

高浜発電所 4号機
蒸気発生器伝熱管の損傷について
(12月6日公開会合のご質問の回答)

2019年12月19日

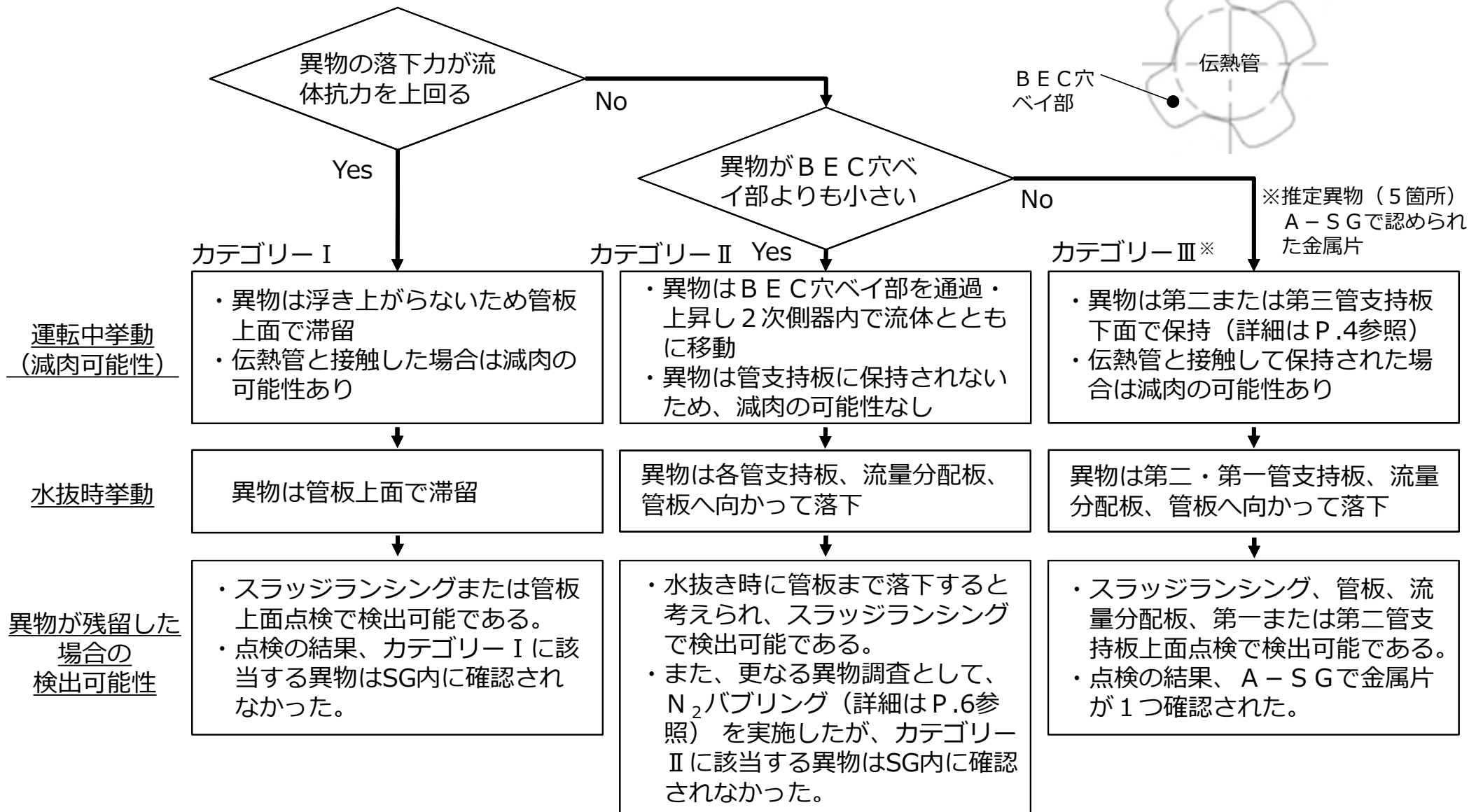


: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

説明項目		ページ 番号
1	S G内に異物は残留していないのか	3
2	エロージョンの限界流速に温度影響を考慮する必要はないのか	7
3	粒界腐食割れ等の伝熱管減肉要因のきずの形状を示すこと	8
参考 1	複数S Gで同時に異物による減肉が発生した海外事例はあるのか	10
参考 2	減肉により施栓した伝熱管が他の伝熱管へ影響を及ぼすことはないのか	11

