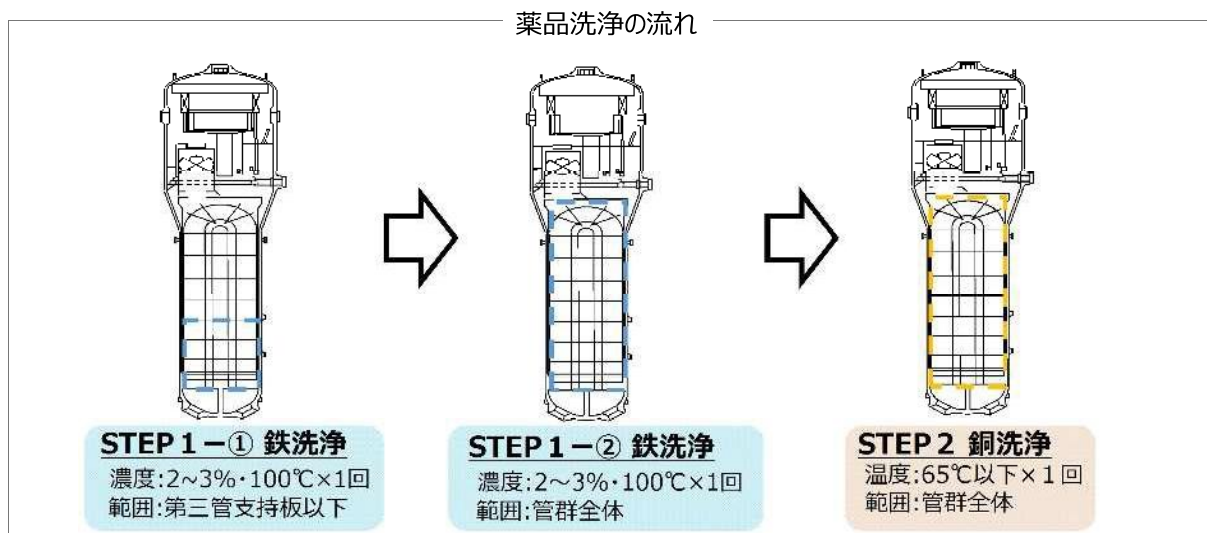


前回の定期検査における薬品洗浄の実施結果（1／2）

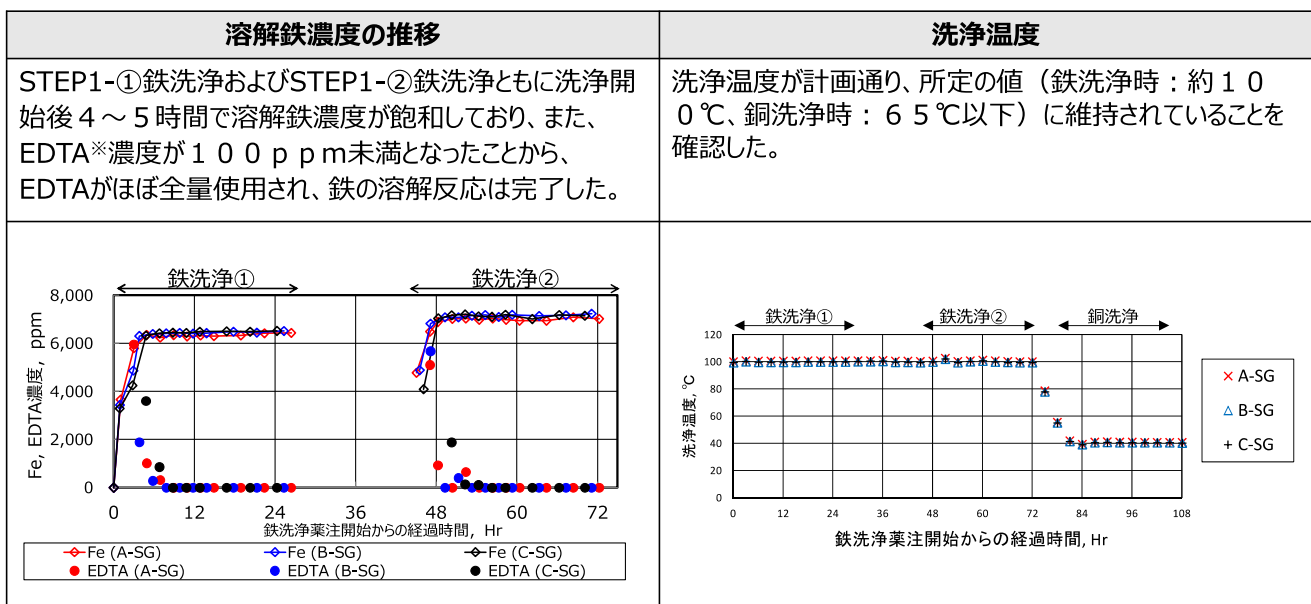
＜前回の定期検査における薬品洗浄の実施方法＞

- 洗浄条件については、洗浄試験の結果から、薬品濃度は2%～3%、洗浄温度は100℃とした。
- 洗浄範囲については、管群全体を対象とした。なお、今後のプラント運転に更なる万全を期するため、スケールの生成メカニズムから、スケールは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いることから、第三管支持板以下については、更に1回追加洗浄を行った。
- その他の洗浄に係る諸条件は、これまでの国内施工実績と同様とした。



＜薬品洗浄の実施結果＞

- 以下の水質挙動から、鉄洗浄結果は良好であり、鉄溶解効果は十分得られていると考えられる。
- 洗浄中のSG器内水の鉄濃度と洗浄水位から算出した鉄除去量は、約670kg（STEP1-①鉄洗浄で約190kg、STEP1-②鉄洗浄で約480kg）であることを確認した。



※：エチレンジアミン四酢酸

前回の定期検査における薬品洗浄の実施結果（2／2）

<主蒸気圧力の向上>

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

主蒸気圧力[MPa abs]



<蒸気発生器伝熱抵抗係数の低下>

○蒸気発生器伝熱抵抗係数について、第25運転サイクル初期の評価を実施した。

評価の結果、従来はサイクルを重ねる度に伝熱管表面のスケールが成長し、蒸気発生器伝熱抵抗係数は徐々に上昇する傾向であったが、今サイクルは、前サイクルに比べ低下を確認した。

運転サイクル	蒸気発生器伝熱抵抗係数 ($10^{-4} \text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ \text{F} / \text{Btu}$) 運転サイクル初期
25サイクル (今回評価)	1.33
24サイクル	1.81
23サイクル	1.77

1. 前回の薬品洗浄条件設定の考え方

- 稠密スケールの一部を溶解して稠密層厚さを低減させること目的として、S G器内構造物への影響が少なく、スケール脆弱化効果が期待できる洗浄条件を設定した。

	設定条件	根拠
EDTA※濃度	～ 3 %	<ul style="list-style-type: none"> 鉄の溶解量はEDTA濃度に依存するため、高いスケール脆弱化効果を得るためには、洗浄液中のEDTA濃度は高いほうが望ましい。 → S G器内構造物への影響を考慮して、国内実機適用実績の最大濃度3 %を上限に設定
温度	100 °C	<ul style="list-style-type: none"> 温度が高いほど鉄との反応が進行するため 80 °Cよりも高温側が望ましい。 → 洗浄時のS G器内が均一になること、および、作業安全の観点から沸騰しない温度として、100°Cを上限に設定
時間	24 時間	<ul style="list-style-type: none"> 薬品洗浄実績から、24時間で鉄溶解完了している。 → 洗浄時間は24時間で設定

- ラボ試験では、スケールのみでS G器内スラッジを模擬しており、実機に存在する反応面積が大きい粉末状のスラッジを実際に共存させた試験は実施していなかった



図1 スケール回収画像 (C-SG 第一管支持板)
(高浜発電所 4号機前回 (第23回) 定期検査の薬品洗浄前)

※ エチレンジアミン四酢酸

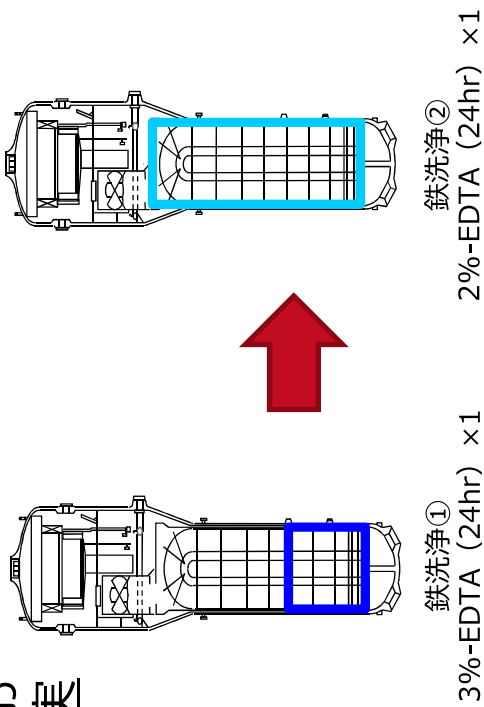


図2 実機での前回薬品洗浄のステップ

2. SG器内スラッジの影響確認試験

- SG器内スラッジ量は、SG器内全体の鉄量に比べ、大きな割合を占めるものではないが、表面積が大きいスラッジが共存することにより、スケールの脆弱化効果を低減する可能性が考えられる。
- そこで、スラッジ共存環境下における洗浄効果に対する影響を確認するため、前回の薬品洗浄条件 (EDTA3%+2%) でスラッジを共存させた試験を実施した。

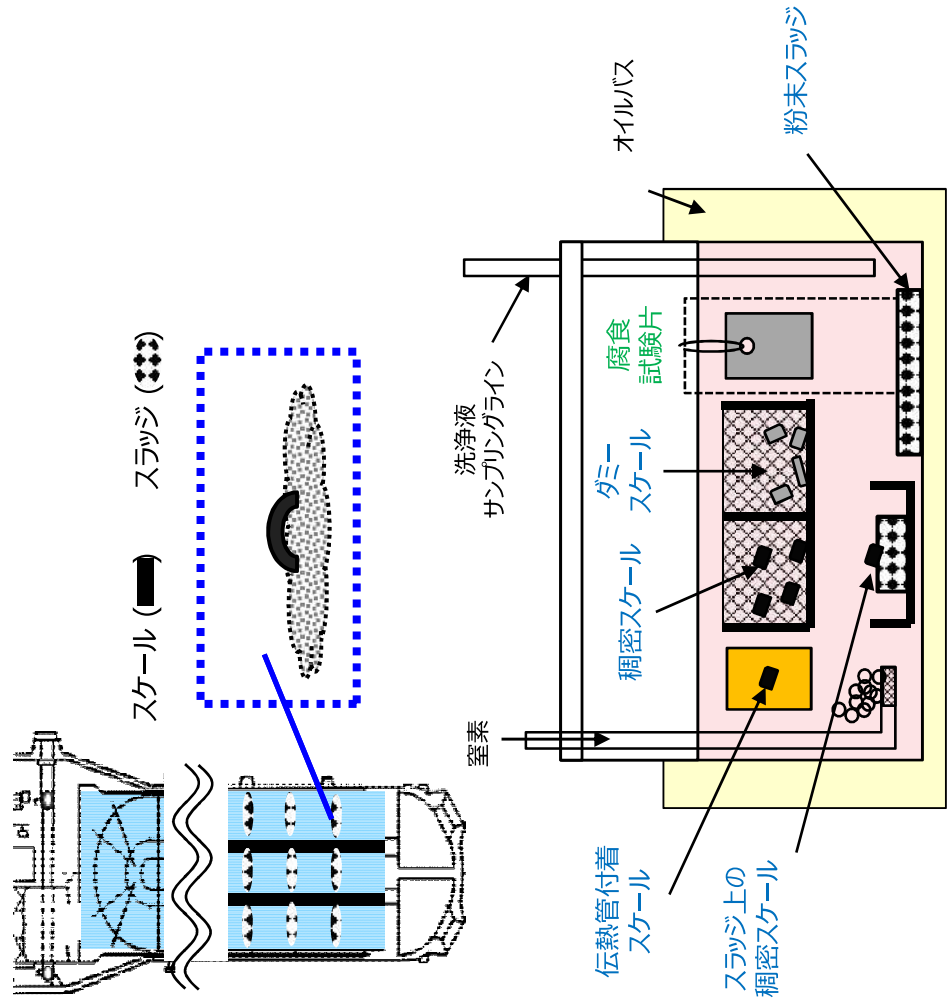
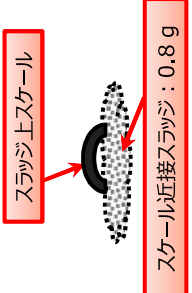
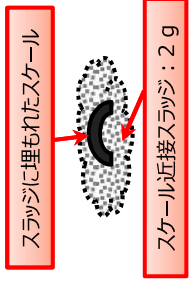
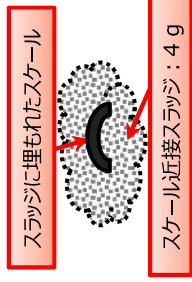


図3 試験装置の概略図

項目	目的
伝熱管付着スケール	伝熱管に付着したスケールを模擬した、スケールの片側からの洗浄効果を確認するための試験片
稠密スケール	試験中の固体を管理し、洗浄前後のスケール減量や稠密層の変化を評価するための試験片
ダミースケール	試験容器内の洗浄液/スラッジ量を調整するためのスケール (洗浄前後の固体を区別しない)
スラッジ上の稠密スケール	スラッジ上に落下したスケールに対する洗浄効果を確認するための試験片
粉末スラッジ	試験容器内の洗浄液/スラッジ量を調整するためのスラッジ
腐食試験片	実機の構成材料の腐食量を評価する試験片。接液面積比は実機を模擬。

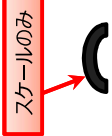
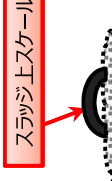
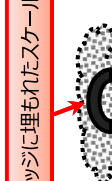

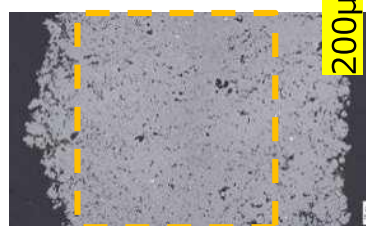
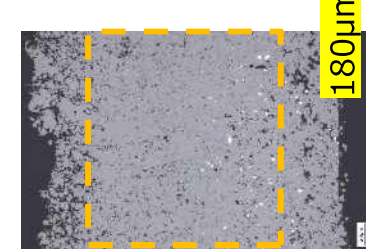
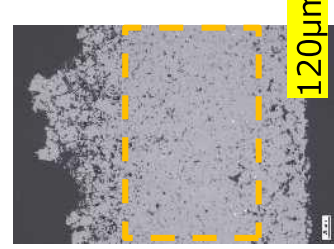


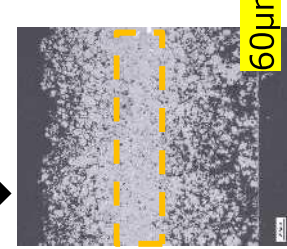
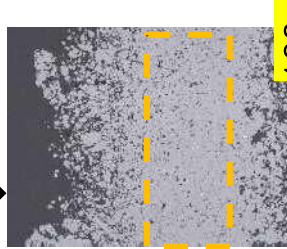

3. S G 器内スラッジの影響確認試験 — 試験条件 —

- スラッジ上スケールに対する脆弱化効果の低下傾向は確認 (試験①)
- 実機環境は、共存するスラッジ量やスケール上へのスラッジ堆積状況が多種多様であり、洗浄効果が異なることが想定されるため、スラッジ量およびスラッジ環境を変更した影響確認試験を実施 (試験②, ③)

	試験①	試験②	試験③
EDTA濃度	3 % → 2 %	3 % → 2 %	3 % → 2 %
温度	100℃	100℃	100℃
時間	24時間 × 2回	24時間 × 2回	24時間 × 2回
スケール・スラッジ量 / 液量	11g / 400g-液 (S G 器内想定鉄量の1.5倍)	14g/400g-液 (試験①にスケール量を合わせ、スラ ジを増量)	11g / 400g-液 (試験①に鉄量を合わせ、スラッジを増 量)
スケール量： スラッジ量	9g : 2g (スラッジ割合=18 %)	9g : 5g (スラッジ割合=36 %)	7g : 4g (スラッジ割合=36 %)
想定鉄量内訳	<ul style="list-style-type: none"> ・スケール 9g ・稠密(個体) 1枚 ・スラッジ 2g (粉末スラッジ:1.2g+スケール近接スラッジ:0.8g) ・スラッジ上スケール 1枚 ・伝熱管スケール 1枚	<ul style="list-style-type: none"> ・スケール 9g ・稠密(個体) 1枚 ・スラッジ 5g (粉末スラッジ:3g+スケール近接スラッジ:2g) ・スラッジ上スケール 1枚 ・伝熱管スケール 1枚	<ul style="list-style-type: none"> ・スケール 7g ・スラッジ 4g (粉末スラッジ:0g+スケール近接スラッジ:4g) ・スラッジ上スケール 1枚
試験環境			

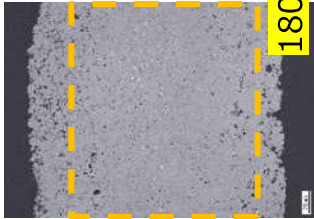
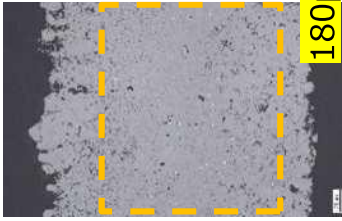
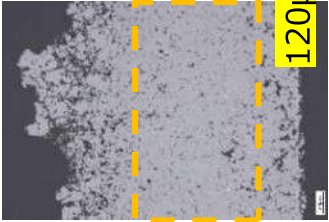
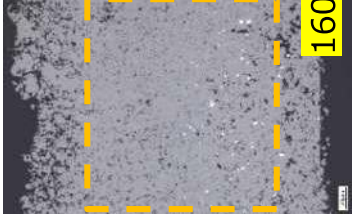
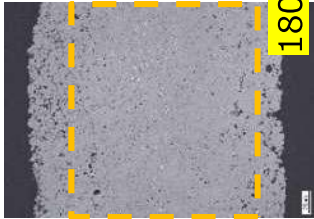
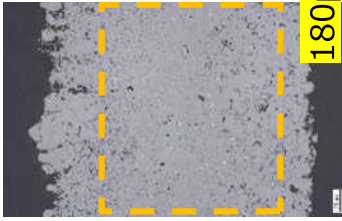
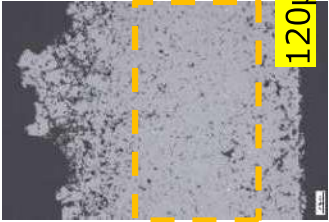
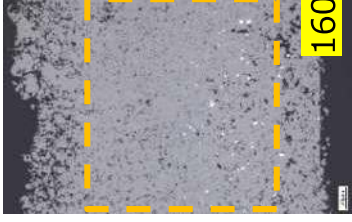
4. S G器内スラッジの影響確認試験 — 試験結果 —


