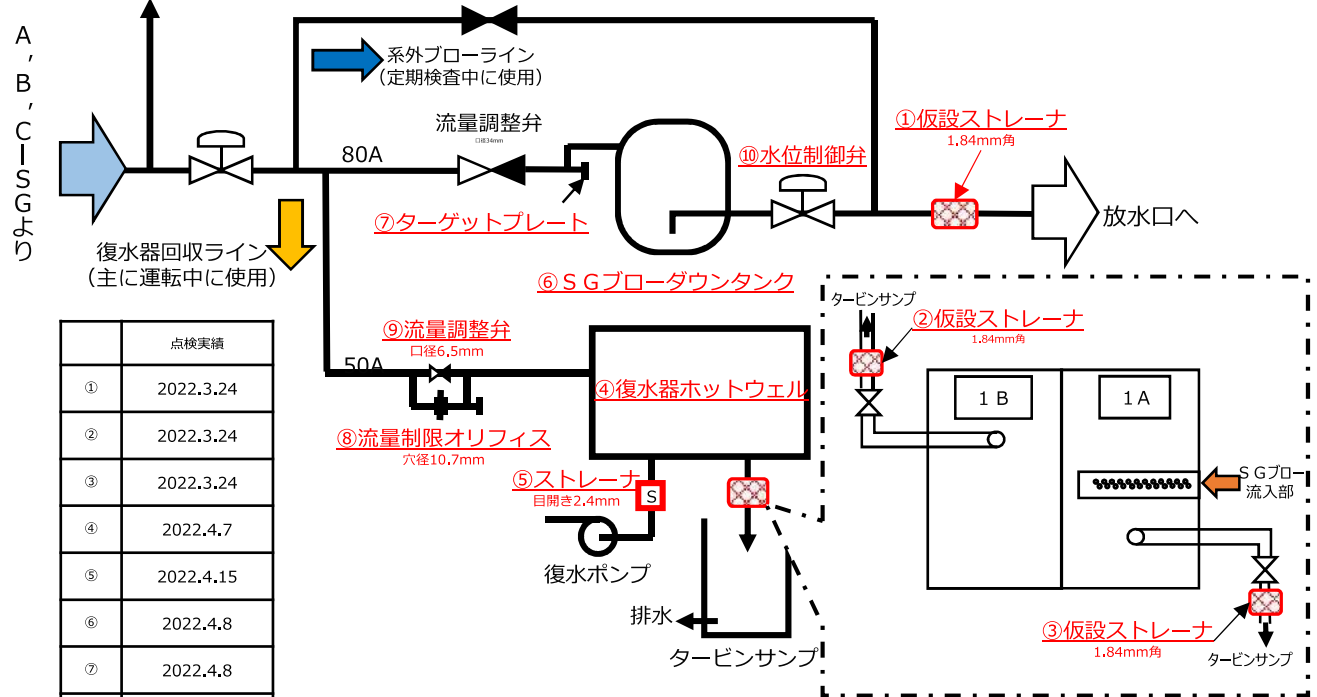


SGブローダウン系統点検結果 (1/7)

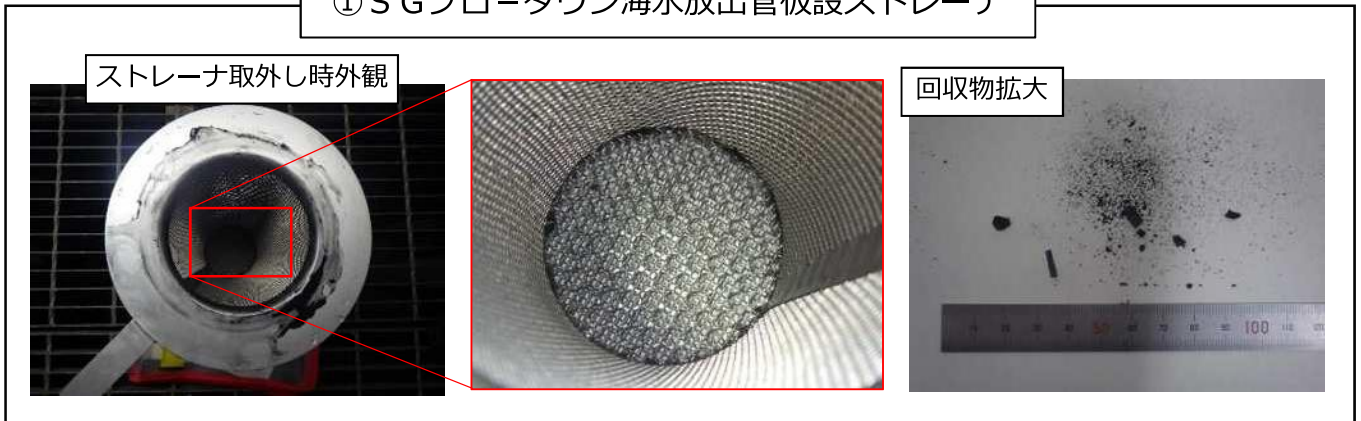
SGブローダウン系統の点検概略図

⑩ SGブローダウンサンプル系統



	点検実績
①	2022.3.24
②	2022.3.24
③	2022.3.24
④	2022.4.7
⑤	2022.4.15
⑥	2022.4.8
⑦	2022.4.8
⑧	2022.4.7
⑨	2022.4.13
⑩	2022.4.12
⑪	2022.4.20

① SGブローダウン海水放出管仮設ストレーナ

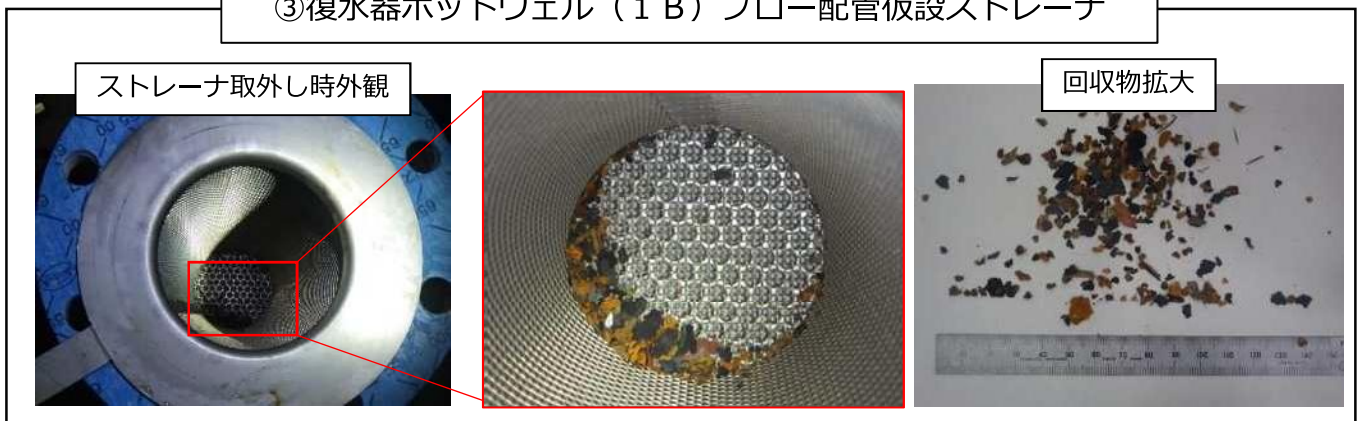


② 復水器ホットウェル (1 A) ブロー配管仮設ストレーナ

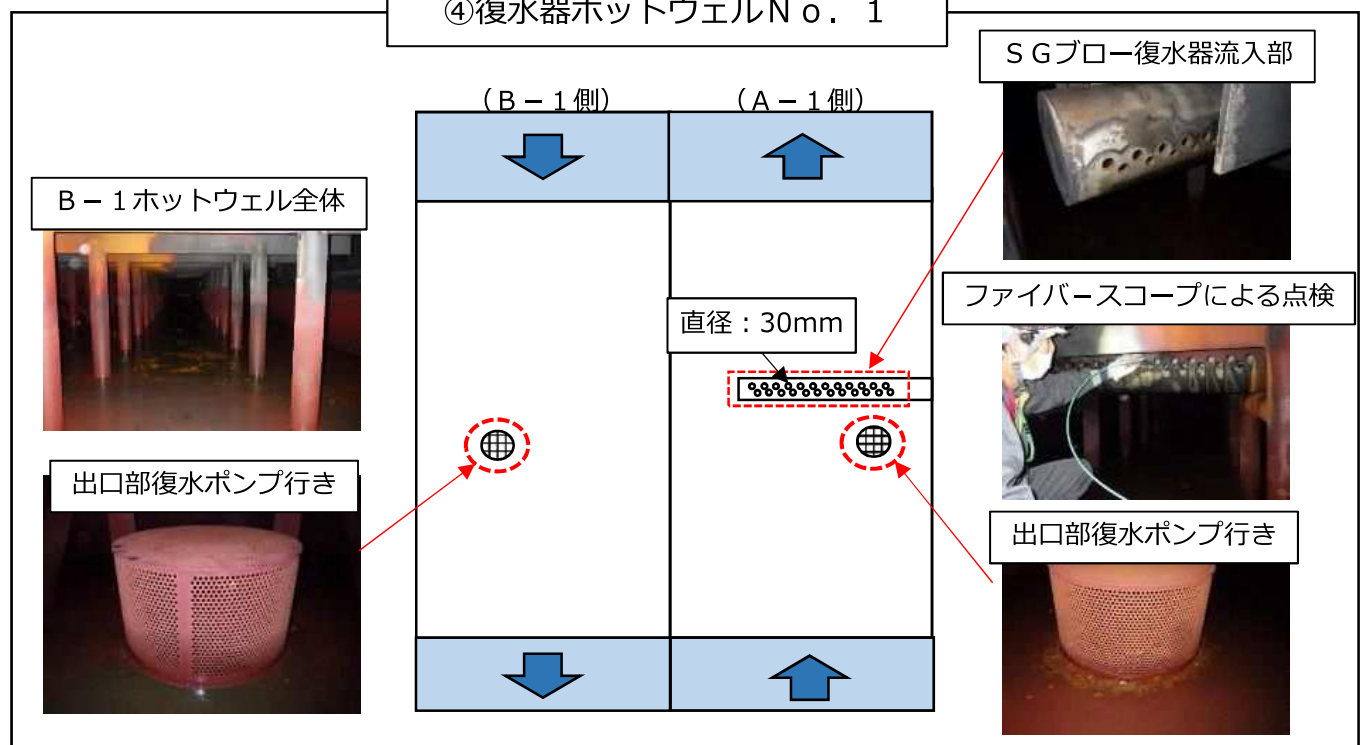


SGブローダウン系統点検結果 (2/7)

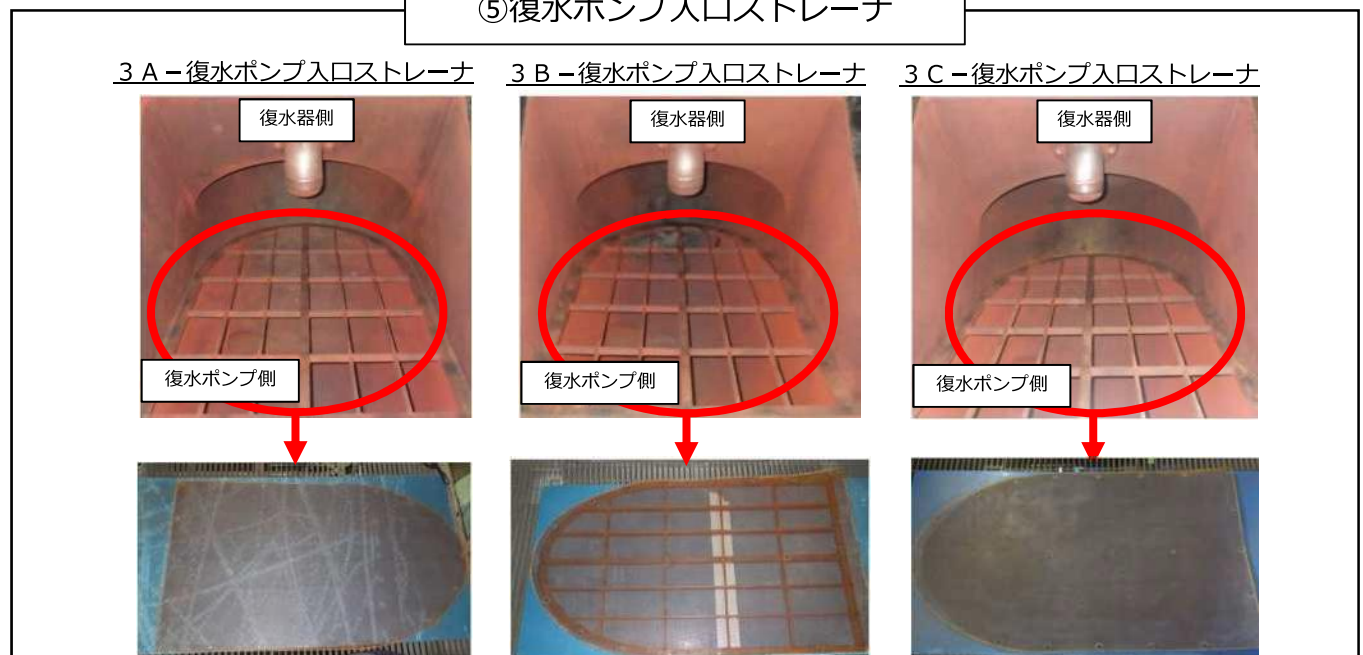
③復水器ホットウェル (1 B) ブロー配管仮設ストレーナ



④復水器ホットウェルNo. 1



⑤復水ポンプ入ロストレーナ

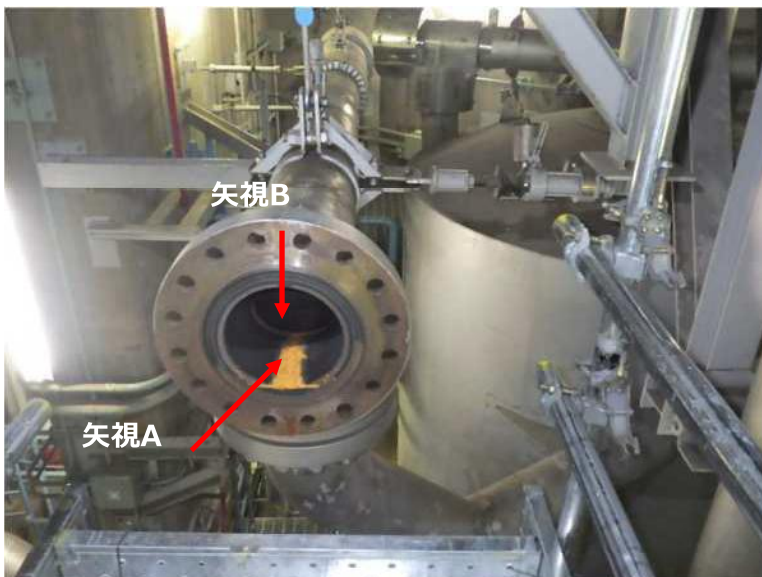


SGブローダウン系統点検結果 (3/7)

⑥ SGブローダウンタンク

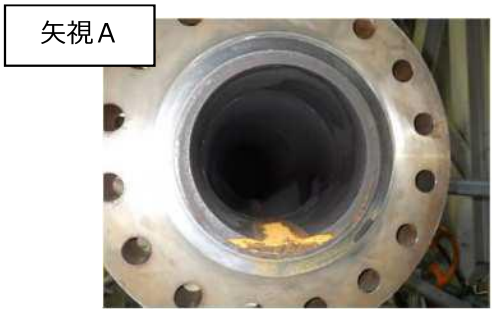
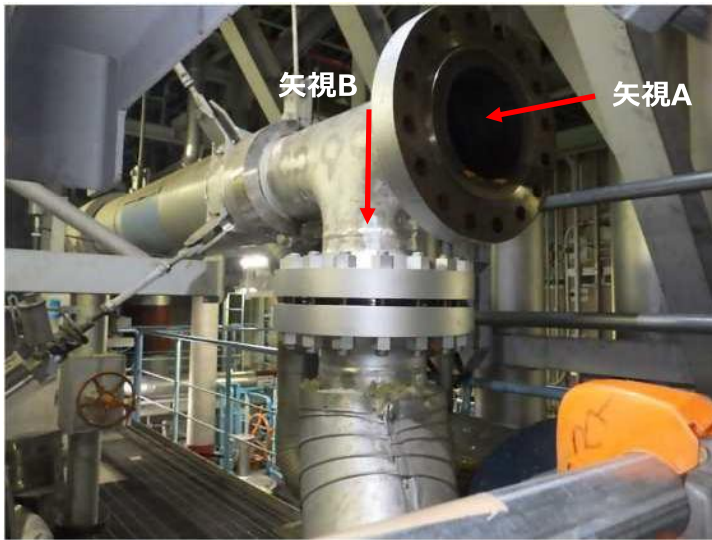


⑦-1 A-SGブローダウン系統ターゲットプレート

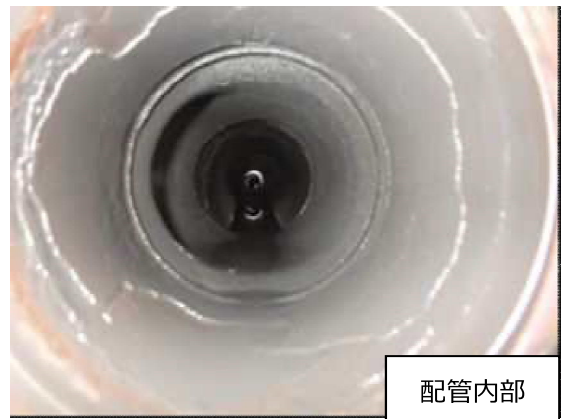
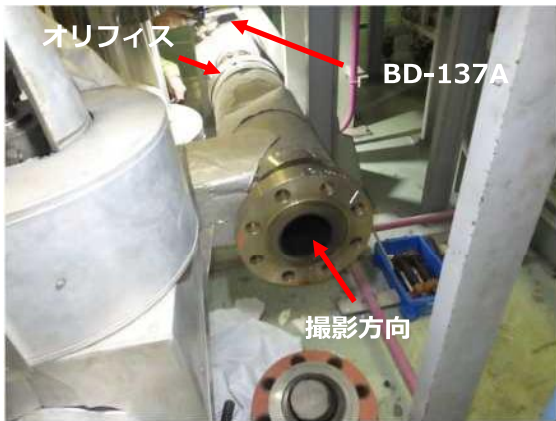


SGブローダウン系統点検結果 (4/7)

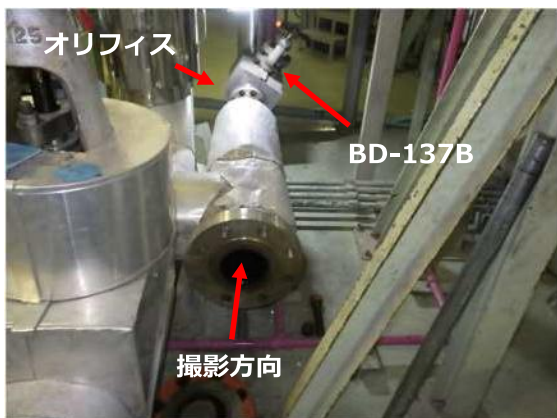
⑦-2 B-SGブローダウン系統ターゲットプレート



⑧-1 A-SG 流量制限オリフィス

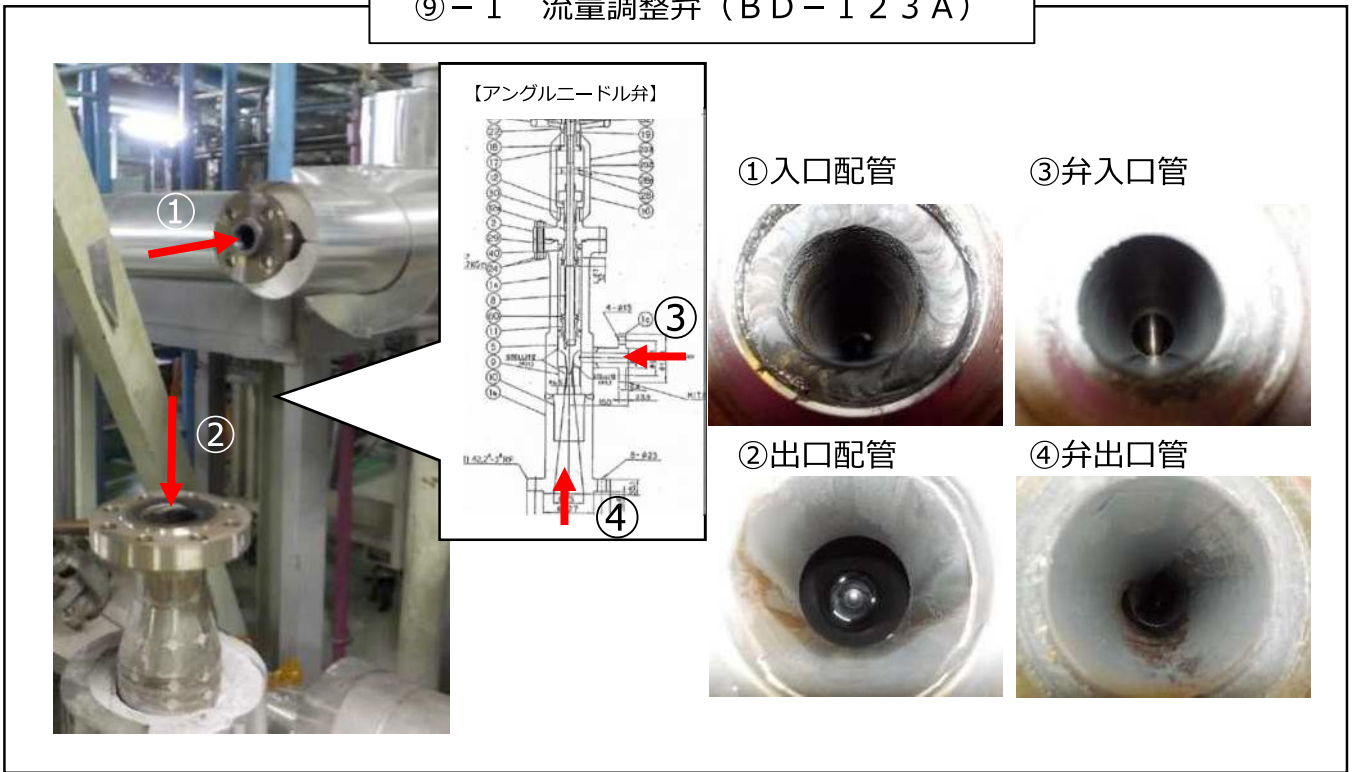


⑧-2 B-SG 流量制限オリフィス

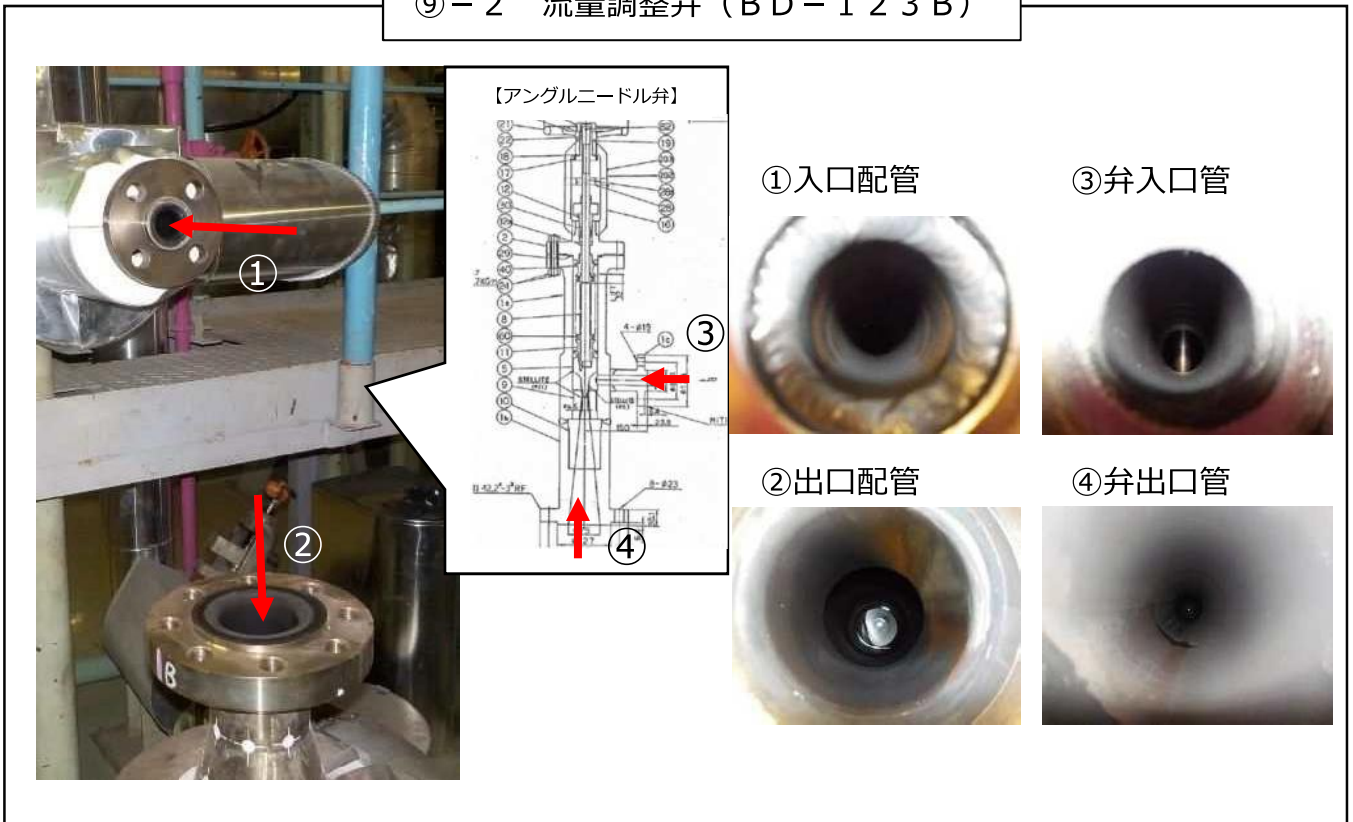


SGブローダウン系統点検結果 (5 / 7)

