

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 1 / 19)

AおよびC-SGで回収したスケールが今回のSG伝熱管損傷事象を発生させた可能性を検証するため、回収したスケールの性状を確認し、次の試験等を実施した。

○回収したスケールの性状

AおよびC-SGで回収したスケール（スケールA, C2, C3およびC4）については、伝熱管と接触が想定される部分に接触痕や光沢があり、また、伝熱管の主成分であるNiとCrを検出したことから、減肉を発生させる可能性のあるスケール性状を把握するため、断面ミクロ観察を実施した結果、空隙率5%以下の稠密層が形成されていることを確認した。 ➡ 43

回収場所	A-SG 回収スケール 第二管支持板下部	C-SG 回収スケール(C2) 第二管支持板上	C-SG 回収スケール(C3) 第一管支持板上	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
断面ミクロ観察結果	<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0.3mm</p> <p>伝熱管界面</p>	<p>約0.3mm</p> <p>伝熱管界面</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	稠密層が主体	稠密層が主体	稠密層が主体	粗密層が主体
厚さ	約0.2~0.3mm	約0.3mm	約0.3mm	約0.3mm	約0.68mm
伝熱管をきず付ける可能性	あり	あり	あり	あり	なし
運転時間	22.2万時間				

○回収スケールと同等性状のスケールによる伝熱管との摩耗試験

今回回収したAおよびC - S Gのスケールは稠密であることから、AおよびC - S G回収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（約0.2～0.3mm）のスケールを3個用いて、伝熱管との摩耗試験を行った。

その結果、伝熱管とスケールの摩耗比（体積比）は最大1 : 0.5となり、伝熱管の方が早く摩耗する結果が得られた。

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

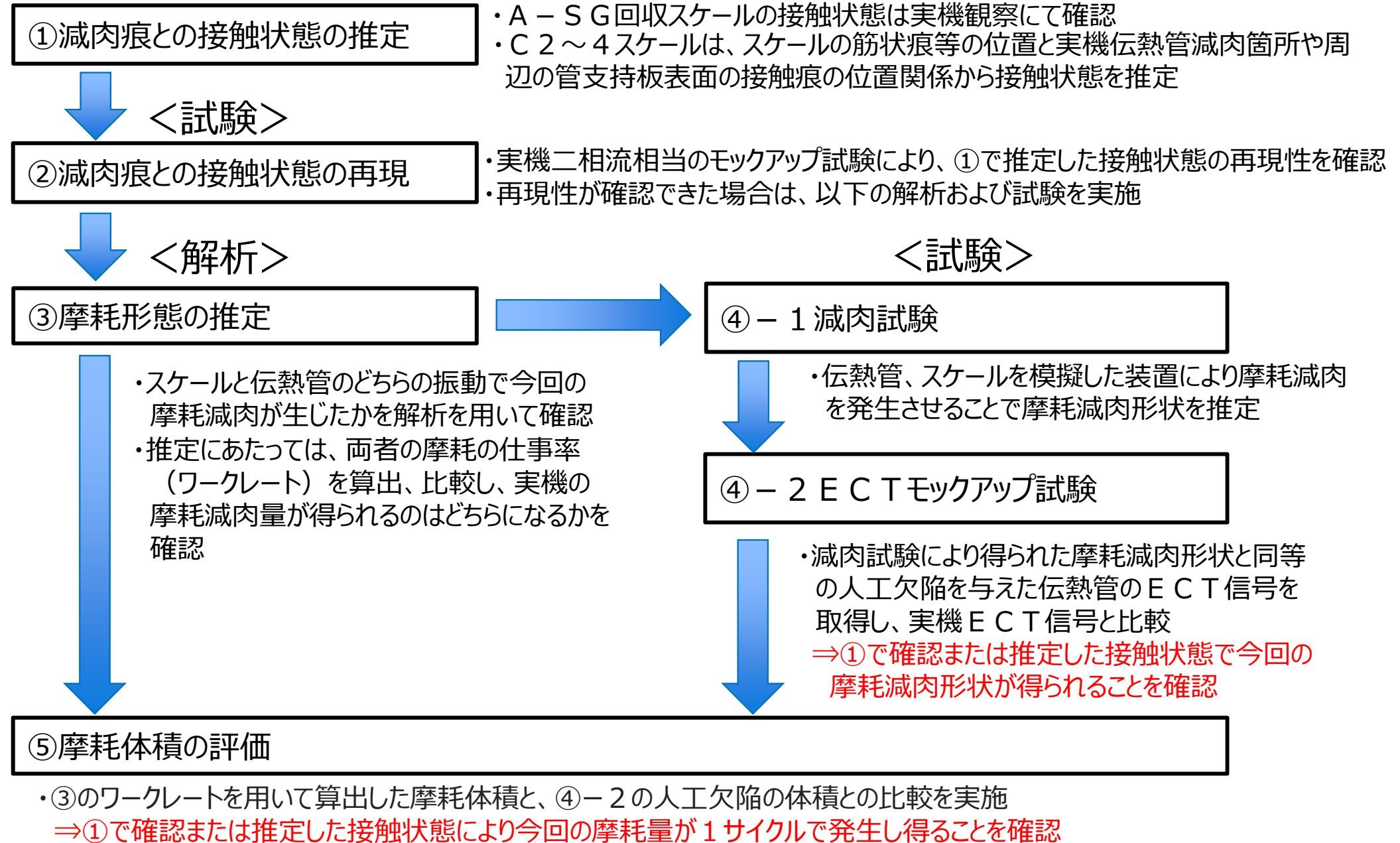
一方、高浜発電所3号機前回（第24回）定期検査の事象では、摩耗試験の結果、摩耗体積比は最大でも1 : 4であり、スケールの方が早く摩滅したことから、スケールが原因の可能性は低いとしていた。これは、前回の試験ではスケールの稠密さではなく厚さに着目しており、主に伝熱管の上部から回収したスケールを供試体として選定したためであり、比較的厚さの大きい約0.6～1.0mm厚さの試験体7個と約0.3～0.4mm厚さの試験体2個の合計9個を抽出して試験を実施したことによるものである。

なお、前回試験の供試体のうち、最も厚く粗密と考える最上段（第七）管支持板上面から回収したスケールでは、空隙率5%を超える領域が主体であったのに対し、今回回収したスケールは空隙率5%以下の領域が主体であったことから、以降では、空隙率5%以下の領域を稠密層と定義する。

以上により、伝熱管に減肉を与える可能性があるスケール性状については、稠密さが重要であり、稠密な性状をもつスケールは、伝熱管と接触することで、減肉を発生させる可能性が高いと考える。

(スケールによる伝熱管の減肉メカニズム調査の流れ)

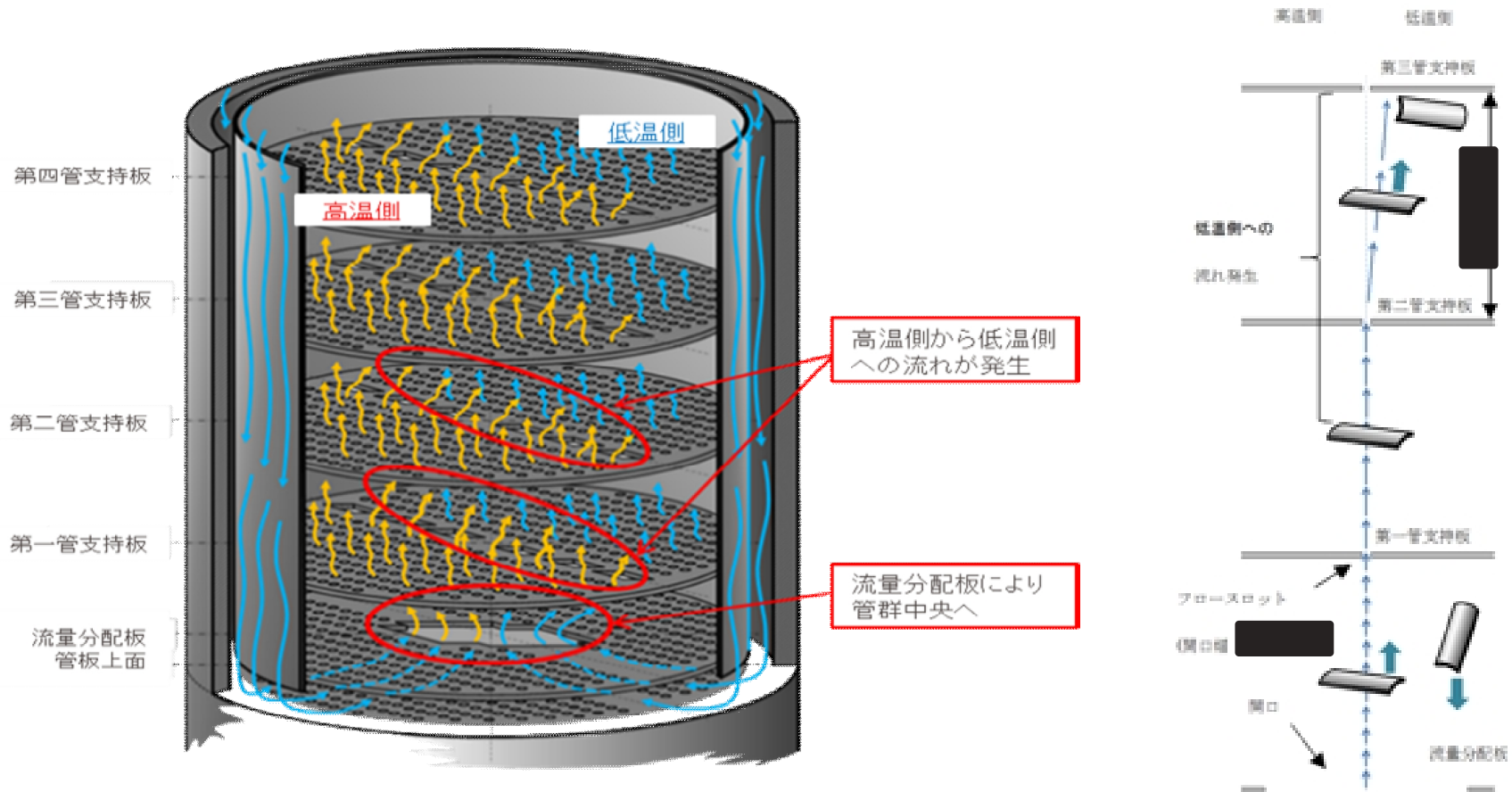
○以下の試験および解析により、回収したA、C 2～4スケールが伝熱管に有意な減肉を与えたメカニズムを調査した。



○ S G 器内挙動の推定および接触状態の再現性確認 (器内のスケール挙動)

主にプラント停止時に伝熱管から剥離し、管板上に落下したスケールの場合、運転中の S G 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、上昇流に加え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ると推定される。

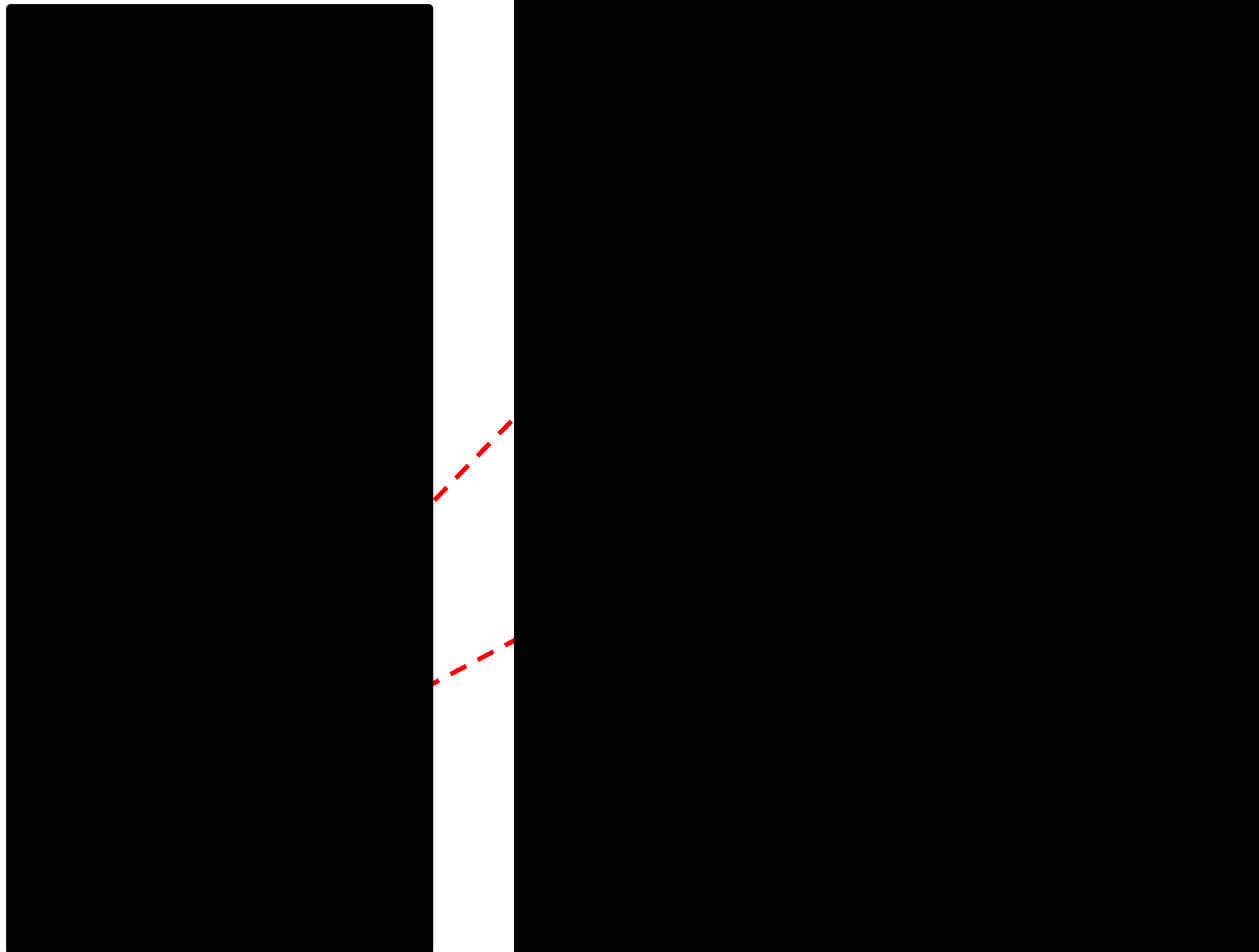
また、第一管支持板上面または第二管支持板上面に落下したスケールの場合も、落下した場所によっては、上記と同様の上昇流および水平方向流に乗って第三管支持板の低温側下面に至る可能性はあると考える。



: 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 器内挙動の推定および接触状態の再現性確認 (S G 2 次側の流況モックアップ試験)
 S G 2 次側の流況を再現するモックアップ試験装置により、スケールの接触状態が実機二相流相当の条件下において再現できることを確認した。

試験装置



3次元熱流動解析で得られるS G 2次側流況を再現

：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。

試験条件

- ・試験流速： [Redacted]
- ・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)
 - 約23mm×約11mm×約0.3mm (C 3スケールと同一形状)
 - 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)

装置断面

伝熱管5×5管群

試験結果

- ・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ることを確認

	二相流を流す前	二相流停止中
C 2スケール と同一形状		
C 3スケール と同一形状		
C 4スケール と同一形状		

○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>

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

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]

