

高浜発電所3号機の定期検査状況について (蒸気発生器伝熱管の損傷に関する調査状況)

2022年4月25日

関西電力株式会社

高浜発電所3号機（加圧水型軽水炉 定格電気出力87万キロワット、定格熱出力266万キロワット）は、2022年3月1日から実施している第25回定期検査において、3台（A、B、C）ある蒸気発生器（SG）の伝熱管全数^{※1}について渦流探傷検査（ECT）^{※2}を実施しました。

その結果、A-SGの伝熱管2本およびB-SGの伝熱管1本に有意な信号指示^{※3}が認められました。このうち、A-SGの1本は、高温側の管板^{※4}部に内面（1次側）からの割れとみられる信号指示で、残りの1本とB-SGの1本は、管支持板^{※5}部付近に外面（2次側）からの減肉とみられる信号指示でした。これらのほか、A-SGの伝熱管1本に管支持板部付近に外面（2次側）からの微小な減肉とみられる信号指示（判定基準未満）が認められました。

なお、本件による環境への放射能の影響はありません。

- ※1 過去に有意な信号指示が認められ、施栓した管等を除きA-SGで3,272本、B-SGで3,247本、C-SGで3,261本、合計9,780本。
- ※2 高周波電流を流したコイルを伝熱管に接近させることで対象物に渦電流を発生させ、対象物のきず等により生じた渦電流の変化を電気信号として取り出すことできず等を検出する検査であり、伝熱管の内面（1次側）から、伝熱管の内面（1次側）と外面（2次側）の両方を検査している。
- ※3 割れを示す信号や20%以上の減肉を示す信号の指示。
- ※4 蒸気発生器内の伝熱管が取り付けられている部品。伝熱管と管板で、1次冷却材と給水（2次冷却水）の圧力障壁となる。
- ※5 伝熱管を支持する部品。

(2022年3月30日お知らせ済み)

1. これまでの経緯

高浜発電所3号機では、前回および前々回の定期検査において、SGの伝熱管に外面からの減肉信号指示が認められており、原因は、管支持板下面に留まった異物と伝熱管が繰り返し接触したことにより摩耗減肉が発生したものと推定していました。

その後、異物対策を実施した高浜発電所4号機の第23回定期検査においても、外面からの減肉信号指示（A-SGの伝熱管1本、C-SGの伝熱管3本）が認められたため、小型カメラによりSG器内を調査した結果、減肉箇所スケール^{※6}の接触を確認するとともに、このスケールの外観観察の結果、伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位に接触痕および光沢を確認しました。

このため、高浜発電所4号機の第23回定期検査においてSG器内のスケールの性状等の調査や回収スケールによる摩耗試験などを実施した結果、SG伝熱管表面からはく離した稠密なスケールによるものと原因を推定しました。

これらのことから、2018年8月以降、高浜発電所3号機および4号機の定期検査において発生したSG伝熱管の外面減肉の原因は、異物ではなくスケールの可能性が否定できないため、対策として、高浜発電所3号機の第24回定期検査においても、SG器内の薬品洗浄を実施し、その後に回収したスケールが脆弱化していることを確認しました。

今回、SG伝熱管に外面からの信号指示が認められたことから、小型カメラによるSG器内の調査に加え、改めてスケールの性状や前回実施した薬品洗浄の実施結果等について調査を行いました。また、念のため、異物混入の可能性についても調査を行いました。

内面からの信号指示が認められた伝熱管については、信号指示の場所が高温度側管板部上端付近であり、従来と同様に応力腐食割れと考えられるため、過去の調査結果や運転履歴の調査を実施しました。

※6 2次冷却水に含まれる鉄の微粒子が、給水系統によってSG内に流れ集まって伝熱管に付着したもの。

2. 外面からの信号指示があった伝熱管の調査

(1) 信号指示が認められた箇所の外観調査

小型カメラを用いて、有意な減肉信号指示が認められた伝熱管2本および微小な減肉信号指示が認められた伝熱管1本の外観を観察した結果、信号指示箇所の伝熱管の周方向に摩耗減肉とみられるきずを確認しました。

きずについては、A-SGの伝熱管では、幅1mm以下、周方向に約3mmから5mm、B-SGの伝熱管では幅1mm以下、周方向に約3mmの大きさであることを確認しました。

なお、きずの周辺には、スケール等の付着物は認められなかったものの、当該伝熱管周辺の管支持板に接触痕を確認しました。

(2) SG器内のスケールの残存状況等の調査

小型カメラを用いて、A、B-SGの管板、第1管支持板、第2管支持板の上面等の調査を行った結果、スケールおよびスラッジ^{※7}が残存していることを確認しました。また、C-SGについても管板、第1管支持板、第2管支持板の上面の調査を行った結果、A、B-SGと同様に、スケールおよびスラッジが残存していることを確認しました。なお、SG器内に異物は確認されませんでした。

※7 スケールが砕けて小さくなったもの。

(3) A、B、C-SGから回収したスケールの性状調査

A、B、C-SGの管板、第1管支持板および第2管支持板上面から取り出したスケール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、SG器内で発生するスラッジと同成分であることを確認しました。

スケール30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）が主体のスケールを13個確認しました。また、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よりも大きくなるスケールを1個確認しました。

(4) 前回の定期検査における薬品洗浄の実施結果

前回定期検査における薬品洗浄時の条件を確認した結果、温度管理や薬品濃度管理が計画通り実施されていたことを確認し、薬品洗浄によって、SG1基あたり約670kgの鉄分を除去できていたことを確認しました。

また、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ました。これは、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ます。

(5) 異物混入の可能性の調査

SG器外の系統を対象に、SGブローダウン系統およびタービンサンプラインの仮設ストレーナの開放点検を実施した結果、異物は確認されませんでした。このため、異物混入の可能性は低いと推定しました。