⑨- 1 流量調整弁 (BD - 1 2 3 A)

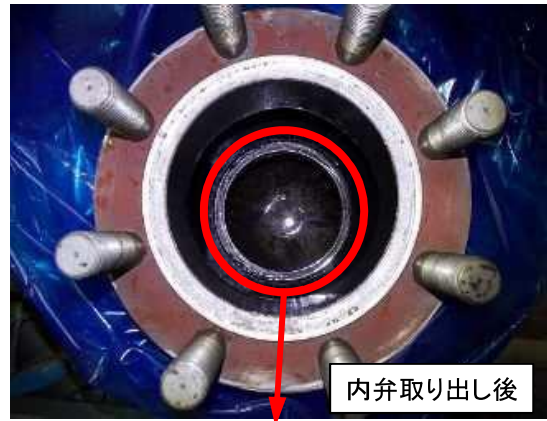


⑨- 2 流量調整弁 (BD - 1 2 3 B)



SGブローダウン系統点検結果 (6/7)

⑩-1 水位制御弁 弁内部



⑩-2 水位制御弁 1次側配管内部

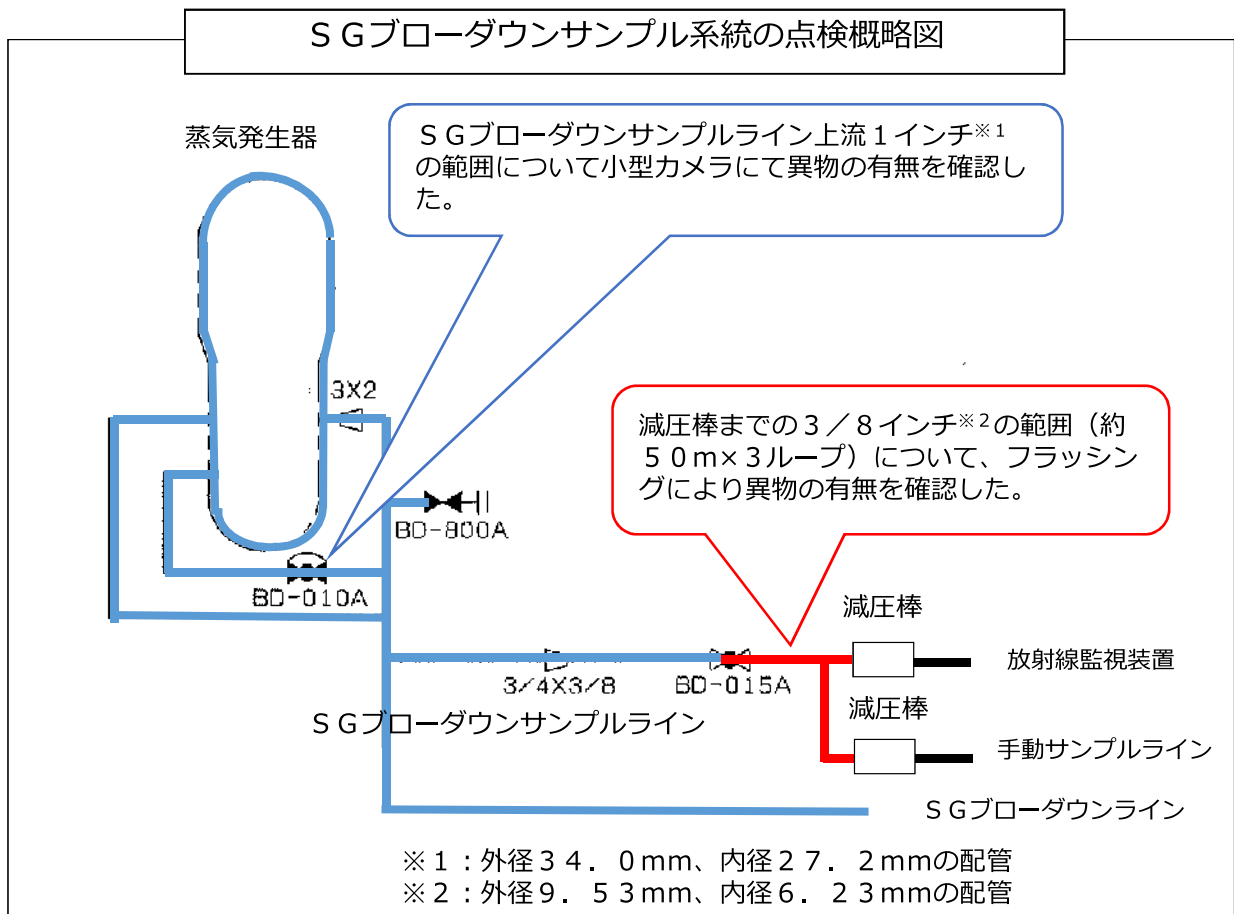


⑩-3 水位制御弁 2次側配管内部



SGブローダウン系統点検結果 (7/7)

① SGブローダウンサンプル系統



小型カメラを用いた点検結果

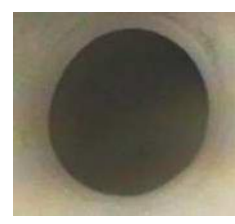
1インチ範囲における小型カメラでの点検を実施した結果、異物は確認できなかった。



①SG側



②反SG側



(A-S/Gの例)

フラッシング結果

3/8インチ配管(約50m×3ループ)について、空気でのフラッシングによる確認を実施した結果、異物は確認できなかった。



(フラッシングの様子)



(フラッシング後のフィルタ)

SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

A-SG 第二管支持板上写真



A-SG 第一管支持板上写真

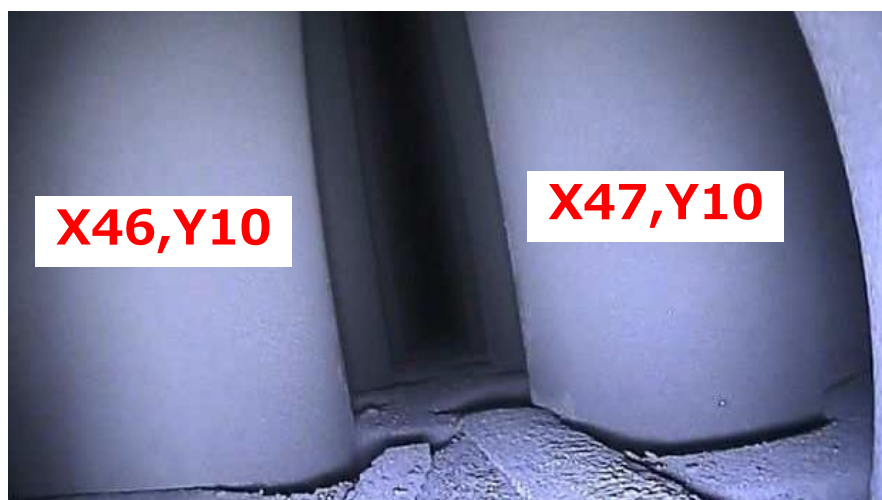


A-SG 管板上写真



SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

B-SG 第二管支持板上写真



B-SG 第一管支持板上写真

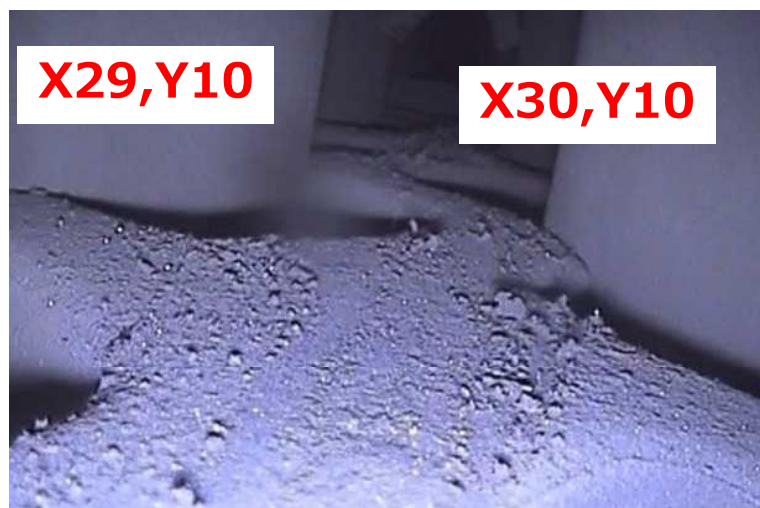


B-SG 管板上写真



SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

C-SG 第二管支持板上写真



C-SG 第一管支持板上写真



C-SG 管板上写真



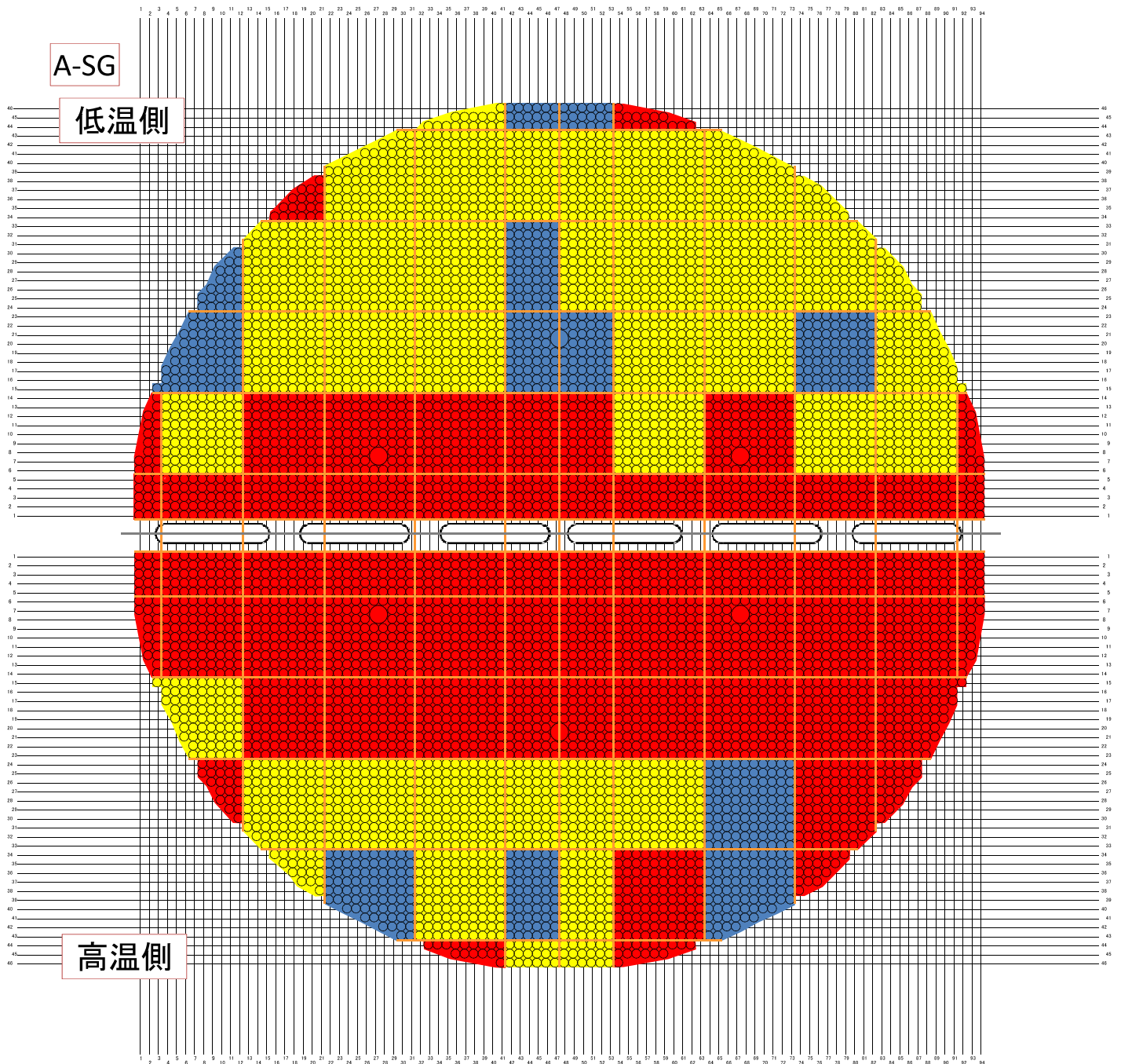
SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況 (第三管支持板)

全体的にスケールが残存していることを確認した。

高温側と低温側(水平方向)および管支持板間(上下方向)において、有意な差が無いことを確認した。

フロー SLOT 部の近傍にスケールが多い傾向が見られるが、SG水抜き時の水の流れによるものと考えられる。



管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を“多”“中”“少”に色分けした。



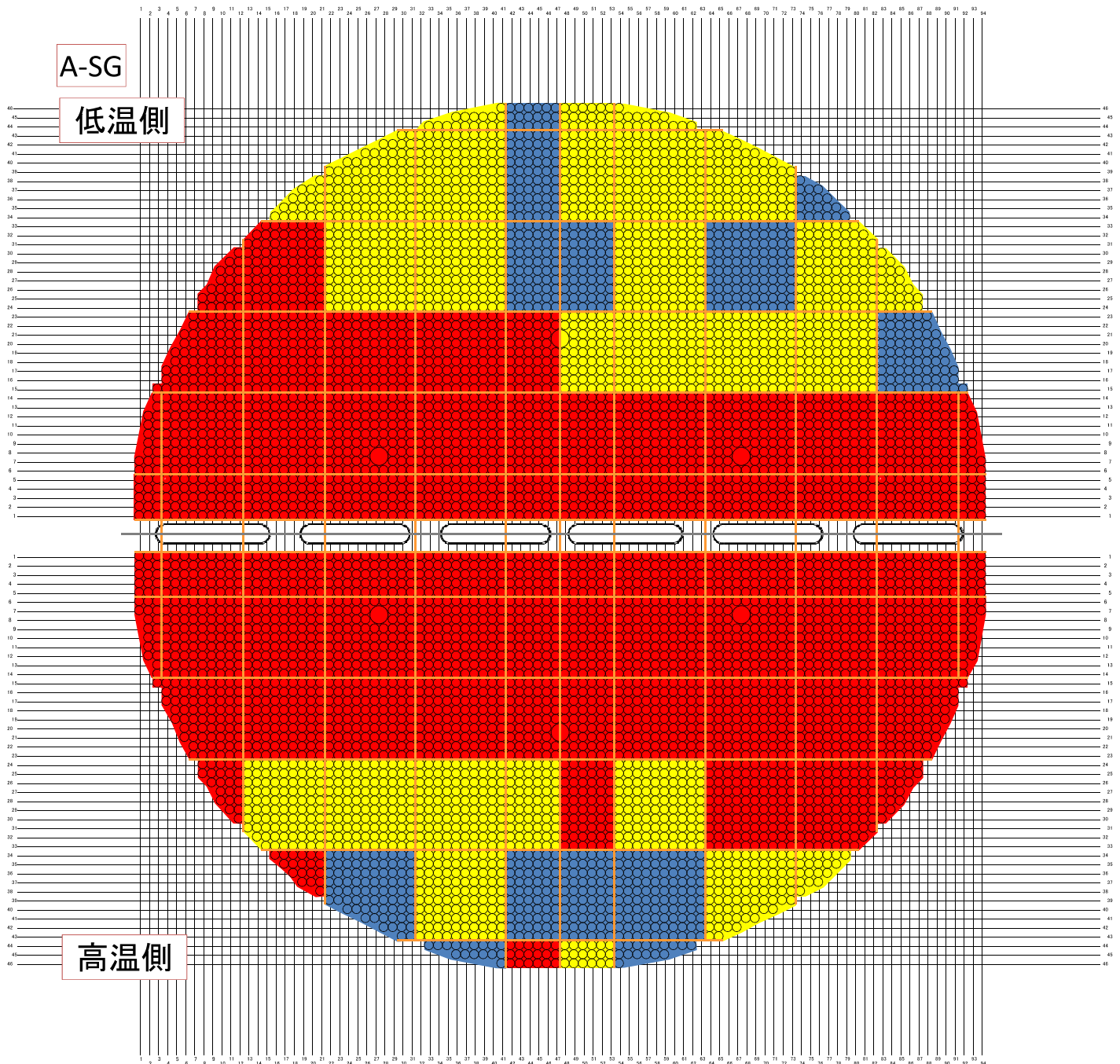
SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況（第二管支持板）

全体的にスケールが残存していることを確認した。

高温側と低温側（水平方向）および管支持板間（上下方向）において、有意な差が無いことを確認した。

フローズット部の近傍にスケールが多い傾向が見られるが、SG水抜き時の水の流れによるものと考えられる。



管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を“多””中””少”に色分けした。



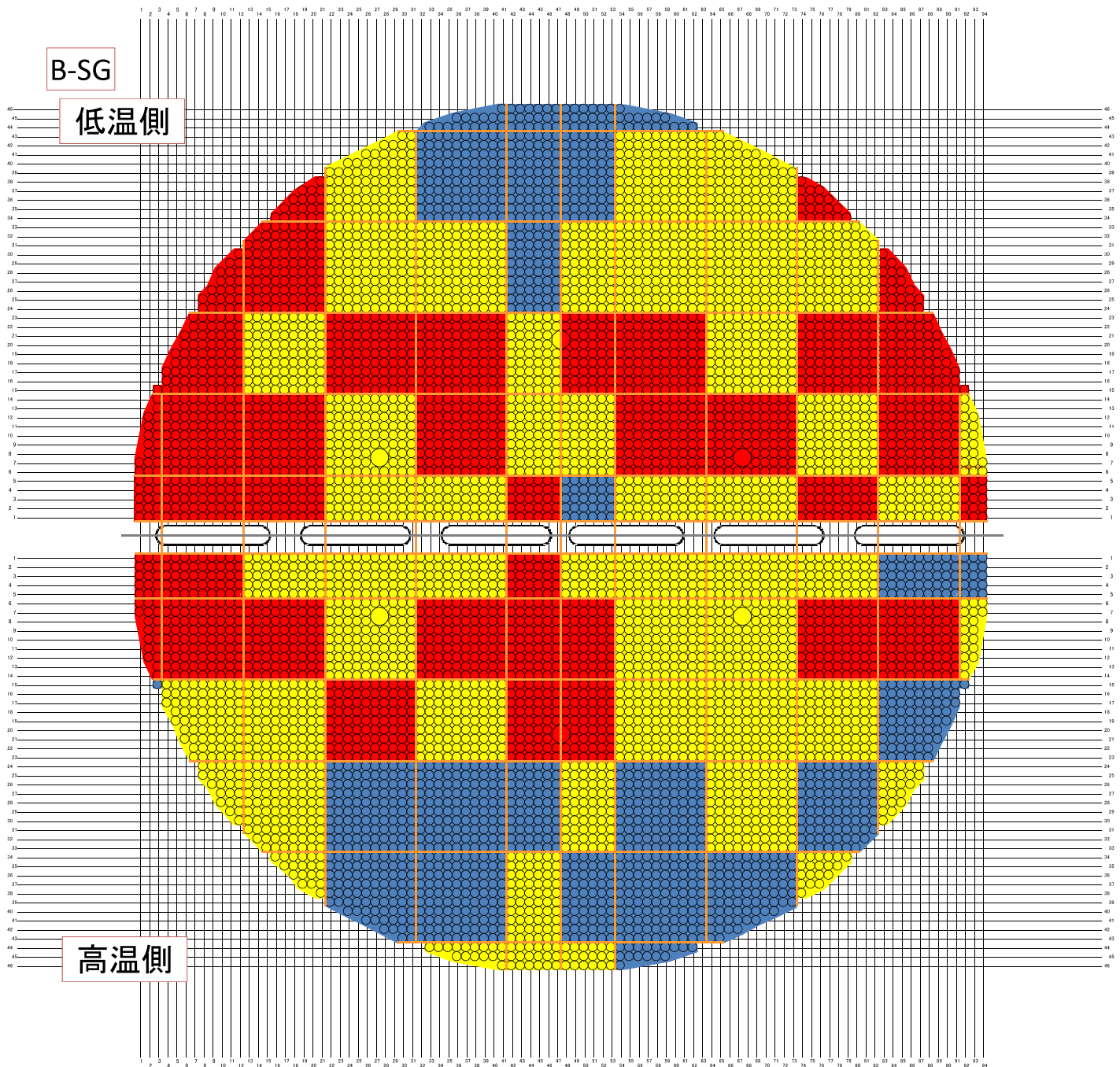
SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況（第一管支持板）