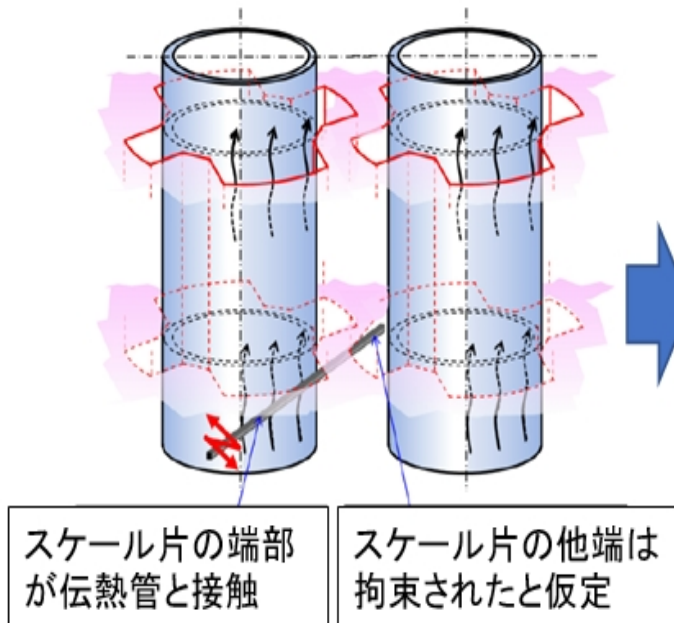
T : 運転時間 [s]

v : 摺動速度 [m/s]

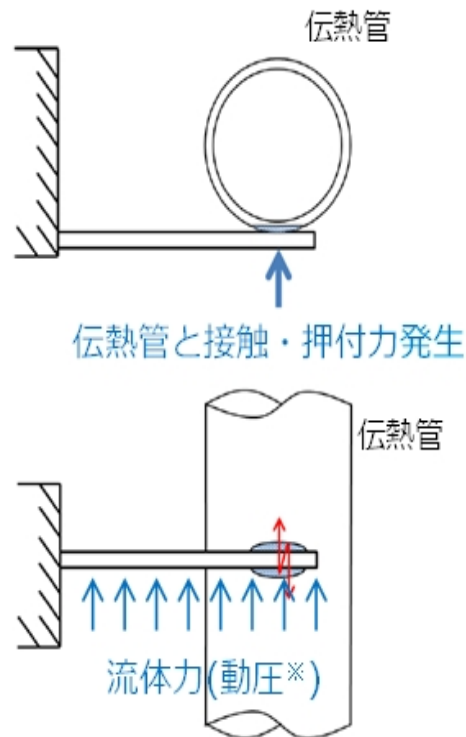
W_R : ワークレート (= $F \times v$: 摩耗を生じさせる仕事率) [W]

○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[%]

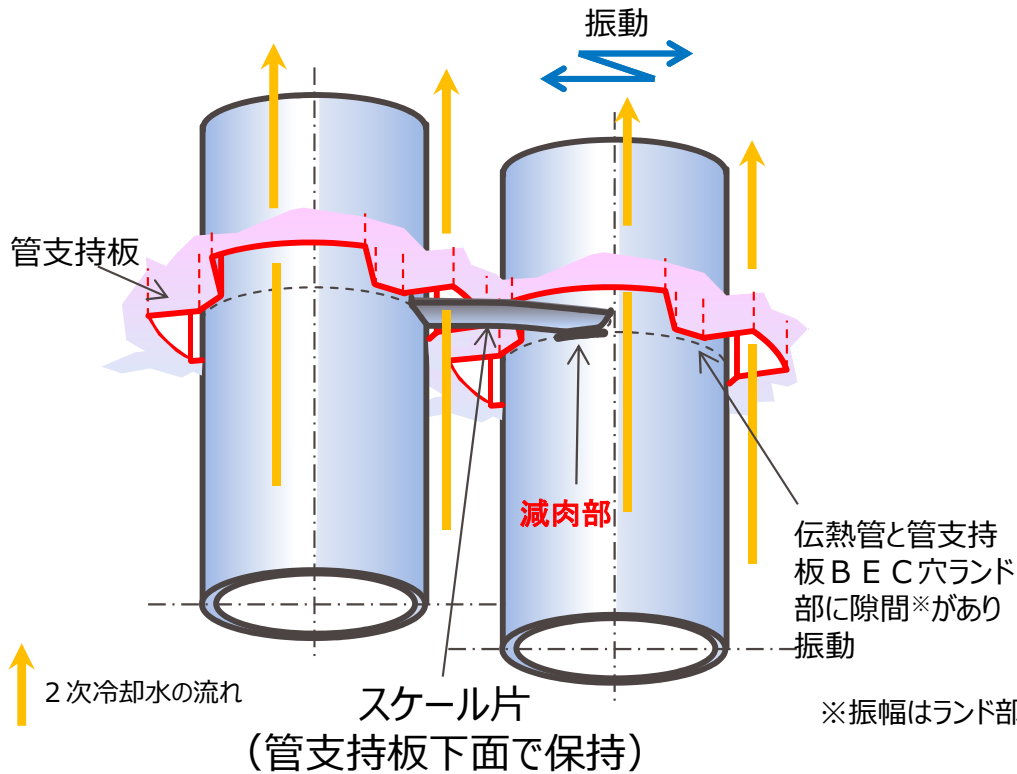
f : 固有振動数[Hz]

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	×

○伝熱管振動のケース

- ・2次冷却水の流れによる伝熱管のランダム振動により伝熱管自身に摩耗減肉が発生することを想定する。
- ・流動振動解析によりワークレートを試算すると、スケール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。



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 X21, Y8		約2	
C-SG X55, Y3		約3	
C-SG X55, Y8		約2	

今回の摩耗減肉は、伝熱管振動によって生じたものと推定される。

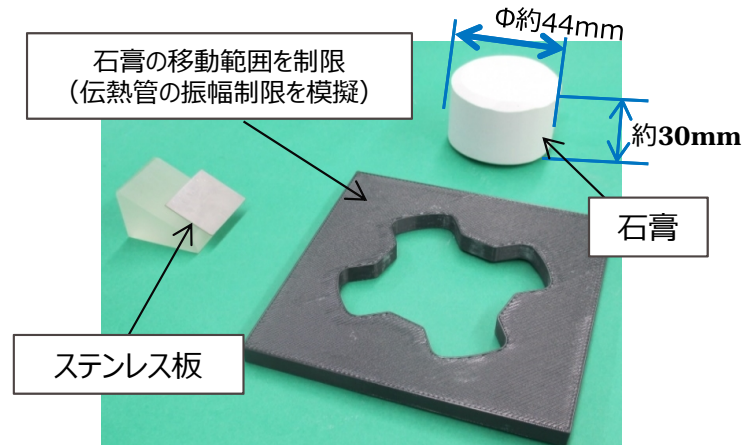
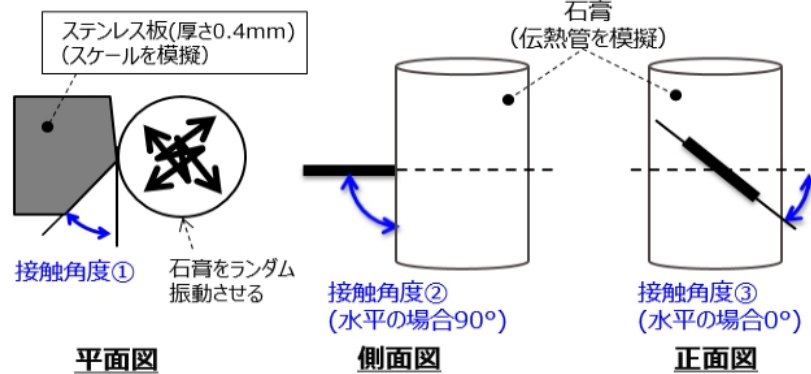
○減肉試験

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>

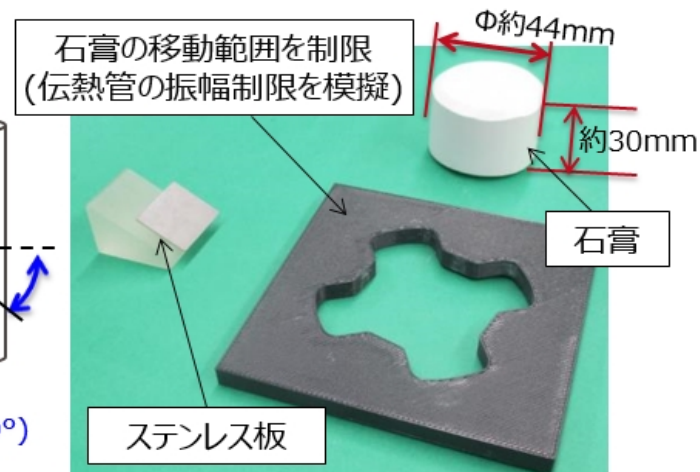
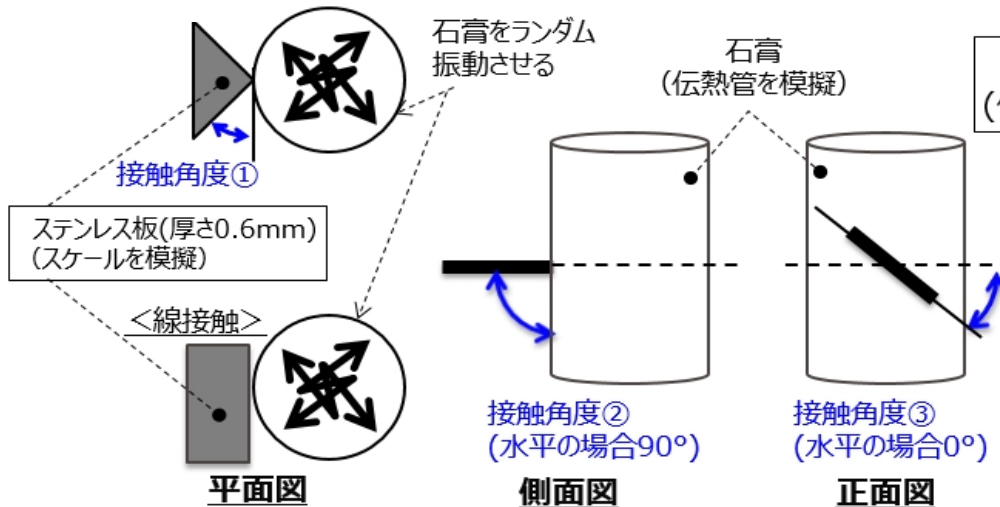
- ・伝熱管は石膏で、スケールはステンレス板で模擬
- ・ステンレス板に石膏を接触させ、石膏を振動させることにより摩耗減肉を模擬
- ・ステンレス板の接触角度（①接線方向および②軸方向③接線方向の傾き）を変化させ、摩耗減肉形状を模擬

(Aスケールの場合)



装置外観 (実機2倍スケールで模擬)

(C2～C4スケールの場合)



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 10/19) 51

○減肉試験

<試験条件>

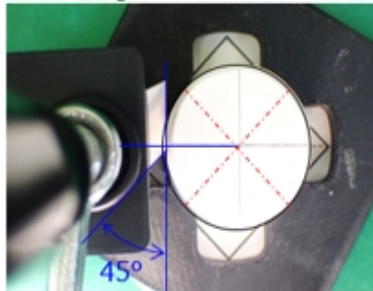
対象伝熱管	振動モード	接触角度①	接触角度②	接触角度③	振動振幅 (2倍スケール)
A-SG: X51, Y4 (Aスケール)	伝熱管振動	45°	135°	40°	[Redacted]
C-SG: X55, Y8 (C2スケール)		0°	90°	0°	
C-SG: X21, Y8 (C3スケール)		0°	90°	0°	
C-SG: X55, Y3 (C4スケール)		0°	90°	0°	

・A-SGの減肉痕について、次のとおり減肉形状を取得した。

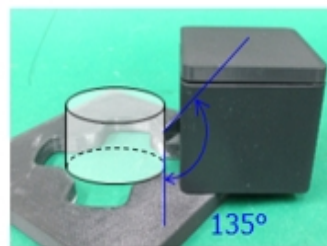
模擬スケール (ステンレス板)



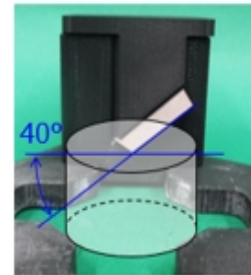
接触角度①: 45°



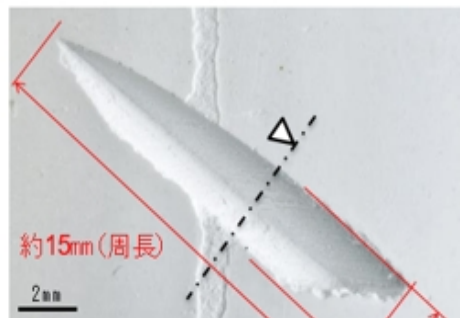
接触角度②: 135°



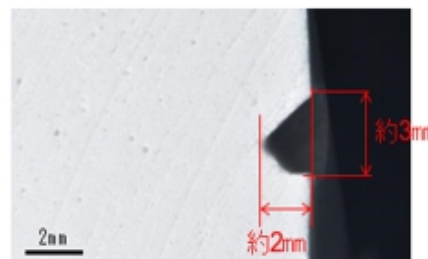
接触角度③: 40°



周方向断面



軸方向断面



Aスケール	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

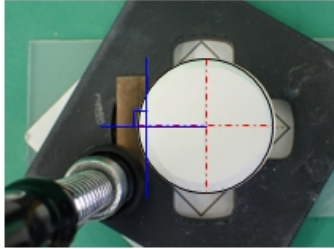
[Redacted] : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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 11 / 19) 52

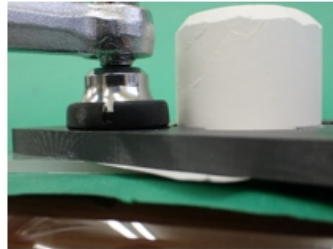
○減肉試験

- ・C-SGの減肉痕について、次のとおり減肉形状を取得した。
(C2、C3スケール)

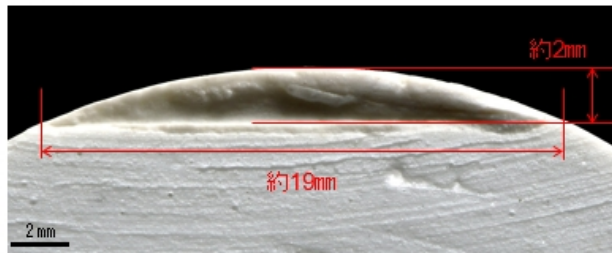
接触角度① : 0°



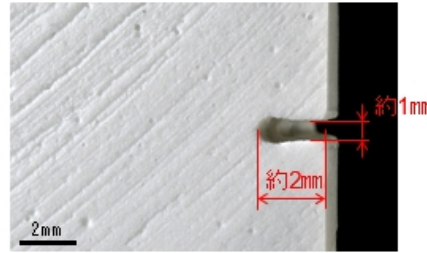
接触角度② : 90°



周方向断面



軸方向断面

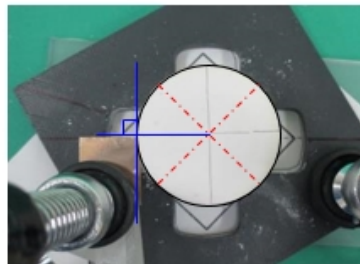


C2スケール	減肉試験結果	実機相当寸法
深さ	約2mm	約0.4mm
軸方向長さ	約1mm	約0.3mm
周方向長さ	約19mm	約6mm

C3スケール	減肉試験結果	実機相当寸法
深さ	約2mm	約0.5mm
軸方向長さ	約1mm	約0.3mm
周方向長さ	約19mm	約6mm

(C4スケール)