1. SG内に異物は残留していないのか（異物の器内挙動 1 / 3）

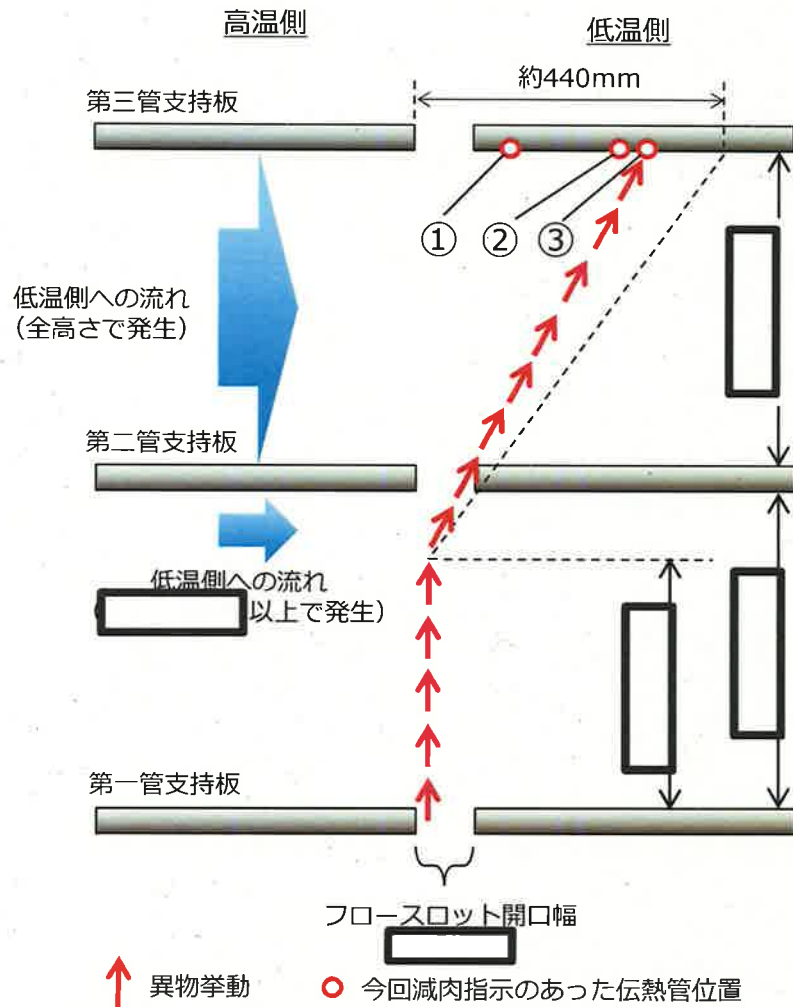
○異物のSG内での挙動は、次のとおり分類される。



今回実施したSG内部目視点検、スラッジランシング、N₂バブリングにより、異物は確認されなかったことから、異物はSG内に残留していないと考える。

1. SG内に異物は残留していないのか（異物の器内挙動 2 / 3）

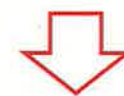
○ P.3のフローでカテゴリⅢに分類される異物が第二または第三管支持板下面で保持されることを確認するため、今回、第三管支持板下面に到達した推定異物を代表に、第一管支持板を通過してから第三管支持板に至るまでの水平方向の移動量を算出し、フロー Slots の開口幅と比較した。



推定異物の水平方向移動量算出結果

対象伝熱管	減肉位置	移動量 (mm)
① A-SG (X 8 5, Y 2)	第三管支持板	441
② B-SG (X 9 2, Y 8)	第三管支持板	439
③ C-SG (X 5 2, Y 9)	第三管支持板	441

計算の結果、第一～第三管支持板間の水平方向移動量はいずれも約440mmであり、第三管支持板のフロー Slots の開口幅 よりも大きい



P.3のフローでカテゴリⅢに分類される異物は第二または第三管支持板で保持され则认为（第三管支持板以上には上昇しない）



: 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。

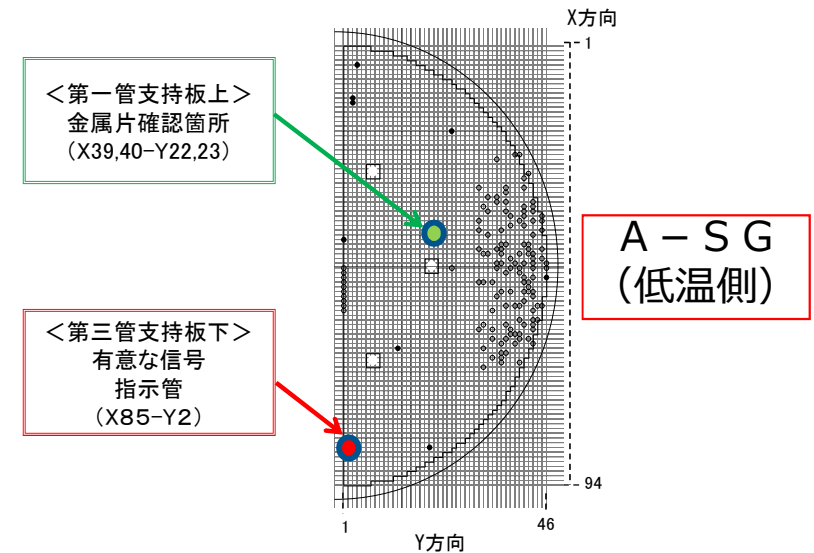
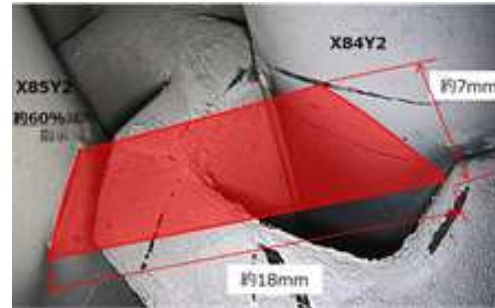
1. S G内に異物は残留していないのか（異物の器内挙動 3 / 3）

