

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}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							

(単位：本)

SG	A	B	C	合計
指示管本数	1	0	3	4

事象の状況

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を(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。

事象の原因

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。

(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。

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。

(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。

(2) SG伝熱管外面(2次側)からの損傷

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。

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。

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

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

(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

(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。

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

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SG 2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SG 2次側へ持ち込まれる鉄イオンは、SG 2次側温度域においては、高温ほど溶解度が小さくなるため、より高温となる伝熱管下部において、溶解度の減少幅が大きく、鉄イオンがマグネタイトとして析出付着する。そのため、伝熱管の下部に付着するスケールは稠密で薄い傾向がある。

(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low、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

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。

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

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。

(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、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

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。

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加え、そのE C T信号を取得し、実機のE C T信号と比較した結果、両者は整合することを確認した。

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。

＜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)
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)	—

事 象 の 原 因

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

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

c. 伝熱管の摩耗試験結果の比較

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

事 象 の 原 因

<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、スケールの断面ミ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。</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。</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

S Gの施栓^{*5}済みの伝熱管を除く、全数の伝熱管についてE C Tを実施した。

(単位：本)

S G	A	B	C	合 計
検査対象本数	3, 2 4 4	3, 2 4 7	3, 2 5 6	9, 7 4 7

^{*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

(添付資料ー 2、 3)

E C T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。リサージュ表示^{*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E C T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)

S G	A	B	C	合 計
指示管本数	1	0	3	4

A-S G

第三管支持板 X51, Y4 : 減肉率 約 3 3 %

C-S G

第三管支持板 X55, Y3 : 減肉率 約 2 5 %

第三管支持板 X55, Y8 : 減肉率 約 3 2 %

第三管支持板 X21, Y8 : 減肉率 約 3 6 %

^{*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 S G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-S G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-S G伝熱管1本(2次側)、C-S G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

E C T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、E C T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) E C T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、E C T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）

E C T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. デンティング*⁹

（添付資料-5）

E C Tの信号指示を確認した結果、デンティングではないと考える。

*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. ピッチング*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

(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－ 1 1)

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^イ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^イ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－ 1 2)

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

(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「N i」という。）およびクロム（以下「C r」という。）の成分を検出した。

(イ) C-S G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N iを僅かに検出したが、C rは検出できなかった。

(ウ) 付着物分析のまとめ

AおよびC-S G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-S G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N iおよびC rの成分を検出した。

C-S G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N iの成分を僅かに検出したが、C r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。

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られる。

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low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。

スケールの生成に係るものは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、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) SG2次側の流況モックアップ試験

SG2次側の流況を再現するモックアップ試験装置により、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加え、その ECT 信号を取得し、実機の ECT 信号と比較した結果、両者は整合することを確認した。

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

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。

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。

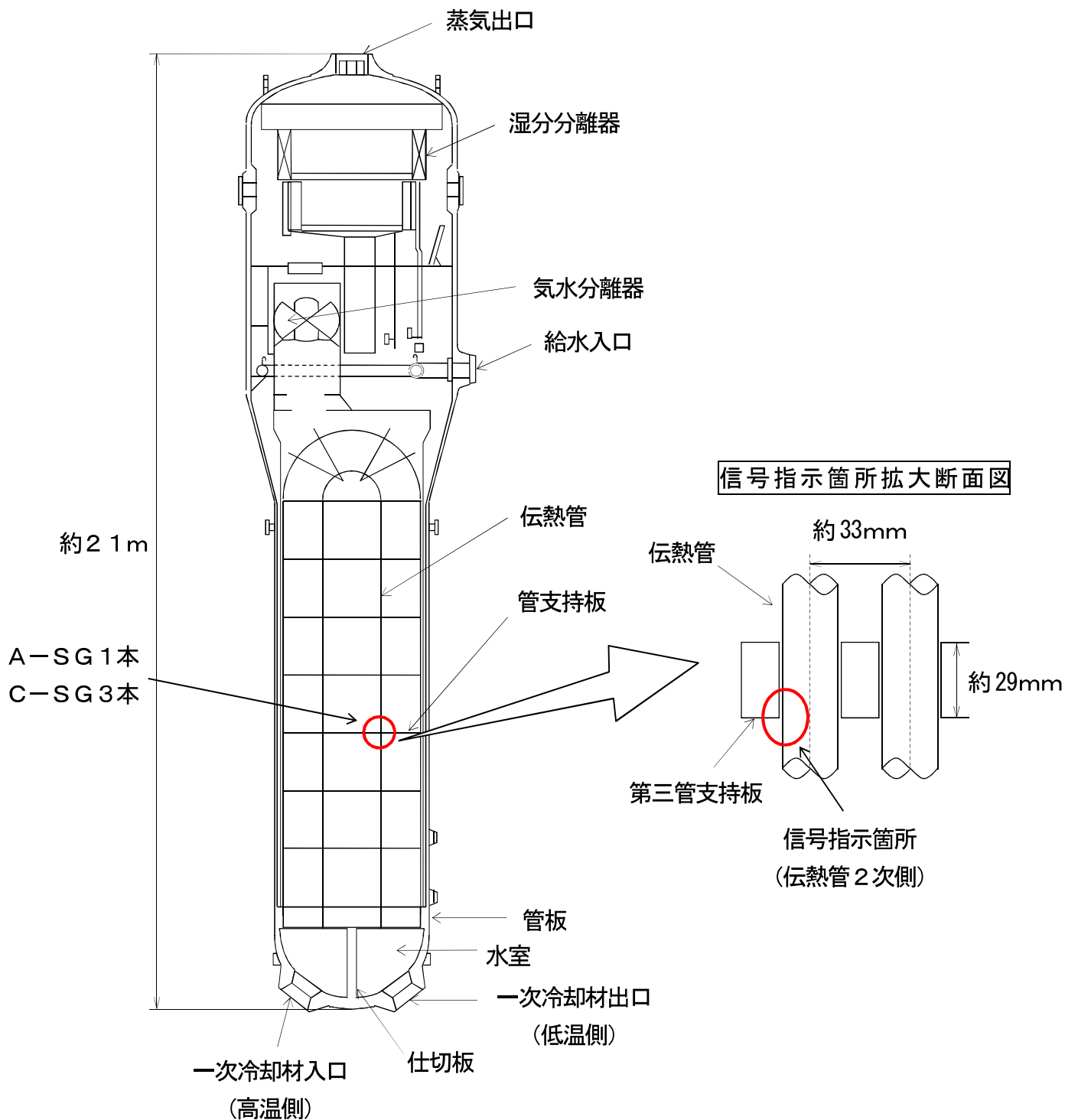
以 上

添 付 資 料

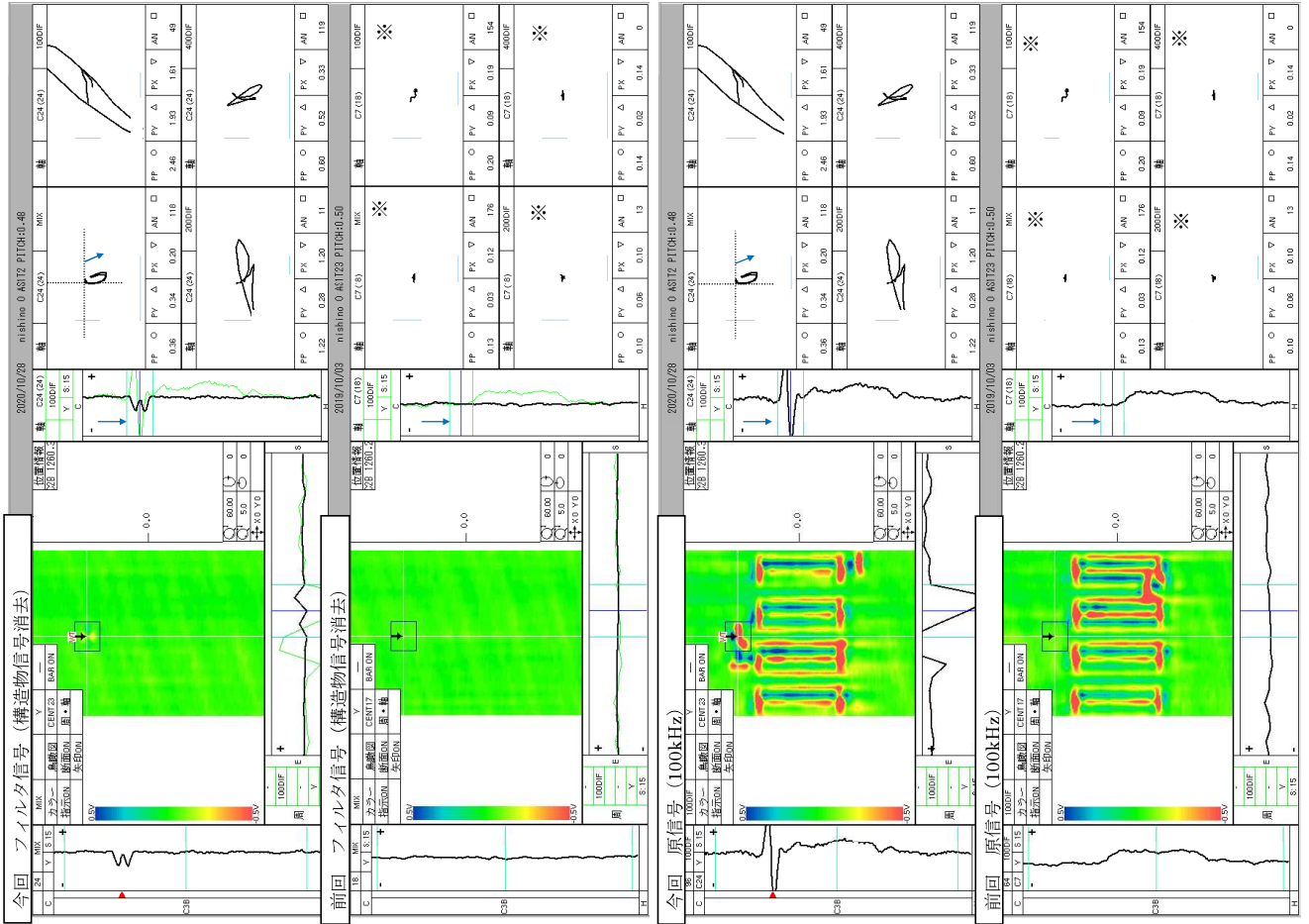
1. SG伝熱管信号指示箇所概要図
2. SG伝熱管ECT結果
3. SG伝熱管ECT信号指示位置図
4. 要因分析図
5. ECTの位相評価
6. 粒界腐食割れに関する検討結果
7. ピッチング発生に関する検討結果
8. リン酸減肉によるきずの形状
9. 流体振動による疲労評価
10. エロージョンの発生可能性評価
11. 管支持板との接触による摩耗減肉の評価
12. 過去事象を踏まえた点検調査
13. SG器内点検結果
14. SGブローダウン系統点検結果
15. SG 2次側内部品について
16. 付着物分析結果
17. C-SG回収スケール回収範囲図
18. C-SG回収スケールに関する分析結果
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)

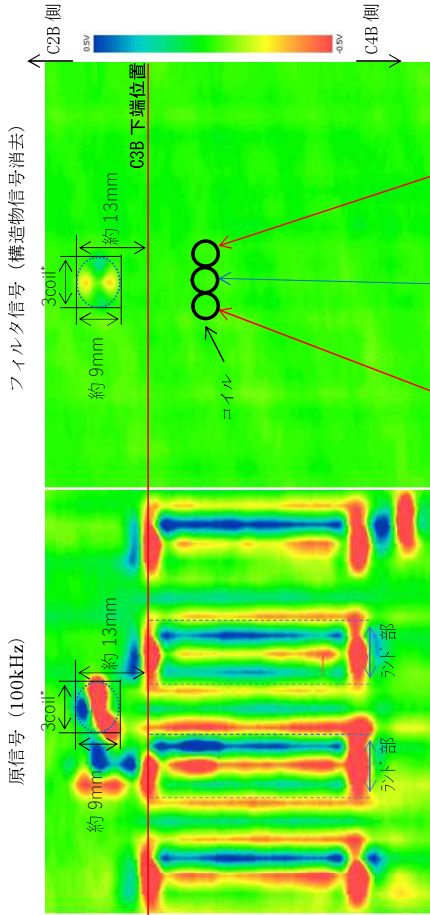


SG伝熱管ECT結果 (1/4)



※特異な信号がないため任意の位置で表示。

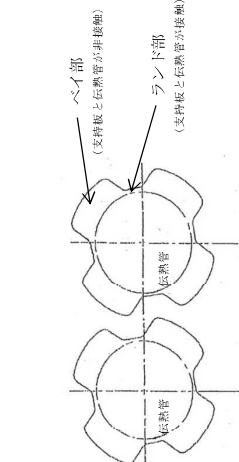
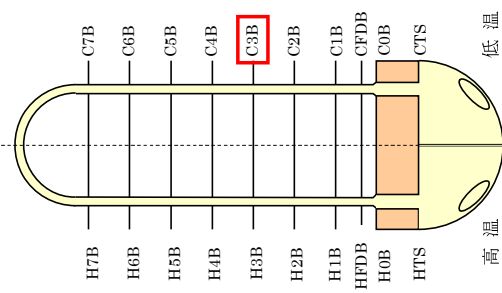
前今比較



軸方向	周方向	軸方向
PF 0.27	PF 0.20	PF 0.22
PK 0.38	PK 0.22	PK 0.35
AN 0.04	AN 0.20	AN 0.28
IN 0.36	IN 0.18	IN 0.28
AV 0.20	AV 0.20	AV 0.25
V 0.76	V 0.20	V 0.76

【A-SG X51, Y4 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

*Icoil : 約 3mm ※内側から見たイメージ



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。

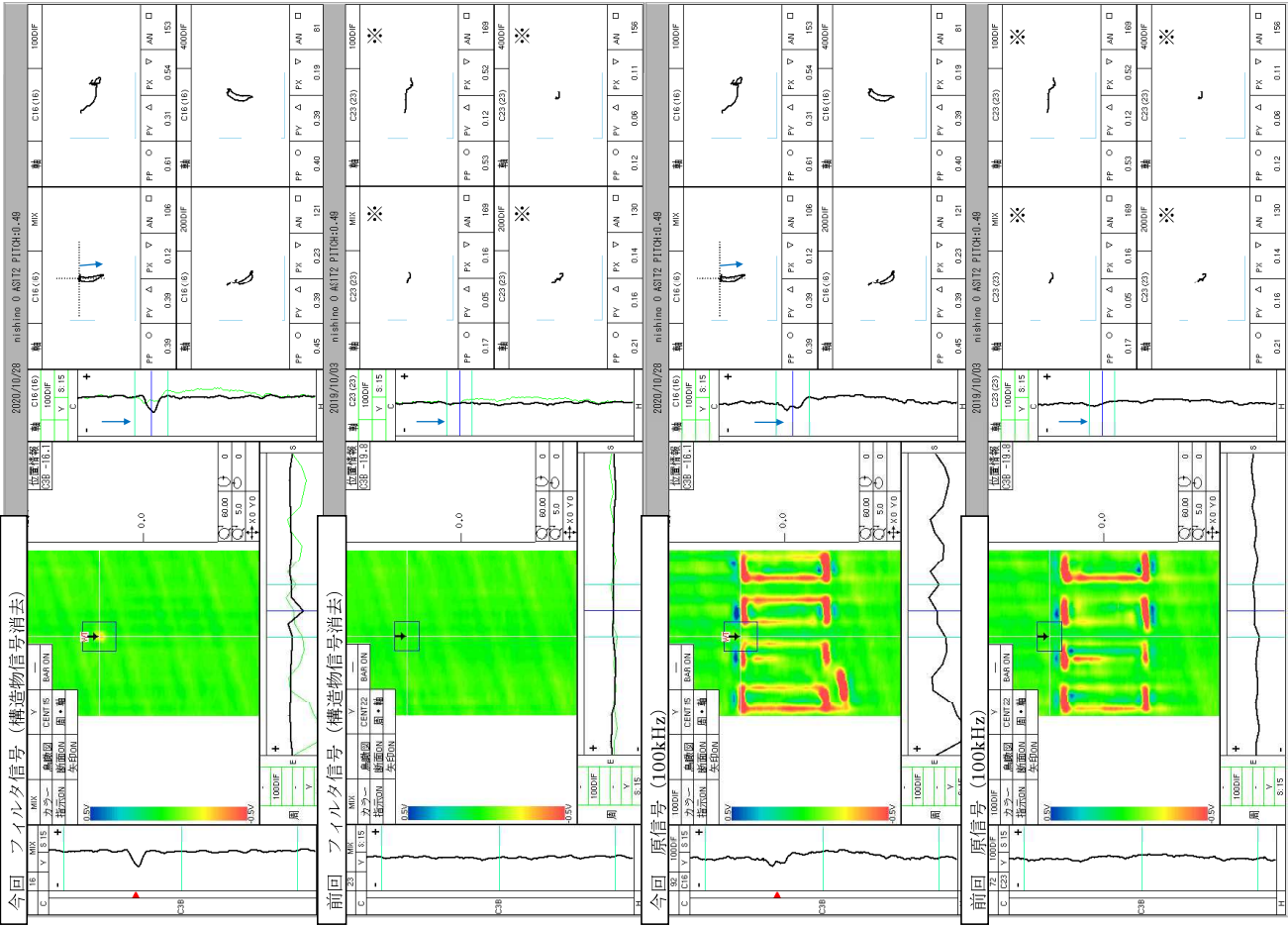
上記の通り軸方向成分及び周方向成分の両方の成分が読み取れるため、広がりを持つ臍肉と評価する。(下図参照)

MIX表示における特徴

A-SG X51, Y4 部位 : C3B

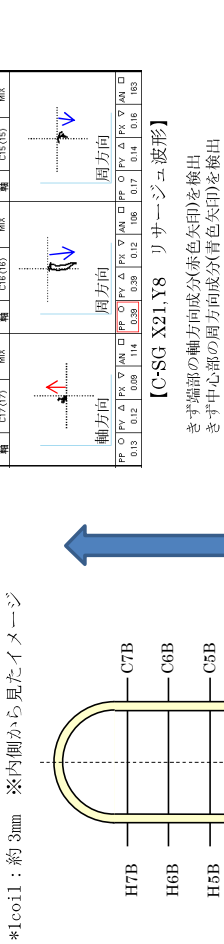
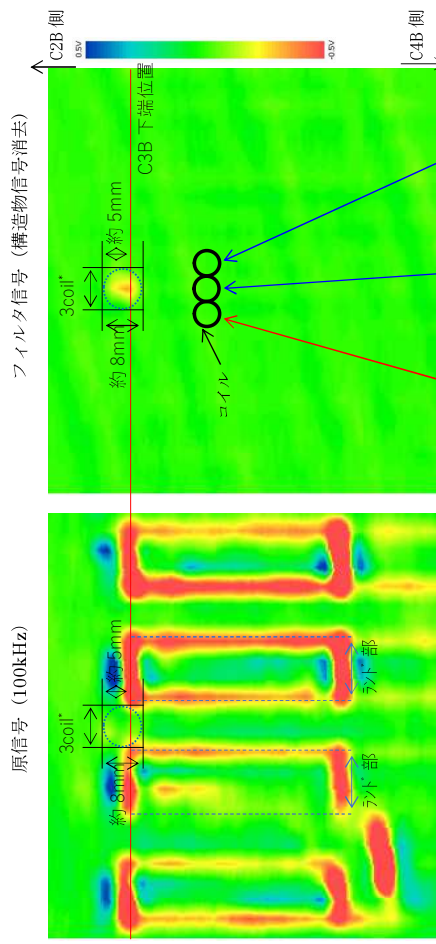
信号評価

SG伝熱管ECT結果 (2/4)



前今比較

C-SG X21, Y8 部位 : C3B



【C-SG X21, Y8 リサーチ波形】

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

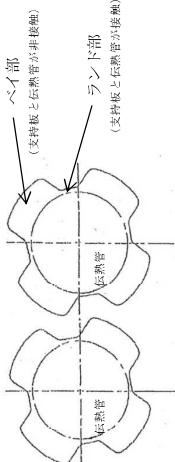
波形評価

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

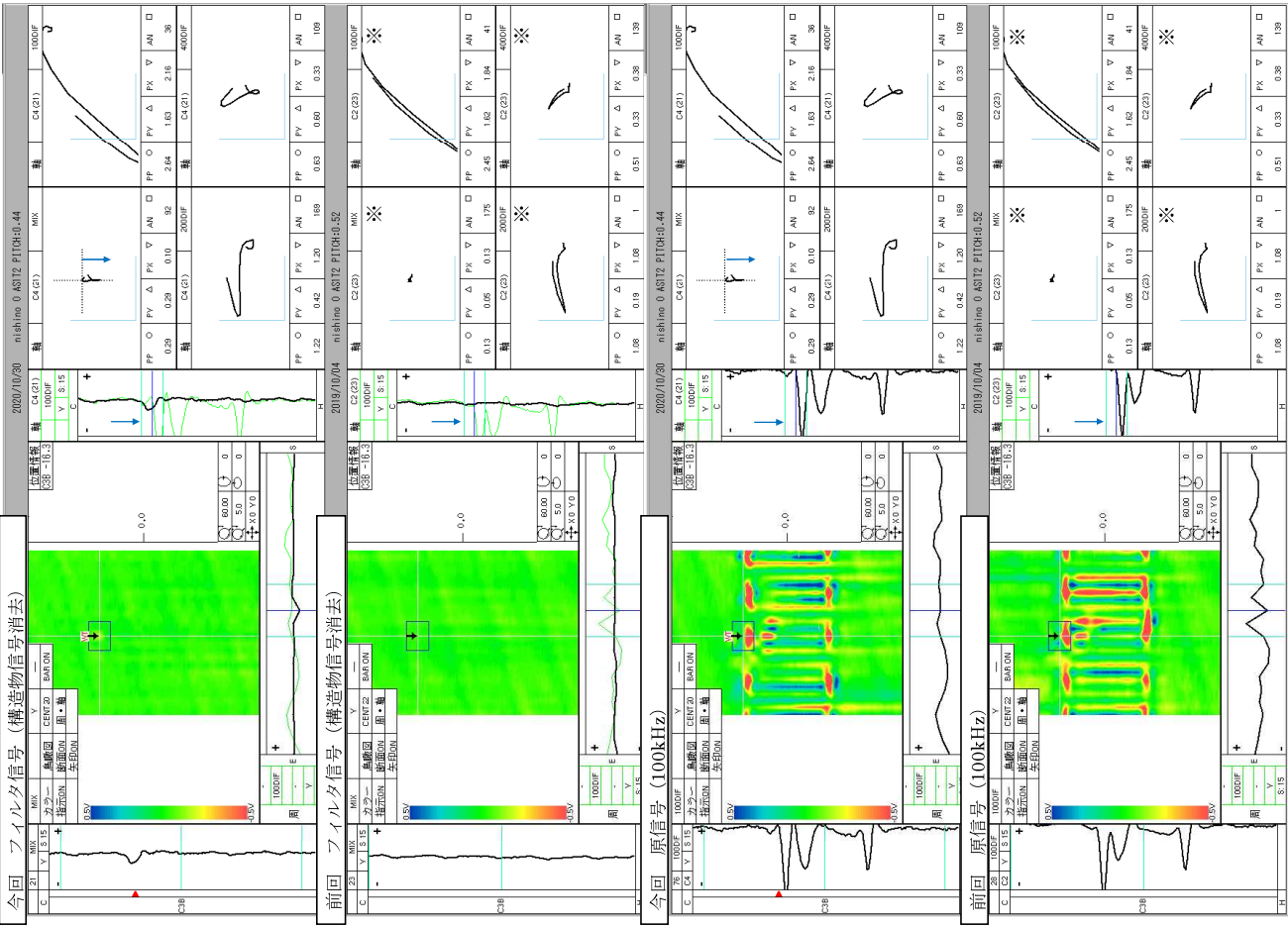
上記の通り軸方向成分及び周方向成分の両方の成分が読み取れるため、広がりを持つ減肉と評価する。(下図参照)

MIX 表示における特徴

信号評価



SG伝熱管ECT結果 (3/4)

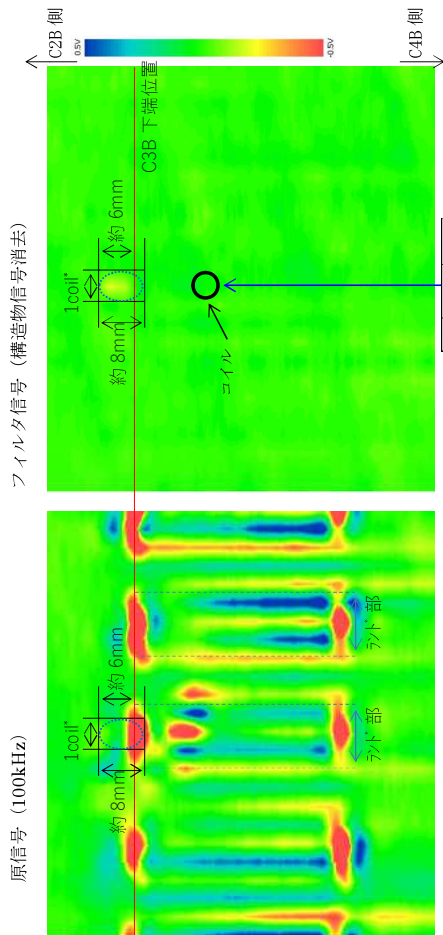


※特異な信号がないため任意の位置で表示。

前今比較

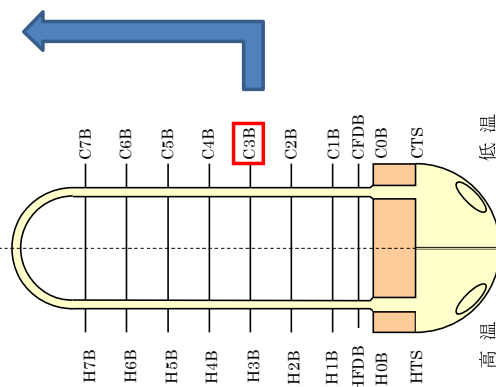
C-SG X55, Y3 部位 : C3B

信号評価



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

*1coil : 約 3mm ※内側から見たイメージ

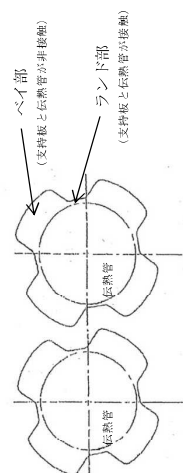


波形評価

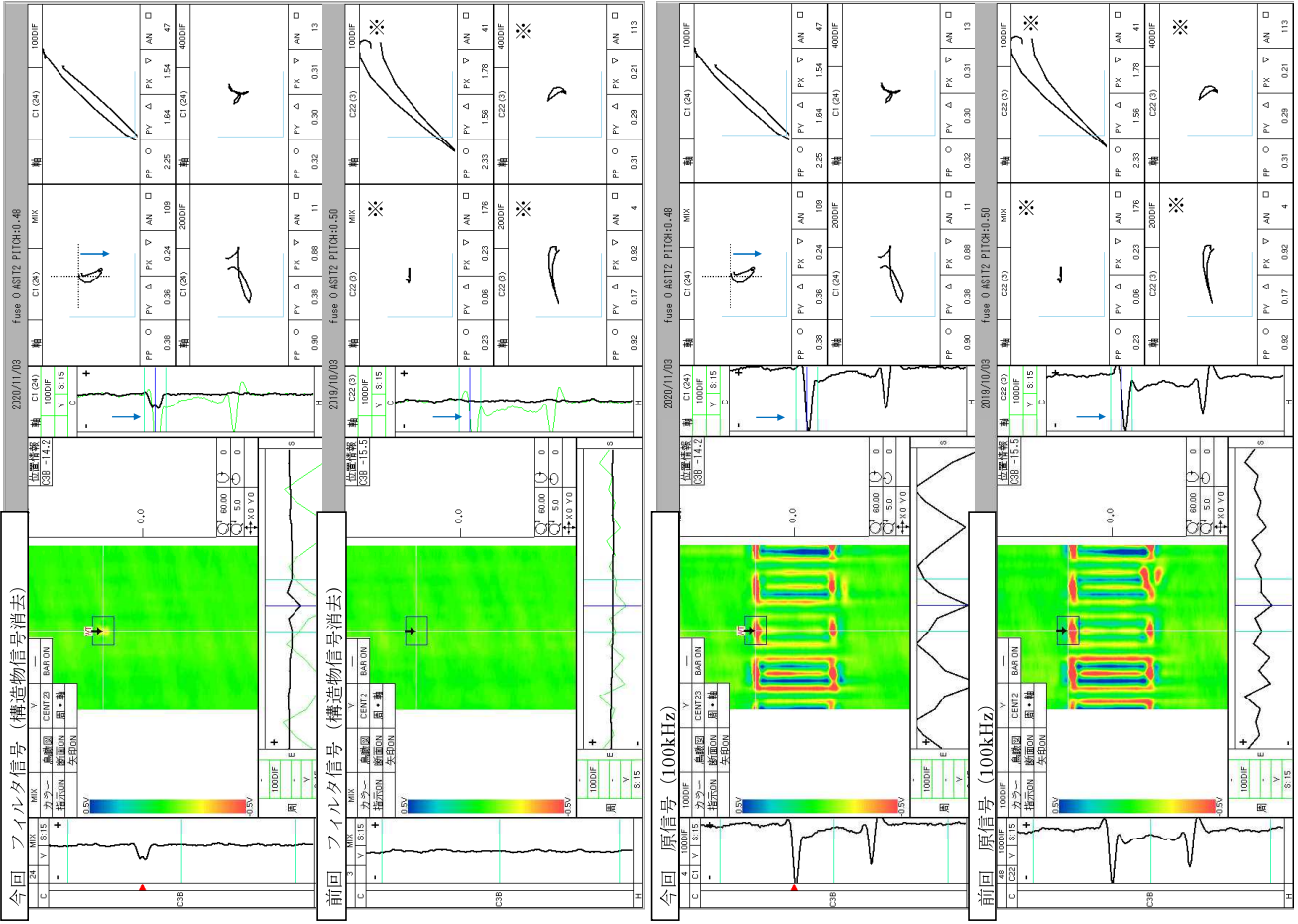
- 位相角評価から、外面指示の特徴を持っている。
- 指示は複数のコイルで検出されており、指示の中心部のコイルは周方向成分、両端部のコイルでは軸方向・周方向成分の特徴を持っている。

