作る。

(b) 銅洗浄

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

以上の洗浄条件をまとめると表2の通りとなる。

表2 ASCA洗浄条件一覧

項目	鉄洗浄		銅洗浄	
		備考		備考
EDTA	1~3% (10,000~30,000ppm)	国内実績値	0.4% (大飯3号機実績)	Cu含有量の2倍
その他薬品	・アンモニア ・ヒドラジン (1,000ppm)	pH調整 還元性雰囲気	・アンモニア ・重炭酸アンモニウム	pH調整 EDTA触媒
温度	80℃	—	40~65℃	—
pH	9	アンモニアで調整	10	アンモニアで調整
洗浄雰囲気	還元性雰囲気	N ₂ バブリング	酸化性雰囲気	エアバブリング
洗浄時間	24hr	反応飽和目安	24hr	反応飽和目安

b. ASCA洗浄の工事概要

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

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

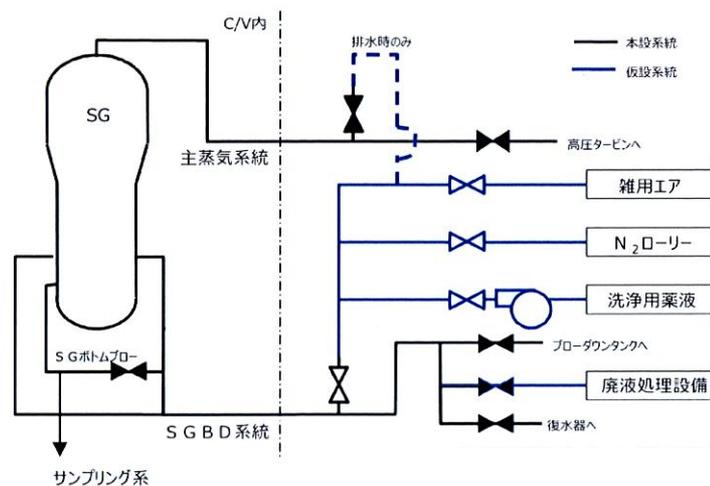


図1 洗浄用仮設系統概略図

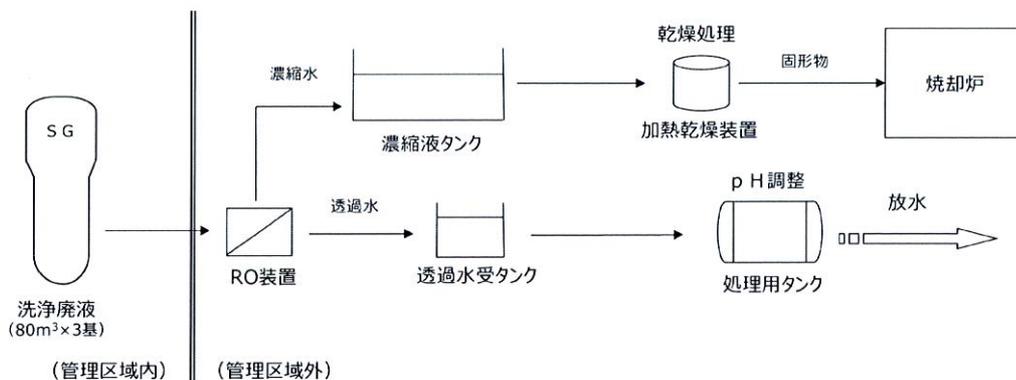


図2 廃液処理装置概略図

2. 洗浄試験について

実機洗浄条件については、実機スケールの薬品（EDTA）浸漬試験により十分なスケール脆弱化効果が確認できた条件を適用することとし、試験の効果は、浸漬試験前後での稠密層（空隙率5%以下）厚さ及び伝熱管との摩擦試験結果の変化により確認した。

(1) 浸漬試験条件の設定

A S C A 洗浄は、スケールの粗密化を目的としてスケールの主成分である鉄を溶解する鉄洗浄と、鉄洗浄後に銅酸化物を除去するための銅洗浄からなる。そのため、スケールの脆弱化に関係する鉄洗浄について、今回の対策として条件を最適化すべく、洗浄効果の主因子である薬品濃度と洗浄温度について検討を行った。

a. 薬品濃度

図3の通り、薬品濃度に比例して鉄の溶解量は増加することから、スケール脆弱化の観点では濃度が高くなるほどよい。一方、図4の通り、薬品濃度に比例してS G 器内構造物の主な構成材料である炭素鋼の腐食量も増加する。

E D T A 濃度 1 0 % 以下では炭素鋼の腐食量は 1 0 0 μ m 未満と十分小さいが、S G 器内構造物への腐食影響を最小限に抑える観点で、薬品濃度については国内実績で最大の 3 % 以下とし、浸漬試験においては、2 % 及び 3 % を適用する。

