

資料 1 - 2

関原発 第 302 号
2020年 9月 7日

原子力規制委員会 殿

大阪市北区中之島3丁目6番16号
関西電力株式会社
執行役社長 森本

高浜発電所3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535号（2020年2月19日）にてご報告しておりますが、別紙のとおり
原因ならびにその対策について取り纏めましたのでご報告します。

枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

発電用原子炉施設故障等報告書

2020年9月7日

関西電力株式会社

件名	高浜発電所3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について										
事象発生の日時	2020年2月18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3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 (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3号機(加圧水型軽水炉、定格電気出力87万kW、定格熱出力266万kW)は、2020年1月6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^{*1}全数について、健全性を確認するため渦流探傷試験^{*2}(以下、「ECT」という。)を実施した。</p> <p>その結果、B-SGの伝熱管1本およびC-SGの伝熱管1本について、管支持板^{*3}付近に、外面からの減肉とみられる有意な信号指示^{*4}が認められたことから、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則第18条並びに第56条に適合しておらず、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条に該当することを、2020年2月18日13時00分に判断した。</p> <p>^{*1} SGの中で1次冷却材(1次側)と給水(2次側)の熱交換を行う逆U字形の管群。1次冷却材は入口管板部(高温側)から入り、給水と熱交換後に出口管板部(低温側)へ流れる。</p> <p>^{*2} 高周波電流を流したコイルを伝熱管に挿入することで伝熱管に渦電流を発生させ、伝熱管の欠陥により生じる渦電流の変化を電気信号として取り出すことで欠陥を検出する試験(ECT; Eddy Current Test)。全周に対して渦電流の発生と検出を別々のコイルを用いた24組のコイルで伝熱管の欠陥による渦電流の変化を信号として検出する。</p> <p>^{*3} 伝熱管を支持する部品。</p> <p>^{*4} ノイズレベル(雑音信号レベル)を超える信号であって、SG管支持板等の外部構造物あるいは伝熱管の形状等に起因する信号(疑似信号)ではない信号指示。</p> <p>2. ECT結果</p> <p>(1) 検査期間</p> <p>2020年 2月 2日～2020年 2月18日(定期事業者検査終了日)</p> <p>探傷検査・データ整理期間 2020年 2月 2日～2020年 2月15日</p> <p>解析・評価検査期間 2020年 2月16日～2020年 2月18日</p> <p>(2) 検査範囲</p> <p>SGの施栓^{*5}済みの伝熱管を除く、全数の伝熱管についてECTを実施した。</p> <p>(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>3,272</td> <td>3,248</td> <td>3,262</td> <td>9,782</td> </tr> </tbody> </table> <p>^{*5} 伝熱管の1次側出入口部分に機械式栓を用いて栓をし、供用外とすること。</p> <p>(3) 検査結果</p> <p>ECTデータを評価した結果^{*6}、2本の伝熱管に有意な信号指示を確認した。リサーチ表示^{*7}(信号表示)で分析した結果、いずれも伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。</p> <p>また、有意な信号指示が認められた箇所は、色調図表示^{*8}で分析した結果、管支持板部付近であった。</p> <p>なお、高浜発電所3号機前回(第23回)の定期検査におけるECTデータを確認した結果、今回有意な信号指示を確認した伝熱管の外面に、有意な信号指示が認められなかったことを確認した。</p>	SG	A	B	C	合計	検査対象本数	3,272	3,248	3,262	9,782
SG	A	B	C	合計							
検査対象本数	3,272	3,248	3,262	9,782							

(単位：本)

SG	A	B	C	合計
指示管本数	0	1	1	2

B-SG

第三管支持板 X54, Y4：減肉率 約32%

C-SG (有意な信号指示2箇所*9)

第三管支持板 X38, Y3：減肉率 約28%、約56%

*6 一般社団法人日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格 (2008年改訂版) JSME S NA1-2008 SG伝熱管に対する判定基準に従う。

*7 渦電流変化の電気信号を図で表したものを (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。

*9 小型カメラによる目視点検の結果、同一伝熱管上に2箇所のきずを確認。

事象の原因

1. 減肉伝熱管2次側からの確認結果

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

(1) 伝熱管外観観察

小型カメラを用いて、減肉信号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を確認した。

a. B-SG

第三管支持板 (減肉率 約32%) :

周方向約4.0mm、軸方向約1.0mm (X54, Y4)

b. C-SG

第三管支持板 (減肉率 約28%) :

周方向約1.0mm、軸方向1.0mm以下 (X38, Y3)

第三管支持板 (減肉率 約56%) :

周方向約4.0mm、軸方向1.0mm以下 (X38, Y3)

(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により、ECTにより得られる減肉信号指示による位置およびサイズが当該部の外観観察結果と相違ないことを確認した。

2. 原因調査

有意な信号指示があった伝熱管の外表面減肉の原因調査を行った。

(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. デンティンク*10

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られる。

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

b. 粒界腐食割れ (IGA) *11

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3号機のようなアンモニアとヒドラジンによるAVT (All Volatile Treatment) *12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られる。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ものと考えられ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られる。

*11 金属の結晶粒の境目 (粒界) に沿って進展する腐食。

*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. ピッチング*13

過去にSG 2次側環境において海水リーク等による塩化物環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、ピッチングが発生した実績があるが、高浜発電所3号機のような塩素濃度が十分低く管理され、かつ、アンモニアとヒドラジンによるAVTを実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考えられる。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ものと考えられる減肉であることから、ピッチングの可能性はないと考えられる。

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

d. リン酸減肉

過去の2次系水処理において、リン酸を使用していたプラントでリン酸による減肉が発生した実績があるが、高浜発電所3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。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ものと考えられ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られる。

e. 摩耗減肉

(a) 管支持板との接触

ア. 管支持板ベイ部*14の信号

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

*14 管支持板に加工されている四ツ葉管穴のうち凹面部。

イ. 管支持板ランド部*15の信号

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

*15 管支持板に加工されている四ツ葉管穴のうち凸面部。

f. SG器内発生物、SG器外流入物との接触

(a) SG器内の点検

ア. 目視点検

A、B、C-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三管支持板の下面の減肉指示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確認を実施した。

(ア) A-SG器内の異物確認

A-SGの流量分配板上(X54-55, Y44)に重さ約0.2g、長さ約24mm、幅約5mm、厚さ約0.2mmの金属片を確認した。

(イ) B-SG器内の異物確認

B-SG器内には剥離したスケール(以下、スラッジという。)以外に異物は確認できなかった。

(ウ) C-SG器内の異物確認

C-SGの流量分配板上(X2-3, Y5-6)に重さ約0.3g、長さ約33mm、幅約5mm、厚さ約0.2mmの金属片を確認した。

金属片を確認した位置は、減肉を確認した位置(第三管支持板の下面(X38, Y3))から約3.5m下方、約1.2m半径方向に離れた場所であった。

その後、点検範囲を拡大し、第三管支持板以上の上面の全ての範囲についても小型カメラによる目視点検を実施した結果、A、B、C-SGについてスラッジ以外に異物は確認できなかった。

(エ) スラッジランシング*¹⁶等による調査

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

更にSG器内に水を張り、底部から窒素を噴射させたのち、水を抜くことによる異物の有無の確認（以下、「N₂バブリング」という。）を行った。その結果、スラッジは回収できたが、スラッジ以外に異物は確認できなかった。また、N₂バブリング実施後、SG器内に異物が残留していないことを小型カメラにより確認した結果、スラッジ以外に異物は確認できなかった。

なお、SG上部構造物については、構造上異物が湿分分離器を通過することはないため、湿分分離器よりも下部に設置されているデッキプレート上面について念のため目視点検を行った結果、異物がないことを確認した。

*¹⁶ 管板部に堆積したスラッジ（酸化鉄(主にマグネタイト))を水圧により除去する方法。

イ. 金属片分析

(ア) 金属片の材質

A、C-SGで確認した金属片について、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。

(イ) 金属片の類似形状

A、C-SGで確認した金属片と同じ材質で、類似する形状の資材等を確認したところ、流体が漏れないよう弁等のシールに用いられる幅約5mmの渦巻きガスケットの一部であるフープ材（以下、「金属片」という。）であると推定した。

(ウ) 金属片の表面観察

A、C-SGで確認した金属片の表面を走査型電子顕微鏡（以下、「SEM」という。）により観察した結果、部分的な筋状の擦れ跡、打痕、摩耗等を確認した。

(エ) 金属片の切断面観察

A、C-SGで確認した金属片と同様のフープ材を様々な方法で切断した試験材の切断面と金属片の切断面をSEMにより観察、比較した結果、金属片はせん断破壊や低サイクル疲労などの過大な荷重が負荷されて破断したものではなく、グラインダー等の砥石により切断されたものである可能性が高いことを確認した。

(オ) 金属片への伝熱管成分付着確認

C-SGの金属片の伝熱管と接触したと推定される角部に伝熱管の主成分であるニッケル（以下、「Ni」という。）の付着があるかどうかを調査するため、角部を切断して断面の化学分析を実施した結果、どの切断面においても、表層には伝熱管の母材のNi成分は検出されなかった。

なお、過去の美浜発電所3号機の異物によるSG伝熱管外面の摩耗減肉事象においても、原因となった異物の表面の付着物分析を実施した結果、スラッジの主成分であるマグネタイト以外は認められなかった。

(b) SG内部品の脱落調査

今回の減肉を生じさせた可能性のある異物の想定形状（薄片）*¹⁷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を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、内部品が脱落した可能性はないと考えられる。

なお、想定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が考えられることから、念のため、当該部のカメラによる目視点検を実施した。その結果、給水内管裏当金の溶接部に損傷は確認されなかった。

A、C-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。

*17 「3. 減肉メカニズム (1) 異物形状および伝熱管との接触状態の推定」に記載している想定形状。

(c) スラッジによる減肉の可能性

ア. スケール性状

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

伝熱管表面のスケールはマグネタイト粒子の付着がベースとなって形成されており、マグネタイト単体としては、伝熱管よりも硬いものの、スケール内には空隙が存在するため、スケールは脆い性質を有している。

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ものの、スラッジによる伝熱管摩耗試験を実施した。試験条件については、スラッジの伝熱管への押付力を実機相当の1Nとし、摺動速度や接触角度については保守的にスラッジが摩滅しにくくなるよう調整した。

その結果、スラッジに対する伝熱管の摩耗体積比が最も大きいものでも、スラッジの摩耗体積が約0.014mm³に対し、伝熱管の摩耗体積は約0.004mm³であり、スラッジの方が伝熱管よりも十分早く摩滅していくことから、スラッジによって判定基準を超える減肉が発生することは考え難い。

以上のことから、スラッジにより今回の摩耗減肉が生じた可能性は低いと考えられる。

ウ. 海外事例調査

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

(d) SG器外 (SGブローダウン系統) の目視点検

ア. 系外ブローライン (海水放出ライン) の目視点検

(ア) 仮設ストレーナの点検結果

高浜発電所4号機前回 (第22回) 定期検査におけるSG伝熱管損傷事象の調査結果を踏まえ、高浜発電所3号機では今回 (第24回) の定期検査開始後のSG水抜き前に、系外ブローラインに仮設ストレーナを新たに設置した。

SG水抜き後、仮設ストレーナの開放点検を実施したところ、SG2次側のスラッジランシング等で回収されるスラッジと同じようなスラッジを確認したが、それ以外の異物は確認できなかった。

(イ) SGブローダウンタンク内の点検結果

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

(ウ) 水位制御弁等の点検結果

水位制御弁等については、異物が滞留しやすい構造となっていることから、これらについて開放点検を実施した結果、異物は確認できなかった。

(エ) 配管の点検結果

開口部より小型カメラを用いて異物が通過し得るSGブローダウン系統配管内部の点検を実施した結果、異物は確認できなかった。なお、SGブローダウンサンプルラインのうち3/8インチ (外径9.53mm、内径6.23mm) の配管については、空気ポンプからホースにより圧縮空気を配管に流し込んでフラッシングすることによって点検を実施した結果、異物は確認できなかった。

イ. 復水器回収ラインの目視点検

復水器回収ラインは定期検査開始直後の数日間には通水を継続する運用であることから、本ラインの点検範囲については、高浜発電所4号機前回（第22回）定期検査時のSG伝熱管損傷事象の調査結果と同様に、本ラインに流れてくる異物は主流路にある流量調整弁で滞留すると想定の上、ここまでの範囲を点検範囲としていた。

一方、ア. のとおり系外ブローラインで異物を確認できなかったこと、ならびに回収した金属片およびその他の想定異物（11. 参照）の形状から、本ラインの主流路にある流量調整弁に加え、流量調整弁をバイパスするオリフィスのライン（分岐ライン）に異物が流れ、その後復水器に流入する可能性も否定できないことから、これらのラインも含め範囲を拡大し点検を実施した。

(ア) 流量調整弁およびオリフィスの点検結果

異物が滞留しやすい構造となっている流量調整弁およびオリフィスについて開放点検を実施した結果、異物は確認できなかった。

(イ) 復水器ホットウェルの点検結果

SG内に残留した金属片またはその他の異物は、プラント停止後にSG器内の上昇流が緩和された際、落下して管板まで到達した後、SGブローダウン系統復水器回収ラインを通じて復水器ホットウェルに流入する可能性があることから、ホットウェル内部の目視点検を実施した結果、異物は確認できなかった。

なお、異物がホットウェル部に流入した場合、定期検査時にタービンサンプへ流出する可能性は否定できない。

(ウ) 復水ポンプ入口ストレーナの点検結果

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

(エ) 配管の点検結果

開口部より小型カメラを用いて配管内部の点検等を実施した結果、異物は確認できなかった。

(e) まとめ

A、B、C-SG器内のカメラによる目視点検、スラッジランシング、N₂バブリングおよびSGブローダウン系統の目視点検の結果、以下の内容を確認した。

ア. SG器内の目視点検を実施した結果、A、C-SGの流量分配板上に、それぞれ1つずつ金属片を確認したことから、SEMによる表面観察を行った結果、2つの金属片には複数箇所筋状の擦れ跡や摩耗、打痕を確認した。また、成分分析の結果、2つの金属片はオーステナイト系ステンレス鋼（SUS304相当）であった。更に、形状の類似性から、金属片は渦巻きガasketの一部であると推定した。

イ. 上記金属片以外については、目視点検およびスラッジランシング、並びにN₂バブリングを実施した結果、スラッジ以外に異物は確認できなかった。

ウ. SGブローダウン系統の仮設ストレーナ、タンク、水位制御弁および異物が滞留し得る配管等について目視点検等を実施した結果、異物は確認できなかった。

エ. A、C-SGで確認した金属片に部分的な筋状の擦れ跡、打痕、摩耗等を確認したこと、また、一部に板厚の減少が認められたことから、有意な信号指示を確認したC-SGについては、この金属片が伝熱管にきずを付けた可能性は否定できない。

オ. 有意な信号指示を確認したB-SGでは異物が確認されていないことから、SGブローダウン系統へ流出した異物が復水器回収ラインを通じて復水器ホットウェルに流入し、タービンサンプへ異物が流出した可能性は否定できない。

g. 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。

h. エロージョン*18

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。

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。

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

i. 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られる。

3. 減肉メカニズム

C-SGで発見した金属片またはその他の異物が今回のSG伝熱管損傷事象を発生させた可能性を検証するため、以下の試験等を実施した。

(1) 異物形状および伝熱管との接触状態の推定

a. C-SG

(a) 金属片単体で2箇所の減肉を発生させたと想定した場合

金属片単体が2箇所の減肉を発生させるには、1箇所に金属片の角部が接触した状態で減肉が進展し、その後、減肉の進展とともに接触した状態が緩和され、2次側の流体力で安定した姿勢に変化したことによりもう1箇所に接触し、計2箇所の減肉を発生させたものと推定した。

(b) 上記(a)以外を想定した場合

2箇所の減肉を発生させた異物の組合せには、金属片と他の異物の組合せ、金属片以外の異物の組合せ、または金属片以外の異物単体が考えられ、金属片以外で想定される異物については、次の形状を推定した。

想定異物1：長さ約25mm、幅約4mm、厚さ1mm以下

想定異物2：長さ約16mm、幅約6mm、厚さ1mm以下

想定異物3：長さ約15mm、幅約7mm、厚さ1mm以下

b. B-SG

B-SGで減肉を発生させた異物については、次の形状を推定した。

想定異物4：長さ約24mm、幅約7mm、厚さ1mm以下

想定異物5：長さ約24mm、幅約5mm、厚さ約0.2mm*19

*19 C-SGで金属片が認められたことを踏まえ、渦巻ガスケットの小片を想定。

(2) SG2次側器内挙動の推定および接触状態の再現性確認

熱流動解析によりSG2次側器内で管支持板下面に到達するまでの異物挙動を推定するとともに、SG2次側の流況モックアップ試験により、推定した異物の接触状態が実機二相流相当条件においても再現するか確認を行った。

a. SG器内流入後の異物挙動

異物は給水リングJチューブから管群外筒を経て管板上面中央部に到達し、その後は、運転中のSG2次側器内の流況下では流体抗力が異物の落下力を上回ることから、管群内の上昇流に乗って流量分配板および各管支持板フローロット部を通過し、減肉箇所へ到達したものと考えられる。第一管支持板より上方では、上昇流に加え高温側から低温側への水平方向流があることから、第一管支持板および第二管支持板フローロット部を通過したものが第三管支持板の低温側下面に至ったものと推定される。

b. SG 2次側の流況モックアップ試験

SG 2次側の流況を再現するモックアップ試験装置により、上記(1)で推定した金属片等の異物の接触状態が実機二相流相当の条件下において再現できることを確認した。

(3) 摩耗形態の推定

金属片等の異物との接触で伝熱管が摩耗する場合、金属片等の異物の振動により摩耗するケースと、伝熱管の振動により摩耗するケースが考えられるため、次の通り各ケースで想定されるワークレート^{*20}の比較を行った。

^{*20} 摩耗体積を評価する一般式で用いられる摩耗を生じさせる力で、押付力と摺動速度の積で表現される。

a. 金属片等の異物振動のケース

本ケースでは金属片等の異物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、金属片等の異物では流体力を受ける面積が小さいため、有意な減肉が生じるワークレートは発生しないことを確認した。

b. 伝熱管振動のケース

本ケースでは、金属片等の異物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^{*21}により伝熱管自身に減肉が発生したことが想定される。管支持板部の伝熱管の振幅は、伝熱管と管支持板BEC穴ランド部の隙間に制限されるため、隙間が確保され振幅が大きくなる伝熱管において金属片との接触により減肉が生じるものと推定される。本想定に基づきワークレートを試算すると、金属片振動のケースに比べて十分大きなワークレートが得られることを確認した。

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

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

(4) 減肉形状の再現性確認試験

上記(1)、(2)および(3)で推定した金属片等の異物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、減肉試験を行った。また、減肉試験で得られた減肉形状と同等の人工欠陥を与えた伝熱管のモックアップ試験体のECT信号を取得し、実機のECT信号と比較した。

a. 減肉試験

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、模擬異物の角部を接触させることにより、減肉を発生させた。

b. ECTモックアップ試験

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

(5) ワークレートによる摩耗体積評価

上記(1)、(2)および(3)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金属片等の異物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、(4)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、金属片等の異物との接触により1サイクルで発生した可能性があることを確認した。

以上の試験等による検証結果から、C-SGで回収した金属片またはその他の想定異物は、SG器内へ持ち込まれ当該の管支持板下面まで到達すれば、伝熱管との接触により今回の外面減肉を発生させた可能性があると考えられる。

4. SGへの異物流入に関する調査

(1) 異物により減肉した国内外事例調査

国内外で報告されている異物による外面減肉事象を調査した結果、国内では4件、海外では多数の事例があることを確認した。

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

(2) 異物流入経路

SG伝熱管外面にきずを付けた異物がSG器内へ移動する可能性がある流路の範囲を調査した結果、主給水ブースタポンプ入口ストレーナ以降の主給水系統および脱気器タンク以降のSG水張系統は、SGまでの間にストレーナ等がないため、異物が流入する可能性があると考えられる。

(3) SG器外の2次系機器内部構成品の混入

2次系機器の内部構成部品が異物となってSGへ流入する可能性について検討した結果、(2)の系統範囲にある機器の内部構成品のうち、3.(1)で想定した異物の類似形状品として、消耗品である渦巻きガスケットが抽出された。

(4) 渦巻きガスケットの混入

a. 運転中における渦巻きガスケットの欠損

上記(3)にて渦巻きガスケットが抽出されたことおよび渦巻きガスケットの一部と考えられる金属片がSGに流入した経緯の特定のため、SGに異物が流入する可能性がある範囲において、渦巻きガスケットを有する機器等の調査を実施した。

SGに渦巻きガスケットが(2)の異物流入経路において混入する可能性がある範囲では、約3mmと約5mmの仕様の渦巻きガスケットが用いられている。この中で、部品同士が噛み合うインロータイプでは、運転中に渦巻きガスケットが破損しても渦巻きガスケットが系統内に流出しない構造となっており、SGへ流入する可能性のある約3mmの渦巻きガスケットは全てインロータイプである。よって、今回の調査は、約5mmの渦巻きガスケットを使用している機器のうち、構造上流出の可能性のある機器(20箇所)を対象とした。

b. 渦巻きガスケットの健全性確認

高浜発電所3号機今回(第24回)定期検査にて、点検周期に基づき機器を開放点検していた2箇所に加え、18箇所を追加で開放点検した結果、全ての機器等の渦巻きガスケットが健全であることを確認した。このことから、運転中に渦巻きガスケットが破損し、SGに流入した可能性はない。

また、構造上流出の可能性のある機器における初回定期検査以降の開放点検記録を確認した結果、点検時に渦巻きガスケットが破損していた記録はなかった。

c. 作業時における渦巻きガスケットの混入

(a) 渦巻きガスケットの管理状況

渦巻きガスケットを有する機器等の開放点検記録を確認した結果、高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査時に開放点検を実施した機器等については、最終異物確認を実施し、異物管理がなされていることを確認した。なお、高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査時のSG伝熱管損傷事象の自主的な対策として、主給水系統の目視確認が不可能となる範囲については小型カメラを用いた最終異物確認を実施している。ただし、伝熱管にきずを付けた想定異物の形状では、SG水張系統からの異物が流入した可能性はないとしており、当該系統における小型カメラを用いた最終異物確認は実施していない。

(b) 周辺作業の実施状況

定期検査関連作業に従事する作業員に対して、渦巻きガスケット取り外し作業の状況を確認したところ、スクレイパー(ヘラ)やニッパーを用いて取り外す場合はあるが、グラインダー等を用いてガスケットを切断することはないことを確認した。

ただし、過去の定期検査や、構外等を含めた全ての作業において、グラインダー等を用いたガスケットの切断作業が実施されていないことの確認は不可能であった。

ことから、過去の点検時に混入した可能性や、構外等から系統周辺に持ち込まれた可能性は否定できない。

(5) 金属片以外の異物混入の可能性

上記3. での検証結果のとおり、渦巻きガスケット以外の異物がSGに混入し、伝熱管にきずを付けた可能性は否定できないため、以下の調査を実施した。

a. 異物として推定される資材等

外部からの異物混入は、(6)で述べる開放点検等を実施した作業のうち、最終異物確認時に目視確認が困難となる範囲が存在した作業において、異物が生じたものと考えられる。このため、発電所の作業において、想定する異物と類似する異物が発生する可能性の有無を確認したところ、以下のような可能性が考えられる。

保温材外装板施工時や配管識別表示等を金属製のバンドで配管等に固定する際に、外装板の大きさやバンドの長さを調整しているが、その時に発生した切れ端や切削くずが残存する可能性は否定できない。

また、開放点検等を実施した周辺の作業状況を確認したところ、開口部のある期間中に、上記のような切れ端や切削くずが混入する可能性がある作業が(6)で述べる3件で実施されていることが分かった。

一方、開放点検等を実施した当該作業や、それ以外の作業によって発生した異物が、作業服や靴の裏に付着して開放点検等の作業場所周辺に持ち込まれた可能性が考えられることから、SGに流入する可能性のある系統で実施している全ての開放点検等の対象機器351箇所のいずれかの作業から異物が混入した可能性は否定できない。

(6) 異物混入の可能性のある作業の調査

SGに異物が流入する範囲において、機器の開放点検等を実施した箇所は異物混入の可能性が否定できないことから、すべての箇所を抽出し、開口部養生状況、最終異物確認状況等の異物管理状況について確認した。

その結果、すべての作業において開口部養生、連続監視等は適切に実施されていた。また、高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査時におけるSG伝熱管損傷事象の自主対策として、開放点検を実施した機器等については、目視確認が不可能となる範囲に対し、小型カメラを用いて最終異物確認を実施していた。しかし、SG水張系統については、目視確認が不可能となる範囲の最終異物確認を実施していなかったことから、SG水張系統における開放点検等の作業実績を確認したところ、脱気器タンクでの作業において、最終異物確認時に目視確認が困難な範囲が存在するため、異物が混入する可能性が完全には否定できないことが分かった。

また、高浜発電所3号機前々回(第22回)定期検査以前には、目視による最終異物確認は実施していたものの、高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査におけるSG伝熱管損傷事象を踏まえた対策が実施されていなかったことから、開放点検を実施した機器等から系統内部に異物が混入して、この異物がSG器内等に留まり、高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査以降にSG伝熱管をきず付けた可能性が完全には否定できないことが分かった。これらの異物が混入する可能性のある作業としては、最終異物確認時点で、目視確認が困難な範囲となる垂直管のある弁分解点検作業、ストレーナ開放点検作業および脱気器タンク開放点検作業が考えられる。

(7) 異物混入の可能性のある時期

SG2次側に異物が混入する可能性のある作業は、定期検査中の作業が考えられる。

高浜発電所3号機前々回(第22回)定期検査以前は、高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査におけるSG伝熱管損傷事象を踏まえた対策が実施されていなかったが、高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査時は、目視確認が不可能となる範囲について、小型カメラを用いた最終異物確認を実施している。

ただし、高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査におけるSG伝熱管損傷事象では、想定異物の形状から、SG水張系統からの異物の持ち込みの可能性は想定していなかったため、当該系統の目視確認が困難な範囲については小型カメラを用いた最終異物確認は実施していなかった。

以上のことから、異物は高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査以前にSG水張系統から混入したか、高浜発電所3号機前々回(第22回)定期検査以前に主給水系統から混入したものと考えられる。

5. 伝熱管の健全性

(1) 減肉伝熱管の健全性

減肉した伝熱管の強度、耐震性について以下のように評価した。

a. 強度

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

得られた伝熱管の破断圧力は、通常運転時および事故時の最大内外差圧に比べ、十分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。なお、「原子力規制検査における個別事項の安全重要度評価プロセスに関するガイド」に基づき評価した結果、十分な構造健全性が確保されていることを確認した。

b. 耐震性

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

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

(2) 隣接伝熱管の健全性

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

6. A-SGで確認した金属片について

A-SGで確認した金属片が、高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査できずを確認した伝熱管を損傷させた可能性について評価した。

その結果、A-SGの金属片が高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査で認められたきずの位置(BEC穴下面よりも約5mm上側)で伝熱管と接触するには、金属片が管支持板BEC穴の縁で支持される姿勢をとる必要があるが、当該BEC穴周辺に接触痕は認められていないことから、当該金属片が高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査時のSG伝熱管損傷の原因である可能性は低いと考える。

7. 推定原因

- 高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査以前にSG水張系統から金属片またはその他の異物が混入し、最終異物確認時に目視確認が困難となる範囲に残留した。その後、SGに到達し、高浜発電所3号機前回運転サイクル中に第三管支持板下面で伝熱管と接触したと推定した。
- 高浜発電所3号機前々回(第22回)定期検査以前に主給水系統から金属片またはその他の異物が混入し、最終異物確認時に目視確認が困難となる範囲に残留した。その後SGに到達し、高浜発電所3号機前回運転サイクル中に第三管支持板下面で伝熱管と接触したと推定した。
- 伝熱管と接触し残留した金属片またはその他の異物は、運転中に生じる伝熱管の振動によって、伝熱管外表面を摩耗させ、伝熱管外面にきずを付けた。
- C-SG伝熱管にきずを付けるメカニズムは、C-SGで確認された金属片またはその他の異物のいずれか単体が運転中に2箇所のみきずを付ける場合と、金属片と他の異物の組合せ等の2つの物体がそれぞれのきずを確認した箇所に固定されてきずを付けた場合があると推定されるが、いずれの場合も、SG器内へ持ち込まれ当該の管支持板下面まで到達すれば、伝熱管との接触によりきずを付ける可能性があるとして推定した。
- B-SG伝熱管にきずを付けるメカニズムは、想定した異物がSG器内へ持ち込まれ、きずを確認した伝熱管の第三管支持板下面まで到達すれば、伝熱管との接触によりきずを付ける可能性があるとして推定した。

保護装置の種類
及び動作状況

該当せず

放射能の影響	なし
被害者	なし
他に及ぼした障害	なし
復旧の日時	2020年12月下旬（発電機並列予定）
再発防止対策	<p>1. 減肉伝熱管の施栓 外周減肉が認められたSG伝熱管について、高温側および低温側のSG管板部で施栓し、供用外とする。</p> <p>2. SG器内への異物流入対策 (1) 高浜発電所3号機前回（23回）定期検査で実施した以下の異物管理を継続実施する。 a. 作業員の立ち入る作業前に作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。 b. 垂直配管に取り付けられている弁点検時は、弁箱内部に使用する機材に異物の付着がないことを確実に確認する。 また、最終異物確認時において直接目視にて異物の有無の確認ができない範囲については、小型カメラによる目視点検を行う。</p> <p>(2) 高浜発電所4号機前回（22回）定期検査で実施した、SGへの異物流入の可能性のある機器の点検における異物混入防止対策の徹底を図る。 a. 作業員が機器内部に立ち入って作業を行う場合は、機器内部へ立ち入る直前に器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。 b. 開口部に周辺作業と隔離したエリアを設けることで、異物の混入防止を図る。 c. ウェスを使用する場合は、新しいウェスに限るものとし、新ウェスは再使用ウェスと区別して管理する。 d. 作業中に発生した保温材の切れ端等の清掃・片づけについては一作業一片づけを徹底するとともに、作業服、靴に異物が付着していないか確認することにより、異物の拡散を防止する。 e. 当該作業における異物混入防止対策が作業手順書通りに実施されていることを確認するため、現場パトロールの実施等による管理強化を図る。</p> <p>(3) その他の対策 a. SG水張系統からの異物混入対策として、SG水張ポンプ入口にストレーナを設置する。 b. 今回、渦巻きガスケットの小片をSG器内で発見したことを踏まえ、機器開放時における渦巻きガスケットの破損状況の不具合・懸案事項の確認や異物管理・施工管理を徹底する観点から記録を取得すべきであるため、今後機器を開放した時点で渦巻きガスケットに損傷を確認した場合は、工事報告書に必要事項を記載することを調達要求文書に定める。</p> <p>なお、今回SG二次側に異物が混入していたことを踏まえ、SG器内に水を張り、N₂バブリングおよび水抜きを行った結果、スラッジが回収されたものの、異物は回収されなかった。 また、起動前に実施している2次系クリーンアップにおいて、通常よりも通水量の増加および時間の延長により、可能な限り異物除去効果を向上させる。</p>