3. 内面からの信号指示があった伝熱管の調査

高浜発電所3号機では、2000年の第12回定期検査以降、これまでの定期検査の中で、伝熱管24本に高温側管板拡管部で損傷が確認されており、原因は、SG製造時に伝熱管内面からローラ拡管^{※8}を実施した際に伝熱管内面に局所的に生じた引張り残留応力と運転時の内圧および温度環境が相まって生じた応力腐食割れであると推定されています。

今回の有意な信号指示も、高温側管板部のローラ拡管上端部付近において、伝熱管の軸方向に沿った内面きずを示しており、過去の事例と特徴が類似していることを確認しました。また、1次冷却材の主要パラメータである温度、圧力、水質について調査を行い、これまでの運転実績の中で、過大な応力を発生させる温度、圧力の変化はなく、水質も基準値の範囲内で安定していたことを確認しました。

なお、高浜発電所3号機では、2001年の第13回定期検査において、SG伝熱管の高温側管板拡管部内面にショットピーニング^{※9}を施工し、伝熱管内表面の引張り残留応力を改善しています。しかしながら、この施工では、伝熱管内表面近傍（深さ約0.2mmまで）の引張り残留応力は改善されますが、これより深い部分では効果が小さいことが知られています。

このため、ショットピーニング施工時に、ECTの検出限界未満（深さ約0.5mm未満）の微小なきずが既に発生していた場合、時間の経過とともにきずが進展する可能性があるかと推定しており、高経年化技術評価でも当該箇所での応力腐食割れの検出が否定できないとしています。今回の損傷についても、このような応力腐食割れが進展し、検出されたものと推定しています。

※8 伝熱管内部に機械式ローラを通すことで伝熱管を押し広げて、伝熱管と管板を接合させる工程。

※9 伝熱管内面に小さな金属球を高速で叩き付けることにより、伝熱管内面の引張り残留応力を圧縮応力に改善する工事。

4. これまでの原因調査状況のまとめ

伝熱管の外面減肉が認められた原因は、これまでの調査状況を踏まえると、稠密なスケールが前回定期検査時の薬品洗浄の後もSG内に残存し、プラント運転中に管支持板下部に留まり、伝熱管に繰り返し接触したことで摩耗減肉が発生した可能性が高いと推定していますが、引き続き回収したスケールの形状や性状等の調査を継続します。

伝熱管内面に有意な信号指示が認められた原因は、既往知見である応力腐食割れと推定しました。

5. 今後の予定

回収したスケールの形状や性状等の調査を引き続き行うとともに、S G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管支持板上も含めたS G器内の洗浄を実施します。

また、薬品洗浄に関してS G器内のスケールをさらに低減する洗浄条件等の検討を行います。

なお、損傷が認められた伝熱管4本については、高温側および低温側管板部で閉止栓（機械式栓）を施工し、使用しないこととします。

以 上

添付資料1：これまでの経緯

添付資料2：外面からの信号指示があった伝熱管の調査

添付資料3：内面からの信号指示があった伝熱管の調査

添付資料4：蒸気発生器内のスケール等の回収

添付資料5：蒸気発生器伝熱管の施栓方法と施栓状況

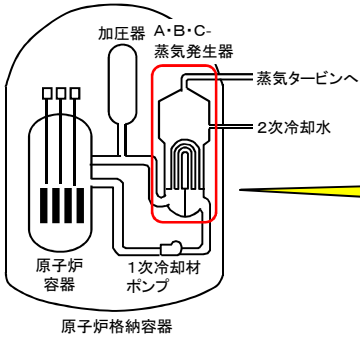
これまでの経緯(高浜発電所3、4号機におけるSG伝熱管外面の損傷事例)

	SG伝熱管外面の 損傷本数	調査結果概要	
高浜3号機 第23回定検 (2018年8月)	A-SG: 1本 (減肉率20% 未満)	減肉指示のあった箇所付近にスケールを確認。スケールの回収を試みたものの、破損したため、スケール以外の異物による減肉と推定し異物管理を徹底。	 <p>減肉箇所</p>
高浜4号機 第22回定検 (2019年10月)	A-SG: 1本 B-SG: 1本 C-SG: 3本	きず近傍にスケールは確認されず。A-SG内に異物(ステンレス薄片)が確認されたものの、摩耗痕が確認されなかったため、異物は流出したものと推定。	 <p>異物(ステンレス薄片)</p>
高浜3号機 第24回定検 (2020年2月)	B-SG: 1本 C-SG: 1本	きず近傍にスケールは確認されず。AおよびB-SG内に異物(ガスケットフープ材)が確認され、そのうちの1つが1本のきずの原因の可能性があり、その他の異物は流出したものと推定。	 <p>異物(ガスケットフープ材)</p>
高浜4号機 第23回定検 (2020年11月)	A-SG: 1本 C-SG: 3本	有意な信号指示があった1本の伝熱管の減肉箇所にスケールが確認され、 <u>スケールによる減肉と推定</u> 。その他2本の伝熱管についても、近傍の管支持板上で摩耗痕のあるスケールを回収。	 <p>減肉箇所(A-SG)</p> <p>スケール</p>

