


関原発 第 283 号
平成30年 9 月 13 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3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 9月13日

関西電力株式会社

件名	高浜発電所3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9月12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3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 (C)																				
事象の状況	<p>1. 事象発生の状況</p> <p>高浜発電所3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8月3日より第23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、C-SGの伝熱管1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9月12日10時52分に判断した。</p> <p>なお、A、B-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</p> <p>平成30年8月19日～平成30年9月12日(定期事業者検査終了日)</p> <p>探傷検査・データ整理期間 平成30年8月19日～平成30年9月9日</p> <p>解析・評価検査期間 平成30年9月10日～平成30年9月12日</p> <p>(2) 検査範囲</p> <p>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。</p> <p>(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>3,273</td> <td>3,248</td> <td>3,263</td> <td>9,784</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</p> <p>ECTデータを評価した結果^{*6}、1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。</p> <p>(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>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</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 NAI-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	3,273	3,248	3,263	9,784	SG	A	B	C	合計	指示管本数	0	0	1	1
SG	A	B	C	合計																	
検査対象本数	3,273	3,248	3,263	9,784																	
SG	A	B	C	合計																	
指示管本数	0	0	1	1																	

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、リサージュ表示*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23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23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23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T600*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

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）
- ・第21回定期検査（平成30年5月～平成30年9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、3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、3号機の伝熱管については、第13回定期検査時(平成13年6月～平成13年8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. 3号機では第13回定期検査時(平成13年6月～平成13年8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、SG伝熱管のECTで有意な信号指示は認められていなかったが、第21回定期検査時(平成24年2月～平成28年2月)に1本、第22回定期検査時(平成28年12月～平成29年6月)に1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>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>既施栓本数</td> <td>109</td> <td>134</td> <td>119</td> <td>362</td> </tr> <tr> <td>総施栓本数</td> <td>109</td> <td>134</td> <td>120</td> <td>363</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>3.2</td> <td>4.0</td> <td>3.5</td> <td>3.6</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3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	0	0	1	1	既施栓本数	109	134	119	362	総施栓本数	109	134	120	363	設備本数	3,382	3,382	3,382	10,146	施栓率(%)	3.2	4.0	3.5	3.6
SG	A	B	C	合計																											
今回施栓本数	0	0	1	1																											
既施栓本数	109	134	119	362																											
総施栓本数	109	134	120	363																											
設備本数	3,382	3,382	3,382	10,146																											
施栓率(%)	3.2	4.0	3.5	3.6																											

高浜発電所3号機
蒸気発生器伝熱管の損傷について

平成30年9月

関西電力株式会社

1. 件名

高浜発電所3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9月12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23回定期検査中

5. 事象発生の状況

（添付資料－1）

高浜発電所3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8月3日より第23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、C-SGの伝熱管1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9月12日10時52分に判断した。

なお、A、B-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8月19日～平成30年9月12日（定期事業者検査終了日）

探傷検査・データ整理期間 平成30年8月19日～平成30年9月9日

解析・評価検査期間 平成30年9月10日～平成30年9月12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	3,273	3,248	3,263	9,784

^{*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)

ECTデータを評価した結果^{*6}、1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	0	0	1	1

^{*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ECTで有意な信号指示が認められた原因調査を、要因分析 (FT) 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

(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23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23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23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。

*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E C T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E C T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）
- ・第21回定期検査（平成30年5月～平成30年9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E C Tにおいても、3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E C T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、3号機の伝熱管については、第13回定期検査時（平成13年6月～平成13年8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. 3号機では第13回定期検査時(平成13年6月～平成13年8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、SG伝熱管のECTで有意な信号指示は認められていなかったが、第21回定期検査時(平成24年2月～平成28年2月)に1本、第22回定期検査時(平成28年12月～平成29年6月)に1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*²⁰10%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	0	0	1	1
既施栓本数	109	134	119	362
総施栓本数	109	134	120	363
設備本数	3,382	3,382	3,382	10,146
施栓率 (%)	3.2	4.0	3.5	3.6

[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3号機では施栓率10%において安全性を確認している。

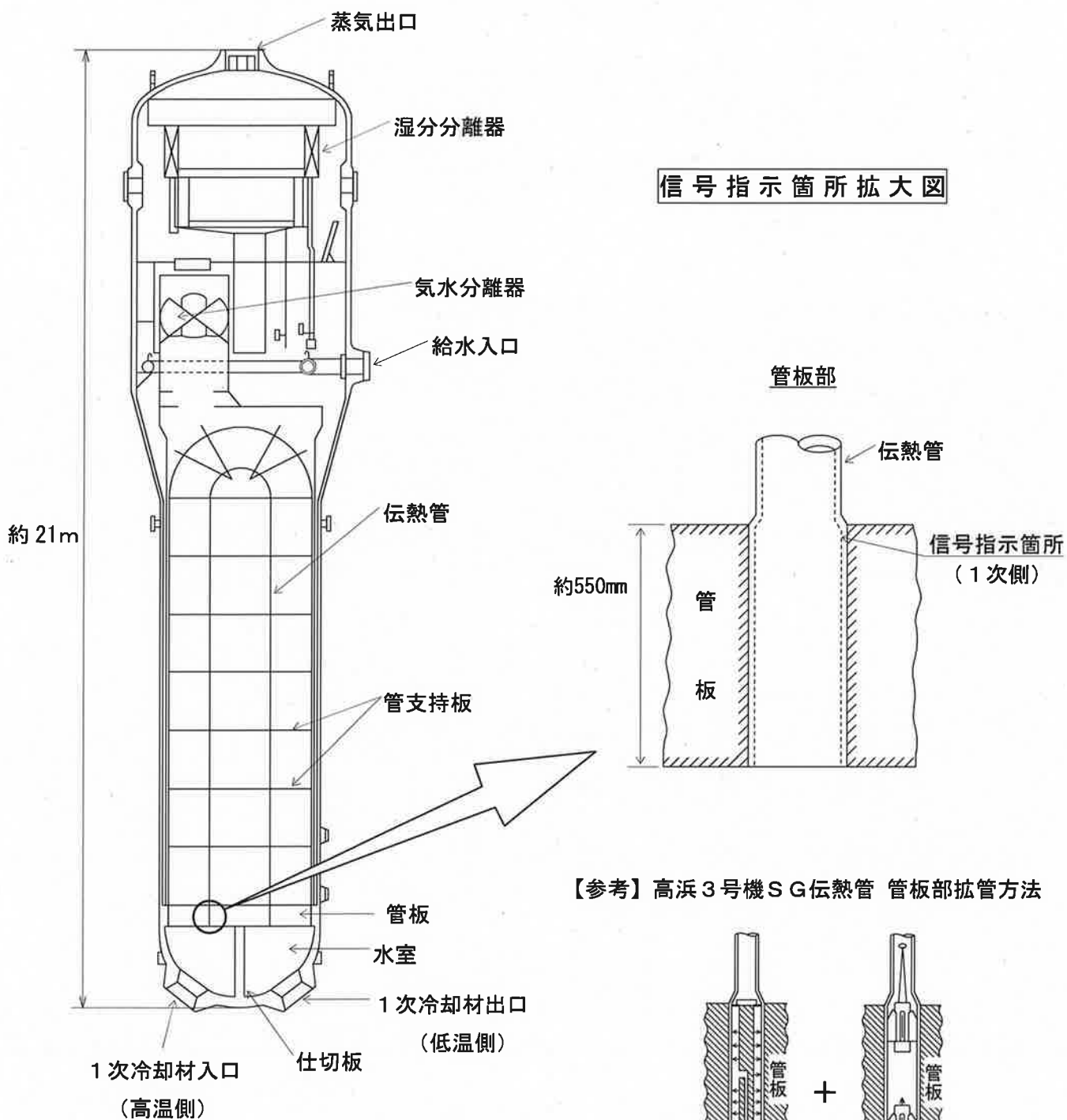
(2) 過去の知見調査の結果から、高温側管板部では検出が想定されることから、今後も定期検査毎に、SG伝熱管の全数について全長のECTを実施して健全性を確認していく。

