

高浜発電所 4 号機
蒸気発生器伝熱管の損傷について
(実機によるスケール脆弱化効果の確認結果のご報告
および 2 月 5 日公開会合でのご質問回答)

2021 年 2 月 16 日



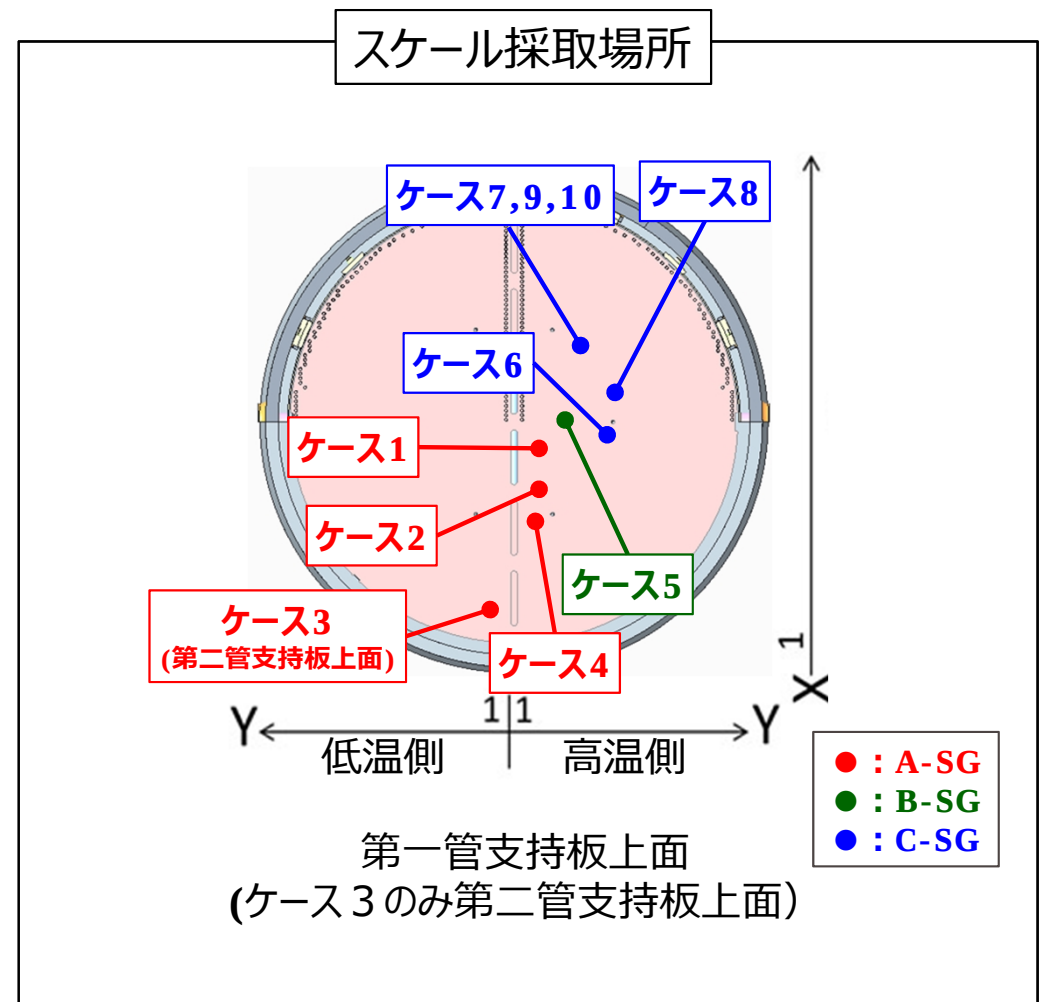
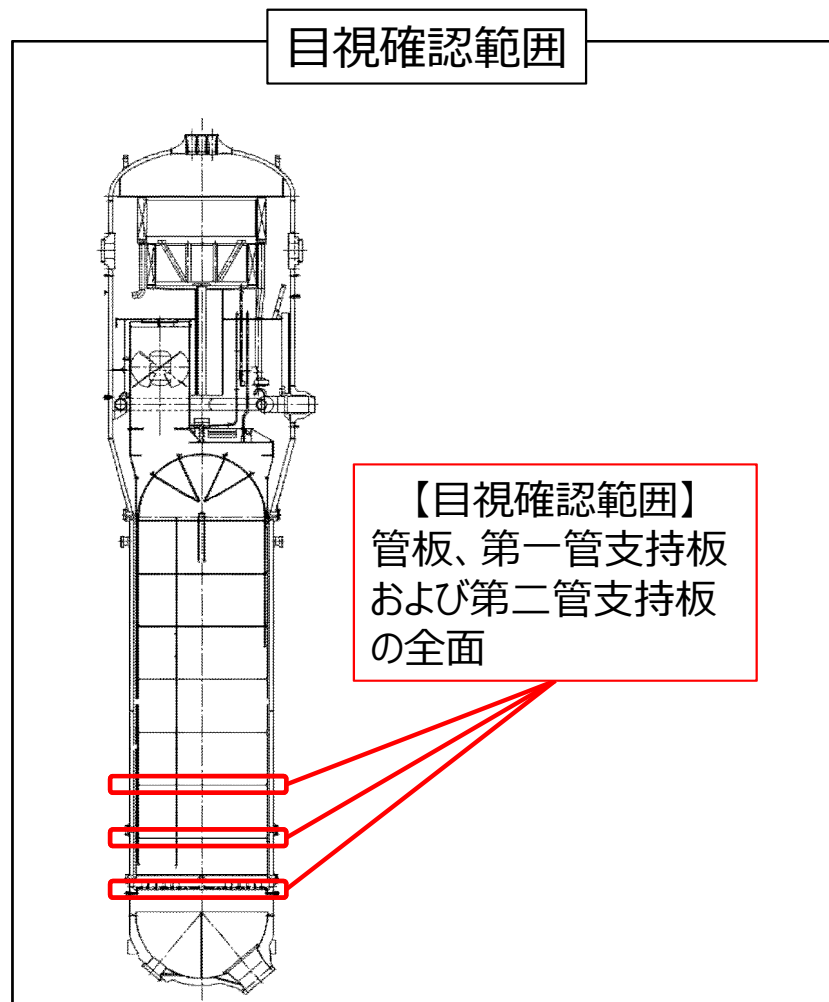
: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

説明項目		ページ番号
1	実機によるスケール脆弱化効果の確認結果	3
2	スケールに対する保全指標について	7
3	他プラントへの水平展開について	8
4	薬品洗浄有効性検証 (100℃での腐食量) について	9
5	スケール A の接触状態における 減肉の進展性について	10

○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ると考えられるため、薬品洗浄後のスケール脆弱化効果の確認に際しては、稠密層本体のスケールが一番多く堆積していたと考えられるエリア（蒸気発生器（以下、SG）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た。

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）を選定し、稠密層厚さの確認および摩耗試験を実施した。



1. 実機によるスケール脆弱化効果の確認結果（2 / 4）

4

○薬品洗浄後のスケールと伝熱管との摩耗試験について

高浜発電所3号機にて薬品洗浄を実施した後、S G器内からスケールを採取し、断面ミクロ観察および摩耗試験を実施した結果、いずれのスケールも稠密層厚さが**0.1mm**未満であり、試験片製作時にスケールが欠損、摩耗試験開始直後にスケールが欠損、または有意に摩滅することを確認した。

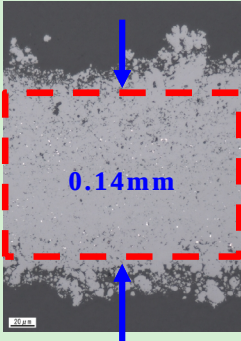
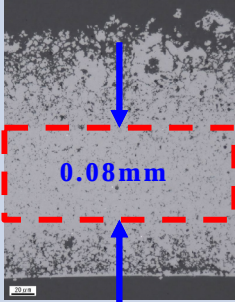
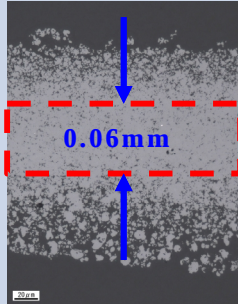
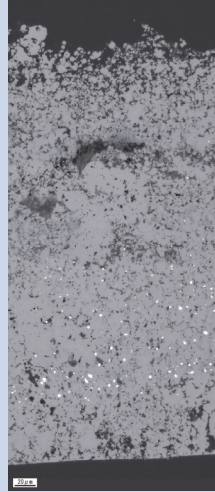
No	回収場所	スケール厚さ※ (mm)	稠密層厚さ (mm)	摩耗体積比 (伝熱管／スケール)
1	A－S G 第一管支持板上	0.2	0.08	試験開始直後に欠損
2	A－S G 第一管支持板上	0.2	0.08	試験開始直後に欠損
3	A－S G 第二管支持板上	0.2	0.04	試験開始直後に欠損
4	A－S G 第一管支持板上	0.2	0.02	試験開始直後に欠損
5	B－S G 第一管支持板上	0.3	0.04	試験開始直後に欠損
6	C－S G 第一管支持板上	0.2	0.06	0.02
7	C－S G 第一管支持板上	0.3	0.06	試験開始直後に欠損
8	C－S G 第一管支持板上	0.2	0.06	試験片製作時に欠損
9	C－S G 第一管支持板上	0.3	0.04	0.01
10	C－S G 第一管支持板上	0.3	0.06	0.01
参考	C－S G 第七管支持板上	0.5	0.00	0.01