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、広がりを持つ臍肉と評価する。(下図参照)

MIX表示における特徴



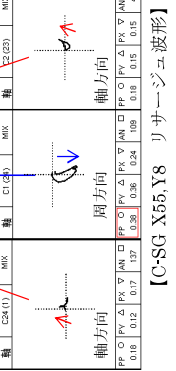
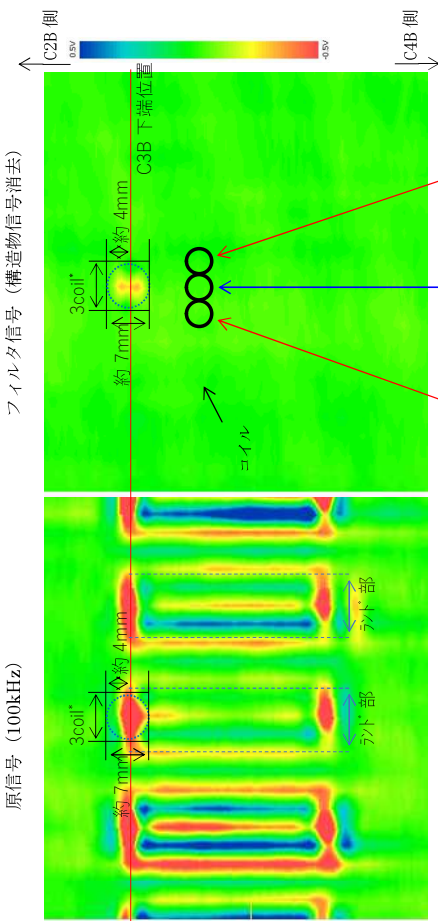
SG伝熱管ECT結果 (4/4)



※特異な信号がないため任意の位置で表示。

前今比較

C-SG X55, Y8 部位 : C3B



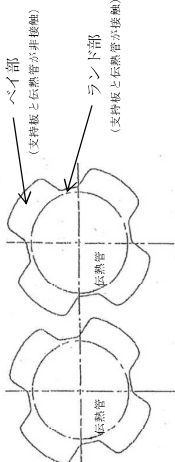
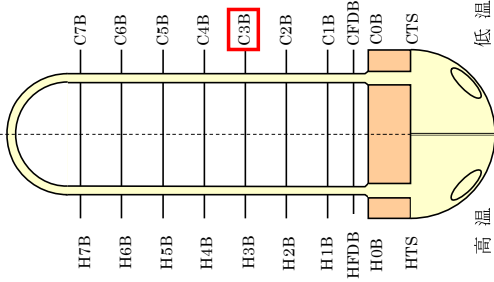
波形評価

- ・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

*Icoil : 約 3mm ※内側から見たイメージ

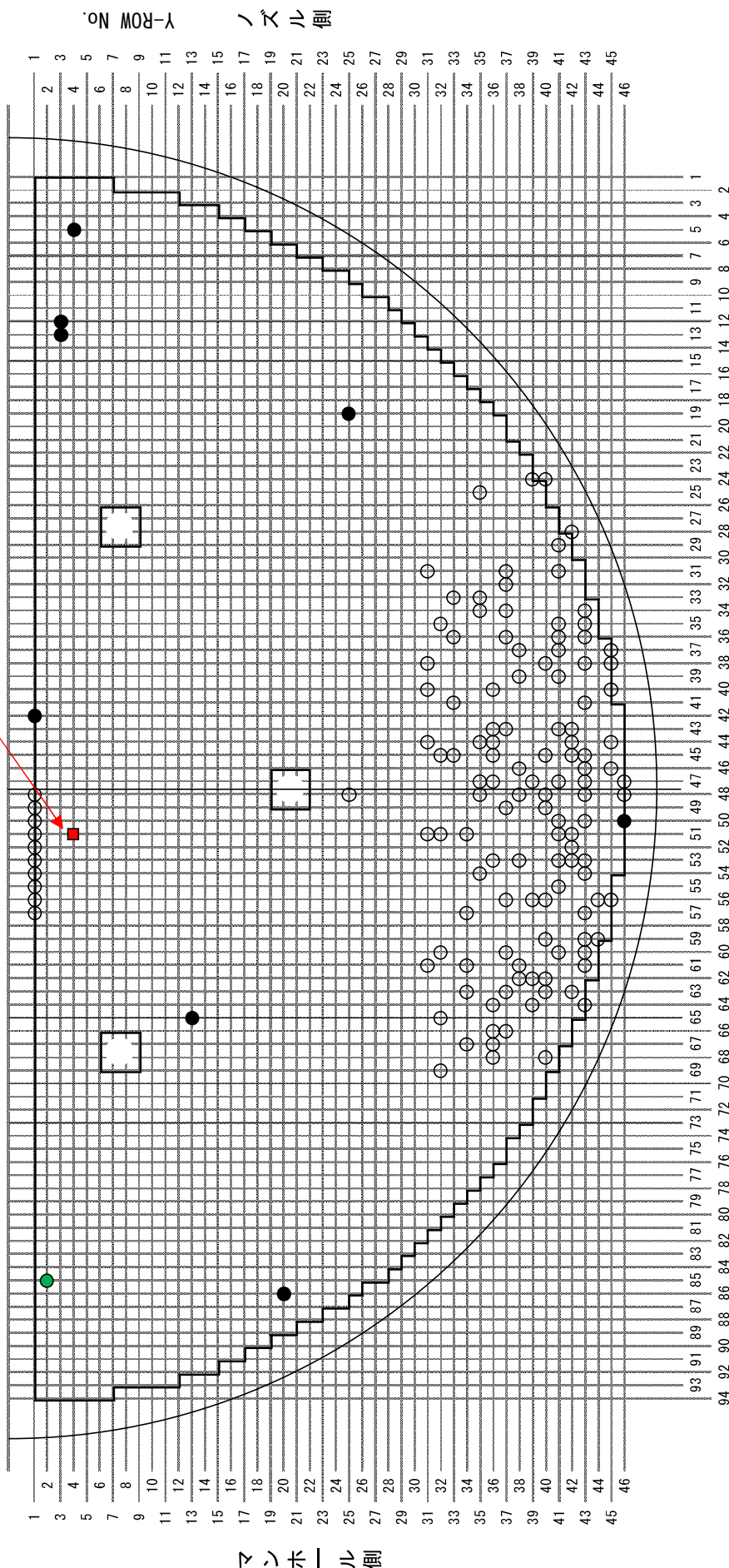


SG伝熱管ECT信号指示位置図
A-SG (低温側)

- : 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
 (051, Y4)

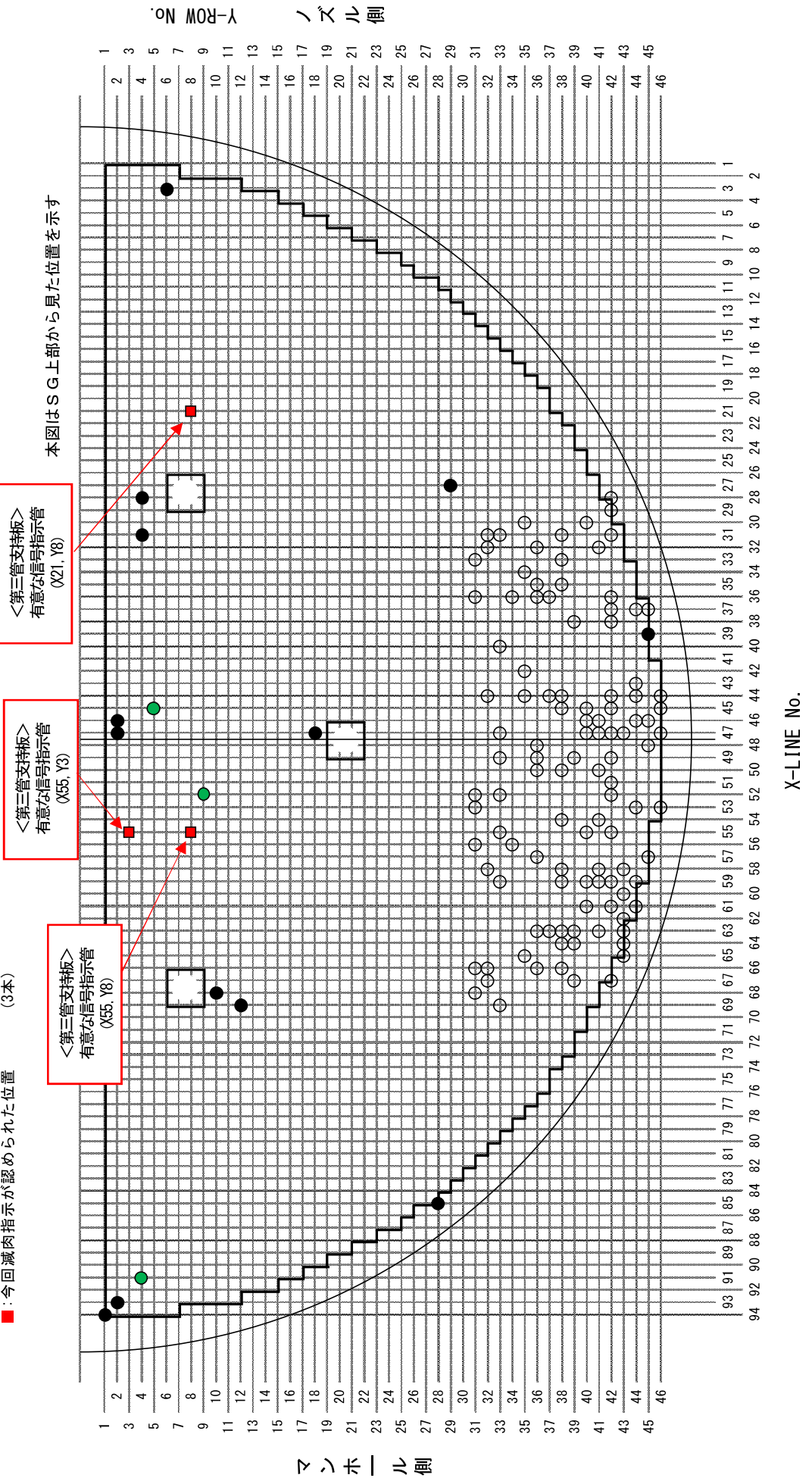
本図はSG上部から見た位置を示す



X-LINE No.

SG伝熱管ECT信号指示位置図
C-SG (低温側)

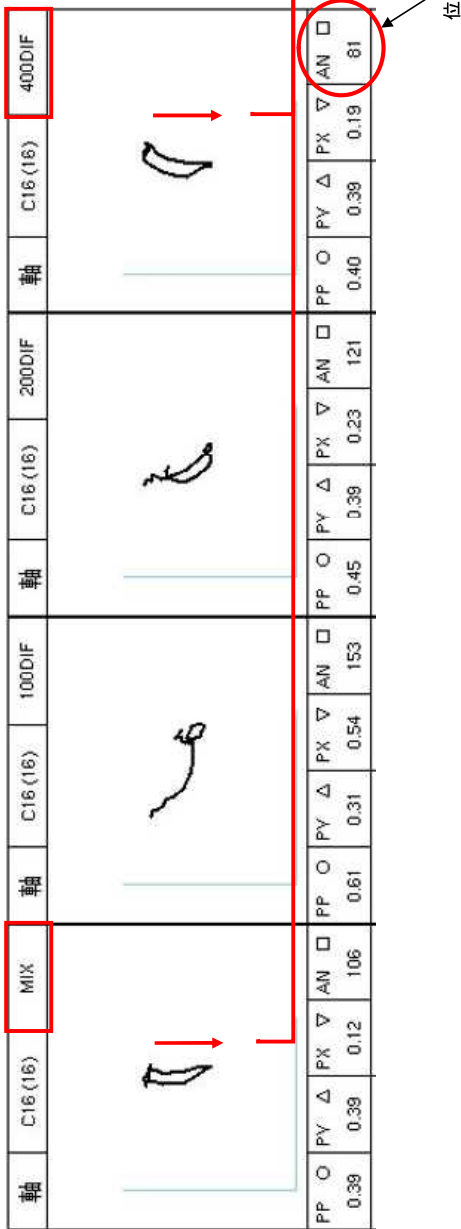
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (110本)
- : 既施栓管 (外面減肉) (3本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (13本)
- : 今回減肉指示が認められた位置 (3本)



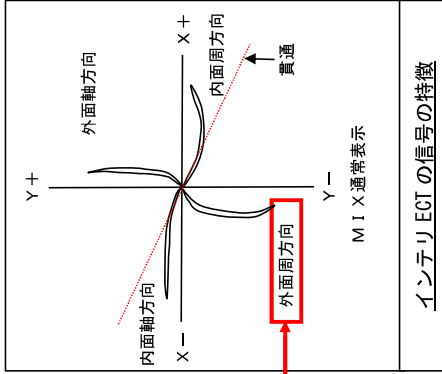
本図はSG上部から見た位置を示す

ECTの位相評価

当該管リサージュ表示 (C-SG X21-Y8)

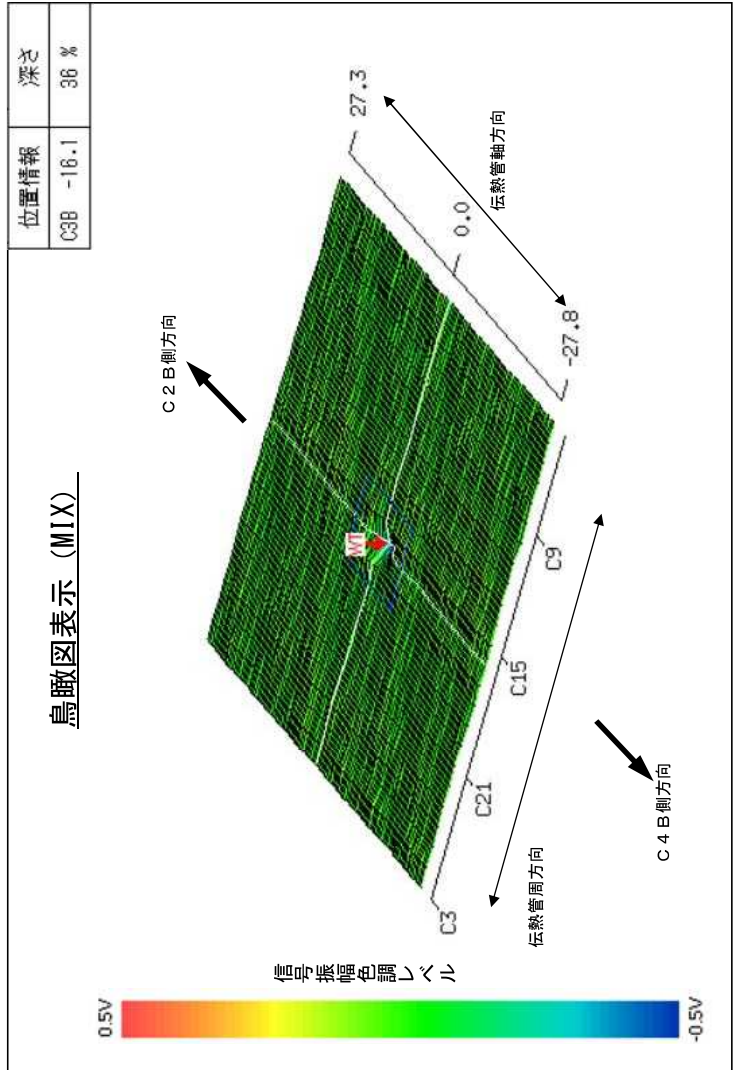


(1)内面軸方向信号の特徴との比較
インテリジェント ECT の信号の特徴と今回の当該信号を比較したところ、今回の当該信号は 400kHz および MIX の位相角で Y-方向の外周方向向きの特徴を示している。そのため、伝熱管内面 (1 次側) からの損傷ではないと考えられる。

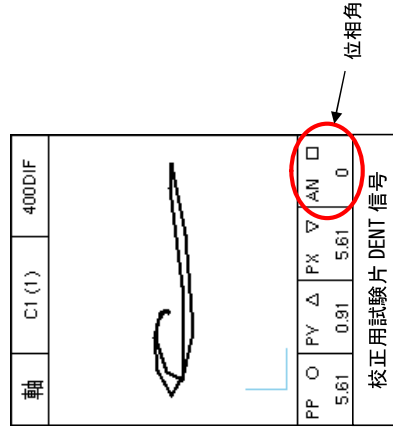


位相角

鳥瞰図表示 (MIX)



(2) デンチング (DENT) 信号の特徴との比較

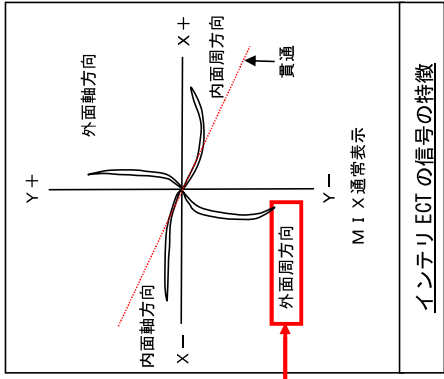
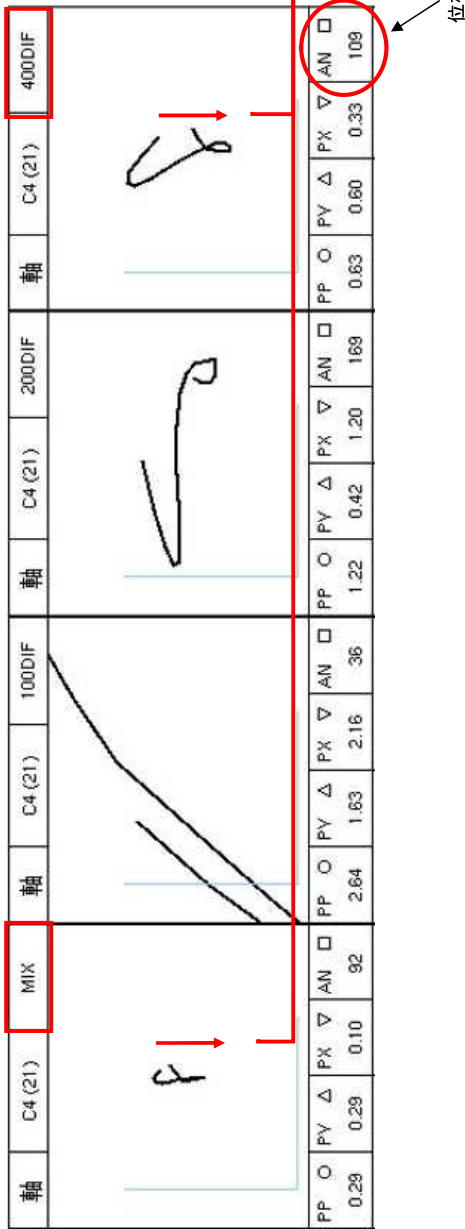


位相角

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

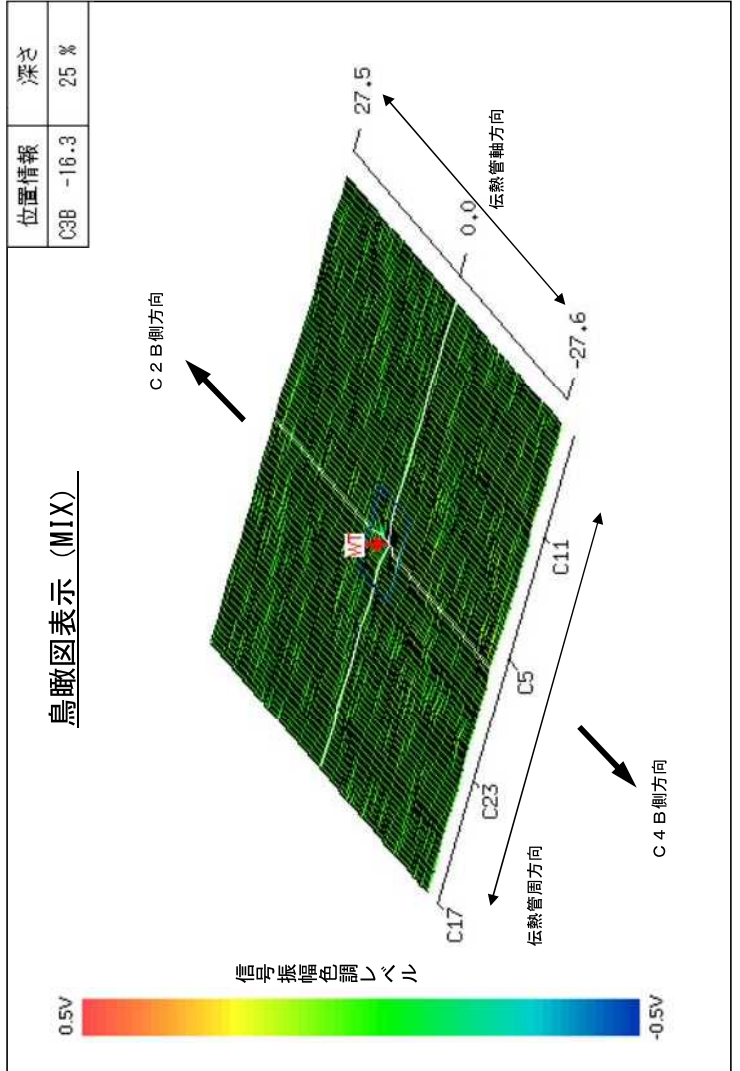
ECTの位相評価

当該管リサーチ表示 (C-SG X55-Y3)

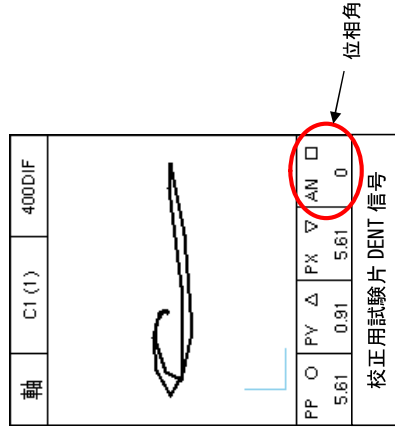


(1)内面軸方向信号の特徴との比較
インテリ ECT の信号の特徴と今回の当該信号を比較したところ、今回の当該信号は 400kHz および MIX の位相角で Y-方向の外周方向向きの特徴を示している。そのため、伝熱管内面 (1 次側) からの損傷ではないと考えられる。

鳥瞰図表示 (MIX)



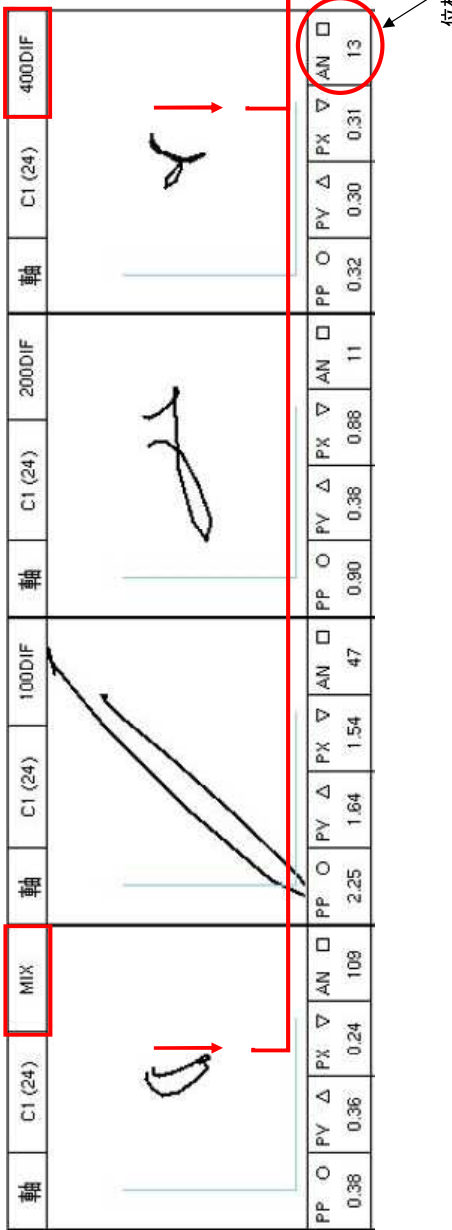
(2) デンチング (DENT) 信号の特徴との比較



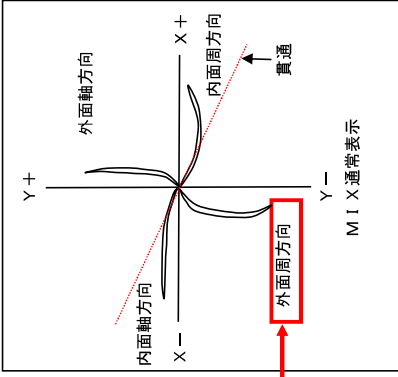
校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は“全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる”という特徴を持っているが、今回の当該信号は Y-方向の位相角を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外周方向向きの特徴を持っていると言える。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考えられる。

ECTの位相評価

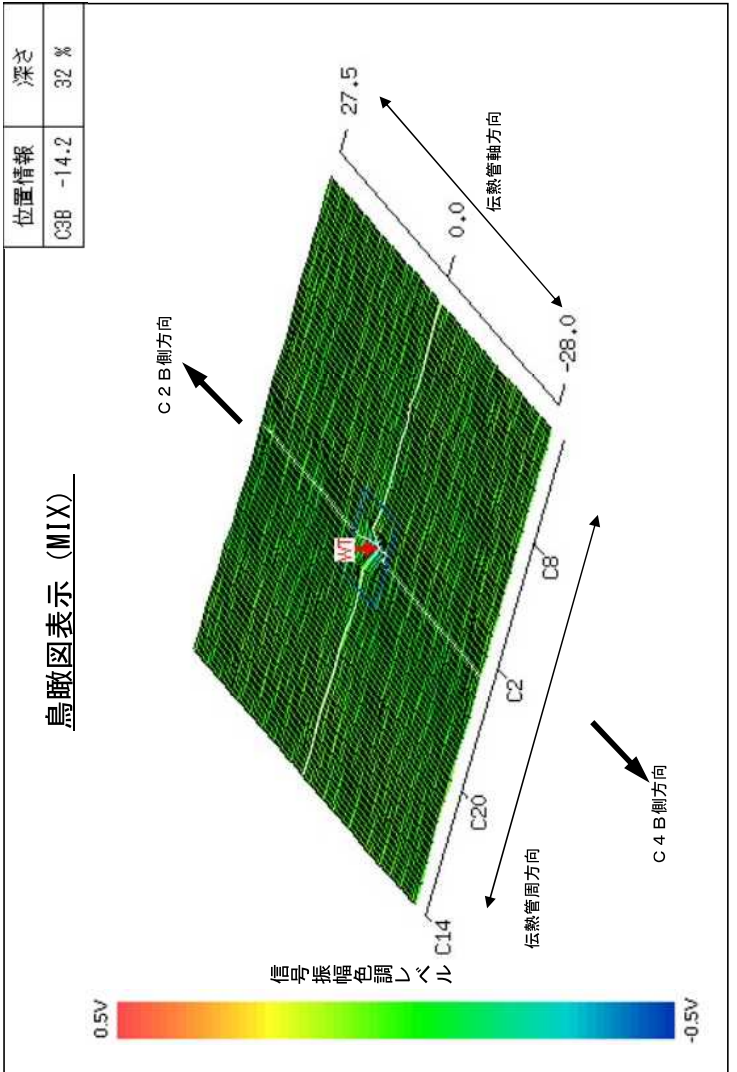
当該管リサージェ表示 (C-SG X55-Y8)



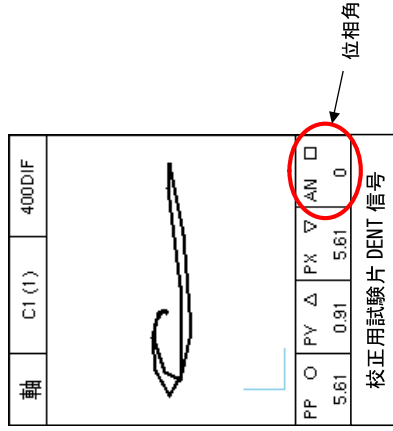
(1)内面軸方向信号の特徴との比較
 インテリジェント ECT の信号の特徴と今回の当該信号を比較したところ、今回の当該信号は 400kHz および MIX の位相角で Y-方向の外周方向を示している。そのため、伝熱管内面 (1 次側) からの損傷ではないと考えられる。