○A – S Gで確認された金属片と減肉の原因となった想定異物の挙動について考察を行った。

【確認された金属片】



【想定異物】



○金属片の流入に関する考察

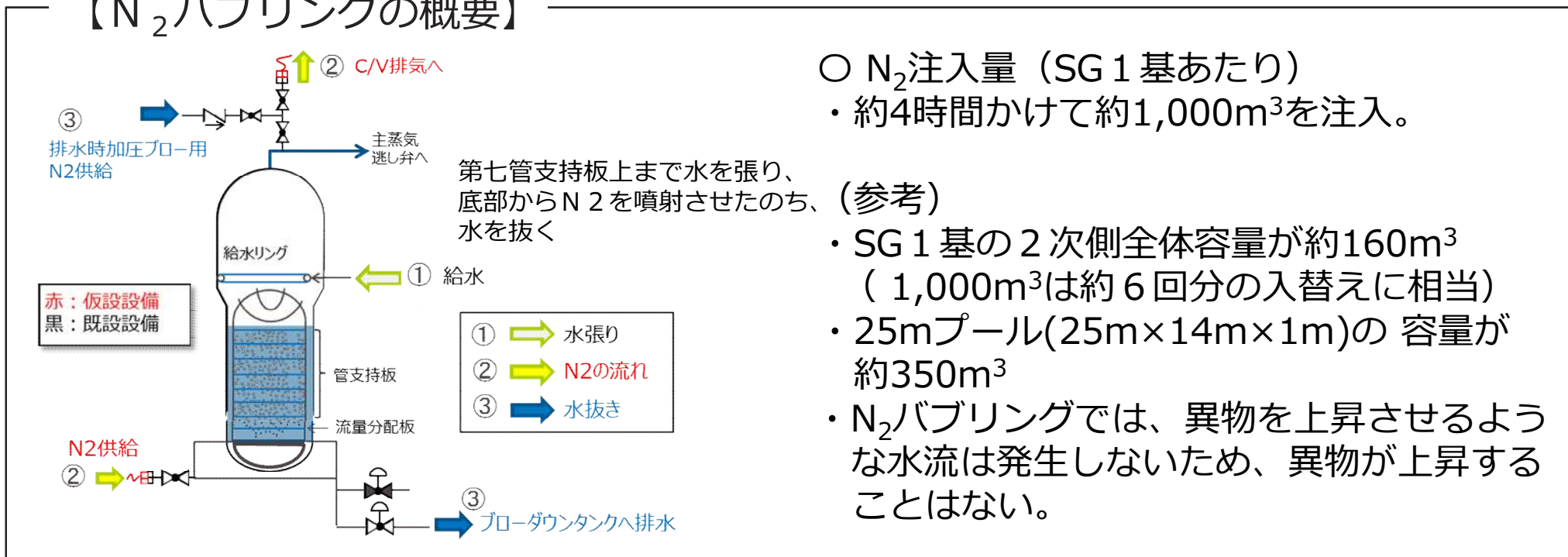
金属片は想定異物に比べ、落下力は想定異物の約4倍、流体抗力は想定異物の約2倍となる。金属片は想定異物よりも相対的に浮き上がりやすく、横方向に流されやすいため、低温側管群中央部に移動したものと考える。

A-SG	材質	寸法(長さ*幅*厚さ) 【mm】	重量 【g】	落下力 【N】	流体抗力 【N】	流体抗力 /落下力
想定異物	SUS304	18*7*0.3	0.24	2.4×10^{-3}	1.2×10^{-2}	5.0
金属片	SUS304 相当	20*10*0.6	1.0	1.0×10^{-2}	2.4×10^{-2}	2.4

○金属片の流出に関する考察

金属片は想定異物に比べ、落下力は想定異物の約4倍となる。また、S G水抜き時に、S G中央部付近ではフローロットに向かう流れが大きい一方で、低温側管群中央部ではフローロットに向かう流れが比較的小さいことから、金属片は低温側管群中央部に留まり、流出しなかったものと考えられる。

【N₂バブリングの概要】



○ N₂注入量 (SG 1 基あたり)
 ・ 約4時間かけて約1,000m³を注入。

(参考)

- ・ SG 1 基の 2 次側全体容量が約160m³ (1,000m³は約 6 回分の入替えに相当)
- ・ 25mプール(25m×14m×1m)の 容量が約350m³
- ・ N₂バブリングでは、異物を上昇させるような水流は発生しないため、異物が上昇することはない。

<スラッジ回収量>

○N₂バブリングの結果

- ・ N₂バブリング後の異物回収の結果、通常の定期検査にて実施するスラッジランシング時の回収量の約 3 割のスラッジを回収できた。
- ・ なお、スラッジ以外の異物は確認されていない。

	N ₂ バブリング後	4u 第22回 スラッジランシング時
A-SG	4.53kg	16.67kg
B-SG	3.07kg	13.41kg
C-SG	3.97kg	11.14kg
合計	11.57kg	41.22kg

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）>

- ・SG 2次側温度269℃での水の密度は769 kg/m³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159GPa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り、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、SG 2次側器内流速3m/sに対して十分余裕がある。（図2）

