

高浜発電所3号機の定期検査状況について (蒸気発生器伝熱管損傷の原因と対策)

2023年11月9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87.0万キロワット、定格熱出力266万キロワット)は、2023年9月18日から実施している第26回定期検査において、3台(A、B、C)ある蒸気発生器(以下、SG)の伝熱管全数^{※1}について渦流探傷検査(以下、ECT)^{※2}を実施しました。

その結果、A-SGの伝熱管1本の高温側第2管支持板部付近に外面(2次側)からの減肉とみられる有意な信号指示^{※3}が認められました。また、C-SGの伝熱管1本の高温側管板上部に内面(1次側)からの割れとみられる有意な信号指示が認められました。

- ※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3,269本、B-SGで3,246本、C-SGで3,261本、合計9,776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し、きず等を検出する検査であり、伝熱管の内外面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。

(2023年10月17日お知らせ済み)

当社は、これまでの調査結果や原因と対策を取りまとめ、本日、原子力規制委員会に原子炉施設故障等報告書を提出しました。

今後、原子力規制委員会が当該報告書の確認を行うことから、当社は、真摯に対応してまいります。

1. 外面からの信号指示が認められた伝熱管の調査

伝熱管の外面減肉については、2018年以降の高浜発電所3号機および4号機の定期検査(3号機:第23回~第25回、4号機:第22回~第24回)において、これまで計27本確認しており、直近の事例(3号機:第25回、4号機:第23回・第24回)では、原因はスケール^{※4}による摩耗減肉と推定しています。このことから、信号指示が認められた箇所について、小型カメラを用いた外観観察等を実施しました。

- ※4 2次冷却水に含まれる鉄分が、SG器内に流れ集まって伝熱管に付着したもの。

(1) 信号指示が認められた箇所の外観観察

A-SGの第2管支持板下面に信号指示が認められた伝熱管1本について、小型カメラを用いた外観観察を行った結果、当該伝熱管の管支持板下面に付着物を確認し、回収しました。

また、当該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。きずの大きさは、幅約1mm以下、周方向に約7mmでした。

(2) 回収した付着物の詳細調査

外観観察の結果、回収した付着物は長さ約23mm、幅約7mmで、過去から認められているスケールと同様に黒い色調であることを確認しました。また、伝熱管の外径に近い円筒状に沿った形状であり、伝熱管との接触部位に接触痕および伝熱管の成分であるニッケルおよびクロムを確認しました。

これらのことから、付着物は伝熱管表面に生成されたスケールと断定しました。また、断面観察の結果、密度の高い酸化鉄の層（以下、稠密層）の厚さが0.1mmあり、過去の調査結果を踏まえると、伝熱管を摩耗させる可能性のあるスケールであることを確認しました。

(3) SG器内のスケールの残存状況調査および伝熱管表面の観察

小型カメラを用いて、A-SGの管板、第1管支持板上を調査した結果、過去の調査と同様にスケールおよびスラッジ※⁵が残存していることを確認しました。

また、近傍の伝熱管表面を観察した結果、局所的にスケールが剥離した痕跡を確認しました。

※⁵ スケールが砕けて小さくなったもの。

(4) 薬品洗浄による効果の確認

SG器内に残存しているスケールを取り出し、これまでの薬品洗浄による効果を確認するため、断面観察および摩耗試験を実施しました。

(断面観察)

高浜発電所3号機および4号機では、2018年以降に発生した外面減肉事象を踏まえ、これまでに272個のスケールを対象に断面観察および摩耗試験を実施しており、薬品洗浄後のスケールは全体的に稠密層の厚さが薄くなっていることを確認しています。

これらのデータ拡充等を目的として、今回は、稠密なスケールが多く堆積していると考えられる箇所（A、B、C-SGの管板、第1管支持板および第2管支持板上）から、比較的大きなスケールを60個取り出し、断面観察を行いました。

その結果、稠密層が主体のスケールを1個（約6mm×約4mm）確認しました。また、前回定期検査（第25回）において実施した薬品洗浄前のデータと比較した結果、全体的に稠密層の厚さが薄くなっていることを確認しました。

(摩耗試験)

断面観察を実施した60個のスケールのうち、摩耗試験が可能な大きさ(約10mm×約5mm以上)である10個を対象に試験を行った結果、伝熱管を摩耗させる可能性のあるスケールは確認されませんでした。

2. 過去のSG伝熱管の外表面減肉事象の調査で得られた知見

(1) これまでの定期検査等における調査結果

(スケールの発生・減肉メカニズム)

スケールは2次冷却水に含まれる鉄分が、SG器内に集まって伝熱管に付着したものであり、スケールの生成と関係するSG器内への鉄イオンや鉄微粒子の持ち込み量について調査した結果、高浜発電所3号機および4号機については、SGの運転時間が他プラントよりも長いことなどから、持ち込まれた鉄分の量が多いことを確認しています。

また、福島第一原子力発電所事故後の長期停止中は、腐食防止のため、SG器内をヒドラジン水による満水保管にしており、その状態を模擬した試験の結果、時間の経過とともにスケールを構成する鉄粒子が結合し粒径が大きくなることを確認しています。粒径が大きくなれば伝熱管との接触面積が減少するため、プラントの運転等に伴い伝熱管からスケールが剥離しやすい状態になっていたものと推定しています。

