

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10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	6
3	薬品洗浄有効性検証 (100℃での腐食量) について	7
4	スケールAの接触状態における 減肉の進展性について	8

1. 実機によるスケール脆弱化効果の確認結果（1 / 3）

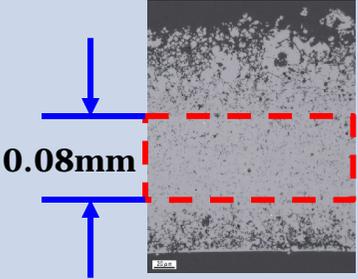
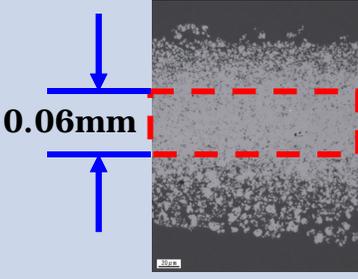
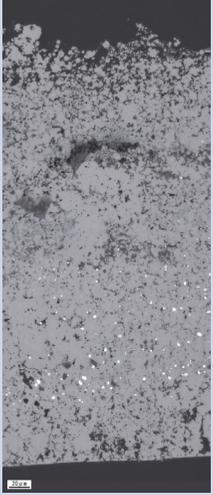
○薬品洗浄後のスケールと伝熱管との摩耗試験について

高浜発電所3号機にて薬品洗浄を実施した後、蒸気発生器（以下、SG）器内からスケールを採取し、断面マイ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、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。

ケース	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-SG 第一管支持板上	0.2	0.08	試験開始直後に欠損
2	A-SG 第一管支持板上	0.2	0.08	試験開始直後に欠損
3	C-SG 第一管支持板上	0.2	0.06	0.02
4	C-SG 第一管支持板上	0.3	0.06	試験開始直後に欠損
5	C-SG 第一管支持板上	0.2	0.06	試験片製作時に欠損
6	C-SG 第一管支持板上	0.3	0.04	0.01
7	C-SG 第一管支持板上	0.3	0.06	0.01
8	評価中	評価中	評価中	評価中
9	評価中	評価中	評価中	評価中
10	C-SG 第七管支持板上	0.5	0.00	0.01

※：ノギスにより計測

○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3)	<薬品洗浄後> C-SG 回収スケール 第七管支持板上 (ケース10)
断面ミクロ観察結果			
稠密層厚さ (mm)	0.08	0.06	0.00
スケール厚さ※ (mm)	0.2	0.2	0.5

