

大飯発電所 3号機加圧器スプレイライン配管における  
亀裂の調査を踏まえた対策  
および

高浜発電所 4号機蒸気発生器伝熱管の損傷の原因と対策

2021年3月4日

大飯発電所 3 号機  
加圧器スプレイライン配管における亀裂の  
調査を踏まえた対策

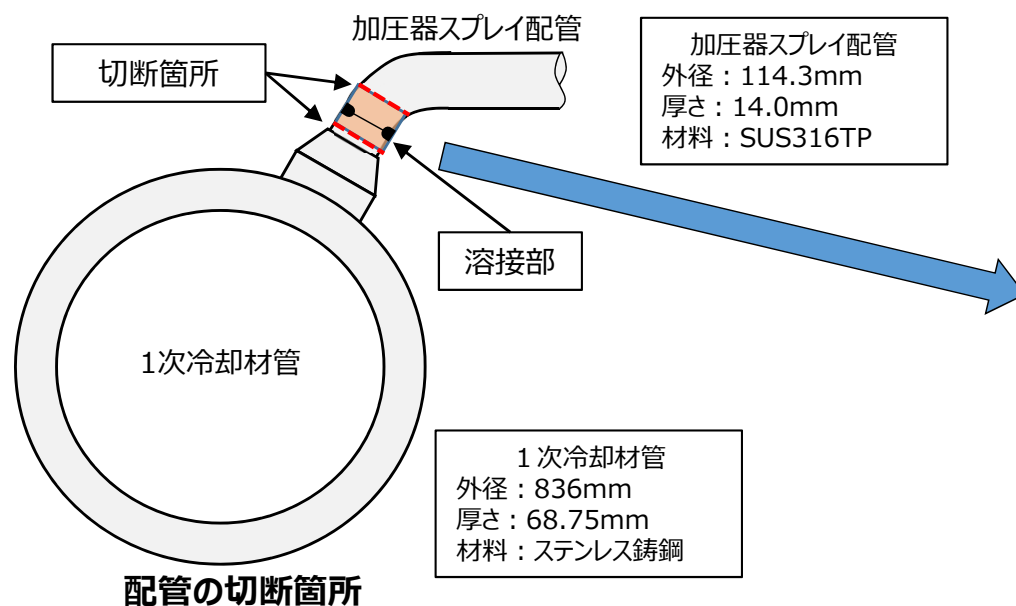
# 本事象のまとめ

## <事象の概要>

- 供用期間中検査（ISI）にて、加圧器スプレラインの1次冷却材管台と管継手（エルボ部）（材質：オーステナイト系ステンレス鋼（SUS316））の配管溶接部に有意な指示が認められた。その後の破壊調査により、**溶接熱影響部にて深さ4.4mm、長さ60mmの亀裂**があることが明らかとなった。

## <亀裂発生及び亀裂進展原因>

- 調査の結果、**過大な溶接入熱（若手による丁寧かつ慎重な溶接や手入れ溶接の可能性を含む）と、形状による影響※が重畳したことで、表層近傍において特異な硬化が生じたものと考えられる。**
- この**硬化部に高い応力が影響したことにより**、亀裂が発生したものと考えられるが、メカニズムがすべて明らかにはなっておらず、PWR1次系の配管溶接部では、これまで同様の事象が生じていないことから、今後知見の拡充に努める。  
※管台－エルボ形状では、変形領域が狭いため、溶接部近傍でひずみが大きくなる。
- 亀裂は溶接熱影響部で粒界に沿って進展しており、硬化したオーステナイト系ステンレス鋼はSCCで進展することが知見としてあることから、**粒界型SCCで進展したものと判断した。**



切断した配管の外観

# 溶接入熱が大きくなる要因の整理

これまでの原因調査より、溶接入熱が大きくなる要因として以下が考えられる。

## ①全層TIG溶接以外の溶接手法

2層目以降の溶接において、TIG溶接では比較的安定した溶融池が形成されるのに対し、TIG溶接以外の溶接では、溶融池が不安定となるため、厚めの初層溶接を行うことから、入熱量が大きくなる傾向がある。

## ②現地溶接

工場溶接では、溶接対象物を回転させつつ、安定した溶接姿勢で溶接が可能であるが、現地溶接では、上向き姿勢や狭隘部での溶接となる場合もあり慎重な作業となることから、入熱が大きくなる可能性がある。

## ③若手溶接士による施工

当該溶接部は、若手の溶接士が丁寧かつ慎重に溶接したことで溶接速度が遅くなり入熱が大きくなったと推定しており、同様に若手溶接士が施工した場合、入熱が大きくなる可能性がある。

