

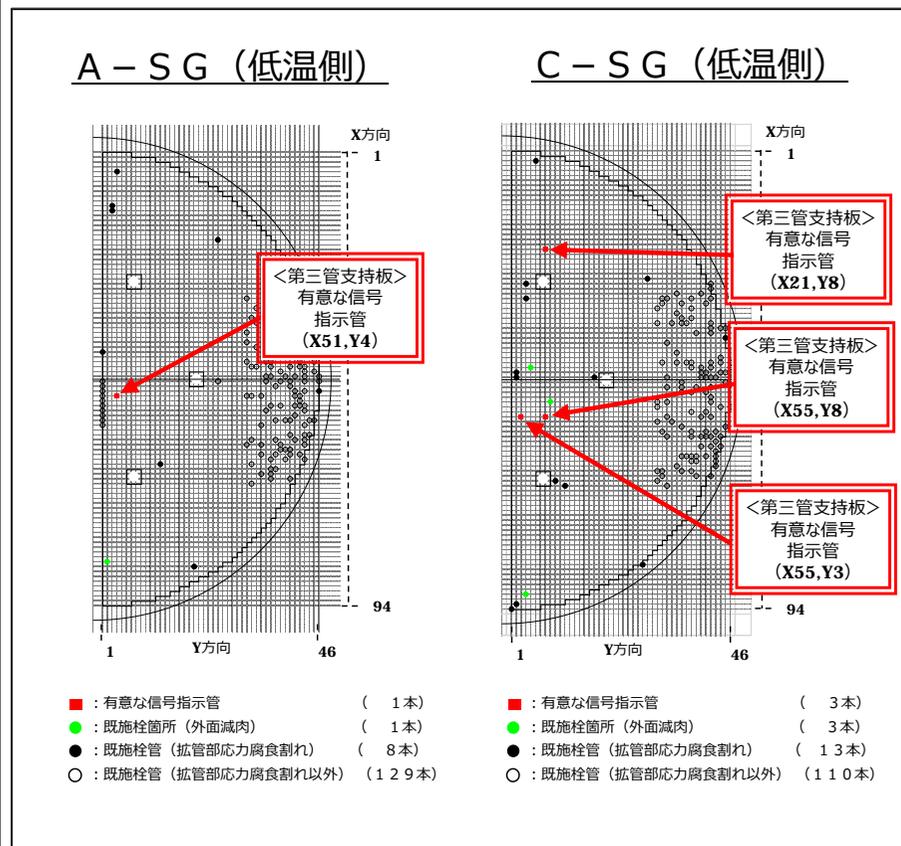
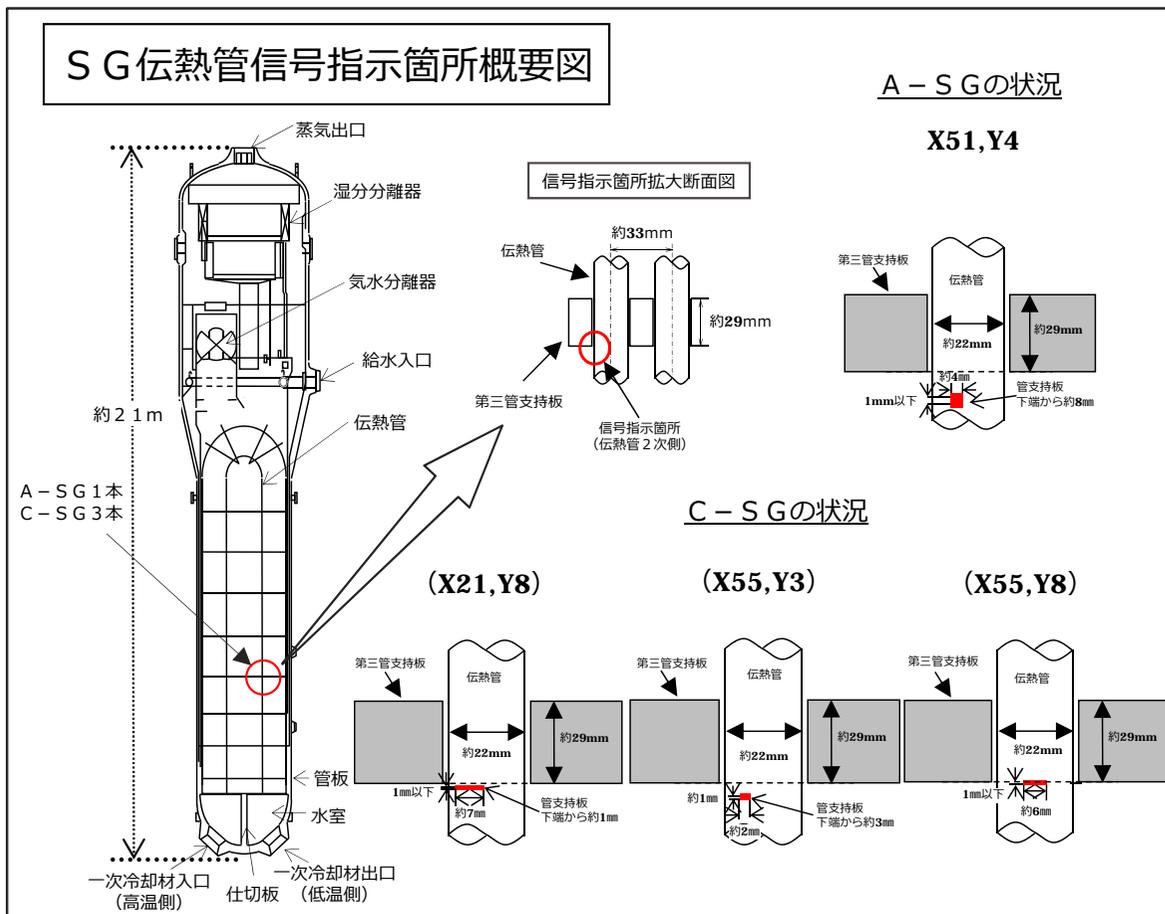
高浜発電所 4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について (概要版)

2021年1月28日

説明項目		ページ番号
1	事象の概要	3
2	原因調査	9
3	減肉メカニズム	3 3
4	伝熱管の健全性	6 1
5	推定原因	6 4
6	健全性評価	6 6
7	対策	7 3

1. 事象の概要

2020年10月7日からの第23回定期検査において、3台ある蒸気発生器（以下「SG」という。）の伝熱管の健全性を確認するため渦流探傷試験（以下「E実実」という。）を実施した。その結果、A-SGの伝熱管1本およびC-SGの伝熱管3本の伝熱管4本について、管支持板部付近に、外面からの減肉とみられる有意な信号指示を確認したことから、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、11月20日13時00分に判断した。

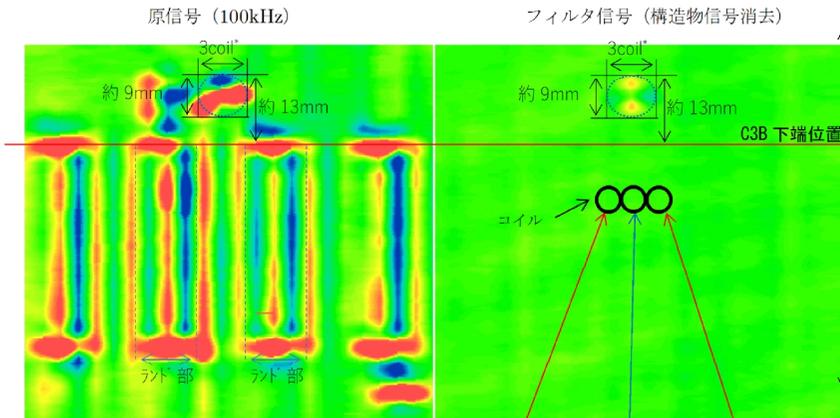


1. 事象の概要 (SG-ECT結果: A-SG)

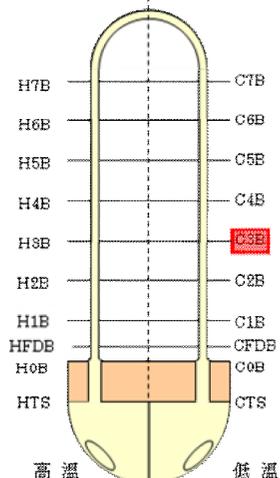
ECTデータを分析した結果、伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

A-SG低温側第三管支持板 (X51, Y4) のECT結果

減肉率: 約33%



*1coil: 約3mm ※内側から見たイメージ



軸	C1 (1)	MIX	軸	C24 (24)	MIX	軸	C23 (23)	MIX
軸方向	0.27	0.20	0.22	0.35	0.56	0.34	0.20	0.18
周方向								
軸方向								

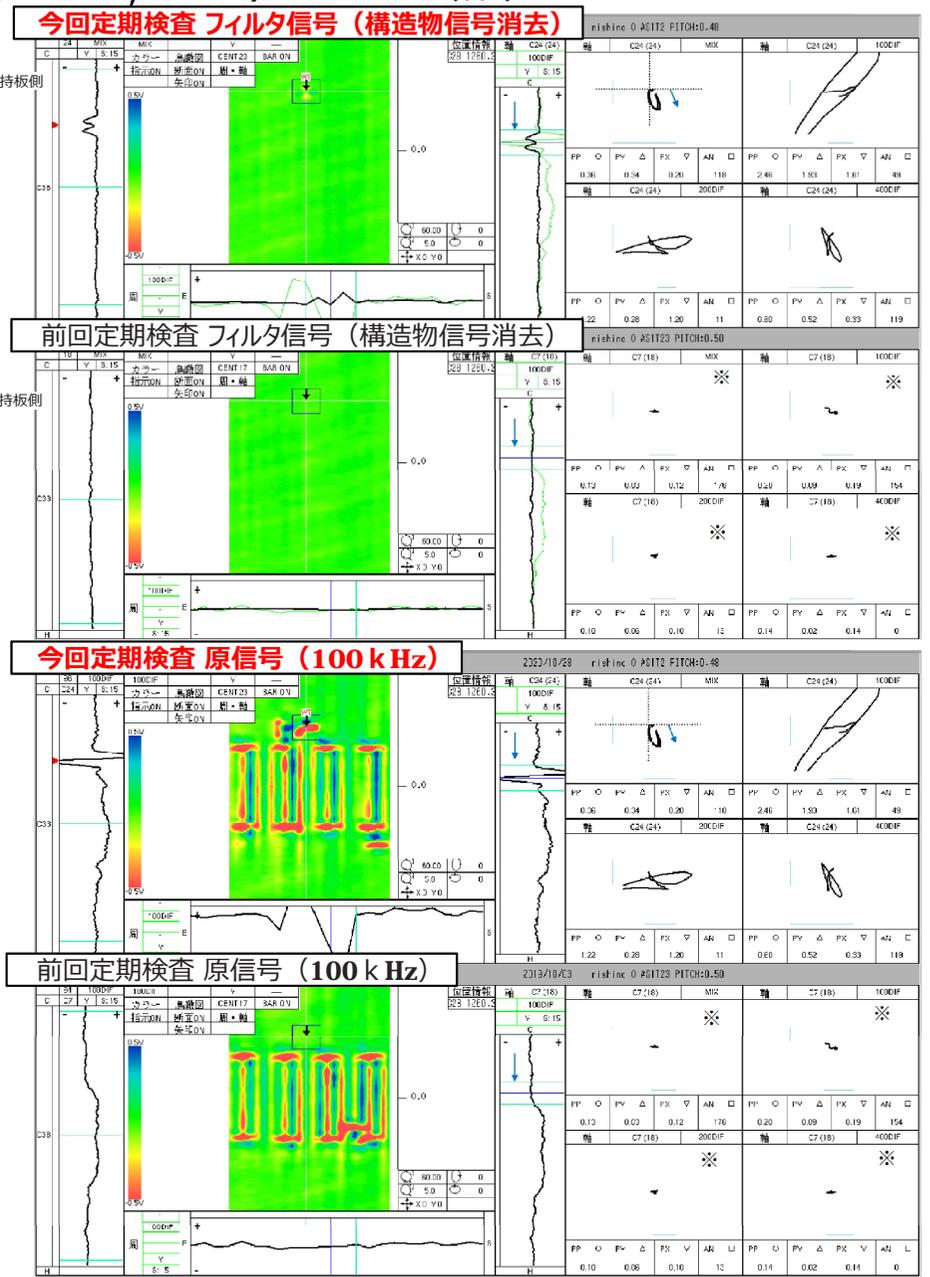
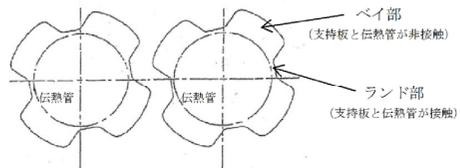
【A-SG X51-Y4 リサーチ波形】

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

波形評価

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

上記の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)



※特異な信号がないため任意の位置で表示。

信号評価

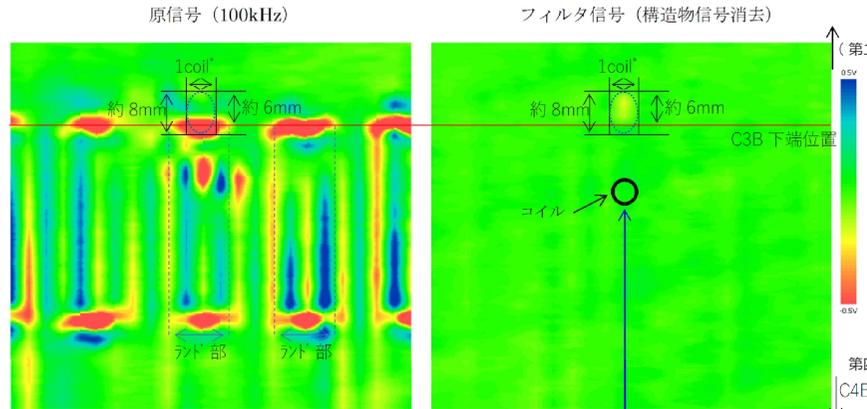
前回と今回の比較

1. 事象の概要 (SG-ECT結果: C-SG 1/3)

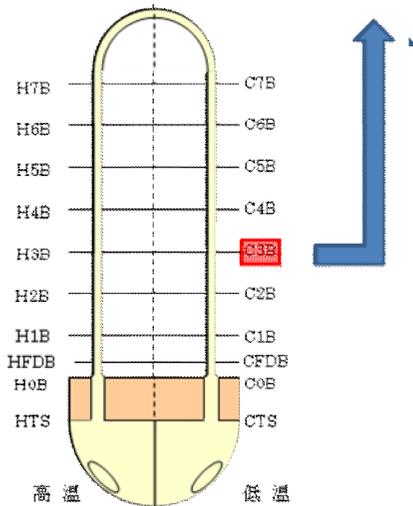
ECTデータを分析した結果、伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

C-SG低温側第三管支持板 (X55, Y3) のECT結果

減肉率: 約25%



*1coil: 約3mm ※内側から見たイメージ



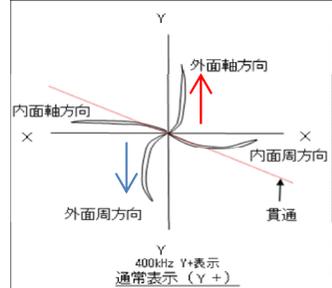
【C-SG X55-Y3 リサージュ波形】

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

波形評価

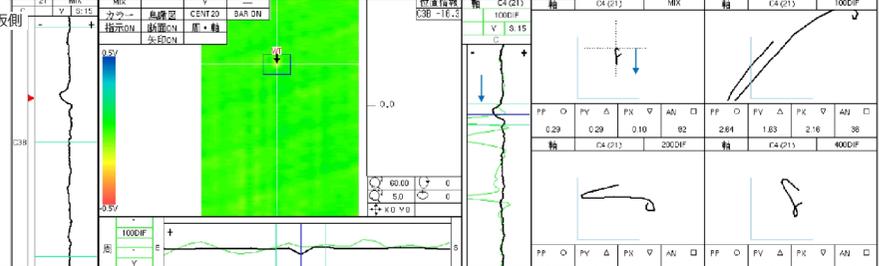
- ・位相角評価から、外面指示の特徴を持っている。
- ・指示は複数のコイルで検出されており、指示の中心部のコイルは周方向成分、両端部のコイルでは軸方向・周方向成分の特徴を持っている。

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)

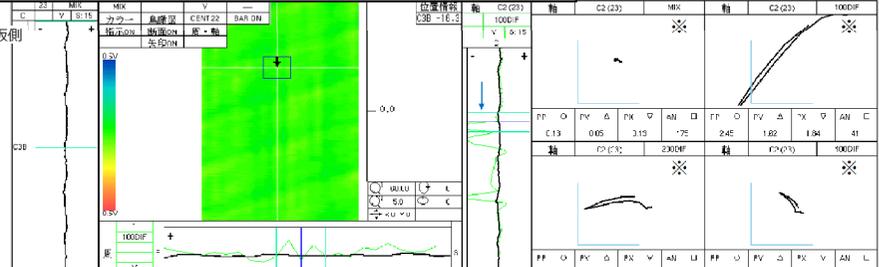


信号評価

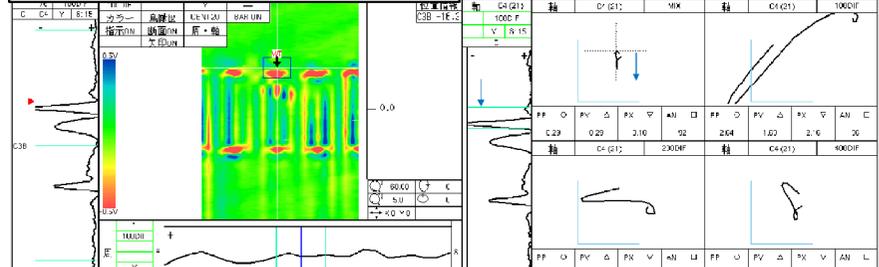
今回定期検査 フィルタ信号 (構造物信号消去)



