

関原発 第 361 号  
2019 年 11 月 15 日

原子力規制委員会 殿

大阪市北区中之島3丁目6番16  
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314号（2019年10月18日）にてご報告しておりますが、調査状況等について取り纏めましたのでご報告します。

なお、本事象の原因と対策につきましては、その結果が纏まり次第、追って報告します。

## 発電用原子炉施設故障等報告書

2019年11月15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<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<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、2019年10月17日10時50分に判断した。</p> <p><sup>*1</sup> 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><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、SG管支持板等の外部構造物あるいは伝熱管の形状等に起因する信号(疑似信号)ではない信号指示。</p> <p>2. ECT結果</p> <p>(1) 検査期間</p> <p>2019年10月 2日～2019年10月17日(定期事業者検査終了日)</p> <p>探傷検査・データ整理期間 2019年10月 2日～2019年10月14日</p> <p>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</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 style="text-align: right;">(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><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>、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<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は、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>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
		<p>*6 一般社団法人日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格 (2008年改訂版) JSME S NA1-2008 SG伝熱管に対する判定基準に従う。</p> <p>*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)。</p> <p>*8 24組分のコイルのチャートを平面状に並べ、信号振幅に応じて色調として表示させたもの。伝熱管全長についての信号指示の大きさや位置等の分析に用いる表示方法。</p>				
事 象 の 原 因	<p>1. 減肉伝熱管2次側からの確認結果 ECTで減肉とみられる信号指示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。</p> <p>(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。</p> <p>a. A-S/G 第三管支持板：長さ約6.0mm、幅約1.0mm以下 (X85, Y2)</p> <p>b. B-S/G 第三管支持板：長さ約5.0mm、幅約1.0mm (X92, Y8)</p> <p>c. C-S/G 第二管支持板：長さ約4.0mm、幅約1.0mm以下 (X45, Y5) 第二管支持板：長さ約5.0mm、幅約2.0mm以下 (X91, Y4) 第三管支持板：長さ約8.0mm、幅約1.0mm以下 (X52, Y9)</p> <p>(2) ECT信号との比較 伝熱管2次側減肉部位における外観観察結果は、ECTにより得られる減肉信号指示による位置およびサイズが当該部の外観観察結果と相違ないことが確認された。</p> <p>2. 原因調査 有意な信号指示があった伝熱管の外表面減肉の原因を調査するため、要因分析を行った。</p> <p>(1) SG伝熱管内面 (1次側) からの損傷 ECTの信号指示により、伝熱管内面 (1次側) にきずがないことを確認した。</p> <p>(2) SG伝熱管外面 (2次側) からの損傷</p> <p>a. 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*9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。</p> <p>b. 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*10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。</p> <p>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。</p>					

d. 摩耗減肉

(a) 管支持板との接触

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

\*<sup>12</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>13</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。

\*<sup>13</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。

(b) 器内発生物との接触・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×板厚約0.6mmの扇形に湾曲した長方形型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器内にはスケール以外の異物は確認されなかった。

- ・スラッジランシング\*<sup>14</sup>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。

\*<sup>14</sup> 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。

(イ) 異物分析

- ・A-SGで発見された金属片についてX線回折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、異物の表面観察の結果、伝熱管との接触に伴う摺動痕がないことを確認した。

なお、今後、更なる異物調査として、SG器内に水張りをして底部からN<sub>2</sub>を噴射(バブリング)させたのち、水を抜くことにより異物の有無を確認する。

イ. 内部品の脱落調査

- ・今回の異物の想定形状(薄片)\*<sup>15</sup>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。

\*<sup>15</sup> 「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。

- ・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。

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<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) の粒子と鉄イオン (Fe<sup>2+</sup>) 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1Nおよび約2Nに下げた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。
- ・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。

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。
- ・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. デンティンク

ECTの信号指示を確認した結果、デンティンク\*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

当該部流速は約3m/sであり、かつ、TT600合金は耐エロージョン性が高いことから (室温条件では約70m/s以上がエロージョン発生領域)、エロージョンの発生はないと考えられる。

(3) 損傷以外のECT信号指示

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

	<p>3. 減肉メカニズム</p> <p>(1) 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について、C-SGの第二管支持板 (X45, Y5) で認められた減肉を先行して推定した結果は次のとおりである。  長さ：約22mm、幅：約6mm、厚さ：約1mm以下</p> <p>今後、他の4箇所の減肉についても減肉痕等の位置関係から異物形状の推定を行うとともに、推定した異物形状を基に、全5箇所の減肉メカニズムを調査する。</p> <p>4. 異物流入に関する調査</p> <p>(1) 異物流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)においては、伝熱管の外面減肉は確認されていないことから、前回定期検査において異物が流入したものと考えられる。</p> <p>(2) 異物流入経路  上記3.(1)項にて推定した異物の形状および通常運転中の流速を勘案すると、流体抗力が落下力を上回る。その結果、想定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考えられる。  今後、他の4箇所の減肉において推定する異物形状についても、同様に流入の可能性について調査を行う。</p> <p>(3) 異物流入の可能性検討  異物流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)において異物流入による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、異物が流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、同様な原因での異物流入の可能性は否定できない。</p> <p>(4) 異物流入の可能性のある作業の調査  今後、異物流入の可能性のある作業について調査を実施する。</p> <p>5. 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外面観察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> <p>6. 推定原因  今後、原因調査結果等に基づき、推定原因を検討する。</p>
保護装置の種類及び動作状況	該当せず
放射能の影響	なし
被害者	なし
他に及ぼした障害	なし
復旧の日時	未定
再発防止対策	1. 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. その他の対策については、原因調査結果を踏まえ対策を講じる。

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

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<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	3,245	3,248	3,259	9,752

<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、3)

ECTデータを評価した結果<sup>\*6</sup>、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<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は、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。

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

<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(2008年改訂版) JSME S NA1-2008 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> 24組分のコイルのチャートを平面状に並べ、信号振幅に応じて色調として表示させたもの。伝熱管全長についての信号指示の大きさや位置等の分析に用いる表示方法。

8. 時系列

- 10月 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18日 SG器内のカメラによる目視確認、スラッジ等の収集および確認等を開始
- 11月14日 SG器内のカメラによる目視確認、スラッジ等の収集および確認等を完了

## 9. 減肉伝熱管2次側からの確認結果

ECTで減肉とみられる信号指示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。

### (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-S/G

第三管支持板：長さ約6.0mm、幅約1.0mm以下 (X85,Y2)

#### b. B-S/G

第三管支持板：長さ約5.0mm、幅約1.0mm (X92,Y8)

#### c. C-S/G

第二管支持板：長さ約4.0mm、幅約1.0mm以下 (X45,Y5)

第二管支持板：長さ約5.0mm、幅約2.0mm以下 (X91,Y4)

第三管支持板：長さ約8.0mm、幅約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。

## 10. 原因調査

(添付資料-4)

有意な信号指示があった伝熱管の外面減肉の原因を調査するため、要因分析図に基づき、要因分析を行った。

### (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

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<sup>\*9</sup>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

過去にSG2次側環境において海水リーク等による塩化物環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、ピッチング<sup>\*10</sup>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、アンモニアとヒドラジンの注入により良好な還元性雰囲気は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) 器内発生物との接触・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×板厚約0.6mmの扇形に湾曲した長方形型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 2.5 m 下方、約 1.6 m 半径方向に離れた場所であった。

なお、B、C-SG 器内にはスケール以外の異物は確認されなかった。

- ・スラッジランシング\*<sup>14</sup>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。

\*<sup>14</sup> 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。

#### (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。

なお、今後、更なる異物調査として、SG 器内に水張りをして底部から N<sub>2</sub> を噴射（バブリング）させたのち、水を抜くことにより異物の有無を確認する。

#### イ. 内部品の脱落調査

- ・今回の異物の想定形状（薄片）\*<sup>15</sup> 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。

\*<sup>15</sup> 「11. 減肉メカニズム（1）異物の形状」に記載している想定形状。

- ・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。

#### 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 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) の粒子と鉄イオン ( $\text{Fe}^{2+}$ ) 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1Nおよび約2N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。
- ・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。

#### 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。
- ・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. デンティンク

E C Tの信号指示を確認した結果、デンティンク\*<sup>16</sup>ではないと考えられる。

\*<sup>16</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。

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

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。

(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

(1) 異物の形状

(添付資料-5)

減肉痕等の位置関係から、減肉を生じさせた異物の形状について、C-S Gの第二管支持板(X45,Y5)で認められた減肉を先行して推定した結果は次のとおりである。

長さ：約22 mm、幅：約6 mm、厚さ：約1 mm以下

今後、他の4箇所の減肉についても減肉痕等の位置関係から異物形状の推定を行うとともに、推定した異物形状を基に、全5箇所の減肉メカニズムを調査する。

1 2. 異物流入に関する調査

(1) 異物流入の可能性のある時期

S G 2次側に異物が流入する可能性のある作業は、S G給水システム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)においては、伝熱管の外表面減肉は確認されていないことから、前回定期検査において異物が流入したものと考えられる。

(2) 異物流入経路

(添付資料-6)

上記1 1.(1)項にて推定した異物の形状および通常運転中の流速を勘案すると、流体抗力が落下力を上回る。その結果、想定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考えられる。

今後、他の4箇所が減肉において推定する異物形状についても、同様に流入の可能性について調査を行う。

(3) 異物流入の可能性検討 (添付資料-7)

異物流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)において異物流入による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、異物が流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、同様な原因での異物流入の可能性は否定できない。

(4) 異物流入の可能性のある作業の調査

今後、異物流入の可能性のある作業について調査を実施する。

1.3. 隣接伝熱管の健全性 (添付資料-8)

SG器内において小型カメラを用いて伝熱管の外面観察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 (添付資料-9)

今後、原因調査結果等に基づき、推定原因を検討する。

1.5. 対策

(1) 減肉伝熱管の施栓

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

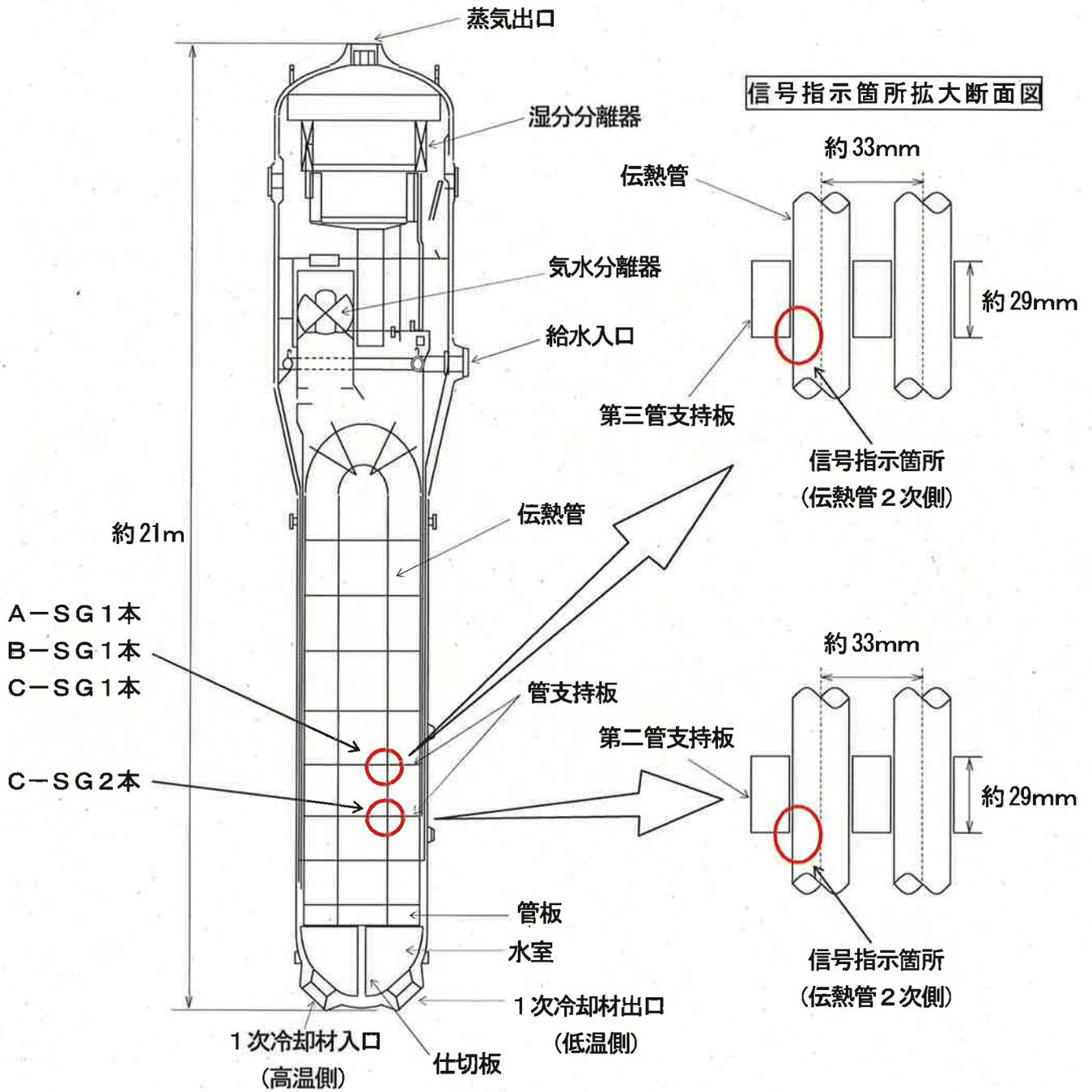
その他の対策については、原因調査結果を踏まえ検討する。

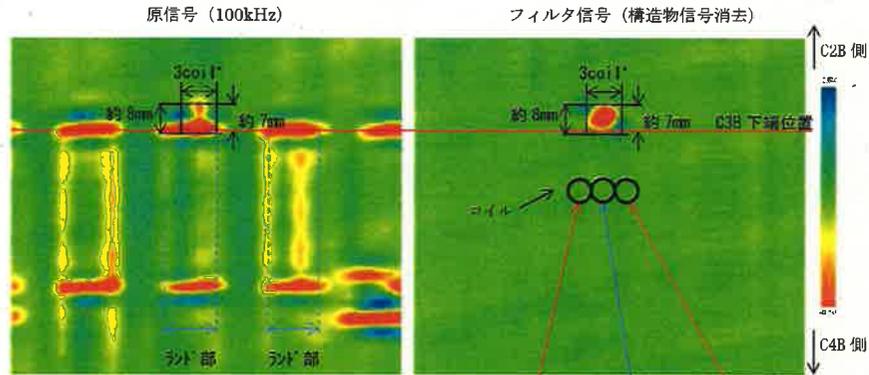
以上

## 添 付 資 料

1. SG伝熱管信号指示箇所概要図
2. SG伝熱管E C T結果
3. SG伝熱管E C T信号指示位置図
4. 要因分析図
5. 異物の形状
6. 異物混入調査系統
7. 開放機器への異物混入可能性評価
8. 隣接伝熱管の健全性
9. 蒸気発生器点検スケジュール

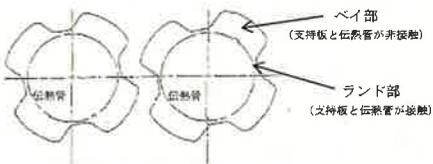
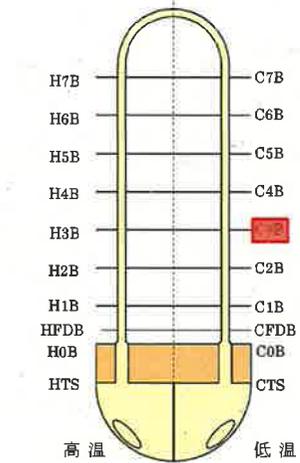
SG伝熱管信号指示箇所概要図 (SG管支持板部)





\*1coil : 約 3mm

※内側から見たイメージ



【A-SG X85-Y2 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

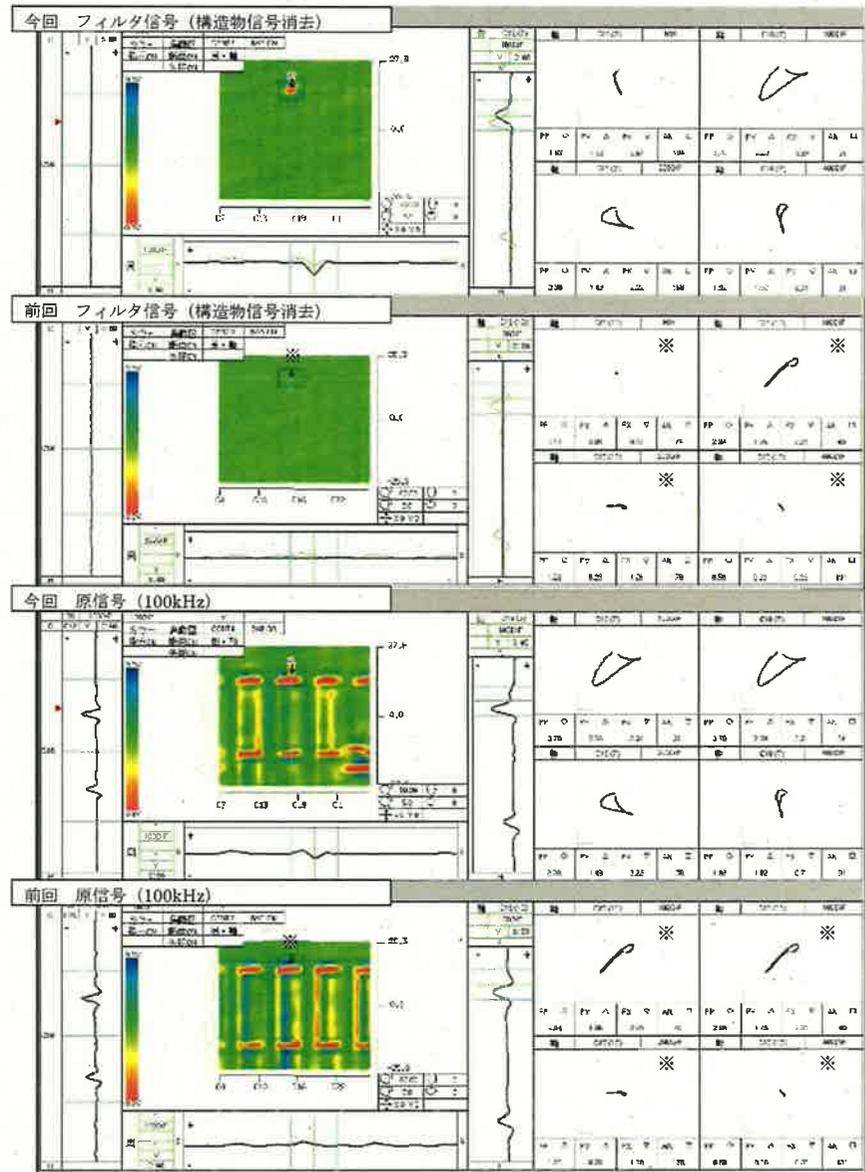
波形評価

- ・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)



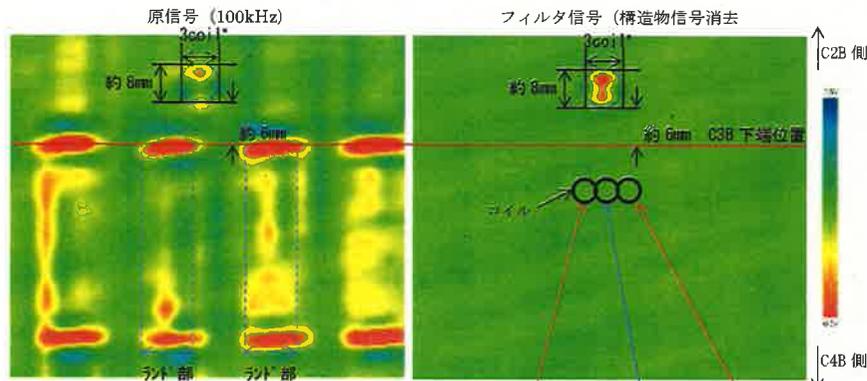
信号評価

A-SG X85 Y 2 部位 : C3B



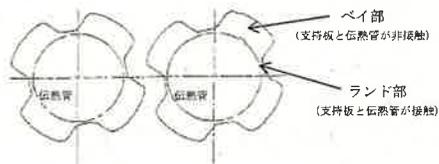
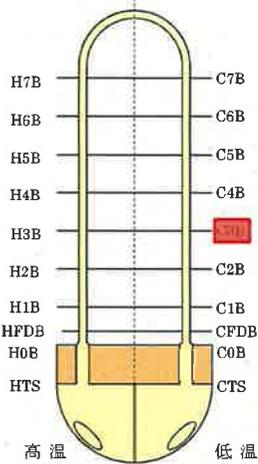
※特異な信号がないため任意の位置で表示。

前今比較



\*1coil : 約 3mm

※内側から見たイメージ

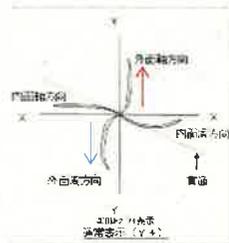


【B-SG X92-Y8 リサーチ波形】

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

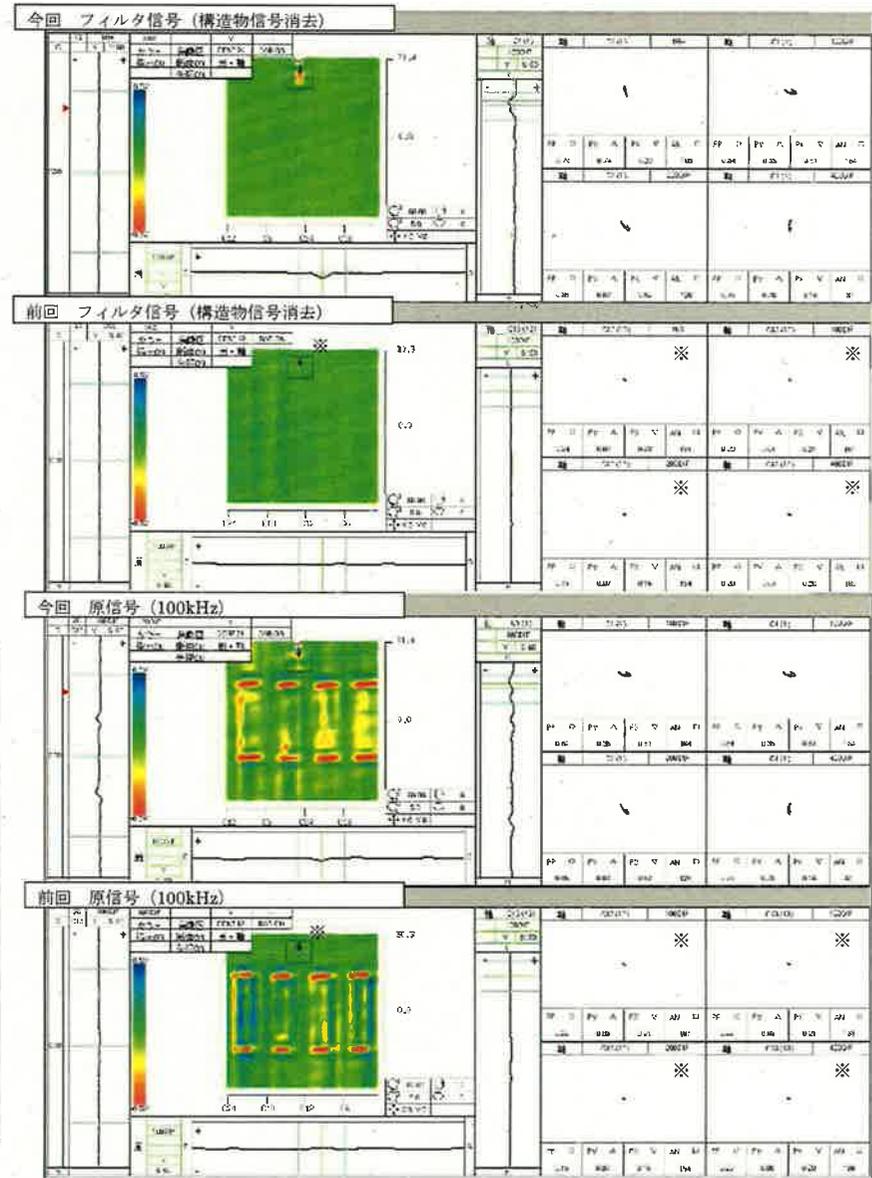
波形評価

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



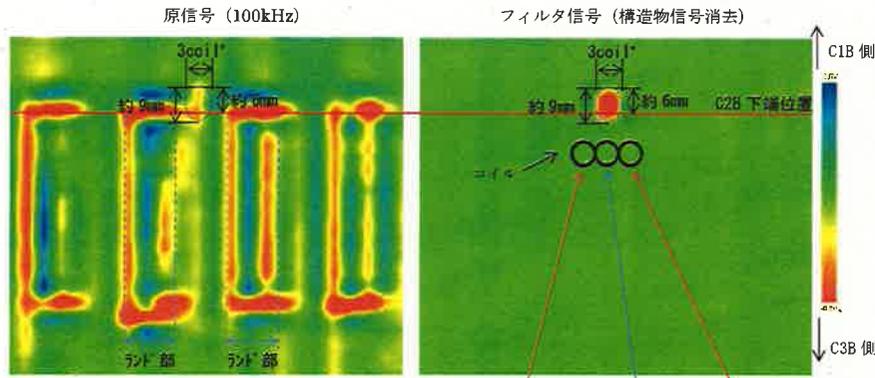
信号評価

B-SG X92 Y 8 部位 : C3B



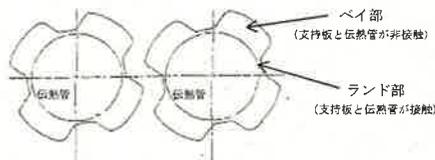
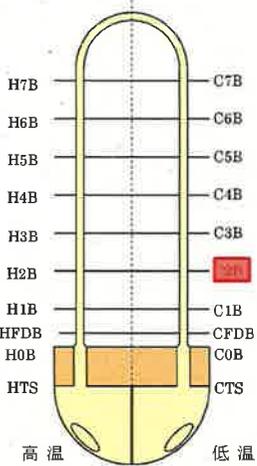
※特異な信号がないため任意の位置で表示。