以上

添 付 資 料

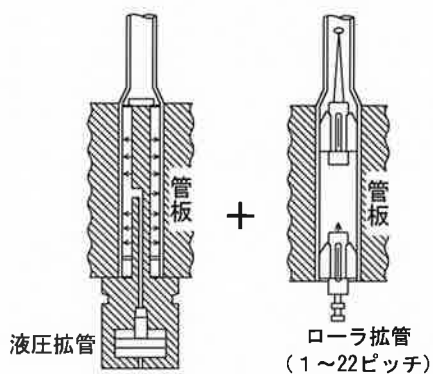
1. SG伝熱管信号指示箇所概要図
2. 高浜3号機 SG伝熱管ECT結果
3. 高浜3号機 SG伝熱管ECT信号指示位置図
4. 高浜3号機 SG伝熱管管板拡管部の有意な信号指示の要因検討
(損傷原因の推定FT図)
5. 信号指示の記録
6. 高浜3号機 蒸気発生器 製造時検査記録
7. 製造履歴に関する聞き取り調査
8. 高浜3号機 運転履歴調査結果(1次冷却材温度・圧力、放射線監視装置)
9. 高浜3号機 運転履歴調査結果(1次冷却材水質)
10. 高浜3号機 蒸気発生器 材料検査記録
11. 粒界腐食割れ、ピitting、局所変形、エロージョンについて
12. 高浜3号機 第12回および高浜4号機 第11回定期検査時 抜管調査結果について
13. 高浜3号機 第23回・第22回 定期検査時の信号指示の比較
14. 高浜3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3号機 SG伝熱管の補修来歴
18. 高浜発電所3号炉 高経年化技術評価書(抜粋)

S G 伝熱管信号指示箇所概要図



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

【参考】高浜3号機SG伝熱管 管板部拡管方法



高浜3号機 SG伝熱管ECT結果

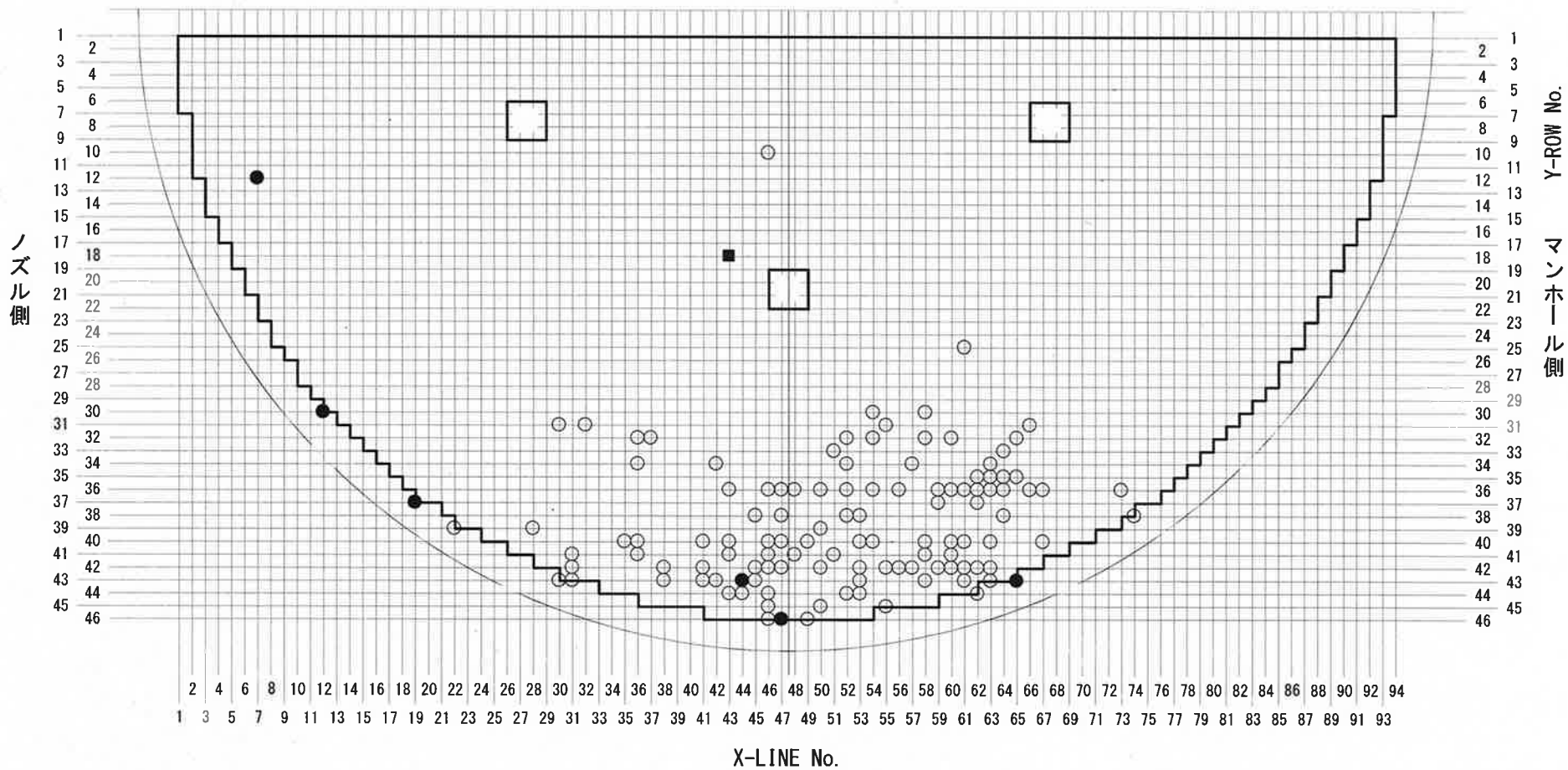
	A-SG	B-SG	C-SG	合計
設備本数	3,382	3,382	3,382	10,146
既施栓本数 (応力腐食割れによる施栓本数※)	109 (7)	134 (10)	119 (6)	362 (23)
検査対象本数	3,273	3,248	3,263	9,784
指示管本数	0	0	1	1
結果	高温側伝熱管の管板部のローラ拡管上端部（22ピッチ）において1本に有意な信号指示（内面軸方向に沿ったきず信号）が認められた。			
備考				

※既施栓本数の内数を示す。

高浜3号機 SG伝熱管ECT信号指示位置図
C-SG (高温側)

- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (113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 (1本)