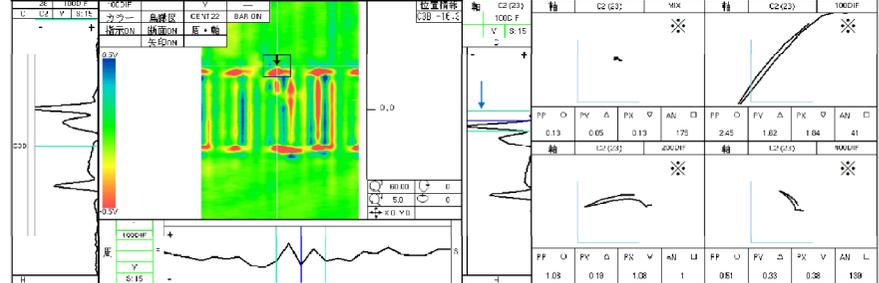
前回定期検査 フィルタ信号 (構造物信号消去)



今回定期検査 原信号 (100kHz)



前回定期検査 原信号 (100kHz)



※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

1. 事象の概要 (SG-ECT結果: C-SG 2/3)

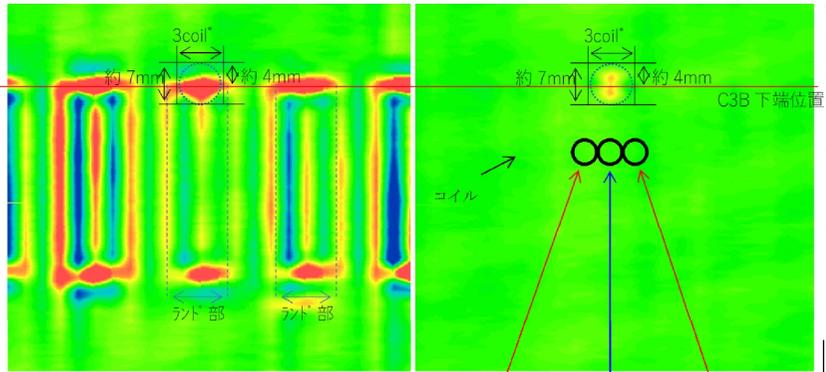
ECTデータを分析した結果、伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

C-SG低温側第三管支持板 (X55, Y8) のECT結果

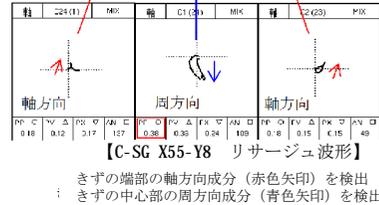
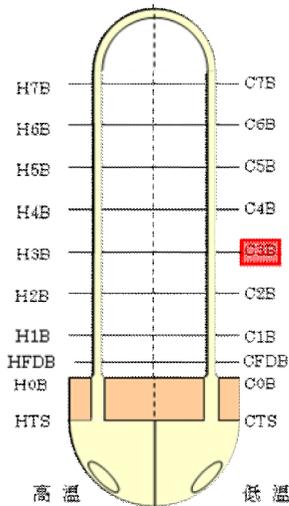
減肉率: 約32%

原信号 (100kHz)

フィルタ信号 (構造物信号消去)



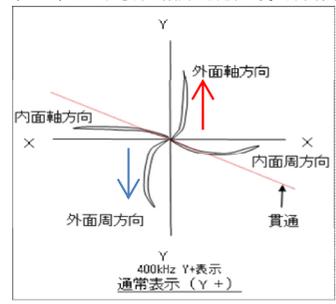
*1coil: 約3mm ※内側から見たイメージ



波形評価

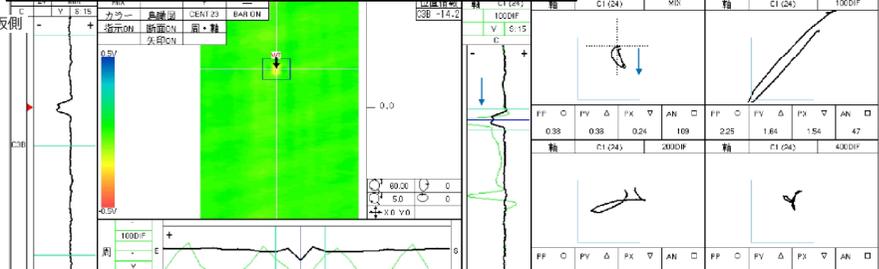
- ・位相角評価から、外面指示の特徴を持っている。
- ・指示は複数のコイルで検出されており、指示の中心部のコイルは周方向成分、両端部のコイルでは軸方向・周方向成分の特徴を持っている。

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

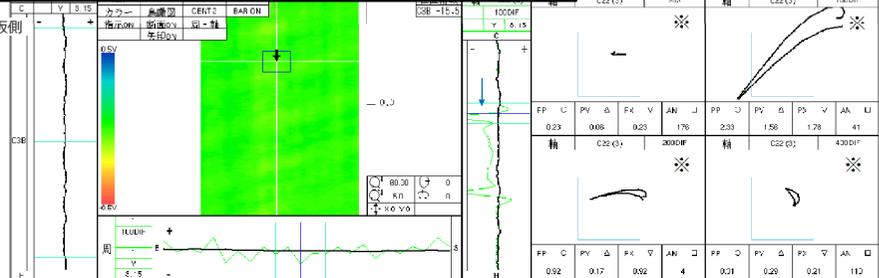


信号評価

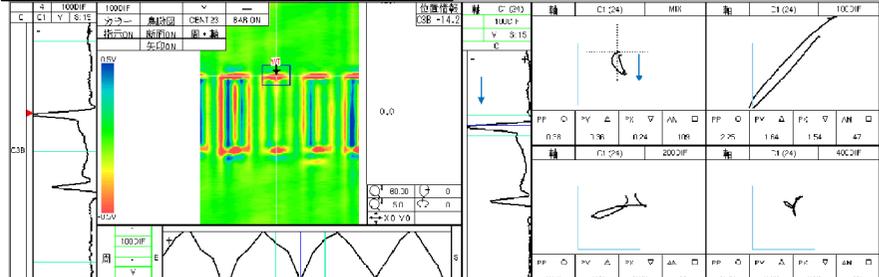
今回定期検査 フィルタ信号 (構造物信号消去)



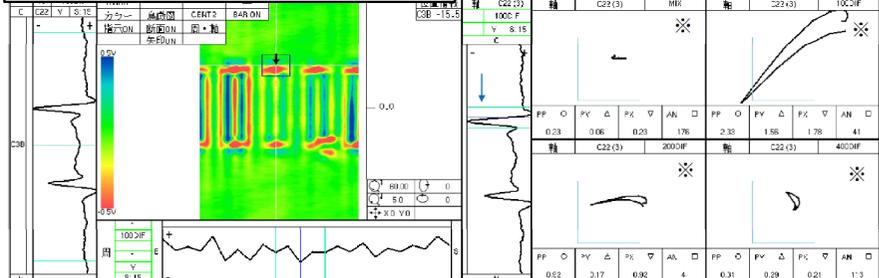
前回定期検査 フィルタ信号 (構造物信号消去)



今回定期検査 原信号 (100 kHz)



前回定期検査 原信号 (100 kHz)



※特異な信号がないため任意の位置で表示。

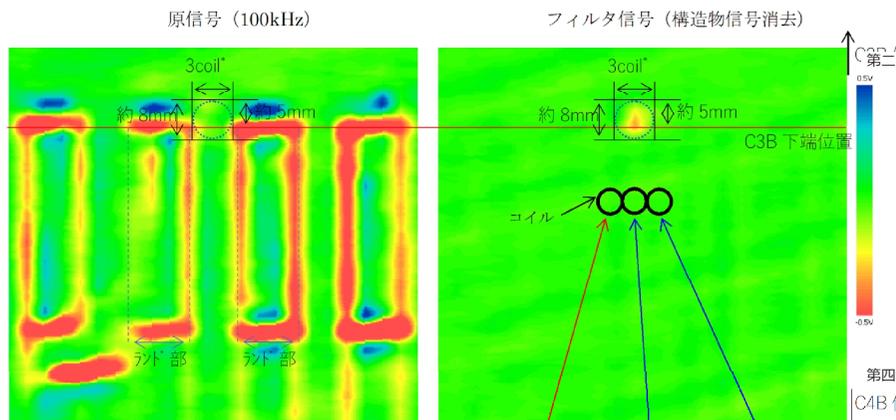
前回と今回の比較

1. 事象の概要 (SG-ECT結果: C-SG 3/3)

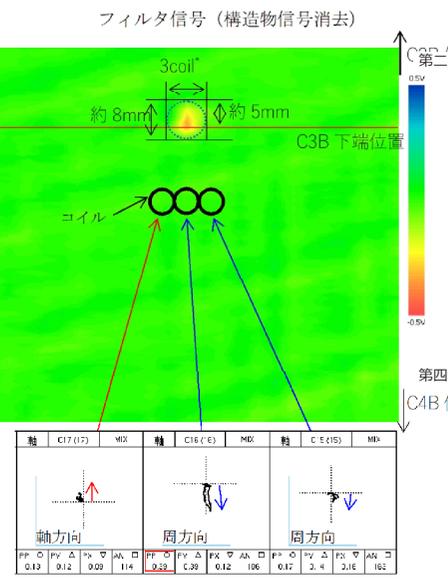
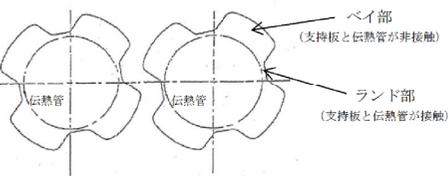
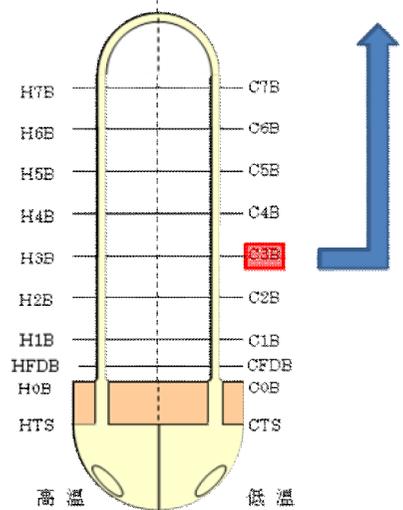
ECTデータを分析した結果、伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

C-SG低温側第三管支持板 (X21, Y8) のECT結果

減肉率: 約36%



*1coil: 約3mm ※内側から見たイメージ



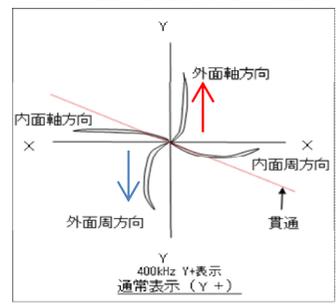
【C-SG X21-Y8】リサージュ波形

- きずの端部の軸方向成分 (赤色矢印) を検出
- きずの中心部の周方向成分 (青色矢印) を検出

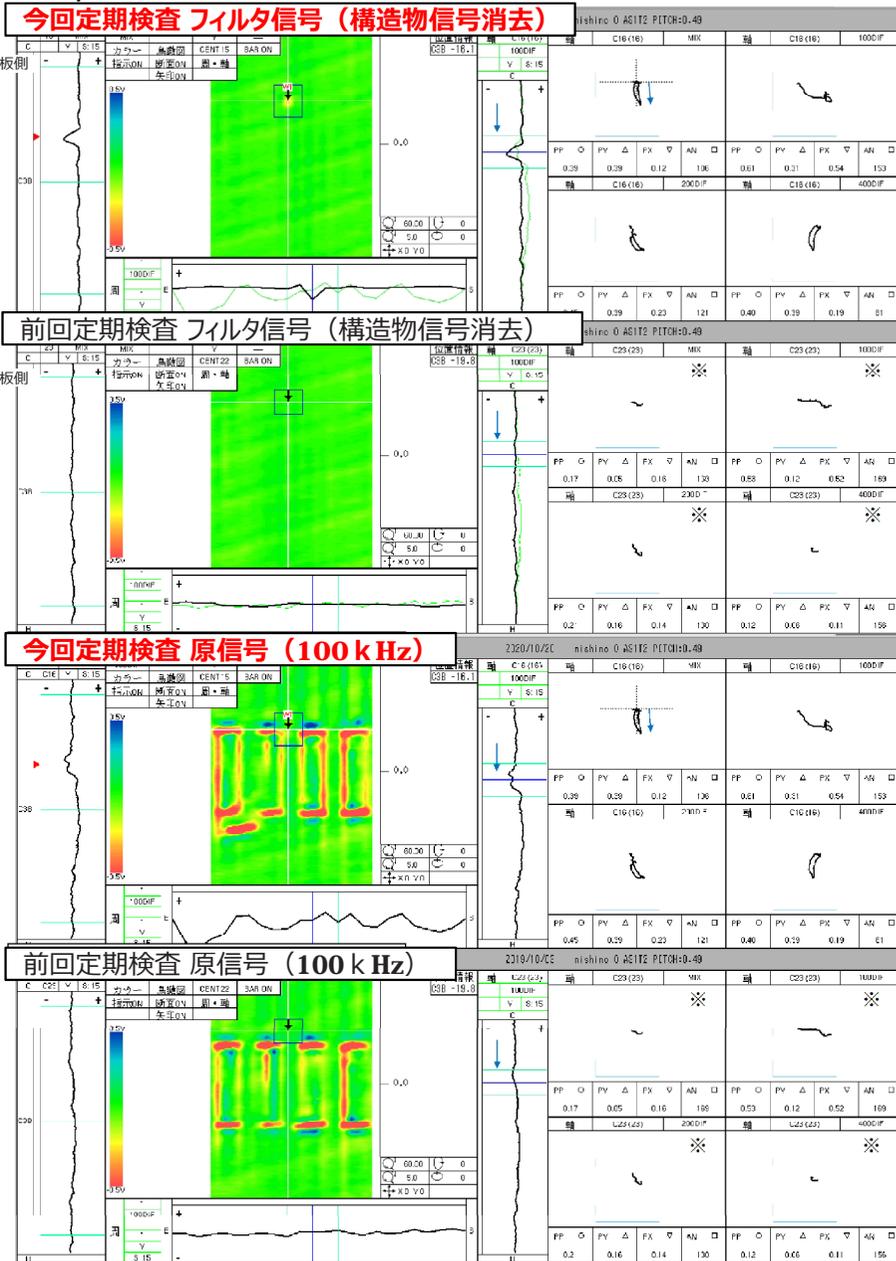
波形評価

・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)



信号評価



※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

1. 事象の概要 (減肉伝熱管 2次側からの確認結果)

E C Tで減肉とみられる信号指示が認められた伝熱管を、2次側から小型カメラにて点検した結果、摩耗減肉痕とみられる箇所を確認した。なお、E C Tの信号指示による位置およびサイズと相違はなかった。