前今比較



\*1coil : 約 3mm

※内側から見たイメージ

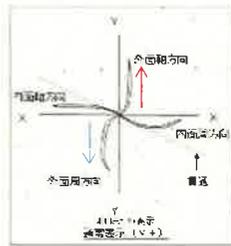


【C-SG X45-Y5 リサーチ波形】

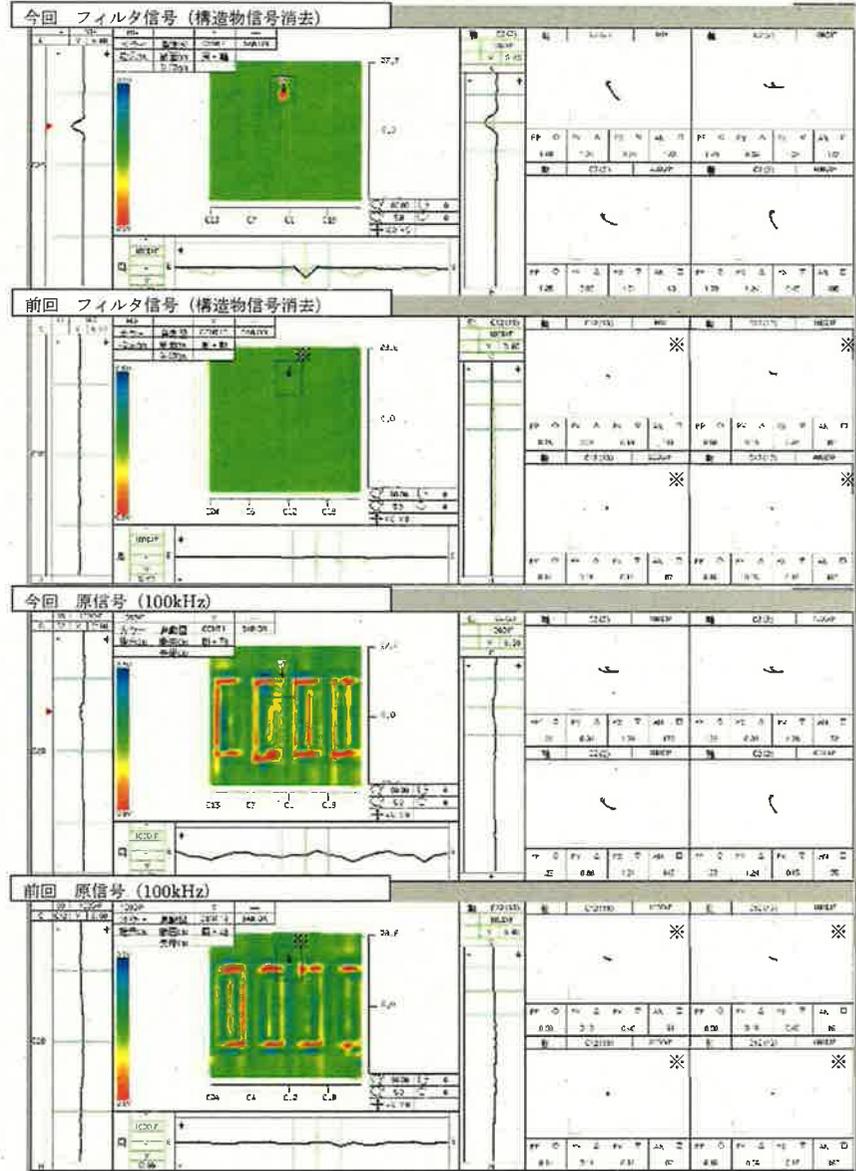
きず端部の軸方向成分(赤色部)を検出  
きず中心部の周方向成分(青色部)を検出

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)



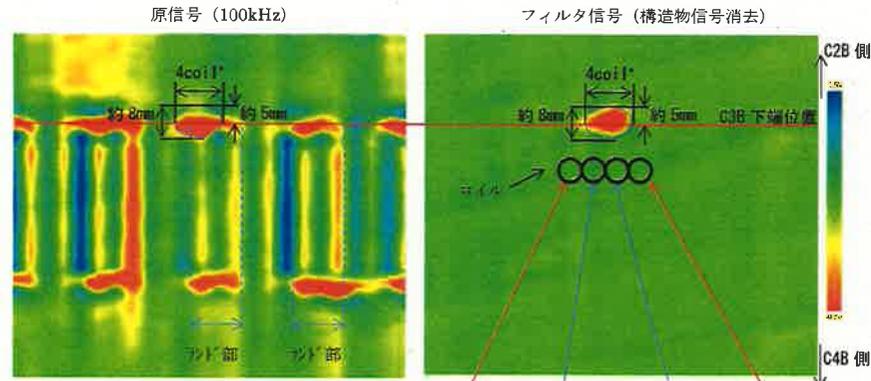
信号評価



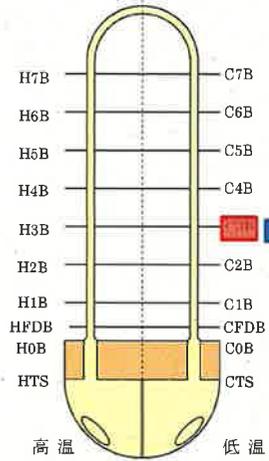
※特異な信号がないため任意の位置で表示。

前今比較

C-SG X45 Y 5 部位 : C2B



\*1coil : 約 3mm ※内側から見たイメージ

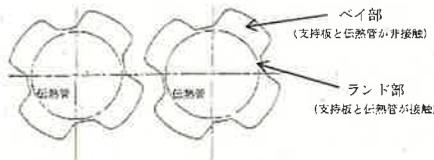
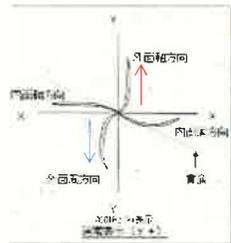


【C-SG X52-Y9 リサージュ波形】

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

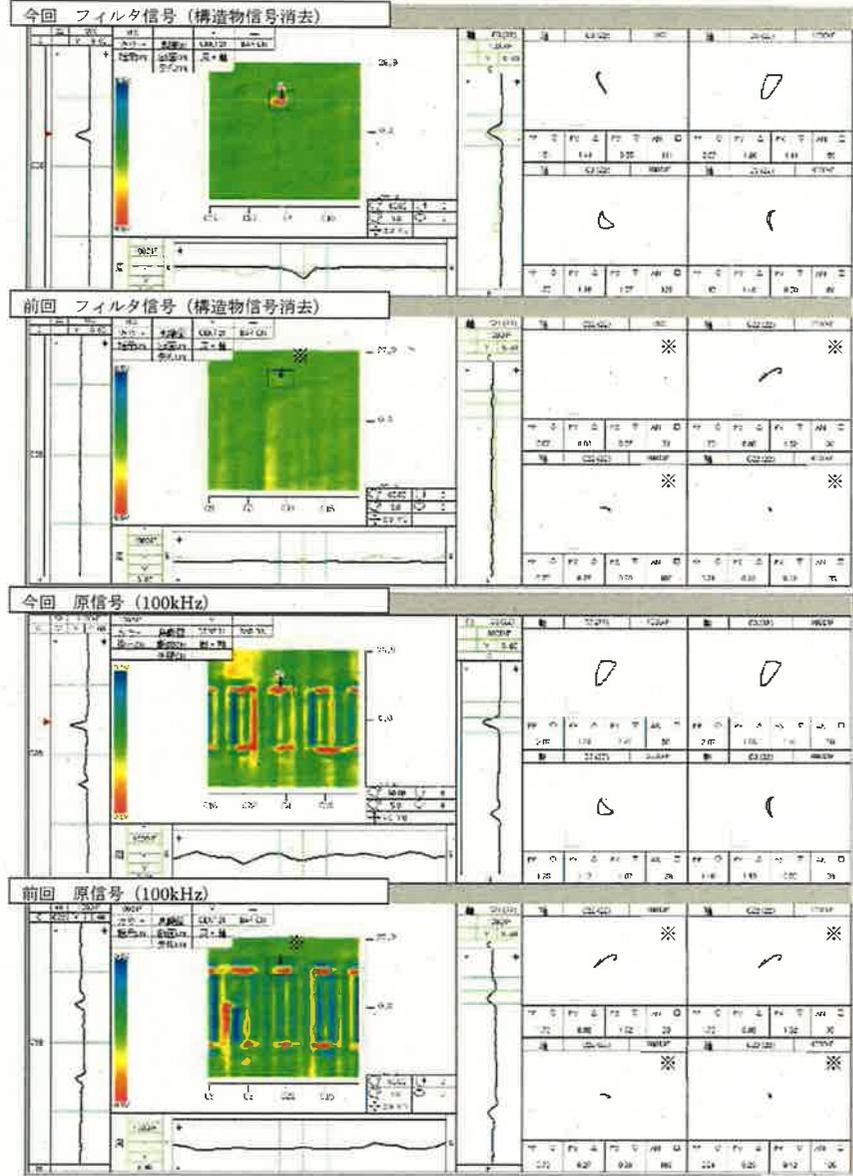
波形評価

- ・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2コイルは周方向成分、両端部のコイルでは軸方向成分の特徴を持っている。
- 上記の通り軸方向成分及び周方向成分の両方の成分が読み取れるため、広がりを持つ減肉と評価する。(下図参照)



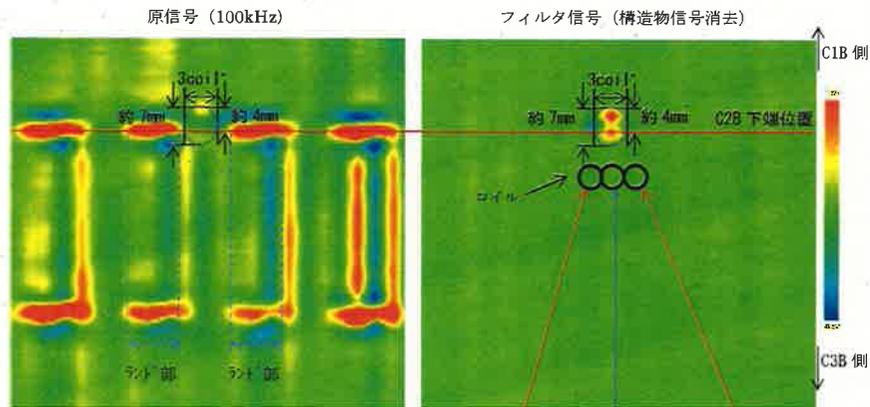
信号評価

C-SG X52 Y 9 部位 : C3B

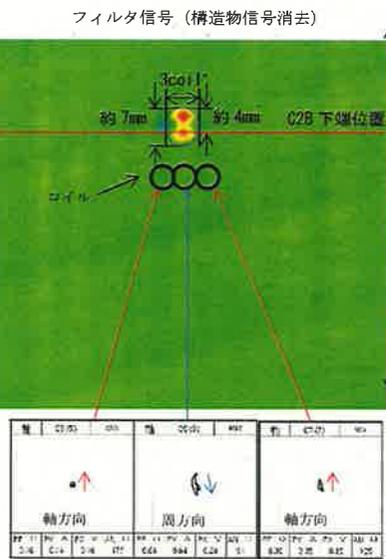
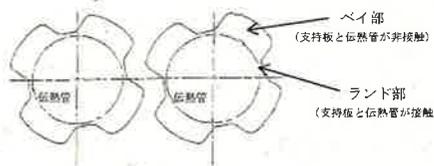
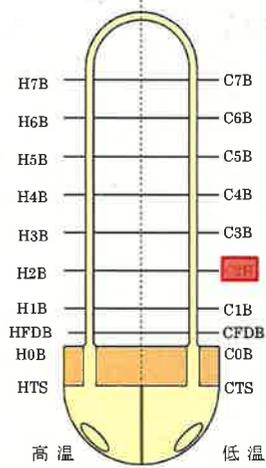


※特異な信号がないため任意の位置で表示。

前今比較



\*1coil: 約 3mm ※内側から見たイメージ



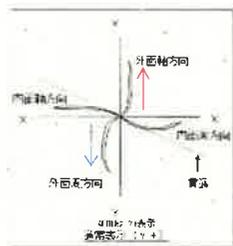
【C-SG X91-Y4 リサージュ波形】

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

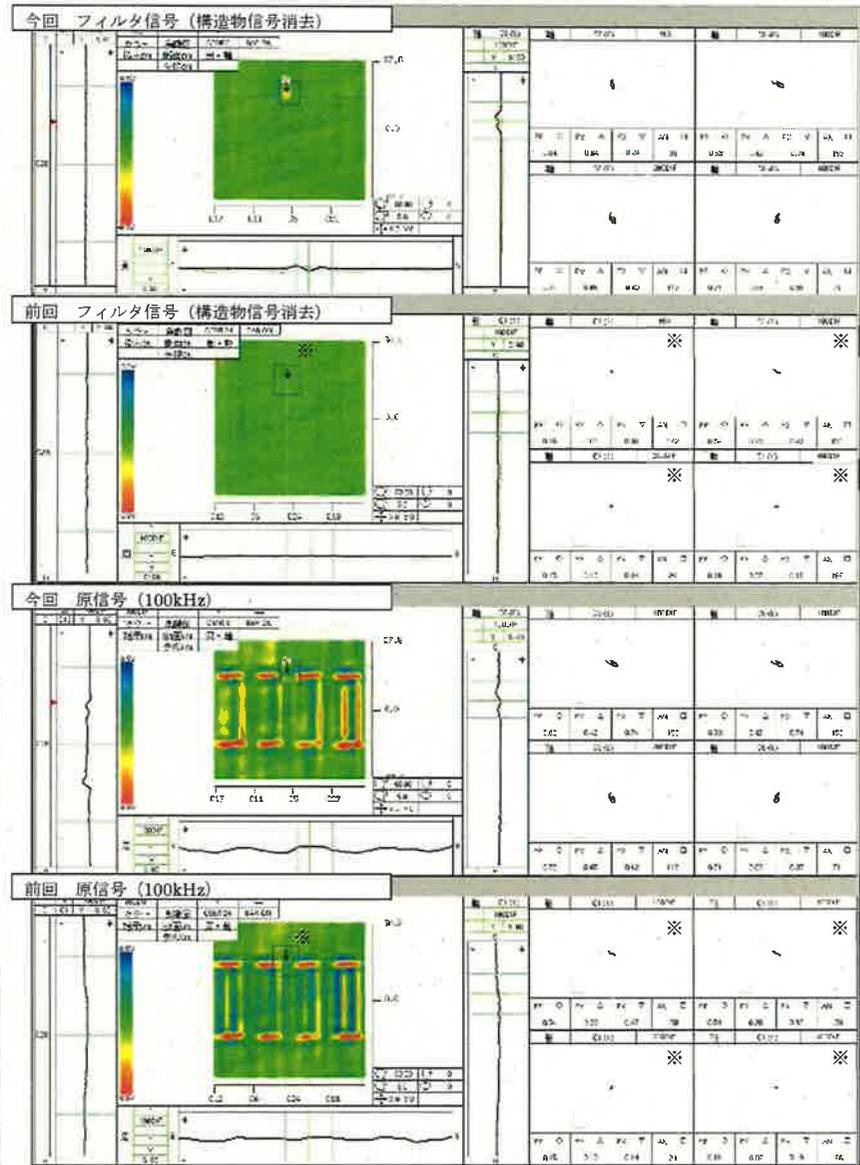
- ・位相角評価から、外面指示の特徴を持っている。
- ・指示は複数のコイルで検出されており、指示の中心部のコイルは周方向成分、両端部のコイルでは軸方向成分の特徴を持っている。

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)



信号評価

C-SG X91 Y 4 部位 : C2B



※特異な信号がないため任意の位置で表示。

前今比較

高浜4号機 SG伝熱管ECT信号指示位置図  
A-SG (低温側)

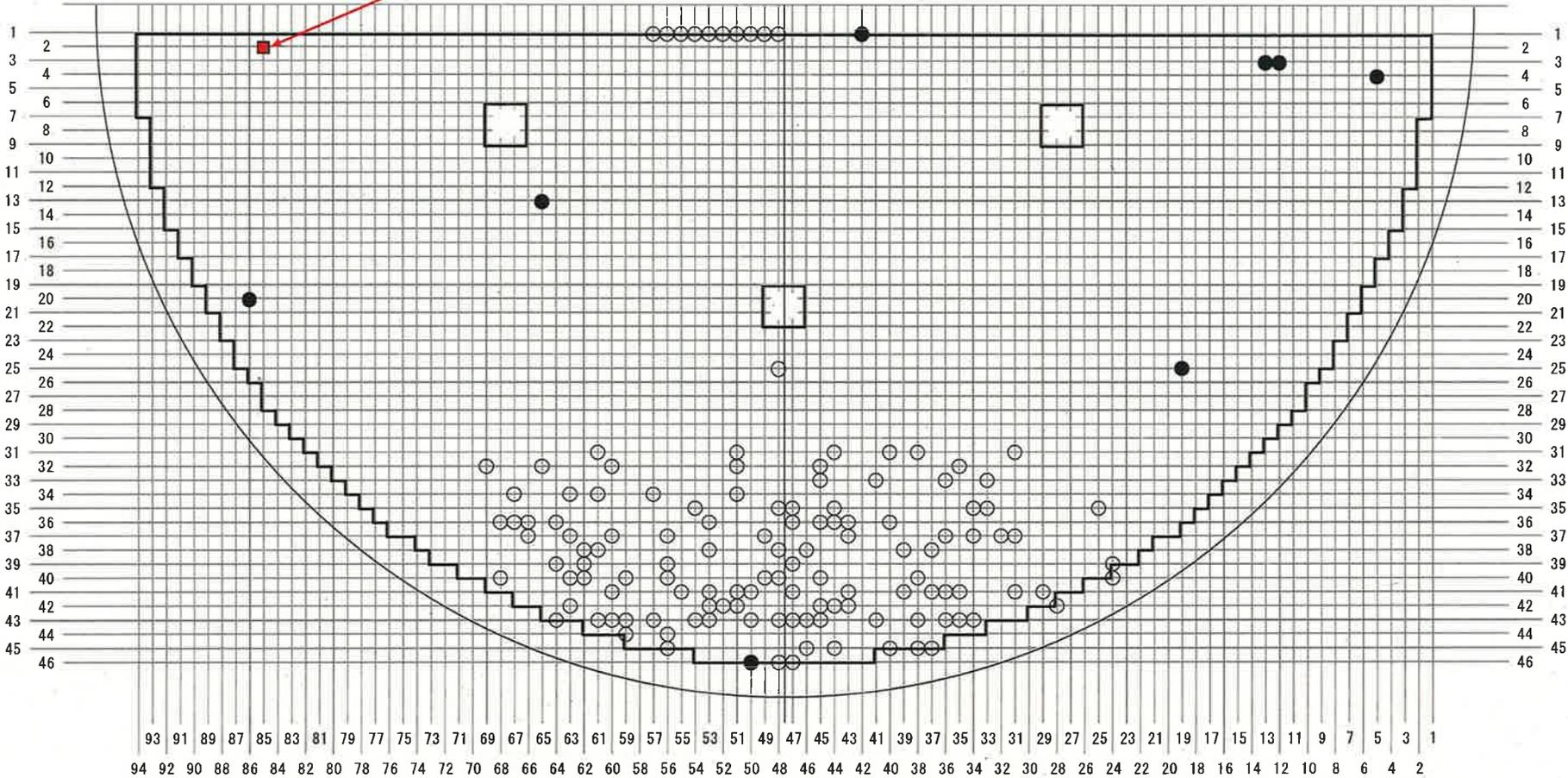
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (129本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (8本)
- : 今回減肉信号が認められた位置 (1本)

<第3管支持板>  
有意な信号指示管  
(X85-Y2)

本図はSG上部から見た位置を示す

-16- マンホール側

Y-ROW No. ノズル側



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)

- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (131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 (1本)

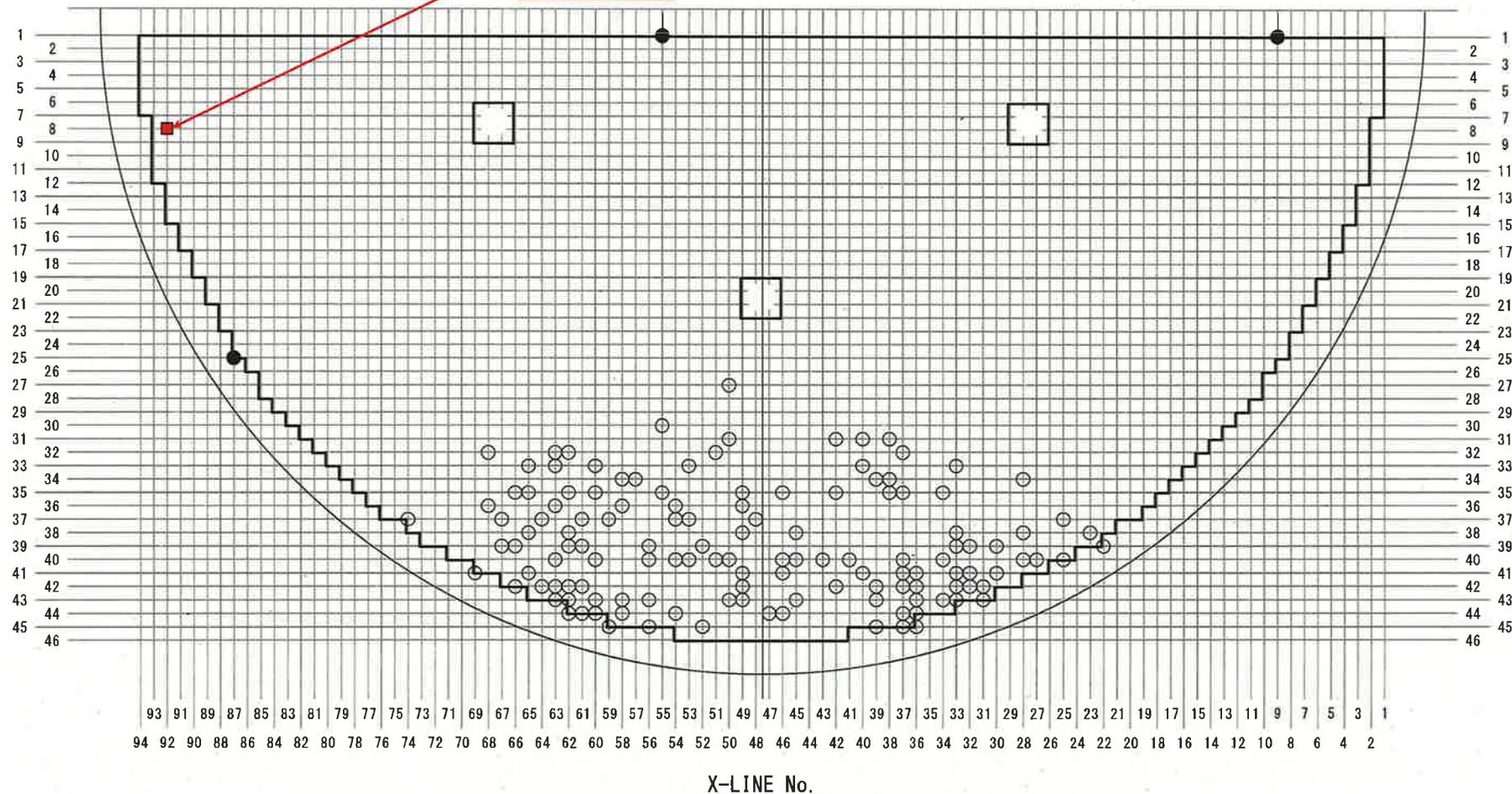
<第3管支持板>  
有意な信号指示管  
(X92-Y8)

本図はSG上部から見た位置を示す

—17—

マンホール側

Y-ROW No.  
ノズル側



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)

<第2管支持板>  
有意な信号指示管  
(X91-Y4)

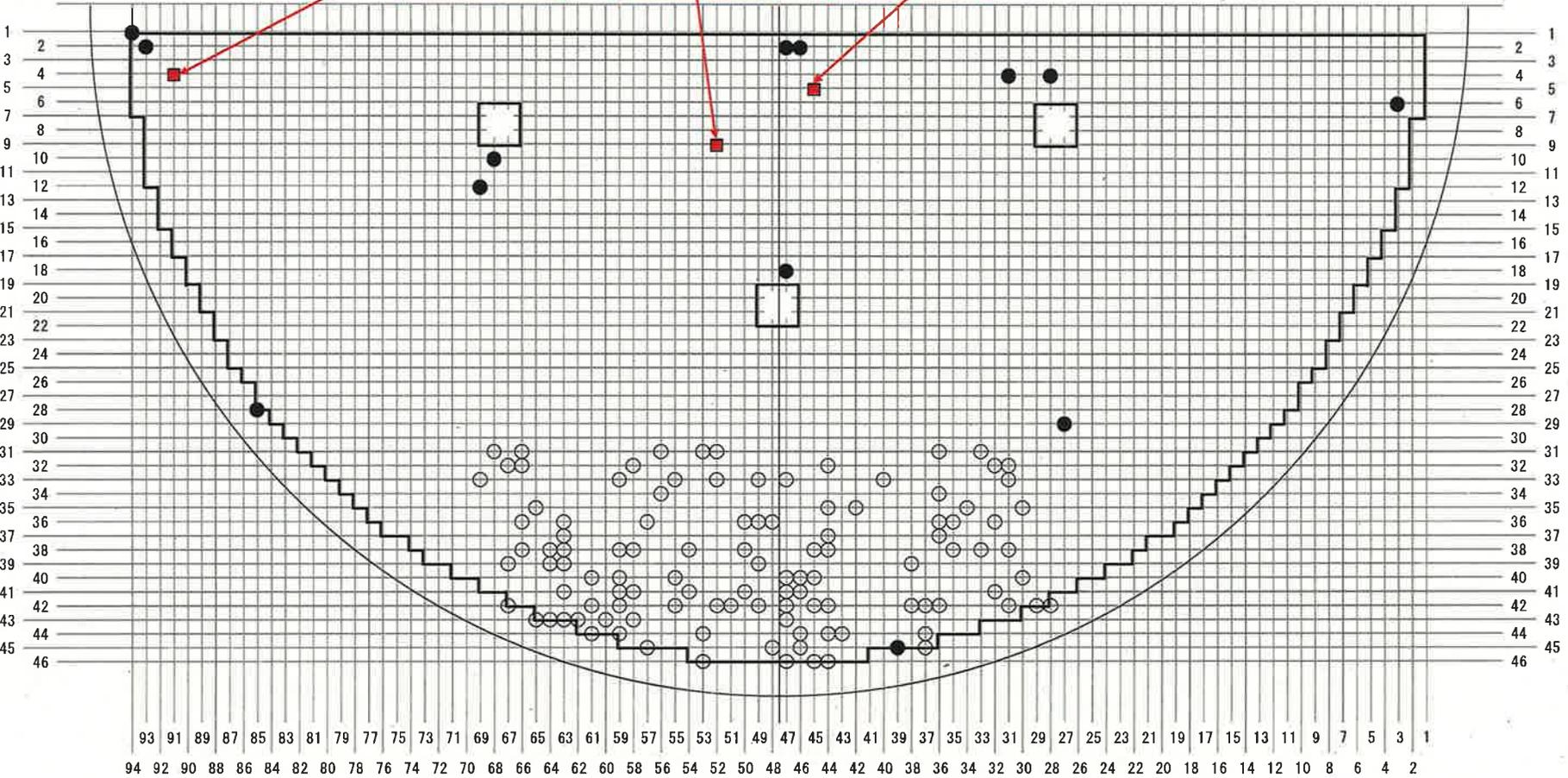
<第3管支持板>  
有意な信号指示管  
(X52-Y9)

<第2管支持板>  
有意な信号指示管  
(X45-Y5)

本図はSG上部から見た位置を示す

マンホール側  
-18-

Y-ROW No.  
ノズル側



X-LINE No.

