

# 高浜発電所 3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について (概要版)

2022年5月23日



: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

説明項目		ページ番号
1	事象の概要	3
2	原因調査	8
3	減肉メカニズム ・ <u>第四管支持板下面に到達するまでのスケール挙動</u> ・ <u>第二管支持板高温側下面に到達するまでのスケール挙動</u> ・ <u>S G器内スラッジの影響</u>	1 2
4	推定原因	2 0
5	対策 ・ <u>小型高圧洗浄装置による洗浄</u> ・ <u>薬品洗浄条件の変更</u>	2 2

下線：前回（高浜発電所4号機第23回定期検査）のスケールによる損傷事象からの追加事項

2022年3月1日からの高浜発電所 3号機第25回定期検査において、全3台の蒸気発生器（以下、S G）の伝熱管の健全性を確認するため渦流探傷試験（以下、E C T）を実施した。

その結果、A - S Gの伝熱管2本およびB - S Gの伝熱管1本について、有意な信号指示が認められたことから、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則第18条並びに第56条に適合しておらず、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条に該当することを、3月30日13時00分に判断した。

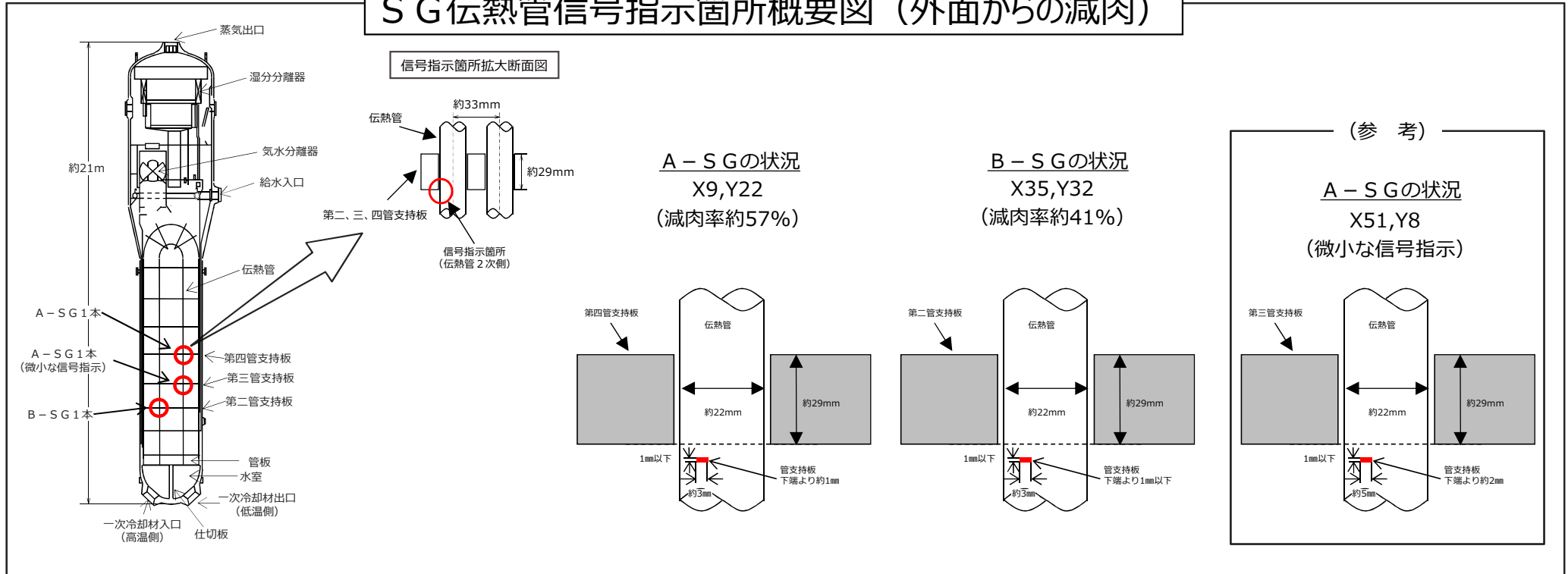
A - S Gの1本は、高温側の管板部に内面からの割れとみられる信号指示で、残りの1本とB - S Gの1本は、管支持板部付近に外面からの減肉とみられる信号指示であった。

また、A - S Gの伝熱管1本について、管支持板部付近に外面からの微小な信号指示（判定基準未満）が認められた。

なお、A - S Gの1本で認められた高温側管板部内面の信号指示については、S G製造時に高温側の管板部で伝熱管を拡管する際、伝熱管内面で局所的に引張り残留応力が発生し、これが運転時の内圧および高温の一次冷却材環境と相まって、伝熱管内面から応力腐食割れが発生・進展したものと推定している。

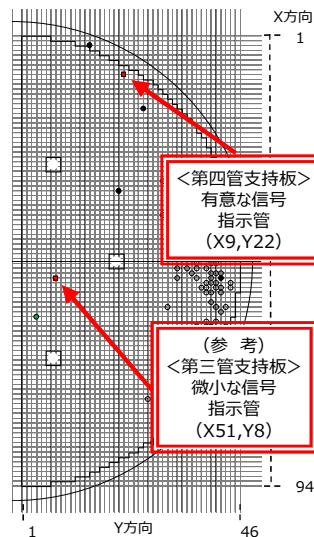
以降は、外面からの減肉事象について説明する。

## S G 伝熱管信号指示箇所概要図 (外面からの減肉)



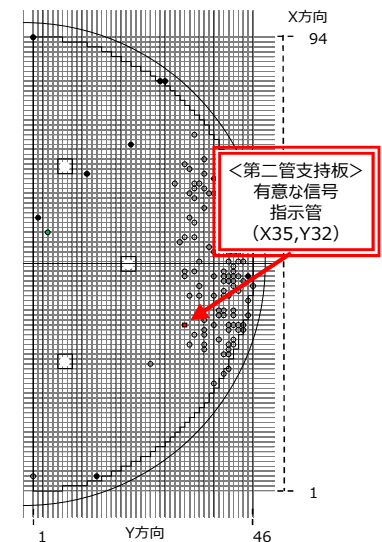
### A-SG (低温側)

- : 有意および微小な信号指示管 ( 2 本)
- : 既施栓箇所 (外面減肉) ( 1 本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) ( 7 本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) ( 1 0 2 本)



### B-SG (高温側)

- : 有意な信号指示管 ( 1 本)
- : 既施栓箇所 (外面減肉) ( 1 本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) ( 1 0 本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) ( 1 2 4 本)



# 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、摩耗痕とみられる箇所を確認した。なお、E C T の信号指示と相違はなかった。

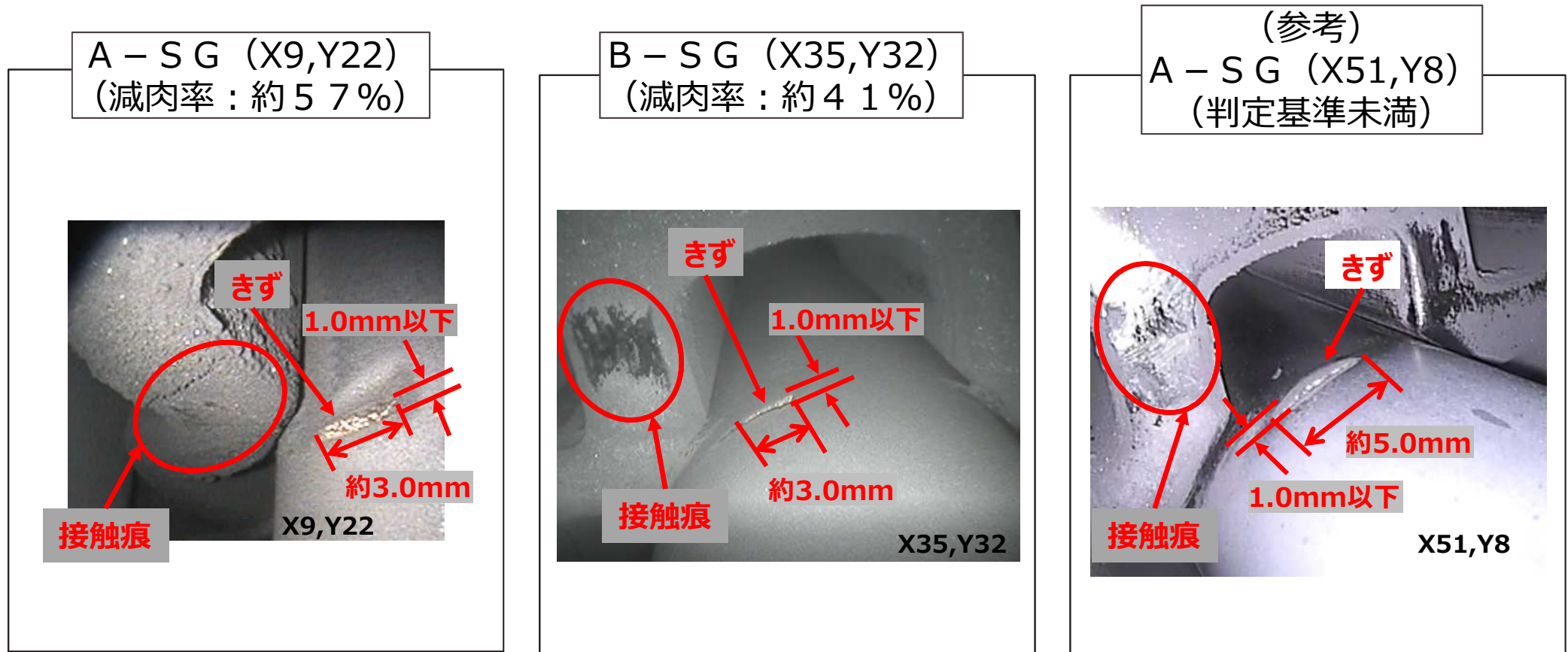
## ○ A - S G

第四管支持板：長さ 約3.0mm、幅 1.0mm以下 (X9,Y22) 減肉率：約 5 7 %


(参考) 第三管支持板：長さ 約5.0mm、幅 1.0mm以下 (X51,Y8) 減肉率：判定基準未滿

## ○ B - S G

第二管支持板：長さ 約3.0mm、幅 1.0mm以下 (X35,Y32) 減肉率：約 4 1 %



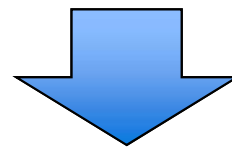
# 1. 事象の概要（これまでのSG外面減肉（1 / 2））

定期検査回次	外面減肉本数	調査結果概要	
高浜発電所 3号機 第23回定期検査 (2018年8月～)	A-SG : 1本 (最大減肉率 : 20%未満)	<ul style="list-style-type: none"> <li>減肉指示のあった箇所付近にスケールを確認</li> <li>スケールの回収を試みたものの破損</li> </ul> ⇒スケール以外の異物による減肉と推定	 <p>確認されたスケール</p>
高浜発電所 4号機 第22回定期検査 (2019年9月～)	A-SG : 1本 B-SG : 1本 C-SG : 3本 (最大減肉率 : 約63%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>きず近傍にスケールは確認されず</li> <li>A-SG器内に異物（ステンレス薄片）が確認されたものの、摩耗痕は確認されず</li> </ul> ⇒異物による減肉であり、異物は流出したものと推定	 <p>確認された異物（ステンレス薄片）</p>
高浜発電所 3号機 第24回定期検査 (2020年1月～)	B-SG : 1本 C-SG : 1本 (最大減肉率 : 約56%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>きず近傍にスケールは確認されず</li> <li>AおよびC-SG器内に異物（ガスケットフープ材）を確認</li> </ul> ⇒確認した異物のうちの1つが、1本のきずの原因の可能性があり、その他の異物は流出したものと推定	 <p>確認された異物（ガスケットフープ材）</p>
高浜発電所 4号機 第23回定期検査 (2020年10月～)	A-SG : 1本 C-SG : 3本 (最大減肉率 : 約36%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>減肉指示のあった1本の伝熱管(A-SG)の減肉箇所にスケールを確認</li> <li>その他3本の伝熱管についても、近傍の管支持板上で摩耗痕のあるスケールを回収</li> </ul> ⇒スケールによる減肉と推定	 <p>確認されたスケール 減肉箇所 (A-SG)</p> <p>確認されたスケール</p>