また、A - S G (X51,Y4) およびC - S GのうちX55,Y3の信号指示付近において付着物を確認したことから、付着物を回収した。

○ A - S G

第三管支持板：長さ約4.0mm、幅 1.0mm以下 (X51,Y4) 減肉率：約33%

○ C - S G

第三管支持板：長さ約2.0mm、幅約1.0mm (X55,Y3) 減肉率：約25%

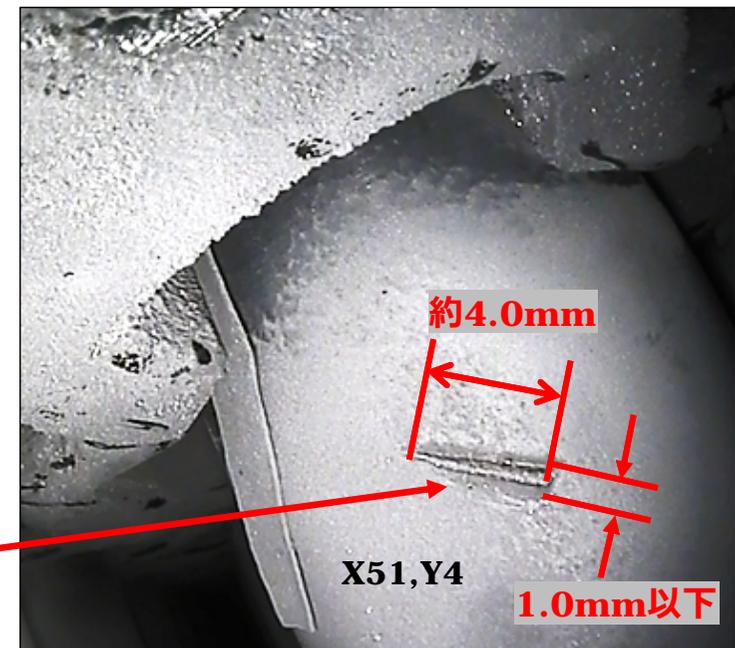
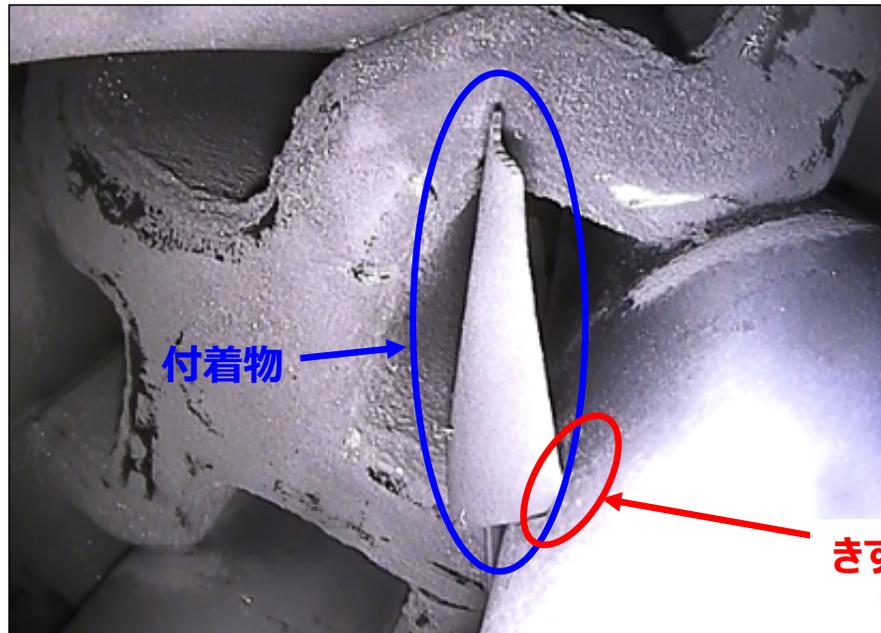
第三管支持板：長さ約6.0mm、幅 1.0mm以下 (X55,Y8) 減肉率：約32%

第三管支持板：長さ約7.0mm、幅 1.0mm以下 (X21,Y8) 減肉率：約36%

A - S G (X51, Y4)

付着物回収前

付着物回収後



2. 原因調査（要因分析に基づく調査）

○ S G伝熱管内面（1次側）からの損傷

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

○ S G伝熱管外面（2次側）からの損傷

- 粒界腐食割れ、ピitting、リン酸減肉発生の可能性について確認した結果、4号機では良好な水質が維持されており、発生の可能性はない。また、カメラによる外観観察結果からも、これらの損傷ではないことを確認した。
- 管支持板との接触による摩耗減肉は、E C T結果から周方向に4ヶ所の減肉指示を確認していないことから、管支持板との接触・摩耗によって発生した減肉ではない。
- 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。
- 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、流体振動による疲労損傷は発生しない。
- 当該部流速は約 [] 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。
- S G器外流入物による減肉について、カメラ等による目視点検を実施した結果、異物は確認できなかった。⇒ [10] ~ [16]
- S G器内流入物のうち、S G内部品の脱落について、設計図書により確認した結果、内部品の脱落がないことを確認した。⇒ [17]
- S G器内流入物のうち、AおよびC - S Gの伝熱管に付着したスケールおよびC - S Gの減肉を確認した伝熱管周辺で回収したスケールについて成分分析等を実施した結果、A - S Gに付着したスケールおよびC - S G伝熱管周辺で回収したスケールが減肉を発生させたと考える。⇒ [18] ~ [32]

○ 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。

[] : 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。

高浜発電所 4 号機前回（2 2 回定期検査）において、以下の異物混入対策を実施しており、異物混入の可能性はないことを確認した。

なお、異物混入対策の内容については、高浜発電所 3 号機 2 4 回定期検査における異物混入対策と同等の実施内容である。

- 機器内部へ立ち入る作業では直前に作業服の着替えや靴カバーを着用し、機内内部へ立ち入っていることから、異物が混入する可能性は極めて低い。
- 直接目視にて異物確認ができない範囲は小型カメラを用いた確認を実施した結果、異物が混入していないことを確認している。
- 開口部に周辺作業と隔離したエリアを設けることで、異物の混入対策を図っており、異物が混入する可能性は極めて低い。
- ウエスを使用する場合は、新しいウエスに限るものとし、新ウエスは再使用ウエスと区別して管理しており、異物が混入する可能性は極めて低い。
- 作業中に発生した保温材の切れ端等の清掃・片づけについては一作業一片づけを徹底するとともに、作業服、靴に異物が付着していないか確認することにより、異物の拡散を防止する対応を実施しており、異物が混入する可能性は極めて低い。

各異物混入対策の詳細は次ページのとおり。

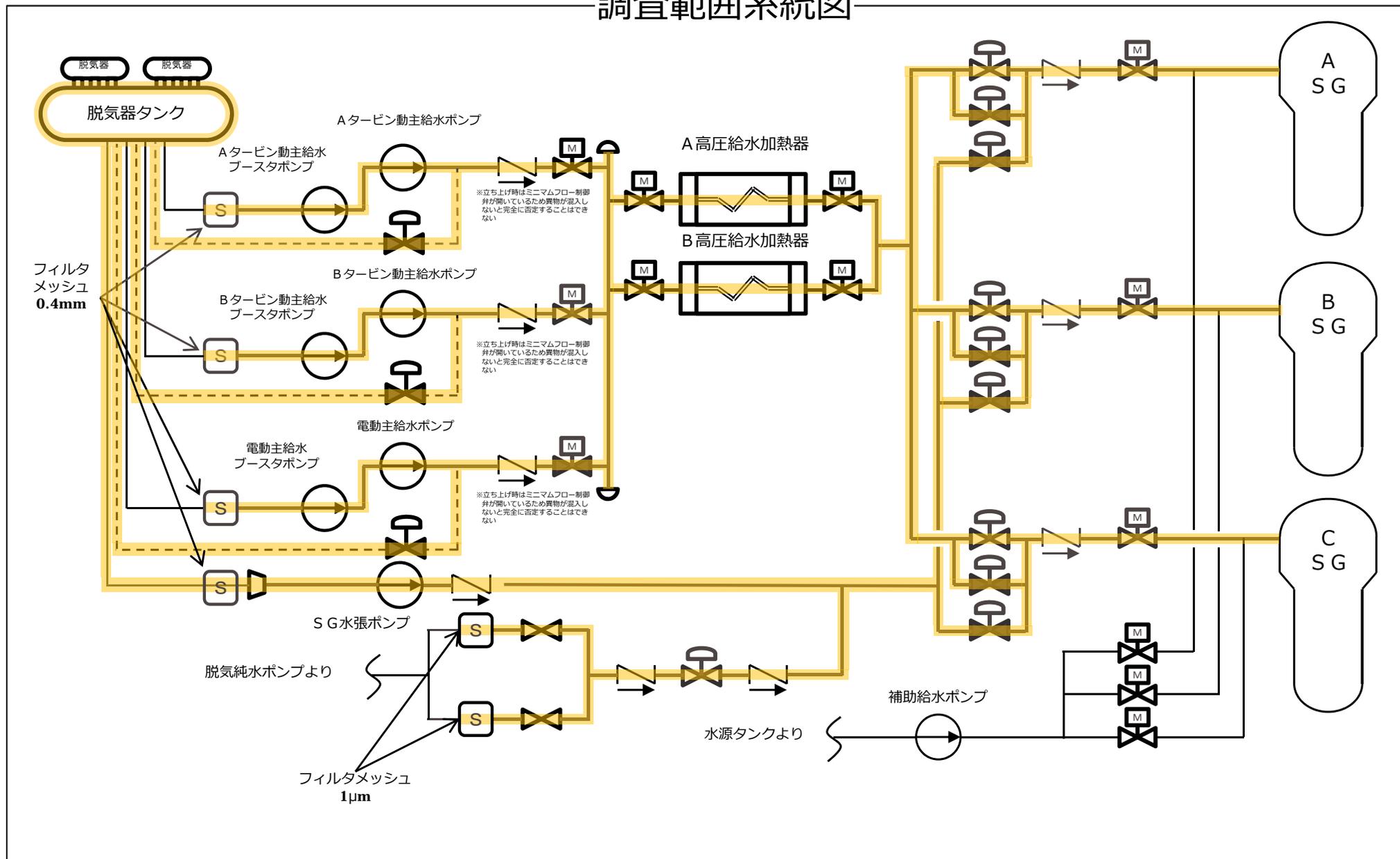
	機器立入	垂直配管取付弁	その他
（前回） 高浜 3 号機 第 2 4 回定期検査	<ul style="list-style-type: none"> ・機器内部に立ち入る前に、器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。 ・機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。 ・開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。 	<ul style="list-style-type: none"> ・弁点検時は、弁箱内部に使用する機材（ウエス含む）に異物の付着がないことを確実に事前確認する。 ・最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、小型カメラで確認する。 ・ウエスは、新ウエスを使用する。 ・新ウエスは再使用ウエスと区別して管理する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・保温材の切れ端等の清掃・片づけは一作業一片づけを徹底し、作業服、靴の異物付着確認を行う。 ・機器を開放した時点でうず巻きガasket等の金属製の消耗品に損傷を確認した場合は、当社工事担当者に報告することに加え、工事報告書に必要事項を記載することを調達要求文書に定める。
（前回） 高浜 4 号機 第 2 2 回定期検査	<ul style="list-style-type: none"> ・機器内部に立ち入る作業前に、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。 ・機器内部に立ち入る前に、器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。 ・開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。 	<ul style="list-style-type: none"> ・弁点検時は、弁箱内部に使用する機材（ウエス含む）に異物の付着がないことを確実に事前確認する。 ・最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、小型カメラで確認する。 ・ウエスは、新ウエスを使用する。 ・新ウエスは再使用ウエスと区別して管理する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・保温材の切れ端等の清掃・片づけは一作業一片づけを徹底し、作業服、靴の異物付着確認を行う。
（前々回） 高浜 3 号機 第 2 3 回定期検査	<ul style="list-style-type: none"> ・機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・弁点検時は、弁箱内部に使用する機材（ウエス含む）に異物の付着がないことを確実に事前確認する。 ・最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、小型カメラで確認する。 【自主対応】 	—
（従前） 高浜 3 号機 第 2 3 回定期検査以前 高浜 4 号機 第 2 1 回定期検査以前	<ul style="list-style-type: none"> ・機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを確認する（本人でも可）。 	<ul style="list-style-type: none"> ・最終異物確認は直接目視にて実施（手鏡等を使用） 	—

今回、S G 器内および器外点検の結果、異物は確認できなかったことから異物混入対策は有効であったと判断する。今後も引き続き同様の異物混入対策を実施する。

2. 原因調査 (異物流入調査 1 / 2)

- S Gに異物が流入する可能性のある系統について調査した。
- 範囲は以下のとおり、主給水系統およびS G水張系統である。

調査範囲系統図



- S Gに異物が流入する可能性のある系統で実施している全ての点検対象機器 3 1 0 箇所について機器の健全性および異物管理状況を確認した結果、異物混入の可能性はないことを確認した。
- 今回（第 2 3 回）の定期検査で、異物は確認していないものの、3号機第 2 4 回定期検査で S G器内でガスケットパッキンの一部を確認したことを受け、念のため以下の調査を実施した。
 - ・ 今回（第 2 3 回）の定期検査で開放した機器について、ガスケットパッキンが健全であることを確認した。（2 4 箇所）
 - ・ 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について、過去の点検記録を確認し異常のないことを確認した。（2 0 箇所）

開放点検箇所分類	箇所数	機器の健全性	異物混入の可能性
ポンプ	7	○	○
容器	1	○	○
フランジ	2 1	○	○
ストレーナ	3	○	○
弁	2 7 8	○	○
合計	3 1 0	○	○
人の立ち入りがある点検箇所 （再掲）	4	○	○

調査結果例

タービン動主給水
ブースタポンプ入口フランジ

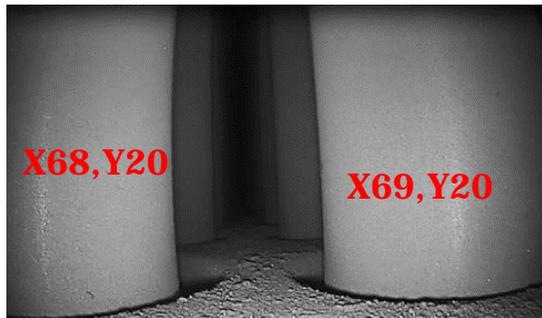


内径：約 5 0 0 mm

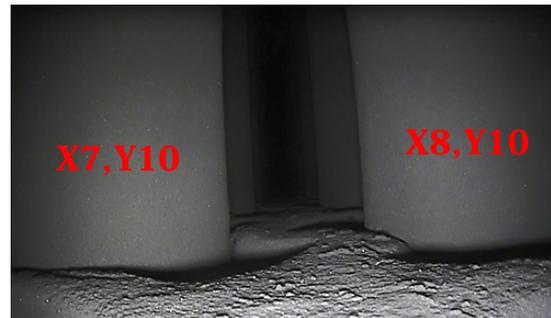
AおよびC – S Gの管板、流量分配板、第一および第二管支持板の上面の全ての範囲並びに減肉が認められた伝熱管近傍の第三管支持板の下面について目視点検を実施した。また、念のため、AおよびC – S Gの第三管支持板以上の上面の全ての範囲についても目視点検を実施した。

- 伝熱管から剥離したスケールおよびスラッジ以外の異物は確認できなかった。

A – S G点検結果の例



流量分配板上

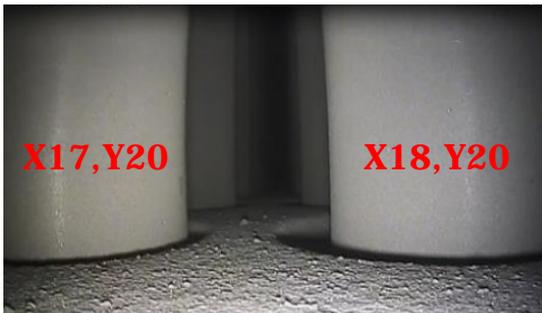


第一管支持板上



第二管支持板上

C – S G点検結果の例



流量分配板上

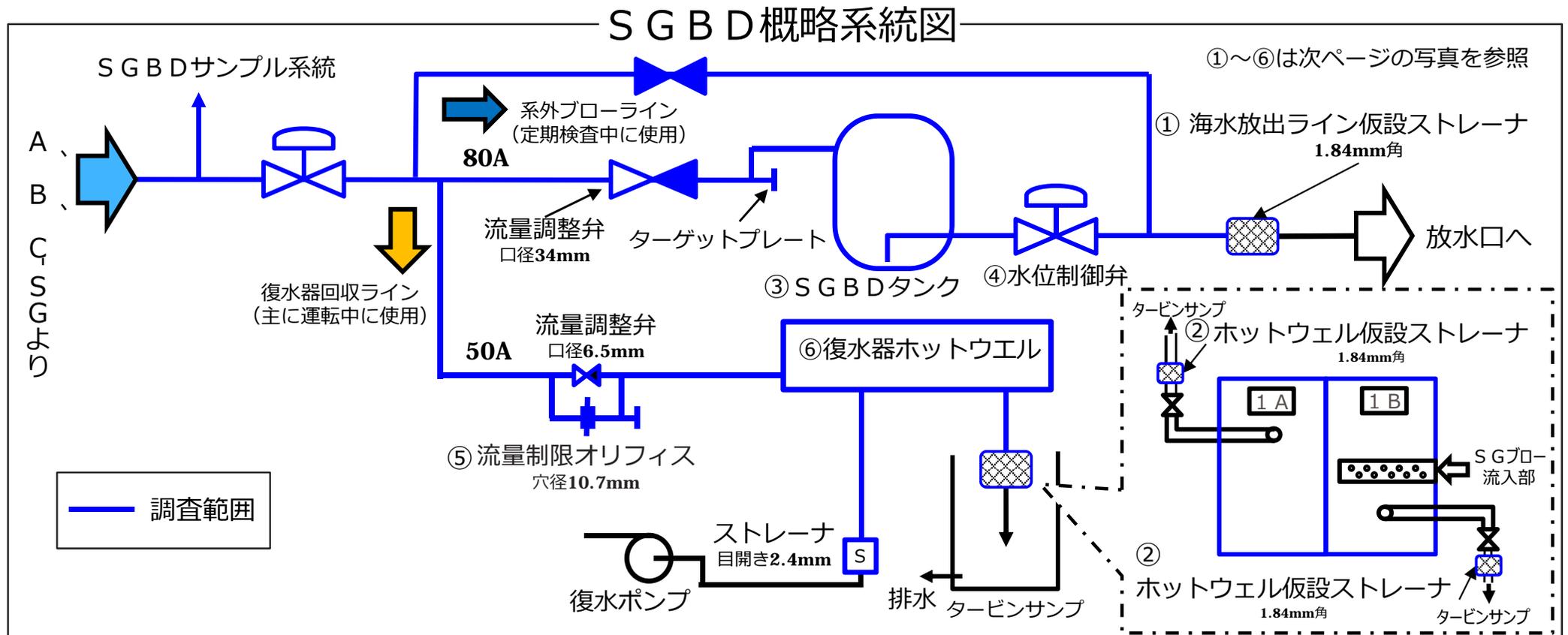


第一管支持板上



第二管支持板上

- 高浜3号機前回 (第24回) 定期検査時のSG伝熱管外面減肉事象を踏まえ、SGブローの前に系外ブローラインおよび復水器ホットウェルブローラインに仮設ストレーナを設置し、SGブロー後に開放点検を実施
- 系外ブローラインにおいて異物が滞留する可能性がある機器であるSGBDタンク、水位制御弁およびSGBD配管等について、開放点検を実施
- 復水器回収ラインにおいて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) から異物が復水器に流入する可能性が否定できないことから、復水器回収ラインの流量制限オリフィス、復水器ホットウェル、復水ポンプ入口ストレーナ等について、開放点検を実施