## 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)

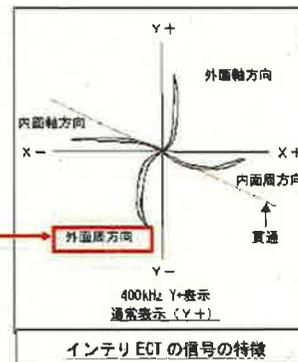
要因		調査項目	評価				
減肉指示	1次側からの損傷	ECT信号	ECTの指示信号から損傷は、1次側からの損傷ではないと考えられる。	×	資料1 (1)項		
	粒界腐食割れ (IGA)	使用環境	過去にSG2次側環境においてアルカリ環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、粒界腐食割れが発生した実績があるが、高浜発電所4号機のようなアンモニアとヒドラジンの注入により良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考えられる。	×	資料2		
	ピitting	使用環境	過去にSG2次側環境において海水リーク等による塩化物環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、ピittingが発生した実績があるが、高浜発電所4号機のような塩素濃度が十分低く管理され、且つ、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。	×	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ヒドラジンによるAVTを実施しているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考えられる。	×			
	腐食減肉	管支持板との接触	設計評価	管支持板との接触による摩耗減肉が顕在化している場合は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4	
	2次側からの損傷	器内発生物との接触	内部品が脱落して接触	設計評価	今回の減肉を発生させた異物の想定形状(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ところ、振止め金具のキー固定板等が比較的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、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、SG器内からの異物の可能性はないと考えられる。	×	資料5
		器内発生物との接触	スラッジとの接触	設計評価	スラッジは空隙を有しており、脆いため、伝熱管を摩耗減肉させることは考えにくい。高浜4号機で採取したスラッジと伝熱管とを接触させる試験を行った結果、伝熱管に僅かな傷はつくものの、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6
		器外流入物との接触	目視点検	現状の調査から、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器内に水張りをして底部からN2を噴射(バブリング)させたのち、水を抜くことにより、異物の有無を確認する。	△	資料7	
			設計評価	減肉メカニズムについて検討中。	実施中		
	ECT探傷	損傷以外の信号	局所的な異物等の付着・剥離	ECT信号	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10
	デンチング	ECT信号	ECTの信号指示からデンチ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8		
	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(室温条件下では約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9		

×: 要因の可能性なし。△: 要因の可能性あり。

## 渦電流探傷検査の位相評価

当該管リサージュ表示 (A-SG X85-Y2)

軸	C18(7)	MIX	軸	C18(7)	100DIF	軸	C18(7)	200DIF	軸	C18(7)	400DIF																				
PP ○	1.63	PV △	1.60	PX ▽	0.51	AN □	104	PP ○	3.70	PV △	2.29	PX ▽	3.31	AN □	31	PP ○	2.39	PV △	1.49	PX ▽	2.22	AN □	159	PP ○	1.92	PV △	1.92	PX ▽	0.71	AN □	91



(1) 内面軸方向信号の特徴との比較

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

位相角

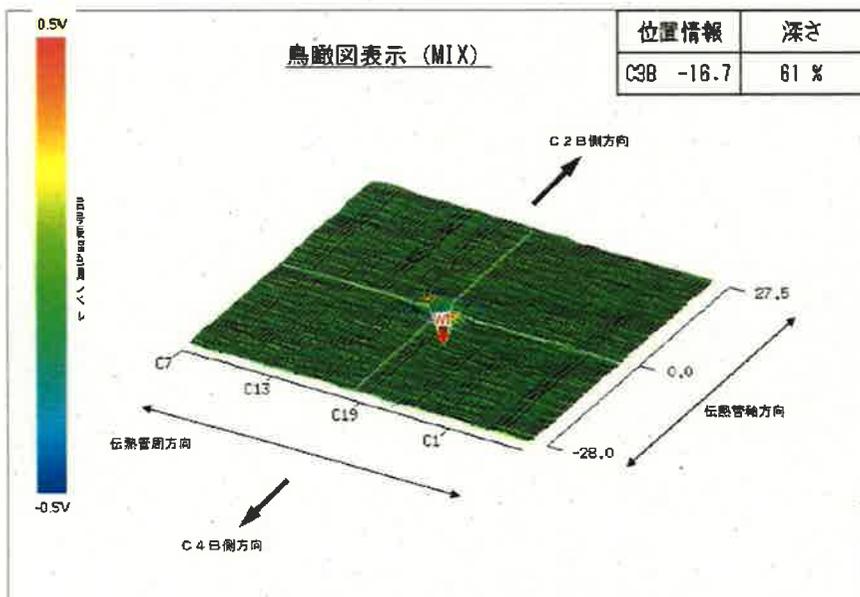
(2) デンティンク (DENT) 信号の特徴との比較

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

校正用試験片 DENT 信号

位相角

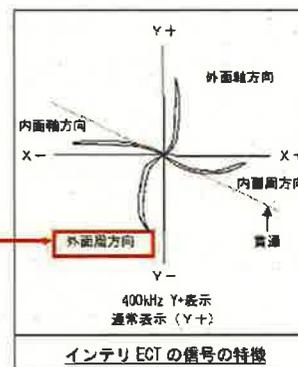
校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は“全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる”という特徴を持っているが、今回の当該信号は位相角が 91° 方向を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外周方向向きずの特徴を持っていると言える。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考えられる。



## 渦電流探傷検査の位相評価

当該管リサーチ表示 (B-SG X92-Y8)

軸	C1 (1)	MIX	軸	C1 (1)	100DIF	軸	C1 (1)	200DIF	軸	C1 (1)	400DIF																				
PP	0	PY	△	PX	▽	AN	□	PP	0	PV	△	PX	▽	AN	□	PP	0	PY	△	PX	▽	AN	□	PP	0	PV	△	PX	▽	AN	□
	0.76		0.74		0.23		103		0.84		0.35		0.91		164		0.85		0.57		0.52		129		0.79		0.78		0.16		81



(1) 内周軸方向信号の特徴との比較

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

位相角

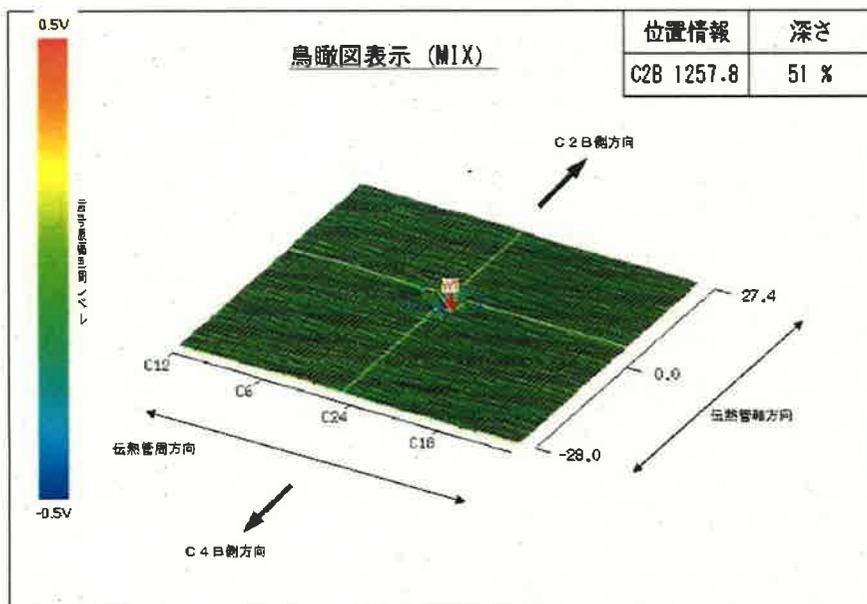
(2) デンティンク (DENT) 信号の特徴との比較

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

校正用試験片 DENT 信号

位相角

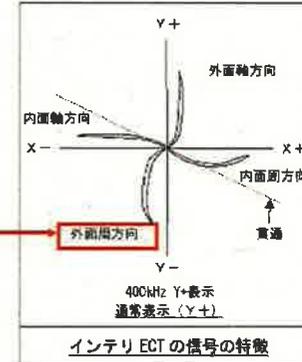
校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は“全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる”という特徴を持っているが、今回の当該信号は位相角が 81° 方向を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外周周方向きずの特徴を持っていると言える。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考えられる。



## 渦電流探傷検査の位相評価

当該管リサージュ表示 (C-SG X45-Y5)

軸	C2 (2)	MIX	軸	C2 (2)	100DIF	軸	C2 (2)	200DIF	軸	C2 (2)	400DIF																				
PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□	PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□	PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□	PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□
1.40	1.20	0.76	122	1.29	0.34	128	172	1.25	0.80	1.01	143	1.28	1.24	0.45	105																



(1) 内周方向信号の特徴との比較

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

位相角

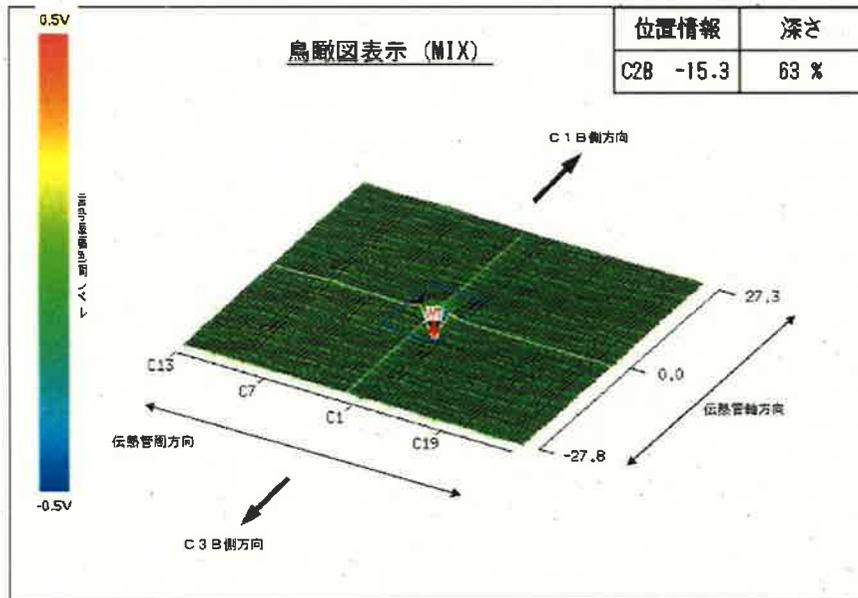
(2) デンティング (DENT) 信号の特徴との比較

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

校正用試験片 DENT 信号

位相角

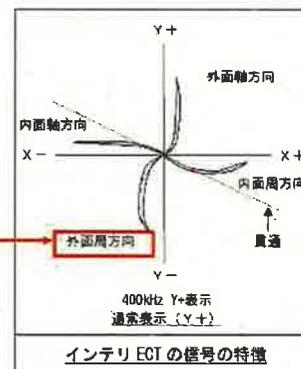
校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は “全振幅を直線と結ぶと、位相角がほとんど 0° となる” という特徴を持っているが、今回の当該信号は位相角が 105° 方向を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外周方向向きずの特徴を持っていると言える。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考えられる。



## 渦電流探傷検査の位相評価

当該管リサージュ表示 (C-SG X52-Y9)

軸	C3 (22)	MIX	軸	C3 (22)	100DIF	軸	C3 (22)	200DIF	軸	C3 (22)	400DIF																				
PP ○	1.51	PV △	1.41	PX ▽	0.65	AN □	111	PP ○	2.07	PV △	1.66	PX ▽	1.41	AN □	50	PP ○	1.25	PV △	1.10	PX ▽	1.07	AN □	129	PP ○	1.40	PV △	1.40	PX ▽	0.50	AN □	89



(1) 内面軸方向信号の特徴との比較

インテリジェント ECT の信号の特徴と今回の当該信号を比較したところ、今回の当該信号は 400kHz および MIX の位相角で Y 方向の外周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) からの横傷ではないと考えられる。

位相角

(2) デンティン (DENT) 信号の特徴との比較

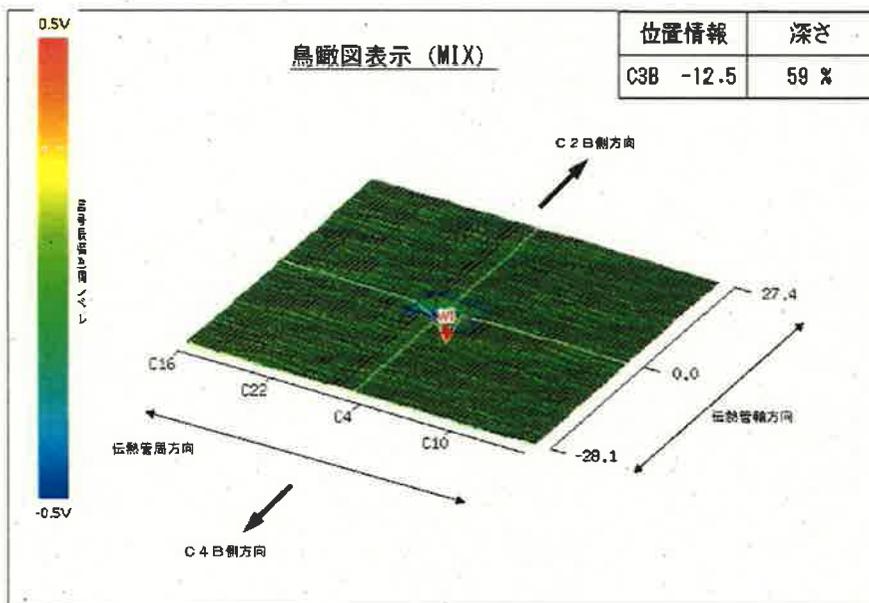
軸	C1 (1)	400DIF					
PP ○	5.61	PV △	0.91	PX ▽	5.61	AN □	0

校正用試験片 DENT 信号

位相角

校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は“全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる”という特徴を持っているが、今回の当該信号は位相角が 89° 方向を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外周周方向向きの特徴を持っていると言える。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考えられる。

鳥瞰図表示 (MIX)



## 渦電流探傷検査の位相評価

当該管リサージュ表示 (C-SG X91-Y4)

軸	C6 (6)	MIX	軸	C6 (6)	100DIF	軸	C6 (6)	200DIF	軸	C6 (6)	400DIF																				
PP ○	0.64	PY △	0.84	PX ▽	0.24	AN □	91	PP ○	0.83	PY △	0.42	PX ▽	0.74	AN □	153	PP ○	0.70	PY △	0.65	PX ▽	0.42	AN □	119	PP ○	0.71	PY △	0.68	PX ▽	0.35	AN □	71



(1) 内面軸方向信号の特徴との比較

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

位相角

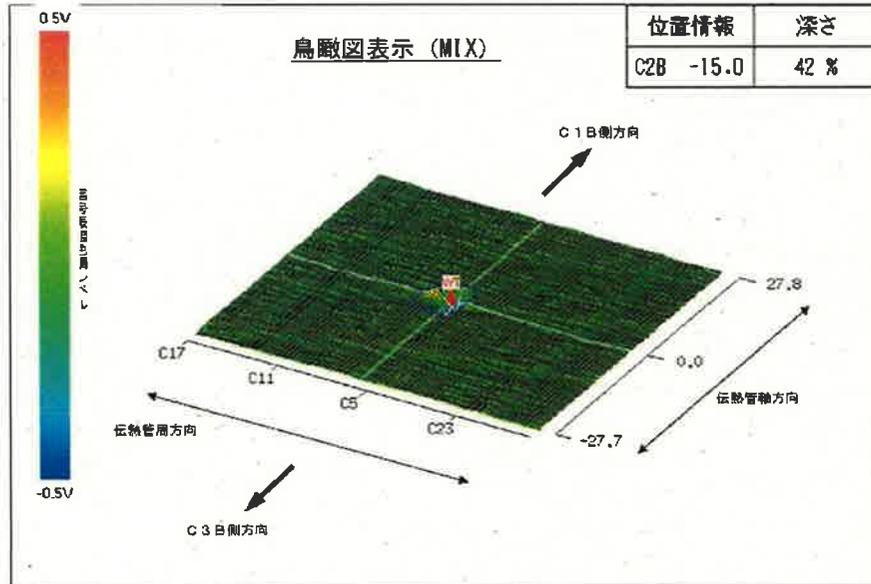
(2) デンティン (DENT) 信号の特徴との比較

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

校正用試験片 DENT 信号

位相角

校正用試験片の DENT 信号と今回の当該信号を比較したところ、DENT 信号は“全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる”という特徴を持っているが、今回の当該信号は位相角が 71° 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。



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中に維持されている。

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 <sub>300°C</sub>	平均5.8

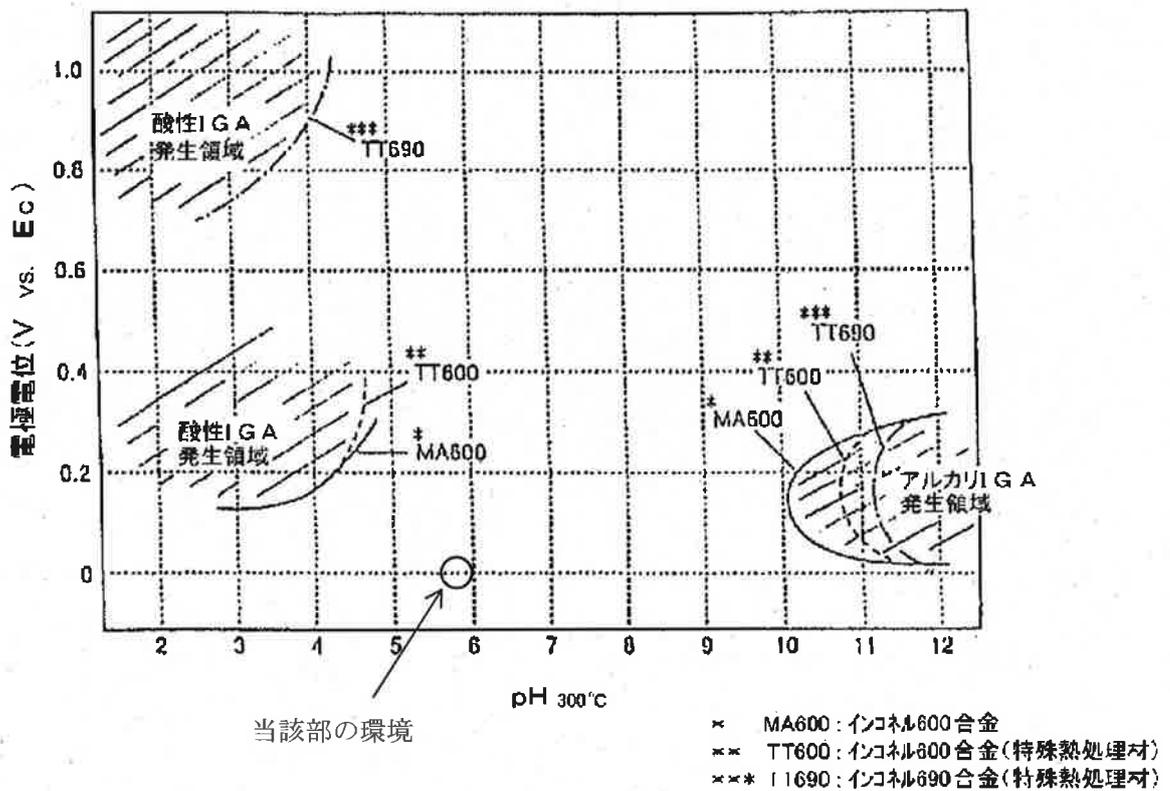


図 粒界腐食割れの発生領域

[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)」]

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。

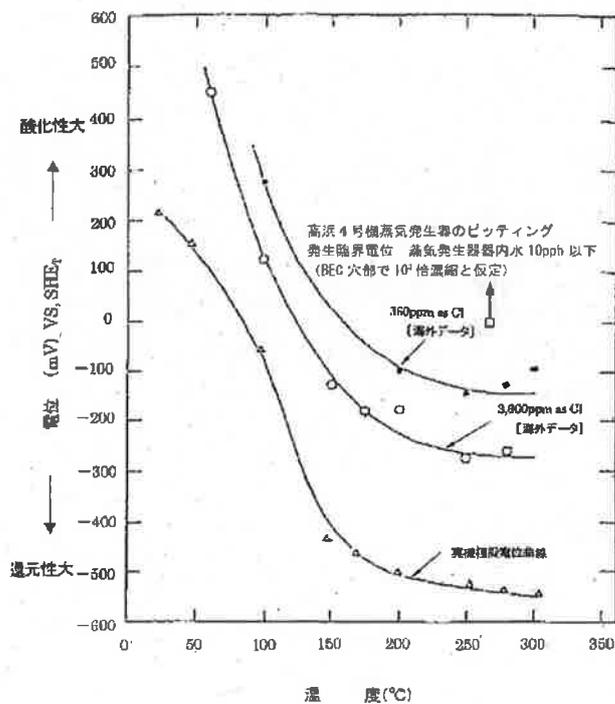
高浜4号機 SG 器内水塩素イオン濃度至近サイクル平均値

	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。



(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

## 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に 4 ヶ所の接触部（ランド部）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。

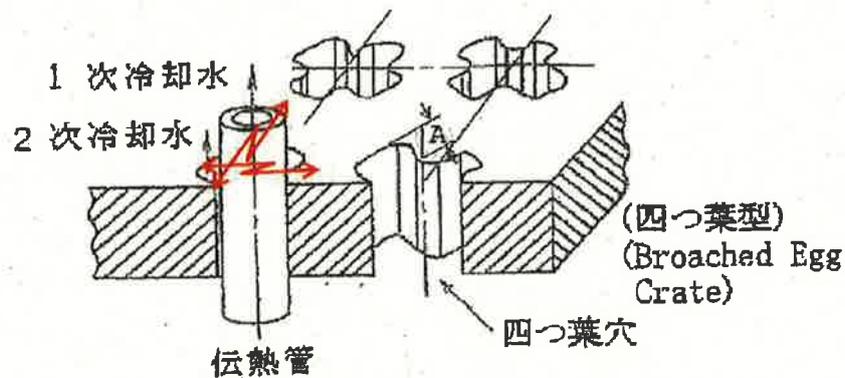


図 1 管支持板四つ葉穴（BEC 穴）による伝熱管の支持状況

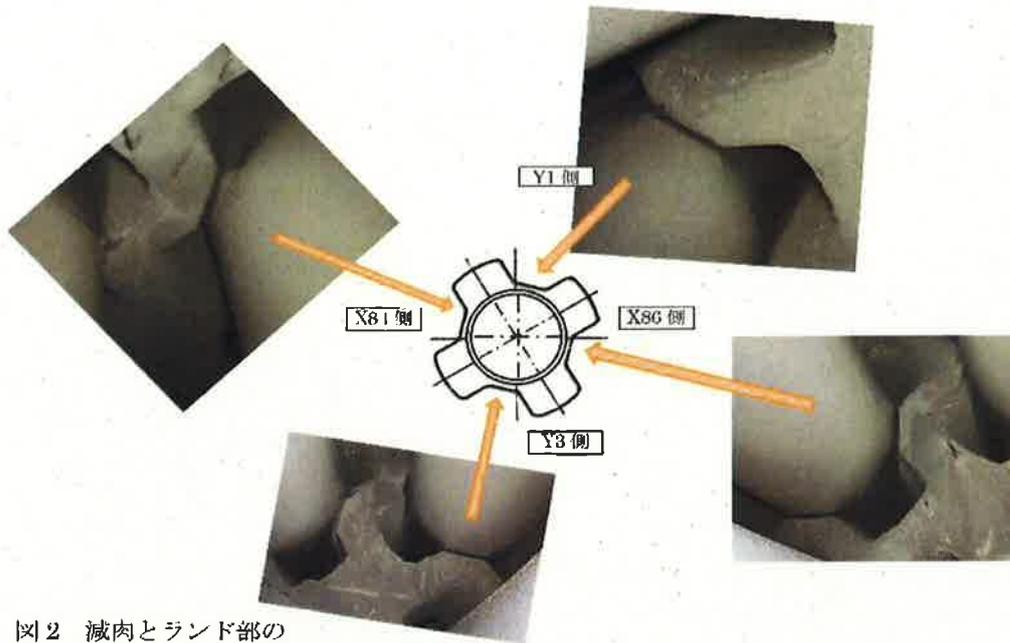


図2 減肉とランド部の位置関係(A-SG X85-Y2)