## ④補修溶接

補修溶接は施工時の検査で判定基準を満たさない場合における通常の施工方法であるが、追加で溶接をするため、入熱が大きくなる可能性がある。

## ①全層TIG溶接以外の溶接手法

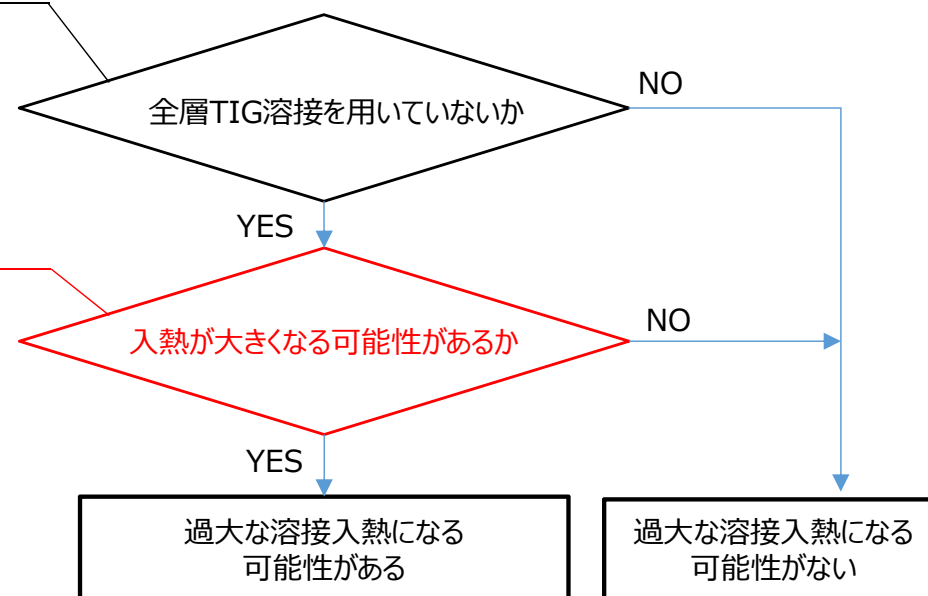
- 従来より考慮している。

## ②現地溶接 + ③若手溶接士による施工

または

## ④補修溶接

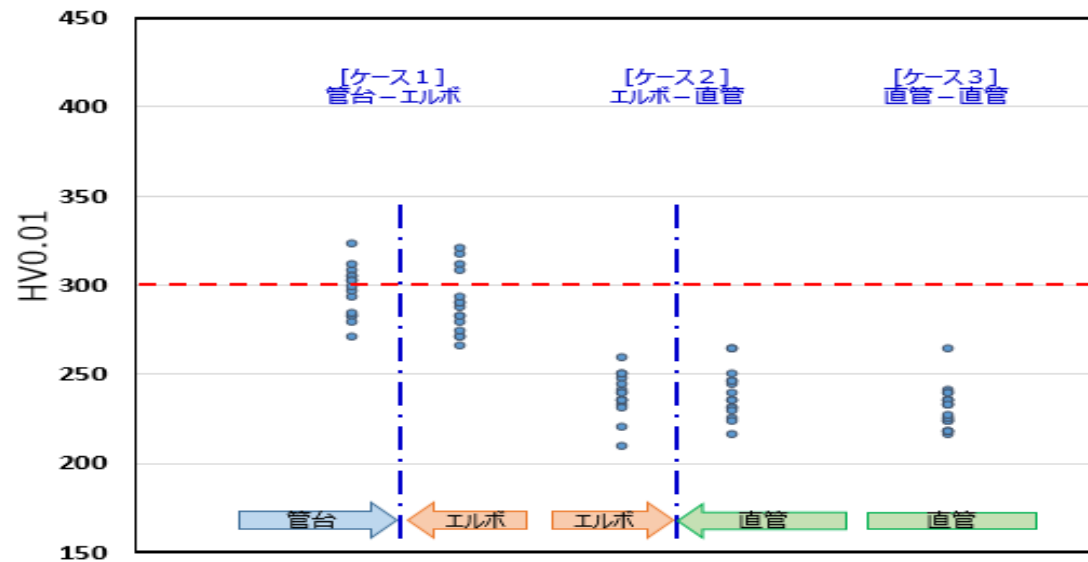
- 工場溶接の場合は、若手溶接士であっても安定した溶接が可能であることから、「②現地溶接」と「③若手溶接士による施工」を組み合わせることを考慮する。
- 「②現地溶接 + ③若手溶接士による施工」と「④補修溶接」は、それぞれがどの程度寄与するか明らかではないため、両要因を考慮する。



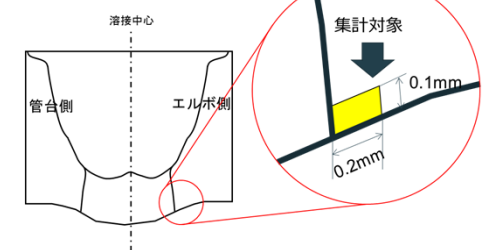
# 形状による分類 (モックアップでの落ち込みおよび表層硬さ)

	ケース	形状	モックアップ形状	モックアップ写真	落ち込みの深さと領域
管台	ケース 1	管台-エルボ			深さ 約1.1mm 領域 約20mm
管台以外	ケース 2	エルボ-直管			深さ 約1.2mm 領域 約30mm
	ケース 3	直管-直管			深さ 約1.4mm 領域 約40mm

