

管支持板との接触による摩耗減肉の評価（1／7）

伝熱管は図 1 に示すとおり管支持板によって水平方向を支持しており、四ツ葉型の穴によって 1 穴あたり 4 箇所が伝熱管と接触する構造となっている。二次冷却水によって伝熱管に振動が生じた場合、伝熱管は水平全方向にランダムに振動するため、管支持板との接触による摩耗減肉が顕著化する場合は 4 箇所の接触部(ランド部^{*1})に減肉が生じることとなる。

今回、減肉指示が確認された位置の目視点検を行った結果、図 2～図 13 に示すとおり、減肉は管支持板下端位置にしか発生していない、かつ、ランド部の位置に発生していない、またはランド部の位置に発生している場合でも接触部 4 箇所のうち 1 箇所しか発生していないことから、前述の傾向とは異なり、減肉が管支持板との接触・摩耗によって発生した可能性はないと考える。

^{*1} 管支持板に加工されている四ツ葉型管穴のうち凸面部。

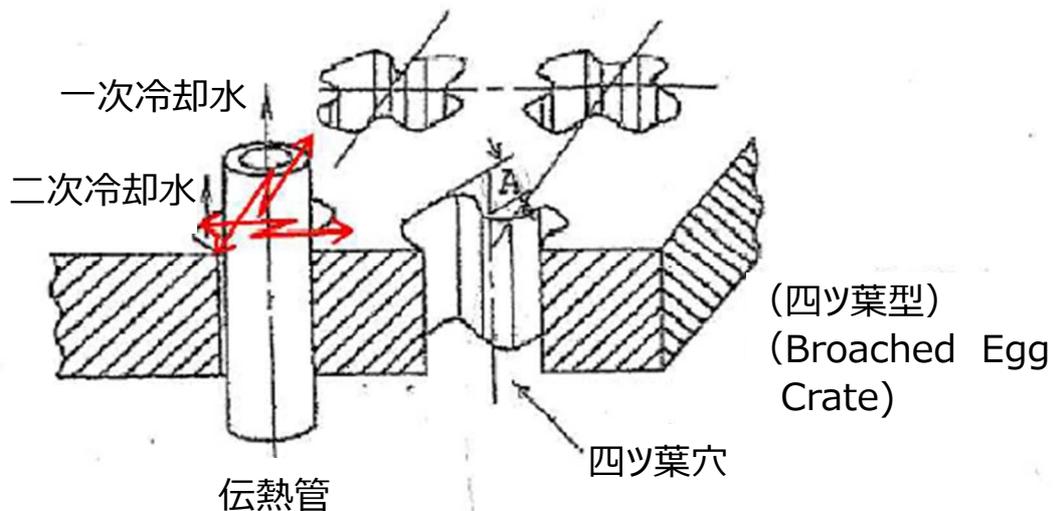


図 1 管支持板四ツ葉穴（BEC 穴）による伝熱管の支持状況

管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (2/7)

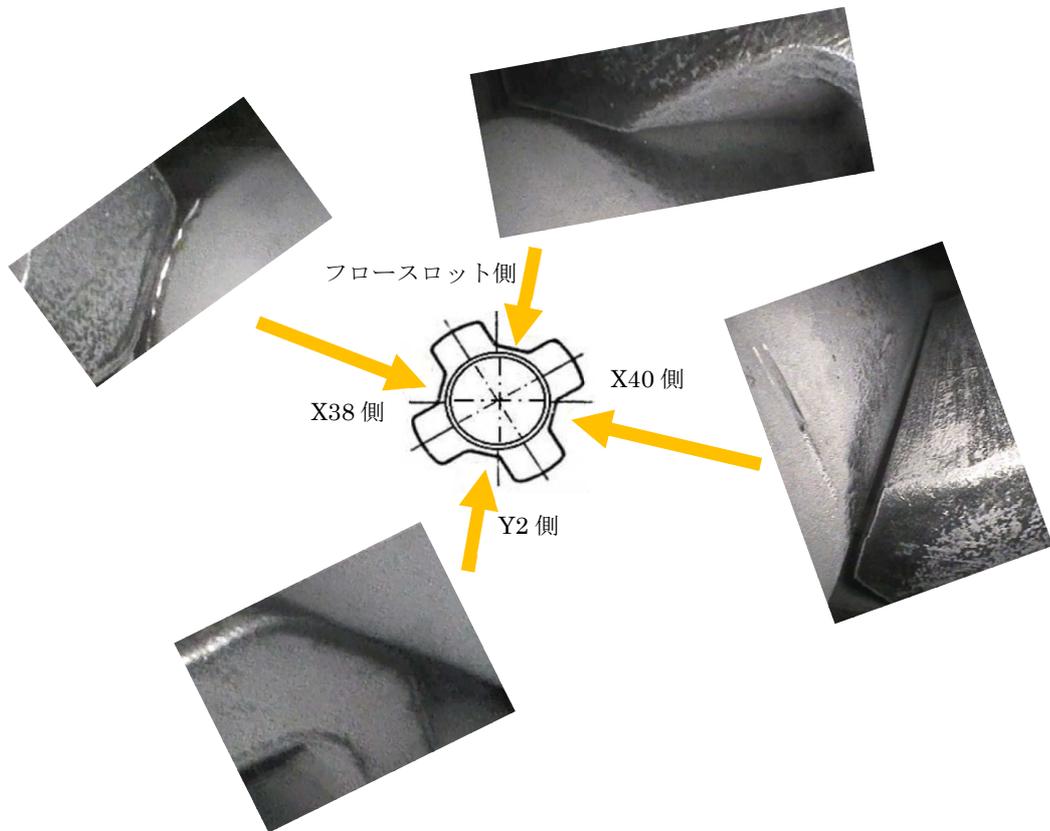


図2 減肉とランド部の位置関係(A-SG X39, Y1)

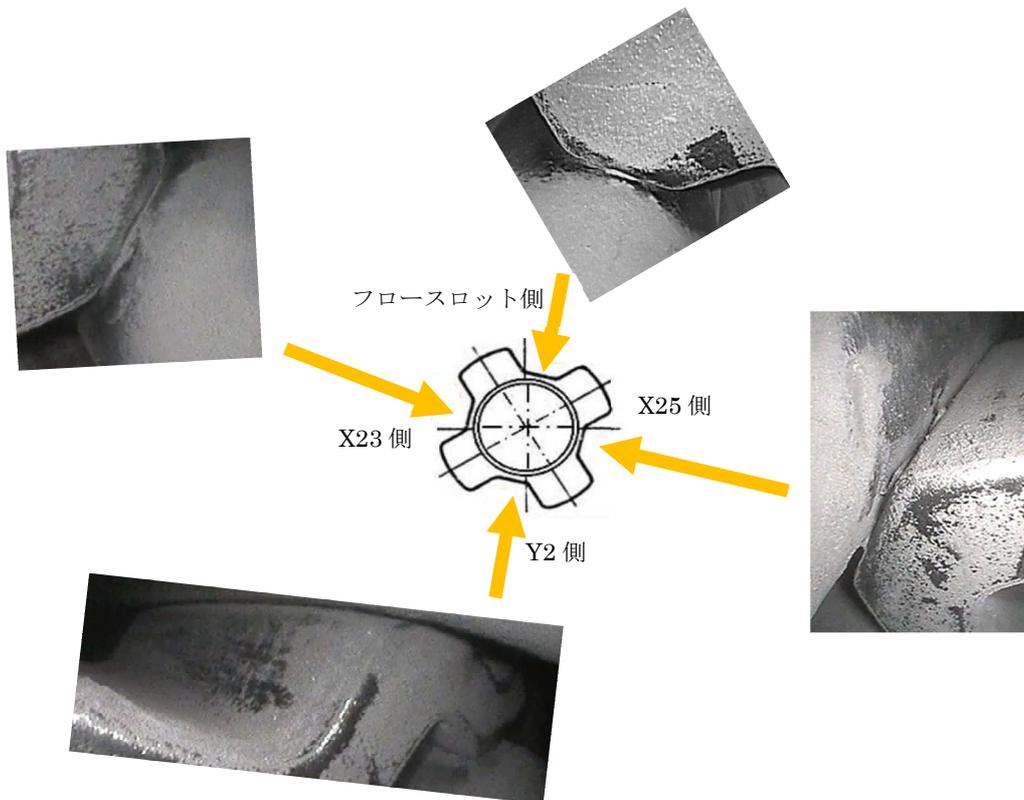


図3 減肉とランド部の位置関係(A-SG X24, Y1)

管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (3/7)

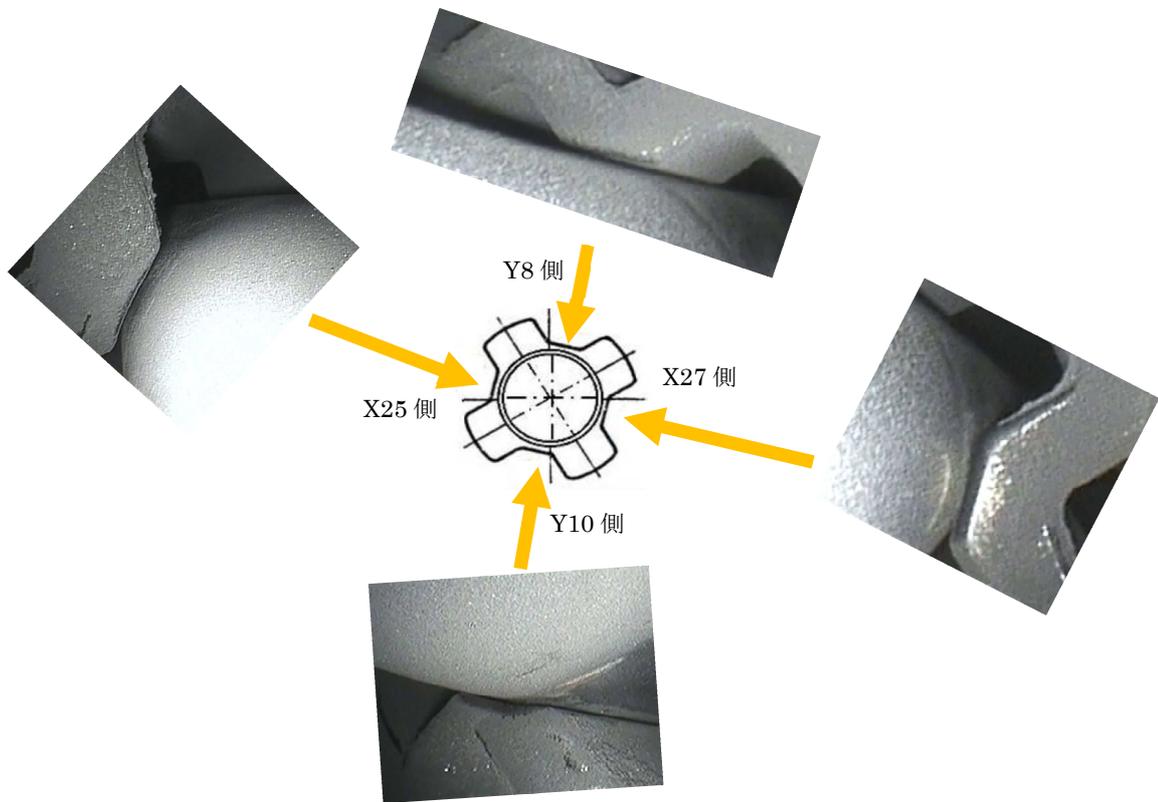


図4 減肉とランド部の位置関係(A-SG X26, Y9)

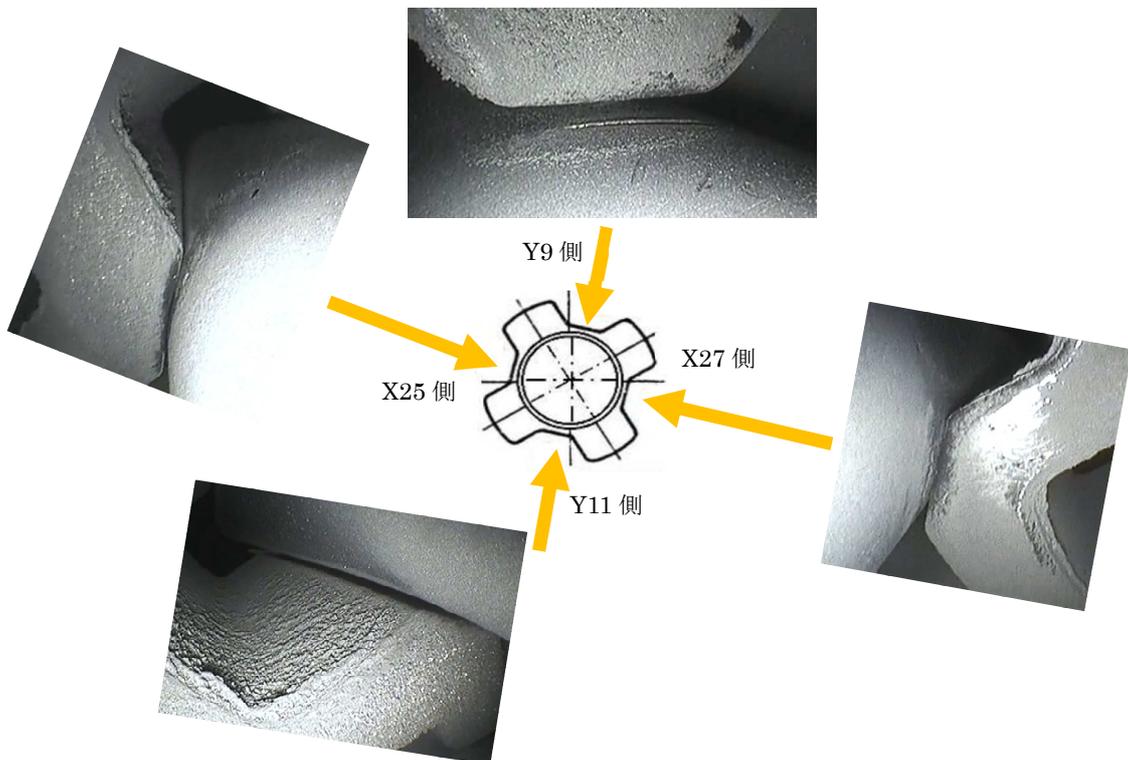


図5 減肉とランド部の位置関係(A-SG X26, Y10)

管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (4/7)

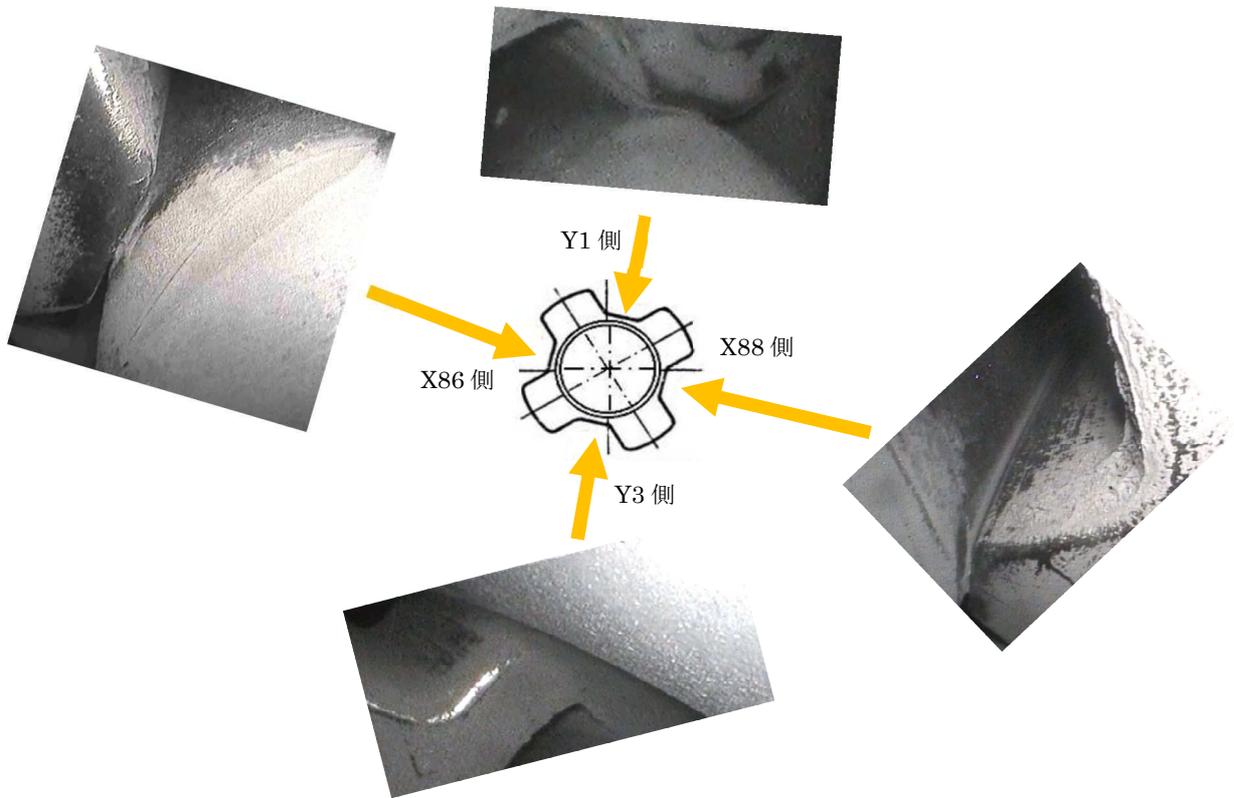


図 6 減肉とランド部の位置関係(A-SG X87, Y2)

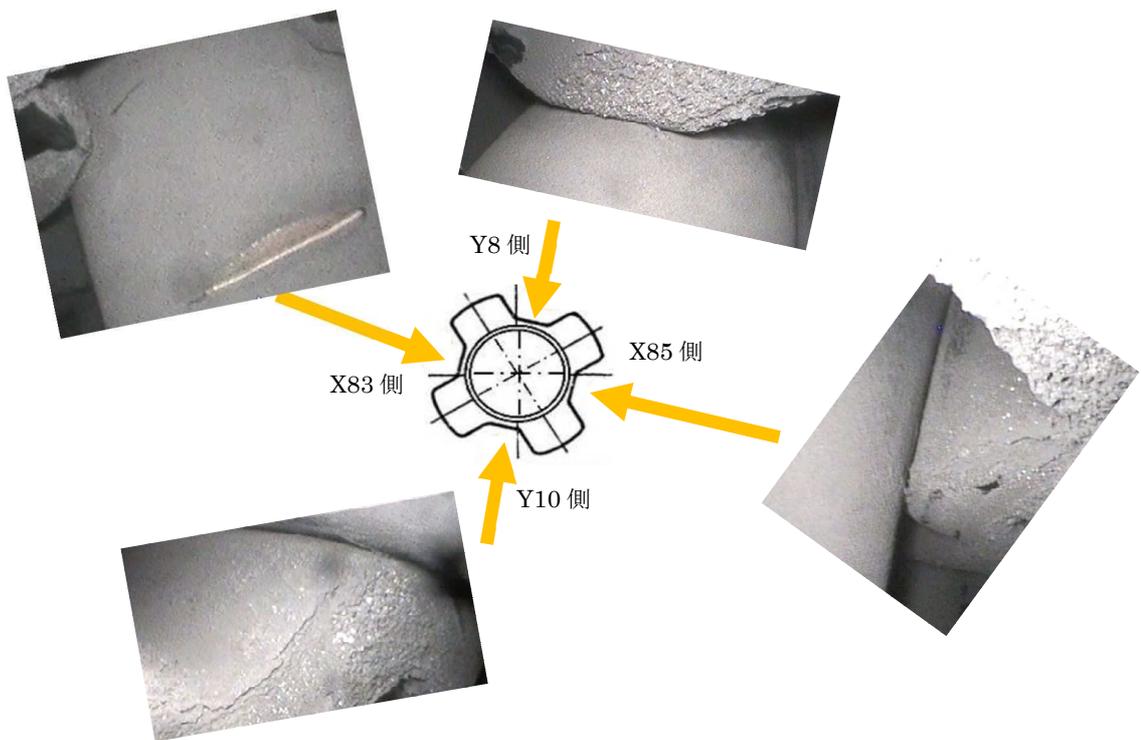


図 7 減肉とランド部の位置関係(B-SG X84, Y9)

管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (5/7)

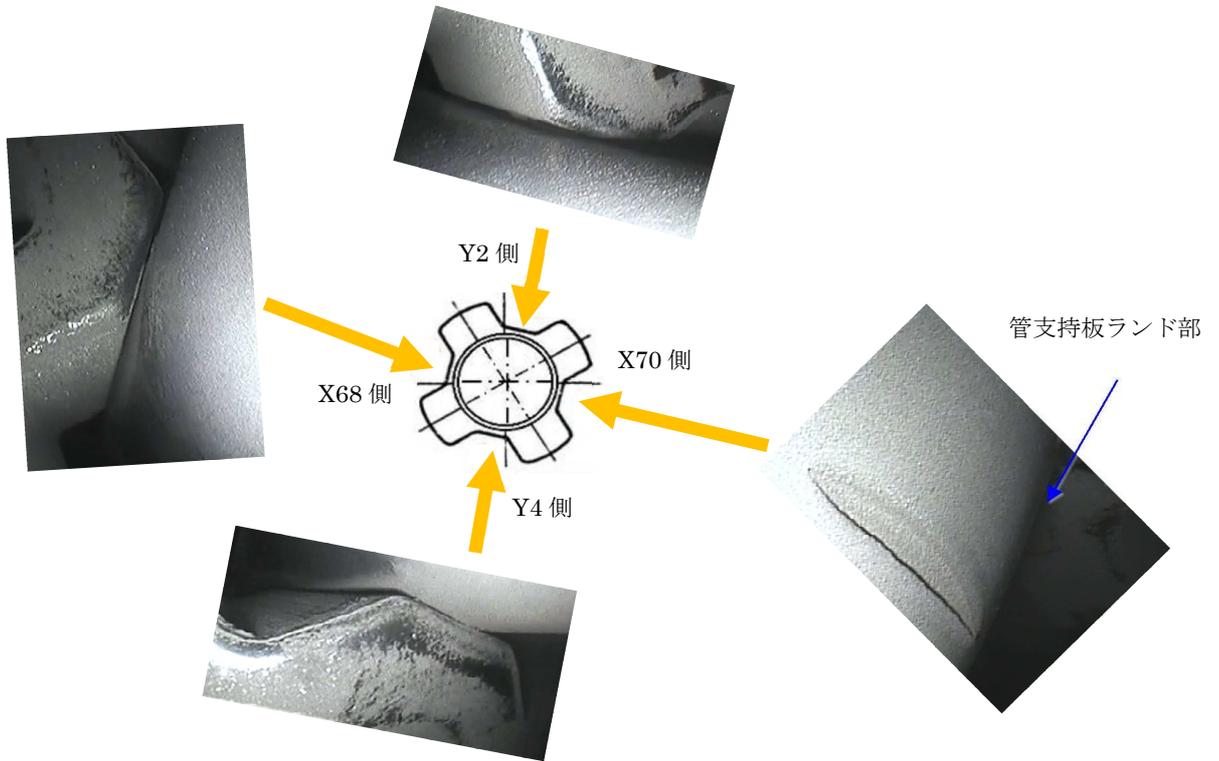


図 8 減肉とランド部の位置関係(B-SG X69, Y3)

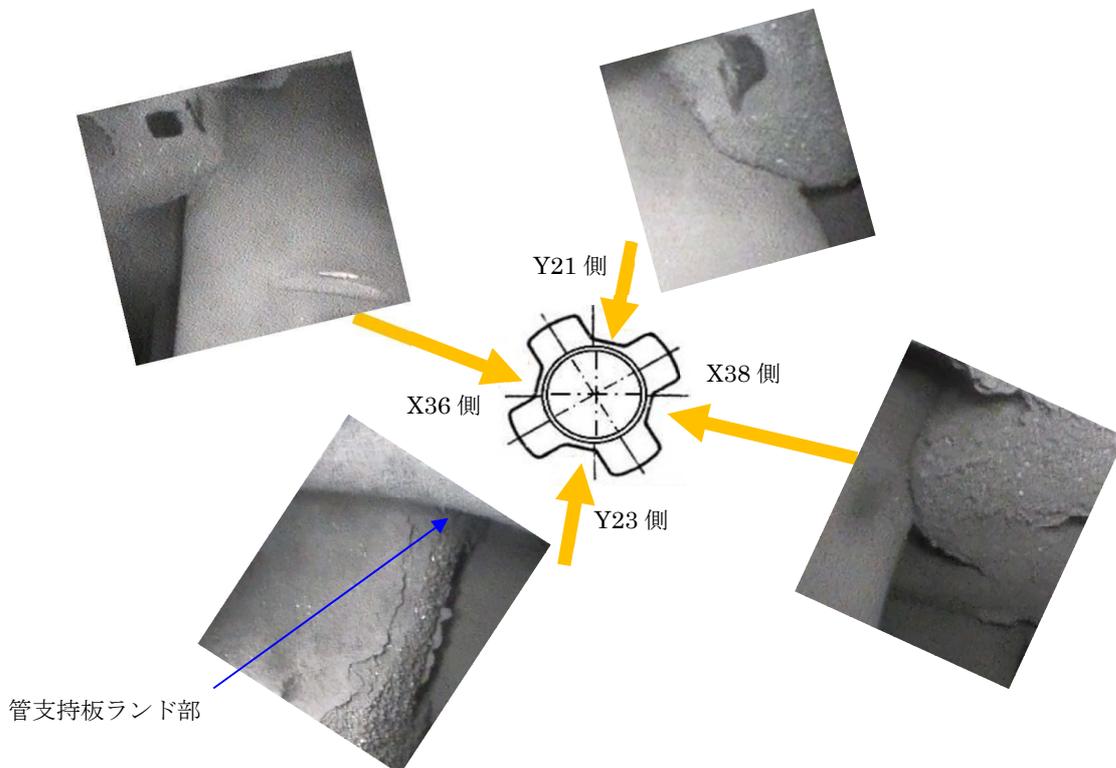


図 9 減肉とランド部の位置関係(C-SG X37, Y22)

管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (6/7)

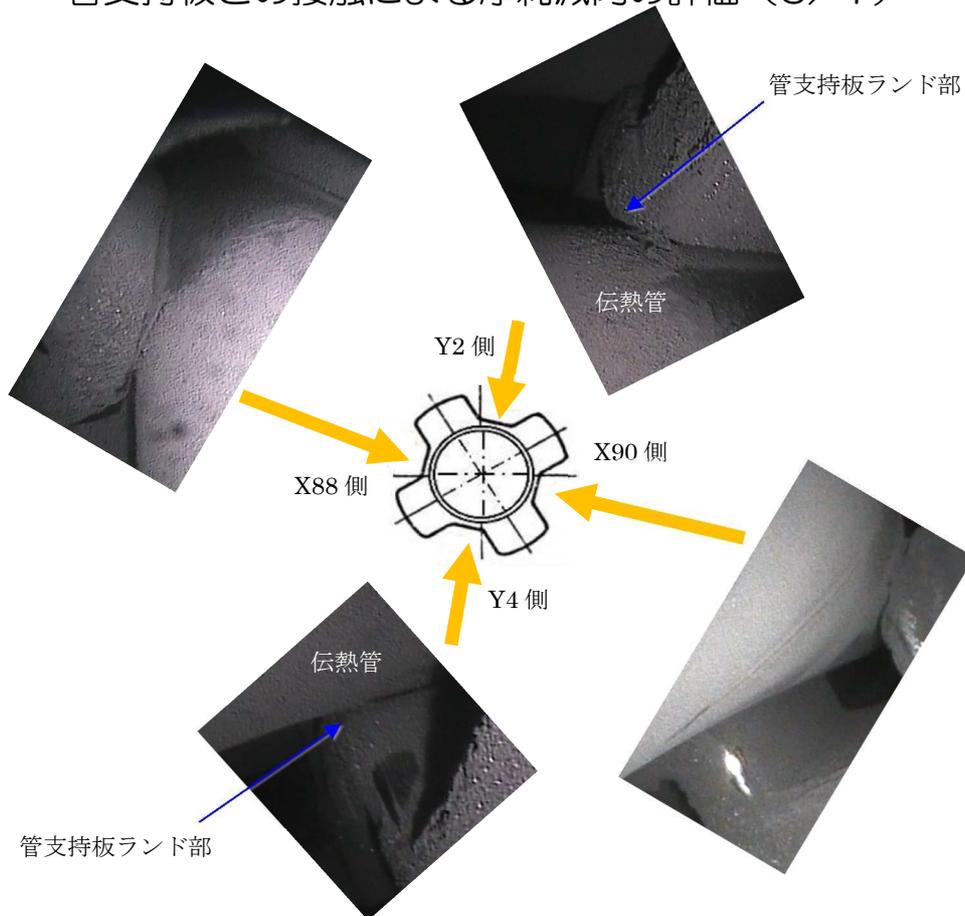


図 10 減肉とランド部の位置関係(C-SG X89, Y3)

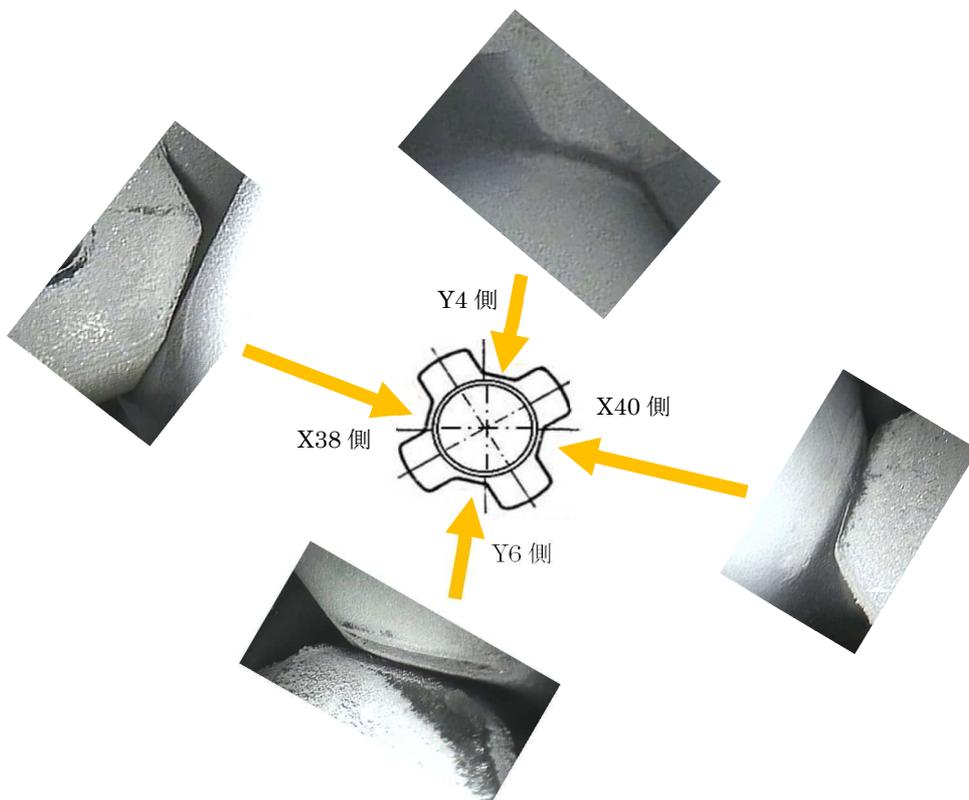


図 11 減肉とランド部の位置関係(C-SG X39, Y5)

管支持板との接触による摩耗減肉の評価 (7/7)

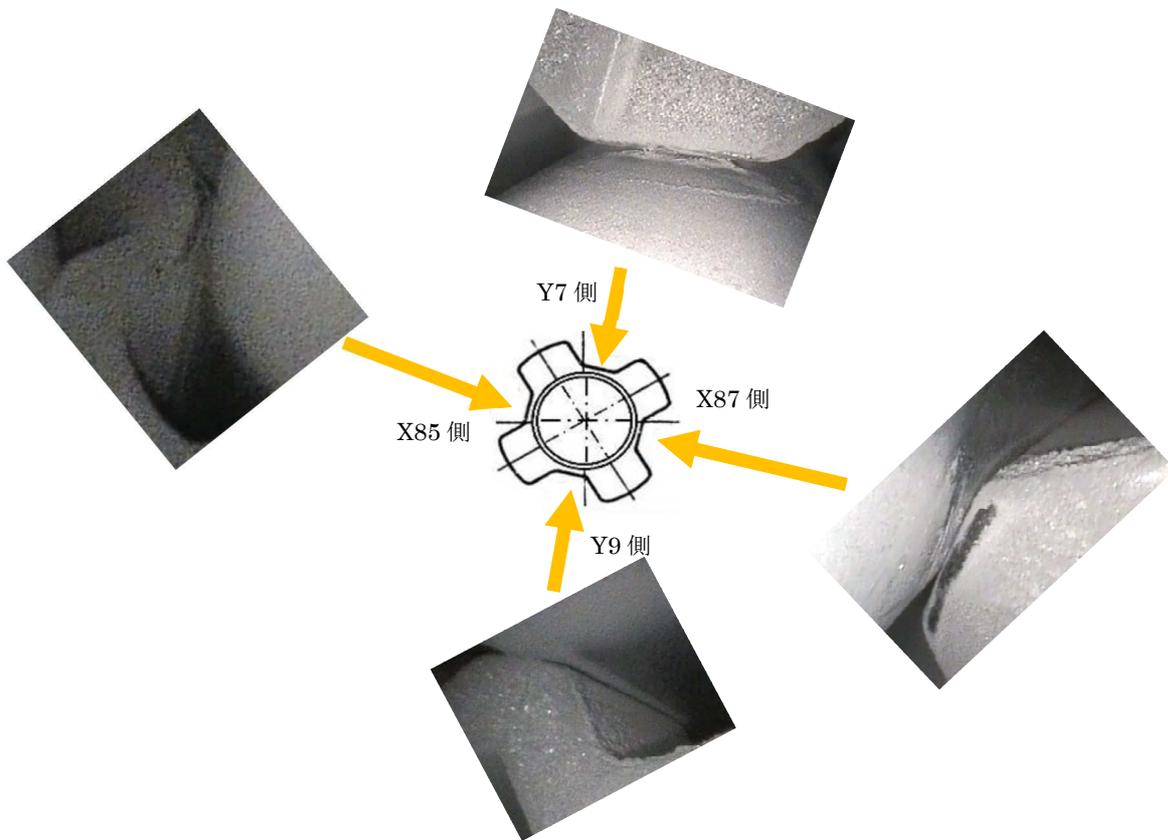


図 12 減肉とランド部の位置関係(C-SG X86, Y8)

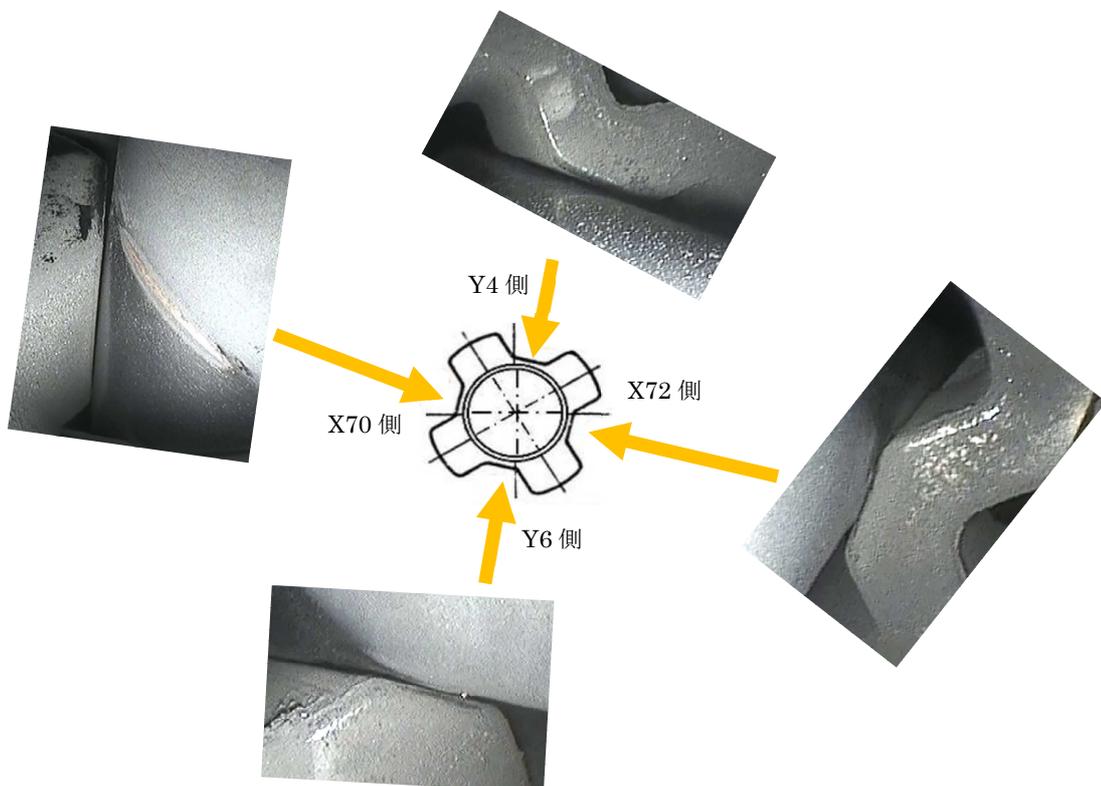


図 13 減肉とランド部の位置関係(C-SG X71, Y5)

異物混入対策について（1 / 2）

高浜発電所4号機前回（第23回）定期検査において、以下の異物混入対策を実施していることを確認した。

- 機器内部へ立ち入る作業では直前に作業服の着替えや靴カバーを着用し、機器内部へ立ち入っていることから、異物が混入する可能性は極めて低い。
- 直接目視にて異物確認ができない範囲は小型カメラを用いて点検した結果、異物が混入していないことを確認している。
- 開口部に周辺作業と隔離したエリアを設けることで、異物の混入対策を図っており、異物が混入する可能性は極めて低い。
- ウエスを使用する場合は、新しいウエスに限るものとし、新ウエスは再使用ウエスと区別して管理しており、異物が混入する可能性は極めて低い。
- 作業中に発生した保温材の切れ端等の清掃・片づけについては、一作業一片づけを徹底するとともに、作業服、靴に異物が付着していないか確認することで異物の拡散防止を図っており、異物が混入する可能性は極めて低い。

各異物混入対策の詳細は次ページのとおり。

発電用原子炉施設故障等報告書
（高浜発電所3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について）
（2022年5月25日）より引用

