

関原発 第380号  
2022年 8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16号  
関西電力株式会社  
執行役社長 森 望

高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について

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

## 発電用原子炉施設故障等報告書

2022年8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	2022年7月8日 13時00分 (技術基準に適合していないと判断した日時)										
事象発生の場所	高浜発電所4号機 原子炉格納容器内										
事象発生の発電用原子炉施設名	原子炉冷却系統施設 一次冷却材の循環設備 蒸気発生器 (A、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、2022年6月8日より第24回定期検査中であり、3台ある蒸気発生器(以下「SG」という。)の伝熱管<sup>*1</sup>全数について、健全性を確認するため渦流探傷試験<sup>*2</sup>(以下「ECT」という。)を実施した。</p> <p>その結果、A-SGの伝熱管4本、B-SGの伝熱管1本およびC-SGの伝熱管5本について、管支持板<sup>*3</sup>部付近に、外面からの減肉とみられる有意な信号指示<sup>*4</sup>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、2022年7月8日13時00分に判断した。</p> <p>なお、有意な信号指示ではないものの、A-SGの伝熱管1本およびB-SGの伝熱管1本について、管支持板部付近の外面に判定基準未満の微小な信号指示が認められた。</p> <p><sup>*1</sup> SGの中で一次冷却材(1次側)と給水(2次側)の熱交換を行う逆U字形の管群。一次冷却材は入口管板部(高温側)から入り、給水と熱交換後に出口管板部(低温側)へ流れる。</p> <p><sup>*2</sup> 高周波電流を流したコイルを伝熱管に挿入することで伝熱管に渦電流を発生させ、伝熱管の欠陥により生じる渦電流の変化を電気信号として取り出すことで欠陥を検出する試験(ECT:Eddy Current Test)。全周に対して渦電流の発生と検出を別々のコイルを用いた24組のコイルで伝熱管の欠陥による渦電流の変化を信号として検出する。</p> <p><sup>*3</sup> 伝熱管を支持する部品。</p> <p><sup>*4</sup> ノイズレベル(雑音信号レベル)を超える信号であって、管支持板等の外部構造物あるいは伝熱管の形状等に起因する信号(疑似信号)ではない信号指示。</p> <p>2. ECT結果</p> <p>(1) 検査期間</p> <p>2022年6月23日～2022年7月8日(定期事業者検査終了日)</p> <p>探傷検査・データ整理期間 2022年6月23日～2022年7月5日</p> <p>解析・評価検査期間 2022年7月6日～2022年7月8日</p> <p>(2) 検査範囲</p> <p>SGの施栓<sup>*5</sup>済みの伝熱管を除く、全数の伝熱管についてECTを実施した。</p> <p>(単位:本)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>SG</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>合計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>検査対象本数</td> <td>3,243</td> <td>3,247</td> <td>3,253</td> <td>9,743</td> </tr> </tbody> </table> <p><sup>*5</sup> 伝熱管の1次側出入口部分に機械式栓を用いて栓をし、供用外とすること。</p> <p>(3) 検査結果</p> <p>ECTデータを評価した結果<sup>*6</sup>、10本の伝熱管に有意な信号指示を確認した。</p> <p>リサーチ表示<sup>*7</sup>(信号表示)で分析した結果、いずれも伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。</p> <p>また、有意な信号指示が認められた箇所を色調図表示<sup>*8</sup>で分析した結果、管支持板部付近であった。</p> <p>今回有意な信号指示を確認した箇所について、高浜発電所4号機前回(第23回)定期検査におけるECTデータを確認した結果、外面に有意な信号指示が認められなかつ</p>	SG	A	B	C	合計	検査対象本数	3,243	3,247	3,253	9,743
SG	A	B	C	合計							
検査対象本数	3,243	3,247	3,253	9,743							

たことを確認した。

なお、有意な信号指示ではないものの、A-SGの伝熱管1本およびB-SGの伝熱管1本について、管支持板部付近の外面に判定基準未満の微小な信号指示を確認した。

(単位：本)

SG	A	B	C	合計
指示管本数 (微小な信号指示)	4 (1)	1 (1)	5	10 (2)

A-SG

第四管支持板 X39, Y 1 : 減肉率 約4.7%

第四管支持板 X24, Y 1 : 減肉率 約2.5%

第三管支持板 X26, Y 9 : 減肉率 約3.3%

第三管支持板 X26, Y10 : 減肉率 約4.0%

(第四管支持板 X87, Y 2 : 判定基準未満の微小な信号指示)

B-SG

第四管支持板 X84, Y 9 : 減肉率 約4.9%

(第三管支持板 X69, Y 3 : 判定基準未満の微小な信号指示)

C-SG

第四管支持板 X37, Y22 : 減肉率 約3.4%

第四管支持板 X89, Y 3 : 減肉率 約3.1%

第三管支持板 X39, Y 5 : 減肉率 約4.9%

第三管支持板 X86, Y 8 : 減肉率 約3.5%

第三管支持板 X71, Y 5 : 減肉率 約3.4%

\*6 一般社団法人日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格(2012年版/2013年追補/2014年追補) JSME S NA1-2012/2013/2014 SG伝熱管に対する判定基準に従う。

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

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

事象の状況

事象の原因

1. 原因調査

外面減肉を示す信号指示があった伝熱管の原因調査を実施した。

(1) 高浜発電所3号機および4号機におけるSG伝熱管外面の損傷事象の経緯

高浜発電所3号機および4号機では、高浜発電所3号機前回(第24回)、高浜発電所3号機前々回(第23回)および高浜発電所4号機前々回(第22回)定期検査において、SGの伝熱管に外面からの減肉信号指示が認められており、原因は、管支持板下面に留まった異物と伝熱管が繰り返し接触したことにより摩擦減肉が発生したものと推定した。

その後、異物対策を実施した高浜発電所4号機前回(第23回)定期検査においても、外面からの減肉信号指示が認められたため、小型カメラによりSG器内を調査した結果、減肉箇所スケール<sup>\*9</sup>の接触を確認するとともに、このスケールの外観観察の結果、伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位に接触痕および光沢を確認した。

このため、高浜発電所4号機前回(第23回)定期検査においてSG器内のスケールの性状等の調査や回収スケールによる摩擦試験などを実施した結果、SG伝熱管が減肉した原因は、伝熱管表面から剥離した稠密なスケールによるものと推定した。

これらのことから、2018年8月以降、高浜発電所3号機前回(第24回)および高浜発電所4号機前回(第23回)定期検査において発生したSG伝熱管の外面減肉に対し、対策としてSG器内の薬品洗浄<sup>\*10</sup>を実施し、回収したスケールが脆弱化していることを確認した。

その後、高浜発電所3号機今回(第25回)定期検査において、スケールによるものと推定される伝熱管の外面減肉事象が再度発生したことを踏まえ、高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査で実施した薬品洗浄の再現試験を行った。その結果、スケール近傍にスラッジが存在する場合はスケールの脆弱化効果が低減することを確認したため、薬品洗浄の前にスケールおよびスラッジを可能な限り除去することとし、小型高圧洗浄装置を用いて管支持板上も含めたSG器内の洗浄を実施した。

SG器内洗浄後、小型カメラによりSG器内の状況を確認した結果、管支持板上等のスケールおよびスラッジを大幅に低減できたことを確認した。

また、薬品洗浄については、SG器内の構成部品に大きな影響を及ぼすことなくスケールの脆弱化を図る薬品洗浄条件について再度検討した。

事 象 の 原 因

その結果、伝熱管全域を薬品濃度3%での薬品洗浄を2回実施することにより、スケール近傍にスラッジが存在する場合でもスケールを脆弱化できることを工場試験で確認できたことから、同条件（薬品濃度、回数）での洗浄を実施した。洗浄後にSG器内からの鉄除去量を評価した結果、1台あたり約1,000kgの鉄分が除去された。

\*9 2次系配管等に含まれる鉄イオンや鉄の微粒子が、給水系統によってSG器内に流れ集まって生成されたもの。伝熱管で生成されたものをスケール（フレーク状（板状）に剥がれ落ちたものを含む）という。

\*10 希薄なエチレンジアミン四酢酸（EDTA：Ethylene Diamine Tetra acetic Acid）によりスケール中の鉄を一部溶解し、スケールの粗密化によって表面積を拡大することでSG伝熱性能の回復を図る手法。

(2) 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。

(3) SG伝熱管外面（2次側）からの損傷

a. デンティング\*11

ECTの信号指示を確認した結果、デンティングではないと考える。

\*11 管支持板の腐食およびそれに伴う腐食生成物の体積膨張による伝熱管の変形をいう。

b. 粒界腐食割れ

過去にSG2次側環境においてアルカリ環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、粒界腐食割れが発生した実績があるが、高浜発電所4号機のようなアンモニアとヒドラジンによるAVT（All Volatile Treatment）処理\*12を実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考える。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉であると考えことから、粒界腐食割れの可能性はないと考える。

\*12 pH調整剤のアンモニアと酸素除去剤のヒドラジンで水質調整を行う揮発性物質処理。

c. ピットイング

過去にSG2次側環境において海水リーク等による塩化物環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、ピットイングが発生した実績があるが、高浜発電所4号機のような塩素濃度が十分低く管理され、かつ、アンモニアとヒドラジンによるAVT処理を実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考える。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉であると考えことから、ピットイングの可能性はないと考える。

d. リン酸減肉

過去の2次系水処理において、リン酸を使用していたプラントでリン酸による減肉が発生した実績があるが、高浜発電所4号機のようなアンモニアとヒドラジンによるAVT処理を実施しているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考える。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉であると考えことから、リン酸減肉の可能性はないと考える。

e. 流体振動による疲労

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

f. エロージョン

当該部流速は約 [ ] であり、かつ、インコネルTT600は耐エロージョン性が高いことから（室温条件では約70m/s以上がエロージョン発生領域）、エロージョンの発生はないと考える。

なお、室温条件にて評価を行っているが、温度によるエロージョンへの影響は小さく、常温の知見を用いても問題ないことを評価している。



事 象 の 原 因

g. 摩耗減肉

A、BおよびC-SGの減肉信号を確認した伝熱管について、小型カメラによる目視点検を実施した結果、機械的な影響によるものとみられる減肉を確認したため、以下の確認を実施した。

(a) 減肉伝熱管 2 次側からの確認結果

ア. 伝熱管外観観察

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

(ア) A-SG

第四管支持板下面付近 (X39, Y1) :

周方向約 3 mm、軸方向 1 mm 以下 (減肉率: 約 4.7%)

第四管支持板下面付近 (X24, Y1) :

周方向約 2 mm、軸方向 1 mm 以下 (減肉率: 約 2.5%)

第三管支持板下面付近 (X26, Y9) :

周方向約 4 mm、軸方向 1 mm 以下 (減肉率: 約 3.3%)

第三管支持板下面付近 (X26, Y10) :

周方向約 4 mm、軸方向 1 mm 以下 (減肉率: 約 4.0%)

第四管支持板下面付近 (X87, Y2) :

周方向約 5 mm、軸方向 1 mm 以下 (減肉率: 判定基準未滿)

(イ) B-SG

第四管支持板下面付近 (X84, Y9) :

周方向約 7 mm、軸方向約 1 mm (減肉率: 約 4.9%)

第三管支持板下面付近 (X69, Y3) :

周方向約 5 mm、軸方向約 1 mm (減肉率: 判定基準未滿)

(ウ) C-SG

第四管支持板下面付近 (X37, Y22) :

周方向約 6 mm、軸方向 1 mm 以下 (減肉率: 約 3.4%)

第四管支持板下面付近 (X89, Y3) :

周方向約 6 mm、軸方向 1 mm 以下 (減肉率: 約 3.1%)

第三管支持板下面付近 (X39, Y5) :

周方向約 4 mm、軸方向 1 mm 以下 (減肉率: 約 4.9%)

第三管支持板下面付近 (X86, Y8) :

周方向約 4 mm、軸方向 1 mm 以下 (減肉率: 約 3.5%)

第三管支持板下面付近 (X71, Y5) :

周方向約 5 mm、軸方向 1 mm 以下 (減肉率: 約 3.4%)

イ. 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と相違ないことを確認した。

(b) 管支持板との接触

ア. 管支持板ベイ部<sup>\*13</sup>の信号

構造上、伝熱管と管支持板ベイ部は接触しない。また、運転中に伝熱管へねじれを発生させる外力は発生せず、伝熱管と管支持板ベイ部は接触しない。

<sup>\*13</sup> 管支持板に加工されている四つ葉型管穴のうち凹面部。

イ. 管支持板ランド部<sup>\*14</sup>の信号

管支持板との接触により摩耗減肉が発生したのであれば、4 箇所の管支持板ランド部に減肉が生じることになるが、目視点検の結果からは 4 箇所の管支持板ランド部の減肉は確認できなかったため、管支持板との接触・摩耗によって発生した減肉ではないと考える。

<sup>\*14</sup> 管支持板に加工されている四つ葉型管穴のうち凸面部。

事 象 の 原 因

(c) SG器外発生物との接触

ア. 過去事象を踏まえた異物混入対策

美浜発電所3号機の異物混入事象（2000年、2007年）を踏まえた従前の異物混入対策（開口部管理の徹底等）に加え、高浜発電所3号機前々回（第23回）定期検査以降の伝熱管減肉事象を踏まえた異物混入対策（機器内部に立ち入る前に、器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する等）については、高浜発電所4号機前回（第23回）定期検査においても実施していることを確認した。

イ. SG器内点検

A、BおよびC-SGの減肉信号を確認した伝熱管並びにAおよびB-SGの判定基準未満の微小な減肉信号を確認した伝熱管について小型カメラにて目視点検を実施した結果、信号指示箇所スケール等の付着物は認められなかったものの、当該伝熱管周辺の管支持板に接触痕を確認した。

また、A、BおよびC-SG器内の管板、流量分配板、第一～第七管支持板の上面の全ての範囲並びに第三、第四管支持板の下面の減肉信号を確認した伝熱管周辺部について、小型カメラによる目視点検を実施した結果、全体的にスケールおよびスラッジ<sup>\*15</sup>が残存していることを確認したが、それら以外の異物は確認できなかった。

<sup>\*15</sup> 2次系配管等に含まれる鉄イオンや鉄の微粒子が、給水系統によってSG器内に流れ集まって生成されたもの。伝熱管で生成されたものをスケール（フレーク状（板状）に剥がれ落ちたものを含む）といい、スケールを形成せず粒子状となり、水中を漂うものや、スケールが碎けて小さくなったものが管支持板上等に堆積したものをスラッジという。

ウ. SG器外点検

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

以上の調査結果から、SG器内に異物が混入している可能性はない。

(d) SG器内発生物との接触

ア. SG内部品の脱落調査

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

なお、伝熱管を減肉させる薄片形状と異なるものの、SG器内（2次側）の経年劣化事象を起因とする内部品の脱落として、流れ加速型腐食による給水内管裏当金を想定するが、高浜発電所4号機前々回（第22回）定期検査において、当該部のカメラによる目視点検を実施しており、給水内管裏当金の溶接部が全く損傷していなかったことから、脱落した可能性はないと考える。

イ. スケールによる伝熱管損傷の可能性調査

これまでの経緯を踏まえ、SG伝熱管の外表面減肉の原因は、SG伝熱管から剥離した稠密なスケールの可能性が否定できないため、SG器内のスケール残存状況および回収したスケール調査を実施した。

(ア) SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況等の調査

小型カメラを用いて、A、BおよびC-SGの管板～第七管支持板の上面の調査を行った結果、スケールおよびスラッジが残存していることを確認した。

SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況等の調査に合わせ、伝熱管の外観観察を行った結果、ほぼ全ての伝熱管は全面的にスケールに覆われていた。また、一部の伝熱管は局所的にスケールが剥離した痕跡等も認められた。これらの状況については、高温側と低温側（水平方向）、管支持板間（上下方向）において有意な差は認められなかった。

事 象 の 原 因

(イ) SGから回収したスケールの性状調査

I. 各SG器内のスケール回収

A、BおよびC-SGの管板、第一～第三管支持板上面に残存しているスケールのうち、比較的大きなものを選定し、約200個を回収した。また、今後の知見拡充のため、A、BおよびC-SGからスケールを更に約200個回収した。

II. 回収したスケールの化学成分および形状分析結果

回収したスケールについて、化学成分分析を実施した結果、主成分はマグネタイトであり、SG器内で発生するスラッジと同成分であることを確認した。A、BおよびC-SGの管板、第一～第三管支持板上面から取り出したスケールは、主に多角型、長尺型に分類され、長さが最大のものは、前者が長さ約25mm、幅約13mm、後者が長さ約29mm、幅約6mmであり、これらのスケールは管支持板の流路穴よりも大きく、運転中に管支持板下面に留まる可能性のある形状であった。また、これらのスケールについては、目視確認の結果、やや湾曲した形状をしており、そのうち各SGから取り出した15個のスケールについて3次元測定器により計測した結果、直径約22.3～22.5mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管(円筒)の外径(直径22.2mm)に近いことを確認した。

III. 回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果

スケール120個を対象に断面観察を行った結果、稠密層(密度の高い酸化鉄の層)が主体のスケールを48個確認した。

また、スケール50個(約10mm×約5mm以上)を対象に摩耗試験を行い、伝熱管とスケールの摩耗体積比<sup>\*16</sup>を調査した結果、伝熱管の減肉量がスケール摩滅量以上のスケールを2個確認した。

<sup>\*16</sup> 摩耗試験における伝熱管の減肉量とスケールの摩滅量の体積比。

IV. 接触痕を有するスケールの調査

減肉が認められた伝熱管に接触していた可能性のあるスケールを調査するために、A、BおよびC-SG器内から取り出したスケールの外観を観察した。このうち、AおよびB-SG伝熱管減肉部の下方(第二管支持板上面)に残存していたスケール各1個については、伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位に接触痕および光沢があった。

これらのスケールの形状を計測した結果、直径約22.6mm(A-SG採取スケール)、直径約22.3mm(B-SG採取スケール)の円筒状に沿った形状であり、伝熱管(円筒)の外径(直径22.2mm)に近い形状であった。

走査型電子顕微鏡(以下「SEM」という。)による観察を行った結果、接触想定部位に伝熱管との摺動によりできたものと推定される筋状痕があった。

化学成分分析の結果、主成分はマグネタイトで、SG器内で発生するスラッジと同成分であり、接触想定部位に伝熱管の主成分であるニッケルおよびクロムの成分を検出した。

これらのスケールを切断して断面を観察した結果、スケールの厚さは約0.2mm(A-SG採取スケール)、約0.3mm(B-SG採取スケール)であり、稠密層が主体のスケールであった。

(4) 損傷以外のECT信号指示

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

(5) 減肉メカニズムの検討

これまでの原因調査の結果、薬品洗浄後においても、稠密なスケールがSG器内に残存し、伝熱管の外表面減肉を発生させた可能性が高いことから、減肉を発生させるスケールの生成・剥離メカニズム、SG器内のスケールの挙動およびスケールが伝熱管を損傷させる可能性について、以下のとおり調査および検討を実施した。

事 象 の 原 因

a. スケールの生成メカニズム

(a) スケールの生成および性状の調査

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

ア. 析出付着

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

イ. 蒸発残渣

伝熱管の上部では、伝熱管表面と給水の温度差が伝熱管の下部に比べて小さく沸騰現象が顕著であることから、鉄イオンの析出付着よりも、鉄の微粒子が蒸発残渣として伝熱管表面に残留、堆積する現象が主体である。そのため、伝熱管の上部に付着するスケールは、粗密<sup>\*17</sup>な傾向があり、脆く摩耗に対する耐性も低いと考える。また、蒸発残渣によって残留、堆積する鉄の微粒子の方が析出付着する鉄イオンに比べて粒径が大きいことから、伝熱管の上部で生成するスケールの方が伝熱管の下部より粗密で厚い傾向にある。

<sup>\*17</sup> 密度が比較的 low、粗な状態。

(b) スケール性状の実機調査

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

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

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

(c) 2次系の水質管理調査

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

ア. 水処理履歴

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

SG器内への鉄の持込みに関係する項目はpHであり、2次系構成機器の流れ加速型腐食等による給水中への鉄の放出を抑制するためにはアルカリ側に水質管理を行う必要がある。そのため、これまでpH上昇によりSG器内への鉄の持込み量低減を図るべく、AVT処理(pH9.2)、ETA<sup>\*18</sup>処理(pH9.4~9.5)、高ETA処理(pH9.8)、高アンモニア処理(pH9.8)のようにpHの高い処理方法へと改善を図ってきた。

各水処理における給水中の鉄含有量の実測データは次のとおりであり、pHの低い水処理方法ほど給水中の鉄含有量が多いことが分かっている。

<sup>\*18</sup> エタノールアミン。

事 象 の 原 因

イ. 給水中の鉄含有量

上記水処理方法での給水中の鉄含有量は次のとおりである。

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

ウ. 運転時間

上記水処理方法での運転時間は次のとおりである。

水処理方法	運転時間
A V T 処理	約 9 . 8 万時間
E T A 処理	約 8 . 0 万時間
高 E T A 処理	約 2 . 0 万時間
高アンモニア処理	約 3 . 4 万時間

エ. 鉄の持込み量

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

水処理方法	鉄の持込み量 / S G
A V T 処理	約 1 , 6 8 0 k g
E T A 処理	約 6 5 0 k g
高 E T A 処理	約 7 0 k g
高アンモニア処理	約 1 2 0 k g
合計	約 2 , 5 2 0 k g

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

(d) スケール厚さに関する実機調査

スケール厚さの傾向を推定するパラメータとして、主蒸気圧力や S G 伝熱抵抗係数<sup>\*19</sup>があり、その変化量を確認した結果、いずれも運転時間の経過とともに圧力低下や係数増加が認められ、スケール厚さは経年的に増加するものと推定される。

また、高浜発電所 3 号機第 8 回 ( 1 9 9 5 年 ) および第 1 4 回 ( 2 0 0 2 年 ) 定期検査において、スケール厚さを把握するため、周波数 3 k H z の E C T を実施した結果、第 8 回から第 1 4 回定期検査までの 6 サイクルで増加したスケール厚さは、数十  $\mu$  m ～ 1 0 0  $\mu$  m 程度であった。

<sup>\*19</sup> 伝熱管の外表面に不純物が付着するなどにより、熱伝達特性を低下させる度合いを示す指標。

以上の結果から、スケール厚さは経年的に増加していくものであることを確認した。また、現在では高 E T A 処理や高アンモニア処理によって給水の p H を高く維持することで、1 サイクルあたりの鉄の持込み量は数十 k g / S G 程度に抑えられていることを確認した。

b. スケールの剥離メカニズム

(a) 剥離メカニズムの検討

伝熱管表面に生成したスケールが主に剥離するのは、起動停止時の伝熱管の熱伸びと収縮によるものと推定される。具体的には次のア. ～ウ. のとおりであり、スケールはプラント停止時の伝熱管の熱収縮に追従できずにフレック状 ( 板状 ) に剥離したものと推定される。

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

イ. プラント運転中に割れの隙間が新たに生成したスケールで埋まる。

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

事 象 の 原 因

また、プラント起動時および運転中においても、停止時に剥離しなかったスケールが、伝熱管の振動やSG器内の流れの影響により剥離する可能性も否定できない。

(b) 長期停止の影響調査

東日本大震災以降、2011年7月に定期検査を開始し、その後、2017年5月に再稼動するまでの約6年間、プラントは長期停止状態となっていた。その間、SG器内は腐食を防止するためヒドラジン水による満水保管状態としていたことから、この状態がスケール剥離挙動に与える影響を調査するため、スラッジ（粒の観察を容易にするため粉末状スラッジを使用）を対象にヒドラジン水による浸漬試験を1か月間実施した。その結果、時間の経過とともにスケールを構成する鉄粒子同士が合わさり粒径が大きくなることを確認した。これは、ヒドラジンの還元作用でスケールの鉄が一部溶解、再析出を繰り返し、粒径が大きくなったものと推定される。

粒径が大きくなると、伝熱管との接触面積が減少し、剥離が促進される可能性がある。スケールの剥離量が増えるとスラッジランシングでのスケール回収量が大きくなる可能性があるため、高浜発電所4号機の長期停止前後の回収量を調査した結果、長期停止前はSG3台から約20kgのスケール等を回収したが、長期停止後の第21回定期検査時には約40kgと増加していることを確認した。

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

c. SG器内挙動の推定およびスケールと伝熱管の接触状態の再現性確認

SG器内調査およびスケール分析の結果、今回の外面減肉はスケールによる摩耗の可能性が高いことから、剥離したスケールがSG器内で第三および第四管支持板下面へ到達するまでの挙動を推定した。また、SG2次側器内の流況モックアップ試験により、実機を模擬した二相流の条件においても、推定した伝熱管へのスケールの接触状態が再現するかの確認を実施した。なお、評価に当たっては、SG器内で確認されているスケールを参考に形状を想定して評価した。

(a) 器内のスケール挙動検討

運転中のSG2次側器内の流況下では流体抗力がスケールの落下力を上回ることから、スケール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ことが考えられる。

(b) SG2次側器内の流況モックアップ試験

SG2次側器内の流況を再現するモックアップ試験結果から、実機を模擬した二相流の条件においてスケールの接触状態が再現できることを確認した。

d. スケールが伝熱管を損傷させる可能性の調査

(a) 高浜発電所4号機前回（第23回）定期検査における薬品洗浄の実施結果

ア. 薬品洗浄効果

薬品洗浄時の条件を確認した結果、温度管理や薬品濃度管理が計画どおり実施されていたことを確認し、薬品洗浄によって、SG1台あたり、約680kgの鉄分を除去できていたことを確認した。

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

イ. スラッジ影響を考慮した薬品洗浄効果の確認試験結果

高浜発電所4号機前回（第23回）定期検査において、スケールの脆弱化を目的として薬品洗浄を実施したが、今回（第24回）定期検査にてSG器内から回収したスケールを分析したところ、稠密層厚さが0.1mmを超えるスケールが確認されたことから、薬品洗浄効果の確認試験を行った。

確認試験は実機薬品洗浄時のSG器内環境（薬品濃度、温度等）を模擬した水槽中で実施した。また、SG器内における薬品との接液環境を模擬するため、水槽中にはスケールおよびスラッジに加え、SG器内構成部品と同材料の試験片を設置し、スケールおよびスラッジの比率やスケール周辺のスラッジ量を変化させ

た3パターンの試験を実施した。その結果、スケール周辺のスラッジ量が多くなった場合は、薬品洗浄によるスケールの脆弱化効果が低減することを確認した。

以上により、高浜発電所4号機前回(第23回)定期検査における薬品洗浄により鉄分が一定量除去されており、SG器内のスケールはおおむね脆弱化していたと推定されるが、SG器内にスケールとスラッジが混在していたことから、一部のスケール脆弱化効果が低減し、前回薬品洗浄後においても脆弱化できなかったスケールが一部存在していたものと推定される。

なお、高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査において薬品洗浄後にスケールのサンプル調査を実施し、脆弱化していたことを確認していたが、今回のサンプル調査では稠密層が厚いスケールが比較的多く見つかった。その要因としては、前回の薬品洗浄により脆弱化されたスケールの多くは運転中にスラッジになり、稠密層が厚いものがスケールとして残ったためと推定される。

#### (b) 摩耗形態の推定

スケールとの接触で伝熱管が摩耗する場合、スケールの振動により摩耗するケースと、伝熱管の振動により摩耗するケースが考えられるため、次のとおり各ケースで想定されるワークレート<sup>\*20</sup>の比較を実施した。

<sup>\*20</sup> 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。

##### ア. スケール振動のケース

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

##### イ. 伝熱管振動のケース

本ケースでは、スケールが管支持板下面で保持され、接触する伝熱管のランダム振動<sup>\*21</sup>により伝熱管自身に減肉が発生したことを想定する。管支持板部の伝熱管の振幅は、伝熱管と管支持板BEC穴ランド部の隙間に制限されるため、隙間が確保され振幅が大きくなる伝熱管においてスケールとの接触により減肉が生じるものと推定される。本推定に基づきワークレートを試算すると、スケール振動のケースに比べて十分大きなワークレートが得られることを確認した。

<sup>\*21</sup> 蒸気と水が伝熱管に衝突する力と、伝熱管の周りに生じる流れの乱れによって伝熱管が振動する現象。

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

なお、伝熱管振動のケースでは、最大減肉深さは伝熱管の振動振幅に制限されるため、減肉の進展により伝熱管を貫通することはない。

#### (c) 減肉形状の再現性確認試験

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

##### ア. 減肉試験

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

##### イ. ECTモックアップ試験

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

事 象 の 原 因

(d) ワークレートによる摩耗体積評価

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

e. 高浜発電所3号機および4号機の特異性

(a) 当社他プラントとの鉄持込み量、薬品洗浄実績およびスケール回収量の比較

鉄の持込み量について、比較のため当社他プラントの調査を実施した。また、大飯発電所3号機および4号機では薬品洗浄を実施しており、スケール性状に影響を与えている可能性があることから、その実績を確認した。さらに、スケールの厚さや長期停止に伴うスケールの剥離量は、スケール回収量に現れている可能性があることから、あわせて長期停止前後のスケール回収量について比較調査を実施した。

ア. 鉄持込み量および薬品洗浄実績

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

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

<表1：各プラントの鉄持込み量および薬品洗浄実績>

	高浜発電所		大飯発電所		美浜発電所	高浜発電所	
	3号機	4号機	3号機	4号機	3号機	1号機	2号機
運転時間* <sup>22</sup> (万時間)	23.2	23.2	17.0	18.2	9.3	10.9	12.5
鉄持込み量 (kg)	2,650	2,520	1,850	1,970	810	680	940
薬品洗浄 実績回数	2回	1回	2回	1回	—	—	—
薬品洗浄時点 の運転時間 (万時間)	22.3 (第24回) 23.2 (第25回)	22.2 (第23回)	16.1 (第17回) 17.0 (第18回)	16.2 (第16回)	—	—	—

\*<sup>22</sup> 美浜発電所3号機、高浜発電所1号機および2号機については、SG取替え以降の運転時間を示す。なお、運転時間については、現時点で直近の定期検査解列時点とする。

イ. スケール回収量

スケール回収量\*<sup>23</sup>を確認した結果、高浜発電所3号機および4号機では、いずれも長期停止後にスケール回収量が増加していた。

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

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

\*<sup>23</sup> スラッジランシングで回収したスラッジおよびスケールのうち、スケールの回収量を表2に示す。

事 象 の 原 因



＜表2：スケール回収量（長期停止前後比較）＞

プラント	長期停止前 (k g)	長期停止後 (k g)		
高浜発電所 3号機	0.01 未満 (第21回)	0.41 (第22回)	0.24 (第23回)	0.36 (第24回)
高浜発電所 4号機	0.01 未満 (第20回)	12.37 (第21回)	8.24 (第22回)	6.08 (第23回)
大飯発電所 3号機	0.01 未満 (第16回)	0.01 未満 (第17回)	0.01 未満 (第18回)	—
大飯発電所 4号機	0.01 未満 (第15回)	0.01 未満 (第16回)	0.01 未満 (第17回)	—

(b) 当社他プラントとのスケール比較

スケールの稠密層厚さと鉄持込み量に相関があるかを検証するため、当社他プラントのSG下部からスケールを採取し、断面マイクロ観察を実施した結果を確認した。採取対象プラントは、高浜発電所4号機、大飯発電所3号機および4号機からは薬品洗浄回数のない大飯発電所4号機、SG取替えプラント（美浜発電所3号機、高浜発電所1号機および2号機）からは、最も鉄の持込み量の大きい高浜発電所2号機を選定した。なお、高浜発電所3号機については、高浜発電所4号機とスケール性状が同等であることを確認している。

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

＜表3：スケール観察結果\*24＞

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

\*24 高浜発電所4号機前回（第23回）定期検査のSG伝熱管外面損傷事象における原因調査の過程で確認。

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

(c) 伝熱管の摩耗試験結果の比較

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

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

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

f. スケールにより減肉した国内外事例調査

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

事 象 の 原 因

<p>事 象 の 原 因</p>	<p>なお、国内外において、SGの運転時間が高浜発電所3号機および4号機で外面減肉事象が生じた運転時間以上であり、かつ薬品洗浄の実績が認められず、高浜発電所3号機および4号機と同等の伝熱管支持構造を有するプラントを調査した結果、8プラントのみであることを確認した。</p> <p>2. 伝熱管の健全性</p> <p>(1) 減肉伝熱管の健全性</p> <p>減肉した伝熱管の強度、耐震性について以下のように評価した。</p> <p>a. 強度</p> <p>「蒸気発生器信頼性実証試験」((財) 発電用熱機関協会、1975年度～1980年度)では、局部減肉を有する伝熱管の内圧強度評価手法を確立するため、内圧による高温破壊試験を実施しており、その試験結果から運転中および事故時を包絡する内外差圧による伝熱管の破断圧力を算出した。</p> <p>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。</p> <p>b. 耐震性</p> <p>基準地震動<math>S_s</math>による地震力および伝熱管全長モデルから、伝熱管直管部(管支持板部)に作用する力(部材力)を算出した。</p> <p>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した結果、十分な裕度があることから、減肉した伝熱管が地震により損壊することはない。</p> <p>(2) 隣接伝熱管の健全性</p> <p>今回減肉が見つかった伝熱管に隣接した伝熱管についても念のため健全性を確認した結果、有意な減肉信号指示がないことを確認した。</p> <p>3. 推定原因</p> <p>A、BおよびC-SG伝熱管で認められた外面減肉は、これまでの運転に伴い、伝熱管表面に生成された稠密なスケールが前回(第23回)定期検査時の薬品洗浄の後もSG器内に残存し、プラント運転中に管支持板下面に留まり、そのスケールに伝熱管が繰り返し接触したことで摩耗減肉が発生した可能性が高いと推定した。</p> <p>4. 薬品洗浄の条件設定</p> <p>SGの器内構成部品に大きな影響を及ぼさない範囲で、SG器内のスケールの脆弱化を図る薬品洗浄条件について検討した結果、薬品濃度として3%、洗浄回数を2回とする。また、第四管支持板の下面で減肉が確認されたことも踏まえ、洗浄範囲を1回目、2回目ともにSG伝熱管全域とする。</p> <p>なお、薬品洗浄の効果を高めるため、薬品洗浄実施前に小型高压洗浄装置を用いて管支持板上も含めたSG器内の洗浄を行うことにより、SG器内に残存するスケールおよびスラッジをできる限り除去することとする。</p>
<p>保護装置の種類及び動作状況</p>	<p>該当せず</p>
<p>放射能の影響</p>	<p>なし</p>
<p>被害者</p>	<p>なし</p>
<p>他に及ぼした障害</p>	<p>なし</p>
<p>復旧の日時</p>	<p>2022年10月下旬(発電機並列予定)</p>
<p>再発防止対策</p>	<p>高浜発電所3号機今回(第25回)定期検査において実施した対策によりSG器内のスケール除去・脆弱化が効果的に実施できたことおよび高浜発電所4号機今回(第24回)定期検査において採取したスケールに対しても、高浜発電所3号機今回(第25回)定期検査で実施した薬品洗浄が有効に作用することを確認したことから、高浜発電所4号機今回(第24回)定期検査においては以下の対策を実施する。</p>

再 発 防 止 対 策

- (1) 減肉伝熱管の施栓  
外面減肉が認められたA-SG伝熱管5本、B-SG伝熱管2本およびC-SG伝熱管5本について、高温側および低温側のSG管板部で施栓し、供用外とする。
- (2) 小型高圧洗浄装置による洗浄  
SG器内に残存するスケールおよびスラッジを可能な限り除去するため、小型高圧洗浄装置を用いて管支持板上も含めたSG器内の洗浄を実施する。
- (3) 薬品洗浄による稠密なスケールの脆弱化  
SG器内に薬液を注入し、伝熱管全域を薬品に浸した状態で2回洗浄を行い、伝熱管に付着している稠密なスケールを脆弱化させる。
- (4) 今後のSG保全  
今回取り出したスケールについては、今後、追加の3次元測定器による計測、断面観察および摩耗試験を実施し、スケールの形状や性状に関する知見の拡充に努める。  
また、毎定期検査時にスケールを回収し、スケールの稠密層厚さの確認および摩耗試験を実施する。確認および摩耗試験では、稠密層厚さ0.1mm未満および摩耗体積比0.1未満であることを確認し、それを超えた場合は薬品洗浄や小型高圧洗浄装置による洗浄を実施する。  
さらに、高浜発電所3号機および4号機のSGについては、インコネルTT600製の伝熱管に応力腐食割れが認められていることから、本事象も踏まえ、今後も引き続き、SG取替えに係る検討を進めていく。

高浜発電所 4 号機  
蒸気発生器伝熱管の損傷について

2022年8月

関西電力株式会社

## 1. 件 名

高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について

## 2. 事象発生日

2022年7月8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24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、2022年6月8日より第24回定期検査中であり、3台ある蒸気発生器（以下「SG」という。）の伝熱管<sup>\*1</sup>全数について、健全性を確認するため渦流探傷試験<sup>\*2</sup>（以下「ECT」という。）を実施した。

その結果、A-SGの伝熱管4本、B-SGの伝熱管1本およびC-SGの伝熱管5本について、管支持板<sup>\*3</sup>部付近に、外面からの減肉とみられる有意な信号指示<sup>\*4</sup>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、2022年7月8日13時00分に判断した。