- 試験の結果、スラッジとスケールが接していなければ十分な脆弱化効果があるが、スラッジと接していると脆弱化効果が低減することを確認した。
- また、スケール上にスラッジが堆積しているような状況では、さらに効果が低減する傾向を確認した。

	過去試験結果 (T4#23)	試験①	試験②	試験③
スラッジの添加状況	スケールのみ 	スラッジ上スケール 	スラッジに埋もれたスケール 	スラッジに埋もれたスケール 
	スケール近接スラッジ : 0.8 g	スケール近接スラッジ : 2 g	スケール近接スラッジ : 4 g	
洗浄前	 200µm	 180µm	 120µm	 120µm
洗浄後	 0µm	 60µm	 100µm	 80µm
	200µm減	120µm減	20µm減	40µm減

【参考】SG器内スラッジの影響確認試験 — 試験結果 —

- 試験①、②において設置した、「稠密スケール（スラッジ非接触）」および「伝熱管付着スケール」について、スケールが脆弱化していることを確認した。

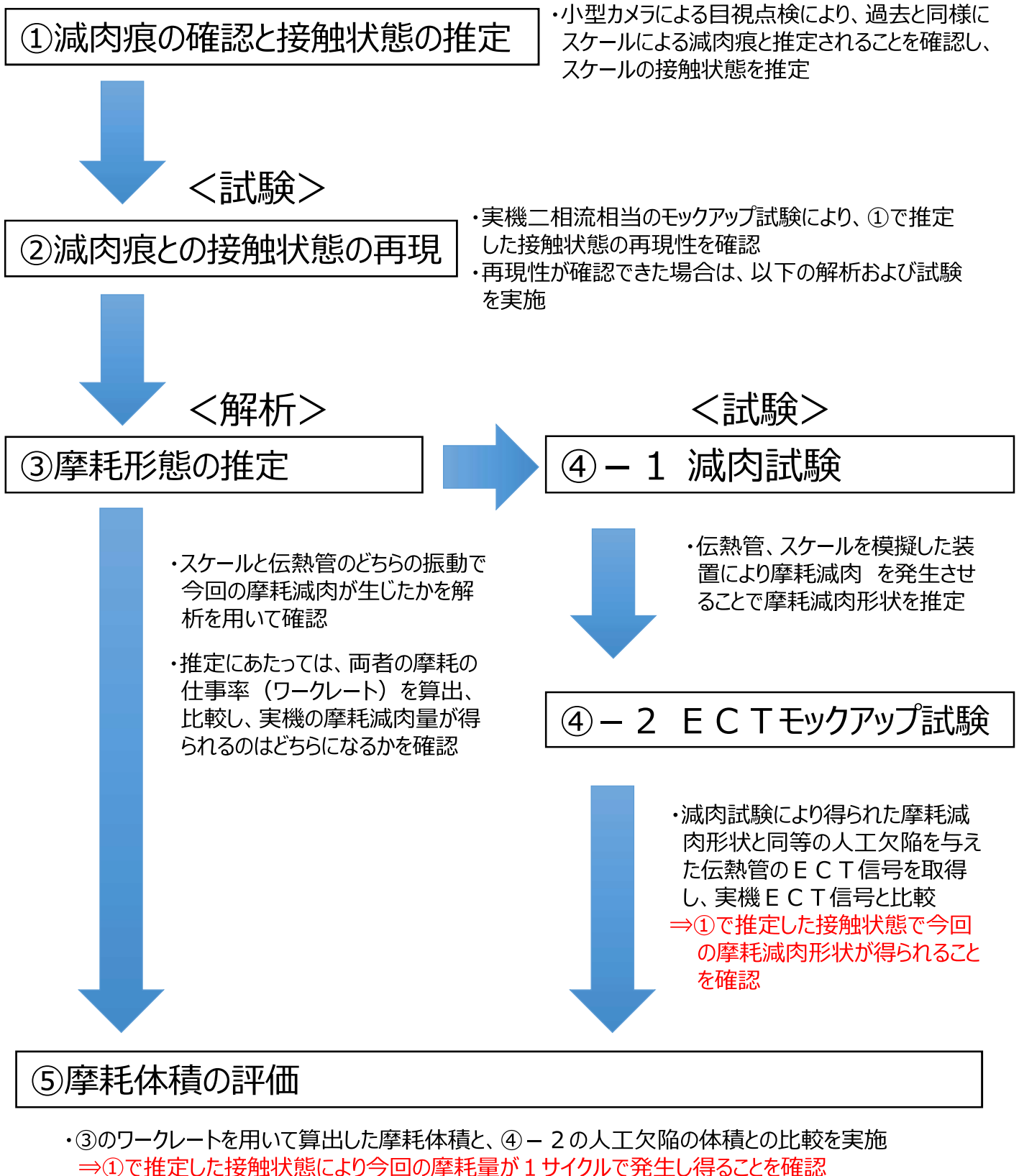
	試験① 稠密スケール (スラッジ非接触)	試験① 伝熱管付着スケール	試験② 稠密スケール (スラッジ非接触)	試験② 伝熱管付着スケール
洗浄前	 180µm	 180µm	 120µm	 160µm
洗浄後	 0µm	 0µm	 0µm	 80µm
	180µm減	180µm減	120µm減	80µm減



稠密層厚さ

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、回収したスケールが伝熱管に有意な減肉を与えうるメカニズムを調査した。
- 各試験および解析については、実機条件を模擬して行った。



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、押付力と摺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]

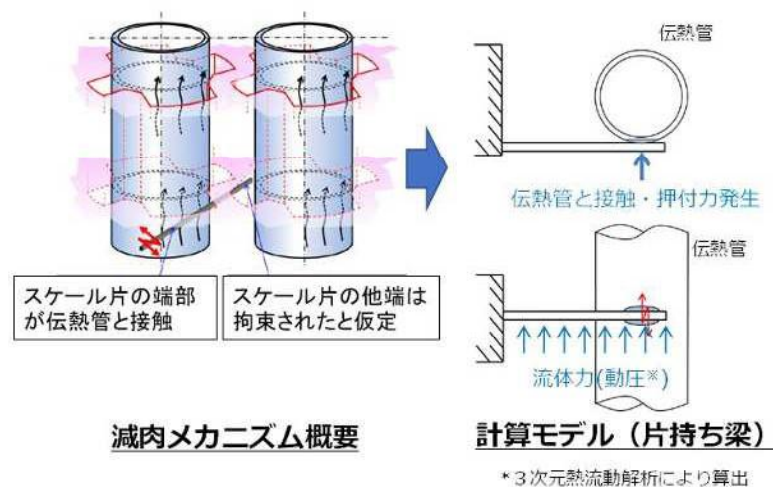


図1 スケールの接触状態の計算モデル化概要(スケール振動ケース)

この結果、今回、外面減肉が見つかった伝熱管付近において、高浜発電所４号機（第２３回定期検査）にて伝熱管を減肉させたと推定されたスケールのうち最大のものをスケール形状として想定した場合、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

評価伝熱管	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-S G X9Y22	23×11×0.3 ^{*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
A-S G X51Y8	23×11×0.3 ^{*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
B-S G X35Y32	23×11×0.3 ^{*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

*³ 高浜発電所４号機（第２３回定期検査）にて伝熱管を減肉させたと推定されたスケールのうち最大のもの

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*⁴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*⁵の隙間の範囲に制限される（図２参照）。

*⁴ 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

*⁵ 管支持板に加工されている四ツ葉型管穴のうち凸面部

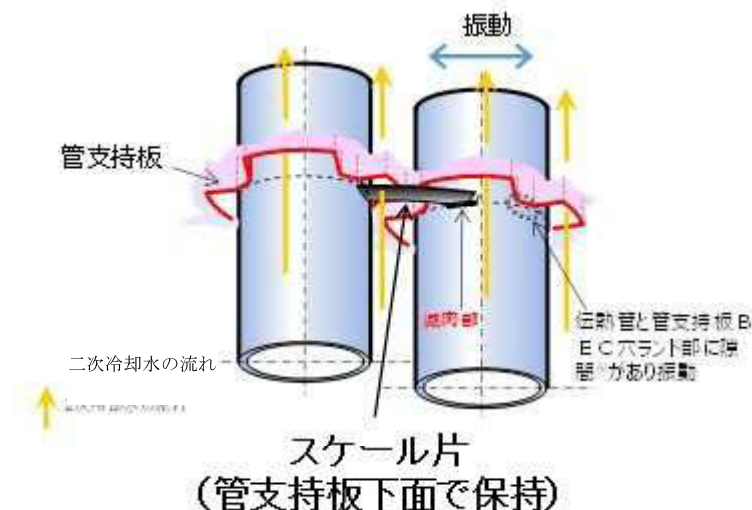


図２ スケール片の接触状態の想定（伝熱管振動ケース）

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）。

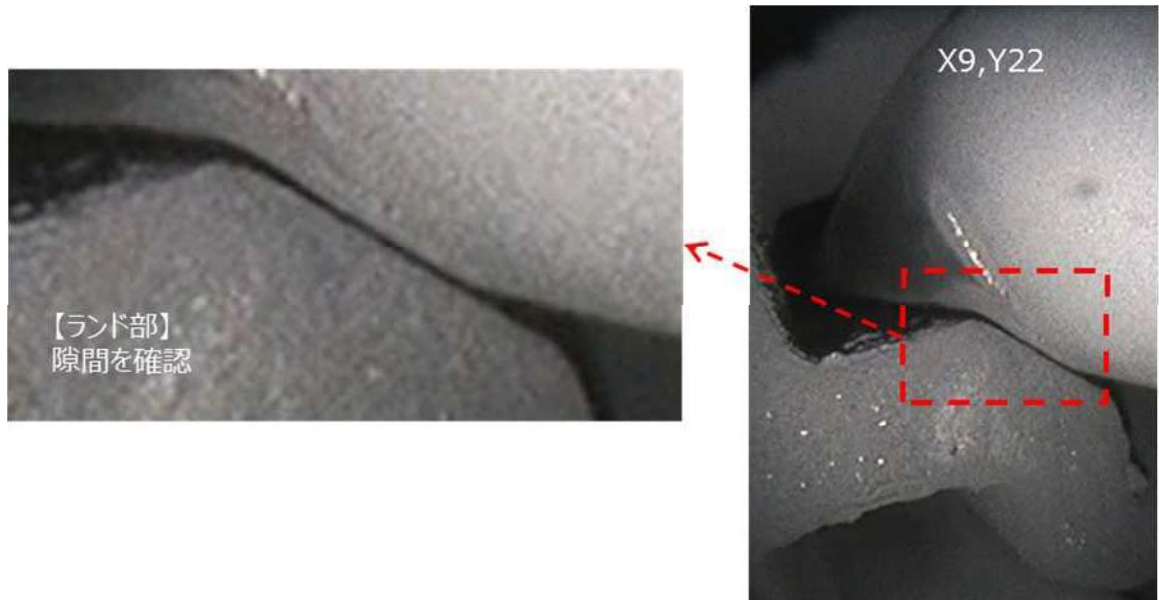


図３－１ 伝熱管とランド部の隙間確認結果（Ａ－ＳＧ：Ｘ９，Ｙ２２）

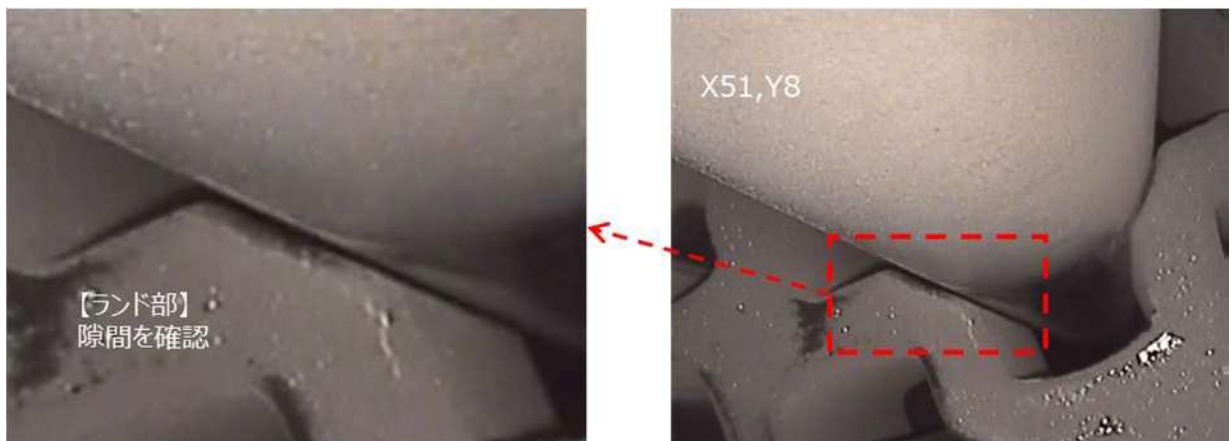


図３－２ 伝熱管とランド部の隙間確認結果（Ａ－ＳＧ：Ｘ５１，Ｙ８）

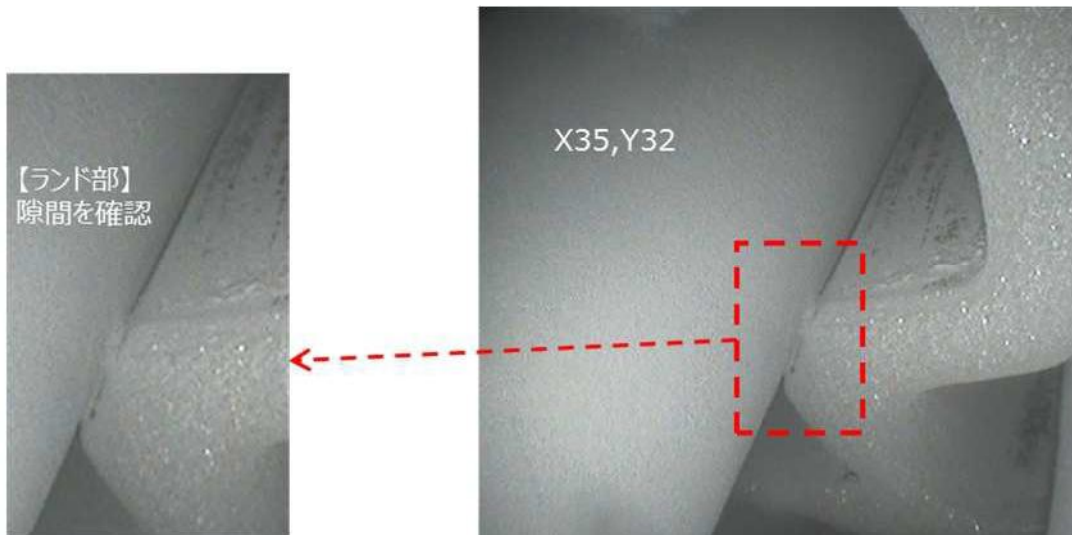


図 3-3 伝熱管とランド部の隙間確認結果（B-SG：X35，Y32）

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3本の伝熱管についてワークレートの試算*6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 X9, Y22	約 1	約 3	○
A-SG X51, Y8		約 3	
B-SG X35, Y32		約 2	

*6 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

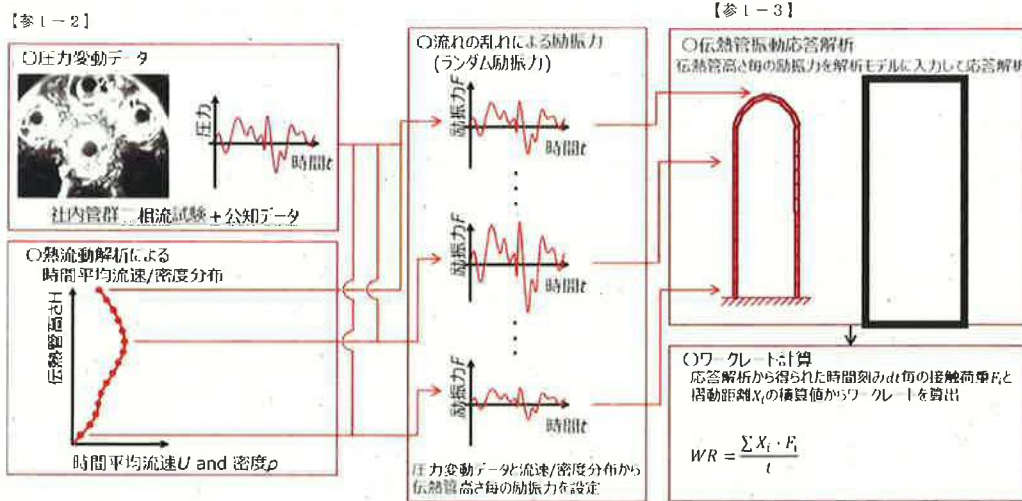
以上の通り、スケール片振動では有意なワークレートは発生しないが、伝熱管振動では有意なワークレートが発生することを確認したため、今回の減肉事象は伝熱管振動によるものと推定した。

<参考>

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 (X9, Y22) 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。
- ・伝熱管全体をモデル化し、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。



参1-2. 熱流動解析 (図5参照)