※：ノギスにより計測

1. 実機によるスケール脆弱化効果の確認結果（3 / 4）

5

○薬品洗浄後のスケール稠密層厚さについて（以下に代表例を示す。）

回収場所	＜薬品洗浄前＞ C－SG 回収スケール 第一管支持板上	＜薬品洗浄後＞ A－SG 回収スケール 第一管支持板上 （ケース2）	＜薬品洗浄後＞ C－SG 回収スケール 第一管支持板上 （ケース6）	＜薬品洗浄後＞ C－SG 回収スケール 第七管支持板上 （参考）
断面ミクロ 観察結果				
稠密層厚さ (mm)	0.14	0.08	0.06	0.00
スケール厚さ※ (mm)	0.2	0.2	0.2	0.5

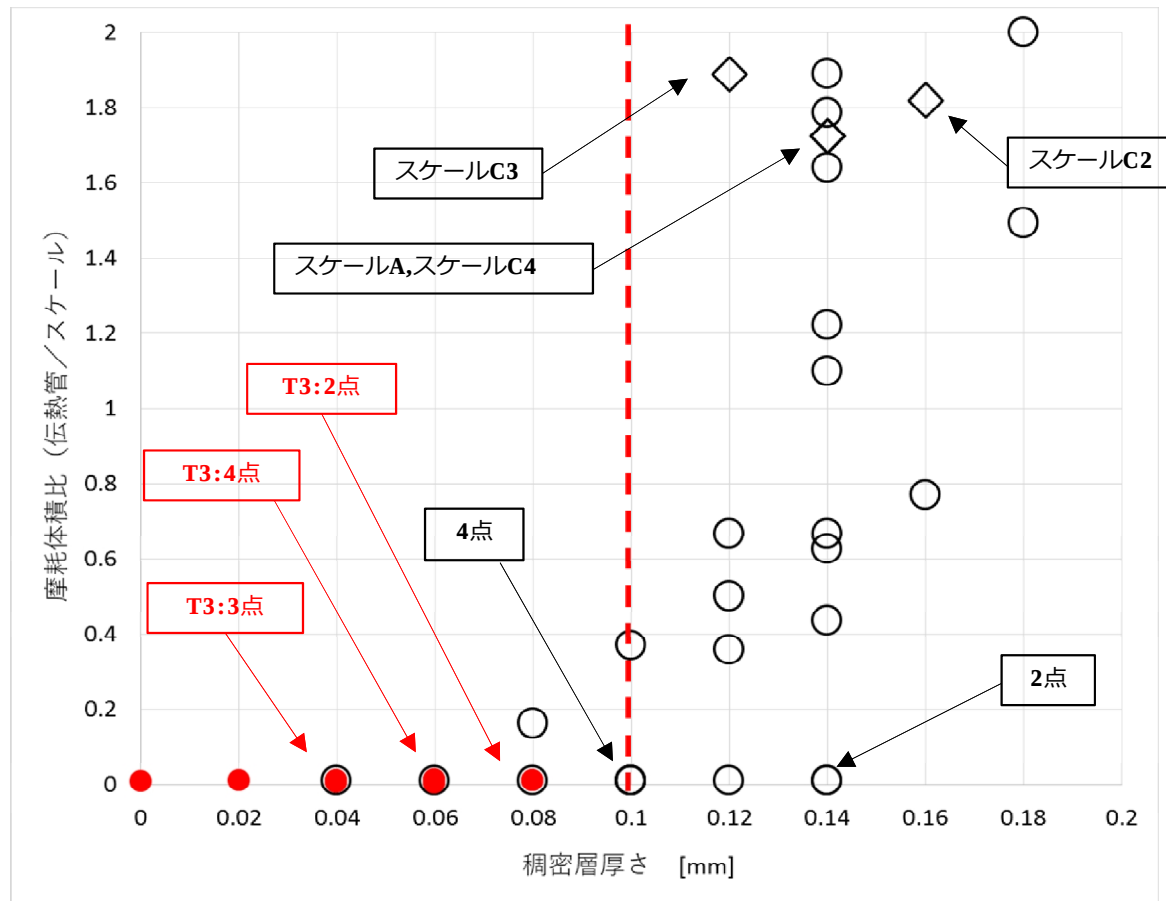
※：ノギスにより計測

：稠密層の範囲

○稠密層厚さと摩耗体積比の関係

薬品洗浄後の高浜発電所 3 号機から採取した実機スケールについて、稠密層厚さと摩耗体積比の関係を整理した結果、稠密層厚さおよび摩耗体積比ともに十分低いことを確認した。

稠密層厚さと摩耗体積比の関係

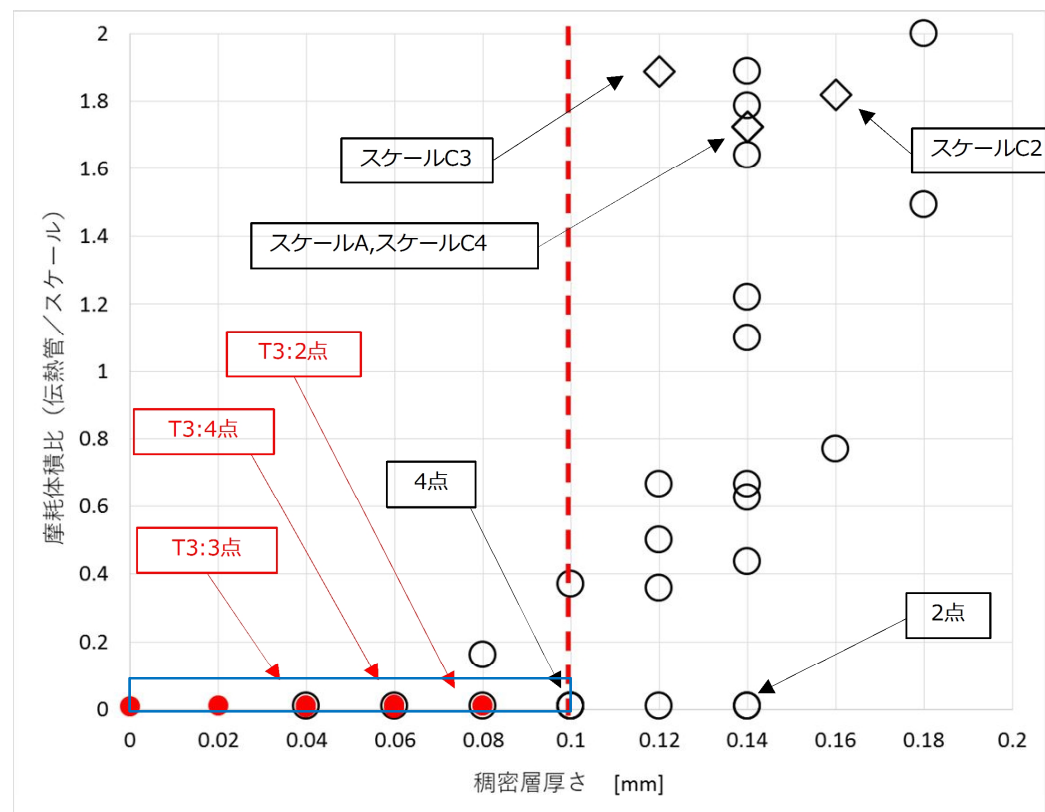


- ◇ : 減肉原因スケール(推定) (注) 4個
- : 高浜 4 号機回収スケール 26個
- : 高浜 3 号機回収スケール 11個 (薬品洗浄後)

注) 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ECTモックアップ試験から得た実機相当の伝熱管の摩耗量から算出した。また、稠密層厚さは断面ミクロ観察を行い測定した。

以上から、薬品洗浄は、スケールに起因した伝熱管減肉事象の対策として有効であると考ええる。

- なお、高浜発電所 3 号機および 4 号機の S G については、T T 6 0 0 合金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、S G 取替（以下、S G R）に係る検討を進めていく。