なお、有意な信号指示ではないものの、A-SGの伝熱管1本およびB-SGの伝熱管1本について、管支持板部付近の外面に判定基準未満の微小な信号指示が認められた。

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

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

<sup>\*3</sup> 伝熱管を支持する部品。

<sup>\*4</sup> ノイズレベル（雑音信号レベル）を超える信号であって、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

2022年6月23日～2022年7月 8日（定期事業者検査終了日）  
 探傷検査・データ整理期間 2022年6月23日～2022年7月 5日  
 解析・評価検査期間 2022年7月 6日～2022年7月 8日

### (2) 検査範囲

SGの施栓<sup>\*5</sup>済みの伝熱管を除く、全数の伝熱管についてECTを実施した。

(単位：本)

SG	A	B	C	合計
検査対象本数	3,243	3,247	3,253	9,743

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

### (3) 検査結果

(添付資料-2～4)

ECTデータを評価した結果<sup>\*6</sup>、10本の伝熱管に有意な信号指示を確認した。  
 リサージュ表示<sup>\*7</sup>（信号表示）で分析した結果、いずれも伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

また、有意な信号指示が認められた箇所を色調図表示<sup>\*8</sup>で分析した結果、管支持板部付近であった。

今回有意な信号指示を確認した箇所について、高浜発電所4号機前回（第23回）定期検査におけるECTデータを評価した結果、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。

なお、有意な信号指示ではないものの、A-SGの伝熱管1本およびB-SGの伝熱管1本について、管支持板部付近の外面に判定基準未満の微小な信号指示を確認した。

(単位：本)

SG	A	B	C	合計
指示管本数	4	1	5	10
(微小な信号指示)	(1)	(1)		(2)

### A-SG

第四管支持板 X39, Y 1 : 減肉率 約4.7%

第四管支持板 X24, Y 1 : 減肉率 約2.5%

第三管支持板 X26, Y 9 : 減肉率 約3.3%

第三管支持板 X26, Y10 : 減肉率 約4.0%

(第四管支持板 X87, Y 2 : 判定基準未満の微小な信号指示)

## B-SG

第四管支持板 X84, Y 9 : 減肉率 約 4 9 %

(第三管支持板 X69, Y 3 : 判定基準未満の微小な信号指示)

## C-SG

第四管支持板 X37, Y22 : 減肉率 約 3 4 %

第四管支持板 X89, Y 3 : 減肉率 約 3 1 %

第三管支持板 X39, Y 5 : 減肉率 約 4 9 %

第三管支持板 X86, Y 8 : 減肉率 約 3 5 %

第三管支持板 X71, Y 5 : 減肉率 約 3 4 %

\*<sup>6</sup> 一般社団法人日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格 (2012 年版/2013 年追補/2014 年追補) JSME S NA1-2012/2013/2014 SG 伝熱管に対する判定基準に従う。

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

\*<sup>8</sup> 2 4 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

6 月 2 3 日 定期事業者検査開始 (探傷検査・データ整理)

7 月 8 日 定期事業者検査終了

A-SG 伝熱管 4 本 (2 次側)、B-SG 伝熱管 1 本 (2 次側) および C-SG 伝熱管 5 本 (2 次側) に外面からの減肉と認められる有意な信号指示があることを確認

有意な信号指示ではないものの、A-SG 伝熱管 1 本 (2 次側) および B-SG 伝熱管 1 本 (2 次側) に外面からの減肉と認められる判定基準未満の微小な信号指示を確認

各 SG 器内のカメラによる目視点検を開始

8 月 1 2 日 各 SG 器内のカメラによる目視点検完了

## 9. 原因調査

(添付資料-5)

外面減肉を示す信号指示があった伝熱管の損傷原因を調査するため、要因分析図に基づき、原因調査を実施した。

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

(添付資料-6)

高浜発電所 3 号機および 4 号機では、高浜発電所 3 号機前回 (第 2 4 回)、高浜発電所 3 号機前々回 (第 2 3 回) および高浜発電所 4 号機前々回 (第 2 2 回) 定期検査において、SG の伝熱管に外面からの減肉信号指示が認められており、原因は、管支持板下面に留まった異物と伝熱管が繰り返し接触したことにより摩耗減肉が発生したものと推定した。

その後、異物対策を実施した高浜発電所 4 号機前回 (第 2 3 回) 定期検査においても、外面からの減肉信号指示が認められたため、小型カメラにより SG 器内を調

査した結果、減肉箇所にスケール\*<sup>9</sup>の接触を確認するとともに、このスケールの外観観察の結果、伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位に接触痕および光沢を確認した。

このため、高浜発電所4号機前回（第23回）定期検査においてSG器内のスケールの性状等の調査や回収スケールによる摩耗試験などを実施した結果、SG伝熱管が減肉した原因は、伝熱管表面から剥離した稠密なスケールによるものと推定した。

これらのことから、2018年8月以降、高浜発電所3号機前回（第24回）および高浜発電所4号機前回（第23回）定期検査において発生したSG伝熱管の外面減肉に対し、対策としてSG器内の薬品洗浄\*<sup>10</sup>を実施し、回収したスケールが脆弱化していることを確認した。

その後、高浜発電所3号機今回（第25回）定期検査において、スケールによるものと推定される伝熱管の外面減肉事象が再度発生したことを踏まえ、高浜発電所3号機前回（第24回）定期検査で実施した薬品洗浄の再現試験を行った。その結果、スケール近傍にスラッジが存在する場合はスケールの脆弱化効果が低減することを確認したため、薬品洗浄の前にスケールおよびスラッジを可能な限り除去することとし、小型高圧洗浄装置を用いて管支持板上も含めたSG器内の洗浄を実施した。

SG器内洗浄後、小型カメラによりSG器内の状況を確認した結果、管支持板上等のスケールおよびスラッジを大幅に低減できたことを確認した。

また、薬品洗浄については、SG器内の構成部品に大きな影響を及ぼすことなくスケールの脆弱化を図る薬品洗浄条件について再度検討した。

その結果、伝熱管全域を薬品濃度3%での薬品洗浄を2回実施することにより、スケール近傍にスラッジが存在する場合でもスケールを脆弱化できることを工場試験で確認できたことから、同条件（薬品濃度、回数）での洗浄を実施した。洗浄後にSG器内からの鉄除去量を評価した結果、1台あたり約1,000kgの鉄分が除去された。

\*<sup>9</sup> 2次系配管等に含まれる鉄イオンや鉄の微粒子が、給水系統によってSG器内に流れ集まって生成されたもの。伝熱管で生成されたものをスケール（フレーク状（板状）に剥がれ落ちたものを含む）という。

\*<sup>10</sup> 希薄なエチレンジアミン四酢酸（EDTA：Ethylene Diamine Tetra acetic Acid）によりスケール中の鉄を一部溶解し、スケールの粗密化によって表面積を拡大することでSG伝熱性能の回復を図る手法。

## （2）SG伝熱管内面（1次側）からの損傷 （添付資料－7）

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。

## （3）SG伝熱管外面（2次側）からの損傷

### a. デンティンク\*<sup>11</sup> （添付資料－7）

ECTの信号指示を確認した結果、デンティンクではないと考える。

\*<sup>11</sup> 管支持板の腐食およびそれに伴う腐食生成物の体積膨張による伝熱管の変形をいう。



b. 粒界腐食割れ

(添付資料－ 8)

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によるAVT (All Volatile Treatment) 処理<sup>\*12</sup>を実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考える。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉であることから、粒界腐食割れの可能性はないと考える。

<sup>\*12</sup> pH調整剤のアンモニアと酸素除去剤のヒドラジンで水質調整を行う揮発性物質処理。

c. ピッティング

(添付資料－ 9)

過去にSG 2次側環境において海水リーク等による塩化物環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、ピッティングが発生した実績があるが、高浜発電所4号機のような塩素濃度が十分低く管理され、かつ、アンモニアとヒドラジンによるAVT処理を実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考える。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉であることから、ピッティングの可能性はないと考える。

d. リン酸減肉

(添付資料－ 10)

過去の2次系水処理において、リン酸を使用していたプラントでリン酸による減肉が発生した実績があるが、高浜発電所4号機のようなアンモニアとヒドラジンによるAVT処理を実施しているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考える。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉であることから、リン酸減肉の可能性はないと考える。

e. 流体振動による疲労

(添付資料－ 11)

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

f. エロージョン

(添付資料－ 12)

当該部流速は約  であり、かつ、インコネルTT600は耐エロージョン性が高いことから(室温条件では約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る。

なお、室温条件にて評価を行っているが、温度によるエロージョンへの影響は小さく、常温の知見を用いても問題ないことを評価している。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

g. 摩耗減肉

A、BおよびC-SGの減肉信号を確認した伝熱管について、小型カメラによる目視点検を実施した結果、機械的な影響によるものとみられる減肉を確認したため、以下の確認を実施した。

(a) 減肉伝熱管2次側からの確認結果 (添付資料-13)

ア. 伝熱管外観観察

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

(ア) A-SG

第四管支持板下面付近 (X39, Y1) :

周方向約3 mm、軸方向1 mm以下 (減肉率: 約47%)

第四管支持板下面付近 (X24, Y1) :

周方向約2 mm、軸方向1 mm以下 (減肉率: 約25%)

第三管支持板下面付近 (X26, Y9) :

周方向約4 mm、軸方向1 mm以下 (減肉率: 約33%)

第三管支持板下面付近 (X26, Y10) :

周方向約4 mm、軸方向1 mm以下 (減肉率: 約40%)

第四管支持板下面付近 (X87, Y2) :

周方向約5 mm、軸方向1 mm以下 (減肉率: 判定基準未滿)

(イ) B-SG

第四管支持板下面付近 (X84, Y9) :

周方向約7 mm、軸方向約1 mm (減肉率: 約49%)

第三管支持板下面付近 (X69, Y3) :

周方向約5 mm、軸方向約1 mm (減肉率: 判定基準未滿)

(ウ) C-SG

第四管支持板下面付近 (X37, Y22) :

周方向約6 mm、軸方向1 mm以下 (減肉率: 約34%)

第四管支持板下面付近 (X89, Y3) :

周方向約6 mm、軸方向1 mm以下 (減肉率: 約31%)

第三管支持板下面付近 (X39, Y5) :

周方向約4 mm、軸方向1 mm以下 (減肉率: 約49%)

第三管支持板下面付近 (X86, Y8) :

周方向約4 mm、軸方向1 mm以下 (減肉率: 約35%)

第三管支持板下面付近 (X71, Y5) :

周方向約5 mm、軸方向1 mm以下 (減肉率: 約34%)

## イ. 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と相違ないことを確認した。

## (b) 管支持板との接触 (添付資料-14)

### ア. 管支持板ベイ部<sup>\*13</sup>の信号

構造上、伝熱管と管支持板ベイ部は接触しない。また、運転中に伝熱管へねじれを発生させる外力は発生せず、伝熱管と管支持板ベイ部は接触しない。

<sup>\*13</sup> 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<sup>\*14</sup>の信号

管支持板との接触により摩耗減肉が発生したのであれば、4箇所の管支持板ランド部に減肉が生じることになるが、目視点検の結果からは4箇所の管支持板ランド部の減肉は確認できなかったため、管支持板との接触・摩耗によって発生した減肉ではないと考える。

<sup>\*14</sup> 管支持板に加工されている四ツ葉型管穴のうち凸面部。

## (c) SG器外発生物との接触

### ア. 過去事象を踏まえた異物混入対策 (添付資料-15)

美浜発電所3号機の異物混入事象(2000年、2007年)を踏まえた従前の異物混入対策(開口部管理の徹底等)に加え、高浜発電所3号機前々回(第23回)定期検査以降の伝熱管減肉事象を踏まえた異物混入対策(機器内部に立ち入る前に、器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する等)については、高浜発電所4号機前回(第23回)定期検査においても実施していることを確認した。

## イ. SG器内点検

A、BおよびC-SGの減肉信号を確認した伝熱管並びにAおよびB-SGの判定基準未満の微小な減肉信号を確認した伝熱管について小型カメラにて目視点検を実施した結果、信号指示箇所にスケール等の付着物は認められなかったものの、当該伝熱管周辺の管支持板に接触痕を確認した。

また、A、BおよびC-SG器内の管板、流量分配板、第一～第七管支持板の上面の全ての範囲並びに第三、第四管支持板の下面の減肉信号を確認した伝熱管周辺部について、小型カメラによる目視点検を実施した結果、全体的にスケールおよびスラッジ<sup>\*15</sup>が残存していることを確認したが、それら以外の異物は確認できなかった。

<sup>\*15</sup> 2次系配管等に含まれる鉄イオンや鉄の微粒子が、給水系統によってSG器内に流れ集まって生成されたもの。伝熱管で生成されたものをスケール(フレック状(板状)に剥がれ落ちたものを含む)といい、スケールを形成せず粒子状となり、水中を漂うものや、スケールが砕けて小さくなったものが管支持板上等に堆積したものをスラッジという。

#### ウ. SG器外点検

(添付資料-16)

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

以上の調査結果から、SG器内に異物が混入している可能性はない。

#### (d) SG器内発生物との接触

##### ア. SG内部品の脱落調査

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

なお、伝熱管を減肉させる薄片形状と異なるものの、SG器内(2次側)の経年劣化事象を起因とする内部品の脱落として、流れ加速型腐食による給水内管裏当金を想定するが、高浜発電所4号機前々回(第22回)定期検査において、当該部のカメラによる目視点検を実施しており、給水内管裏当金の溶接部が全く損傷していなかったことから、脱落した可能性はないと考える。

##### イ. スケールによる伝熱管損傷の可能性調査

これまでの経緯を踏まえ、SG伝熱管の外面減肉の原因は、SG伝熱管から剥離した稠密なスケールの可能性が否定できないため、SG器内のスケール残存状況および回収したスケール調査を実施した。

##### (ア) SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況等の調査

(添付資料-17、18)

小型カメラを用いて、A、BおよびC-SGの管板～第七管支持板の上面の調査を行った結果、スケールおよびスラッジが残存していることを確認した。

SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況等の調査に合わせ、伝熱管の外観観察を行った結果、ほぼ全ての伝熱管は全面的にスケールに覆われていた。また、一部の伝熱管は局所的にスケールが剥離した痕跡等も認められた。これらの状況については、高温側と低温側(水平方向)、管支持板間(上下方向)において有意な差は認められなかった。

## (イ) SGから回収したスケールの性状調査

### I. 各SG器内のスケール回収

A、BおよびC-SGの管板、第一～第三管支持板上面に残存しているスケールのうち、比較的大きなものを選定し、約200個を回収した。また、今後の知見拡充のため、A、BおよびC-SGからスケールを更に約200個回収した。

### II. 回収したスケールの化学成分および形状分析結果

(添付資料-19)

回収したスケールについて、化学成分分析を実施した結果、主成分はマグネタイトであり、SG器内で発生するスラッジと同成分であることを確認した。A、BおよびC-SGの管板、第一～第三管支持板上面から取り出したスケールは、主に多角型、長尺型に分類され、長さが最大のもは、前者が長さ約25mm、幅約13mm、後者が長さ約29mm、幅約6mmであり、これらのスケールは管支持板の流路穴よりも大きく、運転中に管支持板下面に留まる可能性のある形状であった。また、これらのスケールについては、目視確認の結果、やや湾曲した形状をしており、そのうち各SGから取り出した15個のスケールについて3次元測定器により計測した結果、直径約22.3～22.5mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管(円筒)の外径(直径22.2mm)に近いことを確認した。

### III. 回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果

(添付資料-20、21)

スケール120個を対象に断面観察を行った結果、稠密層(密度の高い酸化鉄の層)が主体のスケールを48個確認した。

また、スケール50個(約10mm×約5mm以上)を対象に摩耗試験を行い、伝熱管とスケールの摩耗体積比<sup>\*16</sup>を調査した結果、伝熱管の減肉量がスケール摩滅量以上のスケールを2個確認した。

<sup>\*16</sup> 摩耗試験における伝熱管の減肉量とスケールの摩滅量の体積比。

### IV. 接触痕を有するスケールの調査

(添付資料-22)

減肉が認められた伝熱管に接触していた可能性のあるスケールを調査するために、A、BおよびC-SG器内から取り出したスケールの外観を観察した。このうち、AおよびB-SG伝熱管減肉部の下方(第二管支持板上面)に残存していたスケール各1個については、伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位に接触痕および光沢があった。

これらのスケールの形状を計測した結果、直径約22.6mm(A-SG採取スケール)、直径約22.3mm(B-SG採取スケール)の

円筒状に沿った形状であり、伝熱管（円筒）の外径（直径22.2mm）に近い形状であった。

走査型電子顕微鏡（以下「SEM」という。）による観察を行った結果、接触想定部位に伝熱管との摺動によりできたものと推定される筋状痕があった。

化学成分分析の結果、主成分はマグネタイトで、SG器内で発生するスラッジと同成分であり、接触想定部位に伝熱管の主成分であるニッケルおよびクロムの成分を検出した。

これらのスケールを切断して断面を観察した結果、スケールの厚さは約0.2mm（A-SG採取スケール）、約0.3mm（B-SG採取スケール）であり、稠密層が主体のスケールであった。

#### （4）損傷以外のECT信号指示 （添付資料-23）

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

#### （5）減肉メカニズムの検討

これまでの原因調査の結果、薬品洗浄後においても、稠密なスケールがSG器内に残存し、伝熱管の外表面減肉を発生させた可能性が高いことから、減肉を発生させるスケールの生成・剥離メカニズム、SG器内のスケールの挙動およびスケールが伝熱管を損傷させる可能性について、以下のとおり調査および検討を実施した。

##### a. スケールの生成メカニズム （添付資料-24）

###### （a）スケールの生成および性状の調査

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

###### ア. 析出付着

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

###### イ. 蒸発残渣

伝熱管の上部では、伝熱管表面と給水の温度差が伝熱管の下部に比べて小さく沸騰現象が顕著であることから、鉄イオンの析出付着よりも、鉄の微粒子が蒸発残渣として伝熱管表面に残留、堆積する現象が主体である。そのため、伝熱管の上部に付着するスケールは、粗密<sup>\*17</sup>な傾向があり、脆く摩耗に

対する耐性も低いと考える。また、蒸発残渣によって残留、堆積する鉄の微粒子の方が析出付着する鉄イオンに比べて粒径が大きいことから、伝熱管の上部で生成するスケールの方が伝熱管の下部より粗密で厚い傾向にある。

\*17 密度が比較的lowく、粗な状態。

(b) スケール性状の実機調査 (添付資料-25)

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

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

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

(c) 2次系の水質管理調査

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

ア. 水処理履歴 (添付資料-26)

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

SG器内への鉄の持込みに関係する項目はpHであり、2次系構成機器の流れ加速型腐食等による給水中への鉄の放出を抑制するためにはアルカリ側に水質管理を行う必要がある。そのため、これまでpH上昇によりSG器内への鉄の持込み量低減を図るべく、AVT処理(pH9.2)、ETA<sup>\*18</sup>処理(pH9.4~9.5)、高ETA処理(pH9.8)、高アンモニア処理(pH9.8)のようにpHの高い処理方法へと改善を図ってきた。

各水処理における給水中の鉄含有量の実測データは次のとおりであり、pHの低い水処理方法ほど給水中の鉄含有量が多いことが分かっている。

\*18 エタノールアミン。

イ. 給水中の鉄含有量

上記水処理方法での給水中の鉄含有量は次のとおりである。

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

ウ. 運転時間

上記水処理方法での運転時間は次のとおりである。

水処理方法	運転時間
A V T 処理	約 9. 8 万時間
E T A 処理	約 8. 0 万時間
高 E T A 処理	約 2. 0 万時間
高アンモニア処理	約 3. 4 万時間

エ. 鉄の持込み量

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

水処理方法	鉄の持込み量 / S G
A V T 処理	約 1, 6 8 0 k g
E T A 処理	約 6 5 0 k g
高 E T A 処理	約 7 0 k g
高アンモニア処理	約 1 2 0 k g
合計	約 2, 5 2 0 k g

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

(d) スケール厚さに関する実機調査

(添付資料-27)

スケール厚さの傾向を推定するパラメータとして、主蒸気圧力や S G 伝熱抵抗係数<sup>\*19</sup>があり、その変化量を確認した結果、いずれも運転時間の経過とともに圧力低下や係数増加が認められ、スケール厚さは経年的に増加するものと推定される。

また、高浜発電所 3 号機第 8 回 (1995 年) および第 14 回 (2002 年) 定期検査において、スケール厚さを把握するため、周波数 3 k H z の E C T を実施した結果、第 8 回から第 14 回定期検査までの 6 サイクルで増加したスケール厚さは、数十  $\mu$  m ～ 100  $\mu$  m 程度であった。

\*19 伝熱管の外表面に不純物が付着するなどにより、熱伝達特性を低下させる度合いを示す指標。



以上の結果から、スケール厚さは経年的に増加していくものであることを確認した。また、現在では高E T A処理や高アンモニア処理によって給水のp Hを高く維持することで、1サイクルあたりの鉄の持込み量は数十k g / S G程度に抑えられていることを確認した。

b. スケールの剥離メカニズム (添付資料-28)

(a) 剥離メカニズムの検討

伝熱管表面に生成したスケールが主に剥離するのは、起動停止時の伝熱管の熱伸びと収縮によるものと推定される。具体的には次のア. ~ウ. のとおりであり、スケールはプラント停止時の伝熱管の熱収縮に追従できずにフレーク状(板状)に剥離したものと推定される。

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

イ. プラント運転中に割れの隙間が新たに生成したスケールで埋まる。

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

また、プラント起動時および運転中においても、停止時に剥離しなかったスケールが、伝熱管の振動やS G器内の流れの影響により剥離する可能性も否定できない。

(b) 長期停止の影響調査 (添付資料-29)

東日本大震災以降、2011年7月に定期検査を開始し、その後、2017年5月に再稼動するまでの約6年間、プラントは長期停止状態となっていた。その間、S G器内は腐食を防止するためヒドラジン水による満水保管状態としていたことから、この状態がスケール剥離挙動に与える影響を調査するため、スラッジ(粒の観察を容易にするため粉末状スラッジを使用)を対象にヒドラジン水による浸漬試験を1か月間実施した。その結果、時間の経過とともにスケールを構成する鉄粒子同士が合わさり粒径が大きくなることを確認した。これは、ヒドラジンの還元作用でスケールの鉄が一部溶解、再析出を繰り返し、粒径が大きくなったものと推定される。

粒径が大きくなると、伝熱管との接触面積が減少し、剥離が促進される可能性がある。スケールの剥離量が増えるとスラッジランニングでのスケール回収量が大きくなる可能性があるため、高浜発電所4号機の長期停止前後の回収量を調査した結果、長期停止前はS G 3台から約20k gのスケール等を回収したが、長期停止後の第21回定期検査時には約40k gと増加していることを確認した。

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

c. SG器内挙動の推定およびスケールと伝熱管の接触状態の再現性確認

(添付資料-30)

SG器内調査およびスケール分析の結果、今回の外面減肉はスケールによる摩耗の可能性が高いことから、剥離したスケールがSG器内で第三および第四管支持板下面へ到達するまでの挙動を推定した。また、SG2次側器内の流況モックアップ試験により、実機を模擬した二相流の条件においても、推定した伝熱管へのスケールの接触状態が再現するかの確認を実施した。なお、評価に当たっては、SG器内で確認されているスケールを参考に形状を想定して評価した。

(a) 器内のスケール挙動検討

運転中のSG2次側器内の流況下では流体抗力がスケールの落下力を上回ることから、スケール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ロット部を通過し、減肉箇所へ到達したことが考えられる。

(b) SG2次側器内の流況モックアップ試験

SG2次側器内の流況を再現するモックアップ試験結果から、実機を模擬した二相流の条件においてスケールの接触状態が再現できることを確認した。

d. スケールが伝熱管を損傷させる可能性の調査

(a) 高浜発電所4号機前回(第23回)定期検査における薬品洗浄の実施結果

(添付資料-31、32)

ア. 薬品洗浄効果

薬品洗浄時の条件を確認した結果、温度管理や薬品濃度管理が計画どおり実施されていたことを確認し、薬品洗浄によって、SG1台あたり、約680kgの鉄分を除去できていたことを確認した。

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

イ. スラッジ影響を考慮した薬品洗浄効果の確認試験結果

高浜発電所4号機前回(第23回)定期検査において、スケールの脆弱化を目的として薬品洗浄を実施したが、今回(第24回)定期検査にてSG器内から回収したスケールを分析したところ、稠密層厚さが0.1mmを超えるスケールが確認されたことから、薬品洗浄効果の確認試験を行った。

確認試験は実機薬品洗浄時のSG器内環境(薬品濃度、温度等)を模擬した水槽中で実施した。また、SG器内における薬品との接液環境を模擬するため、水槽中にはスケールおよびスラッジに加え、SG器内構成部品と同材料の試験片を設置し、スケールおよびスラッジの比率やスケール周辺のスラッジ量を変化させた3パターンでの試験を実施した。その結果、スケール周

辺のスラッジ量が多くなった場合は、薬品洗浄によるスケールの脆弱化効果が低減することを確認した。

以上により、高浜発電所4号機前回(第23回)定期検査における薬品洗浄により鉄分が一定量除去されており、SG器内のスケールはおおむね脆弱化していたと推定されるが、SG器内にスケールとスラッジが混在していたことから、一部のスケール脆弱化効果が低減し、前回薬品洗浄後においても脆弱化できなかったスケールが一部存在していたものと推定される。

なお、高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査において薬品洗浄後にスケールのサンプル調査を実施し、脆弱化していたことを確認していたが、今回のサンプル調査では稠密層が厚いスケールが比較的多く見つかった。その要因としては、前回の薬品洗浄により脆弱化されたスケールの多くは運転中にスラッジになり、稠密層が厚いものがスケールとして残ったためと推定される。

(b) 摩耗形態の推定 (添付資料-33、34)

スケールとの接触で伝熱管が摩耗する場合、スケールの振動により摩耗するケースと、伝熱管の振動により摩耗するケースが考えられるため、次のとおり各ケースで想定されるワークレート<sup>\*20</sup>の比較を実施した。

<sup>\*20</sup> 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。

ア. スケール振動のケース

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

イ. 伝熱管振動のケース

本ケースでは、スケールが管支持板下面で保持され、接触する伝熱管のランダム振動<sup>\*21</sup>により伝熱管自身に減肉が発生したことを想定する。管支持板部の伝熱管の振幅は、伝熱管と管支持板BEC穴ランド部の隙間に制限されるため、隙間が確保され振幅が大きくなる伝熱管においてスケールとの接触により減肉が生じるものと推定される。本推定に基づきワークレートを試算すると、スケール振動のケースに比べて十分大きなワークレートが得られることを確認した。

<sup>\*21</sup> 蒸気と水が伝熱管に衝突する力と、伝熱管の周りに生じる流れの乱れによって伝熱管が振動する現象。

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

なお、伝熱管振動のケースでは、最大減肉深さは伝熱管の振動振幅に制限されるため、減肉の進展により伝熱管を貫通することはない。

#### (c) 減肉形状の再現性確認試験

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

##### ア. 減肉試験

(添付資料-35)

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

##### イ. ECTモックアップ試験

(添付資料-36)

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

#### (d) ワークレートによる摩耗体積評価

(添付資料-37)

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

#### e. 高浜発電所3号機および4号機の特異性

##### (a) 当社他プラントとの鉄持込み量、薬品洗浄実績およびスケール回収量の比較

鉄の持込み量について、比較のため当社他プラントの調査を実施した。また、大飯発電所3号機および4号機では薬品洗浄を実施しており、スケール性状に影響を与えている可能性があることから、その実績を確認した。さらに、スケールの厚さや長期停止に伴うスケールの剥離量は、スケール回収量に現れている可能性があることから、あわせて長期停止前後のスケール回収量について比較調査を実施した。

ア. 鉄持込み量および薬品洗浄実績 (添付資料-38)

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

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

<表1：各プラントの鉄持込み量および薬品洗浄実績>

	高浜発電所		大飯発電所		美浜発電所	高浜発電所	
	3号機	4号機	3号機	4号機	3号機	1号機	2号機
運転時間*22 (万時間)	23.2	23.2	17.0	18.2	9.3	10.9	12.5
鉄持込み量 (kg)	2,650	2,520	1,850	1,970	810	680	940
薬品洗浄 実績回数	2回	1回	2回	1回			
薬品洗浄時点 の運転時間 (万時間)	22.3 (第24回)	22.2 (第23回)	16.1 (第17回)	16.2 (第16回)	—	—	—
	23.2 (第25回)		17.0 (第18回)				

\*22 美浜発電所3号機、高浜発電所1号機および2号機については、SG取替え以降の運転時間を示す。なお、運転時間については、現時点で直近の定期検査解列時点とする。

イ. スケール回収量 (添付資料-39)

スケール回収量\*23を確認した結果、高浜発電所3号機および4号機では、いずれも長期停止後にスケール回収量が増加していた。

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

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

\*23 スラッジランシングで回収したスラッジおよびスケールのうち、スケールの回収量を表2に示す。

<表2：スケール回収量（長期停止前後比較）>

プラント	長期停止前 (kg)	長期停止後 (kg)		
高浜発電所 3号機	0.01未満 (第21回)	0.41 (第22回)	0.24 (第23回)	0.36 (第24回)
高浜発電所 4号機	0.01未満 (第20回)	12.37 (第21回)	8.24 (第22回)	6.08 (第23回)
大飯発電所 3号機	0.01未満 (第16回)	0.01未満 (第17回)	0.01未満 (第18回)	—
大飯発電所 4号機	0.01未満 (第15回)	0.01未満 (第16回)	0.01未満 (第17回)	—

(b) 当社他プラントとのスケール比較

(添付資料－４０)

スケールの稠密層厚さと鉄持込み量に相関があるかを検証するため、当社他プラントのSG下部からスケールを採取し、断面マイクロ観察を実施した結果を確認した。採取対象プラントは、高浜発電所４号機、大飯発電所３号機および４号機からは薬品洗浄回数の少ない大飯発電所４号機、SG取替えプラント（美浜発電所３号機、高浜発電所１号機および２号機）からは、最も鉄の持込み量の大きい高浜発電所２号機を選定した。なお、高浜発電所３号機については、高浜発電所４号機とスケール性状が同等であることを確認している。

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

<表３：スケール観察結果\*24>

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

\*24 高浜発電所４号機前回（第２３回）定期検査のSG伝熱管外面損傷事象における原因調査の過程で確認。

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

(c) 伝熱管の摩耗試験結果の比較

(添付資料－４１、４２)

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

有意な減肉を与える稠密層厚さを検討するため、高浜発電所３号機および４号機から採取したスケールの摩耗試験を実施した結果、空隙率５％以下の

稠密層厚さが0.1mm未満のスケールでは有意な摩耗減肉は与えられないことが分かった。

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

f. スケールにより減肉した国内外事例調査 (添付資料-43)

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

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

10. 伝熱管の健全性

(1) 減肉伝熱管の健全性 (添付資料-44)

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、1975年度～1980年度)では、局部減肉を有する伝熱管の内圧強度評価手法を確立するため、内圧による高温破壊試験を実施しており、その試験結果から運転中および事故時を包絡する内外差圧による伝熱管の破断圧力を算出した。

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

b. 耐震性

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

保守的に一様外面減肉と仮定し、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した結果、十分な裕度があることから、減肉した伝熱管が地震により損壊することはない。

(2) 隣接伝熱管の健全性 (添付資料-45)

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

### 1 1. 推定原因 (添付資料－ 4 6、 4 7)

A、 BおよびC－ S G伝熱管で認められた外面減肉は、これまでの運転に伴い、伝熱管表面に生成された稠密なスケールが前回（第 2 3 回）定期検査時の薬品洗浄の後も S G器内に残存し、プラント運転中に管支持板下面に留まり、そのスケールに伝熱管が繰り返し接触したことで摩耗減肉が発生した可能性が高いと推定した。

### 1 2. 薬品洗浄の条件設定 (添付資料－ 4 8)

S Gの器内構成部品に大きな影響を及ぼさない範囲で、S G器内のスケールの脆弱化を図る薬品洗浄条件について検討した結果、薬品濃度として 3 %、洗浄回数を 2 回とする。また、第四管支持板の下面で減肉が確認されたことも踏まえ、洗浄範囲を 1 回目、 2 回目ともに S G伝熱管全域とする。

なお、薬品洗浄の効果を高めるため、薬品洗浄実施前に小型高圧洗浄装置を用いて管支持板上も含めた S G器内の洗浄を行うことにより、S G器内に残存するスケールおよびスラッジをできる限り除去することとする。

### 1 3. 対 策 (添付資料－ 4 9～ 5 4)

高浜発電所 3 号機今回（第 2 5 回）定期検査において実施した対策により S G器内のスケール除去・脆弱化が効果的に実施できたことおよび高浜発電所 4 号機今回（第 2 4 回）定期検査において採取したスケールに対しても、高浜発電所 3 号機今回（第 2 5 回）定期検査で実施した薬品洗浄が有効に作用することを確認したことから、高浜発電所 4 号機今回（第 2 4 回）定期検査においては以下の対策を実施する。

#### (1) 減肉伝熱管の施栓

外面減肉が認められた A－ S G伝熱管 5 本、 B－ S G伝熱管 2 本および C－ S G伝熱管 5 本について、高温側および低温側の S G管板部で施栓し、供用外とする。

#### (2) 小型高圧洗浄装置による洗浄

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

#### (3) 薬品洗浄による稠密なスケールの脆弱化

S G器内に薬液を注入し、伝熱管全域を薬品に浸した状態で 2 回洗浄を行い、伝熱管に付着している稠密なスケールを脆弱化させる。

#### (4) 今後の S G保全

今回取り出したスケールについては、今後、追加の 3 次元測定器による計測、



断面観察および摩耗試験を実施し、スケールの形状や性状に関する知見の拡充に努める。

また、毎定期検査時にスケールを回収し、スケールの稠密層厚さの確認および摩耗試験を実施する。確認および摩耗試験では、稠密層厚さ0.1mm未満および摩耗体積比0.1未満であることを確認し、それを超えた場合は薬品洗浄や小型高圧洗浄装置による洗浄を実施する。

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

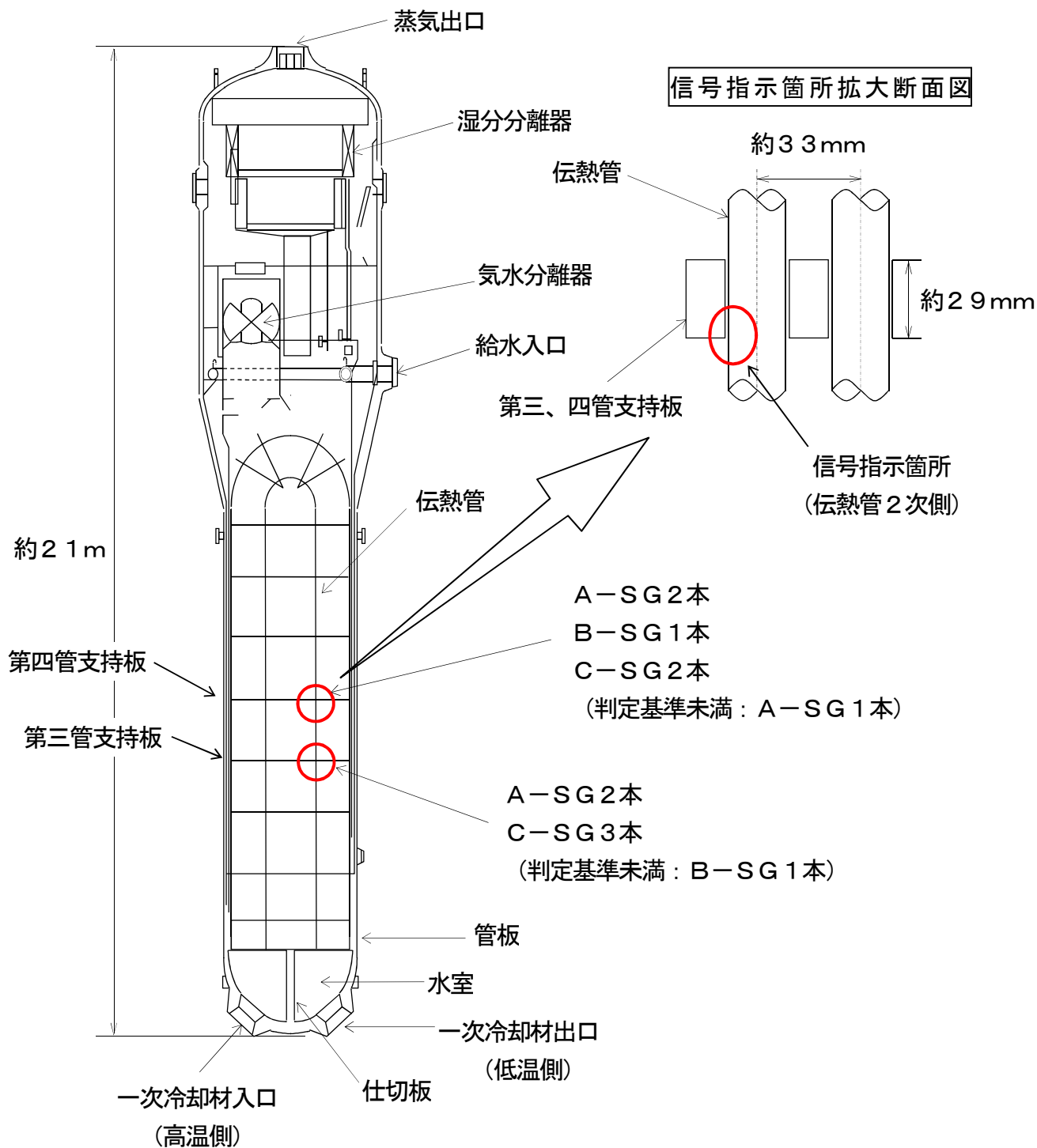
以 上

## 添 付 資 料

1. SG伝熱管信号指示箇所概要図
2. SG伝熱管ECT結果一覧
3. SG伝熱管ECT結果
4. SG伝熱管ECT信号指示位置図
5. 要因分析図
6. 高浜発電所3号機および4号機におけるSG伝熱管外面の損傷事象の経緯
7. ECTの位相評価
8. 粒界腐食割れに関する検討結果
9. ピッチングに関する検討結果
10. リン酸減肉に関する検討結果
11. 流体振動による疲労に関する検討結果
12. エロージョンに関する検討結果
13. SG器内点検結果
14. 管支持板との接触による摩耗減肉の評価
15. 異物混入対策について
16. SGブローダウン系統点検結果
17. SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査
18. SG器内の伝熱管表面の観察結果
19. 回収したスケールの化学分析および形状確認結果
20. 伝熱管とスケールの摩耗試験方法について
21. 回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果
22. 回収物分析結果
23. スケール剥離による減肉信号への影響
24. スケール生成メカニズム
25. スケール性状に関する過去の知見
26. 2次系水処理と水化学管理の変遷
27. プラント性能指標の推移
28. スケール剥離メカニズムイメージ
29. 長期停止影響に係る考察
30. スケールのSG2次側器内挙動の推定および流況モックアップ試験による接触状態の再現
31. 高浜発電所4号機前回（第23回）定期検査における薬品洗浄の実施結果
32. スラッジ影響を考慮した薬品洗浄工場試験結果
33. スケールによる伝熱管の減肉メカニズム調査の流れ
34. スケールと伝熱管の接触時における摩耗形態の推定について
35. 減肉試験による実機摩耗減肉形状の確認について
36. ECTモックアップ試験による実機ECT信号との整合性確認について