異物混入対策について（2/2）

| | 機器立入 | 垂直配管取付弁 | その他 |
|---|---|--|--|
| 高浜発電所 3号機 第 2 4 回定期検査以降 および 高浜発電所 4号機 第 2 3 回定期検査以降 | <ul style="list-style-type: none"> 機器内部に立ち入る前に、器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。 機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。 開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。 | <ul style="list-style-type: none"> 弁点検時は、弁箱内部に使用する機材（ウエス含む）に異物の付着がないことを確実に事前確認する。 最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、小型カメラで確認する。 ウエスは、新ウエスを使用する。 新ウエスは再使用ウエスと区別して管理する。 | <ul style="list-style-type: none"> 保温材の切れ端等の清掃・片づけは作業一片づけを徹底し、作業服、靴の異物付着確認を行う。 機器を開放した時点でうず巻きガスカート等の金属製の消耗品に損傷を確認した場合は、当社工事担当者に報告することに加え、工事報告書に必要事項を記載することを調達要求文書に定める。 S G 水張ポンプ入口仮設ストレーナを設置した。 |
| 高浜発電所 4号機 第 2 2 回定期検査 | <ul style="list-style-type: none"> 機器内部に立ち入る前に、器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。 機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。 開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。 | <ul style="list-style-type: none"> 弁点検時は、弁箱内部に使用する機材（ウエス含む）に異物の付着がないことを確実に事前確認する。 最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、小型カメラで確認する。 ウエスは、新ウエスを使用する。 新ウエスは再使用ウエスと区別して管理する。 | <ul style="list-style-type: none"> 保温材の切れ端等の清掃・片づけは作業一片づけを徹底し、作業服、靴の異物付着確認を行う。 |
| 高浜発電所 3号機 第 2 3 回定期検査 | <ul style="list-style-type: none"> 機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。 | <ul style="list-style-type: none"> 弁点検時は、弁箱内部に使用する機材（ウエス含む）に異物の付着がないことを確実に事前確認する。 最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、小型カメラで確認する。【自主対応】 | - |
| 高浜発電所 3号機 第 2 3 回定期検査以前 高浜発電所 4号機 第 2 1 回定期検査以前 | <ul style="list-style-type: none"> 機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを確認する（本人でも可）。 | <ul style="list-style-type: none"> 最終異物確認は直接目視にて実施（手鏡等を使用） | 美浜 3号機での異物混入事象（2000年、2007年）を踏まえた対策についても実施 <ul style="list-style-type: none"> 機器開口部周辺での管理徹底する。 異物確認者の作業服や作業靴などの清掃等。 |

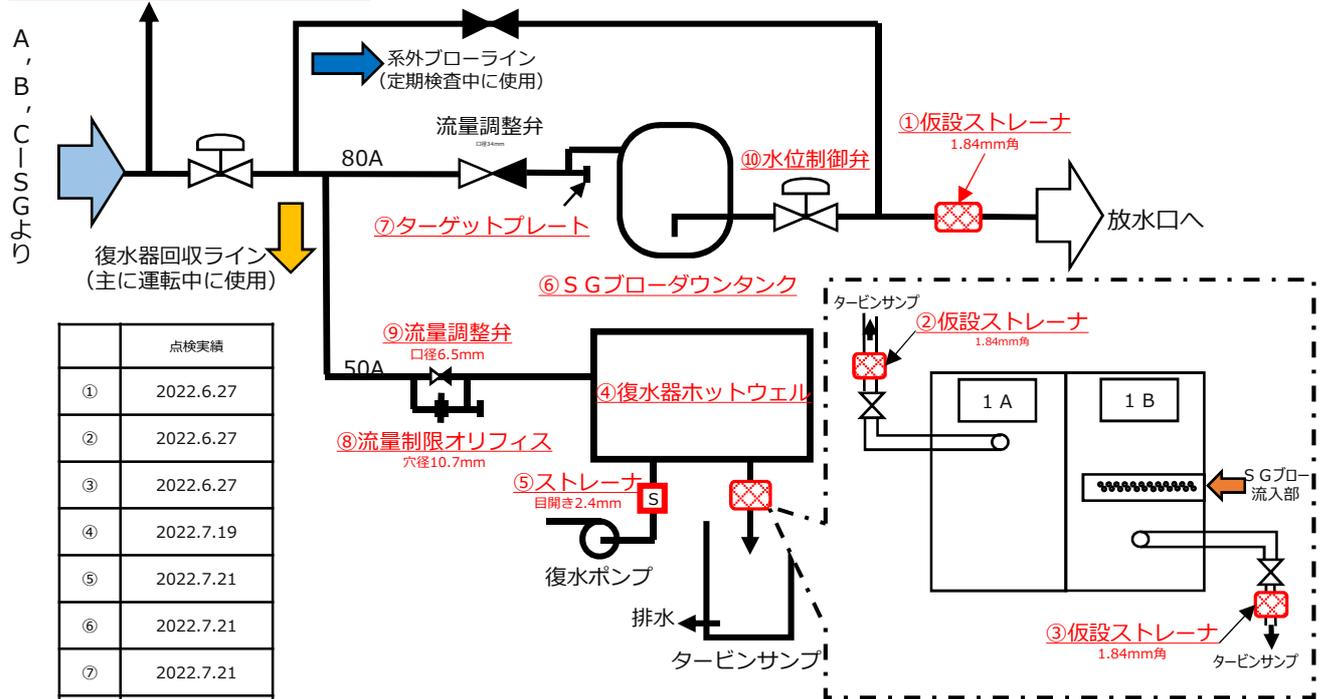
今回、S G 器内および器外点検の結果、異物は確認できなかったことから異物混入対策は有効であったと判断する。今後も引き続き同様の異物混入対策を実施する。

発電用原子炉施設故障等報告書
 （高浜発電所 3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について）
 （2022年5月25日）より引用

SGブローダウン系統点検結果 (1/8)

SGブローダウン系統の点検概略図

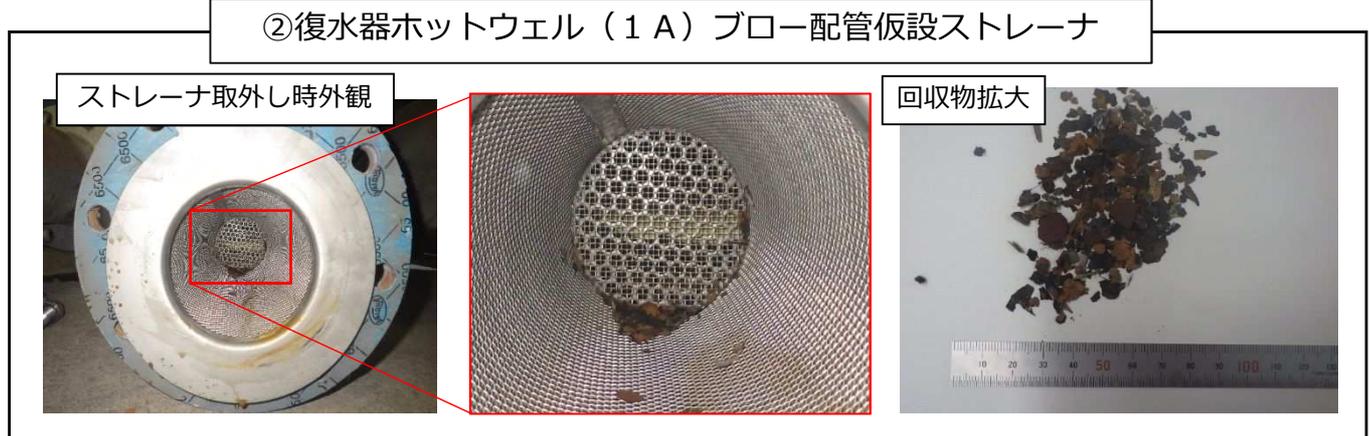
① SGブローダウンサンプル系統



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

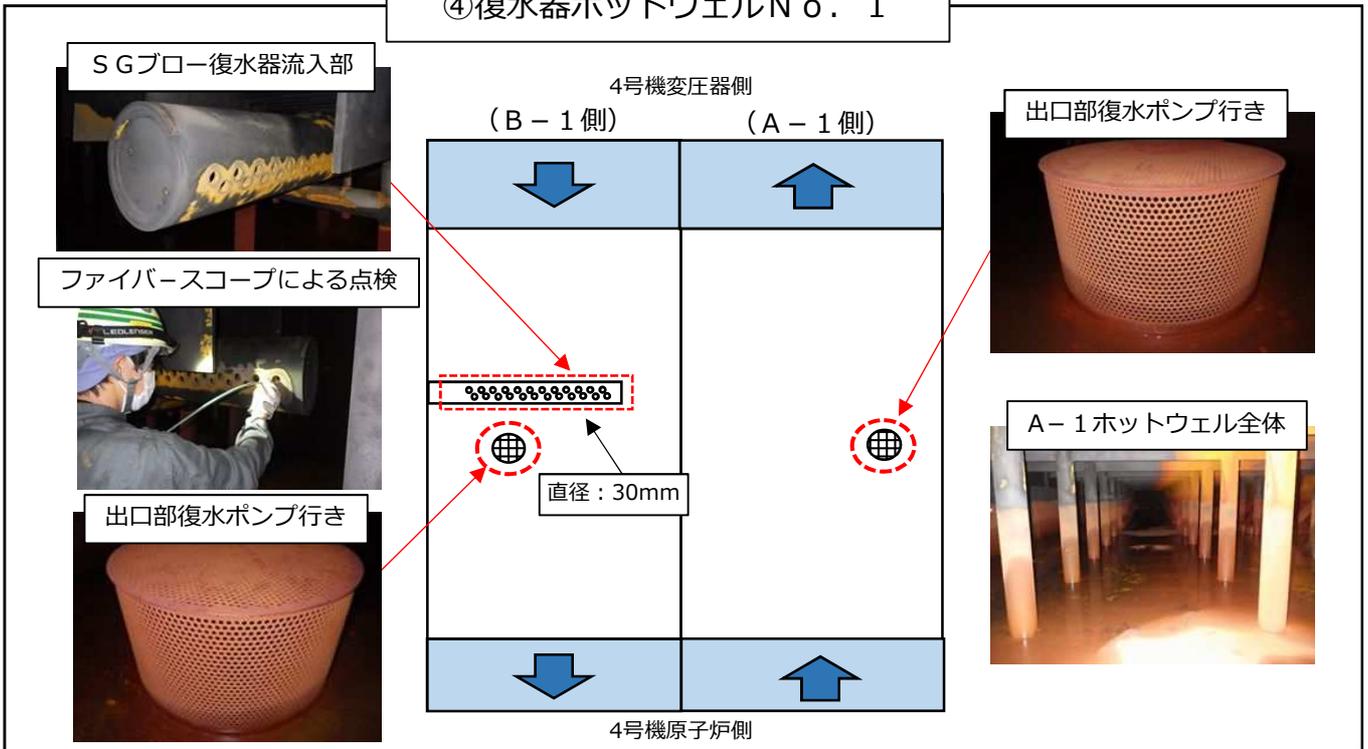


SGブローダウン系統点検結果 (2/8)

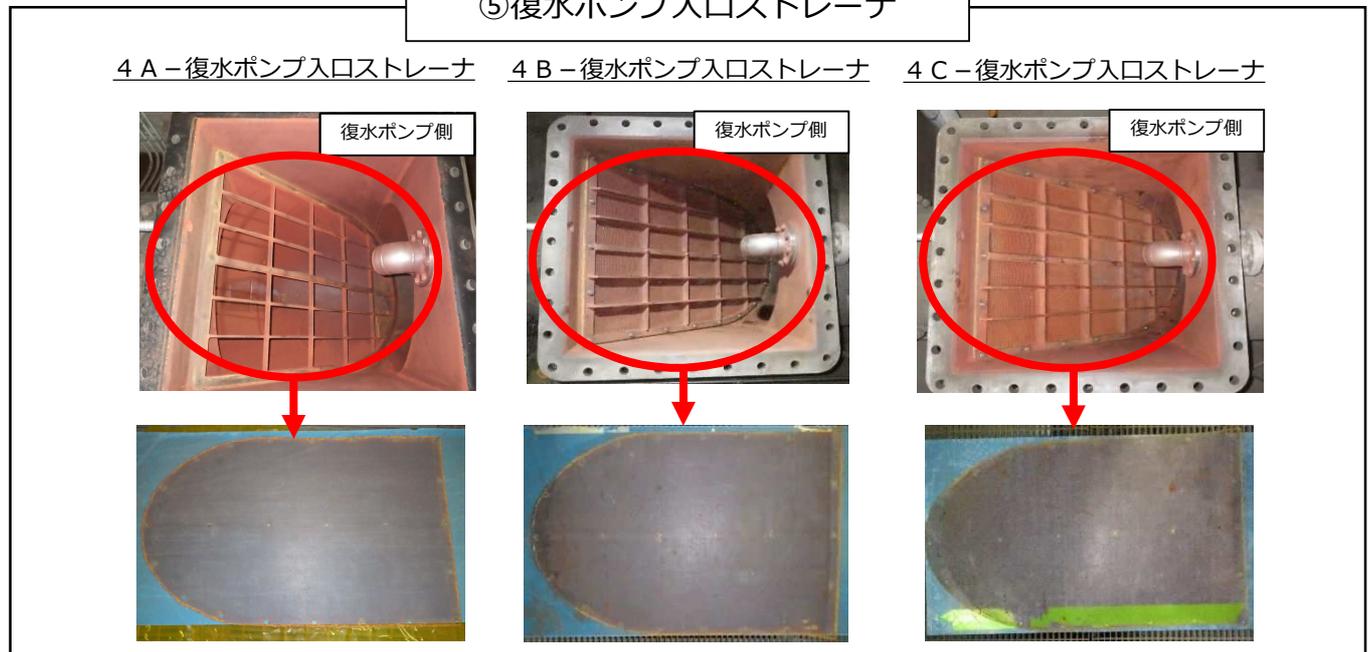
③復水器ホットウェル (1 B) ブロー配管仮設ストレーナ



④復水器ホットウェル No. 1



⑤復水ポンプ入口ストレーナ



SGブローダウン系統点検結果 (3/8)

⑥ SGブローダウンタンク



タンクA系入口配管内部



タンク底部

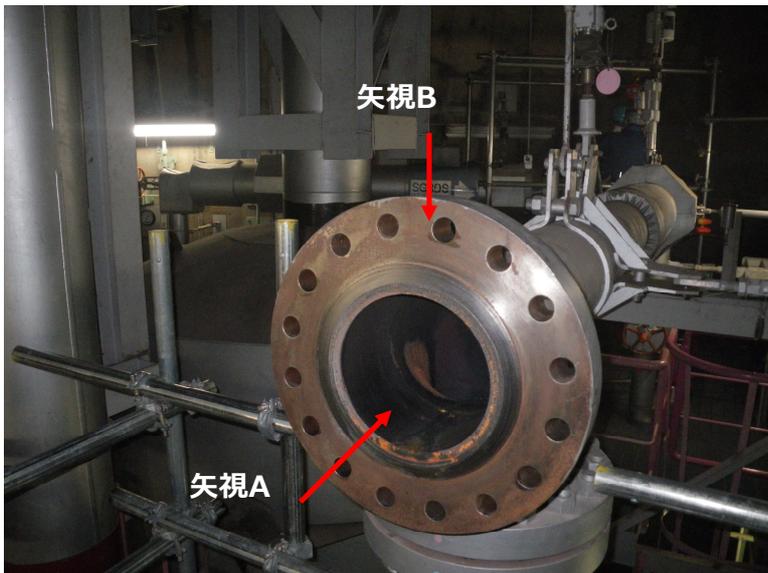


タンク出口配管、ブロー配管付近

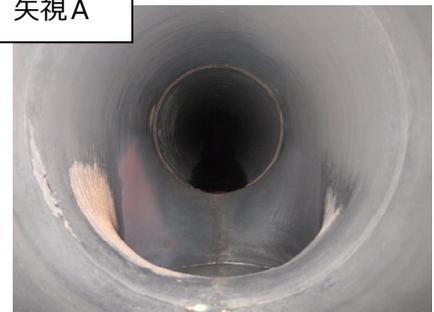


タンク底部拡大

⑦-1 A-SGブローダウン系統ターゲットプレート



矢視A

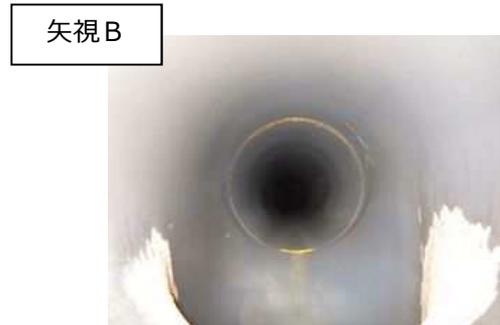
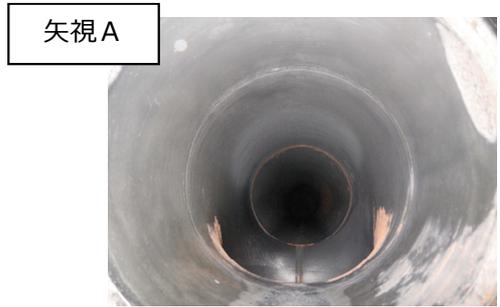
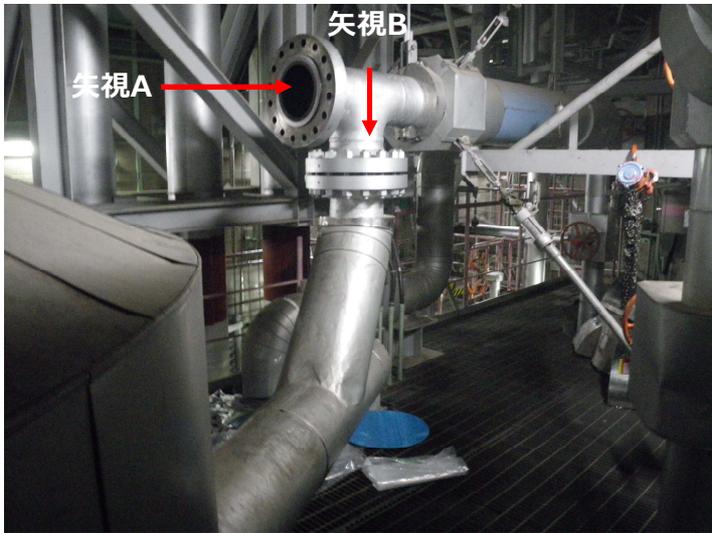


矢視B

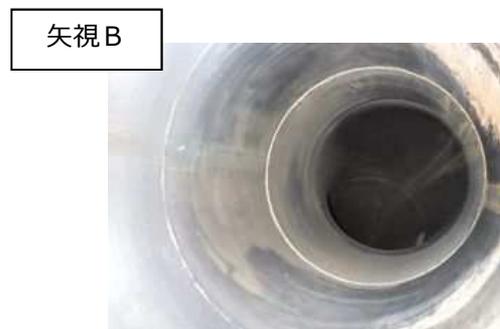
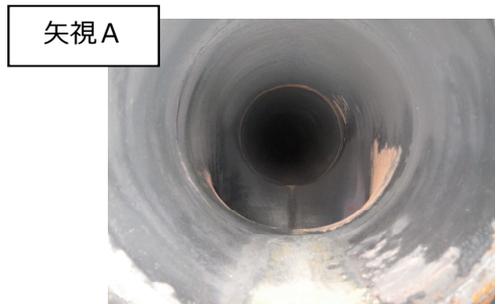
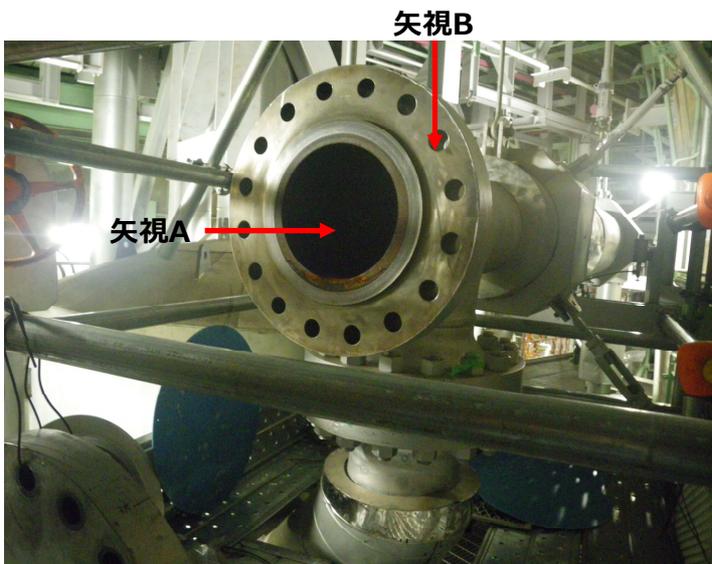


SGブローダウン系統点検結果 (4/8)

⑦-2 B-SGブローダウン系統ターゲットプレート

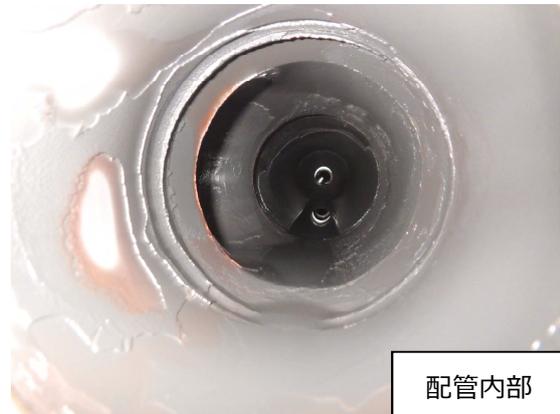
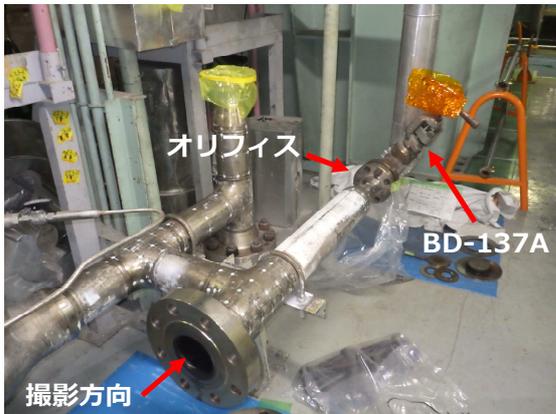


⑦-3 C-SGブローダウン系統ターゲットプレート

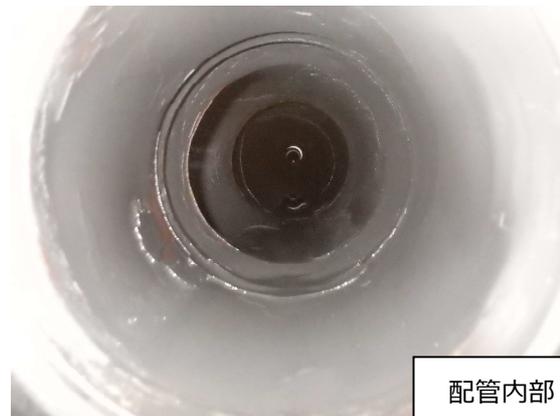
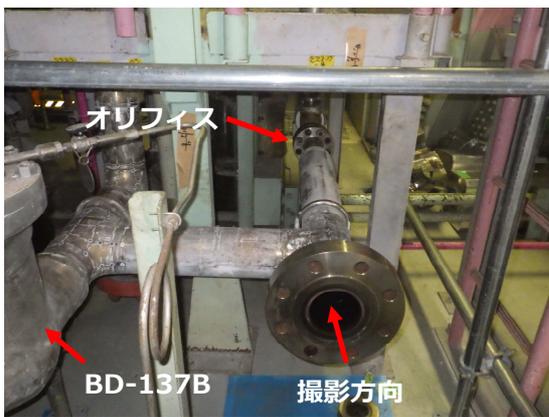


SGブローダウン系統点検結果 (5/8)

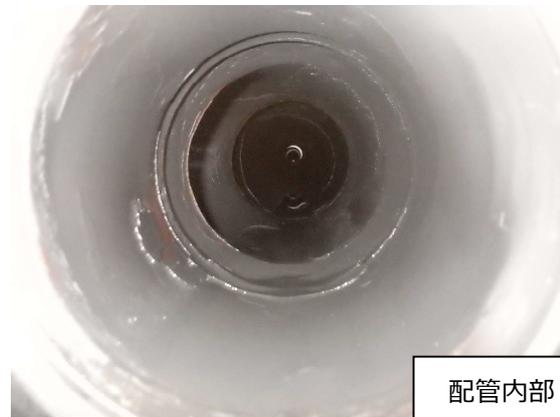
⑧-1 A-SG 流量制限オリフィス



⑧-2 B-SG 流量制限オリフィス

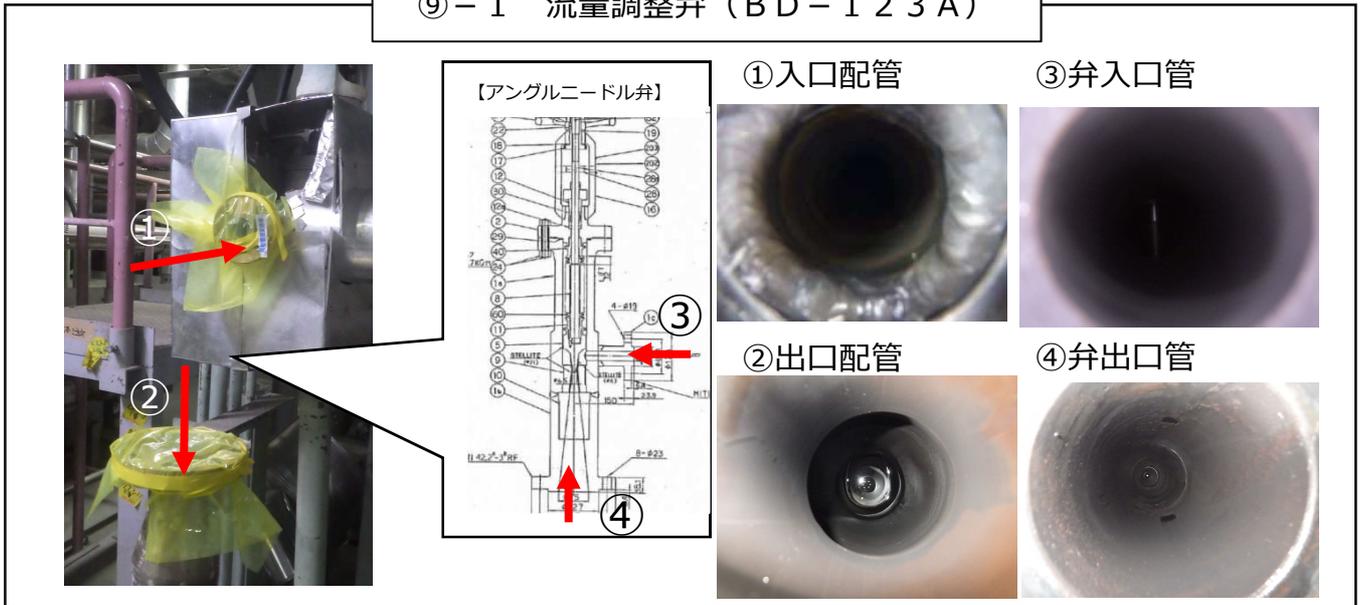


⑧-3 C-SG 流量制限オリフィス

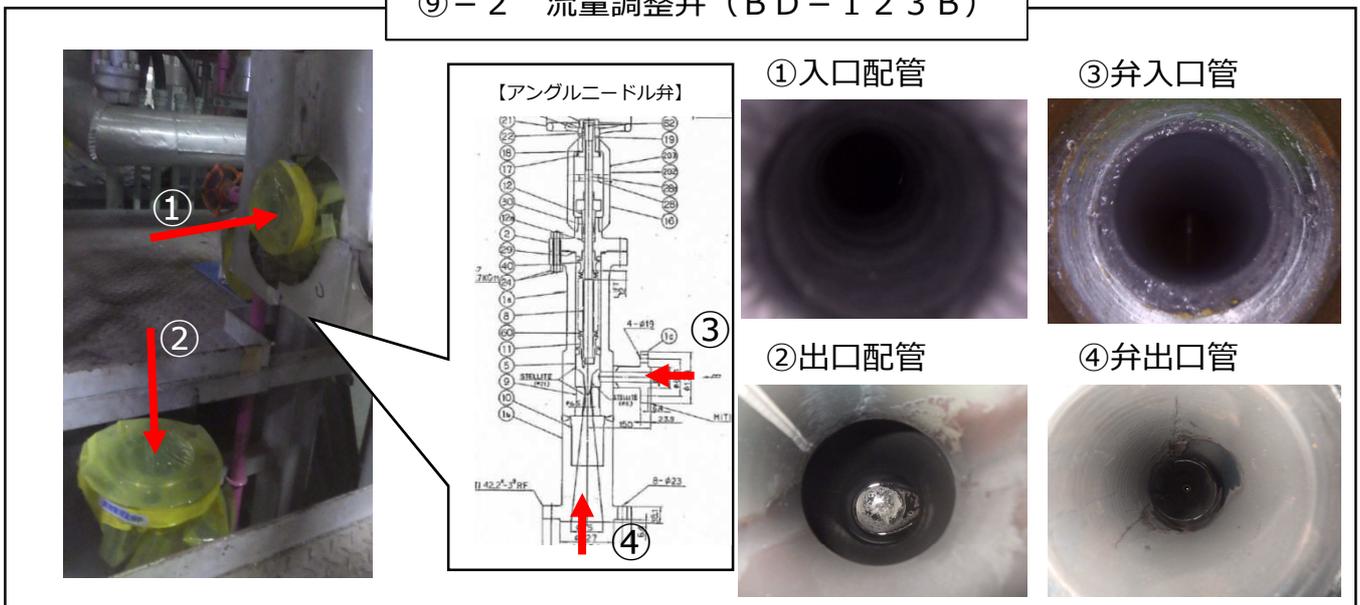


SGブローダウン系統点検結果 (6/8)

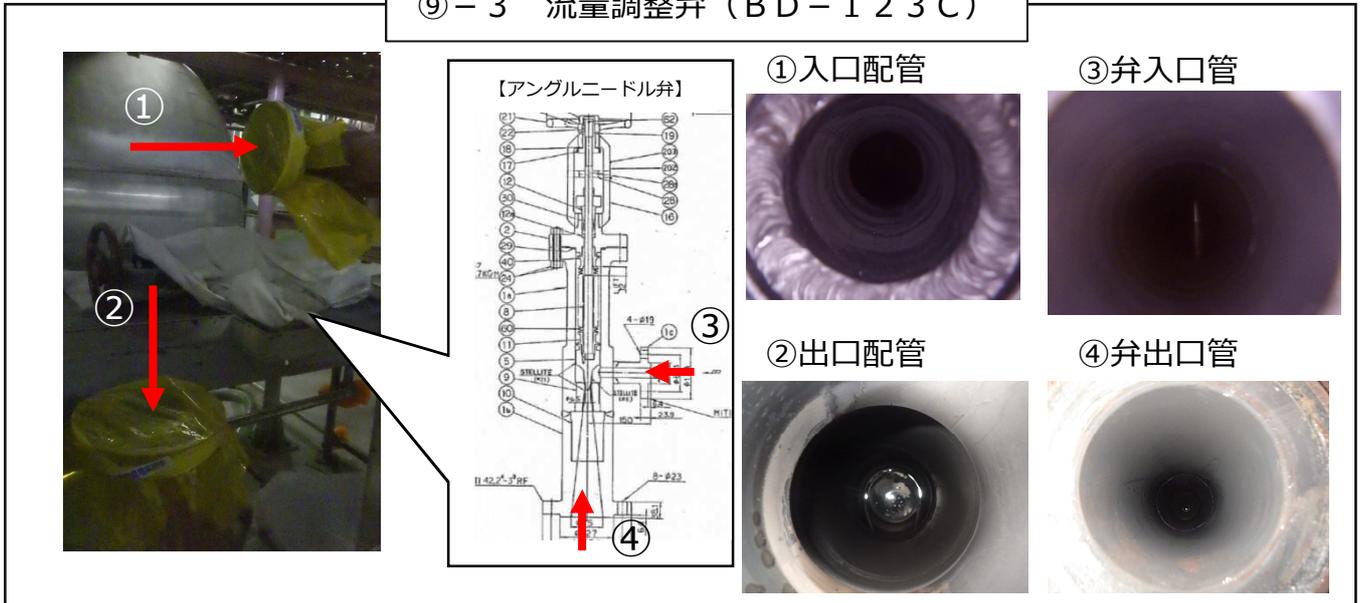
⑨-1 流量調整弁 (BD-123A)



⑨-2 流量調整弁 (BD-123B)

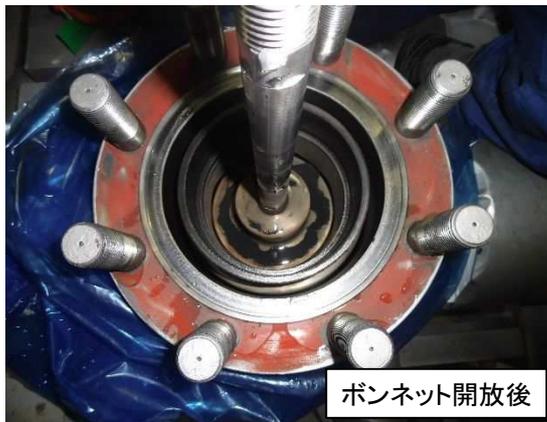
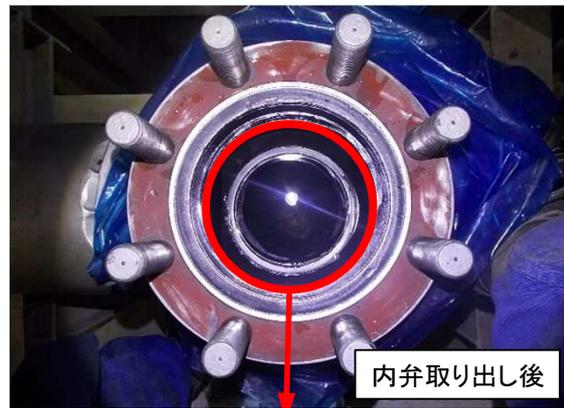


⑨-3 流量調整弁 (BD-123C)

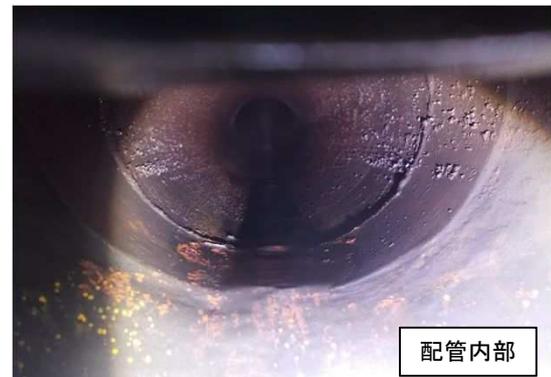


SGブローダウン系統点検結果 (7/8)