全体的にスケールが残存していることを確認した。

高温側と低温側(水平方向)および管支持板間(上下方向)において、有意な差が無いことを確認した。

フローズット部の近傍にスケールが多い傾向が見られるが、SG水抜き時の水の流れによるものと考えられる。



管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



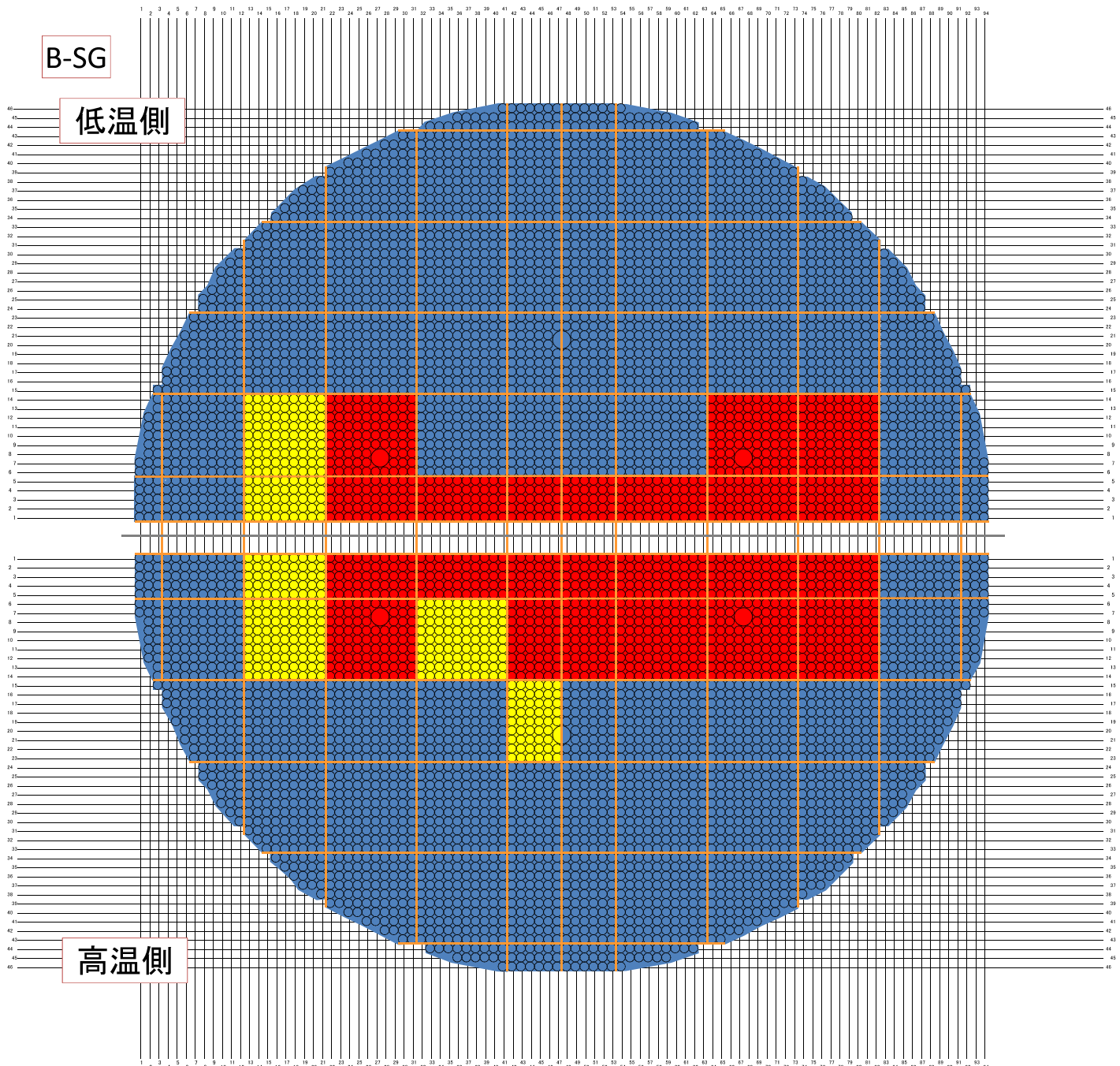
SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況 (管板)

全体的にスケールが残存していることを確認した。

高温側と低温側(水平方向)および管支持板間(上下方向)において、有意な差が無いことを確認した。

中央にスケールが多い傾向が見られるが、SG水抜き時の水の流れによるものと考えられる。



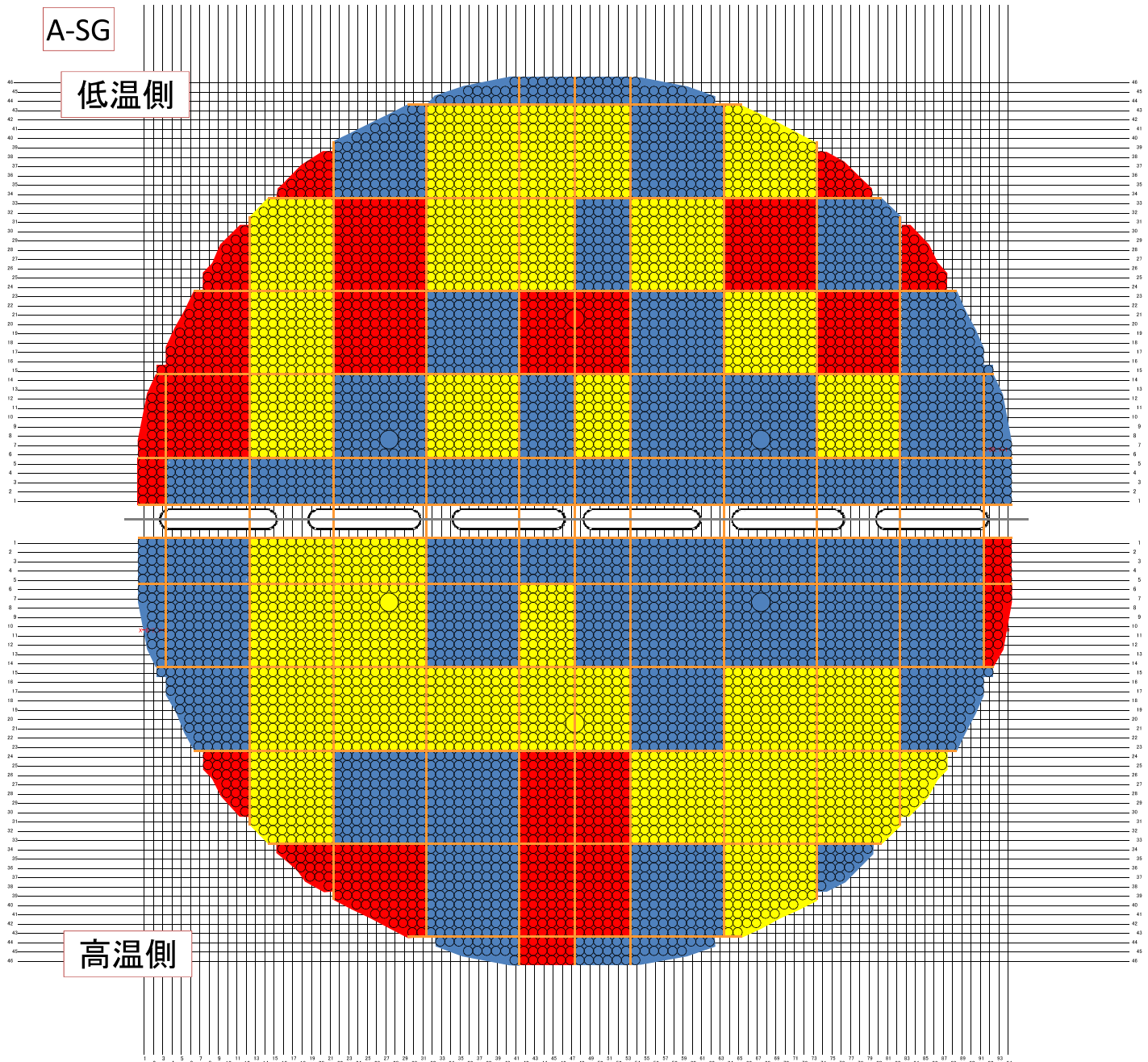
管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を“多””中””少”に色分けした。



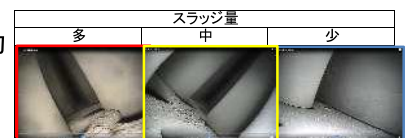
SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スラッジの分布状況（第三管支持板）

全体的にスラッジが残存していることを確認した。



・管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多””中””少”に大別。
 ・それぞれ、多＝赤、中＝黄色、少＝青色に染めることにより、支持板上スラッジの量的分布を概略的に示した。

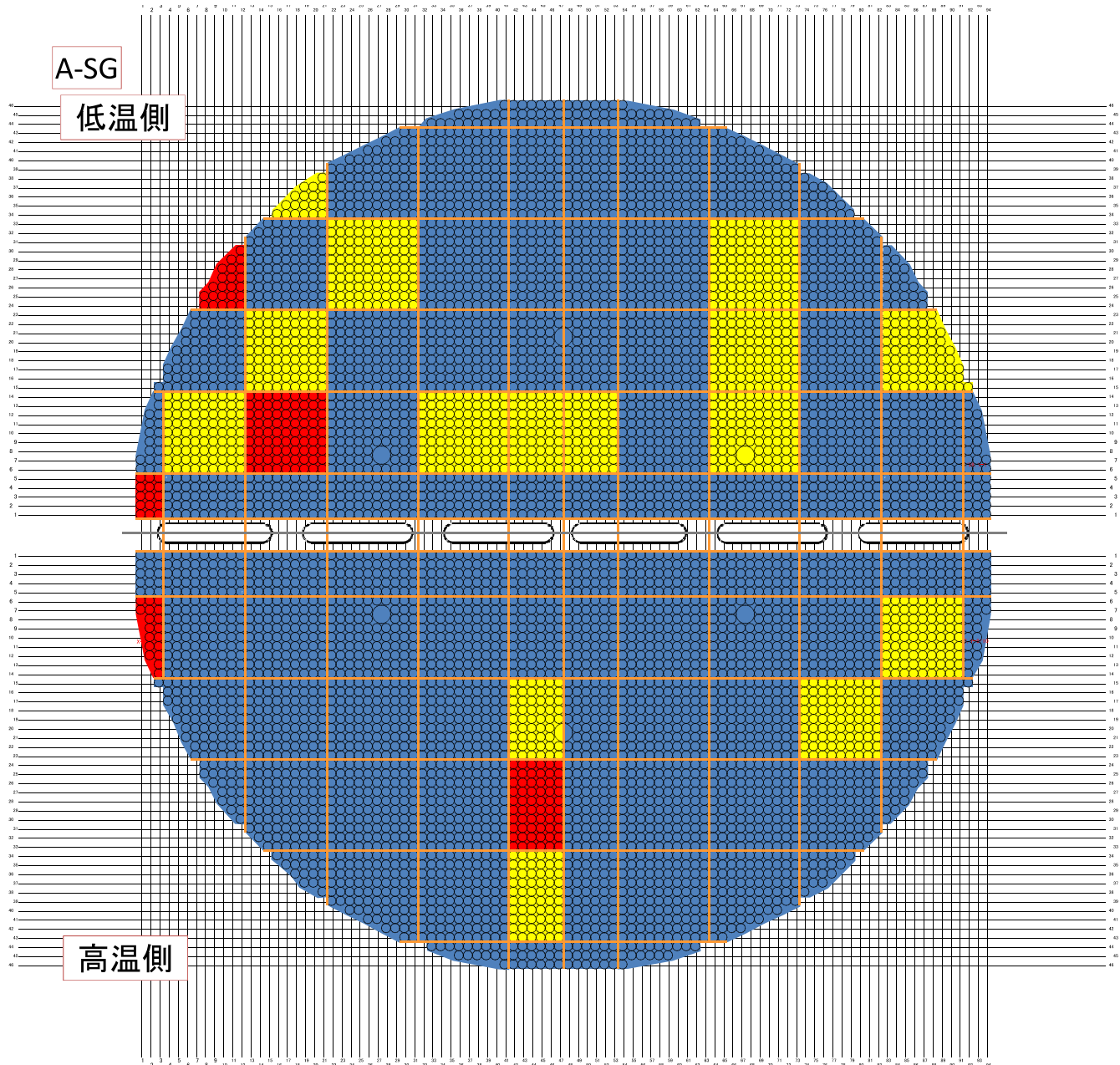


SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

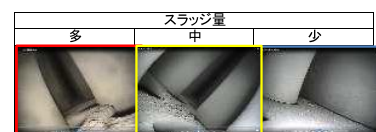
スラッジの分布状況（第二管支持板）

全体的にスラッジが残存していることを確認した。

低温側の方がスラッジが多い傾向が見られ、SG器内の高温側から低温側への水平方向の水の流れによるものと考えられる。



- ・管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を“多”“中”“少”に大別。
- ・それぞれ、多＝赤、中＝黄色、少＝青色に染めることにより、支持板上スラッジの量的分布を概略的に示した。

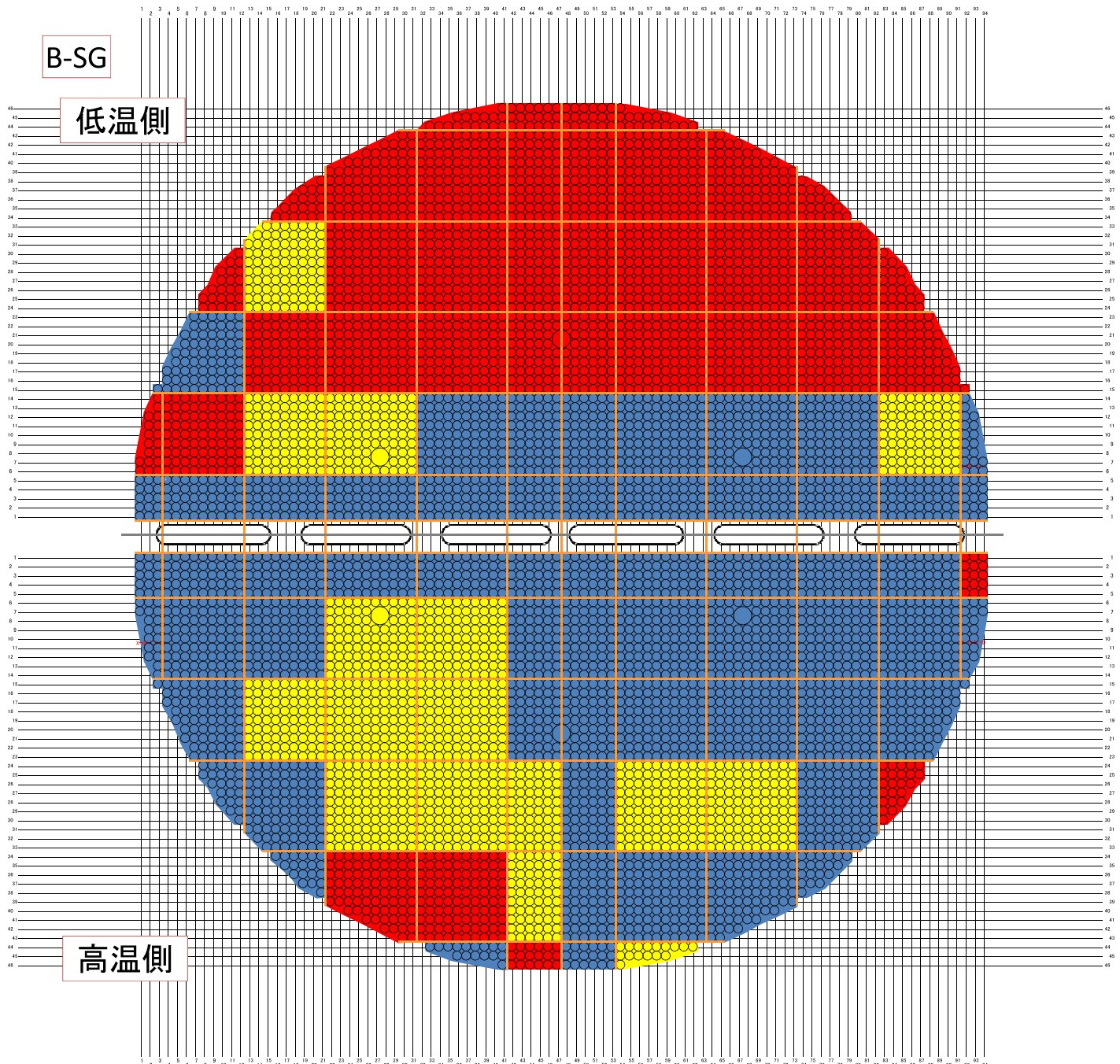


SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

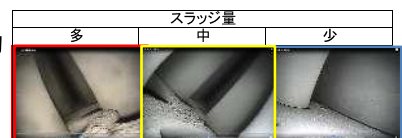
スラッジの分布状況（第一管支持板）

全体的にスラッジが残存していることを確認した。

低温側の方がスラッジが多い傾向が見られ、SG器内の高温側から低温側への水平方向の水の流れによるものと考えられる。



- 管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多””中””少”に大別。
- それぞれ、多=赤、中=黄色、少=青色に染めることにより、支持板上スラッジの量的分布を概略的に示した。

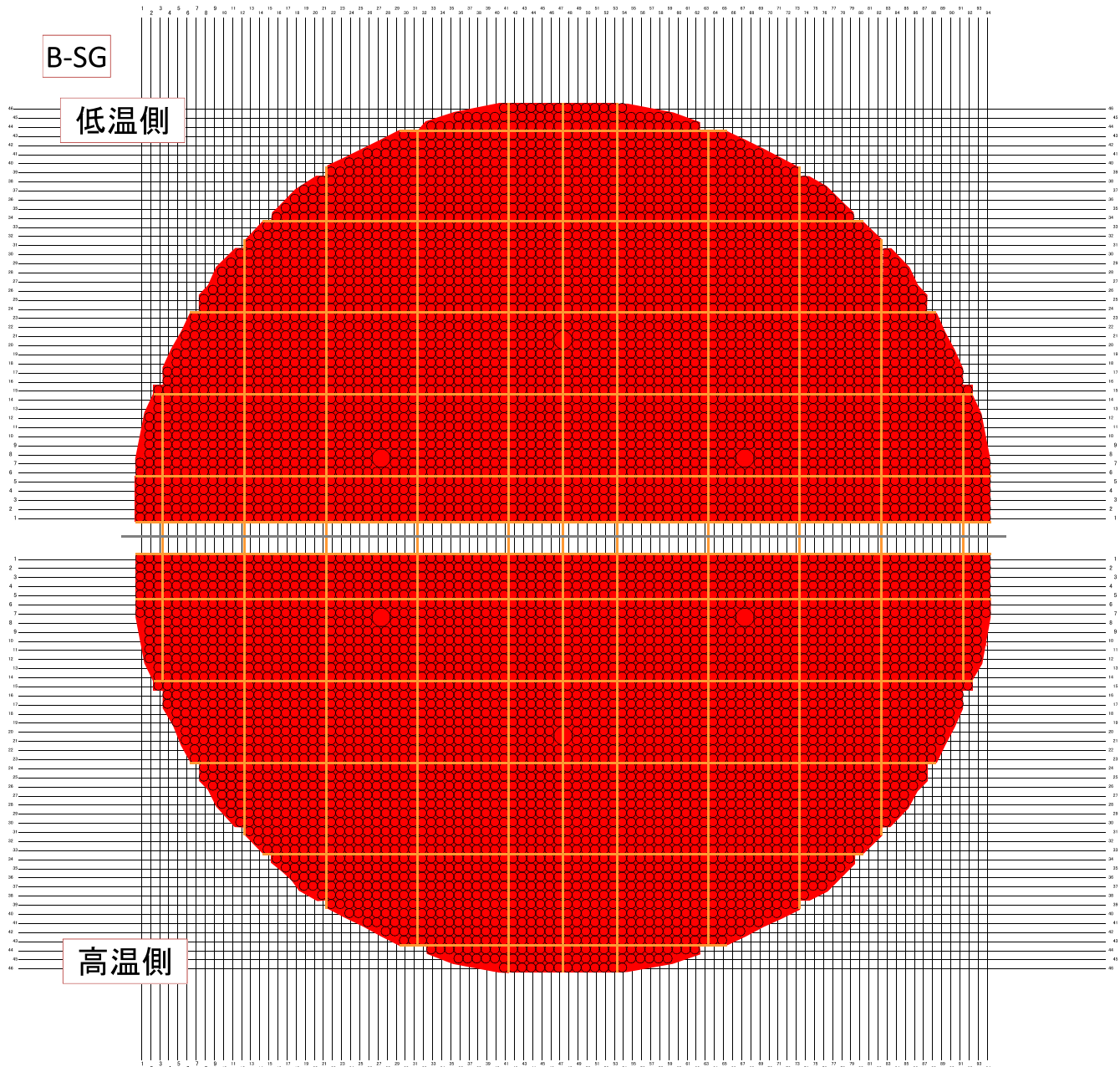


SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

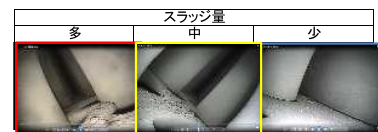
スラッジの分布状況（管板）

全体的にスラッジが残存していることを確認した。

プラント停止時及びSG内の水抜き時において、器内全体のスラッジが下側に集まり、全体として多く堆積したものと考えられる。



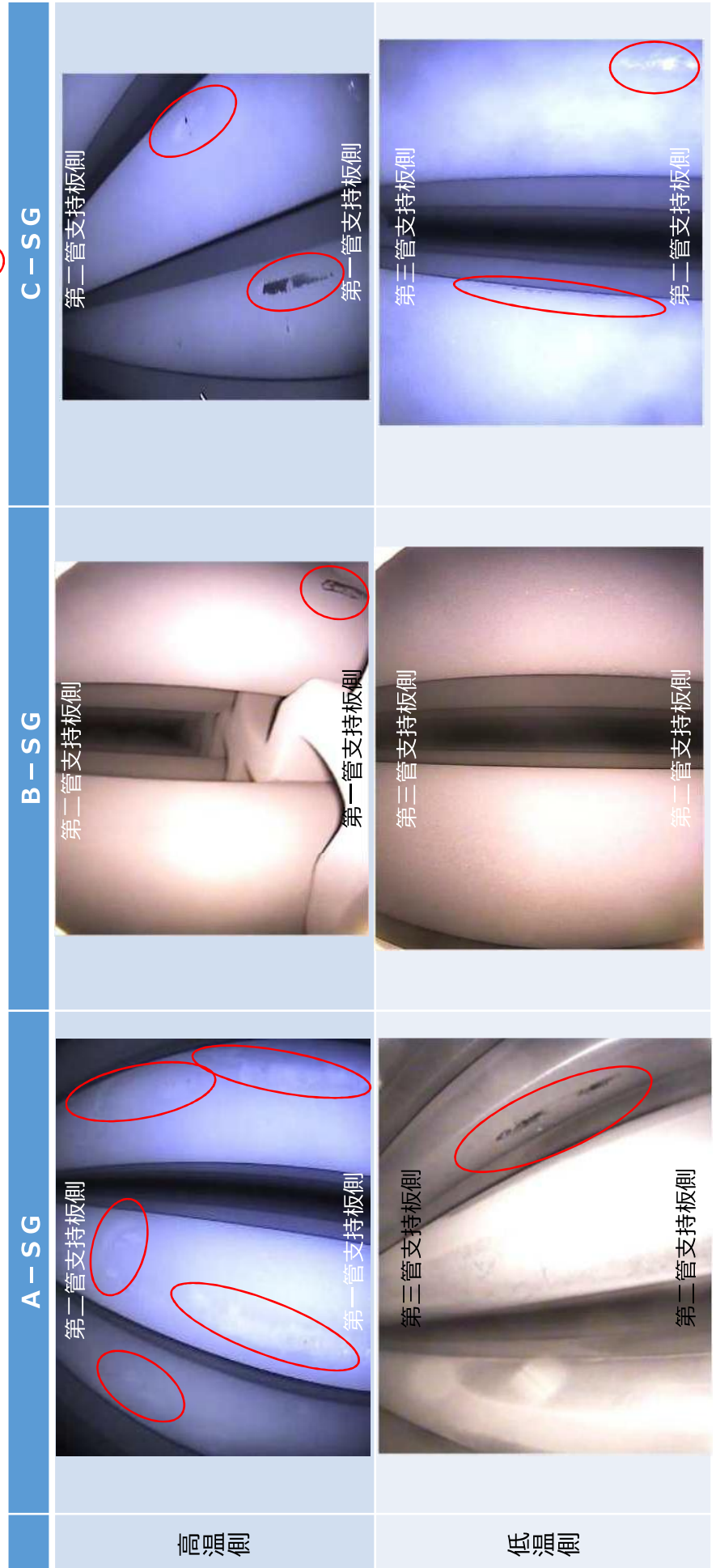
- ・管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を“多”“中”“少”に大別。
- ・それぞれ、多＝赤、中＝黄色、少＝青色に染めることにより、支持板上スラッジの量的分布を概略的に示した。