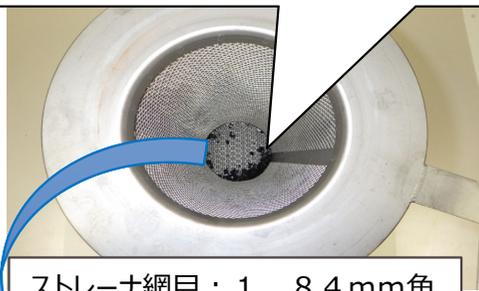
- 仮設ストレーナを確認した結果、スラッジおよび鉄さびを確認したが異物は確認できなかった。
- 系外ブローラインを確認した結果、異物は確認できなかった。
- 復水器回収ラインを確認した結果、異物は確認できなかった。

点検結果の例

【仮設ストレーナ】

① 海水放出ライン

内部に少量の回収物が認められた。



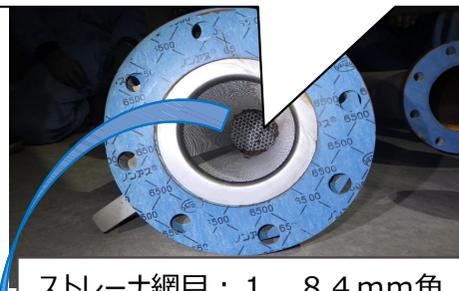
ストレーナ網目：1.84mm角



回収物の大きさ (最大)
約6.5mm×5.0mm×厚さ約1.0mm
回収量：約7.0g
回収物はスラッジと思われる。

② 1Aホットウェルブローライン

内部に少量の回収物が認められた。



ストレーナ網目：1.84mm角



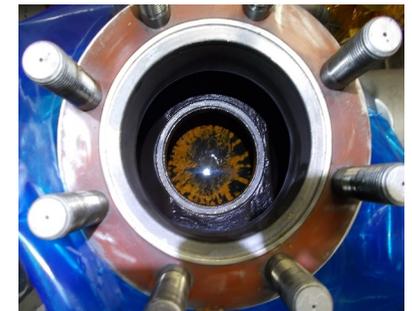
回収物の大きさ (最大)
約6.0mm×6.0mm×厚さ約2.0mm
回収量：約2.9g
回収物は鉄さびと思われる。

【系外ブローライン】

③ SGBDタンク



④ 水位制御弁内部



【復水器回収ライン】

⑤ 流量制限オリフィス



⑥ 復水器ホットウェル

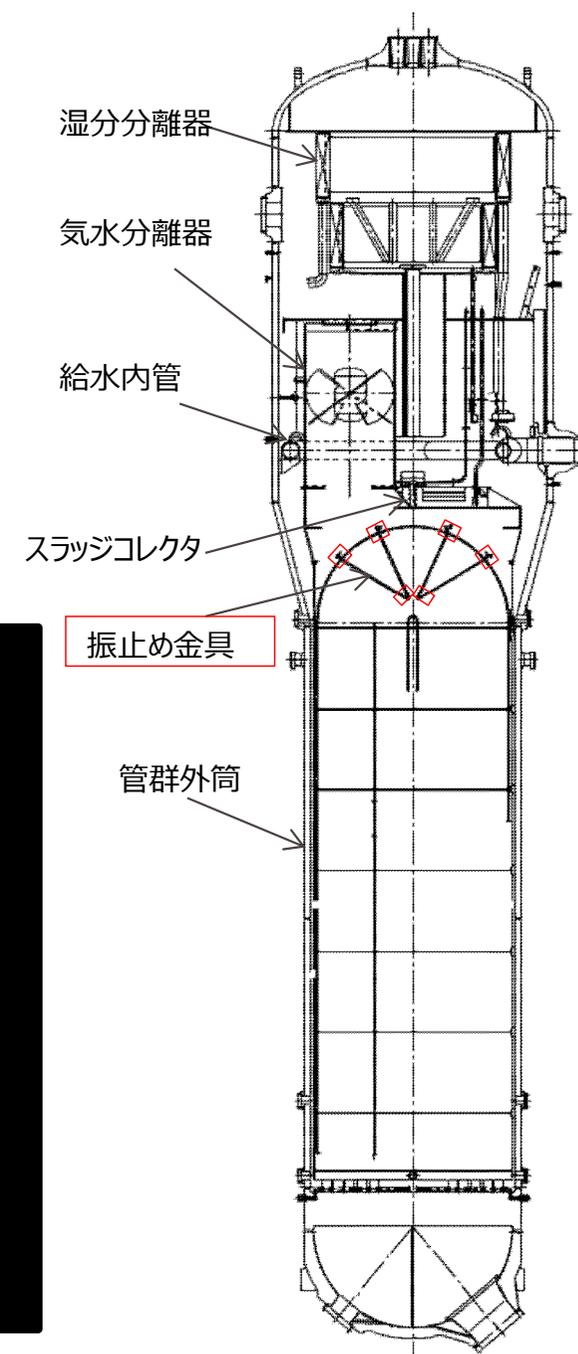


2. 原因調査 (S G 内部品の脱落調査)

○薄片形状のS G 内部品が脱落し、伝熱管を減肉させる可能性を設計図書により確認した。

- ・振止め金具のキー固定板等が、内部品として使用されていることを確認した。
- ・これらの内部品は、溶接止めされていること又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でないことから、**内部品の脱落の可能性はない**と考えられる。

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

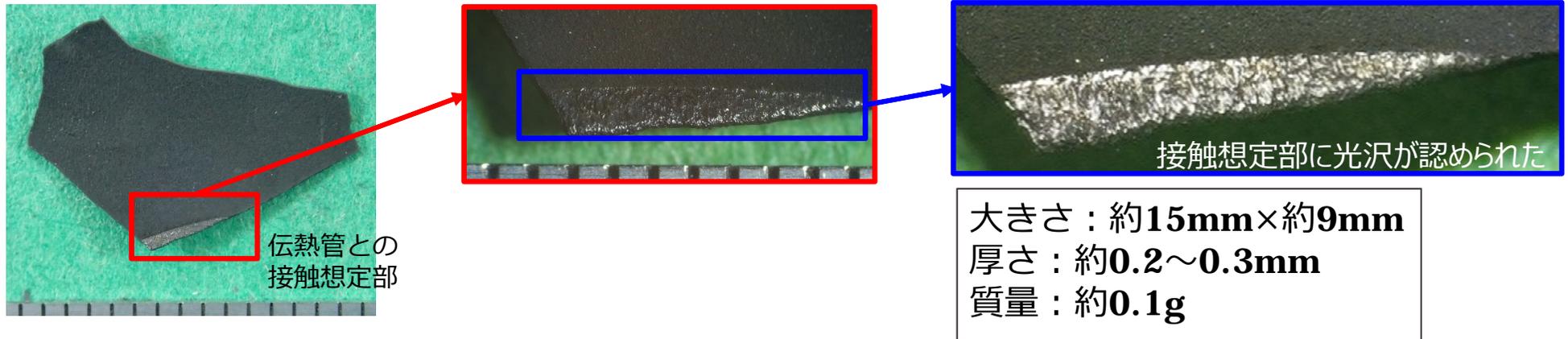


：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

< A - S Gで確認した付着物（X51, Y4 第三管支持板下面） >

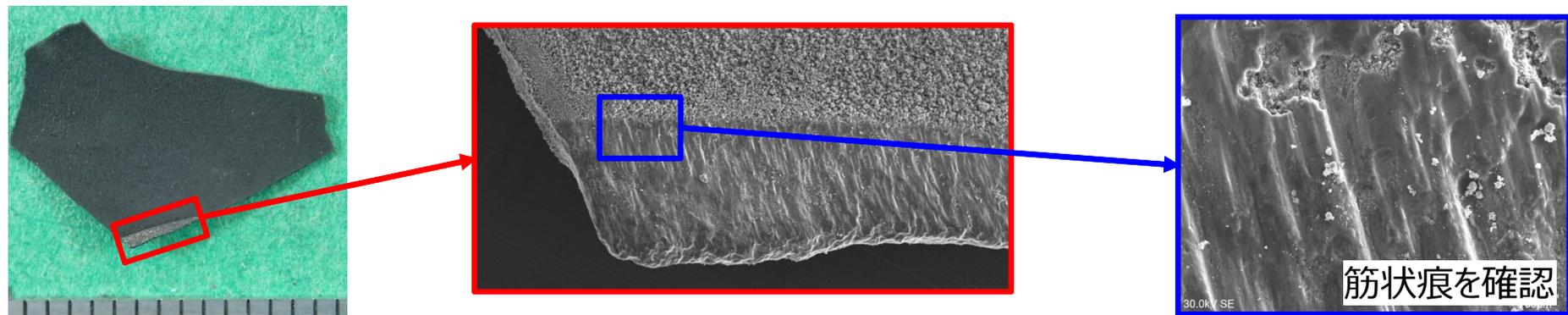
① 外観観察結果

- 伝熱管減肉部と付着物の接触想定部には、接触痕があり、光沢が認められた。
- 形状（**R**形状）を計測した結果、直径約22.5mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。



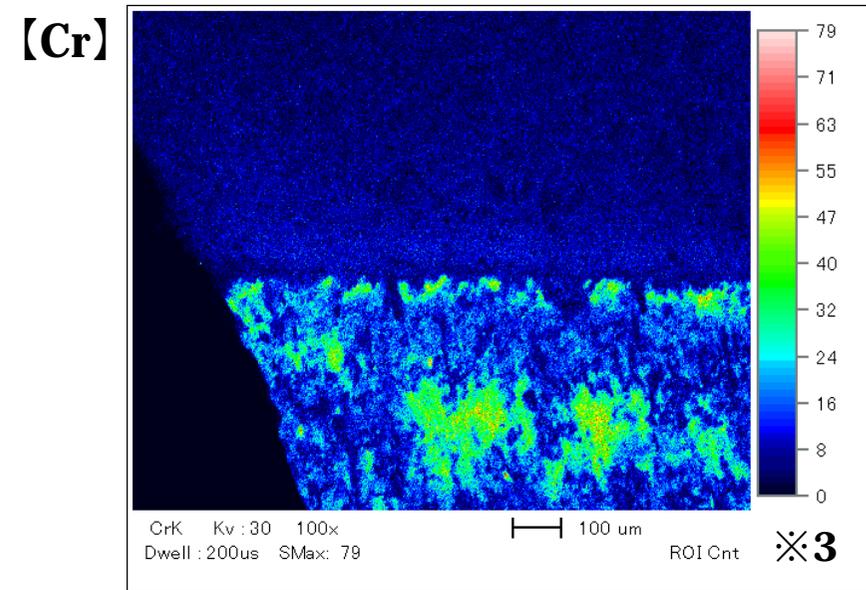
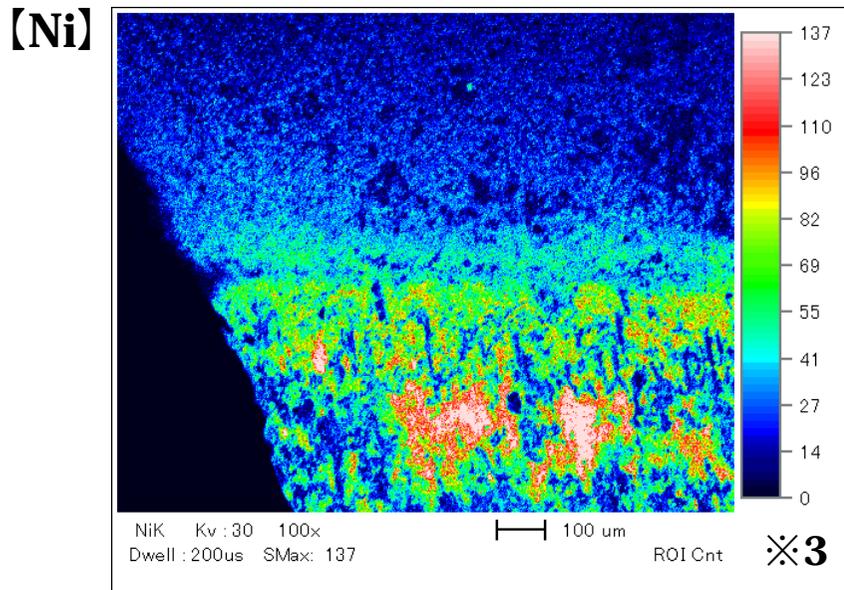
② SEM観察

- 伝熱管との接触想定部を拡大観察した結果、筋状痕を確認した。



③ 成分分析（X線回折※1、EDS※2）

- 表面の化学成分分析を実施した結果、中央部の主成分が酸化鉄（主にマグネタイト）であったことから、スケールであると推定した。（以下「スケールA」という。）
- 伝熱管との接触想定部の成分分析した結果、伝熱管の母材のNiおよびCrの成分を検出した。



※1：試料にX線を照射し、X線の散乱・干渉を解析することで、構成成分の同定をする分析方法

※2：電子線照射により発生する特性X線のエネルギーと強度から構成元素を分析する装置

※3：分析した成分のX線の反射強度で、1秒当たりのX線カウント数（含有元素の濃度が高いほど大きくなる）

< C - S Gで確認した付着物（X55, Y3 第三管支持板下面） >

① 外観観察結果

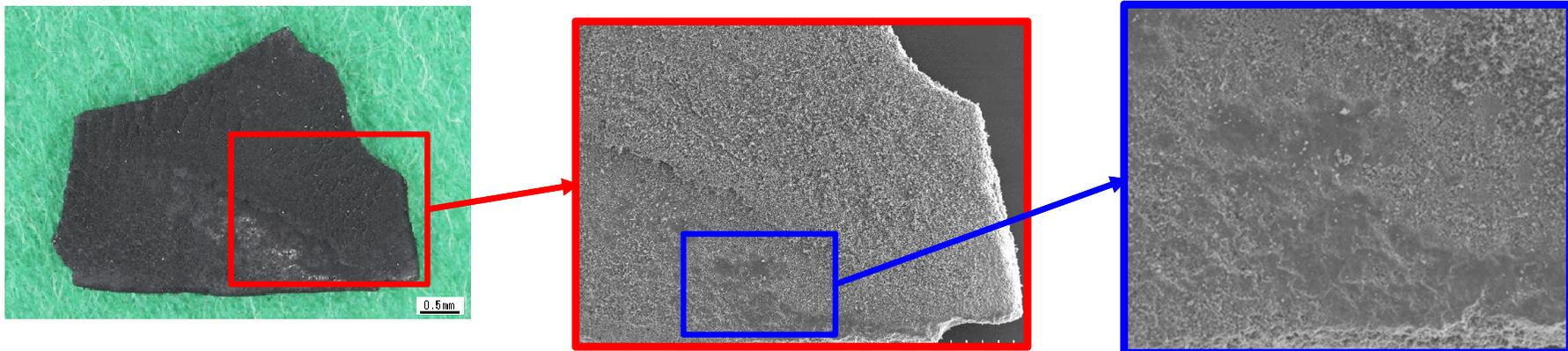
- 付着物の表面を観察した結果、接触痕並びに光沢は確認できなかった。
- 形状（**R**形状）を計測した結果、直径約21.9mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。