⑩-1 水位制御弁 弁内部



⑩-2 水位制御弁 1次側配管内部

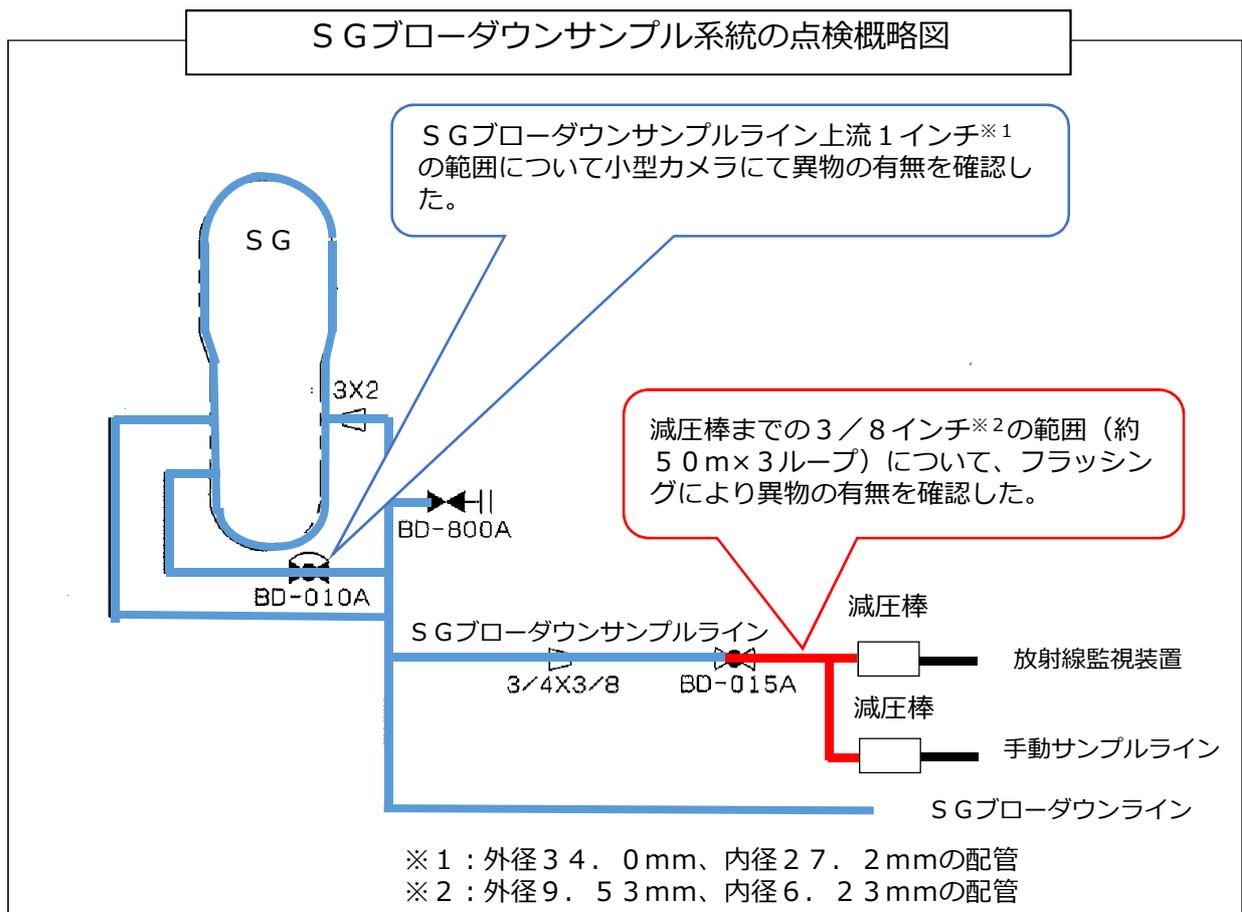


⑩-3 水位制御弁 2次側配管内部



SGブローダウン系統点検結果（8／8）

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



（C-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）



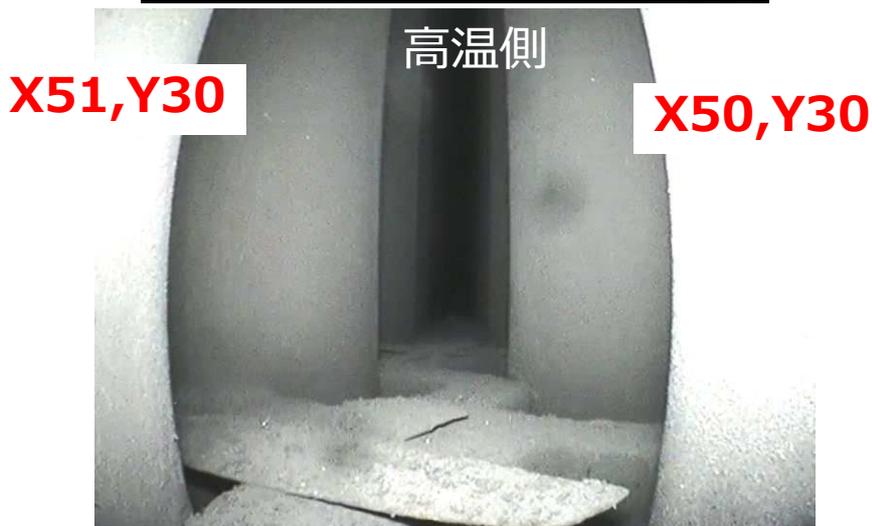
（フラッシング後のフィルタ）

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

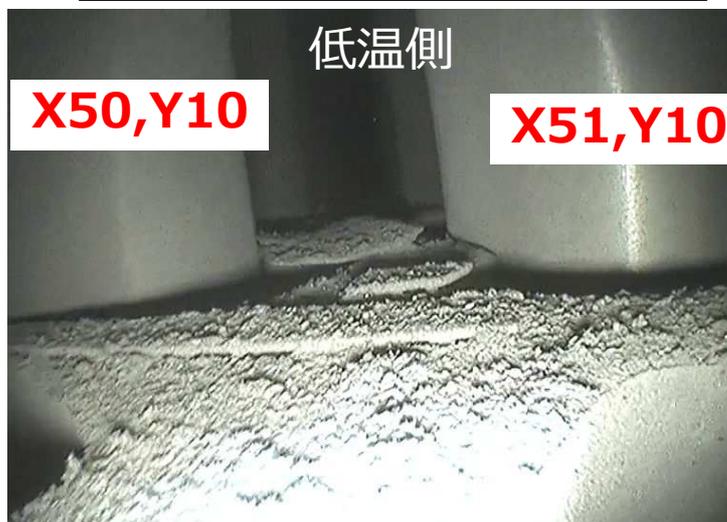


B-SG 管板上写真



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

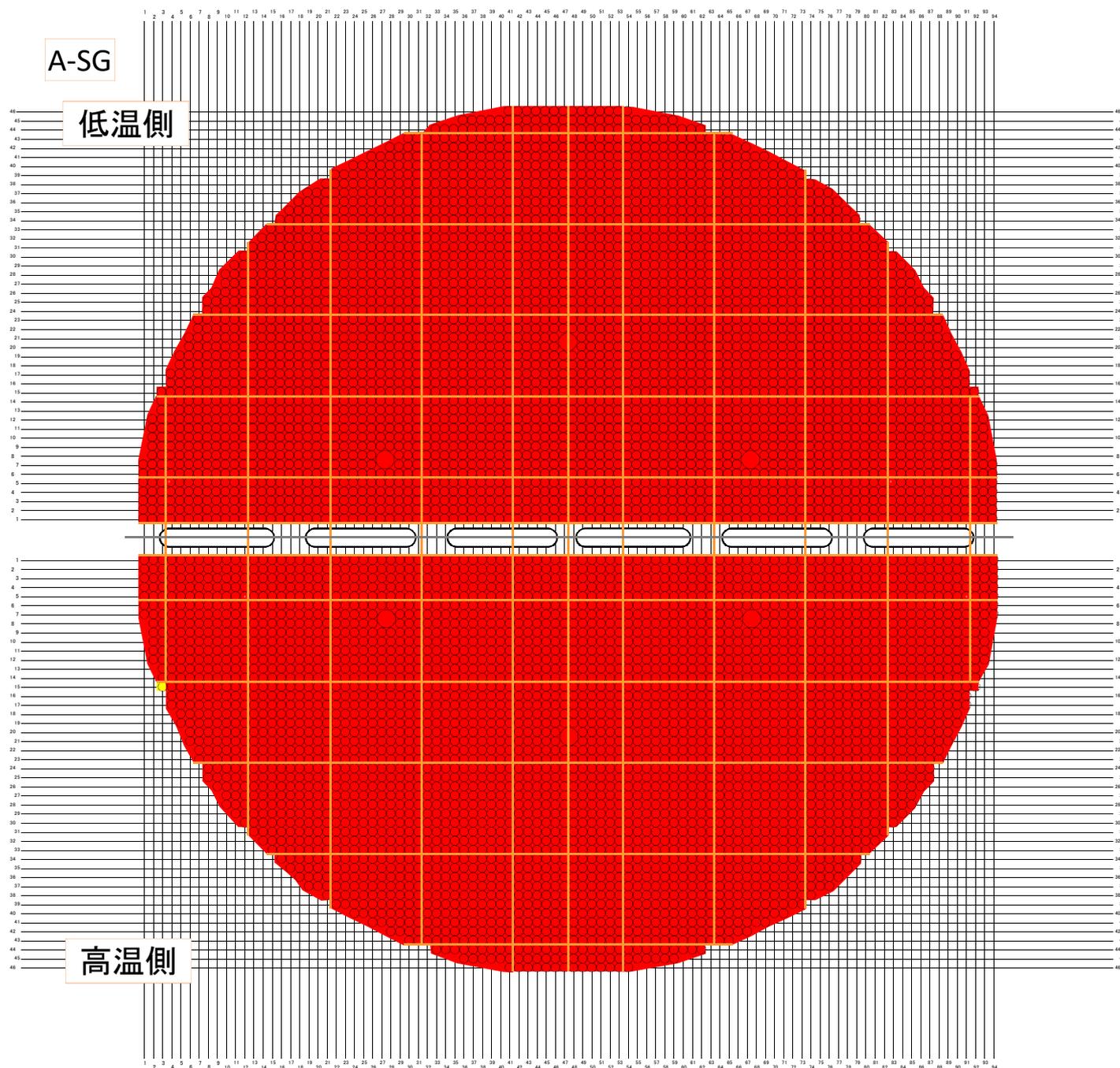


C-SG 管板上写真

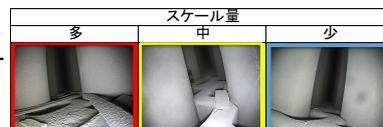


SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況(第三管支持板)

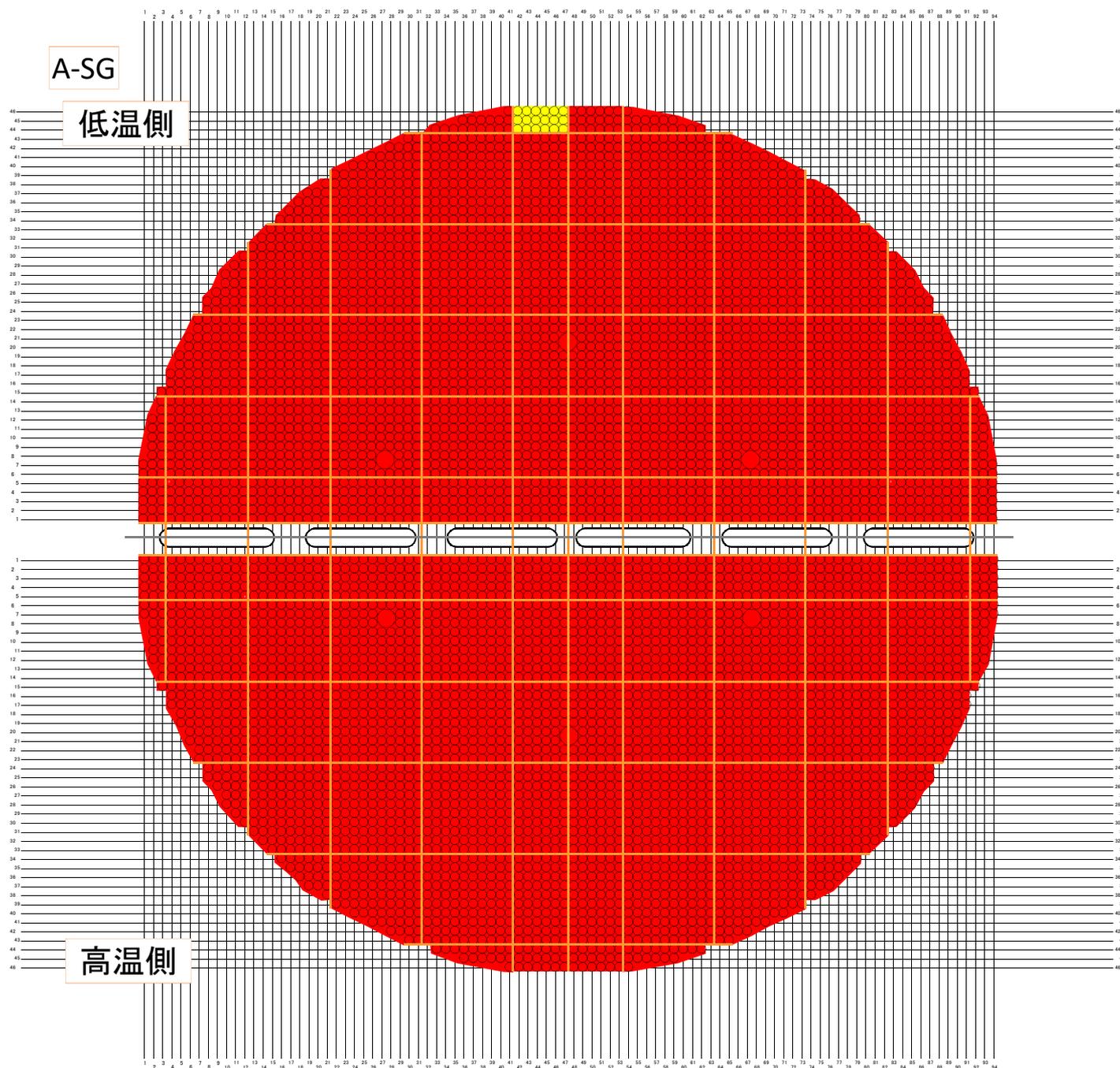


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



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)

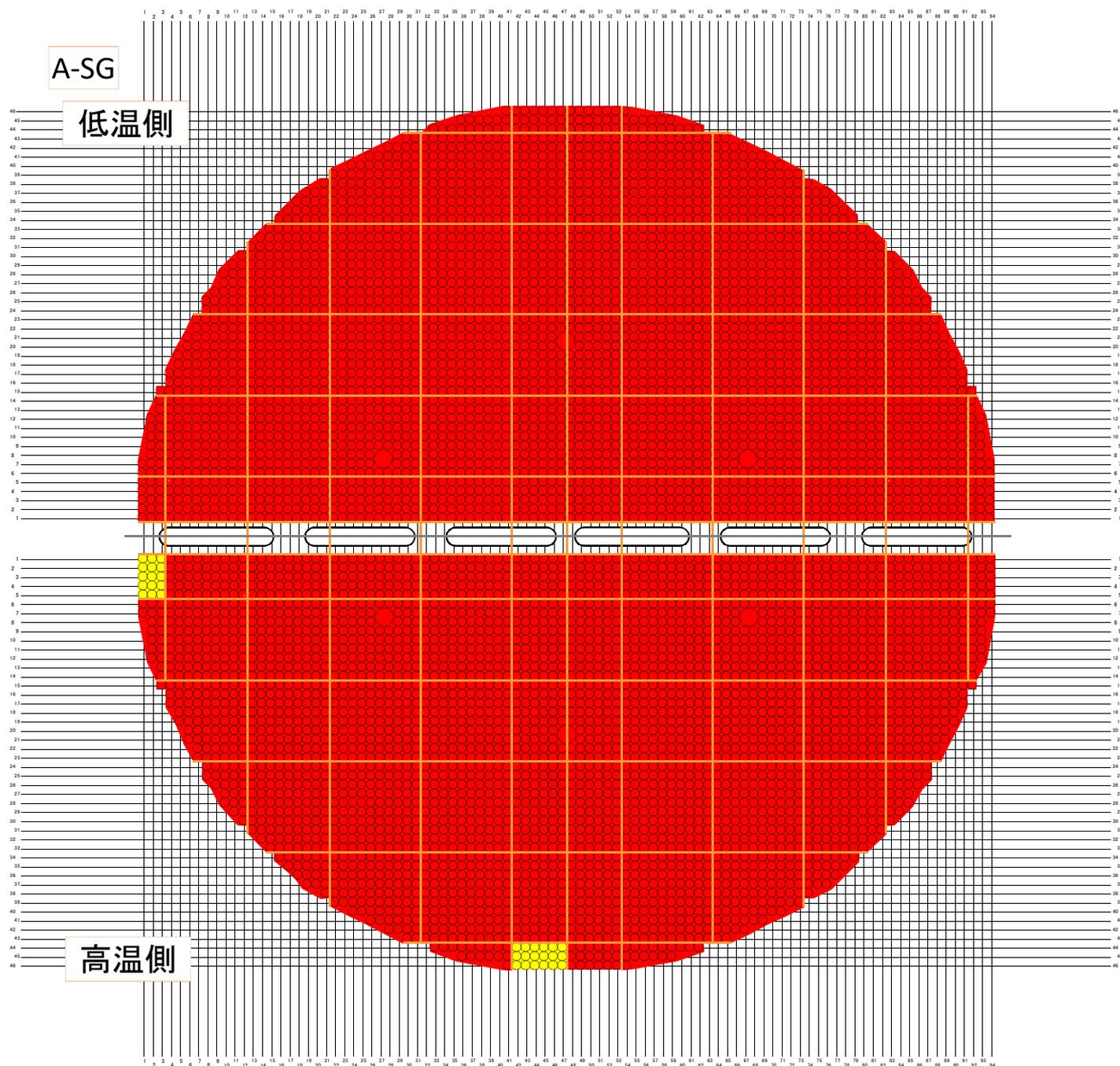


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



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)

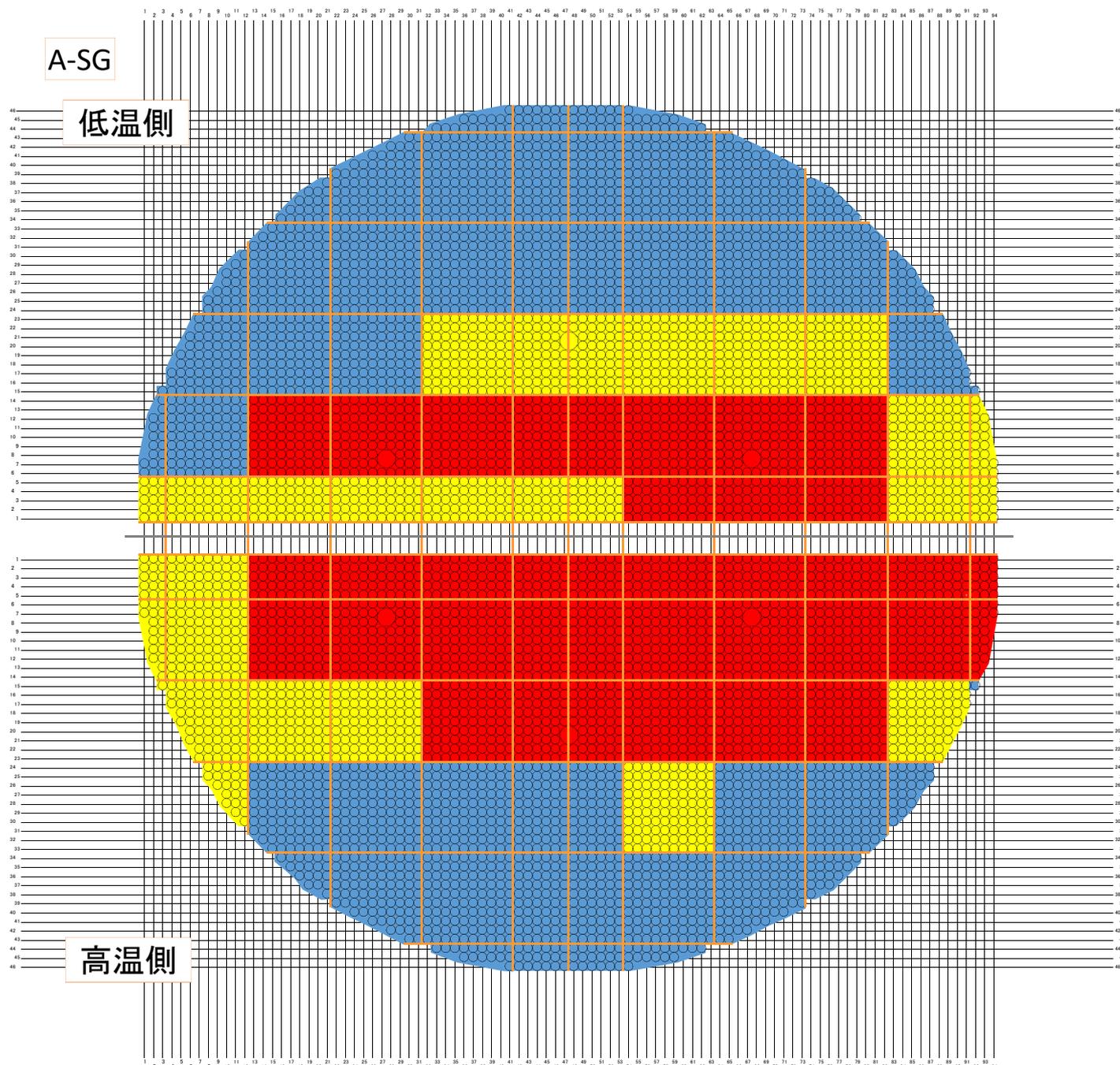


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



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)

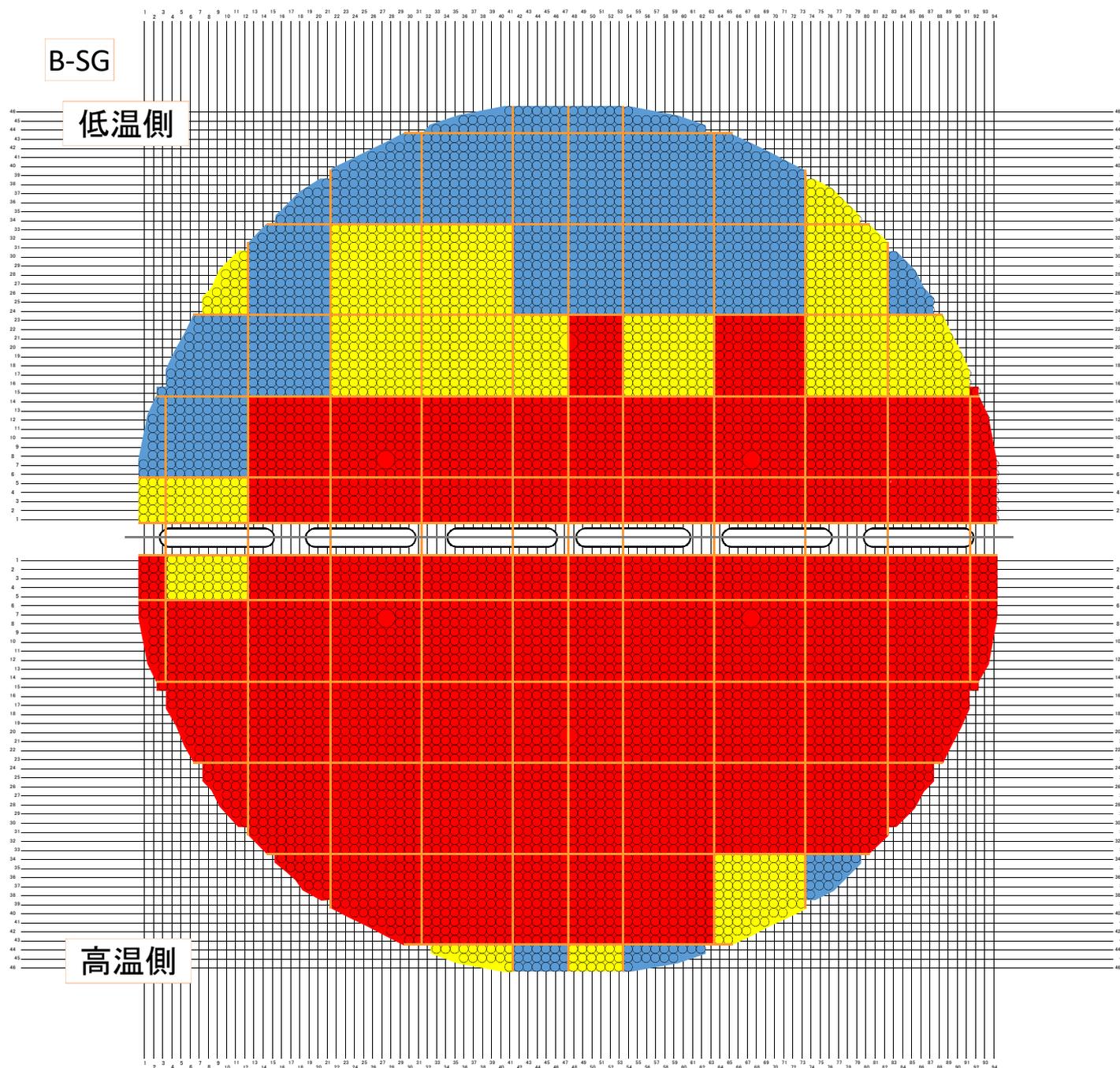


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



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(第三管支持板)

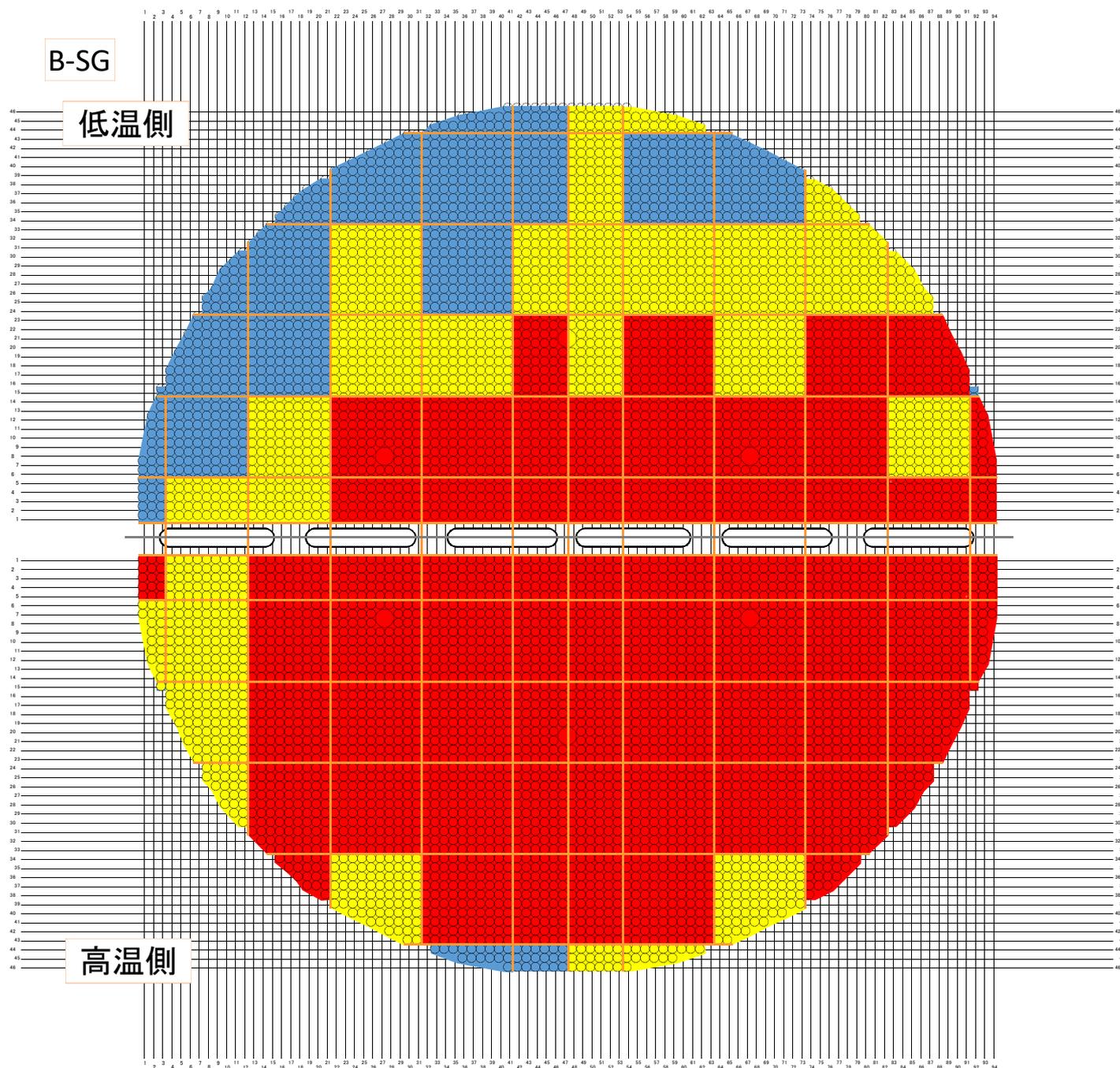


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



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)

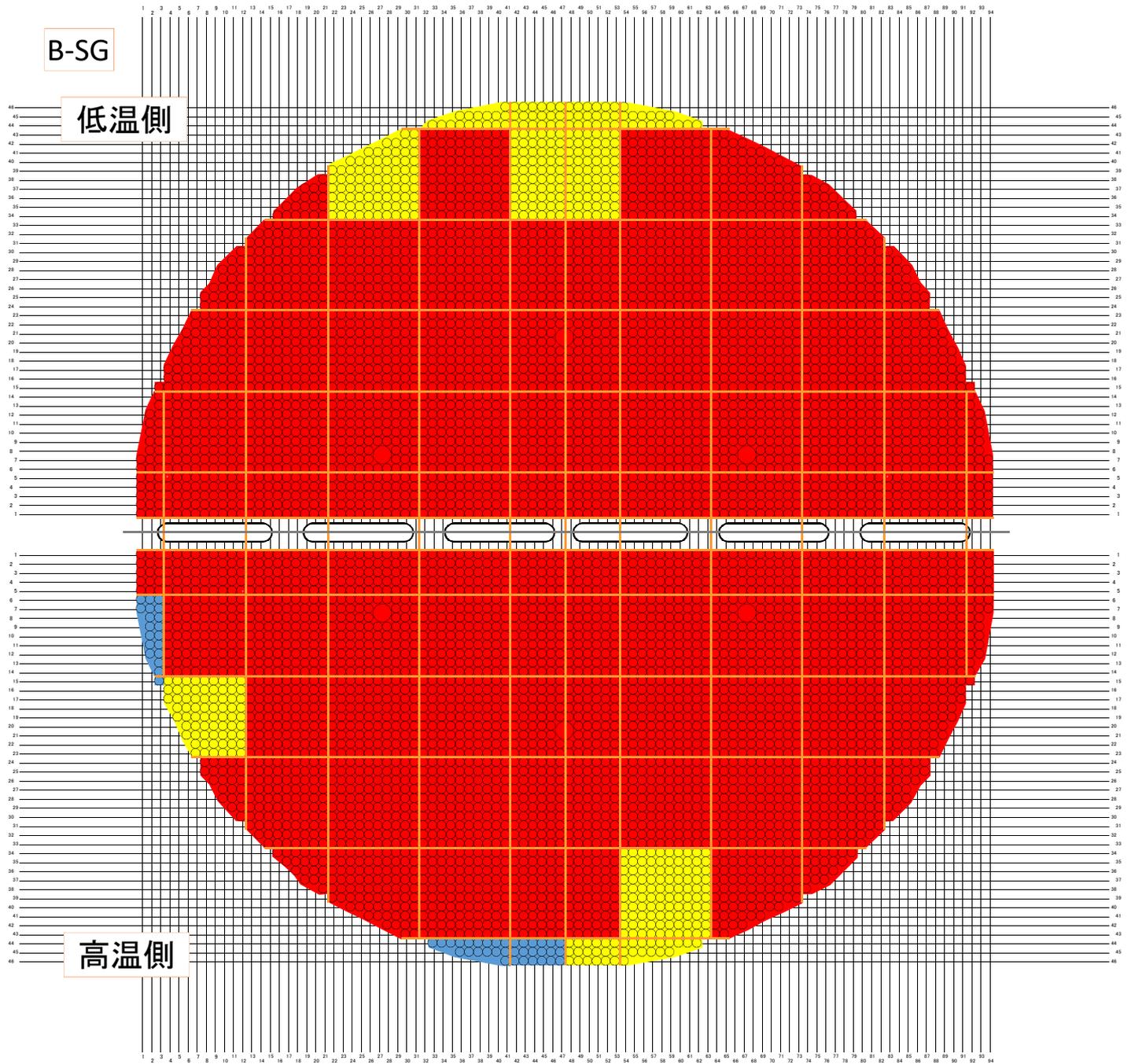


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



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)

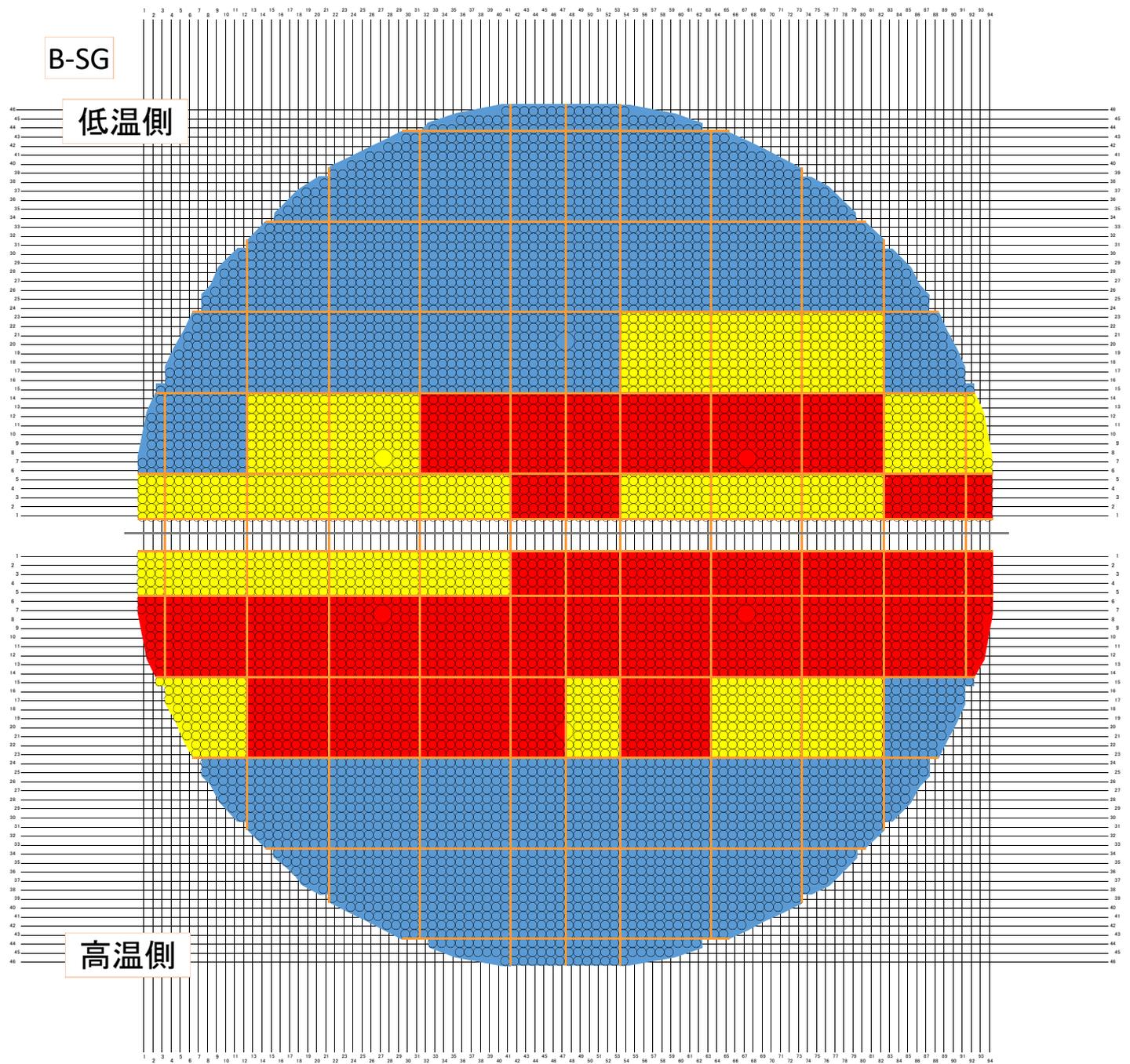


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



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)

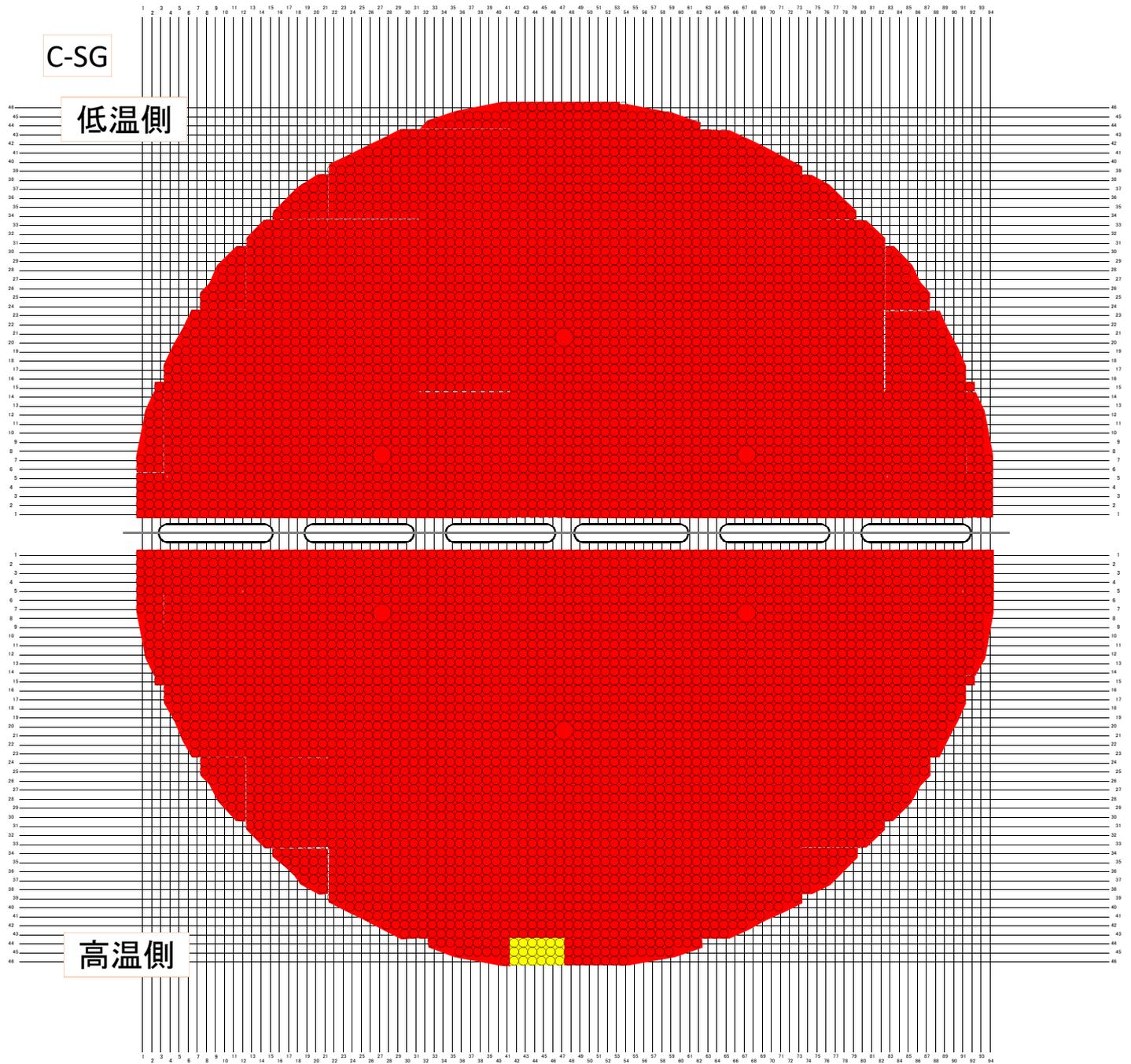


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



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(第三管支持板)

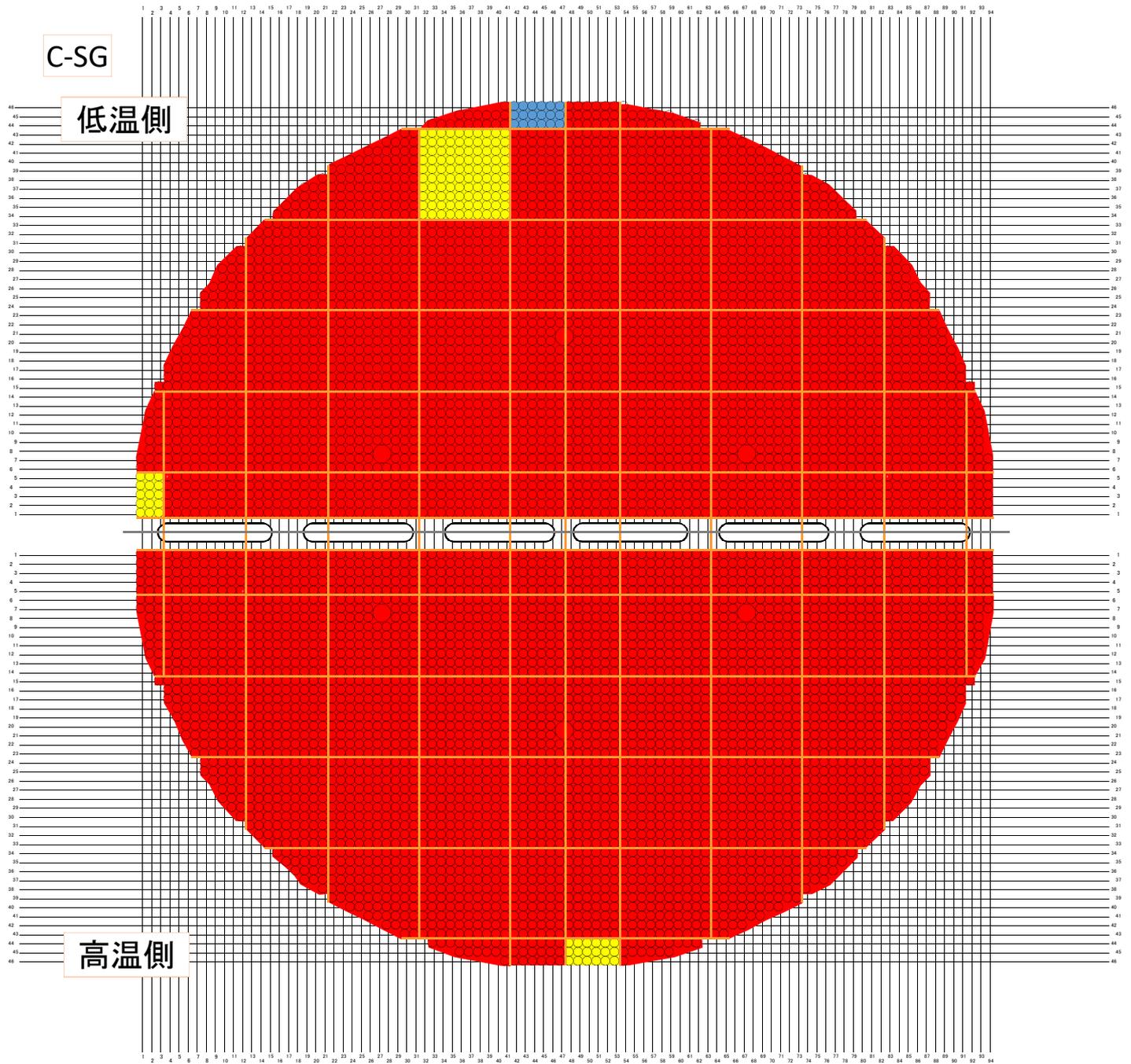


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



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)