※溶接時の条件は何れも、初層Tig+SMAW (入熱量：大)。落ち込み領域は明瞭な塑性変形が確認された領域で、弾性変形の領域はより大きい範囲で生じている。




＜硬さデータプロット範囲＞




- 管台-エルボでは落ち込み領域 (変形領域) が相対的に狭くなる傾向が認められた。
- モックアップで検証した結果、管台を含む形状のみで300HVを超える硬化が確認された。

# 形状による分類（まとめ）

分類	形状	板厚	変形領域	表層硬さ (モックアップ)	水平展開 対象	解説
管台	管台		短	>300HV 管台-エルボ	○	板厚が極端に厚く、急激に変化する。変形領域が短いことで溶接時の自由収縮が阻害され、硬化が生じたものと推定。 実機・モックアップ共に硬化が認められた。また、運転中応力が高くなるターミナルエンド部である。
管台以外	エルボ	20	中	<300HV エルボ-直管	×	管台と比べて板厚が薄く、急激に変化しない。そのため、溶接時の自由収縮が阻害されず硬化が生じにくいと推定。 モックアップでも硬さが増加しにくいことが確認された。
	レジューサ	20	中	-		
	ティー	20	中	-		
	弁	20	中	-		
	直管	13.5	長	<300HV 直管-直管		

➤ 管台は硬化が生じやすい形状であるため、管台以外の形状と分類することとした。

: 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

## 水平展開方法の策定（1/2）

今回、加圧器スプレイ配管で見つかった亀裂は、以下の理由から特異な事象であると判断している。

- これまでのISIで、当社においては11プラントの安全上重要な配管に対し、10年の周期（4回目以降の周期は7年）で、延べ約3,000箇所超音波探傷検査を実施してきており、今回の事象を除いて、溶接部近傍の硬化に起因する粒界割れは確認されていない。
- また国内外のPWRプラントにおいても、これまで同様の発生事例の報告はない。
- 今回事象を受け、既に大飯3,4号機においては、同様の事象の可能性のある部位全て（80箇所）に対し追加検査を実施し、欠陥がないことを確認している。
- 当社プラントの内、最も運転時間の短い大飯3号機（約17万時間）で生じたものであり、それよりも運転時間の長い美浜3号機、高浜1～4号機でも、至近3定検分のISI※（109箇所）及び今定検中における本事象と同じ箇所の検査（10箇所）において、欠陥がないことを確認している。