大きさ：約5mm×約3mm
厚さ：約0.4mm
質量：約0.02g

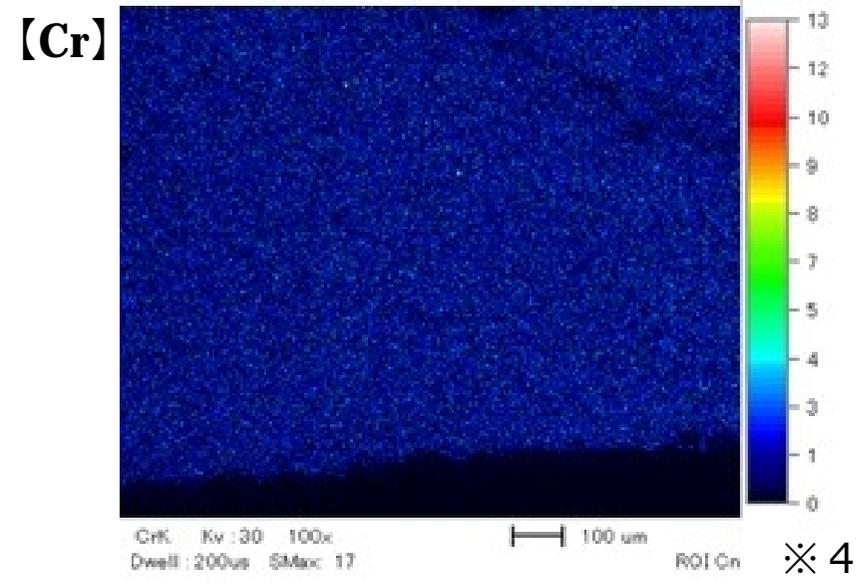
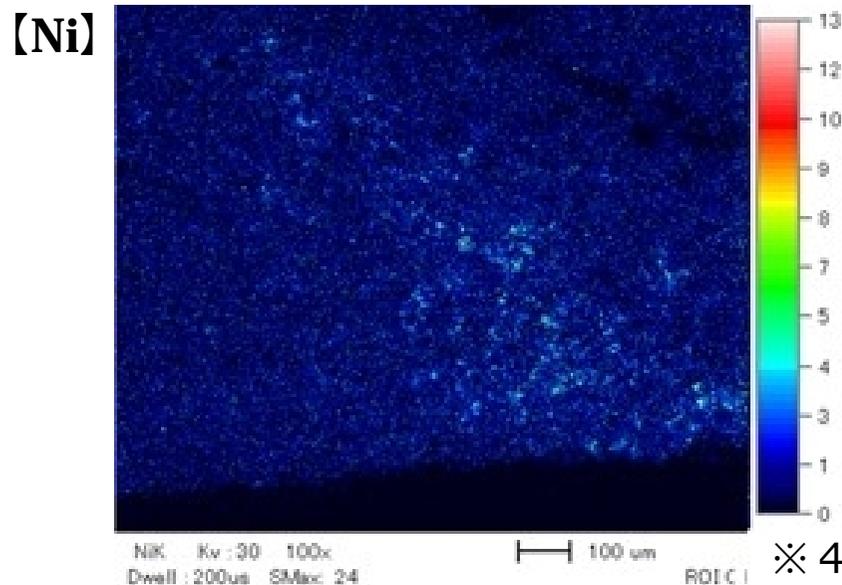
② SEM観察

- 拡大観察した結果、表面の一部に平滑な面はあったが、筋状痕は確認できなかった。



③ 成分分析（X線回折※1、EDS※2）

- 表面の化学成分分析を実施した結果、中央部の主成分が酸化鉄（主にマグネタイト）であったことから、スケールであると推定した。（以下「スケールC 1」という。）
- 平滑な面を成分分析した結果、伝熱管の母材のNiは僅かに検出したが、Crは検出できなかった※3。



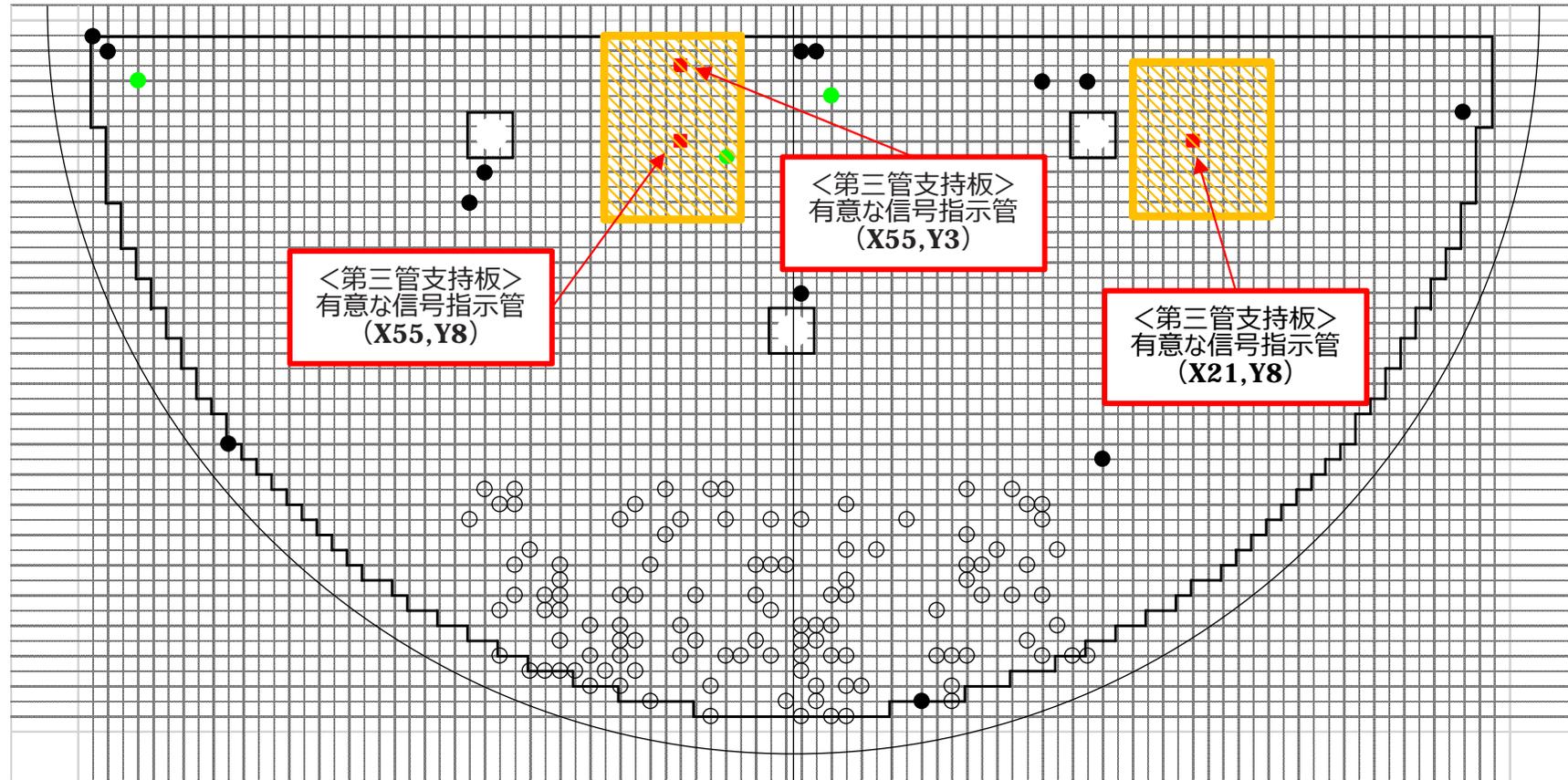
※1：試料にX線を照射し、X線の散乱・干渉を解析することで、構成成分の同定をする分析方法

※2：電子線照射により発生する特性X線のエネルギーと強度から構成元素を分析する装置

※3：Ni成分は3%以下、Cr成分は検出限界以下

※4：分析した成分のX線の反射強度で、1秒当たりのX線カウント数（含有元素の濃度が高いほど大きくなる）

- C - S G 伝熱管の減肉を発生させたと考える異物等を発見していないことを踏まえ、C - S G の減肉を確認した伝熱管を中心にXおよびY方向に約 10列ずつを範囲として、減肉箇所下方の第二および第一管支持板上にあるスケールを約 300個回収し、確認した。



凡例

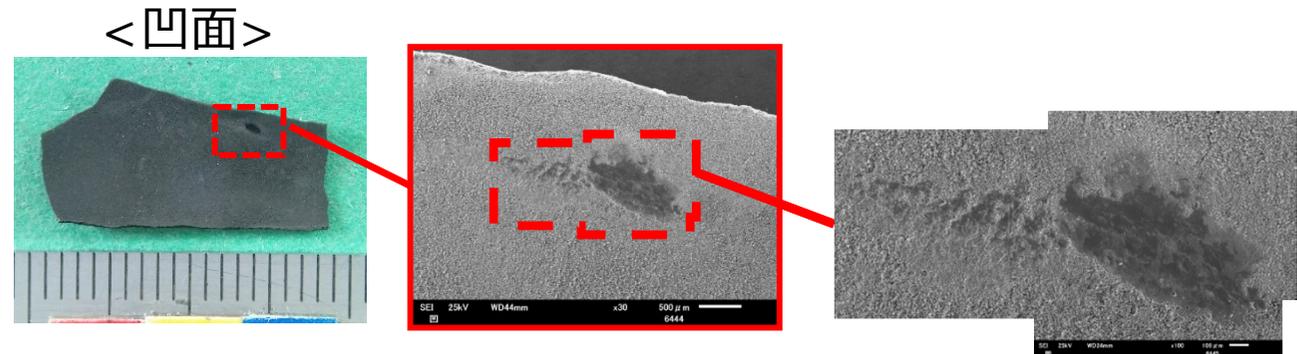
■ : 有意な信号指示管	● : 既施栓箇所（外面減肉）	● : 既施栓管（拡管部応力腐食割れ）
 : 既施栓管（拡管部応力腐食割れ以外）	 : スケール回収範囲	

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

① 外観観察結果

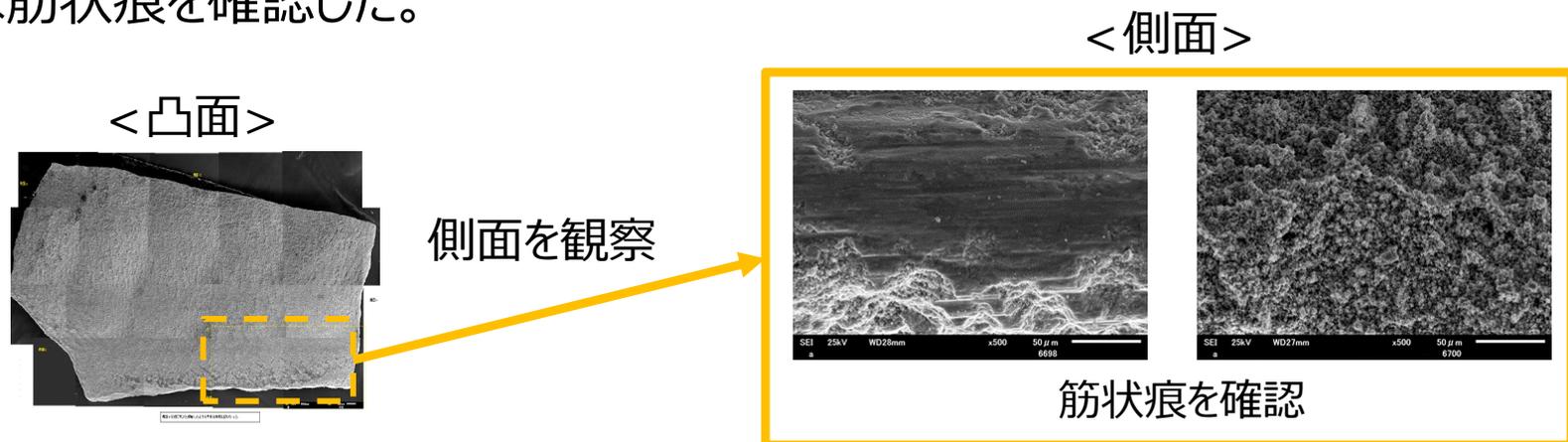
- 回収スケールの表面を観察した結果、凹面の平滑部に接触痕を確認した。また、側面にも一部に接触痕を確認した。形状（**R形状**）を計測した結果、直径約22.3mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。

大きさ：約18mm×約10mm
厚さ：約0.3mm
質量：約0.19g



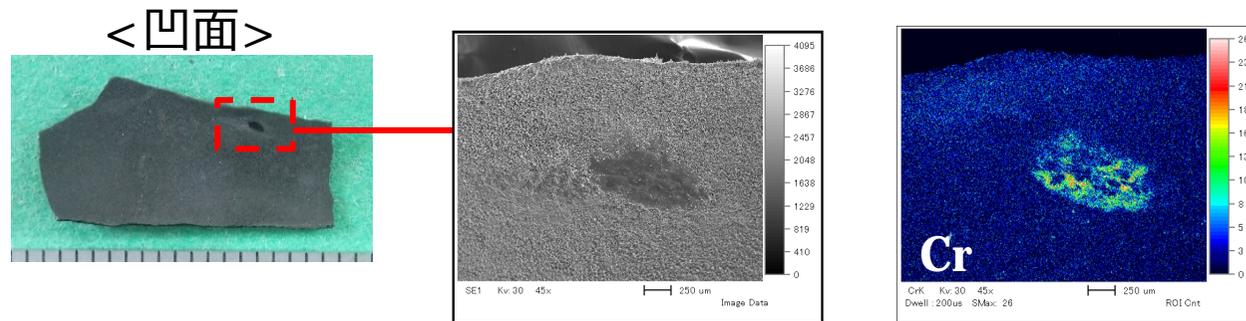
② SEM観察結果

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

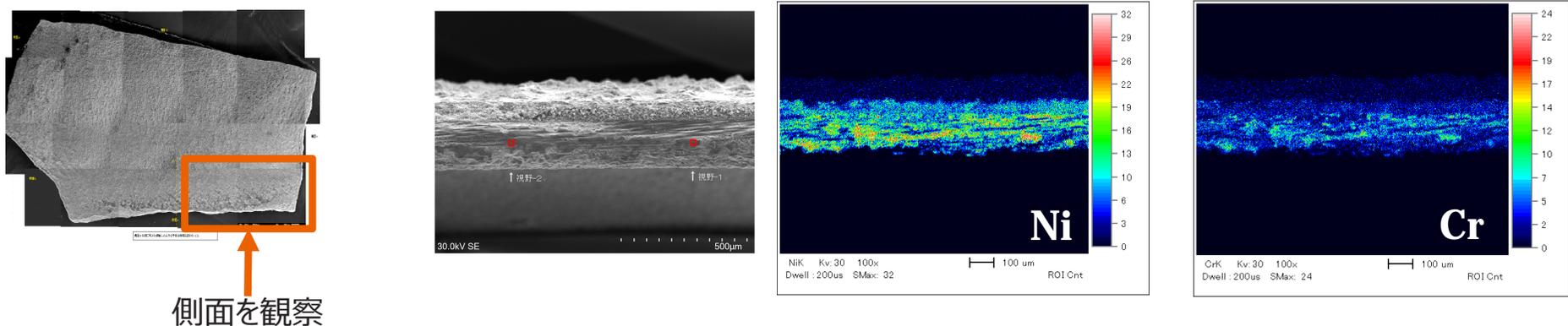


③ 化学成分分析

○回収スケール凹面平滑部の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析を実施した結果、管支持板（**SUS405**）の主成分である**Cr成分を検出した**。



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



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

④ 減肉箇所との関係

○回収スケールの形状や筋状痕、接触痕の位置は、以下の通りX55, Y8の減肉箇所や周辺の第三管支持板表面の接触痕の位置と一致することを確認した。

<凸面>

<側面>

<凹面>

筋状痕

接触痕

筋状痕と減肉部の位置関係は一致

凹面の接触痕と、第三管支持板 B E C 穴ランド部の接触痕の位置関係は一致

第三管支持板表面の接触痕の位置関係と一致

減肉部と接触

第三管支持板 B E C 穴ランド部と接触

第三管支持板表面と接触

フロースロット側

マンホール側

ノズル側

仕切板側

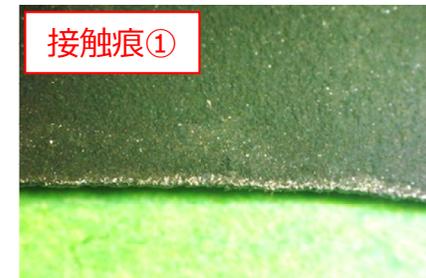
減肉が認められたX21,Y8の第三管支持板部の下方、X21-22,Y12第一管支持板上面で回収したスケール（以下、スケールC3）を分析した結果は、次のとおりである。

① 外観観察結果

- 回収スケールの表面を観察した結果、凸面に接触痕を確認した。また、形状（R形状）を計測した結果、直径約22.6mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。

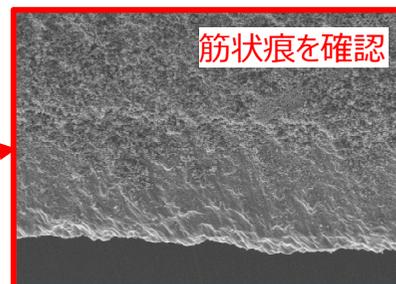
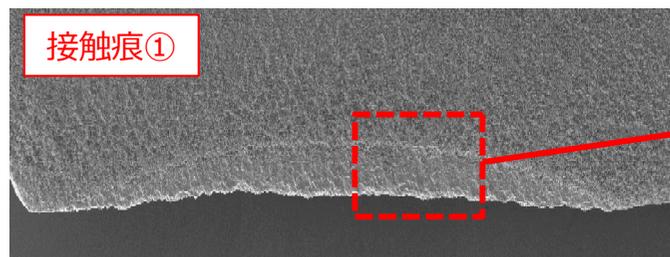
<凸面>

大きさ：約23mm×約11mm
厚さ：約0.3mm
質量：約0.25g

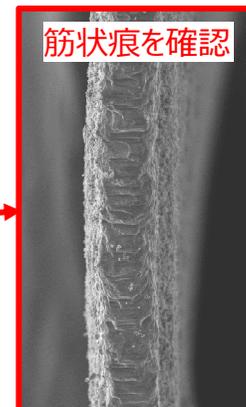
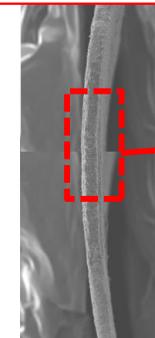