- ・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。

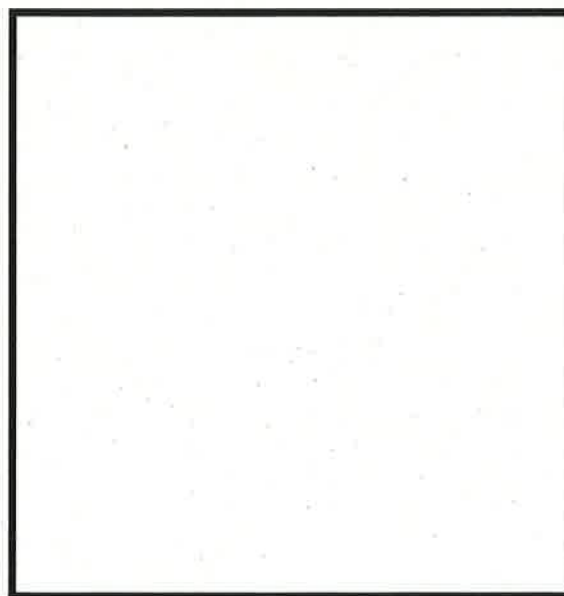


図5 熱流動解析結果 (A-SG : X9, Y22)

: 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。

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。

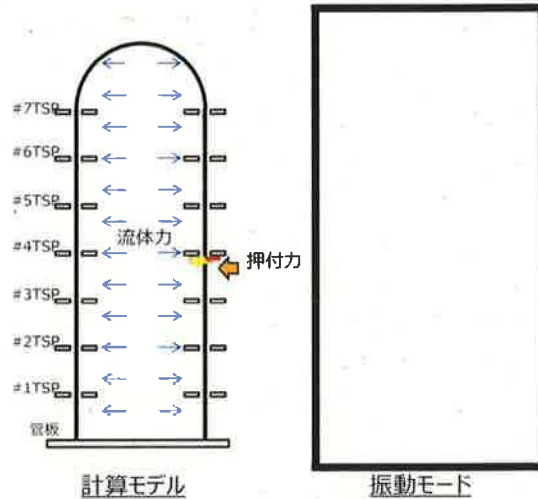


図6 振動応答解析結果 (A-SG : X9, Y22)

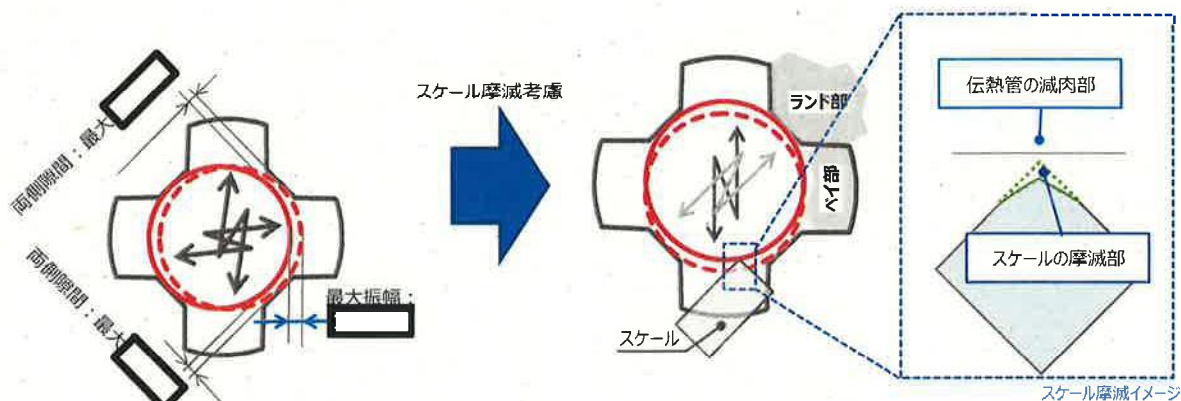
スケールと伝熱管の接触時における摩耗形態の推定について (スケールによる最大減肉深さに係る考察)

＜スケールと異物の減肉メカニズムの考察＞

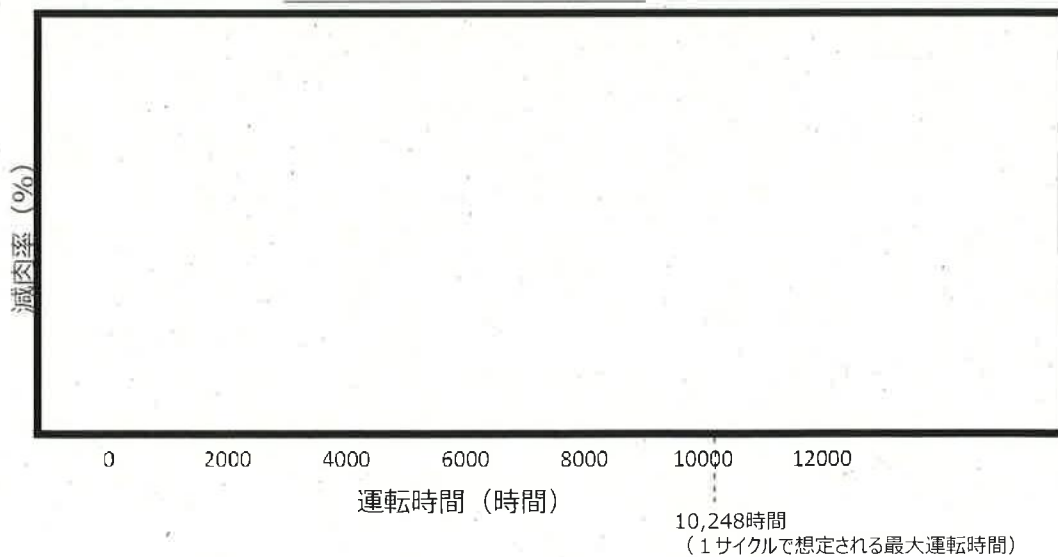
- スケールが伝熱管に摩耗減肉を与えるメカニズムは、次の通りであり、異物の場合と同じである。
 - ・流体力で振動する伝熱管が、上昇流で管支持板下面に押付けられたスケールに接触すると、接触部で伝熱管は撓動
 - ・このとき、スケールが伝熱管との撓動で破損しなければ、撓動は継続し、伝熱管には摩耗減肉が発生
 - ・比摩耗量についても、スケールと異物（SUS304で $6.6 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ ）は同等
- ただし、同じ比摩耗量、同じワークレートで撓動し続けたとしても、最終的な摩耗減肉量は異物の場合より小さい。
 - ・スケールは微細な粒子で構成されるため、伝熱管との撓動で、自身が摩滅（構成粒子が脱落、又は微細な折損）
 - ・伝熱管と接触しなくなるまで自身の摩滅が進むと、その時点で伝熱管の摩耗減肉の進展は停止
 - ・異物の場合は、スケールのような摩滅現象は顕著でないため、異物の方が最終的な摩耗減肉量は大きくなる

＜最大減肉深さの考察＞

- 減肉メカニズムは異物と同じであり、最大減肉深さの考え方（伝熱管最大振幅に制限）も同じである。
- 異物の場合の最大減肉深さは ※となるが、スケールの場合は自身も摩滅するため、最大減肉深さは異物の場合よりも小さくなり、貫通には至らない。※公差内の最大ケース



これまでの外面減肉率の整理



: 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。

減肉試験による実機摩耗減肉形状の確認について

スケールの接触状態を推定した上で、減肉試験を行い、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．スケールの接触状態の推定

伝熱管の減肉位置や減肉形状から、スケールの接触状態を図１－１～３のように推定した。

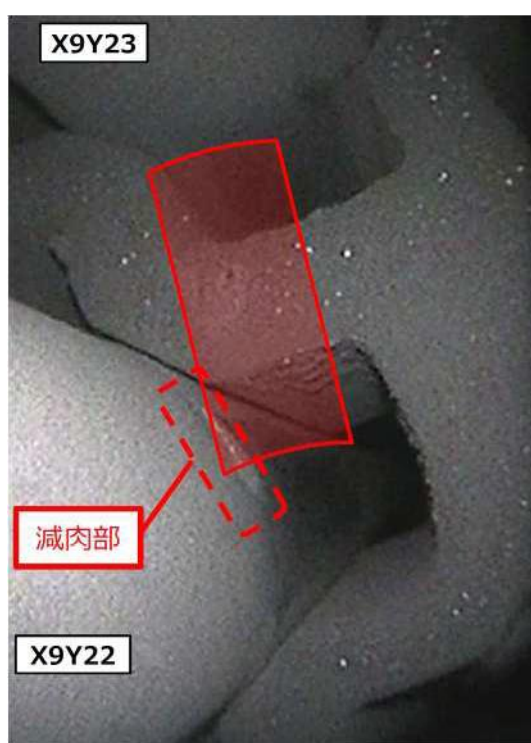


図１－１ スケールの接触状態の推定（A－S G：X 9， Y 2 2）

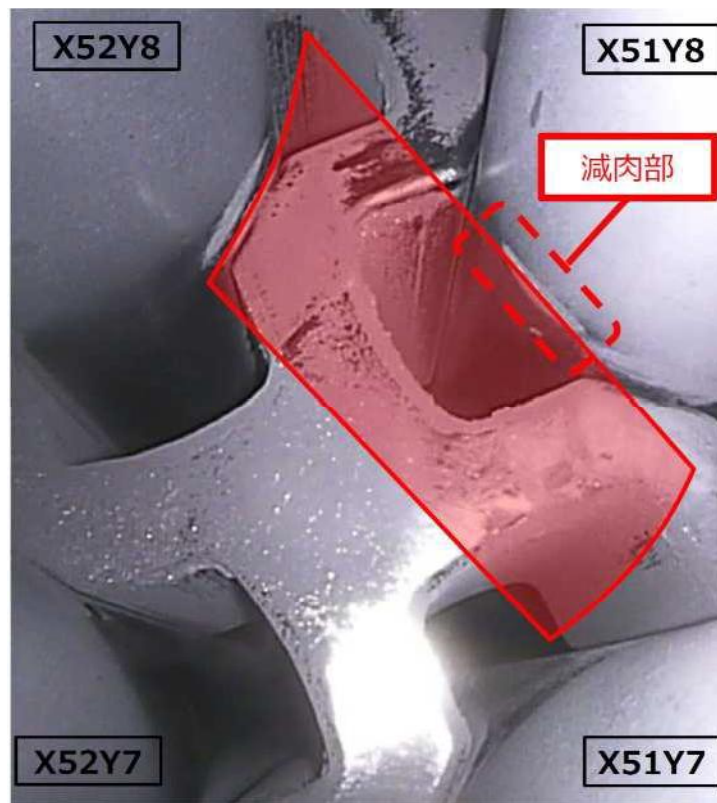


図 1 - 2 スケールの接触状態の推定（A-SG：X51，Y8）

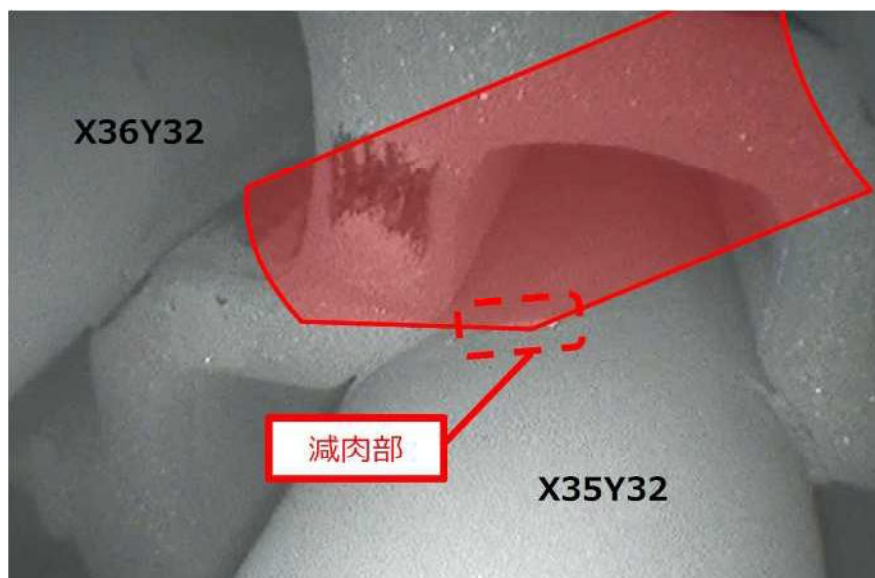


図 1 - 3 スケールの接触状態の推定（B-SG：X35，Y32）

２．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を変化させ、摩耗減肉形状を模擬した。
- ・試験条件一覧を表２－１、試験装置概要を図２－１に示す。

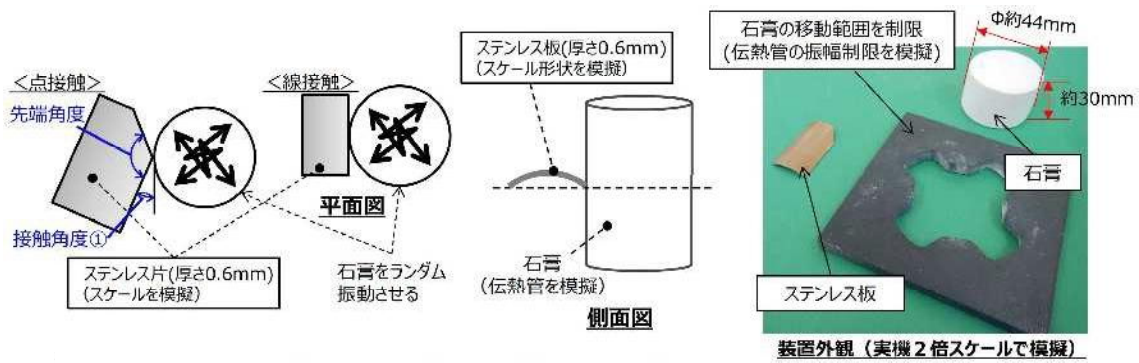


図２－１ 試験装置概要図

表 2－1 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	ステンレス片先端角度	振動振幅 (2倍スケール)
A-SG : X 9, Y 2 2	伝熱管振動	点接触	10°	90°	
A-SG : X 5 1, Y 8		線接触	0°	180°	
B-SG : X 3 5, Y 3 2		点接触	10°	150°	

3. 減肉試験の結果

減肉試験によって得られた、A-SG (X 9, Y 2 2およびX 5 1, Y 8) およびB-SG (X 3 5, Y 3 2) の各減肉形状をそれぞれ図 3-1、図 3-2 および図 3-3 に示す。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 3-1 に示す。

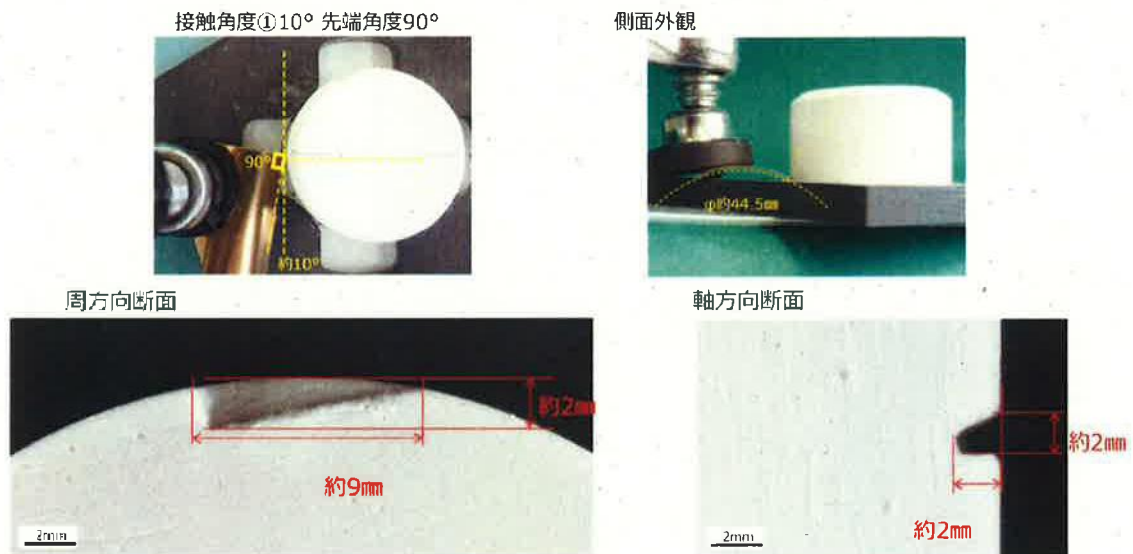



図 3-1 減肉試験で取得した減肉形状 (A-SG (X 9, Y 2 2))

 : 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。

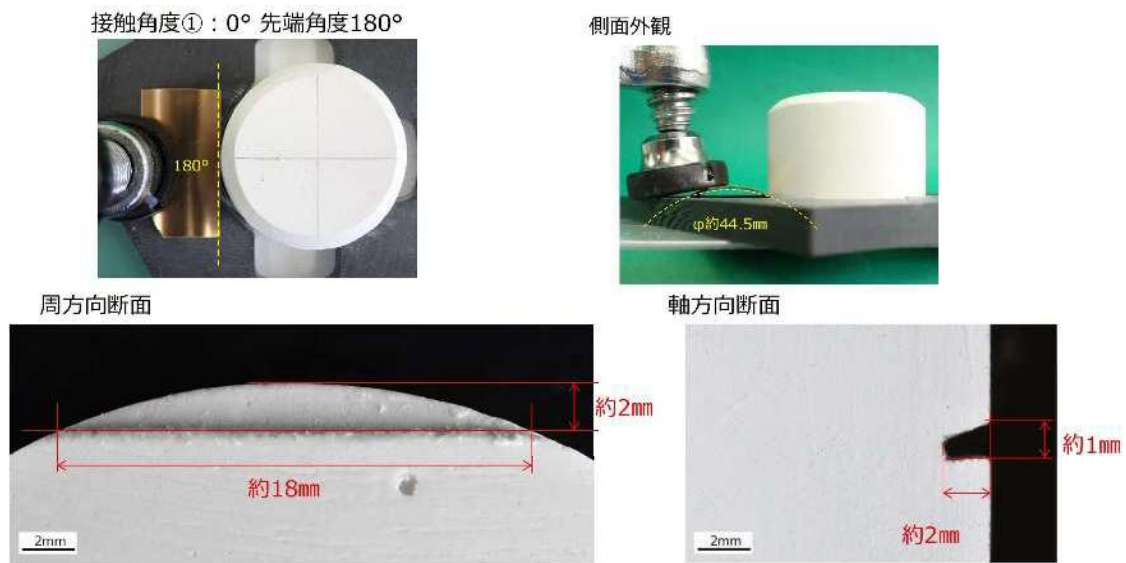


図3-2 減肉試験で取得した減肉形状 (A-SG : X 5 1, Y 8)

