

令和3年1月25日
原子力安全対策課
(02-32)
<15時記者発表>

高浜発電所4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原子炉施設故障等報告書の提出)

このことについて、関西電力株式会社から下記のとおり連絡を受けた。

記

高浜発電所4号機(加圧水型軽水炉;定格電気出力87.0万kW)は、第23回定期検査を実施中のところ、3台ある蒸気発生器(SG)の伝熱管全数^{※1}の渦流探傷検査(ECT)を実施した結果、A-SGの伝熱管1本、C-SGの伝熱管3本の管支持板^{※2}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が認められた。

小型カメラを用いて、これらの伝熱管の外観を調査した結果、A-SG伝熱管の信号指示箇所に付着物を確認した。また、付着物を回収した結果、大きさは、幅約15mm、長さ約9mmであり、伝熱管のきずの大きさは、幅約1mm以下、周方向に約4mmであった。C-SGの3本の伝熱管には、信号指示箇所に幅約1mmもしくは1mm以下、周方向に約2mmから7mmのきずを確認した。

これら4本の伝熱管のきずの位置は、いずれも、第3管支持板下端付近もしくは、第3管支持板下端から約1mm～8mm下にあることを確認した。

SG器内で確認された付着物等について、工場において化学成分分析、外観観察等の詳細調査を実施した結果、プラント運転に伴いSG伝熱管外表面に生成された鉄酸化物(スケール)と推定された。

また、伝熱管にきずをつけた可能性が高いスケール(A、C2、C3)の性状を確認した結果、密度の高い酸化鉄の層(稠密層)であることを確認するとともに、同様の稠密なスケールを採取し摩耗試験を実施した結果、伝熱管の減肉量がスケール自身の摩滅量よりも大きくなることを確認した。

なお、この事象による環境への放射能の影響はない。

※1 既施栓管を除く合計9,747本(A-SG:3,244本、B-SG:3,247本、C-SG:3,256本)

※2 伝熱管を支持する部品

(令和2年11月20日、25日、12月15日、令和3年1月14日、記者発表済)

その後、関西電力は、これまでの調査結果や原因と対策をとりまとめ、本日、原子力規制委員会に対して、原子炉施設故障等報告書を提出した。これらの内容については、次の通りである。

1. 原因調査

SG外面（2次側）からの減肉とみられる有意な信号指示が認められた伝熱管4本について、小型カメラによる外観調査の結果、A-SG伝熱管の信号指示箇所に付着物を確認したため、異物混入の可能性などもあることから、SG器内外の調査を実施した。

また、回収した付着物の調査など、伝熱管外面を損傷させた原因の調査を実施した。

(1) SG器内外の調査

・ SG器内の調査

AおよびC-SGの管板、流量分配板、第1～2管支持板の上面および減肉が認められた伝熱管近傍の第3管支持板下面について、小型カメラ等を用いて点検した結果、スケールやスラッジ以外の異物は確認されなかった。

・ SG器外の調査

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や、SG2次側管板上の清掃（スラッジランシング）などの結果、スケールやスラッジ以外の異物は確認されなかった。

(2) AおよびC-SGから回収したスケールの調査

・ A-SGで回収したスケールの調査

A-SGで有意な信号指示があった伝熱管の減肉箇所に付着物（A）を確認したことから、これを回収し、外観観察を行った結果、伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位に、接触痕および光沢が認められた。

付着物Aの形状を計測した結果、直径約22.5mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管（円筒）の外周（直径約22.2mm）に近い形状であることを確認した。

このため、電子顕微鏡による観察を行った結果、その部位に筋状痕が確認されたことから、伝熱管との摺動によりできたものと推定された。また、化学成分分析の結果、主成分はマグネタイトであることを確認し、SG器内で発生するスラッジと同成分であることを確認するとともに、接触していたと想定される部位に伝熱管の主成分であるニッケルおよびクロムの成分を検出した。

・ C-SGで回収したスケールの調査

A-SGの伝熱管にきずをつけた原因がスケールの可能性が高いことから、C-SGの第1、第2管支持板や管板の上からスケールを回収し、外観観察等を行った結果、3個のスケール（C2、C3、C4）の外周部に接触痕が認められた。また、スケールの表面の一部に平滑な面が認められたが、拡大観察の結果、筋状痕は確認されなかった。

スケール（C2、C3、C4）の形状を計測した結果、それぞれ、直径約22.3mm、約22.6mm、約22.2mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管（円筒）の外周（直径約22.2mm）に近い形状であることを確認した。

