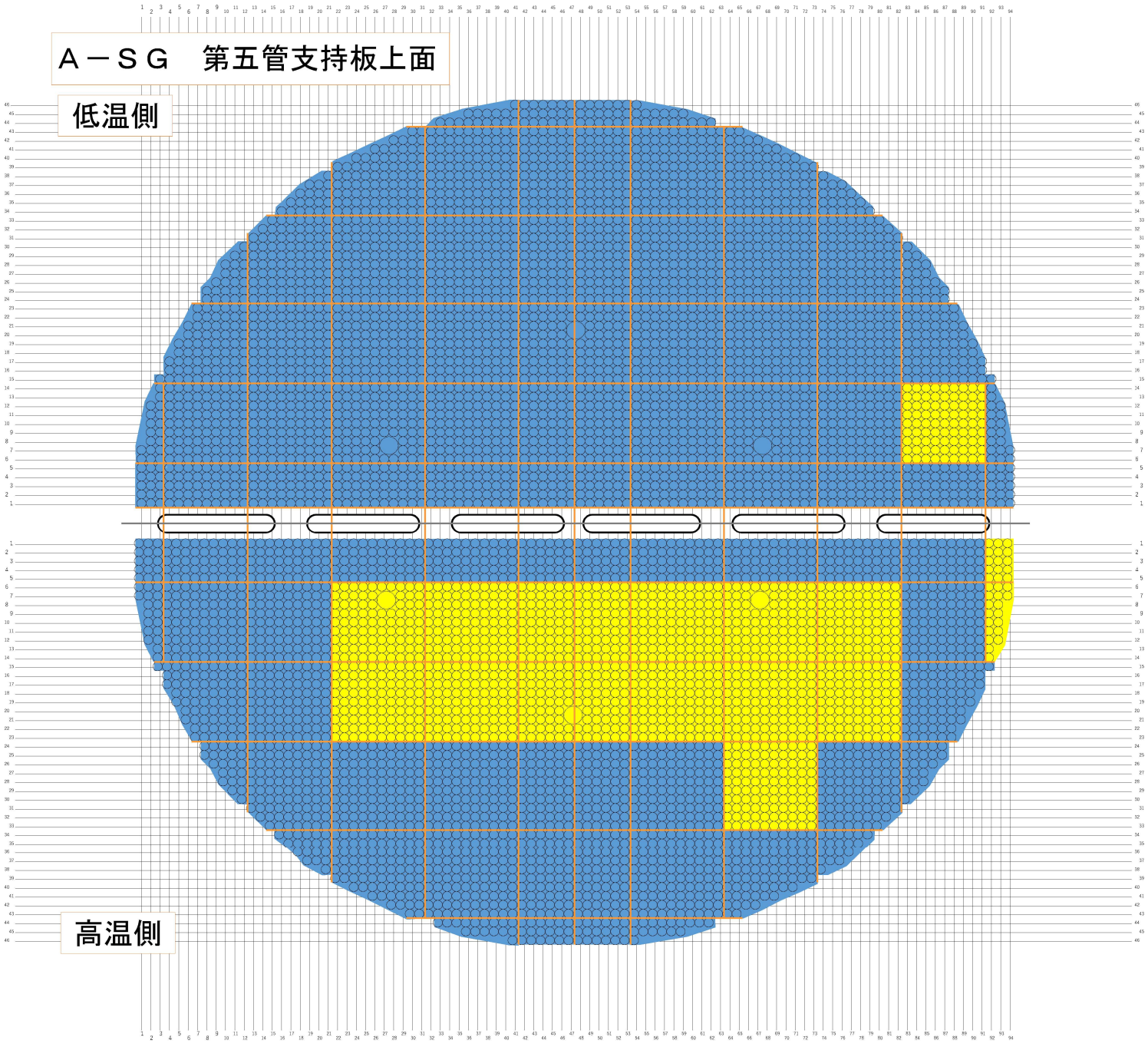
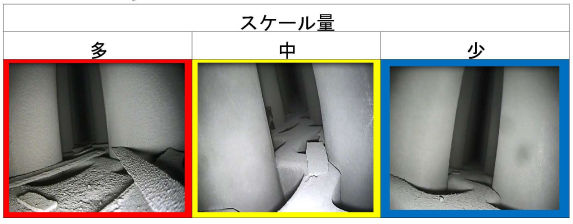
ＳＧ器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況（第五管支持板）

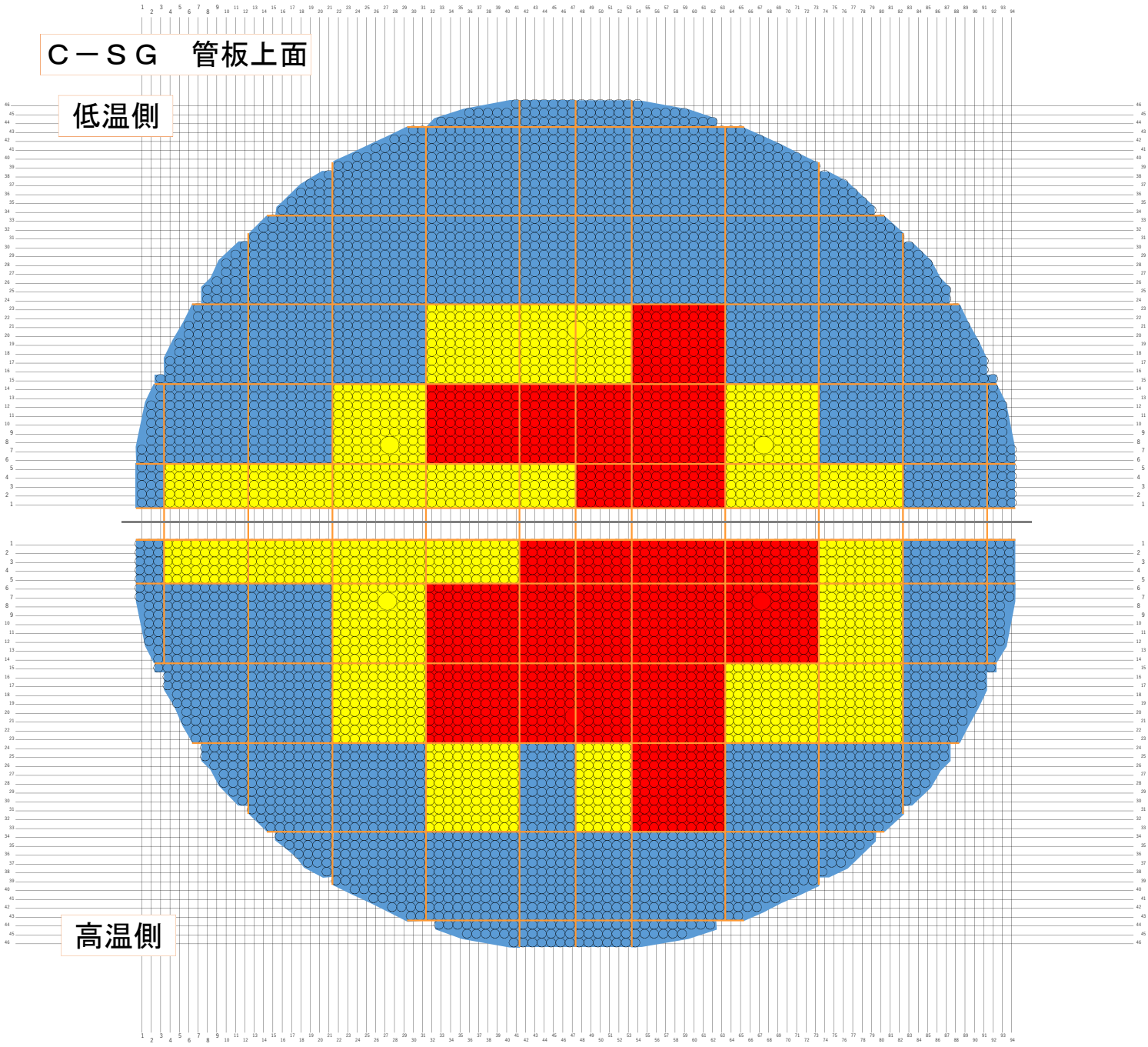


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多””中””少”に色分けした。

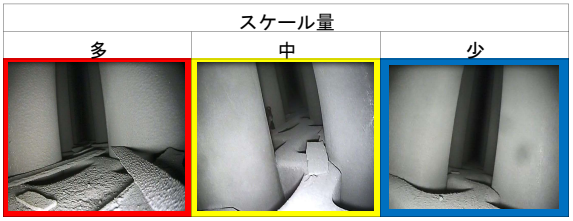


ＳＧ器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況（管板）

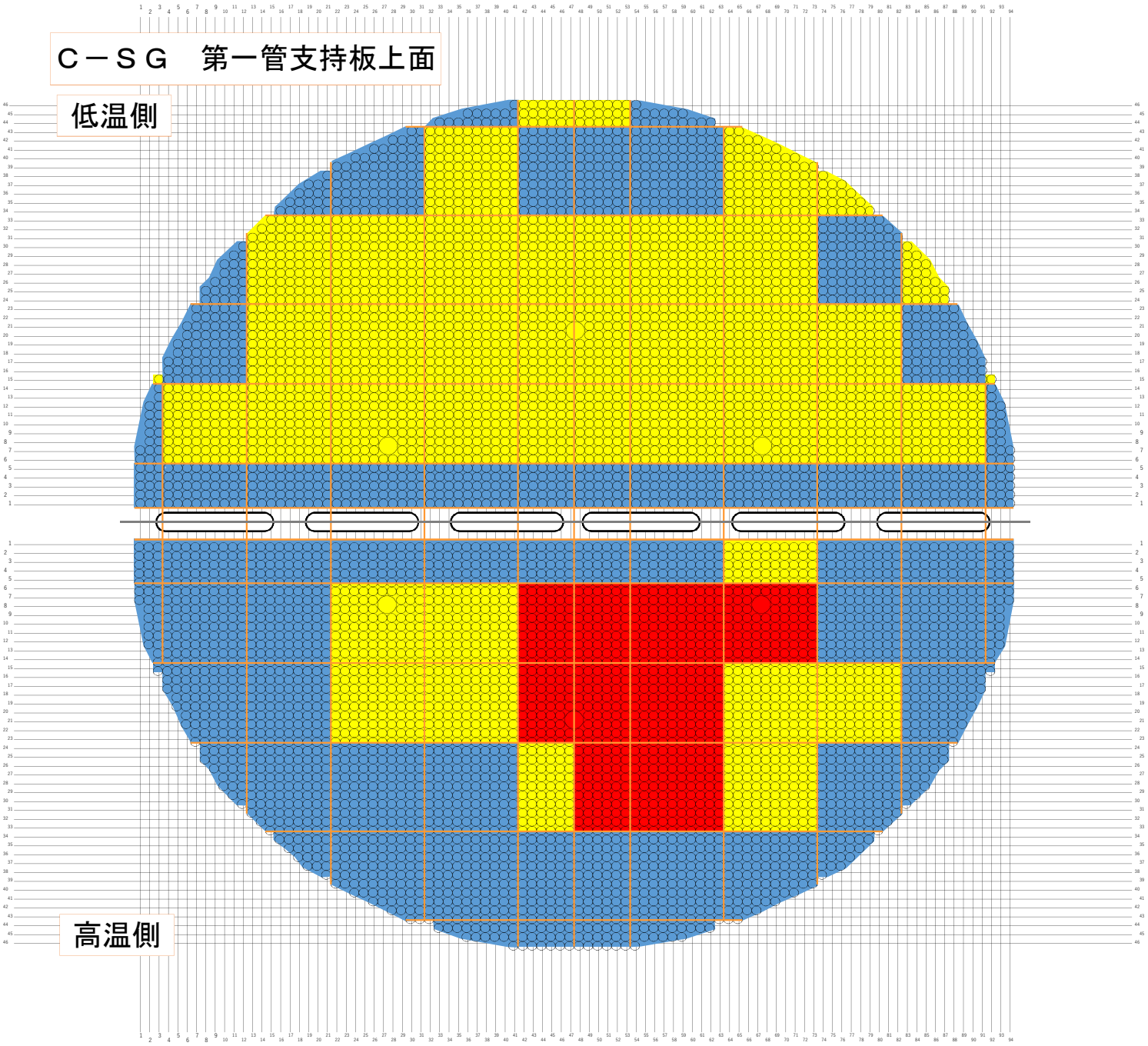


管板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多”“中”“少”に色分けした。

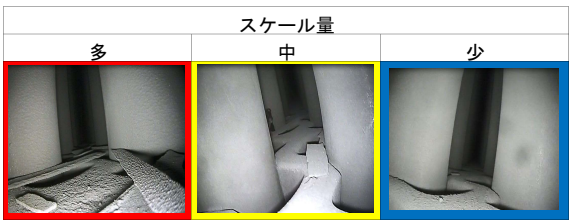


ＳＧ器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況（第一管支持板）

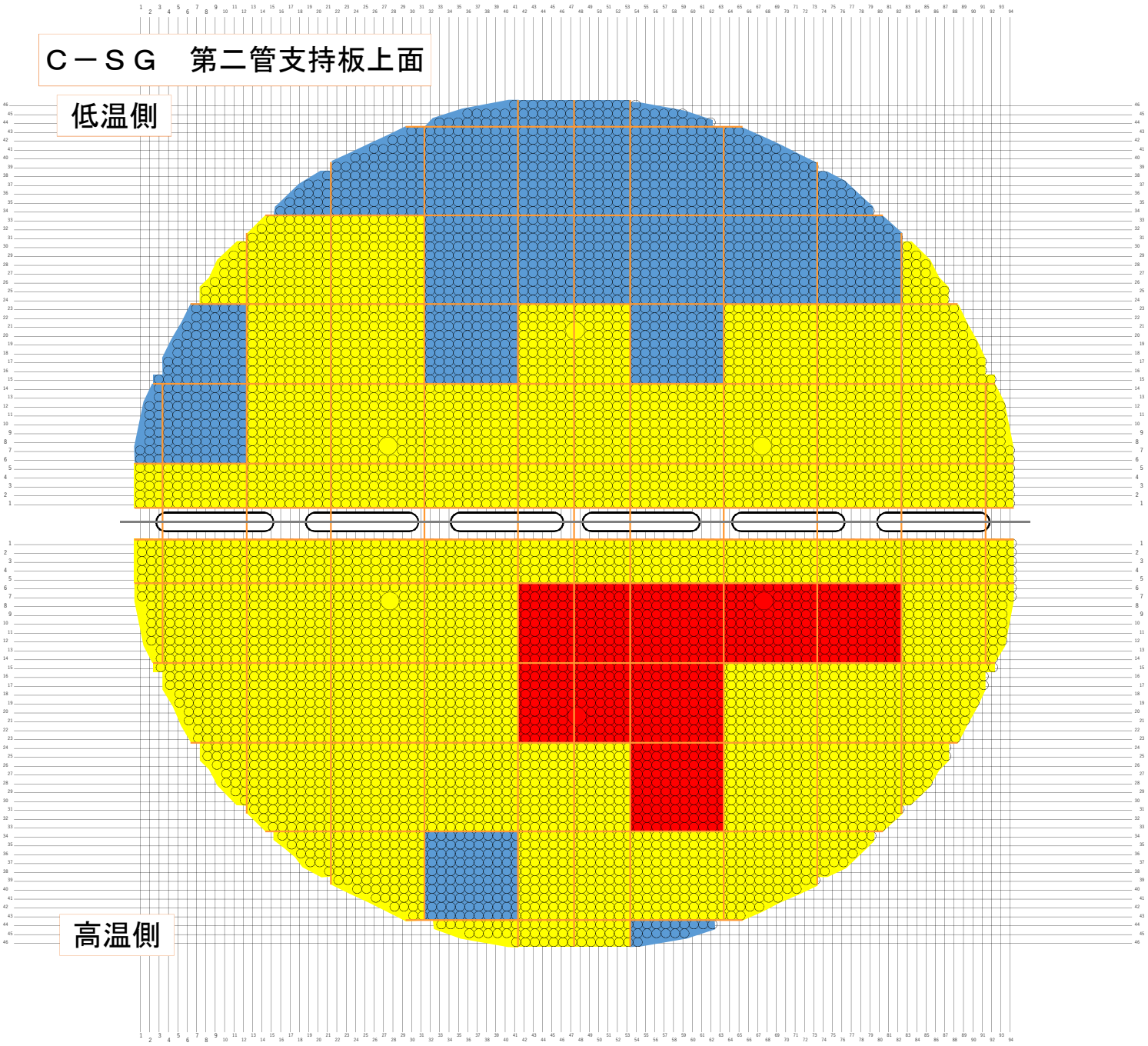


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多”“中”“少”に色分けした。

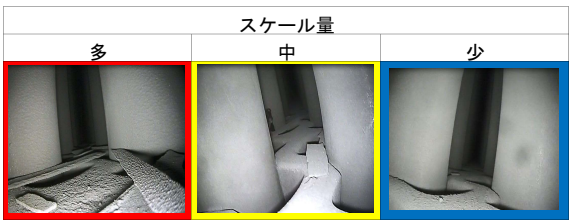


ＳＧ器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況（第二管支持板）

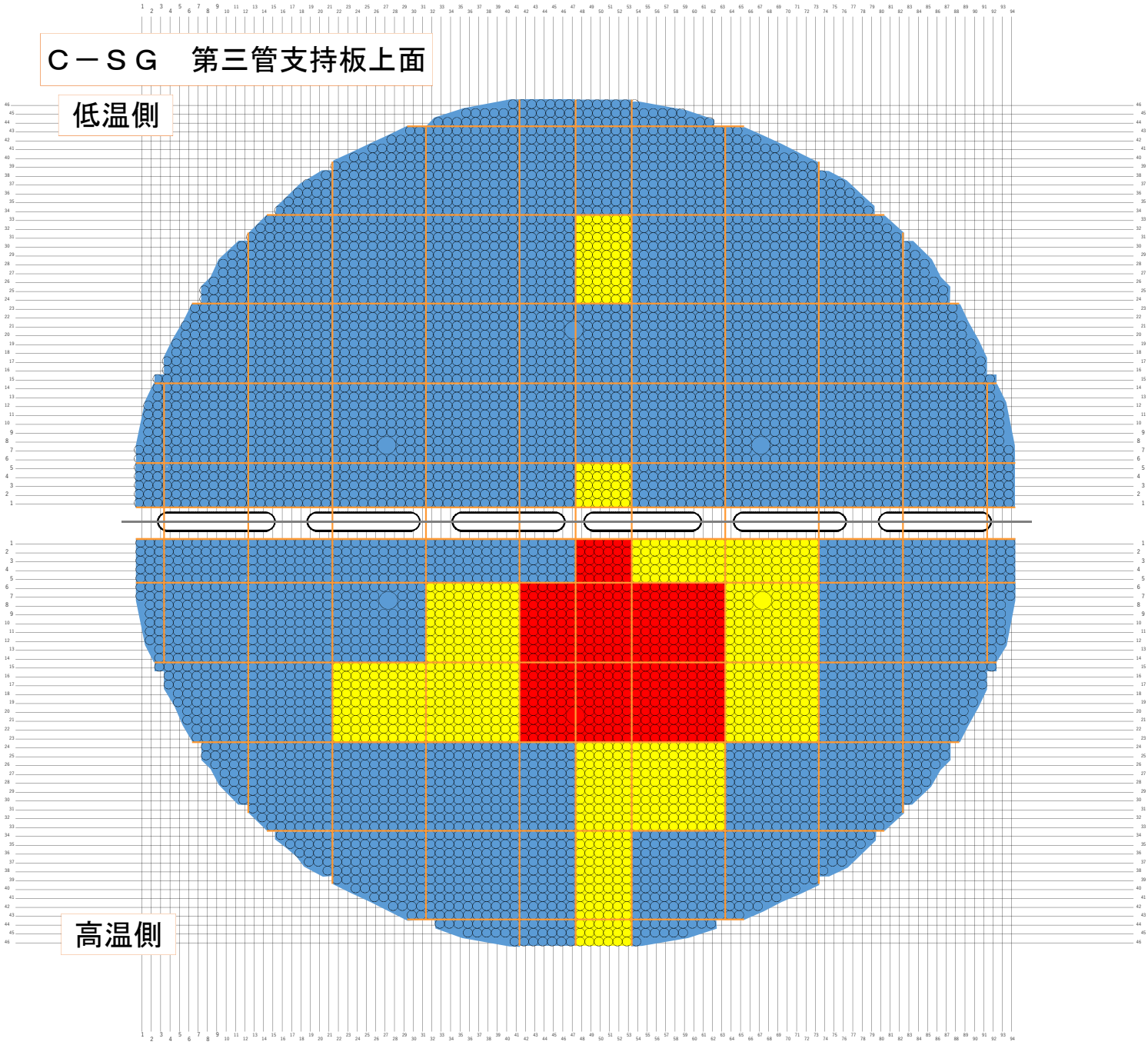


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多”“中”“少”に色分けした。

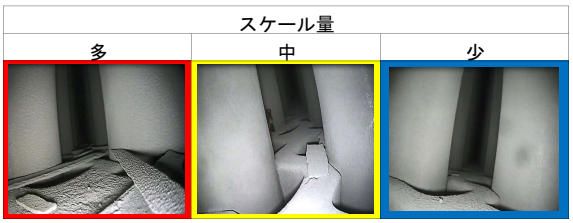


ＳＧ器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況（第三管支持板）

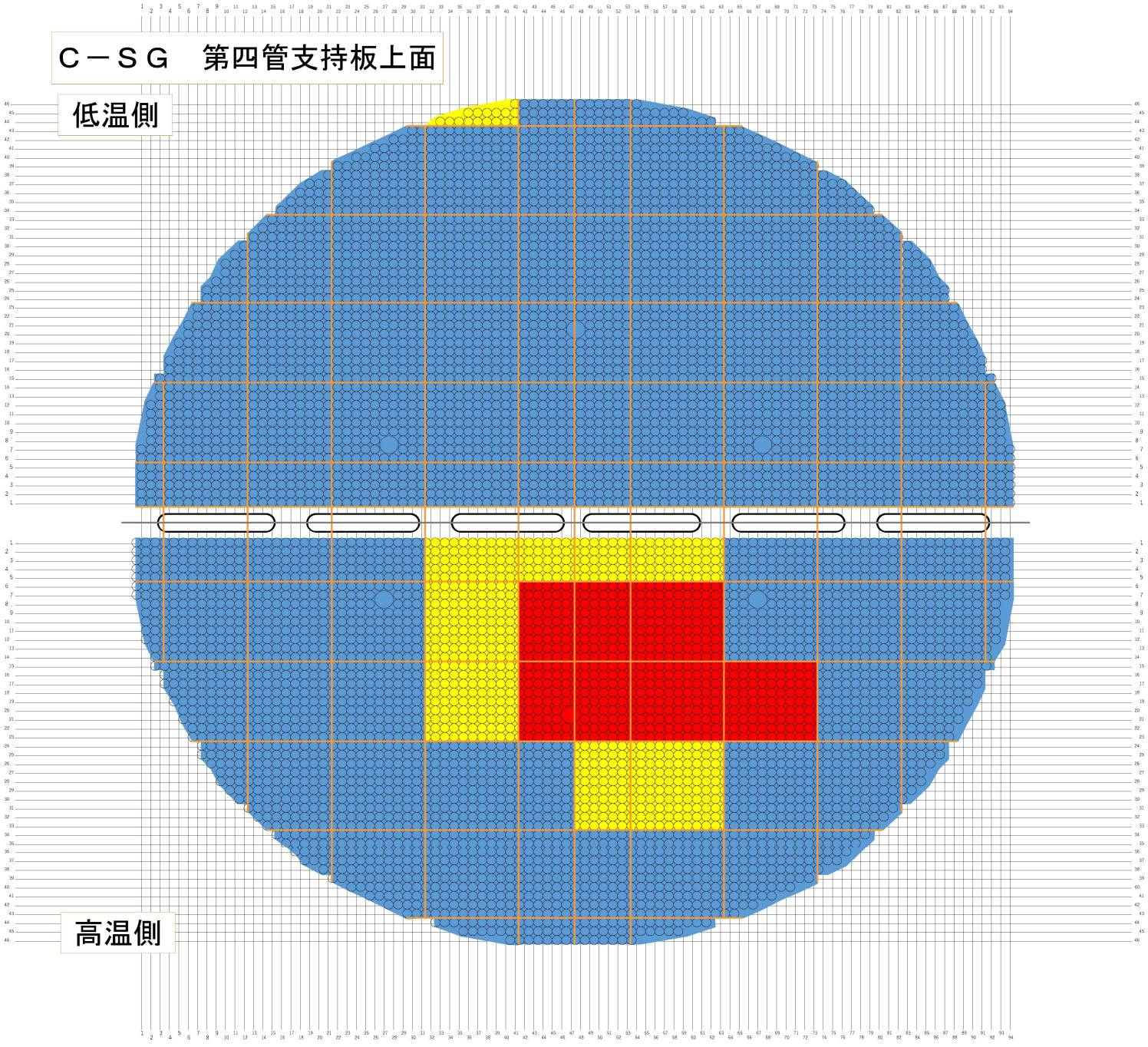


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多”“中”“少”に色分けした。

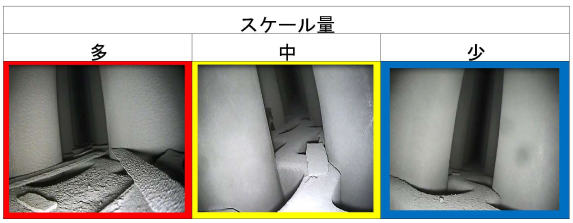


ＳＧ器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況（第四管支持板）

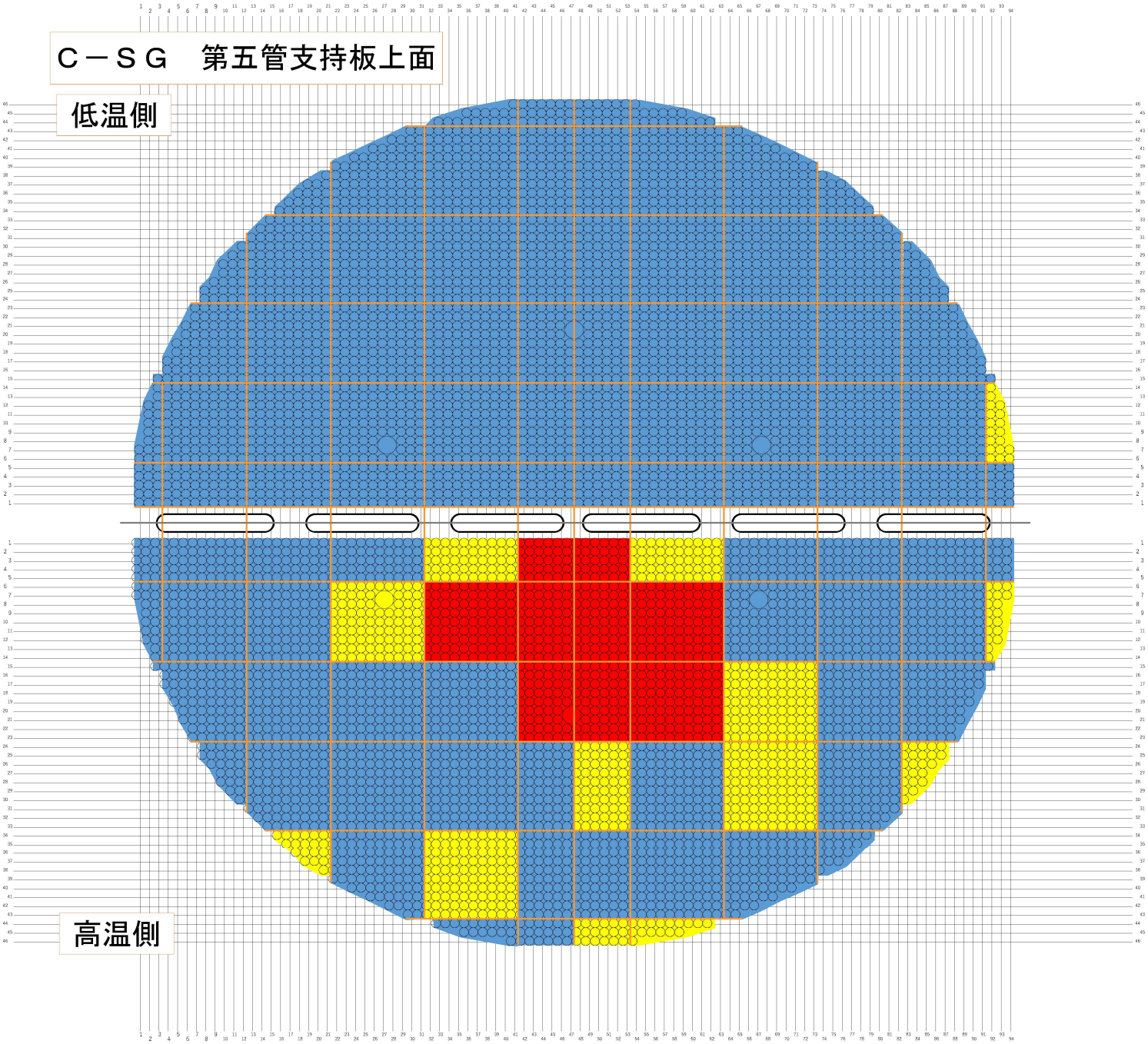


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多”“中”“少”に色分けした。

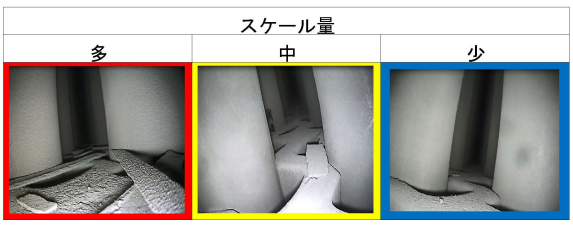


ＳＧ器内のスケールおよびスラッジの残存状況調査

スケールの分布状況（第五管支持板）

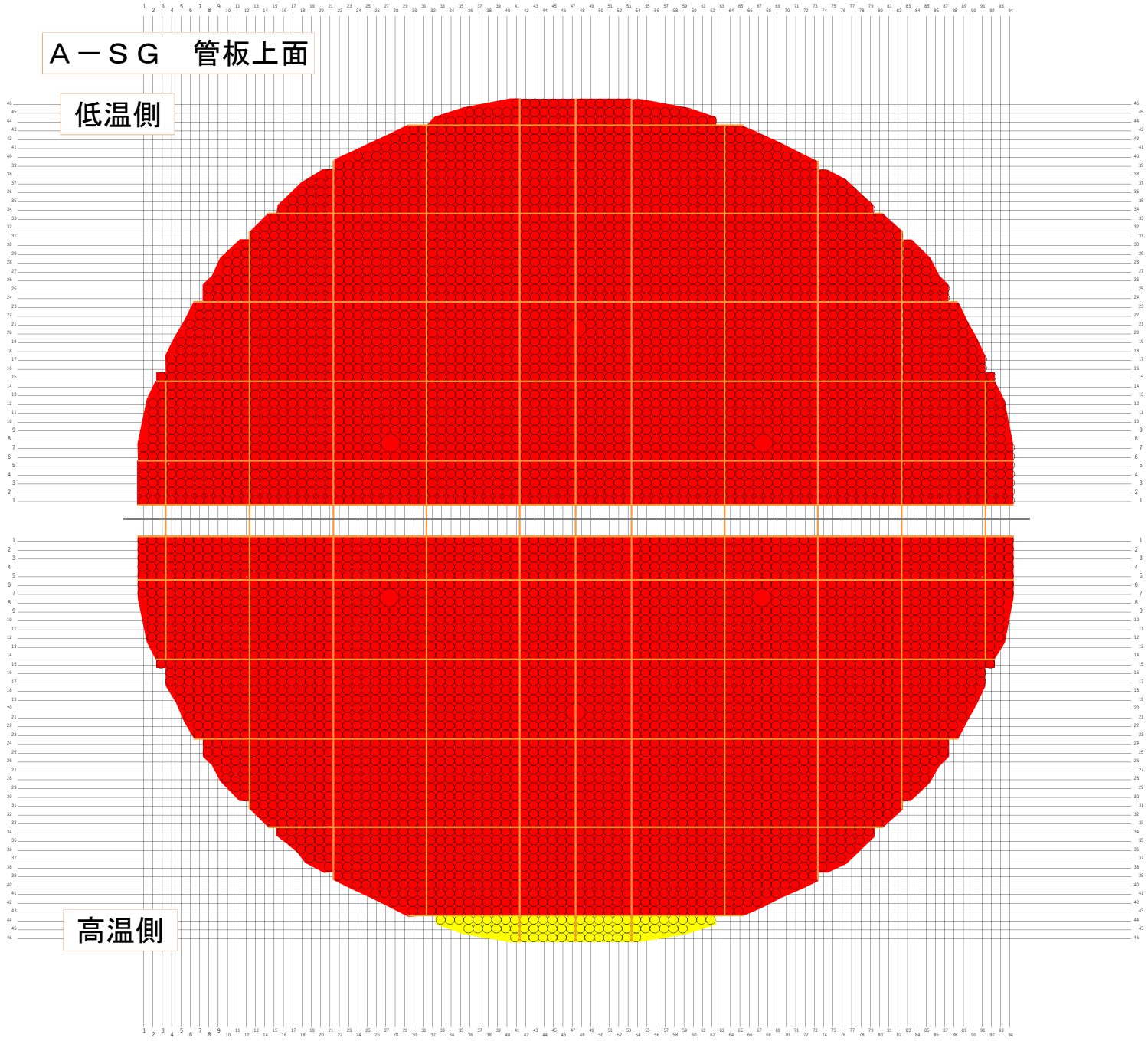


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各アドレスにおいてスケールが現認された頻度を”多”“中”“少”に色分けした。