② SEM観察結果

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

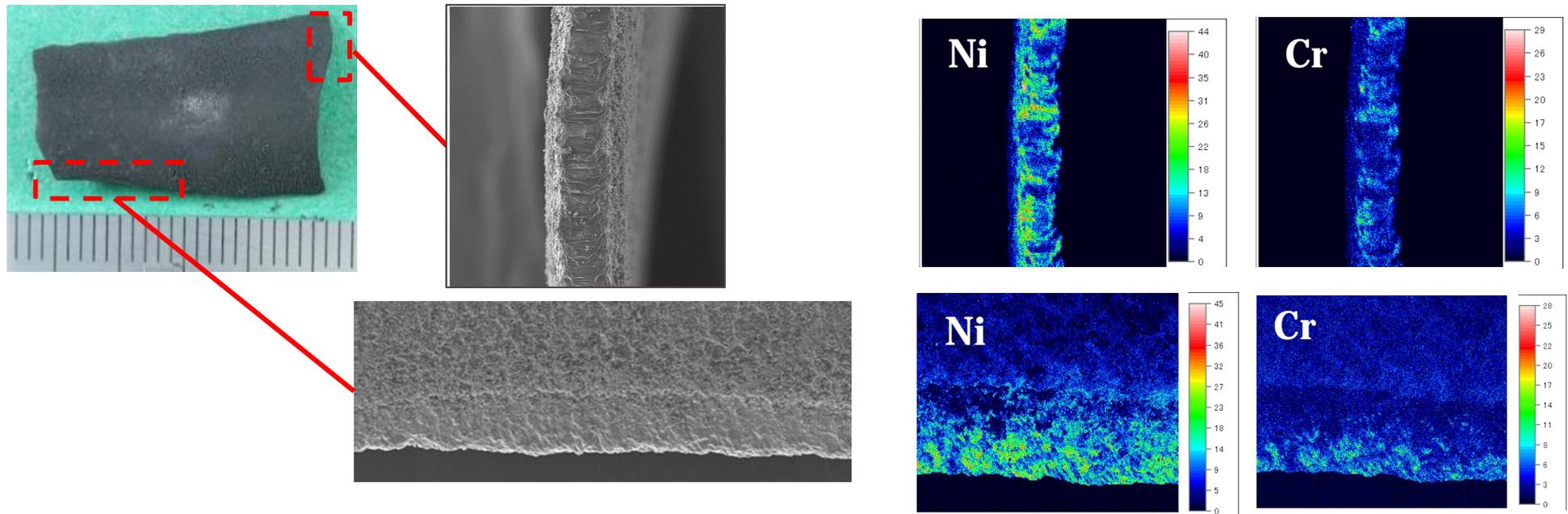


接触痕②（側面）

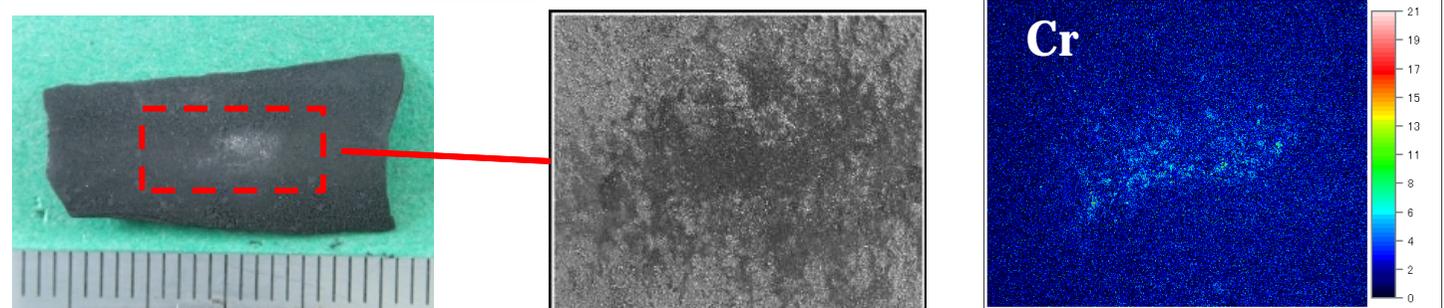


③ 化学成分分析

- 回収スケール凸面の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析を実施した結果、伝熱管（インコネル600）の主成分であるNi成分とCr成分を検出した。



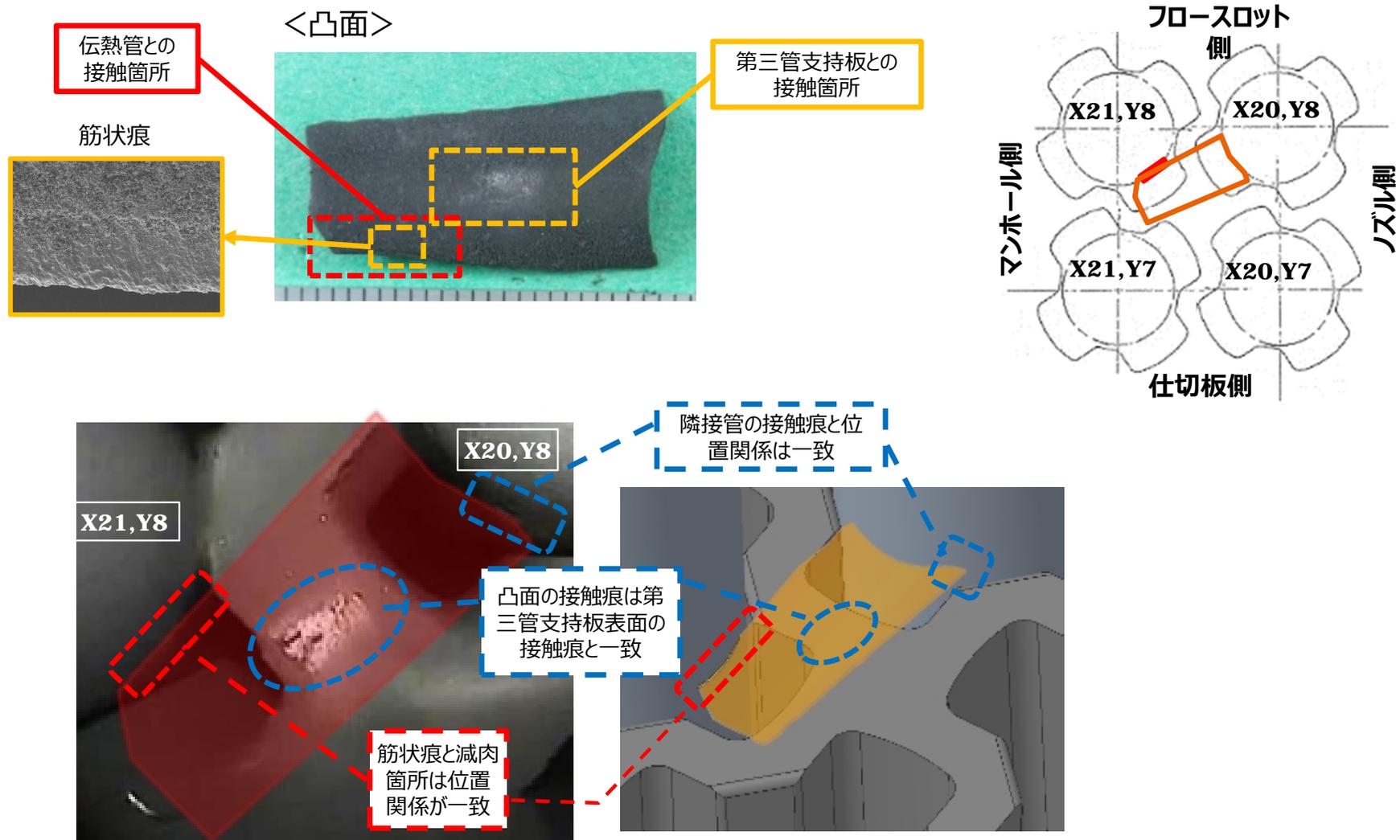
- 回収スケールの凸面中央の接触痕が認められた平滑部表面の化学成分分析を実施した結果、管支持板（SUS405）の主成分であるCr成分を検出した。



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

④ 減肉箇所との関係

○回収スケールの形状や筋状痕、接触痕の位置は、以下の通り**X21,Y8**の減肉箇所並びに周辺の第三管支持板表面および隣接管 (**X20,Y8**) の接触痕の位置と一致することを確認した。



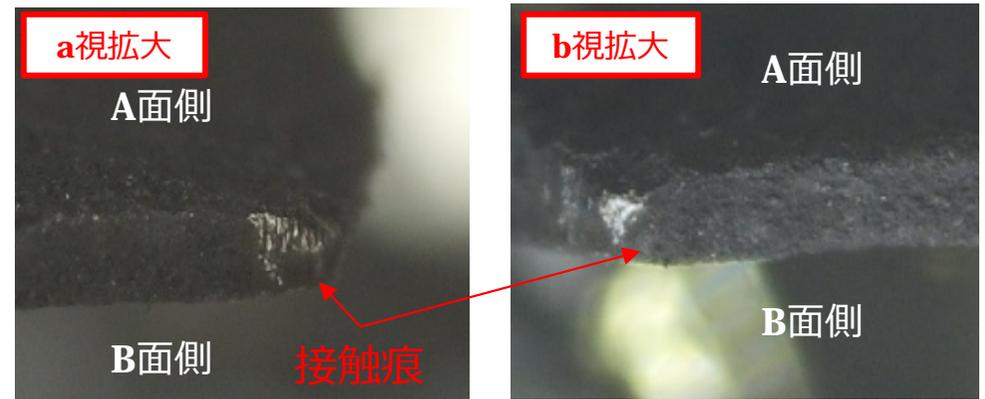
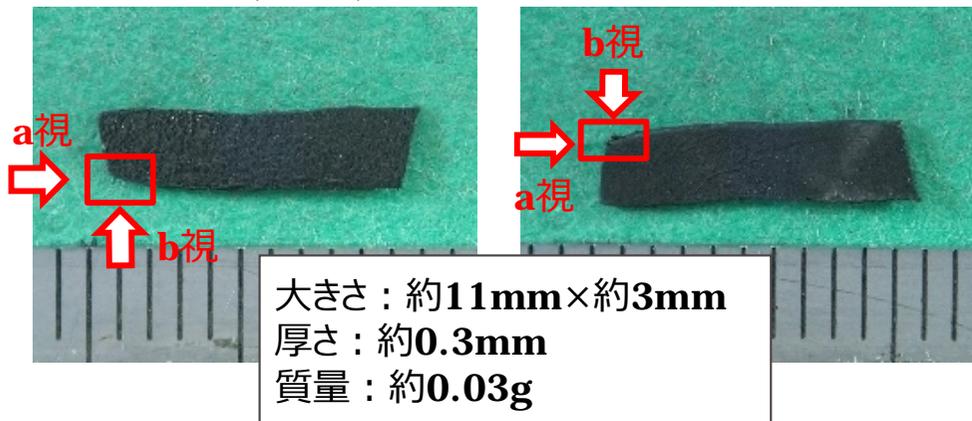
減肉が認められたX55,Y3の第三管支持板部の下方、X55-56,Y4第二管支持板上面で回収したスケール (以下、スケールC4) を分析した結果は、次のとおりである。

① 外観観察結果

○回収スケールの表面を観察した結果、角部に接触痕を確認した。また、形状 (R形状) を計測した結果、直径約22.2mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。

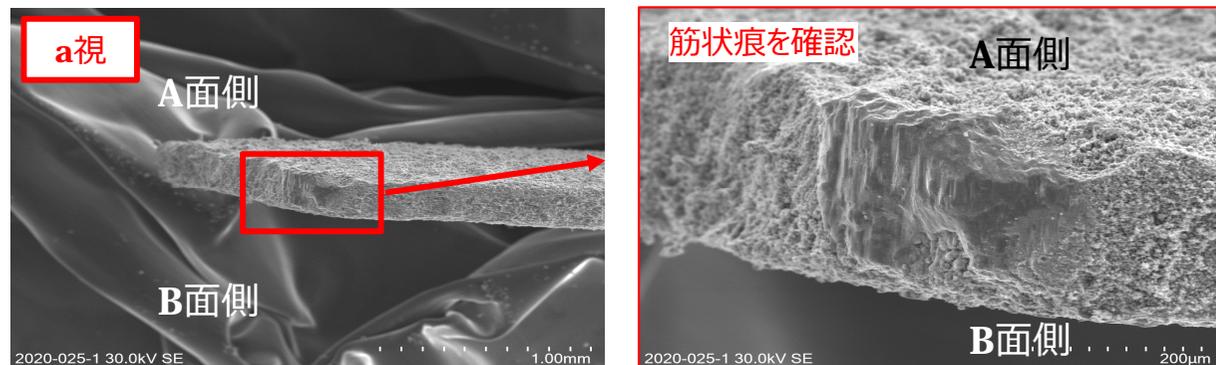
<A面(表面)>

<B面(裏面)>



② SEM観察結果

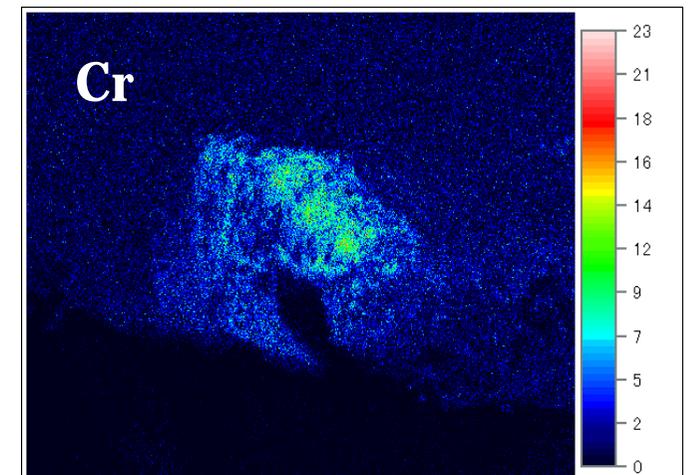
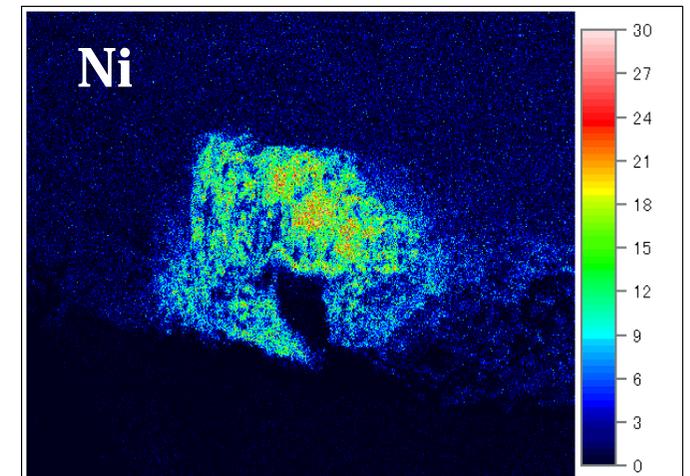
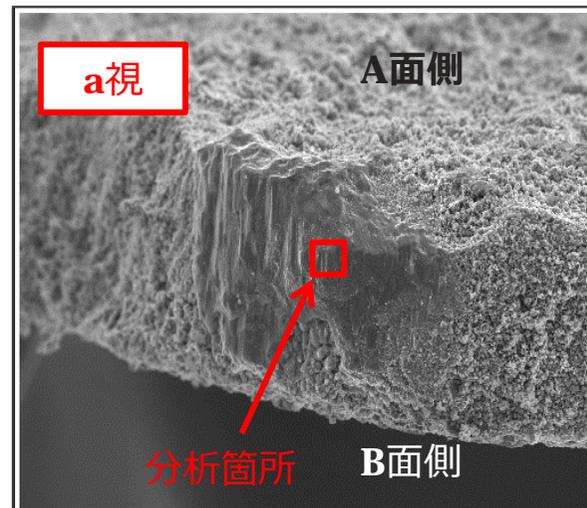
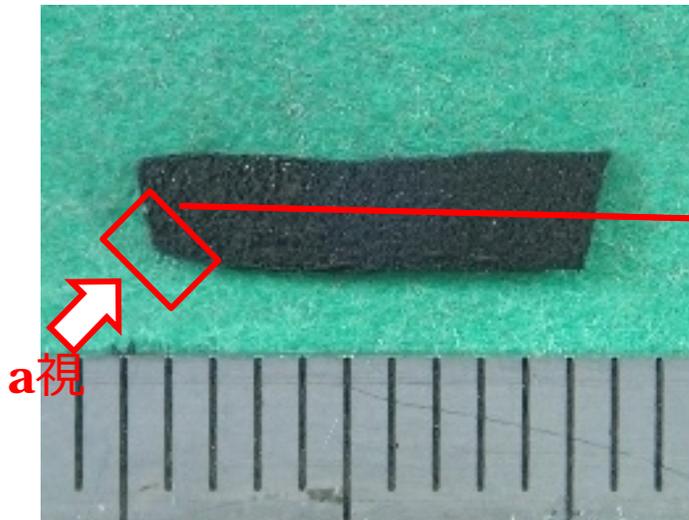
○接触痕を拡大観察した結果、筋状痕を確認した。