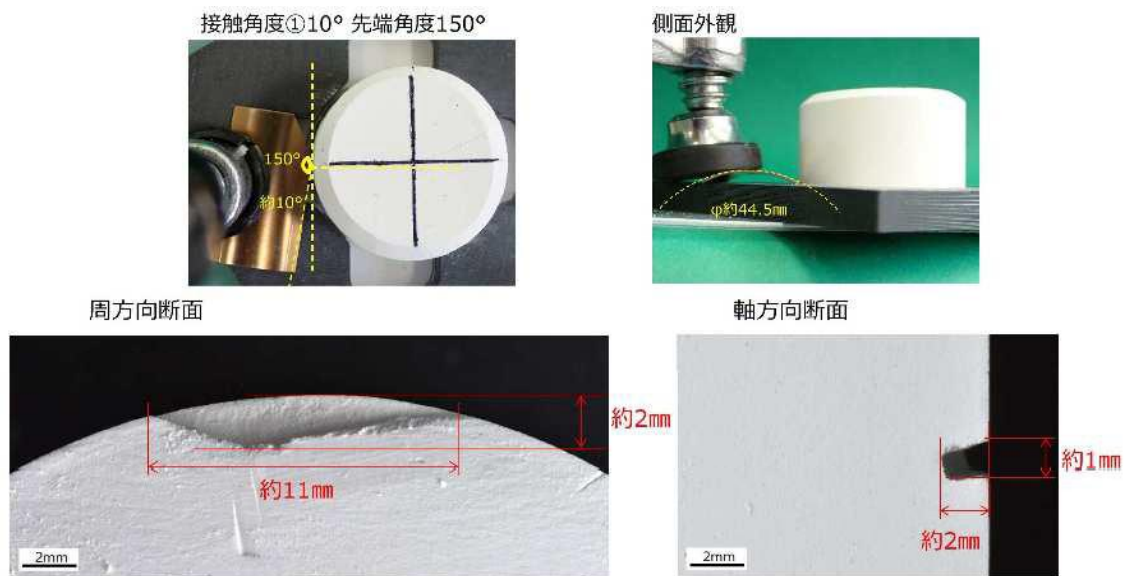


図3-3 減肉試験で取得した減肉形状 (B-SG : X 3 5, Y 3 2)

表 3－1 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：X 9，Y 2 2	減肉試験結果	約 2mm	約 2mm	約 9mm	実機 E C T 信号 の深さを基準に 補正
	実機相当寸法	約 0.7mm	約 0.6mm	約 3mm	
A－SG：X 5 1，Y 8	減肉試験結果	約 2mm	約 1mm	約 18mm	
	実機相当寸法	約 0.2mm	約 0.4mm	約 5mm	
B－SG：X 3 5，Y 3 2	減肉試験結果	約 2mm	約 1mm	約 11mm	
	実機相当寸法	約 0.5mm	約 0.5mm	約 3mm	

なお、以上の通り再現した実機相当寸法については、E C Tモックアップ試験により実機 E C T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	軸方向長さ	周方向長さ	
A-SG : X 9, Y 2 2	約 0.7mm	約 0.6mm	約 3mm	減肉試験結果（実機相当寸法）より設定
A-SG : X 5 1, Y 8	約 0.2mm	約 0.5mm	約 3mm	
B-SG : X 3 5, Y 3 2	約 0.2mm	約 0.4mm	約 5mm	

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1～3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かと推定された。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。

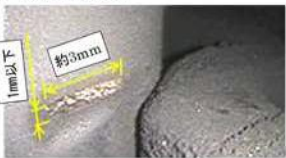
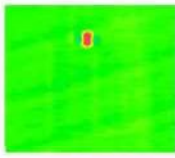
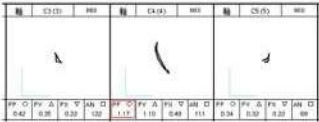
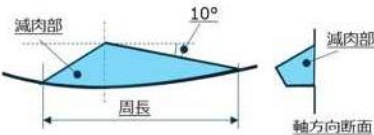
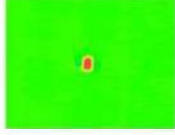

	MIX 色調図	MIX リサージュ	実機信号 整合性
実機 A X9Y22 周長(目視) : 約3mm  ECT減肉指示深さ: 57%	振幅 : 1.17 V 位相 : 111° 		—
モックアップ[60%減肉] 周長 : 約3mm 軸長 : 約0.6mm 	振幅 : 1.08 V 位相 : 111° 		○

図1 ECTモックアップ試験結果（A-SG : X 9, Y 2 2）

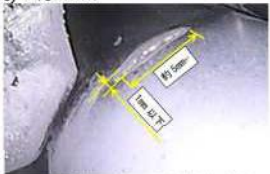

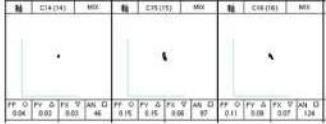
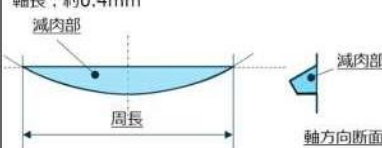

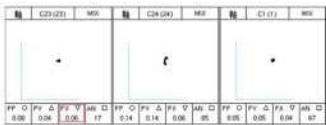
	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性
実機 A X51Y8 周長(目視)：約5mm  ECT減肉指示深さ：判定基準未滿	振幅：0.15 V 位相：97° 		—
モックアップ [18%減肉] 周長：約5mm 軸長：約0.4mm 	振幅：0.14 V 位相：85° 		○

図2 ECTモックアップ試験結果（A－SG：X51，Y8）


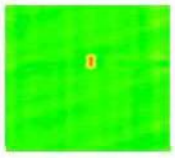
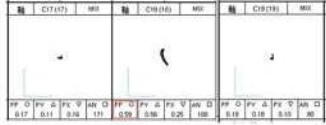
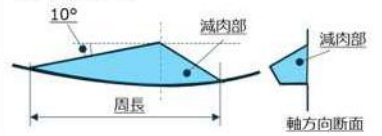
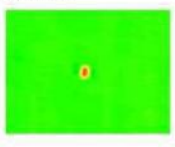

	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性
実機 B X35Y32 周長(目視)：約3mm  ECT減肉指示深さ：41%	振幅：0.59 V 位相：108° 		—
モックアップ [45%減肉] 周長：約3mm 軸長：約0.5mm 	振幅：0.60 V 位相：100° 		○

図3 ECTモックアップ試験結果（B－SG：X35，Y32）

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。

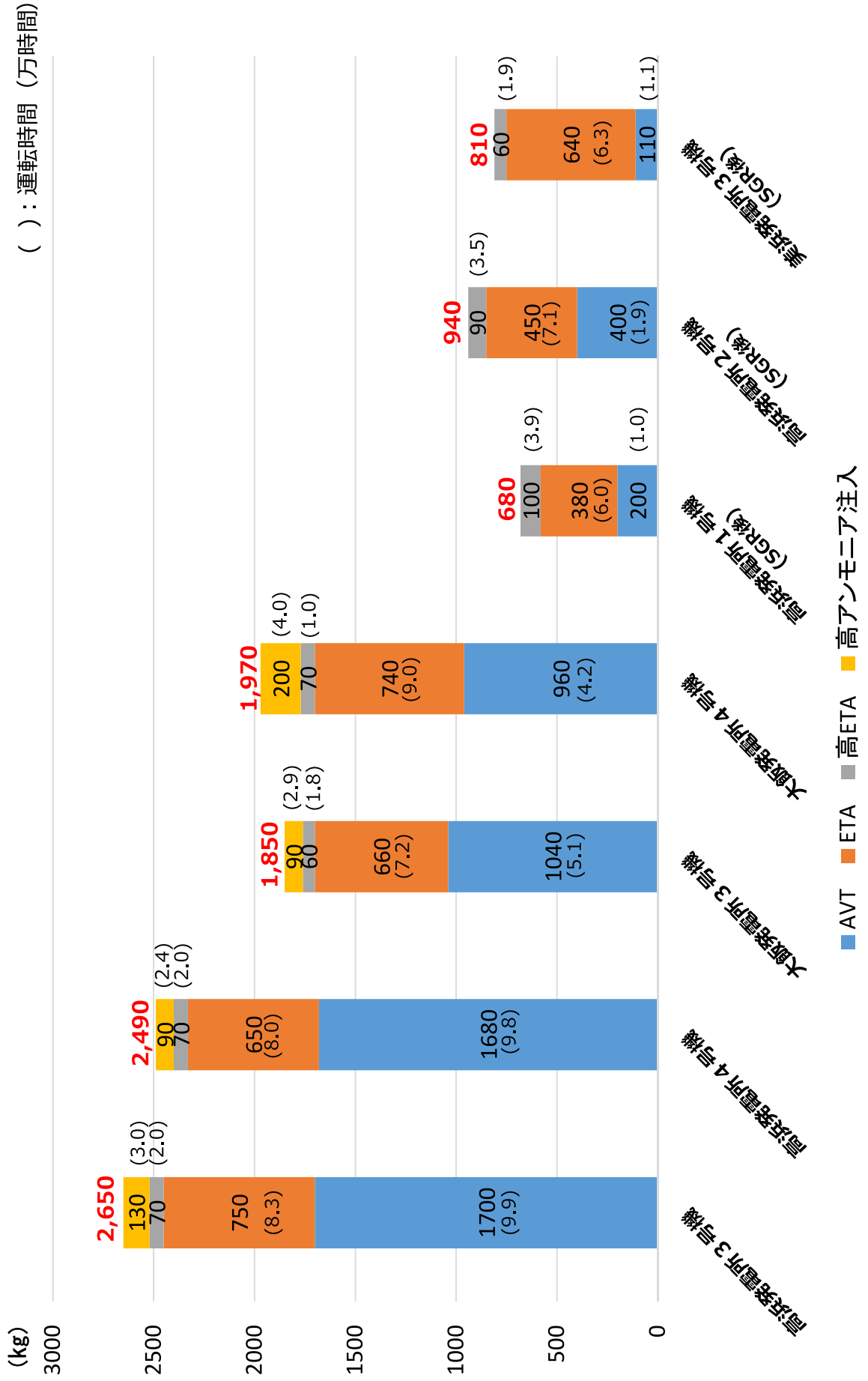
表1 摩耗体積の比較評価結果

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 : X 9, Y 2 2	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 3mW	約 8,500hr	約 0.8mm ³
A-SG : X 5 1, Y 8	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 8,500hr	約 0.8mm ³
B-SG : X 3 5, Y 3 2	ECTモック アップ試験	—	—	—	約 0.4mm ³
	流動振動解析	$1 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$	約 2mW	約 8,500hr	約 0.7mm ³

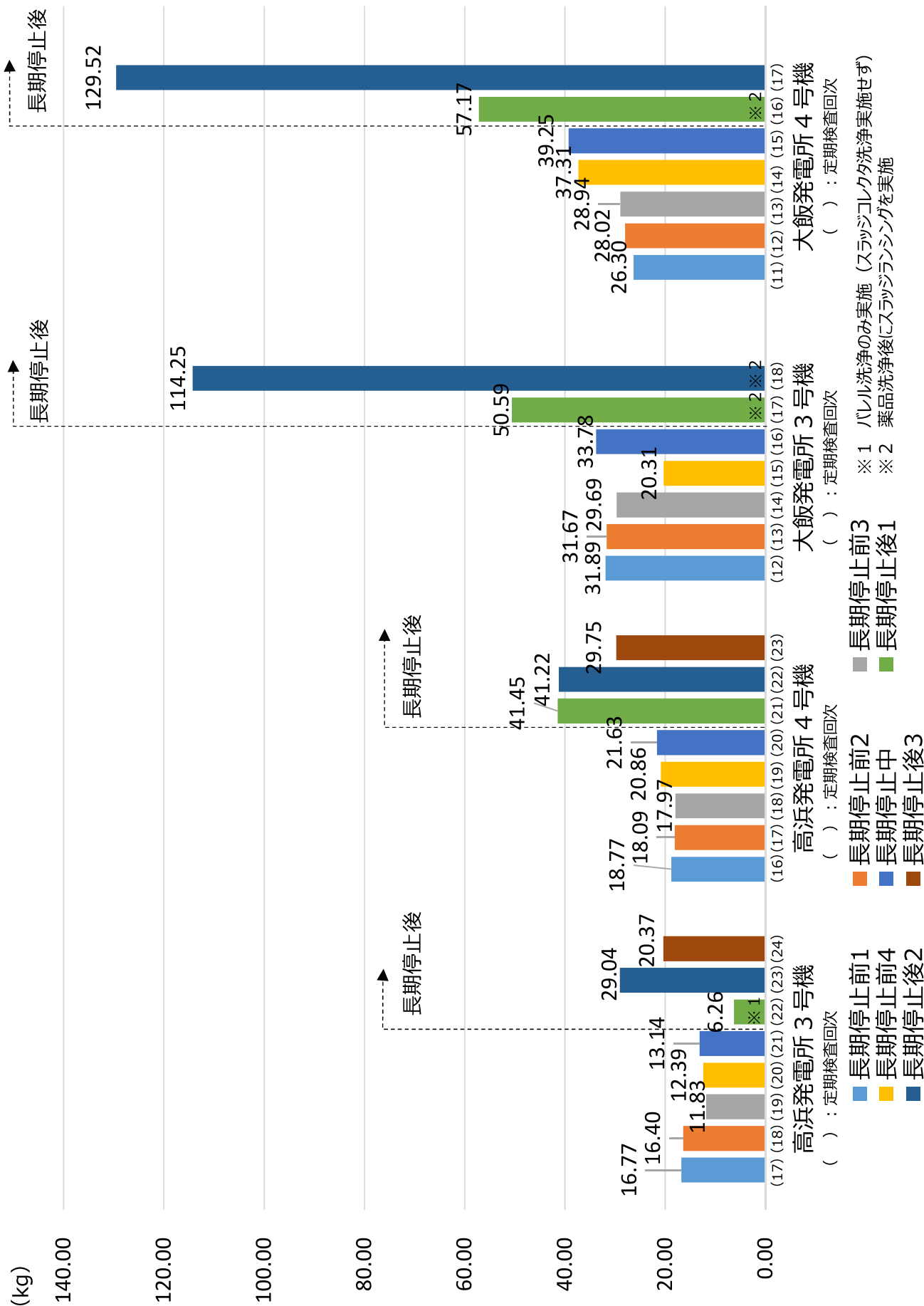
この結果より、ワークレートをを用いて計算した1サイクルで発生する摩耗体積は、ECTモックアップ試験で実機整合性を確認した人工欠陥の摩耗体積とほぼ一致することから、今回認められた減肉痕はスケールとの接触により1サイクルで発生した可能性があることを確認した。