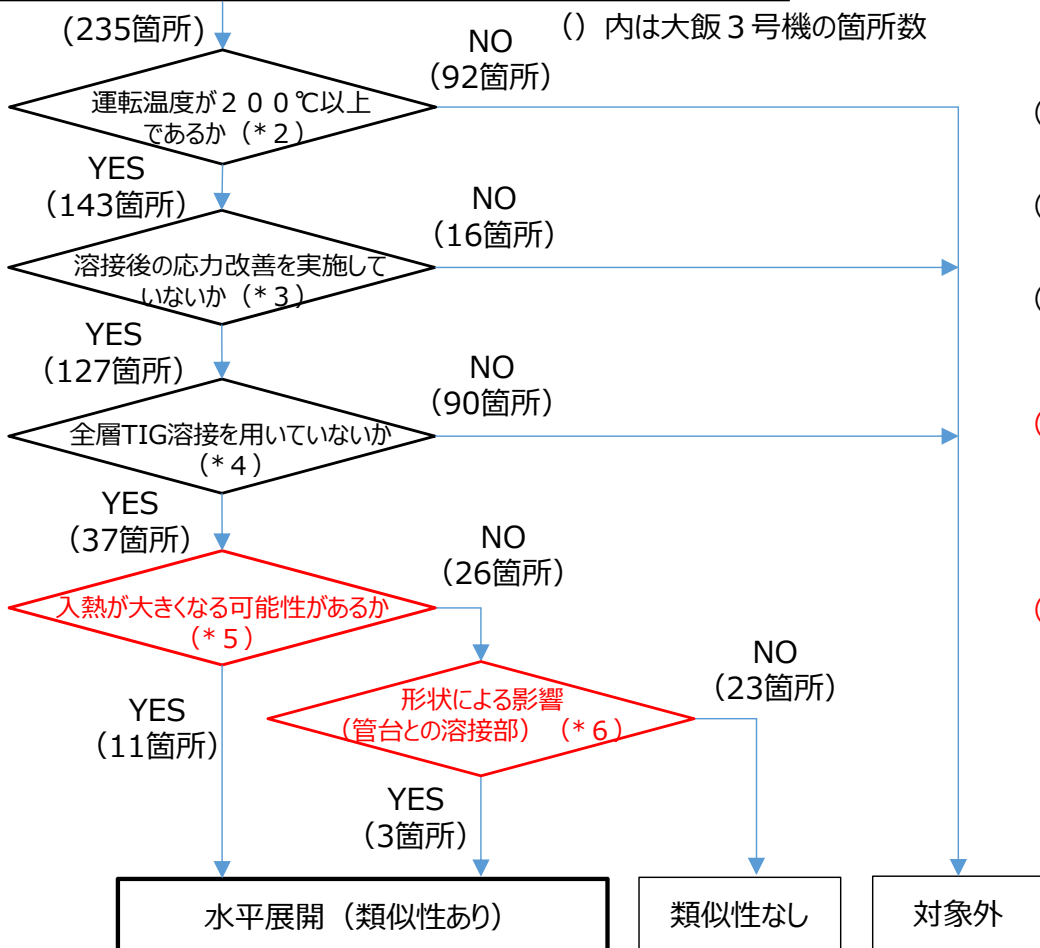
※運転時間で約20万時間が経過した以降の検査



- 上記のとおり、本事象は特異であると判断しているが、メカニズムがすべて明らかにはなっていないため、本事象の原因である「過大な溶接入熱」、「形状による影響」を踏まえ、それぞれについて類似性の高い箇所へ水平展開を行う。

# 水平展開方法の策定 (2/2)

1次系水質環境中オーステナイト系ステンレス鋼配管の  
供用期間中検査 (UT) 対象の全系統の全溶接部 (\*1)



- (\*1) PWR環境中のSCCの進展が認められていないステンレス鋼、初層溶接部が接液しないセットイン管台、及び初層溶接部が除去されているセットオン管台は含まれていない。
- (\*2) PWR環境中のSCCの進展への温度の影響を考慮し、運転温度200℃以上の溶接部は抽出対象とする。
- (\*3) 残留応力の影響を考慮し、溶接後の応力改善 (バフ研磨やピーニング) を実施していない溶接部は抽出対象とする。
- (\*4) 全層TIG溶接は硬化が小さいことを確認していること及び、初層入熱量が小さくできることで、応力についても小さくできることから、全層TIG溶接を用いていない溶接部は抽出対象とする。
- (\*5) 経験年数が少ない溶接士が施工した場合、丁寧かつ慎重に作業することにより入熱が大きくなる可能性があることから、実務経験が3年未満の溶接士が施工した溶接部 (入熱の安定する工場溶接を除く) は抽出対象とする。または、補修溶接を実施した場合は、追加で溶接をするため、入熱が大きくなる可能性があることから、補修溶接を実施した溶接部を抽出対象とする。
- (\*6) 管台は他の形状と比較して溶接による硬化が生じやすく、モックアップにおいても管台を含む形状で300HVを超える硬さを確認したことから、形状の影響の大きい「管台-エルボ」及び「管台-直管」の溶接部を抽出対象とする。

水平展開の対象箇所数

美浜3	高浜1	高浜2	高浜3	高浜4	大飯3	大飯4
21	24	17	14	18	14	9

## 【水平展開】

- 入熱が大きくなる可能性のある溶接部については検査を実施する。また、入熱が大きくなる可能性が低い溶接部であっても、形状による影響を踏まえ検査を実施する。
- これらの類似性の高い箇所に対しては3定検の間、毎定検で検査を実施する。
- なお、知見拡充や研究結果を踏まえて、対象・頻度を検討し、ISI計画に反映する。

## 本定検で実施する検査

水平展開箇所に加え、「類似性なし」とした箇所も含め、現時点において同様の事象が他プラントにおいて生じていないことを念のため確認し、欠陥がないことを確認した上でプラントを稼働する。

本定検で実施する検査の対象箇所数

美浜3	高浜1	高浜2	高浜3	高浜4	大飯3	大飯4
98	94	132	54	44	37(済)	43(済)