③ 化学成分分析

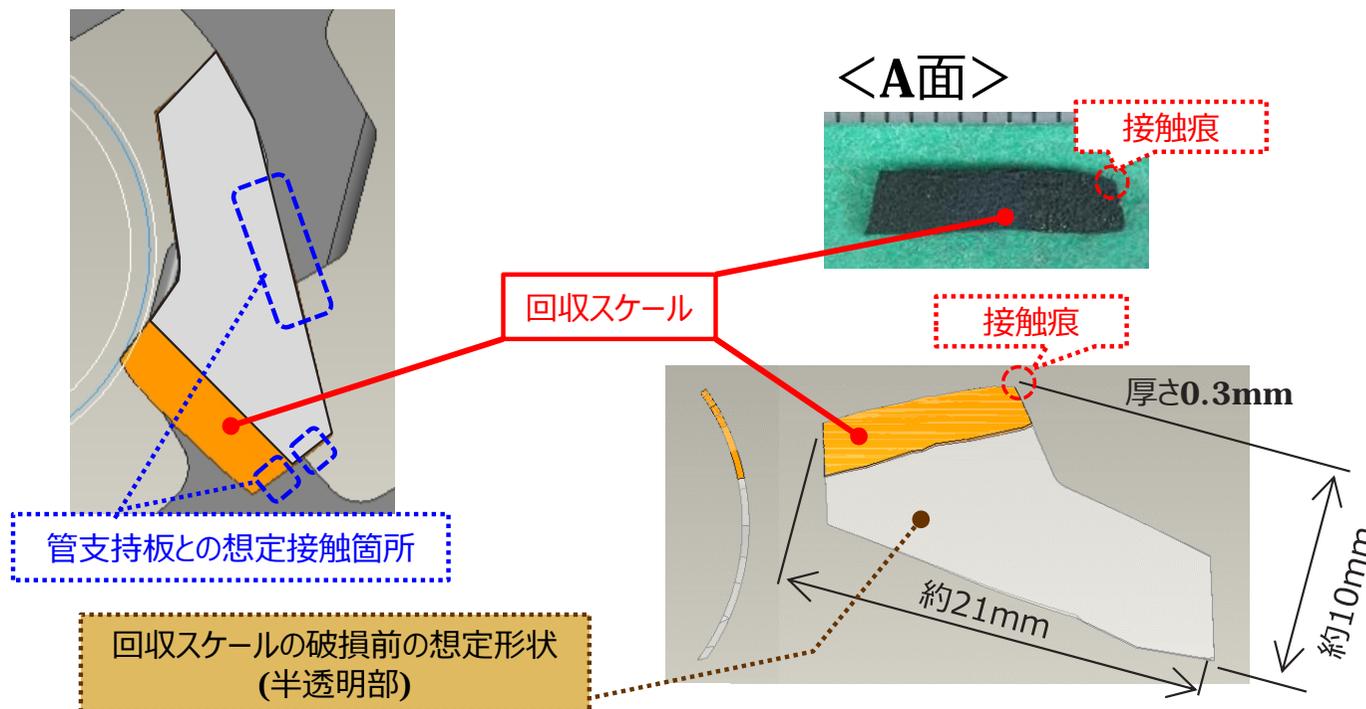
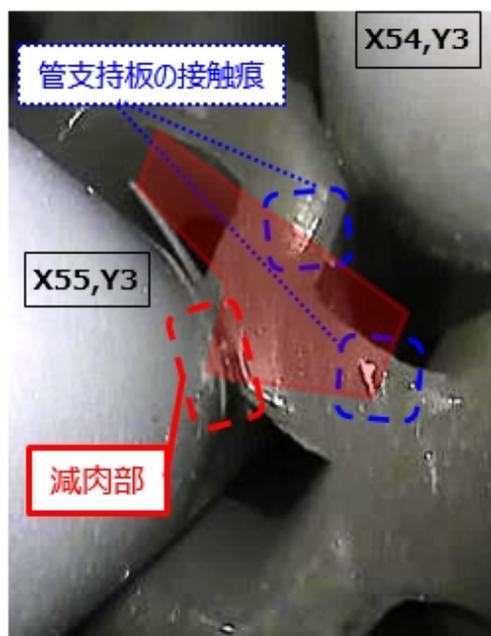
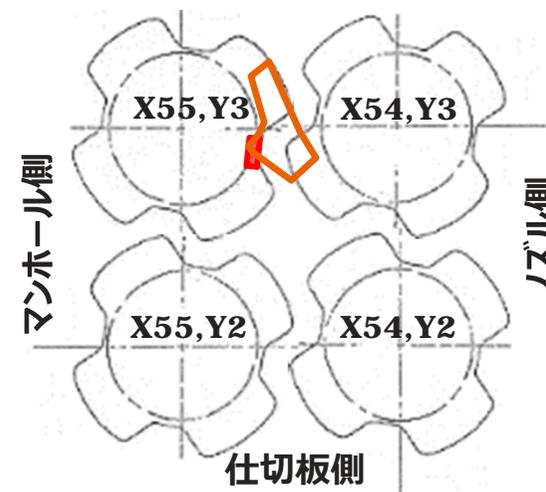
○回収スケール角部の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析を実施した結果、伝熱管（インコネル600）の主成分であるNi成分とCr成分を検出した。

<A面(表面)>



④ 減肉箇所との関係

- 回収したスケールの角部に接触痕が確認されたことから、減肉形状が三角型と推定されるX55,Y3伝熱管との接触条件を検討。
- スケールの一部（伝熱管との接触部以外の箇所）が破損したとすると、回収スケールの破損前の想定形状が管支持板接触痕の位置と一致することを確認した。



- スケールAは接触痕があり光沢が認められ、減肉信号を確認した伝熱管との接触想定部位にN i およびC r の成分を検出したことから、スケールAが減肉を発生させたと考える。
- スケールC 1は接触痕並びに光沢は確認できず、また検出されたN i の成分は僅かに検出したものの、C r の成分が検出されなかったため、減肉を発生させたものではないと考える。
- 減肉信号を確認した伝熱管付近から回収したスケールC 2、C 3およびC 4については、回収したスケールに接触痕を確認し、接触想定部位にN i およびC r の成分を検出したことおよび減肉箇所や管支持板表面の接触痕と形状や接触痕の位置関係が一致することから、スケールC 2、C 3およびC 4が減肉を発生させたと考える。

減肉を発生させるスケールの生成、剥離メカニズムおよび伝熱管を損傷させる可能性について、調査および検討を実施した。

○スケールの生成メカニズム

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

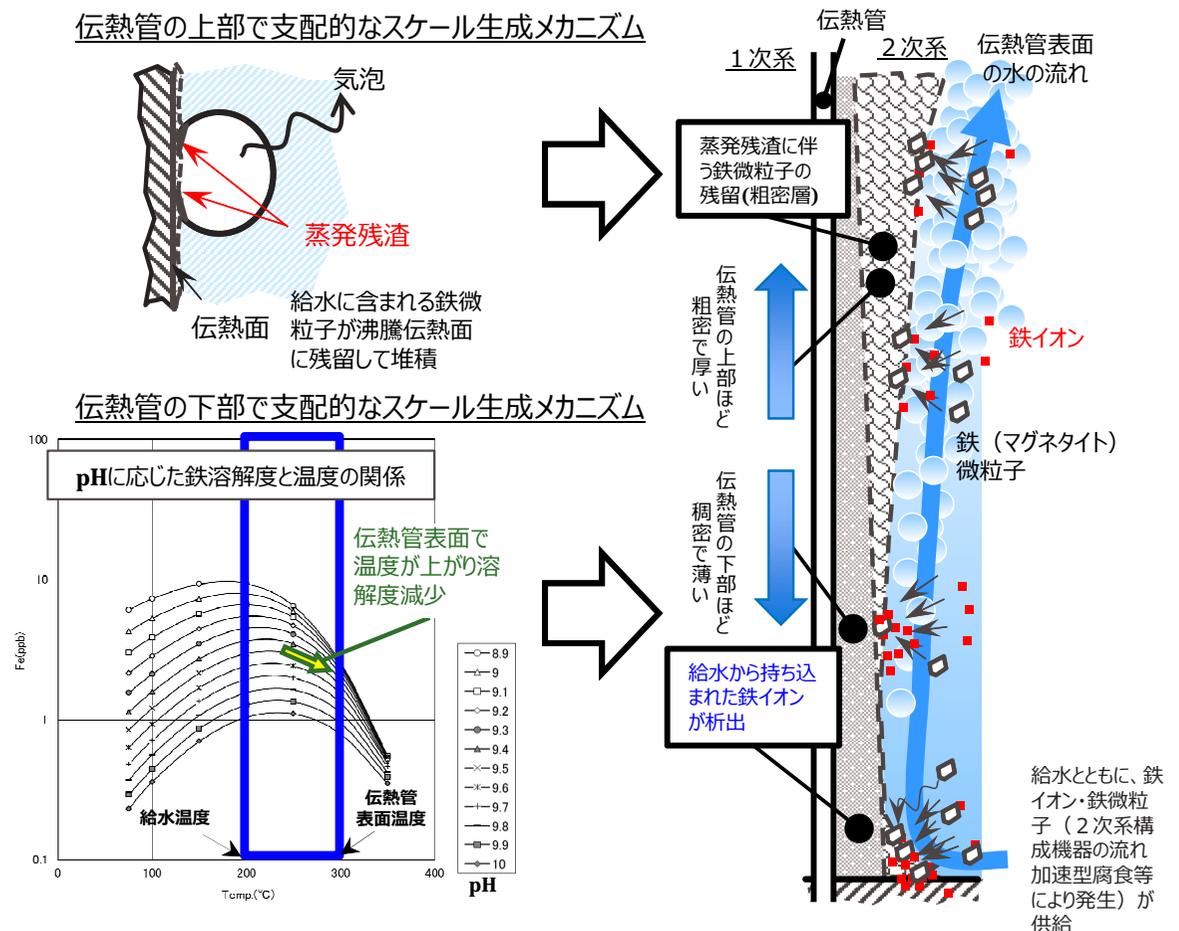
(スケールの生成および性状)

・析出付着

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

・蒸発残渣

伝熱管の上部では、沸騰現象が顕著であることから、鉄イオンの析出付着よりも、鉄の微粒子が蒸発残渣として伝熱管表面に残留、堆積する現象が主体である。そのため、伝熱管の上部に付着するスケールは、粗密な傾向がある。また、蒸発残渣によって残留、堆積する鉄の微粒子の方が析出付着する鉄イオンに比べて粒径が大きいことから、伝熱管の上部で生成するスケールの方が伝熱管の下部より粗密で厚い傾向にある。

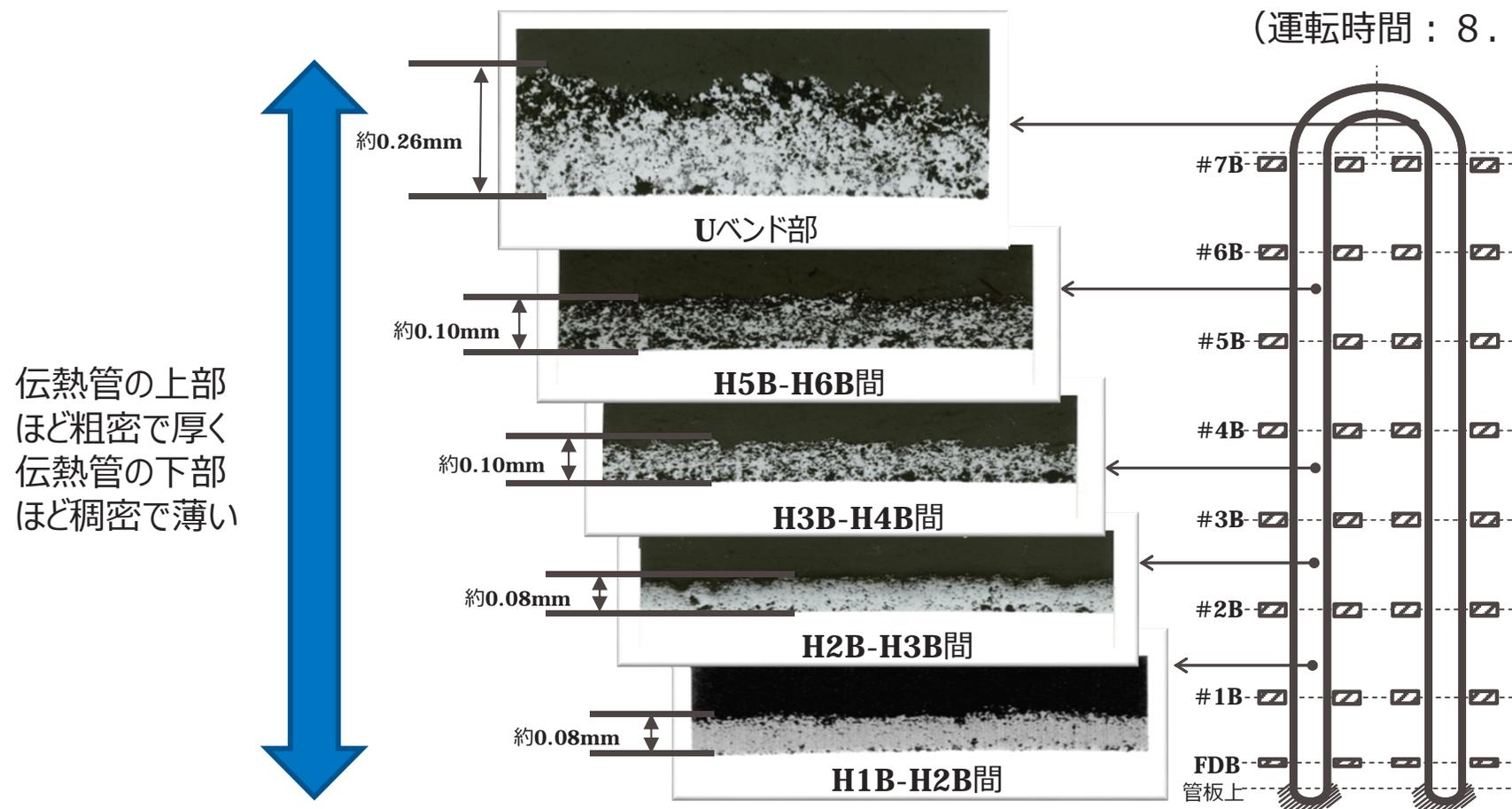


○スケールの性状の実機調査 (過去の調査での知見 (平成8年))

平成8年に高浜発電所3号機第9回定期検査で健全性確認を目的に伝熱管の抜管調査を実施した際、伝熱管各部位 (SG上方からUベンド部、第六から第五管支持板の間、第四から第三管支持板の間、第三から第二管支持板の間、第二から第一管支持板の間) のスケールについて、断面マイクロ観察を実施している。その結果、伝熱管の上部のスケールほど粗密で厚く、伝熱管の下部ほど稠密で薄いということを確認した。

(高浜3号機 平成8年抜管調査時 断面マイクロ観察)

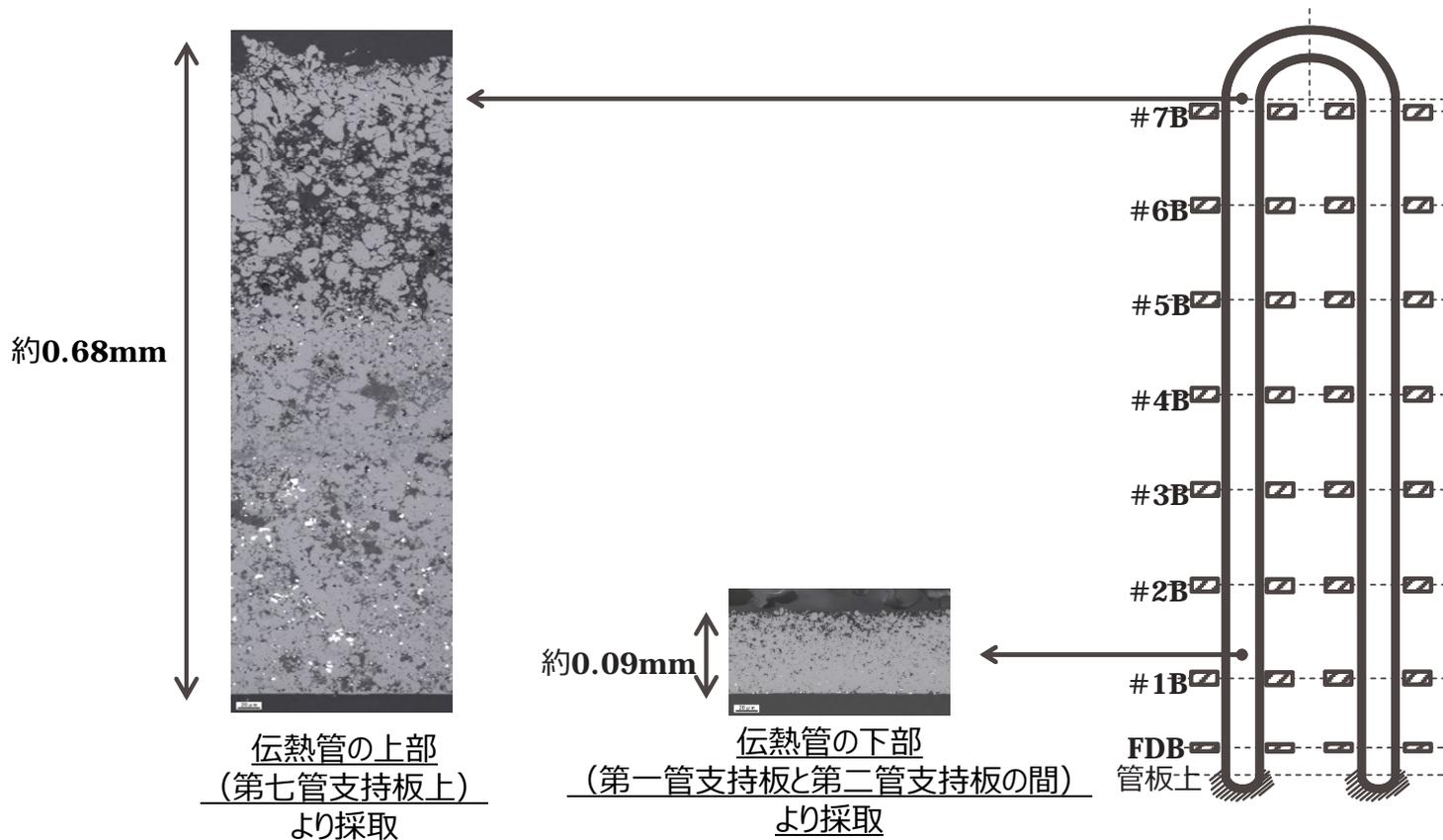
(運転時間: 8.3万時間)