## これまでの外面減肉事例を踏まえた考察および対応













- 高浜発電所4号機の第23回定期検査において、S G器内のスケールの性状等の調査や回収スケールによる摩耗試験などを実施した結果、S G伝熱管表面から剥離した稠密なスケールが原因と推定。
- これらのことから、2018年8月以降、高浜発電所3号機および4号機の定期検査において発生したS G伝熱管の外面減肉の原因はスケールであった可能性が否定できないため、対策として、高浜発電所3号機第24回および4号機第23回定期検査において、S G器内の薬品洗浄を実施し、スケールが脆弱化していることを確認。

その後



定期検査回次	外面減肉本数	調査結果概要
高浜発電所3号機 第25回定期検査 (2022年3月～)	A - S G : 2本※ B - S G : 1本 (最大減肉率 : 約57%) ※ : A - S Gの2本のうち1本は微小な信号指示	小型カメラによる損傷箇所の調査に加え、改めてS G器内のスケールの形状や性状および伝熱管の外観観察等の調査を実施した結果、 <u>スケールによる減肉と推定</u> 。

A - S Gの第一～三管支持板、管板の上面およびB、C - S Gの第一～二管支持板、管板の上面ならびに減肉が認められた伝熱管近傍の管支持板の下面について目視点検を実施した。その結果、全体的にスケールおよびスラッジが残存していることを確認した。なお、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。

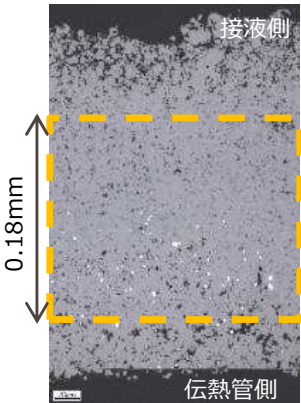
回収したスケールの外観	S G	第一管支持板上	第二管支持板上	管板上
	A 器内			
	B 器内			
	C 器内			

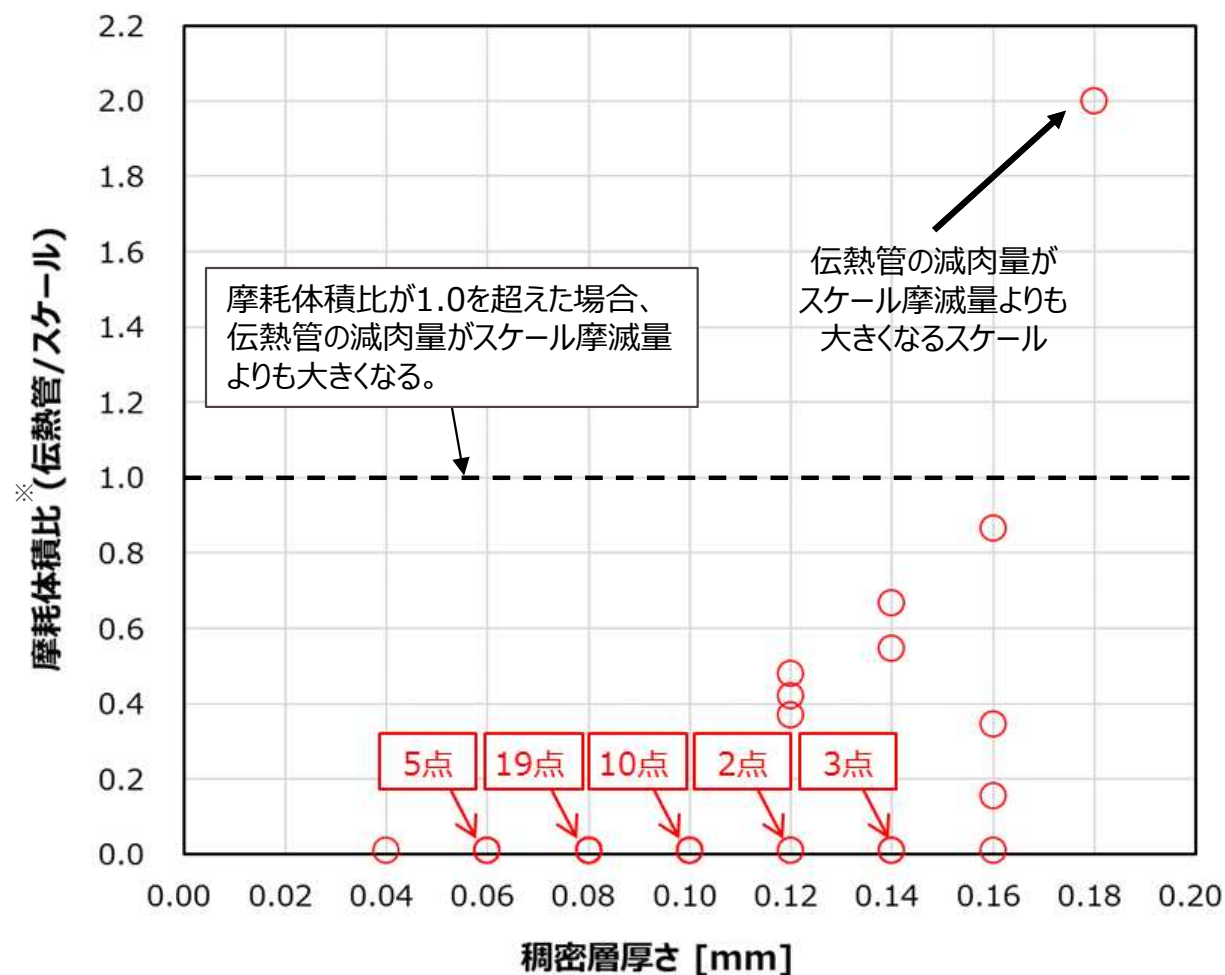


## 2. 原因調査（回収スケールの確認結果）

スケール 1 2 0 個を対象に断面観察を行った結果、稠密層（密度の高い酸化鉄の層）厚さが0.1mm以上のスケールを4 2個確認した。

比較的大きなスケール 5 0 個を対象に摩耗試験を行い、伝熱管とスケールの摩耗体積比を調査した結果、伝熱管の減肉量がスケール摩滅量よりも大きくなるスケールを1 個確認した。

スケール回収位置	A-SG 第一管支持板上 (高温側)
断面マイクロ画像	
スケール厚さ (mm)	約0.3
稠密層厚さ (mm)	0.18
摩耗体積比 (伝熱管 / スケール)	2.0



※：摩耗試験における伝熱管の減肉量とスケールの摩滅量の体積比

### ○ 稠密なスケールによるS G伝熱管減肉のメカニズム調査

薬品洗浄後においても、稠密なスケールがS G器内に残存し、伝熱管の外面減肉を発生させた可能性が高いことから、減肉を発生させるスケールの生成・剥離メカニズム、S G器内のスケールの挙動およびスケールが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

- 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、析出付着および蒸発残渣が発生することでS G伝熱管表面にスケールとして付着する。
- 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。
- 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ETA処理や高アンモニア処理によって給水のpH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kg / S G程度に抑えられていることを確認した。

#### ● スケールの剥離メカニズム

- 伝熱管表面に生成したスケールが主に剥離するのは、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。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。また、前回（24回）定検の薬品洗浄の影響によって、スケールが剥がれやすい状態になり、プラント起動時および運転中にスケールが剥離している可能性も否定できない。
- 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される。

- S G 器内挙動の推定 ⇨ 12 ~ 15
  - 伝熱管から剥離し、管板や管支持板上に落下したスケールは、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、各管支持板フロースロット部、および管支持板と管群外筒の隙間を通過し、減肉箇所へ到達したことが考えられる。
- 前回（第 2 4 回）定期検査における薬品洗浄の実施結果 ⇨ 16
  - 洗浄中の S G 器内水の鉄濃度と洗浄水位から算出した鉄除去量は約 6 7 0 k g であることを確認できたことから鉄洗浄結果は良好であり、鉄溶解効果は十分得られていると考えられる。
- スケールが伝熱管を損傷させる可能性の調査 ⇨ 17 ~ 19
  - 高浜発電所 3 号機前回（第 2 4 回）定期検査における薬品洗浄により鉄分が一定量除去されていることから器内のスケールはおおむね脆弱化していたが、器内にスケールとスラッジが混在していたことから一部のスケールへの反応が弱まり、脆弱化できなかったスケールが存在していたものと推定される。
  - 薬品洗浄後にスケールのサンプル調査を実施し、脆弱化していたことを確認していたが、今回のサンプル調査では有意な減肉を発生させる可能性は低いものの稠密層が厚いスケールが比較的多く見つかった要因としては、前回の薬品洗浄により脆弱化されたスケールの多くはスラッジになったものと推定される。
  - 発生した減肉は伝熱管振動によるものと推定される。
  - 今回の外面減肉は、スケールとの接触により 1 サイクルで発生した可能性があることを確認した。

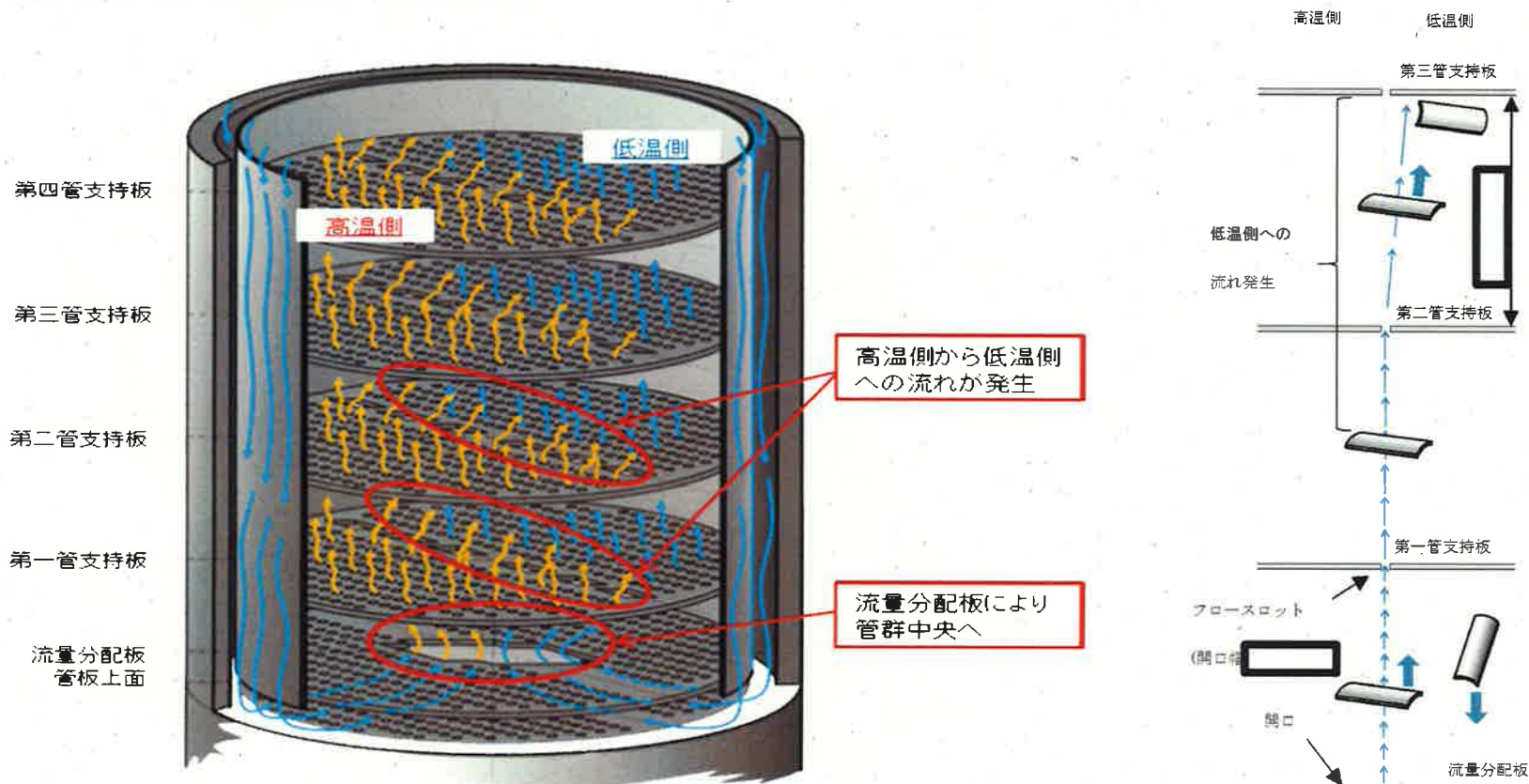
### 3. 減肉メカニズム（スケールの管支持板への到達メカニズム（1/4））

運転中のSG 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、スケールは管群内の上昇流に乗って流量分配板、各管支持板フロー SLOT部、および管支持板と管群外筒の隙間を通過し、減肉箇所へ到達したことが考えられる。