電子顕微鏡による観察を行った結果、伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位に筋状痕が確認されたことから、伝熱管との摺動によりできたものと推定された。

また、化学成分分析の結果、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するとともに、接触していたと想定される部位に伝熱管の主成分であるニッケルおよびクロムの成分を検出した。

なお、スケールの表面に認められた平滑な面には、管支持板の材料に多く含まれるクロムの成分が検出された。

(スケールA、C2、C3、C4の形状)

A：幅：約15mm、長さ：約9mm、C2：幅：約18mm、長さ：約10mm、C3：幅：約23mm、長さ：約11mm、C4（伝熱管から剥離後に破損したスケールの一部と推定）：幅：約11mm、長さ：約3mm

- ・ AおよびC-SGから回収したスケールの性状
スケール（A、C2、C3、C4）について、それぞれ一部を切断して断面を観察した結果、スケールの厚さは約0.2mm～0.3mmであり、大部分が密度の高い層（稠密層）になっていることを確認した。
- ・ 管支持板下面へのスケールの付着状況の想定
スケール（A、C2、C3）について、管支持板下面に付着した場合の傷の位置との関係について調査した結果、スケールの筋状痕と傷の位置や、スケールに認められた平滑な面と管支持板表面の接触痕の位置等が一致することを確認した。
スケール（C4）は、その筋状痕の位置や支持板の接触痕などから、伝熱管にきずをつけたスケールの一部が破損したものと推定した。

(3) スケール生成のメカニズム

- ・ 伝熱管のスケール付着状況の調査
SG伝熱管のスケールの性状については、平成8年に高浜3号機SG伝熱管の健全性確認を目的とした抜管調査を実施した際に、スケールの付着状況の調査を行っており、その結果、伝熱管の場所によりスケールの性状が異なり、伝熱管上部のスケールは厚みがある一方で密度が比較的低い層（粗密層）が主体であり、下部のスケールは層厚が薄いものの稠密層が主体であるとの結果が得られている。
これらを踏まえ、高浜4号機の伝熱管上部および下部のスケールの付着状況を調査するため、SGの上部（第7管支持板上）および下部（第2管支持板から管板上の間）のスケールを採取し、断面観察を行った結果、高浜3号機の調査結果と同様の結果が得られた。
- ・ SGの運転履歴調査
スケールの生成には、SG器内への鉄イオンや鉄微粒子の持ち込み量に関係していることから、運転時間や水質管理の履歴等について調査を行った。

(運転時間)

高浜4号機のSGは、運転開始以降22.2万時間の運転を行っている。また、高浜3号機のSGも22.3万時間の運転実績があり、大飯3、4号機や蒸気発生器の交換を行った美浜1～3号機、大飯1、2号機、高浜1、2号機よりも運転時間が長いことを確認した。

(水質管理履歴)

2次冷却系統は、溶存酸素、電気伝導率等を管理し、また pH を高く維持することで給水設備からの溶出による鉄イオンや鉄の微粒子の持ち込みを抑制しており、これらの履歴からも水質管理に問題がないことを確認した。高浜3、4号機は運転年数も長いことなどから、SG器内に持ち込まれた鉄分の積算量についても、他プラントに比べ多いことを確認した。

なお、大飯3号機および4号機は、SG伝熱性能などのプラント性能指標の回復を目的として、SG器内の薬品洗浄を実施しており、その結果、スケールの除去、粗密化が図られている。

・ 長期停止の影響

福島第一原子力発電所事故後、高浜4号機は、2011年7月に定期検査のため停止し、その後、2017年5月に発電を再開するまで約6年間、長期停止している。その間、SG器内は、腐食防止のためヒドラジン水による満水保管にしていた。

この状態がスケールに与える影響を調査するため、SG器内から回収したスケールをヒドラジン水に浸す試験を実施した結果、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た。

高浜4号機では、他の発電所と同様に、定期検査毎に管板上の清掃（スラッジランシング）を行い、スケール等を回収しているが、長期停止前後の定期検査における回収量を調査した結果、長期停止前は約20kgであったが、長期停止後は約40kgと増加していることを確認した。

これらのことから、長期停止に伴い、スケールの粒径が大きくなることで、伝熱管との接触面積が減少し、プラントの運転等に伴い伝熱管から剥離しやすくなったものと推定した。

(4) 回収スケールによる摩耗試験

・ 過去の摩耗試験結果

高浜4号機および高浜3号機では、至近の定期検査においてSG伝熱管損傷が発生しており、原因調査の中でスケールに起因する可能性を調査するため、SG器内からスケールを採取し摩耗試験を実施している。

