

関原発 第 442 号
2019 年 12 月 23 日

原子力規制委員会 殿

大阪市北区中之島3丁目6番1
関西電力株式会社
取締役社長 岩根 茂

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378号（2019年11月28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

2019年12月23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	2019年10月17日 10時50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、B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、2019年9月18日より第22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、B-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、2019年10月17日10時50分に判断した。</p> <p>^{*1} SGの中で1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。1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 2019年10月 2日～2019年10月17日 (定期事業者検査終了日) 探傷検査・データ整理期間 2019年10月 2日～2019年10月14日 解析・評価検査期間 2019年10月15日～2019年10月17日</p> <p>(2) 検査範囲 SGの施栓^{*5}済みの伝熱管を除く、全数の伝熱管についてECTを実施した。 (単位: 本)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>SG</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>合計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>検査対象本数</td> <td>3,245</td> <td>3,248</td> <td>3,259</td> <td>9,752</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 ECTデータを評価した結果^{*6}、5本の伝熱管の外面に有意な信号指示が認められた。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、前回 (第21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が認められた伝熱管の外面に、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	3,245	3,248	3,259	9,752
SG	A	B	C	合計							
検査対象本数	3,245	3,248	3,259	9,752							

(単位：本)

SG	A	B	C	合計
指示管本数	1	1	3	5

A-SG

第三管支持板 X85, Y2：減肉率 約60%

B-SG

第三管支持板 X92, Y8：減肉率 約50%

C-SG

第二管支持板 X45, Y5：減肉率 約60%

第二管支持板 X91, Y4：減肉率 約40%

第三管支持板 X52, Y9：減肉率 約60%

*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 (2008年改訂版) JSME S NA1-2008 SG伝熱管に対する判定基準に従う。

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

*8 24組分のコイルのチャートを平面状に並べ、信号振幅に応じて色調として表示させたもの。伝熱管全長についての信号指示の大きさや位置等の分析に用いる表示方法。

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が認められ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、減肉信号が確認され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が認められた。

a. A-SG

第三管支持板：長さ約6.0mm、幅1.0mm以下 (X85, Y2)

b. B-SG

第三管支持板：長さ約5.0mm、幅約1.0mm (X92, Y8)

c. C-SG

第二管支持板：長さ約4.0mm、幅1.0mm以下 (X45, Y5)

第二管支持板：長さ約5.0mm、幅2.0mm以下 (X91, Y4)

第三管支持板：長さ約8.0mm、幅1.0mm以下 (X52, Y9)

(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が確認された。

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行った。

(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. 粒界腐食割れ(IGA)^{*9}

過去にSG2次側環境においてアルカリ環境と酸化銅等による酸性性雰囲気を経験したプラントで、粒界腐食割れが発生した実績があるが、高浜発電所4号機のようなアンモニアとヒドラジンの注入により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られる。

*9 金属の結晶粒の境目(粒界)に沿って進展する腐食。

b. ピッチング*¹⁰

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の注入により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られる。

*¹⁰ 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。

c. 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 (All Volatile Treatment) *¹¹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られる。

*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。

d. 摩耗減肉

(a) 管支持板との接触

ア. 管支持板ベイ部*¹²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、運転中に伝熱管にねじれを発生させる外力は発生しないと考えられる。

*¹² 管支持板に加工されている四ツ葉型管穴のうち凹面部。

イ. 管支持板ランド部*¹³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ヶ所の管支持板ランド部に減肉が生じることになるが、ECT結果から周方向に1ヶ所にしか減肉指示が確認されていないことから、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られる。

*¹³ 管支持板に加工されている四ツ葉型管穴のうち凸面部。

(b) SG器内発生物との接触・SG器外発生物との接触

ア. SG器内の目視点検

(ア) 点検結果

減肉指示が認められた箇所について、カメラによる目視確認を行った結果、機械的な影響によるものと考えられる減肉を確認した。

SG器内の管板、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第二および第三管支持板の下面の減肉指示が確認された伝熱管周辺部の点検を実施した。その結果、伝熱管から剥離したスケール（以下、スラッジという。）がSG器内の各所に確認されたほか、A-SGの第一管支持板上（X39-40, Y22-23）に、重さ約1g、長さ約20mm×幅約10mm×厚さ約0.6mmの金属片が確認された。

金属片発見位置は、減肉が確認された位置（第三管支持板の下面（X85, Y2））から約2.5m下方、約1.6m半径方向に離れた場所であった。

なお、B、C-SG器内にはスラッジ以外の異物は確認されなかった。

スラッジランシング*¹⁴等を実施した結果、スラッジ以外の異物については確認されなかった。

また、更なる異物調査として、SG器内に水を張り、底部からN₂を噴射（バブリング）させたのち、水を抜くことによる異物の回収を試みた結果、通常の定期検査にて実施するスラッジランシング時の回収量の約3割のスラッジを回収できたが、スラッジ以外の異物については、確認されなかった。

*¹⁴ 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。

(イ) 金属片分析

A-SGで発見された金属片についてX線回折等により材質を確認した結果、オーステナイト系ステンレス鋼（SUS304相当）が主体であった。

また、金属片の表面観察の結果、伝熱管との接触に伴う摺動痕がないことを確認した。

イ. SG内部品の脱落調査

今回の異物の想定形状（薄片）^{*15}に対して、SG内部品で該当する形状があるかを設計図面により確認したところ、振止め金具のキー固定板等、内部品として使用されていることを確認した。ただし、これらの内部品は、溶接止めされていること、もしくは、周囲を溶接止めされた構造物に囲まれており、万が一、脱落したとしても周囲の構造物の外には出ないことから、内部品の脱落の可能性はないと考えられる。

なお、SG器内の2次側の経年劣化事象を起因とする脱落については、内部品の経年劣化は流れ加速型腐食による給水内管裏当金の脱落が考えられることから、念のため、当該部のカメラによる目視点検を実施した。その結果、給水内管裏当金の溶接部に損傷は確認されなかった。

A-SGで発見された金属片については、SUS304相当品であることから、SGの内部で用いられている材料ではないことを確認した。

^{*15} 「3. 減肉メカニズム（1）異物の形状」に記載している想定形状。

ウ. スラッジによる減肉の可能性

（ア）スケール性状

運転状態において、伝熱管にマグネタイト（ Fe_3O_4 ）の粒子と鉄イオン（ Fe^{2+} ）が供給される。伝熱管外表面での給水沸騰時に粒子状のマグネタイトが残留すること、また、温度上昇による溶解度減少に伴い、鉄イオンが析出することにより、スケールが形成される。

伝熱管表面のスケールはマグネタイト粒子の付着がベースとなって形成されており、マグネタイト単体としては、伝熱管よりも硬いものの、スケール内には空隙が存在するため、スケール内で構造上脆弱な箇所を起点として破壊が進展することを踏まえると、スケール自体は脆い性質であると考えられる。

（イ）SG器内から回収したスラッジによる再現試験

SG器内から回収したスラッジの断面観察を実施した。その結果、スラッジ内には空隙が存在しており、構造上脆いと判断される。

スラッジによる伝熱管摩耗試験を実施した。押付力を10N以上の条件で摩耗試験を実施した結果、スラッジ自体が破損し、摩耗減肉を発生させることはできなかった。このため、押付力を約2Nおよび約1Nに下げて摩耗試験を実施した。その結果、伝熱管に軽微なきずは付くものの、スラッジ先端部は摩滅した。（2Nの場合、伝熱管きず深さ約0.03mmに対し、スラッジ約0.8mm摩耗し、1Nの場合、伝熱管きず深さ約0.02mmに対し、スラッジ約0.5mm摩耗した。）

以上より、スラッジと伝熱管の接触によって摩耗減肉する可能性は低いと考えられる。

（ウ）海外事例調査

米国電力研究所（Electric Power Research Institute）のレポートおよびデータベースで海外事例調査を実施したところ、スラッジが原因で伝熱管が損傷した事例は報告されていないことを確認した。

エ. SG器外（SGブローダウン系統）目視点検結果

摩耗減肉を発生させた原因となる異物は、SG器内で発見されなかった。これらの異物は、SGブローダウン系統からSG器外へ流出したと想定されることから、SGブローダウン系統のうち残留異物が滞留する可能性がある機器であるSGブローダウンタンクや水位制御弁等についても、機器等を開放し、内部の目視点検を実施したが、異物は確認されなかった。

オ. まとめ

- ・SG内部品が脱落した可能性はない。
- ・スラッジとの接触により減肉した可能性は低い。
- ・A-SGで確認された金属片は、伝熱管との接触に伴う摺動痕がないため、減肉の直接の原因ではないと考えられるが、同様な異物がSG器外から流入した可能性が否定できない。
- ・伝熱管に損傷を与えたと推定される異物は発見されなかった。
- ・以上のことから、SG器外から流入した異物による摩耗減肉が発生した可能性が高い。

e. デンティン^{*16}

E C Tの信号指示を確認した結果、デンティンではないと考えられる。

^{*16} 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。

f. 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られる。

g. エロージョン^{*17}

当該部流速は約3 m/sであり、かつ、T T 6 0 0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70 m/s以上がエロージョン発生領域）、エロージョンの発生はないと考えられる。

なお、室温条件にて評価を行っているが、温度により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。

^{*17} 流体が金属表面に衝突することで生じる機械的な衝突力で材料が損傷する現象。

(3) 損傷以外のE C T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、今回の信号は、スケールの剥離ではないと考えられる。

3. 減肉メカニズム

(1) 想定される異物の形状

減肉痕等の位置関係から、減肉を生じさせた異物の形状を以下のとおり推定した。

a. A-S G

第三管支持板：長さ約18 mm、幅約7 mm、厚さ1 mm以下 (X85, Y2)

b. B-S G

第三管支持板：長さ約18 mm、幅約8 mm、厚さ1 mm以下 (X92, Y8)

c. C-S G

第二管支持板：長さ約22 mm、幅約6 mm、厚さ1 mm以下 (X45, Y5)

第二管支持板：長さ約24 mm、幅約6 mm、厚さ1 mm以下 (X91, Y4)

第三管支持板：長さ約24 mm、幅約6 mm、厚さ1 mm以下 (X52, Y9)

(2) S G器内流入後の異物挙動

異物は給水リング J チューブから管群外筒を経て管板上面中央部に到達し、その後は、運転中のS G 2次側器内の流況下では流体抗力が異物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ものと考えられる。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、第一管支持板を通過した異物は上昇する過程で低温側へ流れ、第二管支持板の低温側下面、又は第二管支持板フローロット部を通過したものは第三管支持板の低温側下面に至ったものと推定される。

(3) 管支持板下面での減肉メカニズム

各管支持板下面に到達した異物は、流体力によって伝熱管の間の管支持板下面で保持され、伝熱管と接触することにより、摩耗減肉を発生させたものと推定される。

a. 摩耗形態の推定

異物との接触で伝熱管が摩耗する場合、異物の振動により摩耗するケースと伝熱管の振動により摩耗するケースが考えられる。

(a) 異物振動のケース

隣接した伝熱管での減肉が発生していないことから、異物が伝熱管の間で振動していたことは想定できず、本ケースでは異物の端部が管支持板のB E C穴ランド部に挟まり拘束された状態が想定される。この想定に基づきワークレート^{*18}を計算すると、推定した異物形状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。

^{*18} 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。

(b) 伝熱管振動のケース

本ケースでは、異物が流体力によって管支持板下面で保持され、接触する伝熱管のランダム振動*19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異物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、異物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。

*19 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)項から、発生した減肉は管支持板下面で保持された異物に伝熱管が接触したことによるものと推定されるため、以下の検証を行った。

b. 異物と伝熱管の接触状態の推定

異物と伝熱管の接触状態を推定するため、異物と伝熱管の接触角度に応じた減肉形状を実験で確認するとともに、実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にてECT信号を取得し、実機のECT信号との比較を行った。

(a) 減肉試験

減肉の発生および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、接触角度(伝熱管の接線方向および軸方向)をパラメータとして砥石の角部により減肉を与えた。その結果、接線方向の接触角度に応じて水平方向断面が蒲鉾型(接触角度0°)または三角型(接触角度15°から45°)の減肉形状が得られることを確認した。また、軸方向の接触角に応じて軸方向断面が矩形のスリット形状または三角形に近い形状の断面形状が得られることを確認した。

(b) ECTモックアップ試験

(a)項で得られた蒲鉾型および三角型と同等の形状を有する人工欠陥を伝熱管モックアップに与えた。人工欠陥の寸法については、断面形状は減肉試験で得られた各接触角度の減肉寸法計測結果から、幅および深さは実機のECT信号から設定した。このモックアップのECT信号を取得した結果、三角型の人工欠陥から得られたECT信号が実機のECT信号とよく一致することを確認した。

上記(a)、(b)項から、異物は運転中の流体力により管支持板下面で保持されるとともに、異物の角部が伝熱管に接触したものと推定された。

c. ワークレートおよび摩耗体積の評価

上記a.項で推定した減肉形態を踏まえ、流動振動解析を行った結果、今回の減肉量を再現するのに十分なワークレートおよび摩耗体積が得られることを確認した。また、上記b.項の人工欠陥の摩耗体積と比較を行った結果、両者はほぼ整合することを確認した。

以上の検討結果から、(1)項で推定した形状の異物は、SG器内へ流入後、各管支持板低温側下面へ移動するとともに伝熱管へ摩耗減肉を与えた可能性があることを確認した。

4. 異物流入に関する調査

(1) 異物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異物による外面減肉事象を調査した結果、国内では3件、海外では多数の事例があることを確認した。

また、米国原子力規制委員会(NRC: Nuclear Regulatory Commission)のホームページ上に公開されているレポートから、複数の伝熱管外面が異物により減肉した海外事例を調査した結果、2000年以降で少なくとも10件あることを確認した。

(2) 異物流入経路

異物が流路内で移動するためには、流れによって発生する流体抗力が、異物自体の自重により発生する落下力を上回る必要がある。想定される異物の形状および通常運転中の流速を勘案して、想定される異物が系統水の流れに乗って移動する可能性がある範囲を調査した結果、主給水系統およびSG水張系統から異物が流入する可能性があると考えられる。

(3) SG器外の2次系機器内部構成品の脱落

2次系機器の内部構成品が脱落し、異物となってSGへ流入する可能性について検討した。その結果、(2)の系統範囲にある機器の内部構成品であって、想定される異物と類似形状を持つ構成品はなかったことから、機器内部構成品が脱落して異物となった可能性はないと考えられる。

(4) 作業時の混入

a. 異物混入の可能性のある時期

SG2次側に異物が流入する可能性のある作業は、SG給水系統の定期検査中の作業が考えられる。また、前回定期検査(第21回)では、ECTの結果、伝熱管の外表面減肉が確認されていないことから、前回定期検査中において異物が混入したものと考えられる。なお、前回定期検査時に実施したスラッジランシング後の小型カメラによる管板上点検では、異物は確認されていない。

b. 作業時の異物混入の可能性

異物混入が想定される上記の系統においては、従前より異物管理は実施していた。一方、高浜3号機の前回定期検査(第23回)において異物混入によるSG伝熱管外表面減肉が発生しており、その対策として異物管理の充実を図っているが、異物が混入したと想定される高浜4号機の前回定期検査(第21回)はこの対策の前であることから、同様な原因で異物が混入した可能性は否定できない。

c. 異物混入の可能性のある作業の調査

b. で述べた通り、外部から流入した異物が減肉の原因となった場合、異物混入の可能性のある作業は、高浜4号機の前回定期検査(第21回)に、(1)で述べた系統範囲内の機器で開放点検等を実施した作業である可能性が高いことから、作業実績から該当する作業を抽出した。

次に、抽出した全作業について、異物管理状況として、開口部養生状況、連続監視状況、服装管理状況および最終異物確認状況について確認した。その結果、すべての作業において開口部養生、連続監視および服装管理は適切に実施されていたものの、12件の作業において、最終異物確認時に目視確認が困難な範囲が存在し、異物が混入する可能性が完全には否定できない以下の作業があることがわかった。

(a) 弁分解点検作業

異物混入防止対策として開放作業前の周辺清掃、養生、開放後の開口部養生並びに封印、服装等の確認、最終異物確認時のパイロットミラーを用いた確認を実施していたが、最終異物確認前の作業のうち弁箱内の清掃・ふき取り作業等に使用するウエスは、使用后再使用している場合があること、他の工具類と同じ工具袋内に保管し運搬されていること、さらに、弁の周辺で別作業により端材が発生する可能性があることから、この段階でウエスに異物が付着する恐れがある。一般的に清掃作業等の前にウエスに付着物がないことを確認しているため、可能性は低いですが、異物が確実に除去されず開放作業時に開口部から異物が混入した可能性は否定できない。

また、垂直管に取り付けられた弁については、異物混入後、落下するため、最終異物確認時点では目視確認が困難な範囲となることから、異物が確認できず混入した可能性は否定できない。

(b) ストレーナ開放点検作業

最終異物確認前の作業のうちストレーナ内部へ入る際の服装等の確認を、作業員本人が実施しているが、本人では見えない箇所に異物が付着し、器内の養生作業時にストレーナ内に異物が混入した可能性は否定できない。

また、ストレーナ出口が垂直管であることから、異物混入後、落下するため、最終異物確認時点では目視確認が困難な範囲となり、異物が確認できず混入した可能性は否定できない。

(c) 脱気器タンク開放点検作業

最終異物確認前の作業のうち脱気器タンク内部へ入る際の服装等の確認を、作業員本人が実施しているが、本人では見えない箇所に異物が付着し、器内の養生作業時に異物が混入した可能性は否定できない。

また、脱気器タンク出口が垂直管であることから、異物混入後、落下するため、最終異物確認時点では目視確認が困難な範囲となり、異物が確認できず混入した可能性は否定できない。

d. 異物として推定される資材等

外部からの異物混入は、c. で述べた開放点検等を実施した作業のうち、最終異物確認時に目視確認が困難となる範囲が存在した作業において、異物が生じたものと考えられる。このため、発電所の作業において、想定する異物と類似する異物が発生する可能性の有無を確認したところ、以下のような可能性が考えられる。

保温材外装板施工時や配管識別表示等を金属製のバンドで配管等に固定する際に、外装版の大きさやバンドの長さを調整している。また、配管の取替時に既設配管の切断や開先加工を行う。その時に発生した切れ端や切削くずが想定する異物やA-SGで発見された金属片と類似した形状となることは否定できない。

また、開放点検等を実施した周辺の作業状況を確認したところ、開口部のある期間中に、上記のような切れ端や切削くずが生じる作業が3件行われていることがわかった。

一方、開放点検等を実施した当該作業や、周辺で実施した別工事以外の作業によって発生した異物であっても、作業服や靴の裏に付着して開口点検等を実施した作業の周辺に持ち込まれたと考えられることから、開放点検等を実施した12件のいずれかの作業から異物が混入した可能性は否定できない。

5. 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、十分余裕があることから、減肉した伝熱管が通常運転時および事故時の内外差圧により破断することはない。

b. 耐震性

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

保守的に一様外面減肉と仮定、伝熱管の断面積を減じた上で部材力から発生応力および疲労累積係数を算出し、許容値に対する余裕を確認した結果、十分な余裕があることから、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された、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ことを確認した。

	<p>6. 推定原因</p> <ul style="list-style-type: none"> ・前回（第21回）定期検査時における機器の開放点検作業中に混入した異物が、最終異物確認時に目視確認が困難となる範囲に残留した。 ・前回定期検査後の起動後、残留した異物は主給水系統を通じてSGに到達、SG内の上昇流に乗って第二、第三管支持板下面に到達し、伝熱管と接触した。 ・伝熱管と接触した異物は、運転中に生じる伝熱管の振動によって、伝熱管外表面を摩耗させ、伝熱管外面にきずをつけた。 ・今回（第22回）定期検査開始後、SG内の上昇流が喪失したことにより、異物は落下、また、SG水抜き時にフロースロットを經由し、管板まで到達した後、SGブローダウン系統より海水管に放出された。
保護装置の種類及び動作状況	該当せず
放射能の影響	なし
被害者	なし
他に及ぼした障害	なし
復旧の日時	2020年2月中旬（発電機並列予定）
再発防止対策	<p>1. 減肉伝熱管の施栓 外面減肉が認められたSG伝熱管について、高温側および低温側のSG管板部に施栓し、供用外とする。</p> <p>2. SG器内への異物流入対策</p> <p>(1) 以下の通り、SGへの異物流入の可能性のある機器の点検における異物混入防止対策の徹底を図り、作業手順書等に追記する。</p> <p>a. 作業員の立ち入る機器の点検（脱気器タンクおよび主給水ブースタポンプ入口ストレーナ）</p> <p>(a) 作業員が機器内部に立ち入って作業を行う場合は、機器内部へ立ち入る直前に器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。</p> <p>(b) 開口部に周辺作業と隔離したエリアを設けることで、異物の混入防止を図る。</p> <p>b. 垂直配管に取り付けられている弁の点検</p> <p>(a) 垂直配管に取り付けられている弁点検時は、弁箱内部に使用する機材に異物の付着がないことを確実に確認する。 また、最終異物確認時において直接目視にて異物の有無の確認ができない範囲については、ファイバースコープによる確認を行う。</p> <p>(b) 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する。</p> <p>また、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。</p> <p>(2) 当該作業における異物混入防止対策が作業手順書通りに実施されていることを確認するため、現場パトロールの実施等による管理強化を図る。</p> <p>なお、今回SG二次側に異物が混入していたことを踏まえ、SG器内の水張り、N₂噴射（バブリング）および水抜きを行った結果、スラッジが回収されたものの、異物が回収されなかったことから、今後の運転継続にあたり、器内に異物が残留していないことを最終確認している。（事象の原因 2. (2) d. (b) ア. (ア) に記載の更なる異物調査時に併せて実施済み）また、さらに今回の定期検査において開放点検を実施した脱気器タンク、ストレーナ、垂直配管に取り付けられている弁について、ファイバースコープによる異物確認を行い、機器内に異物が混入していないことを最終確認する。</p>

高浜発電所4号機
蒸気発生器伝熱管の損傷について

2019年11月28日 提出

2019年12月23日 補正

関西電力株式会社

1. 件名

高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について

2. 事象発生日

2019年10月17日（技術基準に適合していないと判断した日）

3. 事象発生の発電用原子炉施設

原子炉冷却系統施設 一次冷却材の循環設備 蒸気発生器

4. 事象発生前の運転状況

第22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、2019年9月18日より第22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、B-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、2019年10月17日10時50分に判断した。

*¹ SGの中で1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。1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

2019年10月 2日～2019年10月17日（定期事業者検査終了日）

探傷検査・データ整理期間 2019年10月 2日～2019年10月14日
 解析・評価検査期間 2019年10月15日～2019年10月17日

(2) 検査範囲

SGの施栓^{*5}済みの伝熱管を除く、全数の伝熱管についてECTを実施した。

(単位：本)

SG	A	B	C	合計
検査対象本数	3,245	3,248	3,259	9,752

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

(3) 検査結果

(添付資料-2、3)

ECTデータを評価した結果^{*6}、5本の伝熱管の外面に有意な信号指示が認められた。

リサーチ表示^{*7} (信号表示) で分析した結果、いずれも伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

また、有意な信号指示が認められた箇所は、色調図表示^{*8}で分析した結果、管支持板部付近であった。

なお、前回(第21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が認められた伝熱管の外面に、有意な信号指示が認められなかったことを確認した。

(単位：本)

SG	A	B	C	合計
指示管本数	1	1	3	5

A-SG

第三管支持板 X85,Y2：減肉率 約60%

B-SG

第三管支持板 X92,Y8：減肉率 約50%

C-SG

第二管支持板 X45,Y5：減肉率 約60%

第二管支持板 X91,Y4：減肉率 約40%

第三管支持板 X52,Y9：減肉率 約60%

^{*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(2008年改訂版) JSME S NA1-2008 SG伝熱管に対する判定基準に従う。

^{*7} 渦電流変化の電気信号を図で表したもの(水平成分および垂直成分を同一画面に表示)。

^{*8} 24組分のコイルのチャートを平面状に並べ、信号振幅に応じて色調として表示させたもの。伝熱管全長についての信号指示の大きさや位置等の分析に用いる表示方法。

8. 時系列 (添付資料－4)

- 10月 2日 定期事業者検査開始 (探傷検査・データ整理)
- 10月 17日 定期事業者検査終了
A－SG伝熱管1本(2次側)、B－SG伝熱管1本(2次側)、
C－SG伝熱管3本(2次側)に、外面からの減肉と認められる
信号指示があることを確認
- 10月 21日 C－SG器内のカメラによる目視確認の結果、伝熱管外面に傷
を確認
- 10月 31日 A－SG器内のカメラによる目視確認の結果、伝熱管外面に傷
を確認
- 11月 8日 B－SG器内のカメラによる目視確認の結果、伝熱管外面に傷
を確認

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が認められ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、減肉信号が確認され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が認められた。

a. A－SG

第三管支持板：長さ約6.0mm、幅1.0mm以下 (X85,Y2)

b. B－SG

第三管支持板：長さ約5.0mm、幅約1.0mm (X92,Y8)

c. C－SG

第二管支持板：長さ約4.0mm、幅1.0mm以下 (X45,Y5)

第二管支持板：長さ約5.0mm、幅2.0mm以下 (X91,Y4)

第三管支持板：長さ約8.0mm、幅1.0mm以下 (X52,Y9)

(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が確認された。

10. 原因調査 (添付資料－5)

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、原因調査を行った。

(1) S G伝熱管内面(1次側)からの損傷

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. 粒界腐食割れ（IGA）*⁹

過去にSG 2次側環境においてアルカリ環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、粒界腐食割れが発生した実績があるが、高浜発電所4号機のようなアンモニアとヒドラジンの注入により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られる。

*⁹ 金属の結晶粒の境目（粒界）に沿って進展する腐食。

b. ピッチィング*¹⁰

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、ピッチィングが発生した実績があるが、高浜発電所4号機のような塩素濃度が十分低く管理され、かつ、アンモニアとヒドラジンの注入により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られる。

*¹⁰ 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。

c. 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（All Volatile Treatment）*¹¹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られる。

*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。

d. 摩耗減肉

(a) 管支持板との接触

ア. 管支持板ベイ部*¹²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、運転中に伝熱管にねじれを発生させる外力は発生しないと考えられる。

*¹² 管支持板に加工されている四ツ葉型管穴のうち凹面部。

イ. 管支持板ランド部*¹³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ヶ所の管支持板ランド部に減肉が生じることになるが、ECT結果から周方向に1ヶ所にしか減肉指示が確認されていないことから、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られる。

*¹³ 管支持板に加工されている四ツ葉型管穴のうち凸面部。

(b) SG器内発生物との接触・SG器外流入物との接触

ア. SG器内の目視点検

(ア) 点検結果

減肉指示が認められた箇所について、カメラによる目視確認を行った結果、機械的な影響によるものと考えられる減肉を確認した。

SG器内の管板、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第二および第三管支持板の下面の減肉指示が確認された伝熱管周辺部の点検を実施した。その結果、伝熱管から剥離したスケール（以下、スラッジという。）がSG器内の各所に確認されたほか、A-SGの第一管支持板上（X39-40,Y22-23）に、重さ約1g、長さ約20mm×幅約10mm×厚さ約0.6mmの金属片が確認された。

金属片発見位置は、減肉が確認された位置（第三管支持板の下面（X85,Y2））から約2.5m下方、約1.6m半径方向に離れた場所であった。

なお、B、C-SG器内にはスラッジ以外の異物は確認されなかった。

スラッジランシング*¹⁴等を実施した結果、スラッジ以外の異物については確認されなかった。

また、更なる異物調査として、SG器内に水を張り、底部からN₂を噴射（バブリング）させたのち、水を抜くことによる異物の回収を試みた結果、通常定期検査にて実施するスラッジランシング時の回収量の約3割のスラッジを回収できたが、スラッジ以外の異物については、確認されなかった。

*¹⁴ 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。

(イ) 金属片分析

A-SGで発見された金属片についてX線回折等により材質を確認した結果、オーステナイト系ステンレス鋼（SUS304相当）が主体であった。

また、金属片の表面観察の結果、伝熱管との接触に伴う摺動痕がないことを確認した。

イ. SG内部品の脱落調査

今回の異物の想定形状（薄片）*¹⁵に対して、SG内部品で該当する形状があるかを設計図面により確認したところ、振止め金具のキー固定板等、内部品として使用されていることを確認した。ただし、これらの内部品は、溶接止めされていること、もしくは、周囲を溶接止めされた構造物に囲まれており、万が一、脱落したとしても周囲の構造物の外には出ないことから、内部品の脱落の可能性はないと考えられる。

なお、SG器内の2次側の経年劣化事象を起因とする脱落については、内部品の経年劣化は流れ加速型腐食による給水内管裏当金の脱落が考えられることから、念のため、当該部のカメラによる目視点検を実施した。その結果、給水内管裏当金の溶接部に損傷は確認されなかった。

A-SGで発見された金属片については、SUS304相当品であることから、SGの内部で用いられている材料ではないことを確認した。

*15 「11. 減肉メカニズム(1) 想定される異物の形状」に記載している想定形状。

ウ. スラッジによる減肉の可能性

(ア) スケール性状

運転状態において、伝熱管にマグネタイト(Fe_3O_4)の粒子と鉄イオン(Fe^{2+})が供給される。伝熱管外表面での給水沸騰時に粒子状のマグネタイトが残留すること、また、温度上昇による溶解度減少に伴い、鉄イオンが析出することにより、スケールが形成される。

伝熱管表面のスケールはマグネタイト粒子の付着がベースとなって形成されており、マグネタイト単体としては、伝熱管よりも硬いものの、スケール内には空隙が存在するため、スケール内で構造上脆弱な箇所を起点として破壊が進展することを踏まえると、スケール自体は脆い性質であると考えられる。

(イ) SG器内から回収したスラッジによる再現試験

SG器内から回収したスラッジの断面観察を実施した。その結果、スラッジ内には空隙が存在しており、構造上脆いと判断される。

スラッジによる伝熱管摩耗試験を実施した。押付力を10N以上の条件で摩耗試験を実施した結果、スラッジ自体が破損し、摩耗減肉を発生させることはできなかった。このため、押付力を約2Nおよび約1Nに下げて摩耗試験を実施した。その結果、伝熱管に軽微なきずは付くものの、スラッジ先端部は摩滅した。(2Nの場合、伝熱管きず深さ約0.03mmに対し、スラッジ約0.8mm摩耗し、1Nの場合、伝熱管きず深さ約0.02mmに対し、スラッジ約0.5mm摩耗した。)

以上より、スラッジと伝熱管の接触によって摩耗減肉する可能性は低いと考えられる。

(ウ) 海外事例調査

米国電力研究所(Electric Power Research Institute)のレポートおよびデータベースで海外事例調査を実施したところ、スラッジが原因で伝熱管が損傷した事例は報告されていないことを確認した。

エ. SG器外（SGブローダウン系統）目視点検結果

摩耗減肉を発生させた原因となる異物は、SG器内で発見されなかった。これらの異物は、SGブローダウン系統からSG器外へ流出したと想定されることから、SGブローダウン系統のうち残留異物が滞留する可能性がある機器であるSGブローダウンタンクや水位制御弁等についても、機器等を開放し、内部の目視点検を実施したが、異物は確認されなかった。

オ. まとめ

- ・SG内部品が脱落した可能性はない。
- ・スラッジとの接触により減肉した可能性は低い。
- ・A-SGで確認された金属片は、伝熱管との接触に伴う摺動痕がないため、減肉の直接の原因ではないと考えられるが、同様な異物がSG器外から流入した可能性が否定できない。
- ・伝熱管に損傷を与えたと推定される異物は発見されなかった。
- ・以上のことから、SG器外から流入した異物による摩耗減肉が発生した可能性が高い。

e. デンティン^{*16}

E C Tの信号指示を確認した結果、デンティン^{*16}ではないと考えられる。

^{*16} 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。

f. 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られる。

g. エロージョン^{*17}

当該部流速は約3 m/sであり、かつ、T T 6 0 0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7 0 m/s以上がエロージョン発生領域）、エロージョンの発生はないと考えられる。

なお、室温条件にて評価を行っているが、温度により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。

^{*17} 流体が金属表面に衝突することで生じる機械的な衝突力で材料が損傷する現象。

(3) 損傷以外のE C T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、今回の信号は、スケールの剥離ではないと考えられる。

1 1. 減肉メカニズム (添付資料－ 6)

(1) 想定される異物の形状 (添付資料－ 7)

減肉痕等の位置関係から、減肉を生じさせた異物の形状を以下のとおり推定した。

a. A－SG

第三管支持板：長さ約 1 8 mm、幅約 7 mm、厚さ 1 mm以下 (X85,Y2)

b. B－SG

第三管支持板：長さ約 1 8 mm、幅約 8 mm、厚さ 1 mm以下 (X92,Y8)

c. C－SG

第二管支持板：長さ約 2 2 mm、幅約 6 mm、厚さ 1 mm以下 (X45,Y5)

第二管支持板：長さ約 2 4 mm、幅約 6 mm、厚さ 1 mm以下 (X91,Y4)

第三管支持板：長さ約 2 4 mm、幅約 6 mm、厚さ 1 mm以下 (X52,Y9)

(2) SG器内流入後の異物挙動 (添付資料－ 8)

異物は給水リング J チューブから管群外筒を経て管板上面中央部に到達し、その後は、運転中の SG 2 次側器内の流況下では流体抗力が異物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スロット部を通過し、減肉箇所へ到達したものと考えられる。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、第一管支持板を通過した異物は上昇する過程で低温側へ流れ、第二管支持板の低温側下面、又は第二管支持板フロースロット部を通過したものは第三管支持板の低温側下面に至ったものと推定される。

(3) 管支持板下面での減肉メカニズム

各管支持板下面に到達した異物は、流体力によって伝熱管の間の管支持板下面で保持され、伝熱管と接触することにより、摩耗減肉を発生させたものと推定される。

a. 摩耗形態の推定 (添付資料－ 9)

異物との接触で伝熱管が摩耗する場合、異物の振動により摩耗するケースと伝熱管の振動により摩耗するケースが考えられる。

(a) 異物振動のケース

隣接した伝熱管での減肉が発生していないことから、異物が伝熱管の間で振動していたことは想定できず、本ケースでは異物の端部が管支持板の B E C 穴ランド部に挟まり拘束された状態が想定される。この想定に基づきワークレート*¹⁸を計算すると、推定した異物形状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。

*18 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。

(b) 伝熱管振動のケース

本ケースでは、異物が流体力によって管支持板下面で保持され、接触する伝熱管のランダム振動*19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異物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、異物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。

*19 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)項から、発生した減肉は管支持板下面で保持された異物に伝熱管が接触したことによるものと推定されるため、以下の検証を行った。

b. 異物と伝熱管の接触状態の推定 (添付資料-10)

異物と伝熱管の接触状態を推定するため、異物と伝熱管の接触角度に応じた減肉形状を実験で確認するとともに、実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にてECT信号を取得し、実機のECT信号との比較を行った。

(a) 減肉試験

減肉の発生および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、接触角度(伝熱管の接線方向および軸方向)をパラメータとして砥石の角部により減肉を与えた。その結果、接線方向の接触角度に応じて水平方向断面が蒲鋒型(接触角度0°)または三角型(接触角度15°から45°)の減肉形状が得られることを確認した。また、軸方向の接触角に応じて軸方向断面が矩形のスリット形状または三角形に近い形状の断面形状が得られることを確認した。

(b) ECTモックアップ試験

(a)項で得られた蒲鋒型および三角型と同等の形状を有する人工欠陥を伝熱管モックアップに与えた。人工欠陥の寸法については、断面形状は減肉試験で得られた各接触角度の減肉寸法計測結果から、幅および深さは実機のECT信号から設定した。このモックアップのECT信号を取得した

結果、三角型の人工欠陥から得られたE C T信号が実機のE C T信号とよく一致することを確認した。

上記（a）、（b）項から、異物は運転中の流体力により管支持板下面で保持されるとともに、異物の角部が伝熱管に接触したものと推定された。

c. ワークレートおよび摩耗体積の評価 （添付資料－1 1）

上記 a. 項で推定した減肉形態を踏まえ、流動振動解析を行った結果、今回の減肉量を再現するのに十分なワークレートおよび摩耗体積が得られることを確認した。また、上記 b. 項の人工欠陥の摩耗体積と比較を行った結果、両者はほぼ整合することを確認した。

以上の検討結果から、（1）項で推定した形状の異物は、S G 器内へ流入後、各管支持板低温側下面へ移動するとともに伝熱管へ摩耗減肉を与えた可能性があることを確認した。

1 2. 異物流入に関する調査

（1）異物により減肉した国内外事例調査 （添付資料－1 2）

国内外で報告されている異物による外面減肉事象を調査した結果、国内では3件、海外では多数の事例があることを確認した。

また、米国原子力規制委員会（NRC：Nuclear Regulatory Commission）のホームページ上に公開されているレポートから、複数の伝熱管外面が異物により減肉した海外事例を調査した結果、2000年以降で少なくとも10件あることを確認した。

（2）異物流入経路 （添付資料－1 3）

異物が流路内で移動するためには、流れによって発生する流体抗力が、異物自体の自重により発生する落下力を上回る必要がある。想定される異物の形状および通常運転中の流速を勘案して、想定される異物が系統水の流れに乗って移動する可能性がある範囲を調査した結果、主給水系統およびS G 水張系統から異物が流入する可能性があると考えられる。

（3）S G 器外の2次系機器内部構成品の脱落 （添付資料－1 4）

2次系機器の内部構成部品が脱落し、異物となってS G へ流入する可能性について検討した。その結果、（2）の系統範囲にある機器の内部構成品であって、想定される異物と類似形状を持つ構成品はなかったことから、機器内部構成部品が脱落して異物となった可能性はないと考えられる。

(4) 作業時の混入

a. 異物混入の可能性のある時期

SG 2次側に異物が流入する可能性のある作業は、SG 給水系統の定期検査中の作業が考えられる。また、前回定期検査（第21回）では、ECTの結果、伝熱管の外面減肉が確認されていないことから、前回定期検査中において異物が混入したものと考えられる。なお、前回定期検査時に実施したスラッジランシング後の小型カメラによる管板上点検では、異物は確認されていない。

b. 作業時の異物混入の可能性

異物混入が想定される上記の系統においては、従前より異物管理は実施していた。一方、高浜3号機の前回定期検査（第23回）において異物混入によるSG伝熱管外面減肉が発生しており、その対策として異物管理の充実を図っているが、異物が混入したと想定される高浜4号機の前回定期検査（第21回）はこの対策の前であることから、同様な原因で異物が混入した可能性は否定できない。

c. 異物混入の可能性のある作業の調査 (添付資料-15、16)

b. で述べた通り、外部から流入した異物が減肉の原因となった場合、異物混入の可能性のある作業は、高浜4号機の前回定期検査（第21回）に、(1)で述べた系統範囲内の機器で開放点検等を実施した作業である可能性が高いことから、作業実績から該当する作業を抽出した。

次に、抽出した全作業について、異物管理状況として、開口部養生状況、連続監視状況、服装管理状況および最終異物確認状況について確認した。その結果、すべての作業において開口部養生、連続監視および服装管理は適切に実施されていたものの、12件の作業において、最終異物確認時に目視確認が困難な範囲が存在し、異物が混入する可能性が完全には否定できない以下の作業があることがわかった。

(a) 弁分解点検作業

異物混入防止対策として開放作業前の周辺清掃、養生、開放後の開口部養生並びに封印、服装等の確認、最終異物確認時のパイロットミラーを用いた確認を実施していたが、最終異物確認前の作業のうち弁箱内の清掃・ふき取り作業等に使用するウエスは、使用後再使用している場合があること、他の工具類と同じ工具袋内に保管し運搬されていること、さらに、弁の周辺で別作業により端材が発生する可能性があることから、この段階でウエスに異物が付着する恐れがある。一般的に清掃作業等の前にウエスに付着物がないことを確認しているため、可能性は低いが、異物が確実に除去されず開放作業時に開口部から異物が混入した可能

性は否定できない。

また、垂直管に取り付けられた弁については、異物混入後、落下するため、最終異物確認時点では目視確認が困難な範囲となることから、異物が確認できず混入した可能性は否定できない。

(b) ストレーナ開放点検作業

最終異物確認前の作業のうちストレーナ内部へ入る際の服装等の確認を、作業員本人が実施しているが、本人では見えない箇所に異物が付着し、器内の養生作業時にストレーナ内に異物が混入した可能性は否定できない。

また、ストレーナ出口が垂直管であることから、異物混入後、落下するため、最終異物確認時点では目視確認が困難な範囲となり、異物が確認できず混入した可能性は否定できない。

(c) 脱気器タンク開放点検作業

最終異物確認前の作業のうち脱気器タンク内部へ入る際の服装等の確認を、作業員本人が実施しているが、本人では見えない箇所に異物が付着し、器内の養生作業時に異物が混入した可能性は否定できない。

また、脱気器タンク出口が垂直管であることから、異物混入後、落下するため、最終異物確認時点では目視確認が困難な範囲となり、異物が確認できず混入した可能性は否定できない。

d. 異物として推定される資材等

(添付資料－17)

外部からの異物混入は、c. で述べた開放点検等を実施した作業のうち、最終異物確認時に目視確認が困難となる範囲が存在した作業において、異物が生じたものと考えられる。このため、発電所の作業において、想定する異物と類似する異物が発生する可能性の有無を確認したところ、以下のような可能性が考えられる。

保温材外装板施工時や配管識別表示等を金属製のバンドで配管等に固定する際に、外装板の大きさやバンドの長さを調整している。また、配管の取替時に既設配管の切断や開先加工を行う。その時に発生した切れ端や切削くずが想定する異物やA-SGで発見された金属片と類似した形状となることは否定できない。

また、開放点検等を実施した周辺の作業状況を確認したところ、開口部のある期間中に、上記のような切れ端や切削くずが生じる作業が3件行われていることがわかった。

一方、開放点検等を実施した当該作業や、周辺で実施した別工事以外の作業によって発生した異物であっても、作業服や靴の裏に付着して開口点検等を実

施した作業の近辺に持ち込まれたと考えられることから、開放点検等を実施した12件のいずれかの作業から異物が混入した可能性は否定できない。

1.3. 伝熱管の健全性 (添付資料-18、19)

(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された、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ことを確認した。

1.4. 推定原因

- ・ 前回(第21回)定期検査時における機器の開放点検作業中に混入した異物が、最終異物確認時に目視確認が困難となる範囲に残留した。
- ・ 前回定期検査後の起動後、残留した異物は主給水系統を通じてSGに到達、SG内の上昇流に乗って第二、第三管支持板下面に到達し、伝熱管と接触した。
- ・ 伝熱管と接触した異物は、運転中に生じる伝熱管の振動によって、伝熱管外表面を摩耗させ、伝熱管外面にきずをつけた。
- ・ 今回(第22回)定期検査開始後、SG内の上昇流が喪失したことにより、異物は落下、また、SG水抜き時にフローズットを經由し、管板まで到達した後、SGブローダウン系統より海水管に放出された。

15. 対 策

(1) 減肉伝熱管の施栓 (添付資料-20~22)

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) SG器内への異物流入対策 (添付資料-23~29)

a. 以下の通り、SGへの異物流入の可能性のある機器の点検における異物混入防止対策の徹底を図り、作業手順書等に追記する。

(a) 作業員の立ち入る機器の点検 (脱気器タンクおよび主給水ブースタポンプ入ロストレーナ)

ア. 作業員が機器内部に立ち入って作業を行う場合は、機器内部へ立ち入る直前に器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。

イ. 開口部に周辺作業と隔離したエリアを設けることで、異物の混入防止を図る。

(b) 垂直配管に取り付けられている弁の点検

ア. 垂直配管に取り付けられている弁点検時は、弁箱内部に使用する機材に異物の付着がないことを確実に確認する。

また、最終異物確認時において直接目視にて異物の有無の確認ができない範囲については、ファイバースコープによる確認を行う。

イ. 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する。

また、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。

b. 当該作業における異物混入防止対策が作業手順書通りに実施されていることを確認するため、現場パトロールの実施等による管理強化を図る。

なお、今後の運転継続にあたり、今回SG二次側に異物が混入していたことを踏まえ、SG器内の水張り、N₂噴射 (バブリング) および水抜きを行った結果、スラッジが回収されたものの、異物が回収されなかったことから、器内に異物が残留していないことを最終確認した (10. (2) d. (b) ア. (ア) に記載の更なる異物調査時に併せて実施済み)。また、さらに今回の定期検査

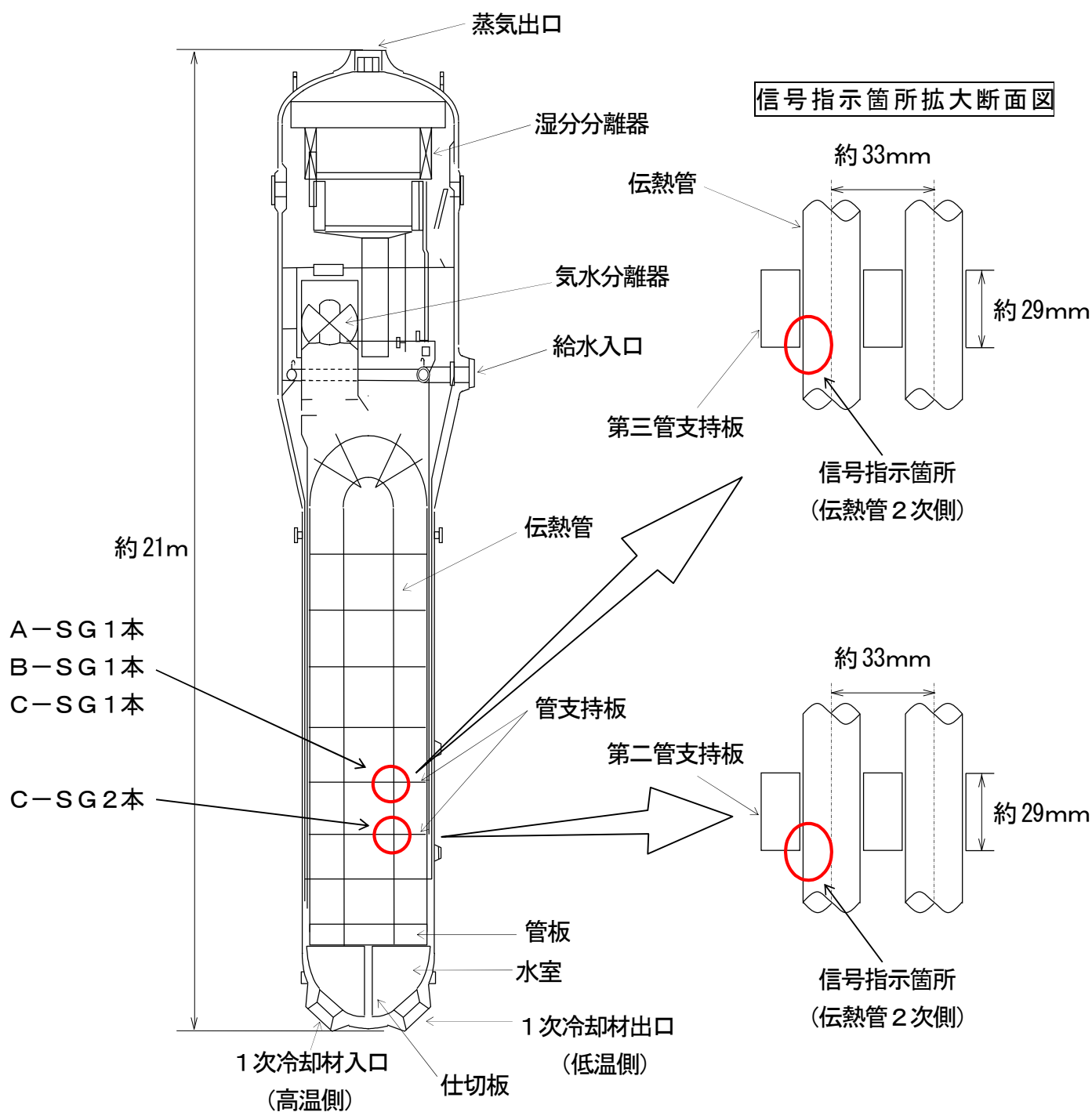
において開放点検を実施した脱気器タンク、ストレーナ、垂直配管に取り付けられている弁について、ファイバースコープによる異物確認を行い、機器内に異物が混入していないことを最終確認する。

以 上

添 付 資 料

1. SG伝熱管信号指示箇所概要図
2. SG伝熱管ECT結果
3. SG伝熱管ECT信号指示位置図
4. SG点検スケジュール
5. 要因分析図
6. 減肉メカニズム（異物による減肉の評価フロー）
7. 異物の形状
8. SG器内流入後の異物挙動について
9. 摩耗形態の推定
10. 異物と伝熱管の接触状態の推定
11. ワークレートおよび摩耗体積の評価
12. 異物により減肉した国内外事例調査
13. 異物混入調査系統
14. SG器外の系統上の機器内部構成品で想定される異物との類似形状品
15. 開放機器への異物混入可能性評価
16. 異物混入の可能性検討
17. 異物として推定される資材等
18. 減肉した伝熱管の評価
19. 隣接伝熱管の健全性
20. SG伝熱管信号指示箇所補修概要図
21. SG伝熱管補修来歴
22. 減肉により施栓した伝熱管が他の伝熱管へ及ぼす影響
23. SG器内への異物流入対策
24. 作業手順見直し（保温）
25. 作業手順見直し（弁）
26. 作業手順見直し（ストレーナ）
27. 作業手順見直し（脱気器タンク）
28. 異物混入防止対策の考え方
29. 異物の器内挙動（異物残留について）

SG伝熱管信号指示箇所概要図（SG管支持板部）

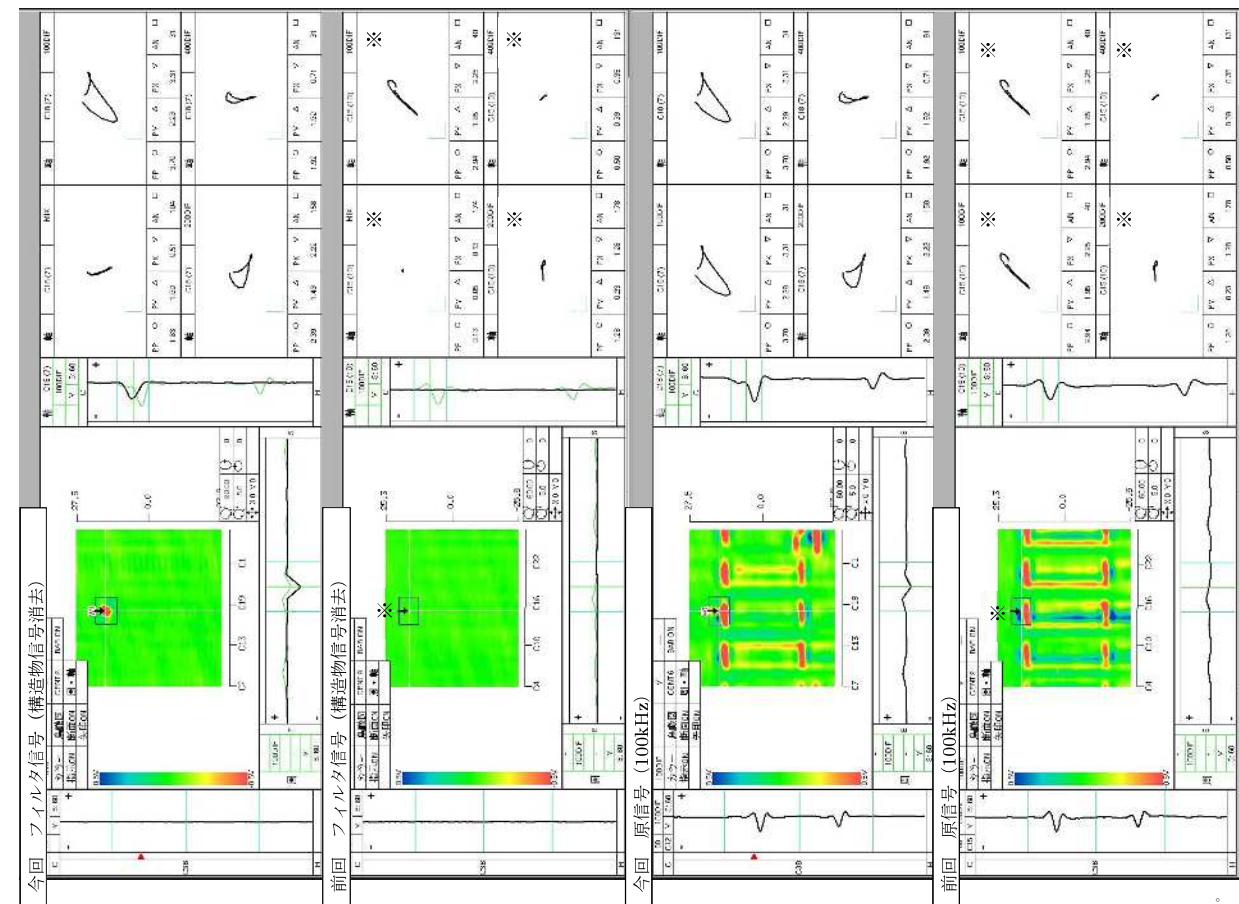


高浜4号機 SG伝熱管ECT結果

	A-SG	B-SG	C-SG	合計
設備本数	3,382	3,382	3,382	10,146
既施栓本数 (応力腐食割れによる施栓本数※)	137 (8)	134 (3)	123 (13)	394 (24)
検査対象本数	3,245	3,248	3,259	9,752
指示管本数	1	1	3	5
結果	管支持板部付近において、A-SGで1本、B-SGで1本およびC-SGで3本に、外部からの減肉とみられる有意な信号指示が認められた。			

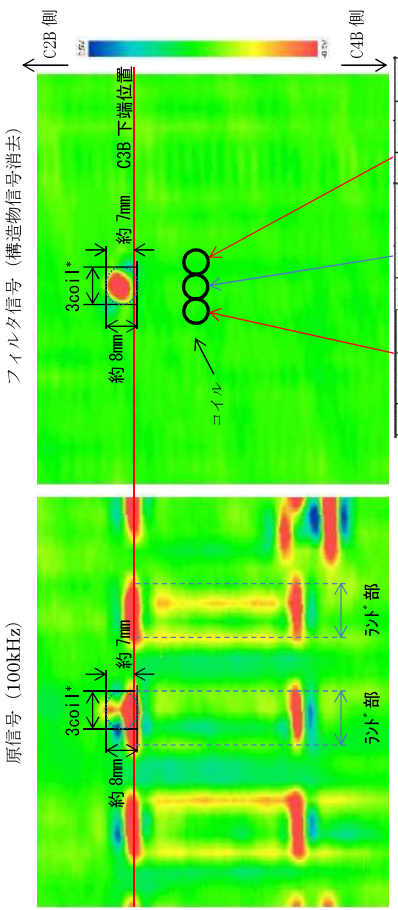
※既施栓本数の内数を示す。

SG伝熱管ECT結果



※特異な信号がないため任意の位置で表示。

前今比較



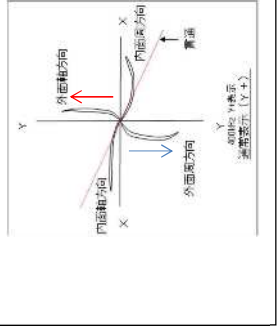
【A-SG X85-Y2 リサーチユ波形】

※1
※2
※3

波形評価

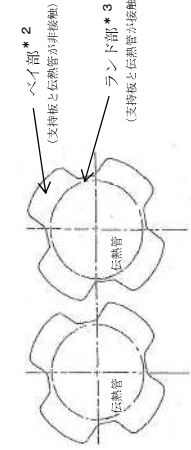
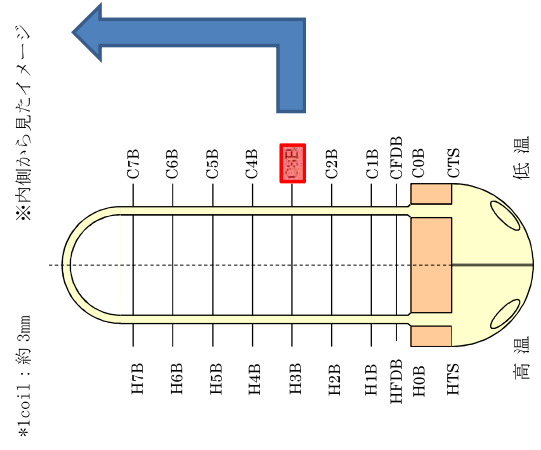
- 位相角評価から、外面指示の特徴を持っている。
- 指示は複数のコイルで検出されており、指示の中心部のコイルは周方向成分、両端部のコイルでは軸方向成分の特徴を持っている。