以上

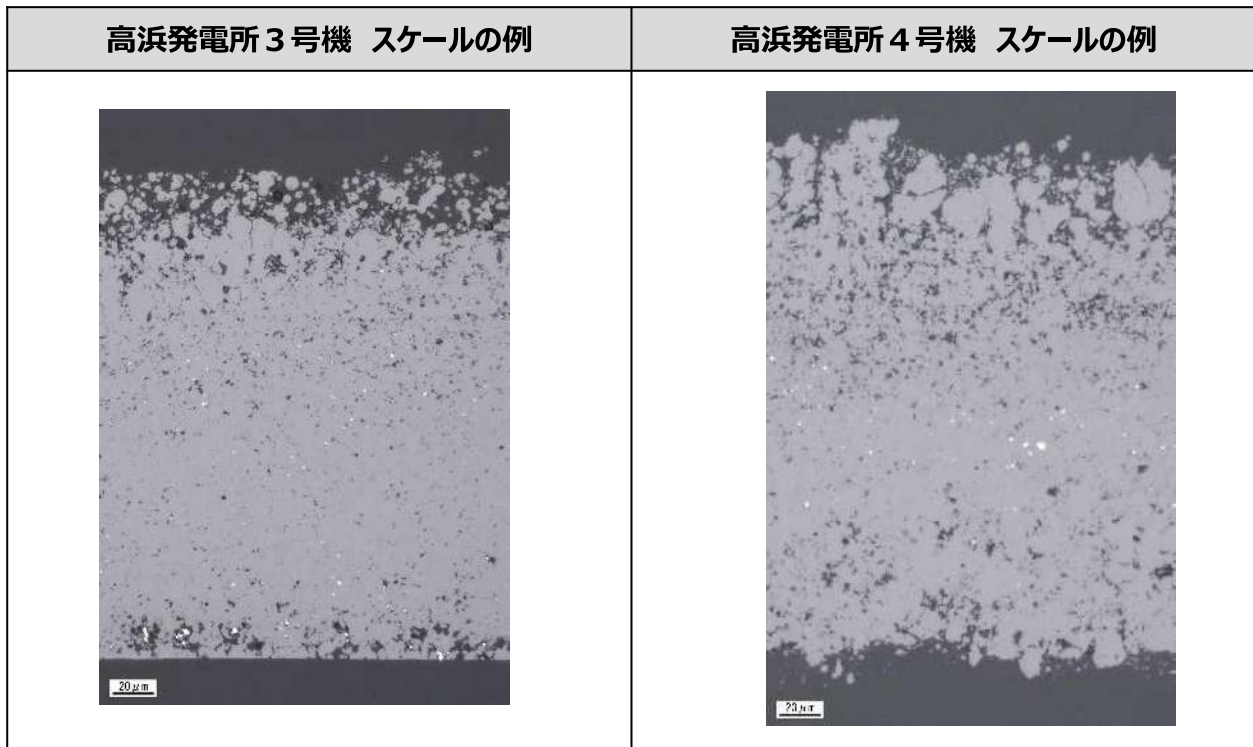
鉄持込み量比較



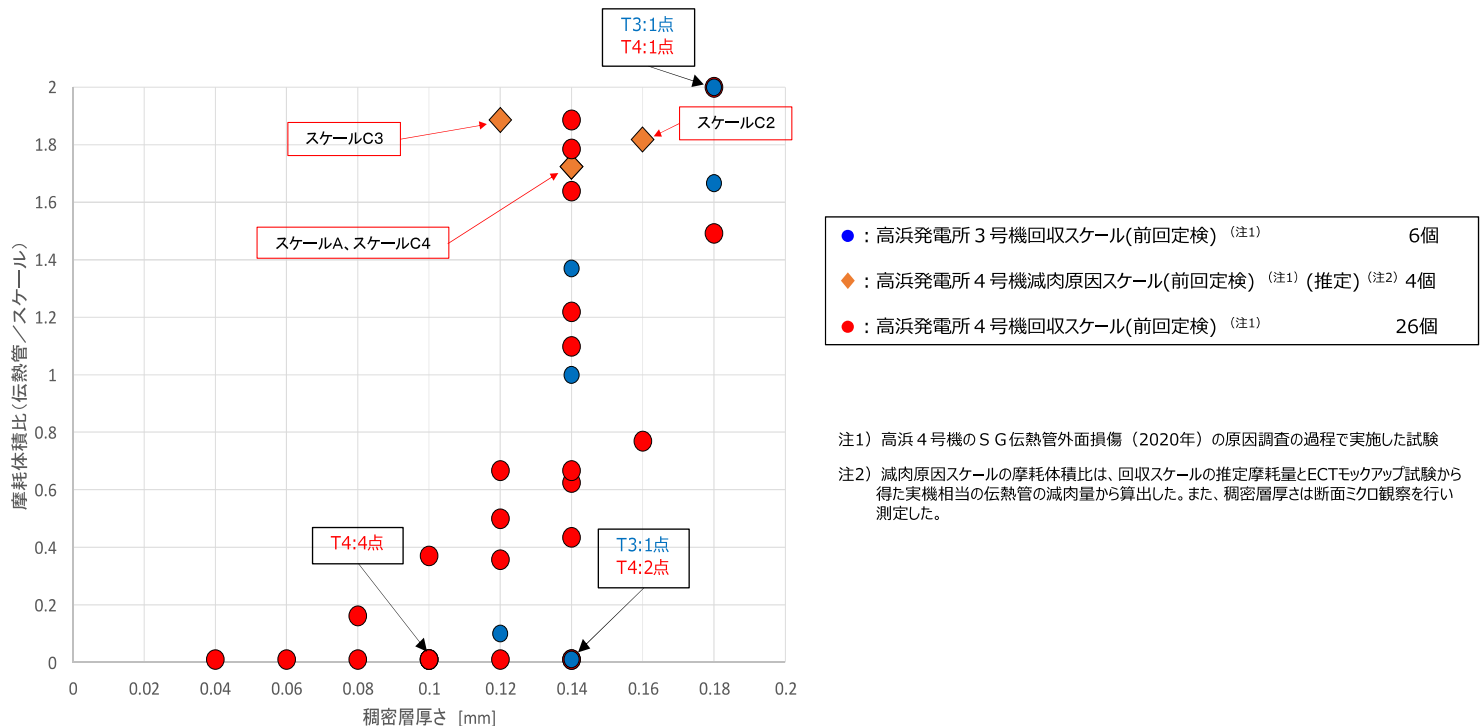
これまでのスラッジランシングによるスラッジ・スケールの総回収量



○高浜発電所3号機および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マイ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。（高浜4号機のSG伝熱管外面損傷（2020年）の原因調査の過程で確認）



○高浜発電所3号機と4号機のスケールについて、稠密層厚さと摩耗体積比の関係を比較した。（高浜4号機のSG伝熱管外面損傷（2020年）の原因調査の過程で確認）



・高浜発電所3号機と4号機のスケールの稠密層厚さ及び摩耗体積比の関係は同等であることを確認

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

当社他プラントスケール摩耗試験結果

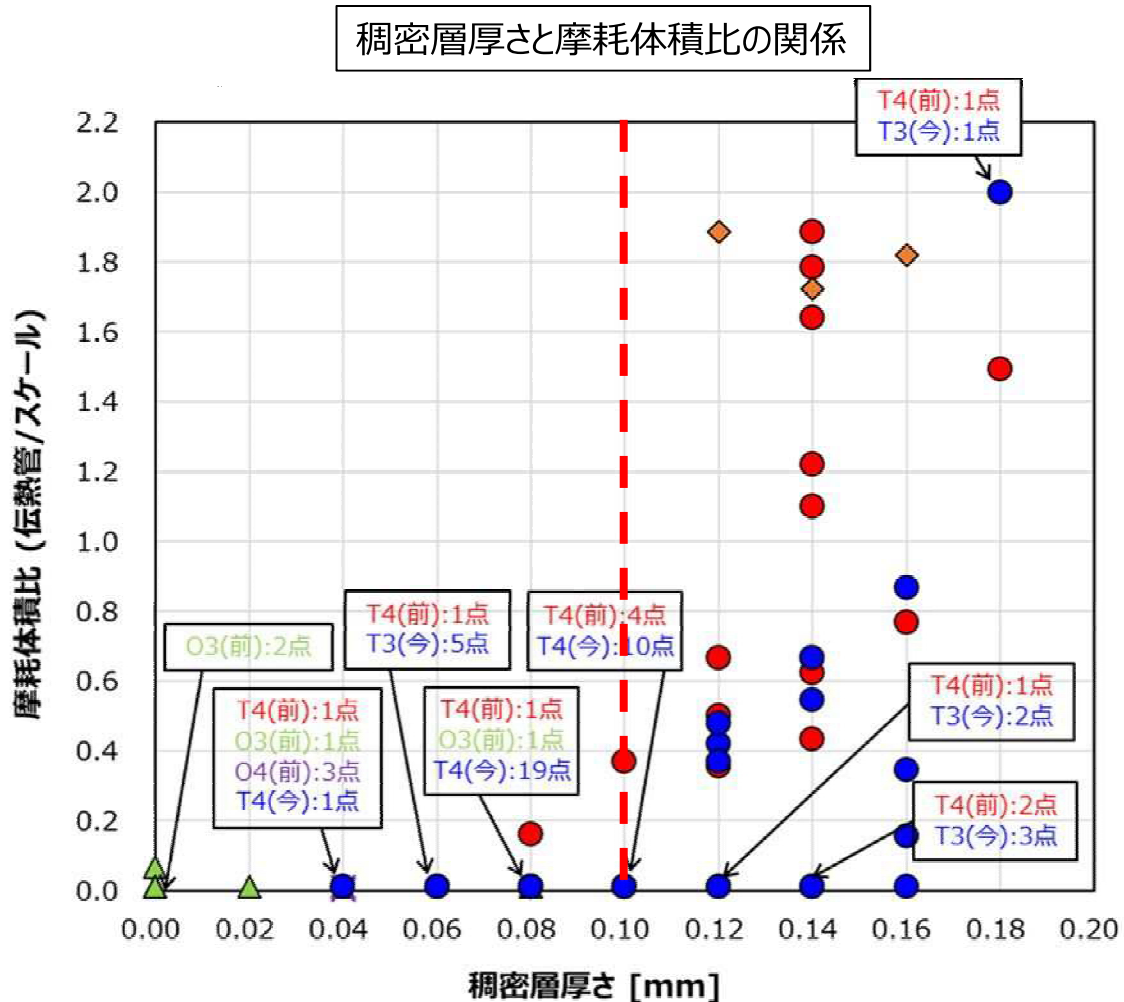
スケール回収場所	スケール厚さ (mm)	伝熱管摩耗体積 (mm ³)	スケール摩耗体積 (mm ³)	摩耗体積比 (伝熱管：スケール)
大飯発電所 3号機 管板上	約0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約0.2	約0.013	約0.19	1：15
	約0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約0.2	—	試験開始後に欠損	—
	約0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約0.2	—	試験開始後に欠損	—
大飯発電所 4号機 管板上	約0.2	約0.001	約0.41	1：410
	約0.1	—	試験開始後に欠損	—
	約0.1	—	試験開始後に欠損	—

注) 本試験結果は高浜4号機のSG伝熱管外面損傷(2020年)の原因調査の過程で実施した試験の結果である。

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

スケール性状による伝熱管減肉影響

- 摩耗に寄与していると考えられる稠密層厚さと摩耗体積比の相関を確認した。
- 空隙率の大きい多孔質化層は、摩耗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。



- | | | |
|---|---|-----|
| ● | 高浜 3号機回収スケール(今回定検) | 50個 |
| ◆ | 高浜 4号機減肉原因スケール(前回定検) ^(注1) (推定) ^(注2) | 4個 |
| ● | 高浜 4号機回収スケール(前回定検) ^(注1) | 26個 |
| ▲ | 大飯 3号機回収スケール(前回定検) ^(注1) | 6個 |
| × | 大飯 4号機回収スケール(前回定検) ^(注1) | 3個 |

注1) 高浜 4号機の S G 伝熱管外面損傷 (2020年) の原因調査の過程で実施した試験

注2) 減肉原因スケールの摩耗体積比は、回収スケールの推定摩耗量と E C T 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 2 6 0 基であるが、この中から、高浜発電所 3 号機および 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 の運転時間が高浜発電所 3 号機および 4 号機で伝熱管外面減肉事象が生じた運転時間以上（E F P Y^{*1} 2 3^{*2}以上）^{*3}のプラント
- ・ 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^{*4}

※ 1 : 定格負荷相当年数（運開後累積発電電力量（MWh）÷ 8 7 0（MW）÷ 2 4（時／日）÷ 3 6 5（日／年）により算出する）

※ 2 : 高浜発電所 3 号機第 2 3 回定期検査（E F P Y 2 4 . 0）、高浜発電所 3 号機第 2 4 回定期検査（E F P Y 2 5 . 2）、高浜発電所 3 号機第 2 5 回定期検査（E F P Y 2 6 . 2）、高浜発電所 4 号機第 2 2 回定期検査（E F P Y 2 4 . 3）、高浜発電所 4 号機第 2 3 回定期検査（E F P Y 2 5 . 0）のうち最小の運転時間（E F P Y 2 4 . 0）に対し更に抽出範囲を広げるため、－E F P Y 1 . 0 を追加考慮

※ 3 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。

※ 4 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 2 6 0 基に対し 7 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	1972.12.14	1982.4.1	31.5 (2021.10.4時点)
プラントB	1973.9.1	1983.5.1	30.0 (2020.10.5時点)
プラントC	1986.4.11	—	26.9 (2019.1.5時点)
プラントD	1985.12.4	—	25.3 (2018.4.7時点)
プラントE	1986.7.18	—	26.0 (2019.1.10時点)
プラントF	1978.6.1	1993.4.1	25.5 (2021.3.14時点)
プラントG	1990.6.7	—	24.7 (2019.2.16時点)

(2) スケールによる減肉経験の有無

EPRISGMP専用のデータベース、EPRIREPORT^{※5}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、EPRIE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。

※5 EPRISGMP専用レポート“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、EPRIE等の各種レポートを確認するとともに、EPRIE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 ^{※6}
BECA穴閉塞	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> スラッジランシング（毎定検） 	<ul style="list-style-type: none"> スラッジランシング 薬品洗浄
伝熱性能低下	<ul style="list-style-type: none"> 薬品洗浄（ASCA洗浄） 	<ul style="list-style-type: none"> 薬品洗浄（ASCA洗浄他）

※6 EPRISGMP専用レポート“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

今回高浜発電所3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29.82MPaであり、通常運転時および事故時の最大内外差圧 [] 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号機および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°C)

t : 板厚=[]

R : 平均半径=[]

a : 減肉深さ=[] (= [] × 0.57)

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
57	29.82	[]	[]

*1 最大減肉深さのA-SG (X9, Y22) で代表

*2 設計基準事故時および重大事故時等を包絡する内外差圧

[] : 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。

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 1508041 号、平成 27 年 8 月 4 日認可）

^{*4} 高浜発電所 3 号機既工認（新規制基準工認）補足説明資料「高浜発電所 3 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 7 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。

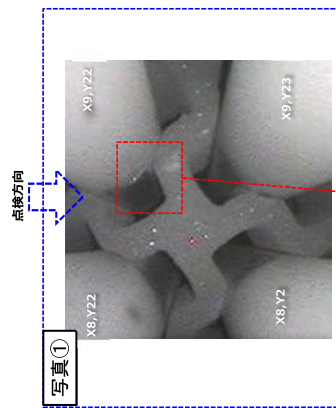
表 減肉した伝熱管の耐震性評価結果

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	230 MPa	334 MPa	1.4
膜応力＋曲げ応力	245 MPa	434 MPa	1.7
一次＋二次応力	247 MPa	492 MPa	1.9
疲労累積係数	0.072	1	-

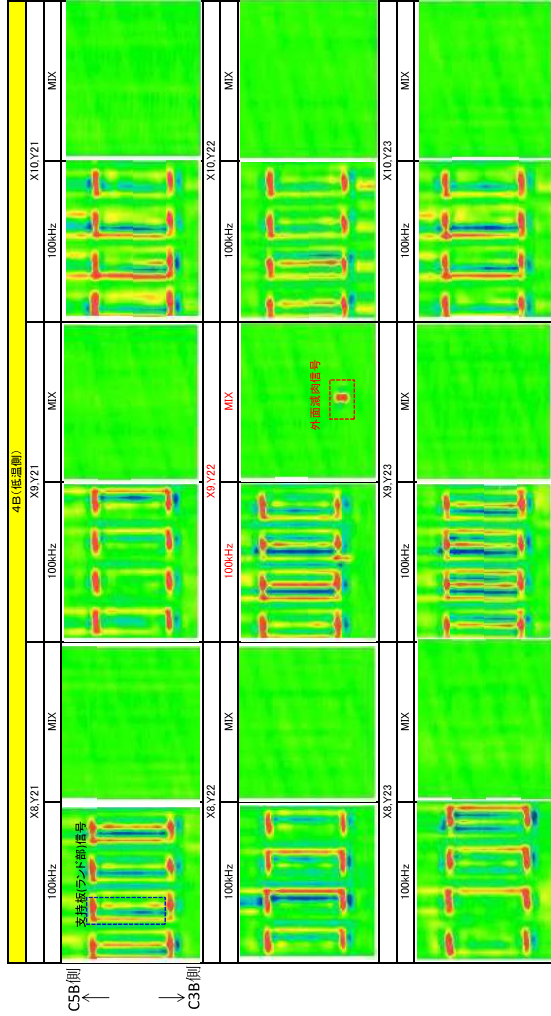
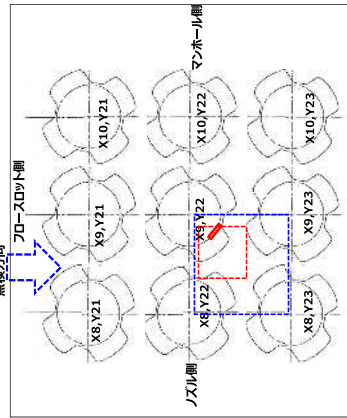
^{*5} 最大減肉深さの A-SG (X9, Y22) で代表

以 上

隣接伝熱管の健全性 (A-S-G 低温側第四支持板下面 伝熱管 X9, Y22)

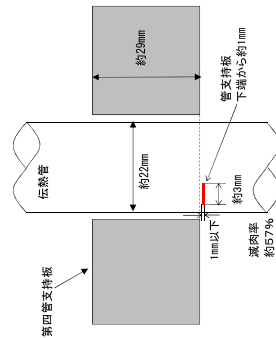


右記波形データにおける
外面減肉信号と推定
される部位



波形上の評価

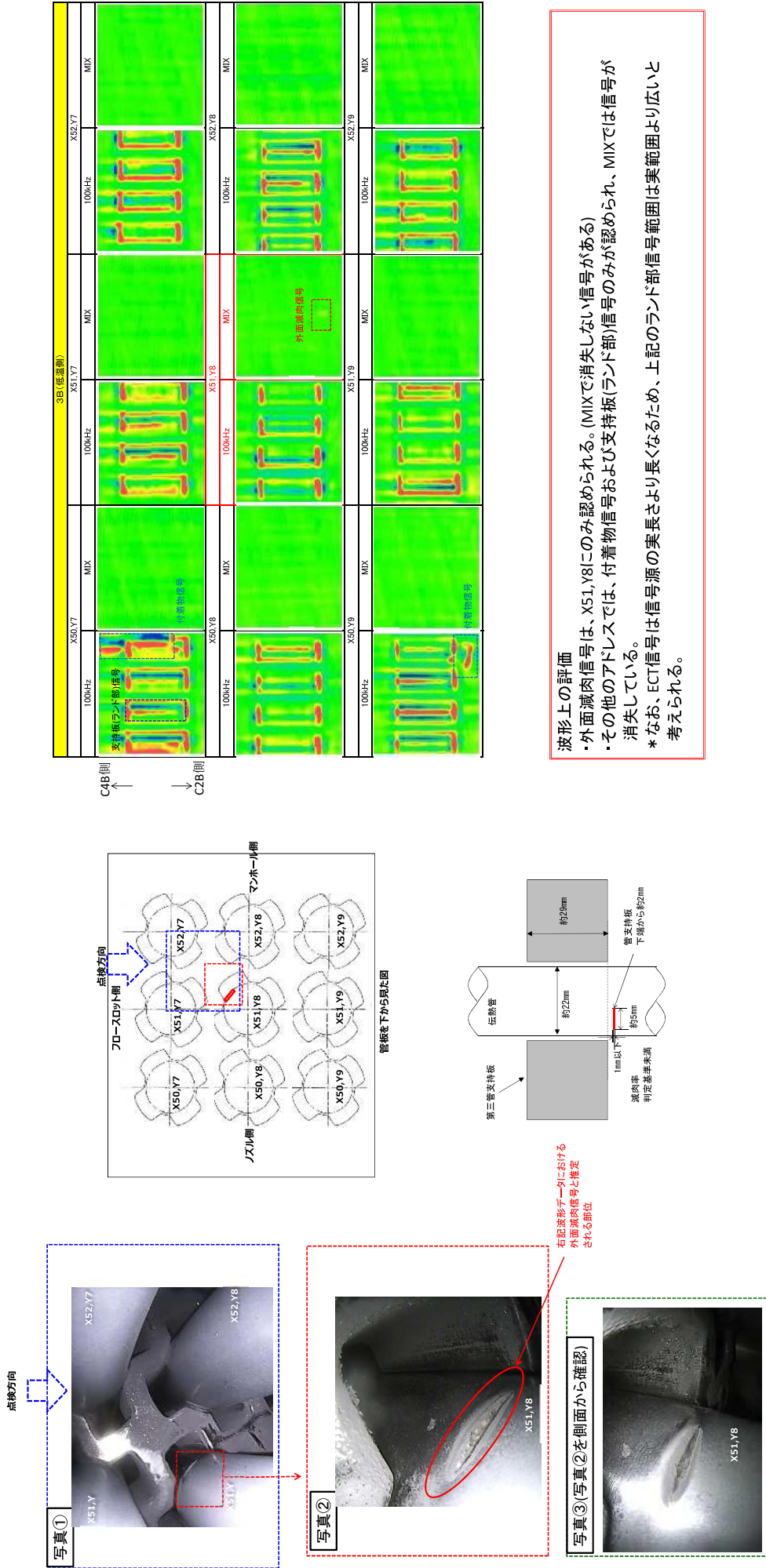
- ・外面減肉信号は、X9, Y22にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
- ・その他のアドレスでは、支持板(ランド部)信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。
- * なお、ECT信号は信号源の美長さより長くなるため、上記のランド部信号範囲は美範囲より広いと考えられる。