インテリ ECT の信号の特徴



(2) デンティンダ (DENT) 信号の特徴との比較



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

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°C}	平均 5.9

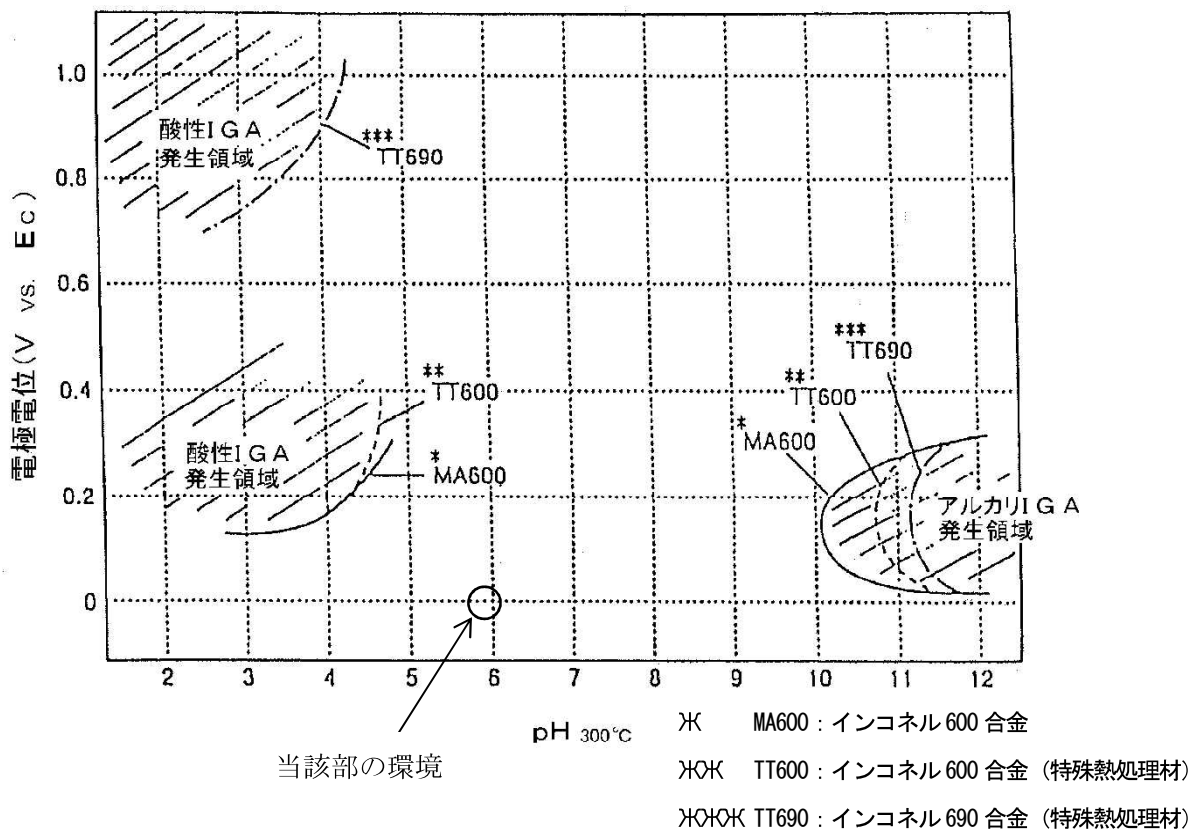
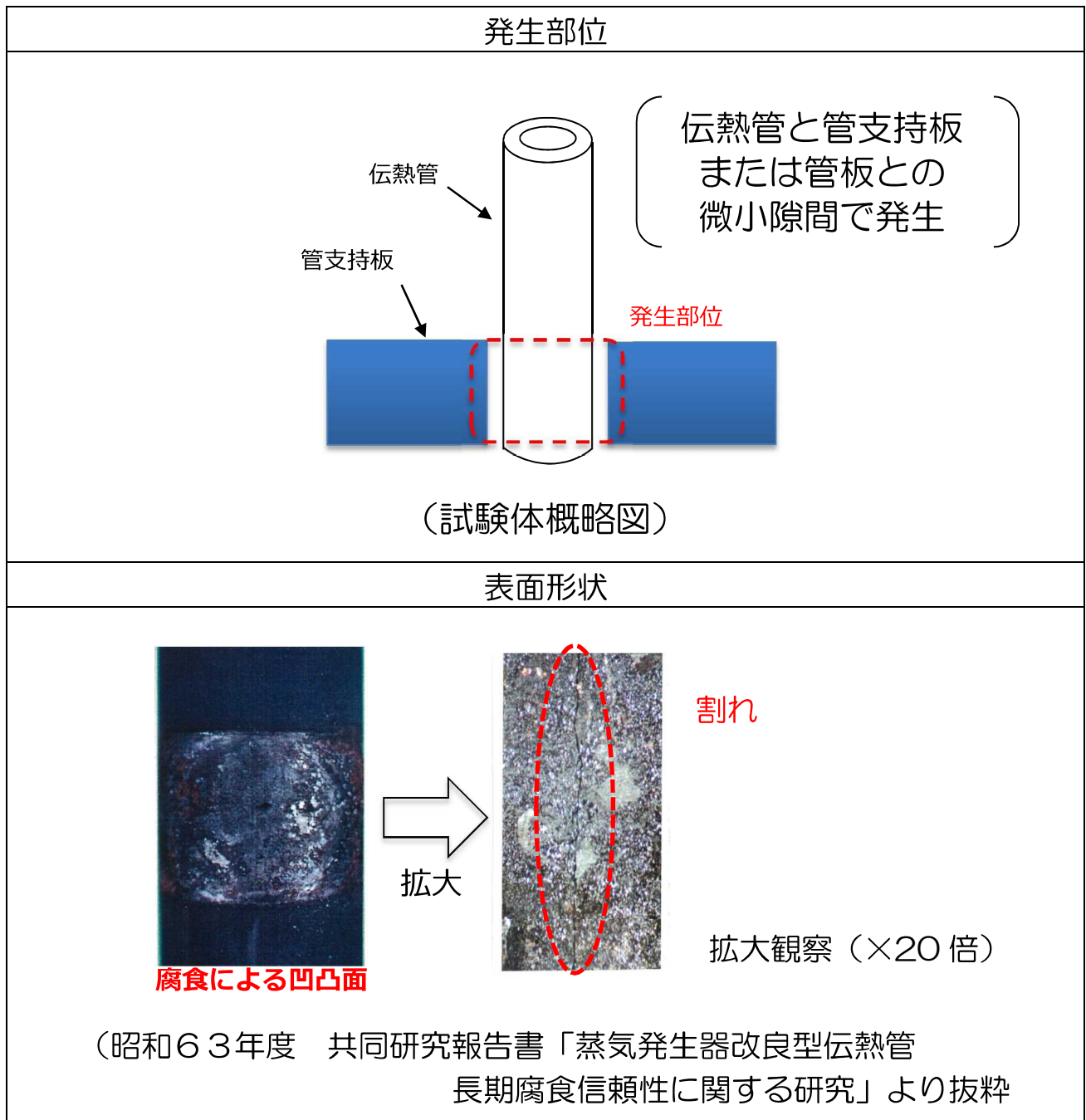


図 粒界腐食割れの発生領域

[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。



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

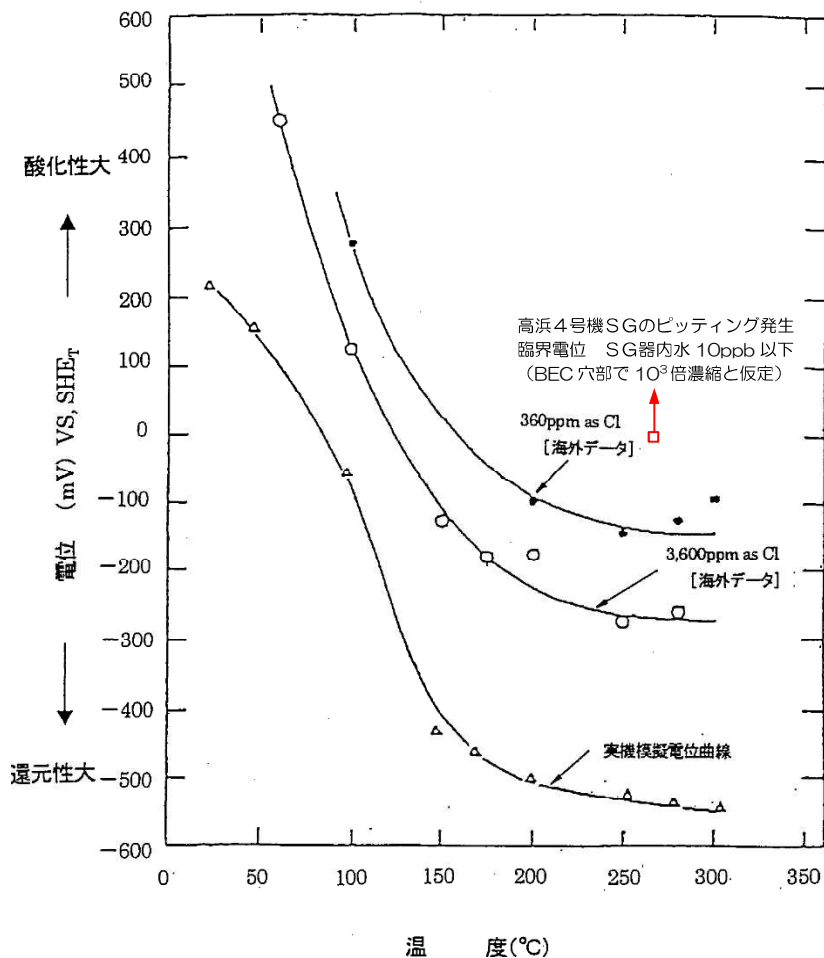
	第23サイクル
塩素イオン (ppb)	0.6

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。

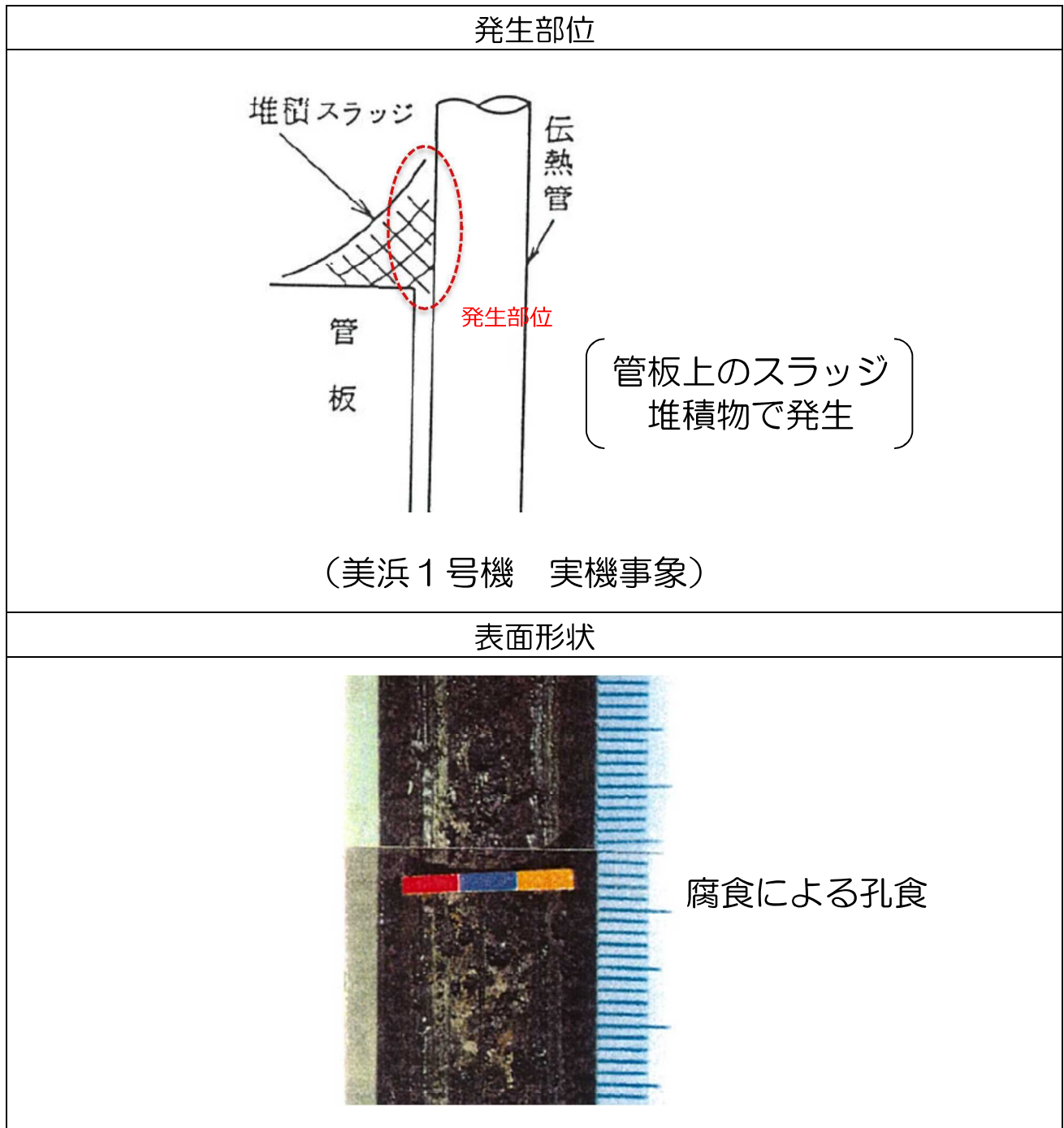
出典

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

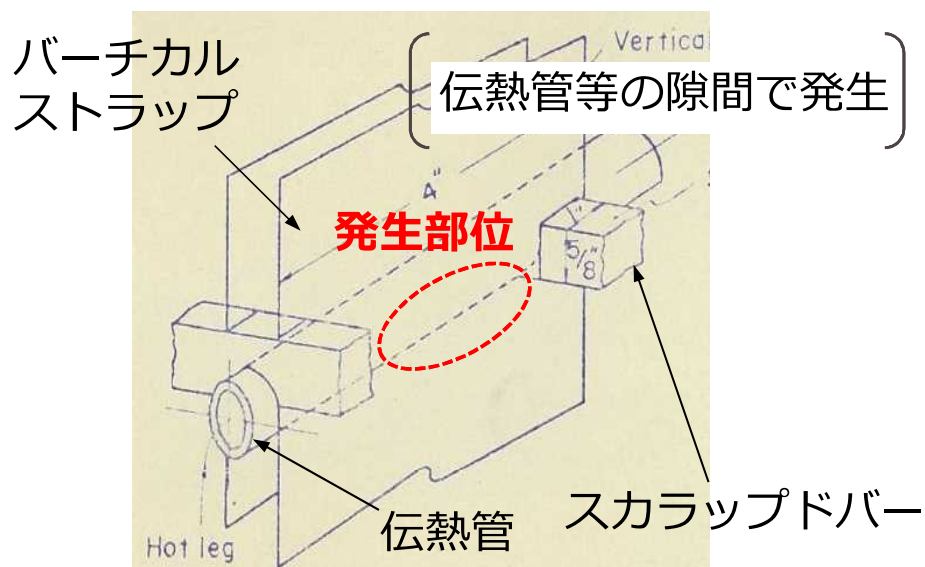
プラントメーカーの材料研究部門の有識者を含め検討した結果、今回確認したきずが摩耗減肉であると判断している。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉と考えられ、ピittingの可能性はないと考えられる。なお、ピittingによるきずの形状例を以下に示す。



リン酸減肉によるきずの形状

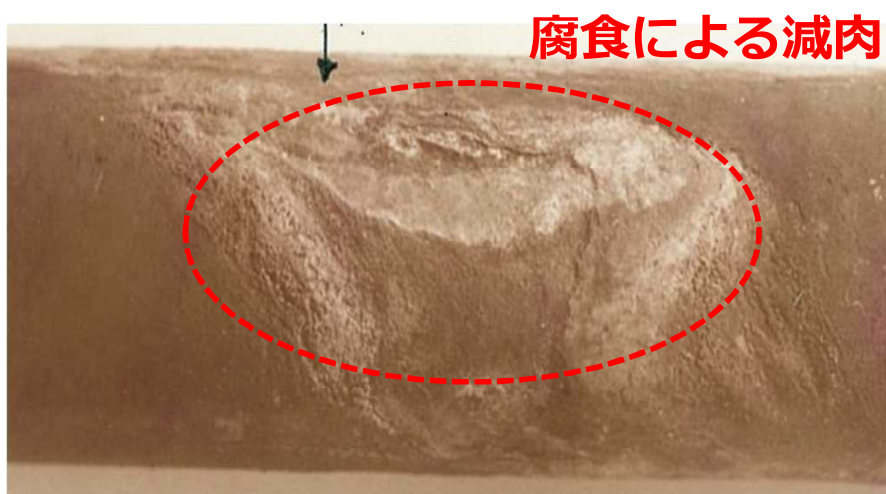
プラントメーカーの材料研究部門の有識者を含め検討した結果、今回確認したきずが摩耗減肉であると判断している。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉と考えられ、リン酸減肉の可能性はないと考えられる。なお、リン酸減肉によるきずの形状例を以下に示す。

発生部位



(美浜1号機 実機事象)

表面形状



拡大観察 (×3倍)

エロージョンの発生可能性評価

1. 目的

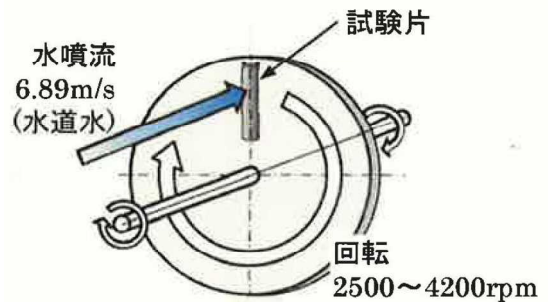
SG 伝熱管の管支持板部に周辺流体の衝突によるエロージョン*1 が発生しないことを評価する。

*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。

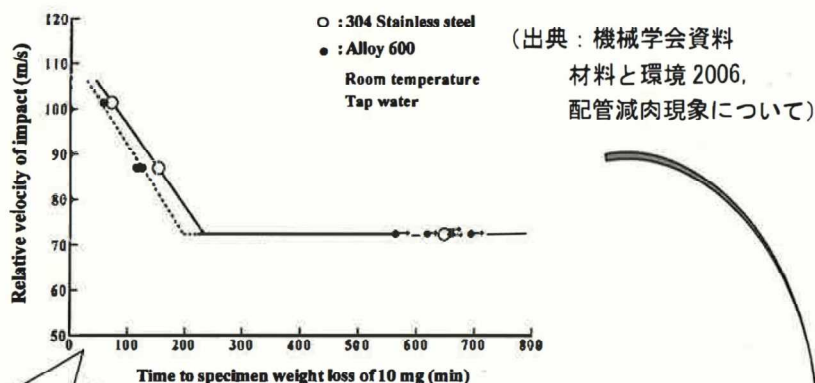


図1 ウォータージェットテストによる限界流速

$$\text{相対速度} = \sqrt{(\text{水噴流速})^2 + (\text{試験片の周速})^2}$$
 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

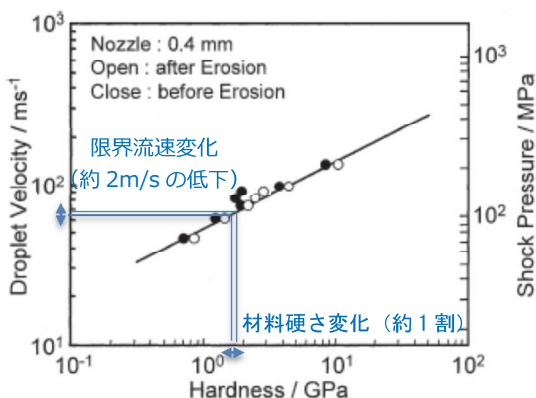


図1 限界流速と硬さの関係

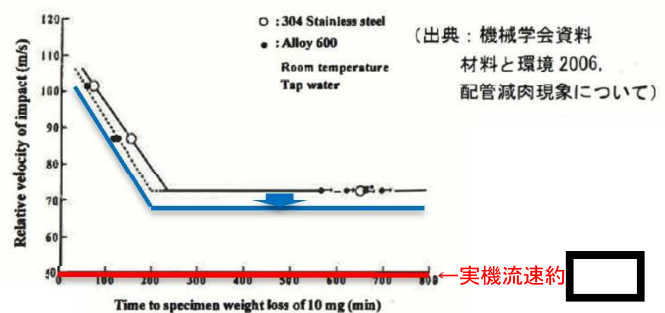


図2 ウォータージェットテストによる限界流速

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。

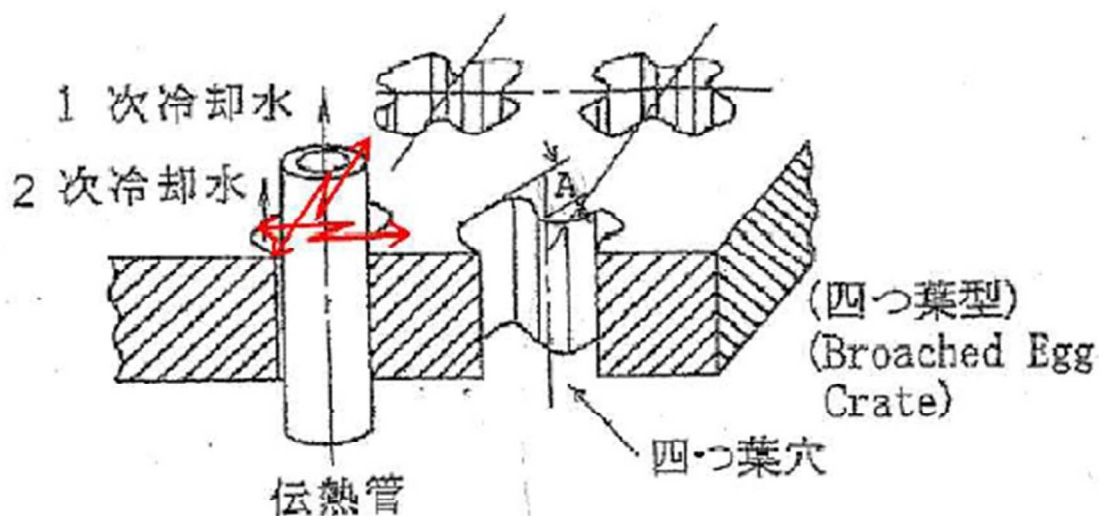


図 1 管支持板四つ葉穴（BEC 穴）による伝熱管の支持状況

管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (2/3)

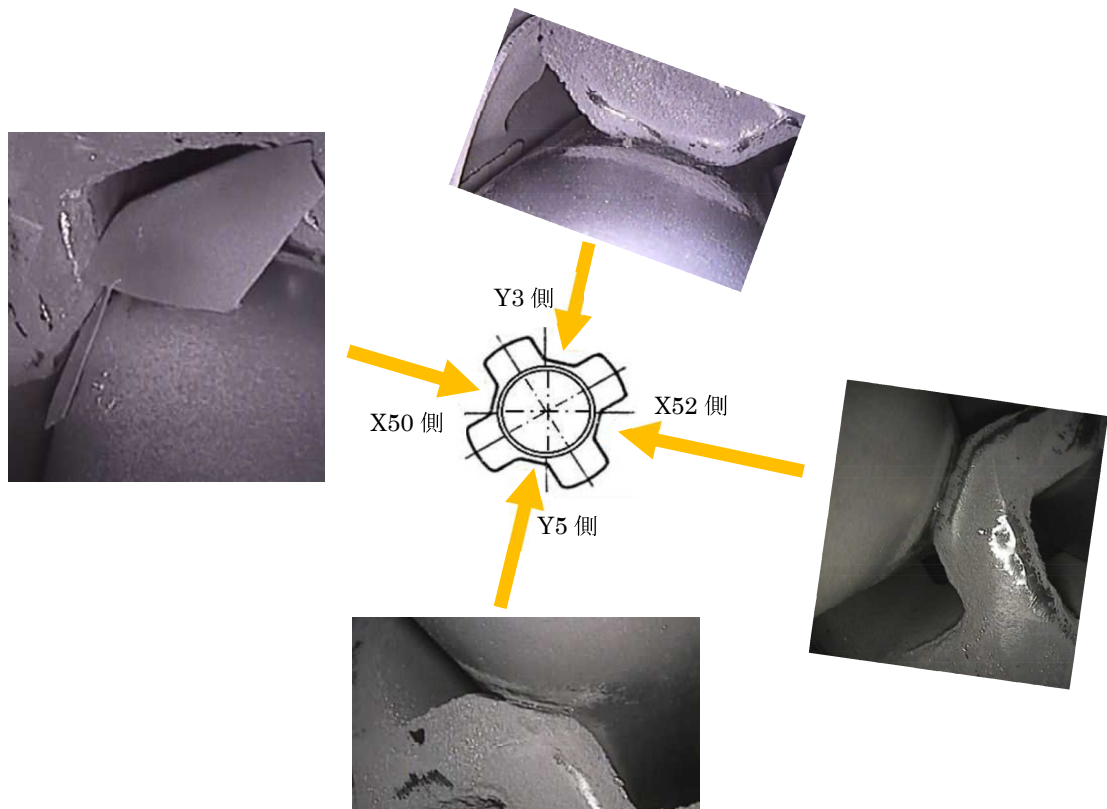


図2 減肉とランド部の位置関係(A-SG X51,Y4)

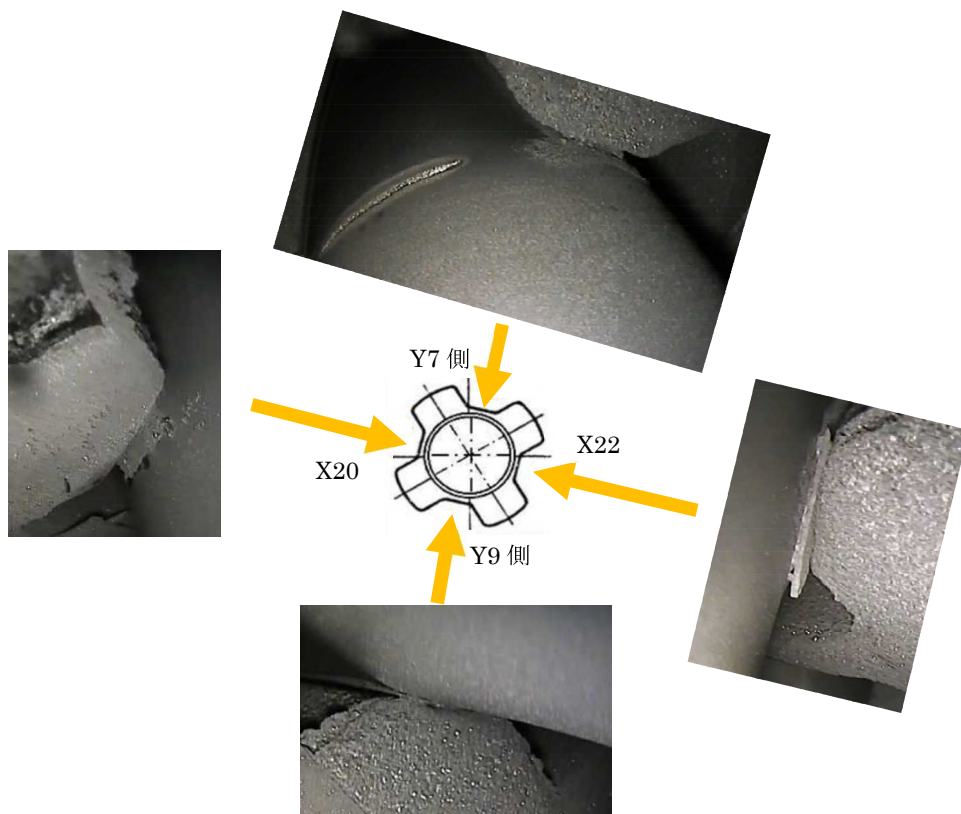


図3 減肉とランド部の位置関係(C-SG X21,Y8)

管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (3/3)

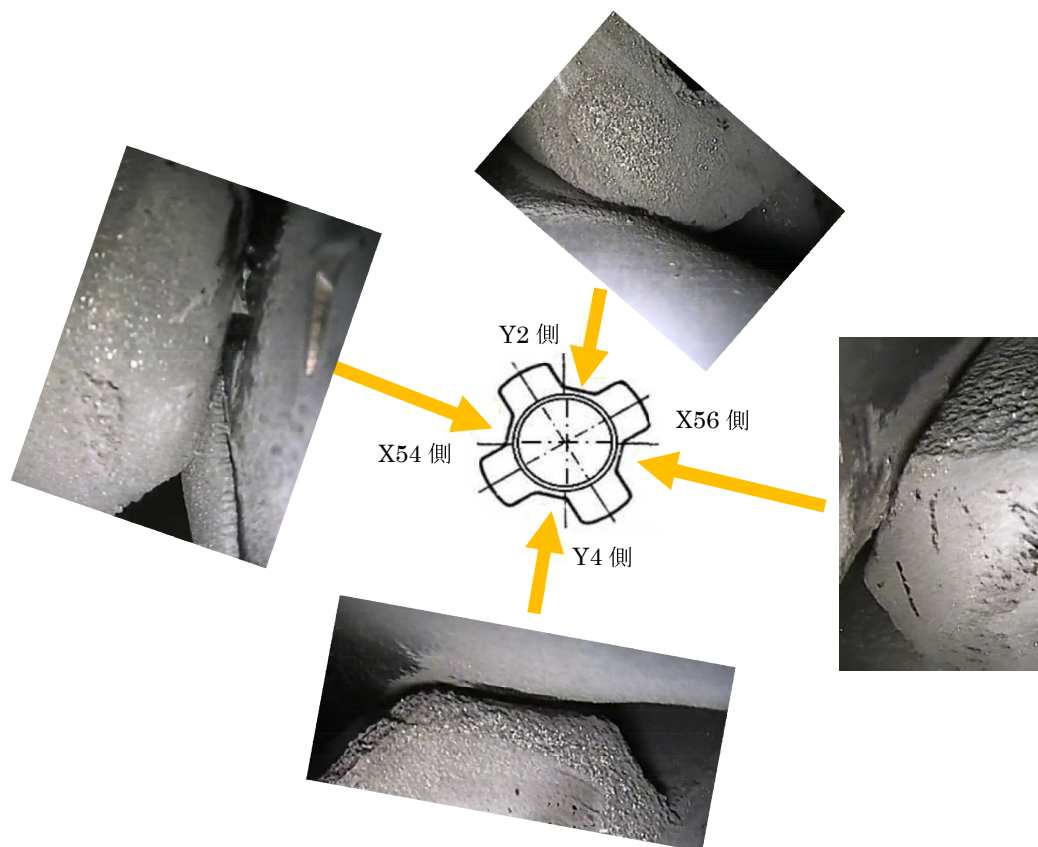


図 4 減肉とランド部の位置関係(C-SG X55,Y3)