高浜3号機では、スケールの厚さが大きいほどスケールが折損しにくいと想定し、比較的厚みのあるもの（約0.6～1.0mm）を7個、比較的薄いもの（約0.3～0.4mm）を2個選定した。

これらの摩耗試験の結果、いずれもスケールが先に摩滅したため、スケールが伝熱管を有意に減肉させる可能性は低いと推定していた。

・ 今回の摩耗試験結果

スケール（A、C2、C3、C4）は、厚さが約0.2～0.3mmであり、稠密層が主体であることから、SG器内から回収したスケールのうち、厚さが0.2～0.3mm程度かつ稠密層が主体のスケールを複数用いて摩耗試験を行った。その結果、伝熱管の減肉量がスケール摩滅量よりも大きくなることを確認した。

2. 推定原因

伝熱管の外面減肉が認められた原因は、これまでの運転に伴い伝熱管表面に生成された稠密なスケールが、プラント運転等に伴い剥離し、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ものと推定した。

3. 再発防止対策の検討

スケールは、薬品洗浄を行うことで稠密層が粗密化し、脆弱化できることが他プラントの事例から実証されており、SG器内から採取した稠密なスケールを薬品で洗浄した。

その後、このスケールを用いて摩耗試験を行った結果、伝熱管をきずつけることなく、試験開始直後にスケールが折損したことから、薬品洗浄の効果があることを確認した。

また、これまでの調査の結果、高浜4号機と高浜3号機のスケールの性状が同様であることを確認しているため、今後、高浜3号機のSG器内の薬品洗浄を実施し、その後、SG器内のスケールを取出し、脆弱化していることを確認する予定である。