高浜発電所3号機
蒸気発生器伝熱管の損傷について

2020年9月7日

関西電力株式会社

1. 件名

高浜発電所3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について

2. 事象発生日

2020年2月18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3号機（加圧水型軽水炉、定格電気出力87万kW、定格熱出力266万kW）は、2020年1月6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^{*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、B-SGの伝熱管1本およびC-SGの伝熱管1本について、管支持板^{*3}部付近に、外面からの減肉とみられる有意な信号指示^{*4}が認められたことから、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則第18条並びに第56条に適合しておらず、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条に該当することを、2020年2月18日13時00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

2020年 2月 2日～2020年 2月18日（定期事業者検査終了日）

探傷検査・データ整理期間 2020年2月 2日～2020年2月15日

解析・評価検査期間 2020年2月16日～2020年2月18日

(2) 検査範囲

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

(単位：本)

SG	A	B	C	合計
検査対象本数	3,272	3,248	3,262	9,782

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

(3) 検査結果

(添付資料-2、3)

ECTデータを評価した結果^{*6}、2本の伝熱管に有意な信号指示を確認した。リサーチ表示^{*7} (信号表示) で分析した結果、いずれも伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

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

なお、高浜発電所3号機前回(第23回)の定期検査におけるECTデータを評価した結果、今回有意な信号指示を確認した伝熱管の外面に、有意な信号指示が認められなかったことを確認した。

(単位：本)

SG	A	B	C	合計
指示管本数	0	1	1	2

B-SG

第三管支持板 X54, Y4 : 減肉率 約32%

C-SG (有意な信号指示2箇所^{*9})

第三管支持板 X38, Y3 : 減肉率 約28%、約56%

^{*6} 一般社団法人日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格(2008年改訂版) JSME S NA1-2008 SG伝熱管に対する判定基準に従う。

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

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

^{*9} 小型カメラによる目視点検の結果、同一伝熱管上に2箇所のきずを確認。

8. 時系列

2月 2日 定期事業者検査開始(探傷検査・データ整理)

2月18日 定期事業者検査終了

B-SG伝熱管1本(2次側)、C-SG伝熱管1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

2月21日 B-SG器内のカメラによる目視確認の結果、伝熱管外面にきずを確認

2月27日 C-SG器内のカメラによる目視確認の結果、伝熱管外面にきずを確認

9. 減肉伝熱管 2 次側からの確認結果

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

(1) 伝熱管外観観察

小型カメラを用いて、減肉信号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を確認した。

a. B-SG

第三管支持板（減肉率 約 3 2 %）：

周方向約 4. 0 mm、軸方向約 1. 0 mm (X54, Y4)

b. C-SG

第三管支持板（減肉率 約 2 8 %）：

周方向約 1. 0 mm、軸方向 1. 0 mm 以下 (X38, Y3)

第三管支持板（減肉率 約 5 6 %）：

周方向約 4. 0 mm、軸方向 1. 0 mm 以下 (X38, Y3)

(2) E C T信号との比較

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

10. 原因調査

(添付資料-4)

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

(1) SG 伝熱管内面（1 次側）からの損傷

(添付資料-5)

E C Tの信号指示により、伝熱管内面（1 次側）にきずがないことを確認した。

(2) SG 伝熱管外面（2 次側）からの損傷

a. デンティング*¹⁰

(添付資料-5)

E C Tの信号指示を確認した結果、デンティングではないと考えられる。

*¹⁰ 管支持板の腐食およびそれに伴う腐食生成物の体積膨張による伝熱管の変形をいう。

b. 粒界腐食割れ（IGA）*¹¹

(添付資料-6)

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 3 号機のようなアンモニアとヒドラジンによる A V T (All Volatile Treatment) *¹²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られる。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ものと考えられ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られる。

*¹¹ 金属の結晶粒の境目（粒界）に沿って進展する腐食。

*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. ピッチング*¹³ (添付資料－7)

過去にSG 2次側環境において海水リーク等による塩化物環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、ピッチングが発生した実績があるが、高浜発電所3号機のような塩素濃度が十分低く管理され、かつ、アンモニアとヒドラジンによるAVTを実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考えられる。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ものと考えられる減肉であることから、ピッチングの可能性はないと考えられる。

*¹³ 塩素イオン等に起因する金属表面の被膜破壊によって起きる局所的な腐食。

d. リン酸減肉 (添付資料－8)

過去の2次系水処理において、リン酸を使用していたプラントでリン酸による減肉が発生した実績があるが、高浜発電所3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。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ものと考えられ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られる。

e. 摩耗減肉

(a) 管支持板との接触 (添付資料－9)

ア. 管支持板ベイ部*¹⁴の信号

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

*¹⁴ 管支持板に加工されている四ツ葉管穴のうち凹面部。

イ. 管支持板ランド部*¹⁵の信号

管支持板との接触により摩耗減肉が発生したのであれば、4箇所管支持板ランド部に減肉が生じることになるが、目視点検の結果からは4箇所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られる。

*¹⁵ 管支持板に加工されている四ツ葉管穴のうち凸面部。

f. SG器内発生物、SG器外流入物との接触

(a) SG器内の点検

(添付資料-10、11)

ア. 目視点検

A、B、C-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三管支持板の下面の減肉指示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確認を実施した。

(ア) A-SG器内の異物確認

A-SGの流量分配板上(X54-55, Y44)に重さ約0.2g、長さ約24mm、幅約5mm、厚さ約0.2mmの金属片を確認した。

(イ) B-SG器内の異物確認

B-SG器内には剥離したスケール(以下、スラッジという。)以外に異物は確認できなかった。

(ウ) C-SG器内の異物確認

C-SGの流量分配板上(X2-3, Y5-6)に重さ約0.3g、長さ約33mm、幅約5mm、厚さ約0.2mmの金属片を確認した。

金属片を確認した位置は、減肉を確認した位置(第三管支持板の下面(X38, Y3))から約3.5m下方、約1.2m半径方向に離れた場所であった。

その後、点検範囲を拡大し、第三管支持板以上の上面の全ての範囲についても小型カメラによる目視点検を実施した結果、A、B、C-SGについてスラッジ以外に異物は確認できなかった。

(エ) スラッジランシング*¹⁶等による調査

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

更にSG器内に水を張り、底部から窒素を噴射させたのち、水を抜くことによる異物の有無の確認(以下、「N₂バブリング」という。)を行った。その結果、スラッジは回収できたが、スラッジ以外に異物は確認できなかった。また、N₂バブリング実施後、SG器内に異物が残留していないことを小型カメラにより確認した結果、スラッジ以外に異物は確認できなかった。

なお、SG上部構造物については、構造上異物が湿分分離器を通過することはないため、湿分分離器よりも下部に設置されているデッキプレート上面について念のため目視点検を行った結果、異物がないことを確認した。

*¹⁶ 管板部に堆積したスラッジ(酸化鉄(主にマグネタイト))を水圧により除去する方法。

イ. 金属片分析

(添付資料－ 1 2)

(ア) 金属片の材質

A、C－SGで確認した金属片について、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。

(イ) 金属片の類似形状

A、C－SGで確認した金属片と同じ材質で、類似する形状の資材等を確認したところ、流体が漏れないよう弁等のシールに用いられる幅約5mmの渦巻きガスケットの一部であるフープ材（以下、「金属片」という。）であると推定した。

(ウ) 金属片の表面観察

A、C－SGで確認した金属片の表面を走査型電子顕微鏡（以下、「SEM」という。）により観察した結果、部分的な筋状の擦れ跡、打痕、摩耗等を確認した。

(エ) 金属片の切断面観察

A、C－SGで確認した金属片と同様のフープ材を様々な方法で切断した試験材の切断面と金属片の切断面をSEMにより観察、比較した結果、金属片はせん断破壊や低サイクル疲労などの過大な荷重が負荷されて破断したものではなく、グラインダー等の砥石により切断されたものである可能性が高いことを確認した。

(オ) 金属片への伝熱管成分付着確認

C－SGの金属片の伝熱管と接触したと推定される角部に伝熱管の主成分であるニッケル（以下、「Ni」という。）の付着があるかどうかを調査するため、角部を切断して断面の化学分析を実施した結果、どの切断面においても、表層には伝熱管の母材のNi成分は検出されなかった。

なお、過去の美浜発電所3号機の異物によるSG伝熱管外面の摩耗減肉事象においても、原因となった異物の表面の付着物分析を実施した結果、スラッジの主成分であるマグネタイト以外は認められなかった。

(b) SG内部品の脱落調査

(添付資料－ 1 3)

今回の減肉を生じさせた可能性のある異物の想定形状（薄片）^{*17}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を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、内部品が脱落した可能性はないと考えられる。

なお、想定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が考えられることから、念のため、当該部のカメラによる目視点検を実施した。その結果、給水内管裏当金の溶接部に損傷は確認されなかった。

A、C-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。

*17 「11. 減肉メカニズム（1）異物形状および伝熱管との接触状態の推定」に記載している想定形状。

(c) スラッジによる減肉の可能性 (添付資料-14)

ア. スケール性状

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

伝熱管表面のスケールはマグネタイト粒子の付着がベースとなって形成されており、マグネタイト単体としては、伝熱管よりも硬いものの、スケール内には空隙が存在するため、スケールは脆い性質を有している。

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ものの、スラッジによる伝熱管摩耗試験を実施した。試験条件については、スラッジの伝熱管への押付力を実機相当の1Nとし、摺動速度や接触角度については保守的にスラッジが摩滅しにくくなるよう調整した。

その結果、スラッジに対する伝熱管の摩耗体積比が最も大きいものでも、スラッジの摩耗体積が約 0.014mm^3 に対し、伝熱管の摩耗体積は約 0.004mm^3 であり、スラッジの方が伝熱管よりも十分早く摩滅していくことから、スラッジによって判定基準を超える減肉が発生することは考え難い。

以上のことから、スラッジにより今回の摩耗減肉が生じた可能性は低いと考えられる。

ウ. 海外事例調査

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

(d) SG器外（SGブローダウン系統）の目視点検（添付資料－15）

ア．系外ブローライン（海水放出ライン）の目視点検

(ア) 仮設ストレーナの点検結果

高浜発電所4号機前回（第22回）定期検査におけるSG伝熱管損傷事象の調査結果を踏まえ、高浜発電所3号機では今回（第24回）の定期検査開始後のSG水抜き前に、系外ブローラインに仮設ストレーナを新たに設置した。

SG水抜き後、仮設ストレーナの開放点検を実施したところ、SG2次側のスラッジランシング等で回収されるスラッジと同じようなスラッジを確認したが、それ以外の異物は確認できなかった。

(イ) SGブローダウンタンク内の点検結果

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

(ウ) 水位制御弁等の点検結果

水位制御弁等については、異物が滞留しやすい構造となっていることから、これらについて開放点検を実施した結果、異物は確認できなかった。

(エ) 配管の点検結果

開口部より小型カメラを用いて異物が通過し得るSGブローダウン系統配管内部の点検を実施した結果、異物は確認できなかった。なお、SGブローダウンサンプルラインのうち3／8インチ（外径9.53mm、内径6.23mm）の配管については、空気ボンベからホースにより圧縮空気を配管に流し込んでフラッシングすることによって点検を実施した結果、異物は確認できなかった。

イ．復水器回収ラインの目視点検

復水器回収ラインは定期検査開始直後の数日間は通水を継続する運用であることから、本ラインの点検範囲については、高浜発電所4号機前回（第22回）定期検査時のSG伝熱管損傷事象の調査結果と同様に、本ラインに流れてくる異物は主流路にある流量調整弁で滞留すると想定の上、ここまでの範囲を点検範囲としていた。

一方、ア．のとおり系外ブローラインで異物を確認できなかったこと、ならびに回収した金属片およびその他の想定異物（11．参照）の形状から、本ラインの主流路にある流量調整弁に加え、流量調整弁をバイパスす

るオリフィスのライン（分岐ライン）に異物が流れ、その後復水器に流入する可能性も否定できないことから、これらのラインも含め範囲を拡大し点検を実施した。

（ア）流量調整弁およびオリフィスの点検結果

異物が滞留しやすい構造となっている流量調整弁およびオリフィスについて開放点検を実施した結果、異物は確認できなかった。

（イ）復水器ホットウェルの点検結果

S G内に残留した金属片またはその他の異物は、プラント停止後にS G器内の上昇流が緩和された際、落下して管板まで到達した後、S Gブローダウン系統復水器回収ラインを通じて復水器ホットウェルに流入する可能性があることから、ホットウェル内部の目視点検を実施した結果、異物は確認できなかった。

なお、異物がホットウェル部に流入した場合、定期検査時にタービンサンプルへ流出する可能性は否定できない。

（ウ）復水ポンプ入口ストレーナの点検結果

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

（エ）配管の点検結果

開口部より小型カメラを用いて配管内部の点検等を実施した結果、異物は確認できなかった。

（e）まとめ

A、B、C－S G器内のカメラによる目視点検、スラッジランシング、N₂バブリングおよびS Gブローダウン系統の目視点検の結果、以下の内容を確認した。

ア．S G器内の目視点検を実施した結果、A、C－S Gの流量分配板上に、それぞれ1つずつ金属片を確認したことから、SEMによる表面観察を行った結果、2つの金属片には複数箇所筋状の擦れ跡や摩耗、打痕を確認した。また、成分分析の結果、2つの金属片はオーステナイト系ステンレス鋼（SUS304相当）であった。更に、形状の類似性から、金属片は渦巻きガasketの一部であると推定した。

イ．上記金属片以外については、目視点検およびスラッジランシング、並びにN₂バブリングを実施した結果、スラッジ以外に異物は確認できなかった。

ウ．SGブローダウン系統の仮設ストレーナ、タンク、水位制御弁および異物が滞留し得る配管等について目視点検等を実施した結果、異物は確認できなかった。

エ．A、C-SGで確認した金属片に部分的な筋状の擦れ跡、打痕、摩耗等を確認したこと、また、一部に板厚の減少が認められたことから、有意な信号指示を確認したC-SGについては、この金属片が伝熱管にきずを付けた可能性は否定できない。

オ．有意な信号指示を確認したB-SGでは異物が確認されていないことから、SGブローダウン系統へ流出した異物が復水器回収ラインを通じて復水器ホットウェルに流入し、タービンサンプへ異物が流出した可能性は否定できない。

g．流体振動による疲労 (添付資料-16)
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。

h．エロージョン*18 (添付資料-17)
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。

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。

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

i．損傷以外のECT信号指示 (添付資料-18)
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られる。

11．減肉メカニズム (添付資料-19)

C-SGで発見した金属片またはその他の異物が今回のSG伝熱管損傷事象を発生させた可能性を検証するため、以下の試験等を実施した。

(1) 異物形状および伝熱管との接触状態の推定 (添付資料-20)

a．C-SG

(a) 金属片単体で2箇所の減肉を発生させたと想定した場合

金属片単体が2箇所の減肉を発生させるには、1箇所に金属片の角部が接触した状態で減肉が進展し、その後、減肉の進展とともに接触した状態が緩和され、2次側の流体力で安定した姿勢に変化したことによりもう1箇所に接触し、計2箇所の減肉を発生させたものと推定した。

(b) 上記 (a) 以外を想定した場合

2箇所での減肉を発生させた異物の組合せには、金属片と他の異物の組合せ、金属片以外の異物の組合せ、または金属片以外の異物単体が考えられ、金属片以外で想定される異物については、次の形状を推定した。

想定異物 1 : 長さ約 25 mm、幅約 4 mm、厚さ 1 mm 以下

想定異物 2 : 長さ約 16 mm、幅約 6 mm、厚さ 1 mm 以下

想定異物 3 : 長さ約 15 mm、幅約 7 mm、厚さ 1 mm 以下

b. B-SG

B-SGで減肉を発生させた異物については、次の形状を推定した。

想定異物 4 : 長さ約 24 mm、幅約 7 mm、厚さ 1 mm 以下

想定異物 5 : 長さ約 24 mm、幅約 5 mm、厚さ約 0.2 mm^{*19}

^{*19} C-SGで金属片が認められたことを踏まえ、渦巻ガスケットの小片を想定。

(2) SG 2次側器内挙動の推定および接触状態の再現性確認 (添付資料-21)

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

a. SG 器内流入後の異物挙動

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

b. SG 2次側の流況モックアップ試験

SG 2次側の流況を再現するモックアップ試験装置により、上記 (1) で推定した金属片等の異物の接触状態が実機二相流相当の条件下において再現できることを確認した。

(3) 摩耗形態の推定 (添付資料-22)

金属片等の異物との接触で伝熱管が摩耗する場合、金属片等の異物の振動により摩耗するケースと、伝熱管の振動により摩耗するケースが考えられるため、次の通り各ケースで想定されるワークレート^{*20}の比較を行った。

^{*20} 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、押付力和摺動速度の積で表現される。

a. 金属片等の異物振動のケース

本ケースでは金属片等の異物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、金属片等の異物では流体力を受ける面積が小さいため、有意な減肉が生じるワークレートは発生しないことを確認した。

b. 伝熱管振動のケース

本ケースでは、金属片等の異物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^{*21}により伝熱管自身に減肉が発生したことが想定される。管支持板部の伝熱管の振幅は、伝熱管と管支持板B E C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金属片との接触により減肉が生じるものと推定される。本想定に基づきワークレートを試算すると、金属片振動のケースに比べて十分大きなワークレートが得られることを確認した。

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

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

(4) 減肉形状の再現性確認試験

上記(1)、(2)および(3)で推定した金属片等の異物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、減肉試験を行った。また、減肉試験で得られた減肉形状と同等の人工欠陥を与えた伝熱管のモックアップ試験体のE C T信号を取得し、実機のE C T信号と比較した。

a. 減肉試験 (添付資料-23)

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、模擬異物の角部を接触させることにより、減肉を発生させた。

b. E C Tモックアップ試験 (添付資料-24)

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

(5) ワークレートによる摩耗体積評価 (添付資料-25)

上記(1)、(2)および(3)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金属片等の異物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、(4)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、金属片等の異物との接触により1サイクルで発生した可能性があることを確認した。

以上の試験等による検証結果から、C-SGで回収した金属片またはその他の想定異物は、SG器内へ持ち込まれ当該の管支持板下面まで到達すれば、伝熱管との接触により今回の外面減肉を発生させた可能性があると考えられる。

1 2. SGへの異物流入に関する調査

(1) 異物により減肉した国内外事例調査 (添付資料-26)

国内外で報告されている異物による外面減肉事象を調査した結果、国内では4件、海外では多数の事例があることを確認した。

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

(2) 異物流入経路 (添付資料-27)

SG伝熱管外面にきずを付けた異物がSG器内へ移動する可能性がある流路の範囲を調査した結果、主給水ブースタポンプ入口ストレーナ以降の主給水系統および脱気器タンク以降のSG水張系統は、SGまでの間にストレーナ等がないため、異物が流入する可能性があると考えられる。

(3) SG器外の2次系機器内部構成品の混入 (添付資料-28)

2次系機器の内部構成部品が異物となってSGへ流入する可能性について検討した結果、(2)の系統範囲にある機器の内部構成品のうち、11.(1)で想定した異物の類似形状品として、消耗品である渦巻きガスケットが抽出された。

(4) 渦巻きガスケットの混入 (添付資料-29)

a. 運転中における渦巻きガスケットの欠損

上記(3)にて渦巻きガスケットが抽出されたことおよび渦巻きガスケットの一部と考えられる金属片がSGに流入した経緯の特定のため、SGに異物が流入する可能性がある範囲において、渦巻きガスケットを有する機器等の調査を実施した。

SGに渦巻きガスケットが(2)の異物流入経路において混入する可能性がある範囲では、約3mmと約5mmの仕様の渦巻きガスケットが用いられている。この中で、部品同士が噛み合うインロータイプでは、運転中に渦巻きガスケットが破損しても渦巻きガスケットが系統内に流出しない構造となっており、SGへ流入する可能性のある約3mmの渦巻きガスケットは全てイ

ンロータイプである。よって、今回の調査は、約5 mmの渦巻きガスケットを使用している機器のうち、構造上流出の可能性のある機器（20箇所）を対象とした。

b. 渦巻きガスケットの健全性確認

高浜発電所3号機今回（第24回）定期検査にて、点検周期に基づき機器を開放点検していた2箇所に加え、18箇所を追加で開放点検した結果、全ての機器等の渦巻きガスケットが健全であることを確認した。このことから、運転中に渦巻きガスケットが破損し、SGに流入した可能性はない。

また、構造上流出の可能性のある機器における初回定期検査以降の開放点検記録を確認した結果、点検時に渦巻きガスケットが破損していた記録はなかった。

c. 作業時における渦巻きガスケットの混入

(a) 渦巻きガスケットの管理状況

渦巻きガスケットを有する機器等の開放点検記録を確認した結果、高浜発電所3号機前回（第23回）定期検査時に開放点検を実施した機器等については、最終異物確認を実施し、異物管理がなされていることを確認した。なお、高浜発電所3号機前回（第23回）定期検査時のSG伝熱管損傷事象の自主的な対策として、主給水系統の目視確認が不可能となる範囲については小型カメラを用いた最終異物確認を実施している。ただし、伝熱管にきずを付けた想定異物の形状では、SG水張系統からの異物が流入した可能性はないとしており、当該系統における小型カメラを用いた最終異物確認は実施していない。

(b) 周辺作業の実施状況

定期検査関連作業に従事する作業員に対して、渦巻きガスケット取り外し作業の状況を確認したところ、スクレイパー（ヘラ）やニッパーを用いて取り外す場合はあるが、グラインダー等を用いてガスケットを切断することはないことを確認した。

ただし、過去の定期検査や、構外等を含めた全ての作業において、グラインダー等を用いたガスケットの切断作業が実施されていないことの確認は不可能であったことから、過去の点検時に混入した可能性や、構外等から系統周辺に持ち込まれた可能性は否定できない。

(5) 金属片以外の異物混入の可能性

上記1.1.での検証結果のとおり、渦巻きガスケット以外の異物がSGに混入し、伝熱管にきずを付けた可能性は否定できないため、以下の調査を実施した。

a. 異物として推定される資材等 (添付資料-30、31)

外部からの異物混入は、(6)で述べる開放点検等を実施した作業のうち、最終異物確認時に目視確認が困難となる範囲が存在した作業において、異物が生じたものと考えられる。このため、発電所の作業において、想定する異物と類似する異物が発生する可能性の有無を確認したところ、以下のような可能性が考えられる。

保温材外装板施工時や配管識別表示等を金属製のバンドで配管等に固定する際に、外装板の大きさやバンドの長さを調整しているが、その時に発生した切れ端や切削くずが残存する可能性は否定できない。

また、開放点検等を実施した周辺の作業状況を確認したところ、開口部のある期間中に、上記のような切れ端や切削くずが混入する可能性がある作業が(6)で述べる3件で実施されていることが分かった。

一方、開放点検等を実施した当該作業や、それ以外の作業によって発生した異物が、作業服や靴の裏に付着して開放点検等の作業場所近辺に持ち込まれた可能性が考えられることから、SGに流入する可能性のある系統で実施している全ての開放点検等の対象機器351箇所のいずれかの作業から異物が混入した可能性は否定できない。

(6) 異物混入の可能性のある作業の調査 (添付資料-32、33)

SGに異物が流入する範囲において、機器の開放点検等を実施した箇所は異物混入の可能性が否定できないことから、すべての箇所を抽出し、開口部養生状況、最終異物確認状況等の異物管理状況について確認した。

その結果、すべての作業において開口部養生、連続監視等は適切に実施されていた。また、高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査時におけるSG伝熱管損傷事象の自主対策として、開放点検を実施した機器等については、目視確認が不可能となる範囲に対し、小型カメラを用いて最終異物確認を実施していた。しかし、SG水張系統については、目視確認が不可能となる範囲の最終異物確認を実施していなかったことから、SG水張系統における開放点検等の作業実績を確認したところ、脱気器タンクでの作業において、最終異物確認時に目視確認が困難な範囲が存在するため、異物が混入する可能性が完全には否定できないことが分かった。

また、高浜発電所3号機前々回(第22回)定期検査以前には、目視による最終異物確認は実施していたものの、高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査におけるSG伝熱管損傷事象を踏まえた対策が実施されていなかったことから、開放点検を実施した機器等から系統内部に異物が混入して、この異物がSG器内等に留まり、高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査以降にSG伝熱管をきず付けた可能性が完全には否定できないことが分かった。これらの異物が混入する可能性のある作業としては、最終異物確認時点で、目視確認が

困難な範囲となる垂直管のある弁分解点検作業、ストレーナ開放点検作業および脱気器タンク開放点検作業が考えられる。

(7) 異物混入の可能性のある時期

SG 2次側に異物が混入する可能性のある作業は、定期検査中の作業が考えられる。

高浜発電所3号機前々回(第22回)定期検査以前は、高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査におけるSG伝熱管損傷事象を踏まえた対策が実施されていなかったが、高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査時は、目視確認が不可能となる範囲について、小型カメラを用いた最終異物確認を実施している。

ただし、高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査におけるSG伝熱管損傷事象では、想定異物の形状から、SG水張系統からの異物の持ち込みの可能性は想定していなかったため、当該系統の目視確認が困難な範囲については小型カメラを用いた最終異物確認は実施していなかった。

以上のことから、異物は高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査以前にSG水張系統から混入したか、高浜発電所3号機前々回(第22回)定期検査以前に主給水系統から混入したものと考えられる。

1.3. 伝熱管の健全性 (添付資料-34、35)

(1) 減肉伝熱管の健全性

減肉した伝熱管の強度、耐震性について以下のように評価した。

a. 強度

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

得られた伝熱管の破断圧力は、通常運転時および事故時の最大内外差圧に比べ、十分裕度があることから、減肉した伝熱管が通常運転時および事故時の内外差圧により破断することはない。なお、「原子力規制検査における個別事項の安全重要度評価プロセスに関するガイド」に基づき評価した結果、十分な構造健全性が確保されていることを確認した。

b. 耐震性

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

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

(2) 隣接伝熱管の健全性

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

1 4. A-SGで確認した金属片について (添付資料-36)

A-SGで確認した金属片が、高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査できずを確認した伝熱管を損傷させた可能性について評価した。

その結果、A-SGの金属片が高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査で認められたきずの位置(BEC穴下面よりも約5mm上側)で伝熱管と接触するには、金属片が管支持板BEC穴の縁で支持される姿勢をとる必要があるが、当該BEC穴周辺に接触痕は認められていないことから、当該金属片が高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査時のSG伝熱管損傷の原因である可能性は低いと考える。

1 5. 推定原因 (添付資料-37)

- ・高浜発電所3号機前回(第23回)定期検査以前にSG水張系統から金属片またはその他の異物が混入し、最終異物確認時に目視確認が困難となる範囲に残留した。その後、SGに到達し、高浜発電所3号機前回運転サイクル中に第三管支持板下面で伝熱管と接触したと推定した。
- ・高浜発電所3号機前々回(第22回)定期検査以前に主給水系統から金属片またはその他の異物が混入し、最終異物確認時に目視確認が困難となる範囲に残留した。その後SGに到達し、高浜発電所3号機前回運転サイクル中に第三管支持板下面で伝熱管と接触したと推定した。
- ・伝熱管と接触し残留した金属片またはその他の異物は、運転中に生じる伝熱管の振動によって、伝熱管外表面を摩耗させ、伝熱管外面にきずを付けた。
- ・C-SG伝熱管にきずを付けるメカニズムは、C-SGで確認された金属片またはその他の異物のいずれか単体が運転中に2箇所の子ずを付ける場合と、金属片と他の異物の組合せ等の2つの物体がそれぞれのきずを確認した箇所に固定されてきずを付けた場合があると推定されるが、いずれの場合も、SG器内へ持ち込まれ当該の管支持板下面まで到達すれば、伝熱管との接触によりきずを付ける可能性があるかと推定した。
- ・B-SG伝熱管にきずを付けるメカニズムは、想定した異物がSG器内へ持ち込まれ、きずを確認した伝熱管の第三管支持板下面まで到達すれば、伝熱管との接触によりきずを付ける可能性があるかと推定した。

16. 対 策

(1) 減肉伝熱管の施栓 (添付資料－38～40)

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

(2) SG器内への異物流入対策 (添付資料－41～47)

a. 高浜発電所3号機前回(23回)定期検査で実施した以下の異物管理を継続実施する。

(a) 作業員の立ち入る作業前に作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。

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

また、最終異物確認時において直接目視にて異物の有無の確認ができない範囲については、小型カメラによる目視点検を行う。

b. 高浜発電所4号機前回(22回)定期検査で実施した、SGへの異物流入の可能性のある機器の点検における異物混入防止対策の徹底を図る。

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

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

(c) ウェスを使用する場合は、新しいウェスに限るものとし、新ウェスは再使用ウェスと区別して管理する。

(d) 作業中に発生した保温材の切れ端等の清掃・片づけについては一作業一片づけを徹底するとともに、作業服、靴に異物が付着していないか確認することにより、異物の拡散を防止する。

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

c. その他の対策

(a) SG水張系統からの異物混入対策として、SG水張ポンプ入口にストレーナを設置する。

(b) 今回、渦巻きガスケットの小片をSG器内で発見したことを踏まえ、機器開放時における渦巻きガスケットの破損状況の不具合・懸案事項の確認や異物管理・施工管理を徹底する観点から記録を取得すべきであるため、今後機器を開放した時点で渦巻きガスケットに損傷を確認した場合は、工事報告書に必要事項を記載することを調達要求文書に定める。

なお、今回SG二次側に異物が混入していたことを踏まえ、SG器内に水を張り、N₂バブリングおよび水抜きを行った結果、スラッジが回収されたものの、異物は回収されなかった。