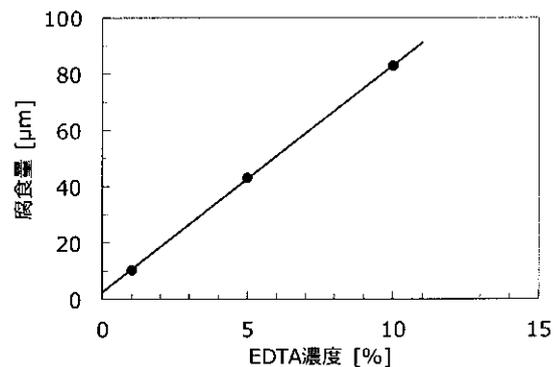
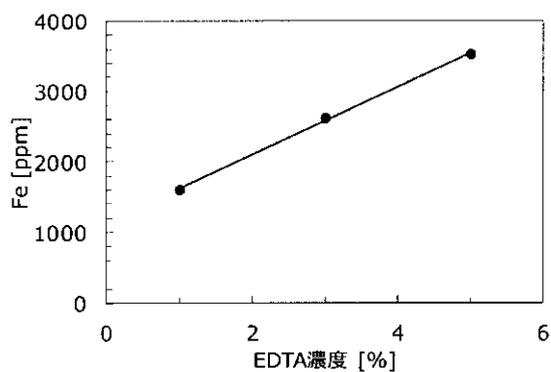


図3 薬品濃度と鉄溶解量の関係 (80°C, 24hr) 図4 薬品濃度と炭素鋼腐食量の関係 (同左)

b. 洗浄温度

温度が高いほどスケール中へのE D T A の浸入及び鉄との反応は進むため、基本となる 8 0 ° C よりも高温側に設定する。ただし、実機適用時を想定し、洗浄中のS G 器内の薬品濃度を均一にすること及び作業安全の観点から、洗浄中のS G 器内圧で沸騰しない 1 0 0 ° C とする (水の蒸気圧約 0. 1 M P a に対し、洗浄中のS G 器内圧は攪拌用窒素の注入・加圧に伴い 0. 1 5 M P a まで上昇)。なお、洗浄温度 1 0 0 ° C によるS G 器内構造物の構成材料である炭素鋼の腐食量については、今回、第三管支持板以下を 2 回洗浄するため、実機実施条件 (E D T A 濃度 2 ~ 3 % で 2 4 時間 / 回) にて試験を行った結果、炭素鋼の腐食量は約 2 7 μ m であり、十分小さいことから、有意な影響がないことを確認した。

(2) 浸漬試験及び摩耗試験の結果

以上を踏まえ、浸漬試験を実施した結果は表3の通りであり、いずれのケースにおいて

も、稠密層厚さは有意な減肉を発生させうる0.1mmを十分下回るとともに、摩耗試験ではいずれも試験中に欠損又は有意に摩滅したため、十分なスケール脆弱化効果が得られたことが確認された。

表3 浸漬試験及び摩耗試験の結果一覧

ケース	薬品濃度・温度※ ¹	試験前後	稠密層厚さ※ ² (mm)	摩耗体積比(伝熱管：スケール)	試験時間(hr)
1	2%・100℃	前	0.14	1：100	約49
		後	0	試験開始直後に欠損	—
2	同上	前	0.12	1：2	約99
		後	0.04	1：27	約35
3	同上	前	0.14	1：0.6	約99
		後	0.06	試験中に欠損	約1
4	3%・100℃	前	0.14	1：0.6	約90
		後	0.02	試験中に欠損	約6