37. ワークレートをを用いた摩耗体積の計算結果について
38. 鉄持込み量比較
39. これまでのスラッジランシングによるスラッジ・スケールの総回収量
40. 高浜発電所3号機および4号機のスケール性状の比較について
41. 当社他プラントスケール摩耗試験結果
42. スケール性状による伝熱管減肉影響
43. 海外のSGの運転履歴等調査結果
44. 減肉した伝熱管の評価
45. 隣接伝熱管の健全性
46. SG点検スケジュール
47. 高浜発電所4号機前回(第23回)定期検査における伝熱管外面減肉事象に係る調査・対策内容からの主な変更点
48. 薬品洗浄条件について
49. SG伝熱管信号指示箇所補修概要図
50. 高浜発電所4号機 SG伝熱管の補修来歴
51. 減肉により施栓した伝熱管が隣接伝熱管へ及ぼす影響
52. 小型高圧洗浄装置による洗浄について
53. スケールに対する保全指標について
54. 高浜発電所4号機SG器内のスケールに対する対策の変遷

SG伝熱管信号指示箇所概要図

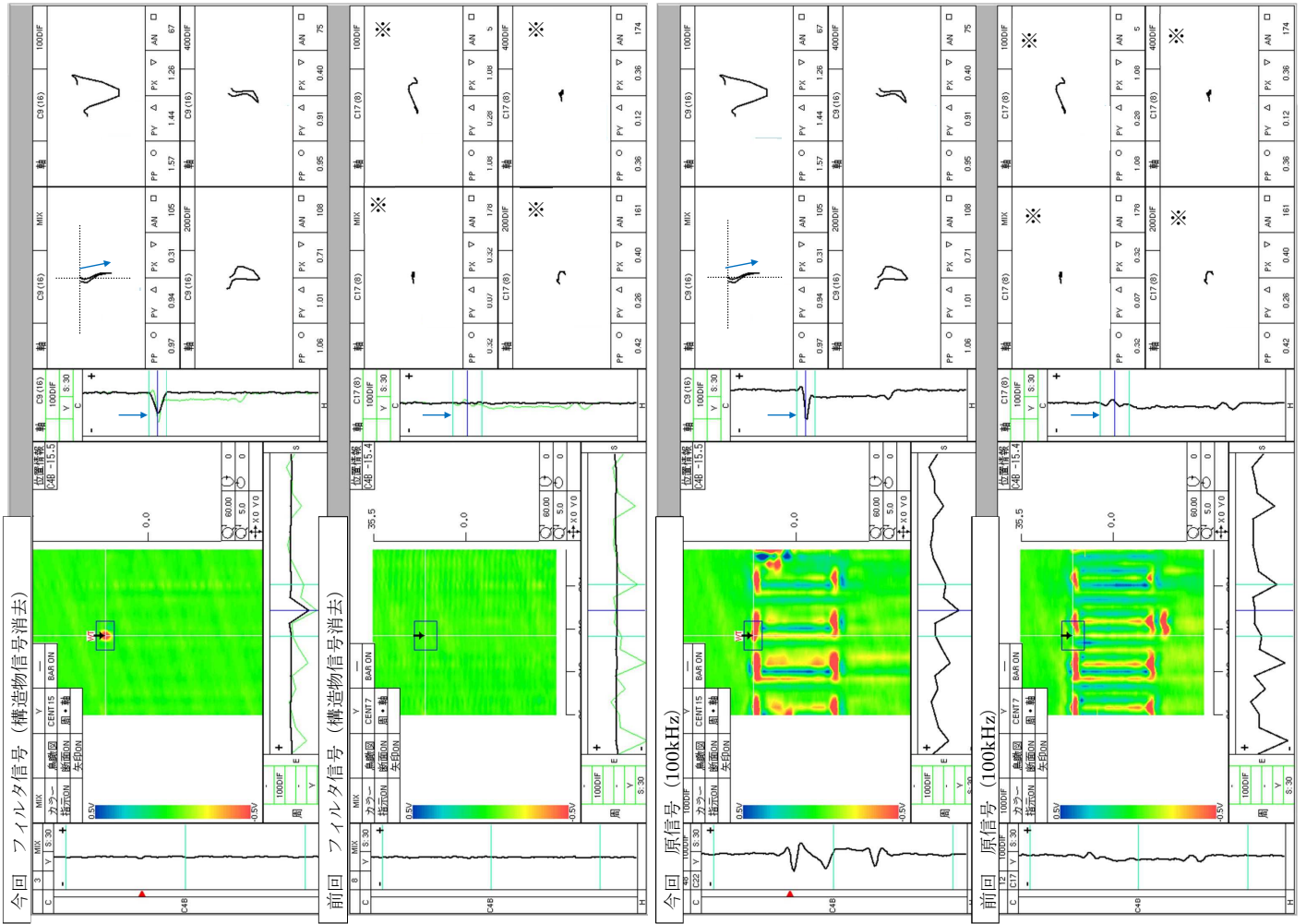


## SG伝熱管ECT結果一覧

	A-SG	B-SG	C-SG	合計
設備本数	3,382	3,382	3,382	10,146
既施栓本数 (応力腐食割れによる施栓本数※)	139 (8)	135 (3)	129 (13)	403 (24)
検査対象本数	3,243	3,247	3,253	9,743
指示管本数 (微小な信号指示)	4 (1)	1 (1)	5	10 (2)
結果	A-SGの伝熱管4本、B-SGの伝熱管1本およびC-SGの伝熱管5本について、管支持板部付近に、外面からの減肉とみられる有意な信号指示が認められた。			
備考	A-SGの伝熱管1本およびB-SGの伝熱管1本について、管支持板部付近の外面に判定基準未満の微小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

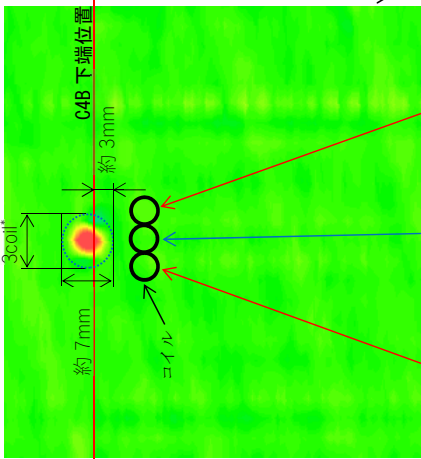


※異なる信号がないため任意の位置で表示。

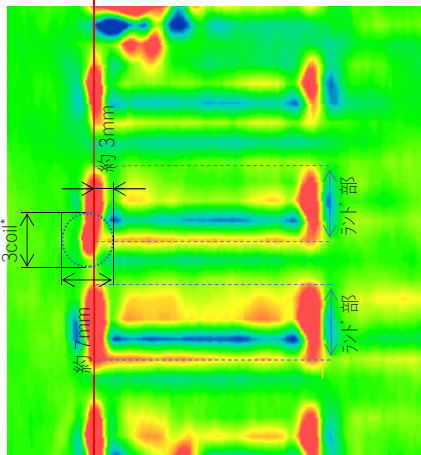
前今比較

A-SG X39, Y1 部位：C4B (深さ：約47%)

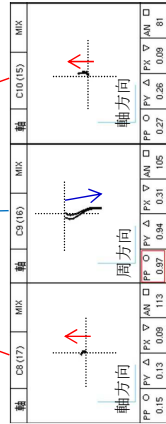
フィルタ信号 (構造物信号消去)



原信号 (100kHz)



\*1coil : 約3mm ※内側から見たイメージ

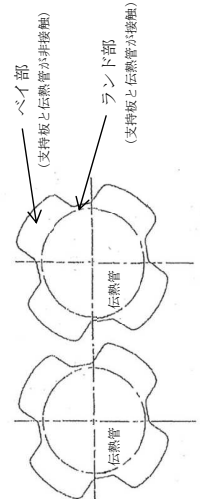
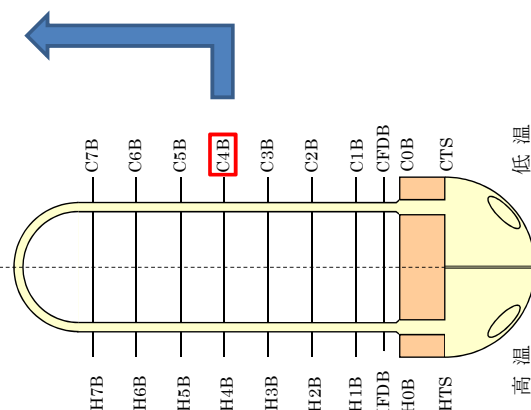
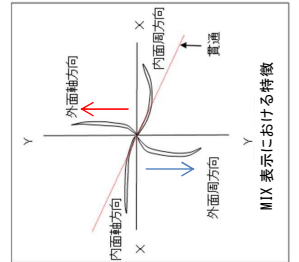


【A-SG X39, Y1 リサージュ波形】

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

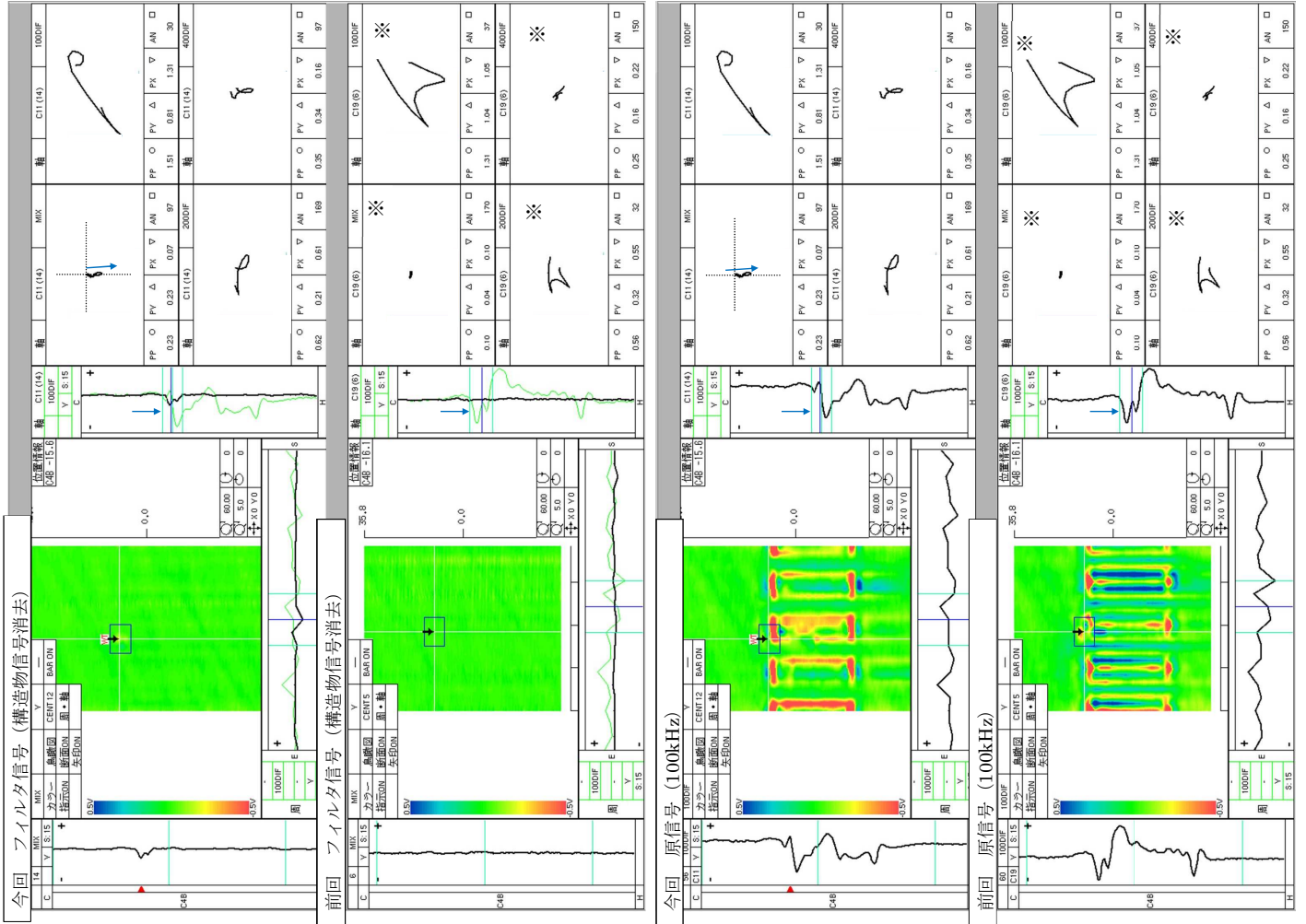
波形評価

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

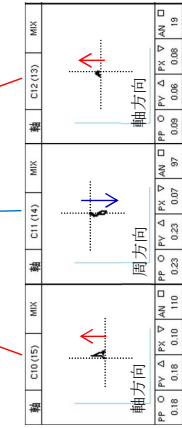
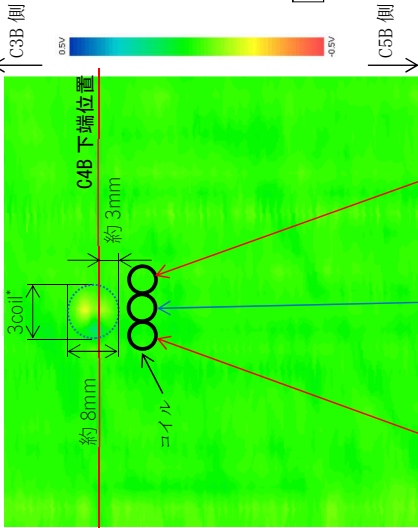


※特異な信号がないため任意の位置で表示。

前今比較

A-SG X24, Y1 部位: C4B (深さ: 約2.5%)

フィルタ信号 (構造物信号消去)

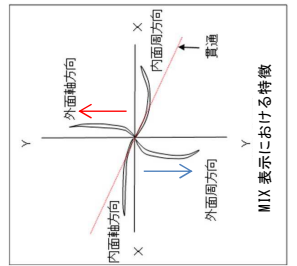


【A-SG X24, Y1 リサージュ波形】

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

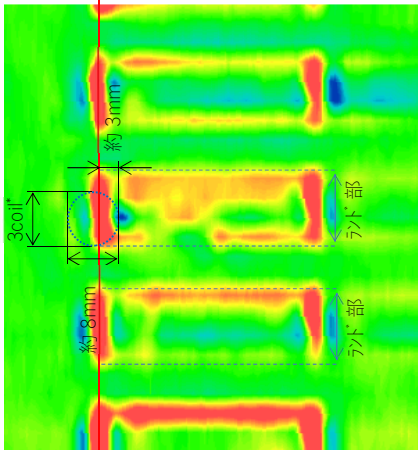
波形評価

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

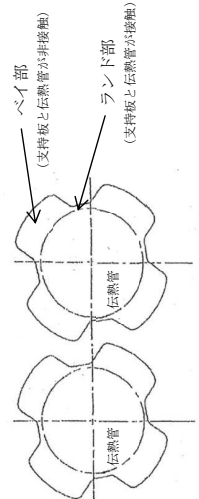
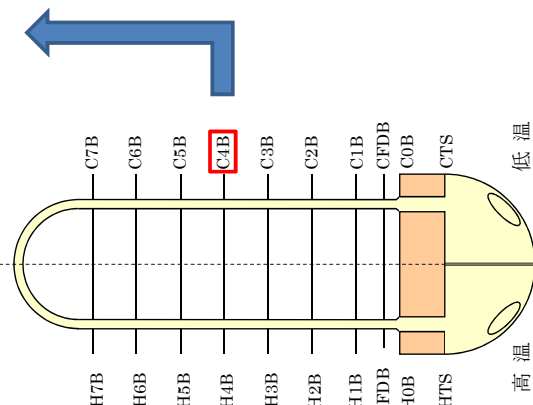


MIX 表示における特徴

原信号 (100kHz)



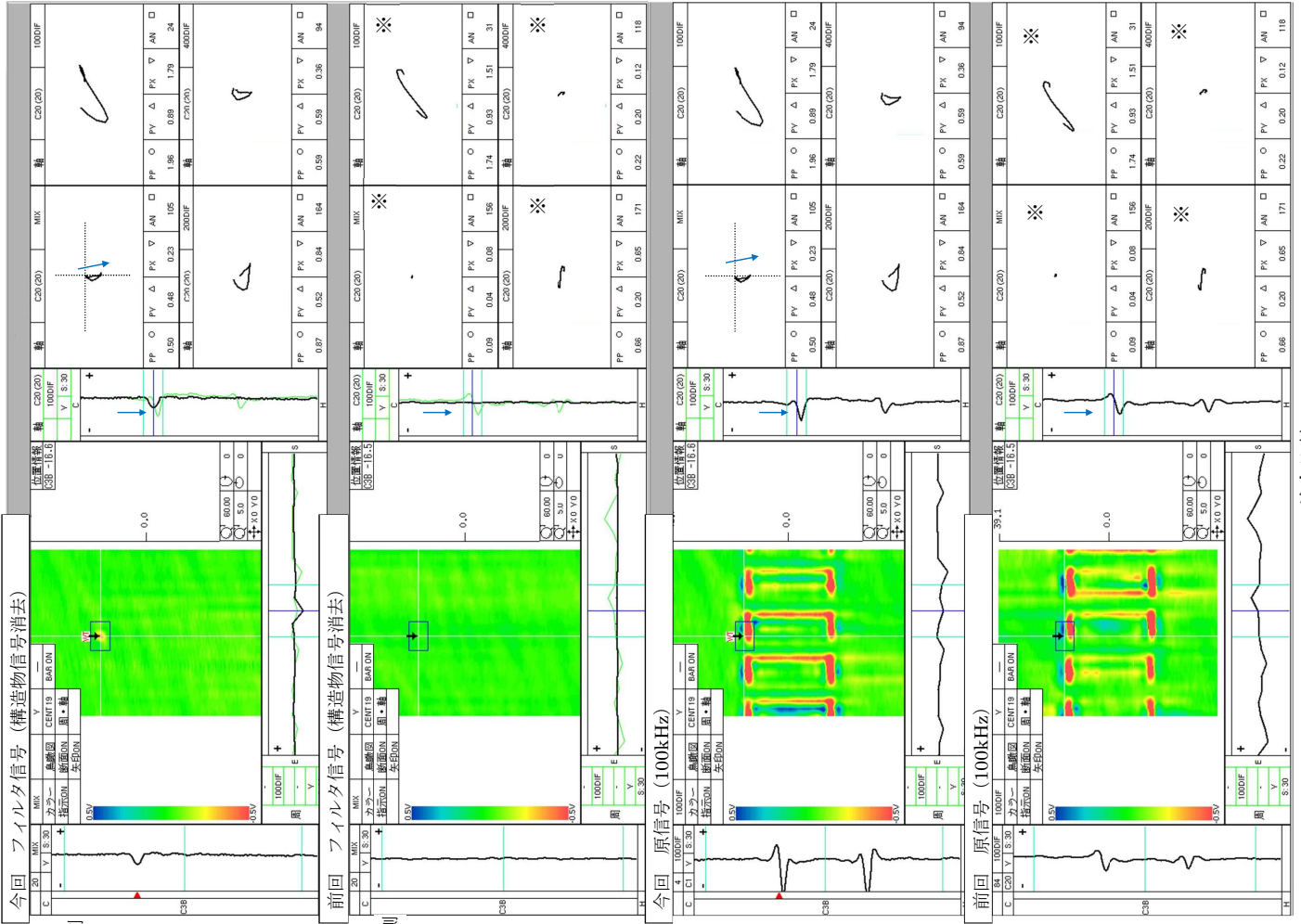
\*1coil: 約3mm ※内側から見たイメージ



信号評価



SG伝熱管ECT結果

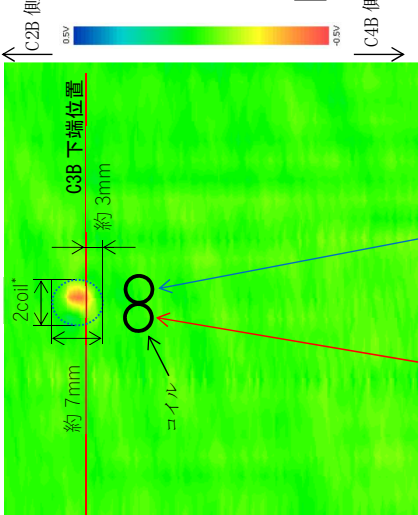


※異なる信号がないため任意の位置で表示。

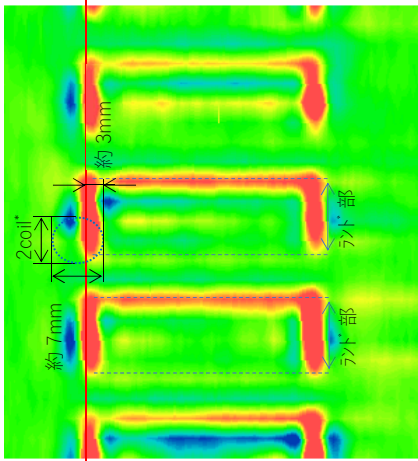
前今比較

A-SG X26, Y9 部位：C3B (深さ：約33%)

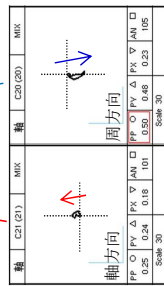
フィルタ信号 (構造物信号消去)



原信号 (100kHz)



\*1coil : 約3mm ※内側から見たイメージ



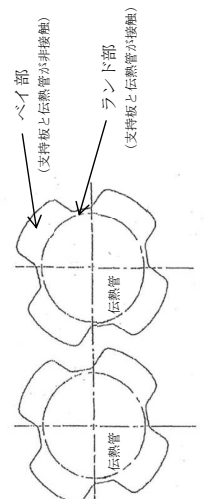
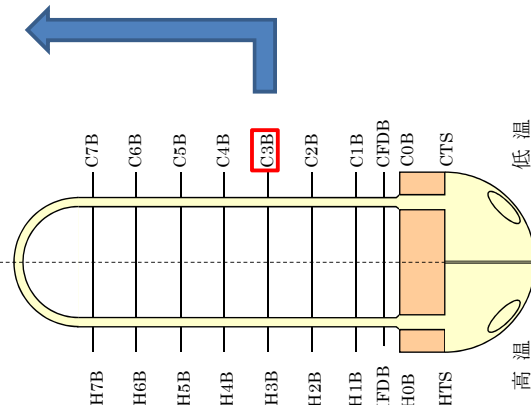
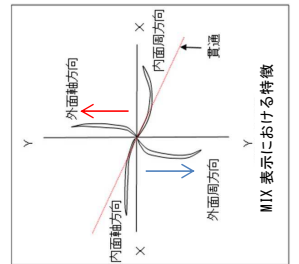
【A-SG X26, Y9 リサーチ】

リサーチ波形  
 必ず端部の軸方向成分(赤色矢印)を検出  
 ます中心部の周方向成分(青色矢印)を検出

波形評価

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

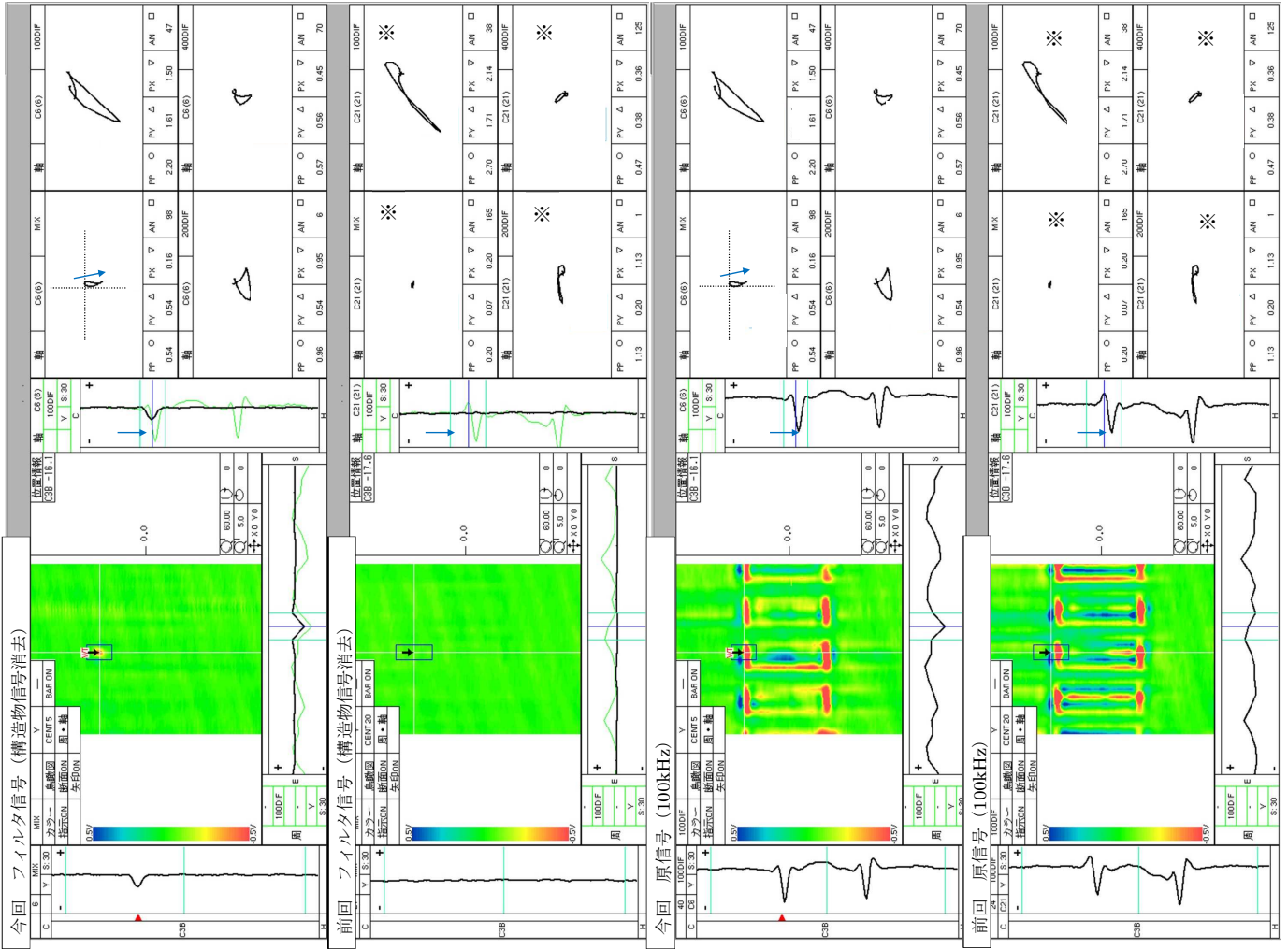
上記のとおり軸方向成分および周方向成分の両方の成分が読み取れるため、広がりを持つ減肉と評価する。(下図参照)



信号評価



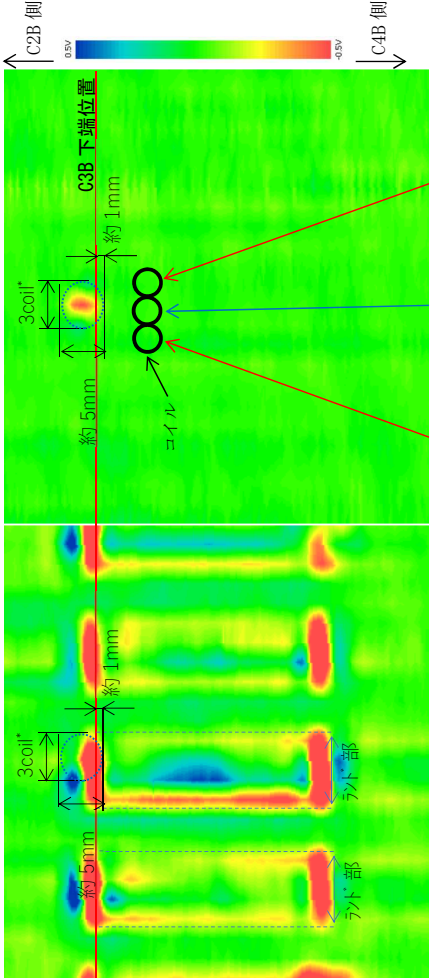
SG伝熱管ECT結果



前今比較

※特異な信号がないため任意の位置で表示。

フィルタ信号 (構造物信号消去)



【A-SG X26,Y10 リサーチ】

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

**波形評価**

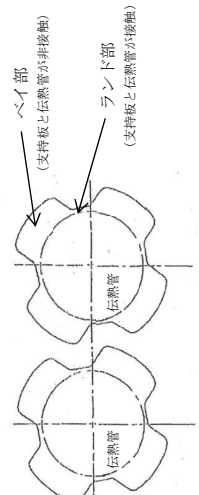
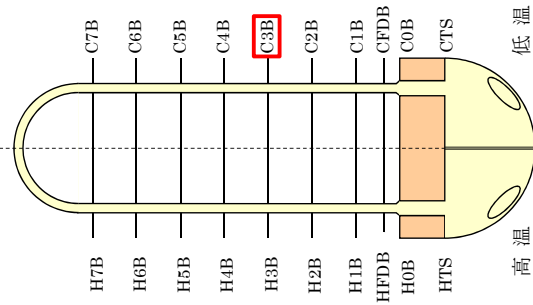
- ・位相角評価から、外面指示の特徴を持っている。
- ・指示は複数のコイルで検出されており、指示の中心部のコイルは周方向成分、両端部のコイルでは軸方向成分の特徴を持っている。

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

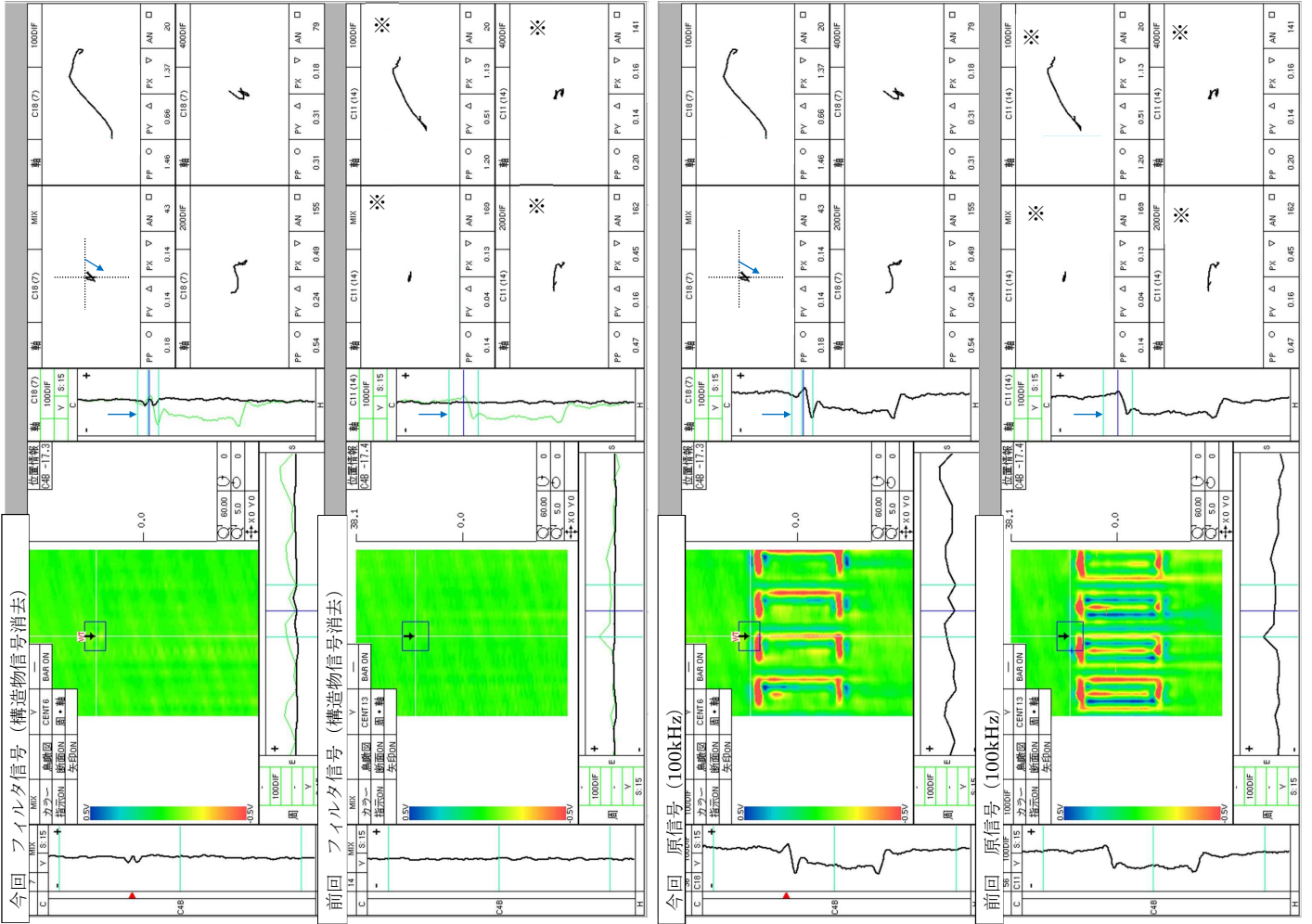
MIX 表示における特徴

信号評価

\*1coil : 約3mm ※内側から見たイメージ



SG伝熱管ECT結果

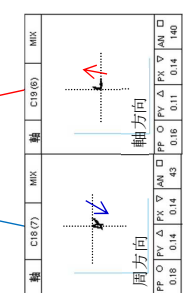
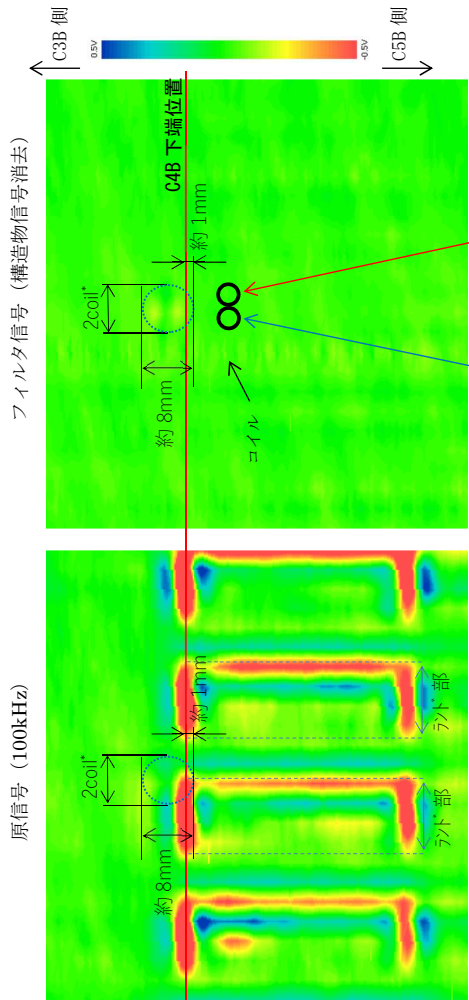


※異なる信号がないため任意の位置で表示。

前今比較

A-SG X87, Y2 部位：C4B (深さ：判定基準未満)