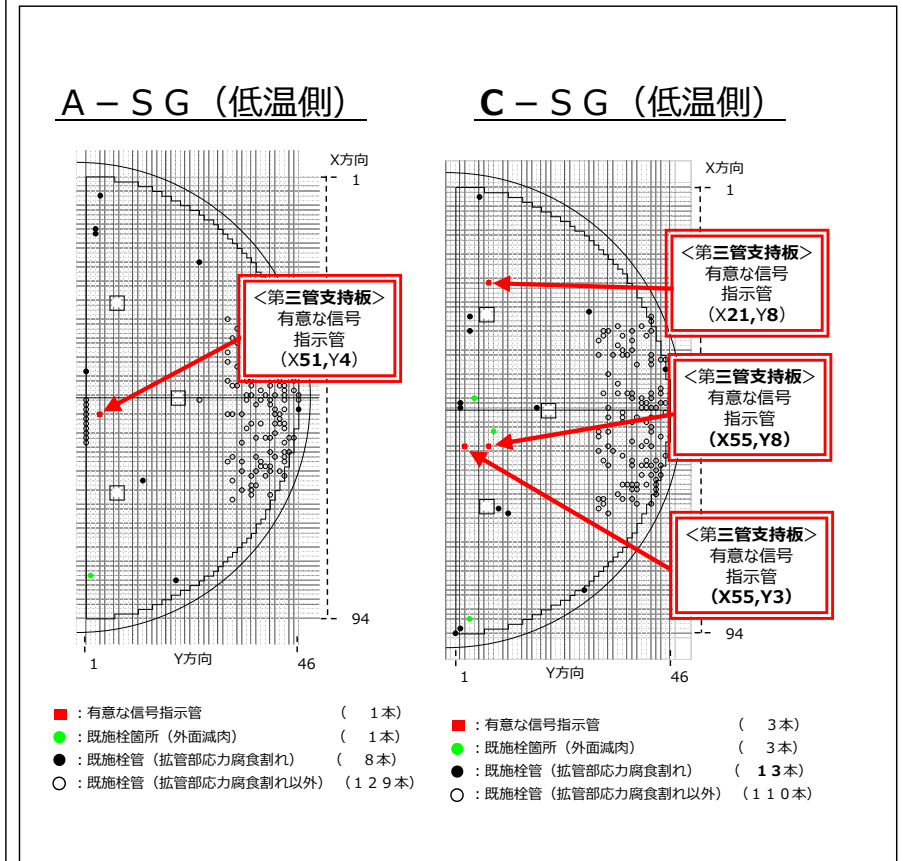
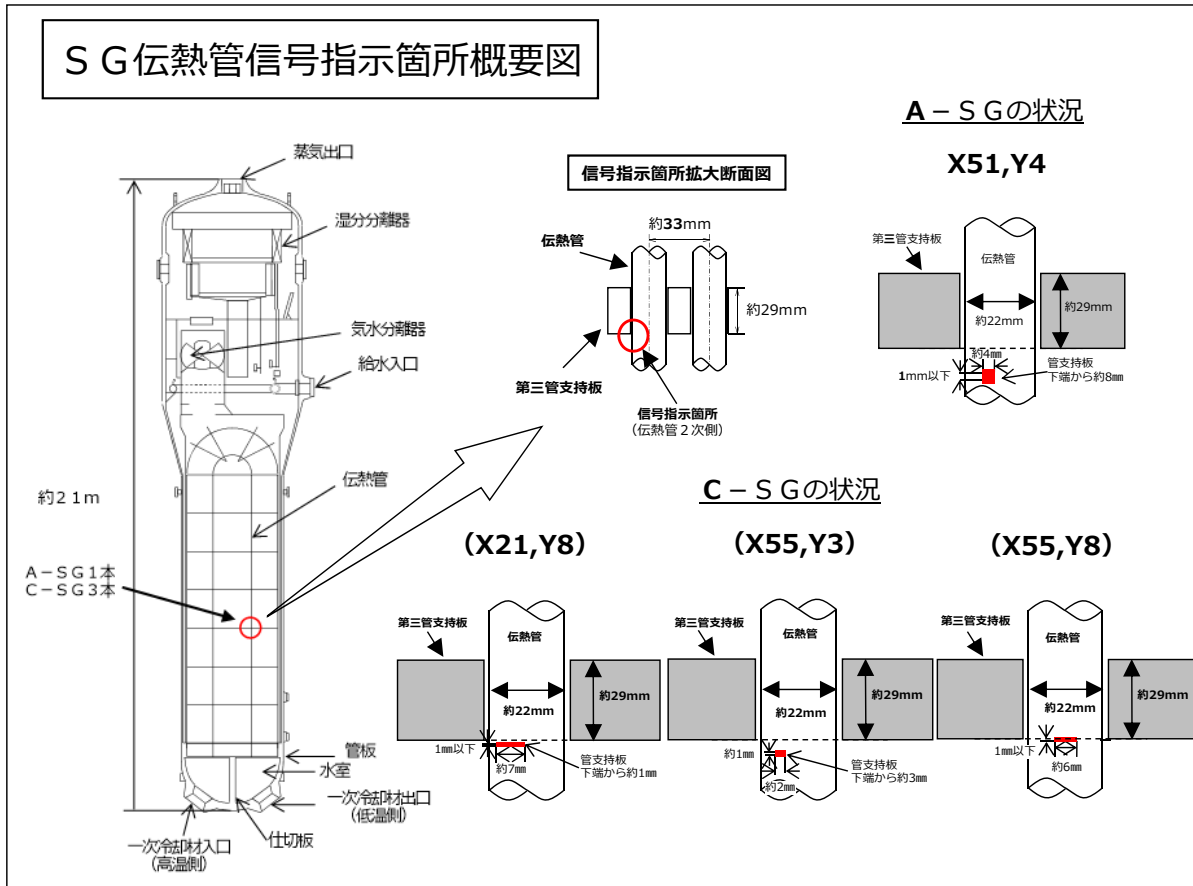