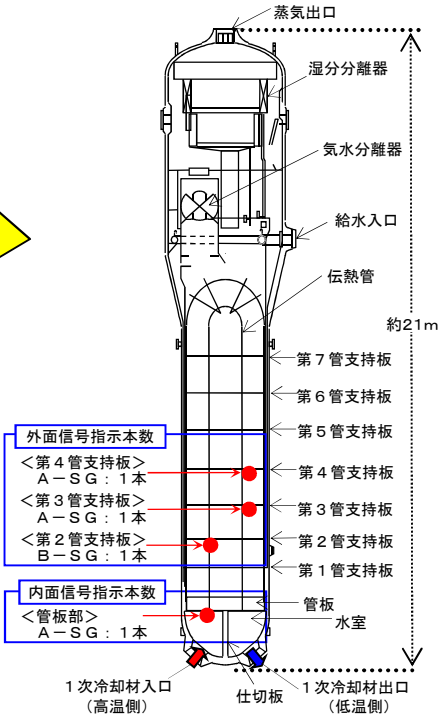
外面からの信号指示があった伝熱管の調査

発生箇所

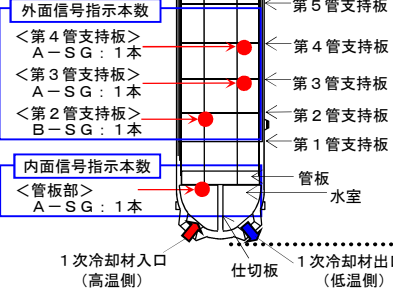
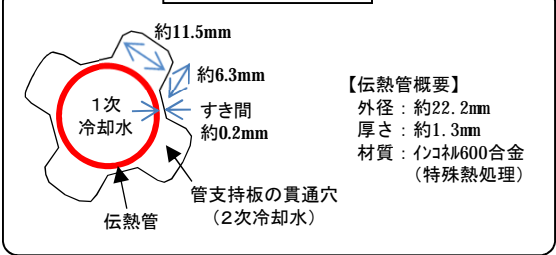
系統概要図



蒸気発生器の概要図

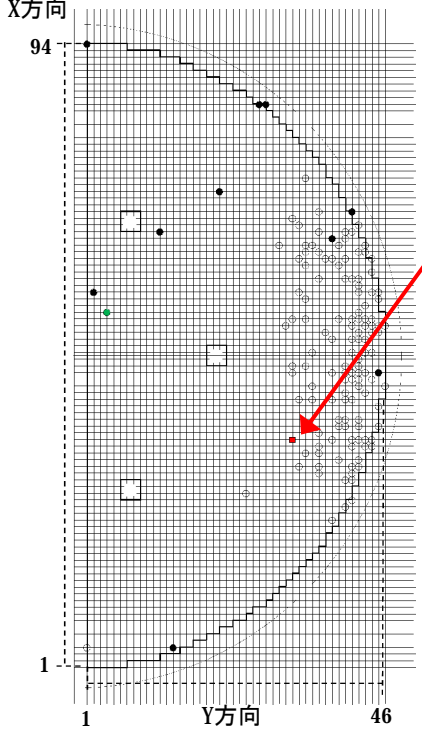


伝熱管の拡大平面図



B蒸気発生器の調査

B蒸気発生器（高温側）上部から見た伝熱管位置を示す図



<第2管支持板>
 有意な信号指示管 (X35-Y32)

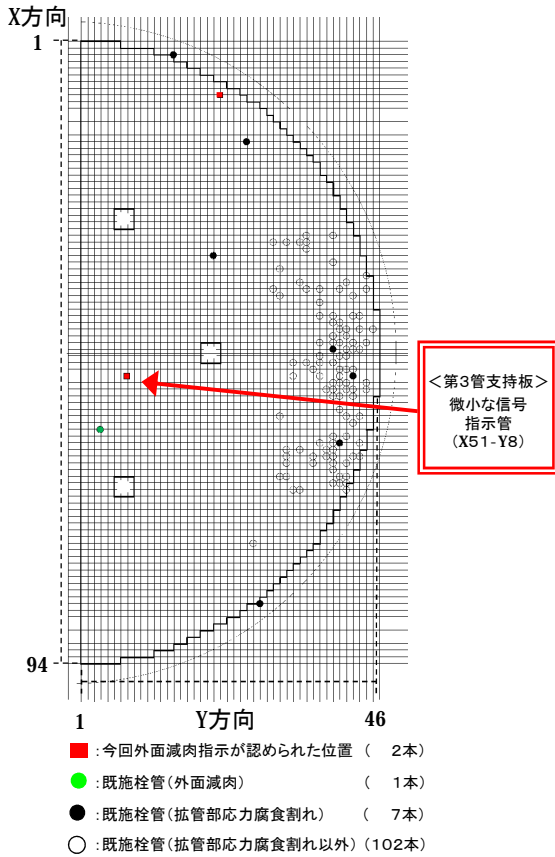
- : 今回外面減肉指示が認められた位置 (1本)
- : 既施検管(外面減肉) (1本)
- : 既施検管(拡管部応力腐食割れ) (10本)
- : 既施検管(拡管部応力腐食割れ以外) (124本)

小型カメラで確認したきずの状況

第2管支持板 (X35-Y32)

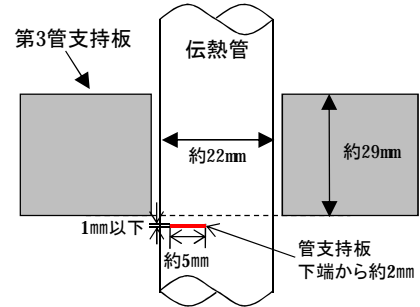
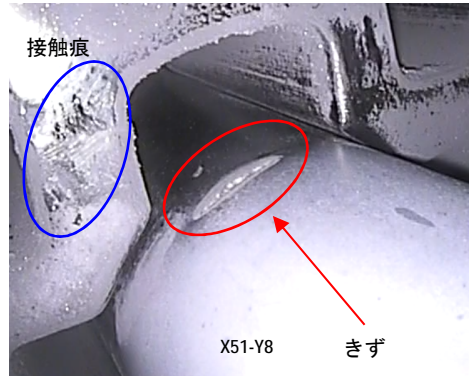
A 蒸気発生器の調査