また、起動前に実施している2次系クリーンアップにおいて、通常よりも通水量の増加および時間の延長により、可能な限り異物除去効果を向上させる。

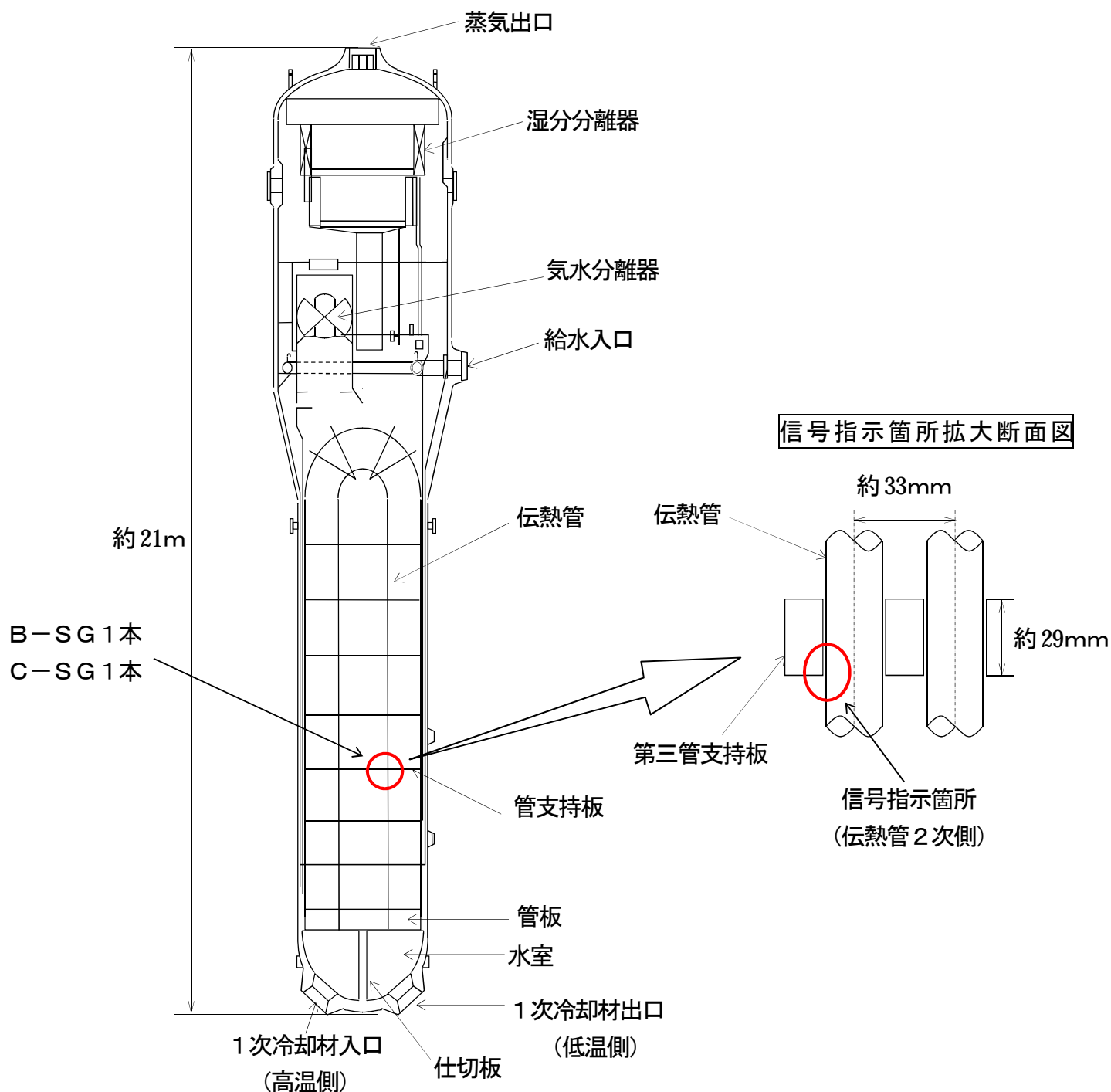
以 上

添 付 資 料

1. SG伝熱管信号指示箇所概要図
2. SG伝熱管ECT結果
3. SG伝熱管ECT信号指示位置図
4. 要因分析図
5. ECTの位相評価
6. 粒界腐食割れに関する検討結果
7. ピッチング発生に関する検討結果
8. リン酸減肉によるきずの形状
9. 管支持板との接触による摩耗減肉の評価
10. SG器内の点検概要
11. 金属片位置図
12. 金属片分析結果
13. SG2次側内部品について
14. スラッジによる摩耗減肉の可能性について
15. SGブローダウン系統点検結果
16. 流体振動による疲労評価
17. エロージョンの発生可能性評価
18. スケール剥離による減肉信号への影響
19. 金属片による伝熱管の減肉可能性調査の流れ
20. 異物形状および伝熱管との接触状態の推定
21. 流況モックアップ試験による接触状態の再現
22. 金属片と伝熱管の接触時における摩耗形態の推定
23. 減肉試験による実機摩耗減肉形状の確認
24. ECTモックアップ試験による実機ECT信号との整合性確認
25. ワークレートをを用いた摩耗体積の計算結果
26. 異物により減肉した国内外事例調査
27. 異物混入調査系統
28. SG器外の系統上の機器内部構成品で想定される異物との類似形状品
29. 蒸気発生器に流入する可能性がある範囲の渦巻きガスケット健全性確認
一覧
30. 異物として推定される資材
31. SGに流入する可能性のある機器開放点検一覧
32. 高浜発電所3号機 前回(第23回)定期検査時に開放点検を実施した機器
33. 異物混入の可能性検討
34. 減肉した伝熱管の評価
35. 隣接伝熱管の健全性
36. A-SGで確認した金属片について

- 37. SG点検スケジュール
- 38. SG伝熱管信号指示箇所補修概要図
- 39. 高浜発電所3号機 SG伝熱管補修来歴
- 40. 減肉により施栓した伝熱管が他の伝熱管へ及ぼす影響
- 41. SG器内への異物流入対策
- 42. 作業手順見直し（保温）
- 43. 作業手順見直し（弁）
- 44. 作業手順見直し（ストレーナ）
- 45. 作業手順見直し（脱気器タンク）
- 46. SG水張系統からの異物混入対策（ストレーナ設置）
- 47. 異物の器内挙動（異物残留について）

SG伝熱管信号指示箇所概要図 (SG管支持板部)

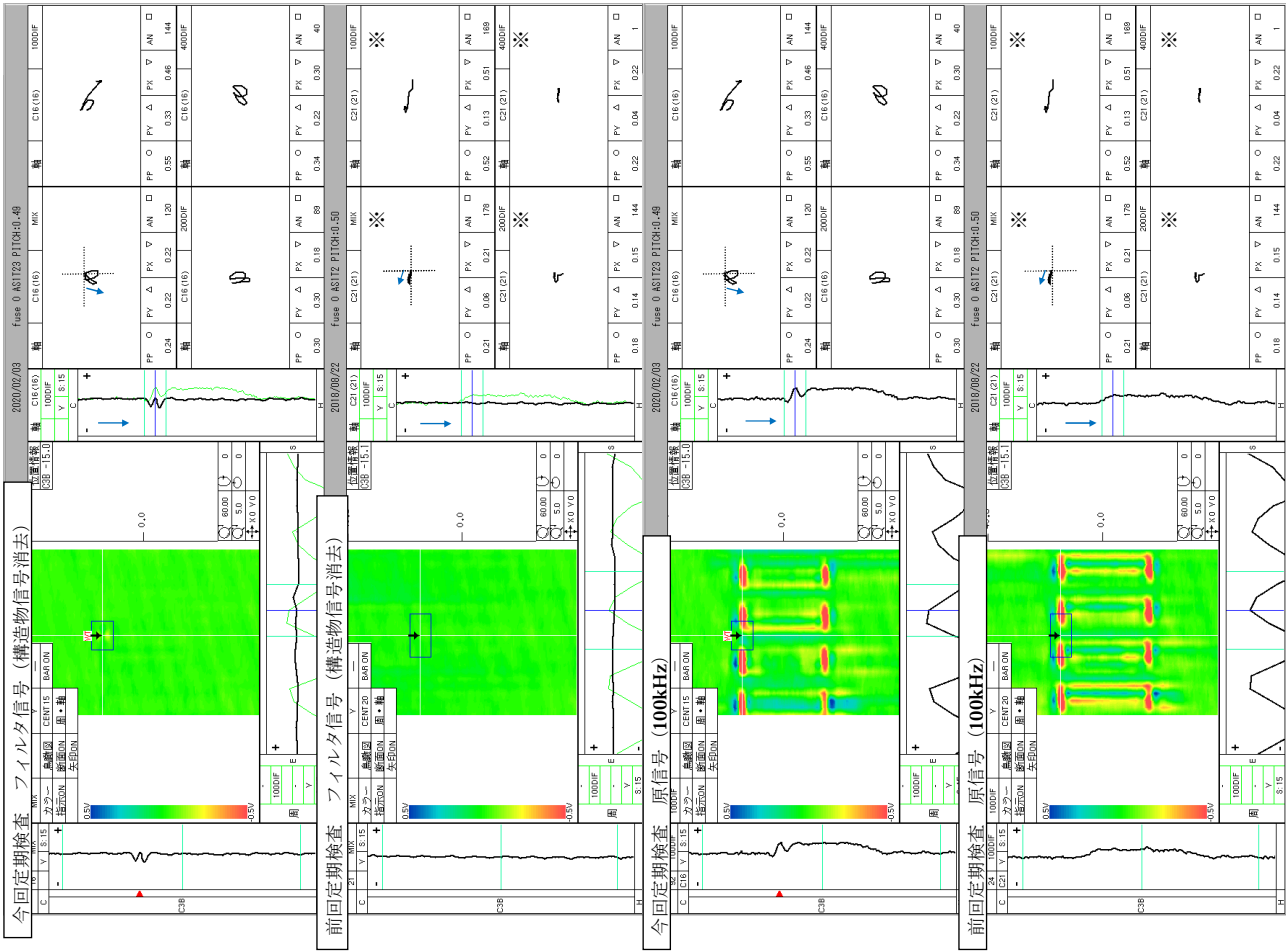


高浜3号機 SG伝熱管ECT結果

	A-SG	B-SG	C-SG	合計
設備本数	3,382	3,382	3,382	10,146
既施栓本数 (応力腐食割れによる施栓本数*)	110 (7)	134 (10)	120 (7)	364 (24)
検査対象本数	3,272	3,248	3,262	9,782
指示管本数	0	1	1	2
結果	管支持板部付近において、B-SGで1本、C-SGで1本に、外部からの減肉とみられる有意な信号指示を確認した。			

* 既施栓本数の内数を示す。

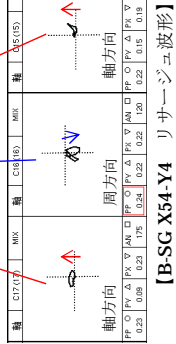
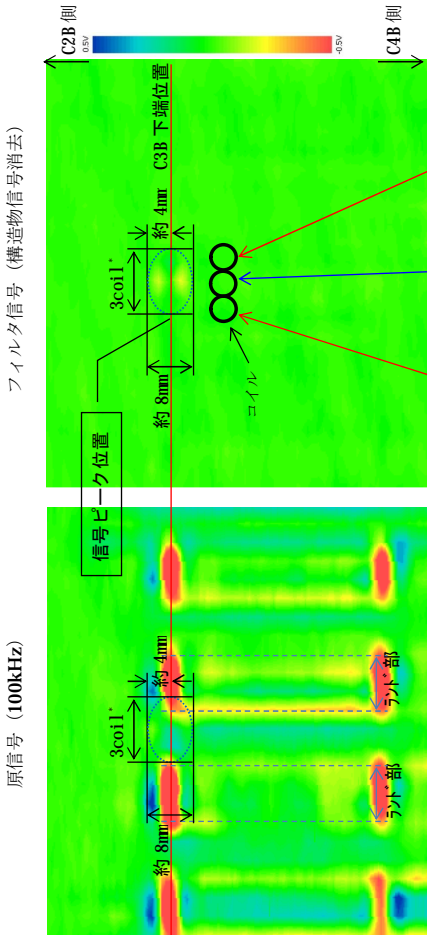
SG伝熱管ECT結果



※特異な信号がないため任意の位置で表示。

前回と今回の比較

B-SG X54 Y 4 部位 : C3B

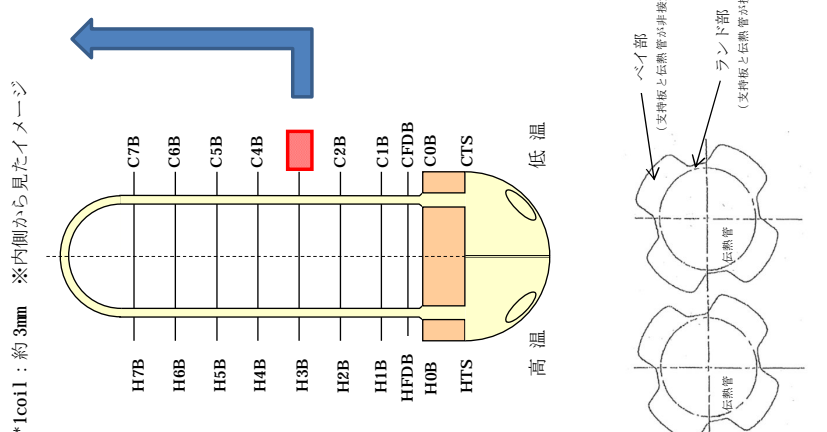


きず端部の軸方向成分(赤色矢印)を検出
きず中心部の周方向成分(青色矢印)を検出

波形評価

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

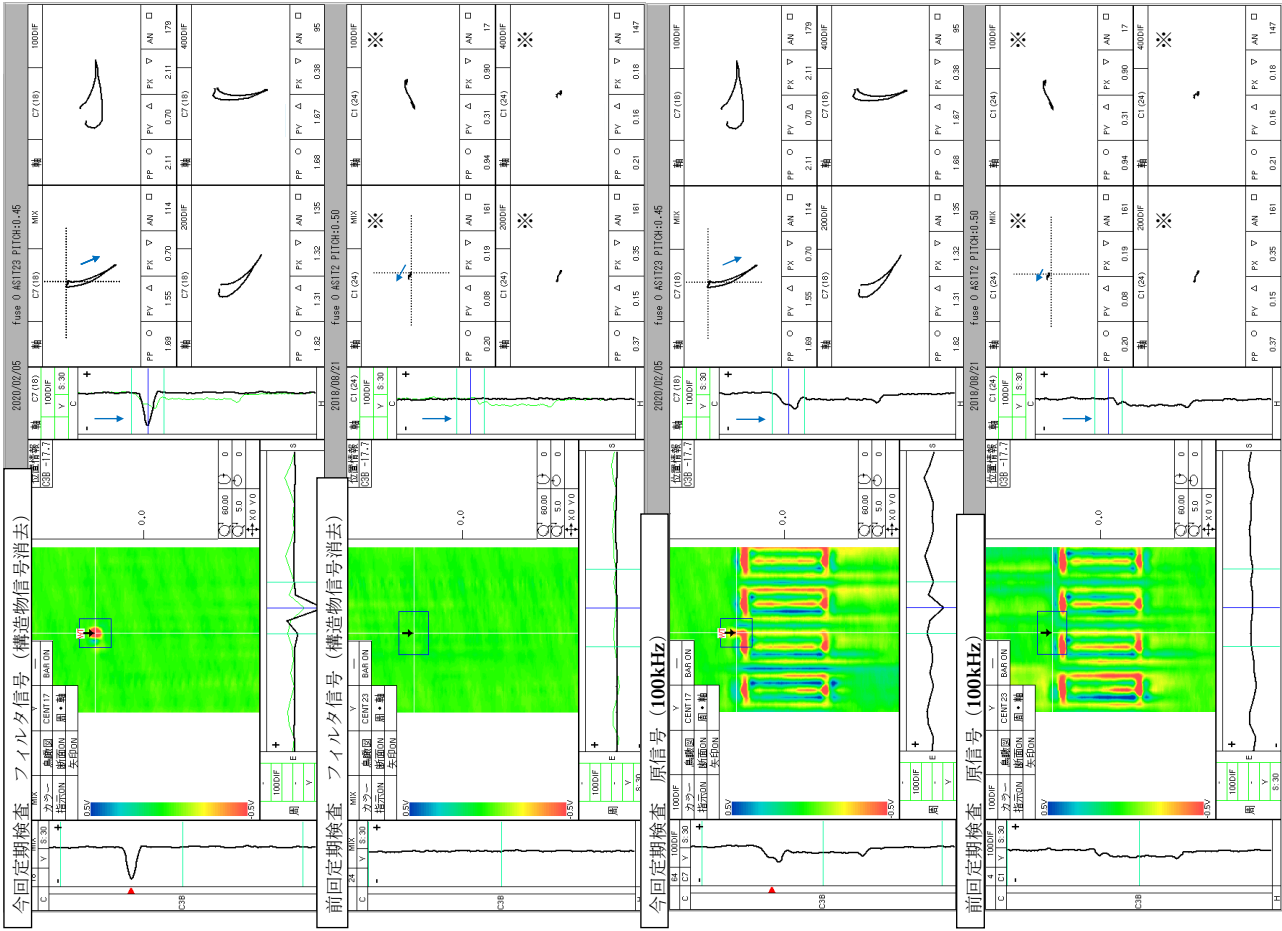
上記の通り軸方向成分および周方向成分の両方の成分が読み取れるため、広がりを持つ腐肉と評価する。(下図参照)



*1coil : 約 3mm ※内側から見たイメージ

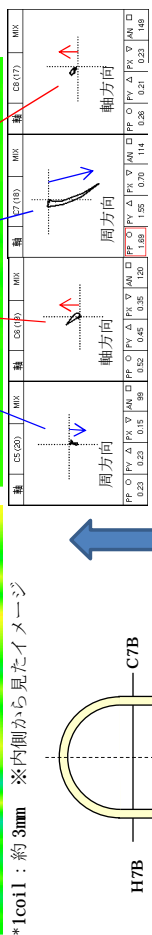
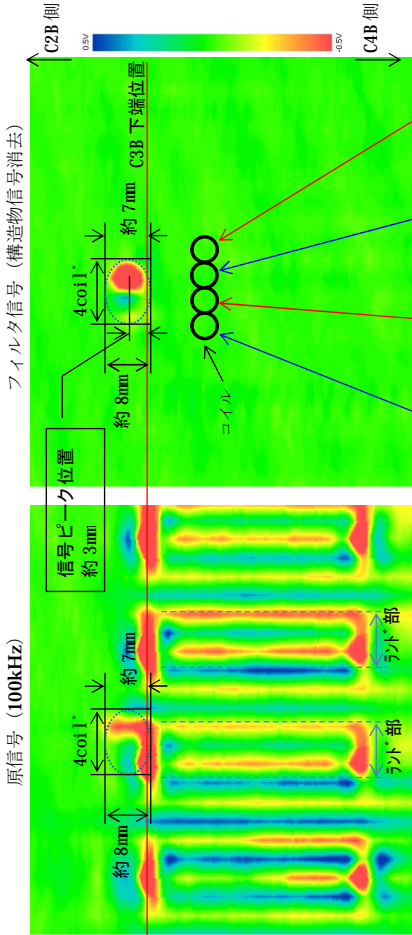
信号評価

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。

前回と今回の比較

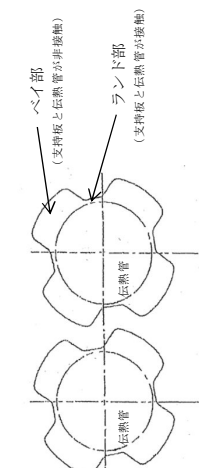
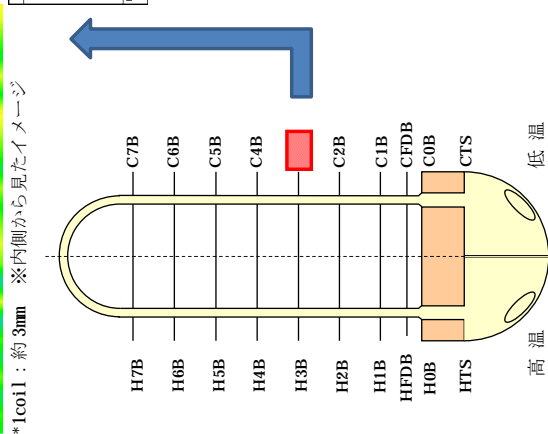


【C-SG X38-Y3 リサーチ ジェネ波形】
 ぎす端部の軸方向成分(赤色矢印)を検出
 ぎす中心部の周方向成分(青色矢印)を検出

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・周方向成分の特徴を持っている。

上記の通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)



C-SG X38 Y 3 部位 : C3B

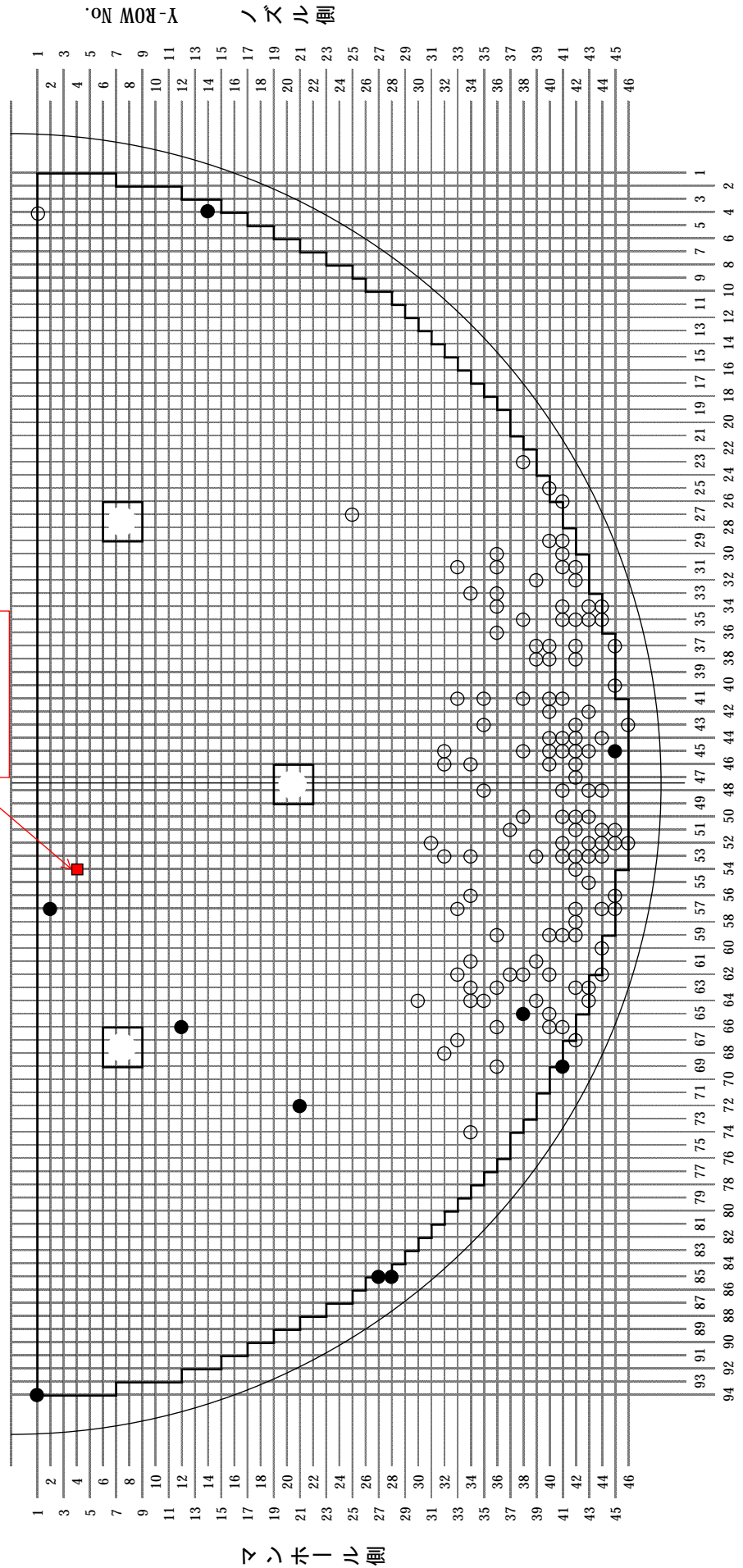
信号評価

高浜3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) (124本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (10本)
- : 今回減肉指示が認められた位置 (1本)

＜第三管支持板＞
有意な信号指示管
(X54-Y4)

本図はSG上部から見た位置を示す



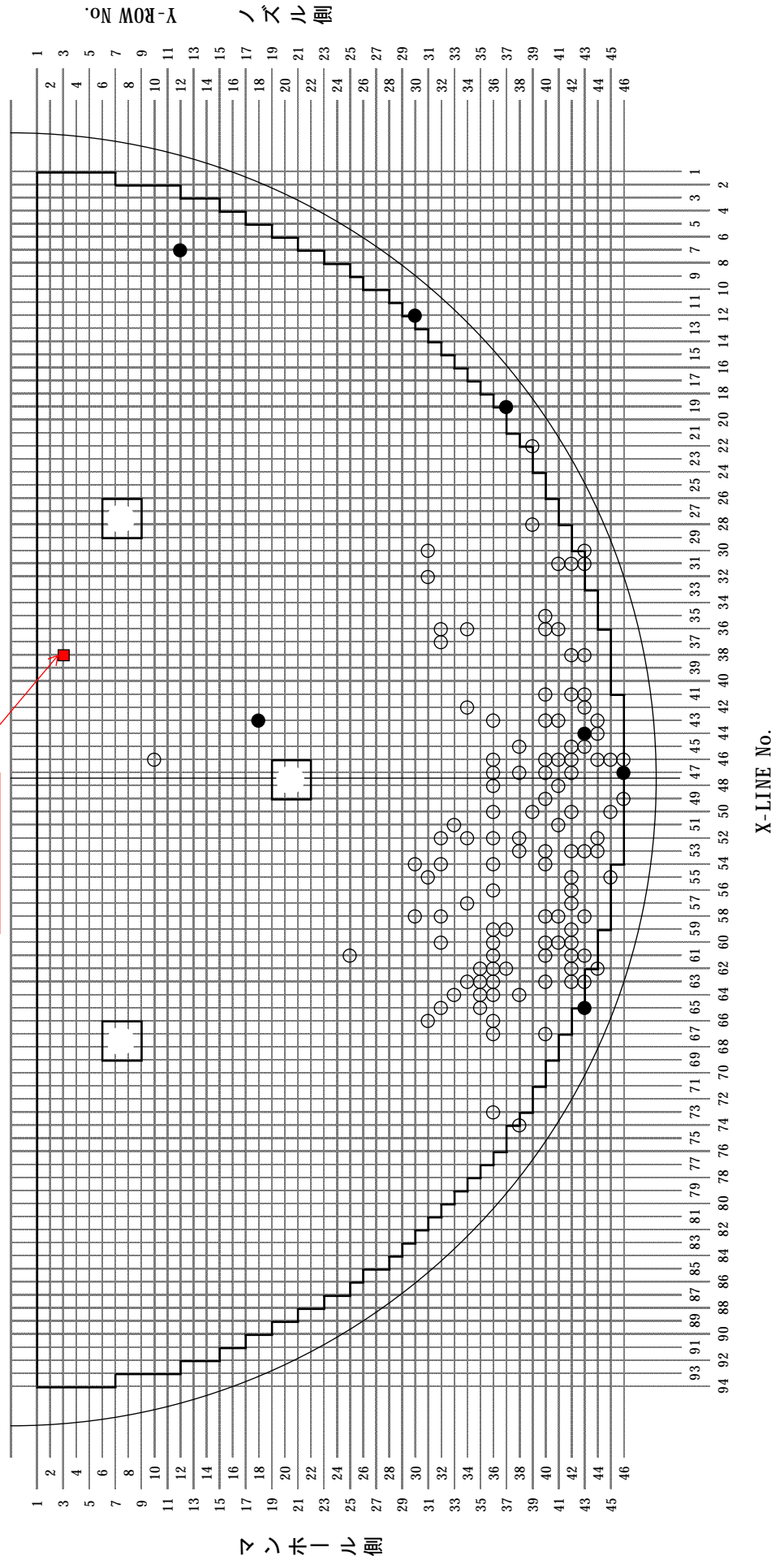
X-LINE No.

