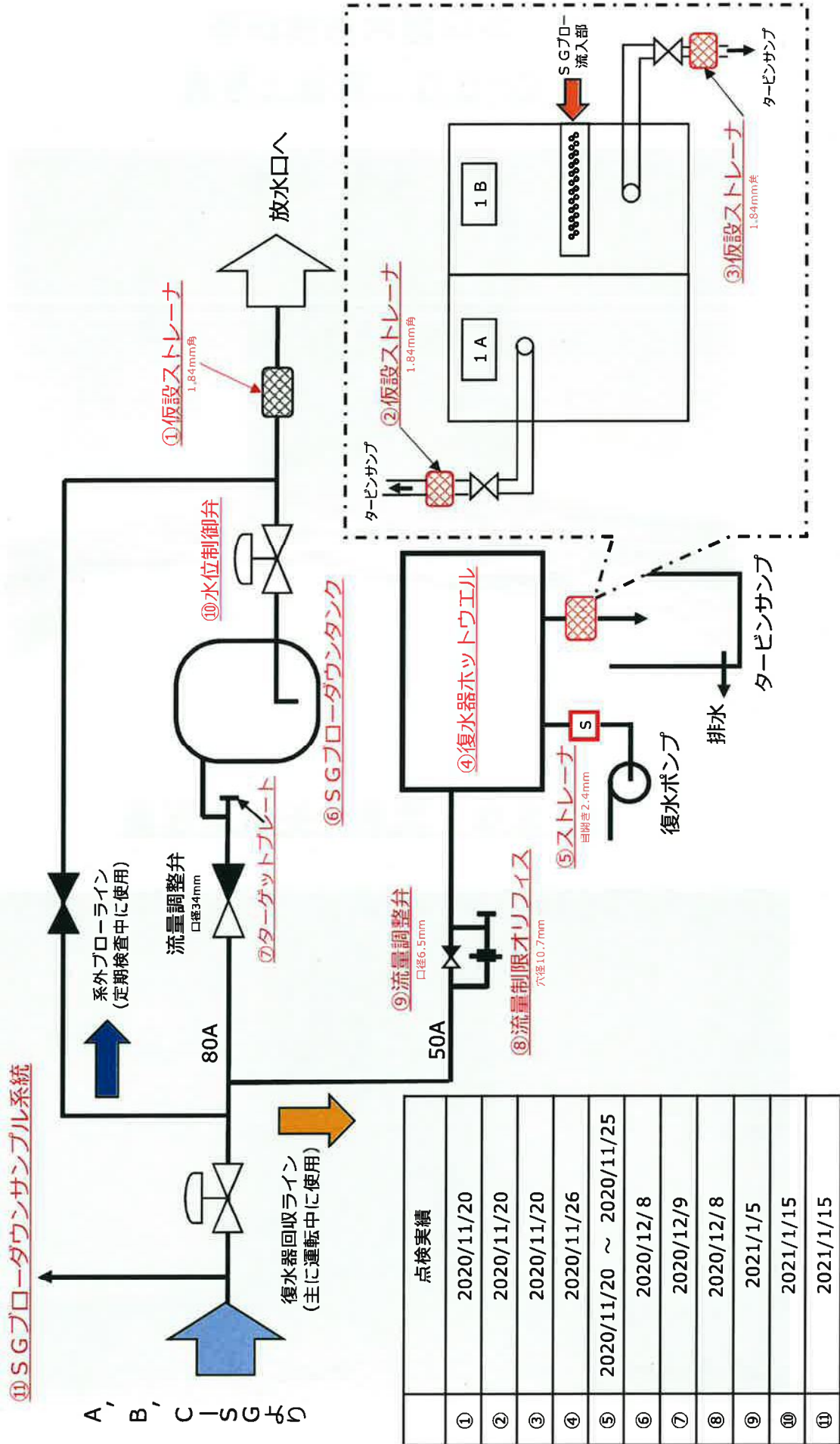


SGブローダウンシステム点検結果 (1/15)

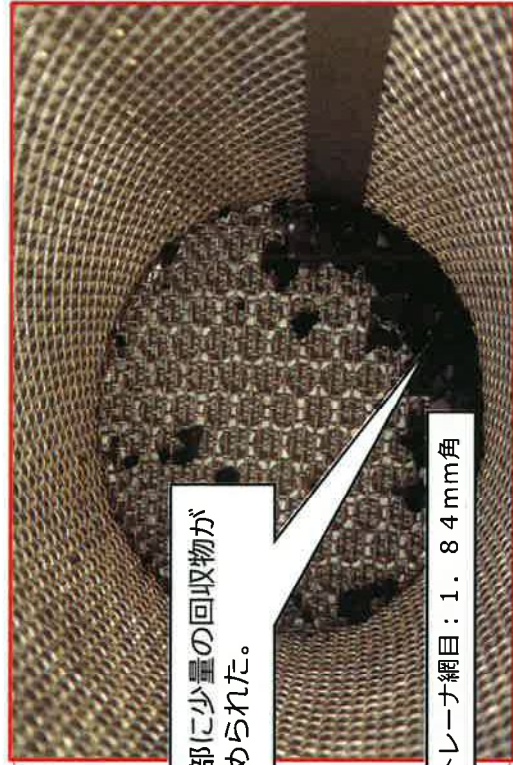
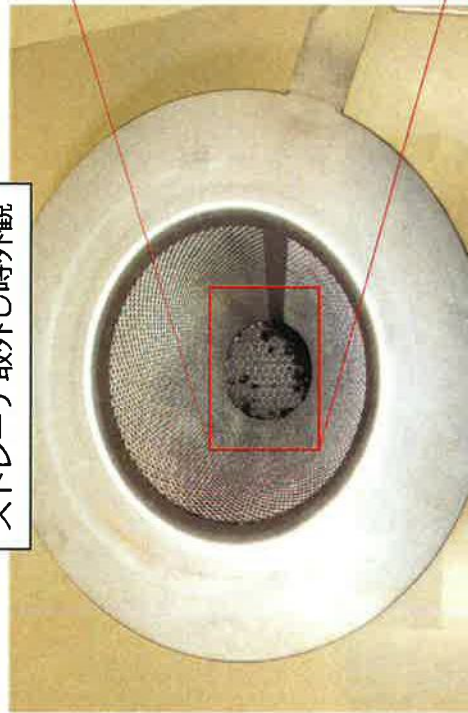
SGブローダウンシステム点検概略図



SGブローダウンシステム点検結果 (2 / 15)

①SGブローダウン海水放出管仮設ストレーナ

ストレーナ取外し時外観



回収物拡大



回収物の大きさ

最大：約6.5mm×約5.0mm×厚さ約1.0mm

回収量：約7.0g

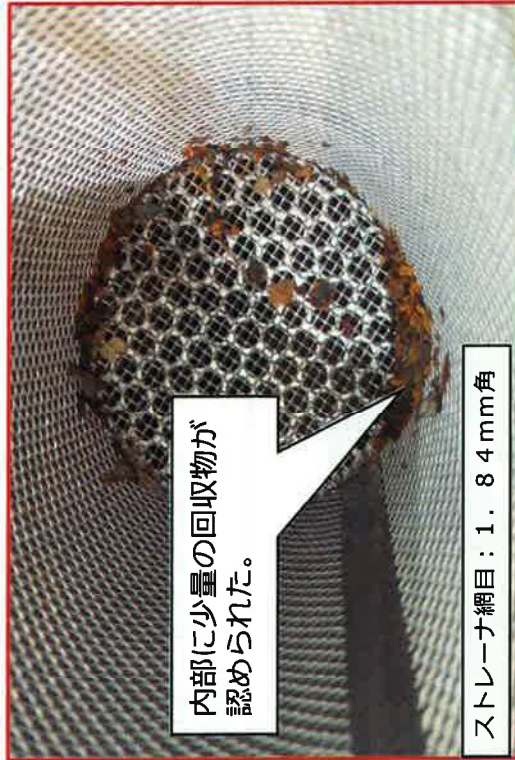
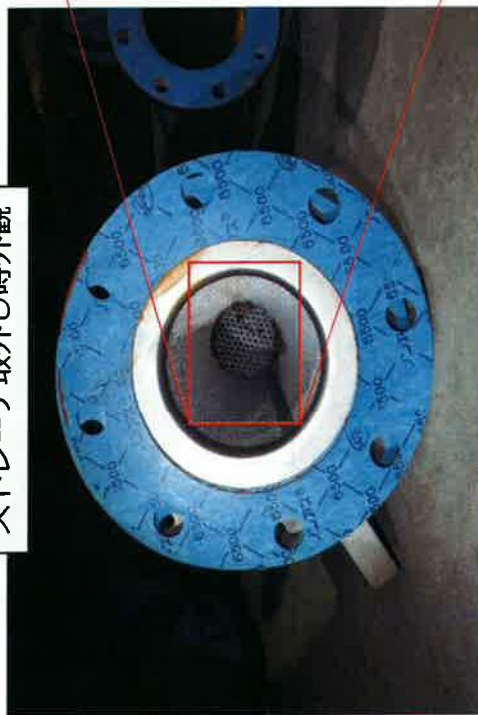
【回収物に対する見解】

回収物はスケールおよびスラッジであり、これまで当該ストレーナで回収されたものと同様である。

SGブローダウンシステム点検結果 (3 / 15)

②復水器ホットウエル(1A)ブロー配管仮設ストレーナ

ストレーナ取外し時外観



回収物拡大



回収物の大きさ

最大：約6.0mm×約6.0mm×厚さ約2.0mm

回収量：約2.9g

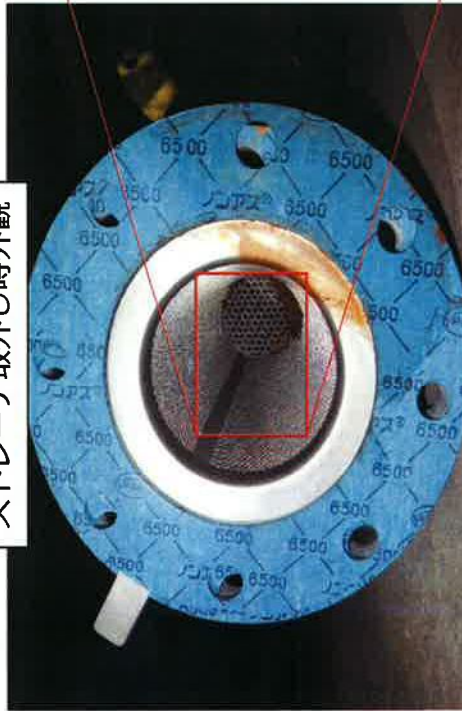
【回収物に対する見解】

回収物は鉄さびであり、二次系配管内で発生したものである。

SGブローダウン系統点検結果 (4 / 15)

③復水器ホットウェル(1B)ブロー配管仮設ストレーナ

ストレーナ取外し時外観



回収物拡大



回収物の大きさ

最大: 約10.0mm×約7.0mm×厚さ約1.0mm

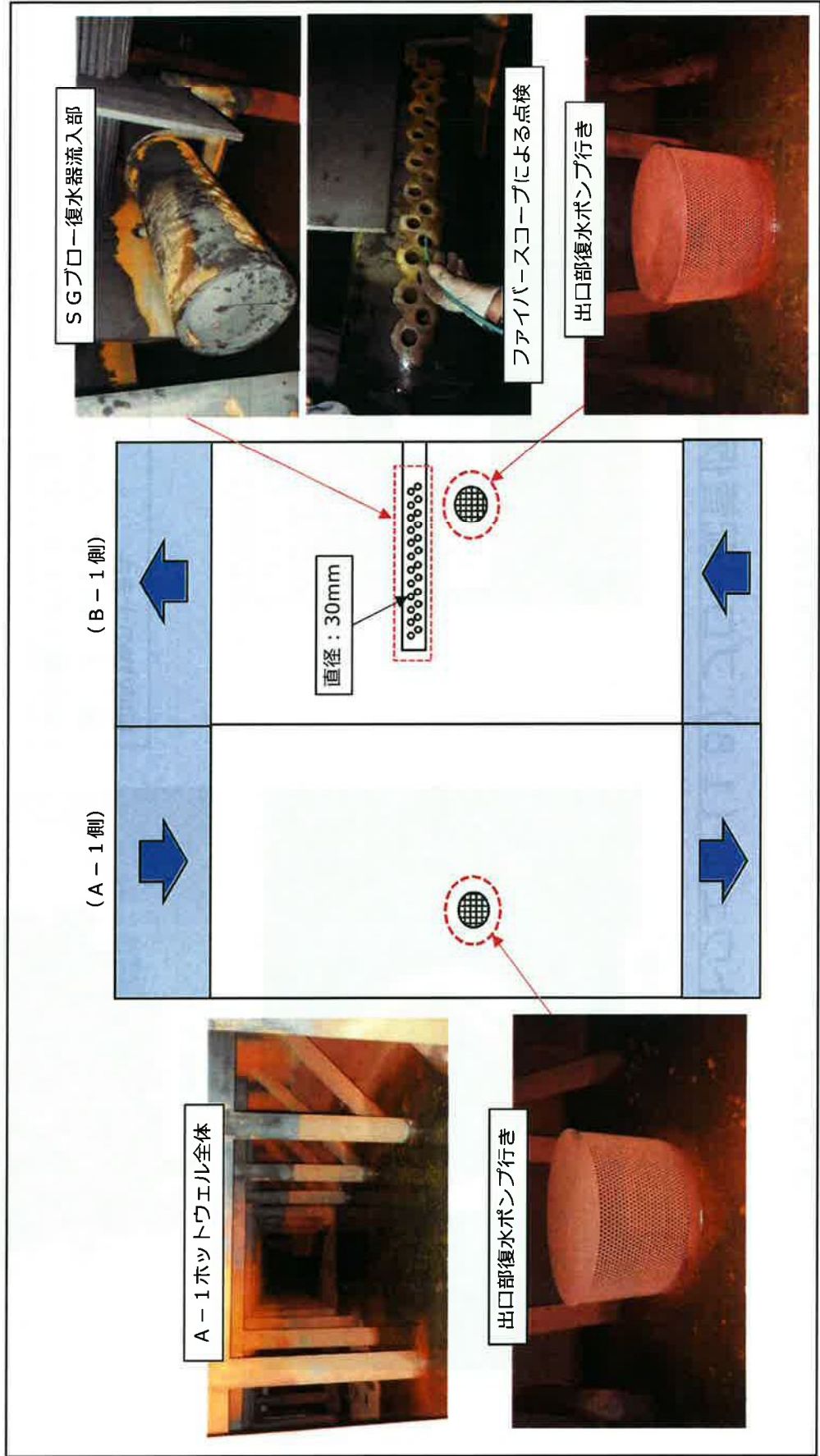
回収量: 約18.9g

【回収物に対する見解】

回収物は鉄さびであり、2次系配管内で発生したものである。

SGブローダーダウン系統点検結果 (5/15)

④復水器ホットウエルNo. 1 (異物なし)



SGブローダウン系統点検結果 (6 / 15)

⑤復水ポンプ入口ストレーナ (異物なし)

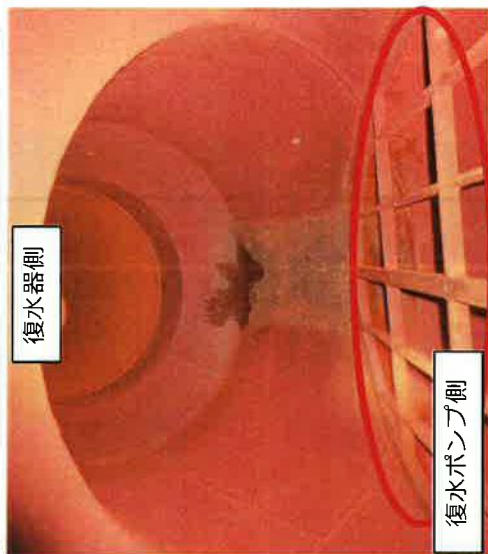
4 A - 復水ポンプ入口ストレーナ



4 B - 復水ポンプ入口ストレーナ

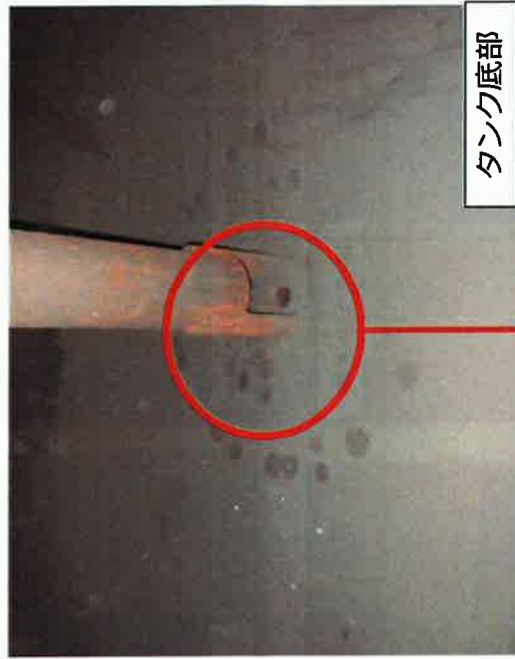


4 C - 復水ポンプ入口ストレーナ



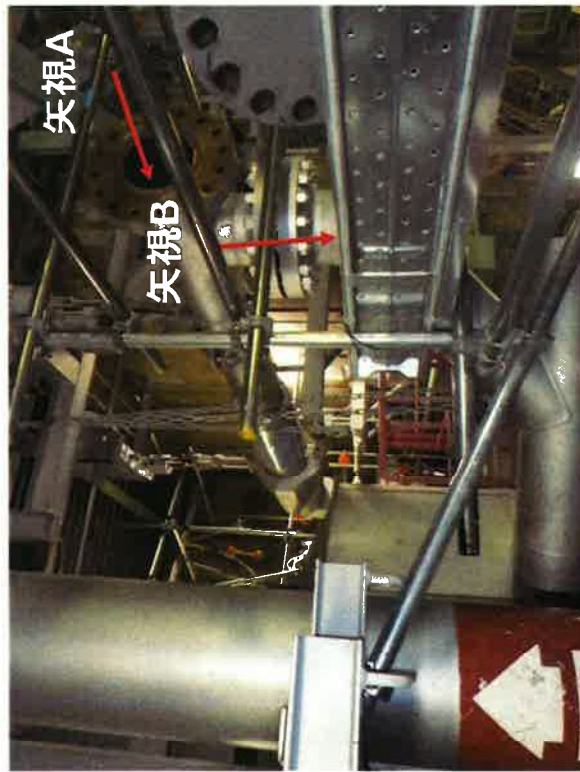
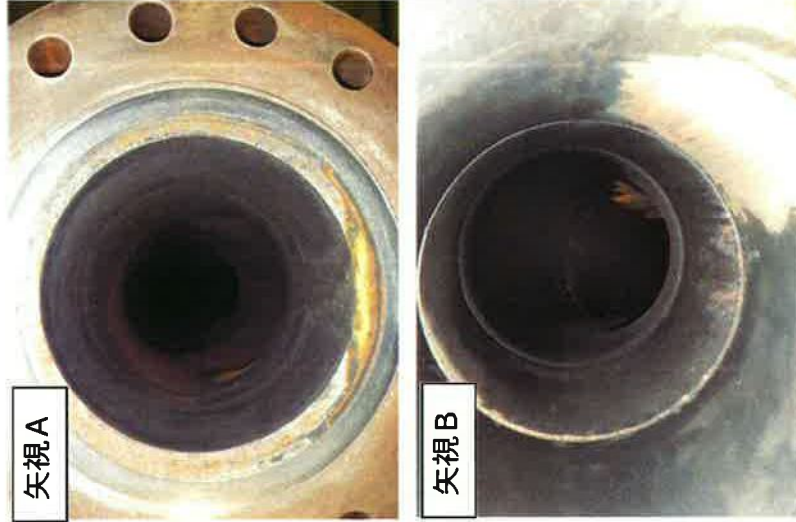
SGブローダウン系統点検結果 (7/15)

⑥ SGブローダウンタンク (異物なし)



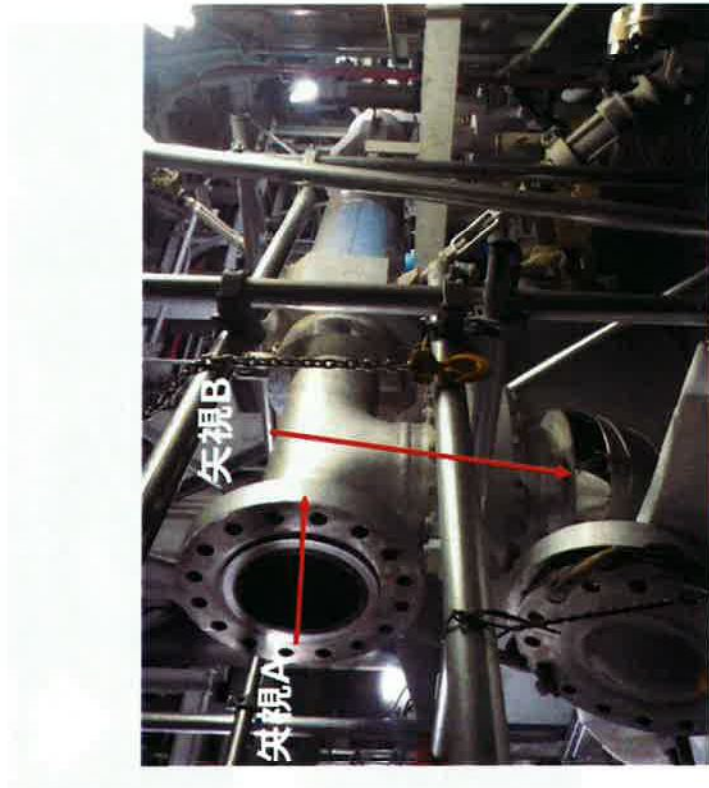
SGブローダウンシステム点検結果 (8/15)

⑦-1 A-SGブローダウンシステム ターゲットプレート (異物なし)



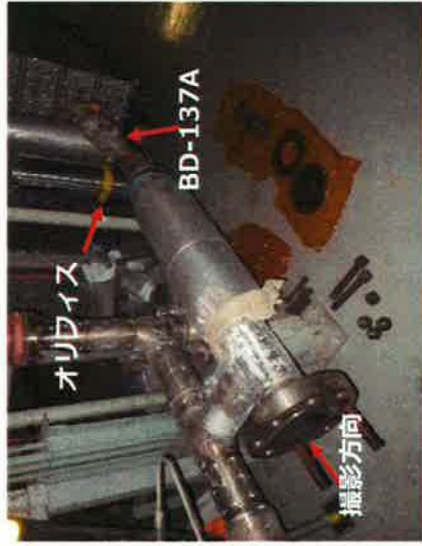
SGブローダウン系統点検結果 (9/15)

⑦-2 C-SGブローダウン系統 ターゲットプレート (異物なし)

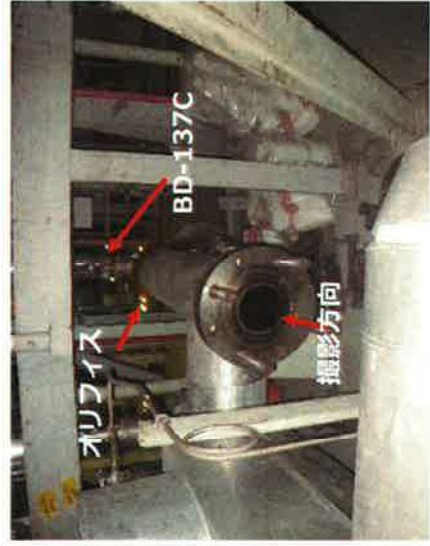


SGブローダウンシステム系統点検結果 (10/15)

⑧-1 A-SG 流量制限オリフイス (異物なし)

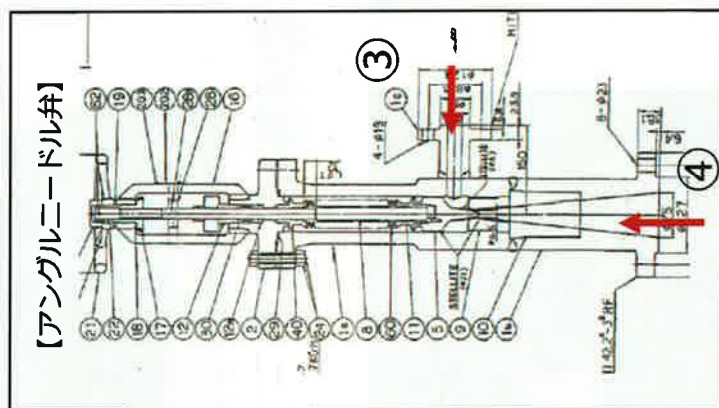
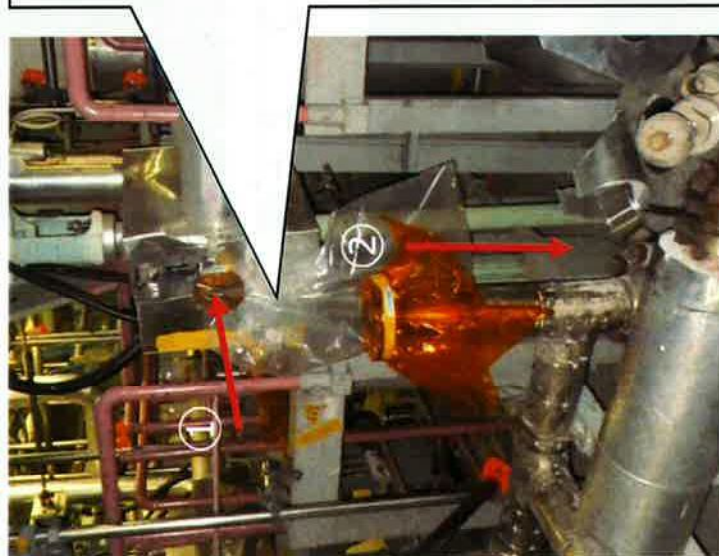


⑧-2 C-SG 流量制限オリフイス (異物なし)



SGブローダウン系統点検結果 (11/15)

⑨-1 流量調整弁 (BD-123A) (異物なし)



①入口配管



③弁入口管



②出口配管

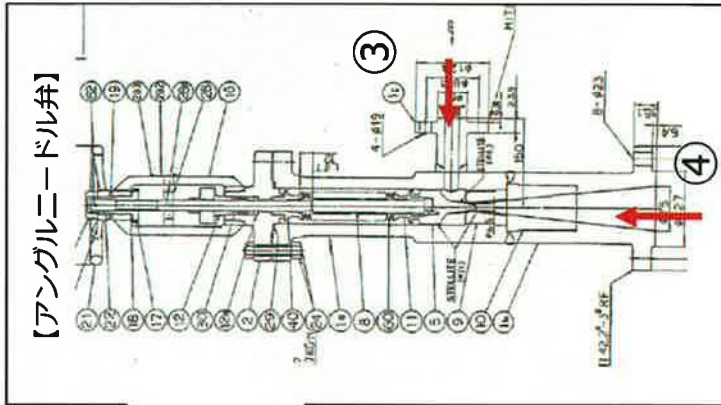
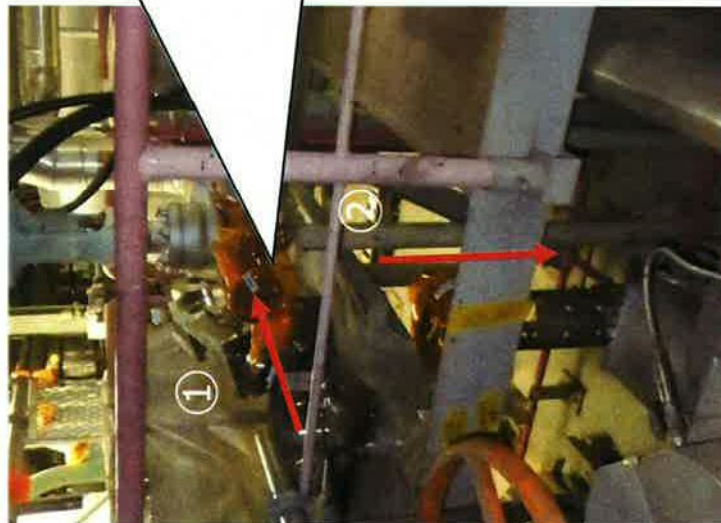


④弁出口管



SGブローダウン系統点検結果 (12/15)