※1 薬品濃度・温度以外の試験条件はこれまでの国内施工実績と同等とし、浸漬時間は24時間、アンモニア及びヒドラジンによるアルカリ環境・還元性雰囲気での試験を実施

※2 空隙率5%以下

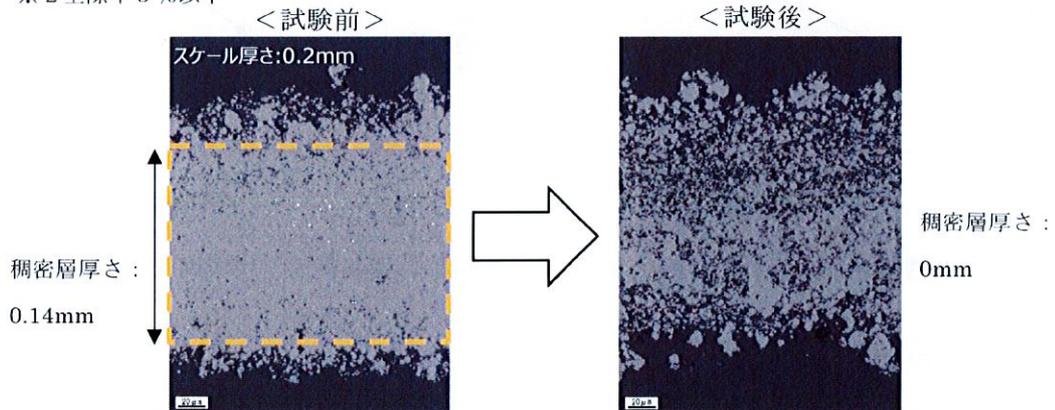


図5 ケース1の断面マイクロ観察による稠密層厚さの比較

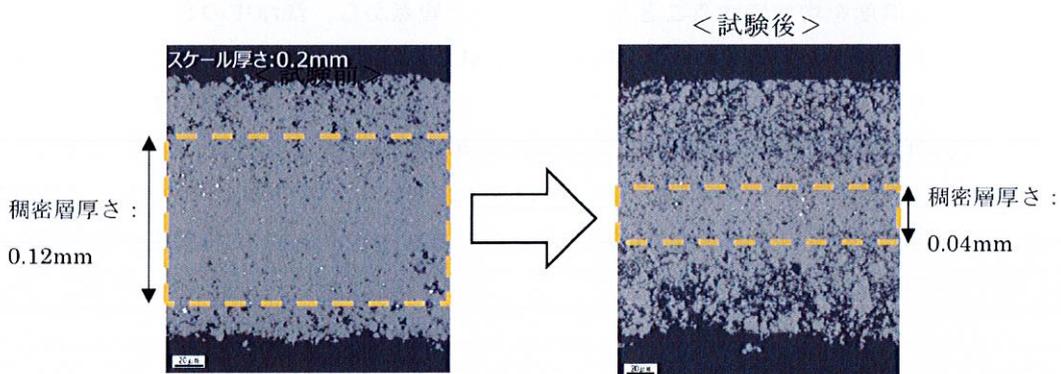


図6 ケース2の断面マイクロ観察による稠密層厚さの比較

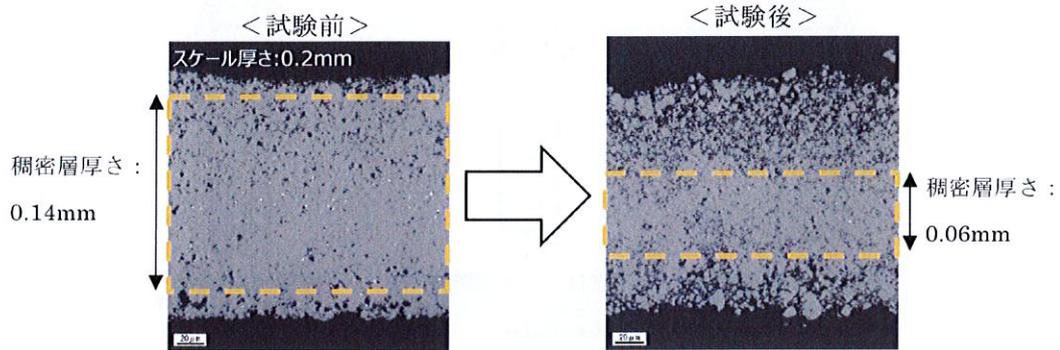


図7 ケース3の断面マイクロ観察による稠密層厚さの比較

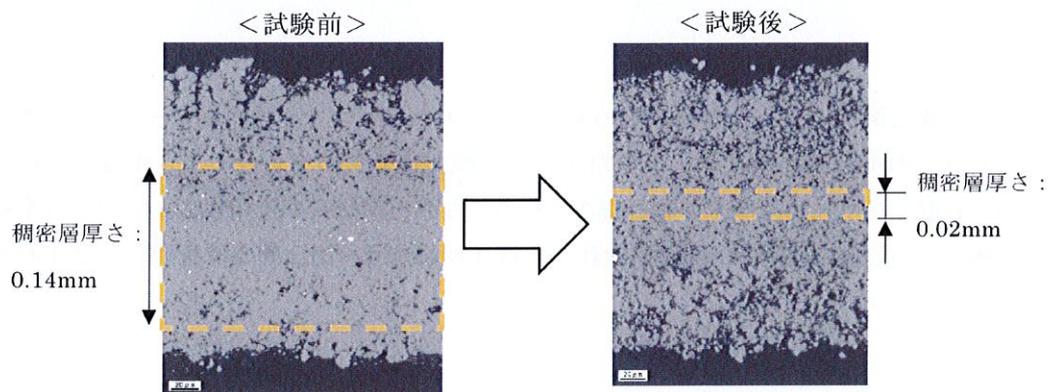


図8 ケース4の断面マイクロ観察による稠密層厚さの比較

3. 実機洗浄条件について

(1) 洗浄条件

以上の結果を踏まえ、実機洗浄条件については、薬品濃度は2%～3%、洗浄温度は100℃とする。なお、その他洗浄に係る諸条件は、これまでの国内施工実績と同様とする。

(2) 洗浄範囲

洗浄範囲については、スケールの生成メカニズムから下部ほど稠密で薄く、上部ほど粗密で厚いことが分かっており、また今回の減肉がいずれも第三管支持板直下で発生しており原因となったスケールは第三管支持板より下方で発生した可能性が高いことを踏まえ、第三管支持板以下が必要な範囲となるが、念のため、第三管支持板よりも上方を含めた管群全体を対象とする。