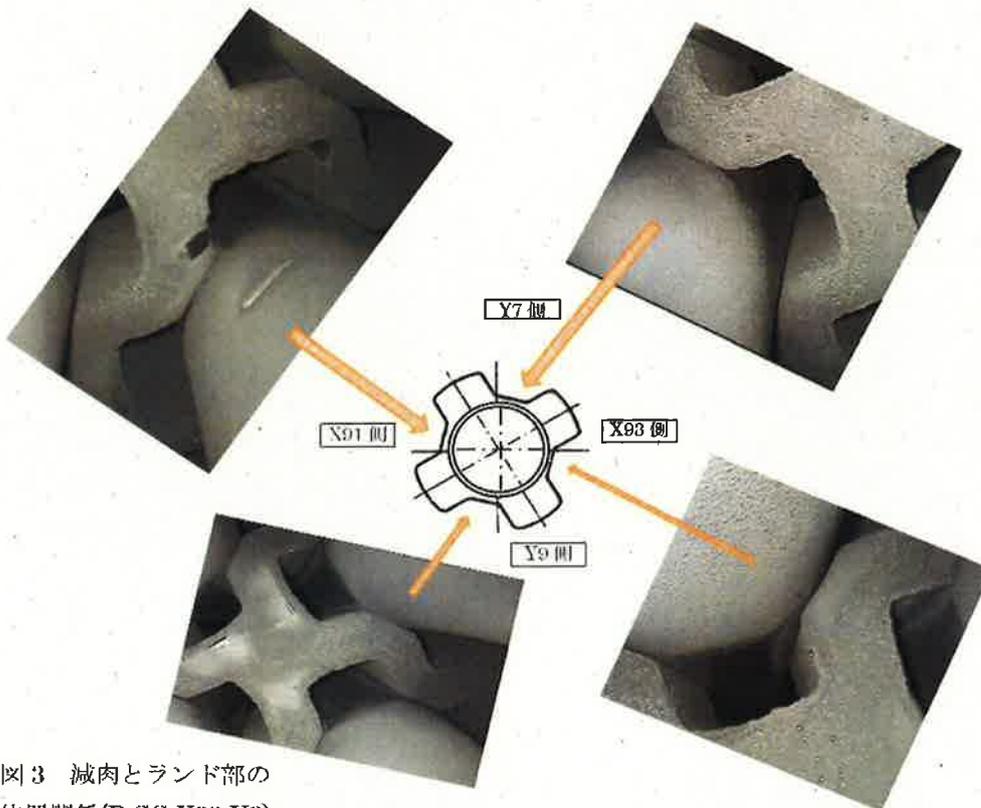


図3 減肉とランド部の位置関係(B-SG X92-Y8)

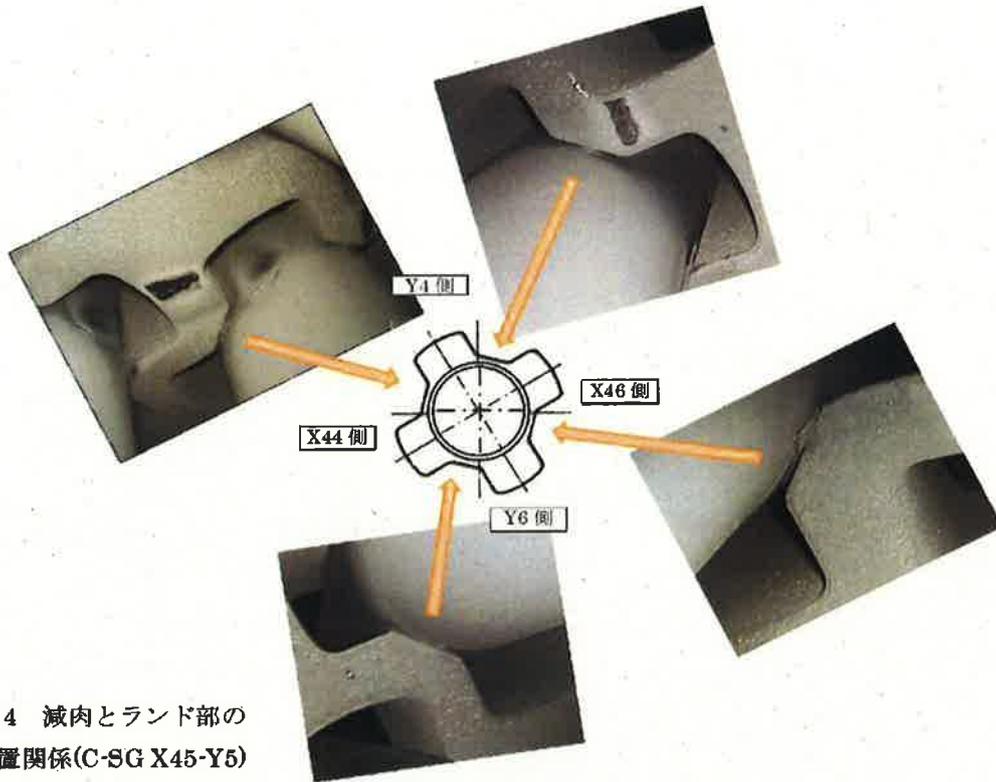


図 4 減肉とランド部の位置関係(C-SG X45-Y5)

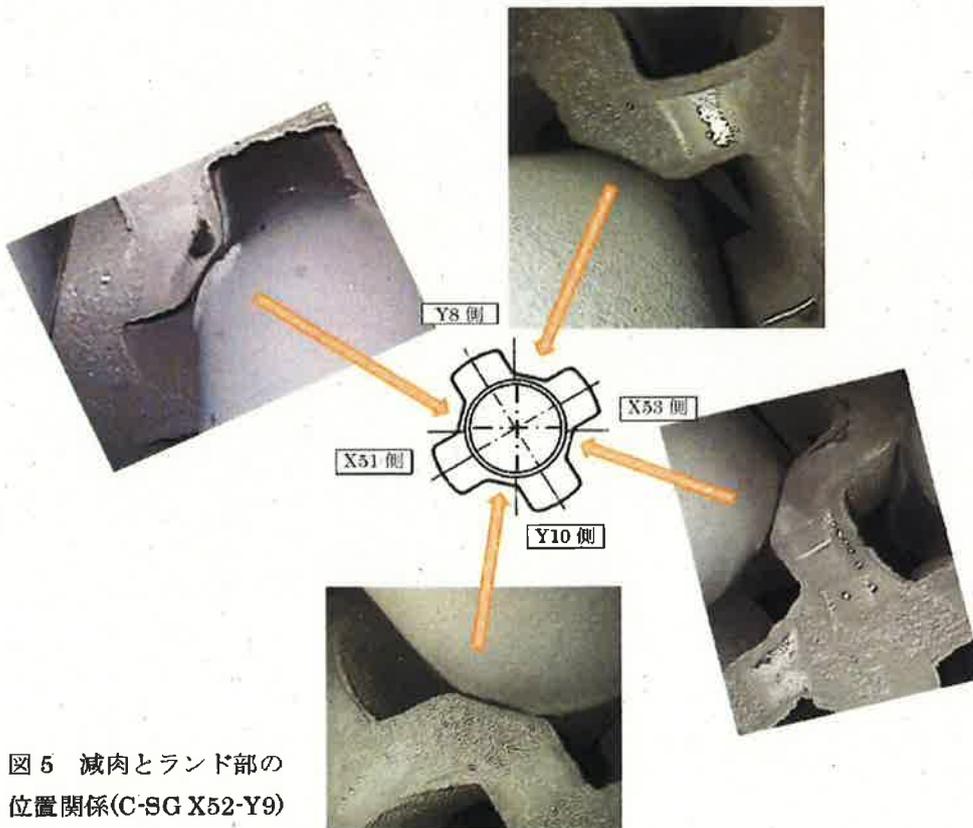


図 5 減肉とランド部の位置関係(C-SG X52-Y9)

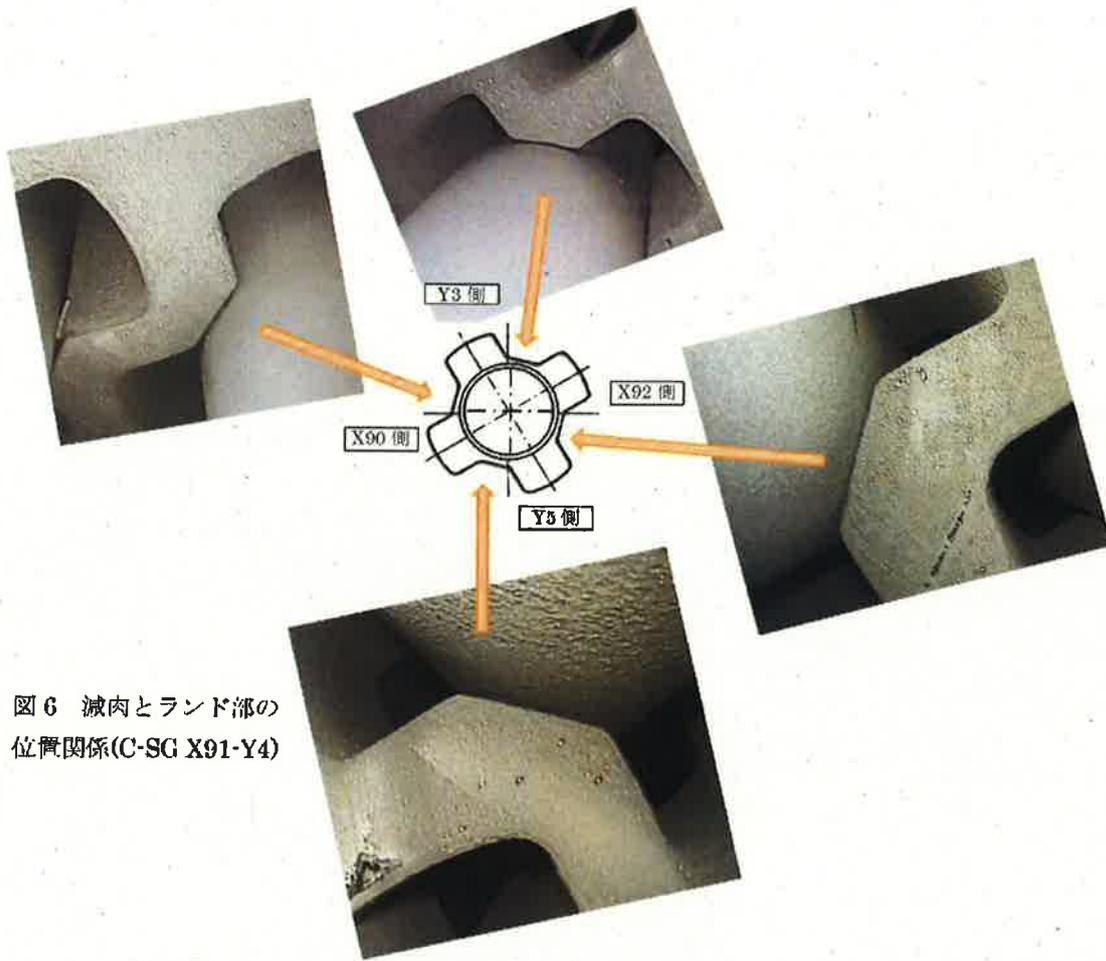


図6 減肉とランド部の  
位置関係(C-SG X91-Y4)

SG 二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 二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 二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 二次側の内部品の経年劣化としては、PLM 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

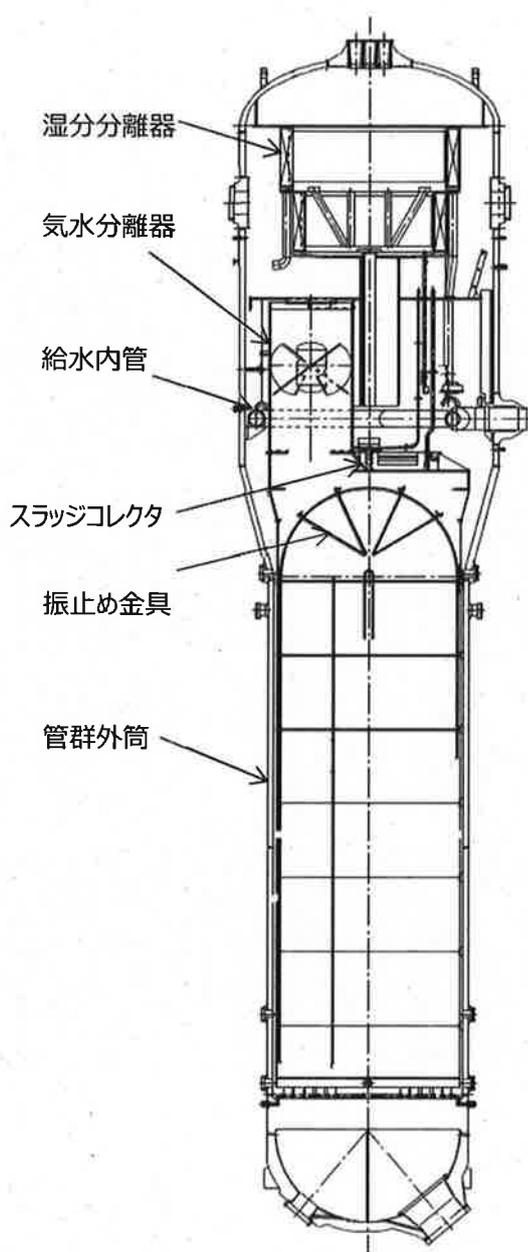
上記のうち、伝熱管群を通過するサイズの異物を発生させる可能性のある事象は、流れ加速型腐食による以下の炭素鋼部品の脱落である。

- ・給水リング（給水内管裏当金 / 給水内管 T 継手部及びレデューサ）
- ・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、裏当金本体及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 S/G 内部品構成部品の調査



S/G 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 S/G 2次側 内部品について

表１ S/G2次側 内部品のスクリーニング

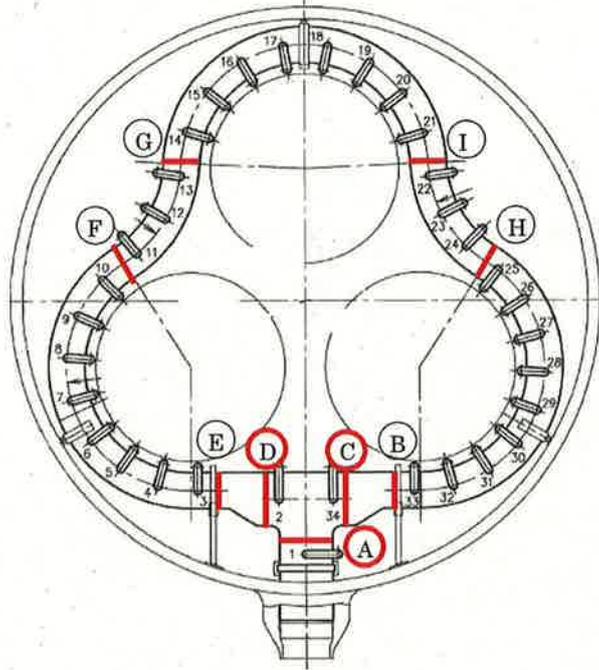
内部品	部品名	サイズ(mm)	
		板厚	長さ／幅
振止め金具	キー固定板	0.61	約 31 / 約 12
振止め金具	板ばね	0.25	約 53 / 約 18



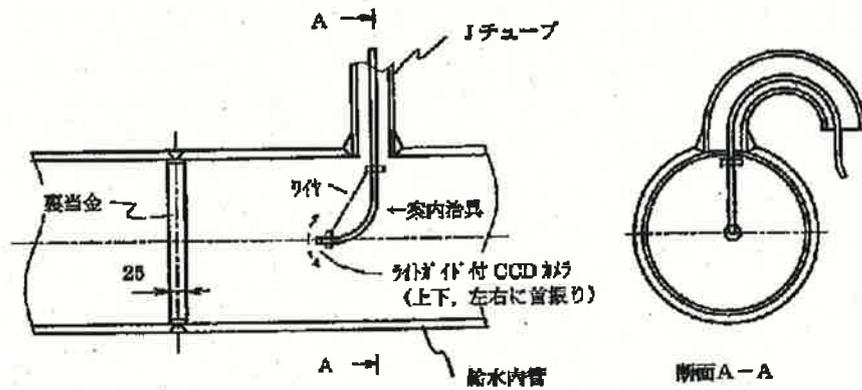
图2 振止的器具構造图

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-SG）



## スケールによる摩耗減肉の可能性について

スケール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ケール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

蒸気発生器（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、スケール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ことは考えがたい。

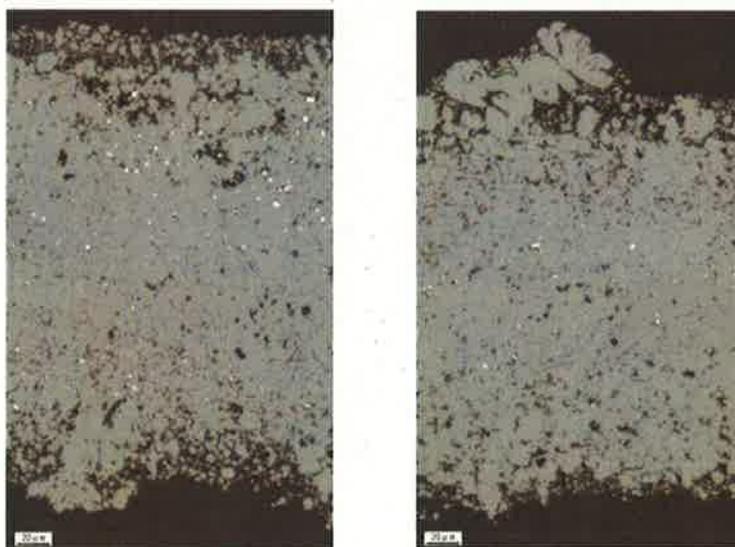


図１ 高浜４号機C-SGから採取した伝熱管外表面スラッジの断面観察例

## 2. スケール摩耗試験

## (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。

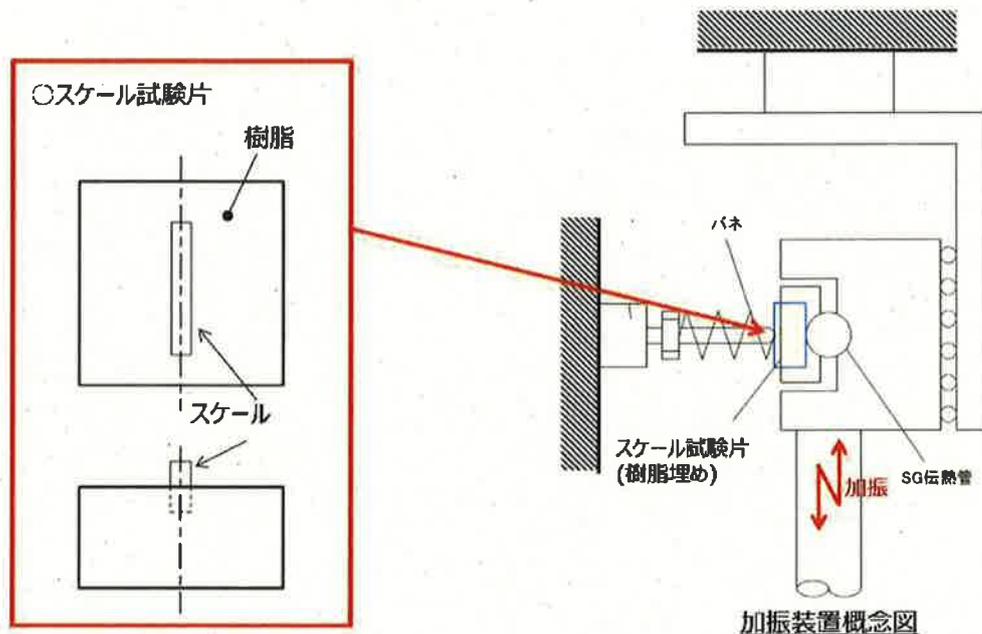


図2 加振装置概念図

## (2) 予備試験

スケール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

スケール試験片：複数配置1ケース、単片3ケース

環境：乾燥3ケース、湿潤1ケース

接触方向：スケールが破損しにくいと考えられる面内方向に加振

押付力：10～15N程度

b. 試験実施状況



図3 試験実施状況 (予備試験)

c. 試験結果

全てのケースにおいてスケール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、押付力は10N以上でスケールが破損しやすいことが分かった。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。



図4 試験結果

(3) 本試験

a. 試験条件

スケール試験片：単片2ケース

環境：乾燥

接触方向：スケールが破損しにくいと考えられる面内方向に加振

押付力：予備試験より低減した荷重条件を設定（ケース１：約 2N、ケース２：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）

摺動速度：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

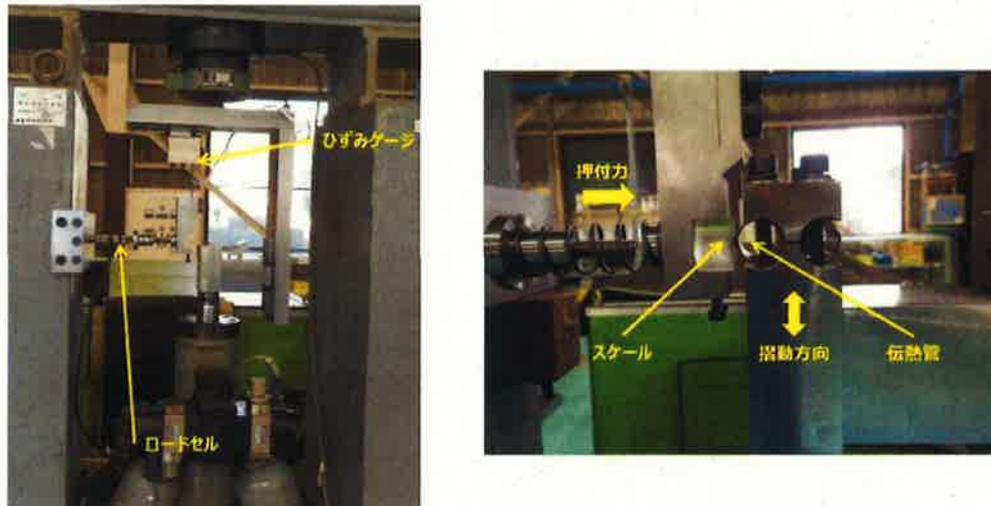


図 5 試験実施状況（本試験）

c. 試験結果

ケース 1, 2 ともに、試験経過とともにスケール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、スケール試験片の接触痕が認められた（図 7 参照）。

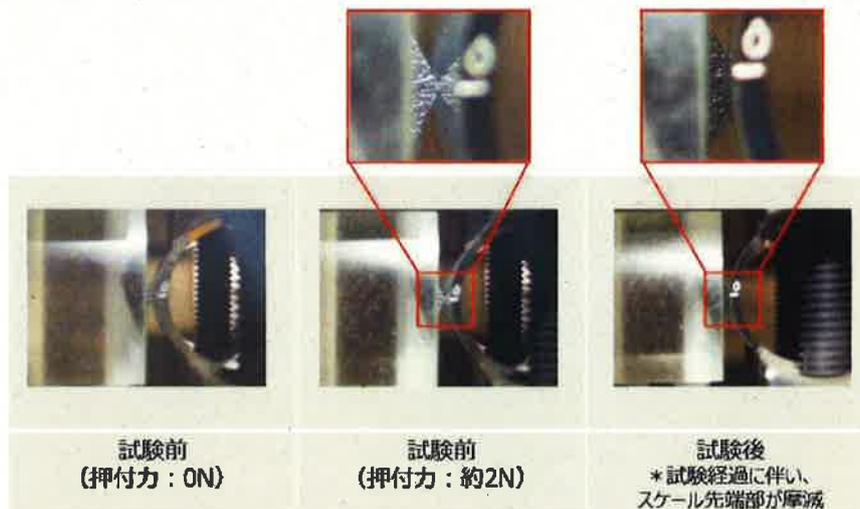


図 6－１ スケール摩滅の様子（ケース 1）

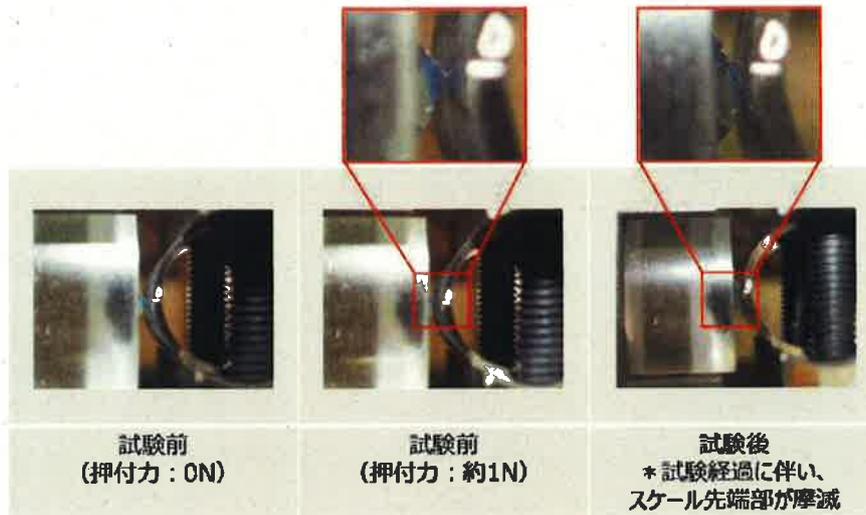


図6-2 スケール摩滅の様子 (ケース2)