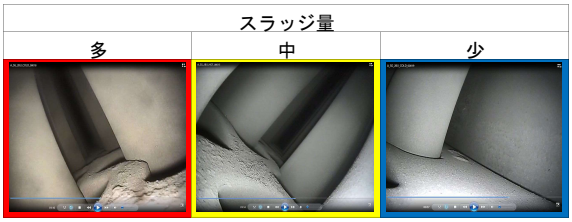


ＳＧ器内のスケールおよびスラッジの残存状況

スラッジの分布状況（管板）

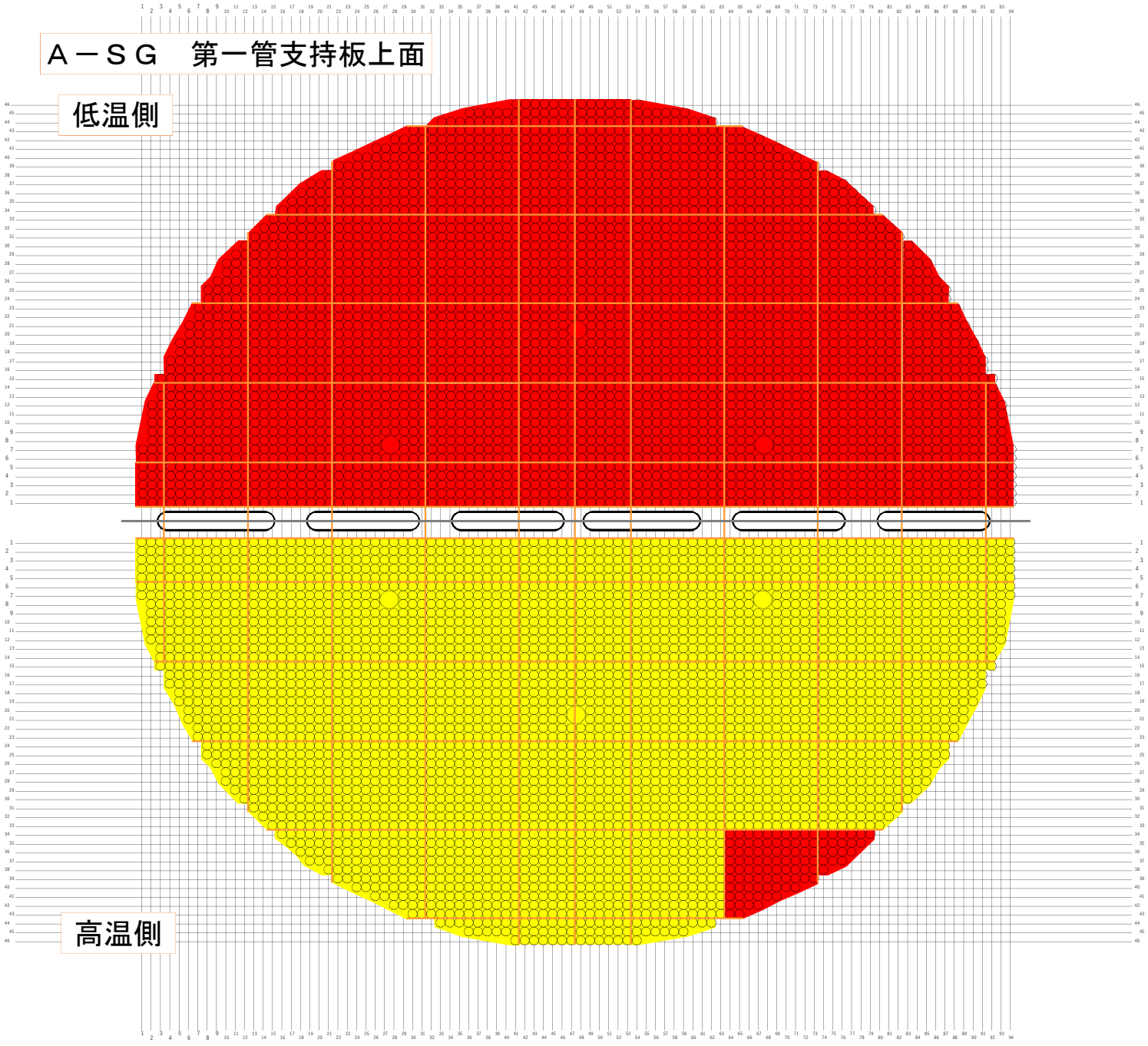


管板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多”,”中”,”少”に色分けした。



ＳＧ器内のスケールおよびスラッジの残存状況

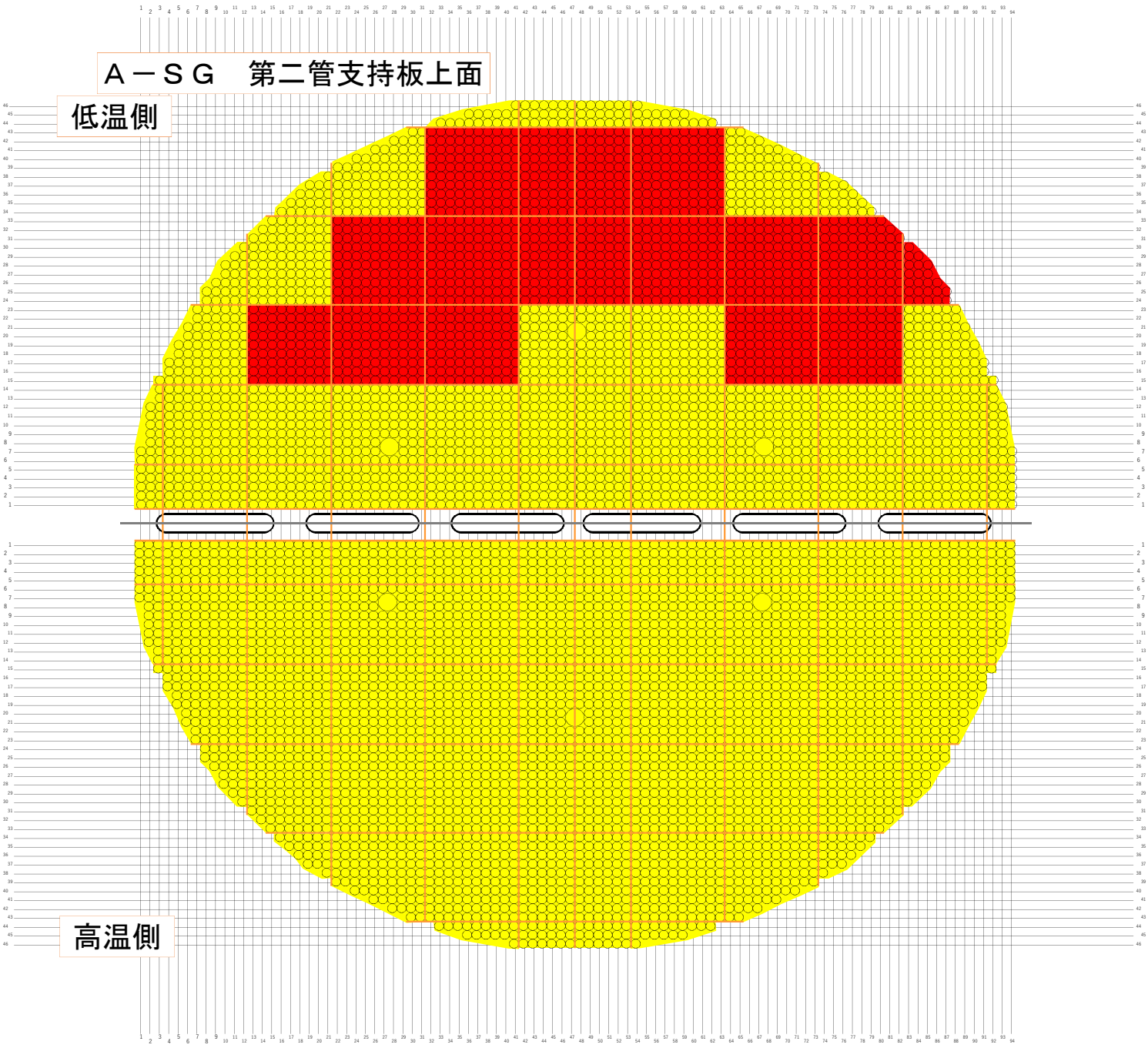
スラッジの分布状況（第一管支持板）



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

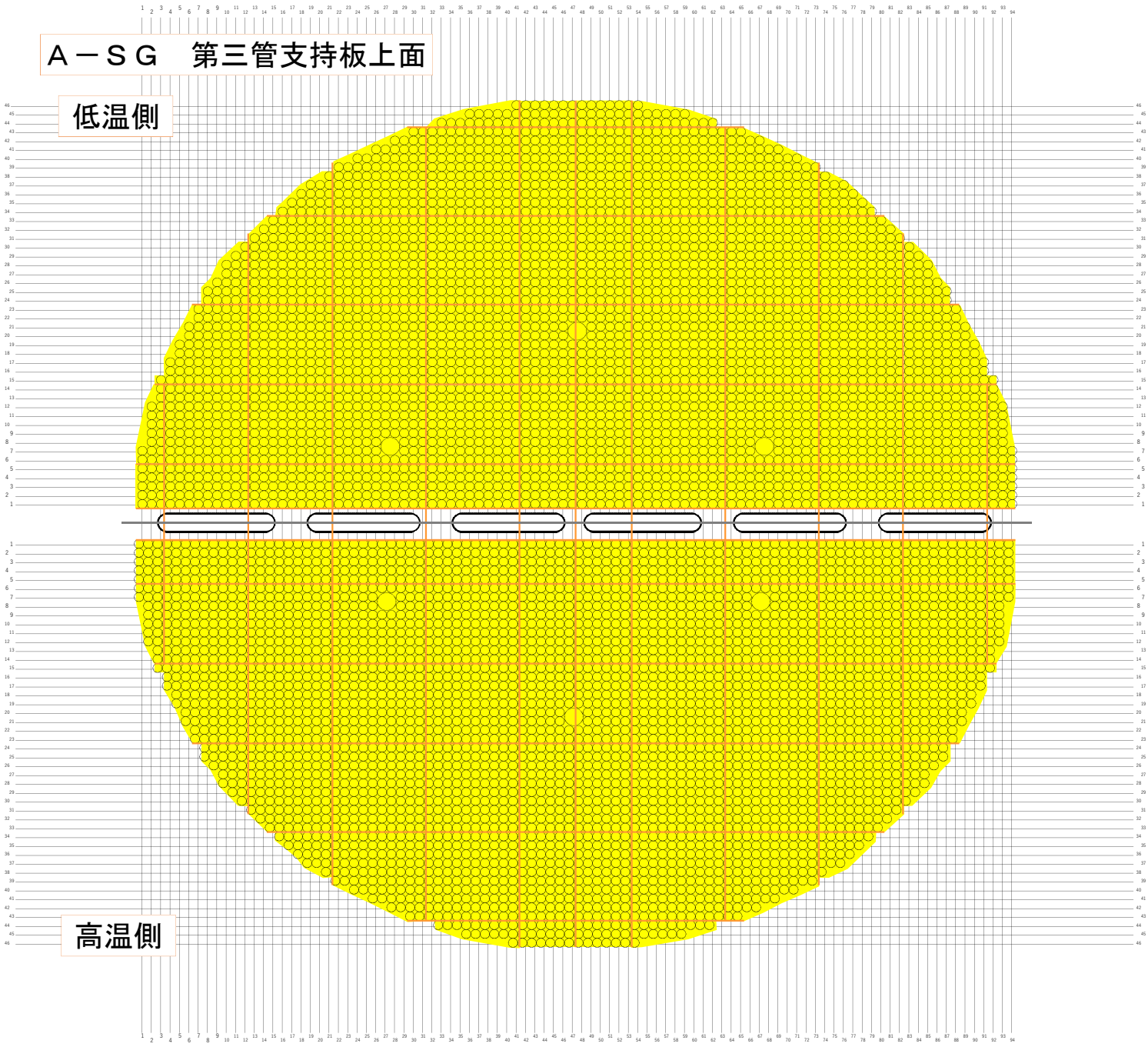
スラッジの分布状況（第二管支持板）



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

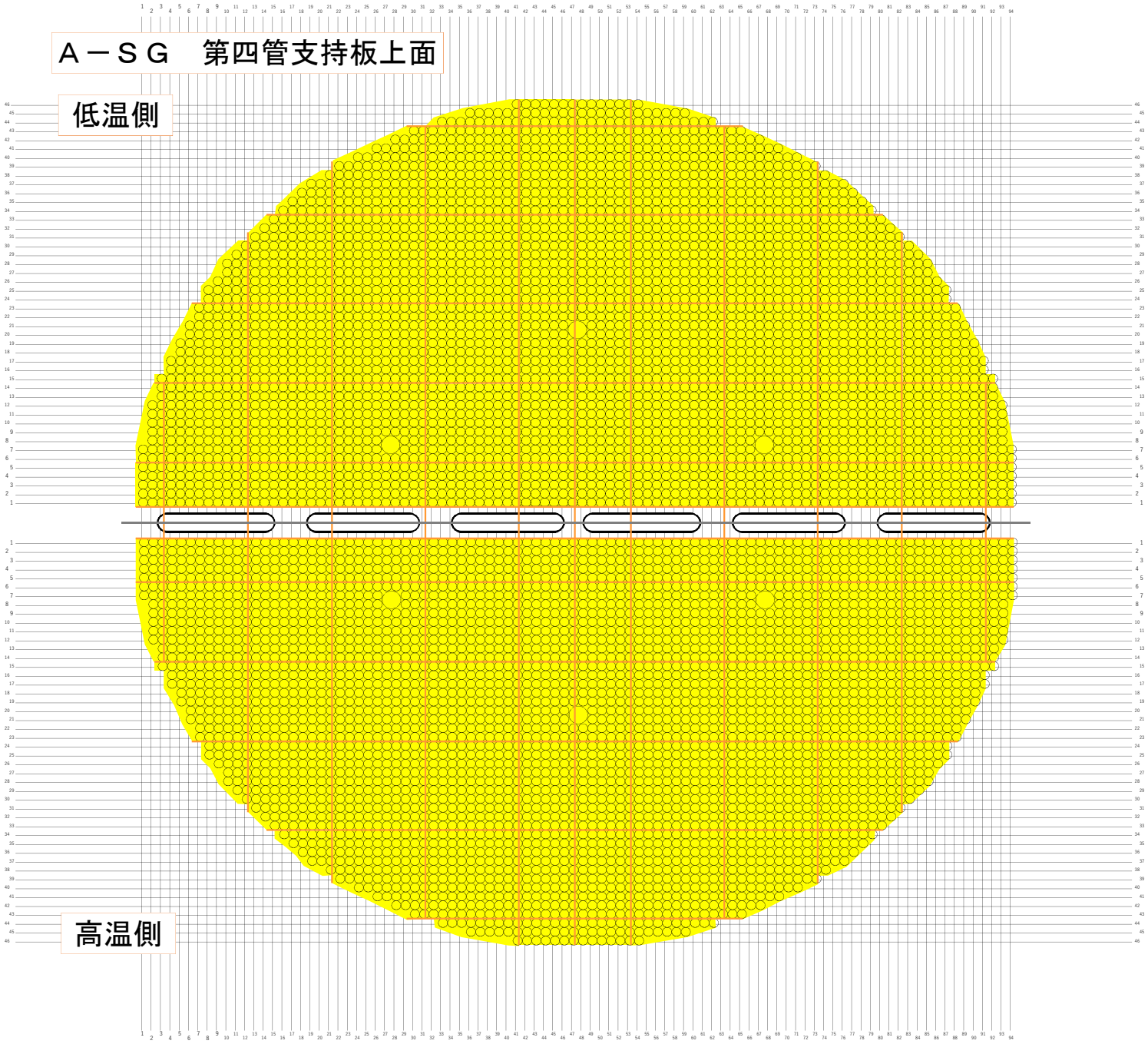
スラッジの分布状況（第三管支持板）



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

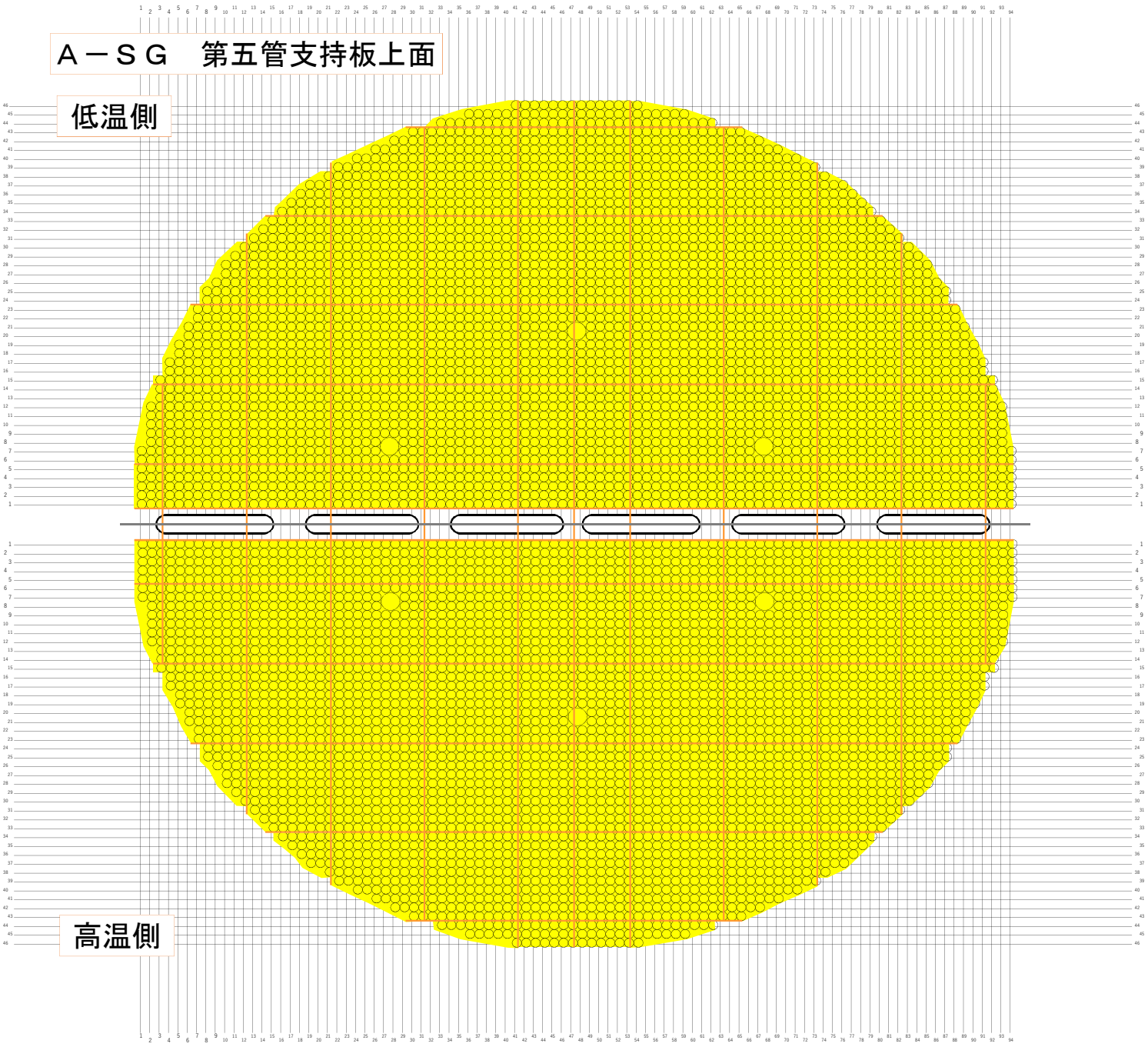
スラッジの分布状況（第四管支持板）



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

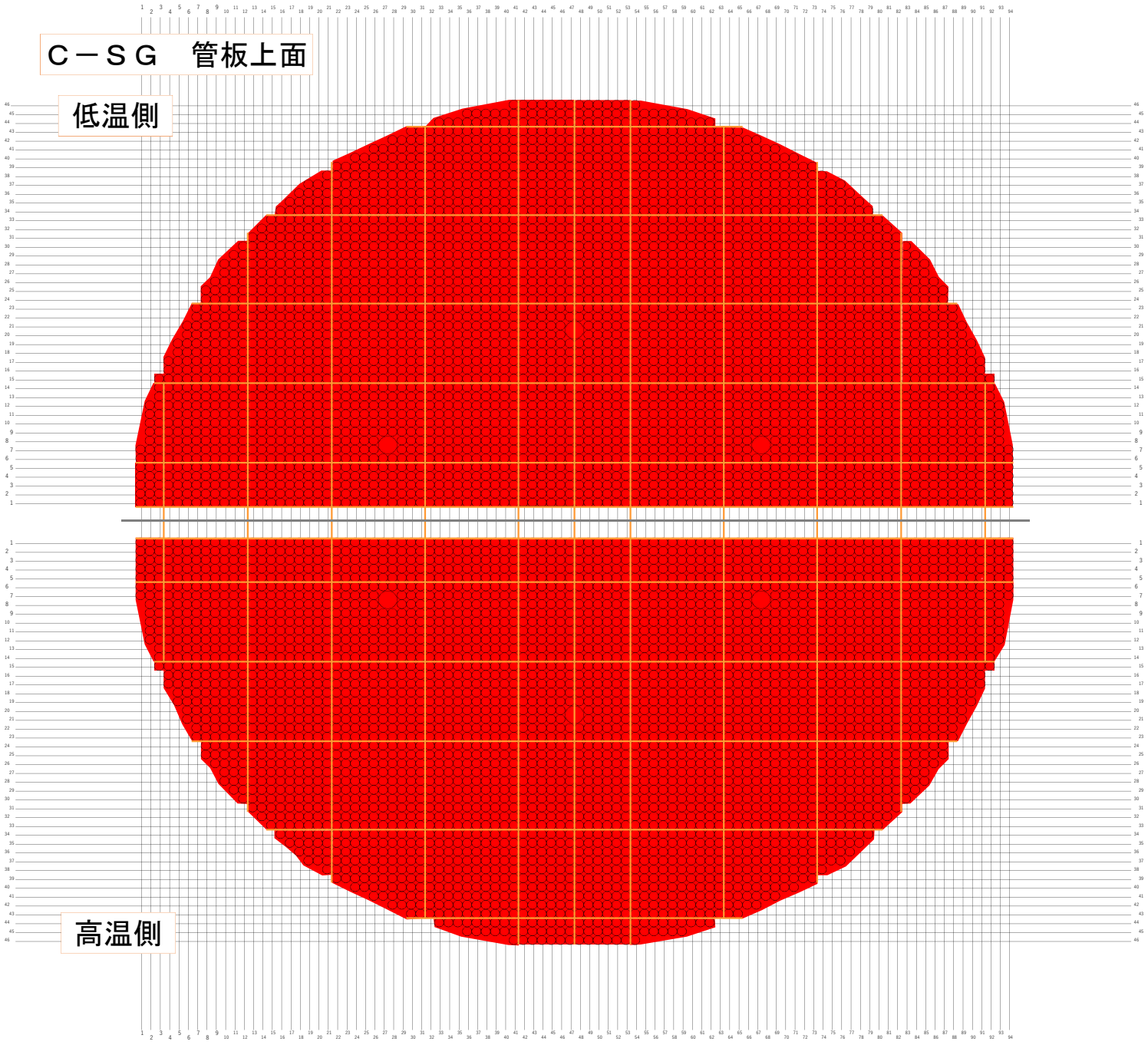
スラッジの分布状況（第五管支持板）



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

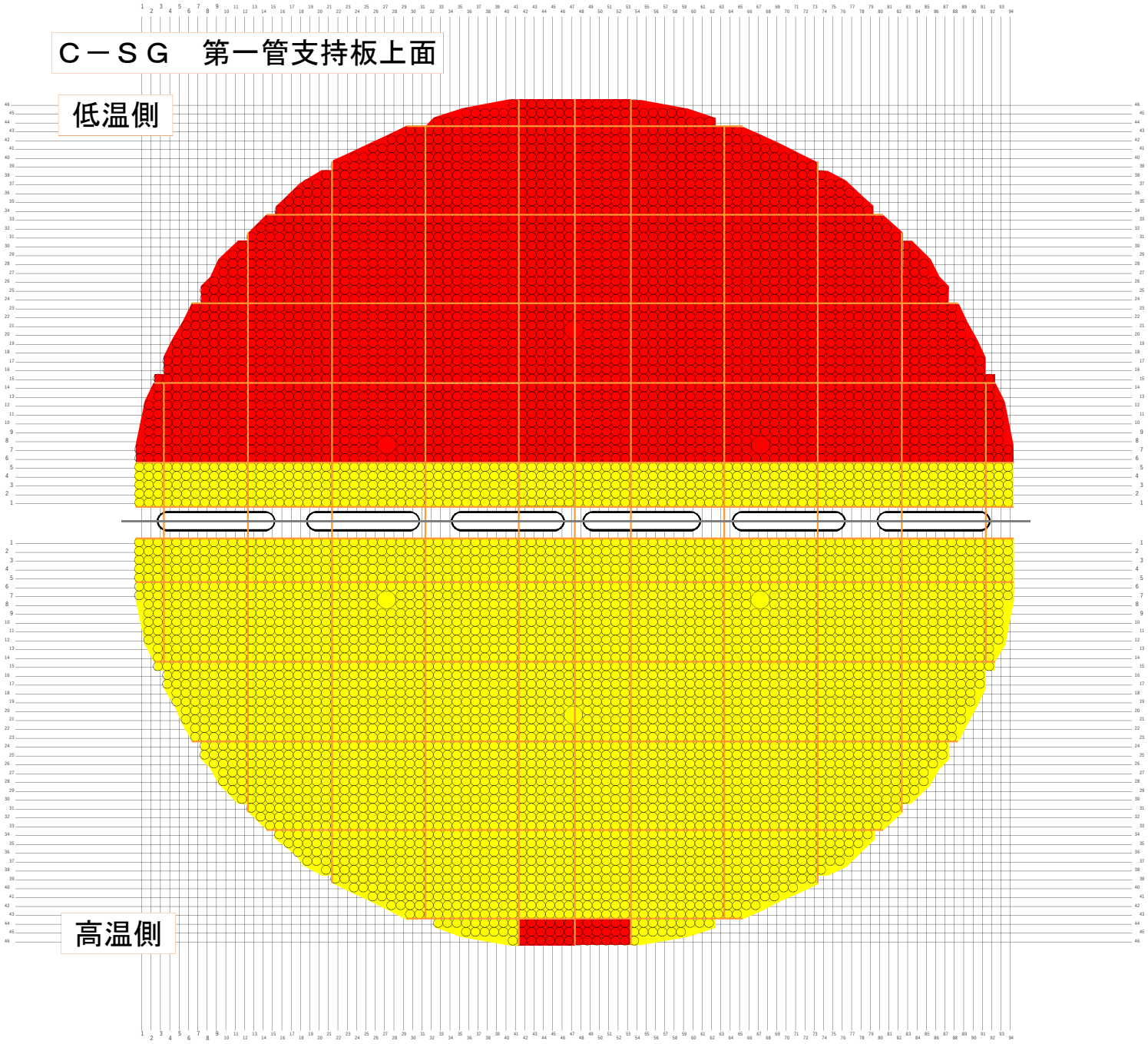
スラッジの分布状況（管板）



管板上をおおよそ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

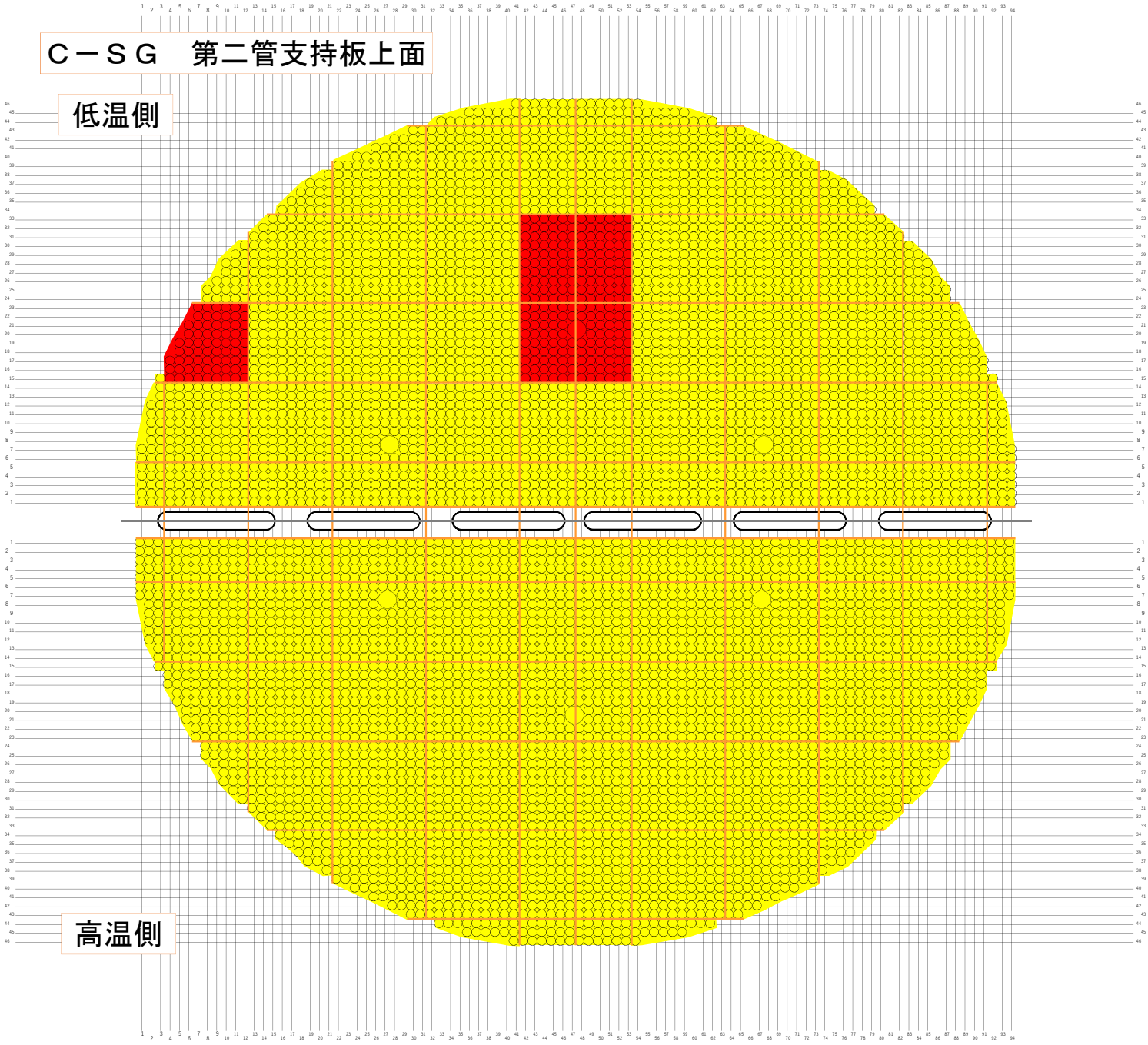
スラッジの分布状況（第一管支持板）



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

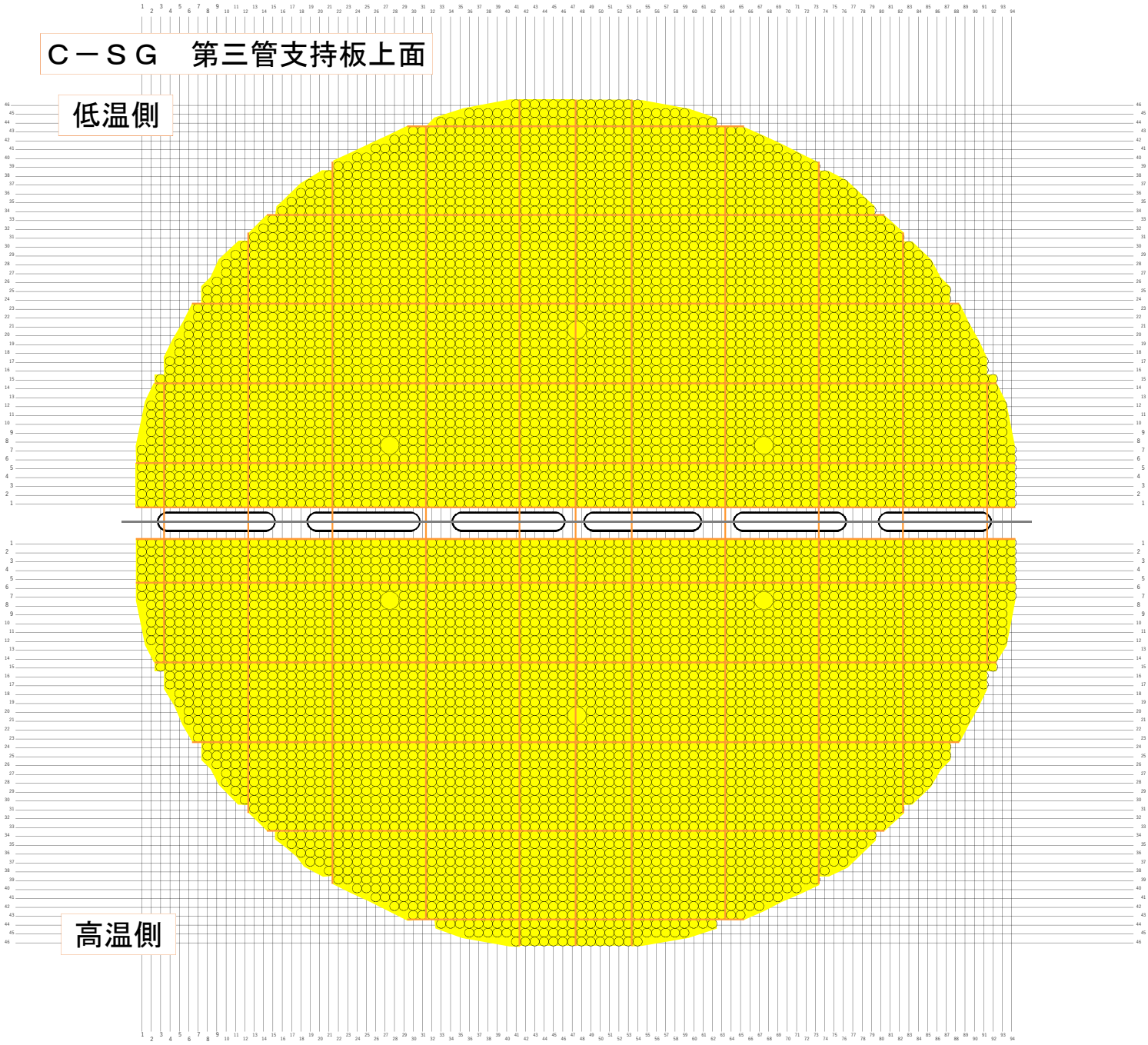
スラッジの分布状況（第二管支持板）



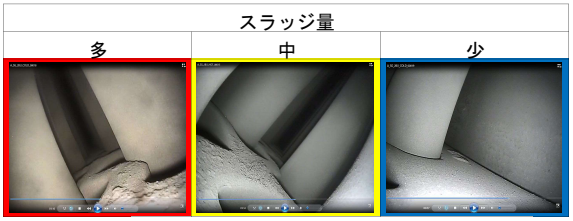
管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多”“中”“少”に色分けした。

ＳＧ器内のスケールおよびスラッジの残存状況

スラッジの分布状況（第三管支持板）

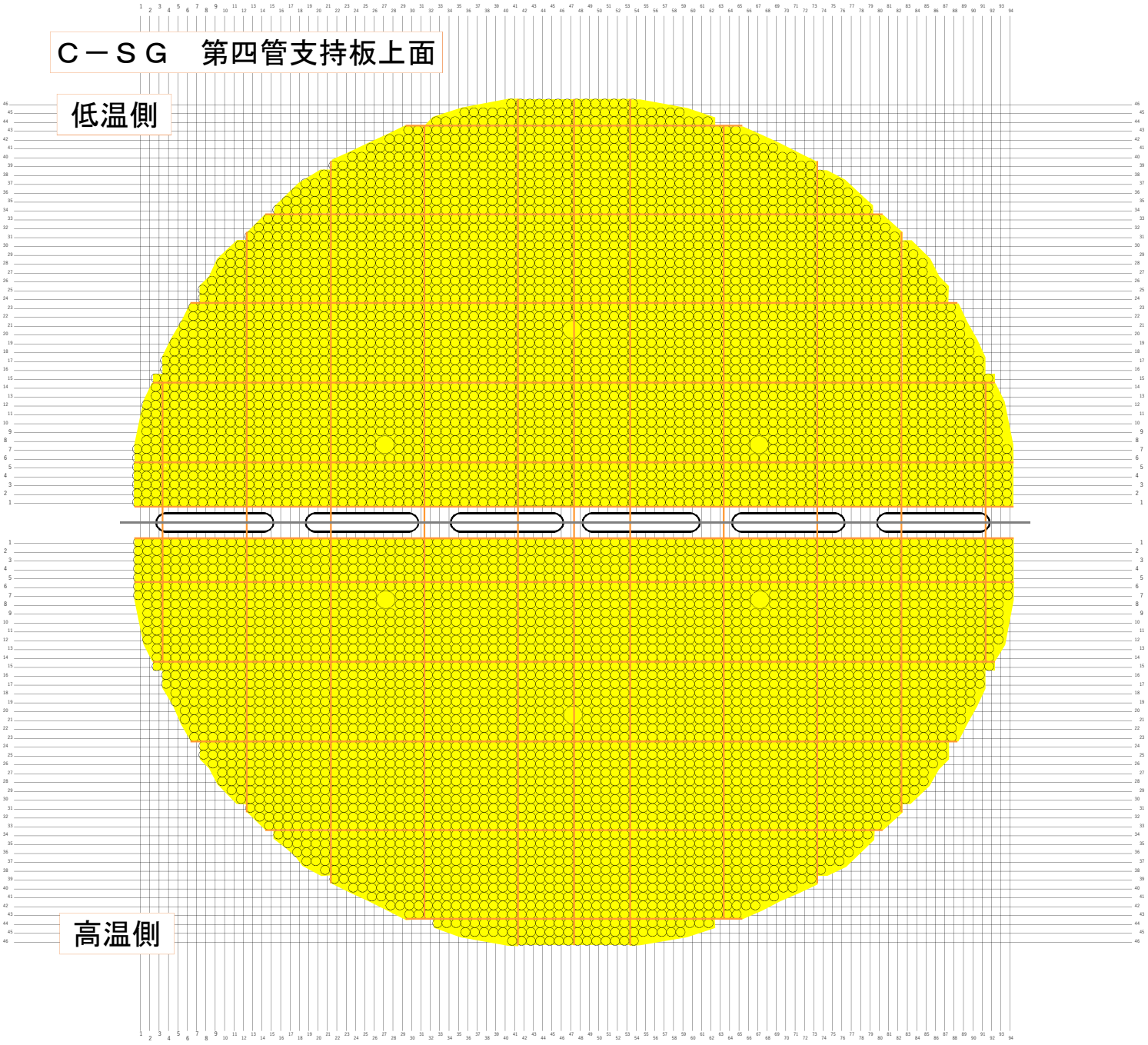


管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多”“中”“少”に色分けした。



ＳＧ器内のスケールおよびスラッジの残存状況

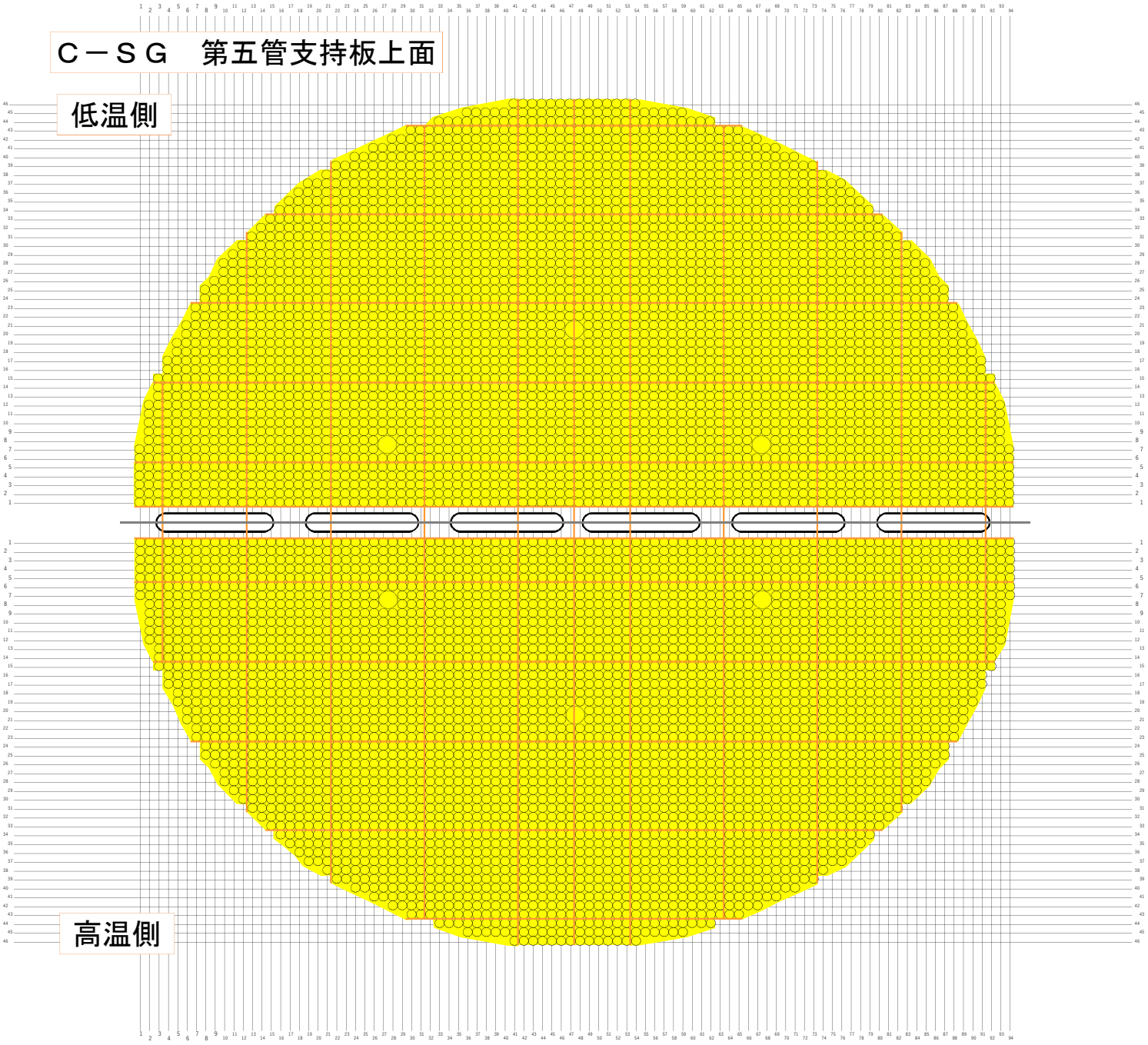
スラッジの分布状況（第四管支持板）



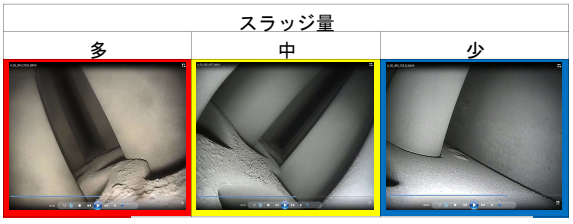
管支持板上をおおよそ10×10アドレス程度で小エリアに分割し、各小エリア内の代表的な点での観察結果から、スラッジ量を”多”“中”“少”に色分けした。

ＳＧ器内のスケールおよびスラッジの残存状況

スラッジの分布状況（第五管支持板）



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器内の伝熱管表面の観察結果

- 小型カメラを用いたＳＧ器内のスケールの残存状況等の調査に合わせて、近傍の伝熱管表面を観察した結果、伝熱管へのスケールやスラッジの付着はあるものの、局所的にスケールが剥離した痕跡が認められた。
- 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（垂直方向）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