本図はSG上部から見た位置を示す



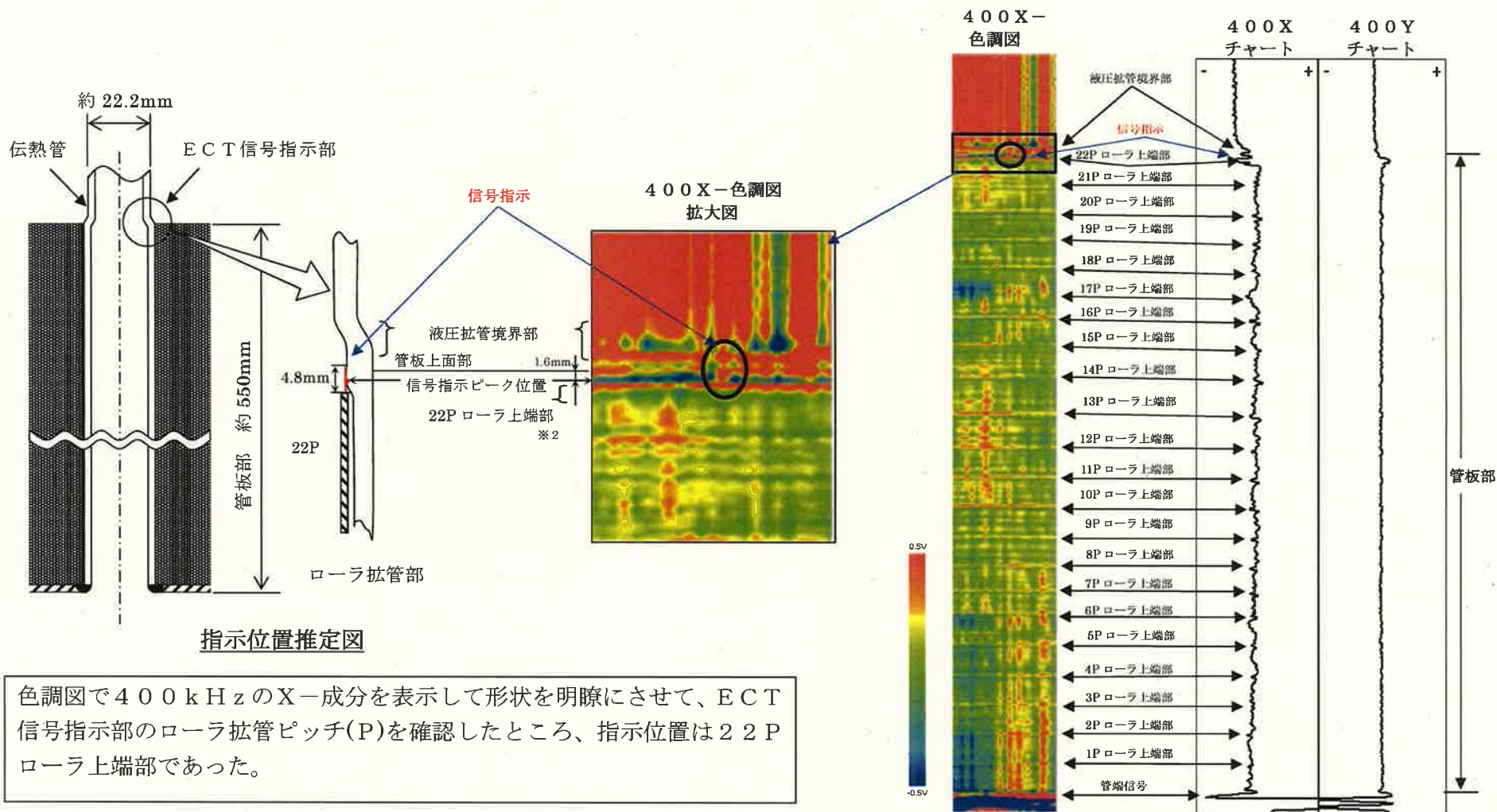
高浜3号機 SG伝熱管管板拡張部の有意な信号指示の要因検討(損傷原因の推定FT図)

要因	因子	調査項目	調査結果	考察					
2次側からの損傷	管板拡張部で有意な信号指示を確認	ECT波形調査	信号指示をリサーチ波形にて分析した結果、400kHzは内面軸方向きずの位相を示している。100kHzでは形状等のノイズ成分の除去は困難であるが、僅全部の波形との比較から内面軸方向きずの影響が示されている。以上から、内面からの信号であると推定されたため、2次側からの損傷の可能性はない【添付資料5】	ECT波形調査から2次側からの損傷ではないと判断	×				
		延性割れ	過大応力	設計図書による確認 異常な過渡変化の有無を調査	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 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】	設計図書による確認及び異常な過渡変化のないことから延性割れではないと判断	×		
			材料不良	ミルシートにより材質を確認	ミルシートから、材料の成分はSG製造メーカ仕様通りであり、TT600合金であることを確認した【添付資料10】	材料調査から材料不良による延性割れではないと判断	×		
		疲労割れ	圧力・温度過渡	設計図書による確認 異常な過渡変化の有無を調査	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 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】	設計図書による確認及び異常な過渡変化のないことから疲労割れではないと判断	×		
			機械的振動 流体振動	振動の有無を調査	運転履歴から、有意な振動を与えるような、異常な温度・圧力変化がないことを確認した【添付資料8】	有意な機械的振動・流体振動がないことから疲労割れではないと判断	×		
		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】	ECTの波形から定期検査作業中に発生したスクラッチではないと判断	×		
		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次冷却材には滞留酸濃度の低減のため水素が注入され、良好な還元性雰囲気は維持されている。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】	水質環境及び材料調査から粒界腐食割れ、ピittingではないと判断	×		
		ピitting	材料	ミルシートにより材質を確認	ミルシートから、材料の成分はSG製造メーカ仕様通りであり、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5、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はないことを確認した【添付資料8】		
					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。管板拡張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】	異常な過渡変化がないこと及び限界流速の調査からエロージョンではないと判断	×	
		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質を確認	ミルシートから、材料の成分はSG製造メーカ仕様通りであり、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回定期検査の拡張調査結果から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、不十分なローラ弧管に伴う引張残留応力が残存し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まま残存していた場合に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いことが確認された【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の施工による欠陥	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 (C-SG X43-Y18)



指示位置推定図

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。

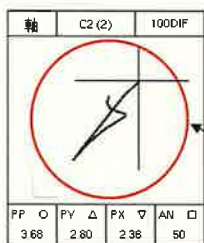
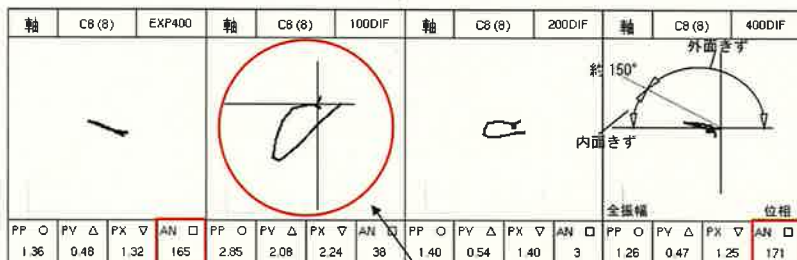
※1：24組のコイル分のチャートを平面状に並べ、信号振幅に応じて色調として表示させたもの。伝熱管全長についての信号指示の大きさや位置等の分析に用いる表示方法。

※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広げて伝熱管と管板を圧着した最終ピッチ部。

インテリジェント ECT 指示管波形

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 (C-SG X43-Y18)



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]

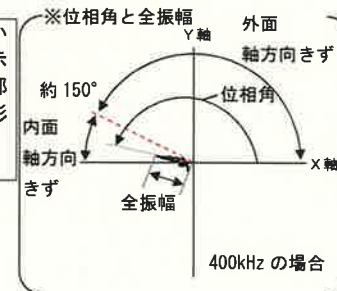
400kHz リサーチ波形の位相から内面軸方向きずパターンを示しており、100kHz において健全部と比較して、内面軸方向きずの影響を示した波形となっている。

位相角

E C T 信号を 2 次元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

100kHz においてきず信号が小さく、構造物や形状等のノイズ信号が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 (9/10) を参照]