A 蒸気発生器（低温側）上部から見た伝熱管位置を示す図

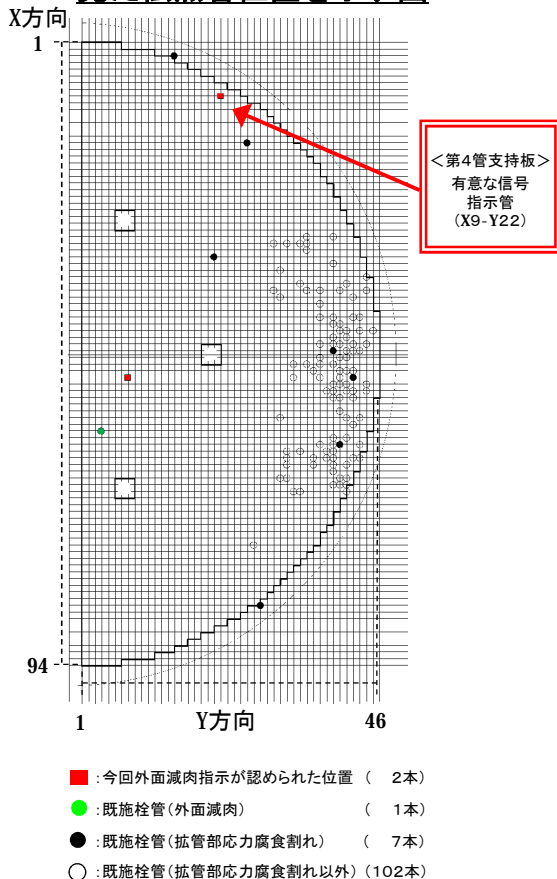


小型カメラで確認したきずの状況

第3管支持板 (X51-Y8)

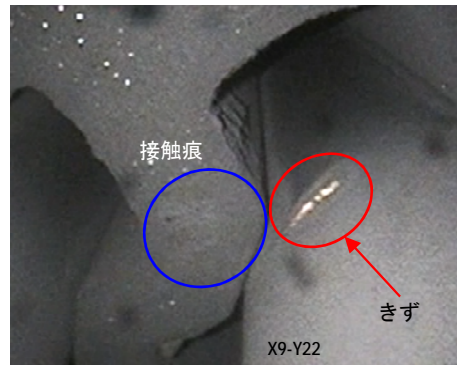


A 蒸気発生器（低温側）上部から見た伝熱管位置を示す図

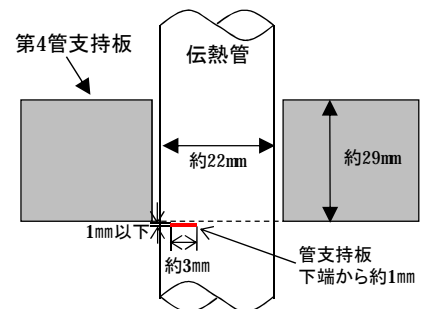


小型カメラで確認したきずの状況

第4管支持板 (X9-Y22)

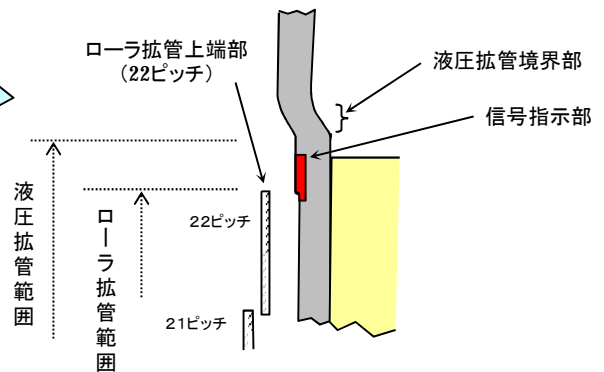
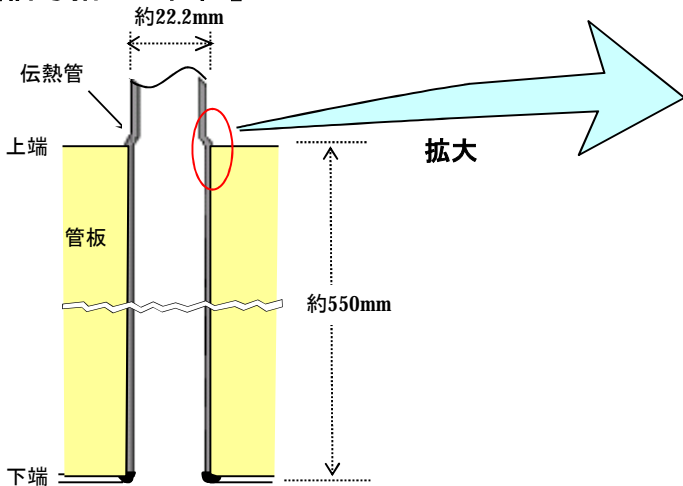