# 高浜発電所 4 号機 蒸気発生器伝熱管の損傷の原因と対策

# 蒸気発生器伝熱管の損傷発生状況

## <事象の概要>

- 2020年10月7日からの第23回定期検査において、蒸気発生器（以下、「SG」と言う）伝熱管の渦流探傷試験を実施した。その結果、同年11月20日にA-SGの伝熱管1本およびC-SGの伝熱管3本の伝熱管4本について、管支持板部付近に外面からの減肉とみられる有意な信号指示を確認した。
- 小型カメラによる外観観察の結果、有意な信号指示を確認した箇所には外面減肉が認められた。



## < 調査結果 >

### (伝熱管を損傷させた原因の確認)

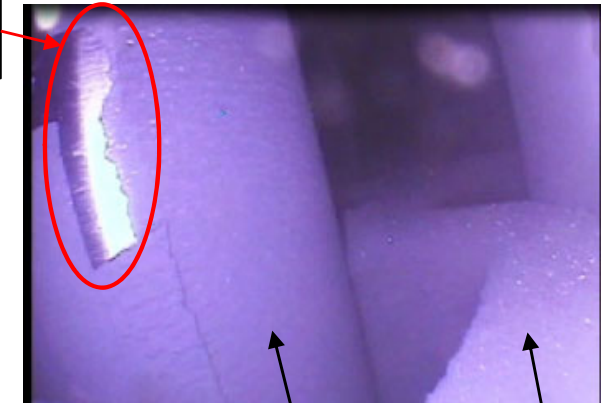
- 各伝熱管の損傷の原因と想定されるスケールを4個※を回収  
(※筋状の摺れ痕や、伝熱管主成分のニッケルやクロムの成分を検出)
- スケールやスラッジ以外の異物は見つかっていない
- 回収した4個のスケールは大部分が密度の高い層(稠密層)

### (損傷原因となりうるスケールの生成メカニズム)

- スケールの生成には、S G内への鉄分の持ち込み量が関係
- 高浜3、4号機のS Gは、他のプラントよりも運転時間が長いことなどから、鉄分の積算量が他のプラントよりも多いことを確認
- 伝熱管下部ほどスケールが稠密であることを確認

### < 伝熱管のスケール剥離状況 >

スケール剥離箇所  
(光沢箇所は伝熱管表面)



伝熱管

管支持板

## < 原因 >

- 伝熱管外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がれ落ち、伝熱管に繰返し接触したことで摩耗減肉が発生したと推定

## < 対策 >

- 伝熱管に付着したスケールを脆弱化させるために、S G器内を薬品で洗浄
- 損傷した伝熱管を施栓

# SG洗浄前の工場における試験

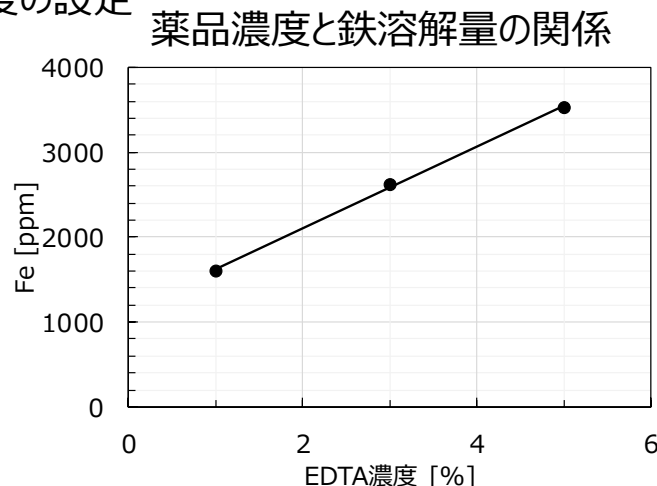
稠密な性状のスケールを脆弱化させるための対策として、大飯発電所3号機および4号機においても実績のある薬品洗浄について、洗浄試験により有効性の検証を行った。

## <工場における洗浄試験>

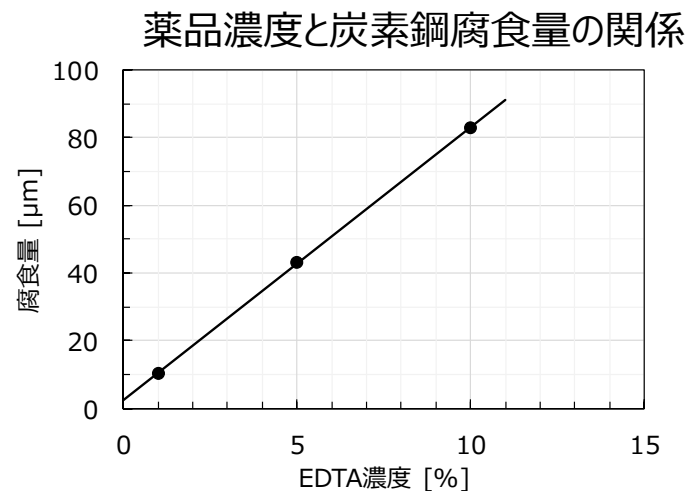
スケールの薬品浸漬試験を行い、稠密層厚さの減少効果を確認するとともに、伝熱管との摩耗試験により脆弱化効果を確認した。