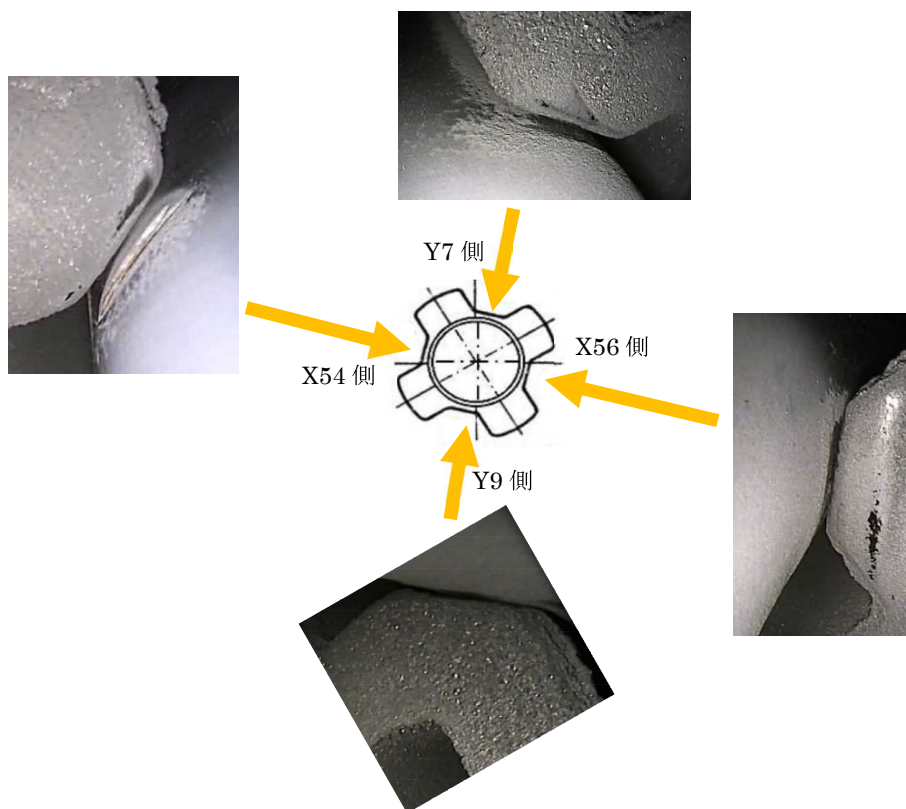


図 5 減肉とランド部の位置関係(C-SG X55,Y8)

過去事象を踏まえた点検調査

高浜発電所 4 号機前回 (第 2 2 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、S G 器内に異物が混入していたことを踏まえ、念のため S G 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 2 4 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。 機器を開放した時点でうず巻きガスケット等の金属製の消耗品に損傷を確認した場合は、当社工事担当者に報告することに加え、工事報告書に必要事項を記載することを調達要求文書に定める。 S G 水張ポンプ入口仮設ストレーナ設置した。
(前回) 高浜 4 号機 第 2 2 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 2 3 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。 	-
(従前) 高浜 3 号機 第 2 3 回定期検査以前 高浜 4 号機 第 2 1 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、S G 器内および器外点検の結果、異物は確認できなかったことから異物混入対策は有効であったと判断する。今後も引き続き高浜発電所 3 号機前回 (第 2 4 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 2 4 回) 定期検査での S G 伝熱管損傷事象を踏まえ、今回、念のため S G 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ボンプ(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ボンプ(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ボンプ(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 水張ボンプ入口フランジ	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 水張ボ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タービン動主給水ボンプ(ケーシングカバー)	ポンプ	無	○	○
22	Bタービン動主給水ボンプ(ケーシングカバー)	ポンプ	無	○	○
23	電動主給水ボンプ(ケーシングカバー)	ポンプ	無	○	○
24	4 S G 水張ボンプ入口弁	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 水張ボンプ出口逆止弁	CW298	無	○	○
32	4 S G 水張ボンプ出口弁	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 入口ストレーナブロー弁	CW311	無	○	○
43	4 S G 水張ボ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タービン動主給水ボンプミニマムフロー制御弁後弁	FW-150A	無	○	○
48	4 Bタービン動主給水ボンプミニマムフロー制御弁後弁	FW-150B	無	○	○
49	4 電動主給水ボ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 電動主給水ボンプ出口制御弁	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 蒸気発生器水張り制御弁	LCV-3720	無	○	○
62	4 C 蒸気発生器水張り制御弁	LCV-3730	無	○	○
63	蒸気発生器水張りポンプ(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ィス	フランジ	無	○	○
93	4 B 蒸気発生器主給水流量オリフィス	フランジ	無	○	○
94	4 C 蒸気発生器主給水流量オリフィス	フランジ	無	○	○
95	高圧給水加熱器後主給水ヘッダ閉止フランジ	フランジ	無	○	○
96	4 B-TDFWP P (d P I A-5210 B) 低圧側元弁	FW-116B	無	○	○
97	4 B-TDFWP 出入口 d P I-5218⇔5220 B 低圧側元弁	FW119B	無	○	○
98	4 B-TDFWP P 吸込圧力計元弁 (P I-5216 B)	FW-202B	無	○	○
99	4 B-TDFWP P ケーシングベント弁	FW-201B	無	○	○
100	4 B-TDFWP P 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 I-5218⇔5220 B 高圧側元弁	FW120B	無	○	○
103	4 B-TDFWP P 出口ベント弁	FW-132B	無	○	○
104	4 B-TDFWP 入口流量計上流側元弁 (FT-5224 B)	FW-123B	無	○	○
105	4 B-TDFWP 入口流量計下流側元弁 (FT-5224 B)	FW-124B	無	○	○
106	4 B-TDFWP 入口流量計上流側元弁 (FT-5226 B)	FW-125B	無	○	○
107	4 B-TDFWP 入口流量計下流側元弁 (FT-5226 B)	FW-126B	無	○	○
108	4 B-TDFWP 吸込圧力計元弁 (P I-5230 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 I-5234 B L)	FW-222B	無	○	○
112	4 B-TDFWP 吐出圧力計元弁 (P I-5234 B)	FW-007Ba	無	○	○
113	4 B-TDFWP 吐出圧力計元弁 (P I-5236 B)	FW-008Ba	無	○	○
114	4 B-TDFWP ミニマムフロ-FT-5238 B 上流側元弁	FW-152Ba	無	○	○
115	4 B-TDFWP ミニマムフロ-FT-5238 B 下流側元弁	FW-153Ba	無	○	○
116	4 B-TDFWP ミニマムフロ-FT-5240 B 上流側元弁	FW-154Ba	無	○	○
117	4 B-TDFWP ミニマムフロ-FT-5240 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-制御弁	FCV-5238B	無	○	○
119	4 B-TDFWP 出口ブロー元弁	FW-017Ba	無	○	○
120	4 FWP 出口ヘッダ圧力計元弁 (P T-5248)	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 出口ヘッドロー元弁	FW-019a	無	○	○
122	4 FWPウォーミング元弁	FW-160	無	○	○
123	4 A-TDFWP (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-TDFWP 吸込圧力計元弁 (PI-5216A)	FW-202A	無	○	○
126	4 A-TDFWP ケーシングベント弁	FW-201A	無	○	○
127	4 A-TDFWP 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-TDFWP 出口ベント弁	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 ミニマフロ-FT-5238A 上流側元弁	FW-152Aa	無	○	○
142	4 A-TDFWP ミニマフロ-FT-5238A 下流側元弁	FW-153Aa	無	○	○
143	4 A-TDFWP ミニマフロ-FT-5240A 上流側元弁	FW-154Aa	無	○	○
144	4 A-TDFWP ミニマフロ-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フロ-制御弁	FCV-5238A	無	○	○
146	4 A-TDFWP 出口ロー元弁	FW-017Aa	無	○	○
147	4 MDFWP 吸込ストレーナ dPIA-5211 低圧側元弁	FW-118A	無	○	○
148	4 A-MDFWP 入口ストレーナ後ロー弁	FW-134A	無	○	○
149	4 MDFWP 吸込ストレーナ dPIA-5212 低圧側元弁	FW-118B	無	○	○
150	4 B-MDFWP 入口ストレーナ後ロー弁	FW-134B	無	○	○
151	4 MDFWP 入口圧力逃し弁	FW112	無	○	○
152	4 MDFWP 入口圧力逃し逆止弁	FW110	無	○	○
153	4 MDFWP 出入口差圧 dPT-5221⇔5223 低圧側元弁	FW121	無	○	○
154	4 MDFWP 吸込圧力計元弁 (PI-5231)	FW-234	無	○	○
155	4 MDFWP ケーシングベント弁	FW-211	無	○	○
156	4 MDFWP ケーシングロー弁	FW-210	無	○	○
157	4 MDFWPウォーミング弁	FW-162	無	○	○
158	4 MDFWP 出入口差圧 dPT-5221⇔5223 高圧側元弁	FW122	無	○	○
159	4 MDFWP 出口ベント弁	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 ケーシングドレン弁	FW-230	無	○	○
167	4 MDFWP 吐出圧力計元弁 (PI-5235L)	FW-232	無	○	○
168	4 MDFWP 吐出圧力計元弁 (PI-5217)	FW-212	無	○	○
169	4 MDFWP ミニマフロ-流量計上流側元弁 (FT-5239)	FW-156a	無	○	○
170	4 MDFWP ミニマフロ-流量計下流側元弁 (FT-5239)	FW-157a	無	○	○
171	4 MDFWP ミニマフロ-流量計上流側元弁 (FT-5241)	FW-158a	無	○	○
172	4 MDFWP ミニマフロ-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フロ-制御弁	FCV-5239	無	○	○
174	4 MDFWP 出口ロー元弁	FW-018a	無	○	○
175	4 A 6ヒータ入口給水ロー元弁	FW020AA	無	○	○
176	4 A 6ヒータ出口給水ベント元弁	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ヒータ出口給水ロー元弁	FW022AA	無	○	○
179	4 B 6ヒータ入口給水ロー元弁	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ヒータ出口給水ベント弁	FW021BA	無	○	○
182	4 B 6ヒータ出口給水ブロー弁	FW022BA	無	○	○
183	4 S G M P 入口ヒドラジン注入弁	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 ケーシングドレン弁	FW-320	無	○	○
186	4 S G M P ケーシングベント弁	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ヒータ出口ヘッド給水サンプリング弁	FW015A	無	○	○
194	4 主給水ヘッド圧力計元弁 (P T - 5 2 5 2)	FW014A	無	○	○
195	4 主給水ヘッド圧力発信器第 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 主給水流量制御弁入口配管ドレン元弁	FW-601A	無	○	○
198	4 A 主給水流量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 主給水流量制御弁入口配管ドレン元弁	FW-601B	無	○	○
207	4 B 主給水流量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 主給水流量制御弁入口配管ドレン元弁	FW-601C	無	○	○
216	4 C 主給水流量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量発信器上流側第 1 元弁 (F T - 4 6 0)	FW513A	無	○	○
225	4 A 蒸気発生器主給水流量発信器上流側第 1 元弁 (F T - 4 6 1)	FW513A	無	○	○
226	4 A 蒸気発生器主給水流量発信器 (仮設) 上流側第 1 元弁	FW523A	無	○	○
227	4 A 蒸気発生器主給水流量発信器 (仮設) 下流側第 1 元弁	FW525A	無	○	○
228	4 A 蒸気発生器主給水流量発信器下流側第 1 元弁 (F T - 4 6 1)	FW515A	無	○	○
229	4 A 蒸気発生器主給水流量発信器下流側第 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量発信器上流側第 1 元弁 (F T - 4 7 0)	FW511B	無	○	○
233	4 B 蒸気発生器主給水流量発信器上流側第 1 元弁 (F T - 4 7 1)	FW513B	無	○	○
234	4 B 蒸気発生器主給水流量発信器 (仮設) 上流側第 1 元弁	FW523B	無	○	○
235	4 B 蒸気発生器主給水流量発信器 (仮設) 下流側第 1 元弁	FW525B	無	○	○
236	4 B 蒸気発生器主給水流量発信器下流側第 1 元弁 (F T - 4 7 1)	FW515B	無	○	○
237	4 B 蒸気発生器主給水流量発信器下流側第 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量発信器上流側第 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	4 C 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	4 C 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	4 C 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	4 C 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	4 C 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	4 C 主給水ブローラインドレン弁	FW-808	無	○	○
247	4 A 主給水ブローラインドレン弁	FW-826	無	○	○
248	4 C 主給水ブローラインドレン弁	FW-820	無	○	○
249	4 B-TDFWP吐出圧力計 (PI-5234B)	FW-007Bb	無	○	○
250	4 B-TDFWP吐出圧力計 (PI-5236B)	FW-008Bb	無	○	○
251	4 B-TDFWPミニマムフロー-FT-5238B上流側弁	FW152Bb	無	○	○
252	4 B-TDFWPミニマムフロー-FT-5238B下流側弁	FW153Bb	無	○	○
253	4 B-TDFWPミニマムフロー-FT-5240B上流側弁	FW154Bb	無	○	○
254	4 B-TDFWPミニマムフロー-FT-5240B下流側弁	FW155Bb	無	○	○
255	4 B-TDFWPミニマムフローブロー元弁	FW-166Ba	無	○	○
256	4 FWP出口ヘッド圧力計 (PT-5248)	FW-010b	無	○	○
257	4 A-TDFWP吐出圧力計 (PI-5234A)	FW-007Ab	無	○	○
258	4 A-TDFWP吐出圧力計 (PI-5236A)	FW-008Ab	無	○	○
259	4 A-TDFWPミニマムフロー-FT-5238A上流側弁	FW152Ab	無	○	○
260	4 A-TDFWPミニマムフロー-FT-5238A下流側弁	FW153Ab	無	○	○
261	4 A-TDFWPミニマムフロー-FT-5240A上流側弁	FW154Ab	無	○	○
262	4 A-TDFWPミニマムフロー-FT-5240A下流側弁	FW155Ab	無	○	○
263	4 A-TDFWPミニマムフローブロー元弁	FW-166Aa	無	○	○
264	4 MDFWP吐出圧力計 (PI-5235L)	FW233	無	○	○
265	4 MDFWPミニマムフロー-流量計上流側弁 (FT-5239)	FW-156b	無	○	○
266	4 MDFWPミニマムフロー-流量計下流側弁 (FT-5239)	FW-157b	無	○	○
267	4 MDFWPミニマムフロー-流量計上流側弁 (FT-5241)	FW-158b	無	○	○
268	4 MDFWPミニマムフロー-流量計下流側弁 (FT-5241)	FW-159b	無	○	○
269	4 MDFWPミニマムフローブロー元弁	FW-167A	無	○	○
270	4 A 6ヒータ入口給水ブロー弁	FW020AB	無	○	○
271	4 A 6ヒータ出口給水ブロー弁	FW022AB	無	○	○
272	4 A 6ヒータ出口給水圧力計 (PI-5250A)	FW-013Ab	無	○	○
273	4 B 6ヒータ入口給水ブロー弁	FW020BB	無	○	○
274	4 B 6ヒータ出口給水圧力計 (PI-5250B)	FW-013Bb	無	○	○
275	4 B 6ヒータ出口給水ブロー弁	FW022BB	無	○	○
276	4 SGMP吐出圧力計 (PI-5258)	CW377B	無	○	○
277	4 SGMP吐出圧力計 (PT-528)	CW378B	無	○	○
278	4 SGMP出口流量計上流側弁 (FT-5259)	CW300B	無	○	○
279	4 SGMP出口流量計下流側弁 (FT-5259)	CW301B	無	○	○
280	4-6ヒータ出口ヘッド給水サンプリング弁	FW015B	無	○	○
281	4 主給水ヘッド圧力発信器第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	4 A 蒸気発生器主給水圧力発信器第2元弁 (PT-3712)	FW510A	無	○	○
284	4 B 蒸気発生器主給水圧力発信器第2元弁 (PT-3722)	FW510B	無	○	○
285	4 C 蒸気発生器主給水圧力発信器第2元弁 (PT-3732)	FW510C	無	○	○
286	4 A 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	4 A 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	4 A 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	4 A 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	4 A 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	4 A 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	4 B 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	4 B 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	4 B 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	4 B 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	4 B 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	4 B 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	4 C 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	4 C 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	4 C 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

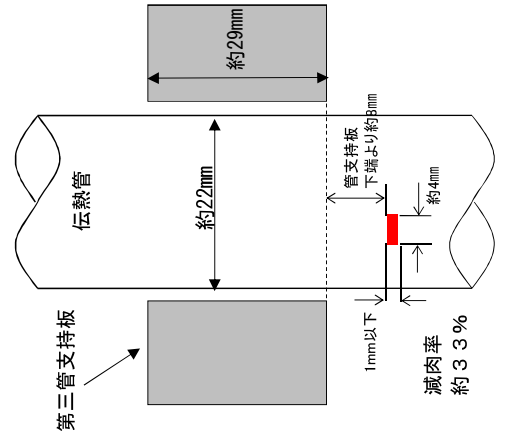
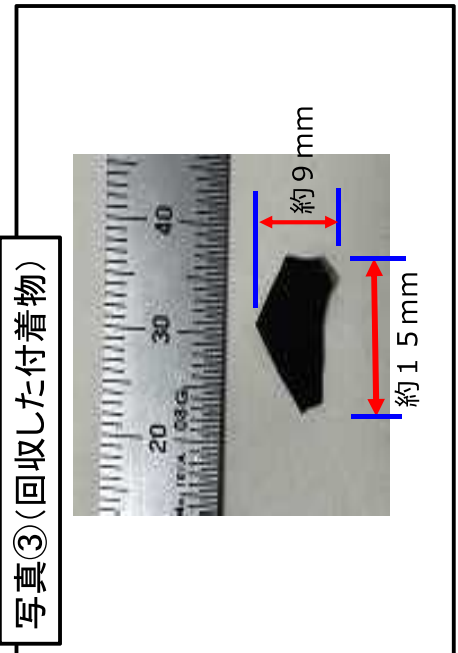
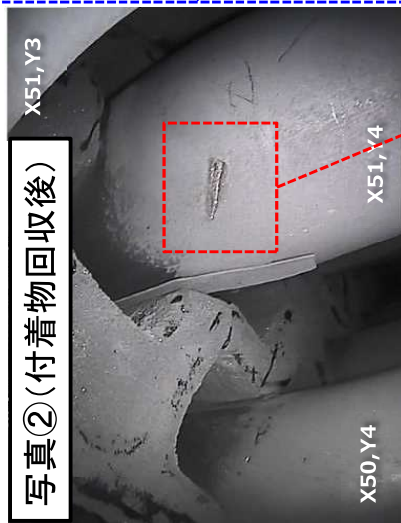
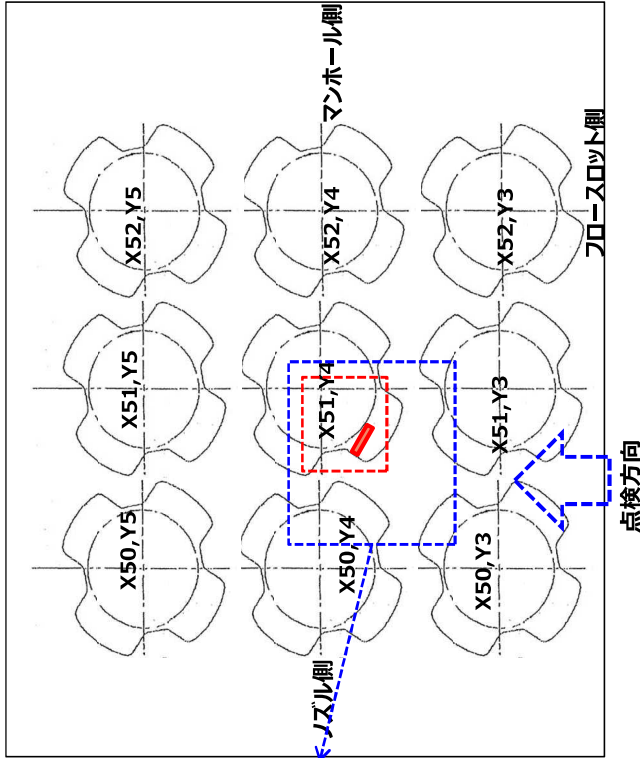
S Gに流入する可能性のある機器開放点検一覧

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タービン動主給水プースタボンプ入口ストレーナ	ストレーナ	有	○	○
305	Bタービン動主給水プースタボンプ入口ストレーナ	ストレーナ	有	○	○
306	A, B 電動主給水プースタボ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 ミニマフロー流量計オリフイスフランジ	フランジ	無	○	○

SG器内点検結果

SG伝熱管2次側表面写真

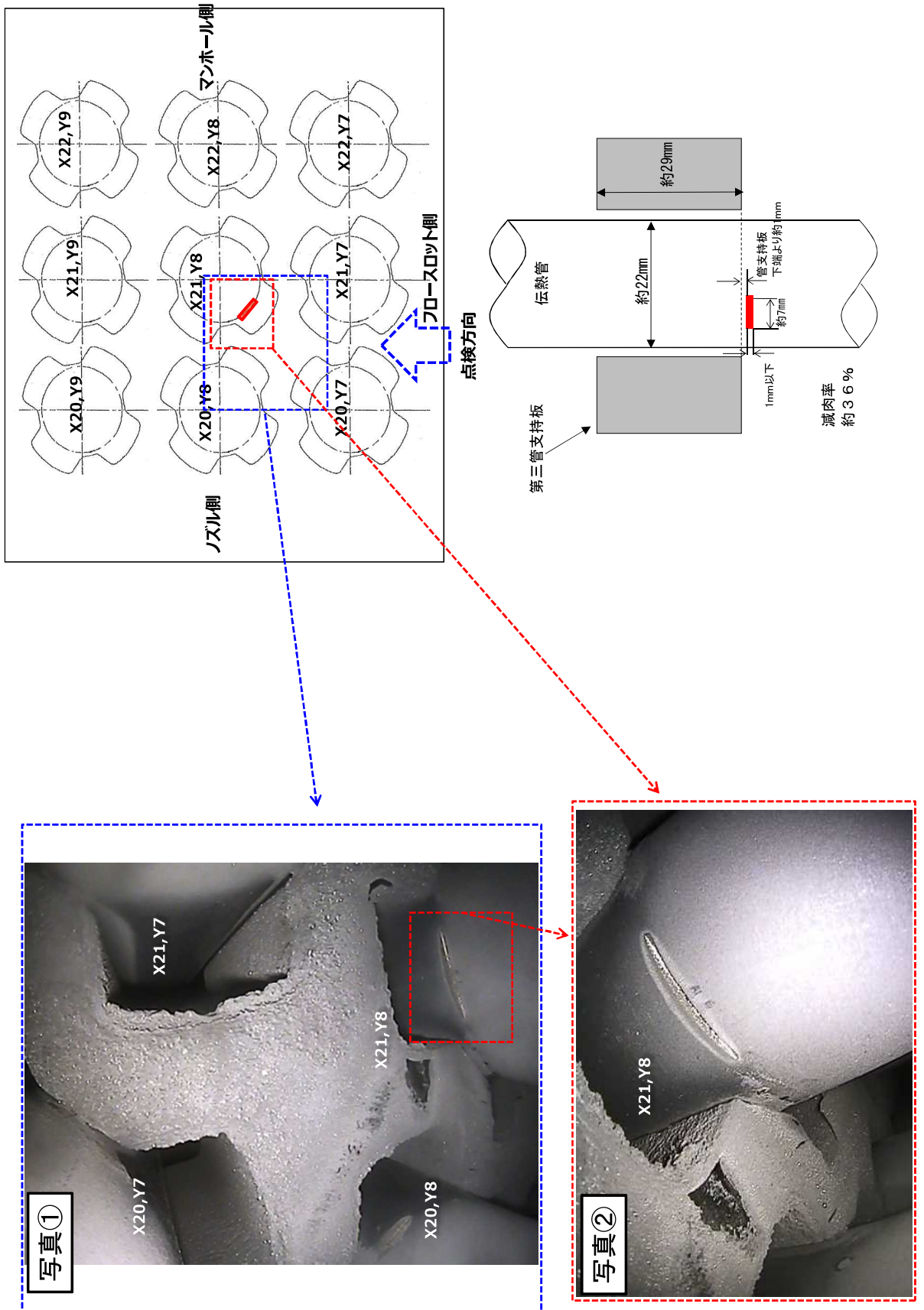
対象：A-SG 第三管支持板下面 伝熱管 X51, Y4 @Cold



SG器内点検結果

SG伝熱管2次側表面写真

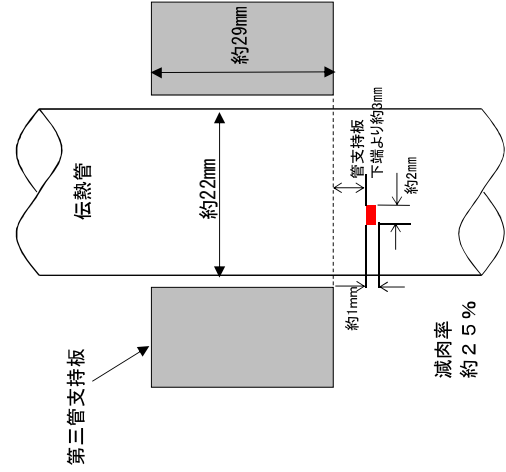
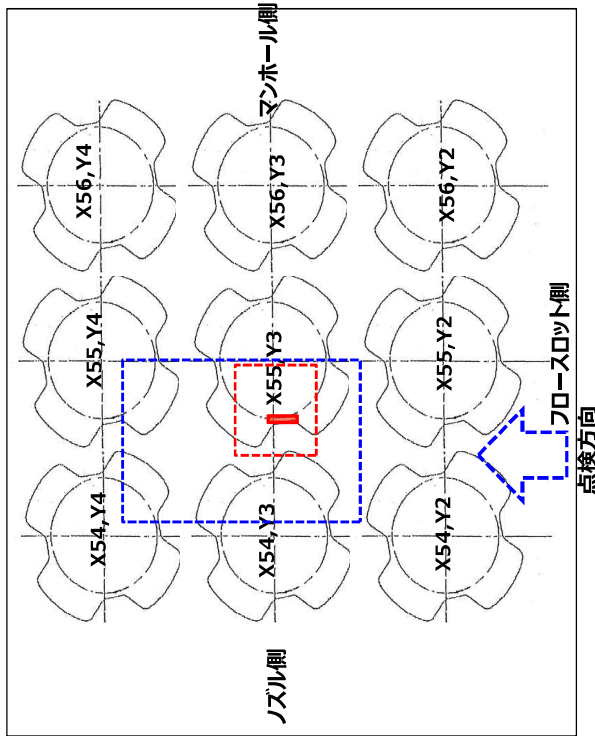
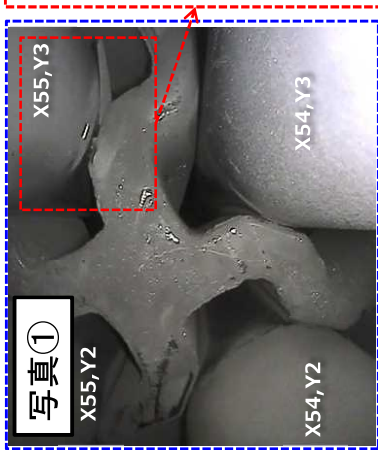
対象：C-SG 第三管支持板下面 伝熱管 X21, Y8 @Cold



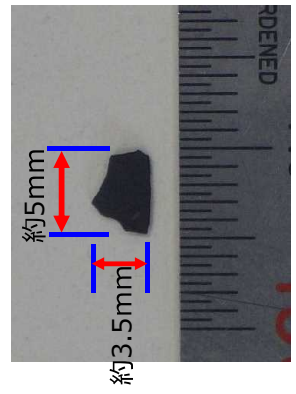
SG器内点検結果

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 X55, Y3 @Cold



写真⑤ (回収した付着物の一部)

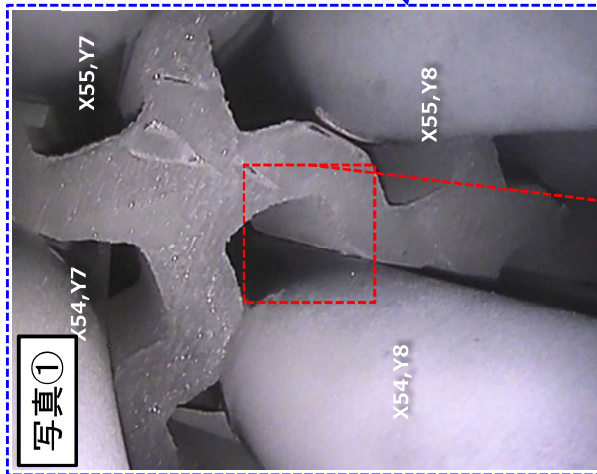
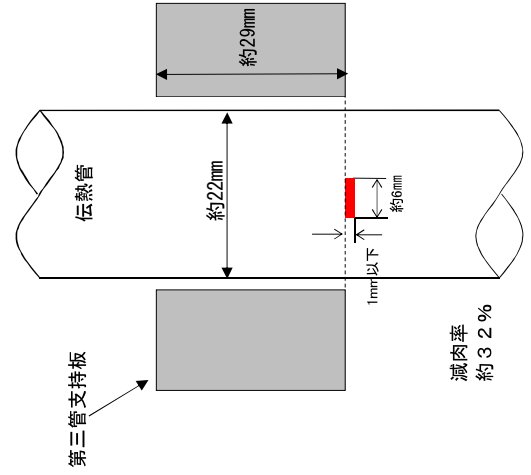
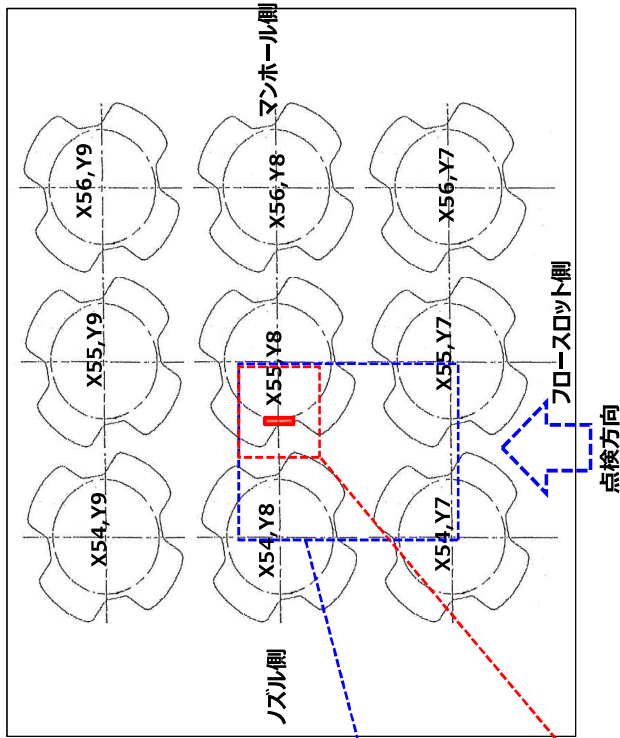