#### ○第三管支持板下面（低温側）に到達するまでのスケール挙動の推定

第一管支持板より上方では、管群の高温側と低温側の圧力損失差から、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 SLOT部を通過したものが第三管支持板の低温側下面に至ったものと推定される。

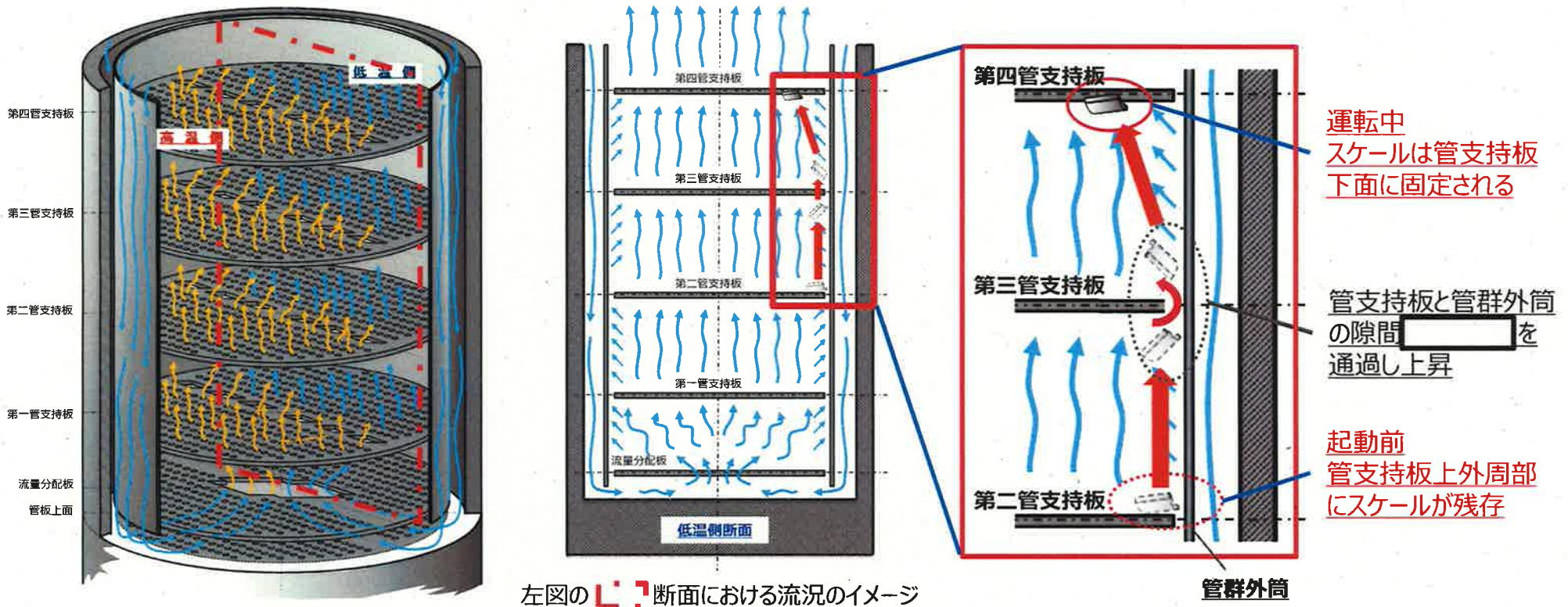
なお、第一管支持板上部または第二管支持板上部で発生したスケールを想定した場合においても、発生したアドレスによっては、同様に管群内の上昇流および高温側から低温側への水平方向流に乗り、フロー SLOT部を通過し、第三管支持板の低温側下面に至る可能性はあると考えられる。



□ : 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。

○第四管支持板下面に到達するまでのスケール挙動の推定（1 / 2）

第二管支持板以下の外周部近傍に残存していたスケールが、鉛直上方に上昇し、**第三管支持板と管群外筒の間隙**（幅：）を通過した後、第四管支持板下面近傍で発生している**管群外筒側から管群内へ向かう流れ**によって、**管群内部の当該部の第四管支持板下面に到達**したと考えられる。



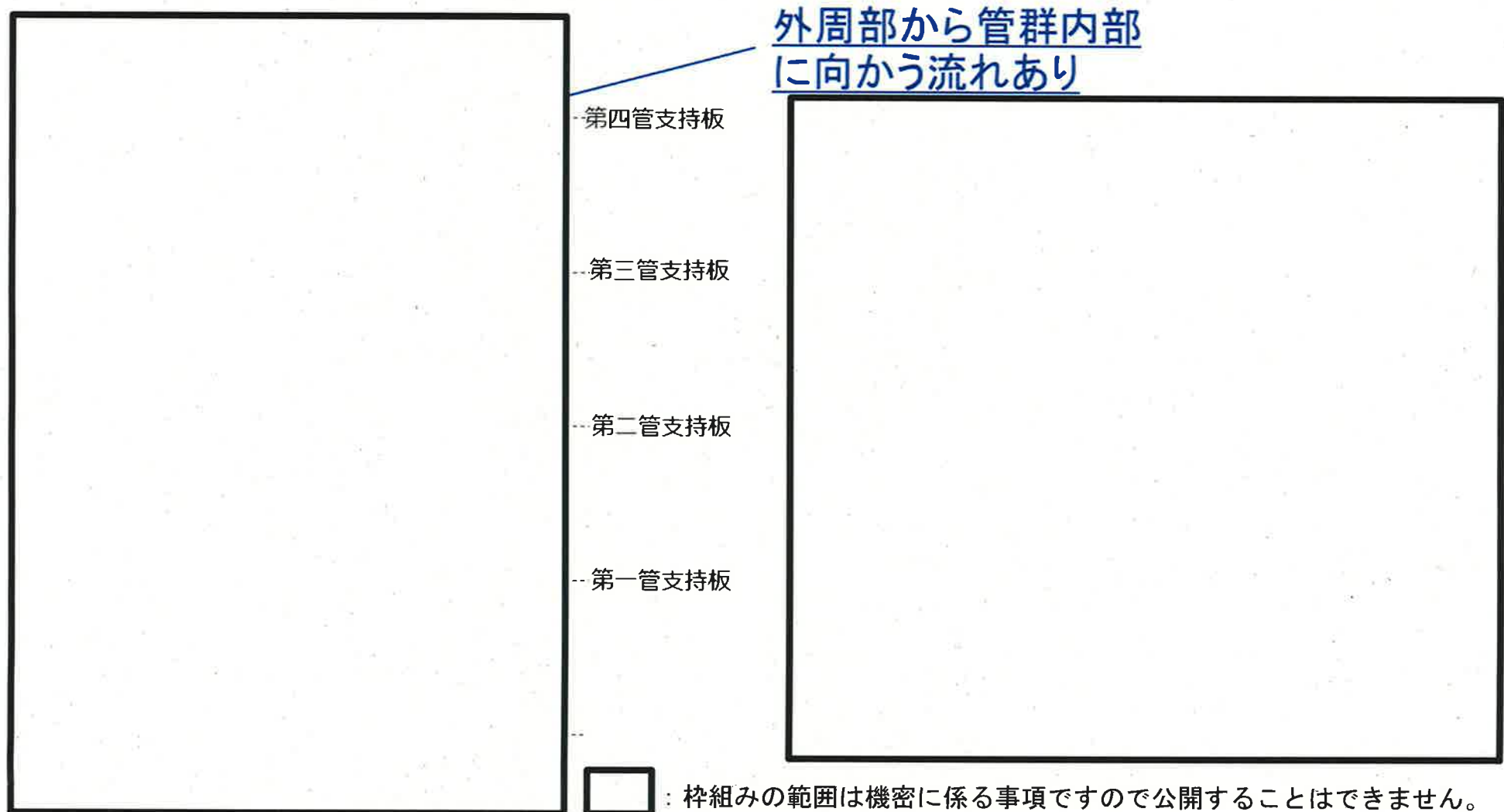
: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

### 3. 減肉メカニズム（スケールの管支持板への到達メカニズム（3 / 4））

14

○第四管支持板下面に到達するまでのスケール挙動の推定（2 / 2）

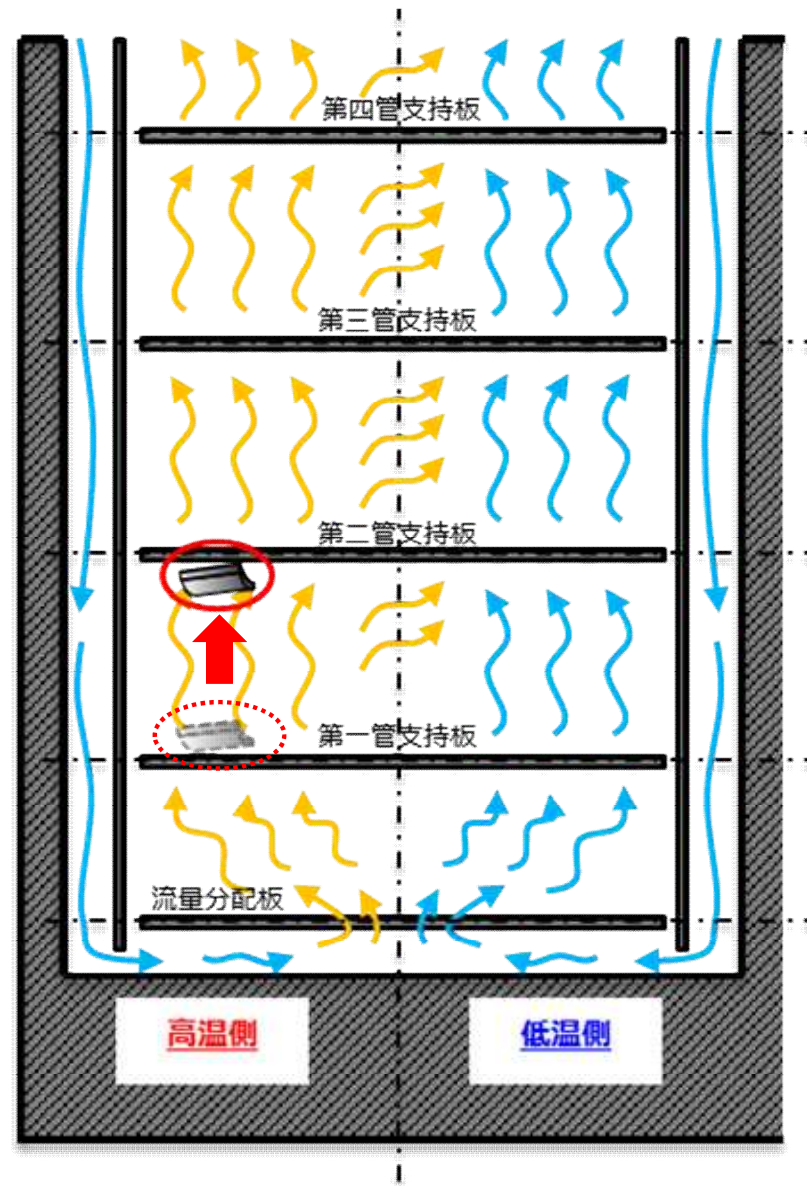
下図に示すように第三管支持板上では、外周部から管群内部に向かう流れがあることを流動解析によって確認していることから、上昇流に乗ったスケールが第三管支持板側面と管群外筒を通過した後、管群内を上昇しながら内側に向かう水平流れの影響を受けて当該部へ到達したと考えられる。