減肉メカニズムについては、工場での再現試験等の結果、SG器内の2次冷却水の上昇流により、スケールの形状によっては管支持板下面に押し付けられその場に留まり、伝熱管がプラント運転に伴う振動でスケールと繰り返し接触し、摩耗減肉が発生することを確認しています。

(薬品洗浄によるSG器内への影響)

薬品洗浄におけるSG器内の残存スケール量の違いがSG器内構成部材に与える腐食影響を評価した結果、スケール量が少ない場合には、炭素鋼製の管群外筒等の腐食量が相対的に大きくなることを確認しています。

(2) これまでの薬品洗浄による効果の確認

高浜発電所3号機および4号機において、2018年以降に発生した外面減肉事象への対策として、これまで2回、SG器内の薬品洗浄を実施しています。

(1回目)

高浜発電所3号機および4号機の前々回定期検査(3号機:第24回、4号機:第23回)において薬品洗浄を実施した結果、回収したスケールが脆弱化していることを確認しています。

(2回目)

高浜発電所3号機の前回定期検査(第25回)において、スケールによるものと推定される伝熱管の外面減肉事象が再度発生したことを踏まえ、薬品洗浄効果の確認試験を行った結果、スケール近傍にスラッジが存在する場合はスケールの脆弱化効果が低減することを確認しました。このため、高浜発電所3号機および4号機の前回定期検査(3号機:第25回、4号機:第24回)において実施した薬品洗浄の前に、SG器内のスケールおよびスラッジを可能な限り除去することとし、小型高圧洗浄装置を用いて管支持板上も含めたSG器内を洗浄しました。その結果、SG器内の残存スラッジの回収量が増加したことから、SG器内のスケールの多くが脆弱化し、除去できたことを確認しています。

3. 外面減肉事象に関する知見の総括

これまでSG器内から取り出したスケールの調査により、スケールの脆弱化が図られていることを確認しています。また、SG器内の洗浄を実施したことで、鉄分の総量も減少しています。

さらに、現状の2次系給水の水質管理では、配管内面等からの鉄分の溶出はほとんどなく、SG器内への鉄分の持ち込み量を十分抑制できていることから、今後、新たに厚みのある稠密層を有するスケールが生成される可能性は低いと考えています。

一方で、伝熱管を損傷させる可能性のあるスケールを完全に除去するには至っていない状況を踏まえ、今後実施するSG取替えまでの間、SG器内のスケールに係るデータ拡充を図る観点から、引き続き、高浜発電所3号機および4号機の定期検査において、伝熱管表面のスケール付着・剥離状況等を確認していきます。

4. 内面からの信号指示が認められた伝熱管の調査

当該伝熱管については、信号指示の場所が高温側管板部のローラ拡管^{※6} 上端部付近であり、伝熱管の軸方向に沿った内面きずを示していることから、従来と同様に応力腐食割れと考えられるため、過去の調査結果を確認するとともに、運転履歴を調査しました。

(1) 過去の調査結果の確認

高浜発電所3号機では、第12回以降の定期検査の中で、伝熱管25本の高温側管板拡管部で損傷を確認しています。

その原因は、SG製造時に伝熱管内面からローラ拡管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しています。

なお、高浜発電所3号機では、第13回定期検査において、伝熱管の高温側管板拡管部内面にショットピーニング^{※7}を施工し、伝熱管内表面の引張り残留応力を改善しました。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くなることを確認しています。

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。

※6 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、伝熱管と管板接合させた箇所。

※7 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。

(2) 運転履歴の調査結果

1次冷却材の主要パラメータである温度、圧力、水質を調査した結果、前回定期検査（第25回）終了以降の運転実績の中で、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。

5. 推定原因

伝熱管の外面減肉が認められた原因は、これまでに発生した事例と同様、過去に持ち込まれた鉄分により伝熱管表面に生成された稠密なスケールが前回の定期検査（第25回）時の薬品洗浄の後もSG器内に残存し、プラント運転中に管支持板下面に留まり、そのスケールに伝熱管が繰り返し接触したことで発生した摩耗減肉と推定しました。

また、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。

6. 対策

これまでの対策や効果を踏まえ、スケールの残存量のさらなる低減のため、小型高圧洗浄装置の改良等により、SG器内の洗浄を強化します。

なお、きずが認められた伝熱管2本については、高温側および低温側管板部で施栓し、使用しないこととします。

今後も毎定期検査時にSG器内のスケールを調査するとともに、長期的な信頼性を確保するという観点から、予防保全策として第28回定期検査においてSGの取替えを計画しています。