接触角度① : 0°



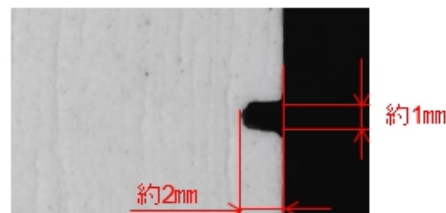
接触角度② : 90°



周方向断面



軸方向断面



C4スケール	減肉試験結果	実機相当寸法
深さ	約2mm	約0.3mm
軸方向長さ	約1mm	約0.3mm
周方向長さ	約9mm	約3mm

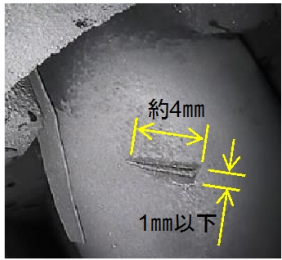
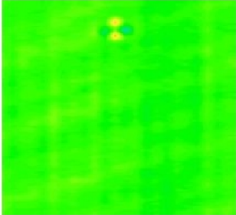
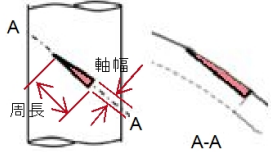
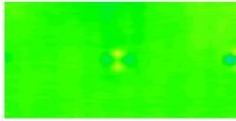
3. 減肉メカニズム (スケールにより伝熱管を損傷させる可能性 12 / 19) 53

○ ECTモックアップ試験

A - S Gについて、減肉試験で取得した減肉形状と同等の人工欠陥をT T 6 0 0 伝熱管モックアップに付与し、ECT信号を取得した結果、実機信号と整合することを確認した。

<試験条件>

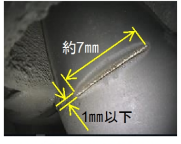
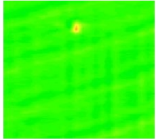
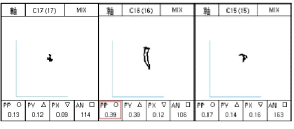
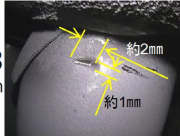
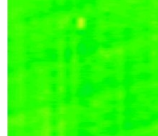
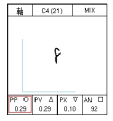
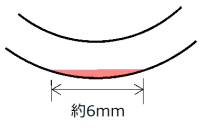
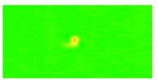
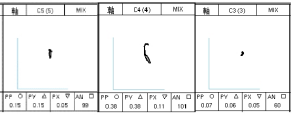
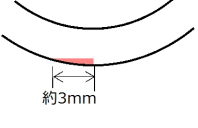
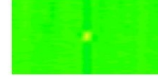
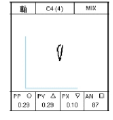
- ・人工欠陥寸法の幅および長さ：減肉試験で得られた実機相当寸法
- ・人工欠陥寸法の深さ：実機のECT信号

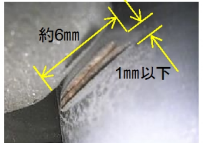
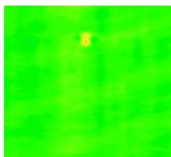
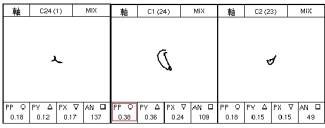
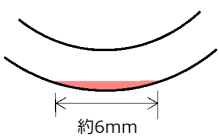
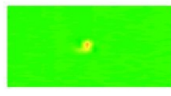
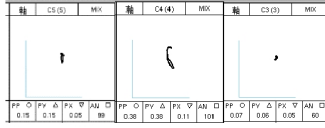
	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性																																													
<p>実機 A X51, Y4 周長(目視)：約4mm</p>  <p>ECT減肉指示深さ：33%</p>	<p>振幅：0.36 V 位相：118°</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>軸</th> <th>C1 (1)</th> <th>MIX</th> <th>軸</th> <th>C24 (24)</th> <th>MIX</th> <th>軸</th> <th>C23 (23)</th> <th>MIX</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PP</td> <td>0.27</td> <td></td> <td>PP</td> <td>0.36</td> <td></td> <td>PP</td> <td>0.30</td> <td></td> </tr> <tr> <td>PV</td> <td>0.20</td> <td></td> <td>PV</td> <td>0.34</td> <td></td> <td>PV</td> <td>0.29</td> <td></td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>0.22</td> <td></td> <td>PX</td> <td>0.20</td> <td></td> <td>PX</td> <td>0.23</td> <td></td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>35</td> <td></td> <td>AN</td> <td>110</td> <td></td> <td>AN</td> <td>76</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	軸	C1 (1)	MIX	軸	C24 (24)	MIX	軸	C23 (23)	MIX	PP	0.27		PP	0.36		PP	0.30		PV	0.20		PV	0.34		PV	0.29		PX	0.22		PX	0.20		PX	0.23		AN	35		AN	110		AN	76		—
軸	C1 (1)	MIX	軸	C24 (24)	MIX	軸	C23 (23)	MIX																																								
PP	0.27		PP	0.36		PP	0.30																																									
PV	0.20		PV	0.34		PV	0.29																																									
PX	0.22		PX	0.20		PX	0.23																																									
AN	35		AN	110		AN	76																																									
<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> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>軸</th> <th>C14 (14)</th> <th>MIX</th> <th>軸</th> <th>C13 (13)</th> <th>MIX</th> <th>軸</th> <th>C12 (12)</th> <th>MIX</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PP</td> <td>0.15</td> <td></td> <td>PP</td> <td>0.26</td> <td></td> <td>PP</td> <td>0.17</td> <td></td> </tr> <tr> <td>PV</td> <td>0.13</td> <td></td> <td>PV</td> <td>0.25</td> <td></td> <td>PV</td> <td>0.17</td> <td></td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>0.11</td> <td></td> <td>PX</td> <td>0.10</td> <td></td> <td>PX</td> <td>0.08</td> <td></td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td>44</td> <td></td> <td>AN</td> <td>105</td> <td></td> <td>AN</td> <td>90</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	軸	C14 (14)	MIX	軸	C13 (13)	MIX	軸	C12 (12)	MIX	PP	0.15		PP	0.26		PP	0.17		PV	0.13		PV	0.25		PV	0.17		PX	0.11		PX	0.10		PX	0.08		AN	44		AN	105		AN	90		○
軸	C14 (14)	MIX	軸	C13 (13)	MIX	軸	C12 (12)	MIX																																								
PP	0.15		PP	0.26		PP	0.17																																									
PV	0.13		PV	0.25		PV	0.17																																									
PX	0.11		PX	0.10		PX	0.08																																									
AN	44		AN	105		AN	90																																									

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 13 / 19) 54

○ ECTモックアップ試験

C-SGについても、減肉試験で取得した減肉形状と同等の人工欠陥をTT600伝熱管モックアップに付与し、ECT信号を取得した結果、実機信号と整合することを確認した。

	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性		MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性
実機 C X21, Y8 周長(目視): 約7mm  ECT減肉指示深さ: 36%	振幅: 0.39 V 位相: 106° 		—	実機 C X55, Y3 周長(目視): 約2mm  ECT減肉指示深さ: 25%	振幅: 0.29 V 位相: 92° 		—
モックアップ [31%減肉] 周長: 約6mm 軸長: 約0.3mm  約6mm	振幅: 0.38 V 位相: 101° 		○	モックアップ [31%減肉] 周長: 約3mm 軸長: 約0.3mm  約3mm	振幅: 0.29 V 位相: 87° 		○

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

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 14 / 19) 55

○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 : X 5 1, Y 4	目視	—	1以下	約4	—
	E C T モックアップ試験	約0.4	約0.7	約3	約0.3
C-SG : X 2 1, Y 8	目視	—	1以下	約7	—
	E C T モックアップ試験	約0.5	約0.3	約6	約0.5
C-SG : X 5 5, Y 3	目視	—	約1	約2	—
	E C T モックアップ試験	約0.3	約0.3	約3	約0.2
C-SG : X 5 5, Y 8	目視	—	1以下	約6	—
	E C T 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]	WR [mW]	運転時間 [hr]	摩耗体積 [mm ³]
A-SG : X 5 1, Y 4	1×10^{-14}	約3	約5,800	約0.5
C-SG : X 2 1, Y 8	1×10^{-14}	約2	約5,800	約0.5
C-SG : X 5 5, Y 3	1×10^{-14}	約3	約5,800	約0.5
C-SG : X 5 5, Y 8	1×10^{-14}	約2	約5,800	約0.5

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 / 19) 56

○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* 2 3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。

なお、高浜発電所 3 号機および 4 号機では薬品洗浄を実施していないが、伝熱性能の低下に伴う主蒸気圧力の低下はあるものの、大飯発電所 3 号機および 4 号機に比べ電気出力の定格電気出力に対する余裕があるため、大飯発電所 3 号機および 4 号機を先行して実施した。

○高浜発電所 3 号機および 4 号機の特異性 (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、SG 取替を実施している美浜発電所 3 号機並びに高浜発電所 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) 17.0 (第18回)	16.2 (第16回)	—	—	—

美浜発電所 3 号機、高浜発電所 1 号機および高浜発電所 2 号機については、蒸気発生器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 16 / 19) 57

○高浜発電所 3 号機および 4 号機の特異性 (スケール回収量)

スケール回収量を確認した結果、高浜発電所 3 号機および 4 号機では、いずれも長期停止前後にスケール回収量が増加していた。

一方、大飯発電所 3 号機および 4 号機では長期停止前後でスケール回収量に変化が認められなかった。

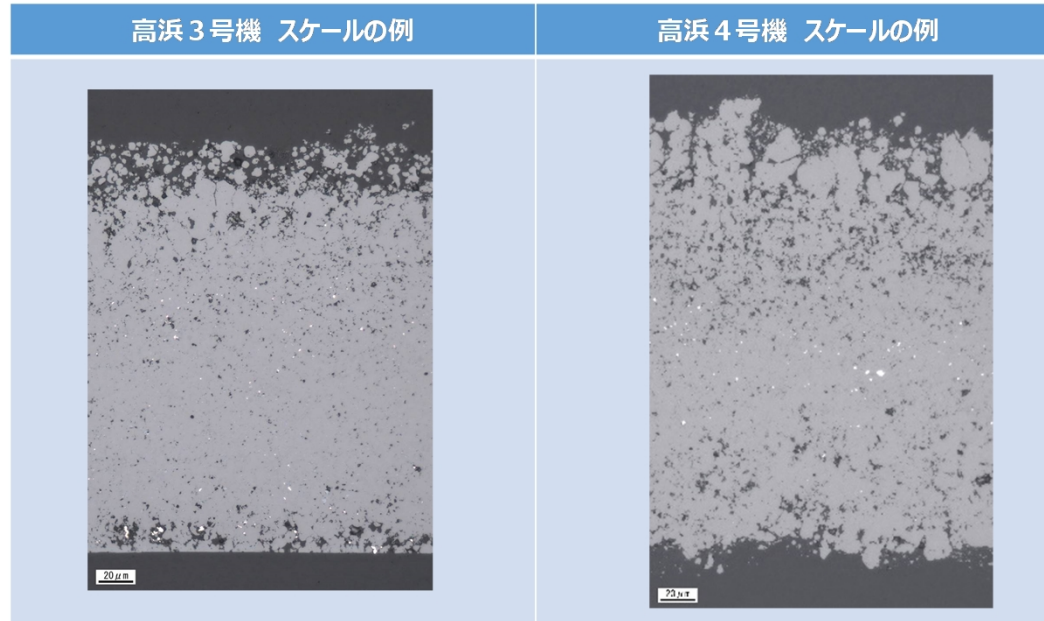
これにより、長期停止に伴うスケール剥離の増加は、スケールが厚く成長した S G ほど顕著であると推定される。

プラント	長期停止前 (kg)	長期停止後 (kg)		
高浜 3 号機	0.01未満 (第21回)	0.41 (第22回)	0.24 (第23回)	0.36 (第24回)
高浜 4 号機	0.01未満 (第20回)	12.37 (第21回)	8.24 (第22回)	—
大飯 3 号機	0.01未満 (第16回)	0.01未満 (第17回)	0.01未満 (第18回)	—
大飯 4 号機	0.01未満 (第15回)	0.01未満 (第16回)	0.01未満 (第17回)	—

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 17 / 19) 58

○高浜発電所 3 号機および 4 号機の特異性 (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、断面マイクロ観察を実施した。採取対象プラントは、高浜発電所 4 号機、大飯発電所 3 号機および 4 号機からは薬品洗浄回数の少ない大飯発電所 4 号機、S G 取替プラントからは、最も鉄の持込み量の大きい高浜発電所 2 号機を選定した。なお、高浜発電所 3 号機については、高浜発電所 4 号機とスケール性状が同等であることを確認しているため、ここでは比較対象に挙げない。



結果は下表のとおりであり、鉄の持込み量が大き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, 490 kg	大飯 4 号機 鉄持込み量： 1, 950 kg	高浜 2 号機 鉄持込み量： 940 kg	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. 18 mm	空隙率 5 % 以下の 稠密層厚さ： 最大 0. 04 mm	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

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。

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 / 19) 59

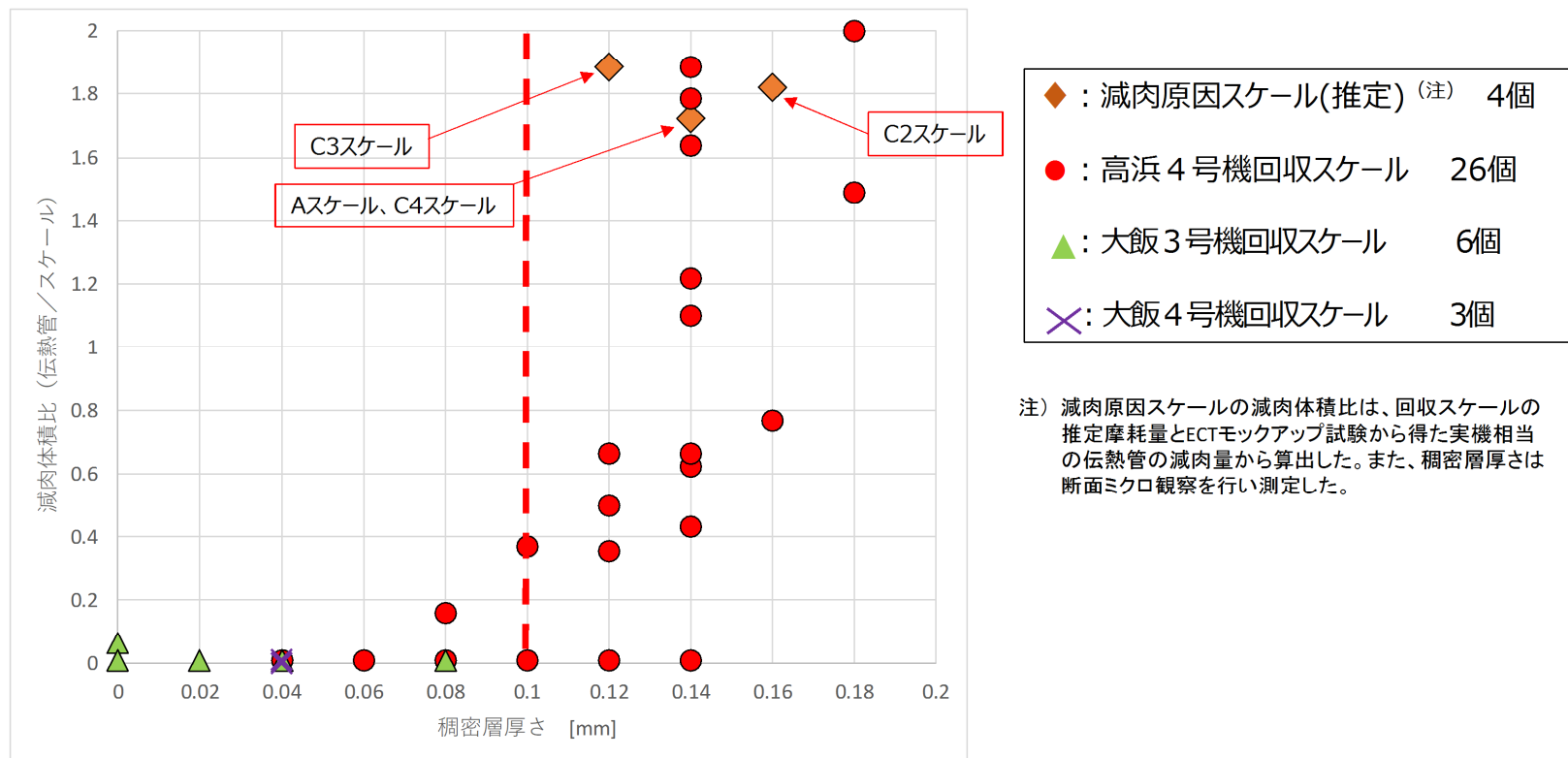
○高浜発電所 3号機および4号機の特異性 (伝熱管の摩耗試験結果の比較)