### 3. 減肉メカニズム（スケールの管支持板への到達メカニズム（4 / 4））

○第二管支持板高温側下面に到達するまでのスケール挙動の推定

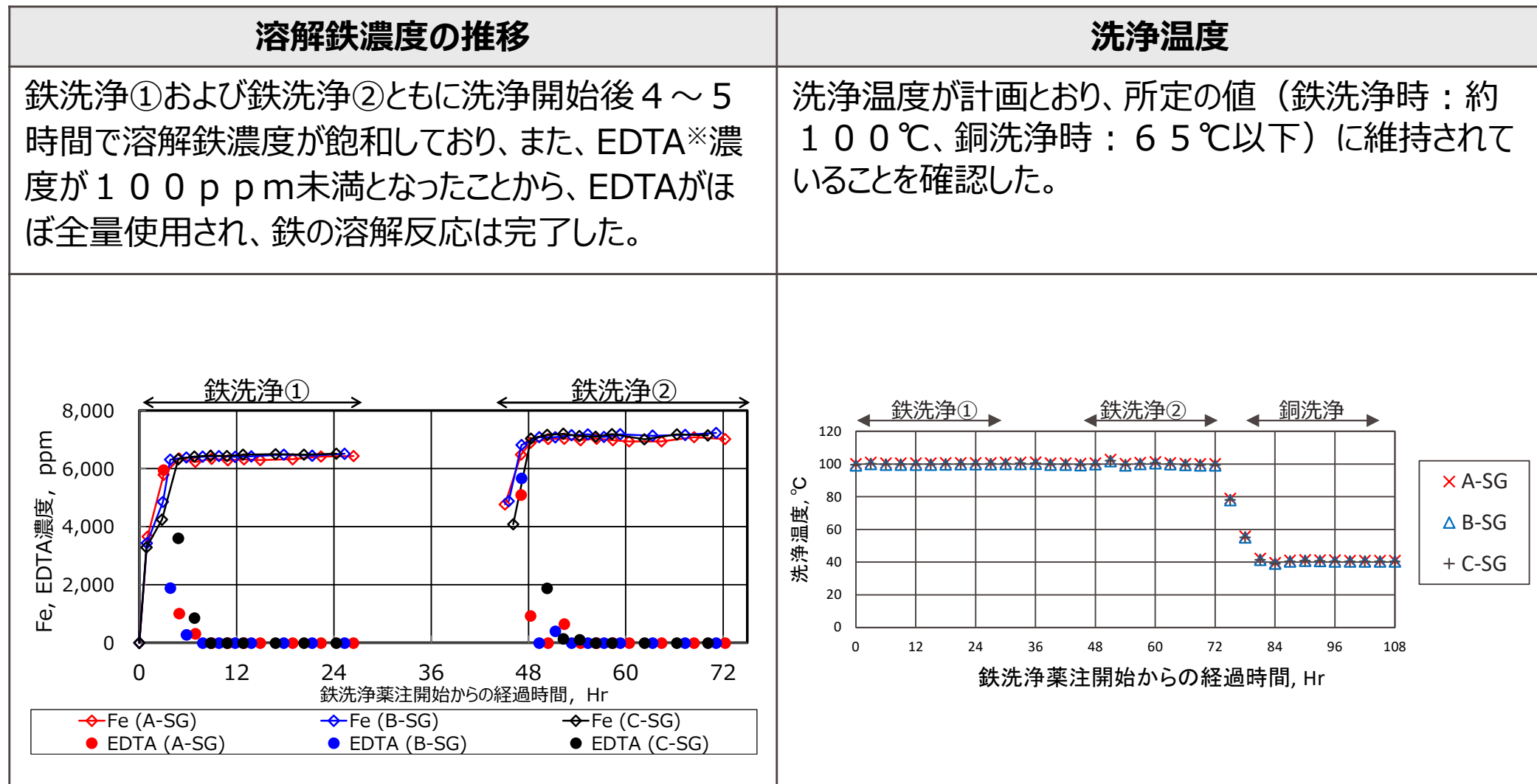
当該部直下近傍の第一管支持板上面に残存していたスケールが運転中の上昇流に乗って当該部の管支持板下面に到達したと考えられる。



#### <薬品洗浄の実施結果>

○以下の水質挙動から、薬品洗浄が適切に実施できていることを確認した。

○洗浄中のSG器内水の鉄濃度と洗浄水位から算出した鉄除去量は、約670kg（鉄洗浄①で約190kg、鉄洗浄②で約480kg）であることを確認した。



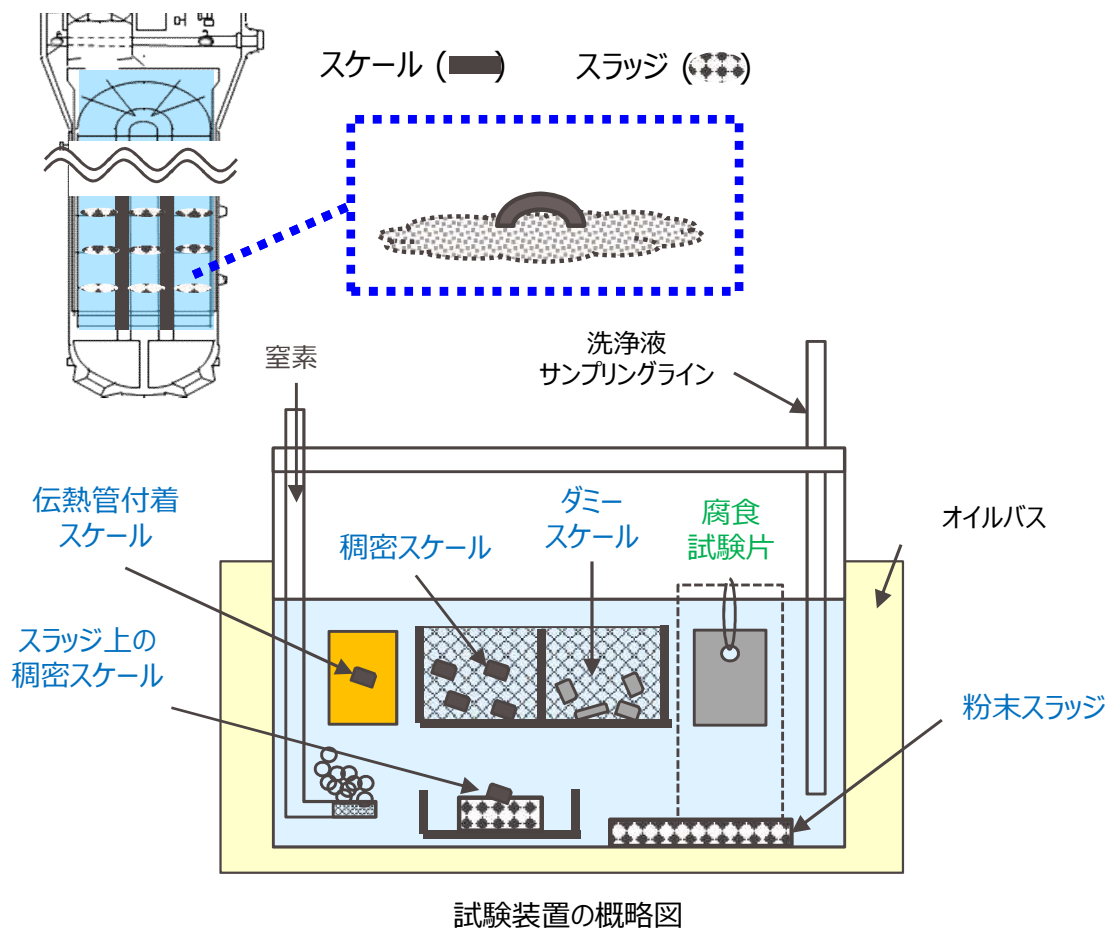
※：エチレンジアミン四酢酸



- 前回のラボ試験では、スケールのみでS G器内スラッジを模擬しており、実機に存在する反応面積が大きい粉末状のスラッジを実際に共存させた試験は実施していなかった。
- S G器内スラッジ量は、S G器内全体の鉄量に比べ、大きな割合を占めるものではないが、表面積が大きいスラッジが共存することにより、スケールの脆弱化効果を低減する可能性が考えられる。
- そこで、スラッジ共存環境下における洗浄効果に対する影響を確認するため、前回の薬品洗浄条件（EDTA3%+2%）でスラッジを共存させた試験を実施した。

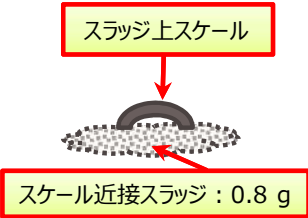
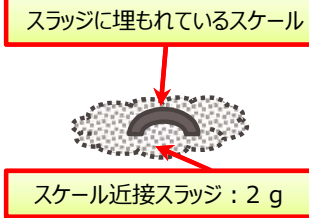
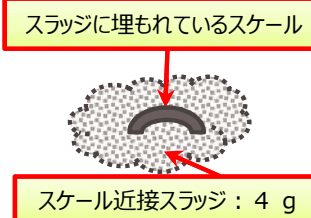


スケール回収画像（C-SG 第一管支持板）  
（高浜発電所4号前回（第23回）定期検査の薬品洗浄前）


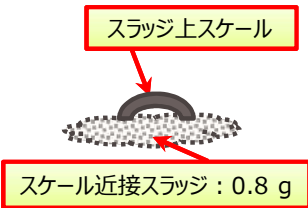
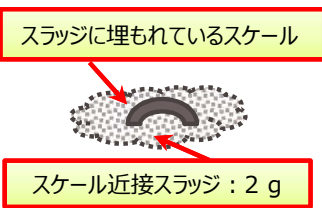
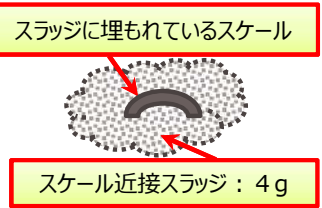
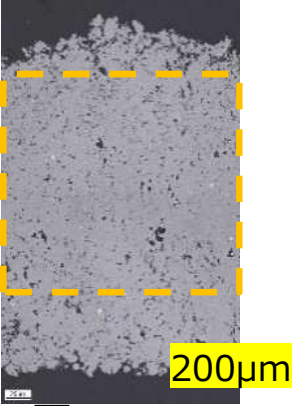
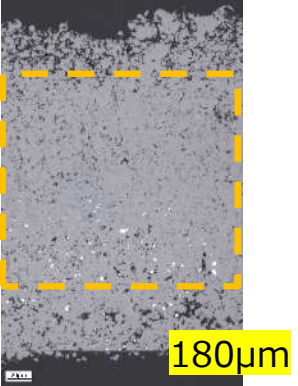
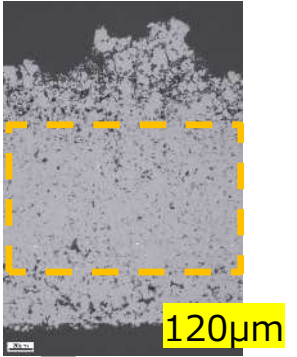
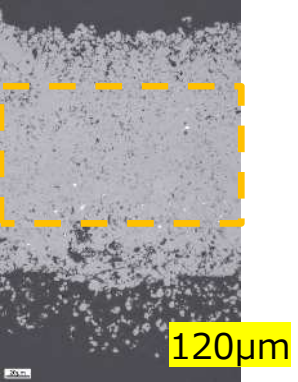
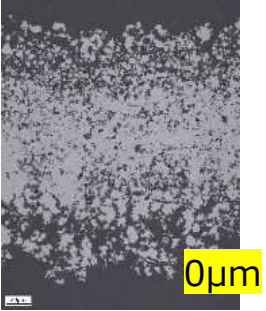
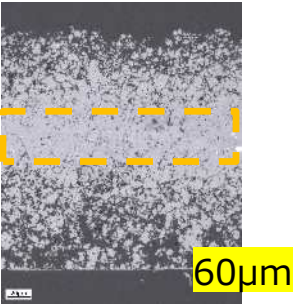
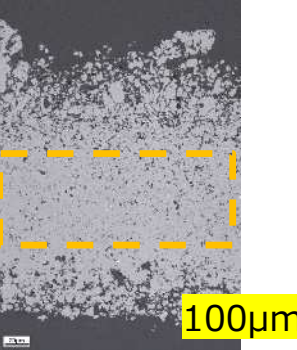
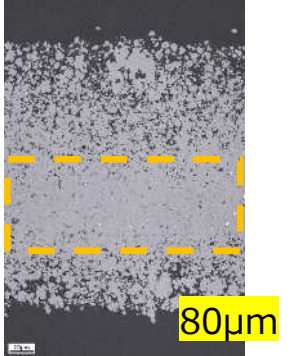


項目	目的
伝熱管付着スケール	伝熱管に付着したスケールを模擬した、スケールの片側からの洗浄効果を確認するための試験片
稠密スケール	洗浄前後のスケール減量や稠密層の変化を評価するための試験片
ダミースケール	試験容器内の洗浄液/スケール量を調整するためのスケール
スラッジ上の稠密スケール	スラッジ上に落下したスケールに対する洗浄効果を確認するための試験片
粉末スラッジ	試験容器内の洗浄液/スラッジ量を調整するためのスラッジ
腐食試験片	実機の構成材料の腐食量を評価する試験片。接液面積比は実機を模擬。