SG内の伝熱管表面の観察結果

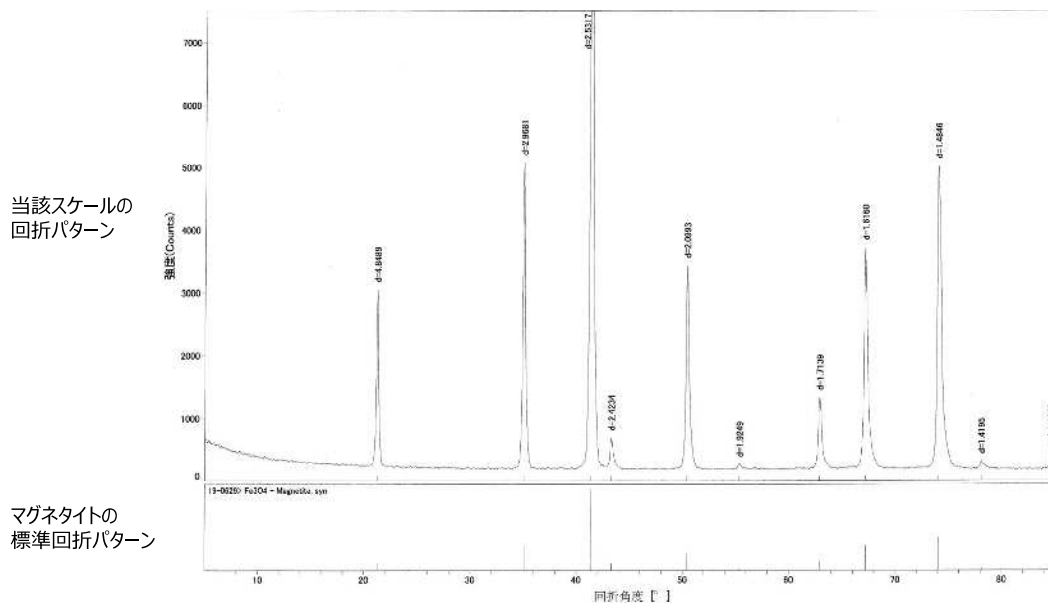
- SG器内のスケールの残存状況等の調査に合わせ、小型カメラを用いて、A、B、C－蒸気発生器の管板から第三管支持板の間の伝熱管の外観観察を行った結果、全面的にスケールに覆われており、局所的にスケールが剥離した痕跡等が認められた。
- 伝熱管のこれらの状況については、高温側と低温側（水平方向）、管支持板間（上下方向）において有意な差は認められなかった。

○：スケールの剥離痕



回収したスケールの化学分析および形状確認結果（１／５）

- 回収したスケールについて、X線回折※を用いた表面の化学成分分析を実施した結果、主成分はマグネタイトであり、蒸気発生器器内で発生するスラッジと同成分であることを確認した。



※：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

- A蒸気発生器の管板、第一管支持板から第三管支持板上部、並びにBおよびC蒸気発生器の管板、第一管支持板から第二管支持板上部に残存しているスケールのうち、比較的大きなものを選定し取り出したスケールは、主に多角型、長尺型に分類され、長さが最大のものは、前者が長さ約17mm、幅約10mm、後者が長さ約47mm、幅約4mmであり、これらのスケールは管支持板の流路穴よりも大きく、運転中に管支持板下面の伝熱管の隙間に留まることが可能な形状であった。
- また、これらのスケールについては、目視確認の結果、やや湾曲した形状をしており、そのうち各SGから取り出した9個のスケールについて3次元測定器等により計測した結果、直径約22.3～22.6mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管（円筒）の外径（直径22.2mm）に近いことを確認した。

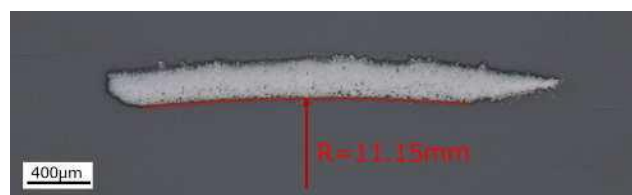
A蒸気発生器 第一管支持板上部（高温側）から回収した長尺型スケール

<凸面>

<凹面>

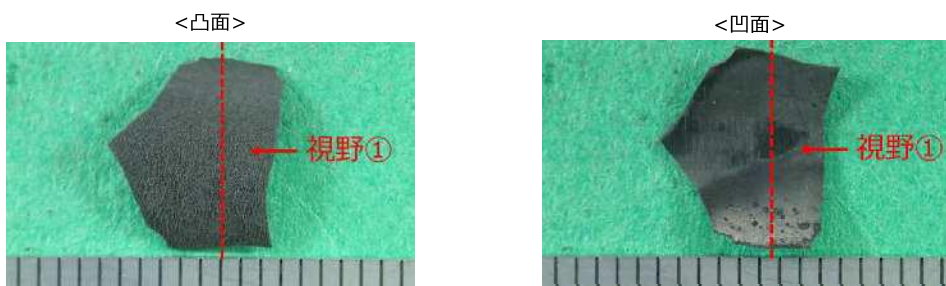


<視野①> 断面画像解析で計測した結果

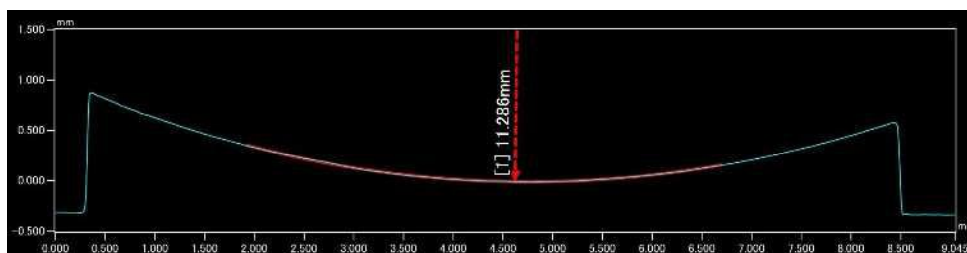


回収したスケールの化学分析および形状確認結果（ 2 / 5 ）

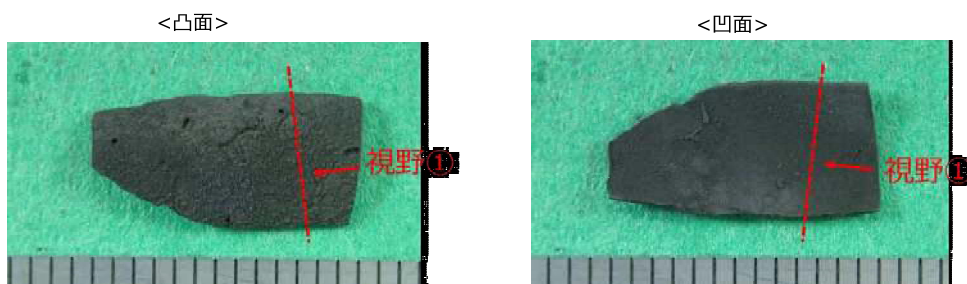
A 蒸気発生器 第二管支持板上面（低温側）から回収したスケール



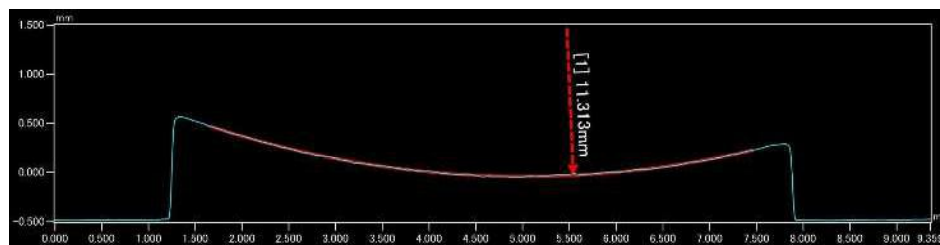
<視野①> スケールを 3 次元測定器で計測した結果



A 蒸気発生器 第二管支持板上面（低温側）から回収したスケール



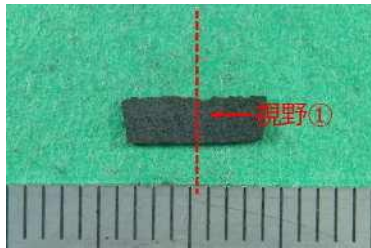
<視野①> スケールを 3 次元測定器で計測した結果



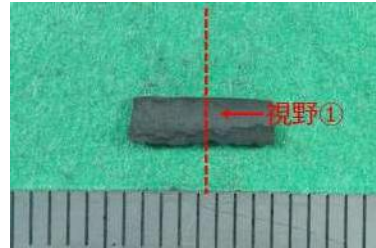
回収したスケールの化学分析および形状確認結果 (3 / 5)

A 蒸気発生器 第三管支持板上面 (低温側) から回収したスケール

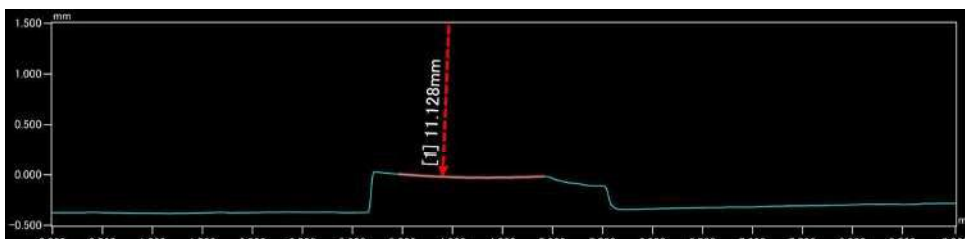
<凸面>



<凹面>

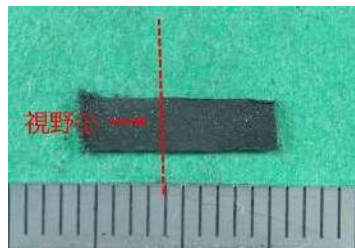


<視野①> スケールを 3 次元測定器で計測した結果

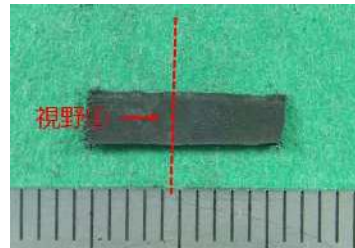


A 蒸気発生器 第三管支持板上面 (低温側) から回収したスケール

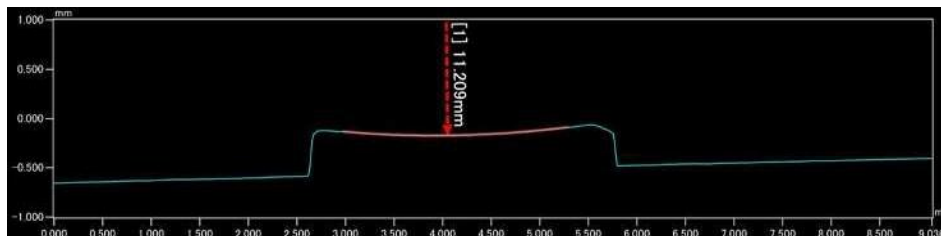
<凸面>



<凹面>



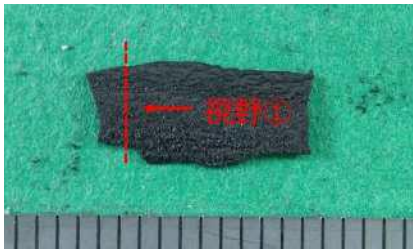
<視野①> スケールを 3 次元測定器で計測した結果



回収したスケールの化学分析および形状確認結果（ 4 / 5 ）

B 蒸気発生器 第一管支持板上面（高温側）から回収したスケール

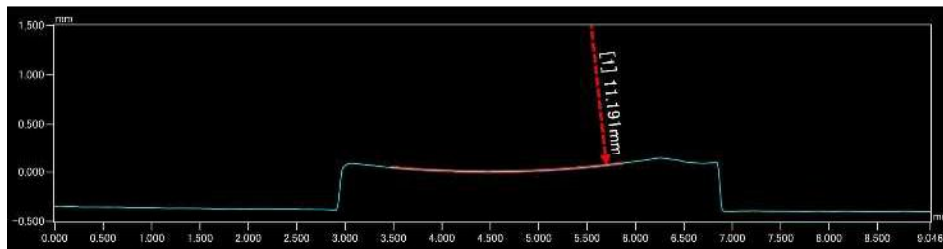
<凸面>



<凹面>



<視野①> スケールを 3 次元測定器で計測した結果



B 蒸気発生器 第一管支持板上面（高温側）から回収したスケール

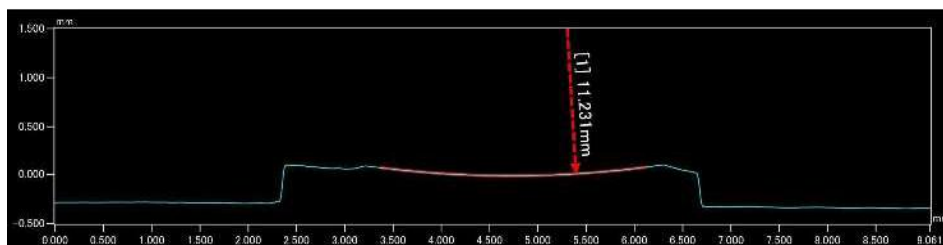
<凸面>



<凹面>



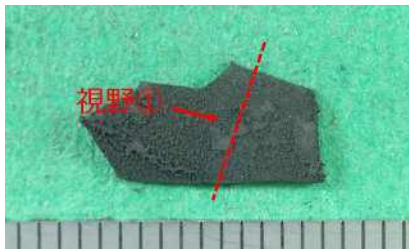
<視野①> スケールを 3 次元測定器で計測した結果



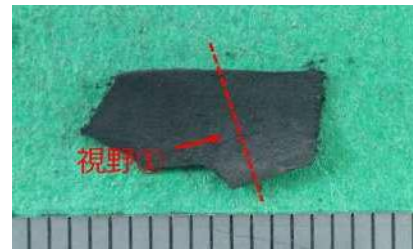
回収したスケールの化学分析および形状確認結果 (5/5)

C蒸気発生器 第二管支持板上面 (低温側) から回収したスケール

<凸面>

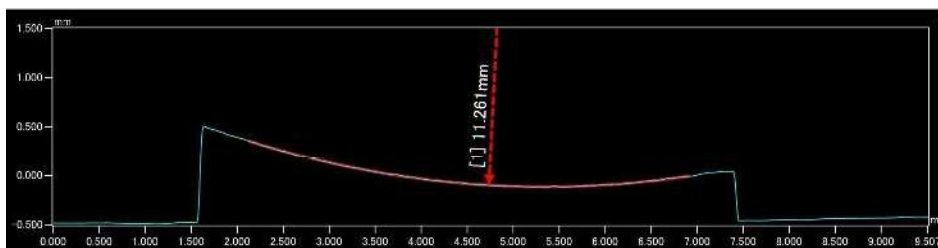


<凹面>



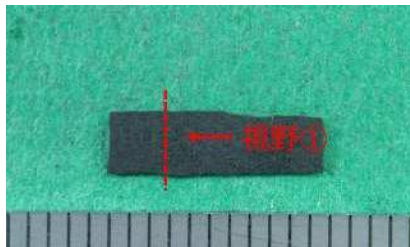
スケールを3次元測定器で計測した結果

<視野①>

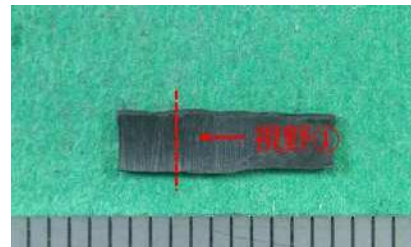


C蒸気発生器 第一管支持板上面 (低温側) から回収したスケール

<凸面>

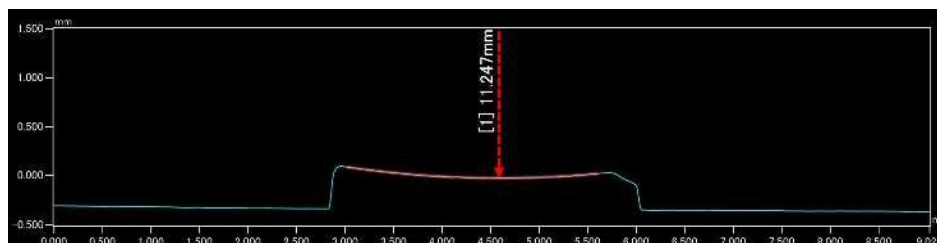


<凹面>



スケールを3次元測定器で計測した結果

<視野①>



伝熱管とスケールの摩耗試験方法について

以下の通り伝熱管とスケールの摩耗試験を実施し、スケールで有意な減肉が生じる可能性を検証した。

1. 試験概要

加振装置（図1参照）により、伝熱管をスケールに接触させた状態で加振し、スケールの撓動による伝熱管の減肉発生状況を確認する。

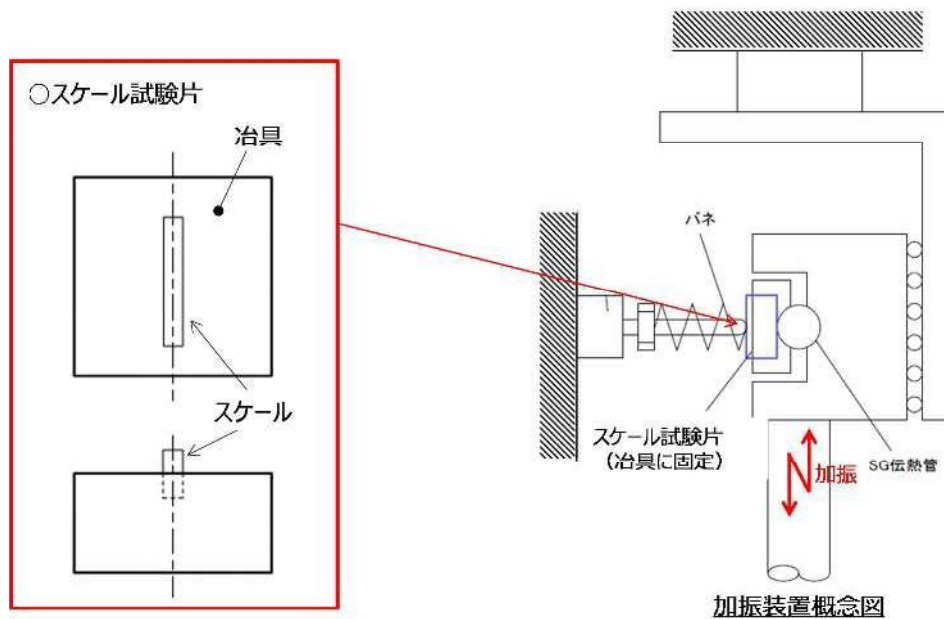


図1 加振装置概念図

2. 試験条件

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表1の通り設定した。

表1 摩耗試験条件

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

3. 摩耗試験結果の整理方法

試験後の伝熱管の減肉量とスケールの摩滅量を測定した後、体積比をとって結果を整理した。スケール及び伝熱管の試験前後の外観を図2及び3に示す。

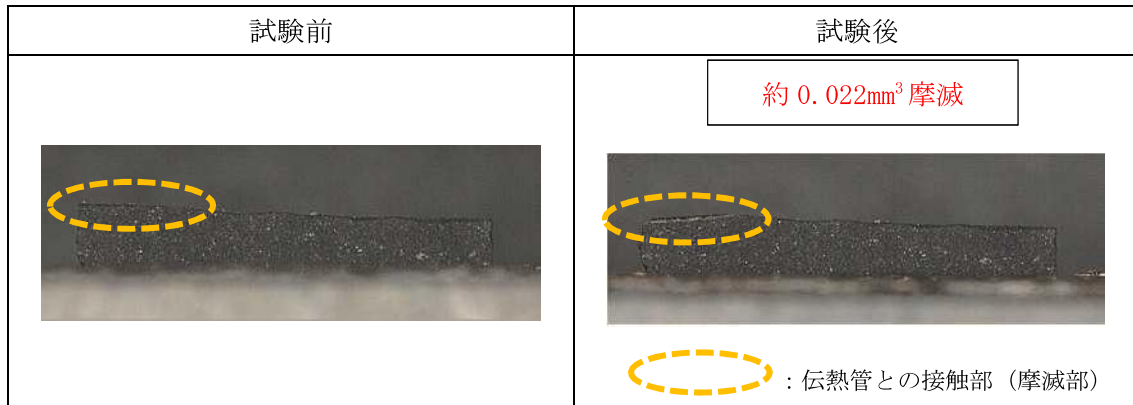


図2 摩耗試験前後のスケール試験片外観 (回収スケールの一例)