以 上

添付資料1：外面からの信号指示が認められた伝熱管の調査

添付資料2：回収した付着物の詳細調査

添付資料3：これまでに実施した蒸気発生器器内の薬品洗浄による効果の調査

添付資料4：内面からの信号指示が認められた伝熱管の調査

添付資料5：伝熱管の施栓方法と施栓状況

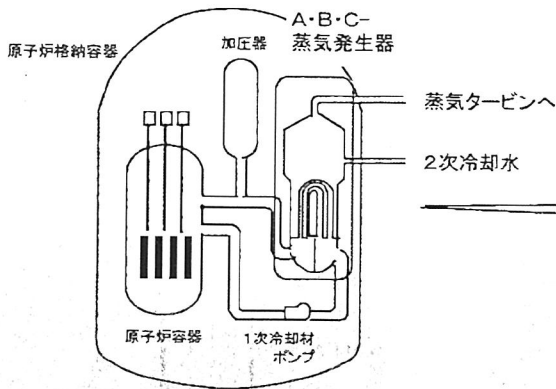
添付資料6：小型高圧洗浄装置による洗浄（スケール等の回収）の強化

添付資料7：これまでの経緯（高浜発電所3、4号機における伝熱管外面の損傷事例）

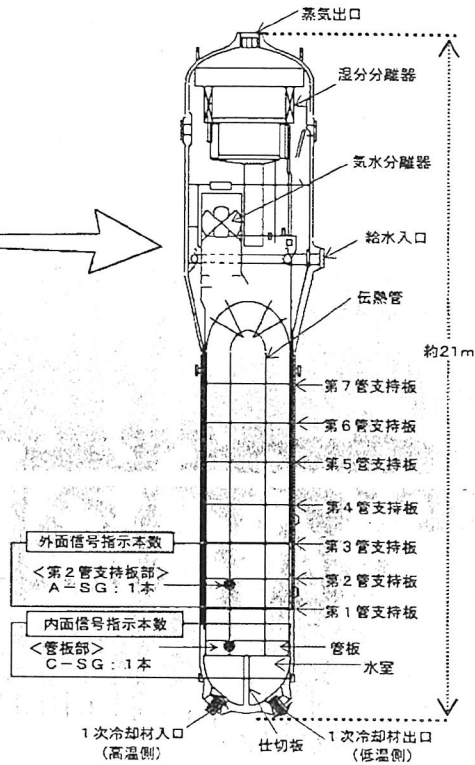
外面からの信号指示が認められた伝熱管の調査

発生箇所

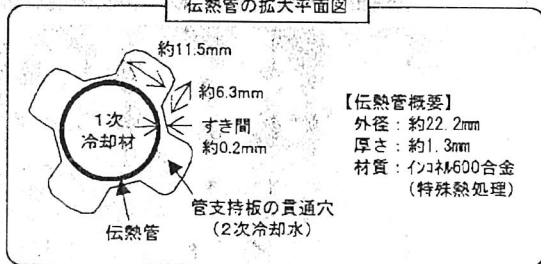
系統概要図



蒸気発生器の概要図



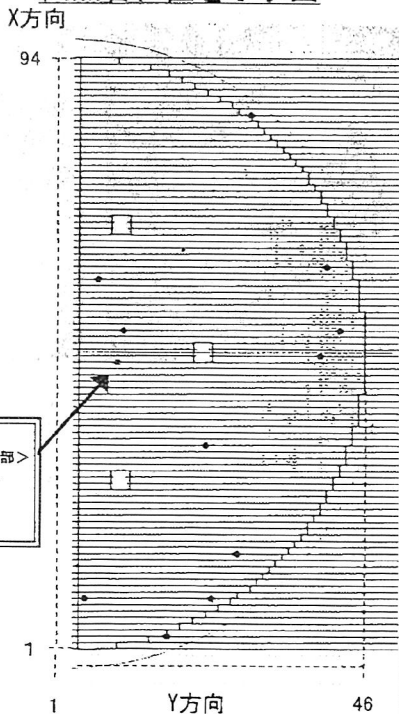
伝熱管の拡大平面図



【伝熱管概要】
 外径：約22.2mm
 厚さ：約1.3mm
 材質：インコニ600合金
 (特殊熱処理)

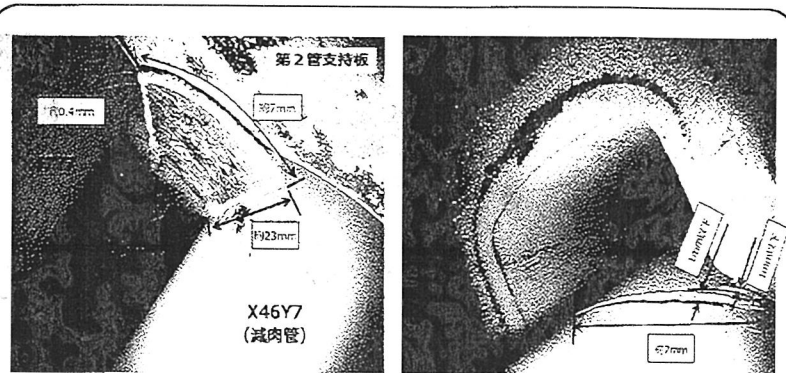
A-蒸気発生器の調査

A-蒸気発生器 (高温側) 上部から見た 伝熱管位置を示す図



- : 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) (3本)
- : 既施検管(拡管部応力腐食割れ) (8本)
- : 既施検管(拡管部応力腐食割れ以外) (102本)

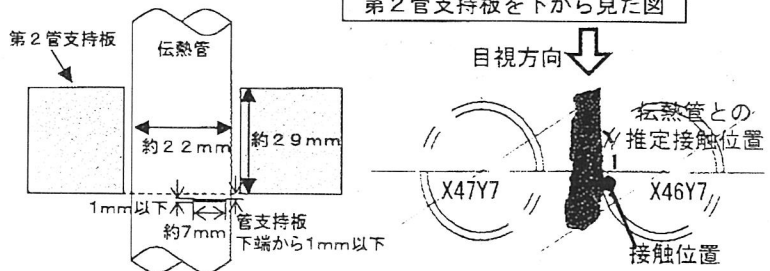
小型カメラによる外観観察結果



(付着物回収前)