	高温側	低温側
A-SG		
C-SG		

スケールのＳＧ２次側器内挙動の推定

外面減肉事象は、ＳＧ下部の伝熱管において鉄イオンの析出により生成された稠密なスケールによるものと推定しており、稠密なスケールが生成される管板から第三管支持板の間にて生成されたスケールが、外面減肉箇所へ到達するまでのＳＧ２次側器内の挙動について検討した。

また、起動時の出力上昇等の過渡的なＳＧ器内の挙動においては、負荷出力の上昇に伴う管群内での局所的な乱れが発生することが想定され、時々刻々の詳細な流況の推定は困難であるが、定格熱出力一定運転条件下の挙動において、３次元熱流動解析を用いＳＧ２次側の沸騰２相流のマクロな流動分布（流速分布、密度分布）の定常解析により、スケールのＳＧ２次側器内挙動の推定を行った。

なお、実機において、ＳＧ上部は気相の割合が高いことから解析結果よりも流れの乱れが大きく、スケールの挙動についてはバラツキが大きい傾向となる。

○外面減肉が生じた管支持板下面に到達するスケールの挙動

外面減肉が生じた管支持板下面に到達するスケールの推定される挙動を図１に示す。

運転中のＳＧ器内２次側の流況下では管群外筒内部で上昇流が発生しており、流体抗力がスケールの落下力より大きいことから、ＳＧ下部で伝熱管から剥離したスケールは管群内の上昇流に乗って上昇することが分かっている。

また、第一～第五管支持板側面と管群外筒の間には幅[redacted]ｍｍの隙間があり、ＳＧ下部で発生したスケールは上昇流に乗って各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方向の流れの影響を受けて当該部へ到達するケースや、ＳＧ下部で発生したスケールは管群内の上昇流に乗って各管支持板にあるフロースロット部を通過し、管群の高温側と低温側の圧力損失差から生じる高温側から低温側への水平方向の流れの影響を受けて、フロースロット部を通過したスケールが当該部に到達するケースなどが推定される。

なお、高浜発電所４号機第２２回定期検査で発生した外面減肉事象においては、異物により外面減肉事象が発生したと推定し、第三管支持板より上方に上昇する可能性は低いと考えていた。これは、異物が主給水系統を通じてＳＧ器外から流入し、ＳＧ２次側最下部の管板まで移動した後に、ＳＧ器内の上昇流に乗って管支持板にあるフロースロット部を通過し、水平方向の流れにより異物が当該部に到達すると評価したものである。一方、今回の外面減肉事象はＳＧ下部で生成された稠密なスケールによるものと推定しており、管板から第三管支持板の間にて生成されたスケールについてＳＧ２次側器内の挙動を評価した結果、第三管支持板より上方に上昇することは十分に起こり得ると考えられる。

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

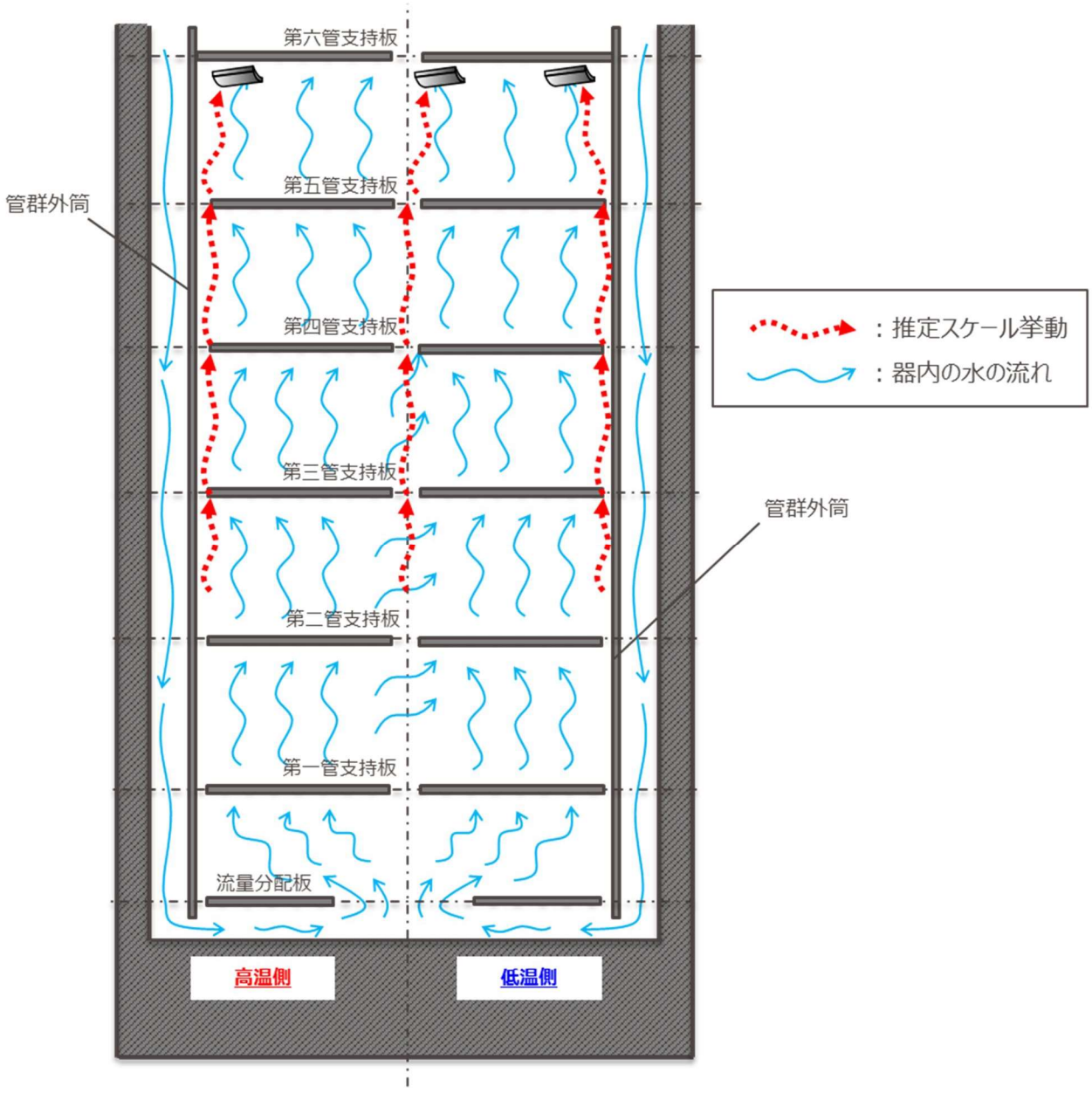


図１　ＳＧ２次側の器内流況およびスケール挙動

参考：定格熱出力一定運転条件下のＳＧ器内２次側の流況について

（１）３次元熱流動解析を用いた流況調査

図２に３次元熱流動解析による第２５サイクル運転中のＳＧ２次側の管群外筒内部の流況を示す。運転中のＳＧ２次側の管群外筒内部では、全体で上昇流が発生し、この上昇流の速度はＳＧの上部ほど大きく、高温側と低温側では高温側でより大きくなっている。また、管群の高温側と低温側の圧力損失差から、管群の中央付近において、水平方向の流れが発生している。この流れは高温側と低温側の温度差の大きいＳＧ下部で顕著である。

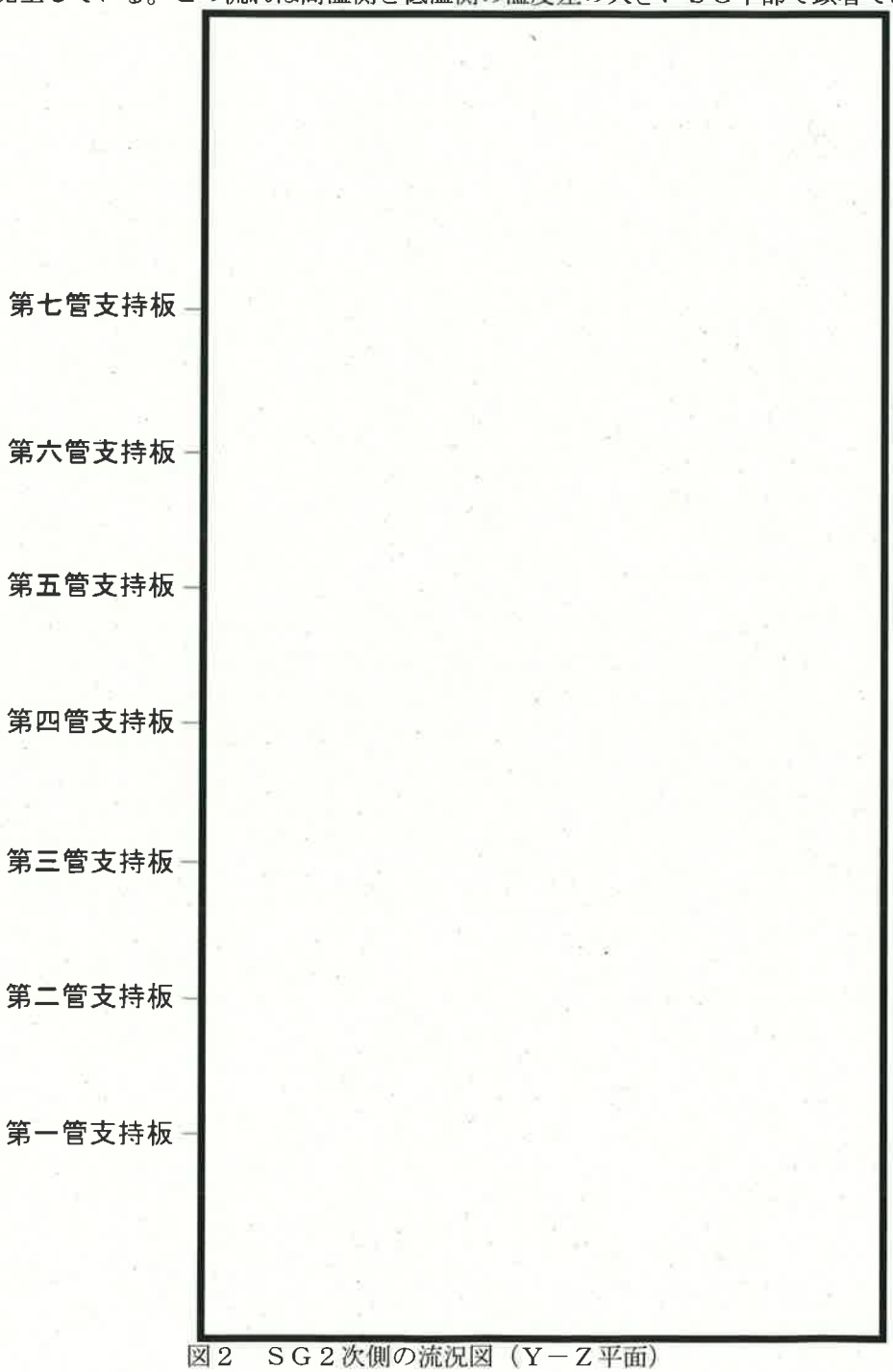


図２　ＳＧ２次側の流況図（Ｙ－Ｚ平面）

□：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に第二～第六管支持板間の高さにおける流れの水平方向成分の強さを示す。

各断面で管群の高温側と低温側の圧力損失差により発生する高温側から低温側に向かう流れがあることが確認でき、ＳＧ器内の高さごとに水平方向の流れの強さを比較すると、第二～四管支持板では特にフロースロット部付近で強い流れがあるのに対し、第四～六管支持板間では全体的に水平方向の流れは弱いことが確認できる。以上から、ＳＧ２次側の管群外筒内部の流況は上部ほど上向きの流れが主体となると推定される。