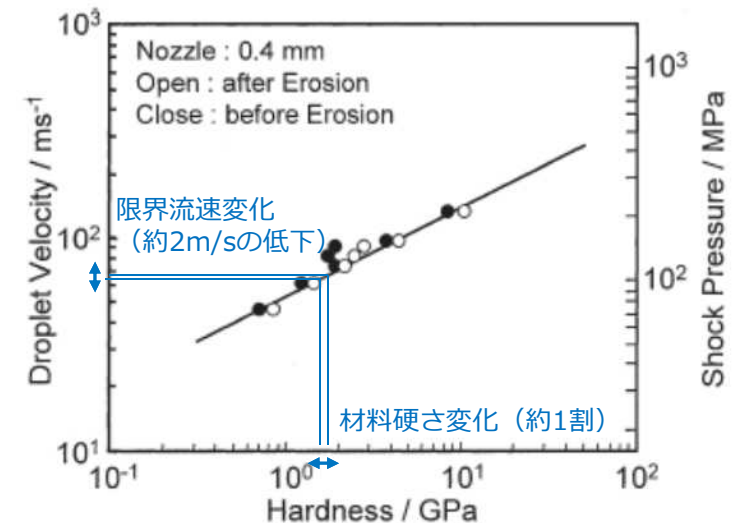


図1 限界流速と硬さの関係

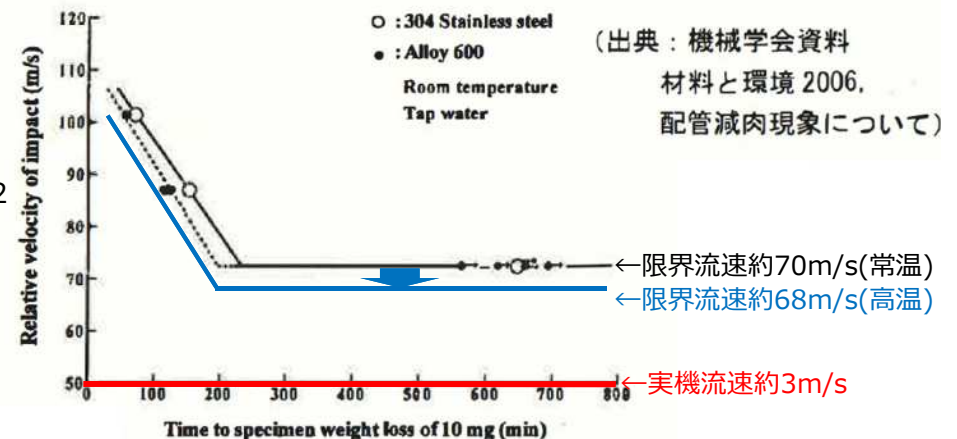
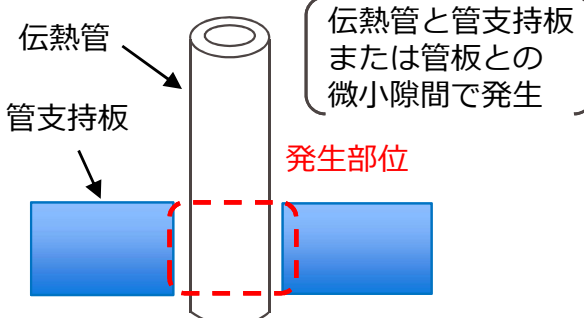
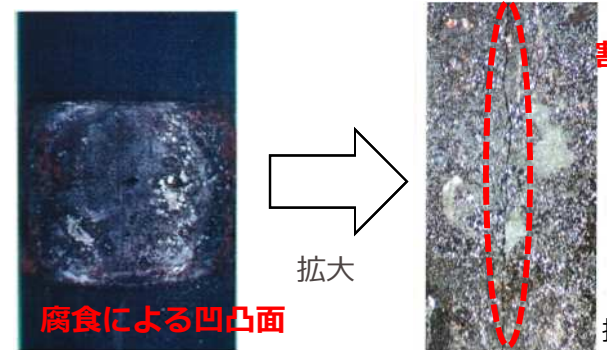
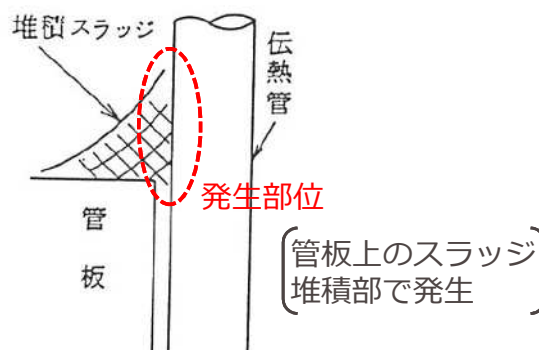
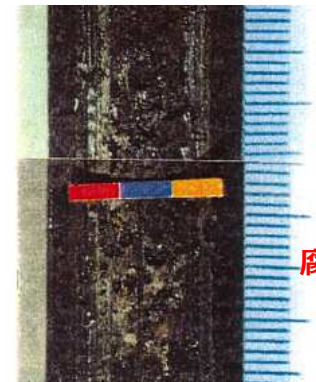
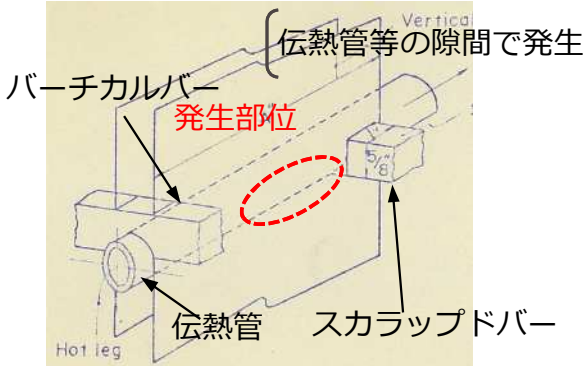