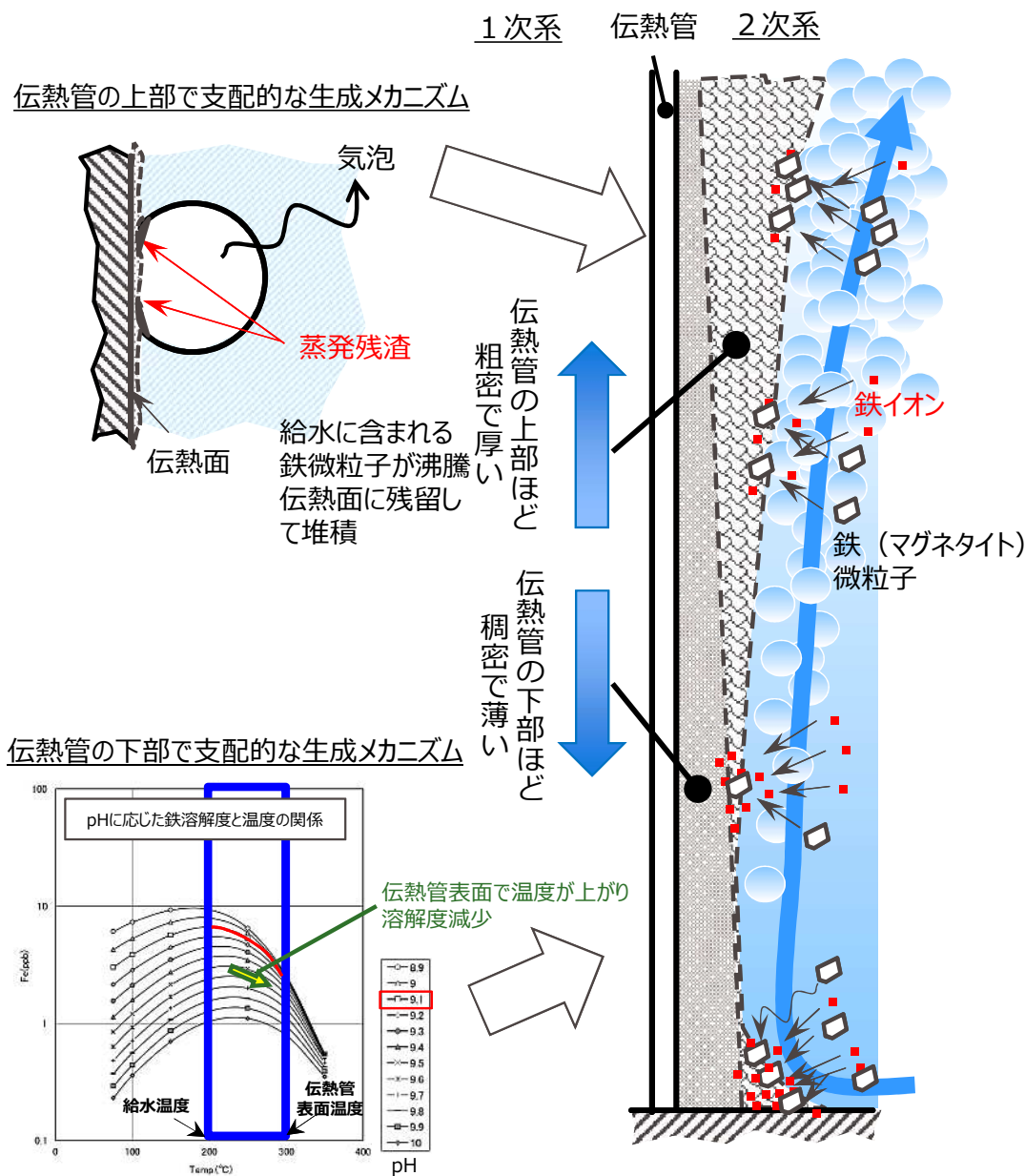
- スラッジ上スケールに対する脆弱化効果の低下傾向を確認（試験①）
- 実機環境は、共存するスラッジ量やスケール上へのスラッジ堆積状況が多種多様であり、洗浄効果が異なることが想定されるため、スラッジ量およびスラッジ環境を変更した影響確認試験を実施（試験②、③）

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

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

	過去試験結果（T4#23）	試験①	試験②	試験③
スラッジの添加状況	 <p>スケールのみ</p>	 <p>スラッジ上スケール</p> <p>スケール近接スラッジ：0.8 g</p>	 <p>スラッジに埋もれているスケール</p> <p>スケール近接スラッジ：2 g</p>	 <p>スラッジに埋もれているスケール</p> <p>スケール近接スラッジ：4 g</p>
洗淨前 稠密層厚さ	 <p>200μm</p>	 <p>180μm</p>	 <p>120μm</p>	 <p>120μm</p>
洗淨後	 <p>0μm</p>	 <p>60μm</p>	 <p>100μm</p>	 <p>80μm</p>

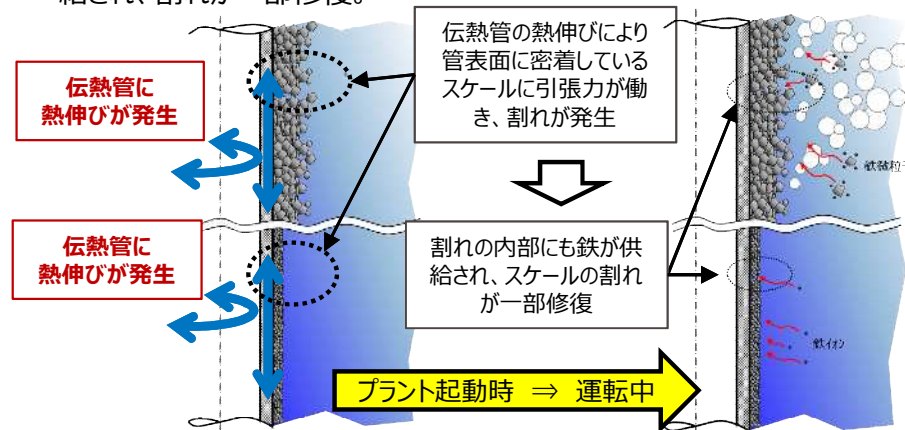
① プラント運転中に給水とともに持ち込まれる鉄イオンおよび鉄微粒子が、析出付着、蒸発残渣として伝熱管表面にスケールが生成される。



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。

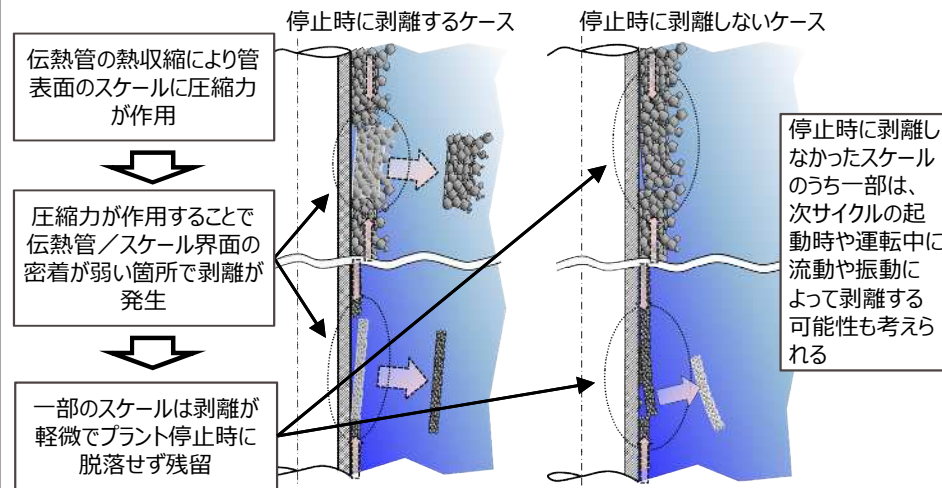
【プラント起動からプラント運転中】

- 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。



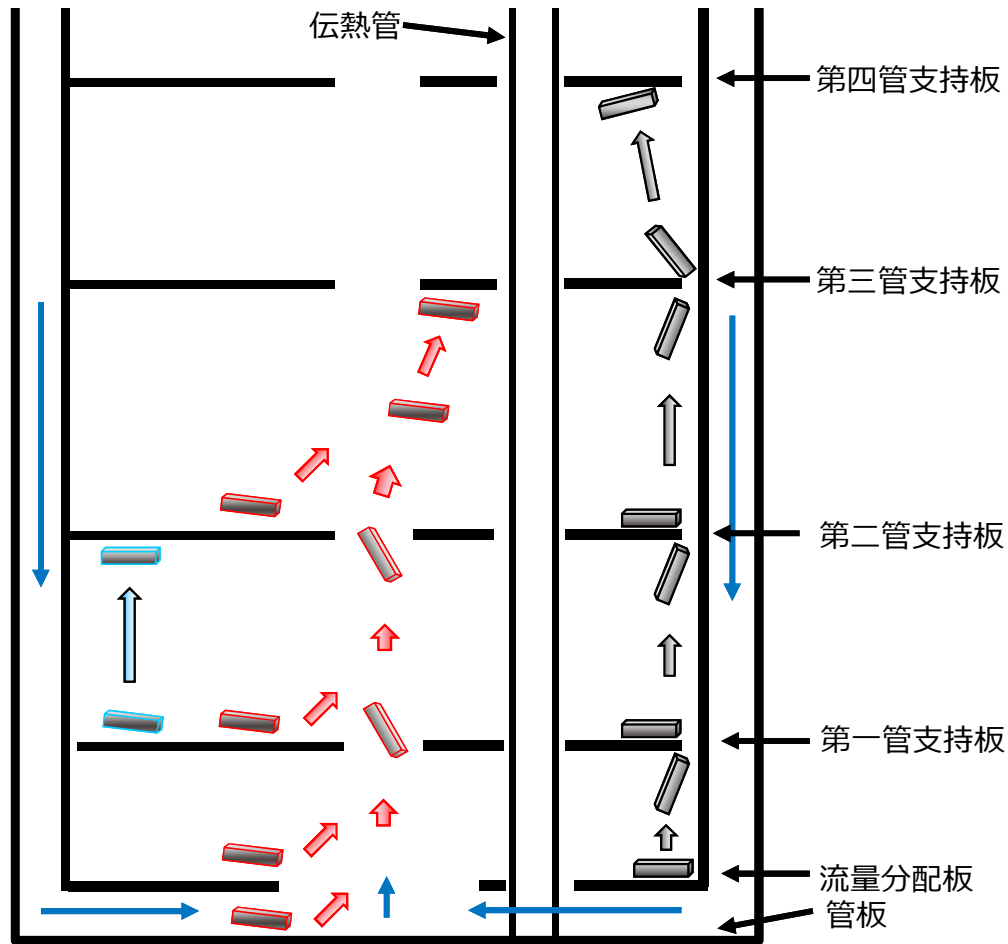
【プラント停止時】

- 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。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。



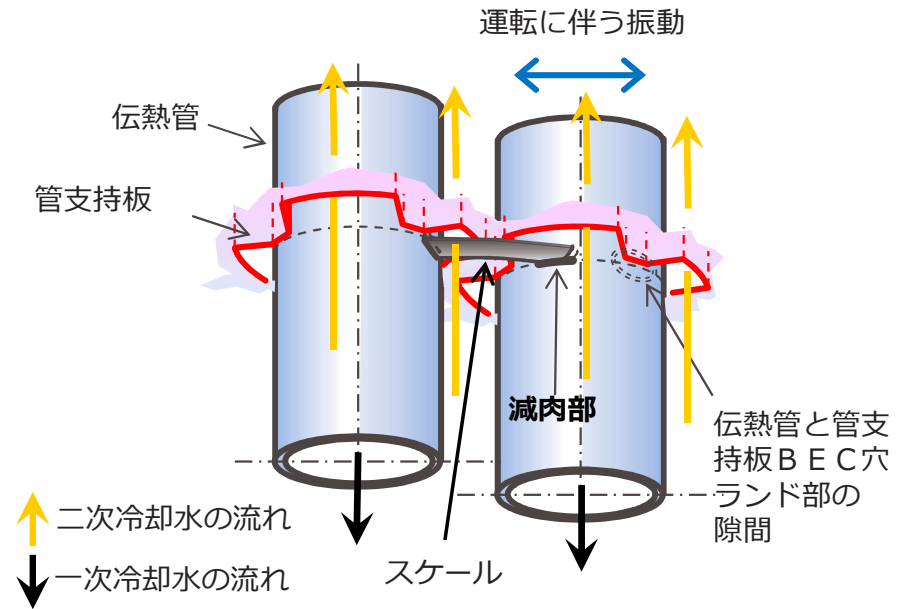
※：前回（24回）定検の薬品洗浄の影響によって、スケールが剥がれやすい状態になり、プラント起動時および運転中にスケールが剥離している可能性も否定できない。