※：黒い影のようなものは小型カメラのレンズに付着した汚れ



内面からの信号指示があった伝熱管の調査

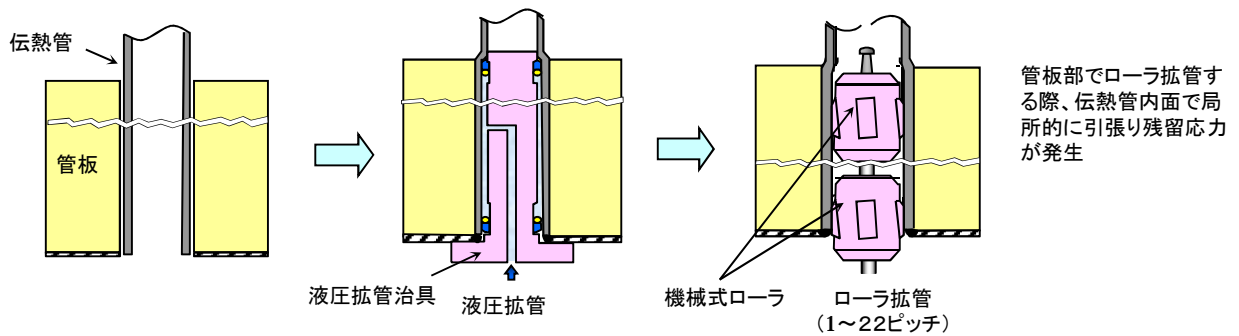
【信号指示の位置】



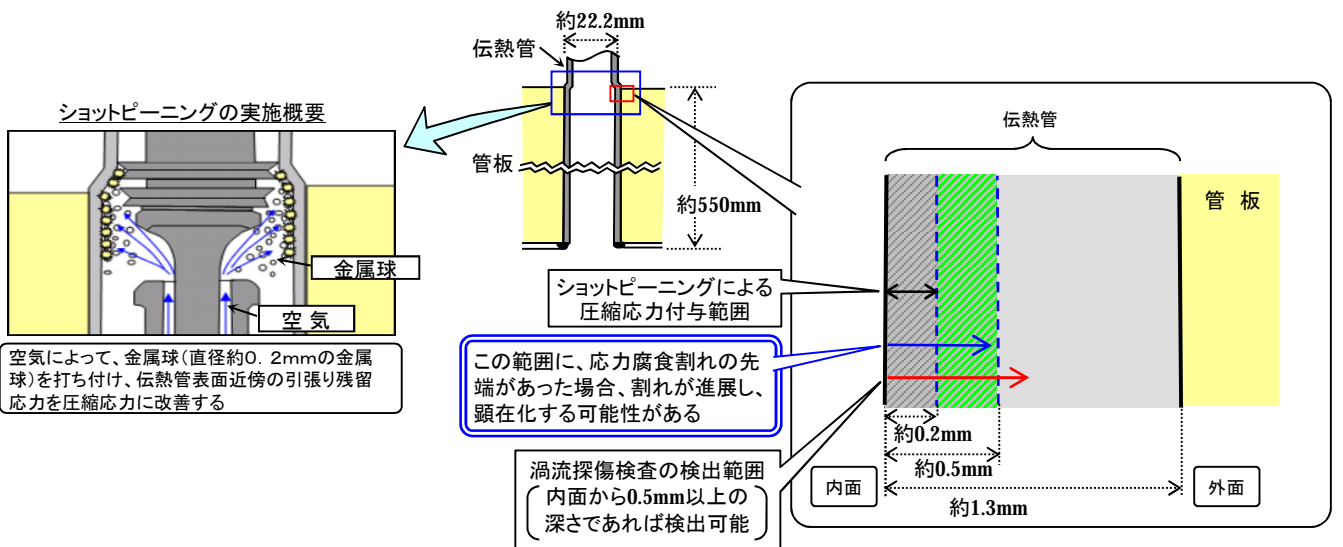
調査結果

信号指示位置は22ピッチローラ拡管
上端部であった

蒸気発生器製造時の管板部の伝熱管拡管方法



【ショットピーニングの効果と渦流探傷検査(ECT)の検出範囲】




【運転実績の調査】

1次冷却材の主要パラメータである温度、圧力、水質について調査を実施した結果、これまでの運転実績の中で、過大な応力を発生させる温度、圧力の変化はなく、水質も基準値の範囲内で安定していたことを確認しました。

原因は、SG製造時に伝熱管内面のローラ拡管の際に生じた引張応力と運転時の内圧および温度環境が相まって生じる応力腐食割れ(既往知見)であると推定しています。

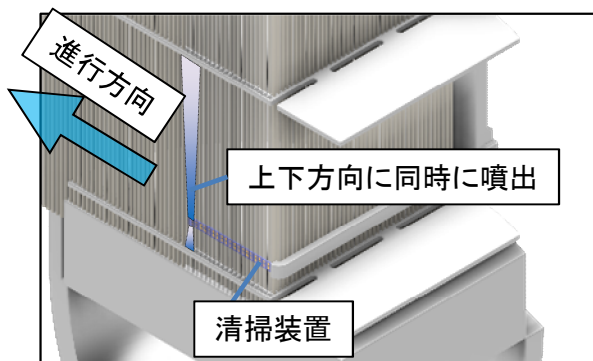
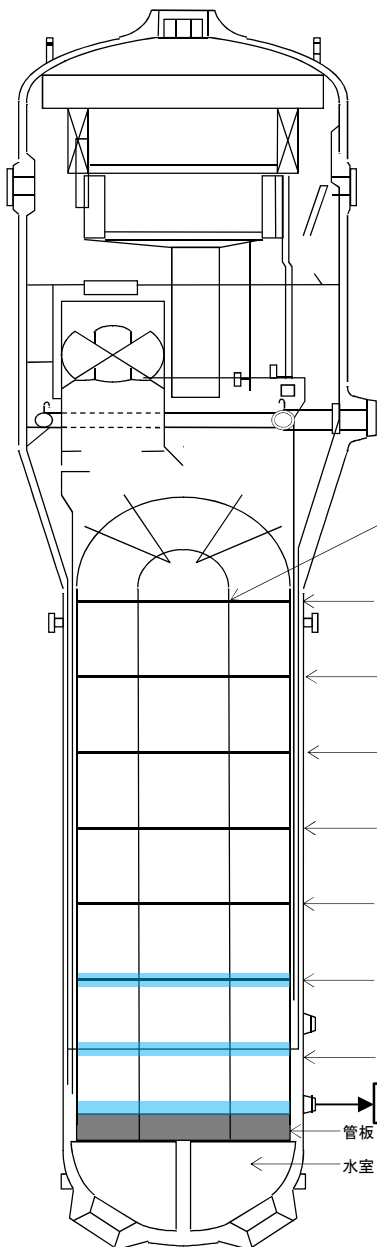
蒸気発生器内のスケール等の回収