ただし、今後のプラント運転に更なる万全を期すため、第三管支持板以下については、更に1回追加洗浄を行うこととする。

以上を踏まえ、実施工においては、銅洗浄含め図9の流れで薬品洗浄を行う。

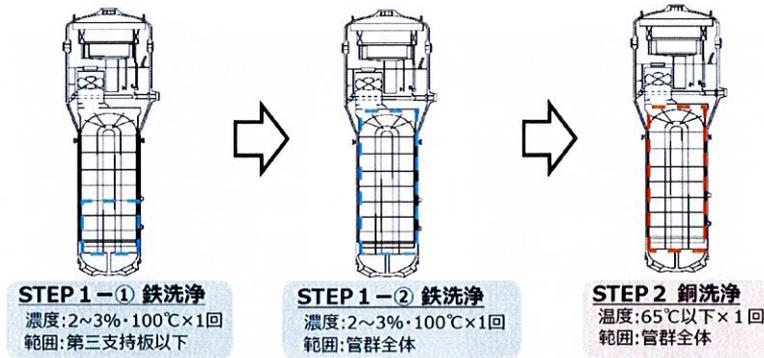


図9 薬品洗浄の流れ

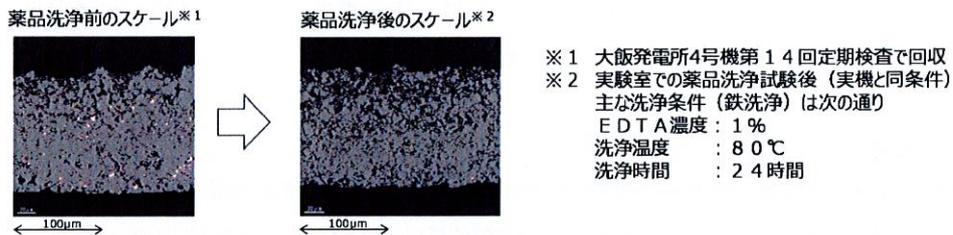
4. まとめ

伝熱管に減肉を与える稠密層の厚いスケールについて、薬品濃度2～3%、洗浄温度100℃の洗浄条件により、十分なスケール脆弱化効果が得られることが確認されたため、対策として、同条件での薬品洗浄を行う。なお、実機への適用においては、万全を期す観点から、念のため、伝熱管群全体の洗浄1回に加え、第三管支持板以下では1回追加洗浄を行う。

以上

<参考>

当社で薬品洗浄の先行実績がある大飯3，4号機のうち、大飯4号機において、薬品洗浄前後のスケール性状を断面マイクロ観察により比較した結果を以下に示す。本観察結果の通り、薬品洗浄によりスケールが粗密化することを確認している。