信号評価



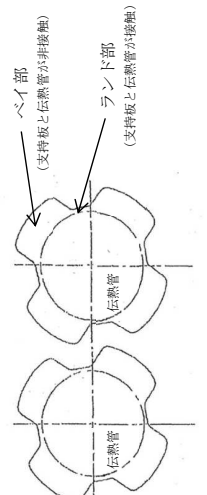
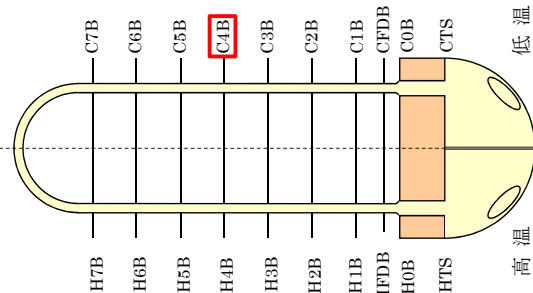
【A-SG X87, Y2 リサージュ波形】  
 必ず端部の軸方向成分(赤色矢印)を検出  
 ます中心部の周方向成分(青色矢印)を検出

**波形評価**

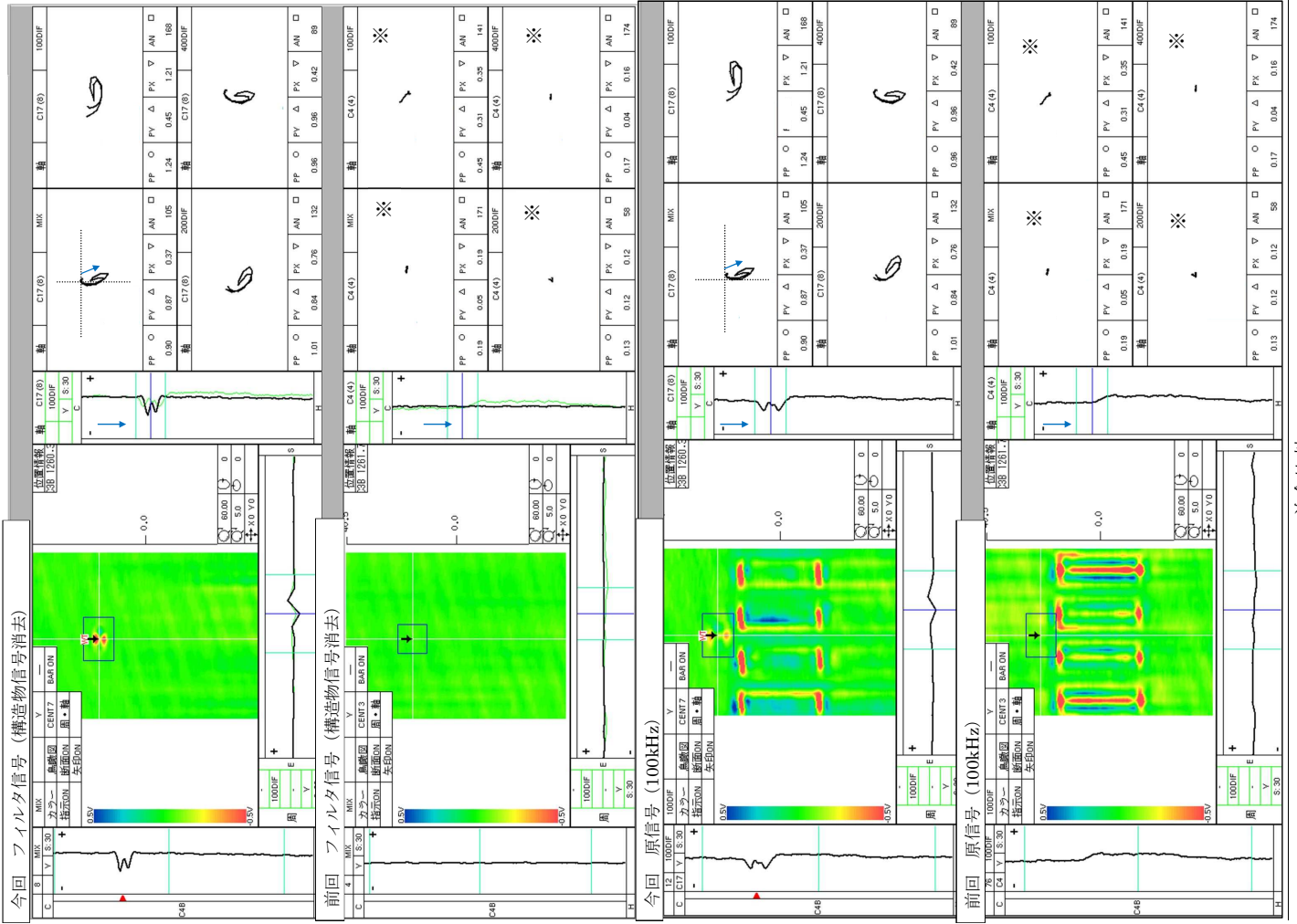
- 位相角評価から、外面指示の特徴を持っている。
- 指示は複数のコイルで検出されており、指示の中心部のコイルは周方向成分、両端部のコイルでは軸方向成分の特徴を持っている。

上記のとおり軸方向成分およ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)

\*1coil : 約3mm ※内側から見たイメージ



SG伝熱管ECT結果

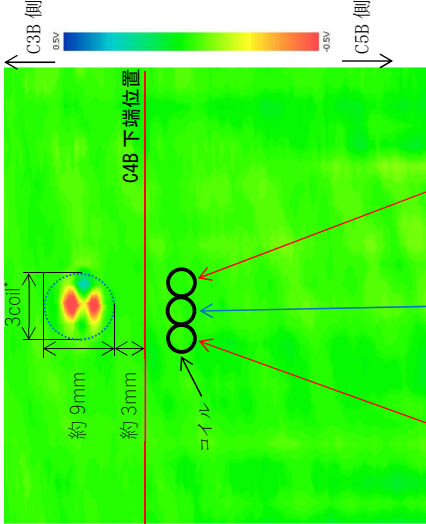


※特異な信号がないため任意の位置で表示。

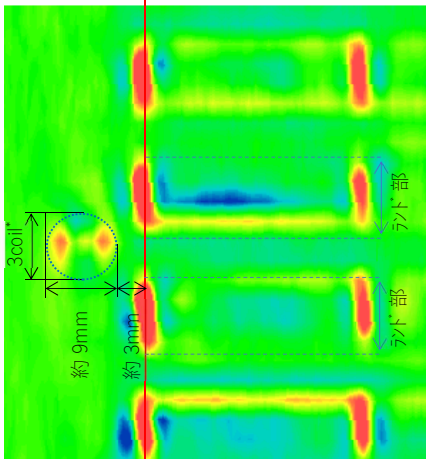
前今比較

B-SG X84, Y9 部位: C4B (深さ: 約49%)

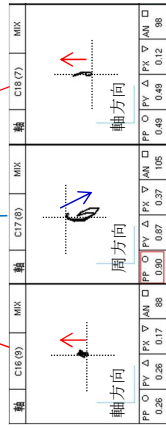
フィルタ信号 (構造物信号消去)



原信号 (100kHz)



\*1coil: 約3mm ※内側から見たイメージ

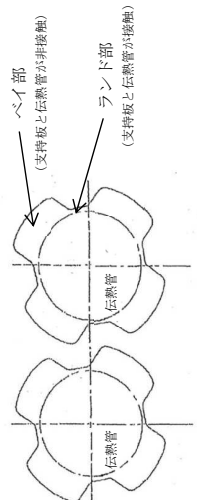
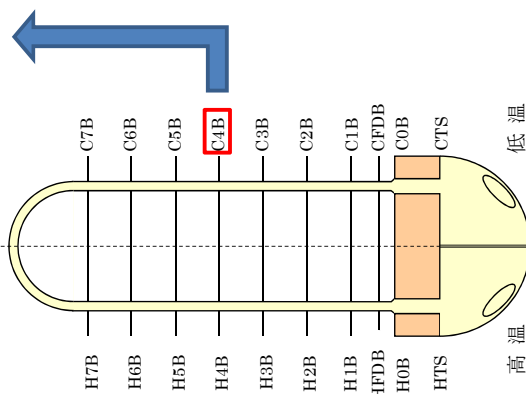
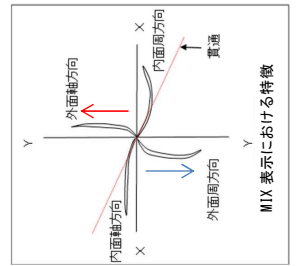


【B-SG X84, Y9 リサージュ波形】

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

波形評価

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

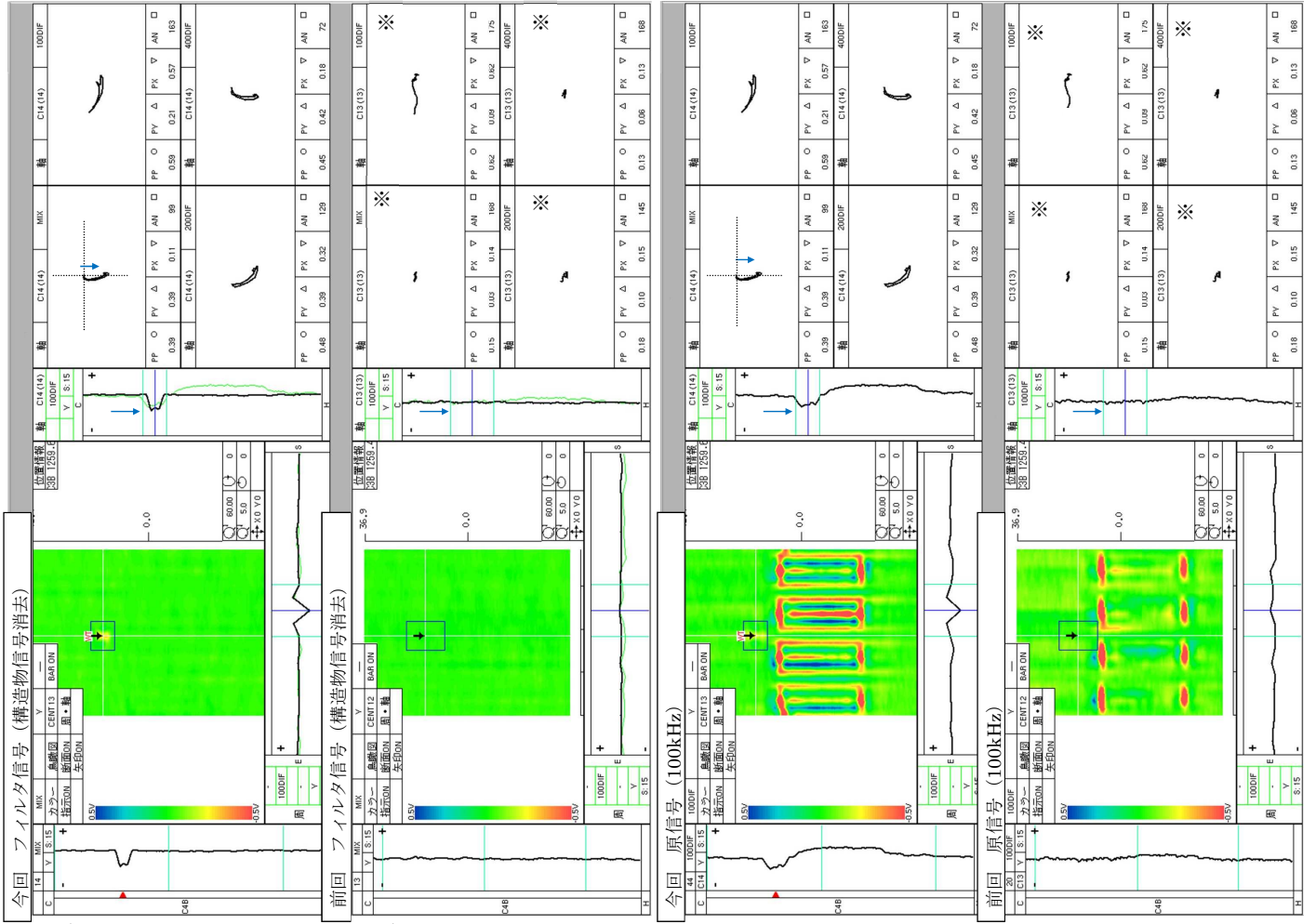


信号評価





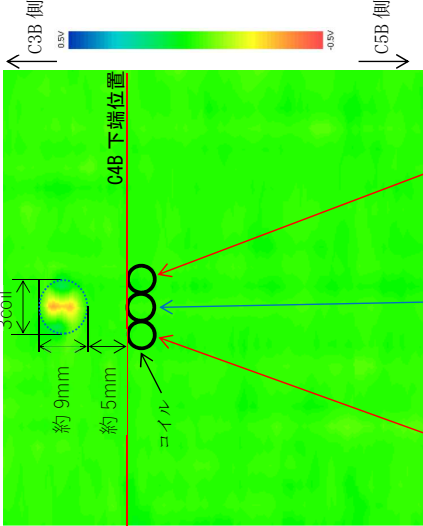
SG伝熱管ECT結果



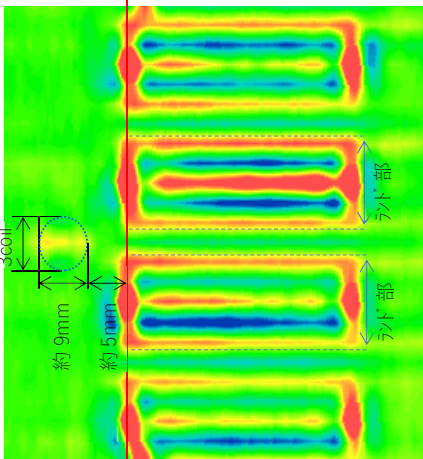
※特異な信号がないため任意の位置で表示。  
前今比較

C-SG X37, Y22 部位 : C4B (深さ : 約34%)

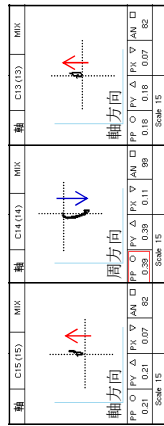
フィルタ信号 (構造物信号消去)



原信号 (100kHz)



\*1coil : 約3mm ※内側から見たイメージ

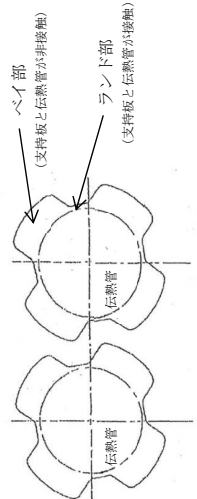
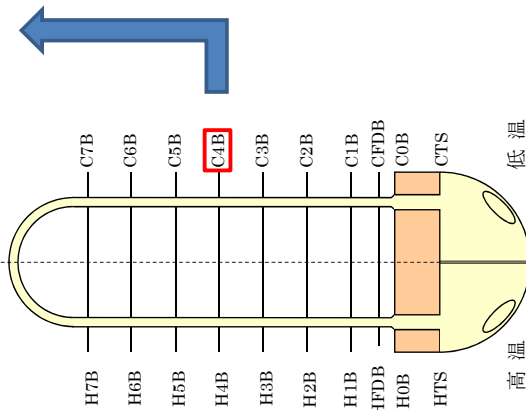
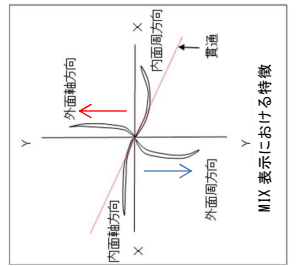


【C-SG X37, Y22 リサージェ波形】

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

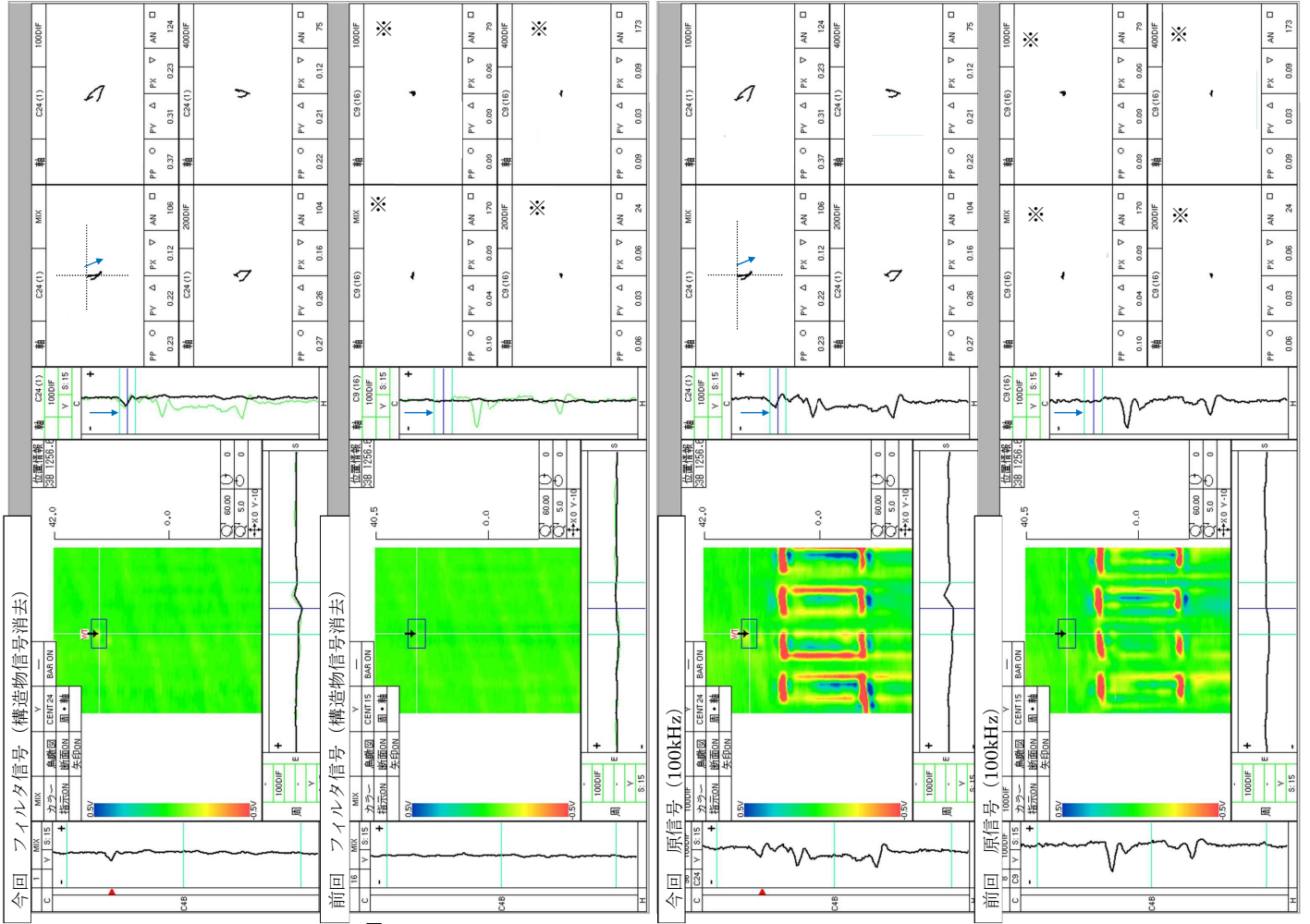
波形評価

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



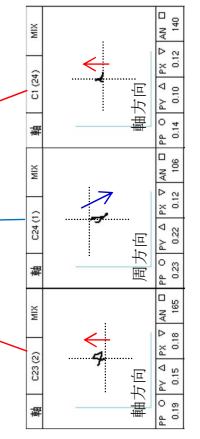
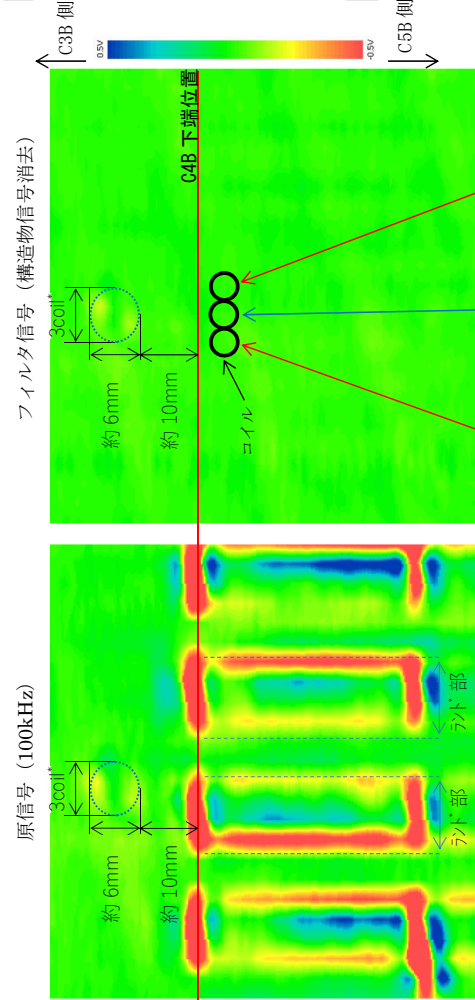
信号評価

SG伝熱管ECT結果



※異なる信号がないため任意の位置で表示。

前回比較



【C-SG X89,Y3 リサージュ波形】  
 必ず端部の軸方向成分(赤色矢印)を検出  
 きず中心部の周方向成分(青色矢印)を検出

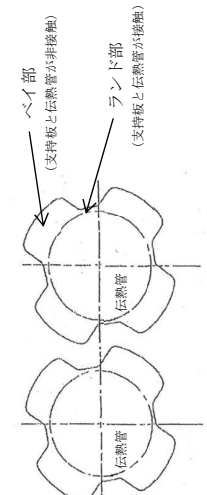
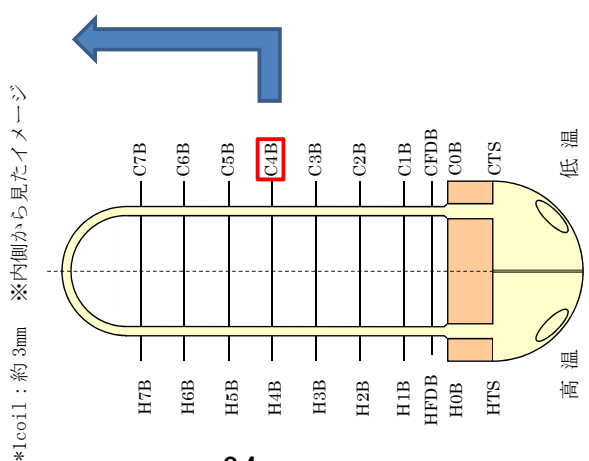
**波形評価**

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

上記のとおり軸方向成分および周方向成分の面方の成分が読み取れるため、広がりを持つ減肉と評価する。(下図参照)

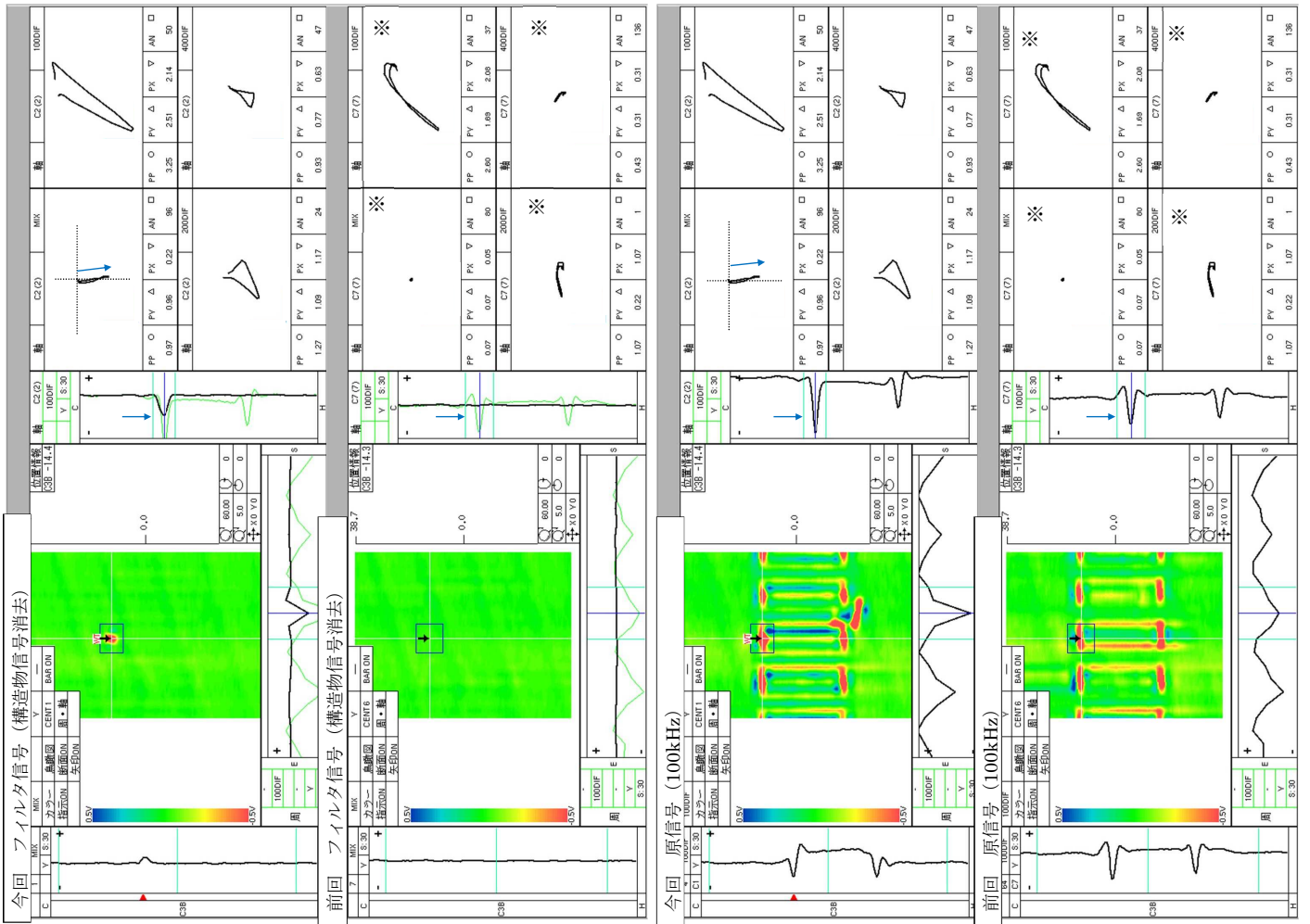
信号評価

C-SG X89, Y3 部位: C4B (深さ: 約31%)





SG伝熱管ECT結果

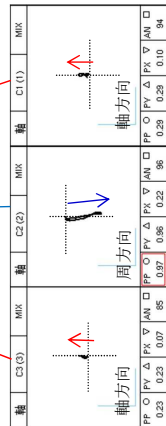
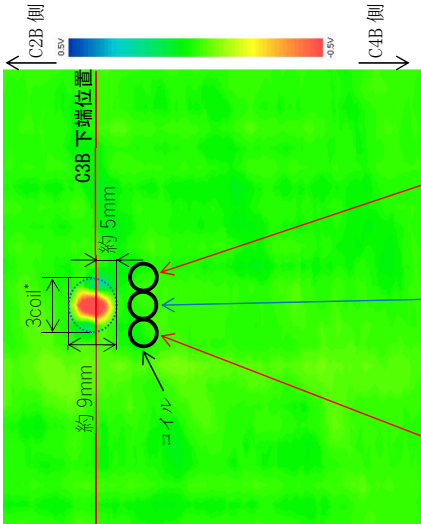


※特異な信号がないため任意の位置で表示。

前今比較

C-SG X39, Y5 部位：C3B (深さ：約49%)

フィルタ信号 (構造物信号消去)

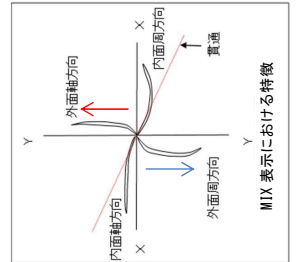


【C-SG X39, Y5 リサージュ波形】

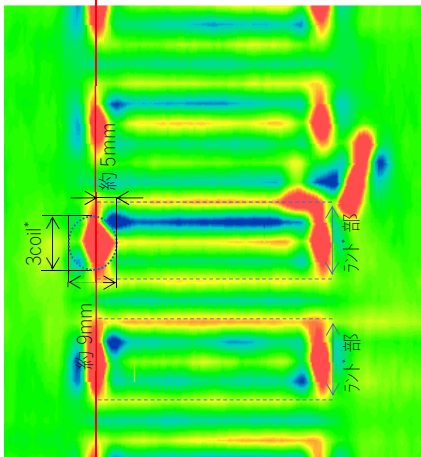
※必ず端部の軸方向成分(赤色矢印)を検出し、必ず中心部の周方向成分(青色矢印)を検出

波形評価

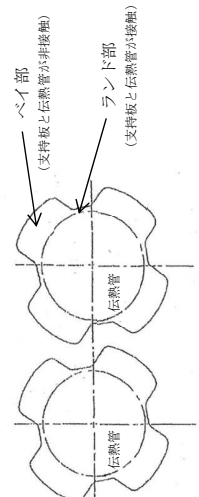
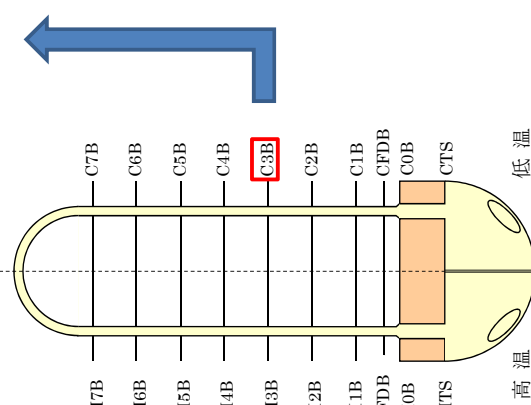
- ・位相角評価から、外面指示の特徴を持っている。
  - ・指示は複数のコイルで検出されており、指示の中心部のコイルは周方向成分、両端部のコイルでは軸方向成分の特徴を持っている。
- 上記のとおり軸方向成分および周方向成分の面方の成分が読み取れるため、広がりを持つ減肉と評価する。(下図参照)



原信号 (100kHz)

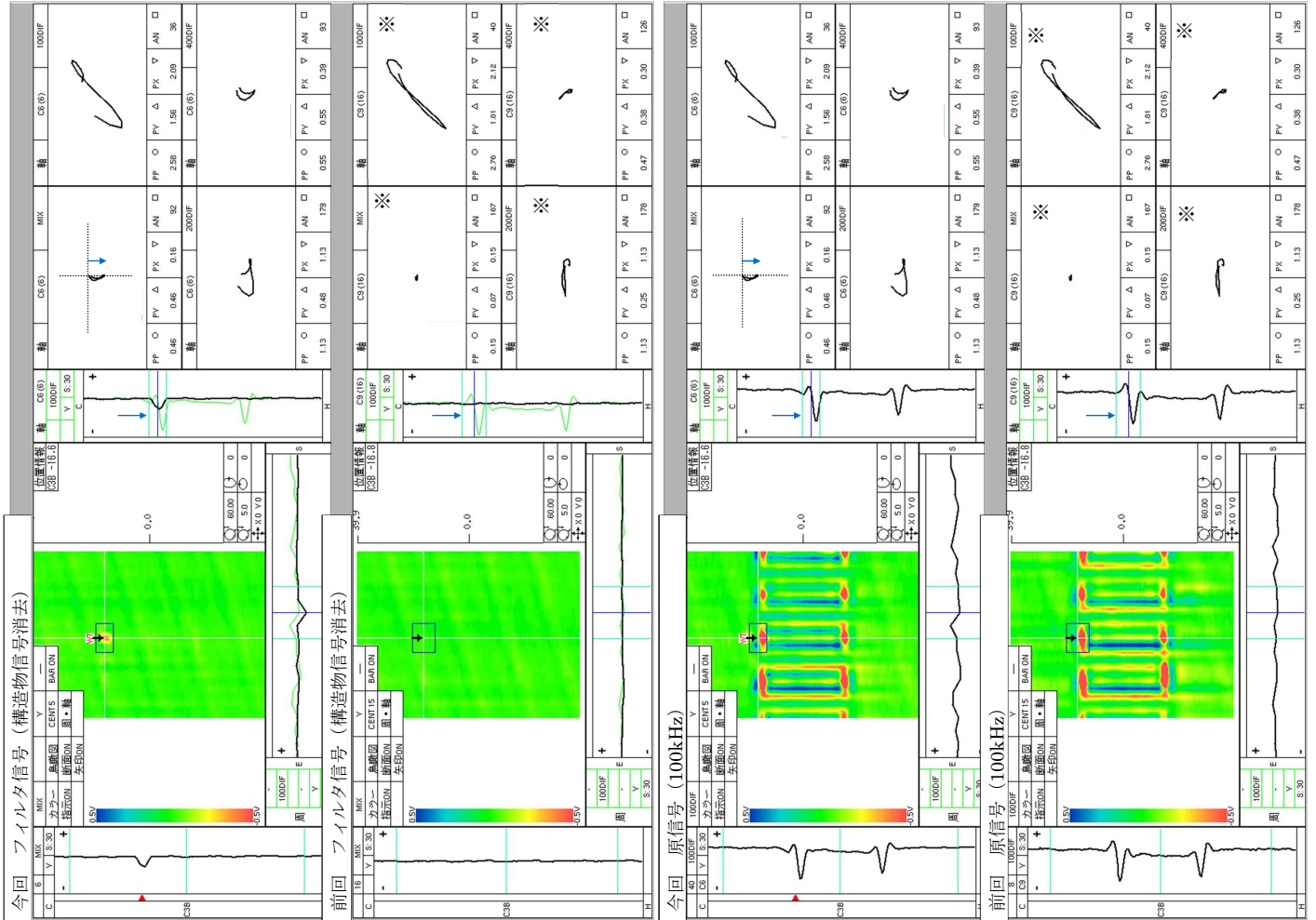


\*1coil : 約3mm ※内側から見たイメージ



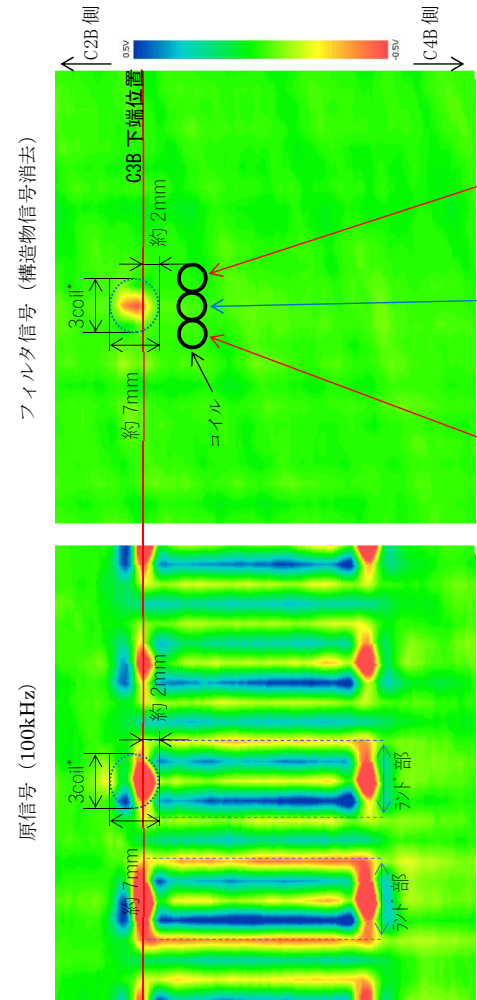
信号評価

# 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 X86, Y8 リサージュ波形】

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

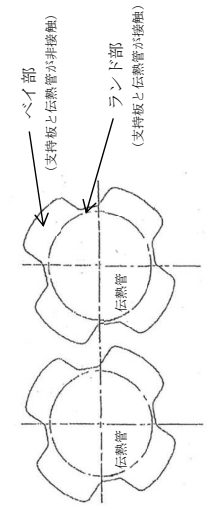
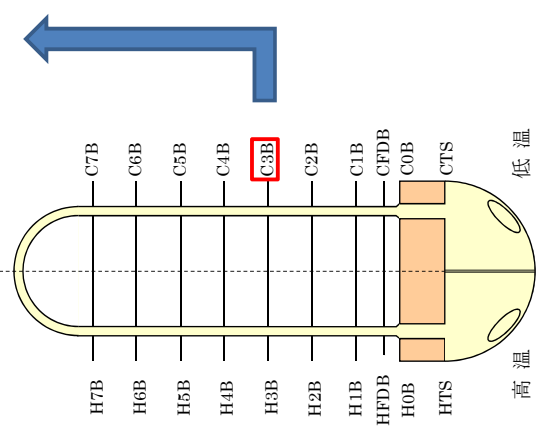
#### 波形評価