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)



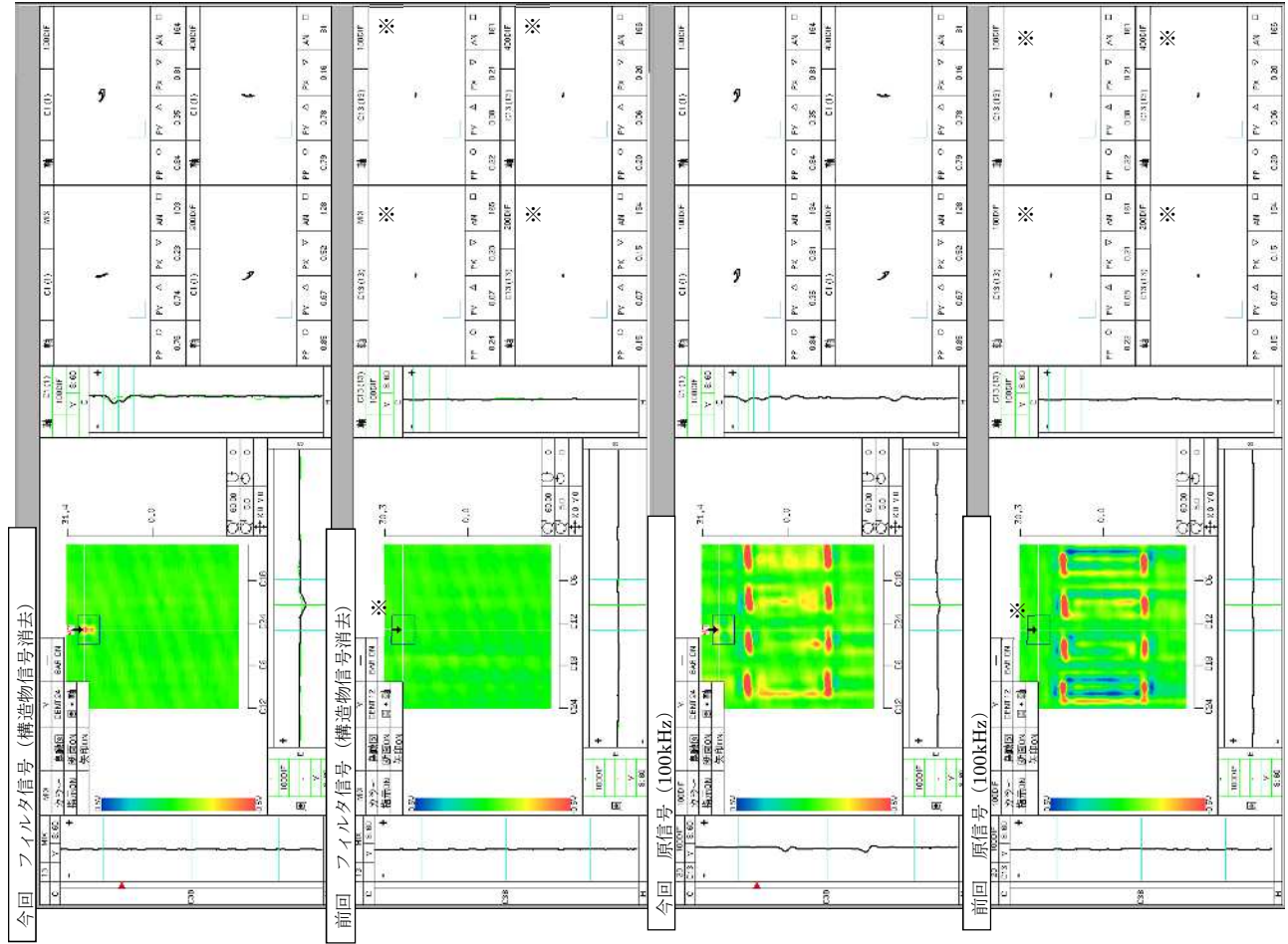
- ※1 渦電流変化の電気信号を図で表したものを(水平成分および垂直成分を同一画面に表示)。
- ※2 管支脚板に加工されている四つ葉型管穴のうち上面部。
- ※3 管支脚板に加工されている四つ葉型管穴のうち下面部。

信号評価



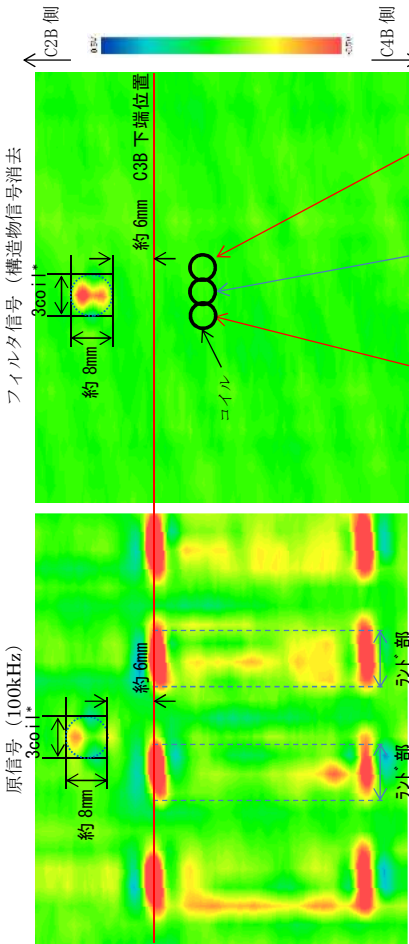
A-SG X85 Y 2 部位 : C3B

SG伝熱管ECT結果



※特異な信号がないため任意の位置で表示。
前今比較

B-SG X92 Y 8 部位 : C3B



【B-SG X92-Y8 リサージュ波形】

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

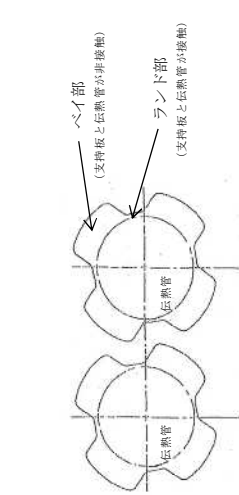
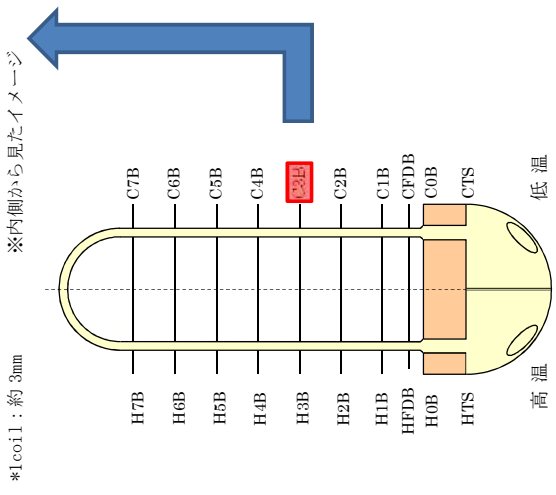
軸方向	周方向	軸方向
↑	→	↑

軸方向	周方向	軸方向
↑	→	↑

波形評価

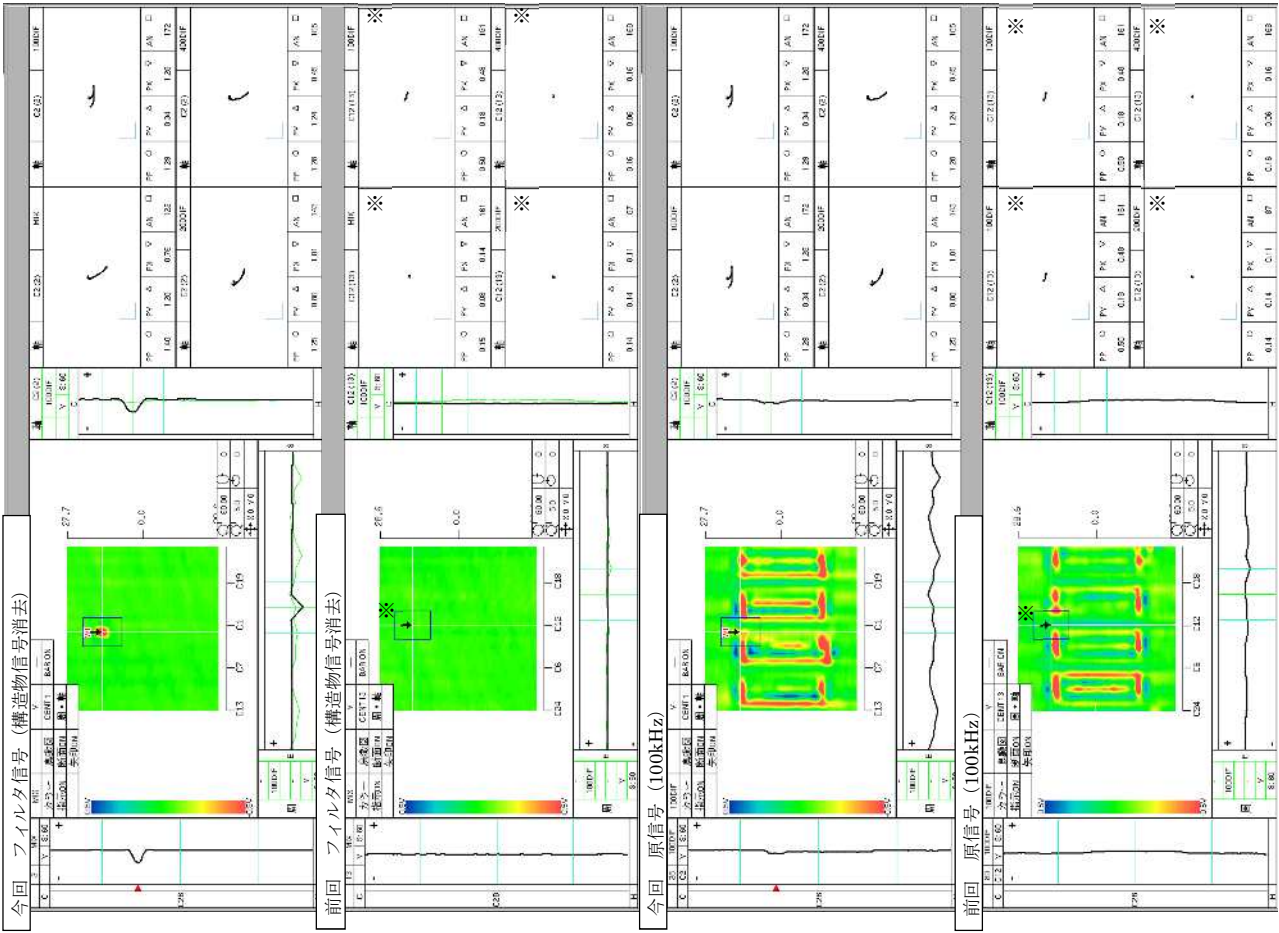
- ・位相角評価から、外面指示の特徴を持っている。
- ・指示は複数のコイルで検出されており、指示の中心部のコイルは周方向成分、両端部のコイルでは軸方向成分の特徴を持っている。

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)



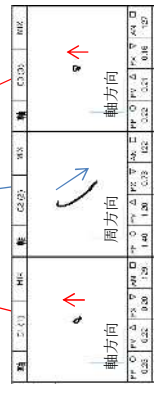
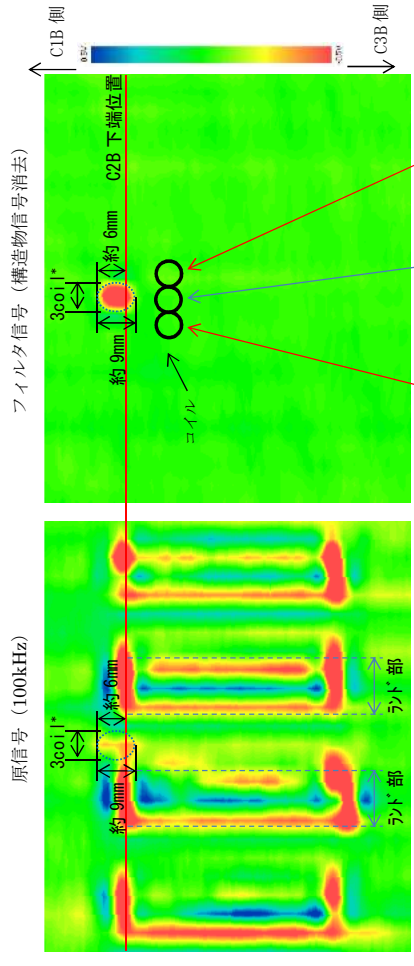
信号評価

SG伝熱管ECT結果



※特異な信号がないため任意の位置で表示。
前今比較

C-SG X45 Y 5 部位 : C2B



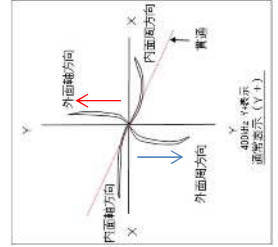
【C-SG X45-Y5 リサージ波形】

さす端部の軸方向成分(赤色部)を検出
さす中心部の周方向成分(青色部)を検出

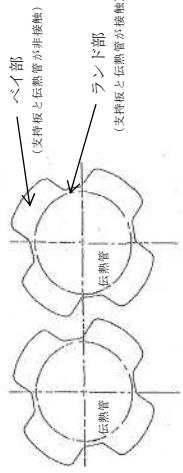
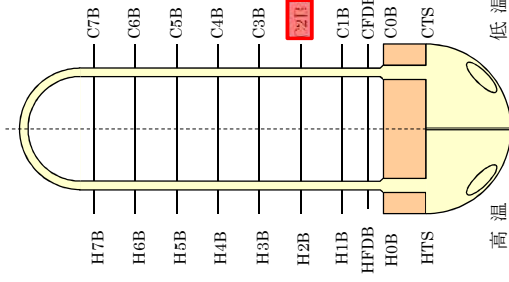
波形評価

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

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

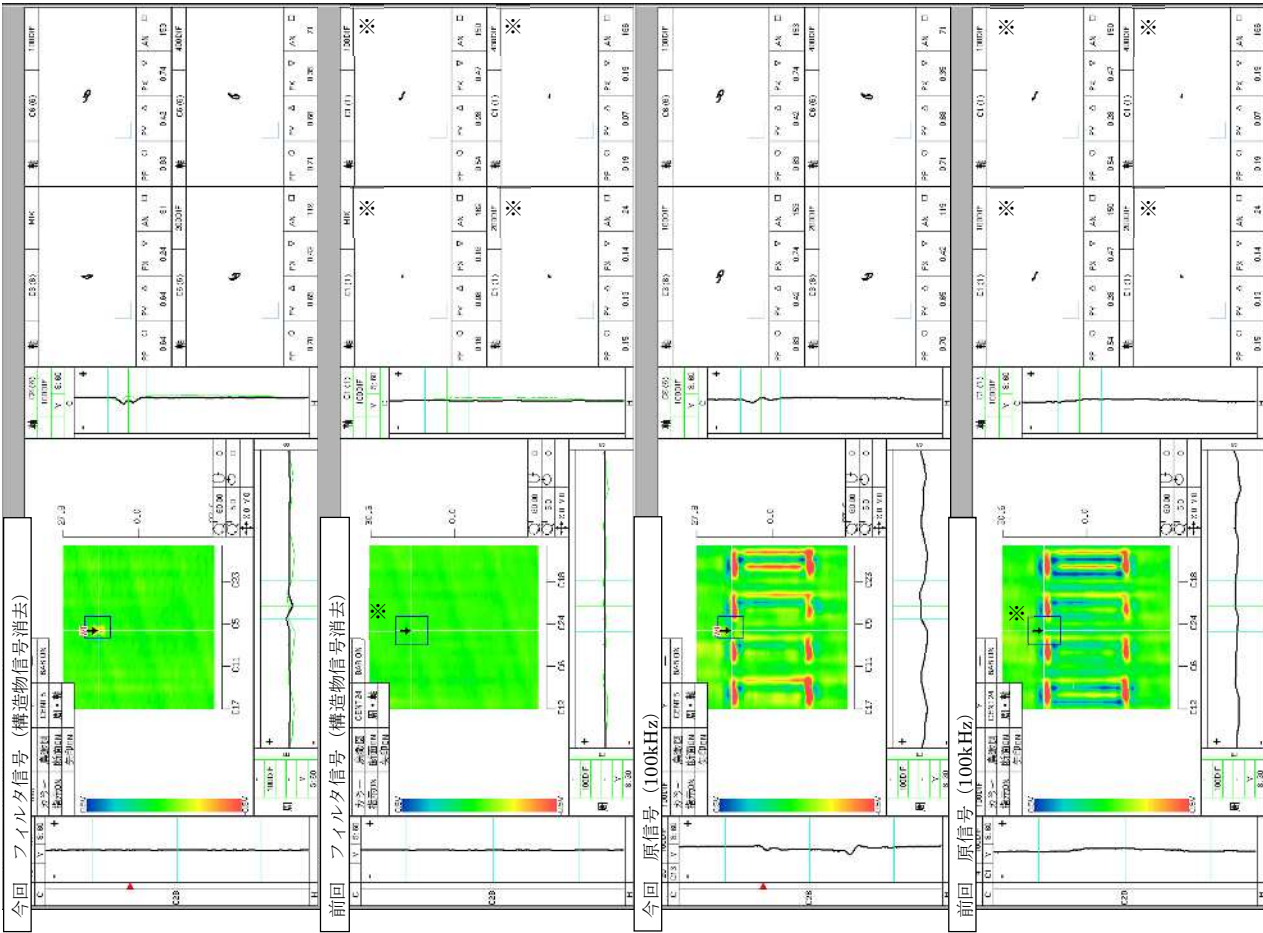


*Icoil : 約3mm



信号評価

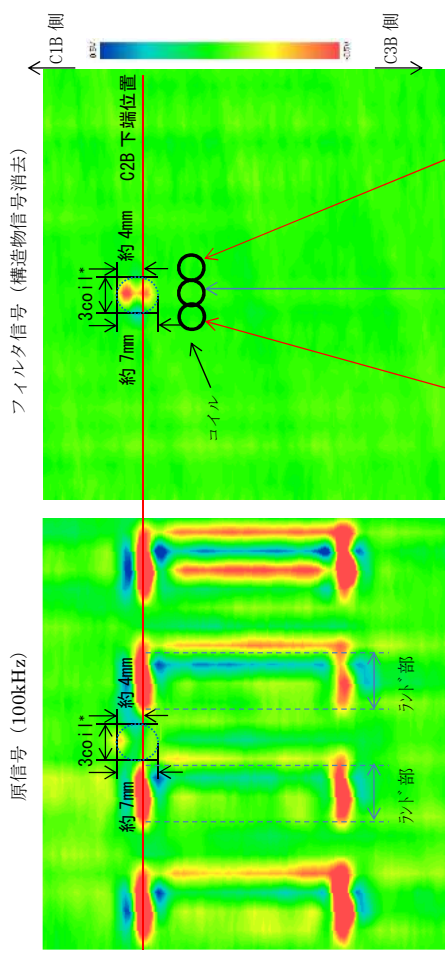
SG伝熱管ECT結果



※特異な信号がないため任意の位置で表示。

前今比較

C-SG X91 Y 4 部位 : C2B



【C-SG X91-Y4 リサーチ波形】

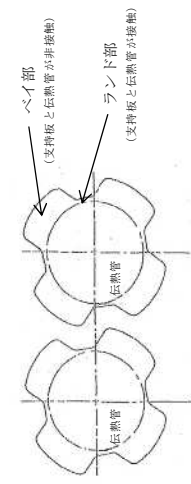
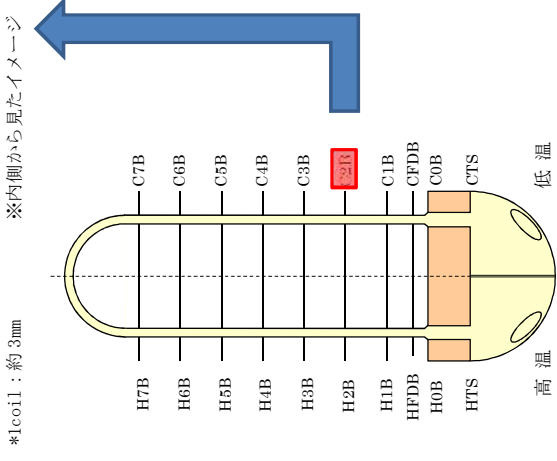
きず端部の軸方向成分(赤色部)を検出
きず中心部の周方向成分(青色部)を検出

精	C202	N05	審	数	測	C271	60K					
軸方向	PP	CI	PS	V	AN	LI	PP	CI	PS	V	AN	LI
周方向	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26
軸方向	4											

波形評価

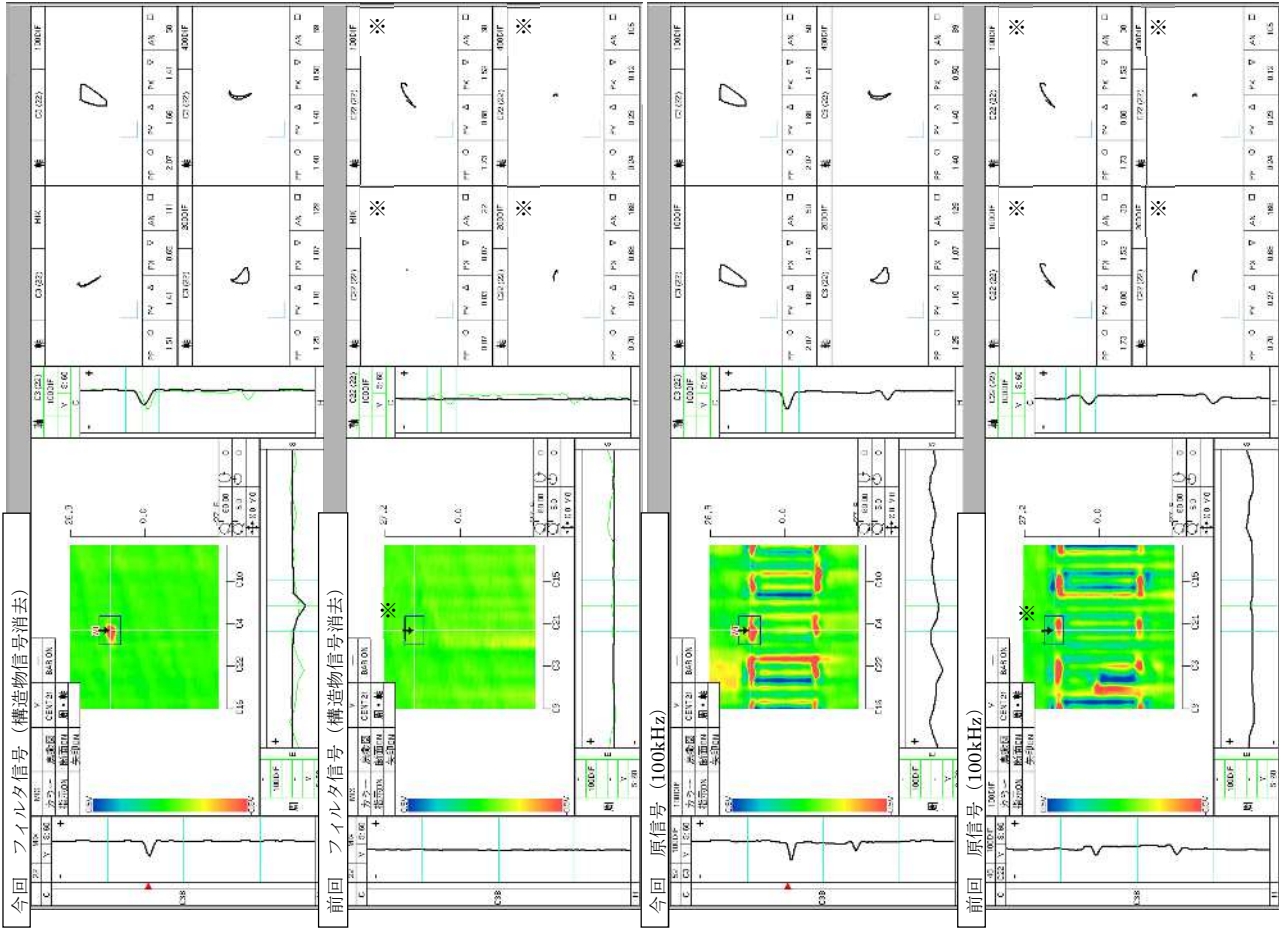
- ・位相角評価から、外面指示の特徴を持つている。
- ・指示は複数のコイルで検出されており、指示の中心部のコイルは周方向成分、両端部のコイルでは軸方向成分の特徴を持つている。

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)



信号評価

SG伝熱管ECT結果

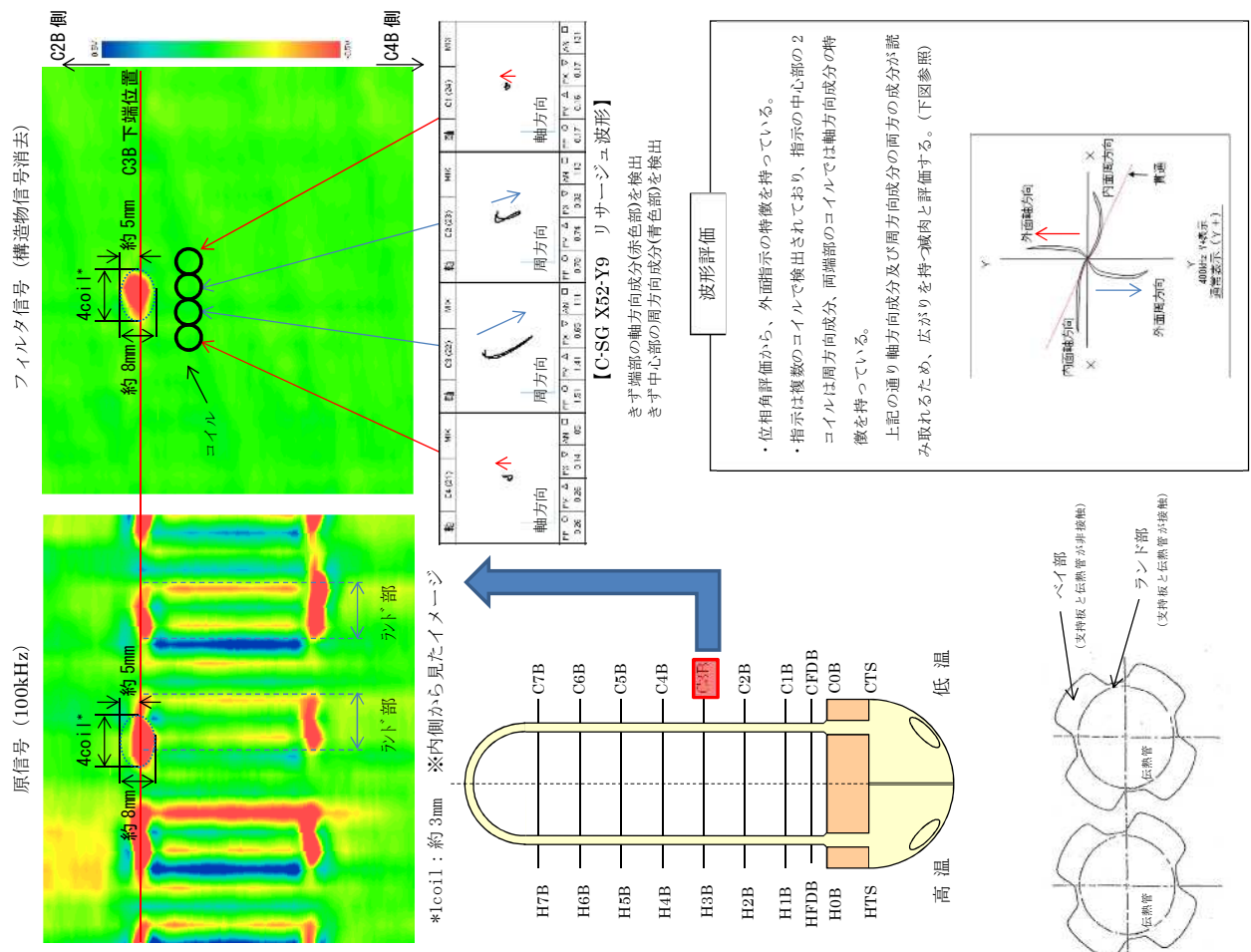


※特異な信号がないため任意の位置で表示。

前今比較

C-SG X52 Y 9 部位 : C3B

信号評価

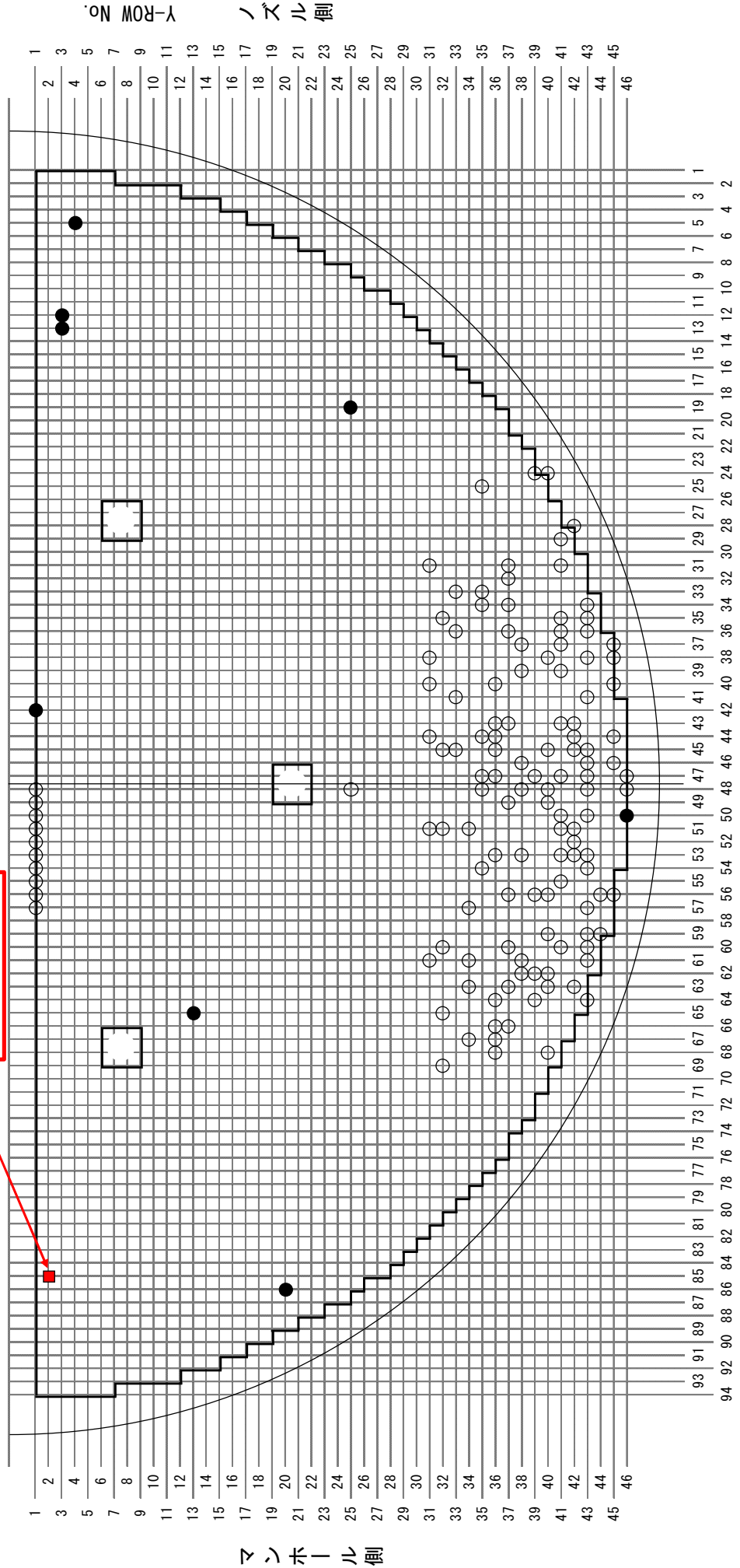


高浜4号機 SG伝熱管ECT信号指示位置図
A-SG (低温側)

- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (129本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (8本)
- : 今回減肉信号が認められた位置 (1本)

＜第三管支持板＞
有意な信号指示管
(X 8 5 - Y 2)

本図はSG上部から見た位置を示す



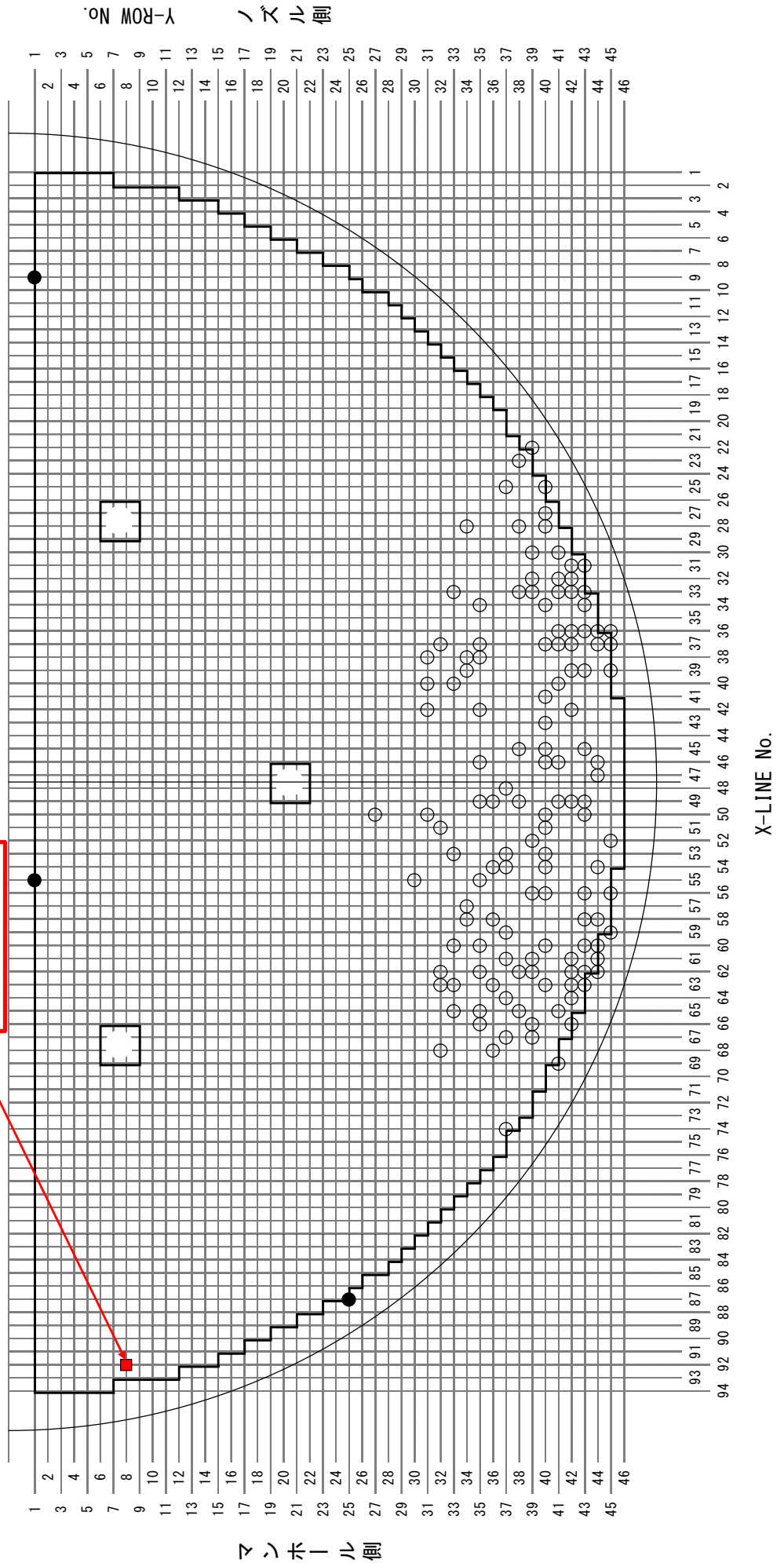
X-LINE No.

高浜4号機 SG伝熱管ECT信号指示位置図
B-SG (低温側)

- : 既施検管 (拡管部心力腐食割れ以外) (131本)
- : 既施検管 (拡管部心力腐食割れ) (3本)
- : 今回減肉指示が認められた位置 (1本)

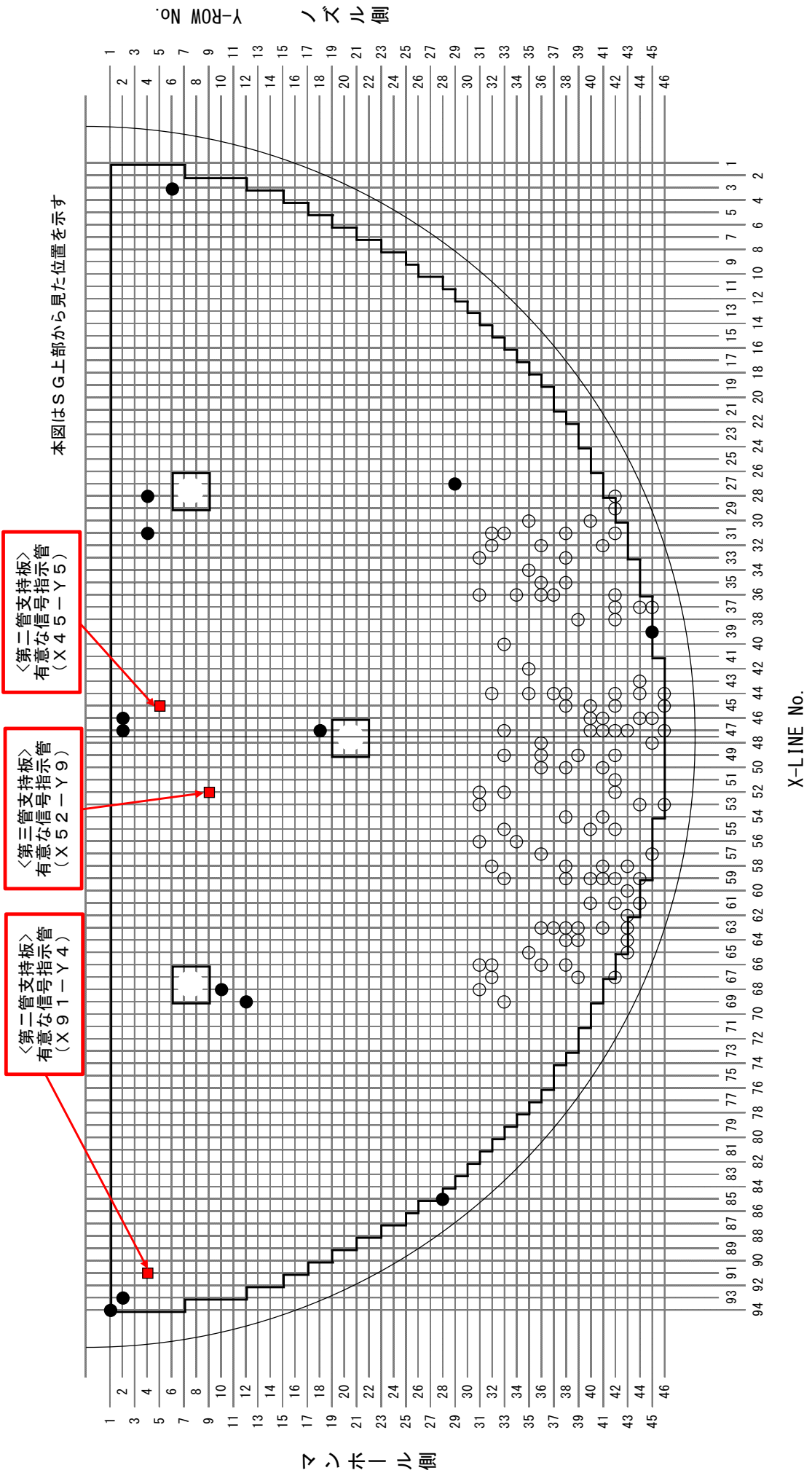
<第三管支持板>
 有意味な信号指示管
 (X92-Y8)

本図はSG上部から見た位置を示す



高浜4号機 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 (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)



マノホー側

SG点検スケジュール

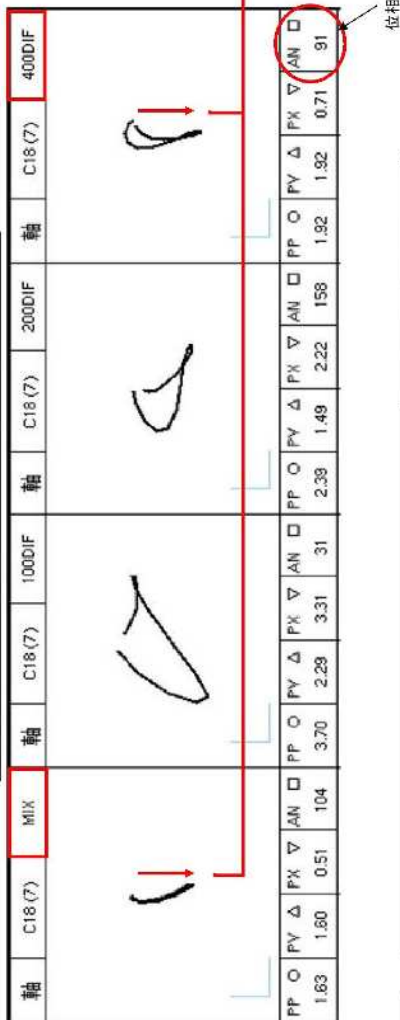
	2019.10月										2019.11月																																				
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
作業準備 完了	C-伝熱管表面、管支持板上（第一、第二）、管板上点検																																														
	作業準備																																														
	完了																																														
	A-伝熱管表面、管支持板上（第一、第二）、管板上点検																																														
	作業準備																																														
	完了																																														
	B-伝熱管表面、管支持板上（第一、第二）、管板上点検																																														
	作業準備																																														
	完了																																														
	C-給水リング点検																																														
	完了																																														
	A-給水リング点検																																														
	完了																																														
	B-給水リング点検																																														
	完了																																														
	SG&D系統（アングル弁、タンク等）点検																																														
	完了																																														
	材質分析																																														
	完了																																														
	表面分析（摩耗痕確認）																																														
	完了																																														
	C+Sフラッシュランジンのスラッジ確認																																														
	完了																																														
	A+Sフラッシュランジンのスラッジ確認																																														
	完了																																														
	B-Sフラッシュランジンのスラッジ確認																																														
	完了																																														
	A-Sフラッシュランジンのスラッジ確認																																														
	完了																																														
	スラッジコメタのフラッシュ確認																																														
	完了																																														
	A-Sフラッシュランジンのスラッジ確認																																														
	完了																																														
	B-Sフラッシュランジンのスラッジ確認																																														
	完了																																														
	A-Sフラッシュランジンのスラッジ確認																																														
	完了																																														
	C+Sフラッシュランジンのスラッジ確認																																														
	完了																																														
	A+S																																														
	完了																																														
	B+S																																														
	完了																																														
	C-S																																														
	完了																																														
	完了																																														

高浜4号機 SG伝熱管 管支持板部の減肉指示の要因検討 (FT図)

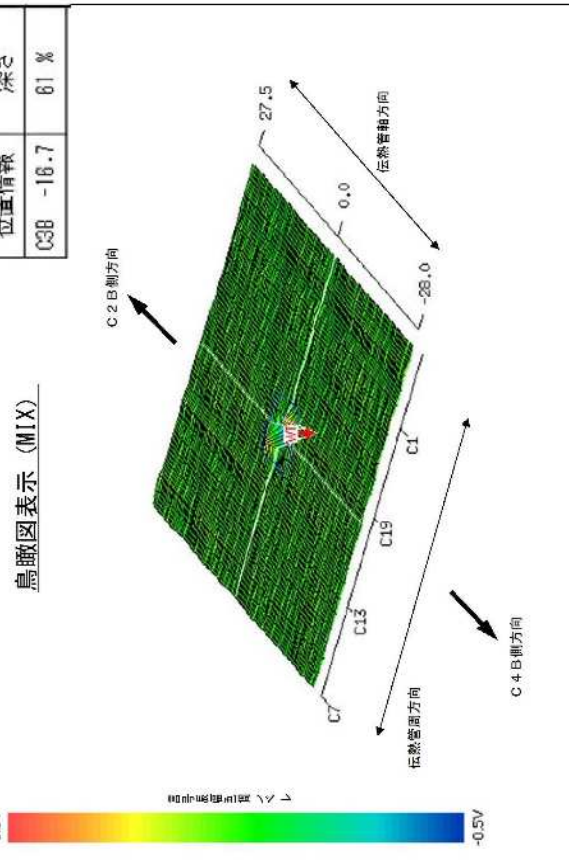
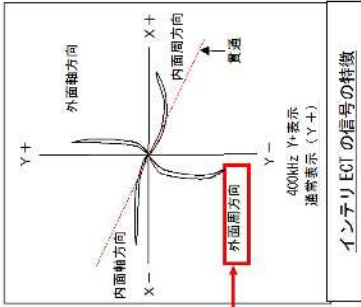
要因		調査項目		評価				
1次側からの損傷	減肉指示	1次側からの損傷	ECT信号	ECTの指示信号から損傷は、1次側からの損傷ではないと考えられる。	×	資料1 (1)項		
		粗界腐食割れ (IGA)	使用環境	過去にSG2次側環境においてアルカリ環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、粗界腐食割れが発生した実績があるが、高浜発電所4号機のようなアンモニアとプラントの注入により良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないと考えられる。※	×	資料2		
		ピッチリング	使用環境	過去にSG2次側環境において海水リーク等による塩化物環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、ピッチリ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、且つ、アンモニアとピッチリングの注入により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と考えられる。※	×	資料3		
		リン酸減肉	使用環境	過去の2次系水処理において、リン酸を使用していたプラントでリン酸による減肉が発生した実績があるが、高浜発電所4号機のようなアンモニアとピッチリングによる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られる。※	×	資料4		
		摩耗減肉	設計評価	管支持板との接触	管支持板との接触による摩耗減肉が顕在化する場合は4ヶ所の接触部(ランド部)に減肉が生じることになるが、ECT信号上は減肉は管支持板下側位置しか発生していない。且つ、ランド部の位置に発生していないことから、前述の傾向とは異なり、減肉が管支持板との接触・摩耗によって発生した可能性はないと考えられる。	×	資料5	
		2次側からの損傷	管支持板部の減肉	管支持板との接触	設計評価	今回の減肉発生させた異物の粗形状(薄片)に対して、SG内部品で該当する形状があるかを設計図面により確認したこと、禁止工具の一面(面)形状等が比較的に類似していることを確認した。しかしながら、これらの内部品は、溶接止めされていること、もしくは、前面を溶接止めされた構造物と面取されており、方が一、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、SG器内からの異物の可能性はないと考えられる。	×	資料6
				SG器内発生物との接触	設計評価	スラッジは空腔を覆っており、脆いため、伝熱管を摩耗減肉させることは考えにくい。悪浜4号機で採取したスラッジと伝熱管との接触させる試験を行った結果、伝熱管に僅かな傷をつづものの、スラッジが伝熱管との接触で破損、または、著しく摩滅することを確認した。	×	資料7
				SG器外流入物との接触	目視点検	A-SGで確認された金属片は減肉の直接の原因ではないと考えられるが、同様な異物がSG器外から流入した可能性が否定できない。今後、更なる異物調査として、SG器内に水を張り、底部からN2を噴射(バブリング)させたのち、水を抜くことによる異物の回収を試みた結果、スラッジ以外の異物については、確認されなかった。	△	資料8
				デンディング	ECT信号	ECTの信号指示からデンディングではないと考えられる。※	×	資料1 (2)項
				流体振動による疲労	設計評価	管支持板部の流れによる伝熱管の管支持板部の応力は、疲労限に比べ非常に小さく、疲労損傷は発生しないと考えられる。※	×	資料9
		ECT探傷	管支持板部の減肉	エロージョン	設計評価	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く(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られる。※	×	資料10
損傷以外の信号	ECT信号			異物等の付着による信号は、減肉信号と異なるが、今回の信号は減肉信号であるため、異物等の付着・剥離の可能性は低い。	×	資料11		
局所的な異物等の付着・剥離	設計評価			※ 寸すりの形状から根本原因でないとは判断できる。 ×: 要因の可能性なし、△: 要因の可能性あり。				

ECTの位相評価

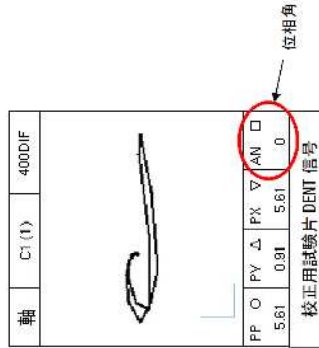
当該管リサージュ表示 (A-SG X85-Y2)



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



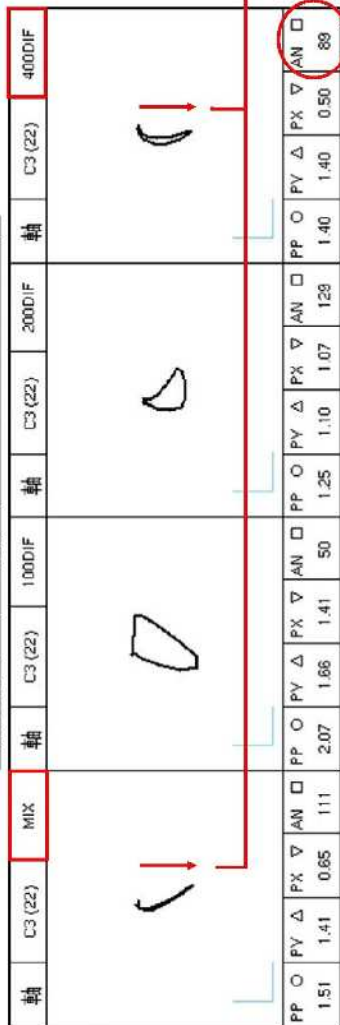
(2) テンディング(DENT)信号の特徴との比較



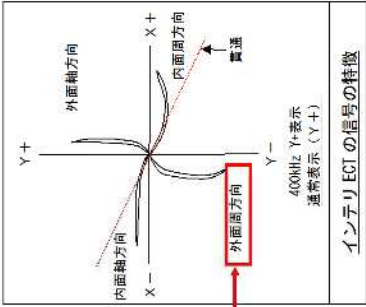
校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は“全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど0”となり、今回の当該信号は位相角が91°方向を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外周周方向きずの特徴を持っていると言える。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考えられる。

ECTの位相評価

当該管リサージュ表示 (C-SG X52-Y9)

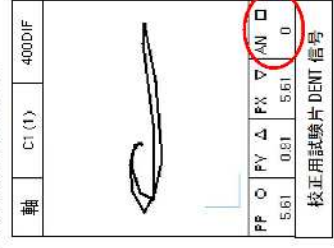


(1)内面軸方向信号の特徴との比較
 インテリジェントECTの信号の特徴と今回の当該信号を比較したところ、今回の当該信号は400kHzとおよびMIXの位相角でY-方向の外周周方向きずの特徴を示している。そのため、伝熱管内面(1次側)からの損傷ではないと考えられる。

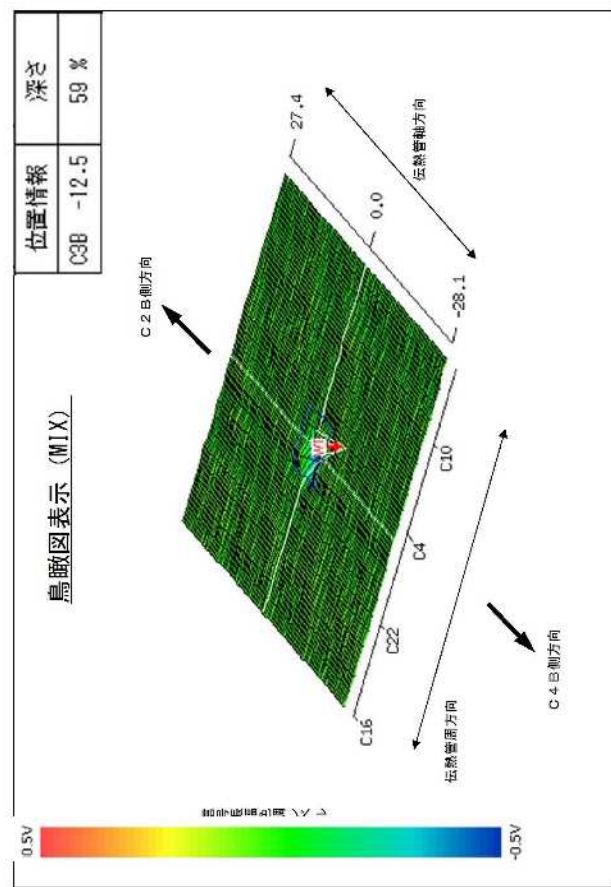


インテリジェントECTの信号の特徴

(2) デンティング(DENT)信号の特徴との比較



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、今回の当該信号は位相角が89°方向を示しており、DENT信号の特徴を持たず外面周方向きずの特徴を持っていると言える。そのため、DENT信号のような局所変形ではないと考えられる。



デンティングによるきずの形状

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、今回確認されたきずが摩耗減肉であると判断している。なお、デンティングによるきずの形状例を以下に示す。



粒界腐食割れに関する検討結果

高浜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 5.8 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４号機では２次系水中にアンモニアとヒドラジンが注入されており、運転中良好な還元雰囲気維持されている。

