

関原発 第 164 号
平成30年 6 月 25 日

原子力規制委員会 殿

大阪市北区中之島3丁目6番16号
関西電力株式会社
取締役社長 岩根 茂

高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について

実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条の規定により、別紙
のとおり取り纏めたので報告します。

発電用原子炉施設故障等報告書

平成30年 6月25日

関西電力株式会社

件名	高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について																				
事象発生の日時	平成30年6月22日 10時52分 (技術基準に適合していないと判断した日時)																				
事象発生の場所	高浜発電所4号機 原子炉格納容器内																				
事象発生の発電用原子炉施設名	原子炉冷却系統施設 一次冷却材の循環設備 蒸気発生器 (A)																				
事象の状況	<p>1. 事象発生の状況</p> <p>高浜発電所4号機(加圧水型軽水炉、定格電気出力87万kW、定格熱出力266万kW)は、平成30年5月18日より第21回定期検査中であり、3台ある蒸気発生器(以下「SG」という。)の伝熱管^{*1}全数について、健全性を確認するため渦流探傷試験^{*2}(以下「ECT」という。)を実施した。</p> <p>その結果、A-SGの伝熱管2本について、高温側の管板^{*3}部に有意な信号指示^{*4}が認められたことから、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則第18条並びに第56条に適合しておらず、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条に該当することを、平成30年6月22日10時52分に判断した。</p> <p>なお、B、C-SG伝熱管については、ECTで有意な信号指示は認められなかった。</p> <p>^{*1} SGの中で1次冷却材(1次側)と給水(2次側)の熱交換を行う逆U字形の管群。1次冷却材は入口管板部(高温側)から入り、給水と熱交換後に出口管板部(低温側)へ流れる。</p> <p>^{*2} 高周波電流を流したコイルを伝熱管に挿入することで伝熱管に渦電流を発生させ、伝熱管の欠陥により生じる渦電流の変化を電気信号として取り出すことで欠陥を検出する試験(ECT; Eddy Current Test)。全周に対して渦電流の発生と検出を別々のコイルを用いた24組のコイルで伝熱管の欠陥による渦電流の変化を信号として検出する。</p> <p>^{*3} 伝熱管が取り付けられている部品。伝熱管と管板で1次冷却材と給水の圧力障壁となる。</p> <p>^{*4} ノイズレベル(雑音信号レベル)を超える信号であって、SG管支持板等の外部構造物あるいは伝熱管の形状等に起因する信号(疑似信号)ではない信号指示。</p> <p>2. ECT結果</p> <p>(1) 検査期間 平成30年6月20日～平成30年6月22日(定期事業者検査終了日)</p> <p>(2) 検査範囲 SGの施栓^{*5}済みの伝熱管を除く、全数の伝熱管についてECTを実施した。 (単位:本)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>SG</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>合計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>検査対象本数</td> <td>3,247</td> <td>3,248</td> <td>3,259</td> <td>9,754</td> </tr> </tbody> </table> <p>^{*5} 伝熱管の1次側出入口部分に機械式栓を用いて栓をし、供用外とすること。</p> <p>(3) 検査結果 ECTデータを評価した結果^{*6}、2本の伝熱管に有意な信号指示が認められた。有意な信号指示が認められた箇所は、高温側の管板部であった。 (単位:本)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>SG</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>合計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>指示管本数</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table> <p>^{*6} 一般社団法人日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格(2008年改訂版) JSME S NA1-2008 SG伝熱管に対する判定基準に従う。</p>	SG	A	B	C	合計	検査対象本数	3,247	3,248	3,259	9,754	SG	A	B	C	合計	指示管本数	2	0	0	2
SG	A	B	C	合計																	
検査対象本数	3,247	3,248	3,259	9,754																	
SG	A	B	C	合計																	
指示管本数	2	0	0	2																	

事 象 の 原 因

1. 原因調査

SG伝熱管のECTで有意な信号指示が認められた原因調査を実施した。

(1) 信号指示の状況

色調図表示*7で分析した結果、伝熱管高温側管板部をローラ拡管している上端部*8(22ピッチ)に有意な信号指示があることを確認した。

また、リサーチ表示*9(信号表示)並びに鳥瞰図表示*10で分析した結果、いずれも伝熱管内面の軸方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

なお、今回の定期検査までのECTで、当該管には有意な信号指示が認められていないことを確認した。

*7 24組分のコイルのチャートを平面状に並べ、信号振幅に応じて色調として表示させたもの。伝熱管全長についての信号指示の大きさや位置等の分析に用いる表示方法。

*8 管板の穴に伝熱管を挿入し、伝熱管の内面から高い圧力(水圧)で拡管した後に、管板下部から上端部に向かって機械式ローラで伝熱管を押し広げて伝熱管と管板を圧着した最終ピッチ部。

*9 渦電流変化の電気信号を図で表したもの(水平成分および垂直成分を同一画面に表示)。

*10 信号の波形を3次元的に表したもので、信号の分布(イメージ)の詳細分析に用いる表示方法。

(2) 製造履歴調査

a. 製造時の検査記録による調査

SG伝熱管について建設時の製造記録を調査した結果、問題となる記録がないことを確認した。

b. 関係者への聞き取りによる調査

SGの製造手順について聞き取り調査を行った結果、管板に伝熱管の穴を加工した後に内面を目視で検査しているが、きずが認められた場合には専用の工具で手入れを行うことを確認した。

その後、伝熱管を管板の穴へ挿入し、伝熱管の内面から高い水圧をかけて拡管した後に、仕上げとして機械式ローラで伝熱管を更に拡管(22ステップ)し、伝熱管を管板に密着固定させる手順で製造されていることを確認した。

(3) 運転履歴調査

a. 1次冷却材温度、圧力

運転開始以降、第21回定期検査開始までの間、1次冷却材温度・圧力変化の調査を行った結果、過大な応力を発生させる異常な温度・圧力の変化がないことを確認した。

b. 放射線監視装置

第21サイクルにおける各放射線監視装置指示値の調査を行った結果、各指示値に有意な変化はなく、SGの1次側から2次側への1次冷却材の漏えいがないことを確認した。

c. 1次冷却材の水質

運転開始以降、第21回定期検査開始までの間、1次冷却材中のpH、電気伝導率、塩素イオン、溶存酸素、溶存水素の調査を行った結果、各データに有意な変化はなく基準値の範囲内で推移していたことを確認した。

(4) 材料調査

当該部分における製造時のミルシートを調査した結果、材料の成分はSG製造メーカーの仕様どおりであり、伝熱管はインコネルTT600*11製であることを確認した。

*11 ニッケルをベースとし、鉄、クロム等を含有するニッケル合金の商標名。

(5) 設計図書調査

工事計画認可申請書の強度計算書を調査した結果、延性割れ*12、疲労割れ*13に対して、設計上考慮されていることを確認した。

*12 材料に過大な応力がかかった時に発生する割れ(破壊)。

*13 材料に応力が継続的に、あるいは繰り返し受け強度が低下した時に発生する割れ。

事 象 の 原 因

(6) 過去の知見調査

SGの伝熱管内面の損傷モードについて、過去の知見等の調査を実施した。

a. 粒界腐食割れ*¹⁴、ピitting*¹⁵について

1次冷却材環境下では塩素イオン、溶存水素、溶存酸素が適切な基準値に保たれていれば、伝熱管内では沸騰による不純物濃縮が起こることはなく、かつ還元性雰囲気を持てるため、粒界腐食割れ、ピittingは発生しないことを確認した。

*¹⁴金属の結晶粒の境目(粒界)に沿って進展する腐食。

*¹⁵塩素イオン等に起因する金属表面の被膜破壊によって起きる局所的な腐食。

b. 局所変形について

局所変形の場合、ECTのリサーチ表示で位相角が0°となり、リサーチ波形の巻きも大きくなるが、今回のECT信号指示は内面きずの特徴を示す位相角を有しており、リサーチ波形に巻きが認められないことから、局所変形による信号指示でないことを確認した。

c. エロージョン*¹⁶について

SGの伝熱管材料にエロージョンが発生する場合の限界流速は非常に速い(約70m/s以上)が、これに対して当該部分の流速は十分遅い(平均約6m/s)ことから、エロージョンは発生しないことを確認した。また、伝熱管内は流体が衝突する形状でないことを確認した。

*¹⁶管内を流れる水により配管内面が摩耗する現象。

d. PWSCCについて(高浜発電所の経験)

(a) 抜管調査結果

4号機の第11回定期検査(平成11年4月~平成11年7月)時におけるSG伝熱管のECTで、高温側管板部のローラ拡管上端部に有意な信号指示が認められ、当該部位の抜管調査を行った結果、有意な信号指示は伝熱管内面を起点とした1次側からと考えられる軸方向に沿った粒界割れであった。その原因は、インコネルTT600製の伝熱管が高温の1次冷却材中で応力腐食割れ*¹⁷(以下「PWSCC」という。)の感受性を有しており、伝熱管のローラ拡管の際に局所的に生じた引張り残留応力*¹⁸と運転中内圧が相まったことによりPWSCCが発生したと推定している。

また、3号機の第12回定期検査(平成12年2月~平成12年4月)時に、4号機の第11回定期検査と同じ部位に有意な信号指示が認められ、当該部位の抜管調査を行った結果、4号機第11回定期検査時の抜管調査と同様の結果を得ている。

*¹⁷1次系水質環境下で発生する加圧水型原子力発電所特有の応力腐食割れ(材料、環境、応力の3要素が重なって発生する割れ)。

*¹⁸伝熱管を管板と接合させた後に、伝熱管に外力が作用していないにも関わらず材料内に生じる単位面積当たりの内力。

(b) 抜管調査以降のECT結果

3号機および4号機では、抜管調査以降の定期検査時におけるSG伝熱管のECTで、同様の箇所(高温側管板部)に軸方向のきずの特徴を有した有意な信号指示が認められているが、発生要因の調査結果では、伝熱管のローラ拡管の際に局所的に生じた引張り残留応力と運転中内圧が相まったことによりPWSCCが発生したものと推定している。

3号機

- ・第13回定期検査(平成13年6月~平成13年8月)
- ・第21回定期検査(平成24年2月~平成28年2月)
- ・第22回定期検査(平成28年12月~平成29年6月)

4号機

- ・第12回定期検査(平成12年9月~平成12年11月)
- ・第13回定期検査(平成14年1月~平成14年3月)
- ・第14回定期検査(平成15年4月~平成15年6月)
- ・第18回定期検査(平成20年8月~平成20年12月)
- ・第19回定期検査(平成22年2月~平成22年5月)
- ・第20回定期検査(平成23年7月~平成29年5月)

事象の原因

e. 国内プラントの経験

他の国内プラントのインコネルTT600製のSG伝熱管のECTにおいても、4号機と同様に有意な信号指示が経年的に確認されている。この信号指示は、同様の部位(高温側管板部)において発生しており、PWSCCであることが認められている。

f. 過去の知見調査のまとめ

インコネルTT600製のSG伝熱管のECT結果で、高温側管板部のローラ拡管部において認められた内面の軸方向に沿ったきずの特徴を有した信号指示は、伝熱管のローラ拡管の際に局所的に生じた引張り残留応力と運転中内圧が相まったことにより発生したPWSCCと推定されている。

(7) ショットピーニング*¹⁹の効果

a. これまでの知見により、SG伝熱管内面のショットピーニングがPWSCCに対する予防保全策として有効であることが確認されていることから、4号機の伝熱管については、第13回定期検査時(平成14年1月～平成14年3月)にショットピーニングを施工した。

ショットピーニングの施工は、これまでの知見から適切な施工条件により実施した場合は、PWSCCの初期欠陥に有意な進展を生じないことが知られていることから、当該定期検査時の施工記録を調査した結果、その条件どおりに施工されていることを確認した。

*¹⁹伝熱管内面にビーズ(金属微粒子)を打ち付けることにより材料表面の残留応力を改善する手法。

b. 4号機では第13回定期検査時(平成14年1月～平成14年3月)にSG伝熱管内面のショットピーニングを施工した後は、第14回定期検査時(平成15年4月～平成15年6月)に2本、第18回定期検査時(平成20年8月～平成20年12月)に1本、第19回定期検査時(平成22年2月～平成22年5月)に1本、第20回定期検査時(平成23年7月～平成29年5月)に2本の伝熱管に有意な信号指示を認めている。ショットピーニング施工以降に、伝熱管のECTで有意な信号指示を検出した理由は以下のとおりと考えられる。

伝熱管の内面に施工したショットピーニングは、圧縮応力を約0.2mmの深さまで付与することが可能である。一方、ECTでは約0.5mm以上の深さのPWSCCによる信号指示を検出することが可能である。

よって、ショットピーニングを施工した時点で、圧縮応力の付与されない範囲にECTにより信号指示の検出が不可能なPWSCCが既に存在した場合は、ショットピーニング施工後もPWSCCが進展し、顕在化する可能性があることから、伝熱管のECTで確認された有意な信号指示もそれに該当すると考えられる。

2. 調査結果のまとめ

(1) SG伝熱管のECTで確認された有意な信号指示は、高温側管板部のローラ拡管上端部(22ピッチ)の位置であり、内面の軸方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

これは、過去に経験したECTの信号指示と同様であることから、従来からインコネルTT600製の伝熱管で経験しているPWSCCによるきずと考えられる。

(2) 設計・建設時の記録やプラントの運転履歴等の調査結果については、特に問題となるものはなかった。

(3) SGの伝熱管にショットピーニングを施工した時点で、圧縮応力の付与されない範囲にECTにより検出不可能なPWSCCが既に存在していた場合は、ショットピーニング施工後もPWSCCが進展し、顕在化する可能性がある。

3. 推定原因

今回SG伝熱管のECTで認められた有意な信号指示は、過去に経験した信号指示と同様に高温側管板部のローラ拡管上端部の位置で、伝熱管内面の軸方向に沿ったきずであることから、SG製造時に高温側の管板部で伝熱管を拡管する際、伝熱管内面で局所的に発生した引張り残留応力と運転時の内圧および高温の1次冷却材環境が相まって、伝熱管内面からPWSCCが発生・進展したものと推定される。

保護装置の種類及び動作状況	該当せず																														
放射能の影響	なし																														
被害者	なし																														
他に及ぼした障害	なし																														
復旧の日時	未定																														
再発防止対策	<p>1. ECTで有意な信号指示の認められたSG伝熱管については、高温側および低温側のSG管板部で施栓し供用外とする。 なお、補修内訳は下表のとおりであり、今回の施栓により、安全解析施栓率*²⁰10%を超えるものではない。</p> <p style="text-align: right;">(単位：本)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>SG</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>合計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>今回施栓本数</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>既施栓本数</td> <td>135</td> <td>134</td> <td>123</td> <td>392</td> </tr> <tr> <td>総施栓本数</td> <td>137</td> <td>134</td> <td>123</td> <td>394</td> </tr> <tr> <td>設備本数</td> <td>3,382</td> <td>3,382</td> <td>3,382</td> <td>10,146</td> </tr> <tr> <td>施栓率 (%)</td> <td>4.1</td> <td>4.0</td> <td>3.6</td> <td>3.9</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">[安全解析施栓率：10%]</p> <p>*²⁰原子力発電所の安全性を解析・評価する際の条件として設定している施栓率であり、高浜4号機では施栓率10%において安全性を確認している。</p> <p>2. 過去の知見調査の結果から、高温側管板部では検出が想定されることから、今後も定期検査毎に、SG伝熱管の全数について全長のECTを実施して健全性を確認していく。</p>	SG	A	B	C	合計	今回施栓本数	2	0	0	2	既施栓本数	135	134	123	392	総施栓本数	137	134	123	394	設備本数	3,382	3,382	3,382	10,146	施栓率 (%)	4.1	4.0	3.6	3.9
SG	A	B	C	合計																											
今回施栓本数	2	0	0	2																											
既施栓本数	135	134	123	392																											
総施栓本数	137	134	123	394																											
設備本数	3,382	3,382	3,382	10,146																											
施栓率 (%)	4.1	4.0	3.6	3.9																											

高浜発電所4号機
蒸気発生器伝熱管の損傷について

平成30年6月

関西電力株式会社

1. 件名

高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について

2. 事象発生日

平成30年6月22日（技術基準に適合していないと判断した日）

3. 事象発生の発電用原子炉施設

原子炉冷却系統施設 一次冷却材の循環設備 蒸気発生器

4. 事象発生前の運転状況

第21回定期検査中

5. 事象発生の状況

（添付資料－1）

高浜発電所4号機（加圧水型軽水炉、定格電気出力87万kW、定格熱出力266万kW）は、平成30年5月18日より第21回定期検査中であり、3台ある蒸気発生器（以下「SG」という。）の伝熱管^{*1}全数について、健全性を確認するため渦流探傷試験^{*2}（以下「ECT」という。）を実施した。

その結果、A-SGの伝熱管2本について、高温側の管板^{*3}部に有意な信号指示^{*4}が認められたことから、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則第18条並びに第56条に適合しておらず、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条に該当することを、平成30年6月22日10時52分に判断した。

なお、B、C-SG伝熱管については、ECTで有意な信号指示は認められなかった。

*1 SGの中で1次冷却材（1次側）と給水（2次側）の熱交換を行う逆U字形の管群。1次冷却材は入口管板部（高温側）から入り、給水と熱交換後に出口管板部（低温側）へ流れる。

*2 高周波電流を流したコイルを伝熱管に挿入することで伝熱管に渦電流を発生させ、伝熱管の欠陥により生じる渦電流の変化を電気信号として取り出すことで欠陥を検出する試験（ECT；Eddy Current Test）。全周に対して渦電流の発生と検出を別々のコイルを用いた24組のコイルで伝熱管の欠陥による渦電流の変化を信号として検出する。

*3 伝熱管が取り付けられている部品。伝熱管と管板で1次冷却材と給水の圧力障壁となる。

*4 ノイズレベル（雑音信号レベル）を超える信号であって、SG管支持板等の外部構造物あるいは伝熱管の形状等に起因する信号（疑似信号）ではない信号指示。

6. ECT結果

（1）検査期間

平成30年6月20日～平成30年6月22日（定期事業者検査終了日）

（2）検査範囲

SGの施栓^{*5}済みの伝熱管を除く、全数の伝熱管についてECTを実施した。

(単位：本)

SG	A	B	C	合計
検査対象本数	3,247	3,248	3,259	9,754

*5 伝熱管の1次側出入口部分に機械式栓を用いて栓をし、供用外とすること。

(3) 検査結果 (添付資料-2、3)

E C Tデータを評価した結果*6、2本の伝熱管に有意な信号指示が認められた。

有意な信号指示が認められた箇所は、高温側の管板部であった。

(単位：本)

SG	A	B	C	合計
指示管本数	2	0	0	2

*6 一般社団法人日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格 (2008年改訂版) JSME S NA1-2008 SG伝熱管に対する判定基準に従う。

7. 原因調査 (添付資料-4)

SG伝熱管のE C Tで有意な信号指示が認められた原因調査を、要因分析 (F T) 図に基づき実施した。

(1) 信号指示の状況 (添付資料-5)

色調図表示*7で分析した結果、伝熱管高温側管板部をローラ拡管している上端部*8 (22ピッチ) に有意な信号指示があることを確認した。

また、リサーチ表示*9 (信号表示) 並びに鳥瞰図表示*10で分析した結果、いずれも伝熱管内面の軸方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

なお、今回の定期検査までのE C Tで、当該管には有意な信号指示が認められていないことを確認した。

*7 24組分のコイルのチャートを平面状に並べ、信号振幅に応じて色調として表示させたもの。伝熱管全長についての信号指示の大きさや位置等の分析に用いる表示方法。

*8 管板の穴に伝熱管を挿入し、伝熱管の内面から高い圧力 (水圧) で拡管した後に、管板下端部から上端部に向かって機械式ローラで伝熱管を押し広げて伝熱管と管板を圧着した最終ピッチ部。

*9 渦電流変化の電気信号を図で表したもの (水平成分および垂直成分を同一画面に表示)。

*10 信号の波形を3次的に表したもので、信号の分布 (イメージ) の詳細分析に用いる表示方法。

(2) 製造履歴調査

a. 製造時の検査記録による調査 (添付資料-6)

SG伝熱管について建設時の製造記録を調査した結果、問題となる記録がないことを確認した。

b. 関係者への聞き取りによる調査 (添付資料-7)

SGの製造手順について聞き取り調査を行った結果、管板に伝熱管の穴を

加工した後に内面を目視で検査しているが、きずが認められた場合には専用の工具で手入れを行うことを確認した。

その後、伝熱管を管板の穴へ挿入し、伝熱管の内面から高い水圧をかけて拡管した後に、仕上げとして機械式ローラで伝熱管を更に拡管（22ステップ）し、伝熱管を管板に密着固定させる手順で製造されていることを確認した。

（3）運転履歴調査 （添付資料－8、9）

a. 1次冷却材温度、圧力

運転開始以降、第21回定期検査開始までの間、1次冷却材温度・圧力変化の調査を行った結果、過大な応力を発生させる異常な温度・圧力の変化がないことを確認した。

b. 放射線監視装置

第21サイクルにおける各放射線監視装置指示値の調査を行った結果、各指示値に有意な変化はなく、SGの1次側から2次側への1次冷却材の漏えいがないことを確認した。

c. 1次冷却材の水質

運転開始以降、第21回定期検査開始までの間、1次冷却材中のpH、電気伝導率、塩素イオン、溶存酸素、溶存水素の調査を行った結果、各データに有意な変化はなく基準値の範囲内で推移していたことを確認した。

（4）材料調査 （添付資料－10）

当該部分における製造時のミルシートを調査した結果、材料の成分はSG製造メーカーの仕様どおりであり、伝熱管はインコネルTT600^{*11}製であることを確認した。

^{*11}ニッケルをベースとし、鉄、クロム等を含有するニッケル基合金の商標名。

（5）設計図書調査

工事計画認可申請書の強度計算書を調査した結果、延性割れ^{*12}、疲労割れ^{*13}に対して、設計上考慮されていることを確認した。

^{*12}材料に過大な応力がかかった時に発生する割れ（破壊）。

^{*13}材料に応力が継続的に、あるいは繰り返し受け強度が低下した時に発生する割れ。

（6）過去の知見調査 （添付資料－11、12、13）

SGの伝熱管内面の損傷モードについて、過去の知見等の調査を実施した。

a. 粒界腐食割れ^{*14}、ピitting^{*15}について

1次冷却材環境下では塩素イオン、溶存水素、溶存酸素が適切な基準値に

保たれていれば、伝熱管内では沸騰による不純物濃縮が起こることはなく、かつ還元性雰囲気を維持できるため、粒界腐食割れ、ピittingは発生しないことを確認した。

*¹⁴ 金属の結晶粒の境目（粒界）に沿って進展する腐食。

*¹⁵ 塩素イオン等に起因する金属表面の被膜破壊によって起きる局所的な腐食。

b. 局所変形について

局所変形の場合、ECTのリサーチ表示で位相角が0°となり、リサーチ波形の巻きも大きくなるが、今回のECT信号指示は内面きずの特徴を示す位相角を有しており、リサーチ波形に巻きが認められないことから、局所変形による信号指示でないことを確認した。

c. エロージョン*¹⁶について

SGの伝熱管材料にエロージョンが発生する場合の限界流速は非常に速い（約70 m/s以上）が、これに対して当該部分の流速は十分遅い（平均約6 m/s）ことから、エロージョンは発生しないことを確認した。また、伝熱管内は流体が衝突する形状でないことを確認した。

*¹⁶ 管内を流れる水により配管内面が摩耗する現象。

d. PWSCCについて（高浜発電所の経験）

（a）抜管調査結果

4号機の第11回定期検査（平成11年4月～平成11年7月）時におけるSG伝熱管のECTで、高温側管板部のローラ抜管上端部に有意な信号指示が認められ、当該部位の抜管調査を行った結果、有意な信号指示は伝熱管内面を起点とした1次側からと考えられる軸方向に沿った粒界割れであった。その原因は、インコネルTT600製の伝熱管が高温の1次冷却材中で応力腐食割れ*¹⁷（以下「PWSCC」という。）の感受性を有しており、伝熱管のローラ抜管の際に局所的に生じた引張り残留応力*¹⁸と運転中内圧が相まったことによりPWSCCが発生したと推定している。

また、3号機の第12回定期検査（平成12年2月～平成12年4月）時に、4号機の第11回定期検査と同じ部位に有意な信号指示が認められ、当該部位の抜管調査を行った結果、4号機第11回定期検査時の抜管調査と同様の結果を得ている。

*¹⁷ 1次系水質環境下で発生する加圧水型原子力発電所特有の応力腐食割れ（材料、環境、応力の3要素が重なって発生する割れ）。

*¹⁸ 伝熱管を管板と接合させた後に、伝熱管に外力が作用していないにも関わらず材料内に生じる単位面積当たりの内力。

（b）抜管調査以降のECT結果

3号機および4号機では、抜管調査以降の定期検査時におけるSG伝熱

管のECTで、同様の箇所（高温側管板部）に軸方向のきずの特徴を有した有意な信号指示が認められているが、発生要因の調査結果では、伝熱管のローラ拡管の際に局所的に生じた引張り残留応力と運転中内圧が相まったことによりPWSCCが発生したものと推定している。

3号機

- ・第13回定期検査（平成13年6月～平成13年8月）
- ・第21回定期検査（平成24年2月～平成28年2月）
- ・第22回定期検査（平成28年12月～平成29年6月）

4号機

- ・第12回定期検査（平成12年9月～平成12年11月）
- ・第13回定期検査（平成14年1月～平成14年3月）
- ・第14回定期検査（平成15年4月～平成15年6月）
- ・第18回定期検査（平成20年8月～平成20年12月）
- ・第19回定期検査（平成22年2月～平成22年5月）
- ・第20回定期検査（平成23年7月～平成29年5月）

e. 国内プラントの経験

他の国内プラントのインコネルTT600製のSG伝熱管のECTにおいても、4号機と同様に有意な信号指示が経年的に確認されている。この信号指示は、同様の部位（高温側管板部）において発生しており、PWSCCであることが認められている。

f. 過去の知見調査のまとめ

インコネルTT600製のSG伝熱管のECT結果で、高温側管板部のローラ拡管部において認められた内面の軸方向に沿ったきずの特徴を有した信号指示は、伝熱管のローラ拡管の際に局所的に生じた引張り残留応力と運転中内圧が相まったことにより発生したPWSCCと推定されている。

(7) ショットピーニング*19の効果 （添付資料-14、15）

a. これまでの知見により、SG伝熱管内面のショットピーニングがPWSCCに対する予防保全策として有効であることが確認されていることから、4号機の伝熱管については、第13回定期検査時（平成14年1月～平成14年3月）にショットピーニングを施工した。

ショットピーニングの施工は、これまでの知見から適切な施工条件により実施した場合は、PWSCCの初期欠陥に有意な進展を生じないことが知られていることから、当該定期検査時の施工記録を調査した結果、その条件どおりに施工されていることを確認した。

*19 伝熱管内面にビーズ(金属微粒子)を打ち付けることにより材料表面の残留応力を改善する手法。

b. 4号機では第13回定期検査時（平成14年1月～平成14年3月）にS

G伝熱管内面のショットピーニングを施工した後は、第14回定期検査時(平成15年4月～平成15年6月)に2本、第18回定期検査時(平成20年8月～平成20年12月)に1本、第19回定期検査時(平成22年2月～平成22年5月)に1本、第20回定期検査時(平成23年7月～平成29年5月)に2本の伝熱管に有意な信号指示を認めている。ショットピーニング施工以降に、伝熱管のECTで有意な信号指示を検出した理由は以下のとおりと考えられる。

伝熱管の内面に施工したショットピーニングは、圧縮応力を約0.2mmの深さまで付与することが可能である。一方、ECTでは約0.5mm以上の深さのPWSCCによる信号指示を検出することが可能である。

よって、ショットピーニングを施工した時点で、圧縮応力の付与されない範囲にECTにより信号指示の検出が不可能なPWSCCが既に存在した場合は、ショットピーニング施工後もPWSCCが進展し、顕在化する可能性があることから、伝熱管のECTで確認された有意な信号指示もそれに該当すると考えられる。

8. 調査結果のまとめ

(1) SG伝熱管のECTで確認された有意な信号指示は、高温側管板部のローラ拡管上端部(22ピッチ)の位置であり、内面の軸方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

これは、過去に経験したECTの信号指示と同様であることから、従来からインコネルTT600製の伝熱管で経験しているPWSCCによるきずと考えられる。

(2) 設計・建設時の記録やプラントの運転履歴等の調査結果については、特に問題となるものはなかった。

(3) SGの伝熱管にショットピーニングを施工した時点で、圧縮応力の付与されない範囲にECTにより検出不可能なPWSCCが既に存在していた場合は、ショットピーニング施工後もPWSCCが進展し、顕在化する可能性がある。

9. 推定原因

今回SG伝熱管のECTで認められた有意な信号指示は、過去に経験した信号指示と同様に高温側管板部のローラ拡管上端部の位置で、伝熱管内面の軸方向に沿ったきずであることから、SG製造時に高温側の管板部で伝熱管を拡管する際、伝熱管内面で局所的に発生した引張り残留応力と運転時の内圧および高温の1次冷却材環境が相まって、伝熱管内面からPWSCCが発生・進展したものと推定される。

10. 対 策

(添付資料-16、17、18)

(1) ECTで有意な信号指示の認められたSG伝熱管については、高温側および低温側のSG管板部で施栓し供用外とする。

なお、補修内訳は下表のとおりであり、今回の施栓により、安全解析施栓率^{*20}10%を超えるものではない。

(単位：本)

SG	A	B	C	合 計
今回施栓本数	2	0	0	2
既施栓本数	135	134	123	392
総施栓本数	137	134	123	394
設備本数	3,382	3,382	3,382	10,146
施栓率 (%)	4.1	4.0	3.6	3.9

[安全解析施栓率：10%]

^{*20}原子力発電所の安全性を解析・評価する際の条件として設定している施栓率であり、高浜4号機では施栓率10%において安全性を確認している。

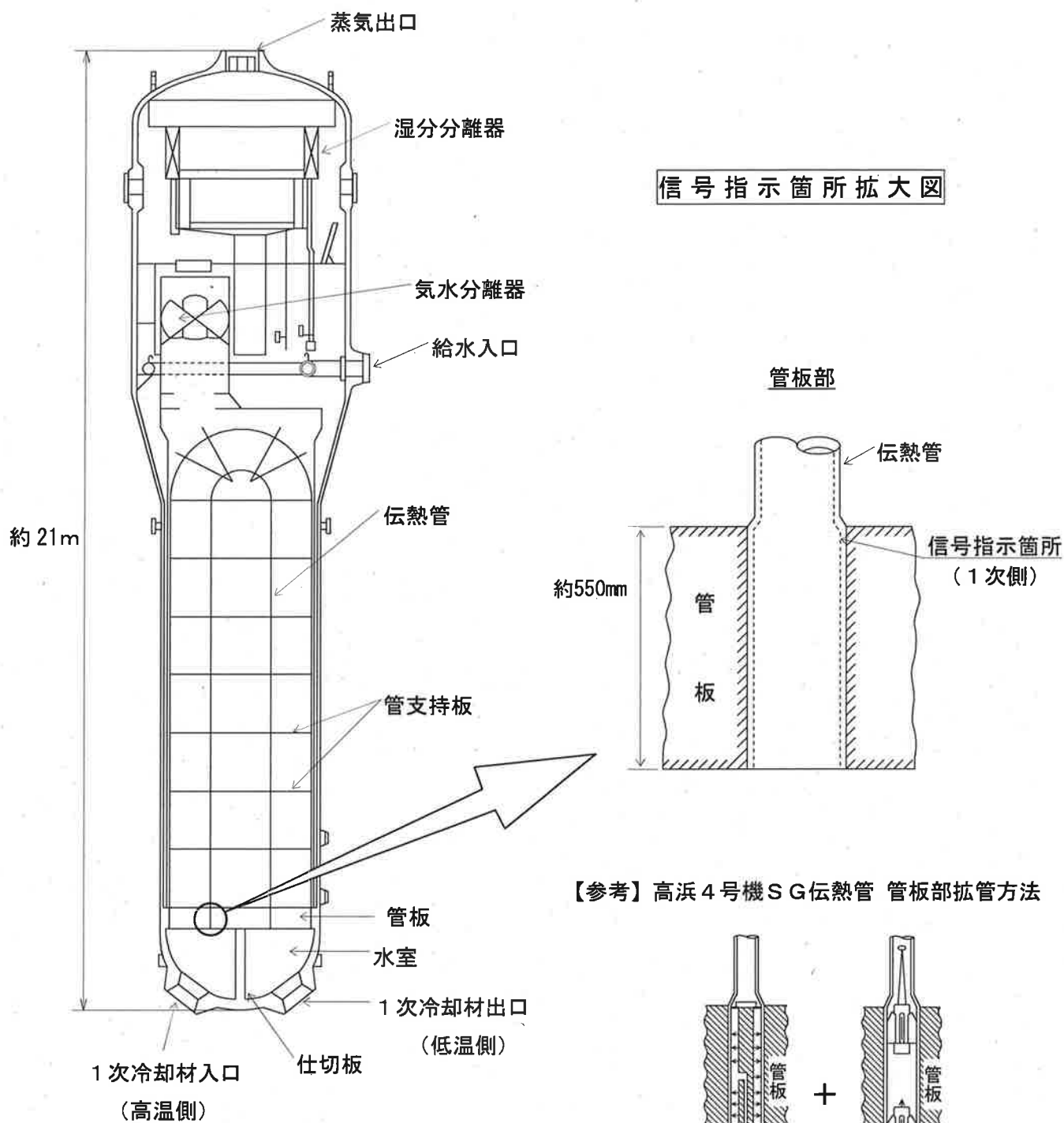
(2) 過去の知見調査の結果から、高温側管板部では検出が想定されることから、今後も定期検査毎に、SG伝熱管の全数について全長のECTを実施して健全性を確認していく。

以 上

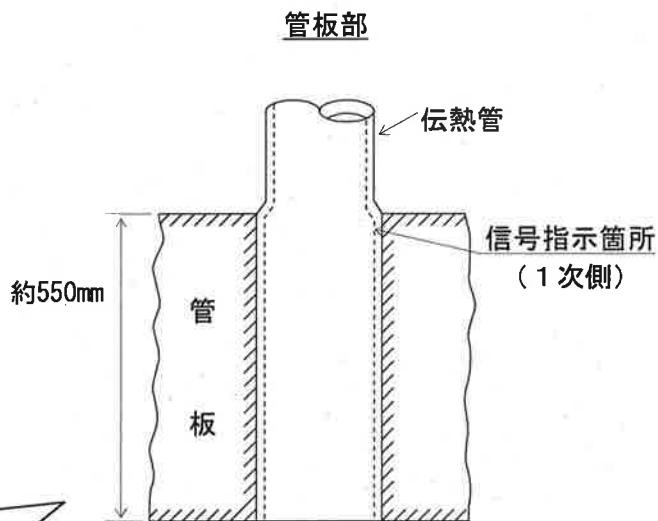
添 付 資 料

1. SG伝熱管信号指示箇所概要図
2. 高浜4号機 SG伝熱管ECT結果
3. 高浜4号機 SG伝熱管ECT信号指示位置図
4. 高浜4号機 SG伝熱管管板拡管部の有意な信号指示の要因検討
(損傷原因の推定FT図)
5. 信号指示の記録
6. 高浜4号機 蒸気発生器 製造時検査記録
7. 製造履歴に関する聞き取り調査
8. 高浜4号機 運転履歴調査結果(1次冷却材温度・圧力、放射線監視装置)
9. 高浜4号機 運転履歴調査結果(1次冷却材水質)
10. 高浜4号機 蒸気発生器 材料検査記録
11. 粒界腐食割れ、ピitting、局所変形、エロージョンについて
12. 高浜4号機 第11回および高浜3号機 第12回定期検査時 抜管調査結果について
13. 高浜4号機 第21回・第20回 定期検査時の信号指示の比較
14. 高浜4号機 蒸気発生器伝熱管ショットピーニング工事総括報告書
15. SG伝熱管へのショットピーニングの有効性とPWSCC検出に関する考察
16. SG伝熱管信号指示箇所補修概要図
17. 高浜4号機 SG伝熱管の補修来歴
18. 高浜発電所4号炉 高経年化技術評価書(抜粋)

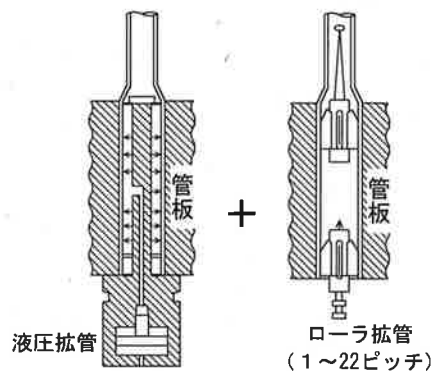
SG伝熱管信号指示箇所概要図



信号指示箇所拡大図



【参考】高浜4号機SG伝熱管 管板部拡管方法



伝熱管：外径	約22.2mm
厚さ	約1.3mm
材質	インコネルTT600

高浜4号機 SG伝熱管ECT結果

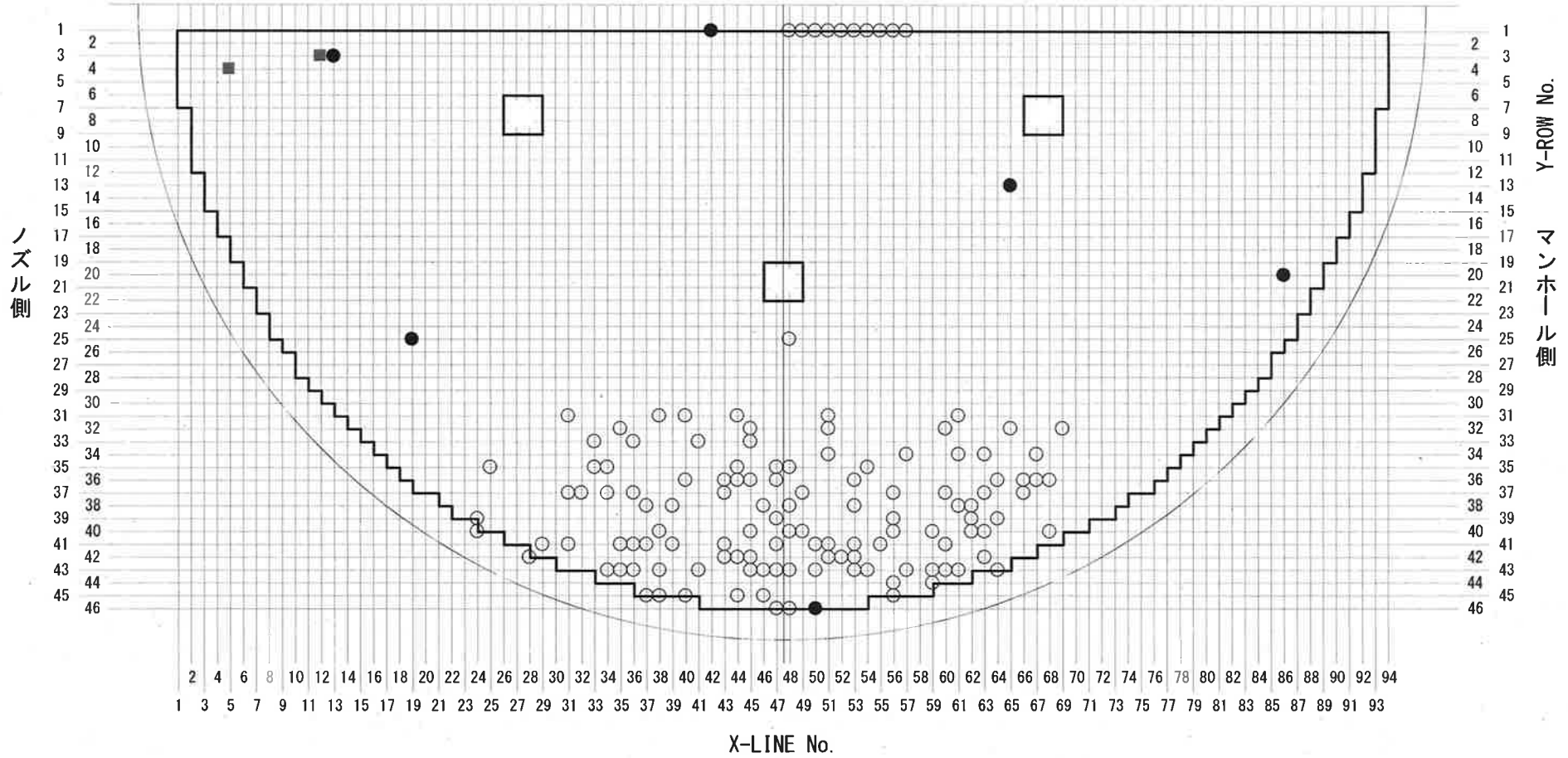
	A-SG	B-SG	C-SG	合計
設備本数	3,382	3,382	3,382	10,146
既施栓本数 (応力腐食割れによる施栓本数※)	135 (6)	134 (3)	123 (13)	392 (22)
検査対象本数	3,247	3,248	3,259	9,754
指示管本数	2	0	0	2
結果	高温側伝熱管の管板部のローラ拡管上端部(22ピッチ)において2本に有意な信号指示(内面軸方向に沿ったきず信号)が認められた。			
備考				

※既施栓本数の内数を示す。

高浜4号機 SG伝熱管ECT信号指示位置図 A-SG (高温側)

- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (129本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (6本)
- : 今回有意な信号指示が認められた位置 (2本)

本図はSG上部から見た位置を示す



高浜4号機 SG伝熱管管板拡管部の有意な信号指示の要因検討(損傷原因の推定FT図)

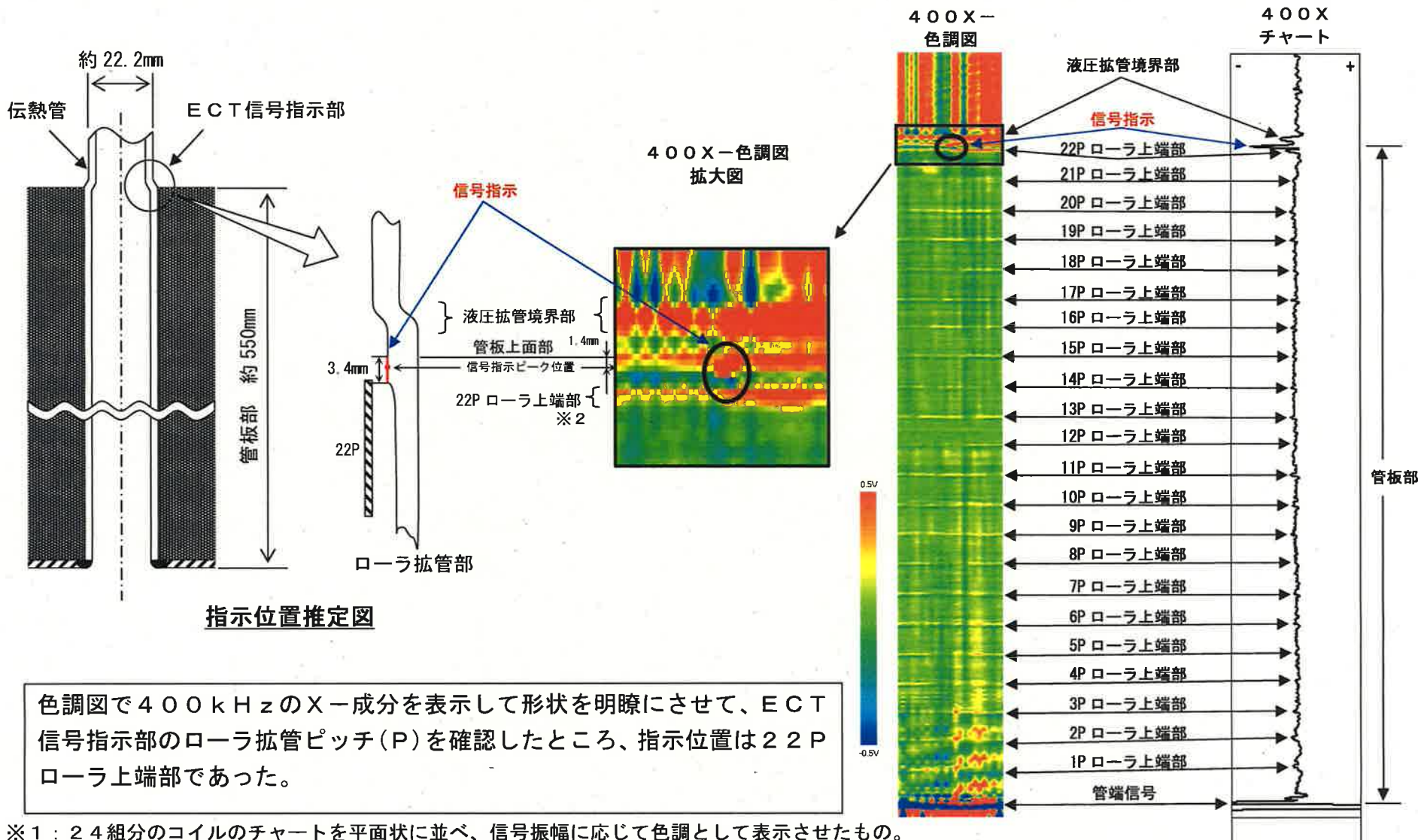
管板拡管部で有意な信号指示を確認

要因	因子	調査項目	調査結果	考察			
2次側からの損傷	延性割れ	設計図書による確認	工事計画認可申請書の強度計算書から、延性割れに対して設計上考慮されていることを確認した	設計図書による確認および異常な過度変化のないことから延性割れでないと判断	×		
		異常な過渡変化の有無を調査	運転履歴から、過大な応力を発生させる異常な温度・圧力変化がないことを確認した【添付資料8】				
	疲労割れ	設計図書による確認	工事計画認可申請書の強度計算書から、疲労割れに対して設計上考慮されていることを確認した	設計図書による確認および異常な過度変化のないことから疲労割れでないと判断	×		
		異常な過渡変化の有無を調査	運転履歴から、疲労割れを発生させる異常な温度・圧力変化がないことを確認した【添付資料8】				
	スクラッチ	製造中に発生	製造履歴調査	検査記録および作業員への聞き取り調査の結果、手順通り作業は行われており、作業においてきずのないことを確認していることを確認した【添付資料6、7】	製造履歴調査から製造中に発生したスクラッチではないと判断	×	
		定期検査作業中に発生	ECT波形調査	ECTの波形から、過去の定期検査中に発生したものではないことを確認した【添付資料5】			
	粒界腐食割れ(IGA)	環境	発生しうる環境であるか確認	1次冷却材は加圧されて沸騰せず、かつ構造上隙間部が存在せず、ドライ&ウェット現象が発生しないので、不純物濃縮による環境の変化はない。更に、1次冷却材には溶存酸素低減のため水素が注入され、良好な還元性雰囲気も維持されている。このような環境ではTT600合金に粒界腐食割れ、ピitting等の腐食の可能性はない【添付資料9、11】	水質環境および材料調査から粒界腐食割れ、ピittingではないと判断	×	
			材料	ミルシートにより材料を確認			ミルシートから、材料の成分はSG製造メーカー仕様通りであり、TT600合金であることを確認した【添付資料10】
	1次側からの損傷	局所変形	管板腐食	ECT波形調査	ECTの波形から、当該指示は内面きずの信号であり、局所変形による信号ではないことを確認した【添付資料11】	ECTの波形から局所変形ではないと判断	×
		エロージョン	過大流速	異常な過渡変化の有無を調査	運転履歴から、管内での過大流速が発生するような過渡がないことを確認した【添付資料8】	異常な過度変化がないことおよび限界流速の調査からエロージョンではないと判断	×
限界流速の調査				周辺流体の衝突によってエロージョンが発生するとされている。管板拡管部の伝熱管内の流速は平均約6m/sであり、伝熱管材料(TT600合金)にエロージョンが発生する限界流速(約70m/s以上)に比べて十分遅く、かつ、当該部の伝熱管内は流体が衝突する形状ではないことから、エロージョン発生の可能性はない【添付資料11】			
摩耗減肉	異物による減肉	ECT波形調査	ECTの波形から、減肉によるものではないことを確認した【添付資料5】	ECTの波形から摩耗減肉ではないと判断	×		
応力腐食割れ環境(PWSCC)	材料	ミルシートにより材料を確認	ミルシートから、材料の成分はSG製造メーカー仕様通りであり、TT600合金であることを確認した【添付資料10】	材料は設計通りであるが、過去の知見からPWSCC感受性を有しているTT600であり、PWSCCの要因であると判断	○		
		材料のPWSCCの感受性調査	過去の知見から、TT600合金はPWSCC感受性を有していることを確認した【添付資料12、13】				
	環境	1次冷却材の水質調査	運転履歴から、塩素イオン等の有害な成分について管理されていることを確認した【添付資料9】	1次冷却材の水質に異常はないが、過去の知見から通常の定格熱出力一定運転中の1次冷却材の環境、温度ではインコネルTT600はPWSCC感受性を有していることからPWSCCの要因であると判断	○		
		1次冷却材環境、温度の調査	過去の知見から、定格熱出力一定運転中の1次冷却材の環境、温度ではTT600合金はPWSCC感受性を有していることを確認した【添付資料12、13】				
応力	今回検出されたECT指示と同様な部位における知見調査	3号12回、4号11回定期検査の接管調査結果からPWSCCによる損傷によるきずが認められたことから、加速試験を行った結果、PWSCCが発生することが確認されている【添付資料12、13】	今回指示が検出された部位は、過去の知見から、不十分なローラ拡管に伴う引張残留応力がかかっている可能性があり、ショットピーニングによる圧縮応力付与範囲を超えすぎた場合にPWSCCが顕在化する要因であると判断	○			
	ショットピーニング施工後にECT指示が確認されたメカニズムの調査	ショットピーニングにより圧縮応力が付与されない範囲とECTの検出限界が重なる範囲にすぎずが残留していた場合、PWSCCが顕在化する可能性がある【添付資料15】					
ショットピーニングの初期欠陥への影響		施工記録	予め確認されている施工条件通り施工されていることを施工記録により確認した。ショットピーニングの施工により初期欠陥は有意に進展していなかったことが確認された【添付資料5、14】	施工記録からショットピーニングの初期欠陥への影響はないと判断	×		
ショットピーニングによる欠陥		施工記録	予め確認されている施工条件通り施工されていることを施工記録により確認した【添付資料14】	施工記録からショットピーニングの施工による欠陥への影響はないと判断	×		