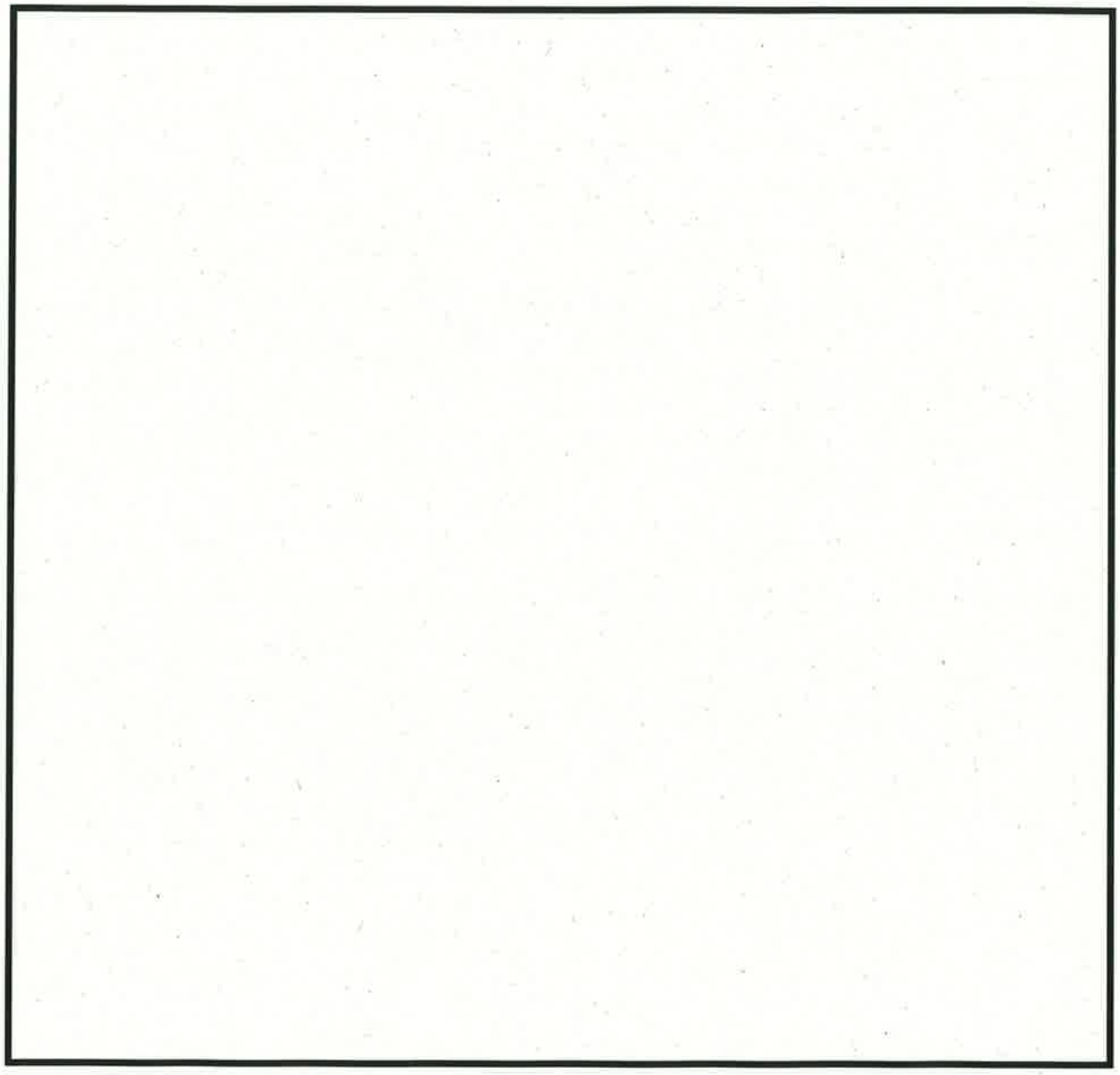


図３　各高さにおける水平方向流れ

：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。

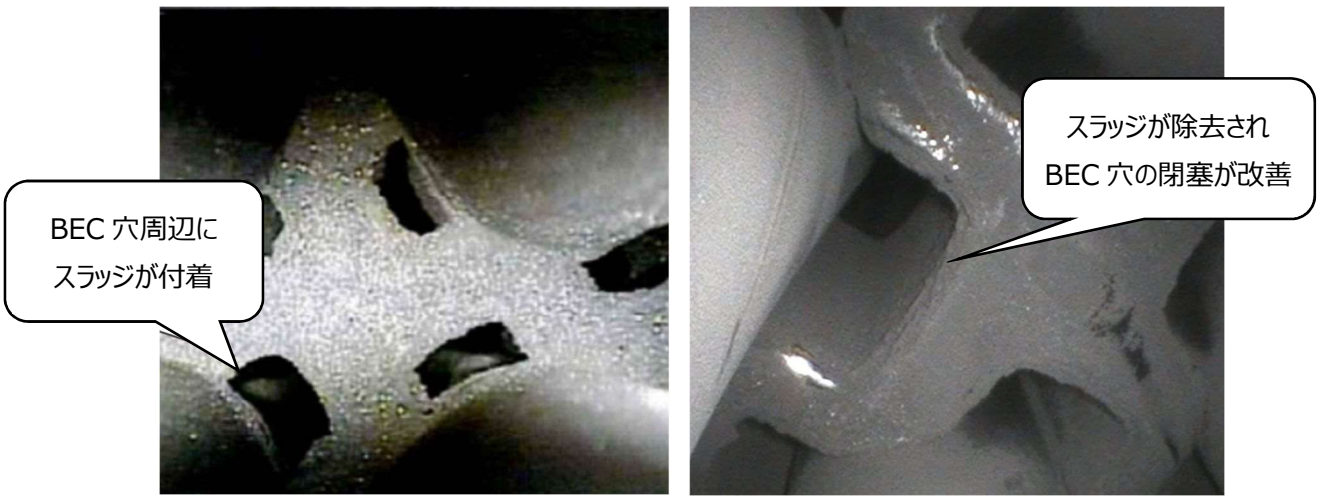
（２）薬品洗浄によるＳＧ器内流況への影響検討

高浜発電所４号機では過去２回（第２３，２４回定期検査）ＳＧ器内のスケール脆弱化を図るため、ＳＧ器内の薬品洗浄を実施している。薬品洗浄の副次的な効果として、ＳＧ器内のＢＥＣ穴に付着しているスラッジが除去されることにより、薬品洗浄前後で管支持板のＢＥＣ穴の閉塞率が改善する。

薬品洗浄前（第１８回定期検査）において実施したＢＥＣ穴の閉塞率の確認結果を表に示す。また、図４に薬品洗浄前後のＢＥＣ穴の状態を示す。薬品洗浄の実施によりＢＥＣ穴周囲のスラッジが除去されていることが確認できる。

表　第１８回定期検査におけるＢＥＣ穴の閉塞率

管支持板	ＢＥＣ穴閉塞率
第七管支持板	２８％
第六管支持板	２６％
第五管支持板	２２％
第四管支持板	３７％
第三管支持板	２２％
第二管支持板	１６％
第一管支持板	１４％



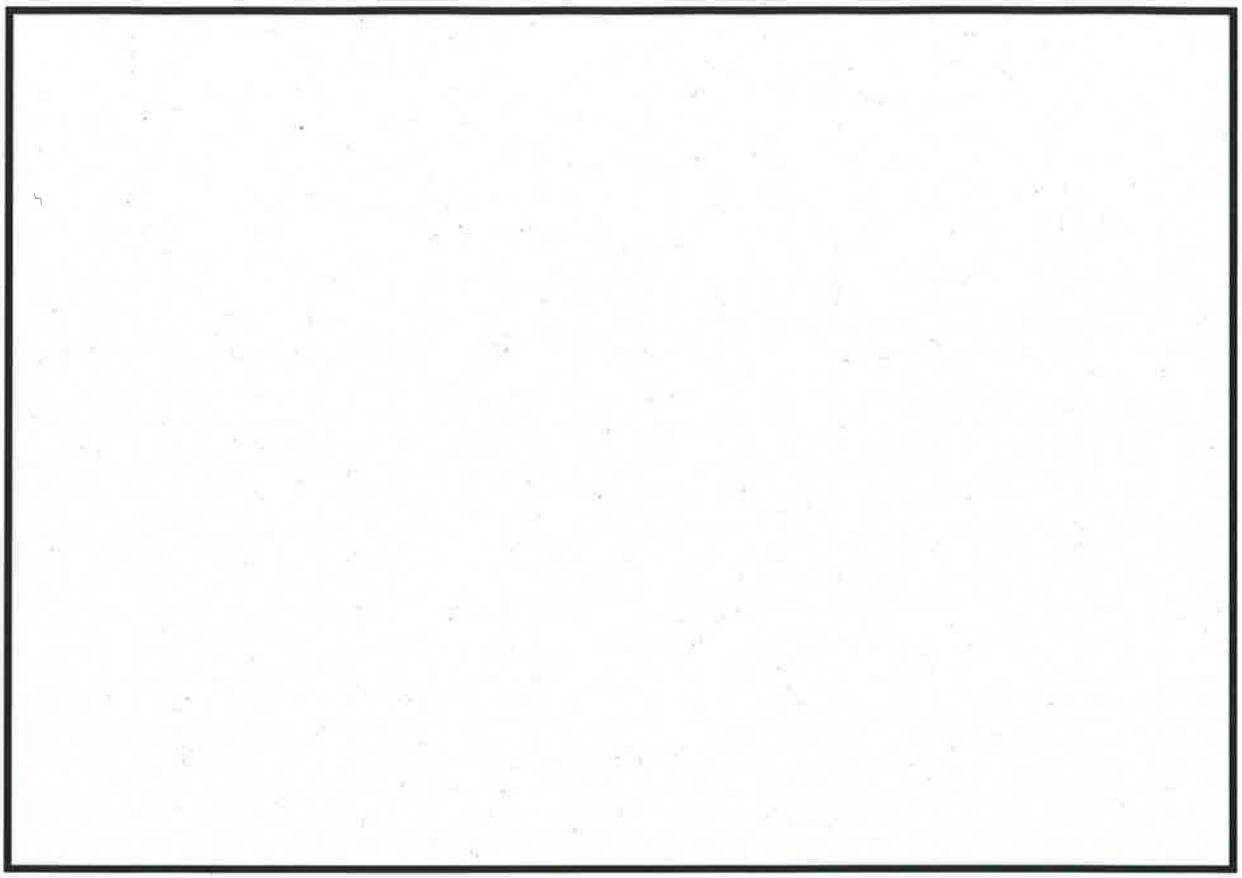
第１８回定期検査時　Ｃ－ＳＧ
第四管支持板下面

第２４回定期検査時　Ｃ－ＳＧ
第四管支持板下面

図４　薬品洗浄前後のＢＥＣ穴の閉塞状態

図５に薬品洗浄前後のＳＧ器内流況の解析結果を示す。

薬品洗浄前後の流況解析結果を比較すると、薬品洗浄後においては、ＢＥＣ穴のスラッジ付着による閉塞が改善されたことで、ＳＧ器内を循環する流量が増加し、ＳＧ器内の上昇流が２割程度強くなっており、第２５サイクルはこれまでの薬品洗浄の効果によって管群外筒内部の上昇流が強まり、以前に比べてスケールが上昇しやすい環境になっていたと推定される。



薬品洗浄前　ＳＧ器内流況
（ＢＥＣ閉塞あり）

薬品洗浄後　ＳＧ器内流況
（ＢＥＣ閉塞なし）

図５　薬品洗浄前後のＳＧ器内流況比較

□：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。

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。

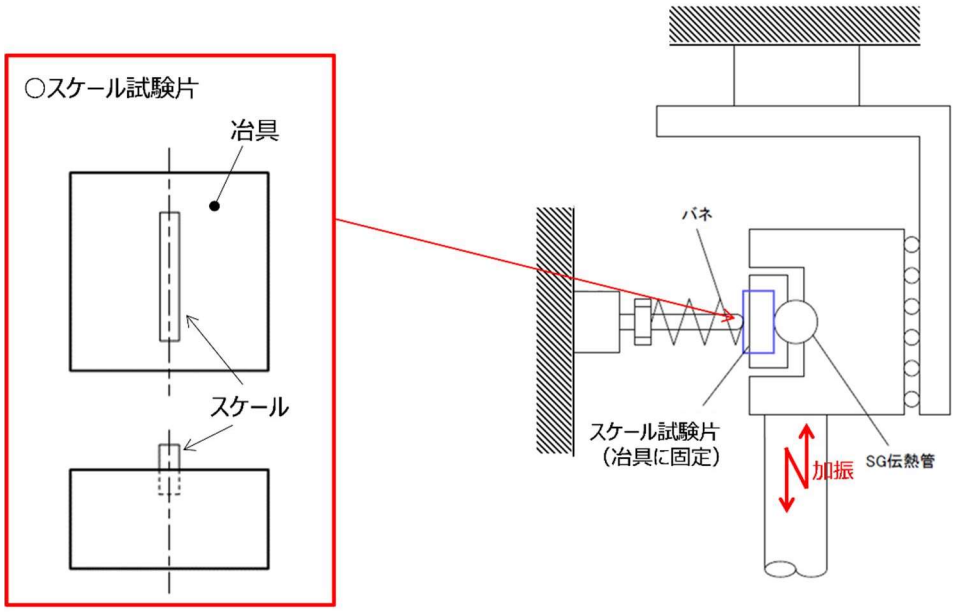


図１　加振装置概念図

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	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する。スケールおよび伝熱管の試験前後の外観の一例を図２および３に示す。

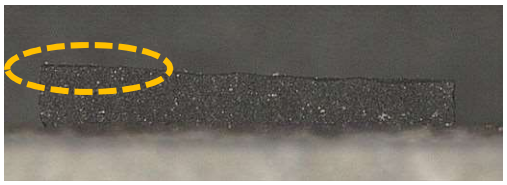
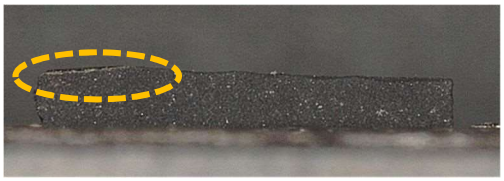
試験前	試験後
	約０．０２２mm^{3}摩滅  ：伝熱管との接触部（摩滅部）

図２　摩耗試験前後のスケール試験片外観（一例）

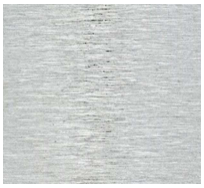
試験前	試験後
	約０．０１２mm^{3}摩耗

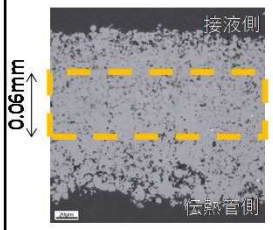
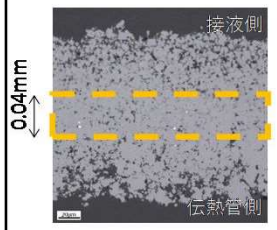
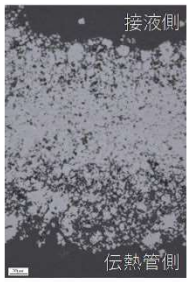
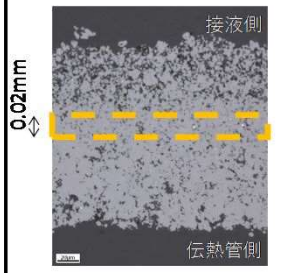
図３　摩耗試験前後の伝熱管試験片外観（一例）

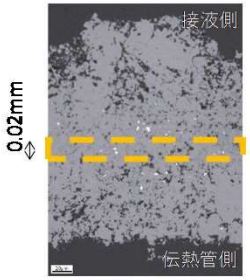
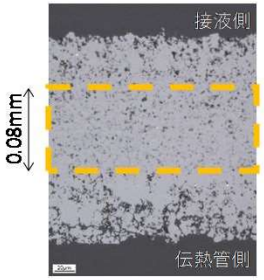
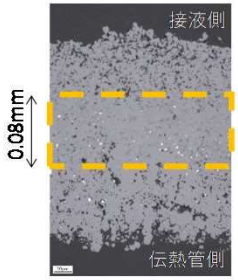
以　上

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（１／１１）

SG下部（第二管支持板以下）より回収したスケール６０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１個確認した。

＜SG下部回収スケール断面観察結果（1/6）＞

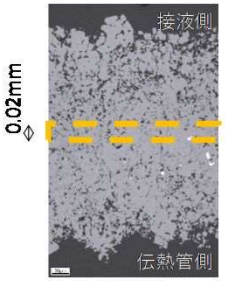
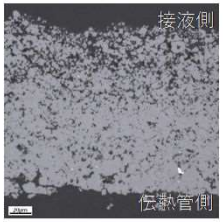
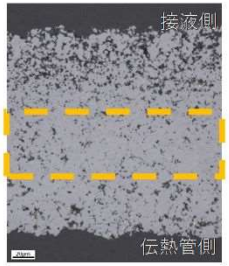
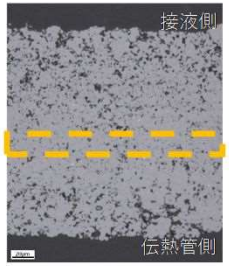
スケール回収位置	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (低温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (低温側)	C-SG 第一管支持板上 (高温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.3	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.06	0.04	0.00	0.00	0.02
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

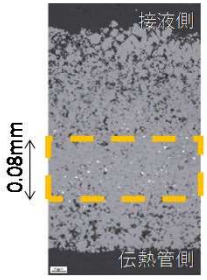
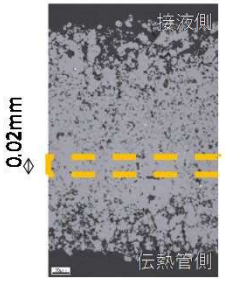
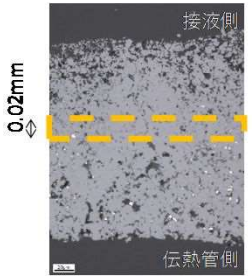
スケール回収位置	B-SG 第一管支持板上 (低温側)	C-SG 第一管支持板上 (低温側)	B-SG 管板上 (低温側)	C-SG 管板上 (高温側)	C-SG 第二管支持板上 (高温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.3	約0.2	約0.2	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.02	0.00	0.00	0.08	0.08
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	0.01	0.07	0.01	0.08	0.01

：稠密層を示す

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（２／１１）

＜ SG下部回収スケール断面観察結果（2/6）＞

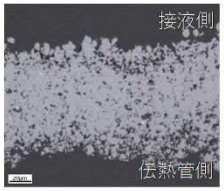
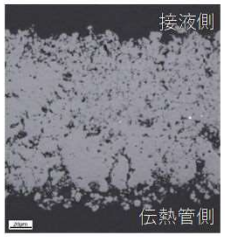
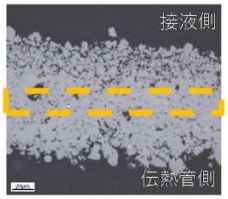
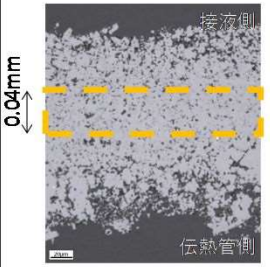
スケール回収位置	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (低温側)	A-SG 管板上 (高温側)	A-SG 管板上 (高温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.3	約0.2	約0.3	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.02	0.00	0.00	0.06	0.02
摩耗体積比 （伝熱管／スケール）	－	－	－	－	－

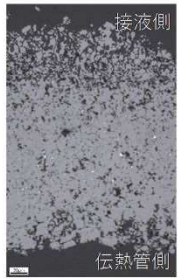
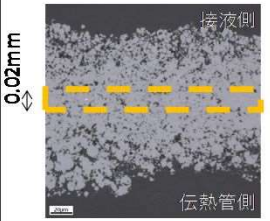
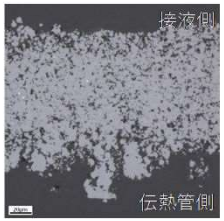
スケール回収位置	A-SG 管板上 (高温側)	A-SG 管板上 (低温側)	C-SG 第一管支持板上 (低温側)	C-SG 第一管支持板上 (高温側)	C-SG 第一管支持板上 (低温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.3	約0.3	約0.3	約0.2	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.08	0.02	0.00	0.00	0.02
摩耗体積比 （伝熱管／スケール）	－	－	－	－	－

：稠密層を示す

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（３／１１）

＜ SG下部回収スケール断面観察結果（3/6）＞

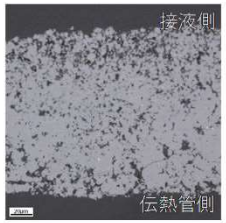
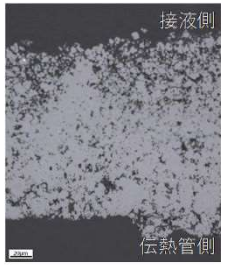
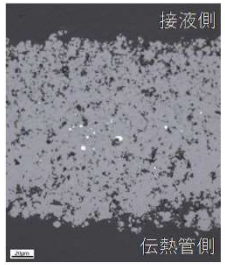
スケール回収位置	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (高温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	－	－	－	－	－

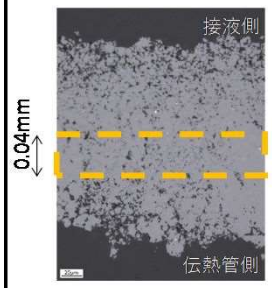
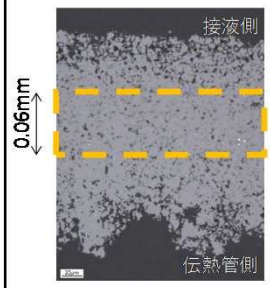
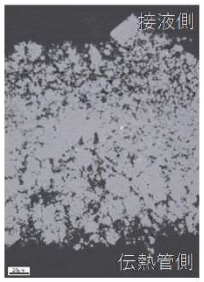
スケール回収位置	A-SG 第一管支持板上 (高温側)	A-SG 第一管支持板上 (低温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)	B-SG 第一管支持板上 (高温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.3	約0.3	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.04	0.00	0.00	0.02	0.00
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	－	－	－	－	－

：稠密層を示す

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（４／１１）

＜ SG下部回収スケール断面観察結果（4/6）＞

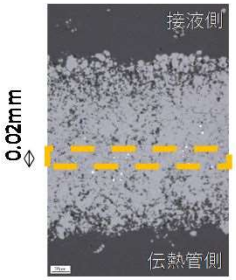
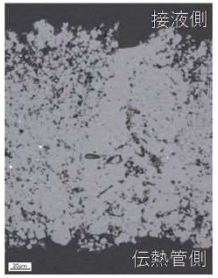
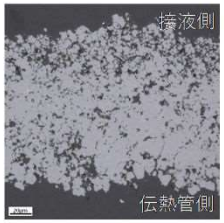
スケール回収位置	B-SG 第二管支持板上 (高温側)	B-SG 第二管支持板上 (高温側)	B-SG 第二管支持板上 (高温側)	B-SG 管板上 (高温側)	B-SG 管板上 (高温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.3	約0.3	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	－	－	－	－	－

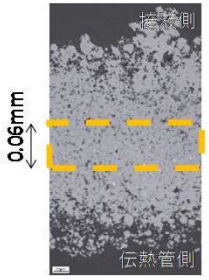
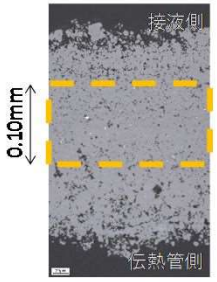
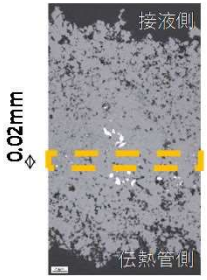
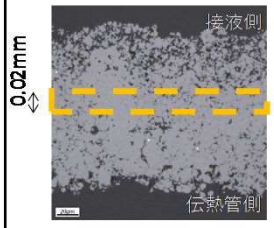
スケール回収位置	A-SG 第一管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (低温側)	B-SG 第一管支持板上 (低温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	C-SG 第一管支持板上 (低温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.00	0.04	0.06	0.00	0.00
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	－	－	－	－	－

：稠密層を示す

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（５／１１）

＜ SG下部回収スケール断面観察結果（5/6）＞

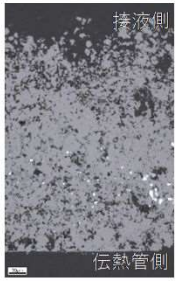
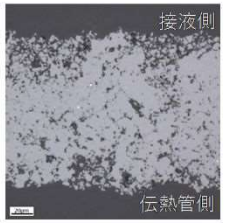
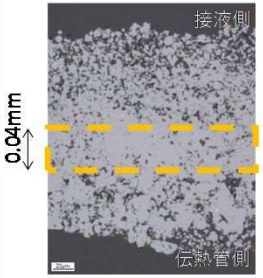
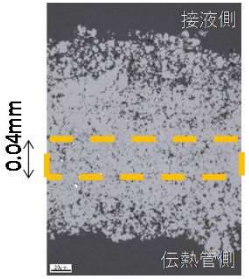
スケール回収位置	C-SG 第一管支持板上 (低温側)	C-SG 第一管支持板上 (低温側)	C-SG 第一管支持板上 (低温側)	A-SG 第二管支持板上 (低温側)	A-SG 第二管支持板上 (高温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.3	約0.3	約0.2	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
摩耗体積比 （伝熱管／スケール）	－	－	－	－	－

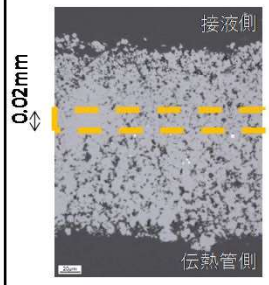
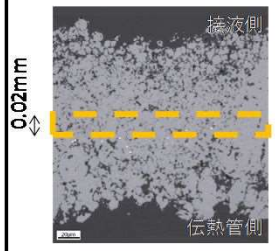
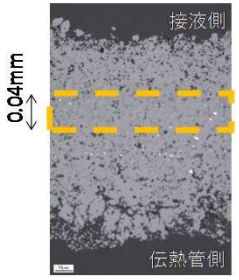
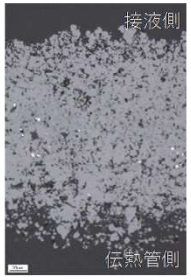
スケール回収位置	A-SG 第二管支持板上 (高温側)	A-SG 第二管支持板上 (高温側)	B-SG 第二管支持板上 (高温側)	A-SG 管板上 (低温側)	A-SG 管板上 (低温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.3	約0.3	約0.2	約0.2	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.06	0.10	0.02	0.06	0.02
摩耗体積比 （伝熱管／スケール）	－	－	－	－	－

：稠密層を示す

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（６／１１）

＜ SG下部回収スケール断面観察結果（6/6）＞

スケール回収位置	B-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 (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0.3	約0.3	約0.2	約0.3	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04
摩耗体積比 （伝熱管／スケール）	－	－	－	－	－

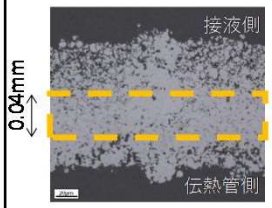
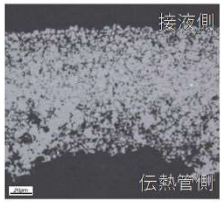
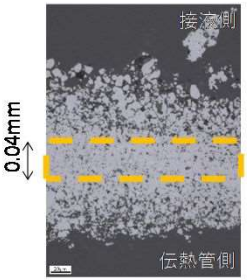
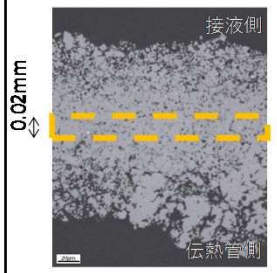
スケール回収位置	C-SG 管板上 (高温側)	C-SG 第二管支持板上 (高温側)	C-SG 第二管支持板上 (低温側)	C-SG 第二管支持板上 (低温側)	C-SG 第二管支持板上 (低温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.3	約0.2	約0.3	約0.3	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.02	0.02	0.04	0.00	0.00
摩耗体積比 （伝熱管／スケール）	－	－	－	－	－

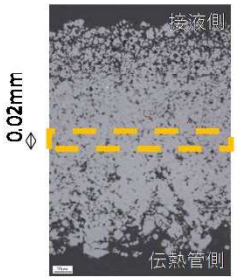
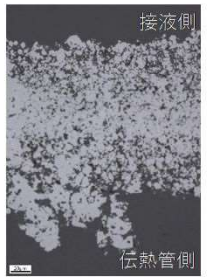
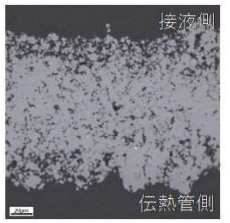
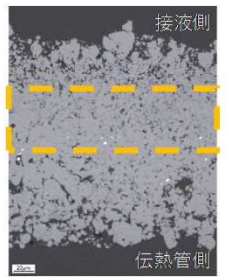
：稠密層を示す

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（７／１１）

SG上部（第四管支持板以上）より回収したスケール３６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以上のスケールは確認されなかった。

＜ SG上部回収スケール断面観察結果（1/４）＞

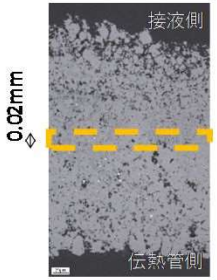
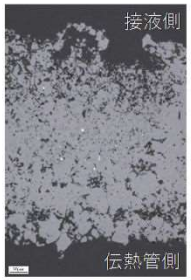
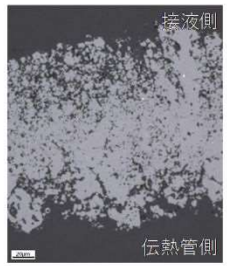
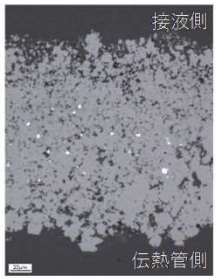
スケール回収位置	A-SG 第七管支持板上 (高温側)	A-SG 第七管支持板上 (高温側)	A-SG 第七管支持板上 (高温側)	A-SG 第七管支持板上 (高温側)	B-SG 第七管支持板上 (高温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.2	約0.2	約0.2	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.04	0.00	0.04	0.02	0.02
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	－	－	－	－	－

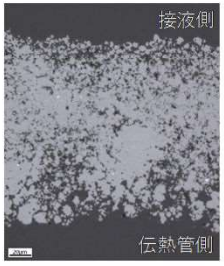
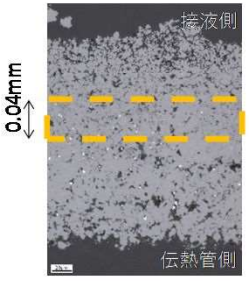
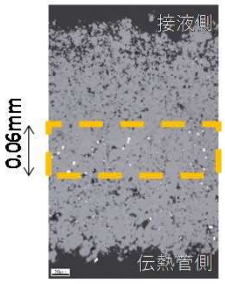
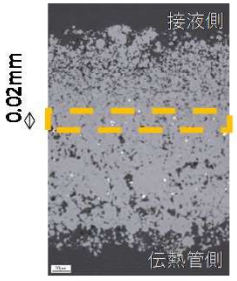
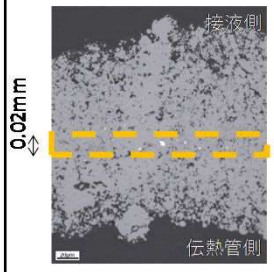
スケール回収位置	B-SG 第七管支持板上 (高温側)	B-SG 第七管支持板上 (高温側)	B-SG 第七管支持板上 (高温側)	C-SG 第七管支持板上 (高温側)	C-SG 第七管支持板上 (高温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.3	約0.3	約0.2	約0.2	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.00	0.02	0.00	0.00	0.06
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	－	－	－	－	－

：稠密層を示す

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（８／１１）

＜ SG上部回収スケール断面観察結果（2/4） ＞

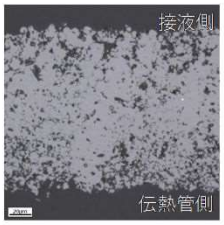
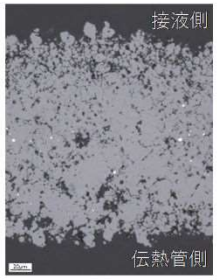
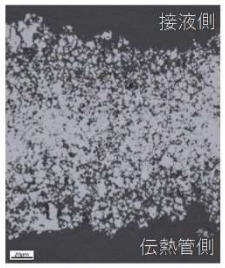
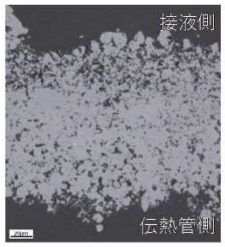
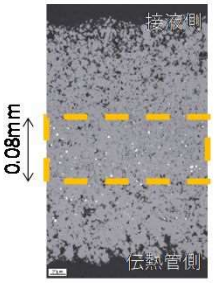
スケール回収位置	C-SG 第七管支持板上 (低温側)	C-SG 第七管支持板上 (低温側)	C-SG 第七管支持板上 (低温側)	A-SG 第五管支持板上 (高温側)	A-SG 第五管支持板上 (高温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.3	約0.4	約0.3	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	－	－	－	－	－