4. 対策

(1) SG器内の薬品洗浄

スケール全体の脆弱化を図るため、SG器内の薬品洗浄を行う。

(2) 伝熱管の施栓

当該伝熱管4本について、高温側および低温側管板部で閉止栓（機械式栓）を施工し、使用しないこととする。

これらの内容を取りまとめた原子炉施設故障等報告書については、今後、原子力規制庁が公開会合を開催し、確認を行う予定としている。

添付資料1：高浜発電所4号機の蒸気発生器伝熱管の損傷（調査結果）

添付資料2：対策（蒸気発生器内の化学洗浄）

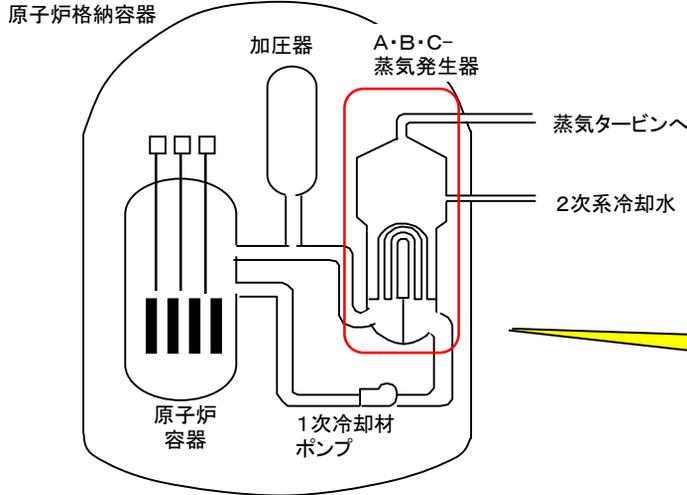
添付資料3：対策（蒸気発生器伝熱管の施栓）

問い合わせ先 原子力安全対策課（山本） 内線 2353・直通 0776(20)0314

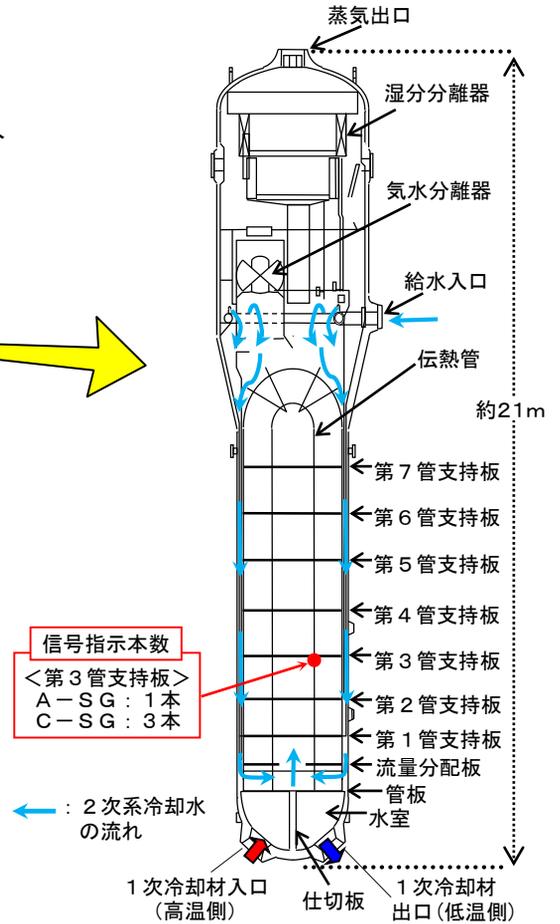
高浜発電所4号機の蒸気発生器伝熱管の損傷(調査結果)

発生箇所

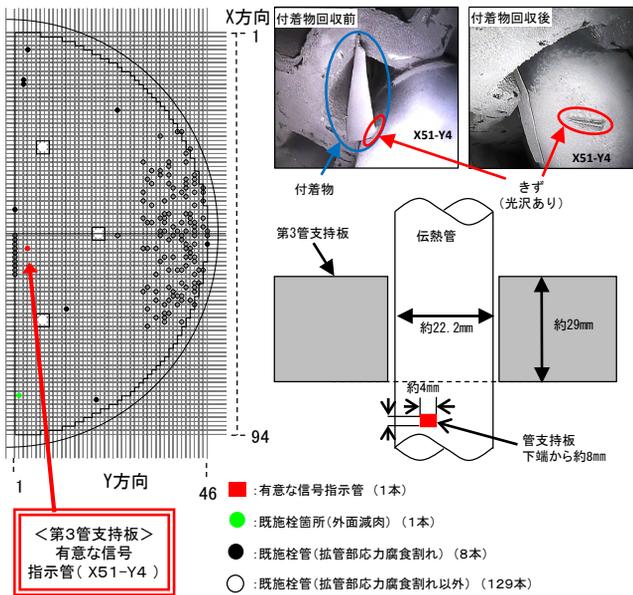
系統概要図



蒸気発生器の概要図



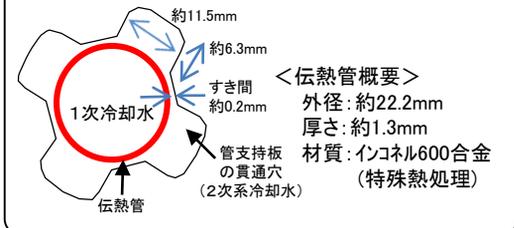
A-蒸気発生器伝熱管(低温側)の状況



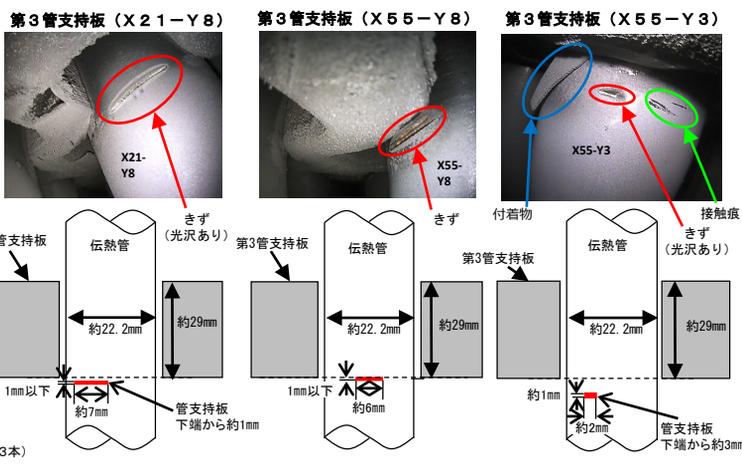
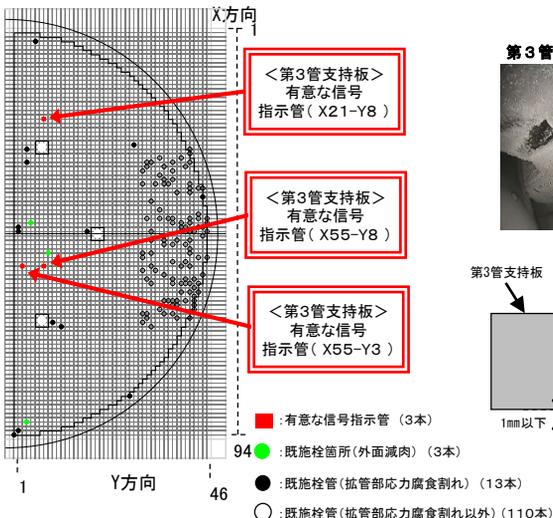
信号指示本数
 <第3管支持板>
 A-SG : 1本
 C-SG : 3本