図2 ウォータージェットテストによる限界流速

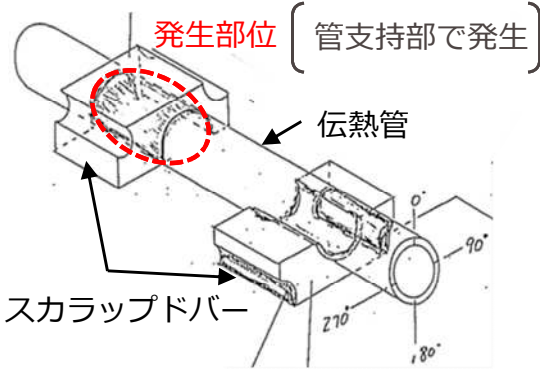

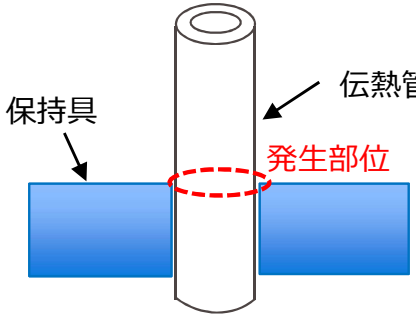
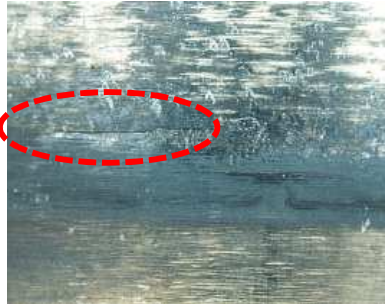
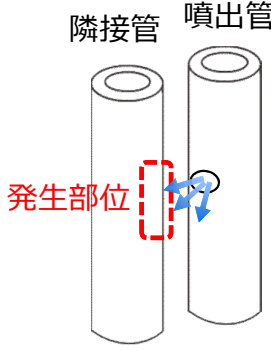
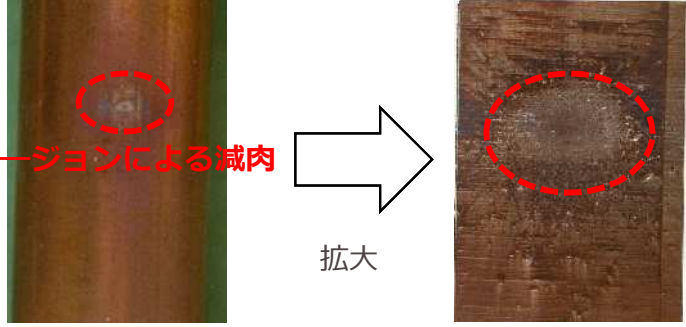
➤ 温度の影響は小さいことから、常温の知見を用いても問題ない。

※1：材料メーカーカタログ（インコネル600合金）の単位を換算
 ※2：材料と環境，57，146-152(2008)，磯本ら

3. 粒界腐食割れ等の伝熱管減肉要因のきずの形状

	発生部位	表面形状
<p>粒界腐食割れ (IGA)</p>	 <p>(試験体概略図)</p>	 <p>(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)</p>
<p>ピitting</p>	 <p>(美浜1号機 実機事象)</p>	
<p>リン酸減肉</p>	 <p>(美浜1号機 実機事象)</p>	 <p>拡大観察 (×3倍)</p>

3. 粒界腐食割れ等の伝熱管減肉要因のきずの形状

	発生部位	表面形状
<p>デンディング</p>	 <p>発生部位 (管支持部で発生)</p> <p>伝熱管</p> <p>スカロップドバー</p> <p>(美浜1号機 実機事象)</p>	 <p>伝熱管圧迫による変形</p>
<p>流体振動による疲労</p>	 <p>保持具</p> <p>伝熱管</p> <p>発生部位</p> <p>(試験体概略図)</p>	<p>疲労による割れ</p>  <p>拡大観察 (×10倍)</p> <p>(平成9年度「溶接部熱影響部信頼性実証試験に関する事業報告書 (発電設備技術検査協会)」より抜粋)</p>
<p>エロージョン</p>	 <p>隣接管 噴出管</p> <p>発生部位</p> <p>(試験体概略図)</p>	 <p>エロージョンによる減肉</p> <p>拡大</p> <p>減肉部</p> <p>(昭和54年度 蒸気発生器信頼性実証試験 伝熱管破断試験結果より)</p>

複数 S G の伝熱管外面が異物により減肉した海外事例を公開情報から調査した結果、2000年以降で少なくとも10件あることを確認した。

○海外事例一覧※

プラント	SG数	事象発生年	異物により減肉した伝熱管本数
V.C. Summer 1	3	2018年	A-SG : 2本、B-SG : 2本
Palisades	2	2014年	A-SG : 2本、B-SG : 1本
Salem 1	4	2013年	SG12 : 1本、SG13 : 3本、SG14 : 1本
Byron 2	4	2011年	A-SG : 1本、C-SG : 1本、D-SG : 2本
Palisades	2	2010年	A-SG : 2本、B-SG : 2本
Calvert Cliffs 2	2	2009年	SG21 : 2本、SG22 : 6本
Millstone 2	2	2008年	SG 1 : 8本、SG 2 : 2本
Robinson 2	3	2007年	B-SG : 5本、C-SG : 1本
Ano 2	2	2005年	A-SG : 8本、B-SG : 4本
Robinson 2	3	2004年	B-SG : 4本、C-SG : 2本

※ NRCのHP上に公開されているレポートより

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、強度及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

当該伝熱管の減肉箇所近傍をカメラにより目視確認した結果、減肉箇所に異物は残留していないことを確認している。また、S G器内の異物調査により、管板上面、流量分配板上面、第一および第二管支持板上面の全ての範囲に異物が残留していないことを確認している。

⇒減肉を発生させる異物は全て除去されており、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。この状態で今回認められた減肉を有する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2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、伝熱管が外圧で損壊することはない。

（詳細はP. 12参照）

3. 耐震

基準地震動Ss条件で減肉を有する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、伝熱管が地震で損壊することはない。

（詳細はP. 13参照）

参考 2. 減肉により施栓した伝熱管が他の伝熱管へ及ぼす影響 (2 / 4) 12

国 P J 「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。

減肉深さ (%) (注1)	圧壊圧力 P_c (MPa)	事故時を包絡する作用外圧 (MPa) (注2)	裕度
63	19.2	8.3	2.3

(注1) 最大減肉深さの C-SG (X45, Y5) で代表

(注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

*本評価式は、過去の高浜3, 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。

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

<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)

S_y : インコネル600合金の設計降伏点 = 188.7MPa (@344℃)

t : 板厚 = (最小板厚を考慮)

R : 平均半径 = 10.54mm

a : 減肉深さ = (= × 0.63)

$2c$: 減肉幅 = 5mm

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8.3MPaに対し、十分な裕度があることを確認した。

⇒減肉により施栓した伝熱管が外圧により損壊することはない。



: 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 The Kansai Electric Power Co., Inc.

