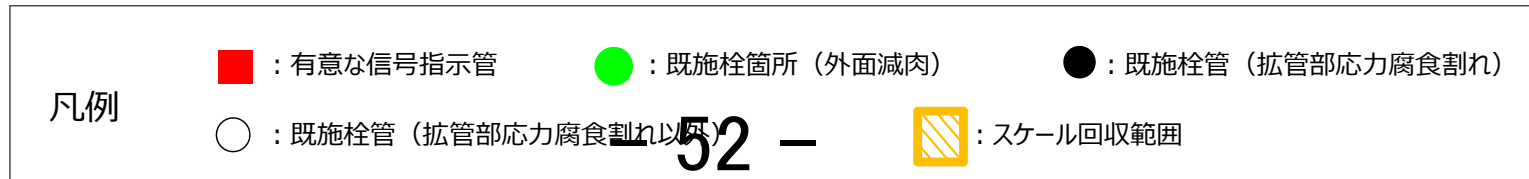
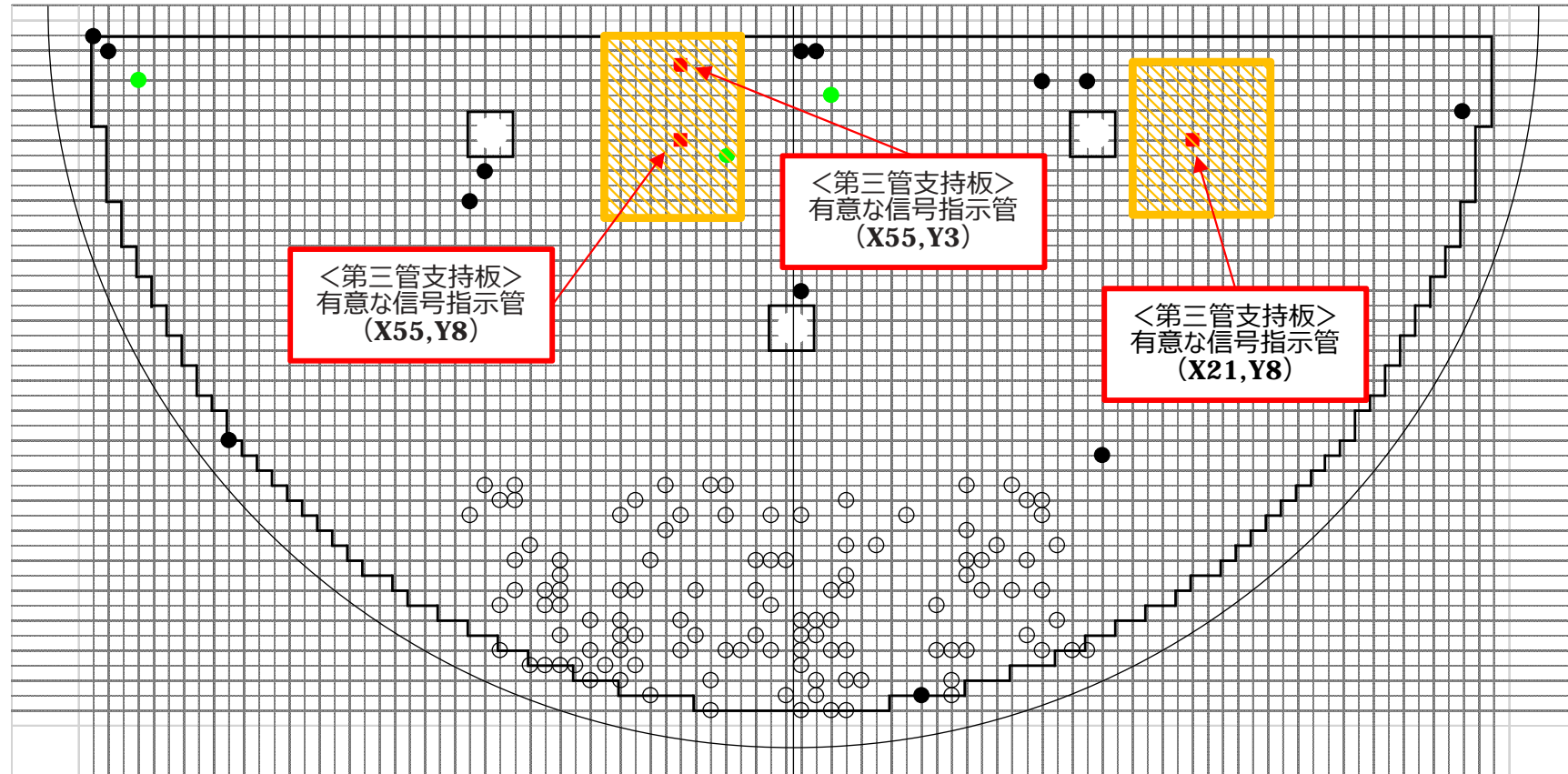


- C - S G 伝熱管の減肉を発生させたと考えられる異物等を発見していないことを踏まえ、C - S G の減肉を確認した伝熱管を中心にXおよびY方向に約 10 列ずつを範囲として、減肉箇所下方の第二および第一管支持板上にあるスケールを約 300 個回収し、確認した。

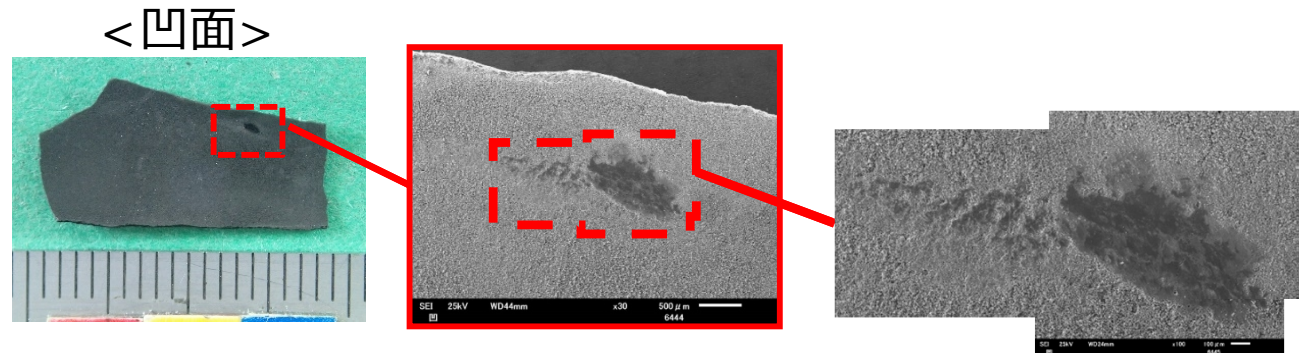


減肉が認められたX55,Y8の第三管支持板部の下方、X54-55,Y3第二管支持板上面で回収したスケール（以下、スケールC2）を分析した結果は、次のとおりである。

① 外観観察結果

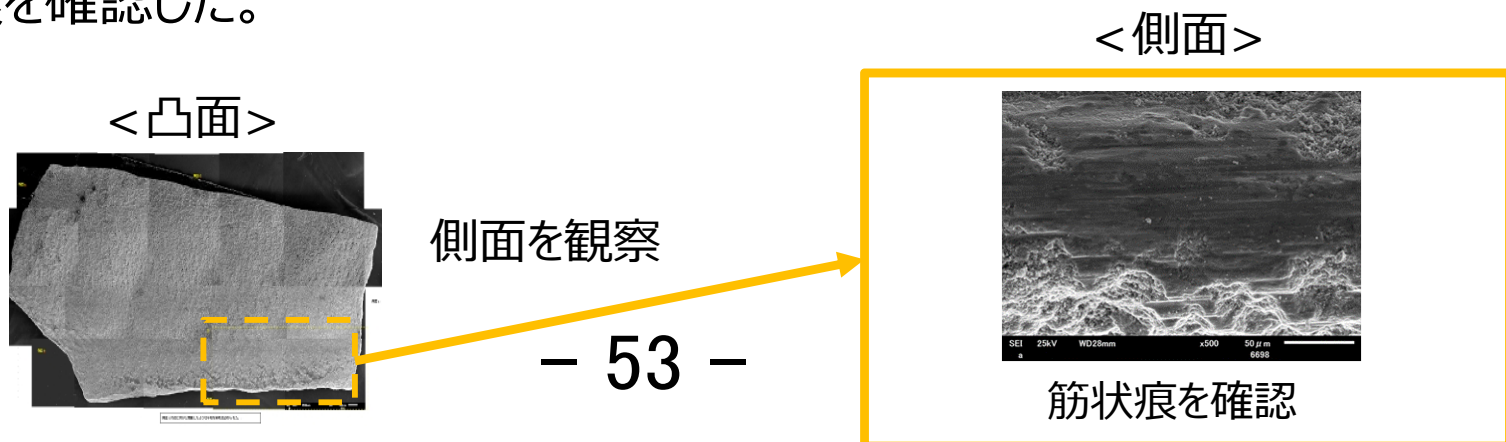
- スケールC2の表面を観察した結果、凹面の一部に接触痕を確認した。また、側面にも一部に接触痕を確認した。形状（R形状）を計測した結果、直径約22.3mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。

大きさ：約18mm×約10mm
厚さ：約0.3mm
質量：約0.19g



② SEM観察結果

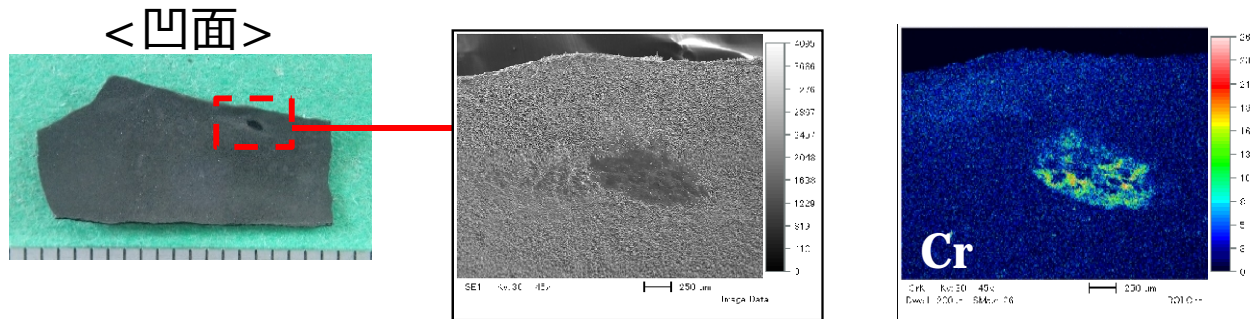
- 拡大観察した結果、凹面の接触痕には筋状痕が確認できなかったものの、側面の接触痕では筋状痕を確認した。



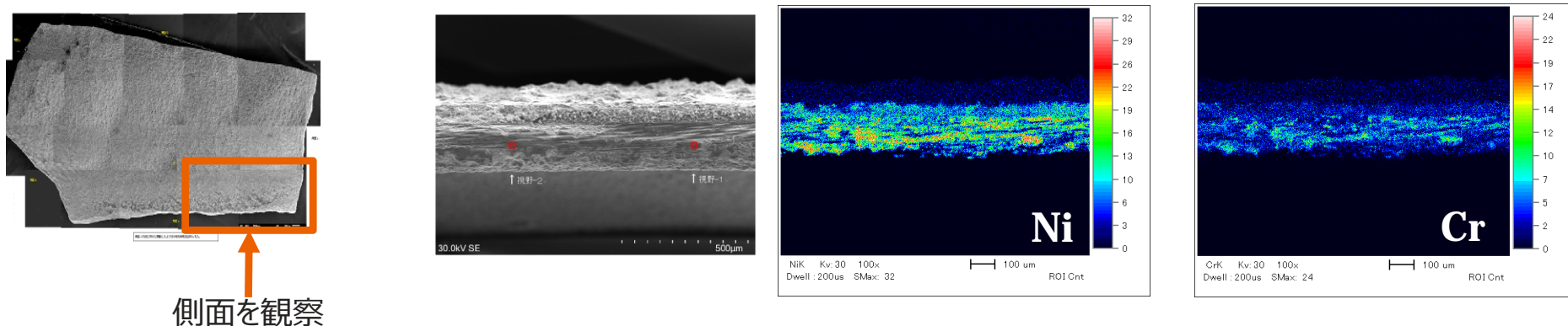
③ 成分分析（X線回折※1、EDS※2）

○スケールC 2凹面の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析を実施した結果、管支持板（SUS405）の主成分であるCr成分を検出した。

※1：試料にX線を照射し、X線の散乱・干渉を解析することで、構成成分の同定をする分析方法
 ※2：エネルギー分散型X線分析（Energy Dispersive X-ray Spectroscopy）のこと。電子線照射により発生する特性X線のエネルギーと強度から構成元素を分析する装置



○スケールC 2側面の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析の結果、伝熱管（インコネル600）の主成分であるNi成分とCr成分を検出した。



④ 減肉箇所との関係

○スケールC 2の形状や筋状痕、接触痕の位置は、以下の通りX55, Y8の減肉箇所や周辺の第三管支持板表面の接触痕の位置と一致することを確認した。

<凸面>

<側面>

<凹面>

筋状痕

接触痕

X55, Y8

X54, Y8

筋状痕と減肉部の位置
関係が一致

凹面の接触痕と、第
三管支持板 B E C
穴ランド部の接触痕
の位置関係が一致

第三管支持板表面の接
触痕の位置関係と一致

A-A断面

減肉部と接触

第三管支持板 B E C穴ランド部と接触

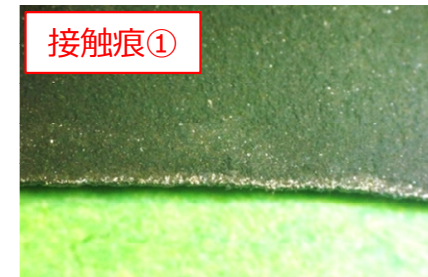
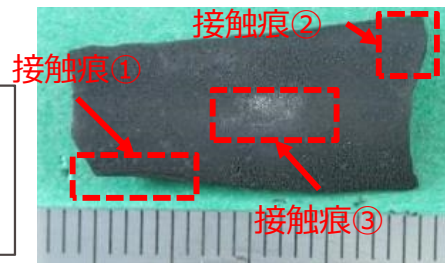
第三管支持板表面と接触

減肉が認められたX21,Y8の第三管支持板部の下方、X21-22,Y12第一管支持板上面で回収したスケール（以下、スケールC3）を分析した結果は、次のとおりである。

① 外観観察結果

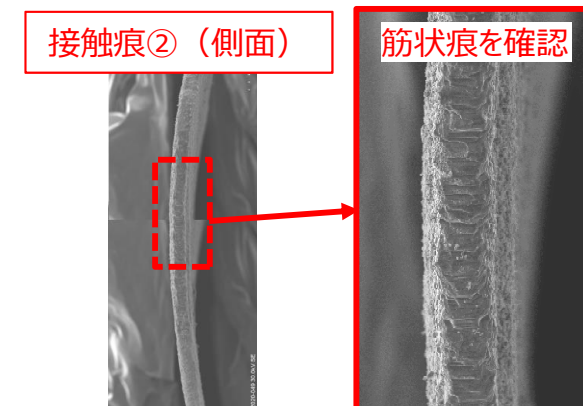
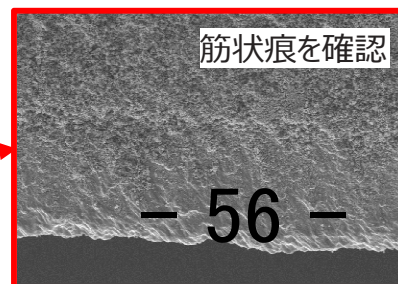
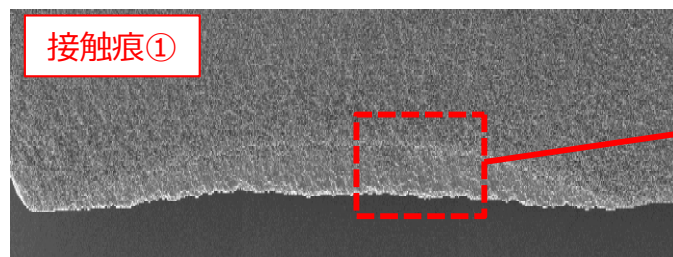
- スケールC3の表面を観察した結果、凸面および側面に接触痕を確認した。また、形状（R形状）を計測した結果、直径約22.6mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。

大きさ：約23mm×約11mm
厚さ：約0.3mm
質量：約0.25g



② SEM観察結果

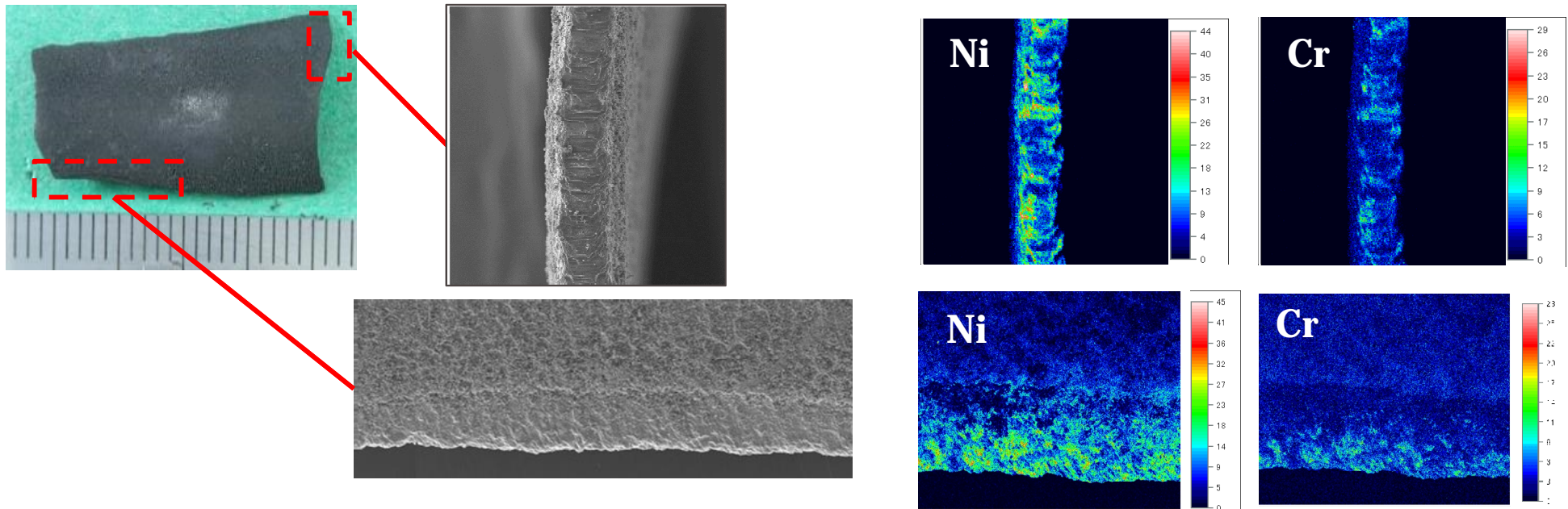
- 接触痕を拡大観察した結果、凸面の接触痕③には筋状痕が確認できなかったが、側面の接触痕①、②に筋状痕を確認した。



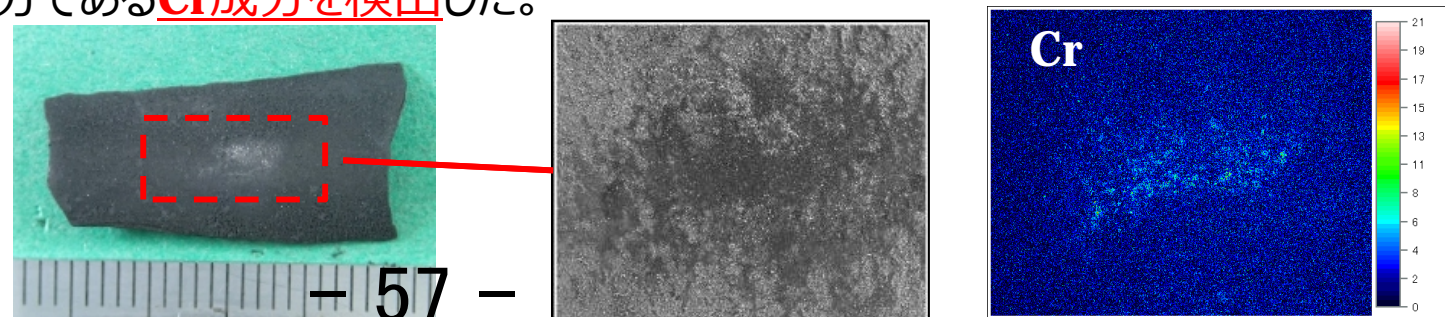
③ 成分分析（X線回折※1、EDS※2）

○スケールC3側面の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析を実施した結果、伝熱管（インコネル600）の主成分であるNi成分とCr成分を検出した。

※1：試料にX線を照射し、X線の散乱・干渉を解析することで、構成成分の同定をする分析方法
 ※2：エネルギー分散型X線分析（Energy Dispersive X-ray Spectroscopy）のこと。電子線照射により発生する特性X線のエネルギーと強度から構成元素を分析する装置



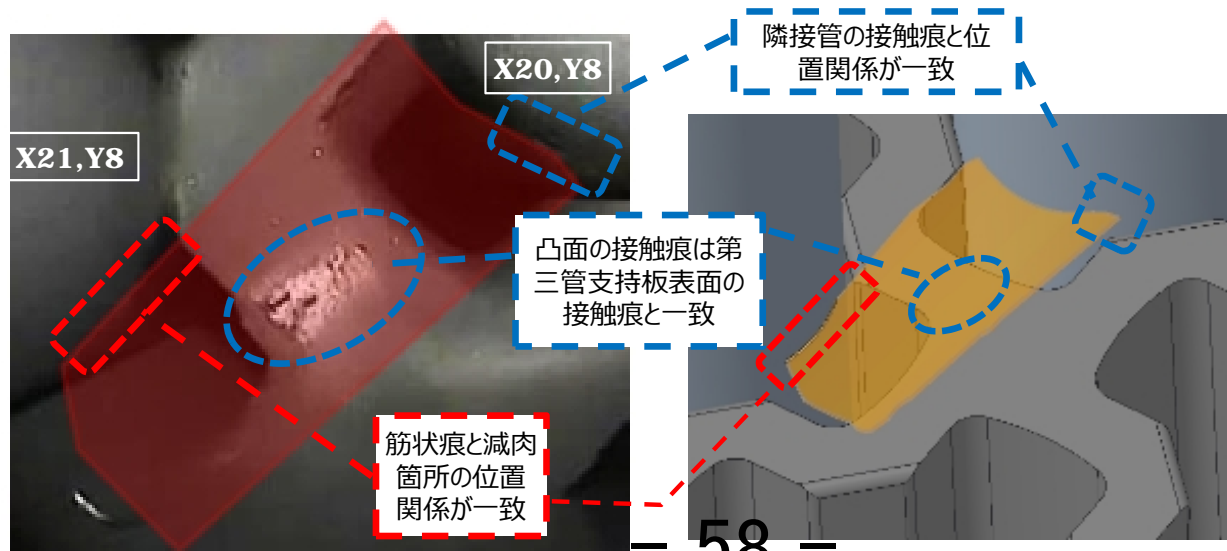
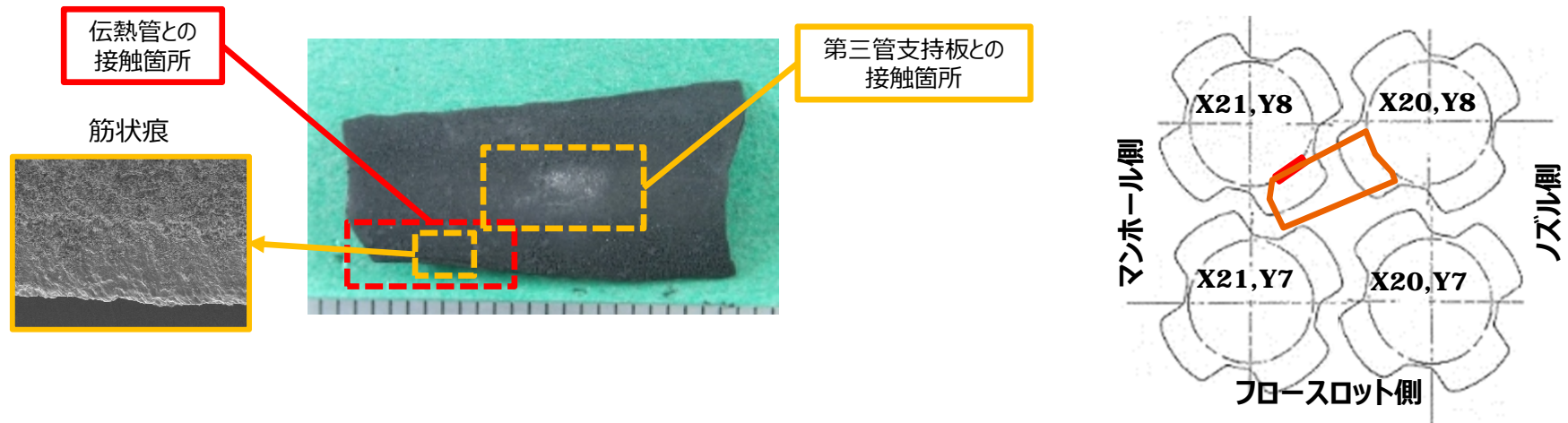
○スケールC3の凸面の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析を実施した結果、管支持板（SUS405）の主成分であるCr成分を検出した。



スケールC3は、管支持板下面と接触しながら、伝熱管に減肉を与えた可能性があると推定した。

④ 減肉箇所との関係

○スケールC3の形状や筋状痕、接触痕の位置は、以下の通りX21,Y8の減肉箇所および周辺の第三管支持板表面並びに隣接管 (X20,Y8) の接触痕の位置と一致することを確認した。



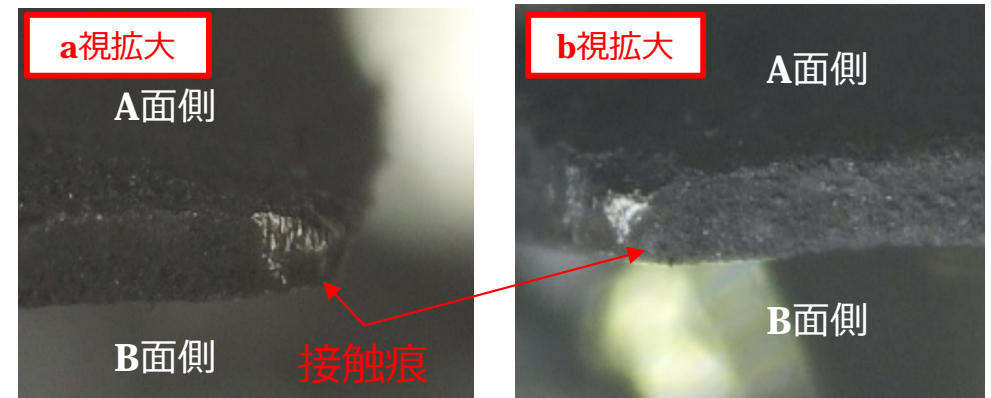
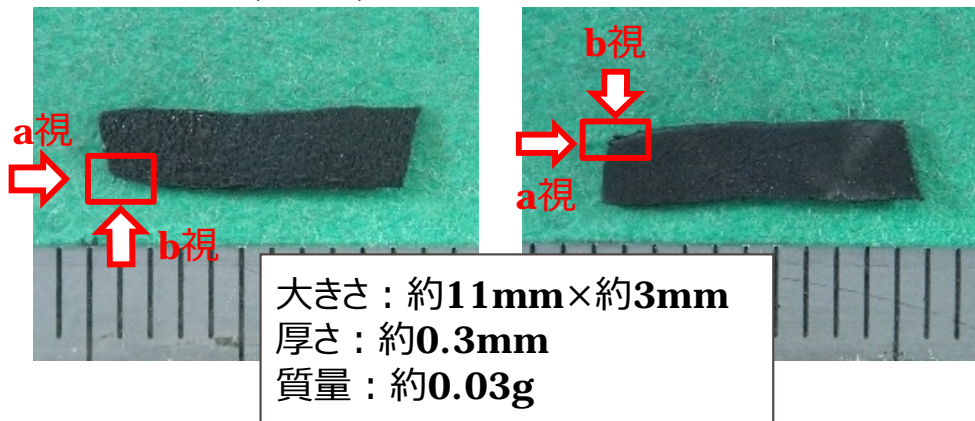
減肉が認められたX55,Y3の第三管支持板部の下方、X55-56,Y4第二管支持板上面で回収したスケール (以下、スケールC4) を分析した結果は、次のとおりである。

① 外観観察結果

○スケールC4の表面を観察した結果、角部に接触痕を確認した。また、形状 (**R形状**) を計測した結果、直径約22.2mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。