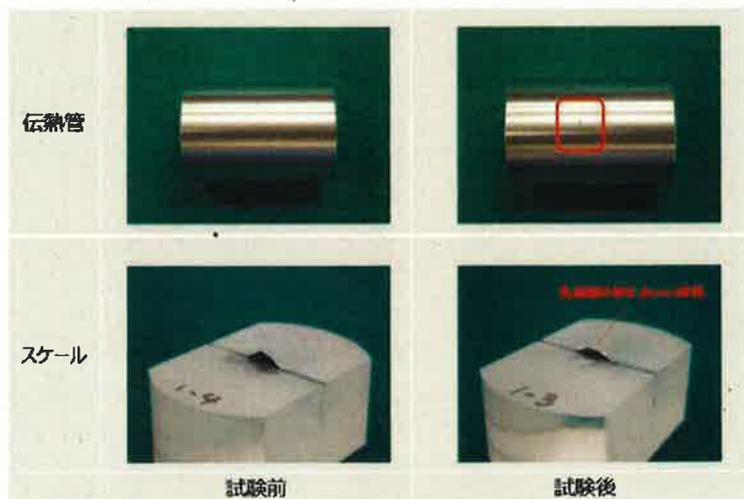


図7-1 試験後の試験片外観 (ケース1)

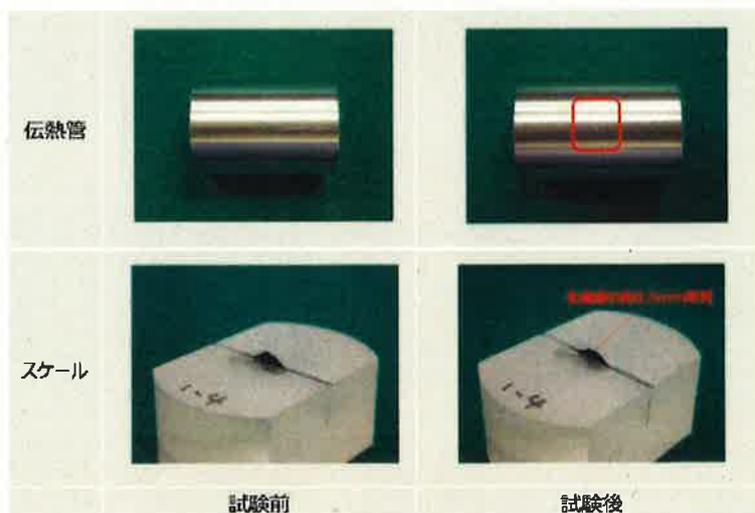


図7-2 試験後の試験片外観 (ケース2)

伝熱管表面の接触痕の詳細観察のため、接触痕の大きいケース１の伝熱管のプロファイルを確認したところ、スケール片の摩滅長さ約 0.8mm に対し、伝熱管の接触痕の深さは約 0.03mm と、スケール摩滅長さの 1/25 以下であった。

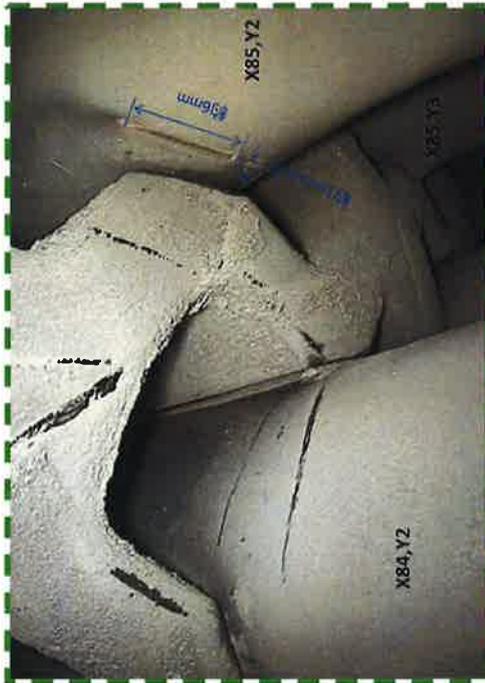
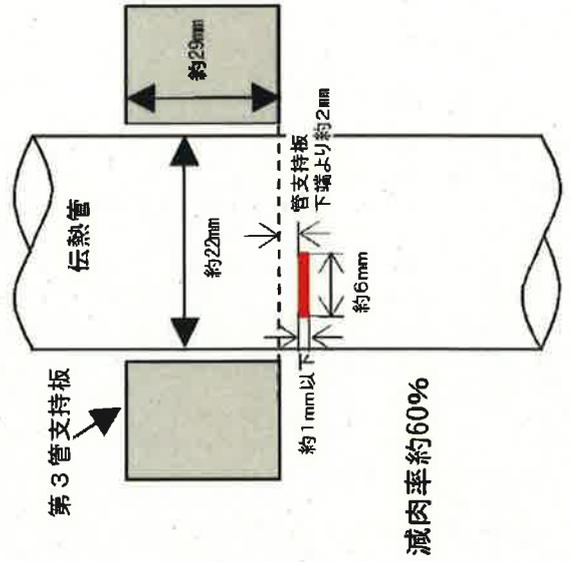
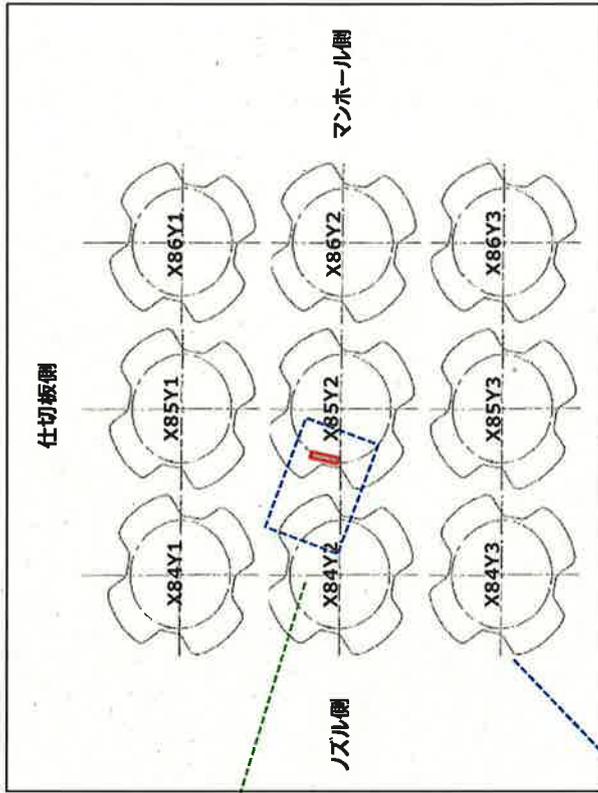
### 3. 結論

- (1) スケール生成メカニズムの観点から、スケール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ことは考えがたい。
- (2) スケール摩耗試験の結果、スケール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ケール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、スケールにより伝熱管に有意な摩耗減肉が生じる可能性は考えがたい。

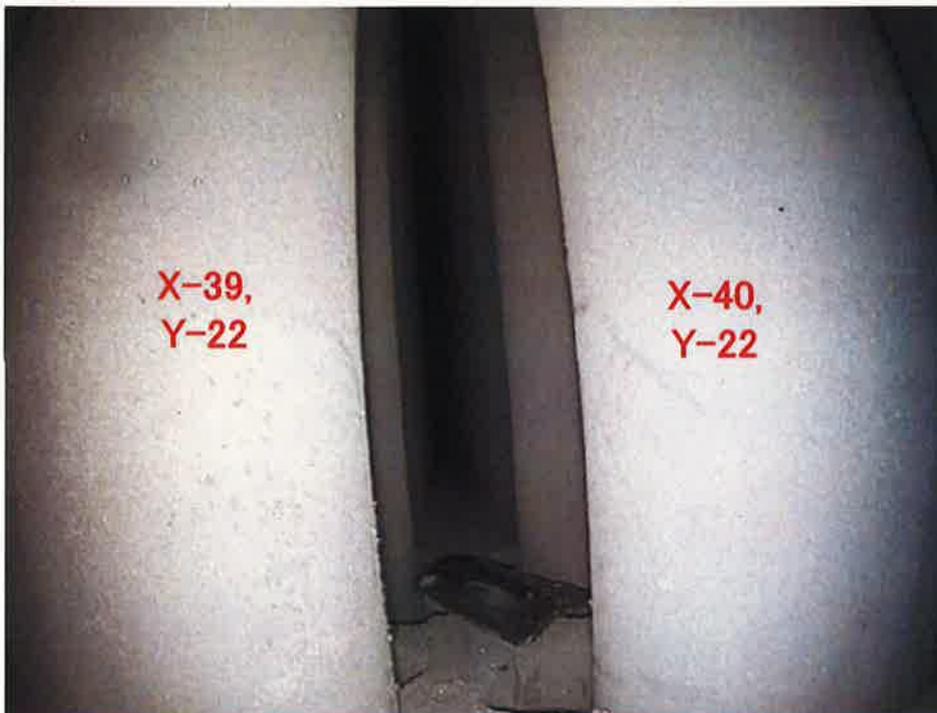
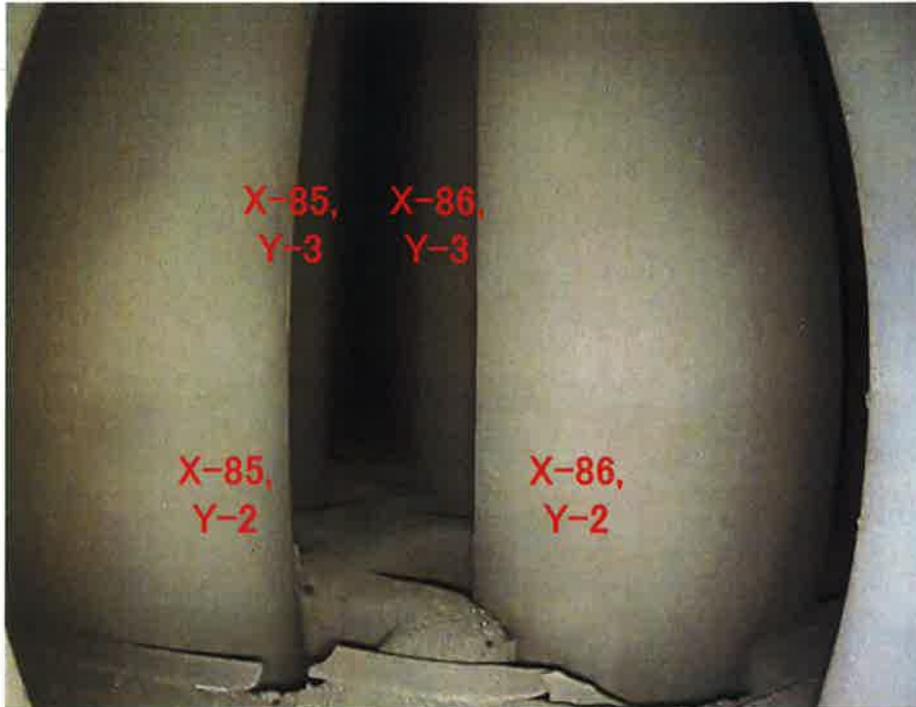
以上

# A-蒸気発生器 伝熱管 2次側表面写真

対象：3B管支持板下面 伝熱管 X85, Y2 @Cold



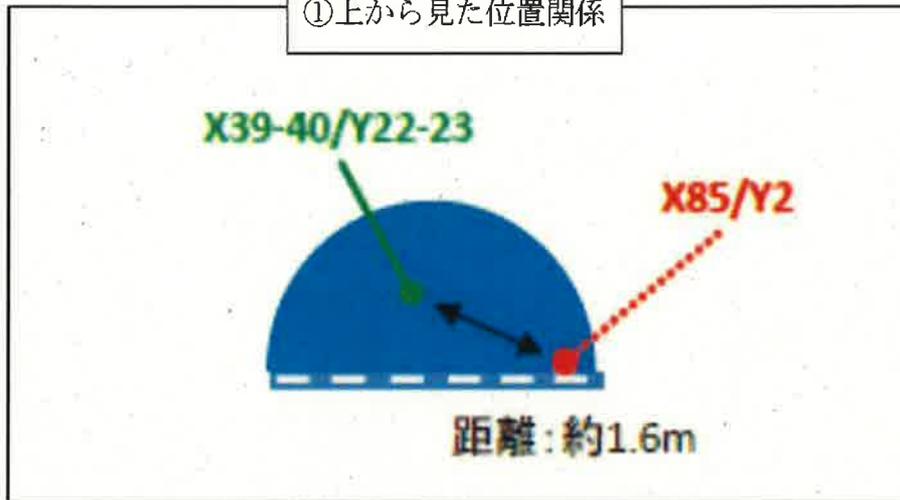
## A-蒸気発生器 #1B管支持板上写真



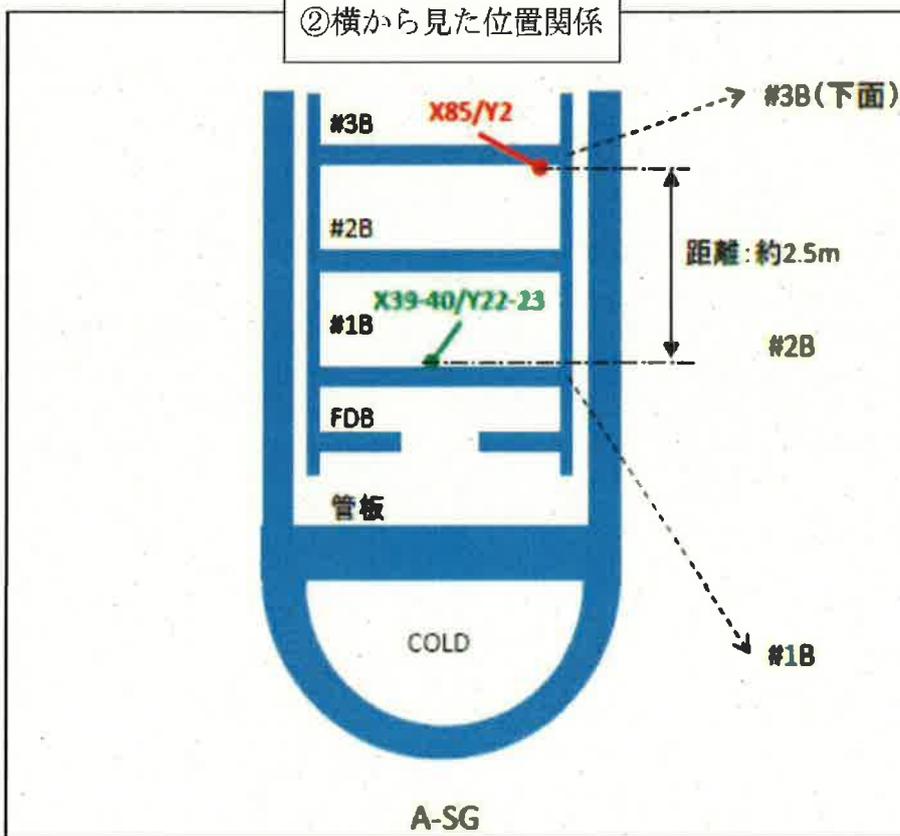
### 減肉部と金属片発見箇所の位置関係図

- 減肉部
- 金属片発見箇所

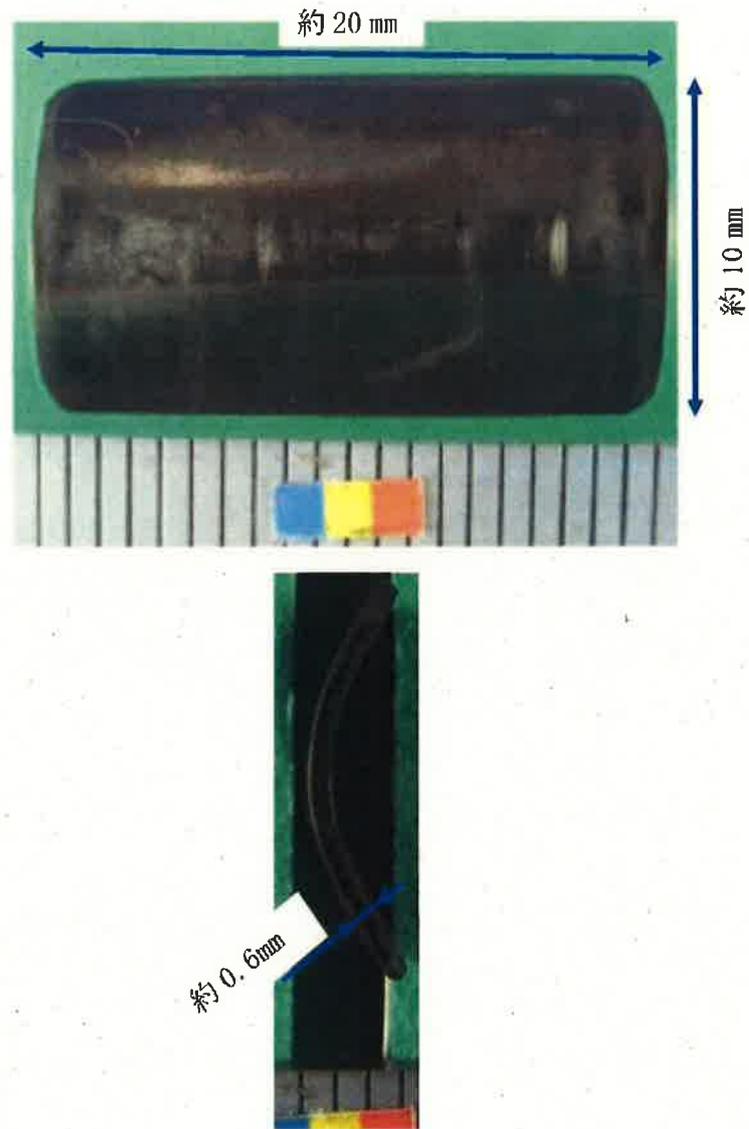
①上から見た位置関係



②横から見た位置関係



## 金属片のサイズ



重さ約1g、長さ約20mm×幅約10mm×板厚約0.6mm

## 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％比）											
Mg	Al	Si	S	Ca	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn
※	※	2	※	※	※	2×10 <sup>1</sup>	1	6×10 <sup>1</sup>	1×10 <sup>1</sup>	※	2

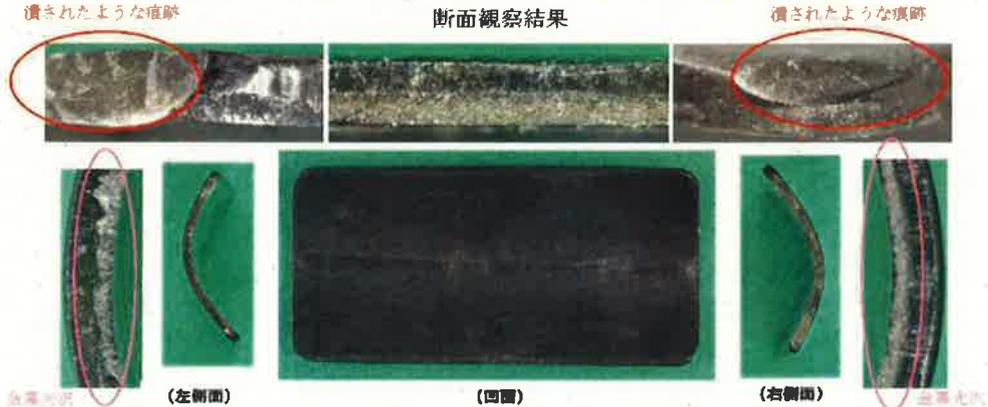
※検出されたが、半定量値が1（質量％比）未満であることを示す。

### 2. 拡大観察

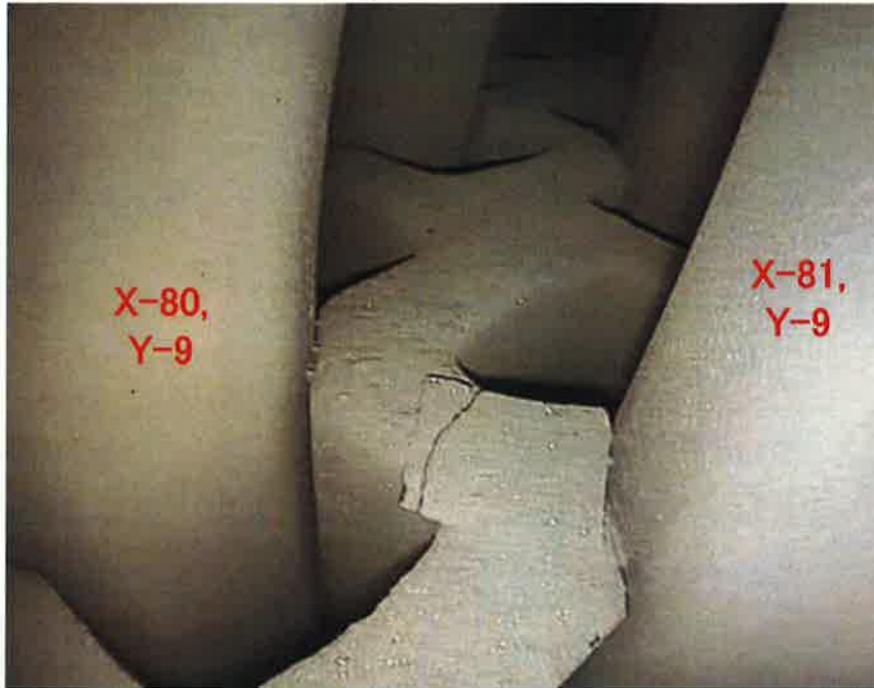
#### <観察結果>

・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。

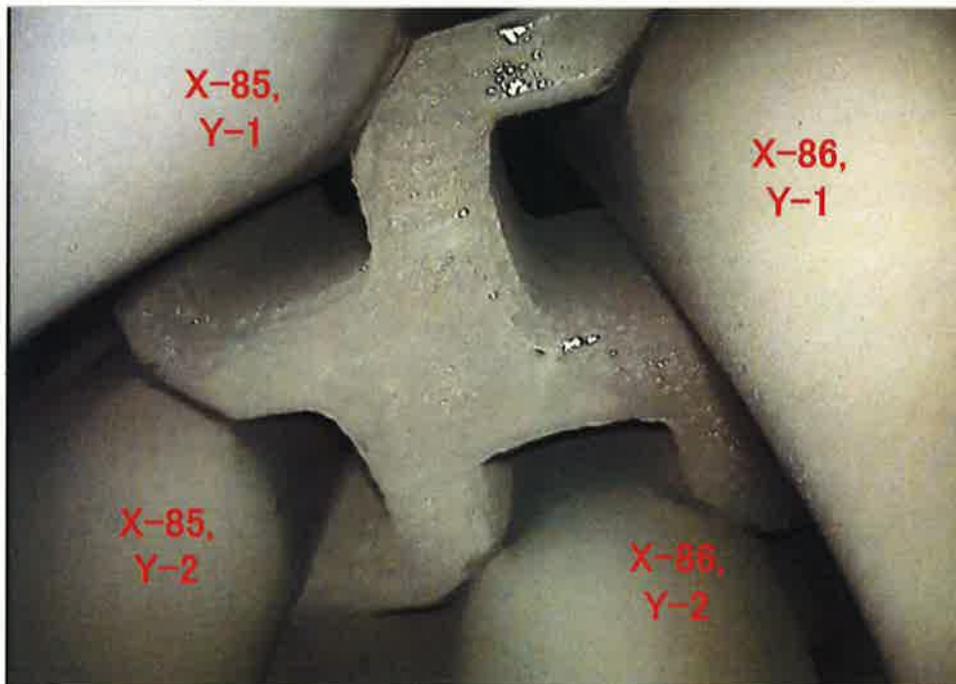
・金属片の側面及び四つ角部には、伝熱管との接触と判断できる有意な痕は確認されず潰されたような痕跡