3. 他プラントへの水平展開について

- 他プラントについては、今回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減肉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
S G R 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 と同等の鉄持ち込み量まで計算上 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	1,950kg	同上	同上	
S G R プラント	高浜 1	680kg	—	—	S G R 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	780kg	—	—	

※高浜 3, 4 号機の最初の外面減肉発生時の鉄持ち込み量は約**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。

○薬品洗浄有効性検証（100℃での腐食量）について

今回の薬品洗浄（洗浄温度100℃）により、SG器内構造物の構成材料である炭素鋼に有意な影響を与えないことを、試験により確認を行っている。

<試験条件>

今回、第三管支持板以下は2回（EDTA濃度2～3%×24時間／回）実施するため、100℃の試験データは洗浄2回分のデータを取得

<試験結果>

炭素鋼腐食量：約27μm

試験の結果、今回の洗浄条件における炭素鋼の腐食量は十分小さいことから、SG構成材料への有意な影響はない。

○スケールAの伝熱管との接触状態における減肉の進展性について

スケールAは伝熱管に対して斜めに接触しており、流体力により伝熱管に押し付けられる方向の外力も作用していると考えられることから、その状態での減肉の進展性について以下に見解をまとめた。

スケールAはB E C穴の2箇所支持されており、その支持状態は次の2ケースが考えられる。

(1) 支持部で固定されているケース

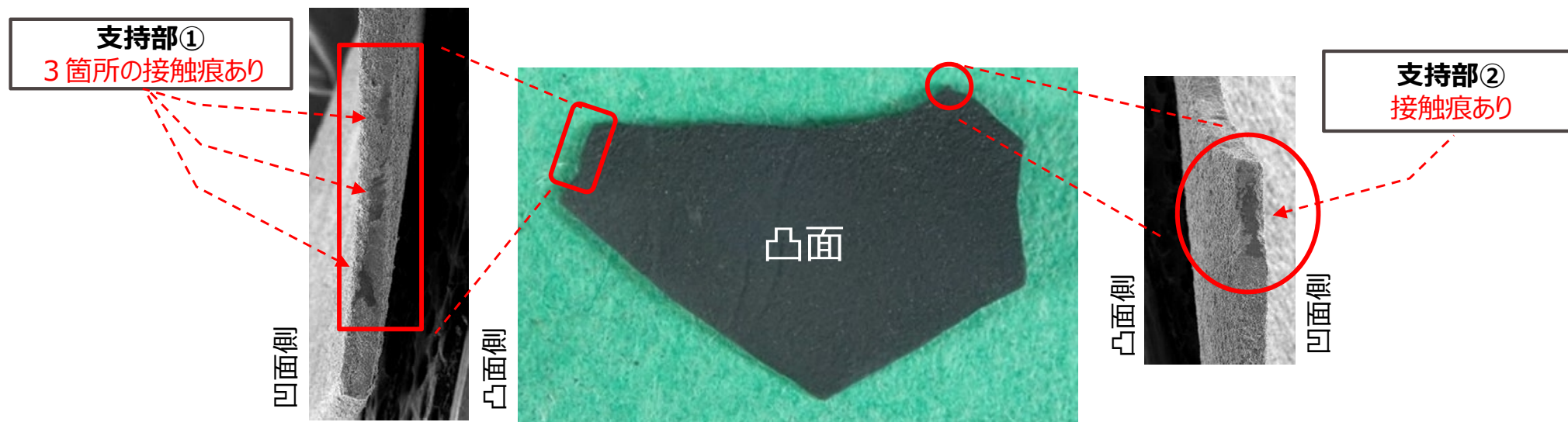
(2) 支持部で固定されておらず、流体力で伝熱管へ押し付けられるが、伝熱管からの押し戻しもあるケース※
また、最も厳しい評価となる次のケースについても仮定し、1サイクルでの最大減肉深さの考察を行った。

(3) 伝熱管からの押し返しに耐えると仮定し、スケールAが伝熱管方向に倒れ続けるケース※

※：ケース(2)(3)では、減肉深さは伝熱管の振動振幅によらない

(1) 支持部で固定されているケース

スケールAのB E C穴での支持部については、2箇所とも接触痕が認められ、かつ支持部①においては、3箇所の接触痕が認められたことから、実際には計4箇所の支持点で固定されていたことが考えられる。



本ケースでは、スケールは動くことなく固定された状態を想定するため、減肉の進展は、他のスケールC 2～C 4と同様に、伝熱管の振動振幅範囲内に制限される。

(2) 支持部で固定されておらず、流体力で伝熱管へ押し付けられるが、伝熱管からの押し戻しもあるケース

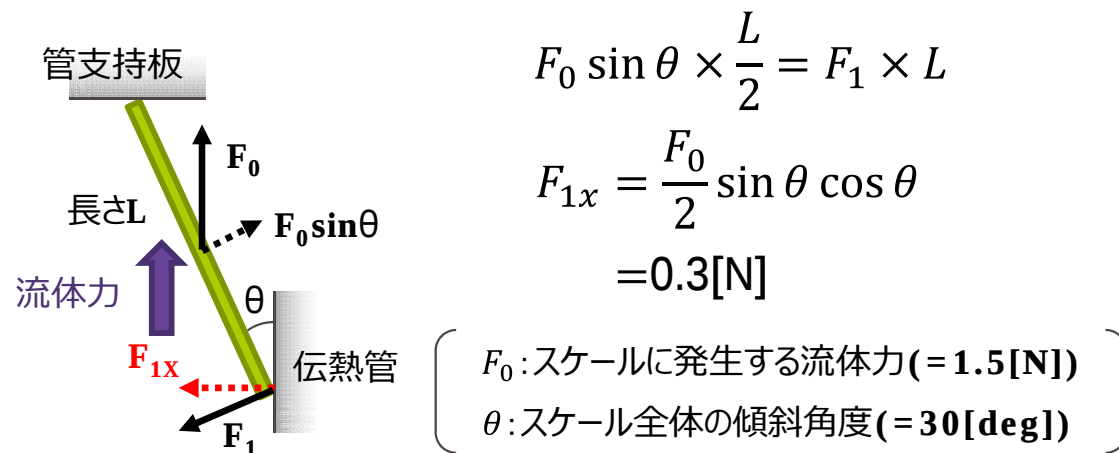
本ケースでは、スケールAはB E C穴縁部の2点で支持されるが、固定はされず、流体力に伴う外力または伝熱管からの押付力の作用により、支持部を支点に動く状態が想定される。

この状態ではスケールAは不安定なため、伝熱管からの押付力によりスケールAは押し戻されることとなり、伝熱管とスケールAの間に発生する押付力は、スケールが受ける流体力によるものとなる。

ここでは、流体力に伴う押付力、ワークレートおよび摩耗体積を算出し、ケース(1)との比較を行った。

<流体力に伴う押付力計算結果>

スケールAに発生する流体力と、流体力により伝熱管との間に発生する押付力による回転モーメントが釣り合うとして評価

**<ワークレート・摩耗体積計算結果>**

ケース	押付力 [N]	ワークレート [mW]	摩耗体積 [mm³]
本ケース	約0.3	約1	約0.2※1
ケース(1)※2	約1	約3	約0.5※3
【参考】 スケール振動のケース※4	1	<0.01	—

※1: 今回サイクル(約5,800hr)を想定した評価結果

※2: 2 / 5 公開会合資料 P. 53より

※3: ECTモックアップ試験で確認した実機相当寸法では約0.3mm³

※4: 本ケース以外でスケール自身が動くケースとして、スケール自身の振動でワークレートを発生させるケースを参考併記
(2 / 5 公開会合資料 P. 46より)