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^{※1}の基準地震動 S_s による地震力および伝熱管全長モデル (右図) ^{※2}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

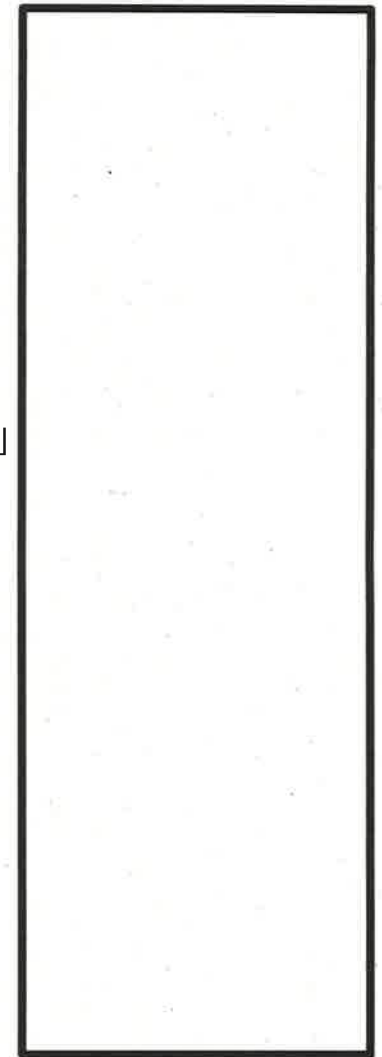
※1 : 既工認添付資料13-17-3-2-2「蒸気発生器内部構造物の耐震計算書」(原規規発第1510091号、平成27年10月9日認可)

※2 : 高浜3, 4号機既工認(新規制基準工認)補足説明資料「高浜発電所第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」

表 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 ^{※3} および疲労累積係数	許容値	裕度
一次一般膜応力	195 MPa	334 MPa	1.7
膜応力+曲げ応力	198 MPa	434 MPa	2.1
一次+二次応力	202 MPa	492 MPa	2.4
疲労累積係数	0.033	1	-

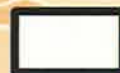
※3 : 最大減肉深さのC-SG (X45, Y5) で代表



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。

⇒減肉により施栓した伝熱管が地震により損壊することはない。

伝熱管地震応答解析モデル



前ページまでの説明のとおり、減肉により施栓した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は確認しているが、ここでは、仮に減肉した施栓管が破断した場合の影響を説明する。

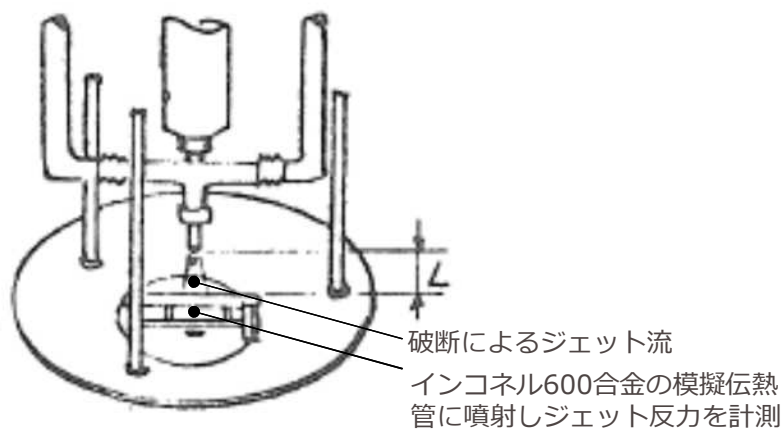
「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」を補足する「安全評価審査指針の手引き」（平成3年11月、資源エネルギー庁）において、伝熱管1本が破断しても隣接管へ有意な影響を与えないと示されている。

●補足（委員会での議論、用語解説等）

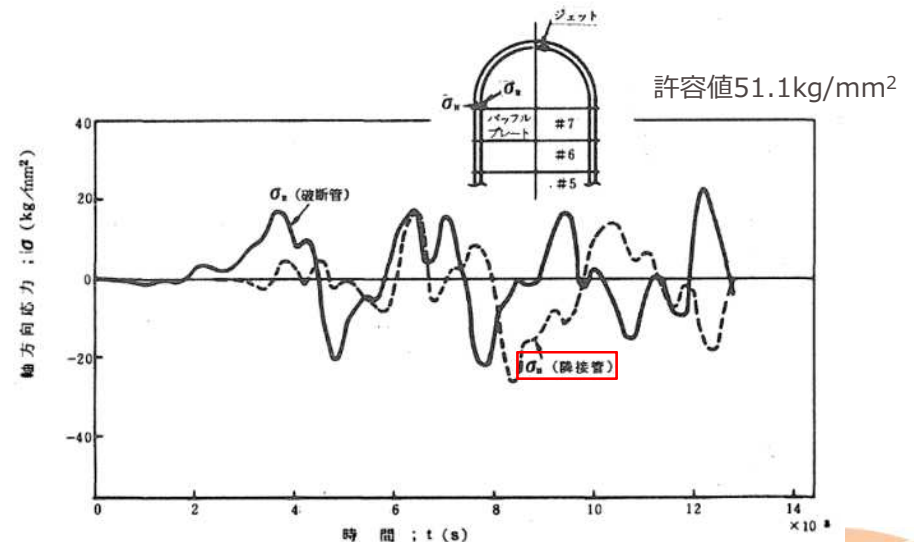
- ① 蒸気発生器伝熱管の複数本が同時に破断する可能性は極めて小さいと考えられること、および蒸気発生器伝熱管1本が破断した場合でも、隣接管の健全性に対して有意な影響を与えることはないことが実験で示されていることから、当面直ちに蒸気発生器伝熱管の複数本破断を考慮する必要はないと考えられる。