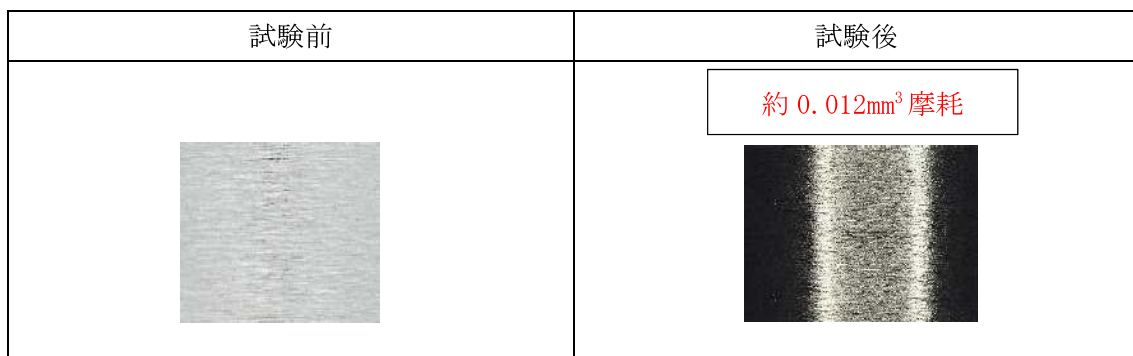
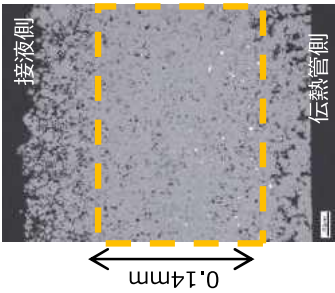
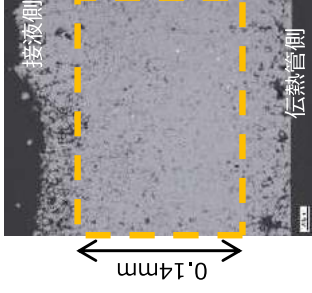
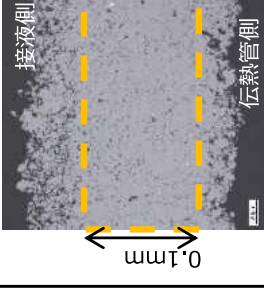
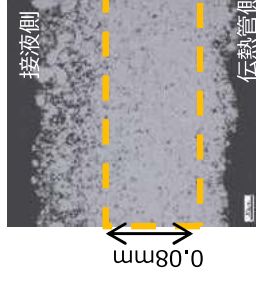
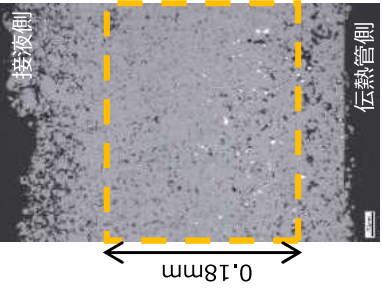
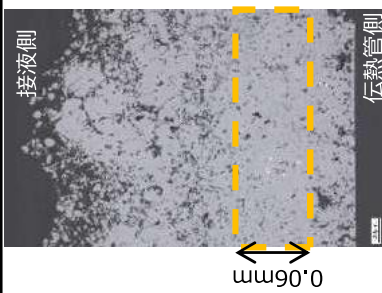
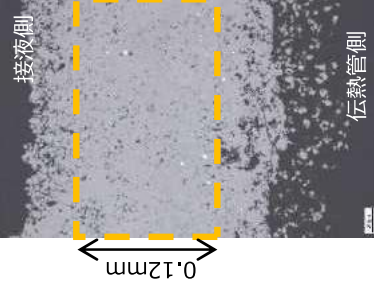
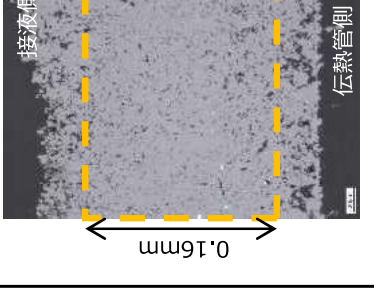
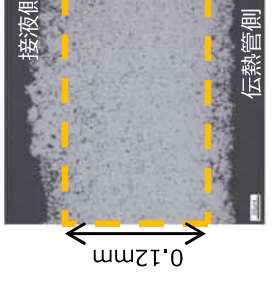
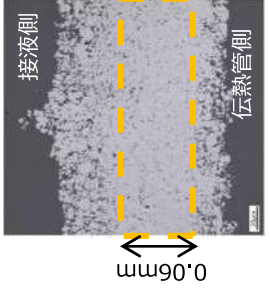


図3 摩耗試験前後の伝熱管試験片外観 (回収スケールの一例)

以 上

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果 (1 / 13)

スケール120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42個確認した。
 <断面観察結果 (1/12) >

スケール回収位置	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第二管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (高温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.3	約0.3	約0.2	約0.2	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.14	0.14	0.10	0.08	0.18
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.5	0.0	0.0	0.0	2.0
スケール回収位置	A-SG 第一管支持板上 (低温側)	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.3	約0.3	約0.3	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.06	0.12	0.16	0.12	0.06
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果 (2 / 13)

<断面観察結果 (2/12) >

スケール回収位置	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (低温側)	A-SG 第一管支持板上 (低温側)	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	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.14	0.08	0.12	0.16	0.10	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.0	0.0	0.5	0.3	0.0	0.0
スケール回収位置	A-SG 第一管支持板上 (低温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	A-SG 第一管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (低温側)	A-SG 第一管支持板上 (低温側)
断面マイクロ画像						
スケール厚さ (mm)	約0.2	約0.1	約0.3	約0.3	約0.3	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.10	0.06	0.16	0.08	0.08	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果 (3 / 13)

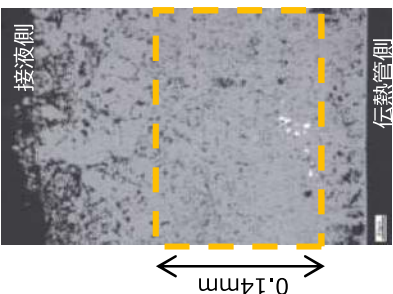
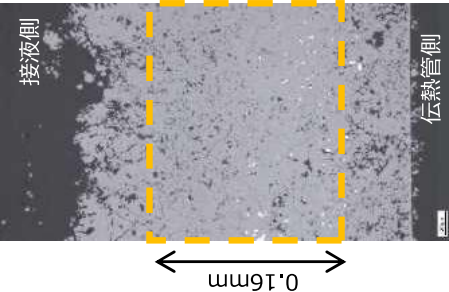
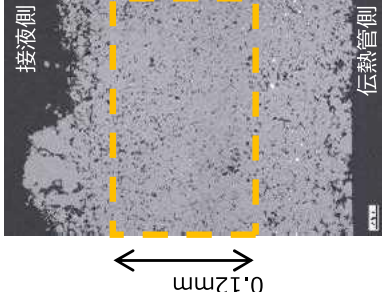
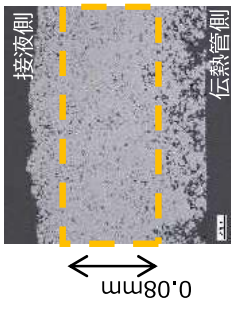
<断面観察結果 (3/12) >

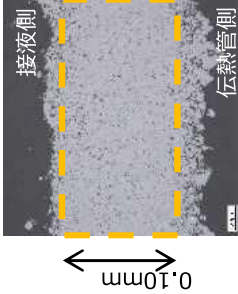
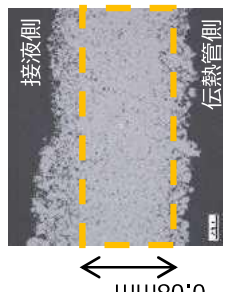
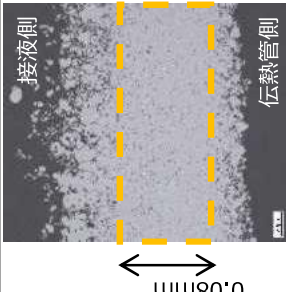
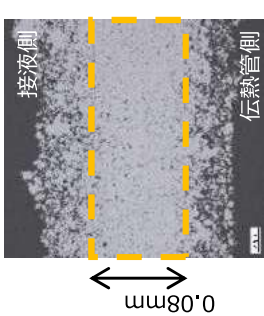
スケール回収位置	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.10	0.08	0.12	0.14	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	C-SG 第一管支持板上 (高温側)	C-SG 第一管支持板上 (高温側)	C-SG 第一管支持板上 (低温側)
断面マイクロ画像				
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.1
稠密層厚さ(mm)	0.08	0.10	0.10	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.0	0.0	0.0	0.0

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果 (4 / 13)

<断面観察結果 (4/12) >

スケール回収位置	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)
断面ミクロ画像				
スケール厚さ(mm)	約0.3	約0.3	約0.3	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.14	0.16	0.12	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.7	0.2	0.4	0.0

スケール回収位置	C-SG 第一管支持板上 (低温側)	C-SG 第二管支持板上 (低温側)	C-SG 第一管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)
断面ミクロ画像				
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.1	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.10	0.08	0.08	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.0	0.0	0.0	0.0

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果 (5 / 13)

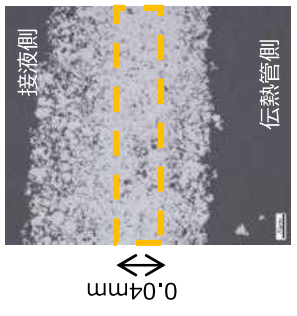
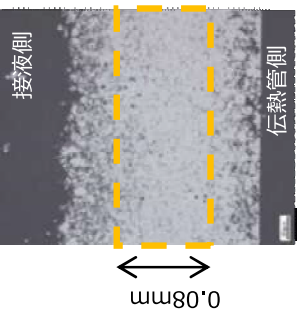
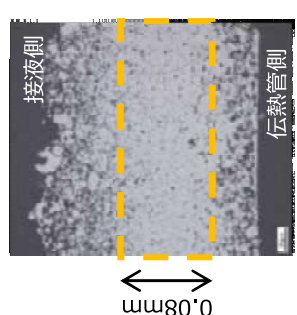
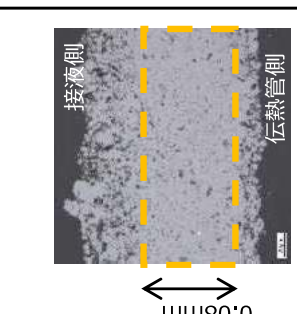
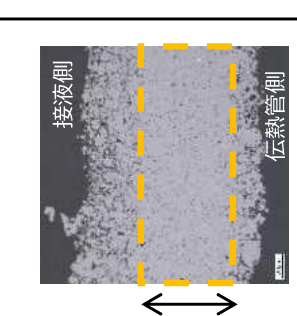
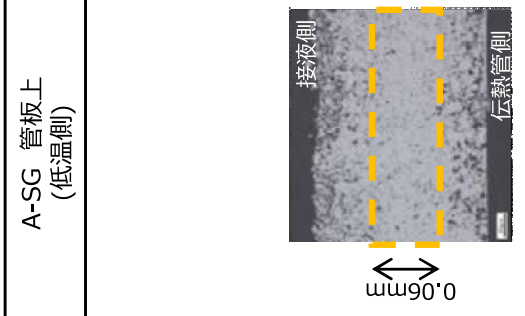
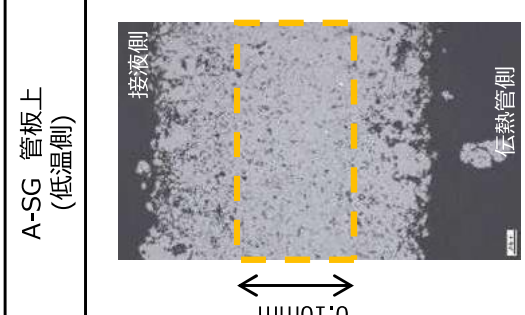
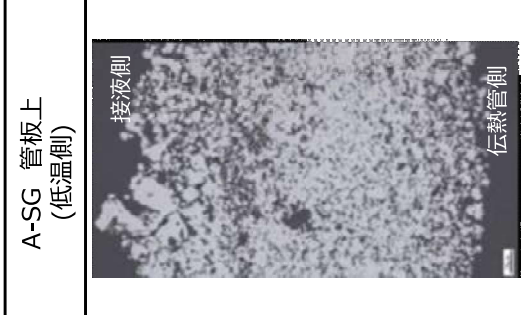
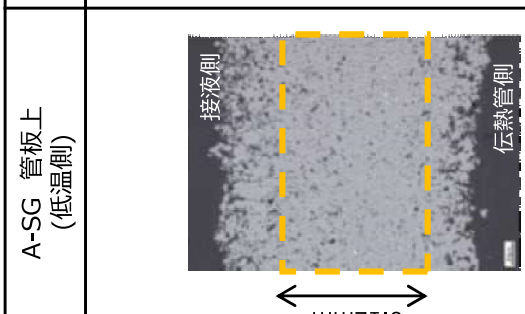
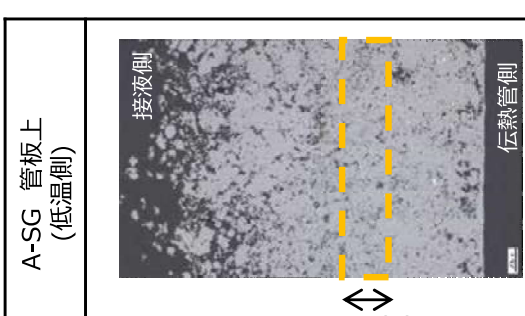
<断面観察結果 (5/12) >

スケール回収位置	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (低温側)	A-SG 第一管支持板上 (低温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.10	0.08	0.08	0.06	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.08	0.10	0.10	0.08	0.06
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

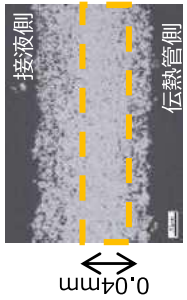

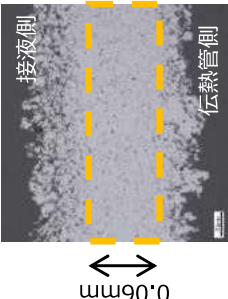
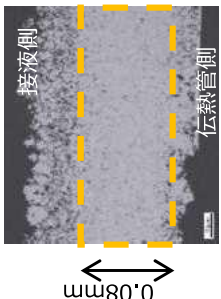
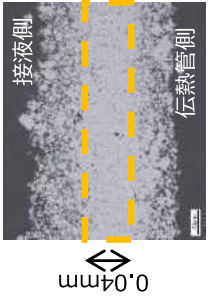
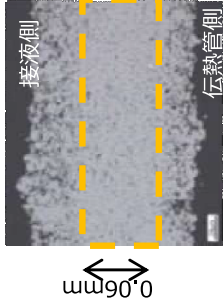
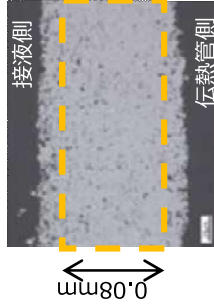
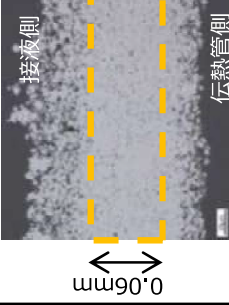
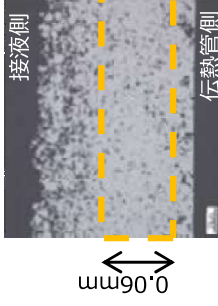
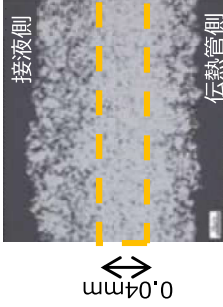
回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果 (6 / 13)

<断面観察結果 (6/12) >

スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.1	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.04	0.08	0.08	0.08	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-
スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.3	約0.3	約0.3	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.06	0.10	0.00	0.12	0.04
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-

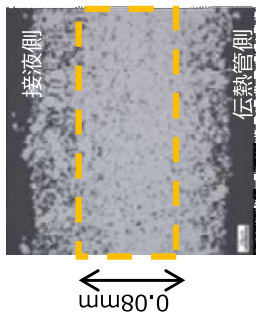
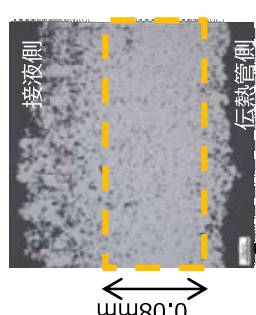
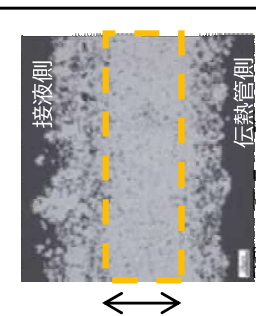
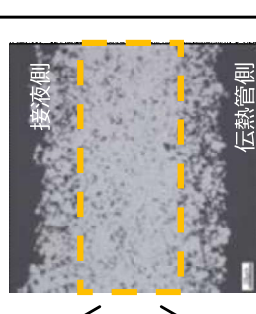
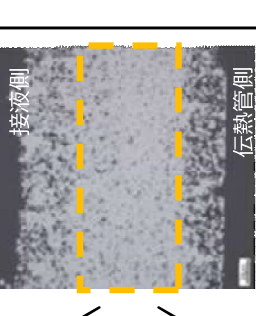
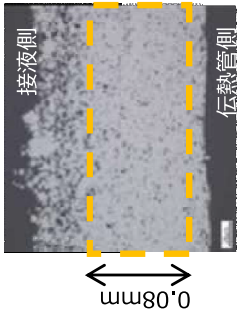
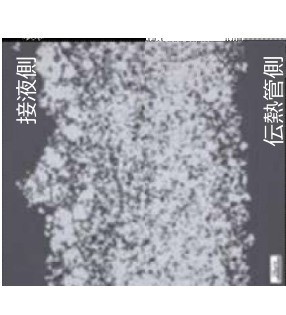
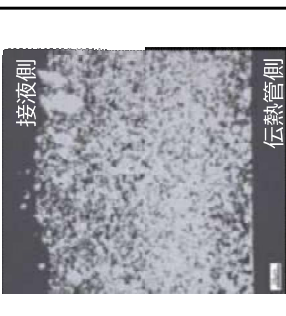
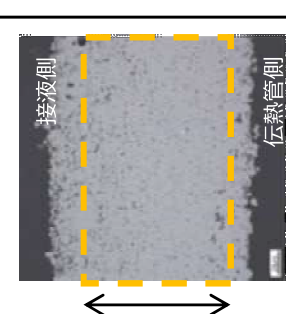
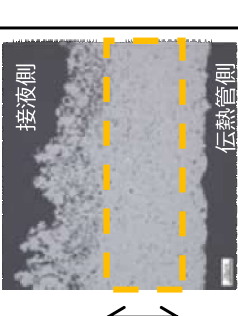
回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果 (7/13)

<断面観察結果 (7/12) >

スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.1	約0.1	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.04	0.06	0.06	0.08	0.04
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-
スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.06	0.08	0.06	0.06	0.04
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-

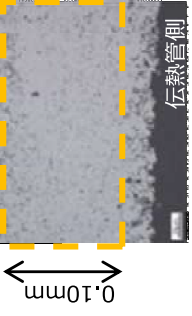
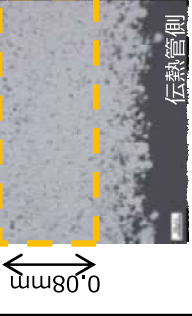
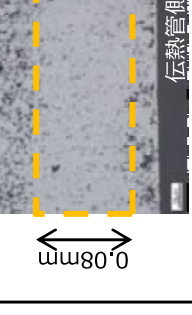
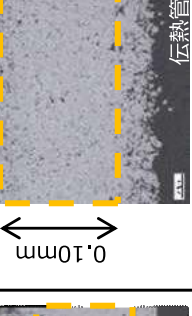
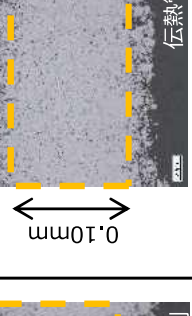

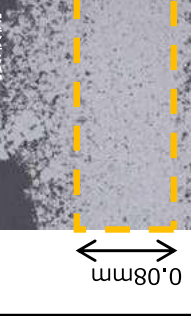
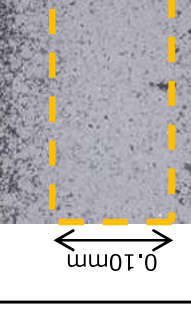
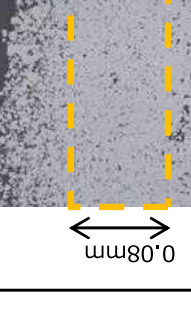
回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果 (8 / 13)

<断面観察結果 (8/12) >

スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)
断面マイクロ画像						
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.08	0.08	0.06	0.08	0.08	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-	-
スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)
断面マイクロ画像						
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.08	0.00	0.00	0.12	0.06	0.06
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-	-

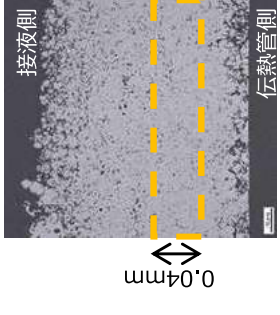
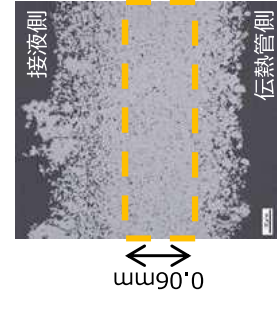
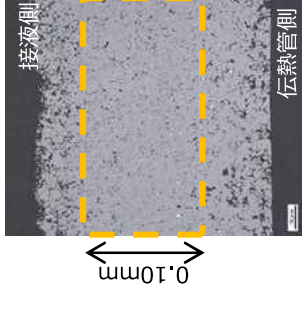
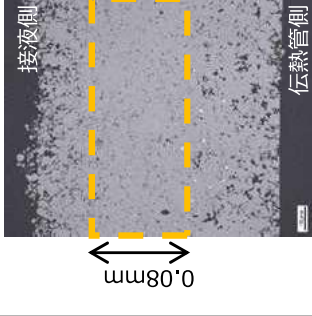
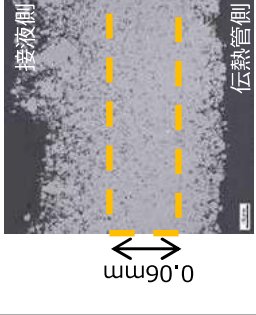
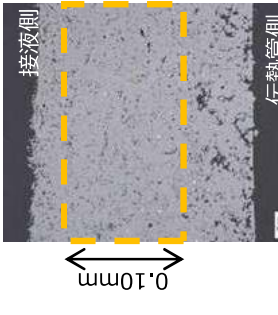
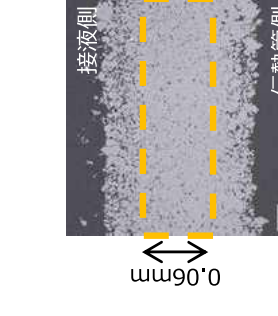
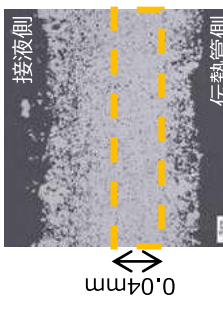
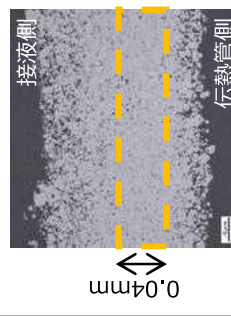
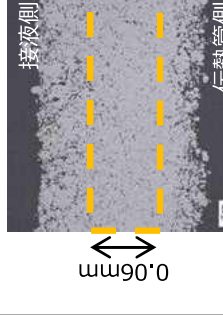
回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果 (9 / 13)

<断面観察結果 (9/12) >

スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)
断面マイクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.10	0.08	0.08	0.10	0.10
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-
スケール回収位置	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	A-SG 第二管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (低温側)	B-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0.2	約0.2	約0.2	約0.1	
稠密層厚さ(mm)	0.08	0.08	0.10	0.06	
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	