本ケースでは、ケース(1)に比べて押付力は1 / 3程度となり、ワークレートおよび摩耗体積も1 / 3程度となる。

したがって、実機において、いずれのケースであっても、貫通することはない。

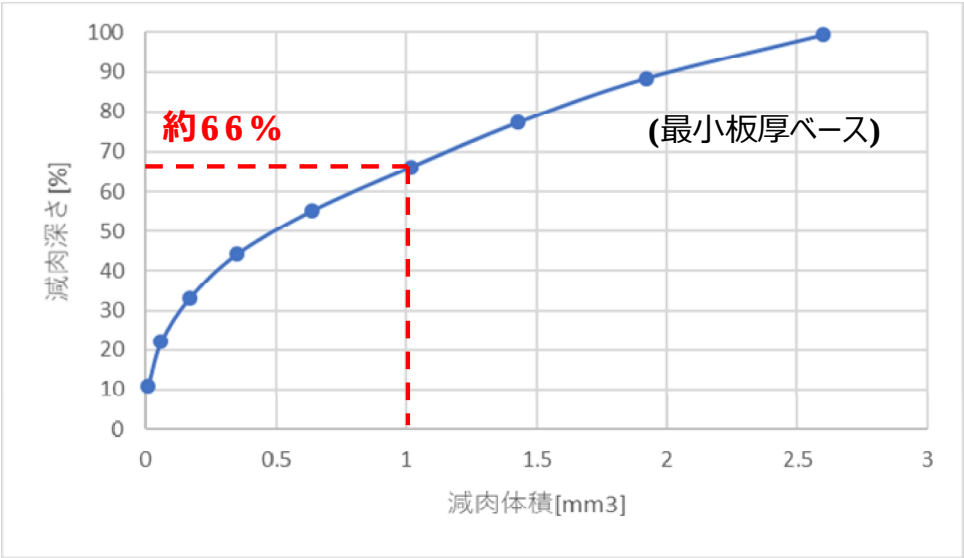
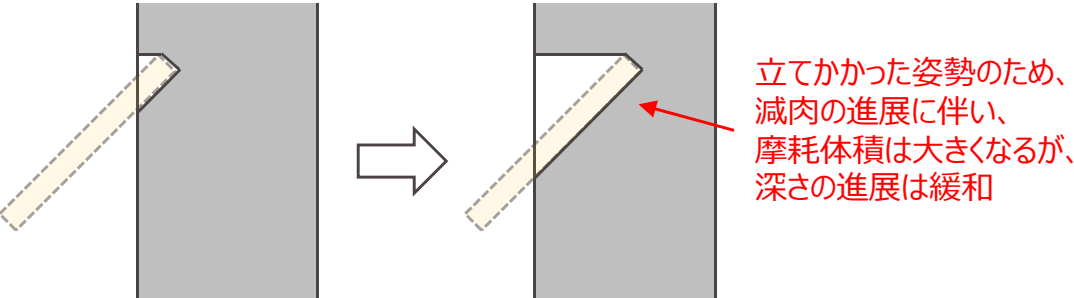
(3) 伝熱管からの押し返しに耐えると仮定し、スケールAが伝熱管方向に倒れ続けるケース

本ケースでは、スケールAの支持条件は無視し、スケールAが伝熱管に倒れ続け、伝熱管との摺動が振動振幅の制限によらず継続するものと仮定した。この仮定における1サイクルでの最大減肉深さを評価するとともに、最大減肉深さにおける強度・耐震評価を行った。

＜最大減肉深さ評価結果＞

ケース	ワークレート[mW]	運転時間[hr]	摩耗体積[mm³]
ケース (3)	約3	10,248※1	1.0※2

※1：1サイクルで想定される最大運転時間（427日）
※2：保守的に切り上げ評価



＜強度評価結果※＞

減肉深さ [%]	破断圧力P _B [MPa]	許容値 [MPa]	裕度
66	27.14		

※評価方法は2 / 5 公開会合資料の通り

＜耐震評価結果※＞

応力分類	発生応力 および疲労累積係数	許容値	裕度
一次一般膜応力	292 MPa	334 MPa	1.1
膜応力 + 曲げ応力	296 MPa	430 MPa	1.4
一次 + 二次応力	221 MPa	492 MPa	2.2
疲労累積係数	0.05	1	—

評価の結果、最大減肉深さは約66%となり、1サイクルでは貫通せず、強度・耐震上も問題ないことを確認した。

：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。

以降、2月5日公開会合資料抜粋

資料1－1 高浜発電所4号機蒸気発生器伝熱管の損傷について（概要版）

1. 事象の概要 (減肉伝熱管 2 次側からの確認結果)

資料 1-1

8

14

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

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

○ A - S G

第三管支持板：長さ 約 4.0mm、幅 1.0mm 以下 (X51,Y4) 減肉率：約 3 3 %

○ C - S G

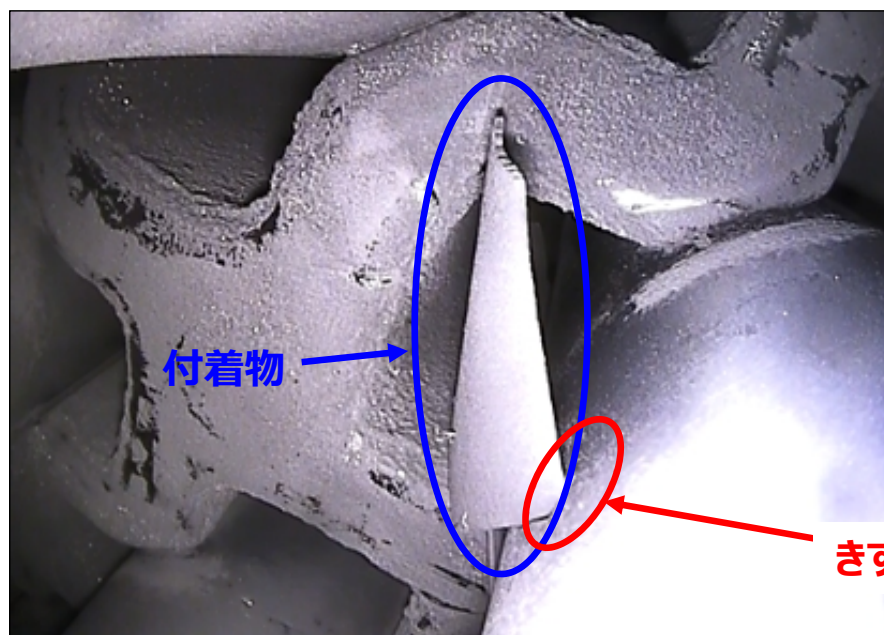
第三管支持板：長さ 約 2.0mm、幅 約 1.0mm (X55,Y3) 減肉率：約 2 5 %

第三管支持板：長さ 約 6.0mm、幅 1.0mm 以下 (X55,Y8) 減肉率：約 3 2 %

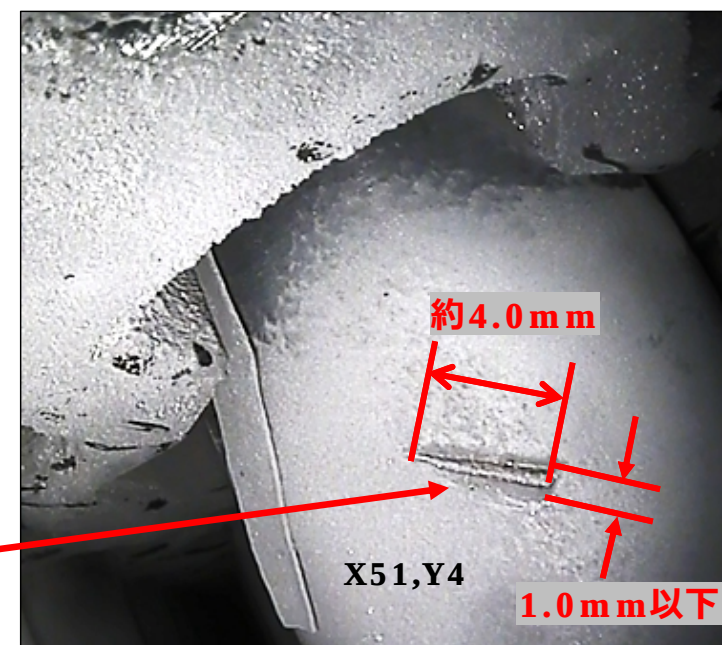
第三管支持板：長さ 約 7.0mm、幅 1.0mm 以下 (X21,Y8) 減肉率：約 3 6 %

A - S G (X 5 1 , Y 4)

付着物回収前



付着物回収後



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耗量と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、稠密層厚さは断面ミクロ観察を行い測定した。

○摩耗形態の推定

管支持板下面で摩耗減肉が発生する場合、以下の2つのケースが考えられる。

- ・ スケール振動による摩耗
- ・ 伝熱管の振動による摩耗

減肉量（摩耗体積）は、下記の一般式を用い算出できることから、ワークレートを求め、摩耗体積の評価を行う。

＜Archardの式＞

$$V = W_s \times \underbrace{F \times v}_{W_R} \times T$$

V : 摩耗体積 [m³]

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） [m²/N]

F : 押付力 [N]