試験を行ったスケールは、高浜4号機から回収（第二管支持板上および管板上）したもので実施

### ①薬品濃度の設定



薬品濃度に比例して鉄の溶解量は増加するため、スケール脆弱化の観点では濃度が高いほどよい。



薬品濃度に比例して炭素鋼（SG器内構造物の主な構成材料）の腐食量も増加。

腐食影響を最小限に抑える観点で、国内実績で最大の3%以下とし、**浸漬試験では2%～3%を適用する。**

### ②洗浄温度の設定

- 温度が高いほどスケール中へのEDTA※の浸入および鉄との反応は進むため、基本の80℃よりも高温側に設定。
- ※：希薄なエチレンジアミン四酢酸。合成洗剤に使用される酸の一種で鉄、銅の溶解を促進する効果を持つ薬液。
- 実機適用時にSG器内の薬品濃度を均一にすることおよび作業安全の観点から、沸騰しない温度で設定。

**100℃を適用。**（水の蒸気圧約0.1MPaに対し、洗浄中のSG器内圧は攪拌用窒素の注入・加圧に伴い0.15MPa）

# SG洗浄後のスケール脆弱化効果の確認結果(1/3)

○薬品洗浄後のスケールと伝熱管との摩耗試験について

高浜発電所 3号機にて薬品洗浄を実施した後、S G器内からスケールを採取し、断面マイクロ観察および摩耗試験を実施した結果、いずれのスケールも稠密層厚さが0.1mm未満であり、試験片製作時にスケールが欠損、摩耗試験開始直後にスケールが欠損、または有意に摩滅することを確認した。

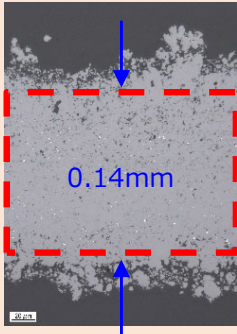
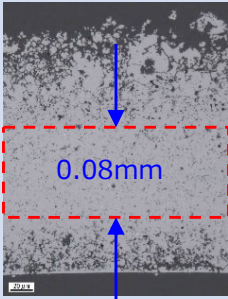
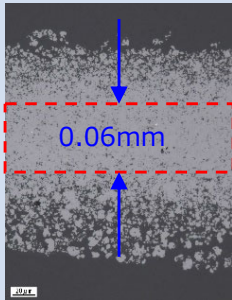
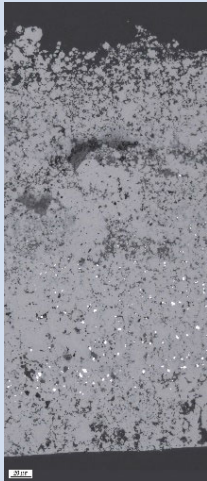
No	回収場所	スケール厚さ※1 (mm)	稠密層厚さ (mm)	摩耗体積比 (伝熱管/スケール)
1	A - S G 第一管支持板上	0.2	0.08	試験開始直後に欠損
2	A - S G 第一管支持板上	0.2	0.08	試験開始直後に欠損
3	A - S G 第二管支持板上	0.2	0.04	試験開始直後に欠損
4	A - S G 第一管支持板上	0.2	0.02	試験開始直後に欠損
5	B - S G 第一管支持板上	0.3	0.04	試験開始直後に欠損
6	C - S G 第一管支持板上	0.2	0.06	0.02
7	C - S G 第一管支持板上	0.3	0.06	試験開始直後に欠損
8	C - S G 第一管支持板上	0.2	0.06	試験片製作時に欠損
9	C - S G 第一管支持板上	0.3	0.04	0.01
10	C - S G 第一管支持板上	0.3	0.06	0.01
※2 参考	C - S G 第七管支持板上	0.5	0.00	0.01

※2：下部スケールと比較のため参考に確認

※1：ノギスにより計測

# SG洗浄後のスケール脆弱化効果の確認結果(2/3)

○薬品洗浄後のスケール稠密層厚さについて（以下に代表例を示す。）

回収場所	<薬品洗浄前> C-SG 回収スケール 第一管支持板上	<薬品洗浄後> A-SG 回収スケール 第一管支持板上 (ケース2)	<薬品洗浄後> C-SG 回収スケール 第一管支持板上 (ケース6)	<薬品洗浄後> C-SG 回収スケール 第七管支持板上 (参考)
断面ミクロ観察結果				
稠密層厚さ (mm)	0.14	0.08	0.06	0.00
スケール厚さ※ (mm)	0.2	0.2	0.2	0.5