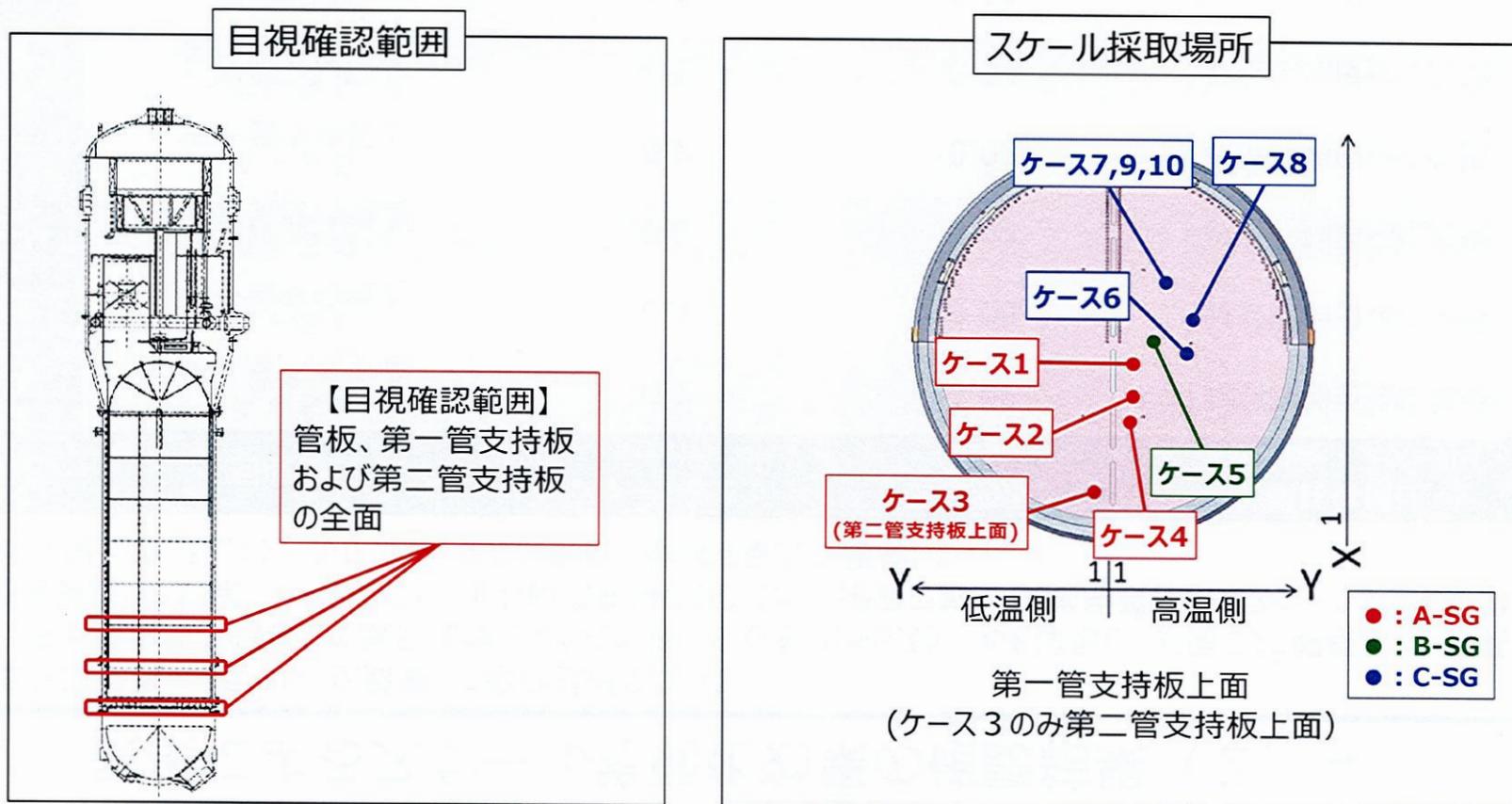
参考図 大飯4号機における薬品洗浄前後のスケール性状比較

実機によるスケール脆弱化効果の確認結果（1 / 4）

○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、薬品洗浄後のスケール脆弱化効果の確認に際しては、稠密層本体のスケールが一番多く堆積していたと考えられるエリア（蒸気発生器（以下、SG）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た。

次に、採取したスケールから0.2～0.3mmのもの、かつ比較的大きいもの（長さ10mm程度）を選定し、稠密層厚さの確認および摩耗試験を実施した。



実機によるスケール脆弱化効果の確認結果（2 / 4）

○薬品洗浄後のスケールと伝熱管との摩耗試験について

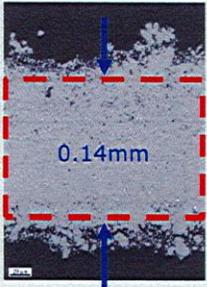
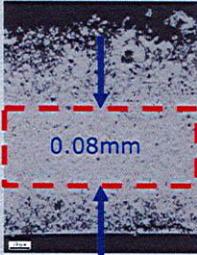
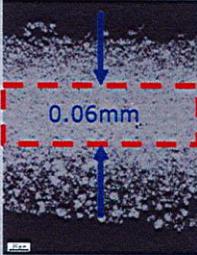
高浜発電所3号機にて薬品洗浄を実施した後、SG器内からスケールを採取し、断面マイクロ観察および摩耗試験を実施した結果、いずれのスケールも稠密層厚さが0.1mm未満であり、試験片製作時にスケールが欠損、摩耗試験開始直後にスケールが欠損、または有意に摩滅することを確認した。

No	回収場所	スケール厚さ※ (mm)	稠密層厚さ (mm)	摩耗体積比 (伝熱管/スケール)
1	A-SG 第一管支持板上	0.2	0.08	試験開始直後に欠損
2	A-SG 第一管支持板上	0.2	0.08	試験開始直後に欠損
3	A-SG 第二管支持板上	0.2	0.04	試験開始直後に欠損
4	A-SG 第一管支持板上	0.2	0.02	試験開始直後に欠損
5	B-SG 第一管支持板上	0.3	0.04	試験開始直後に欠損
6	C-SG 第一管支持板上	0.2	0.06	0.02
7	C-SG 第一管支持板上	0.3	0.06	試験開始直後に欠損
8	C-SG 第一管支持板上	0.2	0.06	試験片製作時に欠損
9	C-SG 第一管支持板上	0.3	0.04	0.01
10	C-SG 第一管支持板上	0.3	0.06	0.01
参考	C-SG 第七管支持板上	0.5	0.00	0.01