×: 要因の可能性なし。○: 要因の可能性あり

信号指示の記録

色調図表示^{※1}による管板部指示管の指示位置推定 (A-SG X5-Y4)

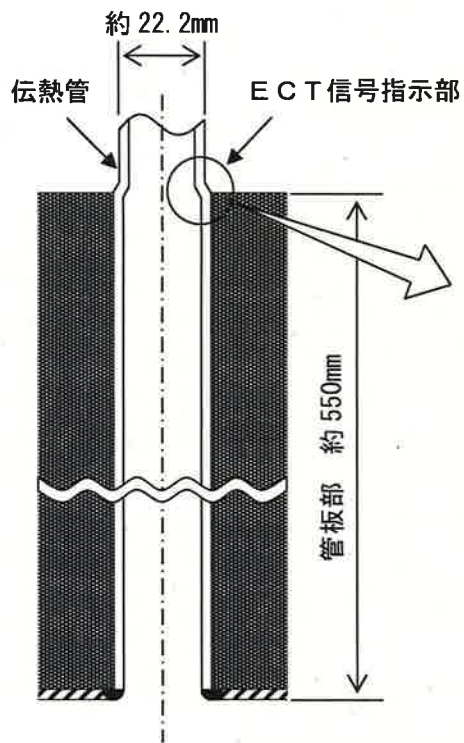


色調図で400kHzのX-成分を表示して形状を明瞭にさせて、ECT信号指示部のローラ拡管ピッチ(P)を確認したところ、指示位置は22Pローラ上端部であった。

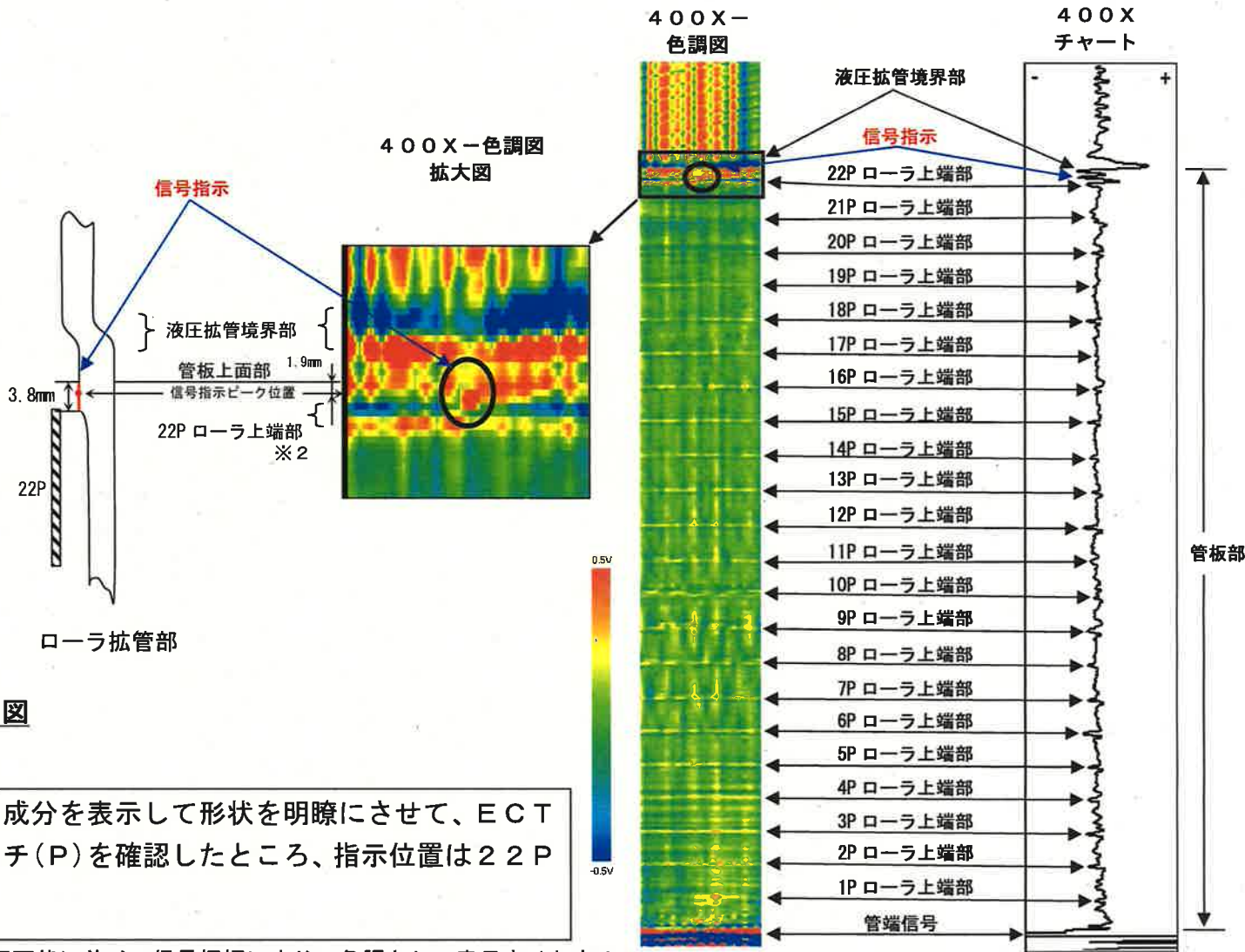
※1：24組分のコイルのチャートを平面状に並べ、信号振幅に応じて色調として表示させたもの。伝熱管全長についての信号指示の大きさや位置等の分析に用いる表示方法。
 ※2：管板の穴に伝熱管を挿入し、伝熱管の内面から高い圧力(水圧)で拡管した後に、管板下端部から上端部に向かって機械式ローラで伝熱管を押し上げて伝熱管と管板を圧着した最終ピッチ部。

インテリジエント ECT 指示管波形

色調図表示※¹による管板部指示管の指示位置推定 (A-SG X12-Y3)



指示位置推定図



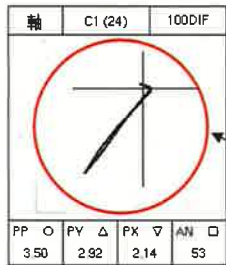
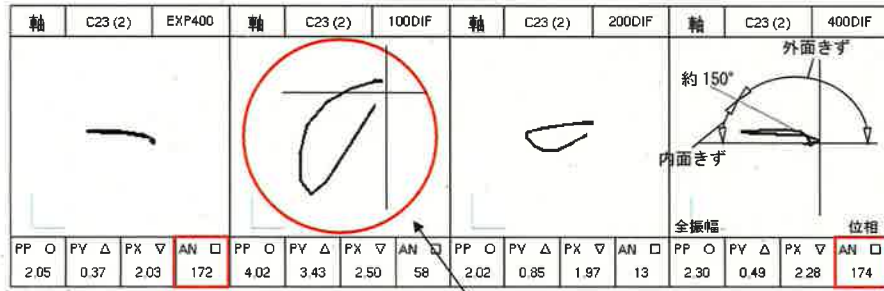
インテリジェント ECT 指示管波形

色調図で400kHzのX-成分を表示して形状を明瞭にさせて、ECT信号指示部のローラ拡管ピッチ(P)を確認したところ、指示位置は22Pローラ上端部であった。

- ※1：24組分のコイルのチャートを平面状に並べ、信号振幅に応じて色調として表示させたもの。伝熱管全長についての信号指示の大きさや位置等の分析に用いる表示方法。
- ※2：管板の穴に伝熱管を挿入し、伝熱管の内面から高い圧力(水压)で拡管した後、管板下端部から上端部に向かって機械式ローラで伝熱管を押し広げて伝熱管と管板を圧着した最終ピッチ部。

有意な信号指示のリサーチ、鳥瞰図表示による分析例 (SCC)

リサーチ表示※¹ (A-SG X5-Y4)



同一番地の伝熱管の健全と評価されるリサーチ

[分析手順-1]

400kHz ※³リサーチ波形の位相からきずパターンを示していることを確認する。

[分析結果-1]

位相から内面軸方向きずパターンを示している。

[分析手順-2]

同様に 100kHz リサーチ波形の位相から内面きずパターンを示していることを確認する。

[分析結果-2]

構造物、形状等のノイズ信号が複合しており、位相から内面きずパターンを確認できない。

[分析手順-3]

リサーチ波形に構造物、形状等のノイズ信号が複合していると認められた場合には、出来るだけノイズ成分を除いたリサーチ波形を表示し確認する。

[分析結果-3]

きず信号が小さくリサーチ波形に構造物、形状等のノイズ信号が複合しており、位相や全振幅の確認ができない。

[分析手順-4]

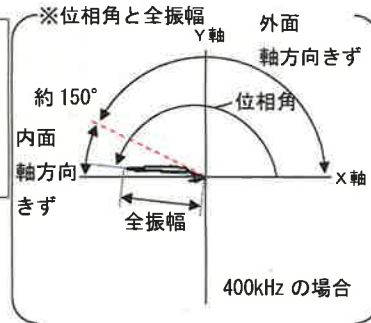
きず信号が小さく、リサーチ波形に構造物、形状等のノイズ信号が複合し位相や全振幅の確認が困難な場合は、健全部の波形と比較して内面きずの影響の有無を確認する。

[分析結果-4]

400kHz リサーチ波形の位相から内面軸方向きずパターンを示しており、100kHzにおいて健全部と比較して、内面軸方向きずの影響を示した波形となっている。

位相角
ECT信号を2次的に表示したリサーチ表示において、X軸0°からの角度をいい、内面きずか外面きずか、軸方向きずか周方向きずかを評価する。

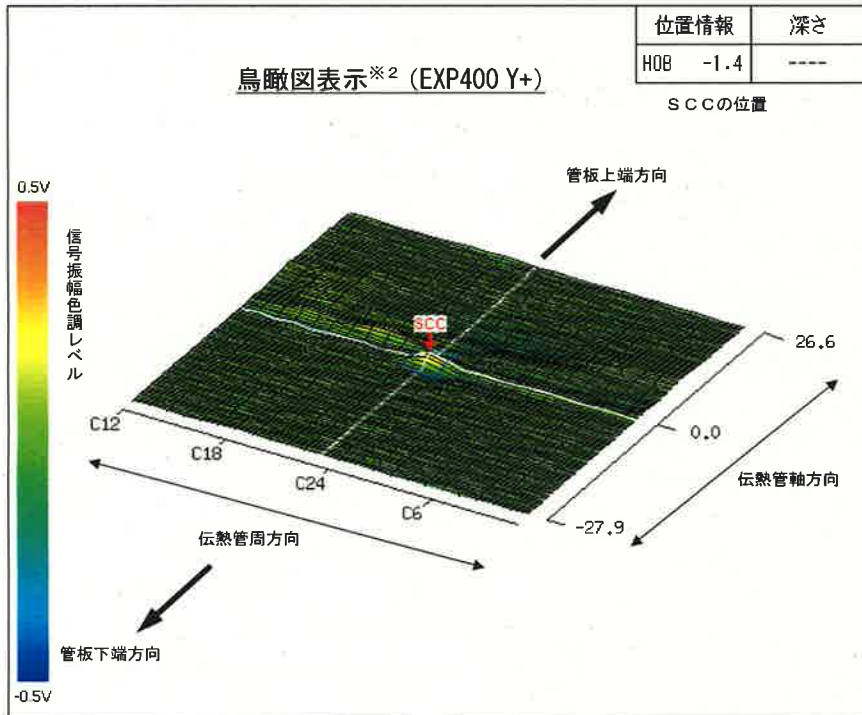
全振幅
リサーチ表示の最大長さをいい、周波数の異なるそれぞれの全振幅の大きさを比較することにより内面きずか外面きずかを判定する。



鳥瞰図表示※² (EXP400 Y+)

位置情報	深さ
HOB -1.4	---

SCCの位置



伝熱管内面軸方向きずの特徴

位相角

位相角が400kHzで約150°以上
100kHzで約170°以上

全振幅

100kHzの全振幅 < 400kHzの全振幅

きず信号が小さく、構造物や形状等に複合し位相角や全振幅の評価が困難な場合は、分析手順により総合的に評価する。

評価

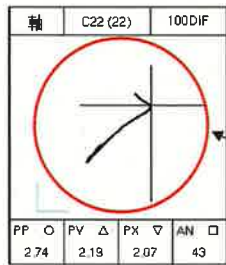
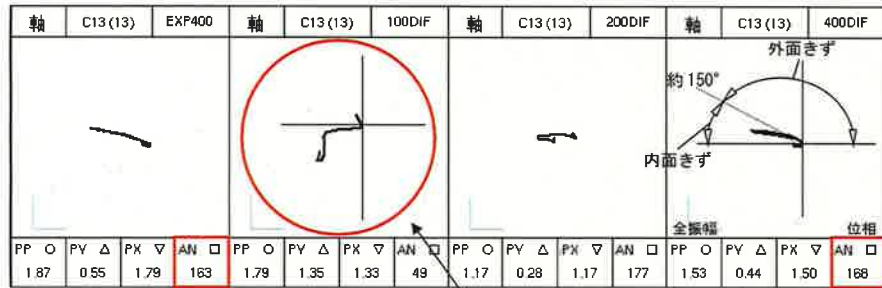
今回の有意な信号指示は高温側管板部で、伝熱管内面軸方向きずの特徴を有している。また、信号の特徴により貫通していないと評価した。

[本分析例の見方は、添付資料-5 (14/15) を参照]

※1: 渦電流変化の電気信号を図で表したものの(水平成分および垂直成分を同一画面に表示)。
 ※2: 信号の波形を3次的に表したもので、信号の分布(イメージ)の詳細分析に用いる表示方法。
 ※3: 400kHzは原信号およびEXPフィルタを含む。

有意な信号指示のリサーチ、鳥瞰図表示による分析例 (SCC)

リサーチ表示※1 (A-SG X12-Y3)



同一番地の伝熱管の健全と評価されるリサーチ

[分析手順-1]

400kHz ※3 リサーチ波形の位相からきずパターンを示していることを確認する。

[分析結果-1]

位相から内面軸方向きずパターンを示している。

[分析手順-2]

同様に 100kHz リサーチ波形の位相から内面きずパターンを示していることを確認する。

[分析結果-2]

構造物、形状等のノイズ信号が複合しており、位相から内面きずパターンを確認できない。

[分析手順-3]

リサーチ波形に構造物、形状等のノイズ信号が複合していると認められた場合には、出来るだけノイズ成分を除いたりサーチ波形を表示し確認する。

[分析結果-3]

きず信号が小さくリサーチ波形に構造物、形状等のノイズ信号が複合しており、位相や全振幅の確認ができない。

[分析手順-4]

きず信号が小さく、リサーチ波形に構造物、形状等のノイズ信号が複合し位相や全振幅の確認が困難な場合は、健全部の波形と比較して内面きずの影響の有無を確認する。

[分析結果-4]

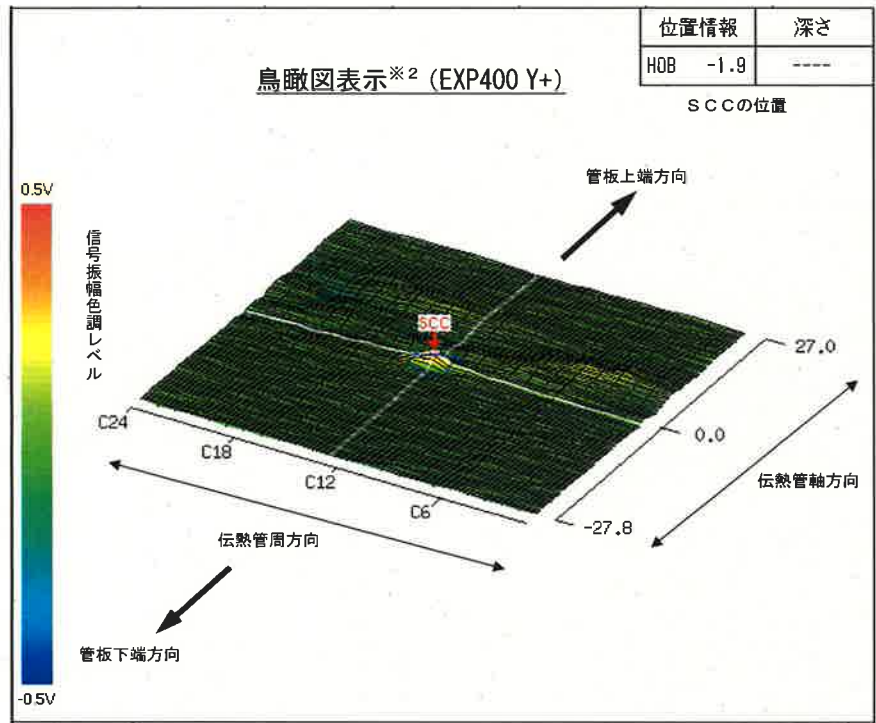
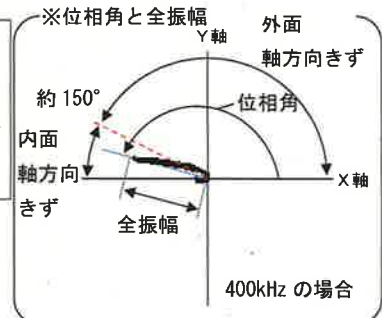
400kHz リサーチ波形の位相から内面軸方向きずパターンを示しており、100kHzにおいて健全部と比較して、内面軸方向きずの影響を示した波形となっている。

位相角

E C T 信号を2次的に表示したリサーチ表示において、X軸0°からの角度をいい、内面きずか外面きずか、軸方向きずか周方向きずかを評価する。

全振幅

リサーチ表示の最大長さをいい、周波数の異なるそれぞれの全振幅の大きさを比較することにより内面きずか外面きずかを判定する。



伝熱管内面軸方向きずの特徴

- 位相角**
位相角が400kHzで約150°以上
100kHzで約170°以上
- 全振幅**
100kHzの全振幅 < 400kHzの全振幅

きず信号が小さく、構造物や形状等に複合し位相角や全振幅の評価が困難な場合は、分析手順により総合的に評価する。

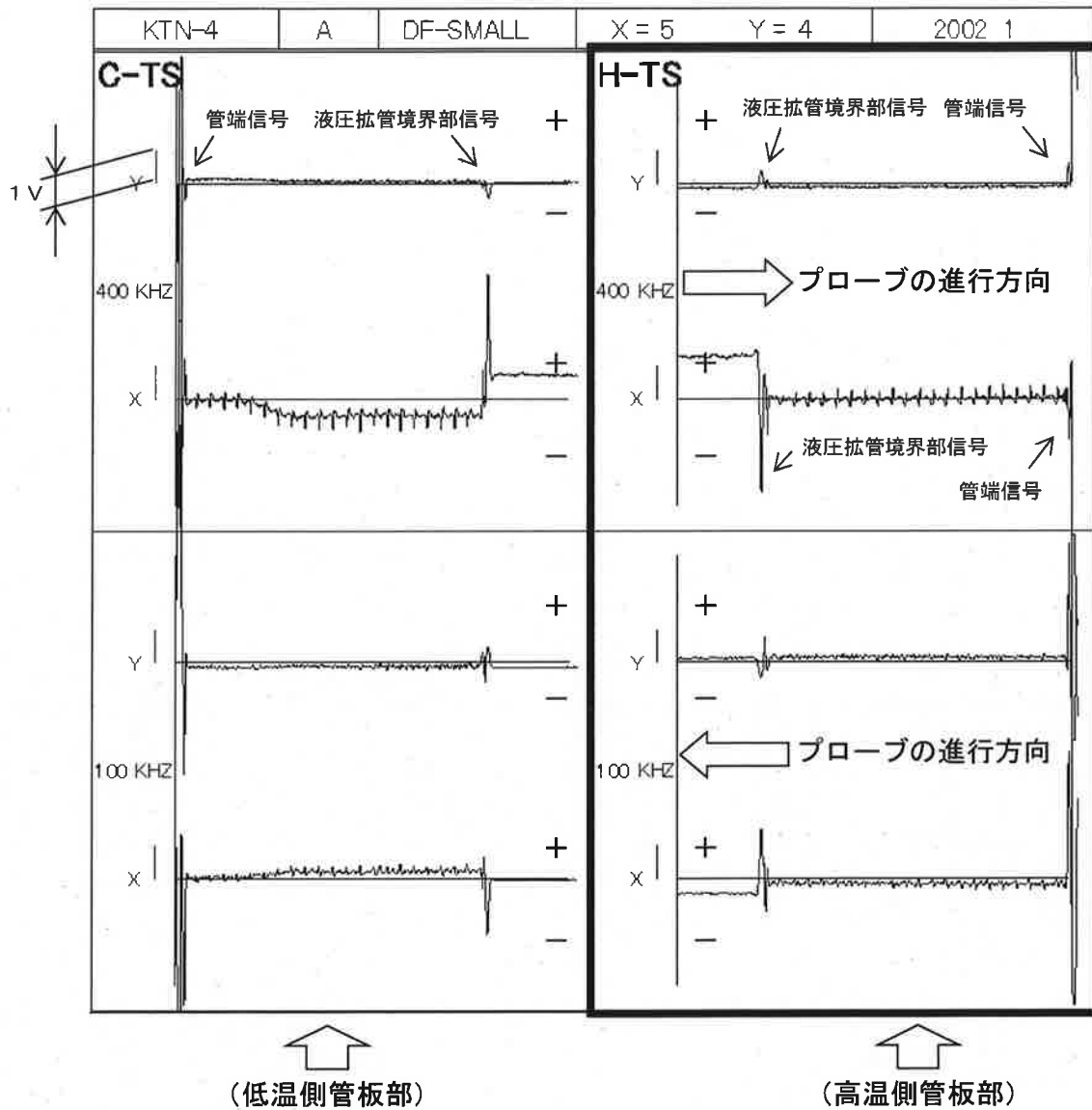
評価

今回の有意な信号指示は高温側管板部で、伝熱管内面軸方向きずの特徴を有している。また、信号の特徴により貫通していないと評価した。
[本分析例の見方は、添付資料-5 (14/15) を参照]

※1: 渦電流変化の電気信号を図で表したものの(水平成分および垂直成分を同一画面に表示)。
※2: 信号の波形を3次的に表したもので、信号の分布(イメージ)の詳細分析に用いる表示方法。
※3: 400kHzは原信号およびEXPフィルタを含む。

当該管のショットピーニング施工前のDF-ECT※波形 (A-SG X5-Y4)

第13回定期検査にショットピーニング施工する前に実施したDF-ECTの波形を確認したところ、当該伝熱管 (A-SG X5-Y4) の高温側管板部には有意な信号指示は確認されなかった。



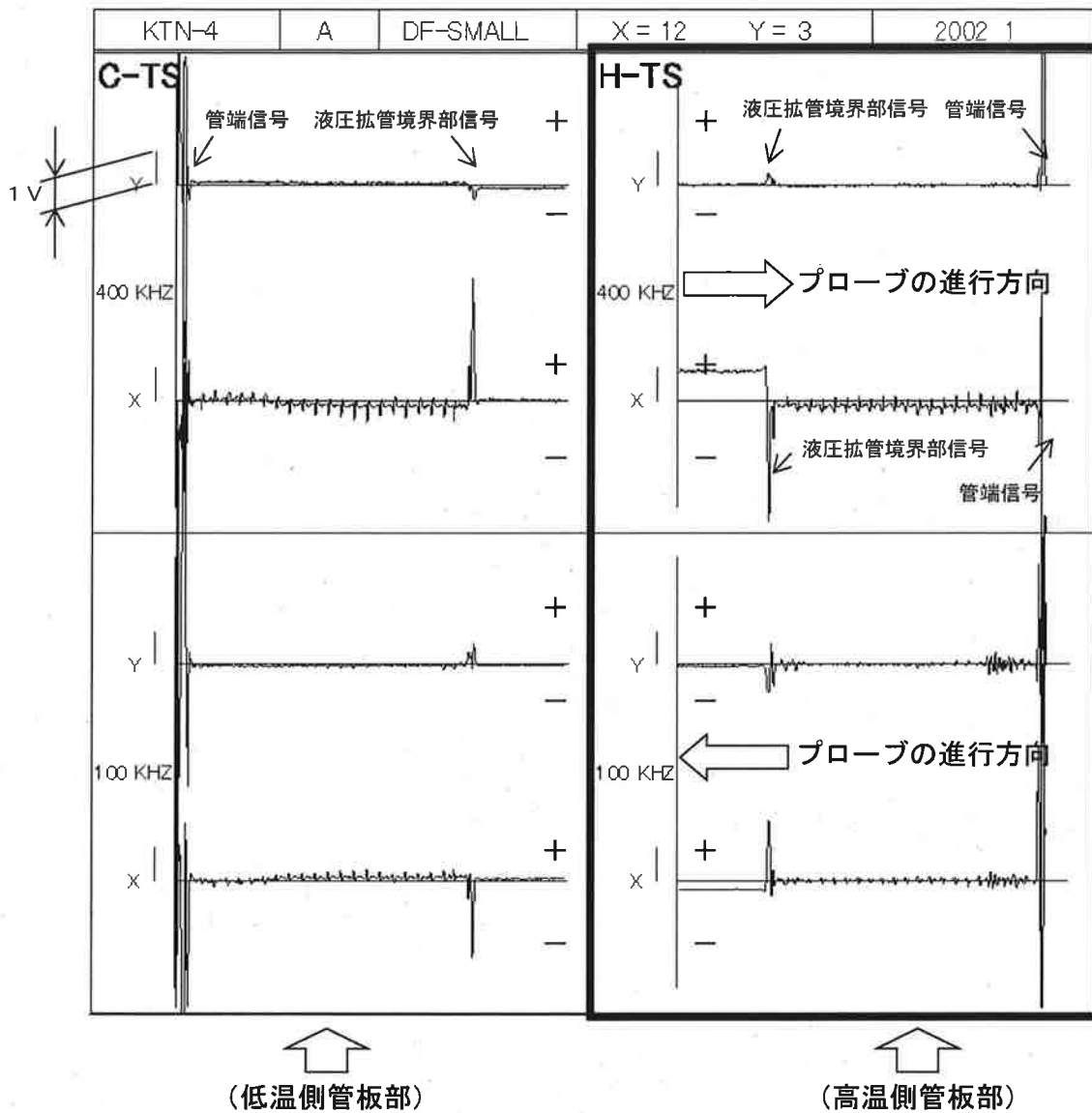
管板部の有意信号とは、

- ・ 400kHz/100kHz の Y 信号がともにプローブの進行方向に対して「+→-」へ変動する
- ・ 400kHz の Y 振幅が 0.5V 以上

※：全周に対して渦電流の発生と検出に同じコイルを用いた1組(2個)のコイルで伝熱管の欠陥による渦電流の変化を信号として検出する試験

当該管のショットピーニング施工前のDF-ECT※波形 (A-SG X12-Y3)

第13回定期検査にショットピーニング施工する前に実施したDF-ECTの波形を確認したところ、当該伝熱管 (A-SG X12-Y3) の高温側管板部には有意な信号指示は確認されなかった。



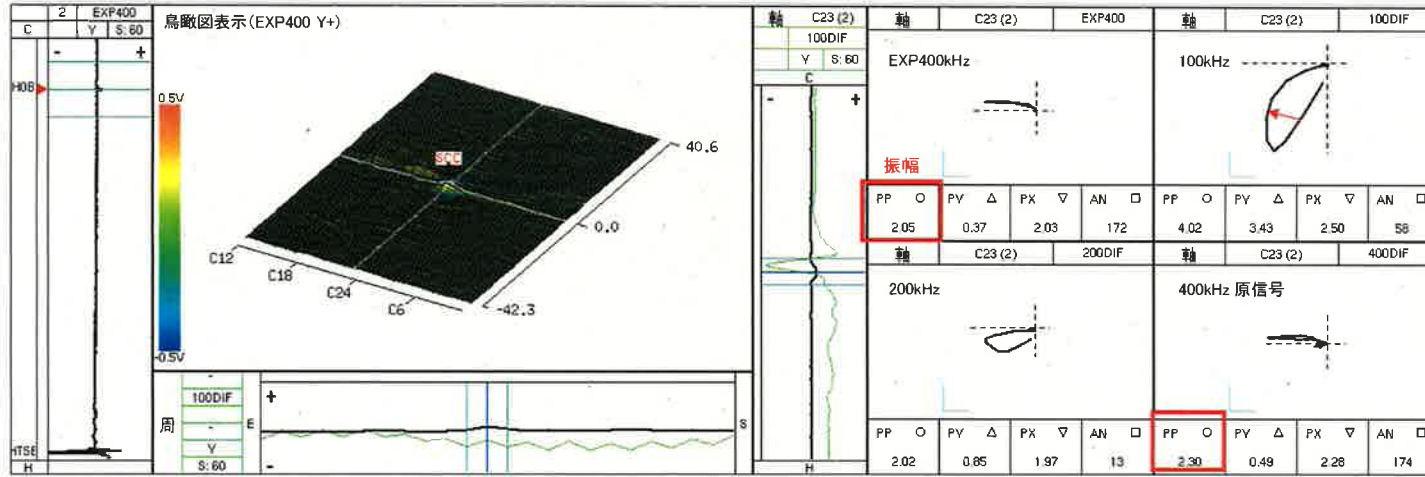
管板部の有意信号とは、

- ・ 400kHz/100kHz の Y 信号がともにプロブの進行方向に対して「+→-」へ変動する
- ・ 400kHz の Y 振幅が 0.5V 以上

※：全周に対して渦電流の発生と検出に同じコイルを用いた1組 (2個) のコイルで伝熱管の欠陥による渦電流の変化を信号として検出する試験

インテリジェント ECT^{※1}の探傷データ(1/3)
 (高温側管板部の経年波形 A-SG X5-Y4)

第 21 回定期検査



分析評価

(* 詳細は、添付資料-5(4/15)参照のこと。)

【400kHz】^{※2}

EXP400のリサージュ波形の振幅において、#20と比較すると振幅が1.05V から2.05V と大きくなっており、内面軸方向きずパターンを示している。

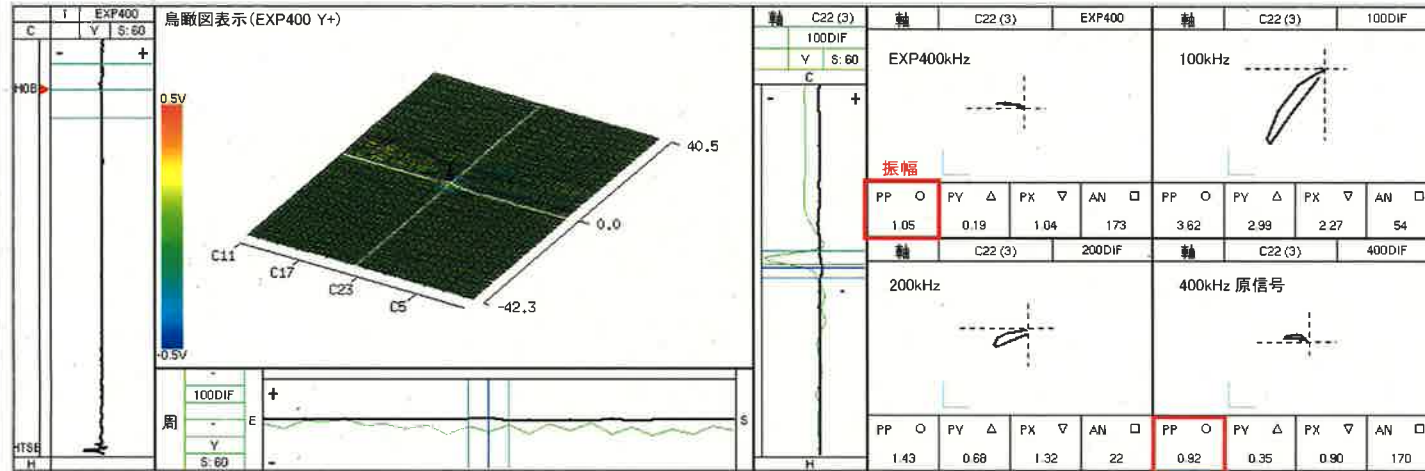
加えて400DIF のリサージュ波形の振幅を見ても同様の変化を示している。

【100kHz】

管板上端信号との区別が困難ではあるが、#20と比較すると、内面きず信号方向に波形の歪みが認められる。

以上から、内面軸方向きずが考えられる。

第 20 回定期検査



分析評価

【400kHz】

位相がほぼ水平で、管板内の形状信号やプローブの揺動信号と類似している。また、リサージュ波形の振幅を見ても#19から有意な増加が認められない。

【100kHz】

健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。

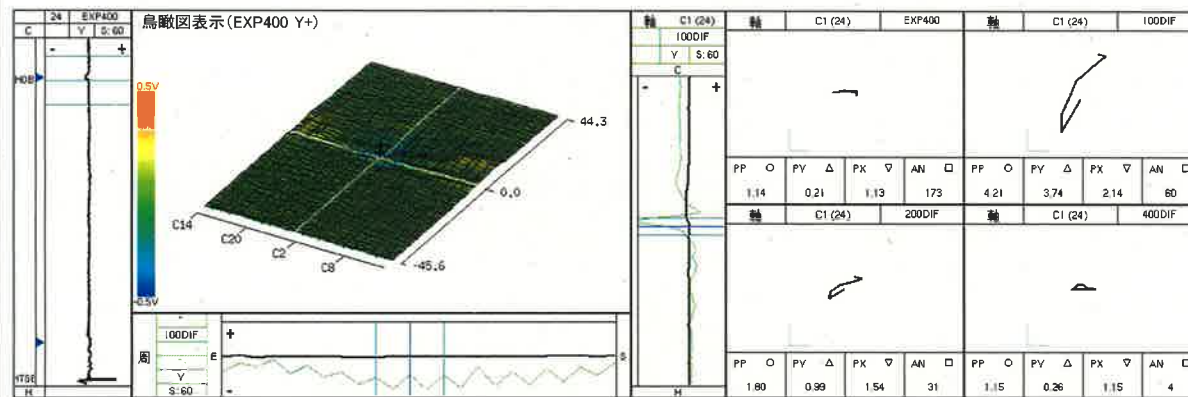
以上から、きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。

※1: 全周に対して渦電流の発生と検出を別々のコイルを用いた24組のコイルで伝熱管の欠陥による渦電流の変化を信号として検出する試験

※2: 400kHz は、原信号および EXP フィルタ(拡管境界部ノイズ信号を低減させるフィルタ)を含む

インテリジェント ECT の探傷データ(2/3)
 (高温側管板部の経年波形 A-SG X5-Y4)

第 19 回定期検査



分析評価

【400kHz】

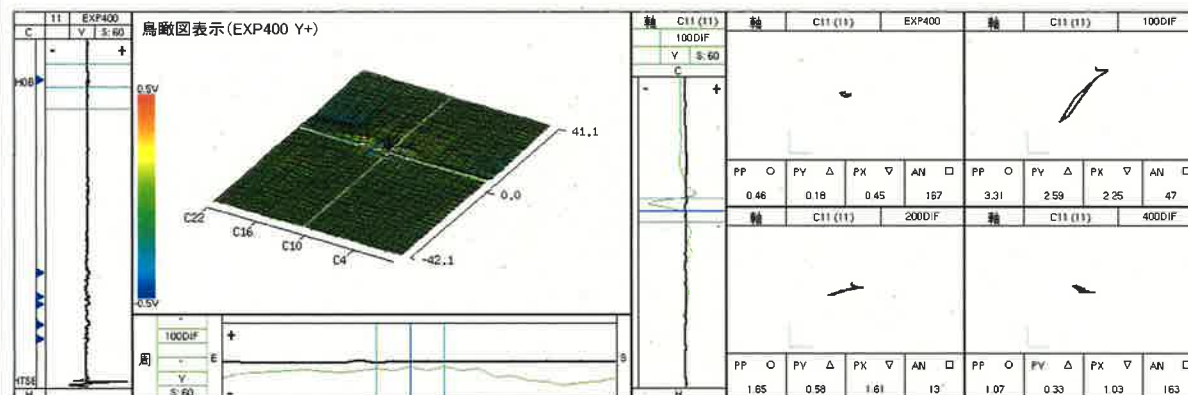
リサージュ波形の振幅を見ると EXP400では#18から増加が認められるが、振幅は小さく管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

【100kHz】

健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。

以上から、きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。

第 18 回定期検査



分析評価

【400kHz】

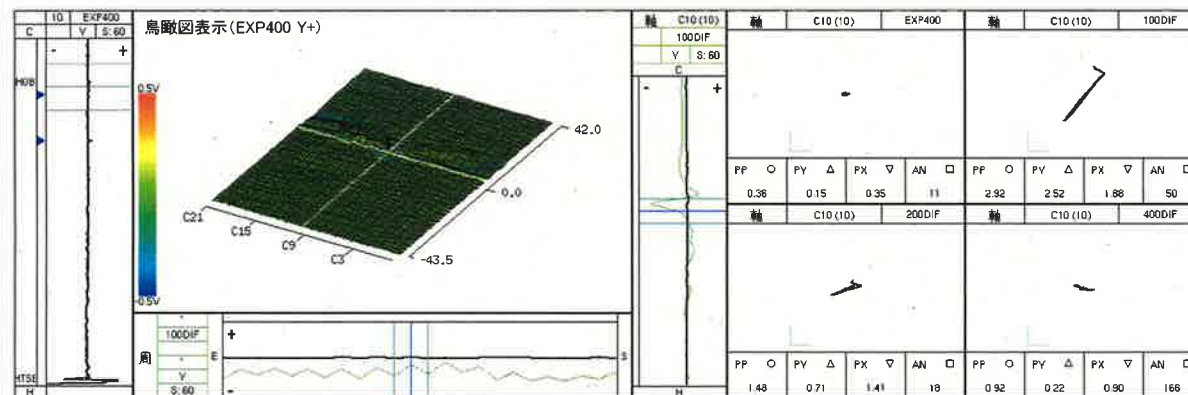
管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

【100kHz】

健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。

以上から、きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。

第 17 回定期検査



分析評価

【400kHz】

管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

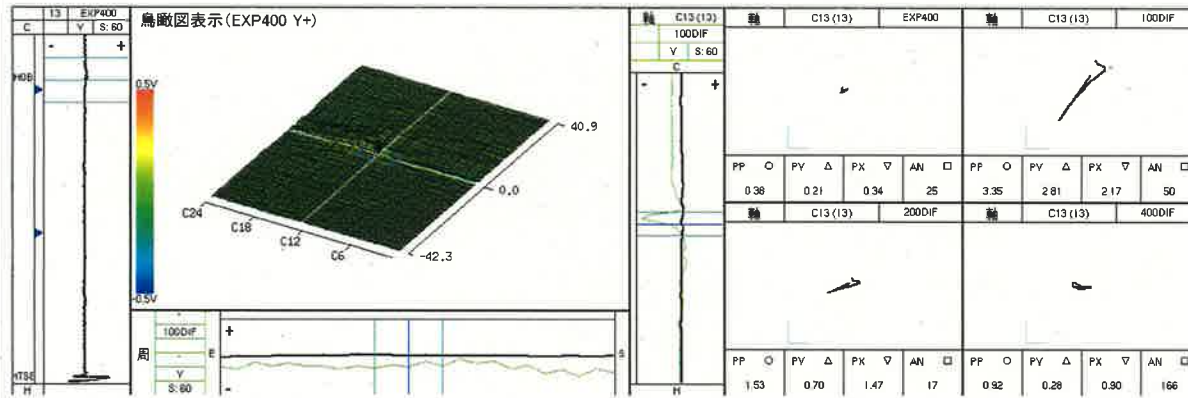
【100kHz】

健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。

以上から、きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。

インテリジェント ECT の探傷データ(3/3)
 (高温側管板部の経年波形 A-SG X5-Y4)

第 16 回定期検査



分析評価

【400kHz】

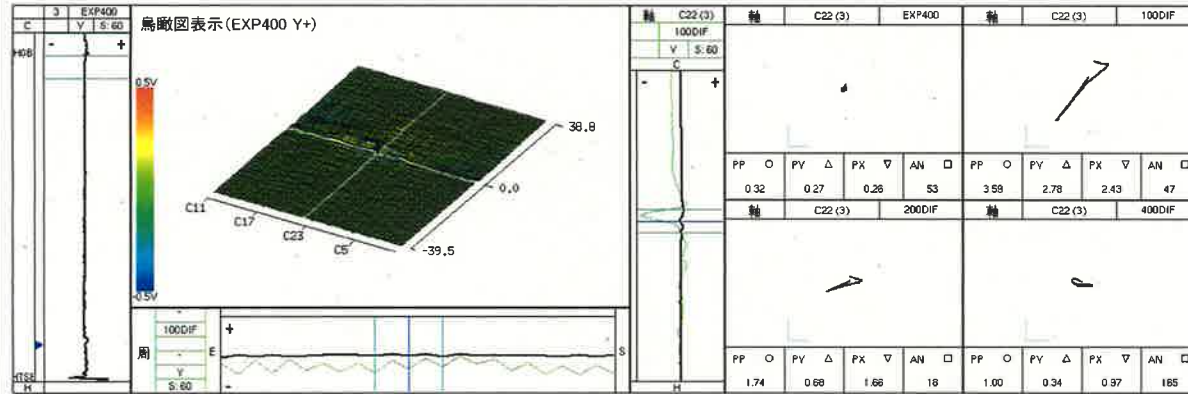
管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

【100kHz】

健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。

以上から、きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。

第 15 回定期検査



分析評価

【400kHz】

管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

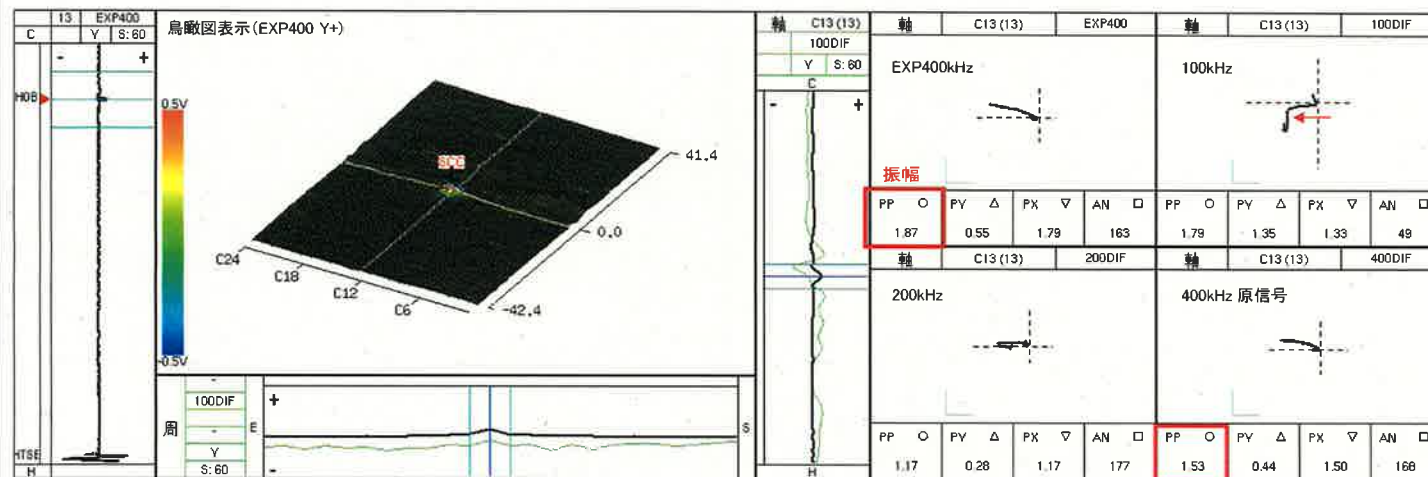
【100kHz】

健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。

以上から、きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。

インテリジェント ECT※1の探傷データ(1/3)
 (高温側管板部の経年波形 A-SG X12-Y3)

第 21 回定期検査



分析評価

(* 詳細は、添付資料-5(5/15)参照のこと。)

【400kHz】※2

リサージュ波形の振幅において、#20と比較すると振幅が0.95V から1.87V と大きくなり、内面軸方向きずパターンを示している。

加えて400DIF のリサージュ波形の振幅/位相を見ても同様の変化を示している。

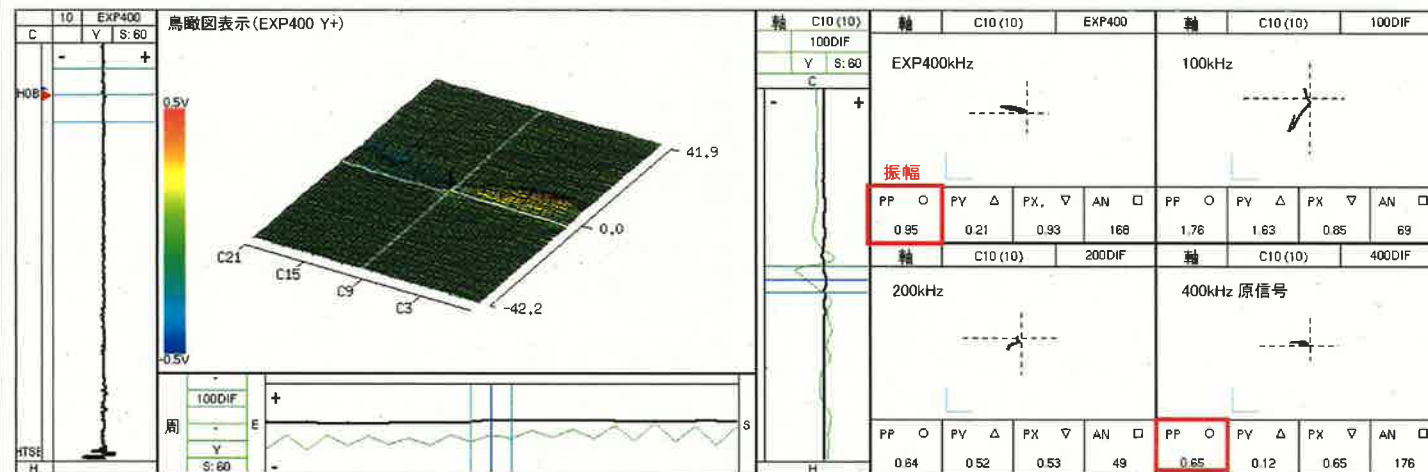
【100kHz】

管板上端信号との区別が困難ではあるが、#20と比較すると、内面きず信号方向に波形の歪みが認められる。

以上から、内面軸方向きずが考えられる。

- 24 -

第 20 回定期検査



分析評価

【400kHz】

管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

【100kHz】

健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。

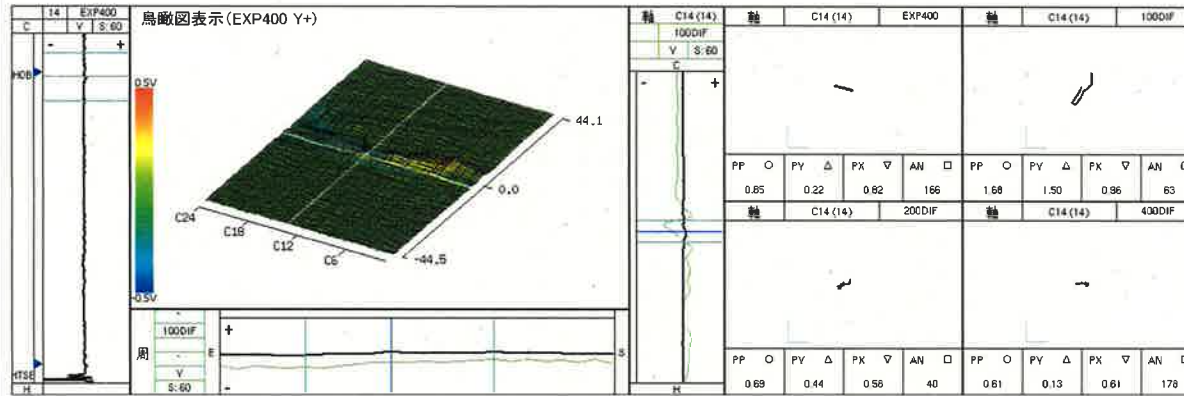
以上から、きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。

※1: 全周に対して渦電流の発生と検出を別々のコイルを用いた24組のコイルで伝熱管の欠陥による渦電流の変化を信号として検出する試験

※2: 400kHz は、原信号および EXP フィルタ(拡管境界部ノイズ信号を低減させるフィルタ)を含む

インテリジェント ECT の探傷データ(2/3)
 (高温側管板部の経年波形 A-SG X12-Y3)