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>

	22 サイクル
pH _{300°C}	平均 5.8

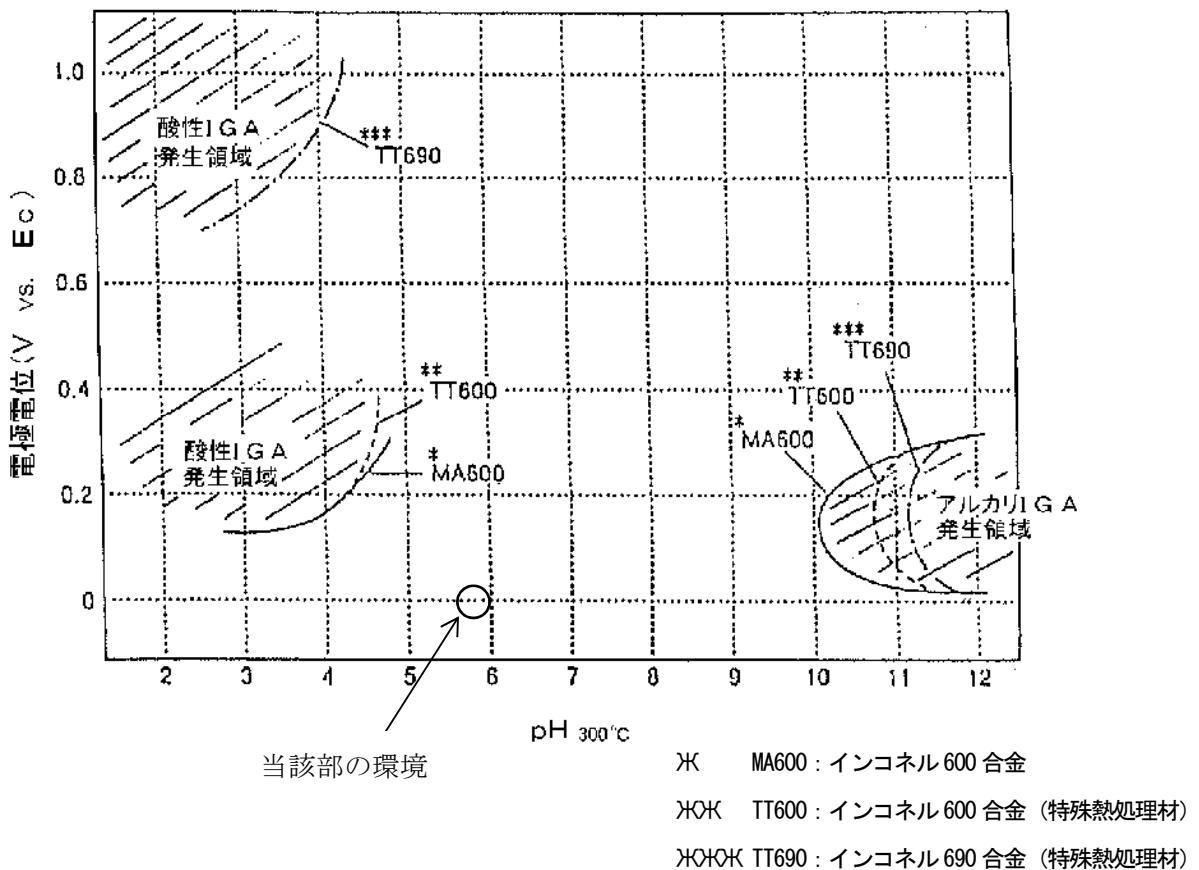
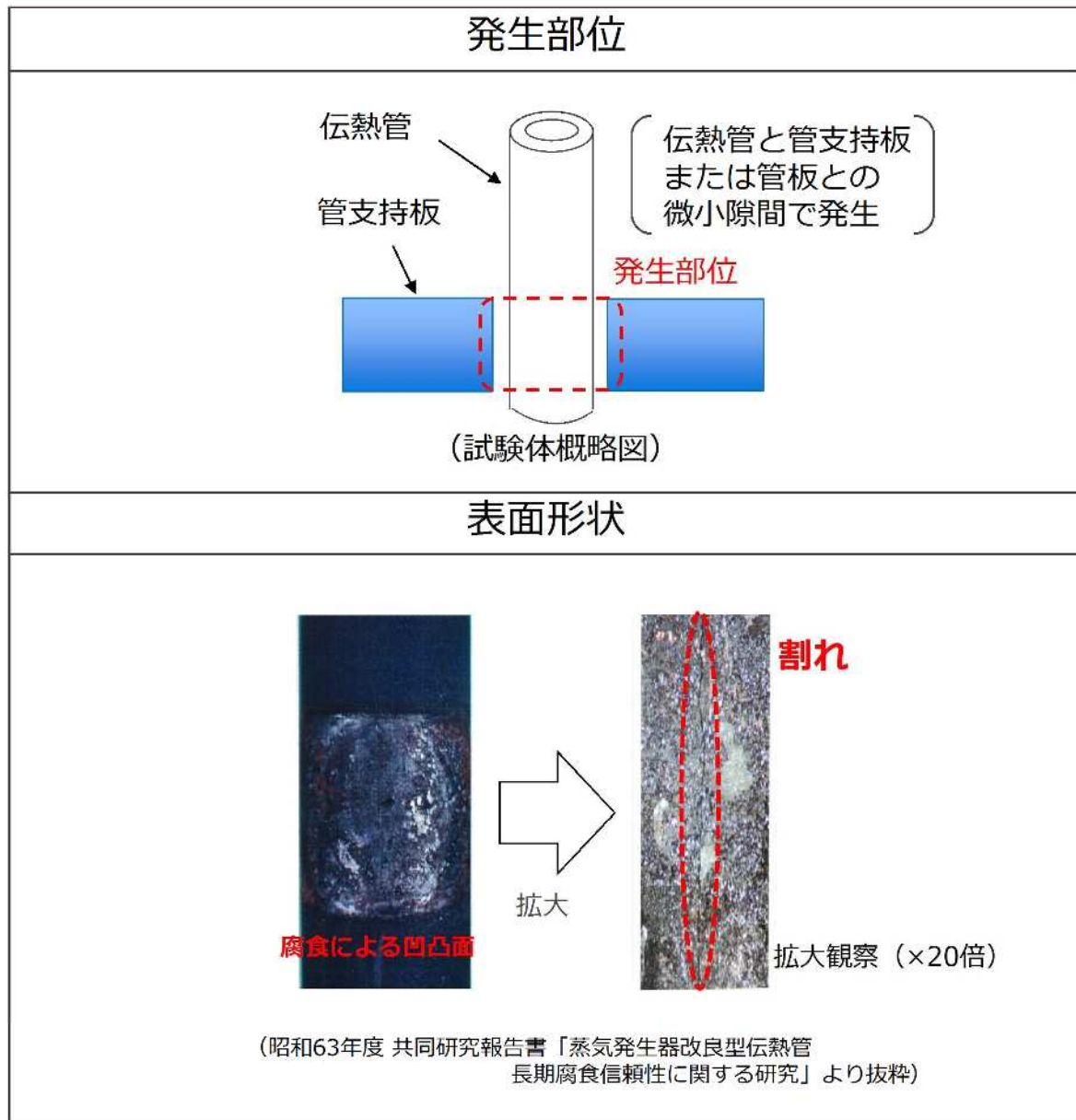


図 粒界腐食割れの発生領域

[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（IGA）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、今回確認されたきずが摩耗減肉であると判断している。なお、粒界腐食割れ（IGA）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４号機SG器内水塩素イオン濃度至近サイクル平均値

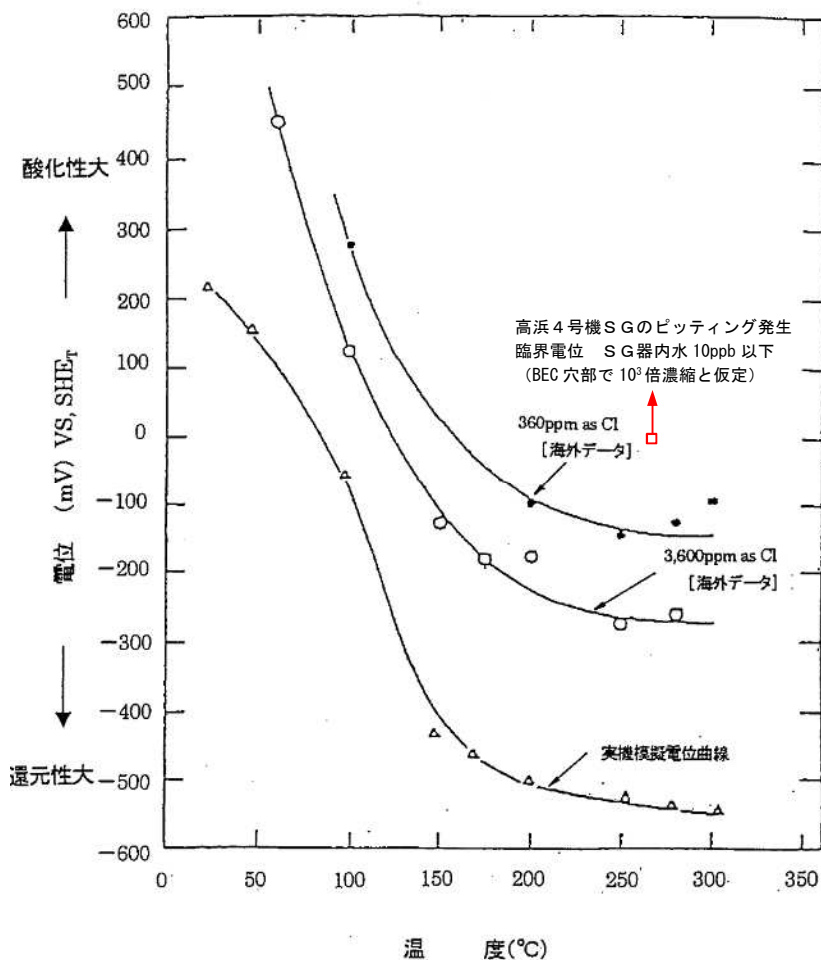
	第22サイクル
塩素イオン (ppb)	0.4

ここで、今回信号が検出された管支持板BEC穴部での塩素イオン濃縮倍率は最大 10^3 程度であり、安全側に最大濃縮倍率を仮定した場合、BEC穴部の塩素イオン濃度は管理値最大でも10ppm以下（至近サイクルは0.4ppm程度）である。よって、ピitting*¹発生限界電位は下図の360ppmのデータの電位（-100mV以下（at 270°C））よりも十分高いと考えられる。

一方、高浜４号機では起動時の高ヒドラジン運転等により、還元性が良好に維持されており、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と評価される。

したがって、高浜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。

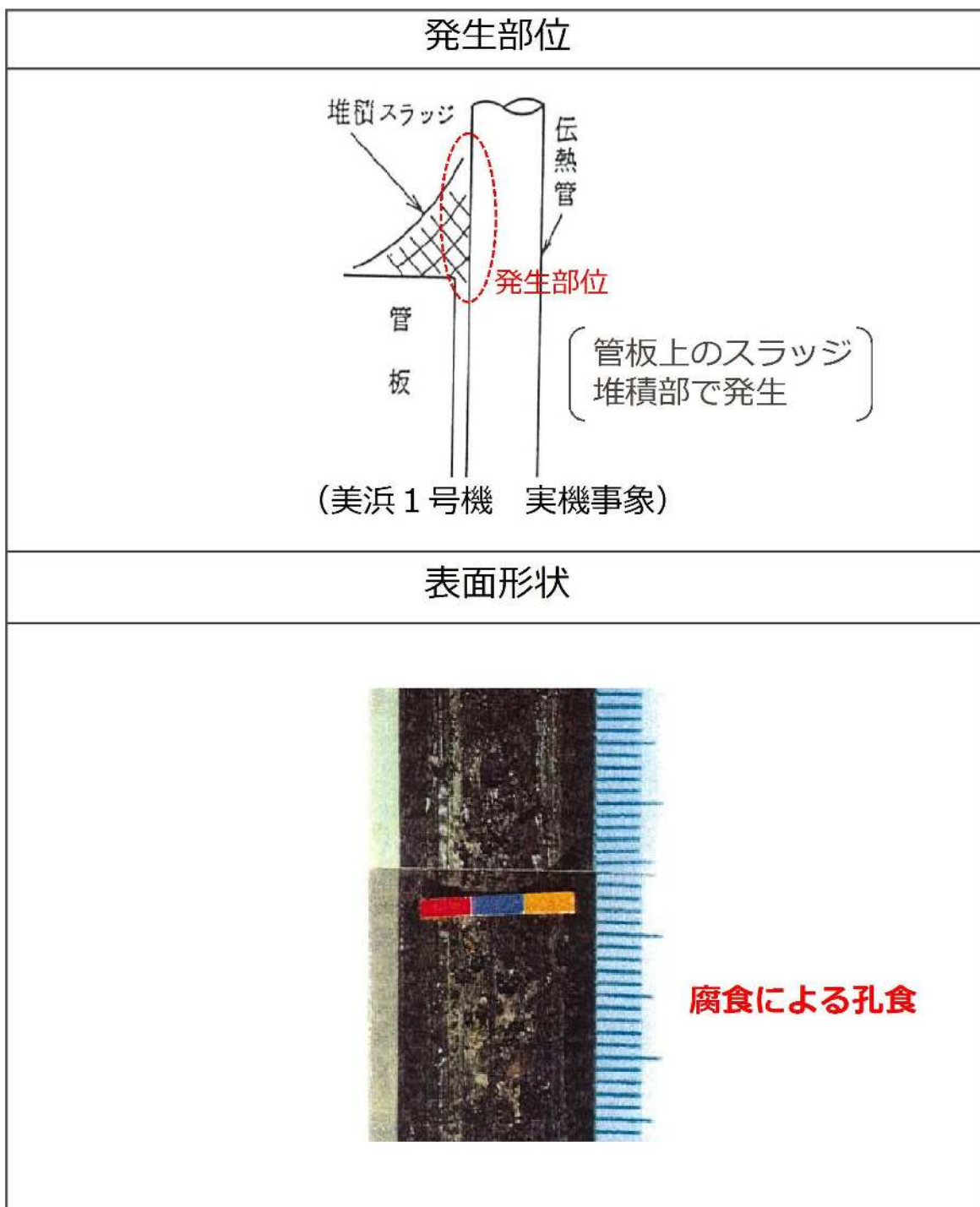
出典

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

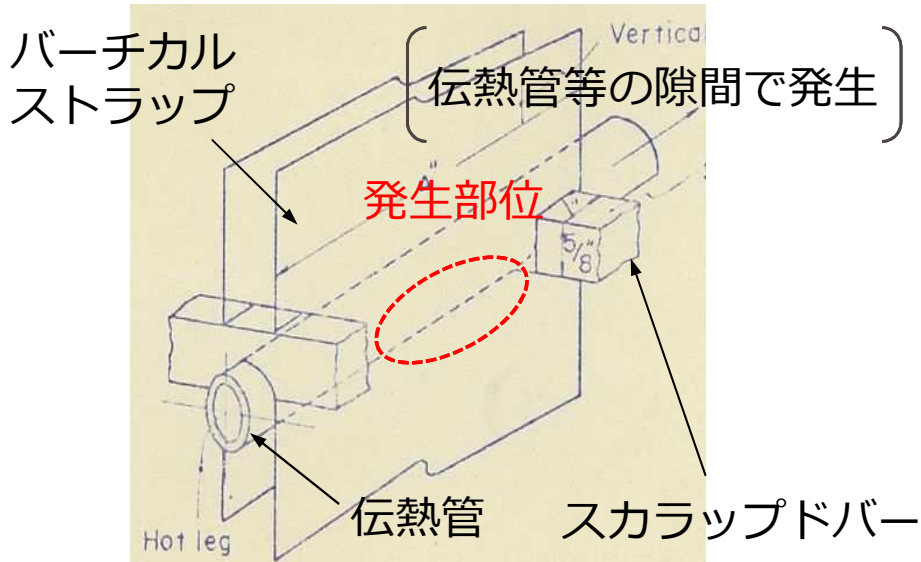
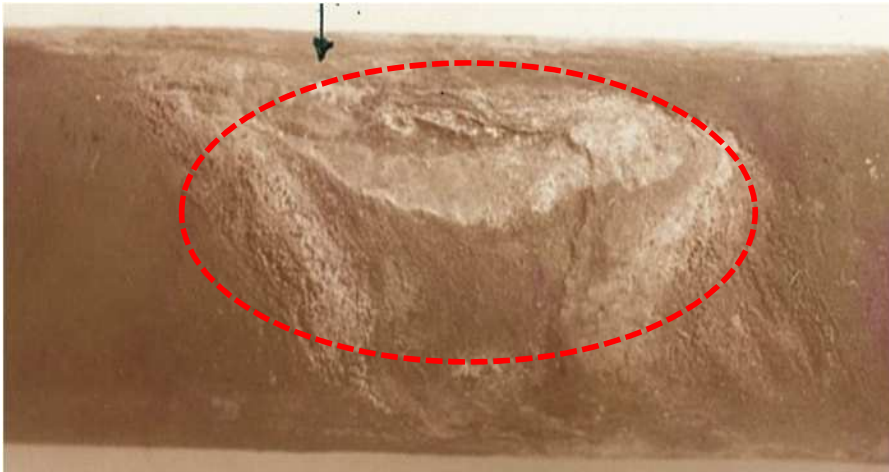
ピittingによるきずの形状

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、今回確認されたきずが摩耗減肉であると判断している。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、今回確認されたきずが摩耗減肉であると判断している。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
 <p>(美浜1号機 実機事象)</p>
表面形状
 <p>拡大観察 (×3倍)</p>

管支持板との接触による摩耗減肉の評価

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されており、四つ葉型の穴によって 1 穴当たり 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在化する場合は 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 6 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、且つ、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。

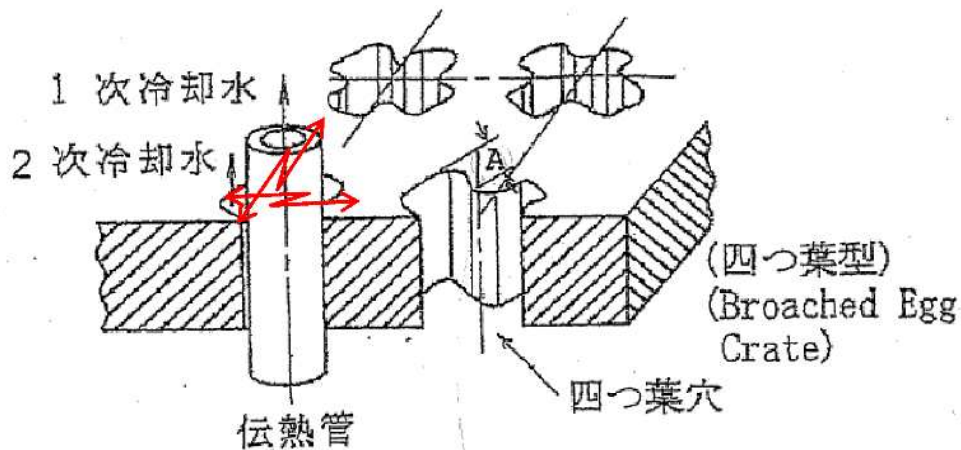


図 1 管支持板四つ葉穴（BEC 穴）による伝熱管の支持状況

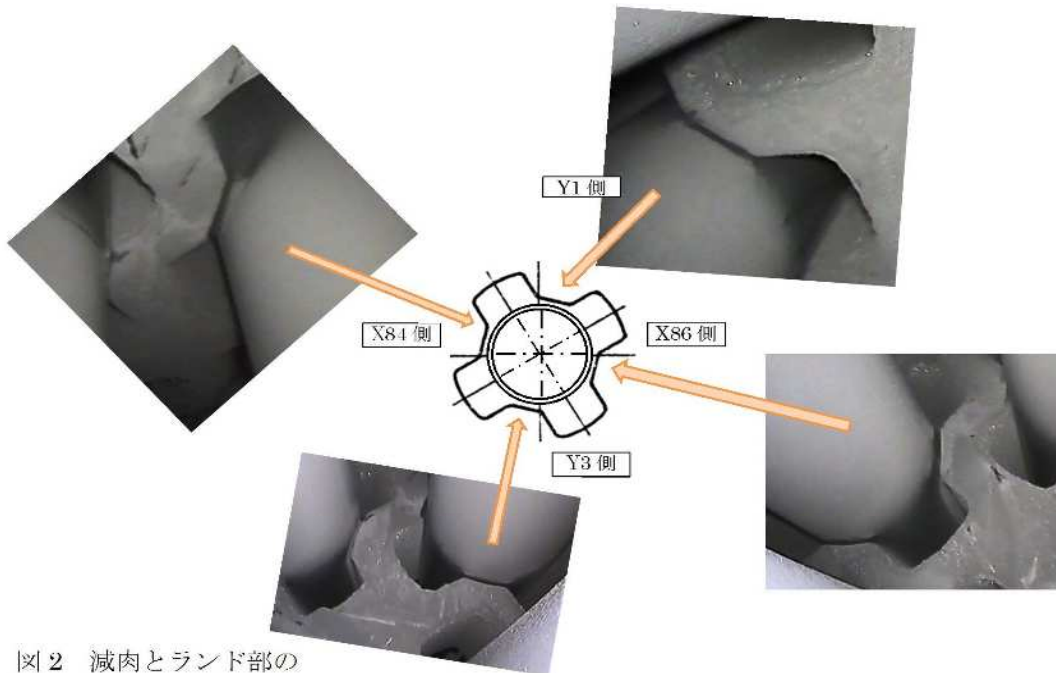


図2 減肉とランド部の位置関係(A-SG X85-Y2)

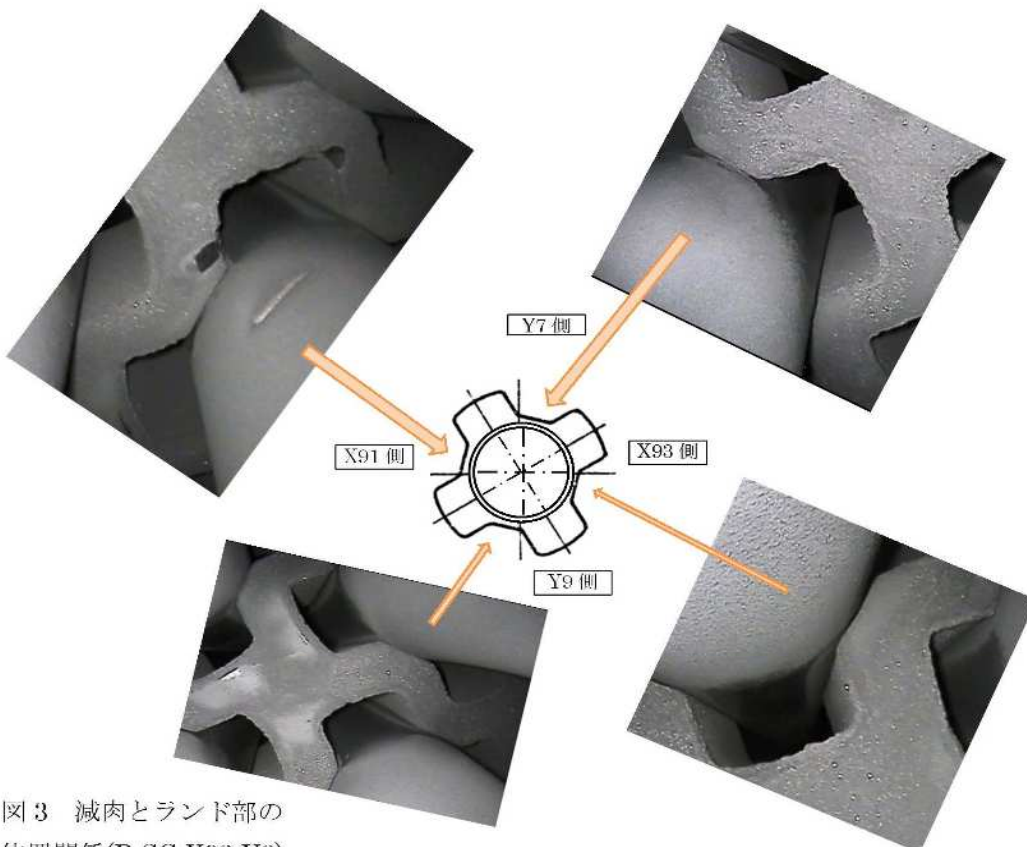


図3 減肉とランド部の位置関係(B-SG X92-Y8)

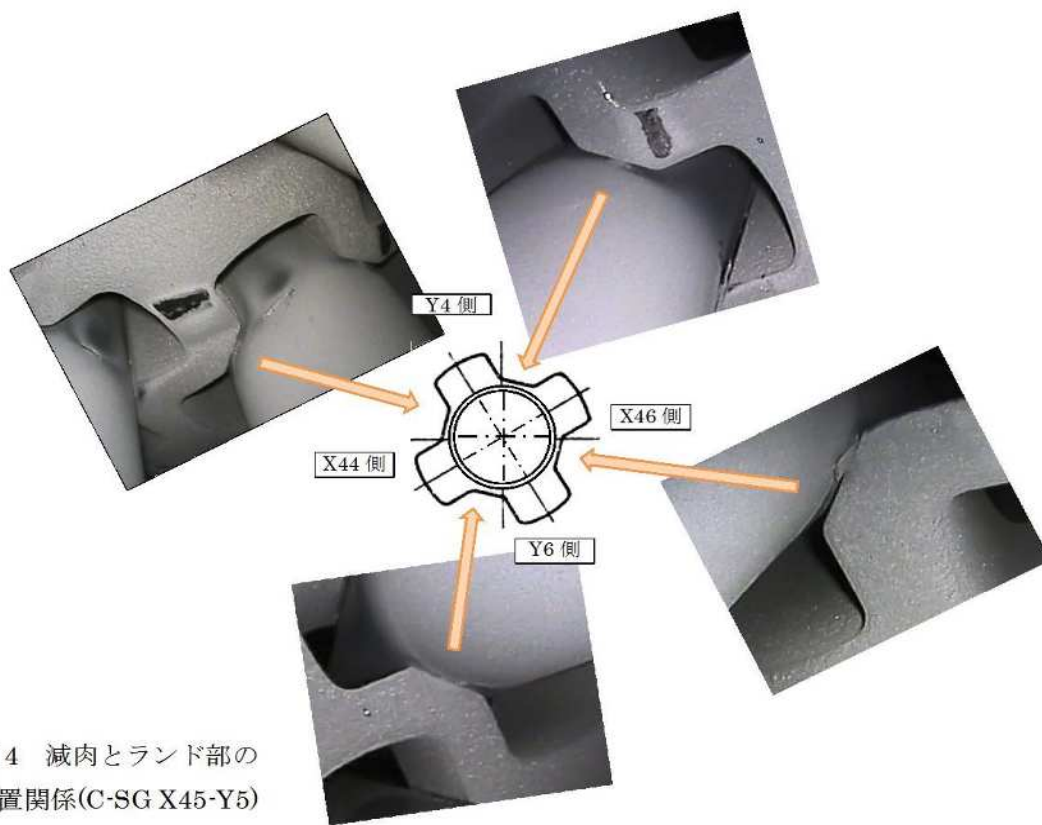


図4 減肉とランド部の位置関係(C-SG X45-Y5)

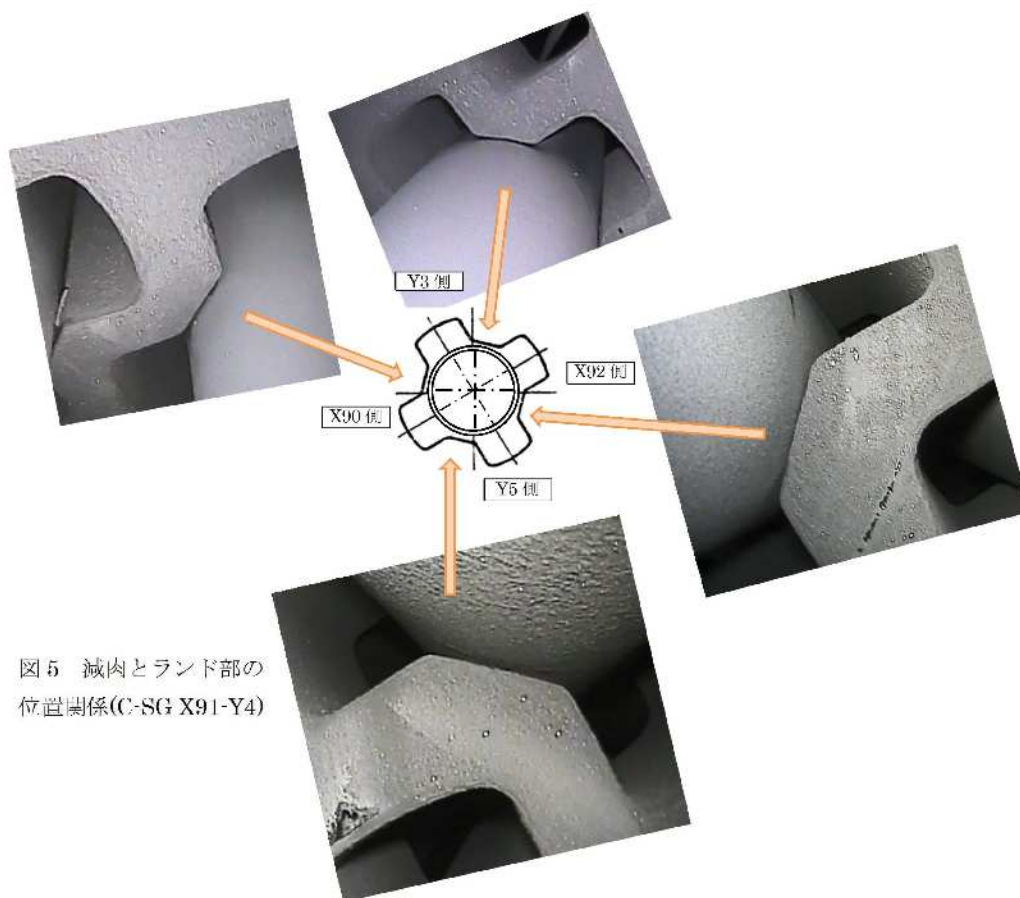


図5 減肉とランド部の位置関係(C-SG X91-Y4)

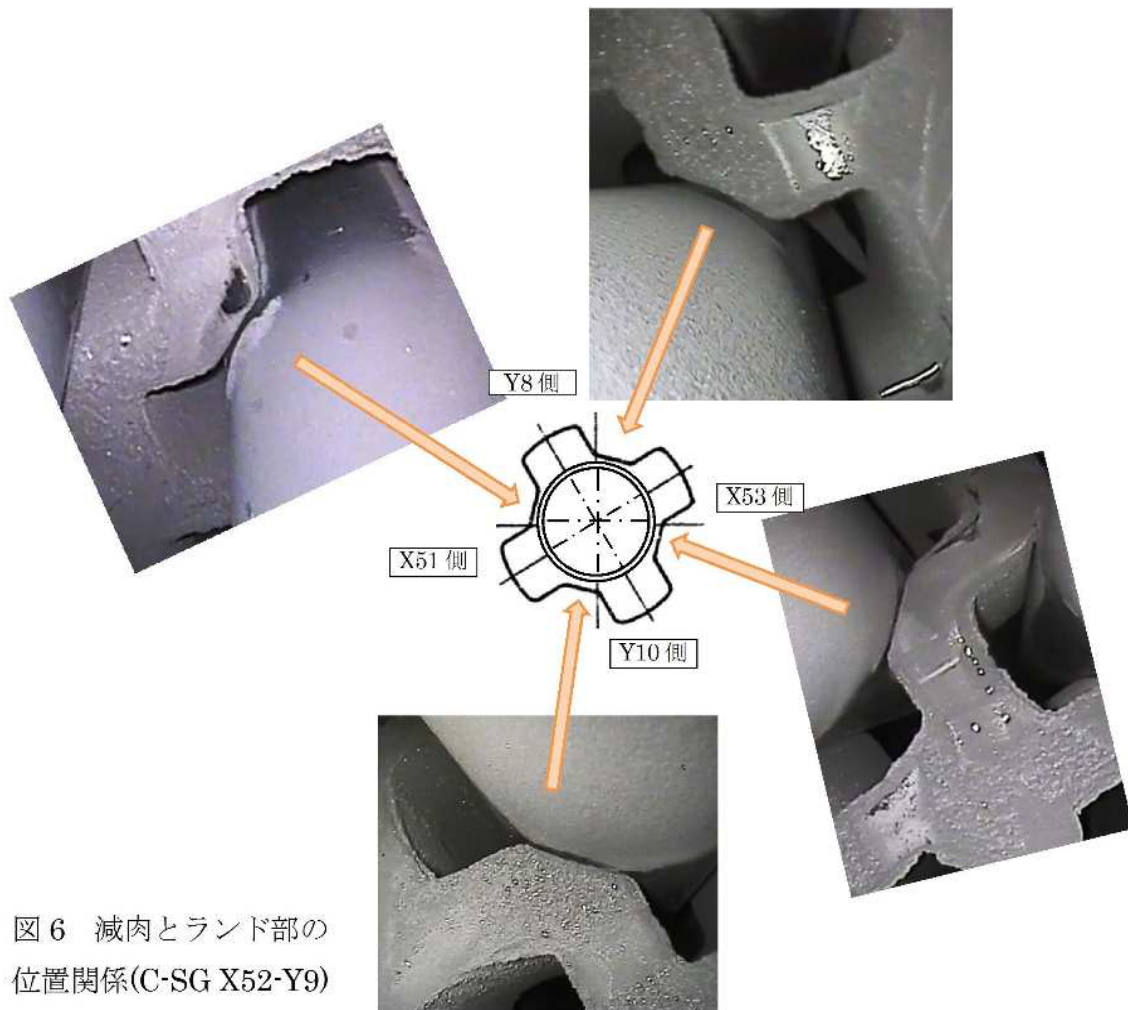


図6 減肉とランド部の位置関係(C-SG X52-Y9)

SG 2 次側内部品について

(1) SG 内部品と想定異物サイズとの整合性（添付 1）

SG 2 次側内部品で使用されている部品サイズと想定異物サイズの整合性を確認したところ、想定異物サイズに整合する部品はない。（図 1）

想定異物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想定異物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

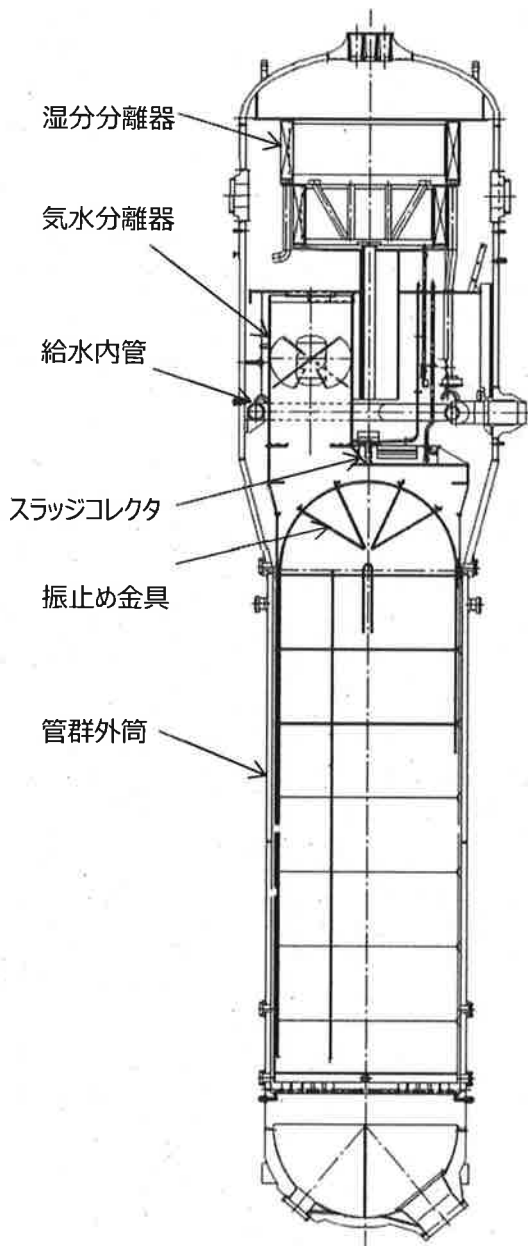
上記のうち、伝熱管群を通過するサイズの異物を発生させる可能性のある事象は、流れ加速型腐食による以下の炭素鋼部品の脱落である。

- ・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。

したがって、給水内管裏当金の溶接部について、給水内管の中で流速が高い給水内管 T 継手近傍の裏当金を目視確認した結果、裏当金本体および裏当金を仮止めするための隅肉溶接に損傷は発見されず、これらが脱落して接触物となった可能性はないことが確認できた。

添付1 SG 内部品構成部品の調査



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

図1 SG 2次側 内部品について

表１ SG２次側 内部品のスクリーニング

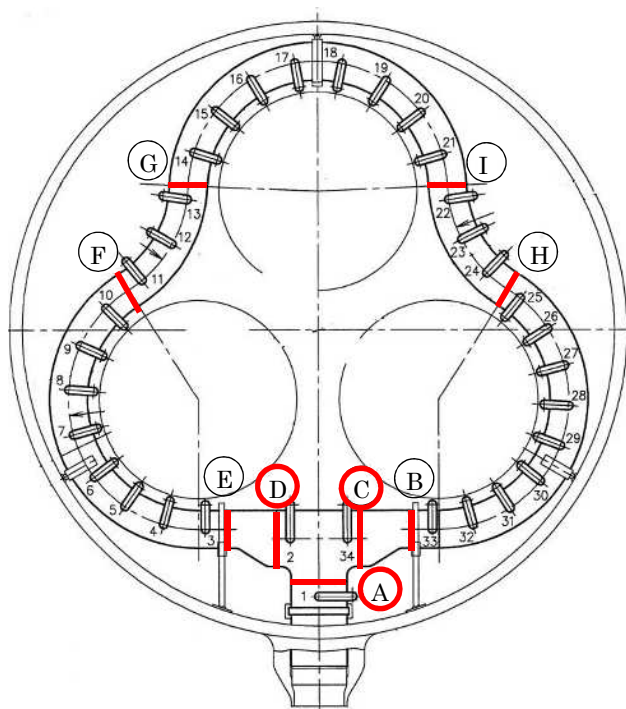
内部品	部品名	サイズ(mm)	
		板厚	長さ／幅
振止め金具	キー固定板	0.61	約 31 / 約 12
振止め金具	板ばね	0.25	約 53 / 約 18



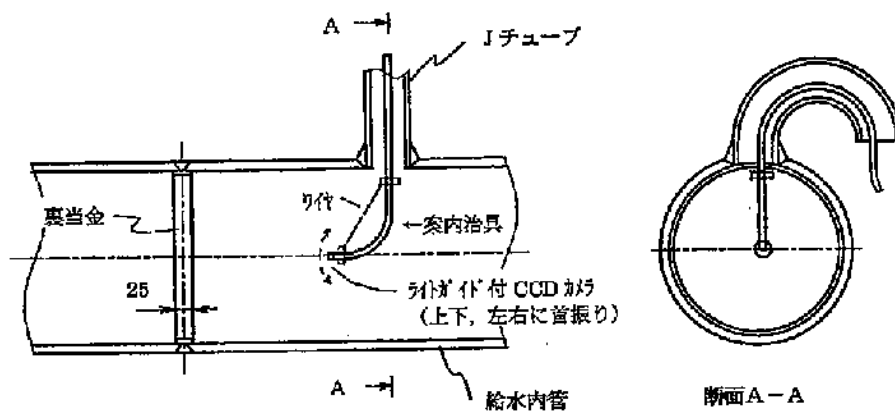
図2 振止め金具（A V B）構造図

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

点検結果（上流側の結果）

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。（代表：B－S G）



スラッジによる摩耗減肉の可能性について

伝熱管から剥離したスケール（スラッジ）によって伝熱管に摩耗減肉が生じる可能性について、スケールの生成メカニズムから考察するとともに、実機から採取したスラッジを用いた摩耗試験による検証を行った。以下にその内容を示す。

１．スケール生成メカニズム

SG伝熱管表面には、主に蒸気・抽気系統での流れ加速型腐食（FAC）により供給される鉄イオン（ Fe^{2+} ）と、鉄イオンの析出により生じるマグネタイト（ Fe_3O_4 ）の粒子が給水により供給される。伝熱管の熱負荷により、それらが次のメカニズムで表面にスケールとして付着する。

（１）マグネタイト（ Fe_3O_4 ）の粒子

伝熱管外表面での給水沸騰時に粒子状の鉄が残留する。

（２）鉄イオン（ Fe^{2+} ）

温度上昇による溶解度減少に伴い、鉄イオンが析出する。

鉄イオンは粒子状マグネタイトの隙間を埋めるバインダーとして作用する。

伝熱管表面のスケールはマグネタイト粒子の付着がベースとなって形成されるため、スケール内には必ず空隙が生じる（図１参照）。そのため、スケールが伝熱管から剥離して生じたスラッジ自体は脆いものであり、伝熱管との相互作用を考えた際にも、スラッジ内の構造上脆弱な箇所を起点として破壊が進展し、伝熱管に有意な損傷を与える可能性は低い。

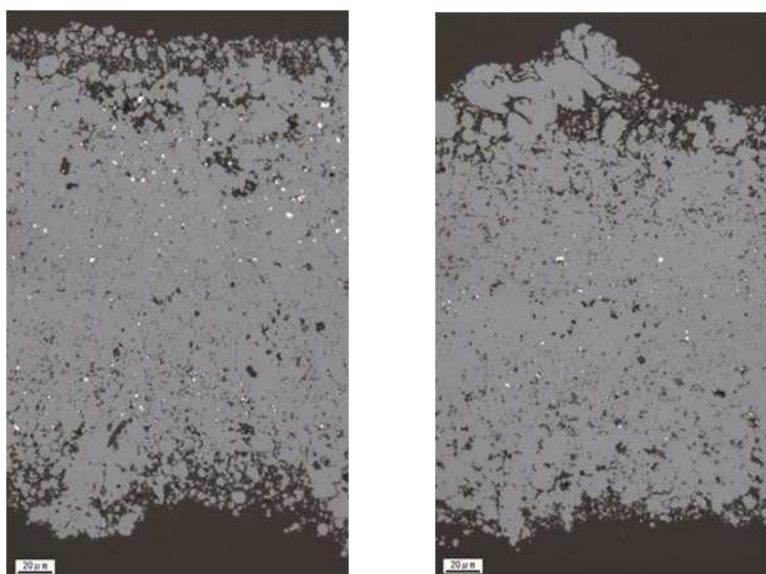


図１ 高浜４号機C-SGから採取した伝熱管外表面スラッジの断面観察例

２．スラッジ摩耗試験

（１）試験概要

加振装置（図２参照）により、伝熱管をスラッジに接触させた状態で加振し、スラッジの摺動による伝熱管の減肉発生状況を確認する。

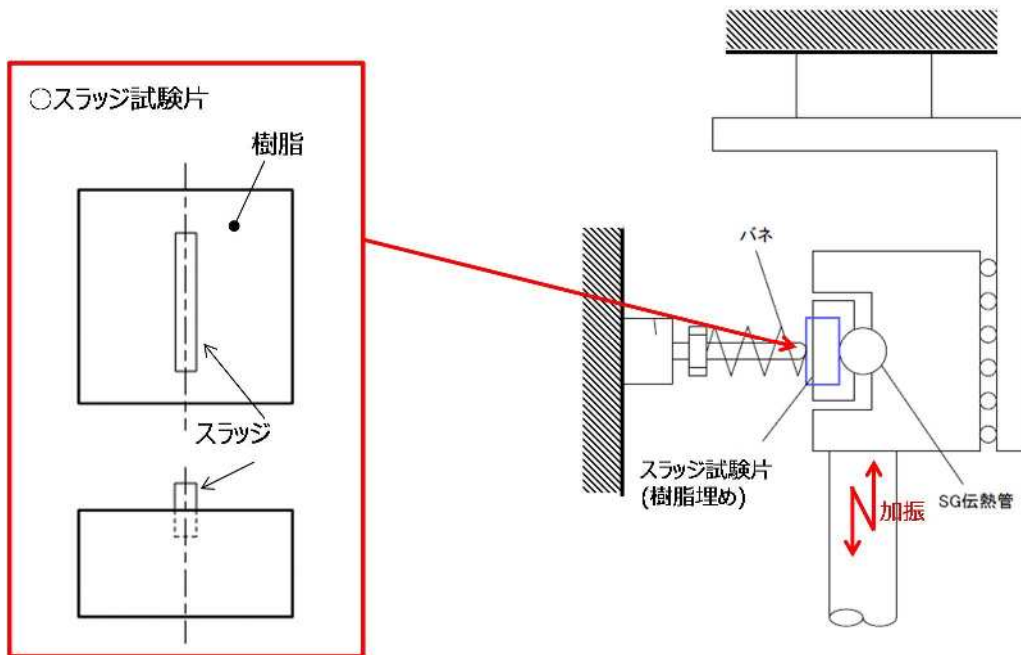


図２ 加振装置概念図

（２）予備試験

スラッジの摩耗試験にあたっては、伝熱管に損傷を与えられる試験条件（押付力）を得るため、本試験に先立ち予備試験を行った。また、実機環境を考慮し、乾燥・湿潤ケースの比較を行った。

a．試験条件

表１ 試験条件一覧（予備試験）

	スラッジ配置	環境	押付力	接触方向
ケース１	複数（６片）配置	室内雰囲気	約 15N	スラッジが破損しにくいと考えられる面内方向に加振
ケース２	単片配置		約 10N	
ケース３		湿潤		

b. 試験実施状況



図3 試験実施状況（予備試験）

c. 試験結果

表2の通り、全てのケースにおいてスラッジの破損を確認するとともに、伝熱管の明らかな減肉は認められなかった。また、乾湿条件は試験に影響せず、押付力が10N以上ではスラッジが破損しやすいことが分かった。試験前後のスラッジ試験片の外観について、ケース1（複数配置）及びケース2（単片配置）を例に図4に示す。

従って、本試験ではより低荷重条件での試験を実施することとした。

表2 試験結果一覧（予備試験）

	結果
ケース1	押付力を負荷した初期状態（1／6片のスラッジが伝熱管に接触）から伝熱管加振を開始した直後、加振に伴い伝熱管と摺動したスラッジ2／6片の破損を確認
ケース2	加振開始から約15～20時間後、加振を停止してスラッジを観察した
ケース3	結果、スラッジの破損を確認



図４－１ 試験結果（ケース１の例）



図４－２ 試験結果（ケース２の例）

(3) 本試験

a. 試験条件

スラッジ試験片：単片２ケース

環境：乾燥

接触方向：スラッジが破損しにくいと考えられる面内方向に加振

押付力：予備試験より低減するとともに、伝熱管振動に伴う押付力と整合するよう荷重条件を設定（ケース４：約 2N、ケース５：約 1N）

変位範囲：減肉形状（周方向長さ）から想定して設定（約±0.2mm）

撓動速度：伝熱管振動を想定して伝熱管固有値を設定（約 30Hz）

b. 試験実施状況

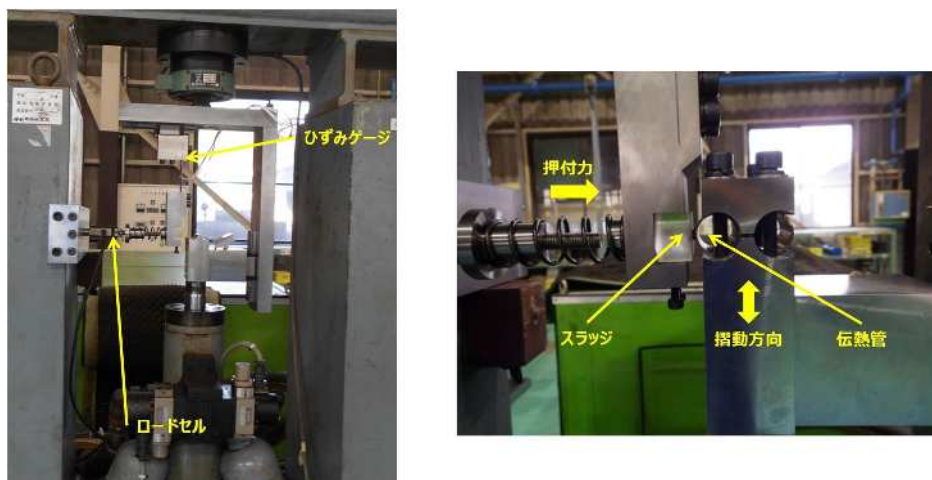


図5 試験実施状況（本試験）

c. 試験結果

ケース4, 5ともに、試験経過とともにスラッジ先端が摩滅していった（図6参照）。一方、試験後の伝熱管表面には、スラッジ試験片の接触痕が認められた（図7参照）。

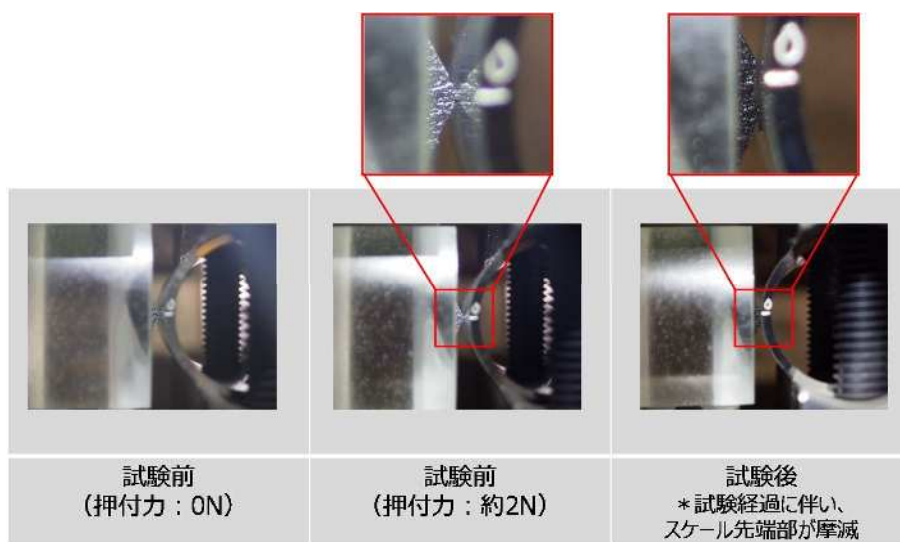


図6－1 スラッジ摩滅の様子（ケース4）

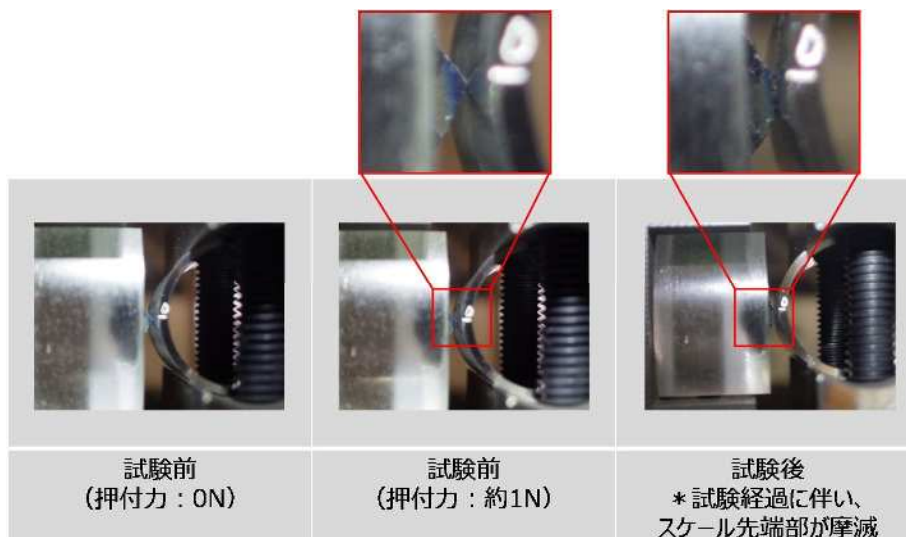


図 6－２ スラッジ摩滅の様子（ケース 5）

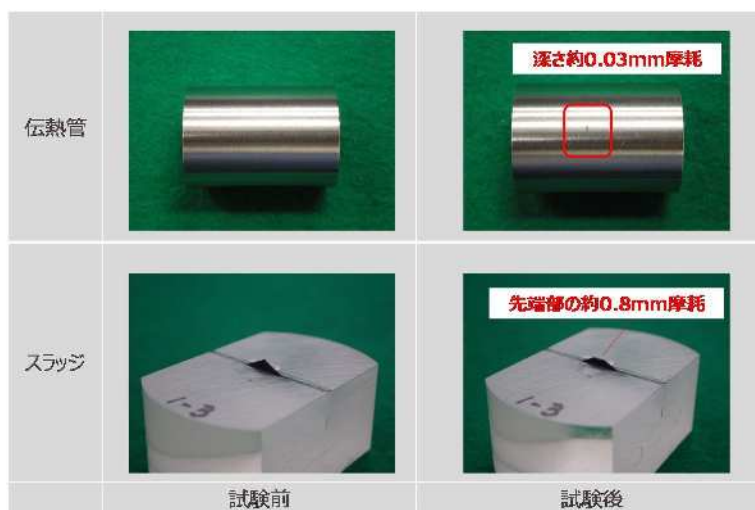


図 7－１ 試験後の試験片外観（ケース 4）

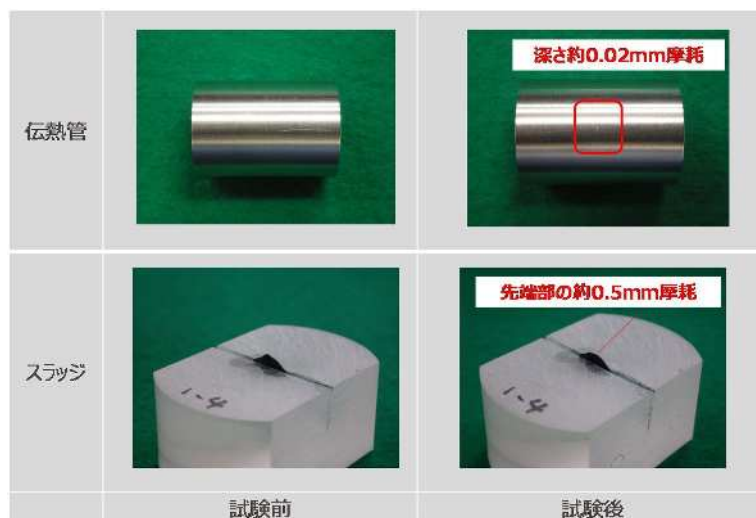


図 7－２ 試験後の試験片外観（ケース 5）

伝熱管表面の接触痕の詳細観察のため、両ケースの伝熱管のプロファイルを確認したところ、ケース４ではスラッジ片の摩滅長さ約 0.8mm に対し、伝熱管の接触痕の深さは約 0.03mm、ケース５ではスラッジ片の摩滅長さ約 0.5mm に対し、伝熱管の接触痕の深さは約 0.02mm となり、伝熱管の接触痕深さはスラッジ摩滅長さの 1/25 以下であった。

3. 結論

- (1) スケール生成メカニズムの観点から、スラッジは空隙を有する脆弱な構造であるため、伝熱管に損傷を与える可能性は低い。
- (2) スラッジ摩耗試験の結果、スラッジは伝熱管との接触に伴い接触部が摩滅していくとともに、伝熱管に与える接触痕深さもスラッジ摩滅量に対して十分小さいことが分かった。そのため、実機においても、スラッジにより伝熱管に有意な摩耗減肉が生じる可能性は低い。

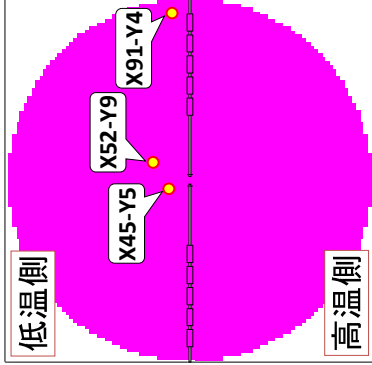
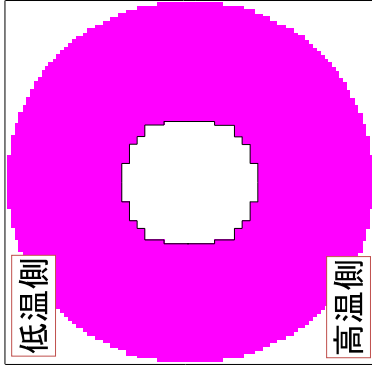
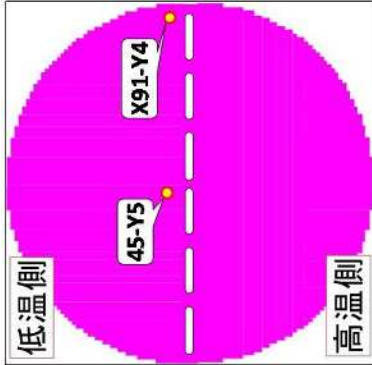
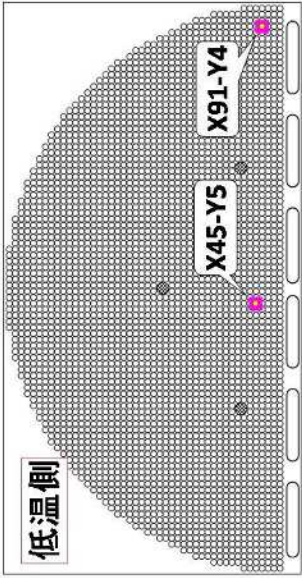
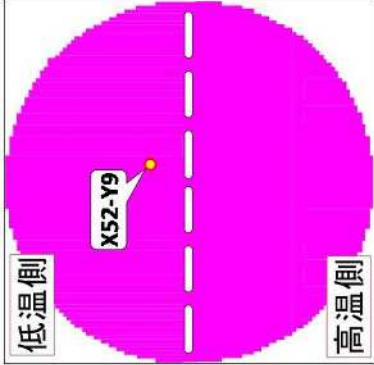
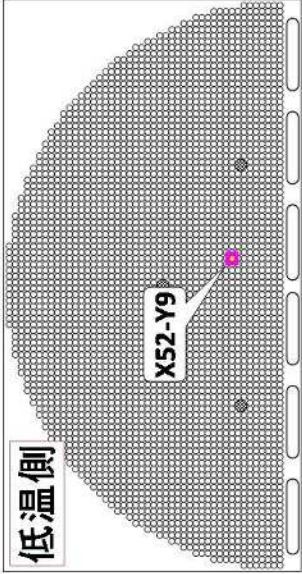
以上

SG器内の目視点検範囲

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第二および第三管支持板の下面の減肉指示が確認された伝熱管周辺部について、カメラによる目視点検を実施した。