- 回収の結果、付着物が折れ、一部回収した。
- 残りの付着物については、粉碎し、回収することができなかった。

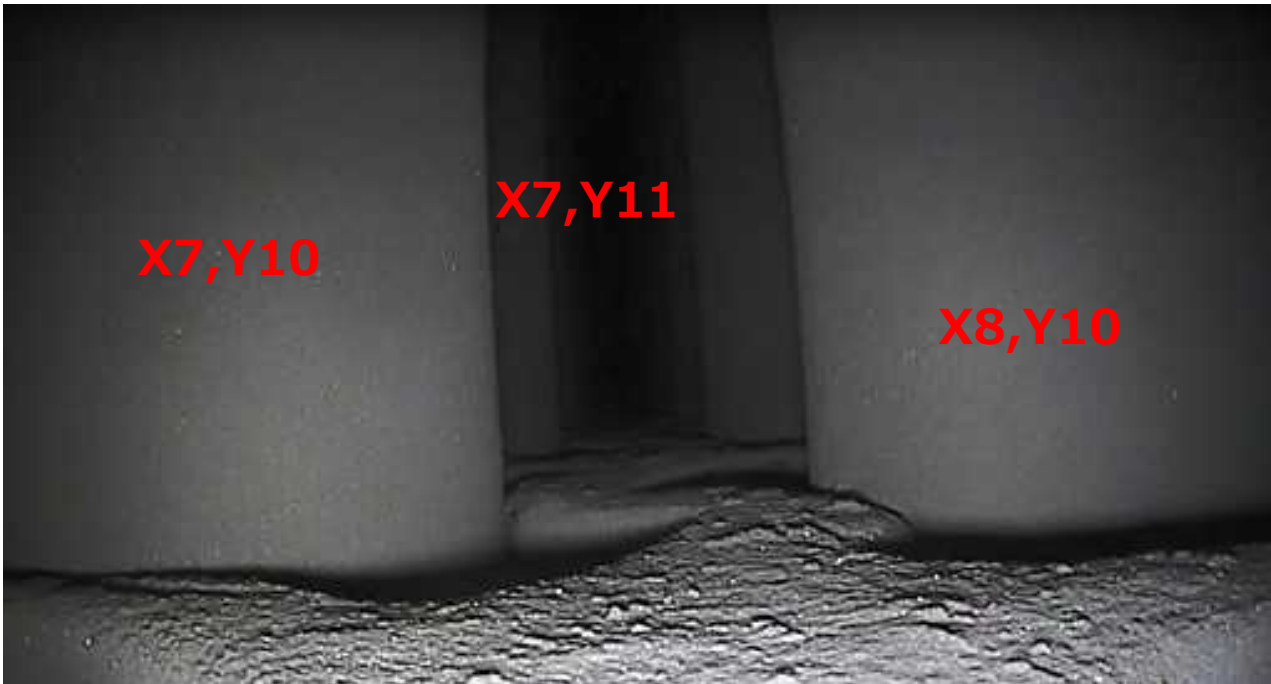
SG器内点検結果

SG伝熱管2次側表面写真

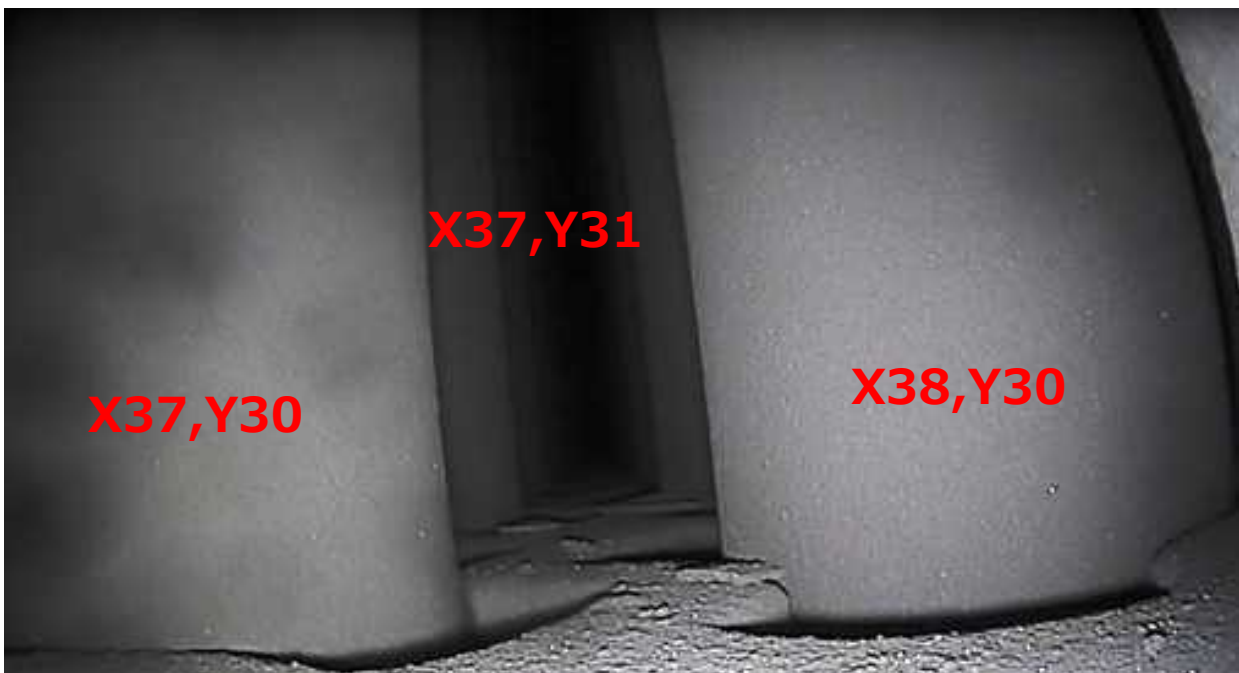
対象：C-SG 第三管支持板下面 伝熱管 X55, Y8 @Cold



S G器内点検結果
A-S G 第一管支持板上写真



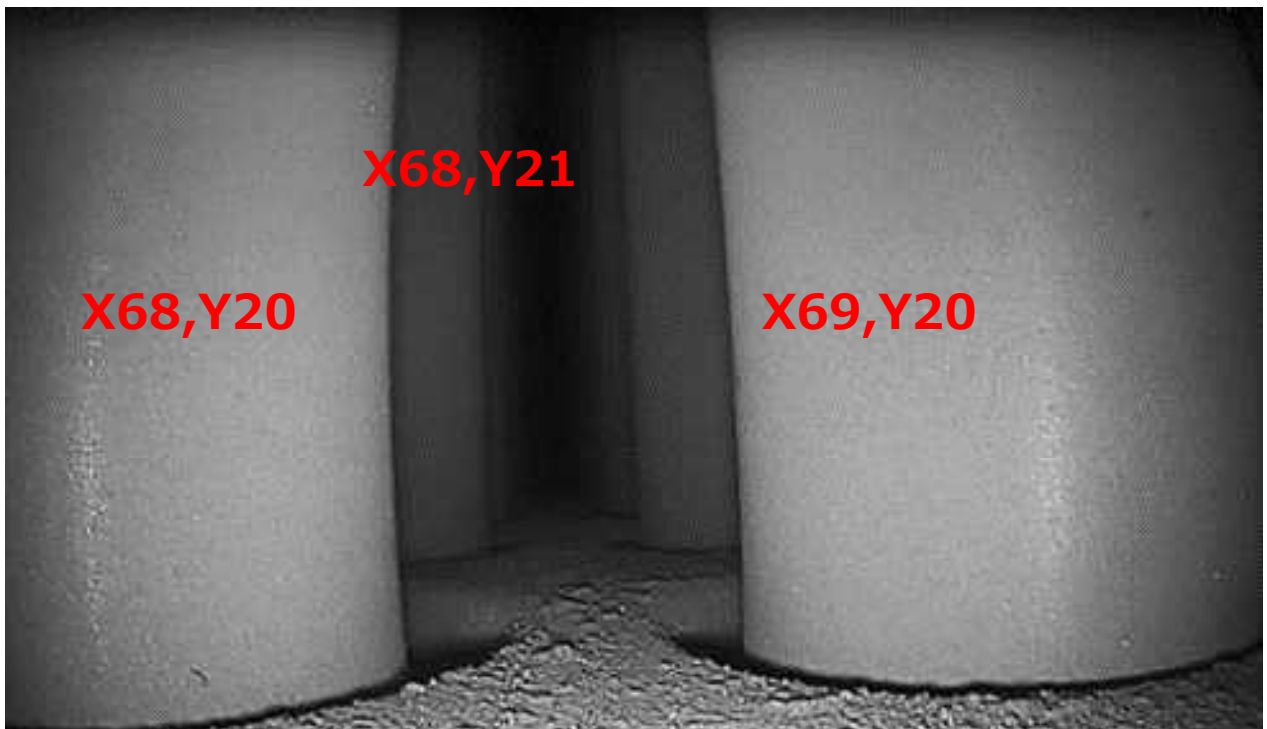
A-S G 第二管支持板上写真



S G器内点検結果
A-S G 管板上写真



A-S G 流量分配板上写真



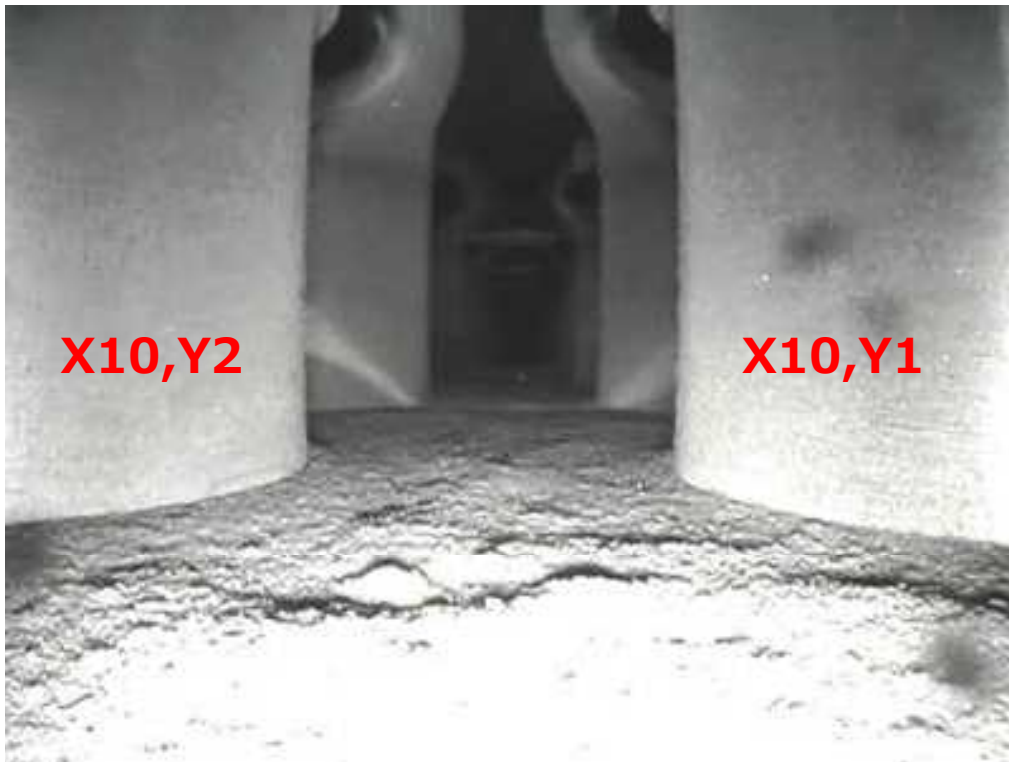
SG器内点検結果
C-SG 第一管支持板上写真



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



C-SG 流量分配板上写真



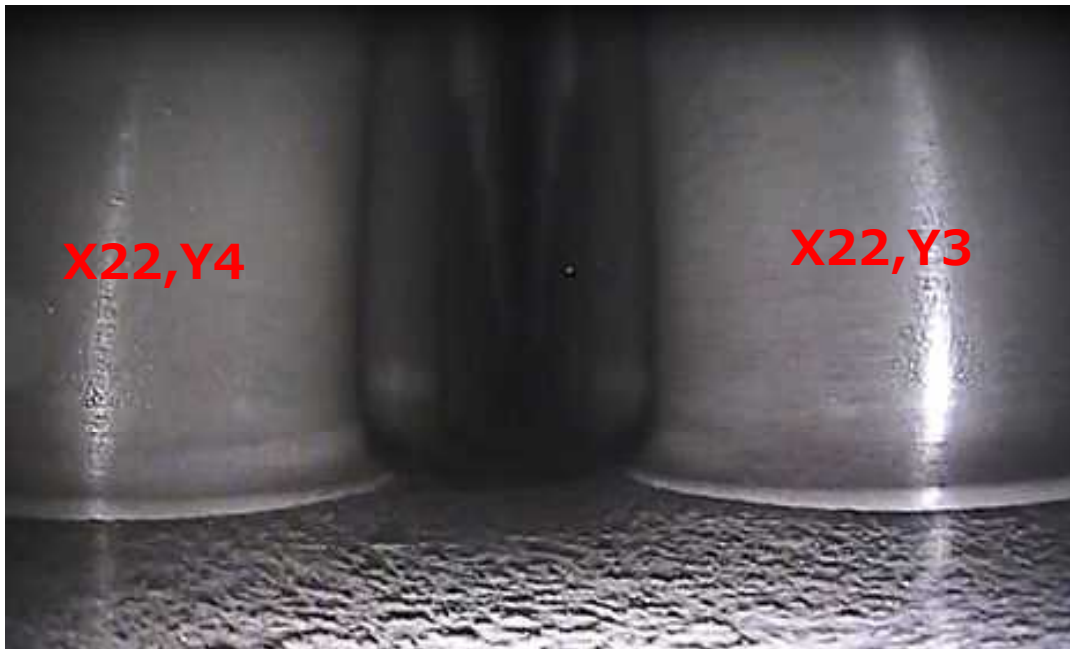
SG器内点検結果
B-SG 第一管支持板上写真



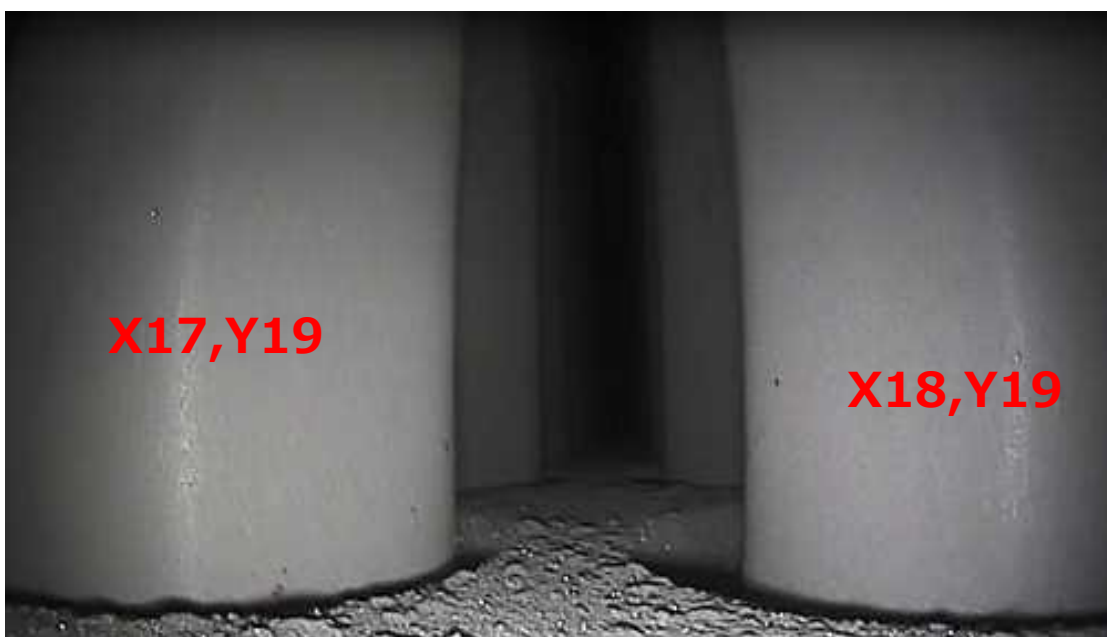
B-SG 第二管支持板上写真



SG器内点検結果
B-SG 管板上写真

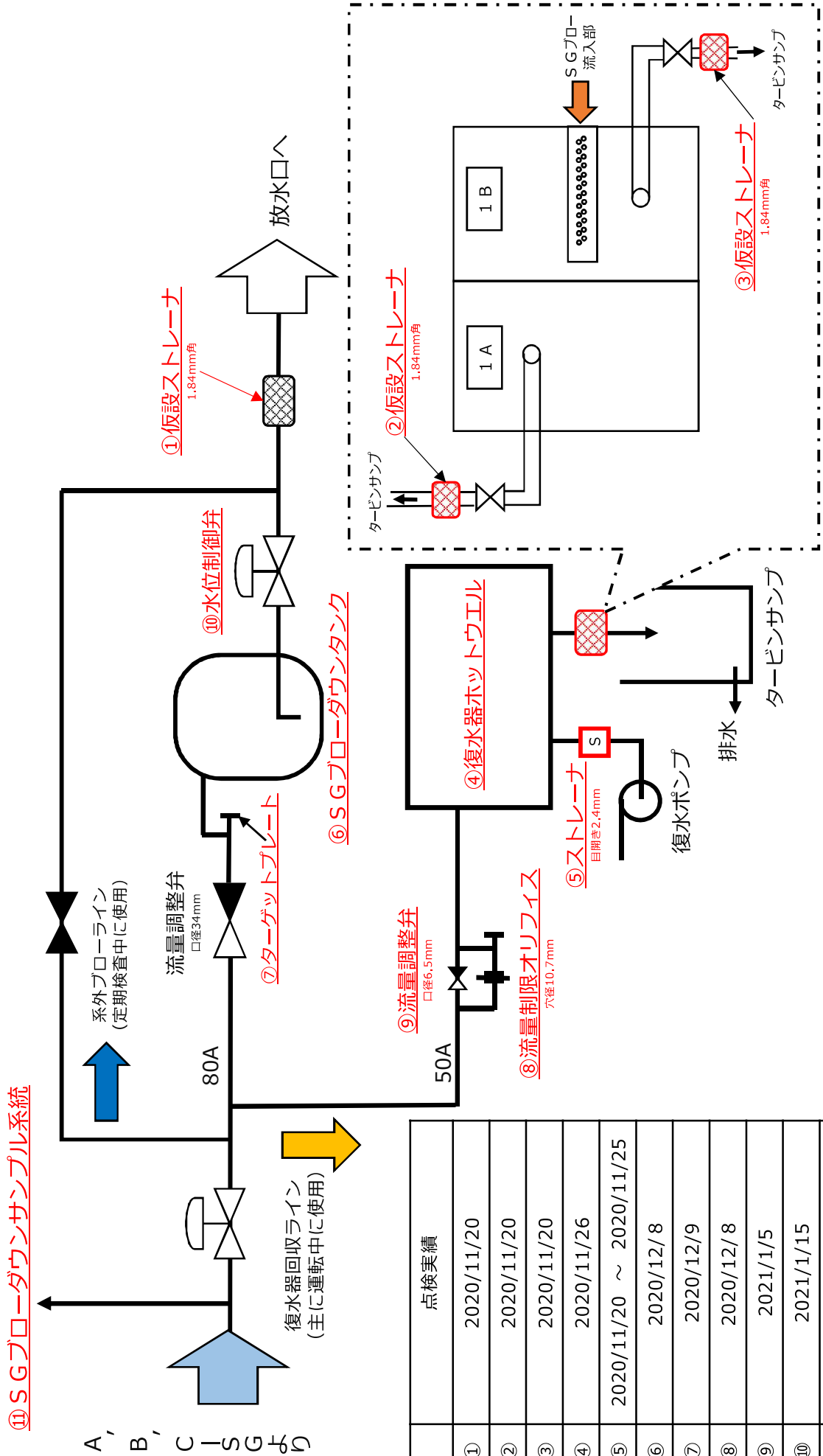


B-SG 流量分配板上写真



SGブローダウンシステム点検結果 (1/15)

SGブローダウンシステム点検概略図

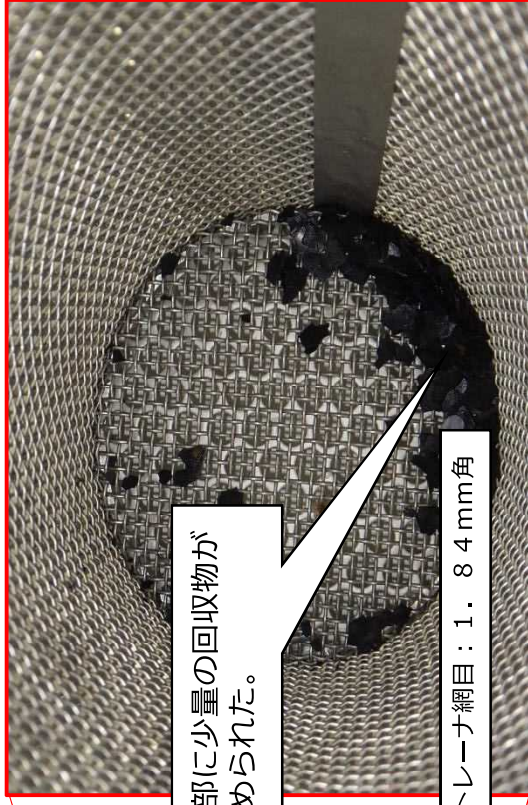


点検実績	点検実績
①	2020/11/20
②	2020/11/20
③	2020/11/20
④	2020/11/26
⑤	2020/11/20 ~ 2020/11/25
⑥	2020/12/8
⑦	2020/12/9
⑧	2020/12/8
⑨	2021/1/5
⑩	2021/1/15
⑪	2021/1/15

SGブローダウンシステム点検結果 (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。

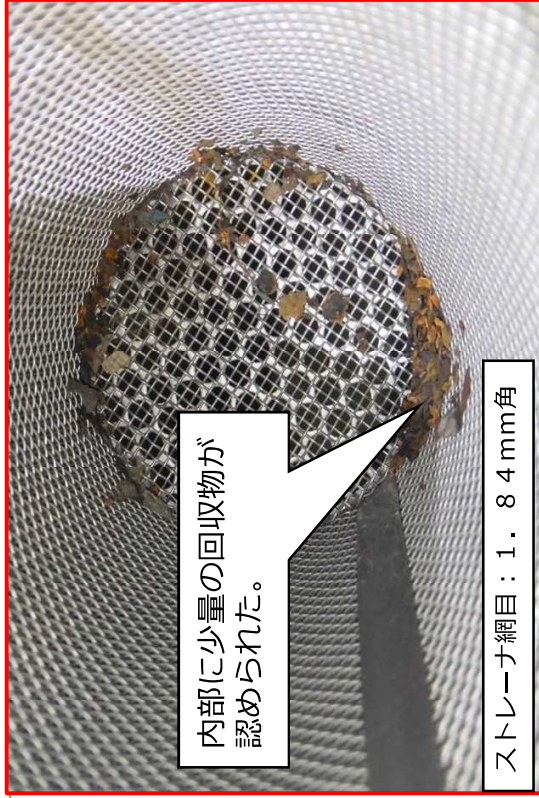
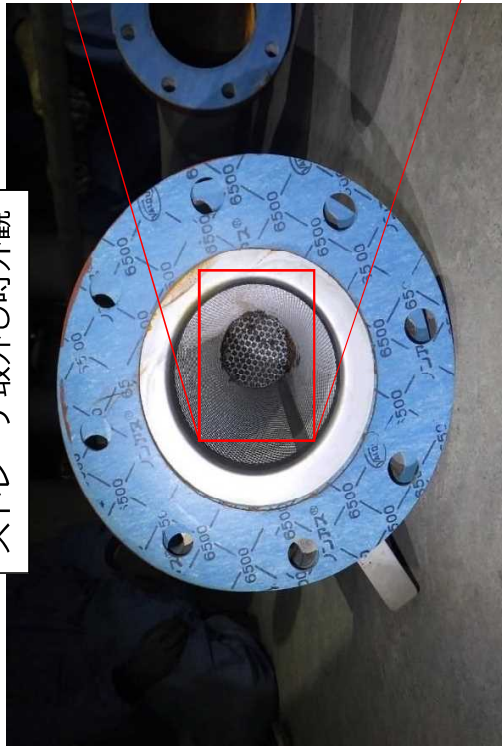
回収物拡大



SGブローダウンシステム点検結果 (3/15)

②復水器ホットウエル(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



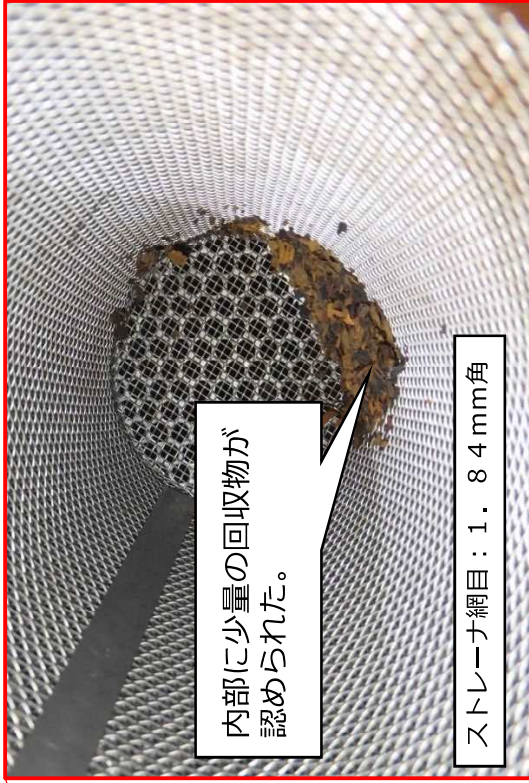
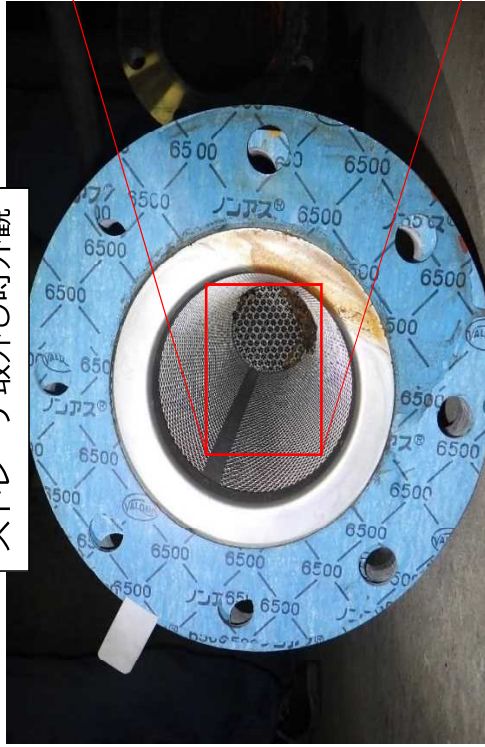
回収物の大きさ
最大：約6.0mm×約6.0mm×厚さ約2.0mm
回収量：約2.9g

【回収物に対する見解】
回収物は鉄さびであり、二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復水器ホットウエル(1B)ブロー配管仮設ストレーナ