有意な減肉を与える稠密層厚さを検討するため、大飯発電所 3号機および4号機、並びに高浜発電所 4号機から採取した実機スケールを摩耗試験した結果、空隙率 5%以下の稠密層厚さ 0.1 mm未満では有意な摩耗減肉は与えられないことが分かった。

以上により、有意な減肉を発生させる可能性があるのは、空隙率 5%以下の稠密層の厚さが 0.1 mm以上のスケールであり、そのような性状のスケールは高浜発電所 3号機および4号機に特有のものであることを確認した。

- 摩耗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。

稠密層厚さと摩耗体積比の関係



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 19 / 19) 60

○高浜発電所 3号機および4号機の特異性 (スケールにより減肉した国内外事例調査)

国内外で報告されている外面減肉事象を調査した結果、国内、海外共にスケールが原因とされた事例は認められなかった。

なお、国内外において、SGの運転時間が高浜発電所 3号機および4号機以上であり、かつ薬品洗浄の実績が認められず、高浜発電所 3号機および4号機と同等の伝熱管支持構造を有するプラントを調査した結果、6プラントのみであることを確認した。

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)

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。

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

<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°C)

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」

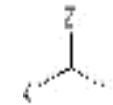
表 減肉を有する伝熱管の耐震性評価結果

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

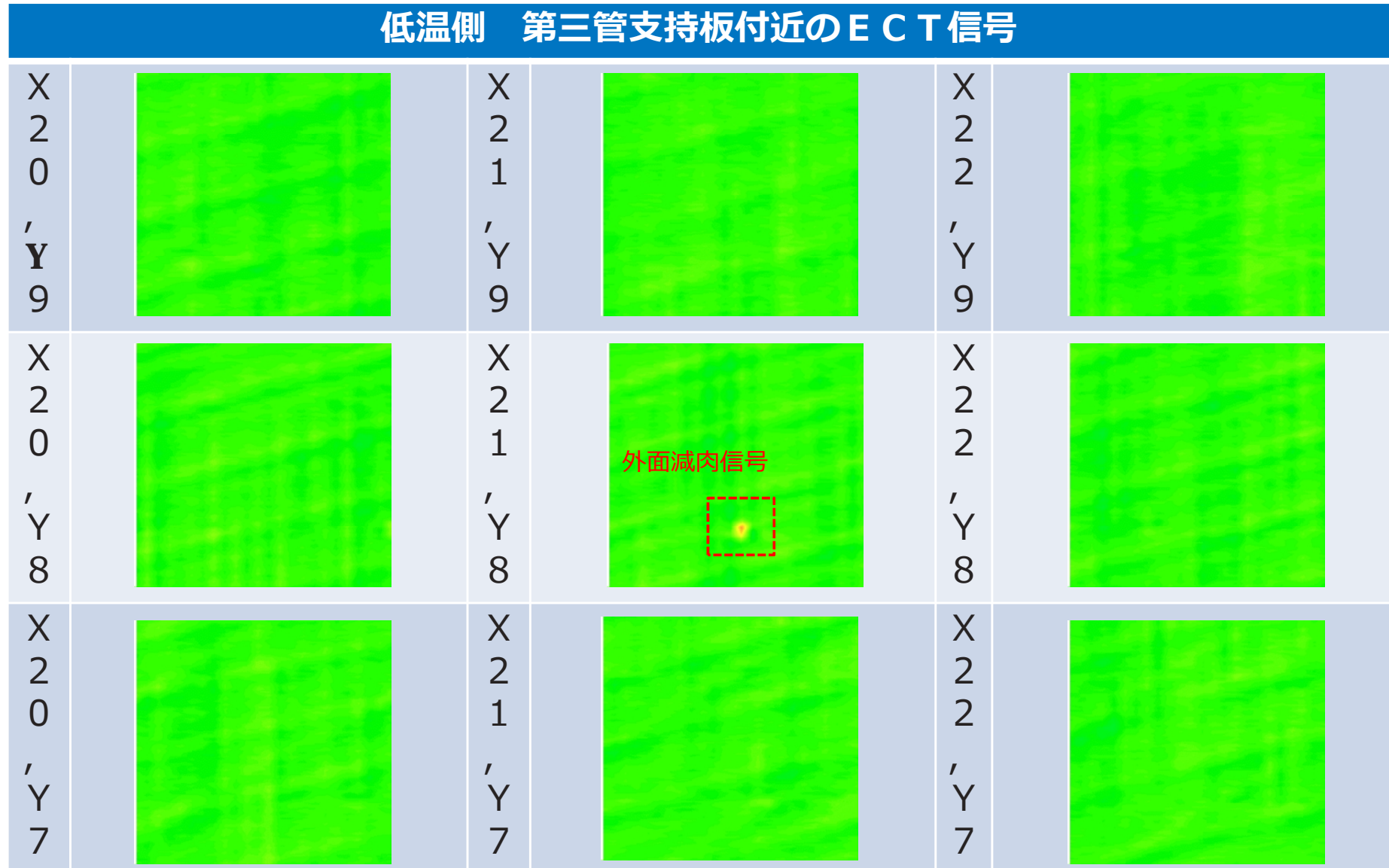
今回認められた減肉を考慮しても、発生応力および疲労累積係数に十分な裕度があること確認した。

⇒減肉した伝熱管が地震により損壊することはない。



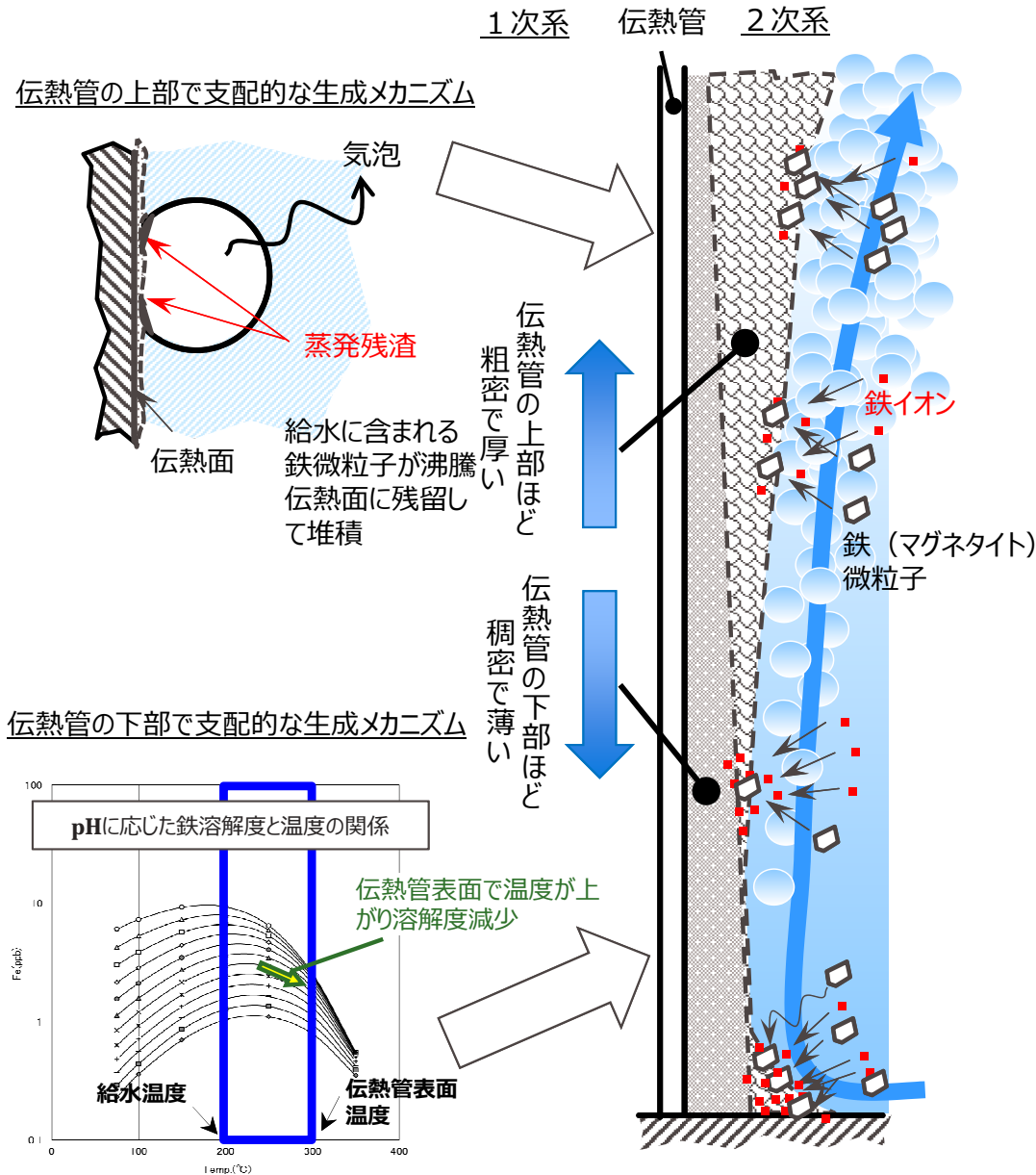
伝熱管地震応答解析モデル

- S G器内において小型カメラを用いて伝熱管の目視観察を実施した際に確認した摩耗痕に隣接した伝熱管の接触痕は、有意な減肉信号指示ではないことを確認した。



摩耗痕のある伝熱管と隣接した伝熱管の E C T 結果 (MIX:C-SG(X21.Y8)の例)

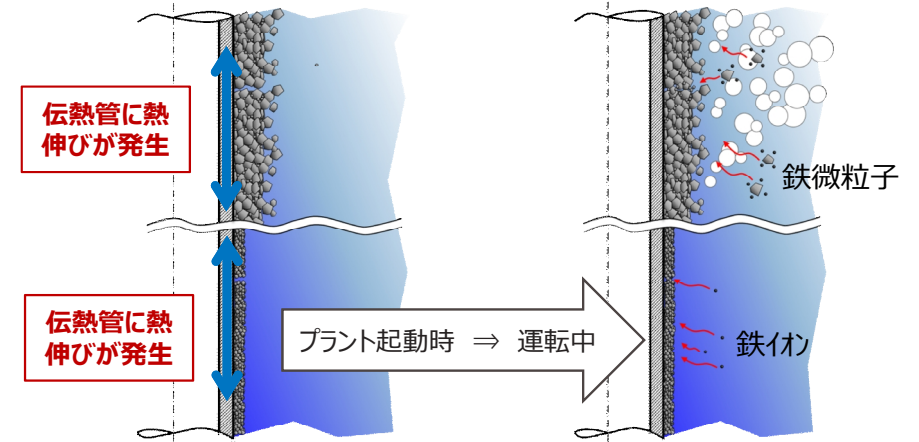
① プラント運転中に2次系給水とともに持ち込まれる鉄イオンおよび鉄微粒子が、析出付着、蒸発残渣として伝熱管表面にスケールが生成される。



② 生成されたスケールは、プラントの起動停止による熱伸びおよび収縮により剥離する。

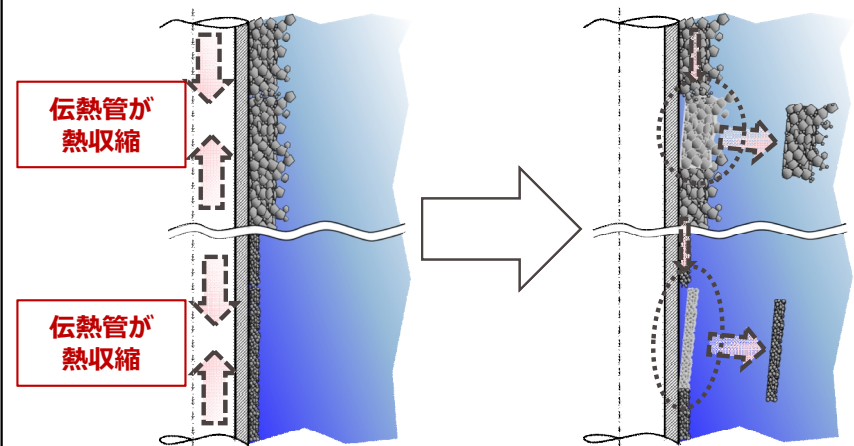
【プラント起動からプラント運転中】

- プラント起動に伴う伝熱管の熱伸びにより伝熱管表面に密着しているスケールに引張力が働き、割れが発生。
- プラント運転中の2次系給水に含まれる鉄イオンおよび鉄微粒子が割れた箇所に供給され、割れが一部修復。