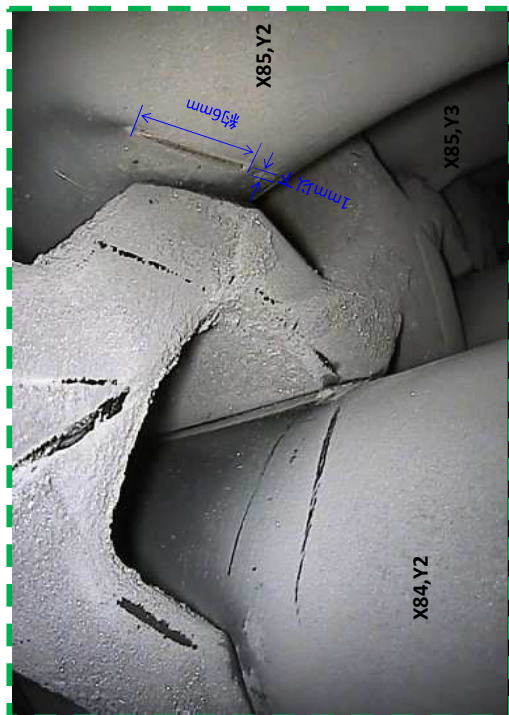
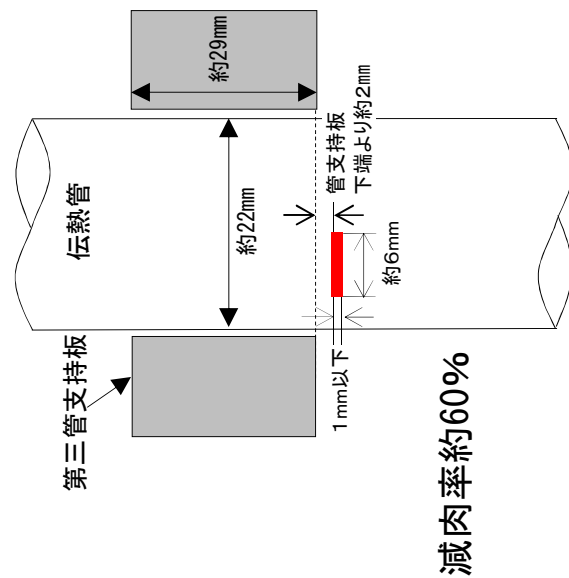
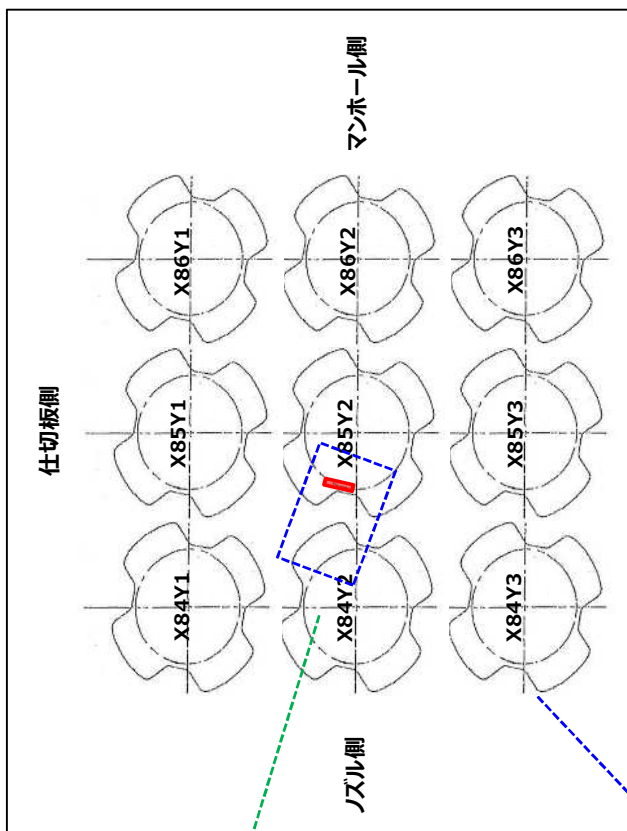
点検範囲：

【C-SGの例(A, B-SGも同様に点検)】

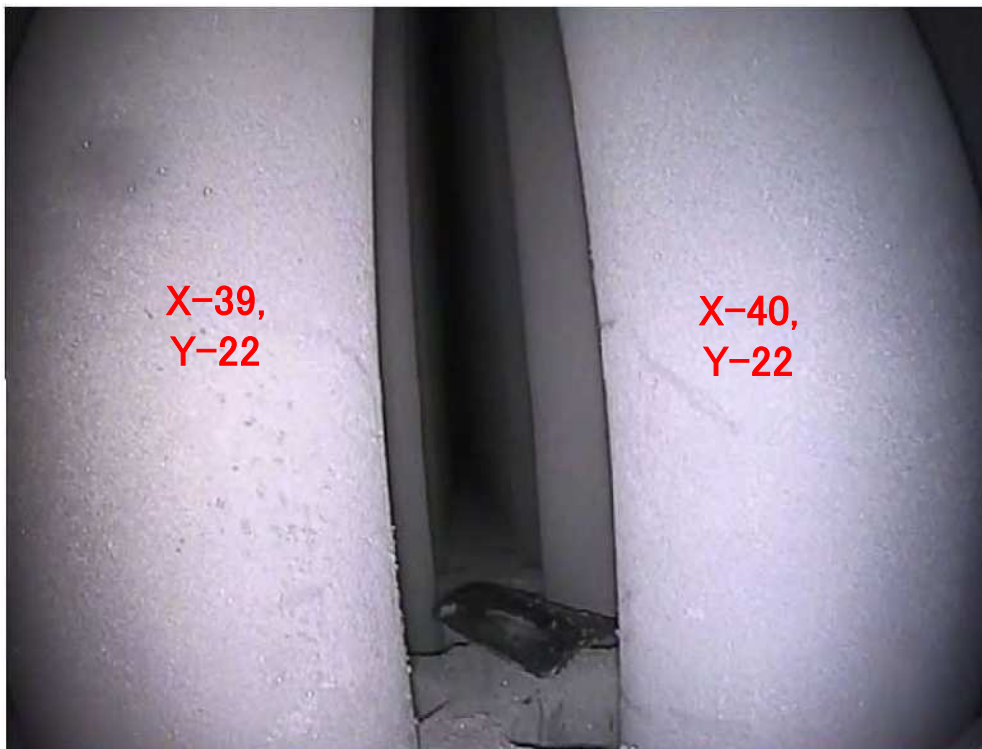
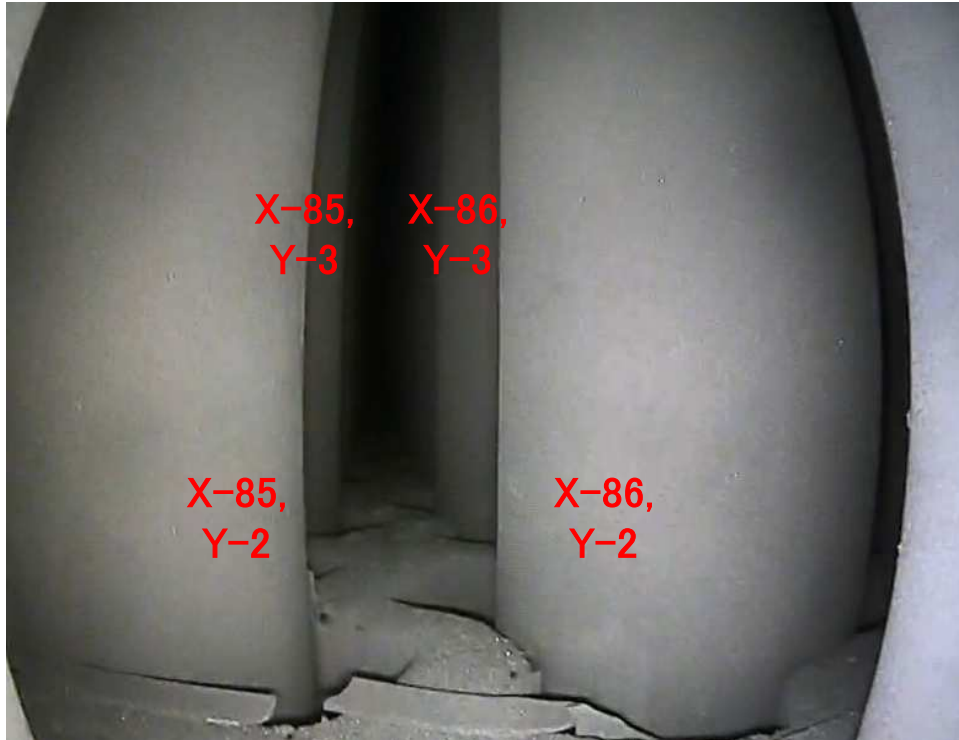
<p>管板上面</p> 	<p>流量分配板上面</p> 	<p>第一管支持板上面</p> 
<p>第二管支持板下面</p> 	<p>第二管支持板上面</p> 	<p>第三管支持板下面</p> 

A-S-G 伝熱管 2次側表面写真

対象：第三管支持板下面 伝熱管 X85, Y2 @Cold

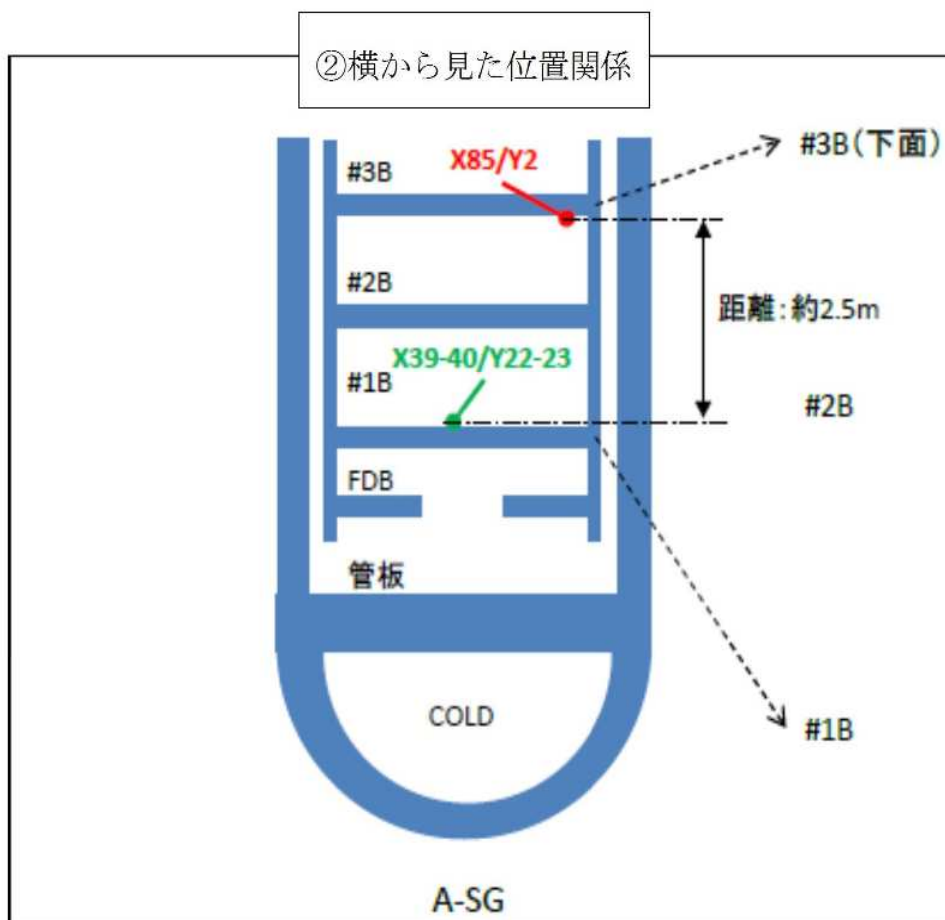
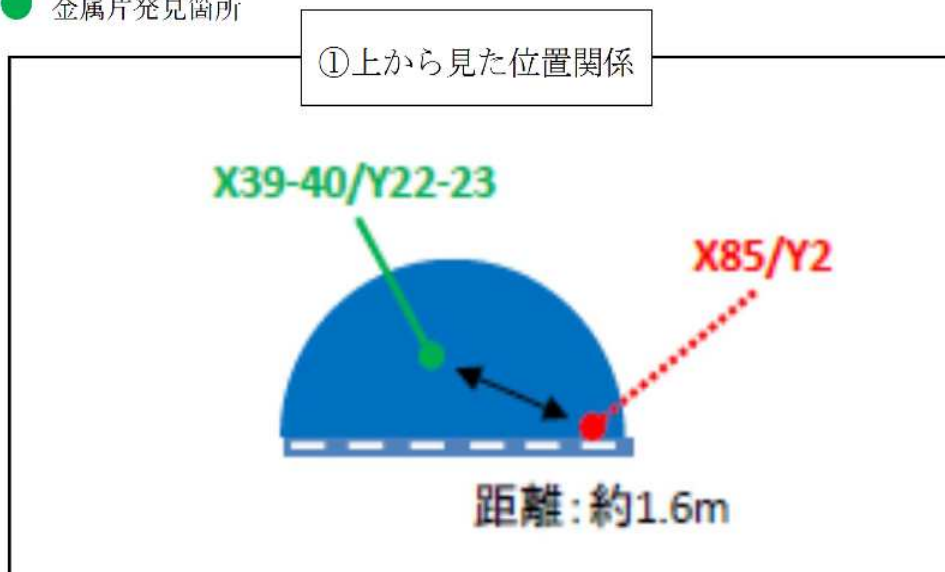


A-S G 第一管支持板上写真

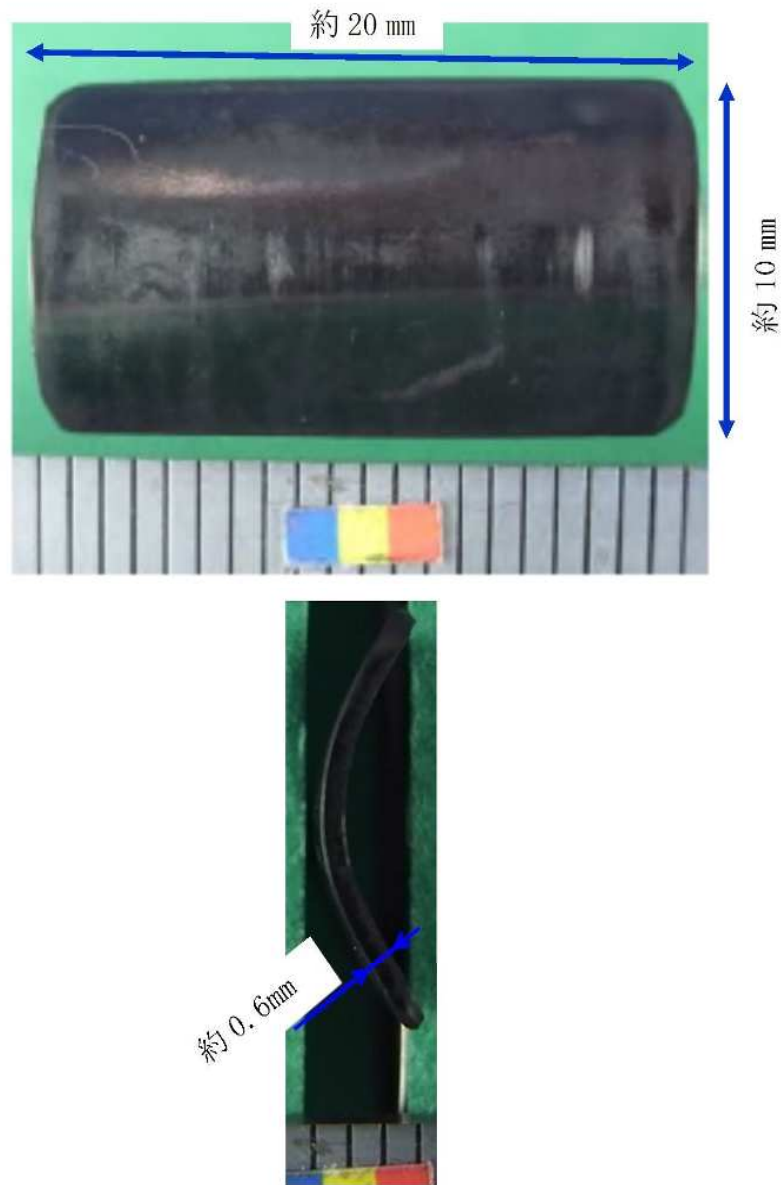


減肉部と金属片発見箇所の位置関係図

- 減肉部
- 金属片発見箇所



金属片のサイズ



重さ約 1 g、長さ約 20 mm×幅約 10 mm×板厚約 0.6 mm

金属片の分析・観察結果

1. 成分分析

<試験要領>

回収された金属片の組成をX線分析等にて分析

<試験結果>

- ・表面の結晶構造を確認した結果、FCC相(面心立方格子相)が主体として検出された。
- ・元素分析を行った結果、Fe、Cr、Niが検出された。

したがって、回収異物は、オーステナイト系ステンレス鋼(成分はSUS304に近いもの)が主体として考えられる。

表 分析結果

半定量値(質量%)											
Mg	Al	Si	S	Ca	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn
※	※	2	※	※	※	2×10 ¹	1	6×10 ¹	1×10 ¹	※	2

※検出されたが、半定量値が1(質量%)未満であることを示す。

2. 拡大観察

<観察結果>

- ・金属片の左右の側面には、延性破面による金属光沢(摩耗痕ではない)を確認。角部に潰されたような痕跡があり。
- ・金属片の側面及び四つ角部には、伝熱管との接触と判断できる有意な痕は確認されず

潰されたような痕跡

断面観察結果

潰されたような痕跡



金属光沢

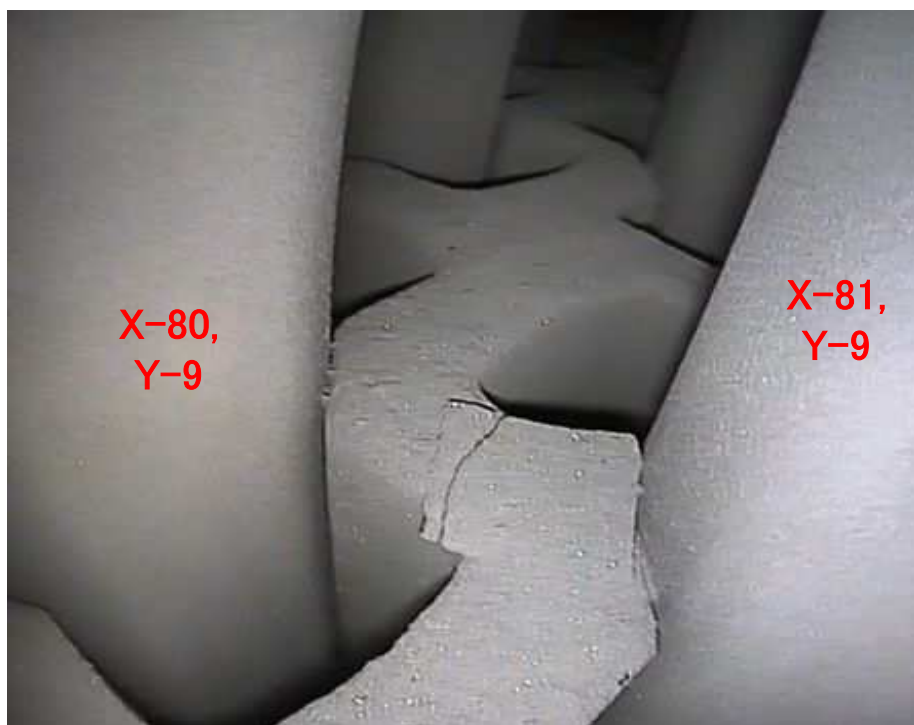
(左側面)

(凹面)

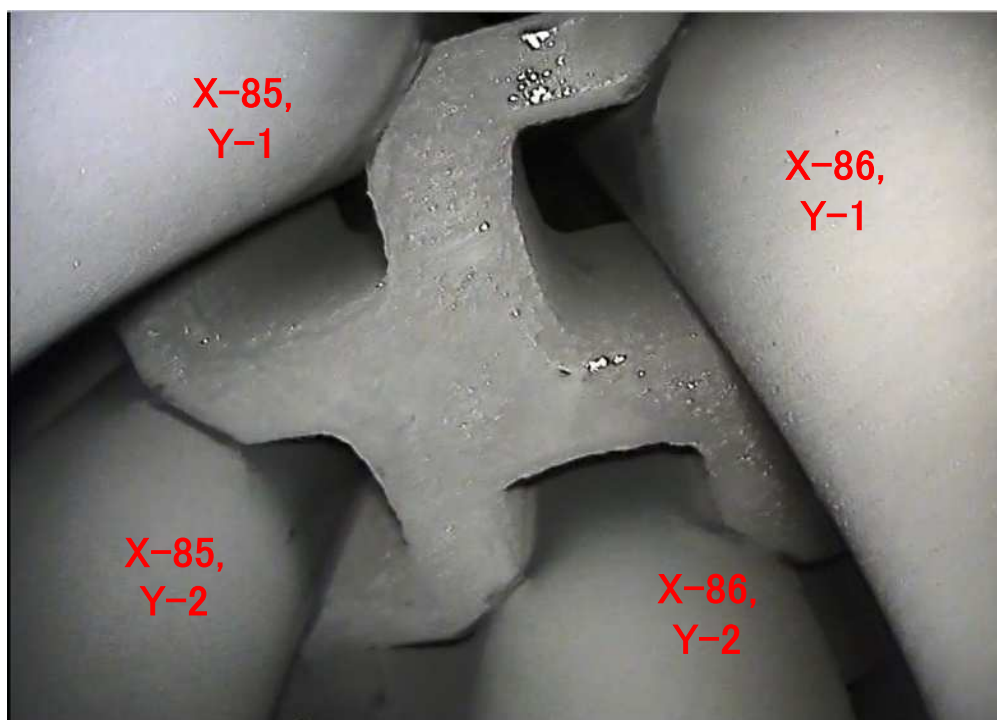
(右側面)

金属光沢

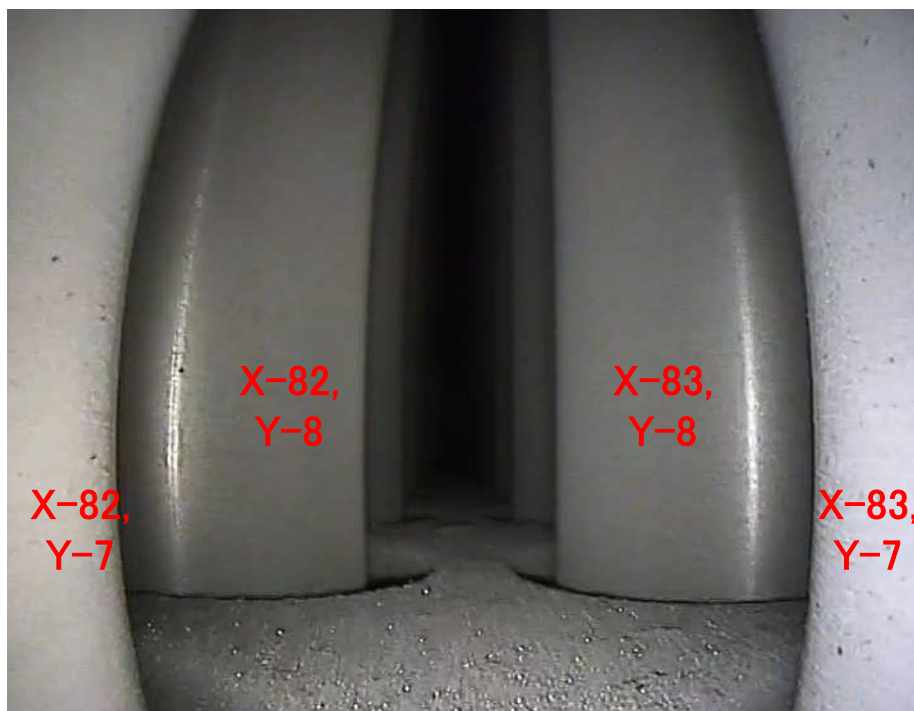
A-S G 第二管支持板上写真



A-S G 第三管支持板下写真



A-S G 管板上写真

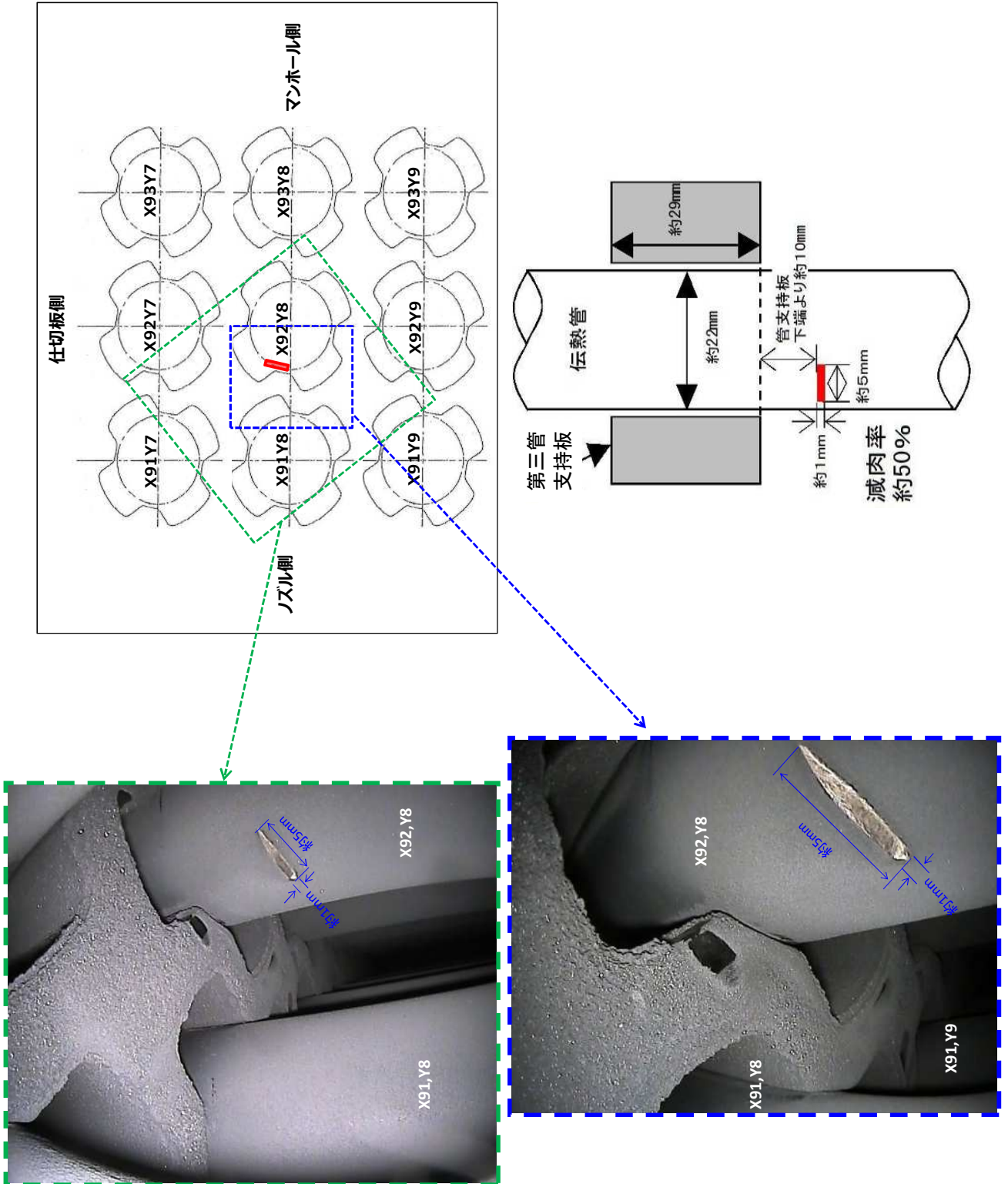


A-S G 流量分配板上写真

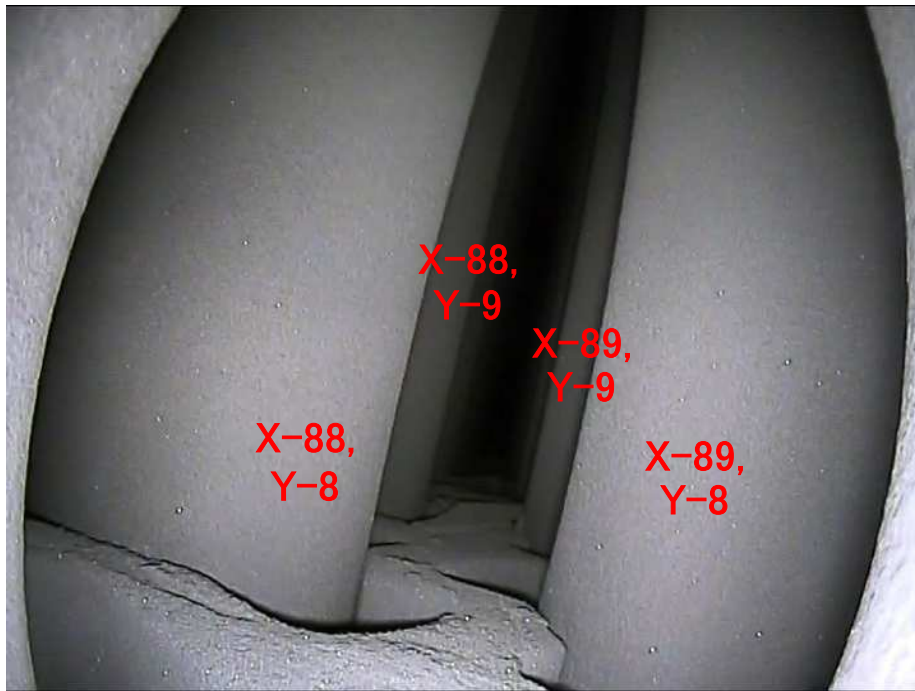


B-S-G 伝熱管 2次側表面写真

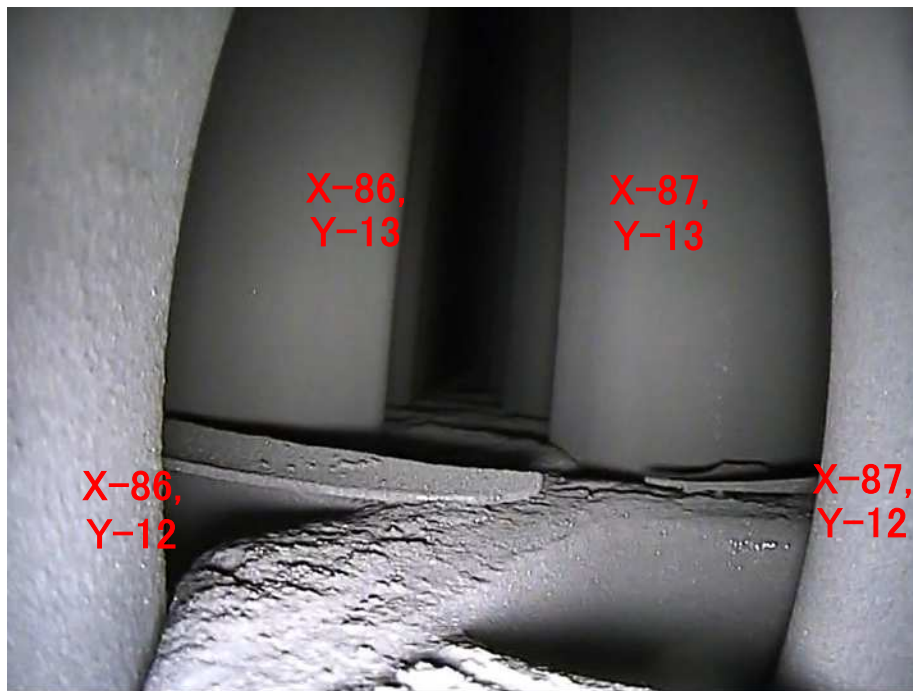
対象：第三管支持板下面 伝熱管 X92, Y8 @Cold



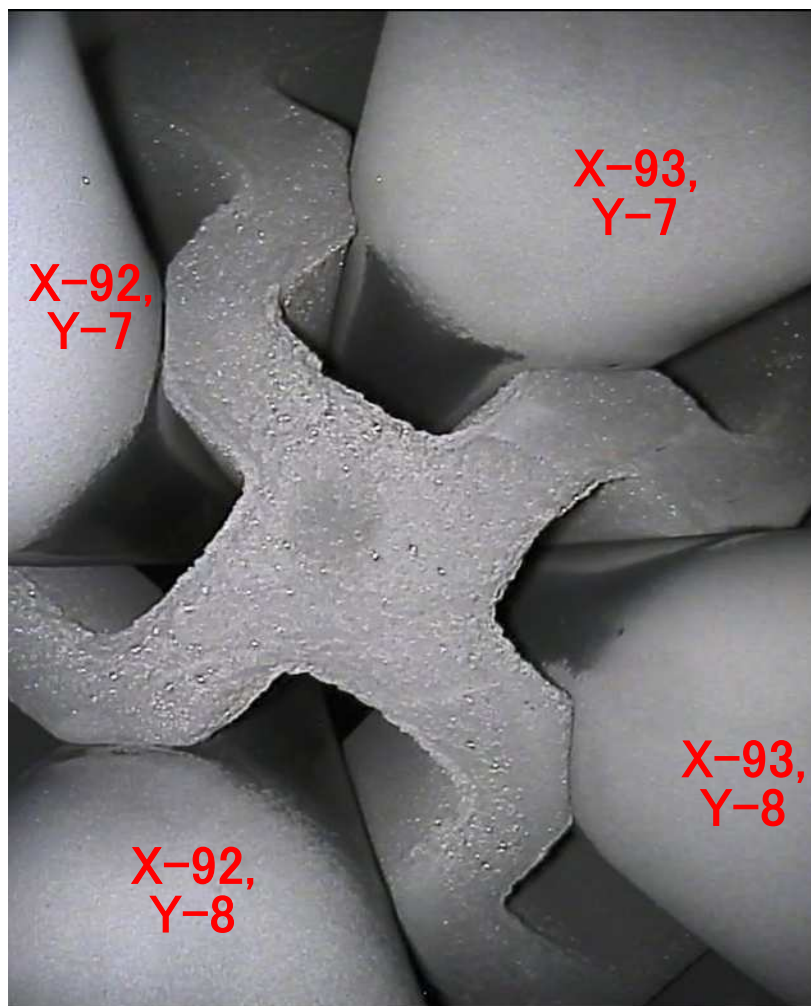
B-S G 第一管支持板上写真



B-S G 第二管支持板上写真



B-S G 第三管支持板下写真



B-S G 管板上写真

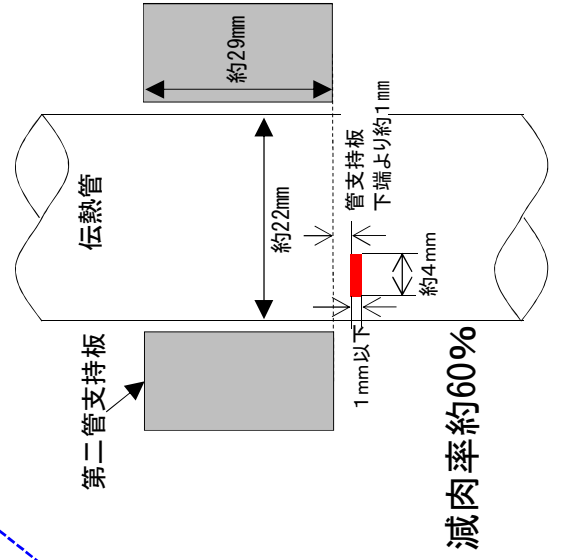
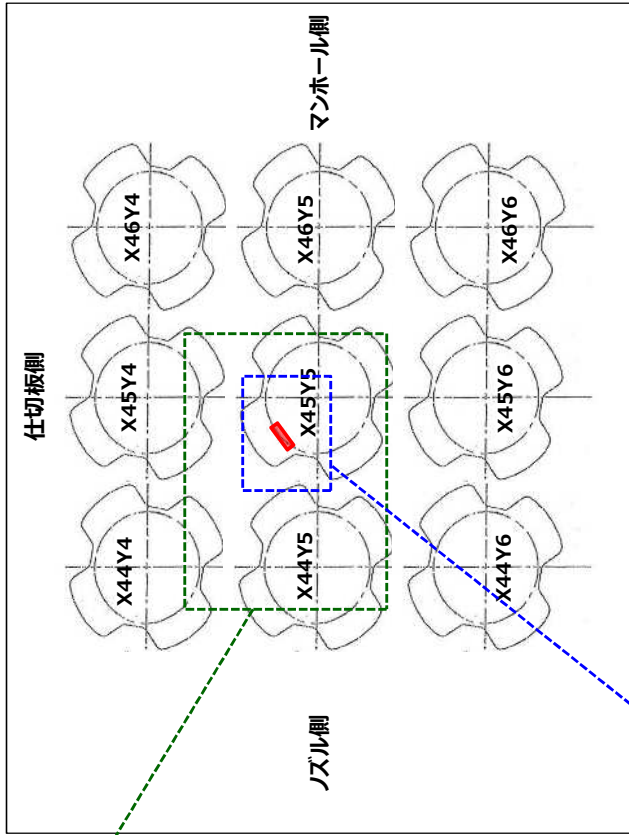


B-S G 流量分配板上写真



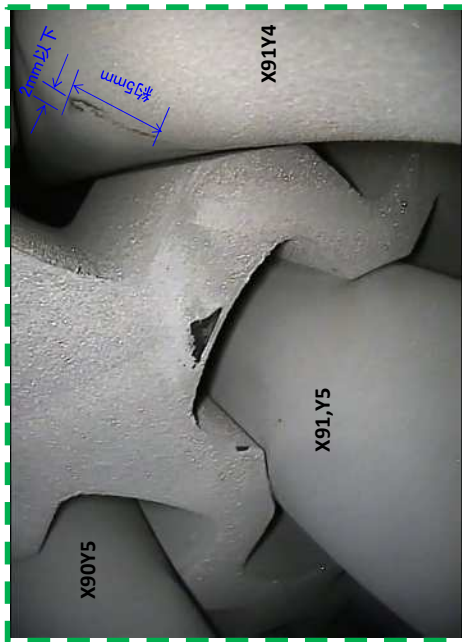
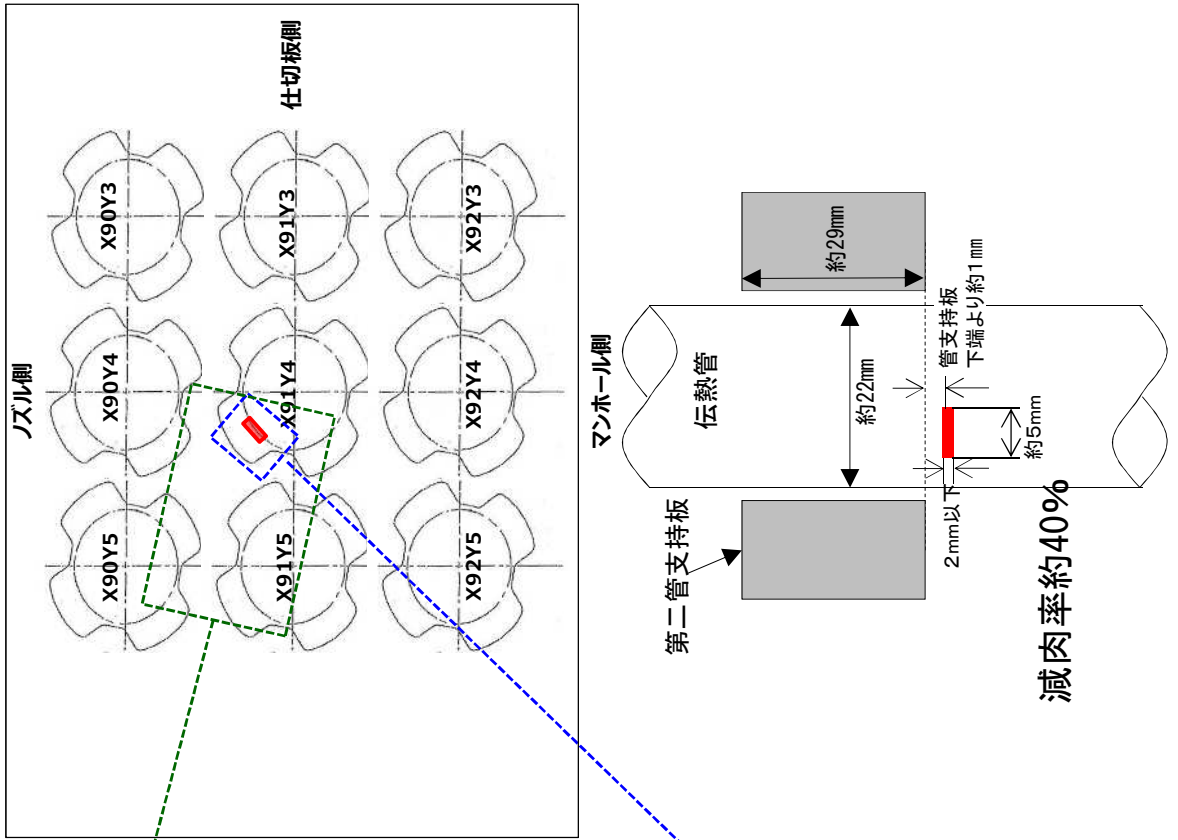
C-SG 伝熱管 2次側表面写真

対象：第二管支持板下面 伝熱管 X45, Y5 @Cold



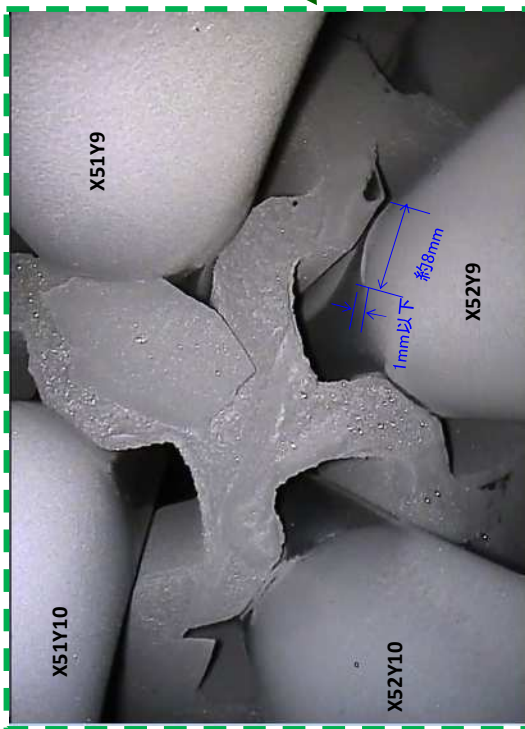
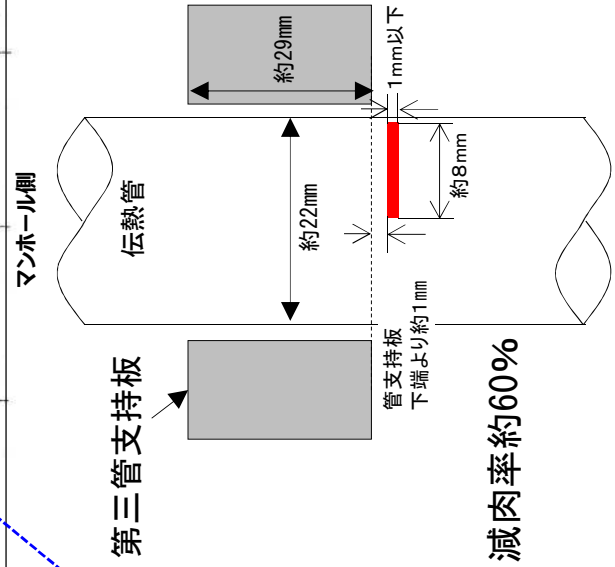
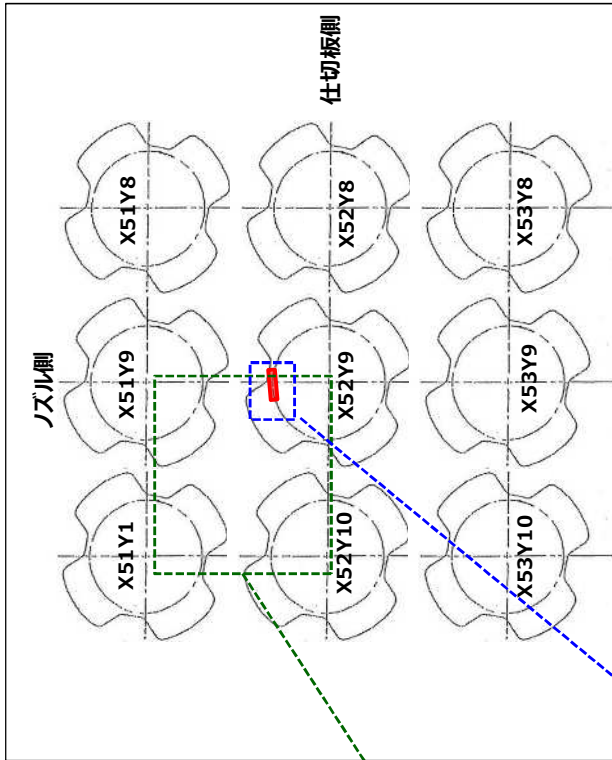
C-S G 伝熱管 2次側表面写真

対象：第二管支持板下面 伝熱管 X91, Y4 @Cold

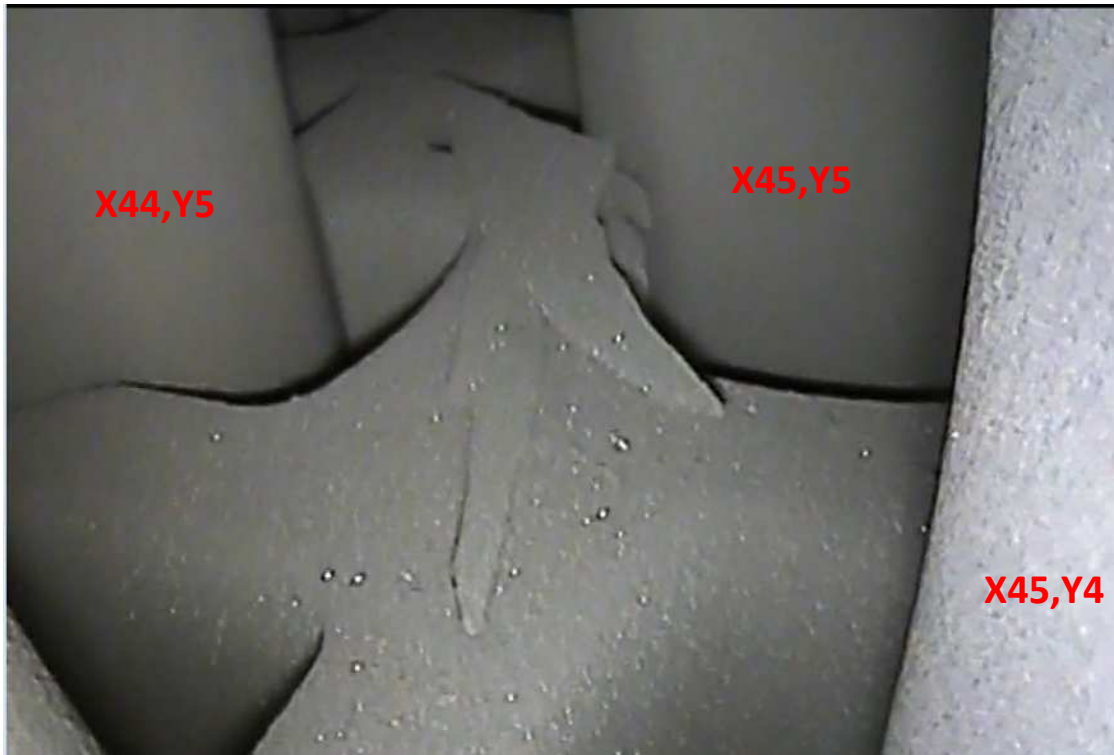


C-SG 伝熱管 2次側表面写真

対象：第三管支持板下面 伝熱管 X52, Y9 @Cold



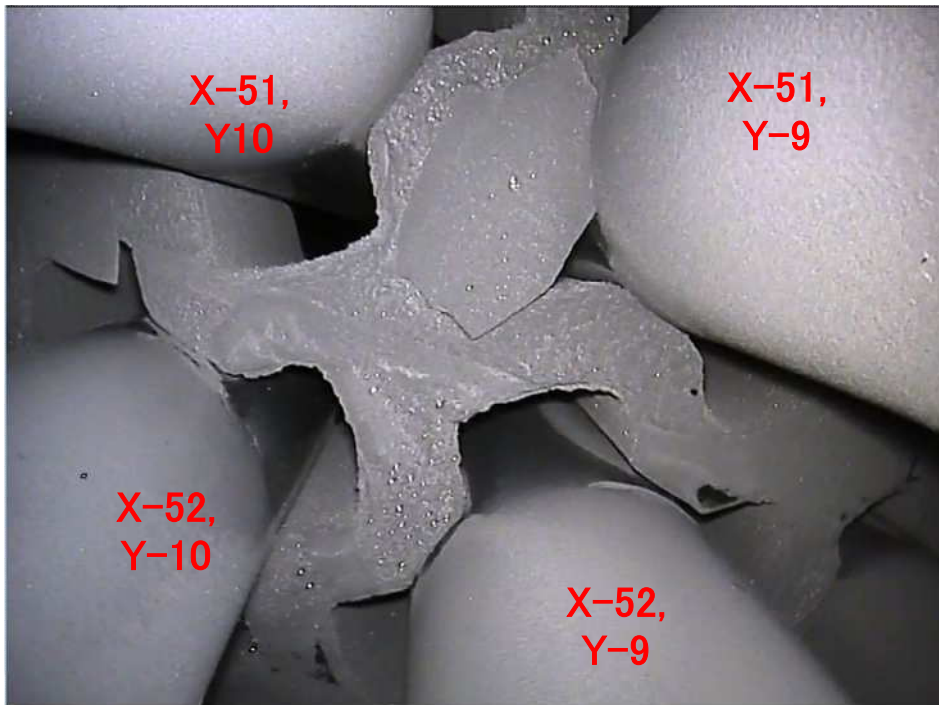
C-S G 第一管支持板上写真



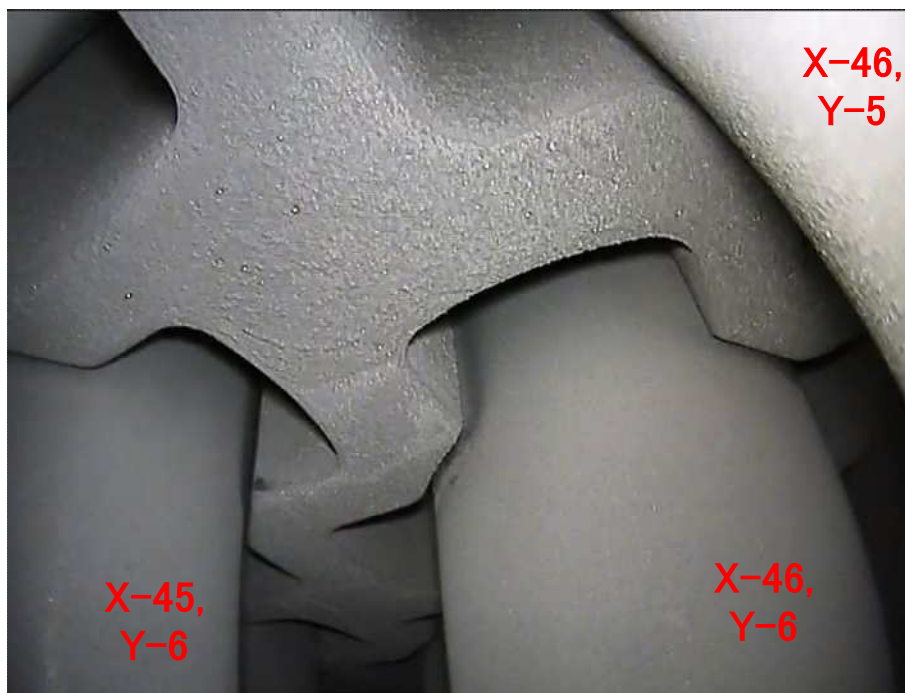
C-S G 第二管支持板上写真



C-S G 第三管支持板下写真



C-S G 第二管支持板下写真



C-S G 流量分配板上写真

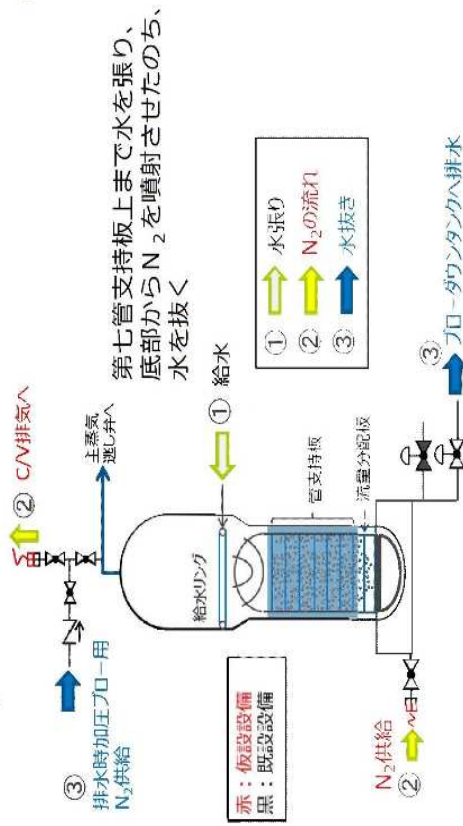


C-S G 管板上写真



N₂ 噴射（バブリング）

【N₂バブリングの概要】



○ N₂注入量（SG1基あたり）
 ・約4時間かけて約1,000m³を注入。

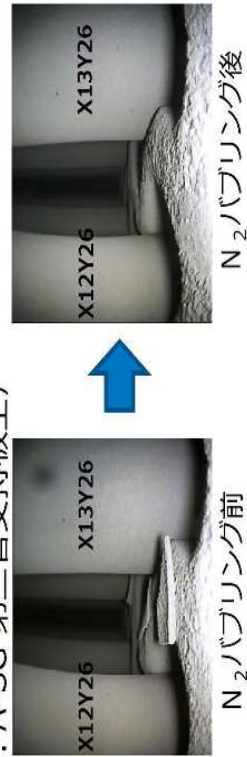
（参考）

- ・ SG1基の2次側全体容量が約160m³（1,000m³は約6回分の入替えに相当）
- ・ 25mプール(25m×14m×1m)の容量が約350m³
- ・ N₂バブリングでは、異物を上昇させるような水流は発生しないため、異物が増えることはない。

ON₂バブリングの結果

- ・ N₂バブリング後の異物回収の結果、通常の定期検査にて実施するスラッジ回収時の回収量の約3割のスラッジを回収できた。
- ・ なお、スラッジ以外の異物は確認されていない。

（例：A-SG 第二管支持板上）



＜スラッジ回収量＞

	N ₂ バブリング後	4号機 第22回定期検査 スラッジランディング時
A-SG	4.53kg	16.67kg
B-SG	3.07kg	13.41kg
C-SG	3.97kg	11.14kg
合計	11.57kg	41.22kg

スラッジ等の収集および確認結果

A-SGスラッジランジング*¹回収分(比較的大きいスラッジのみ抽出し撮影)