※：ノギスにより計測

実機によるスケール脆弱化効果の確認結果（3 / 4）

○薬品洗浄後のスケール稠密層厚さについて（以下に代表例を示す。）

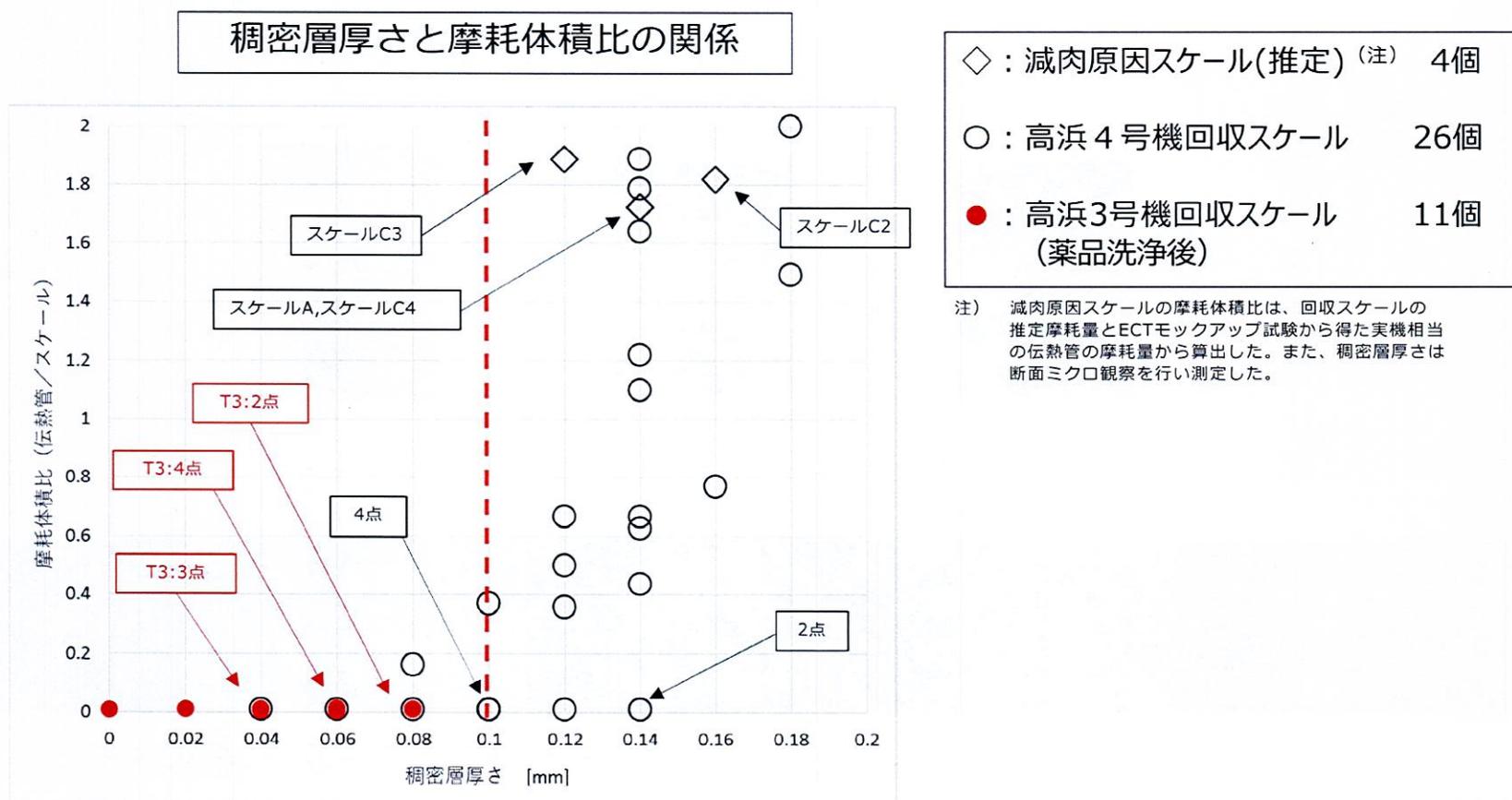
回収場所	<薬品洗浄前> C-SG 回収スケール 第一管支持板上	<薬品洗浄後> A-SG 回収スケール 第一管支持板上 (ケース2)	<薬品洗浄後> C-SG 回収スケール 第一管支持板上 (ケース6)	<薬品洗浄後> C-SG 回収スケール 第七管支持板上 (参考)
断面ミクロ観察結果				
稠密層厚さ (mm)	0.14	0.08	0.06	0.00
スケール厚さ※ (mm)	0.2	0.2	0.2	0.5

※：ノギスにより計測
：稠密層の範囲

実機によるスケール脆弱化効果の確認結果 (4 / 4)