ストレーナ取外し時外観



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

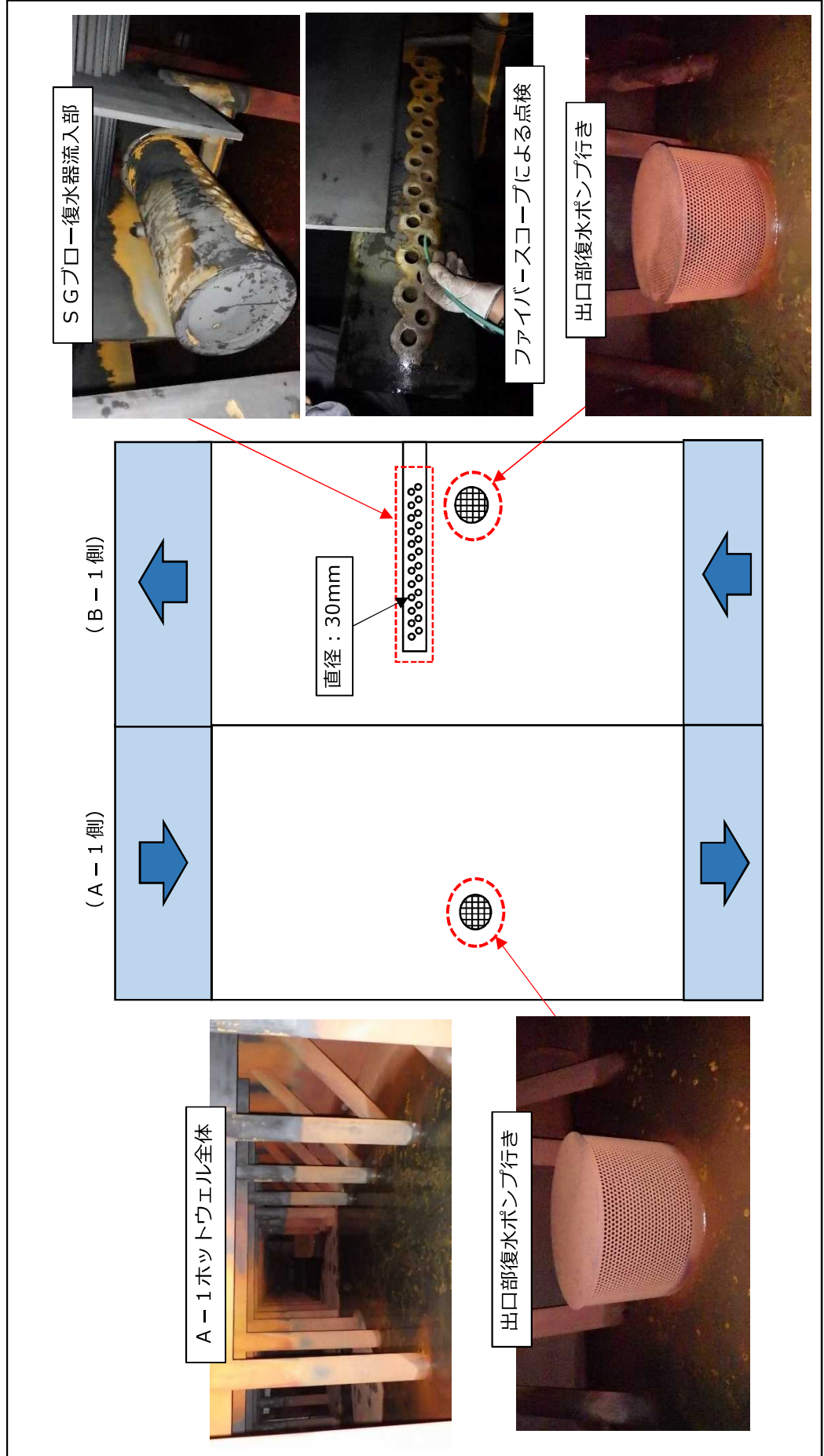


回収物の大きさ
最大：約10.0mm×約7.0mm×厚さ約1.0mm
回収量：約18.9g

【回収物に対する見解】
回収物は鉄さびであり、二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復水器ホットウエルNo. 1 (異物なし)



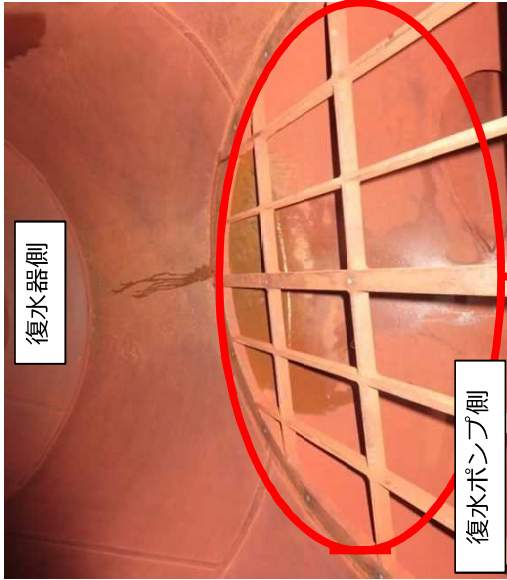
SGブローダウンシステム点検結果 (6/15)

⑤復水ポンプ入口ストレーナ (異物なし)

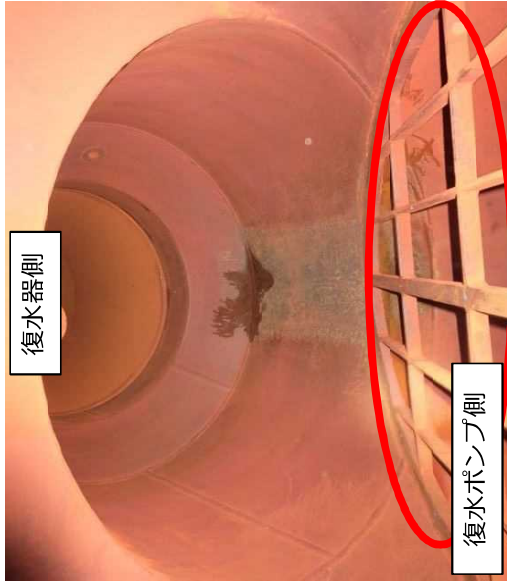
4A-復水ポンプ入口ストレーナ



4B-復水ポンプ入口ストレーナ

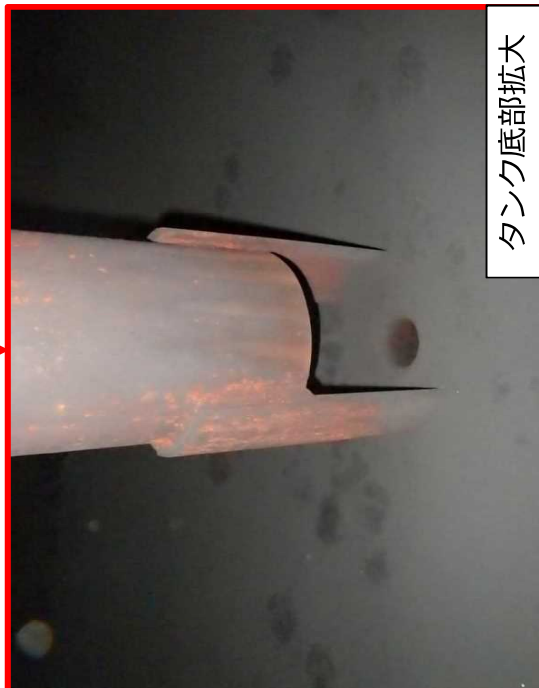
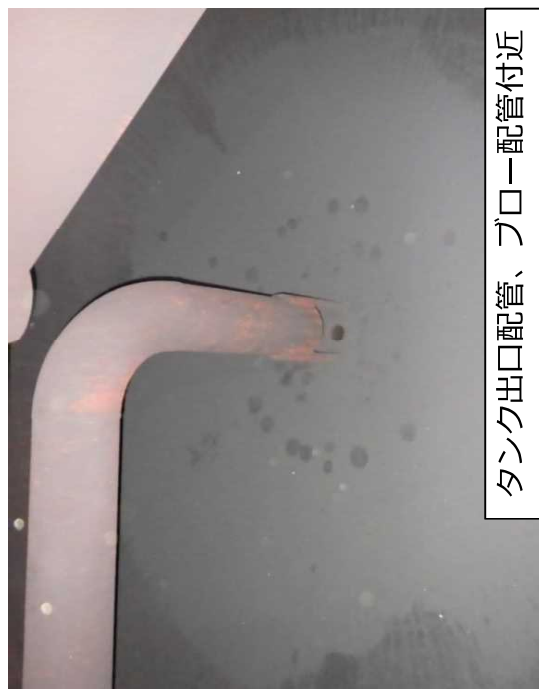
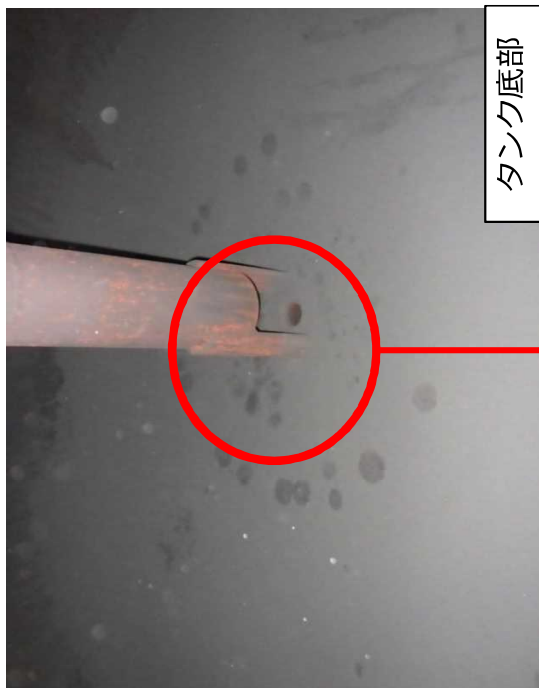


4C-復水ポンプ入口ストレーナ



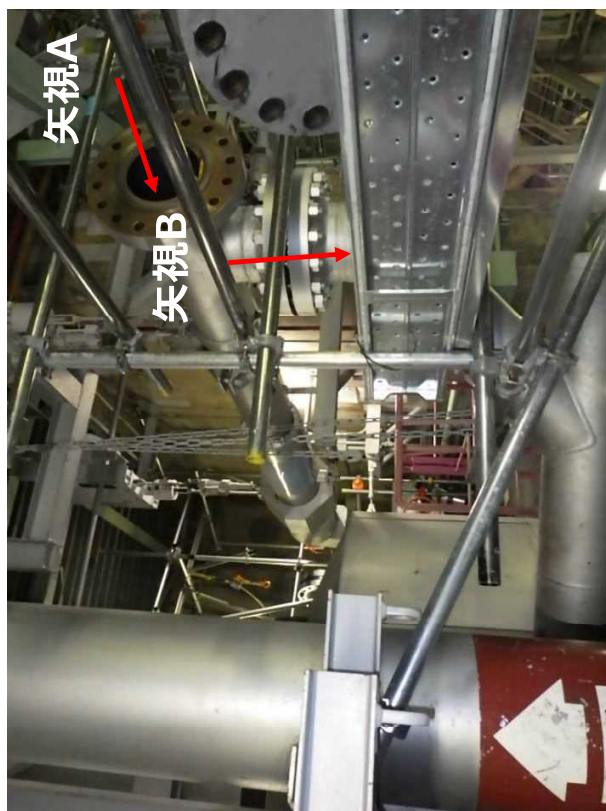
SGブローダウン系統点検結果 (7/15)

⑥SGブローダウンタンク (異物なし)



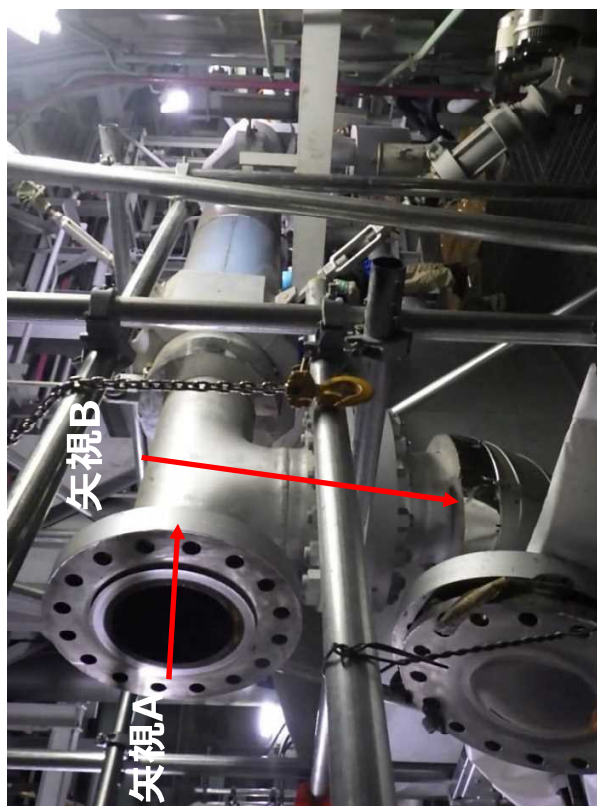
SGブローダウンシステム点検結果 (8/15)

⑦-1 A-SGブローダウンシステム ターゲットプレート (異物なし)



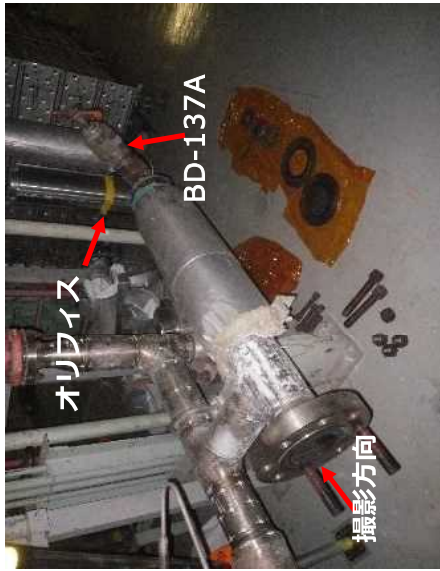
SGブローダウンシステム点検結果 (9/15)

⑦-2 C-SGブローダウンシステム ターゲットプレート (異物なし)

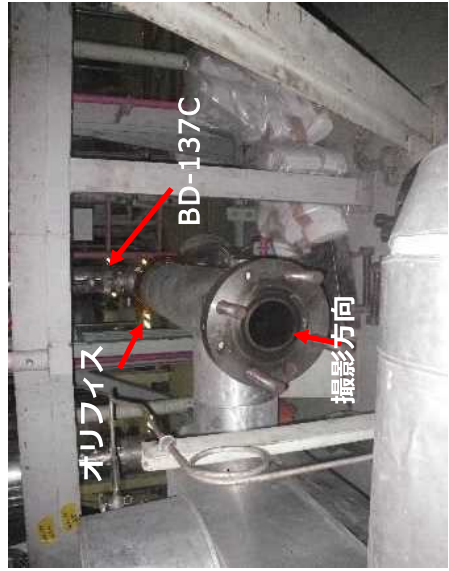


SGブローダウンシステム点検結果 (10/15)

⑧-1 A-SG 流量制限オリフイス (異物なし)

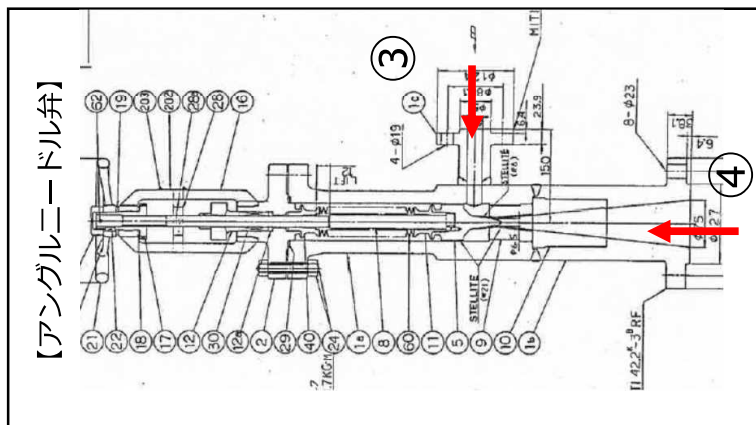
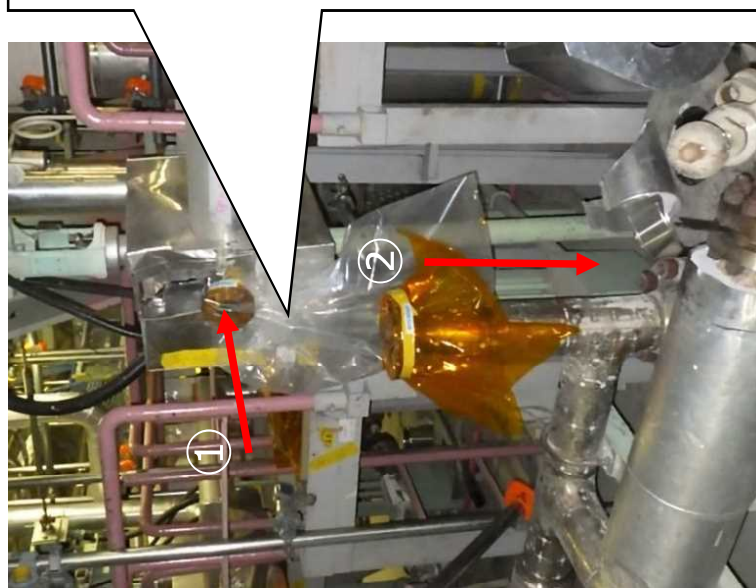


⑧-2 C-SG 流量制限オリフイス (異物なし)



SGブローダウン系統点検結果 (11/15)

⑨-1 流量調整弁 (BD-123A) (異物なし)



①入口配管



③弁入口管



②出口配管

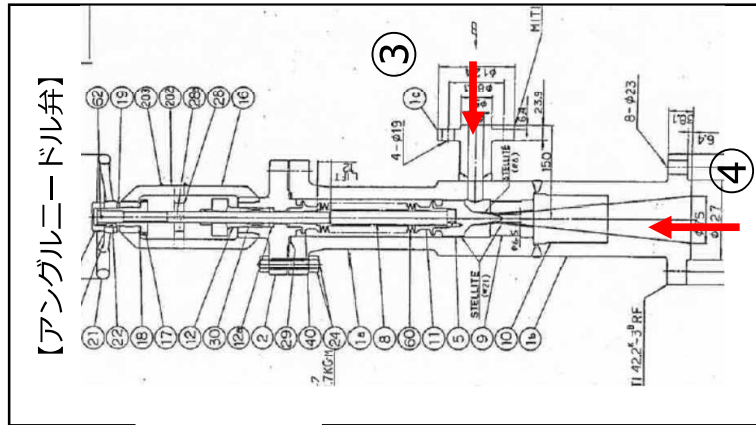
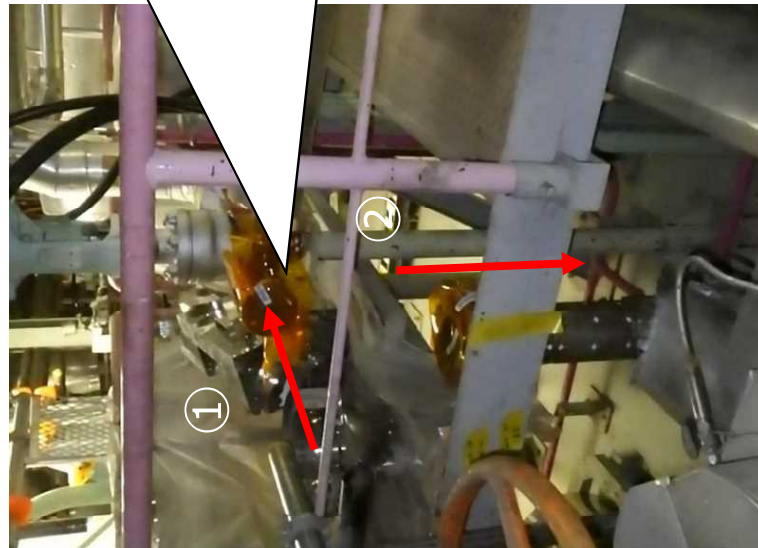


④弁出口管



SGブローダウン系統点検結果 (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

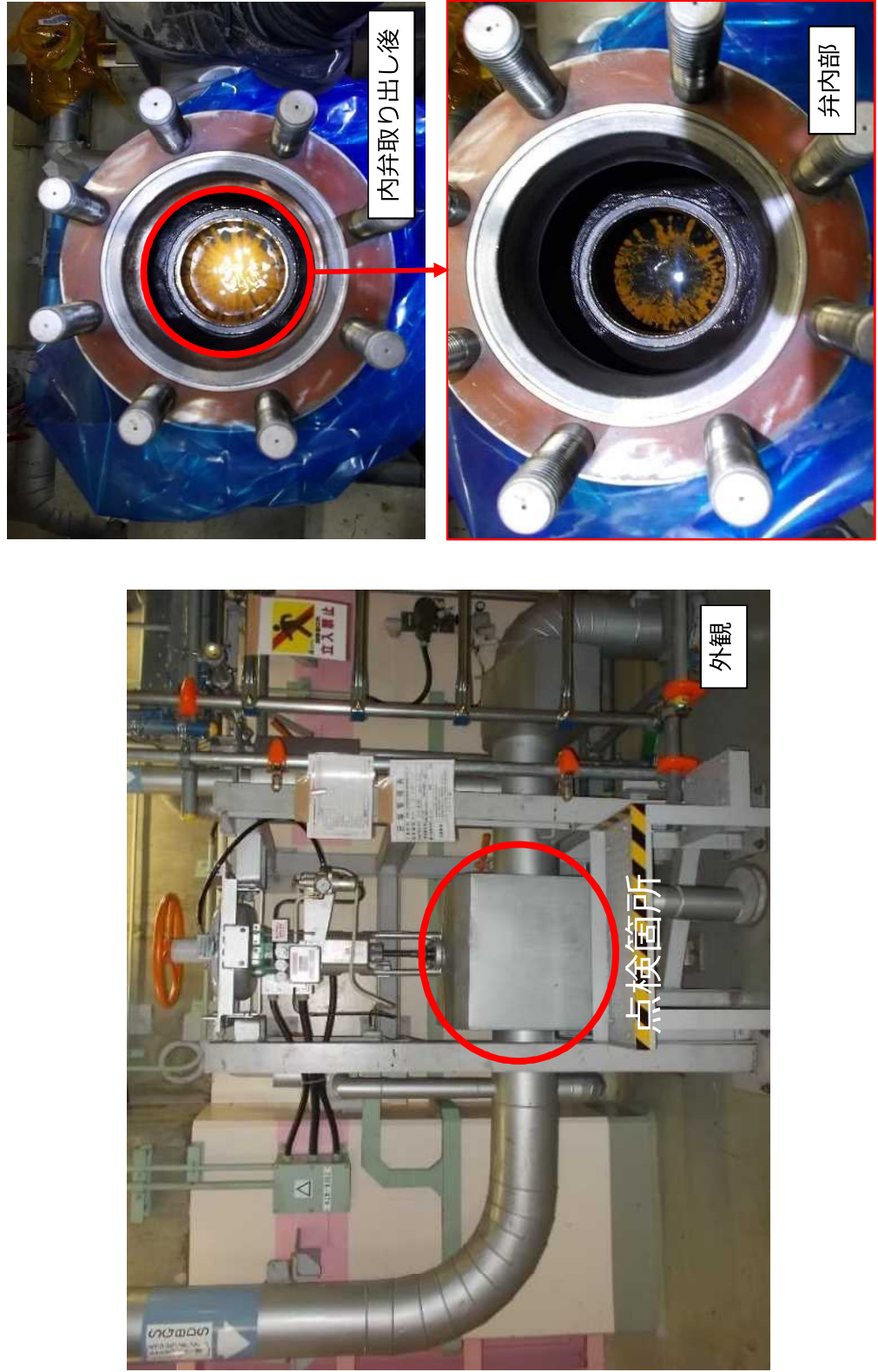


④ 弁出口管



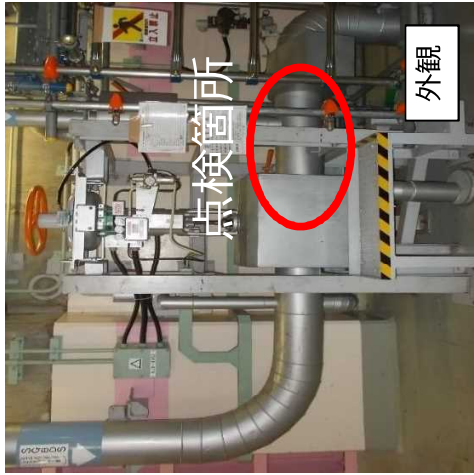
SGブローダーダウン系統点検結果 (13/15)

⑩-1 水位制御弁 弁内部 (異物なし)

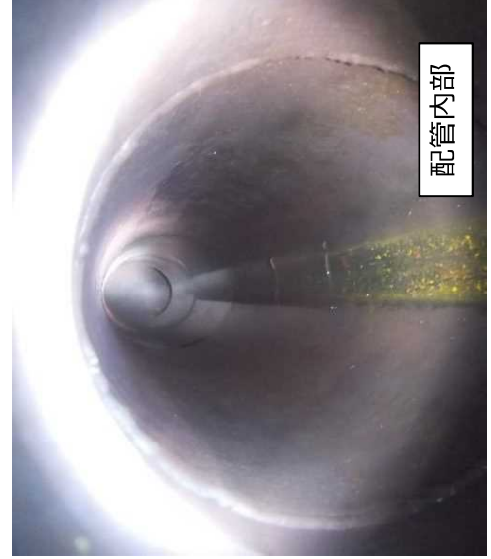
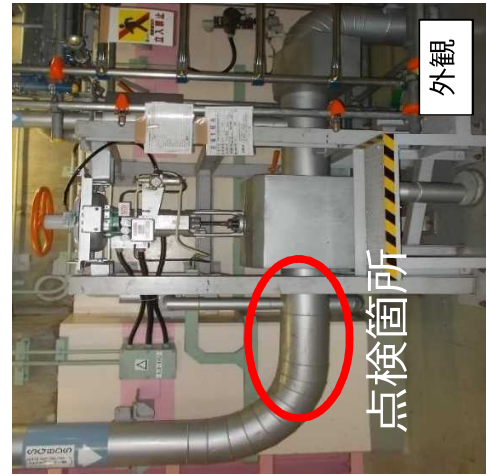


SGブローダウンシステム点検結果（14／15）

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ブローダウンシステム点検結果（15／15）

⑪ SGブローダウンシステム点検結果

SGブローダウンシステムの点検概略図

SGブローダウンサンプルライン上流 1インチ※1の範囲について小型カメラにて異物の有無を確認した。

減圧棒までの3/8インチ※2の範囲（約50m x 3ループ）について、フラッシングにより異物の有無を確認した。

SGブローダウンサンプルライン

減圧棒

放射線監視装置

減圧棒

手動サンプルライン

SGブローダウンライン

※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。

①SG側

②反SG側

(C-S/Gの例)

フラッシング結果

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

(フラッシングの様子) (フラッシング後のフィルタ)

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

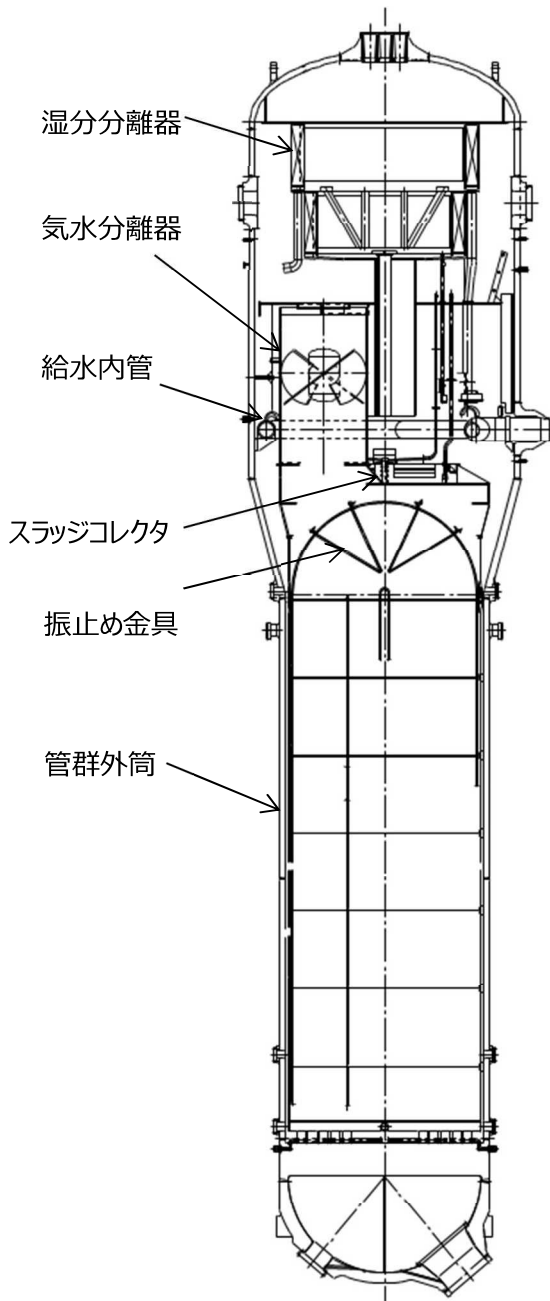
上記のうち、伝熱管群を通過するサイズの異物を発生させる可能性のある事象は、流れ加速型腐食による以下の炭素鋼部品の脱落である。

- ・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	[Redacted]	[Redacted]
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		
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。