*¹ 管板部に堆積したスケール(酸化鉄(主にマグネタイト))を水圧により除去する方法。

スラッジコレクター回収分(一部)：代表 A-SG



N₂噴射(バブリング)による異物調査結果

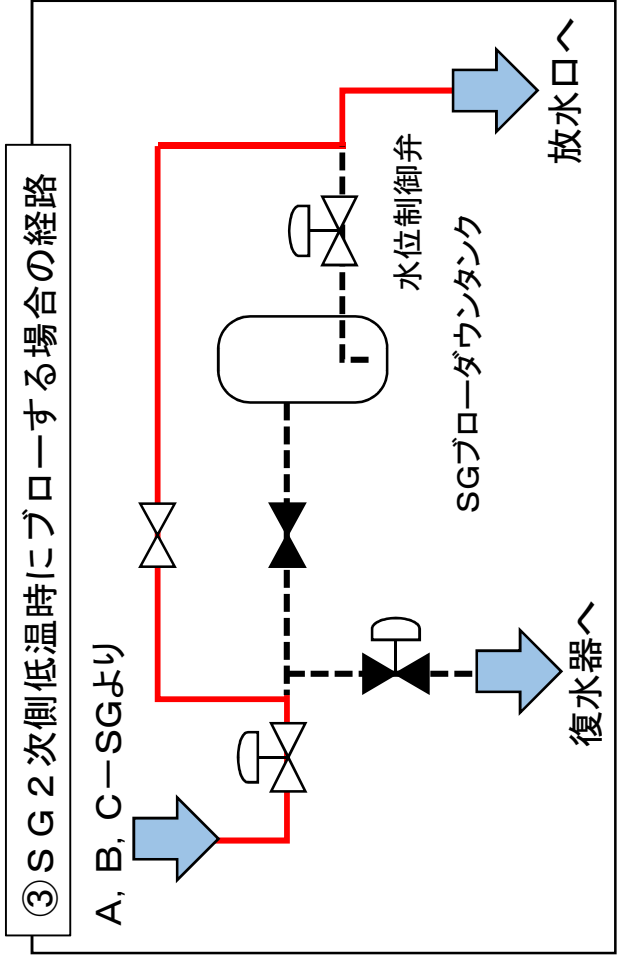
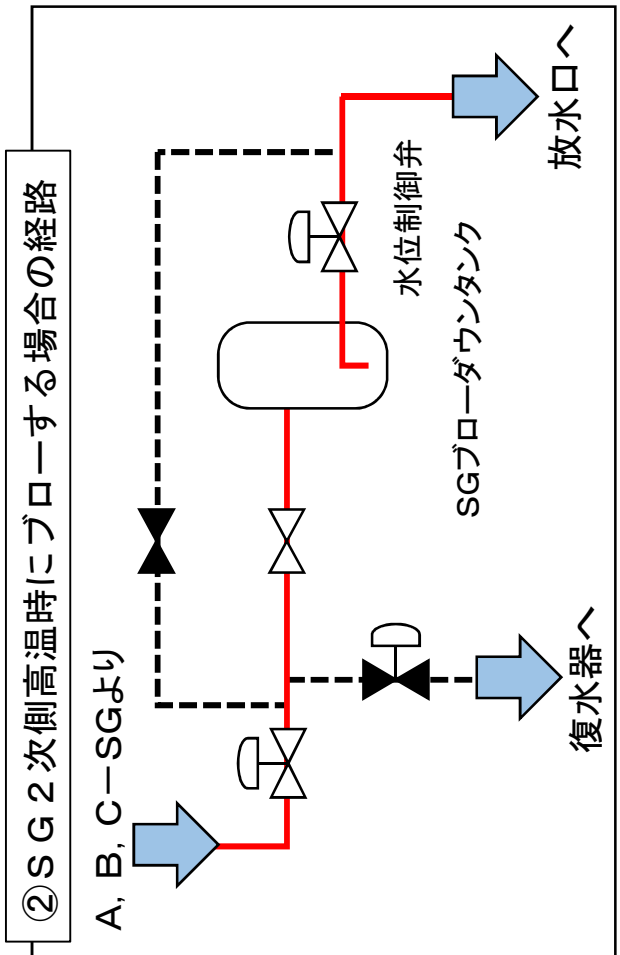
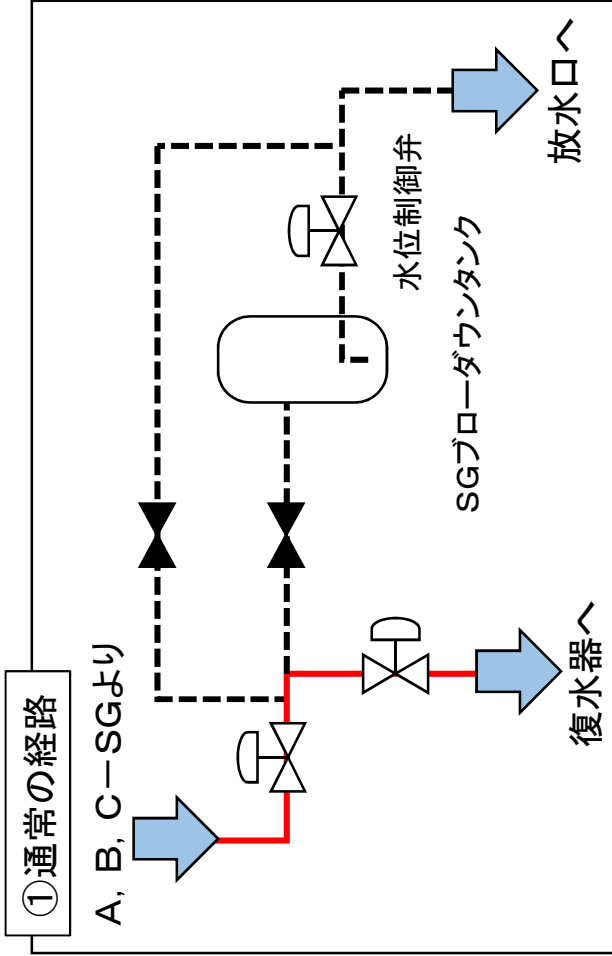
A-SG N₂バブリングによる回収スラッジ



伝熱管外面減肉の要因となった異物の排出経路図

- ①： 通常運転中、SGブローダウンは復水器に回収されているため、異物が経路上の弁にとどまっている可能性がある
- ②： 定検に入った後、燃料取出前（SG 2次側が高温）にSG 2次側の水張替を実施しているが、この場合はSGブローダウンタンクを経由しており、異物が経路上の弁やタンク内にとどまっている可能性がある
- ③： 燃料取出以降（SG 2次側が低温）、作業に伴ってSG 2次側をブローしている。この場合、直接海水管に放出している。

⇒ 残留異物が滞留する可能性がある機器について開放点検を実施した結果、異物は確認されなかった。



SGブローダーダウン系統点検結果（１／４）

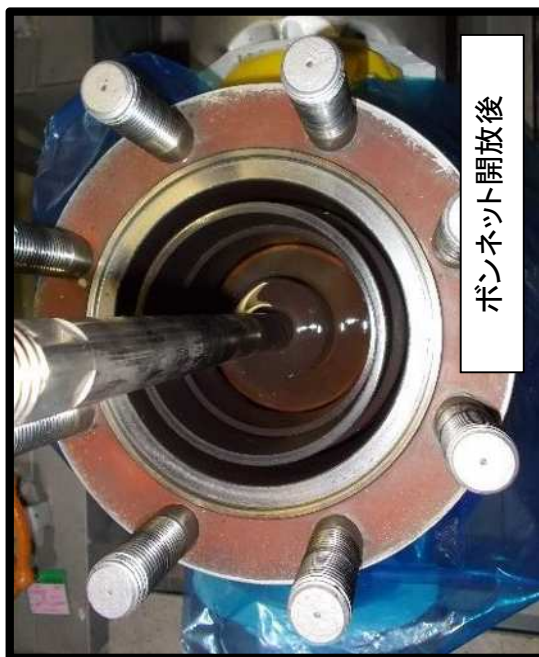
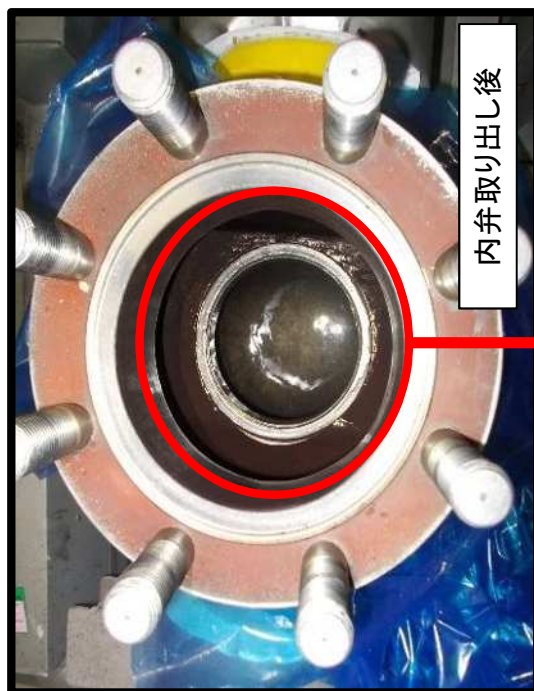
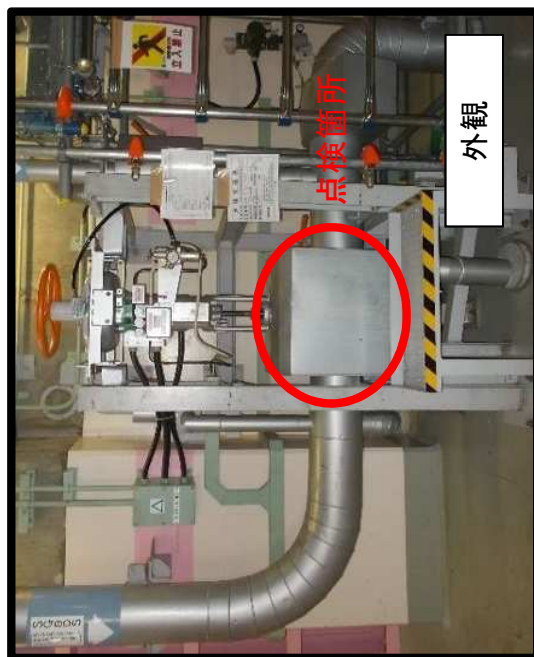
①SGブローダーダウンタンク（異物なし）



SGブローダウンシステム点検結果 (2/4)

②SGブローダウンタンク水位制御弁 弁内部

(異物なし)



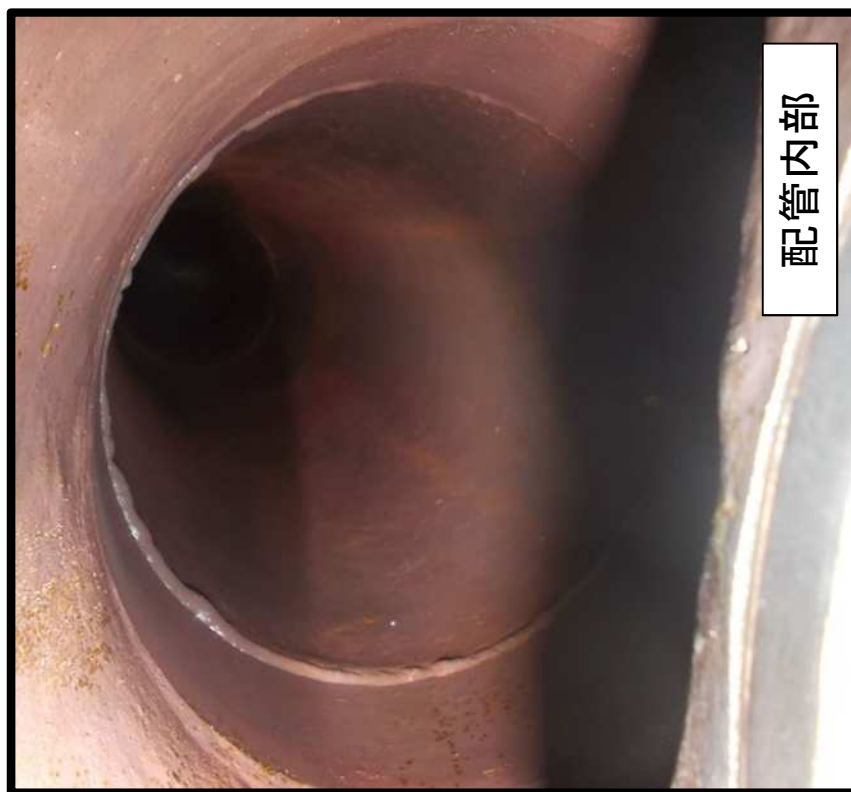
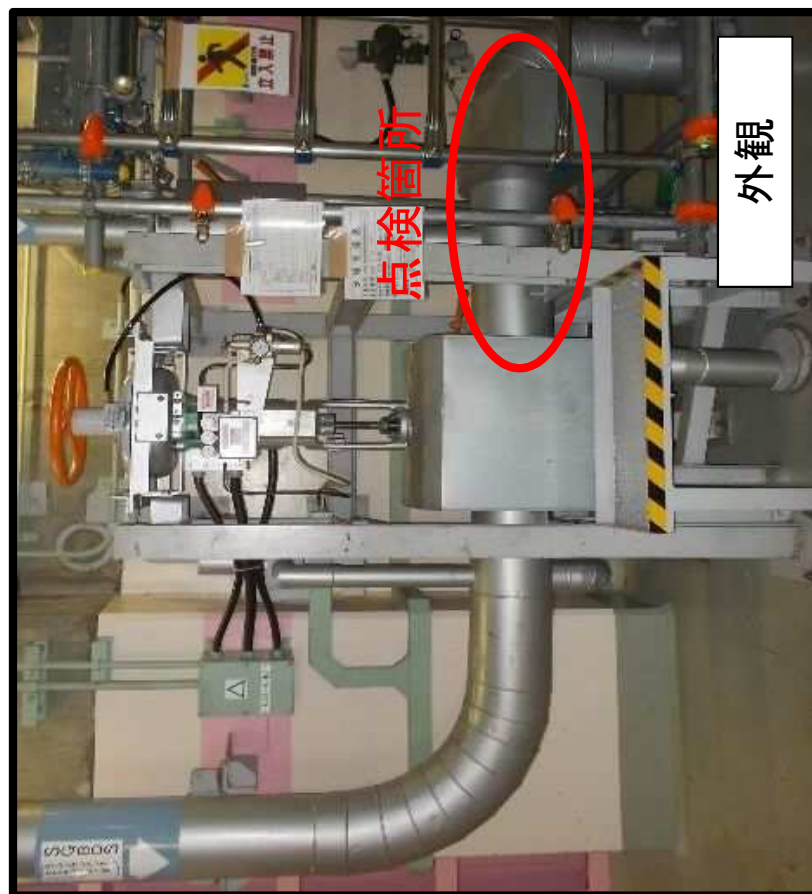
SGブローダーダウンシステム点検結果（３／４）

③SGブローダーダウンタンク水位制御弁 １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（４／４）

④SGブローダウンタンク水位制御弁 ２次側配管内部（異物なし）



流体振動による疲労評価

第二および第三管支持板部において、流体力によって伝熱管に発生する応力を算出し、疲労損傷が生じないことを確認した。

伝熱管に作用する流体力 F は、

$$F = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S = \text{[redacted]}$$

ここで、 C_D : 抗力係数 = [redacted]
 ρ : 流体の密度 = [redacted]
 V : 流速 = [redacted]
 S : 流れを受ける面積 = [redacted]

流体力 F による最大曲げモーメント M は、

$$M = (F/2l) \cdot l^2/8 = \text{[redacted]}$$

ここで、 l : 管支持板間の長さ = [redacted]

伝熱管の断面係数 Z は

$$Z = \frac{\pi(d_2^4 - d_1^4)}{32d_2} = \text{[redacted]}$$

ここで、 d_2 : 伝熱管外径 = [redacted]
 d_1 : 伝熱管内径 = [redacted]

よって、伝熱管に発生する最大応力 σ は、

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

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

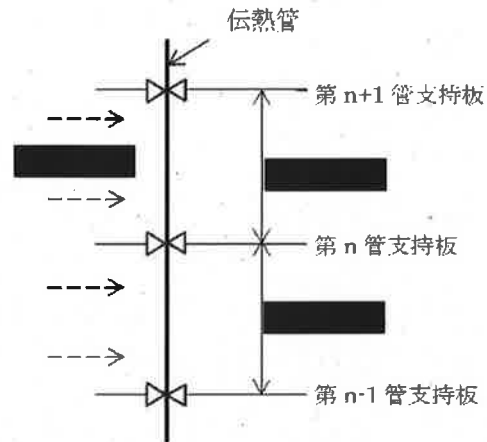
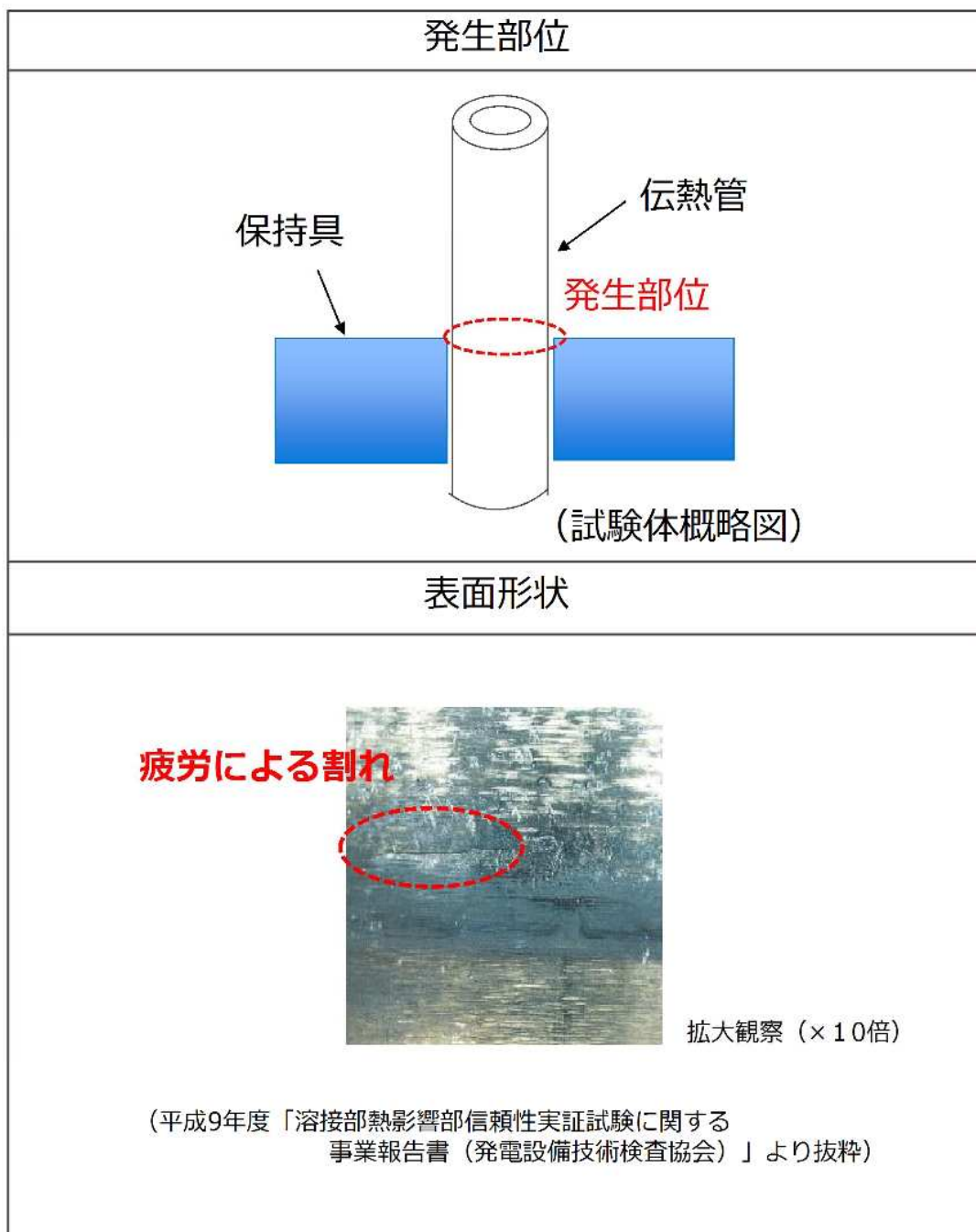


図1 流体力を受ける伝熱管 (n = 2, 3)

流体振動疲労によるきずの形状

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、今回確認されたきずが摩耗減肉であると判断している。なお、流体振動疲労によるきずの形状例を以下に示す。



エロージョン*1の発生可能性評価

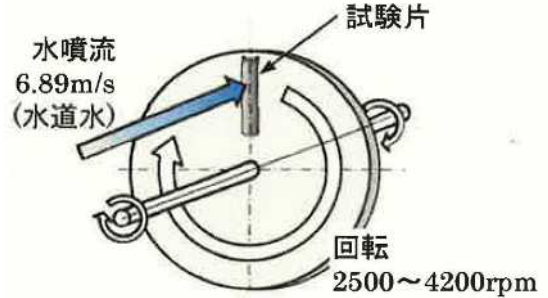
1. 目的

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が発生しないことを評価する。

2. 方法

ウォータージェットテスト（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 3m/s 以下であることからエロージョンの発生可能性はない。

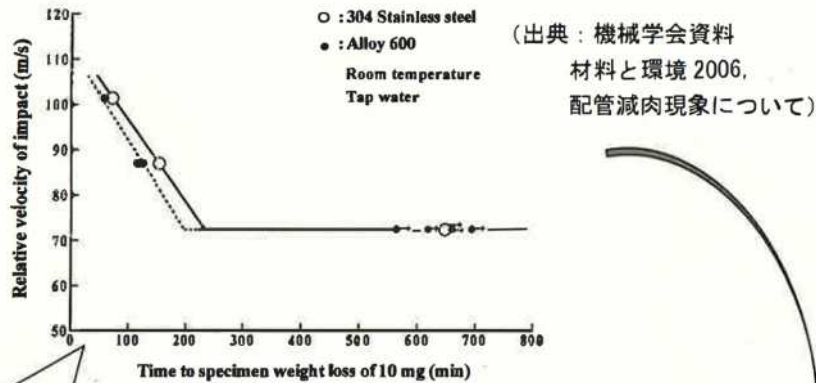


図1 ウォータージェットテストによる限界流速

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

*1: 管内外を流れる水により配管表面が摩耗する現象

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）>

- ✓ SG 2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、SG 2次側器内流速約 3m/s 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

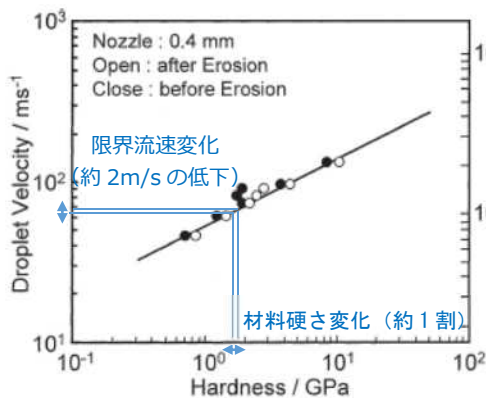


図 1 限界流速と硬さの関係

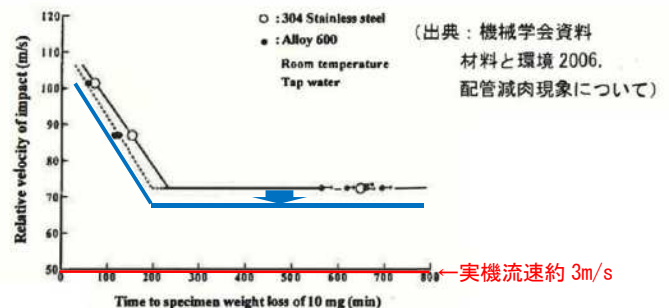
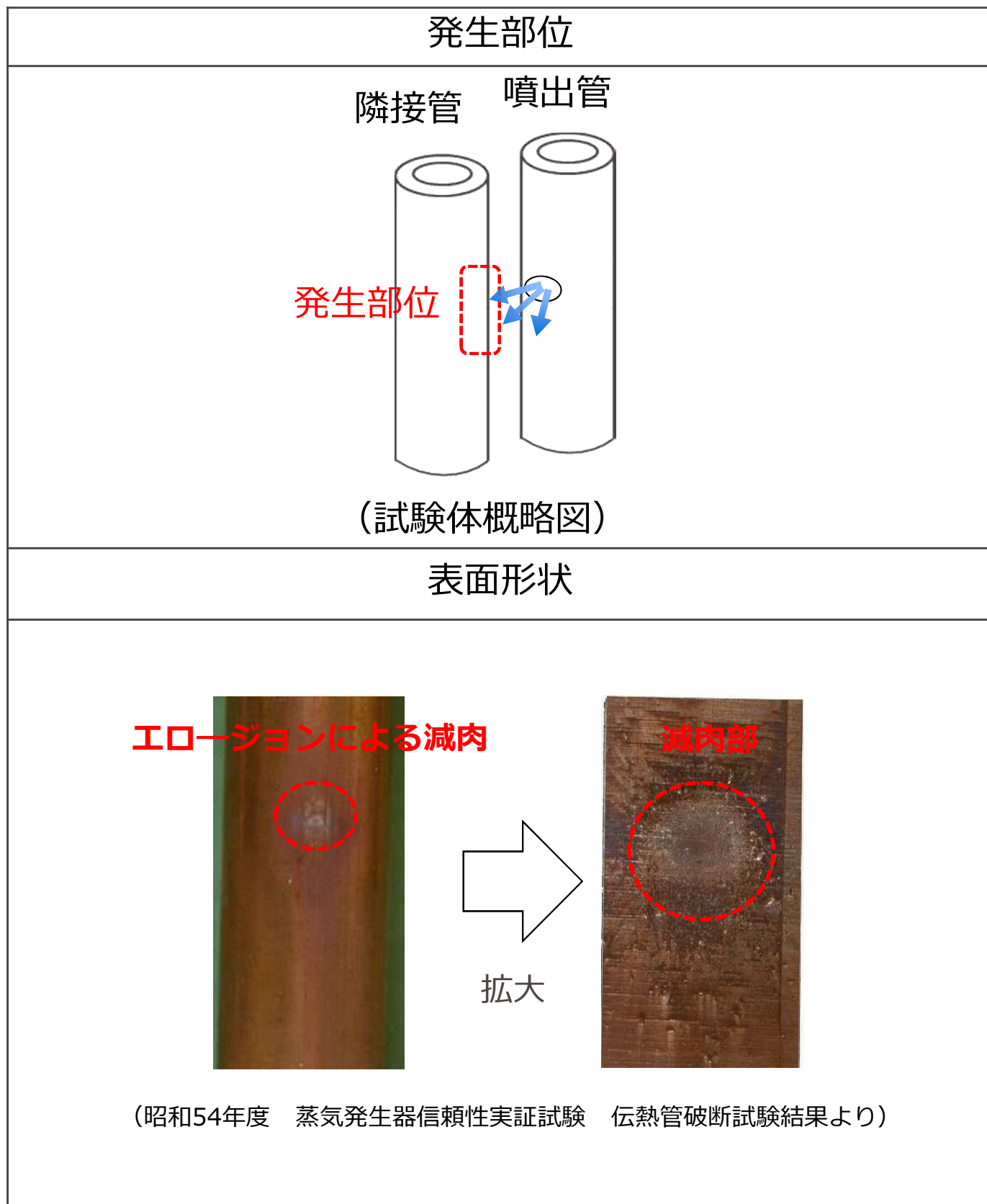


図 2 ウォータージェットテストによる限界流速

温度の影響は小さく、常温の知見を用いても問題ない。

エロージョンによるきずの形状

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、今回確認されたきずが摩耗減肉であると判断している。なお、エロージョンによるきずの形状例を以下に示す。



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*1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*2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。

*1 複数周波数の信号を用いて、管支持板やスケール付着等のノイズ信号を演算処理により消去することで、きざ信号を検出する手法。

*2 放電加工（Electrical Discharge Machining, EDM）によって、試験片に付与させた人工欠陥。

2. 試験方法

2.1 スケール付着・剥離（EDMスリット有り）の試験片データ

深さ59%、長さ5mm、幅0.4mmの外周方向矩形EDMスリットが付与された伝熱管外面に四三酸化鉄を薄く伸ばした厚さ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。

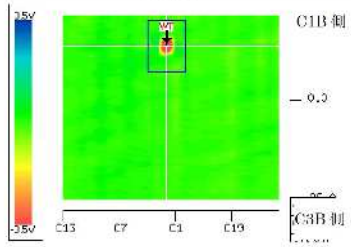

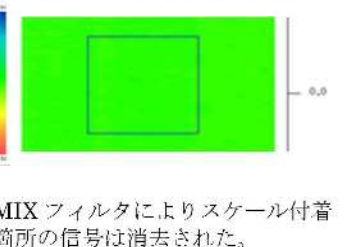
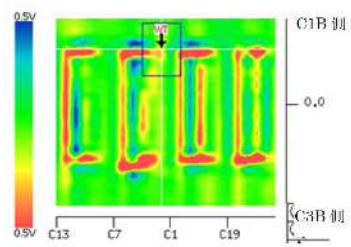
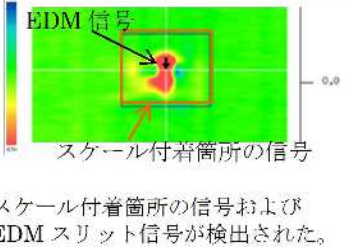
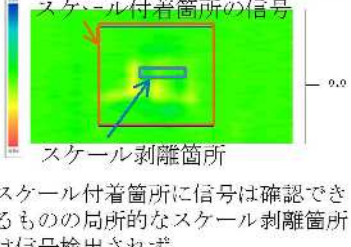
2.2 スケール付着・剥離（EDMスリット無し）の試験片データ

伝熱管外面に四三酸化鉄を薄く伸ばした厚さ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（C-SG X45 Y5） MIX	スケール付着・剥離 （EDMスリット有り）MIX	スケール付着・剥離 （EDMスリット無し）MIX
 <p>C1B 制 0.0 C13 C7 C1 C19 C3B 制</p>	 <p>EDM 信号 0.0</p> <p>MIX フィルタによりスケール付着箇所の信号は消去されたが、EDMスリット信号は検出された。</p>	 <p>0.0</p> <p>MIX フィルタによりスケール付着箇所の信号は消去された。</p>
実機波形（C-SG X45 Y5） 100kHz	スケール付着・剥離 （EDMスリット有り）100kHz	スケール付着・剥離 （EDMスリット無し）100kHz
 <p>C1B 制 0.0 C13 C7 C1 C19 C3B 制</p>	 <p>EDM 信号 スケール付着箇所の信号 0.0</p> <p>スケール付着箇所の信号およびEDMスリット信号が検出された。</p>	 <p>スケール付着箇所の信号 スケール剥離箇所 0.0</p> <p>スケール付着箇所に信号は確認できるものの局所的なスケール剥離箇所は信号検出されず。</p>

4. まとめ

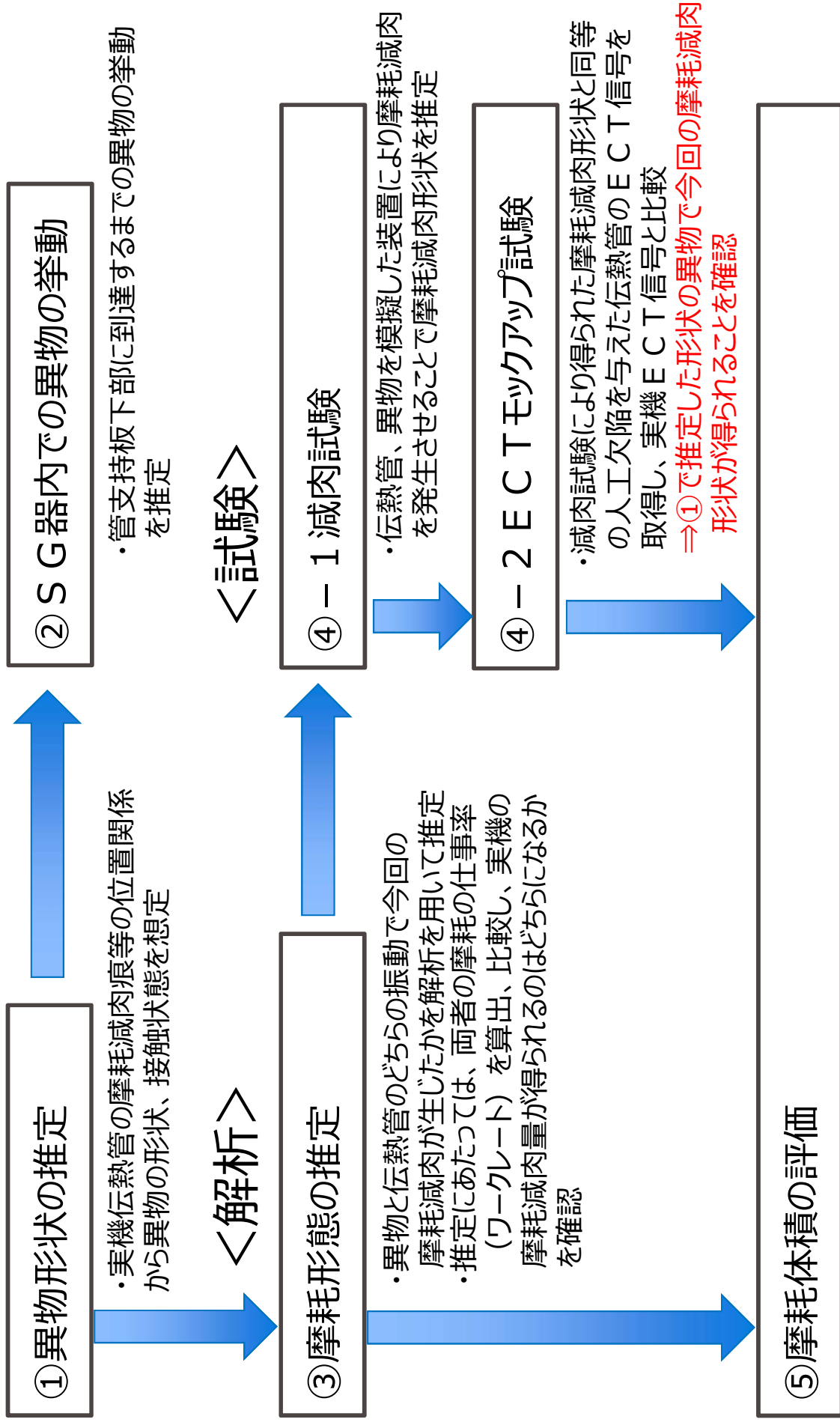
- ・スケール付着・剥離（EDMスリット有り）の試験片を用いた検証結果より、スケール付着箇所の信号はMIXフィルタにより消去されるが、EDMスリットの信号は消去されず、有意な信号として検出される。
- ・スケール付着・剥離（EDMスリット無し）の試験片を用いた検証結果より、局所的なスケール剥離箇所では信号が検出されない。

→実機波形はMIXフィルタを適用しても有意な信号が検出されていることから、スケール付着や局所的なスケール剥離の信号ではなく、減肉信号と考えられる。

以上

減肉メカニズム (異物による減肉の評価フロー)

○減肉メカニズムについて、解析および試験により検証を実施

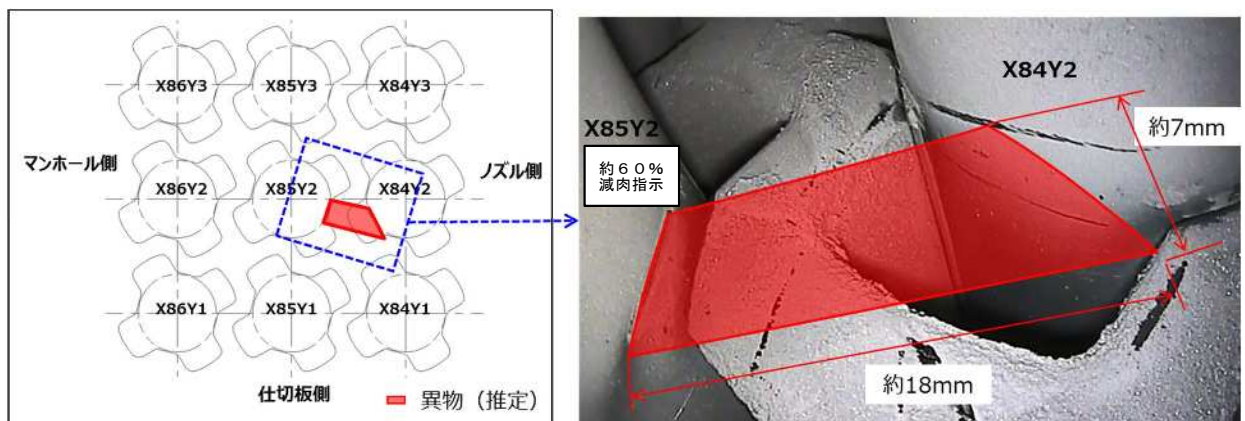


想定される異物の形状

減肉痕等の位置関係から、減肉を生じさせた異物の形状を以下のとおり推定した。

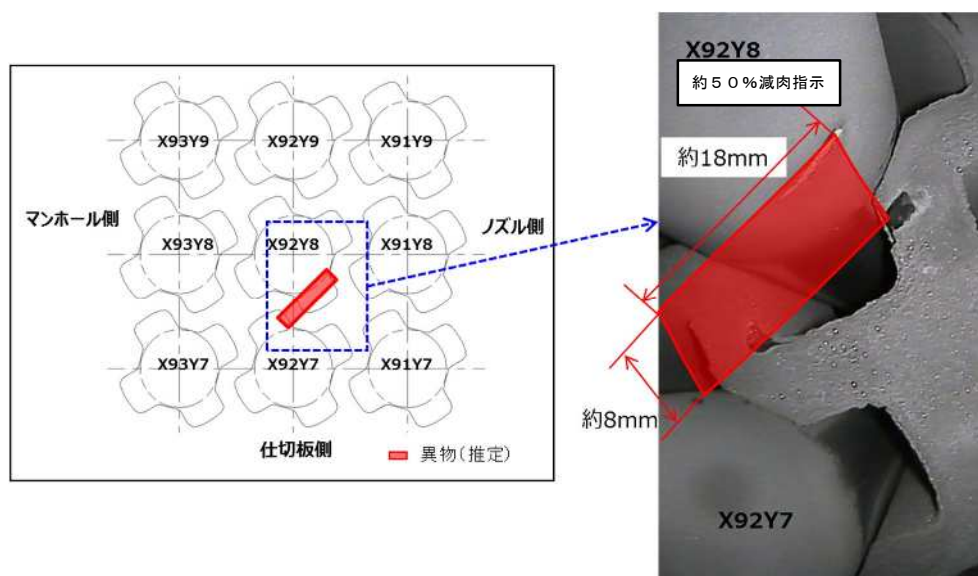
a. A-SG

- 第三管支持板：長さ約18mm、幅約7mm、厚さ1mm以下 (X85, Y2)



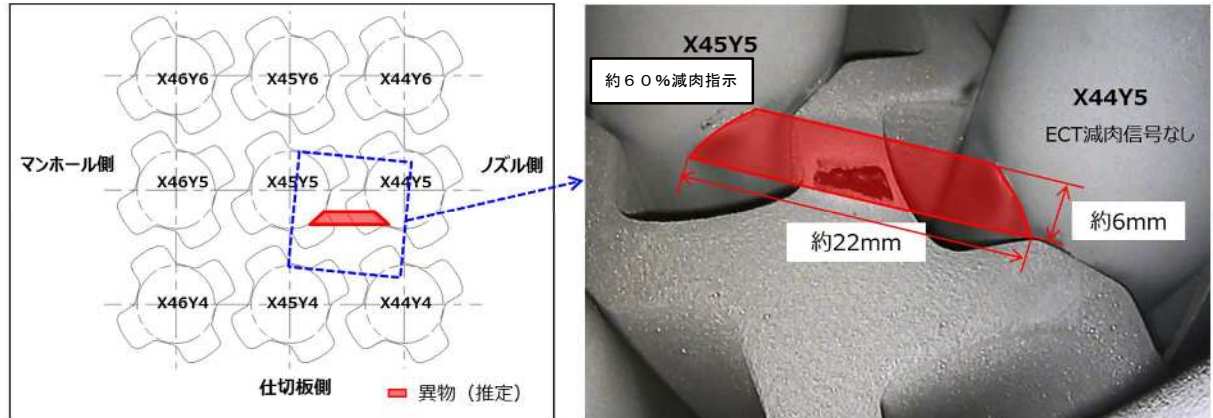
b. B-SG

- 第三管支持板：長さ約18mm、幅約8mm、厚さ1mm以下 (X92, Y8)

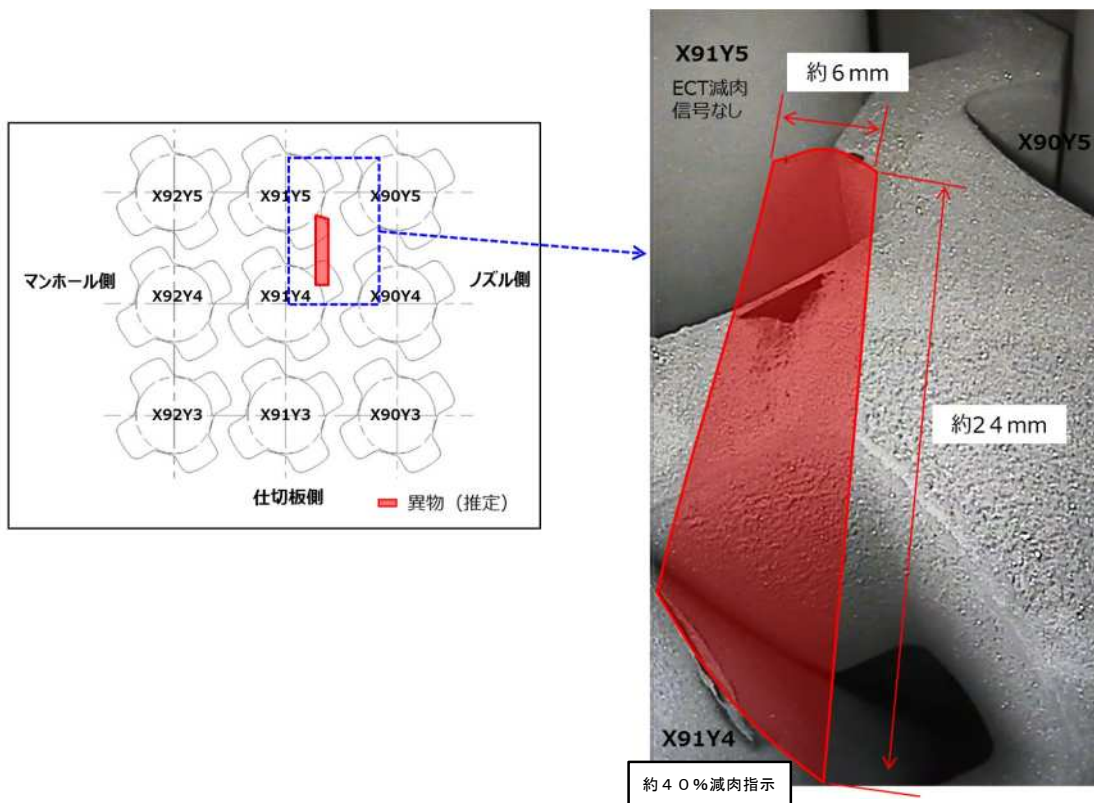


c. C-SG

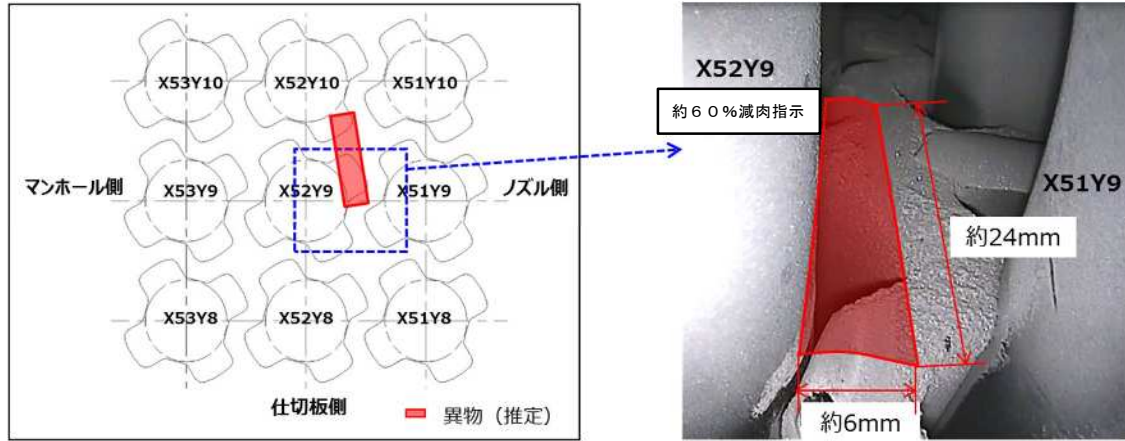
- 第二管支持板：長さ約 22 mm、幅約 6 mm、厚さ 1 mm 以下 (X45, Y5)



- 第二管支持板：長さ約 24 mm、幅約 6 mm、厚さ 1 mm 以下 (X91, Y4)



○ 第三管支持板：長さ約 24 mm、幅約 6 mm、厚さ 1 mm 以下 (X52, Y9)



SG器内流入後の異物挙動について

1. SG器内流入後の異物挙動の推定

図1にSG 2次側下部の器内流況および想定される異物の挙動を示す。

運転中のSG 2次側器内の流況下では、流体抗力が異物の落下力を上回ることから、異物は給水リングJチューブから管群外筒を経て管板上面中央部に到達し、その後は管群内の上昇流に乗って流量分配板および各管支持板フロースロット部を通過し、減肉箇所へ到達したものと考えられる。第一管支持板より上方では、管群の高温側と低温側の圧力損失差から、高温側から低温側への水平方向流があることから、第一管支持板を通過した異物は上昇する過程で低温側へ流れ、第二管支持板の低温側下面に、又は第二管支持板フロースロット部を通過したものは第三管支持板の低温側下面に至ったものと推定される。

この水平方向流が発生する領域は、第一管支持板上面から■■■■上方の領域であり、各管支持板間隔が■■■■であることを踏まえると、水平方向流は第二管支持板以上の領域で顕著であるため、異物は第3管支持板より上方には上昇できないと考えられる。

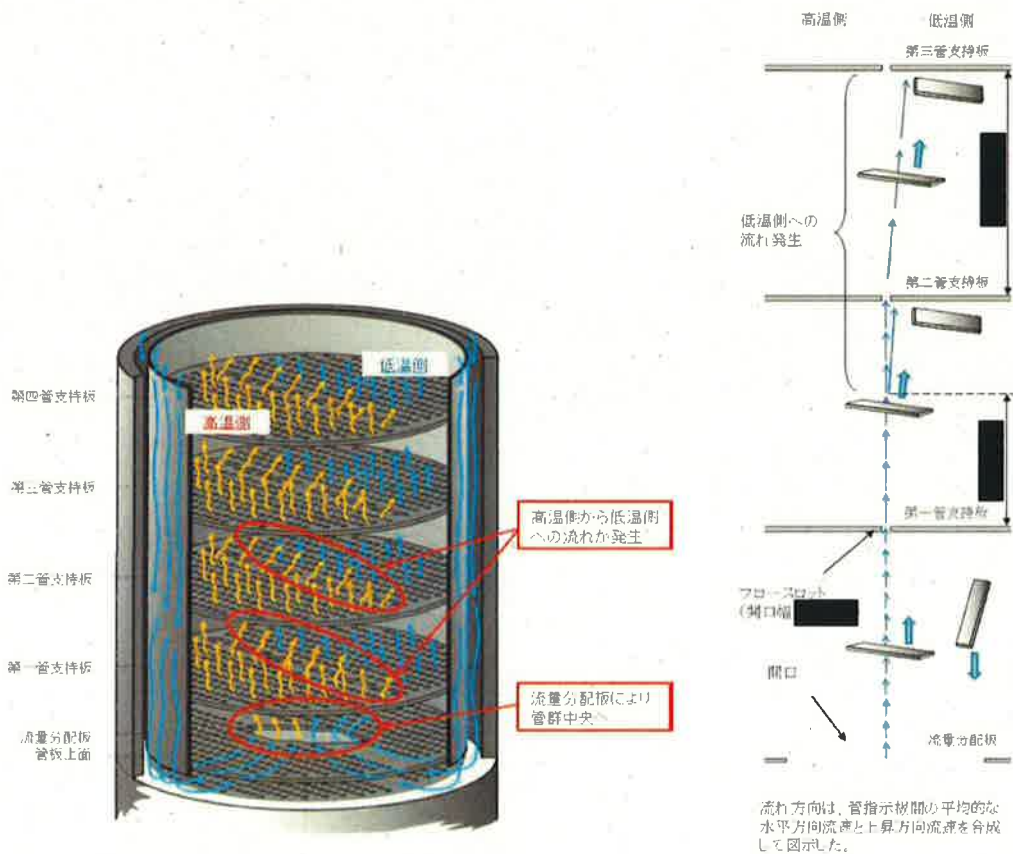


図1 SG 2次側下部の器内流況および異物挙動

2. SG器内流況モックアップ試験

SG 2 次側の流況モックアップ試験により、推定した形状の異物が 1. 項のとおり各管支持板下面に至った後、運転中の流体力により管支持板下面に保持されるか確認を行った。

(1) 試験方法

3次元熱流動解析で得られるSG 2次側流況を再現する水空気試験装置を用いて、次の条件により試験を行った（図2参照）。

- ・試験流速： XXXXXXXXXX
- ・模擬異物形状：22mm×6mm×0.3mm*¹（C-SG：X45，Y5で代表）

*¹ 厚さは添付資料－10－1にて設定



図2 水空気試験装置概要

(2) 試験結果

試験装置内の水－空気2相流中で、模擬異物は管支持板下面に保持されることを確認した（図3参照）。



図3 水空気試験結果

異物と伝熱管の接触時における摩耗形態の推定について

異物との接触で伝熱管が摩耗する場合、異物振動により摩耗するケースと伝熱管振動により摩耗するケースが考えられるため、以下では両ケースの可能性について検討した。

1. 異物振動のケース

異物が振動するには、端部が固定された状態で流体力を受けて振動する必要があるため、本ケースでは異物の端部が管支持板のB E C穴ランド部*¹に挟まり拘束された状態を想定する。この想定に基づき図1の通り計算モデルを設定し、ワークレート*²の計算を行った。

<評価条件>

接触物の片端が固定された片持ち梁を想定し、流体力により接触物の1次モードで振動

*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。

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

<Archardの式>

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

V : 摩耗体積

W_S : 比摩耗量 (材質の組合せと摩耗モードで決まる材料係数 : SUS304 と想定)

W_R : ワークレート (下記参照)

T : 運転時間

<ワークレート計算式>

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

W_R : ワークレート[W]

F : 押付力[N]

L : 静的振幅[m]

ζ : 接触物の減衰比[%]

f : 固有振動数[Hz]

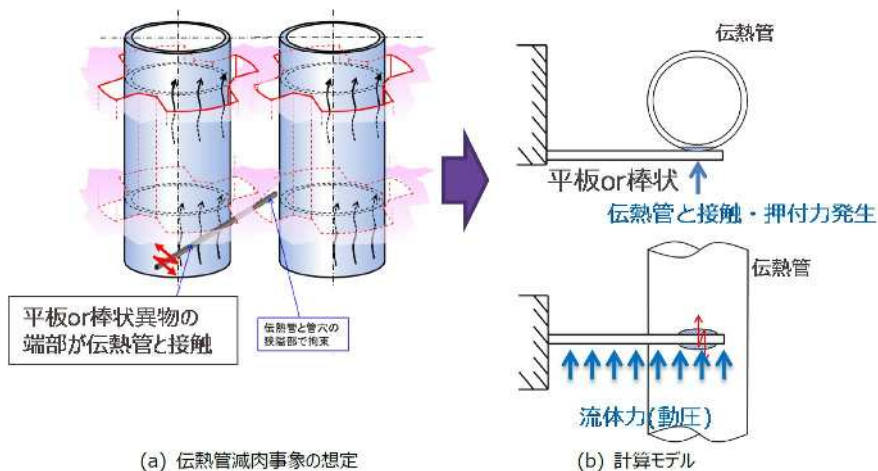


図1 異物の接触状態の計算モデル化概要 (異物振動ケース)

この結果、添付資料－6において推定した異物形状では流体力を受ける面積が小さく、有意なワークレートは発生しないことを確認した。代表として、C－SG（X45，Y5）の結果を表1に示す。

表1 C－SG（X45，Y5）のワークレート計算結果（異物振動ケース）

異物形状 (mm)	押付力 (N)	ワークレート (mW)	実機減肉量 再現可能性	備考
22×6×0.3* ³	1	<0.01	×	実機減肉量を再現するには 1mW オーダーのワークレートが必要

*³ 異物形状の厚さについては、添付資料－9－1にて設定

2. 伝熱管振動のケース

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

*⁴ 蒸気と水が伝熱管に衝突する力と、伝熱管の周りに生じる乱流の力で伝熱管が振動する現象

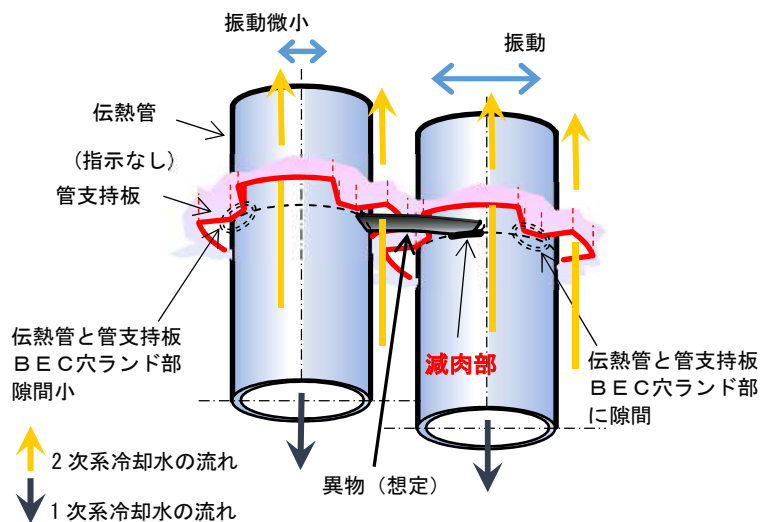


図2 異物の接触状態の想定（伝熱管振動ケース）

そこで、本想定が起ころうかを確認するため、異物が接触したと考えられる伝熱管およびその隣接管について、管支持板BEC穴ランド部との隙間を目視にて再確認した（図3-1～5参照）。この結果、いずれの箇所においても、減肉が生じた伝熱管ではランド部にある程度の隙間が認められた一方で、減肉が認められない（接触痕のみの）伝熱管では、ランド部の隙間は微小であることが確認された。