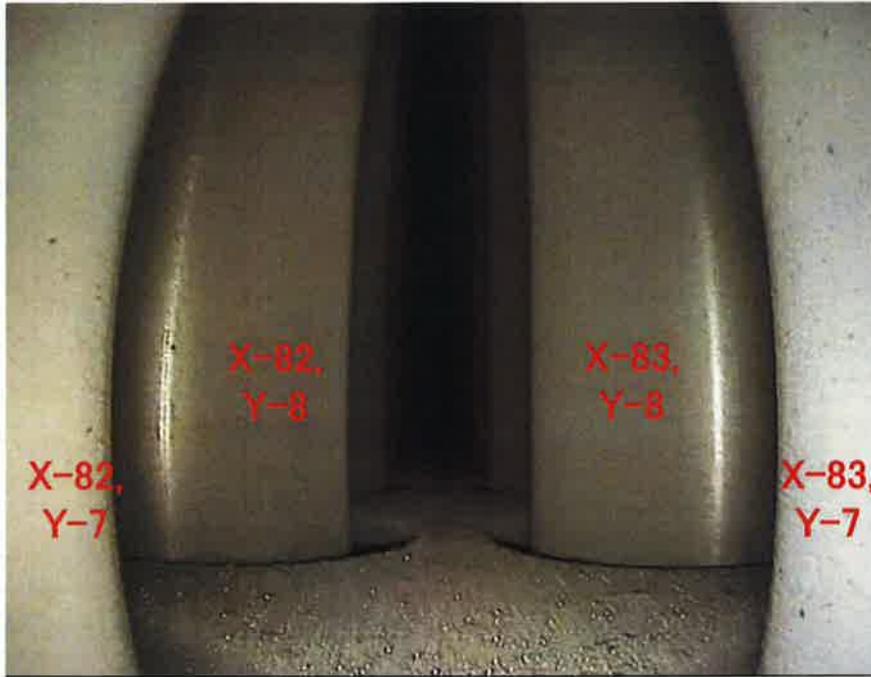
A-蒸気発生器 #2B管支持板上写真



A-蒸気発生器 #3B管支持板下写真



### A-蒸気発生器 管板上写真

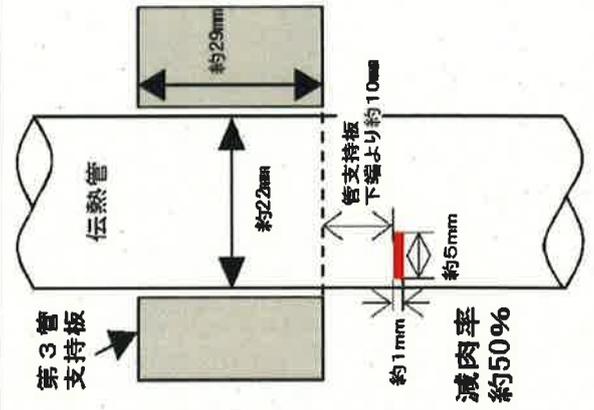
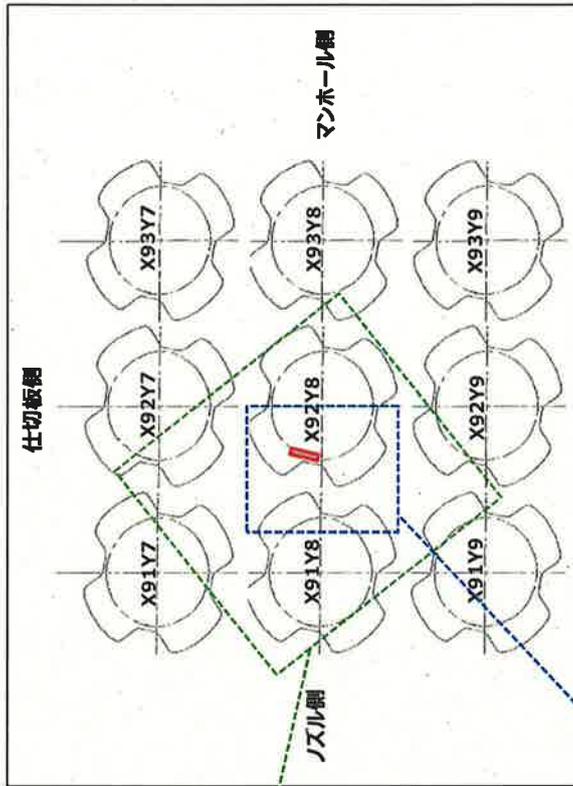


### A-蒸気発生器 流量分配板上写真

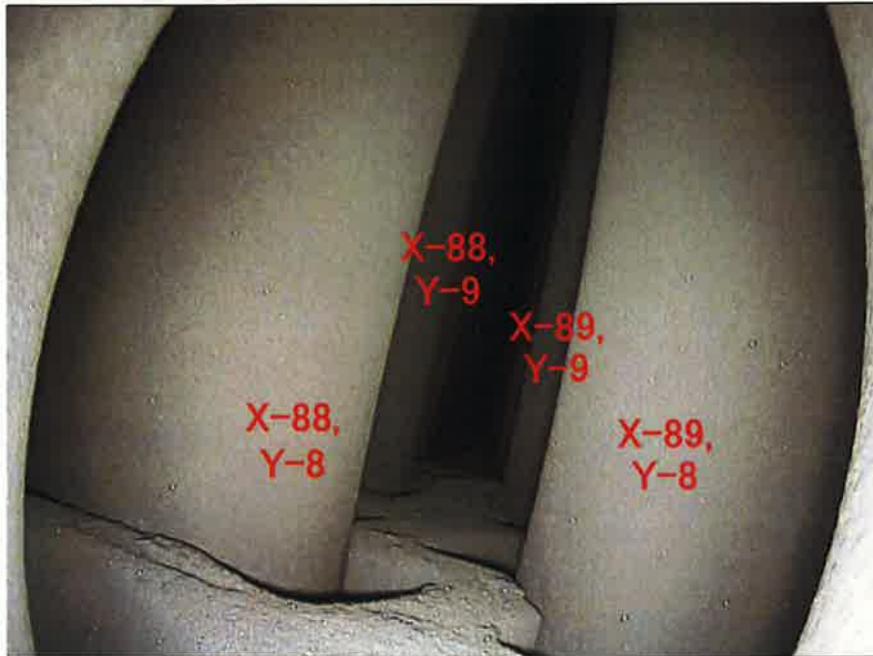


# B-蒸気発生器 伝熱管 2次側表面写真

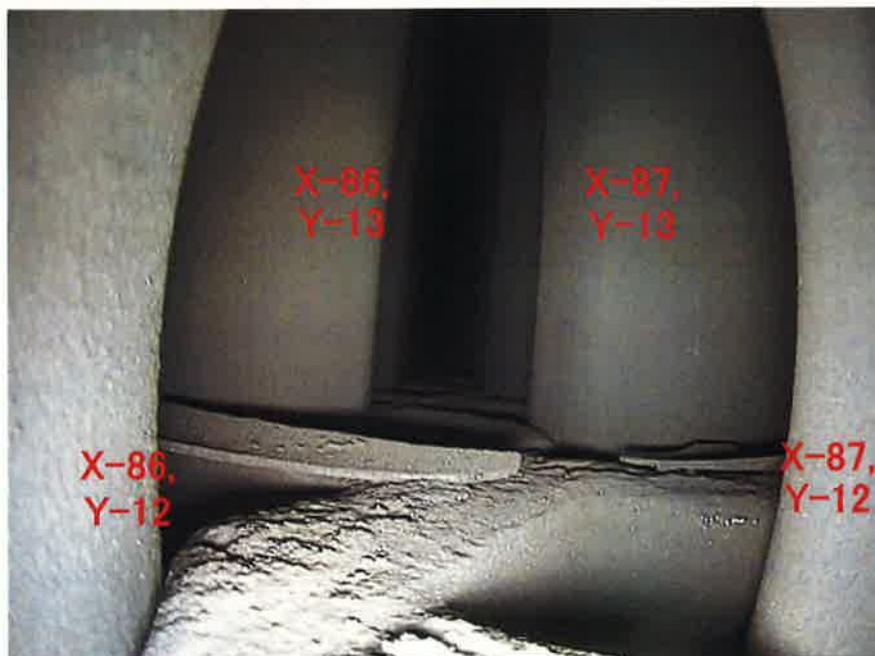
対象：3B管支持板下面 伝熱管 X92, Y8 @Cold



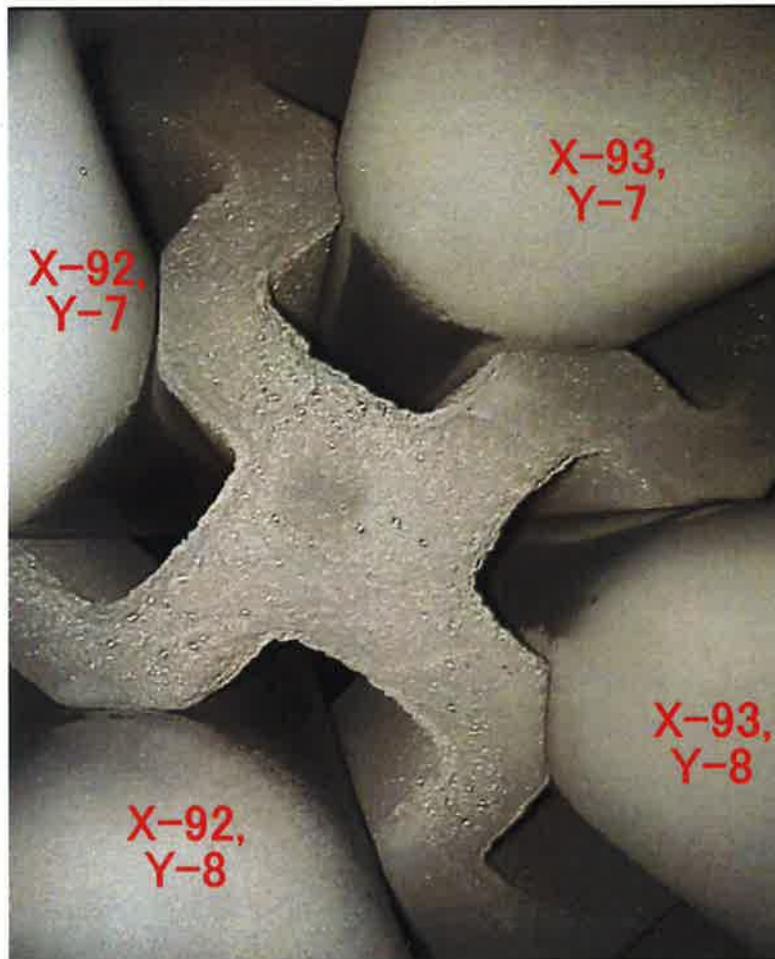
B-蒸気発生器 #1B管支持板上写真



B-蒸気発生器 #2B管支持板上写真



B-蒸気発生器 #3B管支持板下写真



B-蒸気発生器 管板上写真

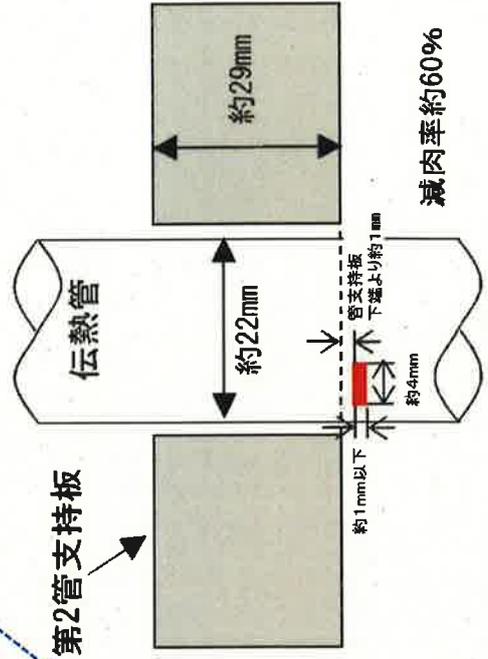
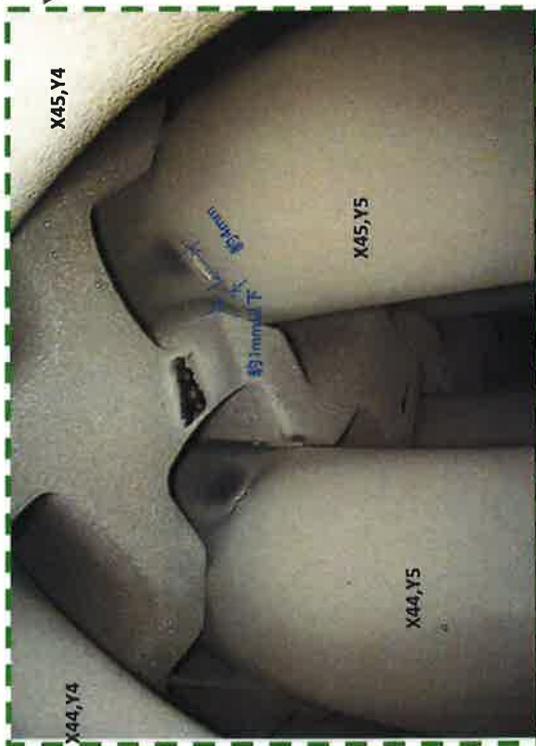
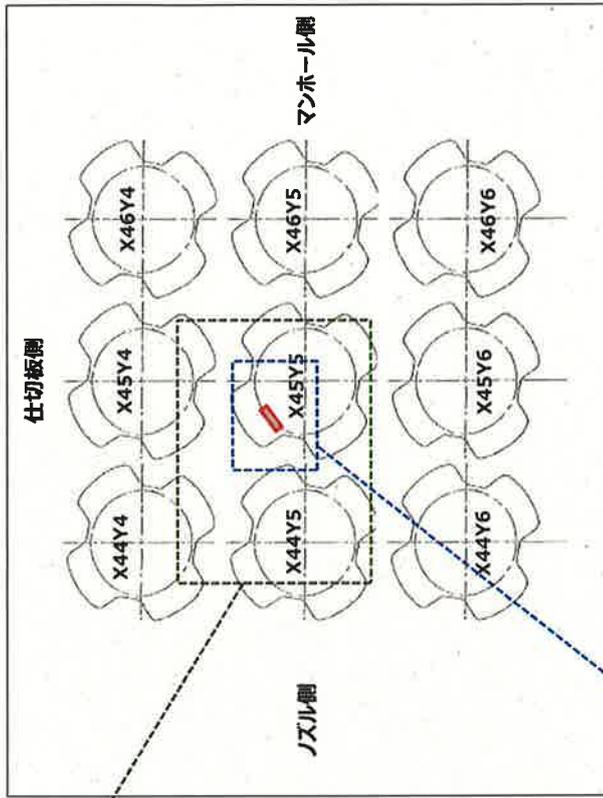


## B-蒸気発生器 流量分配板上写真



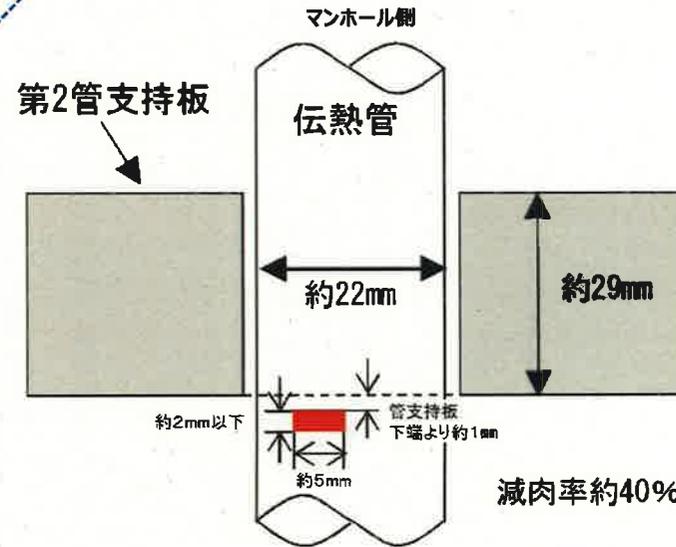
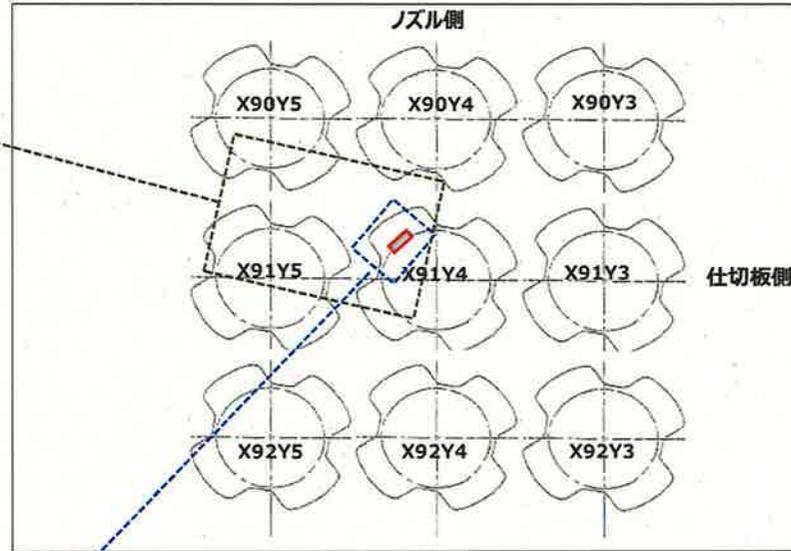
# C-蒸気発生器 伝熱管 2次側表面写真

対象：2B管支持板下面 伝熱管 X45, Y5 @Gold



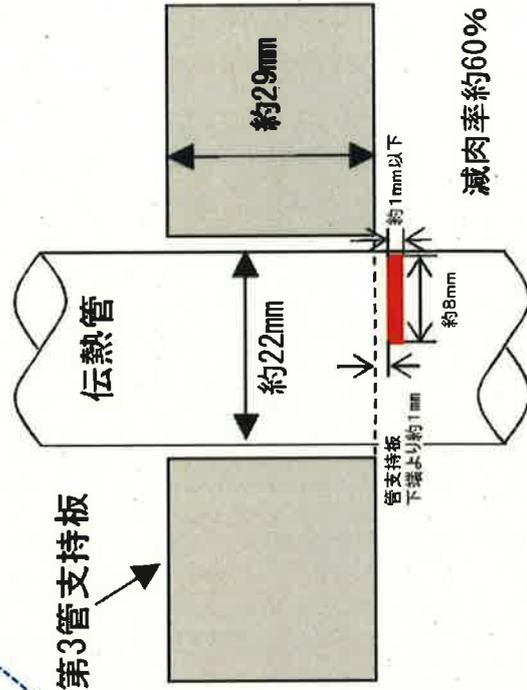
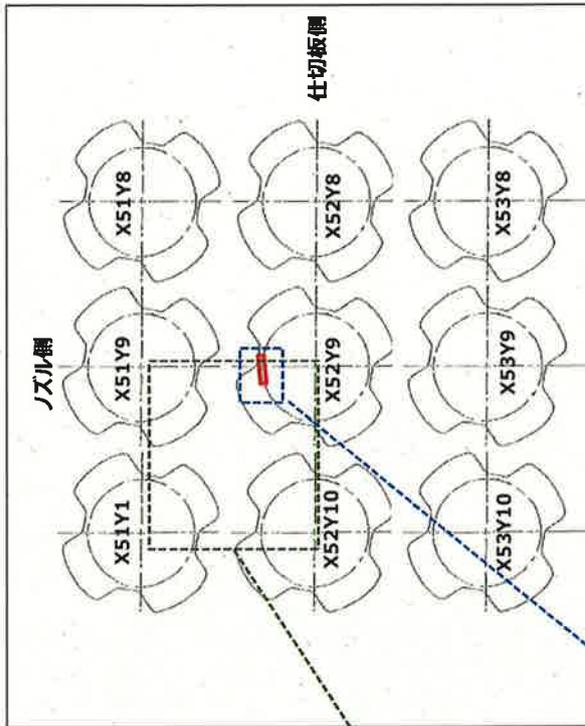
# C-蒸気発生器 伝熱管 2次側表面写真

対象：2B管支持板下面 伝熱管 X91,Y4 @Cold

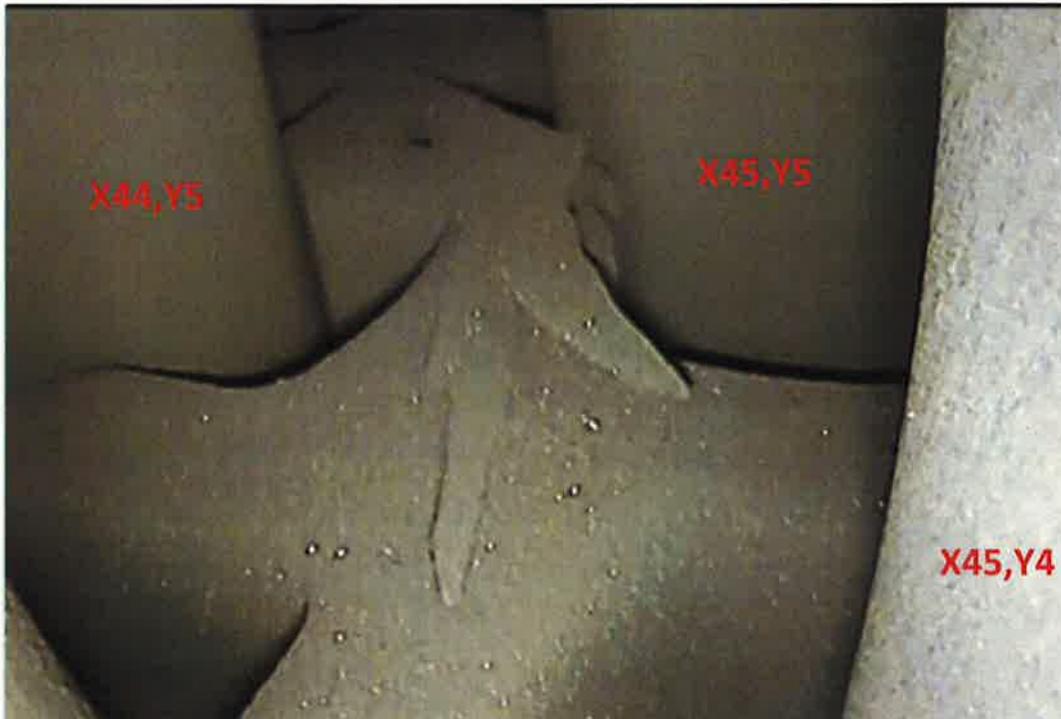


# C-蒸気発生器 伝熱管 2次側表面写真

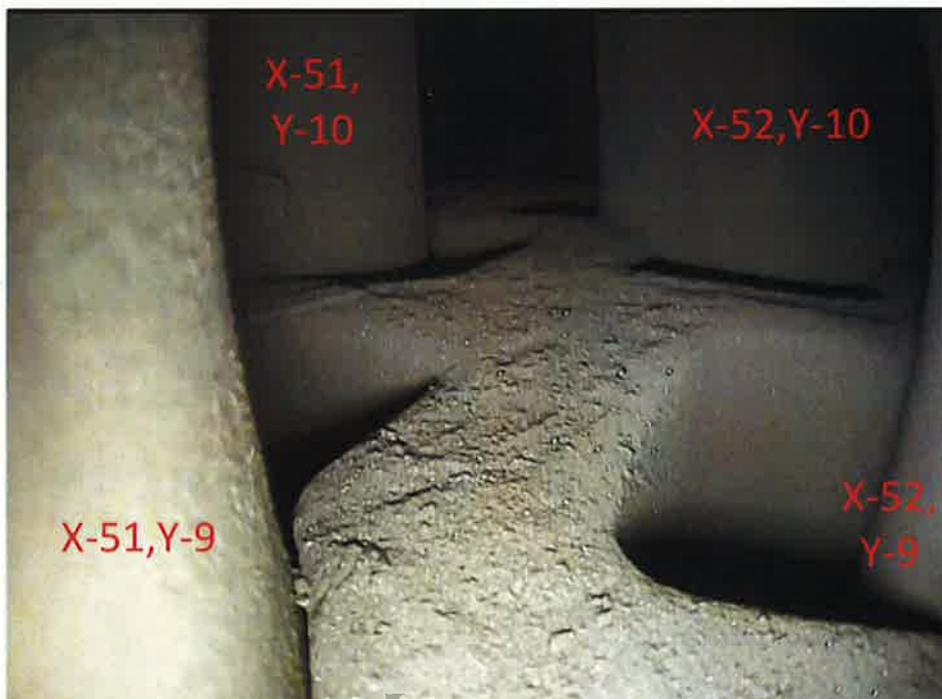
対象：3B管支持板下面 伝熱管 X52, Y9 @Cold



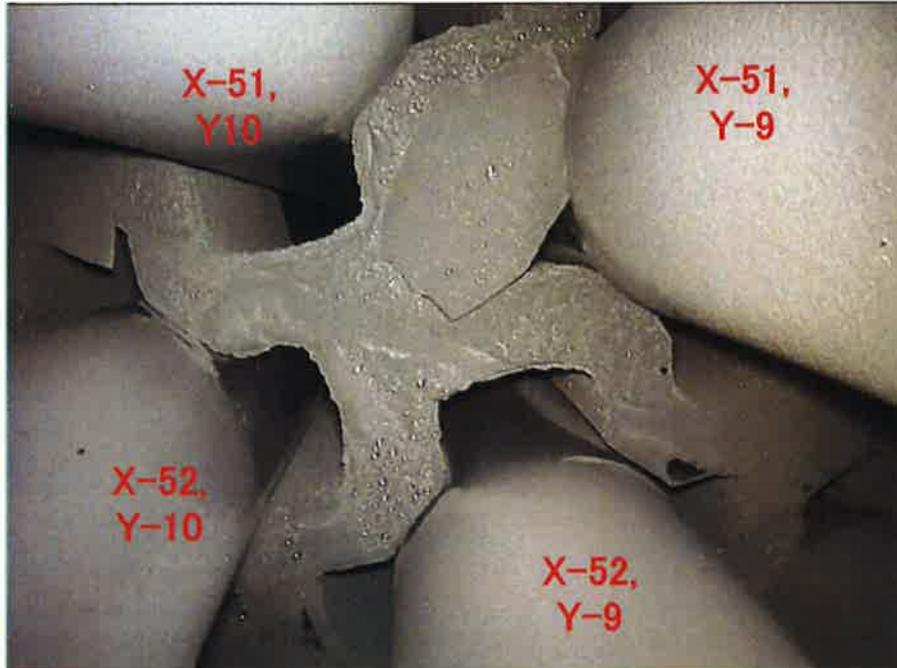
### C-蒸気発生器 #1B管支持板上写真



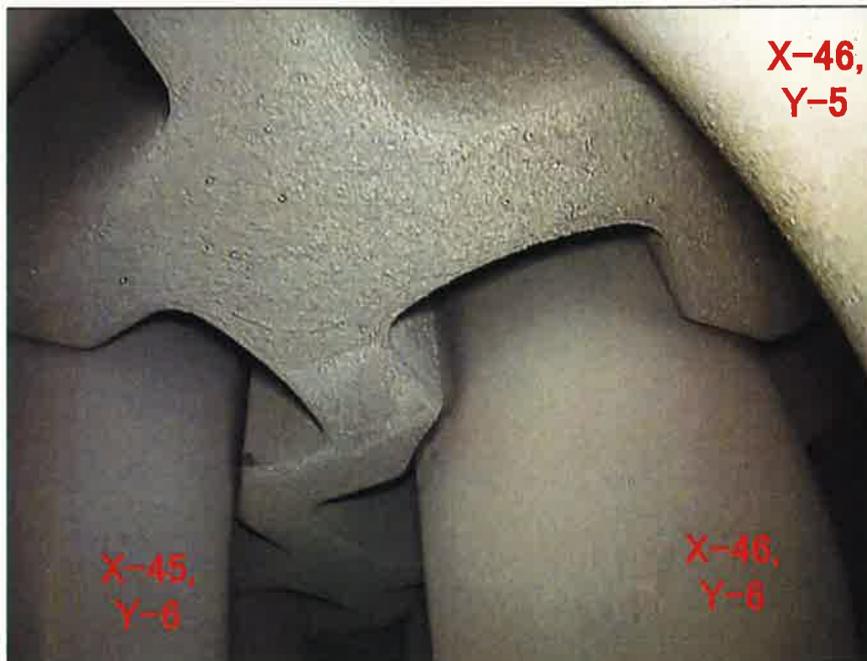
### C-蒸気発生器 #2B管支持板上写真



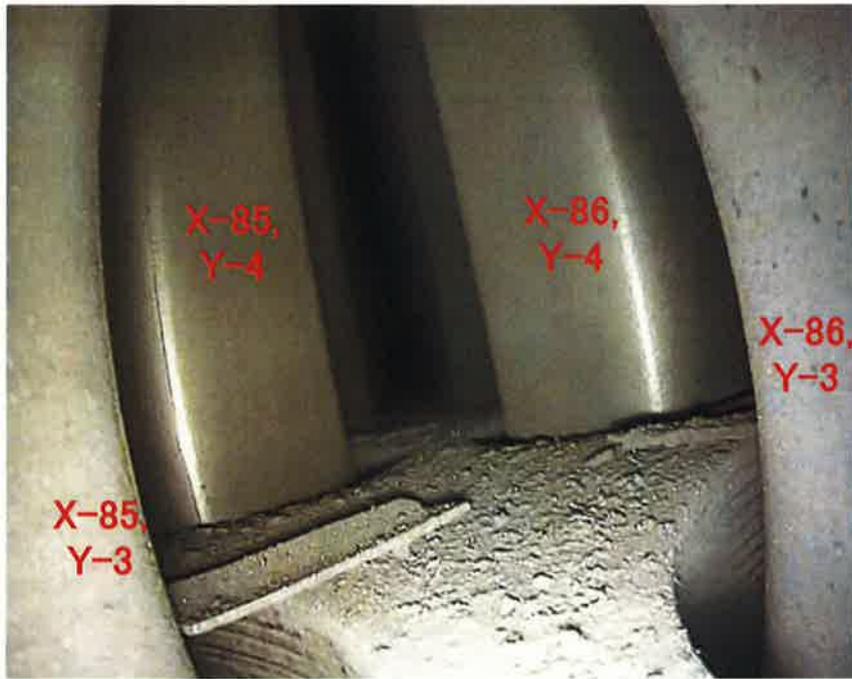
C-蒸気発生器 #3B管支持板下写真



C-蒸気発生器 #2B管支持板下写真



### C-蒸気発生器 流量分配板上写真



### C-蒸気発生器 管板上写真



## スラッジ等の収集及び確認結果

A-蒸気発生器スラッジランシング回収分(比較的大きいスラッジのみ抽出し撮影)