高浜3号機 SG伝熱管ECT信号指示位置図
C-SG (低温側)

- : 既施送管 (拡管部応力腐食割れ以外) (113本)
- : 既施送管 (拡管部応力腐食割れ) (7本)
- : 今回減肉指示が認められた位置 (1本)

＜第三管支持板＞
有意な信号指示管
(X38-Y3)

本図はSG上部から見た位置を示す



要因分析図

要因		調査項目		評価	
1次側からの損傷	減肉指示	デンチング	ECTの番号指示により、伝熱管内面(1次側)にきずがないことを確認した。	×	添付資料-5
		粗界面食割れ (ICA)	ECTの番号指示を確認した結果、デンチングではないと考えられる。*	×	添付資料-5
2次側からの損傷	減肉指示	ピンチング	過去にSG2次側環境においてアルカリ環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、粗界面食割れが発生した実績があるが、高圧発電所3号機のようなアンモニアとトリウムによるAVT処理を実施し、良好な還元性雰囲気維持されているプラントでは発生しないことから、発生の可能性はないと考えられる。また、小型カラによる目視点検結果から機構的な影響によるものと考えられる減肉であることから、粗界面食割れの可能性はないと考えられる。*	×	添付資料-6
		ピンチング	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、ピンチングが発生した実績があるが、高圧発電所3号機のような塩素濃度が十分に低く管理され、かつ、アンモニアとトリウムによるAVTを実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考えられる。また、小型カラによる目視点検結果から機構的な影響によるものと考えられる減肉であることから、ピンチングの可能性はないと考えられる。*	×	添付資料-7
2次側からの損傷	減肉指示	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、高圧発電所3号機のようなアンモニアとトリウムによる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。また、小型カラによる目視点検結果から機構的な影響によるものと考えられ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られる。*	×	添付資料-8
		摩擦減肉	管支持板との接触により摩擦減肉が発生したのであれば、4箇所(管支持板プラント部の減肉)は確認できなくなったため、管支持板との接触・摩擦による発生した減肉ではないと考えられる。	×	添付資料-9
2次側からの損傷	減肉指示	内部品が脱落して接触	今回の減肉発生位置と可能性のある異物の想定形状(薄片)に対し、SGの部品で該当する形状があるかを設計図面に溶接止められていること、もしくは、周囲を溶接止められた構造物に囲まれており、万一、万一、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られる。	×	添付資料-13
		スラッジとの接触	SG室内から回収したスラッジの断面観察を実施した結果、スラッジ内には空洞が存在しており、構造上脆いと判断されるものの、スラッジによる伝熱管摩擦試験を実施した。試験条件については、スラッジの伝熱管への押付力を実験相当の1Nとし、撓動速度や撓動距離については保守的にスラッジが摩滅しにくくなるよう調整した。その結果、スラッジに対する伝熱管の摩擦係数が最も大きいのも、スラッジの摩擦係数が約0.014mm/sに対し、伝熱管の摩擦係数は約0.004mm/sであり、スラッジの方が伝熱管より十分早く摩滅していくことから、スラッジによって判定基準を超える減肉が発生することはないと判断される。	×	添付資料-14
2次側からの損傷	減肉指示	SG壁が飛入物との接触	SG室内の目視点検を実施した結果、A-C-SGの流道分配板上に、それぞれ1つずつ金属片を確認したこと、SEMによる断面観察を行った結果、2つの金属片には異物断片の形状の跡や磨耗、打痕を確認した。また、部分分析の結果、2つの金属片はほぼ推定した系ステンレス鋼(SUS304相当)であった。更に、形状の類似性から、金属片は高圧ガス圧入物断片以外からのものは認められなかった。SGローダックシステムの駆動スレーブ、タンク、水位制御弁およびスラッジポンピング、並びにN2パブリックを実施した結果、スラッジ以外に異物によるSG壁との接触は確認できなかった。SG壁が飛入物との接触は、目視点検およびスラッジポンピング、並びにN2パブリックを実施した結果、スラッジ以外に異物によるSG壁との接触は確認できなかった。また、A-C-SGで確認した金属片に類似した磨耗跡、打痕、磨耗等を確認したこと、また、一部凸部の減少が認められたことから、有意な番号指示を識別したC-SGについては、この金属片が伝熱管にきずを付けた可能性は否定できない。有意な番号指示を識別したB-SGでは異物が確認されていないことから、SGローダックシステムへ流出した異物が復水器回収ラインを通して復水器ホットウェルに流入し、タービンサンプへ異物が流出した可能性は否定できない。	△	添付資料-10 添付資料-11 添付資料-12 添付資料-15
		SG壁が飛入物との接触	減肉がカニズムについて検討した結果、C-SGで回収した金属片またはその他の複素異物は、SG室内へ持ち込まれ当該の管支持板下面まで到達すれば、伝熱管との接触により今回の外面減肉を発生させた可能性があると考えられる。	△	添付資料-19~25
ECT探傷	減肉指示	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。*	×	添付資料-16
		エロージョン	当該部流速は約3m/sであり、かつ、JT600合金は粗エロージョン性が低いことから(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。*	×	添付資料-17
ECT探傷	減肉指示	損傷以外の番号	局所的なスケールの剥離は、減肉と識別できることから、今回の番号指示は、スケールの剥離ではないと考えられる。*	×	添付資料-18

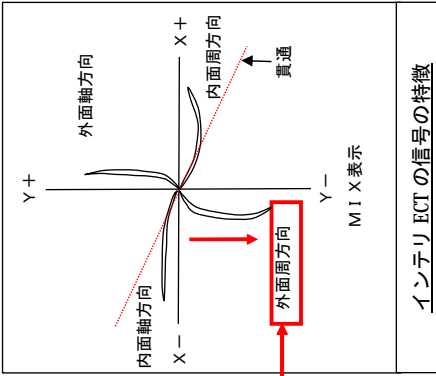
*: 番号の形状からも本損傷でない判断できる。
△: 可能性は否定できない。
×: 要因の可能性なし。

E C T の位相評価

当該管リサージェ表示 (B-SG X54-Y4)

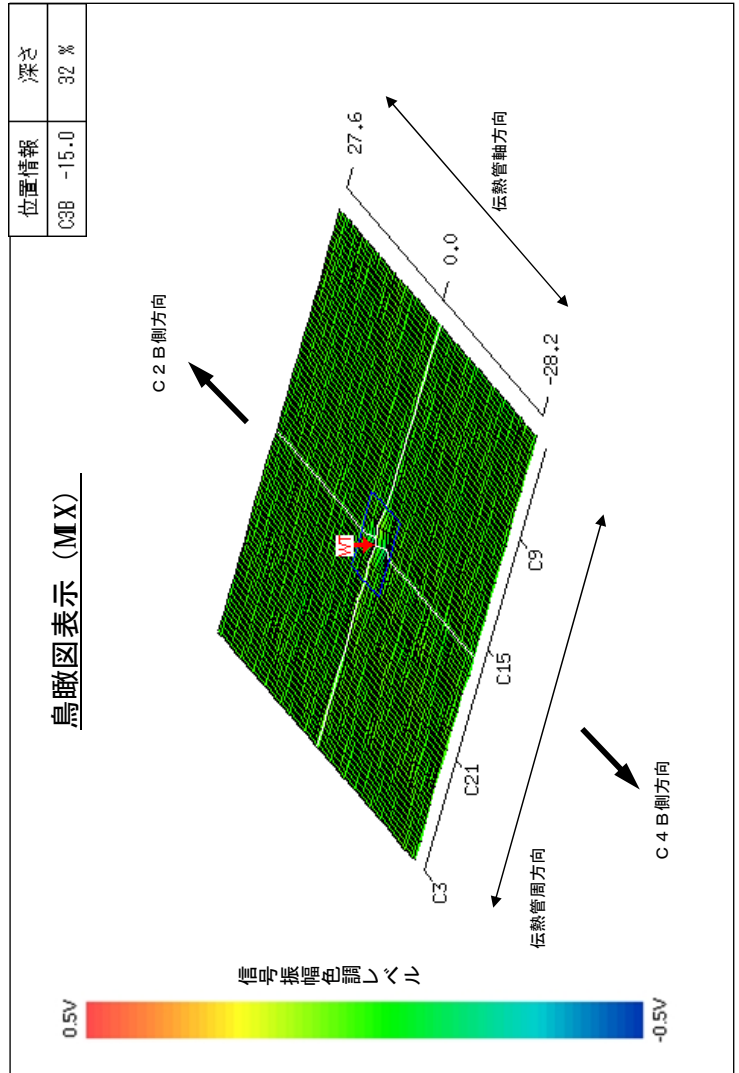
軸	C16 (16)	MIX	C16 (16)	100DIF	軸	C16 (16)	200DIF	軸	C16 (16)	400DIF					
PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□	PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□
0.24	0.22	0.22	0.33	0.46	144	89	0.30	0.34	0.22	0.30	0.30	0.30	40	40	

↑ 位相角

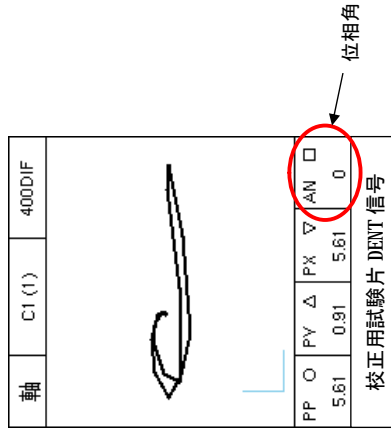


(1) 内面軸方向信号の特徴との比較
インテリジェント ECT の信号の特徴と今回の当該信号を比較したところ、今回の当該信号は 400kHz および MIX の位相角で Y- 方向の外周方向向きの特徴を示している。そのため、伝熱管内面 (1 次側) からの損傷ではないと考えられる。

鳥瞰図表示 (MX)



(2) デンテイング (DENT) 信号の特徴との比較

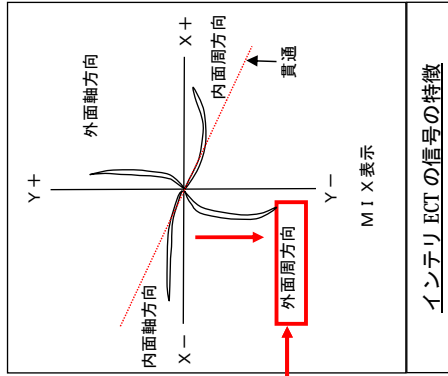


校正用試験片の DENT 信号を見た場合、DENT 信号は“全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる”という特徴を持っている。今回の当該信号は Y- 方向の位相を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外周周方向向きの特徴を持っていると言える。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考えられる。

ECTの位相評価

当該管リサージェ表示 (C-SG X38-Y3)

軸	C7(18)	MIX	軸	C7(18)	100DIF	軸	C7(18)	200DIF	軸	C7(18)	400DIF														
PP ○	PV △	PX ▽	AN □	114	0.70	PP ○	PV △	PX ▽	AN □	1.68	PP ○	PV △	PX ▽	AN □	1.67	PP ○	PV △	PX ▽	AN □	0.38	PP ○	PV △	PX ▽	AN □	95
1.69	1.55	0.70	0.70	114	0.70	1.82	1.31	1.32	135	1.68	1.67	0.38	95												

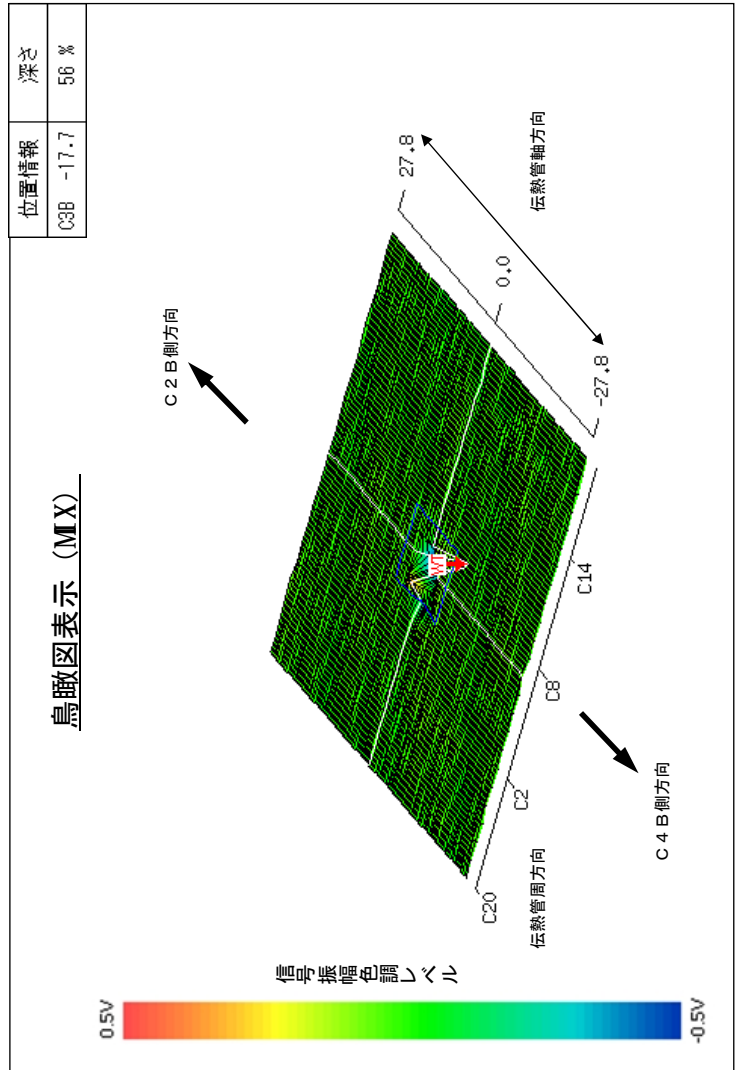


(1)内面軸方向信号の特徴との比較
インテリ ECT の信号の特徴と今回の当該信号を比較したところ、今回の当該信号は 400kHz および MIX の位相角で Y- 方向の外面周方向きずの特徴を示している。そのため、伝熱管内面 (1 次側) からの損傷ではないと考えられる。

(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 信号を見た場合、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。
今回の当該信号は Y- 方向の位相を示しており、DENT 信号の特徴を持たず外面周方向きずの特徴を持っていると言える。そのため、DENT 信号のような局所変形ではないと考えられる。



粒界腐食割れに関する検討結果

高浜発電所3号機 SG の至近サイクルについて、通常運転中の SG 器内水質（バルク水の水質）を用いたクレビス部 pH 計算の結果、クレビス部での pH は平均 5.9 と、高温での中性点（pH：5.5）近傍の値であった。

ここでは、伝熱管と異物との隙間内での濃縮倍率として、 10^3 と安全側に仮定した。

また、高浜発電所3号機では2次系水中にアンモニアとヒドラジンを注入しており、運転中良好な還元雰囲気を維持している。

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

<クレビス部 pH 値計算結果>

	第24サイクル
pH _{300°C}	平均 5.9

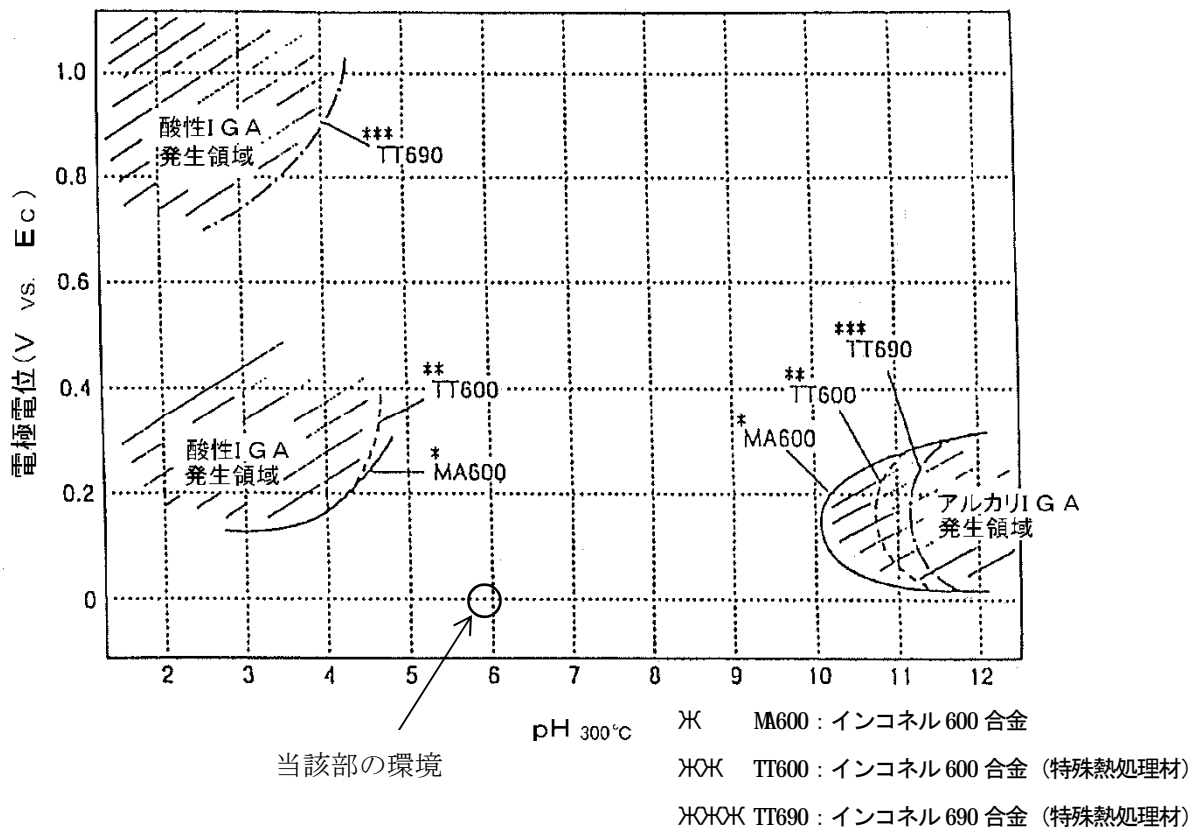
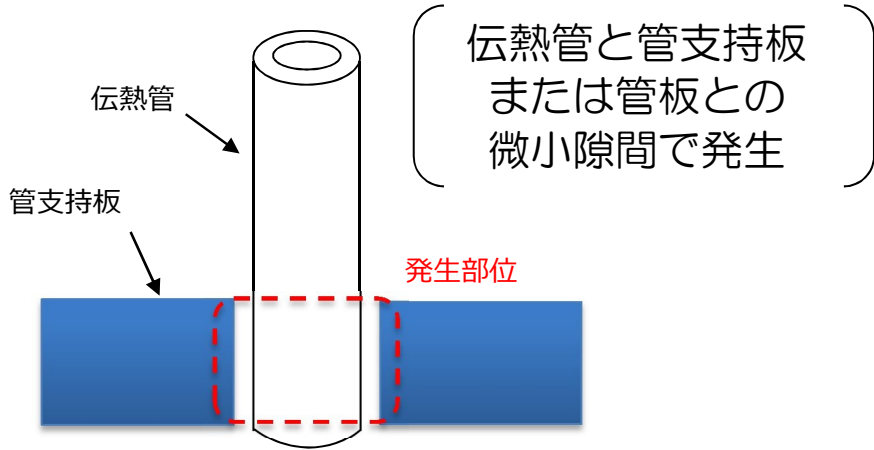

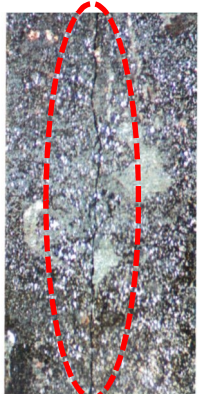


図 粒界腐食割れの発生領域

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

粒界腐食割れによるきずの形状

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

発生部位	
 <p style="text-align: center;">（試験体概略図）</p>	
表面形状	
 <p style="text-align: center;">腐食による凹凸面</p>	 <p style="text-align: center;">割れ 拡大観察（×20倍）</p>
<p>（昭和63年度 共同研究報告書「蒸気発生器改良型伝熱管 長期腐食信頼性に関する研究」より抜粋）</p>	

ピitting発生に関する検討結果

高浜発電所3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3号機 SG 器内水塩素イオン濃度至近サイクル平均値

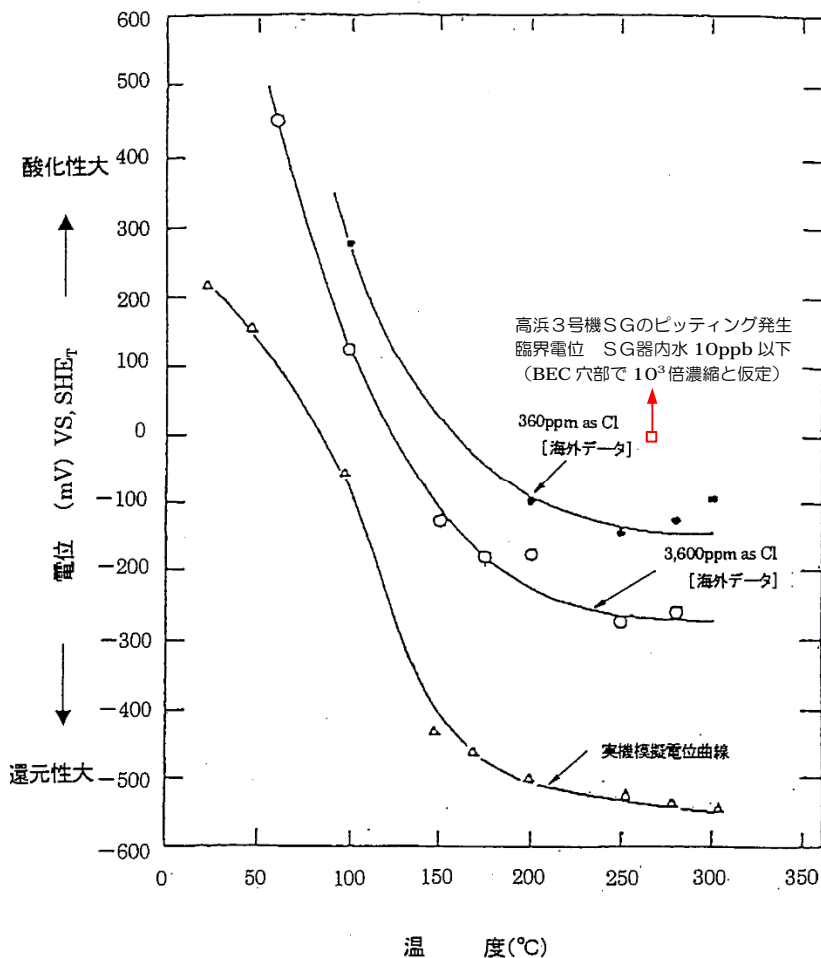
	第24サイクル
塩素イオン (ppb)	0.4

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

一方、高浜発電所3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℃）は約 -540mV と評価している。

したがって、高浜発電所3号機では実機電位がピitting発生電位よりも低く、ピittingの発生環境ではないと考えられる。

*¹ 塩素イオン等に起因する金属表面の被膜破壊によって起きる局所的な腐食。



(説明)

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

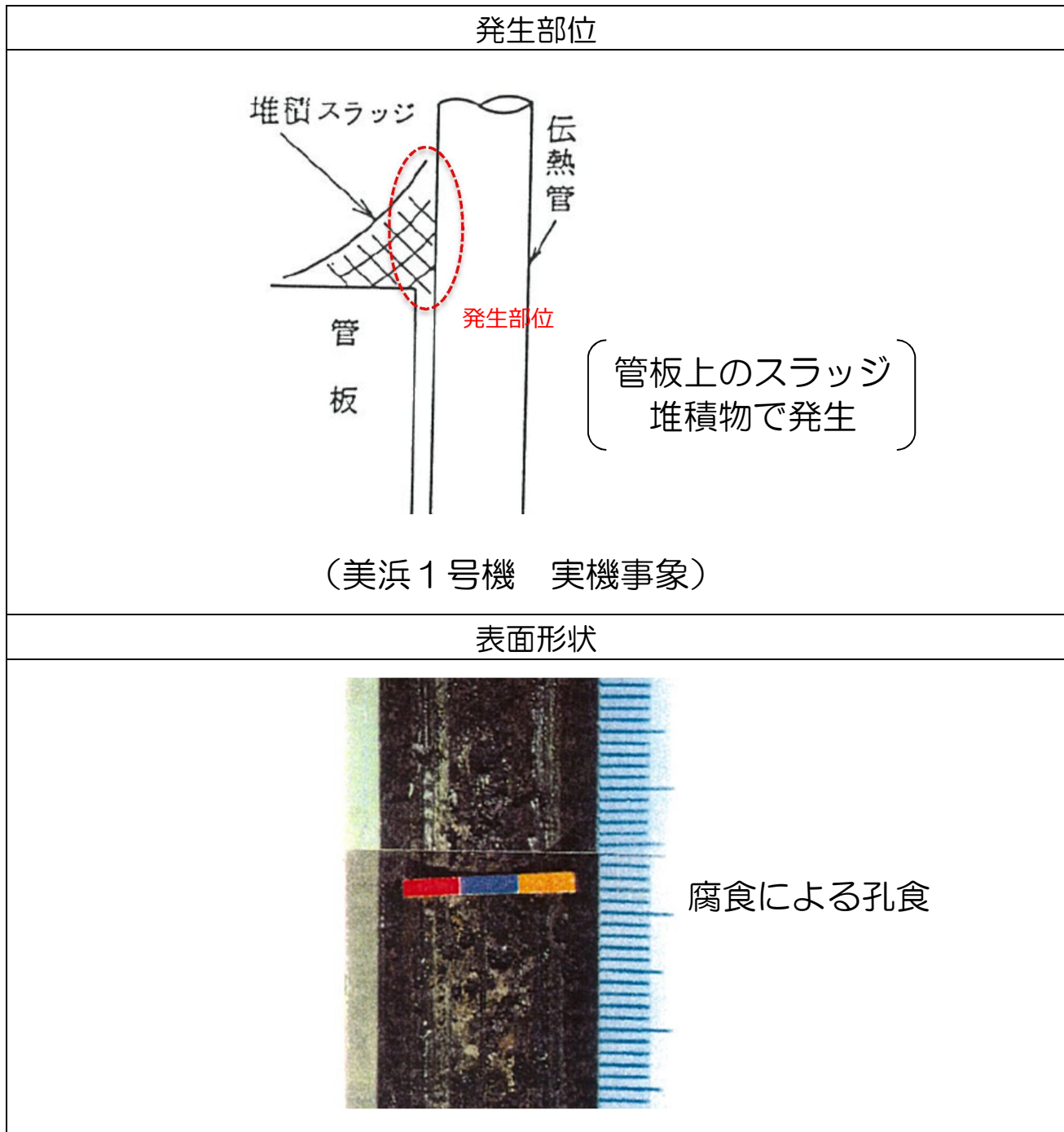
出典

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

図 MA600合金のピitting発生電位

ピittingによるきずの形状

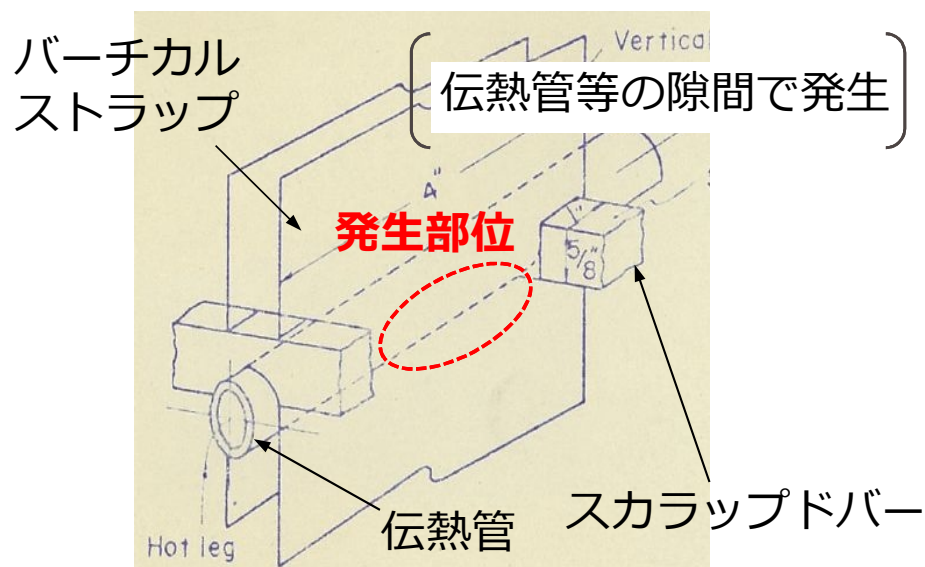
プラントメーカーの材料研究部門の有識者を含め検討した結果、今回確認したきずが摩耗減肉であると判断している。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉と考えられ、ピittingの可能性はないと考えられる。なお、ピittingによるきずの形状例を以下に示す。



リン酸減肉によるきずの形状

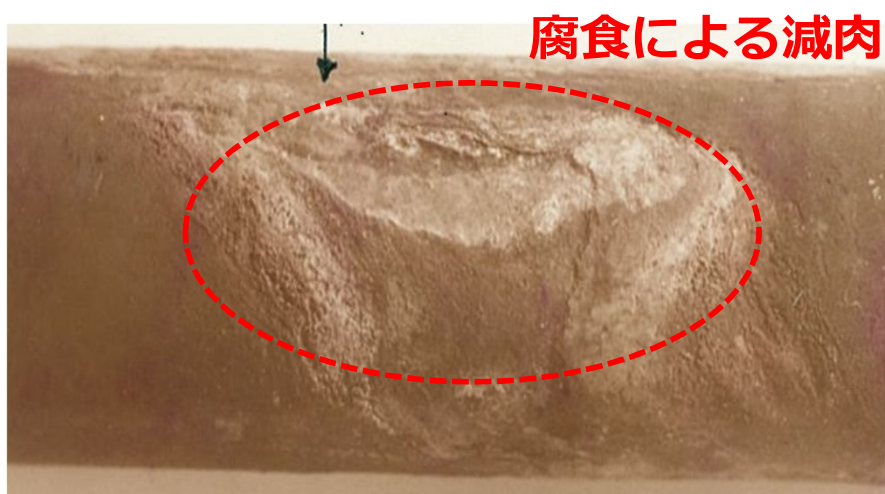
プラントメーカーの材料研究部門の有識者を含め検討した結果、今回確認したきずが摩耗減肉であると判断している。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉と考えられ、リン酸減肉の可能性はないと考えられる。なお、リン酸減肉によるきずの形状例を以下に示す。

発生部位



(美浜1号機 実機事象)

表面形状



拡大観察 (×3倍)

管支持板との接触による摩耗減肉の評価（1／2）

伝熱管は図 1 に示すとおり管支持板によって水平方向を支持しており、四つ葉型の穴によって 1 穴あたり 4 ヶ所が伝熱管と接触する構造となっている。2 次冷却水によって伝熱管に振動が生じた場合、伝熱管は水平全方向にランダムに振動するため、管支持板との接触による摩耗減肉が顕著化する場合は 4 ヶ所の接触部(ランド部^{*1})に減肉が生じることとなる。

今回、減肉指示が確認された位置の目視点検を行った結果、図 2～図 3 に示すとおり、減肉は管支持板下端位置にしか発生していない、かつ、ランド部の位置に発生していない、又はランド部の位置に発生していても接触部 4 ヶ所のうち 1 ヶ所しか発生していないことから、前述の傾向とは異なり、減肉が管支持板との接触・摩耗によって発生した可能性はないと考えられる。

*1 管支持板に加工されている四つ葉型管穴のうち凸面部。

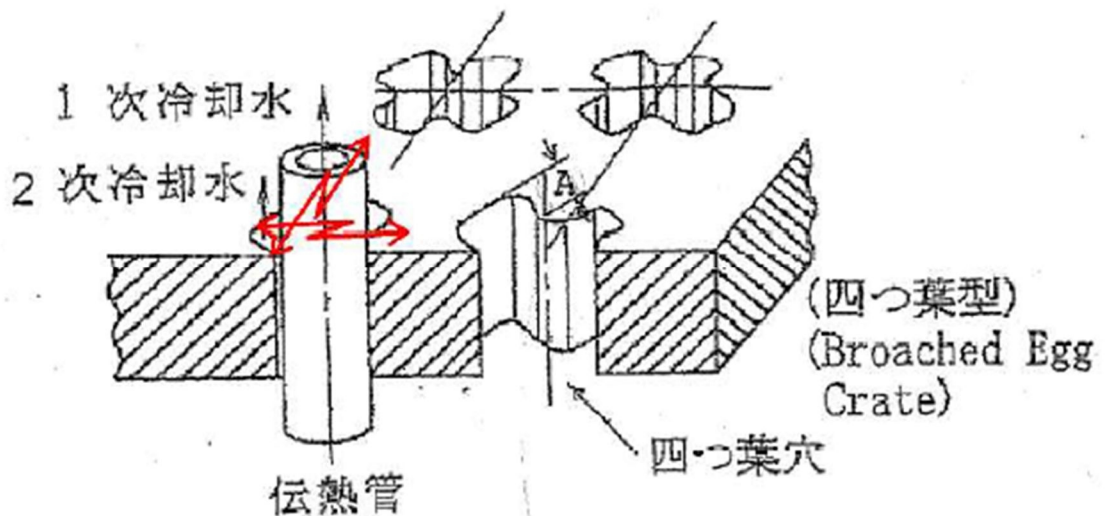


図 1 管支持板四つ葉穴（BEC 穴）による伝熱管の支持状況

管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (2/2)