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。

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



⇒減肉により施栓した伝熱管の内部には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

以降、12月6日公開会合資料抜粋

高浜発電所 4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について (概要版)

抜粋

2019年12月6日



: 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。

1. 事象の概要 (減肉伝熱管 2次側からの確認結果)

E C Tで減肉とみられる信号指示が認められた伝熱管を、2次側から小型カメラにて点検した結果、摩耗減肉痕とみられる箇所が認められた。

なお、E C Tの信号指示による位置およびサイズと相違はなかった。

○ A - S G

第三管支持板：長さ 約 6 mm、幅 1 mm以下 (X85,Y2)

○ B - S G

第三管支持板：長さ 約 5 mm、幅 約 1 mm (X92,Y8)

○ C - S G

第二管支持板：長さ 約 4 mm、幅 1 mm以下 (X45,Y5)

第二管支持板：長さ 約 5 mm、幅 2 mm以下 (X91,Y4)

第三管支持板：長さ 約 8 mm、幅 1 mm以下 (X52,Y9)

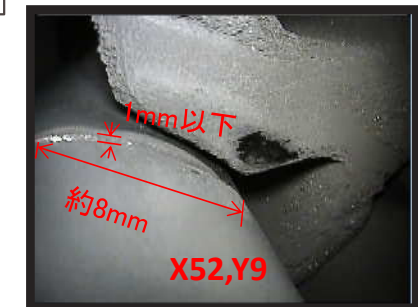
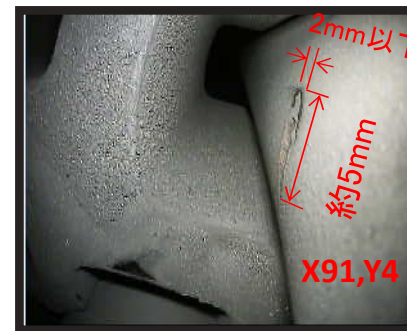
A - S G