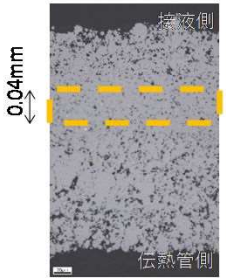
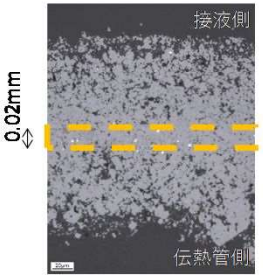
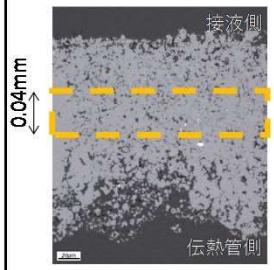
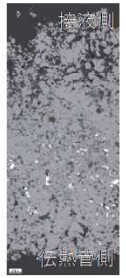
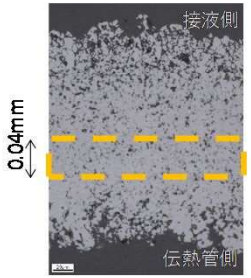
スケール回収位置	A-SG 第五管支持板上 (高温側)	C-SG 第五管支持板上 (低温側)	C-SG 第五管支持板上 (低温側)	C-SG 第五管支持板上 (低温側)	A-SG 第五管支持板上 (高温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.3	約0.3	約0.3	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.00	0.04	0.06	0.02	0.02
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	－	－	－	－	－

：稠密層を示す

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（９／１１）

＜ SG上部回収スケール断面観察結果（3/4） ＞

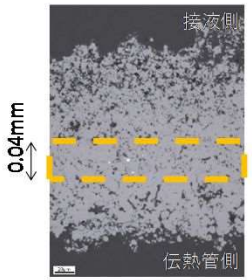
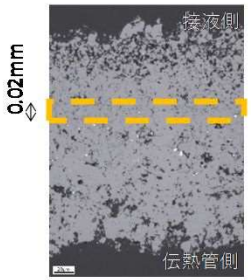
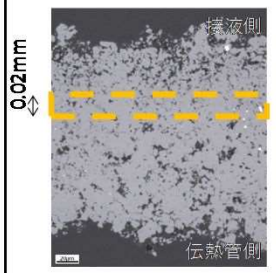
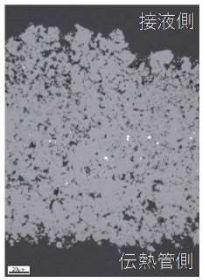
スケール回収位置	A-SG 第五管支持板上 (高温側)	C-SG 第四管支持板上 (低温側)	C-SG 第四管支持板上 (低温側)	C-SG 第四管支持板上 (低温側)	C-SG 第四管支持板上 (低温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.3	約0.3	約0.2	約0.3
稠密層厚さ(mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
摩耗体積比 （伝熱管／スケール）	－	－	－	－	－

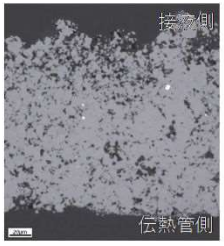
スケール回収位置	C-SG 第五管支持板上 (低温側)	A-SG 第四管支持板上 (高温側)	A-SG 第四管支持板上 (高温側)	A-SG 第四管支持板上 (高温側)	A-SG 第四管支持板上 (高温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.3	約0.2	約0.2	約0.5	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.04	0.02	0.04	0.00	0.04
摩耗体積比 （伝熱管／スケール）	－	－	－	－	－

：稠密層を示す

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（１０／１１）

＜ SG上部回収スケール断面観察結果（4/4） ＞

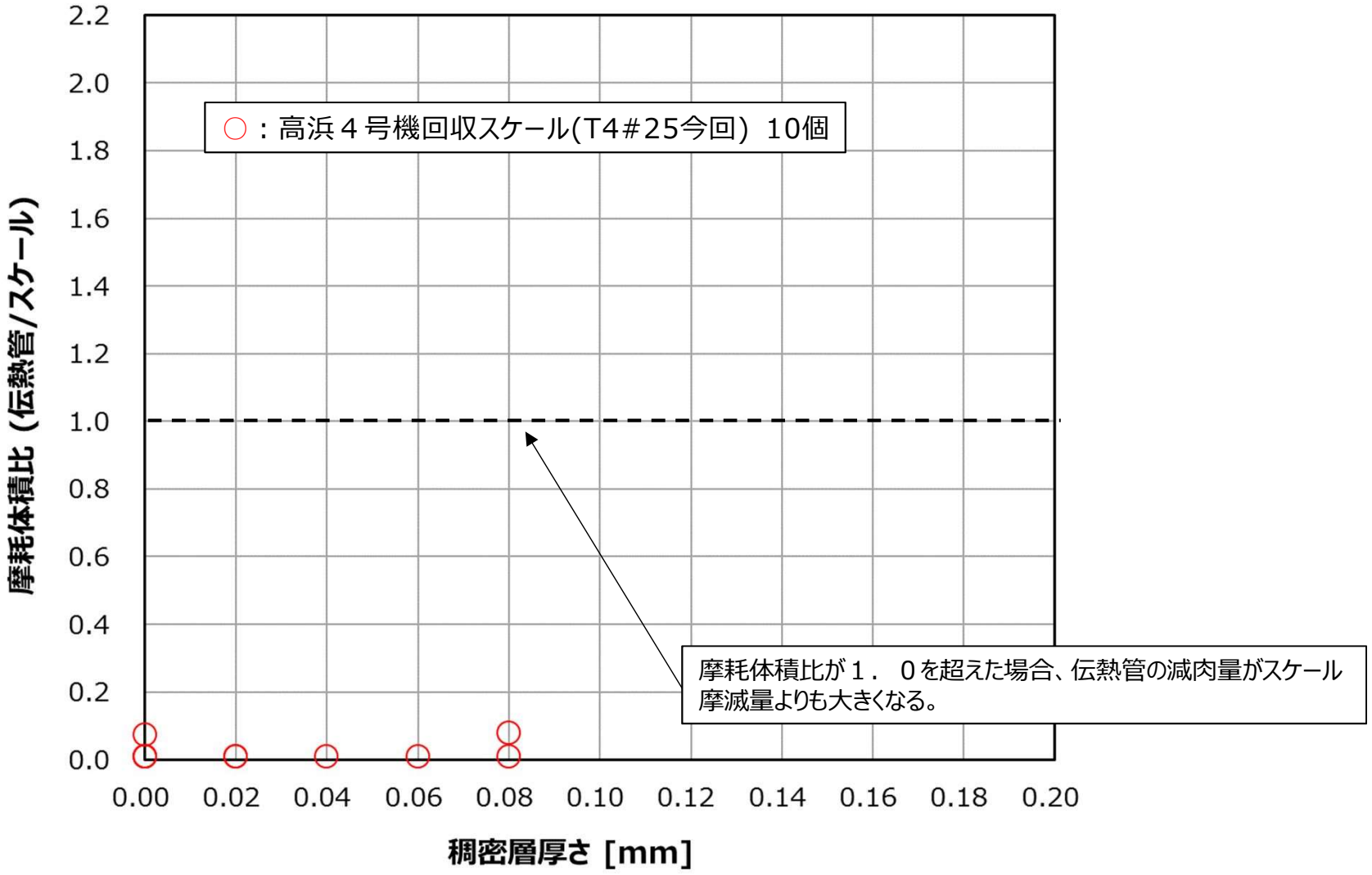
スケール回収位置	C-SG 第六管支持板上 (高温側)	C-SG 第六管支持板上 (高温側)	C-SG 第六管支持板上 (高温側)	C-SG 第六管支持板上 (高温側)	C-SG 第六管支持板上 (高温側)
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2	約0.3	約0.3	約0.2	約0.2
稠密層厚さ(mm)	0.04	0.02	0.00	0.02	0.00
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	－	－	－	－	－

スケール回収位置	C-SG 第六管支持板上 (高温側)				
断面ミクロ画像					
スケール厚さ(mm)	約0.2				
稠密層厚さ(mm)	0.00				
摩耗体積比 (伝熱管／スケール)	－				

：稠密層を示す

回収したスケールの断面観察結果および摩耗試験結果（１１／１１）

ＳＧ下部から回収したスケールのうち、比較的大きなスケール１０個を対象に摩耗試験を行い、伝熱管とスケールの摩耗体積比※を調査した結果、伝熱管の減肉量がスケール摩滅量以上のスケールは確認されなかった。



※ 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滅量の体積比

前回の定期検査における薬品洗浄の実施結果（１／３）

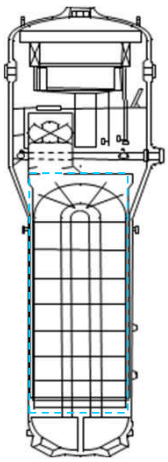
＜前回の定期検査における薬品洗浄の実施方法＞

〇洗浄条件については、薬品濃度は３％、洗浄温度は９０℃とした。

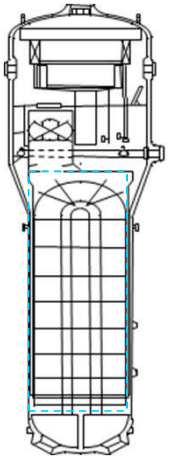
〇洗浄範囲については管群全体を対象とし、２回洗浄とした。

〇その他の洗浄に係る諸条件は、これまでの国内施工実績と同様とした。

薬品洗浄の流れ



STEP１－①　鉄洗浄
濃度：３％･90℃x 1回
範囲：伝熱管全域

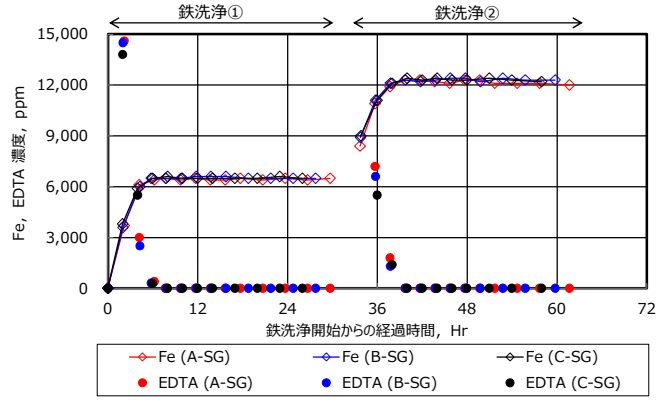
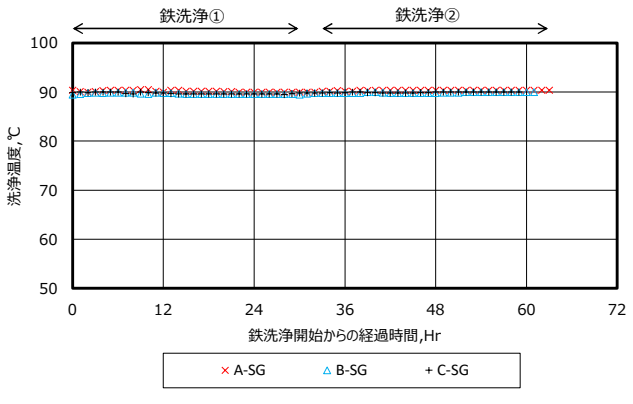


STEP１－①　鉄洗浄
濃度：３％･90℃x 1回
範囲：伝熱管全域

＜薬品洗浄の実施結果＞

〇以下の水質挙動から、鉄洗浄結果は良好であり、鉄溶解効果は十分得られていると考えられる。

〇洗浄中のSG器内水の鉄濃度と洗浄水位から算出した鉄除去量は、約1,320kg（鉄洗浄①で約640kg、鉄洗浄②で約680kg）であることを確認した。

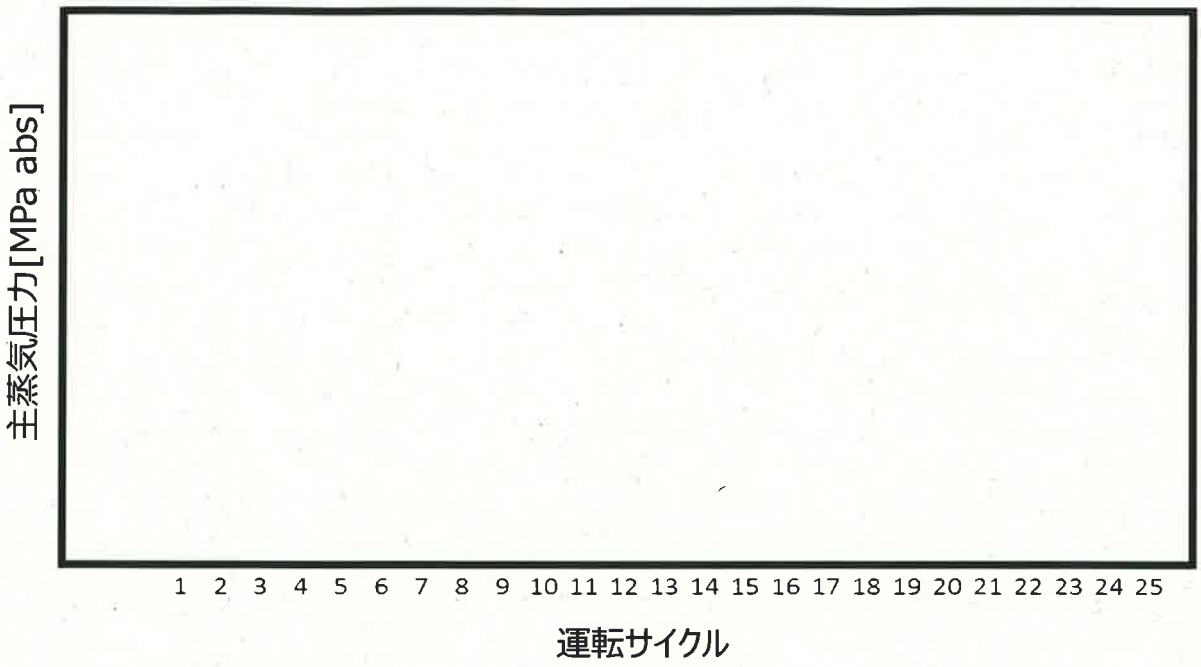
溶解鉄濃度の推移	洗浄温度
鉄洗浄①および鉄洗浄②ともに洗浄開始後6～8時間で溶解鉄濃度が飽和しており、また、EDTA※濃度が１００ｐｐｍ未満となったことから、EDTAがほぼ全量使用され、鉄の溶解反応は完了した。	洗浄温度が計画とおり，約９０℃に維持されていることを確認した。
	

※：エチレンジアミン四酢酸

前回の定期検査における薬品洗浄の実施結果（２／３）

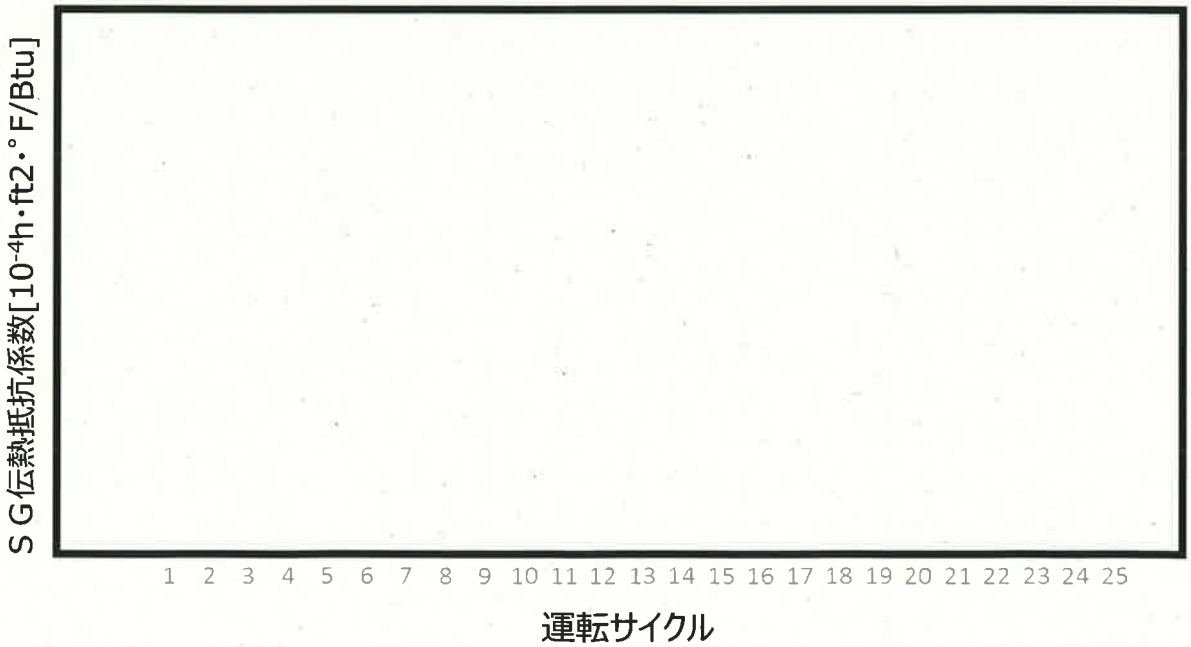
＜主蒸気圧力の向上＞

○前回定期検査後の運転実績を確認した結果、主蒸気圧力が向上したことを確認した。
薬品洗浄の効果により伝熱管に付着したスケールが減少し、熱伝達率が改善したものと考えられる。



＜蒸気発生器伝熱抵抗係数の低下＞

○蒸気発生器伝熱抵抗係数について、第２５運転サイクル初期の評価を実施した。
評価の結果、従来はサイクルを重ねる度に伝熱管表面のスケールが成長し、蒸気発生器伝熱抵抗係数は徐々に上昇する傾向であったが、今サイクルは、前サイクルに比べ低下を確認した。



□：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

前回の定期検査における薬品洗浄の実施結果（３／３）

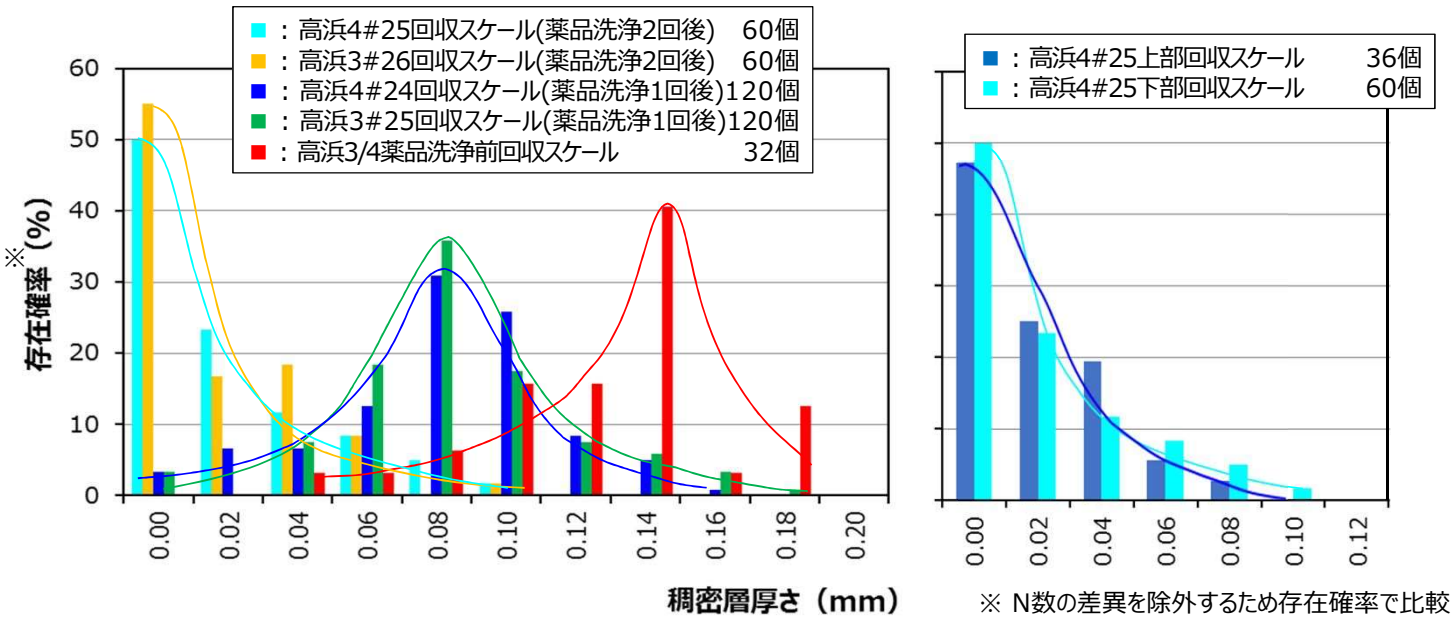
＜薬品洗浄効果（スケールの脆弱化傾向）＞

○ＳＧ器内から回収したスケールの断面観察結果について、薬品洗浄の実施前後を比較した。

評価の結果、薬品洗浄の実施に伴い、稠密層が薄くなる傾向を確認し、伝熱管を損傷させる可能性のある稠密層厚さ０．１mm以上のスケールの割合も大幅に低下した。

また、ＳＧ上部から回収したスケールについても下部から回収したスケール同様に稠密層が薄い傾向となっていることを確認した。

スケール稠密層厚さのヒストグラム（左：薬品洗浄前後の比較）（右：回収位置による比較）

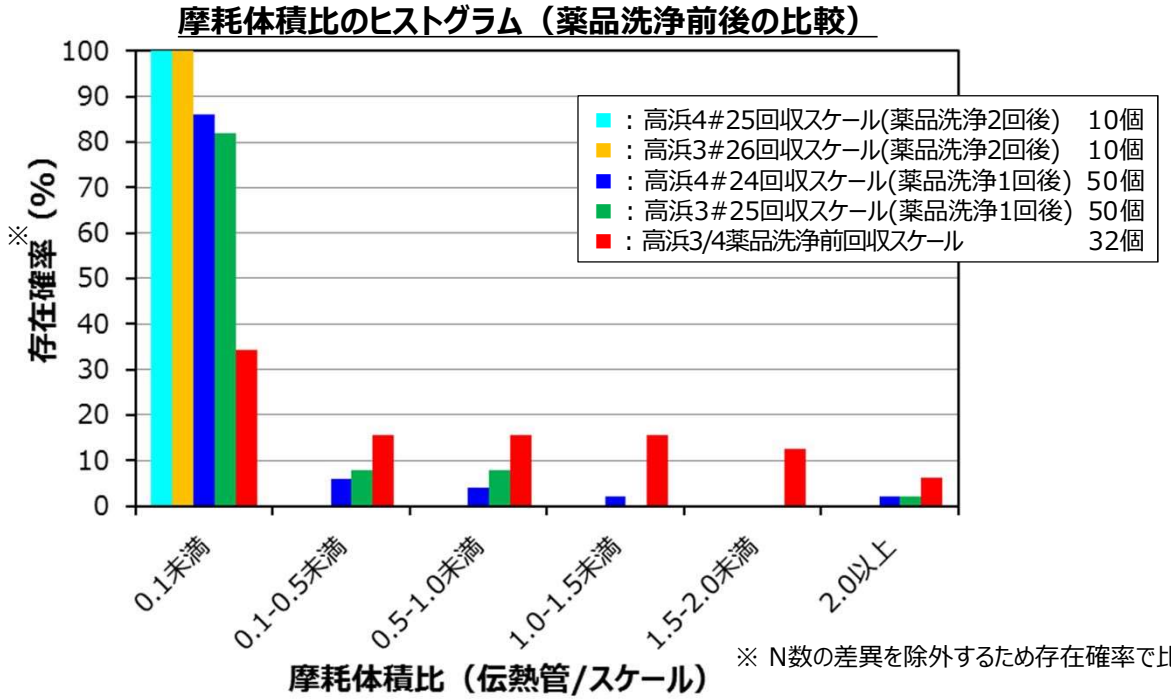


※ N数の差異を除外するため存在確率で比較

○ＳＧ器内から回収したスケールの摩耗試験について、薬品洗浄の実施前後を比較した。

評価の結果、薬品洗浄の実施に伴い、摩耗体積比が小さくなる傾向を確認し、伝熱管を損傷する可能性のあるスケールの割合が低下していることを確認した。

摩耗体積比のヒストグラム（薬品洗浄前後の比較）



※ N数の差異を除外するため存在確率で比較

管支持板との接触による摩耗減肉の評価（１／３）

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 2～5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。

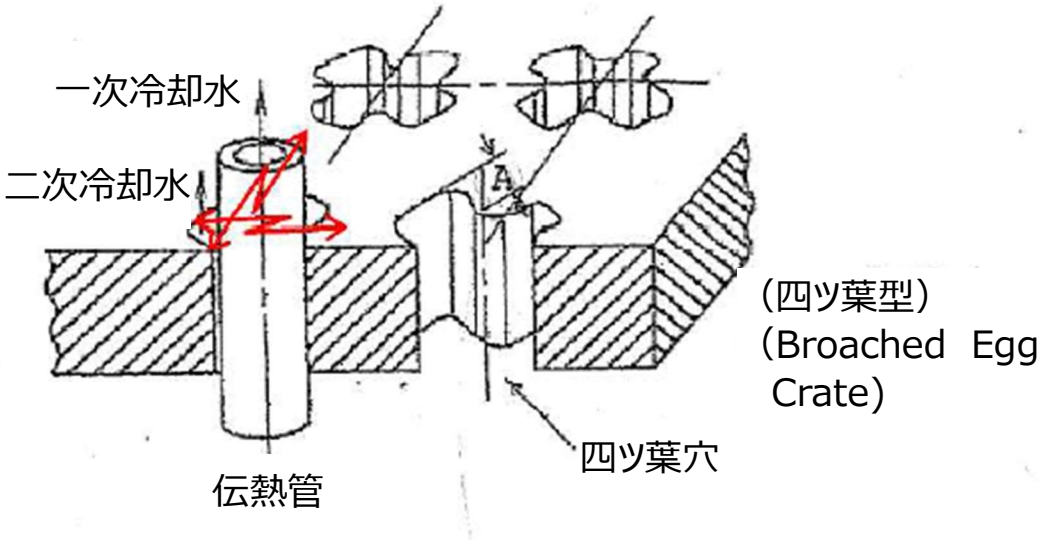


図１　管支持板四ツ葉穴（BEC 穴）による伝熱管の支持状況

管支持板との接触による摩耗減肉の評価（2／3）

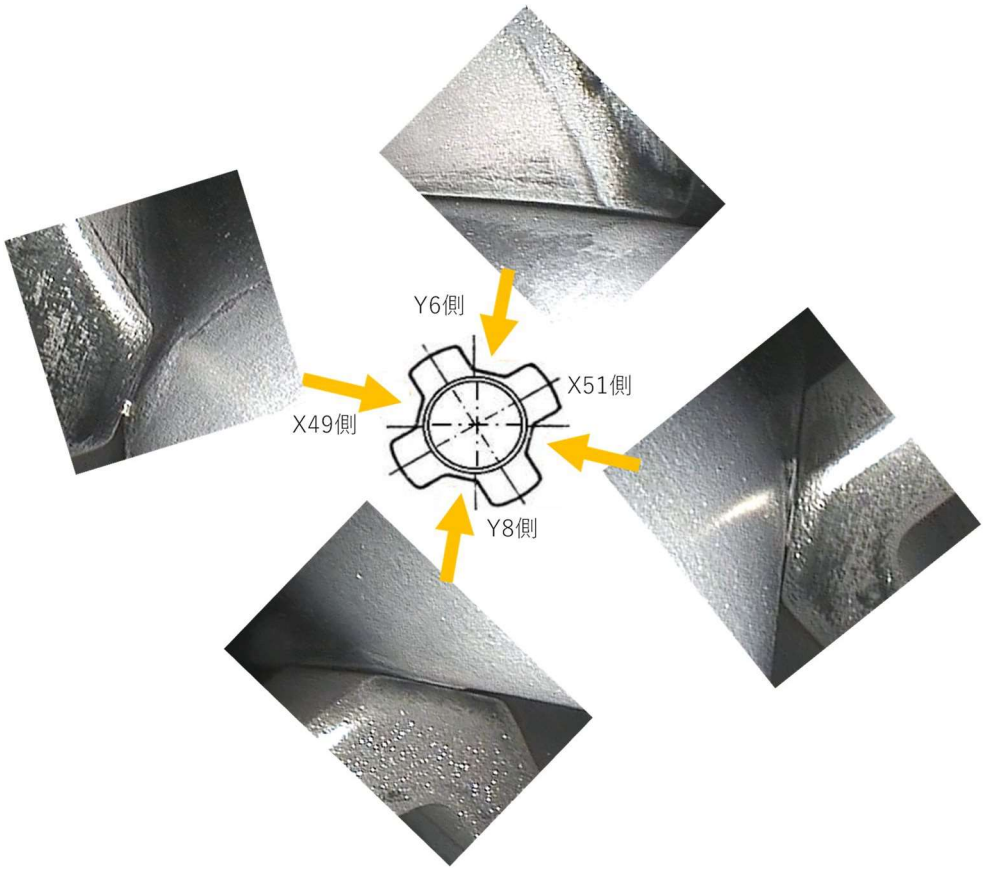


図２ 減肉とランド部の位置関係(A-SG X５０, Y7)