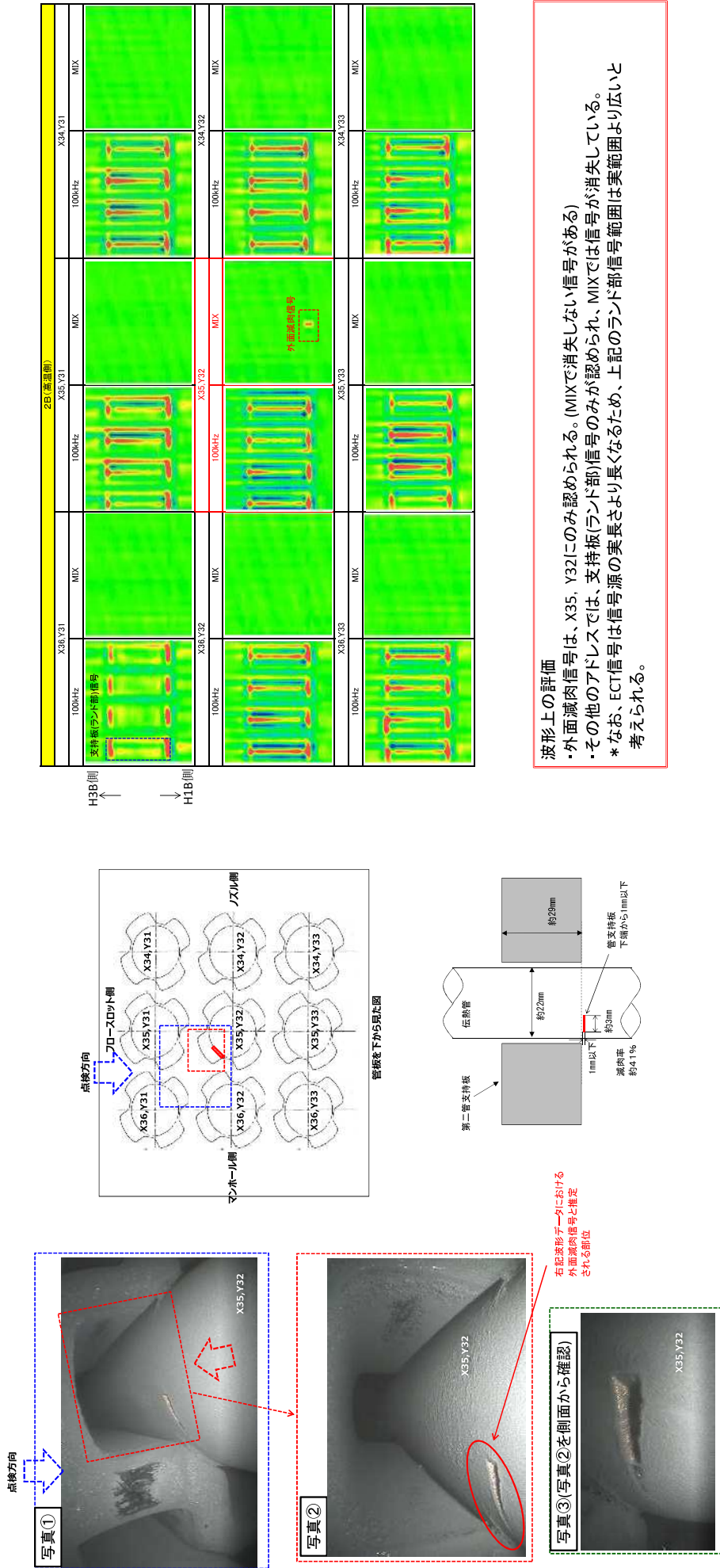
写真③(写真②を側面から確認)



隣接伝熱管の健全性 (A-SG 低温側第三支持板下面 伝熱管 X51, Y8)



隣接伝熱管の健全性 (B-S-G 高温側第二支持板下面 伝熱管 X35, Y32)



SG点検スケジュール

		2022.03							2022.04							2022.05																																				
		24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SG 器内点検	E C T 解析 (定事検)	完了																																																		
	第三管支持板以下当該部 目視確認等	完了																																																		
	▼指示伝熱管撮影日	完了																																																		
SG 器外点検	A～C～SG 第一・第二管支持板上面、A-SG 第三管支持板上面、管板上 異物調査、スケール採取	完了																																																		
	第四管支持板以下当該部 目視確認等	完了																																																		
	第四管支持板以上の管支持板上面 異物調査	完了																																																		
	仮設ストレープ点検	完了																																																		
	SGBD系統 (弁、配管他) 点検	完了																																																		
スケール分析等 (工場)	スケール分析 (摩耗試験・稠密層性状観察)	完了																																																		

高浜発電所4号機 第23回定期検査における
伝熱管外面減肉事象に係る調査・対策内容からの主な変更点

項目 (調査・対策)		今回 高浜3号機 第25回定期検査	前回 高浜4号機 第23回定期検査
調査	SG器内調査	<ul style="list-style-type: none"> ・信号指示が認められた箇所の外観調査 ・SG器内のスケールの残存状況等の調査 ・SGから回収したスケールの形状および性状の調査（摩耗試験数50個） ・SG器内の伝熱管表面の観察 	<ul style="list-style-type: none"> ・信号指示が認められた箇所の外観調査 ・SG器内のスケールの残存状況等の調査 ・SGから回収したスケールの性状の調査（摩耗試験数26個）
	スケールのSG器内挙動	前回推定したスケールのSG器内挙動に加えて、管群外筒を通過する可能性もあると推定。	管板、第一管支持板、第二管支持板上方で発生したスケールが、管群内の上昇流に乗って流量分配板および管支持板フロー SLOT部を通過し、減肉箇所まで移動したと推定。
	スケールの剥離メカニズム	スケールの剥離は主にはプラント停止時だが、前回薬品洗浄により剥離しきらなかったスケールがプラント起動時・運転中にも剥離する可能性は否定できない。	スケールの剥離はプラント停止時と推定。
	薬品洗浄時のスラッジ影響考慮	スケールとスラッジが混在する条件で新たに工場試験を実施した結果、スケール近傍にスラッジが存在する場合は脆弱化効果が低減することを確認した。	工場試験ではスラッジの存在を考慮せず。（すべてスケールとして模擬）
対策	管支持板上の洗浄	管支持板上等のスケールおよびスラッジを可能な限り除去するため、小型高圧洗浄装置により管支持板の洗浄を実施する。	未実施
	薬品洗浄条件 (洗浄範囲、薬品濃度)	1回目：伝熱管全域、薬品濃度3% 2回目：伝熱管全域、薬品濃度3%	1回目：第三管支持板以下、薬品濃度3% 2回目：伝熱管全域、薬品濃度2%

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1-1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1-1 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	20% EDTA※2	1%※3 EDTA※2	1% シュウ酸
	洗浄温度	160～175℃	93～121℃	60～88℃
	洗浄時間	4～10hr	30～40hr	24hr
洗浄効果	S G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
S G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 S G)	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

- 本格化学洗浄については、S G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S G器内構造物への腐食影響の可能性がある。
- A S C A 洗浄に代表される希薄薬品洗浄は、S G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。
- S G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、国内ではA S C A 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、A S C A 洗浄法を適用することとする。

発電用原子炉施設故障等報告書

(高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について)

(2021年2月19日) より引用

1. 薬品洗浄の方法について

(2) ASCA洗浄の方法（基本的なケースを示す）

a. ASCA洗浄の目的及びメカニズム

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。

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。

(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。

- ① SG器内を高濃度のヒドロジン水（1,000ppm）で浸漬し、還元性雰囲気を生成する。
- ② スケール中には空隙が存在することから、高濃度ヒドロ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（マグネサイト：Fe₃O₄）中のFe²⁺はFe³⁺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Fe²⁺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。

① 空気注入による酸化性雰囲気で金属銅（Cu）をCu²⁺として溶解する。

② 溶出したCu²⁺はEDTAと結合して安定な化合物（キレート錯体）を作る。

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

1. 薬品洗浄の方法について

表1-2 A S C A 洗浄条件一覧（各洗浄条件は基本的なケースを示す）

項目	鉄洗浄		銅洗浄	
	鉄洗浄	備考	銅洗浄	備考
EDTA	1～3% (10,000～ 30,000ppm)	国内実績値	0.36% (高浜発電所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

1. 薬品洗浄の方法について

b. A S C A 洗浄の工事概要（基本的なケースを示す）

S Gプロードダウン系統等に仮設系統（図1-1参照）を接続し、表1-2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、S Gプロード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1-2参照）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。

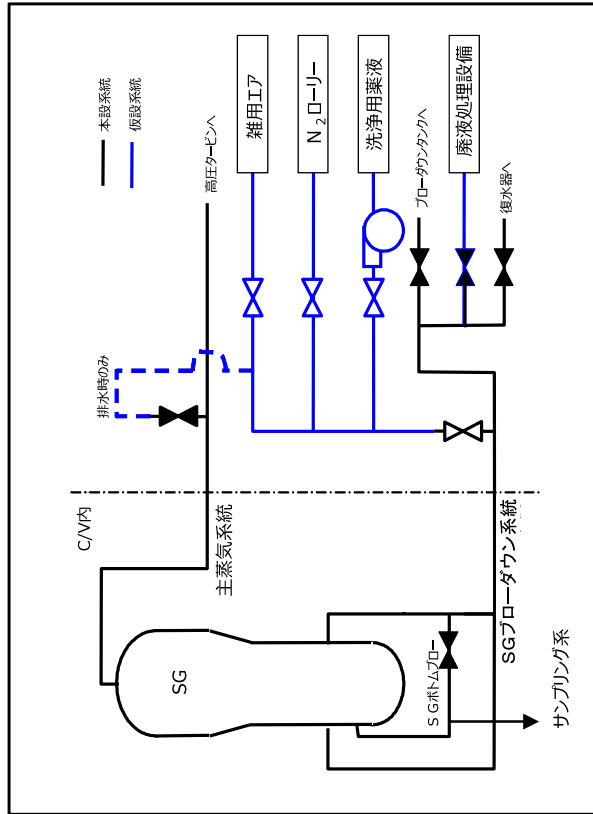


図1-1 洗浄用仮設系統概略図

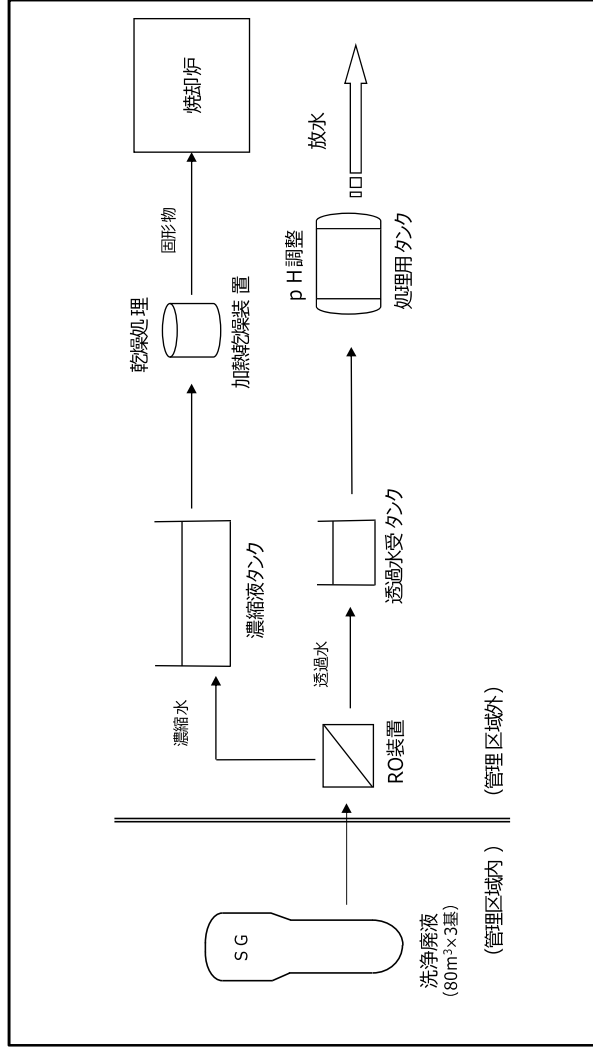


図1-2 廃液処理装置概略図

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

2. SG器内スラッジの影響について

- SG器内スラッジ量は、SG器内全体の鉄量に比べ、大きな割合を占めるものではないが、表面積が大きいスラッジが共存することにより、スケールの脆弱化効果を低減する可能性が考えられる。
- そこで、スラッジ共存環境下における洗浄効果に対する影響を確認するため、今回実施する薬品洗浄条件（EDTA3%×2回）でスラッジを共存させた試験を実施した。

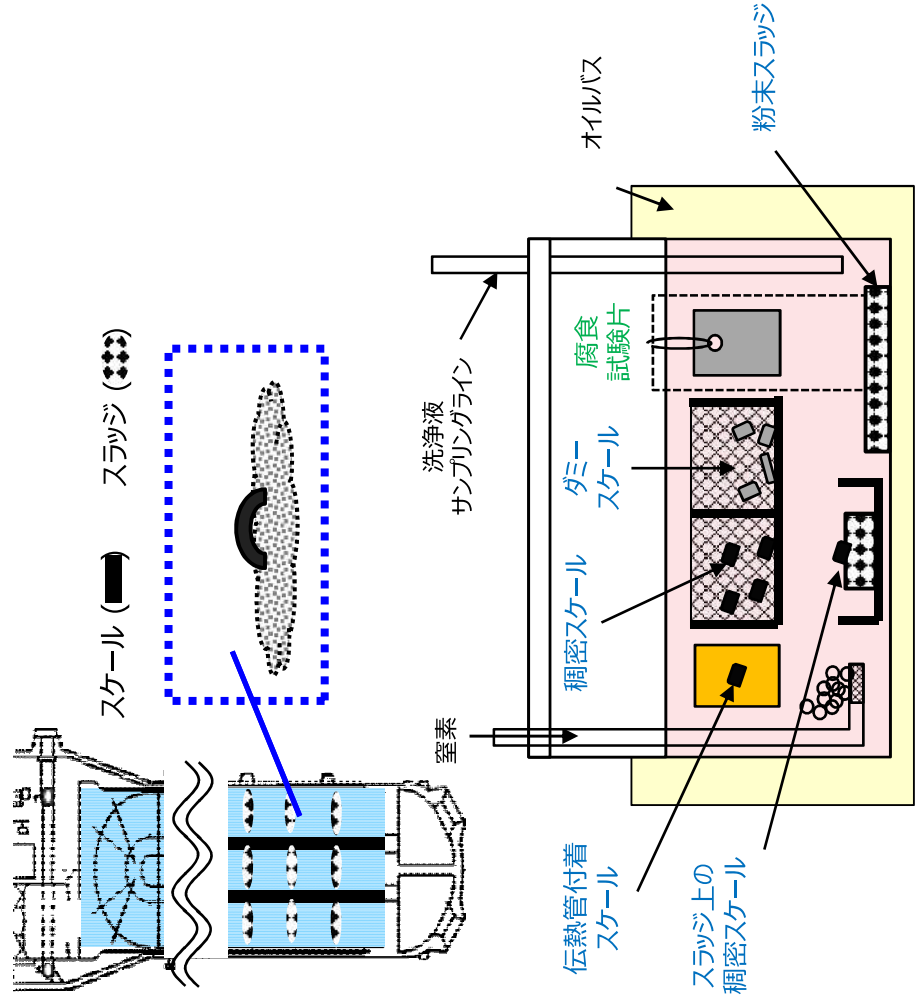
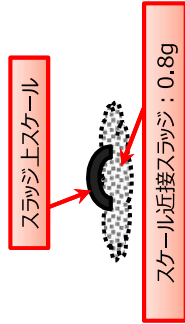
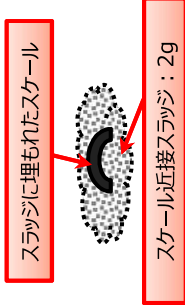


図 2-1 試験装置の概略図

項目	目的
伝熱管付着スケール	伝熱管に付着したスケールを模擬した、スケールの片側からの洗浄効果を確認するための試験片
稠密スケール	試験中の固体を管理し、洗浄前後のスケール減量や稠密層の変化を評価するための試験片
ダミースケール	試験容器内の洗浄液/スラッジ量を調整するためのスケール（洗浄前後の固体を区別しない）
スラッジ上の稠密スケール	スラッジ上に落下したスケールに対する洗浄効果を確認するための試験片
粉末スラッジ	試験容器内の洗浄液/スラッジ量を調整するためのスラッジ
腐食試験片	実機の構成材料の腐食量を評価する試験片。接液面積比は実機を模擬。