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器内の洗浄を実施します。

洗浄箇所：
(管板、第1管支持板および第2管支持板上)

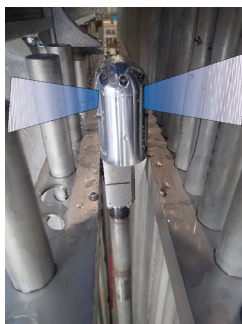
①垂直ノズルによる洗浄

上下方向に高圧水を噴射することで、管支持板と伝熱管との隙間を清掃し、スケール等を管支持板上へ移動させる。



②水平ノズルによる洗浄

①により管支持板上に移動させたスケール等を押し流し、管板に落下させる。



③管板上の洗浄

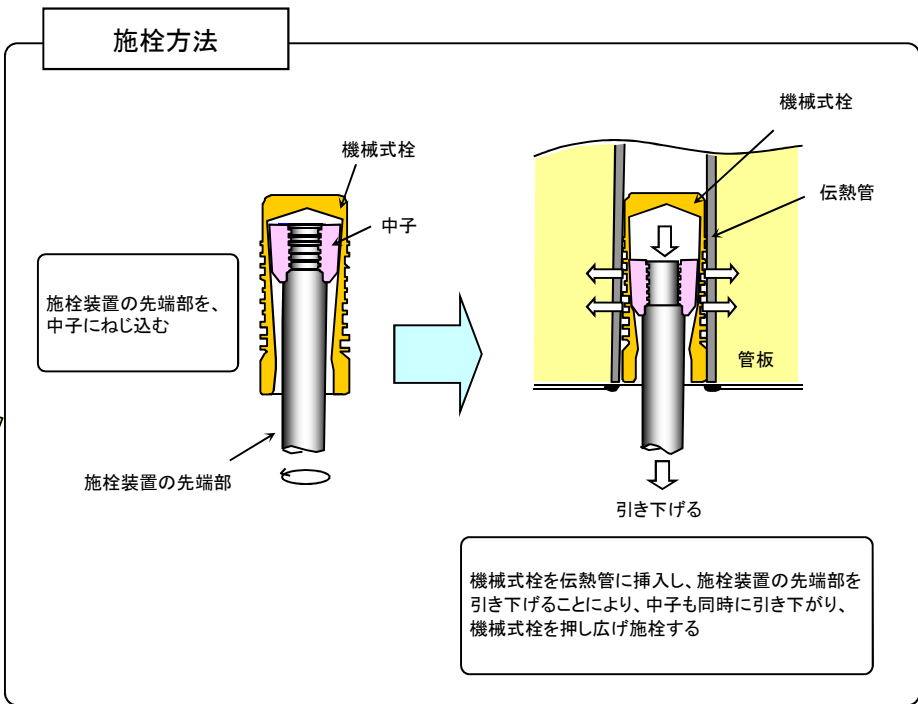
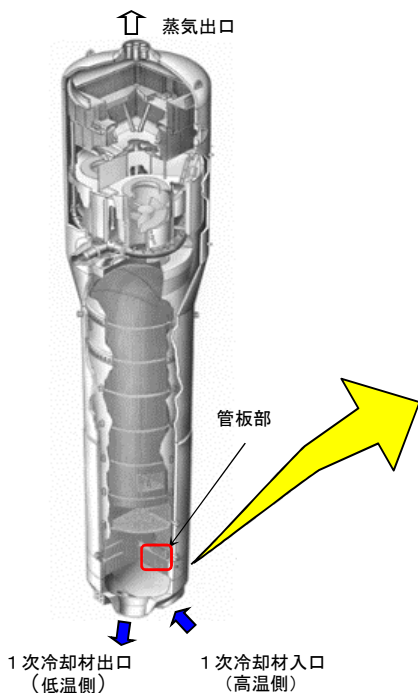
定期検査毎に実施している高圧水による管板上の洗浄により、スケール等を回収する。