← : 2次系冷却水の流れ

伝熱管の拡大平面図



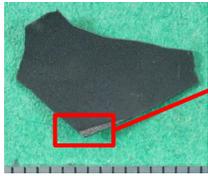
C-蒸気発生器伝熱管(低温側)の状況



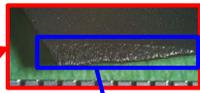
スケールA、C 2、C 3の分析結果

スケールA

<凹面>



伝熱管との接触箇所

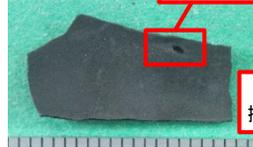


- ・伝熱管との接触箇所に光沢を確認。(電子顕微鏡による観察の結果、筋状の摺れ痕を確認。)
- ・伝熱管の主成分であるニッケルやクロムを検出。

幅 : 約15mm
長さ : 約9mm
厚さ : 約0.2mm~0.3mm
重さ : 約0.1g
材質 : マグネタイト
(鉄酸化物)

スケールC 2

<凹面>

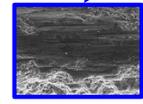
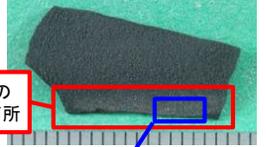


平滑面
(管支持板との
接触想定箇所)

- ・管支持板の主成分であるクロムを検出。

伝熱管との
接触想定箇所

<凸面>

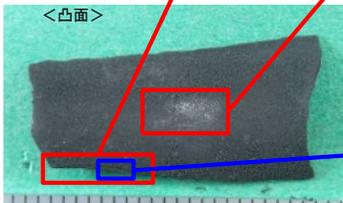


- ・筋状の摺れ痕を確認。
- ・伝熱管の主成分であるニッケルやクロムを検出。

幅 : 約18mm
長さ : 約10mm
厚さ : 約0.3mm
重さ : 約0.19g
材質 : マグネタイト
(鉄酸化物)

スケールC 3

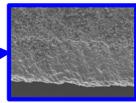
<凸面>



伝熱管との
接触想定箇所

平滑面
(管支持板との
接触想定箇所)

- ・管支持板の主成分であるクロムを検出。



- ・筋状の摺れ痕を確認。
- ・伝熱管の主成分であるニッケルやクロムを検出。

幅 : 約23mm
長さ : 約11mm
厚さ : 約0.3mm
重さ : 約0.25g
材質 : マグネタイト
(鉄酸化物)

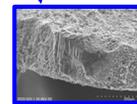
スケールC 4の分析結果

スケールC 4 (折損したスケールの一部と推定)

伝熱管との
接触想定箇所



幅 : 約11mm
長さ : 約3mm
厚さ : 約0.3mm
重さ : 約0.03g
材質 : マグネタイト
(鉄酸化物)



- ・筋状の摺れ痕を確認。
- ・伝熱管の主成分であるニッケルやクロムを検出。

スケールA、C2、C3、C4の断面観察結果

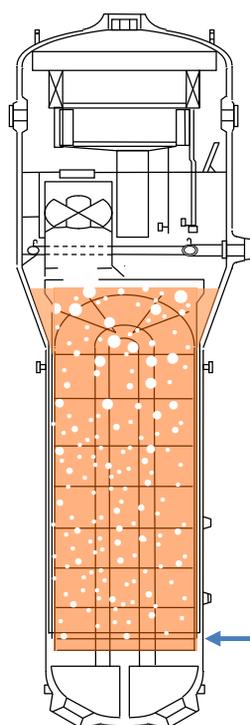
稠密層の範囲

	スケールA	スケールC2	スケールC3	スケールC4
断面観察結果				
回収場所	A-SG伝熱管減肉部 (第3管支持板下部)	第2管支持板上	第1管支持板上	第2管支持板上
性状	稠密層が主体			

対策(蒸気発生器内の化学洗浄)