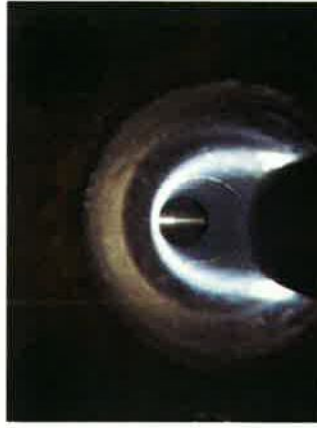
⑨-2 流量調整弁 (BD-123C) (異物なし)



①入口配管



③弁入口管



②出口配管

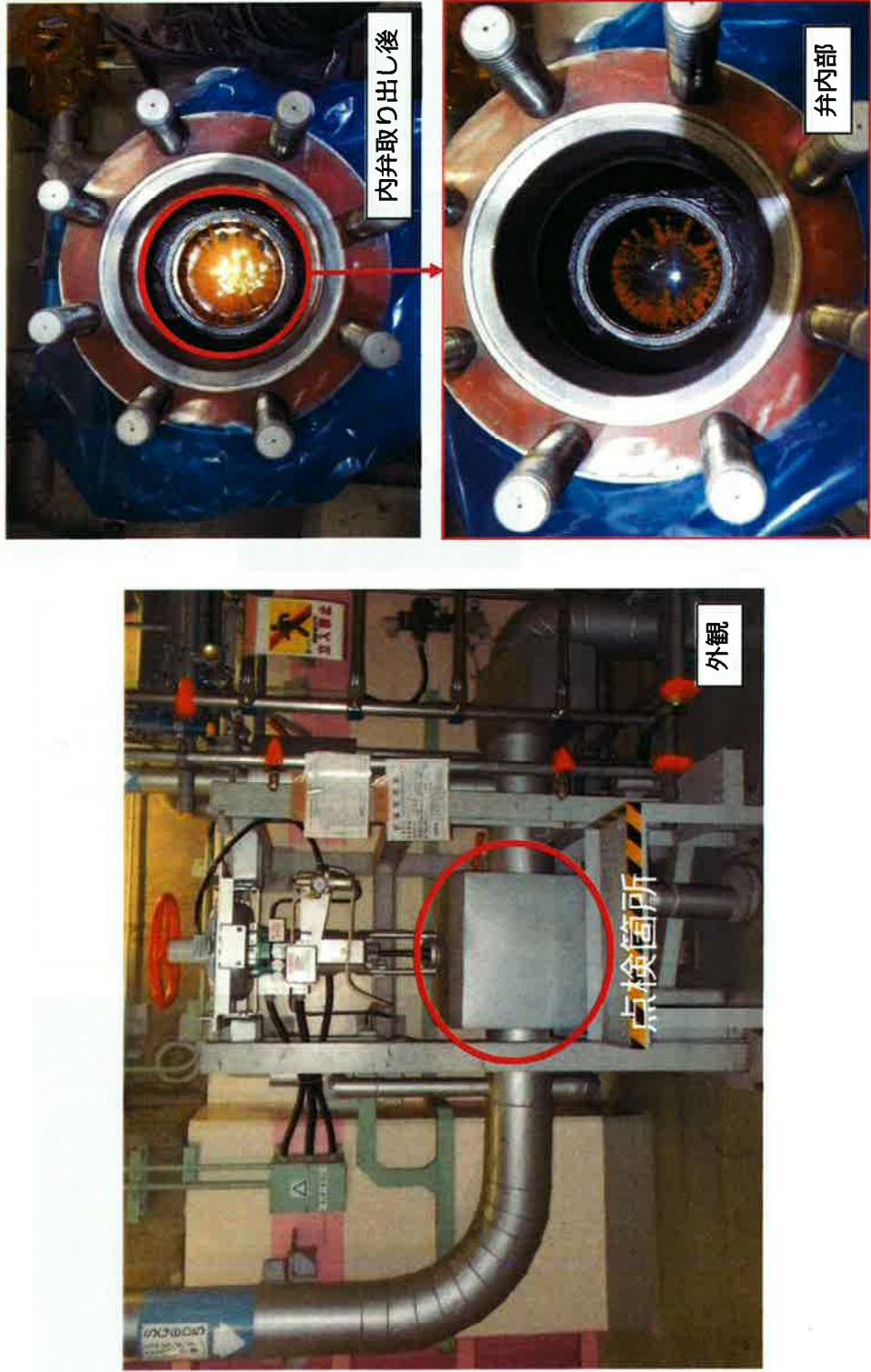


④弁出口管



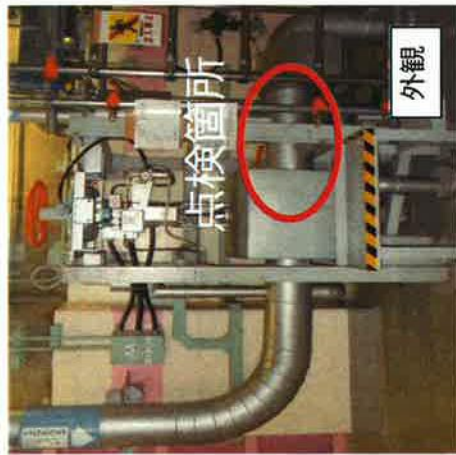
SGブローダウン系統点検結果 (13/15)

⑩-1 水位制御弁 弁内部 (異物なし)

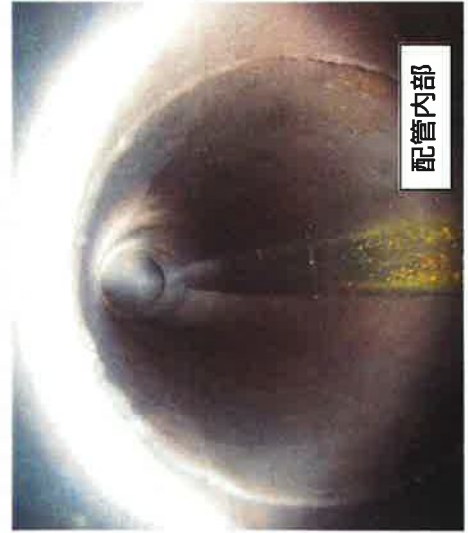


SGブローダーダウン系統点検結果 (14 / 15)

⑩-2 水位制御弁 1次側配管内部 (異物なし)



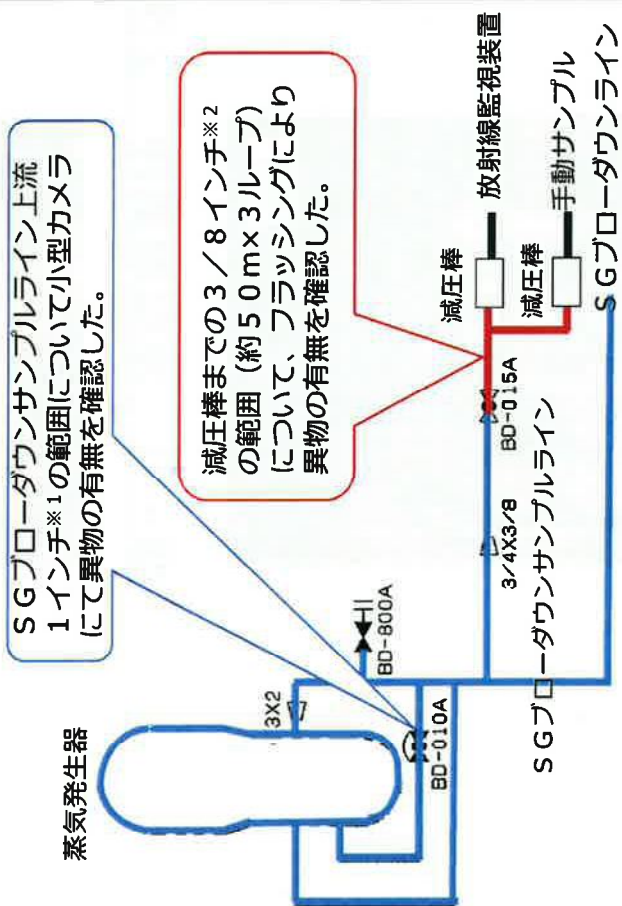
⑩-3 水位制御弁 2次側配管内部 (異物なし)



SGブローダウンシステム点検結果 (15 / 15)

⑪ SGブローダウンシステム点検結果

SGブローダウンシステム点検概略図



※1 : 外径34.0mm、内径27.2mmの配管
 ※2 : 外径9.53mm、内径6.23mmの配管

小型カメラを用いた点検結果

1インチ範囲における小型カメラでの点検を実施した結果、異物は確認できなかった。



フラッシング結果

3/8インチ配管 (約50m x 3ループ) について、空気でのフラッシングによる確認を実施した結果、異物は確認できなかった。



SG 2次側内部品について

(1) SG 内部品と薄片サイズとの整合性（添付1）

SG 2次側内部品で使用されている部品サイズと薄片との整合性を確認したところ、薄片サイズに整合する部品はない。（図1）

薄片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から、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薄片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

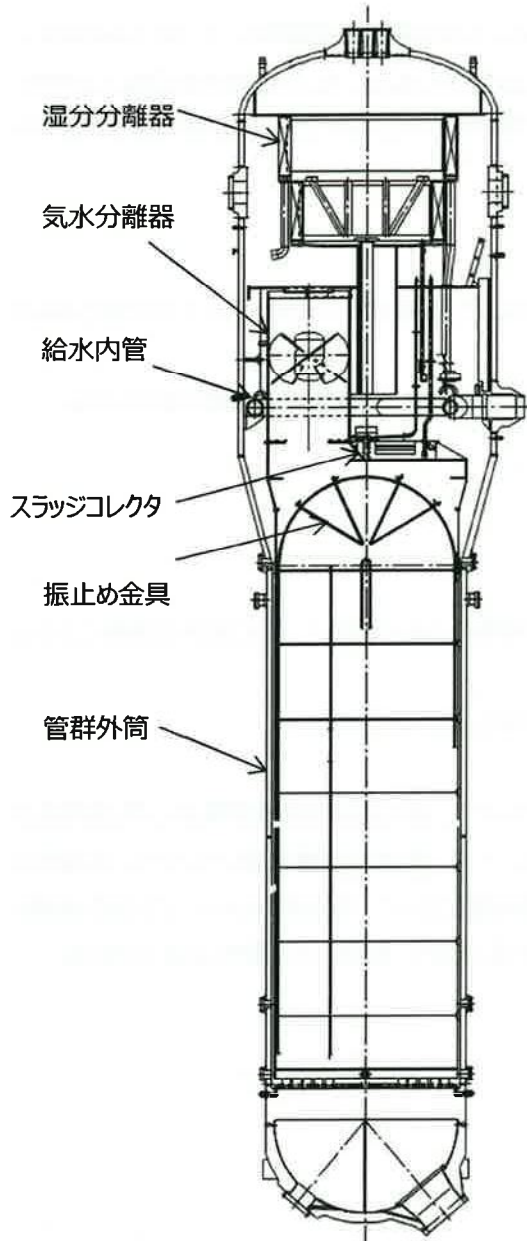
上記のうち、伝熱管群を通過するサイズの異物を発生させる可能性のある事象は、流れ加速型腐食による以下の炭素鋼部品の脱落である。

- ・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が、前回（第22回）定期検査において、当該部のカメラによる目視点検を実施しており、給水内管裏当金の溶接部が全く損傷していなかったことから、脱落した可能性はないと考える。

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

SG 2次側内部品について

表1 SG 2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		

SG 2次側内部品について



図2 振止め金具（AVB）構造図

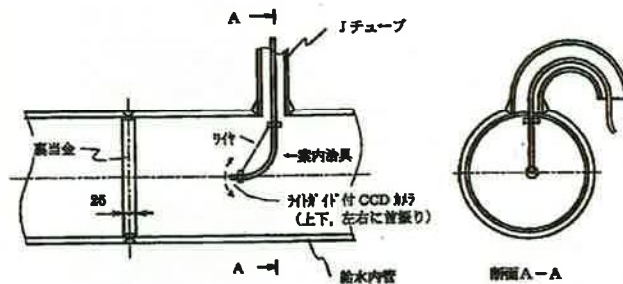
G2次側内部品について

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



(a)点検箇所



(b)点検方法

図1 SG 内部品点検対象および点検方法

給水内管裏当金部点検結果(例)

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。(B-SG：前回定期検査において損傷なし)



付着物分析結果 (1 / 4)

< A - S G で確認した付着物【スケールA】 (X51, Y4 第三管支持板下面) >

① 外観観察結果

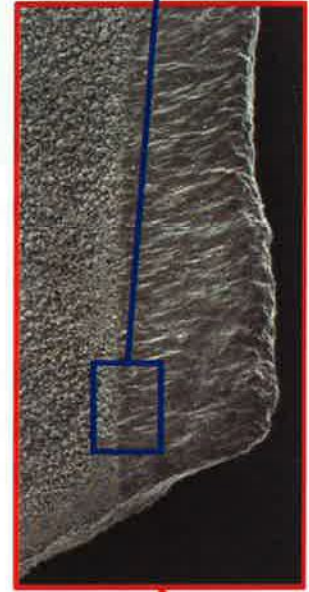
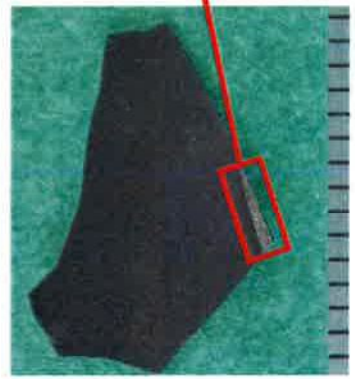
- 伝熱管減肉部と付着物の接触想定部には、接触痕があり、光沢が認められた。
- 形状 (R形状) を計測した結果、直径約 22.5 mm の円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径 22.23 mm に近い形状である。



大きさ：約15mm×約9mm
厚さ：約0.2～0.3mm
質量：約0.1g

② SEM観察結果

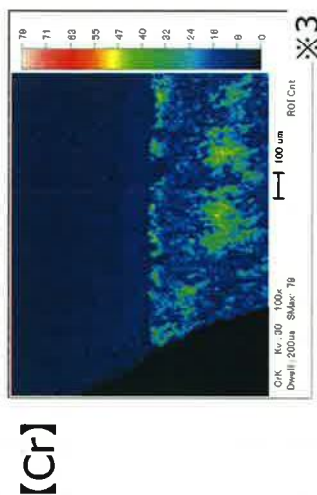
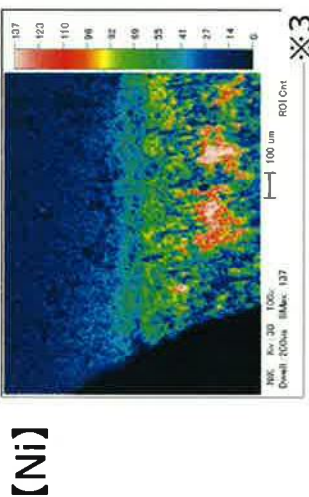
- 伝熱管との接触想定部を拡大観察した結果、筋状痕を確認した。



付着物分析結果 (2/4)

< A - S G で確認した付着物【スケールA】 (X51,Y4 第三管支持板下面) >

- ③ 成分分析 (X線回折※1、E D S※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 (主にマグネサイト)であったことから、スケールであると推定した。
- 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-SG付着物に関する分析結果 (3/4)

< C-SGで確認した付着物【スケールC1】(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 21.9 mm の円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径 22.23 mm 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観察結果

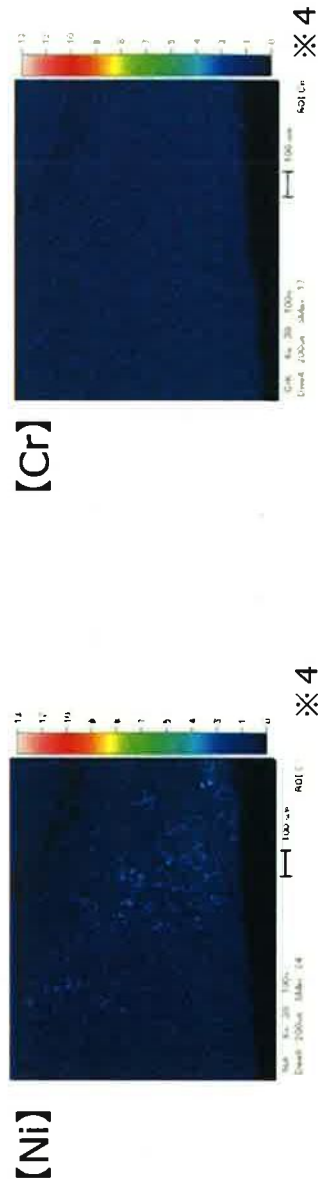
- 拡大観察した結果、表面の一部に平滑な面はあったが、筋状痕は確認できなかった。



C-SG付着物に関する分析結果 (4/4)

<C-SGで確認した付着物【スケールC1】(X55,Y3 第三管支持板下面) >

- 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。
- 平滑な面を成分分析した結果、伝熱管の母材のNiを僅かに検出した。※3。

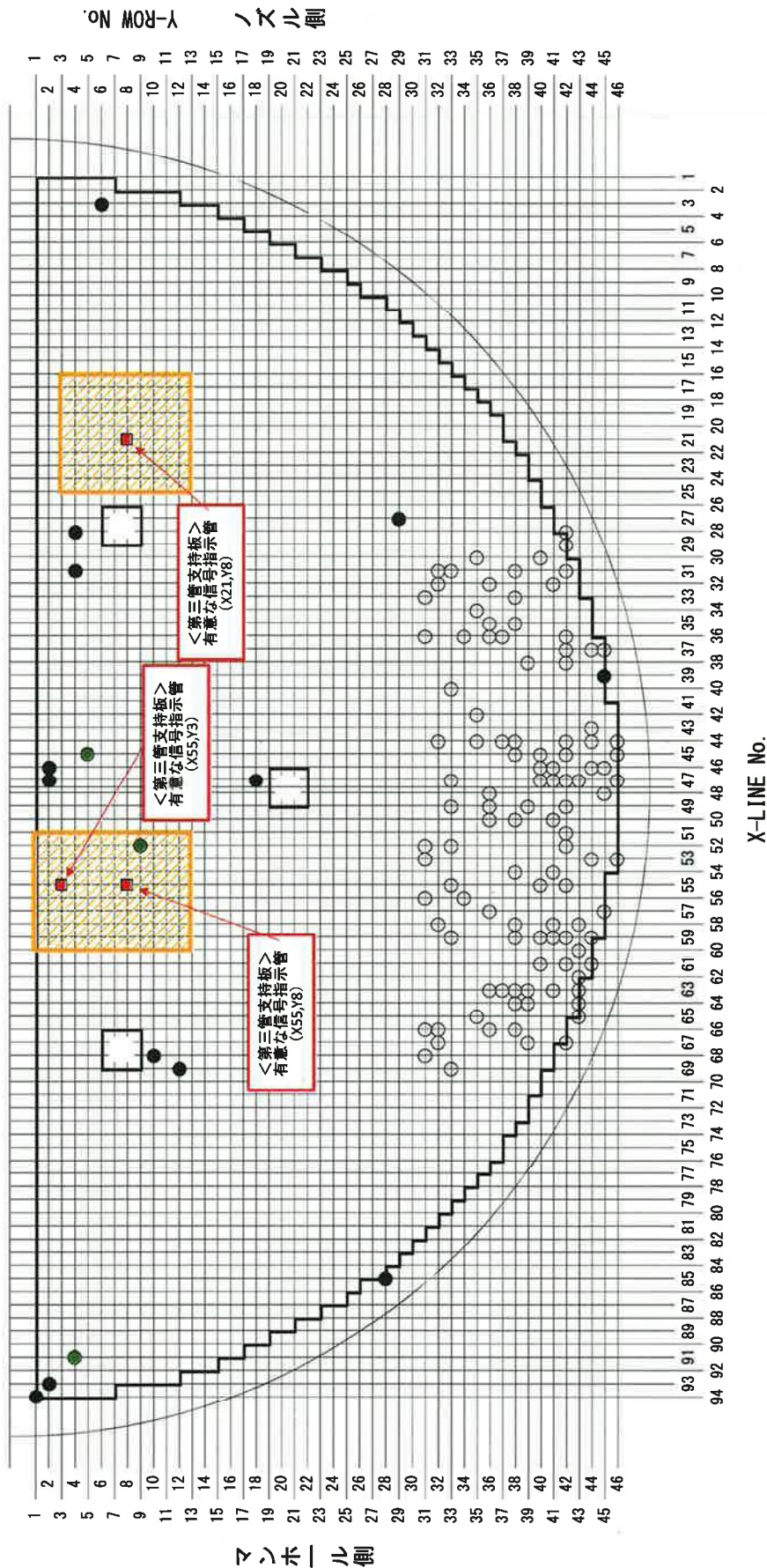


- ※1 : 試料にX線を照射し、X線の散乱・干渉を解析することで、構成成分の同定をする分析方法
- ※2 : 電子線照射により発生する特性X線のエネルギーと強度から構成元素を分析する装置
- ※3 : Ni成分は3%以下、Cr成分は検出限界以下
- ※4 : 分析した成分のX線の反射強度で、1秒当たりのX線カウント数 (含有元素の濃度が高いほど大きくなる)

C-SG回収スケール回収範囲図
C-SG (低温側)

- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (110本)
- : 既施栓管 (外面減肉) (3本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (13本)
- : 今回減肉指示が認められた位置 (3本)
- : スケール回収範囲 (第一および第二管支持板 (上面) とともに同一範囲)

本図はSG上部から見た位置を示す



C-SG回収スケールに関する分析結果（1／9）

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。

<凹面>



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。

<凸面>



側面を観察

<側面>

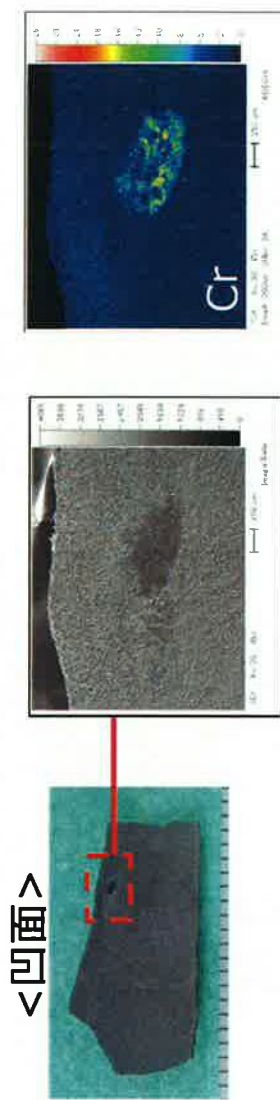


筋状痕を確認

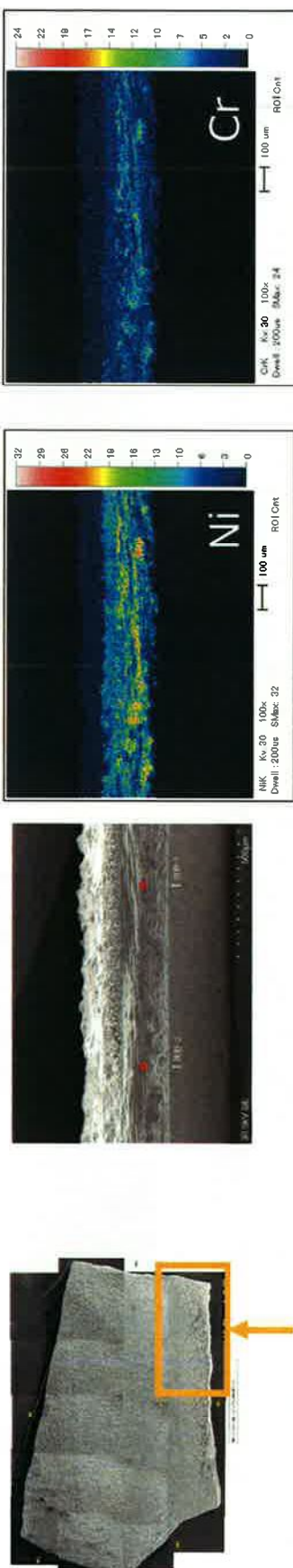
C-SG回収スケールに関する分析結果（2/9）

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成分が検出された。



- 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。

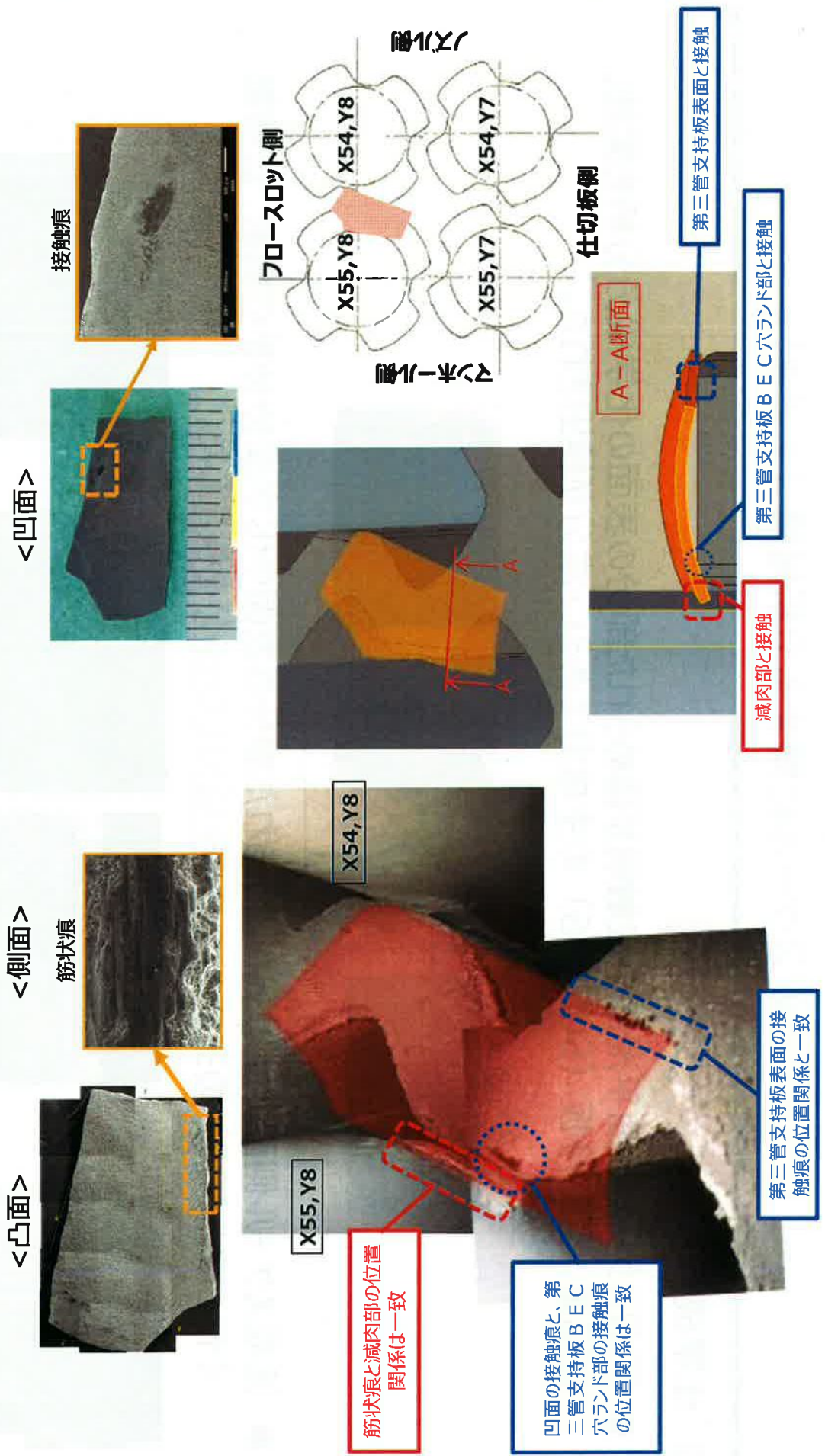


本回収スケールは、管支持板下面と接触しながら、伝熱管に減肉を与えた可能性があると推定した。

C-SG回収スケールに関する分析結果 (3/9)

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。



C-SG回収スケールに関する分析結果 (4/9)

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 22.6 mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径 22.23 mmに近い形状である。