第 19 回定期検査



分析評価

【400kHz】

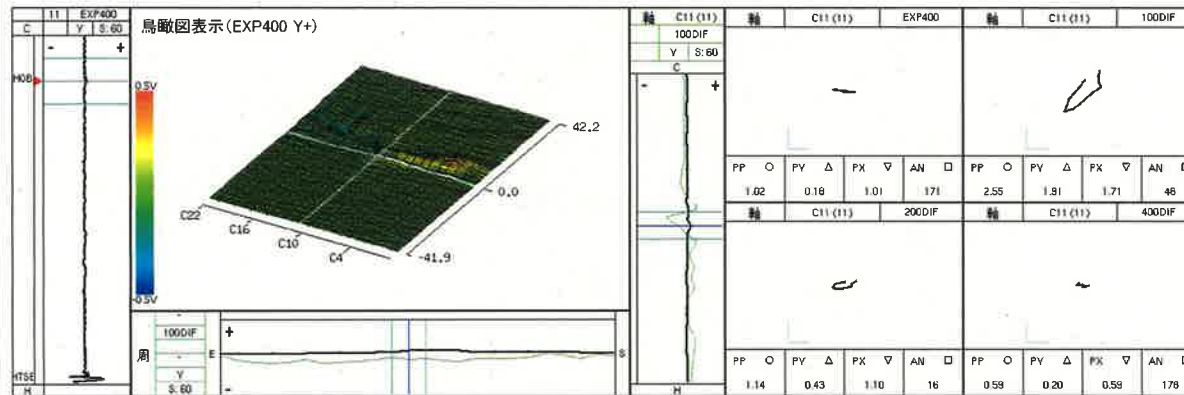
管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

【100kHz】

健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。

以上から、きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。

第 18 回定期検査



分析評価

【400kHz】

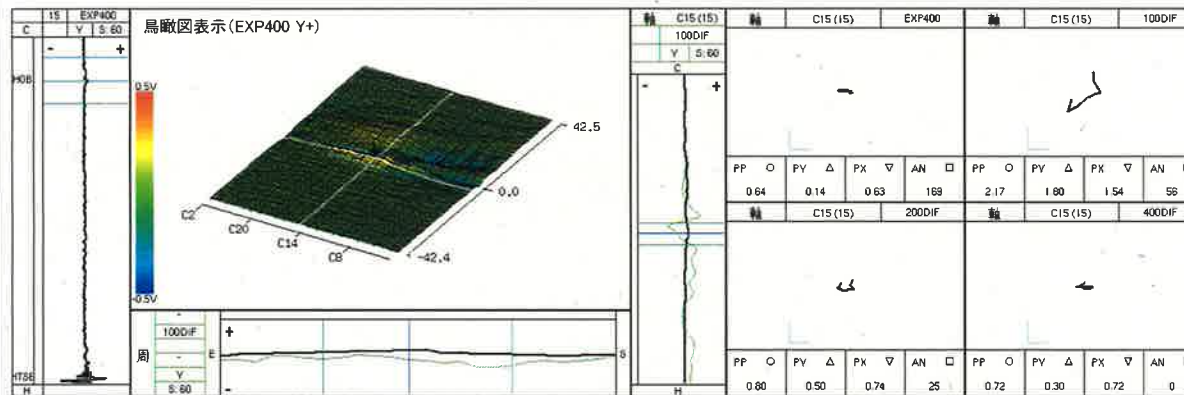
管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

【100kHz】

健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。

以上から、きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。

第 17 回定期検査



分析評価

【400kHz】

管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

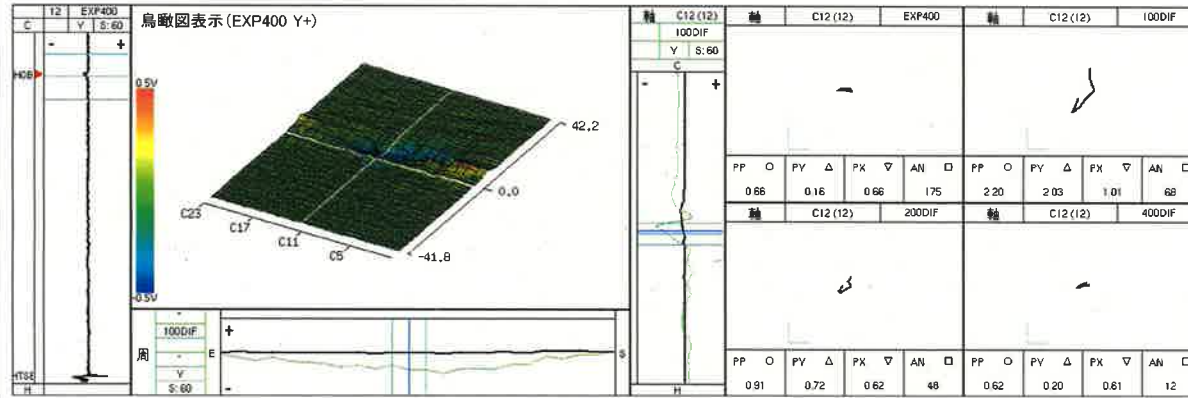
【100kHz】

健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。

以上から、きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。

インテリジェント ECT の探傷データ(3/3)
 (高温側管板部の経年波形 A-SG X12-Y3)

第 16 回定期検査



分析評価

【400kHz】

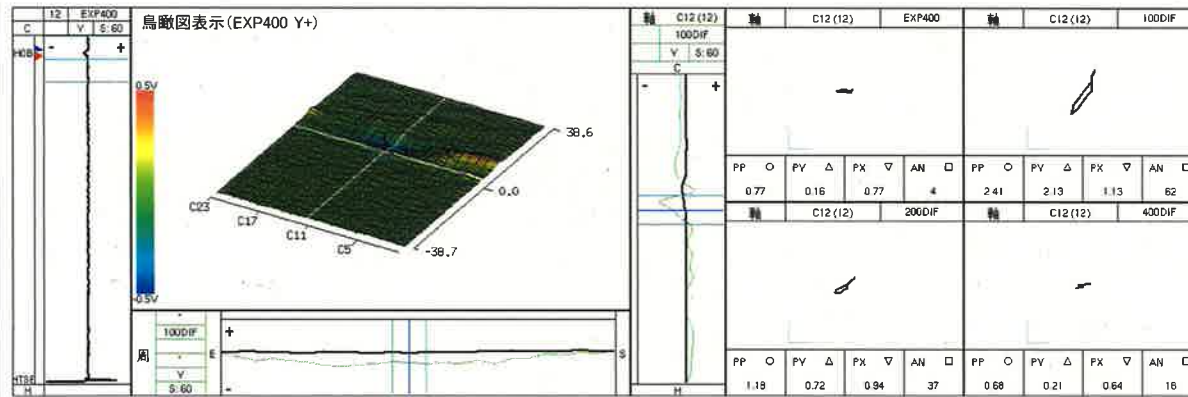
管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

【100kHz】

健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。

以上から、きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。

第 15 回定期検査



分析評価

【400kHz】

管板内の形状信号やプローブの揺動信号との区別が困難な信号である。

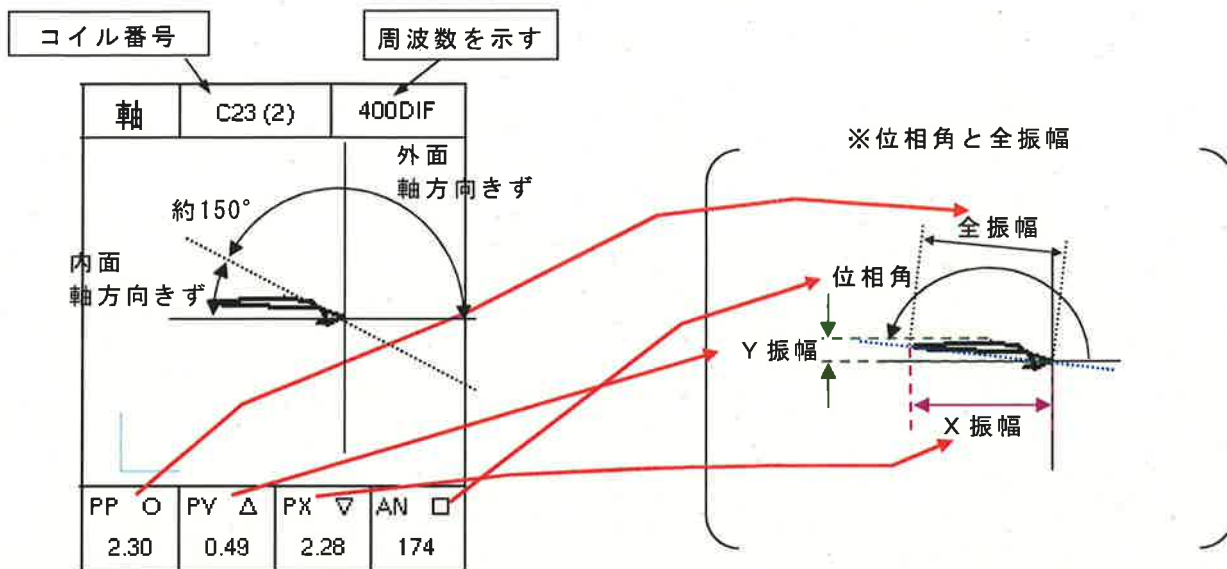
【100kHz】

健全部にみられる管板部上端信号パターンであり、別の信号が複合していると評価できない。

以上から、きず信号パターンを示している信号ではないと考えられる。

有意な信号指示のリサーチ、鳥瞰図表示による分析例

— インテリジェントECT信号波形の見方（リサーチ、鳥瞰図表示） —



内面軸方向きずの場合、位相角は400kHzの場合約150°以上に、100kHzの場合約170°以上にある。また、全振幅は400kHzの方が100kHzより大きい。

渦電流は周波数が高いほど伝熱管内面を流れやすく、周波数が低いほど伝熱管外面まで電流が流れる。このため、内面きずがあった場合は、100kHzより400kHzのほうが電流の変化として現れやすいため、内面きずのECT信号は100kHzより400kHzのほうが大きい。

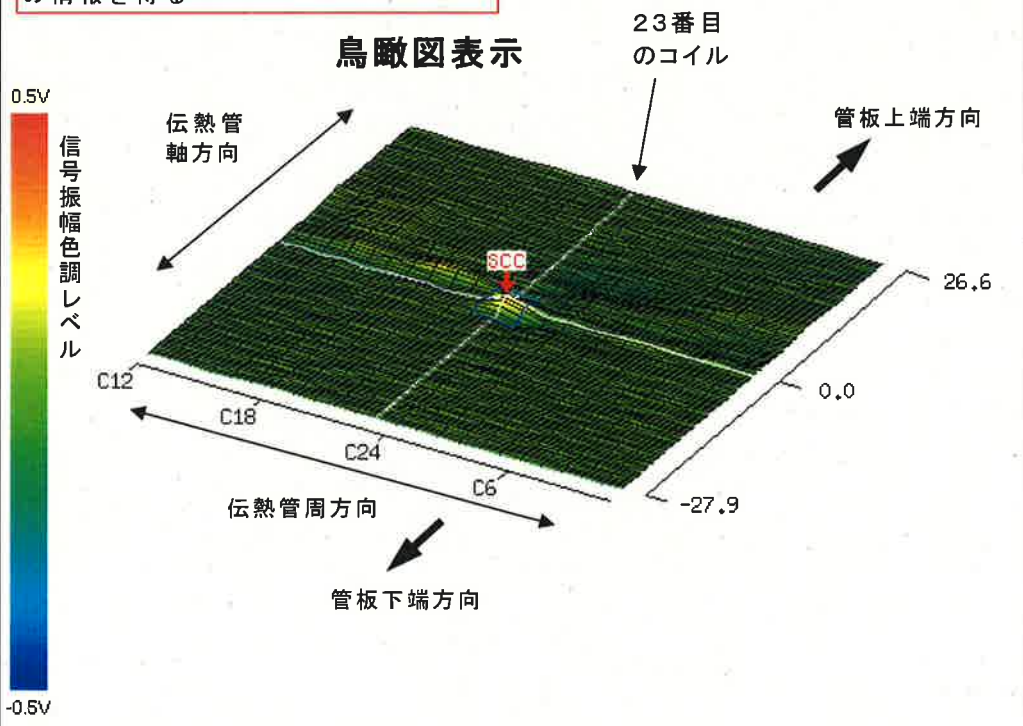
リサーチ表示とは、ECT信号を2次的に示し、周波数の異なるECT信号から、きずが内外面および周軸方向のどちら側か等の情報を得る

鳥瞰図表示とは、信号状況を3次的に示すもので、信号の分布（イメージ）の情報を得る

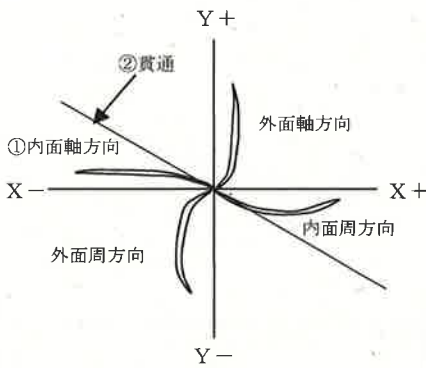
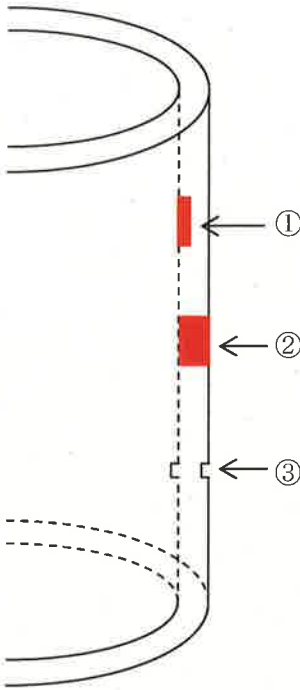
信号の伝熱管位置を示す

位置情報	深さ
HOB -1.4	----

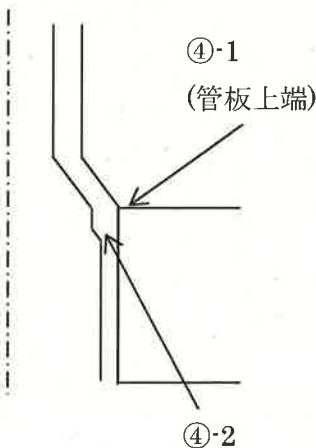
信号レベルが大きいほど赤く（または青く）なる



インテリジェント ECT における信号の特徴について

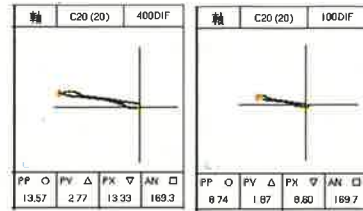


400kHz リサージ
波形の特徴



(拡張管境界部：形状および揺動信号が生じる箇所)

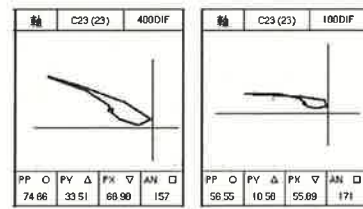
①内面軸方向きず



(特徴)

- ・位相角：400kHz で約 150° 以上
100kHz で約 170° 以上
- ・振幅：100kHz < 400kHz
- ・400kHz の信号が X-, Y+ 方向に軌跡を描く。

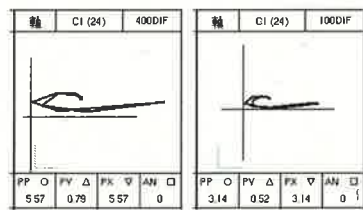
②貫通軸方向きず



(特徴)

- ・位相角：100kHz ≥ 400kHz
- ・振幅：100kHz < 400kHz
- ・400kHz の信号が X-, Y+ 方向に軌跡を描く
- ・400kHz 信号の位相が約 150° となり、100kHz 信号の位相が約 170° となる。

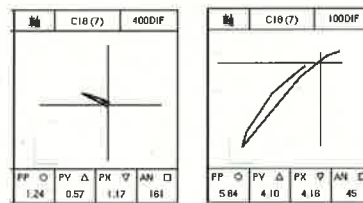
③局所変形信号 (打痕)



(特徴)

- ・位相角：100kHz ≒ 400kHz、ほぼ水平
- ・振幅：100kHz < 400kHz
- ・信号に巻きが大きい傾向がある。

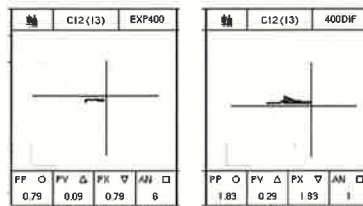
④-1 (管板上端信号)



(特徴)

- ・400kHz の信号が X-, Y+ 方向に軌跡を描く。
- ・100kHz の信号が X-, Y- 方向に軌跡を描く。
- ・振幅：100kHz > 400kHz (伝熱管外側の構造物であるため、低周波の振幅が高周波の振幅より大きくなる)

④-2 (形状および揺動信号)



(特徴)

- ・400kHz では、位相がほぼ水平である。

(揺動信号) (形状信号)

高浜4号機 蒸気発生器 製造時検査記録

№	KTN-11-1033	品正
發送	59.10.4	区分 A



檢 查 記 録

関西電力(株)高浜発電所第4号機

A 蒸気発生器

(1/2分冊)

大通局最終検査
昭和58年8月2日

④ 最終検査
昭和58年7月27日

三菱重工業株式会社
神戸造船所
原子力品質保証部機器品質管理課

課 長 係 長 担 当

--	--	--

溶接検査
申請番号 55神1127号原

枚数 互紙共 436 枚	送付先	注文主 SP	然機関係 IP	大通局 IP	現地QC IP	控 IP	工事番号 7-482304/0100	溶接検査 依頼書番号 55神1128号原
-----------------------	-----	-----------	------------	-----------	------------	---------	-----------------------	----------------------------

作成 昭和59年1月20日

図番
UGG34004
番号 改.2

神戸生5001号(備品製)

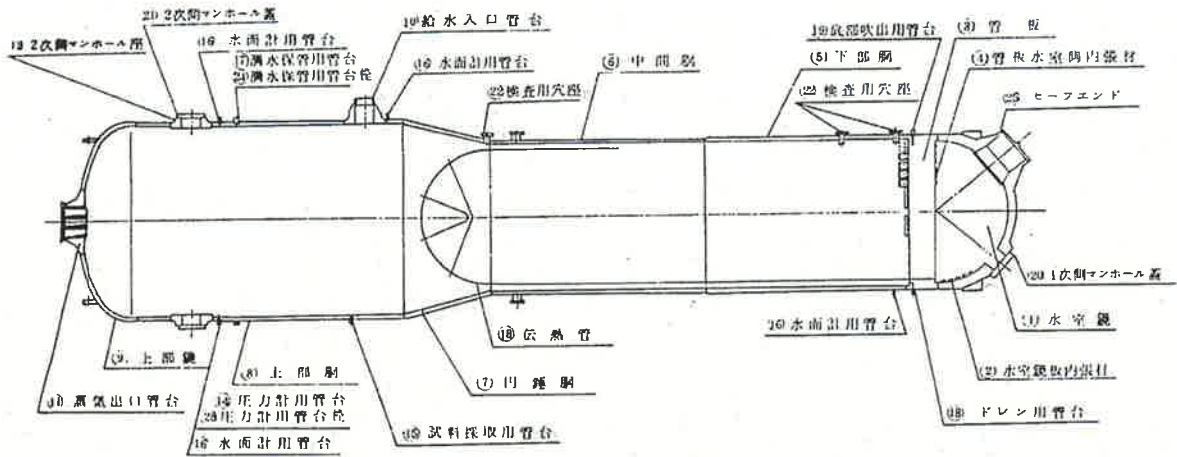
発電所名 : 関西電力(株)高浜発電所第4号機
 品名 : * A 蒸気発生場
 浴申番号 55 神 / 127 号原
 浴依番号 55 神 / 128 号原

目次	ページ
1. 素材チエツクシート	1 ~ 11
2. 素材一覧表	12
3. 素材寸法検査記録 (QT 板材)	13
4. QT 板材試験成績書	14 ~ 20
5. その他の材料試験成績書	3/2 合冊 E 42納
6. 工程中チエツクシート	21 ~ 38
7. 開先検査記録	39 ~ 65
8. 伝熱管検査チエツクシート (材料確認, 挿入位置, 開先検査)	66 ~ 123
9. 液体浸透探傷試験記録	124 ~ 131
10. 磁粉探傷試験記録	132 ~ 144
11. 超音波探傷試験記録	145 ~ 159
12. 放射線透過試験記録	160 ~ 251
13. 溶接部機械試験チエツクシート	252
14. 溶接部機械試験記録	253 ~ 260
15. 焼鈍記録	261 ~ 298
16. リーク試験成績書	299 ~ 302
17. 彎板 (屈曲) 検査記録	303
18. 寸法記録	304 ~ 312
19. オーバレイ厚み計測記録	313 ~ 317
20. 溶接施行記録	318 ~ 399
21. オーバレイ化学分析, フェライト量記録	400
22. 耐圧試験記録	401 ~ 418
23. 耐圧後表面検査記録	419 ~ 422
24. 管台加工面検査記録	423 ~ 425
25. 合格刻印写し	426 ~ 427
26. 内部点検記録	428 ~ 433

素 材 一 覧 表

プラント名 関西電力相模高圧発電所第4号機

A 蒸気発生器



部 名 称	材 質	Charge No.	部 名 称	材 質	Charge No.
(1) 水 室 鏡	SA216 Gr.WCC	11788 INHA38 (8020)	(13) 試料採取用管台	SA508 Cl.1	50C176-3-2-1 50D197-3-4-1
(2) 水室鏡板内張材	ステンレス鋼	—			50C176-3-4-1 50D197-3-4-2 50C176-3-4-3 50D197-3-4-3
(3) 管 板	SA508 Cl.3	80D49-1-1			50C176-3-4-4 50D197-3-4-4
(4) 管板水室鏡内張材	インコネル	—	(14) 水面計用管台	SA508 Cl.1	50C176-3-4-5 50D197-3-4-6
(5) 下 部 胴	SA533 Gr.A Cl.1	80D415-1-1 80D415-1-2			50C176-3-5-1 50D197-3-5-2
(6) 中 間 胴	SA533 Gr.A Cl.1	80C437-2-1 80C437-3-1			50C176-3-5-3 50D197-3-6-10
(7) 円 錐 胴	SA533 Gr.A Cl.1	80C197-1-2 80C288-1-2 80C314-3-1	(17) 満水保管用管台	SA508 Cl.1	50C176-3-2-4 50D197-3-2-4
(8) 上 部 胴	SA533 Gr.A Cl.1	80C513-2-1 80D608-1-1	(18) ドレン用管台	SA508 Cl.1	50C176-3-3-1 50D197-3-3-1
(9) 上 部 鏡	SA533 Gr.A Cl.1	80C314-1-1 80C314-2-1 80C314-2-1	(19) 底部吹出用管台	SA508 Cl.1	50C176-3-1-1 50D197-3-1-2
(10) 給水入口管台	SA508 Cl.2	81C157-1-1	(20) 1次側マンホール蓋	SA533 Gr.A Cl.1	80C449-1-4 80C449-1-4
(11) 蒸気出口管台	SA508 Cl.2	81C157-2-1	(21) 2次側マンホール蓋	SA533 Gr.A Cl.1	80C449-1-2 80C449-1-2
(12) 2次側マンホール蓋	SA508 Cl.2	81C157-1-4 81C157-1-5	(22) 検査用穴座	低合金鋼	—
(13) 伝 熱 管	SH163 Ni-Cr-Fe Alloy	*NNE3717(01~46)	(23) 圧力計用管台枠	SA533 Gr.A Cl.1	035448-1
(14) 圧力計用管台	SA508 Cl.1	50C176-3-3-4 50D197-3-3-4	(24) 満水保管用管台枠	SA533 Gr.A Cl.1	035448-1
			(25) キーフエンド	SA182 F816	708901-1 708901-2

* 正しくはNUE3717(01~46)

伝熱管の製造番号 (A蒸気発生器の伝熱管のチャージ番号) を示したものの。
 ※検査成績書 (添付資料-10 (4/8)) にて、この番号を参照する。

CHECK SHEET (IN-PROCESS) FOR VESSEL
 工程中チェックシート (容器用)

溶申 55 神 1127
 溶旅 55 1128

8

NAME OF PLANT 発電所名		KEP-TAKAHAMA NUCLEAR POWER PLANT UNIT 4 関西電力特高発電所第4号機				ARTICLE 品名	#A 蒸気発生器				DWG No 図番	F4 -0401012/13	
WELD No 溶接番号	PIECE No & NAME OF PIECE 符号・部品名	EDGE PRPE OR SURFA- CE FOR C- LAD P.T OR M.T 開先面 P.T or クラッド面 M.T	EDGE PRPE OR SURFA- CE FOR C- LAD P.T OR M.T 開先面 P.T or クラッド面 M.T	FIT-UP For WELD 開先合せ	FIT-UP For WELD 開先合せ	BACK CHIP 裏切り検査	BACK CHIP 裏切り検査	MT	MT	PT	PT	REMARK 備 考	
W-012-6A ~6C	01,02 中間胴 07 取合金物	56/10/106	56/10/106	56/10/106	56/10/106	56/10/106	56/10/106	56/10/106	56/10/106	/	/	府接仕上部非破壊検査	
		56/10/106	56/10/106	56/10/106	56/10/106	56/10/106	56/10/106	56/10/106	56/10/106	/	/		
W-013-C1-1 ~H46-54	01 管板 01-06 伝熱管	/	/	/	/	/	/	/	/	57/8/19	57/9/16	別 紙	
		/	/	/	/	/	/	/	/	/	/		

伝熱管のシール溶接部のPT結果が問題ないことを確認。

P.T : LIQUID PENETRANT EXAM. M.T : MAGNETIC PARTICLE EXAM. V.I : VISUAL INSPECTION
 R.T : RADIO GRAPHIC EXAM. U.T : ULTRASONIC EXAM.

記録確認



検査官

57.7.2



※上段 A側
下段 B側

伝熱管検査チェックシート

材料確認, 挿入位置, 開先検査

機品管

KTN-4#A/g

ROW No	COLUMN No	管 No	開先深さ	①	ROW No	COLUMN No	管 No	開先深さ	①
	1	092103F				36	029204E		
	2	092109F				37	039006E		
	3	092128F				38	010216E		
	4	092138F				39	091537F		
	5	092126F				40	091933F		
	6	092111F				41	091430F		
	7	092110F				42	019017F		
	8	092127F				43	091043F		
	9	092146F				44	091443F		
	10	092105F				45	019011F		
	11	092134F				46	092311F		
	12	092113F				47	019024F		
	13	092101F				48	039224E		
	14	092141F				49	090537F		
	15	092135F	良	57		50	090531F		
	16	092132F		6/29		51	090533F	良	57
	17	092122F				52	090501F		6/29
	18	092147F				53	090526F		
	19	092108F				54	090519F		
	20	092133F				55	090507F		
	21	092121F				56	090530F		
	22	092117F				57	090540F		
	23	092124F				58	090529F		
	24	092136F				59	090715F		
	25	019013F				60	090705F		
	26	092033F				61	090536F		
	27	019019F				62	090506F		
	28	091523F				63	090502F		
	29	092301F				64	090522F		
	30	091917F				65	090509F		
	31	092012F				66	090532F		
	32	019014F				67	090505F		
	33	049006E				68	090703F		
	34	092116F				69	090701F		
	35	092013F				70	090516F		

3

3

号外 (65.5.18) 機品管

11065

製造時の管No. (今回信号指示が検出された伝熱管) を示したもの。
 ※検査成績書 (添付資料-10 (5/8)) にてこの番号を参照する。

記録確認



検査官

57.7.2



伝熱管検査チェックシート

※上段 A側
下段 B側

材料確認, 挿入位置, 開先検査

機品管

KTN-47A 3/4

ROW No	COLUMN No	管 No	開先深さ	③	ROW No	COLUMN No	管 No	開先深さ	③
	71	090538F				1	091811F		
	72	092212F				2	120120E		
	73	092225F				3	091823F		
	74	090539F				4	091806F		
	75	092223F				5	091829F		
	76	092206F				6	091824F		
	77	092204F				7	091827F		
	78	090514F				8	091819F		
	79	092217F				9	091822F		
	80	092401F				10	091838F		
	81	090528F	57	57		11	091805F		
	82	090542F	57	57		12	091821F		
	83	092214F				13	091826F		
	84	092210F				14	091804F		
	85	092207F				15	091807F	57	57
	86	092221F				16	091808F	57	57
	87	090543F				17	091721F		
	88	090513F				18	091820F		
	89	092203F				19	091812F		
	90	092213F				20	091809F		
	91	092224F				21	091705F		
	92	090544F				22	091718F		
	93	092209F				23	091815F		
	94	090520F				24	091828F		
						25	090611F		
						26	130710F		
						27	130725F		
						28	130724F		
						29	130722F		
						30	130709F		
						31	130716F		
						32	130403F		
						33	137221F		
						34	130735F		
						35	130423F		

3

4

時外 (55. 5. 18) 機品管

H0065

製造時の管No. (今回信号指示が検出された伝熱管) を示したものを。
※検査成績書 (添付資料-10 (6/8)) にてこの番号を参照する。

液体浸透探傷検査記録
LIQUID PENETRANT EXAMINATION RECORD

RECORD No

機器品質管理課
COMPONENT QUALITY CONTROL SECTION

プラント名 PLANT NAME	関西電力㈱高浜発電所第4号機		品名 ARTICLE NAME	# A 蒸気発生器	
工事番号 ORDER No	7-482304	図番 DWG. No	F4-0701001	溶申番号 溶依番号	55/1127 55/1128 号機
部品名 PART NAME	別紙参照	溶接番号 (チャージ番号) WELD (CID) No	別紙参照	表面状態 SURFACE CONDITION	<input type="checkbox"/> 腐蝕肌 <input checked="" type="checkbox"/> クラインタ仕上 <input type="checkbox"/> 機械仕上
方法 Method	浸透材料 Penetrant Material			施行要領 Procedure	浸透液保持時間 Penetrant Time 20 min
	浸透液 Penetrant	洗浄液 Remover	現像液 Developer		
<input checked="" type="checkbox"/> 溶剤除去性 Solvent Removal	Super Check P-T(P-LT)	Super Check R-T(R-LT)	Super Check D-T(D-LT)	MSBNJ6-F116 Rev.6C-1	
<input checked="" type="checkbox"/> 水洗性 Water Washable	Super Check GIII-T	Water	Super Check D-T(D-LT)	MSBNJ6-F116 Rev.6C-2	
探傷箇所 SKETCH					
別紙参照					
判定基準 ACCEPTANCE STD.	<input checked="" type="checkbox"/> 通産省令81号第12条 <input type="checkbox"/> MSBNJ6-F116(R) PARA		検査官 SURVEYOR	別紙参照	
判定結果 RESULT	<input checked="" type="checkbox"/> 合格 ACCEPT <input type="checkbox"/>		探傷日付 DATE	別紙参照	課長 MANAGER
検査員 INSPECTOR	別紙参照				係長 HEAD
					担当 ENGINEER

三菱重工業株式会社 神戸造船所
MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. KOBE SHIPYARD & ENGINE WORKS

伝熱管のシール溶接部のPT結果
が問題ないことを確認。

液体浸透探傷検査記録®
LIQUID PENETRANT EXAMINATION RECORD

NAME OF PLANT 関西電力(株)高浜発電所第4号機
プラント名 関西電力(株)高浜発電所第4号機
溶申 55
溶依 55 神 1127
1128 号原

ARTICLE 品名	* A 蒸気発生器		DWG. NO. 図番	F4-0401010/16		
溶接番号 Weld No.	名称 Description	検査時期 Inspection Stage	検査方法 Method	検査月日 Date	検査員 Inspector	J.E.V.E.L. #
W-010-10A~10C	下部胴 + 取合金物	開先 Edge Preparation	Ⓢ W	56.4.20	[Redacted]	[Redacted]
		裏ハツリ後 Back Chip	S W	/		
		溶接完了後 Finish Weld	S W			
		開先 Edge Preparation	S W			
W-011-1AB	管板 + 90°ロングコネクタ	開先 Edge Preparation	Ⓢ W	56.4.13	[Redacted]	[Redacted]
		裏ハツリ後 Back Chip	S W	56.4.13		
		溶接完了後 Finish Weld	Ⓢ W	56.8.10		
		開先 Edge Preparation	Ⓢ W	56.4.13		
W-011-2A,B	管板 + 蓋板	開先 Edge Preparation	Ⓢ W	56.4.13	[Redacted]	[Redacted]
		裏ハツリ後 Back Chip	S W	56.4.13		
		溶接完了後 Finish Weld	Ⓢ W	56.8.10		
		開先 Edge Preparation	Ⓢ W	56.4.13		
W-012-6A~6C	中間胴 + 取合金物	開先 Edge Preparation	Ⓢ W	56.10.1	[Redacted]	[Redacted]
		裏ハツリ後 Back Chip	S W	56.6.4		
		溶接完了後 Finish Weld	S W	/		
		開先 Edge Preparation	S W	/		
W-013-C1-1 ~ W-013-1146-54	管板 + 伝熱管	開先 Edge Preparation	S W	/	[Redacted]	[Redacted]
		裏ハツリ後 Back Chip	S W	/		
		溶接完了後 Finish Weld	S (W)	57.8.19		
		開先 Edge Preparation	S W	/		
W-016-5A,B	上部鏡 + 吊り上げラック	開先 Edge Preparation	Ⓢ W	57.2.18	[Redacted]	[Redacted]
		裏ハツリ後 Back Chip	S W	57.2.18		
		溶接完了後 Finish Weld	S W	/		
		開先 Edge Preparation	Ⓢ W	/		

S : 溶剤除去性 W : 水洗性

伝熱管のシール溶接部のPT結果が問題ないことを確認。

RECORD OF LEAK TEST
リーク試験成績書

花中 神 号原

NAME OF PLANT プラント名	KEP-TAKAHAMA NUCLEAR POWER PLANT UNIT 4 関西電力株高浜発電所第4号機	CHECKED BY 確認	
ORDER 宛 工事番号	7-482304	関西電力	57.8% [Redacted]
DWG 宛 図面番号	F4-0401013	関西電力	57.8% [Redacted]
NAME OF ARTICLE 品名	井 A 蒸気発生器	MHI 社内	57.8% [Redacted]
試験条件	TEST ITEM: 試験の種類		
	エアリークテスト AIR LEAK TEST		
	ハロゲンリークテスト HALOGEN LEAK TEST		
	○ヘリウムリークテスト HELIUM LEAK TEST		
	TEST PRESSURE 試験圧力		
	加圧 (Positive) 0.1 kg/cm ² 以上 減圧 (Negative) 10mmHg		
試験条件	HOLDING TIME 保持時間 2 分		
	LEAK RATE LIMIT 判定基準 検知基準 5 x 10 ⁻⁷ cc/sec. (2)		
	USED DETECTOR 使用測定器 Varian 936-70, 936-40		
	USED PRESSURE GAUGE 使用圧力計 No. 638727 No. 638731		
DATE OF TEST 検査日 57.8.3 ~ 57.8.6		RESULT 結果 良	
略図又は継手番号 (SKETCH OR JOINT NO OF TESTED ARTICLE)			
W-013-C1-1 ~ W-013-C46-54			
W-013-H1-1 ~ W-013-H46-54			
(抜取立会箇所は別紙管板図に示す)			
Heリーク試験の対象となる全伝熱管のシール溶接部の溶接線番号 (当該管を含む)、および、Heリーク試験結果が問題ないことを確認。 ※当該試験結果詳細は添付資料-6 (12/18) にて問題ないことを確認。			

BYE-F1-016

KEP-TAKAHAMA NUCLEAR POWER PLANT UNIT 4
 関西電力(株)高浜発電所第4号機

#A 蒸気発生器 Heリーク記録

1. 2次側 He 濃度

月日	時刻	濃度 (%)
8.3	9:30	61.0
8.4	9:00	67.6
8.5	8:30	57.7
8.6	8:30	68.9
.	:	.
.	:	.

2. 2次側 圧力計 指示値

月日	時刻	圧計上 (%)	圧計下 (%)
8.3	9:00	0.17	0.17
8.4	8:30	0.17	0.17
8.5	8:30	0.17	0.17
8.6	8:30	0.17	0.17
.	:	.	.
.	:	.	.

3. 1/D 修正値 (使用 S/L 3.75×10^{-7} Acc/sec.)

月日	時刻	1/D1 (Acc/sec.)	1/D2 (Acc/sec.)	月日	時刻	1/D1 (Acc/sec.)	1/D2 (Acc/sec.)
8.3	9:30	9.9×10^{-10}	9.7×10^{-10}				
"	11:50	1.16×10^{-9}	1.30×10^{-9}				
"	15:00	1.17×10^{-9}	9.92×10^{-10}				
"	18:00	1.03×10^{-9}	7.92×10^{-10}				
8.4	9:00	8.42×10^{-10}	1.07×10^{-9}				
"	12:00	1.01×10^{-9}	1.07×10^{-9}				
"	15:00	1.00×10^{-9}	1.03×10^{-9}				
"	18:00	1.02×10^{-9}	9.27×10^{-10}				
8.5	8:50	9.5×10^{-10}	1.03×10^{-9}				
"	12:00	1.03×10^{-9}	9.7×10^{-10}				
"	15:00	9.8×10^{-10}	9.2×10^{-10}				
"	18:00	9.9×10^{-10}	1.00×10^{-9}				
8.6	8:50	9.7×10^{-10}	1.03×10^{-9}				
"	12:00	1.02×10^{-9}	1.02×10^{-9}				
"	15:00	9.8×10^{-10}	9.9×10^{-10}				
"	18:00	9.6×10^{-10}	9.9×10^{-10}				

4. 1/D 修正値 1/D 量

T/D L/S		1/D 量 (Acc/sec.)
HOT CELL	X Y	

全数リセット

A蒸気発生器の全伝熱管のシール溶接部に記録を要するHeリークがなかったことを確認。

KEP-TAKAHAMA NUCLEAR POWER PLANT UNIT 4
 関西電力株式会社高浜発電所第4号機

発電所第 号機 蒸気発生器 番号

A 蒸気発生器

51 F シリーズ
 本数 3382 本

合計 1186 本 (75.5%)

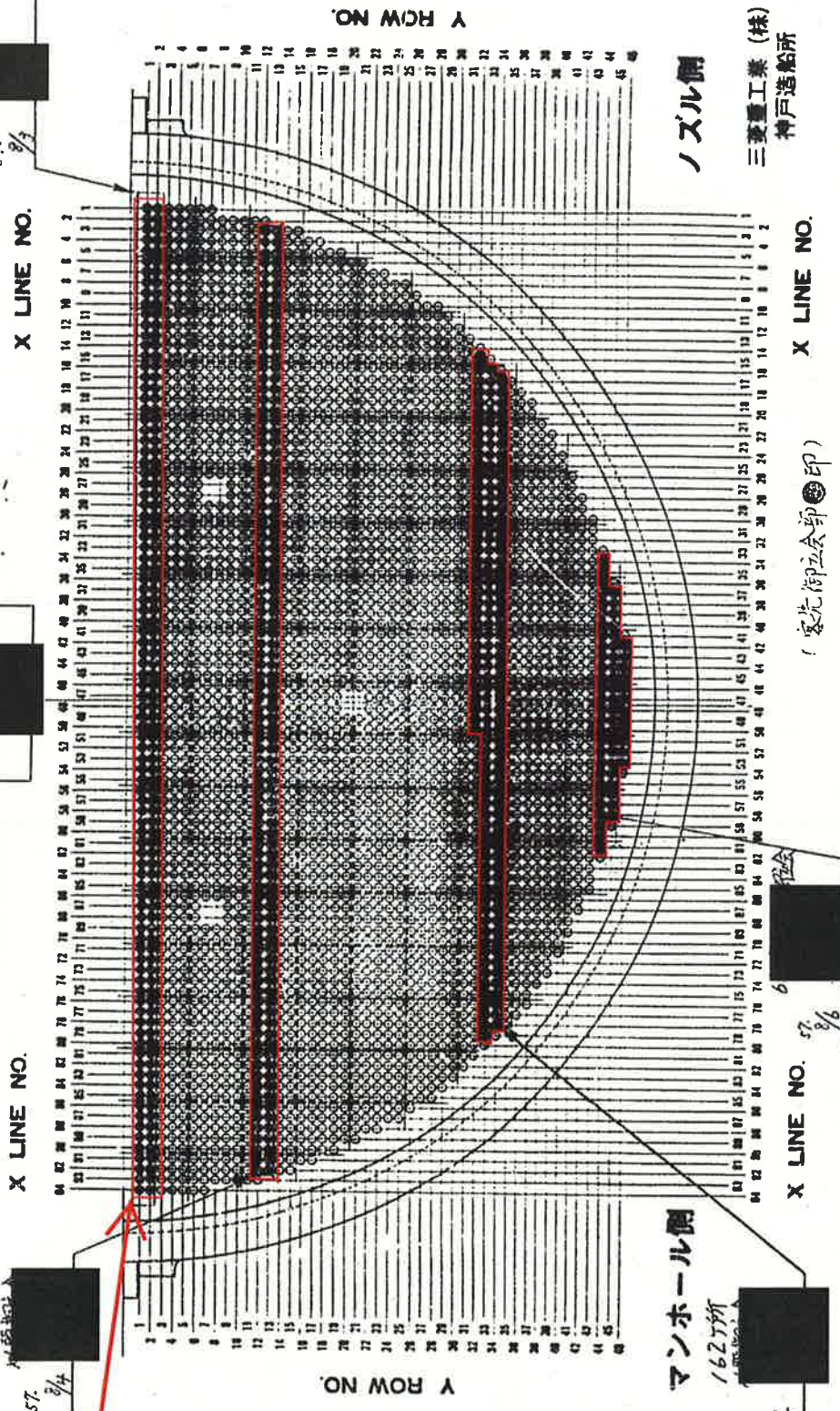
高温側

188 箇所
 6 廠 部 会

57. 8/4

180 箇所
 6 廠 部 会

57. 8/4



Heリーク試験において抜き取り検査を実施した伝熱管（高温側）
 （今回信号指示が検出された伝熱管は含まれていないが、製造
 メーカーにて全伝熱管を対象にリークがなかったことを確認して
 いる。（添付資料-6（11/18）参照）

KEP-TAKAHAMA NUCLEAR POWER PLANT UNIT 4
 関西電力㈱高浜発電所第4号機

発電所第 号機 蒸気発生器番号

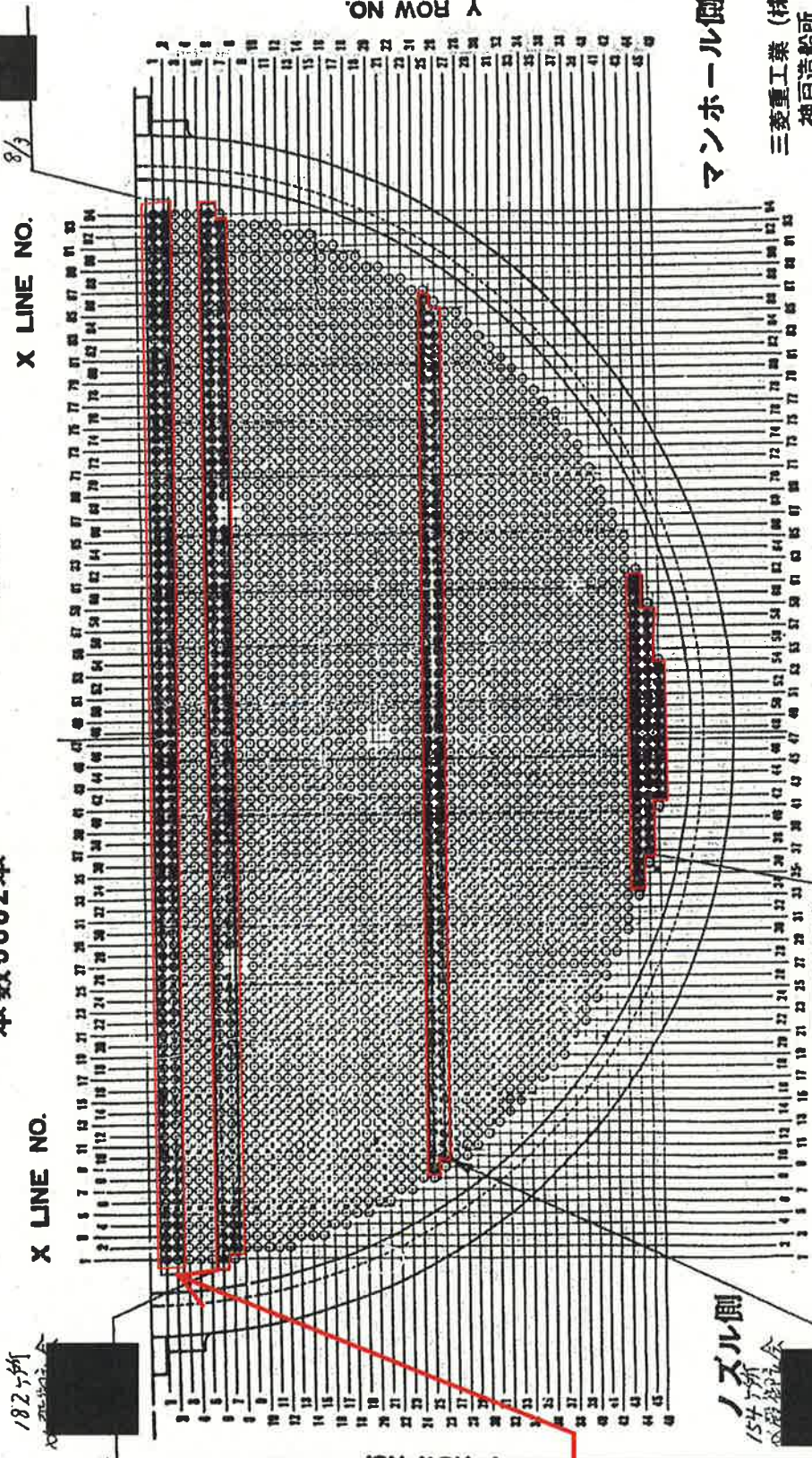
A 蒸気発生器

51 F シリーズ
 本数 3382 本

低温側

188 号機
 株式会社

57. 8/3



マンホール側

三菱重工業 (株)
 神戸造船所

X LINE NO. (高浜発電所印)

182 号機
 株式会社

57. 8/4

マンホール側

154 号機
 株式会社

57. 8/6

Heリーク試験において抜き取り検査を実施した伝熱管 (低温側) (今回信号指示が検出された伝熱管は含まれていないが、製造メーカーにて全伝熱管を対象にリークがなかったことを確認している。(添付資料-6 (11/18) 参照))

検査官
57.9.6

RECORD OF WELDING CONDITION
溶接施行記録

溶接棒のF-6,F-7は
ASME SEC IX の規定
によるものである



KANSAI-TAKAHAMA NUCLEAR POWER PLANT UNIT 4
発電所関西電力高浜発電所第4号機

図号 55 神 1127 号原

NAME OF ARTICLE 品名	蒸気発生器 #1						DWG. No 図番	4-0401013 REVISE (7)
継手 JOINT 番号 No	W-013 H127-1	W-013 H127-2	W-013 H127-3	W-013 H127-4	W-013 H127-4	W-013 H127-5	W-013 H127-5	
施行法 WELDING PROCEDURE 番号 No	193-1	193-1	193-1	433	193-1	433	193-1	
溶接 COMBINATION OF WELDING 方法 PROCESS	S (TIG自動)	S (TIG自動)	S (TIG自動)	S (TIG自動)	S (TIG自動)	S (TIG自動)	S (TIG自動)	
材質 MATERIAL SPEC & P-№ P-№	インコネル 肉盛金属 SB-163	インコネル 肉盛金属 SB-163	インコネル 肉盛金属 SB-163	インコネル 肉盛金属 SB-163	インコネル 肉盛金属 SB-163	インコネル 肉盛金属 SB-163	インコネル 肉盛金属 SB-163	
溶加棒 FILLER METAL 溶接棒 ELECTRODE 心線 TILLER WIRE フラックス FLAX F-№ F-№	/							
棒径 ELECTRODE DIAMETER (%φ) 棒 ELECTRODE LOT№ LOT№	/							
溶接 WELDING 姿勢 POSITION	H	H	H	H	H	H	H	
予熱 PREHEAT 温度 TEMP. (°C)	行わない	行わない	行わない	行わない	行わない	行わない	行わない	
溶接 WELDING 電流 (A)	80~95	80~95	80~95	80~95	80~95	80~95	80~95	
層数	LAYER 層	1	1	1	1	1	1	
	BEAD ビード	1	1	1	1	1	1	
シールド SHIELDING- ガス GAS	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	
溶接 WELDING 月日 DATE	4/30	4/30	4/30	4/30	4/30	4/30	4/30	
溶接士 WELDER NAME	B127	B127	B127	B127	B127	B127	B127	
開先 SHAPE OF 形状 EDGE. PREP.	57 3/194	← Δ	Δ	Δ	Δ	Δ →	57 3/194	

注: NOTE F: 下向 FLAT. H: 水平 HORIZONTAL V: 立向 VERTICAL
O: 上向 OVERHEAD A: 全姿勢 ALL POSITION

神船生1029号 (BYE-F1-006)