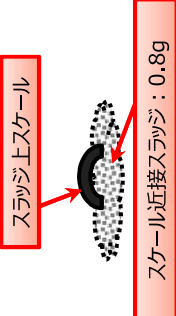
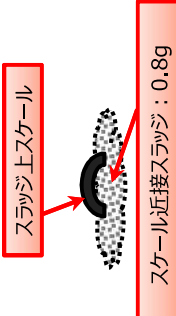
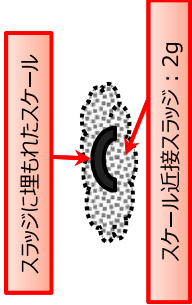
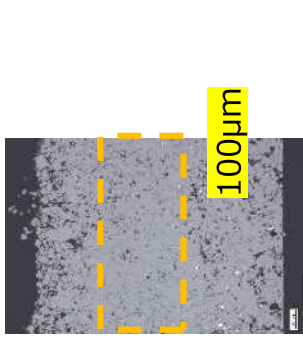
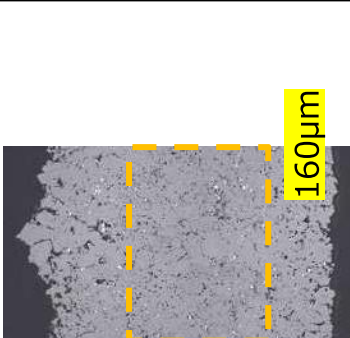
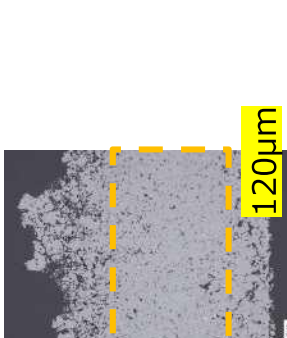
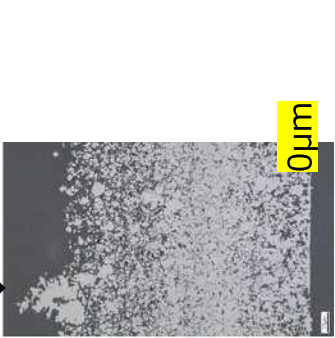
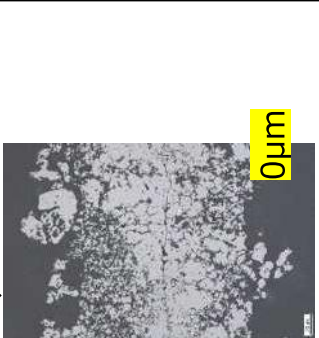
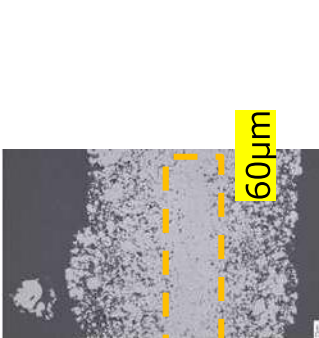
2. S G器内スラッジの影響確認試験－試験条件－

- 実機環境は、共存するスラッジ量やスケール上へのスラッジ堆積状況が多種多様であり、洗浄効果が異なることが想定されるため、スラッジ量およびスラッジ環境を変更した影響確認試験を実施

	試験①- 1、2（同一条件で2回実施）	試験②
EDTA濃度	3% → 3%	3% → 3%
温度	90℃	90℃
時間	24時間 × 2回	24時間 × 2回
スケール・スラッジ量／液量	11g / 400g-液 (S G器内想定鉄量の1.5倍)	14g/400g-液 (試験①にスケール量を合わせ、スラッジを増量)
スケール量：スラッジ量	9g : 2g (スラッジ割合=18%)	9g : 5g (スラッジ割合=36%)
想定鉄量内訳	<ul style="list-style-type: none"> ・スケール 9g ・稠密(個体) 1枚 ・スラッジ 2g (粉末スラッジ：1.2g+スケール下スラッジ：0.8g) ・スラッジ 上スケール 1枚	<ul style="list-style-type: none"> ・スケール 9g ・稠密(個体) 1枚 ・スラッジ 5g (粉末スラッジ：3g+スケール下スラッジ：2g) ・スラッジ 上スケール 1枚 ・伝熱管スケール 1枚
試験環境		

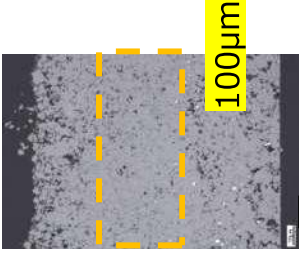
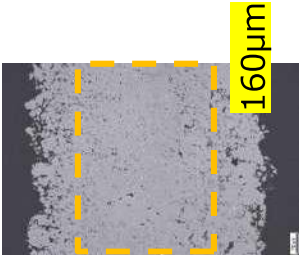
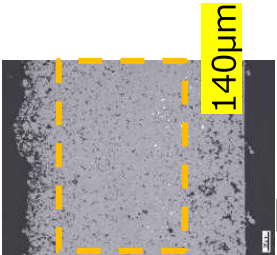
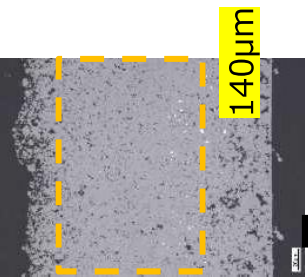


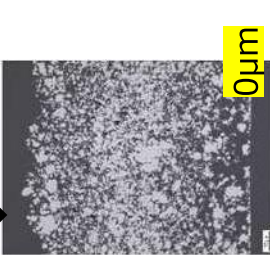
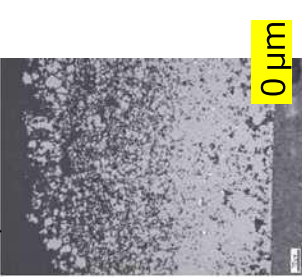
2. スラッジ共存環境における洗浄効果確認 － 試験結果－

- 試験②の条件ではスラッジ上スケールに対して稠密層を完全に脆弱化することはできなかったもの、前回の薬品洗浄試験条件（3%→2%）に比べると一定の脆弱化効果を確認できた。

	試験①－1	試験①－2	試験②
スラッジの添加状況	 <p>スラッジ上スケール スケール近接スラッジ：0.8g</p>	 <p>スラッジ上スケール スケール近接スラッジ：0.8g</p>	 <p>スラッジに埋もれたスケール スケール近接スラッジ：2g</p>
洗浄前	 <p>100µm</p> <p>稠密層厚さ</p>	 <p>160µm</p>	 <p>120µm</p>
洗浄後	 <p>0µm</p> <p>100µm減</p>	 <p>0µm</p> <p>160µm減</p>	 <p>60µm</p> <p>60µm減</p>

2. スラッジ共存環境における洗浄効果確認 - 試験結果 -

- スラッジ上スケール以外のスケールに対する試験結果は以下のとおりであり、十分な脆弱化効果を確認できた。

	試験①-1 稠密スケール (スラッジ非接触)	試験①-2 稠密スケール (スラッジ非接触)	試験② 稠密スケール (スラッジ非接触)	試験② 伝熱管付着スケール (片面溶解)
洗浄前				
洗浄後	 稠密層厚さ			
	100µm減	160µm減	140µm減	140µm減

3. 薬品洗浄によるSG器内構造物の腐食量

- 試験①および②の腐食試験片（炭素鋼および低合金鋼）の腐食量を確認した結果、今回の薬品洗浄（EDTA3%+2%）では、腐食量は炭素鋼30μm程度、低合金鋼40μm程度であることを確認した。

表3-1 3%×2回（90℃）における炭素鋼および低合金鋼の腐食量確認結果^{注)}

試験No.	炭素鋼 [μm]	低合金鋼 [μm]
1	33	38
2	30	40

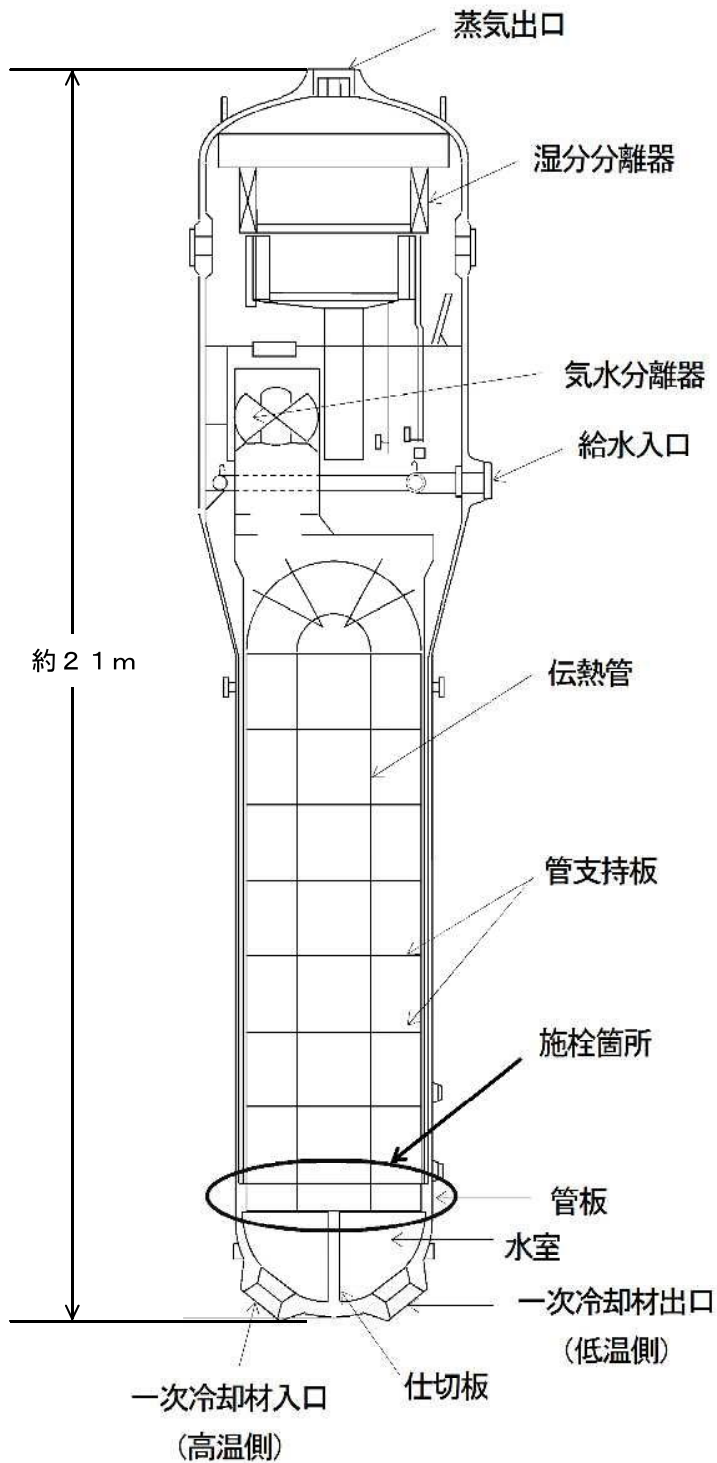
注) 腐食量は腐食試験片2枚の平均重量減量より算出

- 前回の薬品洗浄(EDTA3%+2%)における炭素鋼／低合金鋼の腐食量は約50μmと推定される。また、ステンレス鋼、インコネルの腐食量はごく軽微(0.1μm以下)と推定される。
- 今回の薬品洗浄(EDTA3%+3%)における腐食量は前回とほぼ同等で、炭素鋼／低合金鋼の腐食量は前回薬品洗浄との積算で約100μmになると推定される。
- 上記腐食量に対し、SG耐圧部(管板/胴部：低合金鋼)の許容腐食量は1mmと十分な裕度がある。



上記の検討結果を踏まえ、SG器内の構成部品に大きな影響を及ぼすことなくスケールの脆弱化を図る薬品洗浄条件について検討した結果、薬品濃度3%でSG伝熱管全域を2回に設定した。

SG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

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

高浜発電所3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
使用前	0	0	1	1	製作時の傷
第4回定検 (1989.10～1990.1)	7	12	4	23	振止め金具部の摩耗減肉
第5回定検 (1991.2～5)	1	1	0	2	振止め金具部の摩耗減肉 (改良型振止め金具へ取替え)
第9回定検 (1996.3～6)	0	1	1	2	健全管の抜管調査
第12回定検 (2000.2～4)	1	3	0	4	管板拡管部応力腐食割れ
第13回定検 (2001.6～8)	5	7	5	17	管板拡管部応力腐食割れ (ショットピーニング施工)
第15回定検 (2003.12～2004.3)	94	110	107	311	旧振止め金具部の摩耗減肉検出 (新型のECT装置を適用)
第21回定検 (2012.2～2016.2)	0	0	1	1	管板拡管部応力腐食割れ
第22回定検 (2016.12～2017.6)	1	0	0	1	管板拡管部応力腐食割れ
第23回定検 (2018.8～2018.11)	1	0	1	2	C:管板拡管部応力腐食割れ A:微小な減肉信号
第24回定検 (2020.1～2021.3)	0	1	1	2	外面からの摩耗減肉
第25回定検 (2022.3～)	3	1	0	4	A1本:管板拡管部応力腐食割れ A1本・B:外面からの摩耗減肉 A1本:微小な減肉信号
累積施栓本数	113	136	121	370	
[施栓率]	[3.4%]	[4.1%]	[3.6%]	[3.7%]	

○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)

高浜発電所3号炉 高経年化技術評価書【平成26年1月（平成27年10月一部変更）】より抜粋

資料6-1 高浜発電所3号炉 高経年化技術評価に基づく長期保守管理方針（1/3）

機種名	機器名	経年劣化事象	健全性評価結果	現状保全	総合評価	長期保全計画		長期保守管理方針	
						高経年化への対応	実施時期	No.	保守管理の項目
熱交換器	蒸気発生器	伝熱管の損傷	管板垢部および管境界部腐食割れ等について、改善策を講じている。万一有意な腐食が生じた場合は、検査を実施する。また、検査結果に基づき、必要に応じて、管板腐食割れ等の発生状況を把握し、適切な保全措置を実施する。	損傷形態、部位に応じた適切な補修や、定期的な点検を実施し、健全性を確保している。	管板垢部および管境界部腐食割れ等について、健全性を確保している。また、管板腐食割れ等の発生状況を把握し、適切な保全措置を実施する。	伝熱管材料は600系ニッケル合金であり、管板が蒸気発生器取替を含めた保全方法を検討していく。	1	蒸気発生器の伝熱管の損傷取替を含めた保全方法を検討する。	中長期
容器	原子炉容器	胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化	開連温度の上昇について、第4回目以降の監視試験結果を用いた評価は、運転開始後60年時点でも脆性破壊は起こらないと評価した。上部棚吸収エネルギーは、運転開始後60年時点でも十分上部棚吸収エネルギーがあることと評価した。	定期的な超音波探傷試験を実施し、有意な欠陥がないことを確認している。JEA4201に基づいて、将来的な破断試験を実施し、将来の破断試験の変化を先行把握している。JEA4206に基づき、運転管理上の制限として加熱・冷却運転時に許容しうる温度・圧力の範囲（加熱冷却時制限温度を設けて運用している。	健全性評価結果から判断して、胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化が機器の健全性に影響を与えないと考える。ただし、胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化に対しては、今後計画的に監視試験を実施する必要がある。胴部（炉心領域部）材料の機械的性質の測定は、また有意な欠陥のないことと超音波探傷検査により確認して適切である。	胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化に対しては、JEA4201に基づき計画的に監視試験を実施して健全性評価の妥当性を確認するとともに、定期的に超音波探傷検査を実施していく。また、監視試験結果から、JEA4206に基づき、運転管理上の制限として加熱・冷却運転時に許容しうる温度・圧力の範囲（加熱冷却時制限温度を設けて運用していく。なお、健全性評価の結果から胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化が原子炉の安全性に影響を及ぼす可能性はないと考えるが、健全性評価の妥当性を確認するため、今後の原子炉の運転時間・照射量を勘案して第5回監視試験の実施計画を策定する。	2	原子炉容器の胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化については、原子炉の運転時間および照射量を勘案し、第5回監視試験の実施計画を策定する。	中長期

短期：平成27年1月17日からの5年間、中長期：平成27年1月17日からの10年間

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。この状態下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19.1MPaであり、通常運転時および事故時の最大外圧 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号機および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。

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

<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 × 0.57)

$2c$: 減肉幅=5mm

: 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。

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
57	19.1	<input type="text"/>	<input type="text"/>

*¹ 最大減肉深さのA-SG (X9, Y22) 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1508041号、平成27年8月4日認可)

*⁴ 高浜発電所3号機既工認(新規制基準工認)補足説明資料「高浜発電所3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7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。

: 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。

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	169MPa	334 MPa	1.9
膜応力+曲げ応力	210 MPa	434 MPa	2.0
一次+二次応力	247 MPa	492 MPa	1.9
疲労累積係数	0.070	1	-

*⁵ 最大減肉深さのA-SG（X9，Y22）で代表

4. 減肉した伝熱管の破断を想定した場合の影響

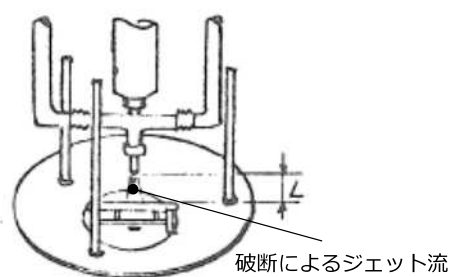
1. ～ 3. で述べた通り、減肉により施栓した伝熱管については、減肉の進展性、強度および耐震性の観点から破損しないことを確認しており、他の健全伝熱管へ影響を及ぼすことはないが、ここでは仮に減肉した施栓管が破断した場合の影響を検討する。

「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。

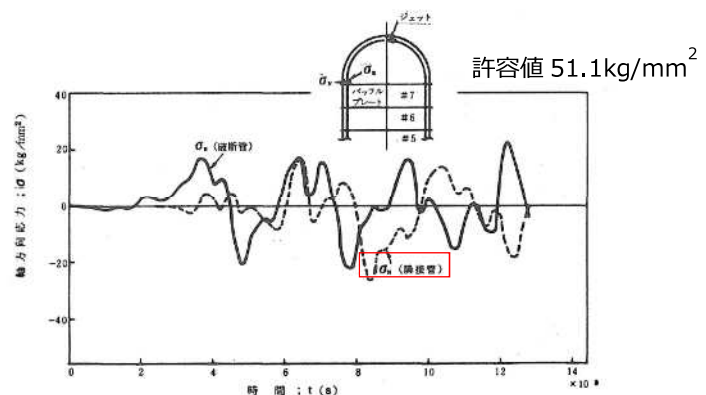
その検討において根拠とされた実験は「蒸気発生器信頼性実証試験」（昭和50～55年度：発電用熱機関協会）によるものであり、その中では、次の実験および解析により、伝熱管が破断しジェット反力によって隣接管へ衝突しても、隣接管に発生する応力は許容値以下であるため、有意な影響がないことを確認している。