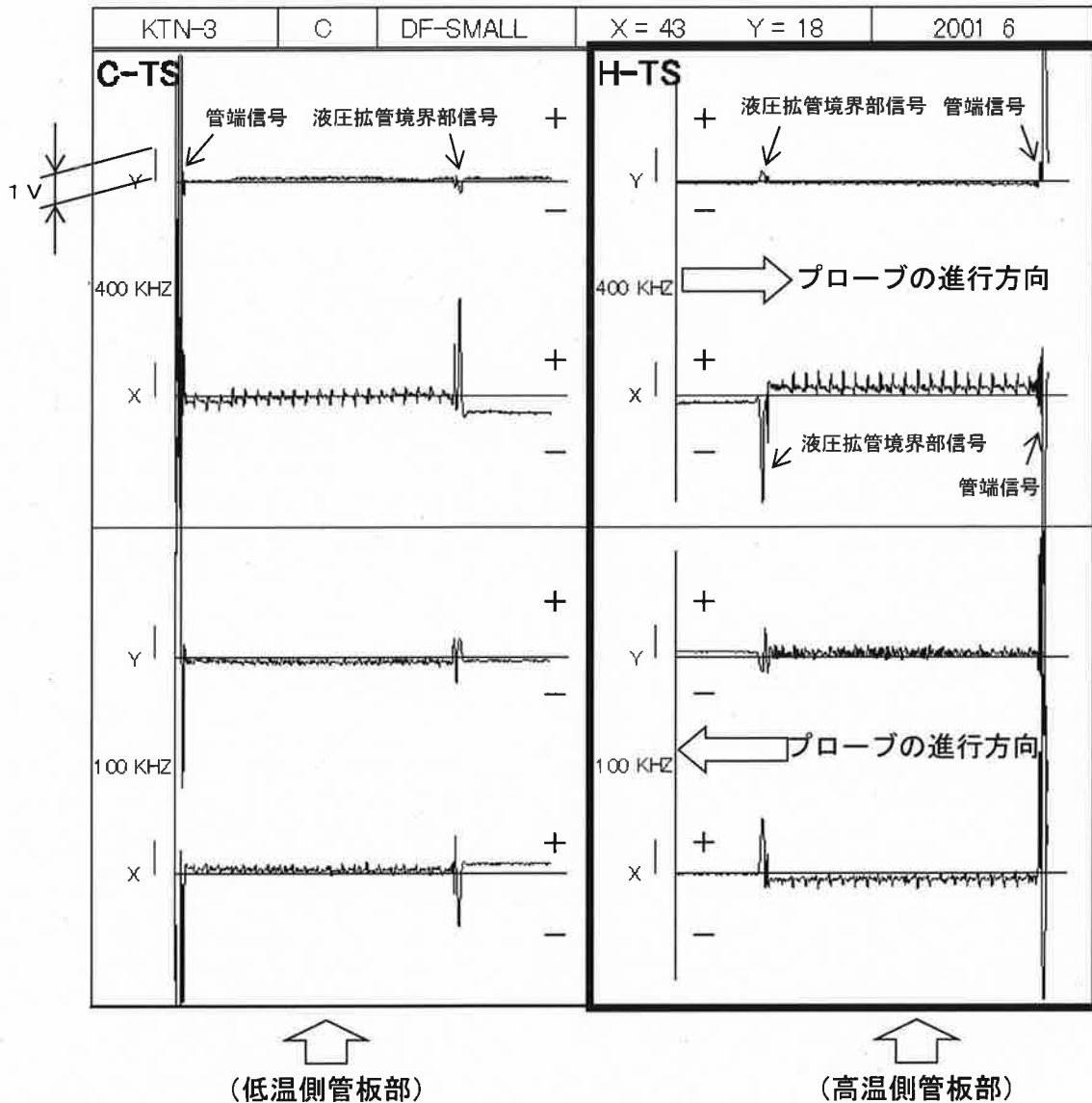
※ 1 : 渦電流変化の電気信号を図で表したもの (水平成分および垂直成分を同一画面に表示)。

※ 2 : 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。

※ 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

第13回定期検査において、ショットピーニング施工前に実施したDF-ECTの波形を確認したところ、当該伝熱管(C-SG X43-Y18)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。

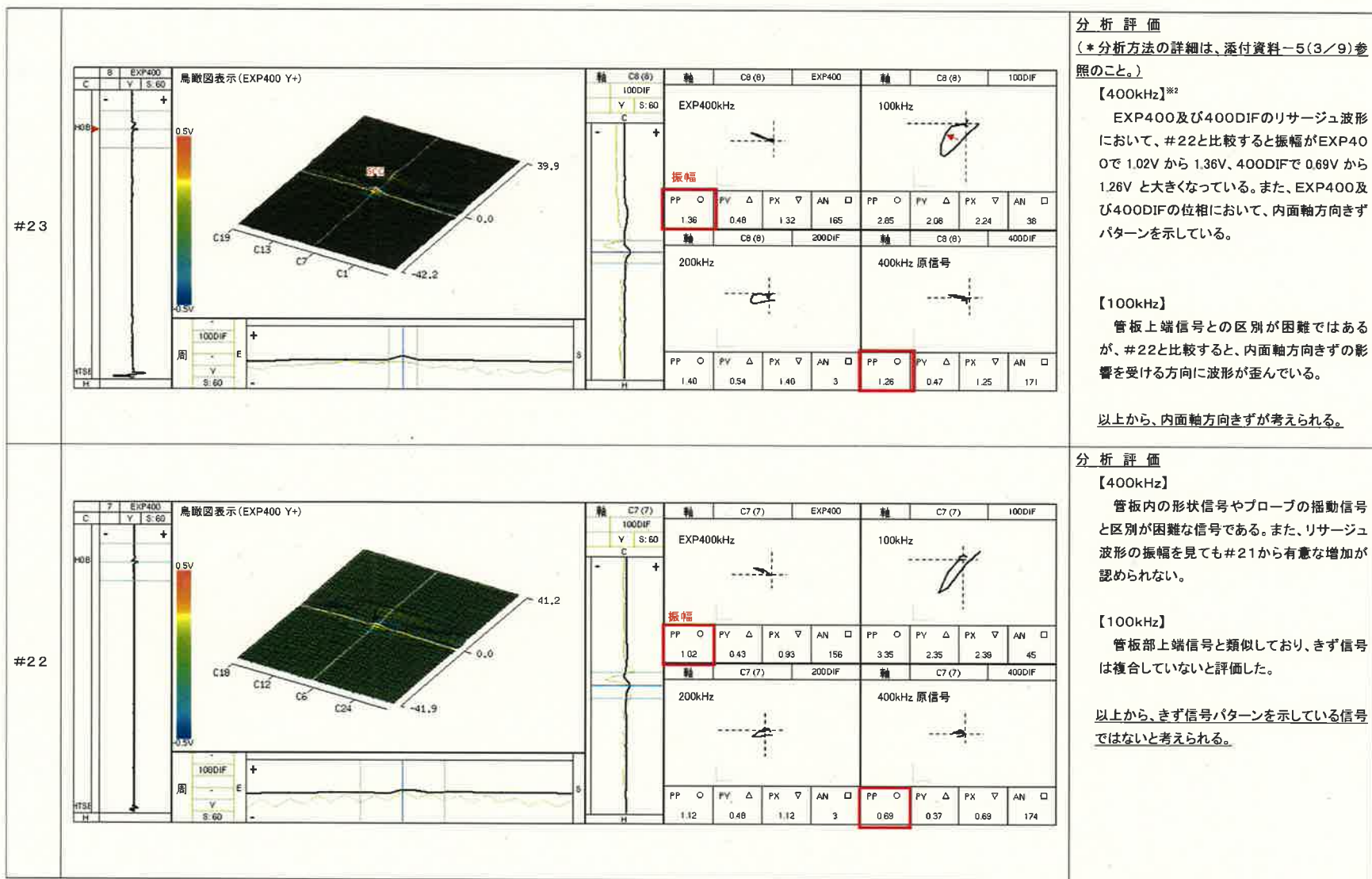


管板部の有意信号とは、

- ・ 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

インテリジェント ECT^{※1}の探傷データ(1/4)
 (高温側管板部の経年波形 C-SG X43-Y18)



※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、原信号及び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

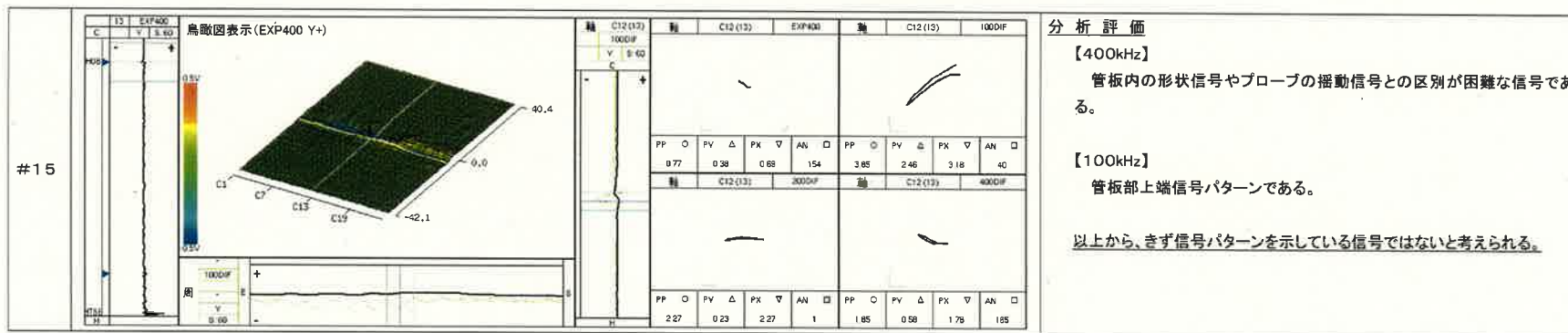
インテリジェント ECT の探傷データ(2/4)
 (高温側管板部の経年波形 C-SG X43-Y18)