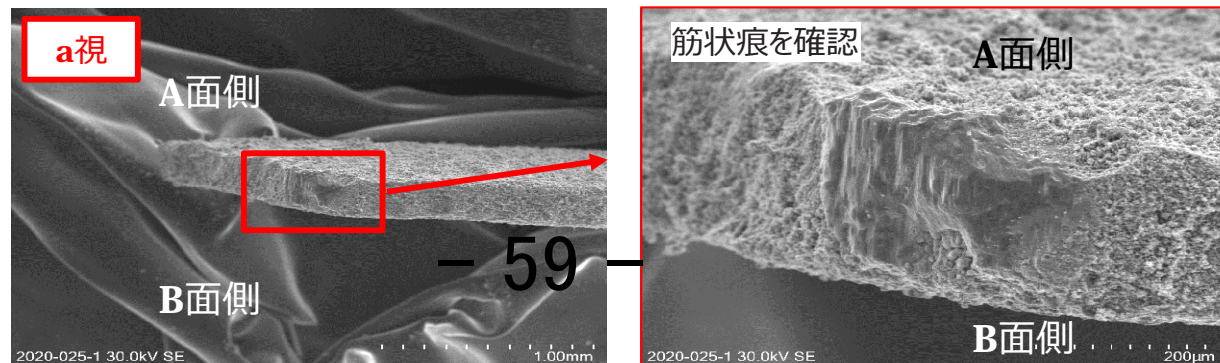
<A面(表面)>

<B面(裏面)>



② SEM観察結果

○接触痕を拡大観察した結果、筋状痕を確認した。

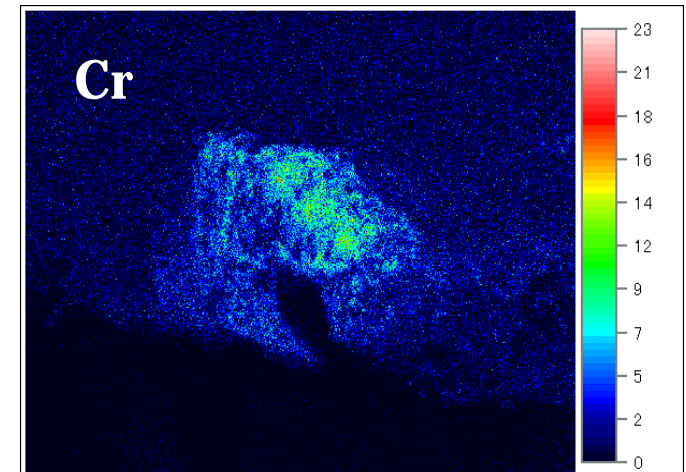
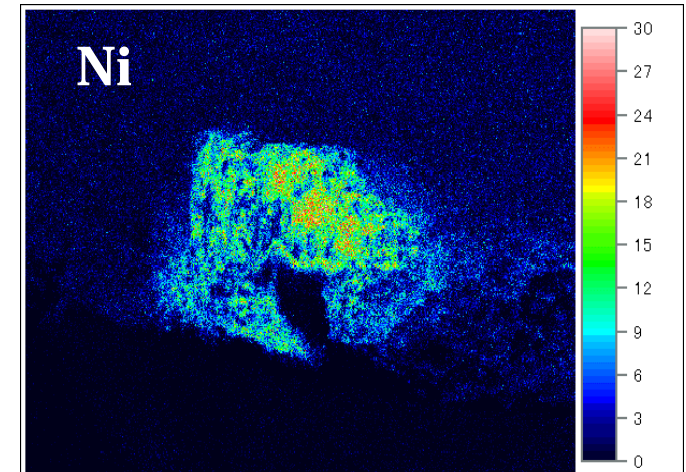
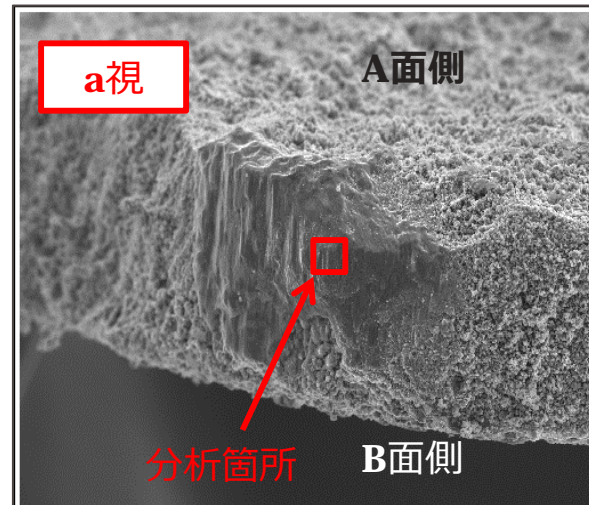
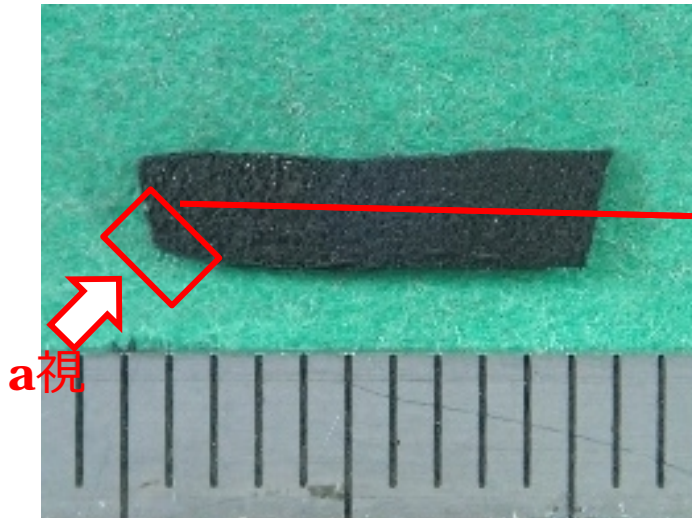


③ 成分分析（X線回折※1、EDS※2）

○スケールC4角部の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析を実施した結果、伝熱管（インコネル600）の主成分であるNi成分とCr成分を検出した。

※1：試料にX線を照射し、X線の散乱・干渉を解析することで、構成成分の同定をする分析方法
※2：エネルギー分散型X線分析（Energy Dispersive X-ray Spectroscopy）のこと。電子線照射により発生する特性X線のエネルギーと強度から構成元素を分析する装置

<A面(表面)>

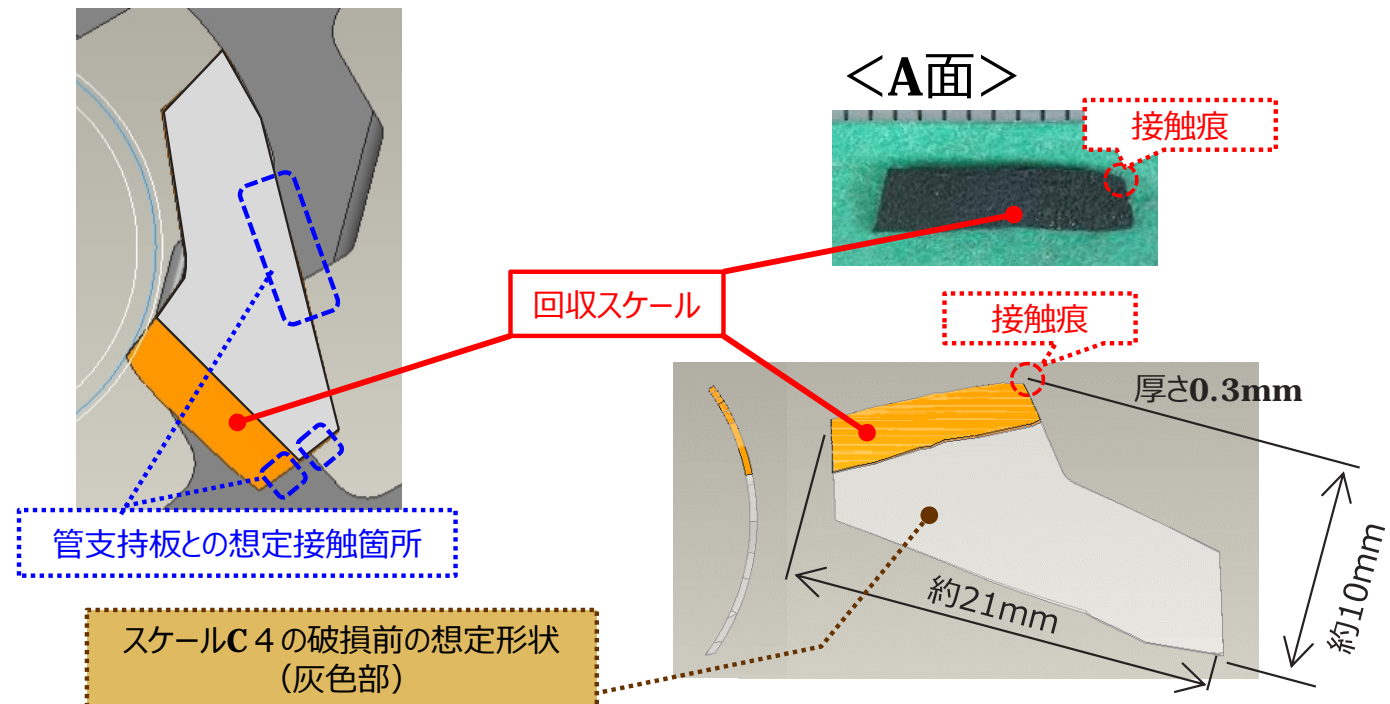
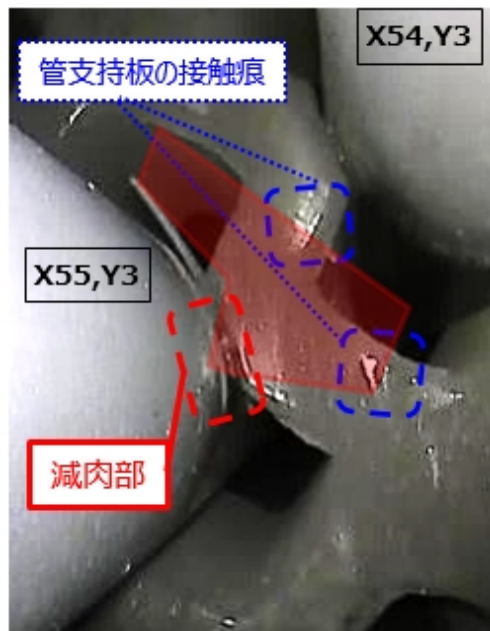
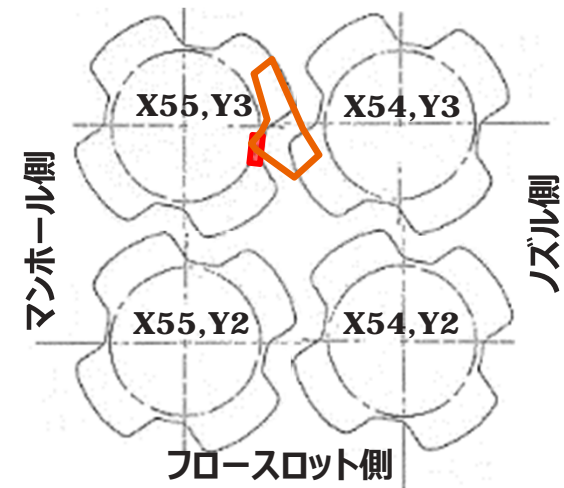


— 60 —

スケールC4は、管支持板下面と接触しながら、伝熱管に減肉を与えた可能性があると推定した。

④ 減肉箇所との関係

- スケールC 4の角部に接触痕が確認されたことから、減肉形状が三角型と推定されるX55, Y3伝熱管との接触条件を検討。
- スケールの一部（伝熱管との接触部以外の箇所）が破損したとすると、スケールC 4の破損前の想定形状が管支持板接触痕の位置と一致することを確認した。



- スケールAは接触痕があり光沢が認められ、減肉信号を確認した伝熱管との接触想定部位に伝熱管の主成分であるNiとCrの成分を検出したことから、スケールAが減肉を発生させたと考える。
- スケールC 1は接触痕および光沢は確認できず、またNiの成分を僅かに検出したものの、Crの成分が検出されなかったため、減肉を発生させたものではないと考える。
- 減肉信号を確認した伝熱管付近から回収したスケールC 2、C 3およびC 4に接触痕を確認し、接触想定部位にNiとCrの成分を検出したことおよび減肉箇所や管支持板表面の接触痕と形状や接触痕の位置関係が一致することから、スケールC 2、C 3およびC 4が減肉を発生させたと考える。

減肉を発生させるスケールの生成メカニズムおよび伝熱管を損傷させる可能性について、調査および検討を実施した。

○スケールの生成メカニズム

これまでの水化学に関する知見※から、2次系構成機器の流れ加速型腐食等で生じる鉄イオンや鉄の微粒子が、給水とともにS G 2次側へ持ち込まれることにより、次の2つの現象が発生することでS G伝熱管表面にスケールとして付着する。

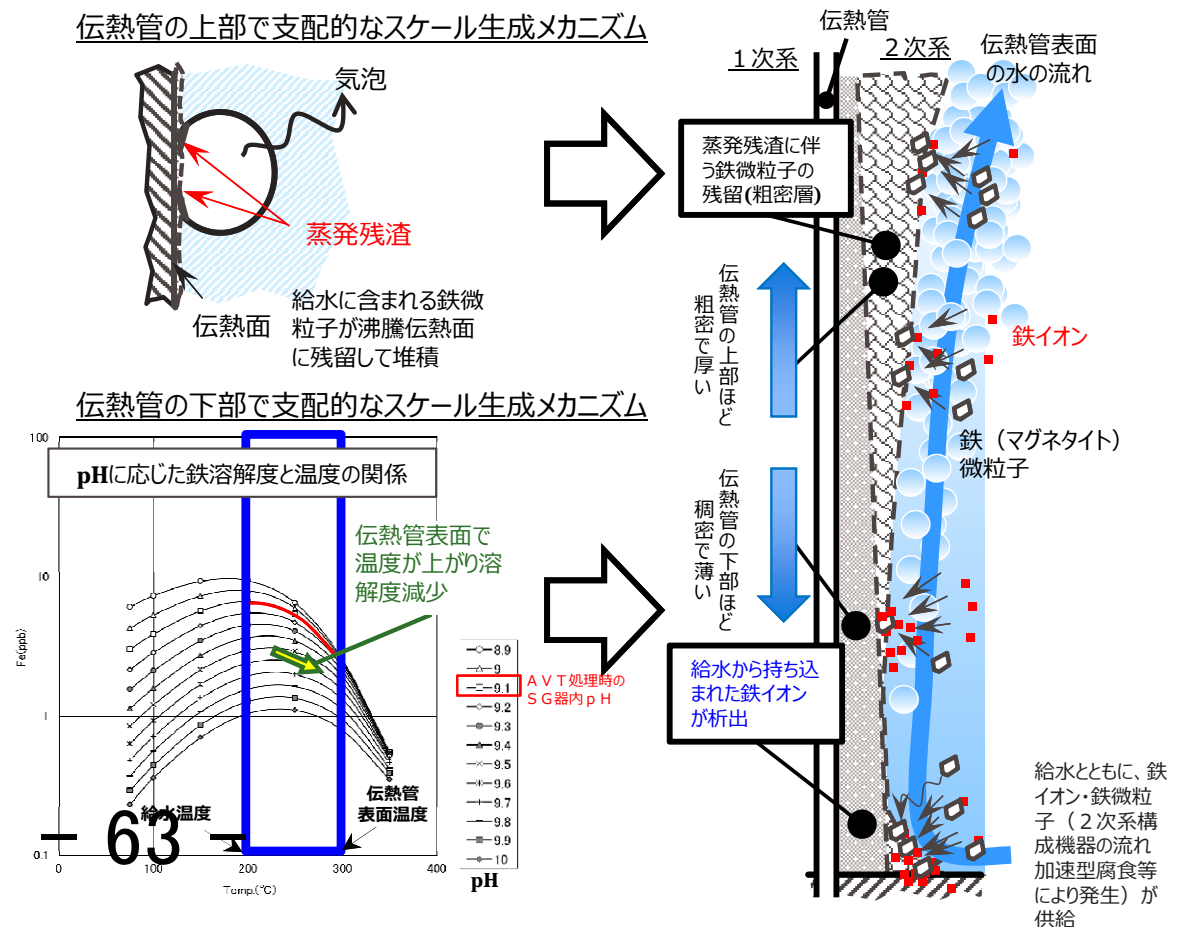
※出典：PWR 5電力委託調査「2次系機器のスケール付着挙動評価に係る調査」（平成15年）他

・析出付着

給水とともにS G 2次側へ持ち込まれる鉄イオンは、S G 2次側温度域においては、高温ほど溶解度が小さくなるため、より高温となる伝熱管下部において、溶解度の減少幅が大きく、鉄イオンがマグネタイトとして析出付着する。そのため、伝熱管の下部に付着するスケールは稠密で薄い傾向がある。

・蒸発残渣

伝熱管の上部では、沸騰現象が顕著であることから、鉄イオンの析出付着よりも、鉄の微粒子が蒸発残渣として伝熱管表面に残留、堆積する現象が主体である。そのため、伝熱管の上部に付着するスケールは、粗密な傾向がある。また、蒸発残渣によって残留、堆積する鉄の微粒子の方が析出付着する鉄イオンに比べて粒径が大きいことから、伝熱管の上部で生成するスケールの方が伝熱管の下部より粗密で厚い傾向がある。



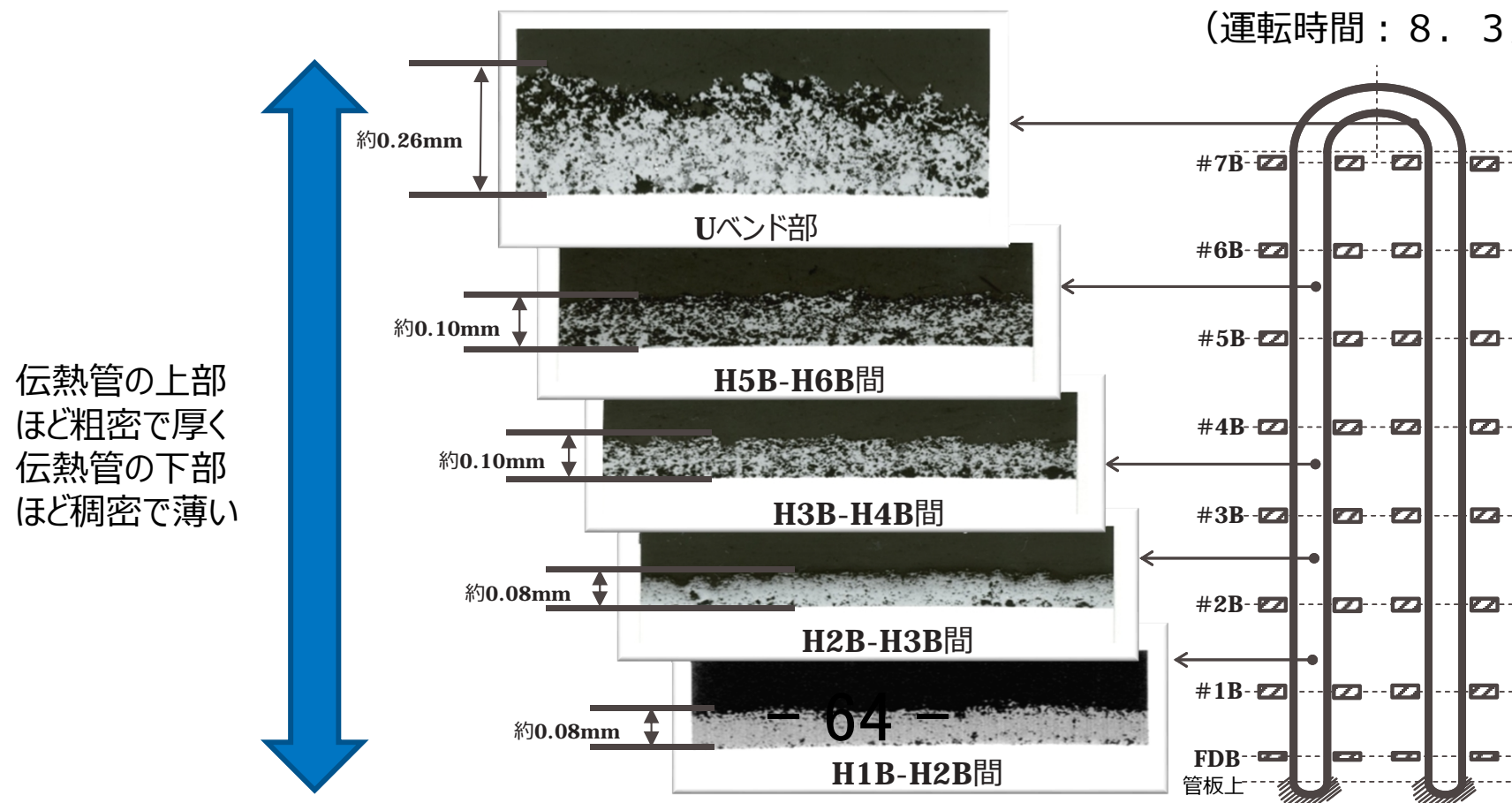
給水とともに、鉄イオン・鉄微粒子（2次系構成機器の流れ加速型腐食等により発生）が供給

○スケールの性状の実機調査 (過去の調査での知見)

平成8年に高浜発電所3号機第9回定期検査で健全性確認を目的に伝熱管の抜管調査を実施した際、伝熱管各部位 (SG上方からUバンド部、第六から第五管支持板の間、第四から第三管支持板の間、第三から第二管支持板の間、第二から第一管支持板の間) のスケールについて、断面マイクロ観察を実施している。その結果、伝熱管の上部のスケールほど粗密で厚く、伝熱管の下部ほど稠密で薄いということを確認した。

(高浜発電所3号機 抜管調査時 断面マイクロ観察)

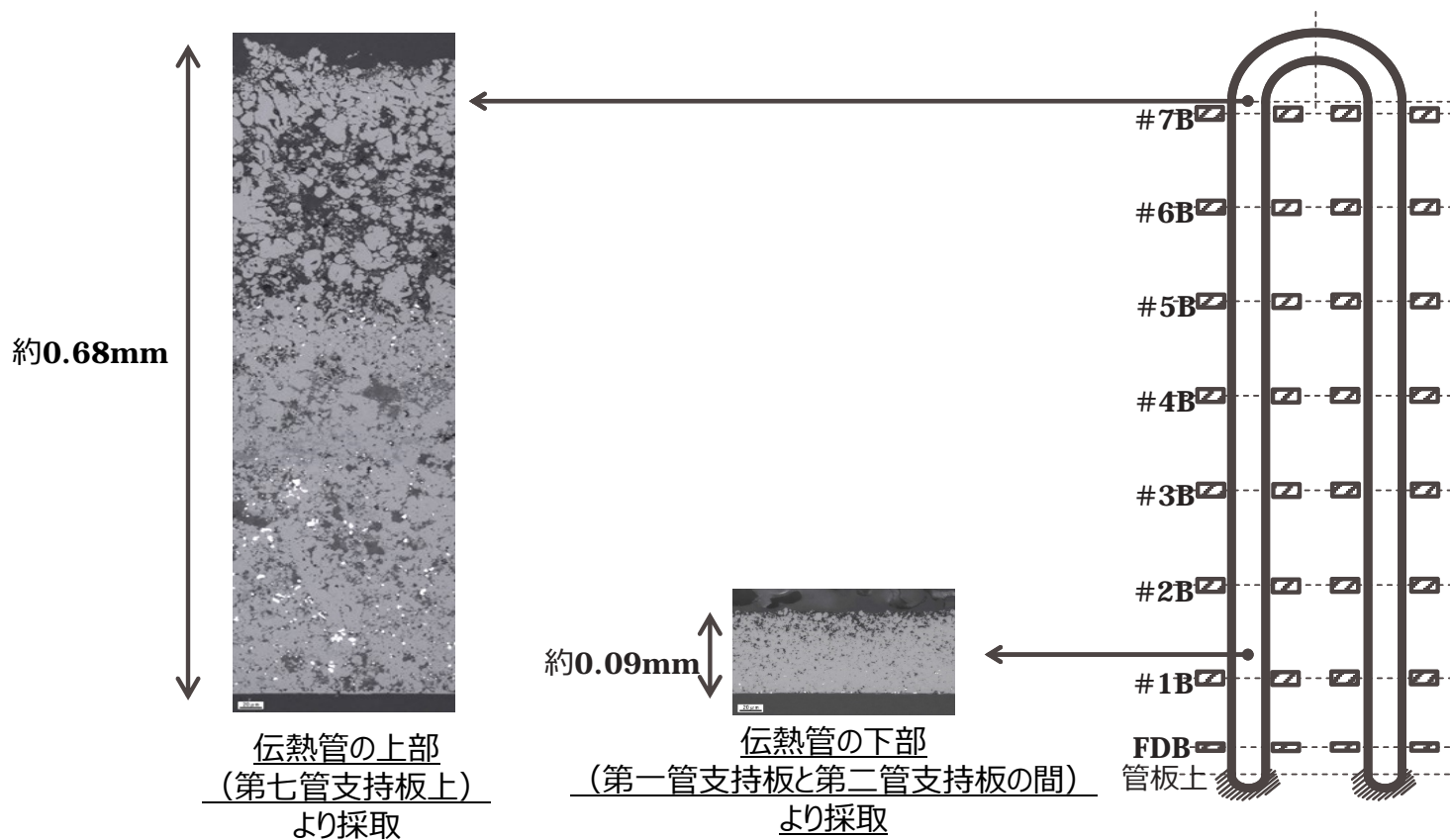
(運転時間: 8.3万時間時点)



○スケールの性状の実機調査 (高浜発電所 4号機におけるスケール調査)

高浜発電所 4号機今回 (第23回) 定期検査において、伝熱管の上部 (第七管支持板上) および伝熱管の下部 (第一管支持板と第二管支持板の間) から1サンプルずつスケールを回収し、性状を確認した結果、伝熱管の上部 (第七管支持板上) のスケールは粗密で厚く、伝熱管の下部 (第一管支持板と第二管支持板の間) では稠密で薄いということを確認した。

(高浜発電所 4号機におけるスケール調査実績)



以上の調査結果から、稠密なスケールは伝熱管の下部で発生し、粗密なスケールは伝熱管の上部で発生することを確認した。

○ 2次系の水質管理調査 (水処理履歴、運転時間)

高浜発電所4号機の各水処理における給水中の鉄含有量は実測データより、pHの低い水処理方法ほど給水中の鉄含有量が多いことが分かっている。

処理方法	給水中鉄含有量	処理方法	運転時間
A V T 処理	約 5 ~ 10 p p b	A V T 処理	約 9.8 万時間
E T A 処理	約 3 p p b	E T A 処理	約 8.0 万時間
高 E T A 処理	約 1 p p b	高 E T A 処理	約 2.0 万時間
高アンモニア処理	約 1 p p b	高アンモニア処理	約 2.4 万時間

○ 2次系の水質管理調査 (鉄の持ち込み量 / 1 S G あたり)

上記水処理期間の鉄の持ち込み量と、合計の鉄の持ち込み量を算出した結果は次のとおり。

処理方法	鉄の持ち込み量
A V T 処理	約 1,680 k g
E T A 処理	約 650 k g
高 E T A 処理	約 70 k g
高アンモニア処理	約 90 k g
合計	約 2,490 k g

以上の調査結果から、水処理方法に応じた量の鉄が経年的に持ち込まれていることを確認した。

スケールは経年的に厚さが増加すると考えられることから、高浜発電所 4 号機について次のとおり厚さの増加に関する調査を実施した。

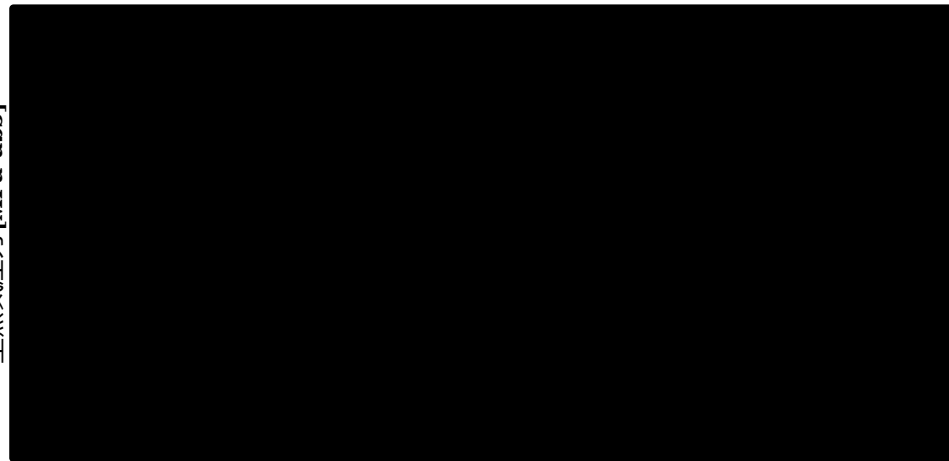
○スケール厚さに関する実機調査

スケール厚さの傾向を推定するパラメータとして、主蒸気圧力や S G 伝熱抵抗係数があり、その変化量を確認した結果、いずれも運転時間の経過とともに圧力低下や係数増加が認められるため、スケール厚さは経年的に増加していると推定できる。

主蒸気圧力

伝熱管表面のスケール成長に伴い、主蒸気圧力は徐々に低下

主蒸気圧力 [MPa abs]

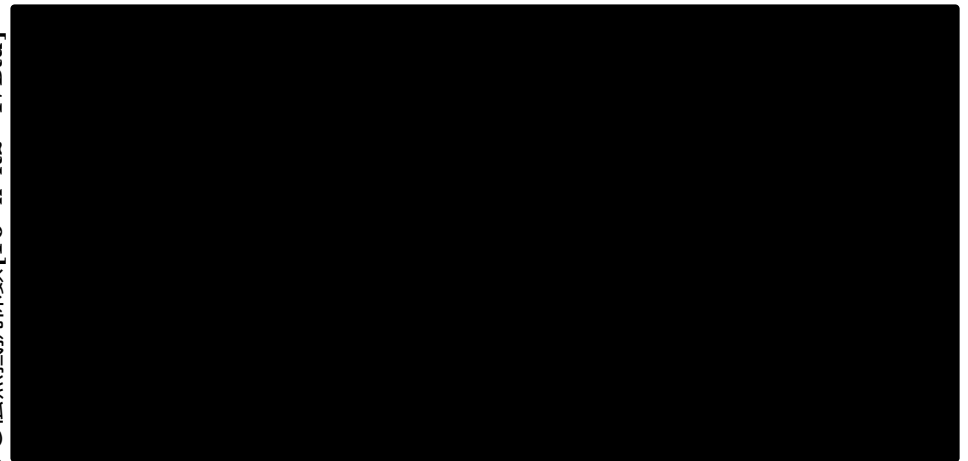


運転サイクル

S G 伝熱抵抗係数

伝熱管表面のスケール成長に伴い、S G 伝熱抵抗係数は徐々に上昇

S G 伝熱抵抗係数 [10⁻⁴h・ft²・°F/Btu]