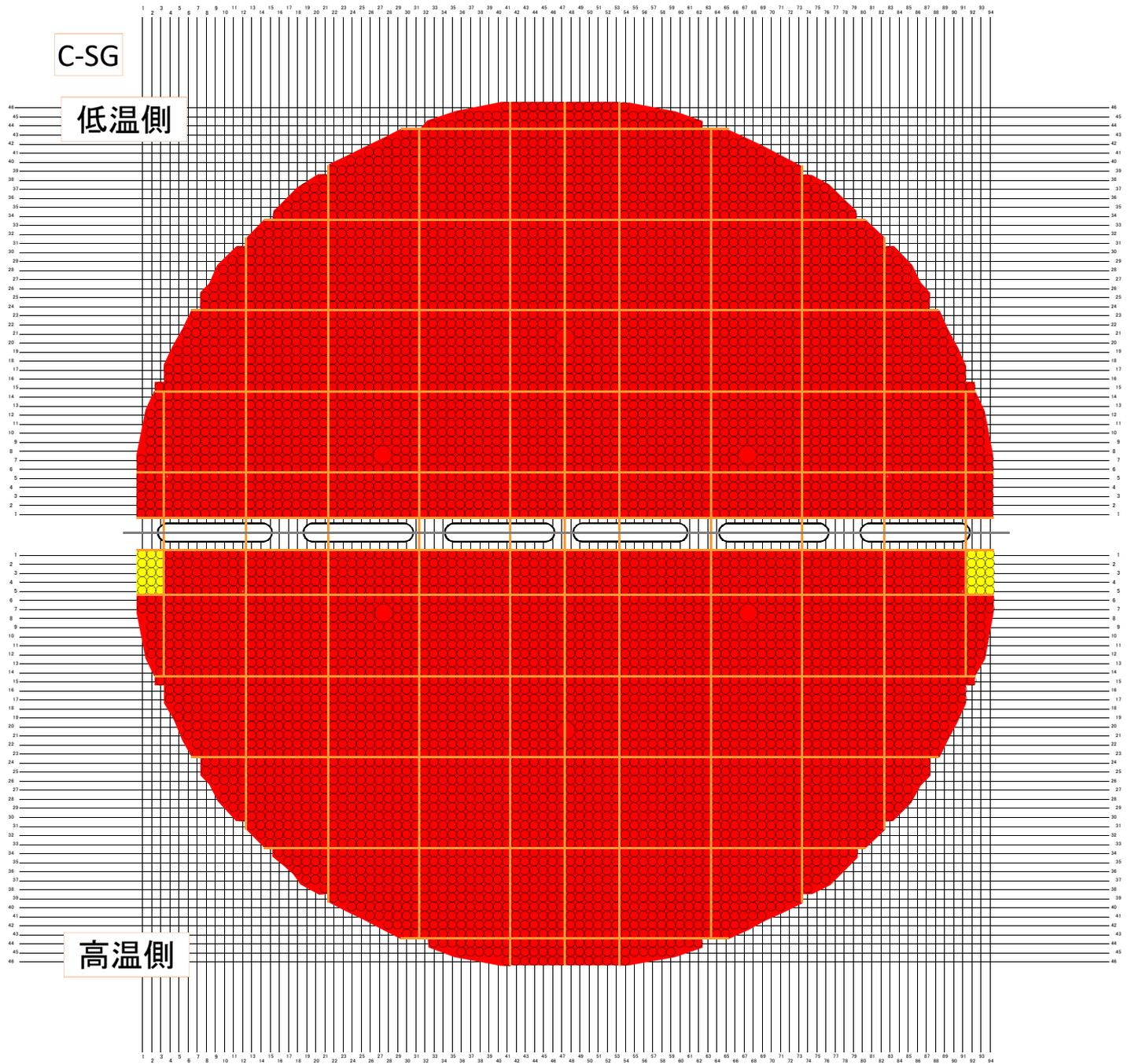


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



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)

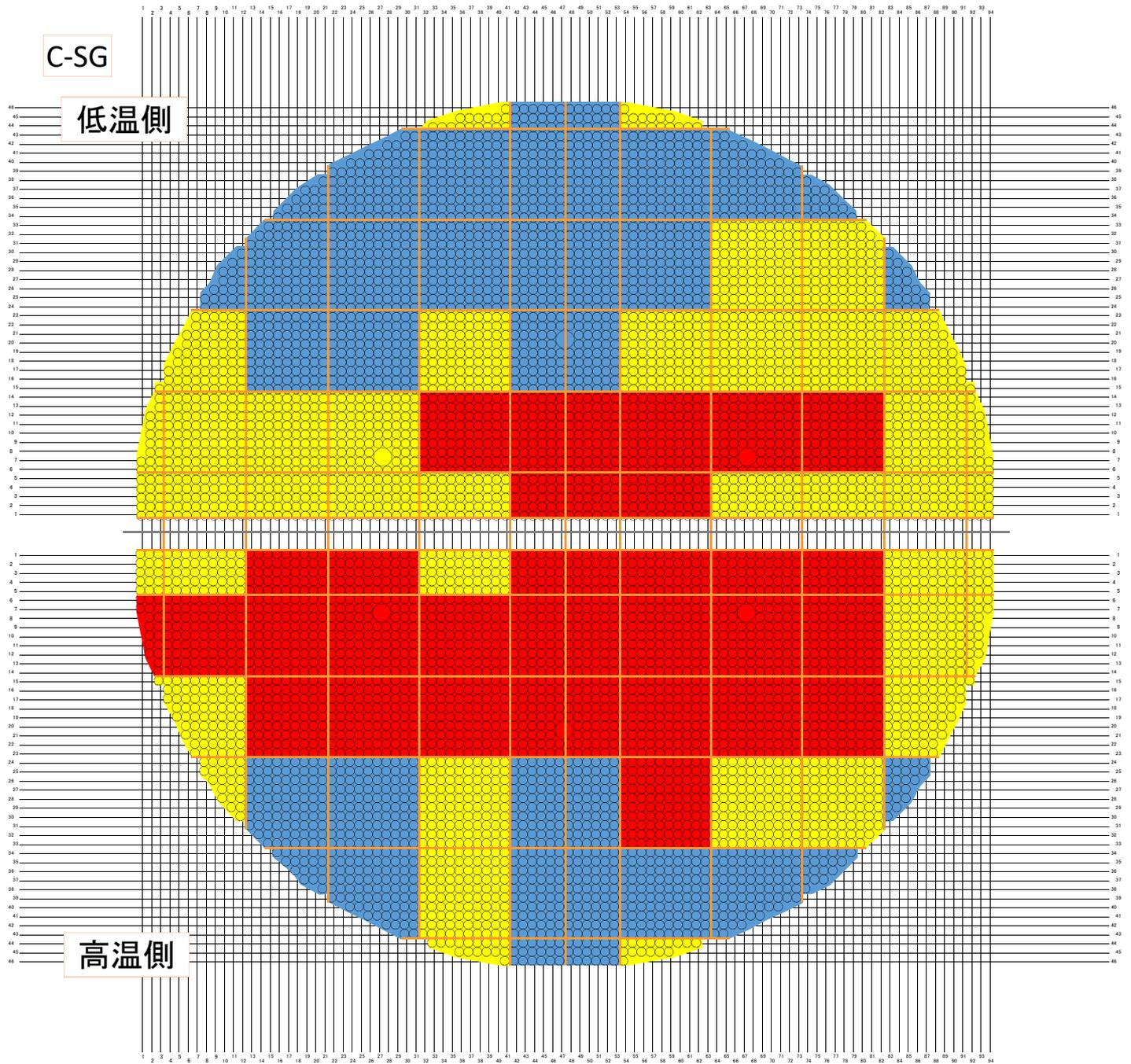


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



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)

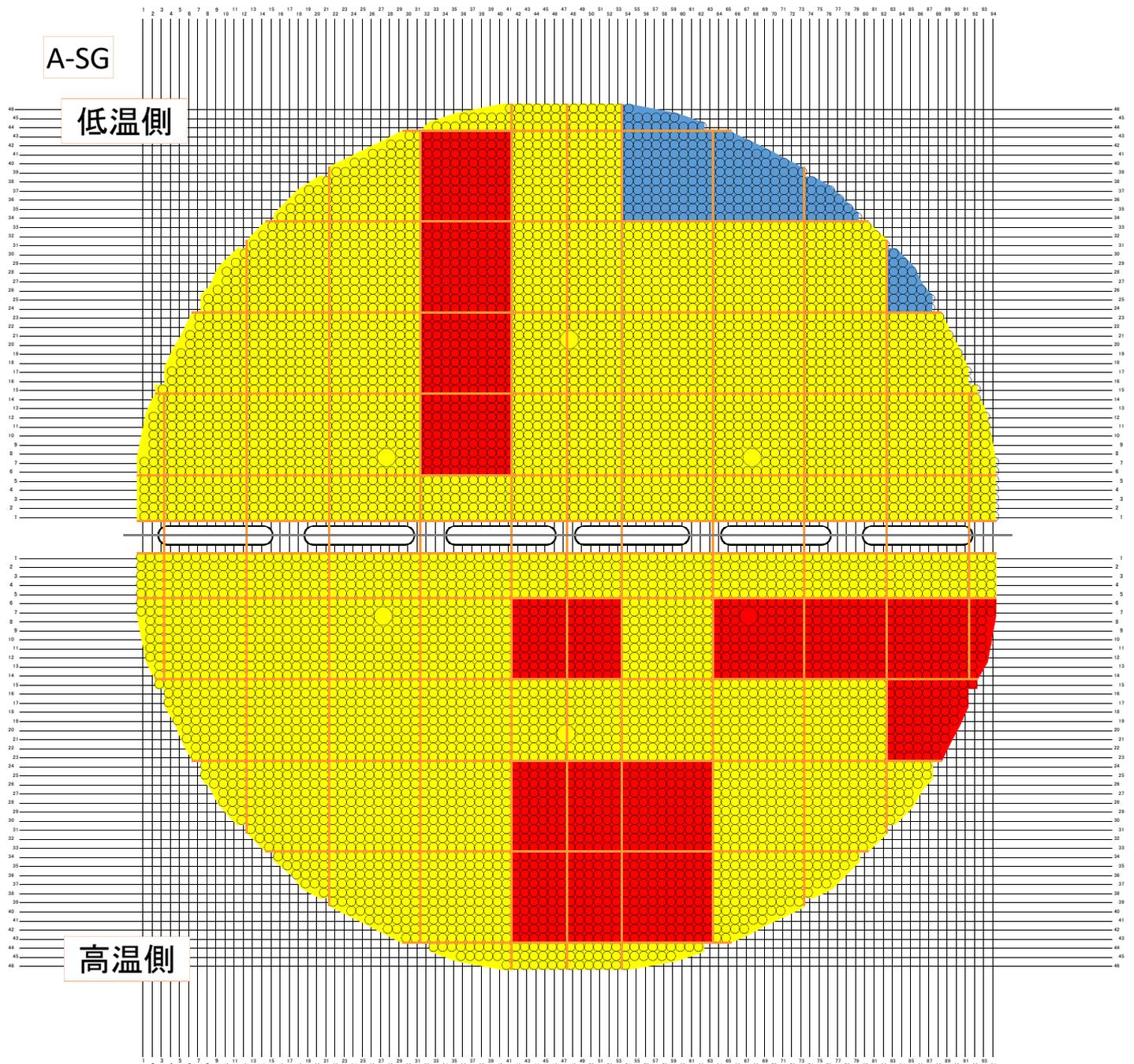


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。



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)

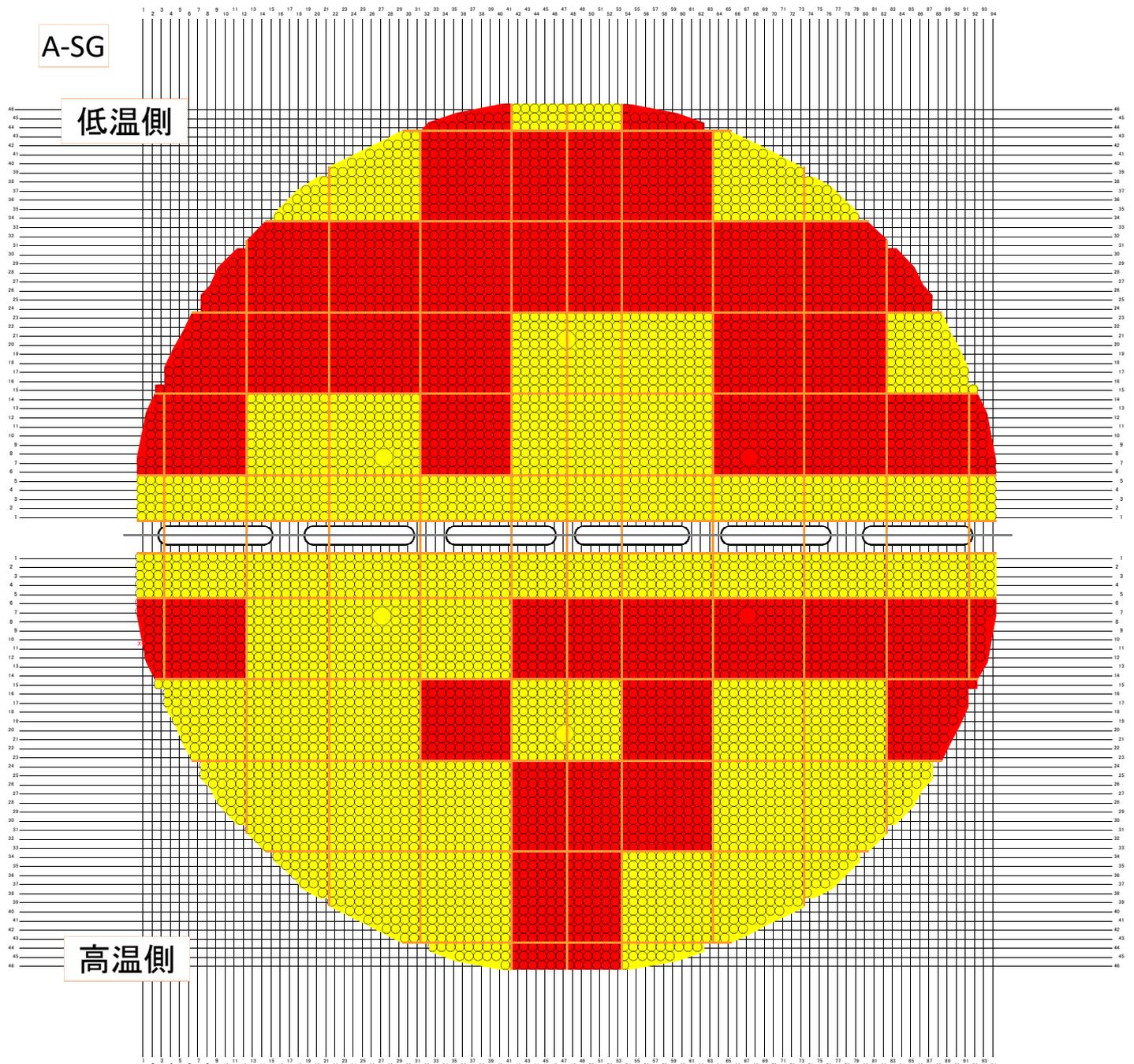


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多””中””少”に色分けした。



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(第二管支持板)

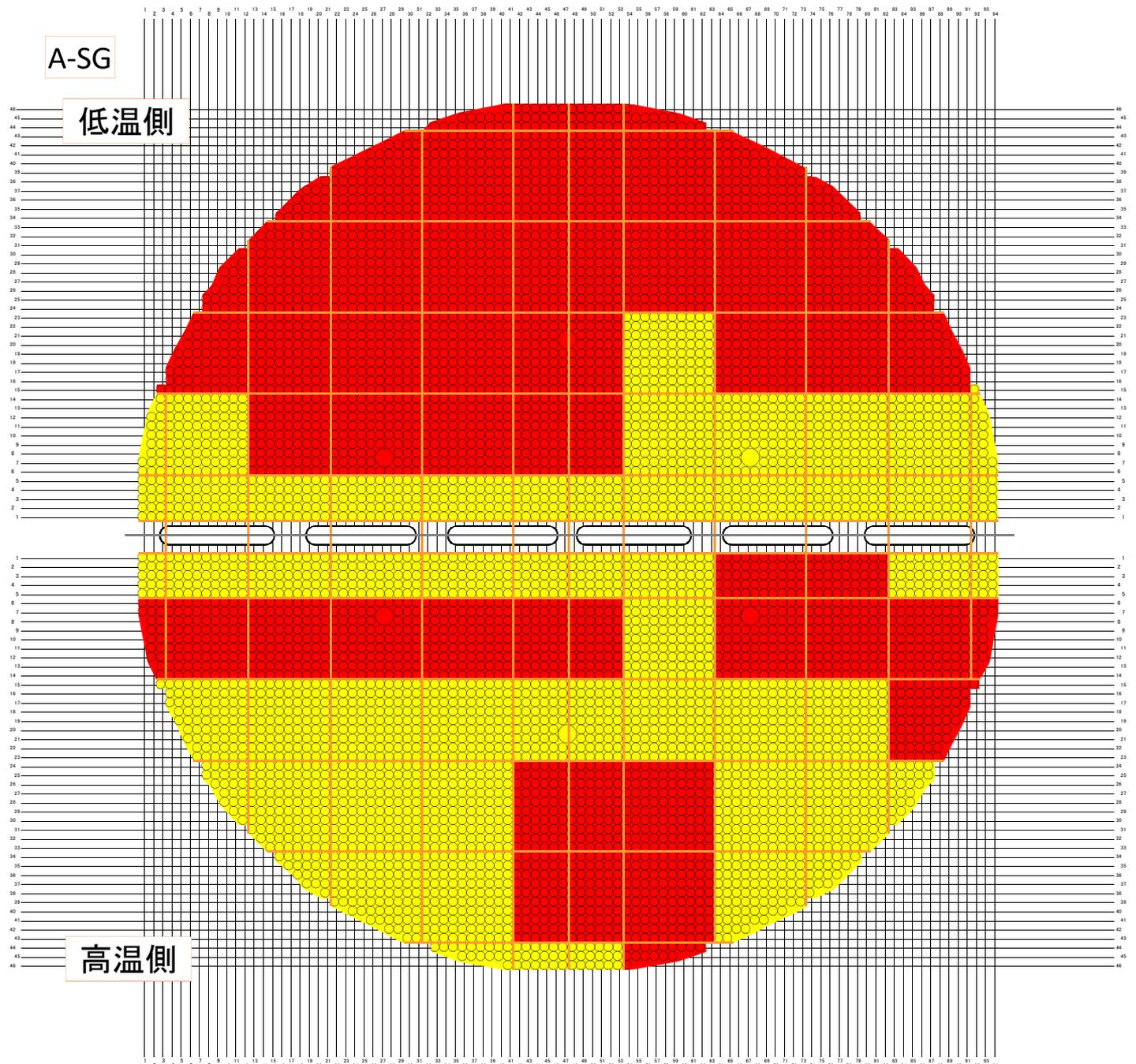


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多””中””少”に色分けした。

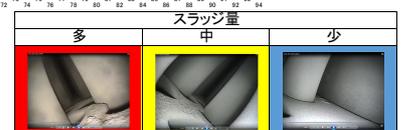


SG器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スラッジの分布状況(第一管支持板)

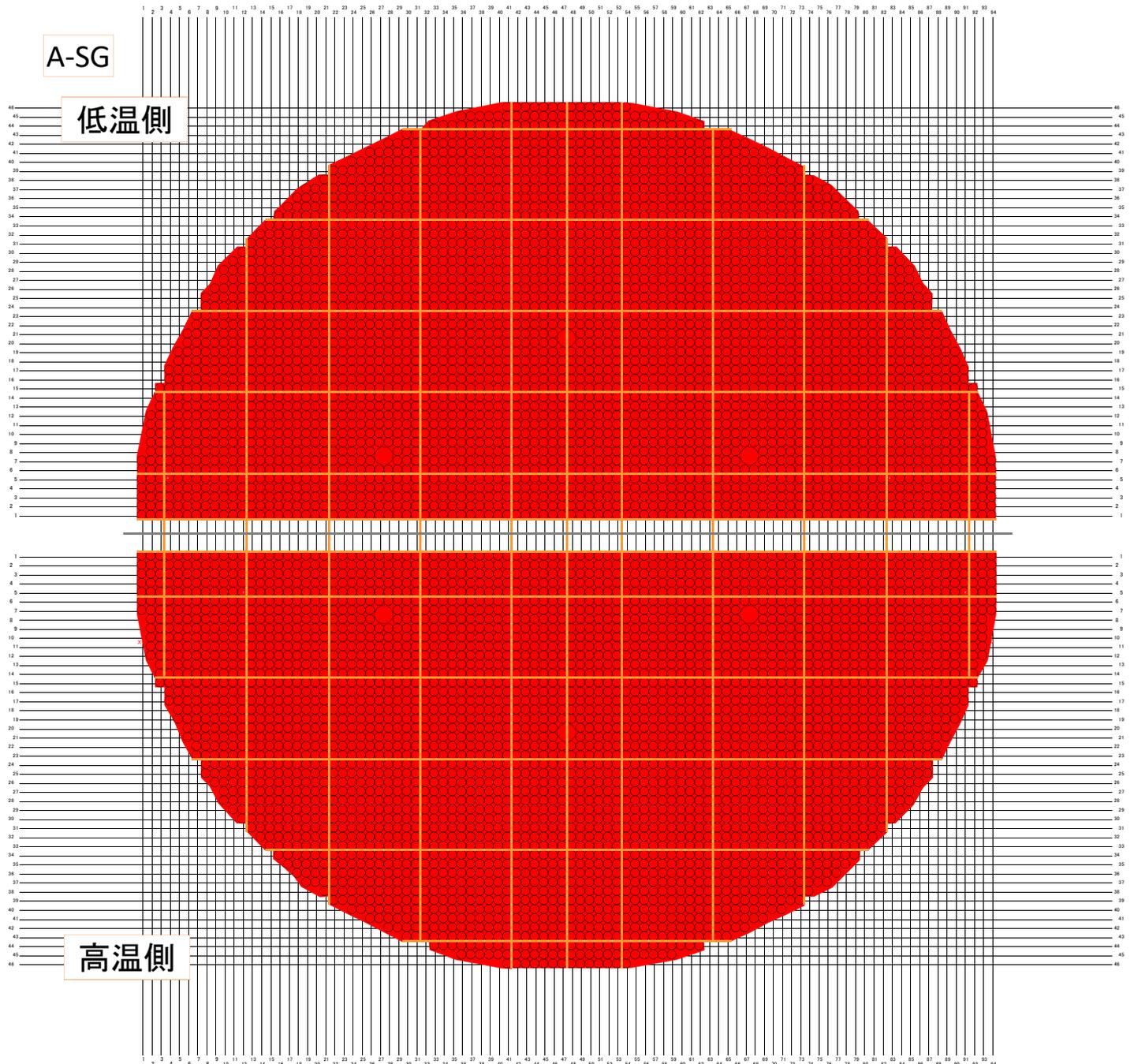


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多””中””少”に色分けした。



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(管板)

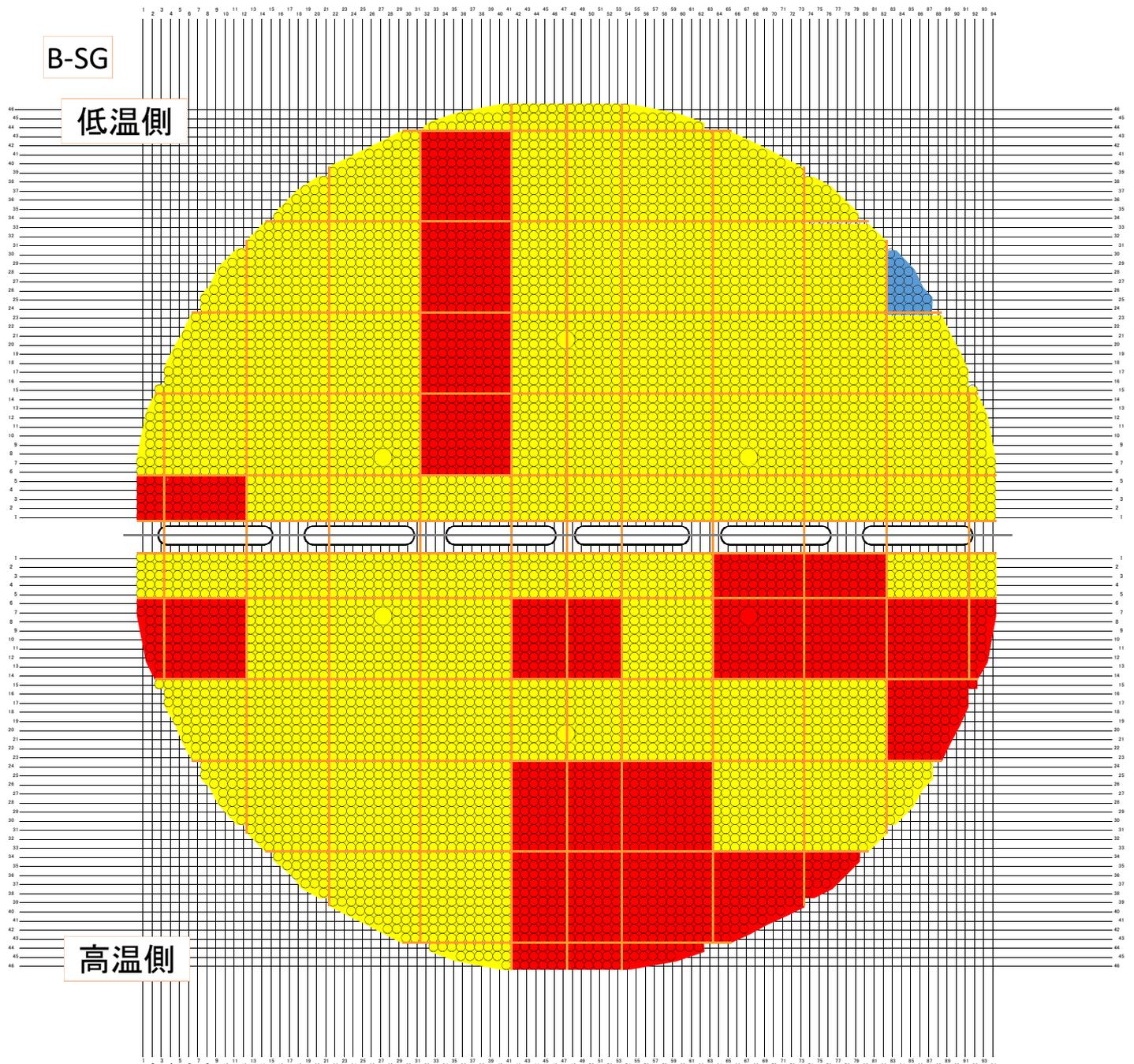


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多””中””少”に色分けした。



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)

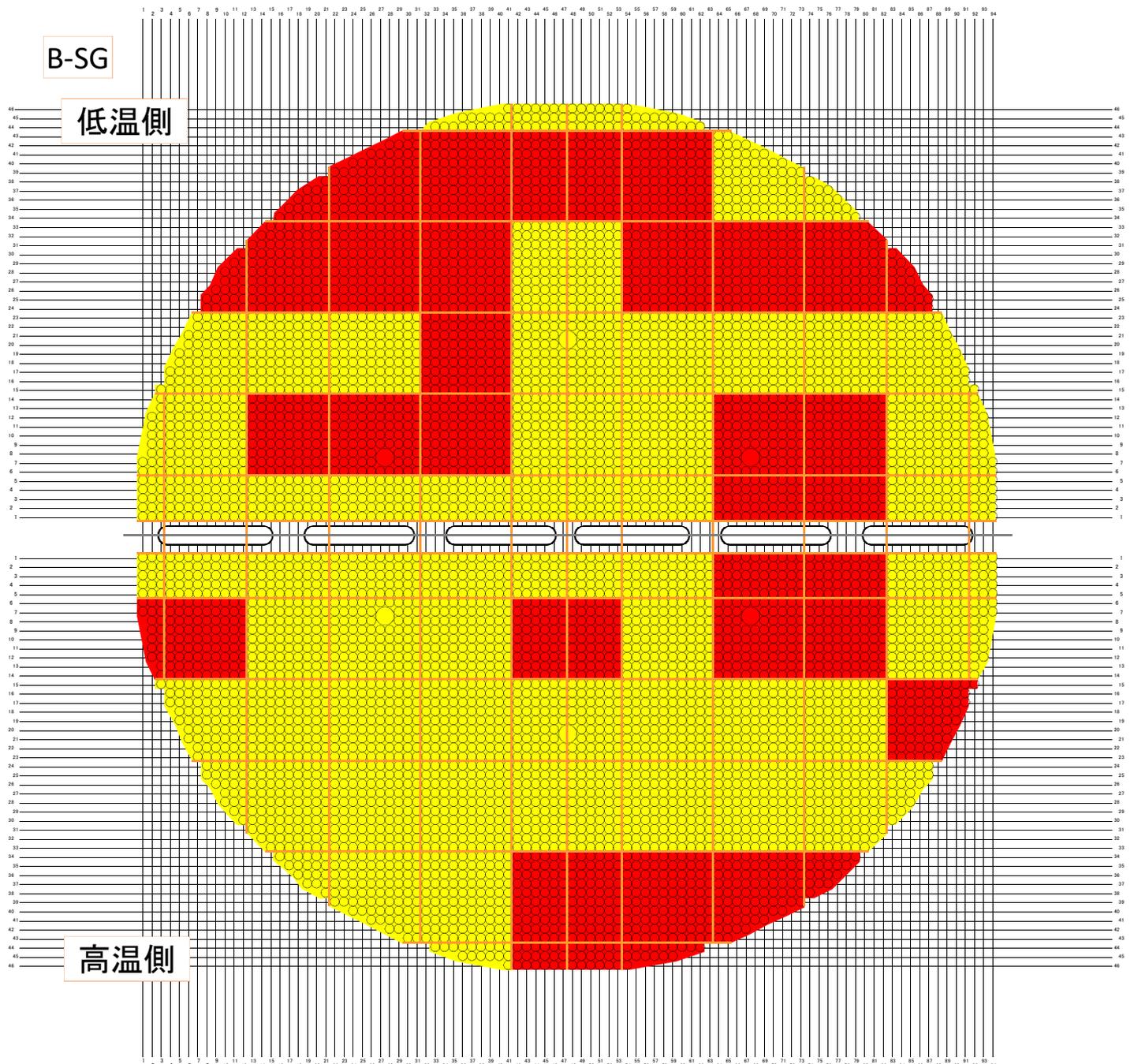


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多””中””少”に色分けした。



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(第二管支持板)

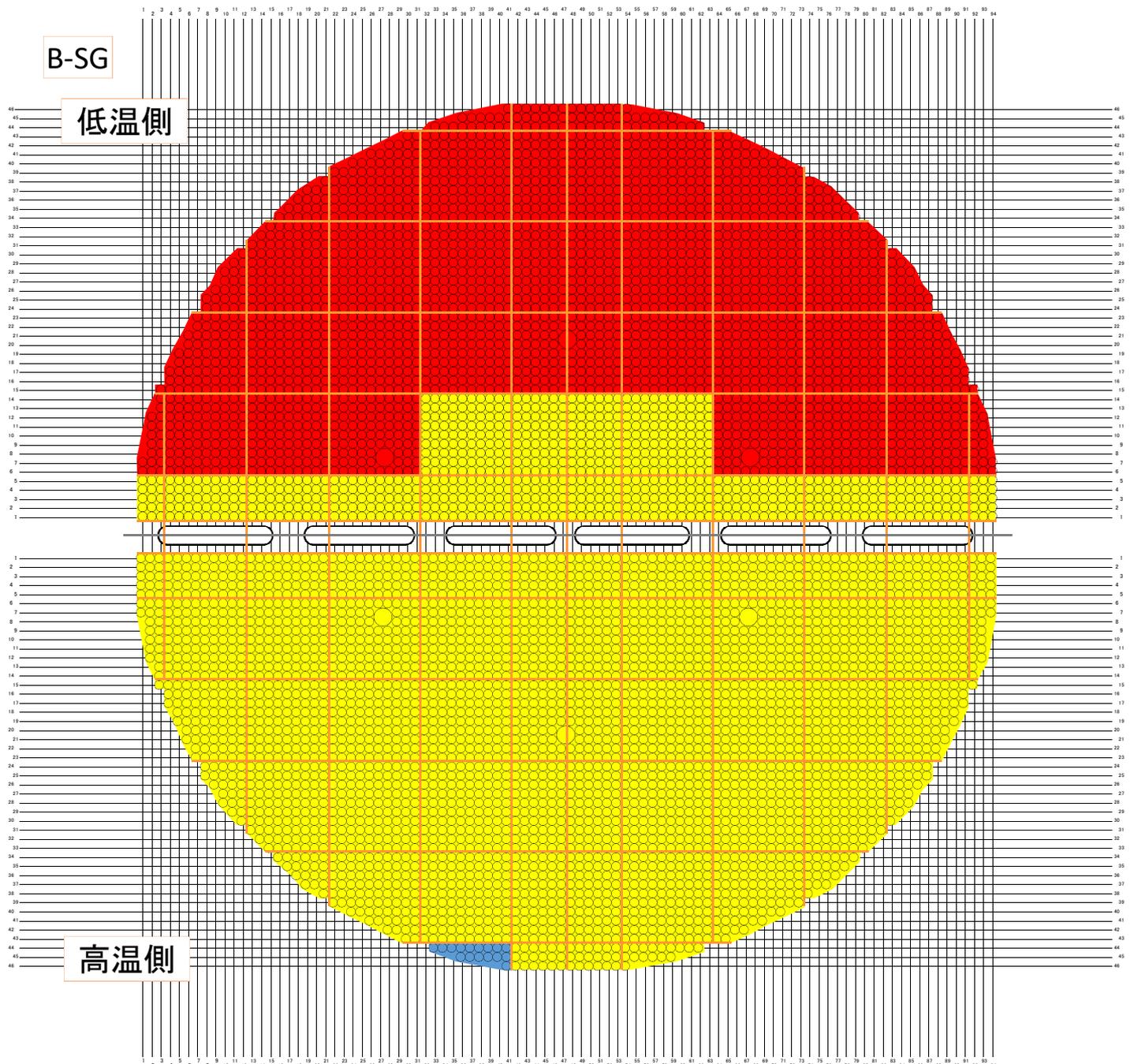


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多””中””少”に色分けした。



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(第一管支持板)

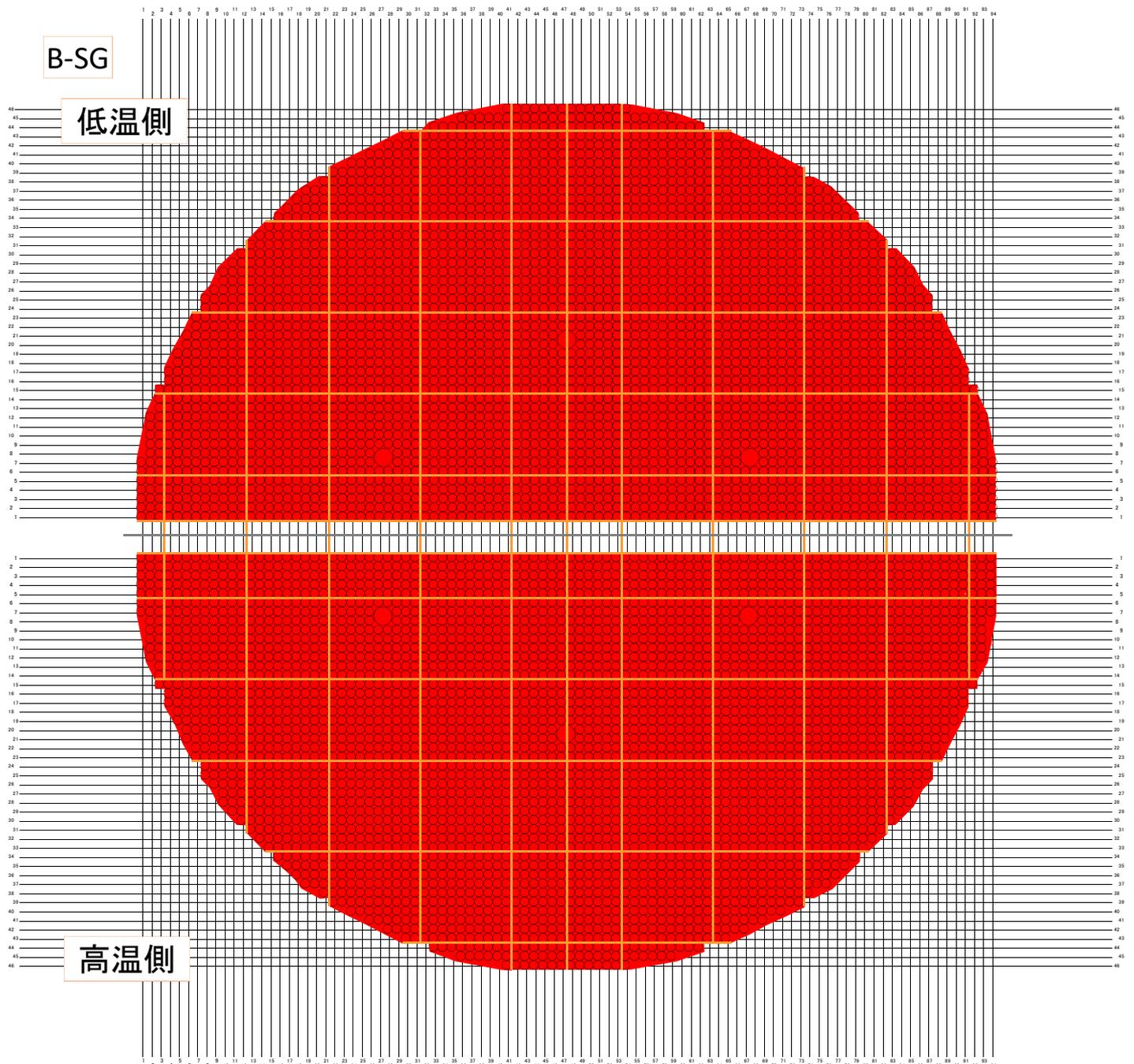


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多””中””少”に色分けした。



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(管板)