適切な溶接施工法にてシール溶接
が実施されたことを確認。

検査官
57.9.6

RECORD OF WELDING CONDITION
溶接施行記録

溶接棒のF-6,F-7は
ASME SECIXの規定
によるものである

KANSAI-TAKAHAMA NUCLEAR POWER PLANT UNIT#
西電力高浜発電所第4号機

溶申 55 神 1127 号原
1128

NAME OF ARTICLE 品名		蒸気発生器 #A						DWG. No 図番
継手 番号	JOINT No	W-013 1122-26-9	W-013 4122-70	W-013 1122-28-10	W-013 111-24-11	W-013 1122-27-11	W-013 1122-12	W-013 1126-7012
施行法 番号	WELDING PROCEDURE No	1P3-1	433	1P3-1	433	1P3-1	433	1P3-1
溶接 方法	COMBINATION OF WELDING PROCESS	S (TIG自動)	S (TIG自動)	S (TIG自動)	S (TIG自動)	S (TIG自動)	S (TIG自動)	S (TIG自動)
材質 SPEC & P-№	MATERIAL SPEC & P-№	インコネル 内盛金属 SB-163	インコネル 内盛金属 SB-163	インコネル 内盛金属 SB-163	インコネル 内盛金属 SB-163	インコネル 内盛金属 SB-163	インコネル 内盛金属 SB-163	インコネル 内盛金属 SB-163
溶加棒 溶接棒 心線 フラックス F-№	FILLER METAL ELECTRODE TILLER WIRE FLAX F-№							
棒径 棒 LOT№	ELECTRODE DIAMETER (%φ) ELECTRODE LOT№							
溶接 姿勢	WELDING POSITION	H	H	H	H	H	H	H
予熱 温度	PREHEAT TEMP. (°C)	行わない	行わない	行わない	行わない	行わない	行わない	行わない
溶接 電流	CURRENT AMPERE (A)	80~95	80~95	80~95	80~95	80~95	80~95	80~95
層数	LAYER 層	1	1	1	1	1	1	1
	BEAD ビード	1	1	1	1	1	1	1
シールド ガス	SHIELDING- GAS	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar
溶接 月日	WELDING DATE	7/2	7/2	7/2	7/2	7/2	7/3	7/3
溶接士 NAME	WELDER NAME	8123	8123	8123	8123	8123	8123	8123
開先 形状	SHAPE OF EDGE. PREP.	57 8/9	← Δ	Δ	Δ	Δ	Δ →	57 8/9

注: NOTE F: 下向 FLAT.
O: 上向 OVERHEAD

H: 水平 HORIZONTAL
A: 全姿勢 ALL POSITION

V: 立向 VERTICAL

特許生1029号 (BYE-F1-006)

適切な溶接施工法にてシール溶接
が実施されたことを確認。

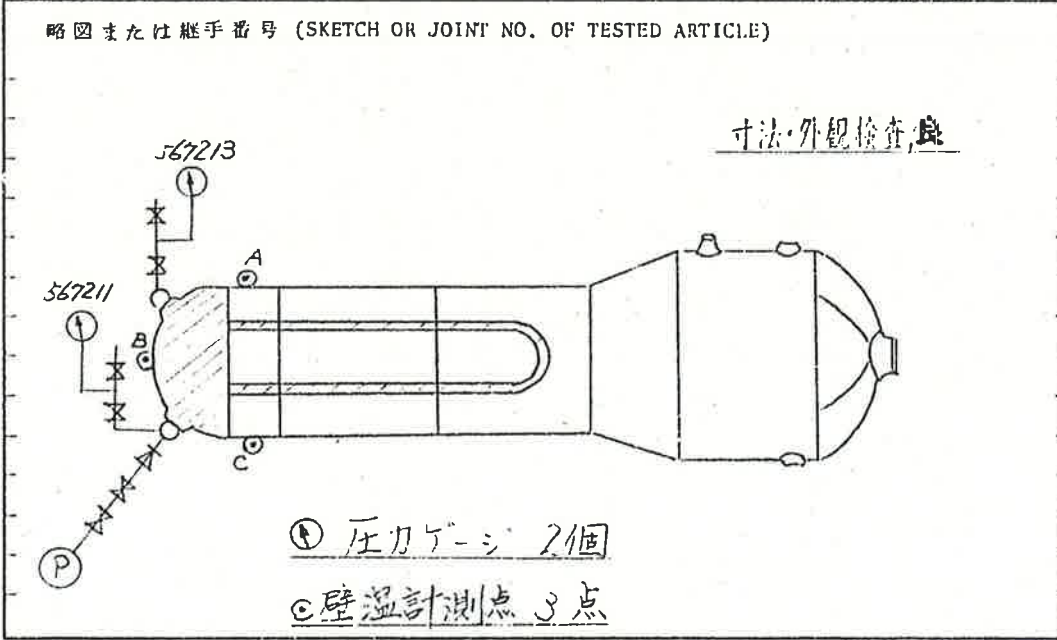
RECORD OF PRESSURE TEST
耐圧試験成績書
(1次側)

原 1127 申 55 容

NAME OF PLANT 発電所名	関西電力高圧発電所第4号機		CHECKED BY 確認
ORDER NO. 工事番号	7-482304/0100		MITI 通産省 58 7/5
DWG. NO. 図番	F4-0401001	LINE SPEC. NO.	関西電力 58 7/5
NAME OF ARTICLE 品名	#A 蒸気発生器		MII 社内 58 7/5

TEST CONDITION	TEST ITEM: 試験の種類	<input type="radio"/> 水 圧 : HYDROSTATIC TEST <input type="radio"/> 気 圧 : AIR PRESSURE TEST <input type="radio"/> 水 張 り : STANDING WATER TEST
	WORKING PRESSURE : 最高使用圧力	175 ㎏G
	TEST PRESSURE : 試験圧力	218.8 ㎏G
	TEST TEMPERATURE : 試験温度	21 ℃以上 (AND OVER)
	TIME AT PRESSURE : 保持時間	1 hr
WATER GRADE : 水質	<input type="radio"/> 脱 塩 水 : DEMINERALIZED WATER <input type="radio"/> 水 道 水 : TAP WATER <input type="radio"/> 工 業 用 水 :	
LEAK DETECTION : 検 査 材 質	① 縞 布 材 72ℓ <input type="radio"/> 工 業 用 水 :	
CALIBRATED DATE OF PRESSURE GAUGE: 圧力計校正月日 58.7.1 材料番号 567213 / 567211		

DATE OF TEST : 検査日 58.7.5 RESULT : 結 果 良



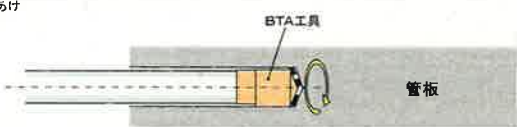
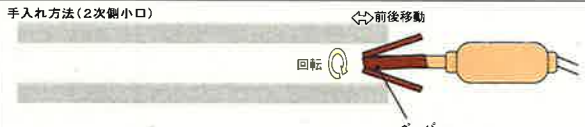
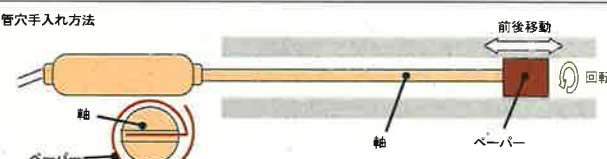



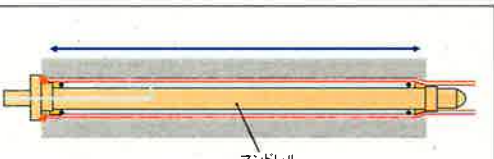
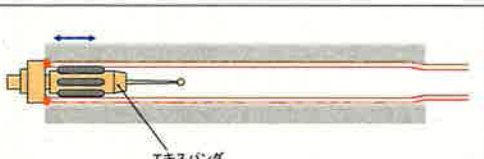
耐圧試験結果に問題がないことを確認。

蒸気発生器 内部点検チェックシート No.15 機器品質管理課							
発電所名	関西電力(株)高浜発電所第4号機	点検日付	58年0月23日				
機器名	#A 蒸気発生器	点検者	[Redacted]				
点検個所	水室内 及び伝熱管	点検要領書	MSBUG6-AV 11				
略図及び点検結果		関西電力 記録確認 58.8.24 [Redacted]					
<div style="border: 2px solid red; padding: 2px; display: inline-block;"> □伝熱管フレット通し完了 </div>							
		<input type="checkbox"/> チェック					
<table border="1" style="margin: auto;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">点 検 項 目</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1) 船後部ノロ, スパック, 脚長など 目視</td> </tr> <tr> <td>2) 養生材撤去</td> </tr> <tr> <td>3) 積掃状態, 異物</td> </tr> </tbody> </table>				点 検 項 目	1) 船後部ノロ, スパック, 脚長など 目視	2) 養生材撤去	3) 積掃状態, 異物
点 検 項 目							
1) 船後部ノロ, スパック, 脚長など 目視							
2) 養生材撤去							
3) 積掃状態, 異物							
手直し後確認点検結果 な し							
点検日付	— 年 — 月 — 日	点検者	—				

製造時の目視点検で異物等の異常が認められなかったことを確認。

製造履歴に関する聞き取り調査

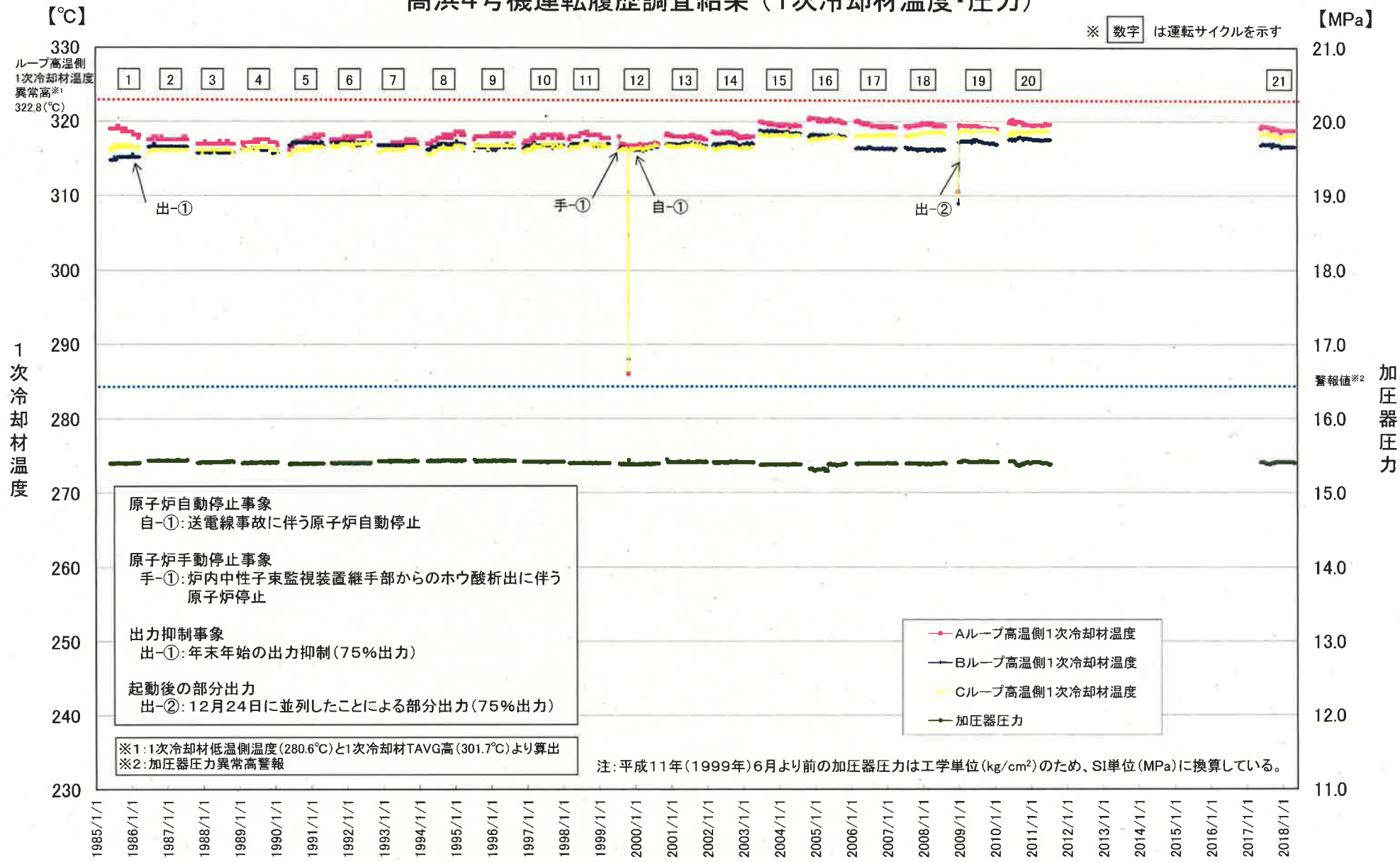
製造手順, 要領について関係者への聞き取りにより調査を行った。

<p>1. 管穴加工</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p>BTA穴あけ</p>  </div> <p>BTA 工具*1 により管板の管穴加工を行う。</p>	<p>1' 管穴 2 次側端部のカエリ取り</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p>手入れ方法 (2次側小口)</p>  </div> <p>管穴加工後, 2次側端部のカエリ取りを全穴実施。</p> <p>【検査】管穴内径確認, 内面外観目視</p>	<p>1'' 管穴内面手入れ</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p>管穴手入れ方法</p>  </div> <p>管穴加工後に目視で内面を検査し, きずが確認された場合は, 紙やすり (P240程度) を取付けた回転工具を用いて手入れを行うことがある。</p> <p>【検査】(手入れ後)内面外観目視</p>
<p>2. 伝熱管挿入</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p>伝熱管挿入</p>  </div> <p>管支持板および管板管穴に伝熱管を挿入。</p>	<p>3. 仮拡管</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p>タックロール</p>  </div> <p>ローラ拡管工具 (エキスパンダ) にて伝熱管端部を仮拡管。</p> <p>【検査】(仮拡管後)開先合せ検査</p>	<p>4. シール溶接</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p>シール溶接</p>  </div> <p>自動 TIG 溶接機で伝熱管端部をシール溶接。</p> <p>【検査】(シール溶接後)溶接部 He リーク試験, PT*2</p>
<p>5. 液圧拡管</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p>液圧拡管</p>  </div> <p>1700kgf/cm² (166.71MPa) の圧力で管板全厚の液圧拡管を行う。</p> <p>【検査】(液圧拡管後)境界部内径確認, 内面外観目視</p>	<p>6. 22 ステップローラ拡管</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p>1ステップローラ拡管</p>  </div> <p>100kgf・cm のトルクで 22 ステップローラ拡管を行う。</p> <p>【検査】(ローラ拡管後)境界部内径確認, 内面外観目視</p>	<p>[調査結果]</p> <p>全 SG において 1. ~6. の手順で製造・検査されていることを確認した。</p>

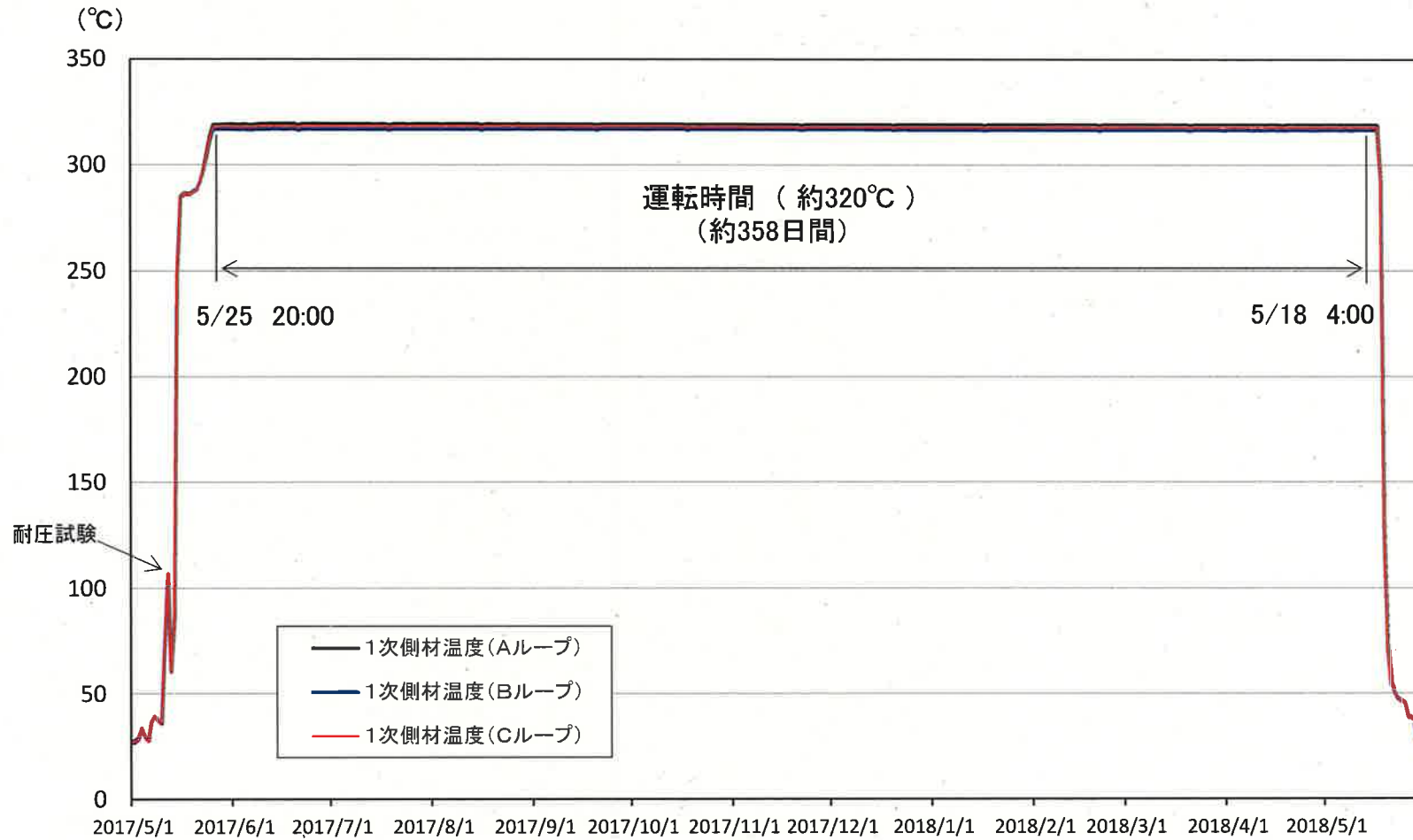
*1: 深さ方向に穴加工をしながら穴の内面を仕上げる工具 *2: 浸透探傷試験

高浜4号機 運転履歴調査結果（1次冷却材温度・圧力、放射線監視装置）

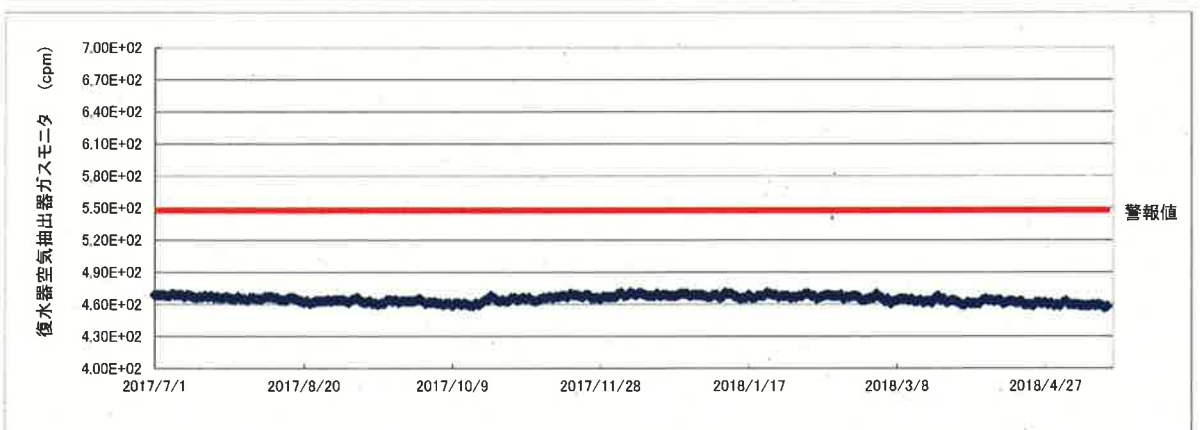
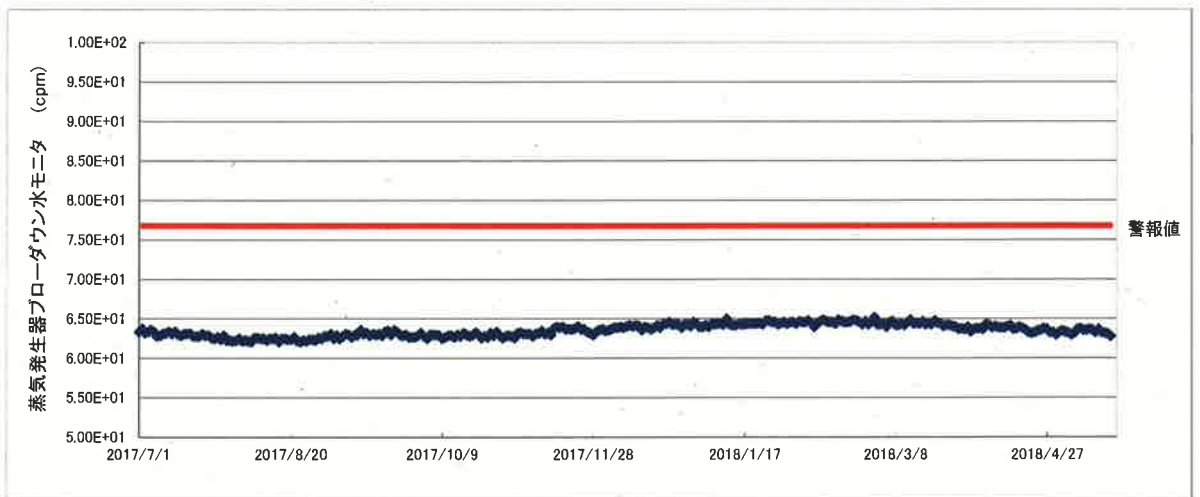
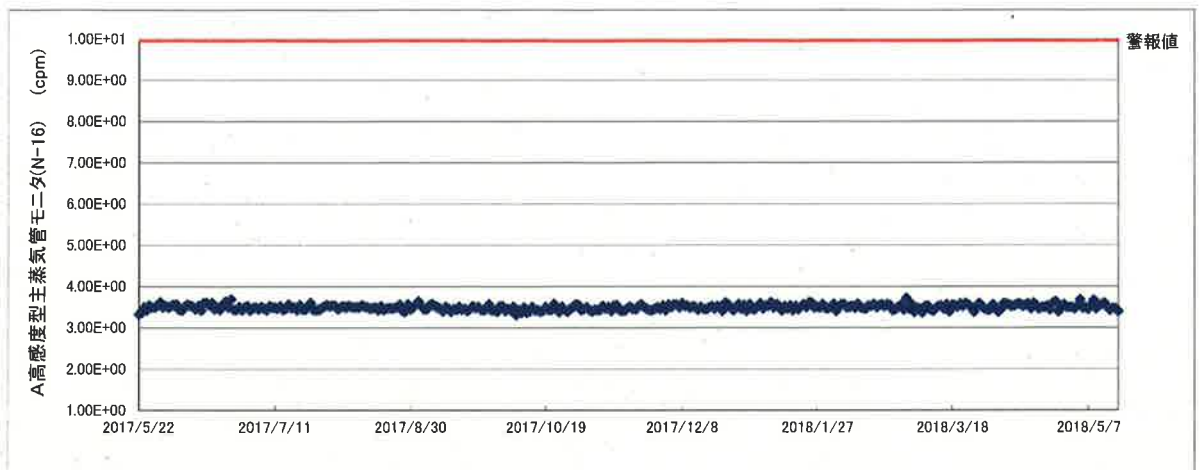
高浜4号機運転履歴調査結果（1次冷却材温度・圧力）



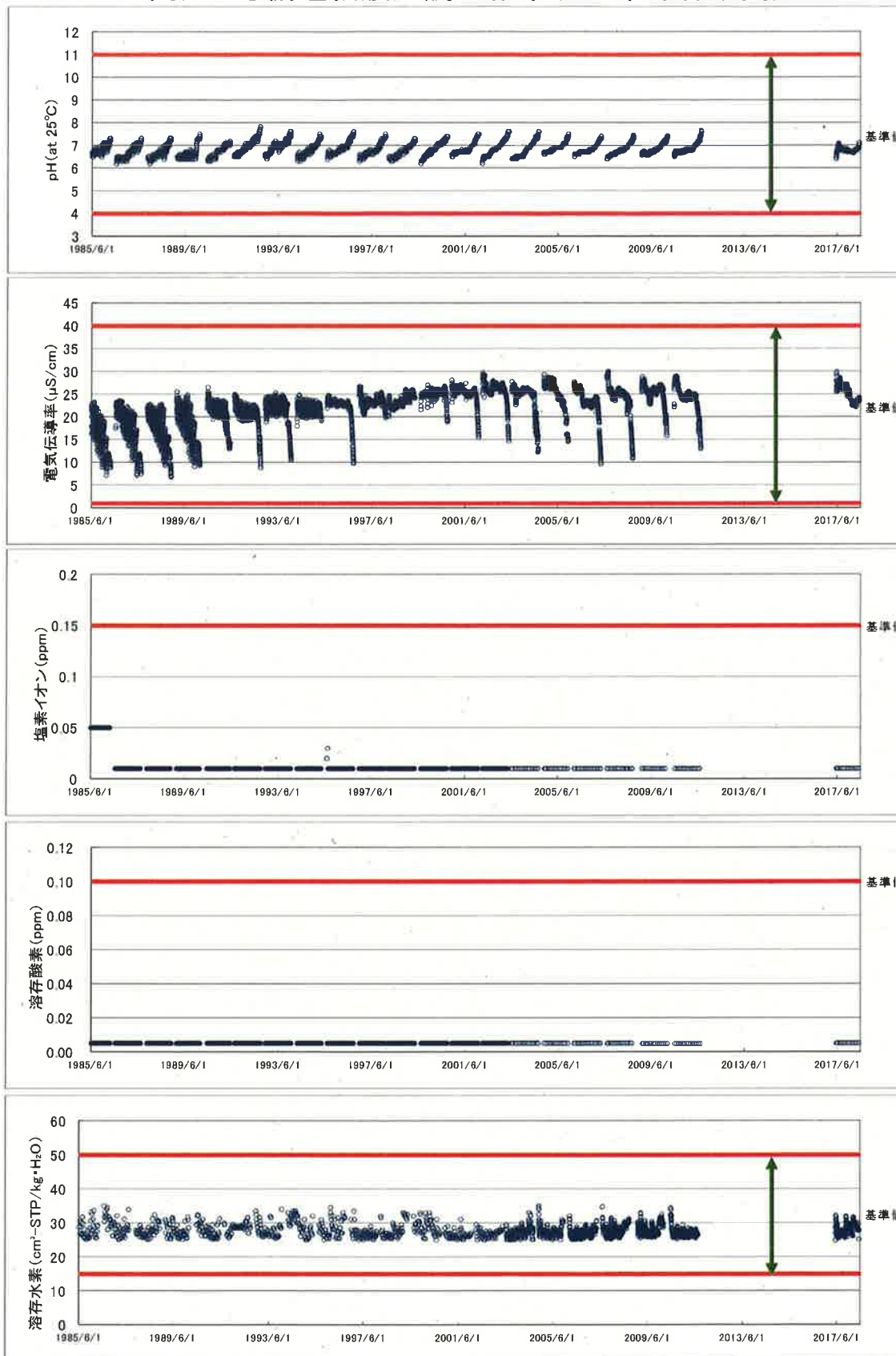
高浜4号機 第21サイクル運転履歴調査結果(1次冷却材温度)



高浜4号機第21サイクル運転履歴調査結果(放射線監視装置)



高浜4号機運転履歴調査結果(1次冷却材水質)



保安規定第19条に定める1次冷却材の水質基準

項目	基準値
pH	4~11 (at25°C)
電気伝導率	1~40 μS/cm
塩素イオン	0.15 ppm以下
溶存酸素	0.1 ppm以下
溶存水素	15~50 cm ³ -STP/kg·H ₂ O

高浜4号機 蒸気発生器 材料検査記録

品番	KTN-4-1034	区分	A
発行	59.10	発行	



検査記録

関西電力(株)高浜発電所第4号機

A 蒸気発生器

(2/2分册)

大通局最終検査
昭和59年8月2日

㊦ 最終検査
昭和58年7月2日

三菱重工業株式会社
神戸造船所
原子力品質保証部機器品質管理課

課長 係長 担当

--	--	--

溶接検査
申請番号 55神/127号原

枚数 表紙共 492 枚	送 付 先	注 文 主 体	熱 機 関 協 会	大 通 局	現 地 Q C	控	工事番号	作 成 日 昭和59年1月20日
							溶接検査 依頼番号	
		18/SP	IP	IP	IP	IP	7-482304/0100	UGG34005 改.2

神船生5001号(機品管)

発電所名： 関西電力株式会社高浜発電所第4号機

品名： * A 蒸気発生器 溶申番号55神1127 号原
 溶依番号55神1128 号原

材料試験成績書目次

図 番	符 号	部 品 名	頁
F4-0401006	01	水 室 鏡	1 ~ 69
"	02 , 03	ド レ ン 管	70 ~ 71
"	04	セーフエンド	72 ~ 79
"	05 , 06	当 板	} 80 ~ 82
"	09	ナットプレート	
"	10 , 11	ヘリサート	83 , 84
F4-0401008	01	ホールドダウンリング	85 ~ 90
F4-0401009	01 , 02	仕切板, 仕切バー	} 91 ~ 94
"	03 , 04	当 て 板	
"	05	六角穴付ボルト	95 ~ 97
F4-0401010	01	管 板	98 ~ 105
"	02	吊金物	仮設品
"	03 , 04	下 部 胴	106 ~ 111
"	05	取 合 金 物	112 ~ 114
"	06	取 合 金 物	115 ~ 118
"	07	トラニオン	仮設品
F4-0401011	01	吹出用内管	119
"	02	90°ロングエルボ	120
"	03	蓋 板	121 ~ 123
"	07	ス リ ー プ	124
F4-0401012	01 , 02	中 間 胴	125 ~ 132
"	03 ~ 05	円 錐 胴	133 ~ 144
"	06	トラニオン	145 ~ 150
"	07	取 合 金 物	112 ~ 114
F4-0401013	01 ~ 46	伝 熱 管	151 ~ 280
F4-0401016	01 ~ 03	上 部 胴	281 ~ 292
"	04 ~ 07	上 部 鏡	293 ~ 300
"	08	吊り上げラグ	297 ~ 300
"	09	当 て 板	301 ~ 303
"	10	サポートパッド	304 ~ 306



SUMITOMO METAL INDUSTRIES, LTD.
STEEL TUBE WORKS
1 NISHINO-CHO HIGASHI MUKOJIMA

HEAD OFFICE
1-1 NISHINO-CHO HIGASHI MUKOJIMA
AMAGASAKI, JAPAN

MITSUBISHI HEAVY IND., LTD.

Customer: KOBE SHIPYARD & ENGINE WORKS

INSPECTION RESULT 検査成績表

MAKER CODE

10

No. NUB3717 (01-46)

Date: APRIL.30.1982

Seamless Ni-Cr-Fe Alloy
U-Bend Tubes (Cold Drawn)

Article 品名

Specification 規格 ASME SB163

Size 寸法 22.23 1.27 19419-24020

O.D. 外径 1.27 Wall 厚 2.23 Length 長さ 19419

Quantity 数量 3382

51306

No. of Pieces 本数

Weight 重量 kg

MHI Work No. 作業番号 NUB3717(01-46) 7482304 ZK 111103-01-46 (SC)

MHI Spec. ZKE0974-2 MSBZK 70-36-6

Hydrostatic Test 水圧試験 220 kg/cm ²	Surface & Dimensions 表面、寸法	Flattening 扁平	Flaring 押拉	Bending 曲げ	Remarks Thermal Treatment; 700°C x 15HR.F.C. Non Destructive Inspection Straight Tubes-Ultrasonic Inspection; GOOD Eddy Current Inspection: GOOD Fluorescent Penetrant Inspection: GOOD U-Tubes-----Dye Penetrant Inspection: GOOD Inner Probe Eddy Current Inspection: GOOD												
					Tensile Properties 引張試験			Chemical Analysis 化学成分 %									
	Yield point or 降伏点(耐力) kg/mm ² , MPa	Tensile Strength 引張強さ kg/mm ² , Xpsi	Elongation 伸 % (50.8mm)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Fe XMo	HRB				
GOOD	Min. 最小 Std. 規格	24.6	56.2	30						72.0	14.0	6.0	-				
	Max. 最大				.15	.5	1.0	.015	.5		17.0	10.0					
JIS	MIN.	25	56	30	.15	.50	1.00	.030	.015	.50	72.00	14.00	6.00				
	MAX.										17.00	10.00	92				
*MHI Requirement:				C ≤	.04		P ≤	.025		Co ≤	.02						

Surveyor to

(Agency or Company)

(Signature)

鋼管 品保証 3 A4 722kg

KTN-4 = A-3/4 伝熱管

記録確認

SUMITOMO METAL INDUSTRIES, LTD.
STEEL TUBE WORKS

伝熱管の製造番号 (A蒸気発生器の伝熱管のチャージ番号) が、添付資料-6 (5/18) に記載の番号と整合していることを確認。

Sumitomo Metal Industries, Ltd.,
Steel Tube Works,

ATTACHMENT TO INSPECTION RESULT

No. NUE 3717 (1-3)-1
Date: April 30 1982

Mill Work No: NUE 3717 (1-3) (ATTACHED SHEET)

Test No.	Tensile Properties			Chemical Analysis %							Hardness			
	Yield Point σ _{0.2} (kg/mm ²)	Tensile Strength R _m (kg/mm ²)	Elongation (%) in 50.8mm	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Fe	Co	HRB
Std.	min. 24.6	max. 56.2	30	.15	.5	1.0		.015	.5	72.0	14.0 17.0	6.0 10.0		
D151501	34.6	74.0	L 45	.026	.31	.31	.008	.001	.01	74.60	16.00	8.36	.013	85
0101**F	34.2	74.2	C 42	.026	.31	.32	.009	.001	.01	74.40	16.10	8.46	.011	86
0909**F	35.5	74.7	43 44											87 86
0914**F	34.6	74.2	C 42	.028	.31	.30	.009	.001	.01	74.65	15.95	8.29	.014	87 87
0922**F	34.8	73.5	43 42											87 86
0910**F	34.7	75.1	44 42	.028	.30	.30	.008	.001	.01	74.70	15.90	8.31	.013	87 86
0916**F	36.7	73.9	42											86
0919**F	33.1	73.9	42	.027	.30	.31	.009	.001	.01	74.40	16.15	8.33	.012	86
0920**F	33.6	73.9	42											
D171302	35.8	75.7	L 40	.026	.30	.32	.008	.001	.01	74.35	15.85	8.76	.012	86
0190**F	36.4	76.2	C 40	.028	.33	.33	.009	.001	.01	74.05	16.05	8.83	.012	86
0905**F	35.9	75.1	43											86
0907**F	35.7	75.1	43 C	.027	.30	.32	.009	.001	.01	74.10	16.00	8.72	.011	86 85
0915**F	36.4	75.6	44											87
0924**F	35.4	74.3	42 C	.027	.31	.33	.010	.001	.01	74.00	16.10	8.72	.010	87 86
0918**F	36.8	75.3	44 43											87 86
0923**F	36.1	74.9	44 43	.027	.30	.32	.009	.001	.01	74.15	16.00	8.72	.010	87 86
0921**F	36.0	74.4	42	.026	.30	.32	.009	.001	.01	74.25	16.05	8.68	.010	87 85
	35.8	74.6	43 C											

L = Lettle
C = Check

PR 57 116 A 4 24

今回信号指示が検出された伝熱管（添付資料-6 (7/18)に記載の伝熱管の管No.）の溶鋼分析および製品分析において化学成分が問題ないことを確認。

ATTACHMENT TO INSPECTION RESULT

No. NUE 3717 (4-6)-1

Mill Work No: NUE 3717 (4-6)

(ATTACHED SHEET)

Date: April 30 1982

Test No.	Tensile Properties			Chemical Analysis %										Hardness.	
	Yield Point R _{0.2} (kg/mm ²)	Tensile Strength R _m (kg/mm ²)	Elongation (%) in 50.8 mm	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Fe	Co	HRB	
Std. min.	24.6	56.2	30												
Std. max.				.15	.5	1.0		.015	.5	72.0	14.0	6.0			
D151501															
	34.9	74.0	44 L	.026	.31	.31	.008	.001	.01	74.60	16.00	8.36	.013		86
0906**F	35.2	74.3	43 C	.027	.31	.31	.009	.001	.01	74.45	16.05	8.37	.013		86
0909**F															
0913**F															
0914**F	35.5 34.7	74.7 74.5	43 44												37 86
	34.6 32.7	74.2 72.1	42 42 C	.028	.31	.30	.009	.001	.01	74.65	15.95	8.29	.014		37 87
0910**F															
0916**F															
0919**F	34.8 34.8	73.5 74.5	43 42												37 86
	36.7 34.1	75.1 74.4	44 42 C	.028	.30	.30	.008	.001	.01	74.70	15.90	8.31	.013		37 86
	33.1	73.9	42												36
0920**F	33.6	73.9	42 C	.027	.30	.31	.009	.001	.01	74.40	16.15	8.33	.012		36
D171302				L	.026	.30	.32	.008	.001	.01	74.35	15.85	8.76	.012	
	35.9	75.1	43												36
0905**F	35.7	75.1	43 C	.027	.30	.32	.009	.001	.01	74.10	16.00	8.72	.011		36 85
0911**F	36.0	74.4	42												87
0921**F	35.8	74.6	43 C	.026	.30	.32	.009	.001	.01	74.25	16.05	8.68	.010		87 85
0912**F															
0917**F	36.8 35.0	75.3 75.0	44 43												87 86
0918**F	36.1 34.8	74.9 75.0	44 44 C	.027	.32	.33	.009	.001	.01	74.15	16.00	8.72	.010		87 86
	36.4	75.6	44												87
0915**F	35.4	74.3	42 C	.027	.31	.33	.010	.001	.01	74.00	16.10	8.72	.010		87 86

L = Ladle
C = Check

116 A4 7 22kg

今回信号指示が検出された伝熱管（添付資料-6 (8/18) に記載の伝熱管の管No.）の溶鋼分析および製品分析において化学成分が問題ないことを確認。

Sumitomo Metal Industries, Ltd.,
Steel Tube Works, Amagasaki

PIPE NO. LIST

Date APRIL 30 1982

Size 120.78 19,624
R mm Length mm

Mill Work No. MUE 3717-03

Order No. 7482304ZK111103-03-SC

Quantity 94 1,307
No. of Pieces Weight Kg

今回信号指示が検出された伝熱管（添付資料-6 (7/18) に記載の伝熱管の管No.）が、添付資料-10 (5/8) で問題ないことが確認された成分分析の確認範囲に含まれていることを確認。

Lot No.	Pipe No.
0190	11F, 13F, 14F, 17F, 19F
"	24F
0905	01F, 02F, 05F, 06F, 07F
"	09F, 13F, 14F, 16F, 19F
"	20F, 22F, 26F, 28F, 29F
"	30F, 31F, 32F, 33F, 36F
"	37F, 38F, 39F, 40F, 42F
"	43F, 44F
0907	01F, 03F, 05F, 15F
0910	43F
0914	30F, 43F
0915	23F, 37F
0919	17F, 33F
0920	12F, 13F, 33F

Lot No.	Pipe No.
0921	01F, 03F, 05F, 08F
"	09F, 10F, 11F, 13F
"	16F, 17F, 21F, 22F
"	24F, 26F, 27F, 28F
"	32F, 33F, 34F, 35F
"	36F, 38F, 41F, 46F
"	47F
0922	03F, 04F, 06F, 07F
"	09F, 10F, 12F, 13F
"	14F, 17F, 21F, 23F
"	24F, 25F
0923	01F, 11F
0924	01F
0102	16E

Lot No.	Pipe No.
0292	04E
0390	06E
0392	24E
0490	06E

Sumitomo Metal Industries, Ltd.,
Steel Tube Works, Amagasaki

PIPE NO. LIST

Date APRIL 30 1982

Size 153.32 19,726
R mm Length mm

Mill Work No. NUE 3717-04

Order No. 7482304ZK111103-04-SC

Quantity 94 1.316
No. of Pieces Weight Kg

Lot No.	Pipe No.
0905	41F
0906	11F
0909	12F, 24F
0910	33F
0913	10F, 15F, 21F
0914	03F, 10F, 16F, 19F, 23F
"	25F, 33F, 44F, 45F
0915	28F
0916	02F, 08F
0917	01F, 03F, 05F, 18F, 21F
"	37F
0918	02F, 04F, 05F, 06F, 07F
"	08F, 09F, 11F, 12F, 13F
"	14F, 15F, 16F, 17F, 19F

Lot No.	Pipe No.
0918	20F, 21F, 22F, 23F
"	24F, 25F, 26F, 27F
"	28F, 29F, 30F, 32F
"	33F, 35F, 36F, 37F
"	38F, 39F
0919	45F
0920	01F, 22F
0921	14F, 37F
1304	03F, 20F, 23F, 24F
1307	01F, 04F, 07F, 08F
"	09F, 10F, 16F, 19F
"	21F, 22F, 24F, 25F
"	35F, 36F
1372	08F, 16F, 21F, 26F

Lot No.	Pipe No.
2202	27F
2206	09F, 10F
0702	17E
1201	20E
0291	01E, 06E
1301	14E

今回信号指示が検出された伝熱管（添付資料-6 (8/18) に記載の伝熱管の管No.）が、添付資料-10 (6/8) で問題ないことが確認された成分分析の確認範囲に含まれていることを確認。

粒界腐食割れ、ピitting、局所変形、エロージョンについて

腐食損傷の発生可能性評価

1次冷却材は加圧されて沸騰せず、かつ構造上隙間部が存在せずドライ&ウェット現象が発生しないので、不純物濃縮による環境の変化はない。

項目	基準値
塩化物イオン	0.15ppm以下

ドライ&ウェット現象：

伝熱管隙間部で熱負荷により沸騰が生じる場合、局部的に乾湿が繰返される現象

1次冷却材には溶存酸素低減のため水素が注入され、良好な還元性雰囲気維持されている。

項目	基準値
溶存水素	15~50cm ³ -STP/kg・H ₂ O
溶存酸素	0.1ppm以下

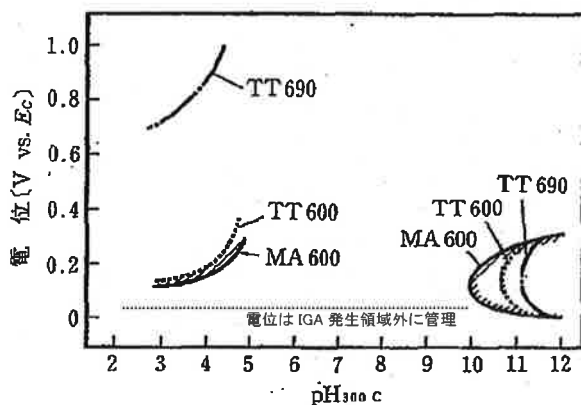
1次冷却材は加圧されているので、伝熱管内では沸騰による不純物濃縮が起こることはなく、かつ還元性雰囲気を維持。

伝熱管内で不純物の濃縮および酸化剤による電位上昇による腐食損傷が発生する可能性はない。

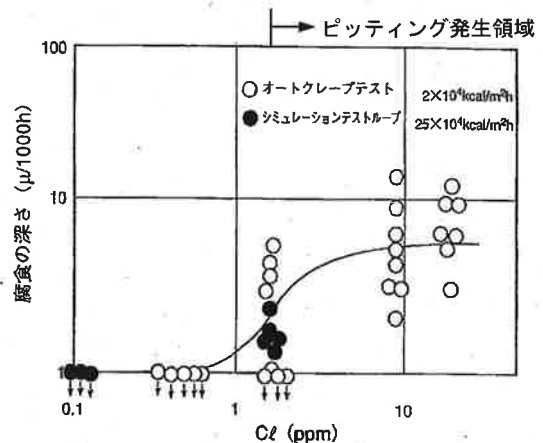
- ※1 粒界腐食割れ (IGA)
- ※2 ピitting

1次冷却材は溶存水素、溶存酸素を管理しており、還元性環境が維持されているので、電位上昇しない。

1次冷却材は塩化物イオン濃度は、十分低く管理されている。



SG 伝熱管材料の IGA 発生環境のまとめ
(出典：八島清爾, 原子力工業, 41, 4, p62(1995))



インコネル600材の腐食に及ぼす塩素イオンの影響

(出典：日本原子力学会 原子炉水化学ハンドブック)

※1：金属の結晶粒の境目(粒界)に沿って進展する腐食

※2：塩素イオンなどに起因する金属表面の被膜破壊によって起きる局所的な腐食

局所変形の発生可能性評価

1. 目的

局所的な変形の有無を今回のECT信号により評価する。

2. 方法

インテリジェントECTが用いている100kHzおよび400kHzの周波数の信号は、局所変形の場合、リサージュ表示で位相角が 0° となり、リサージュ波形の巻きも大きくなる傾向がある。

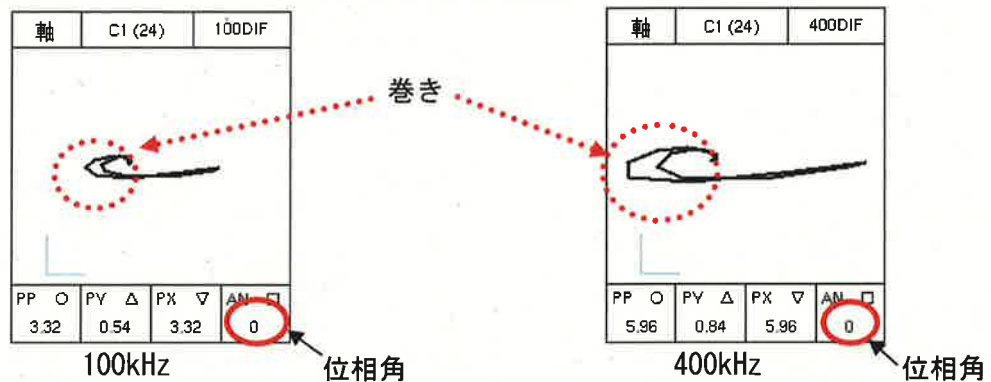
したがって、位相角が100kHz、400kHzとも 0° 近くでないことおよび巻きのないことを確認する。

3. A-SG(X5-Y4)およびA-SG(X12-Y3)の評価結果

今回検出されたA-SG(X5-Y4)およびA-SG(X12-Y3)のECT信号は、400kHzにおいて内面きずの特徴を示す位相角を有している。また、100kHzリサージュ波形は、局所変形の信号の特徴と明らかに異なる。以上から、局所変形と見られるような信号は認められなかった。

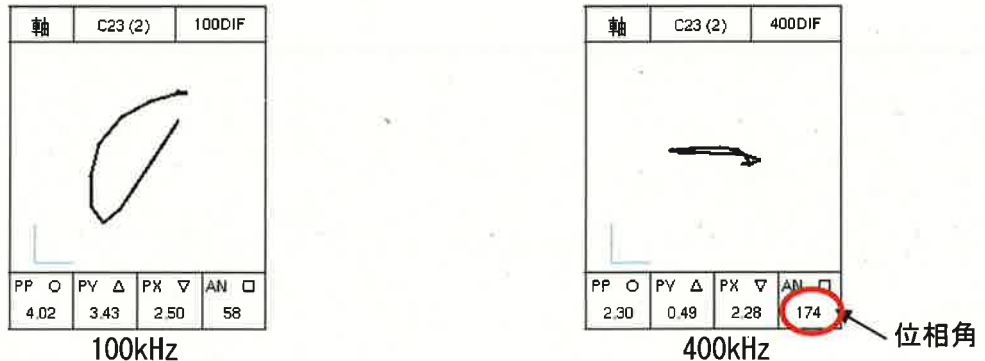
(局所変形の信号)

100kHz、400kHzとも、全振幅を直線で結ぶと、位相角がほとんど 0° となる。



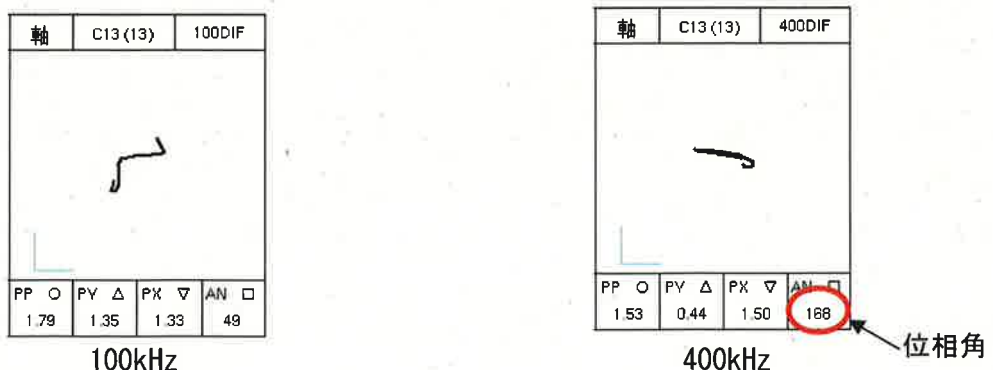
(今回の信号 A-SG X5-Y4)

100kHzにて管板上端信号に内面きず信号の影響が示されており、400kHzにて内面きずの特徴を示す位相角を有している。



(今回の信号 A-SG X12-Y3)