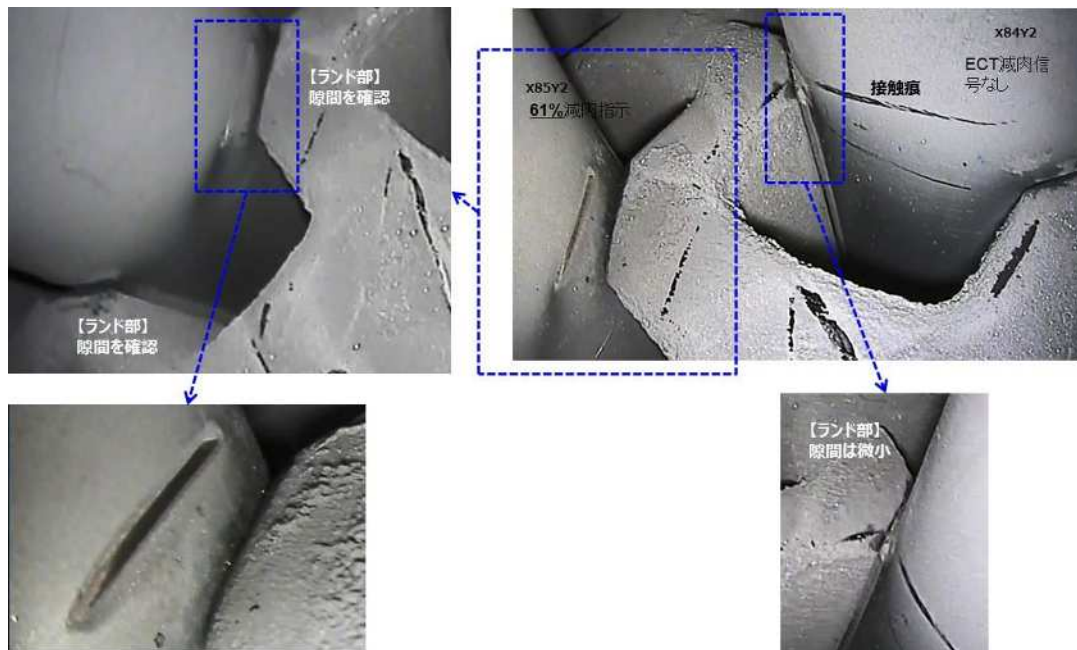


図3-1 伝熱管とランド部の隙間確認結果（A-SG：X85，Y2）

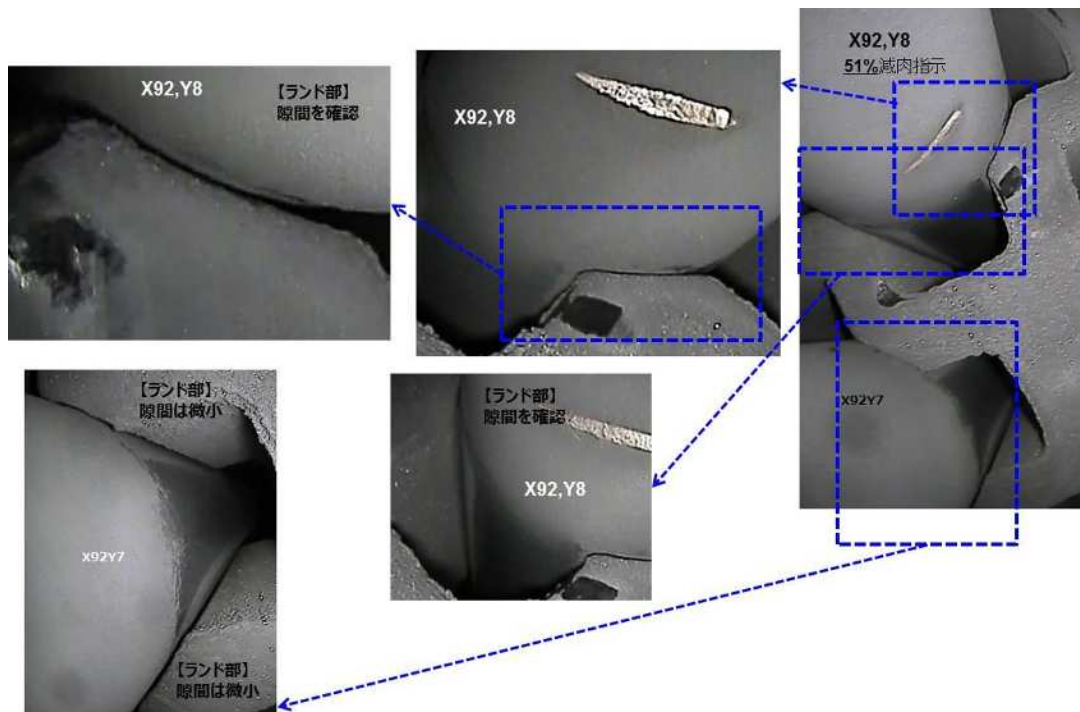


図3-2 伝熱管とランド部の隙間確認結果（B-SG：X92，Y8）

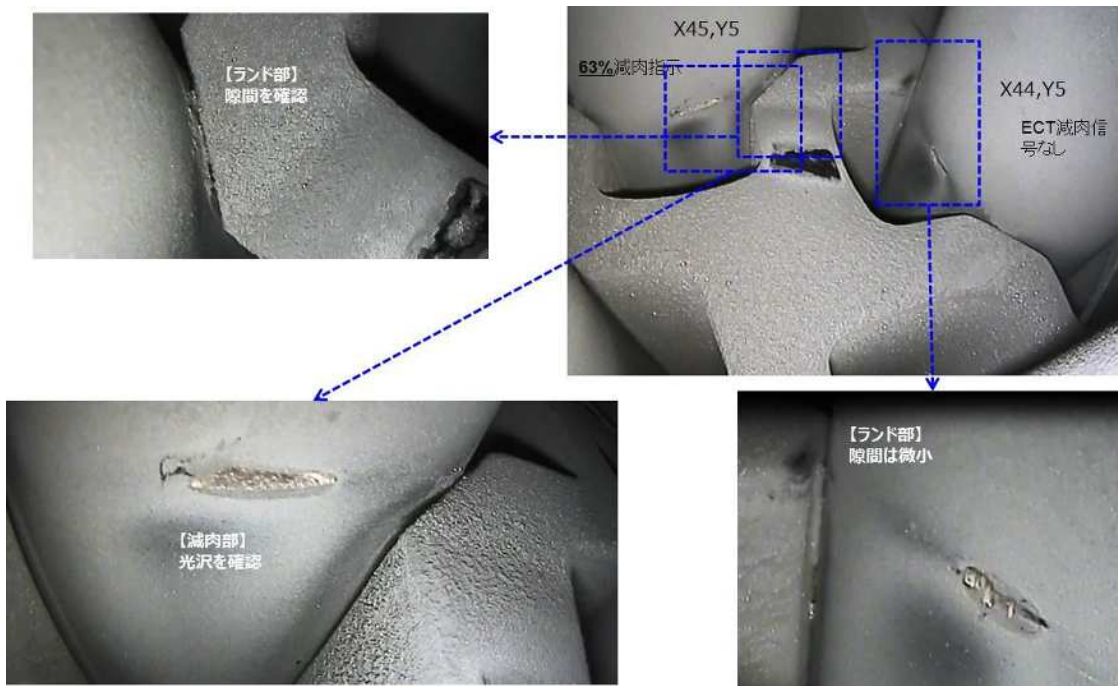


図3-3 伝熱管とランド部の隙間確認結果 (C-SG : X45, Y5)

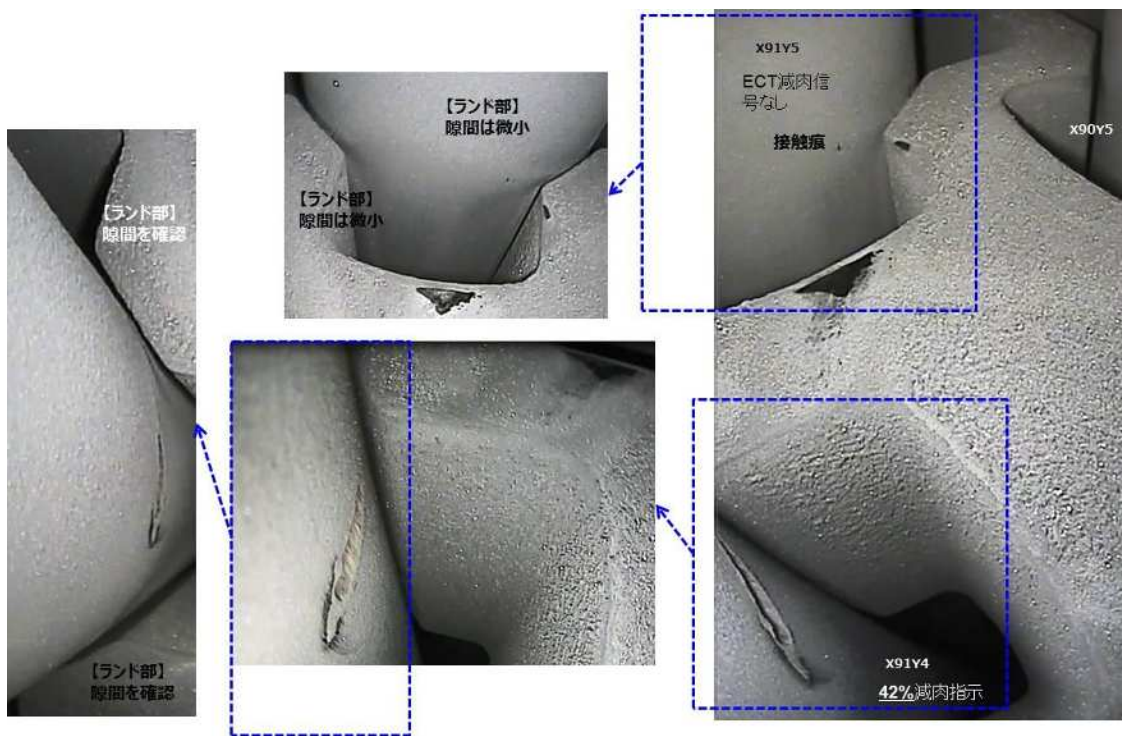


図3-4 伝熱管とランド部の隙間確認結果 (C-SG : X91, Y4)

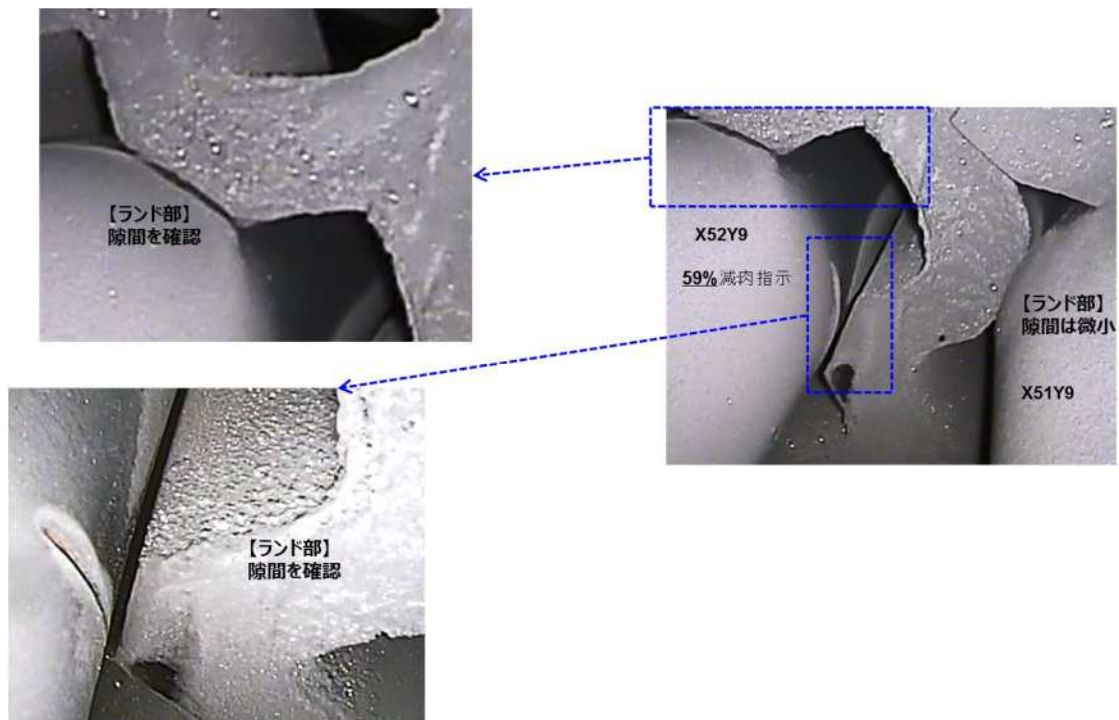


図3-5 伝熱管とランド部の隙間確認結果（C-SG：X52，Y9）

この確認結果より、本想定は実機で起こりうると推定し、C-SG（X45，Y5）を代表として、ワークレートの試算*⁵を行った（表2参照）。その結果、伝熱管振動の場合は異物振動のケースに比べて十分大きなワークレートが得られることを確認した。

表2 C-SG（X45，Y5）のワークレート試算結果（伝熱管振動ケース）

押付力 (N)	ワークレート (mW)	実機減肉量再現可能性
約1	約3	○

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

3. 結論

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

<参考1>

流動振動解析によるワークレートの算出方法について、以下にC-SG（X45，Y5）の場合を例に概要を示す。

参1-1. ワークレート計算の考え方（図4参照）

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

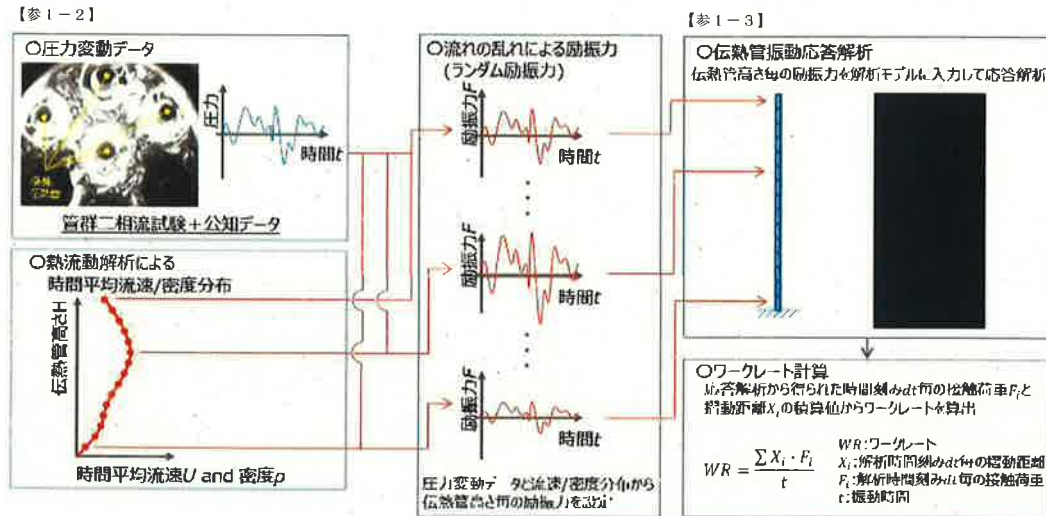


図4 ワークレート算出の流れ（伝熱管振動ケース）

参1-2. 熱流動解析（図5参照）

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

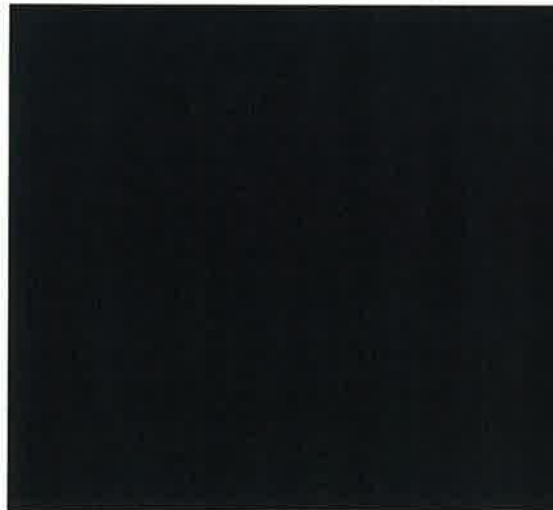


図5 熱流動解析結果（C-SG：X45，Y5）

参 1 - 3 . 振動応答解析 (図 6 参照)

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



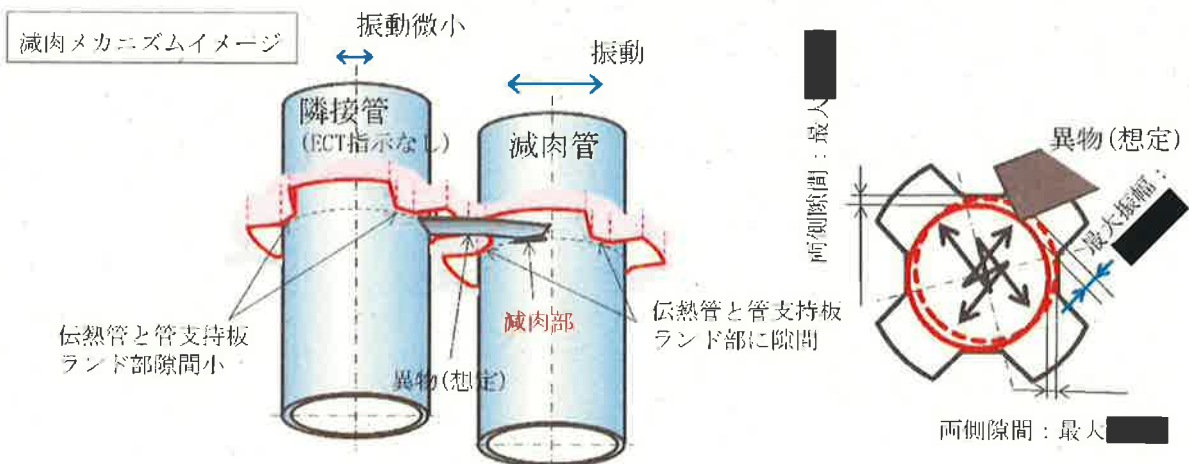
図 6 振動応答解析結果 (C - S G : X 4 5 , Y 5)

< 参考 2 >

減肉深さの制限について、以下に概要を示す。

異物が管支持板の下面で拘束され、伝熱管が振動した場合の減肉量を検証した。

- 試計算により、伝熱管振動により、有意なワークレートが発生することは確認済み。
- 当該管は B E C 穴ランド部に隙間があることにより振動し、異物との接触部で減肉が発生。ただし、振幅はランド部により制限(最大振幅 [redacted])されており、減肉深さには上限がある。
- 隣接管はランド部の隙間が小さく、異物の接触部に有意な減肉は発生せず。
- 減肉深さが最大の場合でも、次の通り耐震・強度上問題ないことを確認している。
 - ・ 直管部は工認で耐震評価の対象としている U ベンド部に比べ地震荷重の影響が小さく、建設工認時のデータでは地震による応力は 1 / 10 以下である。
 - ・ 運転時および事故時の内外圧に対し、減肉深さ 1 . 08mm まで耐えることを確認している。



異物と伝熱管の接触状態の推定について（減肉試験）

異物と伝熱管の接触状態を推定するため、次の試験を行った。

- ・異物と伝熱管の接触角度に応じた減肉形状を実験で確認した。（添付資料－１０－１）
- ・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にてECT信号を取得し、実機のECT信号との比較を行った。（資料資料－１０－２）

1. 減肉試験の方法

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

- ・円筒形状の石膏で伝熱管を模擬し、異物を模擬した砥石との振動接触により減肉を発生させる。
- ・石膏の減肉形状は試験後の破面観察で確認を行う。
なお、形状把握のため、実機２倍のスケールモデルとする。
- ・砥石の厚みについても、実機２倍のスケールモデルとし、予備試験により異物厚さを0.3mmと想定したことから0.6mmと設定する（ただし、次の接触角度②が90°の場合は、0.5mmを使用）。
- ・円筒の接線方向の接触角度（接触角度①）をパラメータとし、円筒の軸方向の接触角度（接触角度②）は予備試験により得られた対象伝熱管に応じた角度を設定し試験を行った。
- ・試験条件は、予備試験を踏まえて設定するため、(2)項に示す。
- ・試験装置概要を図10-1-1に示す。

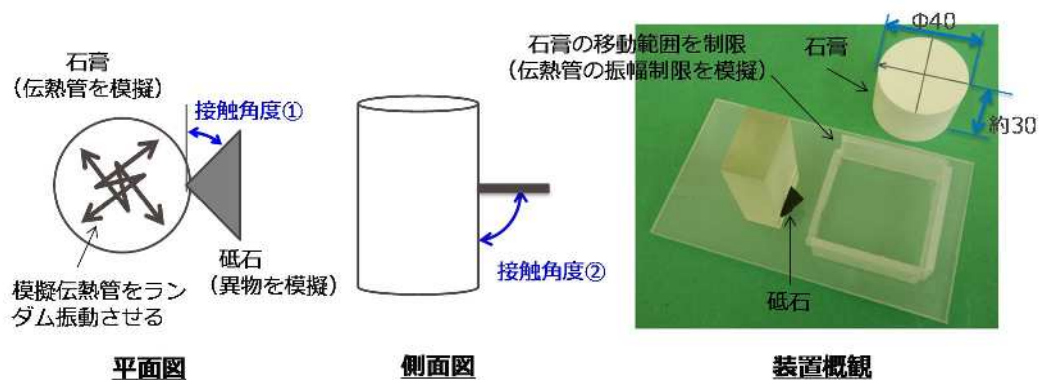


図10-1-1 試験装置概要

(2) 上記(1)項の通り、砥石の厚さおよび接触角度②については、事前に以下の通り予備試験を行い設定した。

a. 砥石の厚さ

砥石の厚さについては、実機のECT信号の再現が可能な厚さに設定した。具体的には、実機のECT信号を再現する条件として、信号強度のピーク数^{*1}および電圧^{*2}に着目し、次のとおり異物厚さを0.3mm程度と想定した。

^{*1} 減肉部の開口サイズに応じて得られるECT信号強度のピーク数は異なり、開口の軸方向長さ（幅）が0.5mm以下であればピーク数は1、0.5mmを超えると開口部の両端のエッジを検出するためピーク数は2となる。

^{*2} ECT信号の電圧の大小は減肉体積の大小と相関がある。

- (a) A-SG (X85, Y2)、C-SG (X45, Y5)、C-SG (X52, Y9)
- ・実機ECT信号強度のピーク数が1（図10-1-2参照）であることから、実機の軸方向減肉幅は0.5mm以下であると考えられるため、異物の厚さは0.5mm以下と想定される（軸方向減肉幅が0.5mmを超える場合はピーク数が2となる）。

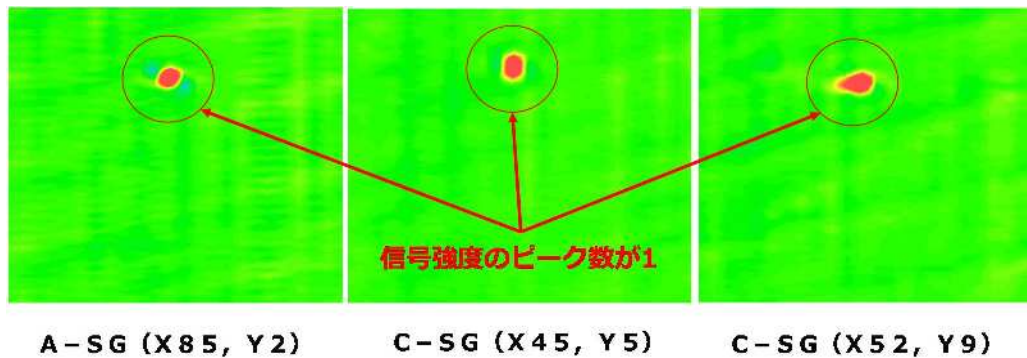


図10-1-2 実機ECT信号（構造物信号除去後）（信号強度ピーク数1）

- ・また、電圧の観点では、軸方向減肉幅が0.3mm程度で、かつ(b)項で述べる通り接触角度②が90°の条件で得られるスリット状の減肉形状では、ECTモックアップ試験（添付資料－10-2参照）の予備試験により得られるECT信号が実機ECT信号と整合することが確認された。
- ・従って、異物厚さは0.3mm程度と想定する。
- ・砥石厚さについては、接触角度②が90°の場合は、石膏の水平方向断面の減肉形状に影響しない（スリット状の軸方向断面形状となるのは自明である）ことから、本ケースでは砥石厚さは0.5mmを使用することとした。

(b) B-SG (X92, Y8)、C-SG (X91, Y4)

- ・実機ECT信号強度のピーク数が2 (C-SG (X91, Y4) の例を図10-1-3に示す) であることから、実機の軸方向減肉幅は0.5mm以上であると考えられる。

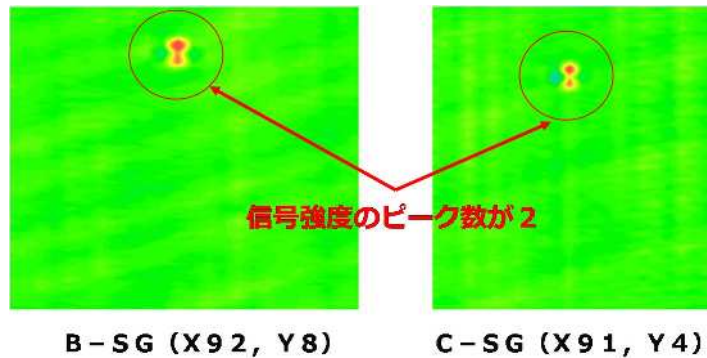


図10-1-3 実機ECT信号 (構造物信号除去後) (信号強度ピーク数2)

- ・しかしながら、異物の厚さが (a) 項と同じ0.3mm程度の場合でも、異物が斜角 (接触角度②が90°未満) で接触した可能性を考慮すると、軸方向減肉幅は大きくなるため、実機ECT信号と矛盾しない。
- ・従って、異物厚さは0.3mmと想定する。
- ・砥石厚さについては、接触角度②が90°未満の場合は、石膏の水平方向断面の減肉形状に影響することから、本試験で採用した2倍スケールモデルの0.6mmを使用することとした。

b. 接触角度②

(a) A-SG (X85, Y2)、C-SG (X45, Y5)、C-SG (X52, Y9)

- ・本ケースでは、想定される異物の接触状態 (添付資料-7) から、異物は伝熱管軸方向に対して垂直 (接触角度②は90°) に接触していると考えられる。
- ・また、上記 a. (a) 項の通り、軸方向減肉幅が0.3mm程度の場合、接触角度②が90°で得られるスリット状の減肉形状では、ECTモックアップ試験の予備試験の結果が実機ECT信号と整合する。
- ・従って、接触角度②は90°とした。

(b) B-SG (X92, Y8)、C-SG (X91, Y4)


- ・本ケースでは、上記 a. (b) 項の通り異物は斜角で伝熱管に接触したと想定される。
- ・B-SG (X92, Y8) では接触角度②を30°、C-SG (X91, Y4) では

接触角度②を 60° として実施したECTモックアップ試験の予備試験の結果が、
実機ECT信号と整合する。

- ・従って、接触角度②は、B-SG (X 9 2, Y 8) では 30°、C-SG (X 9 1, Y 4) では 60° とした。

以上の結果を踏まえ、減肉試験の試験条件は表 1 0 - 1 - 1 の通り設定した。

表 1 0 - 1 - 1 試験条件一覧

対象伝熱管	振動 モード	接触角度 ①	接触角度 ②	振動振幅 (2倍スケール)
A-SG : X 8 5, Y 2	伝熱管 振動	0° , 15° , 30° , 45°	90°	
B-SG : X 9 2, Y 8			30°	
C-SG : X 4 5, Y 5			90°	
C-SG : X 9 1, Y 4			60°	
C-SG : X 5 2, Y 9			90°	

２．減肉試験の結果

減肉試験の結果、いずれの模擬伝熱管においても、表１０－１－２の通り接触角度①に応じて水平方向断面に蒲鉾型または三角型の減肉形状が得られた。一方、接触角度②に応じて軸方向断面に矩形のスリット状または三角形に近い形状の減肉形状が得られた。得られた減肉形状については、ECTモックアップ試験（添付資料－１０－２）で伝熱管モックアップに与える人工欠陥の条件とするため、開口寸法（長さ・幅）の測定を行い、再現対象の伝熱管ごとに結果を表１０－１－３に整理した。

また、得られた減肉形状の外観について、軸方向断面が矩形のスリット状の例としてC-SG（X45，Y5）、軸方向断面が三角形に近い形状の例としてC-SG（X91，Y4）をそれぞれ図１０－１－４、図１０－１－５に示す（水平方向断面はいずれも三角型）。

表１０－１－２ 減肉形状一覧








接触角度		減肉形状イメージ	
接触角度①	0°	蒲鉾型	
	15°	三角型（非対称）	
	30°	三角型（非対称）	
	45°	三角型（対称）	
接触角度②	90°	矩形のスリット状	
	60°	三角形に近い形状	
	30°	三角形に近い形状	

表10-1-3 減肉寸法一覧

再現対象 伝熱管	断面形状		開口寸法		備考
	水平方向断面 (接触角度①)	軸方向断面 (接触角度②)	長さ	幅	
A-SG： X85，Y2 (深さ61%)	蒲鉾型(0°)	スリット状 (90°)	約16mm	約0.6mm	減肉試験は2倍スケールのため、ECTモックアップ（添付資料－10－2）試験では、左記の1／2の寸法を用いる。
	三角型(15°)		約9mm		
	三角型(30°)		約5mm		
	三角型(45°)		約4mm		
B-SG： X92，Y8 (深さ51%)	蒲鉾型(0°)	三角形に近い 形状(30°)	約15mm	約2.6mm	
	三角型(15°)		約8mm		
	三角型(30°)		約5mm		
	三角型(45°)		約5mm		
C-SG： X45，Y5 (深さ63%)	蒲鉾型(0°)	スリット状 (90°)	約16mm	約0.6mm	
	三角型(15°)		約9mm		
	三角型(30°)		約5mm		
	三角型(45°)		約4mm		
C-SG： X91，Y4 (深さ42%)	蒲鉾型(0°)	三角形に近い 形状(60°)	約13mm	約1.2mm	
	三角型(15°)		約5mm		
	三角型(30°)		約3mm		
	三角型(45°)		約3mm		
C-SG： X52，Y9 (深さ59%)	蒲鉾型(0°)	スリット状 (90°)	約16mm	約0.6mm	
	三角型(15°)		約9mm		
	三角型(30°)		約5mm		
	三角型(45°)		約4mm		

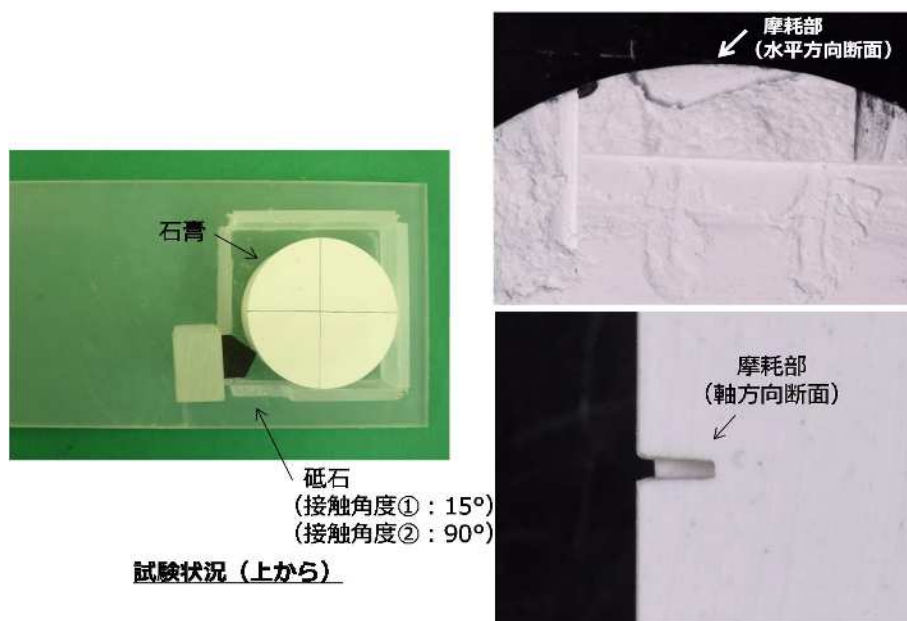


図10-1-4 減肉形状外観 (C-SG : X45, Y5の例)

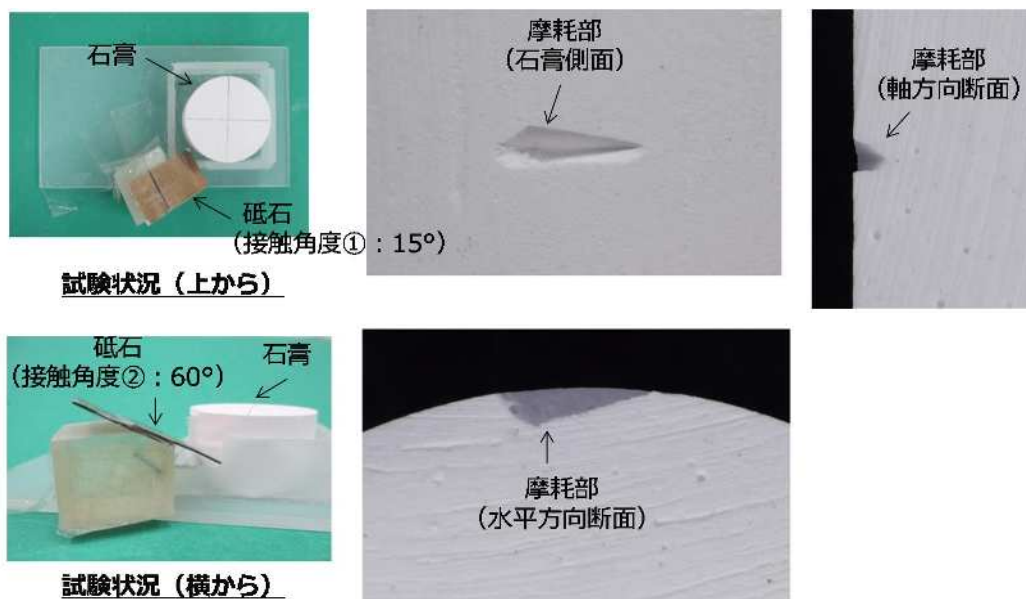


図10-1-5 減肉形状外観 (C-SG : X91, Y4の例)

異物と伝熱管の接触状態の推定について（ECTモックアップ試験）

減肉試験（添付資料－１０－１参照）で再現した蒲鉾型および三角型の減肉形状ならびに減肉の大きさを模擬したモックアップ試験体（インコネル６００合金伝熱管に放電加工による人工欠陥を付与）を製作し、ECT信号を取得するとともに、実機のECT信号との比較を行い、実機との整合性を確認した。

１．ECTモックアップ試験の条件

試験条件を表２－１に示す。実機のECT信号および想定される異物の接触状態より減肉試験で設定した接触角度②に対し、水平方向の異物の接触角度①を変化させた人工欠陥を付与したモックアップ試験体を製作した。

表２－１ ECTモックアップ試験条件（人工欠陥形状一覧）

再現対象 伝熱管	深さ	断面形状		開口寸法		備考
		水平方向断面 (接触角度①)	軸方向断面 (接触角度②)	長さ	幅	
A－SG： X85，Y2 (深さ61%)	60%	蒲鉾型(0°)	スリット状 (90°)	約8mm	約0.3mm	開口寸法については、2倍スケールの減肉試験結果（添付資料－１０－１表10－１－3）を1/2倍にして設定
		三角型(15°)		約4mm		
		三角型(30°)		約2mm		
		三角型(45°)		約2mm		
B－SG： X92，Y8 (深さ51%)	50%	蒲鉾型(0°)	三角形に近い 形状(30°)	約8mm	約1.3mm	
		三角型(15°)		約4mm		
		三角型(30°)		約3mm		
		三角型(45°)		約3mm		
C－SG： X45，Y5 (深さ63%)	60%	蒲鉾型(0°)	スリット状 (90°)	約8mm	約0.3mm	
		三角型(15°)		約4mm		
		三角型(30°)		約2mm		
		三角型(45°)		約2mm		
C－SG： X91，Y4 (深さ42%)	40%	蒲鉾型(0°)	三角形に近い 形状(60°)	約7mm	約0.6mm	
		三角型(15°)		約3mm		
		三角型(30°)		約2mm		
		三角型(45°)		約1mm		
C－SG： X52，Y9 (深さ59%)	60%	蒲鉾型(0°)	スリット状 (90°)	約8mm	約0.3mm	
		三角型(15°)		約4mm		
		三角型(30°)		約2mm		
		三角型(45°)		約2mm		

２．ECTモックアップ試験の結果

１．項の条件でECT信号を取得した結果、蒲鉾型の人工欠陥から得られたECT信号は実機のECT信号と矛盾する一方で、三角型の人工欠陥から得られたECT信号は、実機のECT信号と整合することを確認した。表２－２にECT試験結果一覧を示す。この結果より、異物は伝熱管に対して辺ではなく角部（端部）で接触し、伝熱管に損傷を与えたものと推定された。


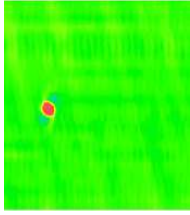
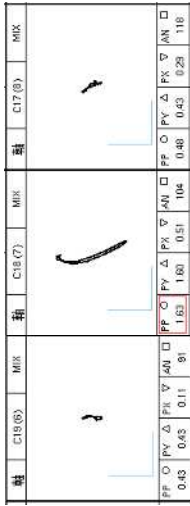

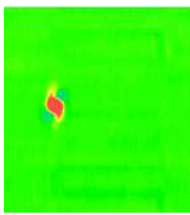


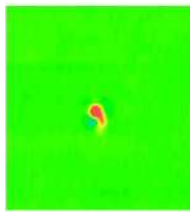
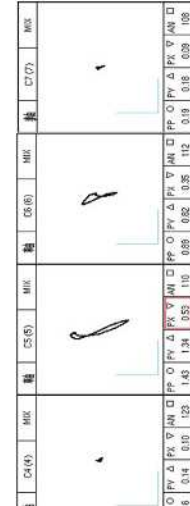
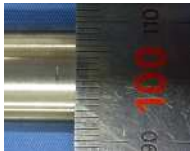
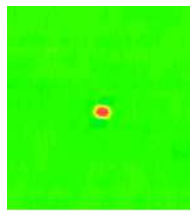


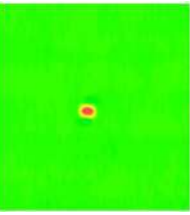

表２－２ ECTモックアップ試験結果一覧

再現対象 伝熱管	深さ	断面形状		開口寸法		試験結果
		水平方向断面 (接触角度①)	軸方向断面 (接触角度②)	長さ	幅	
A-SG : X85, Y2 (深さ 61%)	60%	蒲鉾型(0°)	スリット状 (90°)	約 8 mm	約 0.3mm	×:実機信号と不整合(電圧過大)
		三角型(15°)		約 4 mm		○:実機信号と整合
		三角型(30°)		約 2 mm		△:実機信号とやや不整合
		三角型(45°)		約 2 mm		×:実機信号と不整合(電圧過小)
B-SG : X92, Y8 (深さ 51%)	50%	蒲鉾型(0°)	三角形に近い 形状(30°)	約 8 mm	約 1.3mm	×:実機信号と不整合(電圧過大)
		三角型(15°)		約 4 mm		○:実機信号と整合
		三角型(30°)		約 3 mm		△:実機信号とやや不整合
		三角型(45°)		約 3 mm		△:実機信号とやや不整合
C-SG : X45, Y5 (深さ 63%)	60%	蒲鉾型(0°)	スリット状 (90°)	約 8 mm	約 0.3mm	×:実機信号と不整合(電圧過大)
		三角型(15°)		約 4 mm		○:実機信号と整合
		三角型(30°)		約 2 mm		△:実機信号とやや不整合
		三角型(45°)		約 2 mm		×:実機信号と不整合(電圧過小)
C-SG : X91, Y4 (深さ 42%)	40%	蒲鉾型(0°)	三角形に近い 形状(60°)	約 7 mm	約 0.6mm	△:実機信号とやや不整合
		三角型(15°)		約 3 mm		○:実機信号と整合
		三角型(30°)		約 2 mm		×:実機信号と不整合(電圧過小)
		三角型(45°)		約 1 mm		×:実機信号と不整合(電圧過小)
C-SG : X52, Y9 (深さ 59%)	60%	蒲鉾型(0°)	スリット状 (90°)	約 8 mm	約 0.3mm	×:実機信号と不整合(電圧過大)
		三角型(15°)		約 4 mm		○:実機信号と整合
		三角型(30°)		約 2 mm		×:実機信号と不整合(電圧過小)
		三角型(45°)		約 2 mm		×:実機信号と不整合(電圧過小)

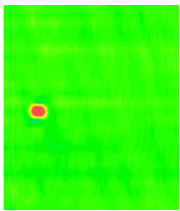
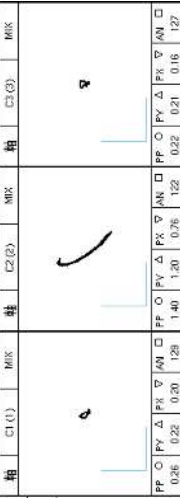

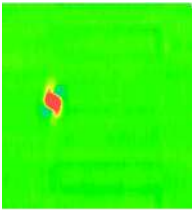
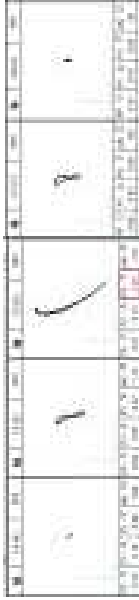

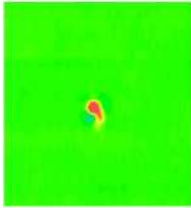
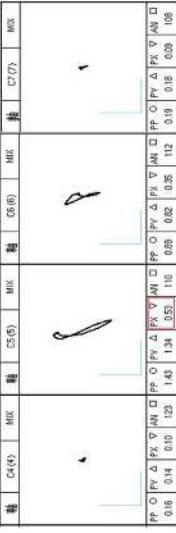

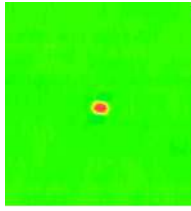


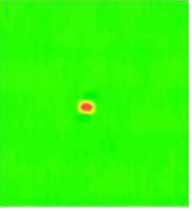

※電圧過大：人工欠陥の大きさが実機欠陥よりも大きいと推定

電圧過小：人工欠陥の大きさが実機欠陥よりも小さいと推定

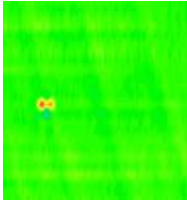
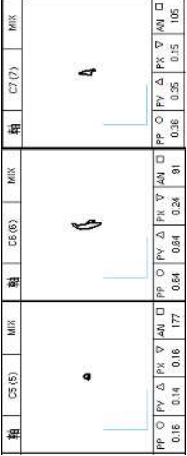

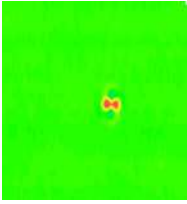



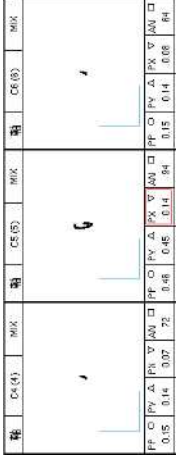

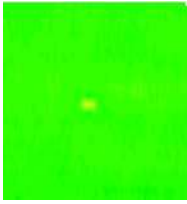


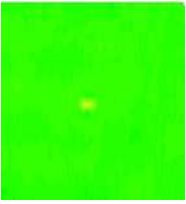
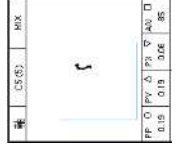
ECTモックアップ試験結果：減肉深さ60%

	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性																																																																																																												
<p>実機 A X85Y2 周長(目視)：約6 mm</p> 	 <p>振幅：1.63V 位相：104°</p>	 <table border="1" data-bbox="341 510 531 1014"> <tr> <td>軸</td> <td>C18(6)</td> <td>MIX</td> <td>軸</td> <td>C17(7)</td> <td>MIX</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.43</td> <td>0.43</td> <td>0.11</td> <td>91</td> <td>1.63</td> </tr> <tr> <td>PV</td> <td>0.43</td> <td>0.43</td> <td>0.11</td> <td>91</td> <td>1.63</td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>0.43</td> <td>0.43</td> <td>0.11</td> <td>91</td> <td>1.63</td> </tr> <tr> <td>Δ</td> <td>0.43</td> <td>0.43</td> <td>0.11</td> <td>91</td> <td>1.63</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.48</td> <td>0.48</td> <td>0.51</td> <td>104</td> <td>0.43</td> </tr> <tr> <td>PV</td> <td>0.48</td> <td>0.48</td> <td>0.51</td> <td>104</td> <td>0.43</td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>0.48</td> <td>0.48</td> <td>0.51</td> <td>104</td> <td>0.43</td> </tr> <tr> <td>Δ</td> <td>0.48</td> <td>0.48</td> <td>0.51</td> <td>104</td> <td>0.43</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.25</td> <td>0.25</td> <td>0.25</td> <td>118</td> <td>0.25</td> </tr> <tr> <td>PV</td> <td>0.25</td> <td>0.25</td> <td>0.25</td> <td>118</td> <td>0.25</td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>0.25</td> <td>0.25</td> <td>0.25</td> <td>118</td> <td>0.25</td> </tr> <tr> <td>Δ</td> <td>0.25</td> <td>0.25</td> <td>0.25</td> <td>118</td> <td>0.25</td> </tr> </table>	軸	C18(6)	MIX	軸	C17(7)	MIX	PP	0.43	0.43	0.11	91	1.63	PV	0.43	0.43	0.11	91	1.63	AN	0.43	0.43	0.11	91	1.63	Δ	0.43	0.43	0.11	91	1.63	PP	0.48	0.48	0.51	104	0.43	PV	0.48	0.48	0.51	104	0.43	AN	0.48	0.48	0.51	104	0.43	Δ	0.48	0.48	0.51	104	0.43	PP	0.25	0.25	0.25	118	0.25	PV	0.25	0.25	0.25	118	0.25	AN	0.25	0.25	0.25	118	0.25	Δ	0.25	0.25	0.25	118	0.25	<p>—</p>																														
軸	C18(6)	MIX	軸	C17(7)	MIX																																																																																																										
PP	0.43	0.43	0.11	91	1.63																																																																																																										
PV	0.43	0.43	0.11	91	1.63																																																																																																										
AN	0.43	0.43	0.11	91	1.63																																																																																																										
Δ	0.43	0.43	0.11	91	1.63																																																																																																										
PP	0.48	0.48	0.51	104	0.43																																																																																																										
PV	0.48	0.48	0.51	104	0.43																																																																																																										
AN	0.48	0.48	0.51	104	0.43																																																																																																										
Δ	0.48	0.48	0.51	104	0.43																																																																																																										
PP	0.25	0.25	0.25	118	0.25																																																																																																										
PV	0.25	0.25	0.25	118	0.25																																																																																																										
AN	0.25	0.25	0.25	118	0.25																																																																																																										
Δ	0.25	0.25	0.25	118	0.25																																																																																																										
<p>モックアップ 蒲鉾型 (接触角度①0°)</p> 	 <p>振幅：2.31V 位相：113°</p>		<p>×</p>																																																																																																												
<p>モックアップ 三角型 (接触角度①15°)</p> 	 <p>振幅：1.43V 位相：110°</p>	 <table border="1" data-bbox="788 510 978 1014"> <tr> <td>軸</td> <td>C4(4)</td> <td>MIX</td> <td>軸</td> <td>C5(5)</td> <td>MIX</td> <td>軸</td> <td>C6(6)</td> <td>MIX</td> <td>軸</td> <td>C7(7)</td> <td>MIX</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.16</td> <td>0.16</td> <td>0.05</td> <td>83</td> <td>0.52</td> <td>0.87</td> <td>0.34</td> <td>109</td> <td>0.17</td> <td>0.17</td> <td>0.06</td> </tr> <tr> <td>PV</td> <td>0.16</td> <td>0.16</td> <td>0.05</td> <td>83</td> <td>0.52</td> <td>0.87</td> <td>0.34</td> <td>109</td> <td>0.17</td> <td>0.17</td> <td>0.06</td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>0.16</td> <td>0.16</td> <td>0.05</td> <td>83</td> <td>0.52</td> <td>0.87</td> <td>0.34</td> <td>109</td> <td>0.17</td> <td>0.17</td> <td>0.06</td> </tr> <tr> <td>Δ</td> <td>0.16</td> <td>0.16</td> <td>0.05</td> <td>83</td> <td>0.52</td> <td>0.87</td> <td>0.34</td> <td>109</td> <td>0.17</td> <td>0.17</td> <td>0.06</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td> <td>0.04</td> <td>82</td> <td>0.51</td> <td>0.86</td> <td>0.33</td> <td>108</td> <td>0.16</td> <td>0.16</td> <td>0.05</td> </tr> <tr> <td>PV</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td> <td>0.04</td> <td>82</td> <td>0.51</td> <td>0.86</td> <td>0.33</td> <td>108</td> <td>0.16</td> <td>0.16</td> <td>0.05</td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td> <td>0.04</td> <td>82</td> <td>0.51</td> <td>0.86</td> <td>0.33</td> <td>108</td> <td>0.16</td> <td>0.16</td> <td>0.05</td> </tr> <tr> <td>Δ</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td> <td>0.04</td> <td>82</td> <td>0.51</td> <td>0.86</td> <td>0.33</td> <td>108</td> <td>0.16</td> <td>0.16</td> <td>0.05</td> </tr> </table>	軸	C4(4)	MIX	軸	C5(5)	MIX	軸	C6(6)	MIX	軸	C7(7)	MIX	PP	0.16	0.16	0.05	83	0.52	0.87	0.34	109	0.17	0.17	0.06	PV	0.16	0.16	0.05	83	0.52	0.87	0.34	109	0.17	0.17	0.06	AN	0.16	0.16	0.05	83	0.52	0.87	0.34	109	0.17	0.17	0.06	Δ	0.16	0.16	0.05	83	0.52	0.87	0.34	109	0.17	0.17	0.06	PP	0.15	0.15	0.04	82	0.51	0.86	0.33	108	0.16	0.16	0.05	PV	0.15	0.15	0.04	82	0.51	0.86	0.33	108	0.16	0.16	0.05	AN	0.15	0.15	0.04	82	0.51	0.86	0.33	108	0.16	0.16	0.05	Δ	0.15	0.15	0.04	82	0.51	0.86	0.33	108	0.16	0.16	0.05	<p>○</p>
軸	C4(4)	MIX	軸	C5(5)	MIX	軸	C6(6)	MIX	軸	C7(7)	MIX																																																																																																				
PP	0.16	0.16	0.05	83	0.52	0.87	0.34	109	0.17	0.17	0.06																																																																																																				
PV	0.16	0.16	0.05	83	0.52	0.87	0.34	109	0.17	0.17	0.06																																																																																																				
AN	0.16	0.16	0.05	83	0.52	0.87	0.34	109	0.17	0.17	0.06																																																																																																				
Δ	0.16	0.16	0.05	83	0.52	0.87	0.34	109	0.17	0.17	0.06																																																																																																				
PP	0.15	0.15	0.04	82	0.51	0.86	0.33	108	0.16	0.16	0.05																																																																																																				
PV	0.15	0.15	0.04	82	0.51	0.86	0.33	108	0.16	0.16	0.05																																																																																																				
AN	0.15	0.15	0.04	82	0.51	0.86	0.33	108	0.16	0.16	0.05																																																																																																				
Δ	0.15	0.15	0.04	82	0.51	0.86	0.33	108	0.16	0.16	0.05																																																																																																				
<p>モックアップ 三角型 (接触角度①30°)</p> 	 <p>振幅：0.92V 位相：108°</p>	 <table border="1" data-bbox="1011 510 1201 1014"> <tr> <td>軸</td> <td>C5(5)</td> <td>MIX</td> <td>軸</td> <td>C6(6)</td> <td>MIX</td> <td>軸</td> <td>C7(7)</td> <td>MIX</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td> <td>0.04</td> <td>82</td> <td>0.51</td> <td>0.86</td> <td>0.33</td> <td>108</td> </tr> <tr> <td>PV</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td> <td>0.04</td> <td>82</td> <td>0.51</td> <td>0.86</td> <td>0.33</td> <td>108</td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td> <td>0.04</td> <td>82</td> <td>0.51</td> <td>0.86</td> <td>0.33</td> <td>108</td> </tr> <tr> <td>Δ</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td> <td>0.04</td> <td>82</td> <td>0.51</td> <td>0.86</td> <td>0.33</td> <td>108</td> </tr> </table>	軸	C5(5)	MIX	軸	C6(6)	MIX	軸	C7(7)	MIX	PP	0.15	0.15	0.04	82	0.51	0.86	0.33	108	PV	0.15	0.15	0.04	82	0.51	0.86	0.33	108	AN	0.15	0.15	0.04	82	0.51	0.86	0.33	108	Δ	0.15	0.15	0.04	82	0.51	0.86	0.33	108	<p>△</p>																																																															
軸	C5(5)	MIX	軸	C6(6)	MIX	軸	C7(7)	MIX																																																																																																							
PP	0.15	0.15	0.04	82	0.51	0.86	0.33	108																																																																																																							
PV	0.15	0.15	0.04	82	0.51	0.86	0.33	108																																																																																																							
AN	0.15	0.15	0.04	82	0.51	0.86	0.33	108																																																																																																							
Δ	0.15	0.15	0.04	82	0.51	0.86	0.33	108																																																																																																							
<p>モックアップ 三角型 (接触角度①45°)</p> 	 <p>振幅：0.76V 位相：104°</p>	 <table border="1" data-bbox="1235 510 1425 1014"> <tr> <td>軸</td> <td>C5(5)</td> <td>MIX</td> <td>軸</td> <td>C6(6)</td> <td>MIX</td> <td>軸</td> <td>C7(7)</td> <td>MIX</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.14</td> <td>0.14</td> <td>0.03</td> <td>86</td> <td>0.75</td> <td>0.72</td> <td>0.23</td> <td>104</td> </tr> <tr> <td>PV</td> <td>0.14</td> <td>0.14</td> <td>0.03</td> <td>86</td> <td>0.75</td> <td>0.72</td> <td>0.23</td> <td>104</td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>0.14</td> <td>0.14</td> <td>0.03</td> <td>86</td> <td>0.75</td> <td>0.72</td> <td>0.23</td> <td>104</td> </tr> <tr> <td>Δ</td> <td>0.14</td> <td>0.14</td> <td>0.03</td> <td>86</td> <td>0.75</td> <td>0.72</td> <td>0.23</td> <td>104</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.04</td> <td>88</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td> <td>0.05</td> <td>88</td> </tr> <tr> <td>PV</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.04</td> <td>88</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td> <td>0.05</td> <td>88</td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.04</td> <td>88</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td> <td>0.05</td> <td>88</td> </tr> <tr> <td>Δ</td> <td>0.05</td> <td>0.05</td> <td>0.04</td> <td>88</td> <td>0.15</td> <td>0.15</td> <td>0.05</td> <td>88</td> </tr> </table>	軸	C5(5)	MIX	軸	C6(6)	MIX	軸	C7(7)	MIX	PP	0.14	0.14	0.03	86	0.75	0.72	0.23	104	PV	0.14	0.14	0.03	86	0.75	0.72	0.23	104	AN	0.14	0.14	0.03	86	0.75	0.72	0.23	104	Δ	0.14	0.14	0.03	86	0.75	0.72	0.23	104	PP	0.05	0.05	0.04	88	0.15	0.15	0.05	88	PV	0.05	0.05	0.04	88	0.15	0.15	0.05	88	AN	0.05	0.05	0.04	88	0.15	0.15	0.05	88	Δ	0.05	0.05	0.04	88	0.15	0.15	0.05	88	<p>×</p>																											
軸	C5(5)	MIX	軸	C6(6)	MIX	軸	C7(7)	MIX																																																																																																							
PP	0.14	0.14	0.03	86	0.75	0.72	0.23	104																																																																																																							
PV	0.14	0.14	0.03	86	0.75	0.72	0.23	104																																																																																																							
AN	0.14	0.14	0.03	86	0.75	0.72	0.23	104																																																																																																							
Δ	0.14	0.14	0.03	86	0.75	0.72	0.23	104																																																																																																							
PP	0.05	0.05	0.04	88	0.15	0.15	0.05	88																																																																																																							
PV	0.05	0.05	0.04	88	0.15	0.15	0.05	88																																																																																																							
AN	0.05	0.05	0.04	88	0.15	0.15	0.05	88																																																																																																							
Δ	0.05	0.05	0.04	88	0.15	0.15	0.05	88																																																																																																							


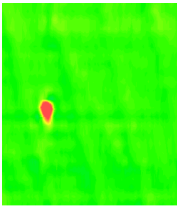
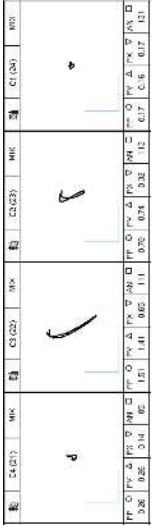

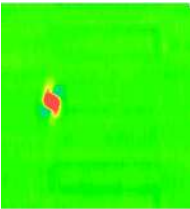
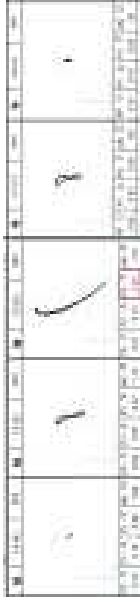

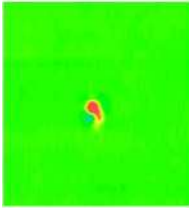
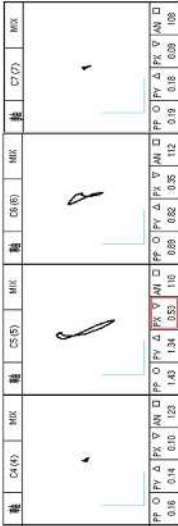
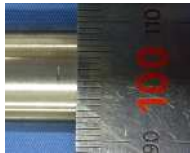
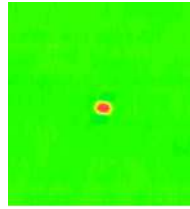