#21	<p>鳥瞰図表示 (EXP400 Y+)</p> <p>軸 C2 (23) 1000IF</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>軸</th> <th>C2 (23)</th> <th>EXP400</th> <th>軸</th> <th>C2 (23)</th> <th>1000IF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PY</td> <td>△</td> <td>PX</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PV</td> <td>△</td> <td>PX</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0.79</td> <td>0.38</td> <td>0.70</td> <td></td> <td>153</td> <td></td> <td></td> <td>3.26</td> <td>2.41</td> <td>2.34</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>45</td> <td></td> </tr> <tr> <td>軸</td> <td>C2 (23)</td> <td>2000IF</td> <td>軸</td> <td>C2 (23)</td> <td>4000IF</td> <td colspan="10"></td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PV</td> <td>△</td> <td>PX</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PV</td> <td>△</td> <td>PX</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1.60</td> <td>0.44</td> <td>1.58</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>1.02</td> <td>0.29</td> <td>1.01</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>171</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	軸	C2 (23)	EXP400	軸	C2 (23)	1000IF	PP	○	PY	△	PX	▽	AN	□	PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□		0.79	0.38	0.70		153			3.26	2.41	2.34				45		軸	C2 (23)	2000IF	軸	C2 (23)	4000IF											PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□	PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□		1.60	0.44	1.58					1.02	0.29	1.01				171		<p>分析評価</p> <p>【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。</p> <p>【100kHz】 管板部上端信号パターンである。</p> <p><u>以上から、ま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。</u></p>
軸	C2 (23)	EXP400	軸	C2 (23)	1000IF																																																																																			
PP	○	PY	△	PX	▽	AN	□	PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□																																																																									
	0.79	0.38	0.70		153			3.26	2.41	2.34				45																																																																										
軸	C2 (23)	2000IF	軸	C2 (23)	4000IF																																																																																			
PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□	PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□																																																																									
	1.60	0.44	1.58					1.02	0.29	1.01				171																																																																										
#20	<p>鳥瞰図表示 (EXP400 Y+)</p> <p>軸 C7 (18) 1000IF</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>軸</th> <th>C7 (18)</th> <th>EXP400</th> <th>軸</th> <th>C7 (18)</th> <th>1000IF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PY</td> <td>△</td> <td>PX</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PV</td> <td>△</td> <td>PX</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0.91</td> <td>0.19</td> <td>0.89</td> <td></td> <td>188</td> <td></td> <td></td> <td>2.96</td> <td>2.41</td> <td>2.01</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>95</td> <td></td> </tr> <tr> <td>軸</td> <td>C7 (18)</td> <td>2000IF</td> <td>軸</td> <td>C7 (18)</td> <td>4000IF</td> <td colspan="10"></td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PV</td> <td>△</td> <td>PX</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PV</td> <td>△</td> <td>PX</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1.36</td> <td>0.56</td> <td>1.31</td> <td></td> <td>16</td> <td></td> <td></td> <td>0.73</td> <td>0.28</td> <td>0.72</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>170</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	軸	C7 (18)	EXP400	軸	C7 (18)	1000IF	PP	○	PY	△	PX	▽	AN	□	PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□		0.91	0.19	0.89		188			2.96	2.41	2.01				95		軸	C7 (18)	2000IF	軸	C7 (18)	4000IF											PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□	PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□		1.36	0.56	1.31		16			0.73	0.28	0.72				170		<p>分析評価</p> <p>【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。</p> <p>【100kHz】 管板部上端信号パターンである。</p> <p><u>以上から、ま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。</u></p>
軸	C7 (18)	EXP400	軸	C7 (18)	1000IF																																																																																			
PP	○	PY	△	PX	▽	AN	□	PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□																																																																									
	0.91	0.19	0.89		188			2.96	2.41	2.01				95																																																																										
軸	C7 (18)	2000IF	軸	C7 (18)	4000IF																																																																																			
PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□	PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□																																																																									
	1.36	0.56	1.31		16			0.73	0.28	0.72				170																																																																										
#19	<p>鳥瞰図表示 (EXP400 Y+)</p> <p>軸 C8 (8) 1000IF</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>軸</th> <th>C8 (8)</th> <th>EXP400</th> <th>軸</th> <th>C8 (8)</th> <th>1000IF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PY</td> <td>△</td> <td>PX</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PV</td> <td>△</td> <td>PX</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0.62</td> <td>0.22</td> <td>0.59</td> <td></td> <td>161</td> <td></td> <td></td> <td>2.87</td> <td>2.29</td> <td>1.83</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>51</td> <td></td> </tr> <tr> <td>軸</td> <td>C8 (8)</td> <td>2000IF</td> <td>軸</td> <td>C8 (8)</td> <td>4000IF</td> <td colspan="10"></td> </tr> <tr> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PV</td> <td>△</td> <td>PX</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> <td>PP</td> <td>○</td> <td>PV</td> <td>△</td> <td>PX</td> <td>▽</td> <td>AN</td> <td>□</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1.41</td> <td>0.48</td> <td>1.34</td> <td></td> <td>18</td> <td></td> <td></td> <td>0.72</td> <td>0.19</td> <td>0.70</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>167</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	軸	C8 (8)	EXP400	軸	C8 (8)	1000IF	PP	○	PY	△	PX	▽	AN	□	PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□		0.62	0.22	0.59		161			2.87	2.29	1.83				51		軸	C8 (8)	2000IF	軸	C8 (8)	4000IF											PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□	PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□		1.41	0.48	1.34		18			0.72	0.19	0.70				167		<p>分析評価</p> <p>【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。</p> <p>【100kHz】 管板部上端信号パターンである。</p> <p><u>以上から、ま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。</u></p>
軸	C8 (8)	EXP400	軸	C8 (8)	1000IF																																																																																			
PP	○	PY	△	PX	▽	AN	□	PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□																																																																									
	0.62	0.22	0.59		161			2.87	2.29	1.83				51																																																																										
軸	C8 (8)	2000IF	軸	C8 (8)	4000IF																																																																																			
PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□	PP	○	PV	△	PX	▽	AN	□																																																																									
	1.41	0.48	1.34		18			0.72	0.19	0.70				167																																																																										

インテリジェント ECT の探傷データ(3/4)
 (高温側管板部の経年波形 C-SG X43-Y18)