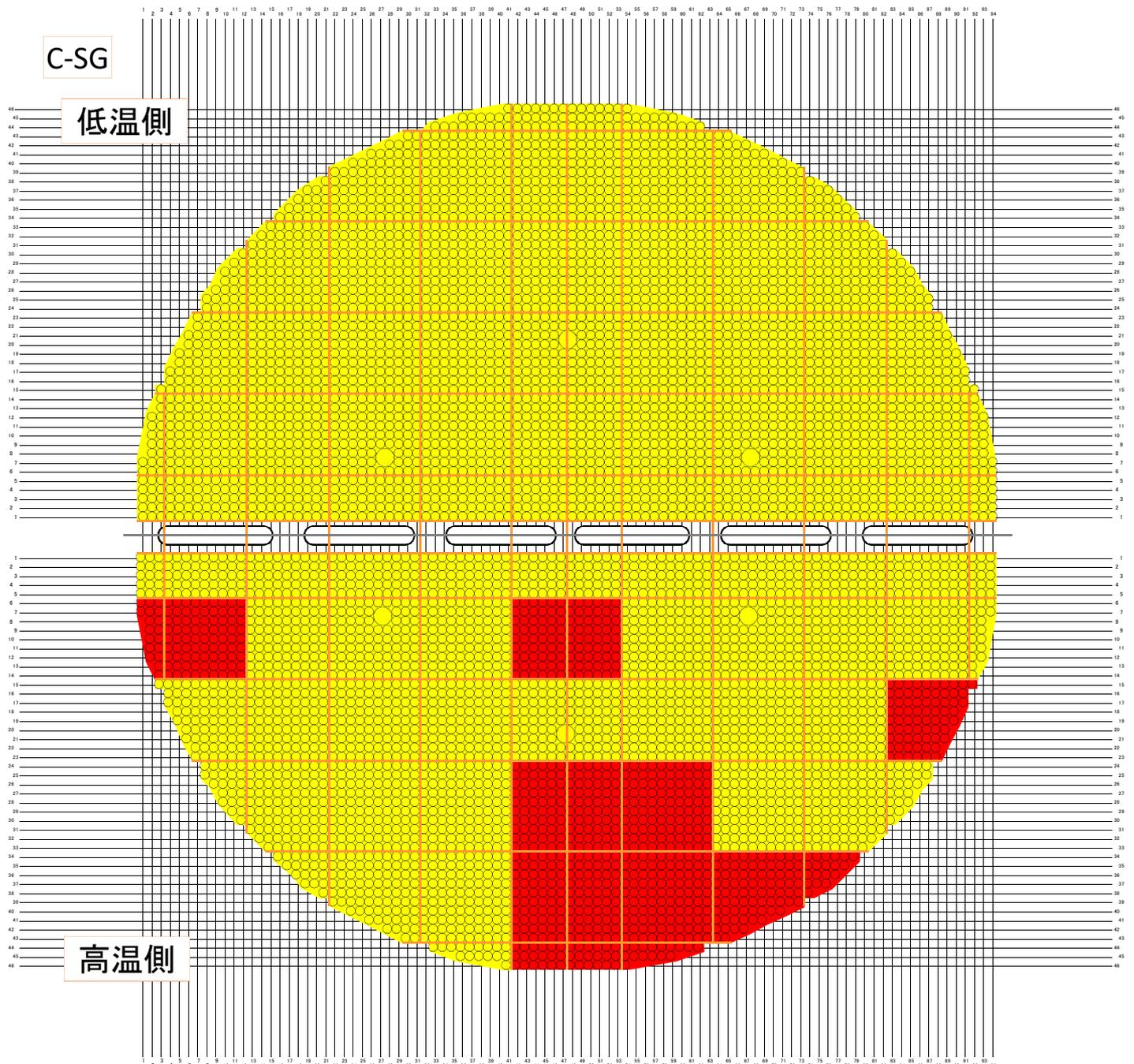


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多””中””少”に色分けした。

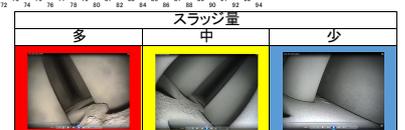
| スラッジ量 | | |
|-------|---|---|
| 多 | 中 | 少 |
| | | |

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)

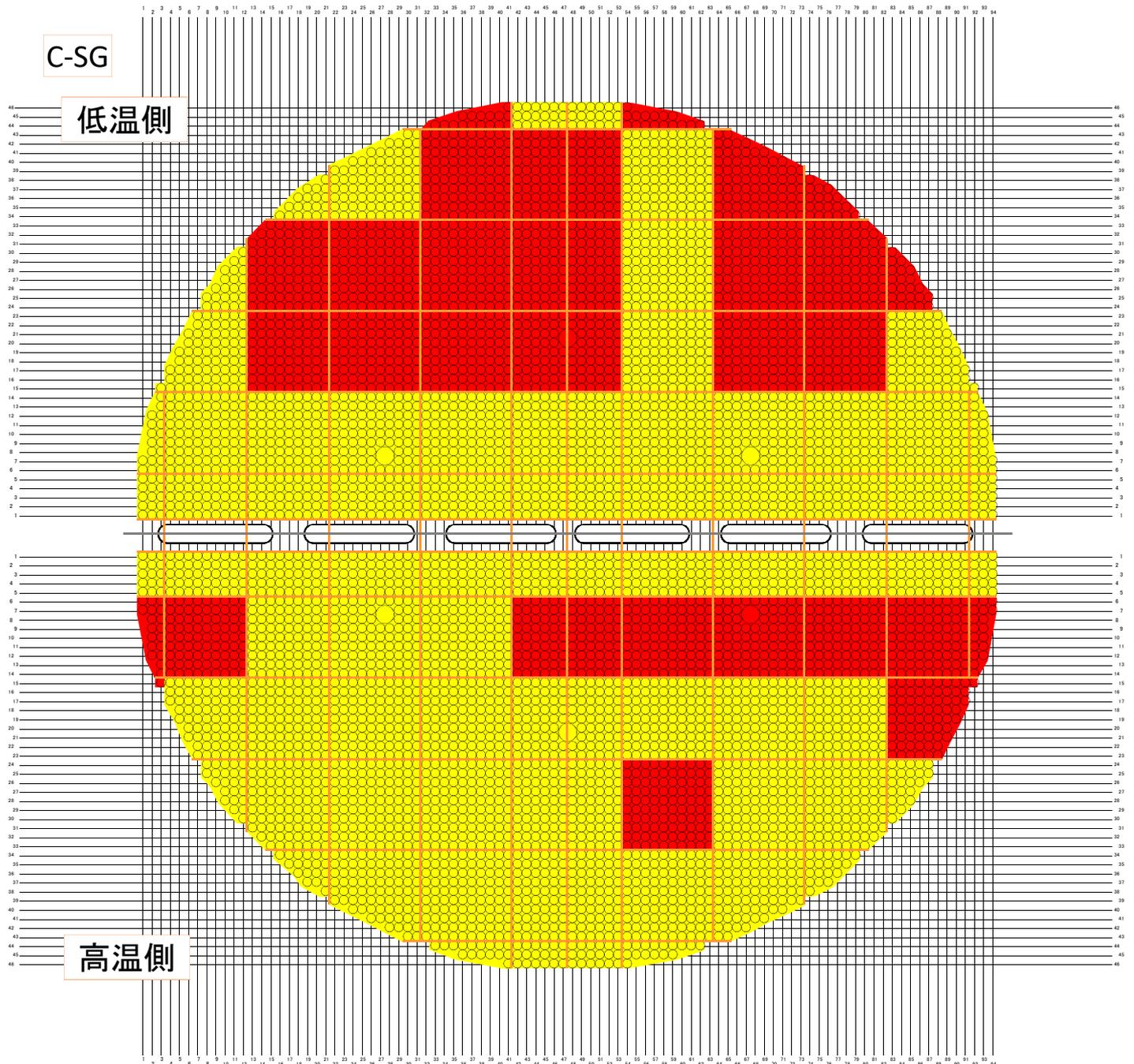


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多””中””少”に色分けした。



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(第二管支持板)

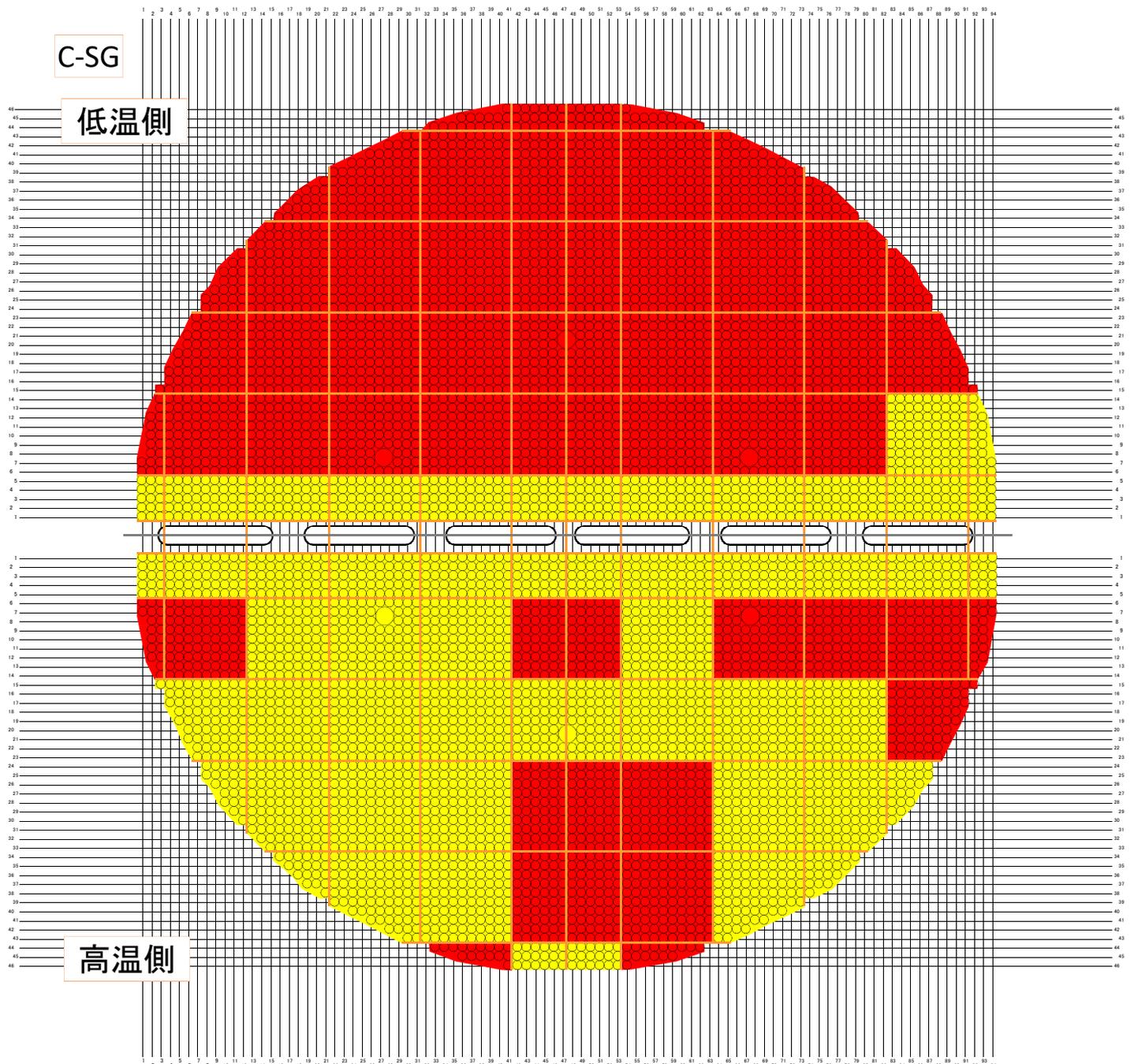


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多””中””少”に色分けした。



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(第一管支持板)

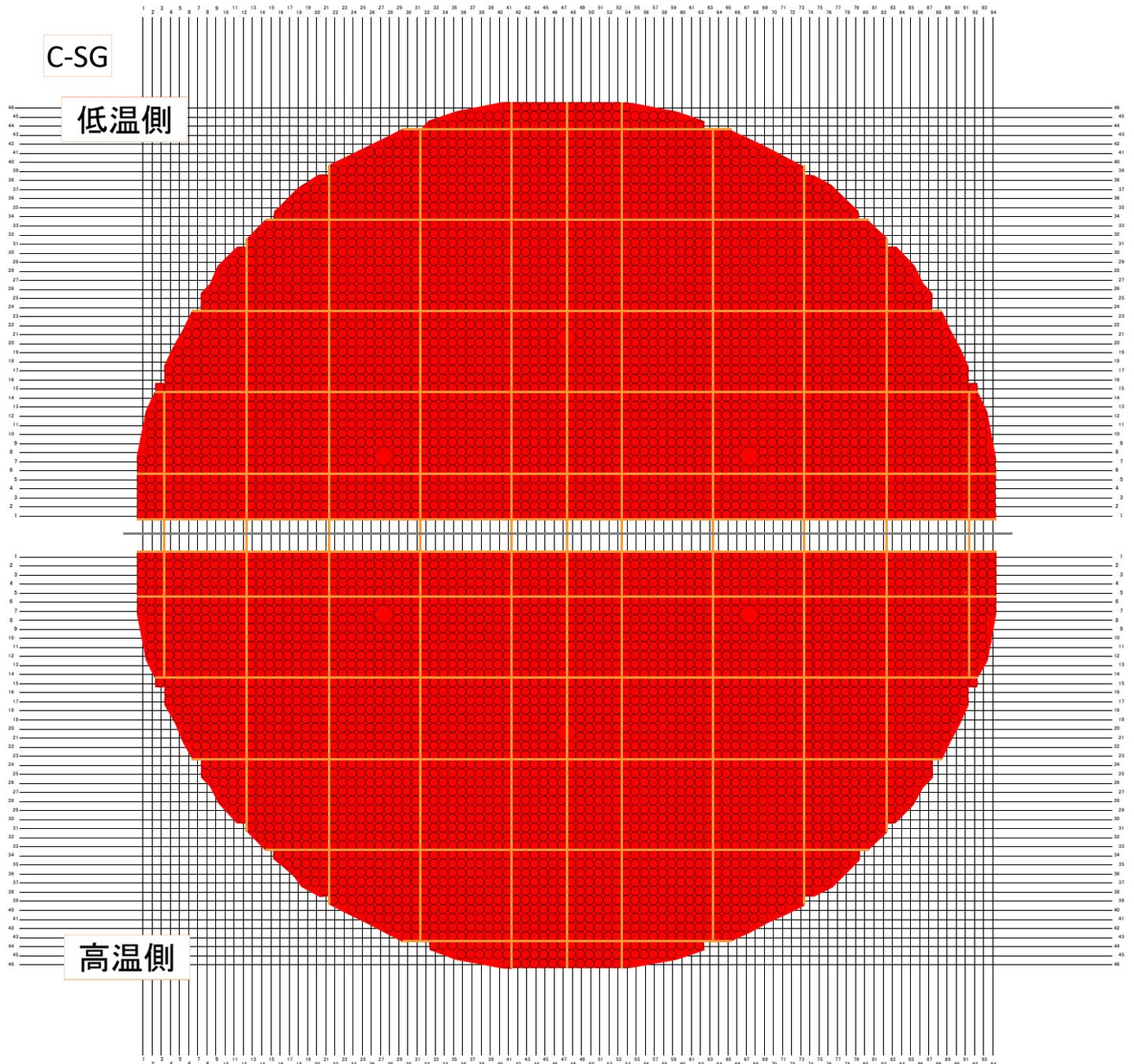


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多””中””少”に色分けした。



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(管板)



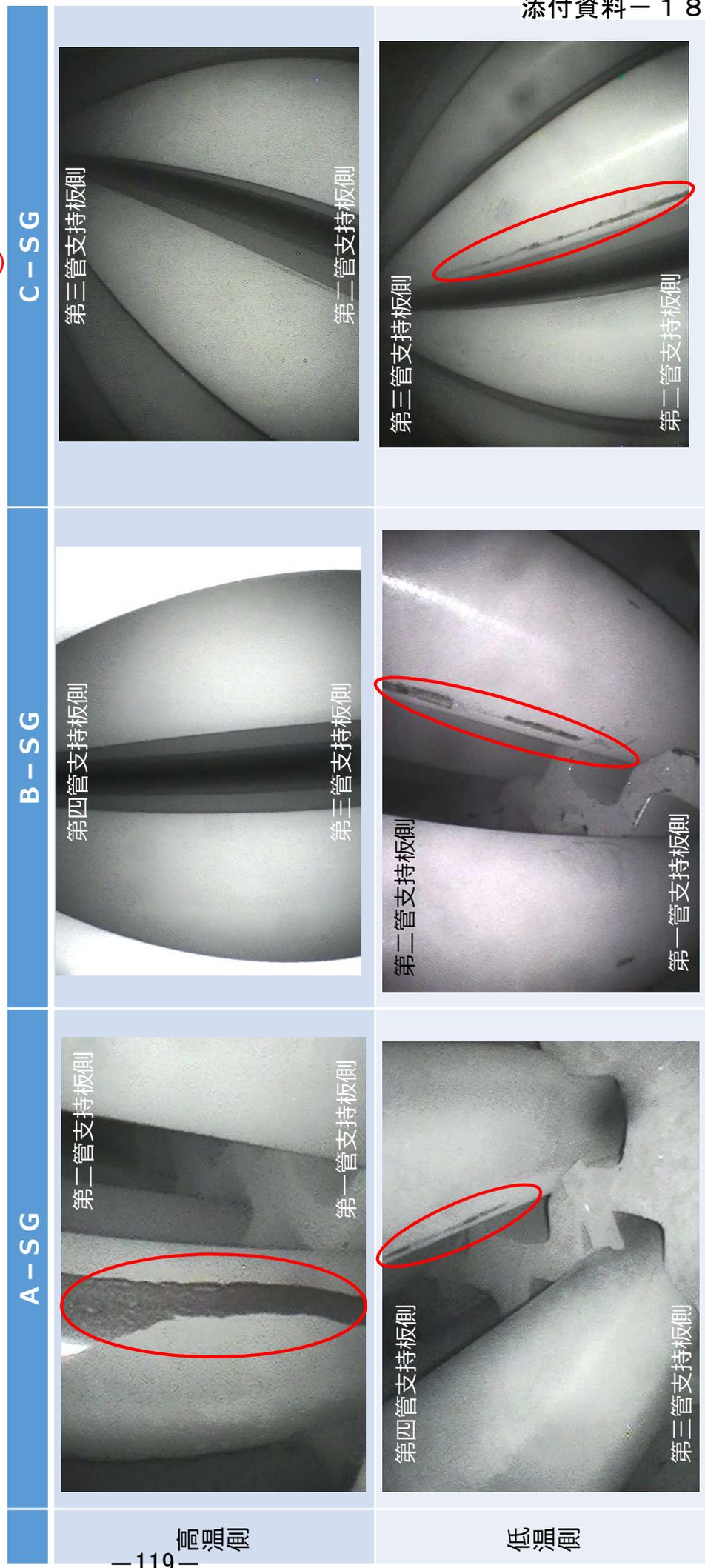
管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多””中””少”に色分けした。



SG器内の伝熱管表面の観察結果

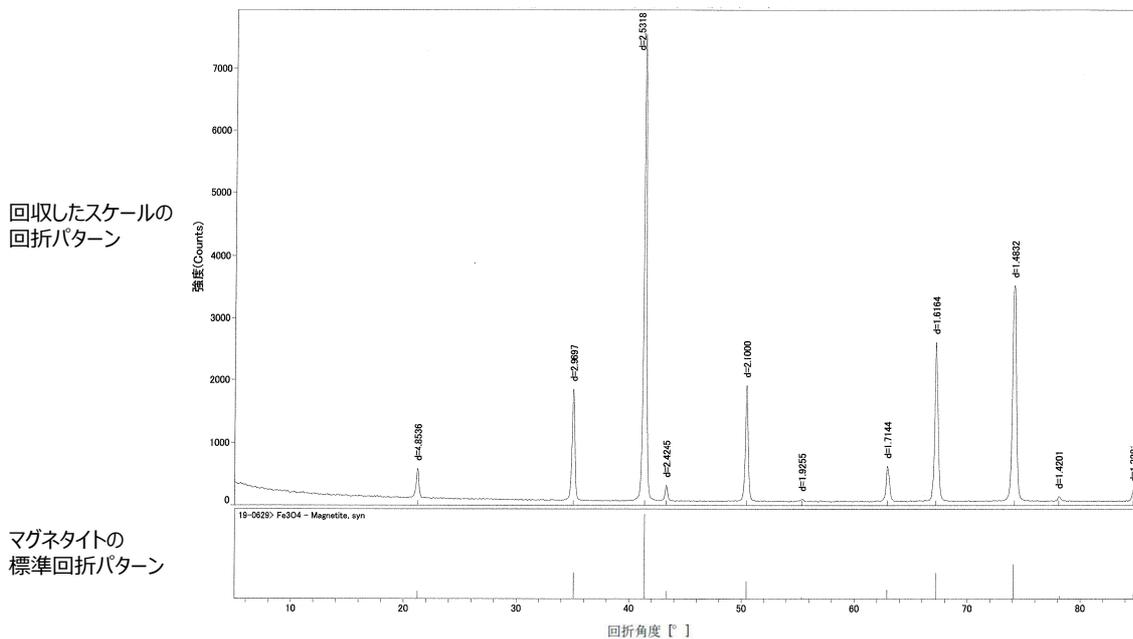
- SG器内のスケールの残存状況等の調査に合わせ、小型カメラを用いて、A、BおよびC-SGの伝熱管の外観観察を行った結果、全面的にスケールに覆われており、局所的にスケールが剥離した痕跡等が認められた。
- 伝熱管のこれらの状況については、高温側と低温側（水平方向）、管支持板間（上下方向）において有意な差は認められなかった。

○：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（1／8）

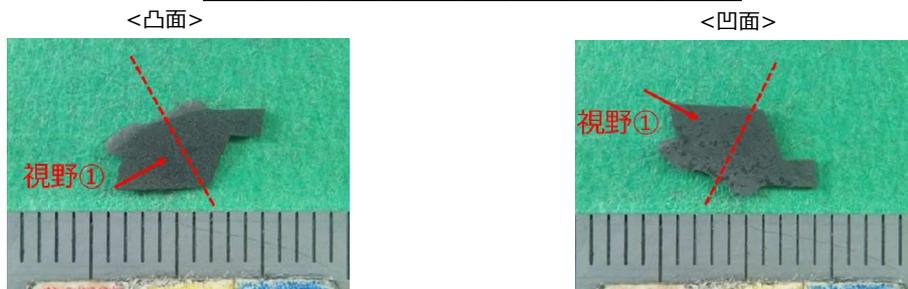
- 回収したスケールについて、X線回折※を用いた表面の化学成分分析を実施した結果、主成分はマグネタイトであり、S G 器内で発生するスラッジと同成分であることを確認した。



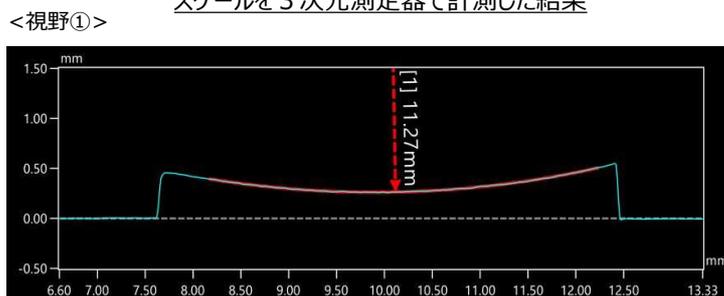
※：対象物にX線を照射し、X線回折パターンを解析することで、構成成分の同定をする分析方法

- A、BおよびC－S Gの管板、第一～第三管支持板上面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25mm、幅約13mm、後者が長さ約29mm、幅約6mm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に留まる可能性のある形状であった。
- 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S Gから取り出した15個のスケールについて3次元測定器により計測した結果、直径約22.3～22.5mm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－S G 管板上面（低温側）から回収したスケール



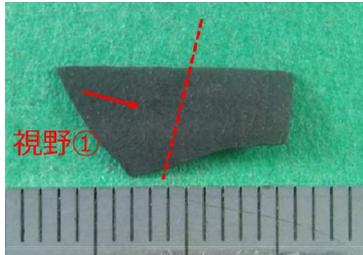
スケールを3次元測定器で計測した結果



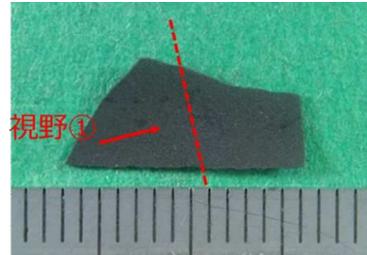
回収したスケールの化学分析および形状確認結果 (2 / 8)

A-SG 管板上面 (高温側) から回収したスケール

<凸面>

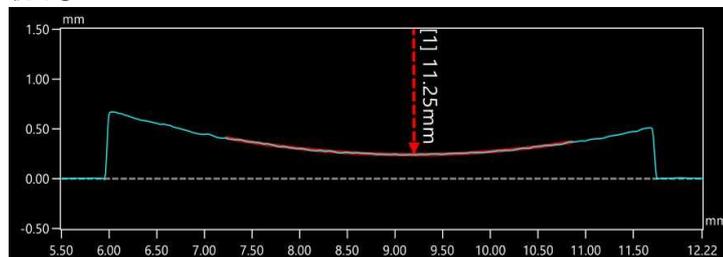


<凹面>



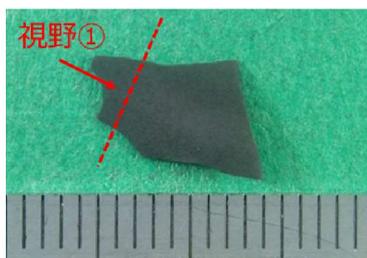
スケールを3次元測定器で計測した結果

<視野①>

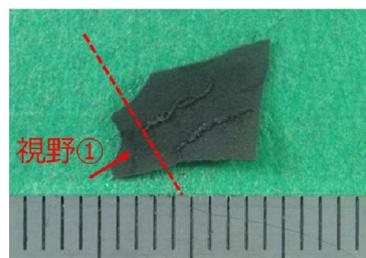


A-SG 管板上面 (高温側) から回収したスケール

<凸面>

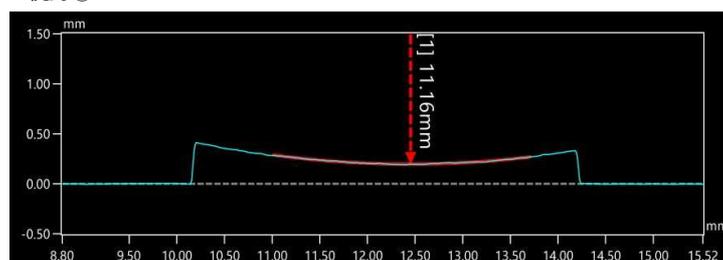


<凹面>



スケールを3次元測定器で計測した結果

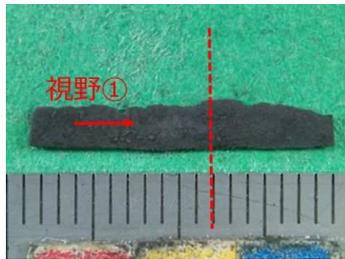
<視野①>



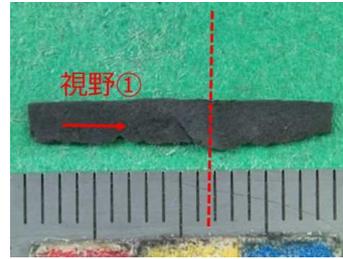
回収したスケールの化学分析および形状確認結果（3／8）

A-SG 第一管支持板上面（低温側）から回収したスケール

<凸面>

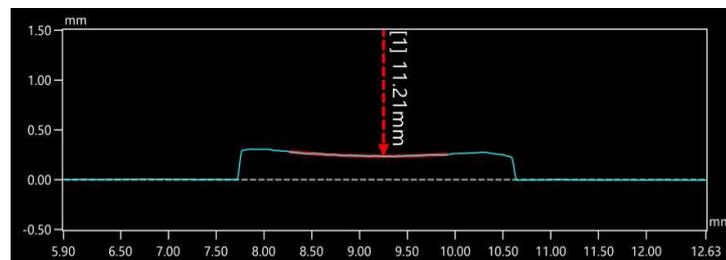


<凹面>



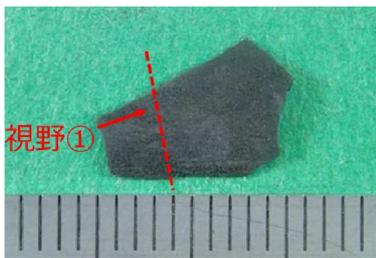
スケールを3次元測定器で計測した結果

<視野①>

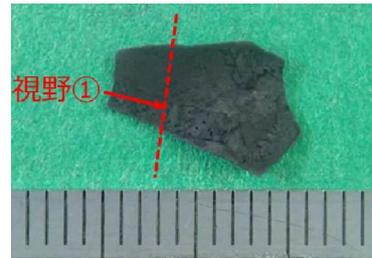


A-SG 第二管支持板上面（高温側）から回収したスケール

<凸面>

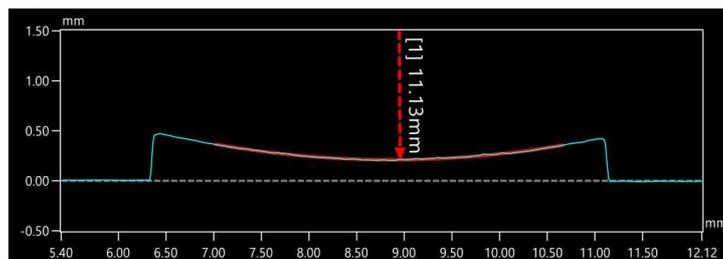


<凹面>



スケールを3次元測定器で計測した結果

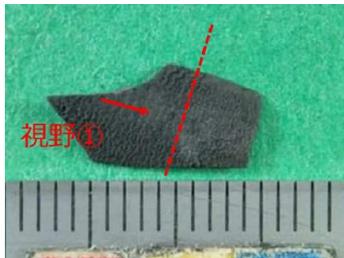
<視野①>



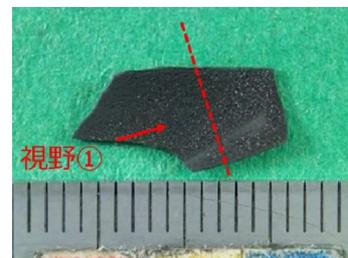
回収したスケールの化学分析および形状確認結果 (4 / 8)