100kHzにて管板上端信号に内面きず信号の影響が示されており、400kHzにて内面きずの特徴を示す位相角を有している。



エロージョン^{*1}の発生可能性評価

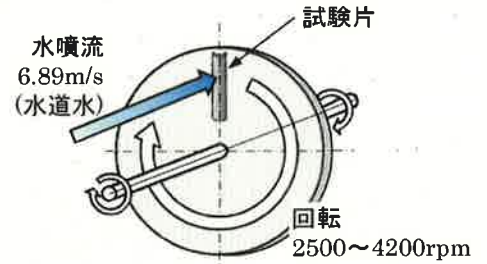
1. 目的

SG伝熱管拡管部に周辺流体の衝突によるエロージョン(侵食)が発生しないことを評価する。

2. 方法

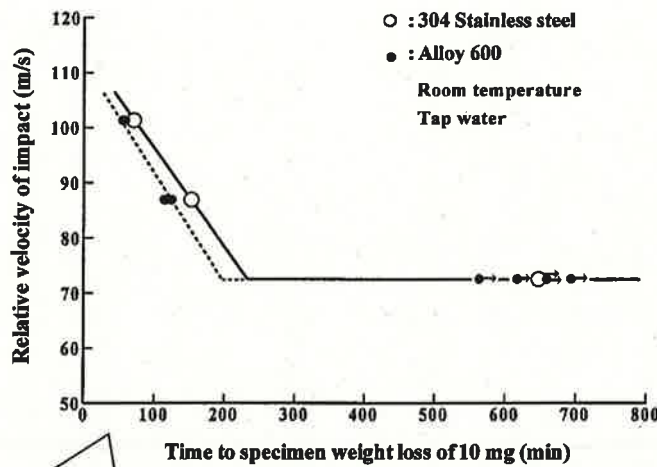
ウォータージェットテスト(常温)によりエロージョン発生限界流速を求め、実機流速と比較する。

エロージョンの評価においては管内外に差異はないため、管内外に正面から噴流を衝突させた試験結果を基に評価する。



3. 評価結果

インコネルTT600製伝熱管のエロージョンが発生する限界流速は約70m/s以上であり、拡管部の実機流速は平均約6m/sであることからエロージョンの発生可能性は小さい。



(出典：機械学会資料
材料と環境 2006,
配管減肉現象について)

図1 ウォータージェットテストによる限界流速

相対速度 = $\sqrt{(\text{水噴流速})^2 + (\text{試験片の周速})^2}$
 試験例の場合 水噴流速 = 6.89m/s
 試験片の周速 = 72.22m/s
 周速 = 試験片の円周長さ × 回転数
 $= (2\pi \times 0.23) \times (3000/60)$
 試験片までの半径 (m) ; 0.23
 回転数 (rpm) ; 3000

表面の番号は、試験片番号



図2 ウォータージェットテスト後の外観
(700分間水噴流後の状況)

*1 : 管内外を流れる水により配管表面が磨耗する現象

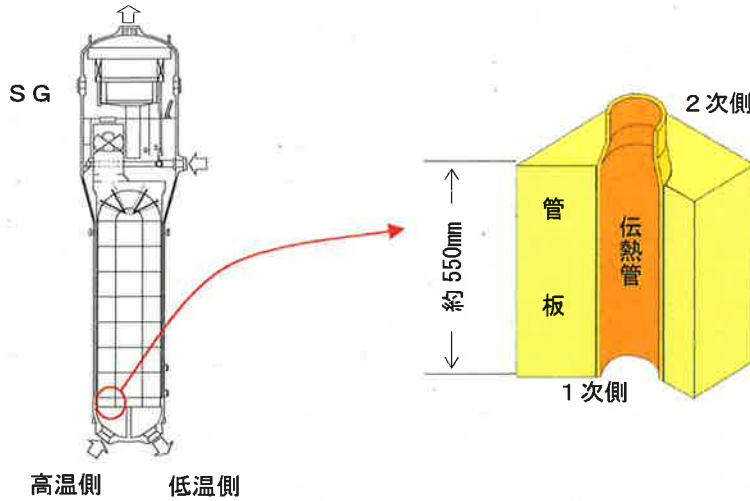
高浜4号機第11回および高浜3号機第12回定期検査時

抜管調査結果について

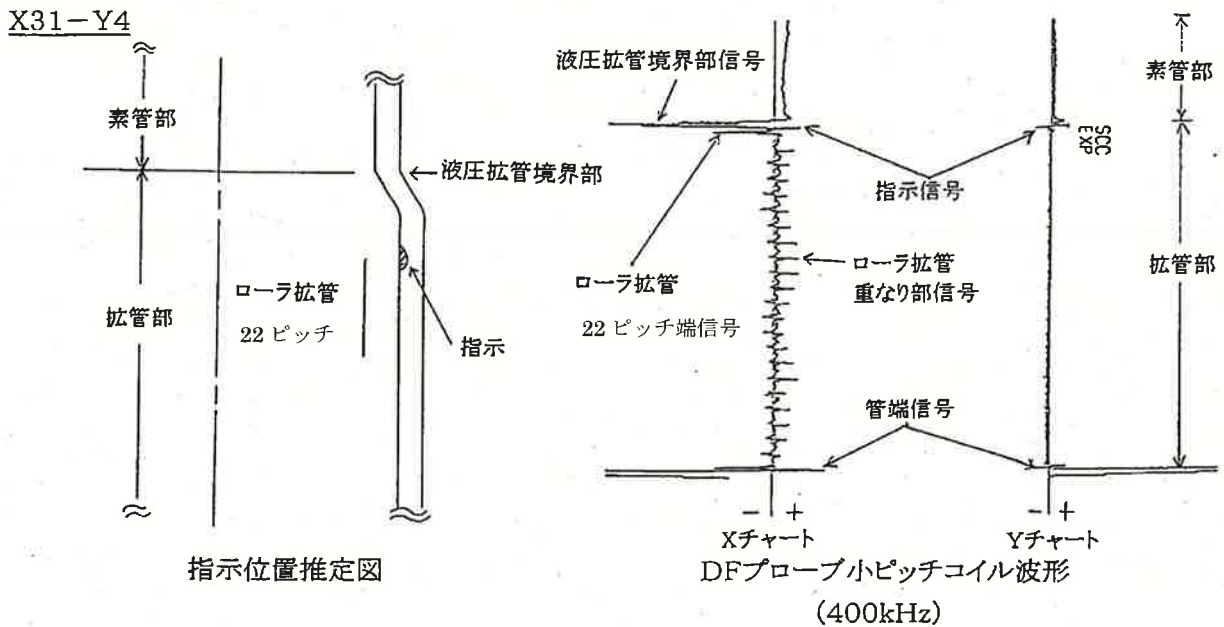
高浜4号機第11回定期検査時の抜管調査結果について

1. 抜管した伝熱管

調査対象SG：C-SG	調査対象伝熱管番地：X31-Y4	調査対象部位：高温側管板部
-------------	------------------	---------------



2. 抜管した伝熱管のDF-ECT信号波形と指示位置



○DF-ECTにより高温側伝熱管の管板部のローラ拡管上端部に有意な信号指示が確認された。
 ○また、信号指示を分析した結果、信号指示はいずれも内面きずの特徴を呈していた。

内面きずの特徴

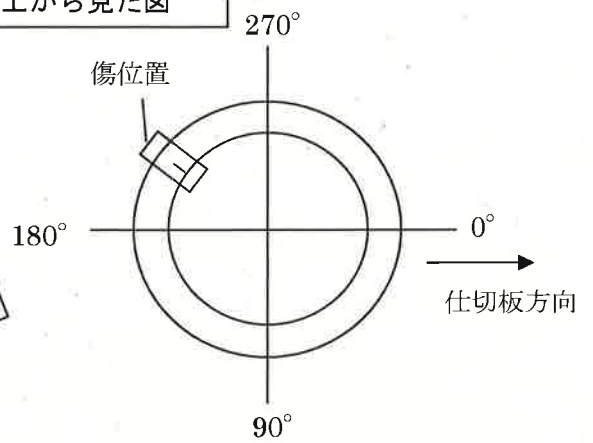
- ・400kHzのY信号がプローブの進行方向に対して「+→-」、X信号が「-→+」両振れする
- ・400kHzのY信号とX信号の振幅比 X振幅>Y振幅

3. 抜管調査結果

浸透探傷試験 (PT)



上から見た図



断面ミクロ観察

観察位置はきず中央部

【浸透探傷試験結果】

○伝熱管内表面のPTの結果、管板上
面より下方のローラ拡張上部に約
3mmの軸方向の損傷指示が確認さ
れた。これは、ECTで認められた
有意な信号指示の位置に対応してい
た。

深さ 0.80mm
(約 63%)

1.27mm

外側

内側

拡大

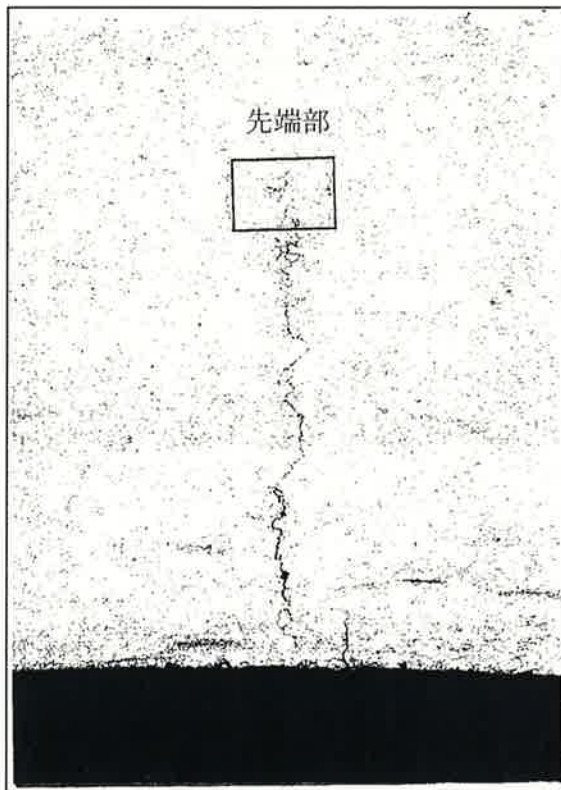
【断面ミクロ観察結果】

○損傷部の横断面を光学顕微鏡で観察
した結果、損傷は伝熱管内表面を起
点とした1次側からの応力腐食割れ
(PWSCC)と考えられる管軸方
向の粒界割れが確認された。

- ・最大深さ：約0.80mm
(管肉厚の約63%)

【抜管調査結果まとめ】

- 渦流探傷検査で認められた有意な信号指
示の位置に損傷指示が認められた。
- 断面ミクロ観察の結果、伝熱管内表面を
起点とする1次側からの応力腐食割れ
(PWSCC)と考えられる管軸方向の
粒界割れが確認された。



4. PWSCC発生要因の検討

材料の検討

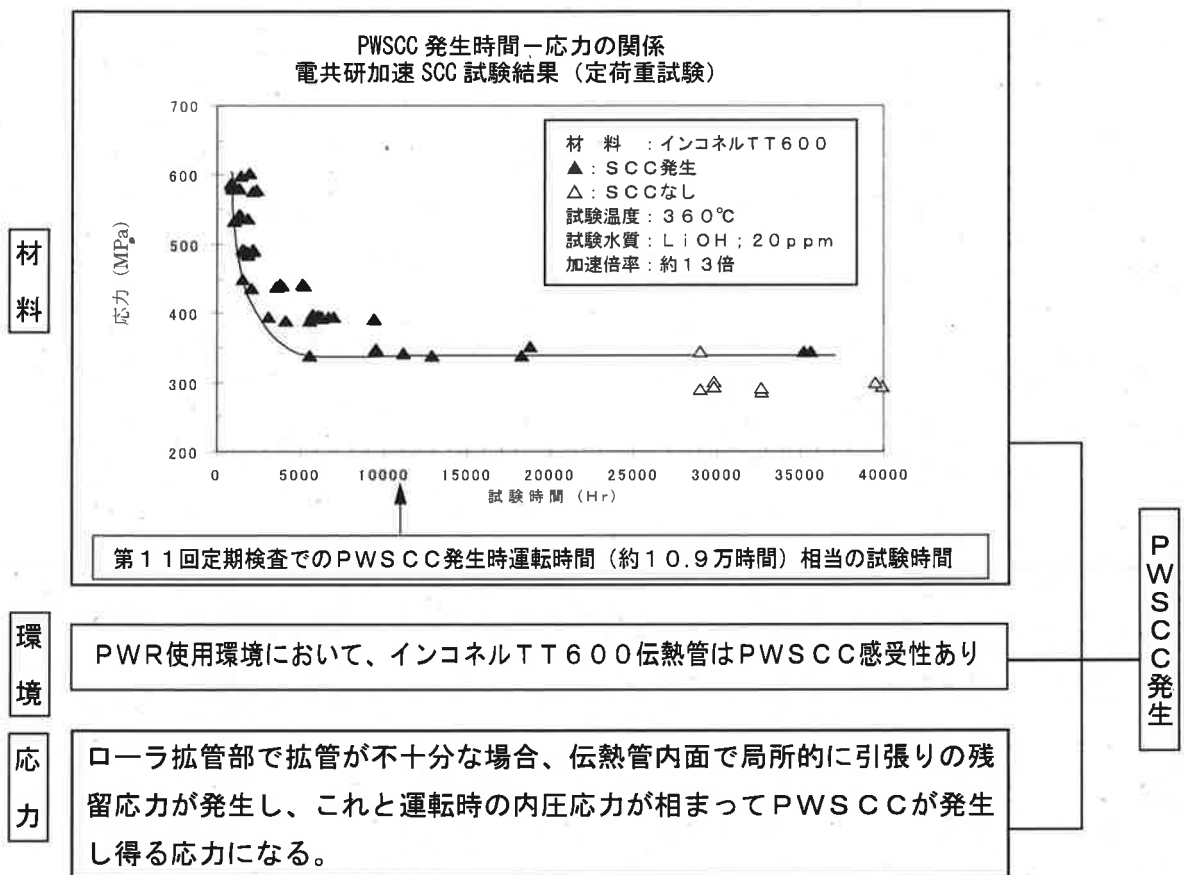
試験によりインコネルTT600伝熱管のPWSCC発生応力と発生時間の相関が得られている。

環境の検討

実機水質はインコネルTT600伝熱管がPWSCCの感受性を有する環境である。

応力の検討

ローラ拡管部で拡管が不十分であれば、伝熱管内面で局所的に引張りの残留応力が発生し、これと運転時の内圧が相まってPWSCCが発生し得る応力になる。



5. まとめ

高浜4号機SG伝熱管で使用しているインコネルTT600（材料）は、PWR使用環境（環境）においてPWSCC発生に対する感受性を有することが確認されている。伝熱管拡管の際、伝熱管内面で局所的に引張りの残留応力（応力）が発生し、これと運転時の内圧応力があいまって、伝熱管ローラ拡管の内表面から、PWSCCが発生したものと推定される。

高浜発電所4号機
蒸気発生器伝熱管の損傷について

平成11年6月
関西電力株式会社

1. 件名

高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について

2. 事象発生の日時

平成11年5月27日 (発見)

3. 事象発生の電気工作物

原子炉冷却系統設備 蒸気発生器

4. 事象発生前の運転状況

第11回定期検査中

5. 事象発生の状況

高浜発電所4号機は、平成11年4月22日より第11回定期検査に入り、蒸気発生器の伝熱管の健全性を確認するため、渦流探傷検査を実施した。

その結果、一部の伝熱管に有意な信号指示が認められた。

以下に渦流探傷検査結果、原因調査及び対策等について報告する。

6. 渦流探傷検査結果

(1) 検査期間

平成11年4月28日～平成11年5月27日

(2) 検査範囲

蒸気発生器の施栓済みのものを除く伝熱管全数について検査を実施した。

(本)

蒸気発生器	A	B	C	合計
検査本数	3,365	3,373	3,377	10,115

(3) 検査結果

C-蒸気発生器の伝熱管4本に有意な信号指示が認められた。

有意な信号指示の認められた箇所はいずれも高温側の管板拡管部であった。

なお、指示位置はローラ拡管部またはローラ拡管上端部であった。

(添付資料1, 2, 3)

指示本数

(本)

蒸気発生器	A	B	C	合計
指示本数	0	0	4	4

7. 抜管調査

原因調査のために、有意な信号指示が認められた4本のうち1本について抜管調査を実施した。

	伝熱管番地	調査対象部位
C-蒸気発生器	X31-Y4	高温側管板部

(1) 外観観察

管板部の内外表面を観察した結果、渦流探傷検査で有意な信号指示が認められた管板上面付近の外表面では、抜管時に生じたこすれ跡が見られたが、特に異常は認められなかった。

また、内表面においては液圧抜管境界部及びローラ抜管上端部を示す色調変化が認められた。(添付資料4)

(2) 浸透探傷試験

浸透探傷試験を実施した結果、渦流探傷検査で有意な信号指示が認められた部位の管内表面に、約3mmの軸方向の損傷指示が1箇所認められた。(添付資料5)

(3) 断面マイクロ観察

損傷部のほぼ中央の横断面を光学顕微鏡で観察した結果、損傷は管内表面を起点としており、1次側からの応力腐食割れ(PWSCC^(注))と考えられる管軸方向の粒界割れであることが確認された。

また、損傷の最大深さは約0.8mm(管肉厚の約6.3%)であった。

(添付資料6)

(注) PWSCC : Primary Water Stress Corrosion Cracking

(4) 材料分析

化学成分、結晶粒度、硬さ及び金属組織について調査した結果、異常は認められなかった。(添付資料7)

8. PWSCCの発生要因の検討

抜管調査の結果、伝熱管で経験したPWSCCと同じと考えられる損傷が今回TT^(注)600合金伝熱管に確認されたことから、PWSCCの発生要因である材料、環境、応力について検討した。(添付資料8)

(注) TT : Thermal Treatment (耐食性改善のための特殊熱処理)

8. 1 材料の検討

TT600合金伝熱管のPWSCC感受性に関する知見を調査した。

(1) 模擬RCS^(注)水中SCC試験

360℃温度加速、予歪リバーソUベンド試験片を用いたSCC試験により、TT600合金伝熱管がPWSCC感受性を有することが確認されている。

(添付資料9)

(注) RCS: Reactor Coolant System (原子炉冷却系統)

(2) 改良加速SCC試験 (定荷重試験)

温度による加速に加え、20ppmのLiOHを添加した改良加速試験 (電力共通研究) によりTT600合金伝熱管のPWSCC発生応力-発生時間の相関が得られている。

(添付資料10)

8. 2 環境の検討

実機水質は、TT600合金伝熱管がPWSCC感受性を有する環境である。

8. 3 応力の検討

過去のMA600合金伝熱管の検討結果から、管板拡管部でのPWSCC発生に対する応力発生要因として、ローラ拡管不良 (ローラの摩耗、潤滑油不足等) による管板への伝熱管密着不十分等が考えられる。

(1) 拡管施工に伴う応力の検討

MA600合金伝熱管のPWSCCの発生応力要因を踏まえ、ローラ拡管不良 (全周にわたる密着不十分) を模擬した供試体を用いて、内圧100kg/cm²を負荷したポリチオン酸試験を実施し、割れの発生時間から当該部の応力を推定した結果、密着はしていなかったものの、ローラ拡管上端部における残留応力+運転中内圧応力は、32kg/mm²程度以下と評価された。

(添付資料11)

(2) 管板管穴状況に伴う応力の検討

損傷の認められた方向 (X方向) 及びそれと直角の方向 (Y方向) について、抜管後の管板管穴の内径計測を実施した結果、管板上部付近でY方向の内径がわずかに大きくなっていることが確認された。

(添付資料12)

管板管穴の内径が拡大した要因について、工場の製作過程を調査した結果、管穴加工後に管穴内面の手入れを行う際、部分的にわずかな穴径拡大が発生する可能性があることがわかった。

(添付資料13)

部分的な穴径変化があれば局所的に残留応力が高くなる可能性があることから、応力確認のため、部分的な管穴拡大を模擬した供試体を用いて、ポリチオン酸試験を実施した結果、ローラ拡管上端部、ローラ拡管部とも残留応力+運転中内圧応力は38kg/mm²程度と評価された。

(添付資料11)

8. 4 検討結果

ローラ拡管不良により密着不十分がある場合の応力は 3.2 kg/mm^2 程度以下と評価され、改良加速SCC試験結果から応力レベル的には今回の損傷発生要因とは考えられない。

一方、部分的にわずかな管板管穴拡大がある場合の応力は 3.8 kg/mm^2 程度と評価され、同加速SCC試験結果からも高浜4号機の運転時間程度でPWSCCが発生し得る応力レベルであり、今回の損傷発生要因と考えられる。(添付資料14)

9. 推定原因

当該蒸気発生器製作の際、管板管穴加工時に穴径が部分的にわずかに広がったため、その後の伝熱管拡管の際に局所的に生じた残留応力と運転中内圧応力とが重畳して、伝熱管ローラ拡管部の内面側に応力腐食割れが発生したものと推定される。

10. 対 策

(1) 有意な信号指示の認められた伝熱管は、機械式栓（メカニカルプラグ）にて施栓する。なお、抜管した1本はスリーブ付機械式栓とする。(添付資料15)

(2) 補修内訳は下表のとおりである。

(本)

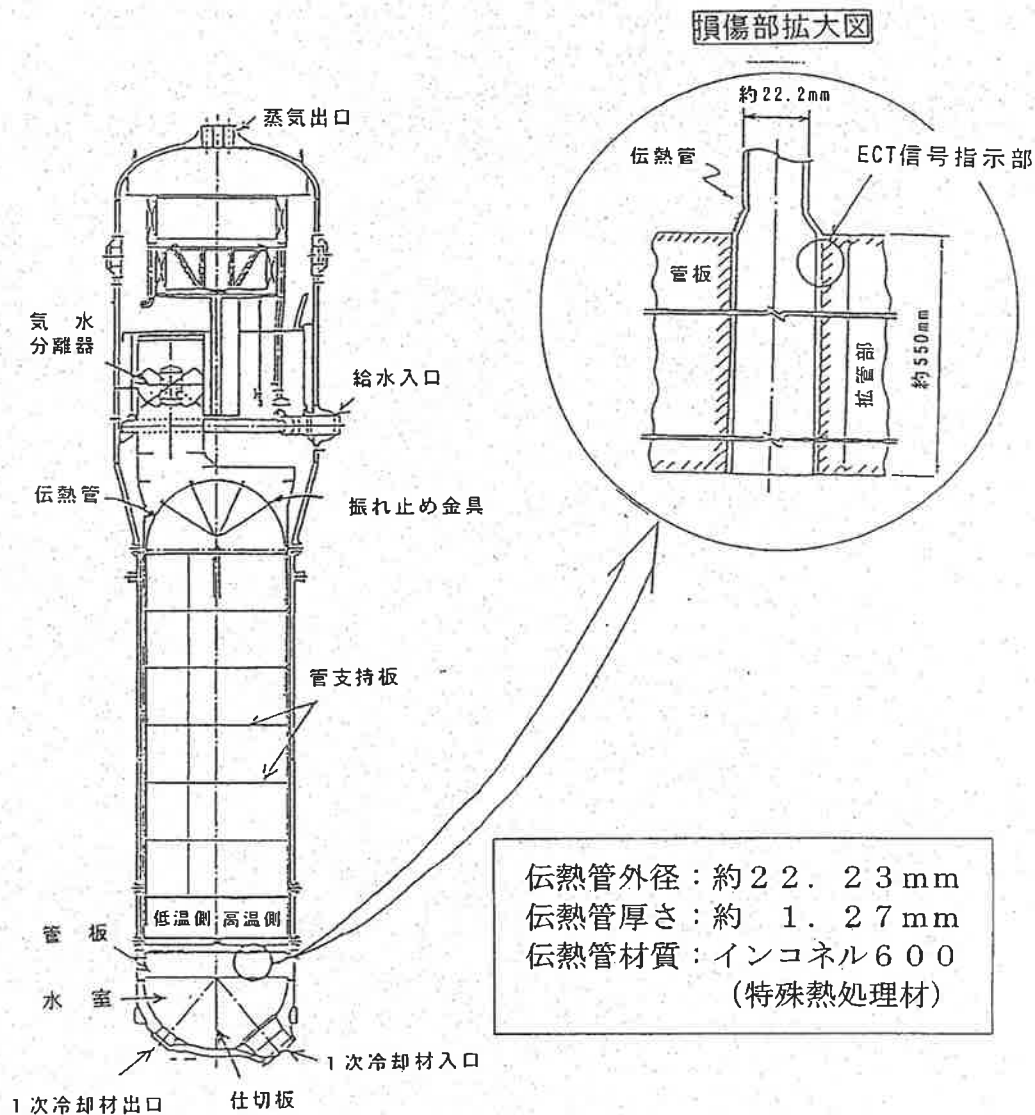
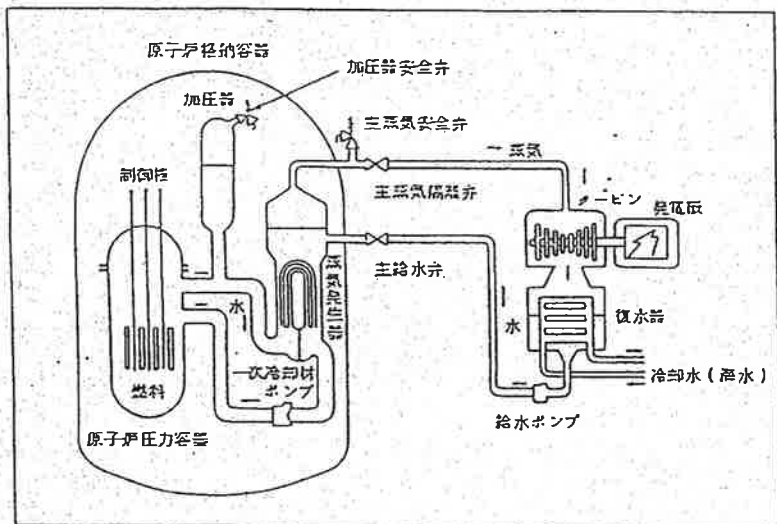
蒸気発生器	A	B	C	合計
今回施栓本数	0	0	4	4
既施栓本数	17	9	5	31
総施栓本数	17	9	9	35
施栓率 (%)	0.5	0.3	0.3	0.3

以 上

添 付 資 料

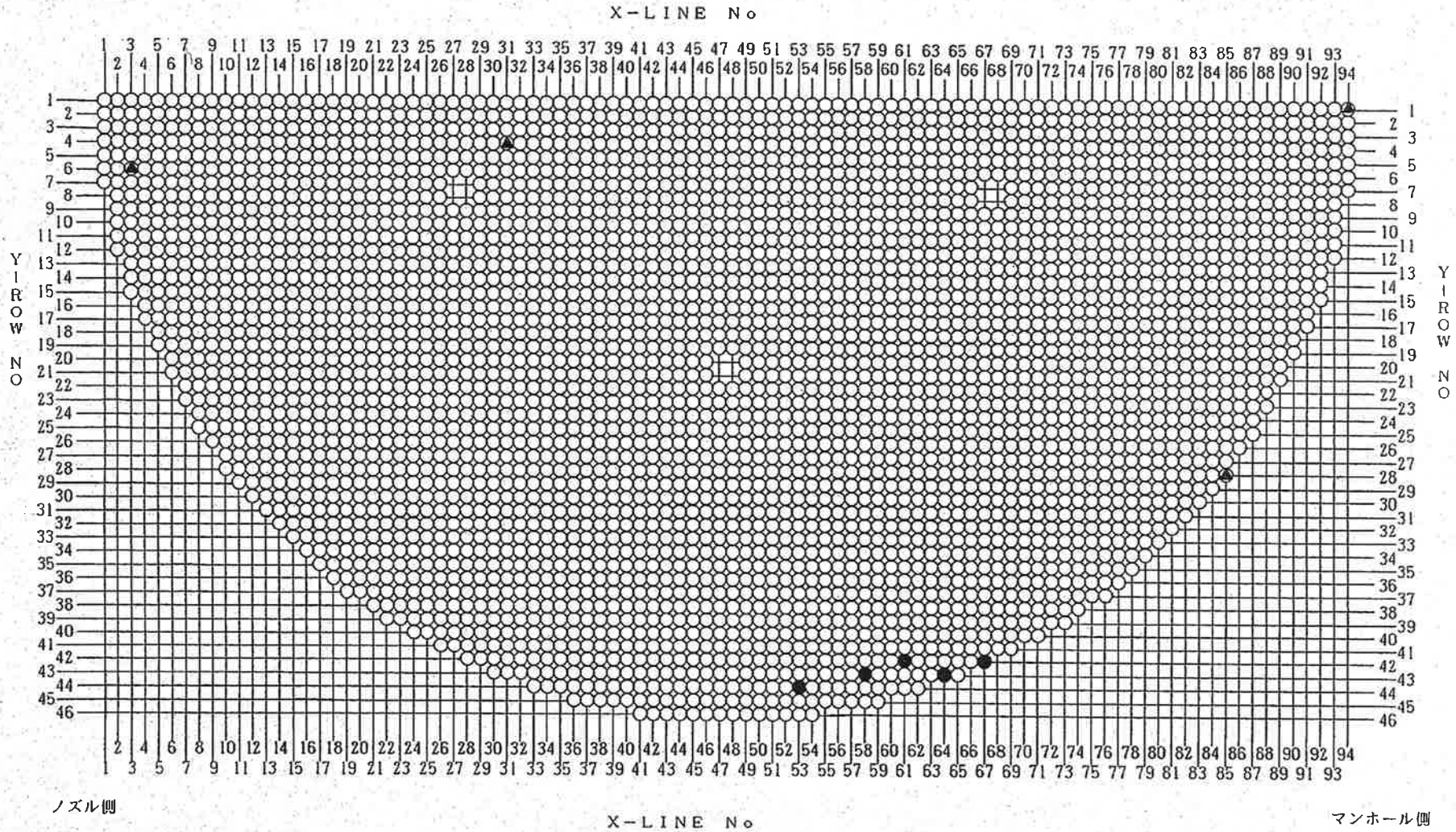
1. 蒸気発生器伝熱管損傷発生箇所概要図
2. 蒸気発生器伝熱管損傷位置を示す図
3. ECT信号波形と指示位置推定図
4. 抜管調査結果 (外観観察)
5. 抜管調査結果 (浸透探傷試験)
6. 抜管調査結果 (断面マイクロ観察)
7. 抜管調査結果 (材料分析)
8. 管板拵管部損傷要因の検討
9. 模擬RCS水中SCC試験結果
10. 改良加速SCC試験 (定荷重試験)
11. ポリチオン酸試験結果
12. 管板管穴内径調査結果
13. 手入れによる部分的な管板管穴のわずかな拡大
14. 実機におけるPWSCC発生時間評価
15. 伝熱管補修方法

蒸気発生器伝熱管損傷発生箇所概要図



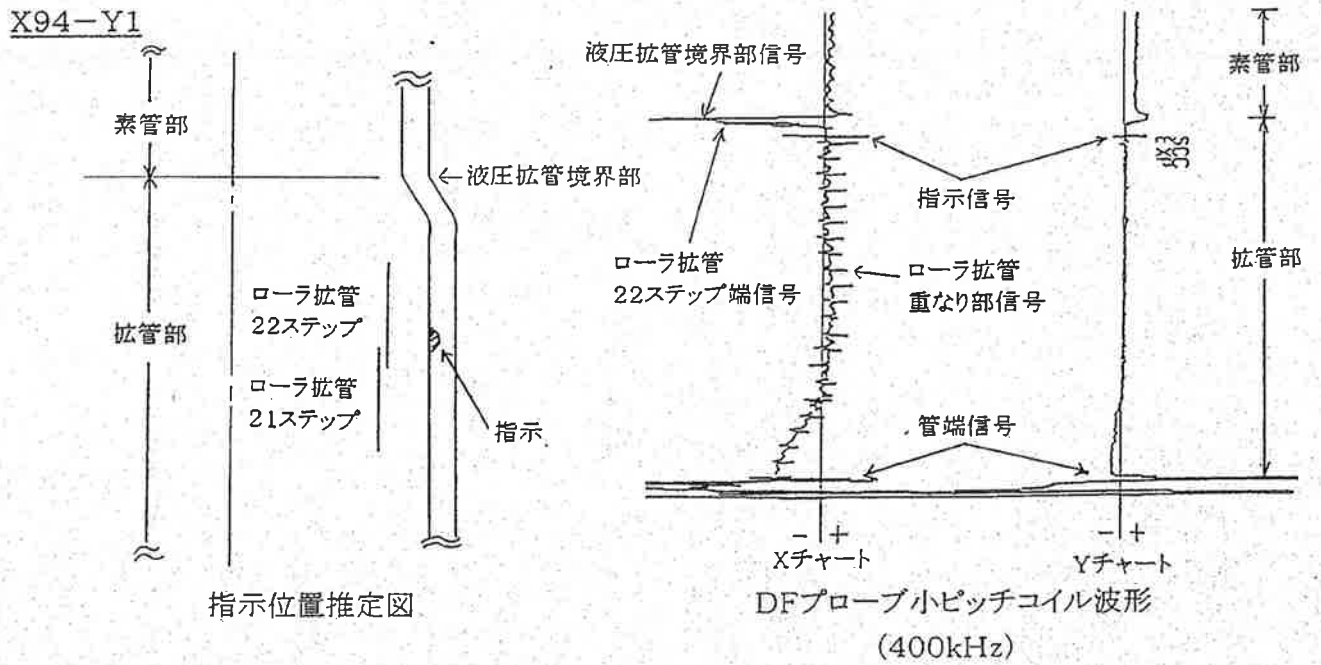
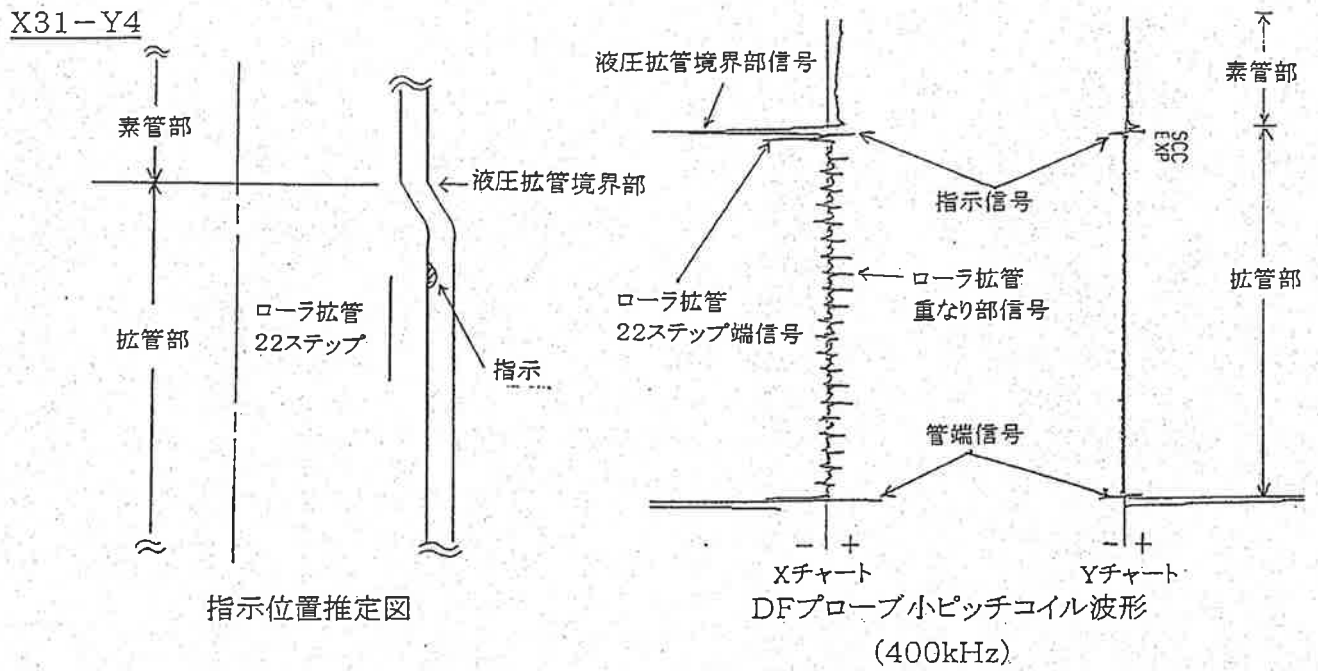
蒸気発生器伝熱管損傷位置を示す図
C - 蒸気発生器高温側

- ▲ : 今回損傷位置
- : 既往取付位置

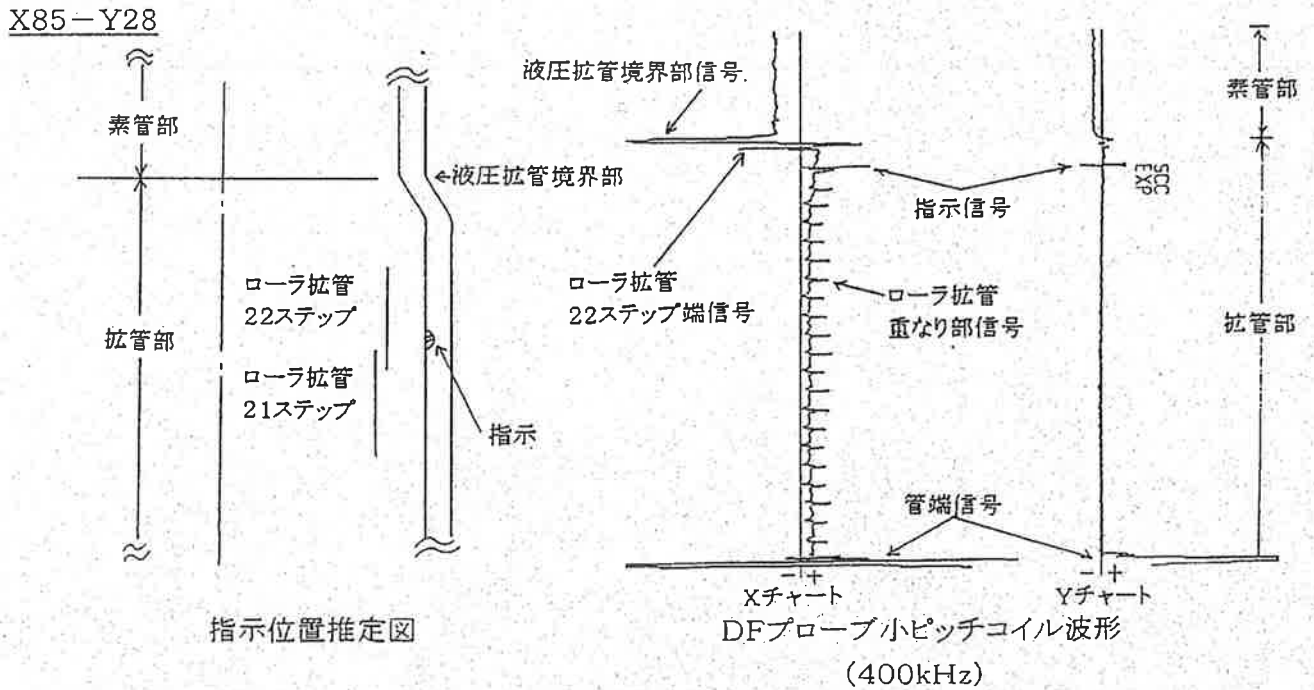
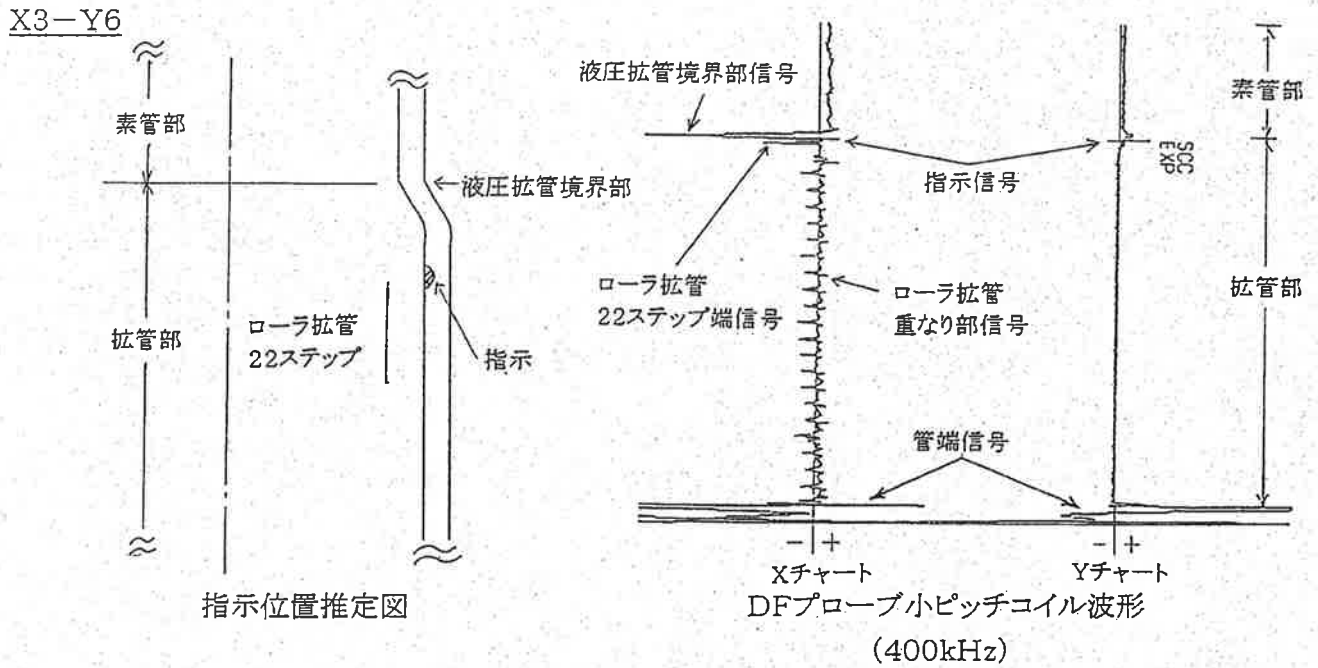


(1) 本図は蒸気発生器上部から見た位置を表す。

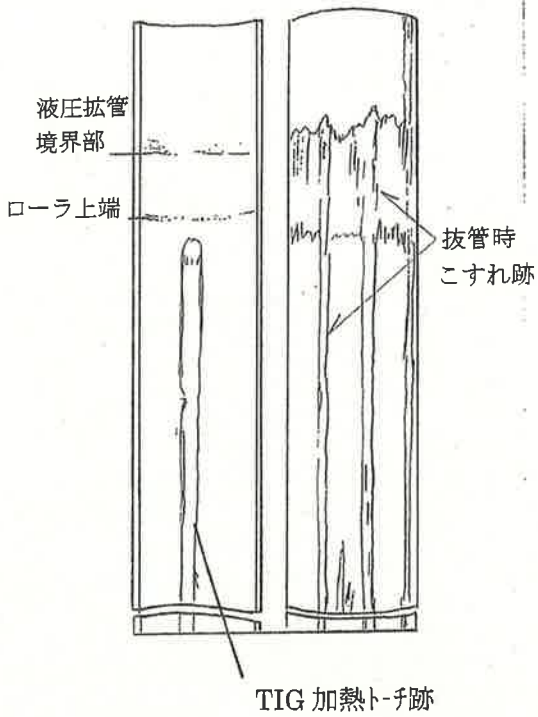
ECT信号波形と指示位置推定図



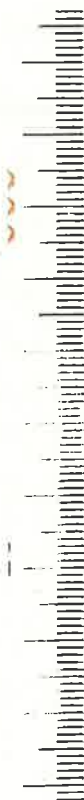
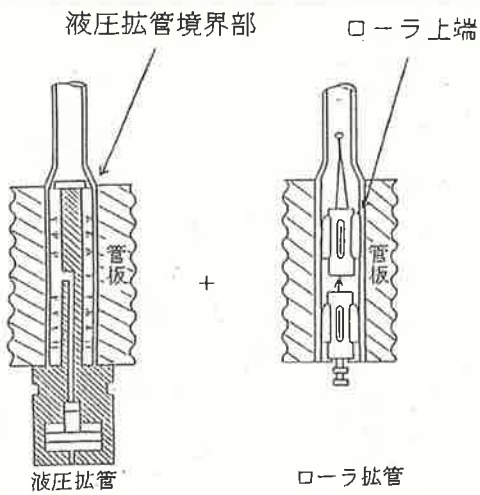
ECT信号波形と指示位置推定図



管内面 管外面
 90° 180° 270° 90° 0° 270°
 | | | | | |

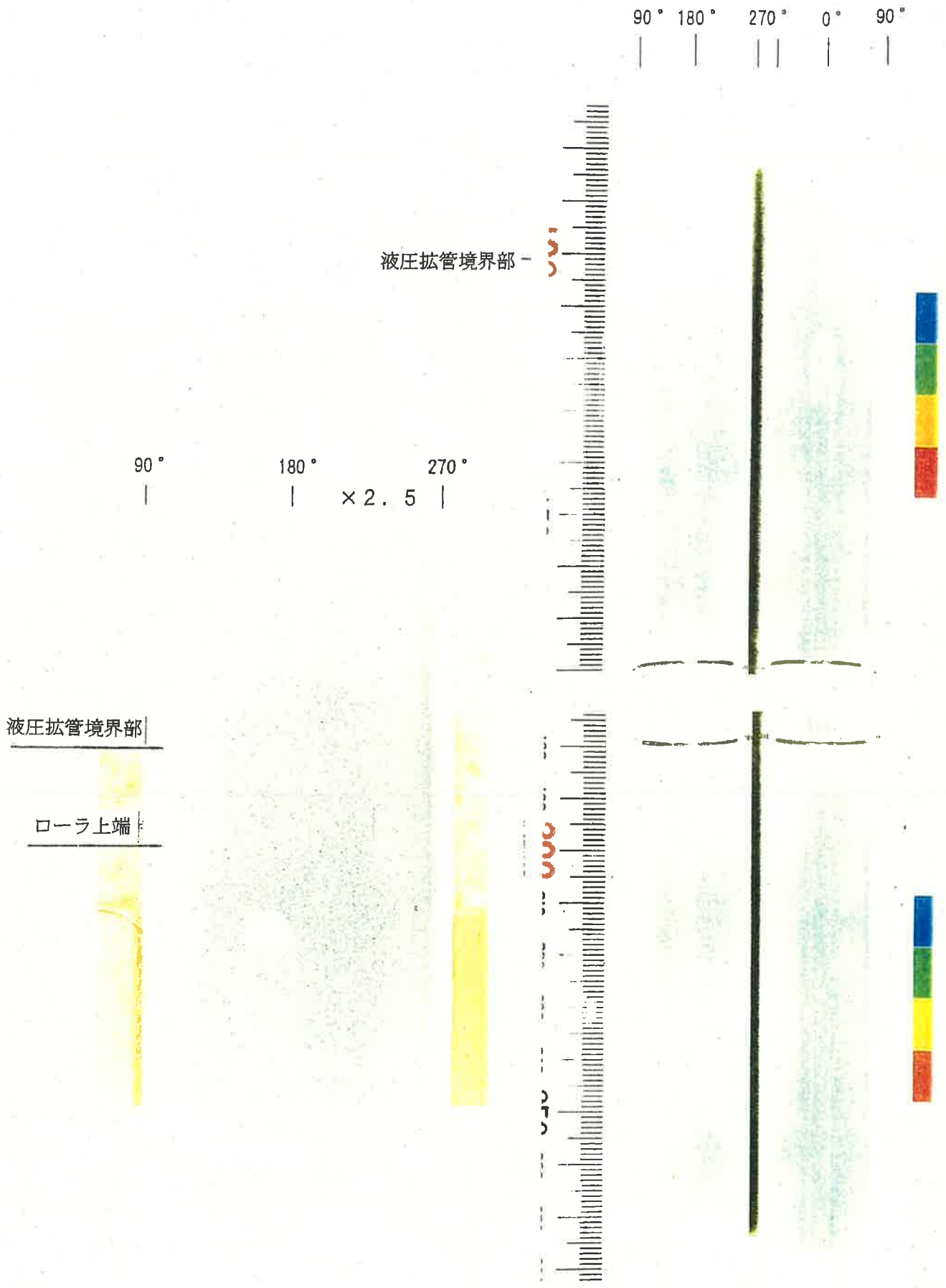


- 液圧拡張境界部
- ローラ上端
- 22ピッチ
- 21ピッチ
- 20ピッチ

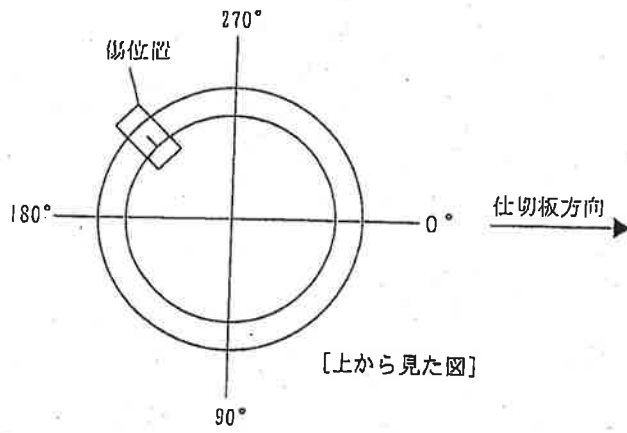


- 19ピッチ
- 18ピッチ
- 17ピッチ
- 16ピッチ

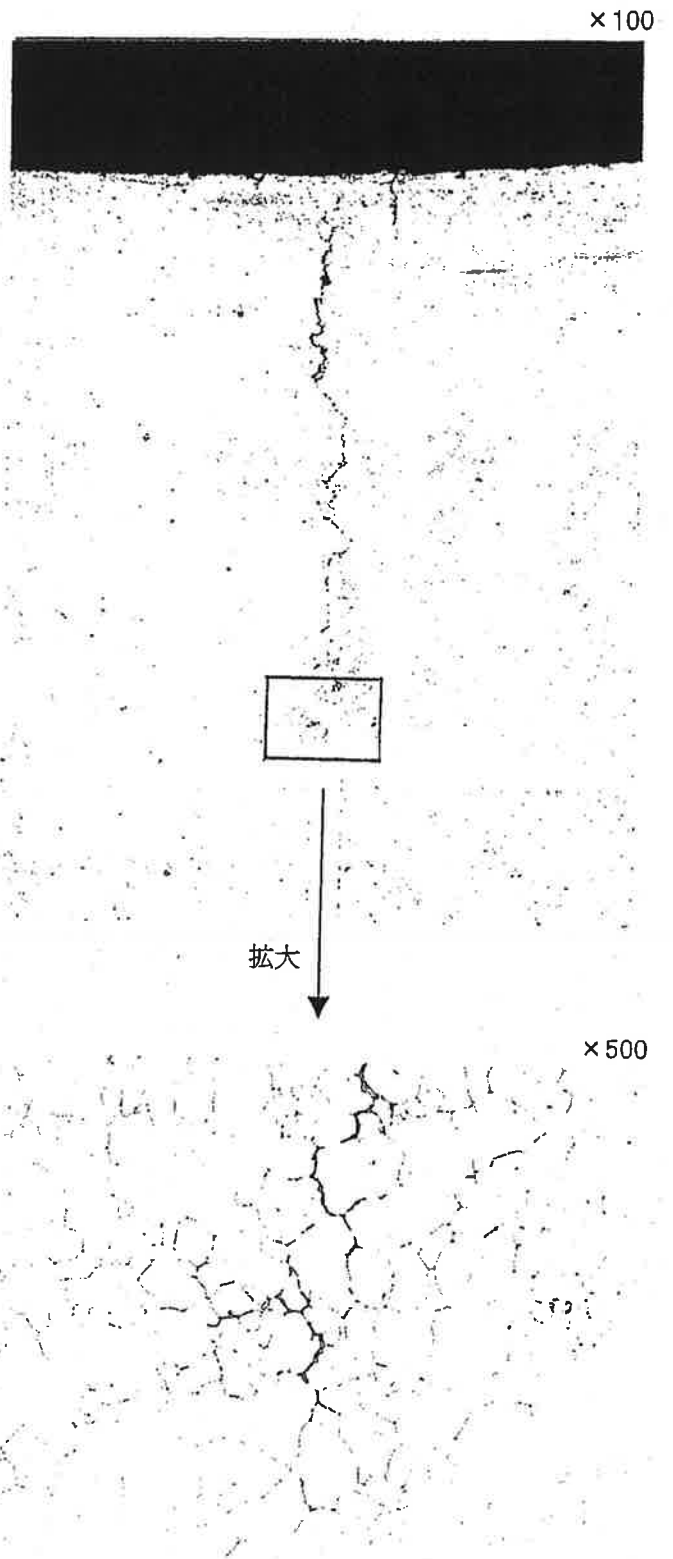
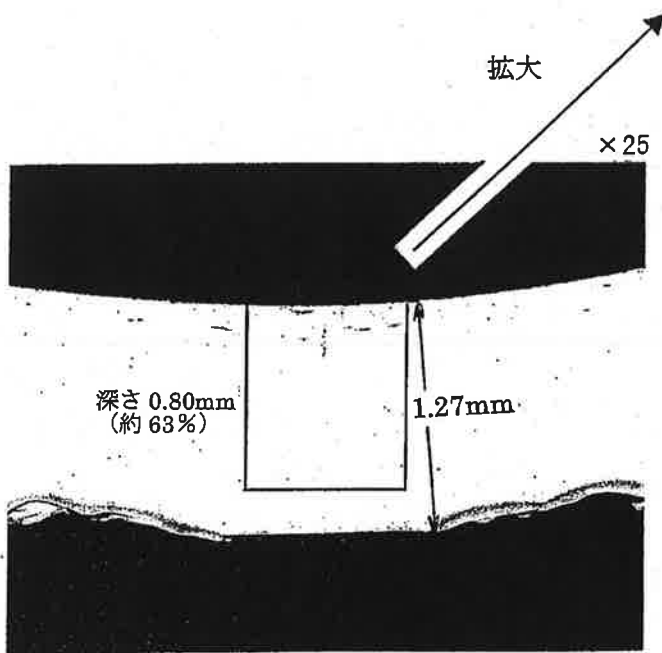
抜管調査結果 (外観観察)