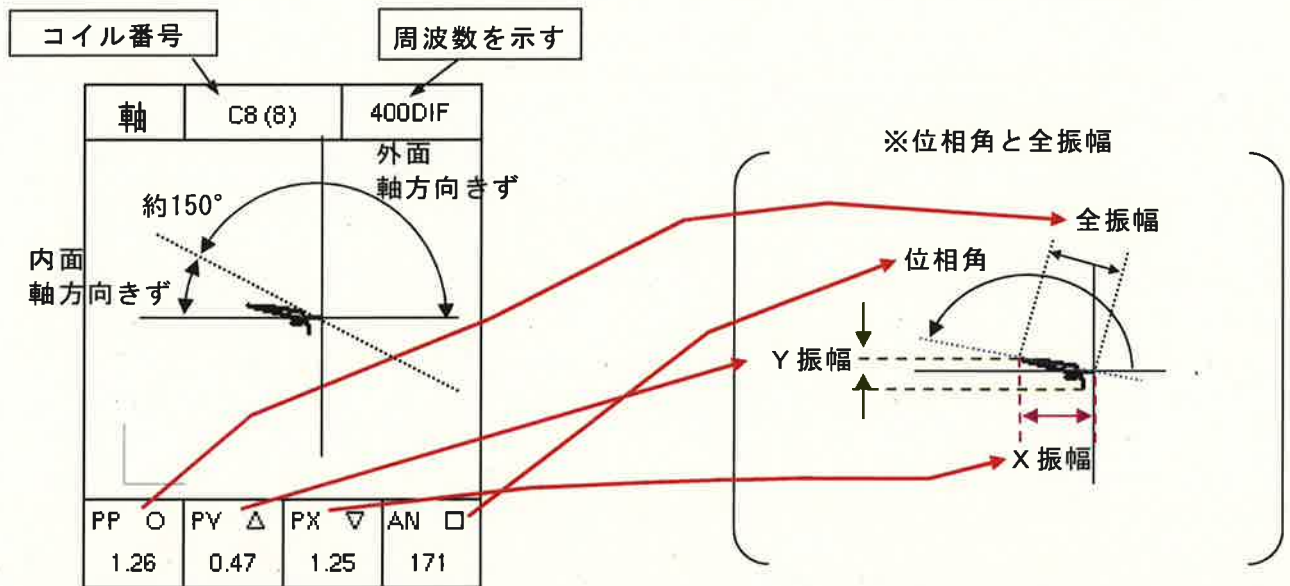
#18	<p>鳥瞰図表示 (EXP400 Y+)</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>軸</th> <th>C6 (6)</th> <th>EXP400</th> <th>軸</th> <th>C6 (6)</th> <th>1000IF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PP</td> <td>0.49</td> <td>182</td> <td>PP</td> <td>2.83</td> <td>1.63</td> </tr> <tr> <td>PV</td> <td>0.15</td> <td></td> <td>PV</td> <td>2.32</td> <td>52</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>0.47</td> <td></td> <td>PX</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td></td> <td></td> <td>AN</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th>軸</th> <th>C6 (6)</th> <th>2000IF</th> <th>軸</th> <th>C6 (6)</th> <th>4000IF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PP</td> <td>1.22</td> <td>22</td> <td>PP</td> <td>0.71</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>PV</td> <td>0.65</td> <td></td> <td>PV</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>1.12</td> <td></td> <td>PX</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td></td> <td></td> <td>AN</td> <td></td> <td>174</td> </tr> </tbody> </table>	軸	C6 (6)	EXP400	軸	C6 (6)	1000IF	PP	0.49	182	PP	2.83	1.63	PV	0.15		PV	2.32	52	PX	0.47		PX			AN			AN			軸	C6 (6)	2000IF	軸	C6 (6)	4000IF	PP	1.22	22	PP	0.71	0.15	PV	0.65		PV			PX	1.12		PX			AN			AN		174	<p>分析評価</p> <p>【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。</p> <p>【100kHz】 管板部上端信号パターンである。</p> <p><u>以上から、ま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。</u></p>
軸	C6 (6)	EXP400	軸	C6 (6)	1000IF																																																										
PP	0.49	182	PP	2.83	1.63																																																										
PV	0.15		PV	2.32	52																																																										
PX	0.47		PX																																																												
AN			AN																																																												
軸	C6 (6)	2000IF	軸	C6 (6)	4000IF																																																										
PP	1.22	22	PP	0.71	0.15																																																										
PV	0.65		PV																																																												
PX	1.12		PX																																																												
AN			AN		174																																																										
#17	<p>鳥瞰図表示 (EXP400 Y+)</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>軸</th> <th>C6 (6)</th> <th>EXP400</th> <th>軸</th> <th>C6 (6)</th> <th>1000IF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PP</td> <td>0.73</td> <td>179</td> <td>PP</td> <td>2.87</td> <td>1.63</td> </tr> <tr> <td>PV</td> <td>0.18</td> <td></td> <td>PV</td> <td>2.29</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>0.73</td> <td></td> <td>PX</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td></td> <td></td> <td>AN</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th>軸</th> <th>C6 (6)</th> <th>2000IF</th> <th>軸</th> <th>C6 (6)</th> <th>4000IF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PP</td> <td>1.46</td> <td>20</td> <td>PP</td> <td>0.65</td> <td>0.17</td> </tr> <tr> <td>PV</td> <td>0.52</td> <td></td> <td>PV</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>1.37</td> <td></td> <td>PX</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td></td> <td></td> <td>AN</td> <td></td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	軸	C6 (6)	EXP400	軸	C6 (6)	1000IF	PP	0.73	179	PP	2.87	1.63	PV	0.18		PV	2.29	50	PX	0.73		PX			AN			AN			軸	C6 (6)	2000IF	軸	C6 (6)	4000IF	PP	1.46	20	PP	0.65	0.17	PV	0.52		PV			PX	1.37		PX			AN			AN		1	<p>分析評価</p> <p>【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。</p> <p>【100kHz】 管板部上端信号パターンである。</p> <p><u>以上から、ま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。</u></p>
軸	C6 (6)	EXP400	軸	C6 (6)	1000IF																																																										
PP	0.73	179	PP	2.87	1.63																																																										
PV	0.18		PV	2.29	50																																																										
PX	0.73		PX																																																												
AN			AN																																																												
軸	C6 (6)	2000IF	軸	C6 (6)	4000IF																																																										
PP	1.46	20	PP	0.65	0.17																																																										
PV	0.52		PV																																																												
PX	1.37		PX																																																												
AN			AN		1																																																										
#16	<p>鳥瞰図表示 (EXP400 Y+)</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>軸</th> <th>C19 (6)</th> <th>EXP400</th> <th>軸</th> <th>C19 (6)</th> <th>1000IF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PP</td> <td>0.58</td> <td>189</td> <td>PP</td> <td>3.88</td> <td>2.75</td> </tr> <tr> <td>PV</td> <td>0.18</td> <td></td> <td>PV</td> <td>2.75</td> <td>45</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>0.57</td> <td></td> <td>PX</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td></td> <td></td> <td>AN</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th>軸</th> <th>C19 (6)</th> <th>2000IF</th> <th>軸</th> <th>C19 (6)</th> <th>4000IF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PP</td> <td>1.52</td> <td>7</td> <td>PP</td> <td>0.80</td> <td>0.39</td> </tr> <tr> <td>PV</td> <td>0.67</td> <td></td> <td>PV</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>1.51</td> <td></td> <td>PX</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>AN</td> <td></td> <td></td> <td>AN</td> <td></td> <td>174</td> </tr> </tbody> </table>	軸	C19 (6)	EXP400	軸	C19 (6)	1000IF	PP	0.58	189	PP	3.88	2.75	PV	0.18		PV	2.75	45	PX	0.57		PX			AN			AN			軸	C19 (6)	2000IF	軸	C19 (6)	4000IF	PP	1.52	7	PP	0.80	0.39	PV	0.67		PV			PX	1.51		PX			AN			AN		174	<p>分析評価</p> <p>【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。</p> <p>【100kHz】 管板部上端信号パターンである。</p> <p><u>以上から、ま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。</u></p>
軸	C19 (6)	EXP400	軸	C19 (6)	1000IF																																																										
PP	0.58	189	PP	3.88	2.75																																																										
PV	0.18		PV	2.75	45																																																										
PX	0.57		PX																																																												
AN			AN																																																												
軸	C19 (6)	2000IF	軸	C19 (6)	4000IF																																																										
PP	1.52	7	PP	0.80	0.39																																																										
PV	0.67		PV																																																												
PX	1.51		PX																																																												
AN			AN		174																																																										

インテリジェント ECT の探傷データ(4/4)
 (高温側管板部の経年波形 C-SG X43-Y18)