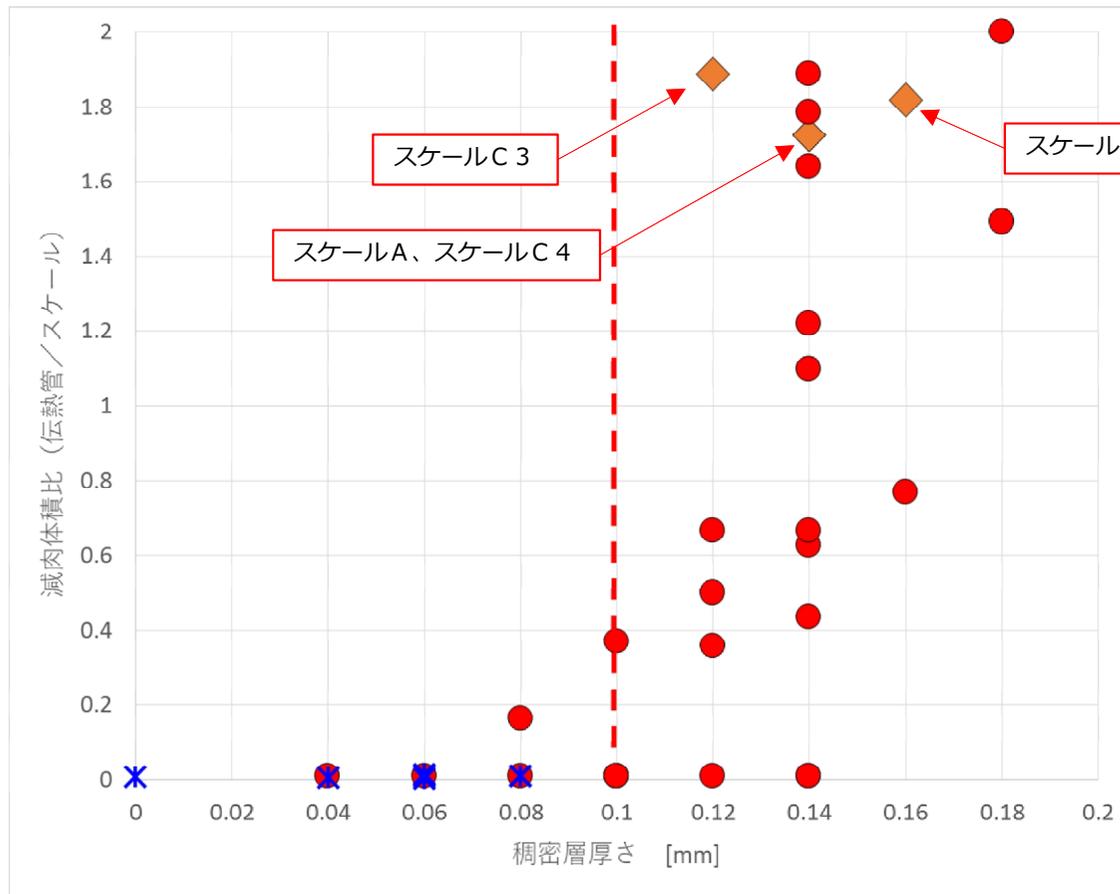
※：ノギスにより計測

 : 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



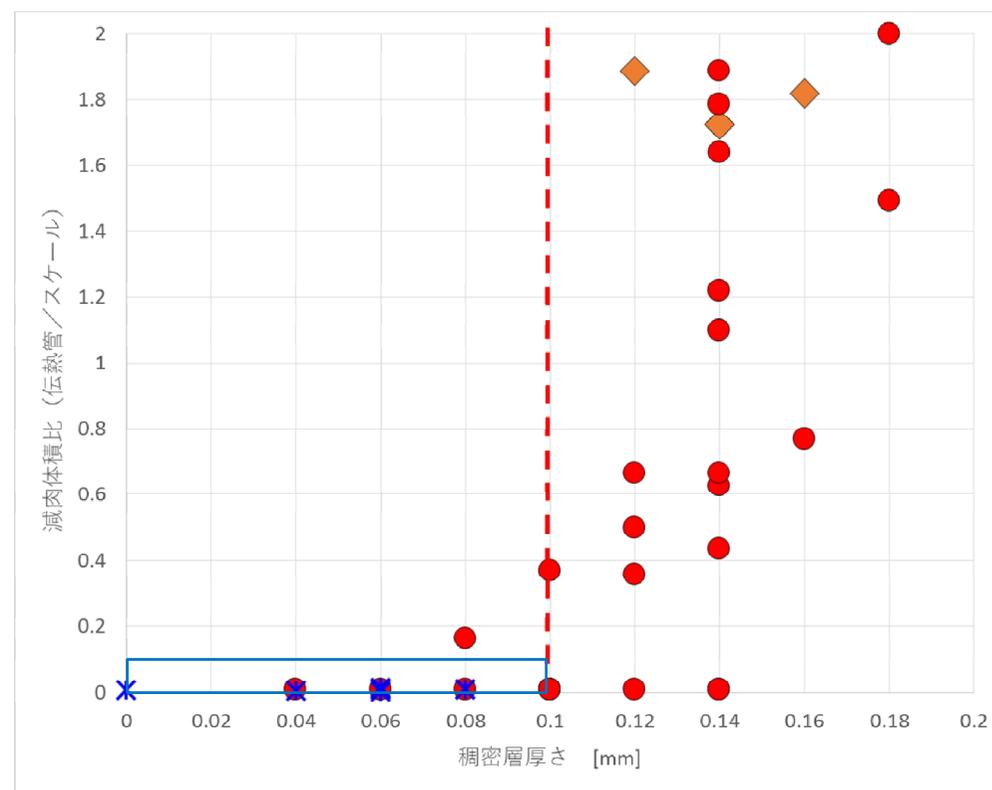
- ◆ : 減肉原因スケール(推定) (注) 4個
- : 高浜4号機回収スケール 26個
- ✳ : 高浜3号機回収スケール 8個 (薬品洗浄後)

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。

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ます。

○ S G 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。

Ⅰ 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。確認および試験では、稠密層厚さ 0.1 mm 未満、減肉体積比 0.1 未満であることを確認し、それを超えた場合は、薬品洗浄を実施する。



Ⅰ 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 取替に係る検討を進めていく。

○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

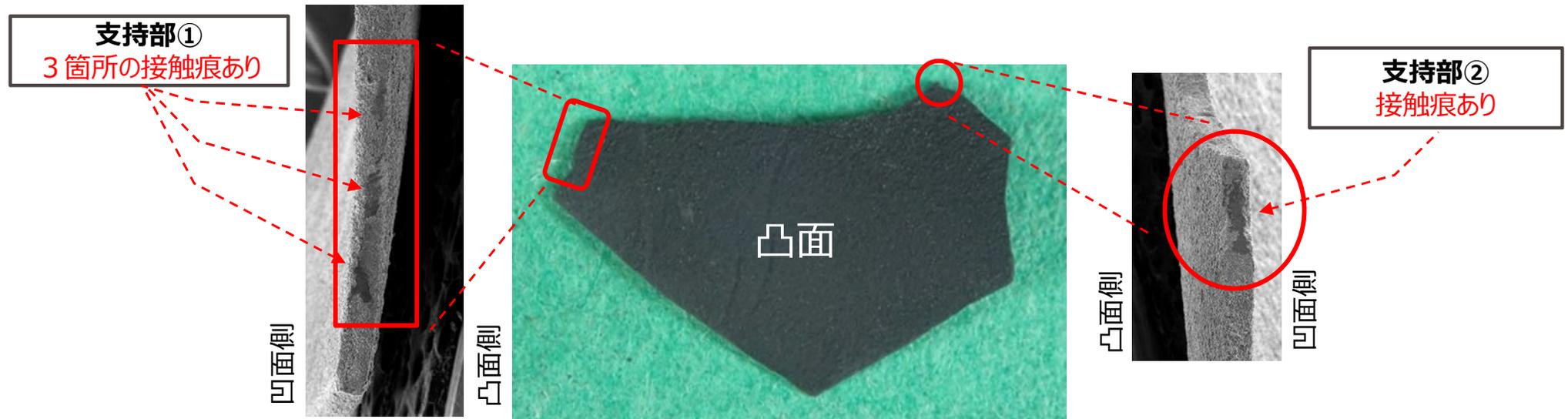
(2) 支持部で固定されておらず、流体力で伝熱管へ押し付けられるが、伝熱管からの押し戻しもあるケース※
また、最も厳しい評価となる次のケースについても仮定し、1サイクルでの最大減肉深さの考察を行った。