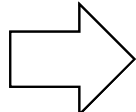

B - S G



C - S G

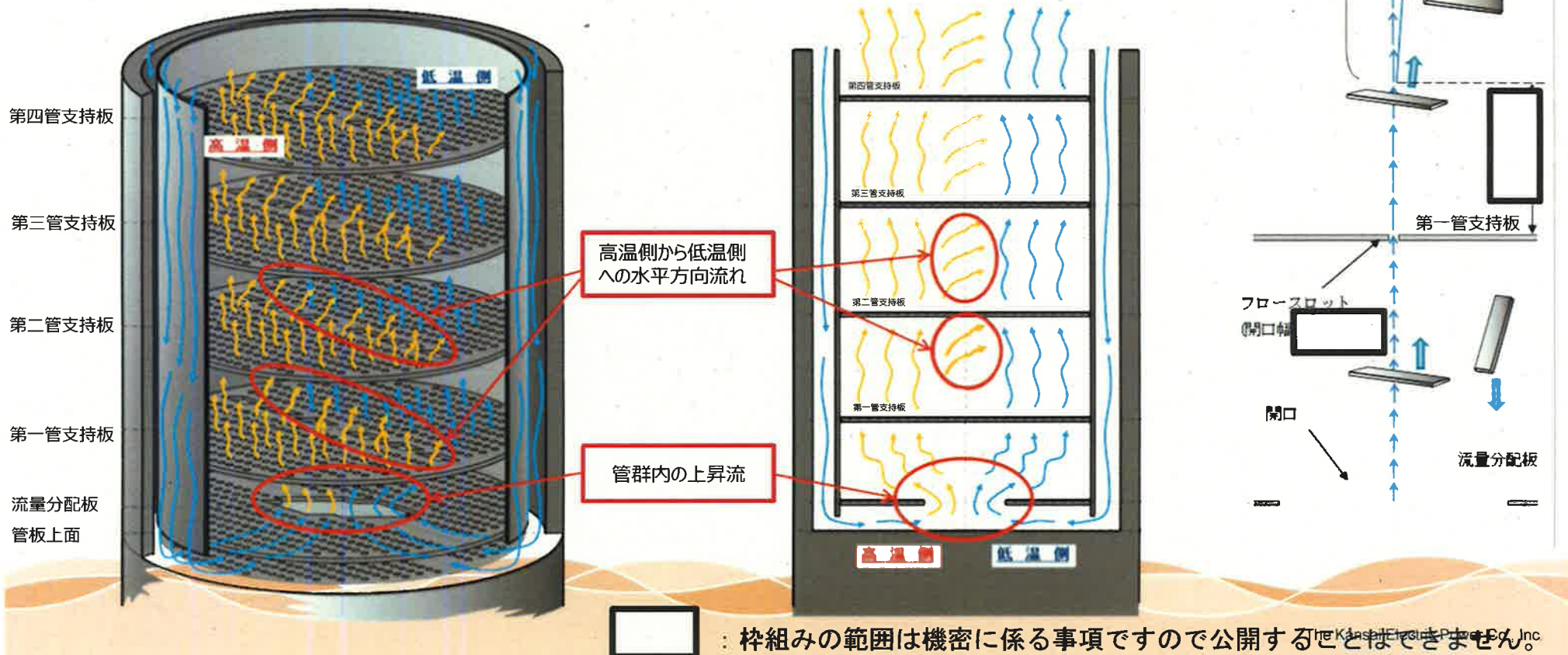


2. 原因調査（要因分析に基づく調査）

- S G伝熱管内面（1次側）からの損傷
E C Tの信号指示を確認した結果、伝熱管内面（1次側）にきずがないことを確認。
- S G伝熱管外面（2次側）からの損傷
 - ・ 粒界腐食割れ、ピitting、リン酸減肉発生の可能性について確認した結果、4号機では良好な水質が維持されており、発生の可能性はない。また、カメラによる外観観察結果からも、これらの損傷ではないことを確認。
 - ・ 管支持板との接触による摩耗減肉は、E C T結果から周方向に1ヶ所にしか減肉指示が確認されていないことから、管支持板との接触・摩耗によって発生した減肉ではない。
 - ・ E C Tの信号指示を確認した結果、デンティングではない。
 - ・ 管支持板部の流れによる伝熱管の管支持板部の応力は、疲労限に比べ非常に小さく、流体振動による疲労損傷は発生しない。
 - ・ 当該部流速は約3 m/sであり、かつ、T T 6 0 0合金は耐エロージョン性が高いことから（室温条件では約7 0 m/s以上がエロージョン発生領域）、エロージョンの発生はない。
 - ・ S G器内発生物・S G器外流入物との接触による損傷の可能性  
- 損傷以外のE C T信号指示
局所的なスケールの剥離は、減肉と識別できることから、今回の信号は、スケールの剥離ではない。

3. 減肉メカニズム (② S G器内での異物の挙動 1 / 2)

- 3次元熱流動解析を実施した結果、異物はS G器内に流入後管板上へ到達し、管群内の上昇流に乗って流量分配板および各管支持板フローロット部を通過したと考えられる。
- 第一管支持板より上方では、上昇流に加え高温側から低温側への水平方向流があることから低温側へ流れ、第二管支持板の低温側下面、又は第三管支持板の低温側下面に至ったものと推定される。



要因			調査項目	評価	
減肉指示	1次側からの損傷		ECT信号	ECTの指示信号から損傷は、1次側からの損傷ではないと考えられる。 ×	
	粒界腐食割れ (IGA)		使用環境	過去にSG2次側環境においてアルカリ環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、粒界腐食割れが発生した実績があるが、高浜発電所4号機のようなアンモニアとヒドラジンの注入により良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考えられる。 ×	
			使用環境	過去にSG2次側環境において海水リーク等による塩化物環境と酸化銅等による酸化性雰囲気を経験したプラントで、ピittingが発生した実績があるが、高浜発電所4号機のような塩素濃度が十分低く管理され、且つ、アンモニアとヒドラジンの注入により良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考えられる。 ×	
			使用環境	過去の2次系水処理において、リン酸を使用していたプラントでリン酸による減肉が発生した実績があるが、高浜発電所4号機のようなアンモニアとヒドラジンによるAVTを実施しているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考えられる。 ×	
	リン酸減肉		設計評価	管支持板との接触による摩耗減肉が顕在化する場合は4ヶ所の接触部(ランド部)に減肉が生じることになるが、ECT信号上は減肉は管支持板下端位置にしか発生していない、且つ、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られる。 ×	
		SG器内発生物との接触	内部品が脱落して接触	設計評価	今回の減肉を発生させた異物の想定形状(薄片)に対して、SG内部品で該当する形状があるかを設計図面により確認したところ、振止め金具のキー固定板等が比較的類似していることを確認した。しかしながら、これらの内部品は、溶接止めされていること、もしくは、周囲を溶接止めされた構造物に囲まれており、方が一、脱落したとしても周囲の構造物の外には出ないことから、SG器内からの異物の可能性はないと考えられる。 ×
			スラッジとの接触	設計評価	スラッジは空隙を有しており、脆いため、伝熱管を摩耗減肉させることは考えにくい。高浜4号機で採取したスラッジと伝熱管とを接触させる試験を行った結果、伝熱管に僅かな傷はつくものの、スラッジが伝熱管との接触で破損、または、著しく摩滅することを確認した。 ×
	SG器外流入物との接触		目視点検	A-SGで確認された金属片は減肉の直接の原因ではないと考えられるが、同様な異物がSG器外から流入した可能性が否定できない。今後、更なる異物調査として、SG器内に水を張り、底部からN2を噴射(バブリング)させたのち、水を抜くことによる異物の回収を試みた結果、スラッジ以外の異物については、確認されなかった。 △	
			設計評価	減肉メカニズムについて検討した結果、推定した形状の異物は、SG器内へ流入後、各管支持板低温側下面へ移動するとともに伝熱管へ摩耗減肉を与え、プラント停止後にブローダウン管より流出した可能性があることを確認した。 △	
	2次側からの損傷	デンティング		ECT信号	ECTの信号指示からデンティングではないと考えられる。 ×
流体振動による疲労			設計評価	管支持板部の流れによる伝熱管の管支持板部の応力は、疲労限に比べ非常に小さく、疲労損傷は発生しないと考えられる。 ×	
エロージョン			設計評価	当該部流速は約3m/sであり、かつ、TT600合金は耐エロージョン性が高く(室温条件では約70m/s以上がエロージョン発生領域)、エロージョンの発生はないと考えられる。 ×	
局所的な異物等の付着・剥離			ECT信号	異物等の付着による信号は、減肉信号と異なるが、今回の信号は減肉信号であるため、異物等の付着・剥離の可能性は低い。 ×	
ECT探傷	損傷以外の信号		ECT信号	異物等の付着による信号は、減肉信号と異なるが、今回の信号は減肉信号であるため、異物等の付着・剥離の可能性は低い。 ×	

×: 要因の可能性なし、△: 要因の可能性あり。