<凸面>

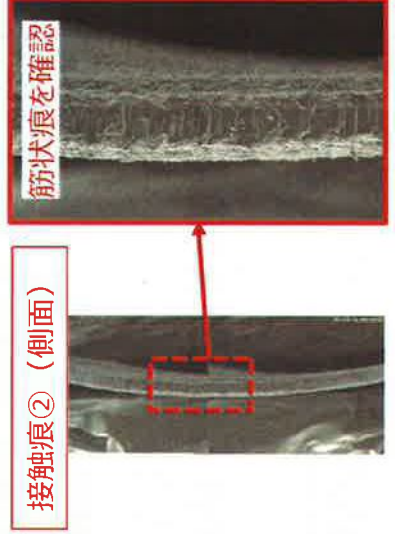
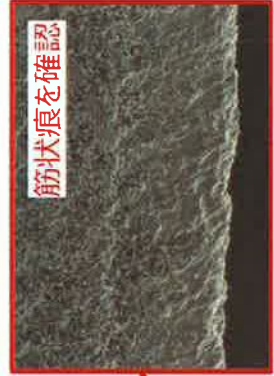


大きさ：約23mm×約11mm
厚さ：約0.3mm
質量：約0.25g



② SEM観察結果

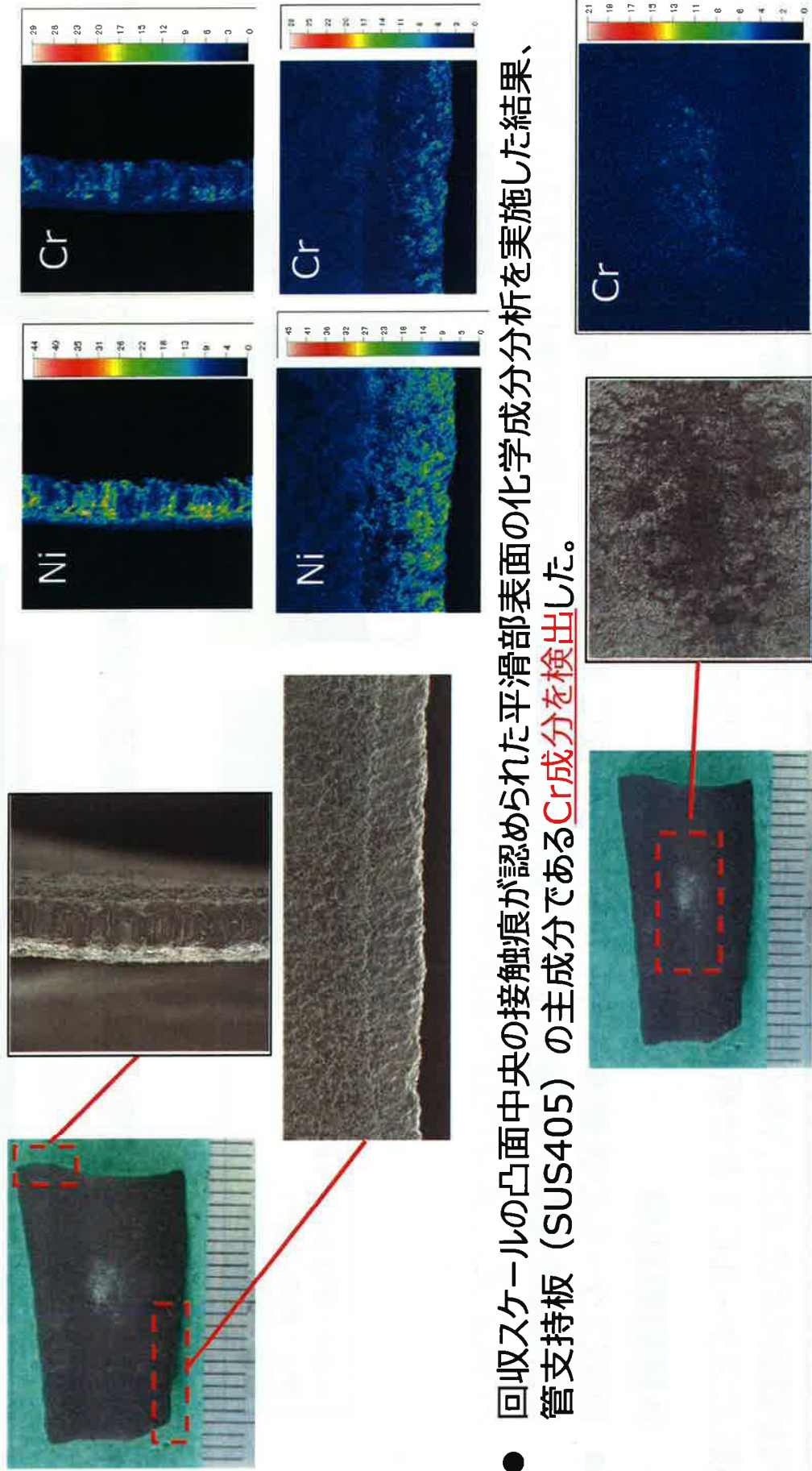
- 接触痕を拡大観察した結果、平滑部表面の接触痕③には筋状痕が確認できなかったが接触痕①、②に筋状痕を確認した。



C-SG回収スケールに関する分析結果（5/9）

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。



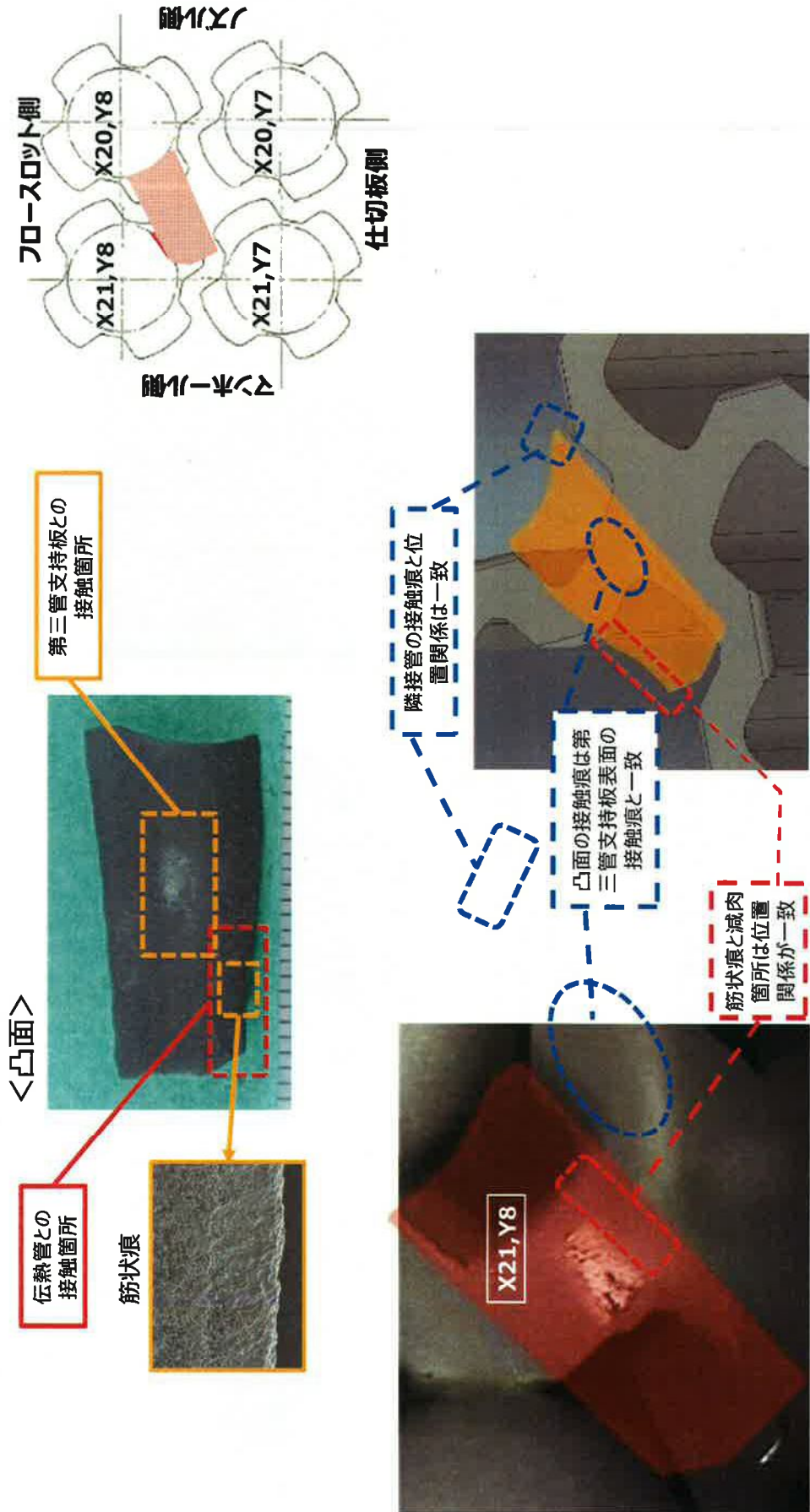
- 回収スケールの凸面中央の接触痕が認められた平滑部表面の化学成分分析を実施した結果、管支持板（SUS405）の主成分であるCr成分を検出した。

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。

C-SG回収スケールに関する分析結果 (6/9)

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。



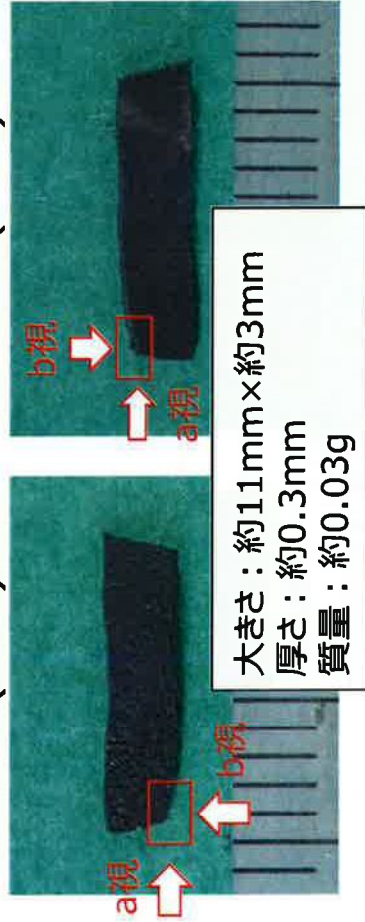
C-SG回収スケールに関する分析結果 (7/9)

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。**

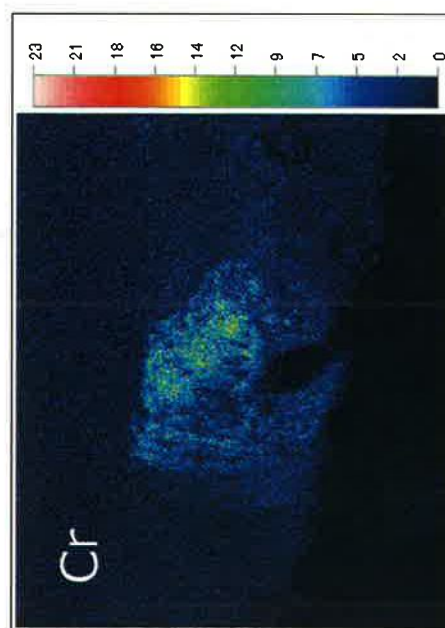
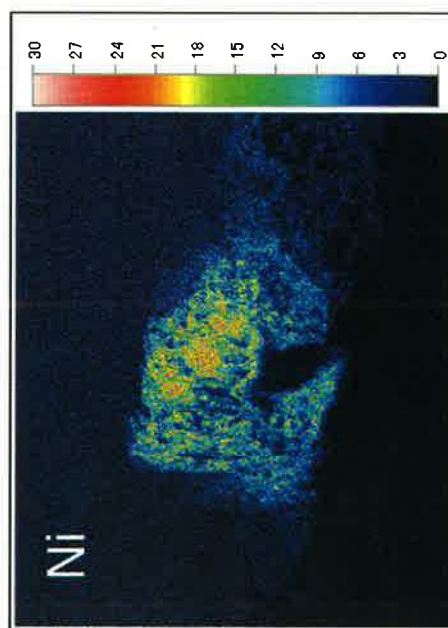
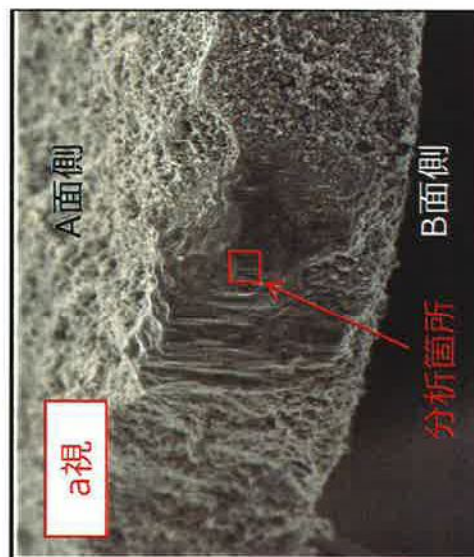
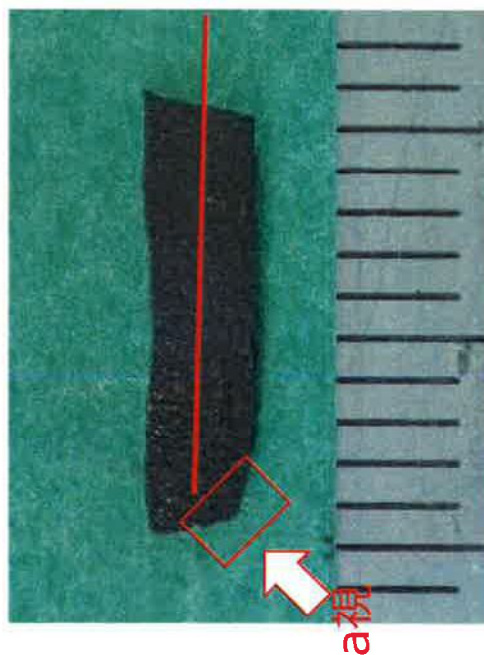


C-SG回収スケールに関する分析結果 (8/9)

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。

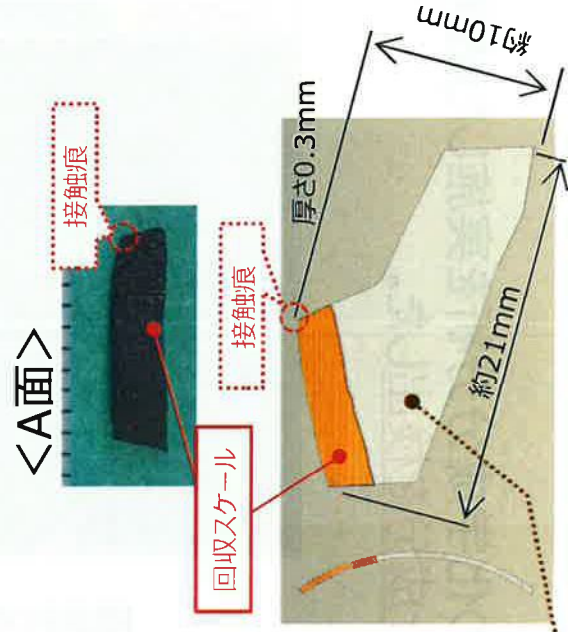
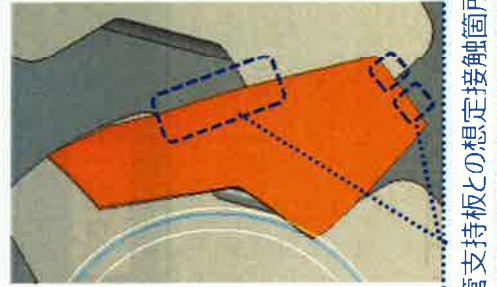
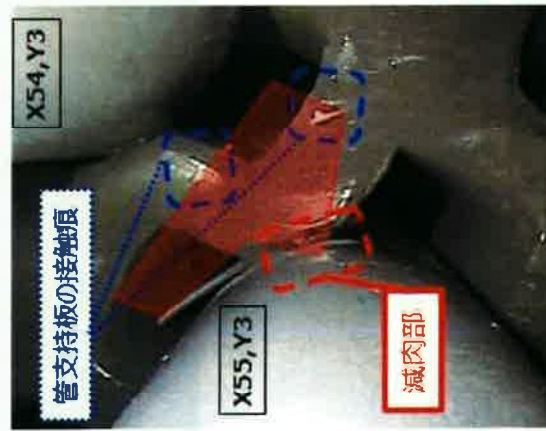
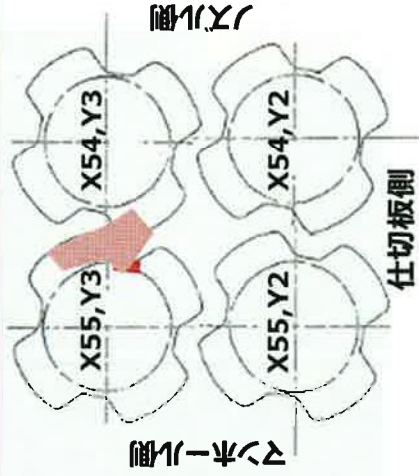
<A面(表面)>



C-SG回収スケールに関する分析結果 (9/9)

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、管支持板接触痕と整合し当該部に滞留し得ることを確認した。



回収スケールの破損前の想定形状
(半透明部)

スケール剥離による減肉信号への影響

1. 概要

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

2. 試験方法

2.1 スケール付着・剥離 (EDM スリット有り) の試験片データ

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

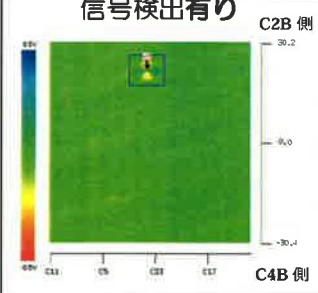
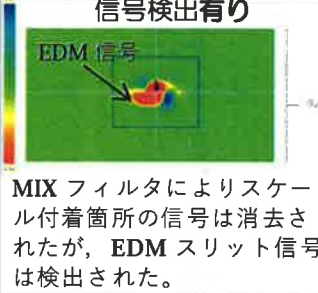
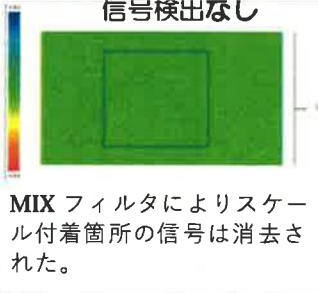
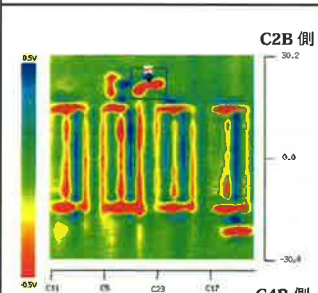
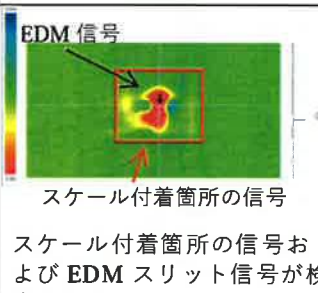
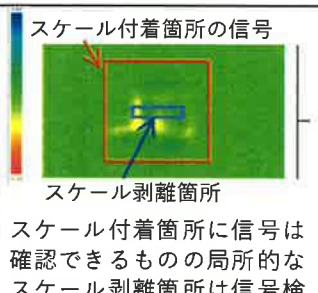
2.2 スケール付着・剥離 (EDM スリット無し) の試験片データ

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

3. 結果

取得したデータを表 1 に示す。

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

実機波形 (A-SG X51 Y4) MIX	スケール付着・剥離 (EDM スリット有り) MIX	スケール付着・剥離 (EDM スリット無し) MIX
<p>信号検出有り</p>  <p>C2B 側 C4B 側</p>	<p>信号検出有り</p>  <p>EDM 信号</p> <p>MIX フィルタによりスケール付着箇所の信号は消去されたが、EDM スリット信号は検出された。</p>	<p>信号検出なし</p>  <p>MIX フィルタによりスケール付着箇所の信号は消去された。</p>
実機波形 (A-SG X51 Y4) 100kHz	スケール付着・剥離 (EDM スリット有り) 100kHz	スケール付着・剥離 (EDM スリット無し) 100kHz
 <p>C2B 側 C4B 側</p>	<p>EDM 信号</p>  <p>スケール付着箇所の信号</p> <p>スケール付着箇所の信号および EDM スリット信号が検出された。</p>	<p>スケール付着箇所の信号</p>  <p>スケール剥離箇所</p> <p>スケール付着箇所に信号は確認できるものの局所的なスケール剥離箇所は信号検出されず。</p>

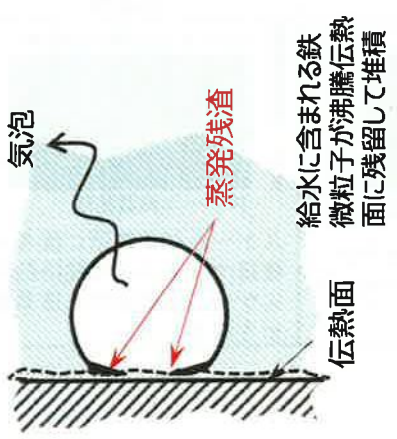
4. まとめ

- スケール付着・剥離 (EDM スリット有り) の試験片を用いた検証結果より、スケール付着箇所の信号は MIX フィルタにより消去されるが、EDM スリットの信号は消去されず、有意な信号として検出される。
 - スケール付着・剥離 (EDM スリット無し) の試験片を用いた検証結果より、局所的なスケール剥離箇所では信号が検出されない。
- ⇒実機波形は MIX フィルタを適用しても有意な信号が検出されていることから、スケール付着や局所的なスケール剥離の信号ではなく、減肉信号と考えられる。

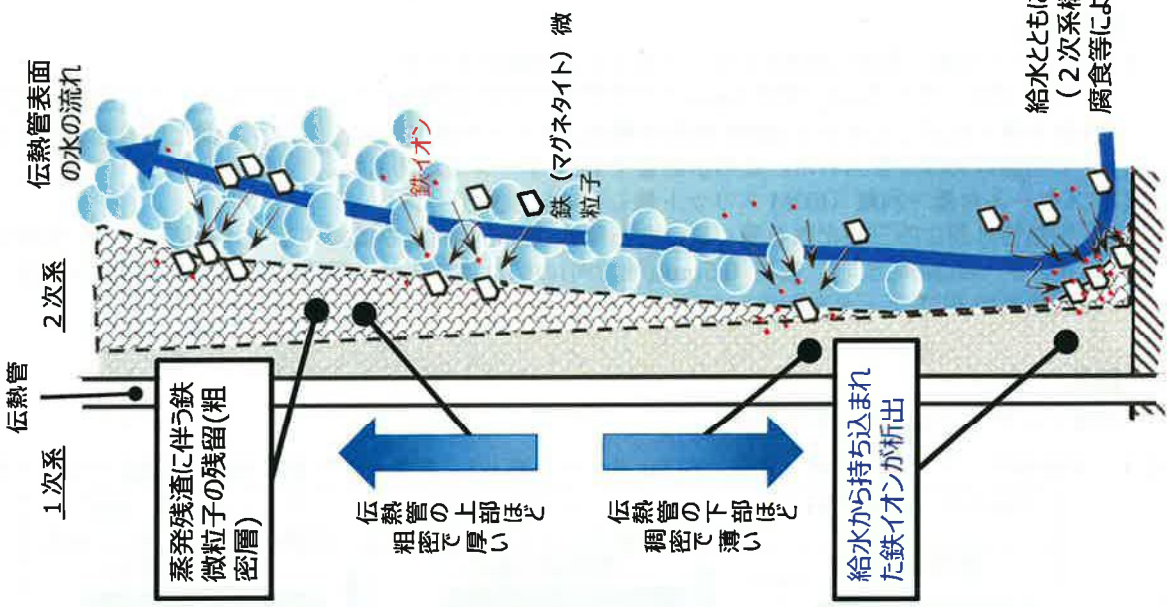
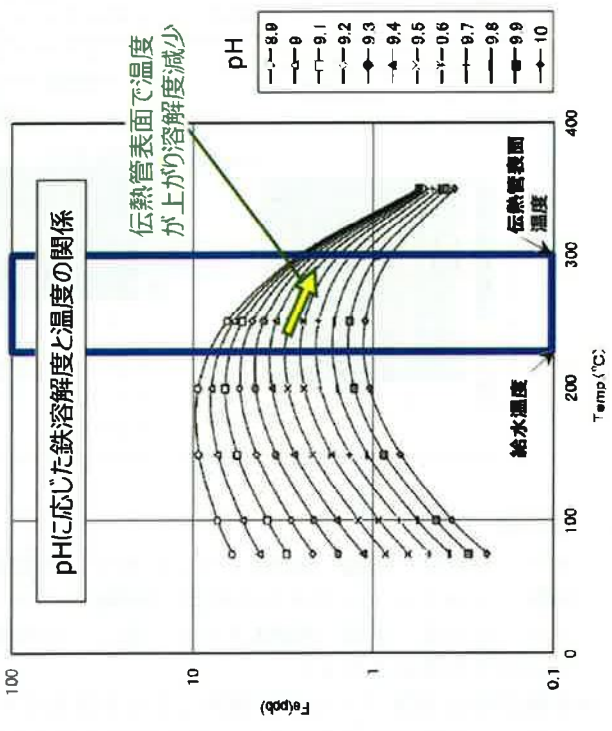
以上

スケール生成メカニズム (平成8年 高浜3号機 蒸気発生器伝熱管調査報告書の知見を踏まえたイメージ)

伝熱管の上部で支配的なスケール生成メカニズム

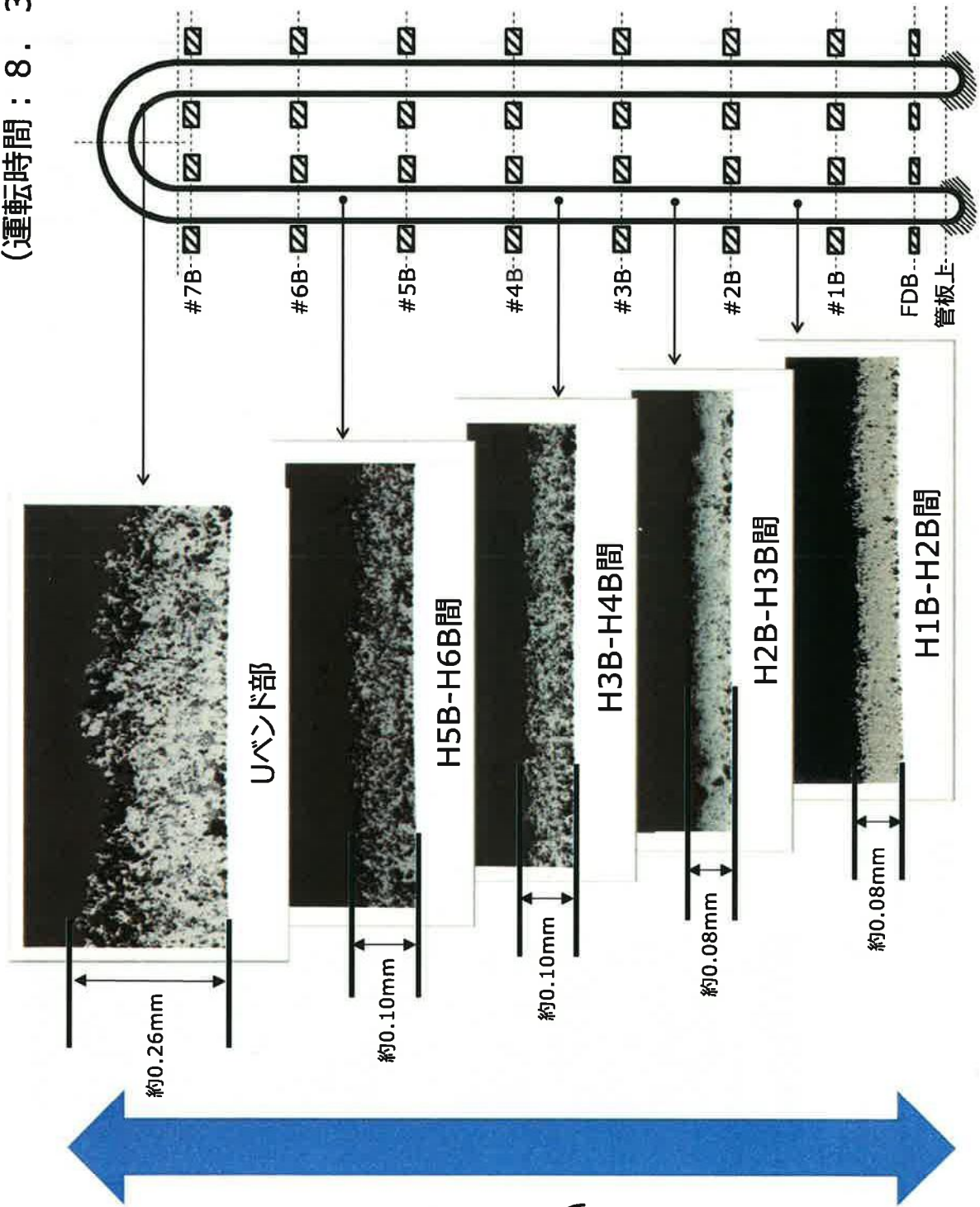


伝熱管の下部で支配的なスケール生成メカニズム



スケール性状に関する過去の知見 (高浜3号機 平成8年調査時)