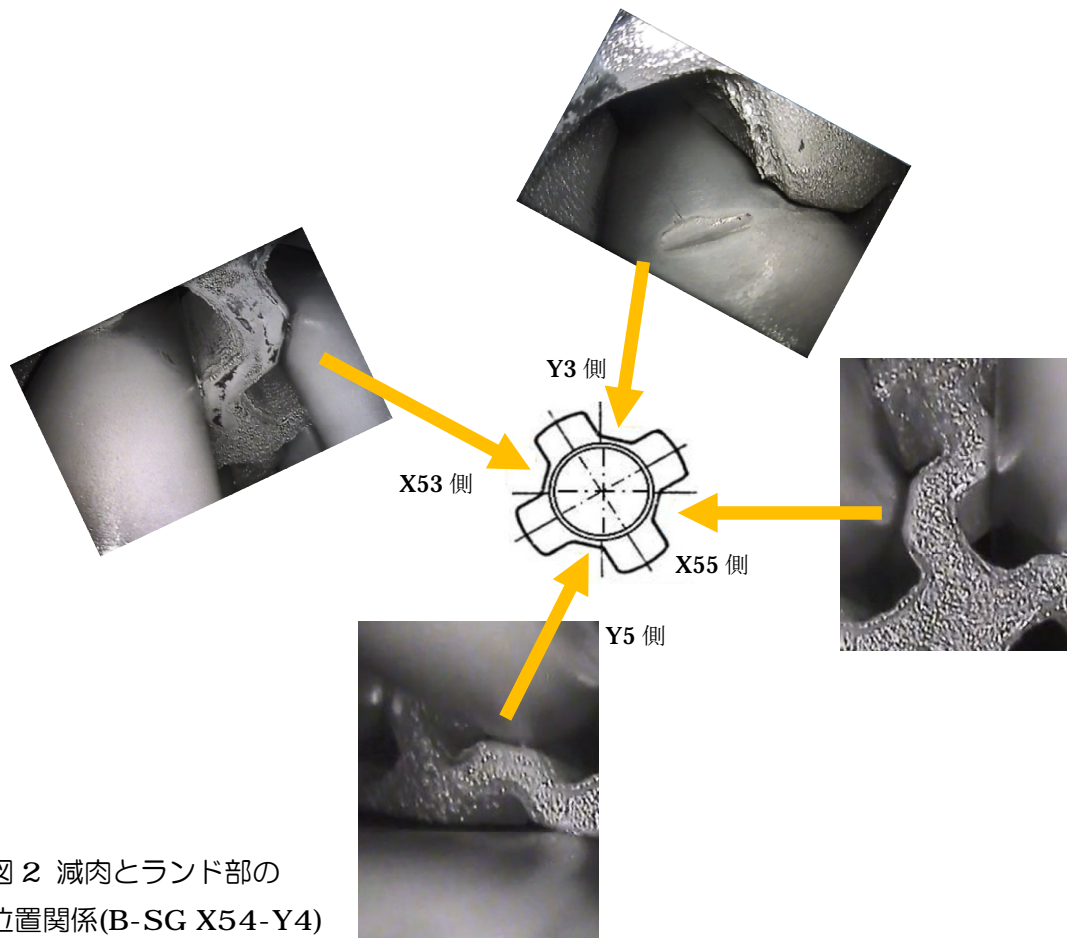


図 2 減肉とランド部の位置関係(B-SG X54-Y4)

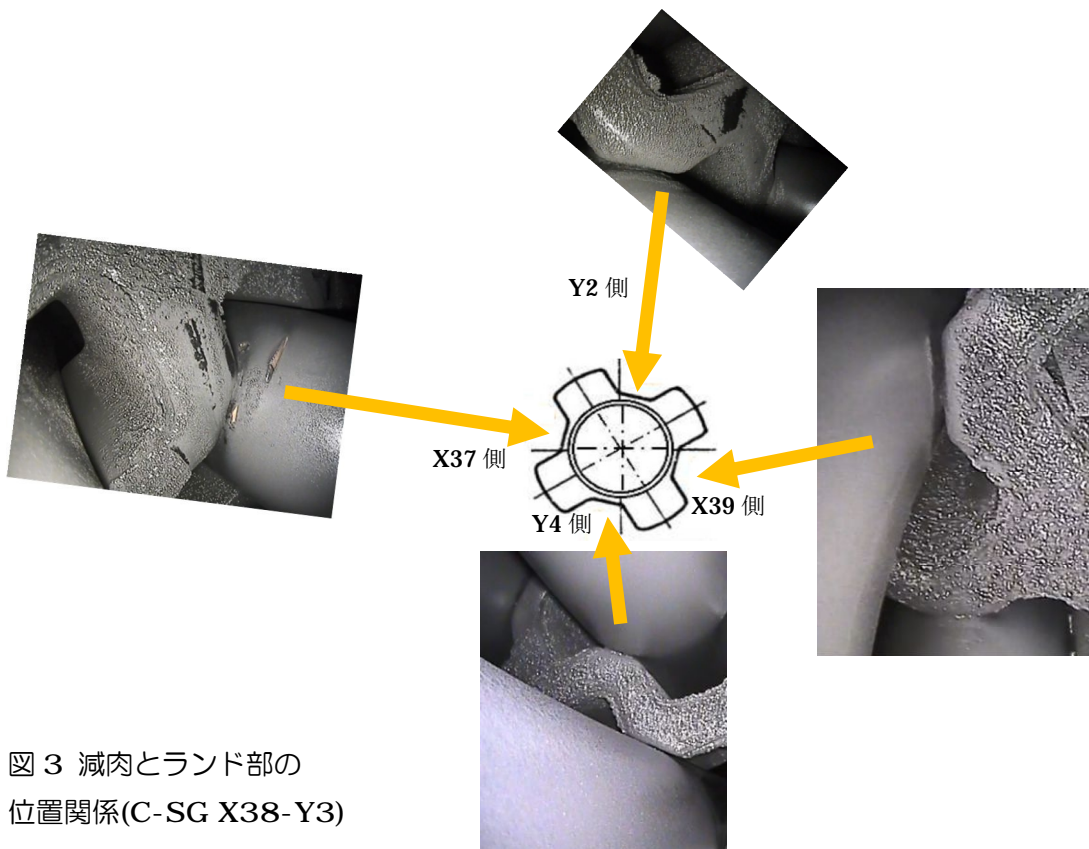
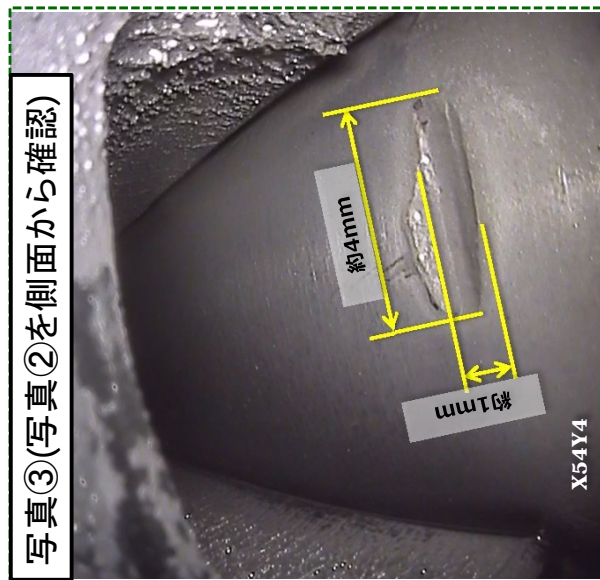
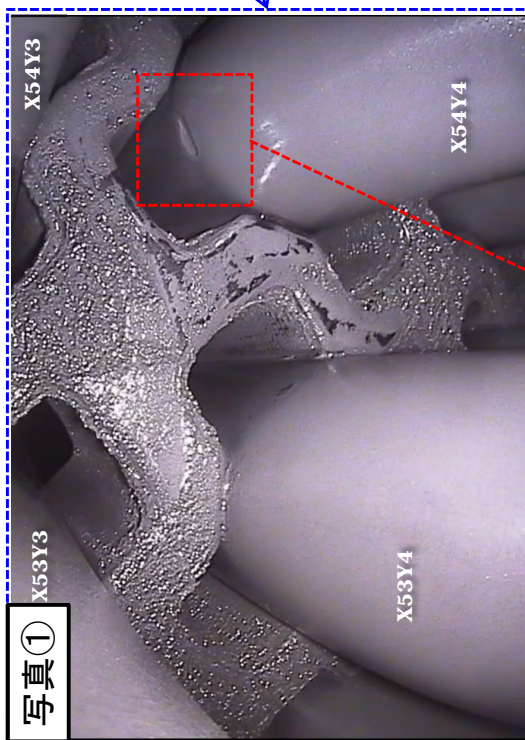
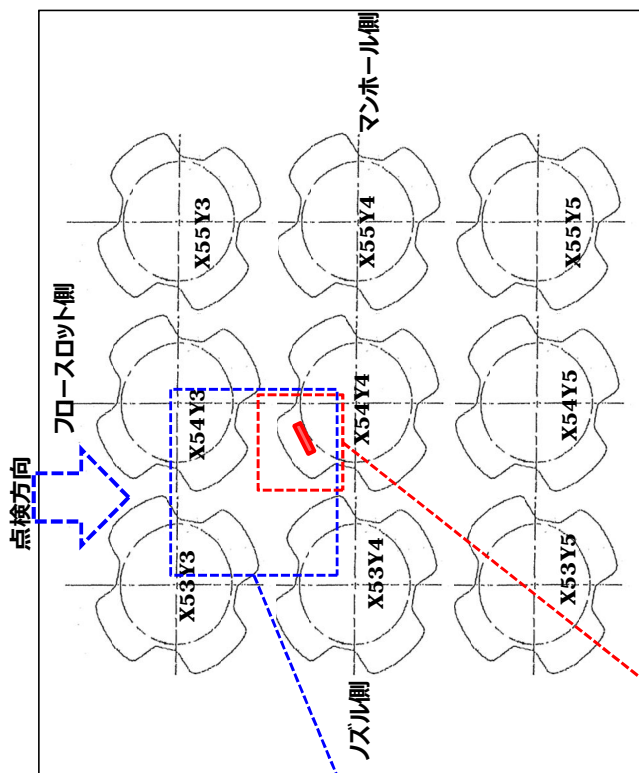


図 3 減肉とランド部の位置関係(C-SG X38-Y3)

S G器内の点検概要

B-SG 伝熱管 2次側表面写真

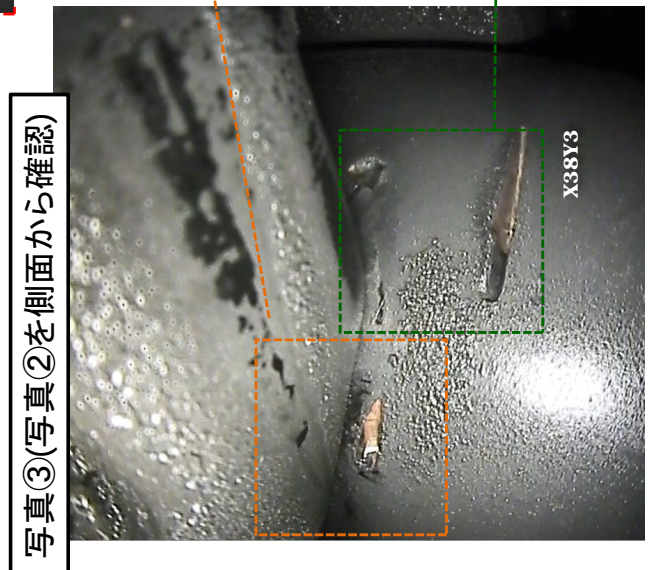
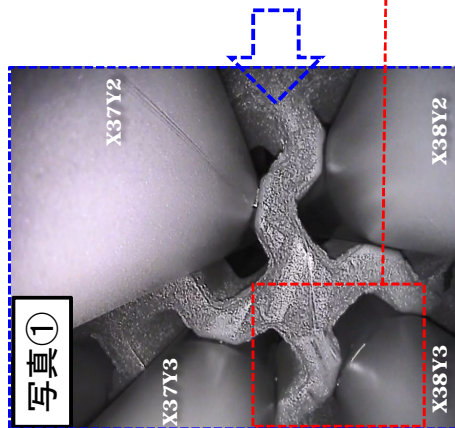
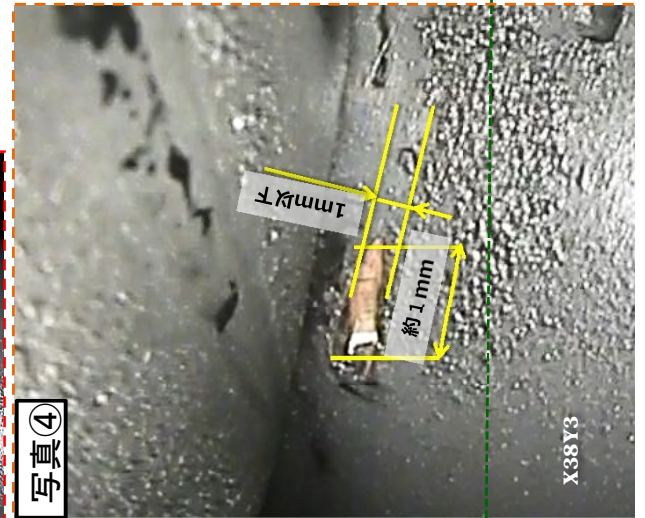
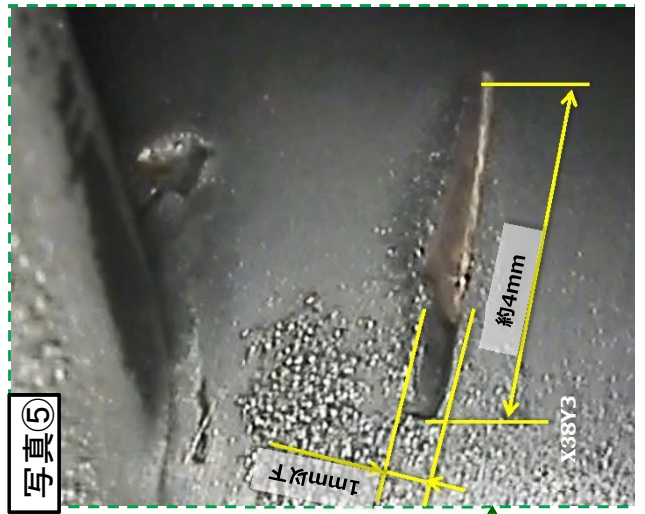
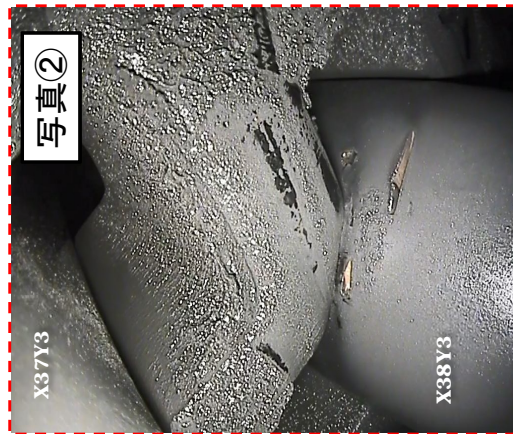
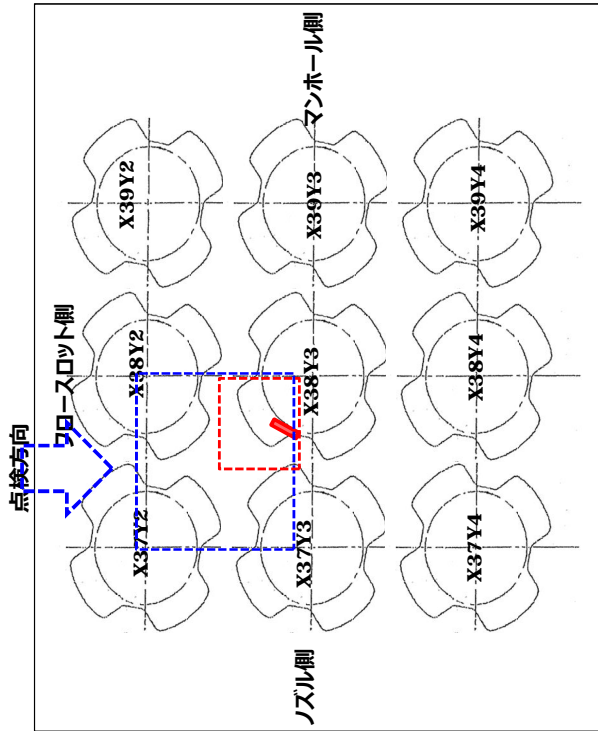
対象：第三管支持板下面 伝熱管 X54, Y4 @Cold