SG 2次側内部品について

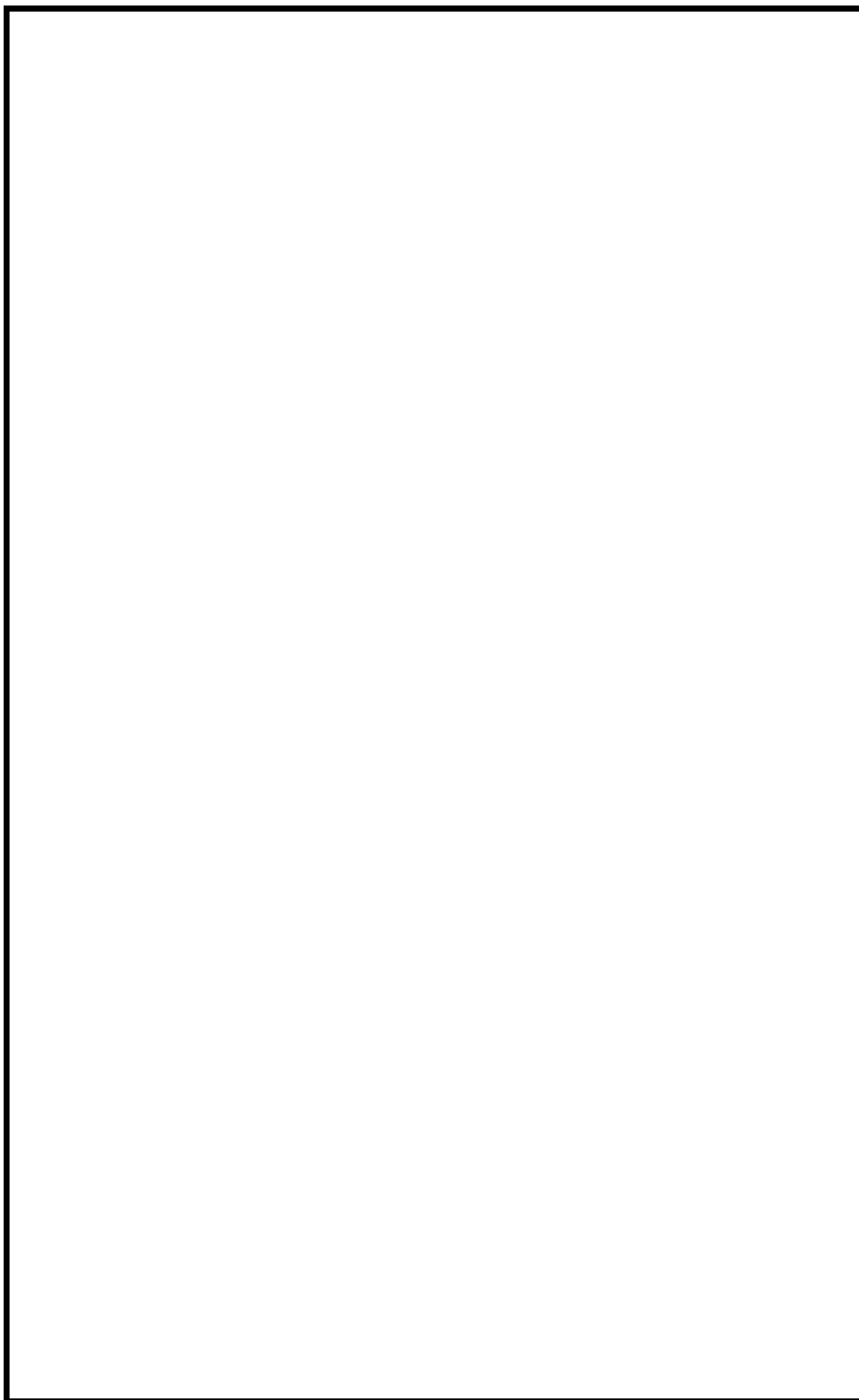



図2 振止め金具（AVB）構造図

 : 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。

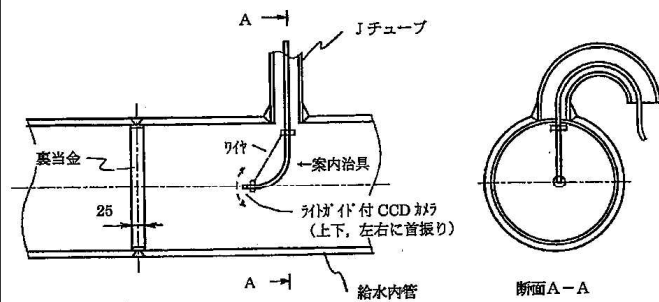
SG 2 次側内部品について

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）



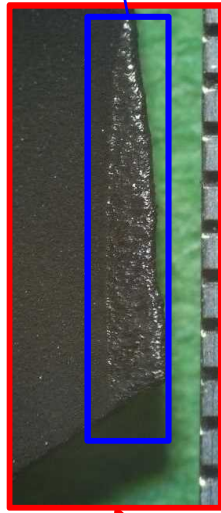
: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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

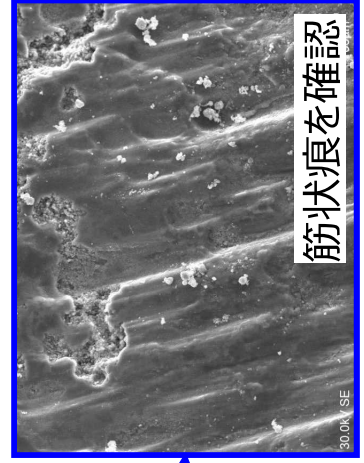
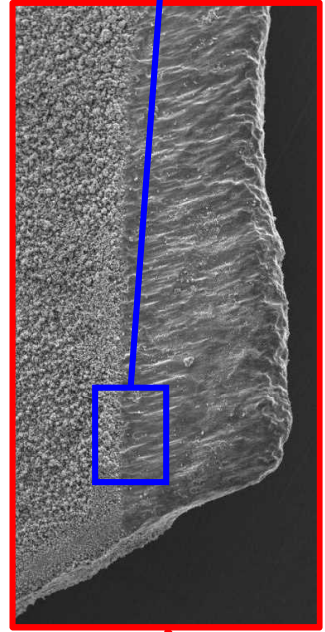
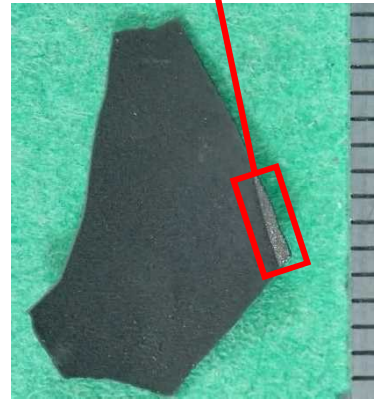
- 伝熱管減肉部と付着物の接触想定部 (角部) には、接触痕があり、光沢が認められた。
- 形状 (R形状) を計測した結果、直径約 2.5 mm の円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径 2.2. 2.3 mm に近い形状である。



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。



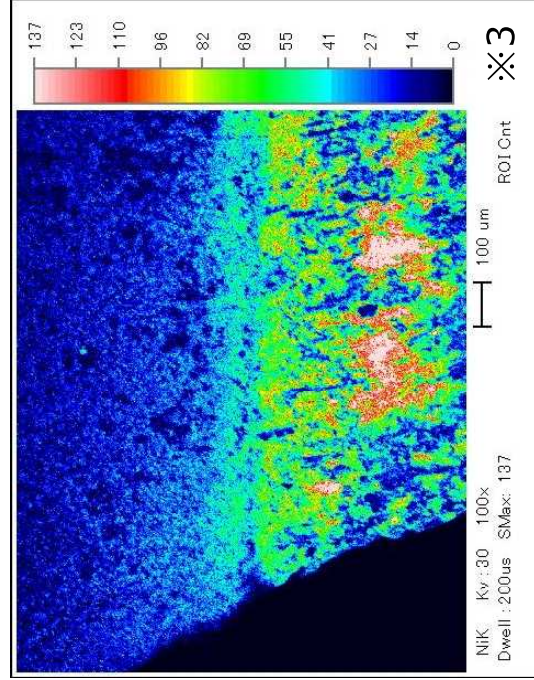
付着物分析結果（2 / 5）

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

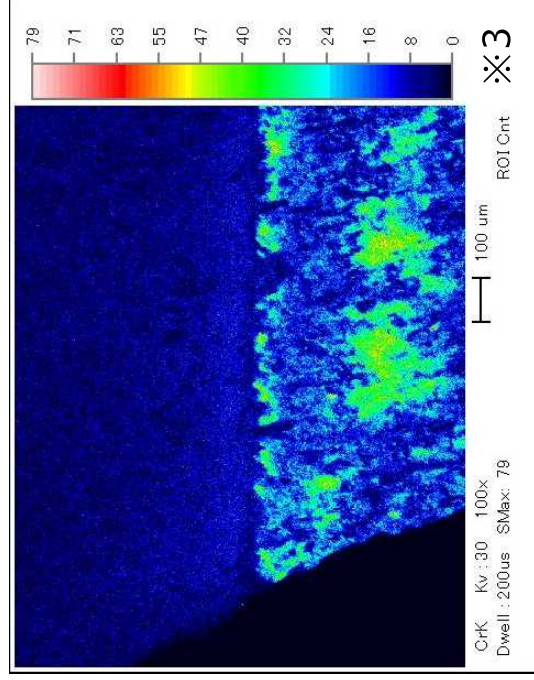
③ 成分分析（X線回折※1、EDS※2）

- 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。

【Ni】



【Cr】



※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、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

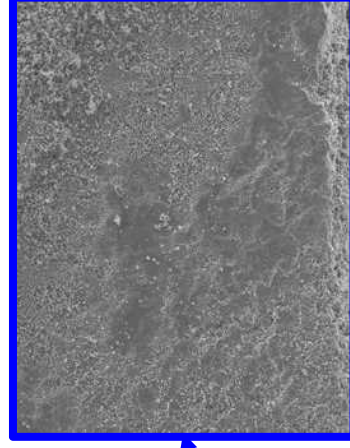
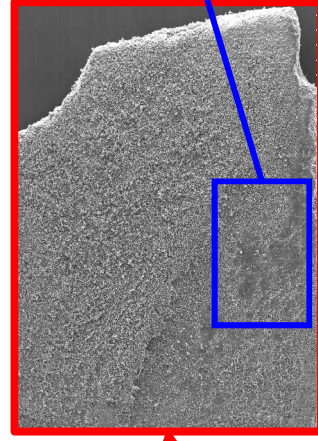
- 付着物の表面を観察した結果、接触痕並びに光沢は確認できなかった。
- 形状（R形状）を計測した結果、直径約 21.9mm の円筒状に沿った形状であり、これは 伝熱管の外径 22.23mm に近い形状 である。



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。

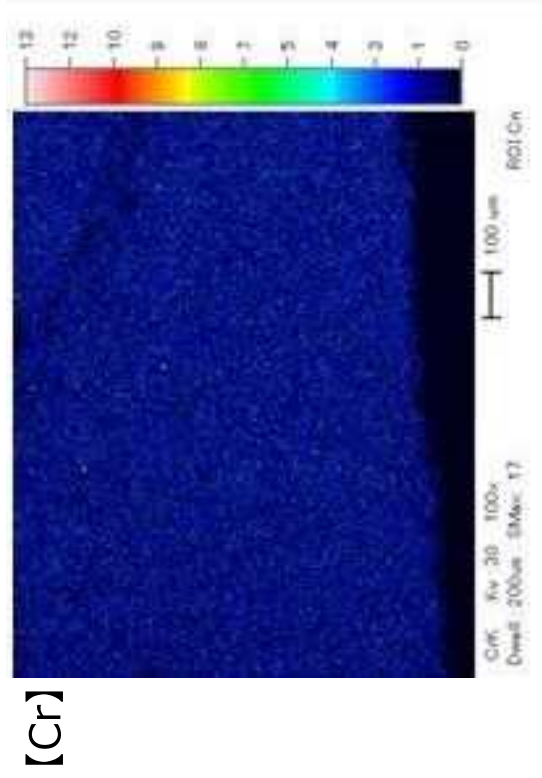
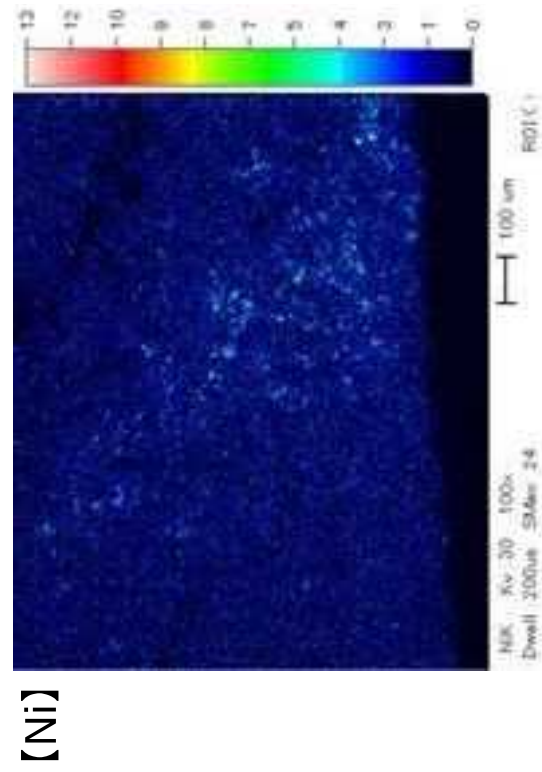


付着物分析結果（4 / 5）

< 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） >

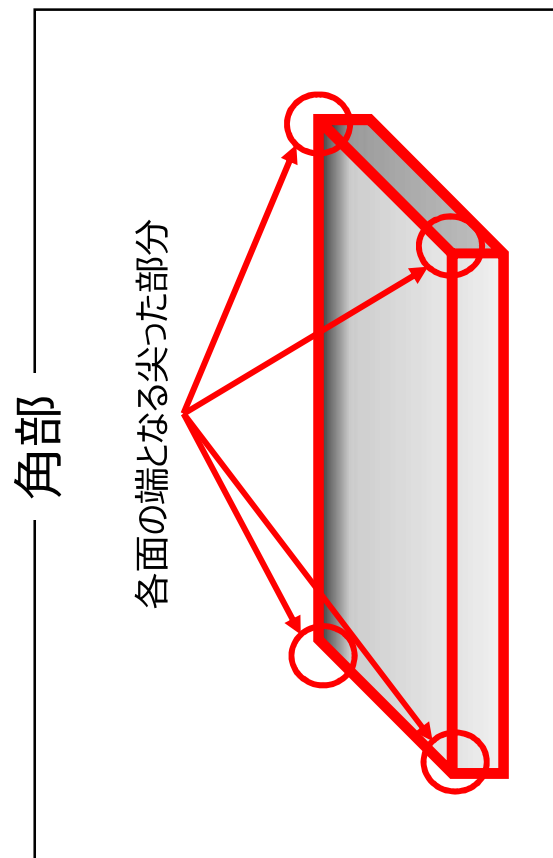
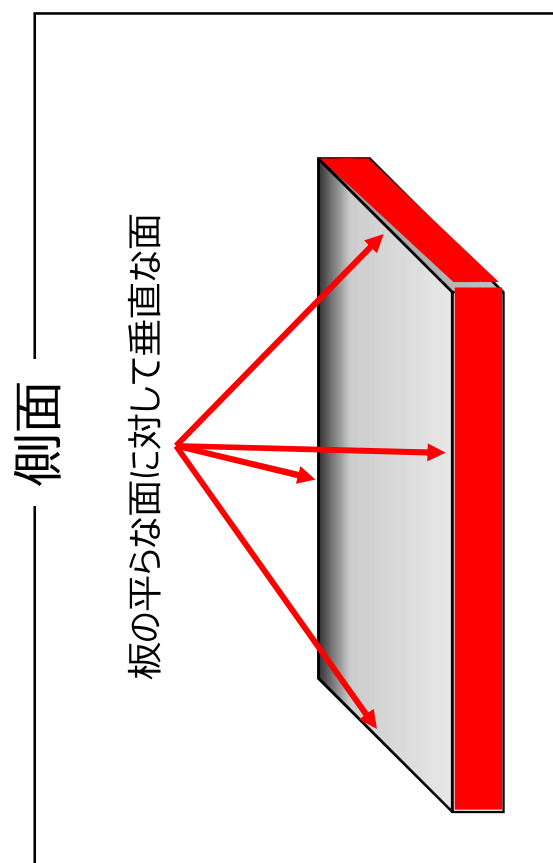
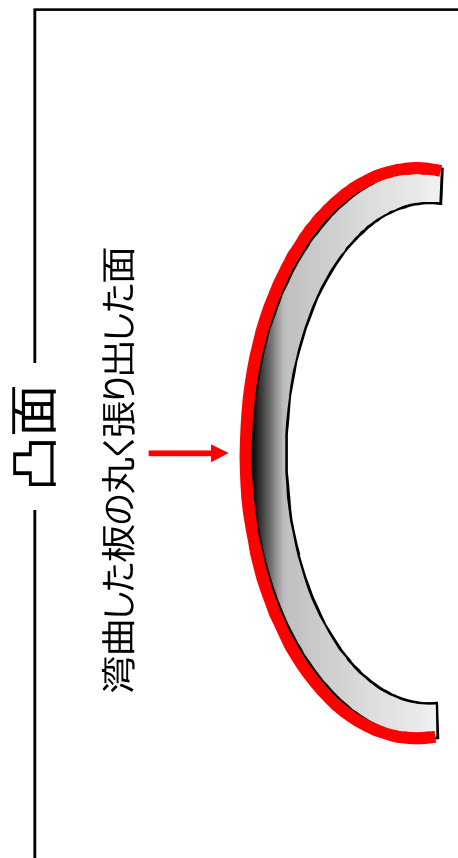
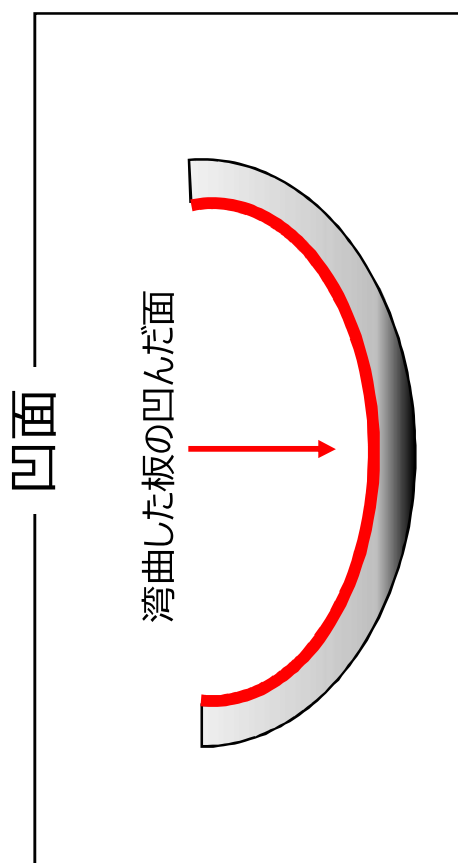
- ③ 成分分析（X線回折、EDS）
- 表面の化学成分分析を実施した結果、中央部の主成分が酸化鉄（主にマグネサイト）であったことから、スケールであると推定した。
- 凹面の接触痕を成分分析した結果、伝熱管の母材のNiを僅かに検出したが、Crは検出できなかった。 ※1。

※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）

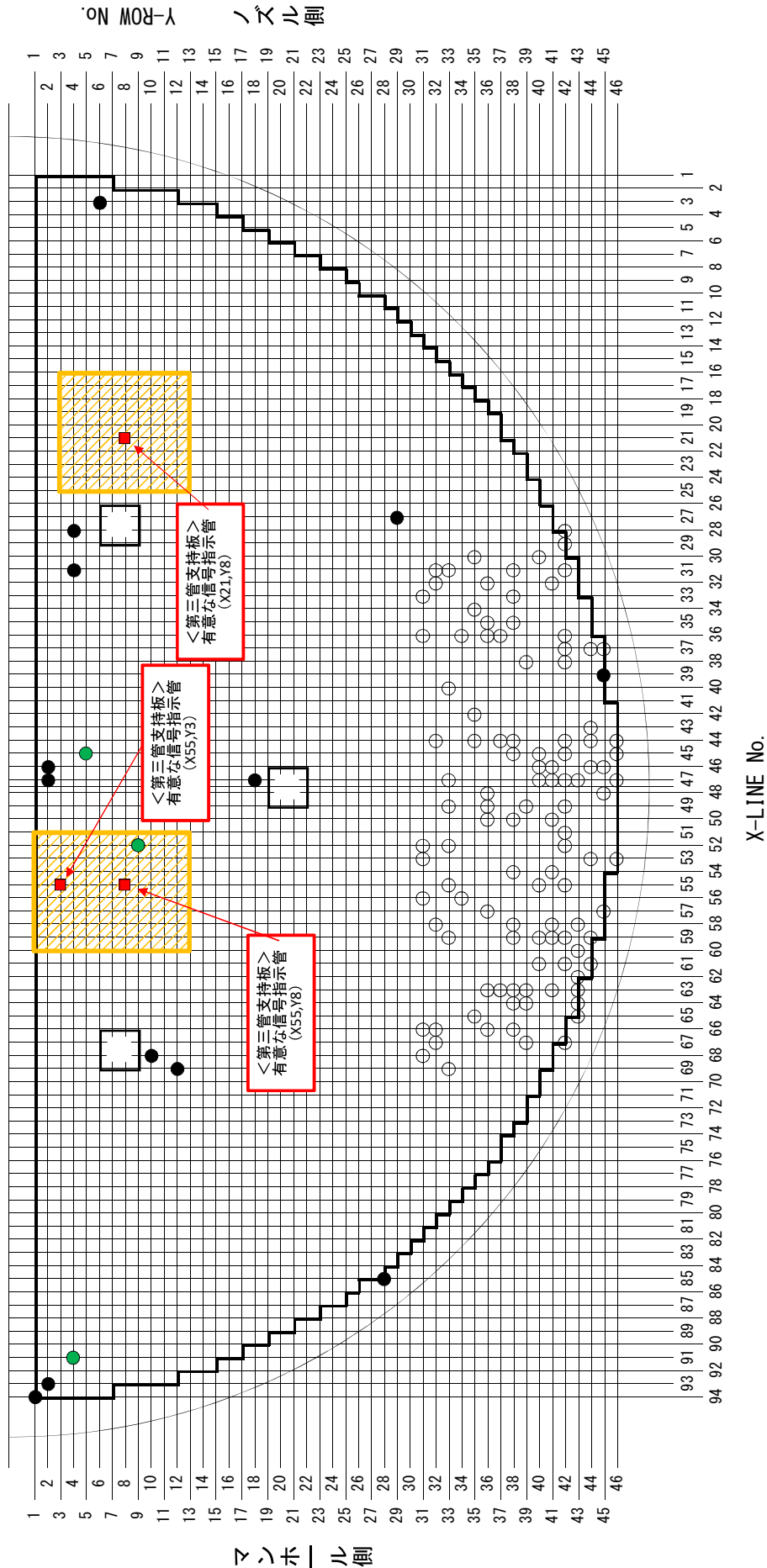
回収物の観察結果等で用いた用語については、以下のとおりであり、赤で示した部分を示す。



C-SG回収スケール回収範囲図
C-SG (低温側)

- : 既施設管 (拡管部応力腐食割れ以外) (110本)
- : 既施設管 (外面減肉) (3本)
- : 既施設管 (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

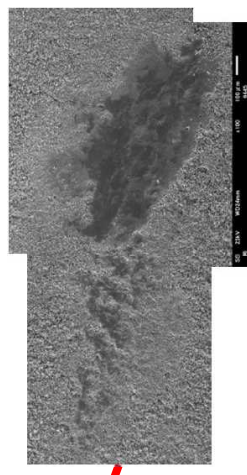
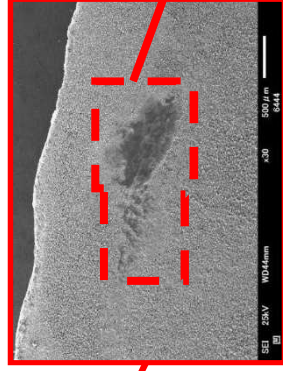


減肉が認められたX55, Y8の第三管支持板部の下方、X54-55, Y3第二管支持板上面で回収したスケールC2を分析した結果は、次のとおりである。

① 外観観察結果

- スケールC2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22.3mm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。

<凹面>

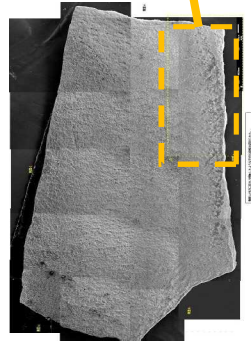


大きさ：約18mm×約10mm
厚さ：約0.3mm
質量：約0.19g

② SEM観察結果

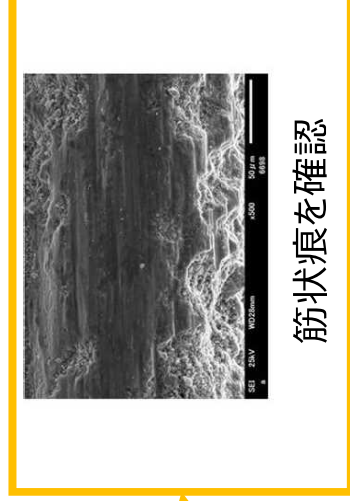
- 拡大観察した結果、凹面の接触痕には筋状痕が確認できなかったものの、側面の接触痕では筋状痕を確認した。

<凸面>



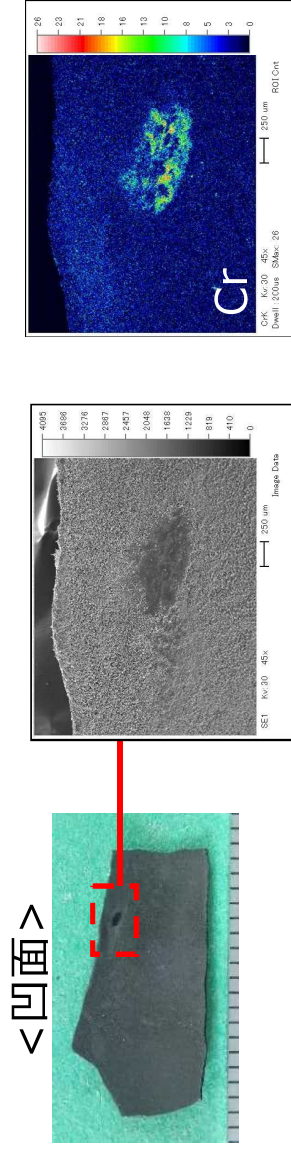
側面を観察

<側面>

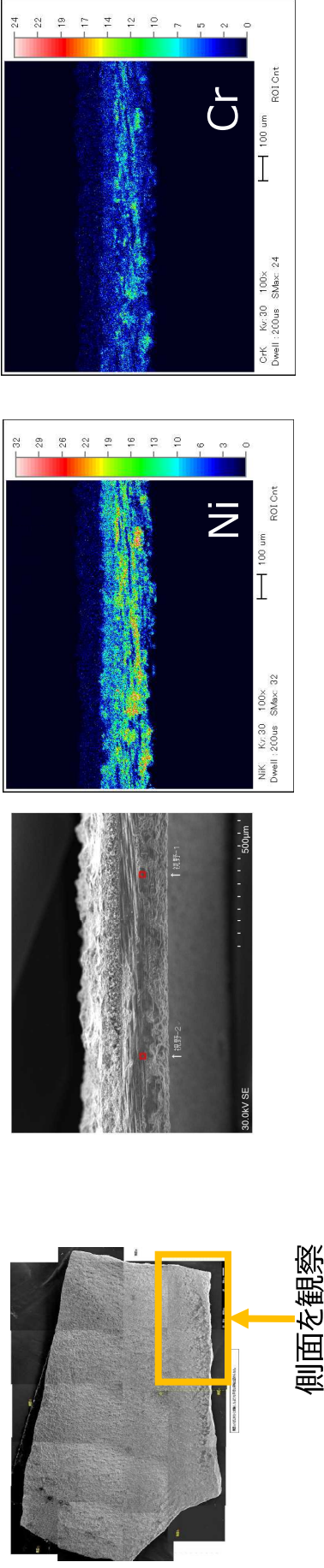


③ 成分分析（X線回折、EDS）

- 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。



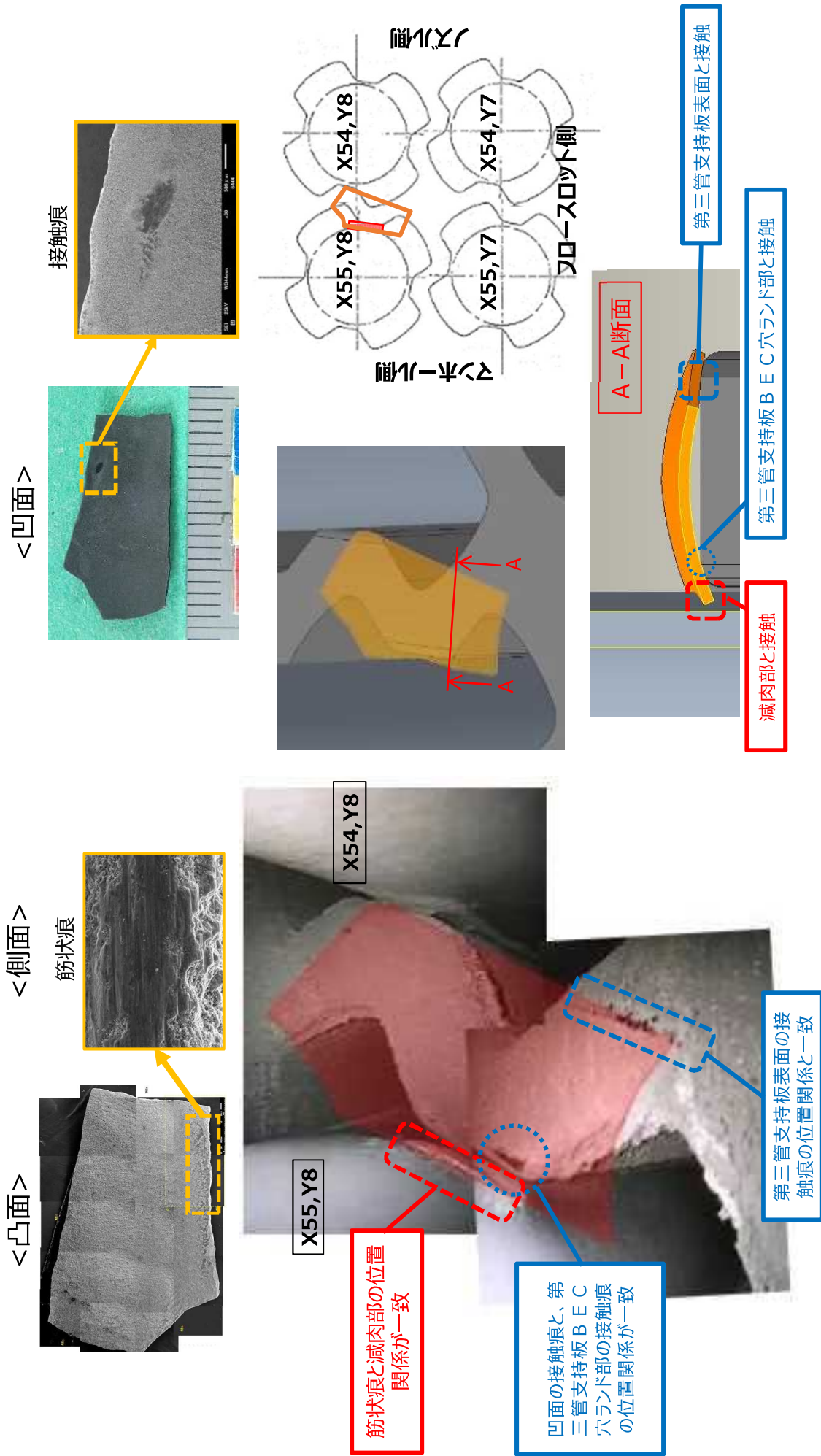
- スケールC 2側面の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析の結果、伝熱管（インコネル600）の主成分であるNi成分とCr成分を検出した。