(付着物回収後)

第2管支持板を下から見た図

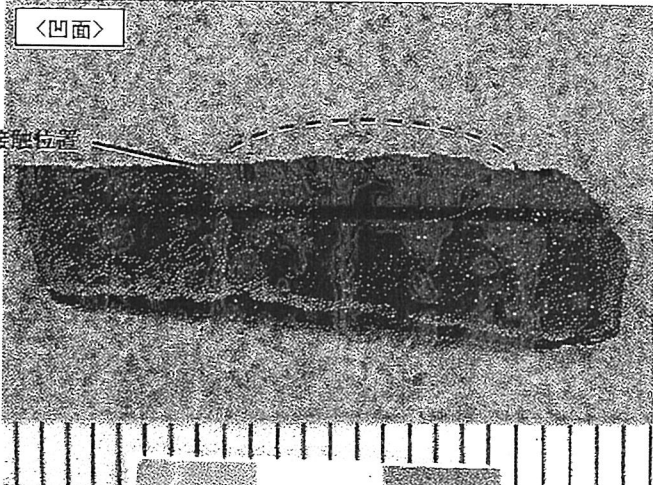
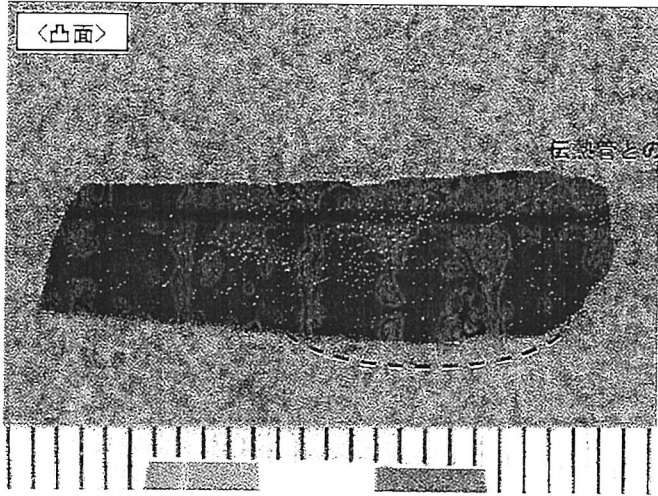


小型カメラを用いた外観観察の結果、きずに接触する長さ約23mm、幅約7mmの付着物を確認し、回収。

回収した付着物の詳細調査

付着物の分析結果

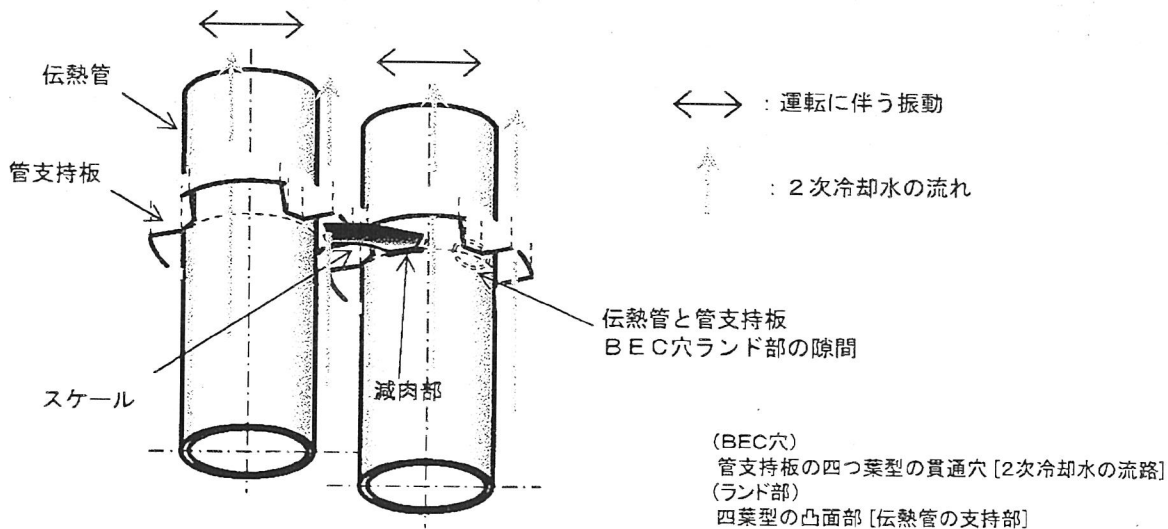
付着物は過去から認められているスケールと同様に黒い色調であることを確認。また、伝熱管の外径に近い円筒状に沿った形状であり、伝熱管との接触部位に接触痕および伝熱管の成分であるニッケルおよびクロムを確認。これらのことから、付着物は伝熱管表面に生成されたスケールと断定。



大きさ：約2.3mm×約7mm
 厚さ：約0.4mm
 質量：約0.2g

管支持板下面での減肉のメカニズム

過去の原因調査の中で、工場で再現試験等を実施した結果、SG器内の2次冷却水の上昇流により、スケールの形状によっては管支持板下面に押し付けられその場に留まり、伝熱管がプラント運転に伴う振動でスケールと繰り返し接触し、摩耗減肉が発生することを確認。