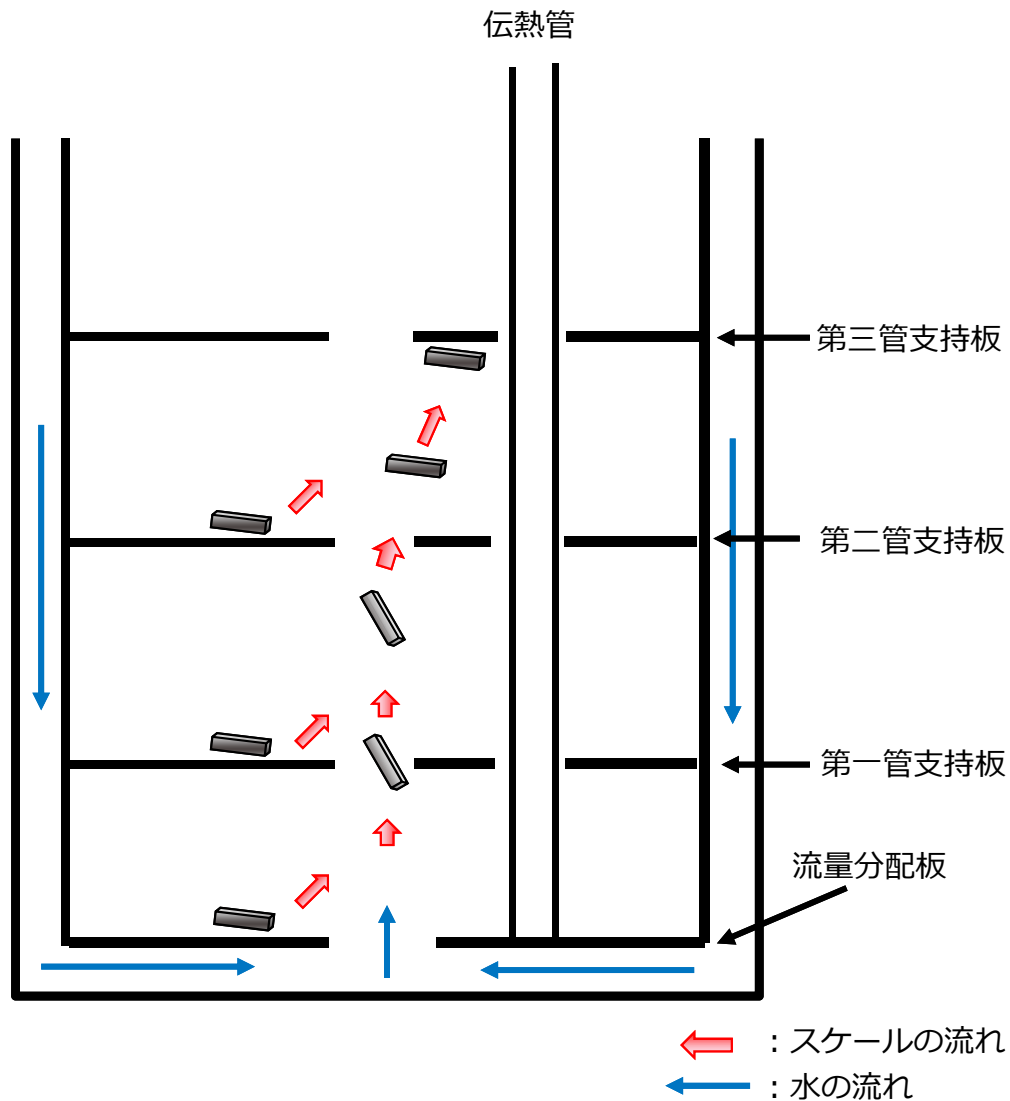


【プラント停止時】

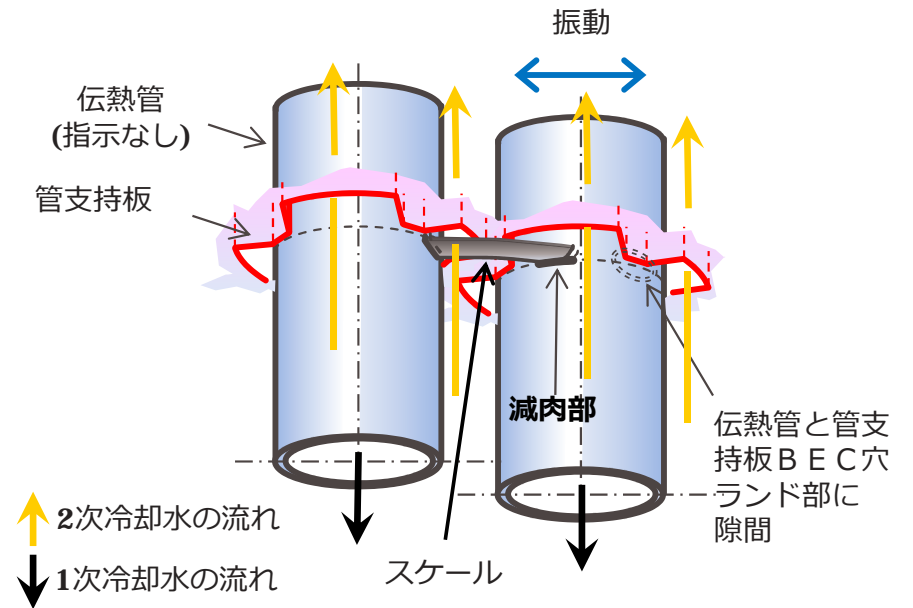
- プラント停止に伴う伝熱管の熱収縮により伝熱管表面のスケールに圧縮力が作用し、界面の密着が弱い箇所で剥離が発生。



③停止時に剥離したスケールは、プラント起動・運転時の管群上昇流および水平方向流に乗って、第三管支持板下面で伝熱管と接触した。



④剥離したスケールの内、AおよびC-S Gで回収した稠密な性状をもつスケールが、伝熱管と接触し、運転中に生じる伝熱管の振動によって、伝熱管外表面を摩耗させ、伝熱管外面にきずをつけた。



減肉メカニズム概要

稠密な性状をもつスケールを脆弱化させるための手段として、大飯発電所 3 号機および 4 号機で実施している薬品洗浄の採否を検討するにあたり、薬品洗浄の有効性を検討した。

○薬品洗浄の概要と効果

S G 器内に薬液*を注入し、伝熱管全体を浸すことにより、伝熱管表面の鉄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。

* 希薄な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を持つ薬液。

○洗浄方法の概要

薬品洗浄は鉄洗浄、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。

<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。

<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 S G 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。

○主に国内で適用されている基本的な薬品洗浄条件は以下のとおり。

項目	鉄洗浄		銅洗浄	
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	100℃	—	65℃以下	—
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

<洗浄試験>

実機洗浄条件については、スケールの薬品浸漬試験で十分な脆弱化効果が確認できた条件を適用する。
なお、脆弱化効果については、伝熱管との摩耗試験により確認した。

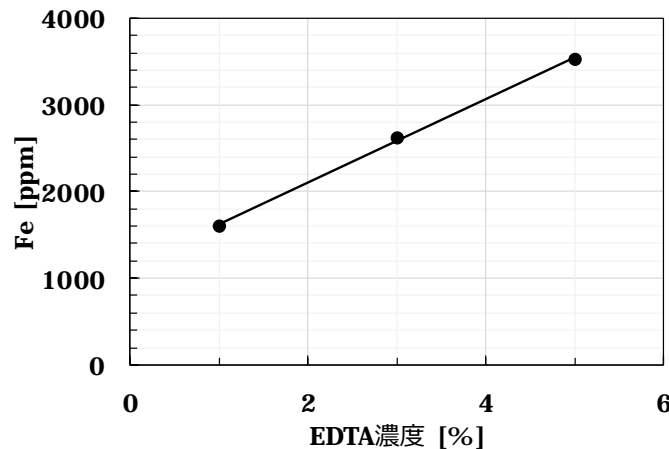
○浸漬試験条件の設定

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。

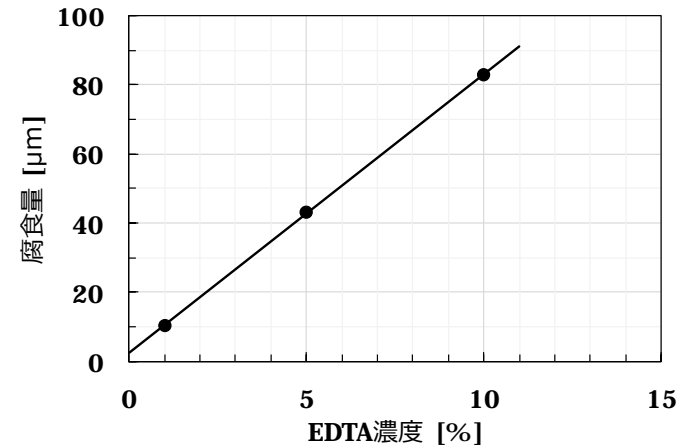
①薬品濃度

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、薬品濃度に比例してS G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ため、S G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%～3%を適用する。



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、洗浄中のS G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S G器内圧は攪拌用窒素の注入・加圧に伴い0.15MPaまで上昇）。

<洗浄試験（続き）>

○浸漬試験および摩耗試験の結果

浸漬試験を実施した結果は下表の通りであり、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欠損またはスケールの摩滅量が大きく増加したため、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。

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

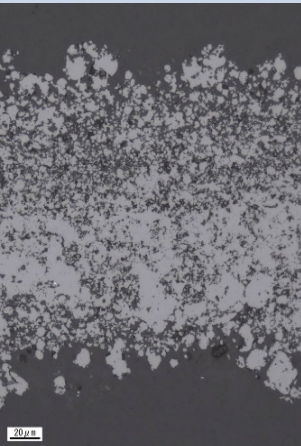
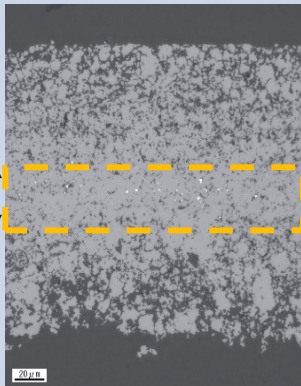
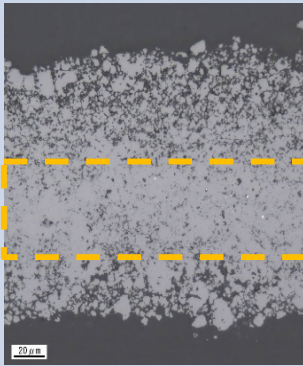
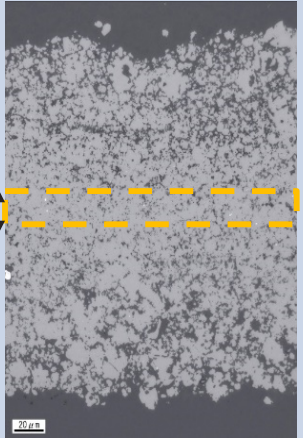
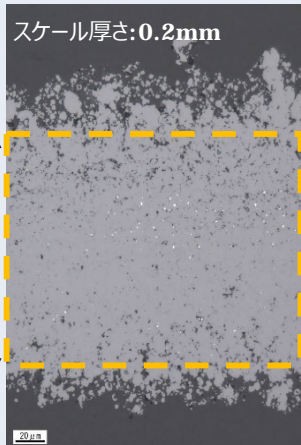
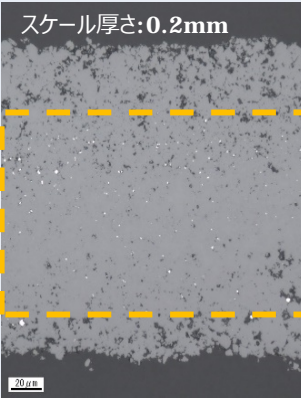
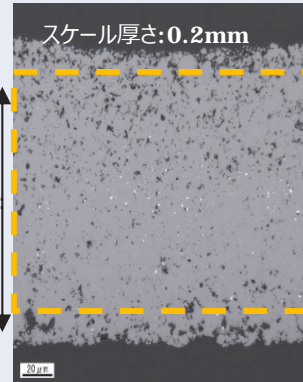
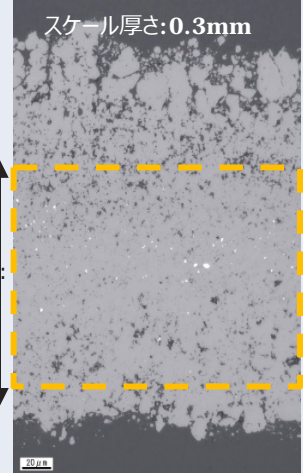
※2 空隙率5%以下

<洗浄試験 (続き) >

○浸漬試験及び摩耗試験の結果

高浜発電所 4 号機で採取した稠密な性状のスケールに薬液を浸し、スケールの空隙率を確認した結果、稠密層厚さが減少していることを確認した。

断面マイクロ観察による稠密層厚さの比較

ケース	1	2	3	4
試験後	 <p>稠密層厚さ : 0mm</p>	 <p>稠密層厚さ : 0.04mm</p>	 <p>稠密層厚さ : 0.06mm</p>	 <p>稠密層厚さ : 0.02mm</p>
試験前	 <p>スケール厚さ: 0.2mm</p> <p>稠密層厚さ : 0.14mm</p>	 <p>スケール厚さ: 0.2mm</p> <p>稠密層厚さ : 0.12mm</p>	 <p>スケール厚さ: 0.2mm</p> <p>稠密層厚さ : 0.14mm</p>	 <p>スケール厚さ: 0.3mm</p> <p>稠密層厚さ : 0.14mm</p>

以上から、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る。

<実機洗浄方法>

○洗浄条件

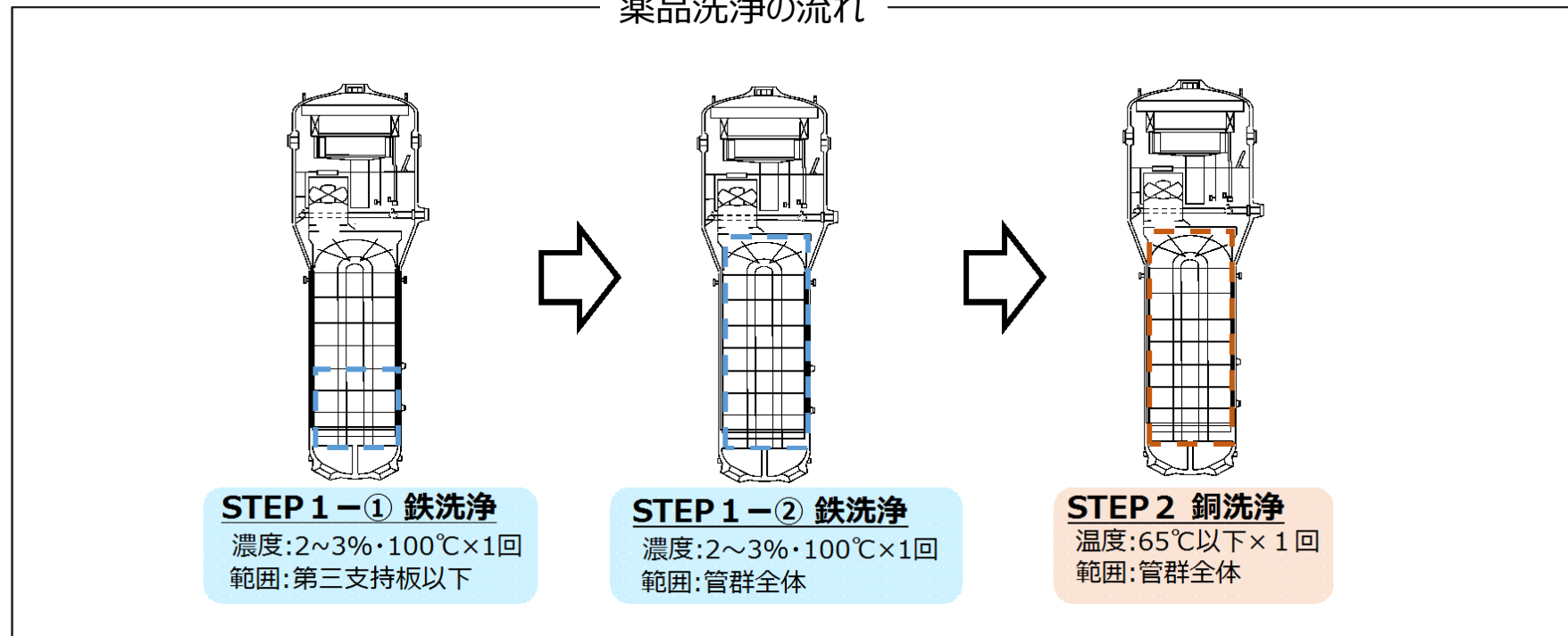
浸漬試験および摩耗試験の結果から、実機洗浄条件については、薬品濃度は2%～3%、洗浄温度は100℃とする。なお、その他洗浄に係る諸条件は、これまでの国内施工実績と同様とする。

○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。

以上を踏まえ、実施工においては、銅洗浄含め、以下の流れで薬品洗浄を行う。

薬品洗浄の流れ



<実機洗浄方法>

○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。

<薬品洗浄による稠密性状スケールの脆弱化の効果検証>

対策の実施に先立ち、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、S G器内に薬液を注入した後にスケールを回収し、薬液注入によるスケールの粗密化効果を実機にて確認する。