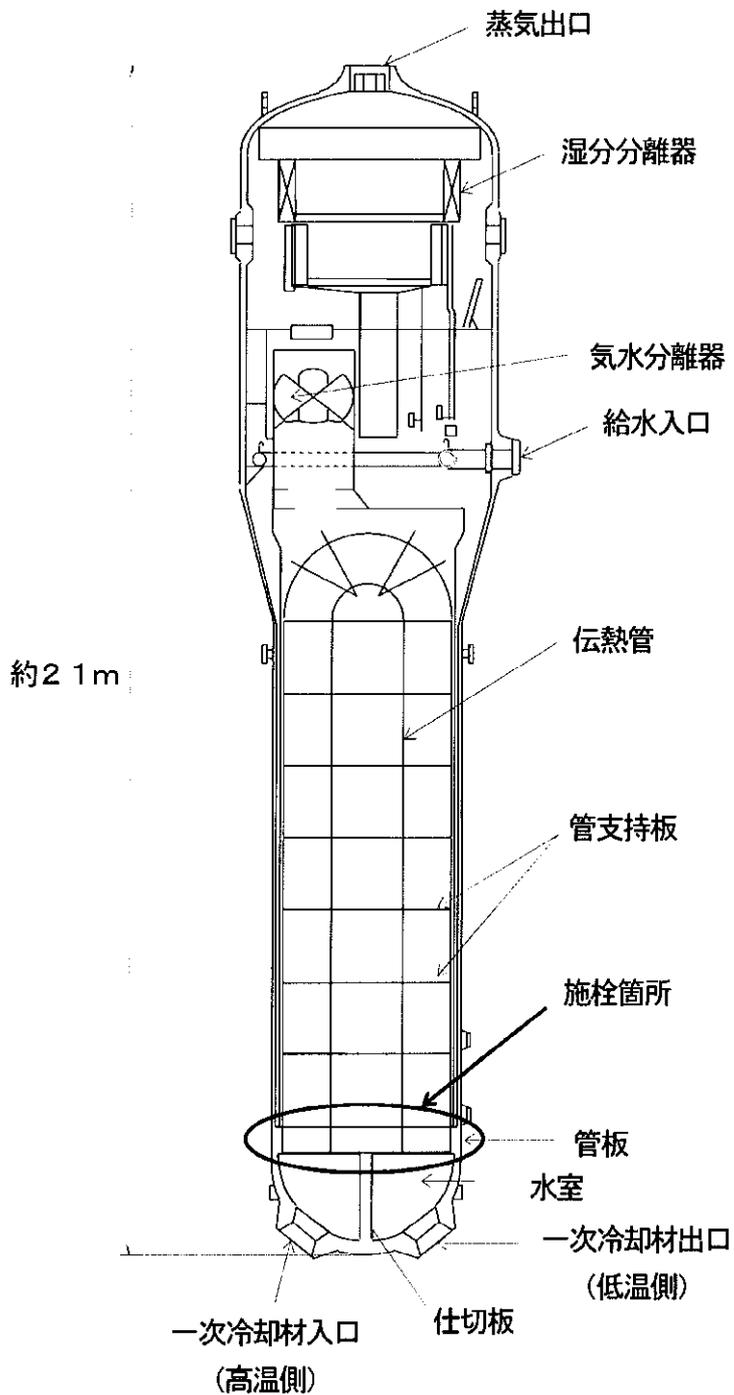
○稠密層厚さと摩耗体積比の関係

薬品洗浄後の高浜発電所 3 号機から採取した実機スケールについて、稠密層厚さと摩耗体積比の関係を整理した結果、稠密層厚さおよび摩耗体積比ともに十分低いことを確認した。



以上から、薬品洗浄は、スケールに起因した伝熱管減肉事象の対策として有効であると考える。

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4号機 SG伝熱管の補修来歴

	A-蒸気発生器 (3,382本)	B-蒸気発生器 (3,382本)	C-蒸気発生器 (3,382本)	合計 (10,146本)	施 栓 理 由 ()内は、実施した対策
第4回定検 (1990.2～5)	7	9	5	21	振止め金具部の摩耗減肉 (振止め金具の取替実施)
第9回定検 (1996.9～11)	10	0	0	10	管支持板洗浄装置の接触痕を確認
第11回定検 (1999.4～7)	0	0	4	4	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第12回定検 (2000.9～11)	4	1	6	11	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第13回定検 (2002.1～3)	1	0	0	1	高温側管板拡管部の応力腐食割れ (ショットピーニング施工)
第14回定検 (2003.4～6)	1	1	0	2	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第15回定検 (2004.8～10)	112	122	105	339	旧振止め金具部の微小な摩耗減肉 (新方式のECT採用)
第18回定検 (2008.8～12)	0	0	1	1	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第19回定検 (2010.2～5)	0	0	1	1	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第20回定検 (2011.7～2017.5)	0	1	1	2	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第21回定検 (2018.5～9)	2	0	0	2	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第22回定検 (2019.9～2020.2)	1	1	3	5	外面からの摩耗減肉
第23回定検 (2020.10～)	1	0	3	4	外面からの摩耗減肉
累積施栓本数 [施栓率]	139 [4.1%]	135 [4.0%]	129 [3.8%]	403 [4.0%]	

○蒸気発生器1基あたりの伝熱管本数:3,382本

○定検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P J「蒸気発生器信頼性実証試験」（（財）発電用熱機関協会、昭和50年度～昭和55年度）では、局部減肉を有する伝熱管の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18.9MPa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, 4号機 蒸気発生器伝熱管の旧振止め金具による局部減肉の特殊設計施設認可申請においても用いられており、下式にて表される。

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

<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600合金の設計降伏点=188.7MPa (@344℃)

t : 板厚 = mm

R : 平均半径 = mm

a : 減肉深さ = mm (= mm × 0.36)

$2c$: 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。

減肉により施栓した伝熱管が隣接伝熱管へ及ぼす影響

表 減肉を有する施栓後の伝熱管の強度評価結果

減肉深さ (%) * ¹	圧壊圧力 Pc (MPa)	事故時を包絡 する作用外圧 (MPa) * ²	裕度
36	18.9	<input type="text"/>	<input type="text"/>

*¹ 最大減肉深さのC-SG (X21, Y8) で代表

*² 設計基準事故時および重大事故等時を包絡する2次側圧力

3. 耐震性

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

(評価内容)

減肉を有する伝熱管の耐震性について、次のとおり評価した。

- ・既工認*³の基準地震動S_sによる地震力および伝熱管全長モデル(右図)*⁴から、伝熱管直管部(管支持板部)に作用する力(部材力)を算出
- ・保守的に一様外面減肉と仮定し、伝熱管の断面積を減じた上で部材力から発生応力および疲労累積係数を算出し、許容値に対する裕度を確認

*³ 既工認添付資料13-17-3-2-2「蒸気発生器内部構造物の耐震計算書」(原規規発第1510091号、平成27年10月9日認可)

*⁴ 高浜発電所4号機既工認(新規制基準工認)補足説明資料「高浜発電所4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9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。

減肉により施栓した伝熱管が隣接伝熱管へ及ぼす影響

表 減肉を有する施栓後の伝熱管の耐震性評価結果

応力分類	発生応力* ⁵ および疲労累積係数	許容値	裕度
一次一般膜応力	115 MPa	334 MPa	2.9
膜応力+曲げ応力	122 MPa	437 MPa	3.5
一次+二次応力	115 MPa	492 MPa	4.2
疲労累積係数	0.003	1	-