○スケールの性状の実機調査 (高浜発電所 4 号機におけるスケール調査)

高浜発電所 4 号機今回 (第 2 3 回) 定期検査において、伝熱管の上部 (第七管支持板上) および伝熱管の下部 (第一管支持板と第二管支持板の間) から 1 サンプルずつスケールを回収し、性状を確認した結果、伝熱管の上部 (第七管支持板上) のスケールは粗密で厚く、伝熱管の下部 (第一管支持板と第二管支持板の間) では稠密で薄いということを確認した。

(高浜発電所 4 号機におけるスケール調査実績)



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

○ 2次系の水質管理調査（水処理履歴、運転時間）

各水処理における給水中の鉄含有量は実測データより、pHの低い水処理方法ほど給水中の鉄含有量が多いことが分かっている。

処理方法	給水中鉄含有量	処理方法	運転時間
A V T 処理	約 5 ~ 1 0 p p b	A V T 処理	約 9 . 8 万時間
E T A 処理	約 3 p p b	E T A 処理	約 8 . 0 万時間
高 E T A 処理	約 1 p p b	高 E T A 処理	約 2 . 0 万時間
高アンモニア処理	約 1 p p b	高アンモニア処理	約 2 . 4 万時間

○ 2次系の水質管理調査（鉄の持ち込み量）

上記水処理期間の鉄の持ち込み量と、合計の鉄の持ち込み量を算出した結果は次のとおり。

処理方法	鉄の持ち込み量
A V T 処理	約 1 , 6 8 0 k g
E T A 処理	約 6 5 0 k g
高 E T A 処理	約 7 0 k g
高アンモニア処理	約 9 0 k g
合計	約 2 , 4 9 0 k g

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

経年的に厚さが増加すると考えられることから、次のとおり厚さの増加に関する調査を実施した。

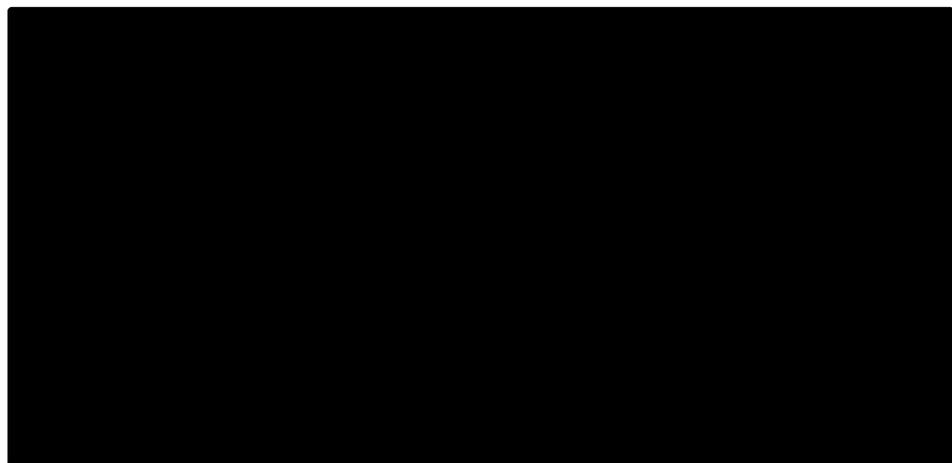
○スケール厚さに関する実機調査

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

S G出口圧力

伝熱管表面のスケール成長に伴い、S G出口圧力は徐々に低下

S G出口圧力[MPa abs]

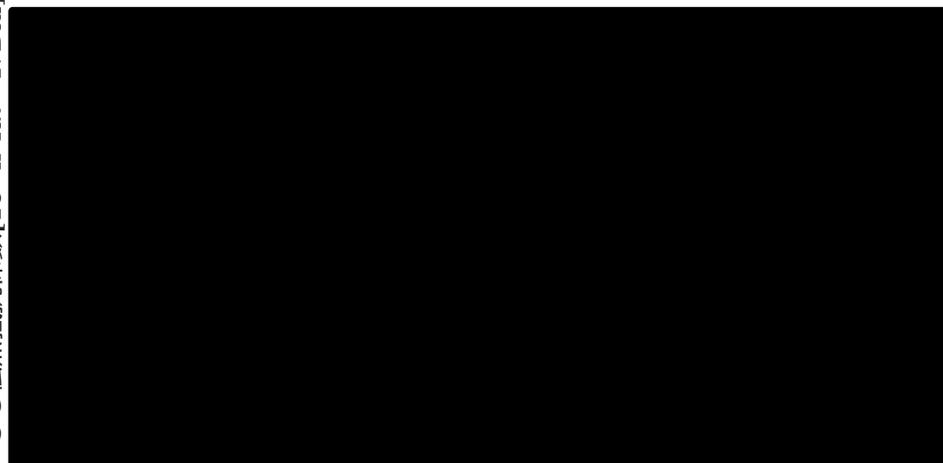


運転サイクル

S G伝熱抵抗係数

伝熱管表面のスケール成長に伴い、S G伝熱抵抗係数は徐々に上昇

S G伝熱抵抗係数[$10^{-4} \text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{°F} / \text{Btu}$]



運転サイクル

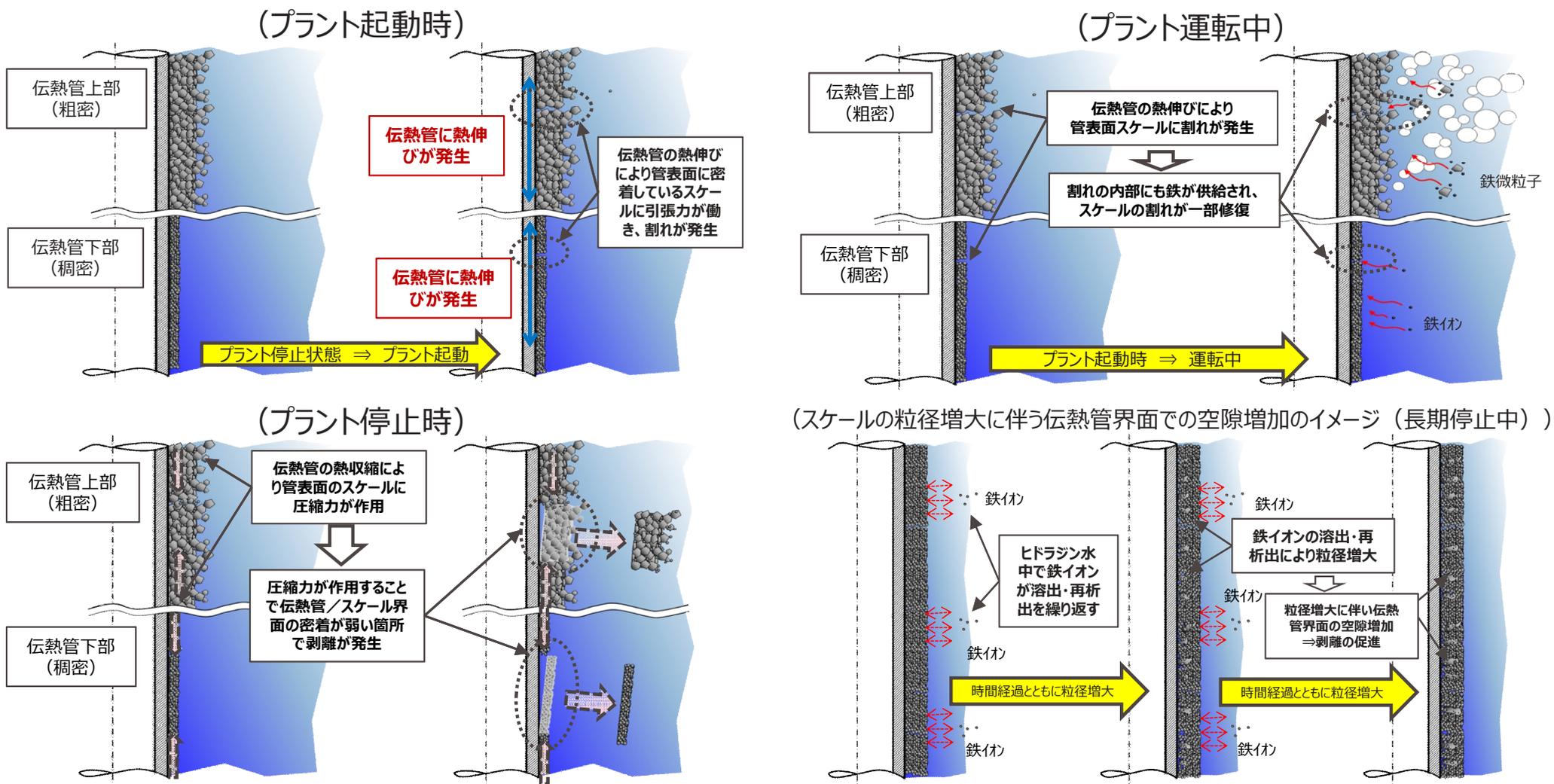
以上の結果から、スケール厚さは経年的に増加していくものであることを確認した。また、現在では高E T A処理や高アンモニア処理によって給水のp H値を高く維持することで、1サイクルあたりの鉄の持込み量は数十k g / S G程度に抑えられていることを確認した。

： 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。

○スケールの剥離 (剥離メカニズム)

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

- (a) プラント起動時の伝熱管の熱伸びに伴い伝熱管表面のスケールに割れが生じる。
- (b) プラント運転中に割れの隙間が新たに生成したスケールで埋まる。
- (c) 隙間が埋まったため、プラント停止時の熱収縮に追従できずスケールは剥離する。



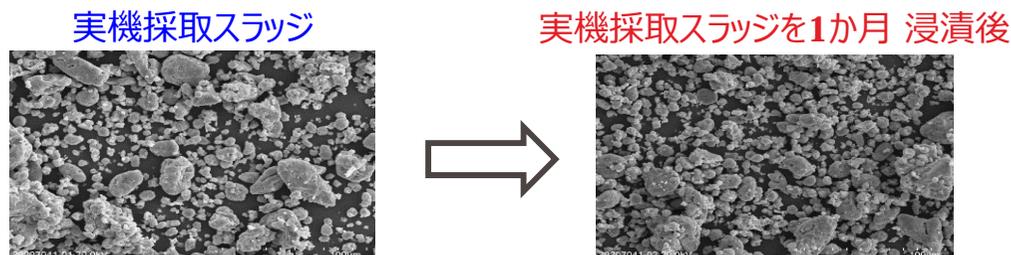
○スケールの剥離 (長期停止の影響)

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

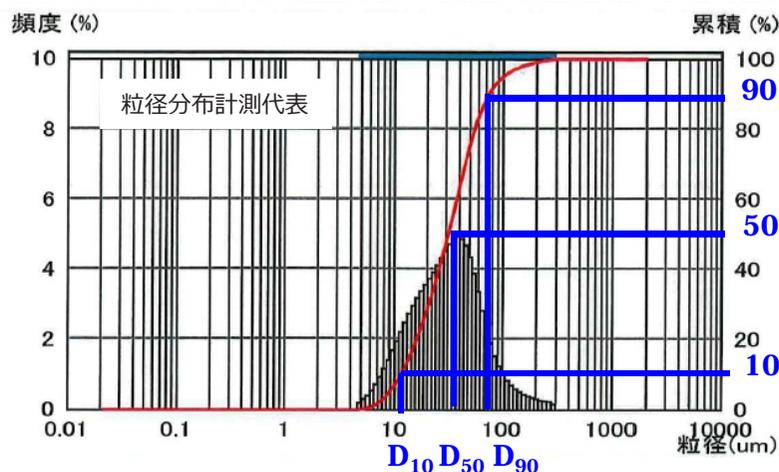
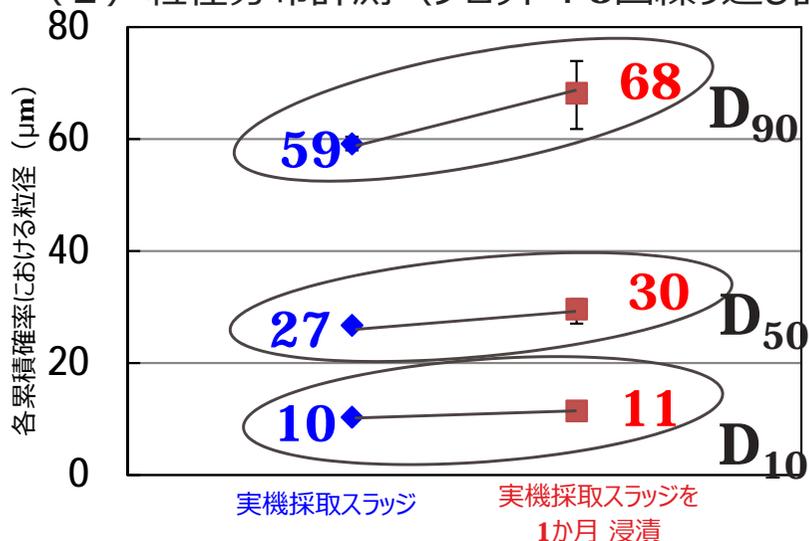
粒径が大きくなると、伝熱管との接触面積が減少し、剥離が促進される可能性がある。スケールの剥離量が増えるとスラッジランニングでのスケール回収量が大きくなる可能性があるため、高浜発電所4号機の長期停止前後の実績を調査した結果、スケール回収量は長期停止後に増加している傾向が認められた。以上により、長期停止後に伴い、スケールの粒径が大きくなることで伝熱管との接触面積が減少し、プラントの運転等に伴い伝熱管からスケールが多数剥離したと推定した。

(ヒドラジン水浸漬試験結果)

(1) SEM観察

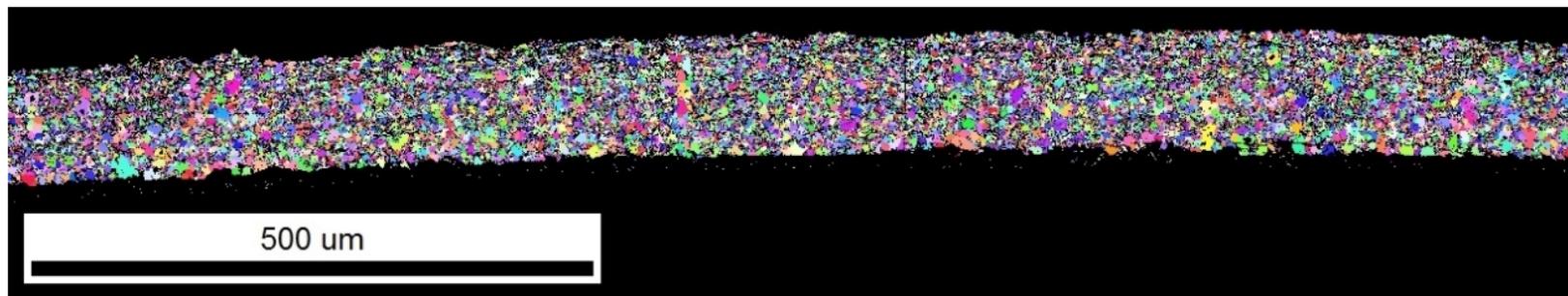


(2) 粒径分布計測 (プロット: 3回繰り返し計測平均値, エラーバー: 3回計測の最大値, 最小値)



長期停止前後のスケール断面粒観察結果は以下のとおりである。

長期停止前スケール断面粒観察結果
(大飯発電所 3号機第 16 回定期検査時)



長期停止後スケール断面粒観察結果
(大飯発電所 3号機第 18 回定期検査時)

長期停止後は長期停止前に比べ、大きな粒が認められる