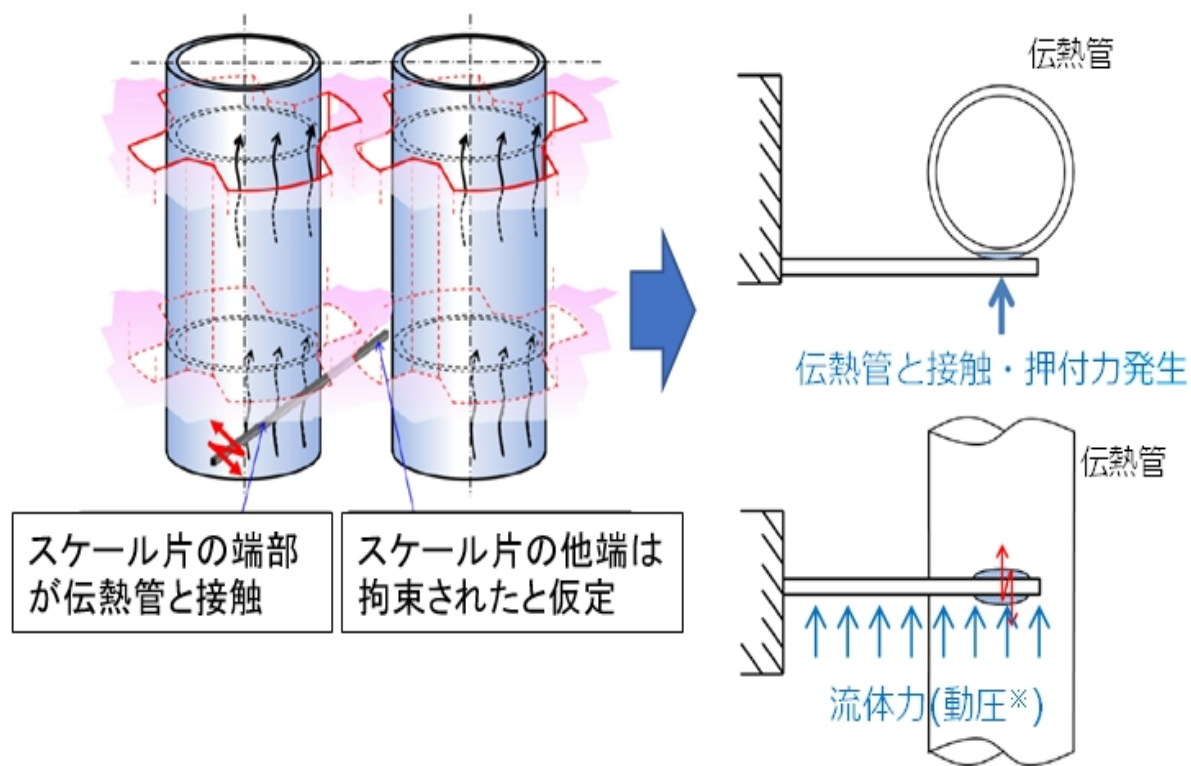
T : 運転時間 [s]

v : 摺動速度 [m/s]

W_R : ワークレート (= $F \times v$: 摩耗を生じさせる仕事率) [W]

○スケール振動のケース

- ・スケールの端部が拘束されたと想定する（片持ち梁と仮定）。
- ・スケールでは流体力を受ける面積が小さいため、ワークレートは小さく、有意な摩耗減肉が発生しないことを確認した。



減肉メカニズム概要

計算モデル（片持ち梁）

* 3次元熱流動解析により算出

＜片持ち梁の場合の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]

ワークレート試算結果

スケール	押付力 (N)	ワークレート (mW)	実機減肉量 再現可能性
A	1	<0.01	×
C 2	1	<0.01	×
C 3	1	<0.01	×
C 4	1	<0.01	×

3. 減肉メカニズム（スケールにより伝熱管を損傷させる可能性 15／18）

- ワークレートによる摩耗体積評価
- ・流動振動解析により得られたワークレートから算出した1サイクルで発生する摩耗体積と、実機ECT結果との整合性が確認された人工欠陥の体積を比較した。
 - ・その結果、解析による摩耗体積と人工欠陥の体積がほぼ一致することを確認した。

ECTモックアップ試験により実機整合性を確認した減肉形状の体積

対象	確認手段	減肉形状 [mm]			摩耗体積 [mm ³]
		深さ	軸方向長さ	周方向長さ	
A-SG : X51, Y4	目視	—	1以下	約4	—
	ECTモックアップ試験	約0.4	約0.7	約3	約0.3
C-SG : X21, Y8	目視	—	1以下	約7	—
	ECTモックアップ試験	約0.5	約0.3	約6	約0.5
C-SG : X55, Y3	目視	—	約1	約2	—
	ECTモックアップ試験	約0.3	約0.3	約3	約0.2
C-SG : X55, Y8	目視	—	1以下	約6	—
	ECTモックアップ試験	約0.4	約0.3	約6	約0.5

流動振動解析により得られたワークレートから算出した摩耗体積

対象	比摩耗量 [m ² /N]	ワークレート [mW]	運転時間 [hr]	摩耗体積 [mm ³]
A-SG : X51, Y4		約3	約5,800	約0.5
C-SG : X21, Y8		約2	約5,800	約0.5
C-SG : X55, Y3		約3	約5,800	約0.5
C-SG : X55, Y8		約2	約5,800	約0.5

：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。

3. 減肉メカニズム (スケールにより伝熱管を損傷させる可能性 16 / 18)

資料1-1

54

19

○高浜発電所 3 号機および 4 号機の特異性

鉄の持込み量について、比較のため当社他プラントの調査を実施した。また、当社他プラントでは薬品洗浄を実施しており、スケール性状に影響を与えている可能性があることから、その実績を確認した。さらに、スケールの厚さ増加や長期停止による剥離挙動の影響は、スケール回収量に現れている可能性があることから、あわせて比較調査を実施した。

○鉄持込み量※および薬品洗浄実績

各プラントの鉄持込み量および薬品洗浄実績を調査した結果は下表とおりであり、鉄持込み量は高浜発電所 3 号機および 4 号機が最も大きく、続いて大飯発電所 3 号機および 4 号機であり、S G 取替を実施している美浜発電所 3 号機ならびに高浜発電所 1 号機および 2 号機が最も小さいことを確認した。

以上から、鉄持込み量が最大の高浜発電所 3 号機および 4 号機のスケールが、最も稠密層が厚く成長しているものと推定した。

	高浜 3	高浜 4	大飯 3	大飯 4	美浜 3	高浜 1	高浜 2
運転時間 (万時間)	22.3	22.2	17.0	17.2	9.0	10.9	12.5
鉄持込み量 (kg)	2,620	2,490	1,850	1,950	780	680	940
薬品洗浄 実績回数			2回	1回			
薬品洗浄 実績時間 (万時間)	—	—	16.1 (第17回定期検査) 17.0 (第18回定期検査)	16.2 (第16回定期検査)	—	—	—

美浜発電所 3 号機、高浜発電所 1 号機および 2 号機については、S G 取替以降の運転時間を示す。

※：①給水ヘッダから給水を約20ccサンプリングし、それに酸を加えて加熱することで鉄イオン溶液にする。

②①の溶液を、質量分析器にかけ、鉄質量 (μg / リットル) を算出する。(標準試料と鉄イオン濃度との比較で、鉄質量を算出)

③鉄質量 (μg / リットル) に、給水流量 (5,210t / h) 、運転時間を乗じて、鉄持ち込み量 (鉄) を算出する。

④鉄持ち込み量 (鉄) に質量比 (1.382) を乗じて、鉄持ち込み量 (マグネタイト量) を算出する。

3. 減肉メカニズム (スケールにより伝熱管を損傷させる可能性 18 / 18)

資料1-1

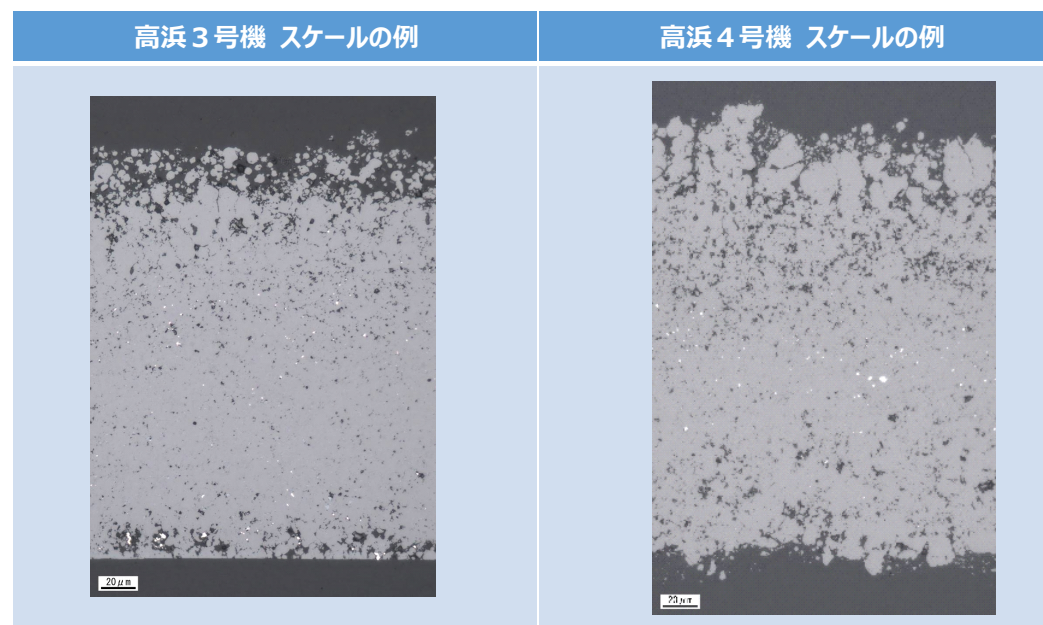
56

20

○当社他プラントとの実機スケール比較

スケールの稠密層厚さが鉄持込み量と相関するかを検証するため、当社他プラントの伝熱管下部から実機スケールを採取し、断面ミクロ観察を実施した結果は下表のとおりであり、鉄の持込み量が多いプラントほどスケールの稠密層（空隙率5%以下）は厚く成長していることを確認した。