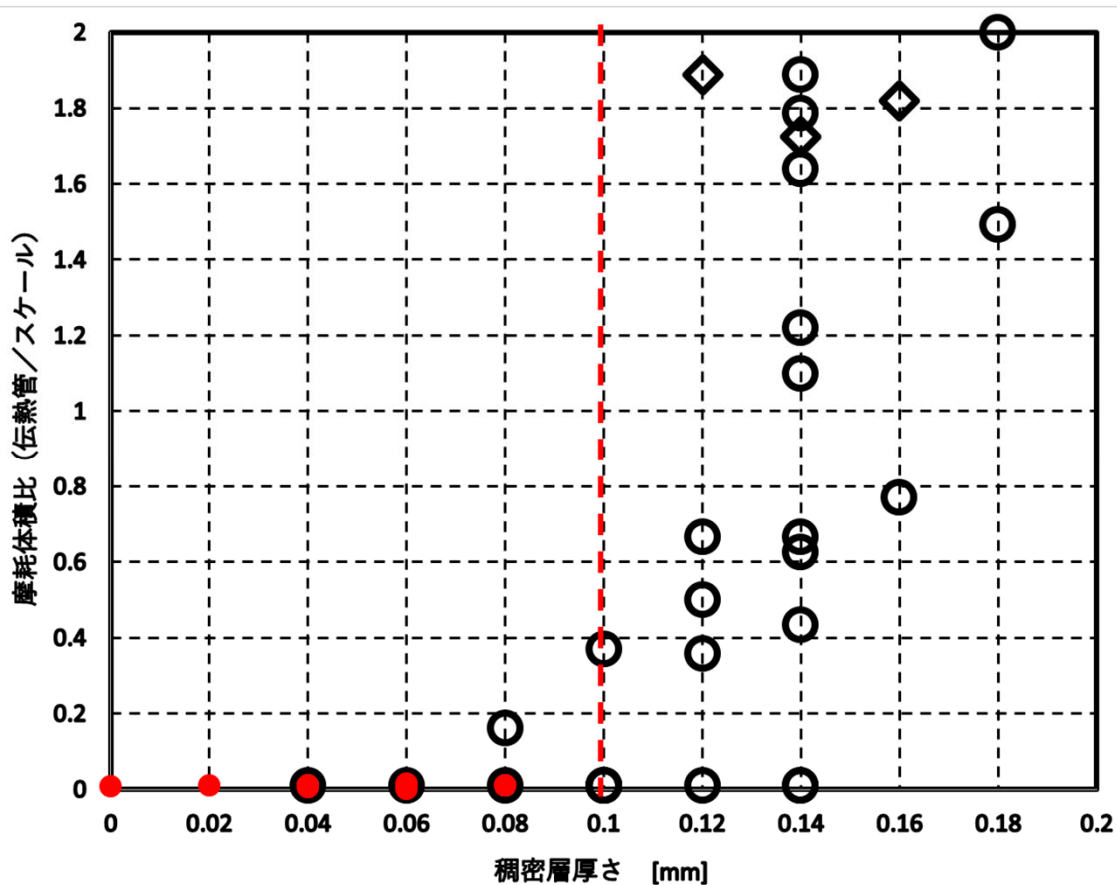
※：ノギスにより計測

[- - -]: 稠密層の範囲

## ○稠密層厚さと摩耗体積比の関係

薬品洗浄後の高浜発電所 3号機から採取した実機スケールについて、稠密層厚さと摩耗体積比の関係を整理した結果、稠密層厚さおよび摩耗体積比ともに十分低いことを確認した。

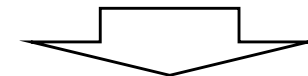
稠密層厚さと摩耗体積比の関係



- ◇ : 減肉原因スケール(推定) (注) 4個
- : 高浜4号機回収スケール 26個
- : 高浜3号機回収スケール 11個 (薬品洗浄後)

注) 減肉原因スケールの摩耗体積比は、回収スケールの推定摩耗量とECTモックアップ試験から得た実機相当の伝熱管の摩耗量から算出した。また、稠密層厚さは断面マイクロ観察を行い測定した。

- 高浜3号機と高浜4号機の運転時間は、ほぼ同じ。
- 高浜3号機と高浜4号機のスケールをSGから取り出し、比較しても同じ性状であることを確認
- 高浜3号機で回収したスケールにて薬品洗浄を実施し、稠密層厚さおよび摩耗体積比ともに十分低いことを確認した。



今後、高浜4号機においても、プラント起動前に薬品洗浄を実施する。

## 今後の対応（前回、委員会からの質問）

### （質問事項 1）

- スケールの性状確認に関して、これまでの知見も踏まえ、今後の保全にどのように活かしていくのか。何が最適か検討すべき。

S G 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は、次の通り定める。

- 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、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、薬品洗浄を実施する。

### （質問事項 2）

- 今後、運転保守において、どのような点に注意すべきかなどの知見を国内外で共有して欲しい。
- 薬品洗浄によりスケールを脆弱化させることで対策は可能だと思う（以前より専門委員会でも指摘をしている）が、蒸気発生器の交換も検討すべき。

今後、国外にも今回得た知見を公表していく（米国EPRIが実施するSGMP（蒸気発生器保全プログラム）のワーキングで発表予定）。

なお、高浜発電所 3 号機および 4 号機の S G については、T T 6 0 0 合金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、今後も引き続き、S G 取替に係る検討を進めていく。