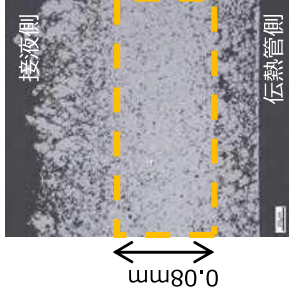
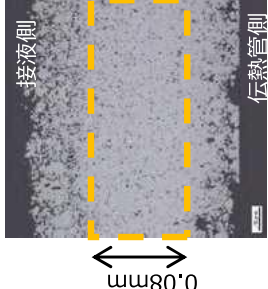
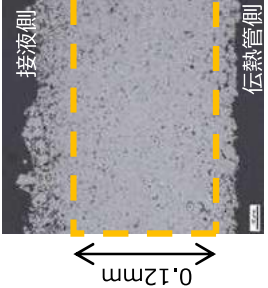
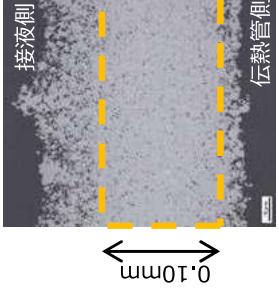
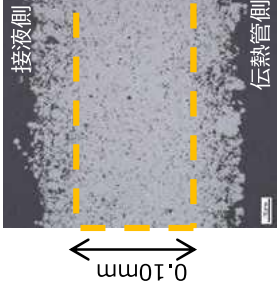
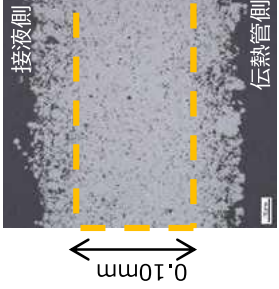
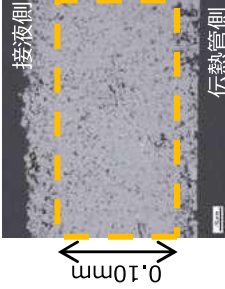
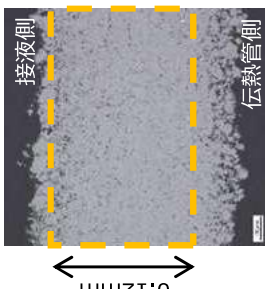
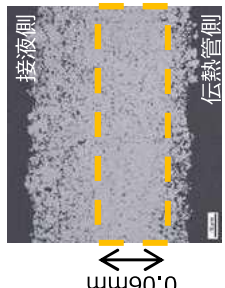
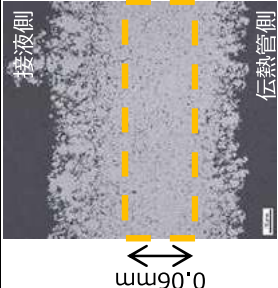
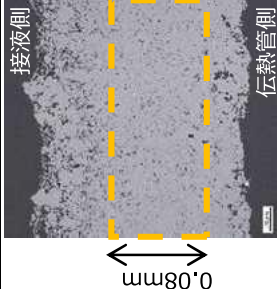
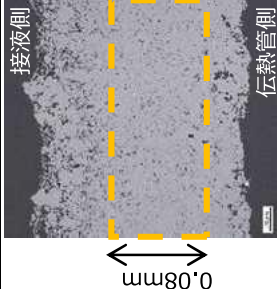
回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（10/13）

＜断面観察結果（10/12）＞

スケール回収位置	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-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0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.04	0.06	0.10	0.08	0.06
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-
スケール回収位置	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-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0.2	約0.1	約0.1	約0.1	約0.1
稠密層厚さ(mm)	0.10	0.06	0.04	0.04	0.06
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-

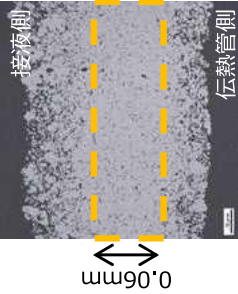
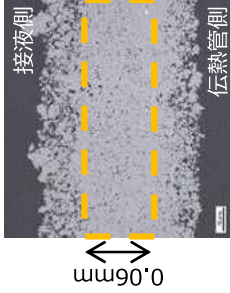
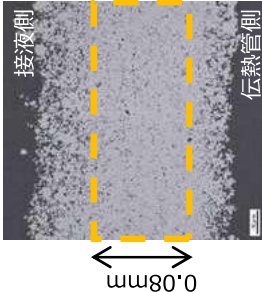
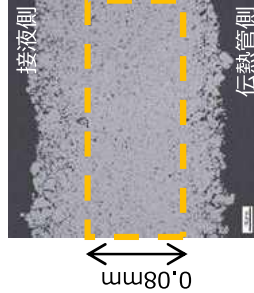
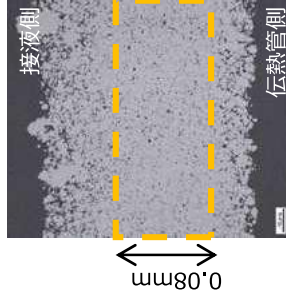
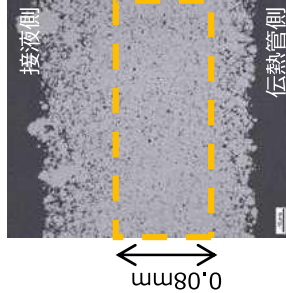
回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果 (11 / 13)

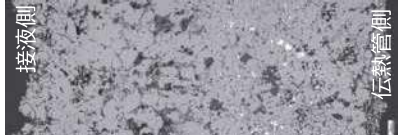
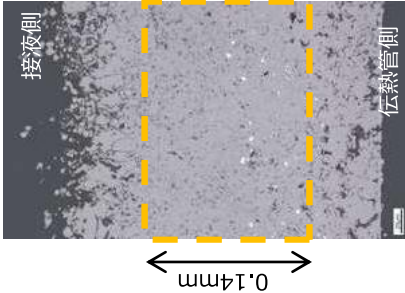
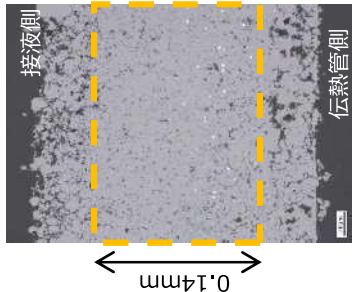
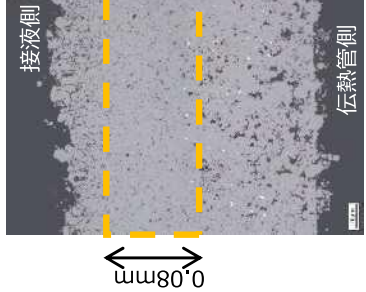
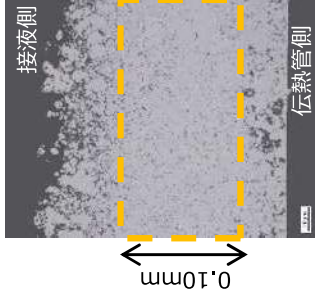
<断面観察結果 (11/12) >

スケール回収位置	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)
断面マイクロ画像						
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.08	0.08	0.12	0.10	0.10	0.10
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-	-
スケール回収位置	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-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0.2	約0.2	約0.1	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.10	0.12	0.06	0.06	0.08	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-	-

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果 (12 / 13)

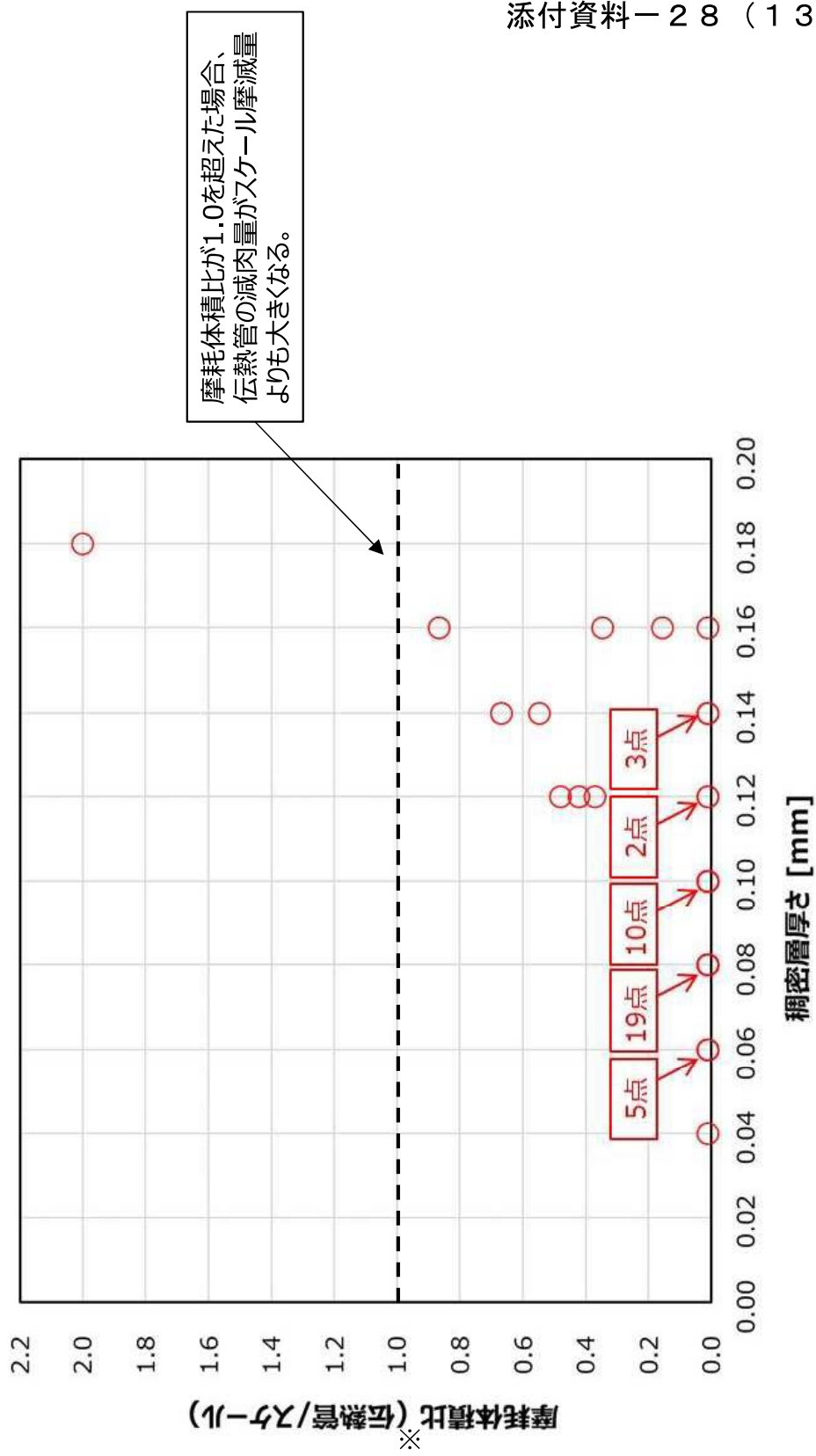
<断面観察結果 (12/12) >

スケール回収位置	C-SG 管板上 (高温側)	C-SG 管板上 (高温側)	C-SG 管板上 (高温側)	C-SG 管板上 (高温側)	C-SG 管板上 (高温側)	C-SG 管板上 (高温側)
断面ミクロ画像						
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.06	0.06	0.08	0.08	0.08	0.08
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-	-

スケール回収位置	A-SG 第三管支持板上 (低温側)	A-SG 第三管支持板上 (低温側)	A-SG 第三管支持板上 (低温側)	A-SG 第三管支持板上 (低温側)	A-SG 第三管支持板上 (低温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.6	約0.3	約0.3	約0.3	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.00	0.14	0.14	0.08	0.10
摩耗体積比 (伝熱管/スケール)	-	-	-	-	-

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（13 / 13）

比較的大きなスケール50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減量より大きくなるスケールを1個確認した。



※ 摩耗体積比 (伝熱管/スケール) : 摩耗試験における伝熱管の減肉量とスケールの摩減量の体積比

スケール剥離による減肉信号への影響

1. 概要

減肉信号とスケール附着信号は、周波数間の振幅・位相の相関関係が異なるため、スケール附着箇所の信号は MIX フィルタを適用することで消去されるが、減肉信号は消去されない。そこで、実機で検出された信号と、スケール附着・剥離 (EDM スリット有り) およびスケール附着・剥離 (EDM スリット無し) の信号を比較し、スケール附着箇所の信号と減肉信号の違いを実験的に示した。また、局所的なスケール剥離について、ECT での信号検出性を確認した。

2. 試験方法

2.1 スケール附着・剥離 (EDM スリット有り) の試験片データ

深さ 59%、長さ 5mm、幅 0.4mm の外面周方向矩形 EDM スリットが付与された伝熱管外面に四三酸化鉄を薄く延ばした厚さ 1.0mm 程度の模擬スケールを貼り付け、スリット直上に当たる部分に、スリット同様の切れ目を入れた。この伝熱管で ECT データを取得した。

2.2 スケール附着・剥離 (EDM スリット無し) の試験片データ

伝熱管外面に四三酸化鉄を薄く延ばした厚さ 1.0mm 程度の模擬スケールを貼り付け、模擬スケールに長さ約 4mm(周方向)、幅約 0.5mm(軸方向)の切れ目を入れ、局所的なスケール剥離を模擬した。この伝熱管で ECT データを取得した。

3. 結果

取得したデータを表 1 に示す。

表 1 実機波形とスケール附着・剥離 (EDM スリット有り)、スケール附着・剥離 (EDM スリット無し) 比較

実機波形 (A-SG X9,Y22) MIX	スケール附着・剥離 (EDM スリット有り) MIX	スケール附着・剥離 (EDM スリット無し) MIX
<p>信号検出有り</p> <p>C3B 側</p> <p>C5B 側</p>	<p>信号検出有り</p> <p>EDM 信号</p> <p>MIX フィルタによりスケール附着箇所の信号は消去されたが、EDM スリット信号は検出された。</p>	<p>信号検出なし</p> <p>MIX フィルタによりスケール附着箇所の信号は消去された。</p>
実機波形 (A-SG X9,Y22) 100kHz	スケール附着・剥離 (EDM スリット有り) 100kHz	スケール附着・剥離 (EDM スリット無し) 100kHz
<p>C3B 側</p> <p>C5B 側</p>	<p>EDM 信号</p> <p>スケール附着箇所の信号</p> <p>スケール附着箇所の信号および EDM スリット信号が検出された。</p>	<p>スケール附着箇所の信号</p> <p>スケール剥離箇所</p> <p>スケール附着箇所に信号は確認できるものの局所的なスケール剥離箇所は信号検出されず。</p>

4. まとめ

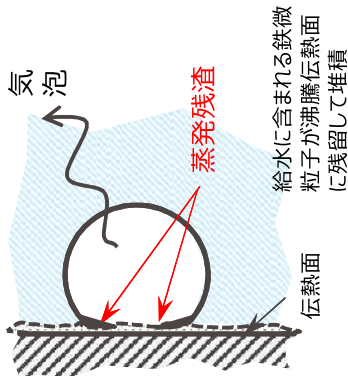
- ・スケール附着・剥離 (EDM スリット有り) の試験片を用いた検証結果より、スケール附着箇所の信号は MIX フィルタにより消去されるが、EDM スリットの信号は消去されず、有意な信号として検出される。
- ・スケール附着・剥離 (EDM スリット無し) の試験片を用いた検証結果より、局所的なスケール剥離箇所では信号が検出されない。

⇒実機波形は MIX フィルタを適用しても有意な信号が検出されていることから、スケール附着や局所的なスケール剥離の信号ではなく、減肉信号と考えられる。

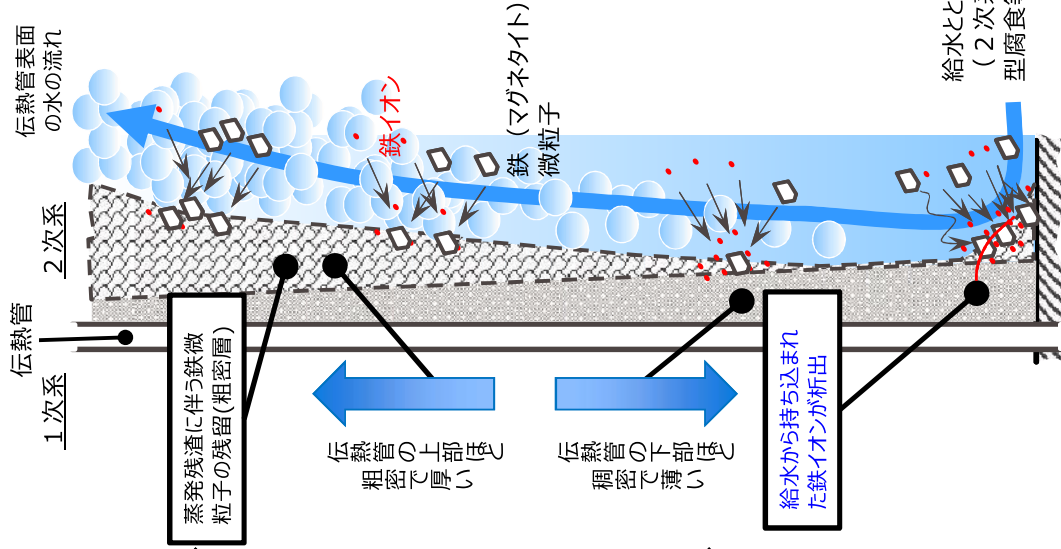
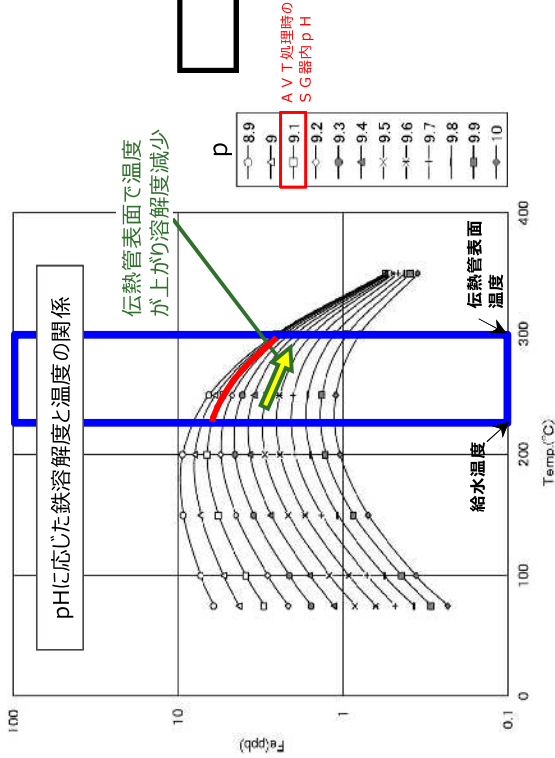
以上

スケール生成メカニズム (平成8年 高浜発電所3号機 蒸気発生器伝熱管調査報告書の知見を踏まえたイメージ)

伝熱管の上部で支配的なスケール生成メカニズム



伝熱管の下部で支配的なスケール生成メカニズム



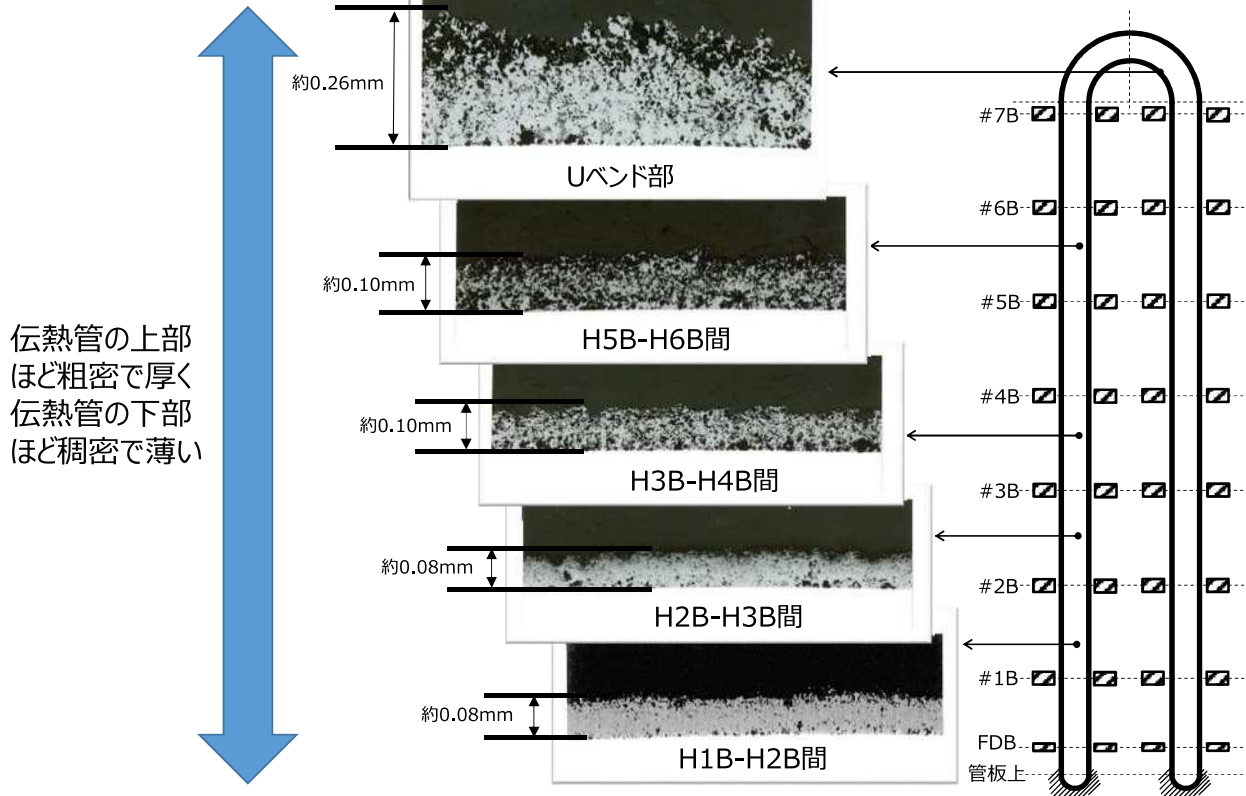
給水とともに、鉄イオン・鉄微粒子
(2次系構成機器の流れ加速
型腐食等により発生) が供給

※ 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

発電用原子炉施設故障等報告書
(高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について)
(2021年2月19日) より引用

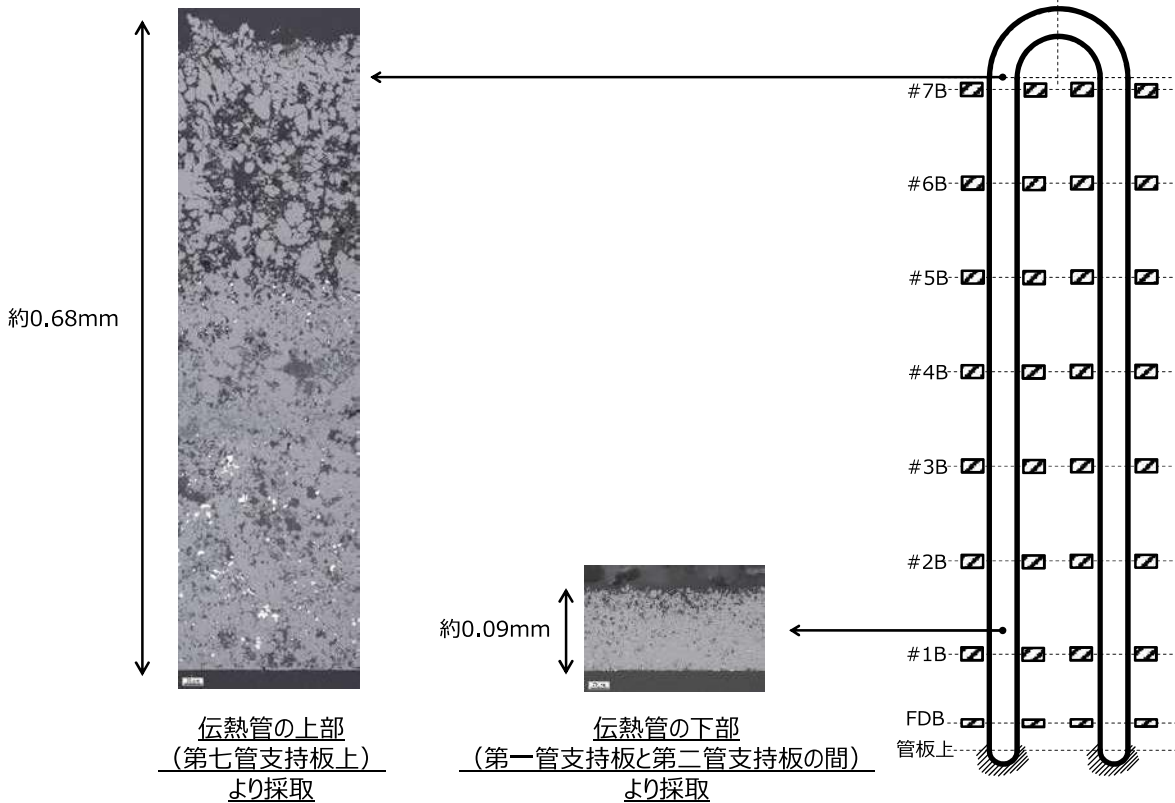
○高浜発電所3号機 平成8年調査時

(運転時間：8.3万時間時点)