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

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

MIX 表示における特徴

\*1coil : 約3mm ※内側から見たイメージ

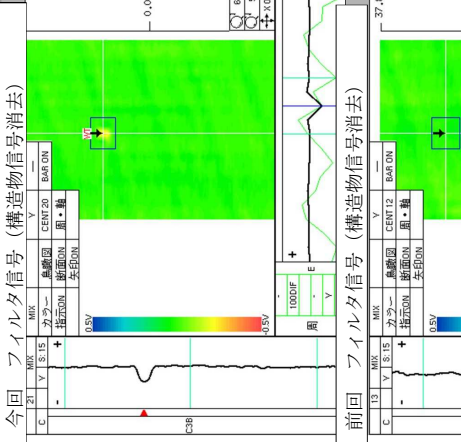
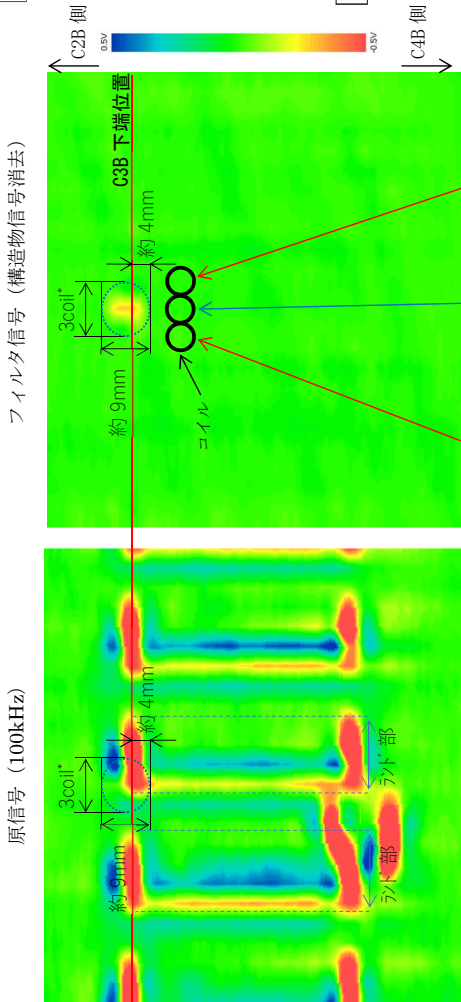


信号評価

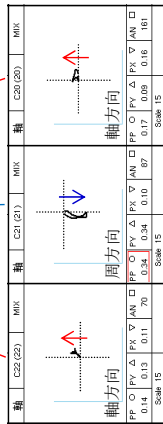
C-SG X86, Y8 部位 : C3B (深さ : 約35%)



SG伝熱管ECT結果



\*1coil : 約3mm ※内側から見たイメージ



【C-SG X71, Y5 リサーチ波形】

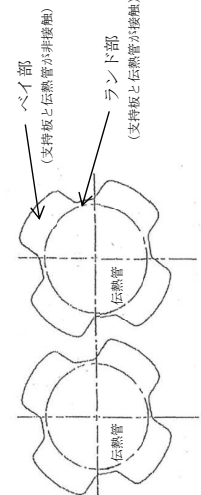
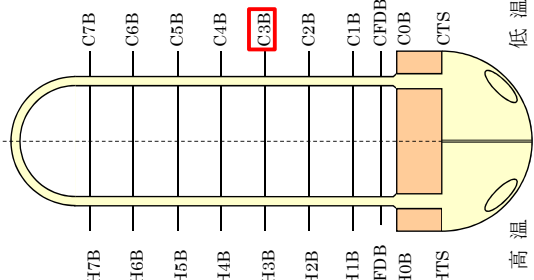
きず端部の軸方向成分(赤色矢印)を検出  
きず中心部の周方向成分(青色矢印)を検出

**波形評価**

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

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

MIX 表示における特徴



信号評価

C-SG X71, Y5 部位 : C3B (深さ : 約34%)

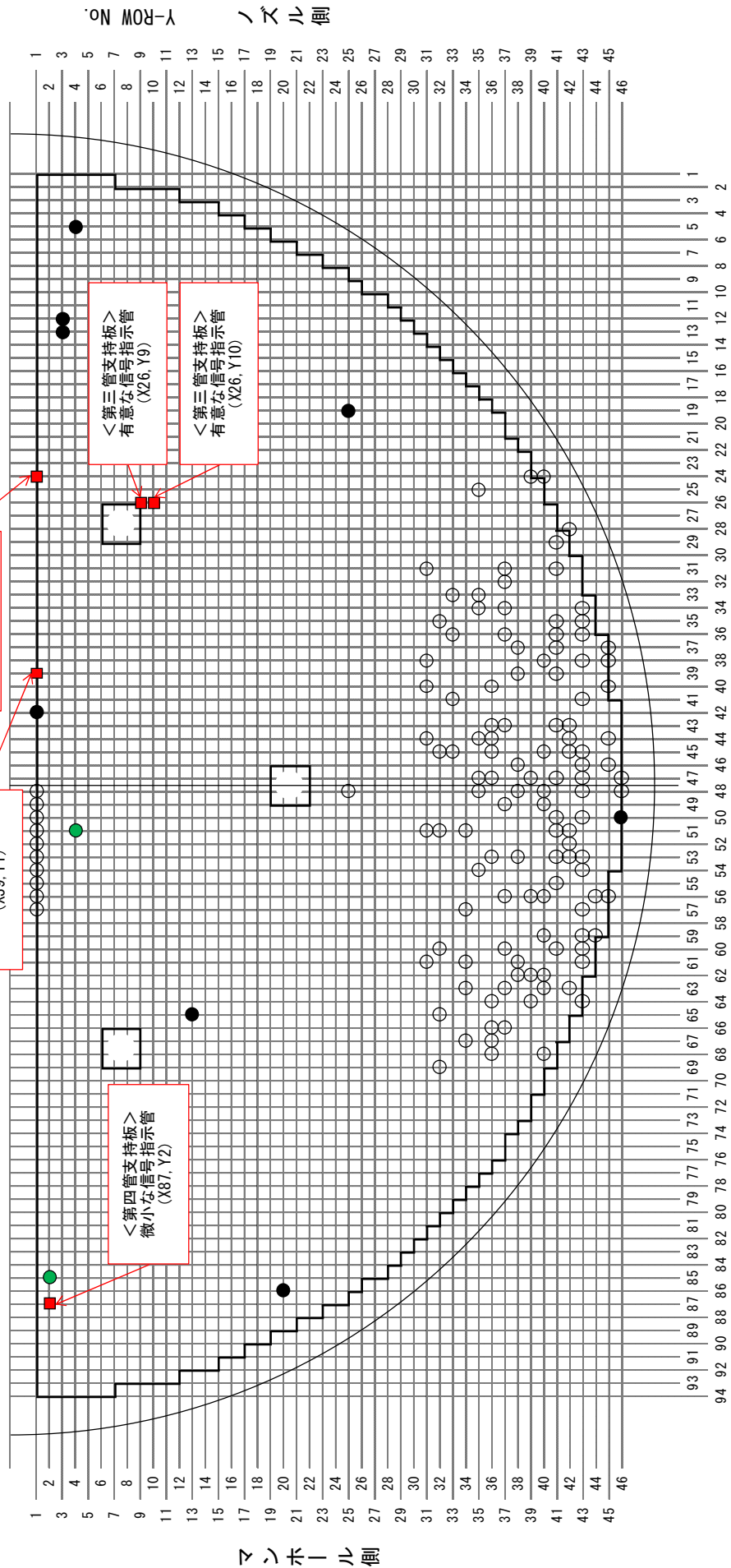
前今比較

※異なる信号がないため任意の位置で表示。

SG伝熱管 ECT信号指示位置図  
A-SG (低温側)

- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (129本)
- : 既施栓管 (外面減肉) (2本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (8本)
- : 今回減肉指示が認められた位置 (5本)

本図はSG上部から見た位置を示す



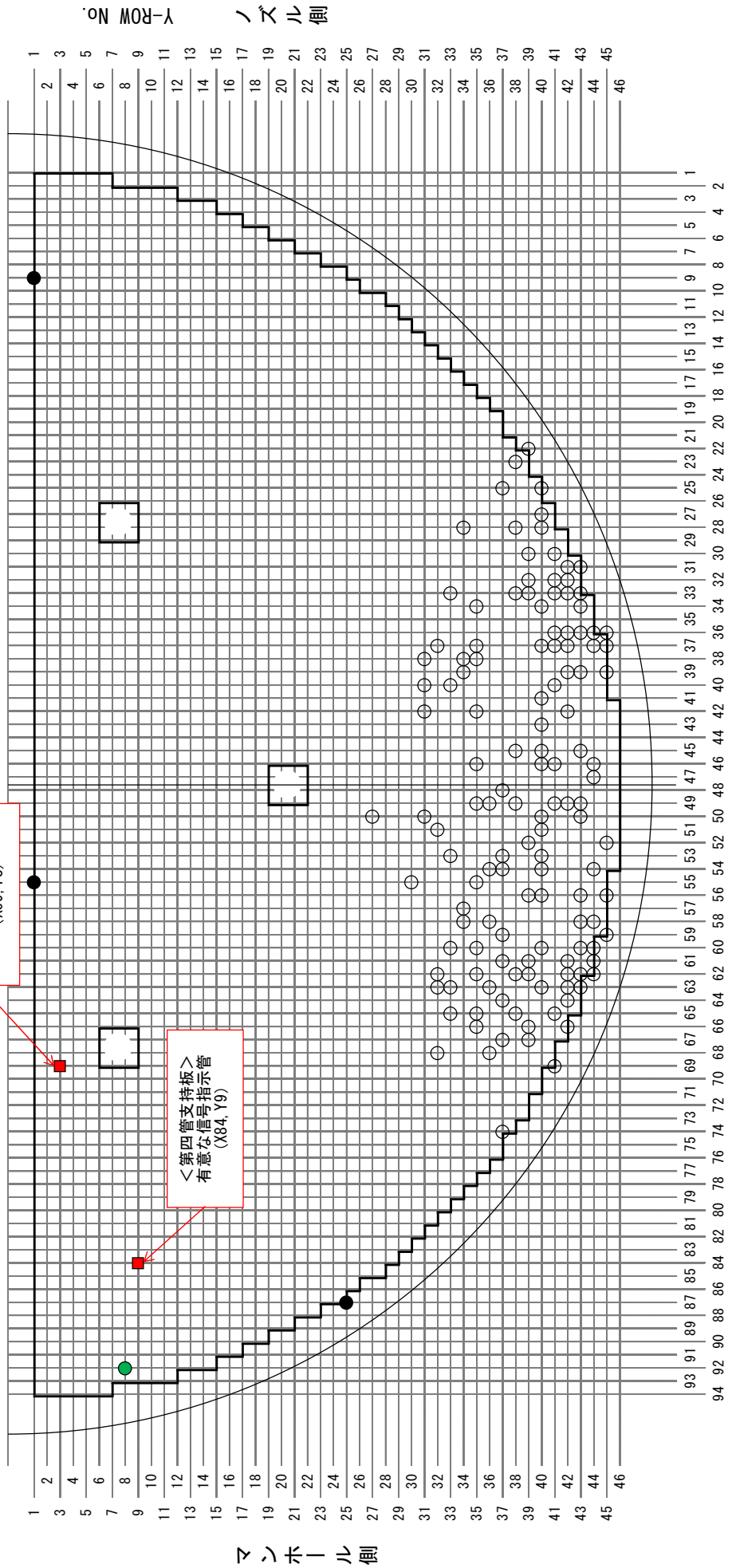
SG伝熱管 ECT 信号指示位置図  
B-SG (低温側)

- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (131本)
- : 既施栓管 (外面減肉) (1本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (3本)
- : 今回減肉指示が認められた位置 (2本)

<第三管支持板>  
微小な信号指示管  
(X69, Y3)

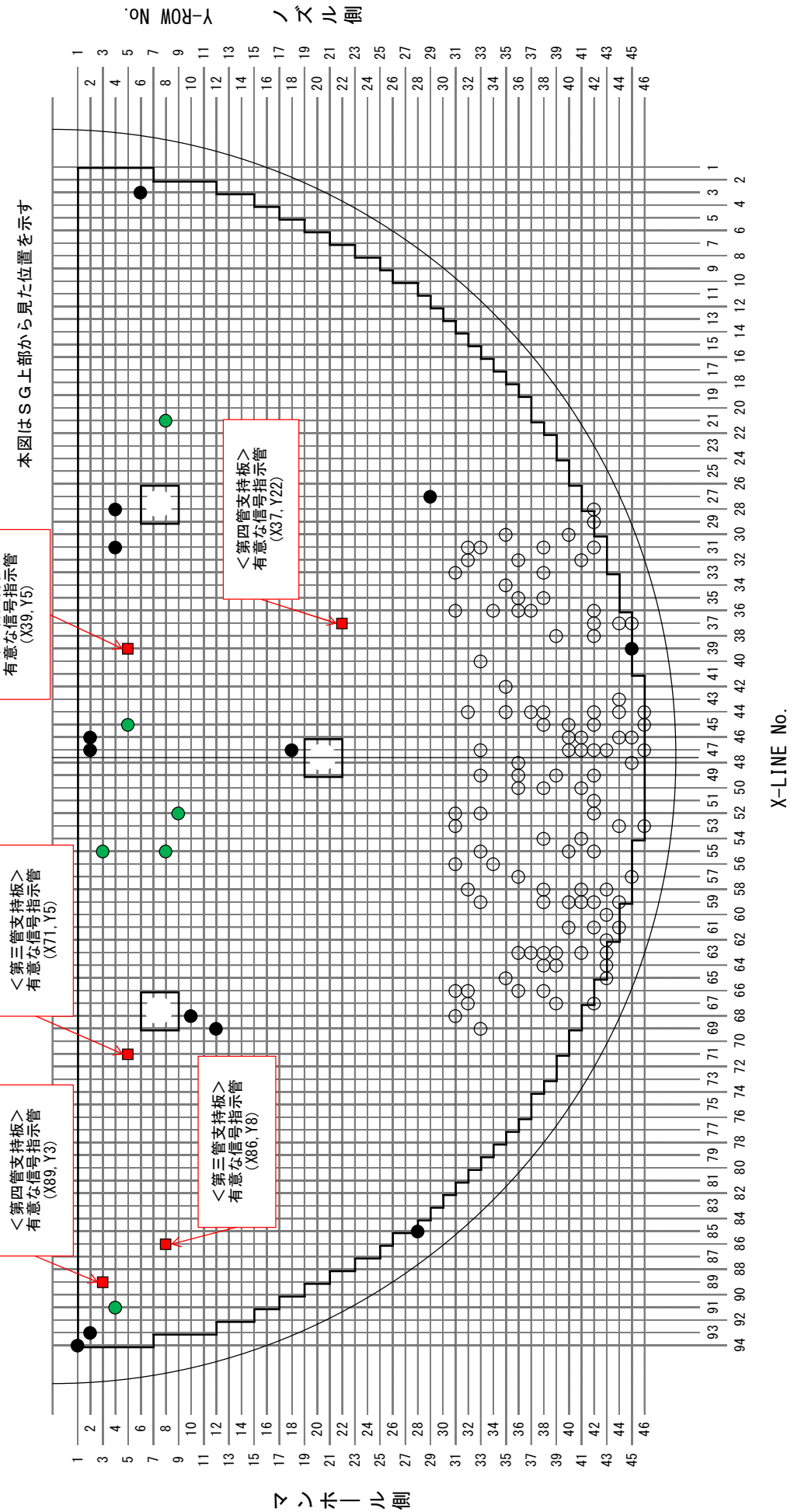
<第四管支持板>  
有意な信号指示管  
(X84, Y9)

本図はSG上部から見た位置を示す



SG伝熱管 ECT 信号指示位置図  
C-SG (低温側)

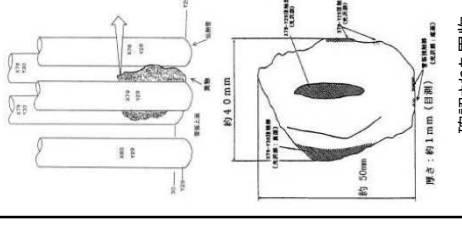

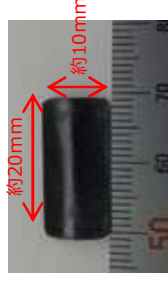

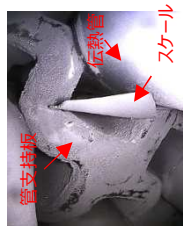
- : 既施栓管 (垢管部応力腐食割れ以外) (110本) (6本)
- : 既施栓管 (外面減肉)
- : 既施栓管 (垢管部応力腐食割れ) (13本)
- : 今回減肉指示が認められた位置 (5本)





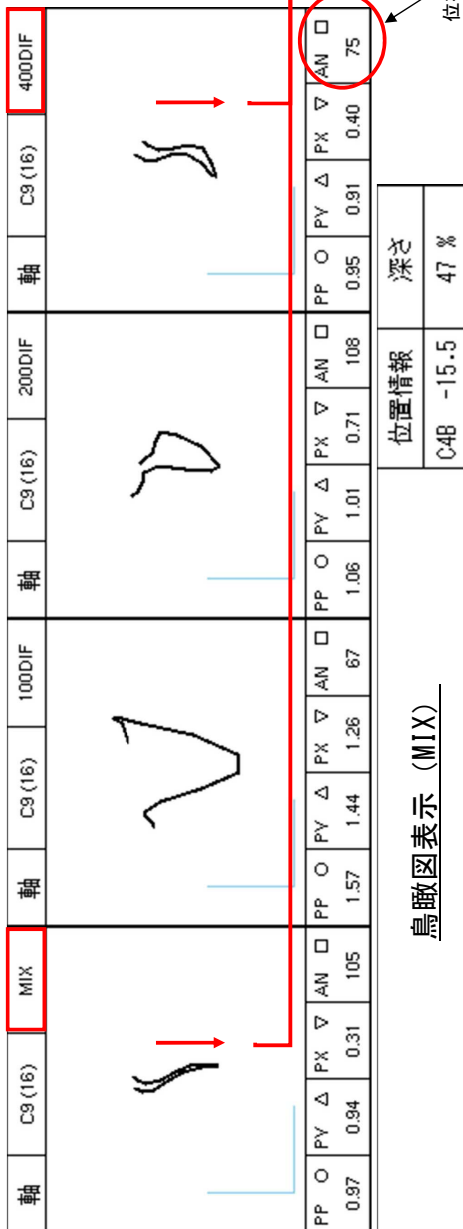


# 高浜発電所3号機および4号機におけるSG伝熱管外面の損傷事象の経緯

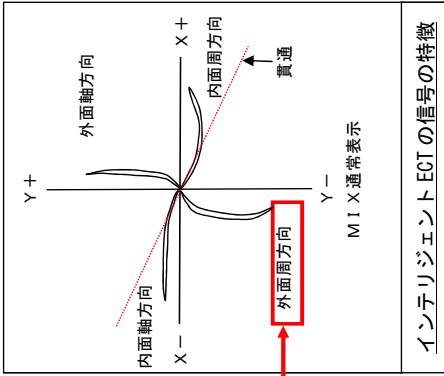
	~2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年
3号機 定期検査	第21回	第22回	第23回	第24回	第25回	第26回	第27回	第28回
4号機 定期検査	第20回	第21回	第22回	第23回	第24回	第25回	第26回	第27回
定期検査	美浜発電所3号機 第18回定期検査 (2000年)	高浜発電所3号機 第23回定期検査 (2018.8.3~2018.11.9)	高浜発電所4号機 第22回定期検査 (2019.9.18~2020.2.1)	高浜発電所3号機 第24回定期検査 (2020.1.6~2021.3.10)	高浜発電所4号機 第23回定期検査 (2020.10.7~2021.4.15)	高浜発電所3号機 第25回定期検査 (2022.3.1~2022.7.26)		
損傷本数	A-SG: 3本 【管板上面】 (最大減肉率: 約48%)	A-SG: 1本 【第三管支持板】 (最大減肉率: 20%未満)	A-SG: 1本 【第三管支持板】 B-SG: 1本 【第三管支持板】 C-SG: 3本 【第二管支持板2本、 第三管支持板1本】 (最大減肉率: 約63%)	B-SG: 1本 【第三管支持板】 C-SG: 1本 【第三管支持板】 (最大減肉率: 約56%)	A-SG: 1本 【第三管支持板】 C-SG: 3本 【第三管支持板】 (最大減肉率: 約36%)	A-SG: 2本 【第三管支持板1本、 第四管支持板1本】 B-SG: 1本 【第二管支持板】 (最大減肉率: 約57%)		
推定原因	・溶接作業時に発生した2次生成物(ノロ)が主給水管から流入したものと推定 ⇒異物による減肉と推定 	・減肉指示のあった箇所付近にスケールを確認 ・スケールの回収を試みたものの破損 ⇒スケール以外の異物による減肉と推定 	・まず近傍にスケールは確認されず ・A-SG器内に異物(ステンレス薄片)が確認されたものの、摩耗痕は確認されず ⇒異物による減肉であり、異物は流出したものと推定 	・まず近傍にスケールは確認されず ・AおよびC-SG器内に異物(ガスケットフープ材)を確認 ⇒確認した異物のうちの1つが、1本のきずの原因の可能性があり、その他の異物は流出したものと推定 	・減肉指示のあった1本の伝熱管(A-SG)の減肉箇所スケールを確認 ・その他3本の伝熱管についても、近傍の管支持板上で摩耗痕のあるスケールを回収 ⇒スケールによる減肉と推定 	・まず近傍にスケールは確認されず ・近傍の管支持板上から、摩耗痕のあるスケールは回収できず ⇒各SGから採取したスケールの性状および摩耗試験等の調査の結果から、スケールによる減肉と推定		

ECTの位相評価

当該管リサージェ表示 (A-SG X39, Y1)

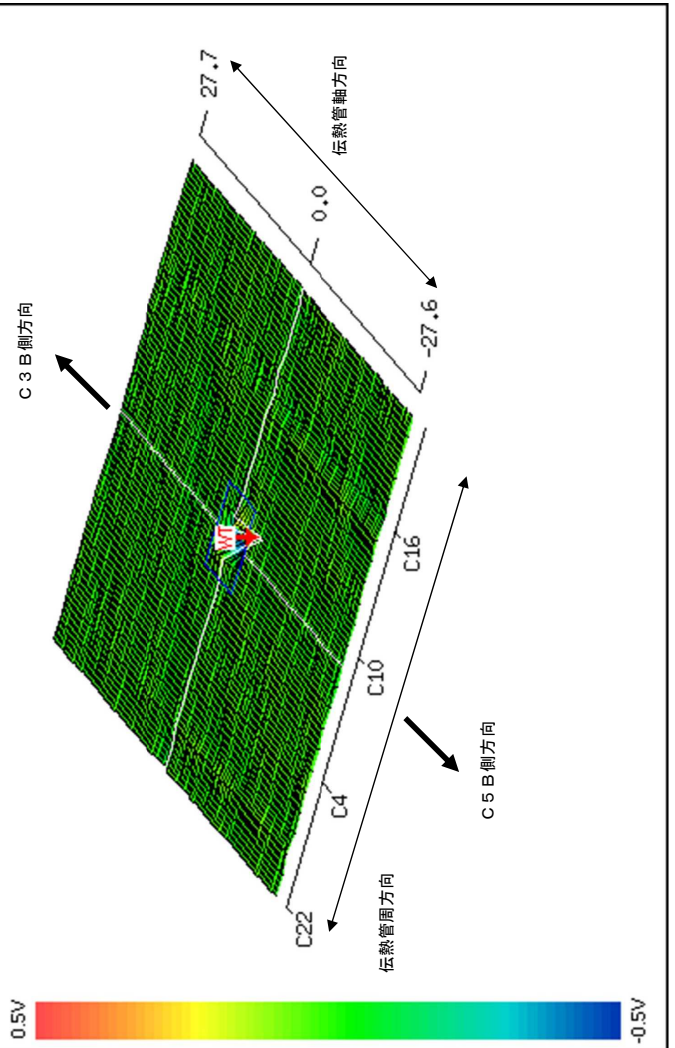


(1)内面軸方向信号の特徴との比較  
インテリジェント ECT の信号の特徴と今回の当該信号を比較したところ、今回の当該信号は 400kHz および MIX の位相角で Y-方向の外周方向向きの特徴を示している。そのため、伝熱管内面 (1 次側) からの損傷ではないと考える。

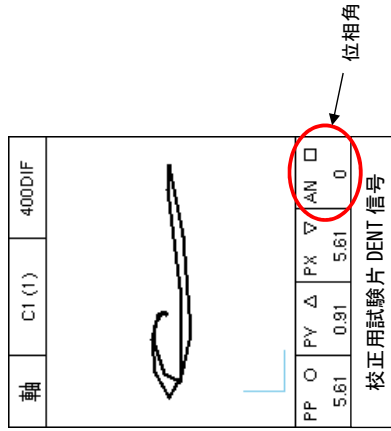


鳥瞰図表示 (MIX)

位置情報	深さ
C48 -15.5	47 %



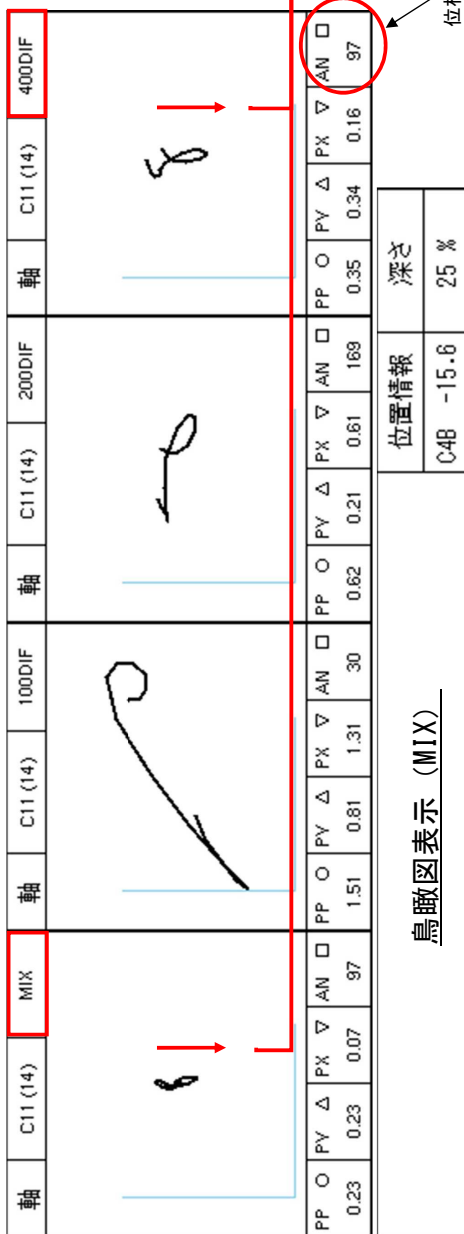
(2) デンティンダ (DENT) 信号の特徴との比較



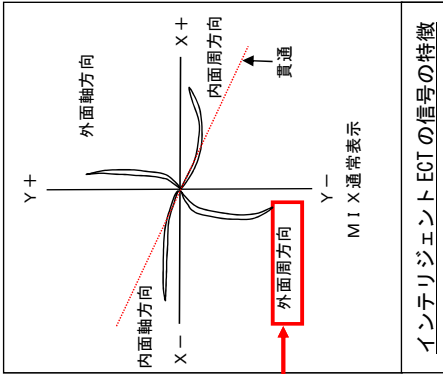
校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は“全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる”という特徴を持っているが、今回の当該信号は Y-方向の位相を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外周方向向きの特徴を持っている。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考える。

ECTの位相評価

当該管リサージュ表示 (A-SG X 2 4, Y 1)

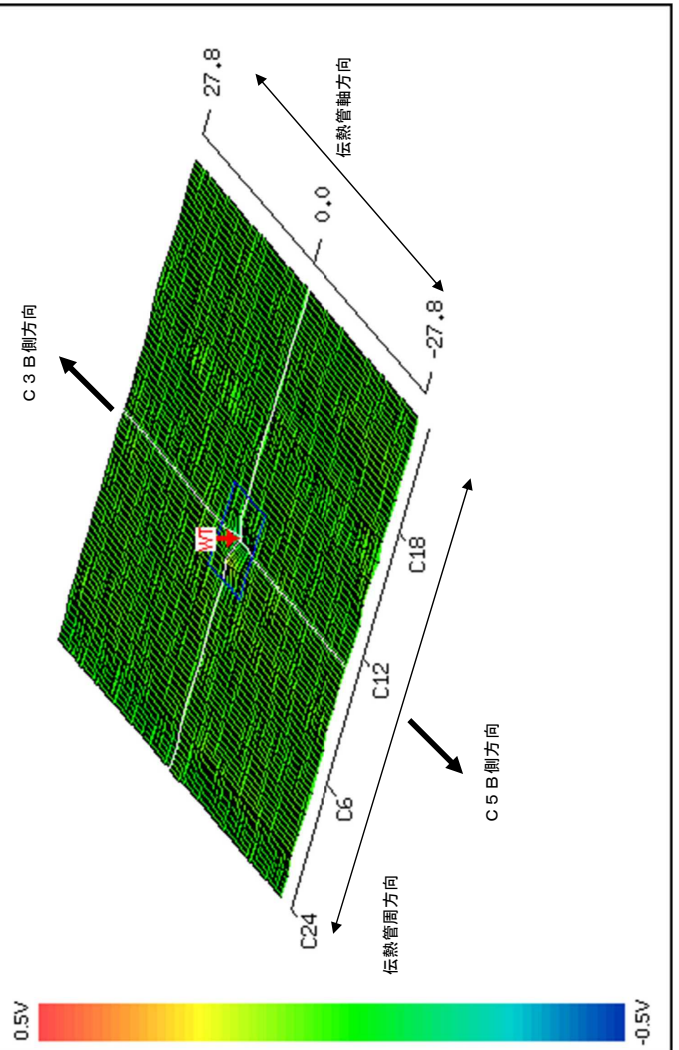


(1)内面軸方向信号の特徴との比較  
インテリジェント ECT の信号の特徴と今回の当該信号を比較したところ、今回の当該信号は 400kHz および MIX の位相角で Y-方向の外周方向向きの特徴を示している。そのため、伝熱管内面 (1 次側) からの損傷ではないと考える。

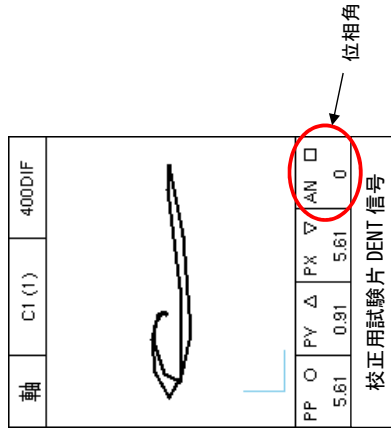


鳥瞰図表示 (MIX)

位置情報	深さ
C4B -15.6	25 %



(2) デンティンダ (DENT) 信号の特徴との比較



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



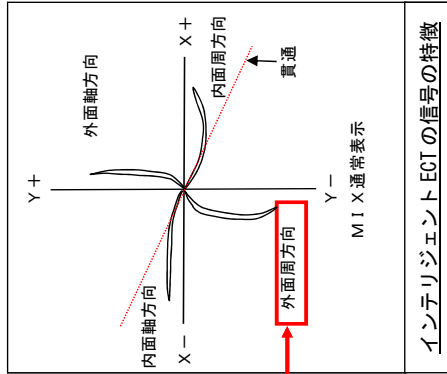


ECTの位相評価

当該管リサージェ表示 (A-SG X26, Y10)

軸	C6 (6)	MIX	軸	100DIF	C6 (6)	軸	200DIF	C6 (6)	軸	400DIF
PP ○	0.54	0.54	PP ○	2.20	0.96	PP ○	0.57	0.56	PP ○	5.61
PV △	0.16	0.16	PV △	1.81	0.54	PV △	0.95	0.56	PV △	5.61
PX ▽	0.16	0.16	PX ▽	1.50	0.95	PX ▽	0.45	0.45	PX ▽	5.61
AN □	98	98	AN □	47	6	AN □	70	70	AN □	0

位置情報 深さ  
C3B -16.1 40 %

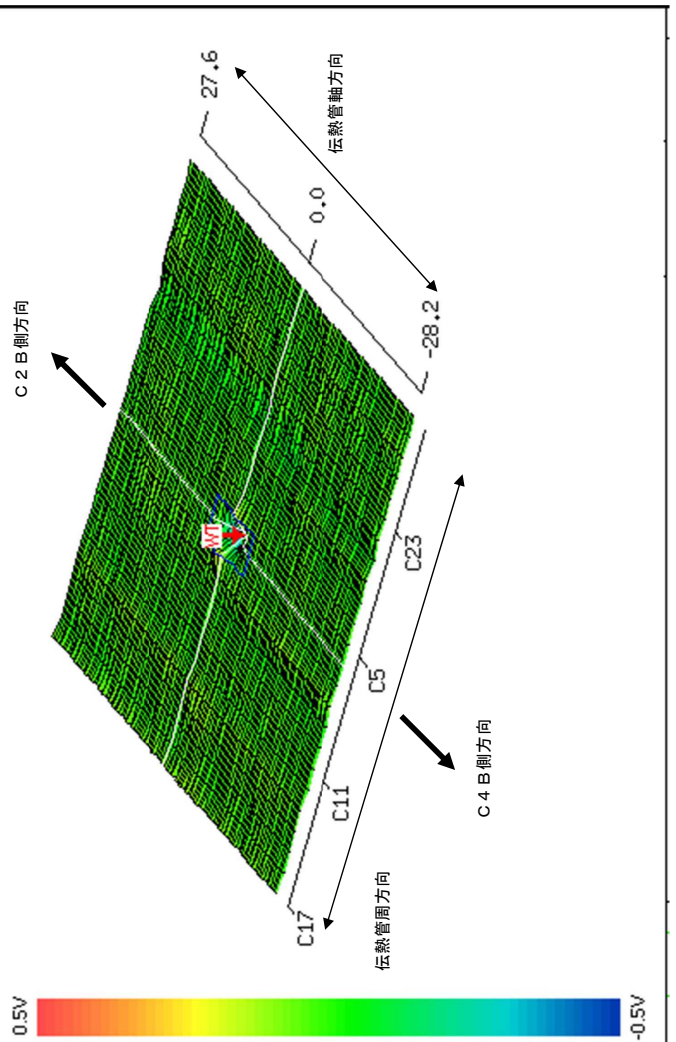


(1)内面軸方向信号の特徴との比較  
インテリジェント ECT の信号の特徴と今回の当該信号を比較したところ、今回の当該信号は 400kHz および MIX の位相角で Y-方向の外周方向向きの特徴を示している。そのため、伝熱管内面 (1 次側) からの損傷ではないと考える。

インテリジェント ECT の信号の特徴

位相角

鳥瞰図表示 (MIX)



(2) デンティンダ (DENT) 信号の特徴との比較

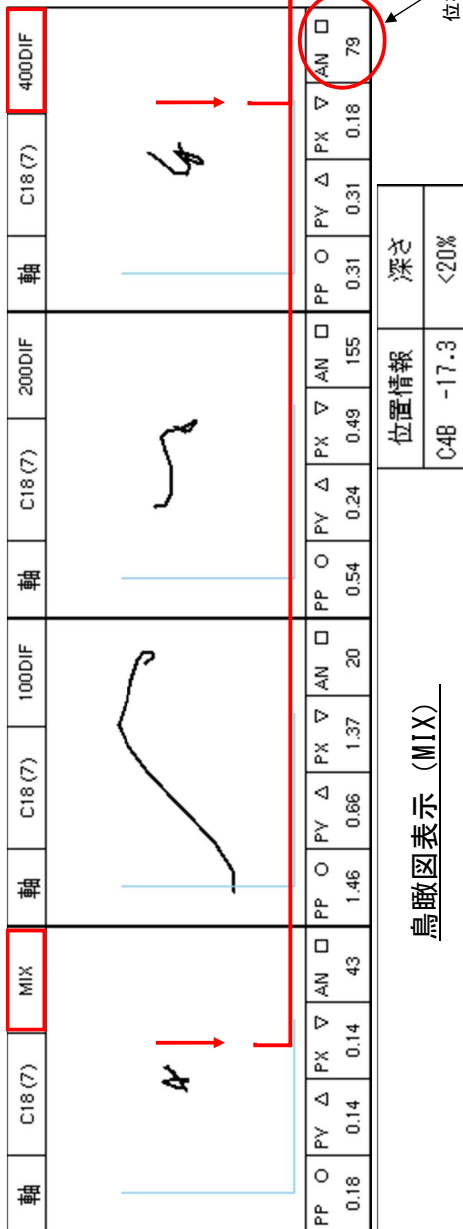
軸	C1 (1)	400DIF
PP ○	5.61	5.61
PV △	0.91	5.61
PX ▽	5.61	5.61
AN □	0	0

校正用試験片 DENT 信号

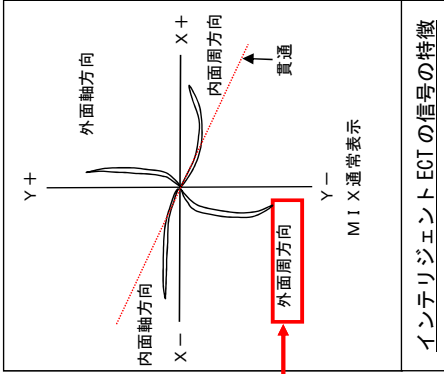
校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は“全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる”という特徴を持っているが、今回の当該信号は Y-方向の位相を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外周方向向きの特徴を持っている。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考える。