S G器内の点検概要

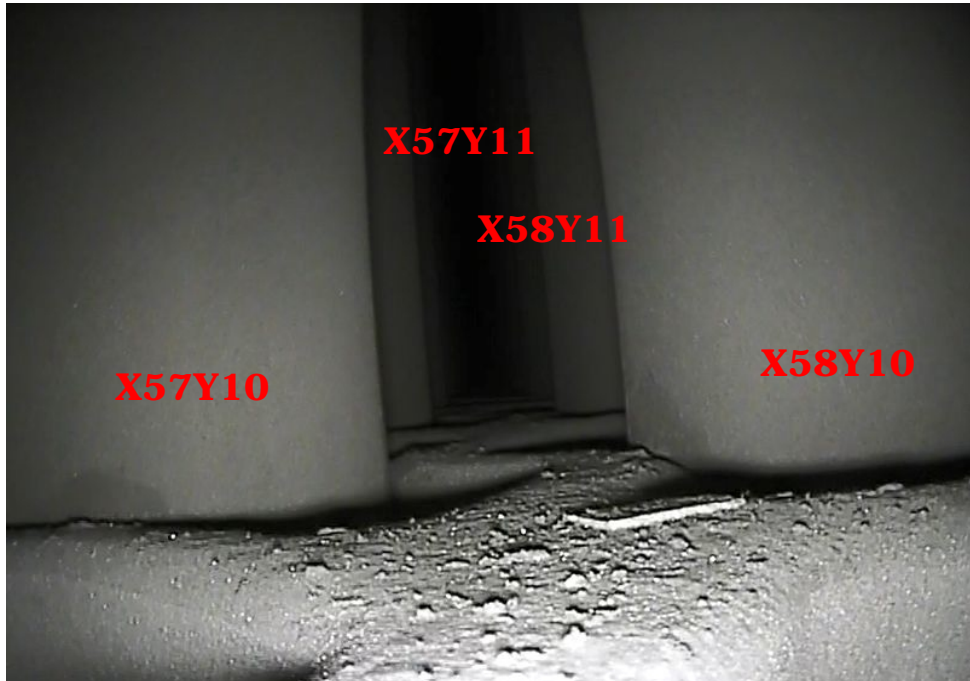
C-SG 伝熱管 2次側表面写真

対象：第三管支持板下面 伝熱管 X38, Y3 @Cold



SG器内の点検概要

A-SG 第一管支持板上写真

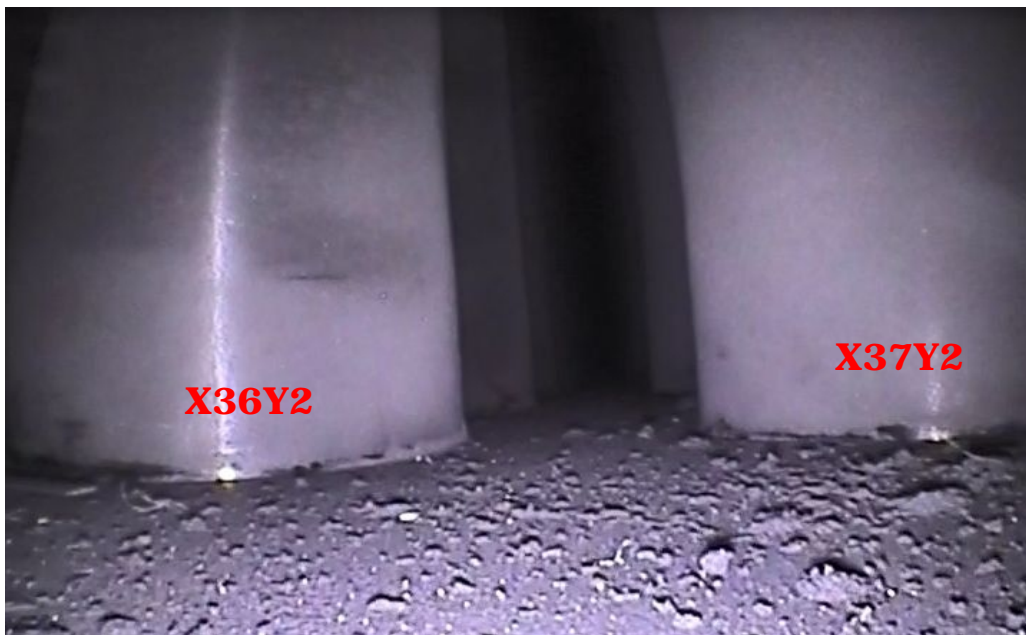


A-SG 第二管支持板上写真

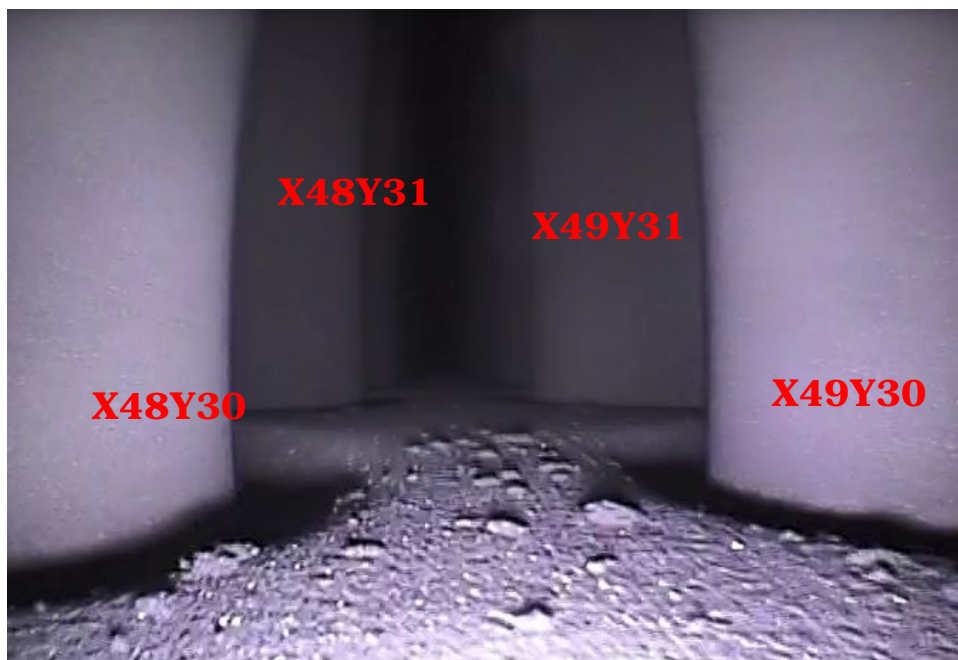


SG器内の点検概要

A-SG 管板上写真

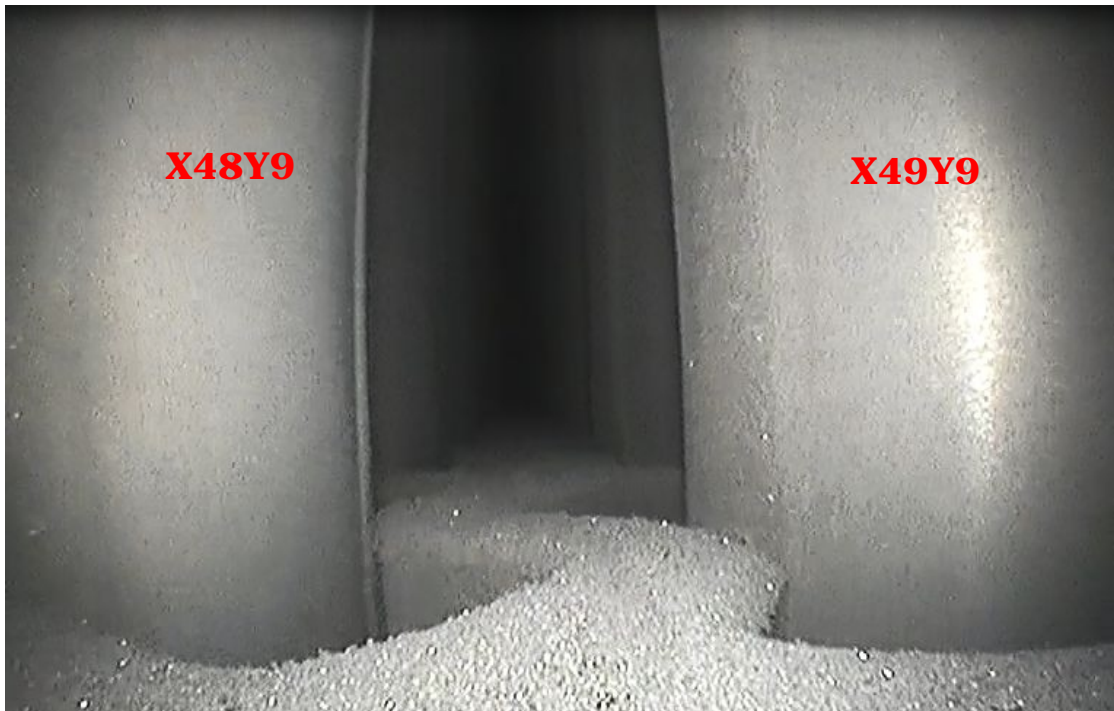


A-SG 流量分配板上写真

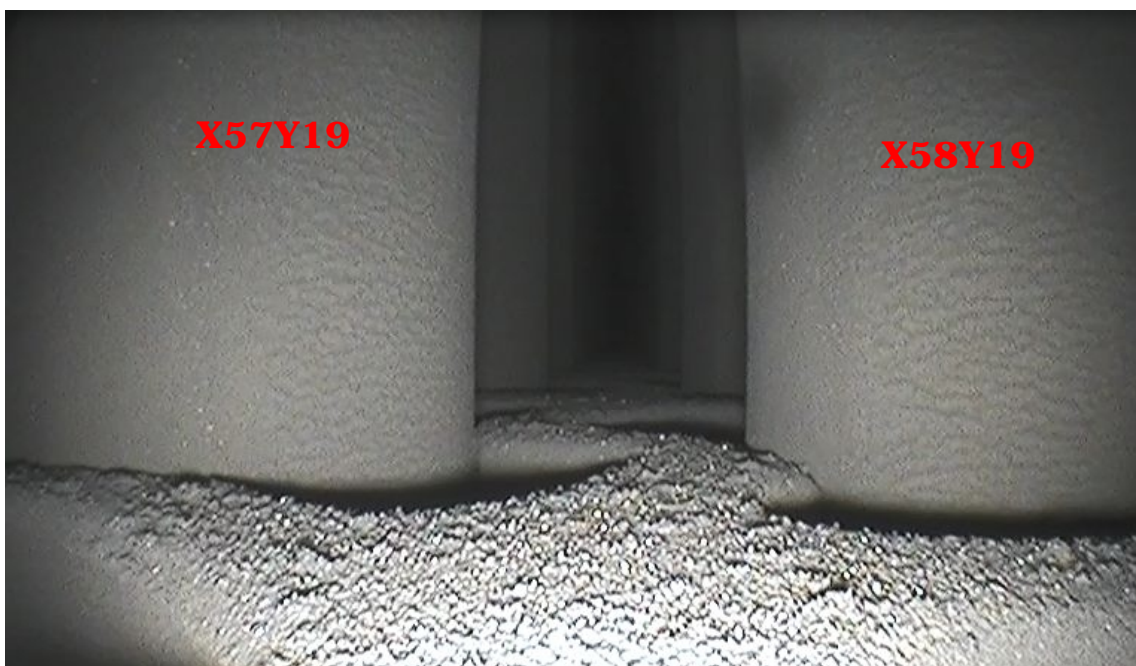


SG器内の点検概要

A-SG 第三管支持板上写真

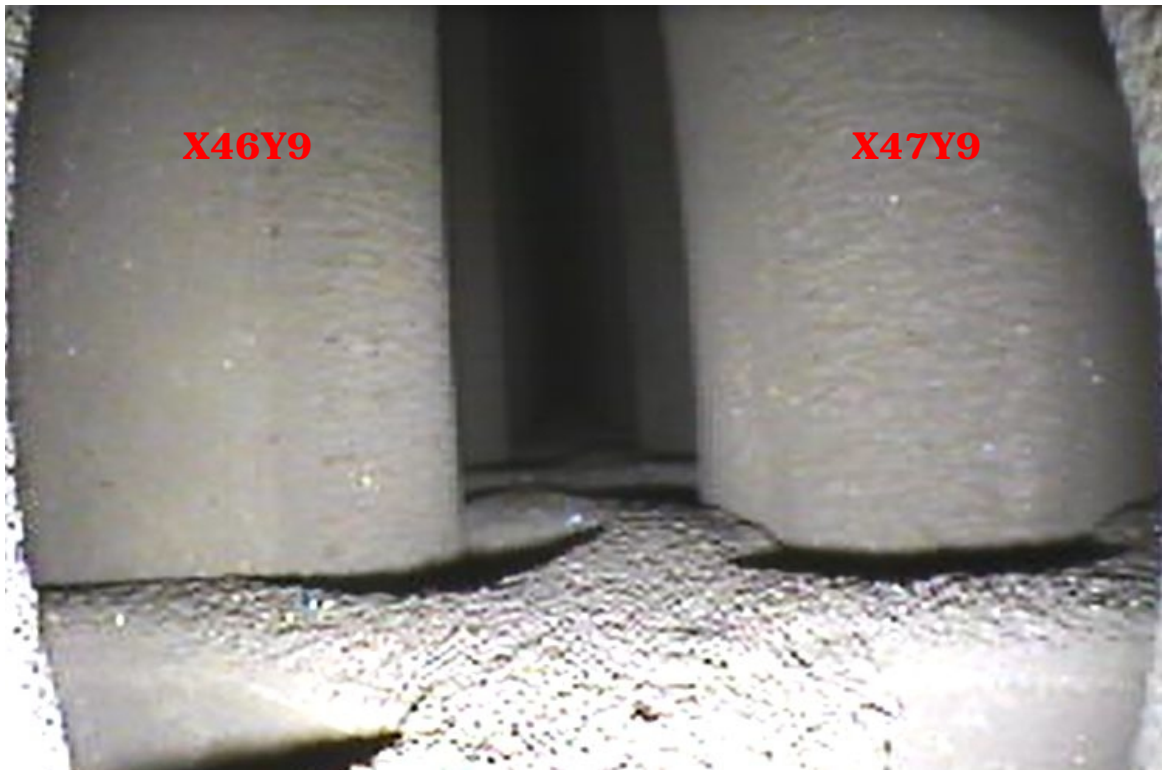


A-SG 第五管支持板上写真



SG器内の点検概要

A-SG 第七管支持板上写真



SG器内の点検概要

B-SG 第一管支持板上写真

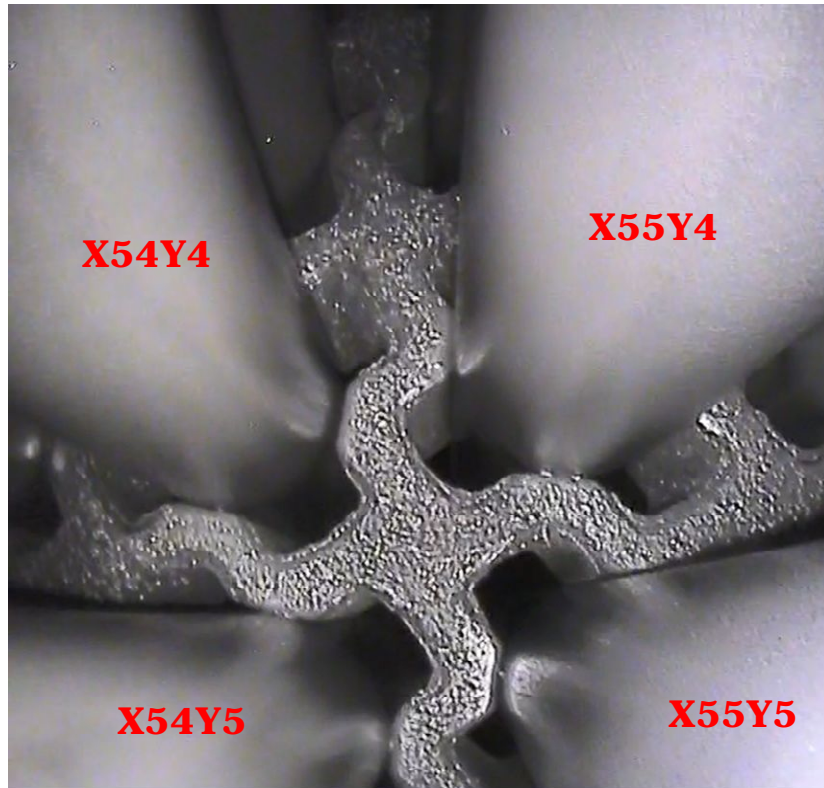


B-SG 第二管支持板上写真



SG器内の点検概要

B-SG 第三管支持板下写真

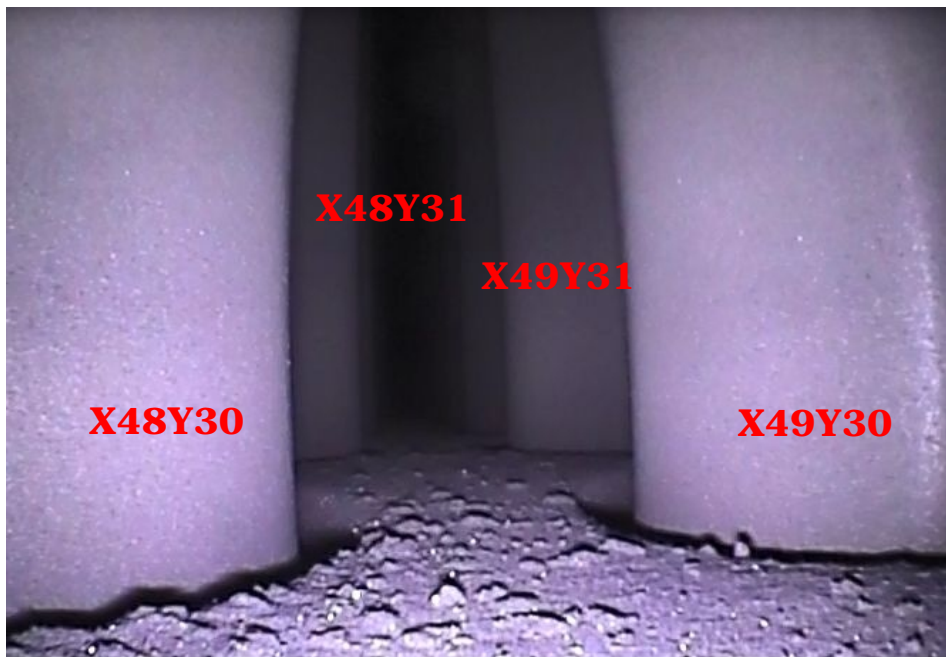


B-SG 管板上写真



SG器内の点検概要

B-SG 流量分配板上写真

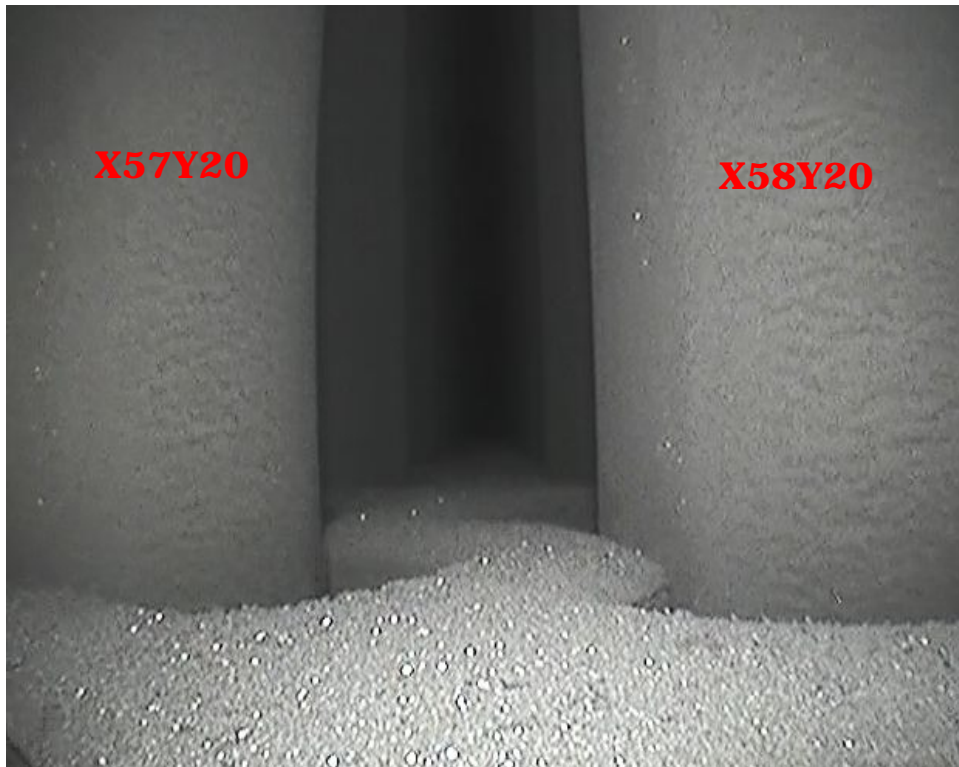


B-SG 第三管支持板上写真

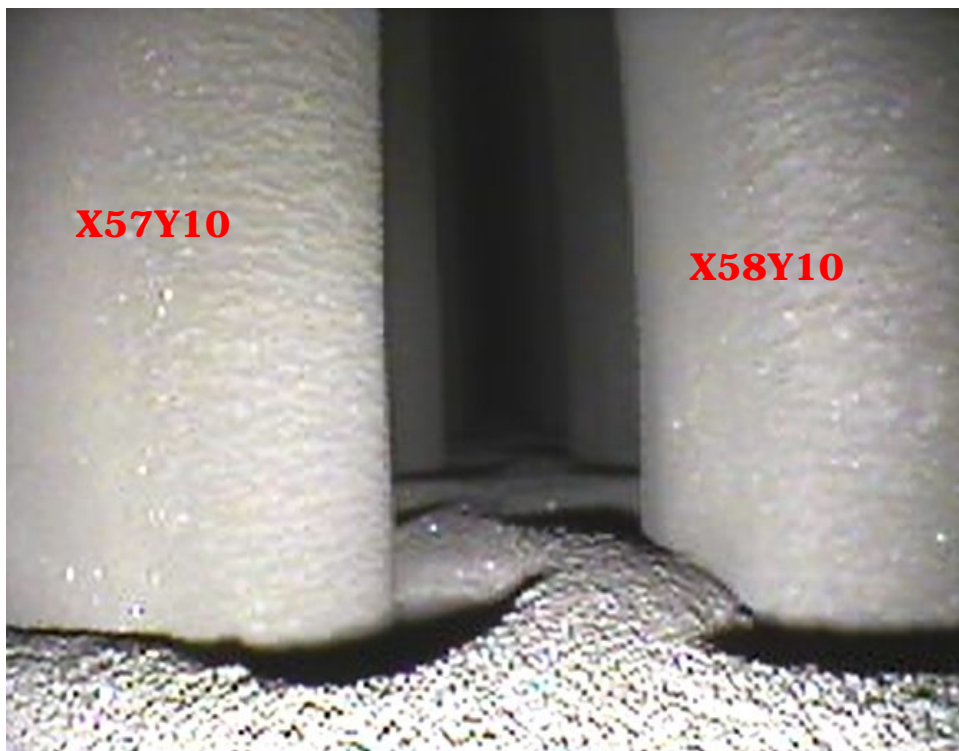


SG器内の点検概要

B-SG 第五管支持板上写真



B-SG 第七管支持板上写真



SG器内の点検概要

C-SG 第一管支持板上写真

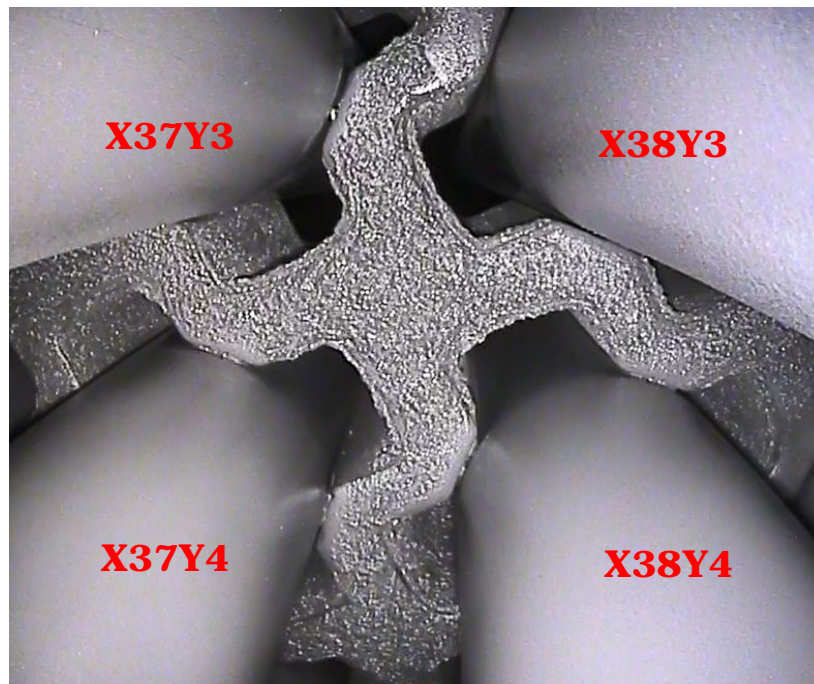


C-SG 第二管支持板上写真



SG器内の点検概要

C-SG 第三管支持板下写真

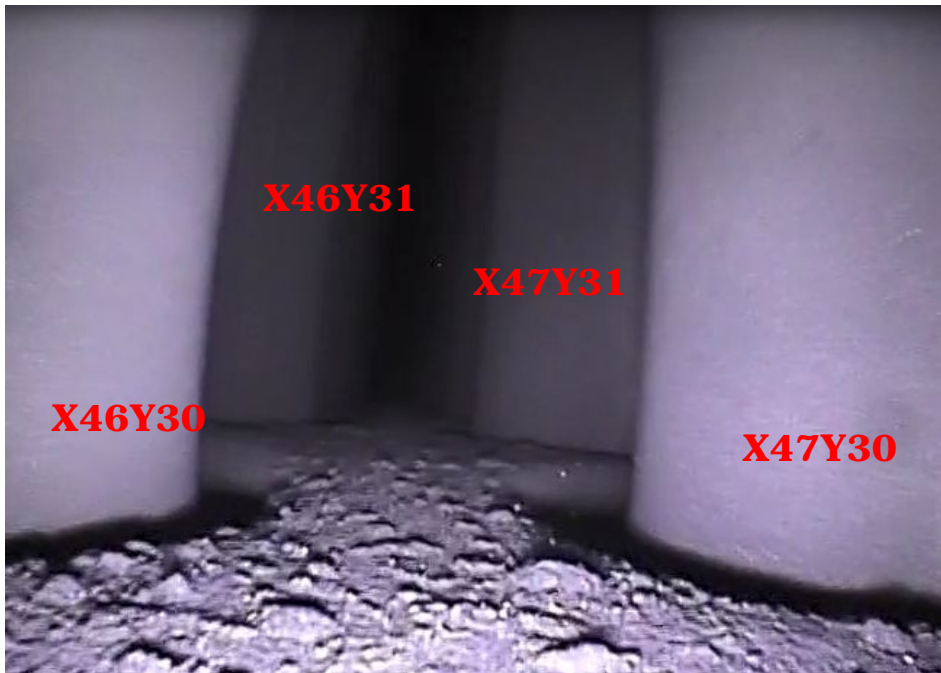


C-SG 管板上写真

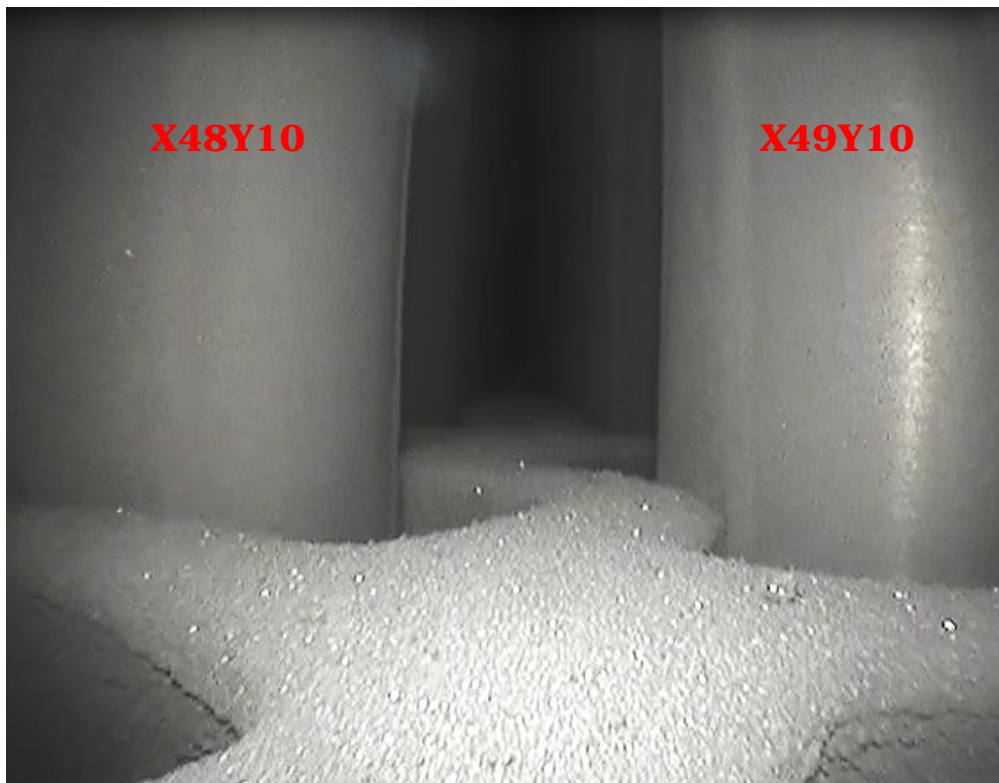


SG器内の点検概要

C-SG 流量分配板上写真



C-SG 第三管支持板上写真

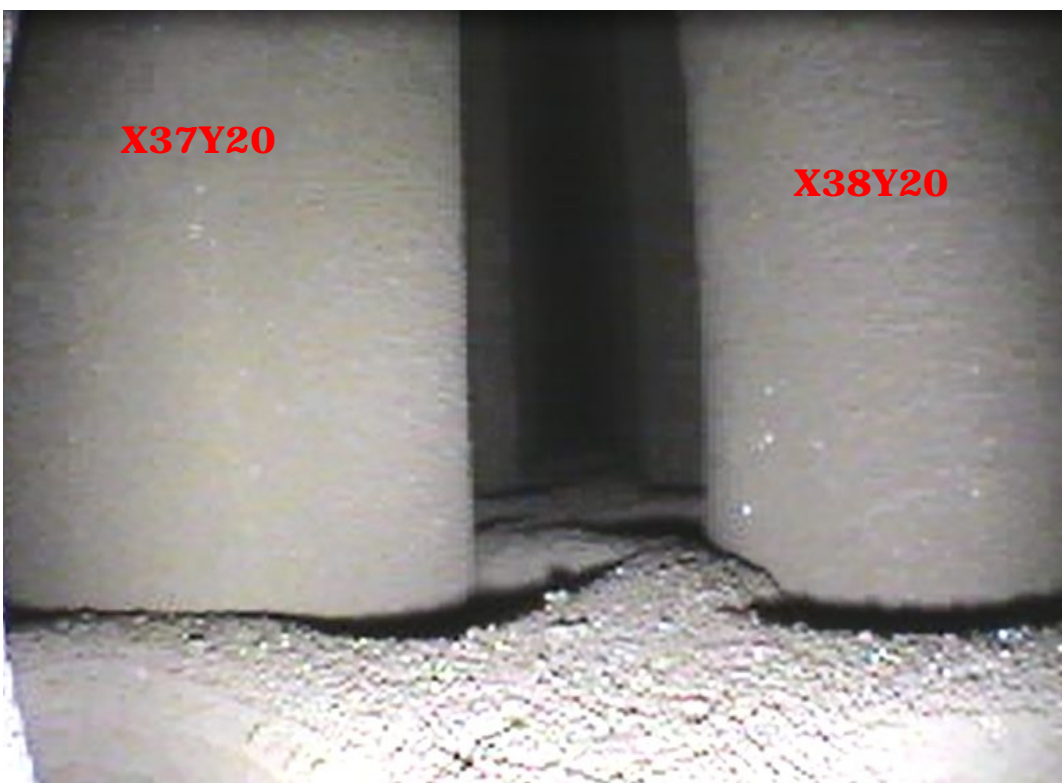


SG器内の点検概要

C-SG 第五管支持板上写真



C-SG 第七管支持板上写真



SG器内の点検概要

スラッジ等の収集および確認結果

B-SGスラッジランシング*¹回収分(比較的大きいスラッジのみ抽出し撮影)



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

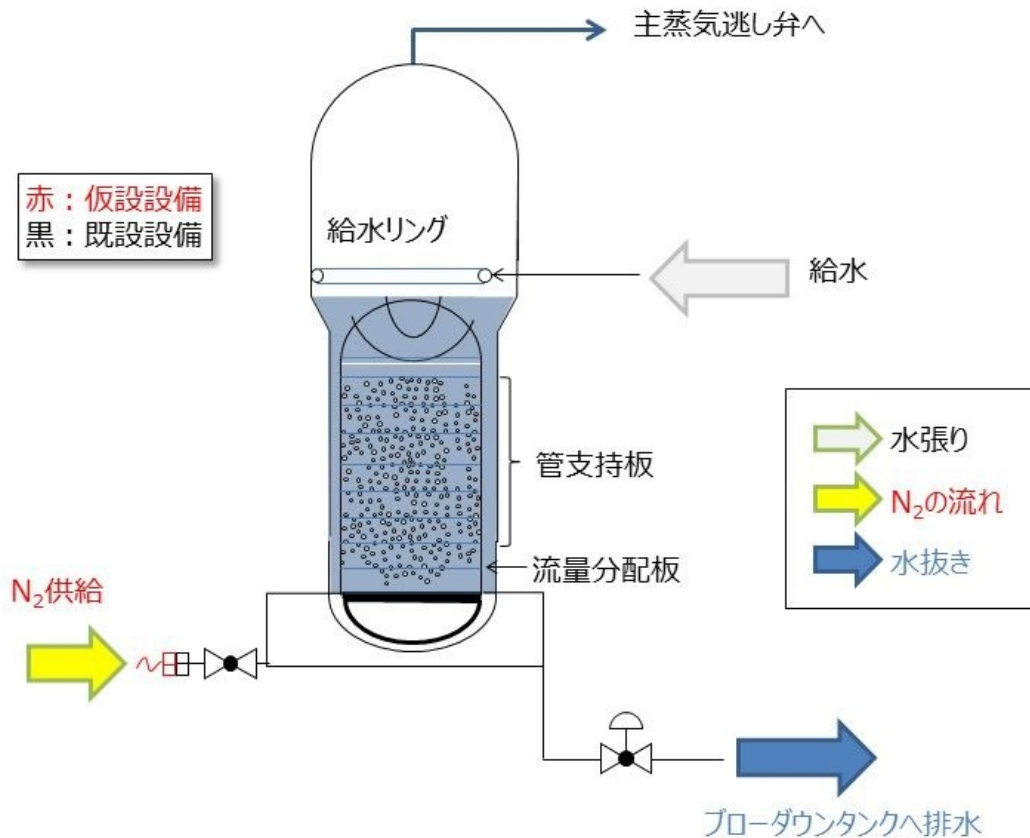
スラッジランシング回収分(一部) : 代表 B-SG



SG器内の点検概要

N₂バブリングの概要

- ① SG 2次側へ給水を行い、第七管支持板まで水張りを行う。
- ② SG 2次側下部からN₂を注入し、バブリングを行う。
(バブリングで使用するN₂は約1,000m³ / SG 1基)
- ③ バブリング終了後、SG器内水をSGBDタンク経由で系外へ排水する。
(これにより、SG器内のスラッジ等は管板上に集積する)
- ④ 管板上を小型カメラで目視点検する。



(参考)

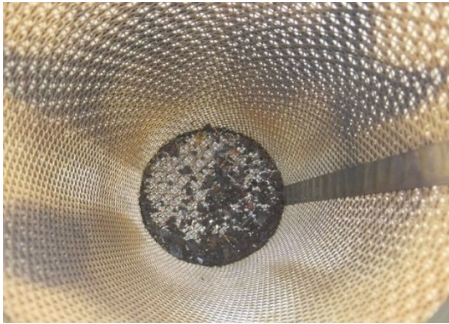
- SG 1基の2次側全体容量が約160m³ (1,000m³は約6回分の入替えに相当)
- 25mプール (25m×14m×1m) の容量が約350m³

SG器内の点検概要

N₂バブリングによる異物調査結果

- ・スラッジは回収できたが、スラッジ以外の異物は確認できなかった。

N₂バブリングによる回収スラッジ(代表:C-SG)



<N₂バブリング後のSGブローダウン系統の仮設ストレーナ×回収スラッジの拡大図>

N₂バブリング前後のSG器内写真(代表:B-SG 管板上)



<N₂バブリング前>



<N₂バブリング後>

デッキプレート上面目視点検

(代表:C-SG)



SG器内の点検概要

外面減肉原因調査の比較・分析

調査項目		T 3 前回 (23回) 定期検査	T 4 前回 (22回) 定期検査	T 3 今回 (24回) 定期検査
SG器内調査	SG器内目視	管板上全面、第一管支持板上ほぼ全面、第二管支持板上部（落下想定範囲）	管板、流量分配板、第一管支持板、第二管支持板上全面	管板、流量分配板、第一管支持板、第二管支持板上全面
	N ₂ バブリング	未実施	実施済	実施
流出異物調査	調査範囲の考え方	・異物は減肉箇所近辺に落下したと評価	・調査装置を改良し、管板～第二管支持板上全面を調査 ・第三管支持板～第七管支持板上を目視調査できない代わりにバブリング調査を実施	・新たな調査装置を導入し、第三管支持板～第七管支持板上全面の目視調査を実施 ・更なる異物調査として、バブリングを実施
	SG系系外フローライン	弁、SGBDタンク	弁、SGBDタンク ターゲットプレート等滞留部	弁、SGBDタンク、配管、系外フロー仮設ストレーナ、ターゲットプレート等滞留部
	SGBD回収ライン	未実施	弁	弁、配管、オリフィス、復水器ホットウエル、復水ポンプ吸入ストレーナ
	調査範囲の考え方	・SGBDを経由して系外に放出されたものと評価	・SGBDを経由して系外に放出されたものと評価 (T3事象は一過性のもので考え仮設ストレーナ等は設置しなかった) ・SGBD回収ライン(オリフィス側)は枝管であるため、ここを経て復水器へ流れる可能性は低いと評価	・連続して外部減肉事象が発生したことを踏まえフローラインにストレーナ設置、調査
	想定異物 (参考)	11.5mm×2.5mm×0.65mm	18～24mm×6～8mm×1mm以下	B-SG : 想定①約24mm×約7mm×1mm以下 想定②約24mm×約5mm×約0.2mm C-SG : 想定①約25mm×約4mm×1mm以下 想定②約16mm×約6mm×1mm以下 想定③約15mm×約7mm×1mm以下
確認異物 (参考)	なし	A-SG : 20mm×10mm×0.6mm	A-SG : 24mm×5mm×0.2mm C-SG : 33mm×5mm×0.2mm	
伝熱管損傷 (参考)	拡管部応力腐食割れ C : 1本 外面減肉 A : 1本 (微小減肉)	拡管部応力腐食割れ なし 外面減肉 A : 1本/B : 1本/C : 3本	拡管部応力腐食割れ なし 外面減肉 B : 1本/C : 1本	

○ T3前回(23回)定期検査ではSG器内の落下想定範囲に異物がなかったことからSGBDから系外に流出したものと推定。SG器内の一部の範囲について確認しております。FDB上で今回確認した異物がT3前回(23回)定期検査から器内に残っていた可能性は否定できない。

○ T4前回(22回)定期検査では管板～2B上全面に異物が無いことの目視確認に加えて器内をN₂バブリングしており、SG器内に異物が残っている可能性は考えにくい。

SG器内の点検概要

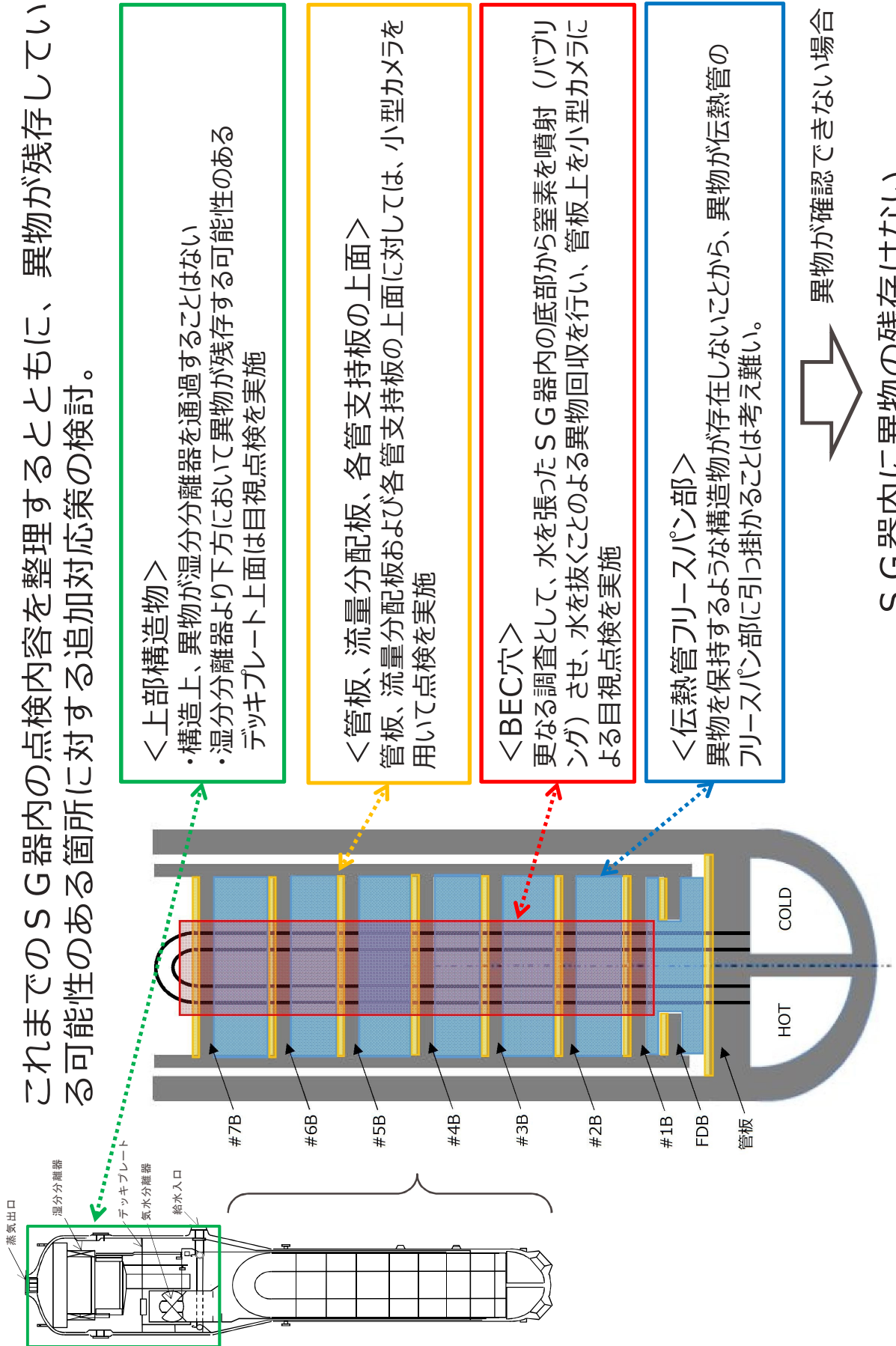
SG器内調査比較図

	T 3前回 (23回) 定期検査	T 4前回 (22回) 定期検査	T 3今回 (24回) 定期検査
SG器内カメラ点検範囲			
点検 / 調査範囲	<p>外面減肉 A : 1本 (微小減肉)</p>	<p>外面減肉 A : 1本/B : 1本/C : 3本</p>	<p>外面減肉 B : 1本/C : 1本</p>