(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

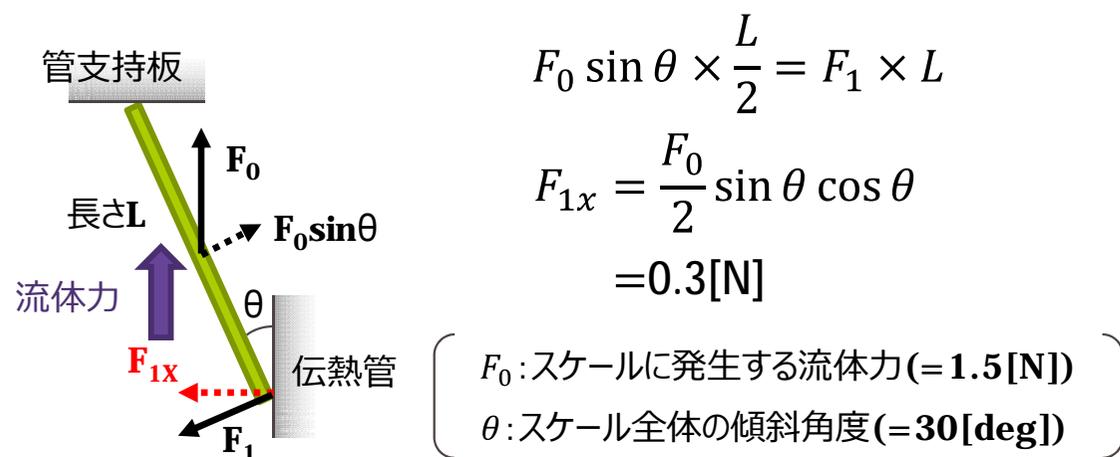
本ケースでは、スケールAはB E C穴縁部の2点で支持されるが、固定はされず、流体力に伴う外力または伝熱管からの押付力の作用により、支持部を支点に動く状態が想定される。

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 [mm ³]
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。

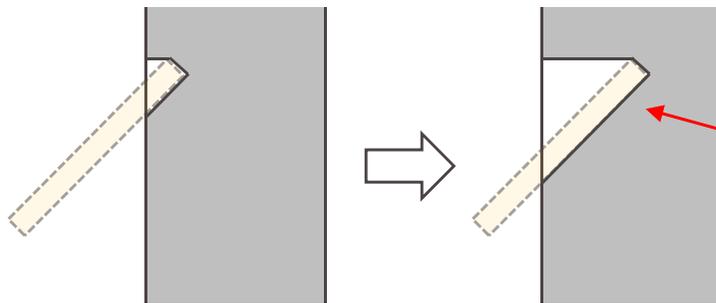
(3) 伝熱管からの押し返しに耐えると仮定し、スケールAが伝熱管方向に倒れ続けるケース

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。

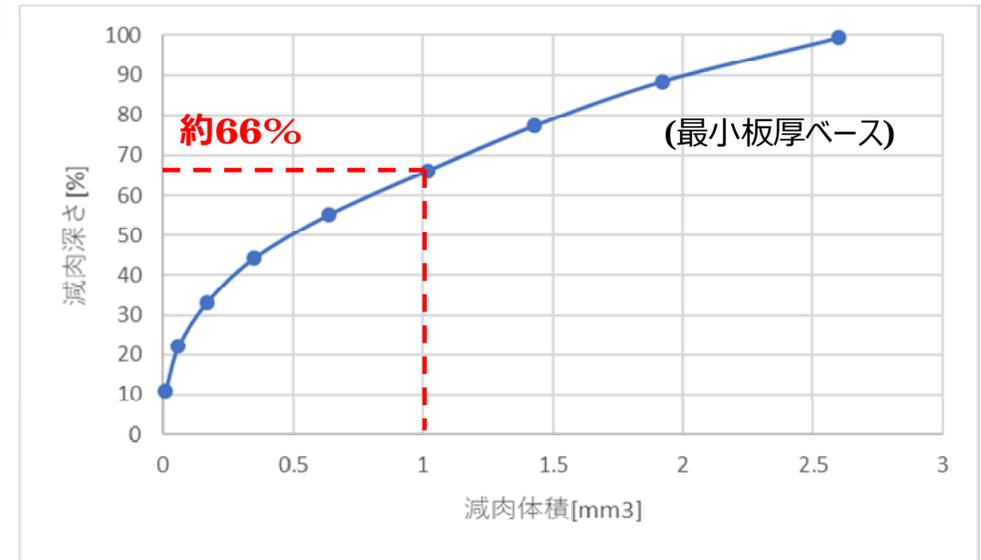
<最大減肉深さ評価結果>

ケース	ワークレート[mW]	運転時間[hr]	摩耗体積[mm ³]
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



立てかかった姿勢のため、減肉の進展に伴い、減肉体積は大きくなるが、深さの進展は緩和



<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)