これまでに実施した蒸気発生器器内の薬品洗浄による効果の調査

薬品洗浄の概要

蒸気発生器器内の伝熱管群部分をエチレンジアミン四酢酸溶液で浸し、スケールの主成分である鉄分を溶出させることで器内に存在するスケールの脆弱化を図るもの。

<高浜発電所3号機 薬品洗浄実績>

		前々回の定期検査 (第24回)	前回の定期検査 (第25回)
洗浄条件	1回目	薬液濃度：3% 洗浄範囲：第3支持板以下	薬液濃度：3% 洗浄範囲：伝熱管全体
	2回目	薬液濃度：2% 洗浄範囲：伝熱管全体	薬液濃度：3% 洗浄範囲：伝熱管全体

薬品洗浄効果(スケールの脆弱化傾向)

(1) 薬品洗浄による鉄分除去量

これまでに実施した薬品洗浄により、合計約1,980kgの鉄分を除去できたことを確認。

<高浜発電所3号機 鉄分除去量>

	前々回の定期検査 (第24回)	前回の定期検査 (第25回)
蒸気発生器 1台あたりの鉄分除去量	約670kg	約1,310kg

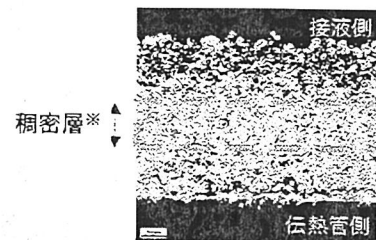
(2) スケールの脆弱化傾向

蒸気発生器器内から回収したスケールの断面を観察し、薬品洗浄実施前と実施後の稠密層厚さの分布に係る違いを調査。

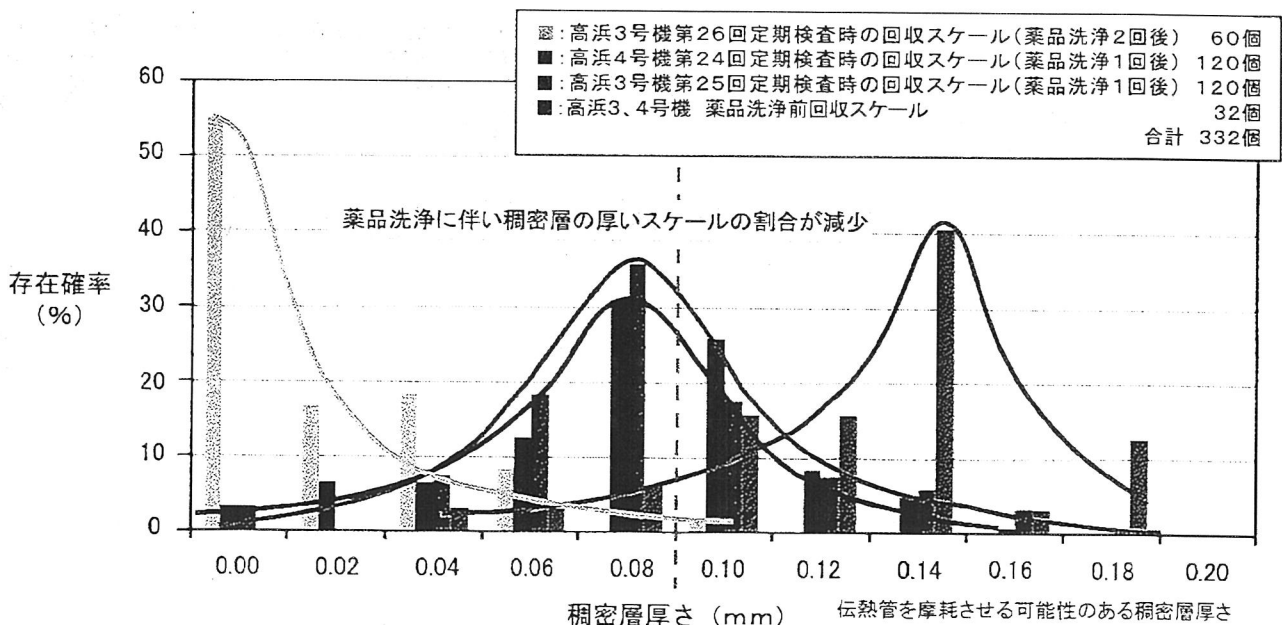
前々回の定期検査(第24回)から今回の定期検査(第26回)までのスケールの稠密層厚さを比較した結果、洗浄実施に伴い稠密層が薄くなる傾向を確認。

また、伝熱管を摩耗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きく減少しており、薬品洗浄による脆弱化効果が得られていると評価。