運転サイクル

以上の結果から、スケール厚さは経年的に増加していくものであることを確認した。また、現在では高 E T A 処理や高アンモニア処理によって給水の p H 値を高く維持することで、1 サイクルあたりの鉄の持込み量は数十 k g / S G 程度に抑えられていることを確認した。

AおよびC - S Gで回収したスケールが今回のS G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 - S Gで回収したスケール（スケールA, C 2, C 3およびC 4）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。このことから、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。➡

40

回収場所	A-SG スケールA 第二管支持板下部	C-SG スケールC2 第二管支持板上	C-SG スケールC3 第一管支持板上	C-SG 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	- 69 - 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、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、押し付け力や振動数の実機条件を模擬した試験条件にて、伝熱管との摩耗試験を行った。

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した。

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)	摩耗試験時間 (hr)
ケース1	約0.2	約0.18	約0.009	約0.006	1 : 0.7	約116
ケース2	約0.2	約0.18	約0.004	約0.002	1 : 0.5	約94
ケース3	約0.3	約0.14	約0.023	約0.014	1 : 0.6	約90

高浜発電所3号機前回（第24回）定期検査の事象では、スケールの稠密さではなく厚さに着目し、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、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。なお、前回試験では、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。

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。

○稠密層厚さと摩耗体積比の関係

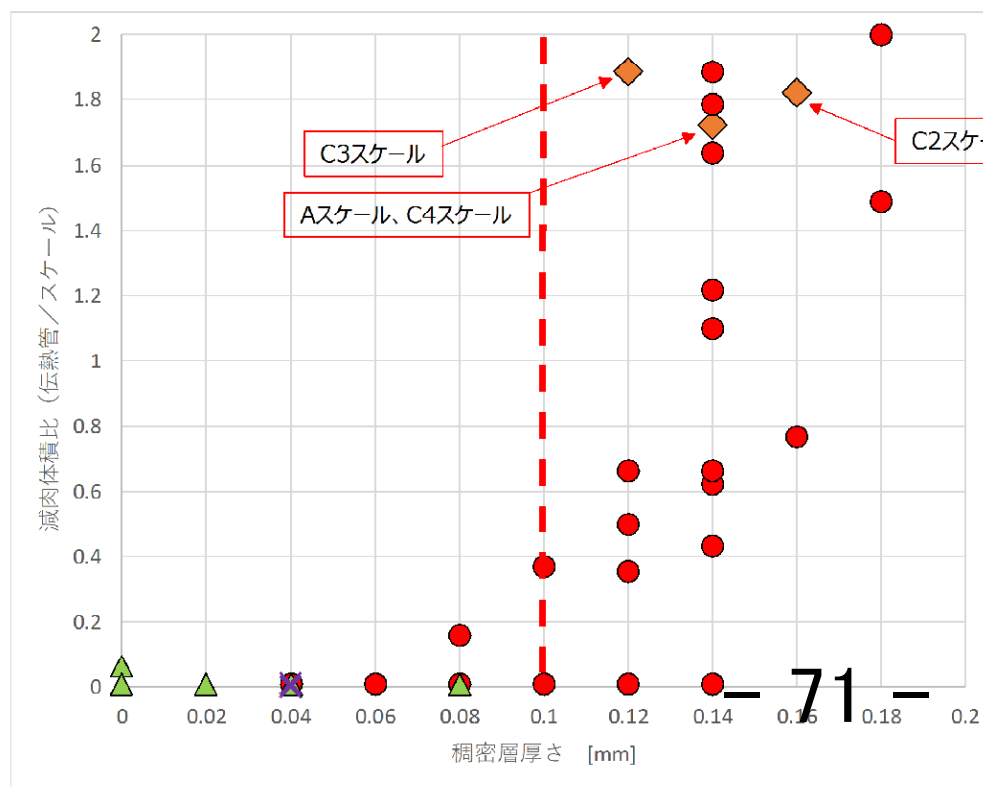
有意な減肉を与える稠密層厚さを検討するため、大飯発電所3号機および4号機ならびに高浜発電所4号機から採取した実機スケールを用いて、摩耗試験を実施した。

- 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整理した。
- 空隙率5%以下の稠密層厚さで整理した。

- ・ 有意な減肉を発生させる可能性があるのは、稠密層の厚さが0.1 mm以上のスケールであることを確認した。
- ・ 大飯発電所3号機および4号機から採取した実機スケールでは、有意な減肉は発生せず、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。

※：高浜発電所3号機についても高浜発電所4号機と同等に、稠密層厚さが0.1 mm以上のスケールが生成されていることを確認した。

稠密層厚さと摩耗体積比の関係

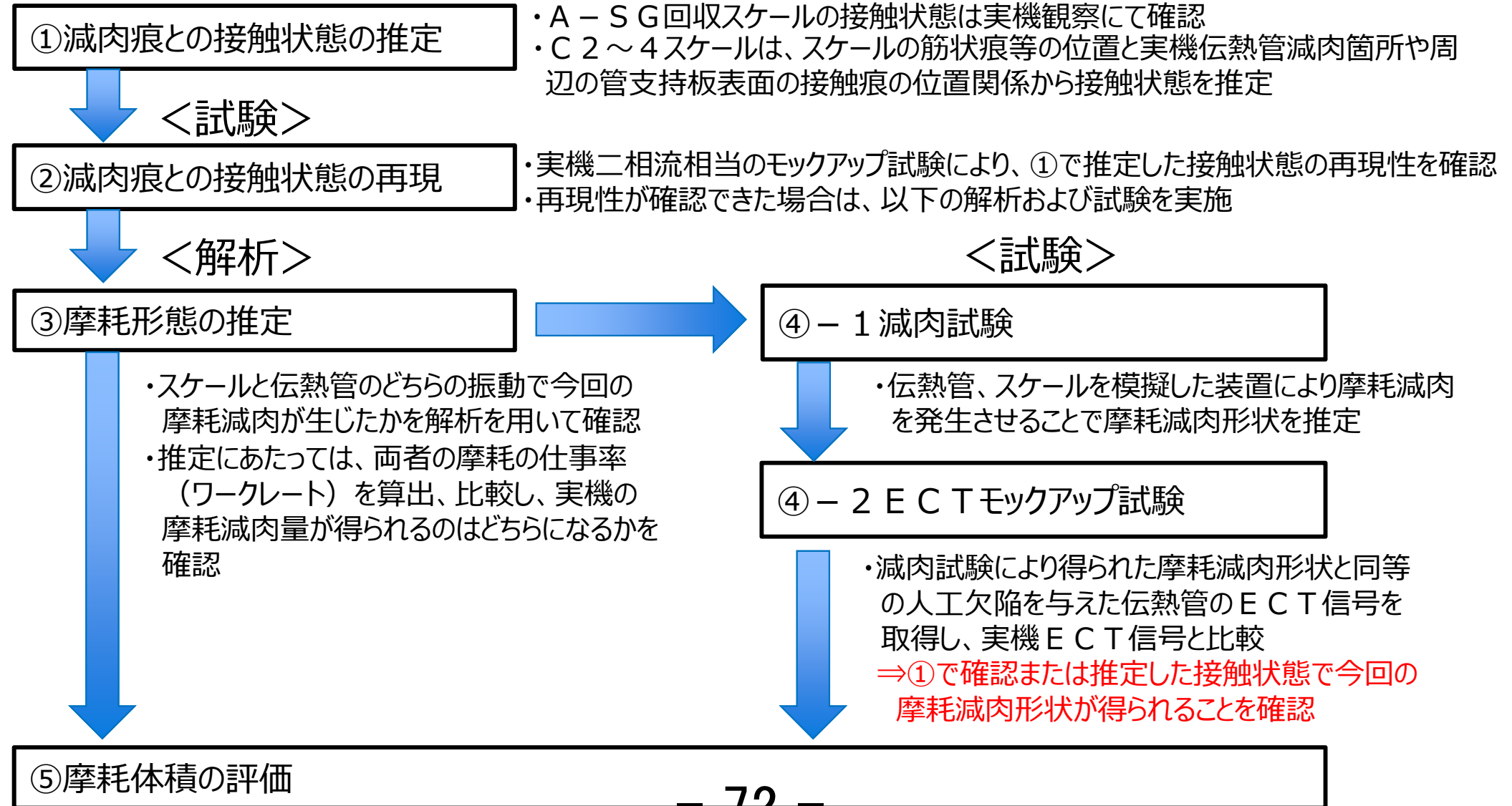


- ◆ : 減肉原因スケール(推定) (注) 4個
- : 高浜4号機回収スケール 26個
- ▲ : 大飯3号機回収スケール 6個
- ✕ : 大飯4号機回収スケール 3個

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、稠密層厚さは断面マイクロ観察を行い測定した。

(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。
- 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。

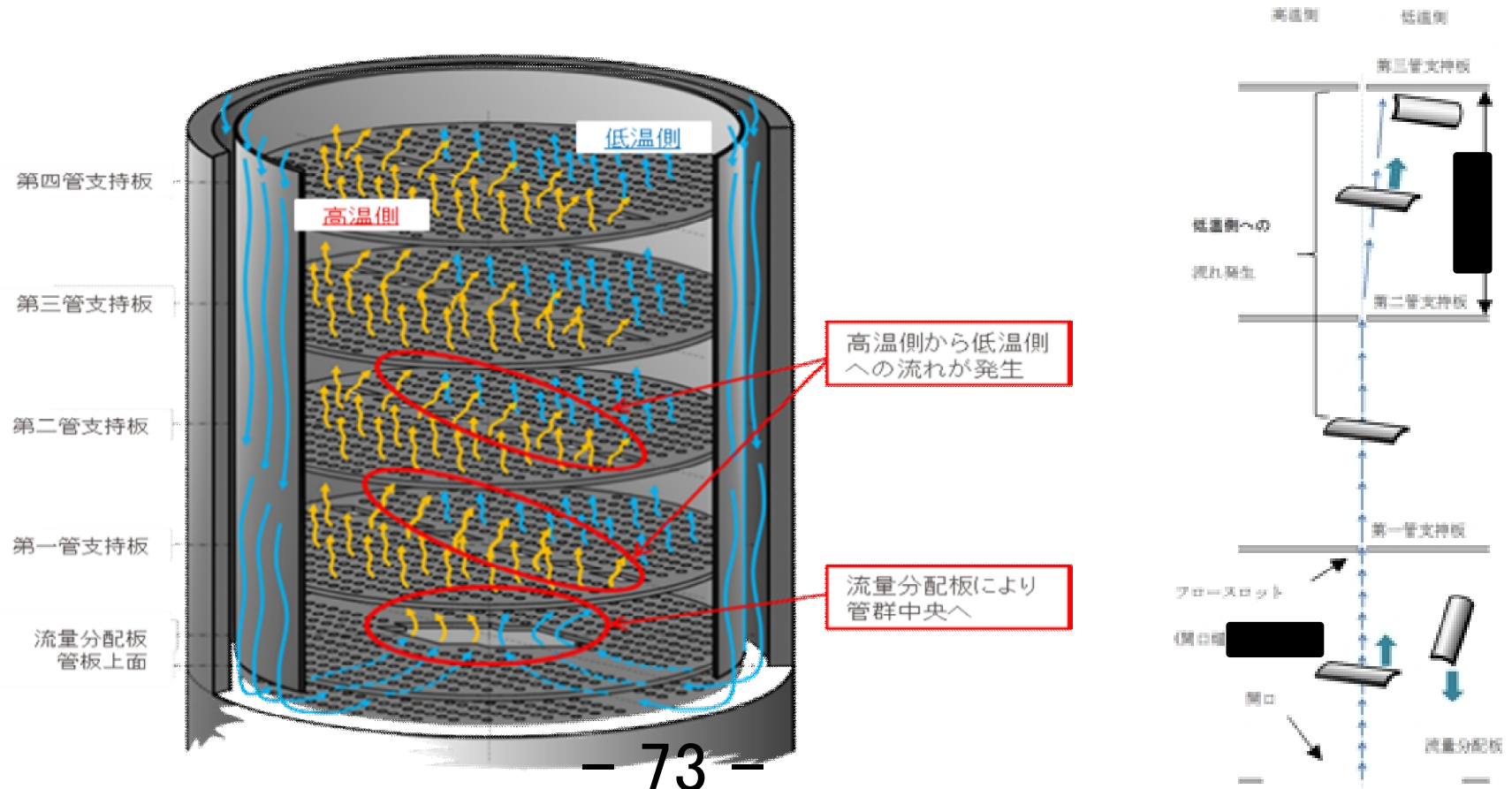


- ・③のワークレートを用いて算出した摩耗体積と、④-2の人工欠陥の体積との比較を実施
- ⇒①で確認または推定した接触状態により今回の摩耗量が1サイクルで発生し得ることを確認

○ 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)

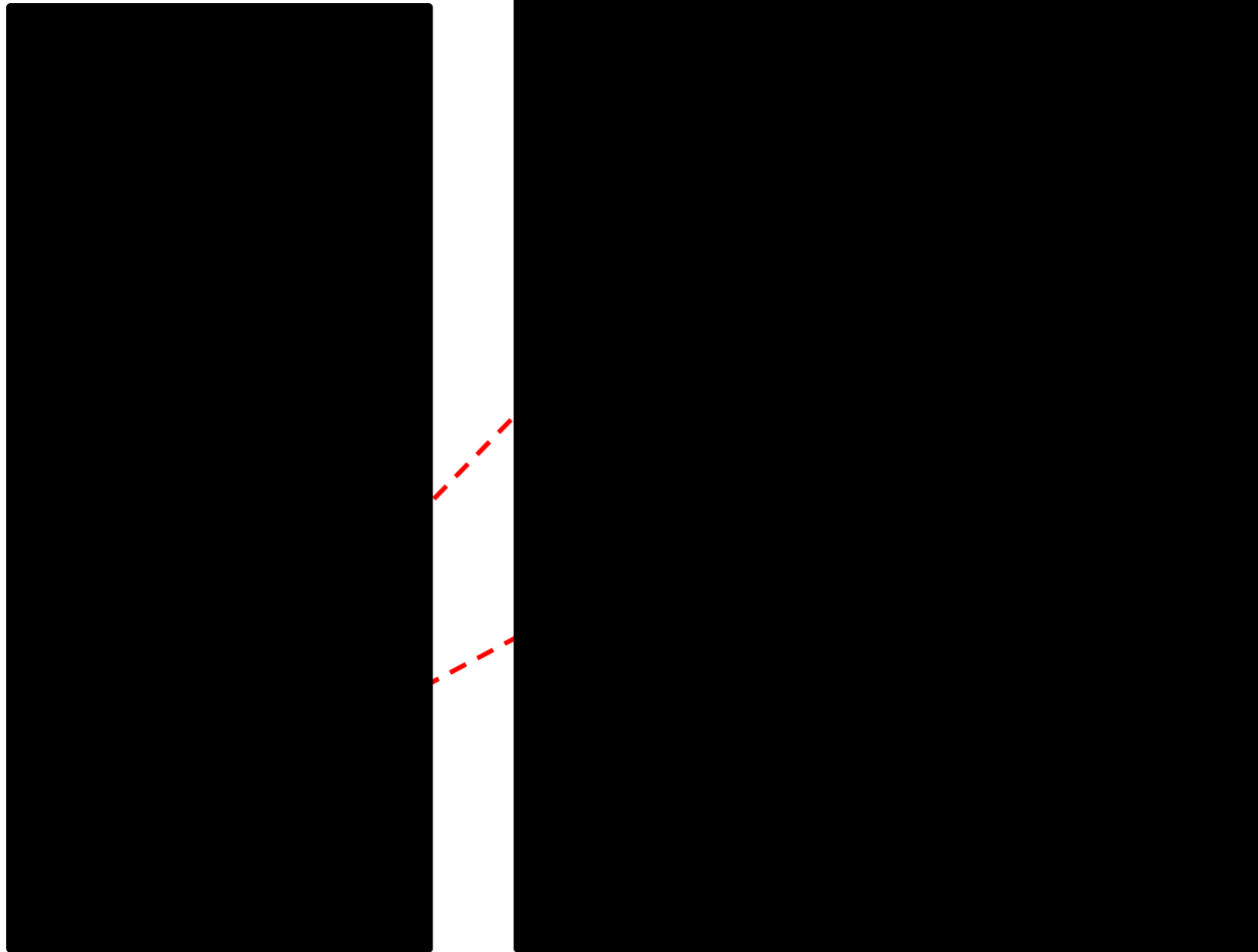
主にプラント停止時に伝熱管から剥離し、管板上に落下したスケールの場合、運転中の S G 2 次側器内の流況下では流体抗力がスケールの落下力を上回ることから、管群内の上昇流に乗って流量分配板および各管支持板フローロット部を通過し、減肉箇所へ到達したことが考えられる。第一管支持板より上方では、上昇流に加え高温側から低温側への水平方向流があることから、第一管支持板および第二管支持板フローロット部を通過したものが第三管支持板の低温側下面に至ると推定される。

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。



- 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



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		

3次元熱流動解析で得られるS G 2 次側流況を再現

[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。

○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]

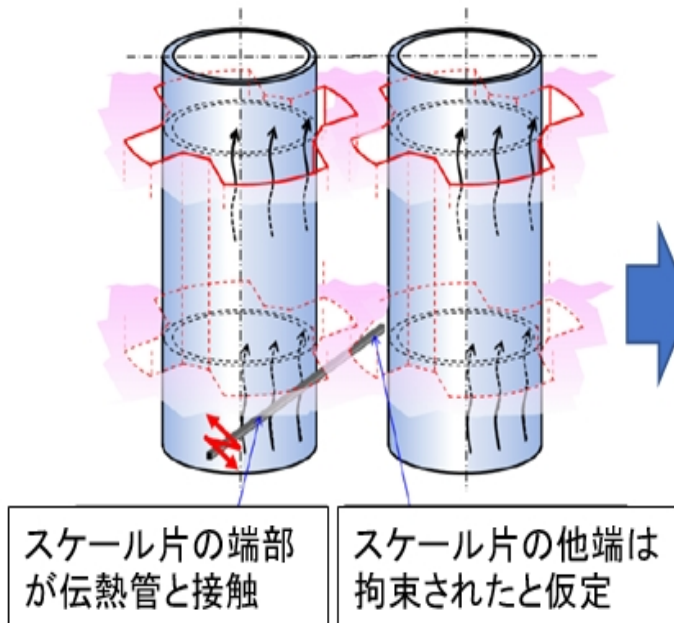
T : 運転時間 [s]

v : 摺動速度 [m/s]

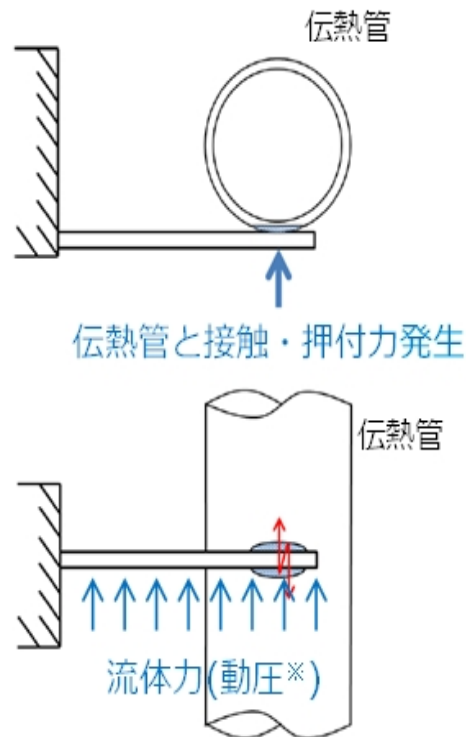
W_R : ワークレート (= $F \times v$: 摩耗を生じさせる仕事率) [W]

○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[%]

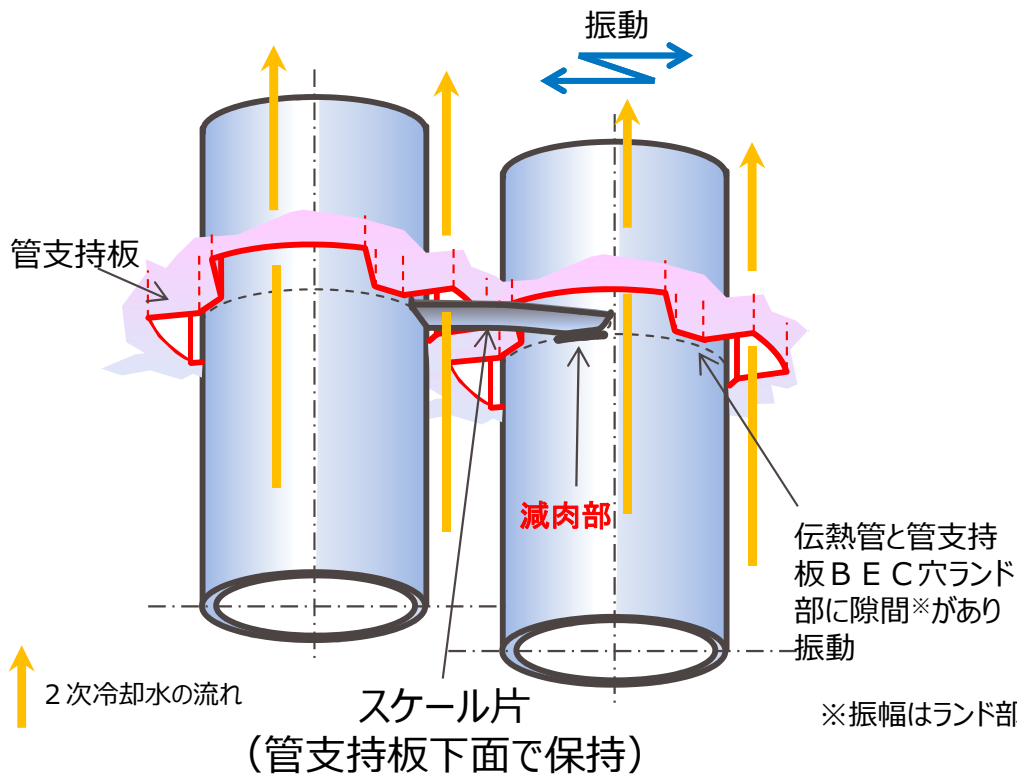
f : 固有振動数[Hz]

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	×

○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。



※振幅はランド部により制限されており、減肉深さには上限がある。

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。

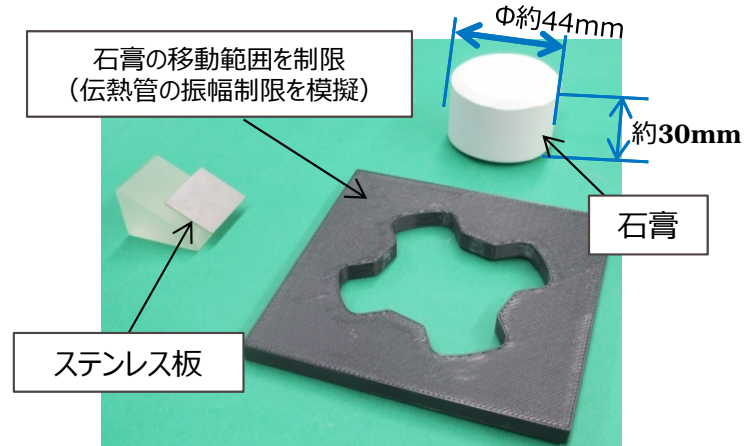
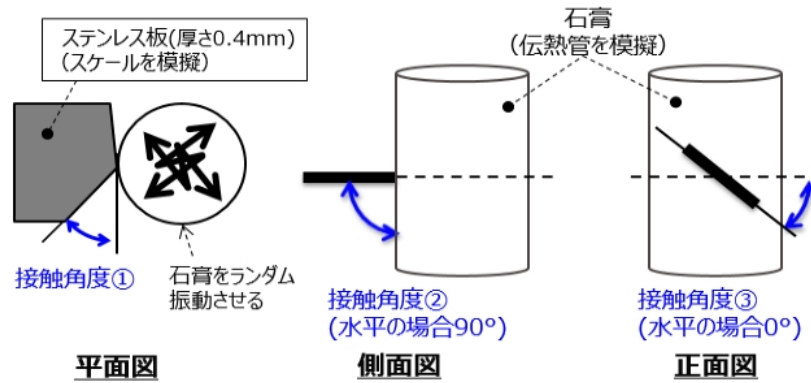
○減肉試験

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>

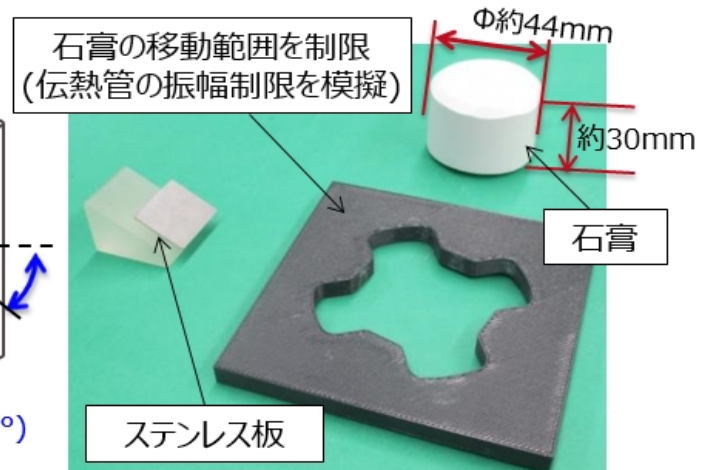
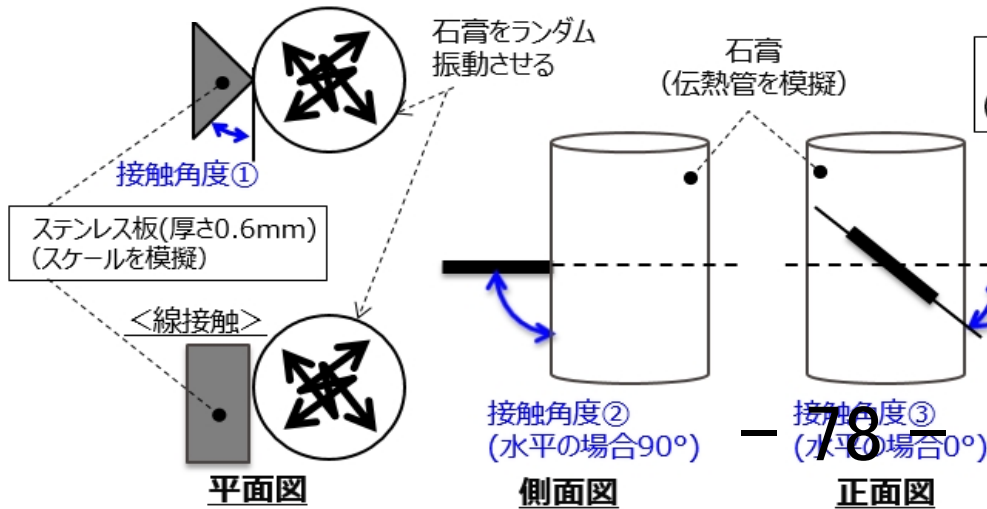
- ・伝熱管は石膏で、スケールはステンレス板で模擬
- ・ステンレス板に石膏を接触させ、石膏を振動させることにより摩耗減肉を模擬
- ・ステンレス板の接触角度（①接線方向および②軸方向③接線方向の傾き）を変化させ、摩耗減肉形状を模擬

(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) 49

○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°	[Redacted]
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°	

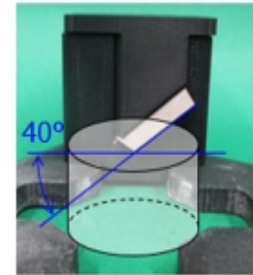
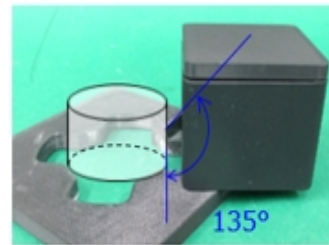
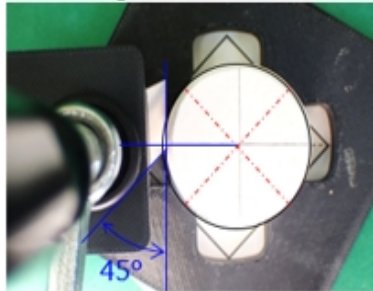
・A-SGの減肉痕について、次のとおり減肉形状を取得した。

模擬スケール (ステンレス板)

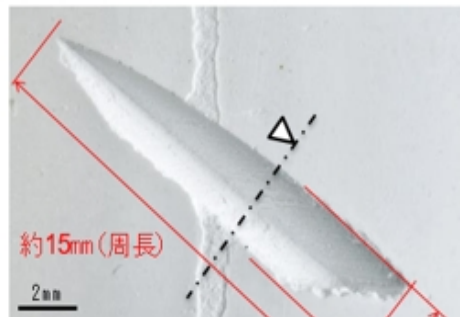
接触角度①: 45°

接触角度②: 135°

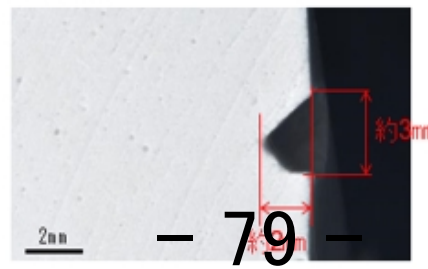
接触角度③: 40°



周方向断面



軸方向断面



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

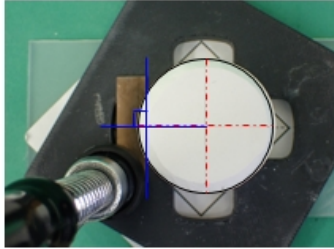
： 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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 12 / 18) 50

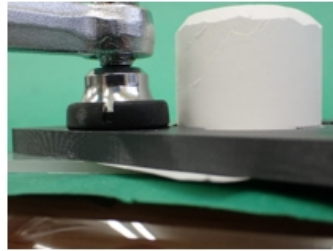
○減肉試験

- ・C - S G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C 2およびC 3)