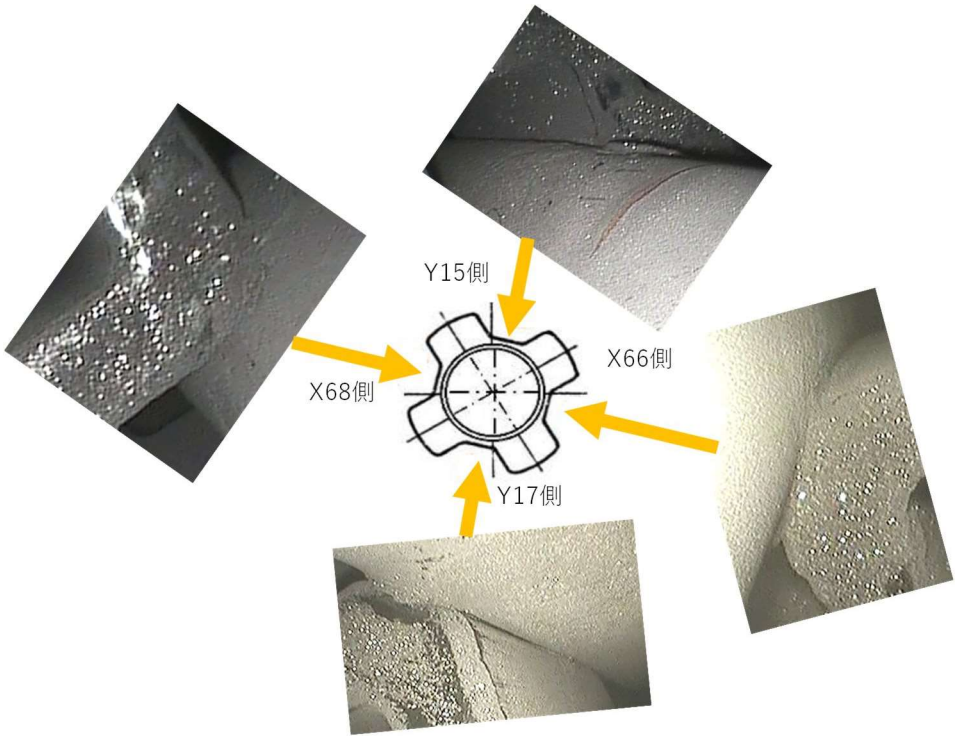


図３ 減肉とランド部の位置関係(A-SG X６７, Y１６)

管支持板との接触による摩耗減肉の評価（３／３）

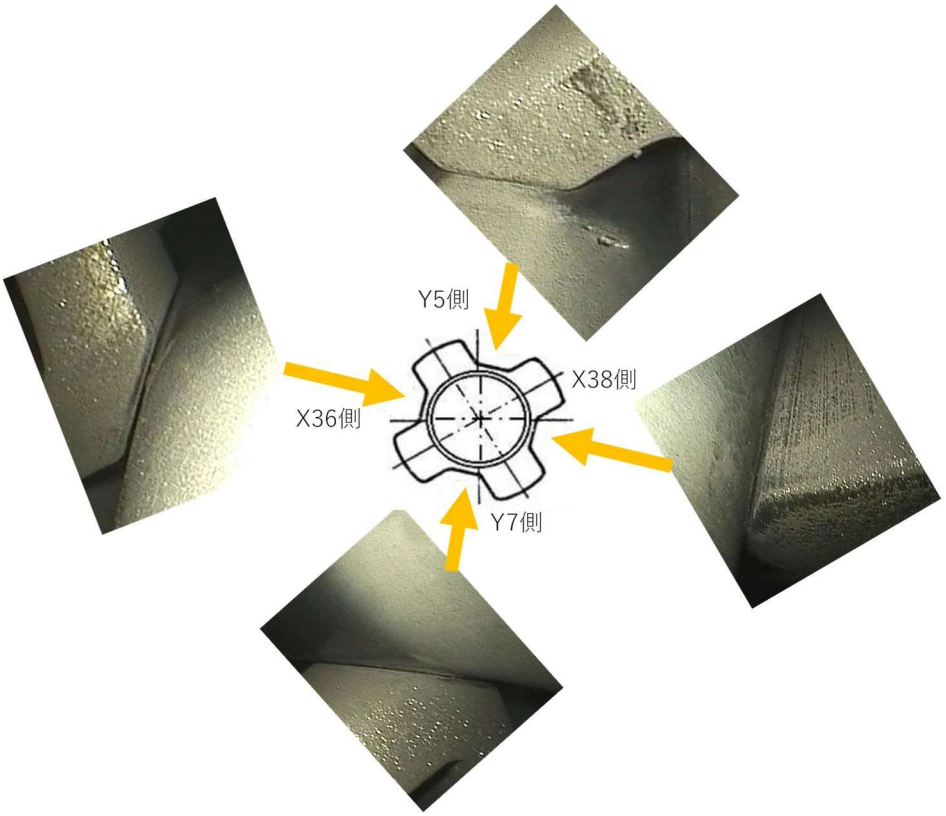


図４ 減肉とランド部の位置関係(C-SG X３７, Y６)

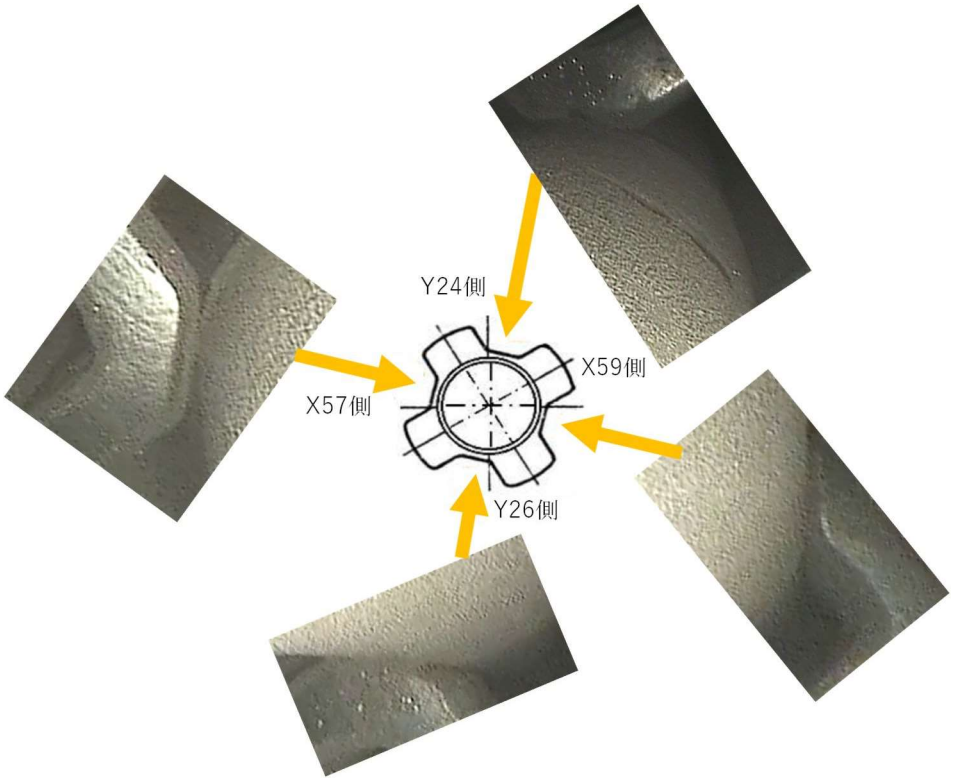


図５ 減肉とランド部の位置関係(C-SG X５８, Y２５)

異物混入対策について（１／２）

高浜発電所４号機前回（第２４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２４回定期検査以降 および 高浜発電所４号機 第２３回定期検査以降	・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。	・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。	・保温材の切れ端等の清掃・片づけは一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ケッ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。 ・ＳＧ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２２回定期検査	・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。	・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。	・保温材の切れ端等の清掃・片づけは一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２３回定期検査	・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。	・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２３回定期検査以前 高浜発電所４号機 第２１回定期検査以前	・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）。	・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 ・機器開口部周辺の管理徹底する。 ・異物確認者の作業服や作業靴などの清掃等。

今回、ＳＧ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

粒界腐食割れに関する検討結果

高浜発電所４号機 SG の至近サイクルについて、通常運転中の SG 器内水質（バルク水の水質）を用いたクレビス部 pH 計算の結果、クレビス部での pH は平均 6.2 と、高温での中性点（pH：5.5）近傍の値であった。

ここでは、伝熱管と異物との隙間内での濃縮倍率として、10^3 と安全側に仮定した。

また、高浜発電所 4 号機では２次系水中にアンモニアとヒドラジンを注入しており、運転中良好な還元雰囲気を維持している。

インコネル TT600 の粒界腐食割れ（IGA）の感受性領域を下図に示すが、IGA が発生する環境になく、IGA 発生の可能性はないものと考えられる。

＜クレビス部 pH 値計算結果＞

	第２５サイクル
$pH_{300℃}$	平均 6.2

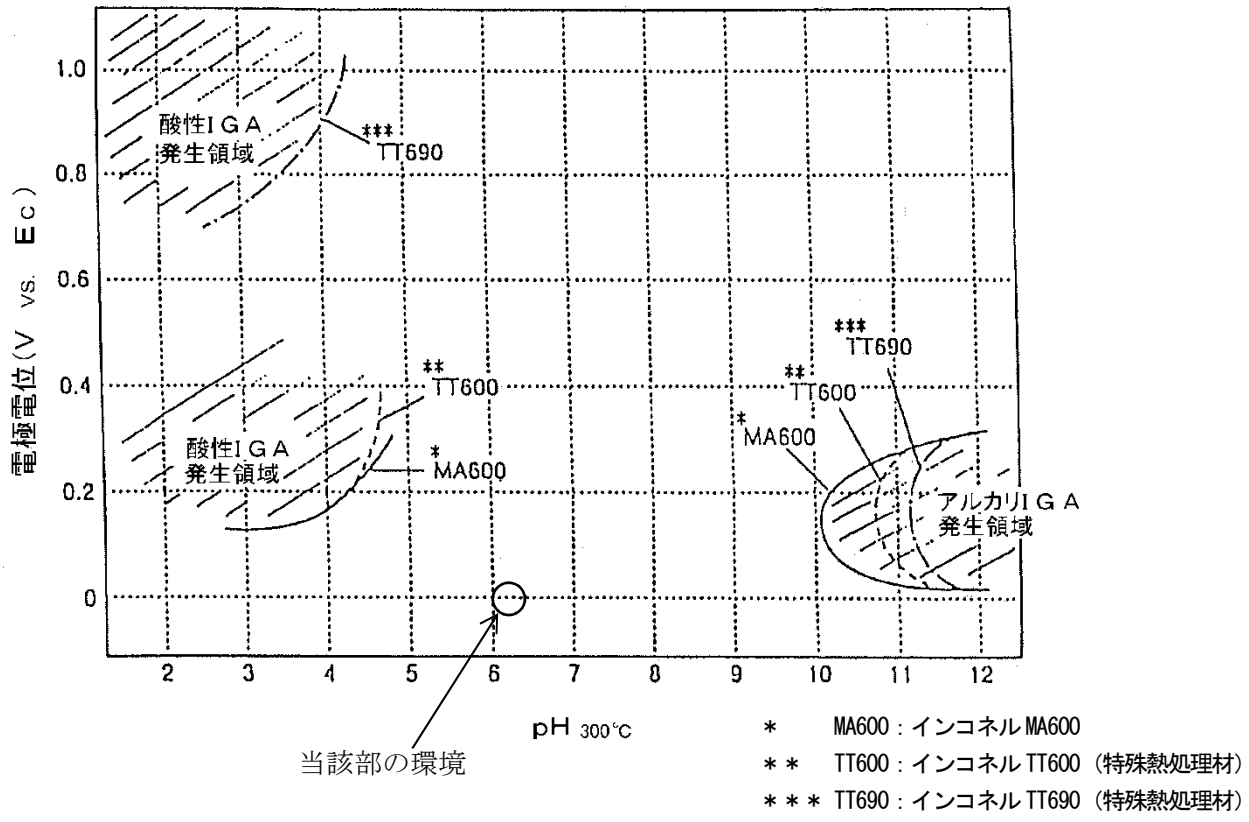
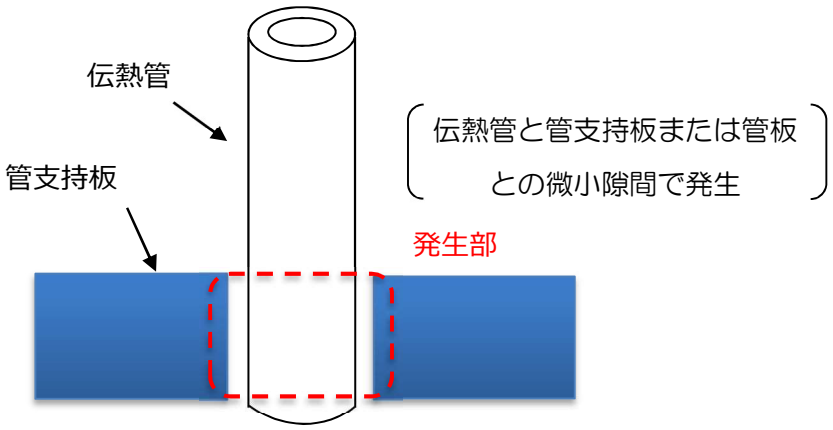


図　粒界腐食割れの発生領域

［出典：(財)発電設備技術検査協会「第７回　報告と講演の会　報告成果スライド集(平成６年１０月２８日)」］

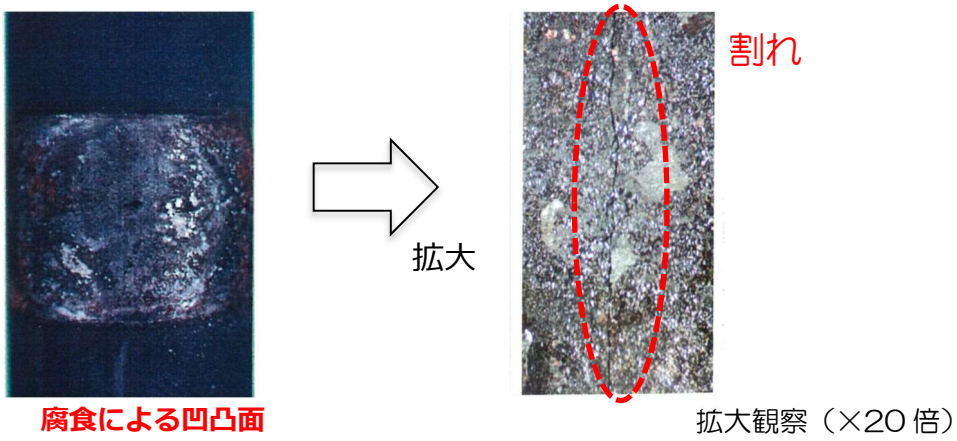
粒界腐食割れによるきずの形状

プラントメーカの材料研究部門の有識者を含め検討した結果、今回確認したきずが摩耗減肉であると判断している。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉と考えられ、粒界腐食割れの可能性はないと考えられる。なお、粒界腐食割れによるきずの形状例を以下に示す。



（試験体概略図）

図１　発生部位



（昭和６３年度　共同研究報告書「蒸気発生器改良型伝熱管長期腐食信頼性に関する研究」より抜粋

図２　表面形状

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

ピッティング発生に関する検討結果

高浜発電所４号機の通常運転時の SG2 次側器内水塩素濃度の管理値は 10ppb である。参考として、至近サイクルの塩素濃度は下表に示すが、実際に管理値を十分下回っていることを確認している。

高浜発電所４号機 SG 器内水塩素イオン濃度至近サイクル平均値

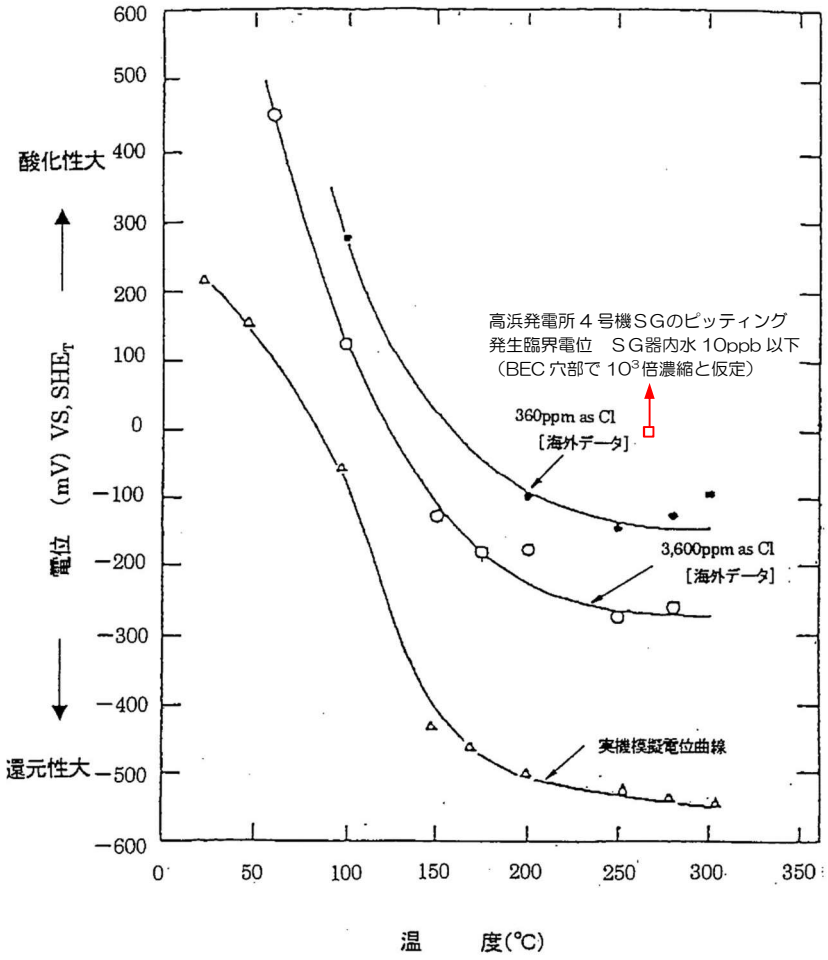
	第２５サイクル
塩素イオン（ppb）	0.4

ここで、今回信号が検出された管支持板 BEC 穴部での塩素イオン濃縮倍率は最大 10^3 程度であり、安全側に最大濃縮倍率を仮定した場合、BEC 穴部の塩素イオン濃度は管理値最大でも 10ppm 以下（至近サイクルは 0.4ppm 程度）である。よって、ピッティング*1発生限界電位は下図の 360ppm のデータの電位（－100mV 以下（at 270℃））よりも十分高いと考えられる。

一方、高浜発電所４号機では起動時の高ヒドラジン運転等により、還元性を良好に維持しており、SG 器内のスラッジ成分のうち、ほとんどがマグネタイトであることから、実機の電位（at 270℃）は約－540mV と評価している。

したがって、高浜発電所４号機では実機電位がピッティング発生電位よりも低く、ピッティングの発生環境ではないと考えられる。

*1　塩素イオン等に起因する金属表面の被膜破壊によって起きる局所的な腐食。



（説明）

・ピッティングは、ピッティング発生臨界電位により実機電位が超過した場合に発生。

・インコネル TT600 のピッティングに対する耐食性は、インコネル MA600 と同等。

出　典
Proc.of　2nd Inter. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, P.456(1985)

図１　インコネル MA600 のピッティング発生電位

ピッティングによるきずの形状

プラントメーカの材料研究部門の有識者を含め検討した結果、今回確認したきずが摩耗減肉であると判断している。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉と考えられ、ピッティングの可能性はないと考えられる。なお、ピッティングによるきずの形状例を以下に示す。

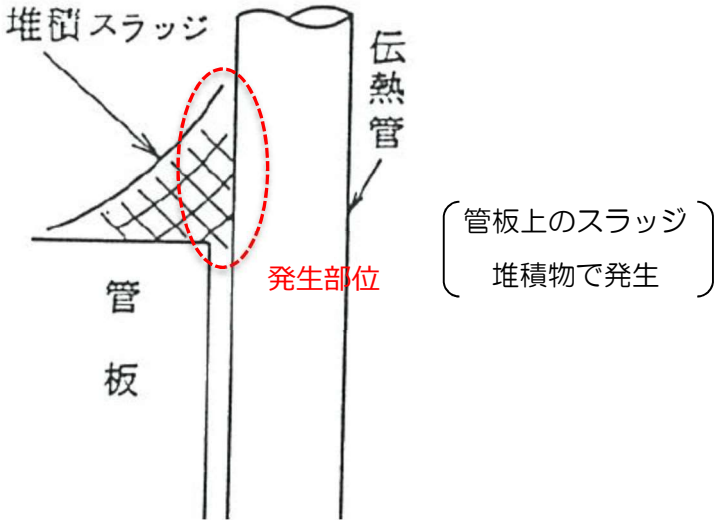


図２　発生部位

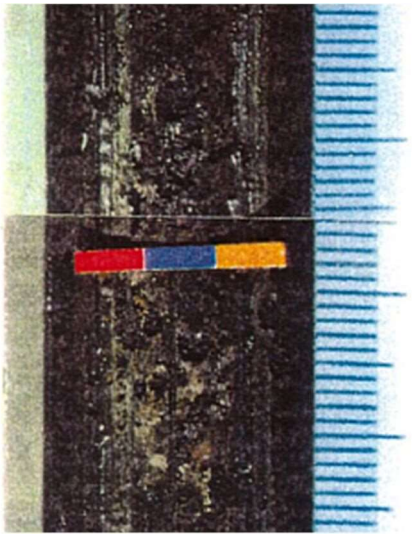


図３　表面形状

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

リン酸減肉に関する検討結果

（リン酸減肉によるきずの形状）

プラントメーカの材料研究部門の有識者を含め検討した結果、今回確認したきずが摩耗減肉であると判断している。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響による減肉と考えられ、リン酸減肉の可能性はないと考える。なお、リン酸減肉によるきずの形状例を以下に示す。

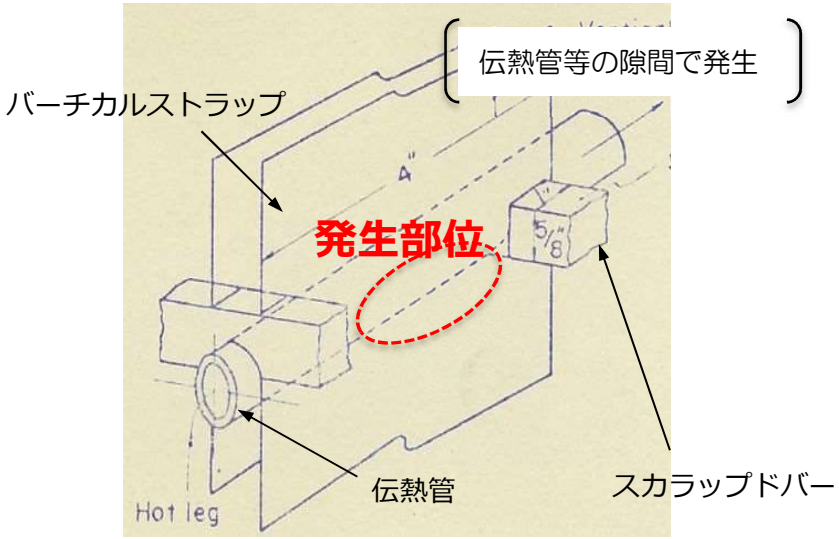


図１　発生部位

拡大観察（×３倍）

図２　表面形状

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

流体振動による疲労評価

第三および第六管支持板部において、流体力によって伝熱管に発生する応力を算出し、疲労損傷が生じないことを確認した。

伝熱管に作用する流体力 F は、

$$F = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S =$$ [redacted]

ここで、C_D：抗力係数＝[redacted]

ρ ：流体の密度＝[redacted] kg/mm³

V：流速＝[redacted] mm/sec

S：流れを受ける面積＝[redacted]

＝[redacted]

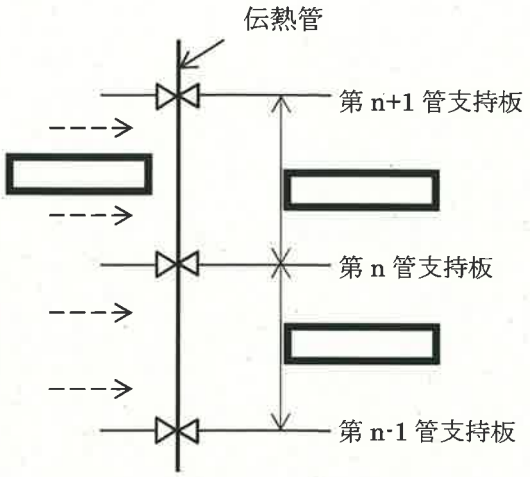


図１　流体力を受ける伝熱管(n=3,6)

流体力 F による最大曲げモーメント M は、

$M = (F/2l) \cdot l^2/8 =$ [redacted] N・mm

ここで、l：管支持板間の長さ＝[redacted] mm

伝熱管の断面係数 Z は

$$Z = \frac{\pi(d_2^4 - d_1^4)}{32d_2} = 414.7\text{mm}^3$$

ここで、d_2：伝熱管外径＝22.23mm

d_1：伝熱管内径＝19.69mm

よって、伝熱管に発生する最大応力σは、

$\sigma = M/Z = 0.053\text{N/mm}^2$

以上より、流体力によって伝熱管に発生する応力 0.053N/mm² は、疲労限 94N/mm² に比べて非常に小さく、疲労損傷は発生しないと考えられる。

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

エロージョンに関する検討結果（１／２）

1. 目的

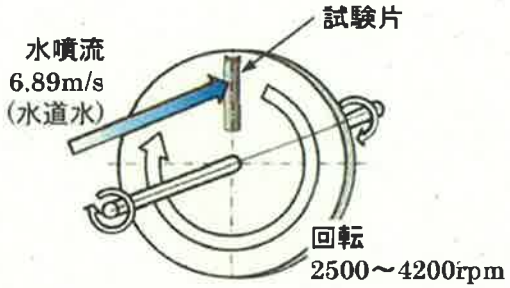
SG 伝熱管の管支持板部に周辺流体の衝突によるエロージョン*1 が発生しないことを評価する。

＊1：管内外を流れる水により配管表面が摩耗する現象

2. 方法

ウォータージェットテスト（室温）によりエロージョン発生限界流速を求め、実機流速と比較する。

エロージョンの評価においては管内外に差異はないため、管外面に正面から噴流を衝突させた試験結果を基に評価する。



3. 評価結果

インコネル TT600 製伝熱管のエロージョンが発生する限界流速は約 70m/s 以上であり、当該部の実機流速は［　　］以下であることからエロージョンの発生可能性はない。

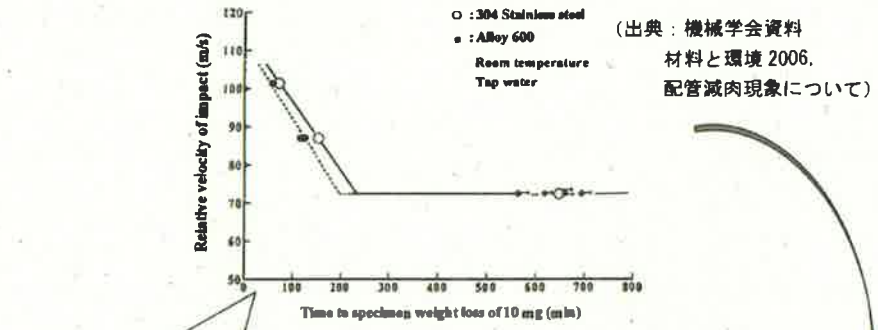


図１　ウォータージェットテストによる限界流速

相対速度＝$\sqrt{（水噴流速）^2＋（試験片の周速）^2}$

試験例の場合　水噴流速＝6.89m/s

試験片の周速＝72.22m/s

周速＝試験片の円周長さ×回転数

＝(2π×0.23)×(3000/60)

試験片までの半径（m）：0.23

回転数（rpm）：3000

図２　ウォータージェットテスト後の外観
（７００分間水噴流後の状況）

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。

エロージョンに関する検討結果（２／２）

（エロージョンの限界流速の温度影響）

エロージョンが発生する限界流速の知見として、常温での試験結果を用いているが、限界流速の温度影響について、以下に説明する。

- エロージョンのメカニズム
  - ✓ エロージョンは、流体が金属表面に衝突することで生じる機械的な衝撃力で材料が損傷する現象である。
  - ✓ 温度は流体因子のうち密度、材料因子のうち硬さに影響する。

＜流体因子（密度）＞

- ✓ ＳＧ２次側温度２６９℃での水の密度は７６９ｋｇ／m^3であり、常温（２０℃）に比べ約２割小さい。
- ✓ 密度が低下するとエロージョンが生じにくくなる。（限界流速は上昇する。）

＜材料因子（硬さ）＞

- ✓ 実機伝熱管温度約３００℃での硬さは約１．５９ＧＰａであり、常温に比べ約１割小さい※1。
- ✓ 硬さが低下するとエロージョンが生じやすくなる。（硬さが約１割低下すると、限界流速は約２m／ｓ低下する。）（図１）※2