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33%

○ C - S G

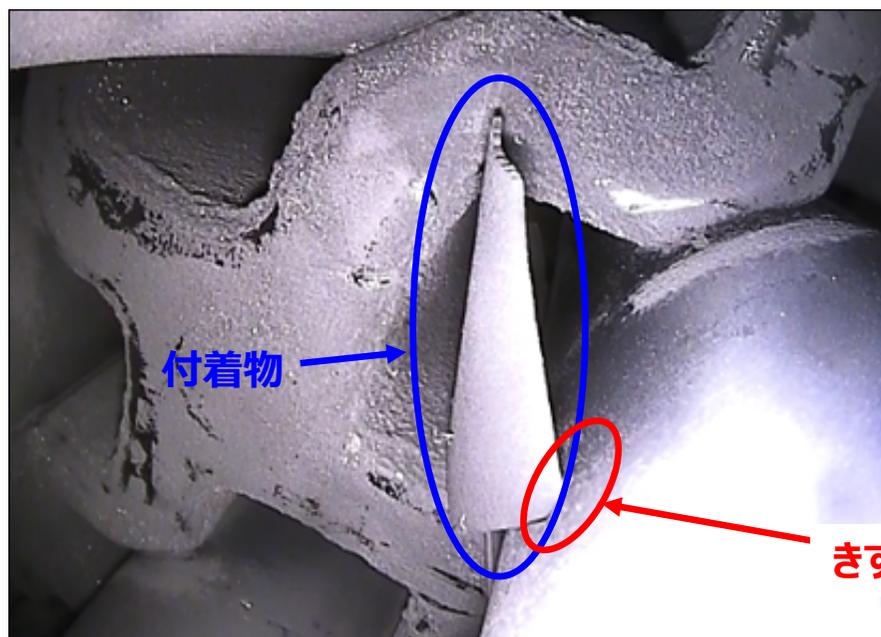
第三管支持板：長さ約2.0mm、幅約1.0mm (X55,Y3) 減肉率：約25%

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

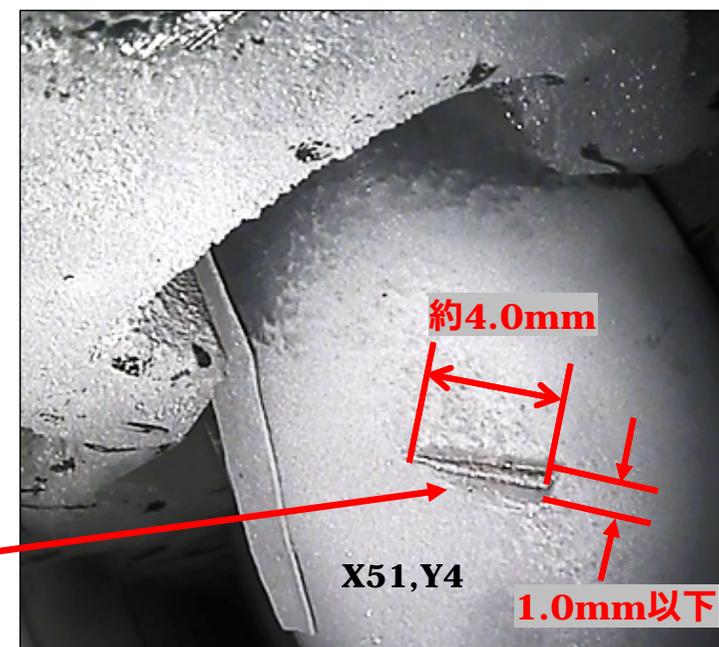
第三管支持板：長さ約7.0mm、幅1.0mm以下 (X21,Y8) 減肉率：約36%

A - S G (X51, Y4)

付着物回収前



付着物回収後



○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]

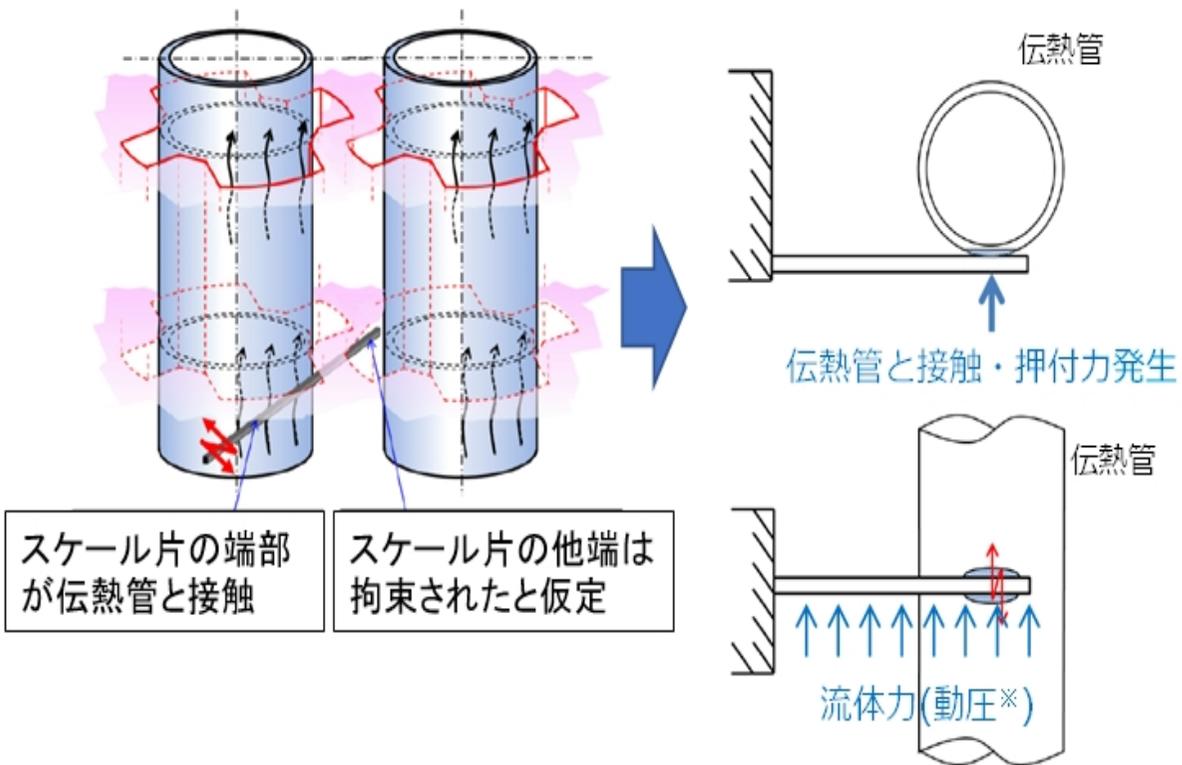
T : 運転時間 [s]