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。

④ 減肉箇所との関係

- スケールC2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。

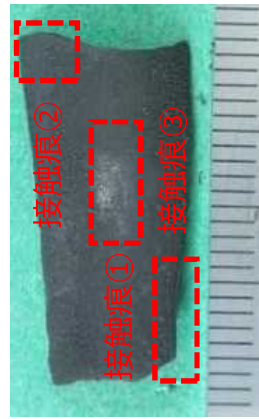


減肉が認められたX21,Y8の第三管支持板部の下方、X21-22,Y12第一管支持板上面で回収したスケールC3を分析した結果は、次のとおりである。

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。

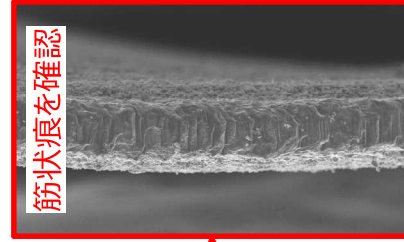
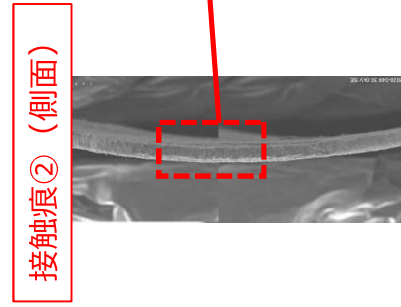
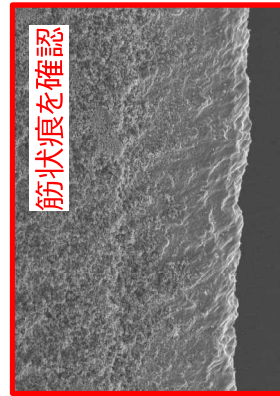
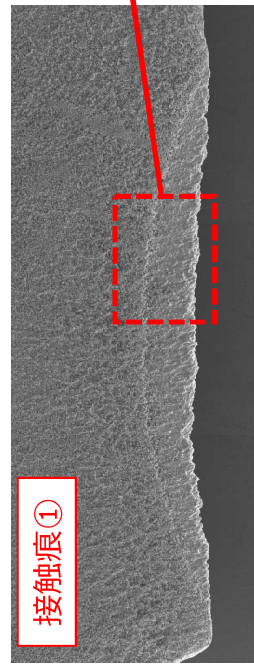
<凸面>



大きさ：約23mm×約11mm
厚さ：約0.3mm
質量：約0.25g

② SEM観察結果

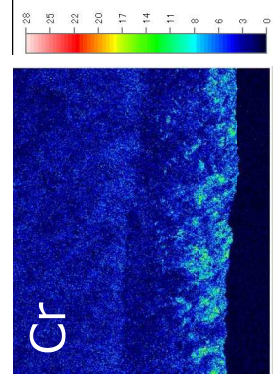
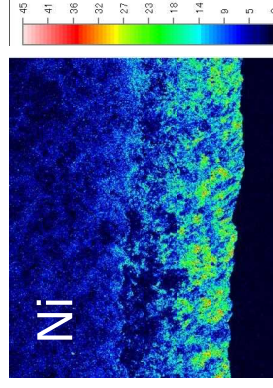
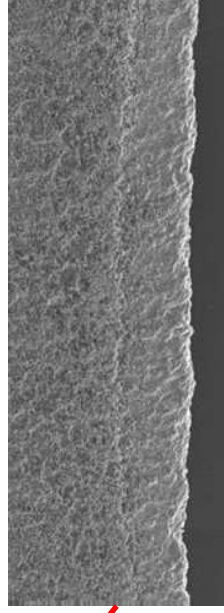
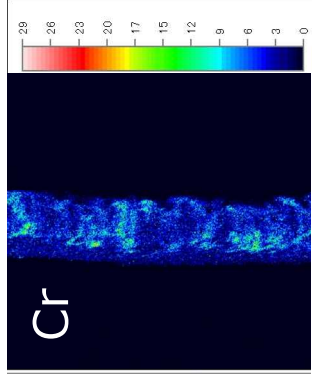
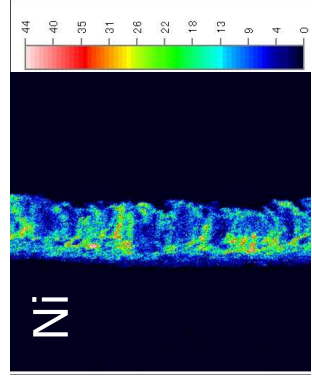
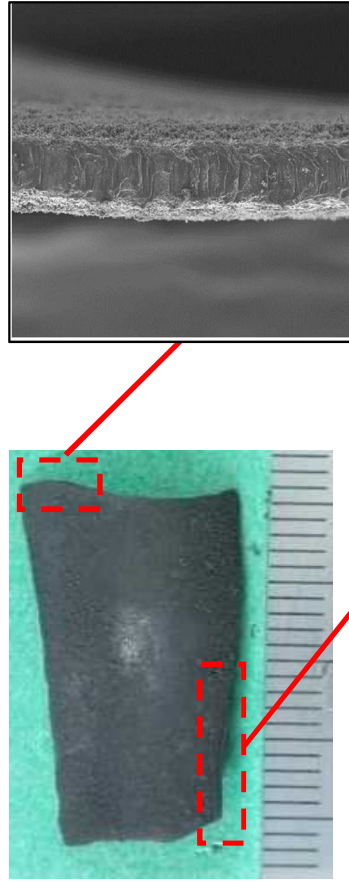
- 接触痕を拡大観察した結果、凸面の接触痕③には筋状痕が確認できなかったが、側面の接触痕①、②に筋状痕を確認した。



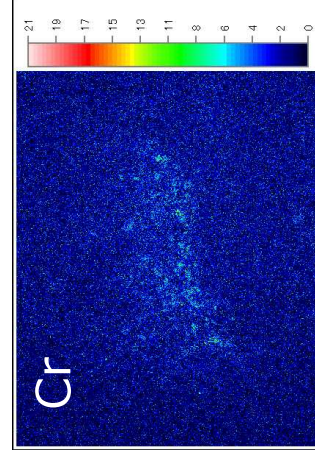
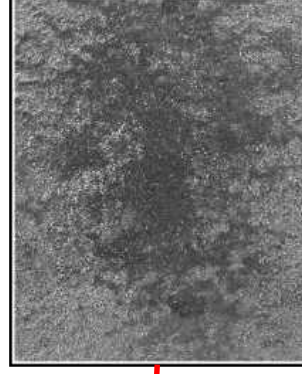
C-SG回収スケールに関する分析結果（5 / 9）

③ 成分分析（X線回折、EDS）

- スケールC3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C3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。

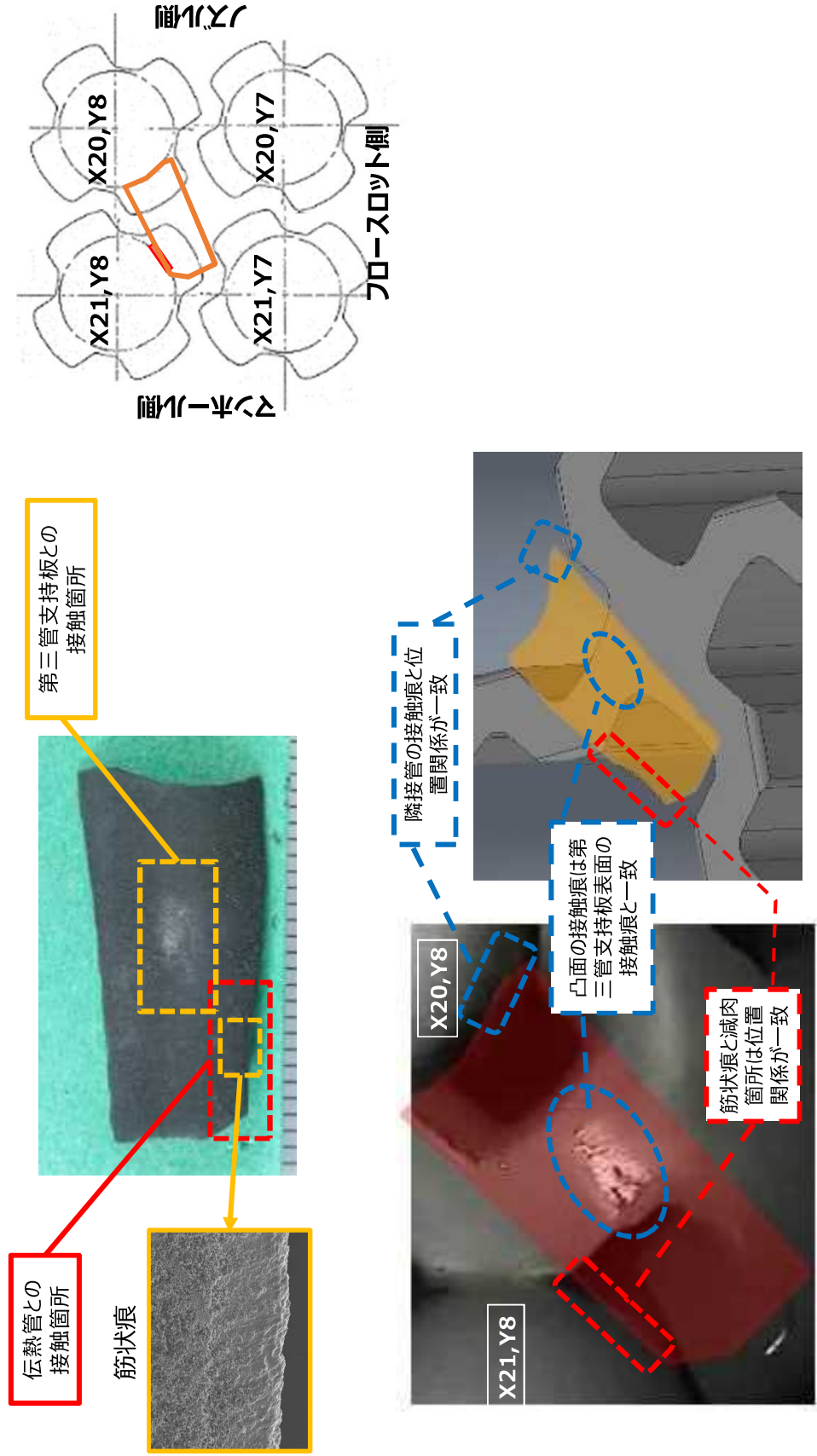


スケールC3は、管支持板下面と接触しながら、伝熱管に減肉を与えた可能性があると推定した。

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C3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。

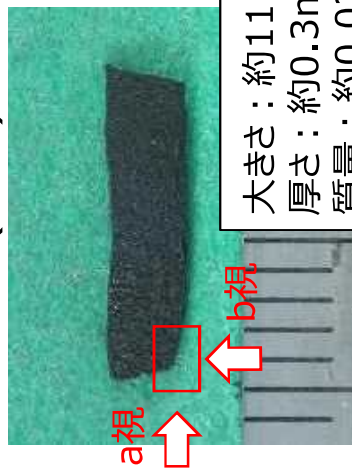


減肉が認められたX55,Y3の第三管支持板部の下方、X55-56,Y4第二管支持板上面で回収したスケールC4を分析した結果は、次のとおりである。

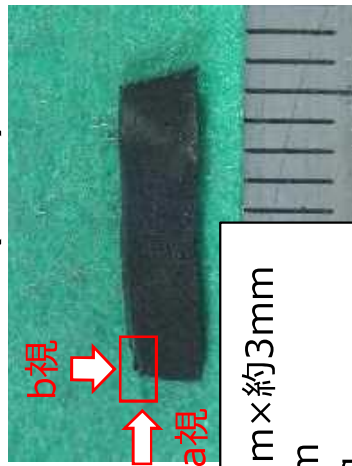
① 外観観察結果

- 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2.2. 2mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径2.2. 2.3mmに近い形状である。

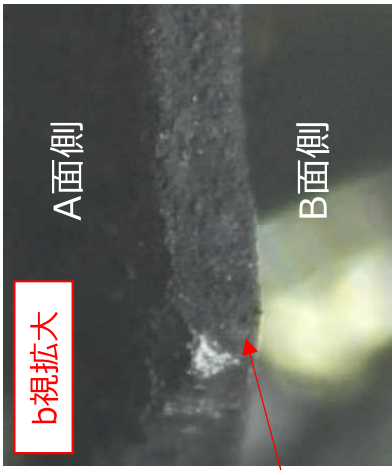
<A面(表面)>



<B面(裏面)>

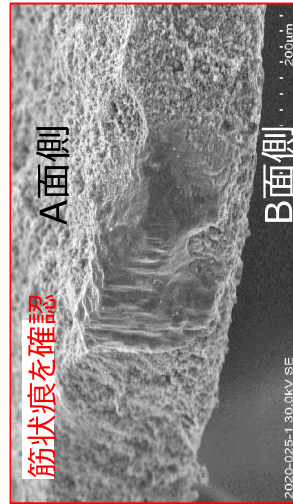
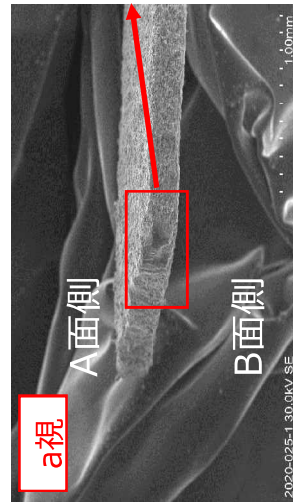


大きさ：約11mm×約3mm
厚さ：約0.3mm
質量：約0.03g



② SEM観察結果

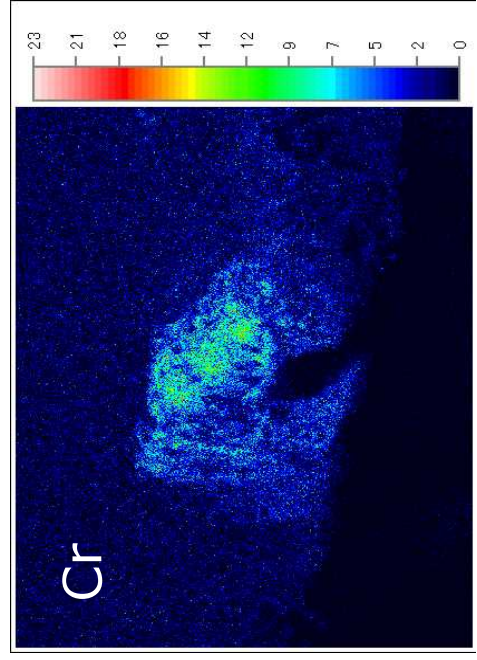
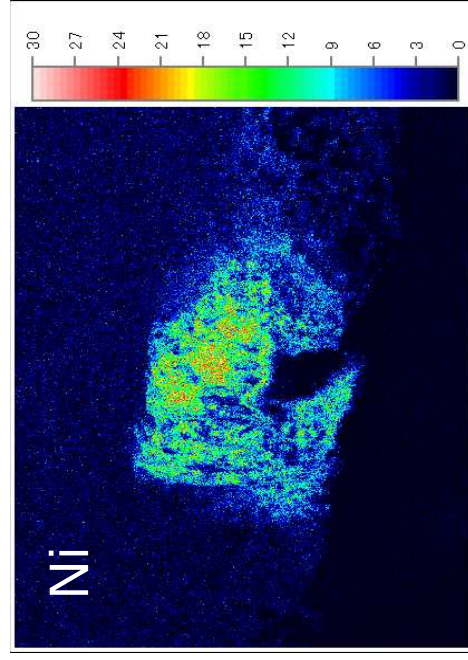
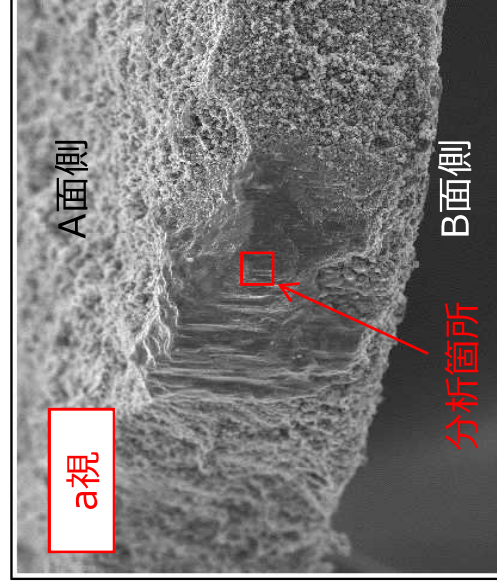
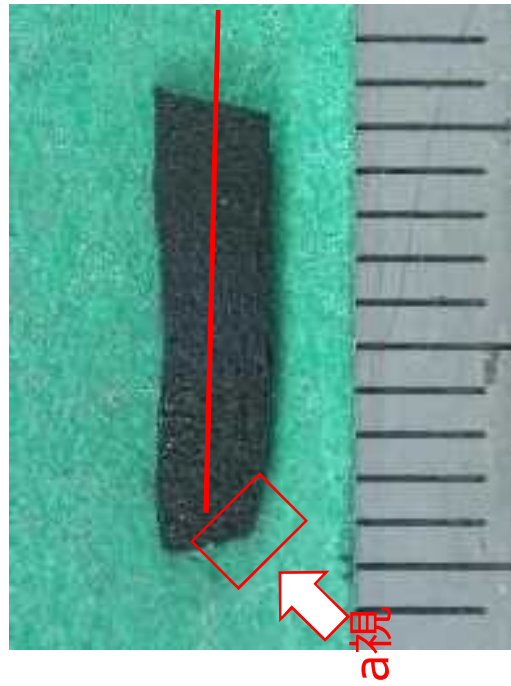
- 接触痕を拡大観察した結果、筋状痕を確認した。



③ 成分分析 (X線回折、EDS)

- スケールC4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。

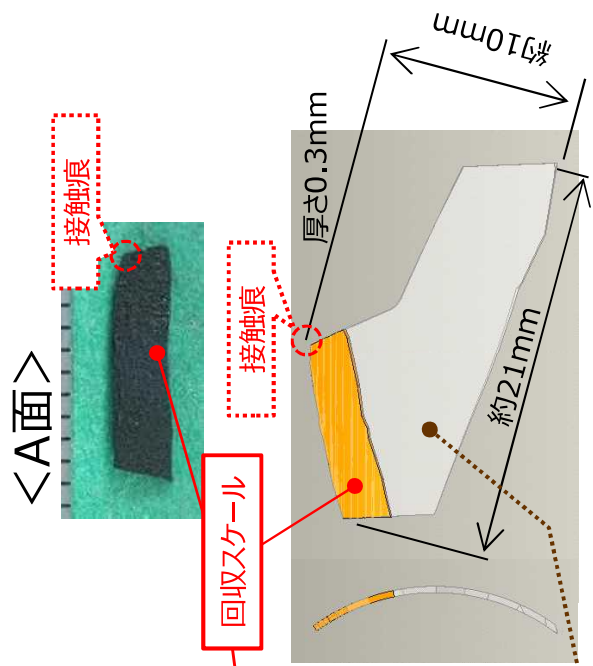
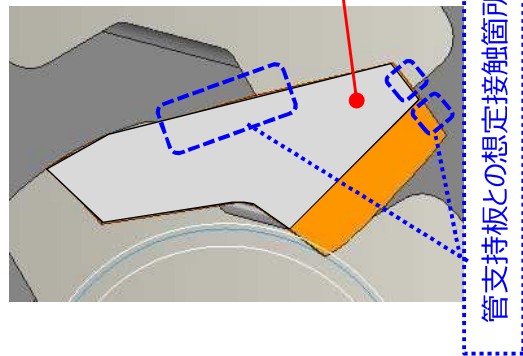
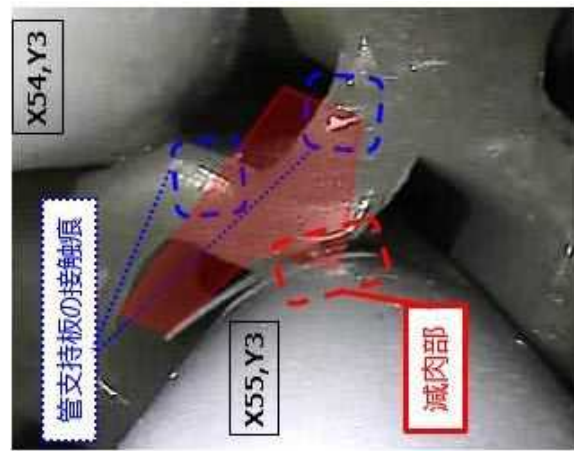
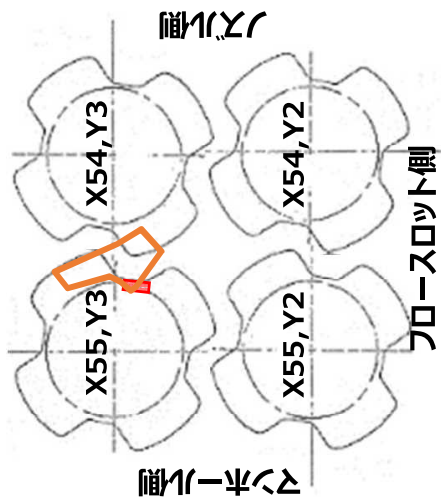
<A面(表面)>



スケールC4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。

④ 減肉箇所との関係

- スケールC4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C4の破損前の想定形状
(灰色部)

スケール剥離による減肉信号への影響

1. 概要

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

2. 試験方法

2.1 スケール付着・剥離（EDM スリット有り）の試験片データ

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

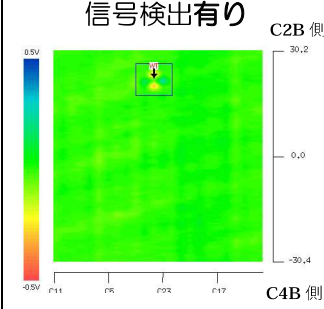
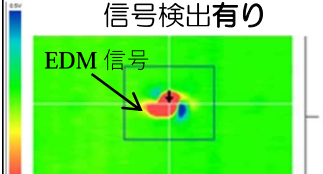
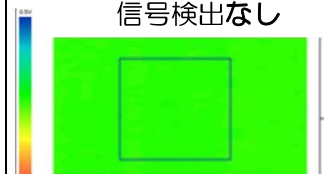
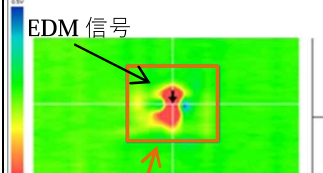
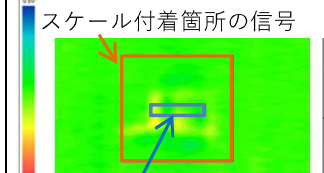
2.2 スケール付着・剥離（EDM スリット無し）の試験片データ

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

3. 結果

取得したデータを表 1 に示す。

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

実機波形 (A-SG 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  C2B 側 C4B 側	信号検出有り  EDM 信号 MIX フィルタによりスケール付着箇所の信号は消去されたが、EDM スリット信号は検出された。	信号検出なし  MIX フィルタによりスケール付着箇所の信号は消去された。
実機波形 (A-SG X51 Y4) 100kHz	スケール付着・剥離 (EDM スリット有り) 100kHz  EDM 信号 スケール付着箇所の信号 スケール付着箇所の信号および EDM スリット信号が検出された。	スケール付着・剥離 (EDM スリット無し) 100kHz  スケール付着箇所の信号 スケール剥離箇所 スケール付着箇所に信号は確認できるものの局所的なスケール剥離箇所は信号検出されず。

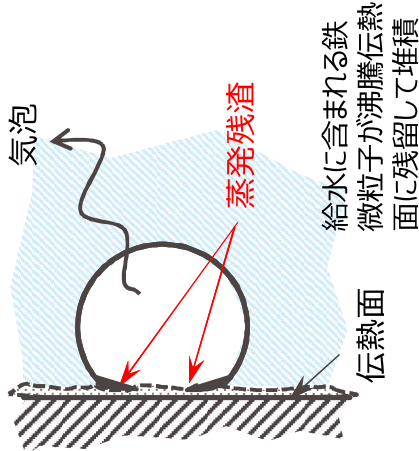
4. まとめ

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

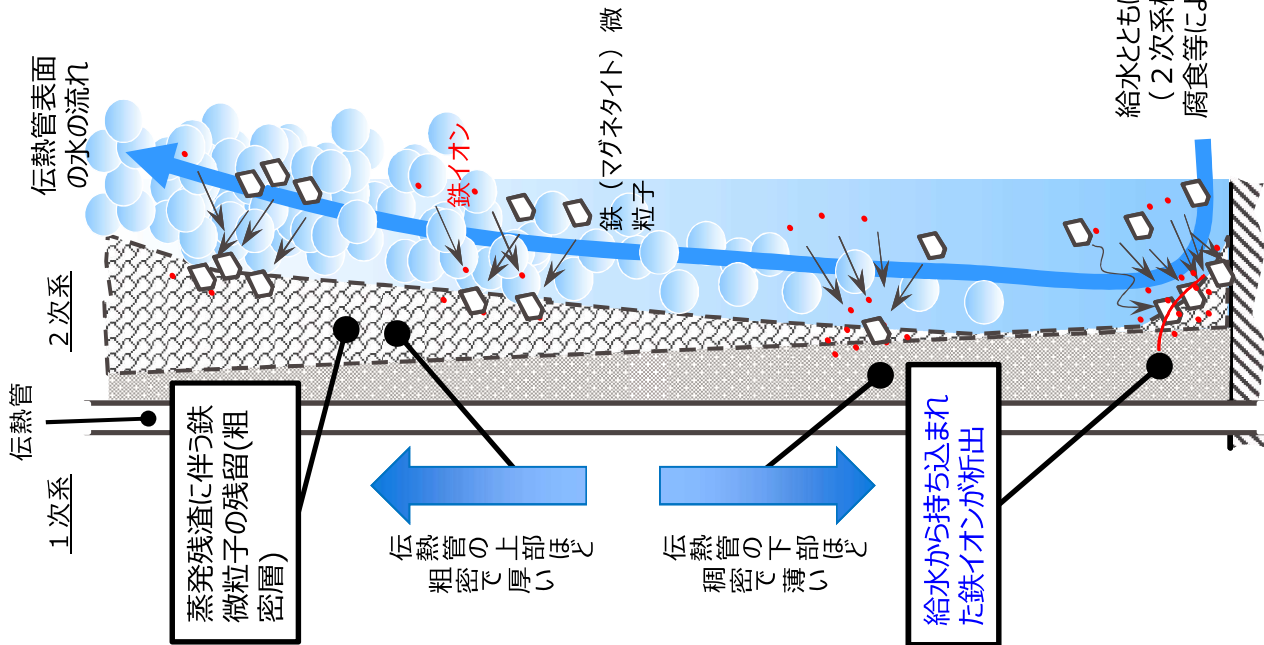
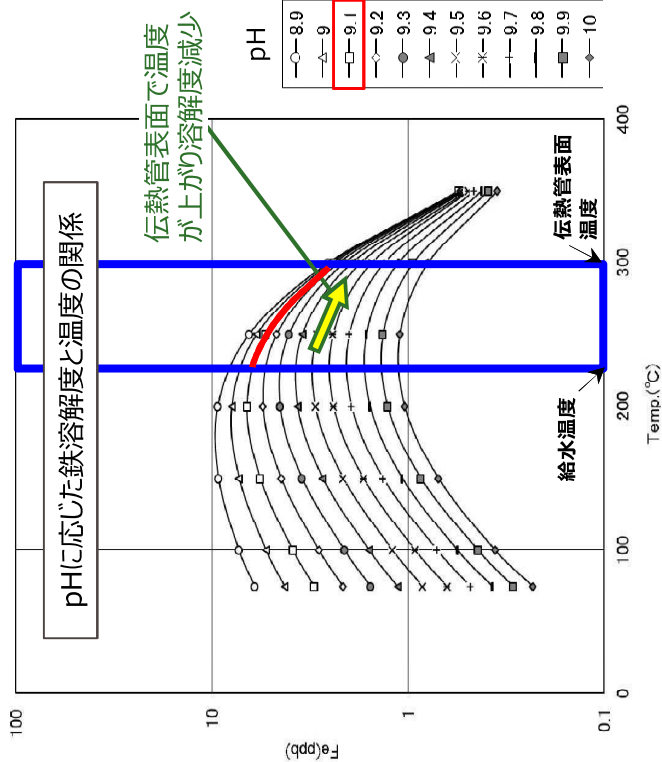
以上

スケール生成メカニズム (平成8年 高浜発電所3号機 蒸気発生器伝熱管調査報告書の知見を踏まえたイメージ)

伝熱管の上部で支配的なスケール生成メカニズム



伝熱管の下部で支配的なスケール生成メカニズム



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