回収場所	高浜4号機 鉄持込み量： 2,490kg	大飯4号機 鉄持込み量： 1,950kg	高浜2号機 鉄持込み量： 940kg	備考
第二管支持板 ～ 管板間	空隙率5%以下の 稠密層厚さ： 最大0.18mm	空隙率5%以下の 稠密層厚さ： 最大0.04mm	空隙率5%以下の 稠密層厚さ： －mm (伝熱管へのスケール付着がごく軽微で あり、採取できるほどの厚みなし)	稠密層厚さは 鉄の持込み量と相関
	高浜3号機も同等 (以下の写真の通り)	大飯3号機も同等であるが、薬品洗 浄回数の少ない大飯4号機を選定	S G取替プラントの中では最も鉄の 持込みが多い高浜2号機を選定	



大飯発電所4号機では第16回定期検査に薬品洗浄を適用していることから、大飯発電所4号機のスケールでは薬品洗浄1回分の粗密化効果の影響もあるものと推定される。

稠密な性状のスケールを脆弱化させるための対策として、大飯発電所3号機および4号機においても実績のある薬品洗浄について、洗浄試験により有効性の検証を行った。

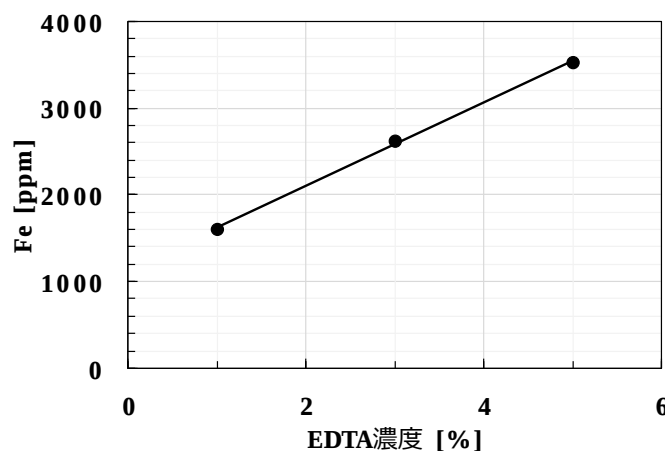
＜洗浄試験＞

スケールの薬品浸漬試験を行い、稠密層厚さの減少効果を確認するとともに、伝熱管との摩耗試験により脆弱化効果を確認した。

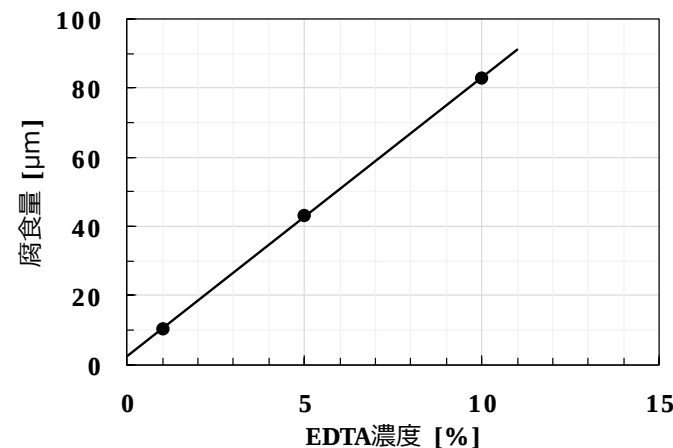
○浸漬試験条件の設定

①薬品濃度

- ・薬品濃度に比例して鉄の溶解量は増加するため、スケール脆弱化の観点では濃度が高いほどよい。
 - ・薬品濃度に比例して炭素鋼（S G 器内構造物の主な構成材料）の腐食量も増加。
- ⇒腐食影響を最小限に抑える観点で、国内実績で最大の3%以下とし、浸漬試験では2%～3%を適用。



薬品濃度と鉄溶解量の関係



薬品濃度と炭素鋼腐食量の関係

②洗浄温度

- ・温度が高いほどスケール中へのEDTA※の浸入および鉄との反応は進むため、基本の80℃よりも高温側に設定。

※：希薄なエチレンジアミン四酢酸。合成洗剤に使用される酸の一種で鉄、銅の溶解を促進する効果を持つ薬液。

- ・ただし、実機適用時にS G 器内の薬品濃度を均一にすることおよび作業安全の観点から、沸騰しない温度とする。

⇒100℃を適用。（水の蒸気圧約0.1MPaに対し、洗浄中のS G 器内圧は攪拌用窒素の注入・加圧に伴い0.15MPa）

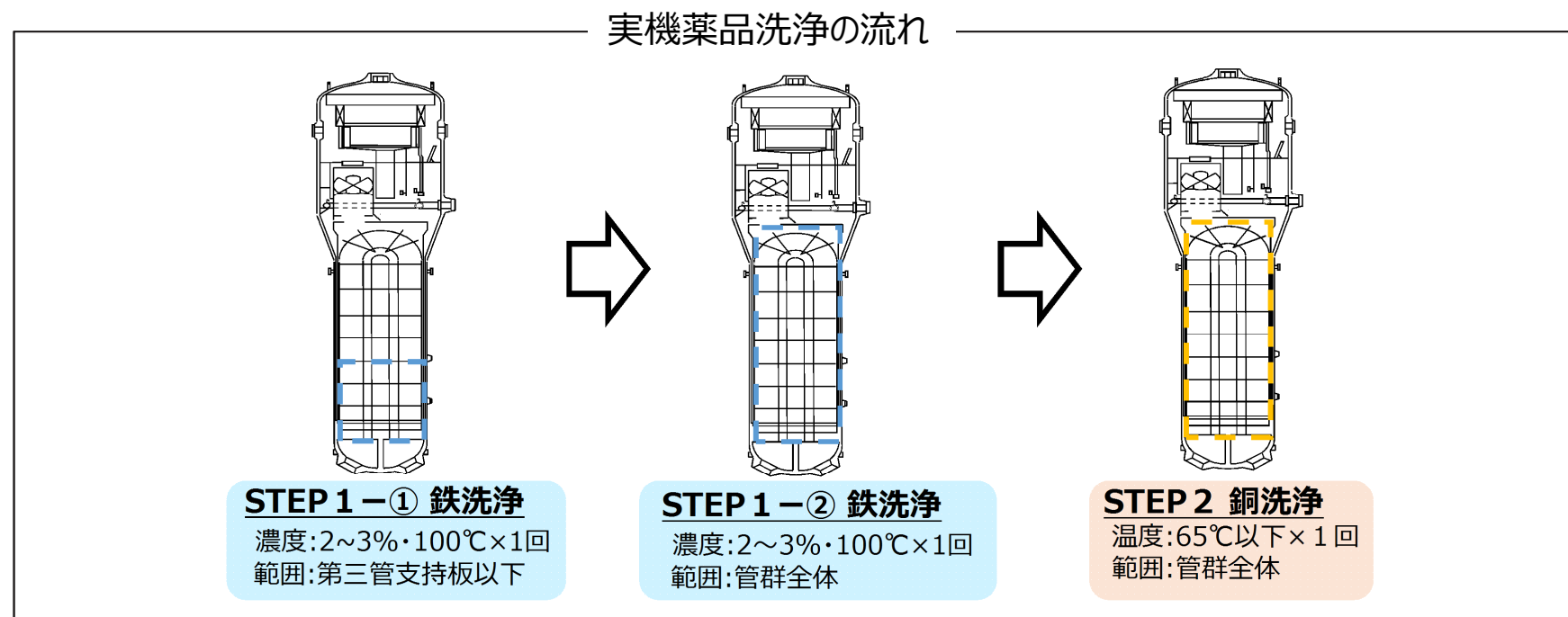
＜実機洗浄方法＞

○洗浄条件

洗浄試験の結果から、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。

○洗浄範囲

洗浄範囲については、管群全体を対象とする。なお、今後のプラント運転に更なる万全を期すため、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回追加洗浄を行うこととする。