*⁵ 最大減肉深さのC-SG (X21, Y8) で代表

4. 減肉した伝熱管の破断を想定した場合の影響

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

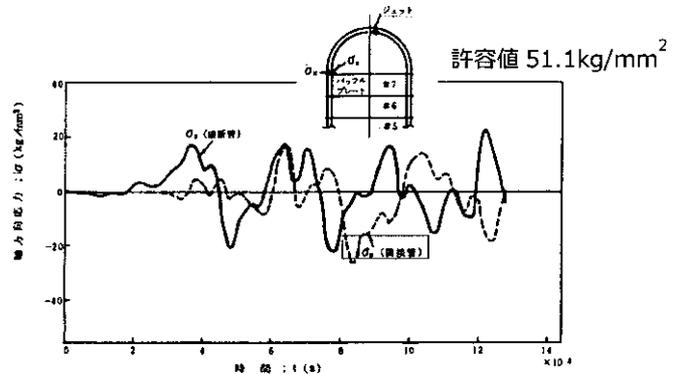
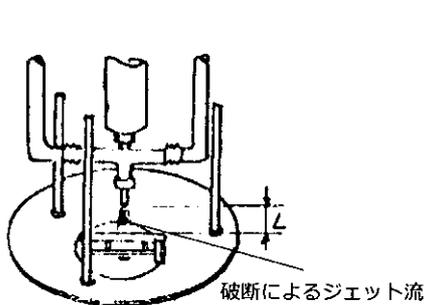
「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」の検討において、伝熱管1本が破断しても隣接管へ有意な影響を与えないことが確認されている。

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

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

実験：破断時のジェット反力を取得

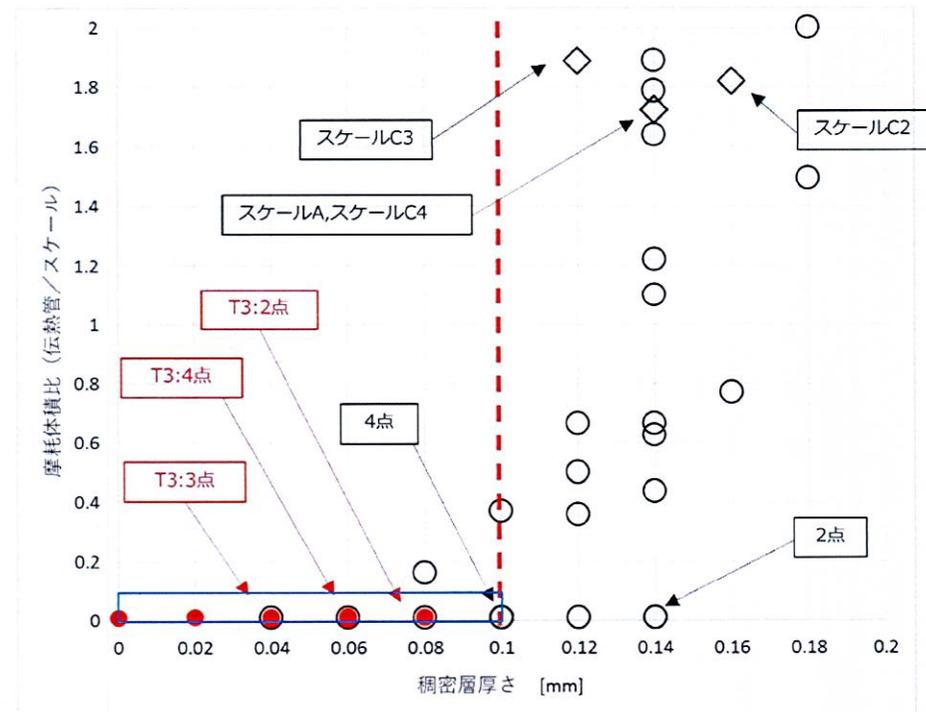
解析：破断管の隣接管への衝突による発生応力を評価



スケールに対する保全指標について（1 / 2）

○ S G伝熱管に付着するスケールに対し、薬品洗浄の頻度に関する保全指標については、以下のとおり。

- 高浜発電所3号機および4号機については、毎定期検査時にスケールを回収し、スケールの稠密層厚さの確認および摩耗試験を行う。なお、確認および摩耗試験を実施するスケールは添付資料-45の考え方のとおり選定する。稠密層厚さ0.1mm未満および摩耗体積比0.1未満であることを確認し、それを超えた場合は、薬品洗浄を実施する。
- なお、高浜発電所3号機および4号機のS Gについては、TT600合金製の伝熱管に応力腐食割れが認められていることから、本事象も踏まえ、今後も引き続き、S G取替（以下、S GR）に係る検討を進めていく。



スケールに対する保全指標について（2 / 2）

- 他プラントについては、今回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
S G R 未実施 プラント	大飯3	1,850kg	2定検毎	稠密層厚さ及び摩耗体積比を確認	薬品洗浄を実施済みであり、高浜3, 4と同等の鉄持ち込み量まで計算上10定検以上となるが、実機スケールを確認し確実に発生を防止するとともに、データの蓄積を図る。
	大飯4	1,950kg	同上	同上	
S G R プラント	高浜1	680kg	—	—	S G Rプラントで鉄持込み量が最大の高浜2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2を代表プラントとしてスケールの確認を行う。
	高浜2	940kg	2定検毎	スケールの有無を確認	
	美浜3	780kg	—	—	

※高浜3, 4号機の最初の外面減肉発生時の鉄持ち込み量は約2,400kg

<薬品洗浄実施時期>

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