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]

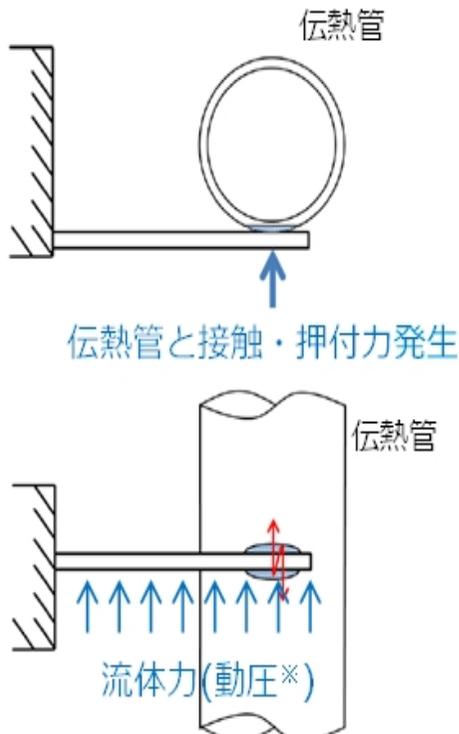
○スケール振動のケース

- ・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。



スケール片の端部が伝熱管と接触

スケール片の他端は拘束されたと仮定



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	×

減肉メカニズム概要

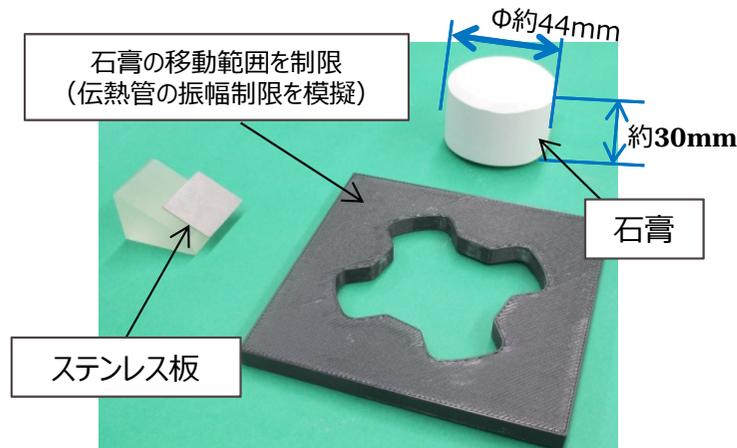
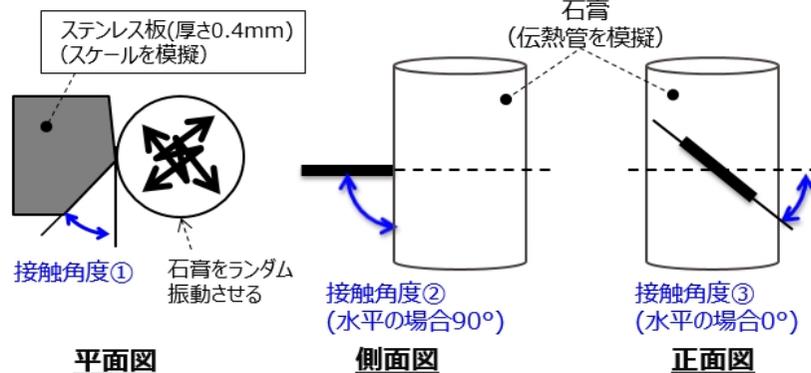
○減肉試験