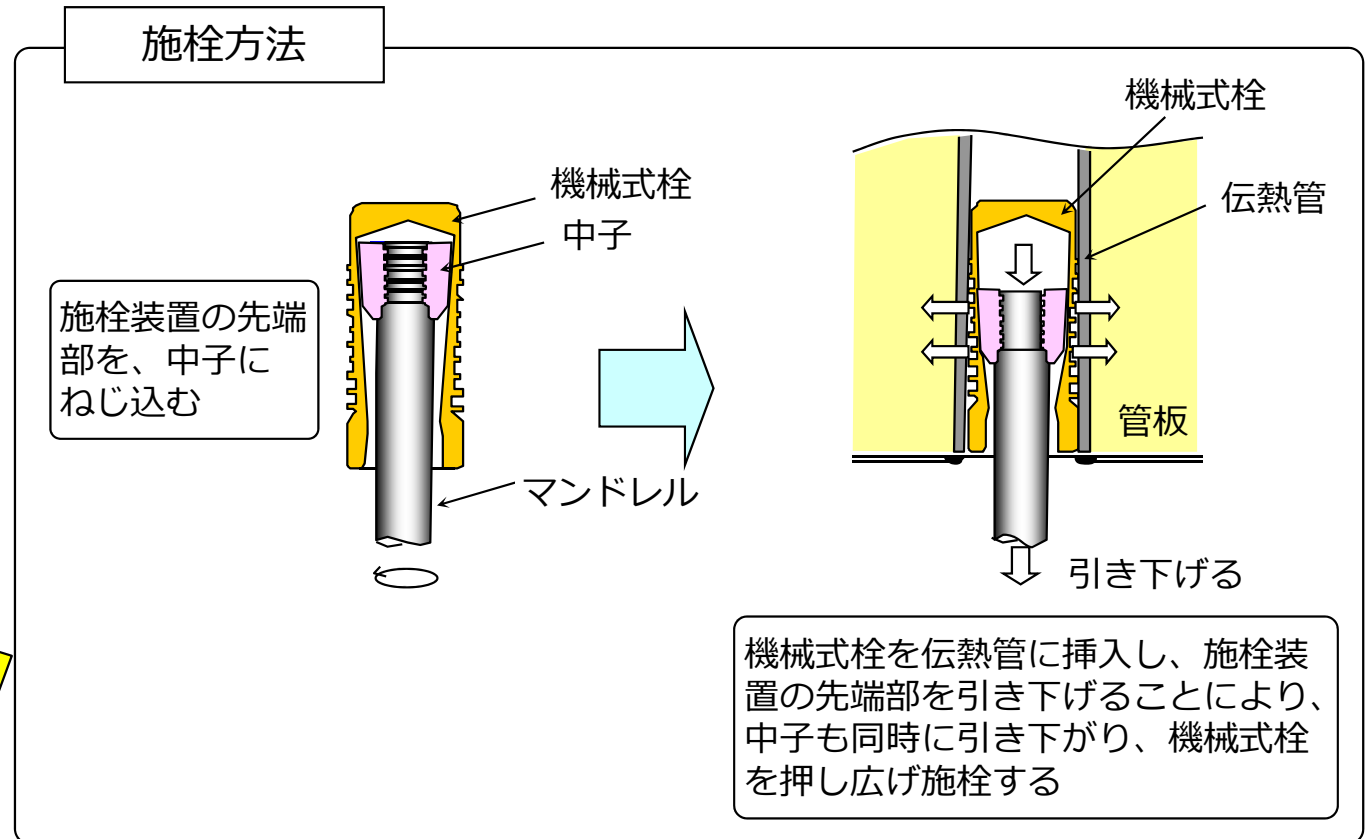
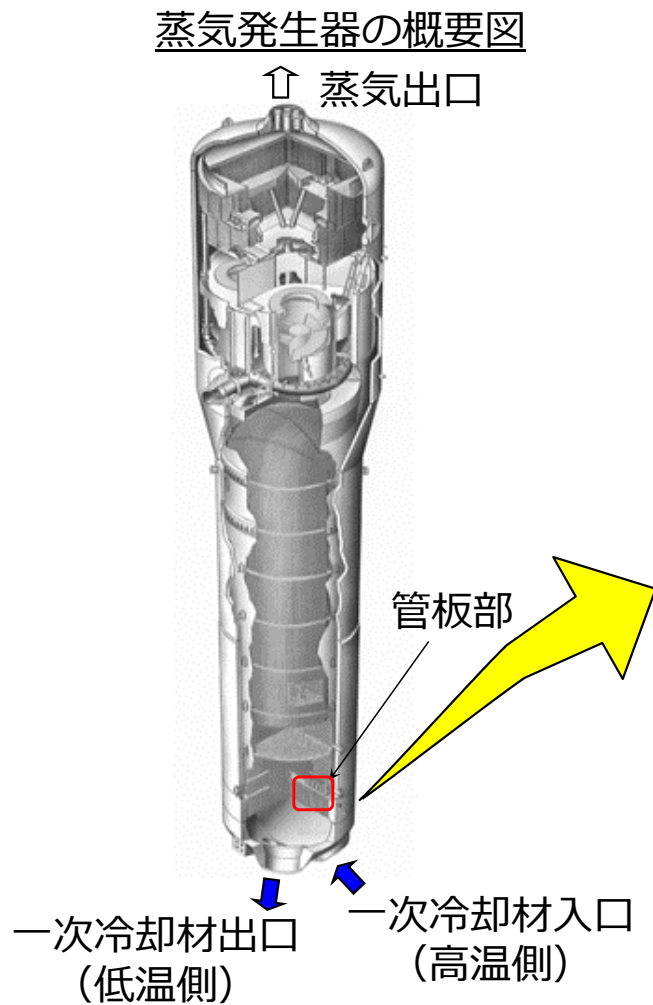
○減肉伝熱管の施栓（従前からの対応） ⇨ 74

○薬品洗浄による稠密性状スケールの脆弱化 ⇨ 71 ~ 72

- Ⅰ 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。

(1) 減肉伝熱管の施栓

損傷が認められた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。



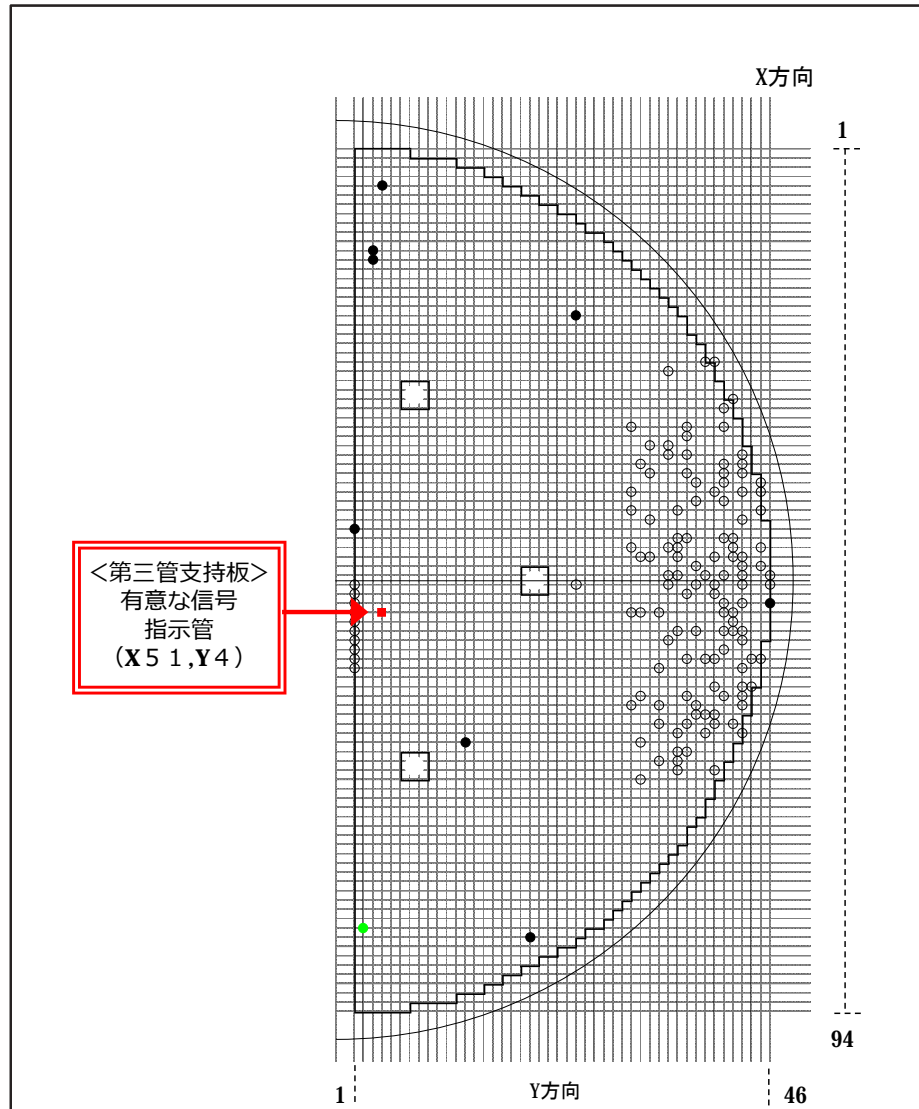
	A-SG (3,382本)	B-SG (3,382本)	C-SG (3,382本)	合計 (10,146本)
今回施栓本数	1	0	3	4
累積施栓本数 [施栓率]	139 [4.1%]	135 [4.0%]	129 [3.8%]	403 [4.0%]

(2) 薬品洗浄による稠密性状スケールの脆弱化

6. 健全性評価 (実機洗浄方法) のとおり。 ➡ 71 ~ 72

參考資料

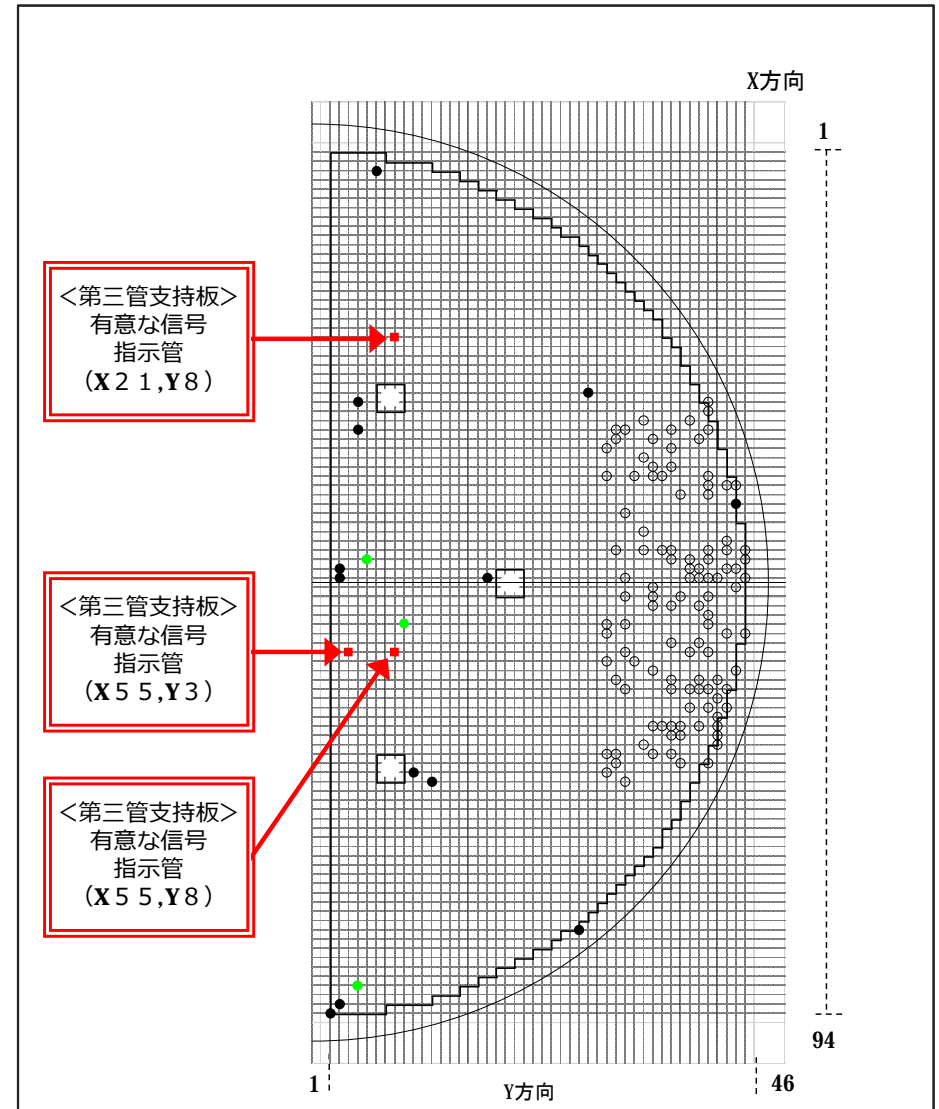
A - S G (低温側) の状況



＜第三管支持板＞
有意な信号
指示管
(X51,Y4)

- : 有意な信号指示管 (1本)
- (緑) : 既施栓箇所 (外面減肉) (1本)
- (黒) : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (8本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (129本)

C - S G (低温側) の状況



＜第三管支持板＞
有意な信号
指示管
(X21,Y8)

＜第三管支持板＞
有意な信号
指示管
(X55,Y3)

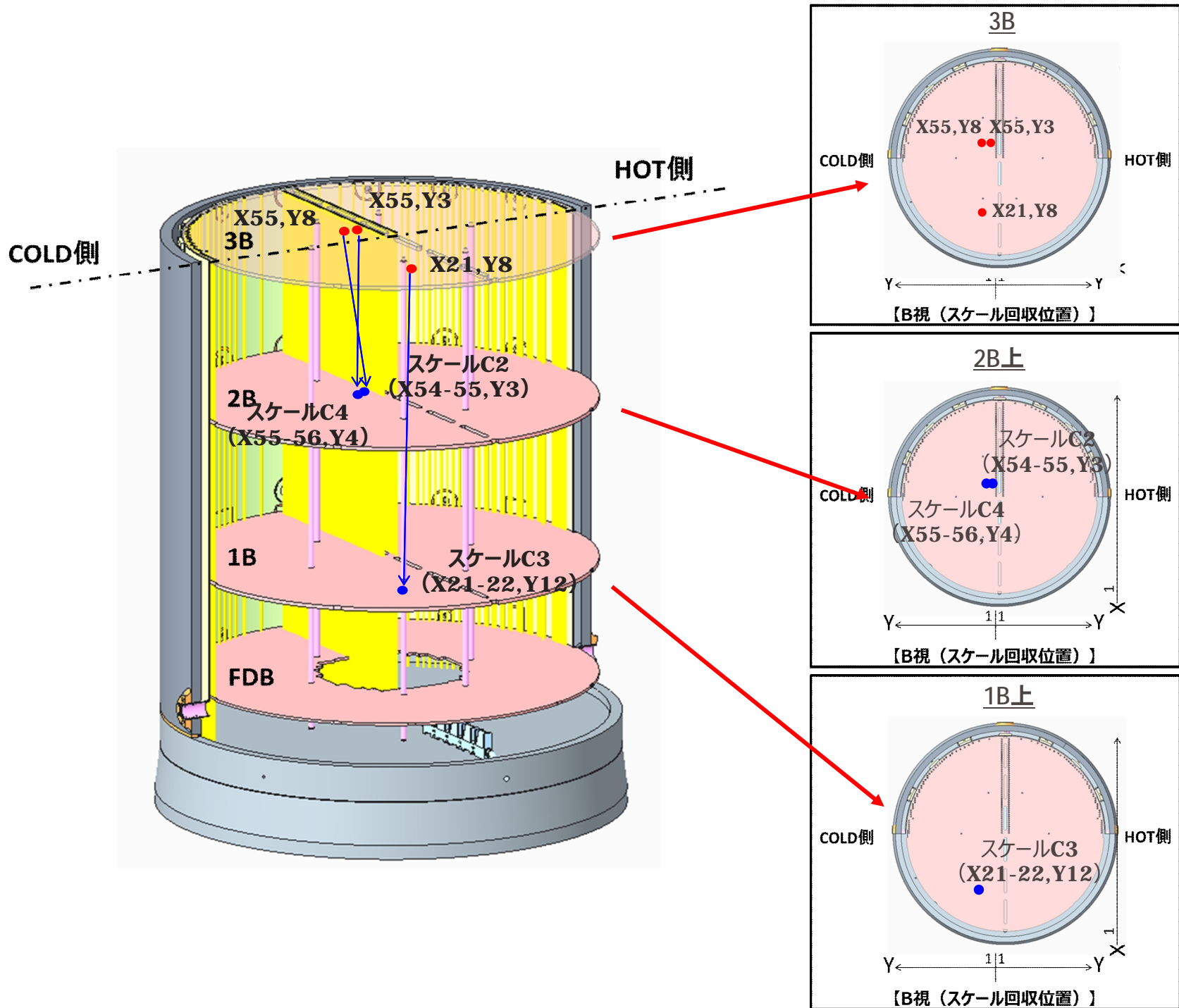
＜第三管支持板＞
有意な信号
指示管
(X55,Y8)