ECTの位相評価

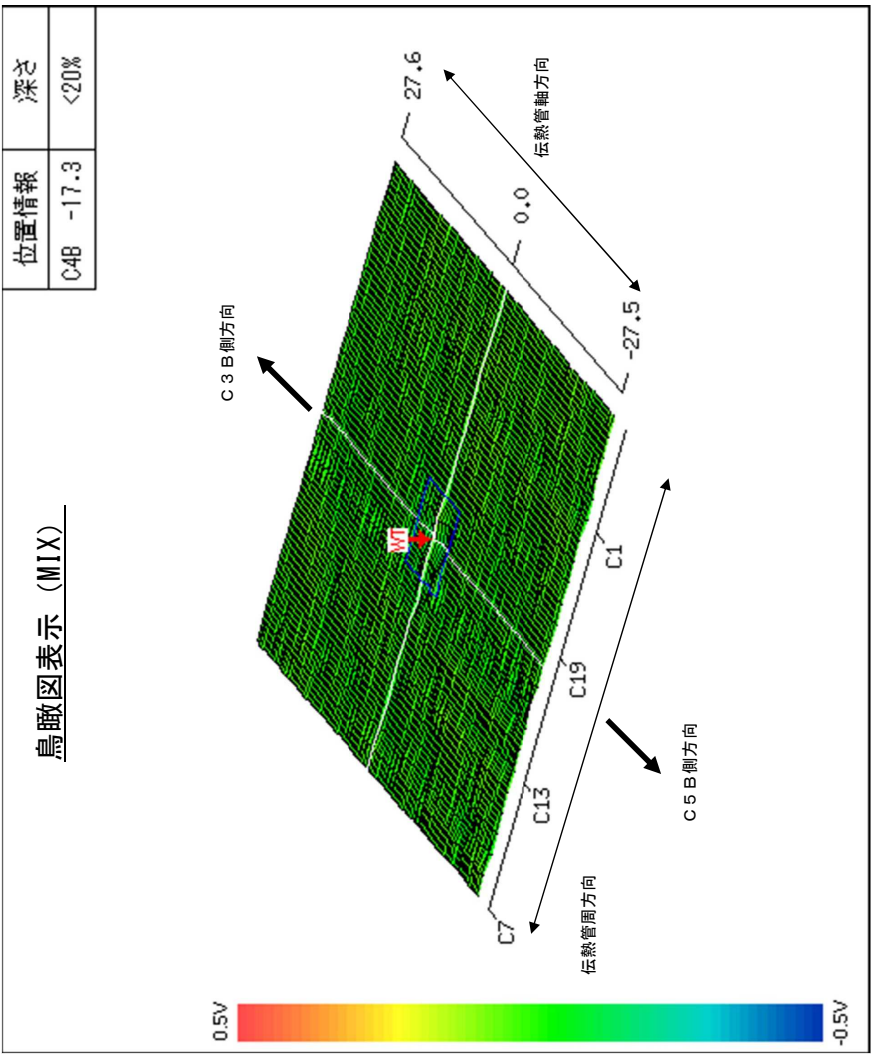
当該管リサージェ表示 (A-SG X 87, Y 2)



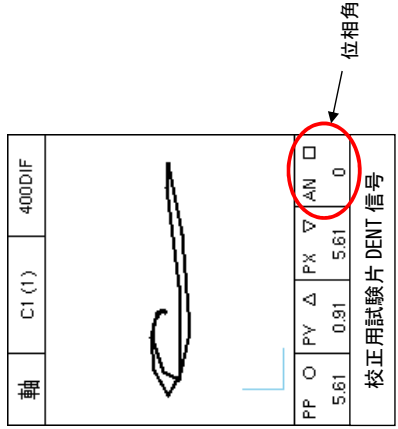
(1)内面軸方向信号の特徴との比較  
インテリジェント ECT の信号の特徴と今回の当該信号を比較したところ、今回の当該信号は 400kHz および MIX の位相角で Y-方向の外周方向向きの特徴を示している。そのため、伝熱管内面 (1 次側) からの損傷ではないと考える。



鳥瞰図表示 (MIX)



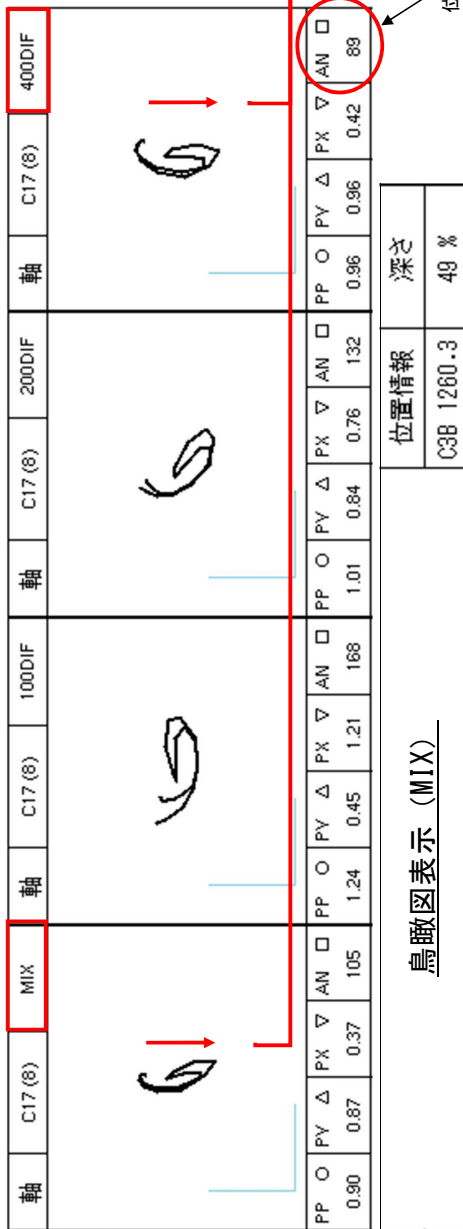
(2) デンティンダ (DENT) 信号の特徴との比較



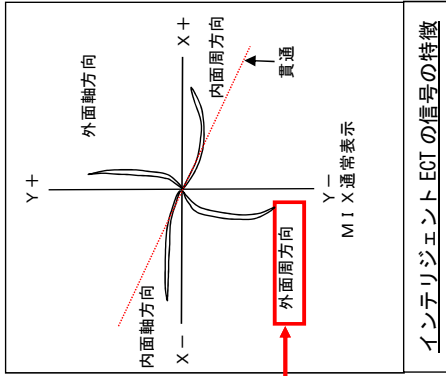
校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は “全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる” という特徴を持っているが、今回の当該信号は Y-方向の位相を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外周方向向きの特徴を持っている。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考える。

ECTの位相評価

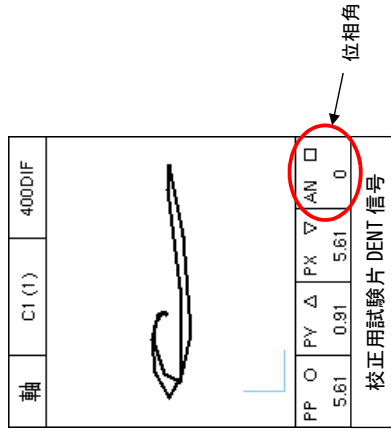
当該管リサージェ表示 (B-SG X84, Y9)



(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 および MIX の位相角で Y-方向の外周方向向きの特徴を示している。そのため、伝熱管内面 (1 次側) からの損傷ではないと考える。

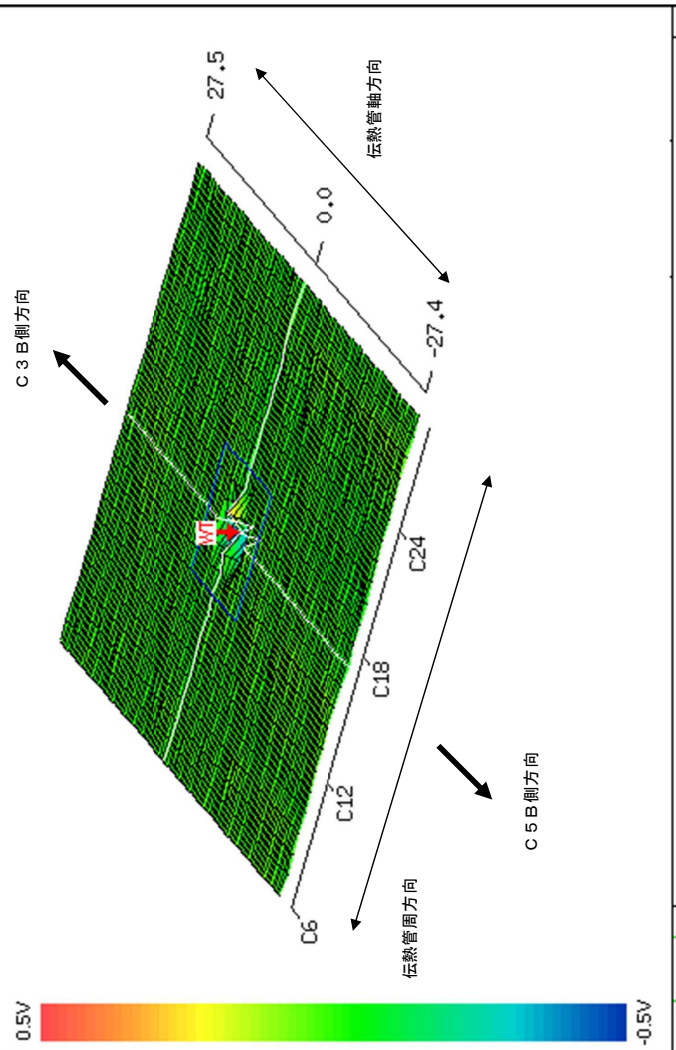


(2) デンテイング (DENT) 信号の特徴との比較



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

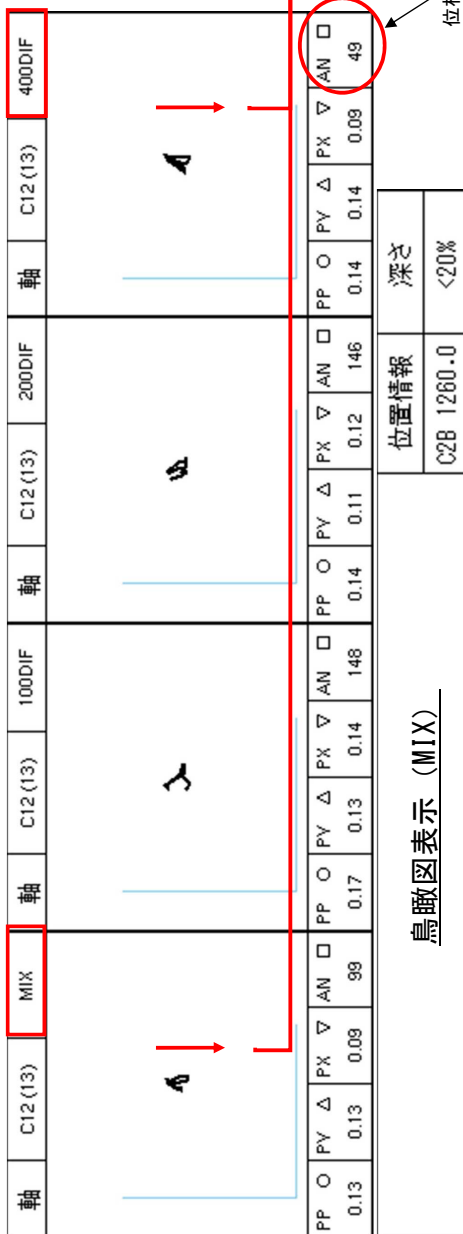
鳥瞰図表示 (MIX)



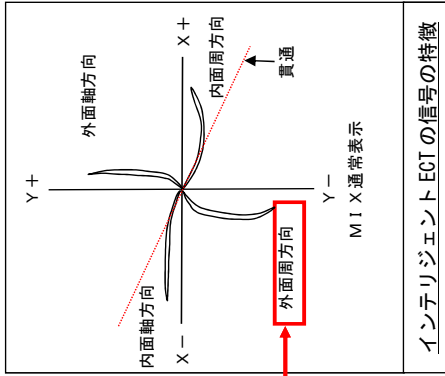


ECTの位相評価

当該管リサージェ表示 (B-SG X69, Y3)

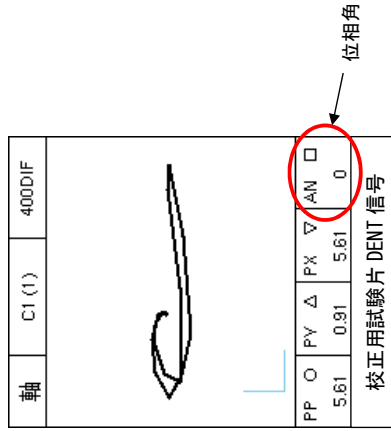


鳥瞰図表示 (MIX)



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

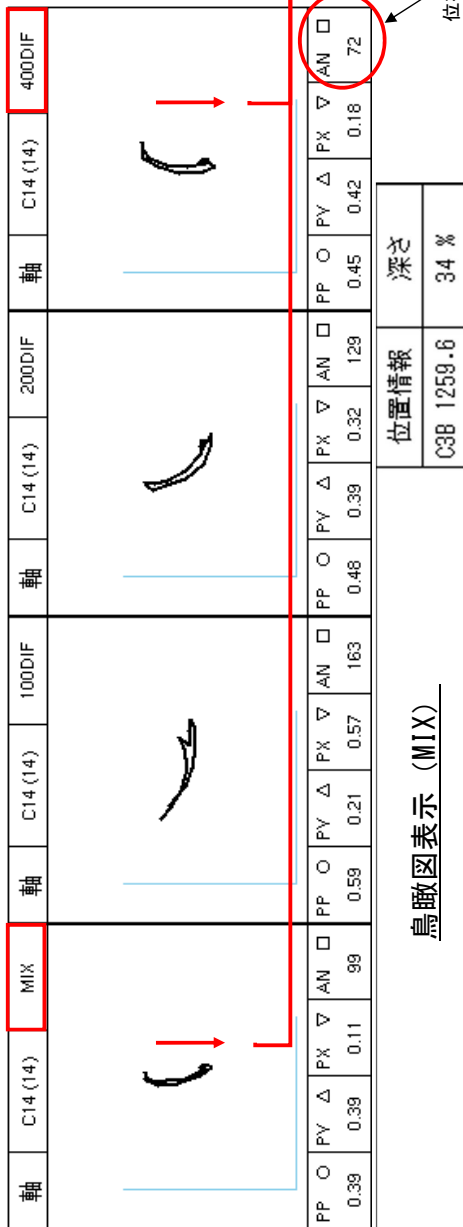
(2) デンティンダ (DENT) 信号の特徴との比較



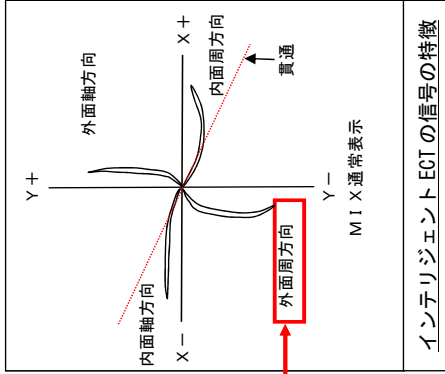
校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は “全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる” という特徴を持っているが、今回の当該信号は Y-方向の位相を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外周方向向きの特徴を持っている。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考える。

ECTの位相評価

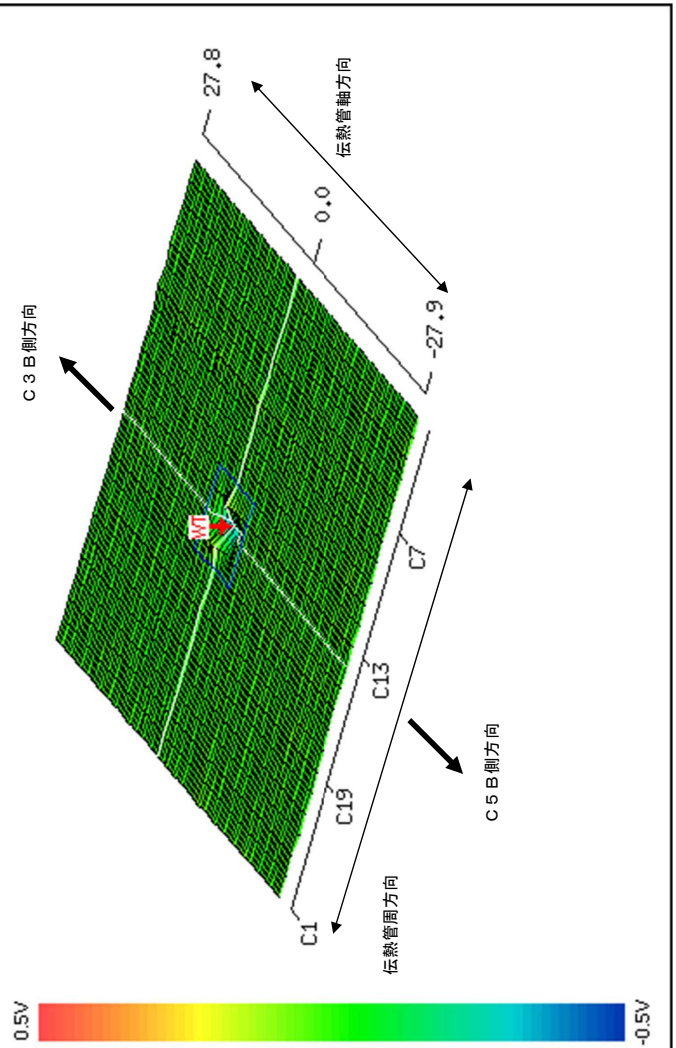
当該管リサージュ表示 (C-SG X37, Y22)



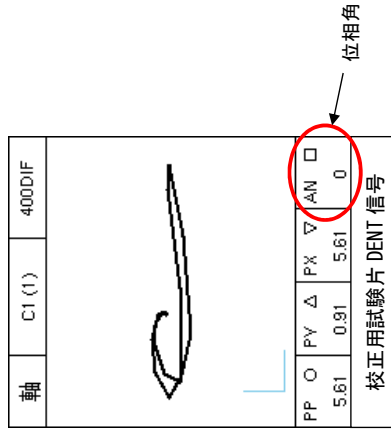
(1)内面軸方向信号の特徴との比較  
インテリジェント ECT の信号の特徴と今回の当該信号を比較したところ、今回の当該信号は 400kHz および MIX の位相角で Y-方向の外周方向向きの特徴を示している。そのため、伝熱管内面 (1 次側) からの損傷ではないと考える。



鳥瞰図表示 (MIX)



(2) デンティンダ (DENT) 信号の特徴との比較



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

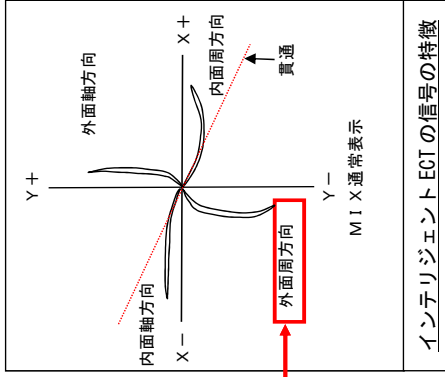
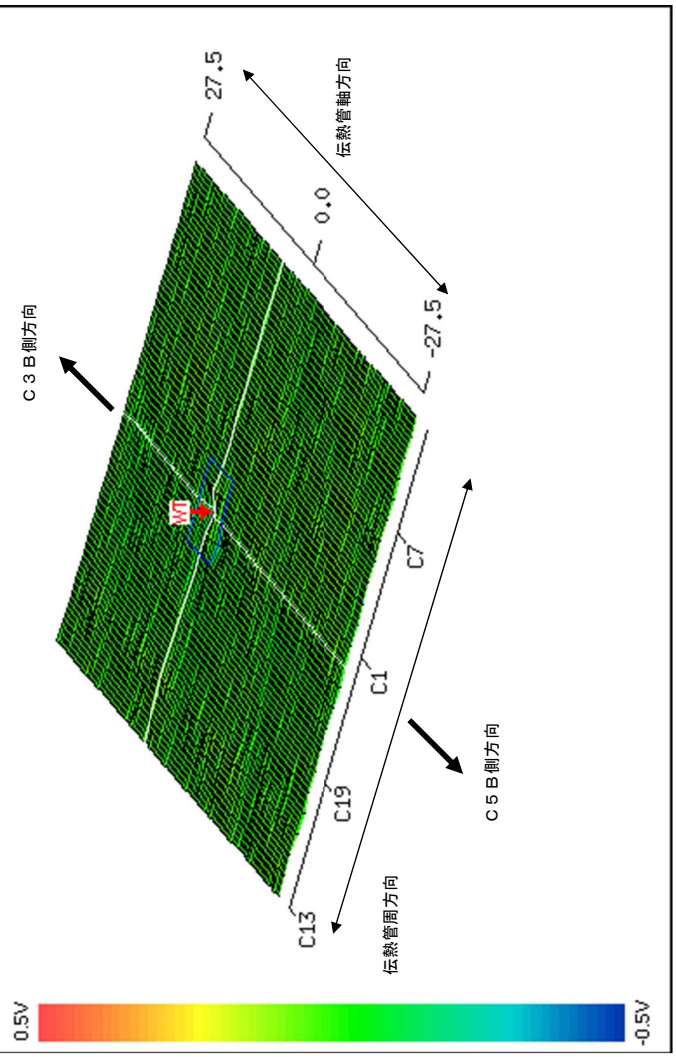
ECTの位相評価

当該管リサージェ表示 (C-SG X89, Y3)

軸	C24(1)	MIX	軸	C24(1)	100DIF	軸	C24(1)	200DIF	軸	C24(1)	400DIF				
PP ○	PV △	PX ▽	AN □	PP ○	PY ○	PX △	PY △	PX ▽	AN □	PP ○	PY ○	PX △	PY △	PX ▽	AN □
0.23	0.22	0.22	0.12	0.37	0.31	0.23	0.26	0.16	104	0.22	0.21	0.12	0.12	0.12	75

位置情報 深さ C3B 1256.6 31 %

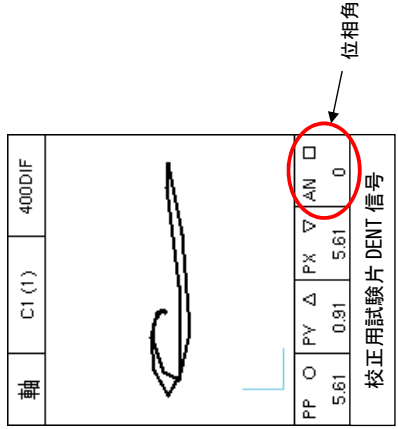
鳥瞰図表示 (MIX)



インテリジェント ECT の信号の特徴

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

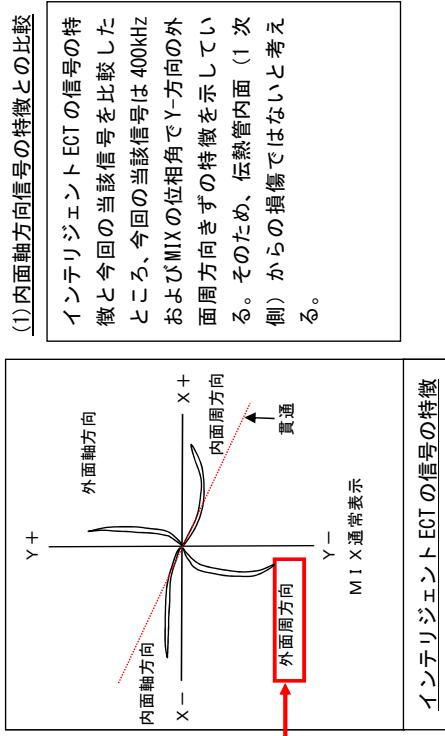
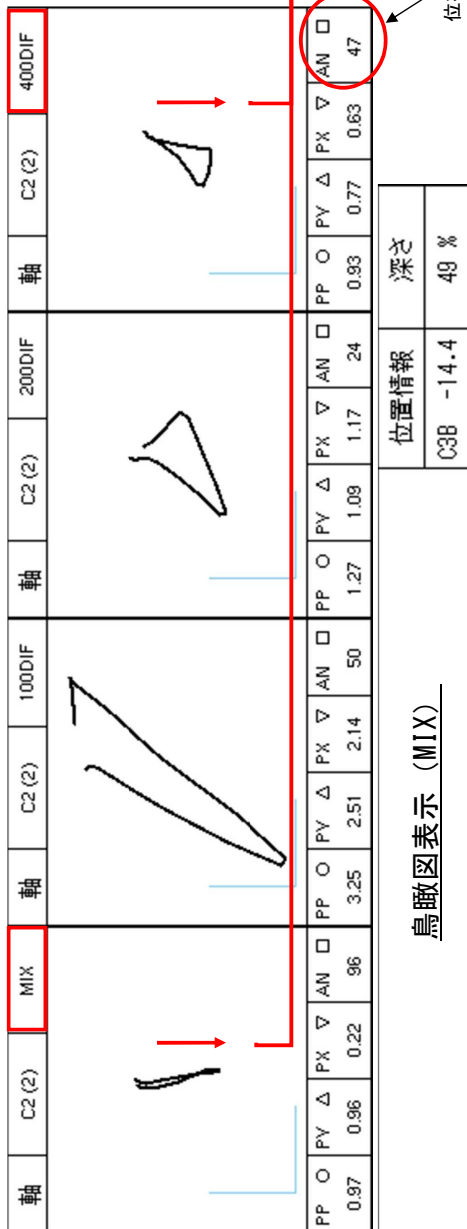
(2) デンティンダ (DENT) 信号の特徴との比較



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

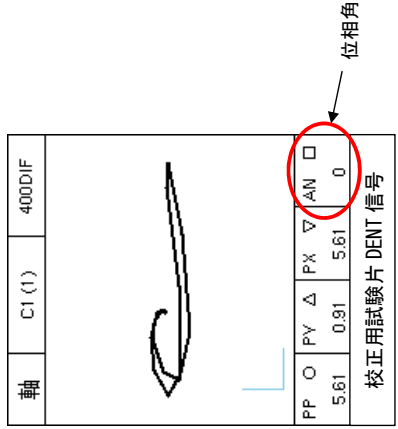
ECTの位相評価

当該管リサージュ表示 (C-SG X39, Y5)



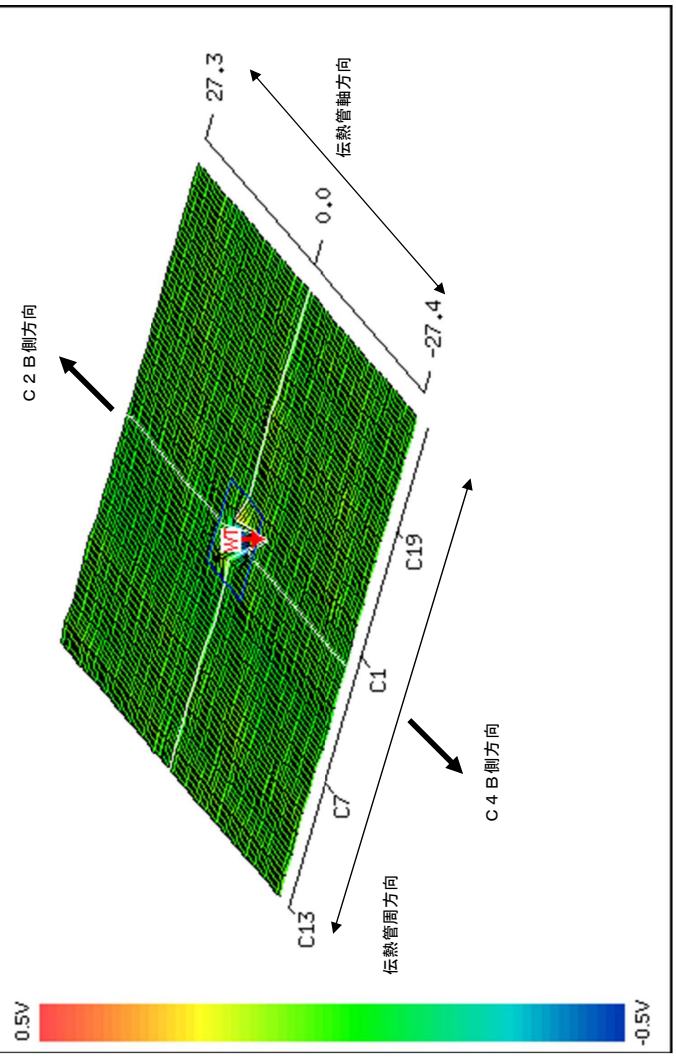
(1)内面軸方向信号の特徴との比較

(2) デンティンダ (DENT) 信号の特徴との比較



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

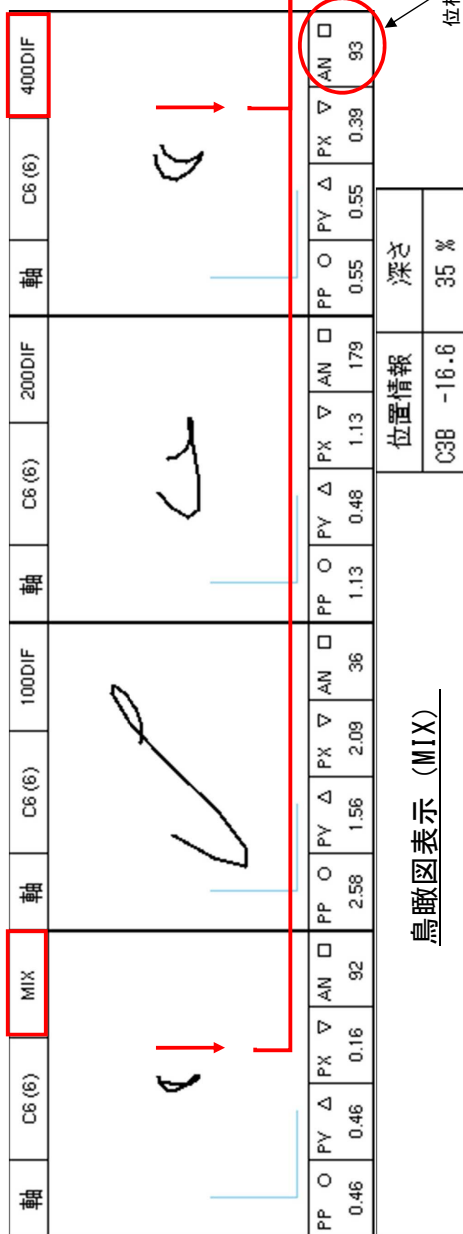
鳥瞰図表示 (MIX)



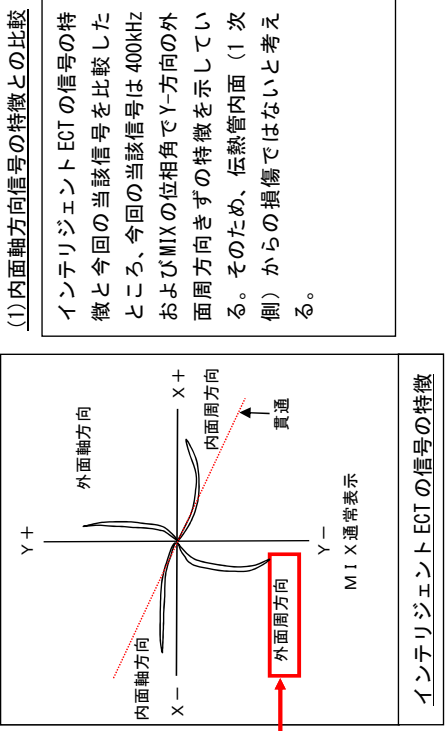
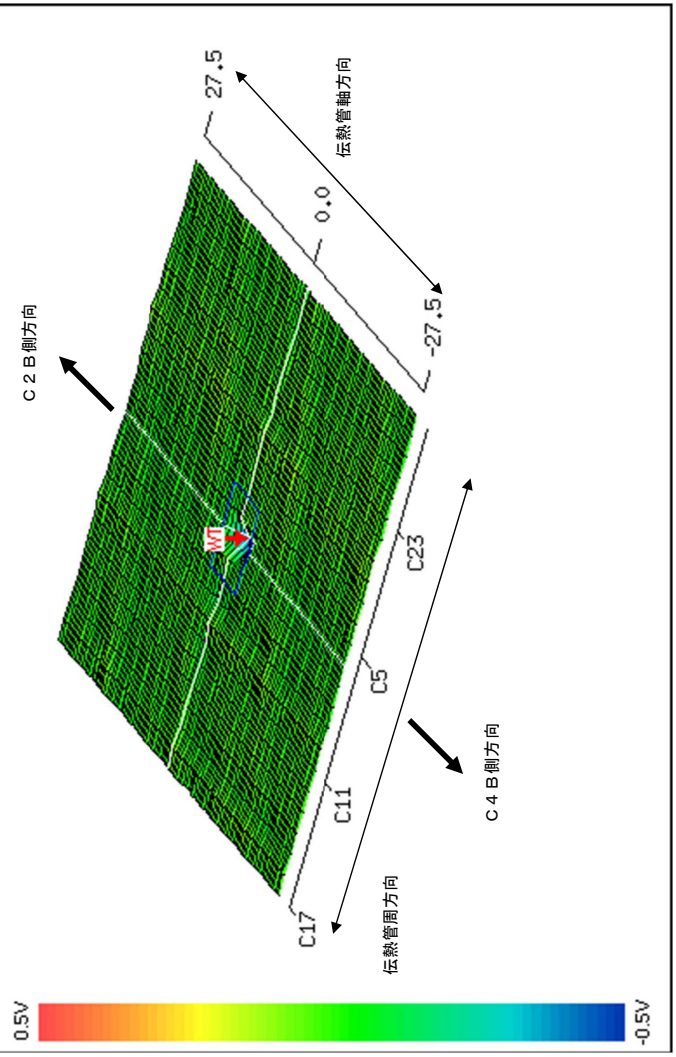


ECTの位相評価

当該管リサージェ表示 (C-SG X86, Y8)

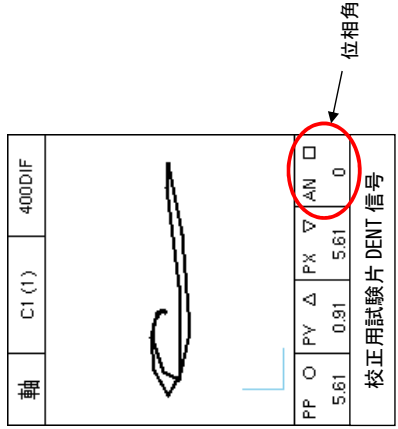


鳥瞰図表示 (MIX)



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

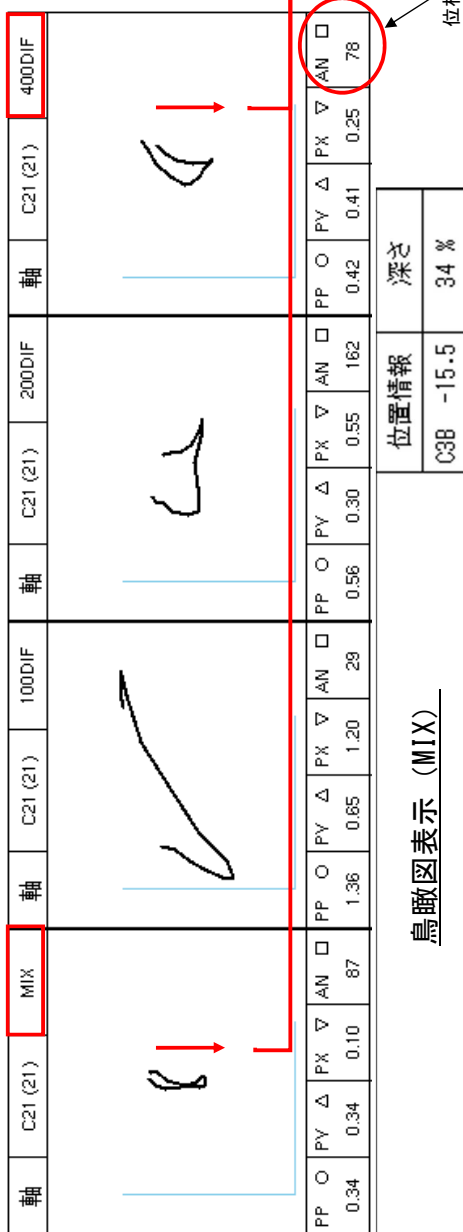
(2) デンティンダ (DENT) 信号の特徴との比較



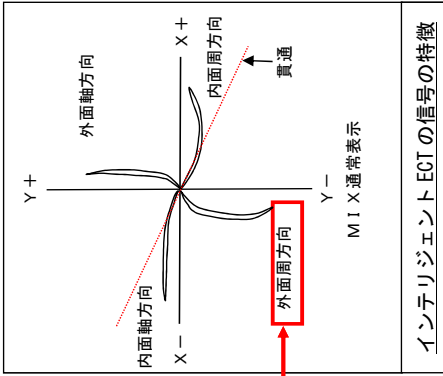
校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は “全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる” という特徴を持っているが、今回の当該信号は Y-方向の位相を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外面周方向向きの特徴を持っている。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考える。

ECTの位相評価

当該管リサージュ表示 (C-SG X71, Y5)