③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各減肉箇所へ達し、伝熱管と接触した。



: スケール      ← : スケールの流れ      ← : 水の流れ  
 : スケール      ← : スケールの流れ      ← : 水の流れ  
 : スケール      ← : スケールの流れ      ← : 水の流れ

④剥離したスケールのうち、稠密な性状をもつスケールに、伝熱管が接触し、運転中に生じる伝熱管の振動によって、伝熱管外表面が摩耗し、伝熱管外面にきずがついた。

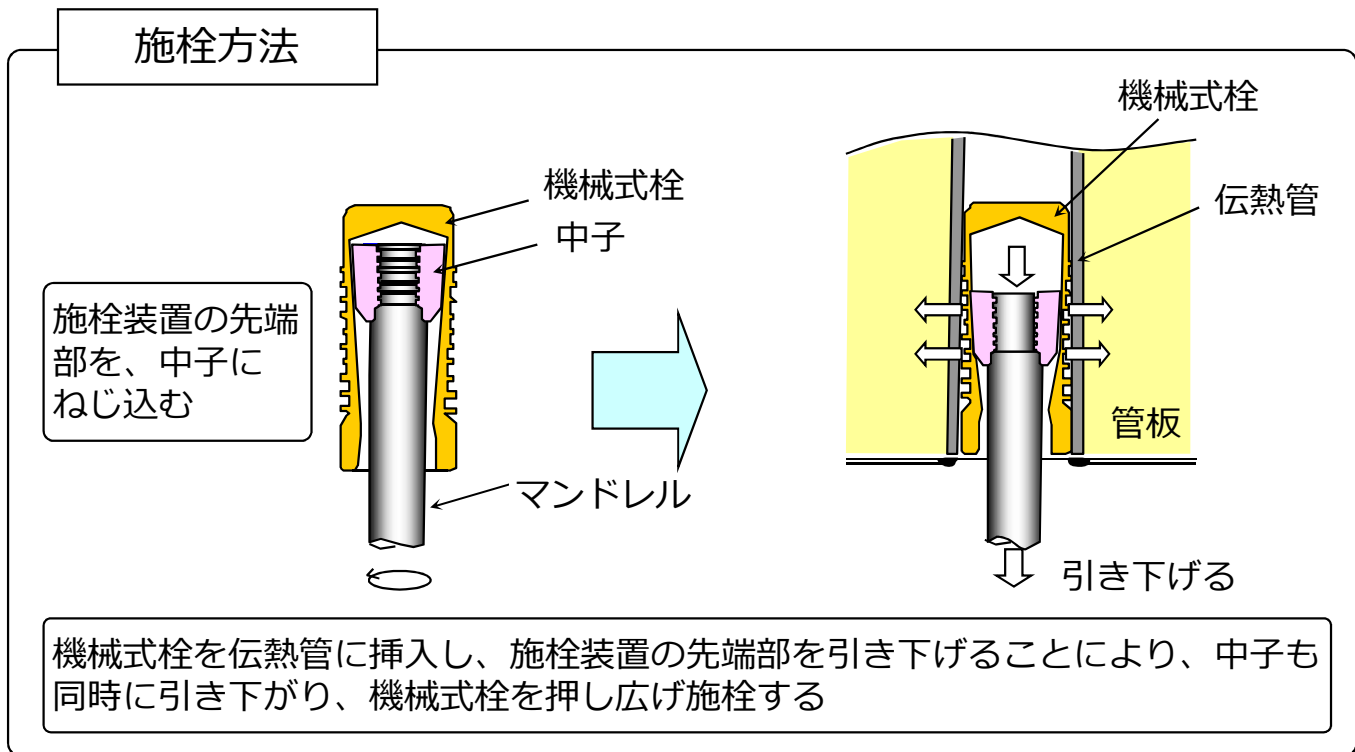
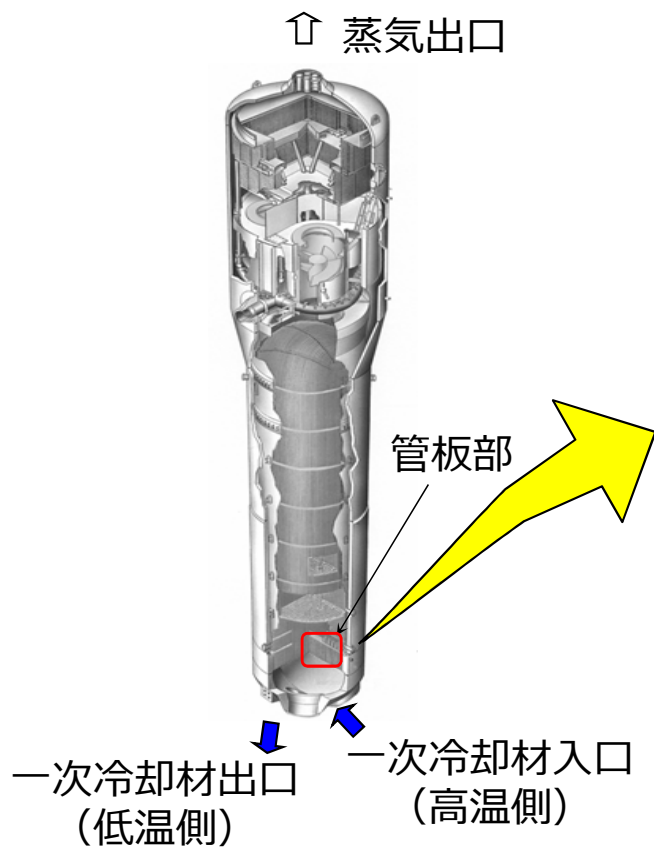


減肉メカニズム概要

## ○伝熱管の施栓

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



	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	3	1	0	4
累積施栓本数 [施栓率]	113 [3.4%]	136 [4.1%]	121 [3.6%]	370 [3.7%]

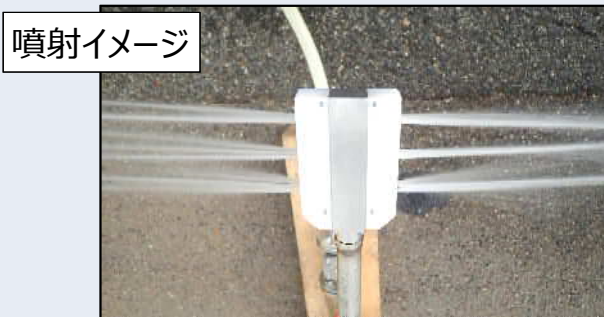
## ＜小型高圧洗浄装置による洗浄＞

S G器内に残存するスケールおよびスラッジを可能な限り除去するため、小型高圧洗浄装置を用いて管支持板上も含めたS G器内の洗浄を実施する。

第七管支持板～第三管支持板の洗浄方法は次のとおり。

### ① 水平ノズル（樹脂ヘッド）による第七管支持板の洗浄

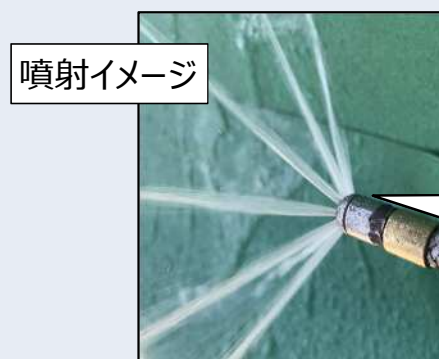
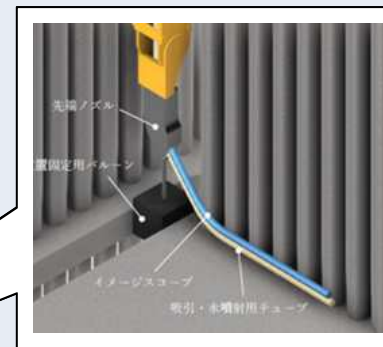
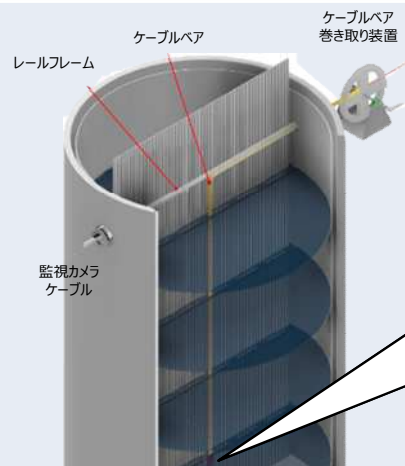
第七管支持板上ハンドホールより第七管支持板に装置を挿入し、フローロット上を走査させながら洗浄水を噴射することで、支持板上のスケールおよびスラッジを押し流し下層の支持板に落下させる。



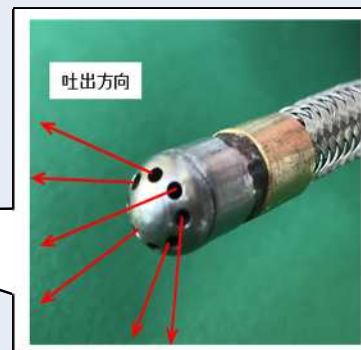
噴射イメージ

### ② 管支持板上走査ノズルによる第六～第三管支持板の洗浄

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

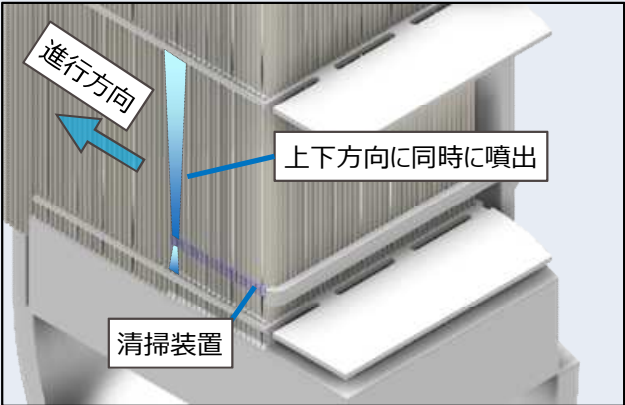





噴射イメージ



吐出方向

第二管支持板および第一管支持板の洗浄方法は次のとおり。

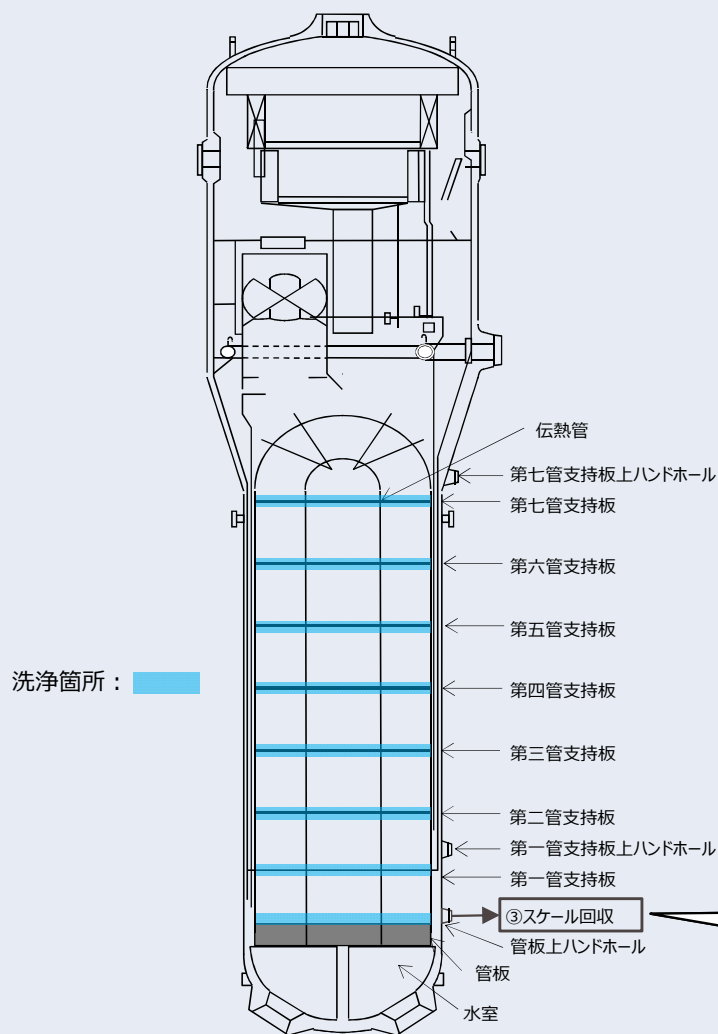
<p>③垂直ノズルによる 第二および第一管支持板の洗浄</p>	<p>④水平ノズル（楕円ヘッド） による第二管支持板の洗浄</p>	<p>⑤水平ノズル（樹脂 ヘッド）による 第一管支持板の洗浄</p>
<p>第一管支持板上ハンドホールより第二管支持板と第一管支持板の間に装置を挿入し、支持板間を走査させながら上下方向に洗浄水を噴射することで、両支持板の伝熱管と支持板の隙間を清掃し、スケールおよびスラッジを支持板および管板上に移動させる。</p>	<p>第一管支持板上ハンドホールより第二管支持板フロー SLOT に装置を挿入し、フロー SLOT を移動させながら洗浄水を噴射することで、支持板上のスケールおよびスラッジを押し流し下層の支持板に落下させる。</p>	
 <p>進行方向</p> <p>上下方向に同時に噴出</p> <p>清掃装置</p> <p>噴射イメージ</p> 	 <p>噴射イメージ</p> 	<p>第一管支持板上ハンドホールより第一管支持板に装置（①と同様）を挿入し、フロー SLOT 上を移動させながら洗浄水を噴射することで支持板上のスケールおよびスラッジを押し流し、管板に落下させる。</p>