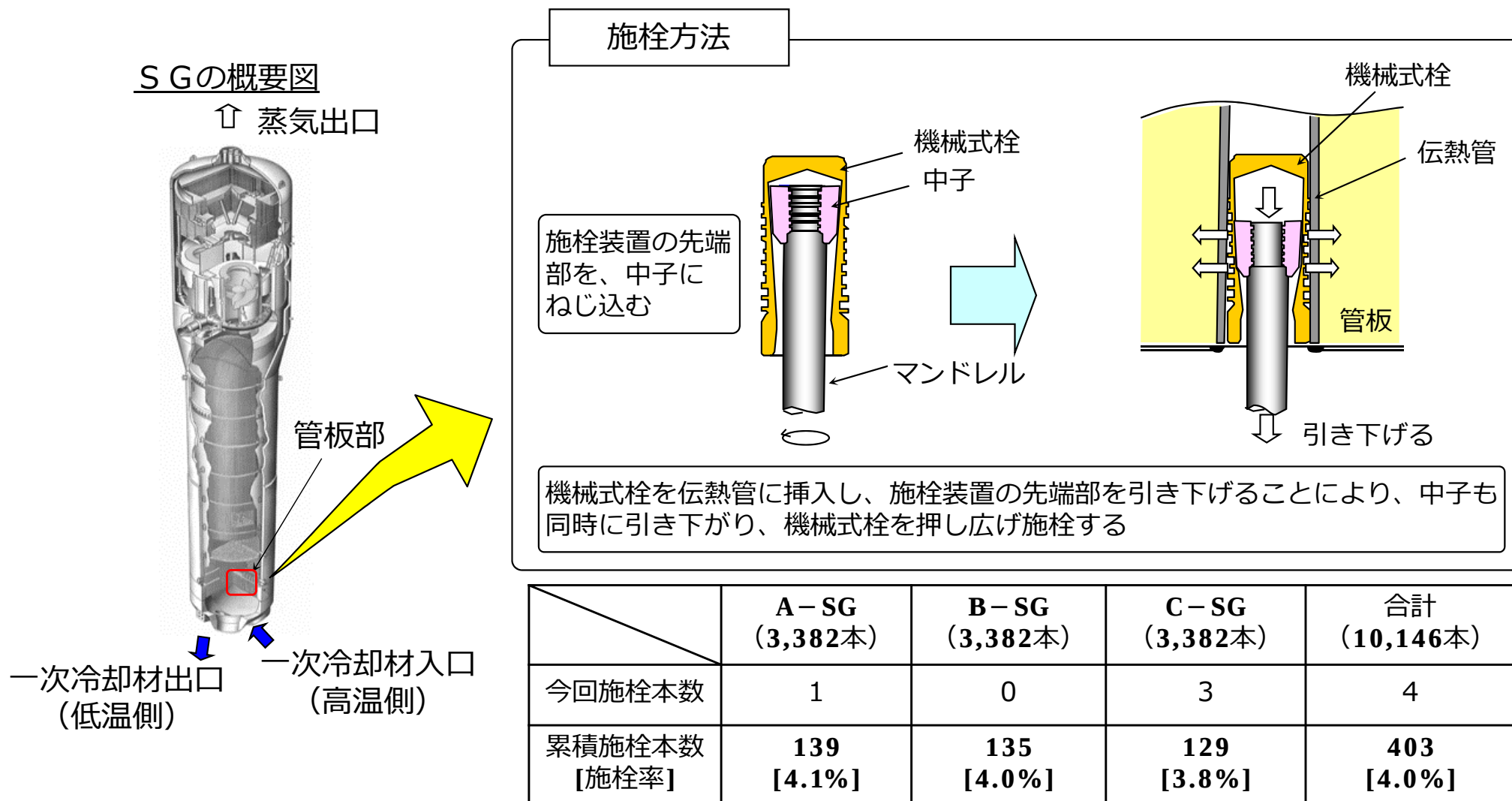


＜実機によるスケール脆弱化効果の確認＞

高浜発電所4号機での対策実施に先立ち、同程度のスケールが蓄積していると考えられる高浜発電所3号機において薬品洗浄を実施後にスケールを回収し、スケールが脆弱化されていることを確認する。

○伝熱管の施栓（従前からの対応）

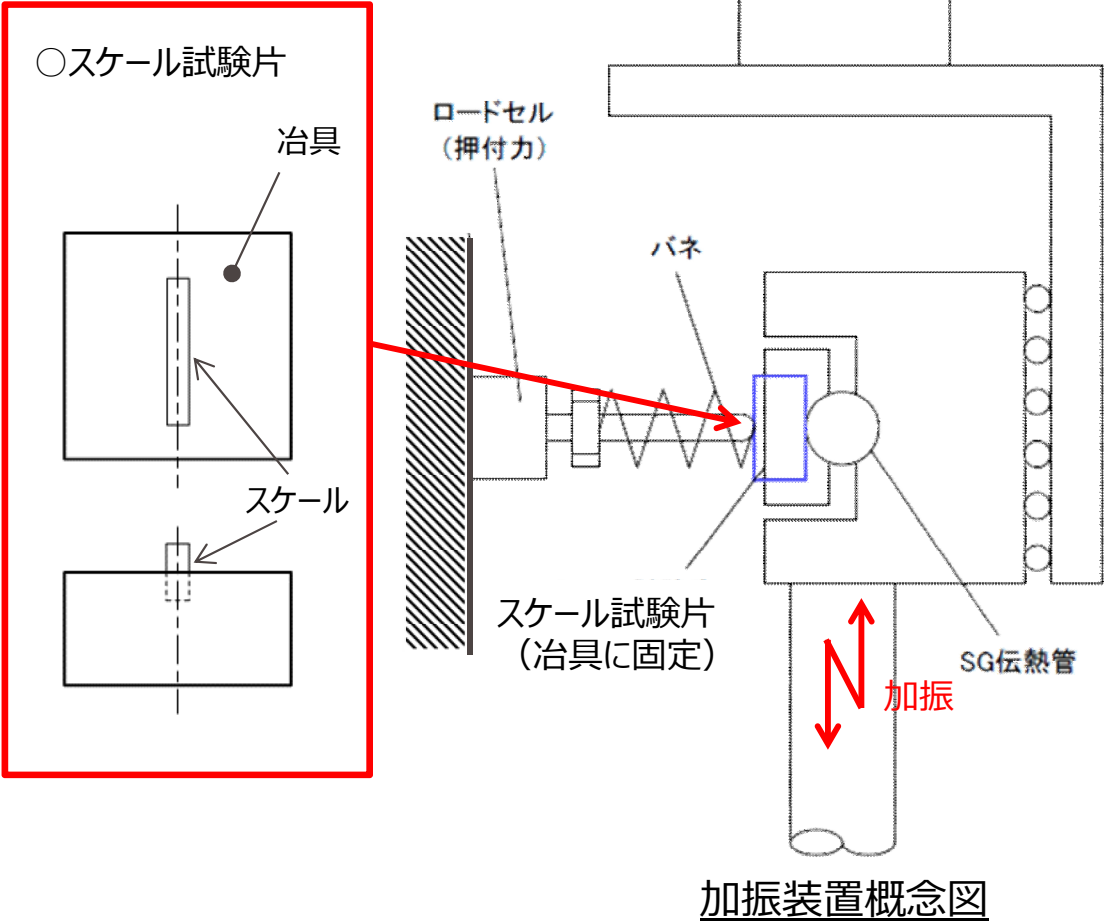
減肉が認められたSG伝熱管について、高温側および低温側のSG管板部で施栓し、供用外とする。



○薬品洗浄による稠密性状スケールの脆弱化 ➡ 59 ~ 62

- I SG器内に薬液を注入し、伝熱管全体を浸すことにより、伝熱管に付着している稠密な性状のスケールを粗密化させ、脆弱化させる。
- I 高浜発電所4号機次回（第24回）定期検査において、スケールの性状を確認し、今後の保全計画に反映する。