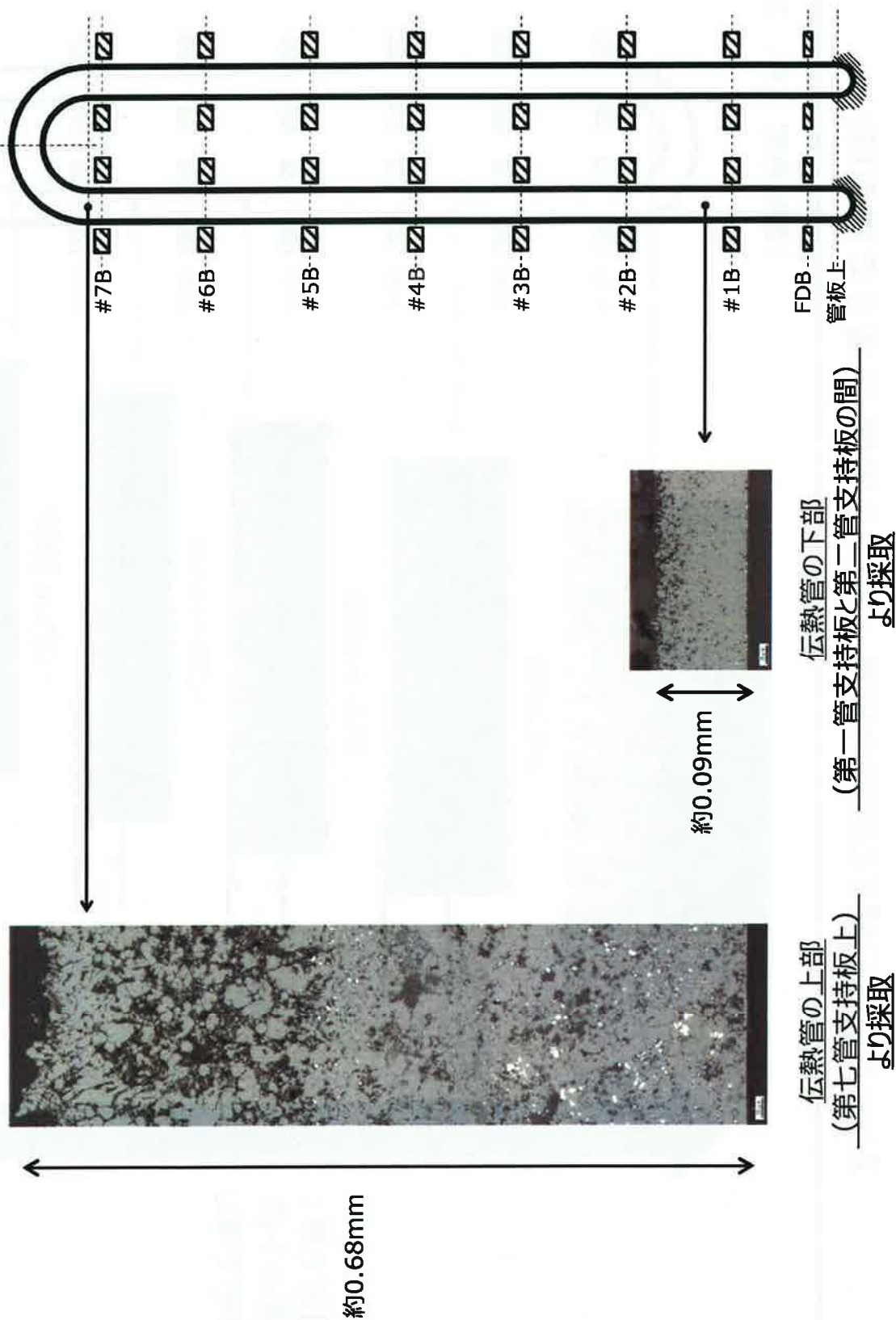
(運転時間: 8.3万時間)



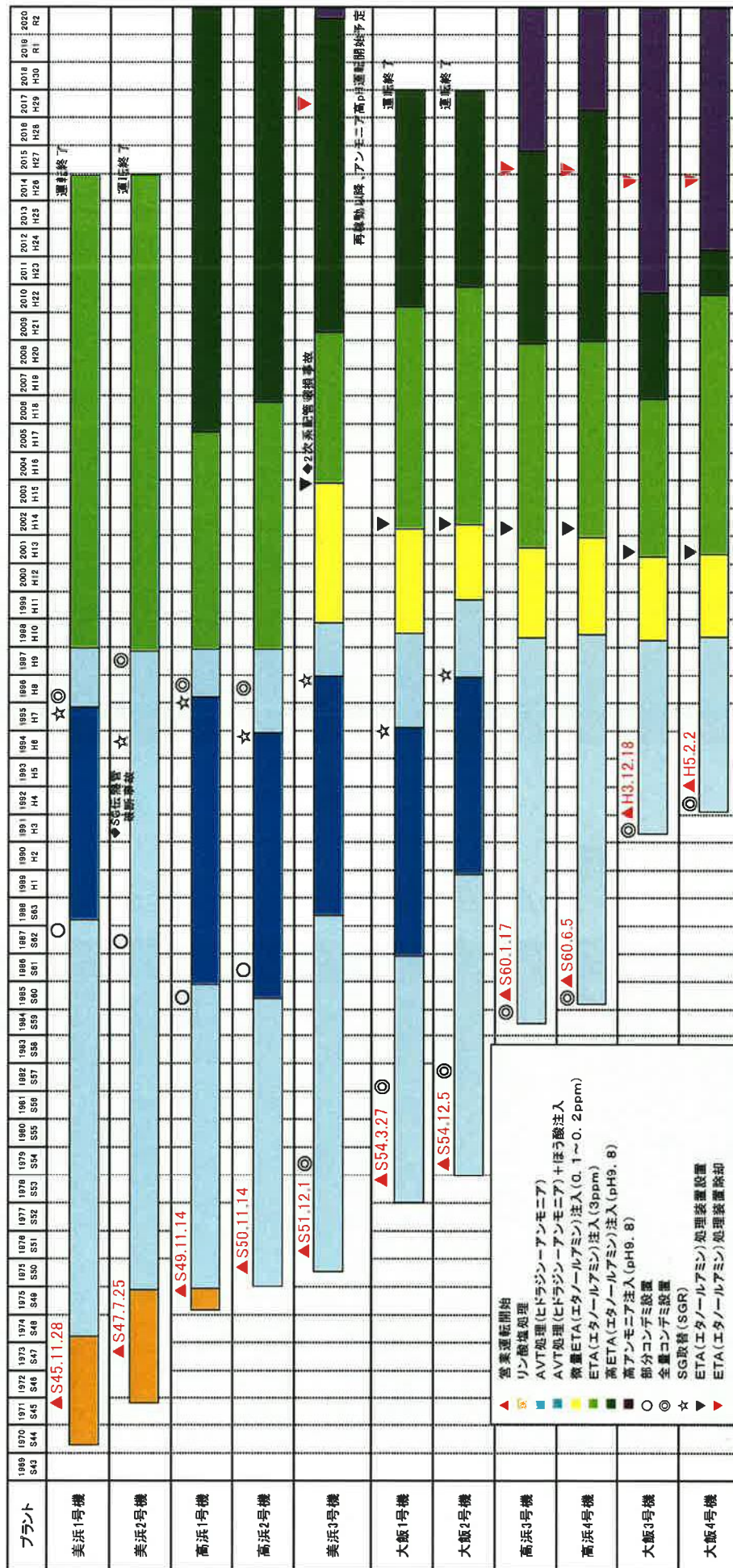
伝熱管の上部
 ほど粗密で厚く
 伝熱管の下部
 ほど稠密で薄い

高浜発電所 4 号機におけるスケール調査実績

伝熱管の上部のスケールは粗密で厚く、伝熱管の下部のスケールは稠密で薄いを確認した。



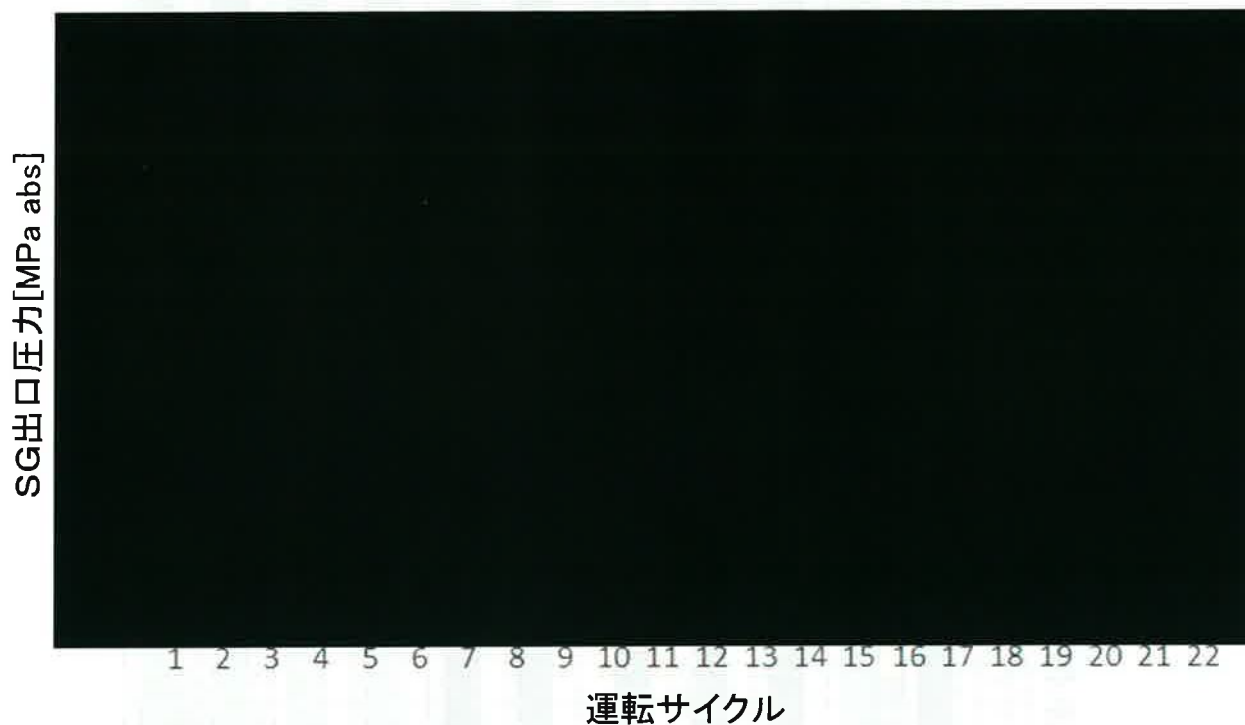
2次系水処理と水化学管理の変遷



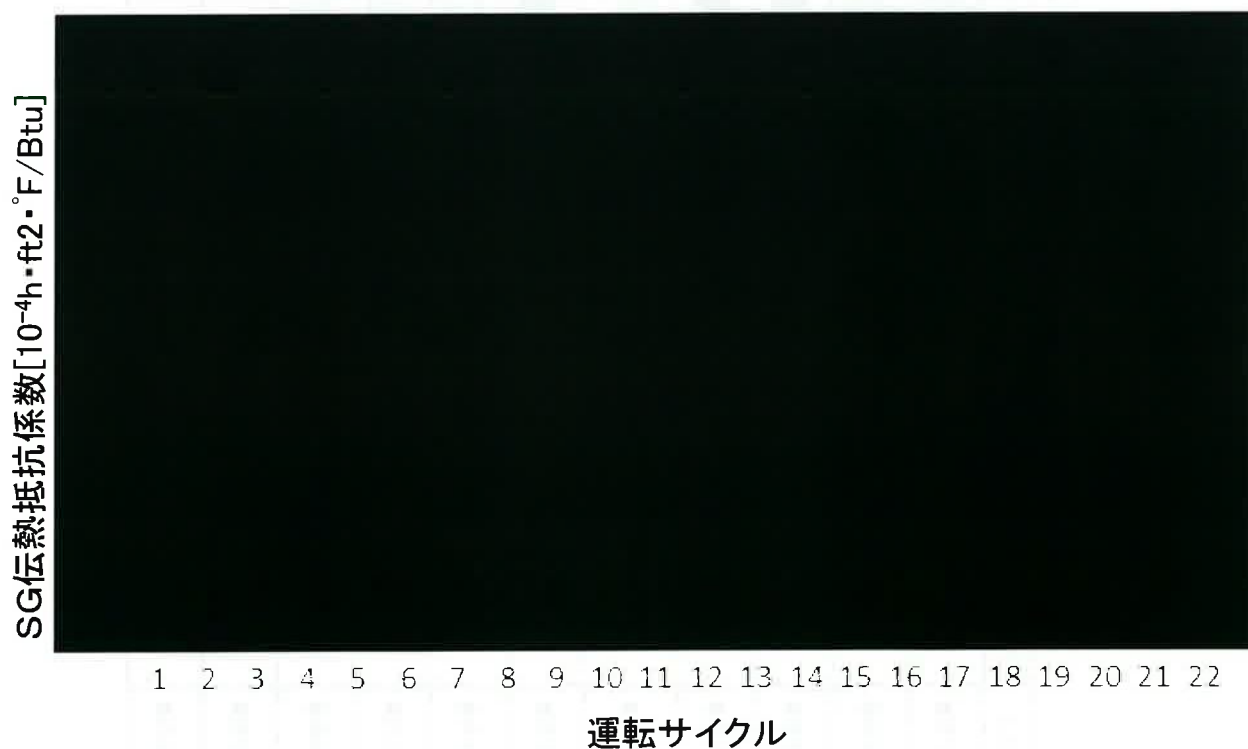
プラント性能指標の推移

SG 出口圧力

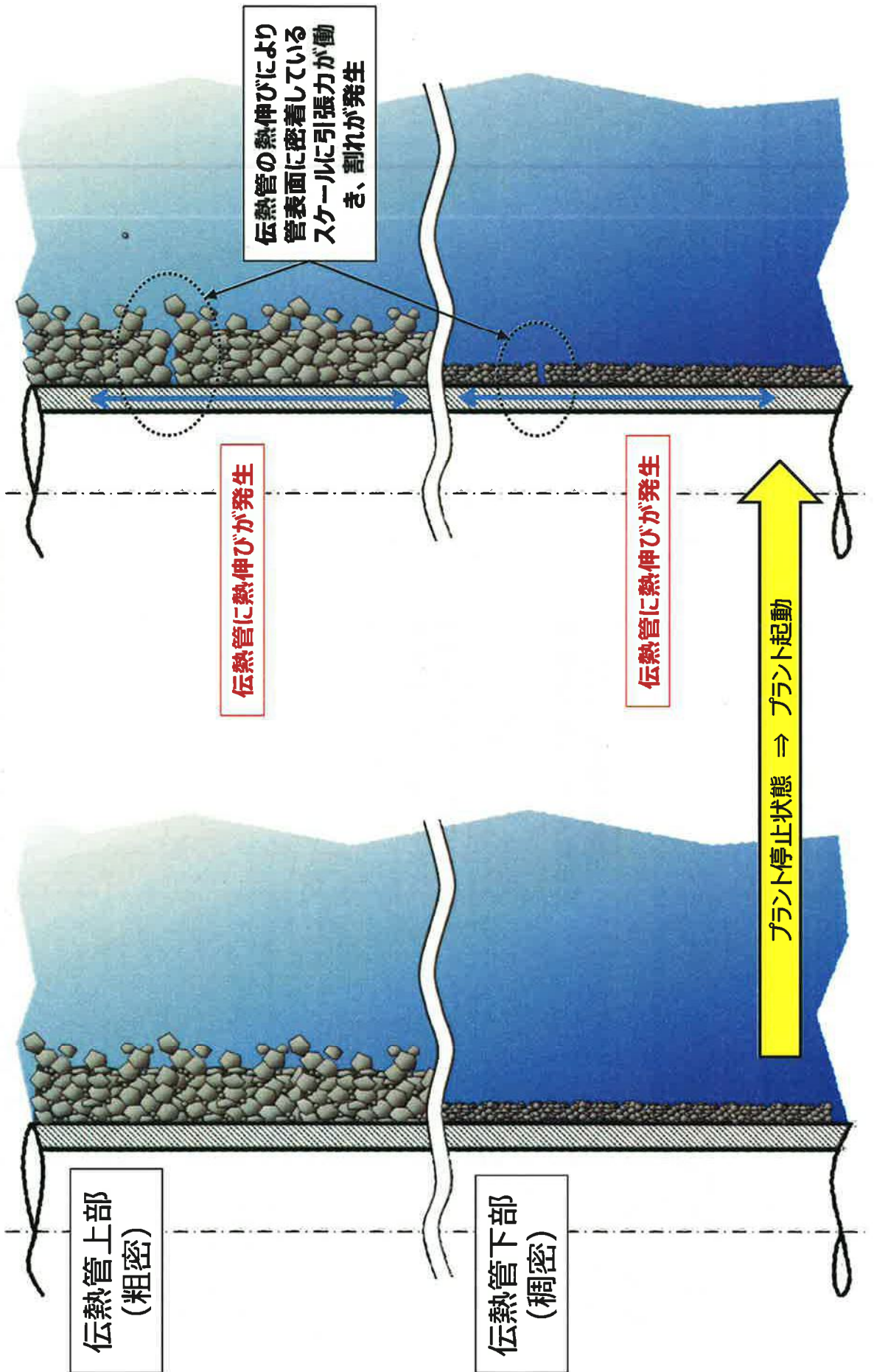
伝熱管表面のスケール成長に伴い、SG 出口圧力は徐々に低下

**SG 伝熱抵抗係数**

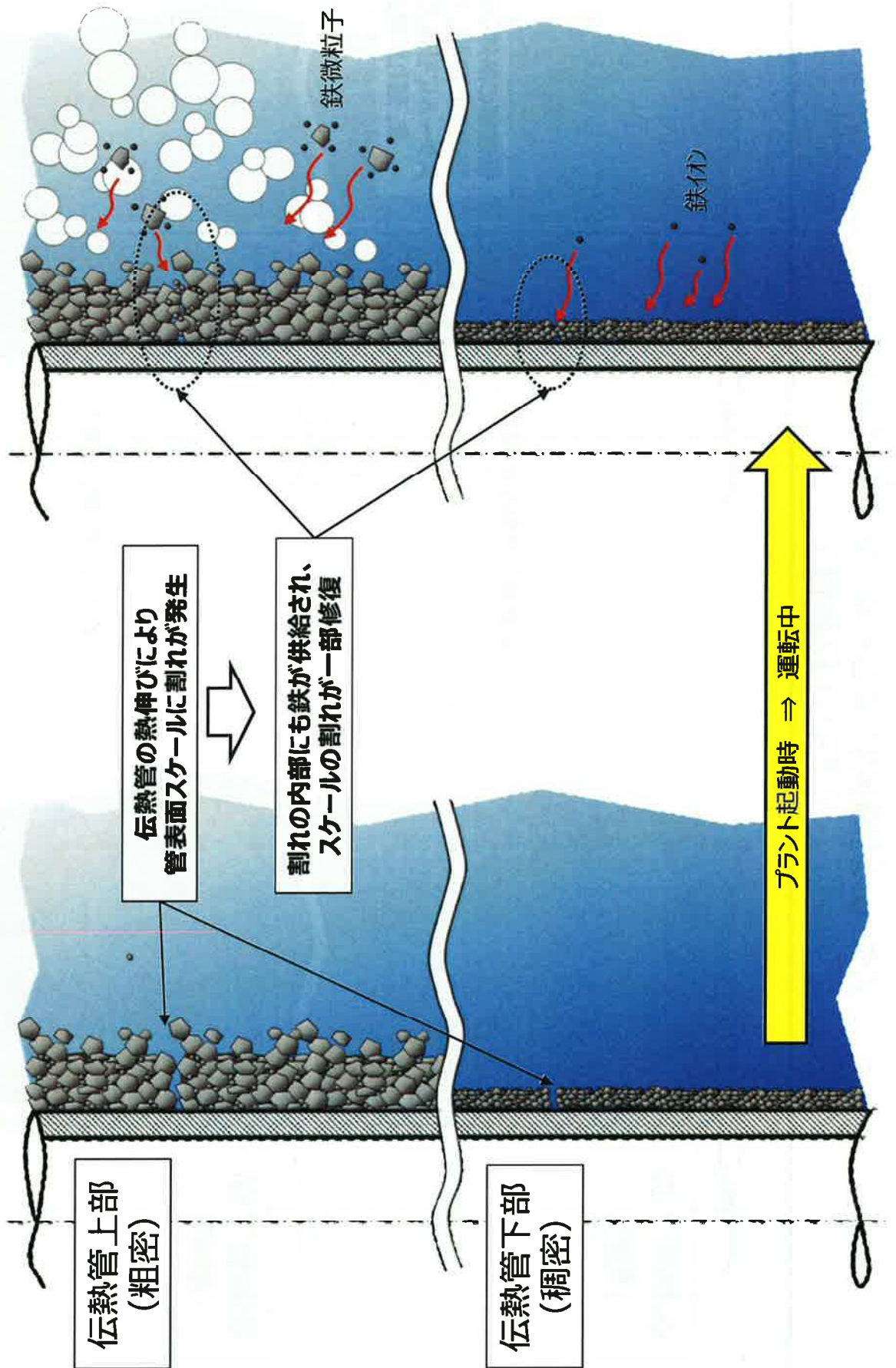
伝熱管表面のスケール成長に伴い、SG 伝熱抵抗係数は徐々に上昇



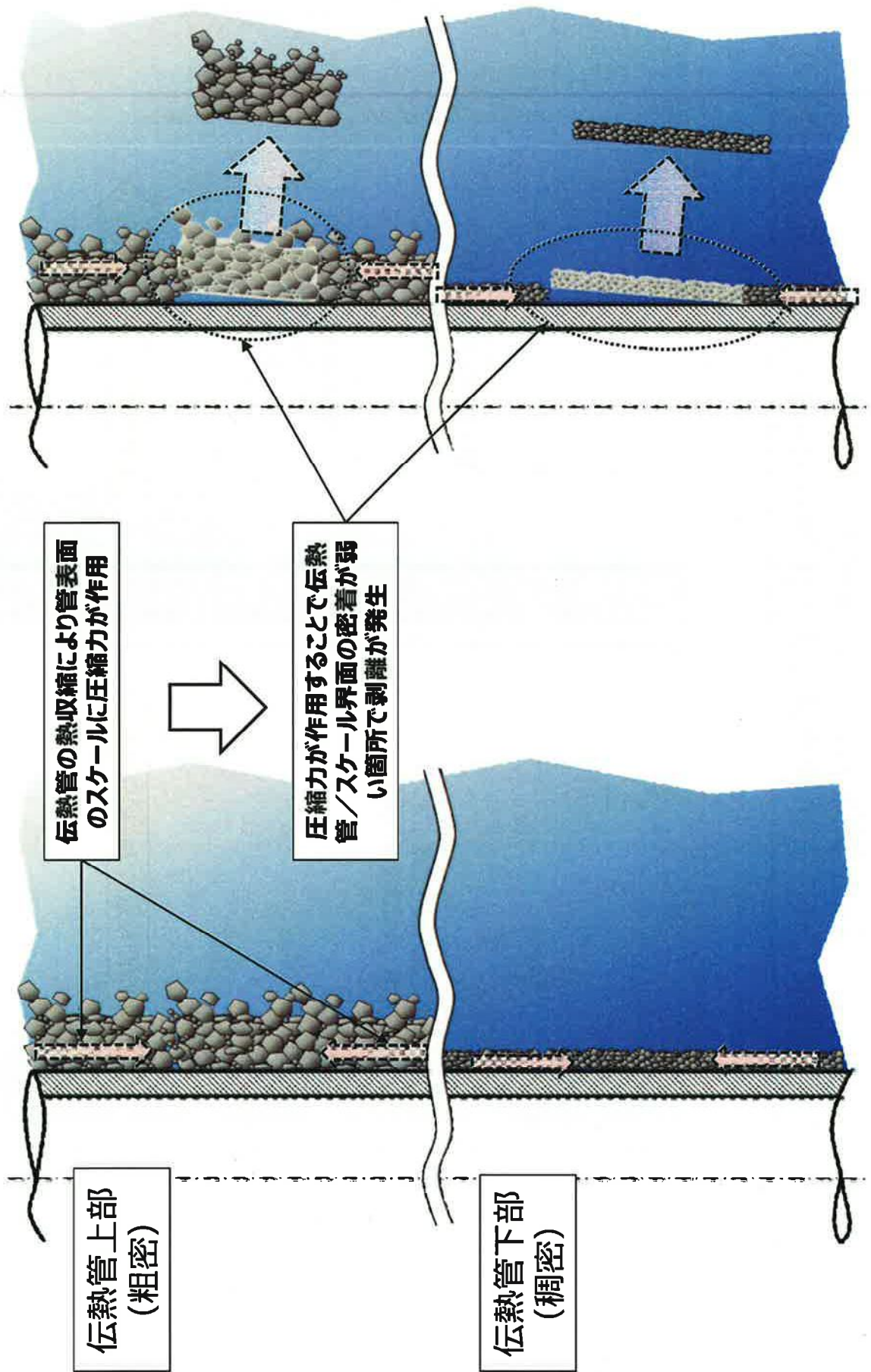
スケール剥離メカニズムイメージ (1/4)
(プラント起動時)



スケール剥離メカニズムイメージ (2/4)
(プラント運転中)



スケール剥離メカニズムイメージ (3/4)
(プラント停止時)

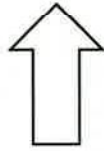
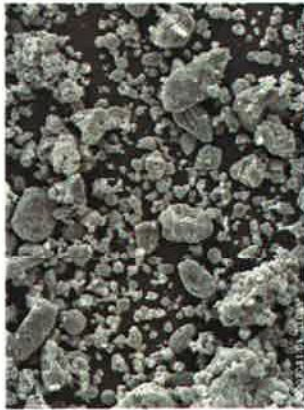


長期停止影響に係る考察

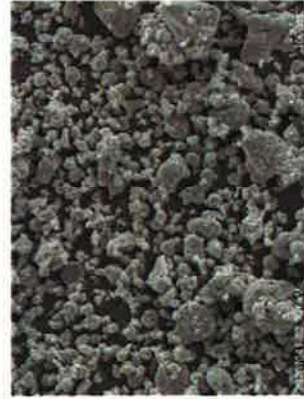
スケールの粒径増大化を実験で検証すべく、実機（ヒドラジン水による満水保管）と同条件にて、スラッジ（粒の観察を容易にするため粉末状スラッジを使用）をヒドラジン水による浸漬試験を1か月間実施した。

(1) SEM観察

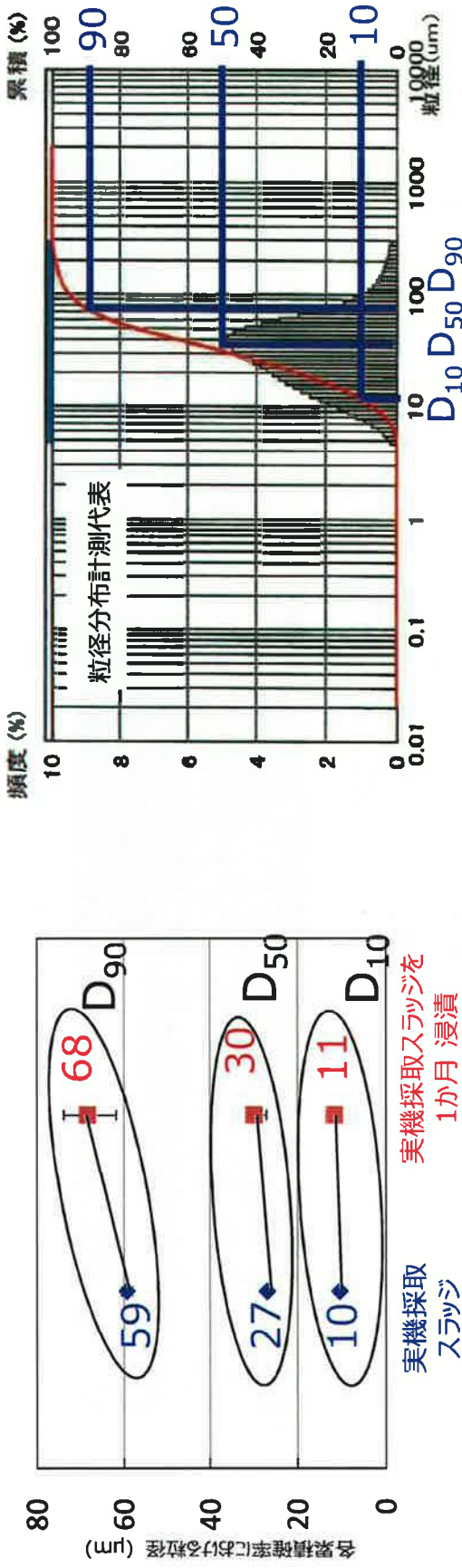
実機採取スラッジ



実機採取スラッジを1か月浸漬後



(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）



浸漬試験後に粒径の分布計測を行った結果、有意な粒径増加が認められたことから、長期停止がスケール性に及ぼす影響は、粒が大きくなることであると推定した。

長期停止影響に係る考察 (2/2)