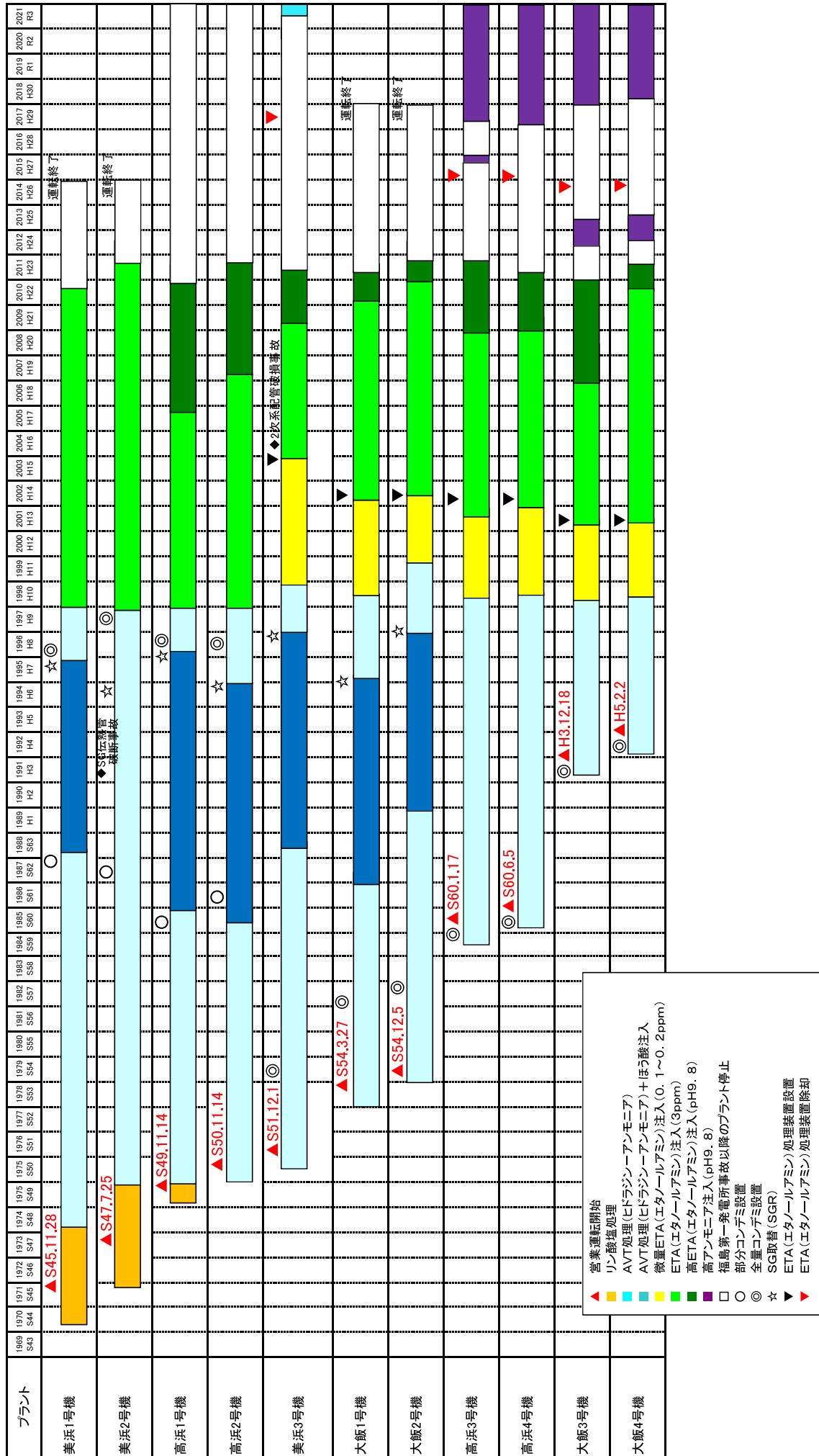
○高浜発電所4号機におけるスケール調査実績

伝熱管の上部のスケールは粗密で厚く、伝熱管の下部のスケールは稠密で薄いことを確認した。

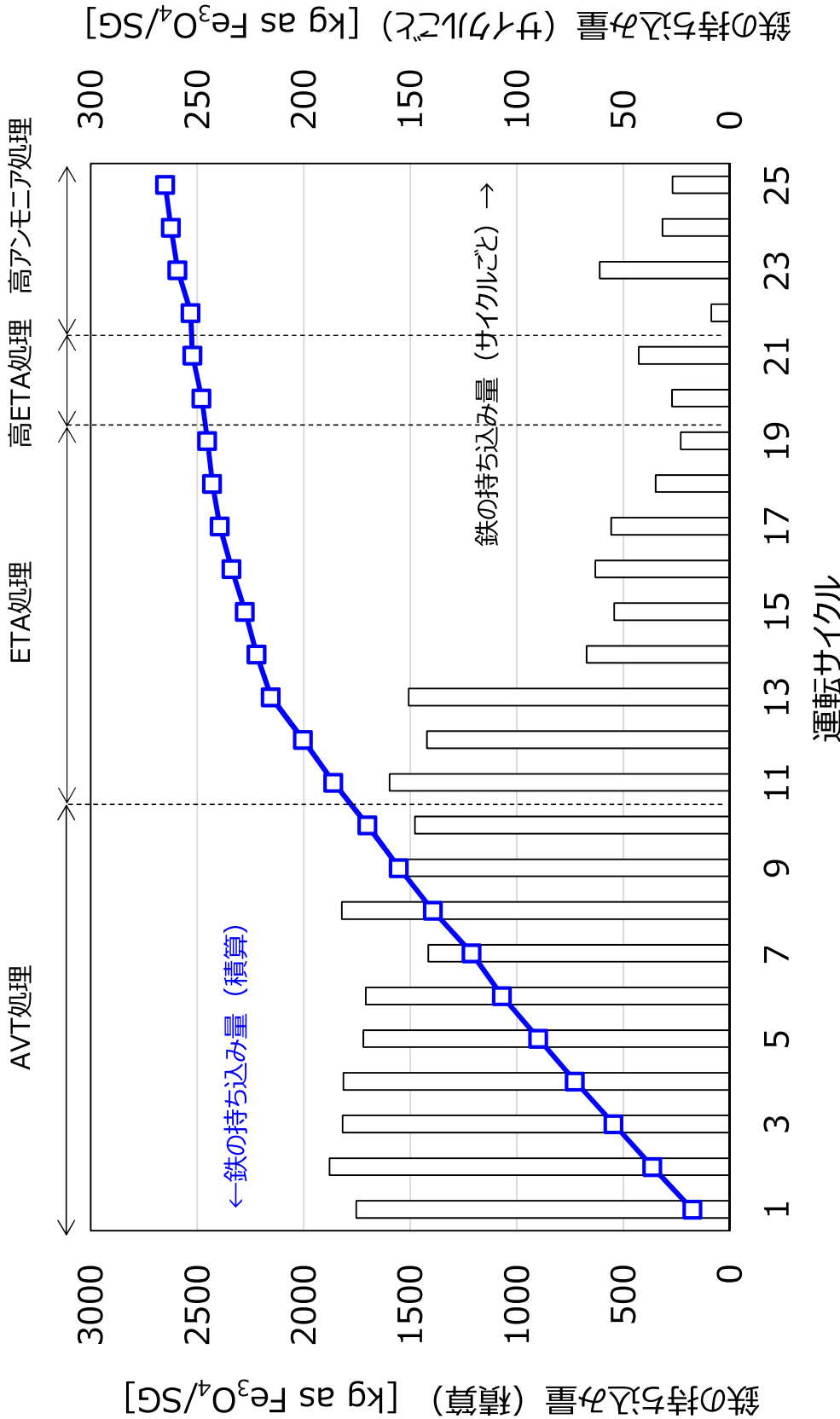


発電用原子炉施設故障等報告書
(高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について)
(2021年2月19日)より引用

2次系水処理と水化学管理の変遷



高浜3号機 鉄の持ち込み量の推移

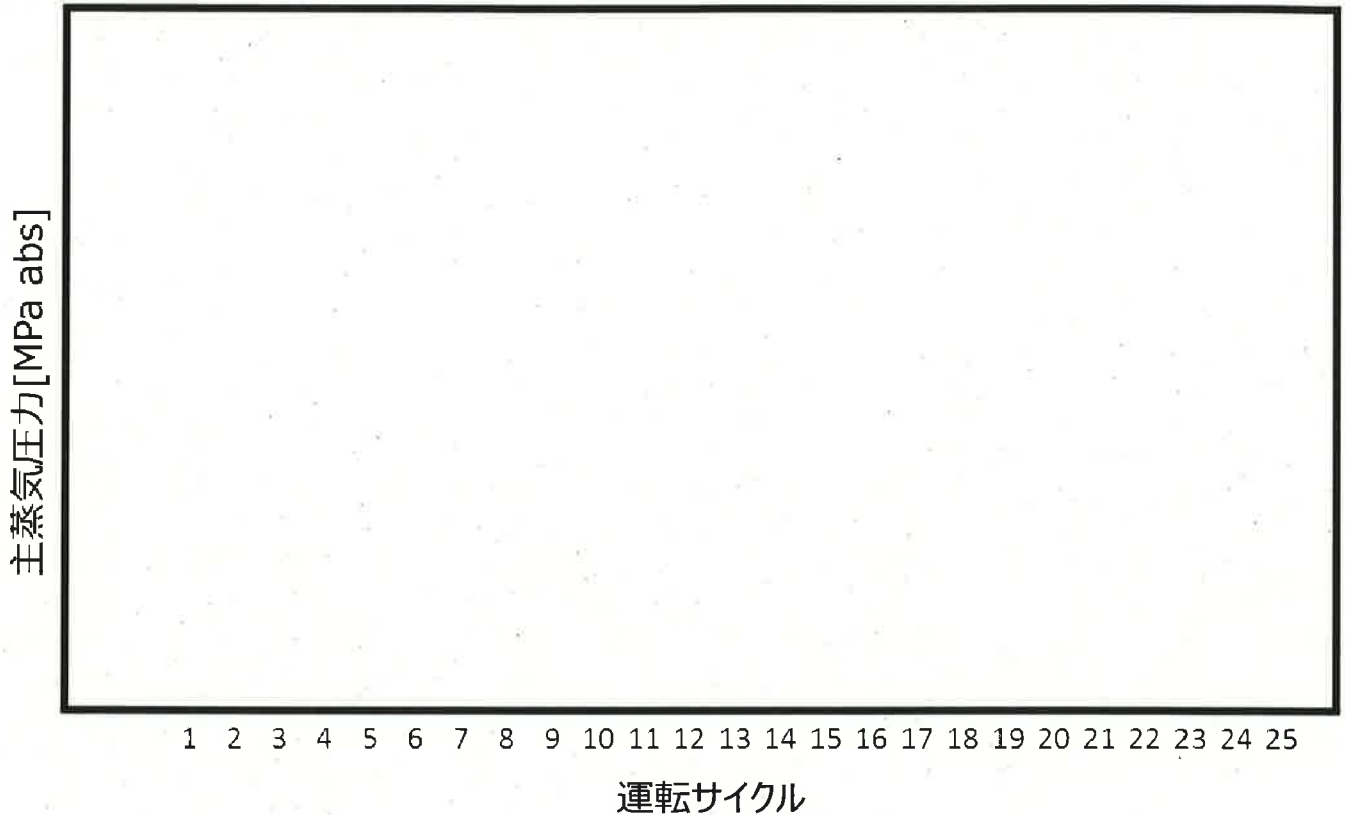


高浜3号機 鉄の持ち込み量の推移

プラント性能指標の推移

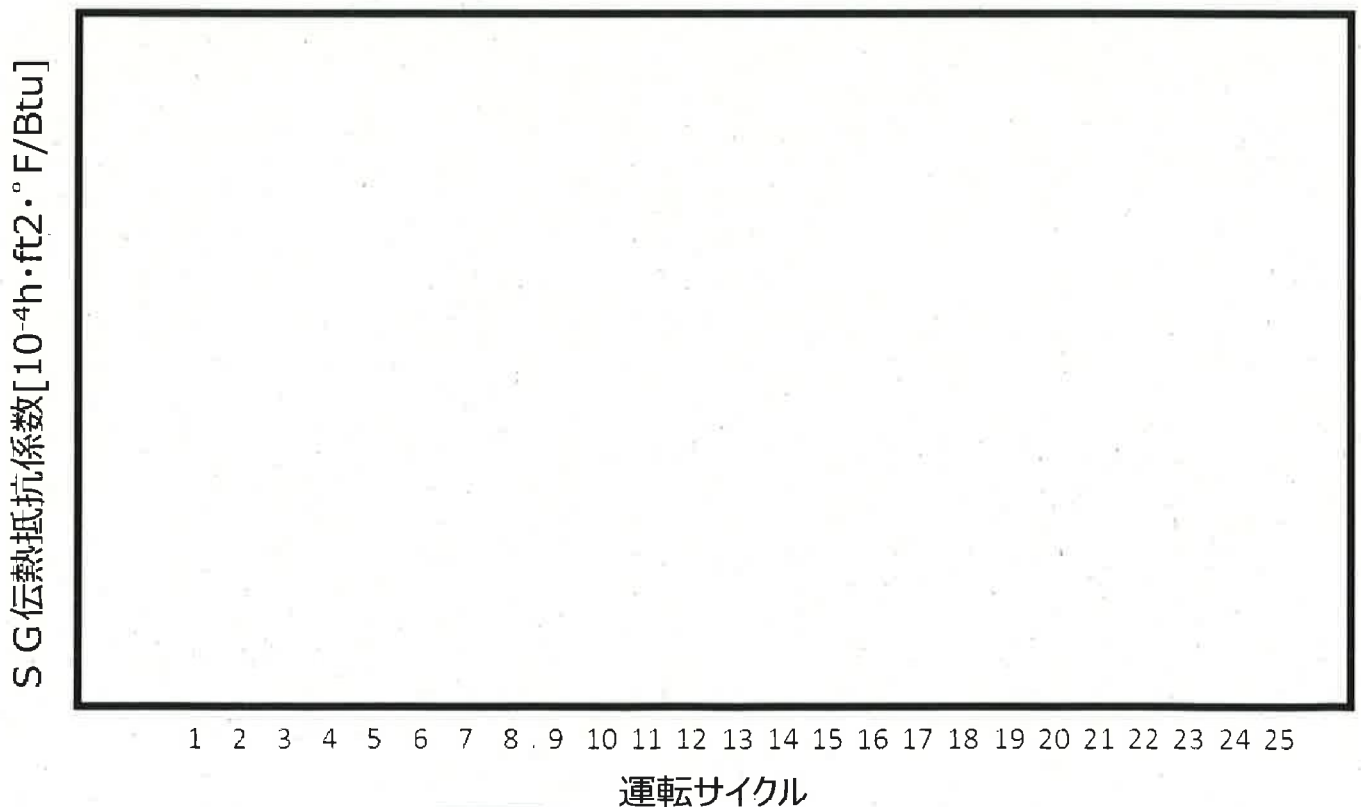
主蒸気圧力

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



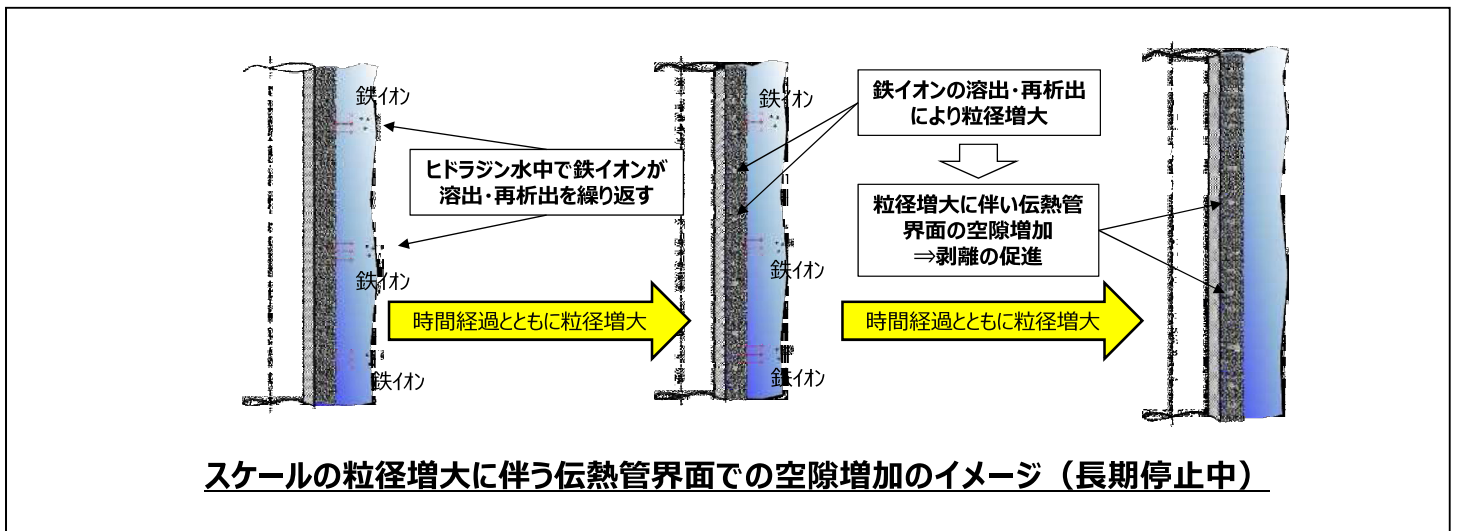
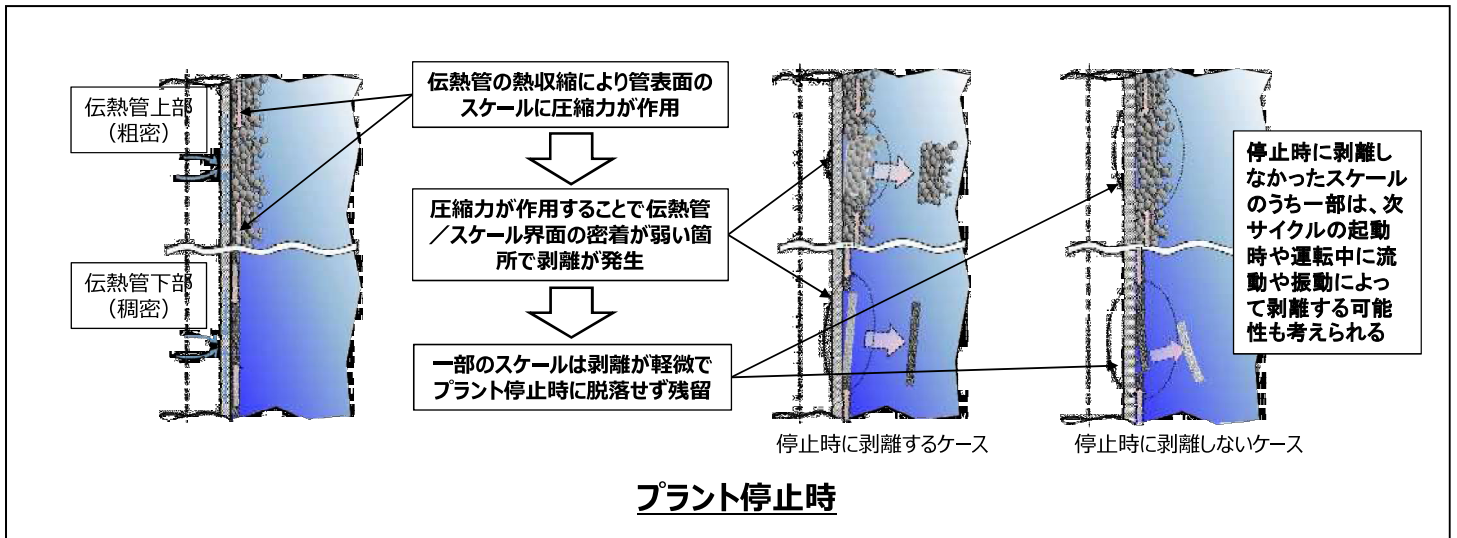
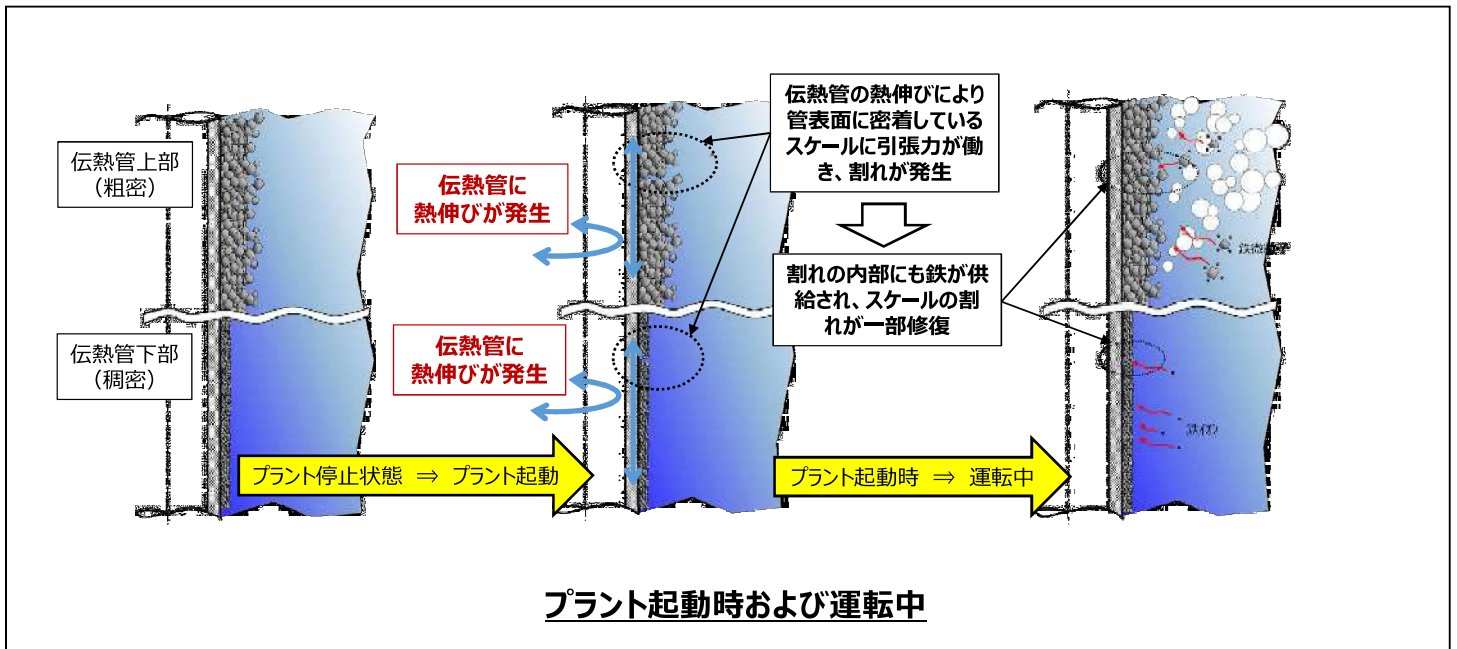
S G 伝熱抵抗係数