推定したスケールと伝熱管の接触状態および摩耗形態で実機の減肉形状が生じるか把握するため、減肉試験（加速試験）を実施した。

＜試験方法＞

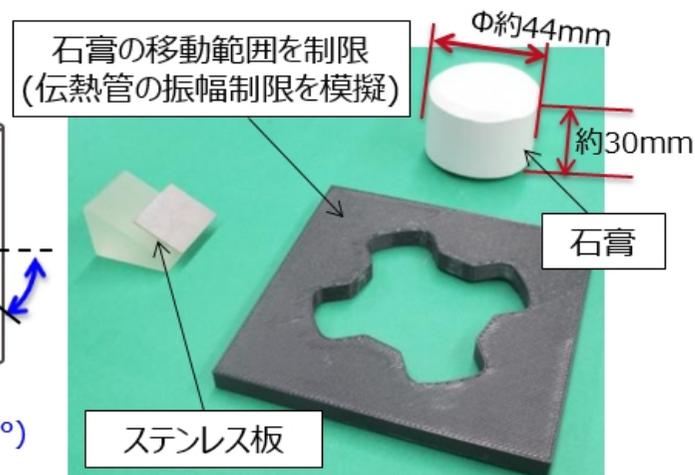
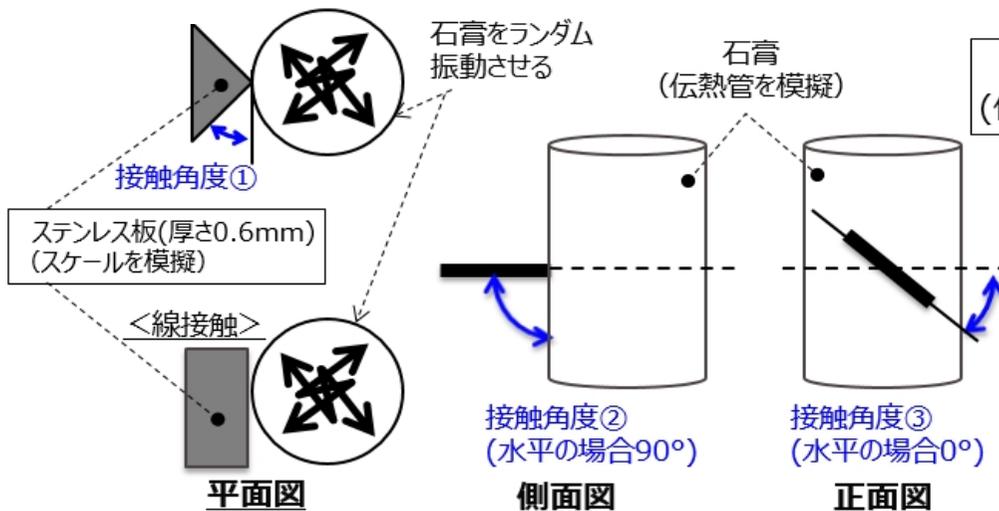
- ・伝熱管は石膏で、スケールはステンレス板で模擬
- ・ステンレス板に石膏を接触させ、石膏を振動させることにより摩耗減肉を模擬
- ・ステンレス板の接触角度（①接線方向および②軸方向③接線方向の傾き）を変化させ、摩耗減肉形状を模擬

(スケールAの場合)



装置外観 (実機2倍スケールで模擬)

(スケールC 2～C 4の場合)



装置外観 (実機2倍スケールで模擬)

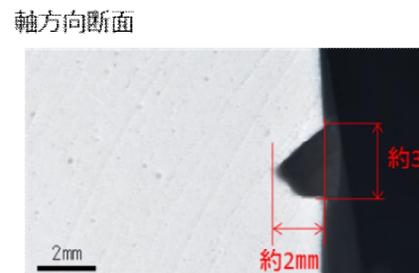
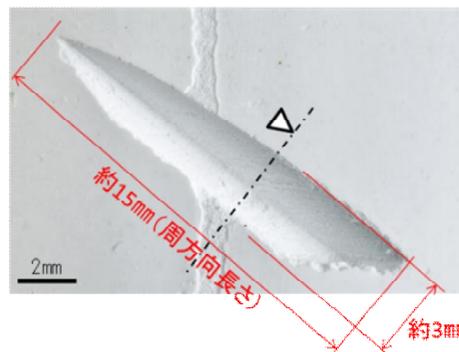
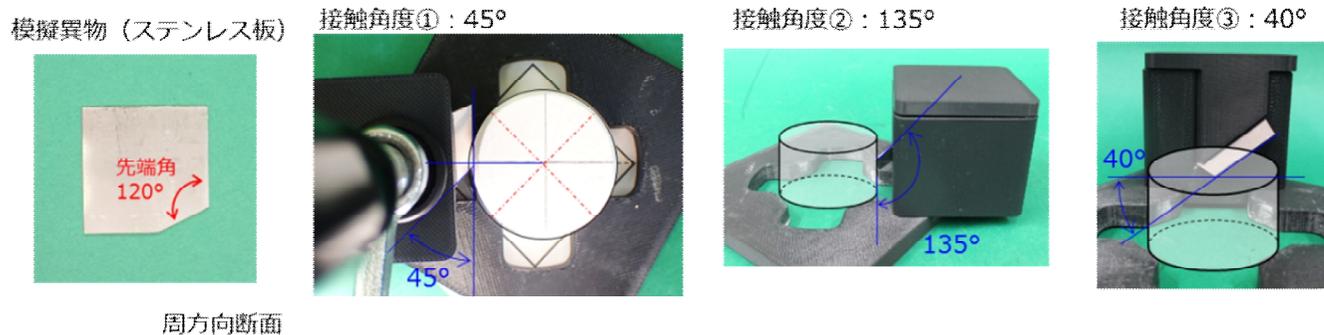
3. 減肉メカニズム (スケールにより伝熱管を損傷させる可能性 11/18)

○減肉試験

<試験条件>

対象伝熱管	振動モード	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 (スケールA)	伝熱管振動	45°	135°	40°	
C-SG: X55, Y8 (スケールC2)		0°	90°	0°	
C-SG: X21, Y8 (スケールC3)		0°	90°	0°	
C-SG: X55, Y3 (スケールC4)		0°	90°	0°	