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。

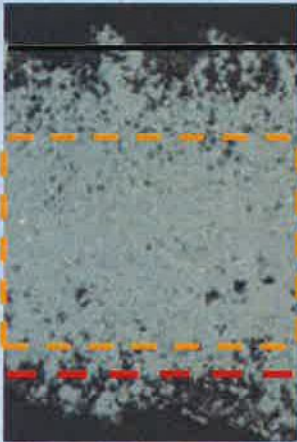
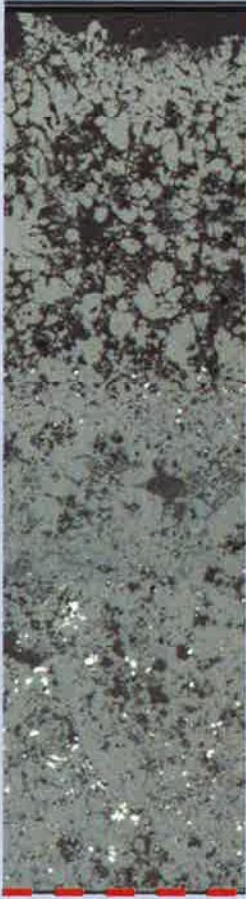
長期停止前スケール断面粒観察結果
(大飯発電所3号機第16回定期検査時)



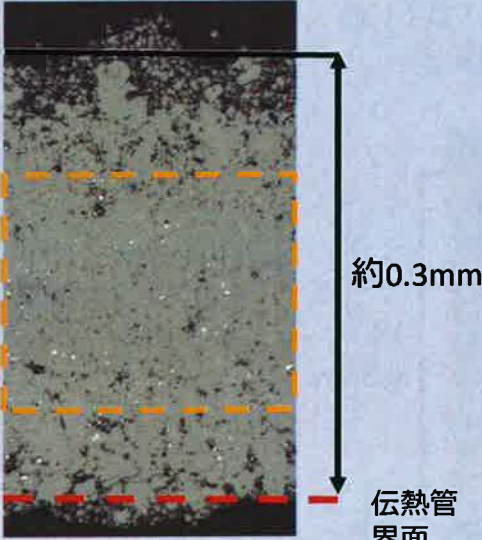
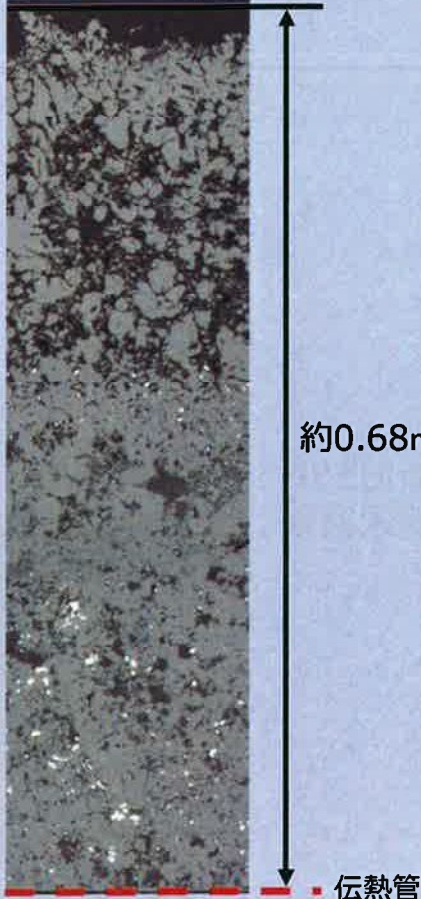
長期停止後スケール断面粒観察結果
(大飯発電所3号機第18回定期検査時)



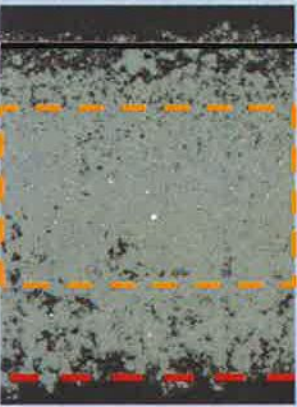

回収スケールの断面マイクロ観察結果 (A-SG)

回収場所	A-SG 回収スケール 第三管支持板下部	【参考】B-SG 第七管支持板上
断面マイクロ観察結果	 <p> ┌──┐ 空隙率5%以下の └──┘ 稠密層の範囲 </p> <p>約0.2~0.3mm</p> <p>伝熱管界面</p>	 <p>約0.68mm</p> <p>伝熱管界面</p>
性状	稠密層が主体	粗密層が主体
厚さ	約0.2~0.3mm	約0.68mm
伝熱管を きず付ける 可能性	あり	なし
運転時間	22.2万時間	

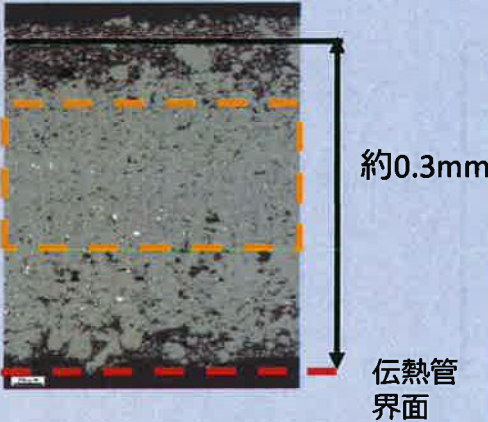
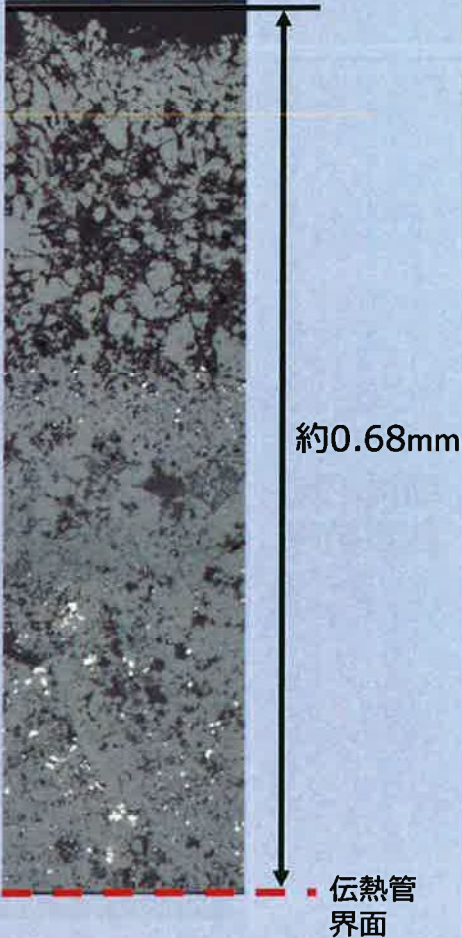
回収スケールの断面マイクロ観察結果 (C-SG)

回収場所	C-SG 回収スケール(C2) 第二管支持板上	【参考】B-SG 第七管支持板上
断面マイクロ観察結果	 <p> ┌──┐ 空隙率5%以下の └──┘ 稠密層の範囲 </p> <p>約0.3mm</p> <p>伝熱管 界面</p>	 <p>約0.68mm</p> <p>伝熱管 界面</p>
性状	稠密層が主体	粗密層が主体
厚さ	約0.3mm	約0.68mm
伝熱管を きず付ける可能性	あり	なし
運転時間	22.2万時間	

回収スケールの断面マイクロ観察結果 (C-SG)

回収場所	C-SG 回収スケール(C3) 第一管支持板上	【参考】B-SG 第七管支持板上
断面マイクロ観察結果	 <p>空隙率5%以下の 稠密層の範囲</p> <p>約0.3mm</p> <p>伝熱管 界面</p>	 <p>約0.68mm</p> <p>伝熱管 界面</p>
性状	稠密層が主体	粗密層が主体
厚さ	約0.3mm	約0.68mm
伝熱管を きず付ける可能性	あり	なし
運転時間	22.2万時間	

回収スケールの断面マイクロ観察結果 (C-SG)

回収場所	C-SG 回収スケール(C4) 第二管支持板上	【参考】B-SG 第七管支持板上
断面マイクロ観察結果	 <p>空隙率5%以下の 稠密層の範囲</p> <p>約0.3mm</p> <p>伝熱管 界面</p>	 <p>約0.68mm</p> <p>伝熱管 界面</p>
性状	稠密層が主体	粗密層が主体
厚さ	約0.3mm	約0.68mm
伝熱管を きず付ける可能性	あり	なし
運転時間	22.2万時間	

伝熱管とスケールの摩耗試験方法について

今回、A、C-SGで伝熱管に有意な減肉を与えたと推定されるスケールを回収したため、以下の通り伝熱管とスケールの摩耗試験を実施し、スケールで有意な減肉が生じる可能性を検証した。

1. 試験概要

加振装置（図1参照）により、伝熱管をスケールに接触させた状態で加振し、スケールの摺動による伝熱管の減肉発生状況を確認する。

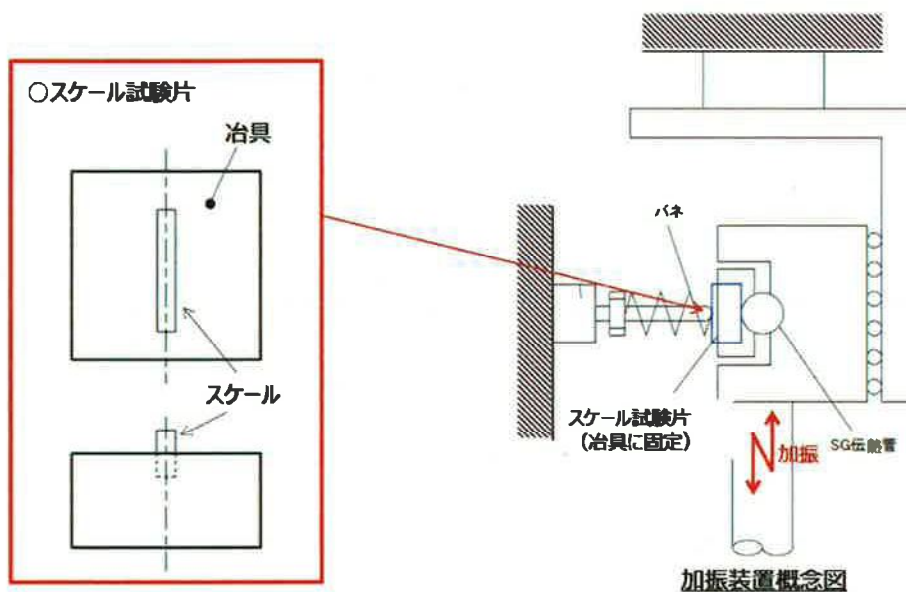
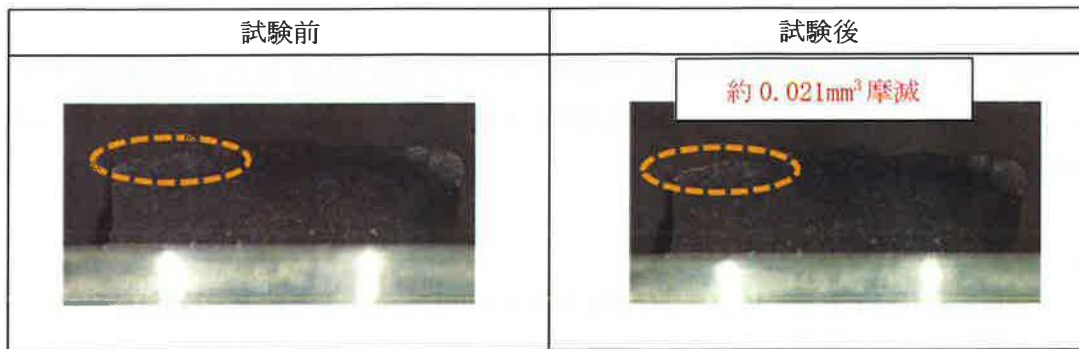


図1 加振装置概念図

2. 摩耗試験結果の整理方法

高浜3号機第24回定検時に実施した摩耗試験方法と同様の方法で伝熱管とスケールの摩耗試験を実施し、試験後の伝熱管の減肉量とスケールの摩減量を測定した後、体積比をとって結果を整理した。スケール及び伝熱管の試験前後の外観を図1及び2に示す。

図1 摩耗試験前後のスケール試験片外観（高浜4号機回収スケールの一例）




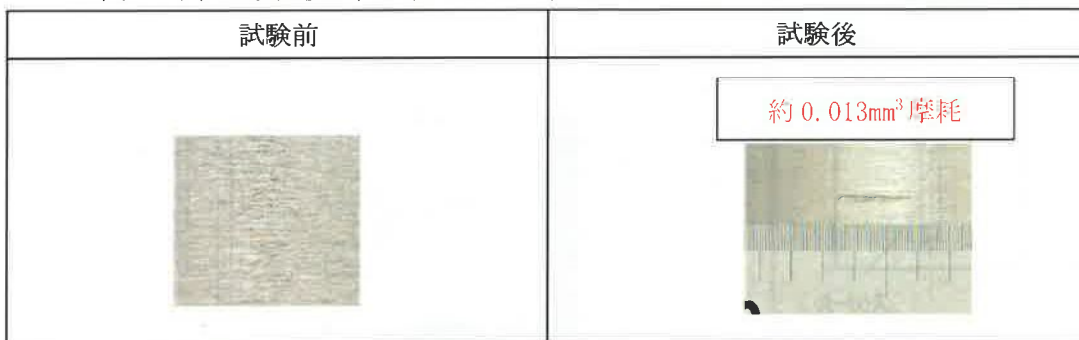
 : 伝熱管との接触部（摩滅部）

図2 摩耗試験前後の伝熱管試験片外観（高浜4号機回収スケールの一例）



2. 摩耗試験結果

(1) 今回原因のスケールと同等性状のスケールの試験結果（高浜4号機）

今回原因と考えられるA、C-SGで回収したスケールと同等の稠密さ（空隙率5%以下の稠密層が主体）、厚さのスケールを高浜4号機から回収し、摩耗試験を実施した。その結果を表1に示す。

この結果、試験片によってはスケールよりも伝熱管の方が先に摩耗したことから、空隙率5%以下の稠密層が主体のスケールは伝熱管に有意な減肉を与える可能性があることを確認した。

表1 今回原因と同等性状のスケールによる摩耗試験結果一覧

試験片	全厚 (mm)	稠密層厚さ (mm)	伝熱管 減肉体積 (mm ³)	スケール片 減肉体積 (mm ³)	減肉摩耗比 (伝熱管： スケール)
ケース1	約0.2	約0.18	約0.009	約0.006	1：0.7
ケース2	約0.2	約0.18	約0.004	約0.002	1：0.5
ケース3	約0.3	約0.14	約0.023	約0.014	1：0.6

(2) 稠密層厚さと摩耗試験結果の関係整理に係るデータ充実（高浜４号機）

稠密層厚さと摩耗試験結果の関係整理にあたり、データを充実させる観点から、表２の通り高浜４号機回収スケールについて、摩耗試験サンプル数を追加した。

得られた結果については、別途稠密層厚さと摩耗試験結果の関係として整理した。

表２ 高浜４号機回収スケールによる摩耗試験結果一覧（表１除く）

試験片	全厚 (mm)	稠密層厚さ (mm)	伝熱管 減肉体積 (mm ³)	スケール片 減肉体積 (mm ³)	減肉摩耗比 (伝熱管： スケール)
ケース４	約 0.3	約 0.14	約 0.013	約 0.021	1 : 1.6
ケース５	約 0.3	約 0.14	約 0.014	約 0.021	1 : 1.5
ケース６	約 0.2	約 0.06	—	試験中に欠損	1 : 100 以上
ケース７	約 0.2	約 0.10	—	試験中に欠損	1 : 100 以上
ケース８	約 0.2	約 0.14	—	試験中に欠損	1 : 100 以上
ケース９	約 0.2	約 0.04	—	試験中に欠損	1 : 100 以上
ケース１０	約 0.2	約 0.12	約 0.005	約 0.010	1 : 2.0
ケース１１	約 0.2	約 0.16	約 0.018	約 0.024	1 : 1.3
ケース１２	約 0.2	約 0.14	約 0.009	約 0.005	1 : 0.6
ケース１３	約 0.2	約 0.08	約 0.015	約 0.093	1 : 6.2
ケース１４	約 0.3	約 0.10	—	試験中に欠損	1 : 100 以上
ケース１５	約 0.3	約 0.12	約 0.012	約 0.018	1 : 1.5
ケース１６	約 0.2	約 0.14	約 0.011	約 0.010	1 : 0.9
ケース１７	約 0.3	約 0.14	約 0.012	約 0.028	1 : 2.3
ケース１８	約 0.3	約 0.12	約 0.016	約 0.044	1 : 2.8
ケース１９	約 0.2	約 0.14	約 0.015	約 0.008	1 : 0.5
ケース２０	約 0.2	約 0.12	—	試験中に欠損	1 : 100 以上
ケース２１	約 0.2	約 0.14	約 0.017	約 0.014	1 : 0.8
ケース２２	約 0.2	約 0.14	—	試験中に欠損	1 : 100 以上
ケース２３	約 0.2	約 0.08	—	試験中に欠損	1 : 100 以上
ケース２４	約 0.2	約 0.10	約 0.006	約 0.016	1 : 2.7
ケース２５	約 0.2	約 0.10	—	試験中に欠損	1 : 100 以上
ケース２６	約 0.2	約 0.10	—	試験中に欠損	1 : 100 以上

以上

スケールによる伝熱管の減肉メカニズム調査の流れ

○以下の試験および解析により、回収したA、C2～4スケールが伝熱管に有意な減肉を与えたメカニズムを調査した。

①減肉痕との接触状態の推定

- ・A-SG回収スケールの接触状態は実機観察結果の通り（添付資料-16）
- ・C2～4スケールは、添付資料-18にて接触状態を推定

<試験>

②減肉痕との接触状態の再現

- ・実機二相流相当のモックアップ試験により、①で推定した接触状態の再現性を確認
- ・再現性が確認できた場合は、以下の解析および試験を実施

<解析>

③摩耗形態の推定

- ・スケールと伝熱管のどちらの振動で今回の摩耗減肉が生じたかを解析を用いて確認
- ・推定にあたっては、両者の摩耗の仕事率（ワークレート）を算出、比較し、実機の摩耗減肉量が得られるのはどちらになるかを確認

<試験>

④-1減肉試験

- ・伝熱管、スケールを模擬した装置により摩耗減肉を発生させることで摩耗減肉形状を推定

④-2ECTモックアップ試験

- ・減肉試験により得られた摩耗減肉形状と同等の人工欠陥を与えた伝熱管のECT信号を取得し、実機ECT信号と比較
⇒①で推定した接触状態で今回の摩耗減肉形状が得られることを確認

⑤摩耗体積の評価

- ・③のワークレートを用いて算出した摩耗体積と、④-2の人工欠陥の体積との比較を実施
⇒①で推定した接触状態により今回の摩耗量が1サイクルで発生し得ることを確認

スケールのSG 2次側器内挙動の推定および流況モックアップ試験による接触状態の再現

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スケール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、推定したスケール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。

1. SG器内でのスケール挙動の推定

図1にSG 2次側下部の器内流況および想定されるスケールの挙動を示す。

運転中のSG 2次側器内の流況下では、流体抗力がスケールの落下力を上回ることから、管板直上で発生したスケールの場合、管群内の上昇流に乗って流量分配板および各管支持板フローロット部を通過し、減肉箇所へ到達したことが考えられる。第一管支持板より上方では、管群の高温側と低温側の圧力損失差から、高温側から低温側への水平方向流があることから、第一管支持板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。

なお、第一管支持板上部または第二管支持板上部で発生したスケールを想定した場合においても、発生したアドレスによっては、同様に管群内の上昇流および高温側から低温側への水平方向流に乗り、第三管支持板の低温側下面に至る可能性はあると考えられる。



図1 SG 2次側下部の器内流況およびスケール挙動

流れ方向は、管支持板間の平均的な水平方向流速と上昇方向流速を合成して図示した。

2. 流況モックアップ試験による接触状態の再現

（1）試験方法

3次元熱流動解析で得られるSG 2次側流況を再現する水空気試験装置を用いて、C 2、C 3、C 4スケールの各模擬スケール片について、推定した接触状態が実機二相流相当条件下において管支持板下面で維持されるか確認を行った（図1参照）。

- ・試験流速： 
- ・模擬スケール片形状：約 18mm×約 10mm×約 0.3mm
（C 2スケールと同一形状、凹面側で管支持板下面に拘束）
- ・模擬スケール片形状：約 23mm×約 11mm×約 0.3mm
（C 3スケールと同一形状、凸面側で管支持板下面に拘束）
- ・模擬スケール片形状：約 21mm×約 10mm×約 0.3mm
（C 4スケールの破損前想定形状と同一形状、凹面側で管支持板下面に拘束）



図1 水空気試験装置概要

（2）試験結果

試験装置内の水－空気二相流中で、模擬スケール片はいずれも管支持板下面で推定した接触状態が維持されたことから、スケール片は凹面・凸面のいずれであっても管支持板下面で保持されうることを確認した（図2参照）。

< C 2スケールと伝熱管 X 5 5, Y 8との接触状態を想定 >



< C 3スケールと伝熱管 X 2 1, Y 8との接触状態を想定 >



< C 4スケールと伝熱管 X 5 5, Y 3との接触状態を想定 >



図2 水空気試験結果

以上の結果から、今回の原因と考えられるスケールは、SG器内で伝熱管から剥離後に管群内の上昇流および高温側から低温側への水平方向流に乗って第三管支持板低温側下面に到達し、伝熱管との接触状態が実機二相流中においても維持された可能性があるものと推定した。

以上

スケールと伝熱管の接触時における摩耗形態の推定について

スケールとの接触で伝熱管が摩耗する場合、スケール片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、両ケースの可能性について検討した。

1. スケール振動のケース

スケールが振動するには、端部が固定された状態で流体力を受けて振動する必要があるため、本ケースではスケールの端部が拘束された片持ち梁の状態を想定する。この想定に基づき図1の通り計算モデル*1を設定し、ワークレート*2の計算を行った。

*1 片端が固定されたスケール片が流体力により1次モードで振動

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

<Archardの式>

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

V : 摩耗体積

W_S : 比摩耗量 (材質の組合せと摩耗モードで決まる材料係数: スケールと伝熱管の摩耗試験により取得)

W_R : ワークレート (下記参照)

T : 運転時間

<ワークレート計算式>

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

W_R : ワークレート[W]

F : 押付力[N]

L : 静的振幅[m]

ζ : 接触物の減衰比[%]

f : 固有振動数[Hz]

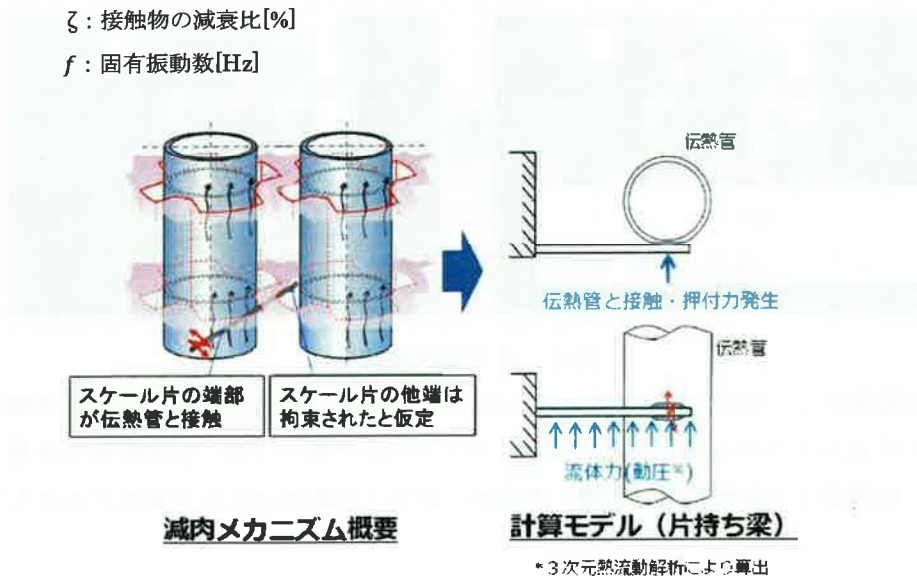


図1 スケールの接触状態の計算モデル化概要 (スケール振動ケース)

この結果、今回の原因のスケール（A、C2、C3、C4）ではいずれも流体力を受ける面積が小さく、有意なワークレートは発生しないことを確認した。ワークレート計算結果を表1に示す。

表1 スケール振動のワークレート計算結果

スケール	スケール形状 (mm)	押付力 (N)	ワークレート (mW)	実機減肉量再現可能性	備考
A	約15×約9× 約0.2~0.3	1	<0.01	×	実機減肉量を再現するには1mWオーダーのワークレートが必要
C2	約18×約10× 約0.3	1	<0.01	×	実機減肉量を再現するには1mWオーダーのワークレートが必要
C3	約23×約11× 約0.3	1	<0.01	×	実機減肉量を再現するには1mWオーダーのワークレートが必要
C4	約21×約10× 約0.3	1	<0.01	×	実機減肉量を再現するには1mWオーダーのワークレートが必要

2. 伝熱管振動のケース

本ケースでは、スケールが流体力によって管支持板下面で保持され、接触する伝熱管のランダム振動*3により伝熱管自身に減肉が発生したことを想定する。本想定下では、管支持板部の伝熱管の振幅は、伝熱管と管支持板BEC穴ランド部*4の隙間の範囲に制限される（図2参照）。

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

*4 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2 スケール片の接触状態の想定（伝熱管振動ケース）

そこで、本想定の実機との整合性を確認するため、減肉が認められた伝熱管について、第三管支持板のBEC穴ランド部との隙間を目視にて確認した結果、一定の隙間が認められた（図3参照）。