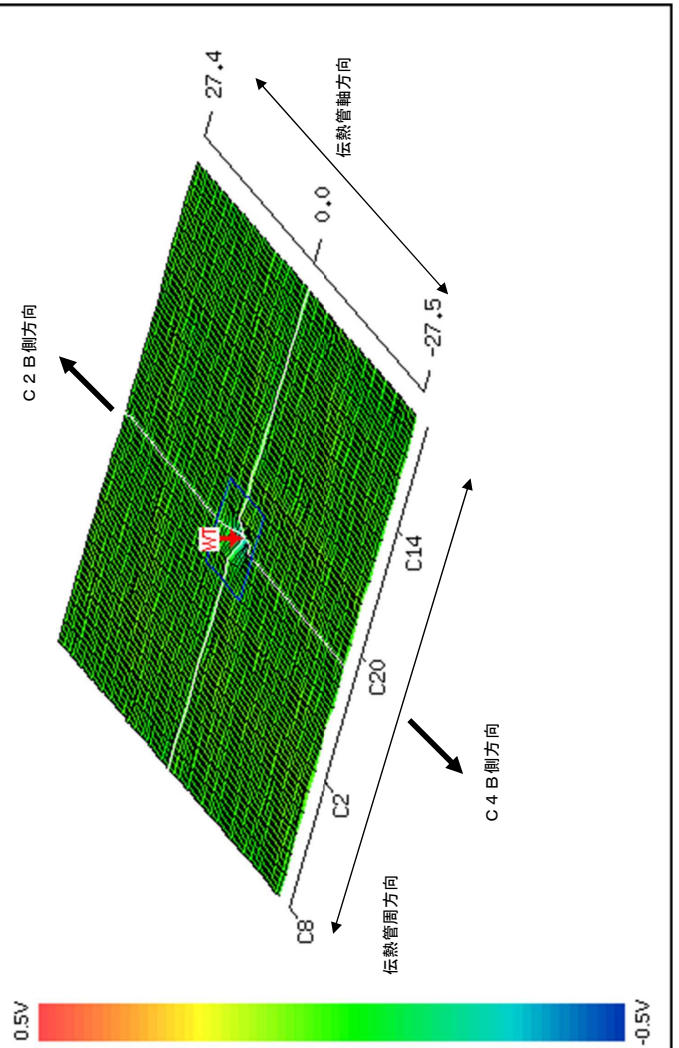


(1)内面軸方向信号の特徴との比較  
インテリジェント ECT の信号の特徴と今回の当該信号を比較したところ、今回の当該信号は 400kHz および MIX の位相角で Y-方向の外周方向向きの特徴を示している。そのため、伝熱管内面 (1 次側) からの損傷ではないと考える。

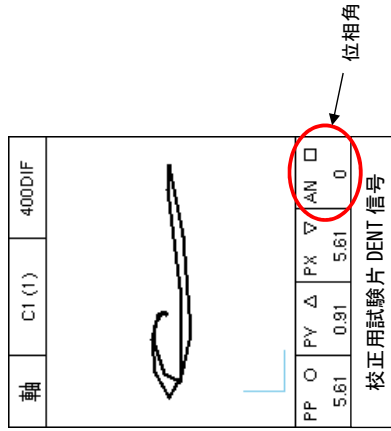


鳥瞰図表示 (MIX)

位置情報		深さ
C3B	-15.5	34 %



(2) デンティンダ (DENT) 信号の特徴との比較



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

## 粒界腐食割れに関する検討結果（1／2）

高浜発電所4号機 SG の至近サイクルについて、通常運転中の SG 器内水質（バルク水の水質）を用いたクレビス部 pH 計算の結果、クレビス部での pH は平均 5.8 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、高浜発電所4号機では2次系水中にアンモニアとヒドラジンを注入しており、運転中良好な還元雰囲気を維持している。

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

<クレビス部 pH 値計算結果>

	第24サイクル
pH <sub>300℃</sub>	平均 5.8

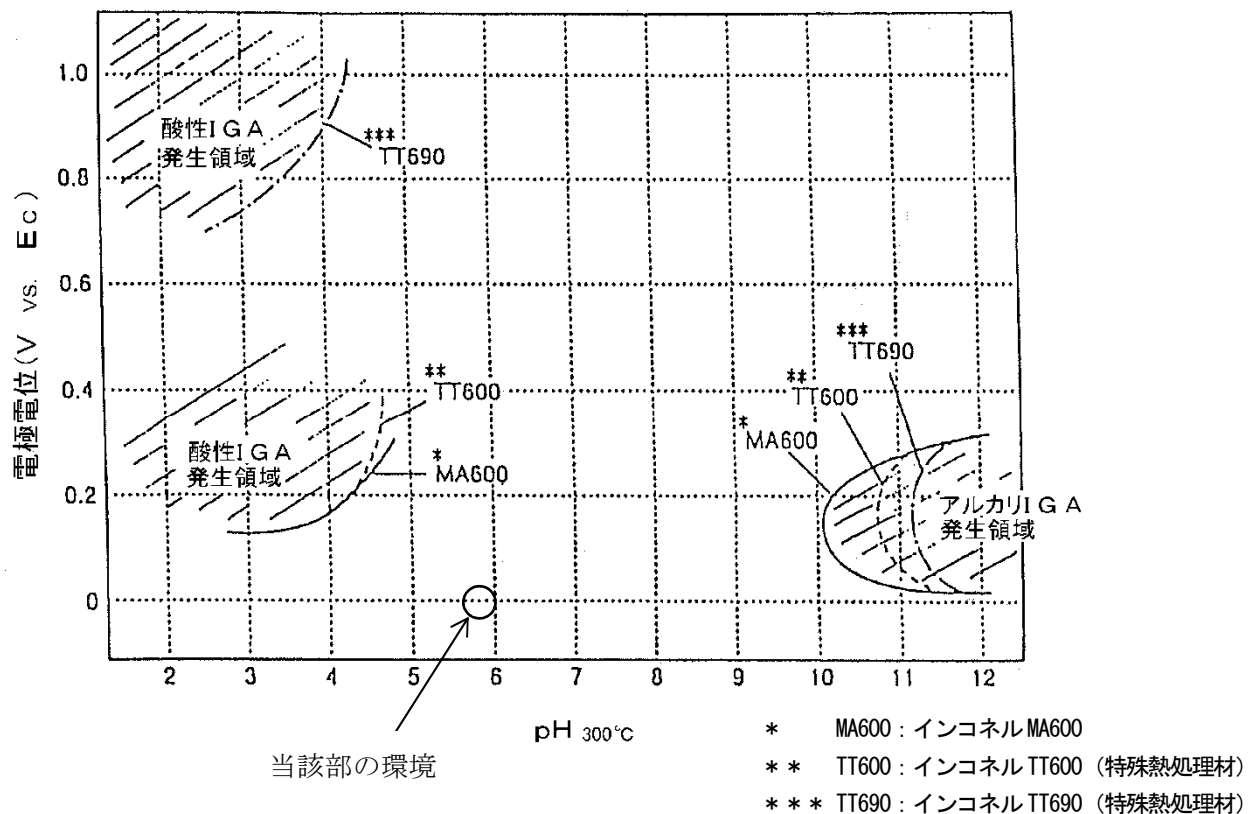


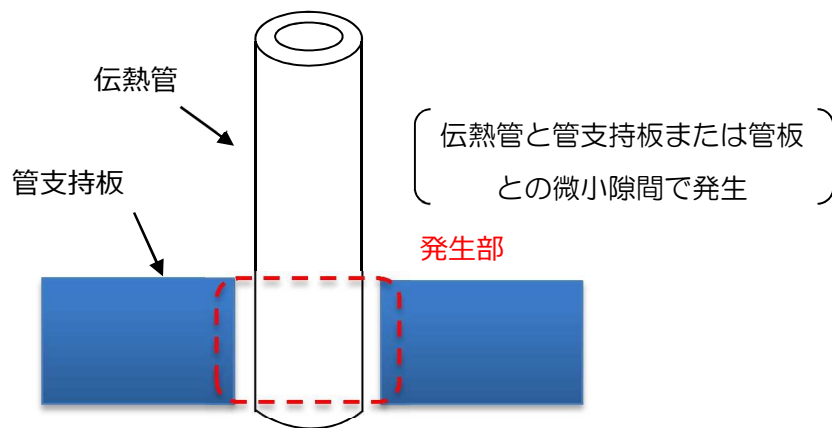
図1 粒界腐食割れの発生領域

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

## 粒界腐食割れに関する検討結果（2／2）

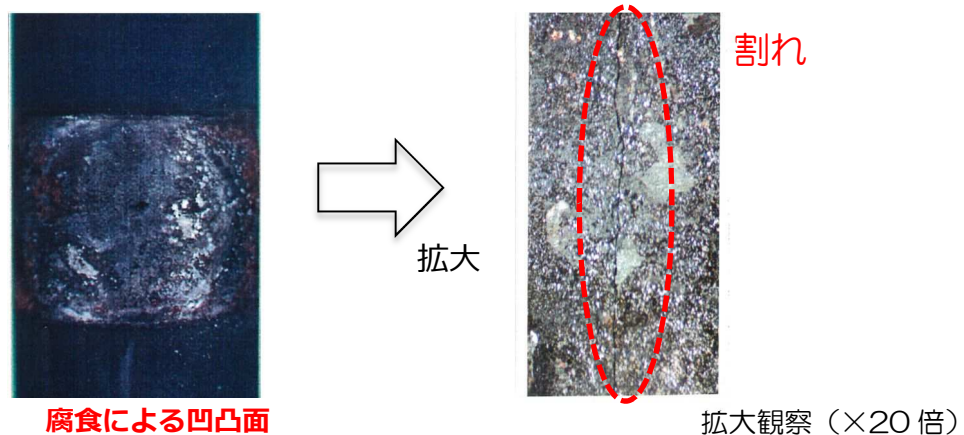
（粒界腐食割れによるきずの形状）

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



（試験体概略図）

図2 発生部位



（昭和63年度 共同研究報告書「蒸気発生器改良型伝熱管長期腐食信頼性に関する研究」より抜粋）

図3 表面形状

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

## ピittingに関する検討結果 (1/2)

高浜発電所4号機の通常運転時のSG2次側器内水塩素濃度の管理値は10ppbである。参考として、至近サイクルの塩素濃度は下表に示すが、実際に管理値を十分下回っていることを確認している。

高浜発電所4号機 SG 器内水塩素イオン濃度至近サイクル平均値

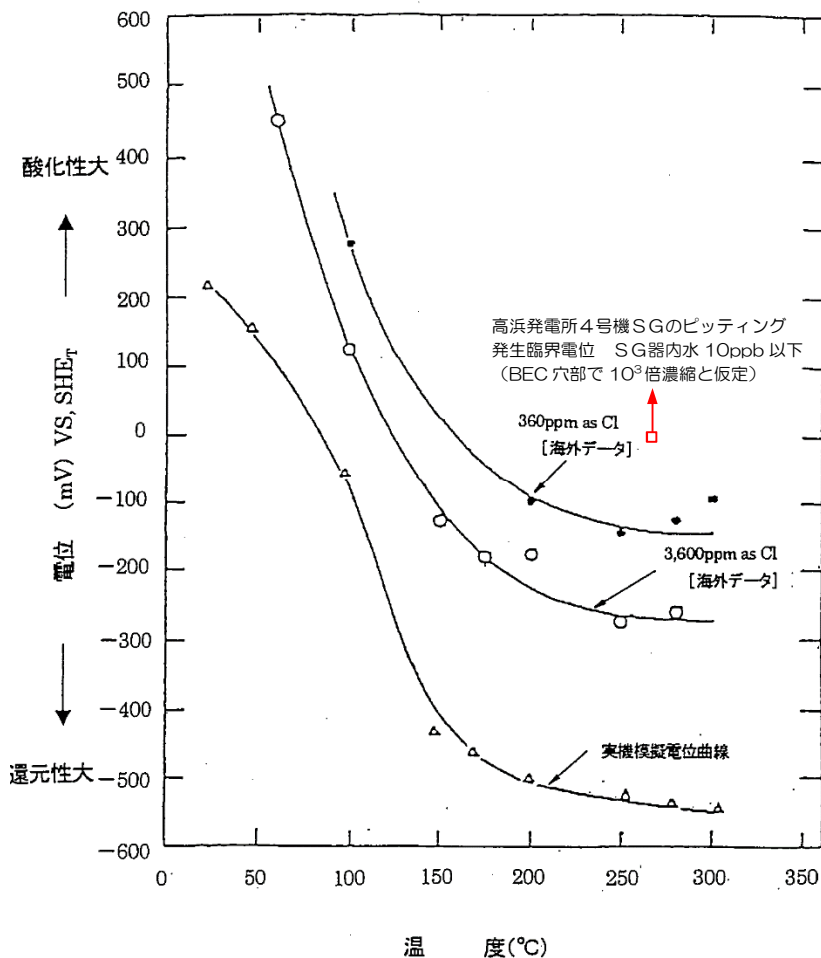
	第24サイクル
塩素イオン (ppb)	0.5

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 0.5ppm 程度）である。よって、ピitting\*1 発生限界電位は下図の 360ppm のデータの電位（-100mV 以下 (at 270°C)）よりも十分高いと考えられる。

一方、高浜発電所4号機では起動時の高ヒドラジン運転等により、還元性を良好に維持しており、SG 器内のスラッジ成分のうち、ほとんどがマグネタイトであることから、実機の電位 (at 270°C) は約 -540mV と評価している。

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

\*1 塩素イオン等に起因する金属表面の被膜破壊によって起きる局所的な腐食。



(説明)

- ピittingは、ピitting発生限界電位より実機電位が超過した場合に発生。
- インコネル TT600 のピittingに対する耐食性は、インコネル MA600 と同等。

出典

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

図1 インコネル MA600 のピitting発生電位

## ピittingに関する検討結果（2／2）

（ピittingによるきずの形状）

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

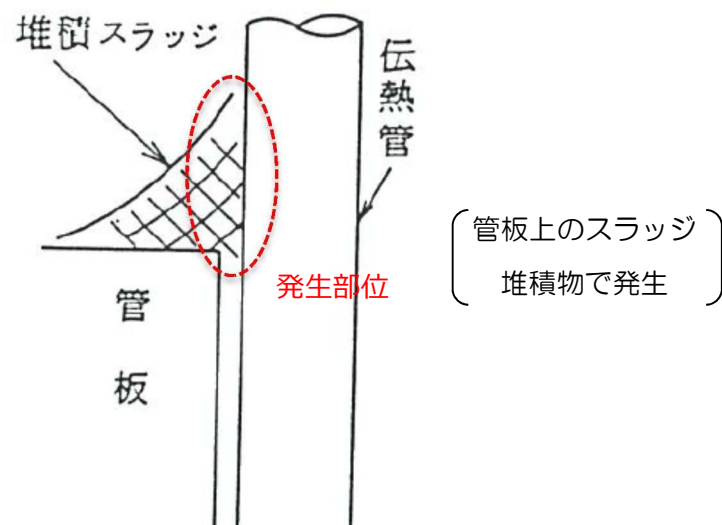


図2 発生部位

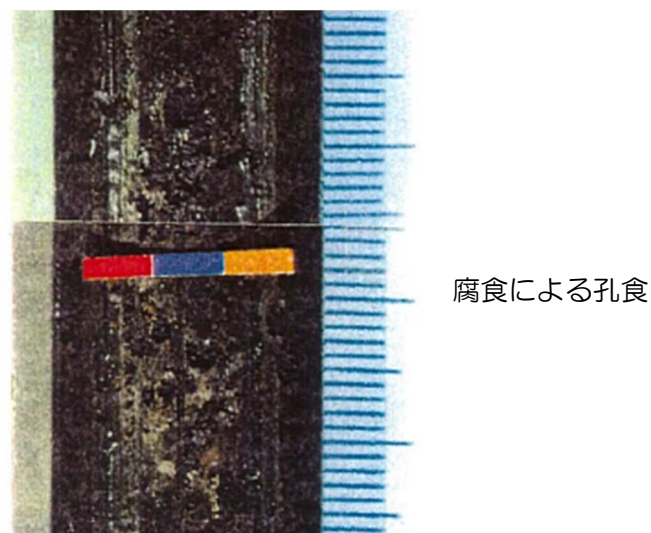


図3 表面形状

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



## リン酸減肉に関する検討結果

(リン酸減肉によるきずの形状)

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

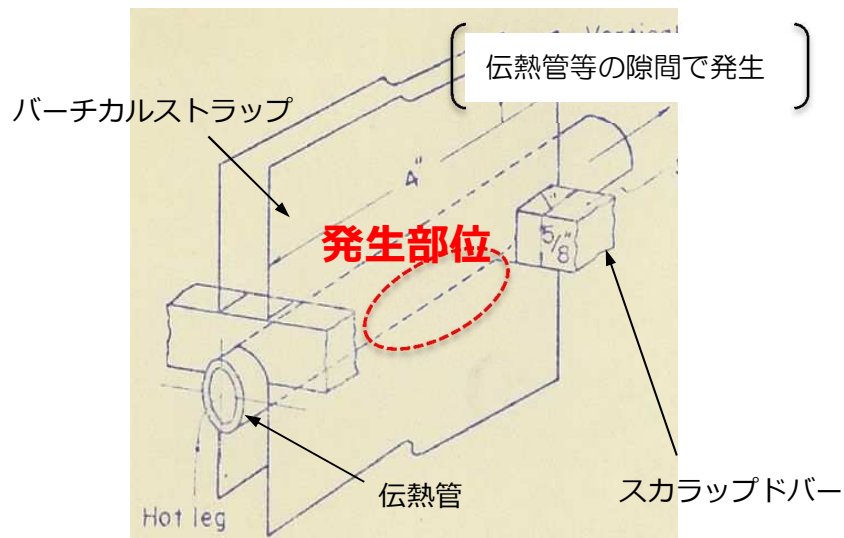
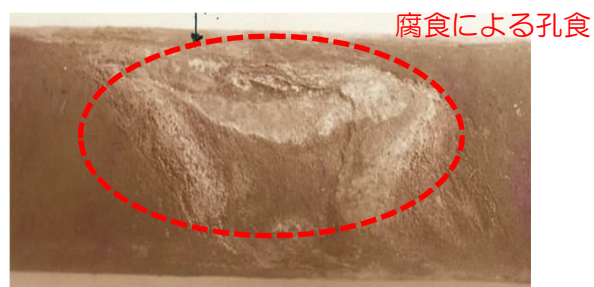


図 1 発生部位



拡大観察 (× 3 倍)

図 2 表面形状

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

## 流体振動による疲労に関する検討結果

第三および第四管支持板部において、流体力によって伝熱管に発生する応力を算出し、疲労損傷が生じないことを確認した。

伝熱管に作用する流体力 F は、

$$F = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S = \boxed{\phantom{000000}}$$

ここで、 $C_D$  : 抗力係数 =  $\boxed{\phantom{000}}$

$\rho$  : 流体の密度 =  $\boxed{\phantom{000}}$  kg/mm<sup>3</sup>

V : 流速 =  $\boxed{\phantom{000}}$  mm/sec

S : 流れを受ける面積 =  $\boxed{\phantom{000000}}$   
 $\boxed{\phantom{000000}}$

流体力 F による最大曲げモーメント M は、

$$M = (F/2l) \cdot l^2/8 = \boxed{\phantom{0000}} \text{ N} \cdot \text{mm}$$

ここで、 $l$  : 管支持板間の長さ =  $\boxed{\phantom{0000}}$  mm

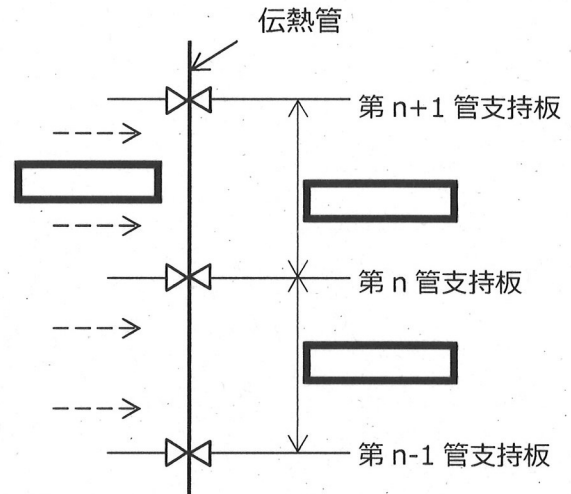


図 1 流体力を受ける伝熱管 (n = 3, 4)

伝熱管の断面係数 Z は

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

ここで、 $d_2$  : 伝熱管外径 = 22.23mm

$d_1$  : 伝熱管内径 = 19.69mm

よって、伝熱管に発生する最大応力  $\sigma$  は、

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

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

$\boxed{\phantom{0000}}$  : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

## エロージョンに関する検討結果 (1/2)

### 1. 目的

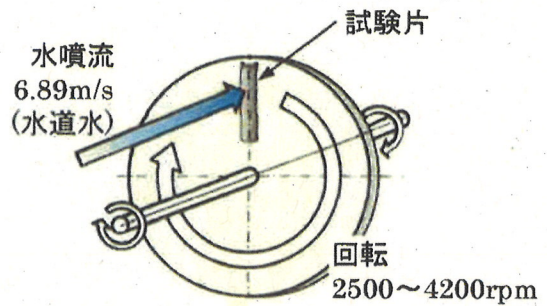
SG 伝熱管の管支持板部に周辺流体の衝突によるエロージョン\*1 が発生しないことを評価する。

\*1：管内外を流れる水により配管表面が摩耗する現象

### 2. 方法

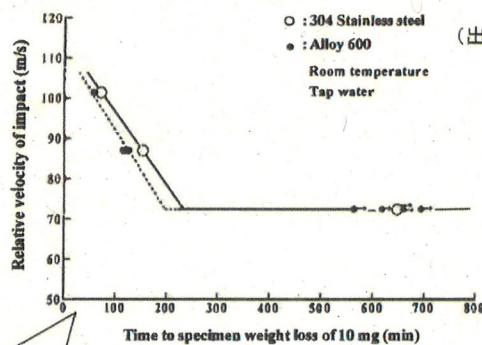
ウォータージェットテスト（室温）によりエロージョン発生限界流速を求め、実機流速と比較する。

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



### 3. 評価結果

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



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

図1 ウォータージェットテストによる限界流速

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

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

表面の番号は、試験片番号

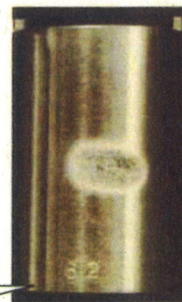


図2 ウォータージェットテスト後の外観  
(700分間水噴流後の状況)

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

[ ] : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



## エロージョンに関する検討結果 (2/2)

(エロージョンの限界流速の温度影響)

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

### ● エロージョンのメカニズム

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

#### <流体因子(密度)>

- ✓ SG2次側温度269℃での水の密度は769 kg/m<sup>3</sup>であり、常温(20℃)に比べ約2割小さい。
- ✓ 密度が低下するとエロージョンが生じにくくなる。(限界流速は上昇する。)

#### <材料因子(硬さ)>

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

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

\*1: 材料メーカーカタログ(インコネルT600)の単位を換算

\*2: 材料と環境, 57, 146-152(2008), 磯本ら

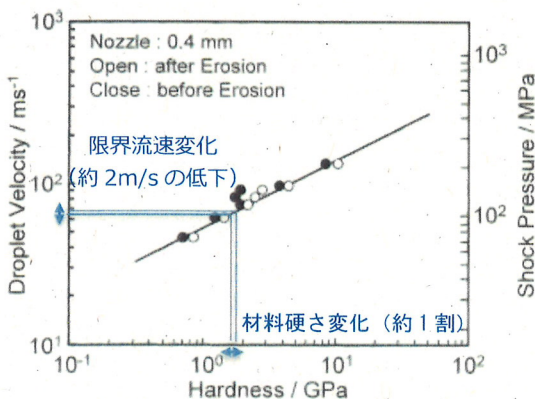


図1 限界流速と硬さの関係

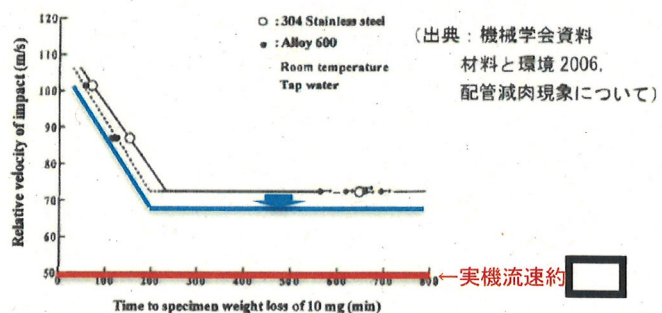


図2 ウォータージェットテストによる限界流速

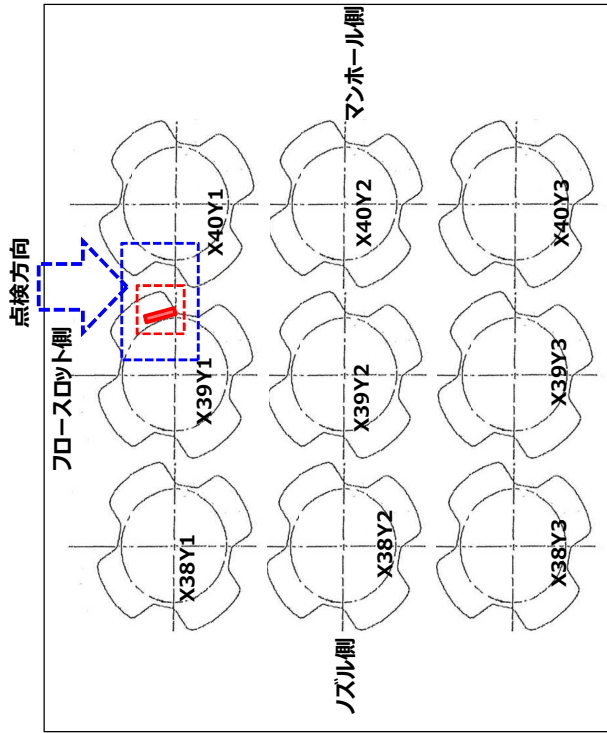
温度の影響は小さく、常温の知見を用いても問題ない。

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

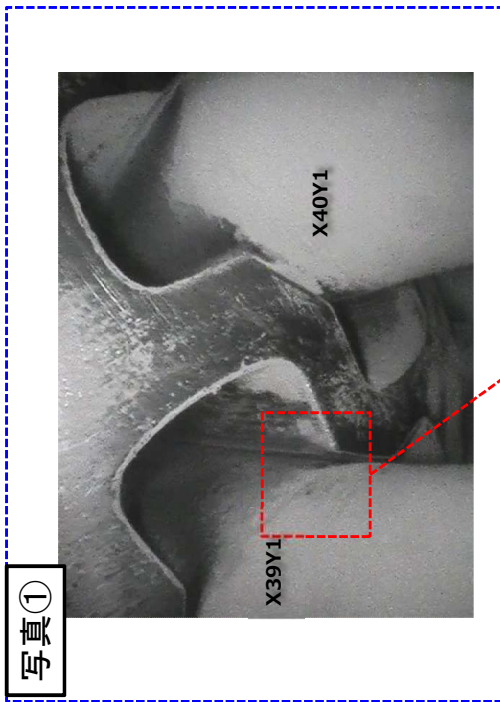
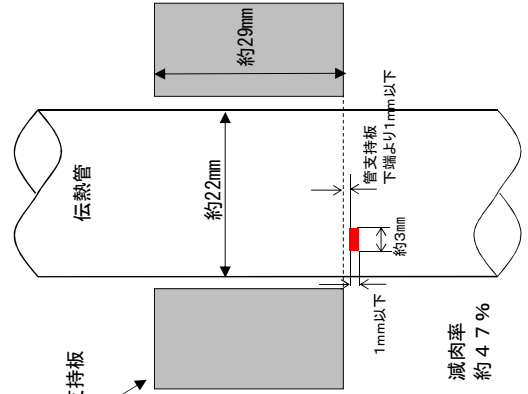
[ ] : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

# SG器内点検結果 (SG伝熱管 2次側表面写真)

対象：A-SG 第四管支持板下面 伝熱管 X39, Y1 低温側



管支持板を下から見た図



写真①

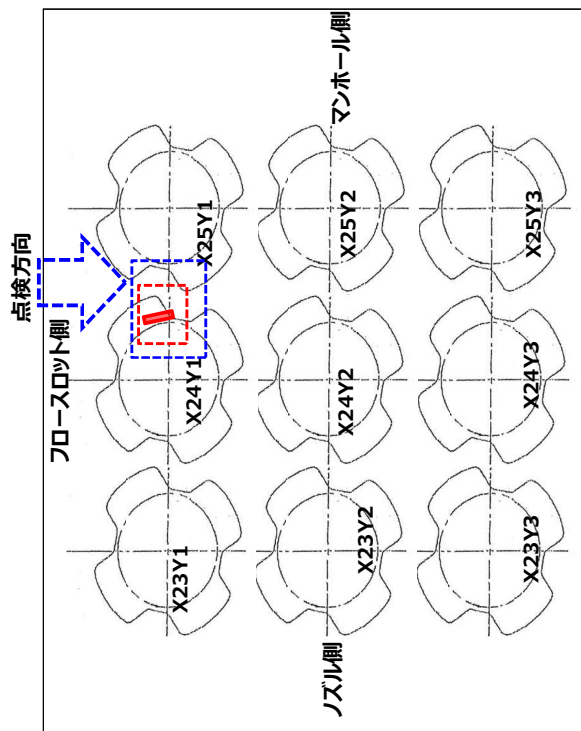


写真②

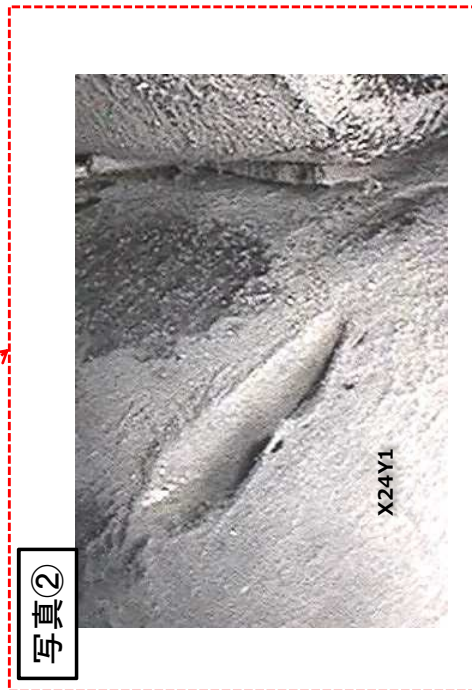
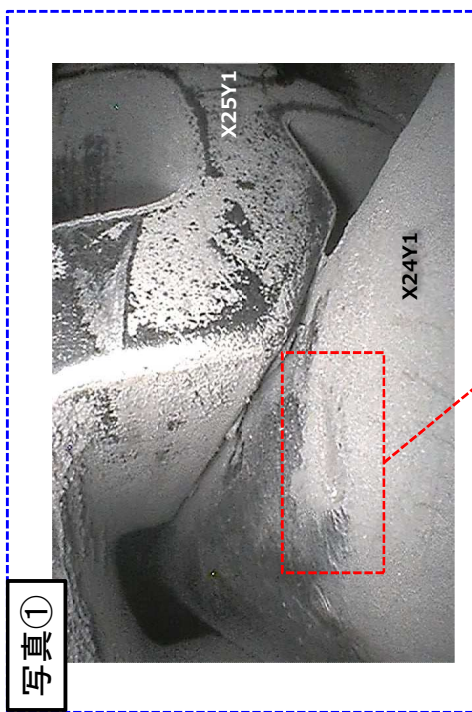
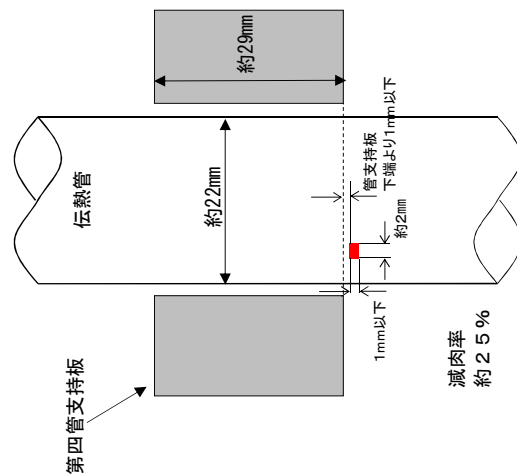


# SG器内点検結果 (SG伝熱管2次側表面写真)

対象：A-SG 第四管支持板下面 伝熱管 X24, Y1 低温側



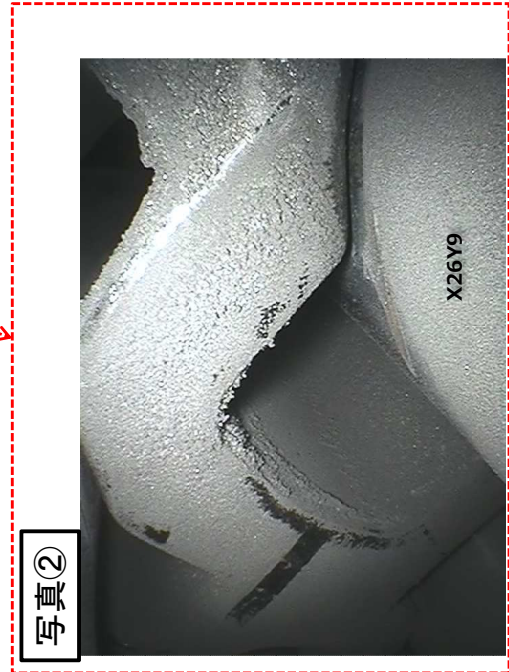
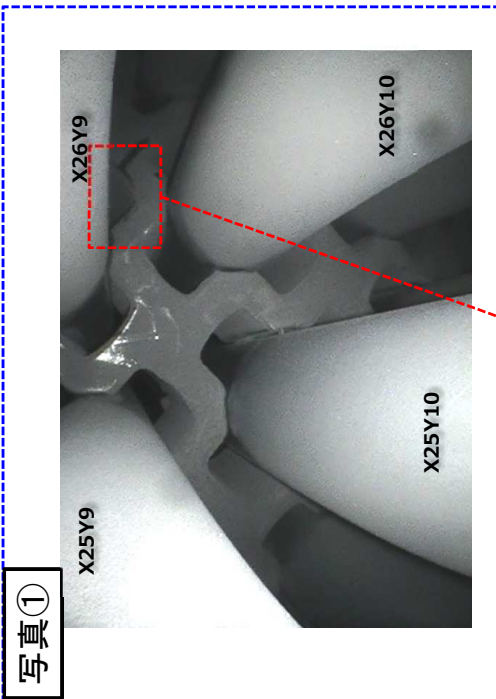
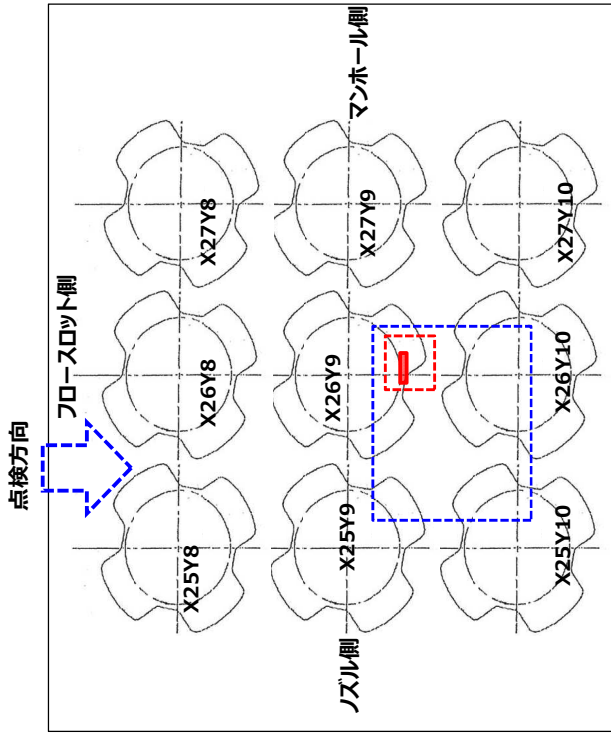
管支持板を下から見た図