<断面観察結果の例>

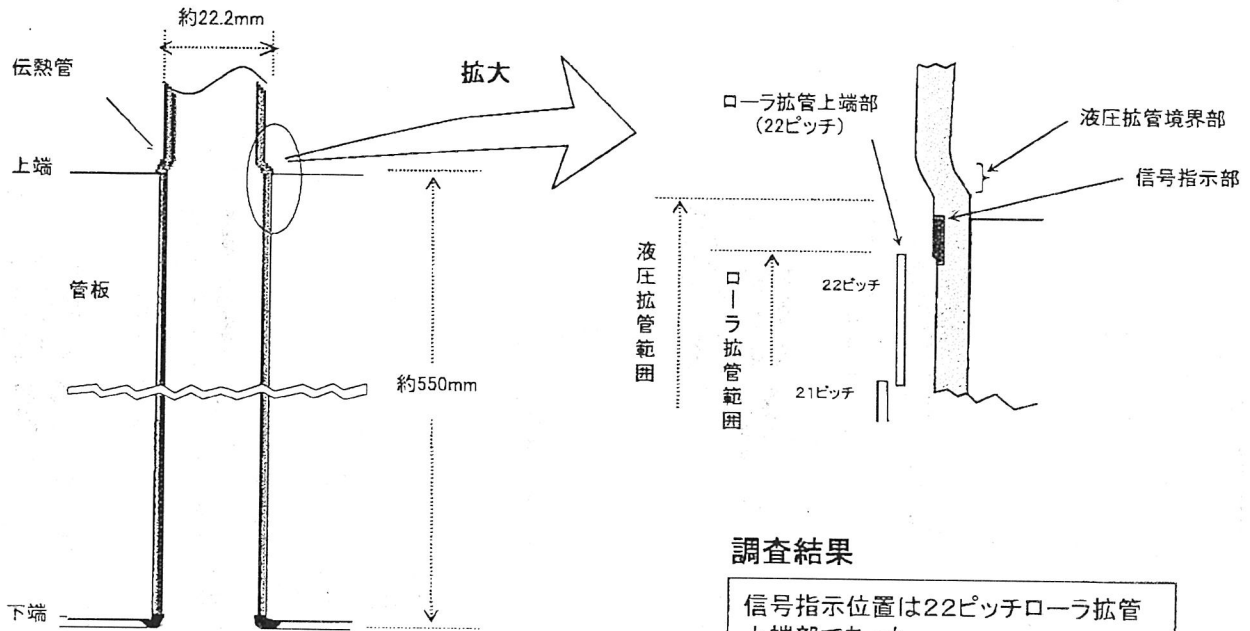


※密度の高い酸化鉄の層



内面からの信号指示が認められた伝熱管の調査

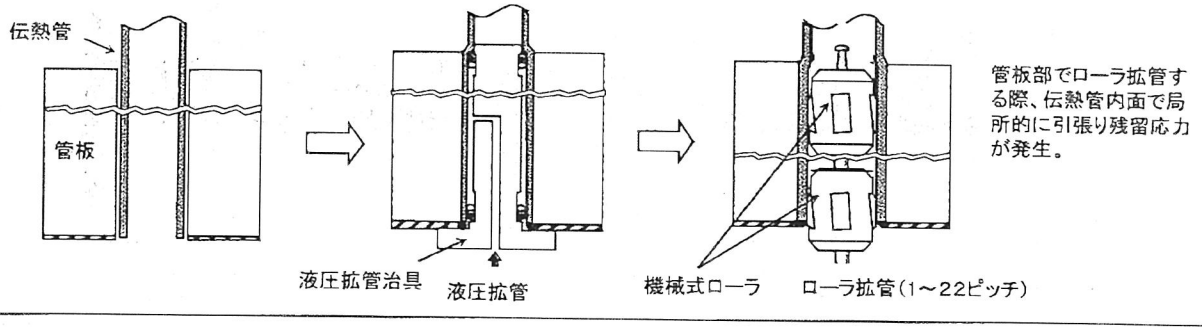
信号指示の位置



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



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、水質を調査した結果、前回定期検査(第25回)終了以降の運転実績の中で、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。

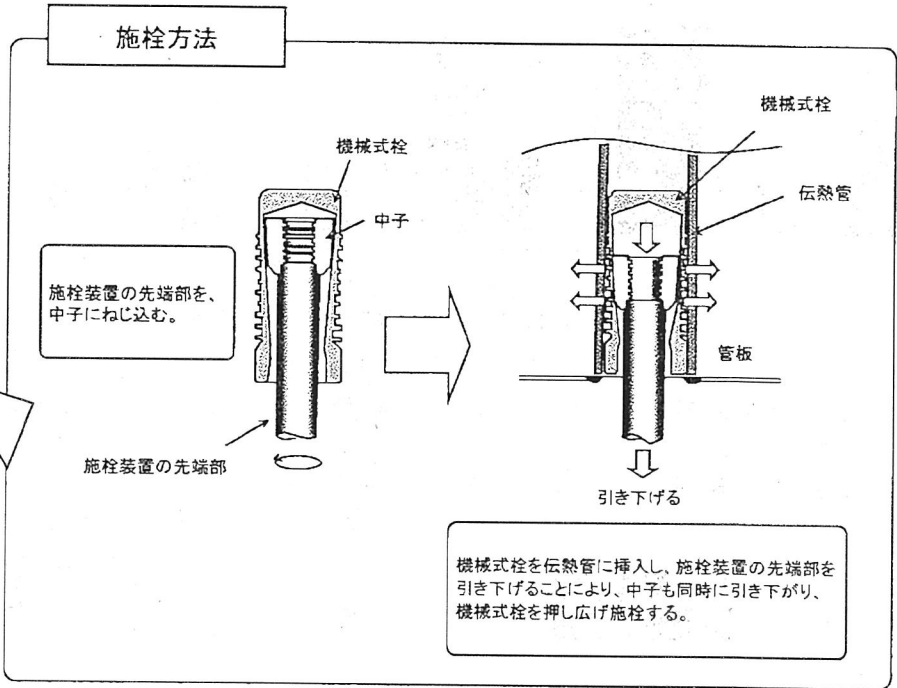
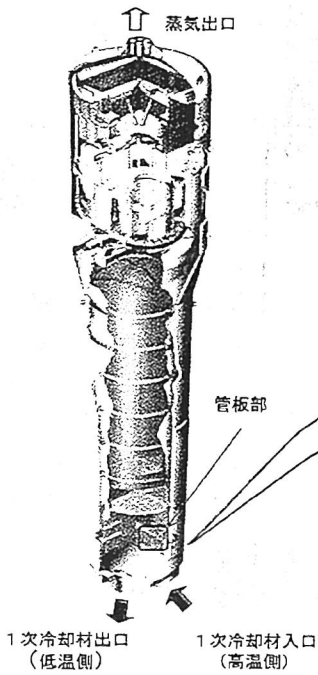
原因は、蒸気発生器製造時に伝熱管内面のローラ拡管の際に生じた引張り残留応力と運転時の内圧および温度環境が相まって生じる応力腐食割れ(既往知見)であると推定。