スラッジコレクター回収分(一部) : 代表 A蒸気発生器

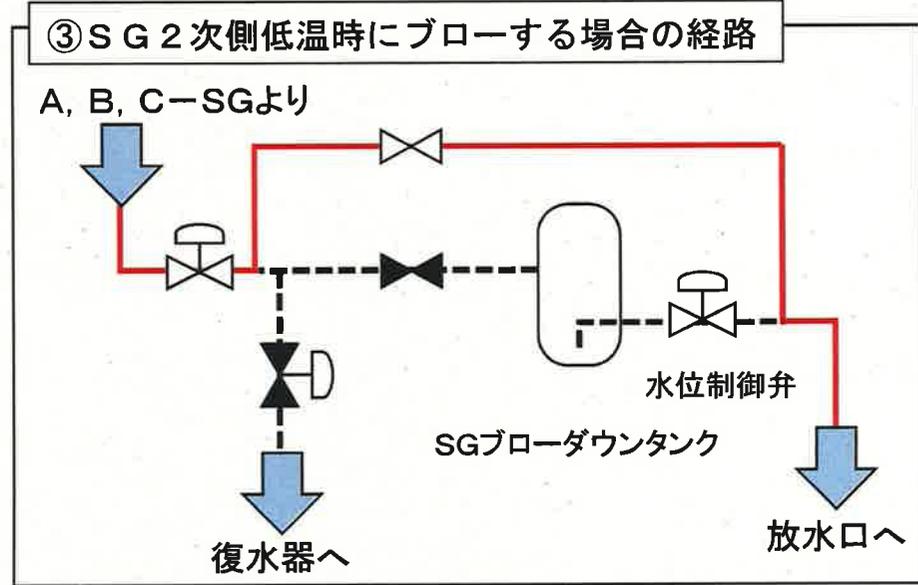
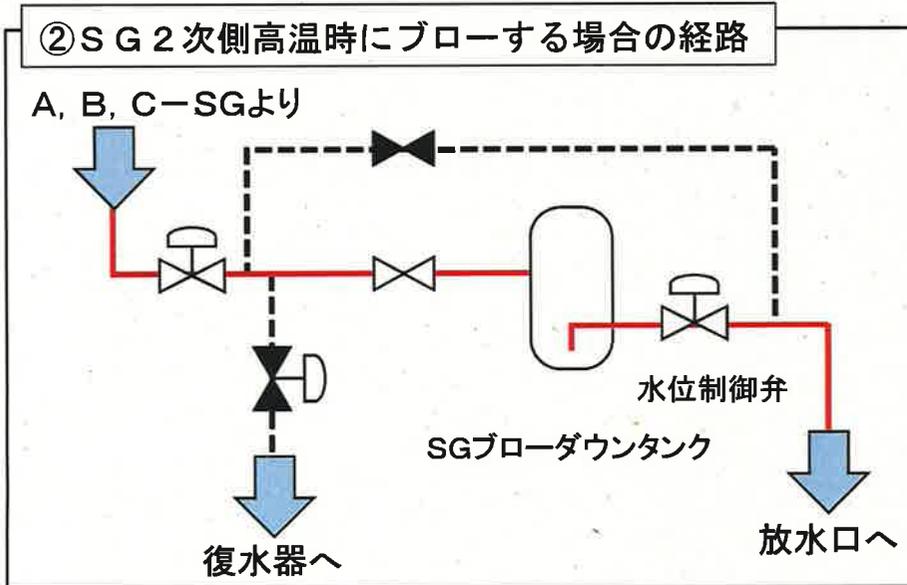
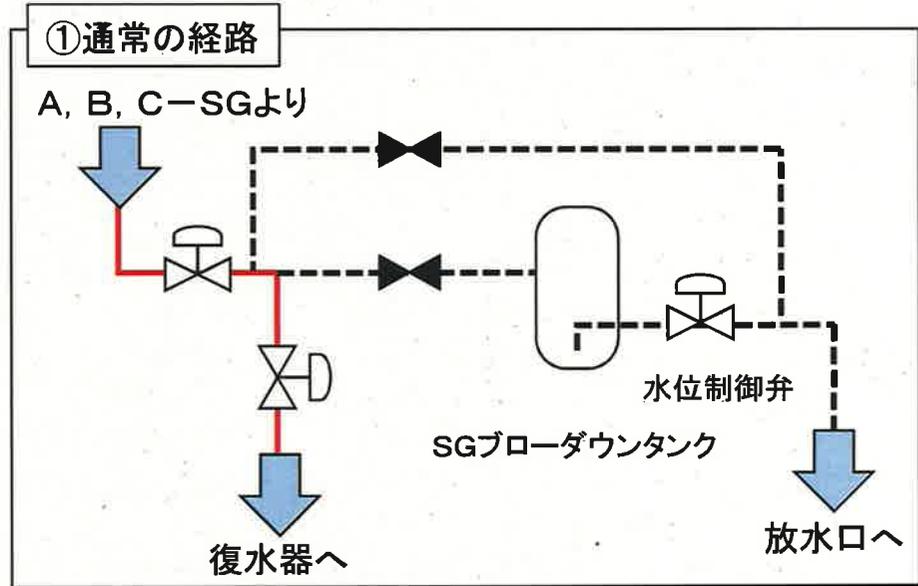


## 外面減肉の要因となった異物の排出経路図

外面減肉の原因となったと考えられる異物は、SGブローダウンを通じて排水されたと考えられる

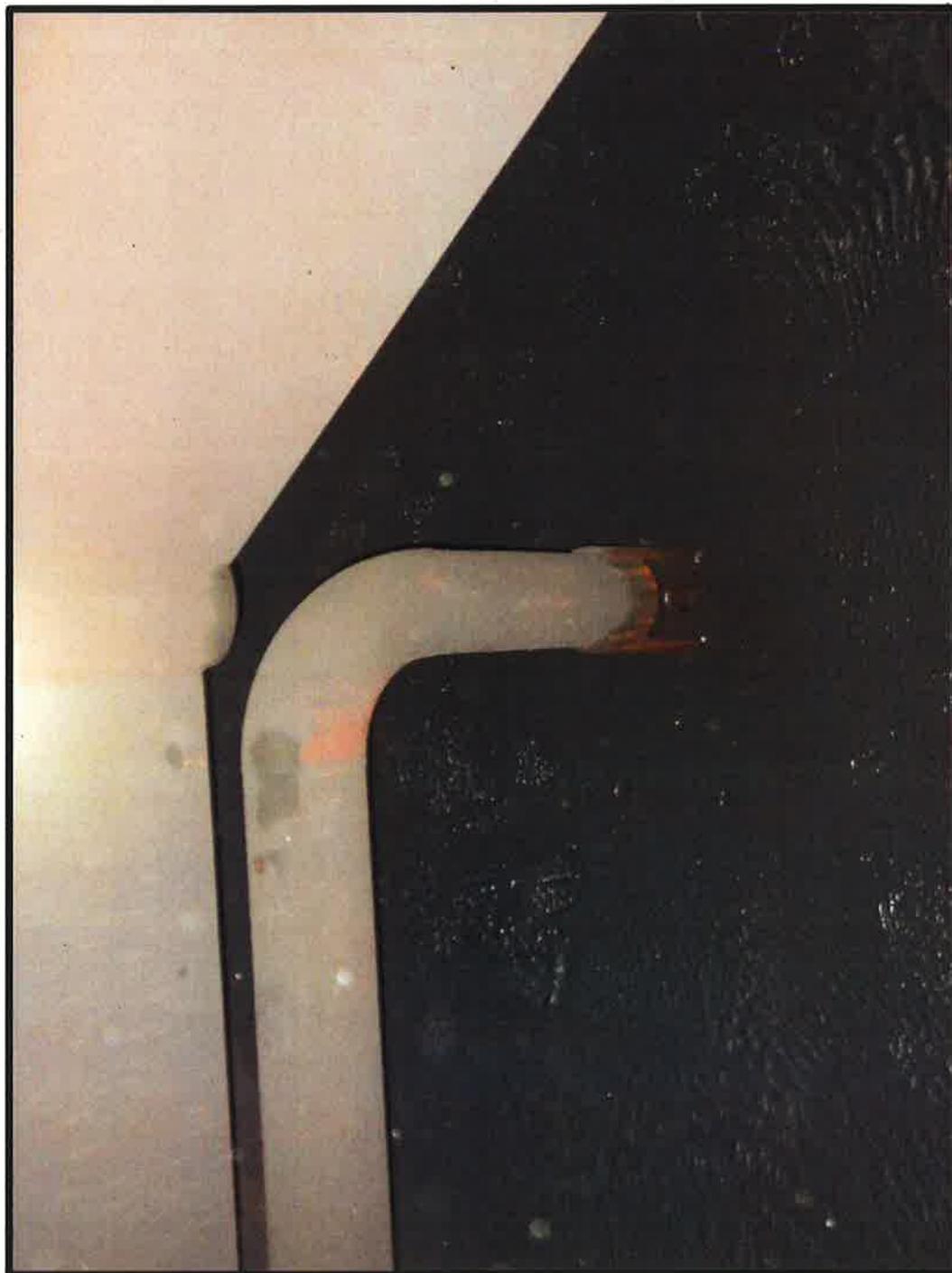
- ①：通常運転中、SGブローダウンは復水器に回収されているため、異物が経路上の弁にとどまっている可能性がある
- ②：定検に入った後、燃料取出前（SG 2次側が高温）にSG 2次側の水張替を実施しているが、この場合はSGブローダウンタンクを経由しており、異物が経路上の弁やタンク内にとどまっている可能性がある
- ③：燃料取出以降（SG 2次側が低温）、作業に伴ってSG 2次側をブローしている。この場合、直接海水管に放出している。

⇒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。



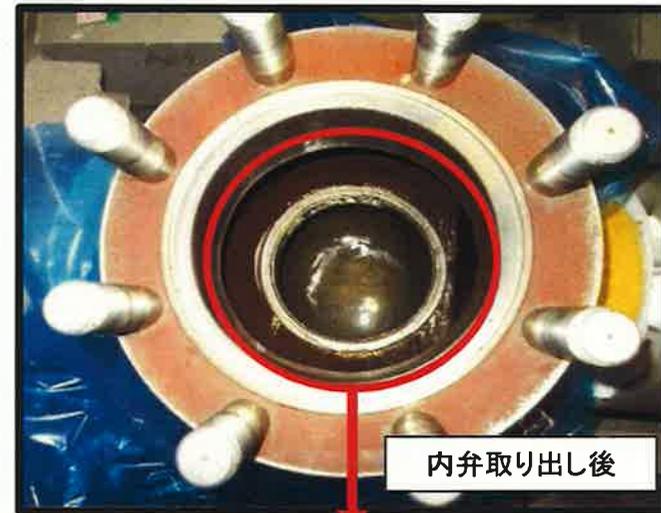
# SGブローダーダウンシステム点検結果（１／４）

## ①SGブローダーダウンタンク（異物なし）



# SGブローダウン系統点検結果 (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ブローダーダウン系統点検結果（4／4）

## ④SGブローダ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2及び第3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]  
 $\rho$  : 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]

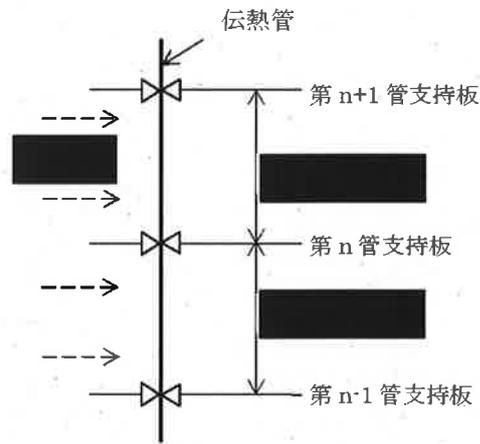


図1 流体力を受ける伝熱管 (n = 2, 3)

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  $\sigma$  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。

エロージョン\*1の発生可能性評価

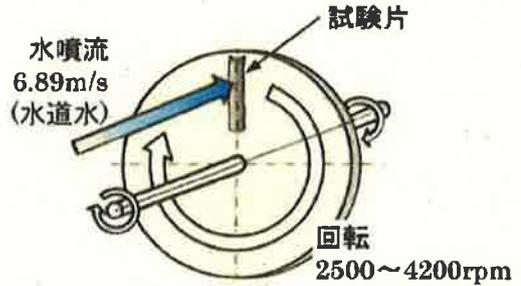
1. 目的

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

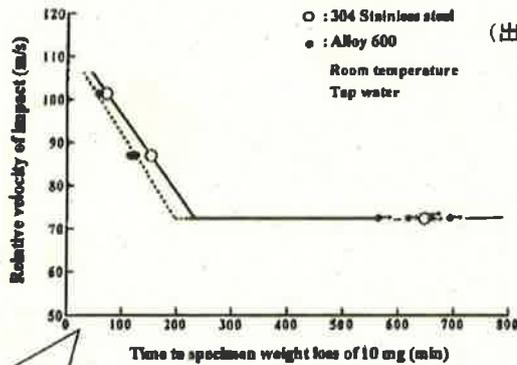
ウォータージェットテスト (室温) によりエロージョン発生限界流速を求め、実機流速と比較する。

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。



(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

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

スケール剥離による減肉信号への影響

1. 概要

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

2. 試験方法

2.1 スケール付着・剥離 (EDM スリット有り) の試験片データ

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

2.2 スケール付着・剥離 (EDM スリット無し) の試験片データ

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

3. 結果

取得したデータを表 1 に示す。

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

実機波形 (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>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>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>スケール付着箇所の信号 スケール付着箇所の信号および EDM スリット信号が検出された。</p>	<p>スケール付着箇所の信号 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

### 異物の形状

C-SGの第二管支持板(X45, Y5)で認められた減肉を生じさせた異物の形状を下図のとおり推定した。

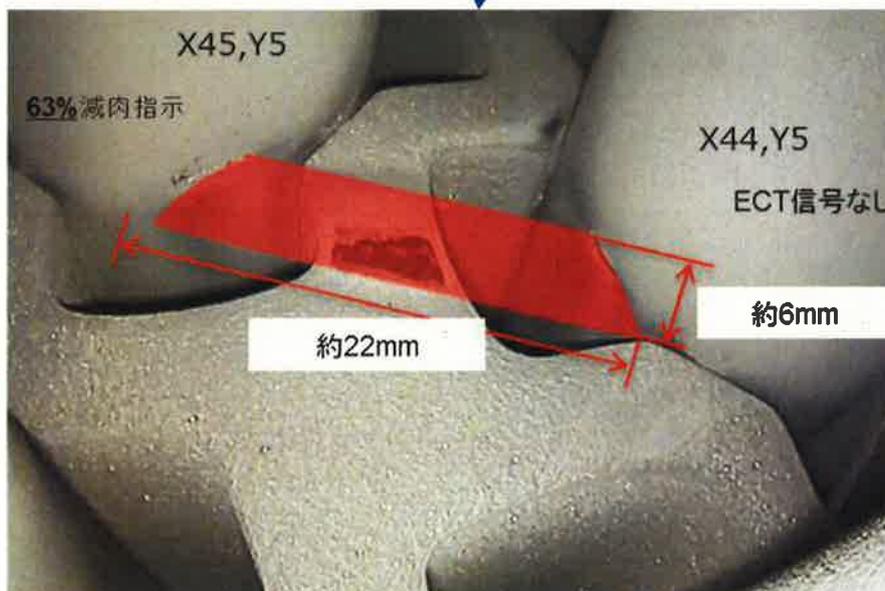
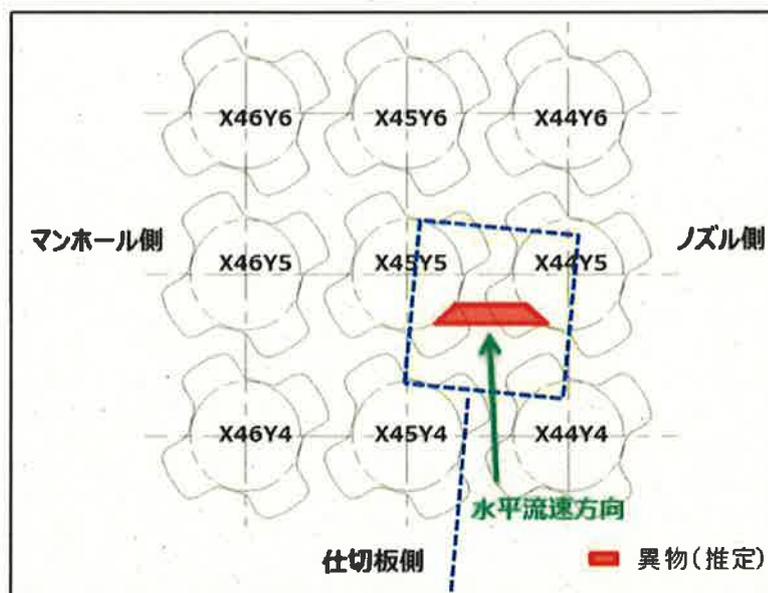
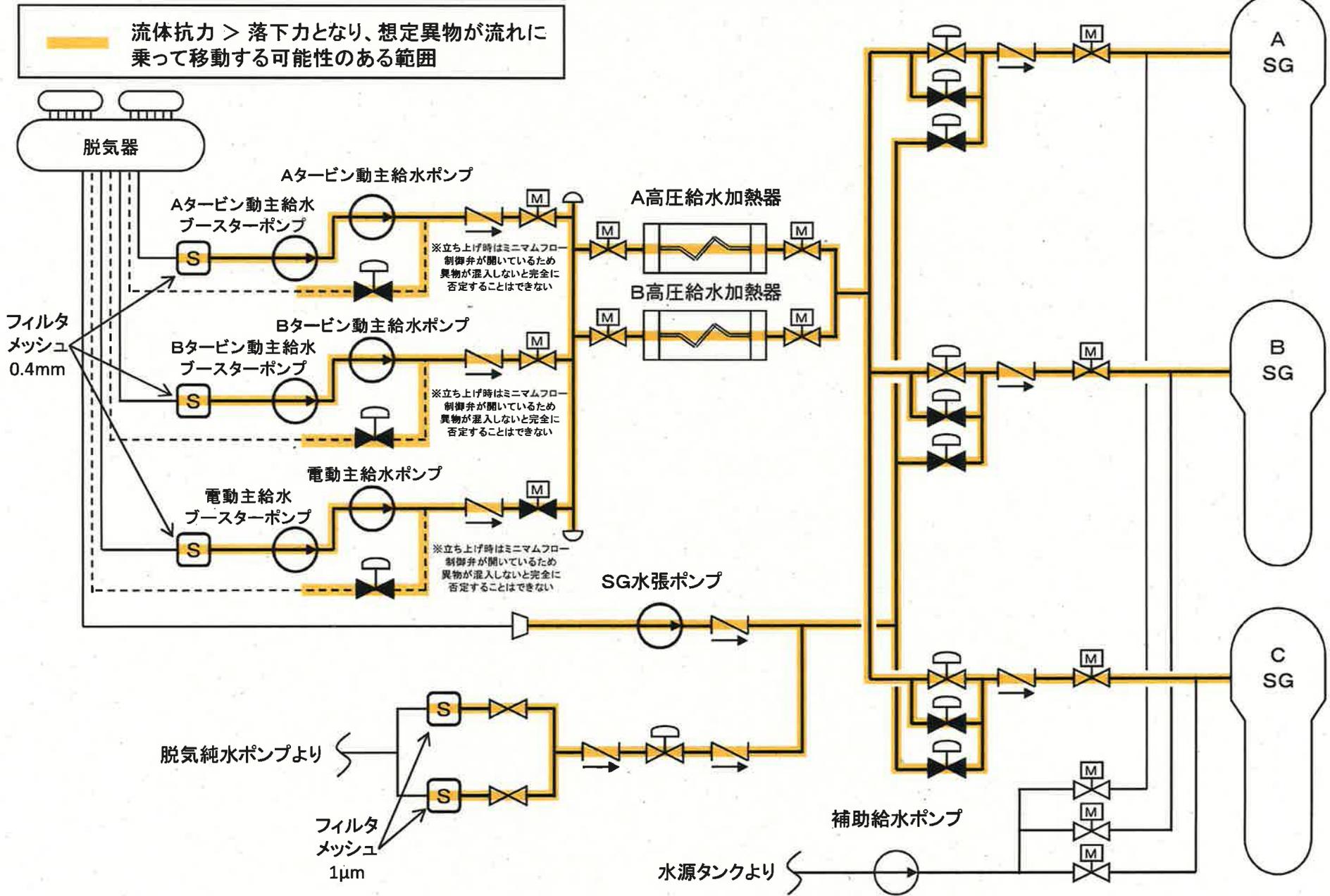


図 異物の推定形状 (C-SG 第二管支持板 (X45, Y5))

# 異物混入調査系統(異物混入の可能性のある系統)



高浜4号機第21回定検 開放機器への異物混入の可能性評価

機器名称	開口サイズ (約mm, ○B, ○A)	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		
4FCV-460 (4A主給水流量制御弁)									
4FCV-470 (4B主給水流量制御弁)									
4FCV-480 (4C主給水流量制御弁)									
4FCV-461 (4A主給水バイパス流量制御弁)									
4LCV-3710 (4A蒸気発生器水張制御弁)									
A-タービン動主給水プースタポンプ入口ストレーナ									
B-タービン動主給水プースタポンプ入口ストレーナ									
B-タービン動主給水ポンプ									
電動主給水プースタポンプ									
脱気純水フィルタ									
4A-TDFWP吐出圧力計(PI-5234A)元弁(FW-007AA)取り出し管台									
4A-TDFWP出入口(dPI-5218~5220)高圧側元弁(FW-120A)取り出し管台									
4A-TDFWP入口流量計上流側元弁(FW-125A)取り出し管台									
4B-TDFWPミニマムフロー(FT-5238B)上流元弁(FW-152BA)取り出し管台									
4-MDFWBP出入口(dPT5221~5223)高圧側元弁(FW122)取り出し管台									
4MDFWP出口流量計(FT-5227)元弁(FW-130)取り出し管台									
4MDFWPミニマムフロー流量計(FT-5241)元弁(FW-158A)取り出し管台									
4MDFWBP吸い込み圧力計(PI-5217)元弁(FW-212)取り出し管台									
4A-TDFWP出入口(dPI-5218~5220B)高圧側元弁(FW-120B)取り出し管台									
4MDFWBP吸い込みストレーナ(dPIA-5211)低圧側元弁(FW-118A)取り出し管台									
4B-TDFWPミニマムフロー(FT-5238B)下流元弁(FW-153BA)取り出し管台									
4B-TDFWPミニマムフロー(FT-5240B)下流元弁(FW-154BA)取り出し管台									
4MDFWPミニマムフロー流量計(FT-5241)元弁(FW-159A)取り出し管台									
FCV-8782(脱気純水フィルタ出口流量調節弁)									
4VA-FW-520B (4B主給水隔離弁)									
4VA-FW-506A (4A主給水バイパス流量制御弁後弁)									
4VA-FW-506B (4B主給水バイパス流量制御弁後弁)									
4VA-FW-001A (4Aタービン動主給水ポンプ出口逆止弁)									
4VA-FW-519C (4C主給水逆止弁)									
4VA-FW-002 (4電動主給水ポンプ出口逆止弁)									