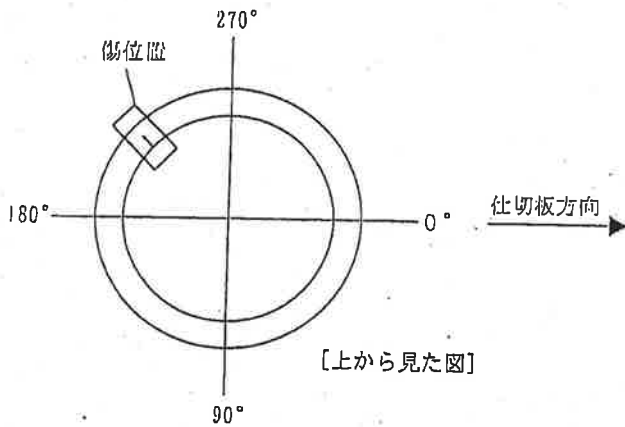
抜管調査結果 (浸透探傷試験)



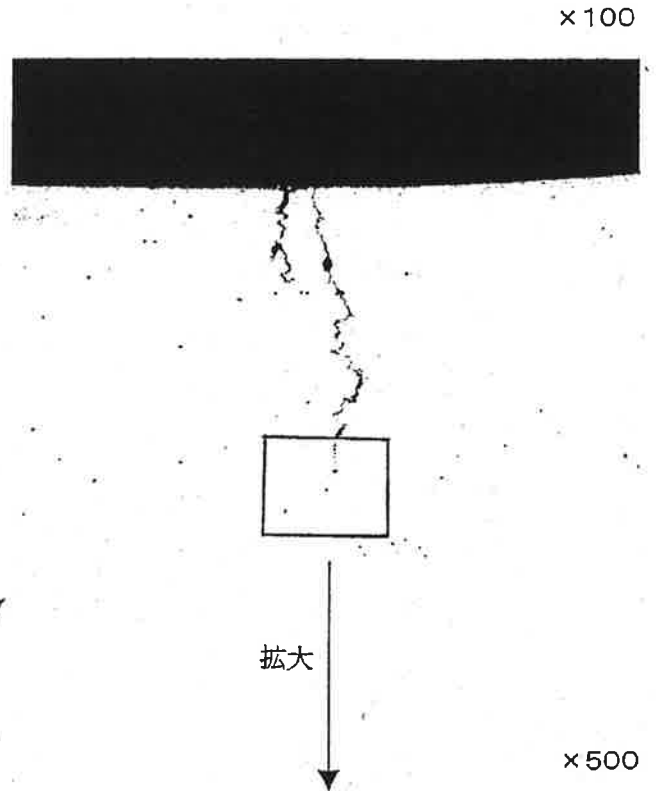
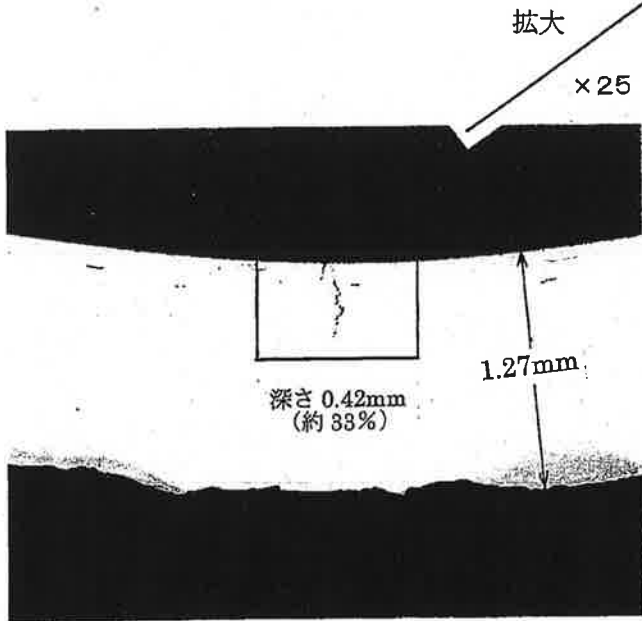
観察位置は傷中央部



抜管調査結果 (断面ミクロ観察)



観察位置は傷中央部から更に追い込んだ部位



抜管調査結果 (断面マイクロ観察)

抜管調査結果（材料分析）

成分分析結果

供 試 管	化 学 成 分 (%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Cu	Al	Ti	Ni
C-SG, X31-Y4	0.029	0.46	0.30	0.009	0.001	16.1	8.09	0.011	0.14	0.25	74.8
規 格 値 〔 ASTM B163 UNS NO6600 〕	≦0.15	≦0.5	≦1.0	-	≦0.015	14.0 ~17.0	6.0 ~10.0	≦0.5	-	-	≧72.0

化学成分	分 析 方 法
C	JIS G1211 高周波誘導加熱炉燃焼-赤外線吸収法
Si	JIS G1212 モリブドけい酸青吸光光度法
Mn	JIS G1213 過よう素酸ナトリウム酸化吸光光度法
P	JIS G1214 モリブドリん酸青吸光光度法
S	JIS G1215 燃焼-高周波誘導加熱赤外線吸収法
Cr	JIS G1217 過マンガン酸カリウム酸化過マンガン酸カリウム滴定法
Fe	JIS G1258 誘導結合プラズマ発光分光分析法
Cu	JIS G1258 誘導結合プラズマ発光分光分析法
Al	JIS G1258 誘導結合プラズマ発光分光分析法
Ti	JIS G1258 誘導結合プラズマ発光分光分析法
Ni	JIS G1216 NI分離後EDTA滴定法

拔管調査結果 (材料分析)

結晶粒度測定結果

	C - S G X31 - Y4
	結晶粒度番号
1	9.1
2	9.3
3	8.9
4	9.3
5	9.0
6	9.0
7	9.6
8	8.9
9	8.9
10	8.9
平均	9.1

代表的視野 (×100)



抜管調査結果 (材料分析)

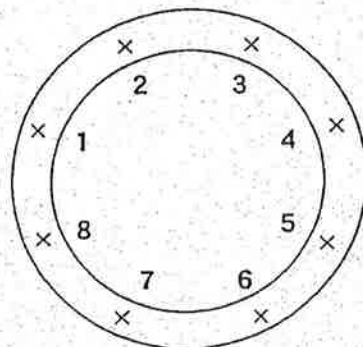
かたさ測定結果

	C - SG X31-Y4
1	174
2	177
3	176
4	178
5	176
6	180
7	178
8	179
範囲	174~180
平均	177

(ロックウェル硬さ換算 : 86.4)

(参考) 規格値 : ロックウェル硬さ92以下 [JIS G4904(1970)]

(注) 1991年硬さ制限撤廃



ビッカースかたさ

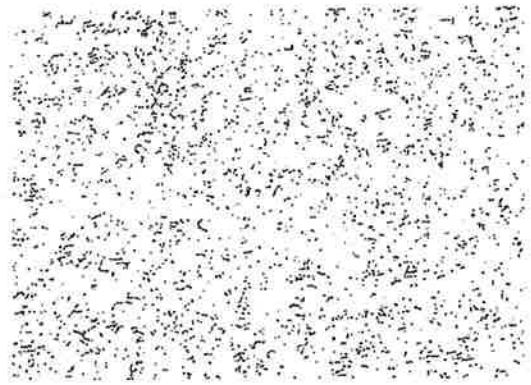
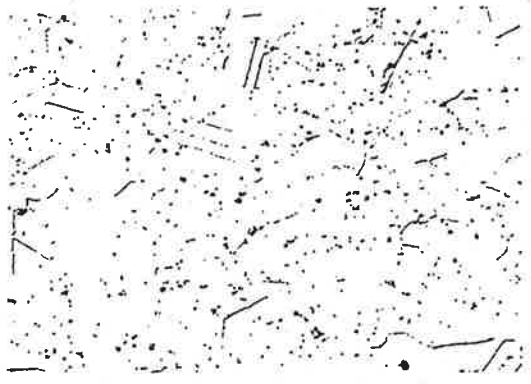
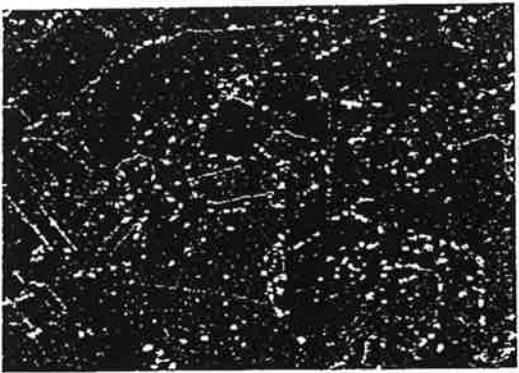
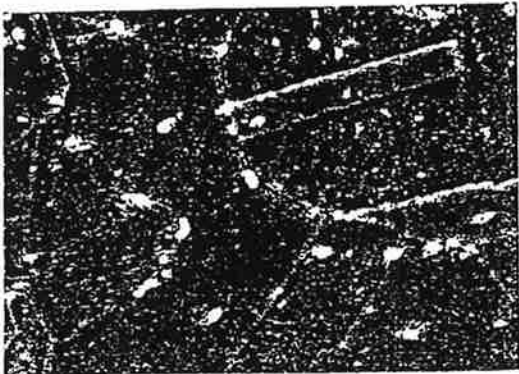
荷重 : 1Kg

測定条件

測定位置

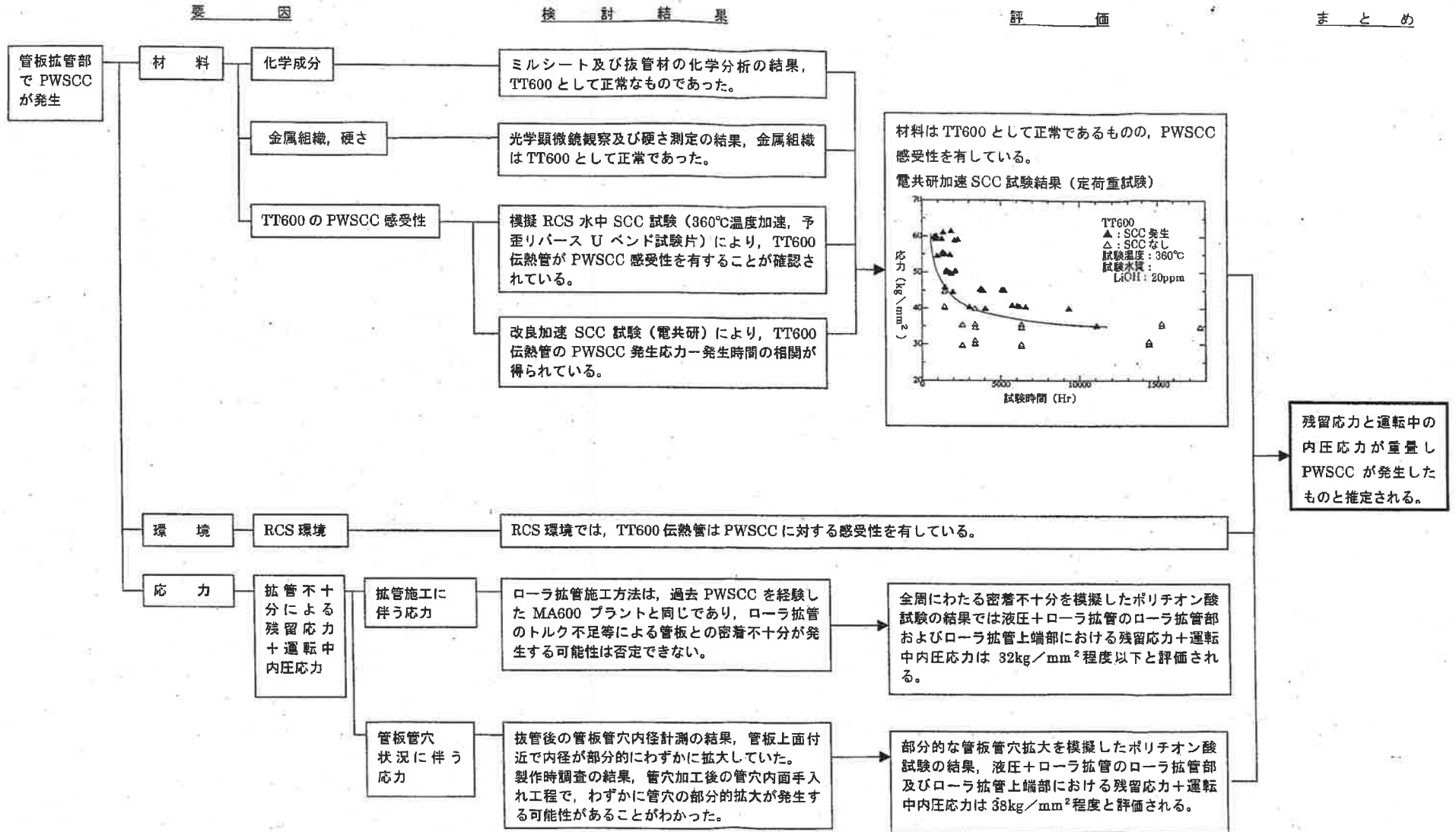
抜管調査結果 (材料分析)

金属組織観察結果

供試管	観察方法	観察倍率	金属組織
C-SG	光学顕微鏡	×100	
		×500	
X31-Y4	SEM	×1000	
		×4500	

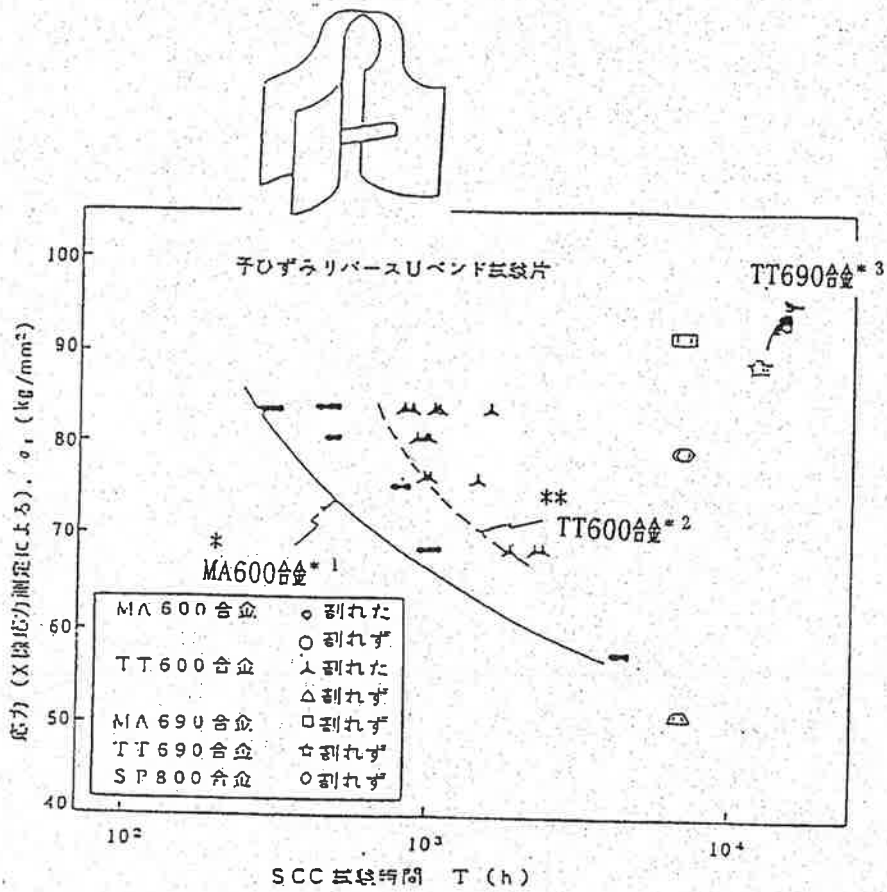
管板 拡管部 損傷 要因 の 検討

ま と め



残留応力と運転中の内圧応力が重畳し PWSCC が発生したものと推定される。

模擬RCS水中SCC試験結果



注*1 : MA600合金・イコネル600合金

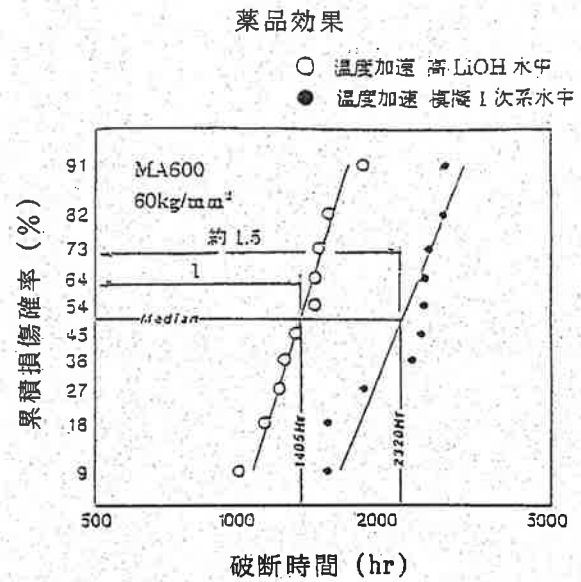
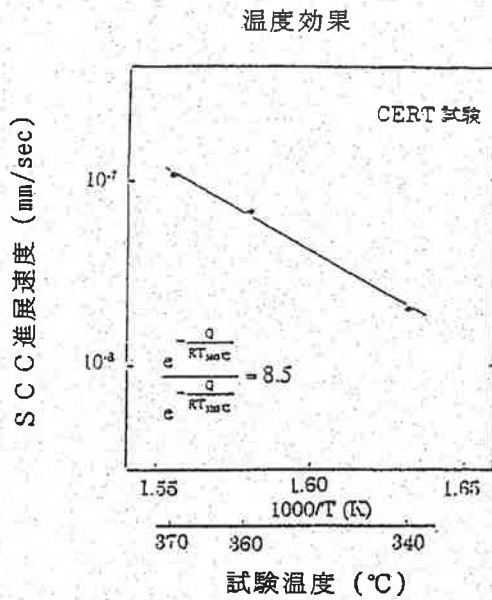
*2 : TT600合金・イコネル600合金 (特殊熱処理)

*3 : TT690合金・イコネル690合金 (特殊熱処理)

出典 : 通産省高経年化対策報告書

改良加速 SCC 試験 (定荷重試験)

①改良加速試験方法の妥当性



実機環境

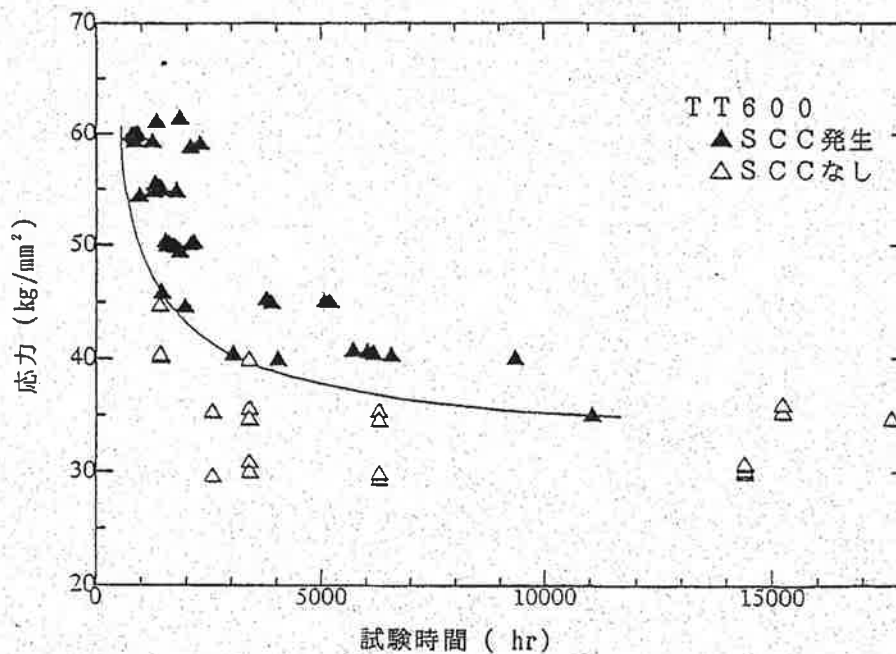
- ・ 温度: 約 320°C (高温側) →
- ・ 水質: 2 ppm LiOH

加速環境

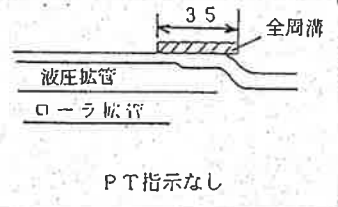
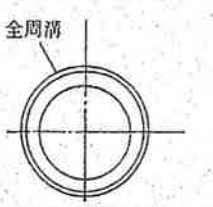
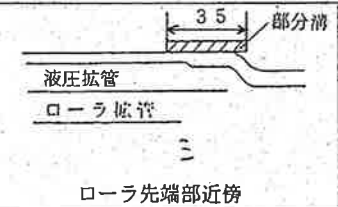
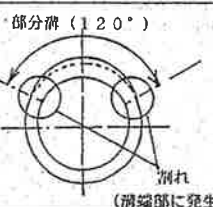
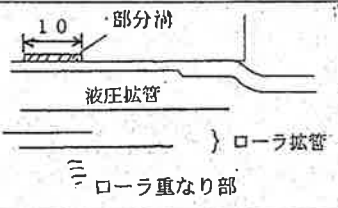
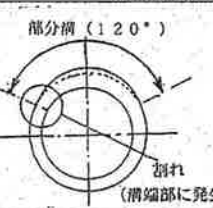
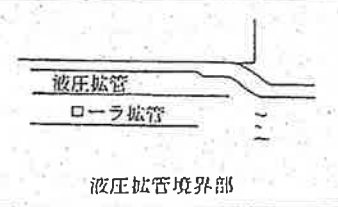

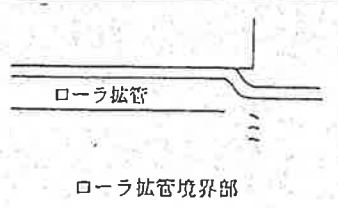
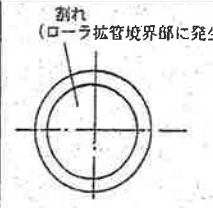
- ・ 温度: 360°C
- ・ 水質: 20 ppm LiOH

$8.5 \times 1.5 = \text{約} 13 \text{ 倍}$

②改良加速試験による定荷重試験

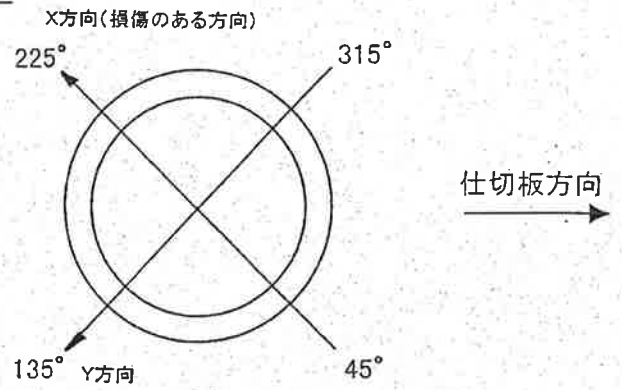


ポ リ チ オ ン 酸 試 験 結 果

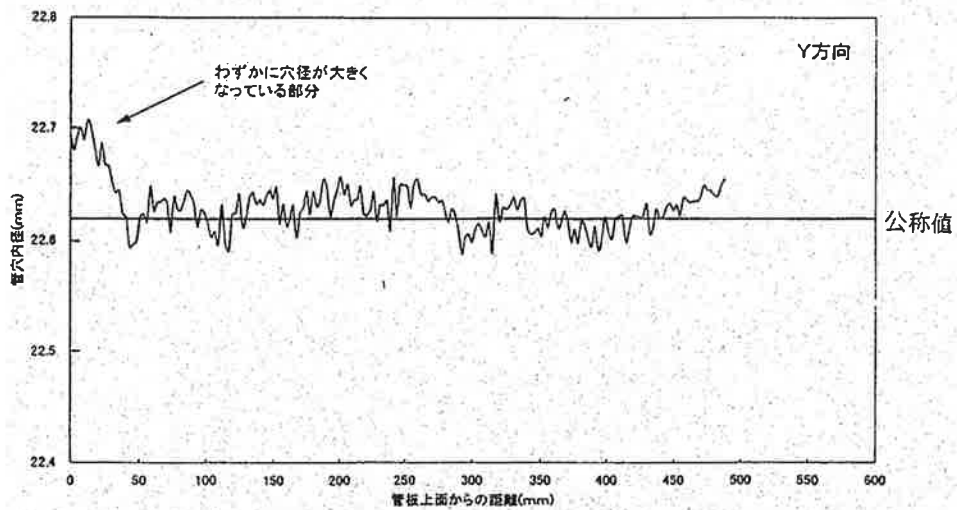
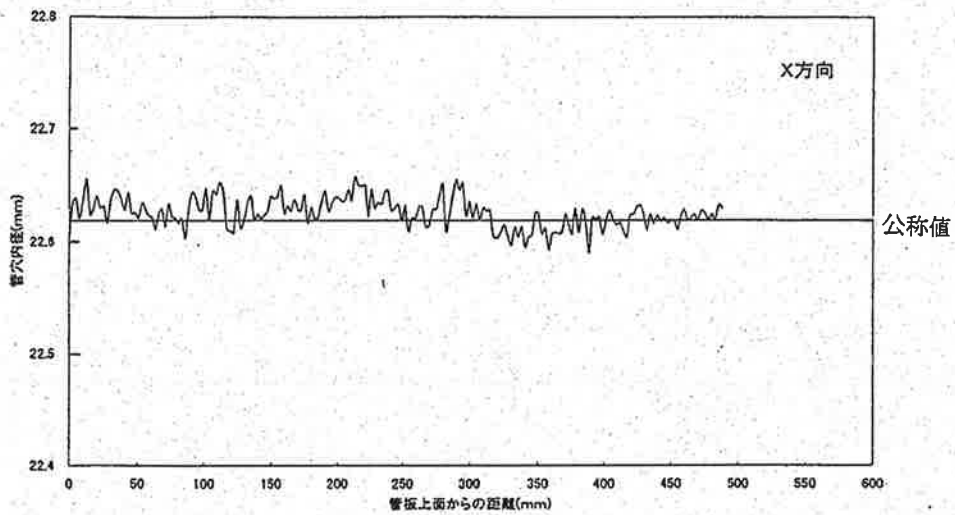
モデル	拡管法	管穴形状	PT指示時間 (Hr)	PT指示位置	PT指示位置 推定応力 σ (kg/mm ²)	
ローラ拡管不良を模擬したモデル	液圧拡管 + ローラ拡管	ローラ先端部近傍に 0.05mm 深さ、軸長さ 35mm の全周溝	1.7 Hr で指示なし			3.2 以下
部分的な管板管穴拡大を模擬したモデル	液圧拡管 + ローラ拡管	ローラ先端部近傍に 0.1mm 深さ、軸長さ 35mm の 1/3 周溝	1.3.5 ~ 1.4.5			~ 3.8
		ローラ拡管重なり部に 0.1mm 深さ、軸長さ 10mm の 1/3 周溝	1.3.5 ~ 1.4.5			~ 3.8
正常拡管モデル (参考)	液圧拡管 + ローラ拡管	溝なし	1.9 ~ 2.0			~ 3.0
	ローラ拡管	溝なし	1.0 ~ 1.1			~ 4.5

管板管穴内径調査結果

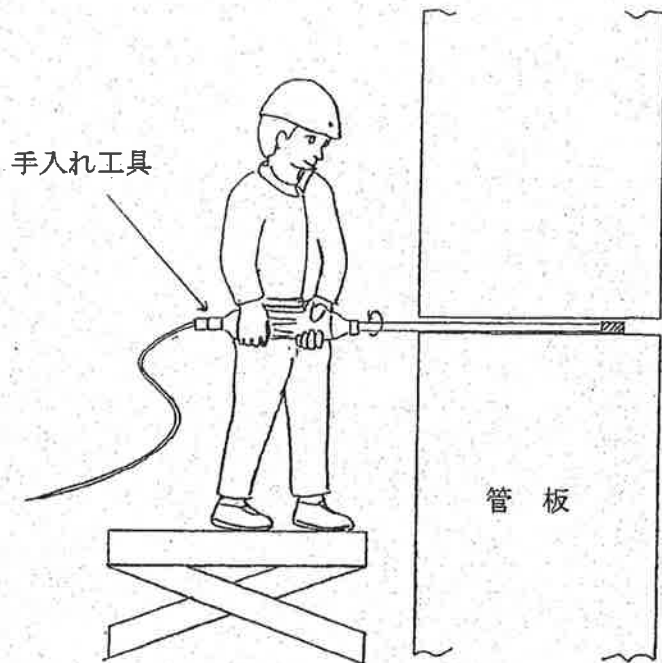
上から見て



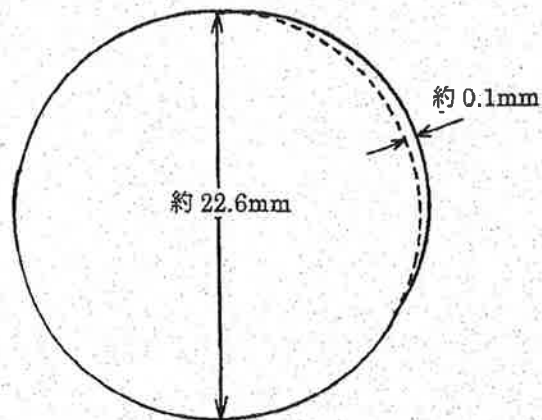
ひずみゲージ式内径計測装置による計測



(注) 微少な変動は、実機管板管穴の抜管後の
こすれ跡、付着物等と推定される。

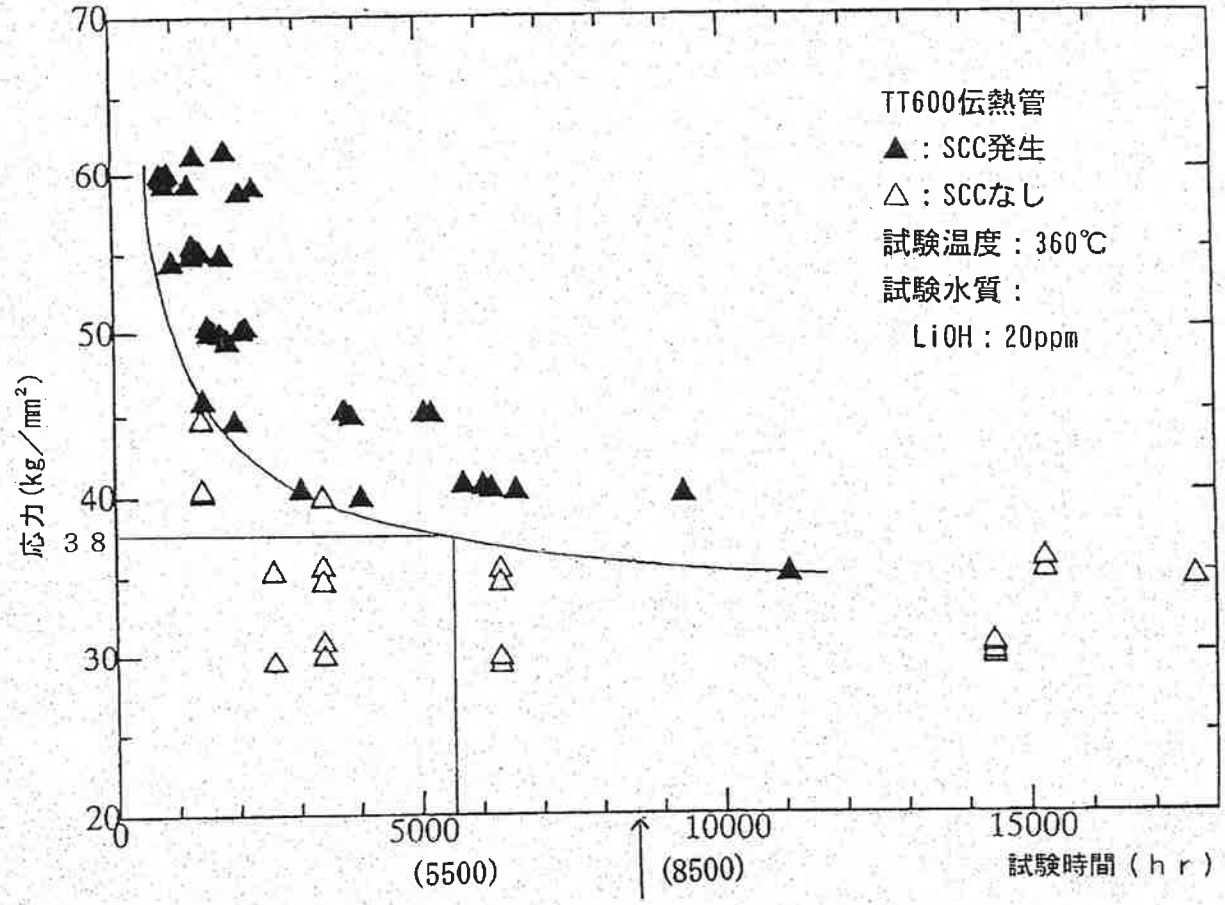


管板管穴手入れ作業状況



手入れによる部分的な管板管穴のわずかな拡大

実機におけるPWSCC発生時間評価



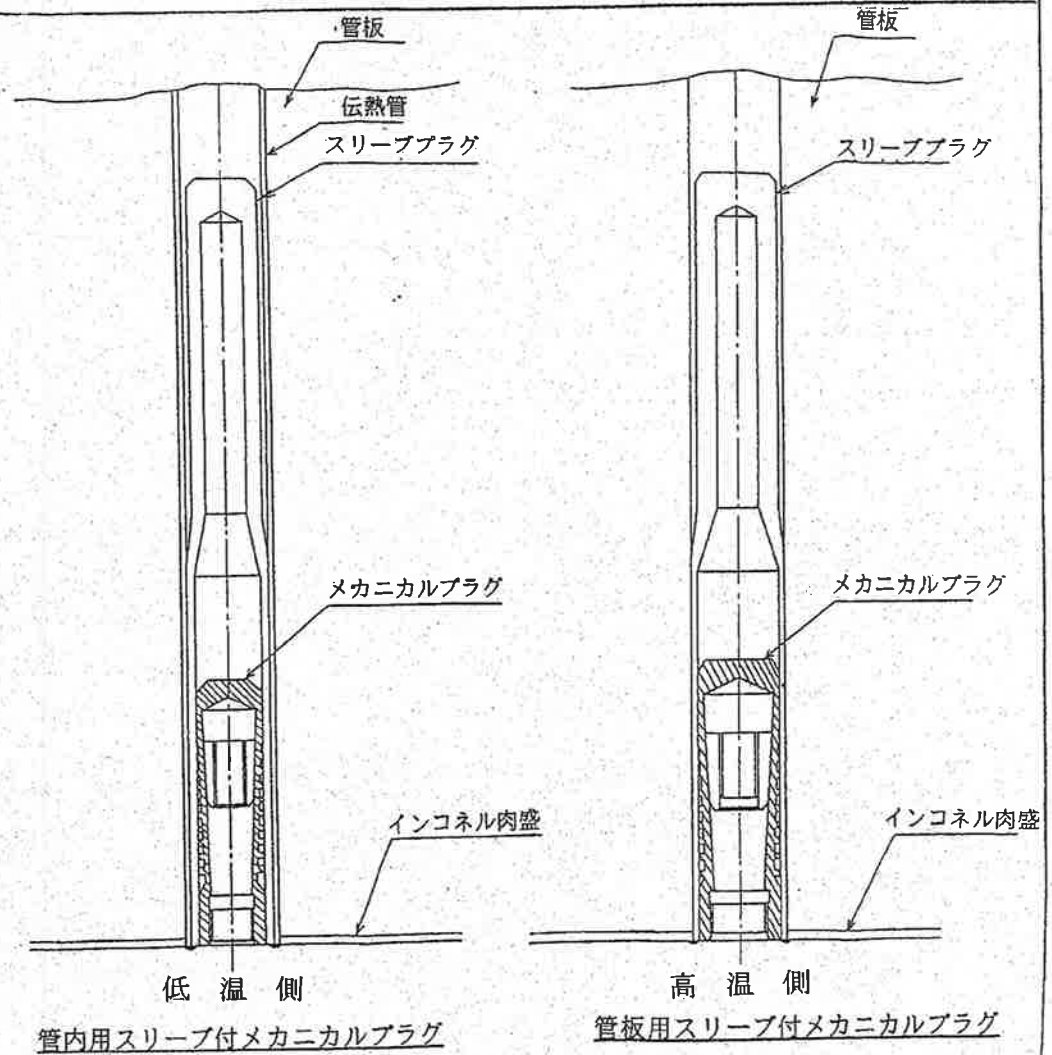
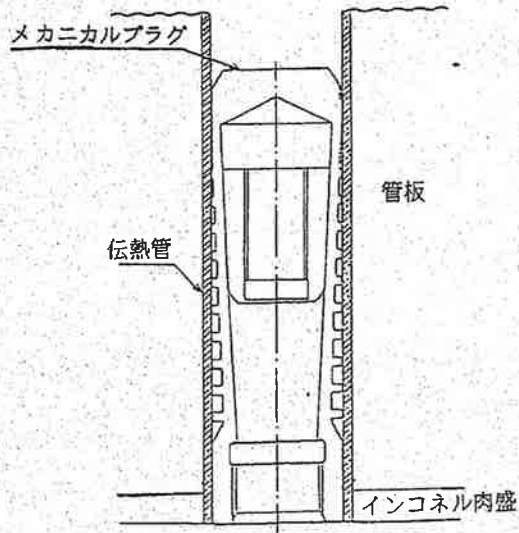
高浜4号機の運転時間相当 (実運転時間 : 約10.9万時間)

応力 3.8 kg/mm²での実機運転時間相当 約70,000時間 = 5500 × 8.5 (温度加速) × 1.5 (LiOH加速)

伝熱管補修方法

伝熱管番地：X94-Y1、X3-Y6、X85-Y28
 材 料：インコネル690合金

伝熱管番地：X31-Y4
 材 料：インコネル690合金



高浜発電所 3号機

蒸気発生器伝熱管の抜管調査結果について

平成12年4月

関西電力株式会社

1. 抜管調査

蒸気発生器伝熱管の損傷データ充実のため、有意な信号指示が認められた伝熱管のうち、B-蒸気発生器の1本について抜管調査を実施した。（添付資料1）

	伝熱管番地	調査対象部位
B-蒸気発生器	X 8 5 - Y 2 8	高温側管板部

(1) 外観観察

伝熱管管板部の内外表面を観察した結果、渦流探傷検査で有意な信号指示が認められた管板上面付近の外表面では、抜管時に生じたこすれ跡以外に、部分的なスケール付着、2次側水の浸入跡が認められた。

また、内表面においては液圧拡張境界部、ローラ拡張上端部及び重なり部を示す色調変化が認められた。（添付資料2）

(2) 浸透探傷試験

浸透探傷試験の結果、管板上面より約30mm下方に長さ約4mm及び約2mmの軸方向指示、また、約56mm下方に長さ約4mmの軸方向指示が認められた。

これらは渦流探傷検査で認められた有意な信号指示の位置に対応していた。

（添付資料3）

(3) 断面ミクロ観察

損傷部断面の光学顕微鏡観察の結果、損傷はいずれも管内表面を起点とした1次側からの応力腐食割れ（PWSCC^(注)）であることが確認された。

また、損傷の最大深さは管板上面より約30mm下方の長さ約4mmのもので約0.76mm（管肉厚の約60%）、長さ約2mmのもので約0.39mm（管肉厚の約31%）、管板上面より約56mm下方長さ約4mmのもので約0.65mm（管肉厚の約51%）であった。（添付資料4）

（注）PWSCC：Primary Water Stress Corrosion Cracking

(4) 材料分析

化学成分、結晶粒度、硬さ及び金属組織の調査結果、異常は認められなかった。

（添付資料5）

(5) 管板管穴内径計測

管板管穴内径計測の結果、損傷部付近で管板管穴内径が公差内であるものの、わずかに拡大（約0.05mm）している傾向が認められた。（添付資料6）

2. PWSCCの発生要因の検討

(添付資料7・8)

2. 1 材料、環境の検討

TT^(注)600合金伝熱管は、PWR使用環境においてPWSCC発生に対する感受性を有していることが確認されている。

(注) TT: Thermal Treatment (耐食性改善のための特殊熱処理)

2. 2 応力の検討

(1) 抜管調査管の検討

抜管調査管では、伝熱管管板部の外表面観察結果より、2次側水の浸入跡があり、ローラ拡管による密着が不十分であったと考えられる。また、管板管穴に部分的なわずかな管穴拡大が認められた。

ローラ拡管重なり部における密着不十分を模擬する方法として拡管トルクを低下させて、以下の供試体を作成した。

- ・部分的な拡大管穴にローラ拡管(トルク不足)した供試体
- また、比較のため、以下の供試体を作成した。
- ・通常の管穴にローラ拡管(トルク不足)した供試体
- ・部分的な拡大管穴にローラ拡管(正常トルク)した供試体

これらを用いたポリチオン酸試験により、発生応力を検討した結果、拡大管穴供試体ではトルク不足の場合 373 N/mm^2 (38 kg/mm^2)程度、通常管穴供試体ではトルク不足の場合 353 N/mm^2 (36 kg/mm^2)程度となった。一方、拡大管穴供試体でも正常トルクの場合 314 N/mm^2 (32 kg/mm^2)以下となった。

したがって、ローラ拡管重なり部において、部分的に拡大した管穴にローラ拡管不十分が重畳した場合、及びローラ拡管不十分のみの場合、PWSCCが発生する可能性がある。

(2) 従来 of 知見

0.1mm程度の部分的な拡大管穴にローラ拡管(正常トルク)した場合、発生応力は 373 N/mm^2 (38 kg/mm^2)程度となり、PWSCCが発生する可能性がある。

3. 考察

TT600合金伝熱管の損傷原因は、伝熱管のローラ拡管に伴う管内面の局所的な残留応力と運転中内圧が相まったことにより、応力腐食割れが発生したものと推定される。

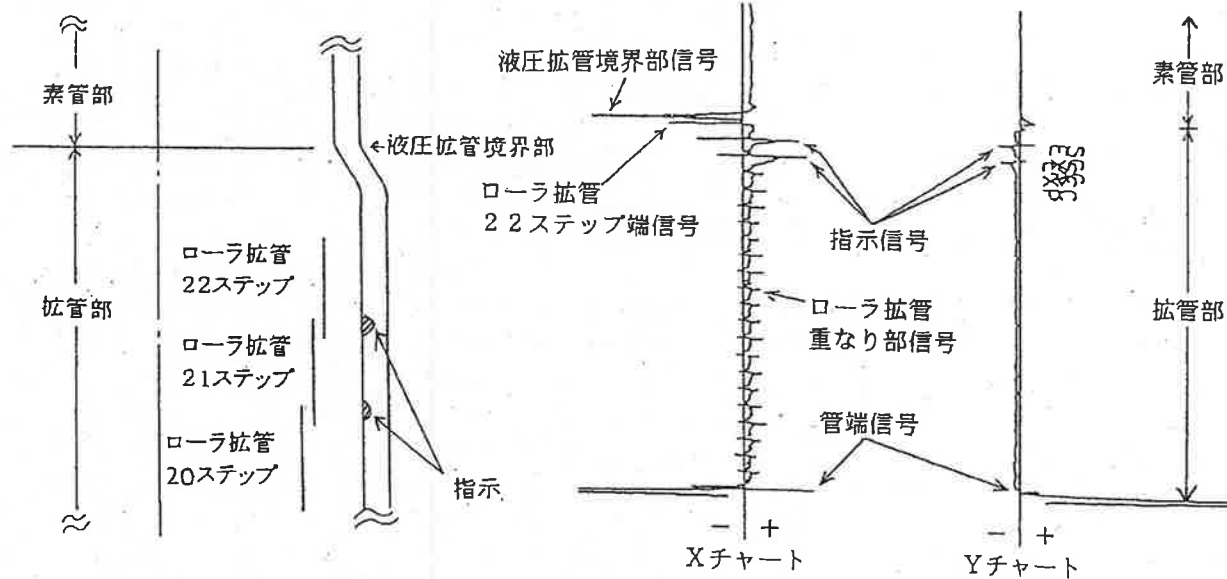
以 上

添 付 資 料

1. 渦流探傷検査信号波形と指示位置推定図
2. 抜管調査結果（外観観察）
3. 抜管調査結果（浸透探傷試験）
4. 抜管調査結果（断面ミクロ観察）
5. 抜管調査結果（材料分析）
6. 管板管穴内径計測結果
7. ポリチオン酸試験結果
8. 高浜3号機 蒸気発生器伝熱管損傷要因の検討