A-SG 第三管支持板上面 (低温側) から回収したスケール

<凸面>

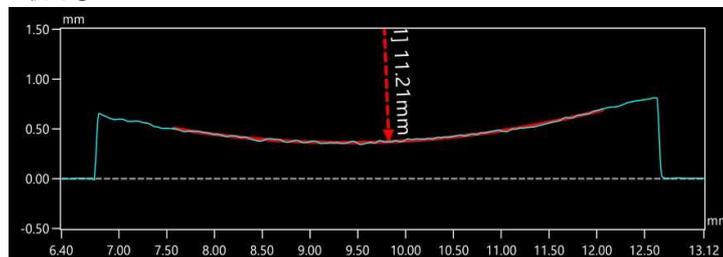


<凹面>



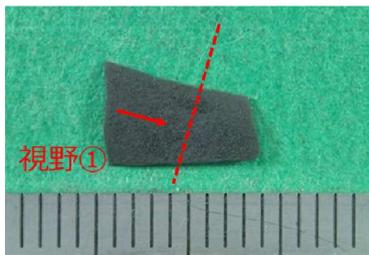
スケールを3次元測定器で計測した結果

<視野①>

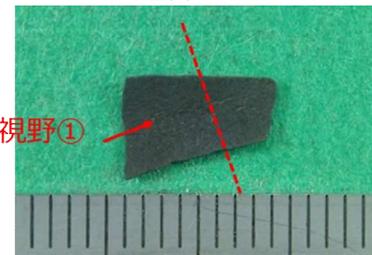


B-SG 管板上面 (高温側) から回収したスケール

<凸面>

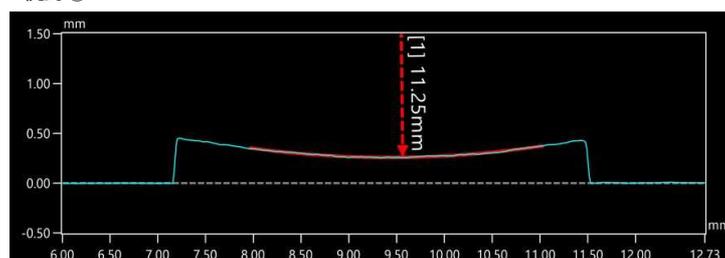


<凹面>



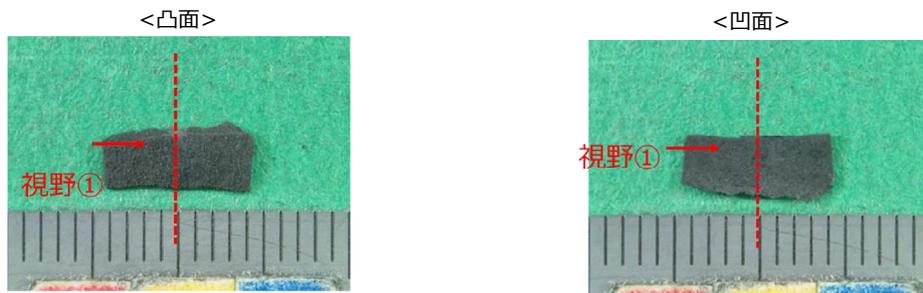
スケールを3次元測定器で計測した結果

<視野①>

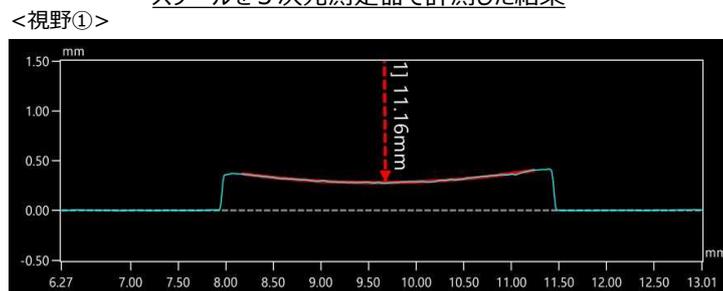


回収したスケールの化学分析および形状確認結果（5／8）

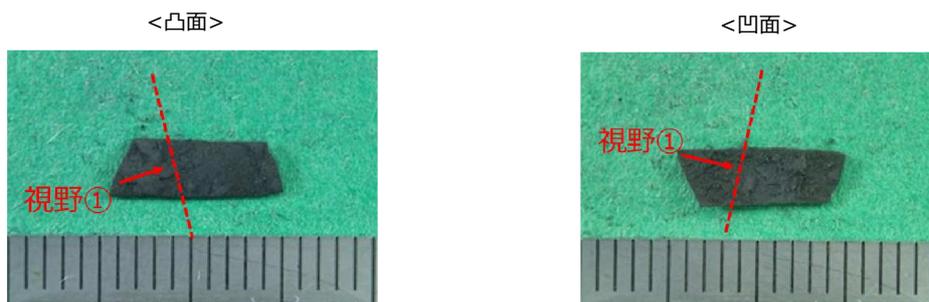
B-S G 管板上面（高温側）から回収したスケール



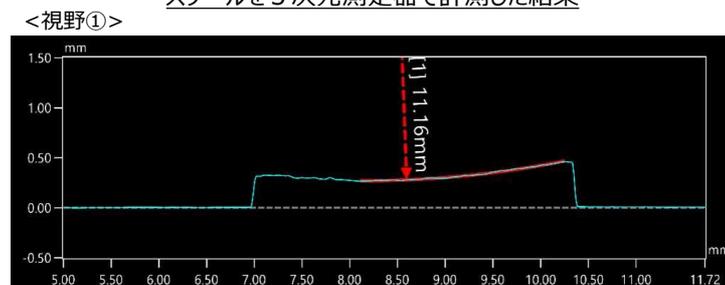
スケールを3次元測定器で計測した結果



B-S G 第一管支持板上面（高温側）から回収したスケール



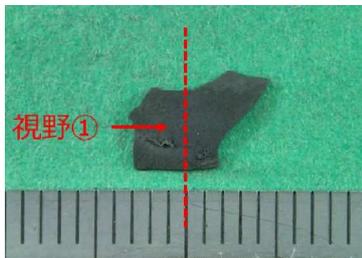
スケールを3次元測定器で計測した結果



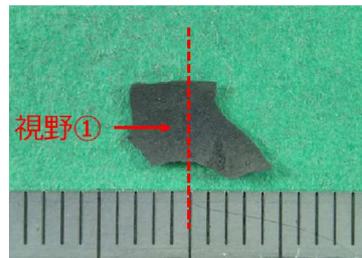
回収したスケールの化学分析および形状確認結果（6／8）

B-S G 第二管支持板上面（低温側）から回収したスケール

<凸面>

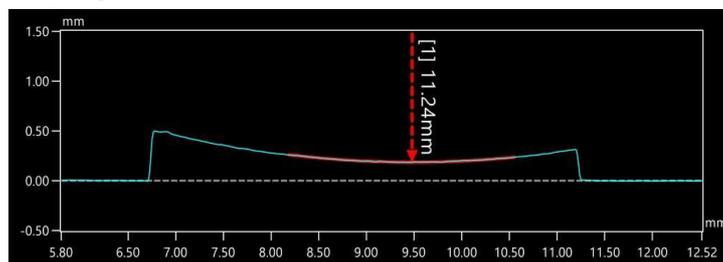


<凹面>



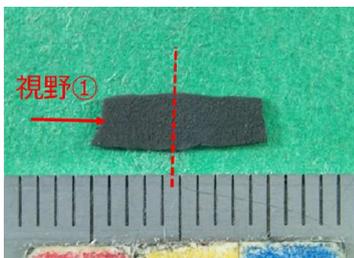
スケールを3次元測定器で計測した結果

<視野①>

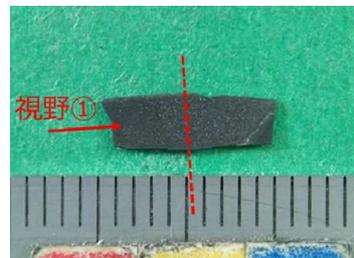


B-S G 第三管支持板上面（低温側）から回収したスケール

<凸面>

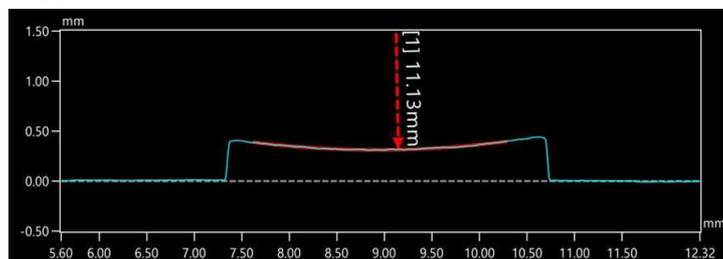


<凹面>



スケールを3次元測定器で計測した結果

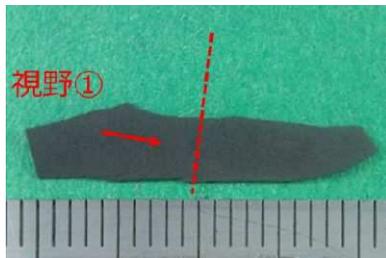
<視野①>



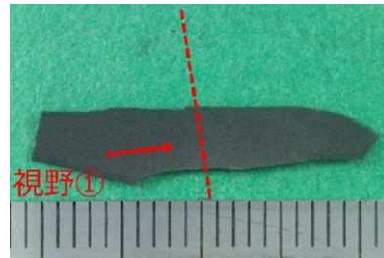
回収したスケールの化学分析および形状確認結果（7／8）

C-SG 管板上面（高温側）から回収したスケール

<凸面>

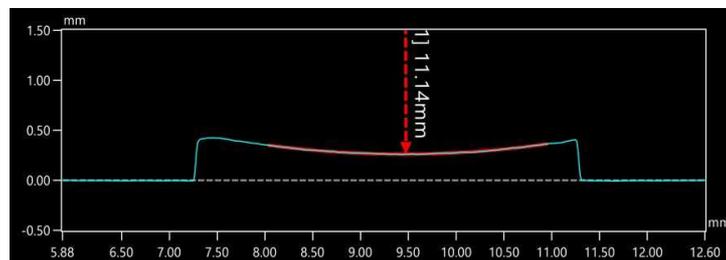


<凹面>



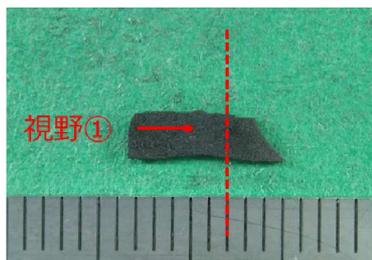
スケールを3次元測定器で計測した結果

<視野①>

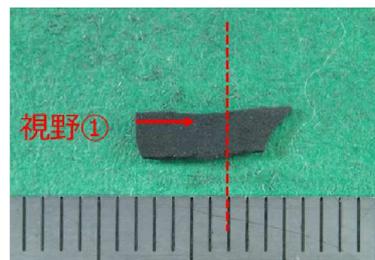


C-SG 第一管支持板上面（高温側）から回収したスケール

<凸面>

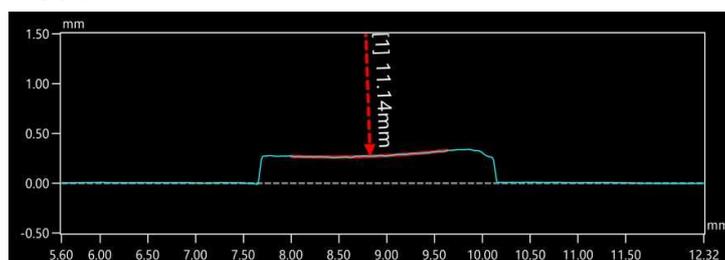


<凹面>



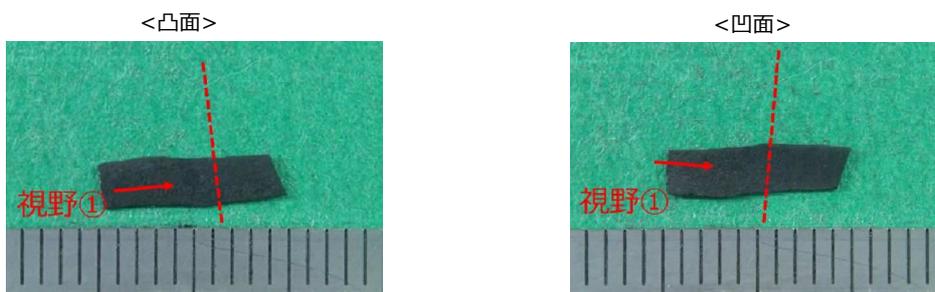
スケールを3次元測定器で計測した結果

<視野①>

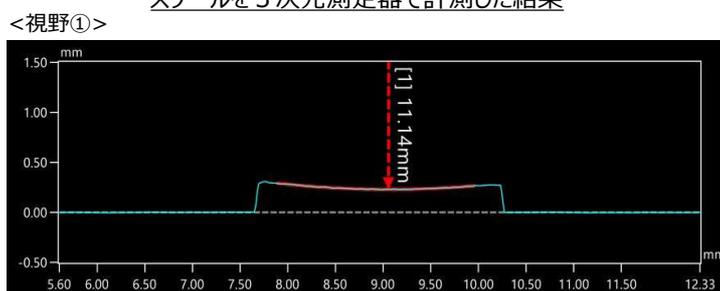


回収したスケールの化学分析および形状確認結果（8／8）

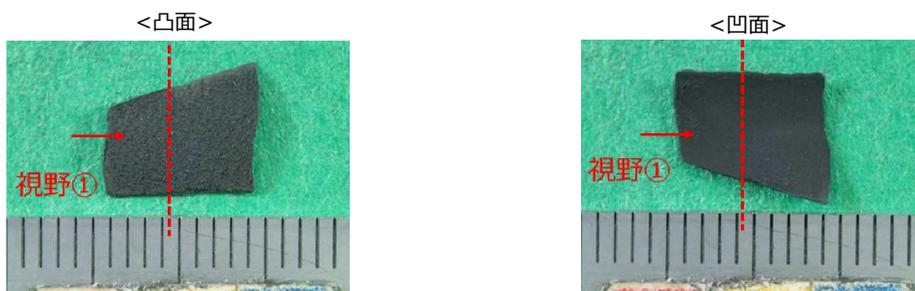
C-SG 第二管支持板上面（低温側）から回収したスケール



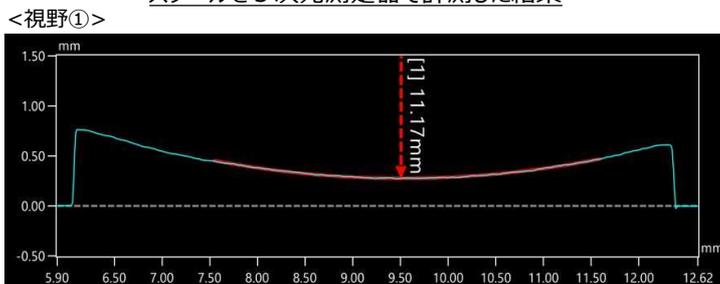
スケールを3次元測定器で計測した結果



C-SG 第三管支持板上面（低温側）から回収したスケール



スケールを3次元測定器で計測した結果



伝熱管とスケールの摩耗試験方法について

以下のとお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、スケールの摺動による伝熱管の減肉発生状況を確認する。

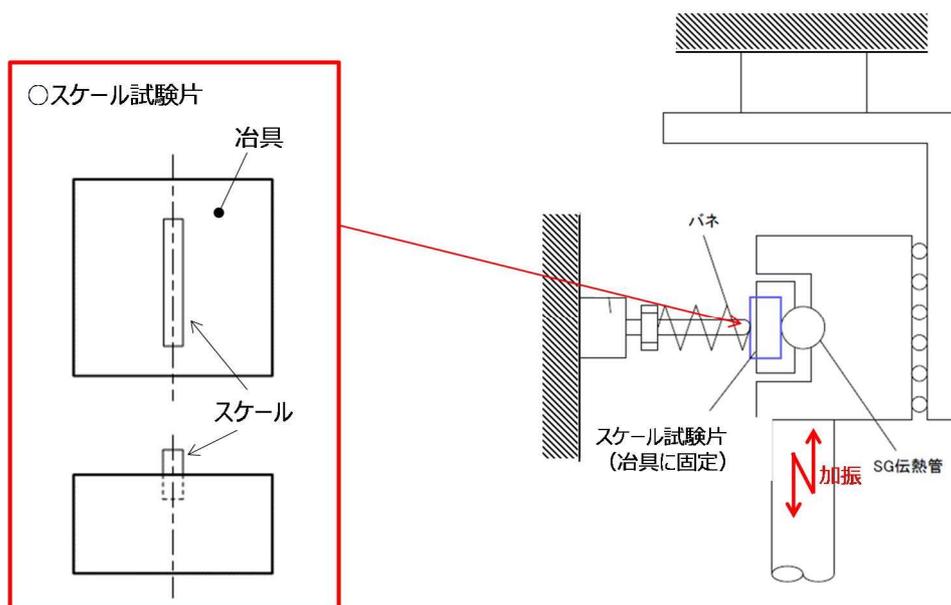


図 1 加振装置概念図

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 のとおり設定した。

表 1 摩耗試験条件

| 項目 | | 条件 | 備考 |
|-------------|-----|----------|----------------|
| 伝熱管 摺動条件 | 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 | BEC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。スケールおよび伝熱管の試験前後の外観を図２および図３に示す。

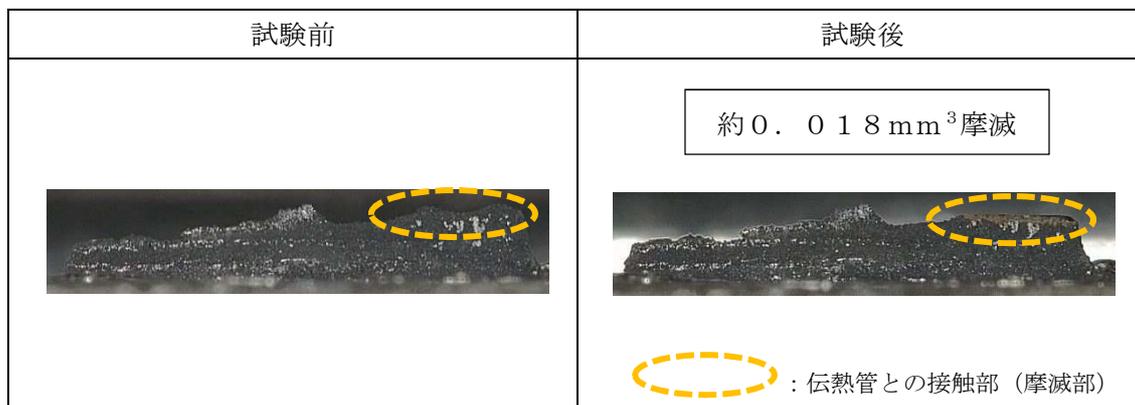


図２ 摩耗試験前後のスケール試験片外観（一例）

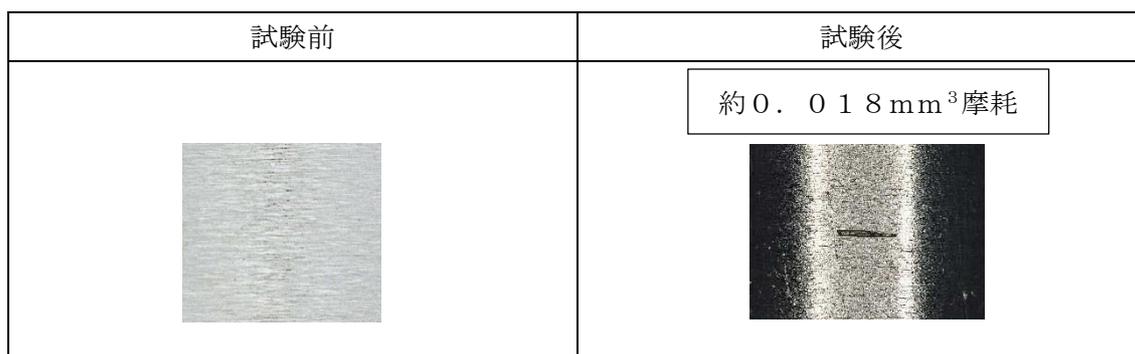


図３ 摩耗試験前後の伝熱管試験片外観（一例）

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48個確認した。
 <断面観察結果 (1/12) >

| スケール回収位置 | B-SG 第一管支持板上 (高温側) | B-SG 第二管支持板上 (低温側) | B-SG 第二管支持板上 (低温側) | B-SG 第二管支持板上 (低温側) | B-SG 第二管支持板上 (低温側) | B-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0.1 | 約0.2 | 約0.2 |
| 稠密層厚さ(mm) | 0.08 | 0.16 | 0.12 | 0.08 | 0.12 | 0.06 |
| 摩耗体積比 (伝熱管/スケール) | 0.0 | 1.0 | 0.4 | 0.0 | 0.4 | 0.0 |
| スケール回収位置 | B-SG 第二管支持板上 (低温側) | B-SG 第二管支持板上 (低温側) | C-SG 第一管支持板上 (高温側) | B-SG 管板上 (高温側) | B-SG 管板上 (高温側) | B-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) | 0.08 | 0.14 | 0.04 | 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 | 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)

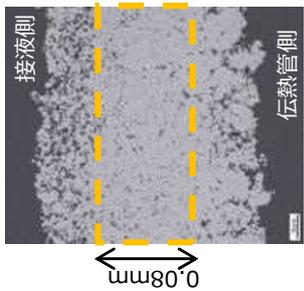
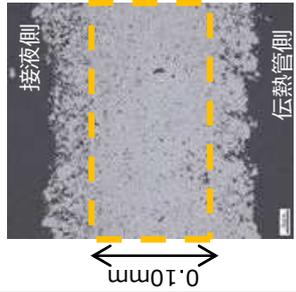
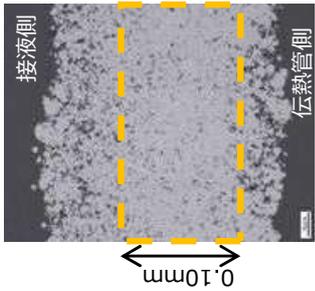
<断面観察結果 (2/12) >

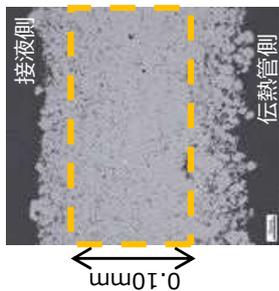
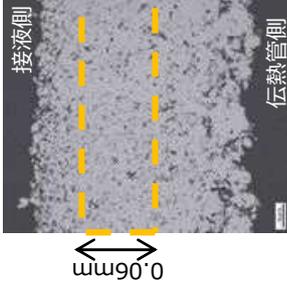
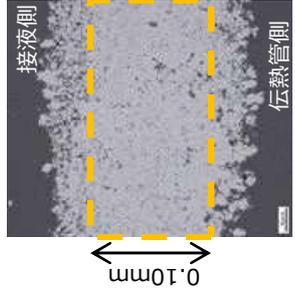
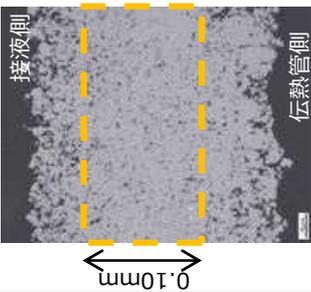
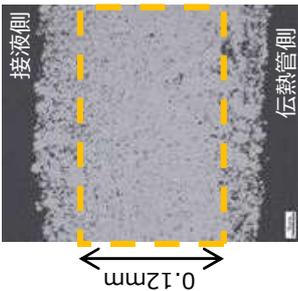
| スケール回収位置 | B-SG 管板上 (高温側) | C-SG 第二管支持板上 (高温側) | C-SG 第二管支持板上 (低温側) | A-SG 第二管支持板上 (高温側) | C-SG 管板上 (低温側) |
|---------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| 断面マイクロ画像 | | | | | |
| スケール厚さ(mm) | 約0.2 | 約0.2 | 約0.2 | 約0.2 | 約0.2 |
| 稠密層厚さ(mm) | 0.04 | 0.08 | 0.10 | 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 | B-SG 第二管支持板上 (低温側) | B-SG 管板上 (高温側) | C-SG 第二管支持板上 (高温側) | C-SG 第二管支持板上 (低温側) | C-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) | 0.12 | 0.12 | 0.06 | 0.04 | 0.08 |
| 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 (3 / 13)

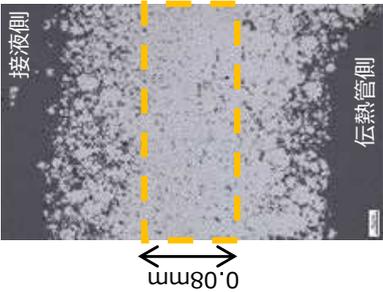
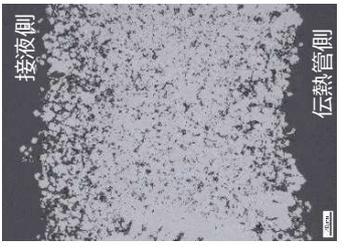
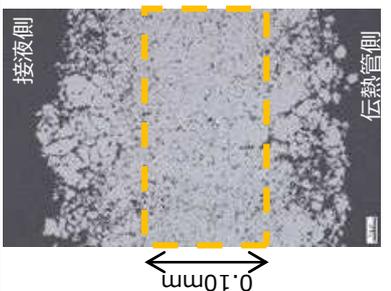
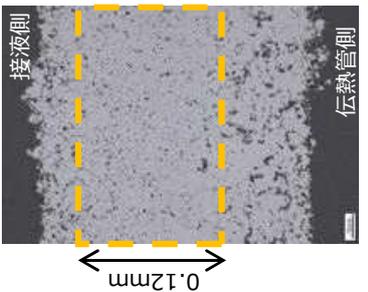
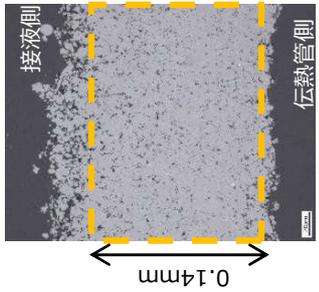
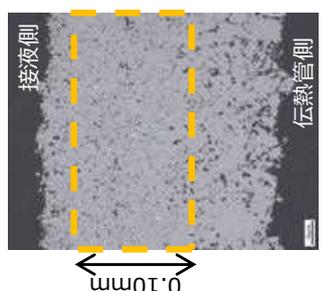
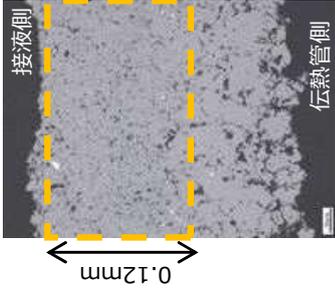
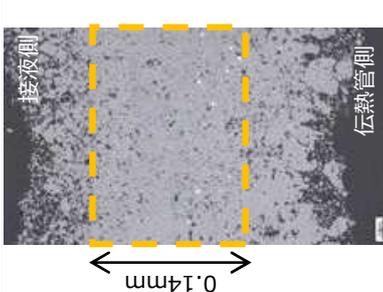
<断面観察結果 (3/12) >

| スケール回収位置 | A-SG 管板上 (高温側) | A-SG 管板上 (高温側) | A-SG 管板上 (高温側) | A-SG 管板上 (高温側) | C-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) | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.10 | 0.10 |
| 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 | C-SG 管板上 (低温側) | 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 | 0.06 | 0.10 | 0.10 | 0.12 |
| 摩耗体積比 (伝熱管/スケール) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.8 |

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 | B-SG 管板上 (高温側) | B-SG 管板上 (高温側) | B-SG 管板上 (高温側) | B-SG 管板上 (高温側) | C-SG 第二管支持板上 (高温側) |
|---------------------|---|---|---|--|--|
| 断面マイクロ画像 |  |  |  |  | |
| スケール厚さ(mm) | 約0.3 | 約0.3 | 約0.3 | 約0.3 | |
| 稠密層厚さ(mm) | 0.08 | 0.00 | 0.06 | 0.10 | |
| 摩耗体積比 (伝熱管/スケール) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.4 | |
| スケール回収位置 | A-SG 管板上 (低温側) | C-SG 管板上 (低温側) | A-SG 第二管支持板上 (高温側) | C-SG 管板上 (低温側) | A-SG 第三管支持板上 (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0.3 |
| 稠密層厚さ(mm) | 0.14 | 0.02 | 0.10 | 0.12 | 0.14 |
| 摩耗体積比 (伝熱管/スケール) | 2.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.9 |

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 | A-SG 第三管支持板上 (低温側) | A-SG 第三管支持板上 (低温側) | C-SG 第三管支持板上 (低温側) | A-SG 第二管支持板上 (高温側) | A-SG 第三管支持板上 (低温側) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 断面マイクロ画像 | | | | | |
| スケール厚さ(mm) | 約0.3 | 約0.2 | 約0.2 | 約0.3 | 約0.3 |
| 稠密層厚さ(mm) | 0.00 | 0.04 | 0.10 | 0.08 | 0.14 |
| 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 | B-SG 第二管支持板上 (低温側) | A-SG 第一管支持板上 (低温側) | A-SG 第一管支持板上 (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0.3 | 約0.2 | 約0.3 |
| 稠密層厚さ(mm) | 0.10 | 0.12 | 0.06 | 0.08 |
| 摩耗体積比 (伝熱管/スケール) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

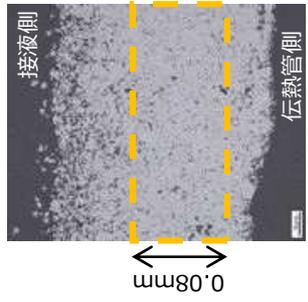
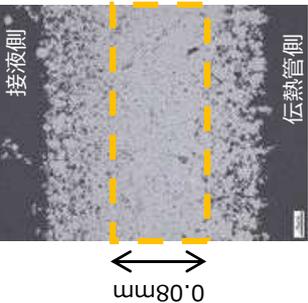
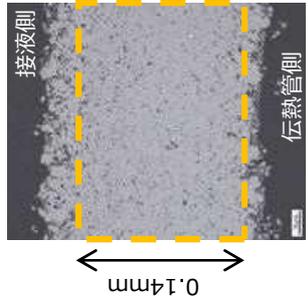
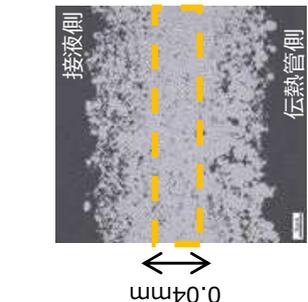
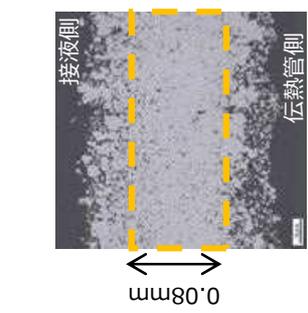
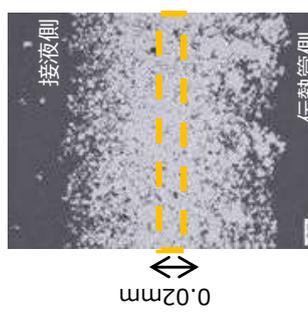
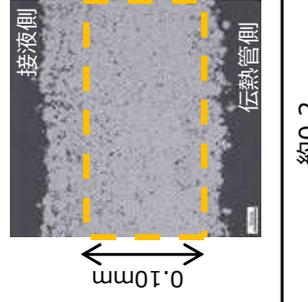
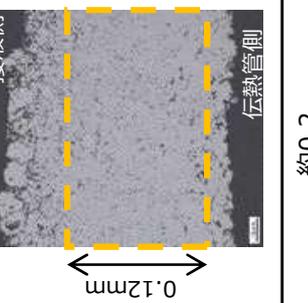
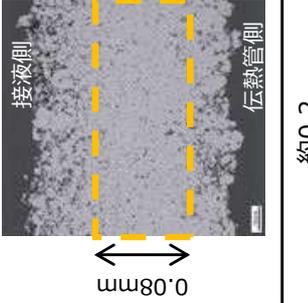
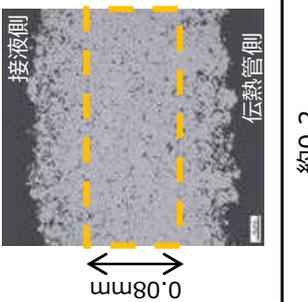
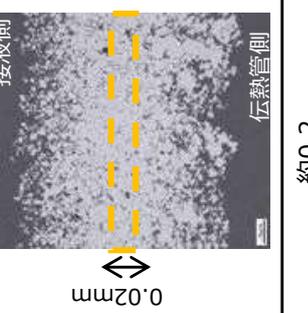
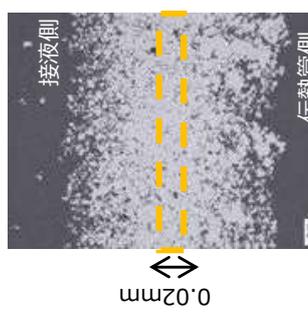
回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果 (6 / 13)

<断面観察結果 (6/12) >

| スケール回収位置 | A-SG 第二管支持板上 (高温側) | B-SG 第一管支持板上 (高温側) | C-SG 第一管支持板上 (高温側) | B-SG 管板上 (高温側) | B-SG 管板上 (高温側) | B-SG 管板上 (高温側) | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|--|
| 断面マイクロ画像 | | | | | | | |
| スケール厚さ(mm) | 約0.2 | 約0.3 | 約0.3 | 約0.3 | 約0.3 | 約0.3 | |
| 稠密層厚さ(mm) | 0.08 | 0.10 | 0.02 | - | 0.08 | 0.02 | |
| 摩耗体積比 (伝熱管/スケール) | - | - | - | - | - | - | |
| スケール回収位置 | B-SG 管板上 (高温側) | B-SG 管板上 (高温側) | B-SG 管板上 (高温側) | C-SG 第二管支持板上 (高温側) | 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0.3 | 約0.2 | 約0.2 | 約0.2 | |
| 稠密層厚さ(mm) | 0.04 | 0.08 | 0.02 | 0.08 | 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 (7/13)

<断面観察結果 (7/12) >

| スケール回収位置 | A-SG 第二管支持板上 (高温側) | A-SG 管板上 (高温側) | A-SG 管板上 (高温側) | A-SG 管板上 (高温側) | A-SG 管板上 (高温側) | A-SG 管板上 (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 | 約0.2 |
| 稠密層厚さ(mm) | 0.08 | 0.08 | 0.14 | 0.04 | 0.08 | 0.02 |
| 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 (高温側) | A-SG 管板上 (高温側) | A-SG 管板上 (高温側) | A-SG 管板上 (高温側) | A-SG 管板上 (高温側) | 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) | 0.10 | 0.12 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.02 |
| 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)

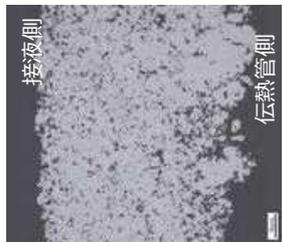
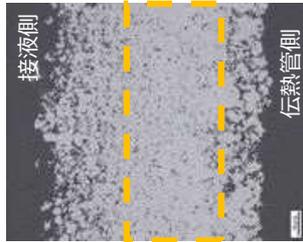
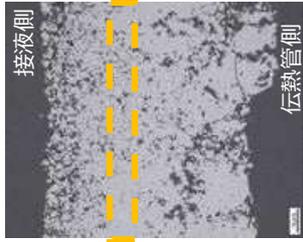
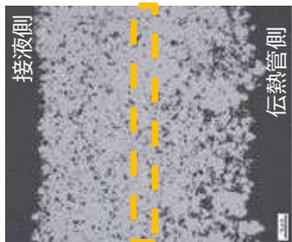
<断面観察結果 (8/12) >

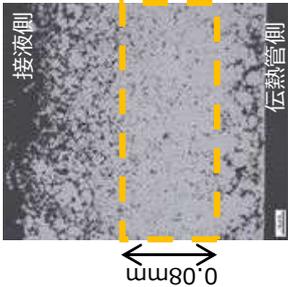
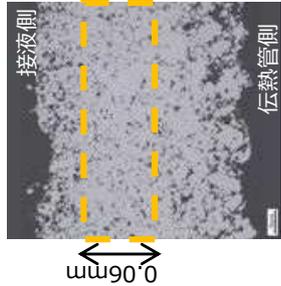
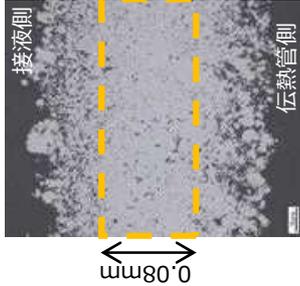
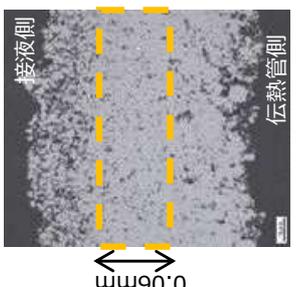
| スケール回収位置 | A-SG 管板上 (低温側) | B-SG 第二管支持板上 (低温側) | C-SG 第二管支持板上 (高温側) | C-SG 第二管支持板上 (高温側) | C-SG 第二管支持板上 (高温側) |
|---------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 断面マイクロ画像 | | | | | |
| スケール厚さ(mm) | 約0.2 | 約0.2 | 約0.2 | 約0.2 | 約0.2 |
| 稠密層厚さ(mm) | 0.08 | 0.06 | 0.10 | 0.10 | 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 (高温側) | A-SG 管板上 (低温側) | C-SG 管板上 (低温側) | C-SG 管板上 (低温側) | C-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 | 0.10 | 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 (9 / 13)

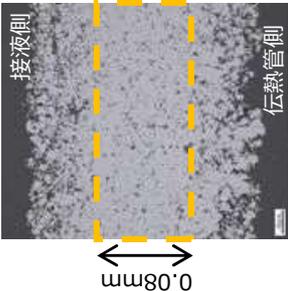
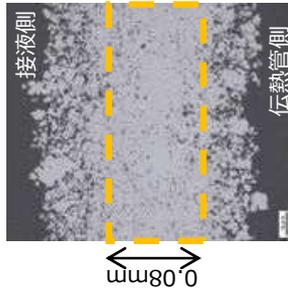
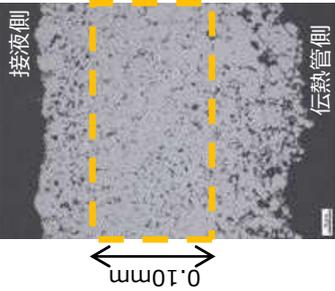
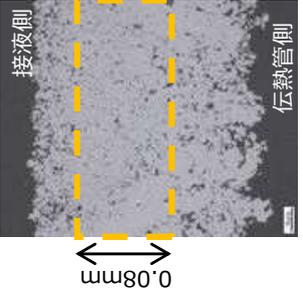
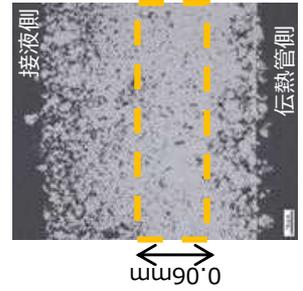
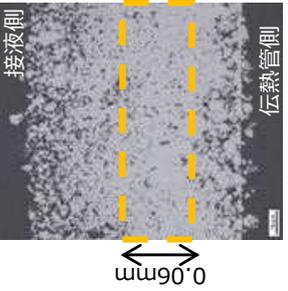
<断面観察結果 (9/12) >

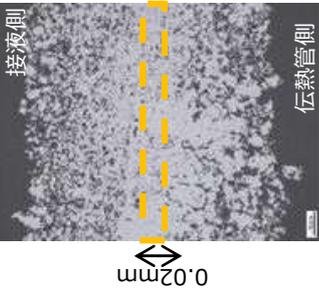
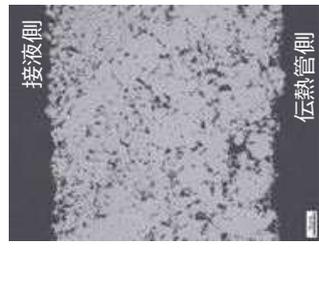
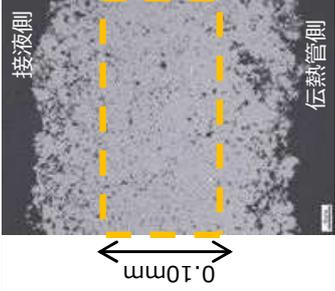
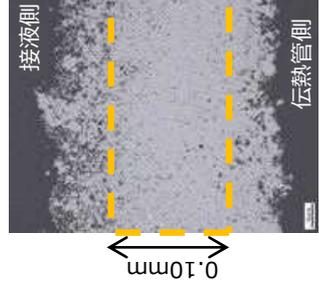
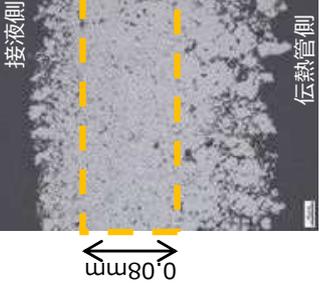
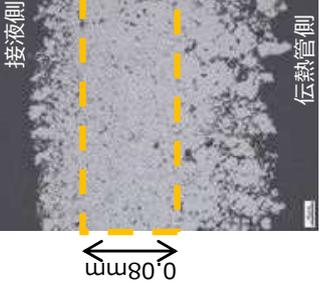
| スケール回収位置 | C-SG 管板上 (低温側) | C-SG 管板上 (低温側) | C-SG 管板上 (低温側) | C-SG 管板上 (低温側) |
|---------------------|---|---|--|---|
| 断面マイクロ画像 |  |  |  |  |
| スケール厚さ(mm) | 約0.2 | 約0.2 | 約0.2 | 約0.2 |
| 稠密層厚さ(mm) | 0.00 | 0.08 | 0.02 | 0.02 |
| 摩耗体積比 (伝熱管/スケール) | - | - | - | - |

| スケール回収位置 | C-SG 第二管支持板上 (高温側) | C-SG 管板上 (低温側) | C-SG 第二管支持板上 (高温側) | C-SG 第二管支持板上 (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 |
| 稠密層厚さ(mm) | 0.08 | 0.06 | 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 (10 / 13)

<断面観察結果 (10/12) >

| スケール回収位置 | C-SG 管板上 (低温側) | C-SG 管板上 (低温側) | C-SG 第二管支持板上 (高温側) | C-SG 管板上 (低温側) | C-SG 管板上 (低温側) | C-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 | 0.10 | 0.08 | 0.08 | 0.06 |
| 摩耗体積比 (伝熱管/スケール) | - | - | - | - | - | - |

| スケール回収位置 | C-SG 管板上 (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) | A-SG 第三管支持板上 (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 | 約0.2 |
| 稠密層厚さ(mm) | 0.02 | 0.00 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.08 |
| 摩耗体積比 (伝熱管/スケール) | - | - | - | - | - | - |

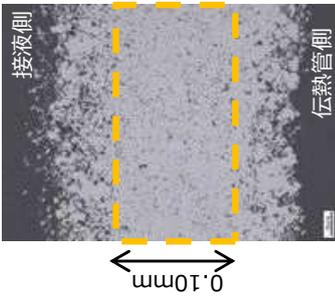
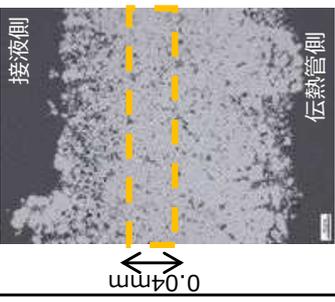
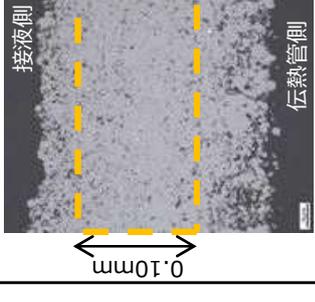
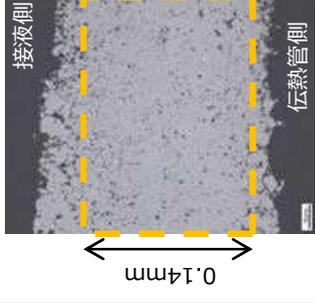
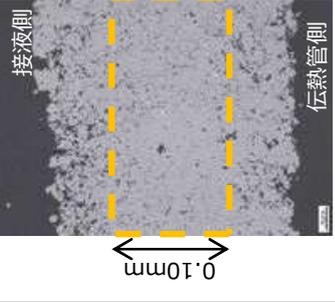
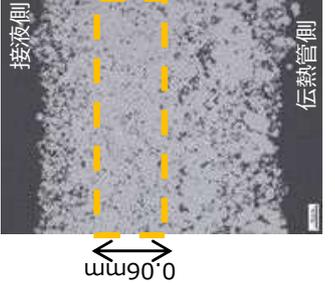
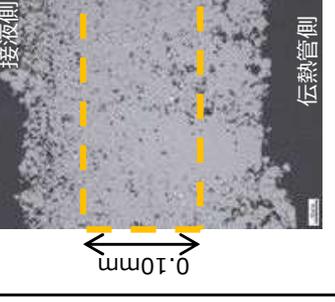
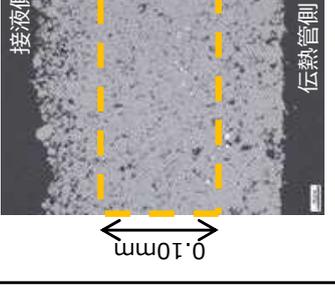
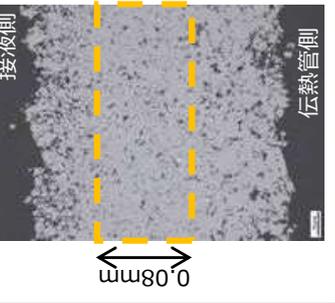
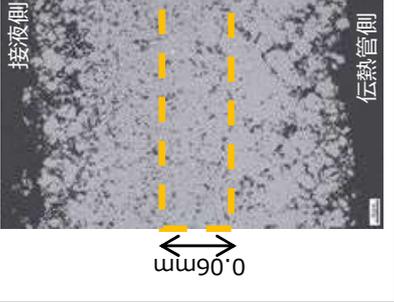
回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果 (11/13)