- 実機条件を模擬した流動振動解析結果から摩耗試験条件を設定
- 設定した条件を再現する加振装置を用いて摩耗試験を実施



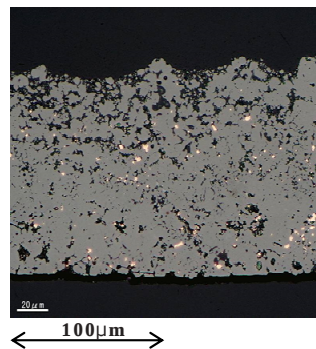
摩耗試験条件

伝熱管摺動条件		備考
押付力	約 1 N	熱流動解析結果より設定
振動数	約 8 Hz	振動応答解析結果より設定
振幅	約 0.4 mm	B E C穴ランド部寸法より設定

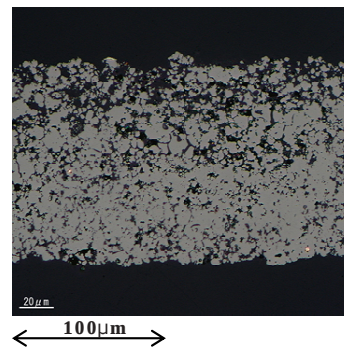
＜薬品洗浄前後スケール性状比較＞

○大飯発電所4号機において、薬品洗浄前後のスケール性状を断面ミクロ観察により比較した結果は以下の通りであり、薬品洗浄により、スケールが粗密化することを確認

薬品洗浄前のスケール※1



薬品洗浄後のスケール※2



- ※1 大飯発電所4号機第14回定期検査で回収
- ※2 実験室での薬品洗浄試験後（実機と同条件）
主な洗浄条件（鉄洗浄）は次の通り
EDTA濃度：1％
洗浄温度：80℃
洗浄時間：24時間

＜3kHz-ECT＞

○大飯発電所3および4号機においても、スケール厚さ把握のため、過去に周波数3kHzでECTを実施していることを確認

○運転時間が最も長いタイミングで取得したデータは、大飯発電所3号機第8回定期検査であり、以下の通り

（大飯発電所3号機第8回定期検査での取得データ（平成13年／7.9万時間／高温側））

第三管支持板以下：約0.05～0.06mm

第三管支持板以上：約0.09～0.17mm

○高浜発電所3および4号機での調査結果と同様に、伝熱管下部ほど薄く、上部ほど厚い傾向であることを確認

強度評価

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。

減肉深さ（％）（注1）	破断圧力P _B （MPa）	事故時を包絡する作用内外差圧（MPa）（注2）	裕度
36	33.81		

（注1）最大減肉深さのC－SG（X21,Y8）で代表
（注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

※本評価式は、過去の高浜発電所3および4号機SG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。

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

＜今回の計算条件＞

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＝（最小板厚を考慮）

R：平均半径＝（D－t）/2＝（D：外径＝22.23mm）

a：減肉深さ＝（×0.36）

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

2c：減肉幅＝5mm

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。

⇒減肉した伝熱管が運転中および事故時の内外差圧により破断することはない。

：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

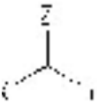
耐震性評価

- 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※1の基準地震動Ssによる地震力および伝熱管全長モデル（右図）※2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
- ※1：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）
- ※2：高浜発電所4号機既工認（新規制基準工認）補足説明資料「高浜発電所第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」

表 減肉を有する伝熱管の耐震性評価結果

応力分類	発生応力※3 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	—

※3：最大減肉深さのC－S G（X21,Y8）で代表



伝熱管地震応答解析モデル

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。

⇒減肉した伝熱管が地震により損壊することはない。

<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（S U S 3 0 4 で $6.6 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ ）は同等

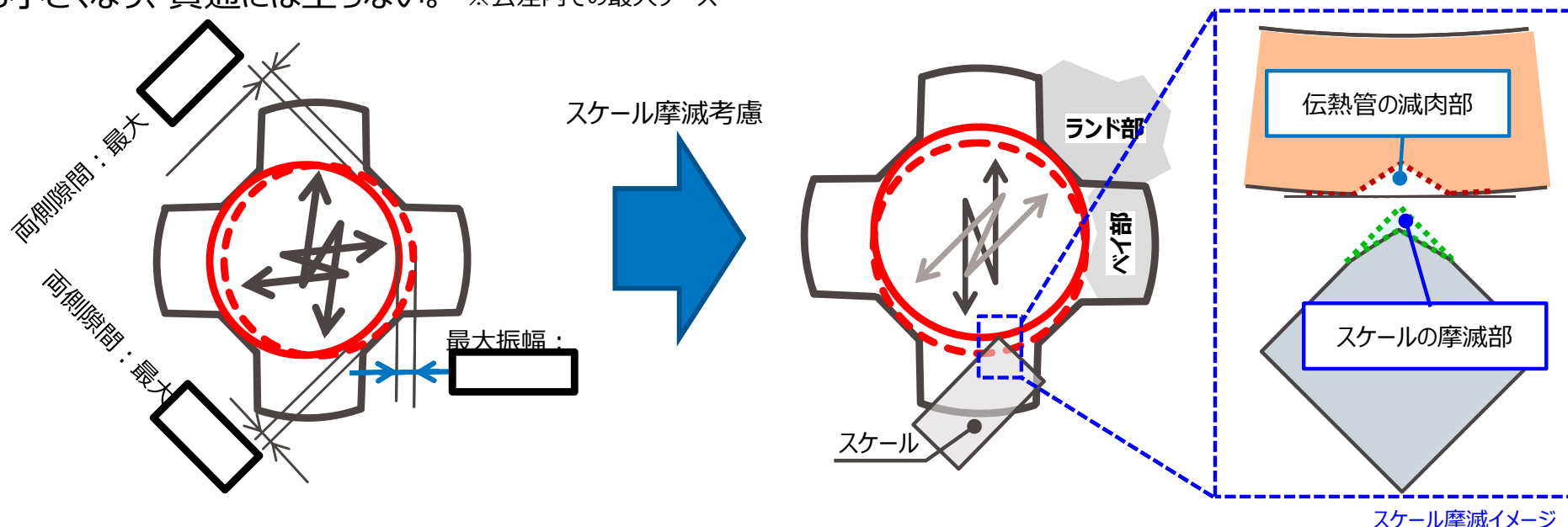
○ただし、同じ比摩耗量、同じワークレートで撓動し続けたとしても、最終的な摩耗減肉量は異物の場合より小さい。

- ・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。 ※公差内での最大ケース



：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。

S G 器内に薬液※を注入し、伝熱管全体を浸すことにより、伝熱管表面のスケールを緩やかに溶解させ、稠密な性状のスケールを粗密化させ、脆弱化させる効果がある。薬品洗浄は鉄洗浄、銅洗浄の2ステップからなり、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。

※ エチレンジアミン四酢酸（Ethylene Diamine Tetra acetic Acid：EDTA）。合成洗剤に使用される酸の一種で鉄、銅の溶解を促進する効果あり

<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 S G 器内を高濃度のヒドラジン水（1, 0 0 0 p p m）で浸漬し、還元性雰囲気生成する。
- 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 E D T A と結合して安定な化合物（キレート錯体）を作る。

<銅洗浄>

- ・鉄洗浄で分離した銅（金属銅）が S G 器内で酸化（酸化銅）し、伝熱管の腐食性雰囲気生成しないよう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生成で金属銅（C u）を Cu^{2+} として溶解する。
- ② 溶出した Cu^{2+} は E D T A と結合して安定な化合物（キレート錯体）を作る。

<主な洗浄条件（国内適用実績）>

項目	鉄洗浄		銅洗浄	
E D T A	1～3% (10,000～30,000ppm)	国内実績値	0.4% (大飯3号機実績)	C u 含有量の2倍
その他薬品	・アンモニア ・ヒドラジン (1,000ppm)	p H 調整 還元性雰囲気	・アンモニア ・重炭酸アンモニウム	p H 調整 E D T A 触媒
温度	80℃	—	65℃以下	—
p H	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

○薬品洗浄に伴う伝熱管等への影響

薬品洗浄を実施することで脆弱化したスケールが伝熱管から剥離するが、脆弱化したスケールがプラント運転中にS G器内の上昇流に伴って伝熱管に接触し、摩耗したとしても、脆弱化したスケールでは伝熱管を減肉させることはない。また、脆弱化したスケールが管板上へ堆積することで、管板上へのスラッジの堆積量が増加すると想定されるが、スラッジでは伝熱管を減肉させることはない。

プラント停止後は、剥離したスケールがS G器内水のブロー時にブロー水とともにS G器外に流出するが、これまで薬品洗浄を実施している大飯発電所3号機および4号機において、S G B D配管等閉塞するなどの事例は認められていないことから、剥離したスケールがプラントに影響を及ぼすことはないと考える。

○薬品洗浄の系統概要

S G B D 系統等に仮設系統を接続し、薬品注入並びに鉄洗浄および銅洗浄を行った後は、S G B D 系統および仮設系統を経由して排水する。