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。

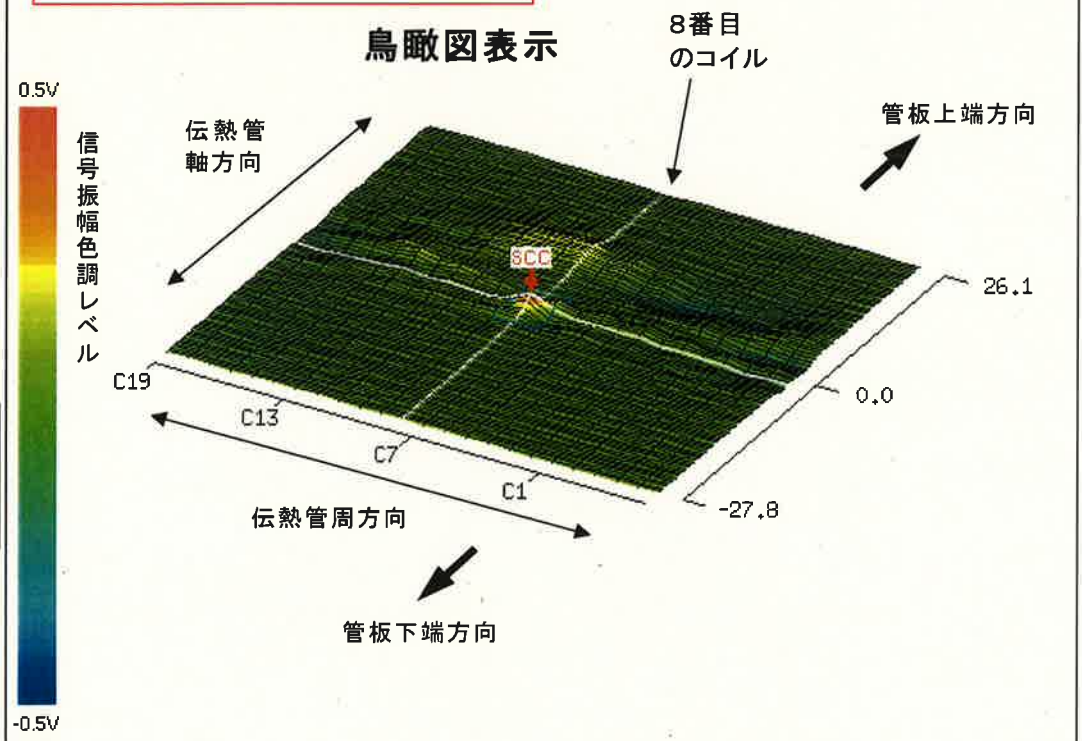
渦電流は周波数が高いほど伝熱管内面を流れやすく、周波数が低いほど伝熱管外面まで電流が流れる。このため、内面きずがあった場合は、100kHzより400kHzのほうが電流の変化として現れやすいため、内面きずのECT信号は100kHzより400kHzのほうが大きい。

リサーチ表示とは、ECT信号を2次的に示すもので、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ことができる。

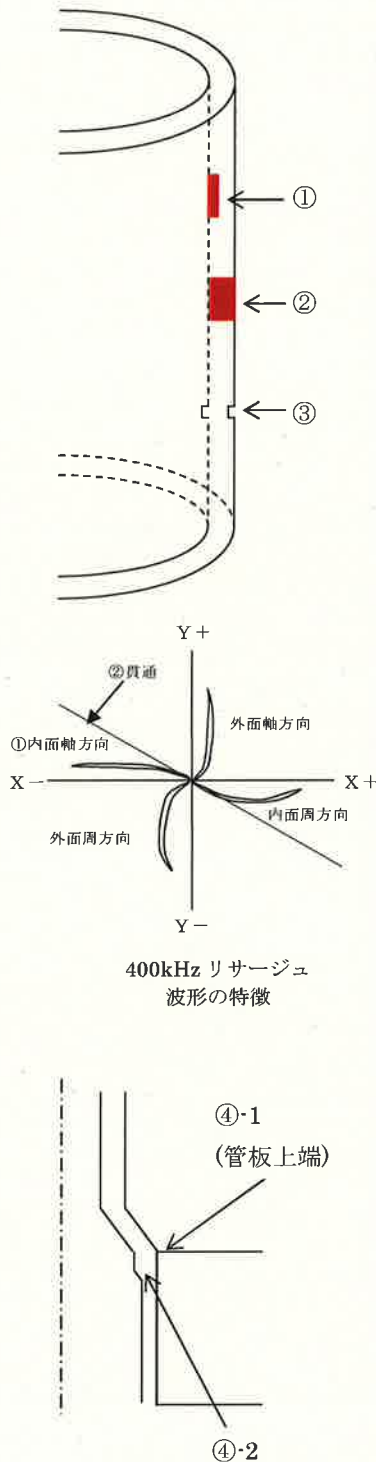
鳥瞰図表示とは、信号状況を3次的に示すもので、信号の分布（イメージ）の情報を得る

信号の伝熱管位置を示す	位置情報	深さ
	HOB	-1.6

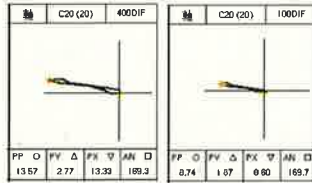
信号レベルが大きいほど赤く（または青く）なる



インテリジェント ECT における信号の特徴について



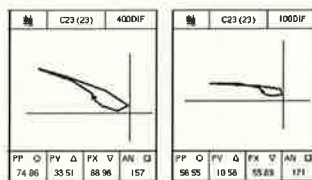
①内面軸方向きず



(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。

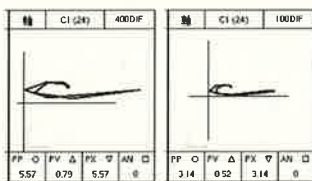
②貫通軸方向きず



(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。

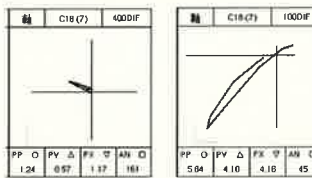
③局所変形信号 (打痕)



(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。

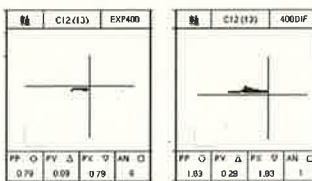
④-1 (管板上端信号)



(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 (形状及び揺動信号)



(特徴)

- ・400kHz では、位相がほぼ水平である。

(拡管境界部：形状および揺動信号が生じる箇所)

高浜3号機 蒸気発生器 製造時検査記録

品番	KTN-1110	区分
製造	58.7.2	A



検査記録

関西電力株式会社高浜発電所第3号機

C 蒸気発生器

(1/2分冊)

㊟ 最終検査
昭和58年7月28日

㊤ 最終検査
昭和58年7月24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 用印

課長 [] 係長 [] 用印 []

溶接検査
申請番号 55 神1104号原

枚数 及紙共	送付 先	注 文 主 体	熱 機 関 協 会	通 産 局	現 地 C C	操 控	工事 番 号	7-482204/0100
433 枚	13 号	IP	IP	IP	2P		溶接検査 依頼番号	55 神1105号原

作 成 昭和58年 5 月 17 日

図 号 UGG 33066 1/2
番 号

神戸製鋼所(機号)

発 所 名 : 関西電力(株)高浜発電所第3号機

品 名 : *C 蒸気発生器

浴申番号 S5 神 1104 号原
浴依番号 S5 神 1105 号原

目 次

	ページ
1. 素材チエックシート	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 ~ 21
5. その他の材料試験成績書	2/2/2/冊1-12
6. 工程中チエックシート	22 ~ 38
7. 開先検査記録	39 ~ 65
8. 伝熱管検査チエックシート (材料確認, 挿入位置, 開先検査)	66 ~ 119
9. 液体浸透探傷試験記録	120 ~ 127
10. 磁粉探傷試験記録	128 ~ 140
11. 超音波探傷試験記録	141 ~ 157
12. 放射線透過試験記録	158 ~ 249
13. 溶接部機械試験チエックシート	250
14. 溶接部機械試験記録	251 ~ 258
15. 焼 鈍 記 録	259 ~ 297
16. リーク試験成績書	298 ~ 301
17. 鋼板 (屈曲) 検査記録	302
18. 寸 法 記 録	303 ~ 311
19. オーバレイ厚み計測記録	312 ~ 316
20. 溶接施行記録	317 ~ 396
21. オーバレイ化学分析, フェライト量記録	397
22. 耐圧試験記録	398 ~ 415
23. 耐圧後表面検査記録	416 ~ 419
24. 管台加工面検査記録	420 ~ 422
25. 合格刻印写し	423 ~ 424
26. 内部点検記録	425 ~ 430