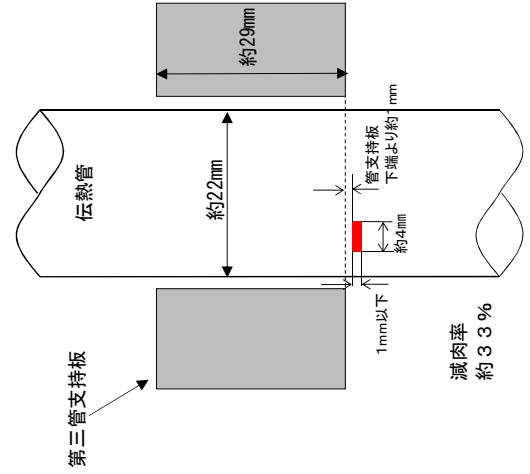


# SG器内点検結果 (SG伝熱管2次側表面写真)

対象：A-SG 第三管支持板下面 伝熱管 X26, Y9 低温側

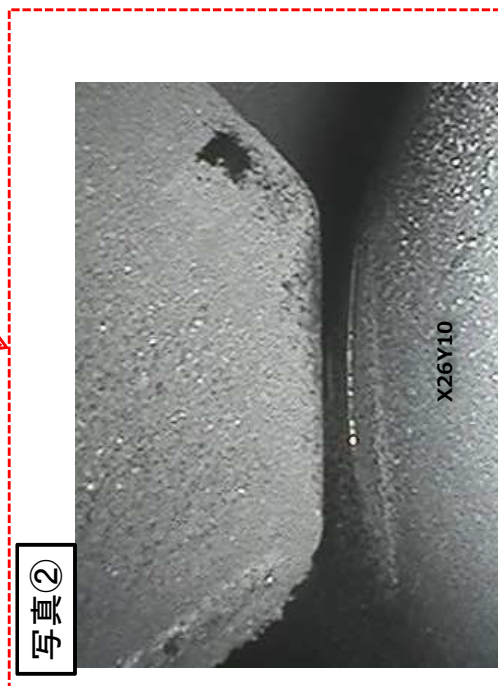
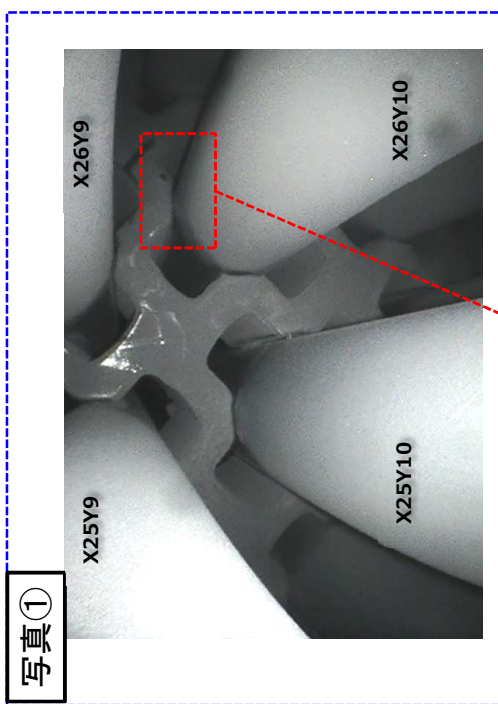
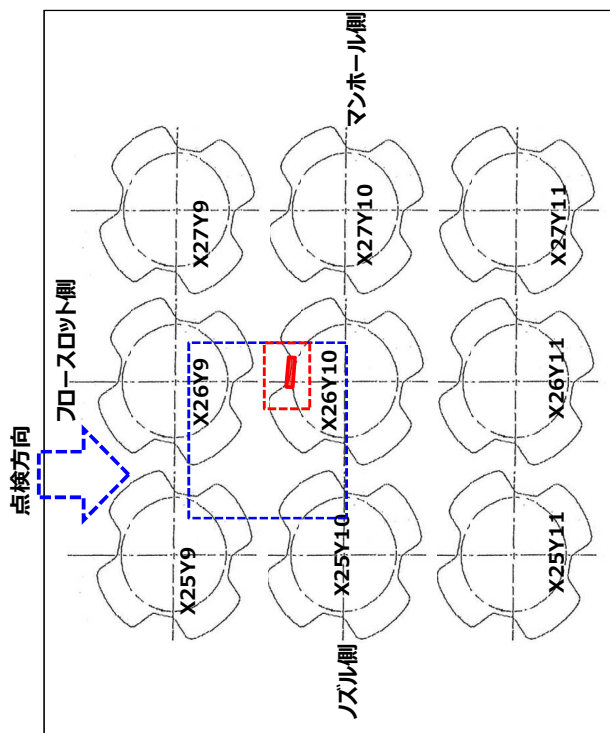


管支持板を下から見た図

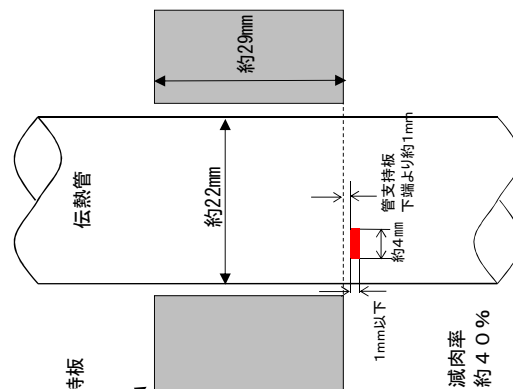


# SG器内点検結果 (SG伝熱管 2次側表面写真)

対象：A-SG 第三管支持板下面 伝熱管 X26, Y10 低温側

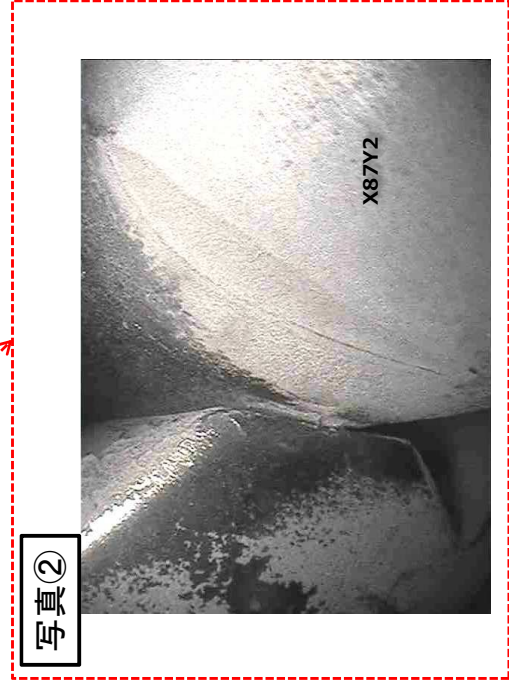
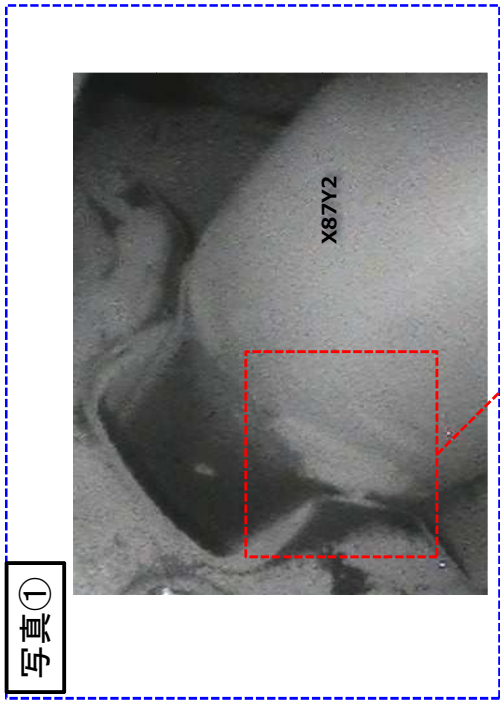
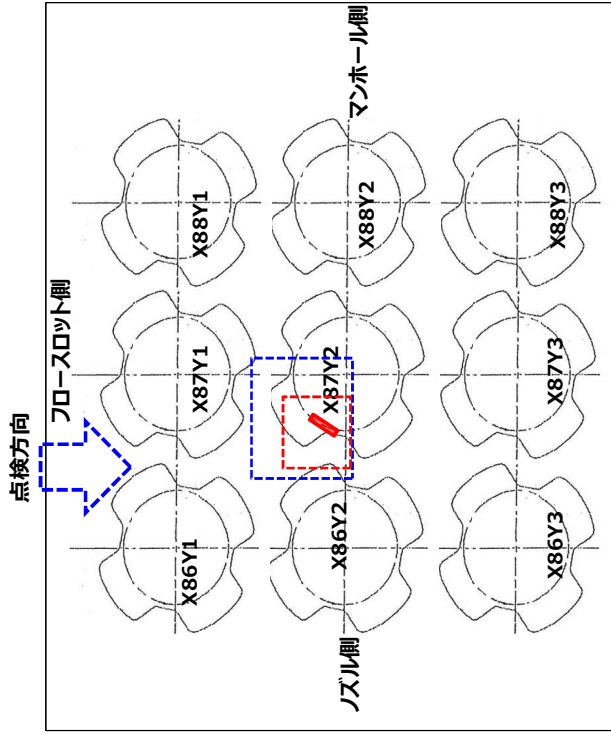


管支持板を下から見た図

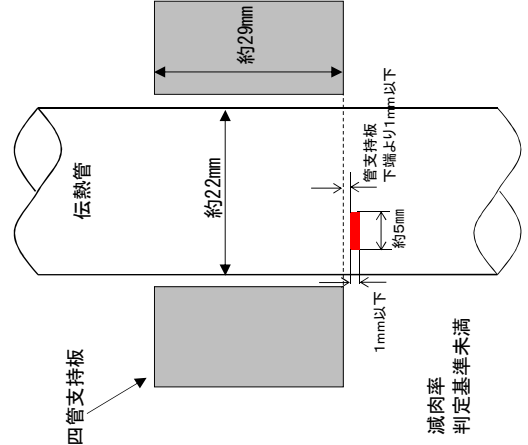


SG器内点検結果 (SG伝熱管2次側表面写真)

対象：A-SG 第四管支持板下面 伝熱管 X87, Y2 低温側

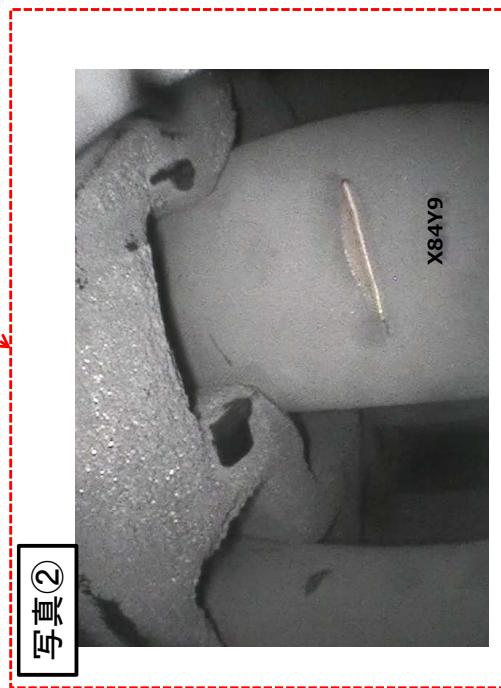
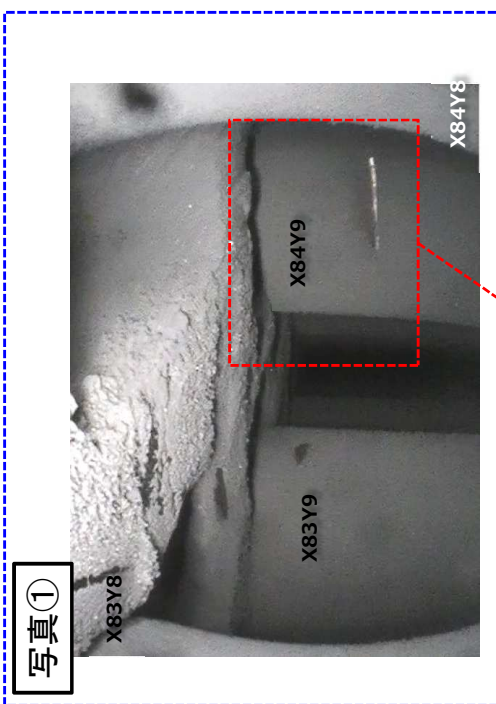
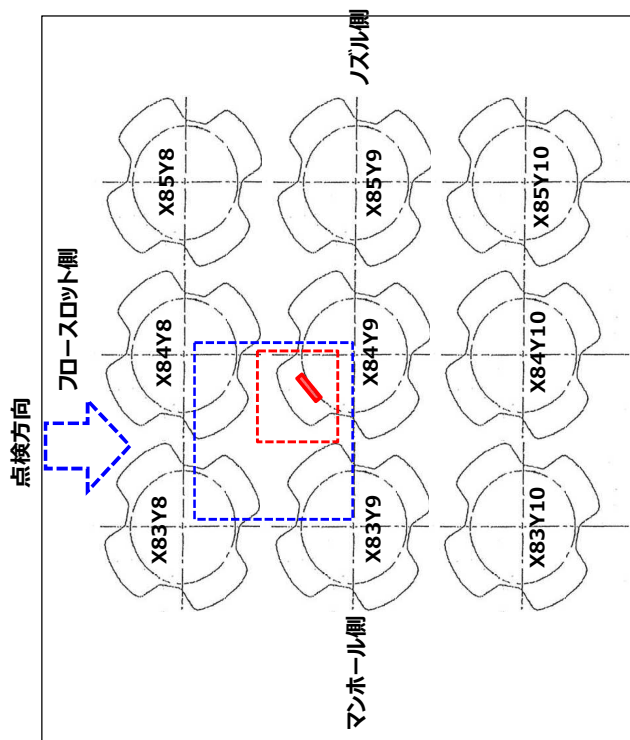


管支持板を下から見た図

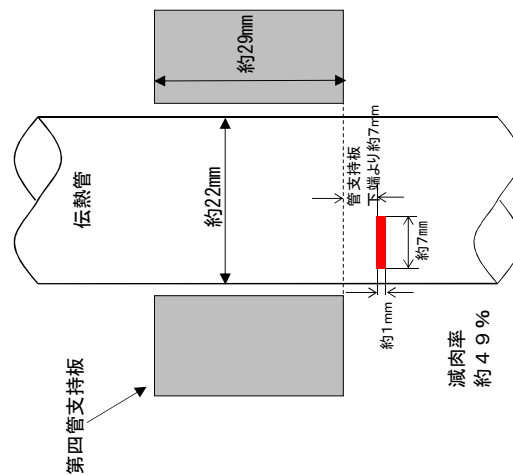


SG器内点検結果 (SG伝熱管2次側表面写真)

対象：B-SG 第四管支持板下面 伝熱管 X84, Y9 低温側



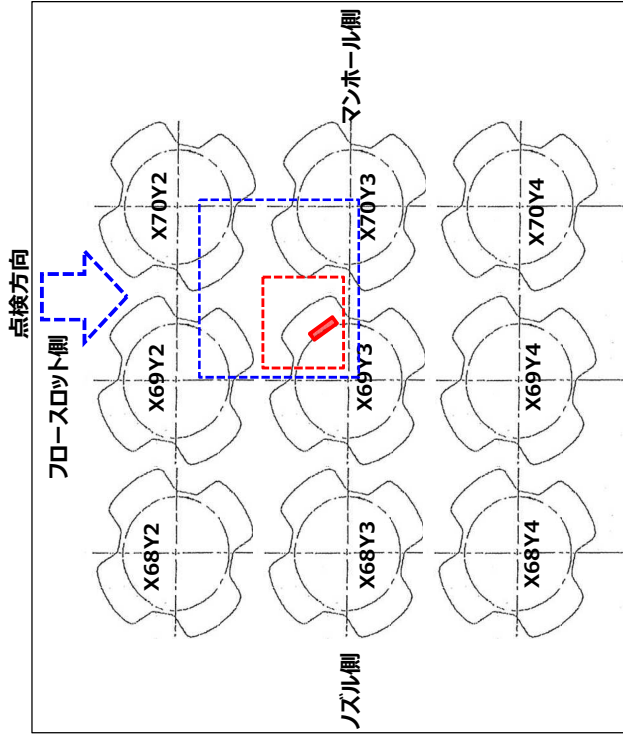
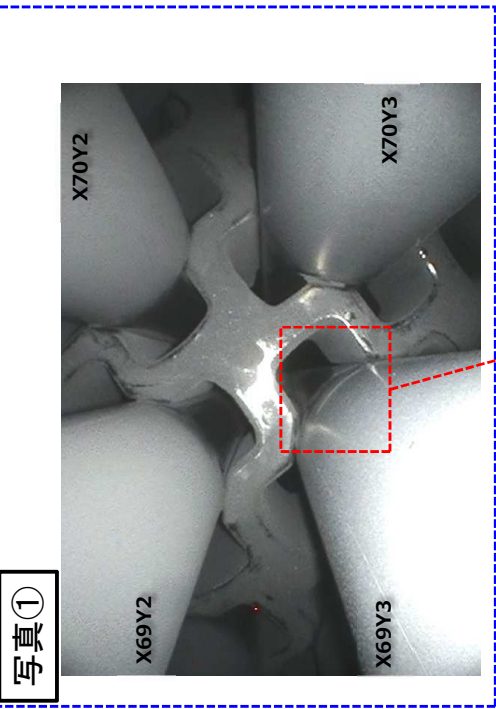
管支持板を下から見た図



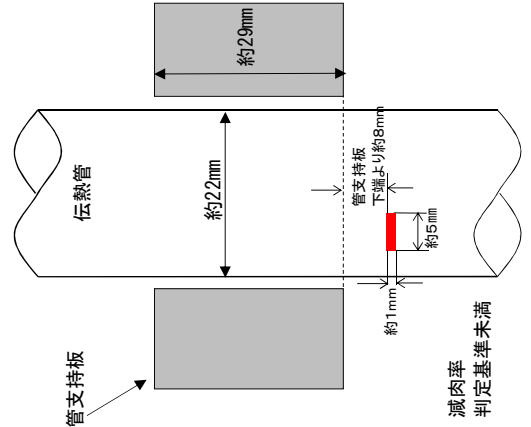


**SG器内点検結果 (SG伝熱管 2次側表面写真)**

対象：B-SG 第三管支持板下面 伝熱管 X69, Y3 低温側

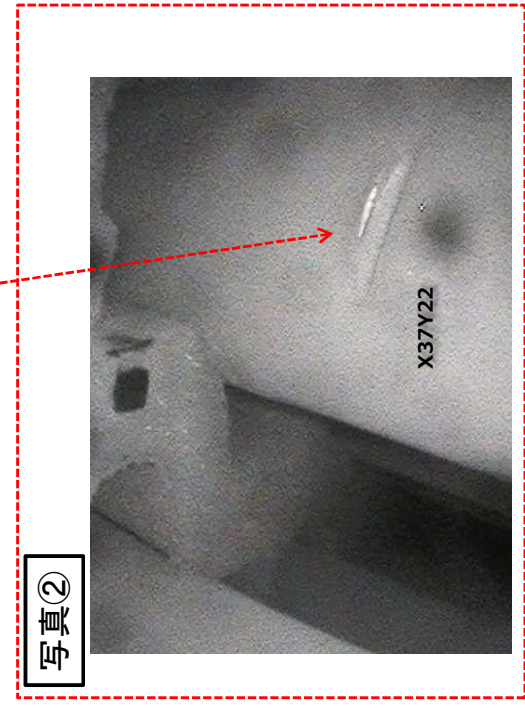
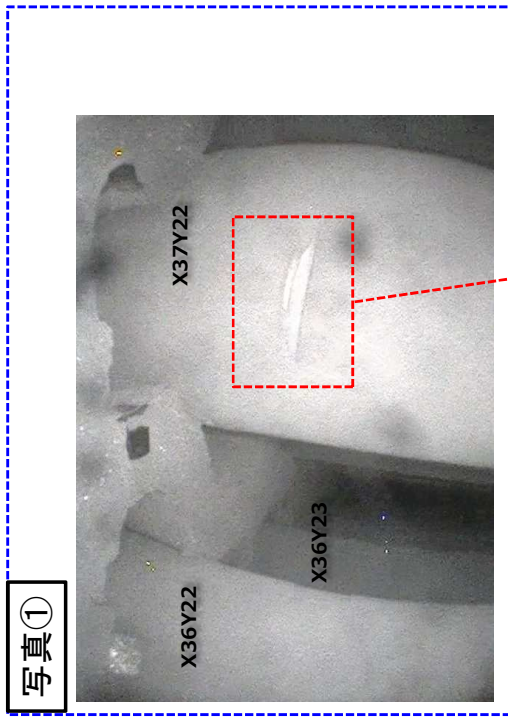
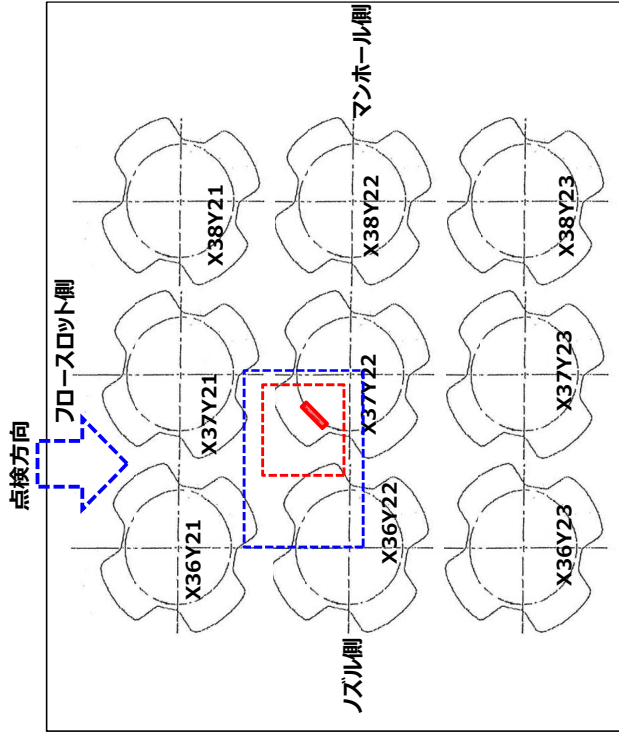


管支持板を下から見た図



# SG器内点検結果 (SG伝熱管2次側表面写真)

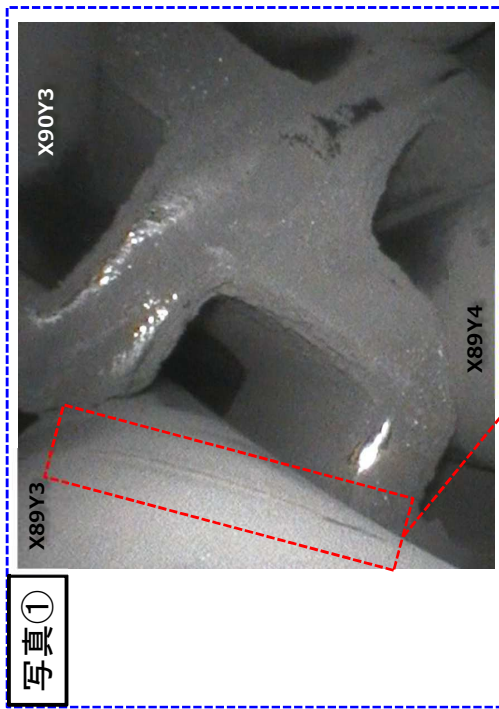
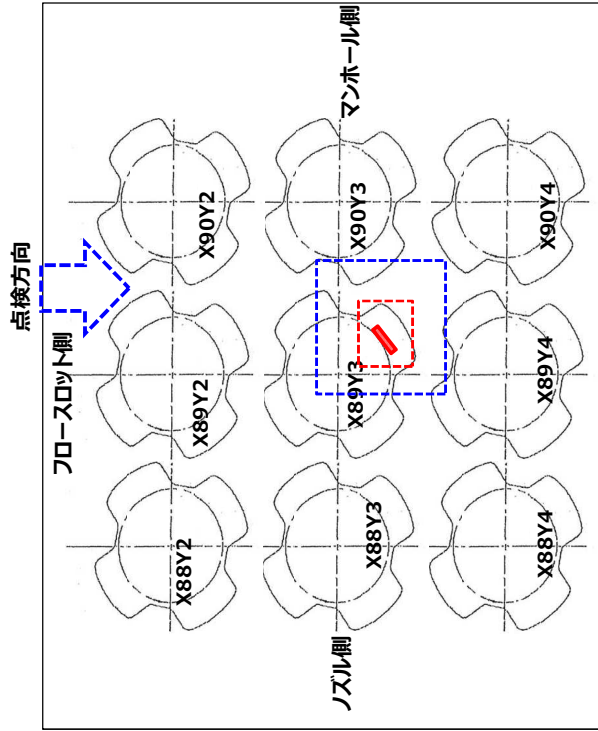
対象：C-SG 第四管支持板下面 伝熱管 X37, Y22 低温側



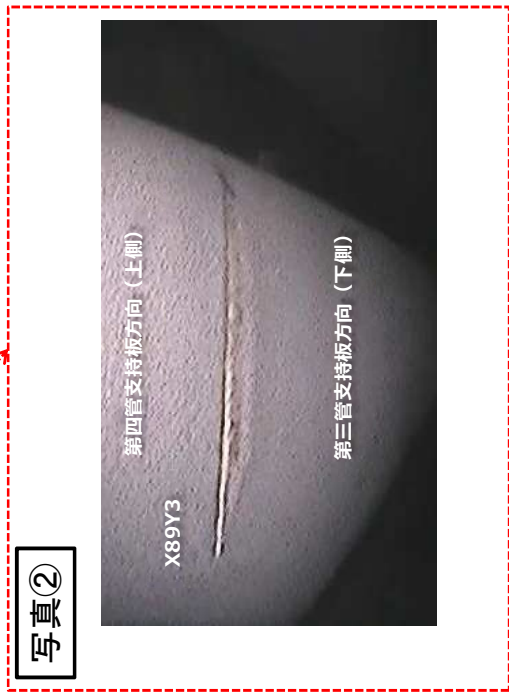
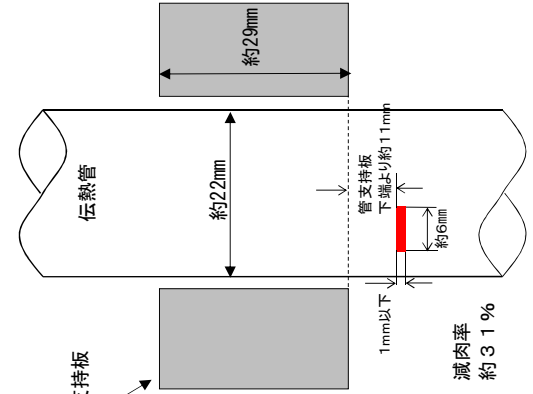


# SG器内点検結果 (SG伝熱管2次側表面写真)

対象：C-SG 第四管支持板下面 伝熱管 X89, Y3 低温側

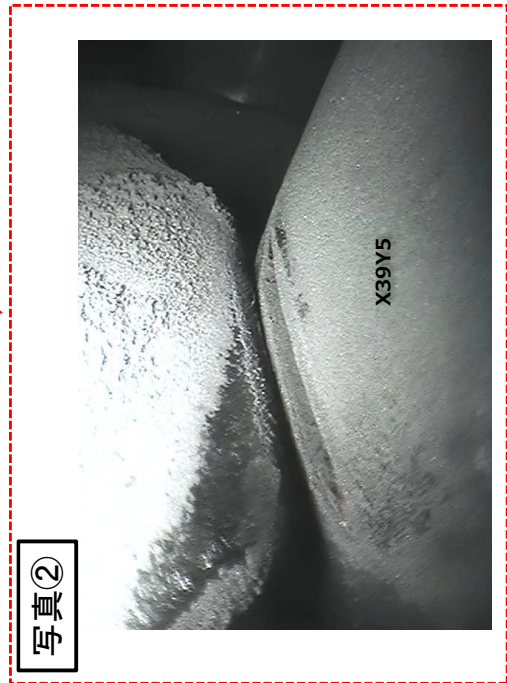
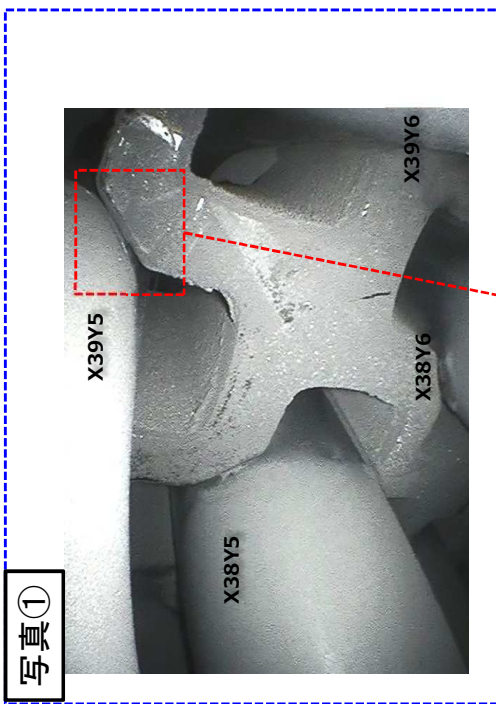
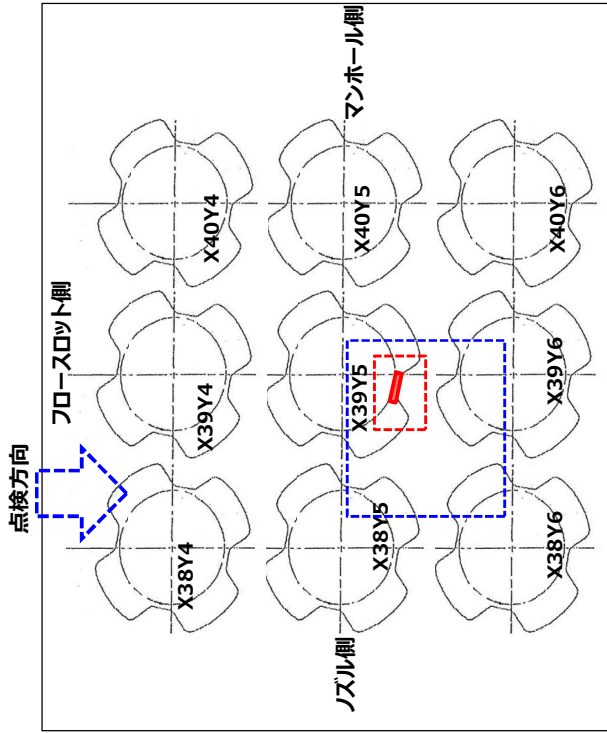


管支持板を下から見た図

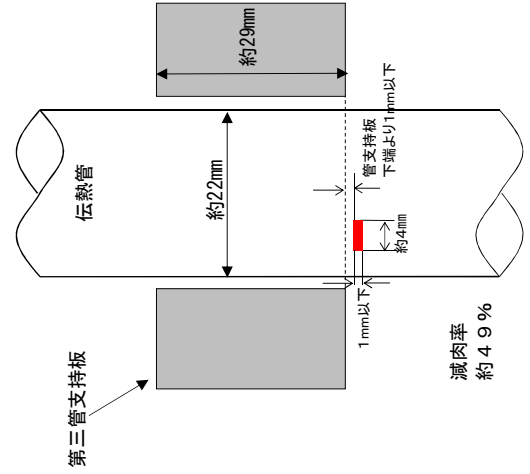


SG器内点検結果 (SG伝熱管2次側表面写真)

対象：C-SG 第三管支持板下面 伝熱管 X39, Y5 低温側

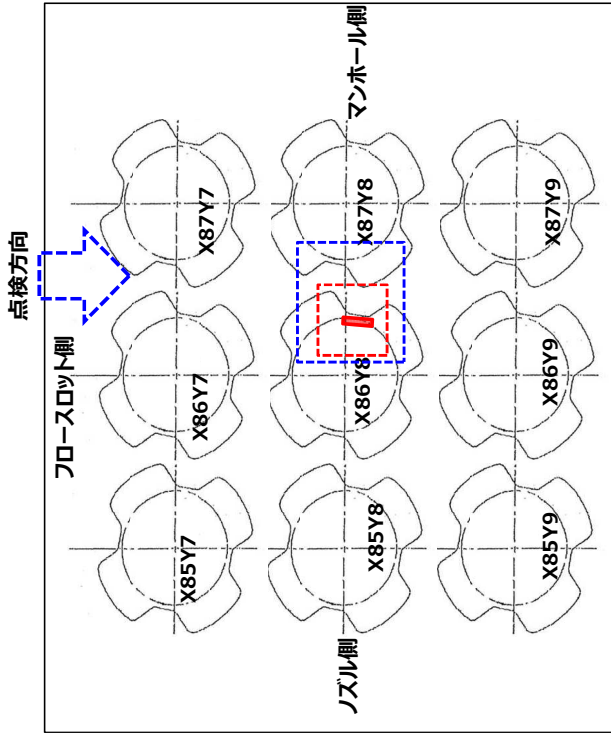


管支持板を下から見た図

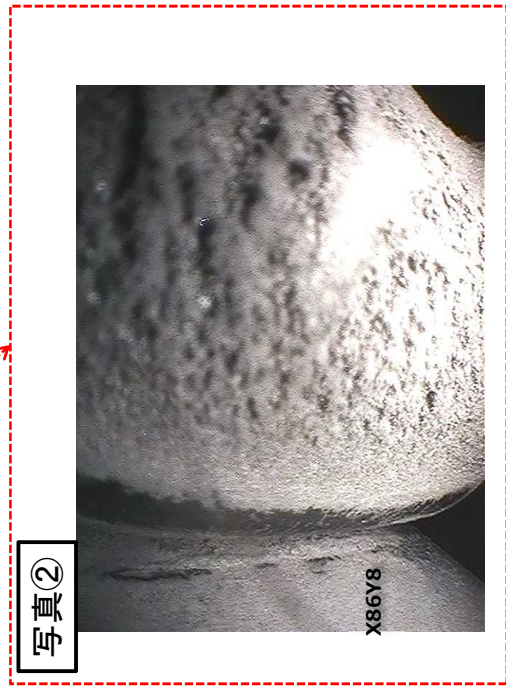
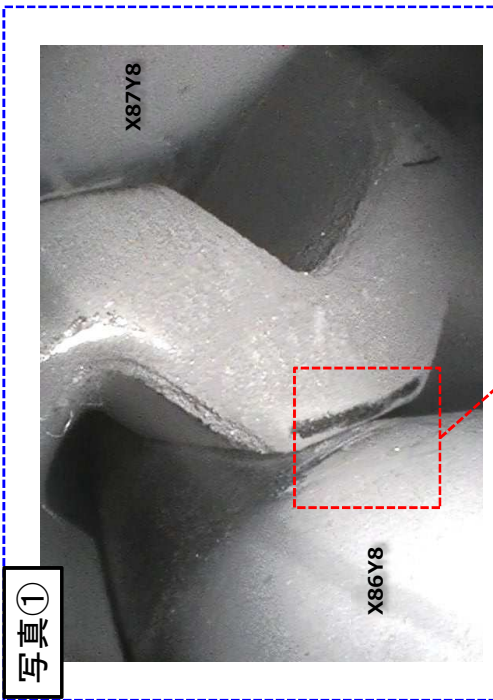
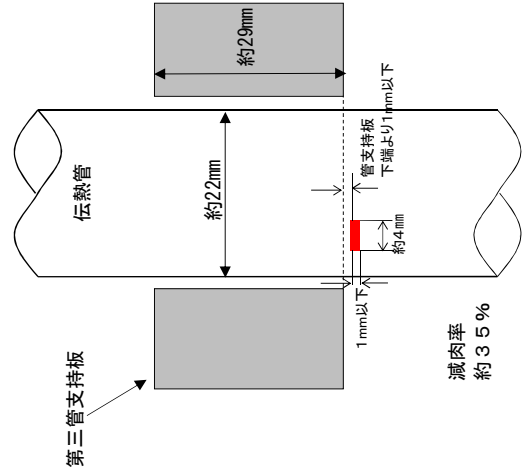


# SG器内点検結果 (SG伝熱管2次側表面写真)

対象：C-SG 第三管支持板下面 伝熱管 X86, Y8 低温側

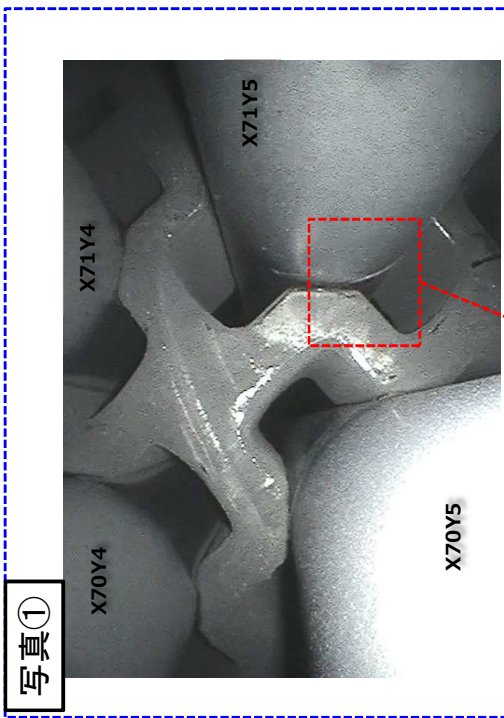
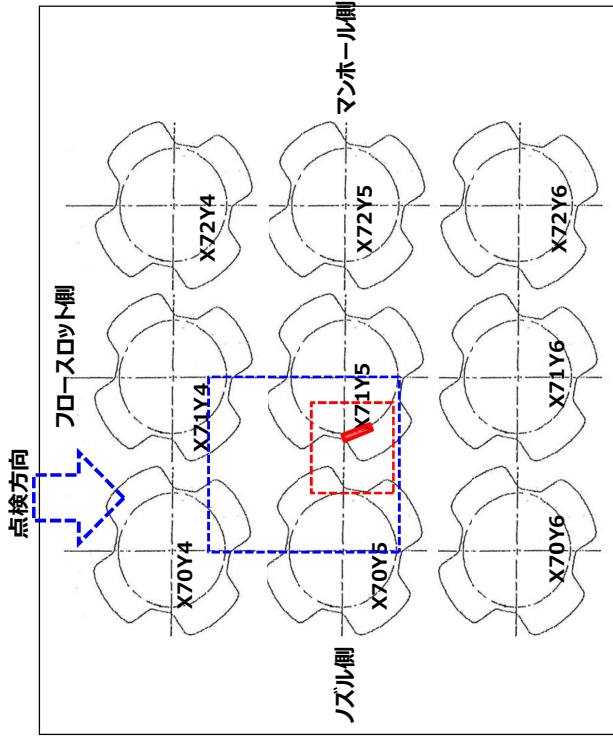


管支持板下から見た図



### SG器内点検結果 (SG伝熱管2次側表面写真)

対象：C-SG 第三管支持板下面 伝熱管 X71, Y5 低温側



管支持板を下から見た図