<断面観察結果 (11/12) >

| スケール回収位置 | A-SG 第三管支持板上 (低温側) | C-SG 管板上 (低温側) | A-SG 管板上 (高温側) | A-SG 管板上 (高温側) | A-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 |
| 稠密層厚さ(mm) | 0.10 | 0.06 | 0.12 | 0.08 | 0.12 |
| 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 (高温側) | A-SG 管板上 (低温側) | A-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 |
| 稠密層厚さ(mm) | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.04 | 0.10 |
| 摩耗体積比 (伝熱管/スケール) | - | - | - | - | - |

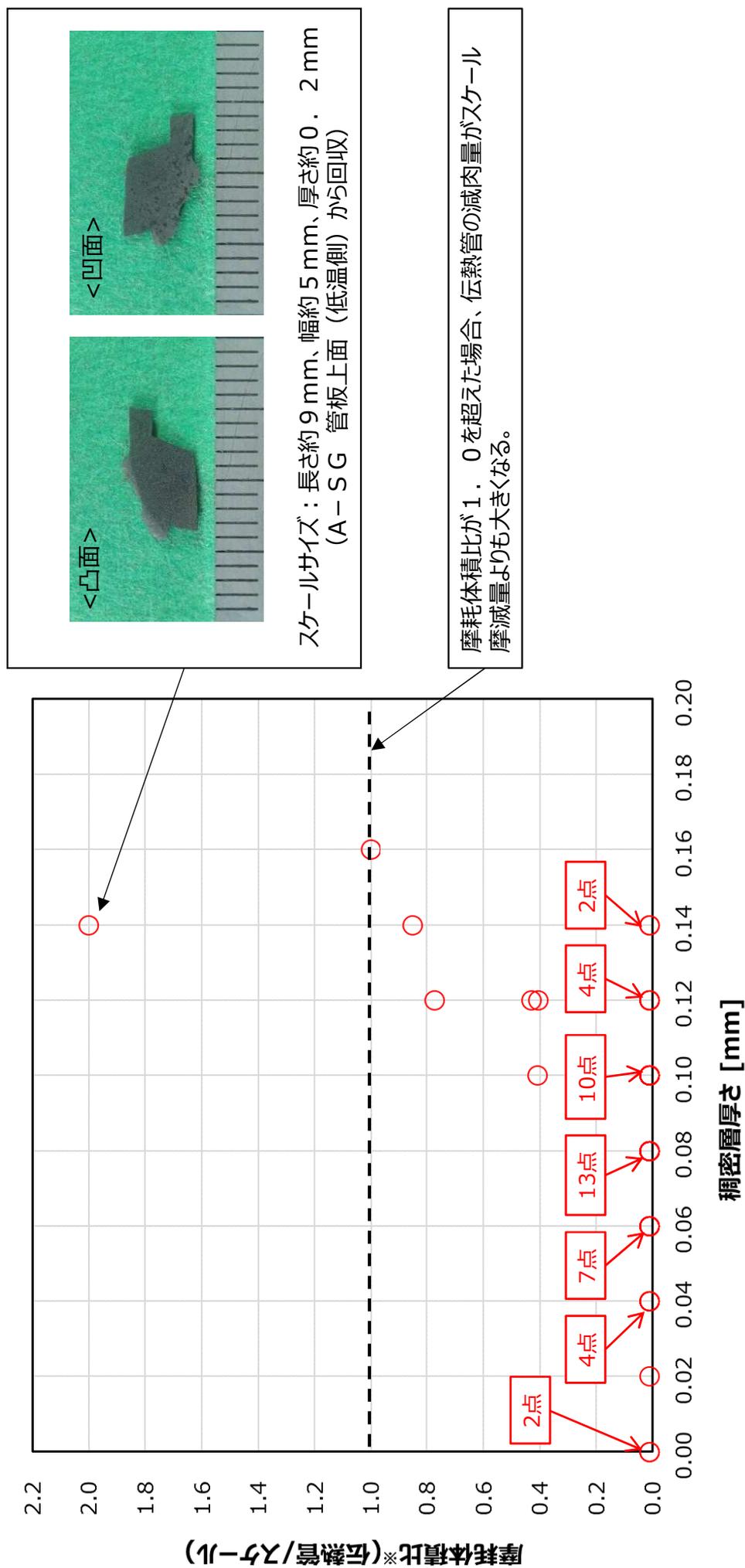
回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果 (12 / 13)

<断面観察結果 (12/12) >

| スケール回収位置 | A-SG 管板上 (高温側) | A-SG 管板上 (高温側) | A-SG 管板上 (高温側) | 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 | 0.04 | 0.10 | 0.14 | 0.10 |
| 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 (高温側) | A-SG 管板上 (高温側) | A-SG 管板上 (高温側) | A-SG 管板上 (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) | 0.06 | 0.10 | 0.10 | 0.08 | 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（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以上のスケールを2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

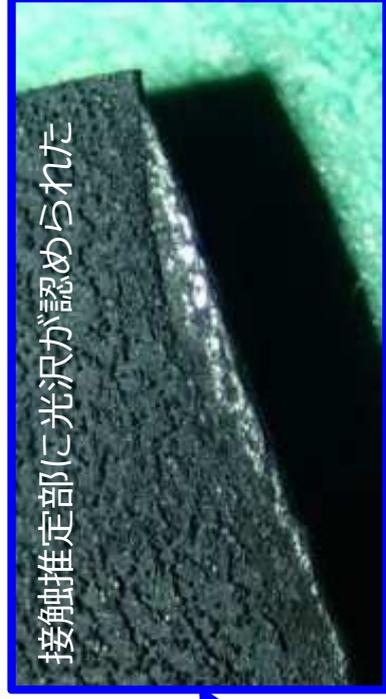
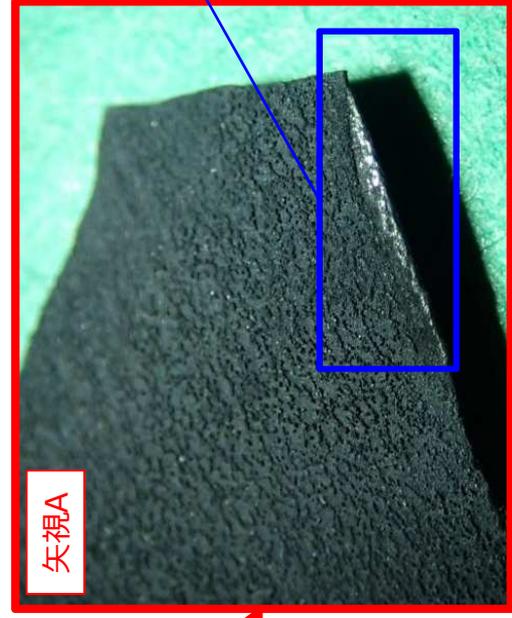
回収物分析結果（A-SG回収物）（1/3）

減肉が認められたX26, Y9の第三管支持板部の下方、X26-27, Y8の第二管支持板上面で回収したA回収物を分析した結果は、次のとおりである。

【凸面】

① 外観観察結果

- 伝熱管減肉部とA回収物の接触想定部には、接触痕のような痕があり、光沢が認められた。
- 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ることと確認したが、これは伝熱管の外径22.2mmに近い形状である。

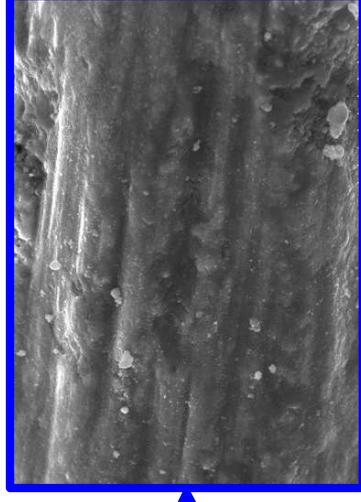
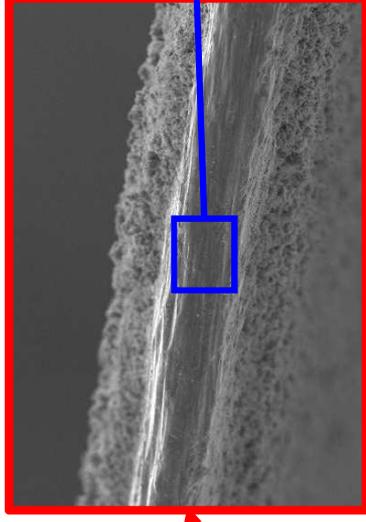


大きさ：約16mm×約10mm
厚さ：約0.2mm
質量：約0.09g

回収物分析結果（A-SG回収物）（2/3）

② 接触想定部のSEM観察

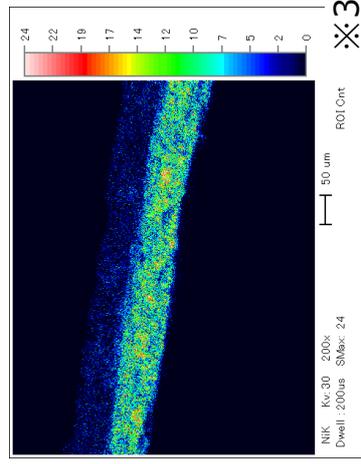
- 伝熱管との接触想定部を拡大観察した結果、筋状痕を確認した。



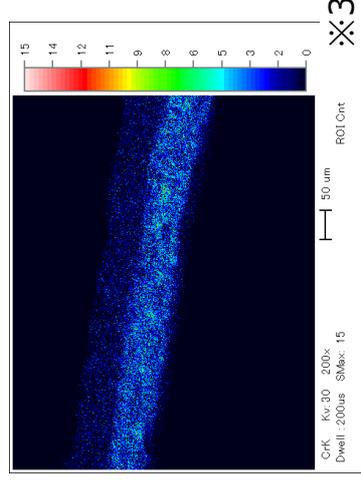
筋状痕を確認

③ 成分分析（X線回折※1、EDS※2）

- 表面の化学成分分析を実施した結果、中央部の主成分はマグネサイトであったことから、スケールであると推定した。
- 伝熱管との接触想定部の表面化学成分を分析した結果、伝熱管（インコネルTT600）の主成分であるニッケルおよびクロムの成分を検出した。



【Ni】



【Cr】

※1：対象物にX線を照射し、X線回折パターンを解析することで、構成成分の同定をする分析方法

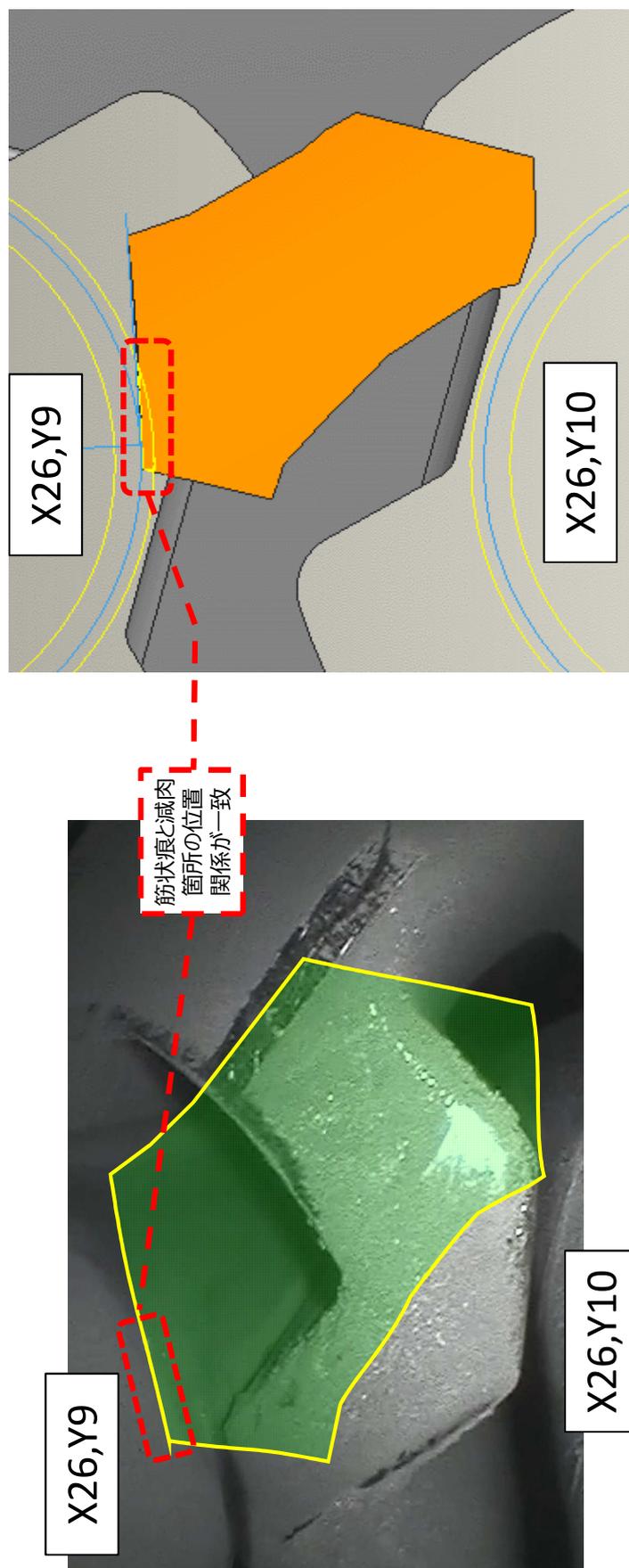
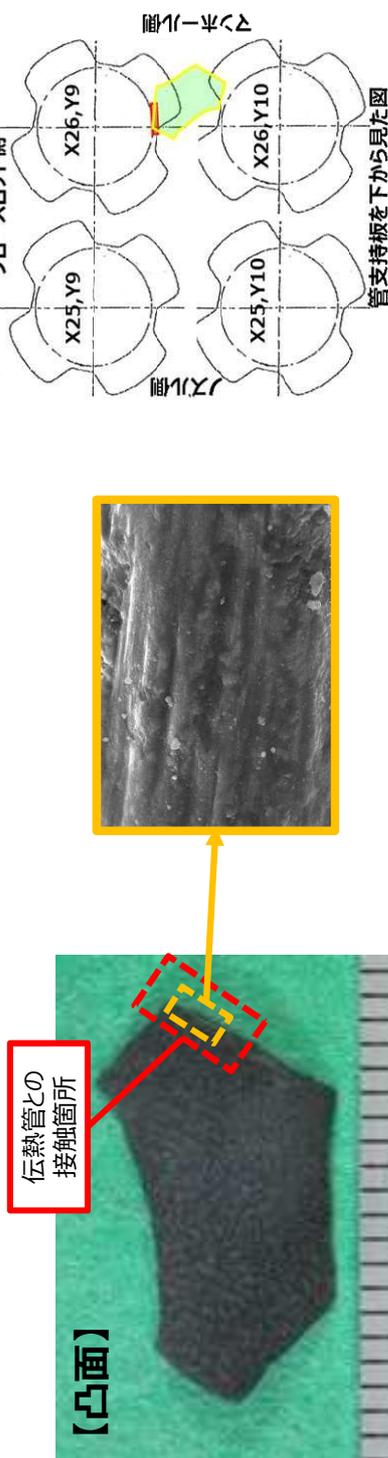
※2：電子線照射により発生する特性X線のエネルギーと強度から構成元素を分析する装置

※3：分析した成分のX線の反射強度で、1秒当たりのX線カウンタ数（含有元素の濃度が高いほど大きくなる）

回収物分析結果（A-SG回収物）（3/3）

④ 減肉箇所との関係

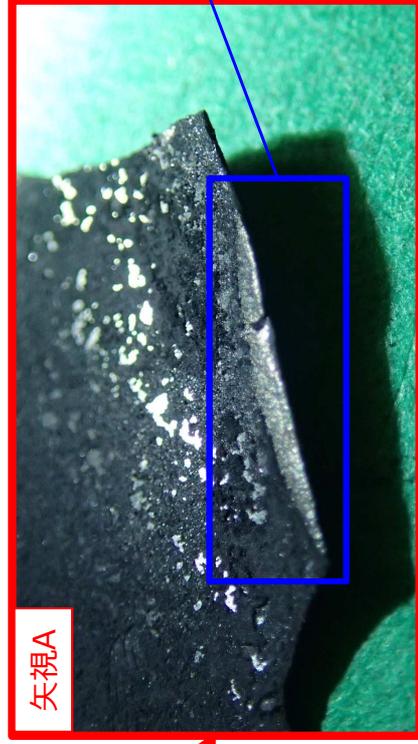
- A回収物の形状や筋状痕の位置は、以下のとおりX26, Y9 の減肉箇所の位置と一致することを確認した。



回収物分析結果（B-SG回収物）（1/3）

減肉が認められたX69, Y3の第三管支持板部の下方、X68-69, Y2の第二管支持板上面で回収したB回収物を分析した結果は、次のとおりである。

- ① 外観観察結果
 - 伝熱管減肉部とB回収物の回収物の接触想定部には、接触痕のような痕があり、光沢が認められた。
 - 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ることと確認したが、これは伝熱管の外径22.2mmに近い形状である。

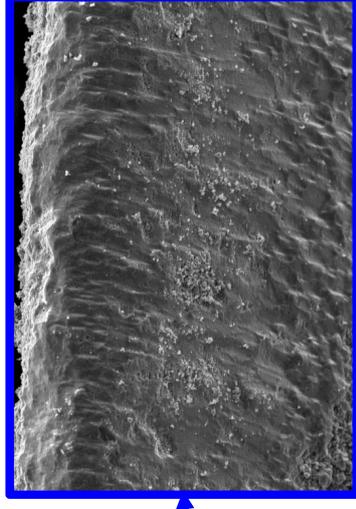
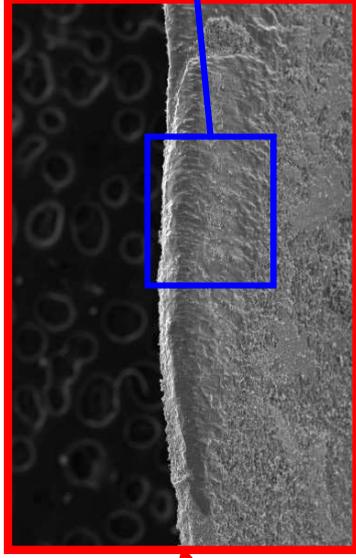
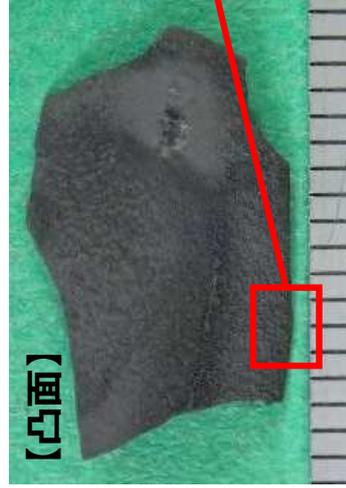


大きさ：約17mm×約10mm
厚さ：約0.3mm
質量：約0.14g

回収物分析結果（B-SG回収物）（2/3）

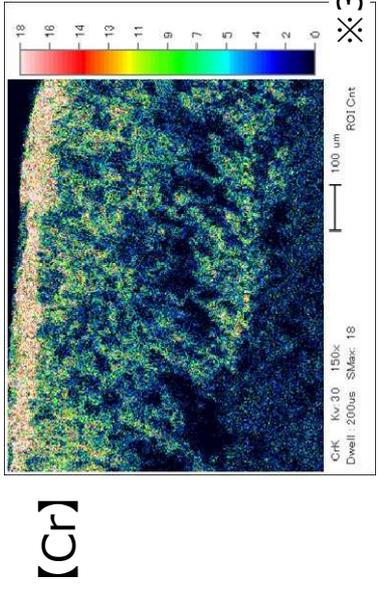
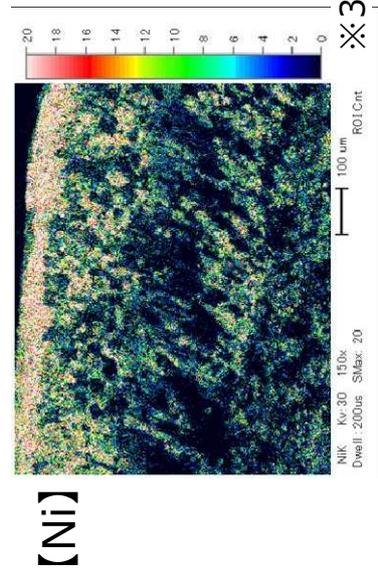
② 接触想定部のSEM観察

- 伝熱管との接触想定部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）

- 表面の化学成分分析を実施した結果、中央部の主成分はマグネサイトであったことから、スケールであると推定した。
- 伝熱管との接触想定部の表面化学成分を分析した結果、伝熱管（インコネルTT600）の主成分であるニッケルおよびクロムの成分を検出した。

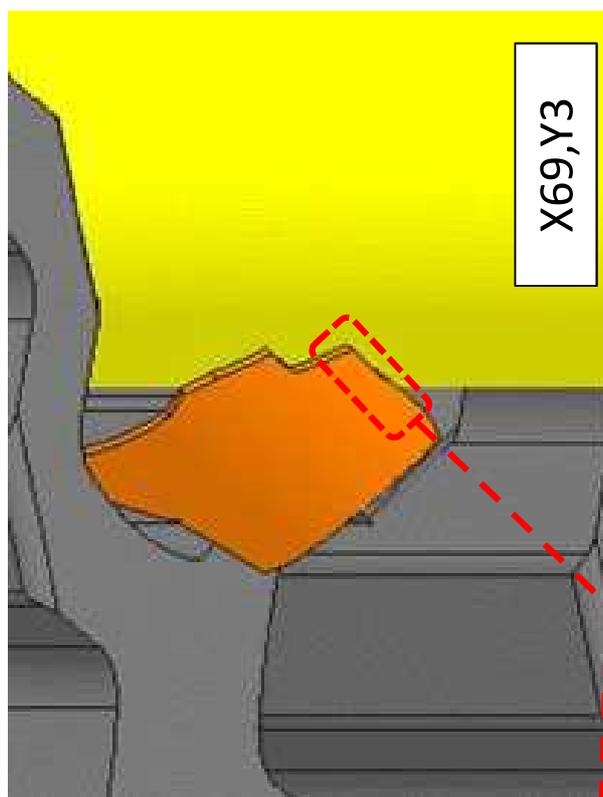
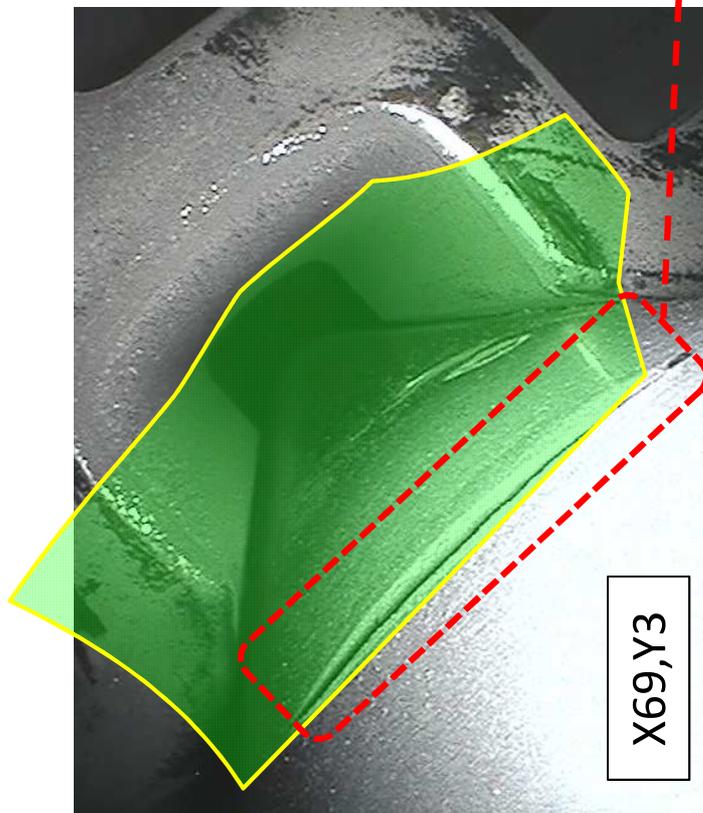
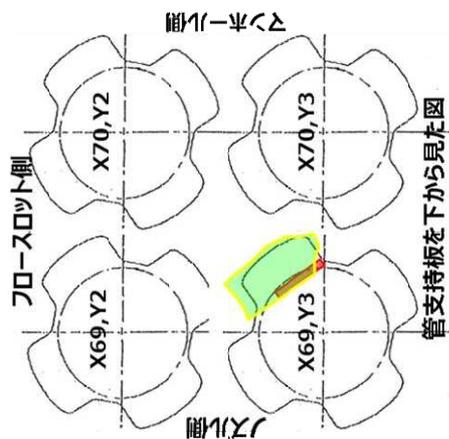
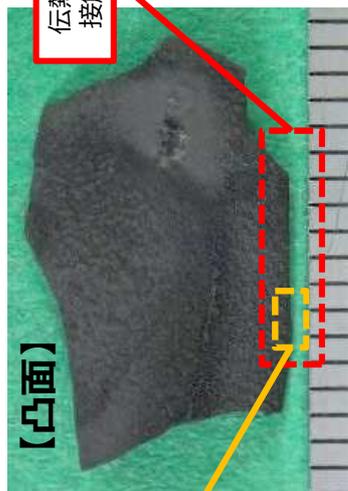
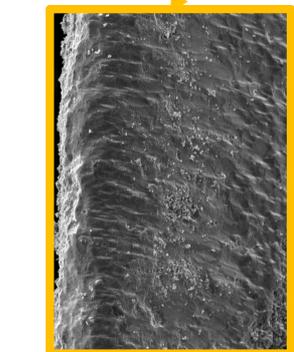


- ※1：対象物にX線を照射し、X線回折パターンを解析することで、構成成分の同定をする分析方法
- ※2：電子線照射により発生する特性X線のエネルギーと強度から構成元素を分析する装置
- ※3：分析した成分のX線の反射強度で、1秒当たりのX線カウント数（含有元素の濃度が高いほど大きくなる）

回収物分析結果（B-SG回収物）（3/3）

④ 減肉箇所との関係

- B回収物の形状や筋状痕の位置は、以下のとおりX69, Y3の減肉箇所の位置と一致することを確認した。



筋状痕と減肉箇所の位置関係が一致

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付着信号は、周波数間の振幅・位相の相関関係が異なるため、スケール付着箇所の信号は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、スケール付着・剥離（EDMスリット有り）およびスケール付着・剥離（EDMスリット無し）の信号を比較し、スケール付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 スケール付着・剥離（EDMスリット有り）の試験片データ

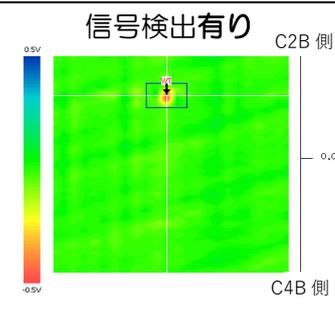
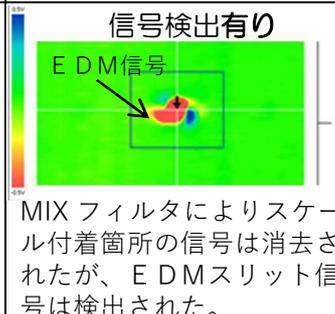
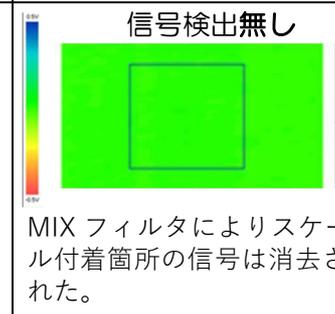
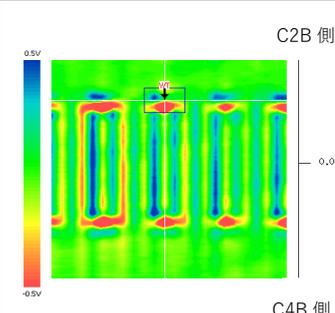
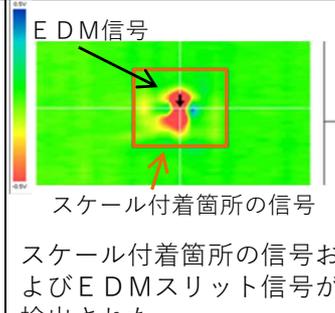
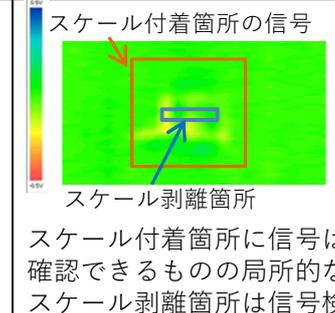
深さ5.9%、長さ5mm、幅0.4mmの外面周方向矩形EDMスリットが付与された伝熱管外面に四三酸化鉄を薄く延ばした厚さ1.0mm程度の模擬スケールを貼り付け、スリット直上に当たる部分に、スリット同様の切れ目を入れた。この伝熱管でECTデータを取得した。

2.2 スケール付着・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

取得したデータを下の表に示す。

| 実機波形 (C-SG X86,Y8) MIX | スケール付着・剥離 (EDMスリット有り) MIX | スケール付着・剥離 (EDMスリット無し) MIX |
|---|---|--|
| <p>信号検出有り</p>  <p>C2B側 C4B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付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>信号検出無し</p>  <p>MIXフィルタによりスケール付着箇所の信号は消去された。</p> |
| <p>実機波形 (C-SG X86,Y8) 100kHz</p>  <p>C2B側 C4B側</p> | <p>スケール付着・剥離 (EDMスリット有り) 100kHz</p>  <p>EDM信号</p> <p>スケール付着箇所の信号</p> <p>スケール付着箇所の信号およびEDMスリット信号が検出された。</p> | <p>スケール付着・剥離 (EDMスリット無し) 100kHz</p>  <p>スケール付着箇所の信号</p> <p>スケール剥離箇所</p> <p>スケール付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> |

表：実機波形とスケール付着・剥離（EDMスリット有り）、スケール付着・剥離（EDMスリット無し）比較

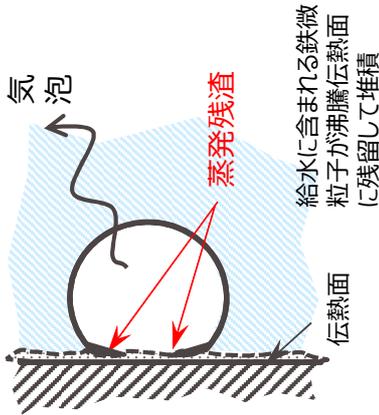
4. まとめ

- スケール付着・剥離（EDMスリット有り）の試験片を用いた検証結果より、スケール付着箇所の信号は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。
 - スケール付着・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、スケール付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。

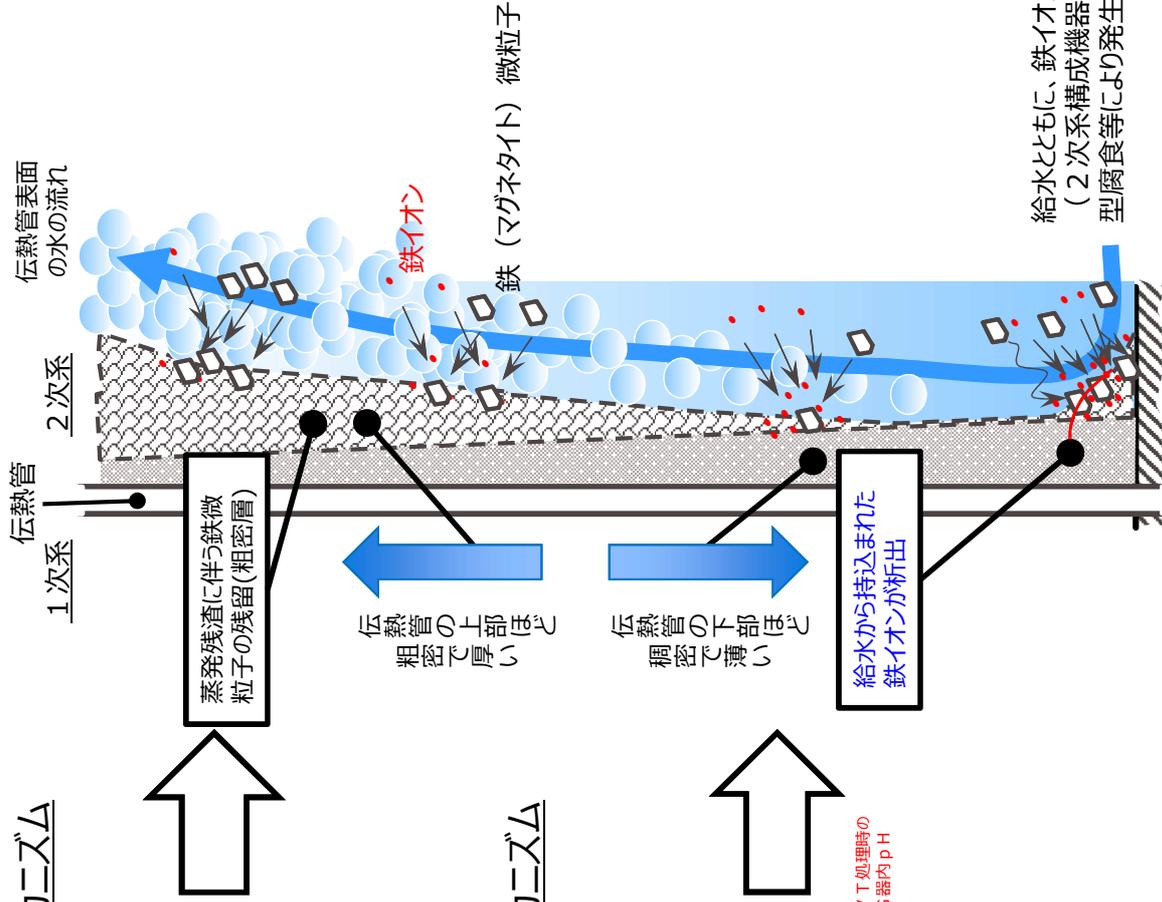
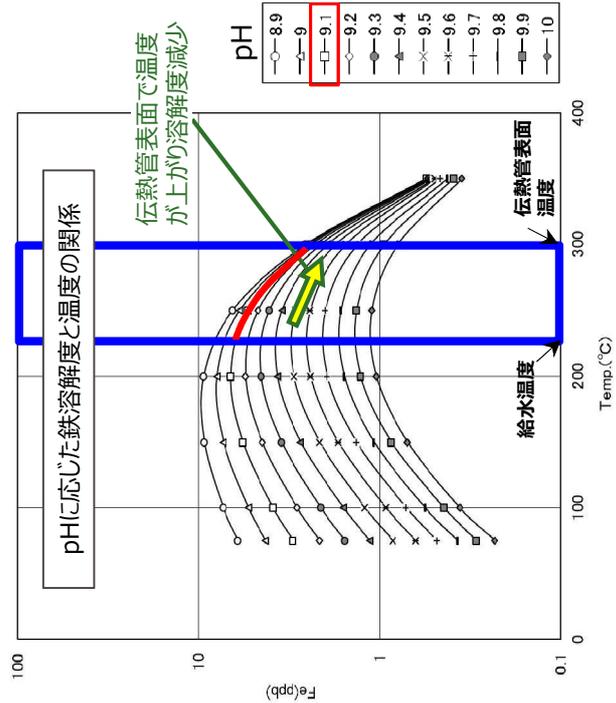
以上