- ◆SG内から回収した稠密なスケールを薬品洗浄し摩耗試験を行った結果、伝熱管をきずつける前に折損したことから、対策として十分な効果があることを確認
このため、今後、SG内の薬品洗浄を実施する予定

【薬品洗浄の流れ】



STEP①

SG内温度を100℃に昇温し、薬品を注入する。

(その後、スケールの洗浄で分離した銅成分の洗浄を実施)

STEP②

SG内温度を常温に戻し、スケールを系外へ排出(回収)する。

STEP③

水張り・水抜きを数回繰り返して残留した薬品やスケールを洗い流す。

STEP①～③までを約1週間かけて実施する。

水

薬品

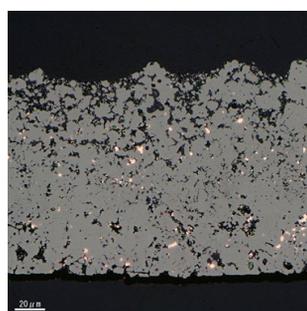
窒素/空気

窒素: 鉄洗浄の際に使用
空気: 銅洗浄の際に使用

- ◆使用後の薬品は、濃縮および乾燥・固化処理を行った後、焼却処分する。
- ◆高浜4号機に先行して、現在、定期検査中の3号機SG内の薬品洗浄を実施し、スケールが脆弱化することを確認予定

(参 考)大飯発電所4号機での薬品洗浄効果の確認

薬品洗浄前のスケール



薬品洗浄後のスケール



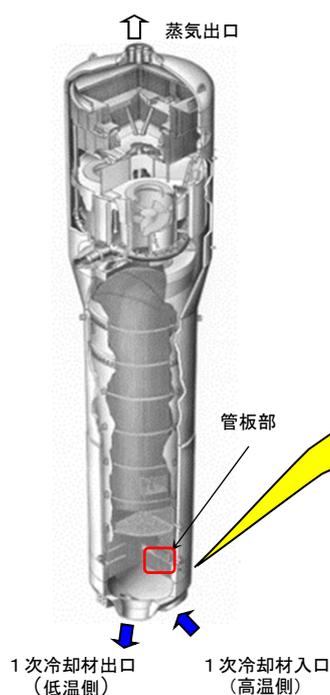
薬品洗浄前に比べ、スケールが粗密化されていることを確認

対策(蒸気発生器伝熱管の施栓)

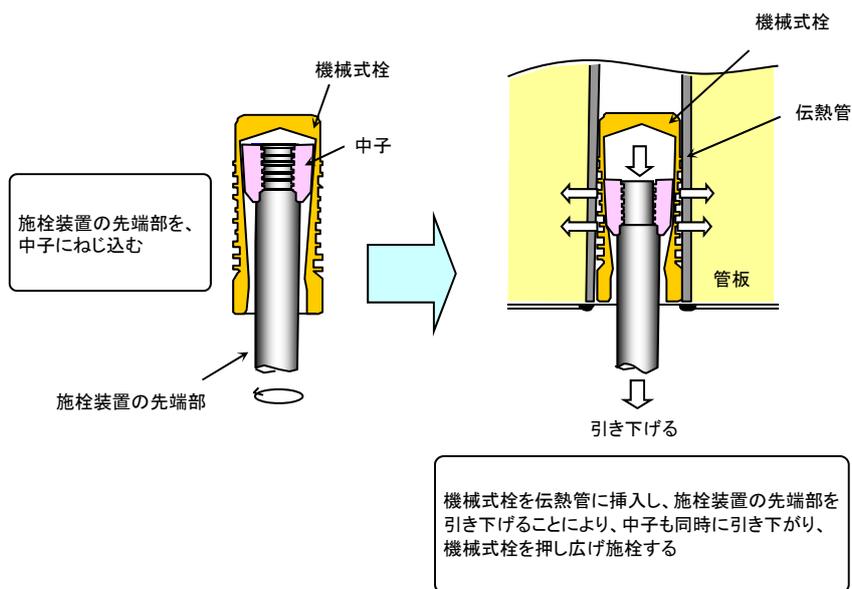
【蒸気発生器伝熱管の施栓方法】

◆外面減肉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、使用しないこととする。

蒸気発生器の概要図



施栓方法



【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	3,244	3,247	3,256	9,747
今回施栓予定	1	0	3	4
累積施栓本数 (応力腐食割れによる施栓本数) [施栓率]	139 (8) [4.1%]	135 (3) [4.0%]	129 (13) [3.8%]	403 (24) [4.0%]

○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)