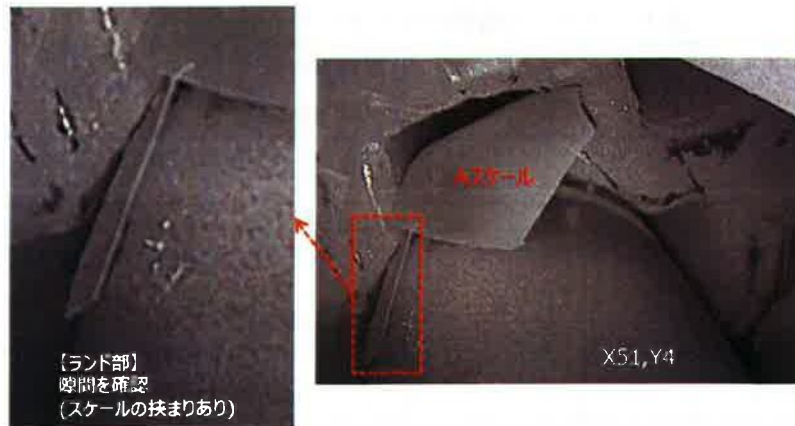


図3-1 伝熱管とランド部の隙間確認結果（A-SG：X51，Y4）

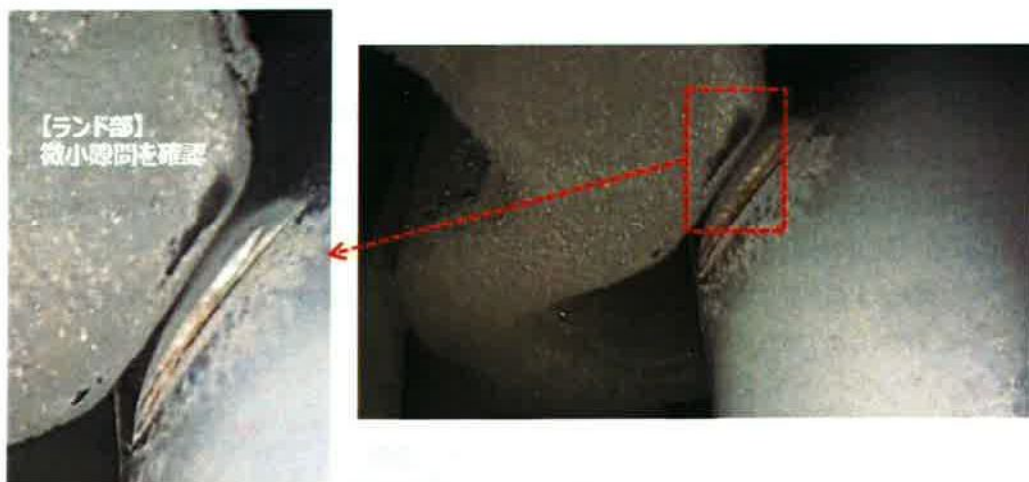


図3-2 伝熱管とランド部の隙間確認結果（C-SG：X55，Y8）

【ランド部】
隙間を確認
(スケールの挟まりあり)

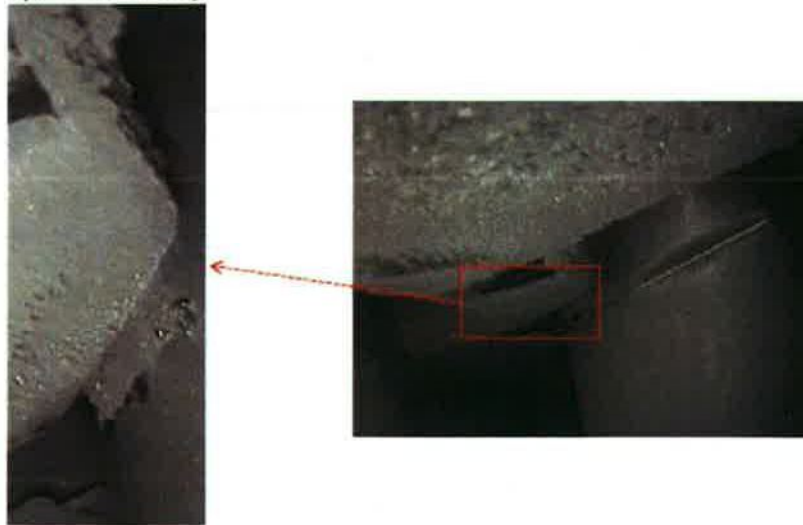


図3-3 伝熱管とランド部の隙間確認結果（C-SG：X21，Y8）

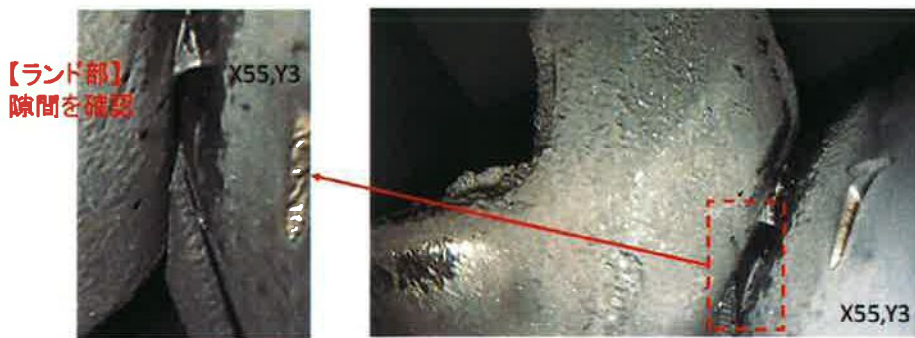


図3-4 伝熱管とランド部の隙間確認結果（C-SG：X55，Y3）

この確認結果より、本想定は実機と整合しているものとし、今回外面減肉が見つかった4本の伝熱管についてワークレートの試算*5を行った（表2参照）。その結果、伝熱管振動の場合はスケール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。

表2 伝熱管振動のワークレート試算結果

評価伝熱管	押付力 (N)	ワークレート (mW)	実機減肉量 再現可能性
A-SG X51, Y4	約1	約3	○
C-SG X55, Y8		約2	
C-SG X21, Y8		約2	
C-SG X55, Y3		約3	

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

3. 結論

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

<参考1>

流動振動解析によるワークレートの算出方法について、以下にA-SG (X51, Y4) の場合を例に概要を示す。

参1-1. ワークレート計算の考え方 (図4参照)

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

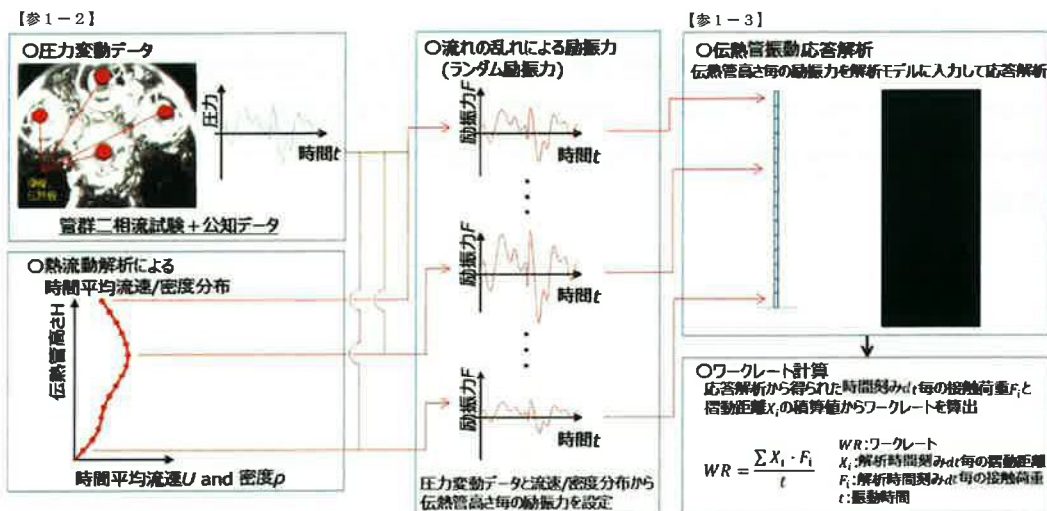


図4 ワークレート算出の流れ (伝熱管振動ケース)

- ・熱流動解析にて当該伝熱管の直管部全長の流速・密度分布を算出する。
- ・熱流動解析より得られた流速・密度分布及び既知の圧力変動データ（管群二相流試験等）から、振動応答解析（参1－3．項参照）の入力条件となる励振力を算出する。



図5 熱流動解析結果（A－SG：X51，Y4）

参1－3．振動応答解析（図6参照）

- ・振動応答解析の計算モデルには、スケールの接触・摺動を考慮し、管支持板下面の位置でスケール片から押付力を受けるものとする。
- ・参1－2．項で算出した励振力を入力して振動応答解析を行い、時間とともに変化する摺動距離、押付力を算出し、それらを積算することでワークレートを算出する。

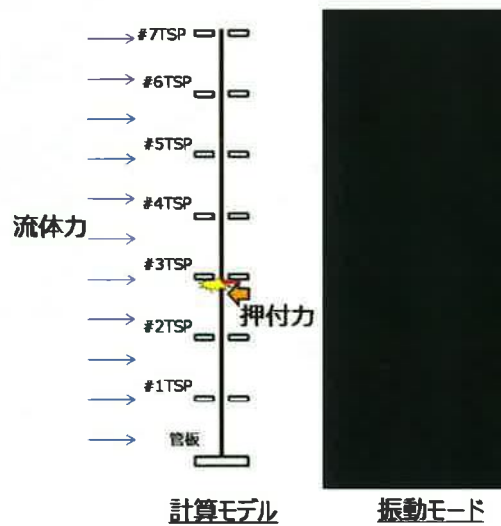


図6 振動応答解析結果（A－SG：X51，Y4）

減肉試験による実機摩耗減肉形状の確認について

以下の通り減肉試験を行い、添付資料-16、18で推定したスケールの接触状態により伝熱管に生じると考えられる摩耗減肉形状を再現した。

1. 減肉試験の方法

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

- ・円柱形状の石膏で伝熱管を模擬し、スケールを模擬したステンレス片との振動接触により減肉を発生させる。
- ・石膏の減肉形状は試験後の破面観察で確認を行う。
なお、形状把握のため、実機2倍のスケールモデルとする。
- ・ステンレス片の厚みについても、A、C2、C3、C4スケールの2倍のスケールモデルとし、Aスケールについては0.4mm、C2～4スケールは0.6mmと設定する。
- ・円柱とステンレス片の接触角度については、接線方向を接触角度①、軸方向を接触角度②、接線方向の傾きを接触角度③とし、添付資料-16、18で推定した接触状態を基に設定した。
- ・試験条件一覧を表1-1、試験装置概要を図1-1、図1-2に示す。

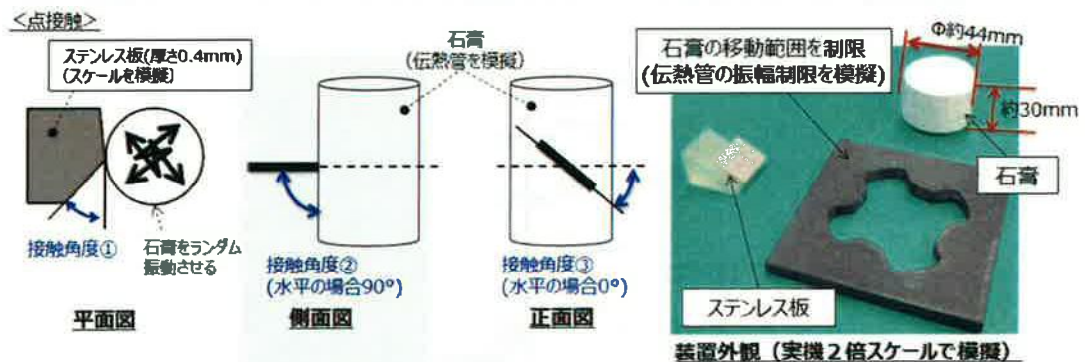


図1-1 試験装置概要図 (Aスケールの場合)

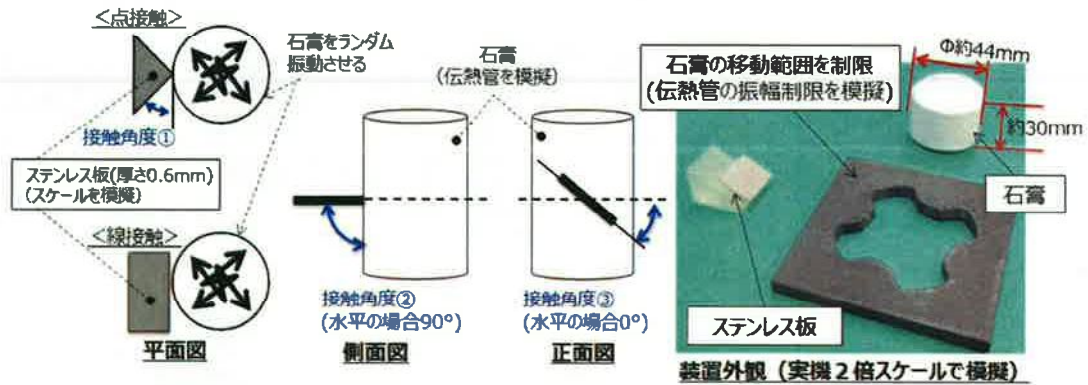


図1-2 試験装置概要図 (C2~4スケールの場合)

表1-1 試験条件一覧

対象伝熱管	振動モード	接触条件	接触角度①	接触角度②	接触角度③	振動振幅 (2倍スケール)
A-SG : X51, Y4 (Aスケール)	伝熱管 振動	点接触	45°	135°	40°	
C-SG : X55, Y8 (C2スケール)		線接触	0°	90°	0°	
C-SG : X21, Y8 (C3スケール)		線接触	0°	90°	0°	
C-SG : X55, Y3 (C4スケール)		点接触	0°	90°	0°	

2. 減肉試験の結果

減肉試験によって得られた、A-SG (X51, Y4) 並びにC-SG (X55, Y8、X21, Y8、およびX55, Y3) の各減肉形状をそれぞれ図1-3、図1-4、および図1-5に示す。

なお、C-SGのX55, Y8及びX21, Y8の減肉形状は、ともにスケールが線接触したことに伴う蒲鉾形であることから、図1-4にまとめて示す。また、それぞれ取得した減肉形状の寸法を実機相当に補正し整理した結果を表1-2に示す。

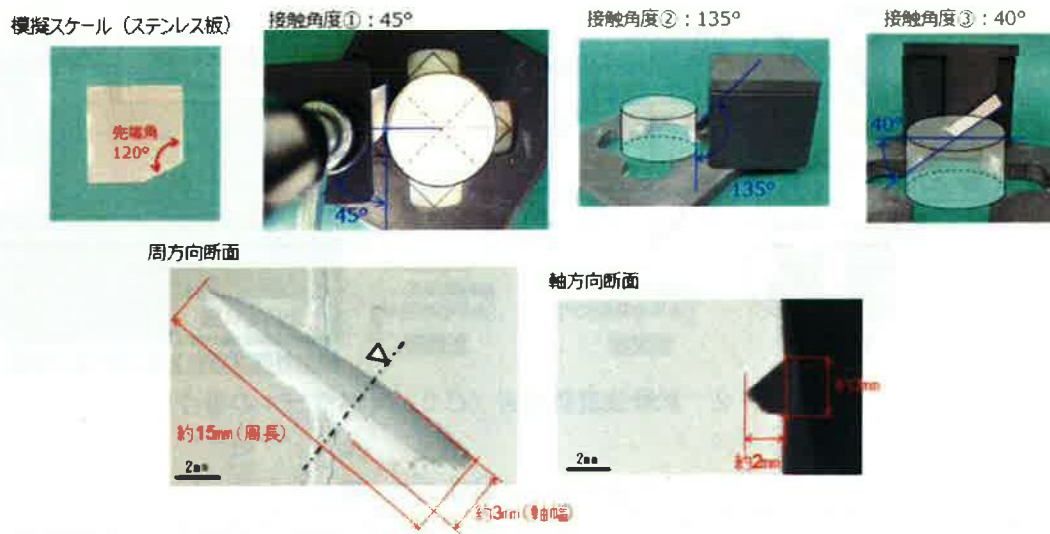


図1－3 減肉試験で取得した減肉形状 (A—SG (X51, Y4))
(Aスケール)

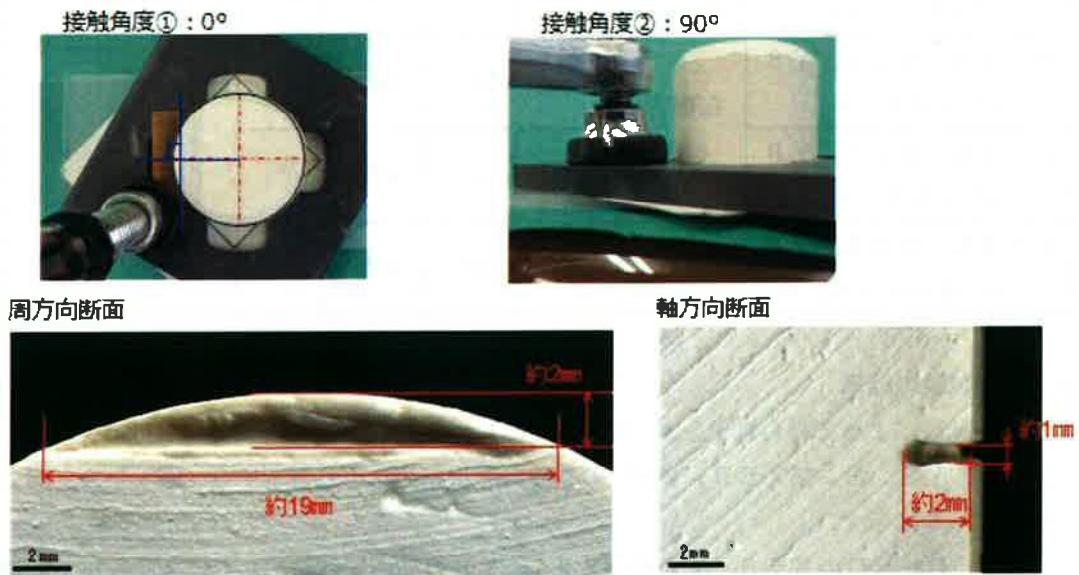
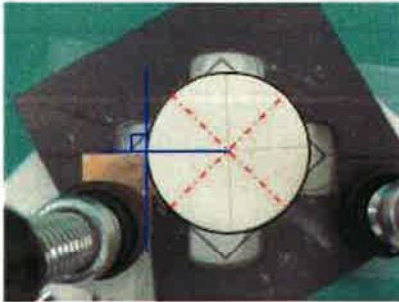


図1－4 減肉試験で取得した減肉形状 (C—SG (X55, Y8, X21, Y8))
(C2、C3スケール)

接触角度①：0°



周方向断面



接触角度②：90°



軸方向断面

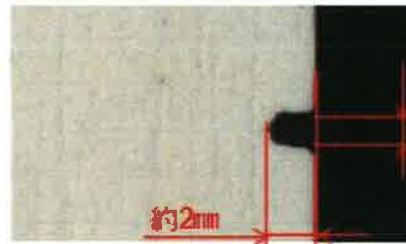


図1-5 減肉試験で取得した減肉形状（C-SG（X55，Y3））
（C4スケール）

表1-2 減肉形状寸法一覧

対象伝熱管	減肉形状寸法			備考	
		深さ	軸方向		周方向
A-SG：X51，Y4 （Aスケール）	減肉試験結果	約2mm	約3mm	約15mm	実機ECT 信号の深さを 基準に補 正
	実機相当寸法	約0.4mm	約0.7mm	約3mm	
C-SG：X55，Y8 （C2スケール）	減肉試験結果	約2mm	約1mm	約19mm	
	実機相当寸法	約0.4mm	約0.3mm	約6mm	
C-SG：X21，Y8 （C3スケール）	減肉試験結果	約2mm	約1mm	約19mm	
	実機相当寸法	約0.5mm	約0.3mm	約6mm	
C-SG：X55，Y3 （C4スケール）	減肉試験結果	約2mm	約1mm	約9mm	
	実機相当寸法	約0.3mm	約0.3mm	約3mm	

なお、以上の通り再現した実機相当寸法については、ECTモックアップ試験（添付資料－33）により実機ECT信号との整合性を確認する。

以上

ECTモックアップ試験による実機ECT信号との整合性確認について

減肉試験で再現した減肉形状（実機相当寸法）と同等形状の人工欠陥を与えた伝熱管モックアップ（インコネル600合金製）のECT信号を取得し、実機ECT信号との整合性を確認した。

1. ECTモックアップ試験の条件

ECTモックアップ試験に用いる人工欠陥寸法を表1に示す。

表1 ECTモックアップ試験に用いる人工欠陥寸法

対象伝熱管	人工欠陥寸法			備考
	深さ	軸方向	周方向	
A-SG : X 5 1, Y 4	約 0.4mm	約 0.7mm	約 3mm	減肉試験結果（実機相当寸法）より設定
C-SG : X 5 5, Y 8	約 0.4mm	約 0.3mm	約 6mm	
C-SG : X 2 1, Y 8	約 0.5mm	約 0.3mm	約 6mm	
C-SG : X 5 5, Y 3	約 0.3mm	約 0.3mm	約 3mm	

2. ECTモックアップ試験の結果

1. 項の人工欠陥の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。図1～4に試験結果を示す。この結果より、スケールが実機で確認または推定した姿勢で伝熱管と摺動すれば、今回認められた減肉を発生させる可能性があると推定された。ただし、1サイクルで今回の減肉に至った可能性（時間的因子）については、別途流動振動解析を用いた計算により検証する。


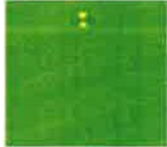

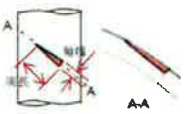


	MIX 色調図	MIX リサージュ	実機信号 整合性
<p>実機 A X51, Y4 周長(目視): 約4mm</p>  <p>ECT減肉指示深さ: 33%</p>	<p>振幅: 0.36 V 位相: 118°</p> 		—
<p>モックアップ [33%減肉] 周長: 約3mm 軸長: 約0.7mm</p> 	<p>振幅: 0.26 V 位相: 105°</p> 		○

図1 ECTモックアップ試験結果 (A-SG: X51, Y4)







	MIX 色調図	MIX リサージュ	実機信号 整合性
<p>実機 C X55, Y8 周長(目視): 約6mm</p>  <p>ECT減肉指示深さ: 32%</p>	<p>振幅: 0.38 V 位相: 109°</p> 		—
<p>モックアップ [31%減肉] 周長: 約6mm 軸長: 約0.3mm</p> 	<p>振幅: 0.38 V 位相: 101°</p> 		○

図2 ECTモックアップ試験結果 (C-SG: X55, Y8)


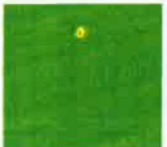




	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性
<p>実機 C X21, Y8 周長(目視): 約7mm</p>  <p>ECT減肉指示深さ: 36%</p>	<p>振幅: 0.39 V 位相: 106°</p> 		—
<p>モックアップ [31%減肉] 周長: 約6mm 軸長: 約0.3mm</p>  <p>約6mm</p>	<p>振幅: 0.38 V 位相: 101°</p> 		○

図3 ECTモックアップ試験結果 (C-SG: X21, Y8)


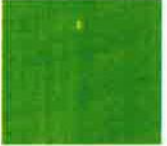




	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性
<p>実機 C X55, Y3 周長(目視): 約2mm</p>  <p>ECT減肉指示深さ: 25%</p>	<p>振幅: 0.29 V 位相: 92°</p> 		—
<p>モックアップ [31%減肉] 周長: 約3mm 軸長: 約0.3mm</p>  <p>約3mm</p>	<p>振幅: 0.29 V 位相: 87°</p> 		○

図4 ECTモックアップ試験結果 (C-SG: X55, Y3)

以上

ワークレートをを用いた摩耗体積の計算結果について

流動振動解析によりスケールと伝熱管の摩耗のワークレートを算出し、比摩耗量および1サイクルの運転時間を乗じて、スケールとの接触により1サイクルで発生する摩耗体積を計算した。また、ECTモックアップ試験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との比較評価を行った。その結果を表1に示す。

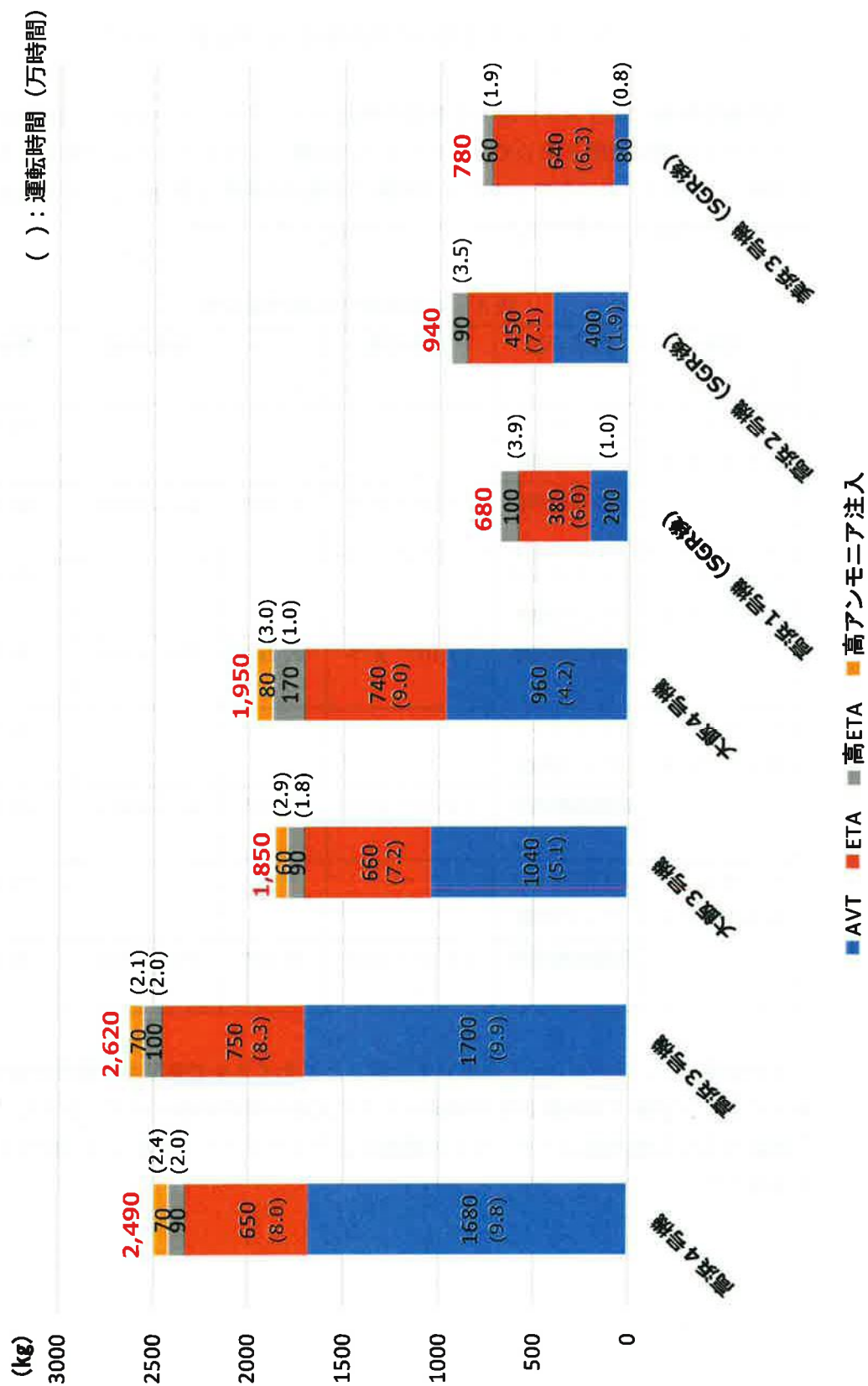
表1 摩耗体積の比較評価結果

対象 伝熱管	評価手法	比摩耗量	ワーク レート	運転時間	摩耗体積
A-SG : X51, Y4	ECTモック アップ試験	—	—	—	約0.3mm ³
	流動振動解析	$1 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$	約3mW	約5,800hr	約0.5mm ³
C-SG : X55, Y8	ECTモック アップ試験	—	—	—	約0.5mm ³
	流動振動解析	$1 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$	約2mW	約5,800hr	約0.5mm ³
C-SG : X21, Y8	ECTモック アップ試験	—	—	—	約0.5mm ³
	流動振動解析	$1 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$	約2mW	約5,800hr	約0.5mm ³
C-SG : X55, Y3	ECTモック アップ試験	—	—	—	約0.2mm ³
	流動振動解析	$1 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$	約3mW	約5,800hr	約0.5mm ³