S G器内の点検概要

S G器内の異物残存可能性について

これまでのS G器内の点検内容を整理するとともに、異物が残存している可能性のある箇所に対する追加対応策の検討。



＜上部構造物＞

- ・構造上、異物が湿分離器を通過することはない
- ・湿分離器より下方において異物が残存する可能性のあるデッキプレート上面は目視点検を実施

＜管板、流量分配板、各管支持板の上面＞

管板、流量分配板および各管支持板の上面に対しては、小型カメラを用いて点検を実施

＜BEC穴＞

更なる調査として、水を張ったS G器内の底部から窒素を噴射（バブリング）させ、水を抜くことよる異物回収を行い、管板上を小型カメラによる目視点検を実施

＜伝熱管プリースパン部＞

異物を保持するような構造物が存在しないことから、異物が伝熱管のプリースパン部に引っ掛かることは考え難い。



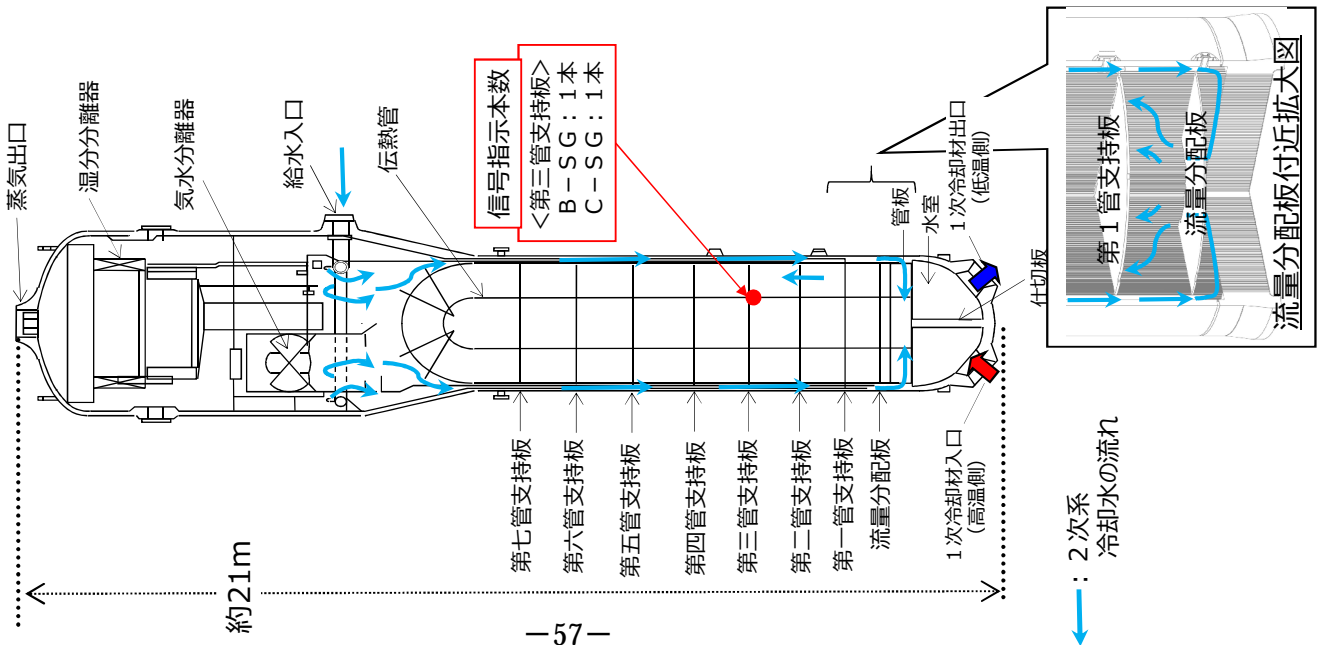
異物が確認できない場合

S G器内に異物の残存はない

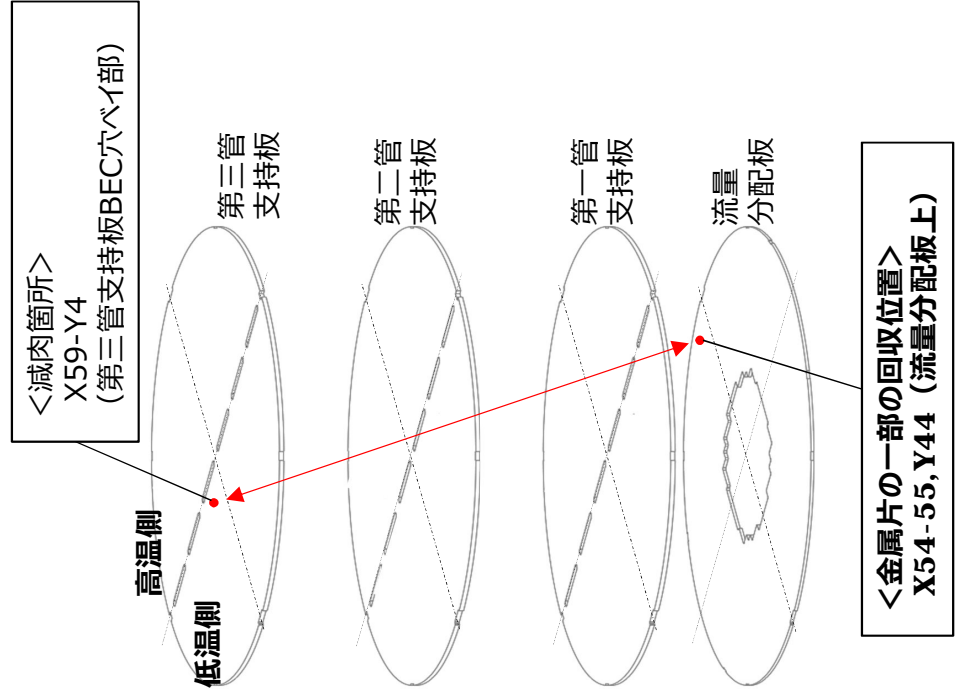
金属片位置図

金属片を確認した位置は、以下のとおりであった。

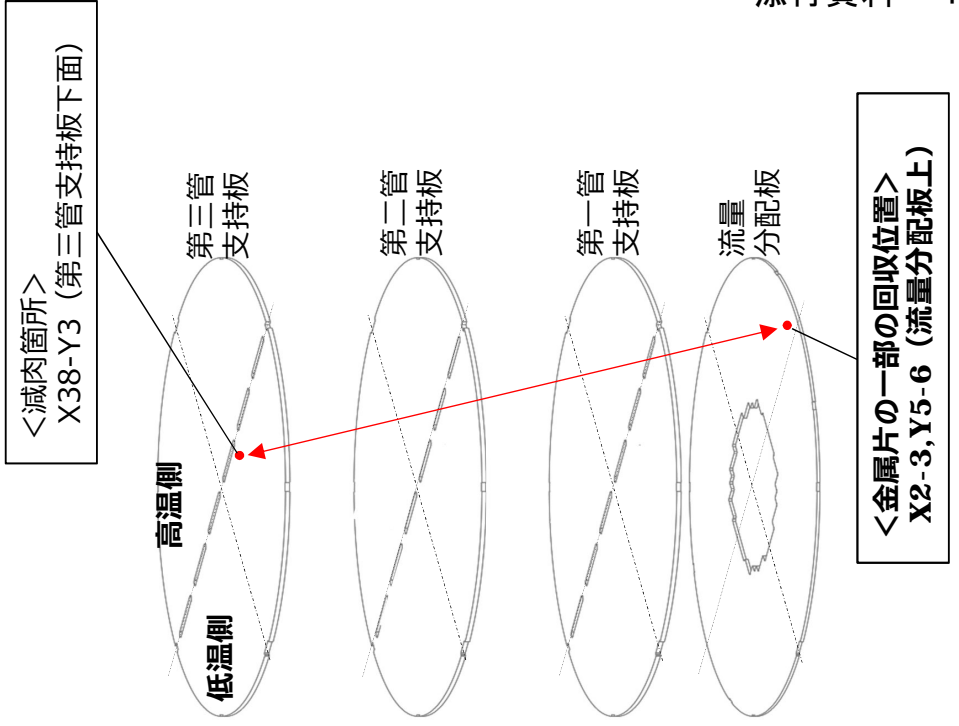
蒸気発生器概要図



A-SG伝熱管の減肉箇所と 金属片の回収位置



C-SG伝熱管の減肉箇所と 金属片の回収位置



金属片分析結果（2／5）

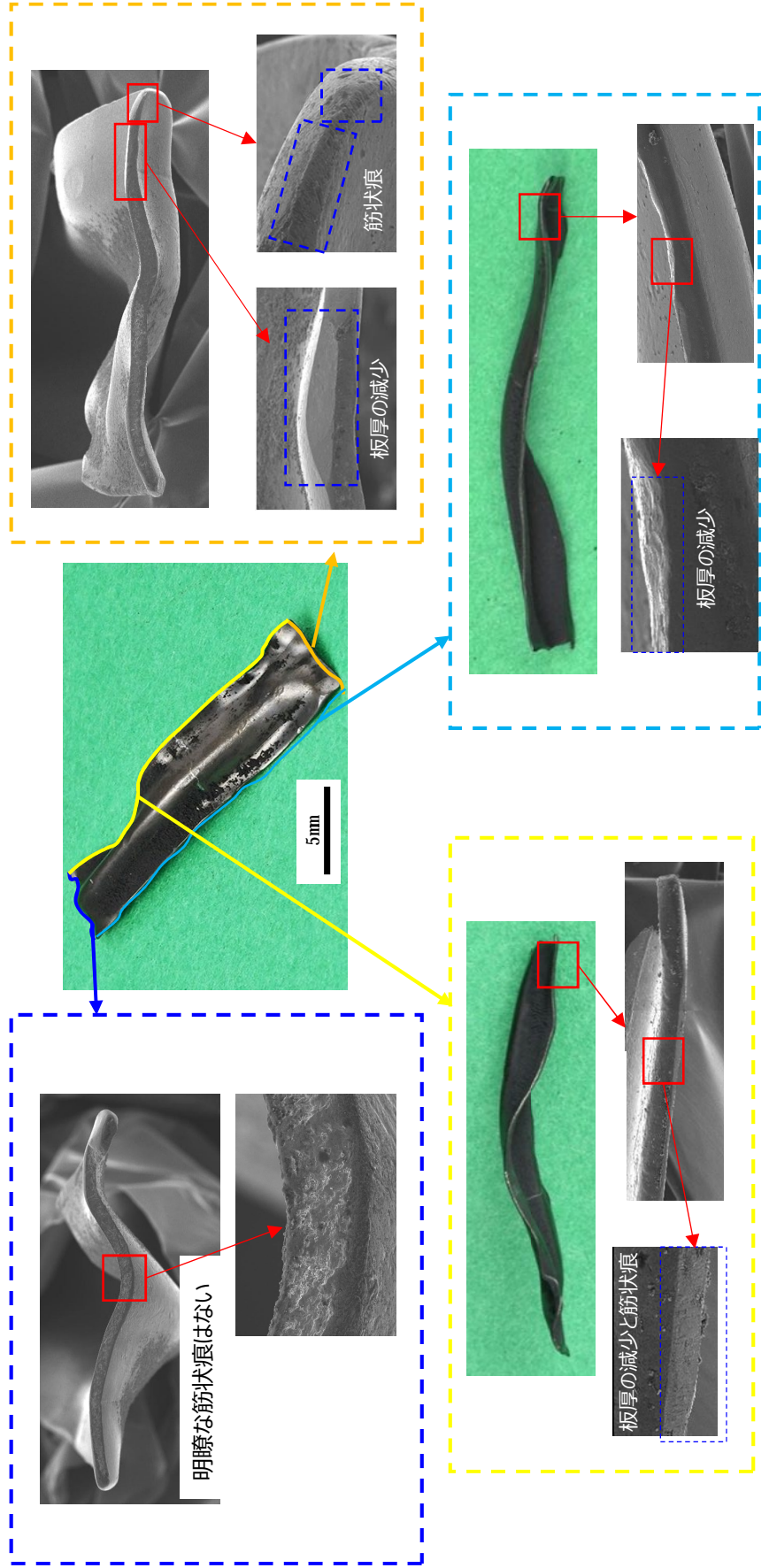
< A-SGで確認した金属片 >

○成分分析結果

・オーステナイト系ステンレスSUS304相当

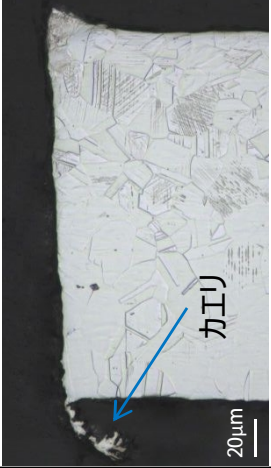






○外観観察結果（SEM）

- ・渦巻きガセットのフープ材の一部と思われる。
- ・SEM観察等の結果から、部分的な筋状の擦れ跡、摩耗など、いくつかの痕跡が確認できた。



金属片分析結果 (3 / 5)

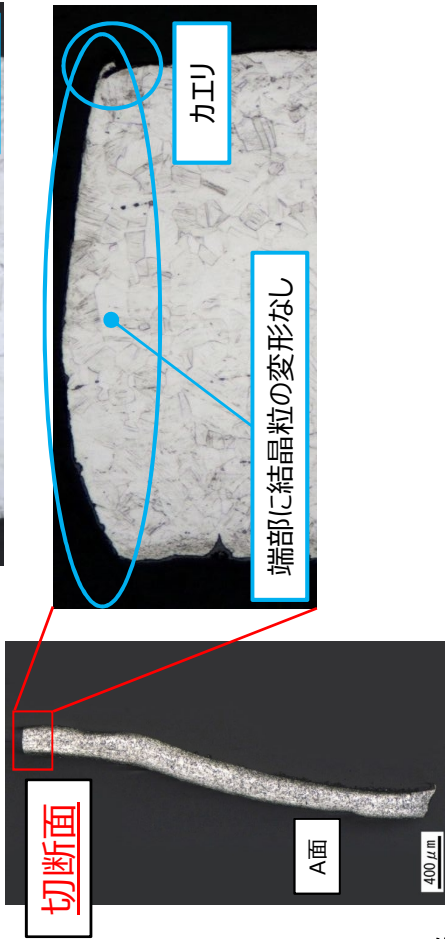
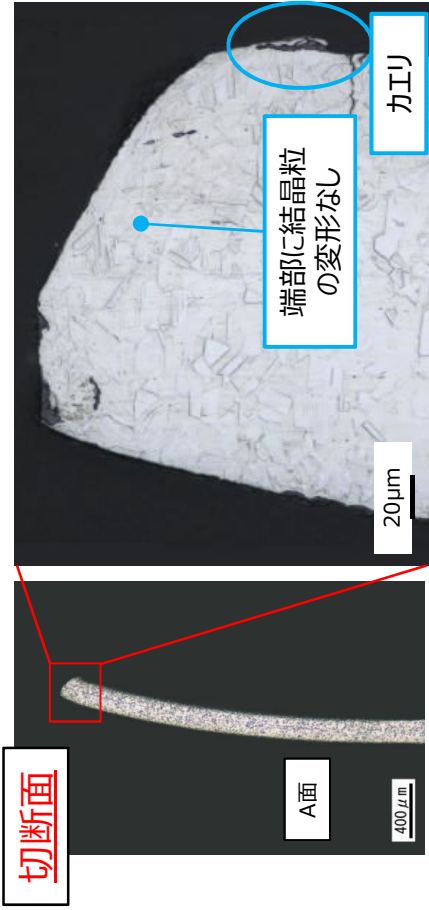
A、C-SGで確認した金属片と同様な形状であるフープ材を様々な方法で切断した試験材の切断面と、金属片の切断面をSEMにより観察、比較する。
 様々な方法で切断した試験材の切断面は以下のとおりとなった。

		高サイクル疲労	
		引張	曲げ
砥石切断	<ul style="list-style-type: none"> 塑性変形の痕（結晶粒の変形）は認められない 切断時にカエリが残る場合あり 	<ul style="list-style-type: none"> 塑性変形の痕（結晶粒の変形）は認められない 疲労評価の結果、可能性低※ 	<ul style="list-style-type: none"> 塑性変形の痕（結晶粒の変形）は認められない 疲労評価の結果、可能性低※ 
		※A、C-SGで回収した金属片は長さが約24～33mmと短く、給水系統の流体力では疲労限に至らないため、高サイクル疲労を起こす可能性は低い	
		せん断	
金切りはさみ	<ul style="list-style-type: none"> 切断方向に曲がり、板厚が減少 破面一帯に塑性変形の痕（結晶粒の変形）あり 	ニッパ-	<ul style="list-style-type: none"> 破面は全体的に大きく変形 切断方向に曲がり、板厚が減少 破面一帯に塑性変形の痕（結晶粒の変形）あり 
低サイクル疲労	<ul style="list-style-type: none"> 破面に局所的な凸凹あり 曲げによる塑性変形の痕（結晶粒の変形）あり 破面以外にもき裂あり 	引張破断	<ul style="list-style-type: none"> 破面は全体的に大きく変形 破面一帯に塑性変形の痕（結晶粒の変形）あり 

金属片分析結果 (4 / 5)

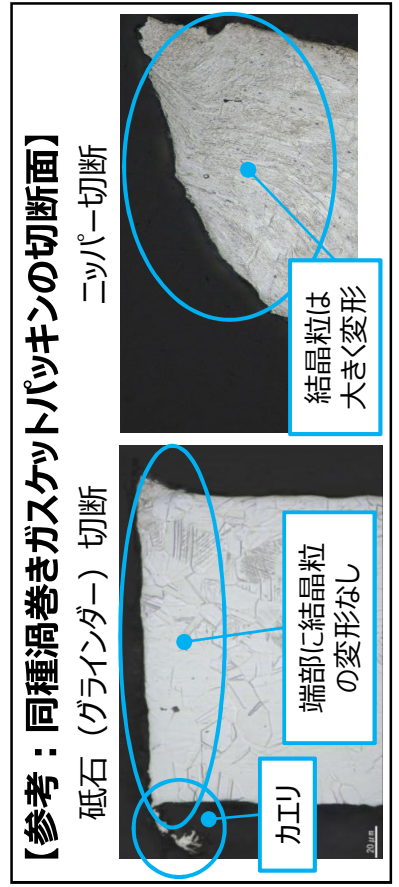
金属片の切断面をSEMにより観察した結果は以下のとおり。

回収した金属片の端部の組織観察のため、破壊調査を実施 (結果は右図)



端部の結晶組織には変形が認められずまたカエリが残っていることから、せん断破壊や低サイクル疲労のよう
に過大な荷重により塑性変形を伴う破壊モードではなく、
砥石切断のように結晶組織に塑性変形を伴わない破壊モードで小片状になったと推定

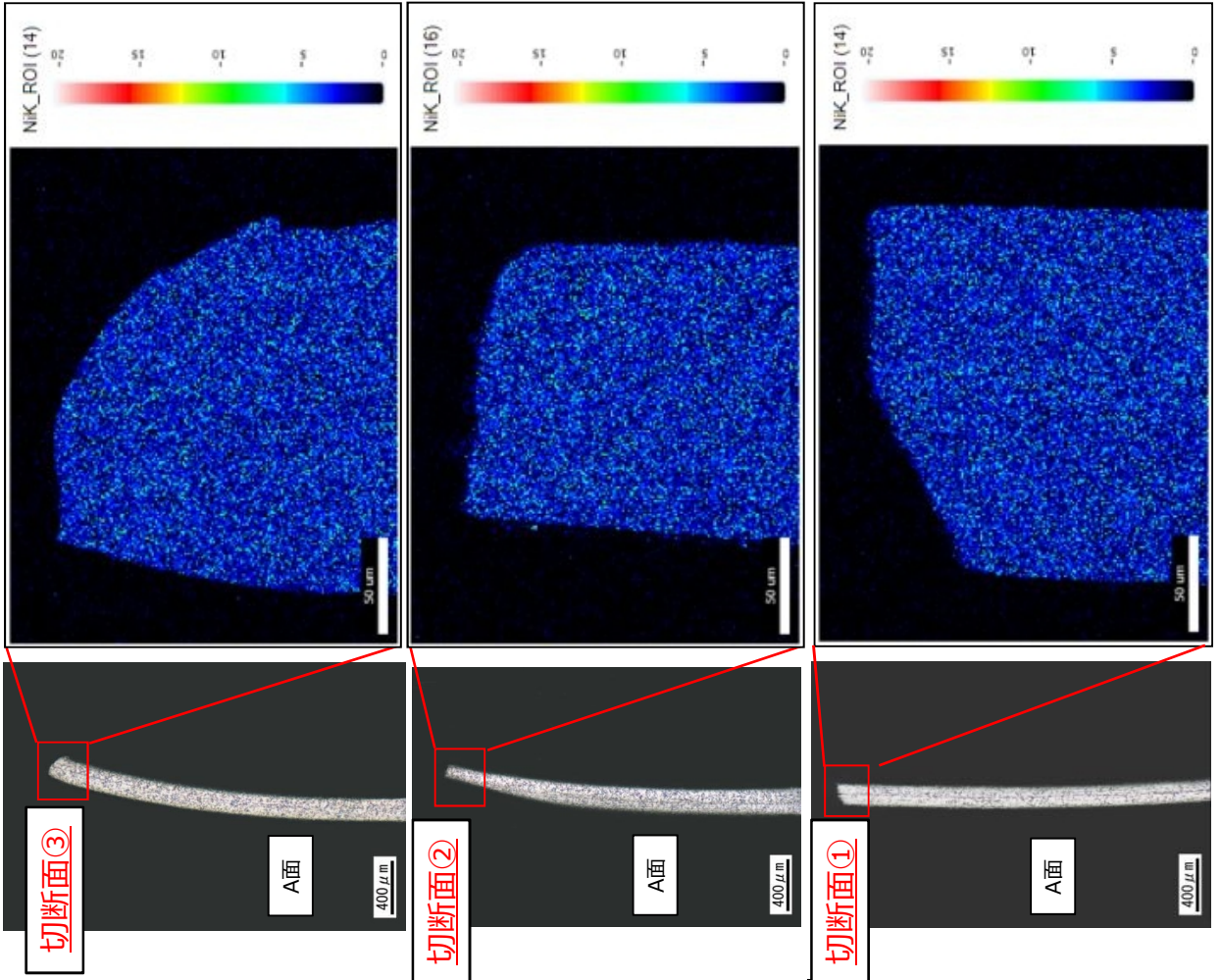
⇒金属片はニッパーで細断されたものではない



金属片分析結果（5／5）

C－S Gの金属片の伝熱管と接触したと推定される角部に伝熱管の主成分であるニッケル（Ni）の付着があるか調査を行った。

- 角部を切断して断面の化学分析を実施



- 化学分析の結果、どの切断面においても、表層には伝熱管の成分と考えられるNi成分は検出されなかった。
なお、過去の美浜3号機の異物によるSG伝熱管外面の摩耗減肉事象（2000.9.1損傷確認）のように、原因となった異物の表面の付着物分析を行った結果、スラッジの主成分であるマグネサイト以外は認められなかった事例はある。

SG 2 次側内部品について

(1) SG 内部品と想定異物サイズとの整合性 (添付 1)

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

想定異物サイズに比較的類似しているものとしては、板厚 1.0 mm 以下の内部品構成部品として、振止め金具キー固定板等が抽出される(表 1)が、これらについては、溶接止めされていること、もしくは、周囲を溶接止めされた構造物に囲まれており、万が一、脱落したとしても周囲の構造物の外には出ないこと、SG 器内からの異物の可能性はないと考えられる。

(2) SG 内部品の経年劣化による脱落の可能性 (添付 2)

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

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

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

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

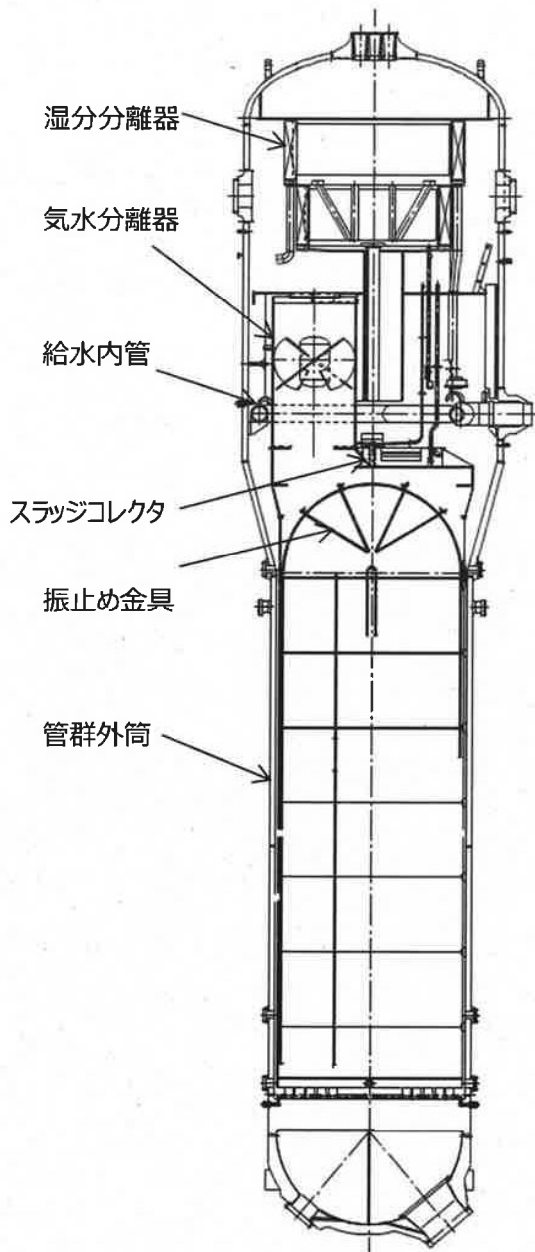
- ・給水リング (給水内管裏当金 / 給水内管 T 継手部およびレデューサ)
- ・サーマルスリーブ