蒸気発生器伝熱管の施栓方法と施栓状況

【蒸気発生器伝熱管の施栓方法】

◆ 損傷が認められた蒸気発生器伝熱管4本については、高温側および低温側管板部で閉止栓（機械式栓）を施工し、使用しないこととします。

蒸気発生器の概要図



【高浜発電所3号機の蒸気発生器伝熱管の施栓状況】

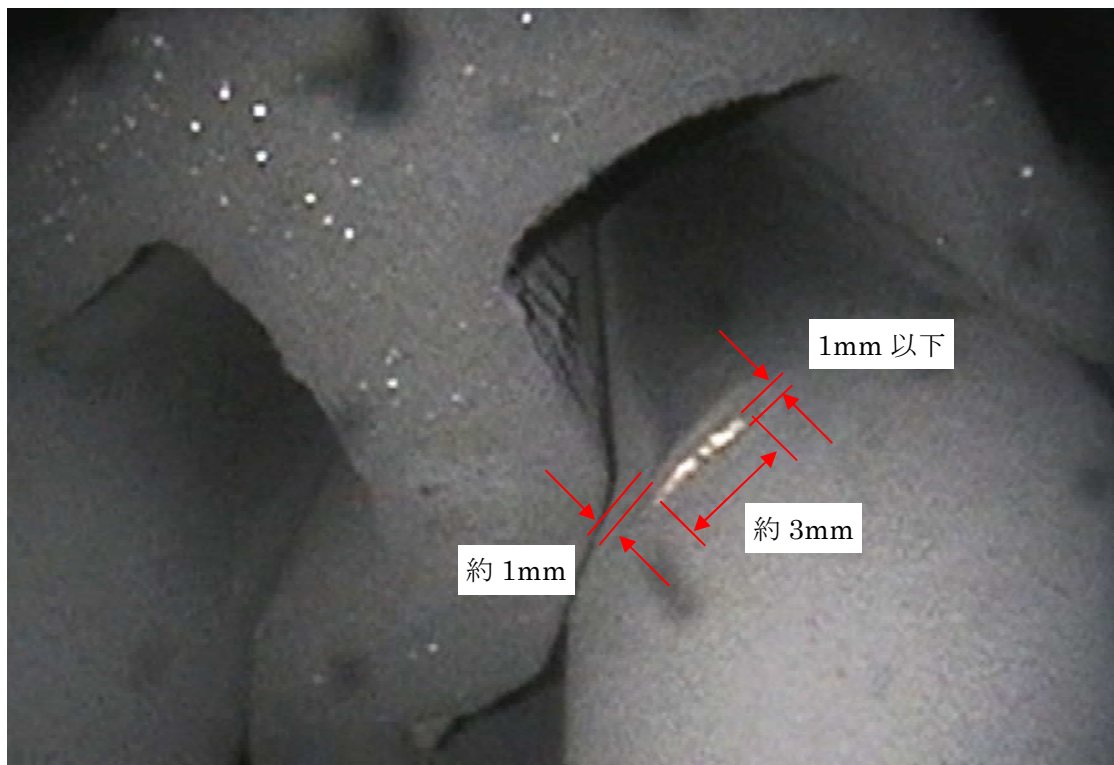
	A蒸気発生器 (3,382本)	B蒸気発生器 (3,382本)	C蒸気発生器 (3,382本)	合計 (10,146本)
検査対象本数	3,272	3,247	3,261	9,780
今回施栓予定	3	1	0	4
累積施栓本数 (応力腐食割れによる施栓本数)	113 (8)	136 (10)	121 (7)	370 (25)
(外面減肉による施栓本数) [施栓率]	(3) [3.4%]	(2) [4.1%]	(1) [3.6%]	(6) [3.7%]

○ 蒸気発生器1基あたりの伝熱管本数: 3,382本

○ 安全解析施栓率は10%

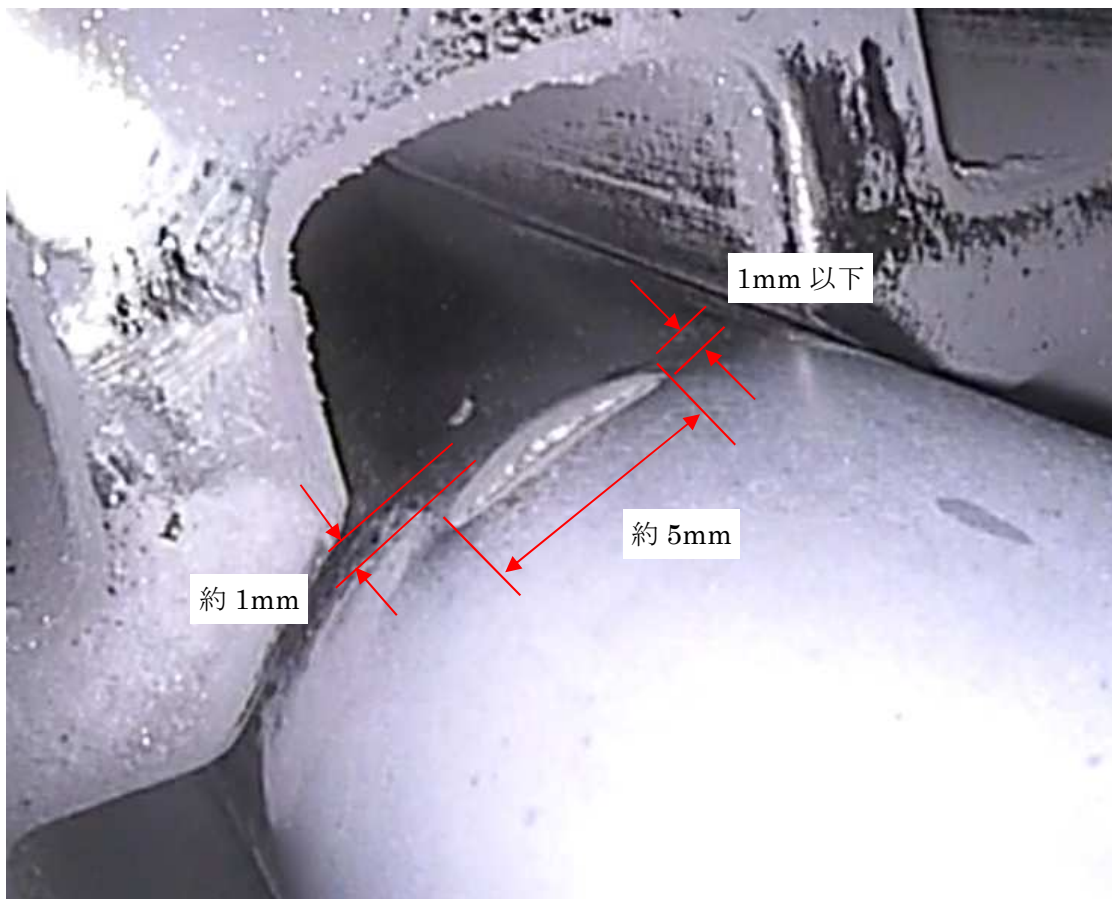
(伝熱管の施栓率が10%の状態において、プラントの安全性に問題がないことが確認されている)