- : 有意な信号指示管 (3本)
- (緑) : 既施栓箇所 (外面減肉) (3本)
- (黒) : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (13本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (110本)

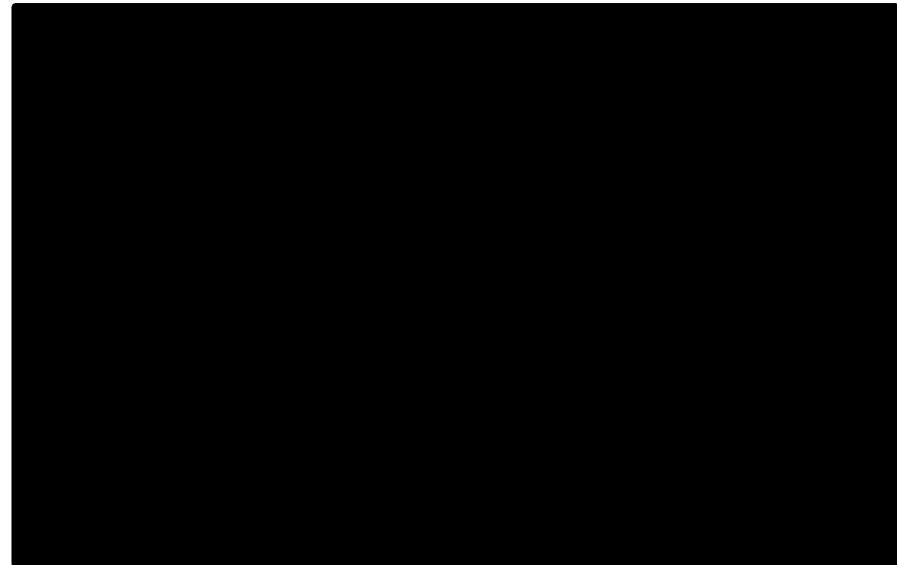
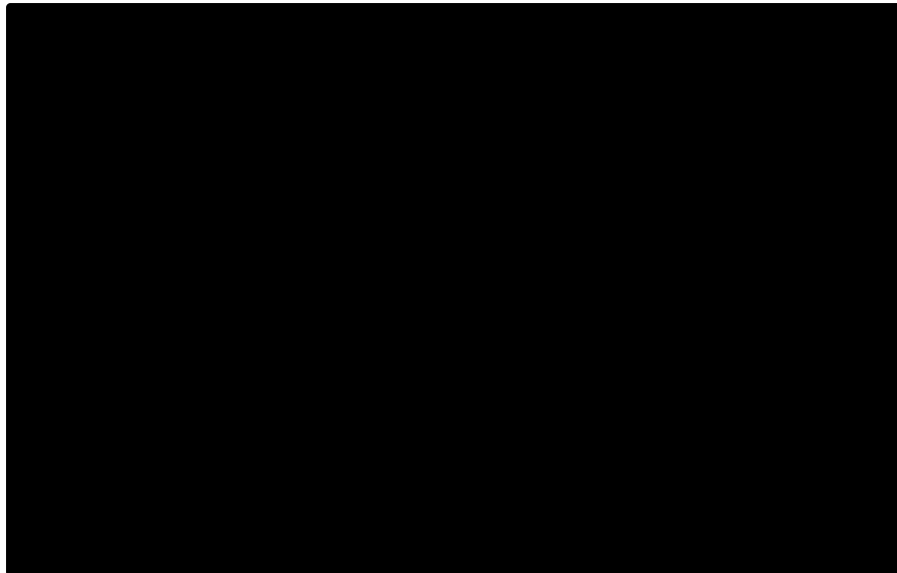
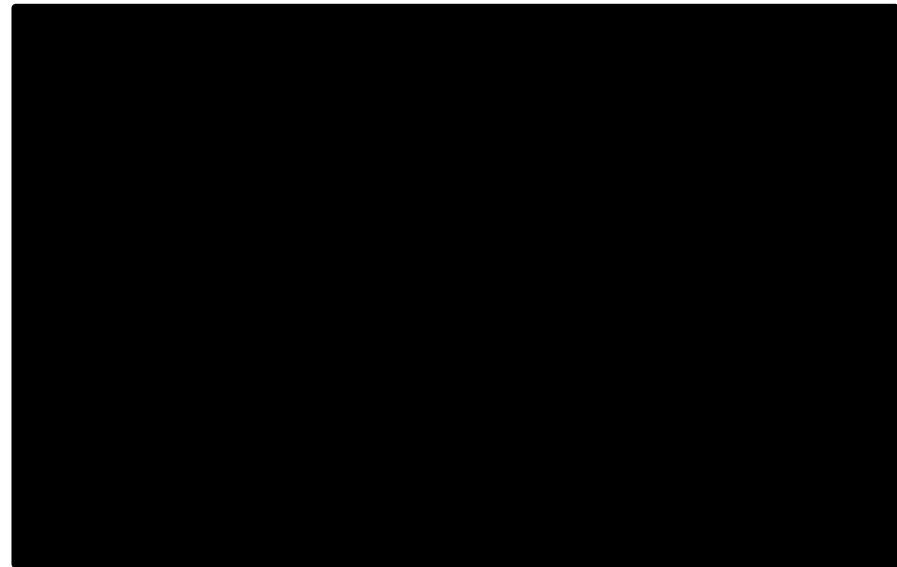
参考資料：要因分析図（FT図）

要因		調査項目	評価	
減肉指示	1次側からの損傷	ECT番号	ECTの番号指示により、伝熱管内面(1次側)にきずがないことを確認した。	
	デンティング	ECT番号	ECTの番号指示を確認した結果、デンティングではないと考えられる。*	
		粒界腐食割れ(IGA)	使用環境	過去にSG2次側環境においてアルカリ環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、粒界腐食割れが発生した実績があるが、高浜発電所3号機のようなアンモニアとヒドラジンによるAVT処理を実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考えられる。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響によるものと考えられる減肉であることから、粒界腐食割れの可能性はないと考えられる。*
		ピitting	使用環境	過去にSG2次側環境において海水リーク等による塩化物環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、ピittingが発生した実績があるが、高浜発電所3号機のような塩素濃度が十分に管理され、かつ、アンモニアとヒドラジンによるAVTを実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考えられる。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響によるものと考えられる減肉であることから、ピittingの可能性はないと考えられる。*
	2次側からの損傷	リン酸減肉	使用環境	過去の2次系水処理において、リン酸を使用していたプラントでリン酸による減肉が発生した実績があるが、高浜発電所3号機のようなアンモニアとヒドラジンによるAVTを実施しているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考えられる。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響によるものと考えられる減肉であることから、リン酸減肉の可能性はないと考えられる。*
		流体振動による疲労	設計評価	管支持板部の流れによる伝熱管の管支持板部の応力は、疲労限に比べ非常に小さく、疲労損傷は発生しないと考えられる。*
		エロージョン	設計評価	当該部流速は約3m/sであり、かつ、TT600合金は耐エロージョン性が高いことから(室温条件では約70m/s以上がエロージョン発生領域)、エロージョンの発生はないと考えられる。*
	管支持板との接触	SG器外流入物との接触	設計評価	管支持板との接触により腐肉が発生したのであれば、4箇所(管支持板ランド部)に減肉が生じることになるが、目視点検の結果からは4か所の管支持板ランド部の減肉は確認できなかったため、管支持板との接触・摩耗によって発生した減肉ではないと考えられる。
			過去の点検調査	前回(第2回)の定期検査において、機器内部へ立ち入る作業では直前に作業服の着替えや靴カバーを着用することや直接目視にて異物確認ができない範囲はファイバースコープを用いた確認を実施する等の異物混入の防止が実施されており、SG器内に異物が入る可能性はない。また、SG器内に異物が入っていたことを踏まえ、念のためSG器内の水張り、窒素充填(ハブリング)および水抜きを実施した結果、異物が回収できなかったことから、SG器内に異物が混入している可能性はない。
		SG器内点検(目視点検)	SG器内点検(目視点検)	AおよびC-SGの減肉信号を確認した伝熱管について、小型カメラによる目視点検を実施した結果、機械的な影響によるものと考えられる減肉を確認した。A-SGで減肉信号を確認した伝熱管を小型カメラにて目視点検を実施した結果、きずに接触する幅約15mm、長さ約9mmの付着物を確認し回収した。C-SGで減肉信号を確認した伝熱管3本を小型カメラにて目視点検を実施した結果、うち1本の伝熱管(XSG、Y3)と第三管支持板の間に付着物を確認したことより回収を試みた。その結果、付着物が折れたため一部の回収はできなかったものの、残りの付着物については、粉碎し、回収できなかった。その他、SG器内の管板等を小型カメラによる目視点検を実施した結果、伝熱管から剥離したスケールおよびスラッジ以外の異物は確認できなかった。また、AおよびC-SGで確認した付着物を分析した結果、主成分が酸化鉄(主にマグネサイト)であり、伝熱管の外径に近い形状であったことから、スケールであると推定した。A-SGの付着物については、減肉信号を確認した伝熱管の傷部分に挟まっていたこと、また、接触痕があり光沢が認められたこと、さらに当該伝熱管との接触想定部位にNiおよびCrの成分を検出したことから、このスケールである付着物が伝熱管と接触し、減肉を発生させた可能性がある。C-SGの付着物(スケールC1)については、接触痕並びに光沢は確認できず、また、平滑面にNiの成分を僅かに検出したが、Crの成分は検出できなかった。
SG器内点検(スラッジランニング)			AおよびC-SGのスラッジランニングを実施し、異物の有無を確認した結果、スケールおよびスラッジ以外に異物は確認できなかった。	
SG器外点検(目視点検)			SGブローダウン系統である系外ブローライン(漏水放出ライン)、復水器回収ラインおよび弁等について異物が残存していないかについて調査した結果、SG2次側のスラッジランニング等で回収されるスラッジと同様のスラッジや系配管の内表面から生じたと考えられる錆びは確認したが、異物は確認できなかった。また、高浜発電所3号機前回(第24回)定期検査でのSG伝熱管損傷現象を踏まえ、外部からの異物混入の可能性は否定できないことから、念のため、SGに異物が流入する可能性のある系統で実施している全ての開放点検等の対象機器について機器の健全並びに異物管理状況を確認した結果、異物混入の可能性はないことを確認した。	
SG器内点検(スラッジランニング)			AおよびC-SGのスラッジランニングを実施し、異物の有無を確認した結果、スケールおよびスラッジ以外に異物は確認できなかったことから、内部物が脱落した可能性は無いと考えられる。	
SG器内発生物との接触		内部物が脱落して接触	設計評価	今回の減肉を生じさせた可能性のある異物の想定形状(薄片)に対して、SG内部部で該当する形状があるかを設計図面により確認したところ、落とし金具のキー固定板等を内部品として使用されていることを確認した。ただし、これらの内部品は、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、内部物が脱落した可能性はないと考えられる。
			SG器内点検(目視点検)	AおよびC-SGの減肉信号を確認した伝熱管について、小型カメラによる目視点検を実施した結果、機械的な影響によるものと考えられる減肉を確認した。A-SGで減肉信号を確認した伝熱管を小型カメラにて目視点検を実施した結果、きずに接触する幅約15mm、長さ約9mmの付着物を確認し回収した。C-SGで減肉信号を確認した伝熱管3本を小型カメラにて目視点検を実施した結果、うち1本の伝熱管(XSG、Y3)と第三管支持板の間に付着物を確認したことより回収を試みた。その結果、付着物が折れたため一部の回収はできなかったものの、残りの付着物については、粉碎し、回収できなかった。その他、SG器内の管板等を小型カメラによる目視点検を実施した結果、伝熱管から剥離したスケールおよびスラッジ以外の異物は確認できなかった。また、AおよびC-SGで確認した付着物を分析した結果、主成分が酸化鉄(主にマグネサイト)であり、伝熱管の外径に近い形状であったことから、スケールであると推定した。A-SGの付着物については、減肉信号を確認した伝熱管の傷部分に挟まっていたこと、また、接触痕があり光沢が認められたこと、さらに当該伝熱管との接触想定部位にNiおよびCrの成分を検出したことから、このスケールである付着物が伝熱管と接触し、減肉を発生させた可能性がある。C-SGの付着物(スケールC1)については、接触痕並びに光沢は確認できず、また、平滑面にNiの成分を僅かに検出したが、Crの成分は検出できなかった。
		SG器内点検(スラッジランニング)	AおよびC-SGのスラッジランニングを実施し、異物の有無を確認した結果、スケールおよびスラッジ以外に異物は確認できなかったことから、内部物が脱落した可能性は無いと考えられる。	
		回収物の分析結果	C-SG伝熱管の減肉を発生させたと考えられる異物等を発見していないことを踏まえ、C-SG伝熱管の減肉箇所下方付近の第二および第一管支持板上にあるスケールを回収し、確認したところ、その中の一つは伝熱管と接触する幅約15mm、長さ約10mmのスケール(スケールC2)および幅約3mm、長さ約1mmのスケール(スケールC3)を確認した。回収スケールC2については凹面および側面、また、回収スケールC3については凸面に3箇所(管支持板との接触部)を確認した。それぞれの形状は、回収スケールC2は直径約2.2.6mmであること、また、成分分析した結果、回収スケールC2については、凹面の接触部には管支持板の主成分であるCrが、また、側面の接触部には伝熱管の主成分であるNiおよびCrを検出した。回収スケールC3については、凸面の3箇所(管支持板との接触部)には管支持板の主成分であるCrが、また、残りの2箇所の接触部には伝熱管の主成分であるNiおよびCrを検出した。	
ECT探傷	損傷以外の信号	局所的な異物等の付着・剥離	ECT番号	局所的なスケールの剥離は、減肉と識別できることから、今回の番号指示は、スケールの剥離ではないと考えられる。 *：きずの形状からも本要因でないと判断できる。

○：可能性は高い、
△：可能性は否定できない、
×：要因の可能性なし。



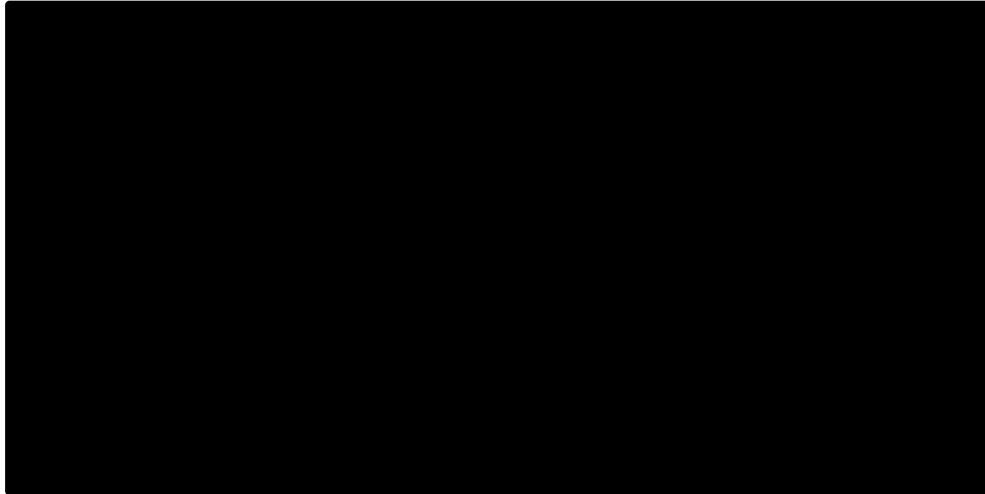
○SG伝熱管表面のスケール成長に伴って伝熱性能が低下し、主蒸気圧力が低下する。高浜3, 4号機はガバナ弁全開圧力（VWO圧力）まで主蒸気圧力が低下しても、夏季に定格出力以下となるまで余裕があるが、大飯3, 4号機には余裕が無いため、当社では大飯3・4号機で先行してSGの薬品（ASCA）洗浄を実施している。