高浜4号機第21回定検 開放機器への異物混入の可能性評価

機器名称	開口サイズ (約mm、OB、OA)	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-504C (4C主給水流量制御弁後弁)									
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)									
4VA-FW-012B (4B6ヒータ入口給水逃し弁)									
4VA-FW-162 (電動主給水ポンプウォーミング弁)									
4VA-FW-013Ba (4B6ヒータ出口給水圧力計元弁 (PI-5250B))									
4VA-FW-123A (4A-TDFWP入口流量計上流側元弁 (FT-5224A))									
4VA-FW-128 (4MDFWP入口流量計下流側元弁 (FT-5225))									
4VA-FW-155Aa (4A-TDFWPミニマムフローFT-5240A下流側元弁)									
4VA-FW-202A (4A-TDFWP吸込圧力計元弁 (PI-5216A))									
4VA-FW-160 (4FWPウォーミング元弁)									
4VA-CW-299 (4SG水張ポンプ出口弁)									
4VA-CW-401 (4脱気水SG供給弁)									
4VA-FW-024A (4A-FWPバランス逆止弁)									
4VA-FW-577A (4A主給水逆止弁バランス弁)									
4VA-FW-577B (4B主給水逆止弁バランス弁)									
4VA-FW-577C (4C主給水逆止弁バランス弁)									
4VA-FW-578A (4A主給水隔離弁バランス弁)									
4VA-FW-578B (4B主給水隔離弁バランス弁)									
4VA-FW-578C (4C主給水隔離弁バランス弁)									
4VA-FW-022AA (4A6ヒータ出口給水ブロー元弁)									
4VA-FW-022AB (4A6ヒータ出口給水ブロー弁)									
4VA-FW-022BA (4B6ヒータ出口給水ブロー元弁)									
4VA-FW-022BB (4B6ヒータ出口給水ブロー弁)									
4VA-FW-019a (4FWP出口ヘッダーブロー元弁)									

## 2次系一般弁(垂直設置弁)分解点検作業方法

### 1. 準備

- ・床養生・周辺養生 ・作業場の4S



### 2. 分解

- ・弁箱シート養生、異物管理シール貼り付けを実施。  
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。



※3号機例

### 3. 手入れ

- ・ウエスは使用済みのものを再使用している場合があり、他の工具類と同じ工具袋内に保管と運搬されていることから異物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の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。



※3号機例



### 4. 組立・復旧

- ・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、異物混入後落下していることから最終異物確認時点では目視確認不可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。

# 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、中のコシ筒を引き抜くとT/D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なう。

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なうが、作業服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、清掃を行なう。養生シートにより作業服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できない箇所があるため、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】

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な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、作業服に付着物が無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、異物残留とならないようにする。

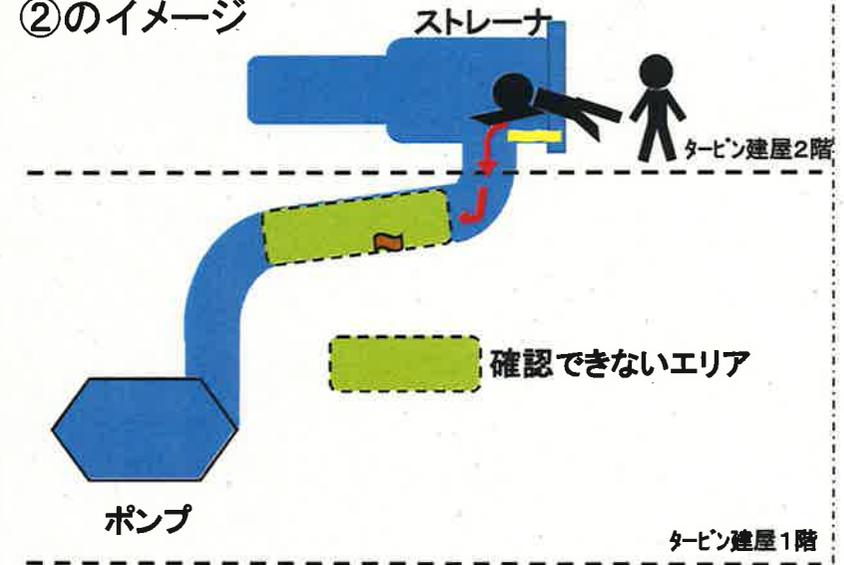
清掃作業終了後は、ストレーナ蓋を仮閉止し(ボルト止め)、異物混入防止を図る。

コシ筒清掃作業完了後、作業服に付着物が無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。

コシ筒を挿入する。(人の立入なし)

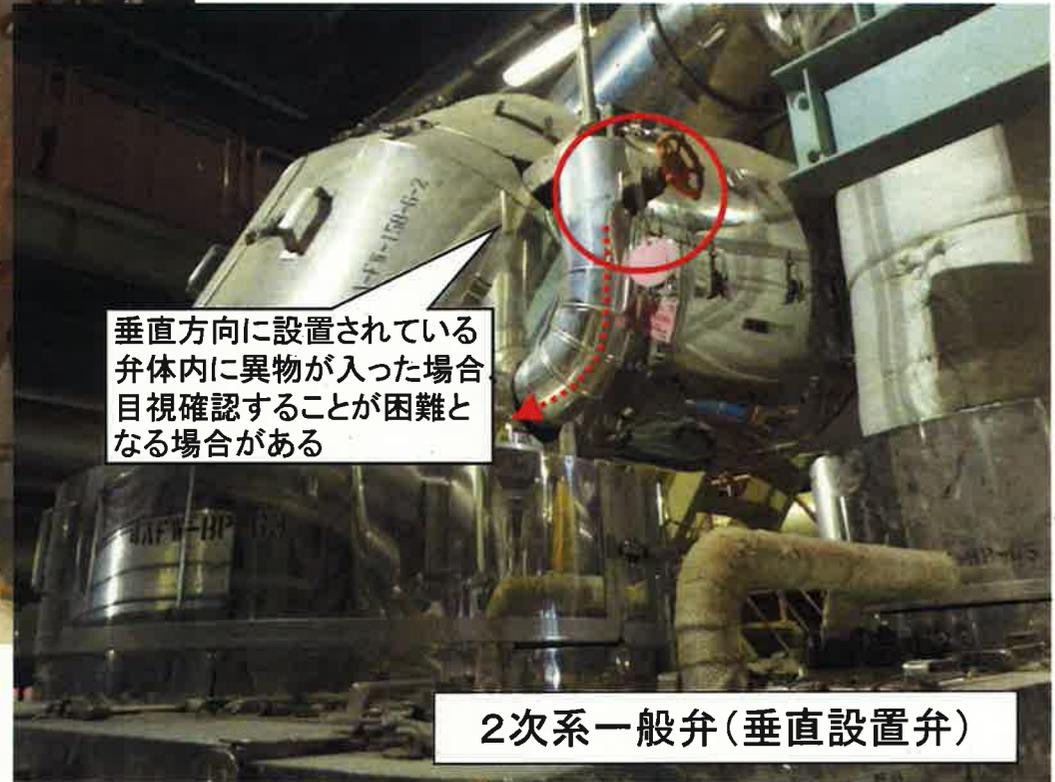
コシ筒挿入後、作業服に付着物が無いことを本人が確認し、コシ筒内の最終異物確認を実施し、ストレーナ蓋を閉止する。

### ②のイメージ

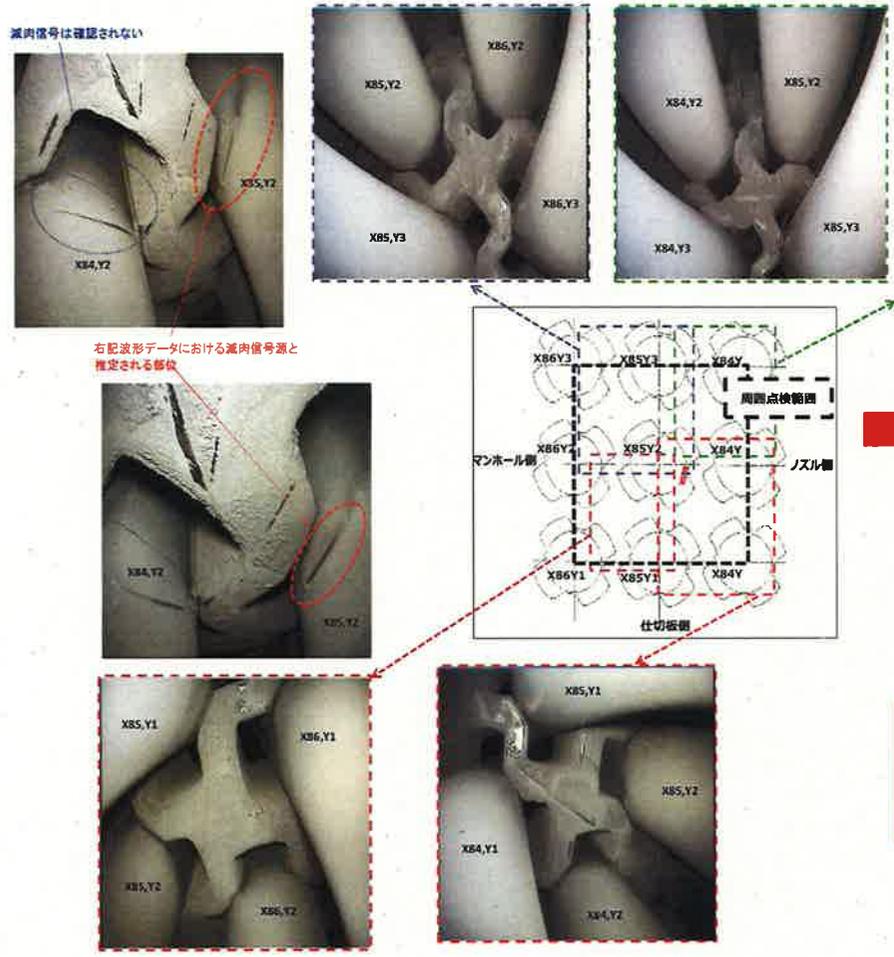


# 異物確認が困難となるケースの例

タービン動主給水ブースタポンプ入口ストレナ

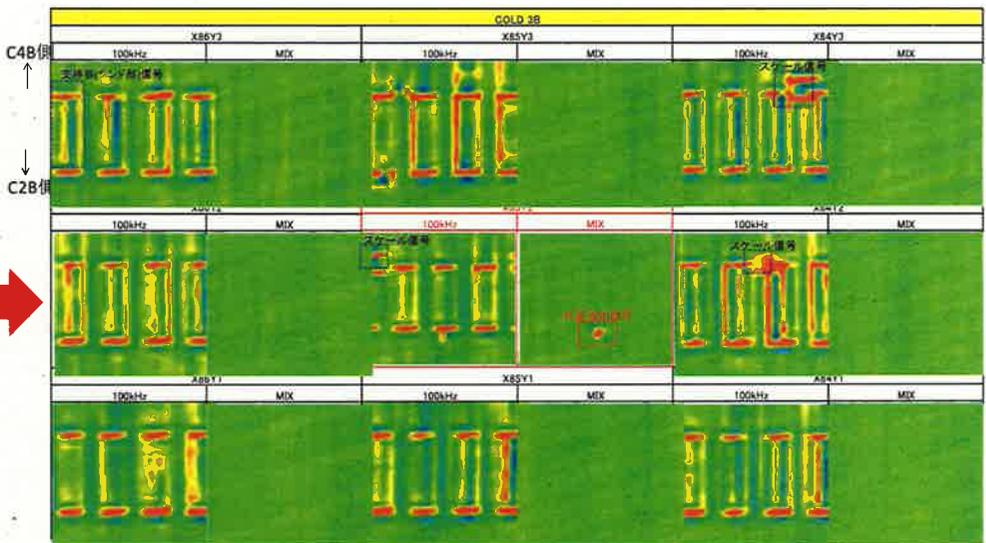


隣接伝熱管の健全性 (A-SG Cold側3B管支持板下面 伝熱管 X85, Y2)



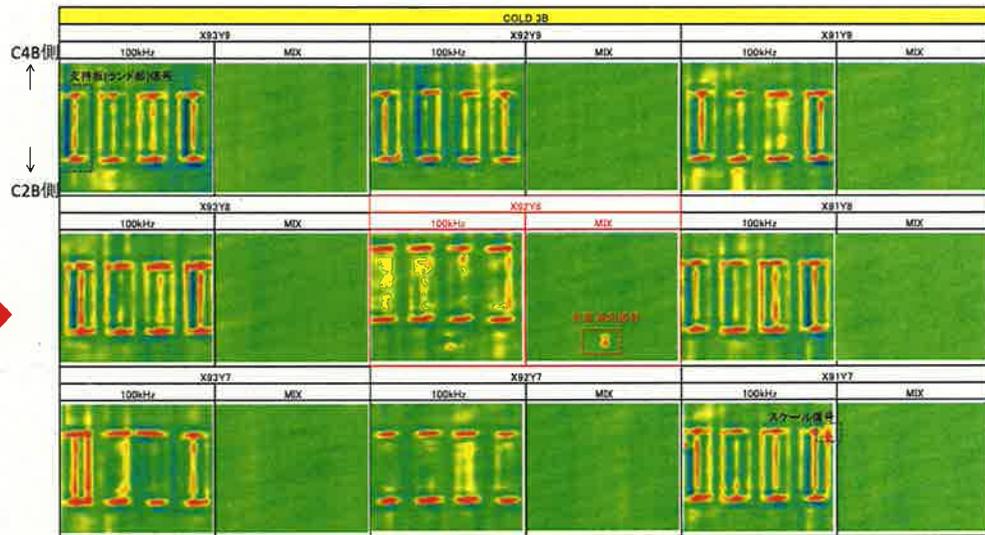
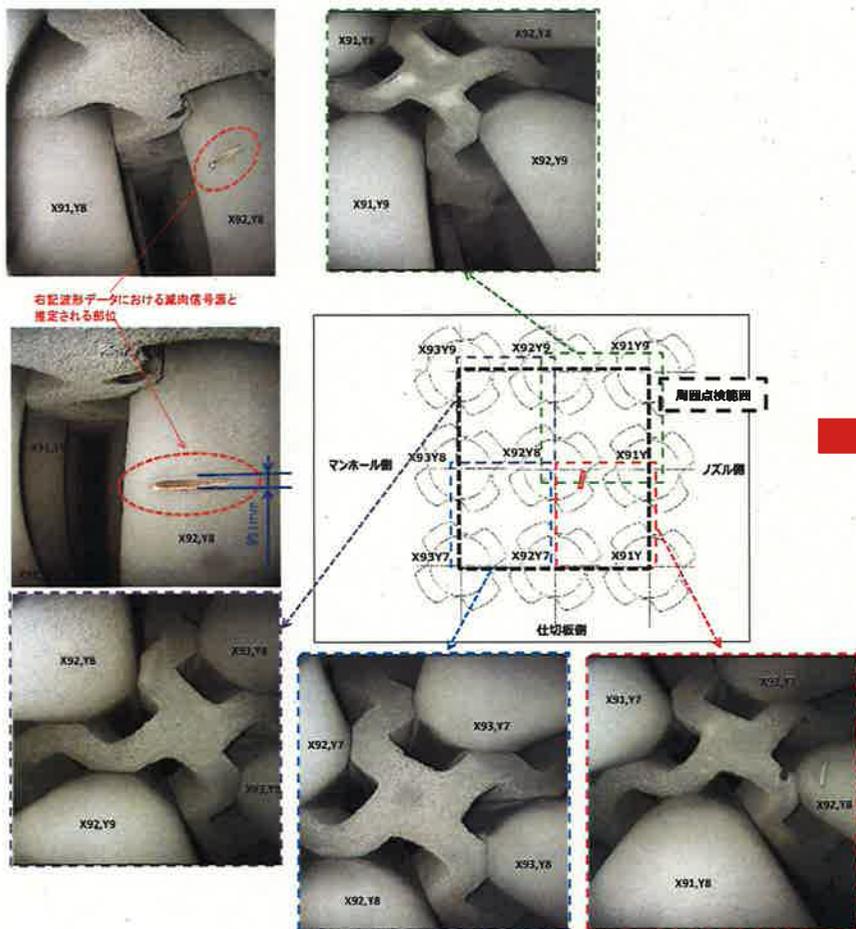
減肉信号は確認されない

上記波形データにおける減肉信号源と推定される部位



波形上の評価  
 ・外面減肉信号は、X85Y2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。

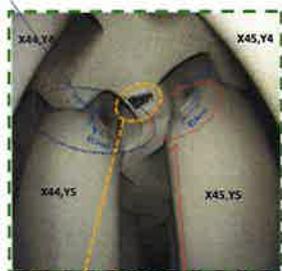
隣接伝熱管の健全性 (B-SG Cold側3B管支持板下面 伝熱管X92, Y8)



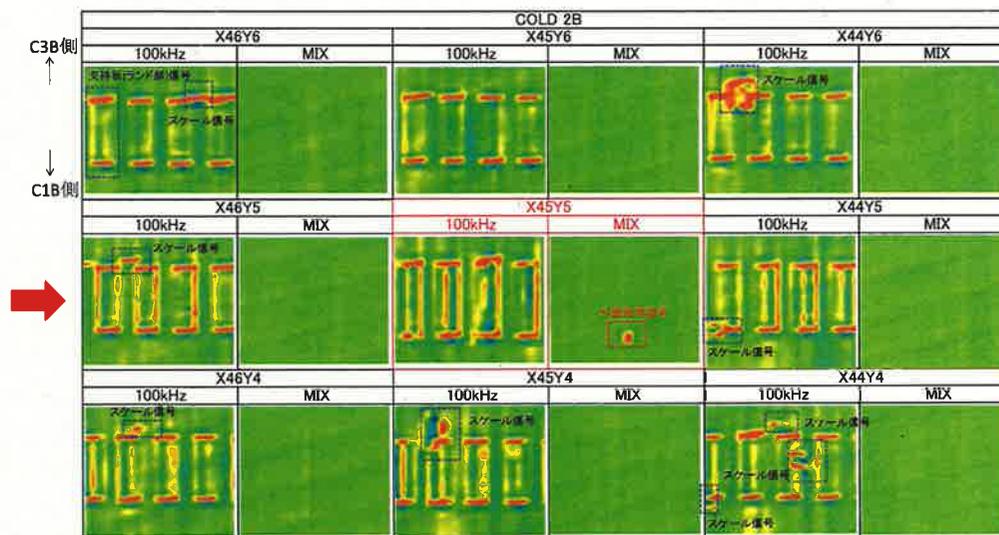
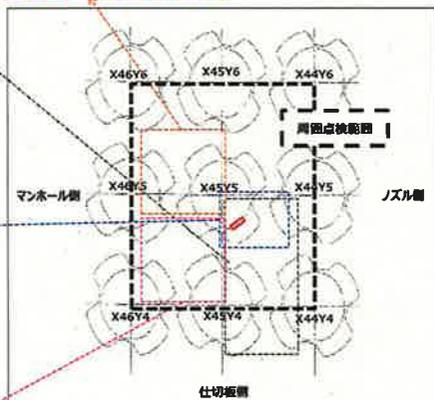
波形上の評価  
 ・外面減肉信号は、X92Y8にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)  
 ・その他のアドレスでは、支持板(ランド部)信号並びに付着物信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。

隣接伝熱管の健全性 (C-SG Cold側2B管支持板下面 伝熱管 X45, Y5)

減肉信号は確認されない



右記波型データにおける減肉信号源と推定される部位



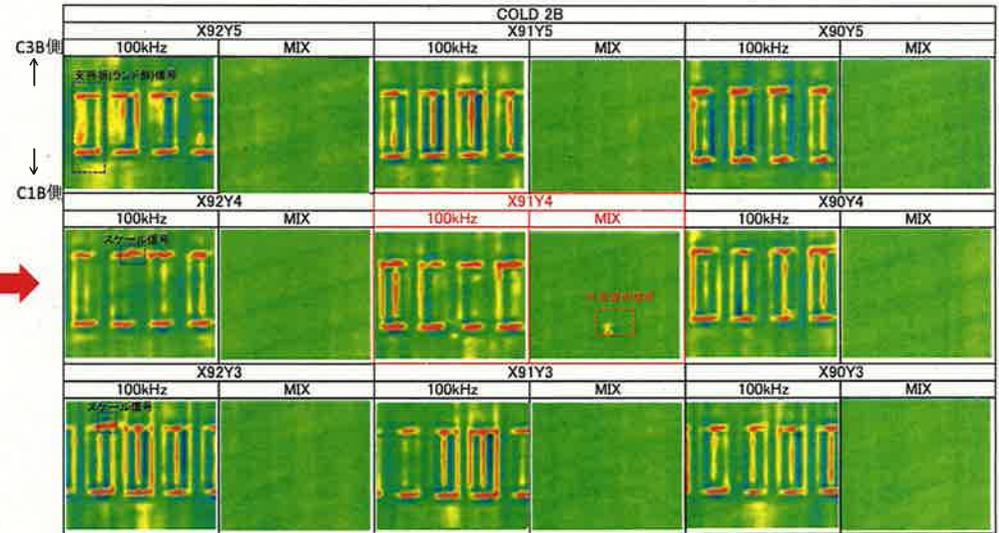
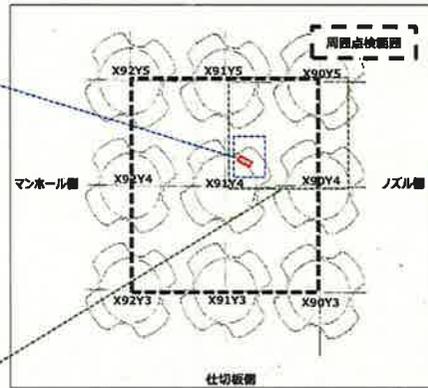
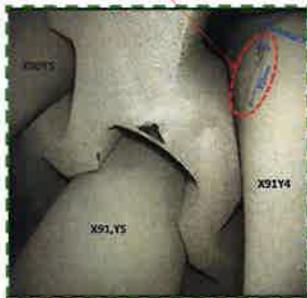
波形上の評価

- ・外面減肉信号は、X45Y5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2B管支持板下面 伝熱管 X91, Y4)



右記波形データにおける減肉信号源と推定される部位



**波形上の評価**

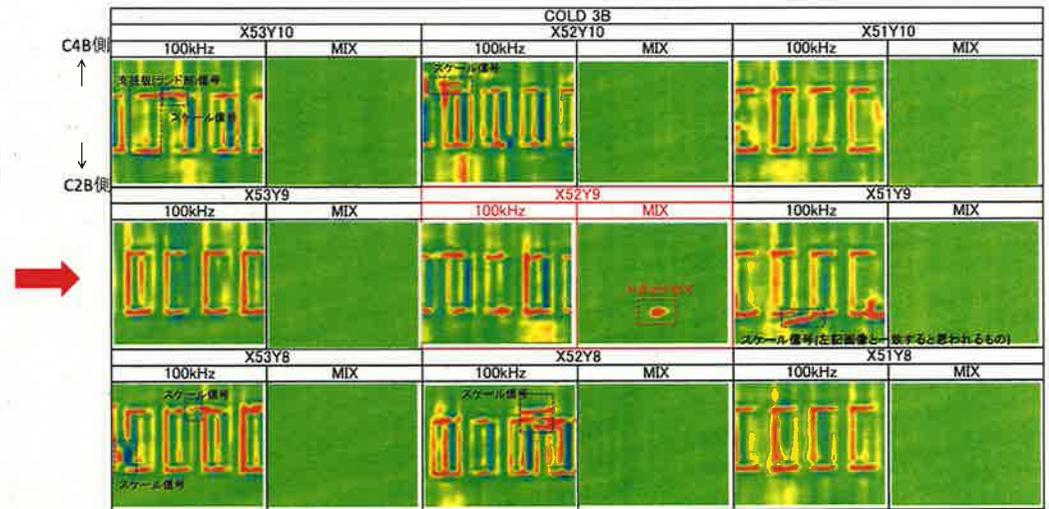
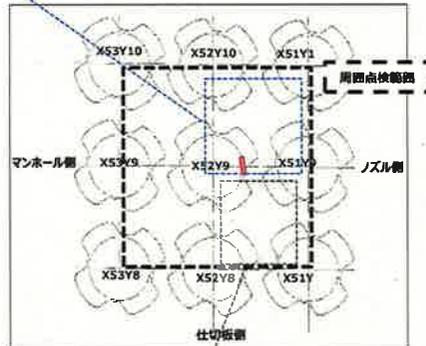
- ・外面減肉信号は、X91Y4にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
- ・その他のアドレスでは、支持板(ランド部)信号並びに付着物信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。

隣接伝熱管の健全性 (C-SG Cold側3B管支持板下面 伝熱管 X52, Y9)

・減肉信号は認められない  
 ・右配管形データにおけるスケール信号源と推定される部位



右配管形データにおける減肉信号源と推定される部位



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JECT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。

## 蒸気発生器点検スケジュール

	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	
	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日
カメラによる SG器内 目視確認	作業準備																																															
	完了															C-伝熱管表面、管支持板上（第1、第2）、管板上点検																																
																完了																																
	作業準備															A-伝熱管表面、管支持板上（第1、第2）、管板上点検																																
																完了																																
回収した 異物の 確認																作業準備																																
																B-伝熱管表面、管支持板上（第1、第2）、管板上点検																																
																完了																																
																SGBD系統（アングル弁、タンク等）点検																																
																完了																																
収集した スラッジの 確認	スラッジコレクタの スラッジ確認																																															
	完了															A-SGスラッジランジンの スラッジ確認																																
																完了																																
N <sub>2</sub> バブリング フィード&ブロー 管板上点検																B-SGスラッジランジンの スラッジ確認																																
																完了																																
																C-SGスラッジランジンの スラッジ確認																																
異物流入に 関する調査																A-SG																																
																完了																																
																B-SG																																
																完了																																
																C-SG																																
																完了																																