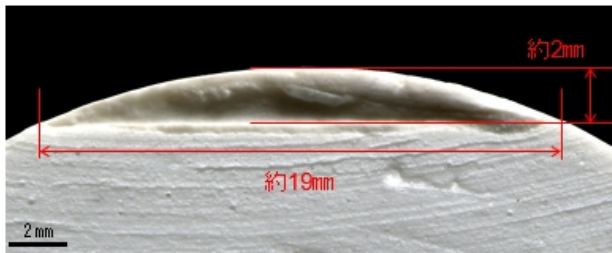
接触角度① : 0°



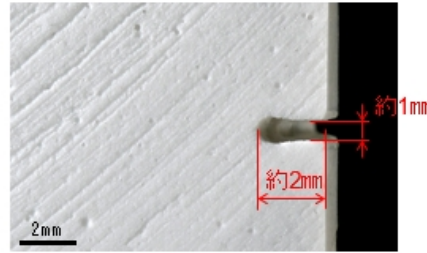
接触角度② : 90°



周方向断面



軸方向断面

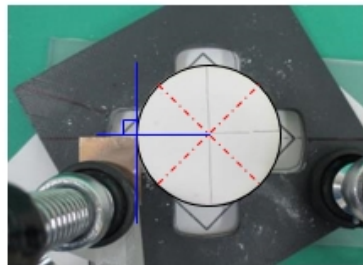


スケールC 2	減肉試験結果	実機相当寸法
深さ	約2mm	約0.4mm
軸方向長さ	約1mm	約0.3mm
周方向長さ	約19mm	約6mm

スケールC 3	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

(スケールC 4)

接触角度① : 0°



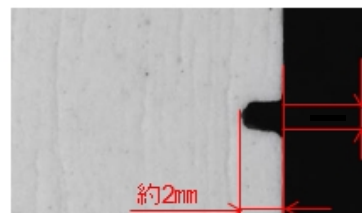
接触角度② : 90°



周方向断面



軸方向断面



スケールC 4	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

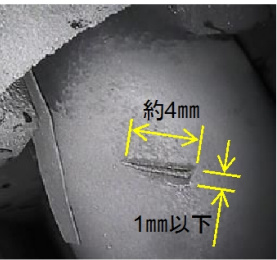
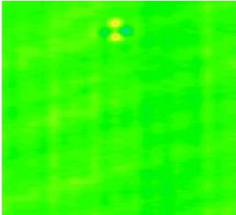
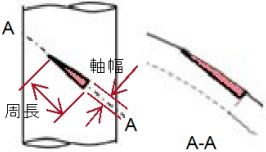
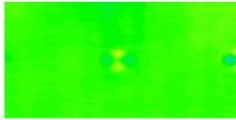
3. 減肉メカニズム (スケールにより伝熱管を損傷させる可能性 13 / 18) 51

○ 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>

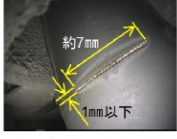
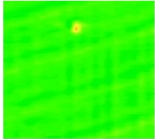
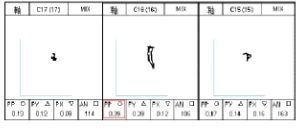
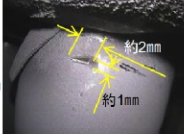
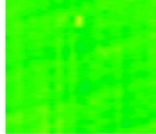
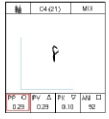
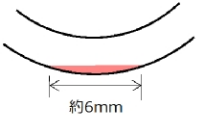
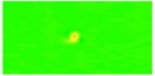
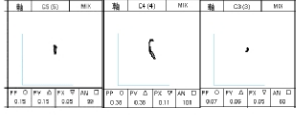
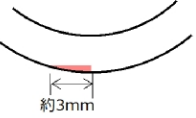


- ・人工欠陥寸法の幅および長さ：減肉試験で得られた実機相当寸法
- ・人工欠陥寸法の深さ：実機のECT信号

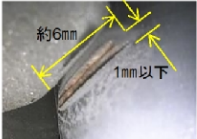
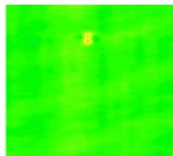
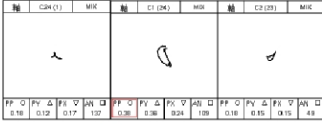
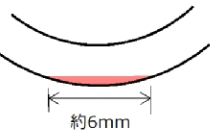
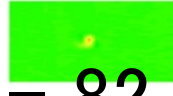
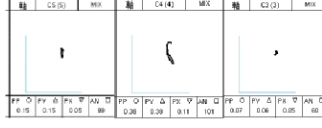
	MIX 色調図	MIX リサーチ	実機信号 整合性																																	
<p>実機 A X51, Y4 周長(目視)：約4mm</p>  <p>ECT減肉指示深さ: 33%</p>	<p>振幅：0.36 V 位相：118°</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>軸</th> <th>C1 (1)</th> <th>MIX</th> <th>軸</th> <th>C24 (24)</th> <th>MIX</th> <th>軸</th> <th>C23 (23)</th> <th>MIX</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PP</td><td>0.27</td><td>PV</td><td>0.20</td><td>PX</td><td>0.22</td><td>AN</td><td>35</td> <td>PP</td><td>0.36</td><td>PV</td><td>0.34</td><td>PX</td><td>0.20</td><td>AN</td><td>118</td> <td>PP</td><td>0.30</td><td>PV</td><td>0.29</td><td>PX</td><td>0.23</td><td>AN</td><td>76</td> </tr> </tbody> </table>	軸	C1 (1)	MIX	軸	C24 (24)	MIX	軸	C23 (23)	MIX	PP	0.27	PV	0.20	PX	0.22	AN	35	PP	0.36	PV	0.34	PX	0.20	AN	118	PP	0.30	PV	0.29	PX	0.23	AN	76	—
軸	C1 (1)	MIX	軸	C24 (24)	MIX	軸	C23 (23)	MIX																												
PP	0.27	PV	0.20	PX	0.22	AN	35	PP	0.36	PV	0.34	PX	0.20	AN	118	PP	0.30	PV	0.29	PX	0.23	AN	76													
<p>モックアップ [33%減肉] 周長：約3mm 軸長：約0.7mm</p>  <p>A-A</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>PV</td><td>0.13</td><td>PX</td><td>0.11</td><td>AN</td><td>44</td> <td>PP</td><td>0.26</td><td>PV</td><td>0.25</td><td>PX</td><td>0.10</td><td>AN</td><td>105</td> <td>PP</td><td>0.17</td><td>PV</td><td>0.17</td><td>PX</td><td>0.08</td><td>AN</td><td>90</td> </tr> </tbody> </table>	軸	C14 (14)	MIX	軸	C13 (13)	MIX	軸	C12 (12)	MIX	PP	0.15	PV	0.13	PX	0.11	AN	44	PP	0.26	PV	0.25	PX	0.10	AN	105	PP	0.17	PV	0.17	PX	0.08	AN	90	○
軸	C14 (14)	MIX	軸	C13 (13)	MIX	軸	C12 (12)	MIX																												
PP	0.15	PV	0.13	PX	0.11	AN	44	PP	0.26	PV	0.25	PX	0.10	AN	105	PP	0.17	PV	0.17	PX	0.08	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 14/18) 52

○ 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 	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 	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 	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 15 / 18) 53

○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	—
	ECT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	—
	ECT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	—
	ECT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	—
	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 : X 5 1, Y 4	83	約3	約5,800	約0.5
C-SG : X 2 1, Y 8		約2	約5,800	約0.5
C-SG : X 5 5, Y 3		約3	約5,800	約0.5
C-SG : X 5 5, Y 8		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) 54

○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、SG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、SG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 ($\mu\text{g}/\text{リットル}$) 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 ($\mu\text{g}/\text{リットル}$) 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 17/18) 55

○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。

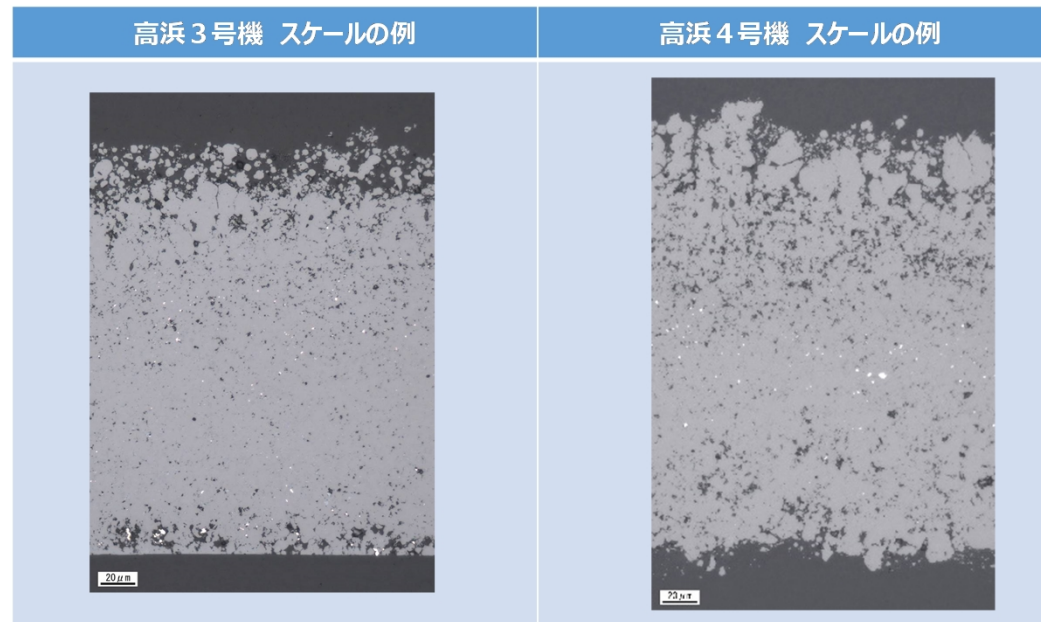
プラント	長期停止前 (kg)		長期停止後 (kg)	
高浜 3 号機	0.01未満 (第21回定期検査)	0.41 (第22回定期検査)	0.24 (第23回定期検査)	0.36 (第24回定期検査)
高浜 4 号機	0.01未満 (第20回定期検査)	12.37 (第21回定期検査)	8.24 (第22回定期検査)	—
大飯 3 号機	0.01未満 (第16回定期検査)	0.01未満 (第17回定期検査)	0.01未満 (第18回定期検査)	—
大飯 4 号機	0.01未満 (第15回定期検査)	0.01未満 (第16回定期検査)	0.01未満 (第17回定期検査)	—

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) 56

○当社他プラントとの実機スケール比較

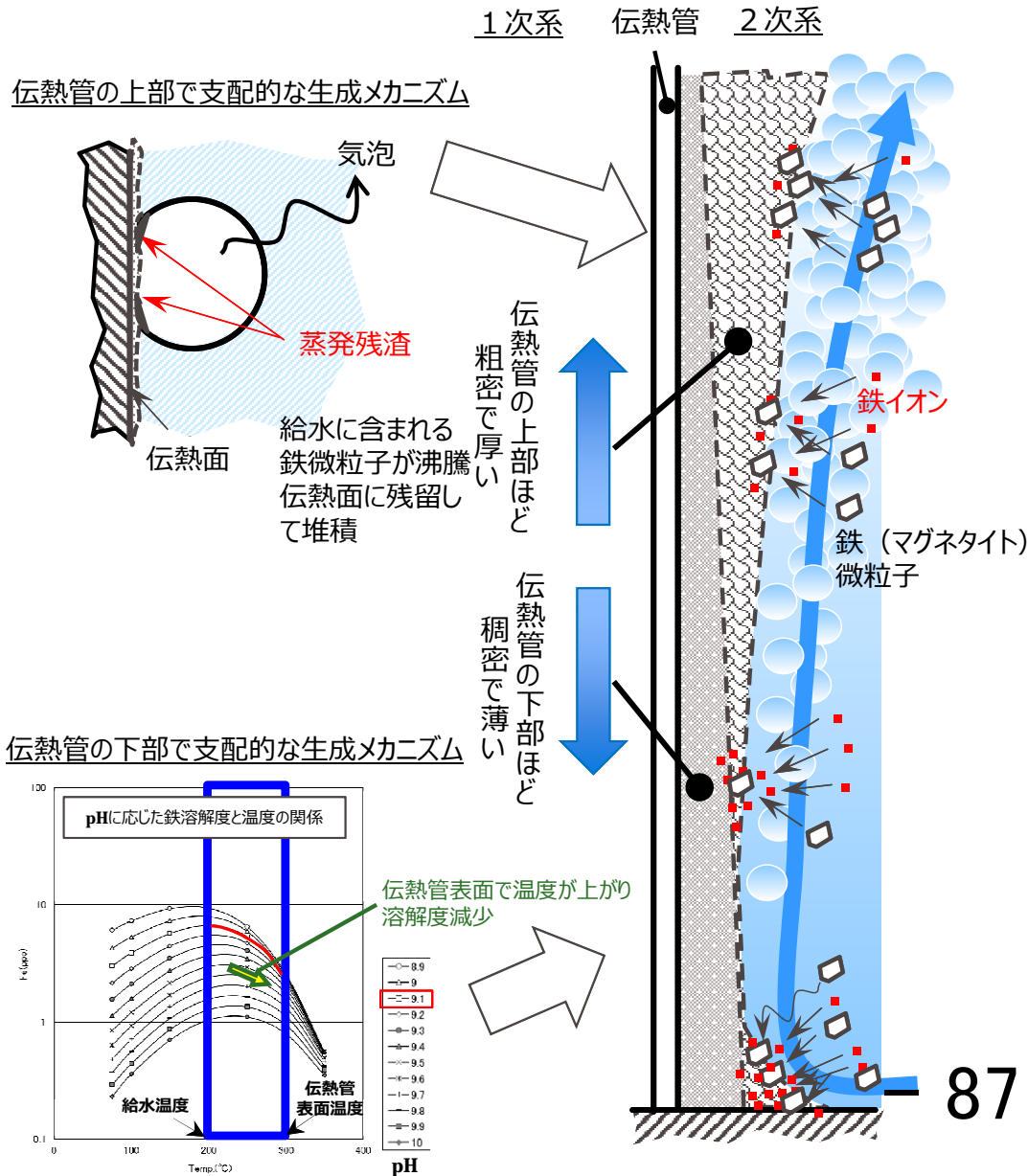
スケールの稠密層厚さが鉄持込み量と相関するかを検証するため、当社他プラントの伝熱管下部から実機スケールを採取し、断面マイクロ観察を実施した結果は下表のとおりであり、鉄の持込み量が多いプラントほどスケールの稠密層（空隙率5%以下）は厚く成長していることを確認した。

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	SG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。

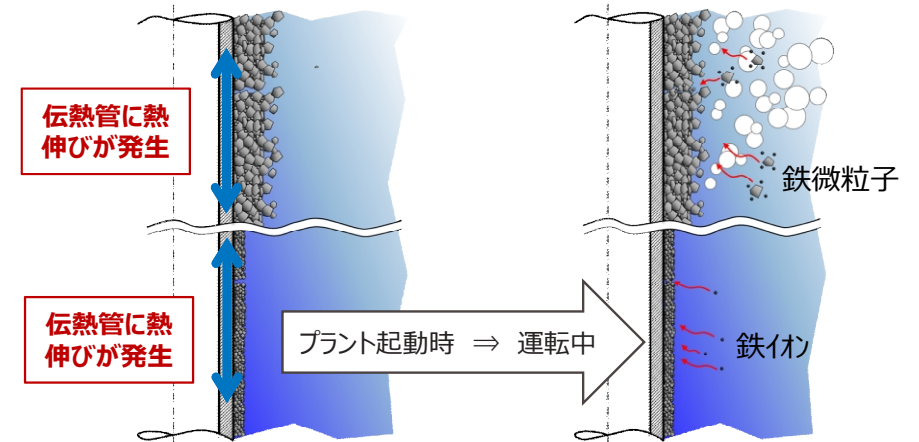
① プラント運転中に給水とともに持ち込まれる鉄イオンおよび鉄微粒子が、析出付着、蒸発残渣として伝熱管表面にスケールが生成される。



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。

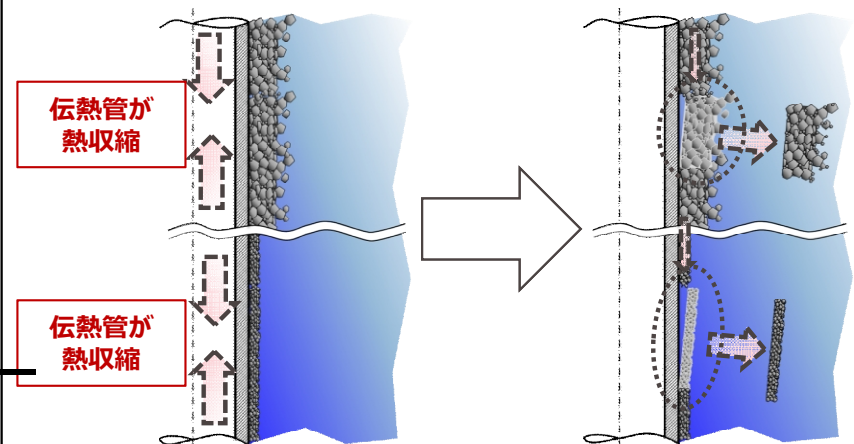
【プラント起動からプラント運転中】

- 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。
- プラント運転中の給水に含まれる鉄イオンおよび鉄微粒子が割れた箇所へ供給され、割れが一部修復。

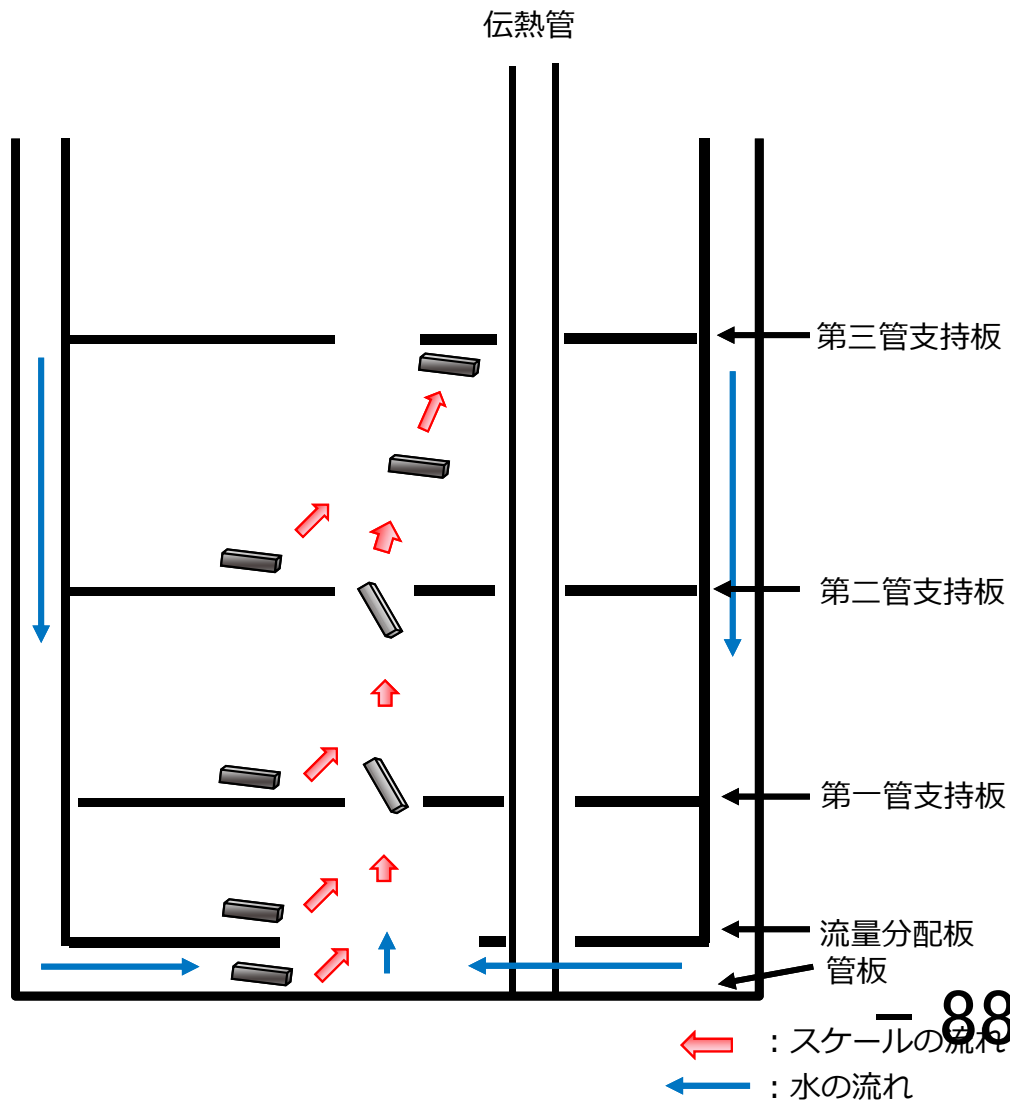


【プラント停止時】

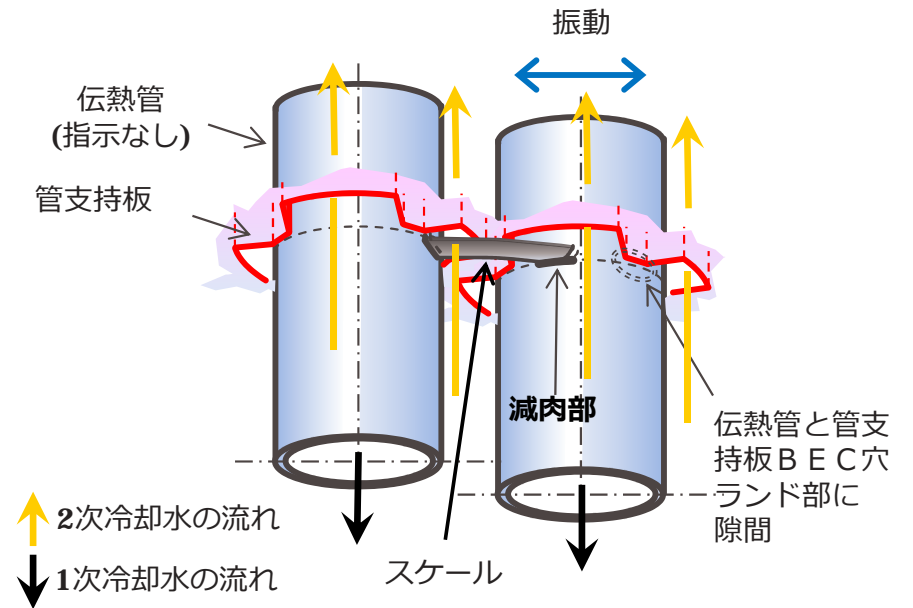
- プラント停止に伴う伝熱管の熱収縮により伝熱管表面のスケールに圧縮力が作用し、界面の密着が弱い箇所では剥離が発生。



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に達し、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。

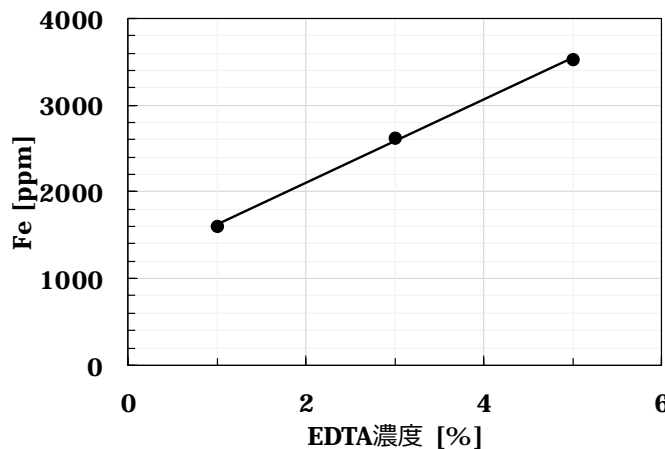
<洗浄試験>

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。

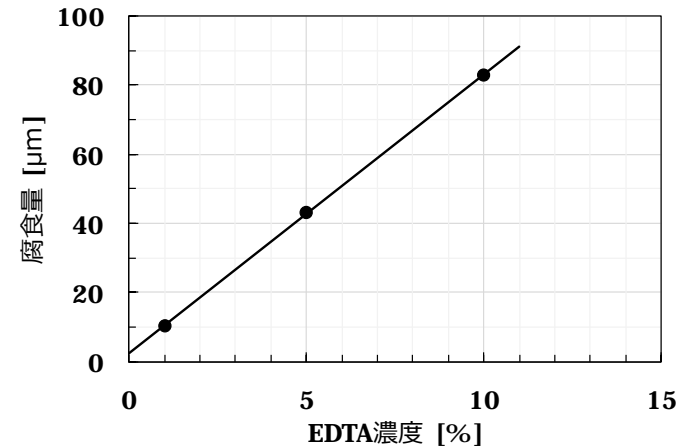
○浸漬試験条件の設定

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。

— 89 —

- ・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）

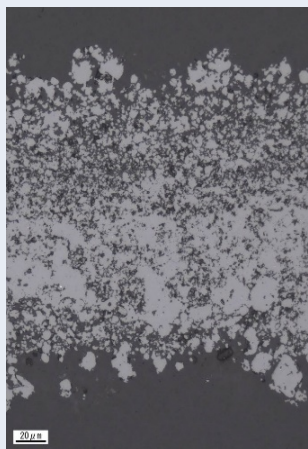
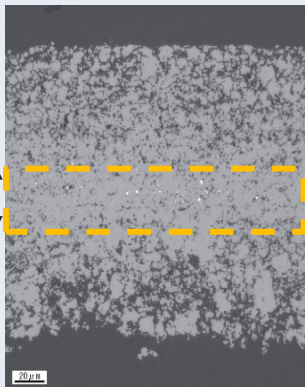
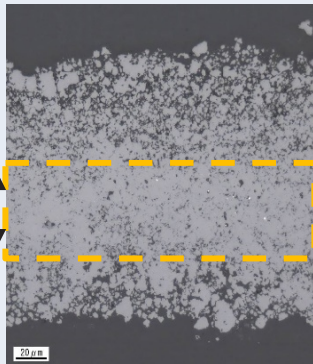
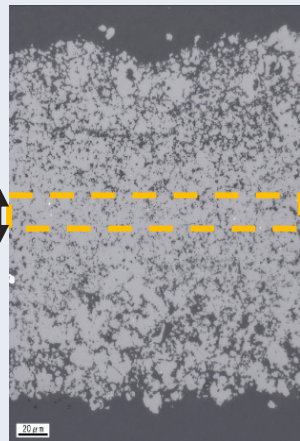
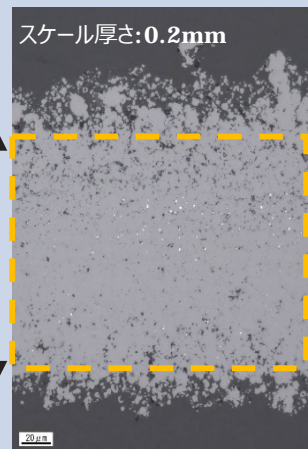
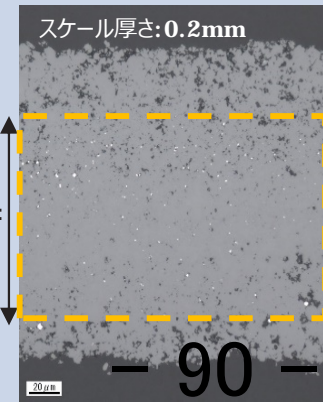
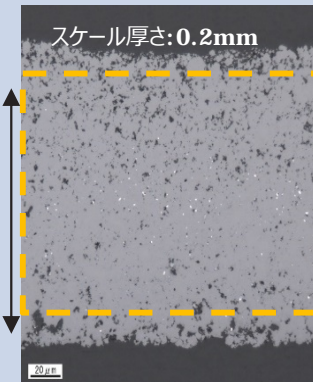
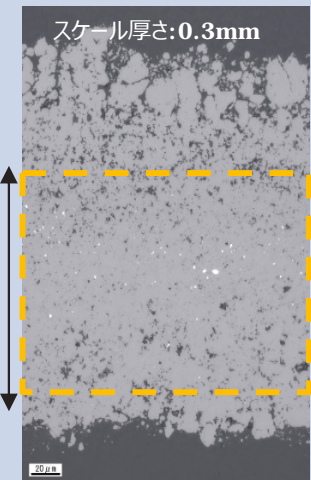
5. 対策検討 (洗浄試験 2 / 3)

<洗浄試験 (続き)>

○浸漬試験の結果

高浜発電所 4 号機採取スケールで浸漬試験を行った結果、稠密層厚さが大きく減少していることを確認した。

浸漬試験結果

ケース	1	2	3	4
薬品濃度・温度※	2%・100℃	同左	同左	3%・100℃
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 style="text-align: center;">- 90 -</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>

※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 (浸漬時間は 2 4 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)

<洗浄試験 (続き) >

○摩耗試験の結果

浸漬試験後のスケールで伝熱管との摩耗試験を行った結果、いずれも試験中に欠損またはスケールの摩滅量が大きく増加したため、十分な脆弱化効果が得られたことを確認した。

摩耗試験結果一覧

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)	試験時間 (hr)
1	2%・100℃	前	0.14	1 : 100	約49
		後	0	試験開始直後に欠損	—
2	同上	前	0.12	1 : 2	約99
		後	0.04	1 : 27	約35
3	同上	前	0.14	1 : 0.6	約99
		後	0.06	試験中に欠損	約1
4	3%・100℃	前	0.14	1 : 0.6	約90
		後	0.02	試験中に欠損	約6

※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 (浸漬時間は2-4時間、アンモニアおよびヒドラジンによるアルカリ環境、還元性雰囲気)