スケール生成メカニズム 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

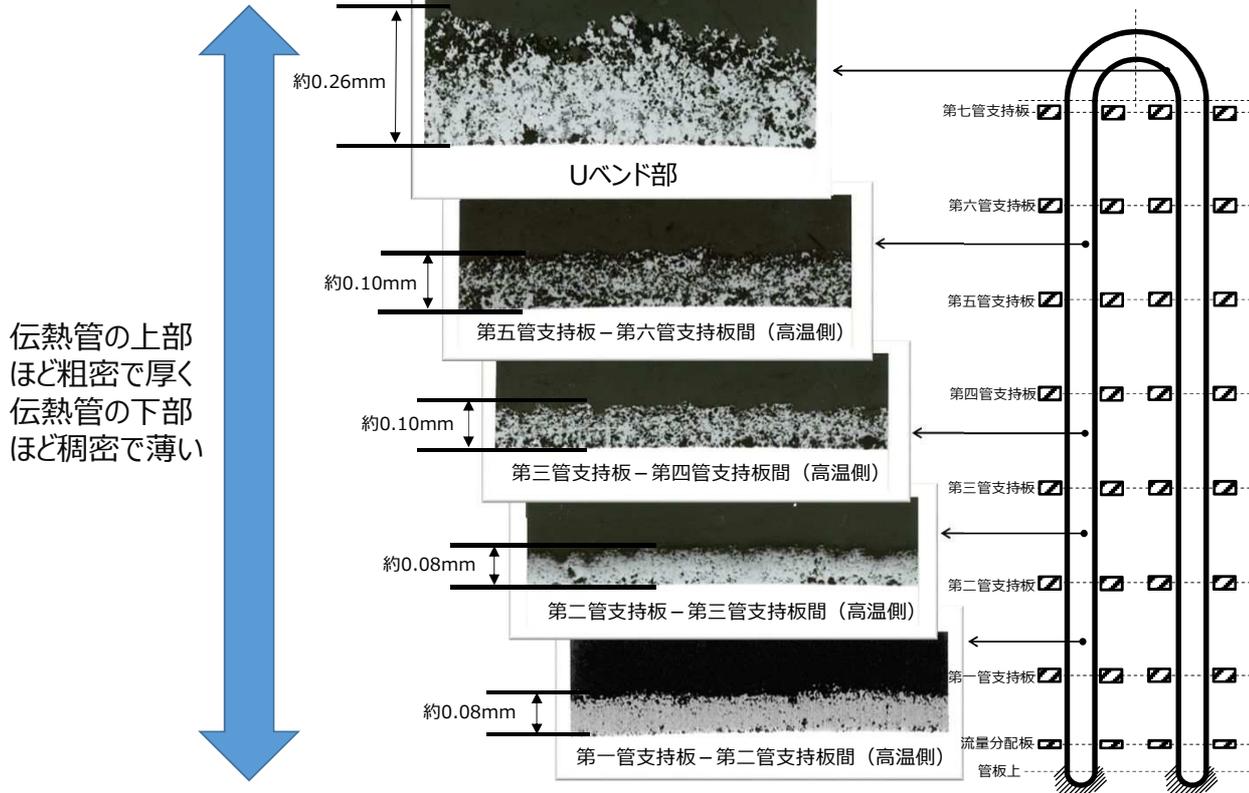


※出典：PWR 5 電力委託調査「2次系機器のスケール付着挙動評価に係る調査」(平成15年) 他

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

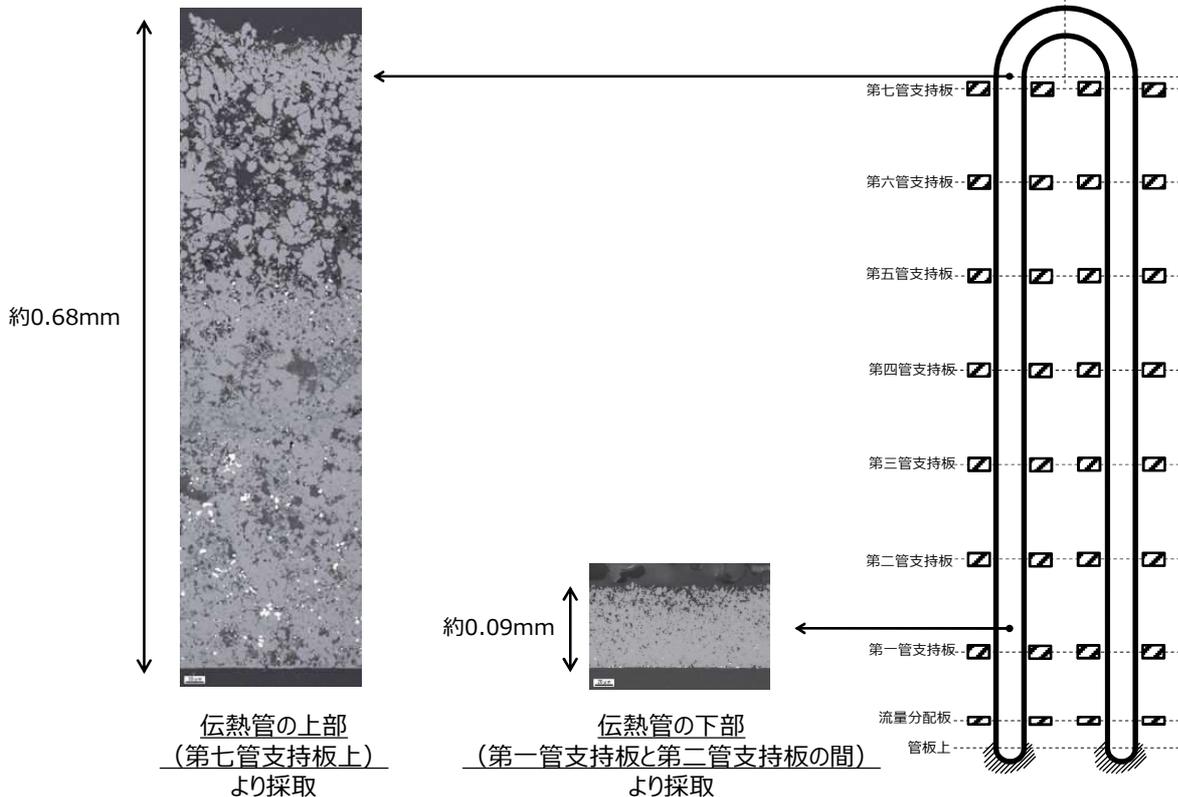
○高浜発電所3号機 平成8年調査時

(運転時間：8.3万時間時点)



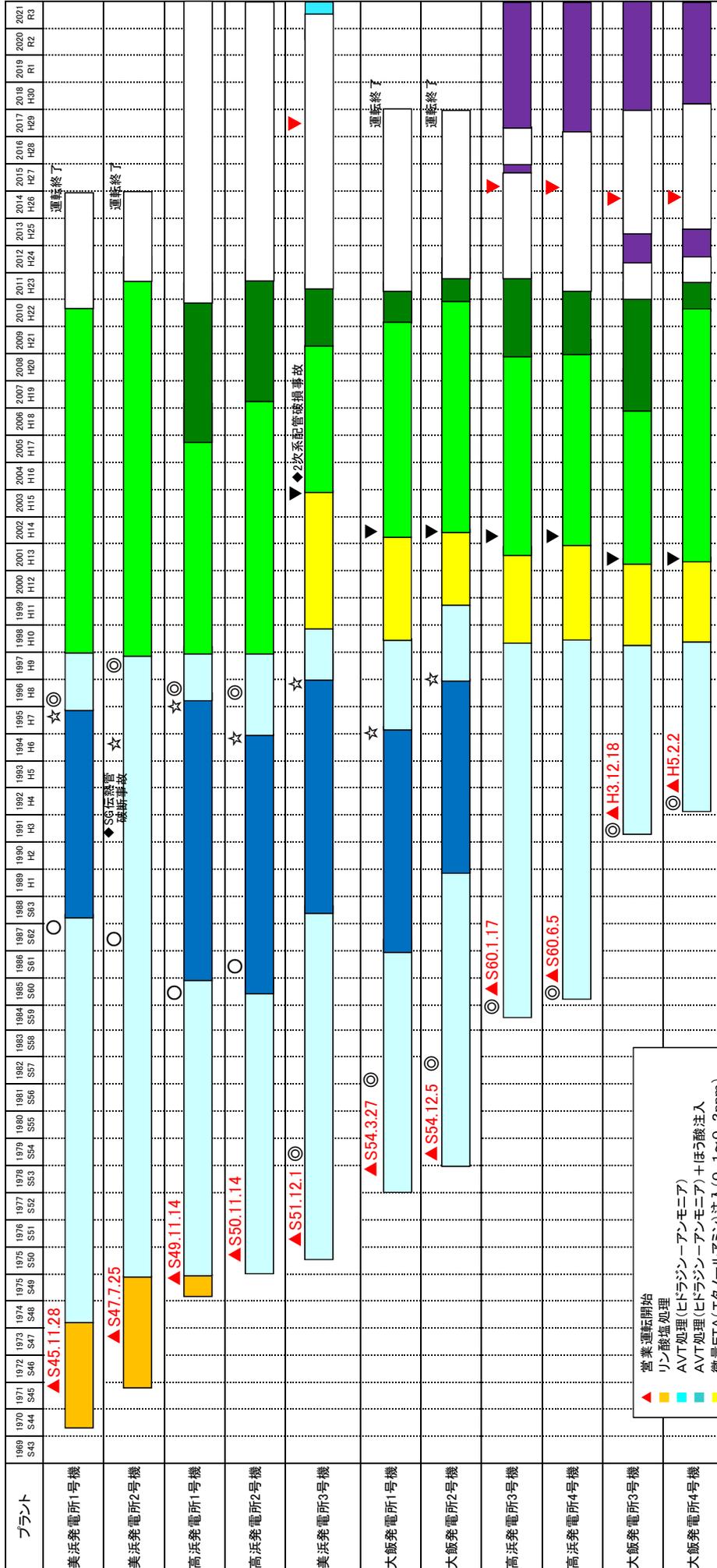
○高浜発電所4号機におけるスケール調査実績

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

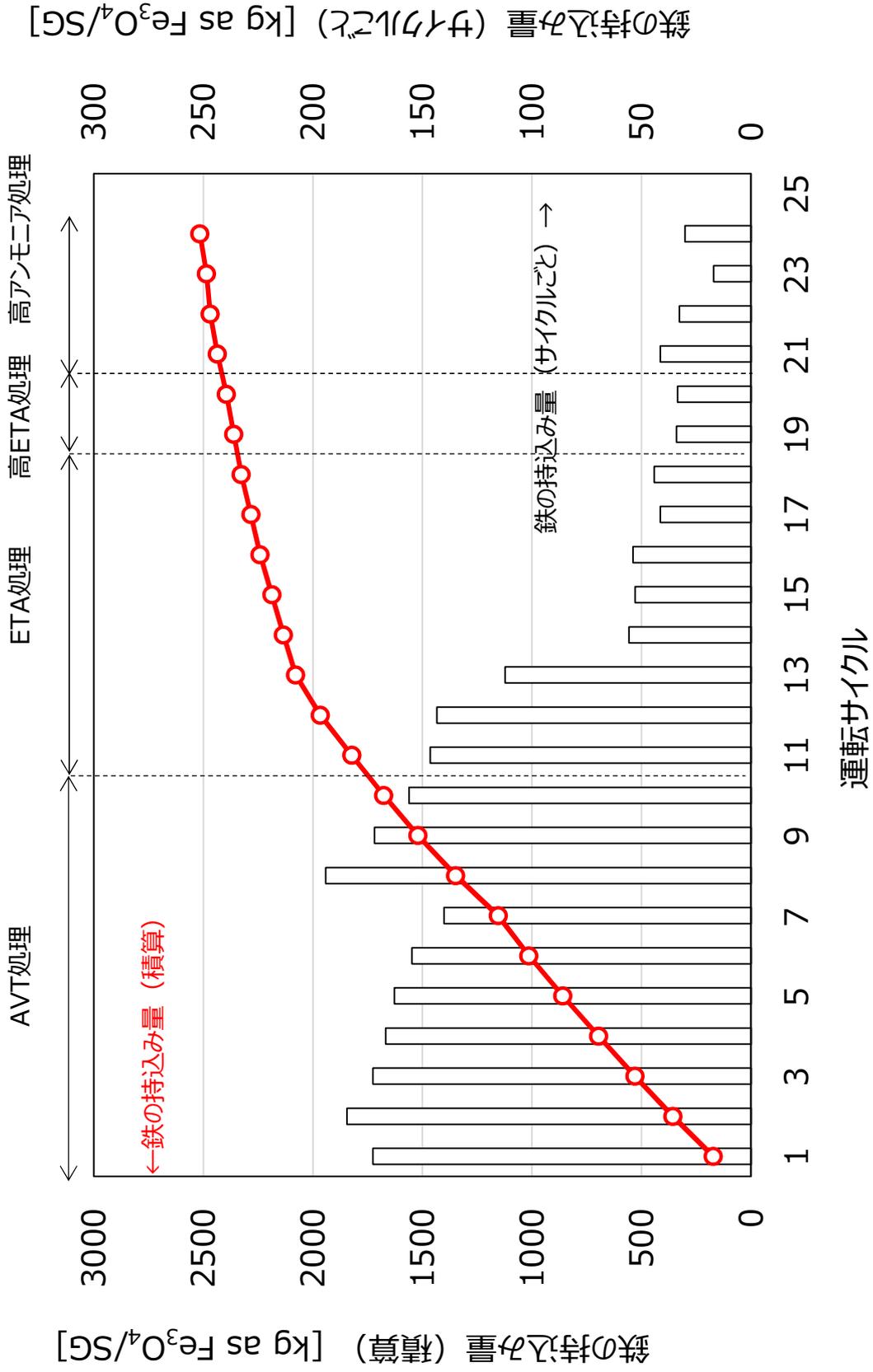
2次系水処理と水化学管理の変遷



▲ 営業運転開始
 ▲ リン酸塩処理
 ▲ AVT処理(ヒドラジン-アンモニア)
 ▲ AVT処理(ヒドラジン-アンモニア)+ほう酸注入
 ▲ 微量ETA(エタノールアミン)注入(0.1~0.2ppm)
 ▲ 高ETA(エタノールアミン)注入(3ppm)
 ▲ 高ETA(エタノールアミン)注入(pH9.8)
 ▲ 高アンモニア注入(pH9.8)
 ▲ 福島第一発電所事故以降のプラント停止
 ▲ 部分コンデミ設置
 ▲ 全量コンデミ設置
 ▲ SG取替(SGR)
 ▲ ETA(エタノールアミン)処理装置設置
 ▲ ETA(エタノールアミン)処理装置除却

発電用原子炉施設故障等報告書
 (高浜発電所3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について)
 (2022年5月25日)より引用

高浜発電所4号機 鉄の持込み量の推移

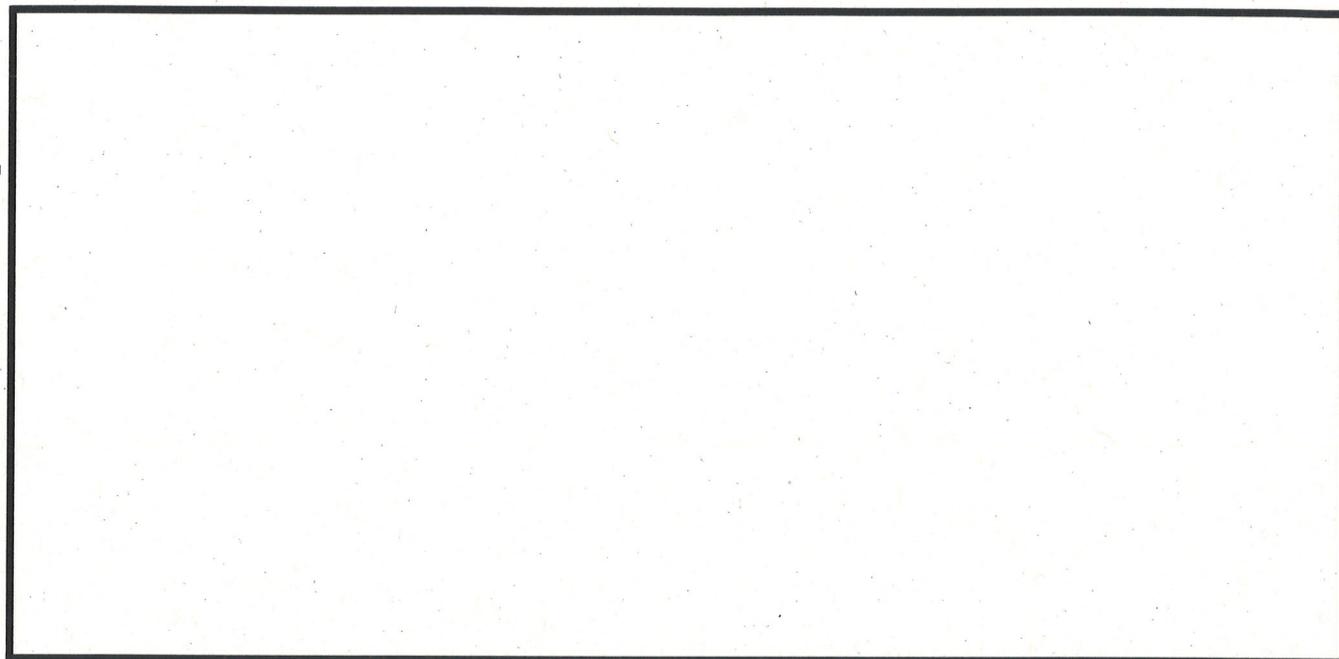


プラント性能指標の推移

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

主蒸気圧力[MPa abs]

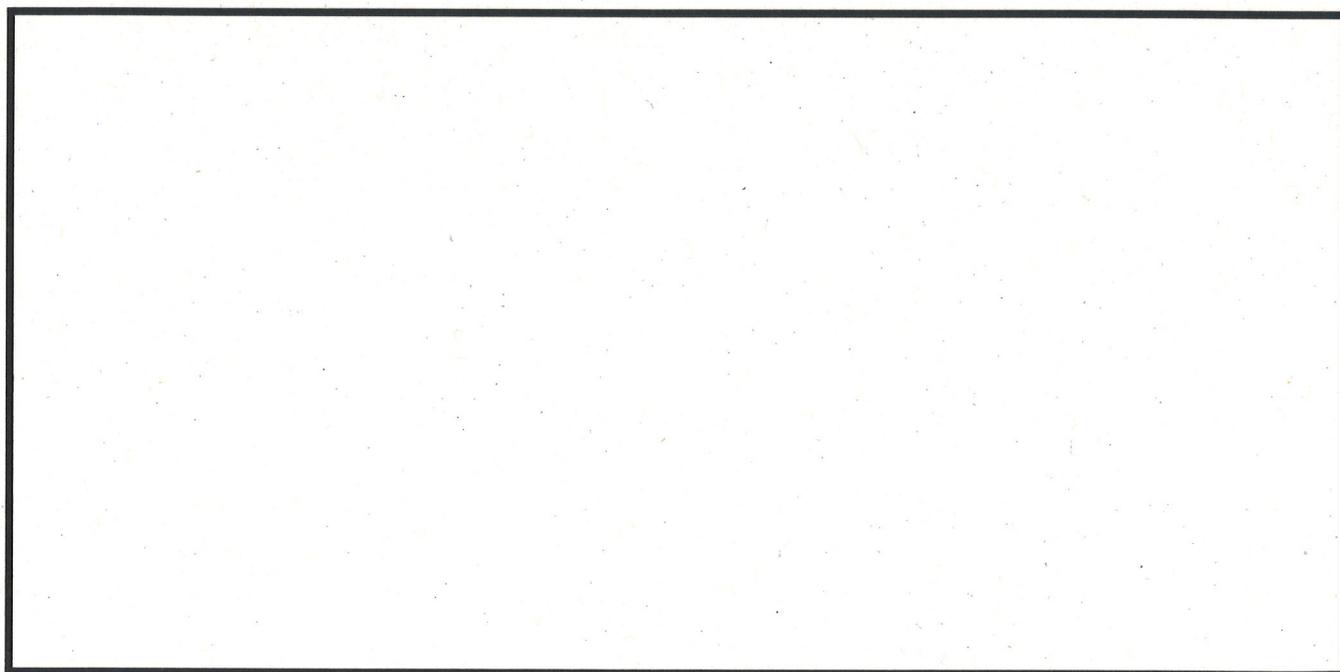


1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
運転サイクル

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

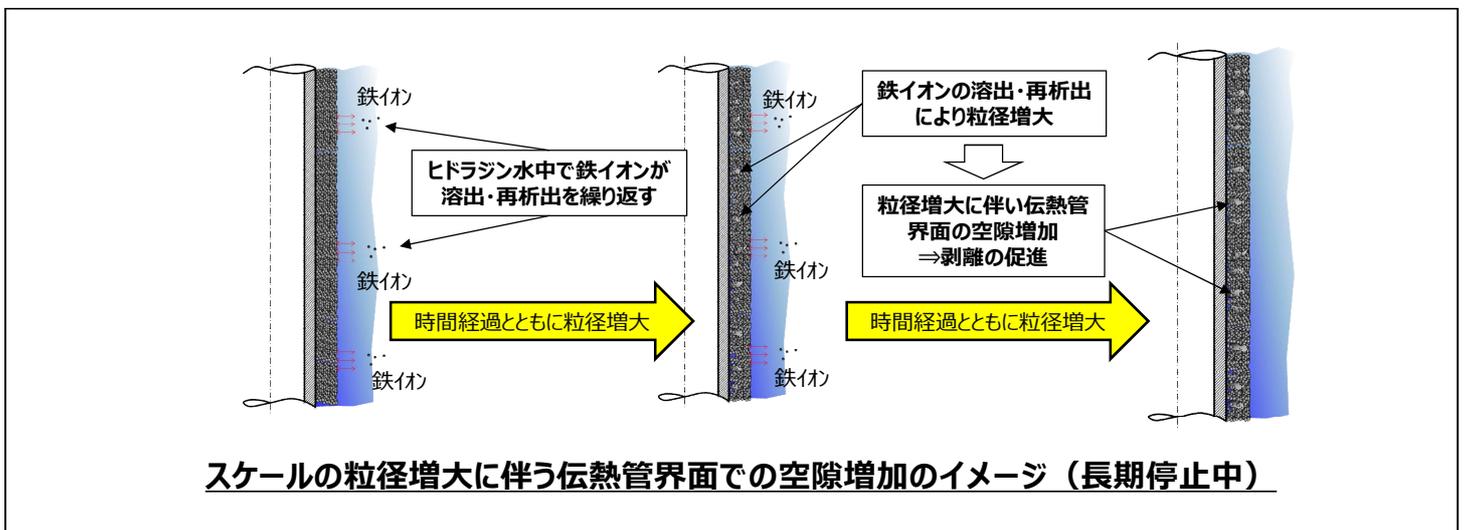
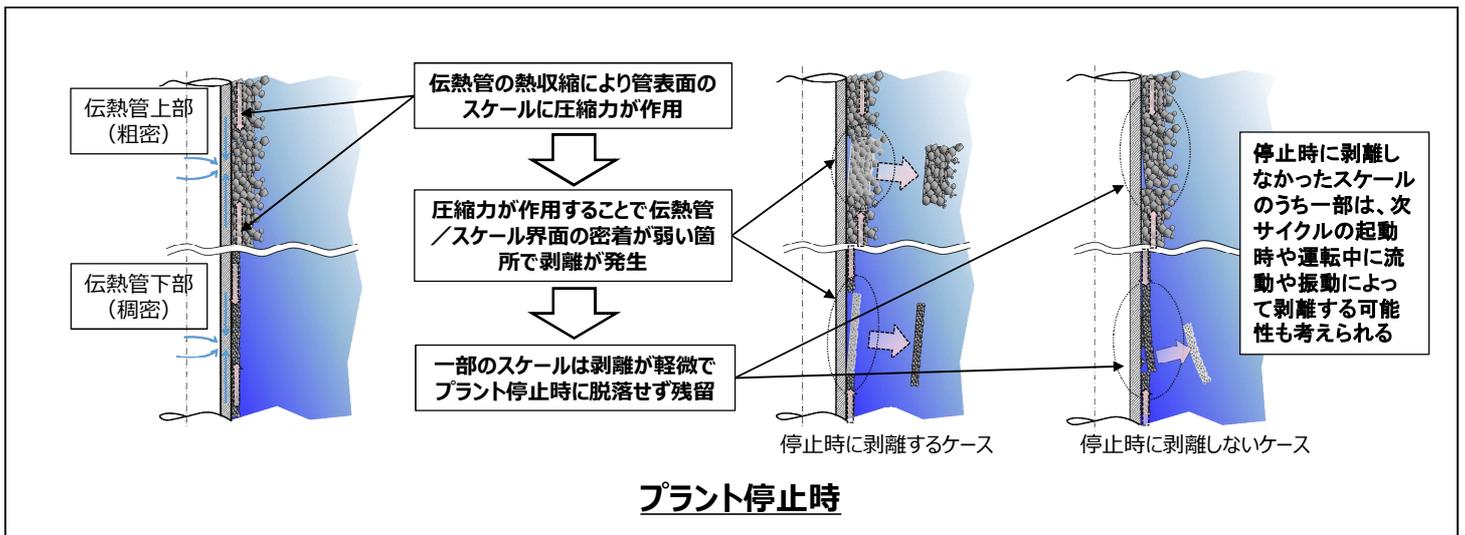
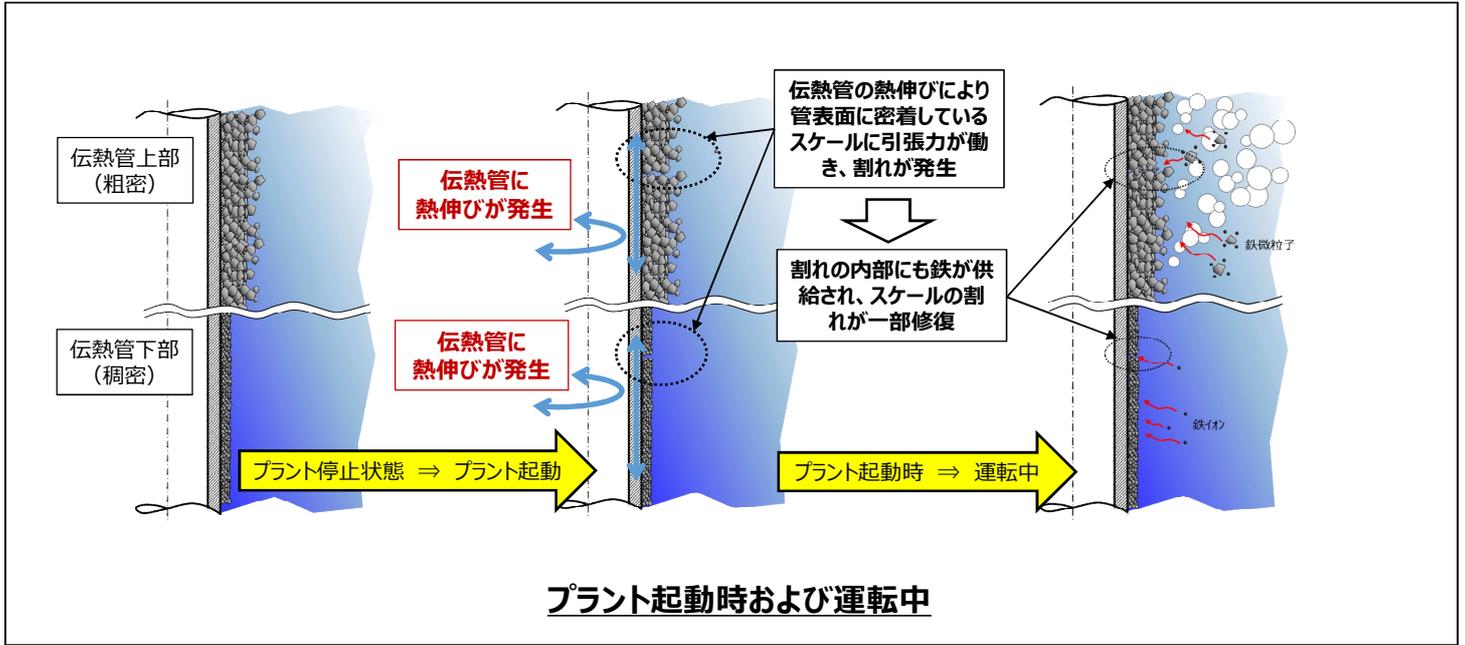
S G 伝熱抵抗係数[$10^{-4} \text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{°F}/\text{Btu}$]



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
運転サイクル

: 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。

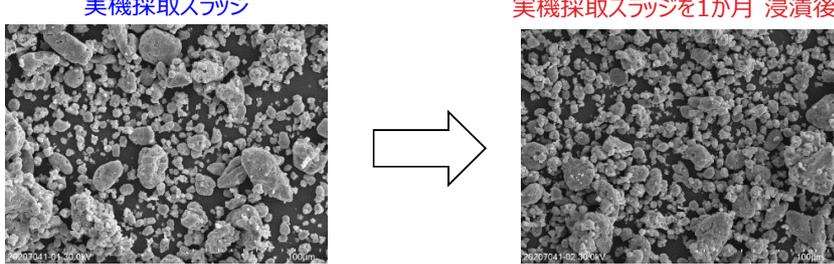
スケール剥離メカニズムイメージ



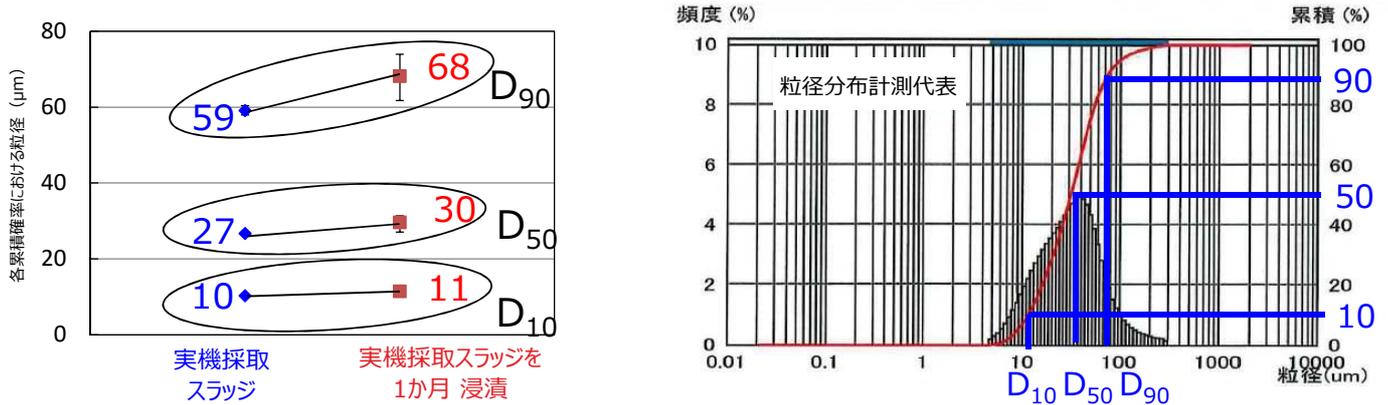
発電用原子炉施設故障等報告書
(高浜発電所3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について)
(2022年5月25日) より引用

・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) 走査型電子顕微鏡 (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、長期停止により、粒径が大きくなることを推定した。

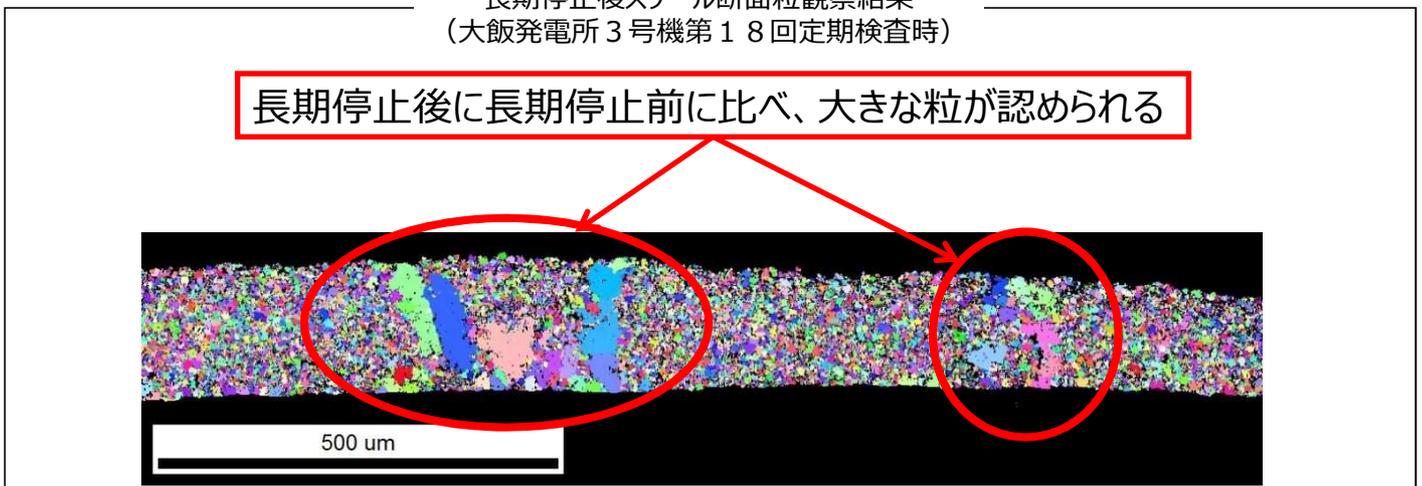
・電子線後方散乱回折法 (EBSD)※により長期停止前後のスケール断面を観察した結果は以下のとおりである。

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次側器内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) フロースロット部近傍の第三および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スロット部を通過し、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ス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、フロースロット部を通過し、第三および第四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。

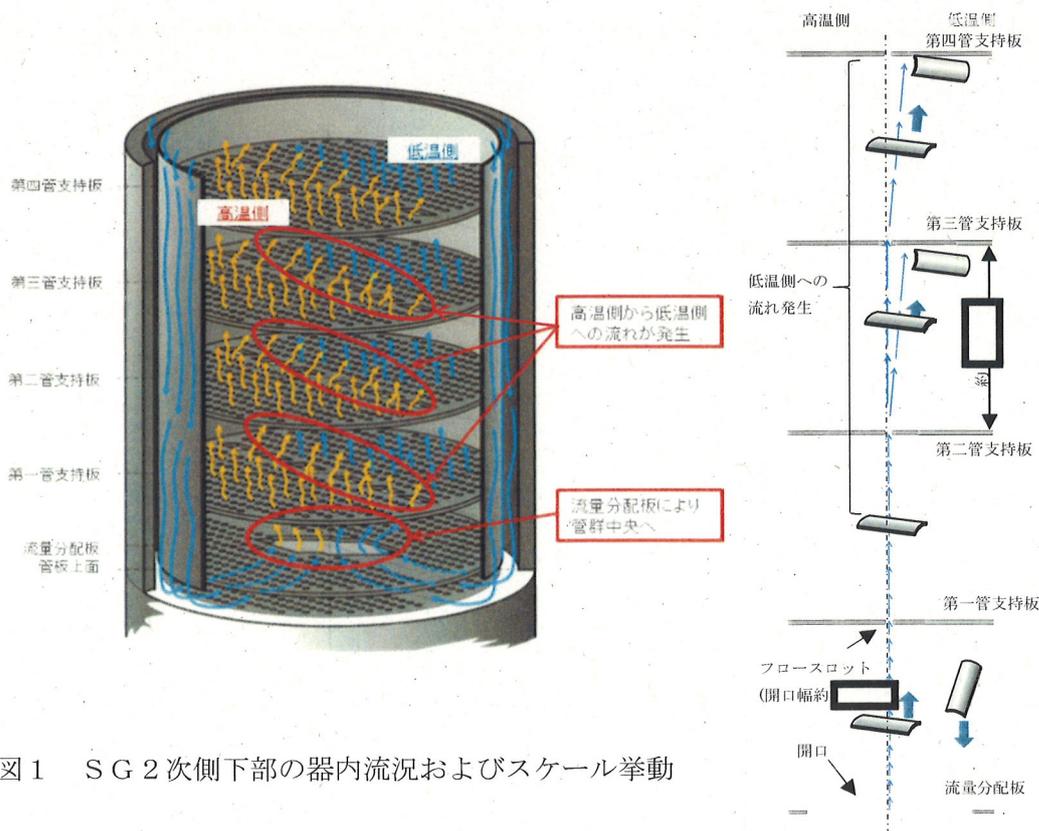


図1 SG 2次側下部の器内流況およびスケール挙動

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) 管群中央領域の第四管支持板低温側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 2次側器内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いため、当該部直下近傍の第三管支持板上面に到達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。

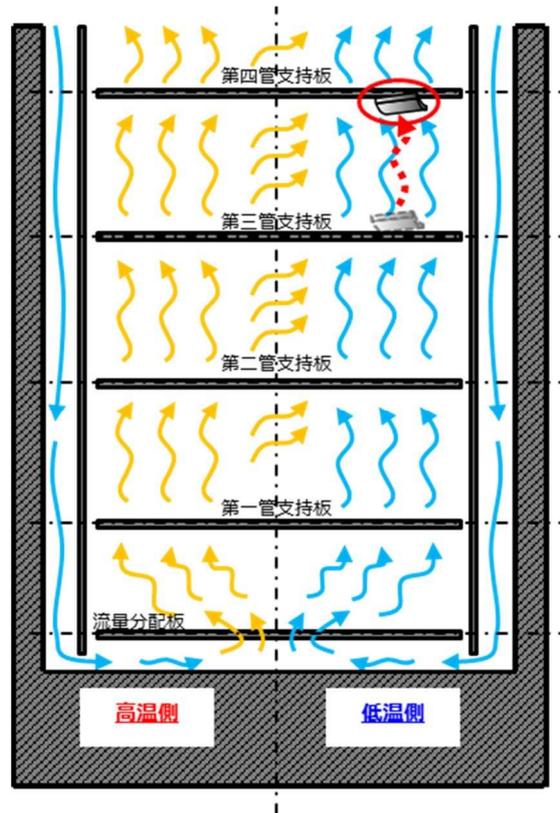


図2 SG 2次側下部の器内流況およびスケール挙動

2. 流況モックアップ試験結果を踏まえた検討

高浜発電所4号機前回(第23回)定期検査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(第24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>

高浜発電所4号機前回（第23回）定期検査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）

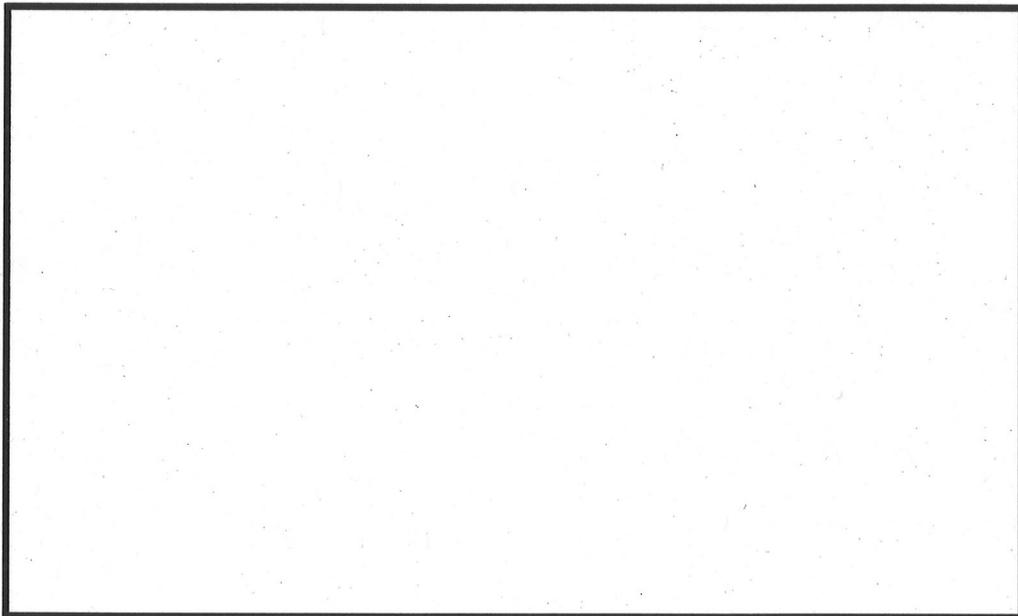


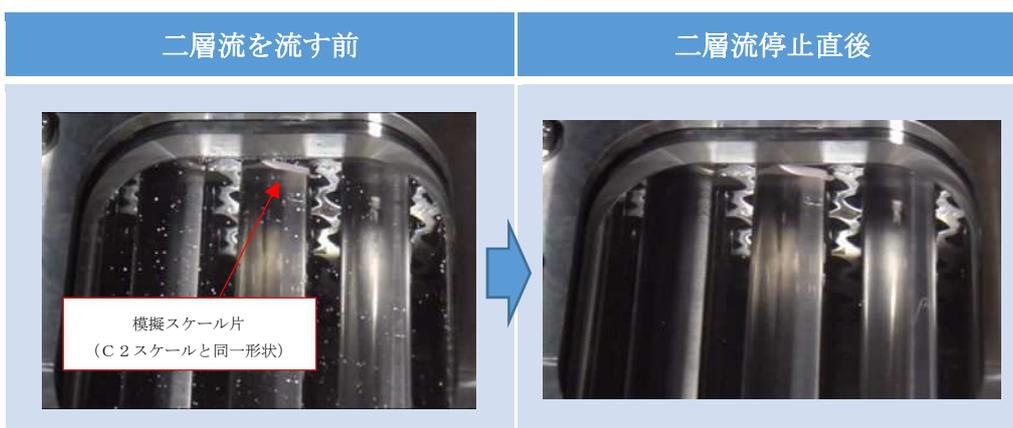
図1 水空気試験装置概要

（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

< 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