管板まで到達したスケールおよびスラッジの洗浄方法は次のとおり。

## ⑥ランシング装置による管板の洗浄とスケールおよびスラッジの回収

ランシング装置を用いた管板の洗浄（従来より定期検査毎に実施）を行うとともに、上層の各支持板から落下させたスケールおよびスラッジを回収する。



①～⑤によりスケールおよびスラッジは第七管支持板から順に落とし、最終的には管板まで落下させる。

ランシング装置を用いた管板の洗浄を行うとともに、上層の各支持板から落下させたスケールおよびスラッジを回収する。

## <薬品洗浄>

S G器内に薬液を注入し、伝熱管全域を薬品に浸した状態で2回洗浄を行い、伝熱管に付着している稠密なスケールを脆弱化させる。その後、S Gブローダウン系統および仮設系統を経由して排水し、S G器内のリンスを行う。

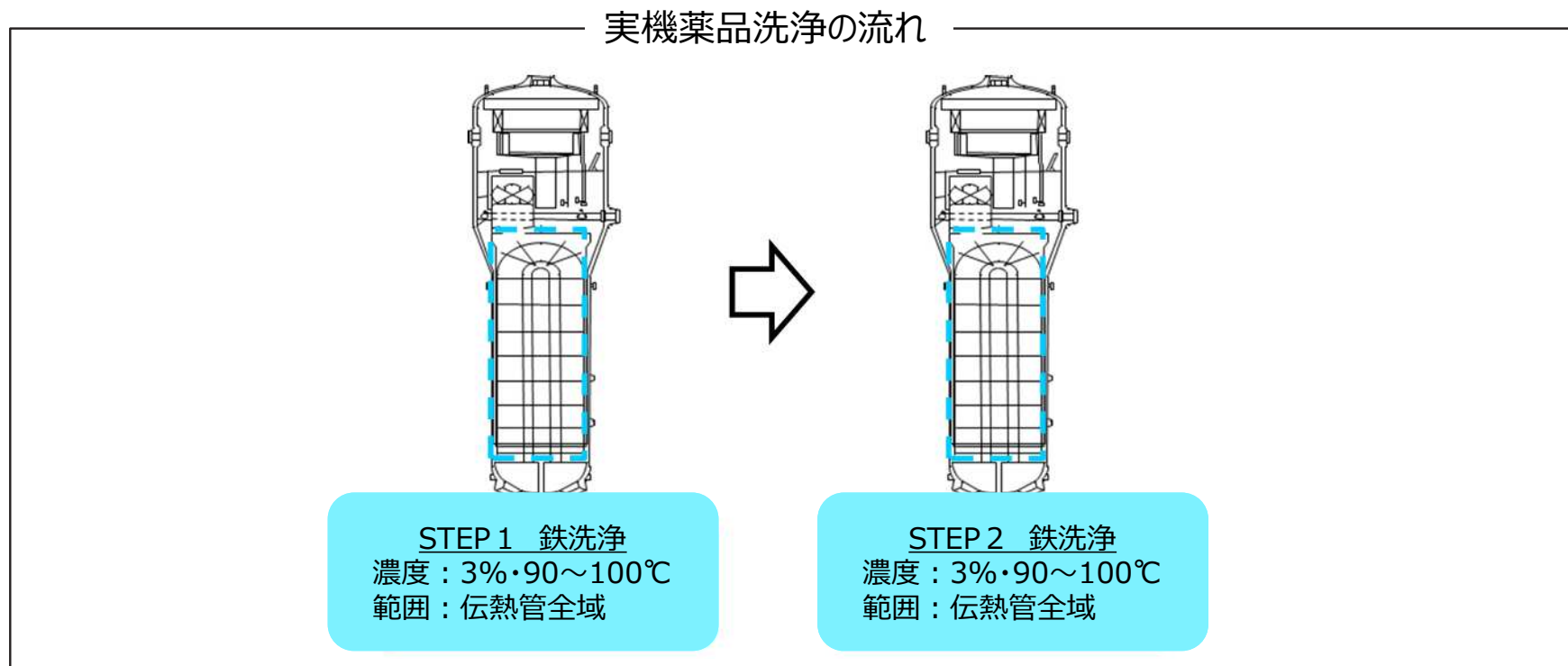
### ○洗浄条件※

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3%、洗浄温度は90～100℃とする。

※：前回（第24回）定期検査では薬品濃度3%を1回、2%を1回の条件で実施したが、今回は薬品濃度3%を2回実施することで効果を向上させる。また、洗浄範囲についても1回目は下部から第三管支持板までを、2回目は伝熱管全域を対象としたが、今回は2回ともに伝熱管全域を対象とする。

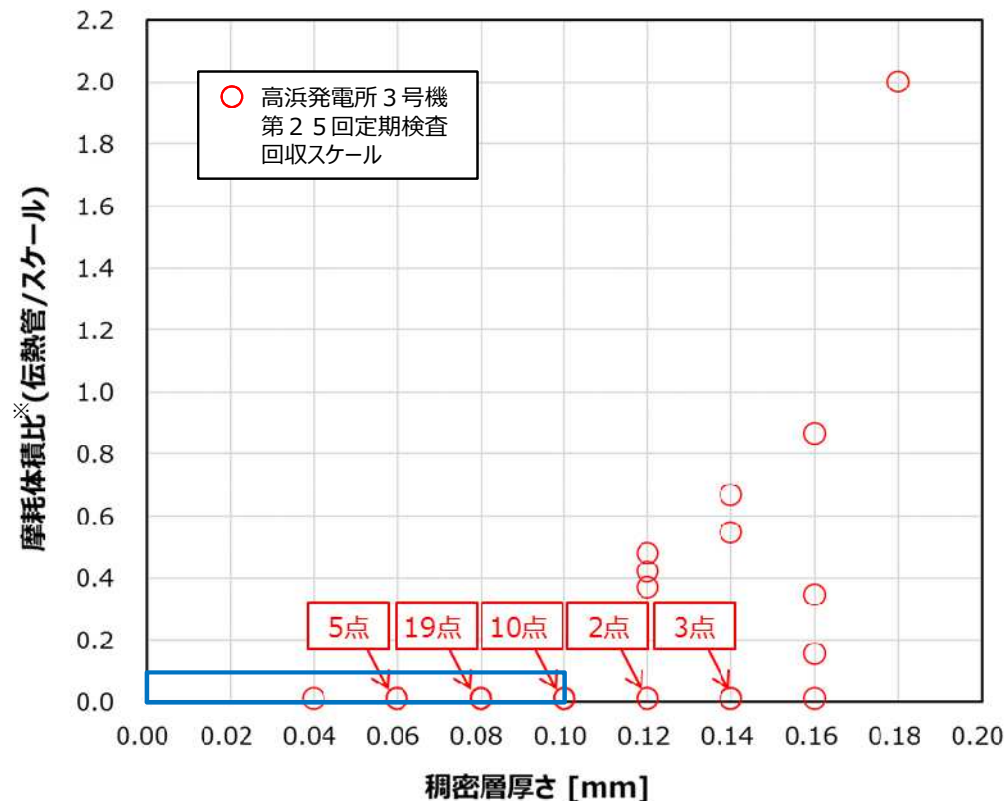
### ○洗浄範囲

洗浄範囲については、伝熱管全域を対象とし、2回の洗浄を行うこととする。



○今回取り出したスケールについては、今後、追加の3次元測定器等による計測、断面観察および摩耗試験を実施し、スケールの形状や性状に関する知見の拡充に努める。また、SG伝熱管に付着するスケールに対し、薬品洗浄の頻度に関する保全指標については、以下のとおり。

- 高浜発電所3号機および4号機については、毎定期検査時にスケールを回収し、スケールの稠密層厚さの確認および摩耗試験を行う。
- 稠密層厚さ0.1mm未満および摩耗体積比0.1未満であることを確認し、それを超えた場合は、薬品洗浄や小型高圧洗浄装置による洗浄を実施する。



※：摩耗試験における伝熱管の減肉量とスケールの摩滅量の体積比

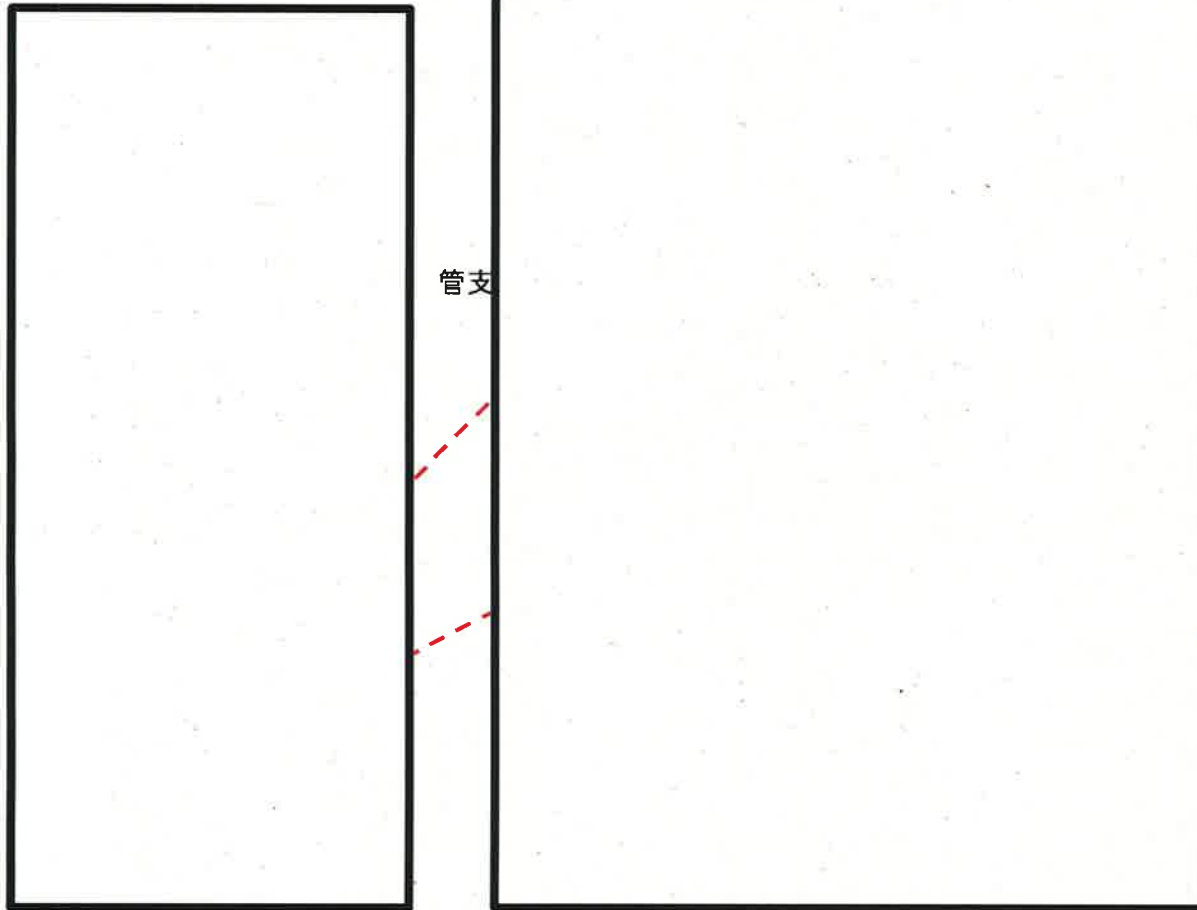
- なお、高浜発電所3号機および4号機のSGについては、インコネルTT600製の伝熱管に応力腐食割れが認められていることから、本事象も踏まえ、今後も引き続き、SG取替（以下、SGR）に係る検討を進めていく。