※2 空隙率5%以下

以上より、スケールに起因した伝熱管減肉事象の対策として有効性を確認した。

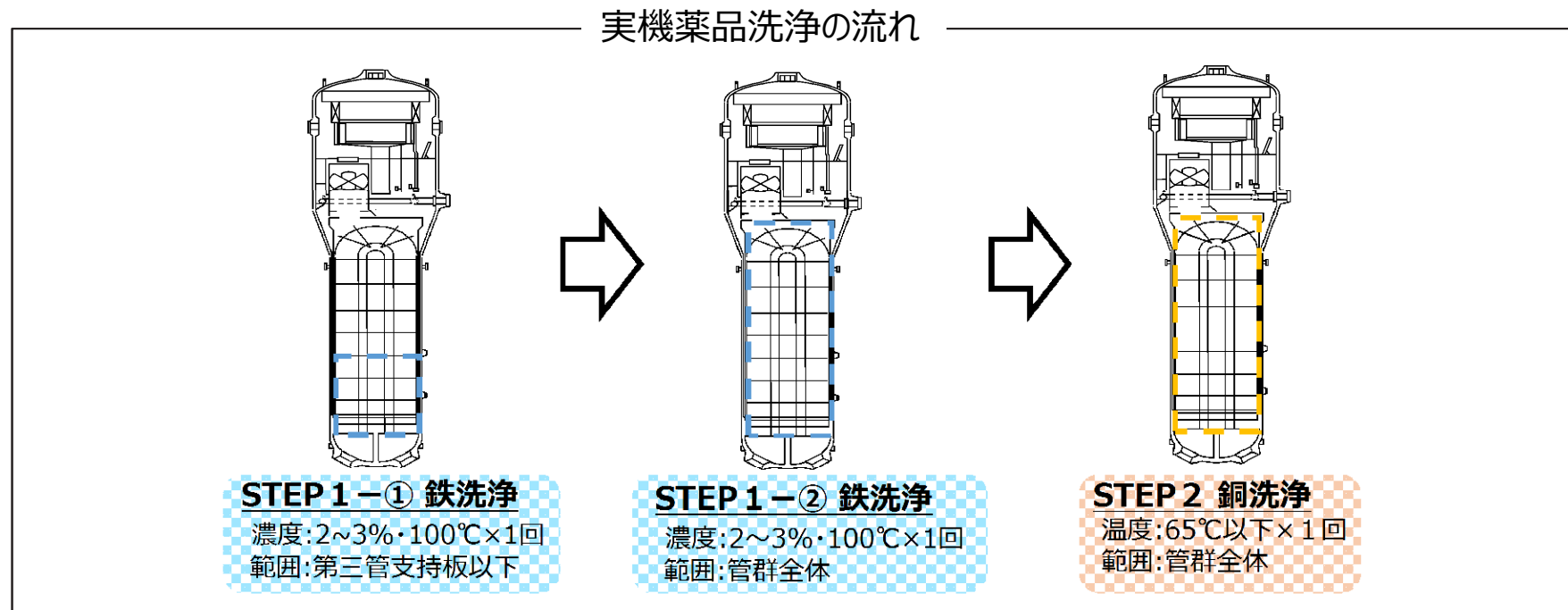
<実機洗浄方法>

○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>

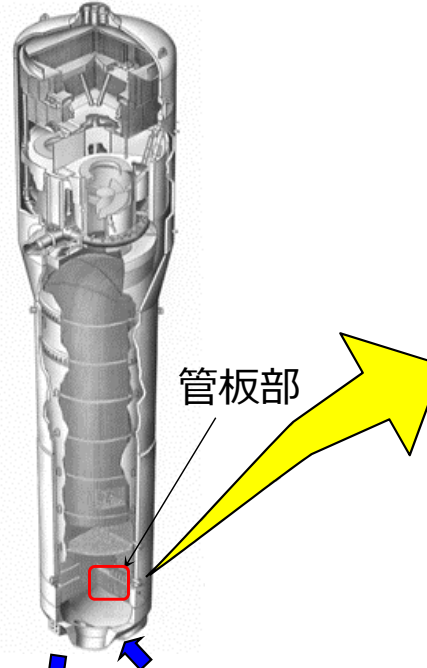
高浜発電所4号機での対策実施に先立ち、同程度のスケールが蓄積していると考えられる高浜発電所3号機において薬品洗浄を実施後にスケールを回収し、スケールが脆弱化されていることを確認する。

○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。

SGの概要図

↑ 蒸気出口

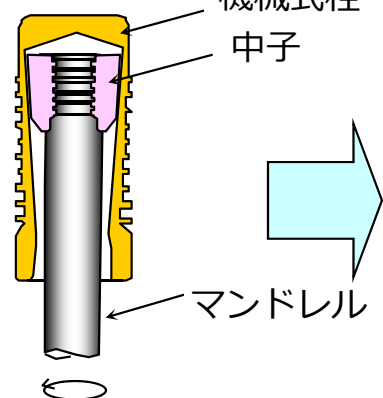


管板部

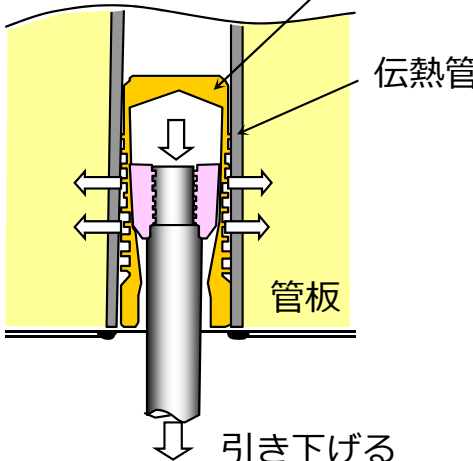
一次冷却材出口（低温側）

一次冷却材入口（高温側）

施栓方法



機械式栓
中子
マンドレル



機械式栓
伝熱管
管板
引き下げる

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

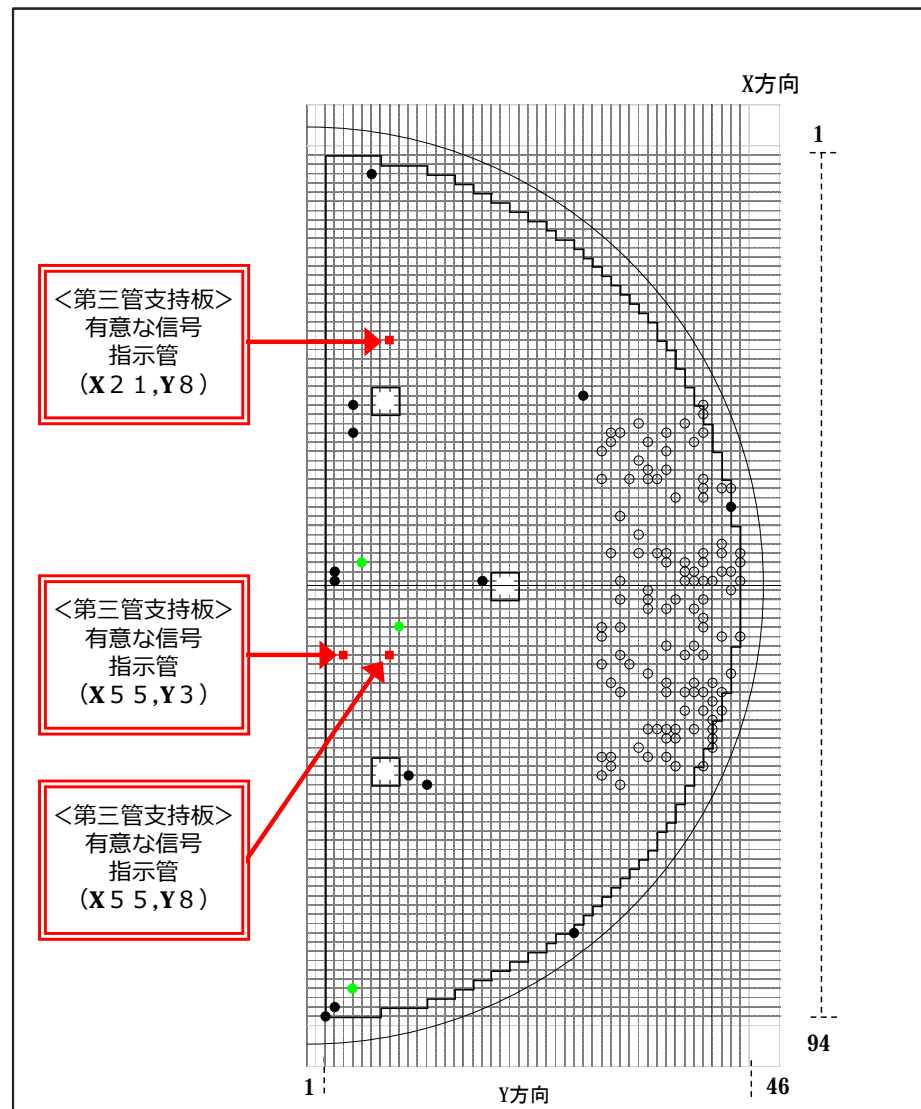
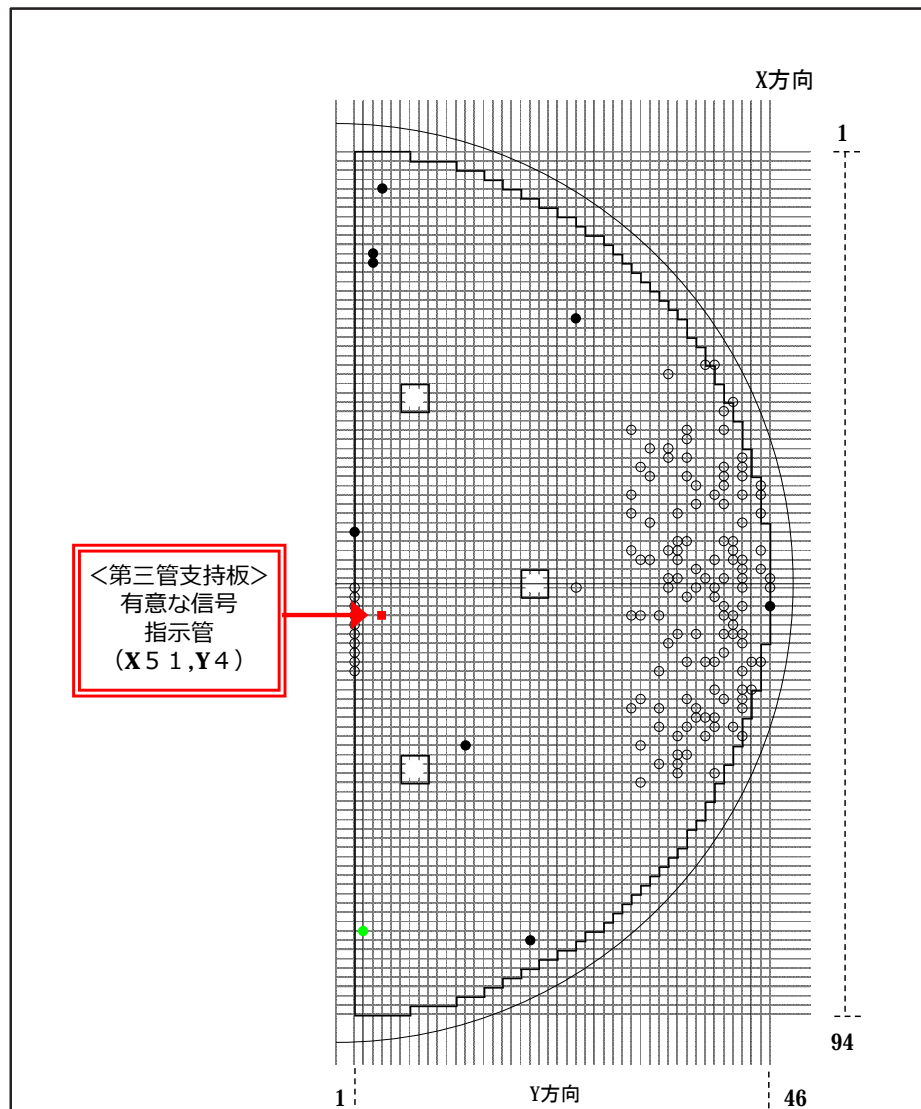
I SG器内に薬液を注入し、伝熱管全体を浸すことにより、伝熱管に付着している稠密な性状のスケールを粗密化させ、脆弱化させる。

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。

參考資料

A - S G (低温側) の状況

C - S G (低温側) の状況



- : 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) (1 2 9 本)

- : 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) (1 3 本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (1 1 0 本)

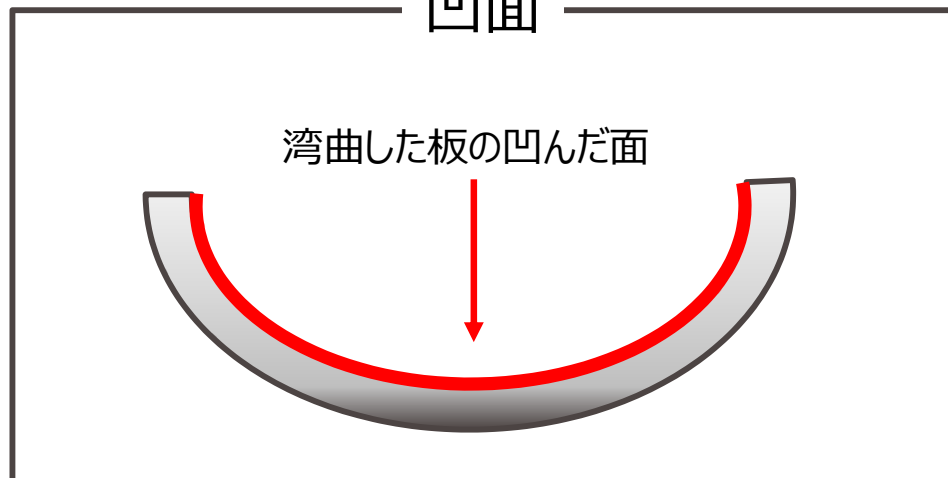
参考資料：要因分析図 (F T図)

要因			調査項目	評価		
減肉指示	1次側からの漏洩		ECT番号	ECTの番号指示により、伝熱管内面(1次側)にさびがないことを確認した。	×	添付資料-5
		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。*	×	添付資料-5
		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剤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、高圧発電所3号機のようなアンモニアとヒドランジによる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、小容量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。*	×	添付資料-6
		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剤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、高圧発電所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ンジによる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、小容量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。*	×	添付資料-7
	2次側からの漏洩	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、高圧発電所3号機のようなアンモニアとヒドランジによる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、小容量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。*	×	添付資料-8
		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。*	×	添付資料-9
		エロージョン	設計評価	当機部流速は約3m/sであり、かつ、1100V合金は耐エロージョン性が高いことから(室温条件下約700μm/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。*	×	添付資料-10
		管支持板との接触	設計評価	管支持板との接触により腐蝕減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。*	×	添付資料-11
		SG器外遺入物との接触	過去の点検調査	前回(第2回)の定期検査において、伝熱管内へ立ち入る作業では直前に作業服の着替えや靴かきを済ませることで直接目視にて異物確認ができていない地盤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対策を実施しており、SG器内に異物が混入している可能性はない。また、SG器内に異物が混入していることを踏まえ、急のためSG器内の水張り、空室噴射(パブリック)および水抜きを実施した結果、異物が回収されなかったことから、SG器内に異物が混入している可能性はない。	×	添付資料-12
		摩耗減肉	SG器内点検 (目視点検)	AおよびC-SGの減肉箇所を確認した伝熱管について、小容量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で減肉箇所を確認した伝熱管を小容量カメラにて目視点検を実施した結果、さびに類似する幅約15mm、長さ約9mmの付着物を確認し、回収した。C-SGで減肉箇所を確認した伝熱管3本を小容量カメラにて目視点検を実施した結果、うち1本の伝熱管(X5、Y3)と第3管支持板の間に付着物を確認したことから回収を試みた。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、粉砕し、回収できなかった。その他、SG器内の管板等を小容量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、主成分が鉄酸化物(主にマグネサイト)であり、伝熱管の外壁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、減肉箇所の形状と一致した。接触面は平滑で、断面は伝熱管との接触位置部付近に凹凸が認められたこと、さらに当該伝熱管との接触位置部付近に凹凸が認められたことから、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、接触面並びに光沢は確認できず、また、平滑な面で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。	×	添付資料-13 添付資料-16
	SG器内点検 (スラッジランニング)	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。	×	添付資料-13	
	SG器外点検 (目視点検)	SG器外点検 (目視点検)	SGプローブダウン系結である系外フローライン(海水放出ライン)、排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2次系配管の内表面から生じた水垢等が混入していることは確認したが、異物は確認できなかった。また、高圧発電所3号機(第2回)定期検査でのSG伝熱管点検結果を踏まえ、外部からの異物混入の可能性は否定できないことから、急のため、SGに異物が混入する可能性がある系統で実施している全ての開閉点検等の対象機器について装置の経年劣化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。	×	添付資料-14	
	SG器内遺入物との接触	内部品が脱落して接触	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内部品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、掘止め金具のキー固定部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、溶接止められていること、もしくは、原因を排除された構造で囲まれていること、さらには、脱落したとしても周囲の構造物外には出ないことから、内部品が脱落した可能性はないと考えられる。	×	添付資料-15	
		SG器内点検 (目視点検)	AおよびC-SGの減肉箇所を確認した伝熱管について、小容量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で減肉箇所を確認した伝熱管を小容量カメラにて目視点検を実施した結果、さびに類似する幅約15mm、長さ約9mmの付着物を確認し、回収した。C-SGで減肉箇所を確認した伝熱管3本を小容量カメラにて目視点検を実施した結果、うち1本の伝熱管(X5、Y3)と第3管支持板の間に付着物を確認したことから回収を試みた。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、粉砕し、回収できなかった。その他、SG器内の管板等を小容量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、主成分が鉄酸化物(主にマグネサイト)であり、伝熱管の外壁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、減肉箇所の形状と一致した。接触面は平滑で、断面は伝熱管との接触位置部付近に凹凸が認められたこと、さらに当該伝熱管との接触位置部付近に凹凸が認められたことから、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、接触面並びに光沢は確認できず、また、平滑な面で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。	○	添付資料-13 添付資料-16	
		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、内部品が脱落した可能性はないと考えられる。	×	添付資料-13	
		回収物の分析結果	C-SG伝熱管の減肉を発生させたと思われる異物等を調査して回収した結果、伝熱管を中心としたXおよびY方向に約10列ずつを範囲として、減肉箇所下方の第2および第3管支持板上にあるスケールを約30個回収し、確認したところ、その中の3つに伝熱管と類似したと思われる成分を有する幅約18mm、長さ約10mmのスケール(スケールC2)、幅約20mm、長さ約11mmのスケール(スケールC3)および幅約11mm、長さ約3mmのスケール(スケールC4)を回収した。スケールC2については凹面の平滑面および側面に、スケールC3については凸面に3箇所(接触面を確認した。また、スケールC4については角部に接触面を確認した。それぞれの形状は、スケールC2は幅約22.2mm、スケールC3は幅約22.2mm、スケールC4は幅約22.2mmの円筒状に似た形状であり、伝熱管の外径22.23mmに近い形状であることを確認した。成分分析した結果、スケールC2については、凹面平滑部の接触面には管支持板の主成分であるCrが、凹面の接触面には伝熱管の主成分であるNiおよびFeを抽出した。スケールC3については、凸面の3箇所(うち1つである平滑部表面)には管支持板の主成分であるCrが、凹面の接触面には伝熱管の主成分であるNiおよびFeを抽出した。スケールC4については、凸面の接触面には伝熱管の主成分であるNiおよびFeを抽出した。スケールC2の形状および形状を整理した結果、スケールC3の形状および形状を整理した結果、スケールC2の想定形状とX5、Y3の減肉箇所との位置関係は、C-SGで確認した3箇所(減肉箇所)のいずれかと一致する箇所を確認した。また、スケールC3についてはX2、Y8の減肉箇所並みにX2、Y8周辺にある第3管支持板表面および管支持板の接合部、回収スケールの形状と位置関係が一致することを確認した。また、スケールC4についてはX5、Y3の減肉箇所並みにX5、Y3周辺にある第3管支持板表面の接合部、回収スケールの想定形状と位置関係が一致することを確認した。	○	添付資料-17 添付資料-18	
ECT探傷	損傷以外の番号	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、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。	×	添付資料-19

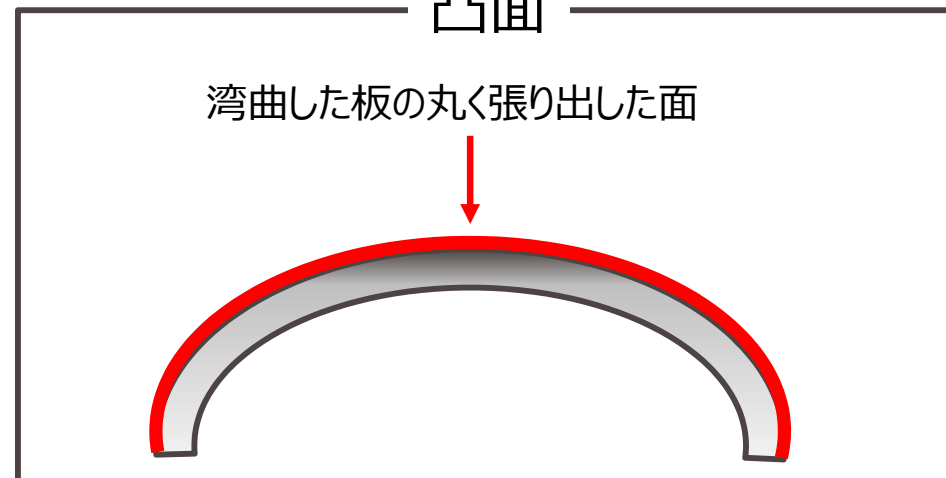
○:可能性が高い
△:可能性は否定できない
×:原因の可能性なし

回収物の観察結果等で用いた用語については、以下のとおりであり、赤で示した部分を示す。

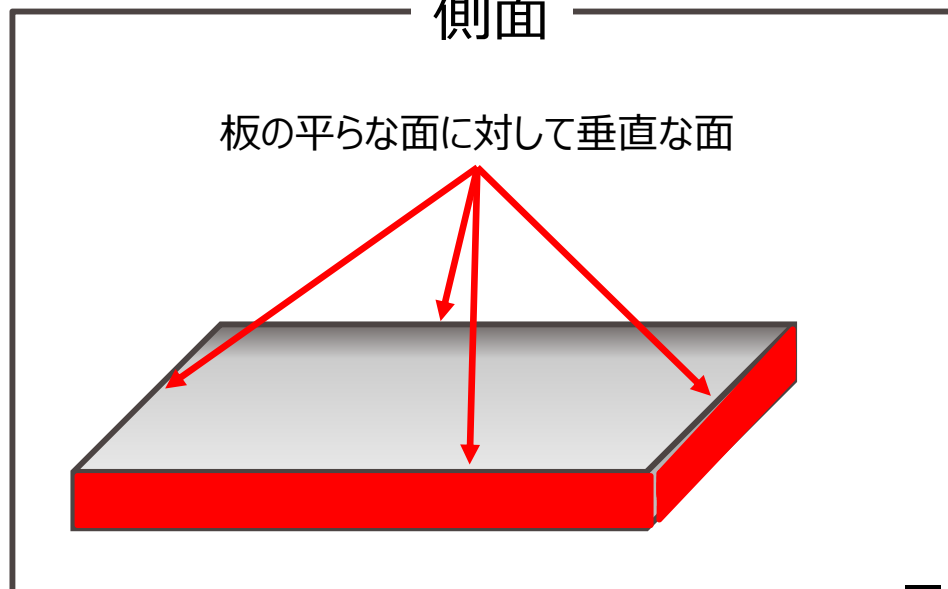
凹面



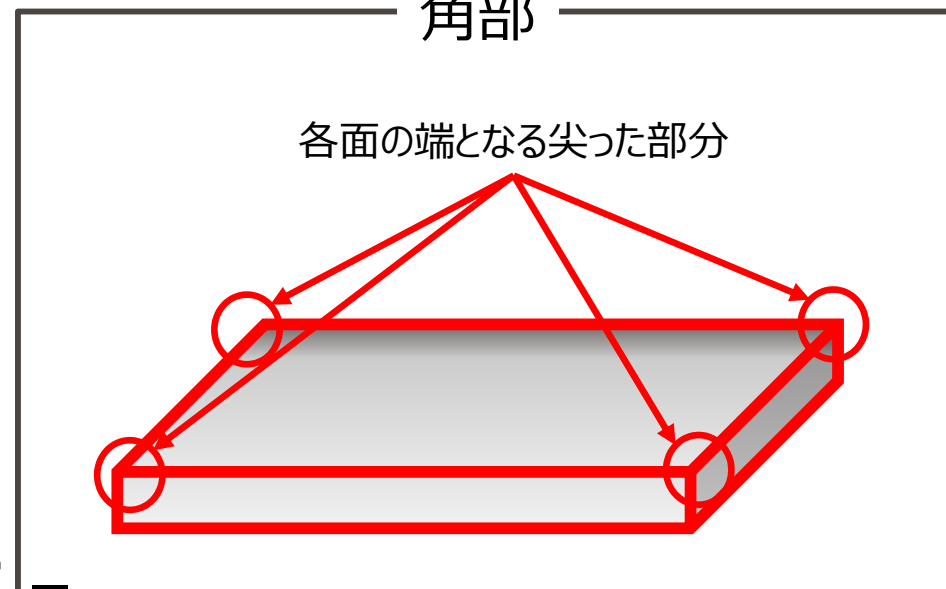
凸面



側面

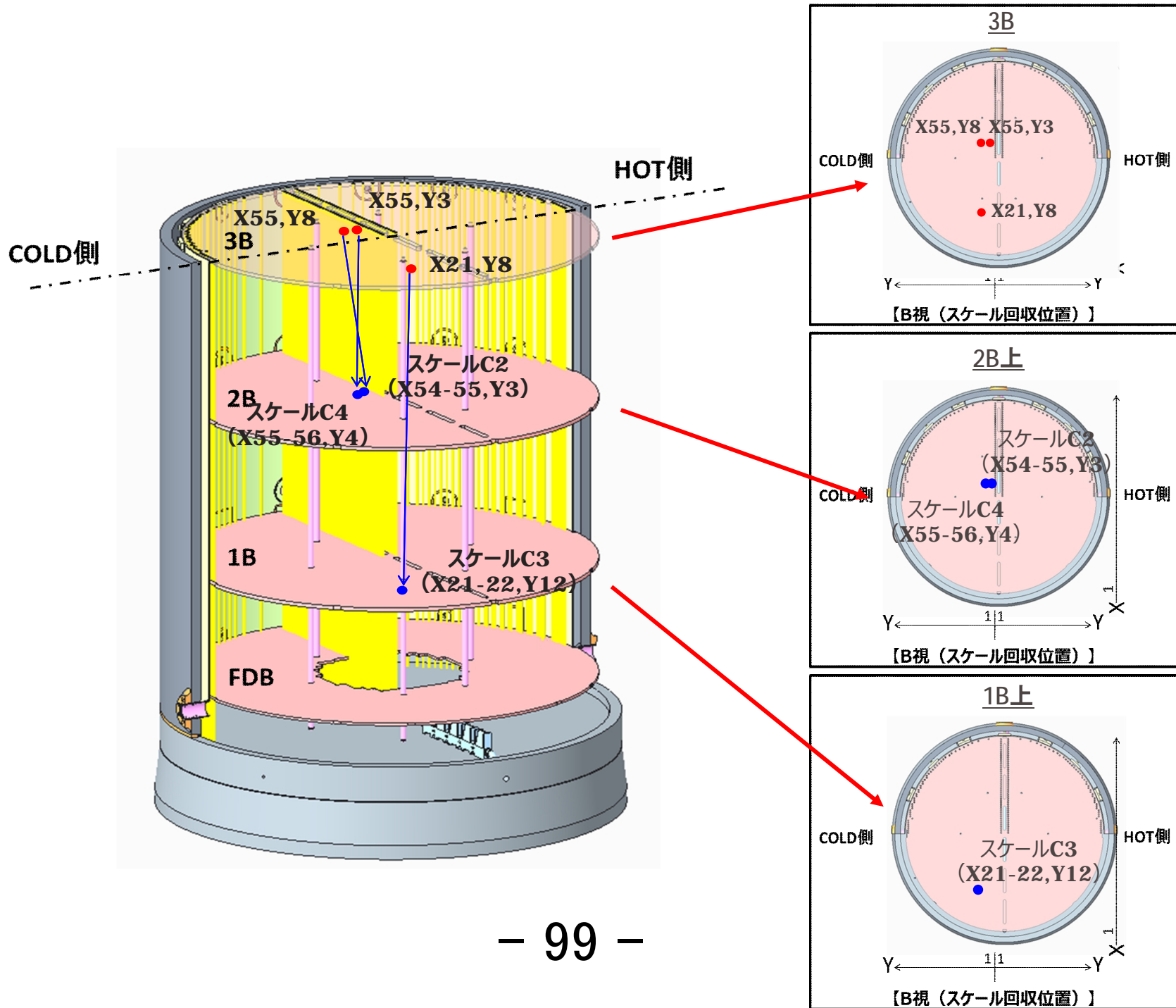


角部



回収物の各部位で確認された接触痕、各種成分を整理した結果は以下のとおり。

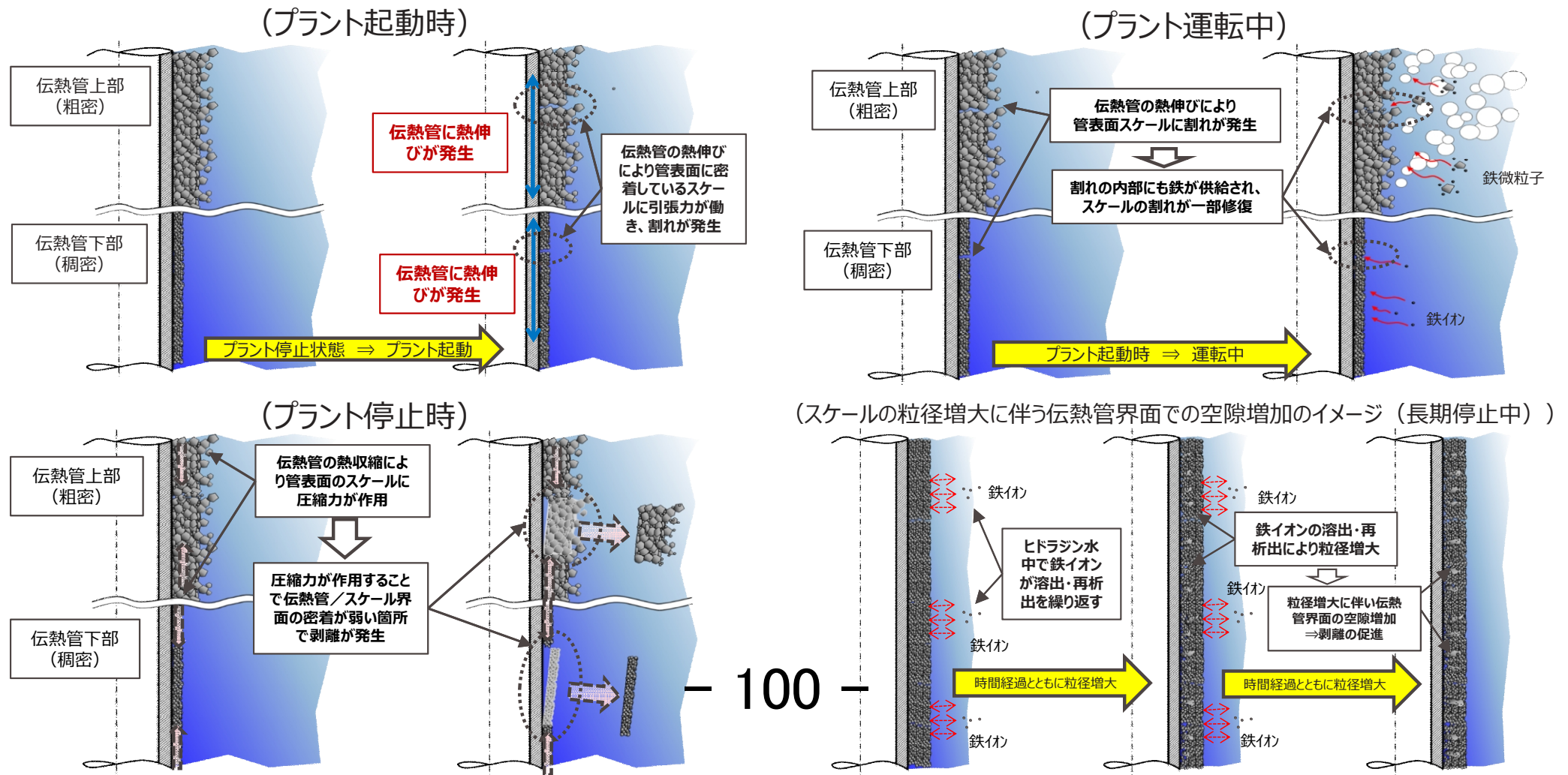
	凹面	凸面	側面	角部
スケール A	—	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 筋状痕 光沢 N i、C r
スケール C 1	<ul style="list-style-type: none"> 接触痕（筋状痕なし） わずかな N i 	—	—	—
スケール C 2	<ul style="list-style-type: none"> 接触痕（筋状痕なし） C r 	—	<ul style="list-style-type: none"> 筋状痕 N i、C r 	—
スケール C 3	—	<ul style="list-style-type: none"> 接触痕③（筋状痕なし） C r 	接触痕①筋状痕 接触痕②筋状痕 <ul style="list-style-type: none"> N i、C r 	—
スケール C 4	—	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 筋状痕 N i、C r