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



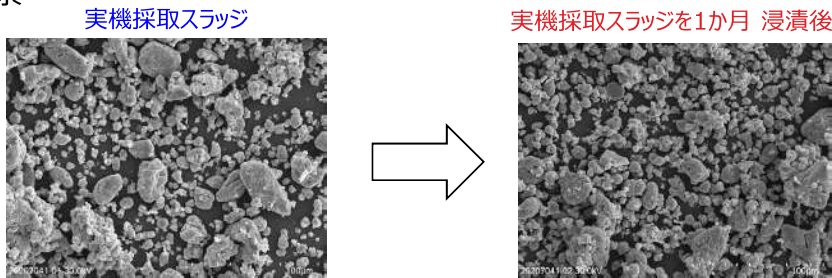
：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

スケール剥離メカニズムイメージ

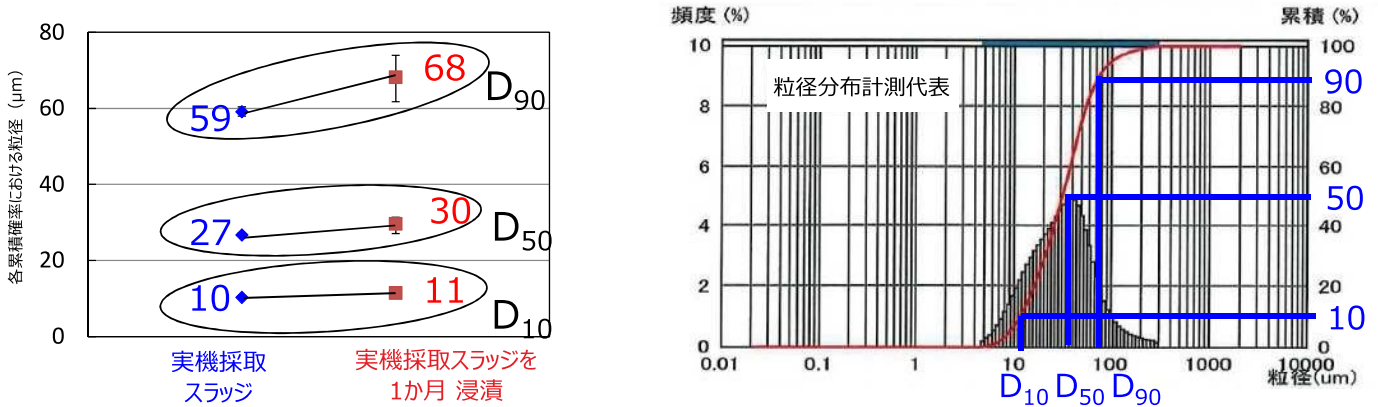


・スケールの粒径増大化を実験で検証すべく、実機（ヒドラジン水による満水保管）と同条件にて、スラッジ（粒の観察を容易にするため粉末状スラッジを使用）をヒドラジン水に浸漬させた試験を1か月間実施した。

(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: 3回計測の最大値, 最小値)



・浸漬試験後に粒径の分布計測を行った結果、有意な粒径増加が認められたことから、長期停止がスケール性状に及ぼす影響は、粒が大きくなることであると推定した。

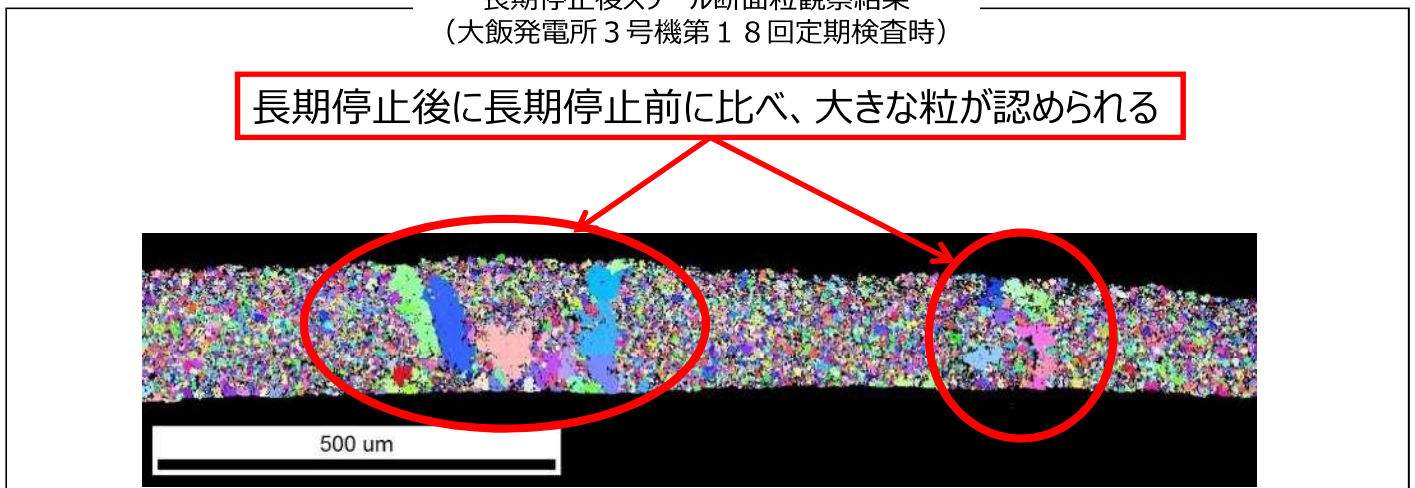
・電子線後方散乱回析法(EBSD)^{*}により長期停止前後のスケール断面を観察した結果は以下のとおりである。

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)

長期停止後に長期停止前に比べ、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。

スケールのSG 2次側器内挙動の推定および流況モックアップ試験による接触状態の再現

熱流動解析によりSG 2次側器内で管支持板下面に到達するまでのスケール挙動を推定するとともに、SG 2次側の流況モックアップ試験により、推定したスケールの接触状態が実機二相流相当条件においても再現するか検討を行った。

1. SG器内でのスケール挙動の推定

(1) 第三管支持板下面（低温側）

図1にSG 2次側下部の器内流況および想定されるスケールの挙動を示す。

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、管板直上で発生したスケールの場合、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、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、フローロット部を通過し、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。

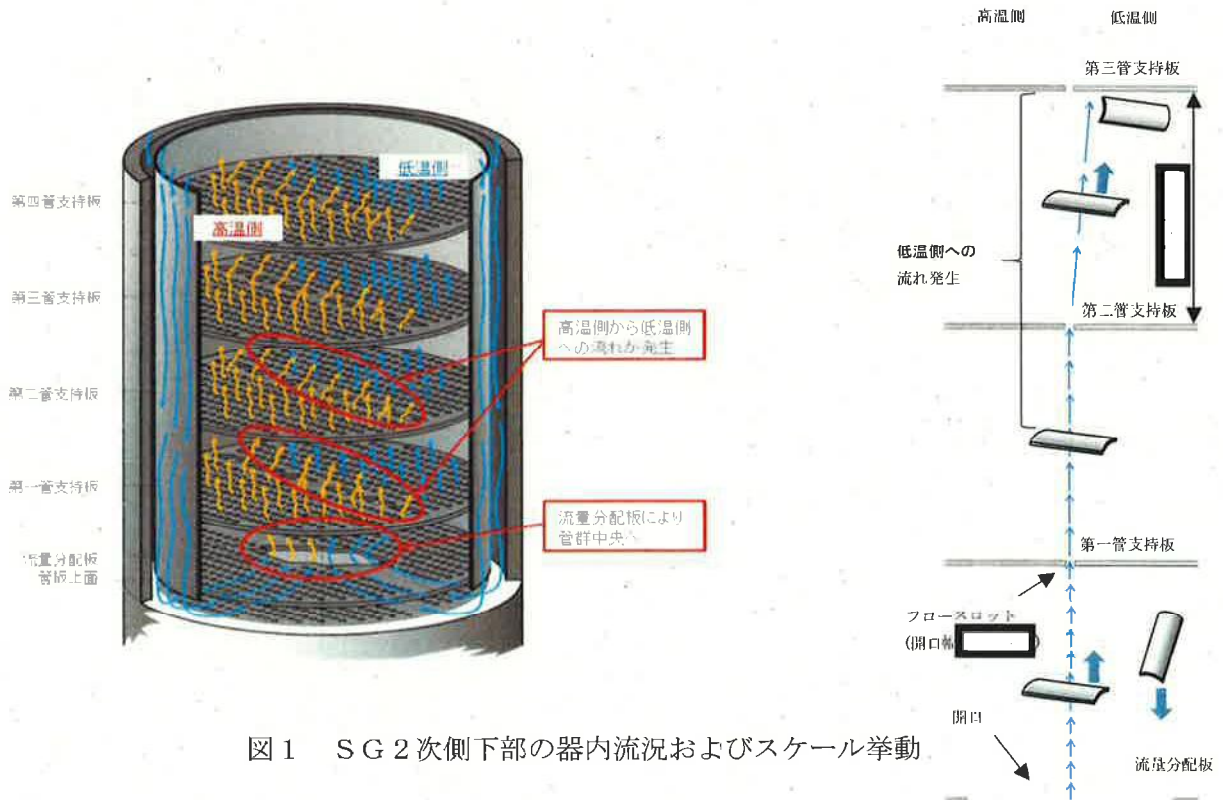


図1 SG 2次側下部の器内流況およびスケール挙動

流れ方向は、管支持板間の平均的な水平方向流速と上昇方向流速を合成して図示した。

□：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。

(2) 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

図2に第四管支持板下面に到達するスケールの推定される挙動を示す。

運転中のSG器内2次側の鉛直方向の流体抗力はスケールの重力による落下力より大きい。また、管支持板側面と管群外筒の間にある幅 の隙間があり、図3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の間を通過した後、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。

なお、第一管支持板上方または第二管支持板上方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、上昇流に乗り、支持板側面と管群外筒を通過し、第四管支持板下面に至る可能性はあると考えられる。

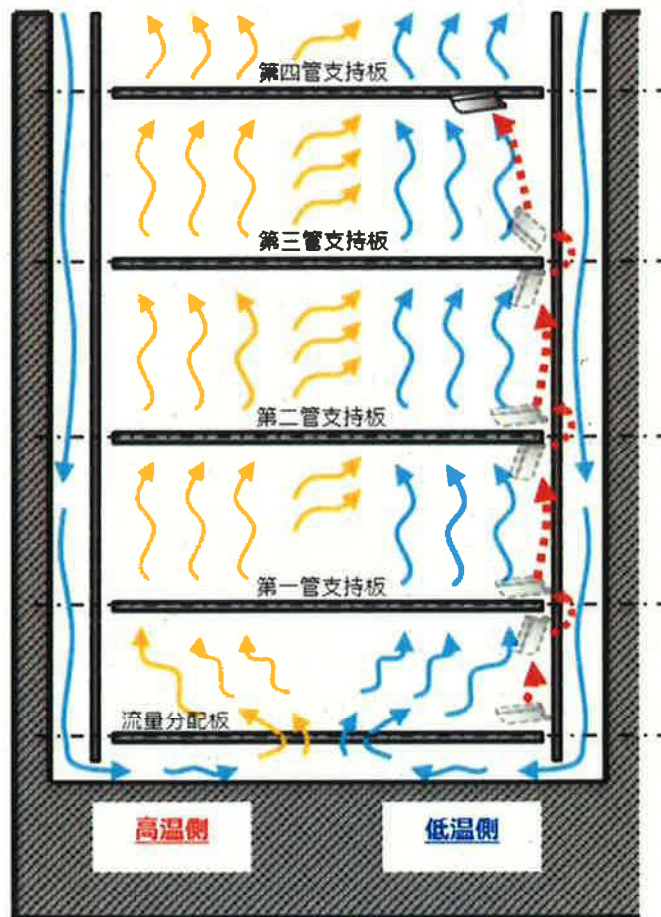


図2 SG 2次側下部の器内流況およびスケール挙動

: 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。

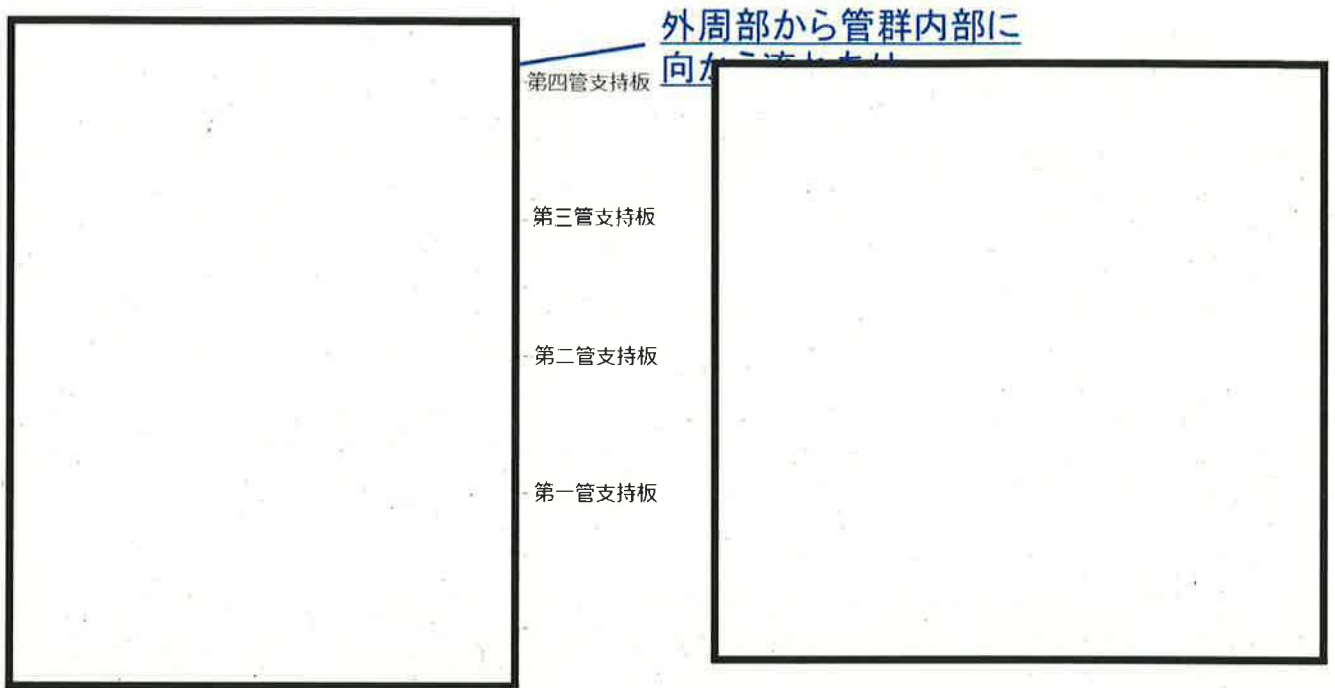


図3 減肉発生箇所における流動解析結果

(3) 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

図4に第二管支持板下面に到達するスケールの推定される挙動を示す。

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。

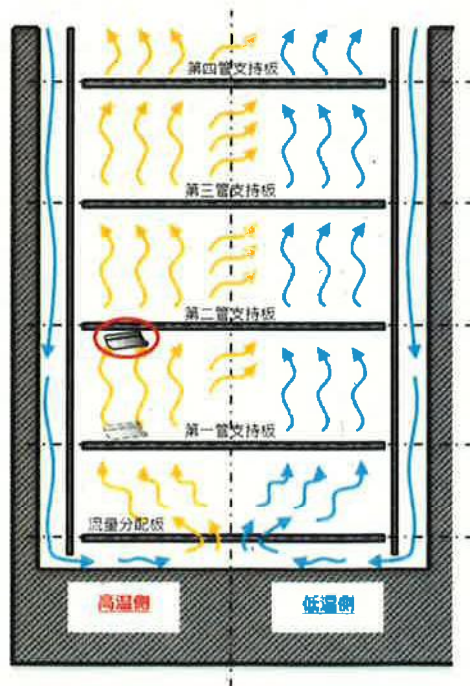


図4 SG 2次側下部の器内流況およびスケール挙動

: 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。

2. 流況モックアップ試験結果を踏まえた検討

高浜4号機第23回定検で実施した流況モックアップ試験の試験流速は実機条件と同等の流体力が発生する流速として設定した。

今回定期検査で確認された減肉箇所における、熱流動解析により求めた流速はいずれも流況モックアップ試験流速と比較して大きいため、スケールはそれぞれの管支持板下面に到達し、伝熱管との接触状態が実機二層流においても維持された可能性があるものと推定した。

＜参考＞

高浜4号機第23回定検における流況モックアップ試験による接触状態の再現

(1) 試験方法

3次元熱流動解析で得られるSG2次側流況を再現する水空気試験装置を用いて、C2、C3およびC4スケールの各模擬スケール片について、推定した接触状態が実機二相流相当条件下において管支持板下面で維持されるか確認を行った（図1参照）。

- ・試験流速：
- ・模擬スケール片形状：約18mm×約10mm×約0.3mm
(C2スケールと同一形状、凹面側で管支持板下面に拘束)
- ・模擬スケール片形状：約23mm×約11mm×約0.3mm
(C3スケールと同一形状、凸面側で管支持板下面に拘束)
- ・模擬スケール片形状：約21mm×約10mm×約0.3mm
(C4スケールの破損前想定形状と同一形状、凹面側で管支持板下面に拘束)

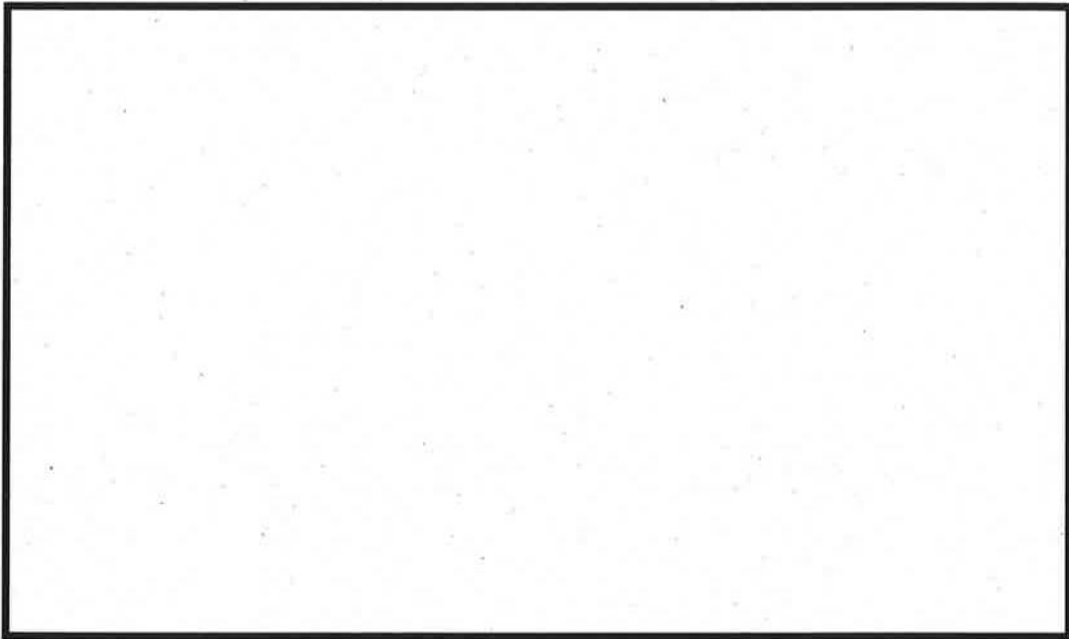


図1 水空気試験装置概要

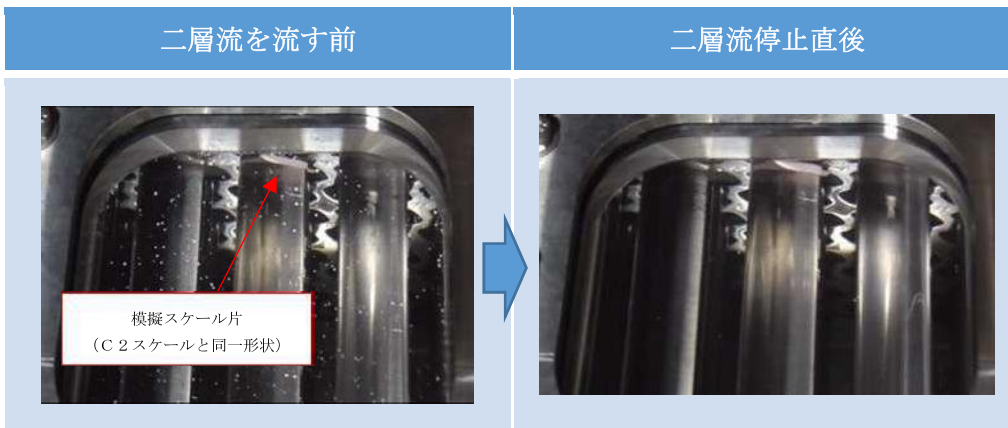
(2) 試験結果

試験装置内の水-空気二相流中で、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たことから、スケール片は凹面・凸面のいずれであっても管支持板下面で保持されうることを確認した（図2参照）。

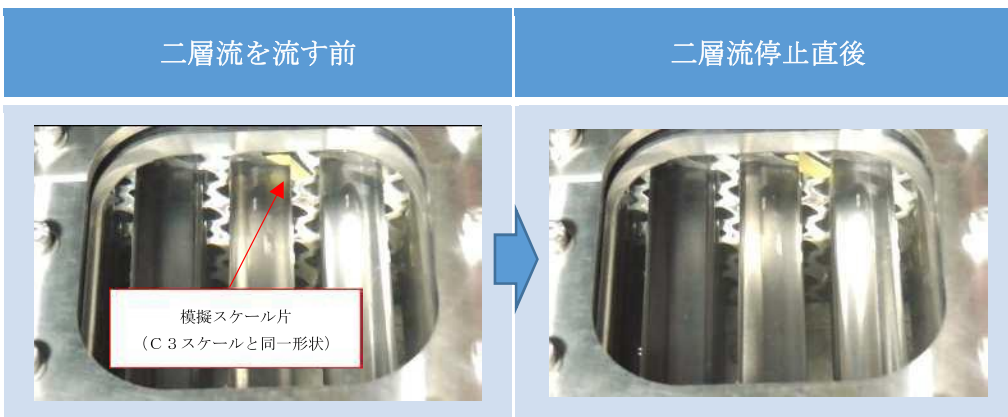
発電用原子炉施設故障等報告書
(高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について)
(2021年2月19日)より引用

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。

< C 2 スケールと伝熱管 X 5 5, Y 8 との接触状態を想定 >



< C 3 スケールと伝熱管 X 2 1, Y 8 との接触状態を想定 >



< C 4 スケールと伝熱管 X 5 5, Y 3 との接触状態を想定 >



図 2 水空気試験結果

以上の結果から、今回の原因と考えられるスケールは、SG器内で伝熱管から剥離後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って第三管支持板低温側下面に到達し、伝熱管との接触状態が実機二相流中においても維持された可能性があるものと推定した。

以 上

発電用原子炉施設故障等報告書
(高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について)
(2021年2月19日)より引用