・A-SGの減肉痕について、次のとおり減肉形状を取得した。



スケールA	減肉試験結果	実機相当寸法
深さ	約2mm	約0.4mm
軸方向長さ	約3mm	約0.7mm
周方向長さ	約15mm	約3mm



: 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 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 E C T 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。

E C T 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。

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。

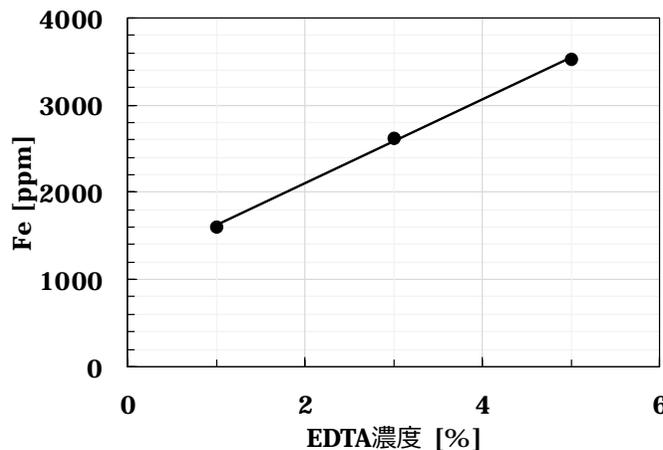
<洗浄試験>

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。

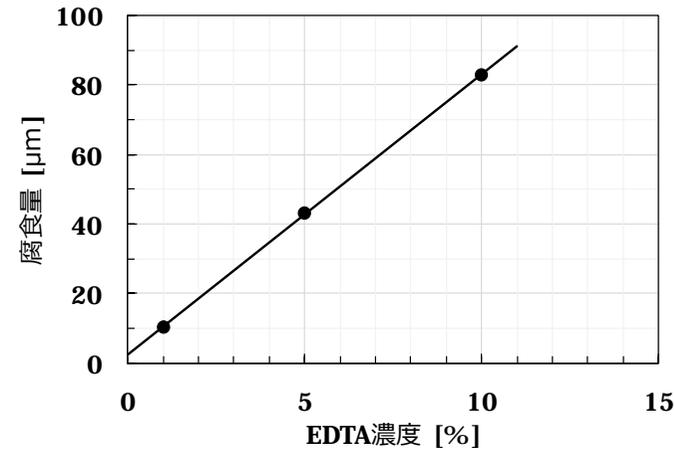
○浸漬試験条件の設定

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。

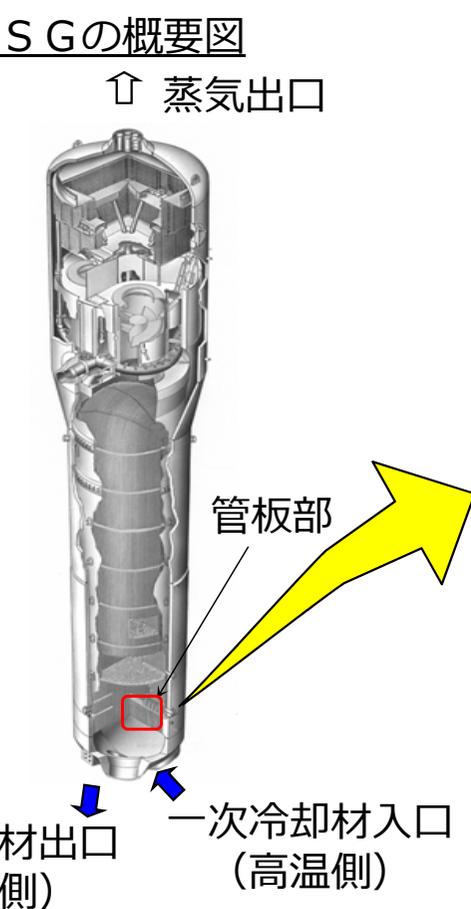
- ・ただし、実機適用時にS G器内の薬品濃度を均一にすることおよび作業安全の観点から、沸騰しない温度とする。