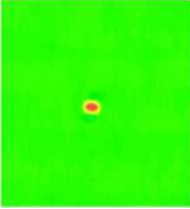

ECTモックアップ試験結果：減肉深さ60%

	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性																																																								
<p>実機 C X45Y5 周長(目視)：約4mm</p>	<p>振幅：1.40 V 位相：122°</p> 	 <table border="1" data-bbox="354 521 534 1021"> <tr> <td>箱 C1(1)</td> <td>MIX</td> <td>箱 C2(2)</td> <td>MIX</td> <td>箱 C3(3)</td> <td>MIX</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.26</td> <td>PV</td> <td>0.22</td> <td>AN</td> <td>0.20</td> </tr> <tr> <td>Δ</td> <td>1.40</td> <td>▽</td> <td>1.40</td> <td>△</td> <td>1.40</td> </tr> <tr> <td>PK</td> <td>0.76</td> <td>▽</td> <td>0.76</td> <td>△</td> <td>0.76</td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>1.22</td> <td>▽</td> <td>1.22</td> <td>△</td> <td>1.22</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.16</td> <td>▽</td> <td>0.16</td> <td>△</td> <td>0.16</td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>0.08</td> <td>▽</td> <td>0.08</td> <td>△</td> <td>0.08</td> </tr> </table>	箱 C1(1)	MIX	箱 C2(2)	MIX	箱 C3(3)	MIX	PP	0.26	PV	0.22	AN	0.20	Δ	1.40	▽	1.40	△	1.40	PK	0.76	▽	0.76	△	0.76	AN	1.22	▽	1.22	△	1.22	PP	0.16	▽	0.16	△	0.16	AN	0.08	▽	0.08	△	0.08	<p>—</p>														
箱 C1(1)	MIX	箱 C2(2)	MIX	箱 C3(3)	MIX																																																						
PP	0.26	PV	0.22	AN	0.20																																																						
Δ	1.40	▽	1.40	△	1.40																																																						
PK	0.76	▽	0.76	△	0.76																																																						
AN	1.22	▽	1.22	△	1.22																																																						
PP	0.16	▽	0.16	△	0.16																																																						
AN	0.08	▽	0.08	△	0.08																																																						
<p>モックアップ 蒲鉾型 (接触角度①0°)</p> 	<p>振幅：2.31 V 位相：113°</p> 		<p>×</p>																																																								
<p>モックアップ 三角型 (接触角度①15°)</p> 	<p>振幅：1.43 V 位相：110°</p> 	 <table border="1" data-bbox="805 510 981 1041"> <tr> <td>箱 C4(4)</td> <td>MIX</td> <td>箱 C5(5)</td> <td>MIX</td> <td>箱 C6(6)</td> <td>MIX</td> <td>箱 C7(7)</td> <td>MIX</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.18</td> <td>PV</td> <td>0.14</td> <td>AN</td> <td>0.13</td> <td>PP</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>Δ</td> <td>1.43</td> <td>▽</td> <td>1.43</td> <td>△</td> <td>1.43</td> <td>▽</td> <td>1.43</td> </tr> <tr> <td>PK</td> <td>0.82</td> <td>▽</td> <td>0.82</td> <td>△</td> <td>0.82</td> <td>▽</td> <td>0.82</td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>1.10</td> <td>▽</td> <td>1.10</td> <td>△</td> <td>1.10</td> <td>▽</td> <td>1.10</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.08</td> <td>▽</td> <td>0.08</td> <td>△</td> <td>0.08</td> <td>▽</td> <td>0.08</td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>0.02</td> <td>▽</td> <td>0.02</td> <td>△</td> <td>0.02</td> <td>▽</td> <td>0.02</td> </tr> </table>	箱 C4(4)	MIX	箱 C5(5)	MIX	箱 C6(6)	MIX	箱 C7(7)	MIX	PP	0.18	PV	0.14	AN	0.13	PP	0.15	Δ	1.43	▽	1.43	△	1.43	▽	1.43	PK	0.82	▽	0.82	△	0.82	▽	0.82	AN	1.10	▽	1.10	△	1.10	▽	1.10	PP	0.08	▽	0.08	△	0.08	▽	0.08	AN	0.02	▽	0.02	△	0.02	▽	0.02	<p>○</p>
箱 C4(4)	MIX	箱 C5(5)	MIX	箱 C6(6)	MIX	箱 C7(7)	MIX																																																				
PP	0.18	PV	0.14	AN	0.13	PP	0.15																																																				
Δ	1.43	▽	1.43	△	1.43	▽	1.43																																																				
PK	0.82	▽	0.82	△	0.82	▽	0.82																																																				
AN	1.10	▽	1.10	△	1.10	▽	1.10																																																				
PP	0.08	▽	0.08	△	0.08	▽	0.08																																																				
AN	0.02	▽	0.02	△	0.02	▽	0.02																																																				
<p>モックアップ 三角型 (接触角度①30°)</p> 	<p>振幅：0.92 V 位相：108°</p> 	 <table border="1" data-bbox="1021 521 1204 1021"> <tr> <td>箱 C5(5)</td> <td>MIX</td> <td>箱 C6(6)</td> <td>MIX</td> <td>箱 C7(7)</td> <td>MIX</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.15</td> <td>PV</td> <td>0.16</td> <td>AN</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>Δ</td> <td>0.92</td> <td>▽</td> <td>0.92</td> <td>△</td> <td>0.92</td> </tr> <tr> <td>PK</td> <td>0.52</td> <td>▽</td> <td>0.52</td> <td>△</td> <td>0.52</td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>0.88</td> <td>▽</td> <td>0.88</td> <td>△</td> <td>0.88</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.17</td> <td>▽</td> <td>0.17</td> <td>△</td> <td>0.17</td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>0.06</td> <td>▽</td> <td>0.06</td> <td>△</td> <td>0.06</td> </tr> </table>	箱 C5(5)	MIX	箱 C6(6)	MIX	箱 C7(7)	MIX	PP	0.15	PV	0.16	AN	0.15	Δ	0.92	▽	0.92	△	0.92	PK	0.52	▽	0.52	△	0.52	AN	0.88	▽	0.88	△	0.88	PP	0.17	▽	0.17	△	0.17	AN	0.06	▽	0.06	△	0.06	<p>△</p>														
箱 C5(5)	MIX	箱 C6(6)	MIX	箱 C7(7)	MIX																																																						
PP	0.15	PV	0.16	AN	0.15																																																						
Δ	0.92	▽	0.92	△	0.92																																																						
PK	0.52	▽	0.52	△	0.52																																																						
AN	0.88	▽	0.88	△	0.88																																																						
PP	0.17	▽	0.17	△	0.17																																																						
AN	0.06	▽	0.06	△	0.06																																																						
<p>モックアップ 三角型 (接触角度①45°)</p> 	<p>振幅：0.76 V 位相：104°</p> 	 <table border="1" data-bbox="1244 548 1428 996"> <tr> <td>箱 C5(5)</td> <td>MIX</td> <td>箱 C6(6)</td> <td>MIX</td> <td>箱 C7(7)</td> <td>MIX</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.14</td> <td>PV</td> <td>0.14</td> <td>AN</td> <td>0.14</td> </tr> <tr> <td>Δ</td> <td>0.76</td> <td>▽</td> <td>0.76</td> <td>△</td> <td>0.76</td> </tr> <tr> <td>PK</td> <td>0.45</td> <td>▽</td> <td>0.45</td> <td>△</td> <td>0.45</td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>0.82</td> <td>▽</td> <td>0.82</td> <td>△</td> <td>0.82</td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>0.15</td> <td>▽</td> <td>0.15</td> <td>△</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>0.05</td> <td>▽</td> <td>0.05</td> <td>△</td> <td>0.05</td> </tr> </table>	箱 C5(5)	MIX	箱 C6(6)	MIX	箱 C7(7)	MIX	PP	0.14	PV	0.14	AN	0.14	Δ	0.76	▽	0.76	△	0.76	PK	0.45	▽	0.45	△	0.45	AN	0.82	▽	0.82	△	0.82	PP	0.15	▽	0.15	△	0.15	AN	0.05	▽	0.05	△	0.05	<p>×</p>														
箱 C5(5)	MIX	箱 C6(6)	MIX	箱 C7(7)	MIX																																																						
PP	0.14	PV	0.14	AN	0.14																																																						
Δ	0.76	▽	0.76	△	0.76																																																						
PK	0.45	▽	0.45	△	0.45																																																						
AN	0.82	▽	0.82	△	0.82																																																						
PP	0.15	▽	0.15	△	0.15																																																						
AN	0.05	▽	0.05	△	0.05																																																						

ECTモックアップ試験結果：減肉深さ40%

	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性
<p>実機 C X91Y4 周長(目視)：約5mm</p>	<p>振幅：0.64 V 位相：91°</p> 		<p>—</p>
<p>モックアップ 蒲鉾型 (接触角度①0°)</p> 	<p>振幅：0.82 V 位相：103°</p> 		<p>△</p>
<p>モックアップ 三角型 (接触角度①15°)</p> 	<p>振幅：0.46 V 位相：100°</p> 		<p>○</p>
<p>モックアップ 三角型 (接触角度①30°)</p> 	<p>振幅：0.20 V 位相：87°</p> 		<p>×</p>
<p>モックアップ 三角型 (接触角度①45°)</p> 	<p>振幅：0.19 V 位相：85°</p> 		<p>×</p>

ECTモックアップ試験結果：減肉深さ60%

	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性
<p>実機 C X52Y9 周長(目視)：約8mm</p> 	<p>振幅：1.51V 位相：111°</p> 		<p>—</p>
<p>モックアップ 蒲鉾型 (接触角度①0°)</p> 	<p>振幅：2.31 V 位相：113°</p> 		<p>×</p>
<p>モックアップ 三角型 (接触角度①15°)</p> 	<p>振幅：1.43 V 位相：110°</p> 		<p>○</p>
<p>モックアップ 三角型 (接触角度①30°)</p> 	<p>振幅：0.92 V 位相：108°</p> 		<p>×</p>
<p>モックアップ 三角型 (接触角度①45°)</p> 	<p>振幅：0.76 V 位相：104°</p> 		<p>×</p>

ワークレートおよび摩耗体積の評価結果について

流動振動解析（添付資料－ 9 参照）により伝熱管摩耗のワークレート*¹および摩耗体積を計算した。また、E C Tモックアップ試験（添付資料－ 1 0－ 2 参照）にて実機減肉形状と整合することを確認した三角型の断面形状について、減肉形状と摩耗体積を評価した。これらの結果を表 1 に示す。

*¹ 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仕事率で、押付力と摺動速度の積で表現される。

表 1 ワークレート並びに減肉形状および摩耗体積の評価結果一覧

対象伝熱管 (E C T深さ)	形状・体積評価手法	減肉形状			ワーク レート	摩耗 体積
		深さ	幅	長さ		
A－S G : X 8 5, Y 2 (深さ 61%)	目視	－	約 1mm 以下	約 6mm	－	－
	E C Tモックアップ	60%	約 0.3mm	約 4mm	－	約 0.6mm ³
	流動振動解析	－	－	－	約 4mW	約 0.8mm ³
B－S G : X 9 2, Y 8 (深さ 51%)	目視	－	約 1mm	約 5mm	－	－
	E C Tモックアップ	50%	約 1.3mm	約 4mm	－	約 0.8mm ³
	流動振動解析	－	－	－	約 6mW	約 1.2mm ³
C－S G : X 4 5, Y 5 (深さ 63%)	目視	－	約 1mm 以下	約 4mm	－	－
	E C Tモックアップ	60%	約 0.3mm	約 4mm	－	約 0.6mm ³
	流動振動解析	－	－	－	約 3mW	約 0.7mm ³
C－S G : X 5 2, Y 9 (深さ 59%)	目視	－	約 1mm 以下	約 8mm	－	－
	E C Tモックアップ	60%	約 0.3mm	約 4mm	－	約 0.6mm ³
	流動振動解析	－	－	－	約 3mW	約 0.6mm ³
C－S G : X 9 1, Y 4 (深さ 42%)	目視	－	約 2mm 以下	約 5mm	－	－
	E C Tモックアップ	40%	約 0.6mm	約 3mm	－	約 0.3mm ³
	流動振動解析	－	－	－	約 3mW	約 0.6mm ³

上記の結果から、流動振動解析により今回の減肉量を再現するのに十分なワークレートおよび摩耗体積が得られることを確認した。また、E C Tモックアップ試験で得た摩耗体積と、流動振動解析で得た摩耗体積はほぼ一致することから、想定した異物形状に基づき推定した減肉メカニズムは、実験および理論の両面から妥当性が検証できたとと言える。

異物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異物による外面減肉事例)

国内外で報告されている異物による外面減肉事例を調査し、国内では3件、海外では多数の事例があることを確認した。

○国内：3件（～2019年の調査）

プラント	事象発生年	原因となった異物	備考
高浜3号機	2018年	ステンレス鋼等の金属片(推定)	法令報告対象外
美浜3号機	2000年	溶断作業で発生した2次生成物	法令報告対象
玄海1号機	1975年	鋼製巻尺	原子力施設情報公開ライブラリー(ニュージーア)より

○海外：[]件（2000年～2018年の調査） ※1

2000年～2018年の年別報告件数 ※1

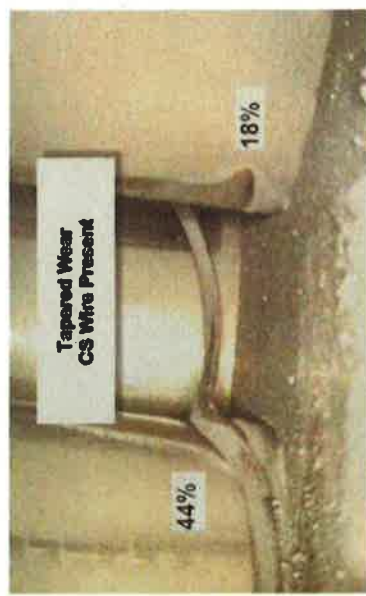
Palo Verde 3(米国)の例 ※2

米国の別のプラントの例 ※3

海外における異物減肉報告件数



ガスケット片による減肉発生(2013年)



ワイヤによる減肉発生

※1: 米国電力研究所(EPRI)の蒸気発生器劣化データベースより
 ※2: 米国原子力規制委員会(NRC)のホームページより
 ※3: EPRIレポート(1020631)より

異物により減肉した国内外事例調査 (複数SGで同時に異物による減肉が発生した海外事例)

複数SGの伝熱管外面が異物により減肉した海外事例を公開情報から調査した結果、2000年以降で少なくとも10件あることを確認した。

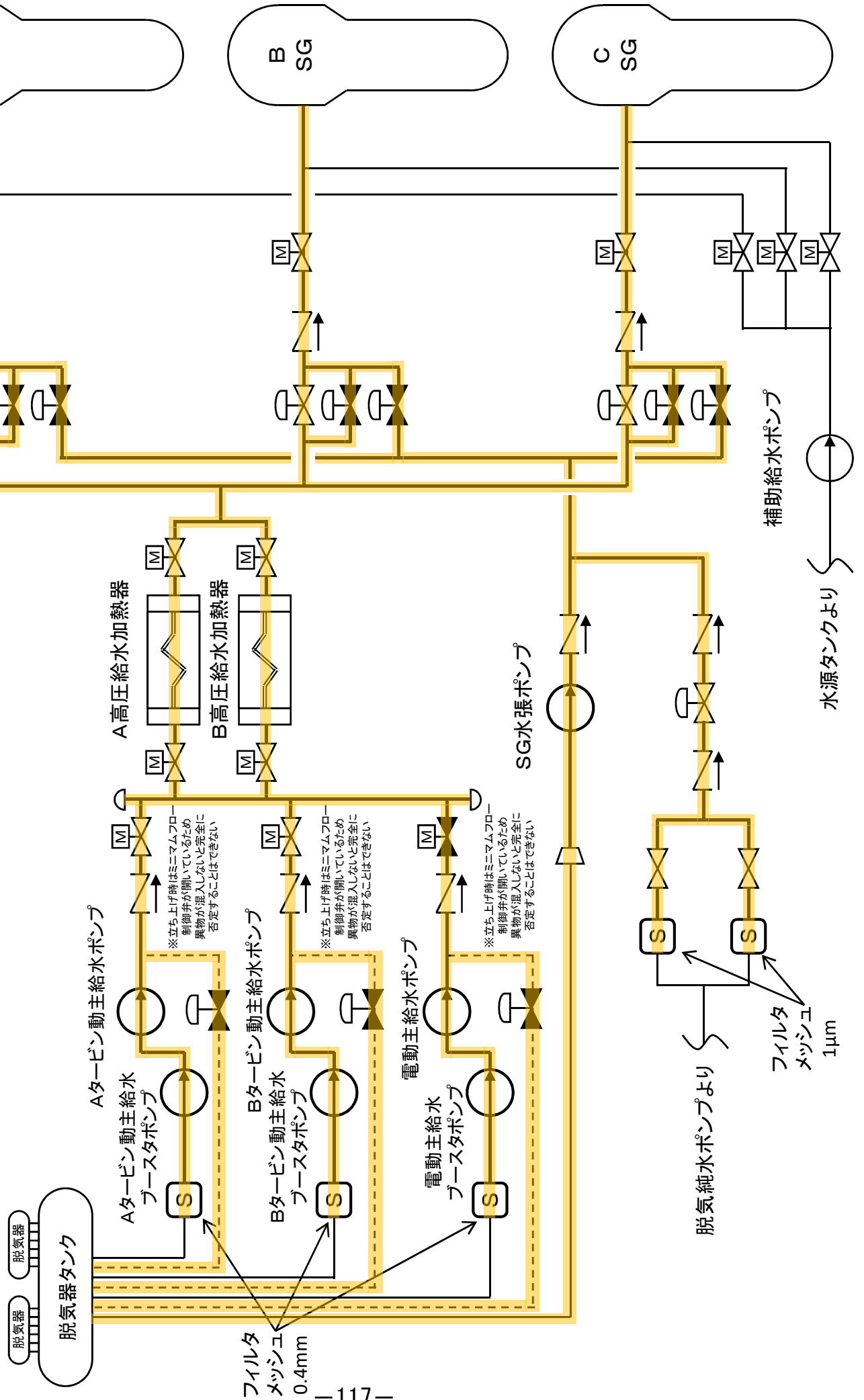
○海外事例一覧※

プラント	SG数	事象発生年	異物により減肉した伝熱管本数
V.C. Summer 1	3	2018年	A-SG : 2本、B-SG : 2本
Palisades	2	2014年	A-SG : 2本、B-SG : 1本
Salem 1	4	2013年	SG12 : 1本、SG13 : 3本、SG14 : 1本
Byron 2	4	2011年	A-SG : 1本、C-SG : 1本、D-SG : 2本
Palisades	2	2010年	A-SG : 2本、B-SG : 2本
Calvert Cliffs 2	2	2009年	SG21 : 2本、SG22 : 6本
Millstone 2	2	2008年	SG1 : 8本、SG2 : 2本
Robinson 2	3	2007年	B-SG : 5本、C-SG : 1本
Ano 2	2	2005年	A-SG : 8本、B-SG : 4本
Robinson 2	3	2004年	B-SG : 4本、C-SG : 2本

※ NRCのホームページ上に公開されているレポートより

異物混入調査系統（異物混入の可能性のある系統）

流体抗力 > 落下力となり、想定異物が流れに乗って移動する可能性のある範囲



SG器外の系統上の機器内部構成品で想定される異物との類似形状品

NO	機器名称	類似形状の有無	評 価	
1	主給水ブースタポンプ	無	ステンレス製の薄板(1mm未満)のワッシャを使用しているが円形であり、想定形状と異なる	×
2	タービン動主給水ポンプ	無	ステンレス製の薄板(1mm未満)のワッシャを使用しているが円形であり、想定形状と異なる	×
3	電動主給水ポンプ	無	ステンレス製の薄板(1mm未満)のワッシャを使用しているが円形であり、想定形状と異なる	×
4	蒸気発生器水張ポンプ	無	薄板状(1mm未満)の部品はない。	×
5	主給水ブースタポンプ入口ストレーナ	無	ステンレス製のストレーナを使用しているが外観目視点検の結果損傷は認められない。	×
6	脱気器タンク	無	薄板状(1mm未満)の部品はない。	×
7	第6 高圧給水加熱器	無	薄板状(1mm未満)の部品はない。	×
8	弁	無	薄板状(1mm未満)の部品はない。	×
9	配管	-	薄板状(1mm未満)の部品はない。	×
10	ガスケットパッキン(消耗品)	無	ステンレス製の金属フープ(0.2mm)はあるが、想定より薄肉であること、また、破損した場合系統外に漏えいが生じるが、現時点で漏えいがないことから該当しない。	×

開放機器への異物混入の可能性評価（高浜4号機第21回定検）

機器名称	サイズ (mm)	開口 方向 (上、横)	人の 立ち入り 有無	異物管理 (○：可能性なし △：否定できない)				評 価	判 定 △：否定できない ○：可能性なし
				開口部 養生	連続 監視 (封印)	服装 管理	最終 異物 確認		
A-タービン動主給水ブースタポンプ入口ストレーナ	Φ883	横	有	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△
B-タービン動主給水ブースタポンプ入口ストレーナ	Φ883	横	有	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△
B-タービン動主給水ポンプ	Φ462	横	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
電動主給水ブースタポンプ	Φ882	横	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
脱気純水フィルタ	Φ356	上	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4A-タービン動主給水ポンプ吐出圧力計(PI-5234A)元弁(FW-007AA)取り出し管台	Φ25	横	無	○	○	○	○	最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があるが、開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されていること、内部の手入れ作業がないことから今回想定した異物を混入させることはない。	○
4A-タービン動主給水ポンプ出入口(dPI-5218～5220)高压側元弁(FW-120A)取り出し管台	Φ25	横	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4A-タービン動主給水ポンプ入口流量計上流側元弁(FW-125A)取り出し管台	Φ25	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されている。最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があるが、流入方向がSG側ではないため今回想定した異物を混入させることはない。	○
4B-タービン動主給水ポンプミニマムフロー(FT-5238B)上流元弁(FW-152BA)取り出し管台	Φ15	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されている。最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があるが、流入方向がSG側ではないため今回想定した異物を混入させることはない。	○
4-電動主給水ブースタポンプ出入口(dPT5221～5223)高压側元弁(FW122)取り出し管台	Φ25	横	無	○	○	○	○	最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があるが、開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されていること、内部の手入れ作業がないことから今回想定した異物を混入させることはない。	○
4-電動主給水ポンプ出口流量計(FT-5227)元弁(FW-130)取り出し管台	Φ25	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されている。最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があるが、流入方向がSG側ではないため今回想定した異物を混入させることはない。	○
4-電動主給水ポンプミニマムフロー流量計(FT-5241)元弁(FW-158A)取り出し管台	Φ15	横	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4-電動主給水ブースタポンプ吸い込み圧力計(PI-5217)元弁(FW-212)取り出し管台	Φ15	横	無	○	○	○	○	最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があるが、開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されていること、内部の手入れ作業がないことから今回想定した異物を混入させることはない。	○
4A-タービン動主給水ポンプ出入口(dPI-5218～5220B)高压側元弁(FW-120B)取り出し管台	Φ25	横	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4-電動主給水ブースタポンプ吸い込みストレーナ(dPIA-5211)低圧側元弁(FW-118A)取り出し管台	Φ25	上	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4B-タービン動主給水ポンプミニマムフロー(FT-5238B)下流元弁(FW-153BA)取り出し管台	Φ15	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されている。最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があるが、流入方向がSG側ではないため今回想定した異物を混入させることはない。	○

機器名称	サイズ (mm)	開口 方向 (上、横)	人の 立ち入り 有無	異物管理 (○：可能性なし △：否定できない)				評 価	判 定 △：否定できない ○：可能性なし
				開口部 養生	連続 監視 (封印)	服装 管理	最終 異物 確認		
4B-タービン動主給水ポンプミニマムフロー(FT-5240B)下流元弁(FW-154BA)取り出し管台	Φ15	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されている。最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があるが、流入方向がSG側ではないため今回想定した異物を混入させることはない。	○
4-電動主給水ポンプミニマムフロー流量計(FT-5241)元弁(FW-159A)取り出し管台	Φ15	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されている。最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があるが、流入方向がSG側ではないため今回想定した異物を混入させることはない。	○
FCV-8782(脱気純水フィルタ出口流量調節弁)	Φ76 (3インチ)	横	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-520B(4B主給水隔離弁)	Φ406 (16インチ)	上	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-506A(4A主給水パイパス流量制御弁後弁)	Φ152 (6インチ)	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△
4VA-FW-506B(4B主給水パイパス流量制御弁後弁)	Φ152 (6インチ)	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△
4VA-FW-001A(4Aタービン動主給水ポンプ出口逆止弁)	Φ457 (18インチ)	上	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-519C(4C主給水逆止弁)	Φ406 (16インチ)	上	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-002(4電動主給水ポンプ出口逆止弁)	Φ457 (18インチ)	上	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-504C(4C主給水流量制御弁後弁)	Φ406 (16インチ)	上	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-150A(4Aタービン動主給水ポンプミニマムフロー制御弁後弁)	Φ304 (12インチ)	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△
4VA-FW-012B(4B6ヒータ入口給水逃し弁)	Φ25 (1インチ)	上	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△
4VA-FW-162(電動主給水ポンプウォーミング弁)	Φ38 (1 1/2インチ)	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△
4VA-FW-013Ba(4B6ヒータ出口給水圧力計元弁(PI-5250B))	Φ12.7 (1/2インチ)	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△
4VA-FW-123A(4Aタービン動主給水ポンプ入口流量計上流側元弁(FT-5224A))	Φ12.7 (1/2インチ)	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されている。最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があるが、流入方向がSG側ではないため今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-128(4電動主給水ポンプ入口流量計下流側元弁(FT-5225))	Φ12.7 (1/2インチ)	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されている。最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があるが、流入方向がSG側ではないため今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-155Aa(4Aタービン動主給水ミニマムフローFT-5240A下流側元弁)	Φ12.7 (1/2インチ)	横	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○

機器名称	サイズ (mm)	開口 方向 (上、横)	人の 立ち入り 有無	異物管理 (○：可能性なし △：否定できない)				評 価	判 定 △：否定できない ○：可能性なし
				開口部 養生	連続 監視 (封印)	服装 管理	最終 異物 確認		
4VA-FW-202A（4Aタービン動 主給水ブースタポンプ吸込圧力計元 弁（PI-5216A））	Φ12.7 (1/2インチ)	横	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-160（4主給水ポンプ ウォーミング元弁）	Φ51 (2インチ)	上	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-CW-299（4SG水張ポンプ 出口弁）	Φ127 (5インチ)	上	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-CW-401（4脱気水SG供給 弁）	Φ102 (4インチ)	上	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-024A（4A主給水ポン バランス逆止弁）	Φ51 (2インチ)	上	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-577A（4A主給水逆止 弁バランス弁）	Φ12.7 (1/2インチ)	上	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-577B（4B主給水逆止 弁バランス弁）	Φ12.7 (1/2インチ)	上	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-577C（4C主給水逆止 弁バランス弁）	Φ12.7 (1/2インチ)	上	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-578A（4A主給水隔離 弁バランス弁）	Φ12.7 (1/2インチ)	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△
4VA-FW-578B（4B主給水隔離 弁バランス弁）	Φ12.7 (1/2インチ)	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△
4VA-FW-578C（4C主給水隔離 弁バランス弁）	Φ12.7 (1/2インチ)	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△
4VA-FW-022AA（4A6ヒータ出 口給水ブロー元弁）	Φ25 (1インチ)	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されている。最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があるが、流入方向がSG側ではないため今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-022AB（4A6ヒータ出 口給水ブロー弁）	Φ25 (1インチ)	上	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-022BA（4B6ヒータ出 口給水ブロー元弁）	Φ25 (1インチ)	横	無	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されている。最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があるが、流入方向がSG側ではないため今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-022BB（4B6ヒータ出 口給水ブロー弁）	Φ25 (1インチ)	上	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
4VA-FW-019a（4FWP出口ヘッ ダブロー元弁）	Φ25	横	無	○	○	○	○	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されており、今回想定した異物を混入させることはない。	○
脱気器タンク	Φ500 (マンホール)	横	有	○	○	○	△	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△

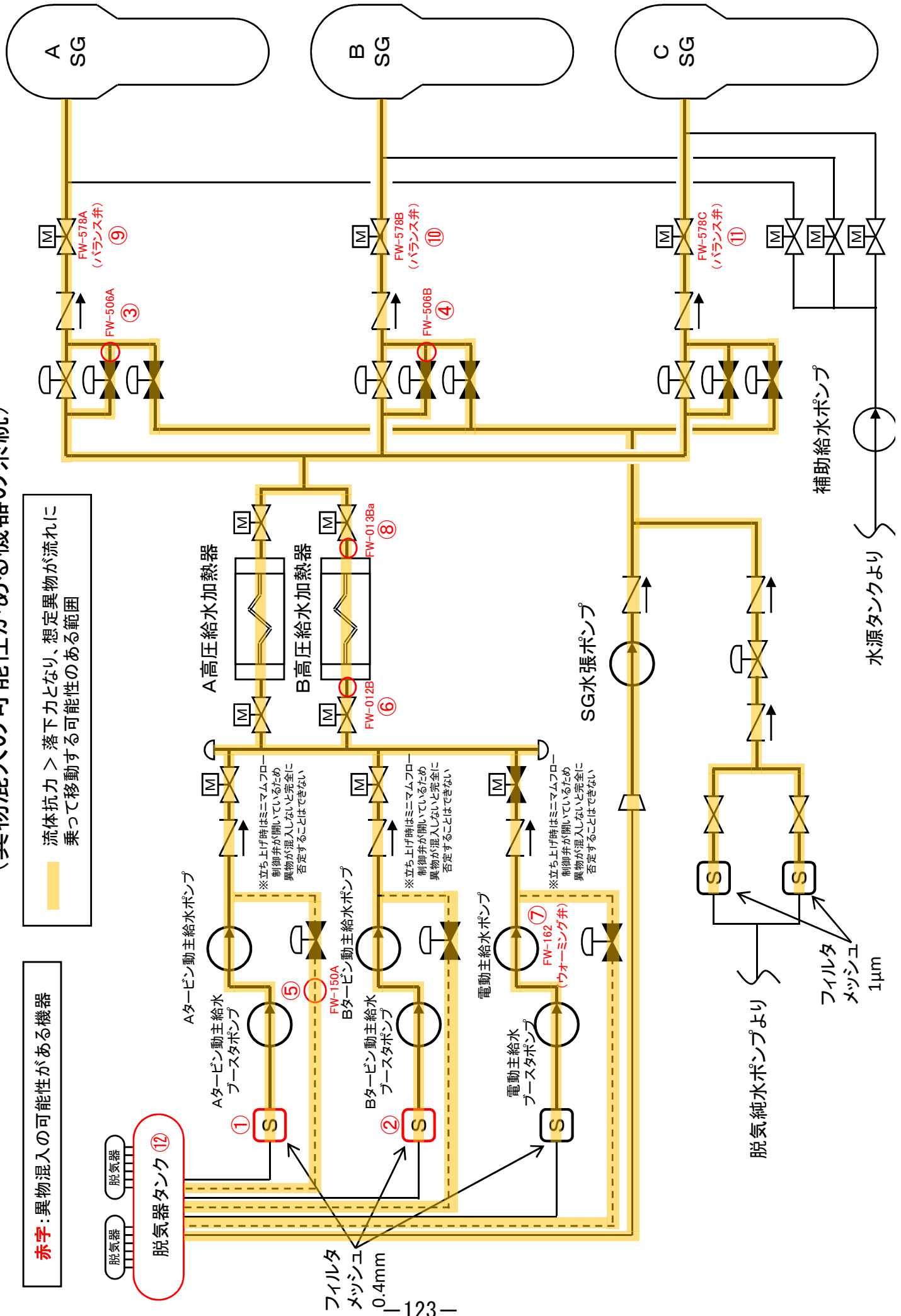
開放機器への異物混入の可能性評価 (異物混入の可能性が否定できない機器とその周辺作業)

No.	機器名称	作業内容	サイズ	開口方向 (上、横)	人の立ち入り有無	評価	判定	機器開放期間 (第21回定検)	当該作業で発生する可能性のある異物	周辺作業有無	周辺作業内容	周辺作業で発生する可能性のある異物
①	A-タービン動主給水ブースクランプ入口ストレーナ	ストレーナ、胴清掃	φ883	横	有	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直主管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△	7/17~7/20	なし	無	なし	周辺作業はないが、作業員が定検作業中のタービン建屋内を移動し当該ストレーナへ来ることからその際に付着する可能性は否定できない。
②	B-タービン動主給水ブースクランプ入口ストレーナ	ストレーナ、胴清掃	φ883	横	有	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直主管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△	7/17~7/20	なし	無	なし	周辺作業はないが、作業員が定検作業中のタービン建屋内を移動し当該ストレーナへ来ることからその際に付着する可能性は否定できない。
③	4VA-FW-506A (4A主給水パイパス流量制御弁後弁)	弁分解点検手入れ	φ152 (6インチ)	横	無	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直主管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△	6/7~6/28	なし	無	なし	周辺作業はないが、ワ工を再使用していること、作業員は別の箇所で見守っていることからその際に付着する可能性は否定できない。
④	4VA-FW-506B (4B主給水パイパス流量制御弁後弁)	弁分解点検手入れ	φ152 (6インチ)	横	無	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直主管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△	6/7~6/15	なし	無	なし	周辺作業はないが、ワ工を再使用していること、作業員は別の箇所で見守っていることからその際に付着する可能性は否定できない。
⑤	4VA-FW-150A (4Aタービン動主給水バルブミニマムフロ制御弁後弁)	弁分解点検手入れ	φ304 (1.2インチ)	横	無	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直主管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△	6/19~6/25	なし	有	・2次系配管取替 (MSDP吐出配管) (6/7~6/25)	配管取替に伴い、保温外装板くず、配管加工くずが発生している。
⑥	4VA-FW-012B (4Bヒータ入口給水配管)	弁分解点検手入れ	φ25 (1インチ)	上	無	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直主管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△	6/6~7/12	なし	有	・配管検査 (0063-2.3) (7/2) ・2次系配管取替 (第1MSDバルブ吐出管) (6/15~21)	配管取替に伴い、保温外装板くず、配管加工くずおよび配管検査に伴い保温外装板くずが発生している。(井本体を工場で手入れしておき現場で内部にワ工を使用することはない)
⑦	4VA-FW-162 (電動主給水ポンプウォーミング弁)	弁分解点検手入れ	φ38 (1.1/2インチ)	横	無	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直主管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△	6/26~6/29	なし	無	なし	周辺作業はないが、ワ工を再使用していること、作業員は別の箇所で見守っていることからその際に付着する可能性は否定できない。
⑧	4VA-FW-013Ba (4Bヒータ出口給水圧力計元弁 (PT-5250B))	弁分解点検手入れ	φ12.7 (1/2インチ)	横	無	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直主管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△	6/8~6/12	なし	無	なし	周辺作業はないが、ワ工を再使用していること、作業員は別の箇所で見守っていることからその際に付着する可能性は否定できない。
⑨	4VA-FW-578A (4A主給水隔離弁 (ワンパス弁))	弁分解点検手入れ	φ12.7 (1/2インチ)	横	無	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直主管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△	6/8	なし	無	なし	周辺作業はないが、ワ工を再使用していること、作業員は別の箇所で見守っていることからその際に付着する可能性は否定できない。
⑩	4VA-FW-578B (4B主給水隔離弁 (ワンパス弁))	弁分解点検手入れ	φ12.7 (1/2インチ)	横	無	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直主管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△	6/14	なし	無	なし	周辺作業はないが、ワ工を再使用していること、作業員は別の箇所で見守っていることからその際に付着する可能性は否定できない。
⑪	4VA-FW-578C (4C主給水隔離弁 (ワンパス弁))	弁分解点検手入れ	φ12.7 (1/2インチ)	横	無	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直主管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△	6/14	なし	無	なし	周辺作業はないが、ワ工を再使用していること、作業員は別の箇所で見守っていることからその際に付着する可能性は否定できない。
⑫	脱気器アンク	タンク内清掃、目視点検 (打頂式、変形、摩耗等)	φ500 (マンホール)	横	有	開口部養生から最終異物確認まで適宜実施されているが、最終確認時垂直主管部で目視確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は完全には否定できない。	△	6/5~7/14	なし	有	・2次系配管取替 (MSDP吐出配管) (6/7~6/25)、4VA-FW-150A (4Aタービン動主給水ポンプミニマムフロ制御弁後弁)	配管取替に伴い、保温外装板くず、配管加工くず、弁分解点検作業により保温外装板のくず発生している。

開放機器への異物混入可能性評価
(異物混入の可能性がある機器の系統)

赤字: 異物混入の可能性がある機器

流体抗力 > 落下力となり、想定異物が流れに乗って移動する可能性のある範囲



フィルタ
メッシュ
0.4mm

脱気純水ポンプより
フィルタ
メッシュ
1μm

異物混入の可能性検討 (2次系一般弁(垂直設置弁)分解点検作業方法)

<p>1. 準備</p> <ul style="list-style-type: none"> 床養生・周辺養生 ・作業場の4S 	<p>2. 分解</p> <ul style="list-style-type: none"> 弁箱シート養生、異物管理シート貼り付けを実施。分解後は直ちに弁箱のシート養生を実施するため弁箱内に異物を落下させる可能性はない。   <p>※3号機例</p>
<p>3. 手入れ</p> <p>ウエスは使用後再使用している場合があること、他の工具類と同じ工具袋内に保管し運搬されていること、さらに、周辺で別作業により端材が発生する可能性があることから、周辺が付着する可能性があり、作業前にウエスに付着物が無いことを確認しているものに確実に除去されなかった場合には開放作業時の開口部から混入した可能性は否定できない。</p>  <p>確認できないエリア</p>  <p>※3号機例</p>	<p>4. 組立・復旧</p> <ul style="list-style-type: none"> 弁箱内部および弁蓋側(弁体・弁棒含む)の異物確認を実施する(関電(定検管理員)立会) パイロットミラーにて上流側、下流側とも確認するが、垂直管に取り付けられた弁については、異物混入後落下した場合、最終異物確認時点では目視確認が困難な範囲となり、異物混入の可能性は完全には否定できない。 復旧時は作業責任者、品管責任者、定検管理員が異物混入防止の観点で連続監視しているため異物混入時は発見が可能である。

異物混入の可能性検討 (タービン動主給水ブースタポンプ入口ストレーナ作業状況)

タービン動主給水ブースタポンプ 入口ストレーナ作業方法

ストレーナ蓋を開放し、中のこし筒を引き抜くとタービン動主給水ポンプ吸い込み側の開口があるため、異物落下防止としてビニールシートにて養生を行う。

①ストレーナ開放時は、作業員が監視しているため、異物落下の可能性は低い

②作業員がストレーナ内部に入り異物落下防止用のビニールシートで養生を行うが、作業服、靴等に付着していた場合には、異物を落下させる可能性は否定できない。

③ストレーナ内部に養生が完了すれば、内部の点検手入れ、清掃を行う。養生シートにより作業服、靴等に付着した異物を落下させる可能性は低い。

作業完了後、養生シートを撤去し、異物確認を行うが、配管内部に落下した異物を確認することが困難な箇所があるため、異物残留を完全には否定できない。



①



②



③

[作業に伴う異物管理方法]

作業は、ストレーナ開放後一人が作業監視、一人が点検清掃作業を行う二人体制で実施する。

ストレーナ内部に入る前に作業に不要な物を持ち込まない、作業服、靴等に付着物がないことを本人が確認し、作業を開始する。

(本人が目視できない箇所に異物が付着している可能性は否定できない)

清掃作業中発見したスラッジ等は、都度監視人へ渡し、異物残留としないようにする。

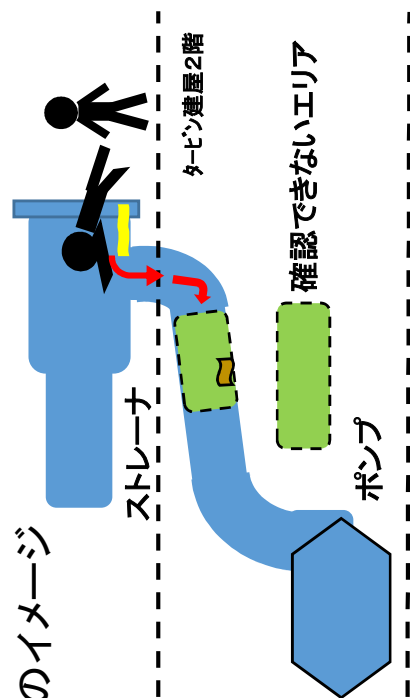
清掃作業終了後は、ストレーナ蓋を仮閉止し(ボルト止め)、異物混入防止を図る。

こし筒清掃作業完了後、作業服、靴等に付着物がないことを本人が確認し、ストレーナ内配管他の最終異物確認を行う。

こし筒を挿入する。(人の立入なし)

こし筒挿入後、作業服、靴等に付着物がないことを本人が確認し、こし筒内の最終異物確認を実施し、ストレーナ蓋を閉止する。

②のイメージ



異物混入の可能性検討 (脱気器タンク作業状況)

脱気器タンク作業方法

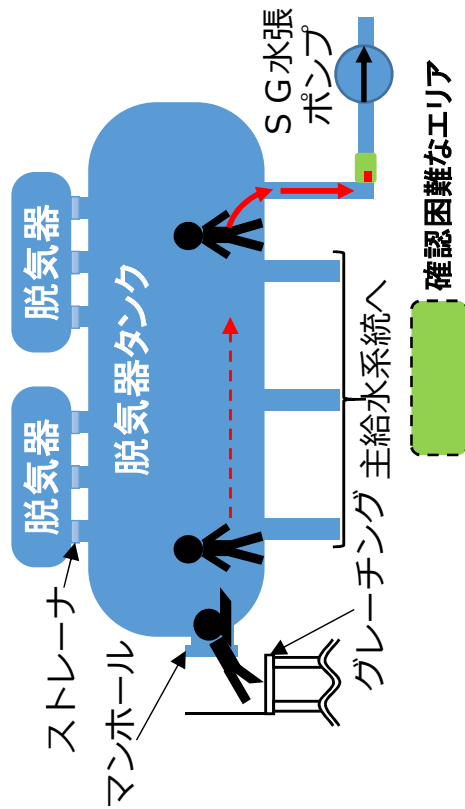
マンホール蓋を開放し、タンク内部に入り、内部には蒸気発生器水張ポンプ吸い込み側の開口があるため、異物落下防止として蓋にて養生する。

- ① 作業員がタンク内部養生を行うが、**作業服、靴等に付着していた場合には、異物を落下させる可能性は否定できない。**
- ② 養生が完了すればタンク内部の点検、清掃を行う。養生蓋により作業服、靴等に付着した異物を落下させる可能性は低い。
作業完了後、養生蓋を撤去し、脱気器タンク内部の異物確認を行うが、蒸気発生器水張ポンプ吸い込み配管内部に**落下した異物を確認することが困難な箇所があるため、異物残留を完全には否定できない。**

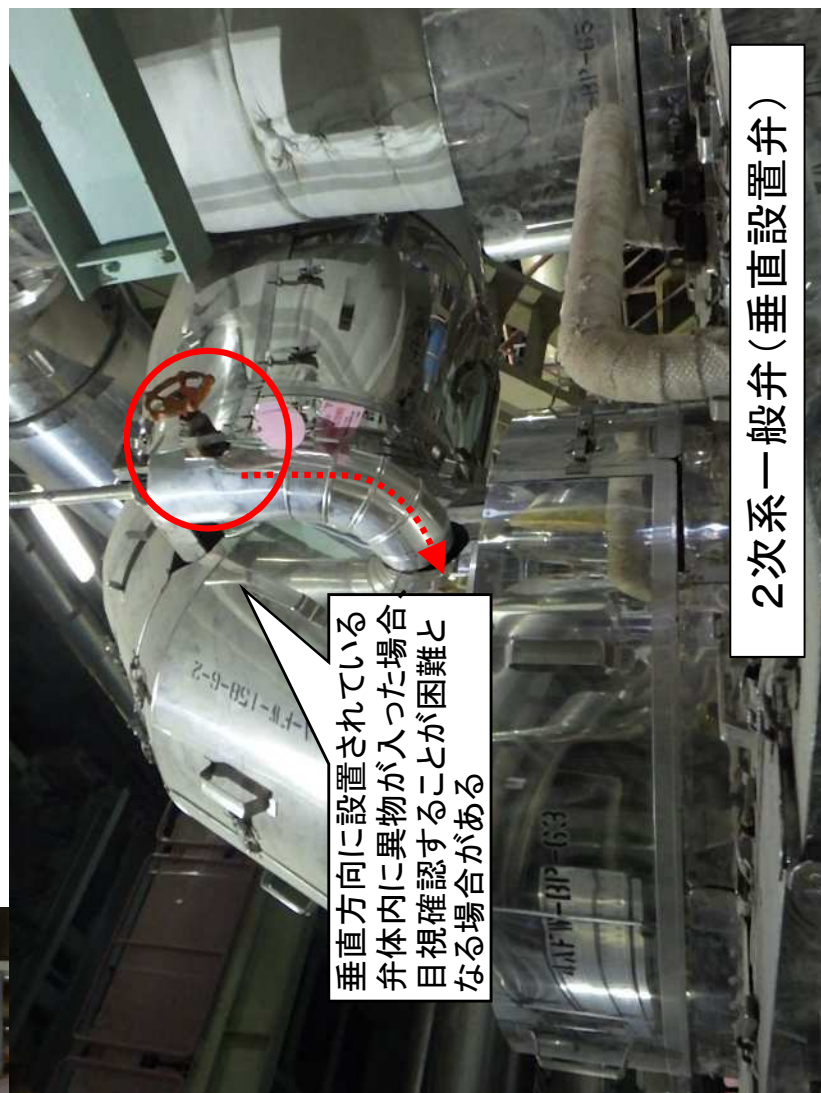
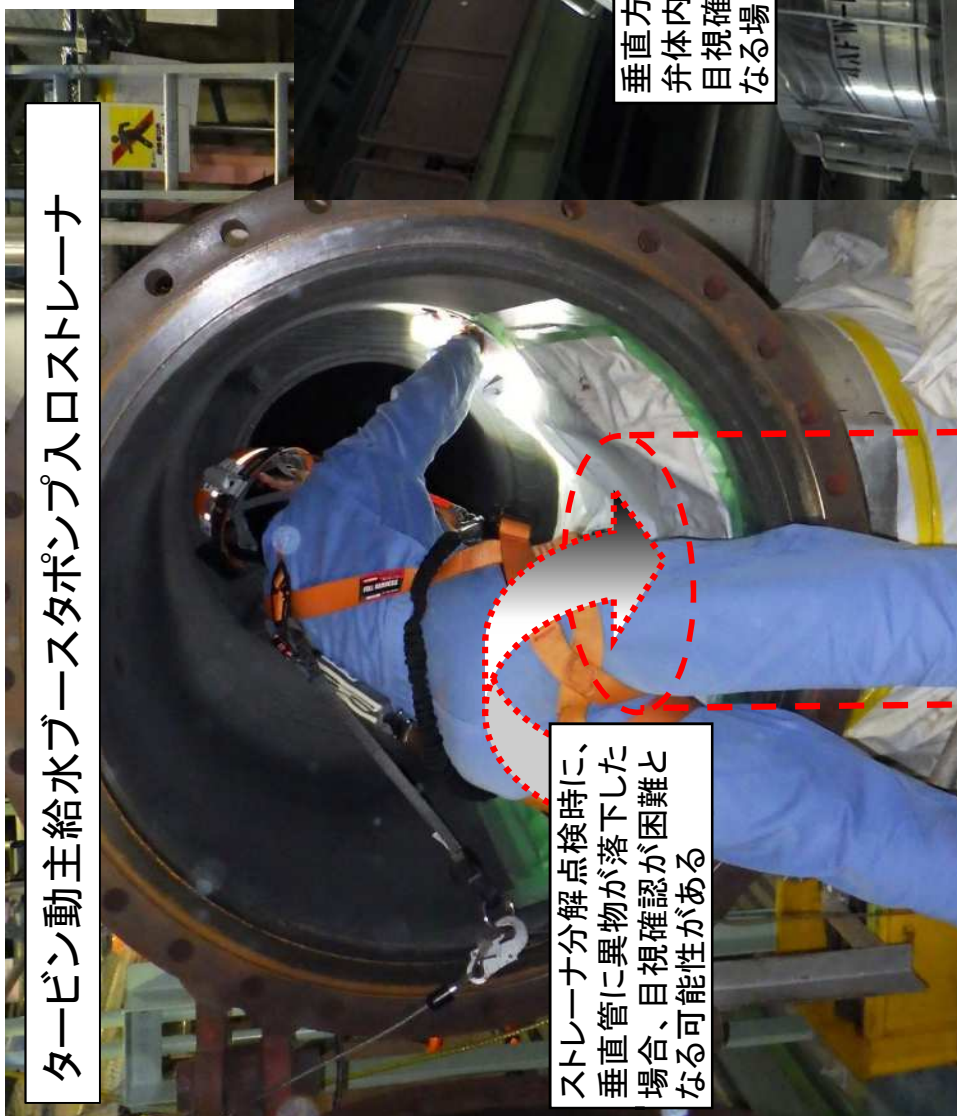
[作業に伴う異物管理方法]

- ・ 脱気器タンク内部作業時はマンホール部に監視人を配置し、常時監視する。
- ・ 脱気器タンク内への立ち入り者、持ち込み品は最小限とする。
- ・ 持ち込み物は確実に持ち出したことを確認する。
- ・ 脱気器タンク内部清掃等作業前には内部の養生を行う。
- ・ 脱気器タンクマンホール開放期間中は、マンホールを仮蓋にて仮閉止し、異物管理を行う。
- ・ すべての作業完了後内部の異物確認を行いマンホールを閉止する。
(作業服、靴等に異物が付着している可能性は否定できない)

作業イメージ



異物混入の可能性検討 (異物確認が困難となるケースの例)



異物として推定される資材等

資材等	現場における作業状況
<p data-bbox="750 1758 837 2038">保温材外装板の切れ端</p> 	<p data-bbox="359 705 630 1220">配管や機器に取り付ける保温材は、ステンレスやアルミの外装板で覆われている。配管や機器サポートの近傍においては、外装板形状やサイズの違いによる調整を行う必要がある。</p>   

異物として推定される資材等

資材等	現場における作業状況
<p data-bbox="646 1771 774 2033">配管識別表示等のバンドの切れ端</p> 	<p data-bbox="316 696 624 1218">配管識別表示等の現場表示には、金属製のバンドで配管等に固定されているものがある。このバンドには、ステンレス鋼の薄板が用いられている場合があり、取付け時には、必要に応じ、バンド長さを調整する。</p>   
<p data-bbox="1294 1778 1337 2024">配管の切削くず</p> 	<p data-bbox="1230 689 1401 1218">配管の取替えにおいては、既設配管の切断を行う必要がある。現地合わせの溶接部においては、開先加工を行う必要がある。</p> 

減肉した伝熱管の評価

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

1. 強度

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

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

その結果、破断圧力は28.17MPaであり、通常運転時および事故時の最大内外差圧17.31MPaに対し、十分な裕度があることを確認した。

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

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

<計算条件>

P_B : 局部減肉を有する伝熱管の破断圧力 (MPa)

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

t : 板厚= [] (最小板厚を考慮)

R : 平均半径=10.54mm

a : 減肉深さは [] (= [] × 0.63)

m : Folias のバルジ係数 (= (1+1.05 · c²/R/t)^{1/2})

2c: 減肉幅=5mm

表 減肉した伝熱管の強度評価結果

減肉深さ (%) *1	破断圧力 Pc (MPa)	事故時を包絡 する作用内外差圧 (MPa) *2	裕度
63	28.17	17.31	1.6

*1 最大減肉深さのC-SG (X45, Y5) で代表

*2 設計基準事故時および重大事故等時を包絡する内外差圧

2. 耐震性

減肉を有する伝熱管の耐震性について、次のとおり評価した。

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

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

^{*4} 高浜 3，4 号機既工認（新規制基準工認）補足説明資料「高浜発電所第 4 号機耐震性に関する説明書に係る補足説明資料 蒸気発生器伝熱管の評価について 関西電力株式会社 平成 27 年 9 月」

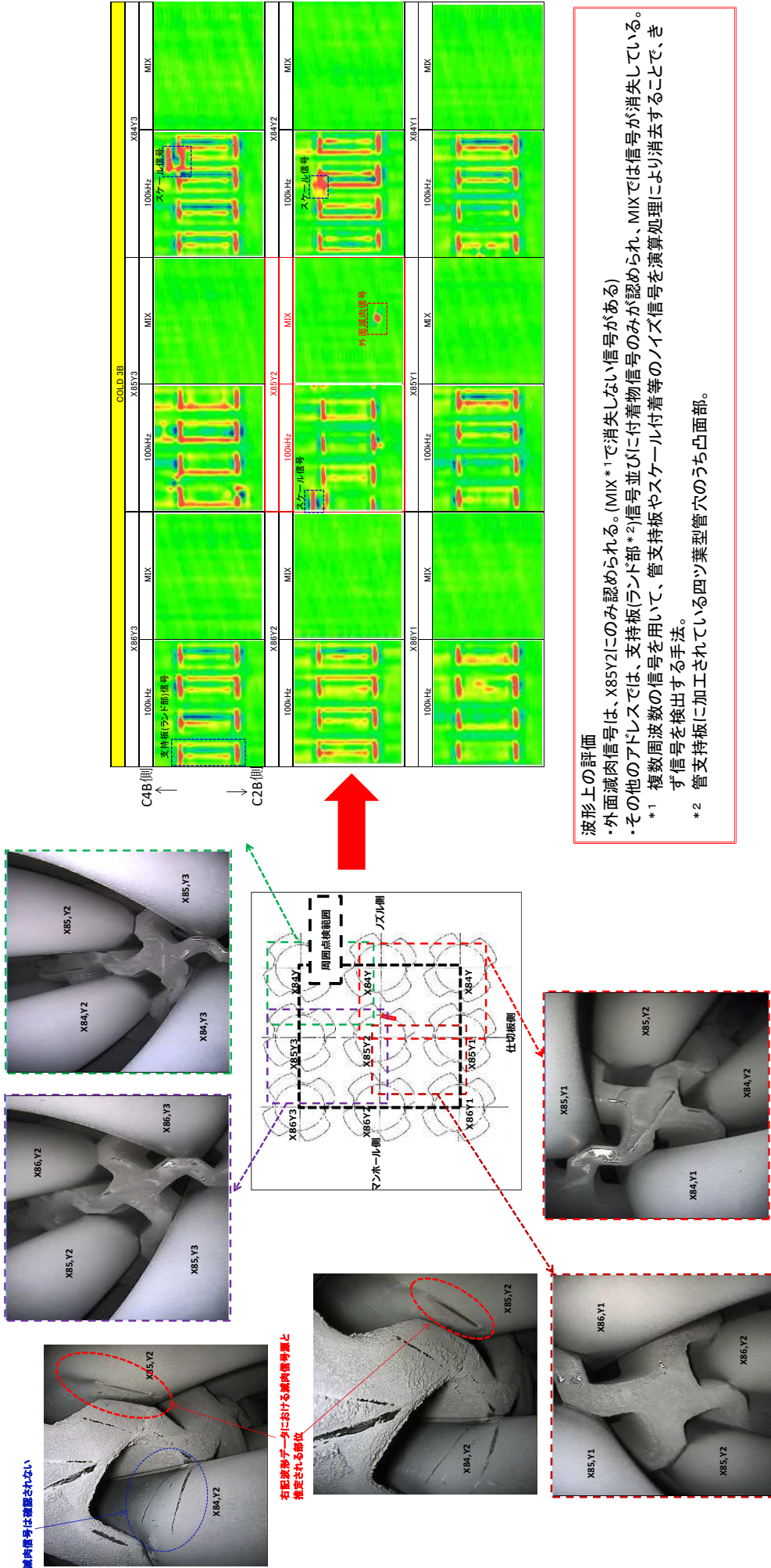
その結果、今回認められた減肉を考慮しても、発生応力および疲労累積係数に十分な裕度があること確認した。