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

きずが認められた伝熱管2本については、高温側および低温側管板部で施栓し、使用しないこととする。

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	3,269	3,246	3,261	9,776
今回施栓予定	1	0	1	2
累積施栓本数 (応力腐食割れによる施栓本数)	114 (8)	136 (10)	122 (8)	372 (26)
(外面減肉による施栓本数) [施栓率]	(4) [3.4%]	(2) [4.0%]	(1) [3.6%]	(7) [3.7%]

○蒸気発生器1台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を確認している)

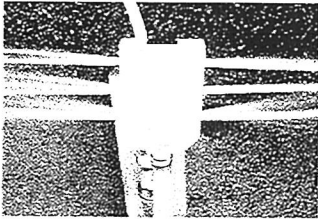
小型高压洗浄装置による洗浄(スケール等の回収)の強化

STEP1: 第7～第3管支持板の洗浄

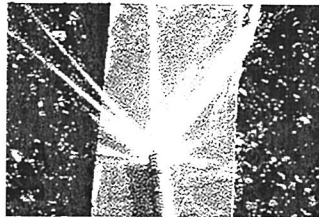
第7管支持板上ハンドホール(A)から装置を挿入し、高压水を噴射することにより、上層の第7管支持板上から順に第3管支持板上までのスケール等を下層の管支持板へ落下させる。

第3から第6管支持板用の噴射ノズルを改良し、噴射範囲の拡大および水の流量(水圧)を増加させ、洗浄を強化させる。

第7管支持板用

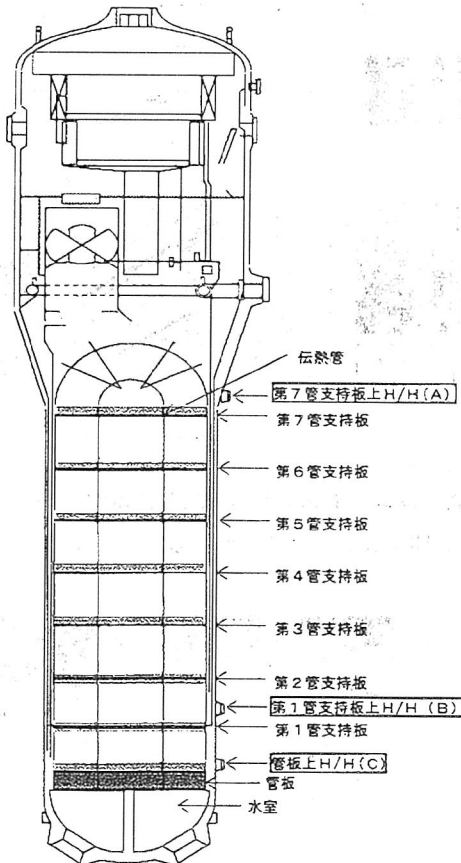


第3～6管支持板用(噴射ノズルを改良)



	改良前	改良後
吐出圧	約2.0MPa	約5.0MPa
流量	約3.9L/min	約7.3L/min

洗浄箇所:
(管板・第1管支持板から第7管支持板上)

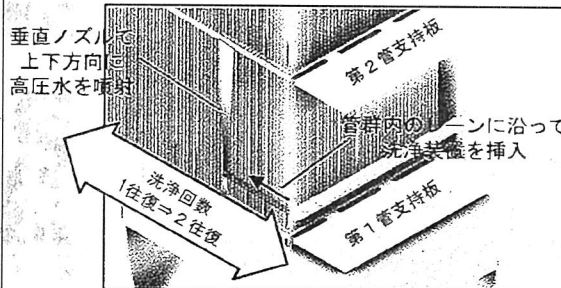


H/H: ハンドホール

STEP2-1: 第2、第1管支持板の洗浄(垂直ノズルによる洗浄)