⇒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）

○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。

SGの概要図



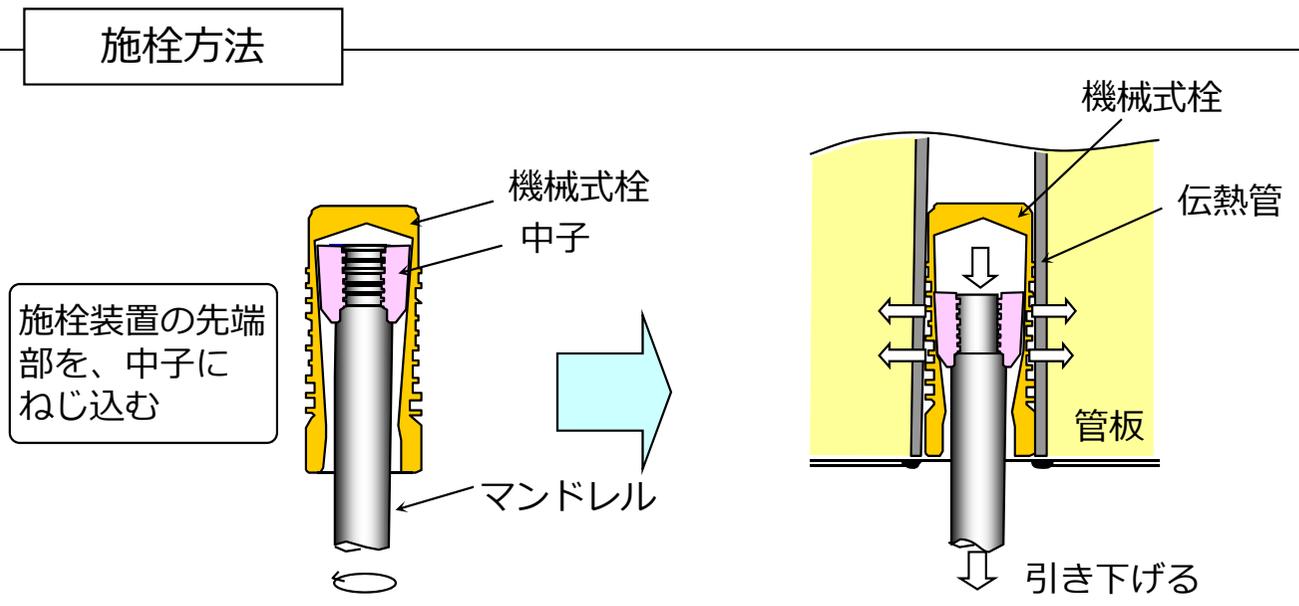
↑ 蒸気出口

管板部

一次冷却材入口（高温側）

一次冷却材出口（低温側）

施栓方法



機械式栓

中子

マンドレル

引き下げる

機械式栓

伝熱管

管板

施栓装置の先端部を、中子にねじ込む

機械式栓を伝熱管に挿入し、施栓装置の先端部を引き下げることにより、中子も同時に引き下がり、機械式栓を押し広げ施栓する

	A-SG (3,382本)	B-SG (3,382本)	C-SG (3,382本)	合計 (10,146本)
今回施栓本数	1	0	3	4
累積施栓本数 [施栓率]	139 [4.1%]	135 [4.0%]	129 [3.8%]	403 [4.0%]

○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。

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

（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 (= $(1 + 1.05 \cdot c^2 / R/t)^{1/2}$)

$2c$ ：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 S_s 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」

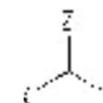
表 減肉を有する伝熱管の耐震性評価結果

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-SG（X21,Y8）で代表

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。



伝熱管地震応答解析モデル



：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

<スケールと異物の減肉メカニズムの考察>

○スケールが伝熱管に摩擦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、伝熱管には摩擦減肉が発生
- ・比摩擦量についても、スケールと異物（SUS304で $6.6 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ ）は同等

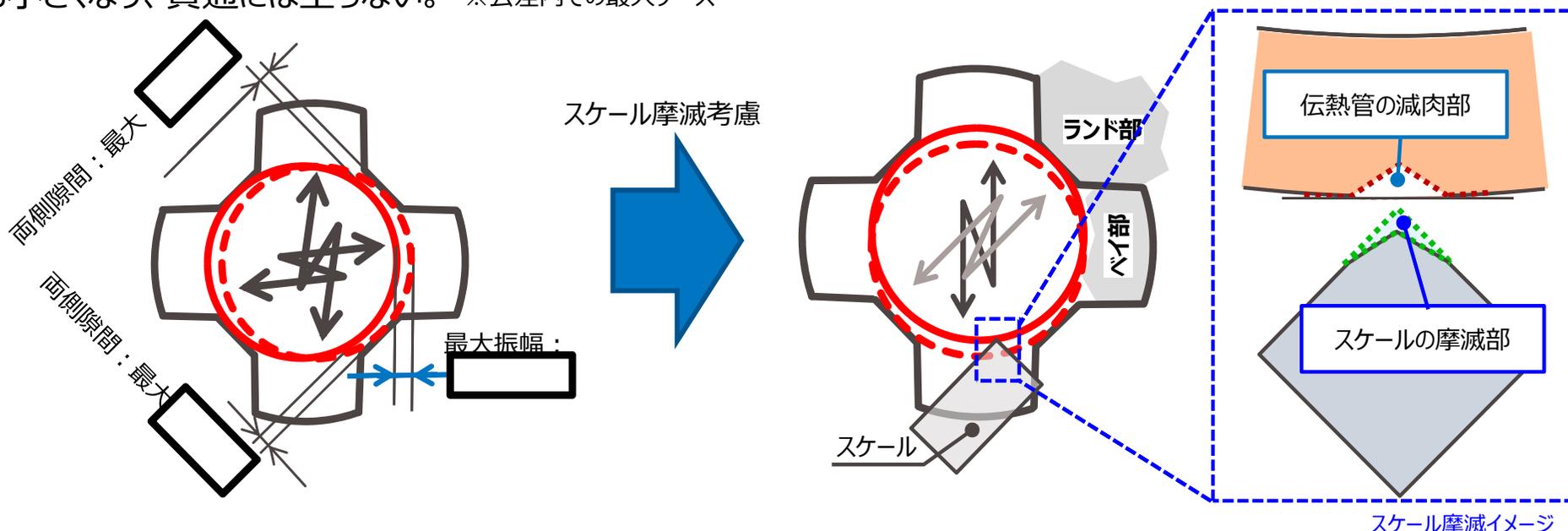
○ただし、同じ比摩擦量、同じワークレートで撓動し続けたとしても、最終的な摩擦減肉量は異物の場合より小さい。

- ・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擦減肉の進展は停止
- ・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擦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。