表 減肉した伝熱管の耐震性評価結果

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

^{*5} 最大減肉深さの C-SG（X45，Y5）で代表

隣接伝熱管の健全性 (A-SG Cold Side) 側第三管支持板下面 伝熱管 X85, Y2



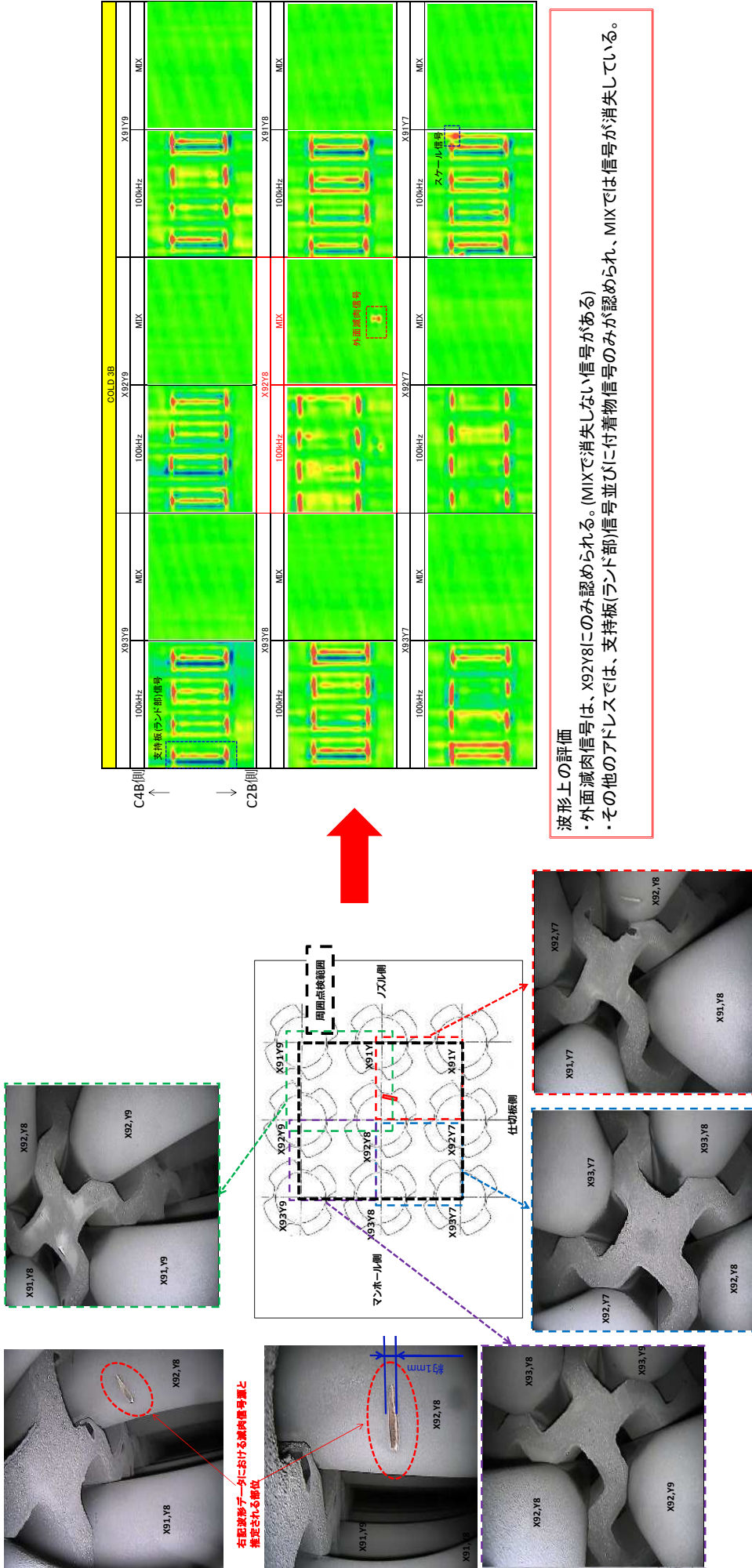
波形上の評価

- 外面減肉信号は、X85Y2にのみ認められる。(MIX *1 で消失しない信号がある)
- その他のアドレスでは、支持板(ランド部 *2)信号並びに付着物信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。
- *1 複数周波数の信号を用いて、管支持板やスケール付着等のノイズ信号を演算処理により除去すること、きず信号を検出する手法。
- *2 管支持板に加工されている四ツ葉型管穴のうち凸面部。

減肉信号は確認されない

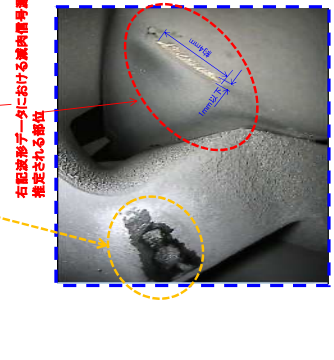
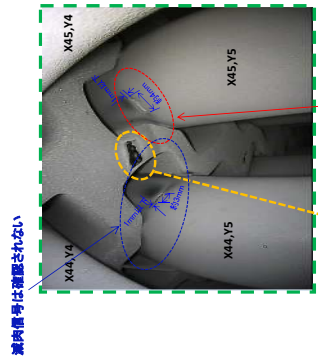
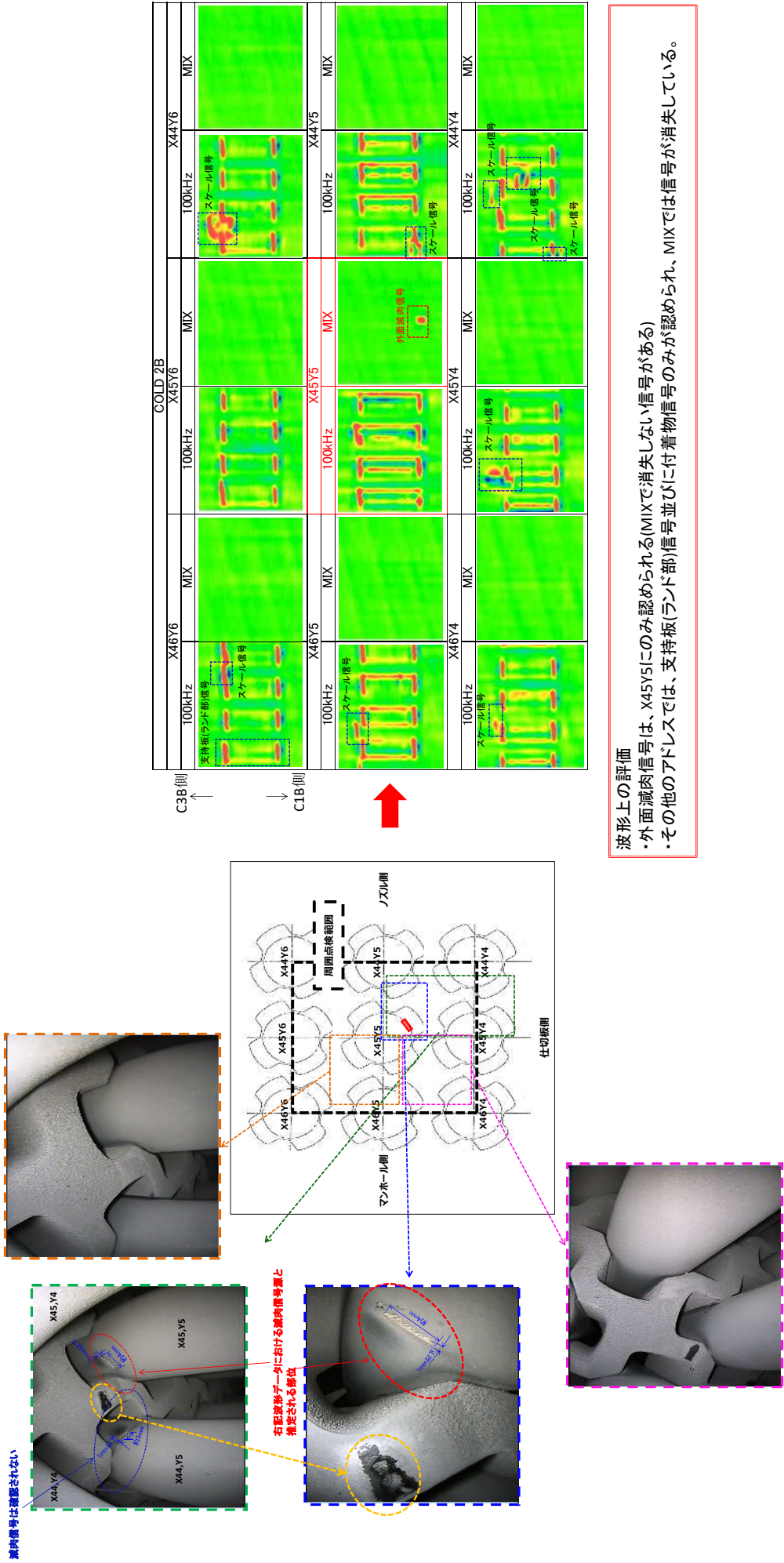
右記管格子一列における減肉信号源と推定される部位

隣接伝熱管の健全性 (B-SG Cold側第三管支持板下面 伝熱管 X92, Y8)

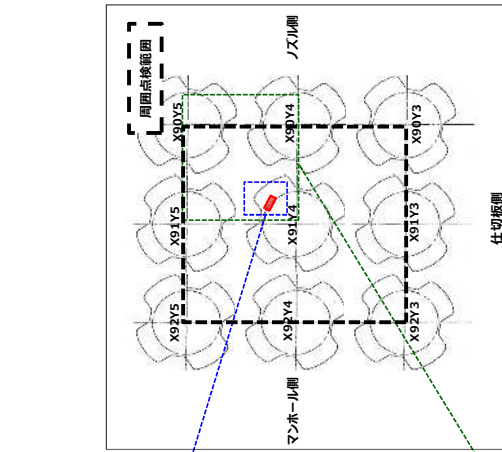
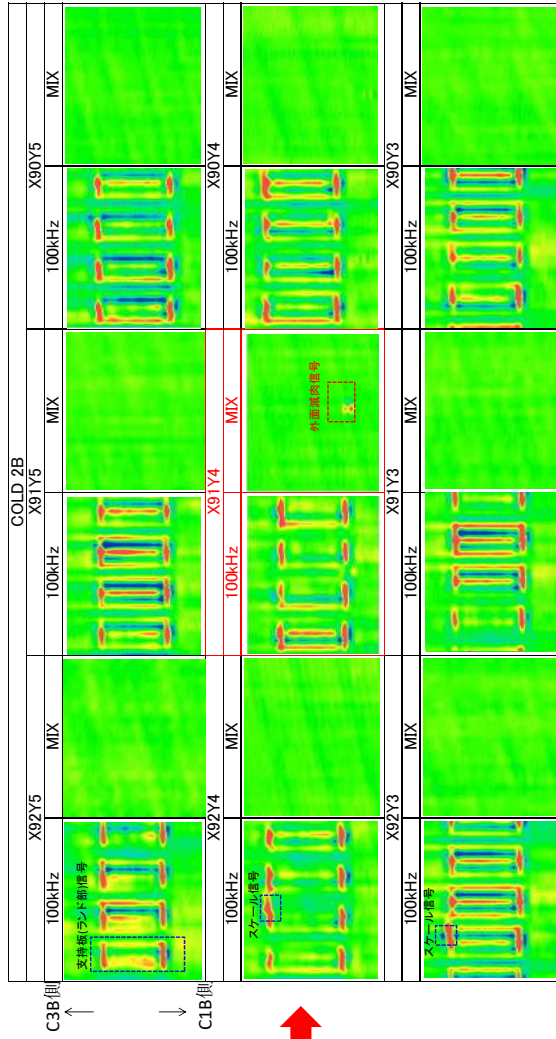


波形上の評価
 ・外面減肉信号は、X92Y8にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
 ・その他のアドレスでは、支持板(ランド部)信号並びに付着物信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。

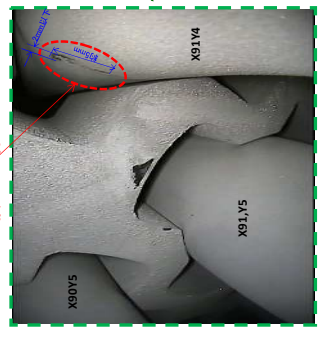
隣接伝熱管の健全性 (C-SG GOLD 2B 側第二管支持板下面 伝熱管 X45, Y5)



隣接伝熱管の健全性の健全性 (C-SG Cold 側第二管支持板下面 伝熱管 X91, Y4)



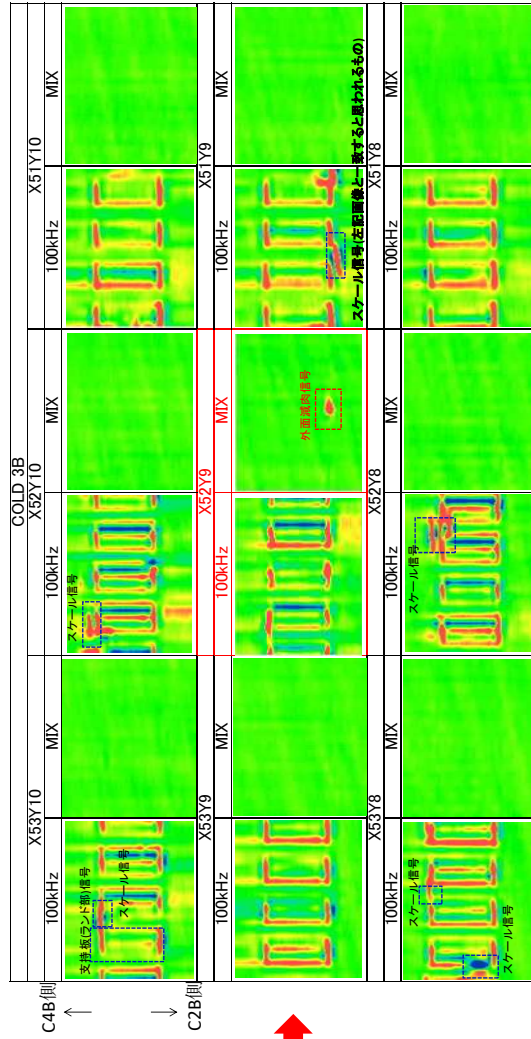
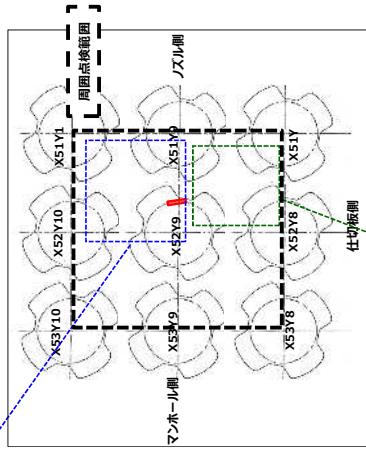
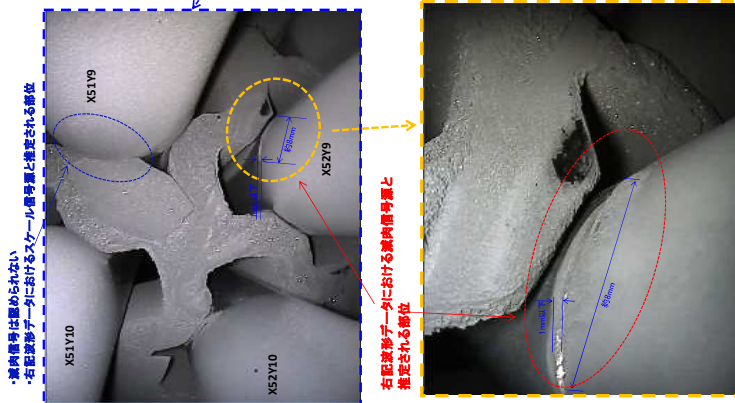
右図画像で一方における減肉箇所と推定される部位



波形上の評価

- ・外面減肉信号は、X91Y4にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
- ・その他のアドレスでは、支持板(ランド部)信号並びに付着物信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。

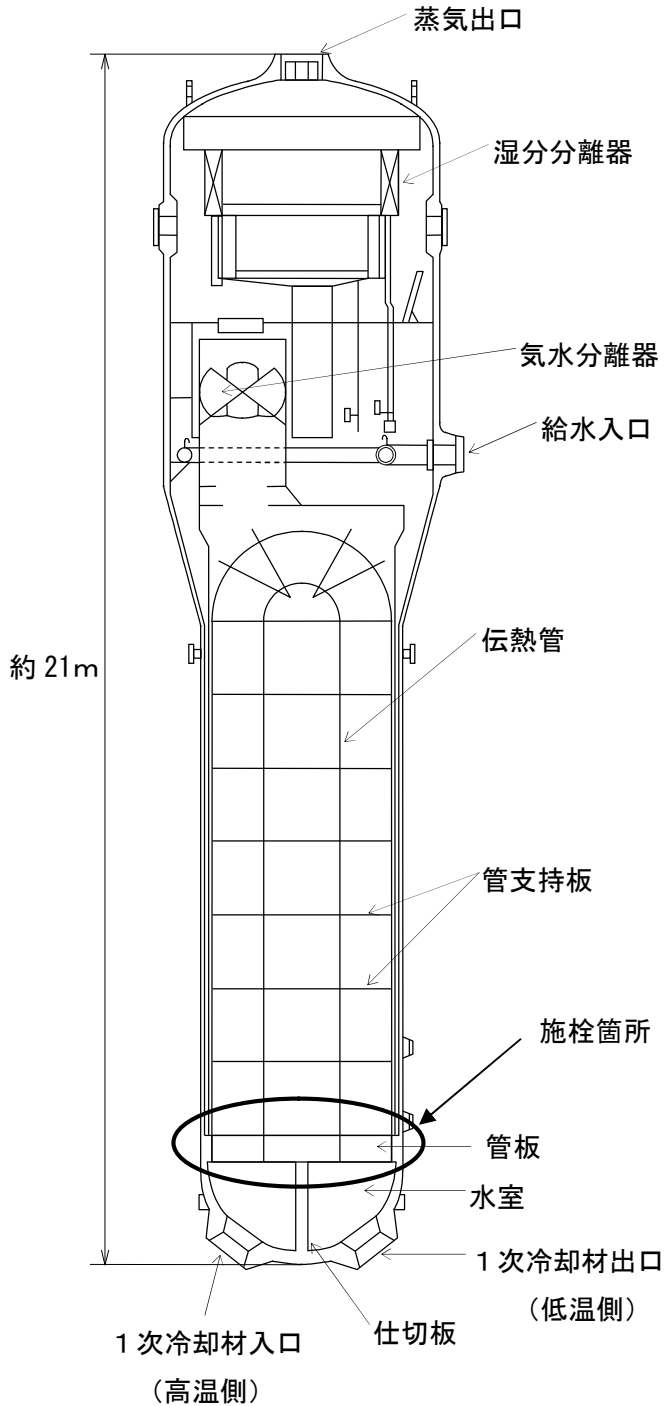
隣接伝熱管の健全性 (C-SG Cold側第三管支持板下面 伝熱管 X52, Y9)



波形上の評価

- ・外面減肉信号は、X52Y9にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
- ・X51Y9のスケール接触部とスケール信号が一致すると推定される。(ただしインテリジェCTでは周方向の絶対位置は特定できない)
- ・その他のアドレスでは、支持板(ランド部)信号並びに付着物信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。

SG伝熱管信号指示箇所補修概要図



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

機械式栓の取付要領

高浜4号機 SG伝熱管の補修来歴

	A-蒸気発生器 (3,382本)	B-蒸気発生器 (3,382本)	C-蒸気発生器 (3,382本)	合計 (10,146本)	施 栓 理 由 ()内は、実施した対策
第4回定検 (1990.2～5)	7	9	5	21	振止め金具部の摩耗減肉 (振止め金具の取替実施)
第9回定検 (1996.9～11)	10	0	0	10	管支持板洗浄装置の接触痕を確認
第11回定検 (1999.4～7)	0	0	4	4	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第12回定検 (2000.9～11)	4	1	6	11	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第13回定検 (2002.1～3)	1	0	0	1	高温側管板拡管部の応力腐食割れ (ショットピーニング施工)
第14回定検 (2003.4～6)	1	1	0	2	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第15回定検 (2004.8～10)	112	122	105	339	旧振止め金具部の微小な摩耗減肉 (新方式のECT採用)
第18回定検 (2008.8～12)	0	0	1	1	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第19回定検 (2010.2～5)	0	0	1	1	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第20回定検 (2011.7～2017.5)	0	1	1	2	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第21回定検 (2018.5～2018.9)	2	0	0	2	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第22回定検 (今回施栓予定)	1	1	3	5	外面からの摩耗減肉
累積施栓本数 [施栓率]	138 [4.1%]	135 [4.0%]	126 [3.7%]	399 [3.9%]	

○蒸気発生器1基あたりの伝熱管本数:3,382本

○定検回数下部に記載しているカッコ内の年月は、解列～並列

○安全解析施栓率は10%

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

減肉により施栓した伝熱管が隣接伝熱管へ及ぼす影響

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

1. 減肉の進展性

減肉により施栓した伝熱管（以下、「減肉伝熱管」という。）の減肉箇所近傍をカメラにより目視確認した結果、減肉箇所に異物は残留していないことを確認した。また、SG器内の異物調査により、管板上面、流量分配板上面、第一および第二管支持板上面の全ての範囲に異物が残留していないことを確認している。このため、減肉を発生させる異物は全て除去されており、減肉の進展性はない。

2. 強度

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

(評価内容)

国PJ「蒸気発生器信頼性実証試験」（（財）発電用熱機関協会、昭和50年度～昭和55年度）では、局部減肉を有する伝熱管の外圧強度評価手法を確立するため、外圧による高温圧壊試験を実施している。その試験結果から導出された外圧圧壊評価式を用いて、施栓後の外圧による圧壊圧力を算出した。

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

その結果、圧壊圧力は19.2MPaであり、通常運転時および事故時の最大外圧8.3MPaに対し、十分な裕度があることを確認した。

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

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

<今回の計算条件>

P_C : 局部減肉を有する伝熱管の圧壊圧力 (MPa)

S_y : インコネル 600 合金の設計降伏点=188.7MPa (@344°C)

t : 板厚= (最小板厚を考慮)

R : 平均半径=10.54mm

a : 減肉深さ = \square (= $\square \times 0.63$)
 2c : 減肉幅 = 5mm

表 減肉を有する施栓後の伝熱管の強度評価結果

減肉深さ (%) *1	圧壊圧力 Pc (MPa)	事故時を包絡 する作用外圧 (MPa) *2	裕度
63	19.2	8.3	2.3

*1 最大減肉深さのC-SG (X45, Y5) で代表

*2 設計基準事故時および重大事故等時を包絡する2次側圧力

3. 耐震性

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

(評価内容)

減肉を有する伝熱管の耐震性について、次のとおり評価した。

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

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

*⁴ 高浜 3, 4 号機既工認 (新規制基準工認) 補足説明資料「高浜発電所第 4 号機 耐震性に関する説明書に係る補足説明資料 蒸気発生器伝熱管の評価について 関西電力株式会社 平成 27 年 9 月」



図 伝熱管地震応答解析モデル

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

表 減肉を有する施栓後の伝熱管の耐震性評価結果

応力分類	発生応力* ⁵ および疲労累積係数	許容値	裕度
一次一般膜応力	195 MPa	334 MPa	1.7
膜応力+曲げ応力	198 MPa	434 MPa	2.1
一次+二次応力	202 MPa	492 MPa	2.4
疲労累積係数	0.033	1	-

*⁵ 最大減肉深さのC-SG (X45, Y5) で代表

4. 減肉した伝熱管の破断を想定した場合の影響

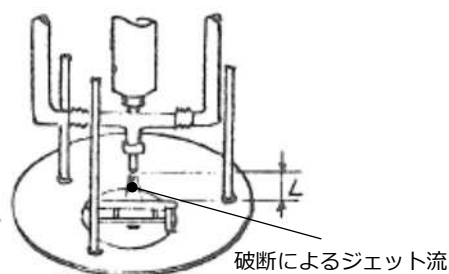
1. ～ 3. で述べた通り、減肉により施栓した伝熱管については、減肉の進展性、強度および耐震性の観点から破損しないことを確認しており、他の健全伝熱管へ影響を及ぼすことはないが、ここでは仮に減肉した施栓管が破断した場合の影響を検討する。

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

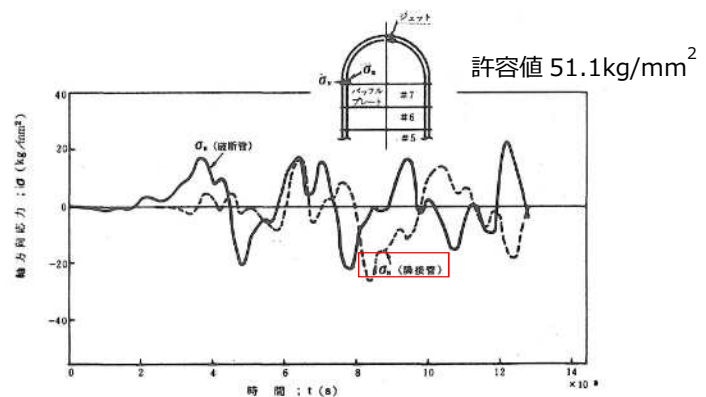
その検討において根拠とされた実験は「蒸気発生器信頼性実証試験」(昭和 50～55 年度：発電用熱機関協会) によるものであり、その中では、次の実験および解析により、伝熱管が破断しジェット反力によって隣接管へ衝突しても、隣接管に発生する応力は許容値以下であるため、有意な影響がないことを確認している。

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

実験：破断時のジェット反力を取得



解析：破断管の隣接管への衝突による発生応力を評価



SG器内への異物流入対策（1／2）

○**対策1**：SGへの異物流入の可能性がある機器の点検における異物混入防止対策の徹底を図り、作業手順書等に追記する。また、一作業一片づけを徹底し、異物の拡散を防止する。

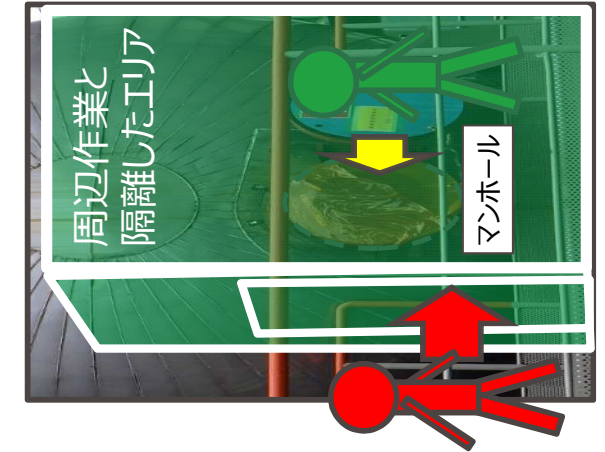
対策イメージ

機器の開口部に周辺作業と隔離した区画エリアを設けることで、異物の混入防止を図る。

・作業員の立ち入る機器の点検

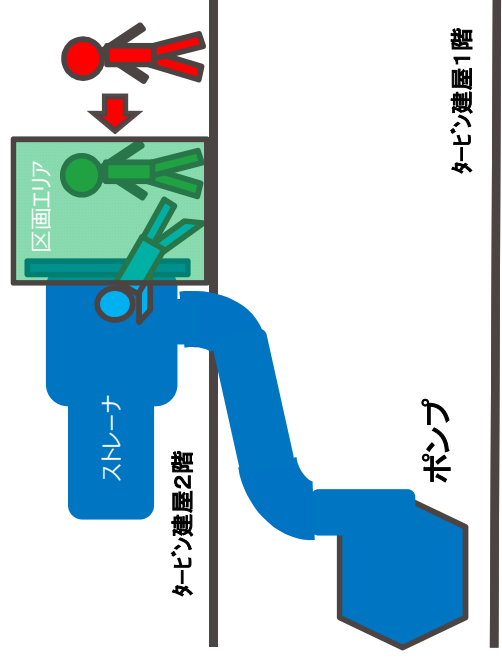
（脱気器タンクの例）

機器内部へ立ち入る直前に
器内作業用の作業服に着替え、
靴カバーを着用する。



（主給水ブースタポンプ入口ストレーナの例）

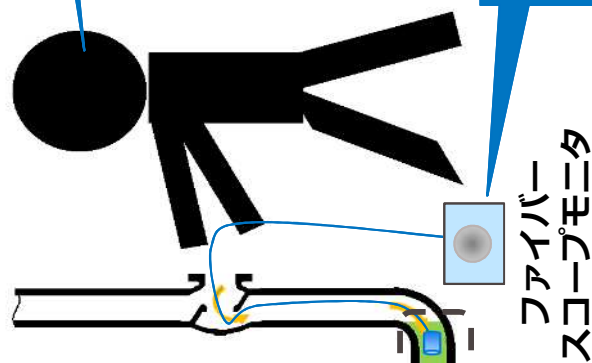
機器内部へ立ち入る直前に
器内作業用の作業服に着替え、
靴カバーを着用する。



SG器内への異物流入対策（2/2）

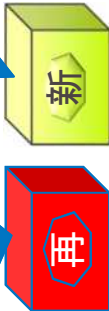
対策イメージ

- ・垂直配管に取り付けられている弁の点検



弁箱内部に使用する機材に異物の付着がないことを確実に確認する。

ウエス使用時は、新しいウエスに限るものとし、**新ウエス**は**再使用ウエス**と区別して管理する。



ウエス収納箱

最終異物確認時において直接目視にて異物の有無の確認ができない範囲については、ファイバースコープによる確認を行う。

直接目視確認ができない範囲

- 対策2**：当該作業における異物混入防止対策が作業手順書通りに実施されていることを確認するため、現場パトロールの実施等による管理強化を図る。
- 対策3**：SG器内の水張り、N₂噴射（バブリング）および水抜きを行った結果、スラッジ以外の異物は回収されなかったことから、今後の運転継続にあたり、器内に異物が残留していないことを最終確認した。

作業要領(手順)

NO.	作業手順	注意事項	確認		備考
			請負会社	技術指導員	
			責任	品管	
6	保温・板金取付け				
	<p>人的ミス防止</p> <p>3) 保温片付け、清掃を行う</p> <p>4) 外装板を取付ける</p>	<p>・現場で上下作業になってしまった場合には、監視人を配置し防護ネットを張る等の危険防止措置を確実に行うこと。</p> <p>・飛散防止の養生及び、仮置き標示等を確実に取外すこと。</p> <p>・作業場周辺の清掃を行い、グレーチング上の場合には階下のフロアも確認清掃を行うこと。</p> <p>・皮手袋等の保護具を使用すること。</p> <p>・外装材の一時仮置きの際は、保護シートを覆い被せ、指定の仮置き場所にて保管すること。</p> <p>・保温材、外装板、ビス等の散乱に注意すること。</p> <p>・電動工具使用時、巻き込まれ、挟まれの無い様取扱には十分注意すること。</p> <p>・屋外配管の外装板継ぎ目には雨水侵入防止用のコーキングを確実に実施すること。</p> <p>・電動ドライバーを使用する際は、落下防止ベルトを付けて使用すること。</p> <p>・ビス、外装板、保温層等が散乱しないよう充分注意し、作業で発生した外装板屑等は速やかに回収する。</p> <p>【回転工具使用時における注意事項】</p> <p>・保護具の装着が完全になされないか確認後、作業を行う。</p> <p>・可動部に人が近寄れないよう、保護カバー等の処置を行う。</p> <p>・処置が難しい場合は、可動部周辺に人が近寄らないよう人払い後、作業を行う。</p> <p>・手元・足元を確認し、転倒にも注意して作業を行う。</p> <p>・可動箇所には手を添えない。</p> <p>・両手で確実に持って使用する。</p> <p>・作業完了後は、電源等を抜いて確実に動作しない状態にしておく。</p>			

〔確認区分の表示〕

◇:METI立会項目

△:作業記録(含む検査記録)の審査

〔確認区分の表示〕

レ:異常なし

▲:異常あり

◎:作業中に同時立会い ○:作業完了後の立会い
 ◇:原子力安全基盤機構立会項目
 ◇・◇: については備考欄に記載する

/:該当なし

作業要領 (手順)

作業名:一般弁分解点検 (仕切弁)

No.	作業・手順	注意事項	確認		備考
			請負会社 作業	技術指導員	
A-7		<p>・有機溶材取扱についてはSDS等に記載の注意事項を遵守すること。</p>	○		
	◎(7) 締付け後のスキマ計測を行い、記録用紙に記入する。	<p>・ボンネット締付け前(0点タッチ時)にボンネット外周部より鋼尺等を入力しインロー外周部までの寸法が均等であることを確認すること。 ・6B未満は4点計測。 ・締付け後面タッチでない弁については鋼尺等でインロー外周部までの寸法が均等であることを確認すること。 ・脚立を使用する際は必ず支持者を設けること。 ・計測器は使用前に機器番号と校正日の確認を行うこと。 ・高所の弁を組込む際は、必ず要求性能墜落制止用器具を着用し、身を乗り出して作業を行わない様、作業床を確保して作業を行うこと。</p>	△		一般弁分解点検記録 (仕切弁)
	◎(8) スタッフィンングボックス内に異物が無いことを確認する。	<p>追記 ↑</p> <p>・異物確認をWチェックで行うこと。 ・最終異物確認において直接目視にて確認できない範囲については、ファイバースコープによる確認を行うこと。 ・挿入前の異物確認を行うこと。 ・一般弁グラント入替えに準ずること。 ・グラントパッキンの組合せ、サイズを確認して挿入を行うこと。</p>	◎		一般弁分解点検記録 (仕切弁)
	◎(9) グラントパッキンをスタッフィンングボックスに挿入する。(手順等については一般弁グラント入替えの各部寸法計測及びパッキン挿入の項に準ずる。)		△		
	◎(10) 弁開閉作動状態の確認及び弁名称板の確認を行い操作許可札作業中弁れの取外しを行う。	<p>・弁の開閉位置を作業前位置へ戻し、開閉状態を確認後記録用紙に記入すること。 ・タグと弁名称板の照合を行うこと。開度表示付きの弁については、全開、全閉位置を開度表示等にて確認する。(開度表示ピン等がある場合は、緩みがないこと等を確認する。)</p>	△		

[確認区分の表示] ◎:作業中に同時立会 ○:作業完了後の立会 △:作業記録(含検査記録)の審査 / :該当なしまたは不要
 令:規制当局立会項目 令:については備考欄に記載する。

[点検結果の表示] ✓:異常なし ▲:異常あり / :該当なし 作業手順番号欄の◎:代行作業責任者立会不可

関電プラント(株)高浜事業所

作業要領(手順)

作業名: 脱気器タンク

No.	作業手順	注意事項	確認				備考
			請負会社 作責	品管	技術 指導員	関電 (定検管理員)	
1	<p>系統隔離及びブロー完了確認</p> <p>a. 作業着手に伴い、隔離・ブローが完了していることを確認する。</p>	<p>・現地においてはブロー弁が『開』状態であることを確認すること。</p> <p>・残水情報がある場合には、安全作業指示書にて明記して残水処理をする旨を明確にして残水処理方法について客先と情報共有する。尚、数日間開放する場合は系統水(残水)が万が一流れきてても養生袋等が外れないよう粘着力の強いものを使用する。合わせて日々の養生確認を行う。漏水がある場合や漏水感知器が設置されている場合は、ホース等で適切に排水先へ導く。カブラを操作する際は元弁が閉止していることを確認する。</p>	<p>○</p>	<p>○</p>	<p>中央: 関電立会</p>		
2	<p>保温取外し及び隙間計測</p> <p>a. マンホール部の保温を取外す。</p> <p>b. 開放前のマンホールフランジの隙間計測を行う。</p>	<p>・保温端面で手、指等をきらないように保護手袋をすること。</p> <p>・保温材は損傷させない様に注意しながら取外すこと。</p> <p>・危険と思われる保温端面については、養生をしてから取外すこと。</p> <p>・測定点のマージングを行う。</p>	<p>／</p>	<p>／</p>	<p>・脱気器タンク隙間計測</p>		
3	<p>マンホール蓋開放</p> <p>a. マンホール蓋を取外す。</p>	<p>・合マークを記入すること。</p> <p>・ボルトは徐々に緩め、残圧、残水に注意すること。</p> <p>・M/Hのボルトは、ラック等にて管理保管し組立時にマージングを確認すること。</p> <p>・イージーオイルはねじ部に適正量塗布し、過剰塗布となつた際はウエスですぐにふき取ること。</p> <p>・周辺と隔離するため、マンホール入口部に区画エリアを設定し異物混入防止を図ること。</p> <p>・器内に立入る際は、立入り前に区画エリア内で作業服(煙管服)、靴を交換すると共に、異物管理責任者は作業服(煙管服)、靴等に異物が付着していないことを確認すること。</p> <p>・作業時に使用するウエスについては、工具類とは区別して保管(袋などに入れる等の区別)し、ウエスに付着した異物を機器内に持ち込まないよう細心の注意を払うとともに、機器内で使用するウエスは再利用せず、新ウエスを使用すること。</p>	<p>／</p>	<p>△</p>	<p>追記</p>		

5.17.02.3.034

作業手順書見直し(脱気器タンク)

[確認区分の表示] ○: 作業中に同時立会 △: 作業完了後の立会

[点検結果の表示] 〇: 異常なし ▲: 異常あり /: 該当なし

◆: 規制当局立会項目

◆: については備考欄に記載する。

作業要領(手順)

作業名: 脱気器タンク

No.	作業手順	注意事項	確認			備考
			請負会社 作責	技術 指導員	関電 (定検管理員)	
4	<p>各部手入れ</p> <p>a. 内部の養生を確実に行う。</p> <p>b. 内部の異物混入の有無等異常がないが確認する。</p> <p>c. 内部を清掃し、スラッジ等の回収を行う。</p> <p>d. 各部の手入れを行う。 (a)マンホール及びマンホール蓋シート面 (b)M/H蓋取付けボルト</p> <p>f. 脱気器水洗浄後、2次系純水にて器内の水洗を行う。</p> <p>◎ 内部の養生を撤去し、異物の無いことを確認する。</p>	<p>・「酸素欠乏等危険箇所作業時の注意事項」</p> <p>①器内立ち入り前に有資格者が酸素濃度、硫化水素濃度測定を行う。</p> <p>②器内立入時は酸素濃度18%以上、硫化水素濃度10ppm以下であること。</p> <p>③酸素欠乏危険作業場所において、作業者が酸素欠乏症等にかかって転落の恐れのあるときは、要求性能墜落制止用器具を着用する。</p> <p>④奥深い箇所の測定にあたっては、空気呼吸器、酸素呼吸器およびホース、マスクを装着して、内部に入ること。</p> <p>⑤測定する場所は、必ず1人以上の補助者による監視の元に測定しなければならない。</p> <p>⑥酸欠主任者は、濃度測定記録をマンホール付近の見やすい位置に掲示すること。</p> <p>⑦爆発、酸化等を防止する為換気することができない場合には、空気呼吸器等を使用させる。</p> <p>⑧測定箇所については、垂直方向、水平方向にそれぞれ3点以上、また酸素欠乏の侵入、または停滞するおそれのある箇所があるときは当該箇所、作業に伴い作業者が立入る箇所とする。</p> <p>⑨器内作業時は監視人を配置し、常時監視すること。」</p> <p>・立ち入り者、持ち込み品は最小限とすること。</p> <p>・グラインダー作業時は無理な姿勢での作業は避け、安定した姿勢で行うこと。</p> <p>・本体ブローラインの養生蓋を撤去すること。</p> <p>・唇、胸付近より上部はスクレーパーを下から上に向けて使用する事。</p> <p>・肩、胸付近より下部はスクレーパーを上から下に向けて使用する事。この際、スクレーパーの刃先の軌道上に身体を入れないこと。</p> <p>・スクレーパーの刃先を身体の反対側へ向けて使用すること。</p> <p>・作業中は保護メガネ(ヘルメットシート含む)を常時着用すること(基本ルーラーの徹底)スプレーノズルなどの噴射口を自分の顔へ向けないこと。スプレーノズルの方向確認は、顔から離れた位置で試し打ちにより行うこと。</p>	<p>請負会社 作責</p>	<p>技術 指導員</p>	<p>関電 (定検管理員)</p>	

[点検結果の表示] し:異常なし ▲:異常あり /:該当なし

◆ については備考欄に記載する。

[確認区分の表示] ◎:作業中に同時立会 ○:作業完了後の立会 △:作業記録(含検査記録)の審査 /:該当なしまたは不要

◆:規制当局立会項目

作業要領 (手順)

作業名: 脱気器タンク

No.	作業手順	注意事項	確認			備考
			請負会社 作責	技術 指導員	関電 (定検管理員)	
5	<p>◎ 各部点検</p> <p>「定期事業者検査要領」に基づき検査を実施する。 【判定基準】表面に機能・性能に影響を及ぼす恐れのあるき裂、打こん、変形及び摩耗がないこと。</p> <p>a. 各部の点検を行う。 (a)胴板 (b)鏡板 (c)マンホール蓋 (d)マンホール蓋</p> <p>追記 →</p>	<p>・周辺と隔離するため、マンホール入口部に区画エリアを設定し異物混入防止を図ること。 ・器内に立入る際は、立入り前に区画エリア内で作業服(煙管服)、靴を交換すると共に、異物管理責任者は作業服(煙管服)、靴等に異物が付着していないことを確認すること。 ・作業時に使用するウエスについては、工具類とは区別して保管(袋などに入れる等の区別)し、ウエスに付着した異物を機器内に持ち込まないよう細心の注意を払うとともに、機器内で使用するウエスは再利用せず、新ウエスを使用すること。</p> <p>追記 →</p>	<p>◎</p>	<p>現場: 関電立会</p> <p>・脱気器タンク内部点検記録</p>		

[確認区分の表示] ◎: 作業中に同時立会 ○: 作業完了後の立会 △: 作業記録(含検査記録)の審査 / 該当なしまたは不要 [点検結果の表示] レ: 異常なし ▲: 異常あり / 該当なし
 ◆ については備考欄に記載する。

作業要領 (手順)

作業名: 脱気器タンク

No.	作業手順	注意事項	確認			備考
			請負会社 作責	技術 指導員	関電 (定検管理員)	
6	<p>マンホール復旧</p> <p>a. 内部の点検を行い、異物のないことを確認する。</p> <p>b. パッキンをシート面に合わせてマンホール蓋を取り付け、ボルトを仮締めする。</p> <p>c. トルクレンチにて3回のステップに分けて隙間計測を行いながら平均に締付ける。 ※締付けトルク値 第1ステップ: 200N・m 第2ステップ: 350N・m 第3ステップ: 490N・m</p> <p style="text-align: center;">人的ミス防止</p> <p style="text-align: center;">↑</p> <p style="text-align: center;">追記</p> <p style="text-align: center;">↑</p>	<p>マンホール及びマンホール蓋シート面を洗淨液にて手入れを行う。</p> <p>判定基準: パッキン圧縮量1.0~1.2mm</p> <p>パッキン仕様を再確認する。</p> <p>洗淨液の手入れ後マンホール及びマンホール蓋シートに異物が付着していないことを確認する。</p> <p>カスケットパッキン取付前にシート面(本体側及び蓋側)及びパッキンに異物が付着していないことを確認する。</p> <p>カスケットパッキンを仮置きする際は、仮置き場をシート等で養生し、異物管理に努めること。</p> <p>パッキンには焼付防止剤を均一に塗布する。</p> <p>締付けは対角に行うこと。</p> <p>トルク設定値を必ず確認すること。</p> <p>隙間計測値は最大と最小の差が0.5mm以内であること。</p> <p>添付マンホール・フランジ部閉止フロアチャートに基づき締付けを行うこと。</p> <p>フランジ等シート面に異常がないこと。</p> <p>ジョッキボルトが弛んでいる事を確認すること。(3mm以上)</p> <p>No. 4各部手入れ注意事項欄の「酸素欠乏等危険箇所作業時の注意事項」に準じて作業を行う。</p> <p>立ち入り者、持ち込み品は最小限とすること。</p> <p>パッキンが正常に取り付けられていることを確認する。</p> <p>周辺と隔離するため、マンホール入口部に区画エリアを設定し異物混入防止を図ること。</p> <p>器内に立入る際は、立入り前に区画エリア内で作業服(煙管服)、靴を交換すると共に、異物管理責任者は作業服(煙管服)、靴等に異物が付着していないことを確認すること。</p> <p>作業時に使用するウエスについては、工具類とは区別して保管(袋など)に入れる等の区別し、ウエスに付着した異物を機器内に持ち込まないよう細心の注意を払うとともに、機器内で使用するウエスは再利用せず、新ウエスを使用すること。</p>	◎			・脱気器タンク 隙間計測記録
7	<p>基礎ボルト点検</p> <p>a. テストハンマにて緩み等の異常が無いか点検する。</p>	<p>手を叩かないように注意すること。</p>	/		△	・脱気器タンク 本体固定ボルト点検記録

[確認区分の表示] ◎: 作業中に同時立会 ○: 作業完了後の立会 △: 作業記録(含検査記録)の審査 /: 該当なしまたは不要 [点検結果の表示] し: 異常なし ▲: 異常あり /: 該当なし

◆: 規制当局立会項目

◆: については備考欄に記載する。

作業要領(手順)

作業名: 脱気器タンク

No.	作業手順	注意事項	確認			備考
			請負会社 作責	技術 指導員	関電 (定検管理員)	
8	<p>塗装剥離部修繕</p> <p>a. M/H等の塗装剥離部について塗裝修繕を行う。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・溶剤に適した防毒マスクを着用する。 ・塗料は耐熱性とし修繕前と同等品以上のものである。 ・有機溶剤作業主任者を配置し、保護具を確実に使用すること。 ・あらかじめ作業方法、順序を作業員に周知させること。 ・溶剤名を確認する。 ・周囲で火気作業のしていないことを確認し、している場合は調整を行うこと。 	/	/	有機溶剤(塗装・洗浄)作業 防火管理要領	
9	<p>通水時点検</p> <p>a. 系統復旧時にマンホール部等から、漏えいがないか目視点検を行う。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・漏えい等の異常があれば処置すると共に担当者に連絡すること。 	/	◎	現場: 関電立会	
10	<p>真空上昇試験時点検</p> <p>a. マンホール部等から漏えい及び煙にて吸込みがないか目視点検を行う。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・漏えい等の異常があれば処置すると共に担当者に連絡すること。 	/	◎	現場: 関電立会	
11	<p>負荷上昇時点検</p> <p>a. 各負荷上昇M/H部等からの漏えいがないか点検する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・高温注意表示を行うこと。 ・機器の状態を確認するとともに皮手袋を着用し周辺に十分注意する。 	/	◎	現場: 関電立会	
12	<p>保温復旧</p> <p>a. マンホール部に保温を取付ける。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・保温端面で手、指等をきらないように保護手袋をすること。 ・プラントは運転中であるため、周辺機器に注意して取付けること。 ・高温箇所では火傷のないよう十分注意すること。 	/	/		

[確認区分の表示] ◎: 作業中に同時立会 ○: 作業完了後の立会 △: 作業記録(含検査記録)の審査 /: 該当なし または 不要 [点検結果の表示] し: 異常なし ▲: 異常あり /: 該当なし
 ◆: 規制当局立会項目 ◆: については備考欄に記載する。

異物混入防止対策の考え方

○今回の対策により、前回の高浜3号機での対策に加え、ハード対策を充実することで、異物混入防止を確実に実施していく。さらに、当社による現場パトロール等により、異物混入防止対策が計画通り実施できていることを確認することによって管理強化を図る。

○また、本対策を他サイト（美浜、大飯）にも水平展開していくとともに、今後も、PDCA※により改善への取り組みを継続していく。

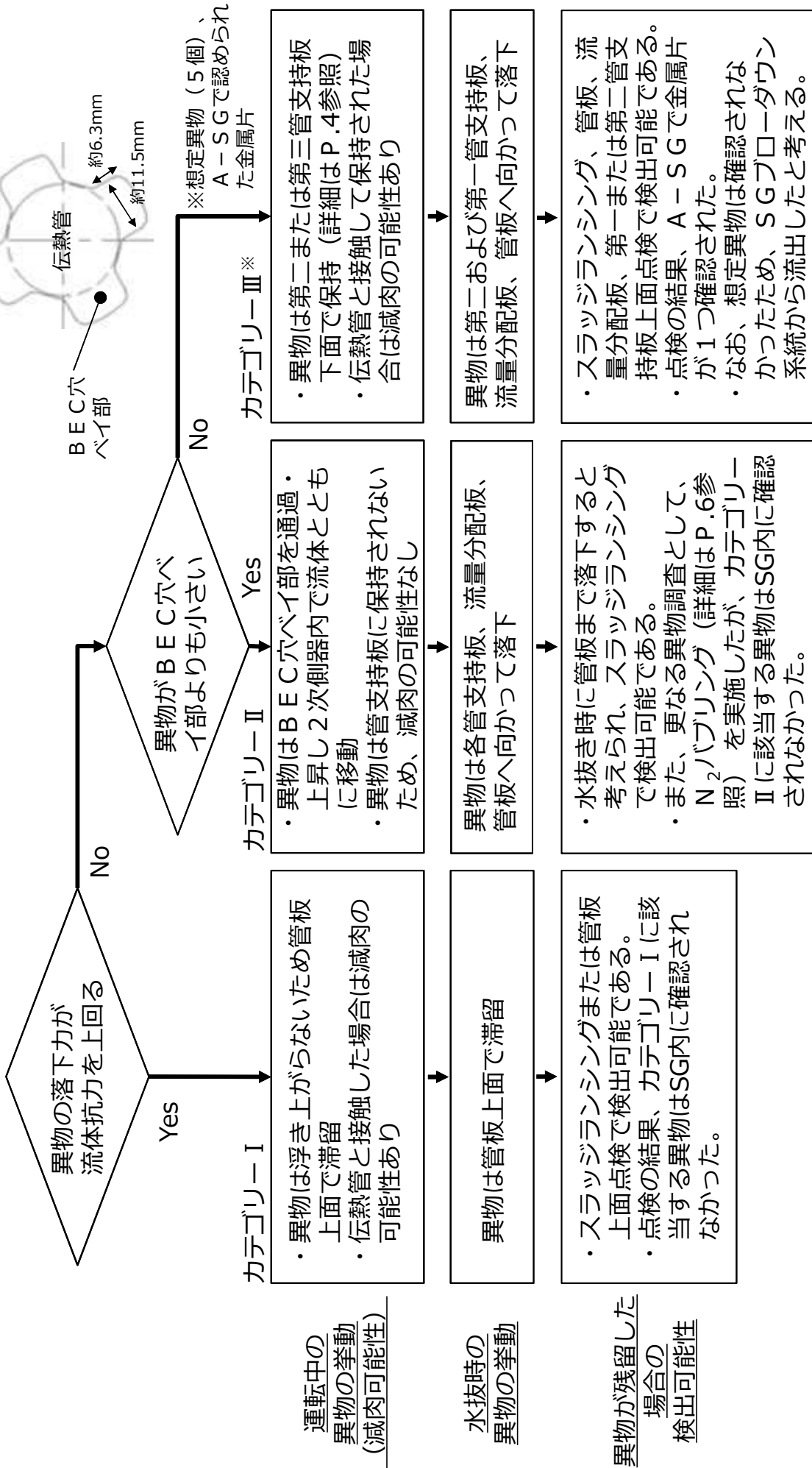
○なお、今回の定期検査の立ち上げにあたり、開放点検を実施した脱気器タンク、ストレーナ、弁についてファイバースコープによる異物確認を行う。

※Plan（計画）、Do（実施）、Check（評価）、Act（改善）

	前回（高浜3号機第23回定検）対策	今回（高浜4号機第22回定検）対策
機器立入対策	<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"> 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。 <u>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。</u> <u>開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。</u>
垂直配管取付弁	<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。 	<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。 <u>最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、ファイバースコープで確認する。</u> <u>ウエスは、新ウエスを使用する。</u> <u>新ウエスは再使用ウエスと区別して管理する。</u>
その他		<ul style="list-style-type: none"> <u>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。</u> <u>異物混入防止対策が作業手順書通りに実施されていることを、現場パトロール等で管理強化する。</u>

異物の器内挙動 (異物残留について) 1 / 3

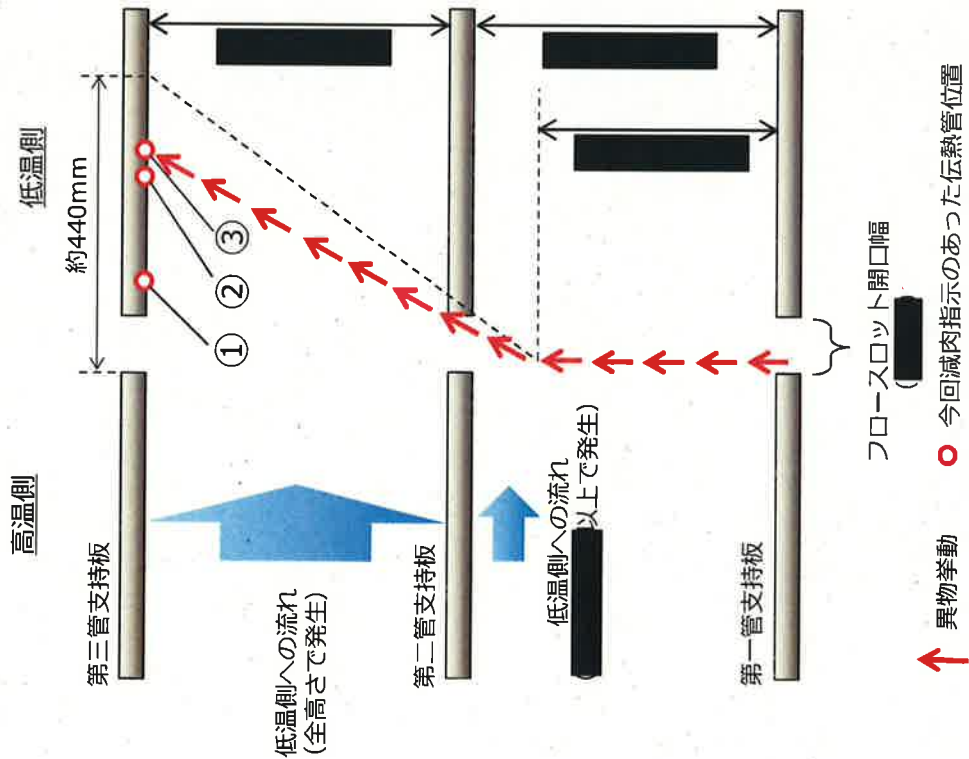
○異物のSG内での挙動は、次のとおり分類される。



今回実施したSG内部視点検、スラッジランシング、N₂バブリングにより、異物は確認されなかったことから、**異物はSG内に残留していないと考える。**

異物の器内挙動 (異物残留について) 2 / 3

○前ページのフローでカテゴリⅢに分類される異物が第二または第三管支持板下面で保持されることを確認するため、今回、第三管支持板下面に到達した推定異物を代表に、第一管支持板を通過してから第三管支持板に至るまでの水平方向の移動量を算出し、フロースロットの開口径と比較した。



推定異物の水平方向移動量算出結果

対象伝熱管	減肉位置	移動量 (mm)
① A-SG (X85, Y2)	第三管支持板	441
② B-SG (X92, Y8)	第三管支持板	439
③ C-SG (X52, Y9)	第三管支持板	441

計算の結果、第一～第三管支持板間の水平方向移動量は、いずれも約440mmであり、第三管支持板のフロースロットの開口径 () よりも大きい



前ページのフローでカテゴリⅢに分類される異物は第二または第三管支持板で保持されると考える (第三管支持板以上には上昇しない)

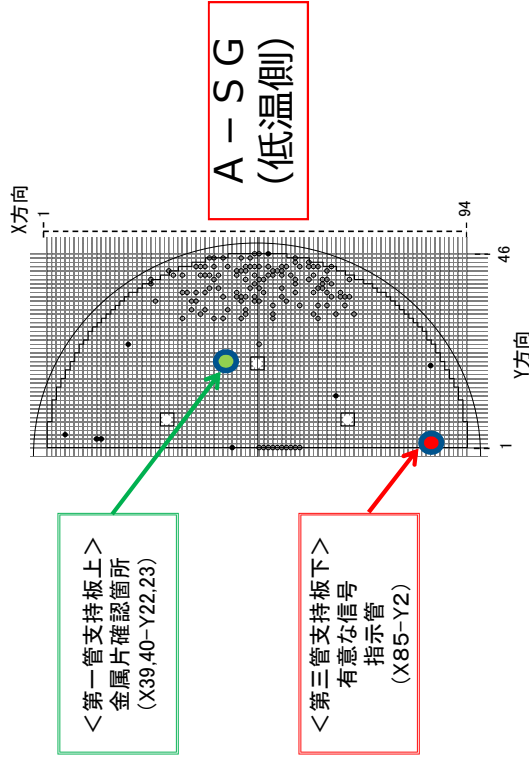
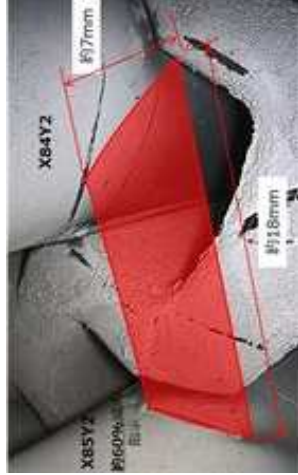
異物の器内挙動（異物残留について） 3 / 3

○ A - S G で確認された金属片と減肉の原因となった想定異物の挙動について考察を行った。

【確認された金属片】



【想定異物】



○ 金属片の流入に関する考察

金属片は想定異物に比べ、落下力は想定異物の約4倍、流体抗力は想定異物の約2倍となる。金属片は想定異物よりも相対的に浮き上がりにくいことから、より多く横方向に流されるため、低温側管群中央部に移動したものと考える。

A-SG	材質	寸法(長さ*幅*厚さ) 【mm】	重量 【g】	落下力 【N】	流体抗力 【N】	流体抗力 /落下力
想定異物	SUS304	18*7*0.3	0.24	2.4×10^{-3}	1.2×10^{-2}	5.0
金属片	SUS304 相当	20*10*0.6	1.0	1.0×10^{-2}	2.4×10^{-2}	2.4

○ 金属片の流出に関する考察

S G 水抜き時に、S G 中央部付近ではフロースロットに向かう流れが大きいことから、想定異物はフロースロットを経由し、管板まで到達した後、ブローダウンシステムから流出したと考える。一方で、金属片が確認された低温側管群中央部ではフロースロットに向かう流れが比較的小さく、また、想定異物に比べ落下力が大きいことから、金属片は横方向に流されにくく、管支持板上の低温側管群中央部に留まっていたものと考ええる。