： 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。

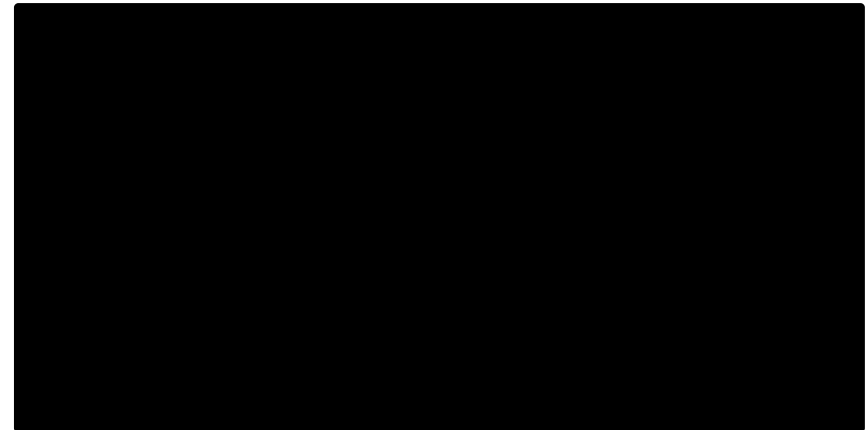
- SG熱抵抗係数（SG汚れ係数）の設計値は、2ループ、3ループ、4ループと設計が新しくなる過程で既設プラントの実績を反映して緻密化されてきた。このため、高浜3, 4号機と大飯3, 4号機では設計SG熱抵抗係数が異なる。

<高浜3号機>

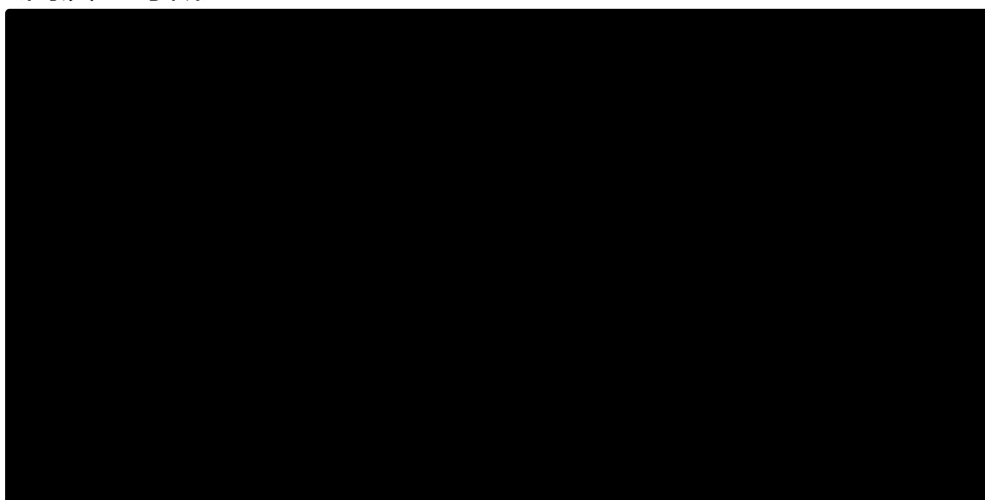


<大飯3号機>

- ・ASCA洗浄（1回目）による回復量：約0.16[$10^{-4}\text{h}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$]
- ・ASCA洗浄（2回目）による回復量：運転再開前のため未評価

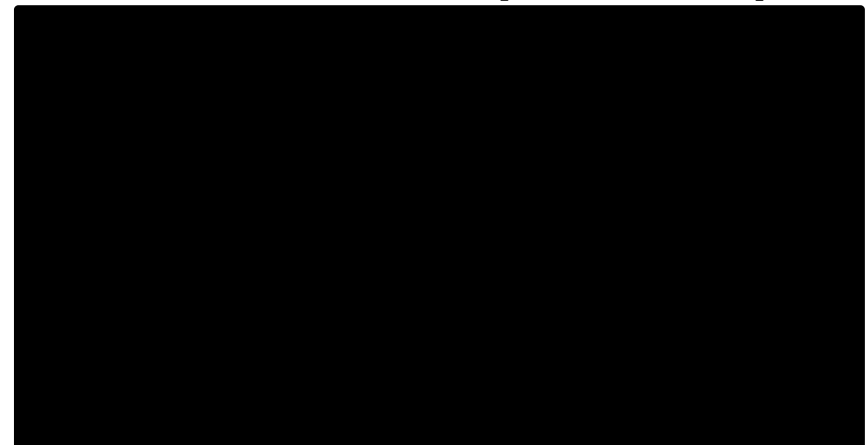


<高浜4号機>

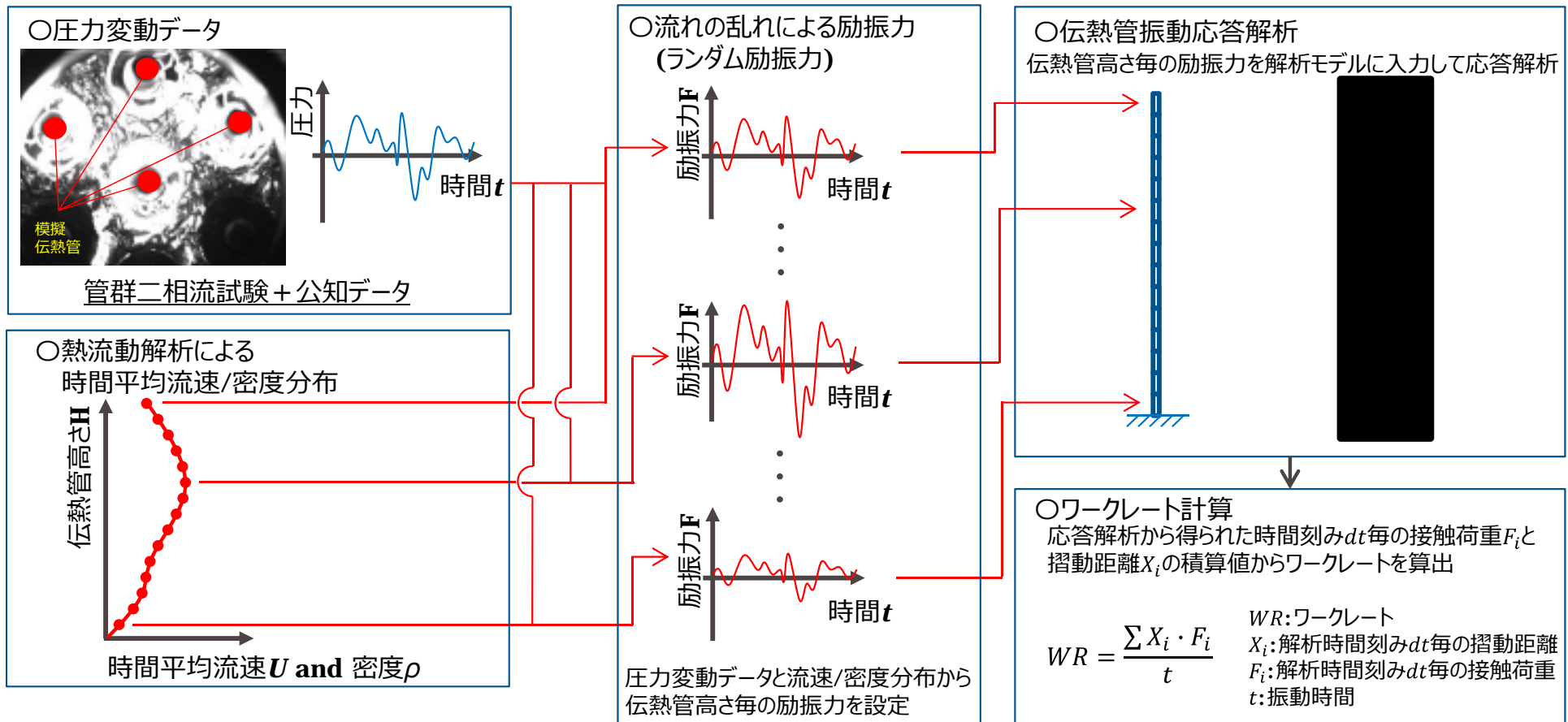


<大飯4号機>

- ・ASCA洗浄による回復量：約0.16[$10^{-4}\text{h}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$]



- 運転中のSG 2次側器内は蒸気-水二相の乱流となっているため、伝熱管は流体から次の作用を受けランダム振動する。
 - ・ 流れの平均流速は一定であるが、刻々と時間変動する乱れ成分があるため、ランダムな流体力が生じる。
 - ・ 蒸気-水二相流では、気相と液相がランダムに伝熱管に衝突する。
- ランダム振動する伝熱管にスケール（上昇流で管支持板下面に固定）が接触すると、伝熱管はスケールとの摺動で摩耗する。
- 摩耗の仕事率（ワークレート）は、以下の通り既往試験データをインプットとして解析により求めることができる。
- 本調査では、解析で得たワークレートを1サイクルの摩耗体積評価に、押付力や摺動速度等を摩耗試験条件に用いている。



■ : 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。

参考資料：廃止措置中プラントの鉄持込み量一覧

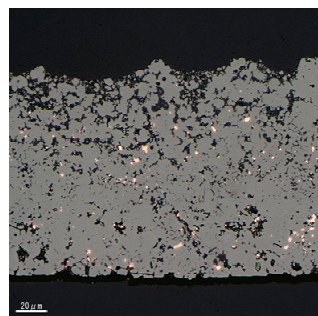
○廃止措置中プラントの鉄持込み量を調査した結果、いずれも蒸気発生器取替（SGR）済みであり、累積の鉄持込み量は運転中SGRプラントで代表の高浜2号機と同程度であることを確認した。

項目	【参考】高浜4号機				【参考】高浜2号機 (SGR後)			大飯1号機 (SGR後)			大飯2号機 (SGR後)			美浜1号機 (SGR後)		美浜2号機 (SGR後)	
	AVT	ETA	高ETA	高AVT	AVT	ETA	高ETA	AVT	ETA	高ETA	AVT	ETA	高ETA	AVT	ETA	AVT	ETA
水処理																	
運転サイクル数	10	8	2	3	2	7	4	3	8	1	2	7	2	2	9	2	11
運転時間 [×10 ⁴ hr]	9.8	8.0	2.0	2.4	1.9	7.1	3.5	10.9			9.8			10.0		11.6	
鉄持込み量 (水処理毎) [kg/SG]	1,680	650	70	90	400	450	90	430	610	40	170	530	100	170	500	300	840
鉄持込み量 (累積) [kg/SG]	2,490				940			1,080			800			670		1,140	

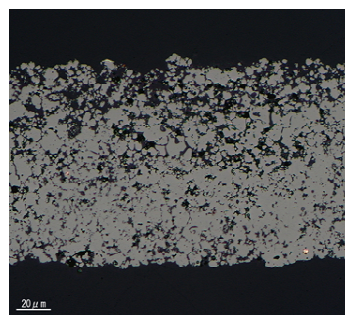
<薬品洗浄前後スケール性状比較>

○大飯4号機において、薬品洗浄前後のスケール性状を断面マイ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 第14回定検で回収
- ※2 ラボ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3, 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3号機第8回定検であり、以下の通り

（大飯3号機第8回定検での取得データ（H13年／7.9万時間／HOT側））

第3管支持板以下：約0.05～0.06mm

第3管支持板以上：約0.09～0.17mm

○高浜3, 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

- 当社とスケールマネジメント方法の主な違いについて下表の通り整理した。
- 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、E P R I等の各種レポート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。

＜整理結果＞

項目	当社	海外※
B E C穴閉塞	<ul style="list-style-type: none"> ・E C T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"> ・E C Tや目視、S G二次側水位による閉塞率管理 ・<u>薬品洗浄による閉塞回復</u>
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 ・<u>薬品洗浄</u>
伝熱性能低下	<ul style="list-style-type: none"> ・薬品洗浄（A S C A洗浄） 	<ul style="list-style-type: none"> ・薬品洗浄（A S C A洗浄他）

※ E P R I S G M P 専有レポート“Deposit Removal Strategies Sourcebook (3002005090)”他より

- 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
- 海外においては、主にB E C穴閉塞対応で薬品洗浄を用いている他、管板直上スラッジの除去にも活用

⇒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、結果として、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。

<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、接触部で伝熱管は摺動
- ・このとき、スケールが伝熱管との摺動で破損しなければ、摺動は継続し、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

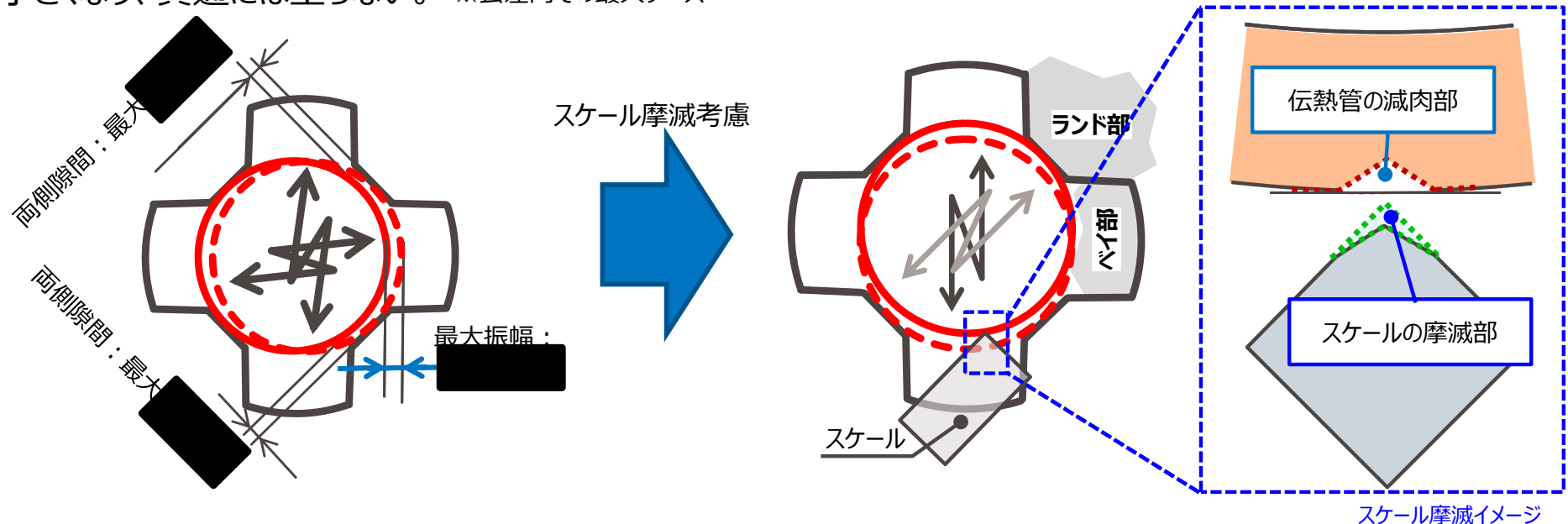
○ただし、同じ比摩擦量、同じワークレートで摺動し続けたとしても、最終的な摩擦減肉量は異物の場合より小さい。

- ・スケールは微細な粒子で構成されるため、伝熱管との摺動で、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。

○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、前ページ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 B D 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。