渦流探傷検査信号波形と指示位置推定図

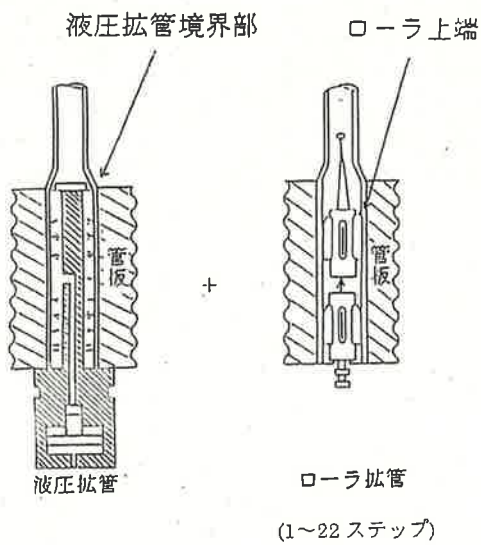
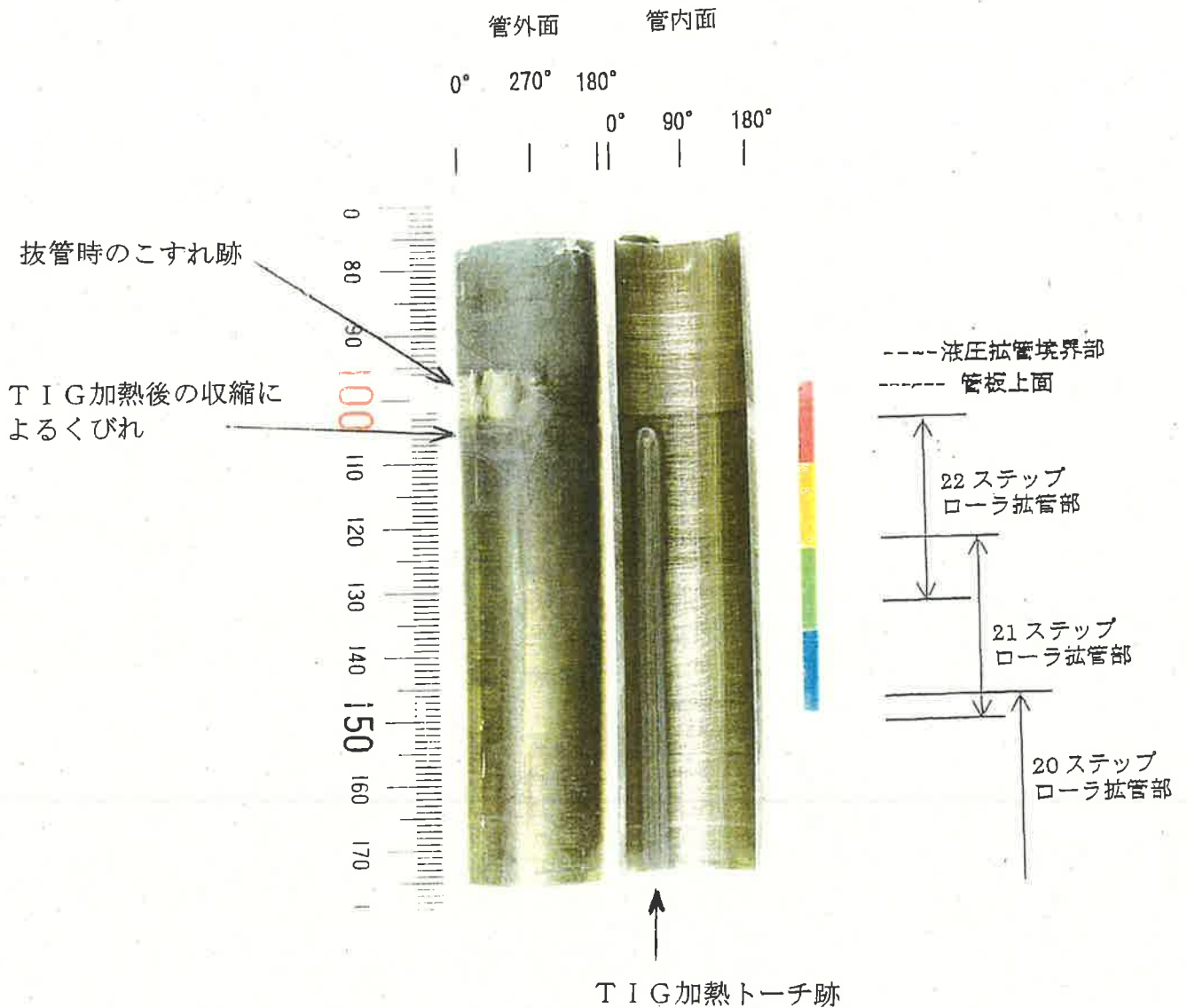
B号機X85-Y28



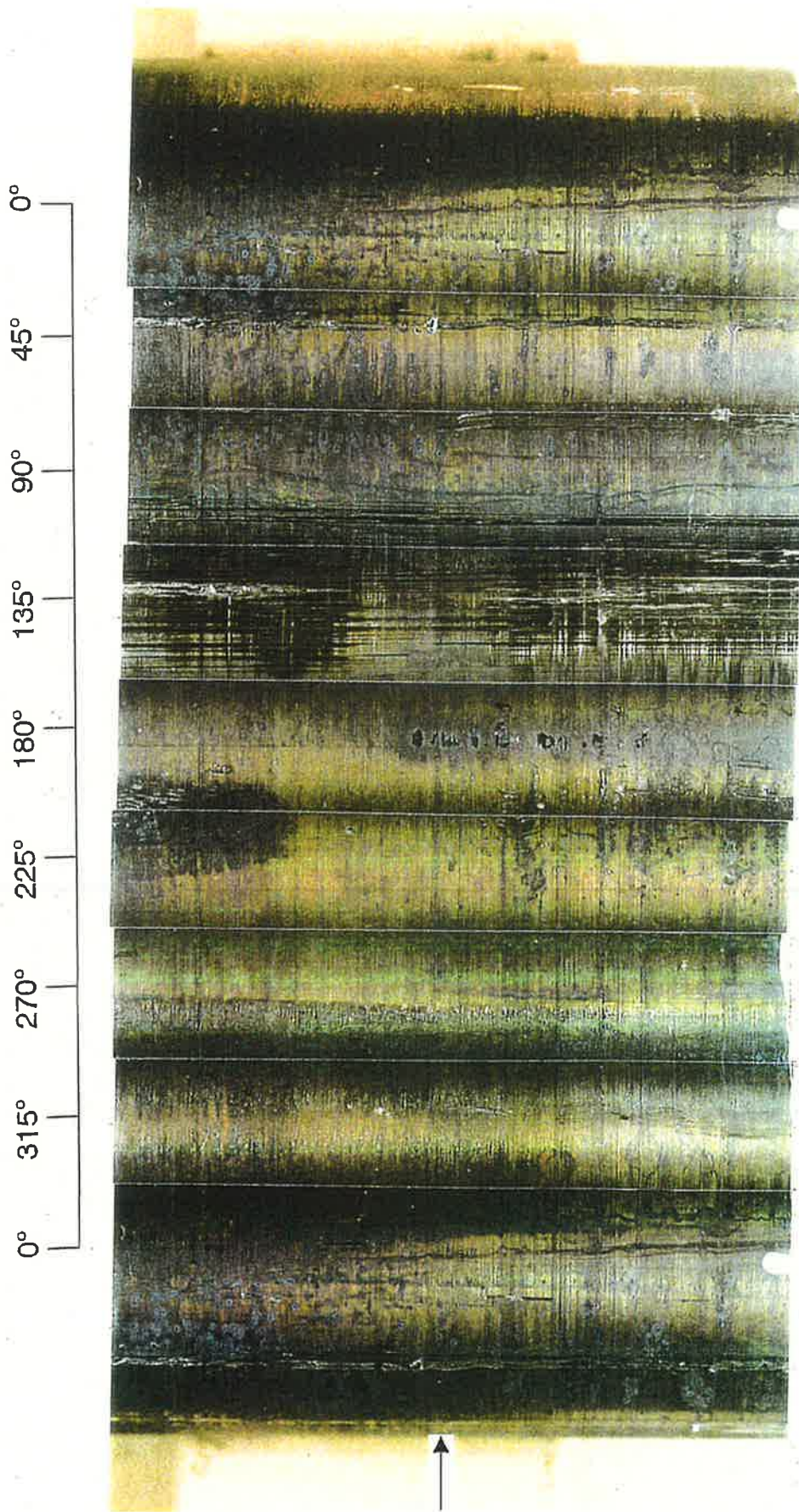
指示位置推定図

DFプローブ小ピッチコイル波形
(400kHz)

抜管調査結果 (外観観察)



抜管調査結果 (外観観察)

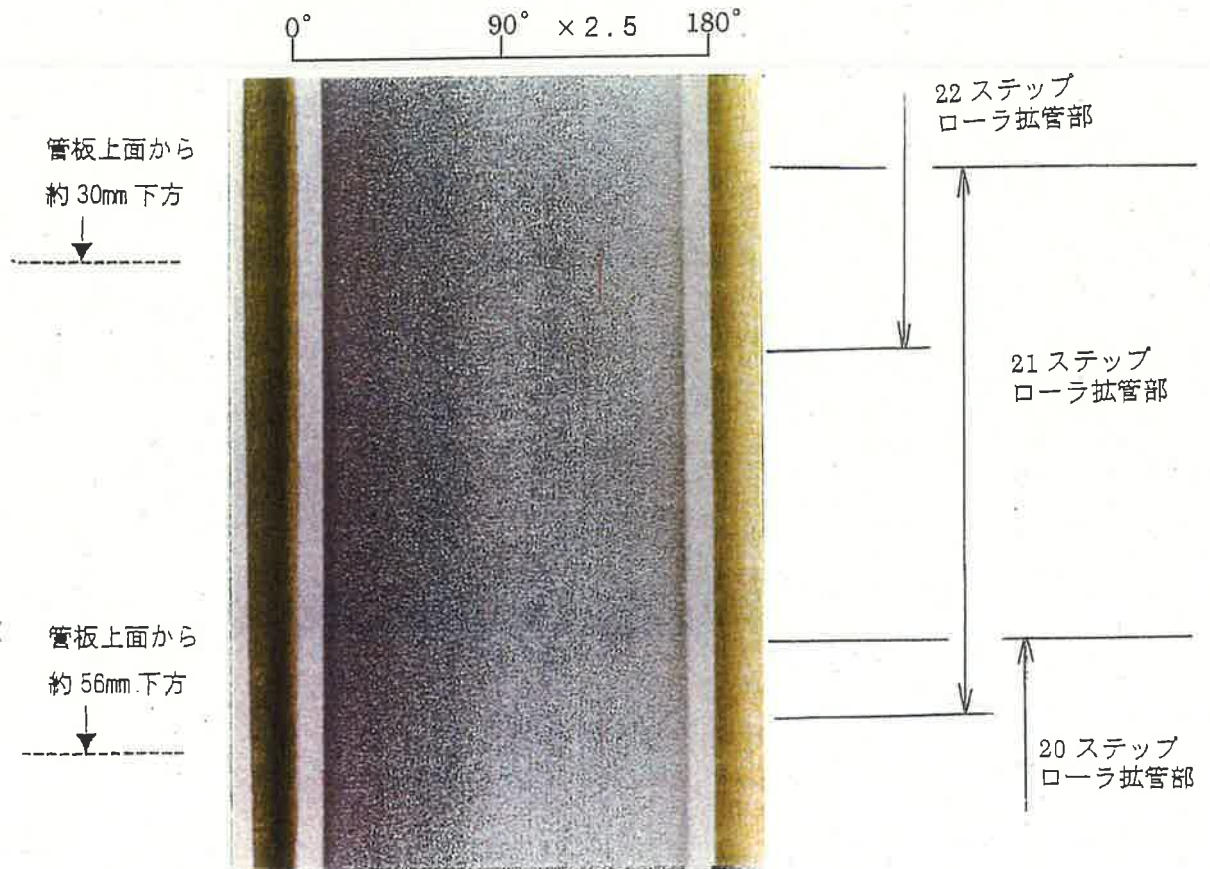
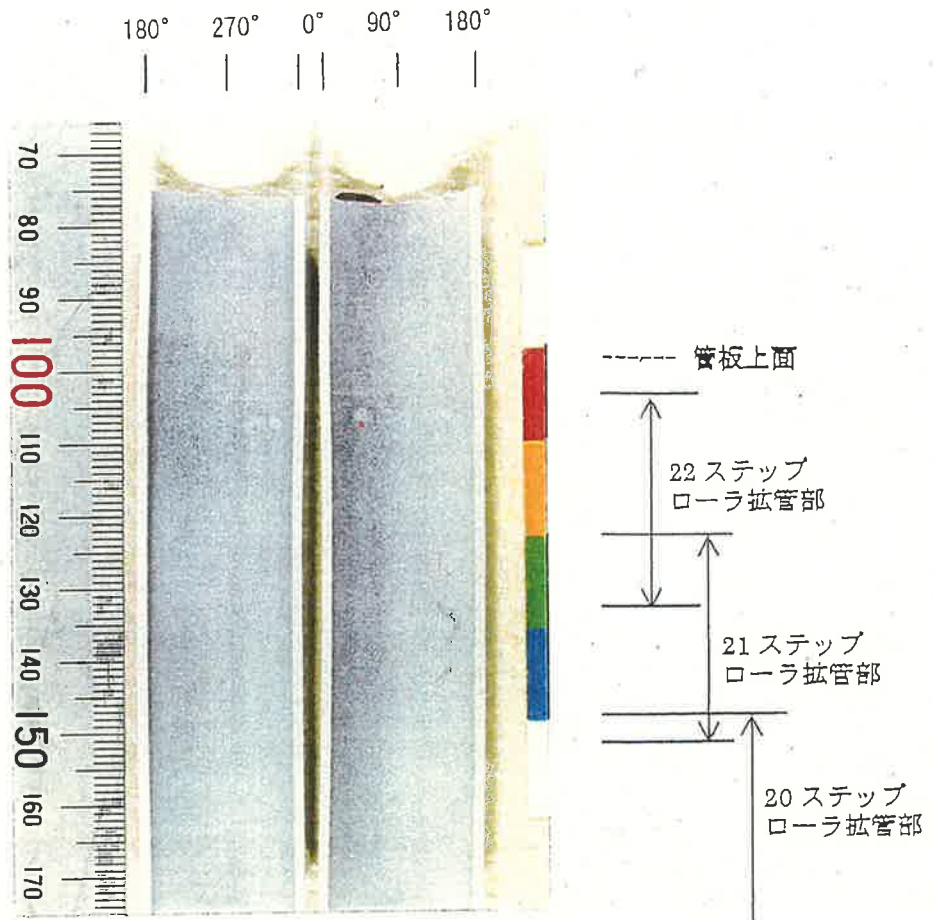


抜管時のこすれ跡

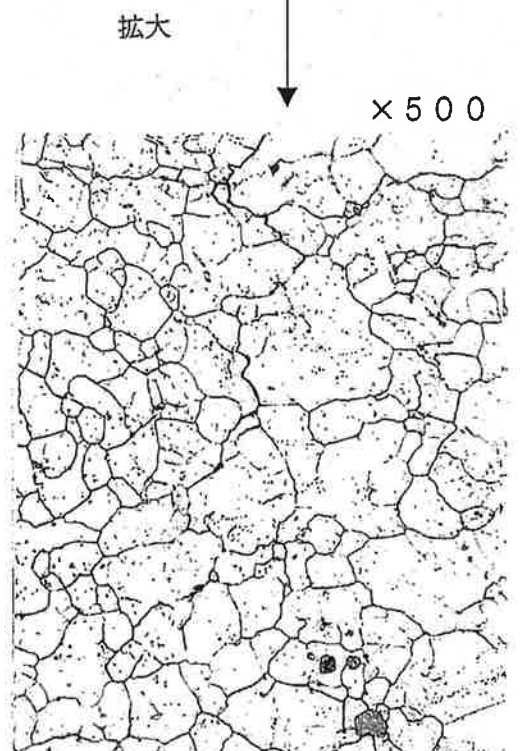
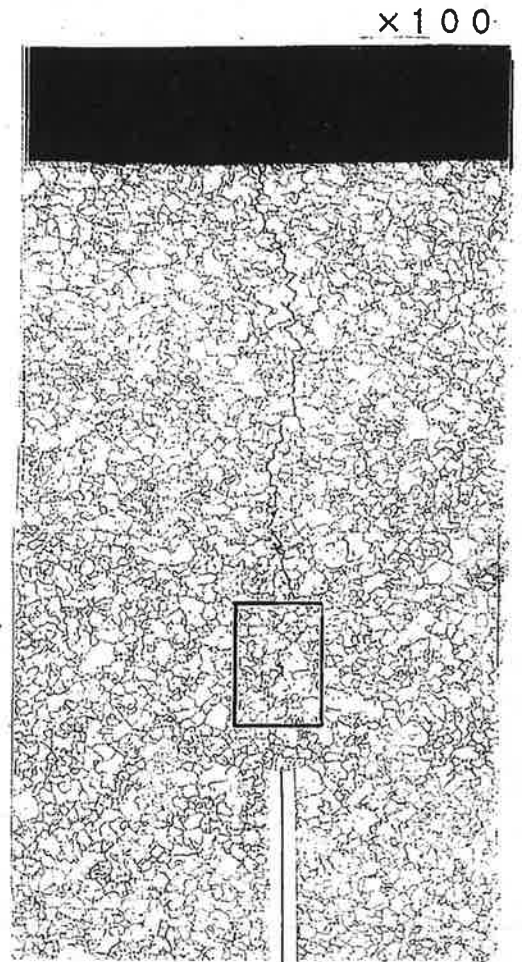
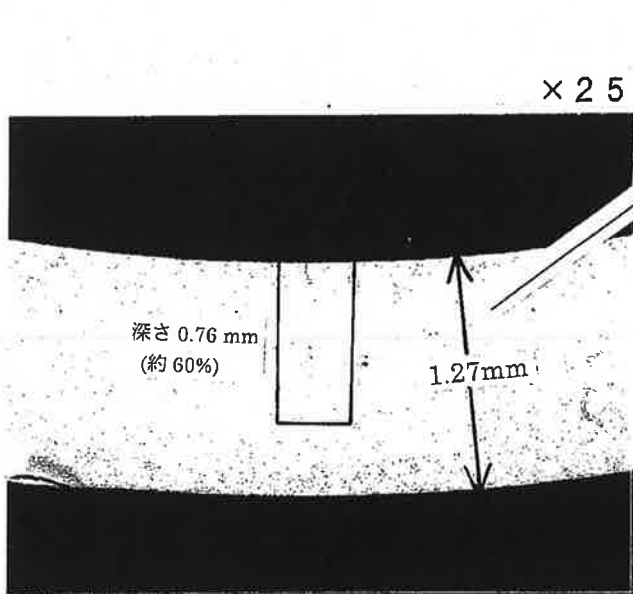
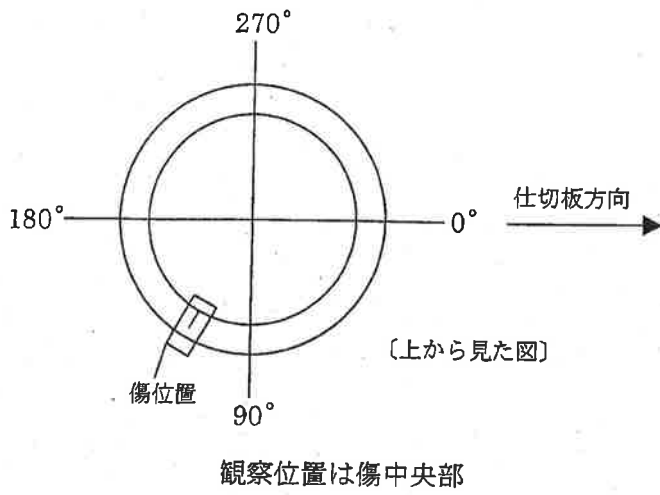
注：しみのように見える色調変化は2次側水の侵入跡と推定される

管板上面から約56mm下方

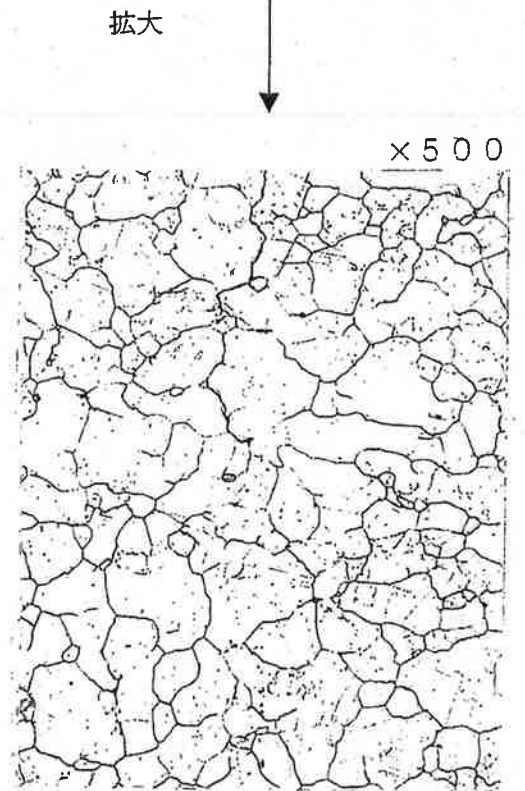
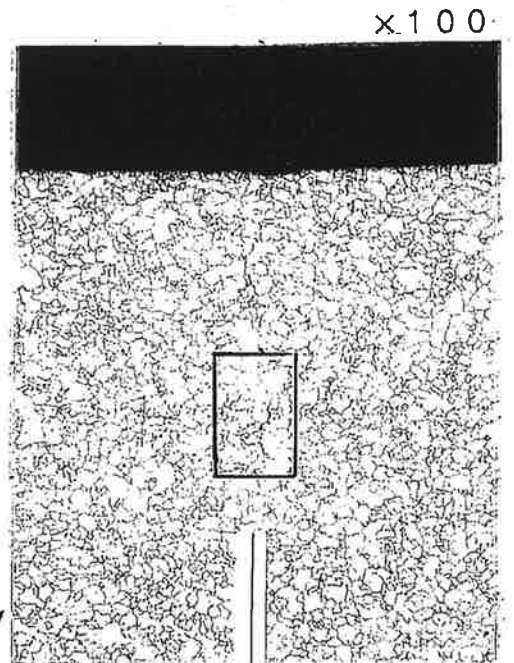
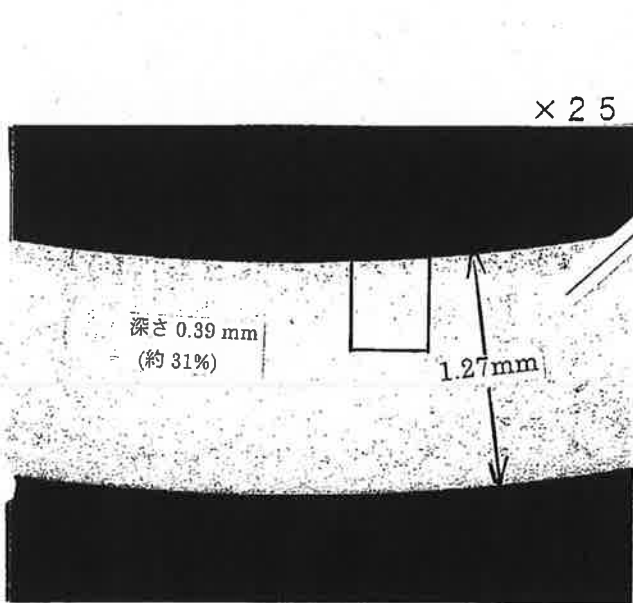
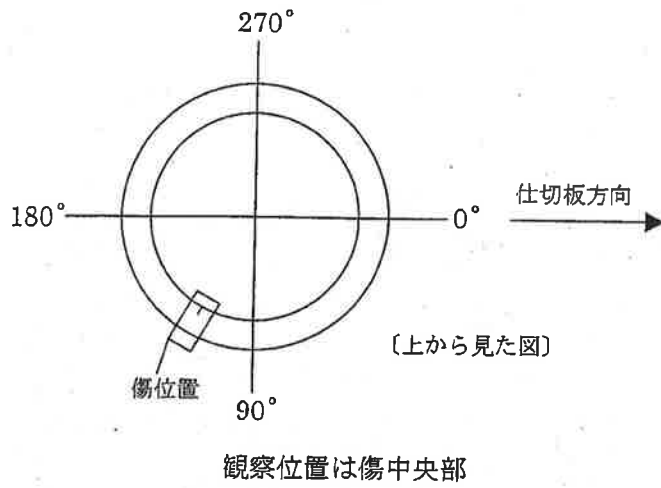
抜管調査結果 (浸透探傷試験)



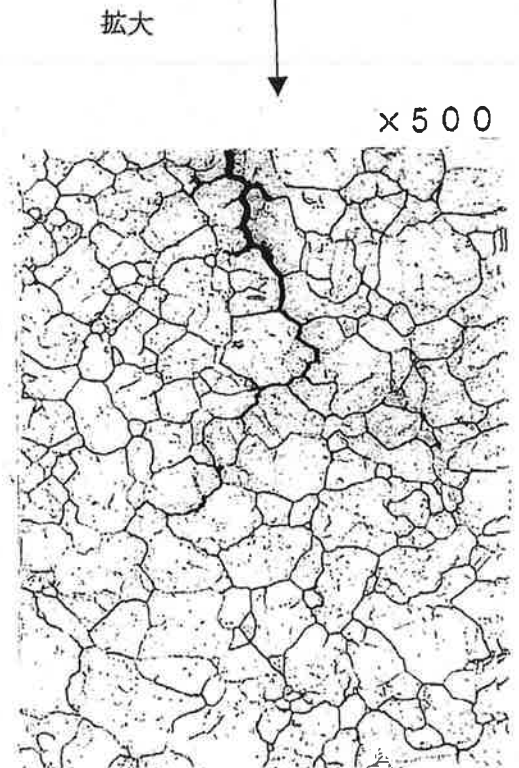
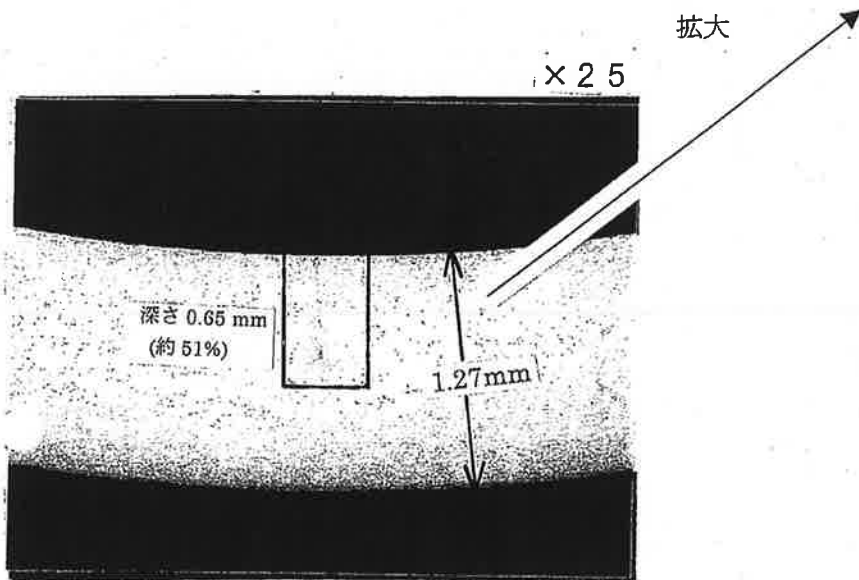
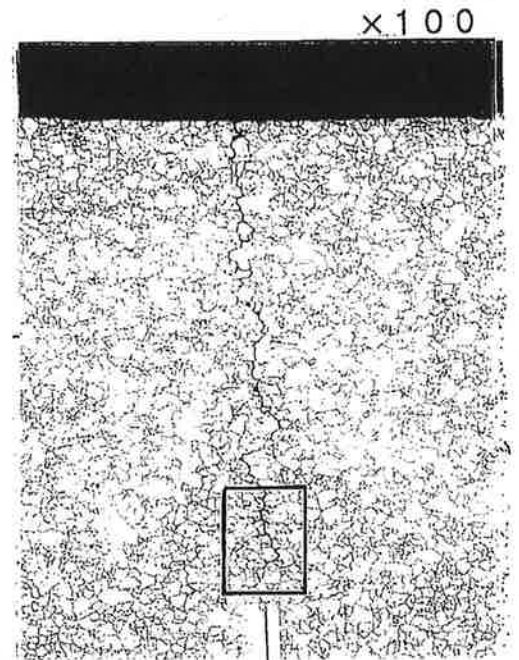
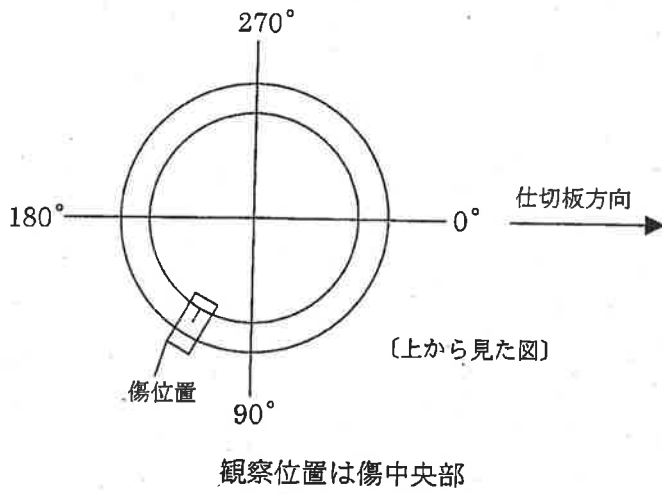
抜管調査結果 (断面マイクロ観察)
(管板上部より約30mm下方 約4mmの損傷)



抜管調査結果 (断面マイクロ観察)
(管板上部より約30mm下方 約2mmの損傷)



抜管調査結果 (断面マイクロ観察)
(管板上面より約56mm 下方 約4mm の損傷)



抜管調査結果 (材料分析)

成分分析結果

供 試 管	化 学 成 分 (%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Cu	Al	Ti	Ni
B-SG、X85-Y28	0.028	0.35	0.30	0.008	<0.001	15.8	8.30	0.01	0.13	0.21	74.9
規格値 (ASME SB-163 Ni-Cr-Fe Alloy)	≤0.15	≤0.5	≤1.0	—	≤0.015	14.0 ~17.0	6.0 ~10.0	≤0.5	—	—	≥72.0

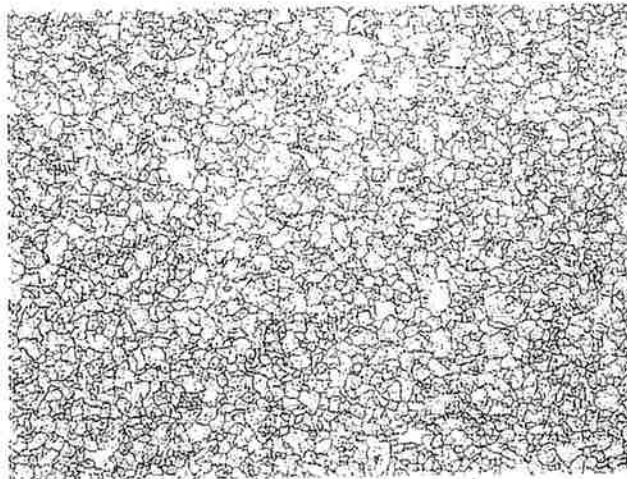
化学成分	分 析 方 法
C	JIS G1211 高周波誘導加熱炉燃焼-赤外線吸収法
Si	JIS G1212 モリブドけい酸青吸光光度法
Mn	JIS G1213 過よう素酸ナトリウム酸化吸光光度法
P	JIS G1214 モリブドリん酸青吸光光度法
S	JIS G1215 燃焼-高周波誘導加熱赤外線吸収法
Cr	JIS G1217 過マンガン酸カリウム酸化過マンガン酸カリウム滴定法
Fe	JIS G1258 誘導結合プラズマ発光分光分析法
Cu	JIS G1258 誘導結合プラズマ発光分光分析法
Al	JIS G1258 誘導結合プラズマ発光分光分析法
Ti	JIS G1258 誘導結合プラズマ発光分光分析法
Ni	JIS G1216 NI分離後EDTA滴定法

抜管調査結果 (材料分析)

結晶粒度測定結果

	B-SG X 8 5 - Y 2 8
	結晶粒度番号
1	9.2
2	8.8
3	8.7
4	8.7
5	9.7
6	9.4
7	9.2
8	8.7
9	9.0
10	9.5
平均	9.1

代表的視野 (× 100)



抜管調査結果 (材料分析)

硬さ測定結果

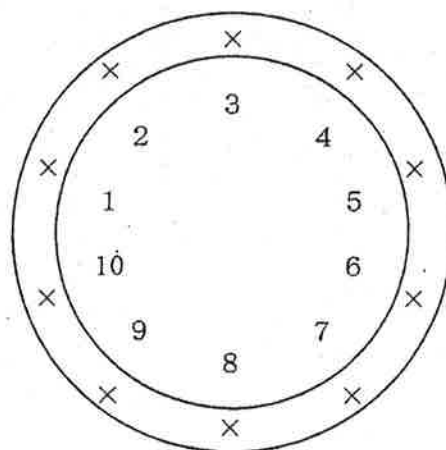
	B-SG X85-Y28
1	173
2	173
3	167
4	169
5	166
6	173
7	173
8	170
9	170
10	171
範囲	166~173
平均	171*

(*ロックウェル硬さ換算: 85)

(参考) 規格値: ロックウェル硬さ92以下 [JIS G4904 (1970)]

(注) 1991年硬さ制限撤廃

測定位置

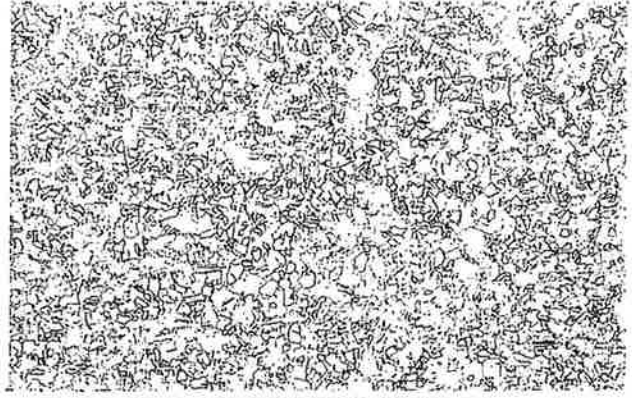

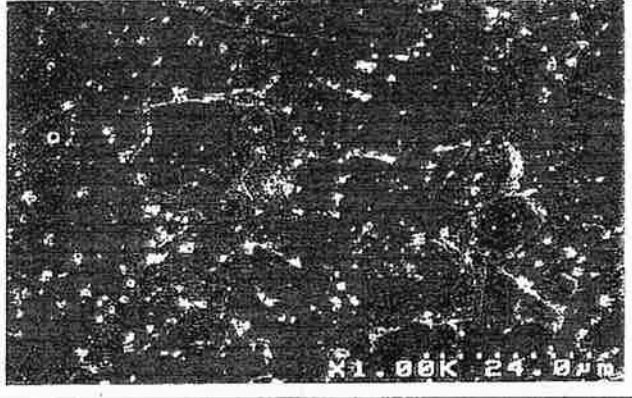



測定条件

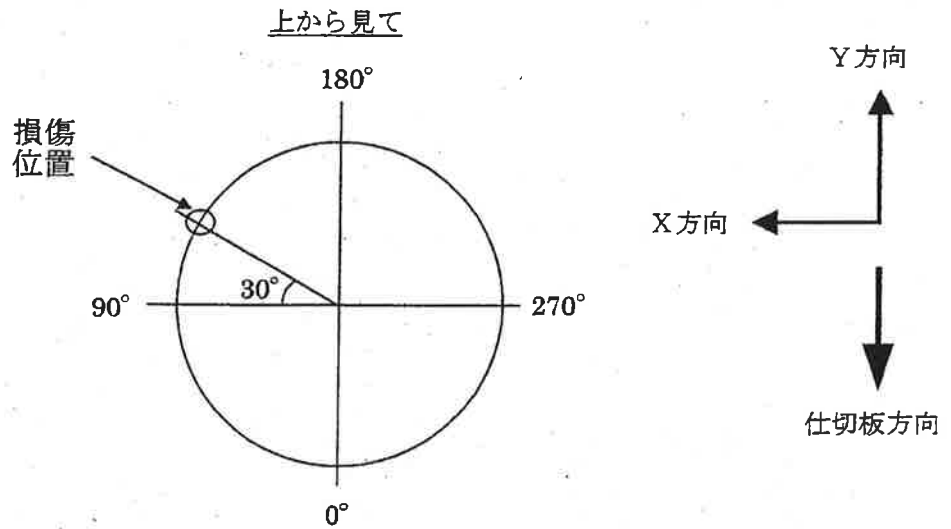
ピッカース硬さ
荷重: 1kg

拔管調査結果 (材料分析)

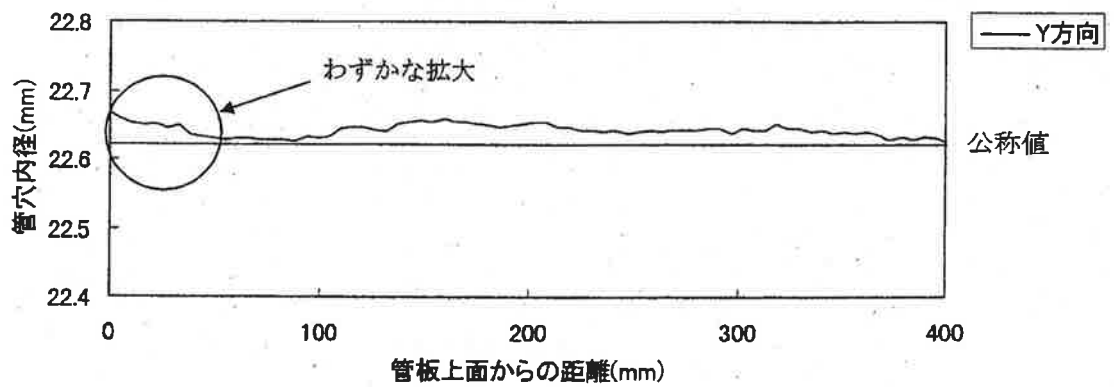
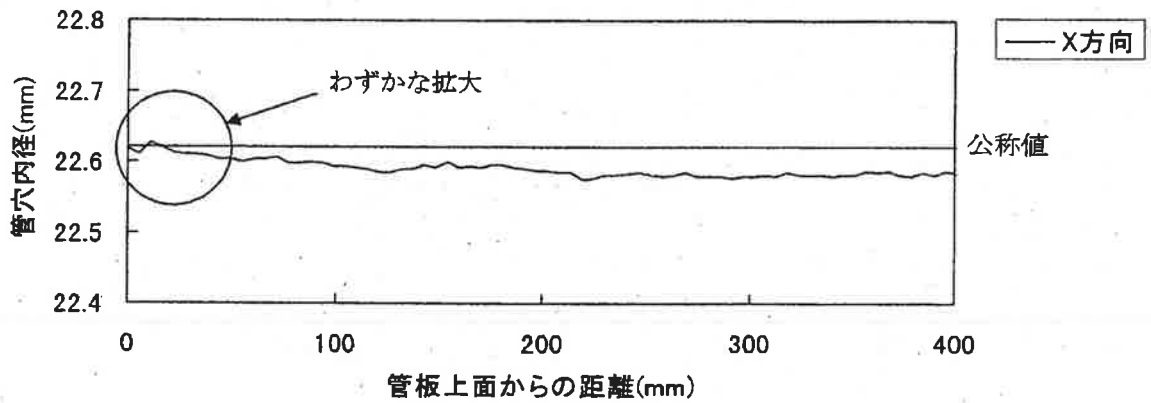
金属組織観察結果

供試管	観察方法	観察倍率	金属組織
B-SG	光学顕微鏡	×100	
		×500	
X85-Y28	SEM	×1000	
		×5000	

管板管穴内径計測結果

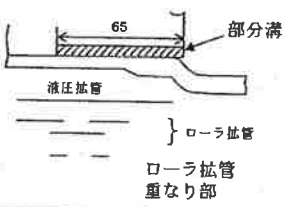
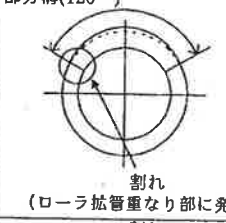
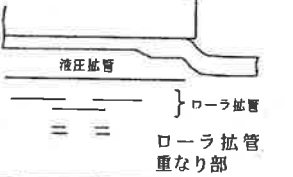
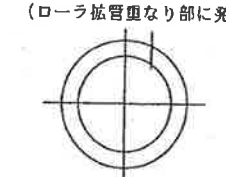
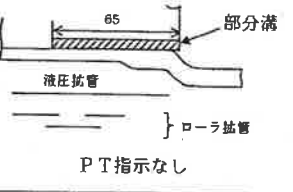
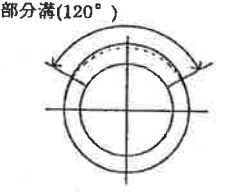


歪みゲージ式内径計測装置による計測

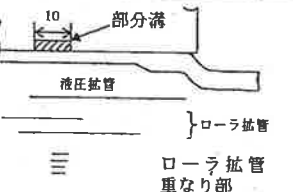
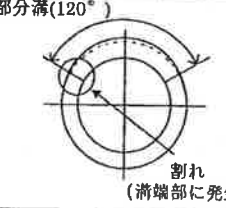
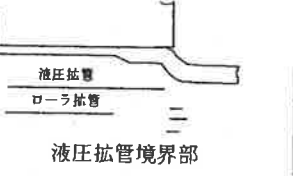



注) 微小な変動は、実機管板管穴の抜管後の
こすれ跡、付着物等と推定される。

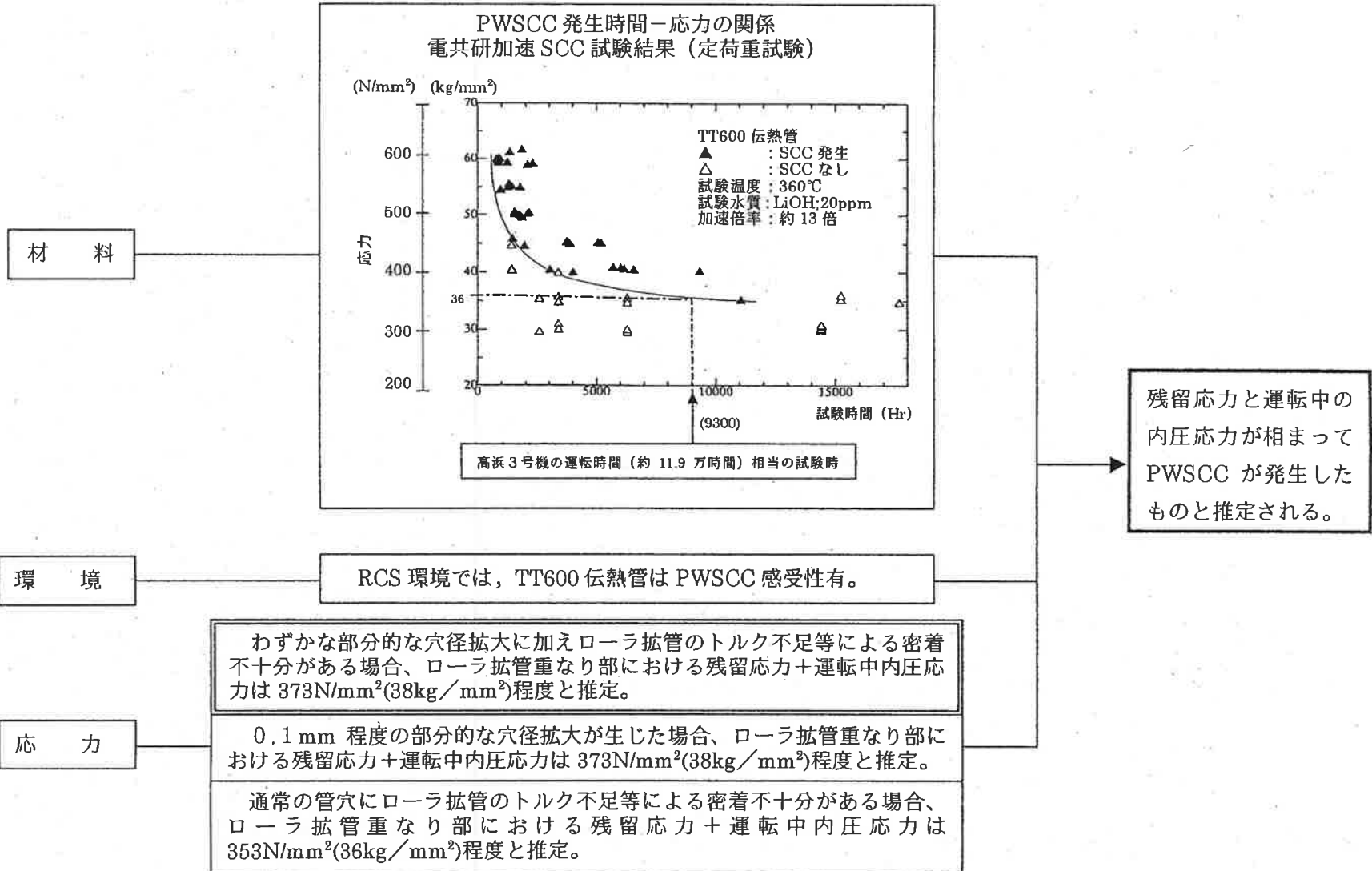
ポリチオン酸試験結果

モデル	拡管法	管穴形状	PT指示位置		PT指示位置 推定応力
部分的管板管穴拡大に密着不十分を模擬	液圧拡管 + ローラ拡管 (トルク不足)	ローラ拡管重なり部に 0.05mm 深さ、軸長さ 65mm の1/3周溝		部分溝(120°) 	~373 N/mm ² (~38 kg/mm ²)
通常の管穴に密着不十分を模擬	液圧拡管 + ローラ拡管 (トルク不足)	溝なし		割れ (ローラ拡管重なり部に発生) 	~353 N/mm ² (~36 kg/mm ²)
部分的管板管穴拡大に密着十分を模擬	液圧拡管 + ローラ拡管 (トルク正常)	ローラ先端部近傍に 0.05mm 深さ、軸長さ 65 mm の1/3周溝		部分溝(120°) 	314 N/mm ² 以下 (32 kg/mm ² 以下)

〔参考〕

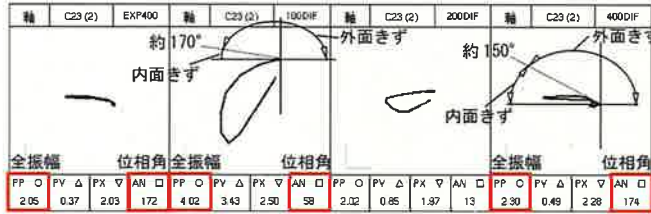
部分的管板管穴拡大を模擬	液圧拡管 + ローラ拡管 (トルク正常)	ローラ拡管重なり部に 0.1mm 深さ、軸長さ 10mm の1/3周溝		部分溝(120°) 	~373 N/mm ² (~38 kg/mm ²)
正常拡管	液圧拡管 + ローラ拡管 (トルク正常)	溝なし		割れ (液圧拡管境界部に発生) 	~294 N/mm ² (~30 kg/mm ²)

高浜 3 号機 蒸気発生器伝熱管損傷要因の検討

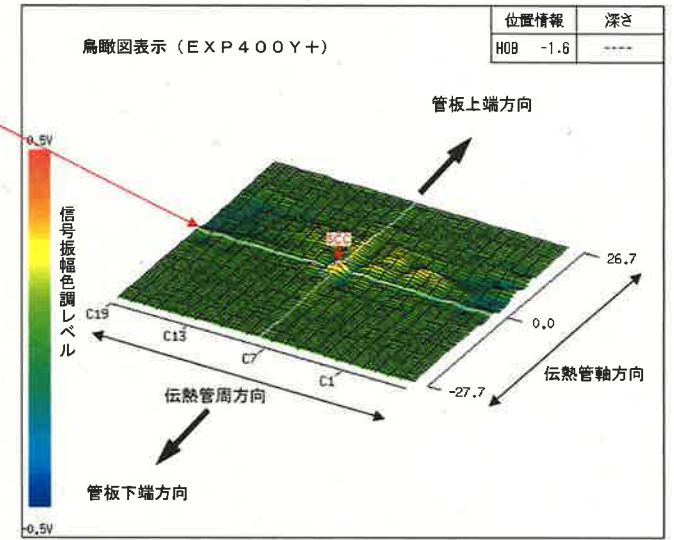
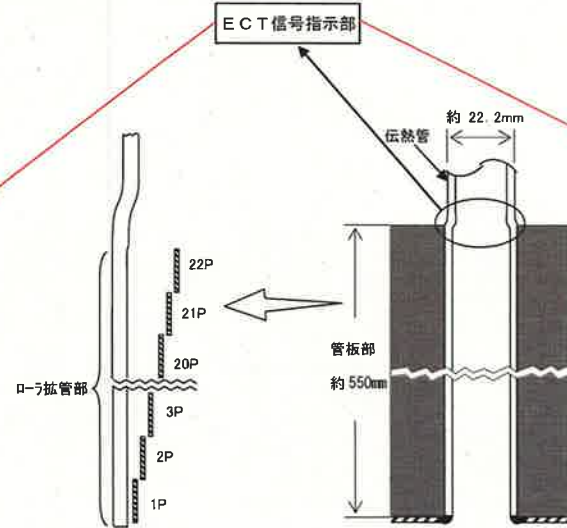
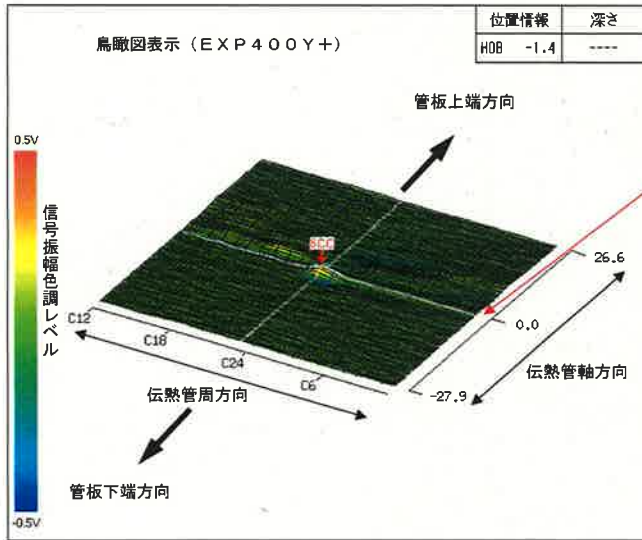
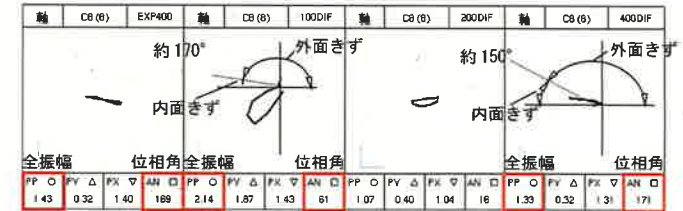