⇒保守的に材料因子（硬さ）の温度影響のみを考慮しても、限界流速は約６８m／ｓであり、ＳＧ２次側器内流速約［　　］に対して十分余裕がある。（図２）

※１：材料メーカカタログ（インコネルＴＴ600）の単位を換算
※２：材料と環境，57，146-152(2008)，磯本ら

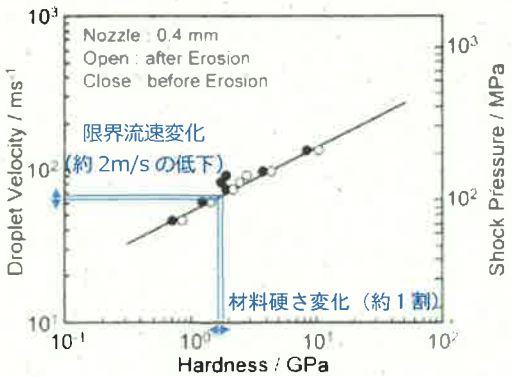


図１　限界流速と硬さの関係

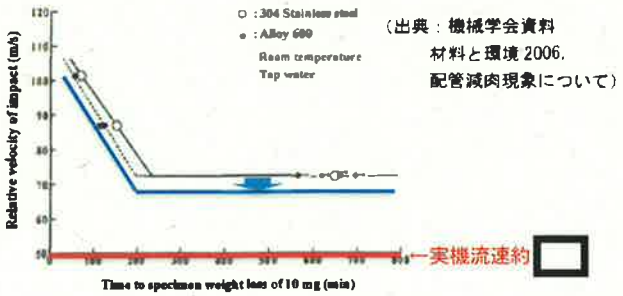


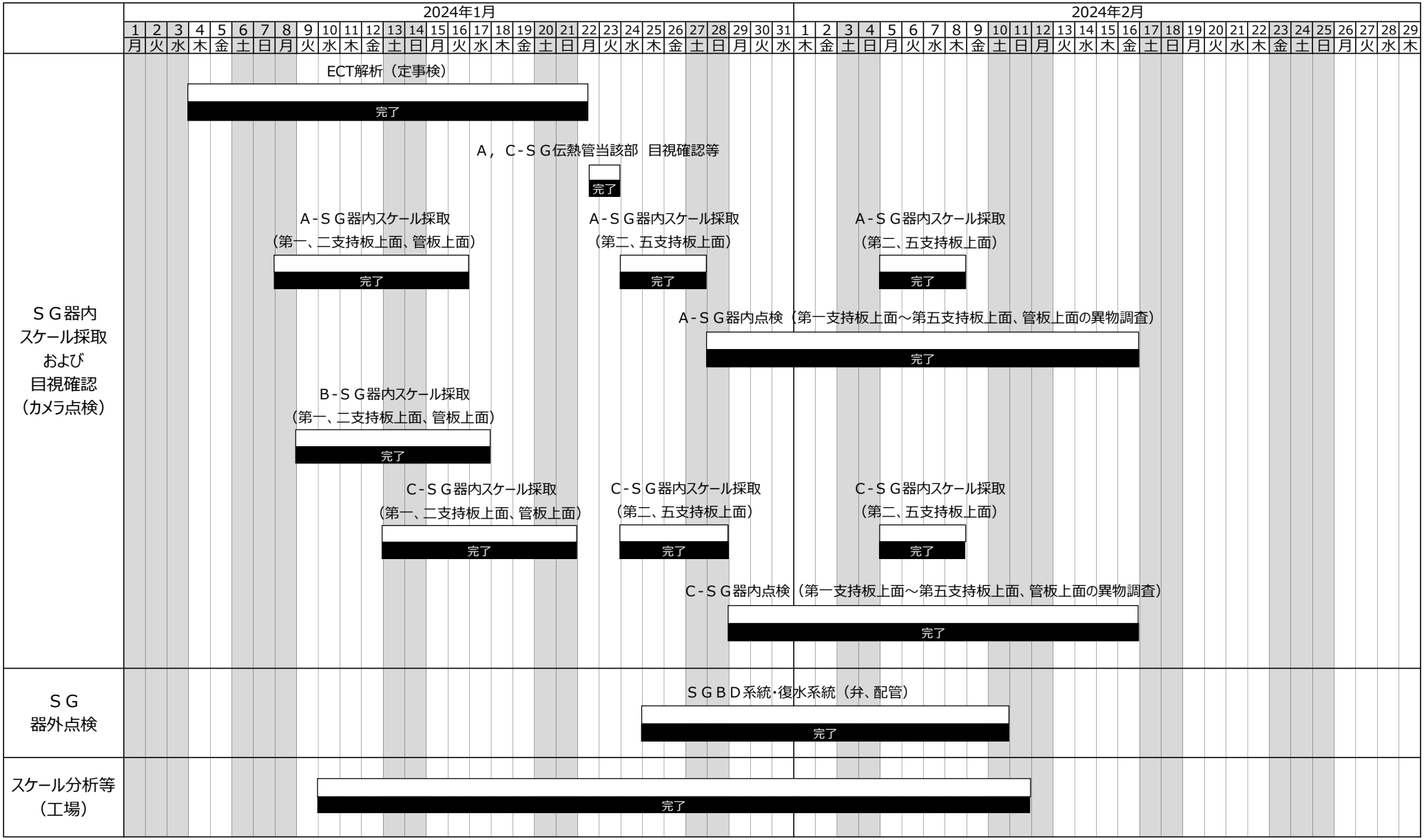
図２　ウォータージェットテストによる限界流速

温度の影響は小さく、常温の知見を用いても問題ない。

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。

ＳＧ点検スケジュール


2024年1月
2024年2月
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
月 火 水 木 金 土 日 月 火 水 木 金 土 日 月 火 水 木 金 土 日 月 火 水 木 金 土 日 月 火 水
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
木 金 土 日 月 火 水 木 金 土 日 月 火 水 木 金 土 日 月 火 水 木 金 土 日 月 火 水 木
ＳＧ器内
スケール採取
および
目視確認
（カメラ点検）
ECT解析（定事検）
完了
A，C-ＳＧ伝熱管当該部 目視確認等
完了
A-ＳＧ器内スケール採取
（第一、二支持板上面、管板上面）
完了
A-ＳＧ器内スケール採取
（第二、五支持板上面）
完了
A-ＳＧ器内スケール採取
（第二、五支持板上面）
完了
A-ＳＧ器内点検（第一支持板上面～第五支持板上面、管板上面の異物調査）
完了
B-ＳＧ器内スケール採取
（第一、二支持板上面、管板上面）
完了
C-ＳＧ器内スケール採取
（第一、二支持板上面、管板上面）
完了
C-ＳＧ器内スケール採取
（第二、五支持板上面）
完了
C-ＳＧ器内スケール採取
（第二、五支持板上面）
完了
C-ＳＧ器内点検（第一支持板上面～第五支持板上面、管板上面の異物調査）
完了
ＳＧ
器外点検
ＳＧＢＤ系統・復水系統（弁、配管）
完了
スケール分析等
（工場）
完了
：予定
：実績

減肉した伝熱管の評価

減肉した伝熱管について、以下のとおり、強度および耐震性の観点から破損しないことを確認した。

１．強度

国ＰＪ「蒸気発生器信頼性実証試験」（(財)発電用熱機関協会、昭和 50 年度～昭和 55 年度）では、局部減肉を有する伝熱管の内圧強度評価手法を確立するため、内圧による高温破壊試験を実施している。その試験結果から導出された内圧破断評価式を用いて、運転中および事故時を包絡する内外差圧による破断圧力を算出した。

得られた破断圧力について、通常運転時および事故時の最大内外差圧に対する裕度を確認することにより、減肉管の強度を評価した。

その結果、破断圧力は 28.75MPa であり、通常運転時および事故時の最大内外差圧[　]MPa に対し、十分な裕度があることを確認した。

本評価式は、過去の高浜発電所３号機および４号機 蒸気発生器伝熱管の旧振止め金具による局部減肉の特殊設計施設認可申請においても用いられており、下式にて表される。

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

＜計算条件＞

P_B：局部減肉を有する伝熱管の破断圧力　(MPa)

σ_f：インコネルＴＴ600 の流動応力=343.8MPa (@361.3℃)

t：板厚＝[　]mm

R：平均半径＝[　]mm

a：減肉深さ＝[　]mm（＝[　]mm×0.61）

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

$2c$：減肉幅＝5mm

表　減肉した伝熱管の強度評価結果

減肉深さ (%) *1	破断圧力 P_B (MPa)	事故時を包絡する作用内外差圧 (MPa) *2	裕度
61	28.75	[　]	[　]

*1 最大減肉深さのＣ－ＳＧ（Ｘ５８，Ｙ２５）で代表

*2 設計基準事故時および重大事故等時を包絡する内外差圧

[　]：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．耐震性

減肉を有する伝熱管の耐震性について、次のとおり評価した。

・既工認*3の基準地震動 Ss による地震力および伝熱管全長モデル（施栓管の評価と同様）*4から、伝熱管直管部（管支持板部）に作用する力（部材力）を算出
・保守的に一様外面減肉と仮定し、伝熱管の断面積を減じた上で部材力から発生応力および疲労累積係数を算出し、許容値に対する裕度を確認

*3 既工認添付資料 13-17-3-2-2「蒸気発生器内部構造物の耐震計算書」（原規規発第 1510091 号、平成 27 年 10 月 9 日認可）

*4 高浜発電所４号機既工認（新規制基準工認）補足説明資料「高浜発電所４号機 耐震性に関する説明書に係る補足説明資料　蒸気発生器伝熱管の評価について 関西電力株式会社　平成 27 年 9 月」

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

表　減肉した伝熱管の耐震性評価結果

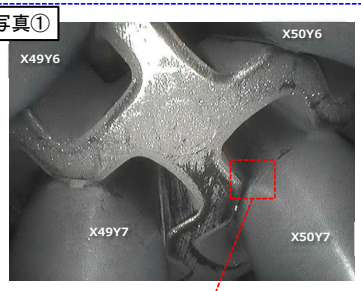
応力分類	発生応力*5 および疲労累積係数	許容値	裕度
一次一般膜応力	253 MPa	334 MPa	1.3
膜応力＋曲げ応力	364 MPa	434 MPa	1.1
一次＋二次応力	473 MPa	492 MPa	1.0
疲労累積係数	0.605	1	-

*5最大減肉深さのＣ－ＳＧ（Ｘ５８，Ｙ２５）で代表

以　上

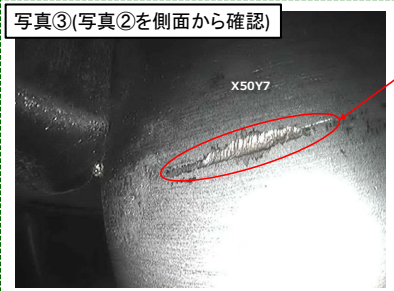
隣接伝熱管の健全性（Ａ－ＳＧ　低温側第三支持板下面　伝熱管　Ｘ５０，Ｙ７）

写真①

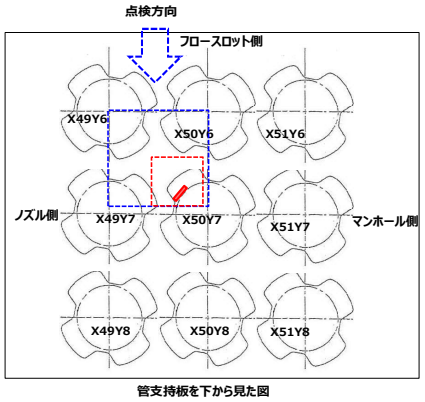


写真②

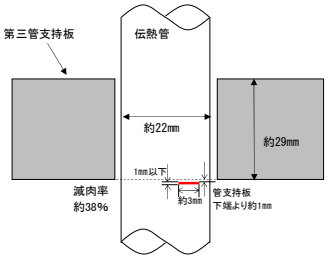
写真③(写真②を側面から確認)

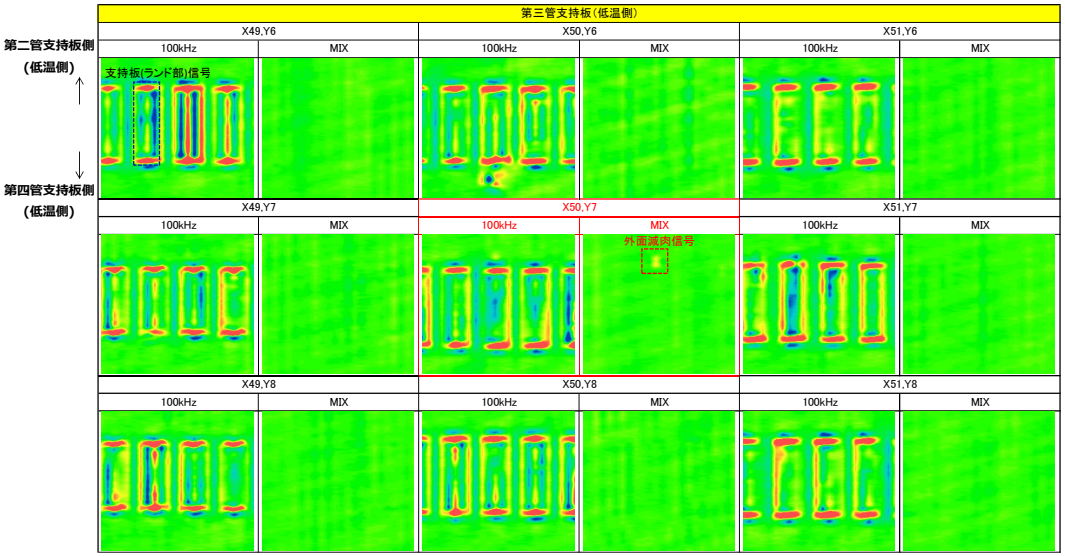


右記波形データにおける
外面減肉信号と
推定される部位



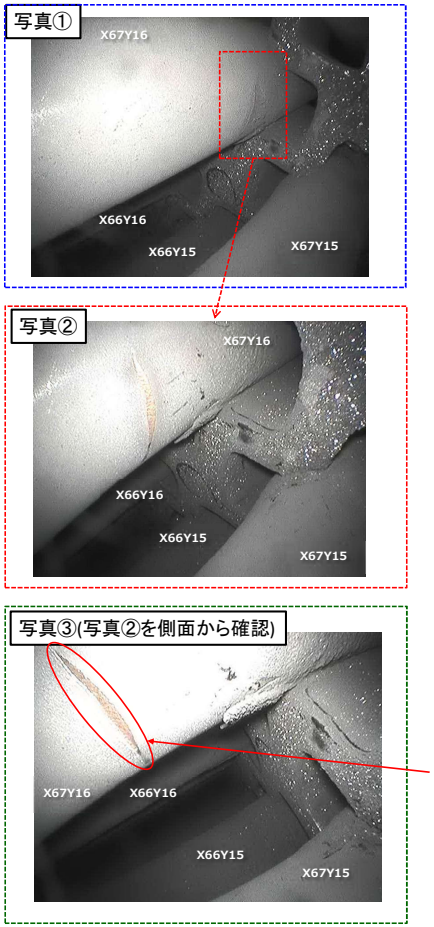
管支持板を下から見た図

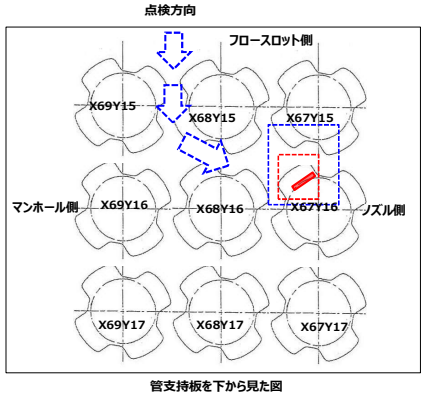


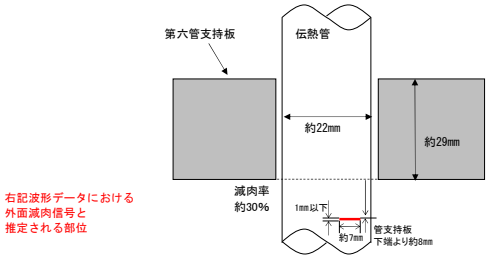


波形上の評価
・外面減肉信号は、X50,Y7にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
・その他のアドレスでは、支持板(ランド部)信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。
＊なお、ECT信号は信号源の実長さより長くなるため、上記のランド部信号範囲は実範囲より広いと考えられる。

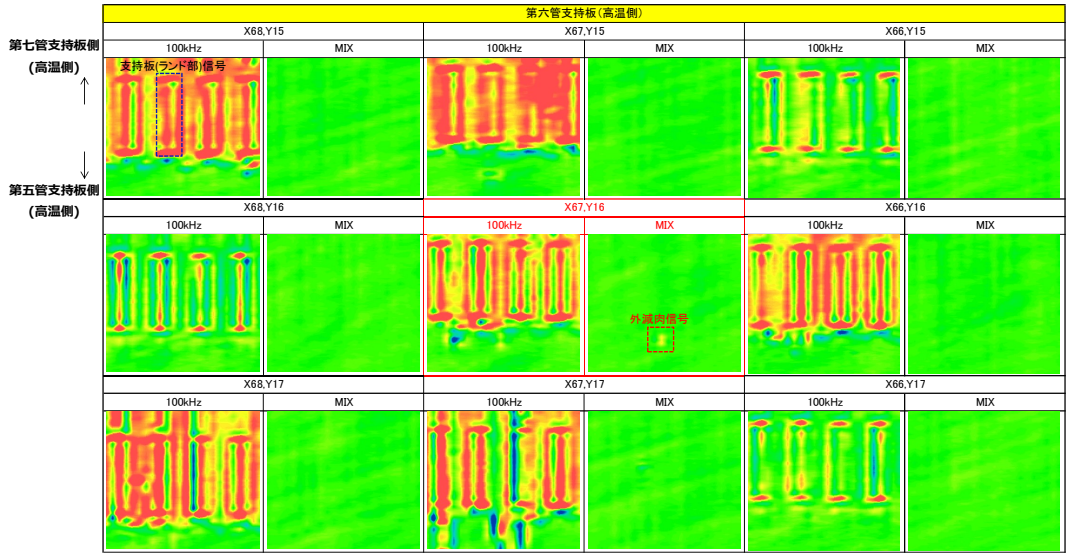
隣接伝熱管の健全性（Ａ－ＳＧ　高温側第六支持板下面　伝熱管　Ｘ６７，Ｙ１６）





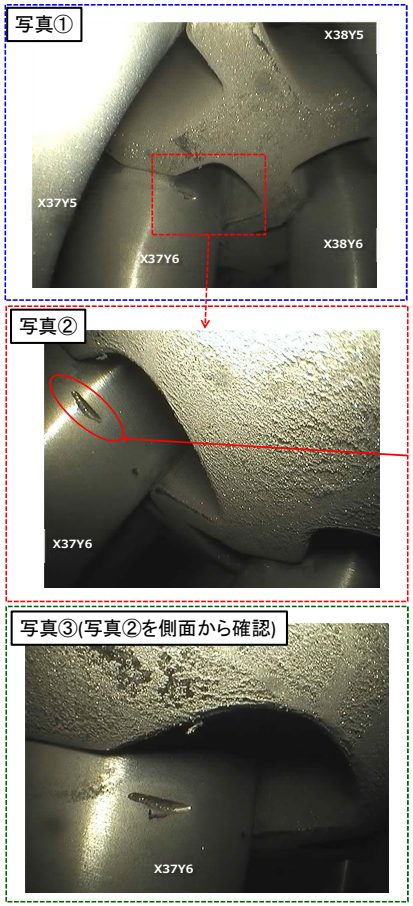


右記波形データにおける
外面減肉信号と
推定される部位

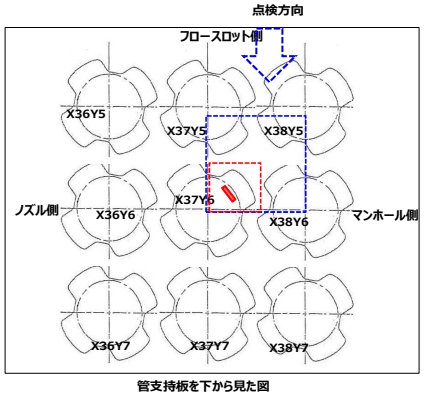


波形上の評価
・外面減肉信号は、X67,Y16にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
・その他のアドレスでは、支持板(ランド部)信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。
＊なお、ECT信号は信号源の実長さより長くなるため、上記のランド部信号範囲は実範囲より広いと考えられる。

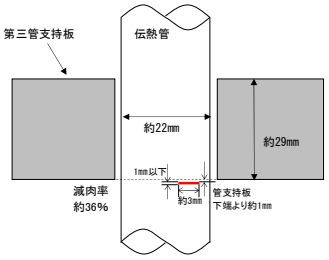
隣接伝熱管の健全性（Ｃ－ＳＧ　低温側第三支持板下面　伝熱管　Ｘ３７，Ｙ６）

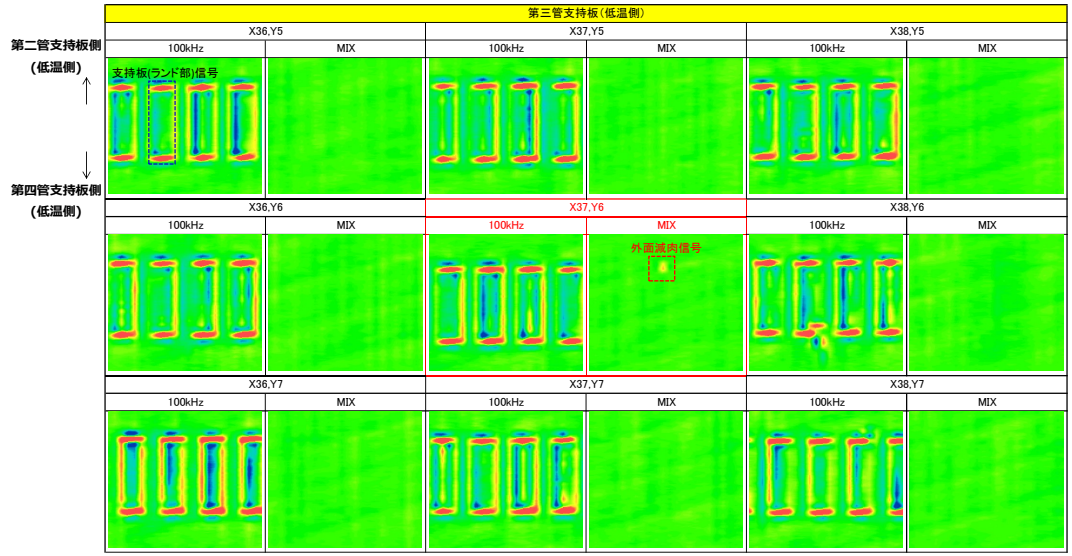


右記波形データにおける
外面減肉信号と
推定される部位



管支持板を下から見た図





波形上の評価
・外面減肉信号は、X37,Y6にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
・その他のアドレスでは、支持板(ランド部)信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。
＊なお、ECT信号は信号源の実長さより長くなるため、上記のランド部信号範囲は実範囲より広いと考えられる。

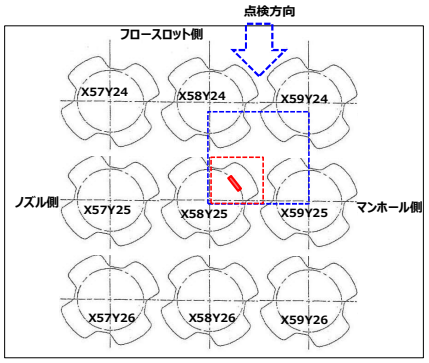
隣接伝熱管の健全性（Ｃ－ＳＧ　低温側第六支持板下面　伝熱管　Ｘ５８，Ｙ２５）

写真①

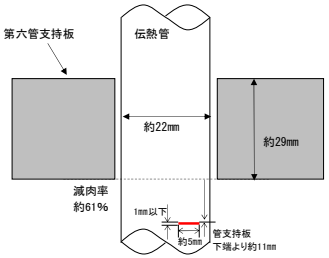
写真②

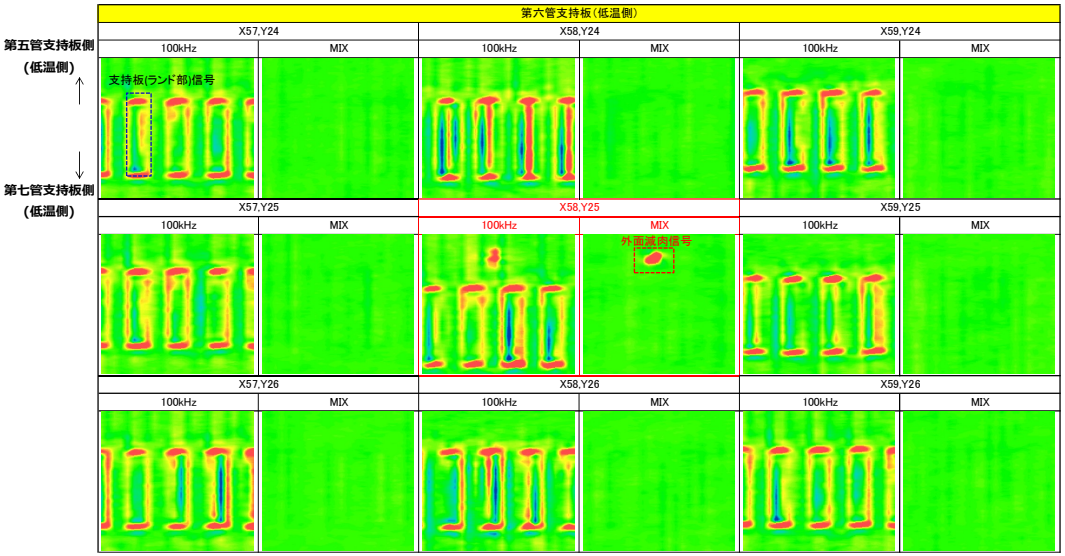
写真③(写真②を側面から確認)

右記波形データにおける
外面減肉信号と
推定される部位



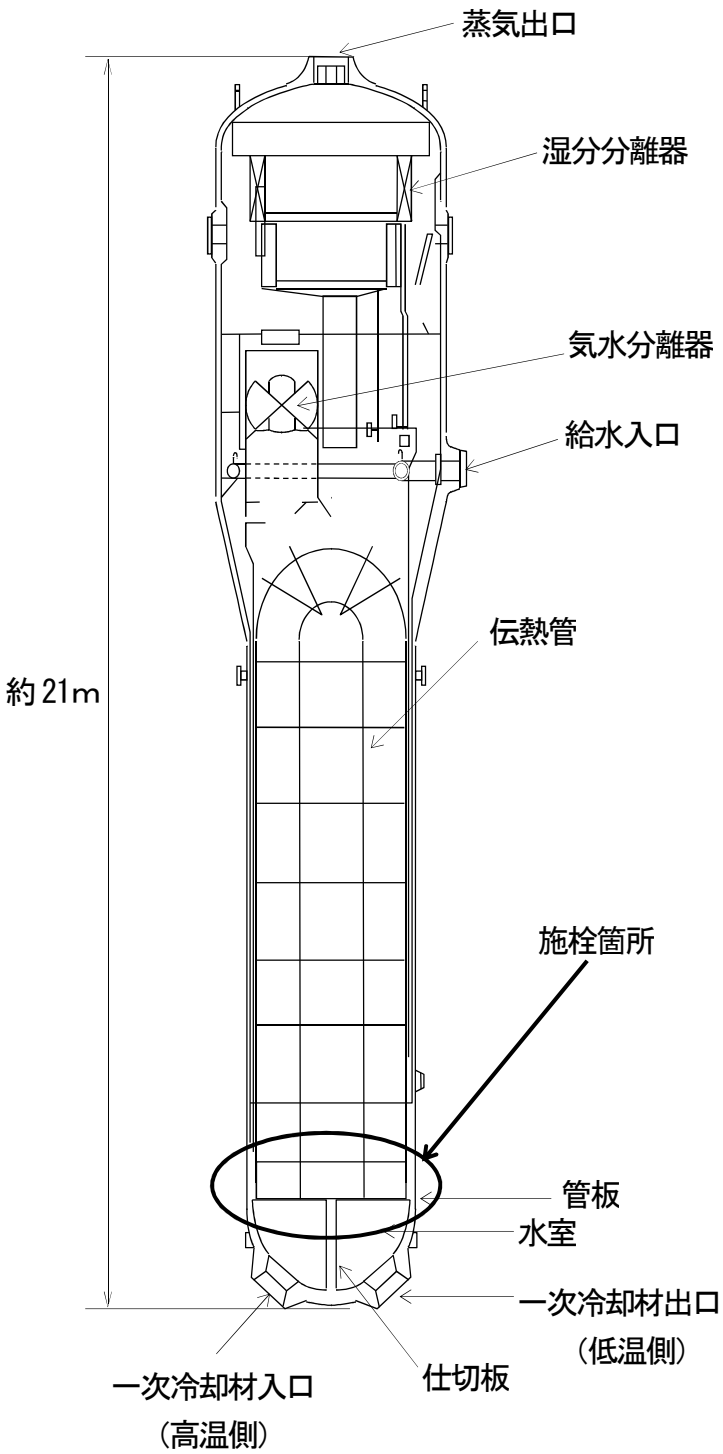
管支持板を下から見た図

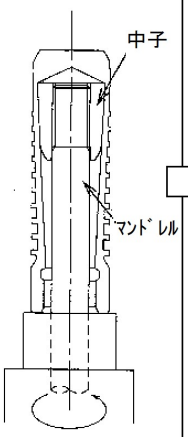
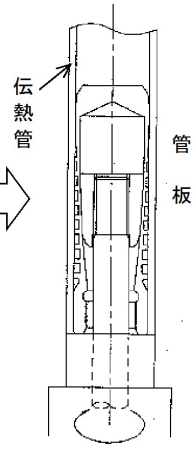




波形上の評価
・外面減肉信号は、X58,Y25にのみ認められる。(MIXで消失しない信号がある)
・その他のアドレスでは、支持板(ランド部)信号のみが認められ、MIXでは信号が消失している。
＊なお、ECT信号は信号源の実長さより長くなるため、上記のランド部信号範囲は実範囲より広いと考えられる。

ＳＧ伝熱管信号指示箇所補修概要図



	ステップ１	ステップ２
概略図		
説明	機械式栓内の中子にマンドレルをねじ込む。	機械式栓を伝熱管に挿入し、マンドレルを介して中子を引き下げることにより、機械式栓を押し広げる。

機械式栓の取付要領

高浜発電所4号機　SG伝熱管の補修来歴

	A－SG （3,382本）	B－SG （3,382本）	C－SG （3,382本）	合計 （10,146本）	施　栓　理　由 （）内は、実施した対策
第4回定期検査 （1990.2～5）	7	9	5	21	振止め金具部の摩耗減肉 （振止め金具の取替えを実施）
第9回定期検査 （1996.9～11）	10	0	0	10	管支持板洗浄装置の接触痕を確認
第11回定期検査 （1999.4～7）	0	0	4	4	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第12回定期検査 （2000.9～11）	4	1	6	11	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第13回定期検査 （2002.1～3）	1	0	0	1	高温側管板拡管部の応力腐食割れ （ショットピーニング施工）
第14回定期検査 （2003.4～6）	1	1	0	2	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第15回定期検査 （2004.8～10）	112	122	105	339	旧振止め金具部の微小な摩耗減肉 （新方式のECT採用）
第18回定期検査 （2008.8～12）	0	0	1	1	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第19回定期検査 （2010.2～5）	0	0	1	1	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第20回定期検査 （2011.7～2017.5）	0	1	1	2	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第21回定期検査 （2018.5～9）	2	0	0	2	高温側管板拡管部の応力腐食割れ
第22回定期検査 （2019.9～2020.2）	1	1	3	5	外面からの摩耗減肉
第23回定期検査 （2020.10～2021.4）	1	0	3	4	外面からの摩耗減肉
第24回定期検査 （2022.6～2022.11）	5	2	5	12	外面からの摩耗減肉 A1本・B1本：微小な減肉信号
第25回定期検査 （2023.12～）	2	0	2	4	外面からの摩耗減肉
累積施栓本数 ［施栓率］	146 ［4．3%］	137 ［4．1%］	136 ［4．0%］	419 ［4．1%］	

〇SG1台あたりの伝熱管本数：3，382本

〇定期検査回数の下部に記載しているカッコ内の年月は、解列～並列

〇安全解析施栓率は10%

（伝熱管の施栓率が10%の状態において、プラントの安全性に問題がないことが確認されている）

減肉により施栓した伝熱管が隣接伝熱管へ及ぼす影響

減肉により施栓した伝熱管については、以下のとおり、伝熱管の減肉の進展性、強度および耐震性の観点から破損しないことを確認しており、他の健全伝熱管へ影響を及ぼすことはない。