高浜 3 号機 A-S/G 第四管支持板下面 X9-Y22



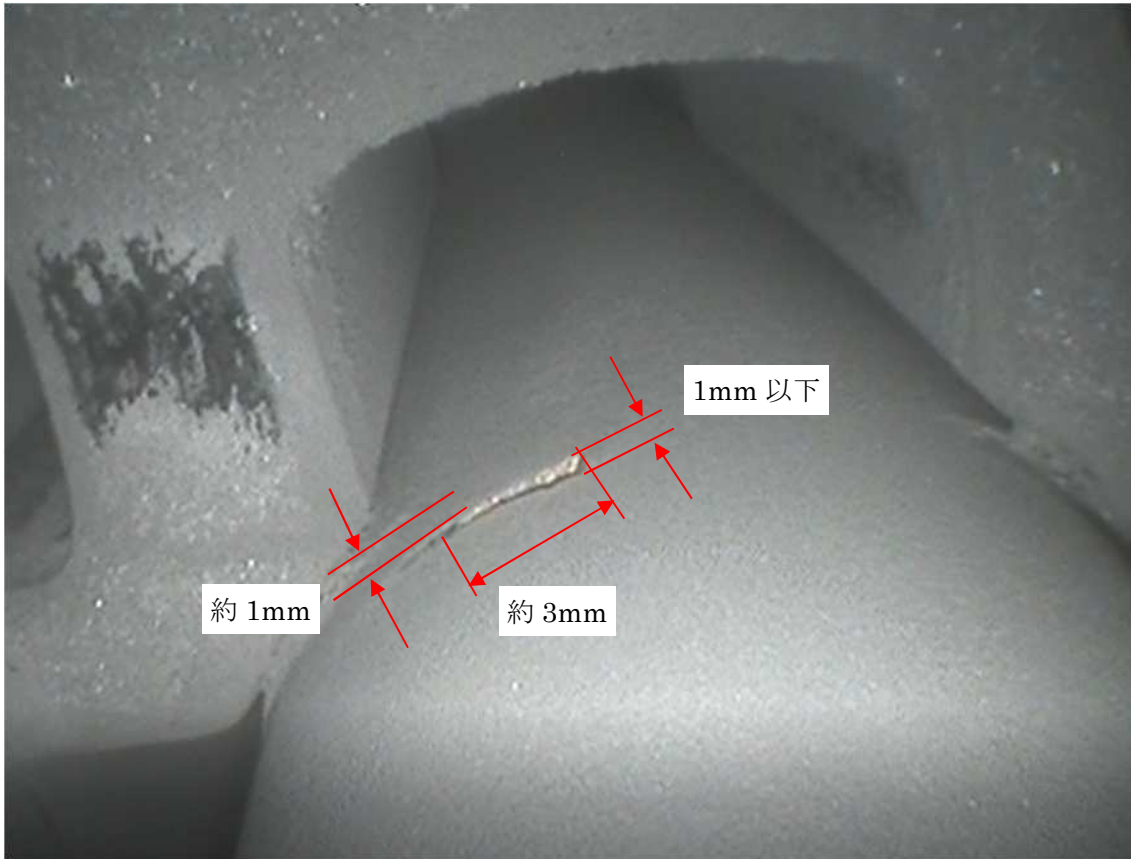
(減肉率 : 約 5.7%)

高浜 3 号機 A-S/G 第三管支持板下面 X51-Y8







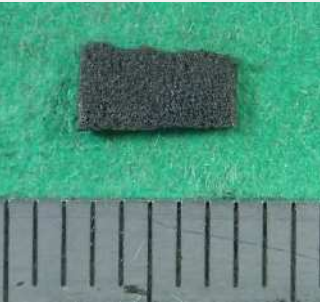







(減肉率：判定基準未滿)

高浜 3 号機 B-S/G 第二管支持板下面 X35-Y32



(減肉率：約 4.1%)

スケール外観写真

外観	S G	第一管支持板上	第二管支持板上	管板上
	<p>A 器内</p>			 <p>COLD Col 37/38 Row 40 Len 51.5 in. Dex 86.5 CW Tip 5.9 in.</p>
	<p>B 器内</p>			 <p>HOT Col 17/18 Row 23 Len 36.0 in. Dex 88.2 CCW Tip 4.6 in.</p>
	<p>C 器内</p>			

高浜発電所 3号機および 4号機 蒸気発生器外面減肉箇所一覧表 資料3

プラント	定検回次 (定検期間※)	蒸気 発生器	アドレス	低温側／高温側	管支持板	減肉率
3号機	第23回 (2018.8～2018.11)	A	X59-Y4	低温側	第3管支持板	20%未満
		B	X54-Y4	低温側	第3管支持板	約32%
	第24回 (2020.1～2021.3)	C	X38-Y3	低温側	第3管支持板	約28%
						約56%
		A	X9-Y22	低温側	第4管支持板	約57%
	第25回 (2022.3～)	A	X51-Y8	低温側	第3管支持板	20%未満
		B	X35-Y32	高温側	第2管支持板	約41%
4号機	第22回 (2019.9～2020.2)	A	X85-Y2	低温側	第3管支持板	約61%
		B	X92-Y8	低温側	第3管支持板	約51%
		C	X45-Y5	低温側	第2管支持板	約63%
		C	X52-Y9	低温側	第3管支持板	約59%
		C	X91-Y4	低温側	第2管支持板	約42%
	第23回 (2020.10～2021.4)	A	X51-Y4	低温側	第3管支持板	約33%
		C	X21-Y8	低温側	第3管支持板	約36%
		C	X55-Y3	低温側	第3管支持板	約25%
		C	X55-Y8	低温側	第3管支持板	約32%

※定検期間は解列年月～並列年月を示す。