○スケールの剥離（剥離メカニズム）

伝熱管表面に生成したスケールが剥離するのは、起動停止時の伝熱管の熱伸びと収縮によるものと推定される。具体的には次の（a）～（c）のとおりであり、スケールはプラント停止時の伝熱管の熱収縮に追従できずにフレーク状（板状）に剥離したものと推定される。

- （a）プラント起動時の伝熱管の熱伸びに伴い伝熱管表面のスケールに割れが生じる。
- （b）プラント運転中に割れの隙間が新たに生成したスケールで埋まる。
- （c）隙間が埋まったため、プラント停止時の熱収縮に追従できずスケールは剥離する。



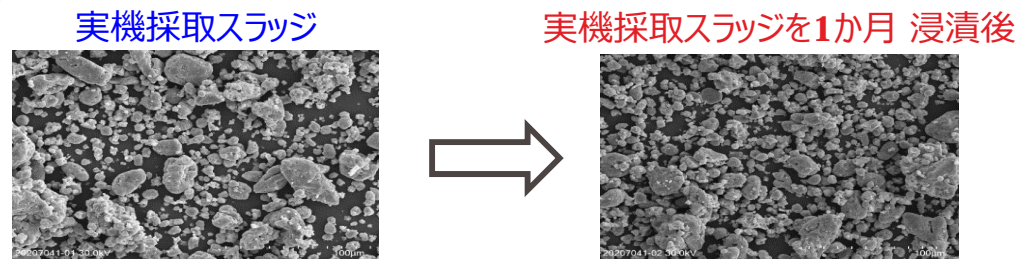
○スケールの剥離（長期停止の影響）

東日本大震災以降、高浜発電所4号機は2011年7月に定期検査を開始し、その後、2017年5月に再稼働するまでの約6年間、プラントは長期停止状態となっていた。その間、SG器内は腐食を防止するためヒドラジン水による満水保管状態としていたが、この状態がスケール剥離挙動に与える影響を調査するため、1か月間、スラッジ（粒の観察を容易にするため粉末状スラッジを使用）をヒドラジン水による浸漬試験を実施した。その結果、時間の経過とともにスケールを構成する鉄粒子同士が合わさり粒径が大きくなることを確認することができた。これは、ヒドラジンの還元作用でスケールの鉄が一部溶解、再析出を繰り返しており、その結果、粒径が大きくなる。

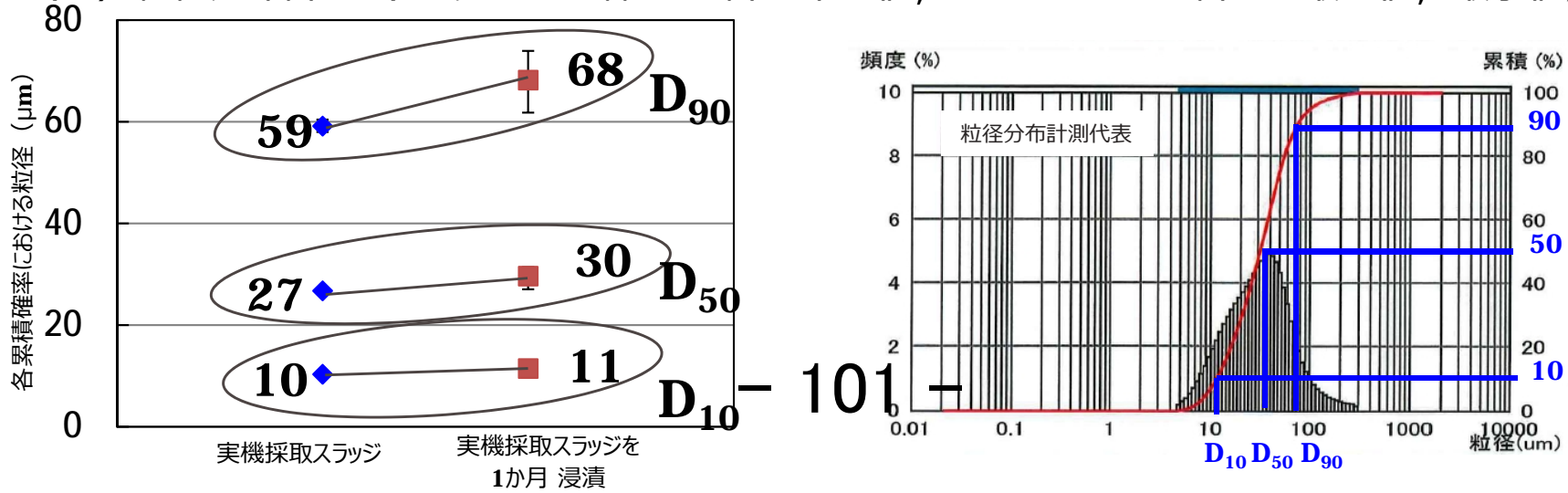
粒径が大きくなると、伝熱管との接触面積が減少し、剥離が促進される可能性がある。スケールの剥離量が増えるとスラッジランニングでのスケール回収量が大きくなる可能性があるため、高浜発電所4号機の長期停止前後の実績を調査した結果、スケール回収量は長期停止後に増加している傾向が認められた。以上により、長期停止後に伴い、スケールの粒径が大きくなることで伝熱管との接触面積が減少し、プラントの運転等に伴い伝熱管からスケールが多数剥離したと推定した。

（ヒドラジン水浸漬試験結果）

（1）SEM観察

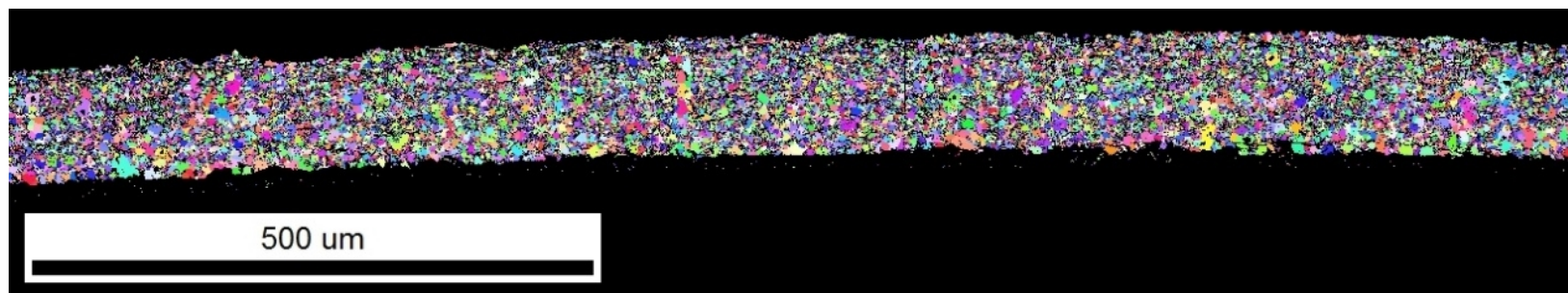


（2）粒径分布計測（プロット：3回繰り返し計測平均値，エラーバー：3回計測の最大値，最小値）



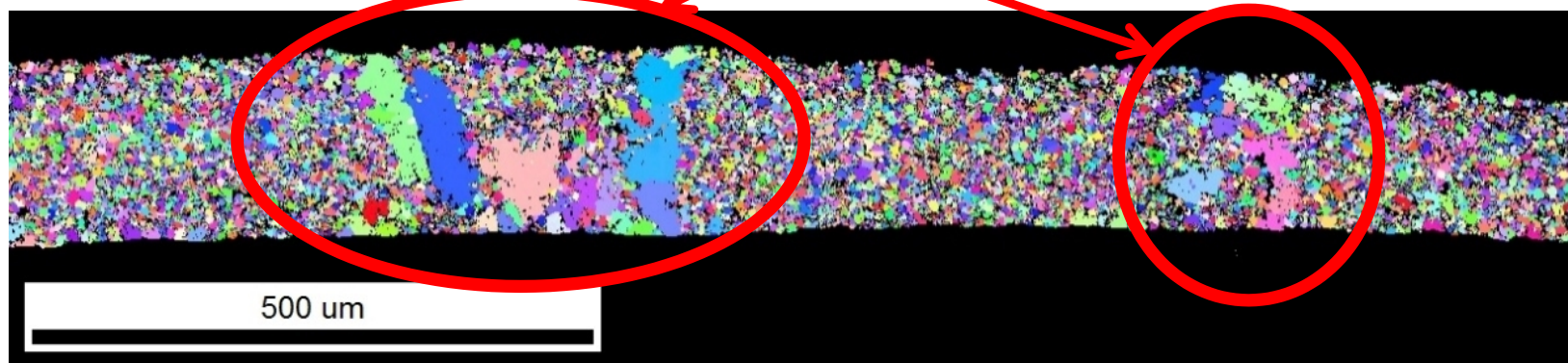
電子線後方散乱回析法（EBS D）※により、長期停止前後のスケール断面を観察した結果は以下のとおりである。

長期停止前スケール断面粒観察結果
（大飯発電所3号機第16回定期検査時）



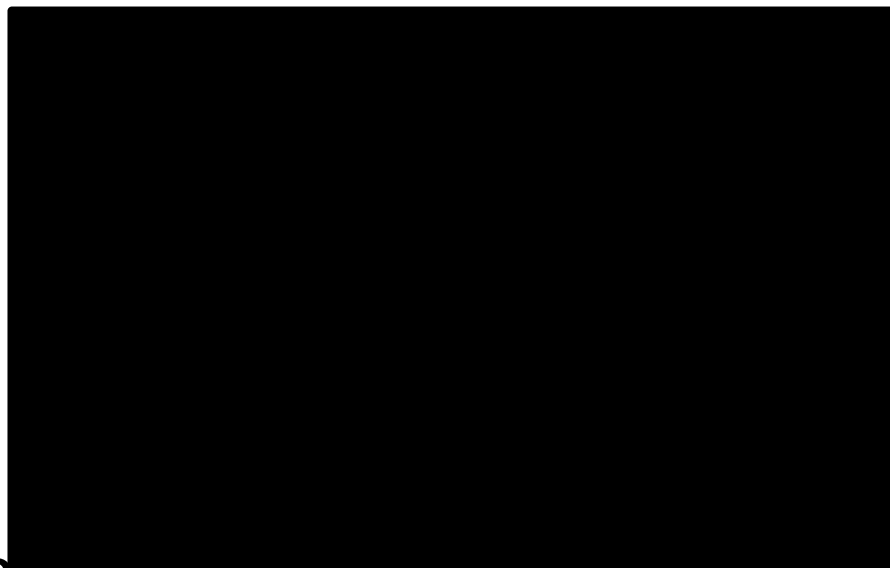
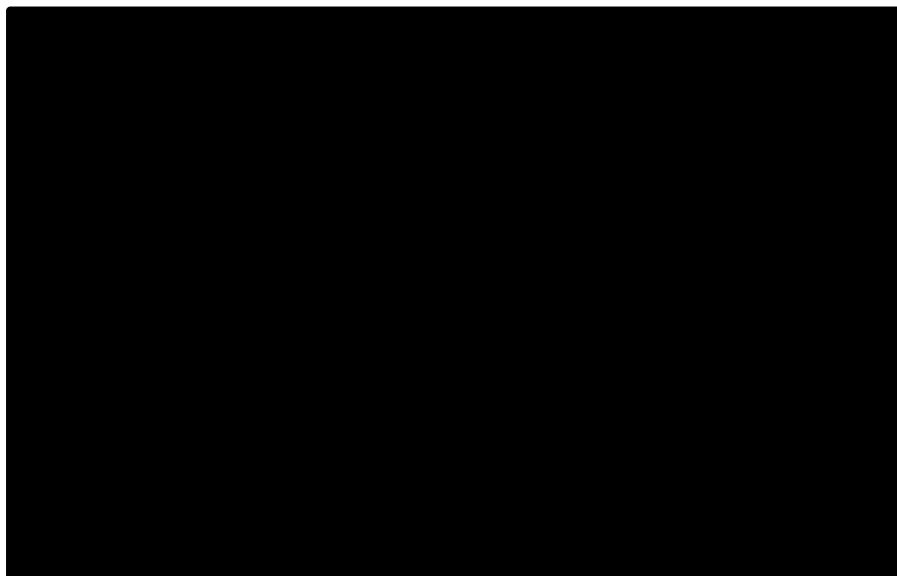
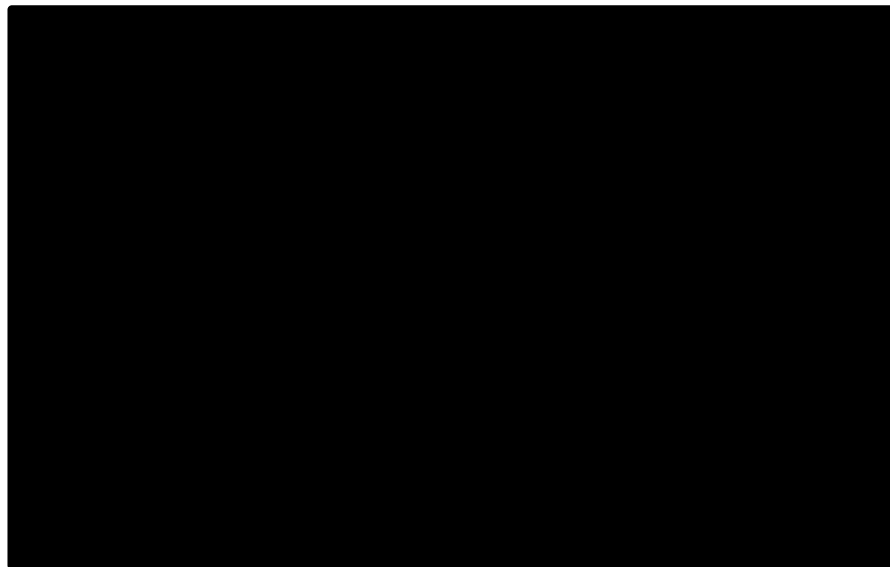
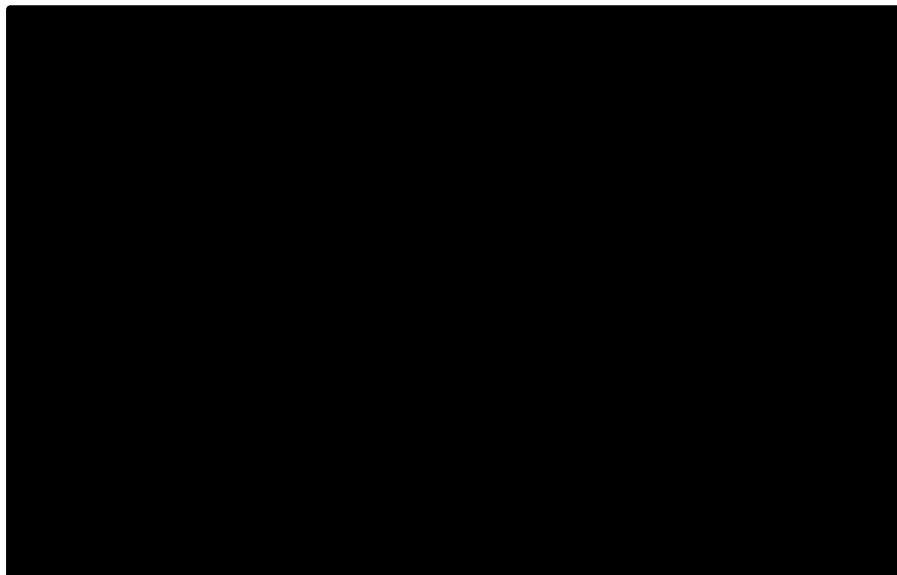
長期停止後スケール断面粒観察結果
（大飯発電所3号機第18回定期検査時）

長期停止後は長期停止前に比べ、大きな粒が認められる



※：結晶粒サイズ等の情報を取得できる分析手法であり、結晶面が向いている方向によって、異なる色で示すことで、同色の一塊が結晶粒であると識別することができる。

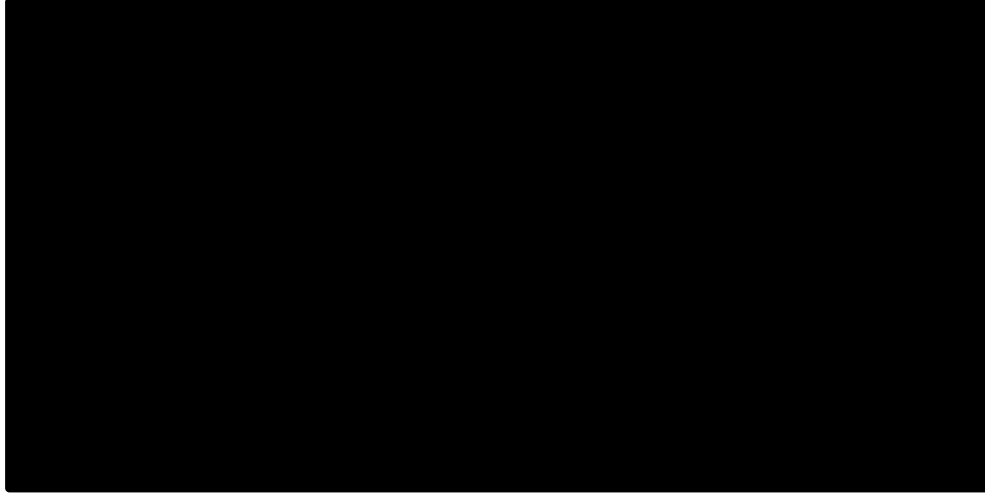
○SG伝熱管表面のスケール成長に伴って伝熱性能が低下し、主蒸気圧力が低下する。高浜発電所3および4号機はガバナ弁全開圧力（VWO圧力）まで主蒸気圧力が低下しても、夏季に定格電気出力以下となるまで余裕があるが、大飯発電所3および4号機には余裕が無いため、当社では大飯発電所3および4号機で先行してSGの薬品洗浄を実施している。



○ S G熱抵抗係数（S G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、高浜発電所3および4号機と大飯発電所3および4号機では設計S G熱抵抗係数が異なる。

<高浜発電所3号機>

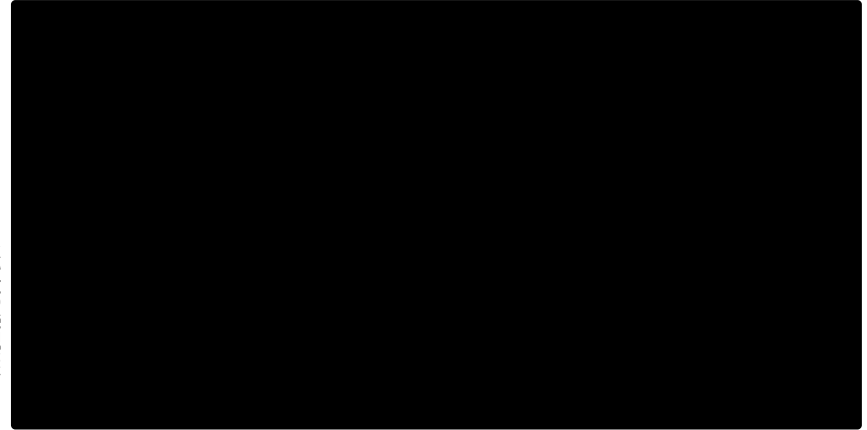
S G熱抵抗係数



<大飯発電所3号機>

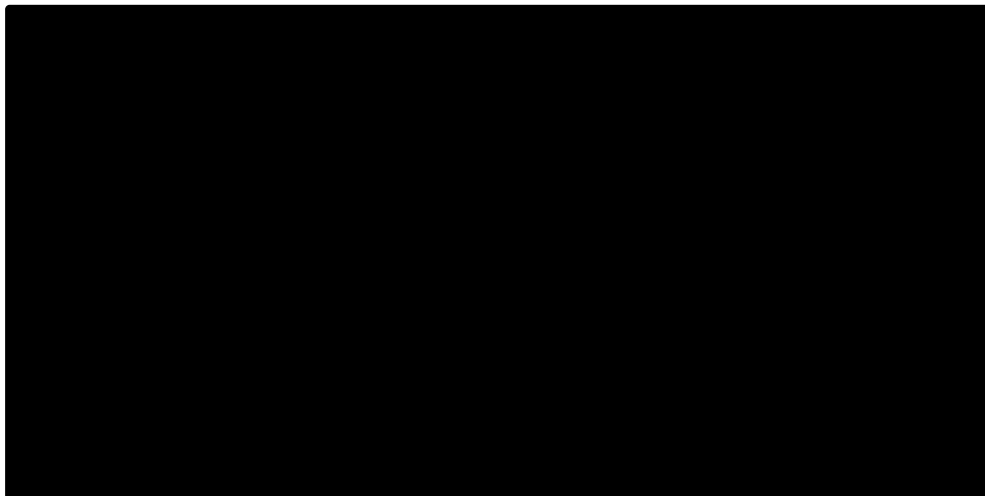
S G熱抵抗係数

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



<高浜発電所4号機>

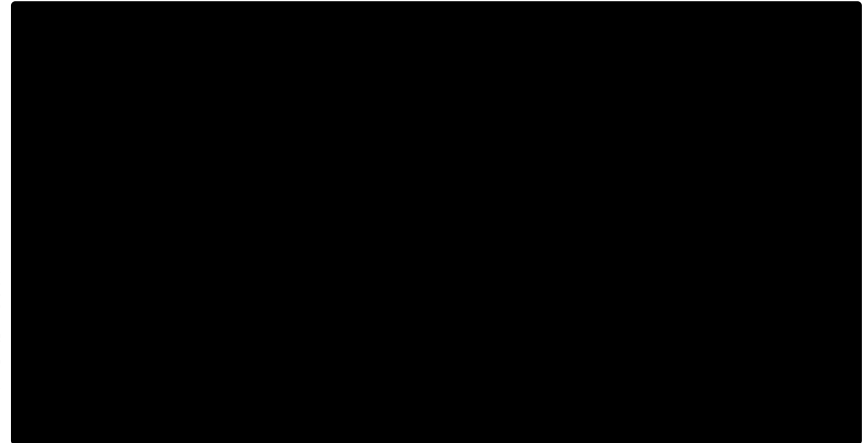
S G熱抵抗係数



<大飯発電所4号機>

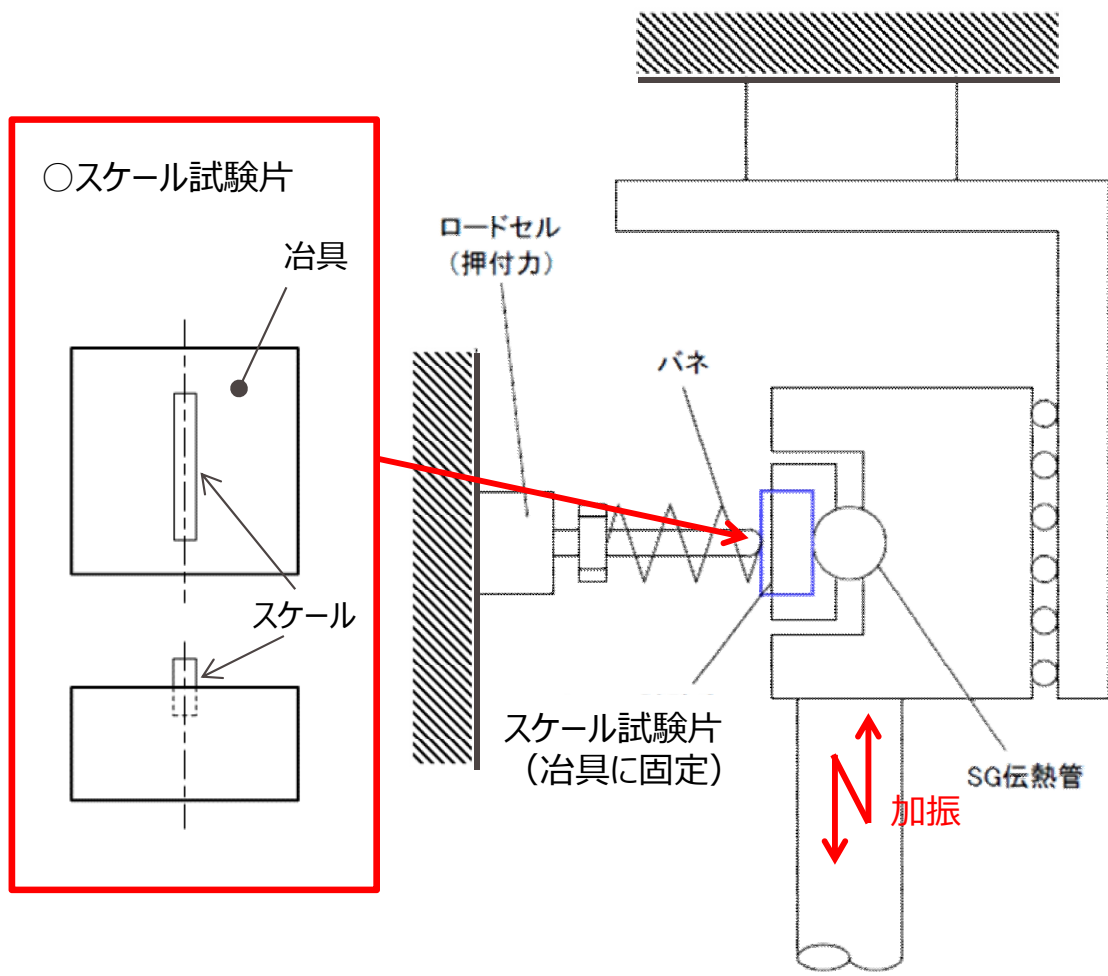
S G熱抵抗係数

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



： 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。

- 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

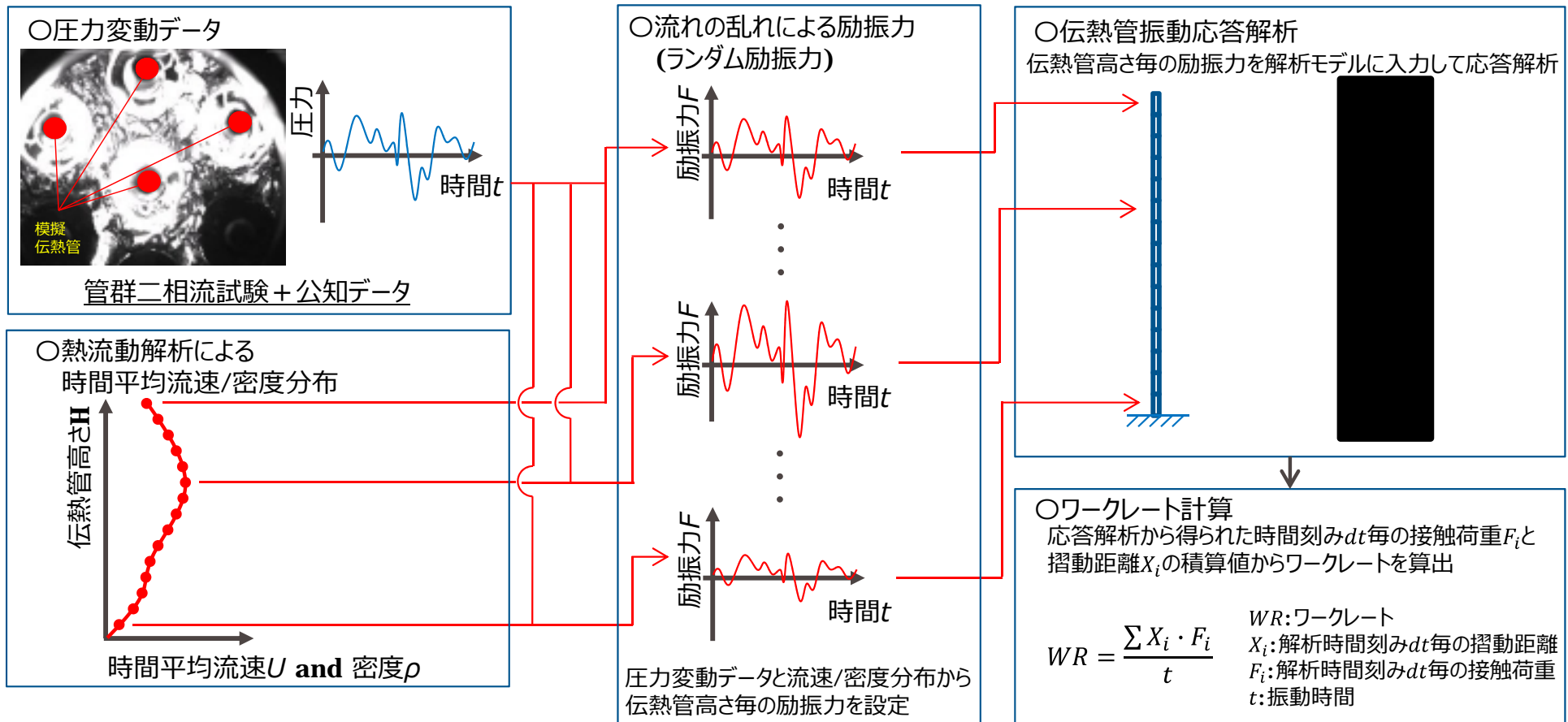


加振装置概念図

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

- 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。



参考資料：廃止措置中プラントの鉄持込み量一覧

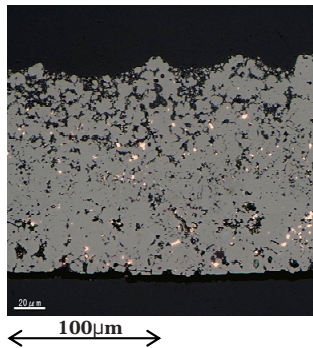
○廃止措置中プラントの鉄持込み量を調査した結果、いずれもSG取替（SGR）済みであり、累積の鉄持込み量は運転中SGRプラントで代表の高浜発電所2号機と同程度であることを確認した。