１．減肉の進展性

対策として実施する薬品洗浄により伝熱管に付着している稠密なスケールは脆弱化するため、伝熱管を有意に減肉させることはなく、減肉の進展性はない。

２．強度

施栓後の伝熱管内は大気圧となるため、運転中および事故時には外圧（２次側から１次側への圧力）が作用する。この状態下で減肉伝熱管が耐えられる限界圧力を算出した結果、通常運転時および事故時のＳＧ２次側最大圧力に対して裕度があることを確認したことから、減肉により施栓した伝熱管が外圧で損壊することはない。

（評価内容）

国ＰＪ「蒸気発生器信頼性実証試験」（(財)発電用熱機関協会、昭和 50 年度～昭和 55 年度）では、局部減肉を有する伝熱管の外圧強度評価手法を確立するため、外圧による高温圧壊試験を実施している。その試験結果から導出された外圧圧壊評価式を用いて、施栓後の外圧による圧壊圧力を算出した。

得られた圧壊圧力について、通常運転時および事故時の最大外圧に対する裕度を確認することにより、施栓された減肉管の強度を評価した。

その結果、圧壊圧力は 19.2MPa であり、通常運転時および事故時の最大外圧 □MPa に対し、十分な裕度があることを確認した。

本評価式は、過去の高浜発電所３号機および４号機 蒸気発生器伝熱管の旧振止め金具による局部減肉の特殊設計施設認可申請においても用いられており、下式にて表される。

$$P_C=0.9Sy\cdot t/R(1.0-a/t\,(-0.539+0.236\sqrt{2c}-0.0103\cdot 2c))$$

＜今回の計算条件＞

P_C：局部減肉を有する伝熱管の圧壊圧力　(MPa)

Sy：インコネルＴＴ600 の設計降伏点=188.7MPa (@344℃)

t：板厚＝□mm

R：平均半径＝□mm

a：減肉深さ＝□mm（＝□mm×0.61）

2c：減肉幅＝5mm

□：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。

表１　減肉を有する施栓後の伝熱管の強度評価結果

減肉深さ（%）*1	圧壊圧力 Pc（MPa）	事故時を包絡する作用外圧（MPa）*2	裕度
61	19.2	[redacted]	[redacted]

*1 最大減肉深さのＣ－ＳＧ（Ｘ５８，Ｙ２５）で代表

*2 設計基準事故時および重大事故等時を包絡する２次側圧力

３．耐震性

基準地震動Ｓｓ条件で減肉伝熱管の耐震評価を行った結果、許容値に対して裕度があることを確認したことから、減肉伝熱管が地震で損壊することはない。

（評価内容）

減肉を有する伝熱管の耐震性について、次のとおり評価した。

・既工認*3の基準地震動 Ss による地震力および伝熱管全長モデル（右図）*4から、伝熱管直管部（管支持板部）に作用する力（部材力）を算出
・保守的に一様外面減肉と仮定し、伝熱管の断面積を減じた上で部材力から発生応力および疲労累積係数を算出し、許容値に対する裕度を確認

*3 既工認添付資料 13-17-3-2-2「蒸気発生器内部構造物の耐震計算書」（原規規発第 1510091 号、平成 27 年 10 月 9 日認可）

*4 高浜発電所４号機既工認（新規制基準工認）補足説明資料「高浜発電所４号機　耐震性に関する説明書に係る補足説明資料　蒸気発生器伝熱管の評価について　関西電力株式会社　平成 27 年 9 月」

図　伝熱管地震応答解析モデル

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

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

表２　減肉を有する施栓後の伝熱管の耐震性評価結果

応力分類	発生応力*5 および疲労累積係数	許容値	裕度
一次一般膜応力	184 MPa	334 MPa	1.8
膜応力＋曲げ応力	330 MPa	434 MPa	1.3
一次＋二次応力	473 MPa	492 MPa	1.0
疲労累積係数	0.596	1	-

*5 最大減肉深さのＣ－ＳＧ（Ｘ５８，Ｙ２５）で代表

４．減肉した伝熱管の破断を想定した場合の影響

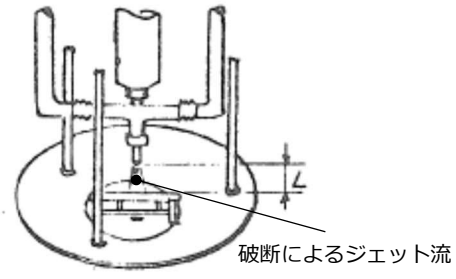
１．～３．で述べた通り、減肉により施栓した伝熱管については、減肉の進展性、強度および耐震性の観点から破損しないことを確認しており、他の健全伝熱管へ影響を及ぼすことはないが、ここでは仮に減肉した施栓管が破断した場合の影響を検討する。

「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」の検討において、伝熱管１本が破断しても隣接管へ有意な影響を与えないことが確認されている。

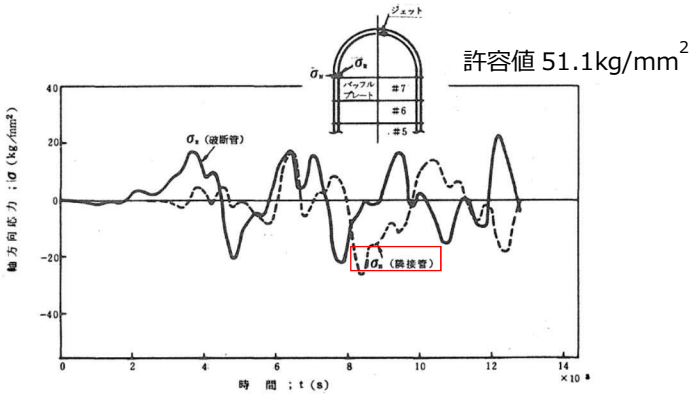
その検討において根拠とされた実験は「蒸気発生器信頼性実証試験」（昭和５０～５５年度：発電用熱機関協会）によるものであり、その中では、次の実験および解析により、伝熱管が破断しジェット反力によって隣接管へ衝突しても、隣接管に発生する応力は許容値以下であるため、有意な影響がないことを確認している。

また、今回減肉により施栓した伝熱管については、その内部に１次系系統圧力がかかっておらず、破断時にジェット反力は生じないため、隣接管への影響はない。

実験：破断時のジェット反力を取得



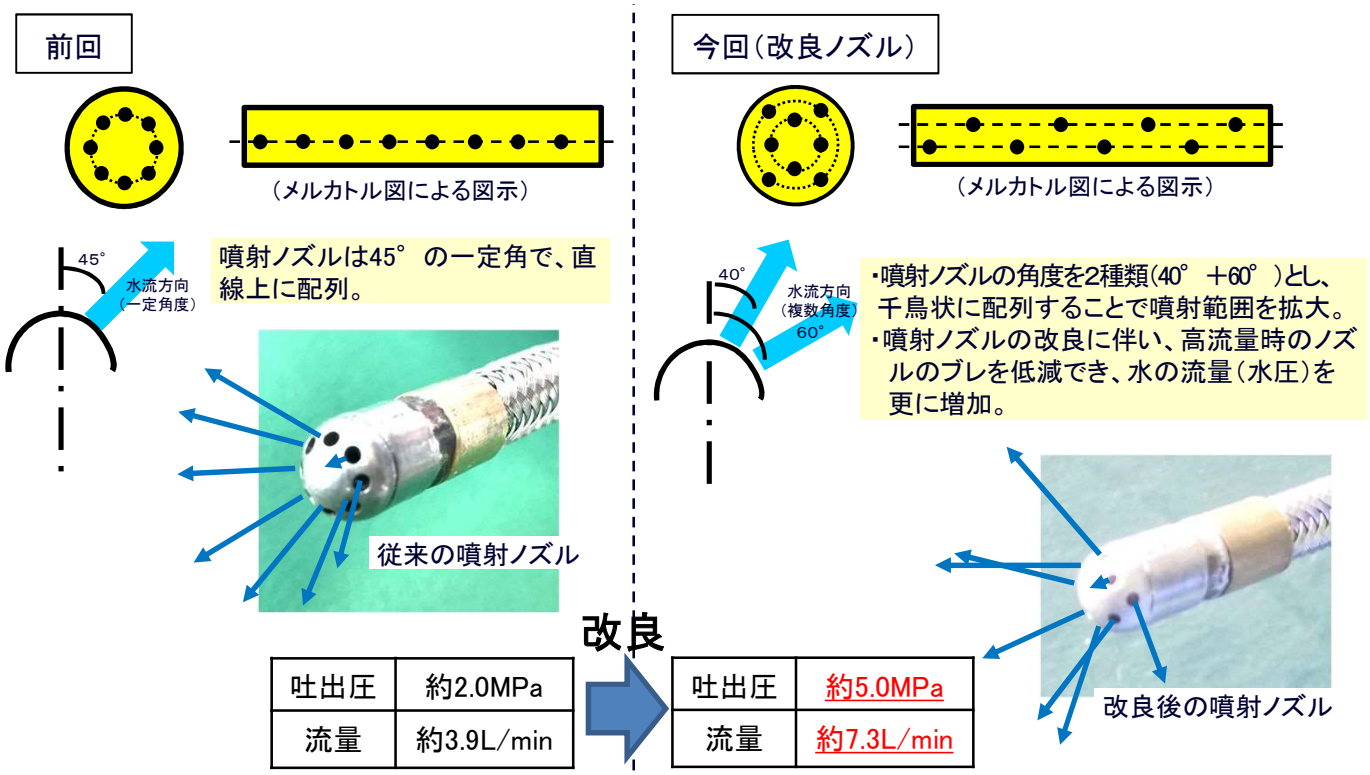
解析：破断管の隣接管への衝突による発生応力を評価



小型高圧洗浄装置による洗浄の強化について（1／2）

①「管支持板上噴射ノズル（第六～第三管支持板清掃用ノズル）」の改良

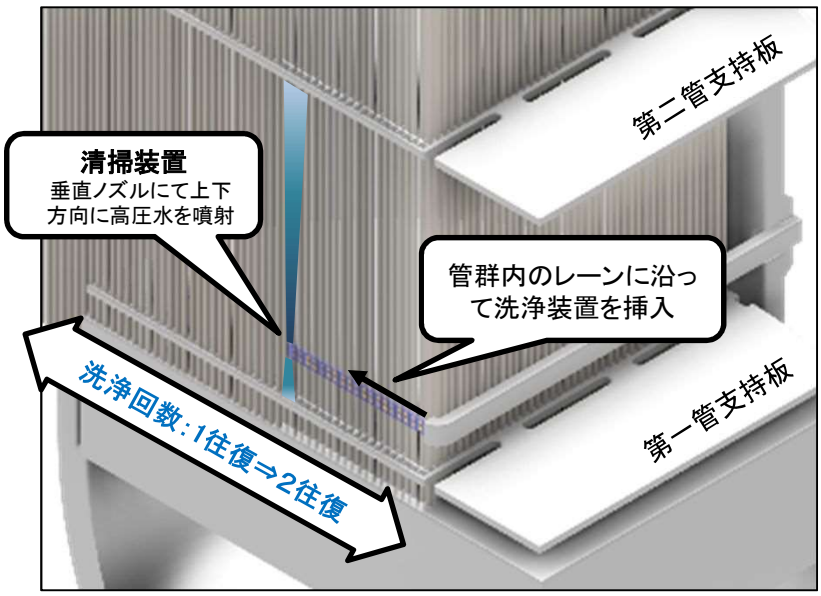
第六管支持板から第三管支持板上面の清掃で用いる**噴射ノズルの改良および水の流量（水圧）の増加により、**洗浄を強化。



②「垂直ノズル」による第二および第一管支持板の洗浄の強化

管群の各レーンに清掃装置を挿入し洗浄を行う際、**レーン毎（総数93レーン）の洗浄回数を1往復から2往復（1往復分追加）に増強することで**、洗浄を強化。

洗浄イメージ



噴射状況

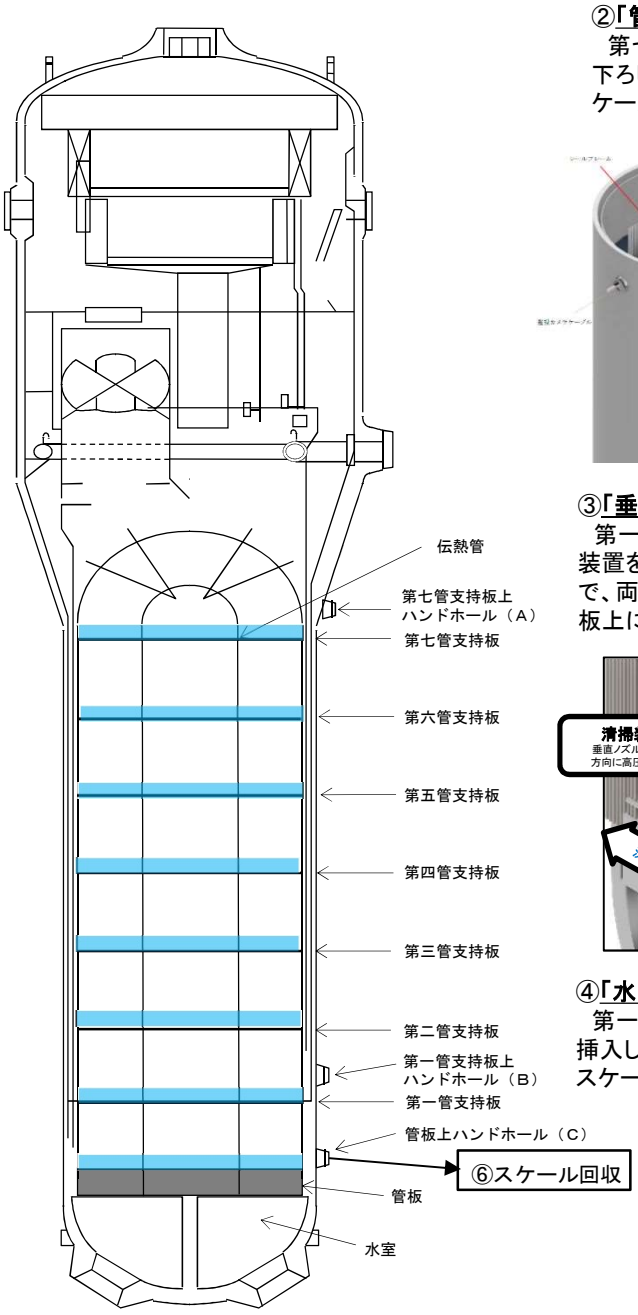
吐出圧	約5.0MPa
流量	約10.0L/min

小型高圧洗浄装置による洗浄の強化について（2／2）

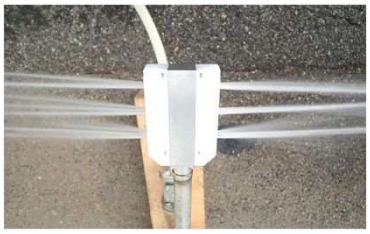
SG器内に残存するスケール等を回収するため、小型高圧洗浄装置を用いてSG器内の洗浄を実施する。

清掃は上層の支持板から順に下層の支持板にスケール等を落下させていき、最終的に管板の洗浄とともに回収する。

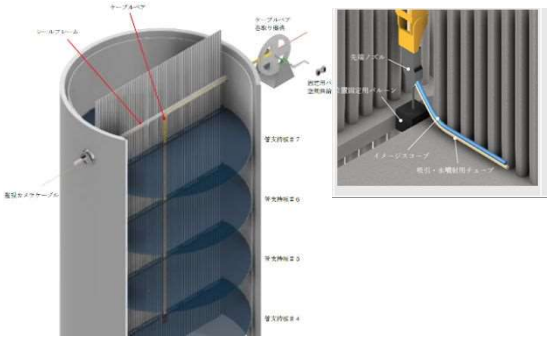
洗浄箇所：
（管板および第一管支持板から第七管支持板上）



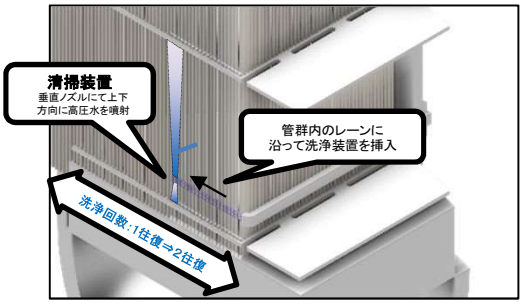
①「水平ノズル（樹脂ヘッド）」による第七管支持板の洗浄
第七管支持板上ハンドホール（A）より第七管支持板に装置を挿入し、フロースロット上を走査させながら洗浄水を噴射することで、支持板上のスケール等を押し流し下層の支持板に落下させる。



②「管支持板上走査ノズル」による第六～第三管支持板の洗浄
第七管支持板上ハンドホール（A）より上層の支持板から順に装置を吊り下ろし、支持板上を走査させながら洗浄水を噴射することで、支持板上のスケール等を下層の支持板に落下させる。



③「垂直ノズル」による第二及び第一管支持板の洗浄
第一管支持板上ハンドホール（B）より第二管支持板と第一管支持板の間に装置を挿入し、支持板間を走査させながら上下方向に洗浄水を噴射することで、両支持板の伝熱管と支持板の隙間を清掃し、スケール等を支持板及び管板上に移動させる。



④「水平ノズル（楕円ヘッド）」による第二管支持板の洗浄
第一管支持板上ハンドホール（B）より第二管支持板フロースロットに装置を挿入し、フロースロットを移動させながら洗浄水を噴射することで、支持板上のスケール等を押し流し下層の支持板に落下させる。

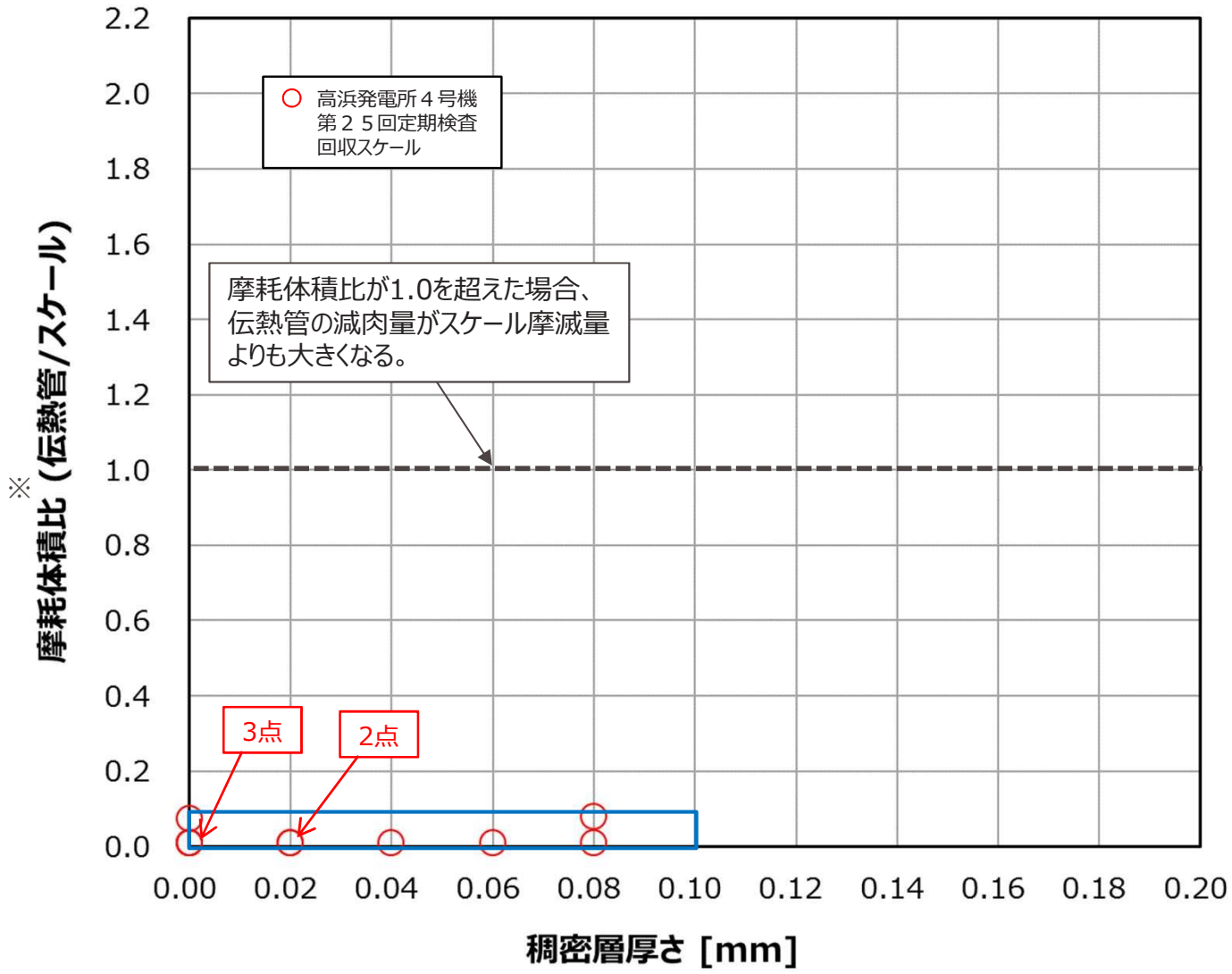
⑤「水平ノズル（樹脂ヘッド）」による第一管支持板の洗浄
第一管支持板上ハンドホール（B）より第一管支持板に装置(①と同様)を挿入し、フロースロット上を移動させながら洗浄水を噴射することで支持板上のスケール等を押し流し、管板に落下させる。

⑥「ランシング装置」による管板の洗浄とスケール等の回収
ランシング装置を用いた管板の洗浄(従来より定期検査毎に実施)を行うとともに、上層の各支持板から落下させたスケール等を管板上ハンドホール（C）から回収する。

スケールに対する保全指標について（１／３）

○ＳＧ伝熱管に付着するスケールに対し、薬品洗浄の頻度に関する保全指標については、以下のとおり。

●高浜発電所３号機および４号機については、毎定期検査時にスケールを回収し、スケールの稠密層厚さの確認および摩耗試験を行う。
●稠密層厚さ０．１ｍｍ未満および摩耗体積比０．１未満であることを確認し、それを超えた場合は、薬品洗浄や小型高圧洗浄装置による洗浄を実施する。
●なお、高浜発電所３号機および４号機のＳＧについては、インコネルＴＴ６００製の伝熱管に応力腐食割れが認められていることから、本事象も踏まえ、今後ＳＧ取替え（以下、ＳＧＲ）を実施する。



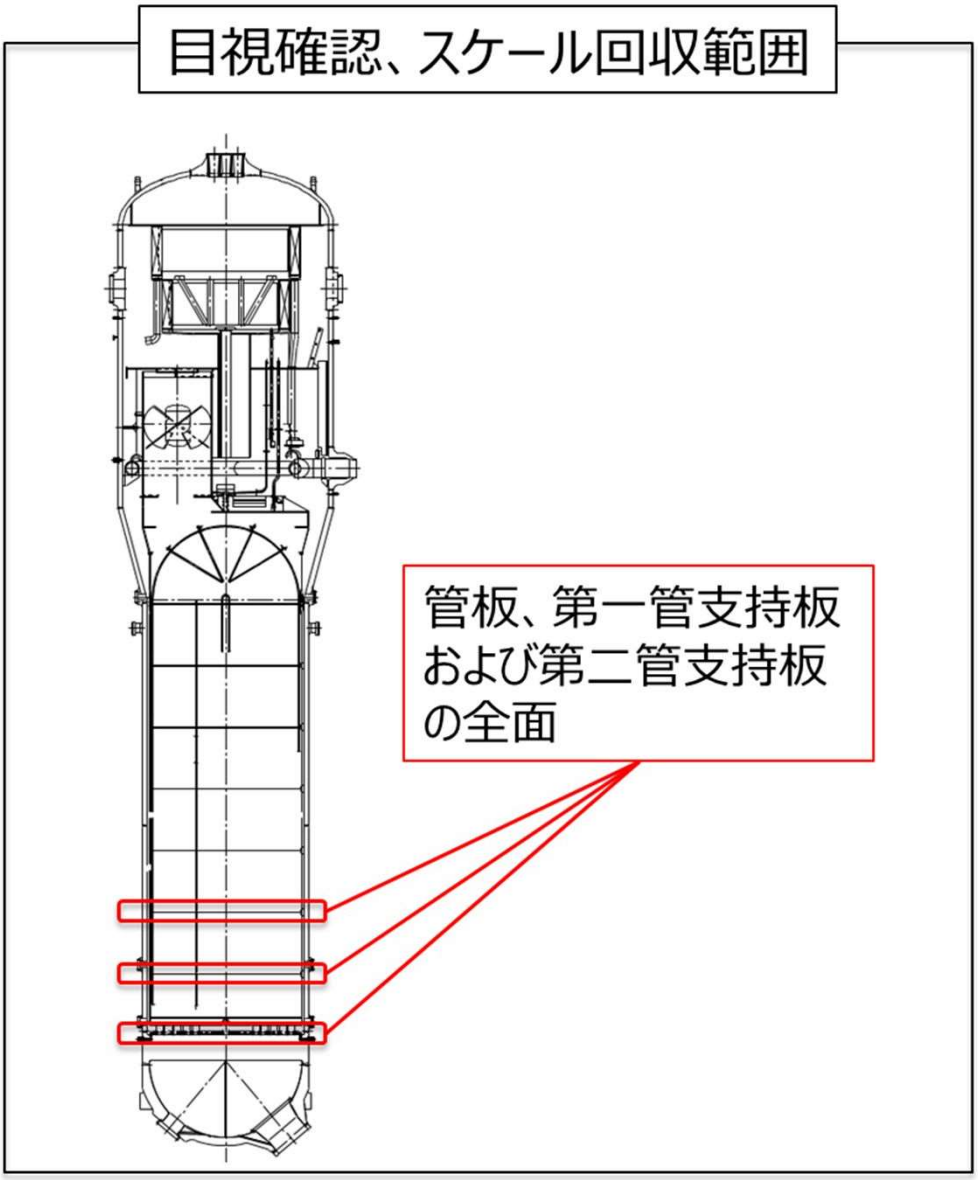
※　摩耗体積比（伝熱管/スケール）：摩耗試験における伝熱管の減肉量とスケールの摩滅量の体積比

スケールに対する保全指標について（２／３）

○スケール選定の考え方について

伝熱管を減肉させるような稠密で薄いスケール(板厚0．2～0．3mm)は、伝熱管の下部で生成されると考えられるため、稠密層本体のスケールが一番多く堆積していると考えられるエリア（ＳＧの管板、第一管支持板および第二管支持板）の全面を目視確認し、各板あたり２０個程度のスケールを採取し、稠密層厚さの確認を実施する。

次に、採取したスケールから0．2～0．3mmのもの、かつ比較的大きいもの（長さ１０mm程度）を１０個程度選定し、摩耗試験を実施する。



スケールに対する保全指標について（３／３）

●他プラントについては、代表プラントでスケールを回収し、いずれも稠密層厚さが０．１mm未満であることおよび摩耗体積比が十分小さいこと(０．１未満)を確認している。
●また、現在の鉄持込み量は約３０ｋｇ／サイクルと十分低く抑えられている。
●従って、至近で薬品洗浄を行う必要はないと考えているが、高浜発電所３号機および４号機の水平展開として、以下のとおり、実機スケールによる監視を行っていく。

＜スケール監視方法＞

プラント		鉄持込み量※	頻度	確認内容	備考
ＳＧＲ未実施プラント	大飯発電所３号機	1,880kg	２定期検査毎	稠密層厚さおよび摩耗体積比を確認	薬品洗浄を実施済であり、高浜発電所３号機および４号機と同等の鉄持込み量まで計算上10サイクル以上となるが、実機スケールを確認し確実に発生を防止するとともに、データの蓄積を図る。
	大飯発電所４号機	2,010kg	同上	同上	
ＳＧＲプラント	高浜発電所１号機	680kg	－	－	ＳＧＲプラントで鉄持込み量が最大の高浜発電所２号機について、今回採取できるスケールはない状況であったが、念のため、高浜発電所２号機を代表プラントとしてスケールの確認を行う。
	高浜発電所２号機	940kg	２定期検査毎	スケールの有無を確認	
	美浜発電所３号機	840kg	－	－	

※高浜発電所３号機および４号機の最初の外面減肉発生時の鉄持込み量は約2,400kg

＜薬品洗浄実施時期＞

●薬品洗浄については、蓄積したデータの傾向を踏まえ、従来の電気出力維持の観点に加え、摩耗減肉に対する予防保全の観点で、適切なタイミングで行うこととする。

高浜発電所４号機ＳＧ器内のスケールに対する対策の変遷

時期	目的	対策
前々回以前	ＳＧへの鉄の持ち込み量を低減 （ＢＥＣ穴閉塞対策および伝熱管へのスケール付着抑制）	• 運転開始以降、２次系統水の水質管理として、ＡＶＴ処理（ヒドラジン、アンモニア）を実施していたが、1998年より、抽気・ドレン系からの鉄持ち込み抑制のためＥＴＡ処理を採用 • その後、2005年～2006年に給水加熱器など銅系材料機器の取替えを実施し、2009年より給水高ｐＨ処理を採用
前々回 （第２３回定期検査）	スケールの脆弱化	ＳＧ器内の薬品洗浄 （条件） １回目：第三管支持板以下、薬品濃度３％ ２回目：伝熱管全域、薬品濃度２％
前回 （第２４回定期検査）	ＳＧ器内に残存するスケール等を可能な限り除去	小型高圧洗浄装置による洗浄 洗浄範囲：第一管支持板～第七管支持板および管板
	スケールの脆弱化	ＳＧ器内の薬品洗浄 （条件） 伝熱管全域、薬品濃度３％×２回
今回 （第２５回定期検査）	ＳＧ器内に残存するスケール等を可能な限り除去	改良した小型高圧洗浄装置等による洗浄の強化 洗浄範囲：第一管支持板～第七管支持板および管板 洗浄強化範囲：第一管支持板～第六管支持板
今後の対応	・スケールの性状確認 ・スケール影響除去	今後のＳＧ保全 ・毎定期検査時にスケールを回収し、稠密層厚さの確認、摩耗試験を実施 ・稠密層厚さの確認、摩耗試験にて、稠密層厚さ0.1㎜未満および摩耗体積比0.1未満を超えた場合は、薬品洗浄や小型高圧洗浄装置による洗浄を実施 ・ＳＧ取替え