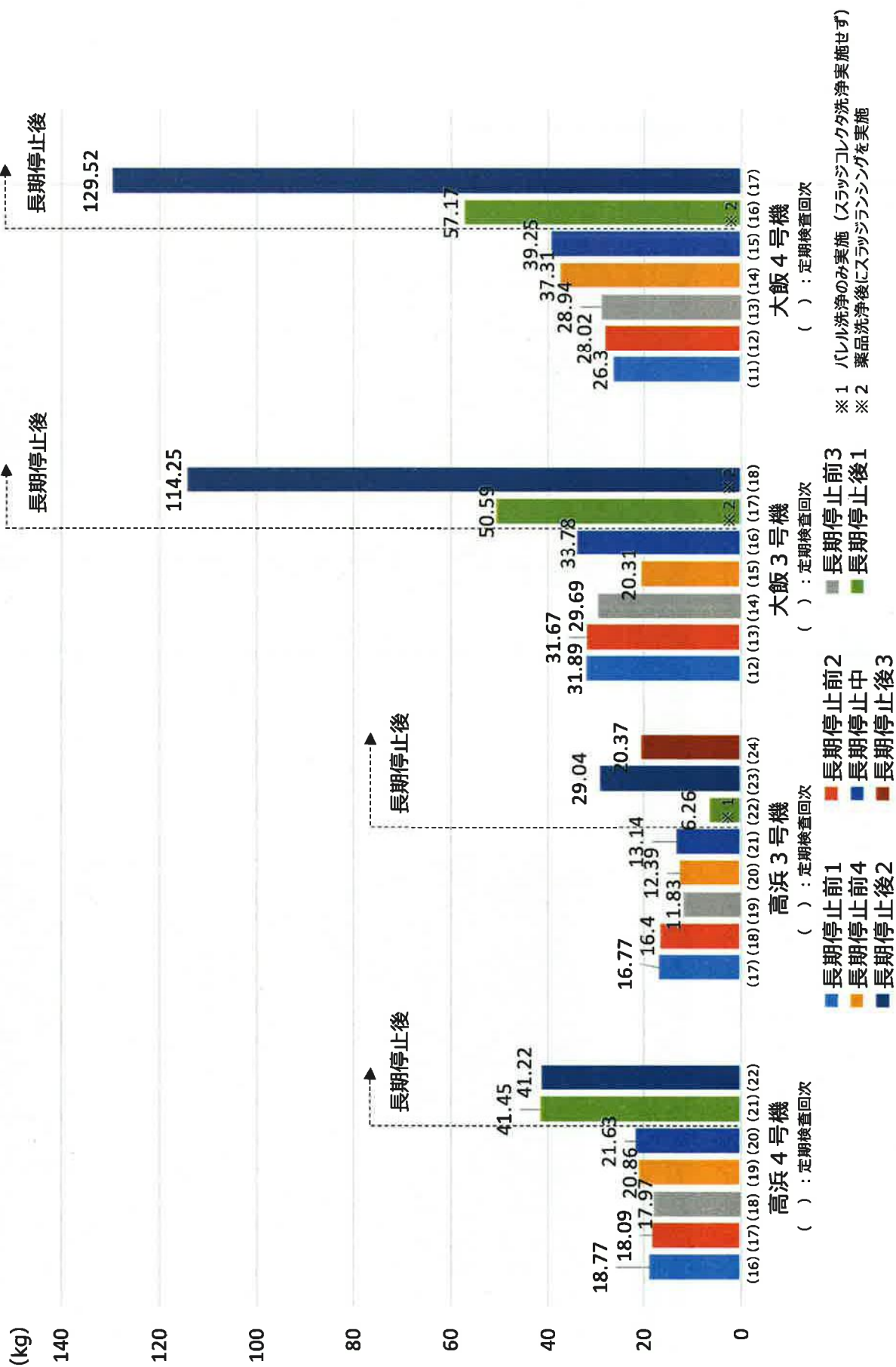
この結果より、ワークレートをを用いて計算した1サイクルで発生する摩耗体積は、ECTモックアップ試験で実機整合性を確認した人工欠陥の摩耗体積とほぼ一致することから、今回認められた減肉痕はスケールとの接触により1サイクルで発生した可能性があることを確認した。

以上

鉄持込み量比較

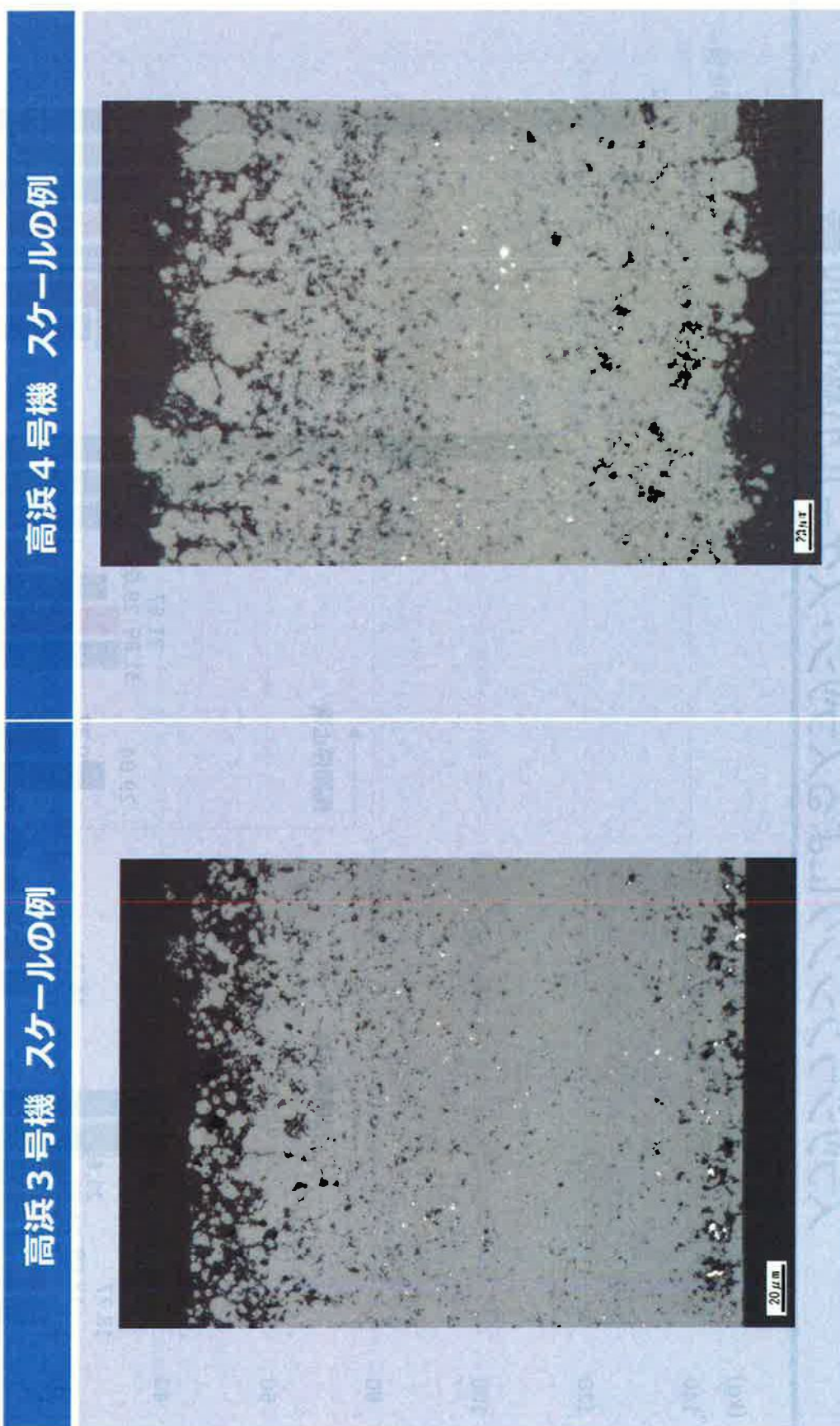


スラッジランシングによるスラッジ・スケールの総回収量



高浜発電所3号機と高浜発電所4号機のスケール性状の比較について

高浜発電所3号機と高浜発電所4号機の第二管支持板上面から回収したスケールの断面ミクロ観察を行った結果、両者の性状は同等であり、稠密層が主体であることを確認した。



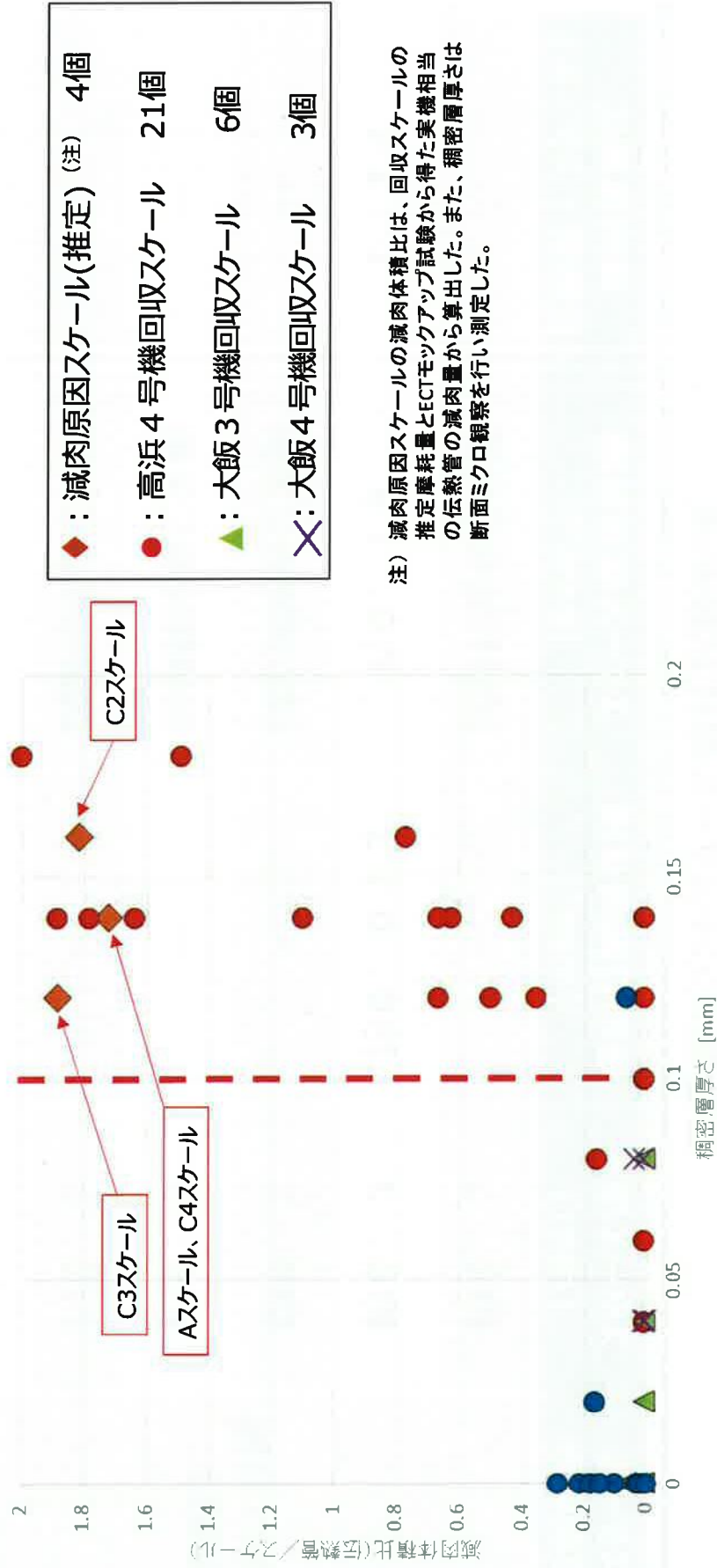
当社他プラントスケール摩耗試験結果

スケール回収場所	スケール厚さ (mm)	伝熱管減肉体積 (mm ³)	スケール摩減体積 (mm ³)	減肉体積比 (伝熱管：スケール)
大飯3号機 管板上	約0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約0.2	約0.013	約0.19	1:15
	約0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約0.2	—	試験開始後に欠損	—
	約0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約0.2	—	試験開始後に欠損	—
大飯4号機 管板上	約0.2	約0.001	約0.41	1:410
	約0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約0.1	—	試験開始後に欠損	—

スケール形状による伝熱管減肉影響

- 摩擦に寄与していると考えられる稠密層厚さと減肉体積比の相関を確認した。
- 空隙率の大きい多孔質化層は、摩擦能力に影響しないとし、「厚さ」としてカウントする稠密層を空隙率5%以下とする。

稠密層厚さと摩擦体積比の関係



注) 減肉原因スケールの減肉体積比は、回収スケールの推定摩擦量とECTモックアップ試験から得た実機相当の伝熱管の減肉量から算出した。また、稠密層厚さは断面マイクロ観察を行い測定した。

海外の蒸気発生器の運転履歴等調査結果

1. 調査方法について

(1) 運転履歴

海外の蒸気発生器の運転履歴について、米国電力研究所（E P R I）の蒸気発生器管理プログラム（S G M P）専有のデータベース等を用いて調査した。

E P R I S G M P専有のデータベースに登録されている世界のプラント総数は約260基であるが、この中から、高浜3, 4号機と同条件と考えられる蒸気発生器を抽出するため、次の条件に合致するプラントを調査した。

なお、広く抽出するため、S Gの設計仕様や運転パラメータが大きく異なるプラントであっても、下記条件に合致していれば対象として抽出を行った。

<抽出条件>

- ・ S Gの運転時間が高浜3, 4号機以上のプラント（E F P Y 2 5以上のプラント）※¹
- ・ 薬品洗浄実績が確認されなかったプラント
- ・ 管支持板が平板状構造であるプラント※²

※¹ E P R I S G M P専有データベースでは、至近定検までの運転時間が登録されている。

※² エッグクレート型管支持板のような、薄板を格子状に配列した支持板構造を持つS Gは除外（スケールが伝熱管と接触した状態で保持されないため）

(2) スケールによる減肉経験の有無

海外においてスケールによる減肉が発生した事例の有無を調査するため、上記のE P R I S G M P専有のデータベースの他、E P R Iの各種レポート（伝熱管の摩耗減肉損傷に関するもの）を確認するとともに、E P R I及びE D Fへの問合せを行った。

2. 調査結果について

(1) 運転履歴

調査の結果、抽出されたプラントは表1の通りであり、全数の約260基に対し6基のみと非常に少ないことを確認した。

表１ 海外プラント抽出結果

プラント名	運開日	SG取替日	現行SGEFPY
プラントA	1986. 8. 1	—	28. 5 (2019. 9. 14 時点)
プラントB	1972. 12. 14	1982. 4. 1	30. 2 (2020. 3. 30 時点)
プラントC	1973. 9. 1	1983. 5. 1	30. 0 (2020. 10. 3 時点)
プラントD	1986. 4. 11	—	26. 9 (2019. 1. 5 時点)
プラントE	1985. 12. 4	—	25. 3 (2018. 4. 7 時点)
プラントF	1986. 7. 18	—	26. 0 (2019. 1. 10 時点)

(2) スケールによる減肉経験の有無

EPR I SGMP専有のデータベース、EPR I レポート^{※3}では、海外でのスケールによる伝熱管損傷事象は確認されなかった。また、EPR I 及びEDFへの問合せの結果、スケールによる伝熱管損傷の事例は報告されていないことを確認した。

※3 EPR I SGMP専有レポート“Foreign Object Handbook R1(3002007858)”より

3. 当社と海外におけるスケールマネジメントの考え方の違い

上記の調査において、海外では多くのプラントで薬品洗浄が行われていたことから、薬品洗浄をはじめとするスケールマネジメント方法の主な違いについて、表2の通り整理した。整理にあたっては、主要国である米国と仏国の状況を調査するため、EPR I 等の各種レポートを確認するとともに、EPR I 及びEDFへの問合せを行った。

表2 スケールマネジメントにおける当社と海外（米国・仏国）の主な違い

項目	当社	海外 ^{※4}
BEC穴閉塞	・ECT及び目視による閉塞率管理 ・機械式洗浄による閉塞回復	・ECTや目視、SG二次側水位による閉塞率管理 ・薬品洗浄による閉塞回復
管板直上の腐食環境生成	・スラッジランシング（毎定検）	・スラッジランシング ・薬品洗浄
伝熱性能低下	・薬品洗浄（ASCA洗浄）	・薬品洗浄（ASCA洗浄他）

※4 EPR I SGMP専有レポート“Deposit Removal Strategies Sourcebook (3002005090)”より

この結果、当社において薬品洗浄で対応するのは伝熱性能の低下のみであるが、海外においては、主にBEC穴閉塞対応で薬品洗浄を用いている他、必要に応じて管板直上に堆積したスラッジ除去においても活用を行っている。従って、海外においては、薬品洗浄はスケールマネジメントにおける主要な対策と位置付けられていると推察され、結果、多くのプラントが薬品洗浄を経験しているものと考えられる。

4. メーカーへの確認結果

スケールによる伝熱管の摩耗減肉に関する知見について、メーカーへの確認を行った結果、上記と同様に、知見はないとの見解を得た。

5. 海外への情報発信

今回高浜4号機で認められたスケールによる伝熱管摩耗減肉事象の原因調査で得られた知見については、今後、海外へもフィードバックを行うべく、EPR IのSGMP等を通じて海外のPWR事業者へ情報発信を行っていく。

以上

減肉した伝熱管の評価

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

1. 強度

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

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

その結果、破断圧力は33.81MPaであり、通常運転時および事故時の最大内外差圧■■■■MPaに対し、十分な裕度があることを確認した。

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

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

<計算条件>

P_B ：局部減肉を有する伝熱管の破断圧力（MPa）

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

t ：板厚=■■■■mm

R ：平均半径=■■■■mm

a ：減肉深さ=■■■■mm (=■■■■mm×0.36)

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

2c：減肉幅=5mm

表 減肉した伝熱管の強度評価結果

減肉深さ (%) *1	破断圧力 P_B (MPa)	事故時を包絡 する作用内外差圧 (MPa) *2	裕度
36	33.81	■■■■	■■■■

*1 最大減肉深さのC-SG (X21, Y8) で代表

*2 設計基準事故時および重大事故等時を包絡する内外差圧

2. 耐震性

減肉を有する伝熱管の耐震性について、次のとおり評価した。

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

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

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

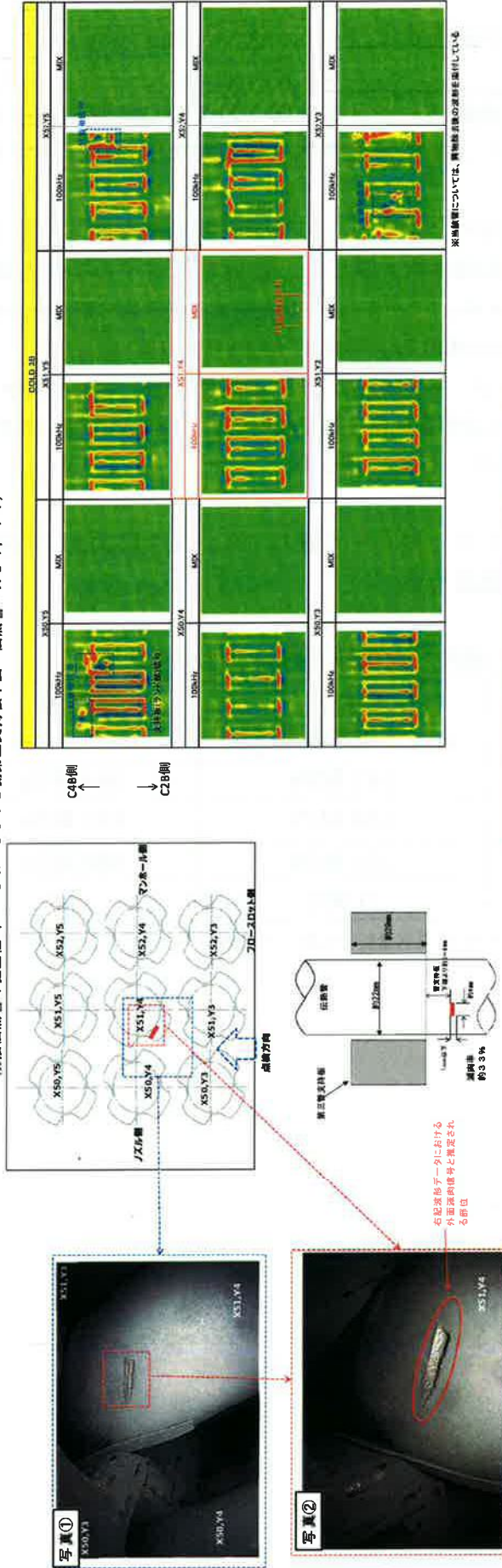
その結果、今回認められた減肉を考慮しても、発生応力および疲労累積係数に十分な裕度があること確認した。

表 減肉した伝熱管の耐震性評価結果

応力分類	発生応力 ^{*5} および疲労累積係数	許容値	裕度
一次一般膜応力	157 MPa	334 MPa	2.1
膜応力＋曲げ応力	158 MPa	437 MPa	2.7
一次＋二次応力	115 MPa	492 MPa	4.2
疲労累積係数	0.003	1	-

^{*5} 最大減肉深さの C-SG (X21, Y8) で代表

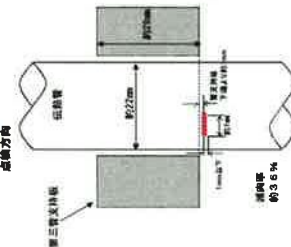
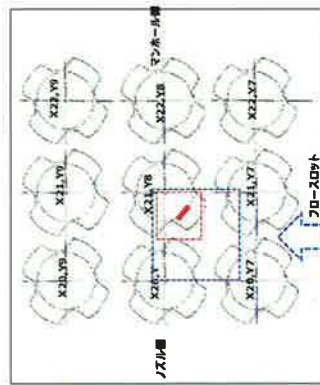
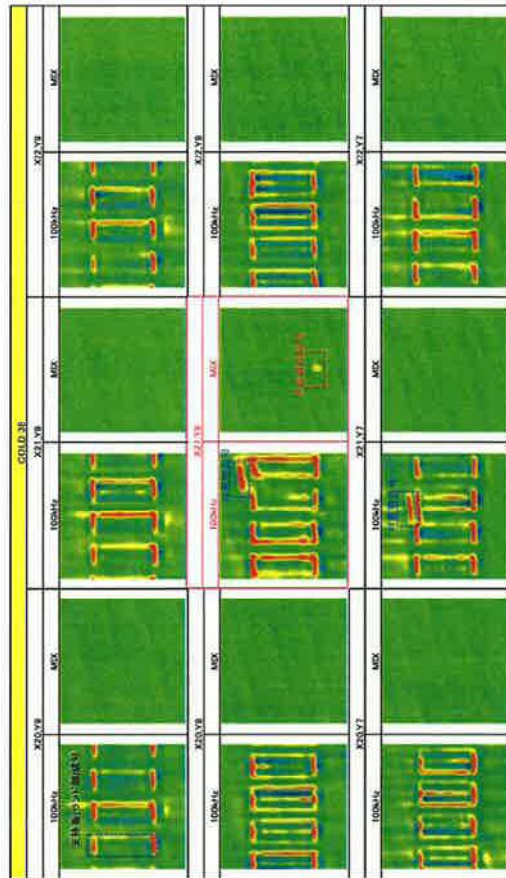
隣接伝熱管の健全性 (A-SG Cold制第三支持板下面 伝熱管 X51, Y4)



波形上の評価

- ・外面減肉信号は、X51,Y4にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
- ・その他のアドレスでは、付着物信号および支持板(ランド部)信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。
- ・なお、ECT信号は信号源の長さより長くなるため、上記のランド部信号範囲は実範囲より広いと考えられる。

隣接伝熱管の健全性 (C-SG Coil 副第三支持板下面 伝熱管 X21, Y8)

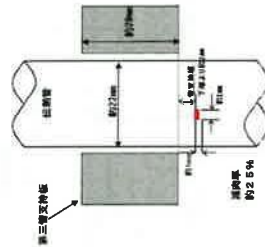
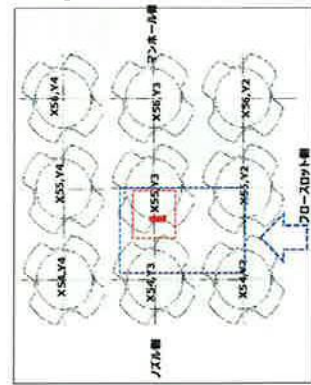
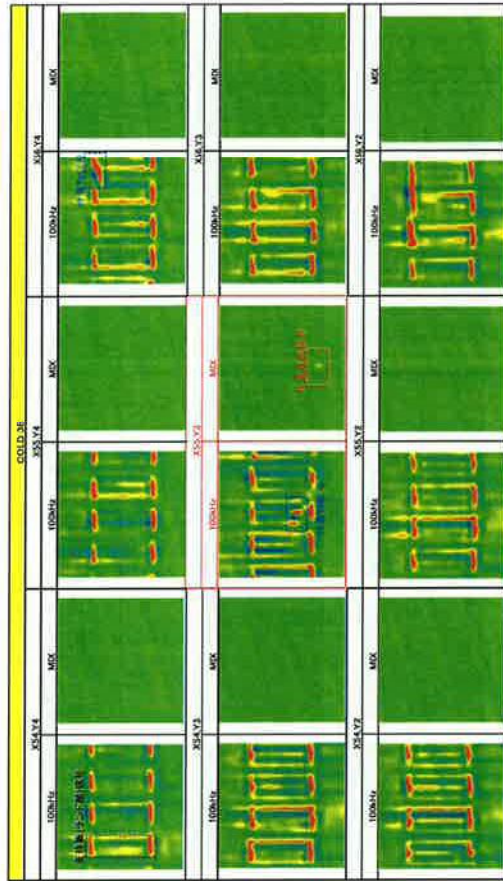


石炭炭形コイルにおける外面深凹箇所と損定される部分

波形上の評価

- ・外面減肉箇所は、X21,Y8にのみ認められる。(MIXで消失しない箇所がある)
- ・その他のアドレスでは、付着物信号および支持板(ランド部)信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。
- ・なお、ECT信号は信号源の質量により異なるため、上記のランド部信号範囲は実範囲より広いと考えられる。

隣接伝熱管の健全性 (C-SG Cold Cold 割第三支持板下面 伝熱管 X55, Y3)



写真③(写真②を側面から確認)

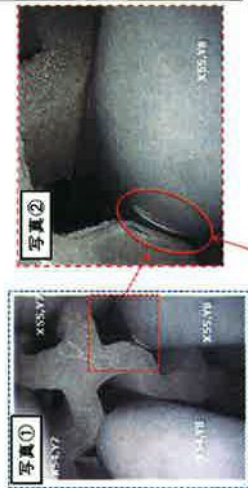
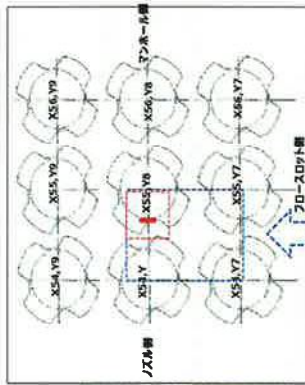
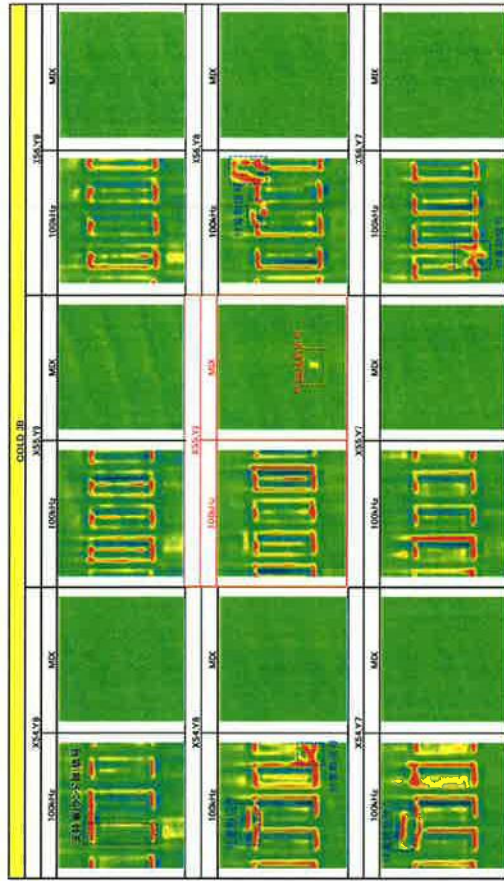


右記波形于一つにおける外面
環向信号と検定される部位

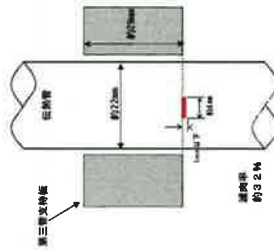
波形上の評価

- ・外面減肉信号は、X55,Y3にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
- ・その他のアドレスでは、付着物信号および支持板(ランド部)信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。
- ・なお、ECT信号は信号源の実長さより長くなるため、上記のランド部信号範囲は実範囲より広いと考えられる。

隣接伝熱管の健全性 (C-SG Cold側第三支持板下面 伝熱管 X55, Y8)



右記減影データにおける外面
深肉信号と判定される箇所



波形上の評価

- ・外面減肉信号は、X55, Y8にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
- ・その他のアドレスでは、付着物信号および支持板(ランド部)信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。
- ・なお、ECT信号は、信号源の実長さより長くなるため、上記のランド部信号範囲は実範囲より広いと考えられる。