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	

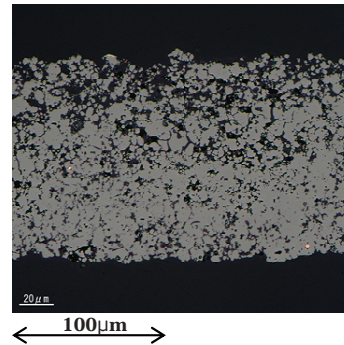
<薬品洗浄前後スケール性状比較>

○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 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

○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伝熱管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号機で伝熱管外面減肉事象が生じた運転時間以上（**EFPY** ※¹ **23**以上※²）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、**8**プラントのみであることを確認した。

※1：定格負荷相当年数（運開後累積発電電力量（MWh）÷ 870（MW）÷ 24（時/日）÷ 365（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（**EFPY24.0**）、高浜発電所 3号機第 2 4 回定期検査（**EFPY25.2**）、高浜発電所 4号機第 2 2 回定期検査（**EFPY24.3**）、高浜発電所 4号機第 2 3 回定期検査（**EFPY25.0**）のうち最小の運転時間（**EFPY24.0**）に対し更に抽出範囲を広げるため、**-EFPY1.0**を追加考慮

プラント名	運開日	SG取替日	現行SG EFPY
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)
プラントG	1978.6.1	1993.4.1	24.1 (2019.9.8時点)
プラントH	1990.6.7	—	24.7 (2019.2.16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)

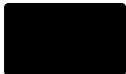
a ：減肉深さ = ██████████ (= ██████████ × 0.36)

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110MPa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」

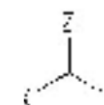
表 減肉を有する伝熱管の耐震性評価結果

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

- 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。

低温側 第三管支持板付近の E C T 信号		
X20,Y9	X21,Y9	X22,Y9
		
X20,Y8	X21,Y8 (摩耗痕のある伝熱管)	X22,Y8
		
X20,Y7	X21,Y7	X22,Y7
		

- 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および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およ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 	<ul style="list-style-type: none"> ・薬品洗浄他

※ 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

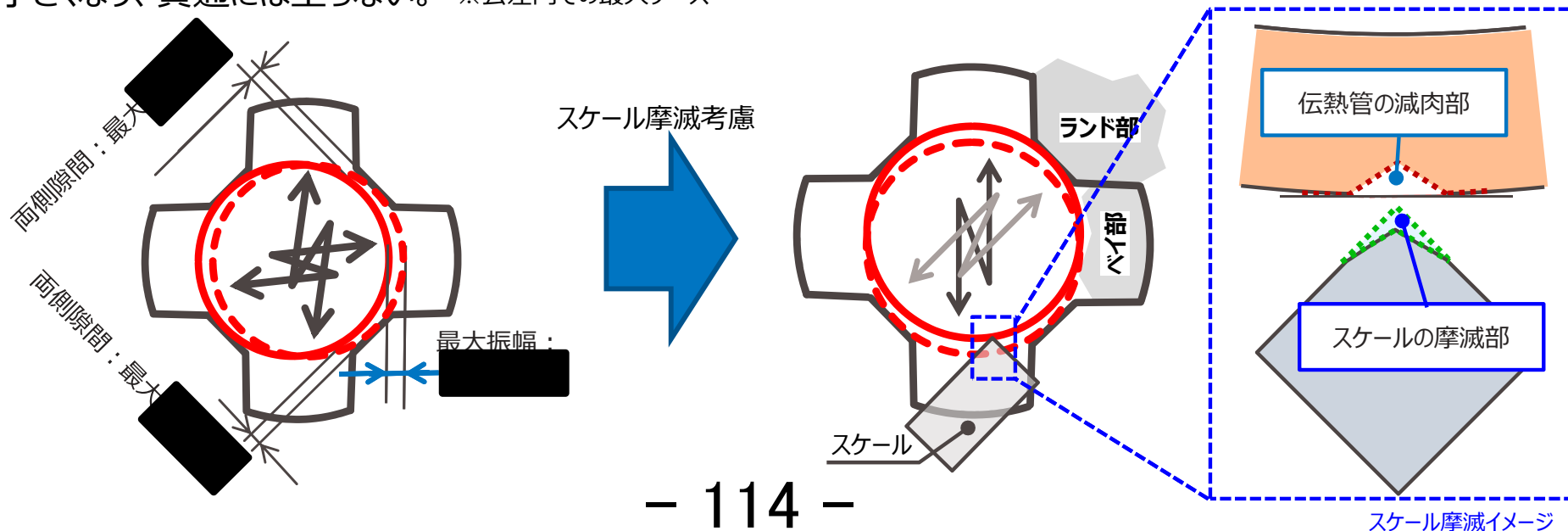
○ただし、同じ比摩擦量、同じワークレートで撓動し続けたとしても、最終的な摩擦減肉量は異物の場合より小さい。

- ・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



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： $F e_3 O_4$ ）中の $F e^{3+}$ は $F e^{2+}$ 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 $F e^{2+}$ 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を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中で金属銅（C u）を $C u^{2+}$ として溶解する。
 - ② 溶出した $C u^{2+}$ 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	
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 ・重碳酸アンモニウム	pH調整 EDTA触媒
温度	80℃	—	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

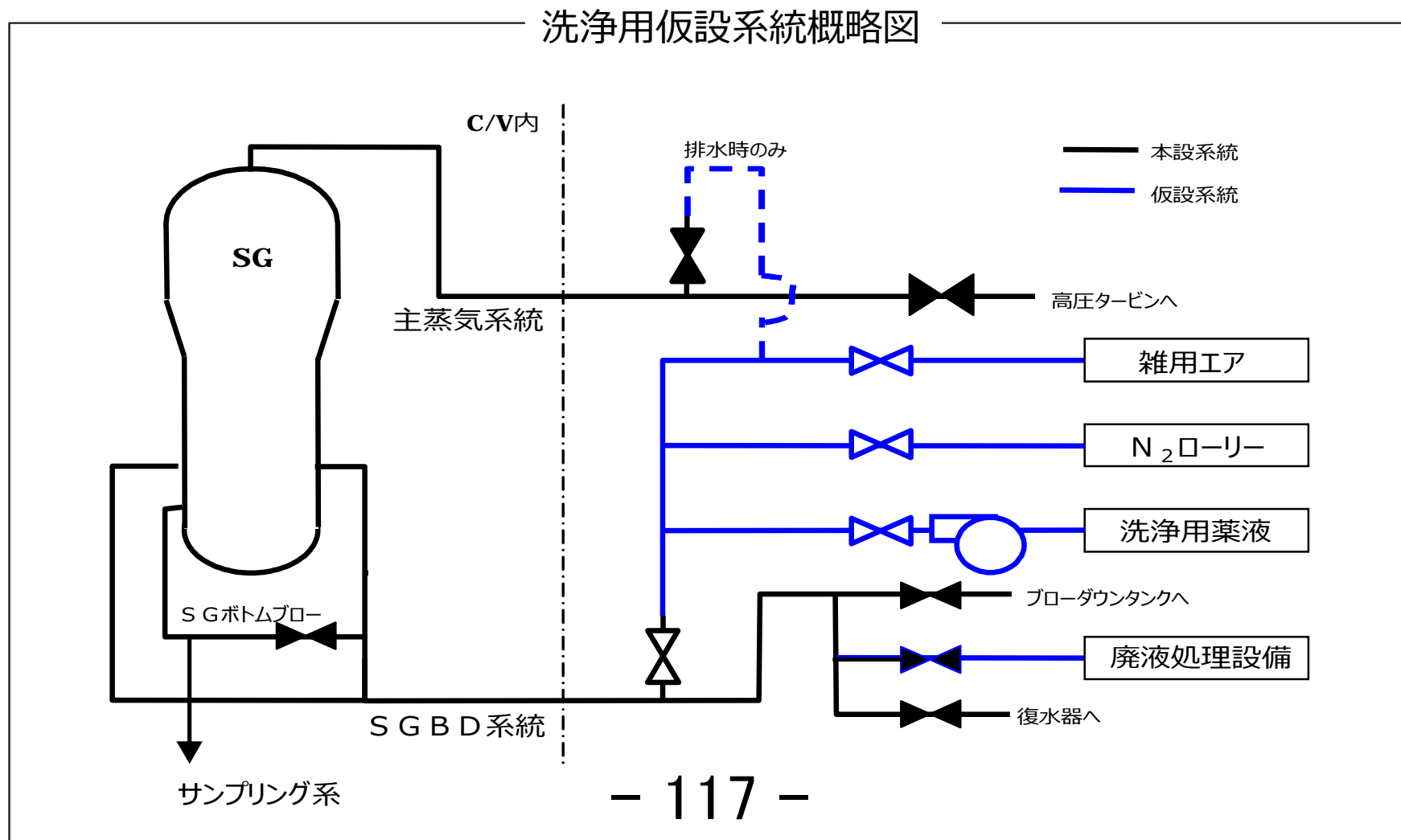
○薬品洗浄に伴う伝熱管等への影響

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られる。

○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。



第 16 回原子力施設等における事故トラブル
事象への対応に関する公開会合 資料 1

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

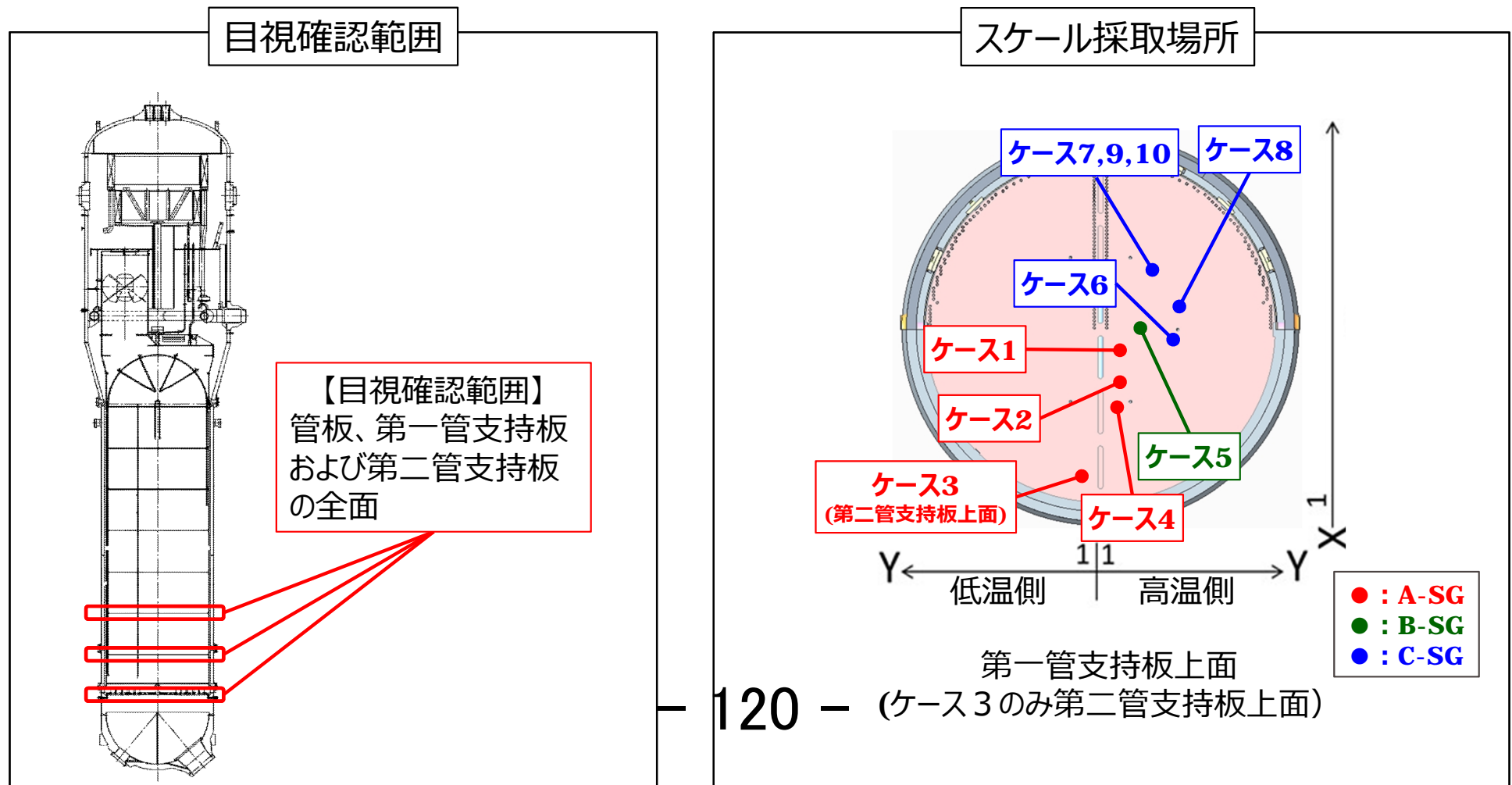


	説明項目	ページ番号
1	実機によるスケール脆弱化効果の確認結果	3
2	スケールに対する保全指標について	7
3	他プラントへの水平展開について	8
4	薬品洗浄有効性検証 (100℃での腐食量) について	9
5	スケールAの接触状態における 減肉の進展性について	10

○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)

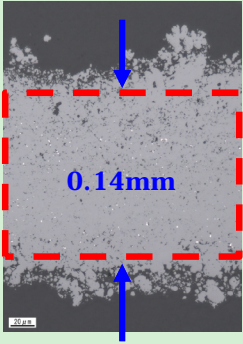
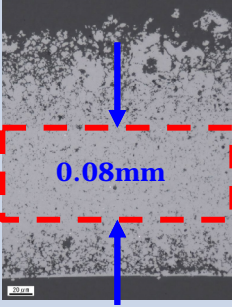
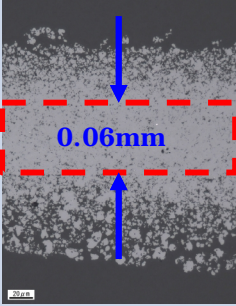
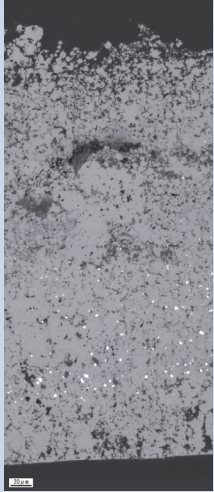
○薬品洗浄後のスケールと伝熱管との摩耗試験について

高浜発電所3号機にて薬品洗浄を実施した後、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、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-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	A-SG 第二管支持板上	0.2	0.04	試験開始直後に欠損
4	A-SG 第一管支持板上	0.2	0.02	試験開始直後に欠損
5	B-SG 第一管支持板上	0.3	0.04	試験開始直後に欠損
6	C-SG 第一管支持板上	0.2	0.06	0.02
7	C-SG 第一管支持板上	0.3	0.06	試験開始直後に欠損
8	C-SG 第一管支持板上	0.2	0.06	試験片製作時に欠損
9	C-SG 第一管支持板上	0.3	0.04	0.01
10	C-SG 第一管支持板上	0.3	0.06	0.01
参考	C-SG 第七管支持板上	0.5 121	-	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。）

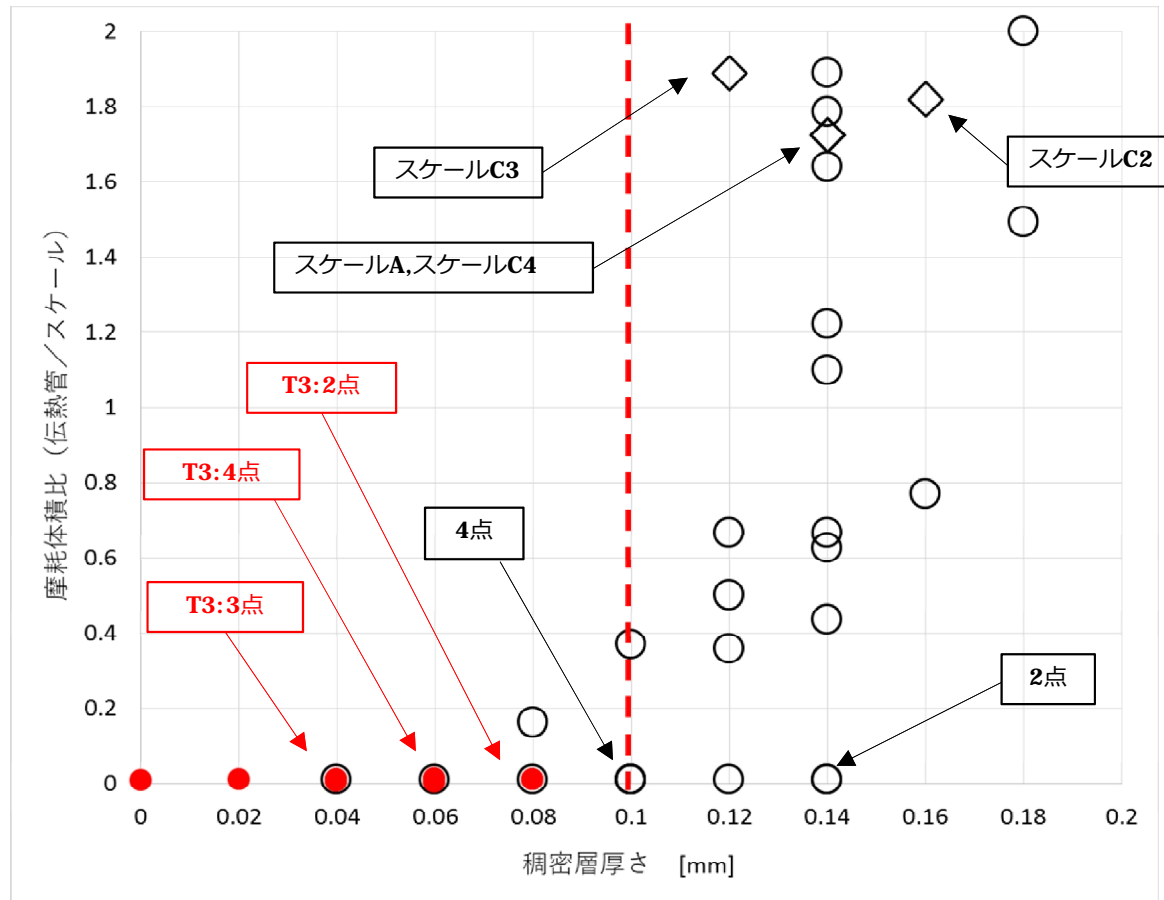
回収場所	<薬品洗浄前> C-SG 回収スケール 第一管支持板上	<薬品洗浄後> A-SG 回収スケール 第一管支持板上 (ケース2)	<薬品洗浄後> C-SG 回収スケール 第一管支持板上 (ケース6)	<薬品洗浄後> C-SG 回収スケール 第七管支持板上 (参考)
断面ミクロ観察結果				
稠密層厚さ (mm)	0.14	0.08	0.06	0.00
スケール厚さ※ (mm)	0.2	0.2	0.2	0.5

※：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、稠密層厚さは断面マイ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られる。

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

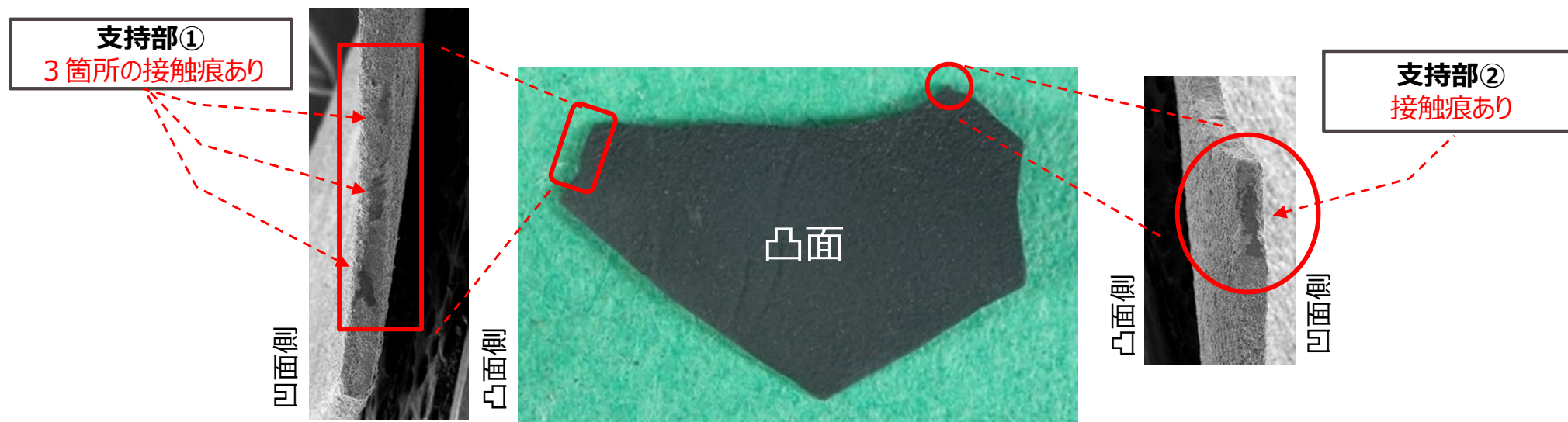
(2) 支持部で固定されておらず、流体力で伝熱管へ押し付けられるが、伝熱管からの押し戻しもあるケース※
また、最も厳しい評価となる次のケースについても仮定し、1サイクルでの最大減肉深さの考察を行った。

(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。



- 127 -

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

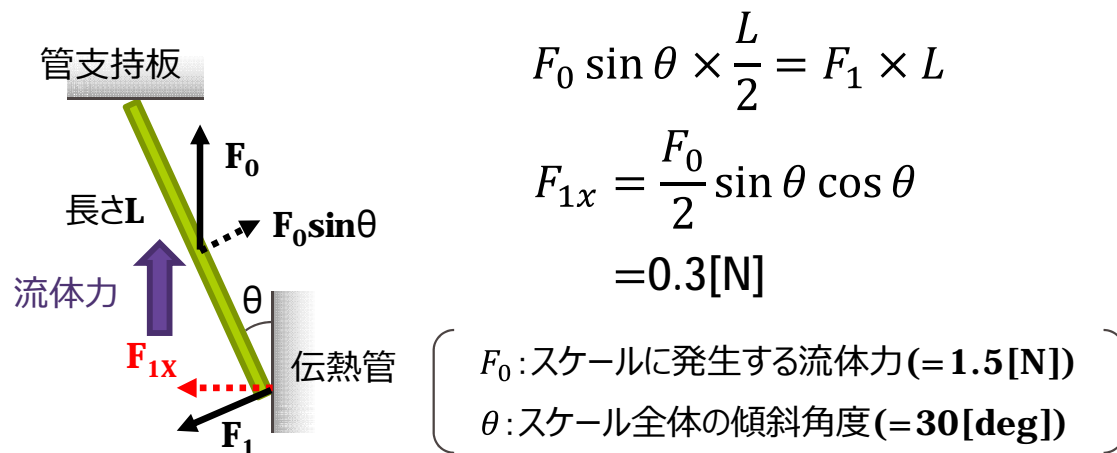
本ケースでは、スケールAはB E C穴縁部の2点で支持されるが、固定はされず、流体力に伴う外力または伝熱管からの押付力の作用により、支持部を支点に動く状態が想定される。

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。

- 128 -

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。

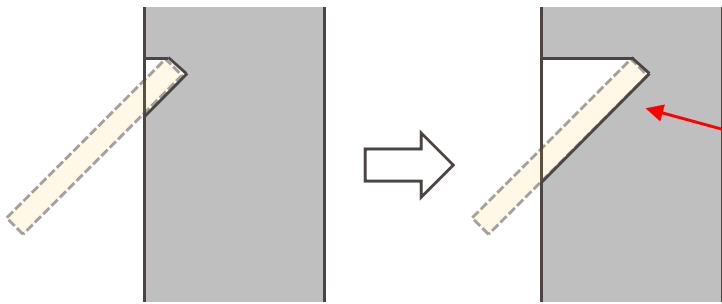
(3) 伝熱管からの押し返しに耐えると仮定し、スケールAが伝熱管方向に倒れ続けるケース

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。

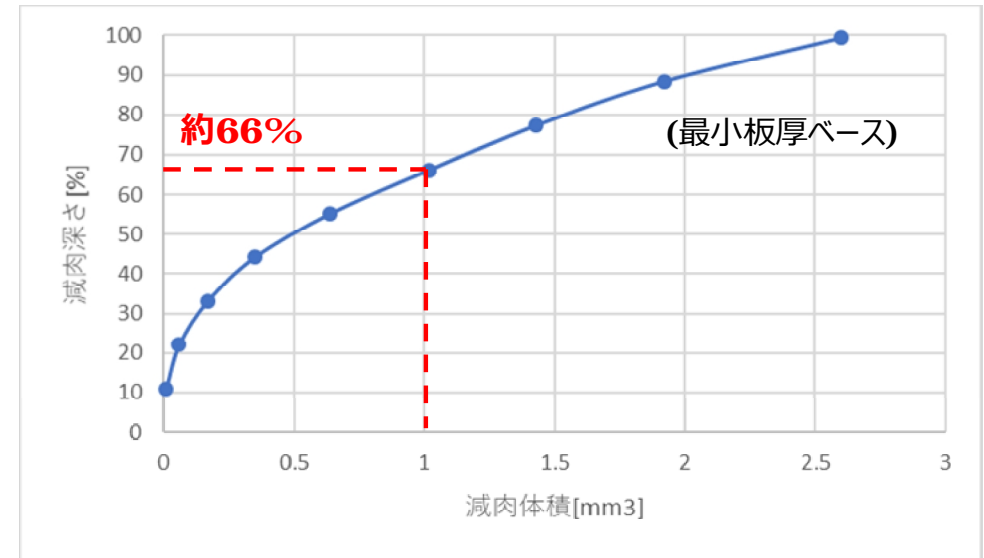
<最大減肉深さ評価結果>

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、
 摩耗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

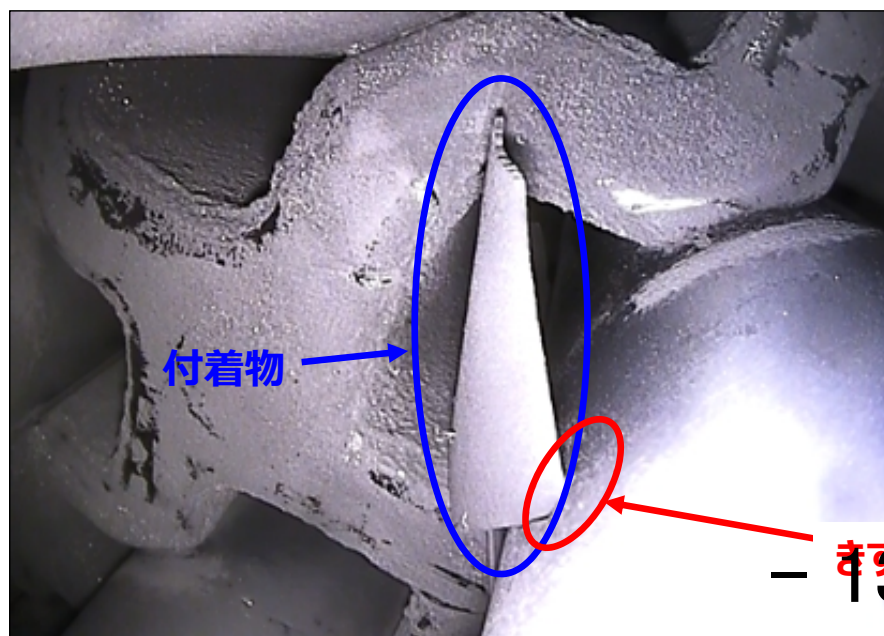
第三管支持板：長さ約2.0mm、幅約1.0mm (X55,Y3) 減肉率：約25%