# 參考資料

- 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。\*

※：高浜発電所 4 号機前回（2 3 回）定期検査時の試験結果

### 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

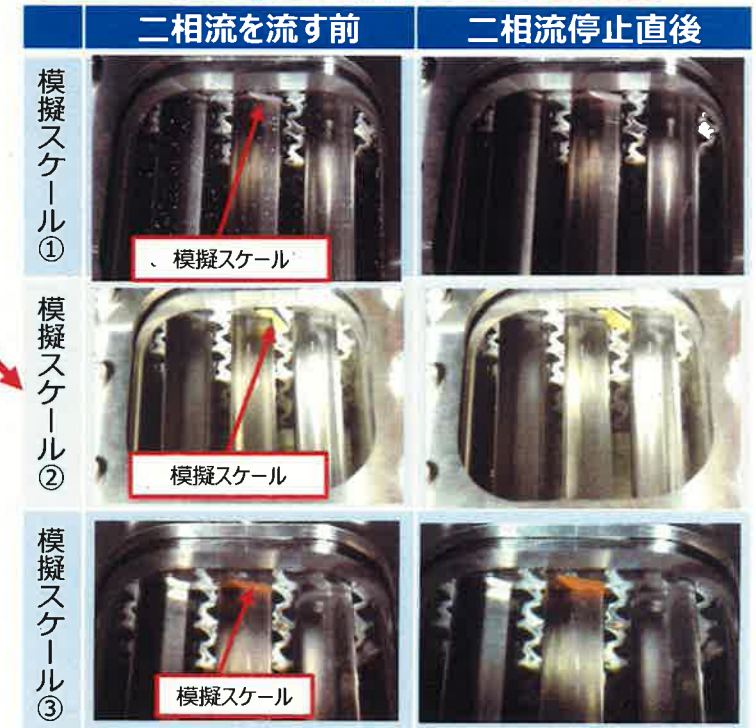
- ・試験流速：
- ・模擬スケール片形状：
  - ①約18mm×約10mm×約0.3mm
  - ②約23mm×約11mm×約0.3mm
  - ③約21mm×約10mm×約0.3mm

### 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**



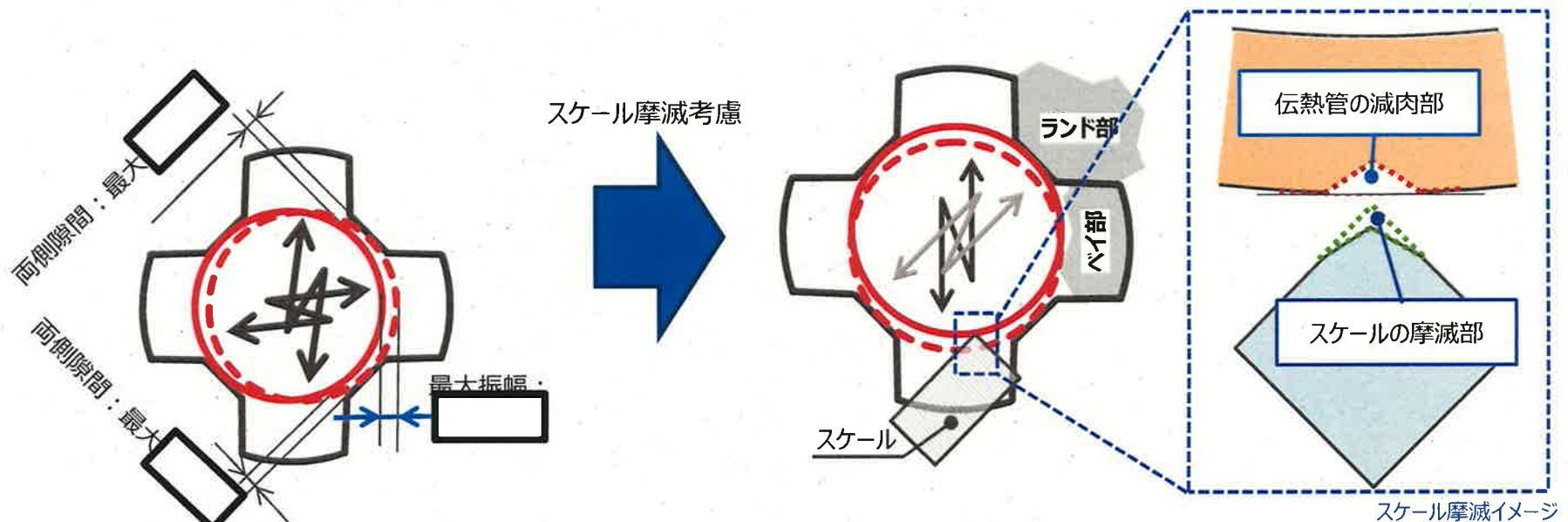
＜スケールと異物の減肉メカニズムの考察＞

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

＜最大減肉深さの考察＞

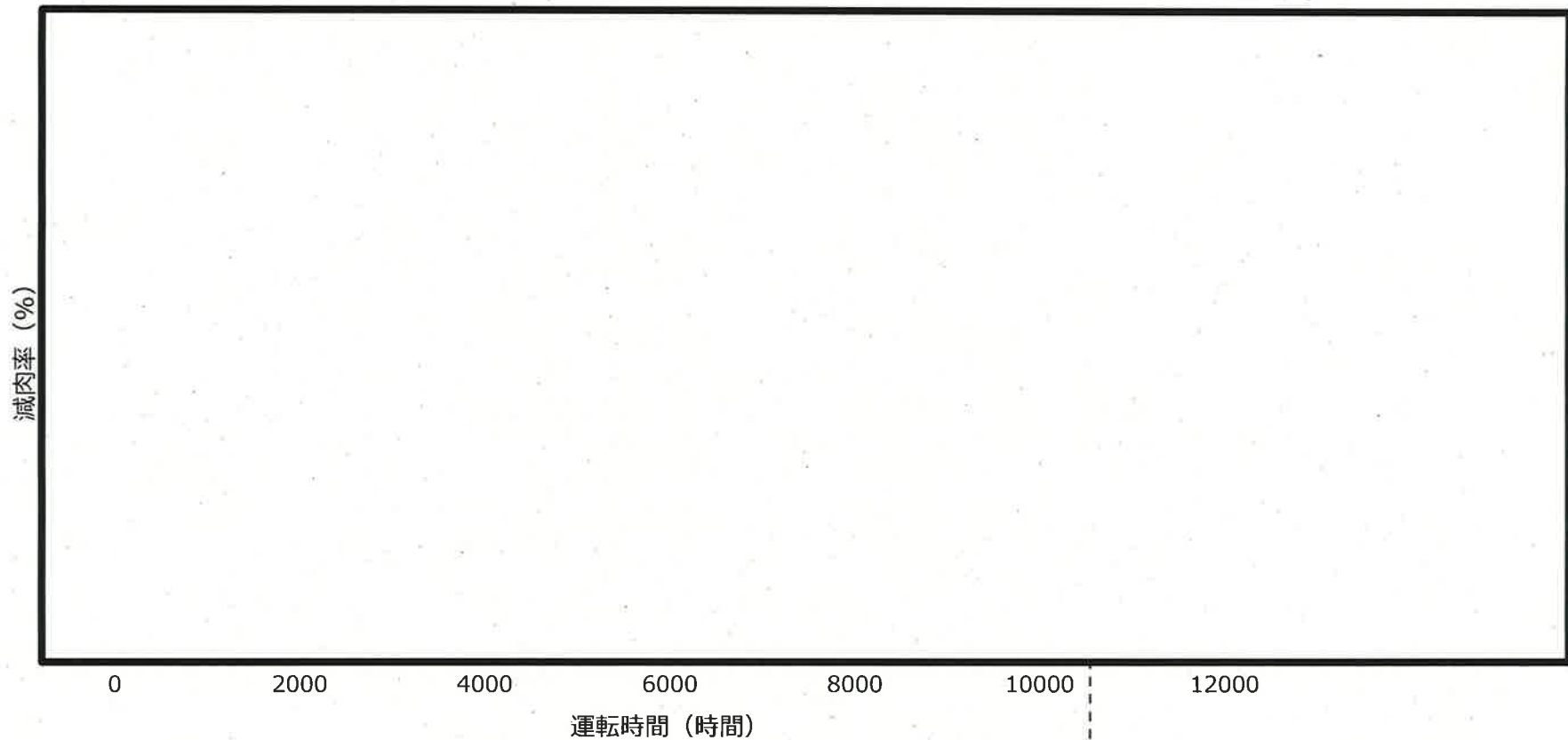
- 減肉メカニズムは異物と同じであり、最大減肉深さの考え方（伝熱管最大振幅に制限）も同じである。
- 異物の場合の最大減肉深さは  ※となるが、スケールの場合は自身も摩滅するため、最大減肉深さは異物の場合よりも小さくなり、貫通には至らない。

※公差内での最大ケース



: 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。

運転時間と減肉率の関係



10,248時間  
(1サイクルで想定される最大運転時間)



: 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。

## 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
57	29.82	<input type="text"/>	<input type="text"/>

(注1) 最大減肉深さのA-S G (X9,Y22) 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S G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)

$\sigma_f$  : インコネル600合金の流動応力 = 343.8 MPa (@361.3°C)

$t$  : 板厚 =  (最小板厚を考慮)

$R$  : 平均半径 =  $(D - t) / 2 =$   (D : 外径 = 22.23 mm)

$a$  : 減肉深さ =  ( < 0.57)

$m$  : Foliasのバルジ係数 (=  $(1 + 1.05 \cdot c^2 / R/t)^{1/2}$ )

$2c$  : 減肉幅 = 5 mm

破断圧力は29.82 MPa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<sup>※1</sup>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）<sup>※2</sup>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1508041号、平成27年8月4日認可）

※2：高浜発電所3号機既工認（新規制基準工認）補足説明資料「高浜発電所3号機 耐震性に関する説明書に係る補足説明資料 蒸気発生器伝熱管の評価について 関西電力株式会社 平成27年7月」

表 減肉を有する伝熱管の耐震性評価結果

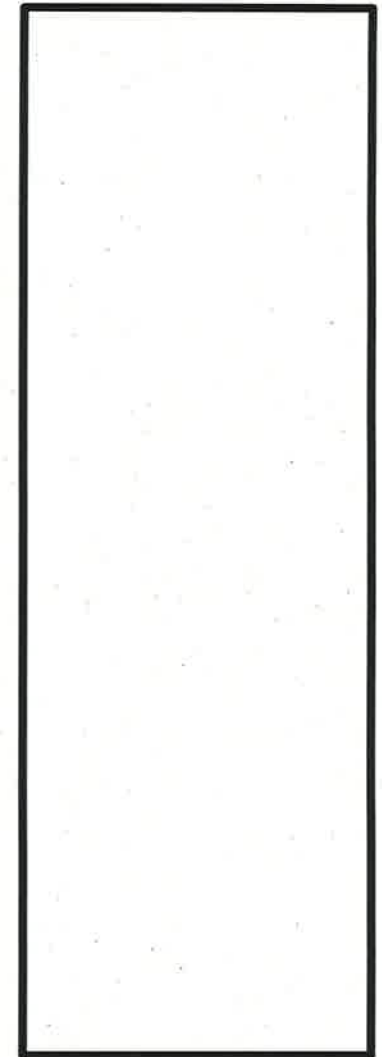
応力分類	発生応力 <sup>※3</sup> および疲労累積係数	許容値	裕度
一次一般膜応力	230 MPa	334 MPa	1.4
膜応力+曲げ応力	245 MPa	434 MPa	1.7
一次+二次応力	247 MPa	492 MPa	1.9
疲労累積係数	0.072	1	-

※3：最大減肉深さのA-SG (X9,Y22) で代表

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

⇒減肉した伝熱管が地震により損壊することはない。

伝熱管地震応答解析モデル



：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

## ○スケール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、稠密層本体のスケールが一番多く堆積していると考えられるエリア（S Gの管板、第一管支持板および第二管支持板）の全面を目視確認し、各板あたり20個程度のスケールを採取し、稠密層厚さの確認を実施する。

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