高浜4号機 第21回・第20回 定期検査時の信号指示の比較 (A-SG X5-Y4)

高浜4号機 第21回定期検査時
リサーチ波形 (A-SG X5-Y4)



高浜4号機 第20回定期検査時
リサーチ波形 (B-SG X55-Y1)



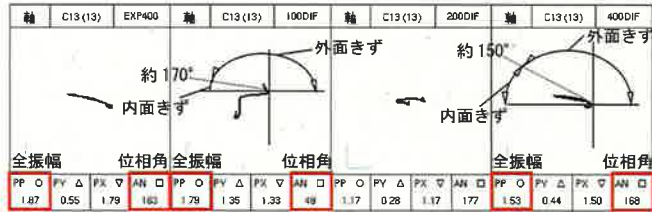
有意な信号指示をリサーチ (信号表示)、鳥瞰図表示で分析した結果、400kHz※1において伝熱管内面軸方向きずの特徴を有していた。また、部位は高温側伝熱管のローラ拡管上部 (22ピッチ) であり、高浜4号機 第20回定期検査で認められたものと同様である。

〔 位 相 : 位相角が400kHzで約150°以上、100kHzで約170°以上 ※2
全振幅 : 100kHzの全振幅<400kHzの全振幅 ※3 〕

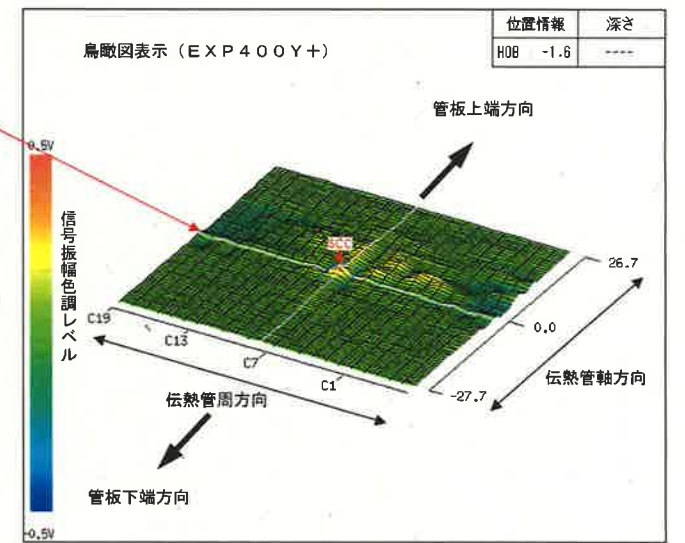
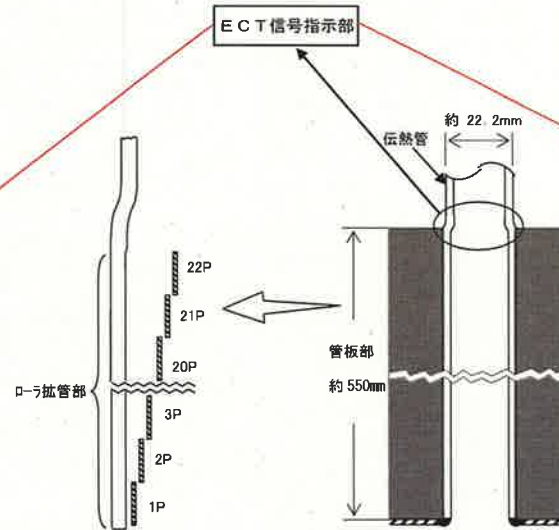
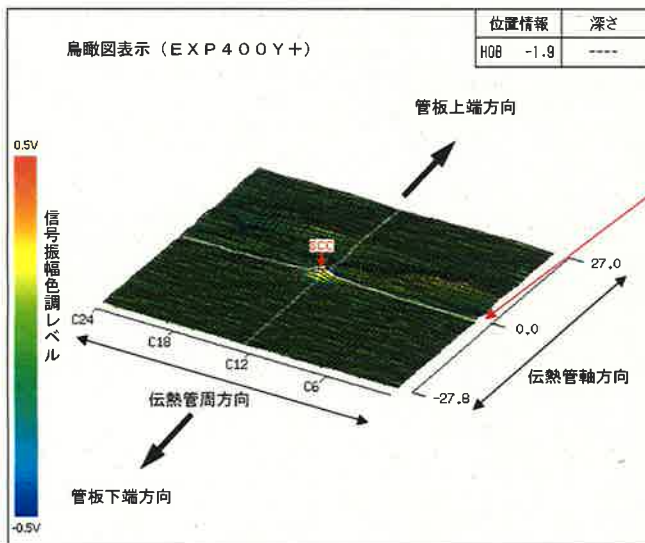
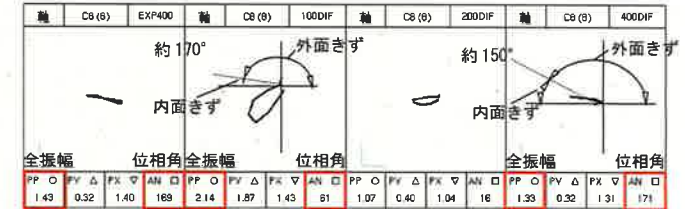
- ※1 400kHzは原信号およびEXPフィルタを含む。
- ※2 管板上端信号と複合し100kHzにおける位相の比較は困難だが、内面軸方向きず信号の方向に波形が歪んでいる。
- ※3 管板上端信号と複合しているため、全振幅の比較は困難である。

高浜4号機 第21回・第20回 定期検査時の信号指示の比較 (A-SG X12-Y3)

高浜4号機 第21回定期検査時
リサージュ波形 (A-SG X12-Y3)



高浜4号機 第20回定期検査時
リサージュ波形 (B-SG X55-Y1)



有意な信号指示をリサージュ (信号表示)、鳥瞰図表示で分析した結果、400kHz※1において伝熱管内面軸方向きずの特徴を有していた。また、部位は高温側伝熱管のローラ拡管上部 (22ピッチ) であり、高浜4号機 第20回定期検査で認められたものと同様である。

- 〔 位 相 : 位相角が400kHzで約150°以上、100kHzで約170°以上 ※2 〕
- 〔 全振幅 : 100kHzの全振幅<400kHzの全振幅 ※3 〕

※1 400kHzは原信号およびEXPフィルタを含む。
 ※2 管板上端信号と複合し100kHzにおける位相の比較は困難だが、内面軸方向きず信号の方向に波形が歪んでいる。
 ※3 管板上端信号と複合しているため、全振幅の比較は困難である。

高浜4号機 蒸気発生器伝熱管ショットピーニング工事総括報告書



A クラス

客先

関西電力(株)高浜発電所4号機

第 13 回 定 検

蒸気発生器伝熱管ショットピーニング工事

総 括 報 告 書

三菱重工原子力技術資料:クラスB

発行	三菱重工株式会社神戸造船所			高浜定検作業所	作成	平成 14 年 2 月 25 日					
作業所図書番号	改訂										
KT4-13-D122		0									
現地	客先	作業所陸	放	機	燃	計	検	作	控	関連資料図書番号	改訂
配布先	1	1							1		0
内 容		注文主	工事番号		年月日		三菱重工株式会社神戸造船所				
本文	262頁	関西電力(株) 高浜発電所 4号機	アイテム		照合者		原子力保全技術部 技術課				
図表	一枚		2323621		H . . .		課長		係長		
表紙共	266枚		0100		H . . .						
備考	原紙保管 原保技課										
配布先									作成	平成 14 年 2 月 25 日	
									出書	平成 14 年 2 月 25 日	
											改訂
										RCG-020008	0

高総-01-1/2

今回信号指示が検出された伝熱管に対して、適切な条件（送り速度、ビーズ噴出圧力、ビーズ粒度）でショットピーニングが施工されたことを確認。ビーズ粒度の詳細確認結果は添付資料-14 (5/5) を参照。

No.	工具	施工アドレス		送り寸法	施工範囲 判定基準	送り速度 判定基準 (200~300mm/min)			ビーズ噴出圧力 判定基準 (0.2~0.4MPa)			ビーズ供給確認	施工月日	施工時間 (終了時間)	確認者		備考
		X	Y			MAX	MIN	AVE	MAX	MIN	AVE				三菱重工	関西電力	
		25	A			15	2	700	620	286	285				285	0.34	
B	15	4	0.34	0.32	0.33	良	10:49:48										
26	A	16	2	700	620	286	285	285	0.34	0.32	0.33	良	1月25日	10:52:00			
	B	16	4						0.34	0.32	0.33						良
27	A	13	2	700	620	286	285	285	0.34	0.32	0.33	良	1月25日	10:57:58			
	B	13	4						0.34	0.32	0.33						良
28	A	12	2	700	620	286	283	285	0.34	0.32	0.33	良	1月25日	11:04:33			
	B	12	4						0.34	0.33	0.33						良
29	A	11	2	700	620	287	285	285	0.34	0.32	0.33	良	1月25日	11:11:58			
	B	11	4						0.34	0.32	0.33						良
30	A	11	1	700	620	287	285	285	0.34	0.32	0.33	良	1月25日	13:13:42			
	B	11	3						0.34	0.32	0.33						良
31	A	12	1	700	620	286	285	285	0.35	0.33	0.34	良	1月25日	13:18:54			
	B	12	3						0.35	0.33	0.34						良
32	A	13	1	700	620	286	285	285	0.35	0.33	0.34	良	1月25日	13:24:04			
	B	13	3						0.35	0.33	0.34						良
33	A	10	1	700	620	286	285	285	0.35	0.33	0.34	良	1月25日	13:30:38			
	B	10	3						0.35	0.33	0.34						良
34	A	9	1	700	620	287	285	285	0.35	0.33	0.34	良	1月25日	13:35:47			
	B	9	3						0.35	0.33	0.34						良
35	A	8	1	700	620	286	284	285	0.35	0.33	0.34	良	1月25日	13:41:33			
	B	8	3						0.35	0.33	0.34						良
36	A	8	2	700	620	286	285	285	0.35	0.33	0.34	良	1月25日	13:46:48			
	B	8	4						0.35	0.33	0.34						良

(A-S/G HOT側) ショットピーニング施工チェックシート【自動】

(/)

今回信号指示が検出された伝熱管に対して、適切な条件（送り速度、ビーズ噴出圧力、ビーズ粒度）でショットピーニングが施工されたことを確認。ビーズ粒度の詳細確認結果は添付資料-14 (5/5) を参照。

No.	工具	施工アドレス		送り寸法	施工範囲 判定基準	送り速度 判定基準 (200~300mm/min)			ビーズ噴出圧力 判定基準 (0.2~0.4MPa)			ビーズ供給確認	施工月日	施工時間 (終了時間)	確認者		備考
		X	Y			MAX	MIN	AVE	MAX	MIN	AVE				三菱重工	関西電力	
73	A	13	7	700	620	286	285	285	0.35	0.33	0.34	良	1月27日	4:44:00			
	B	15	7						0.35	0.33	0.34						
74	A	10	7	700	620	286	285	285	0.35	0.33	0.34	良	1月27日	4:49:05			
	B	12	7						0.35	0.33	0.34						
75	A	10	6	700	620	286	282	285	0.35	0.33	0.34	良	1月27日	4:54:04			
	B	12	6						0.35	0.33	0.34						
76	A	10	5	700	620	286	285	285	0.35	0.33	0.34	良	1月27日	4:59:05			
	B	12	5						0.35	0.33	0.34						
77	A	9	5	700	620	287	285	285	0.35	0.33	0.34	良	1月27日	5:04:06			
	B	11	5						0.35	0.33	0.34						
78	A	9	6	700	620	286	285	285	0.35	0.33	0.34	良	1月27日	5:09:05			
	B	11	6						0.35	0.33	0.34						
79	A	9	7	700	620	286	285	285	0.35	0.33	0.34	良	1月27日	5:14:13			
	B	11	7						0.35	0.33	0.34						
80	A	5	4	700	620	287	285	285	0.35	0.33	0.34	良	1月27日	6:02:47			
	B	7	4						0.35	0.33	0.34						
81	A	4	4	700	620	286	285	285	0.35	0.33	0.34	良	1月27日	6:07:56			
	B	6	4						0.35	0.33	0.34						
82	A	1	4	700	620	286	284	285	0.35	0.33	0.34	良	1月27日	6:13:08			
	B	3	4						0.35	0.33	0.34						
83	A	2	4	700	620	286	285	285	0.39	0.37	0.38	良	1月27日	6:19:20			
	B	0	0						0	0	0						
84	A	1	5	700	620	286	285	285	0.35	0.33	0.34	良	1月27日	6:25:44			
	B	3	5						0.35	0.33	0.34						

表 口 俣 貝 取 調 査

既往試験で使用したビーズ粒度 (#42~#80 : 添付資料-15 (2/2) 参照) と同じであることを確認。

三菱重工業株式会社 御中

発行日2001年11月26日

出荷日2001年11月26日

ビーズ成績書

品名	FP-6 42-80
Lot No	120582
出荷数量	130.00 kg

検査項目	測定値	規 格
見掛密度 (g/cm ³)	4.52	
流動度 (s/50g)	17.5	
粒度分布 + 4 2 5 μm (%)	0.0	2.0 以下
粒度分布 + 3 5 5 μm (%)	17.6	
粒度分布 + 3 0 0 μm (%)	21.2	
粒度分布 + 2 5 0 μm (%)	31.0	
粒度分布 + 1 8 0 μm (%)	27.8	
粒度分布 - 1 8 0 μm (%)	2.4	5.0 以下
ニッケル量 [Ni] (%)	BAL.	BAL.
クロム量 [Cr] (%)	14.7	13.0 ~ 15.0
ボロン量 [B] (%)	3.07	2.50 ~ 3.50
シリコン量 [Si] (%)	4.58	3.70 ~ 4.70
鉄量 [Fe] (%)	3.04	5.00 以下
カーボン量 [C] (%)	0.64	0.50 ~ 0.70
コバルト量 [Co] (%)	0.023	
タンタル量 [Ta] (%)	0.009	

備 考

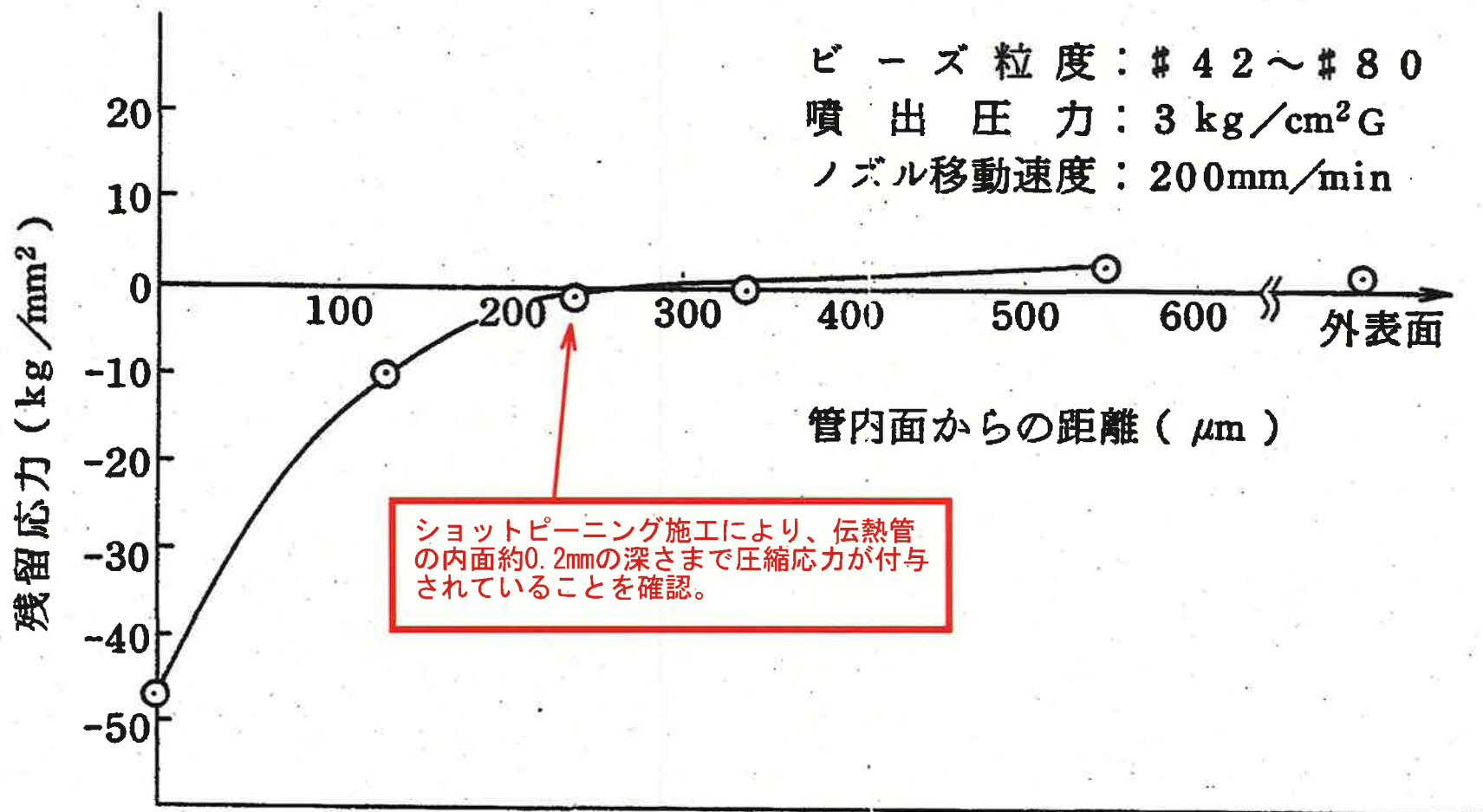
-177-

SG伝熱管へのショットピーニングの有効性とPWSCC検出に関する考察

	SG伝熱管ショットピーニング(SP) (ECTにより施工前の表面状態を確認)	(参考) 原子炉容器管台WJP/SG管台USP (ECTにより施工前の表面状態を確認)
ECT検出可能範囲と 圧縮応力付与範囲の 関係	<p>伝熱管厚さ 約1.3mm</p> <p>圧縮応力範囲※1 約0.2mm</p> <p>ECT※2検出可能 約0.5mm以上</p> <p>※1: 伝熱管は薄肉管であることから、外面に大きな引張り残留応力を残留させずに、圧縮応力を付与できる範囲が小さい</p> <p>※2: 高浜4号機でショットピーニング施工時に実施したDF-ECTの場合(現在適用しているインテリジェントECTでもほぼ同様)</p>	<p>管台溶接部厚さ約80mm</p> <p>圧縮応力範囲 約1mm</p> <p>ECT検出可能 約0.5mm以上</p>
施工前確認時の対応	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 圧縮応力の付与されない範囲で、ECTで検出可能であったPWSCCについては、当該管を施栓し、供用外としている。(①) ➢ 圧縮応力の付与されない範囲で、ECTにより検出されないPWSCCが存在した状態でSPを施工した可能性は否定できない。(②) ➢ 圧縮応力の付与される範囲にECT検出限界未満のPWSCCが存在したとしても、進展は停止するものと考えられる。(③) 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 圧縮応力の付与されない範囲で、ECTで検出可能であったPWSCCについては、除去したうえでWJP等を施工している。(①) ➢ 圧縮応力の付与される範囲で、ECTにより検出可能であったPWSCCについては、除去したうえでWJP等を施工している。(②) ➢ 圧縮応力の付与される範囲にECT検出限界未満のPWSCCが存在したとしても、進展は停止するものと考えられる。(③)
有効性評価	<p>ショットピーニングを施工した時点で、圧縮応力の付与されない範囲にECTにより検出不可能なPWSCC(約0.2mm～約0.5mmの深さのPWSCC)が存在したとすると、ショットピーニング施工後もPWSCCが進展し、顕在化する可能性がある。</p>	<p>WJPを施工した時点で、圧縮応力の付与される範囲とECTの検出能力の関係から、圧縮応力の付与されない範囲にPWSCCが存在する可能性はなく、WJP等の施工後にPWSCCが進展し、顕在化することはない。</p>

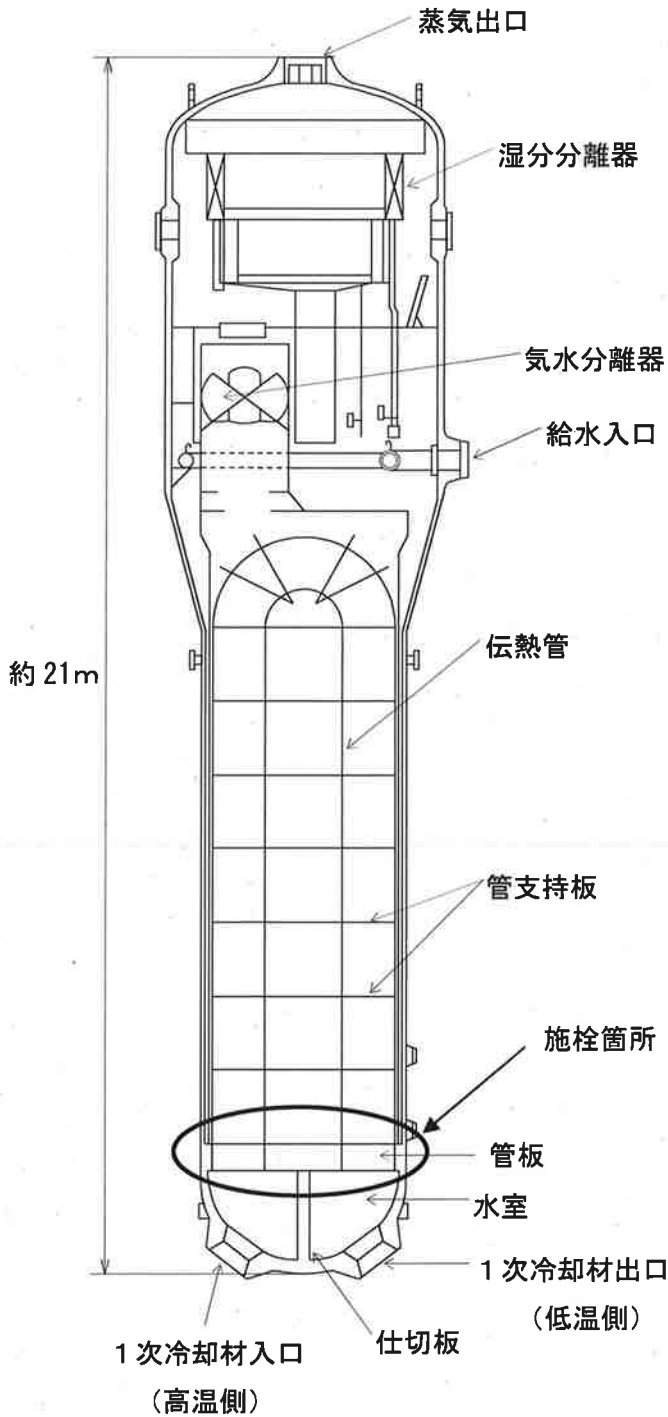
WJP: ウォータージェットピーニング
USP: ウルトラソニックショットピーニング

ショットピーニング施工管の周方向残留応力の管肉厚方向分布



出典：昭和61年通産省顧問会審議資料
「蒸気発生器 周辺部伝熱管クレビス部リロール工法及びショットピーニング工法について」

SG伝熱管信号指示箇所補修概要図



	ステップ1	ステップ2
概略図		
説明	<p>機械式栓内の中子にマンドレルをねじ込む。</p>	<p>機械式栓を伝熱管に挿入し、マンドレルを介して中子を引き下げることにより、機械式栓を押し広げる。</p>

機械式栓の取付要領

高浜4号機 SG伝熱管の補修来歴

	補修伝熱管数				損傷区分
	A-SG	B-SG	C-SG	合計	
第1回定期検査 S61.4~S61.6	0	0	0	0	
第2回定期検査 S62.8~S62.10	0	0	0	0	
第3回定期検査 S63.11~H1.1	0	0	0	0	
第4回定期検査 H2.2~H2.5	7	9	5	21	※AVB部摩耗減肉
第5回定期検査 H3.5~H3.7	0	0	0	0	
第6回定期検査 H4.9~H4.11	0	0	0	0	
第7回定期検査 H5.12~H6.3	0	0	0	0	
第8回定期検査 H7.4~H7.7	0	0	0	0	
第9回定期検査 H8.9~H8.11	10	0	0	10	管支持板洗浄装置の接触による予防施栓
第10回定期検査 H10.1~H10.2	0	0	0	0	
第11回定期検査 H11.4~H11.7	0	0	4	4	管板拡管部応力腐食割れ
第12回定期検査 H12.9~H12.11	4	1	6	11	管板拡管部応力腐食割れ
第13回定期検査 H14.1~H14.3	1	0	0	1	管板拡管部応力腐食割れ
第14回定期検査 H15.4~H15.6	1	1	0	2	管板拡管部応力腐食割れ
第15回定期検査 H16.8~H16.10	112	122	105	339	旧AVB部摩耗減肉検出
第16回定期検査 H17.11~H18.2	0	0	0	0	
第17回定期検査 H19.4~H19.7	0	0	0	0	
第18回定期検査 H20.8~H20.12	0	0	1	1	管板拡管部応力腐食割れ
第19回定期検査 H22.2~H22.5	0	0	1	1	管板拡管部応力腐食割れ
第20回定期検査 H23.7~H29.5	0	1	1	2	管板拡管部応力腐食割れ
第21回定期検査 H30.5~	2	0	0	2	管板拡管部応力腐食割れ
合計	137	134	123	394	施栓率 A : 4.1% B : 4.0% C : 3.6% 全体 : 3.9%

- ・第4回定期検査時に改良型振止め金具へ取替え [安全解析施栓率：10%]
 - ・第13回定期検査時に高温側管板部へショットピーニングを施工
 - ・第15回定期検査より新型のECT装置(インテリジェントECT)を適用
- ※：振止め金具（伝熱管のU字管群に挿入して伝熱管を支持する金具）

高浜発電所 4 号炉

高経年化技術評価書

平成 26 年 6 月

関西電力株式会社

資料6-1 高浜発電所4号炉 高経年化技術評価に基づく長期保守管理方針 (1/2)

機種名	機器名	経年劣化事象	健全性評価結果	現状保全	総合評価	長期保全計画		長期保守管理方針		
						高経年化への対応	実施時期	No.	保守管理の項目	実施時期
熱交換器	蒸気発生器	伝熱管の損傷	管板伝熱管および伝熱管境界部応力腐食割れ等については、改善策を講じることで有意なき裂の発生は著しく低下している。万一有意なき裂が生じた場合、検出限界の大きさのき裂が構造上許容されるき裂深さに達するまでの時間を評価し、適切な間隔で点検を実施することにより健全性を確保できると考える。	損傷形態、部位に応じた適切な渦流探傷プローブにより、定期的に全数渦流探傷検査を実施し、健全性を確認している。	管板伝熱管および伝熱管境界部応力腐食割れ等については発生が否定できないことから、潜在している可能性のある応力腐食割れが進展した場合であっても構造上許容されるき裂の深さに達していないことを確認する必要がある。応力腐食割れの進展が構造上許容されるき裂の深さに達していないことは定期的な全数渦流探傷検査にて検知可能であり、点検手法として適切である。	伝熱管材料は600系ニッケル合金であり、管板伝熱管部の応力腐食割れ等の発生が否定できないことから蒸気発生器取替を含めた保全方法を検討していく。	中長期	1	蒸気発生器の伝熱管の損傷については、蒸気発生器取替を含めた保全方法を検討する。	中長期
容器	原子炉容器	胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化	関連温度の上昇について、第4回までの監視試験結果を用いた評価により、運転開始後60年時点でも脆性破壊は起こらないと評価した。上部棚吸収エネルギーの低下については、運転開始後60年時点でも十分な上部棚吸収エネルギーがあると評価した。	定期的に超音波探傷試験を実施し、有意な欠陥がないことを確認している。JEAC4201に基づいて、計画的に監視試験を実施し、将来の破壊靱性の変化を先行把握している。JEAC4206に基づき、運転管理上の制限として加熱・冷却運転時に許容しうる温度・圧力の範囲（加熱冷却時制限曲線）および耐圧漏えい試験温度を設けて運用している。	健全性評価結果から判断して、胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化が機器の健全性に影響を与える可能性はないと考える。ただし、胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化に対しては、今後も計画的に監視試験を実施して健全性評価の妥当性を確認する必要がある。胴部（炉心領域部）材料の機械的性質の予測は監視試験により把握可能であり、また有意な欠陥のないことも超音波探傷検査により確認していることから、保全内容として適切である。	胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化に対しては、JEAC4201に基づき計画的に監視試験を実施して健全性評価の妥当性を確認するとともに、定期的に超音波探傷検査を実施していく。また、監視試験結果から、JEAC4206に基づき、運転管理上の制限として加熱・冷却運転時に許容しうる温度・圧力の範囲（加熱冷却時制限曲線）および耐圧漏えい試験温度を設けて運用していく。なお、健全性評価の結果から胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化が原子炉の安全性に影響を及ぼす可能性はないと考えるが、健全性評価の妥当性を確認するため、今後の原子炉の運転時間・照射量を勘案して第5回監視試験の実実施計画を策定する。	中長期	2	原子炉容器の胴部（炉心領域部）の中性子照射脆化については、原子炉の運転時間および照射量を勘案し、第5回監視試験の実実施計画を策定する。	中長期

短期：平成27年6月5日からの5年間、中長期：平成27年6月5日からの10年間

高浜発電所4号炉
熱交換器の技術評価書

[運転を断続的に行うことを前提とした評価]

関西電力株式会社

2 蒸気発生器

[対象機器]

- ① 蒸気発生器

[管板拡管部および拡管境界部応力腐食割れ]

応力腐食割れは、材料・応力・環境の3要因により発生し、運転時間の経過にともない顕在化してくる時間依存型の損傷である。

600系ニッケル基合金（特殊熱処理材）は、PWR 1次系水質環境下で応力腐食割れ感受性を有しており、応力腐食割れが発生し破断するまでの時間は応力の大きさに依存することが知られている。民間研究による温度および水質加速定荷重応力腐食割れ試験の結果を図2.3-8に示す。

また、600系ニッケル基合金（特殊熱処理材）のPWR 1次系水質環境下における応力腐食割れの環境要因としては、溶存酸素、塩化物イオン等の化学成分および温度が重要要因となる。しかし、PWRの1次系水は、水素注入や脱塩処理により、溶存酸素濃度、塩化物イオン濃度等を極力低減している。このことから、環境要因としては温度が重要な要因となり、温度が高いほど応力腐食割れ発生時間が短くなる。

高温側の管板部のローラ拡管上端部またはローラ拡管重なり部において、第11回定期検査時（1999年度）から第13回定期検査時（2001年度）の渦流探傷検査で有意な信号指示が確認されている。

高温側の管板部で確認された応力腐食割れについて、現状知見を踏まえて使用部位の応力・温度条件をもとに評価を行った結果を表2.3-2に示す。

本事象は、製作時に高温側の管板部で伝熱管を拡管する際、伝熱管内面で局所的に引張残留応力が発生し、これと運転時の内圧による応力が相まって、伝熱管内面から応力腐食割れが発生したものと推定されており、定期検査時の渦流探傷検査で確認された応力腐食割れを有する伝熱管は全て施栓により供用除外としている。

管板拡管部で応力腐食割れが確認された状況を踏まえ、渦流探傷検査に従来適用しているDF-ECTに替え、検出性能が向上したインテリジェントECTを適用し、伝熱管の定期検査の高度化を図っている。

インテリジェントECTは、美浜2号炉蒸気発生器伝熱管破断事象を契機に国のプロジェクトとして検査技術の高度化に取り組み、長年の研究開発を経て、2003年に実施した確性試験で実用性を確認し、実機適用が可能となった検査手法である。高浜4号炉では第15回定期検査時（2004年度）以降の定期検査に適用している。

さらに、高温側の管板拡管部および拡管境界部応力腐食割れの対応として、第13回定期検査時（2001年度）に予防保全措置としてショットピーニング（応力緩和）を施工し、応力要因の改善を図っている。

高浜4号炉の応力腐食割れの検出本数の推移とショットピーニング施工

時期を図2.3-9に示す。比較として同じ600系ニッケル基合金（特殊熱処理材）伝熱管材と拡管工法を採用し、ショットピーニングを施工していない蒸気発生器の実績も図2.3-9に示す。ショットピーニングを施工していない蒸気発生器では継続的に応力腐食割れの発生が認められたが、高浜4号炉ではショットピーニング施工後に新たに確認される応力腐食割れの検出本数の減少が確認される。管板拡管部に対するショットピーニング施工は、応力腐食割れに対する保全措置に対して一定の効果があったと考える。

拡管部および拡管境界部に施工したショットピーニングによる応力改善の効果を図2.3-10に示す。当該工法は伝熱管内表面から深さ約0.2mmまで圧縮応力を付与できるものであることから、圧縮応力が付与された伝熱管内表面近傍においてショットピーニング施工後に新たな応力腐食割れの発生および進展は防止されるものとする。

しかしながら、ショットピーニング施工後の第14回定期検査時（2003年度）、第18回定期検査時（2008年度）から第20回定期検査時（2011年度～停止継続中）の渦流探傷検査で有意な信号指示が確認されている。

本事象は、ショットピーニング施工前後に実施した渦流探傷検査が管内表面から約0.5mm以上の深さの傷を検出することが可能な手法であったことから、表2.3-3に示すように、ショットピーニング施工後に供用を継続した伝熱管において、圧縮応力の付与されない範囲に当該検査で検出不可能な深さの応力腐食割れ（管内表面から約0.2mm～約0.5mm深さの応力腐食割れ）が潜在し、その後の運転で応力腐食割れが進展、顕在化したものと推定されている。

したがって、高温側の管板拡管部では、今後も応力腐食割れの検出が想定されるため、定期的な検査による健全性の確認が必要と考える。

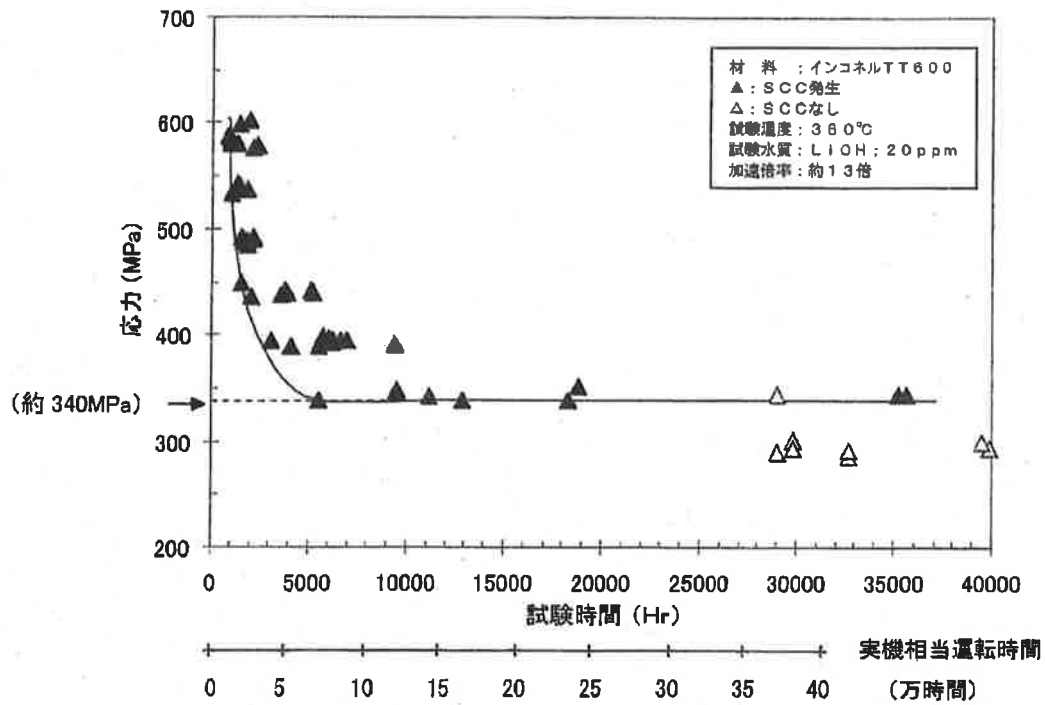


図2.3-8 蒸気発生器伝熱管材の定荷重応力腐食割れ (SCC) 試験結果
 (600系ニッケル基合金 (特殊熱処理材))

[出典 : 電力共通研究「蒸気発生器伝熱管応力腐食割れの寿命予測に
 関する研究 (フェイズ5)」2003年度]

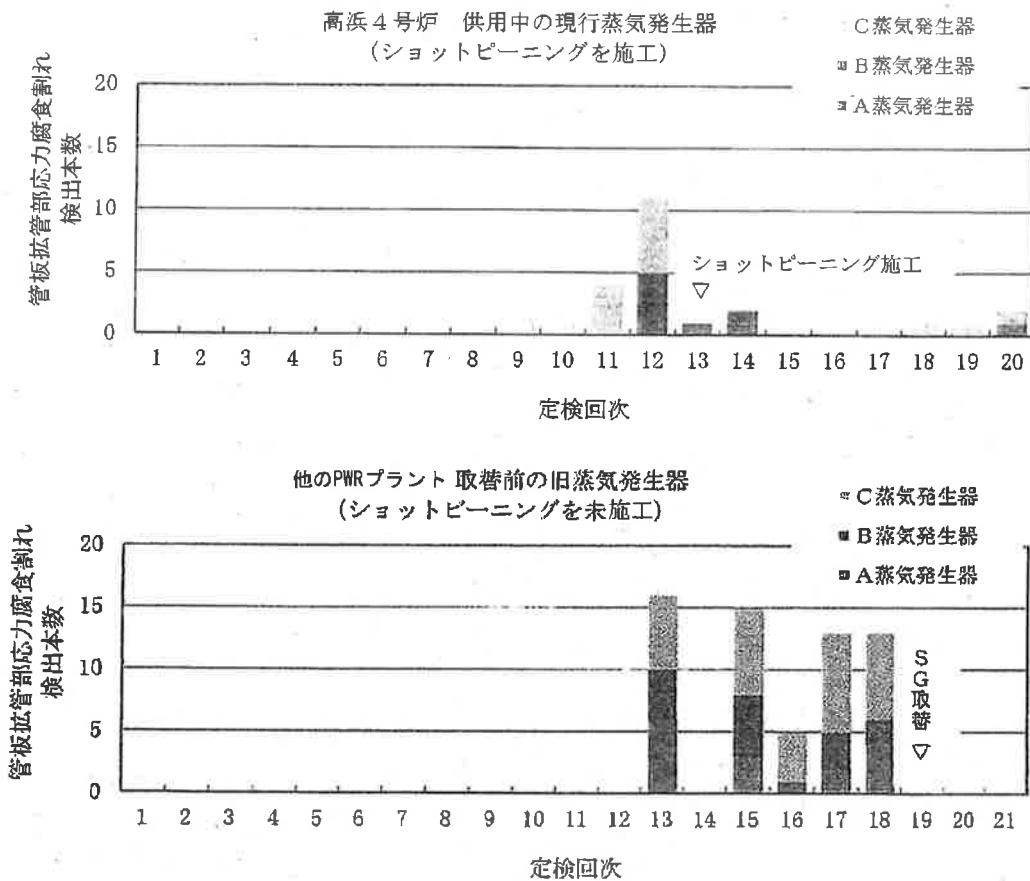


図2.3-9 国内蒸気発生器の管板拡管部応力腐食割れの検出状況
(600系ニッケル基合金(特殊熱処理材)、全厚液圧+全厚ローラ拡管採用プラント)

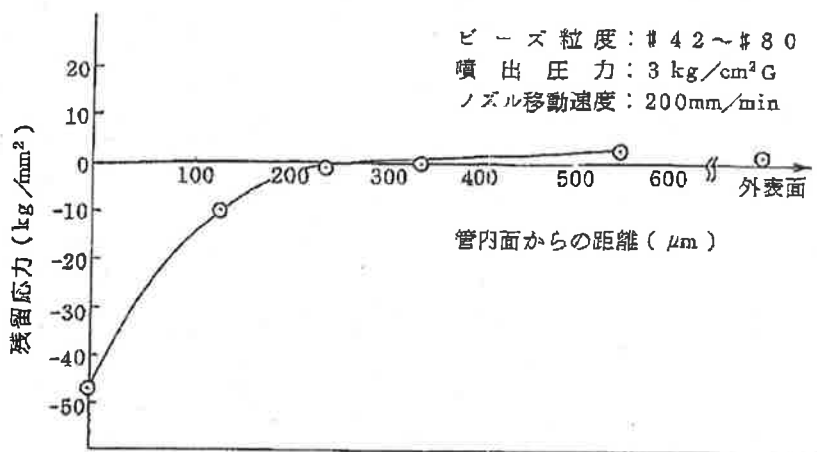


図2.3-10 ショットピーニング施工管の周方向残留応力の管肉厚方向分布
(X線法による測定)

[出典: メーカーデータ 原子力発電技術顧問会機器部会 審議資料「蒸気発生器周辺部伝熱管クレビス部リロール工法およびショットピーニング工法について」昭和61年8月]

表2.3-2 拡管部および拡管境界部の応力レベル (実寸大拡管モックアップによるポリチオン酸試験結果)

[出典: メーカーデータ 第11回定期検査 蒸気発生器伝熱管 渦流探傷検査結果 顛末書「蒸気発生器伝熱管の抜管調査結果について」
(平成11年6月)より抜粋、健全性評価を追記]

モデル	拡管法	管板管穴形状	実寸大拡管部モックアップの割れ検出位置 (浸透探傷試験での指示位置)	実機運転条件		健全性評価	
				割れ検出位置 の推定応力	温度		
ローラ拡管不良を模擬	液圧拡管 + ローラ拡管	ローラ先端部近傍に 0.05mm深さ、軸長さ35mm の全周溝			310MPa以下 (32kg/mm ² 以下)	320℃	SCCが発生する可能性は小さい。
部分的な 管板管穴拡大を模擬	液圧拡管 + ローラ拡管	ローラ先端部近傍に 0.1mm深さ、軸長さ35mm の1/3周溝 (部分溝)			~370MPa (~38kg/mm ²)	320℃	残留応力と運転中の内圧 応力が相まってSCCが発 生する可能性が考えられ る。
		ローラ拡管先端部に 0.1mm深さ、軸長さ10mm の1/3周溝 (部分溝)			~370MPa (~38kg/mm ²)	320℃	
正常拡管	液圧拡管 + ローラ拡管	溝なし			~290MPa (~30kg/mm ²)	320℃	本拡管工法は高浜3/4 号炉に適用した工法に該 当する。 SCCが発生する可能性 は小さい。
	ローラ拡管	溝なし			~440MPa (~45kg/mm ²)	320℃	(参考)本拡管工法は高 浜3/4号炉以前に適用 されていた工法である。 SCCが発生する可能性 がある。

表2.3-3 蒸気発生器伝熱管へのショットピーニングの有効性について

	SG伝熱管ショットピーニング (ECTにより施工前の表面状態を確認)	(参考) SG管台超音波ショットピーニング (ECTにより施工前の表面状態を確認)
ECT検出可能範囲と 圧縮応力付与範囲の関係	<p>伝熱管板厚 約 1.3mm</p> <p>圧縮応力付与範囲^{※1} 約 0.2mm</p> <p>ECT^{※2}検出可能範囲 約 0.5mm 以上</p> <p>※1: 伝熱管は薄肉管であることから、外面に大きな引張残留応力を残留させずに、圧縮応力を付与できる範囲が小さい。 ※2: 高浜3/4号炉でショットピーニング施工時に実施したDF-ECTの場合(現在適用しているインテリジェントECTでもほぼ同様)。</p>	<p>管台溶接部板厚 約 80mm</p> <p>圧縮応力付与範囲 約 1mm</p> <p>ECT^{※3}検出可能範囲 約 0.5mm 以上</p> <p>※3: 高浜3/4号炉で超音波ショットピーニング施工時に実施したECTの場合</p>
施工前確認時の対応	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 圧縮応力の付与されない範囲で、ECTで検出可能であったPWSCCは、当該管を施栓し、供用外としている。(①) ➤ 圧縮応力の付与されない範囲で、ECTにより検出されないPWSCCが存在した状態でショットピーニングを施工した可能性は否定できない。(②) ➤ 圧縮応力の付与される範囲にECT検出限界未満のPWSCCが存在したとしても、進展は停止するものと考えられる。(③) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 圧縮応力の付与されない範囲で、ECTで検出可能であったPWSCCは、除去した上で超音波ショットピーニング等^{※4}を施工している。(①) ➤ 圧縮応力の付与される範囲で、ECTにより検出可能であったPWSCCは、除去した上で超音波ショットピーニング等^{※4}を施工している。(②) ➤ 圧縮応力の付与される範囲にECT検出限界未満のPWSCCが存在したとしても、進展は停止するものと考えられる。(③) <p>※4: 高浜3/4号炉の冷却材入口管台(高温側の管台)は、ECTで検出されたPWSCCは除去した上で耐食性に優れた690系ニッケル基合金による溶接への変更を選択。</p>
有効性の評価	<p>ショットピーニングを施工した時点で、圧縮応力の付与されない範囲にECTにより検出不可能なPWSCC(約0.2mm~約0.5mmの深さのPWSCC)が既に存在したとすると、ショットピーニング施工後もPWSCCが進展し、顕在化する可能性がある。</p>	<p>超音波ショットピーニングを施工した時点で、圧縮応力の付与される範囲とECTの検出能力の関係から、圧縮応力の付与されない範囲にPWSCCが存在する可能性はなく、超音波ショットピーニングの施工後にPWSCCが進展し、顕在化することはない。</p>

渦流探傷検査で検出不可能な傷がショットピーニング施工時点で存在し、その後の運転で、渦流探傷検査で検出できる深さに成長することが考えられる。そこで、渦流探傷検査で検出できない深さの傷が、構造上許容される深さの傷に成長するのに要する時間を検討すると、以下のとおりとなる。

$$T = (t_{CL} - t_{ET}) \div V$$

ここで、 T : き裂が進展するのに要する時間

t_{CL} : 構造上許容されるき裂の深さ

t_{ET} : 保守的に、渦流探傷検査で検出できるき裂の深さを考慮する

V : き裂進展速度

構造上許容されるき裂の深さは、設計条件および事故時における欠陥を有する伝熱管の内圧強度の検討結果から $t_{CL} = 0.83 \text{ mm}$ (元の板厚の約6%深さ) を用いる。渦流探傷検査で検出できる傷 (内面軸方向の割れ状欠陥) の深さは、当該検査手法の確性試験の確認結果から $t_{ET} = 0.46 \text{ mm}$ (元の板厚の約3%深さ) を用いる。き裂進展速度は、600系ニッケル基合金 (特殊熱処理材) 伝熱管のローラ拡管部で想定される進展速度として、 $V = 3.3 \times 10^{-9} \text{ mm/s}$ を用いる。

これにより、渦流探傷検査で検出できない深さの傷が、構造上許容される深さの傷に成長するのに要する時間は、

$$\frac{(0.83 - 0.46) \text{ mm}}{(3.3 \times 10^{-9}) \text{ mm/sec}} \div 3600 = 3 \text{ 万時間}$$

である。よって、定期検査ごとに全数の渦流探傷検査を実施することにより健全性を確保できると考える。

[まとめ]

伝熱管損傷のうち振止め金具（AVB）部摩耗、ピitting、管板直上部腐食損傷、フレット疲労、小曲げUバンド部応力腐食割れおよびデンティングについては、各評価により当該の劣化事象が生じる可能性は小さい。

管板拡管部および拡管境界部応力腐食割れについては、予防保全措置としてショットピーニングを施工し、以後の検査において発生頻度は著しく低下している。しかし、ショットピーニングによる圧縮応力の付与されない範囲でかつ渦流探傷検査で検出不可能な範囲の応力腐食割れは潜在する可能性は否定できない。また粒界腐食割れについては、2次側の水質を改善し、発生を抑制しており、高浜4号炉では発生が確認されていないが、水質改善以前に生じた可能性がある粒界腐食割れが改善された環境下でも徐々にではあるが進展することが考えられるため、渦流探傷検査で検出不可能な範囲の粒界腐食割れは潜在する可能性は否定できない。以上のことから、継続的に全数渦流探傷検査を実施し健全性を確認している。

② 現状保全

伝熱管については、損傷形態、部位に応じた適切な渦流探傷プローブにより、定期的に全数渦流探傷検査を実施し、健全性を確認している。

また、定期的にスラッジランシングを実施し、管板上のスラッジ除去を行っている。

③ 総合評価

健全性評価結果から判断して、伝熱管損傷のうち振止め金具（AVB）部摩耗、ピitting、管板直上部腐食損傷、フレット疲労、小曲げUバンド部応力腐食割れおよびデンティングについては損傷の可能性は小さいと考える。

しかしながら、管板拡管部および拡管境界部応力腐食割れ等については発生が否定できないことから、潜在している可能性のある応力腐食割れが進展した場合であっても構造上許容されるき裂の深さに達していないことを確認する必要がある。応力腐食割れの進展が構造上許容されるき裂の深さに達していないことは定期的な全数渦流探傷検査にて検知可能であり、点検手法として適切である。

c. 高経年化への対応

伝熱管の損傷については、定期的に渦流探傷検査およびスラッジランシングを実施していく。なお、伝熱管材料は600系ニッケル基合金であり、管板拡管部の応力腐食割れ等の発生が否定できないことから、現状保全項目に加えて、蒸気発生器取替を含めた保全方法を検討していく。