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

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

SG 2次側内部品について

添付1 SG 内部品構成部品の調査



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

図1 SG 2次側 内部品について

枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

SG2次側内部品について

表1 SG2次側 内部品のスクリーニング

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

枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

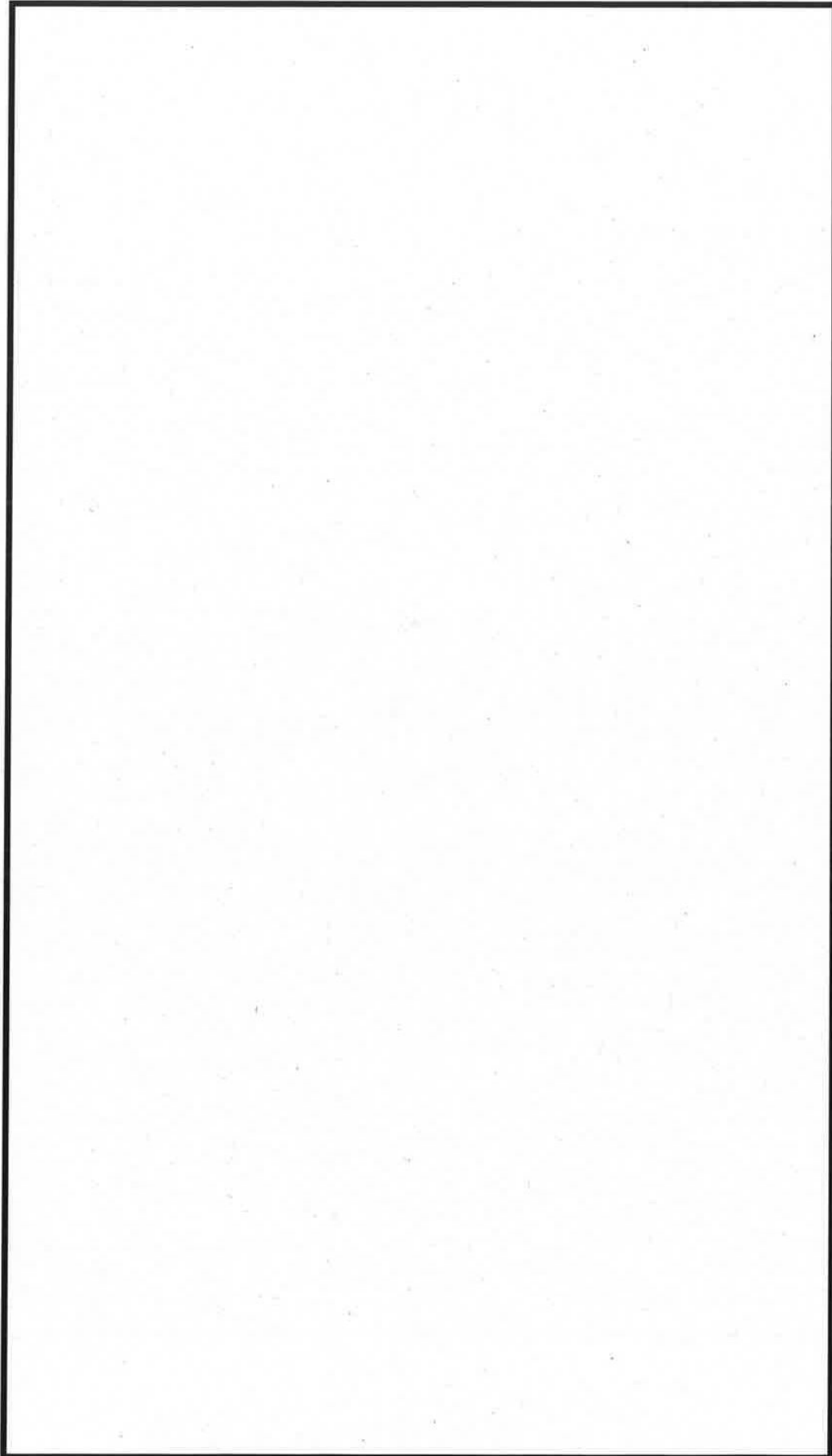


図2 振止め金具（AVB）構造図

枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

SG2次側内部品について

添付2 給水内管点検範囲/点検方法

点検対象 SG	A,B,C-SG
裏当金点検箇所数	各3箇所

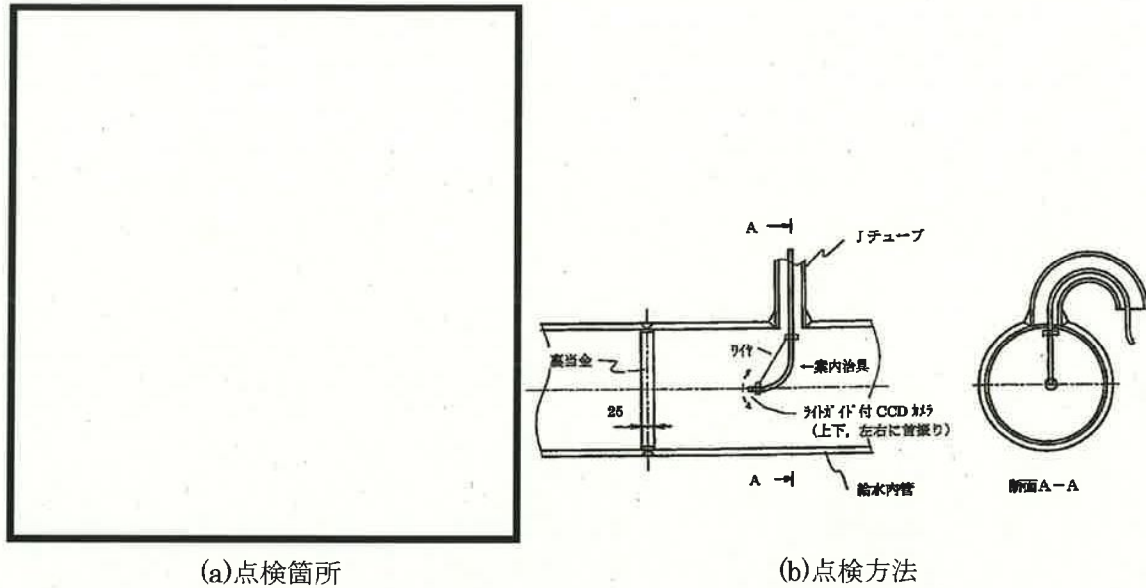
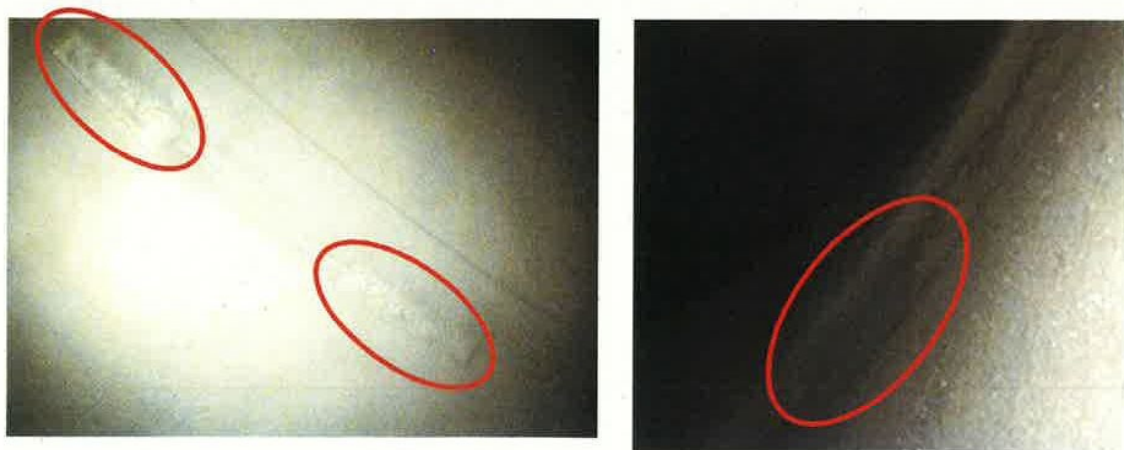


図1 SG 内部品点検対象および点検方法

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)



枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

スラッジによる摩耗減肉の可能性について

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

1. スケール生成メカニズム

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

(1) マグネタイト（ Fe_3O_4 ）の粒子

伝熱管外表面での給水沸騰時に粒子状の鉄が残留する。

(2) 鉄イオン（ Fe^{2+} ）

温度上昇による溶解度減少に伴い、鉄イオンが析出する。

鉄イオンは粒子状マグネタイトの隙間を埋めるバインダーとして作用する。

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

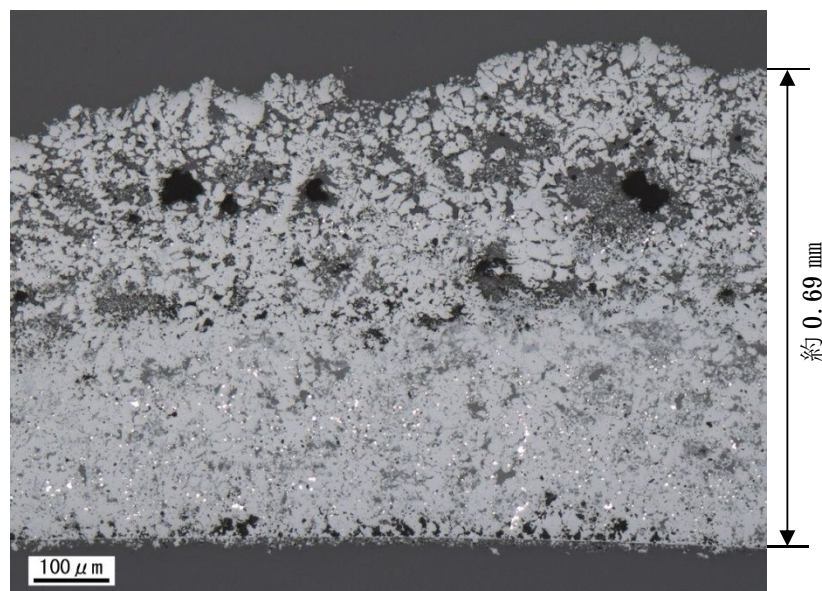


図1 高浜3号機 最上段（第7）管支持板上から採取したスラッジの断面観察例

スラッジによる摩耗減肉の可能性について

2. スラッジ摩耗試験

(1) 試験概要

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

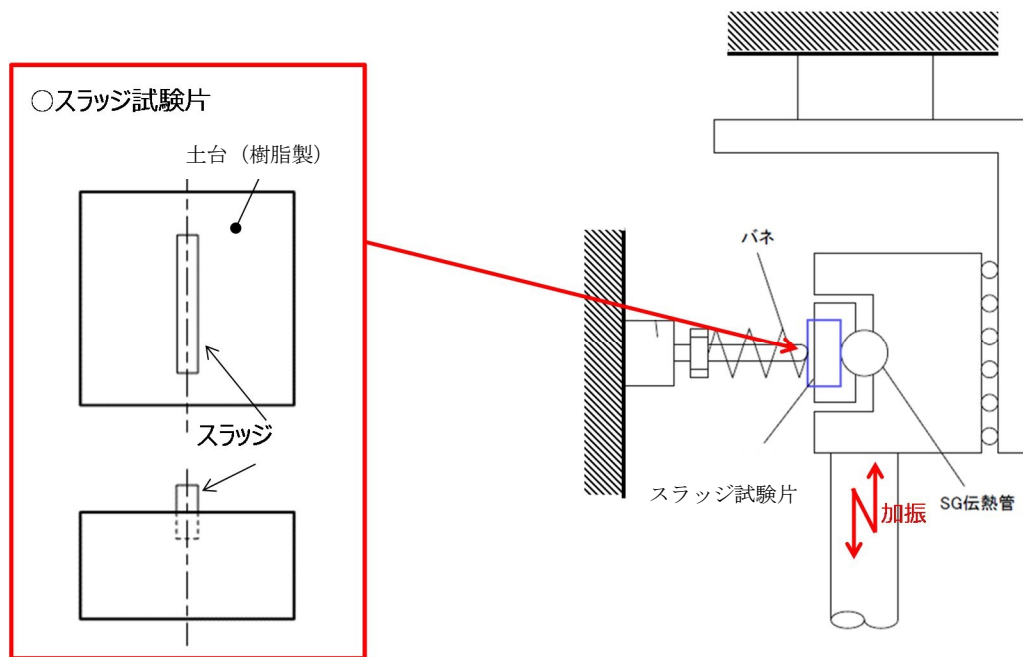


図2 加振装置概念図

(3) 摩耗試験

a. 試験条件

スラッジ試験片：単片9ケース

環境：乾燥

接触方向：スラッジの接触面積が大きいほどスラッジが摩滅しにくいことから、保守的に伝熱管に対してスラッジを一部面接触させて加振

押付力：伝熱管振動に伴う押付力と整合するよう荷重条件を設定（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：伝熱管振動の摺動速度が小さいほどスラッジが摩滅しにくいことから、保守的に実機で想定される摺動速度よりも小さく設定（約8Hz）

スラッジによる摩耗減肉の可能性について

b. 試験実施状況

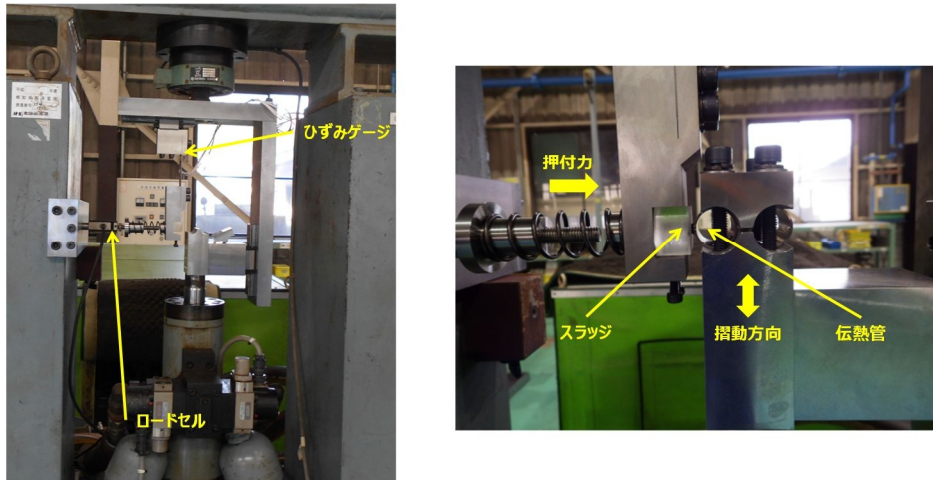


図3 試験実施状況（摩耗試験）

c. 試験結果

ケース1～9ともに、試験経過とともにスラッジ先端がわずかに摩滅していった（図4参照）。一方、試験後の伝熱管表面には、スラッジ試験片の接触痕が認められた（図5参照）。



図4 スラッジ摩滅の様子および試験の様子（ケース1の例）

スラッジによる摩耗減肉の可能性について

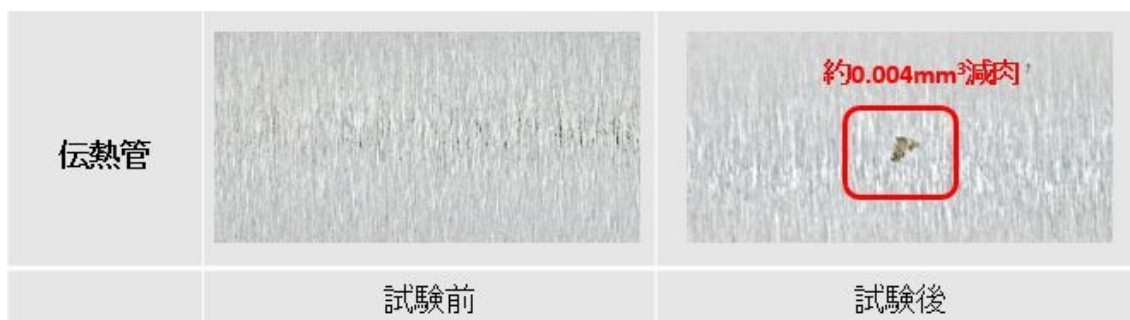


図5 試験後の試験片外観（ケース1の例）

以上の結果から、伝熱管の減肉体積に対するスラッジの摩滅体積の比率を整理すると表1の通りとなり、最大でも約1/4であった。

表1 スラッジ摩耗試験結果一覧

	伝熱管減肉体積	スラッジ片摩滅体積	摩耗体積比
ケース1	約0.004 mm ³	約0.039 mm ³	約1/10
ケース2	約0.002 mm ³	約0.011 mm ³	約1/6
ケース3	約0.003 mm ³	約0.014 mm ³	約1/5
ケース4	約0.004 mm ³	約0.014 mm ³	約1/4
ケース5	約0.002 mm ³	約0.063 mm ³	約1/30
ケース6	約0.003 mm ³	約1.22 mm ³	約1/40
ケース7	約0.002 mm ³	約0.085 mm ³	約1/40
ケース8	約0.017 mm ³	約0.255 mm ³	約1/15
ケース9	約0.043 mm ³	約0.26 mm ³	約1/6

(4) スラッジによる伝熱管の摩耗減肉深さの想定

上記の結果を踏まえ、ここではスラッジによる伝熱管の摩耗減肉の最大深さを想定する。伝熱管振動により伝熱管がスラッジと摺動し、表1の最大比率で両者が摩耗したとしても、伝熱管の振動振幅には制限（約0.85mm）があるため、スラッジの摩滅により伝熱管の減肉深さは最大でも約13%に抑えられ、判定基準（20%未満）に対して十分な裕度がある。

なお、本試験結果はスラッジの摩滅量を可能な限り小さくするよう実機で想定されるよりも保守的な条件下で実施したものであるとともに、これまで国内外でスラッジによる摩耗減肉が発生した事例は報告されていないことから、実機SG2次側環境下で上記試験条件が再現され、減肉が発生することは考え難い。

スラッジによる摩耗減肉の可能性について

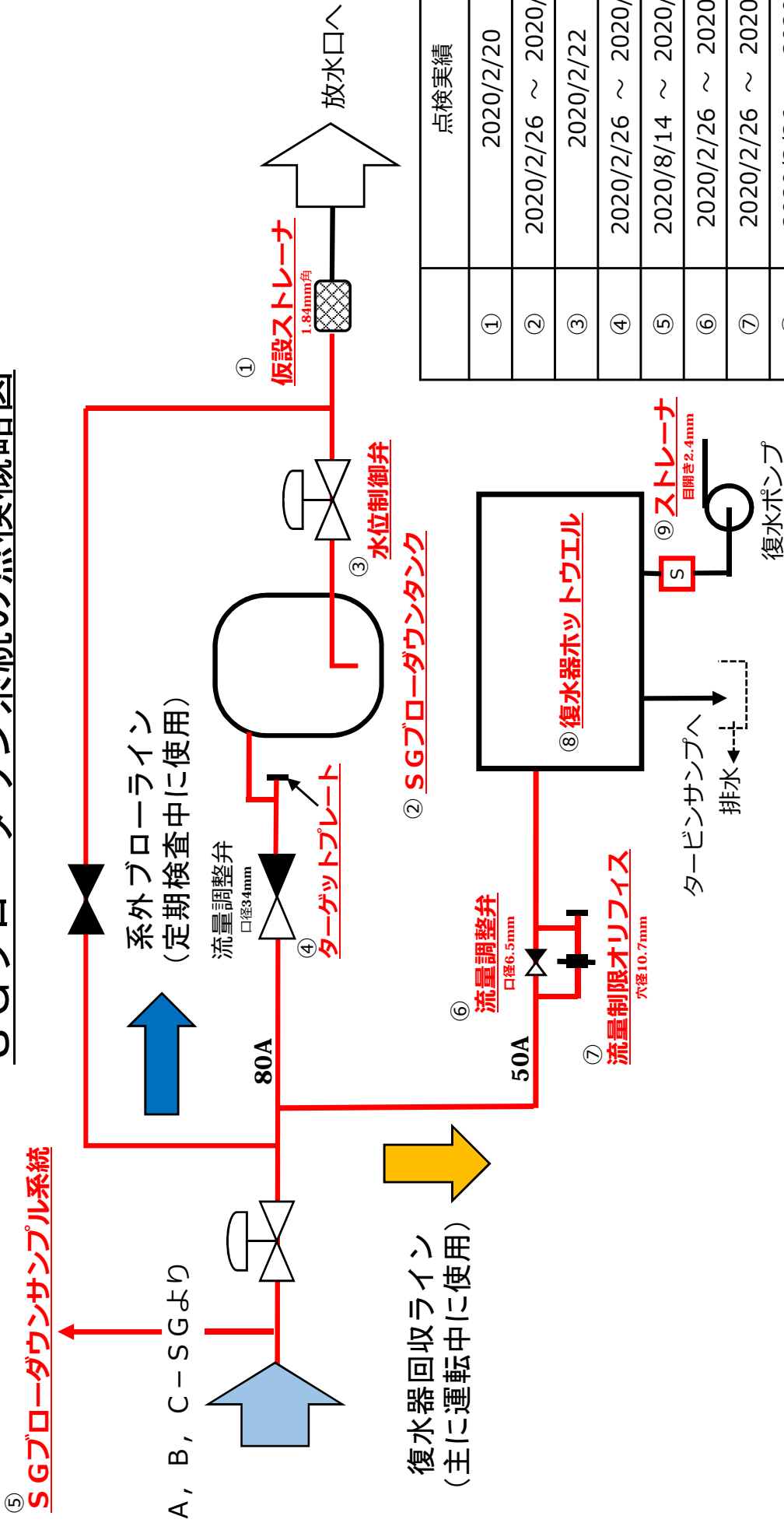
3. 結論

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

以上

SGブローダウンシステム点検結果 (1/18)

SGブローダウンシステムの点検概略図

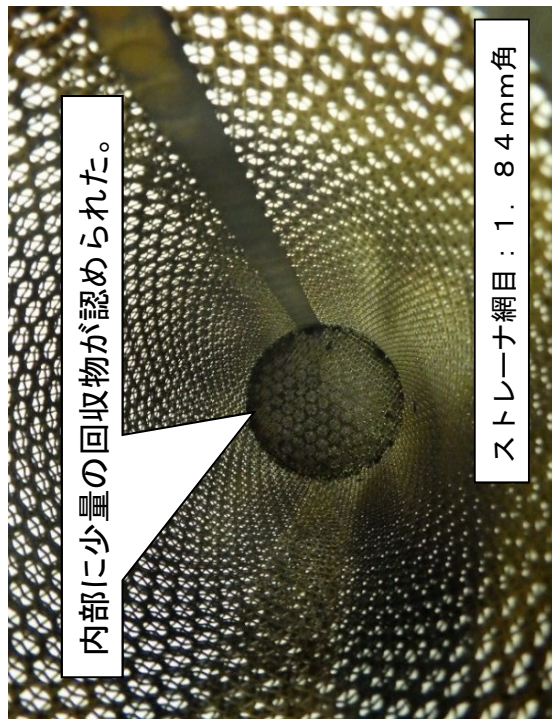
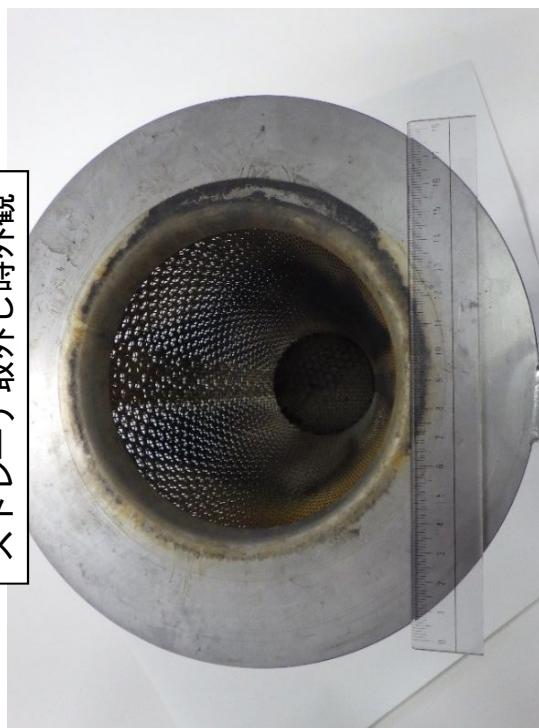


点検実績	点検実績
①	2020/2/20
②	2020/2/26 ~ 2020/2/27
③	2020/2/22
④	2020/2/26 ~ 2020/2/28
⑤	2020/8/14 ~ 2020/8/15
⑥	2020/2/26 ~ 2020/3/6
⑦	2020/2/26 ~ 2020/3/6
⑧	2020/2/26 ~ 2020/3/6
⑨	2020/2/27 ~ 2020/2/28
配管内	2020/4/6 ~ 2020/7/3

SGブローダウンシステム点検結果（2／18）

①仮設ストレーナ（異物なし）

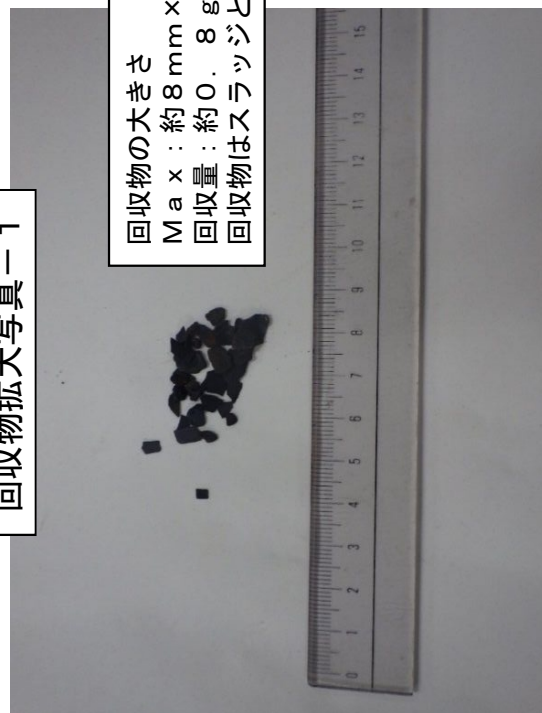
ストレーナ取外し時外観



内部に少量の回収物が認められた。

ストレーナ網目：1.84mm角

回収物拡大写真－1



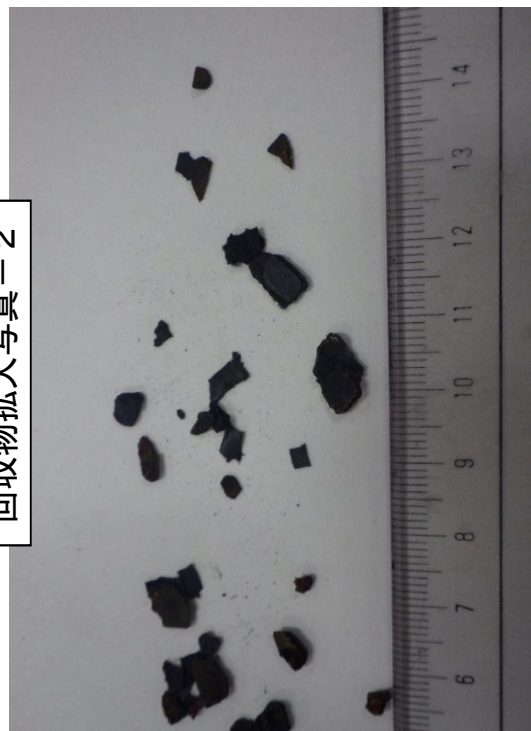
回収物の大きさ

Max：約8mm×5mm×厚さ約1.0mm

回収量：約0.8g

回収物はスラッジと思われる。

回収物拡大写真－2



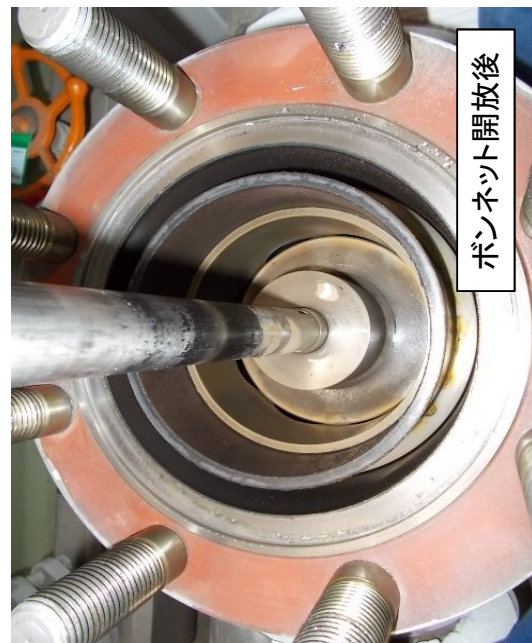
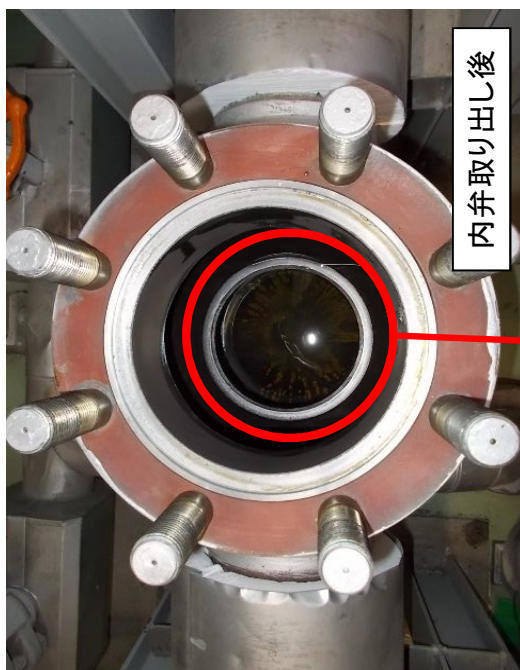
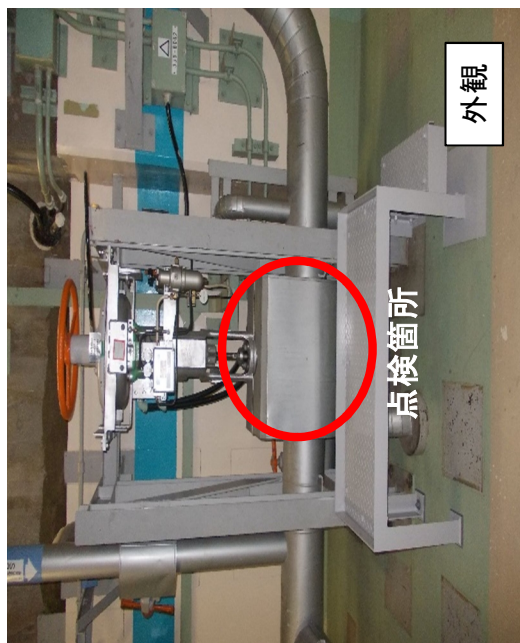
SGブローダウンシステム点検結果 (3/18)

②SGブローダウンタンク (異物なし)



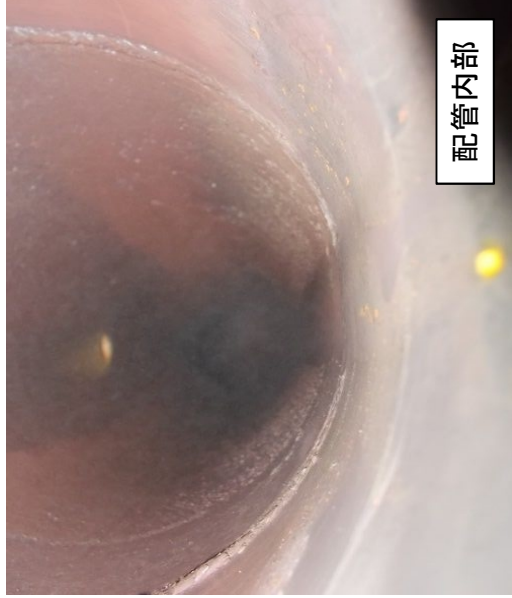
SGブローダウンシステム点検結果 (4/18)

③-1 水位制御弁 弁内部 (異物なし)

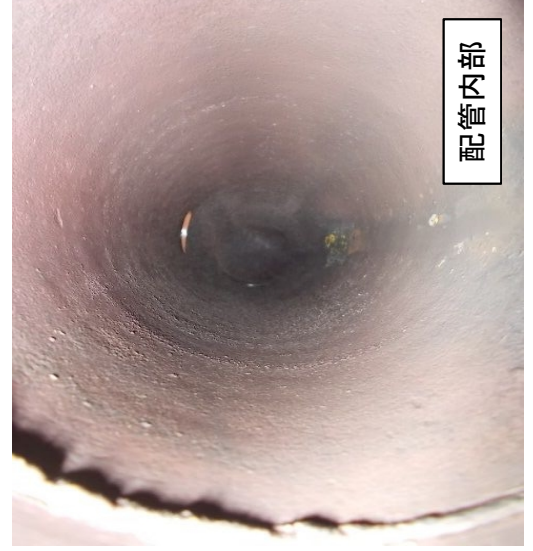
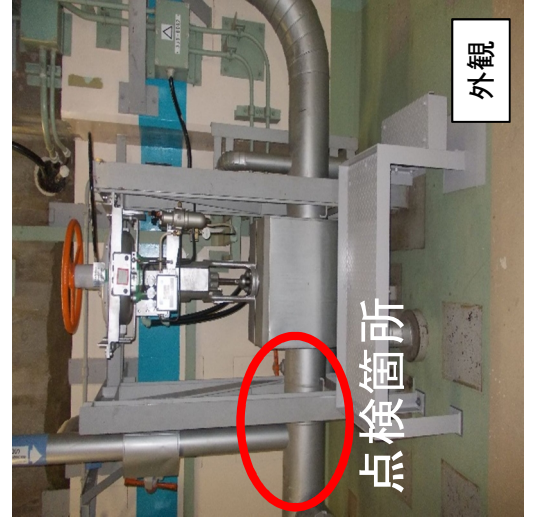


SGブローダウンシステム点検結果 (5/18)

③-2 水位制御弁 1次側配管内部 (異物なし)



③-3 水位制御弁 2次側配管内部 (異物なし)



SGブロワーダウンシステム点検結果 (6/18)

④-1 A-SGブロワーダウンシステム ターゲットプレート (異物なし)