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



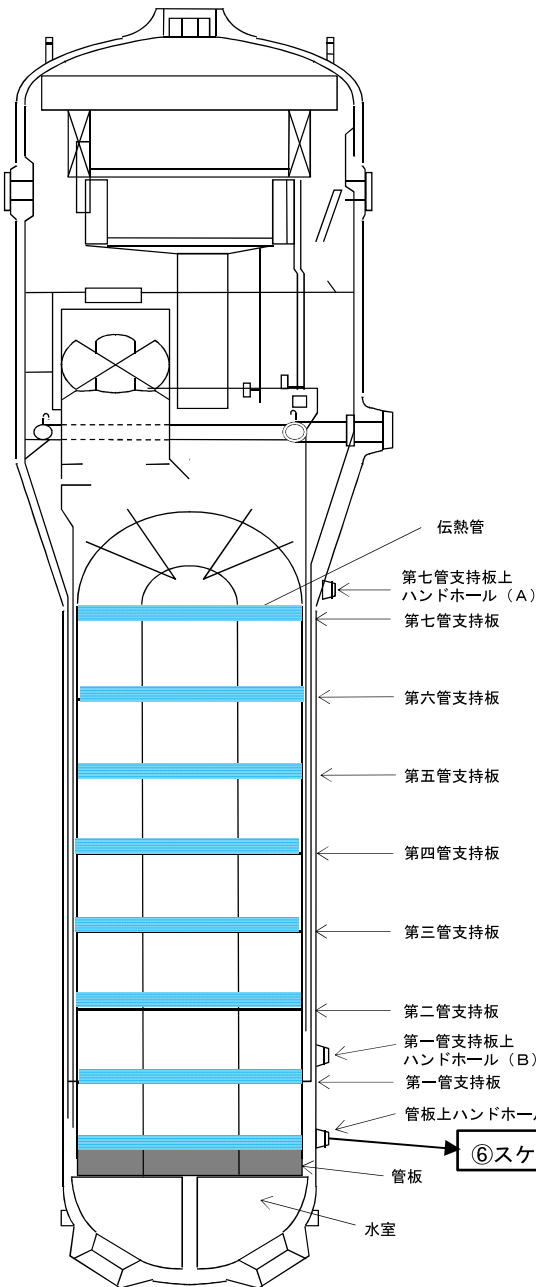
小型高圧洗浄装置による洗浄について

SG器内に残存するスケール等を回収するため、小型高圧洗浄装置を用いてSG器内の洗浄を実施する。

清掃は上層の支持板から順に下層の支持板にスケール等を落下させていき、最終的に管板の洗浄とともに回収する。

洗浄箇所:

(管板および第一管支持板から第七管支持板上)



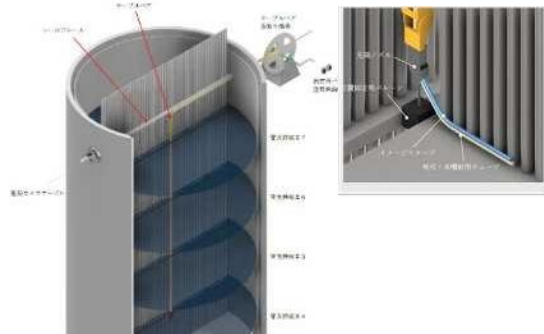
①「水平ノズル(樹脂ヘッド)」による第七管支持板の洗浄

第七管支持板上ハンドホール(A)より第七管支持板に装置を挿入し、フロースロット上を走査させながら洗浄水を噴射することで、支持板上のスケール等を押し流し下層の支持板に落下させる。



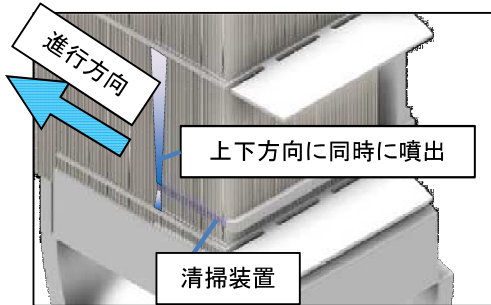
②「管支持板上走査ノズル」による第六～第三管支持板の洗浄

第七管支持板上ハンドホール(A)より上層の支持板から順に装置を吊り下ろし、支持板上を走査させながら洗浄水を噴射することで、支持板上のスケール等を下層の支持板に落下させる。



③「垂直ノズル」による第二及び第一管支持板の洗浄

第一管支持板上ハンドホール(B)より第二管支持板と第一管支持板の間に装置を挿入し、支持板間を走査させながら上下方向に洗浄水を噴射することで、両支持板の伝熱管と支持板の隙間を清掃し、スケール等を支持板及び管板上に移動させる。



④「水平ノズル(楕円ヘッド)」による第二管支持板の洗浄

第一管支持板上ハンドホール(B)より第二管支持板フロースロットに装置を挿入し、フロースロットを移動させながら洗浄水を噴射することで、支持板上のスケール等を押し流し下層の支持板に落下させる。



⑤「水平ノズル(樹脂ヘッド)」による第一管支持板の洗浄

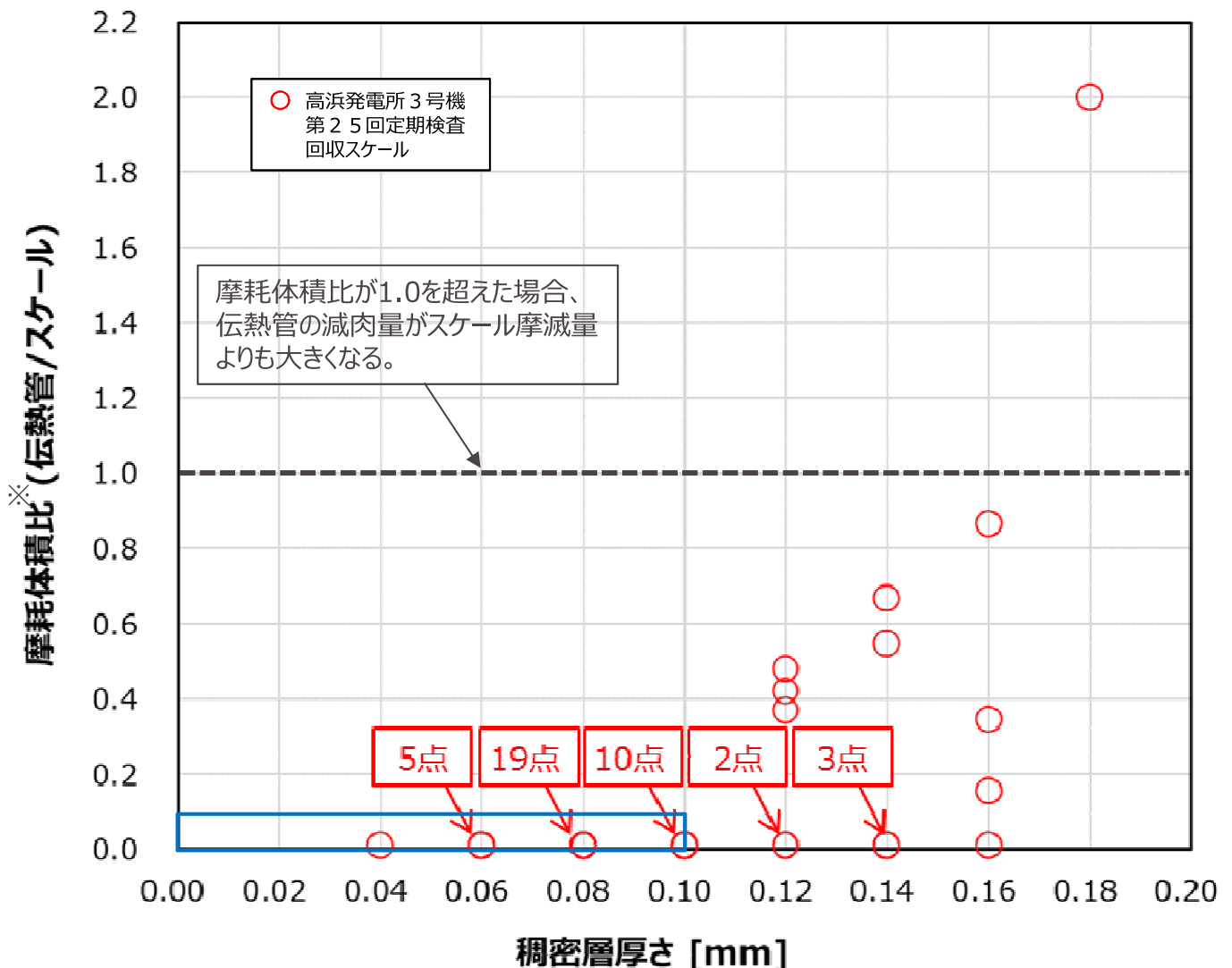
第一管支持板上ハンドホール(B)より第一管支持板に装置(①と同様)を挿入し、フロースロット上を移動させながら洗浄水を噴射することで支持板上のスケール等を押し流し、管板に落下させる。

⑥「ランシング装置」による管板の洗浄とスケール等の回収

ランシング装置を用いた管板の洗浄(従来より定期検査毎に実施)を行うとともに、上層の各支持板から落下させたスケール等を管板上ハンドホール(C)から回収する。

スケールに対する保全指標について（1／3）

- 今回取り出したスケールについては、今後、追加の3次元測定器等による計測、断面観察および摩耗試験を実施し、スケールの形状や性状に関する知見の拡充に努める。また、SG伝熱管に付着するスケールに対し、薬品洗浄の頻度に関する保全指標については、以下のとおり。
- 高浜発電所3号機および4号機については、毎定期検査時にスケールを回収し、スケールの稠密層厚さの確認および摩耗試験を行う。
- 稠密層厚さ0.1mm未満および摩耗体積比0.1未満であることを確認し、それを超えた場合は、薬品洗浄や小型高圧洗浄装置による洗浄を実施する。
- なお、高浜発電所3号機および4号機のSGについては、インコネルTT600製の伝熱管に応力腐食割れが認められていることから、本事象も踏まえ、今後も引き続き、SG取替（以下、SGR）に係る検討を進めていく。



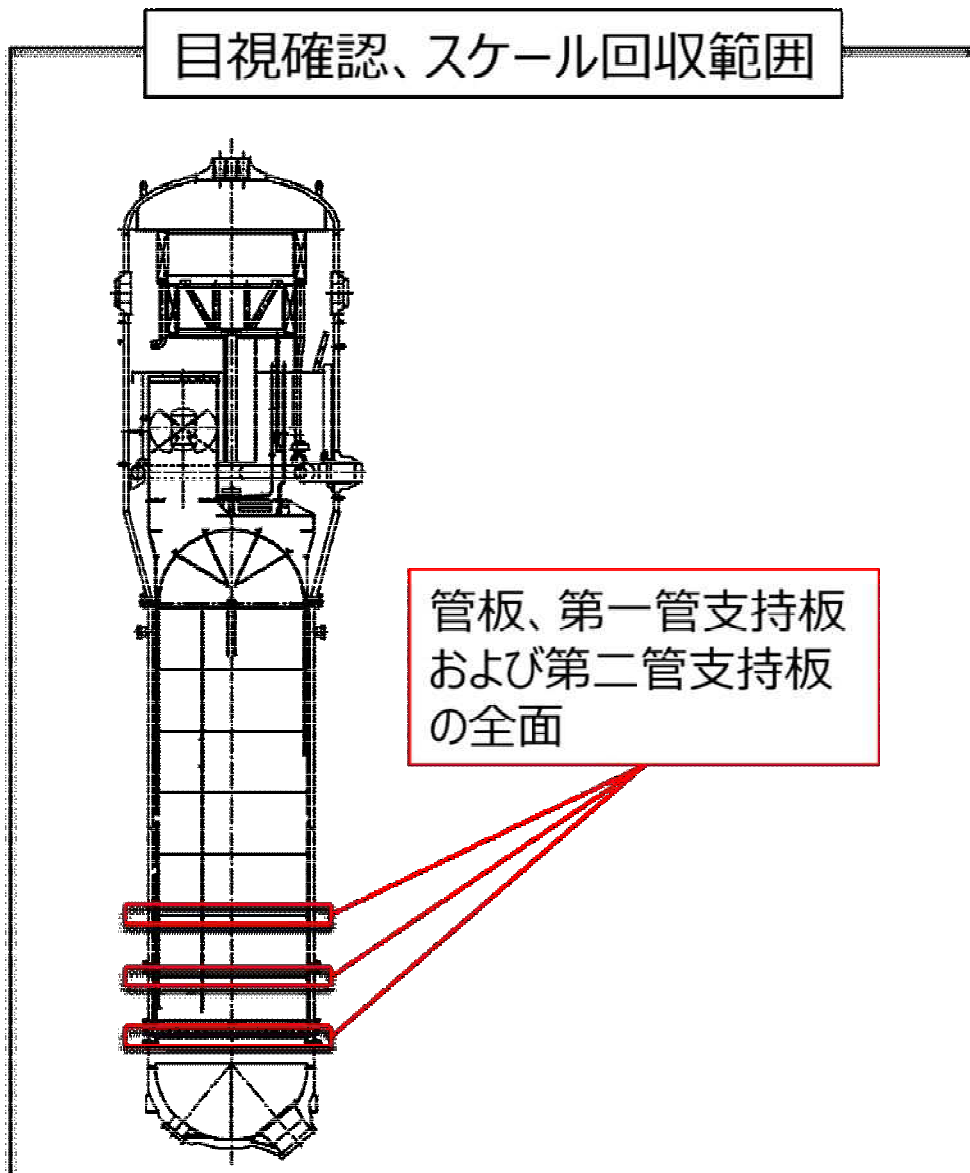
※ 摩耗体積比（伝熱管/スケール）：摩耗試験における伝熱管の減肉量とスケールの摩滅量の体積比

スケールに対する保全指標について（2／3）

○スケール選定の考え方について

伝熱管を減肉させるような稠密で薄いスケール（板厚0.2～0.3mm）は、伝熱管の下部で生成されと考えられるため、稠密層本体のスケールが一番多く堆積していると考えられるエリア（蒸気発生器の管板、第一管支持板および第二管支持板）の全面を目視確認し、各板あたり20個程度のスケールを採取し、稠密層厚さの確認を実施する。

次に、採取したスケールから0.2～0.3mmのもの、かつ比較的大きいもの（長さ10mm程度）を10個程度選定し、摩耗試験を実施する。



スケールに対する保全指標について（3／3）

- 他プラントについては、代表プラントでスケールを回収し、いずれも稠密層厚さが0.1mm未満であることおよび摩耗体積比が十分小さいこと（0.1未満）を確認している。
- また、現在の鉄持込み量は約30kg／サイクルと十分低く抑えられている。
- 従って、至近で薬品洗浄を行う必要はないと考えているが、高浜発電所3号機および4号機の水平展開として、以下のとおり、実機スケールによる監視を行っていく。

<スケール監視方法>

プラント		鉄持込み量 ※	頻度	確認内容	備考
SGR 未実施 プラント	大飯3	1,850kg	2定検毎	稠密層厚さ及び摩耗体積比を確認	薬品洗浄を実施済みであり、高浜3、4と同等の鉄持込み量まで計算上10定検以上となるが、実機スケールを確認し確実に発生を防止するとともに、データの蓄積を図る。
	大飯4	1,970kg	同上	同上	
SGR プラント	高浜1	680kg	－	－	SGRプラントで鉄持込み量が最大の高浜2について、今回採取できるスケールはない状況であったが、念のため、高浜2を代表プラントとしてスケールの確認を行う。
	高浜2	940kg	2定検毎	スケールの有無を確認	
	美浜3	810kg	－	－	

※高浜発電所3号機および4号機の最初の外面減肉発生時の鉄持込み量は約2,400kg

<薬品洗浄実施時期>

- 薬品洗浄については、蓄積したデータの傾向を踏まえ、従来の電気出力維持の観点に加え、摩耗減肉に対する予防保全の観点で、適切なタイミングで行うこととする。

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

高浜発電所 3号機 S G 器内のスケールに対する対策の変遷

時期	目的	対策
前回以前	S G への鉄の持ち込み量を低減 (B E C 穴閉塞対策 および伝熱管への スケール付着抑制)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 運転開始以降、2次系統水の水質管理として、A V T 処理（ヒドラジン、アンモニア）を実施していたが、1998年より、抽気・ドレン系からの鉄持ち込み抑制のため E T A 処理を採用 ・ その後、2005年～2006年に給水加熱器など銅系材料機器の取替えを実施し、2009年より給水高 p H 処理を採用
前回 (第 2 4 回定期検査)	スケールの脆弱化	S G 器内の薬品洗浄 (条件) 1 回目：第 3 管支持板以下、薬品濃度 3 % 2 回目：伝熱管全域、薬品濃度 2 %
今回 (第 2 5 回定期検査)	S G 器内に残存するスケール等を可能な限り除去	小型高圧洗浄装置による洗浄 範囲：第 1 管支持板～第 7 管支持板 および管板
	スケールの脆弱化	S G 器内の薬品洗浄 (条件) 伝熱管全域、薬品濃度 3 % × 2 回
今後の対応	<ul style="list-style-type: none"> ・ スケールの性状確認 ・ スケール影響除去 	今後の S G 保全 <ul style="list-style-type: none"> ・ 毎定期検査時にスケールを回収し、稠密層厚さの確認、摩耗試験を実施 ・ 稠密層厚さの確認、摩耗試験にて、稠密層厚さ 0.1mm 未満および摩耗体積比 0.1 未満を超えた場合は、薬品洗浄や小型高圧洗浄装置による洗浄を実施 ・ S G 取替えに係る検討