SG点検スケジュール

		2020年11月												2020年12月												2021年1月																																				
		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
		ECV解析 (定事後)																																																												
SG器内 目相確認 (カメラ点 検)		C-SG点検直前点検												A-SG器内点検												C-SG器内点検																																				
		▲指示点検有無確認												▲指示点検有無確認												▲指示点検有無確認																																				
SG 器外点検		SGD-9025高圧配管 点検スタート												A-C-3Cブローアップ検査点検												C-SG点検直前点検																																				
		▲指示点検有無確認												▲指示点検有無確認												▲指示点検有無確認																																				
スラットの 確認		A-SGスラットメンテナンス												A-SGスラットメンテナンス												C-SGスラットメンテナンス																																				
		▲指示点検有無確認												▲指示点検有無確認												▲指示点検有無確認																																				
減肉カニスム 調査		▲指示点検有無確認												▲指示点検有無確認												▲指示点検有無確認																																				
		▲指示点検有無確認												▲指示点検有無確認												▲指示点検有無確認																																				

□ : 予定 ■ : 実績

薬品洗浄条件について

1. 薬品洗浄の方法について

(1) 薬品洗浄方法の選定

薬品洗浄については、薬品の種類や濃度、洗浄温度等の条件に応じて、複数の種類があるが、主に下表1の通り、高濃度の薬品を用いる本格化学洗浄と、比較的低濃度の薬品を用いる希薄薬品洗浄に分かれる。

表1 主な薬品洗浄方法（各洗浄条件は基本的なケースを示す）

		本格化学洗浄		希薄薬品洗浄	
		KWU 法 (Simens 法)	EPRI 法	ASCA ^{※1}	DMT
鉄洗浄 条件	薬品濃度	40% EDTA ^{※2}	20% EDTA ^{※2}	1% ^{※3} EDTA ^{※2}	1% シュウ酸
	洗浄温度	160～175℃	93～121℃	80℃	60～88℃
	洗浄時間	4～10hr	30～40hr	24hr	4～24hr
洗浄効果		SG器内スケールをほぼ全量除去	同左	スケールの粗密化（脆弱化）	同左
SG器内構造物に対する腐食影響		影響の可能性あり	同左	影響はごく軽微	同左
国内実績 (現行SG)		実績なし	実績なし	多数実績あり	実績なし

※1 Advance Scale Conditioning Agent

※2 エチレンジアミン四酢酸

※3 国内では3%まで実績あり

このうち、本格化学洗浄については、SG器内スケールのほぼ全量が除去可能であり、洗浄効果は非常に高いものの、高濃度薬品によりSG器内構造物への腐食影響の可能性がある。一方、ASCA洗浄に代表される希薄薬品洗浄は、SG器内構造物への影響はほぼ無視できる程度であり、スケールを粗密化（脆弱化）する効果がある。SG器内構造物への影響の観点から、現在は海外においても後者が主流であり、また、このうち国内ではASCA洗浄が十分な適用実績があることから、今回の対策として、ASCA洗浄法を適用することとする。

(2) ASCA洗浄の方法

a. ASCA洗浄の目的及びメカニズム

従来より国内で適用してきたASCA洗浄は、プラント停止時に酸の一種であるEDTAを加え、比較的低温、アルカリ環境下で緩やかにスケール中の鉄と反応させ、ス

ケールを粗密化し表面積を拡大することで、SG伝熱性能の回復を図るものである。

ASCA洗浄は鉄洗浄、銅洗浄の２ステップからなり、それぞれ内容は次の通りであり、スケールの粗密化（脆弱化）効果をもたらすのは鉄洗浄である。

(a) 鉄洗浄

- ・スケールを一部溶解させ、粗密化させる目的で実施する。
- ・鉄洗浄によるスケール粗密化のメカニズムは次の通り。
 - ① SG器内を高濃度のヒドラジン水（1,000ppm）で浸漬し、還元性雰囲気を作成する。
 - ② スケール中には空隙が存在することから、高濃度ヒドラジン水はスケール内部まで浸入し、還元性環境下でスケール（マグネタイト： Fe_3O_4 ）中の Fe^{3+} は Fe^{2+} として溶出することで、スケールの粗密化が進む。
 - ③ 溶出した Fe^{2+} はEDTAと結合して安定な化合物（キレート錯体）を作る。

(b) 銅洗浄

- ・鉄洗浄によりスケール中に含まれていた銅（金属銅）が分離するが、銅が残留するとSG器内で酸化（酸化銅）し、伝熱管の腐食性雰囲気生成に繋がるおそれがあるため、銅洗浄により除去する。
- ・銅洗浄による銅除去のメカニズムは次の通り。
 - ① 空気注入による酸化性雰囲気中で金属銅（Cu）を Cu^{2+} として溶解する。
 - ② 溶出した Cu^{2+} はEDTAと結合して安定な化合物（キレート錯体）を作る。

以上の洗浄条件をまとめると表2の通りとなる。

表2 ASCA洗浄条件一覧

項目	鉄洗浄		銅洗浄	
		備考		備考
EDTA	1~3% (10,000~30,000ppm)	国内実績値	0.4% (大飯3号機実績)	Cu含有量の2倍
その他薬品	・アンモニア ・ヒドラジン (1,000ppm)	pH調整 還元性雰囲気	・アンモニア ・重炭酸アンモニウム	pH調整 EDTA触媒
温度	80℃	—	40~65℃	—
pH	9	アンモニアで調整	10	アンモニアで調整
洗浄雰囲気	還元性雰囲気	N ₂ バブリング	酸化性雰囲気	エアバブリング
洗浄時間	24hr	反応飽和目安	24hr	反応飽和目安

b. ASCA洗浄の工事概要

SGブローダウン系統等に仮設系統(図1参照)を接続し、表2の条件で薬品注入並びに鉄洗浄及び銅洗浄を行った後は、SGブローダウン系統及び仮設系統を経由して排水し、器内のリンスを行う。

廃液については、廃液処理装置(図2参照)にて濃縮処理及び乾燥固化処理を行い減容し、最終的には、発電所内の焼却設備で焼却処分を行う。

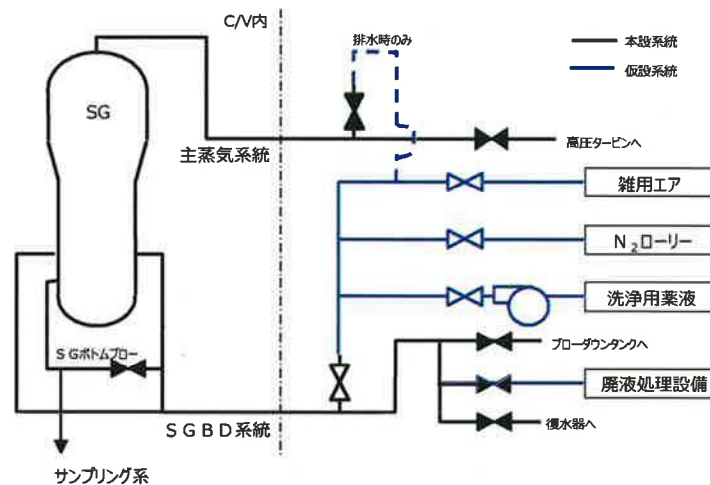


図1 洗浄用仮設系統概略図

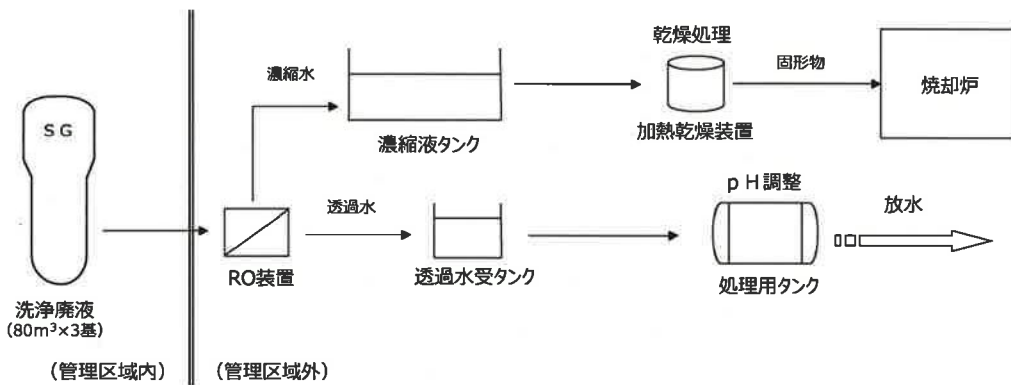


図2 廃液処理装置概略図

2. 洗浄試験について

実機洗浄条件については、実機スケールの薬品(EDTA)浸漬試験により十分なスケール脆弱化効果が確認できた条件を適用することとし、試験の効果は、浸漬試験前後での稠密層(空隙率5%以下)厚さ及び伝熱管との摩耗試験結果の変化により確認した。

(1) 浸漬試験条件の設定

ASCA洗浄は、スケールの粗密化を目的としてスケールの主成分である鉄を溶解する鉄洗浄と、鉄洗浄後に銅酸化物を除去するための銅洗浄からなる。そのため、スケールの脆弱化に関する鉄洗浄について、今回の対策として条件を最適化すべく、洗浄効果の主因子である薬品濃度と洗浄温度について検討を行った。

a. 薬品濃度

図3の通り、薬品濃度に比例して鉄の溶解量は増加することから、スケール脆弱化の観点では濃度が高くなるほどよい。一方、図4の通り、薬品濃度に比例してSG器内構造物の主な構成材料である炭素鋼の腐食量も増加する。

EDTA濃度10%以下では炭素鋼の腐食量は100 μ m未満と十分小さいが、SG器内構造物への腐食影響を最小限に抑える観点で、薬品濃度については国内実績で最大の3%以下とし、浸漬試験においては、2%及び3%を適用する。

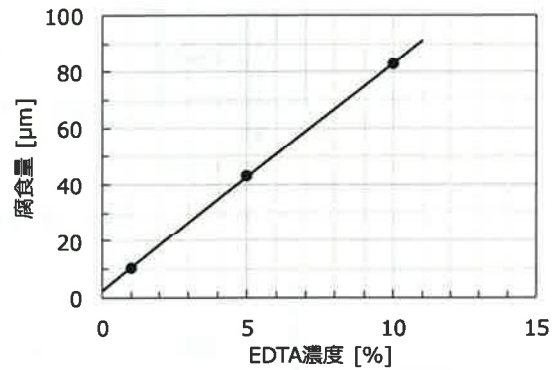
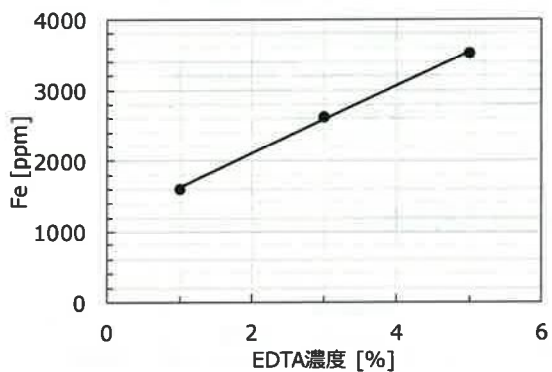


図3 薬品濃度と鉄溶解量の関係 (80℃, 24hr) 図4 薬品濃度と炭素鋼腐食量の関係 (同左)

b. 洗浄温度

温度が高いほどスケール中へのEDTAの浸入及び鉄との反応は進むため、基本となる80℃よりも高温側に設定する。ただし、実機適用時を想定し、洗浄中のSG器内の薬品濃度を均一にすること及び作業安全の観点から、洗浄中のSG器内圧で沸騰しない100℃とする（水の蒸気圧約0.1MPaに対し、洗浄中のSG器内圧は攪拌用窒素の注入・加圧に伴い0.15MPaまで上昇）。

(2) 浸漬試験及び摩耗試験の結果

以上を踏まえ、浸漬試験を実施した結果は表2の通りであり、いずれのケースにおいても、稠密層厚さは有意な減肉を発生させる0.1mmを十分下回るとともに、摩耗試験ではいずれも試験中に欠損したため、十分なスケール脆弱化効果が得られたことが確認された。

表3 浸漬試験及び摩耗試験の結果一覧

ケース	薬品濃度・温度※ ¹	試験 前後	稠密層厚さ※ ² (mm)	摩耗体積比 (伝熱管：スケール)
1	2%・100℃	前	0.14	1：100
		後	0	試験中に欠損
2	同上	前	0.12	1：2
		後	0.04	1：27
3	同上	前	0.14	1：0.6
		後	0.06	試験中に欠損
4	3%・100℃	前	0.14	1：0.6
		後	0.02	試験中に欠損

※1 薬品濃度・温度以外の試験条件はこれまでの国内施工実績と同等とし、浸漬時間は24時間、アンモニア及びヒドラジンによるアルカリ環境・還元性雰囲気での試験を実施

※2 空隙率5%以下

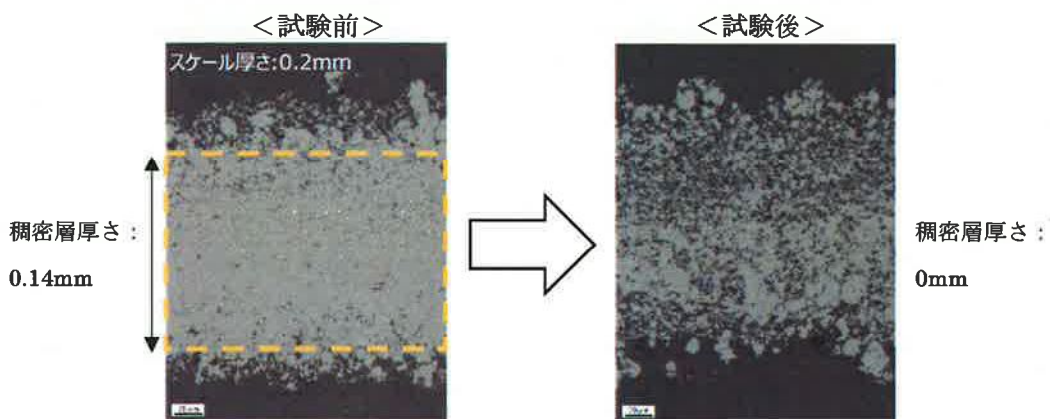


図5 ケース1の断面マイクロ観察による稠密層厚さの比較

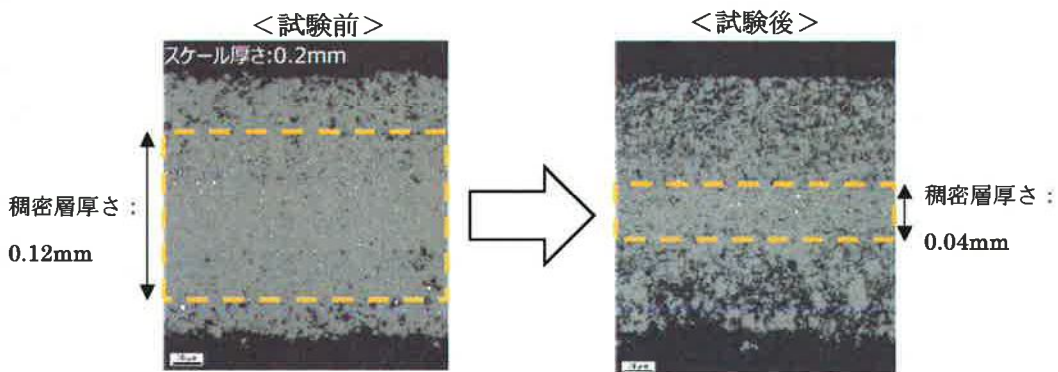


図6 ケース2の断面マイクロ観察による稠密層厚さの比較

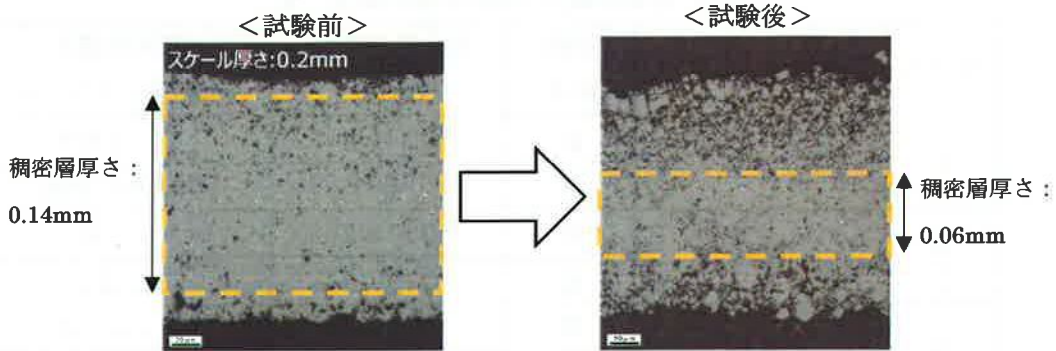


図7 ケース3の断面マイクロ観察による稠密層厚さの比較

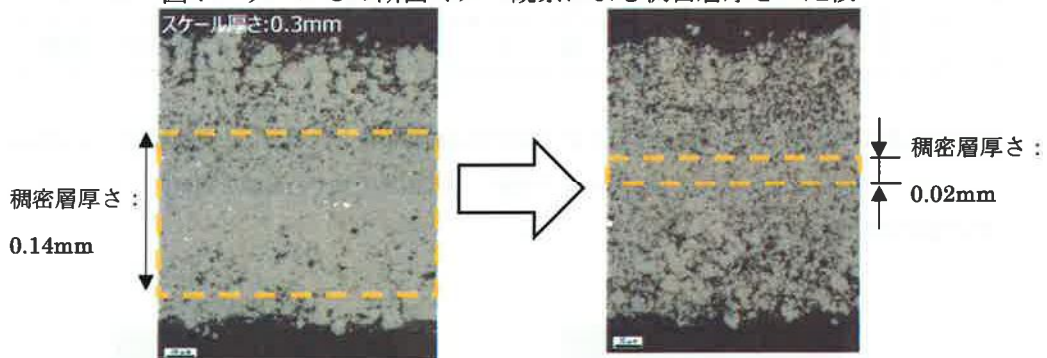


図8 ケース4の断面マイクロ観察による稠密層厚さの比較

3. 実機洗浄条件について

(1) 洗浄条件

以上の結果を踏まえ、実機洗浄条件については、薬品濃度は2%～3%、洗浄温度は100℃とする。なお、その他洗浄に係る諸条件は、これまでの国内施工実績と同様とする。

(2) 洗浄範囲

洗浄範囲については、スケールの生成メカニズムから下部ほど稠密で薄く、上部ほど粗密で厚いことが分かっており、また今回の減肉がいずれも第三管支持板直下で発生しており原因となったスケールは第三管支持板より下方で発生した可能性が高いことを踏まえると、第三管支持板以下が必要な範囲となるが、念のため、第三管支持板よりも上方を含めた管群全体を対象とする。

ただし、今後のプラント運転に更なる万全を期すため、第三管支持板以下については、更に1回追加洗浄を行うこととする。

以上を踏まえ、実施工においては、銅洗浄含め図9の流れで薬品洗浄を行う。

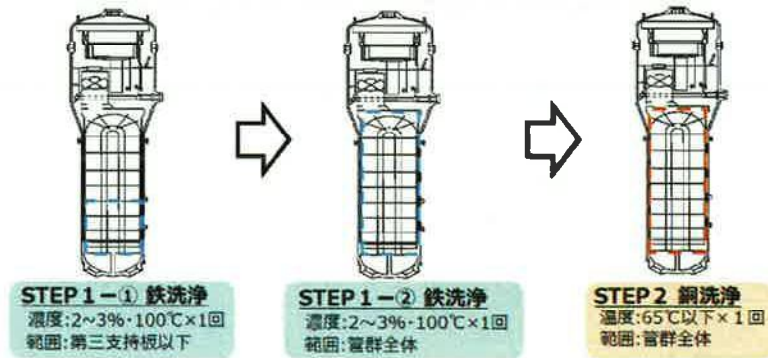


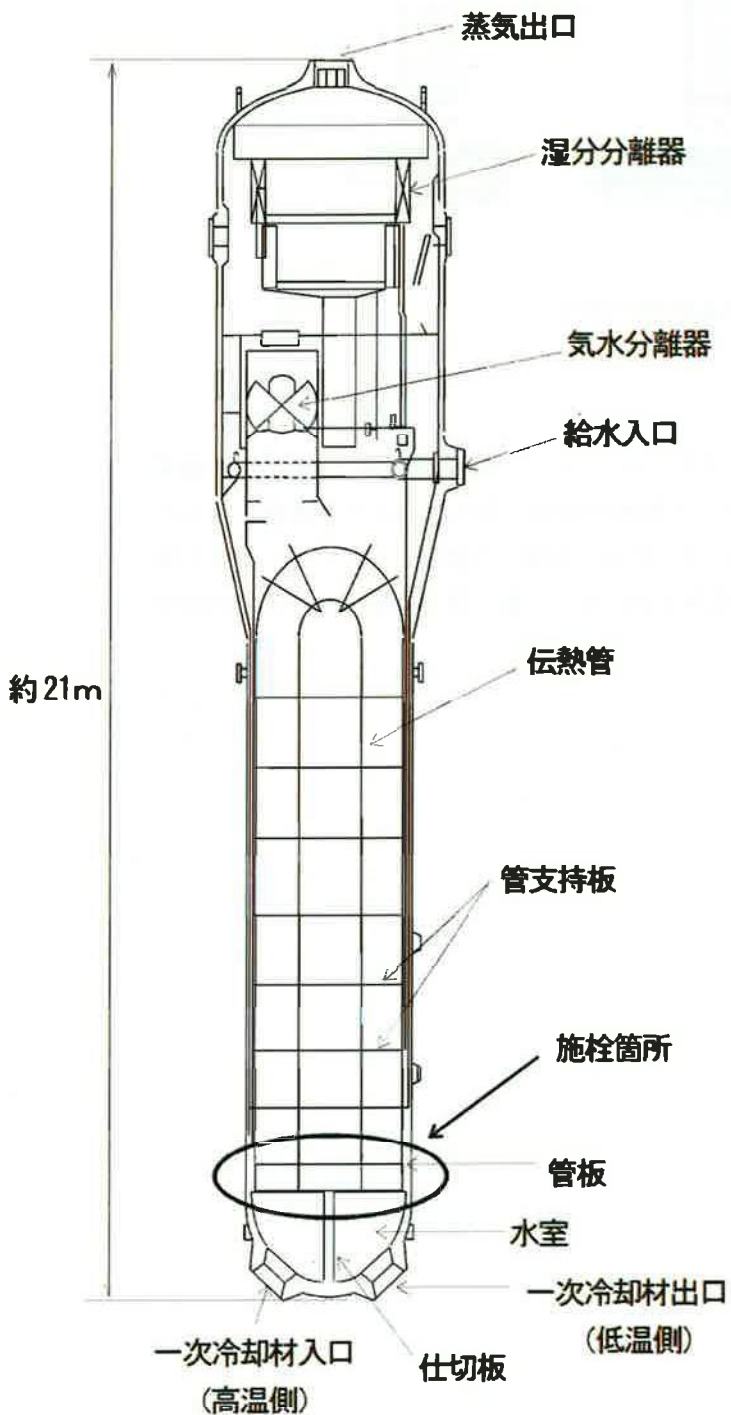
図9 薬品洗浄の流れ

4. まとめ

伝熱管に減肉を与えうる稠密層の厚いスケールについて、薬品濃度2~3%、洗浄温度100℃の洗浄条件により、十分なスケール脆弱化効果が得られることが確認されたため、対策として、同条件での薬品洗浄を行う。なお、実機への適用においては、万全を期す観点から、念のため、伝熱管群全体の洗浄1回に加え、第三管支持板以下では1回追加洗浄を行う。

以上

S G 伝熱管信号指示箇所補修概要図



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

機械式栓の取付要領

高浜4号機 SG伝熱管の補修来歴

	A-蒸気発生器 (3,382本)	B-蒸気発生器 (3,382本)	C-蒸気発生器 (3,382本)	合計 (10,146本)	施 栓 理 由 ()内は、実施した対策
第4回定検 (1990.2～5)	7	9	5	21	振止め金具部の摩耗減肉 (振止め金具の取替実施)
第9回定検 (1996.9～11)	10	0	0	10	管支持板洗浄装置の接触痕を確認
第11回定検 (1999.4～7)	0	0	4	4	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第12回定検 (2000.9～11)	4	1	6	11	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第13回定検 (2002.1～3)	1	0	0	1	高温側管板拡管部の応力腐食割れ (ショットピーニング施工)
第14回定検 (2003.4～6)	1	1	0	2	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第15回定検 (2004.8～10)	112	122	105	339	旧振止め金具部の微小な摩耗減肉 (新方式のECT採用)
第18回定検 (2008.8～12)	0	0	1	1	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第19回定検 (2010.2～5)	0	0	1	1	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第20回定検 (2011.7～2017.5)	0	1	1	2	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第21回定検 (2018.5～9)	2	0	0	2	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第22回定検 (2019.9～2020.2)	1	1	3	5	外面からの摩耗減肉
第23回定検 (2020.10～)	1	0	3	4	外面からの摩耗減肉
累積施栓本数 [施栓率]	139 [4.1%]	135 [4.0%]	129 [3.8%]	403 [4.0%]	

○蒸気発生器1基あたりの伝熱管本数:3,382本

○定検回数下部に記載しているカッコ内の年月は、解列～並列

○安全解析施栓率は10%

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

減肉により施栓した伝熱管が隣接伝熱管へ及ぼす影響

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

1. 減肉の進展性

対策として実施する薬品洗浄により伝熱管に付着している稠密なスケールは脆弱化するため、伝熱管を有意に減肉させることはなく、減肉の進展性はない。

2. 強度

施栓後の伝熱管内は大気圧となるため、運転中および事故時には外圧（2次側から1次側への圧力）が作用する。この状態で減肉伝熱管が耐えられる限界圧力を算出した結果、通常運転時および事故時のSG2次側最大圧力に対して裕度があることを確認したことから、減肉により施栓した伝熱管が外圧で損壊することはない。

(評価内容)

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

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

その結果、圧壊圧力は18.9MPaであり、通常運転時および事故時の最大外圧■■■■MPaに対し、十分な裕度があることを確認した。

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

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

<今回の計算条件>

P_C : 局部減肉を有する伝熱管の圧壊圧力 (MPa)

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

t : 板厚=■■■■mm

R : 平均半径=■■■■mm

a : 減肉深さ=■■■■mm (=■■■■mm×0.36)

$2c$: 減肉幅=5mm

減肉により施栓した伝熱管が隣接伝熱管へ及ぼす影響

表 減肉を有する施栓後の伝熱管の強度評価結果

減肉深さ (%) * ¹	圧壊圧力 Pc (MPa)	事故時を包絡 する作用外圧 (MPa) * ²	裕度
36	18.9	■	■

*¹ 最大減肉深さのC-SG (X21, Y8) で代表

*² 設計基準事故時および重大事故等時を包絡する2次側圧力

3. 耐震性

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

(評価内容)

減肉を有する伝熱管の耐震性について、次のとおり評価した。

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

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

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



図 伝熱管地震応答解析モデル

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

減肉により施栓した伝熱管が隣接伝熱管へ及ぼす影響

表 減肉を有する施栓後の伝熱管の耐震性評価結果

応力分類	発生応力* ⁵ および疲労累積係数	許容値	裕度
一次一般膜応力	115 MPa	334 MPa	2.9
膜応力+曲げ応力	122 MPa	437 MPa	3.5
一次+二次応力	115 MPa	492 MPa	4.2
疲労累積係数	0.003	1	-

*⁵ 最大減肉深さのC-SG (X21, Y8) で代表

4. 減肉した伝熱管の破断を想定した場合の影響

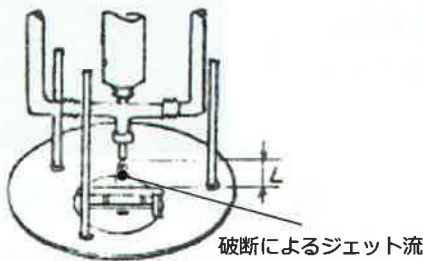
1. ～3. で述べた通り、減肉により施栓した伝熱管については、減肉の進展性、強度および耐震性の観点から破損しないことを確認しており、他の健全伝熱管へ影響を及ぼすことはないが、ここでは仮に減肉した施栓管が破断した場合の影響を検討する。

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

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

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

実験：破断時のジェット反力を取得



解析：破断管の隣接管への衝突による発生応力を評価