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

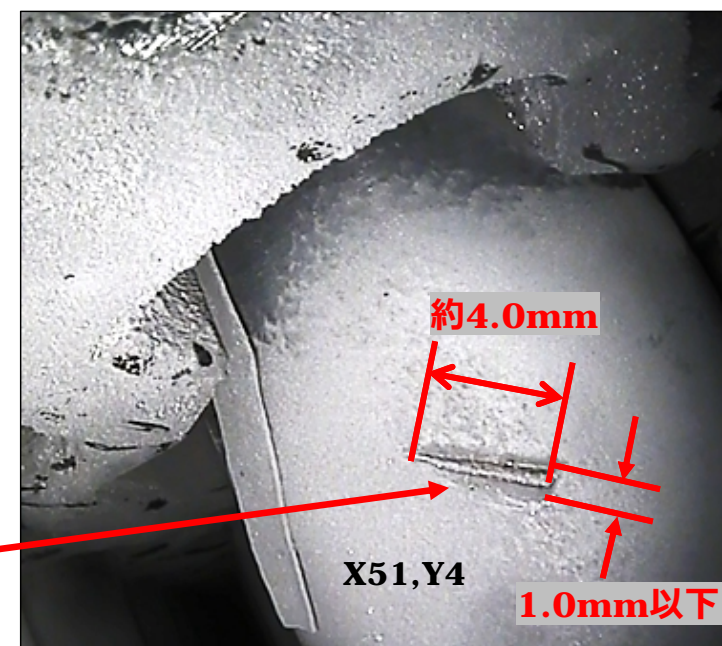
第三管支持板：長さ約7.0mm、幅1.0mm以下 (X21,Y8) 減肉率：約36%

A - S G (X51, Y4)

付着物回収前



付着物回収後



- 131 -

○稠密層厚さと摩耗体積比の関係

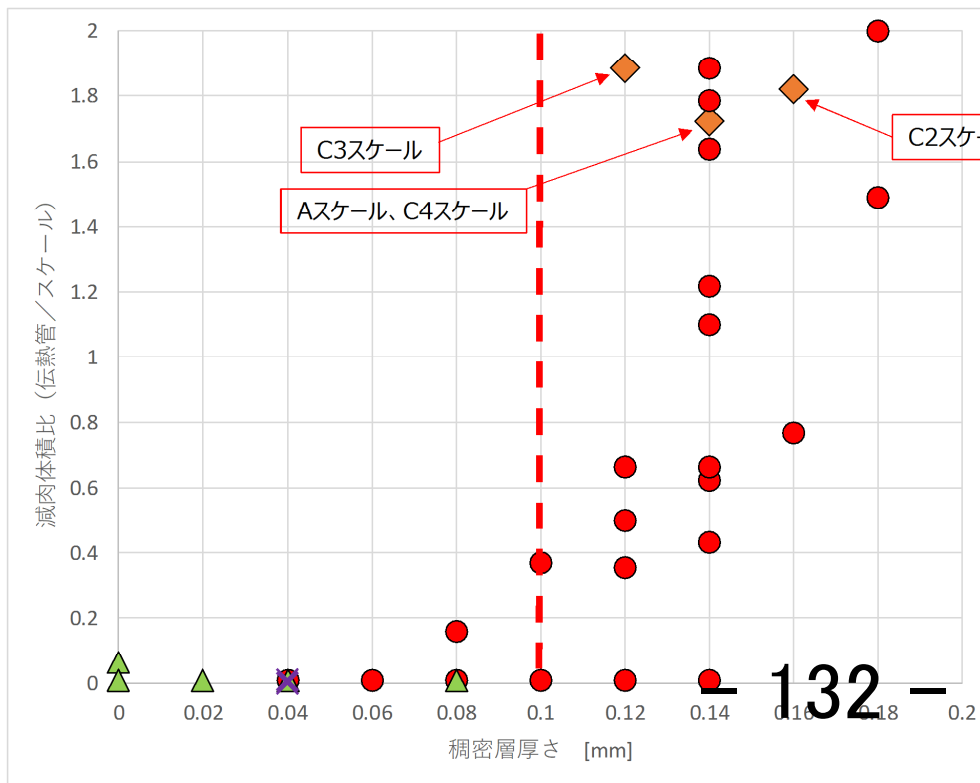
有意な減肉を与える稠密層厚さを検討するため、大飯発電所3号機および4号機ならびに高浜発電所4号機から採取した実機スケールを用いて、摩耗試験を実施した。

- 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整理した。
- 空隙率5%以下の稠密層厚さで整理した。

- ・ 有意な減肉を発生させる可能性があるのは、稠密層の厚さが0.1 mm以上のスケールであることを確認した。
- ・ 大飯発電所3号機および4号機から採取した実機スケールでは、有意な減肉は発生せず、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。

※：高浜発電所3号機についても高浜発電所4号機と同等に、稠密層厚さが0.1 mm以上のスケールが生成されていることを確認した。

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
- ▲ : 大飯3号機回収スケール 6個
- ✕ : 大飯4号機回収スケール 3個

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、稠密層厚さは断面マイ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]

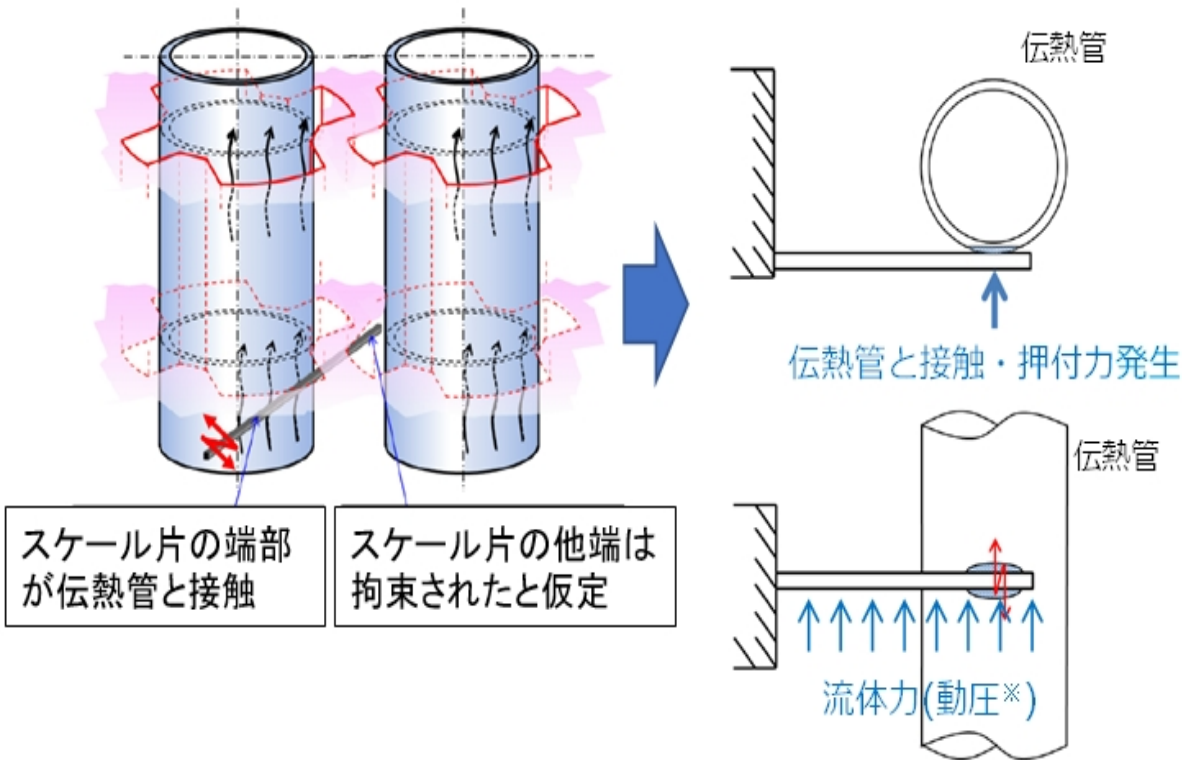
T : 運転時間 [s]

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]

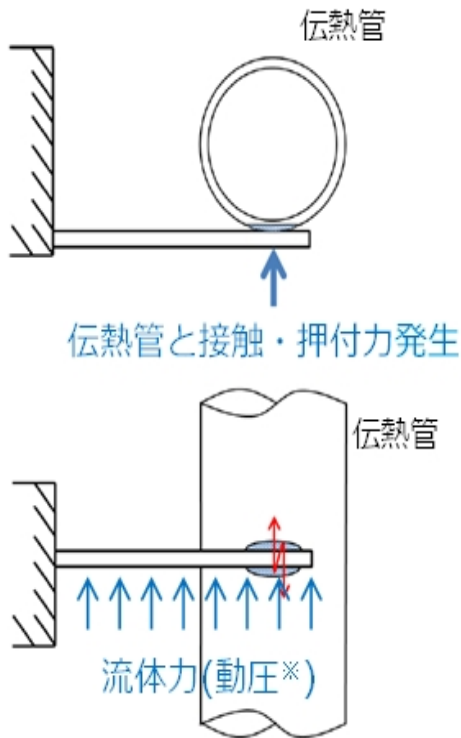
○スケール振動のケース

- ・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。



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

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 : X 5 1, Y 4	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 : X 2 1, Y 8	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 : X 5 5, Y 3	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 : X 5 5, Y 8	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 : X 5 1, Y 4	—	約3	約5,800	約0.5
C-SG : X 2 1, Y 8		約2	約5,800	約0.5
C-SG : X 5 5, Y 3		約3	約5,800	約0.5
C-SG : X 5 5, Y 8		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)

○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、SG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、SG取替以降の運転時間を示す。

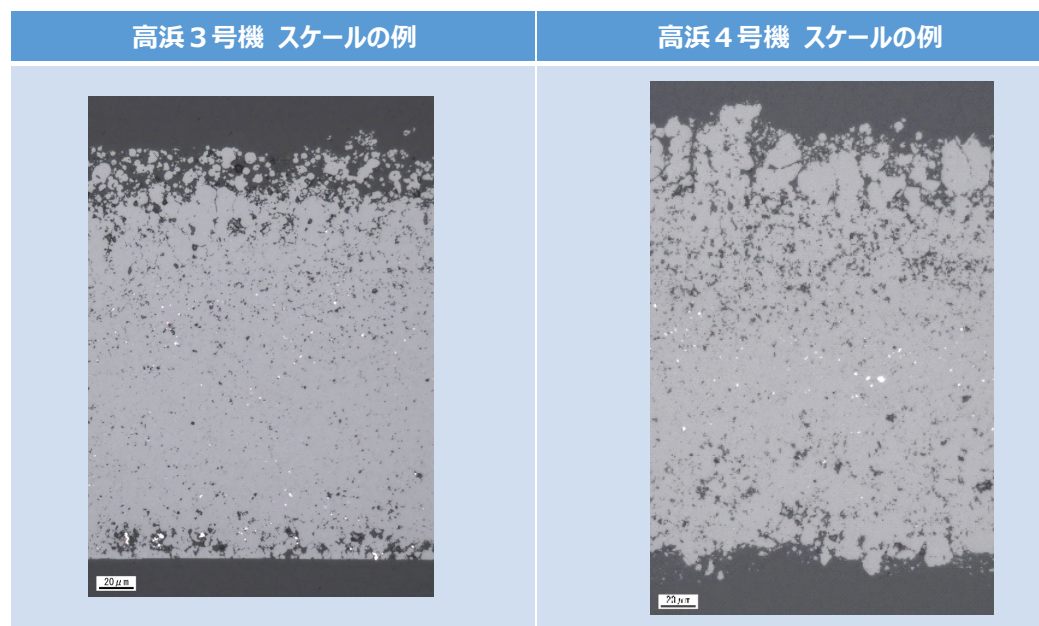
- ※：①給水ヘッダから給水を約20ccサンプリングし、それに酸を加えて加熱することで鉄イオン溶液にする。
 ②①の溶液を、質量分析器にかけ、鉄質量 (μg / リットル) を算出する。(標準試料と鉄イオン濃度との比較で、鉄質量を算出)
 ③鉄質量 (μg / リットル) に、給水流量 (5,210t/h) 、運転時間を乗じて、鉄持ち込み量 (鉄) を算出する。
 ④鉄持ち込み量 (鉄) に質量比 (1.382) を乗じて、鉄持ち込み量 (マグネタイト量) を算出する。

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)

○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： 2,490kg	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	SG取替プラントの中では最も鉄の 持込みが大きい高浜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。

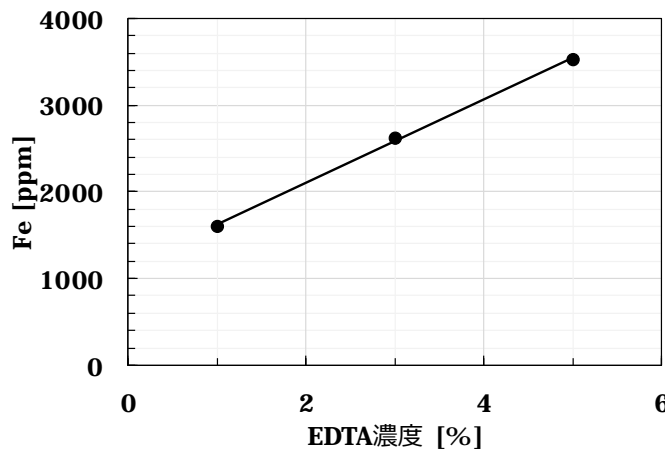
<洗浄試験>

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。

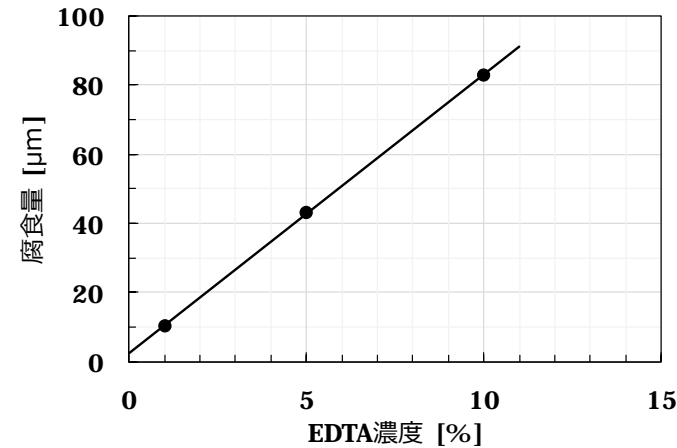
○浸漬試験条件の設定

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。

— 138 —

- ・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）

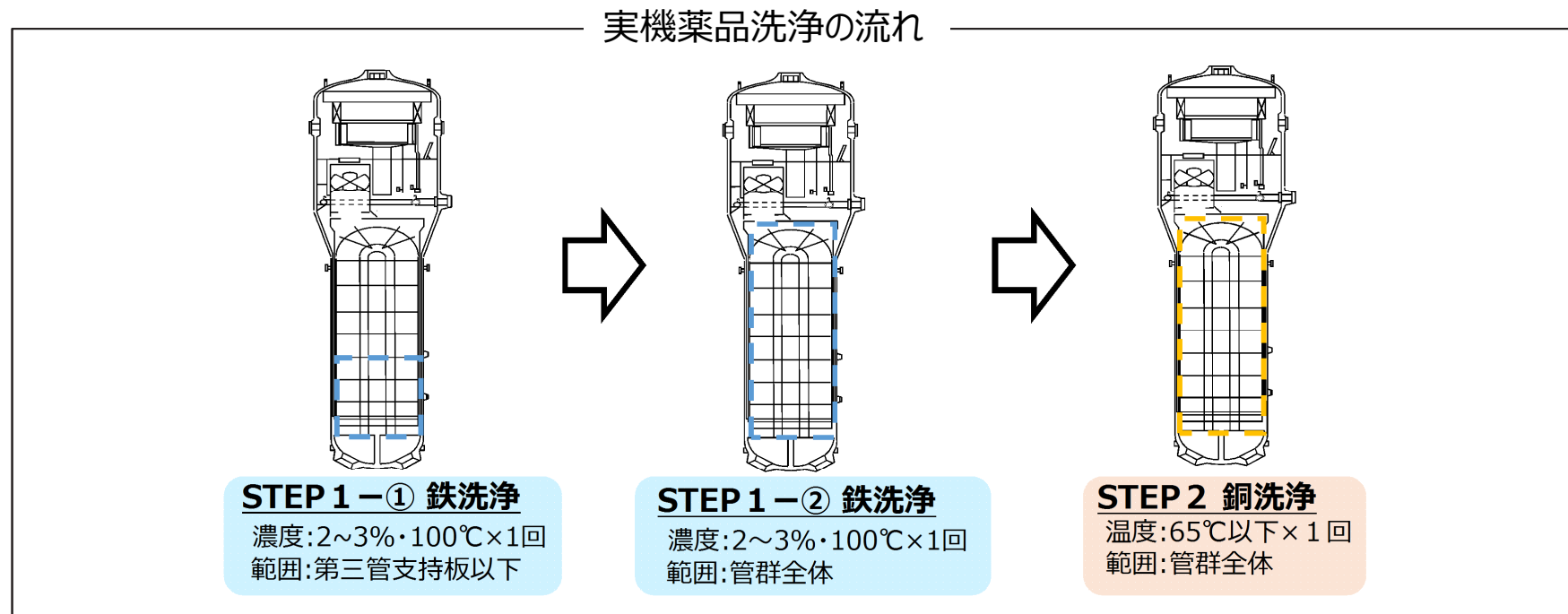
<実機洗浄方法>

○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。



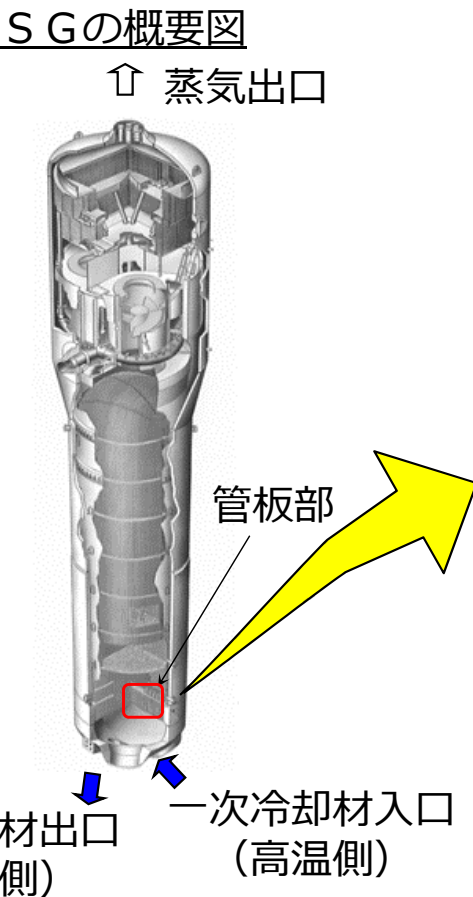
<実機によるスケール脆弱化効果の確認>

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。

SGの概要図



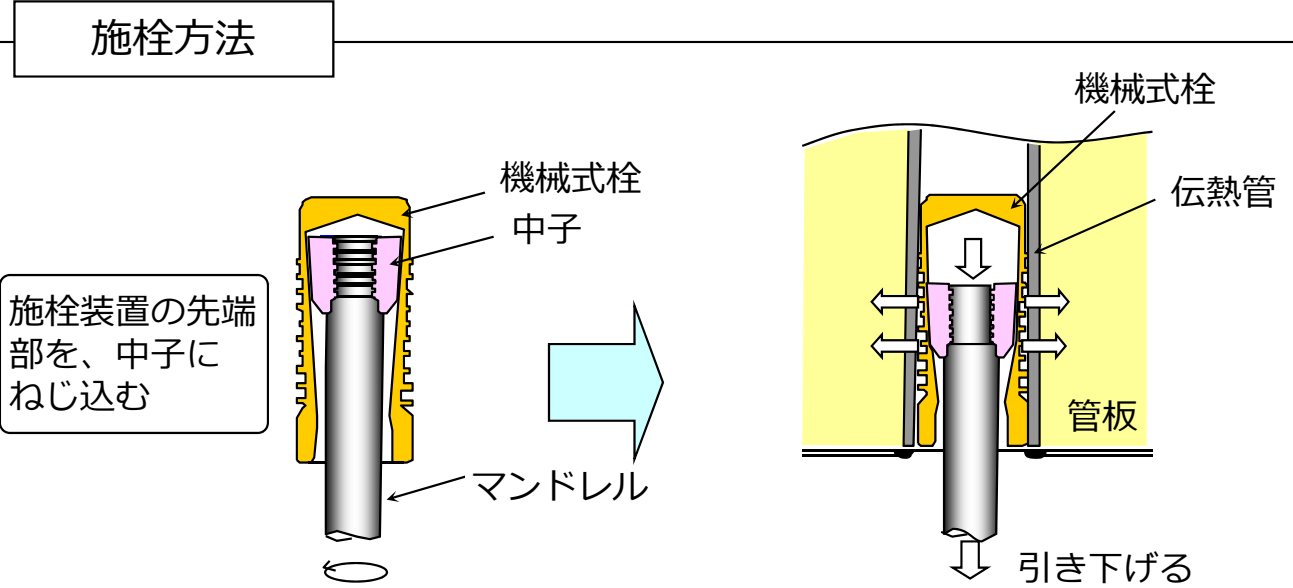
↑ 蒸気出口

管板部

一次冷却材出口
(低温側)

一次冷却材入口
(高温側)

施栓方法



機械式栓
中子
マンドレル

機械式栓
伝熱管
管板

引き下げる

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

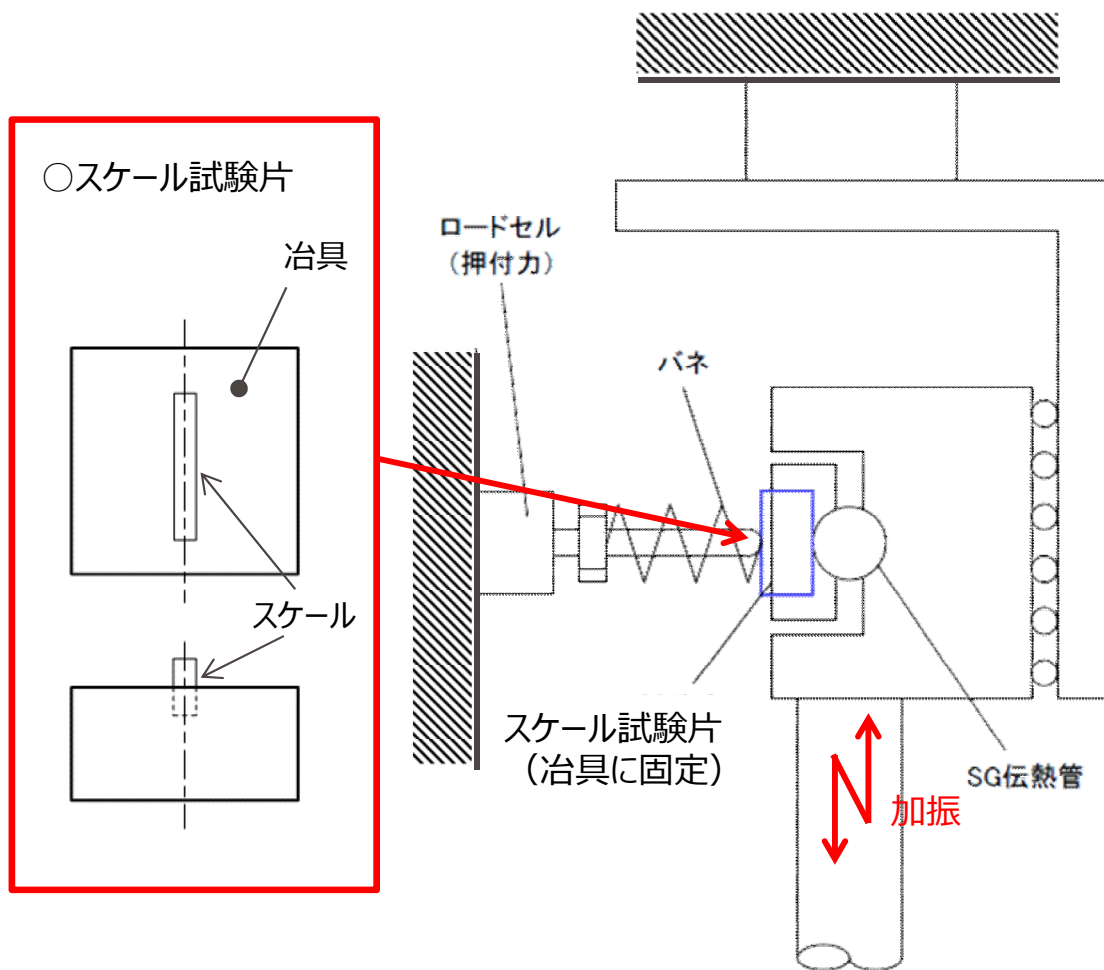
	A-SG (3,382本)	B-SG (3,382本)	C-SG (3,382本)	合計 (10,146本)
今回施栓本数	1	0	3	4
累積施栓本数 [施栓率]	139 [4.1%]	135 [4.0%]	129 [3.8%]	403 [4.0%]

○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。

- 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

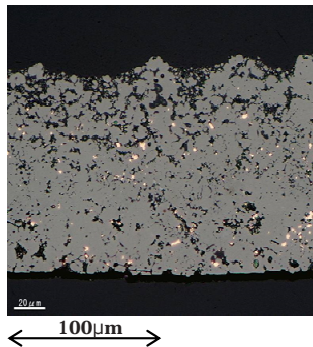
伝熱管摺動条件		備考
押付力	約 1 N	熱流動解析結果より設定
振動数	約 8 Hz	振動応答解析結果より設定
振幅	約 0.4 mm	B E C穴ランド部寸法より設定

加振装置概念図

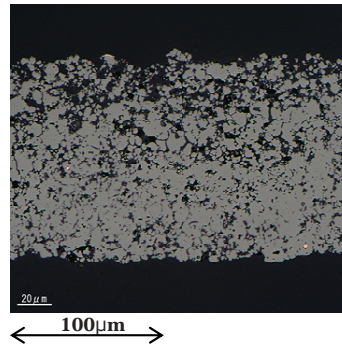
＜薬品洗浄前後スケール性状比較＞

○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 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]「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」

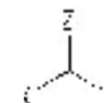
表 減肉を有する伝熱管の耐震性評価結果

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



<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

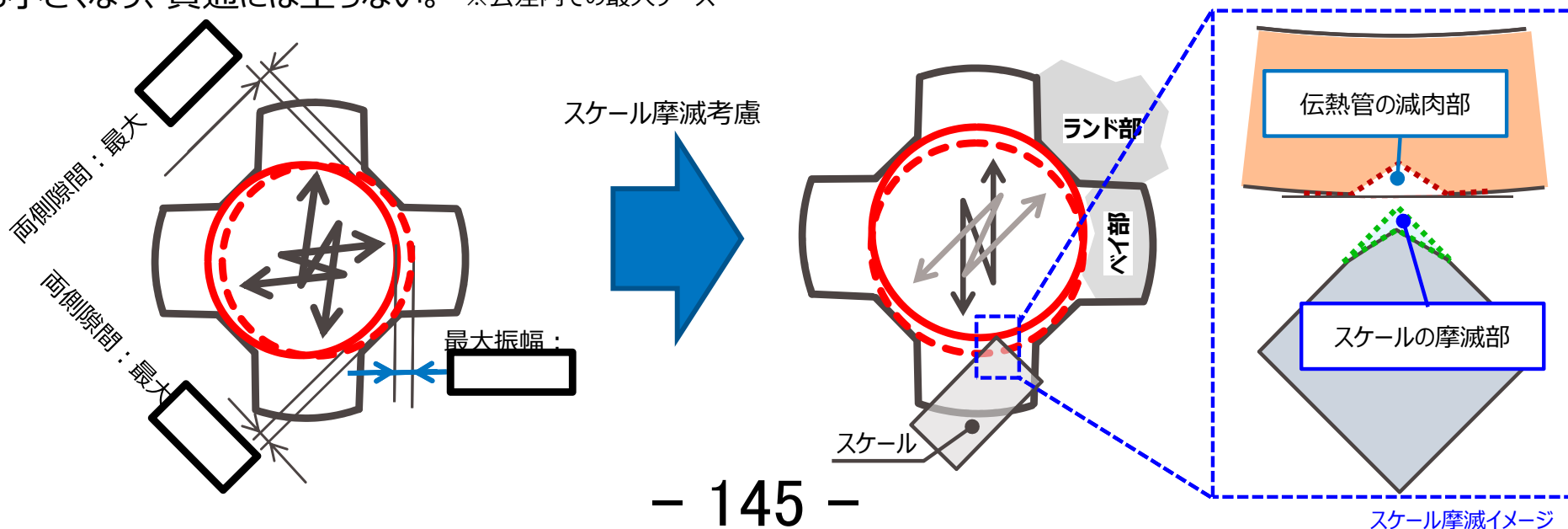
○ただし、同じ比摩擦量、同じワークレートで撓動し続けたとしても、最終的な摩擦減肉量は異物の場合より小さい。

- ・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



- 145 -

 : 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： $F e_3 O_4$ ）中の $F e^{3+}$ は $F e^{2+}$ 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 $F e^{2+}$ 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を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中で金属銅（C u）を $C u^{2+}$ として溶解する。
 - ② 溶出した $C u^{2+}$ 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	
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 ・重碳酸アンモニウム	pH調整 EDTA触媒
温度	80℃	—	65℃以下	—
pH	9	アンモニア調整 N ₂ バブリング	10	アンモニアで調整
洗浄雰囲気	還元性雰囲気	140	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られる。

○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。