第1管支持板上ハンドホール(B)から装置を挿入し、上下方向に高压水を噴射することで、管支持板と伝熱管との隙間を洗浄し、スケール等を管支持板上へ移動させる。

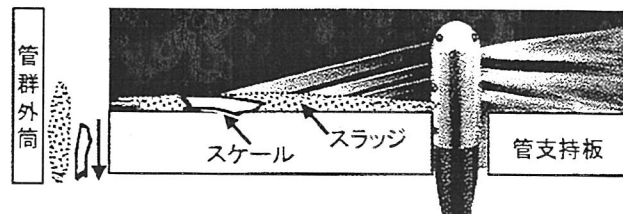
管群内の各レーンに清掃装置を挿入し洗浄を行う際、レーン毎(総数93レーン)の洗浄回数を前回の1往復から2往復(1往復分追加)に増やすことで、洗浄を強化させる。



洗浄装置	
吐出圧	約5.0MPa
流量	約10.0L/min

STEP2-2: 第2、第1管支持板の洗浄(水平ノズルによる洗浄)

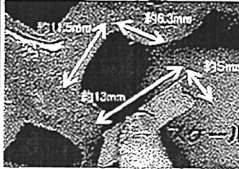

STEP2-1により管支持板上に移動させたスケール等を押し流し、管板に落下させる。



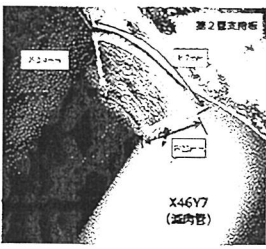
STEP3: 管板上の洗浄

定期検査毎に実施している高压水による管板上の洗浄により、管板上ハンドホール(C)からスケール等を回収する。

これまでの経緯(高浜発電所3、4号機における伝熱管外面の損傷事例)

定期検査	伝熱管外面の損傷本数	調査結果概要		スケールに対する対策
3号機 第23回 (2018年8月～)	A-蒸気発生器:1本 (第3管支持板) 【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。スケールの回収中に破損したため、スケール以外の異物による減肉と推定。異物は流出したものと推定。		
4号機 第22回 (2019年9月～)	A-蒸気発生器:1本 (第3管支持板) B-蒸気発生器:1本 (第3管支持板) C-蒸気発生器:3本 (第2管支持板2本、 第3管支持板1本) 【最大減肉率:63%】	A-蒸気発生器内にステンレス薄片を確認したが、摩耗痕が確認されなかったため、原因となった異物は前回の定期検査時に混入していたものと推定。なお、異物は流出したものと推定。		—
3号機 第24回 (2020年1月～)	B-蒸気発生器:1本 (第3管支持板) C-蒸気発生器:1本 (第3管支持板) 【最大減肉率:56%】	AおよびC-蒸気発生器内にガスケットフープ材を確認。C-蒸気発生器伝熱管の損傷原因を異物と推定。B-蒸気発生器伝熱管の損傷原因となった異物は流出したものと推定。		
4号機 第23回 (2020年10月～)	A-蒸気発生器:1本 (第3管支持板) C-蒸気発生器:3本 (第3管支持板) 【最大減肉率:36%】	A-蒸気発生器の減肉箇所にスケールが残存。C-蒸気発生器の減肉箇所近傍から回収したスケール3個にも接触痕を確認し、原因は、スケールによる減肉と推定。		薬品洗浄を実施。

これまでの経緯(高浜発電所3、4号機における伝熱管外面の損傷事例)

定期検査	伝熱管外面の損傷本数	調査結果概要		スケールに対する対策
3号機 第25回 (2022年3月～)	A-蒸気発生器:2本 (第3管支持板1本、 第4管支持板1本) B-蒸気発生器:1本 (第2管支持板) 【最大減肉率:57%】	摩耗痕のあるスケールは回収できなかったが、各蒸気発生器から採取したスケールの性状、摩耗試験等の調査の結果、スケールによる減肉と推定。		薬品洗浄の前に小型高圧洗浄装置による洗浄を実施し、薬品洗浄を実施。
4号機 第24回 (2022年6月～)	A-蒸気発生器:5本 (第3管支持板2本、 第4管支持板3本) B-蒸気発生器:2本 (第3管支持板1本、 第4管支持板1本) C-蒸気発生器:5本 (第3管支持板3本、 第4管支持板2本) 【最大減肉率:49%】	小型カメラによる損傷箇所の調査に加え、蒸気発生器器内のスケールの形状や性状および伝熱管の外観観察等の調査を実施した結果、スケールによる減肉と推定。 なお、A-蒸気発生器およびB-蒸気発生器から回収したスケール各1個に接触痕を確認。		薬品洗浄の前に小型高圧洗浄装置による洗浄を実施し、薬品洗浄を実施。
3号機 第26回 (今回)	A-蒸気発生器:1本 (第2管支持板1本) 【減肉率:63%】	A-蒸気発生器の減肉箇所にスケール1個が付着。原因は、スケールによる減肉と推定。		<p>小型高圧洗浄装置による洗浄を実施。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・噴射ノズルを改良し、噴射範囲の拡大させるとともに、水の流量(水圧)を増強。 ・垂直ノズルを用いたレーン毎の洗浄回数を、前回の1往復から2往復に増強。

<今後の対応>

今後も毎定期検査時に蒸気発生器器内のスケールを調査するとともに、長期的な信頼性を確保するという観点から、予防保全策として第28回定期検査において蒸気発生器の取替えを計画。