CHECK SHEET (Material) FOR VESSEL

NAME OF PLANT
発電所名

KEP-TAKAHAMA NUCLEAR POWER PLANT UNIT 3
関西電力高浜発電所第3号機

記録確認対象
55 種 1104
55 種 1105

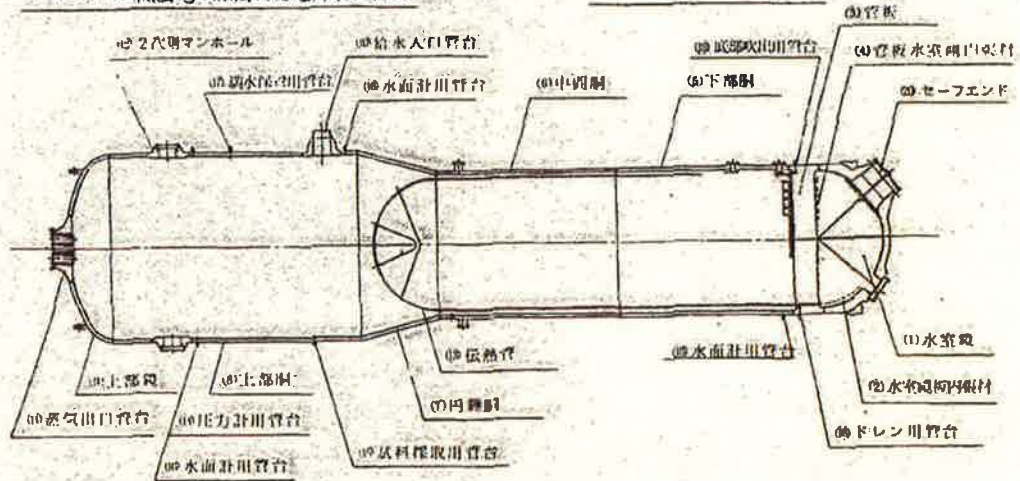
ARTICLE 品名	C 蒸気発生器					CHECK BY		
	DWG. 品 図番	PIECE 品 & NAME OF PIECE 符号と上の部品名	MATERIAL GRADE 材質	SIZE 寸法	HEAT 品 材料番号	NAME OF MILL 製鋼メーカー	WHI 社内	DATE 月/日
0401012	(01) 中間胴	1 SA533 Gr. A Cl. 1	t 77	80D295-3-1	日鋼		55 9/11	
	(02) 中間胴	1 "	t 77	80D295-4-1	日鋼		55 9/11	
	(03) 胴継胴	1 "	t100	80C288-1-1	日鋼		55 9/26	55 9/26
	(04) 胴継胴	2 "	t100	80C288-2-1	日鋼		55 9/26	
	(05) 胴継胴	1 SA533 Gr. A Cl. 1	t100	80C288-2-2	日鋼		55 9/26	
	(06) トラニオ	2 SA508 Cl. 2	φ280	79D512 C328 + 2 ^{11.12}	日鋼		56 5/8	56 5/8
	(07) 取合金物	3 SA516 Gr. 70	t 38	71B1-3-2	日鋼		56 2/24	56 2/24
	()						/	/
	()						/	/
	()						/	/
	()						/	/
	()						/	/
	()						/	/
	()						/	/
0401013	(01-46) 伝熱管	1 S01G1 Ni-Cr-Fe Alloy	φ22.23					

伝熱管の材質が問題
ないことを確認。

材 質 一 覧 表

プラント名 関西電力高圧発電所第3号機

蒸気発生器 # C



No.	名 称	材 質	Charge No.	No.	名 称	材 質	Charge No.
(1)	水 室 殻	SA216 Gr.WCC	90325,600/2	(8)	伝 熱 管	SB163 Ni-Cr-Fe Alloy	NUE3713(01-46)
(2)	水室殻内張材	ステンレス鋼		(9)	圧力計用管台	SA508 Cl.1	80C237-1-4-b
(3)	管 束	SA508 Cl.3	800219-1-1	(10)	試料採取用管台	SA508 Cl.1	80C237-1-3-9
(4)	管板水室側内張材	インコネル					80C237-1-5-19
(5)	下 部 胴	SA533 Gr.A Cl.1	80C288-3-1 80D390-2-1				80C237-1-5-20
(6)	中 間 胴	SA533 Gr.A Cl.1	80D245-3-1 80D245-4-1	(11)	水面計用管台	SA508 Cl.1	80C237-1-5-21
(7)	円 錐 胴	SA533 Gr.A Cl.1	80C288-1-1 80C288-2-1 80C288-2-2				80C237-1-5-22
(8)	上 部 胴	SA533 Gr.A Cl.1	80D510-3-1 80D574-1-1				80C237-1-5-23
			80D574-2-1	(12)	満水保管用管台	SA508 Cl.1	80C237-1-5-24
				(13)	ドレン用管台	SA508 Cl.1	80C237-1-5-25
(9)	上 部 殻	SA533 Gr.A Cl.1	80C197-3-1 80C197-3-1 80D510-1-1 80D510-1-1	(14)	底部吹出用管台	SA508 Cl.1	80C237-1-5-26
(10)	給水入口	SA508 Cl.2	81C145-1-3				80C237-1-3-5
(11)	蒸気出口管台	SA508 Cl.2	81C145-2-3	(15)	セーフエンド	SA182 F316	80C237-1-3-6
(12)	2次側マンホール	SA508 Cl.2	81C145-1-8 81C145-1-9				H 709001-5 C 709001-6

伝熱管の製造番号 (C蒸気発生器の伝熱管のチャージ番号) を示したものを。
 ※検査成績書 (添付資料-10 (4/6)) にて、この番号を参照する。

1102
1105
家申55
添依55冊

CHECK SHEET (IN-PROCESS) FOR VESSEL
 工程中チニクシート (容器用)

NAME OF PLANT 所名	YEP-TAYANU NUCLEAR POWER PLANT UNIT 3 関電力増強発電所第3号機	ARTICLE 品名	蒸気発生器	ITEM NO. 品番	REMARKS
WELD NO.	EDGE PIPE EDGE PIPE OR SURFACE OR SURFACE CE FOR C CE FOR C	PIPE BACK CHIP BACK CHIP			
所注番号	PIPE LAD P.T. OR M.T. OR M.T. OR M.T.	WELDED PIPE END WELDED END			
W-012-6A 5C	01,02 中鋼6A	PT (M) or PT	MT	PT	
07 取合全物					
W-013-01- 1-01-04					
W-013-016 5A 伝熱管					

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.
 R.T.: RADIO GRAPHIC EXAM.
 M.T.: MAGNETIC PARTICLE EXAM.
 U.T.: ULTRASONIC EXAM.

伝熱管検査チェックシート

材料確認, 挿入位置, 開先検査

検査
 47.4.2
 ※上段 A側 91
 F段 B側
 機品管 25

KTN-3#C-96

ROW No.	COLUMN No.	管 No.	開先検査	④	ROW No.	COLUMN No.	管 No.	開先検査	④
	29	J0709B				64	U0218C		
	30	U9701C				65	U0203C		
	31	D0635A				66	U0226C		
	32	D0628A				67	U0220C		
	33	U9709C				68	U0219C		
	34	U9706C				69	U0208C		
	35	U9820C				70	S0213C		
	36	U9806C				71	S0212C		
	37	U9705C				72	U0205C		
	38	U9809C				73	U0209C		
	39	U9704C				74	U0103C		
	40	U9702C				75	U0210C		
	41	U9816C			18	76	U0207C		27/45
	42	U9801C				77	S0116C		
	43	U9821C				78	R0119C		
18	44	U9716C				79	U0208C		
	45	U9711C				80	R0119C		
	46	U9804C				81	R0113C		
	47	U9805C				82	R0121C		
	48	U0216C				83	R0124C		
	49	U0215C				84	U0108C		
	50	U0212C				85	S0113C		
	51	U0223C				86	R0125C		
	52	U0204C				87	R0127C		
	53	U0213C				88	R0130C		
	54	U0217C				89	R0117C		
	55	U0202C				90	R0126C		
	56	U0221C							
	57	U0214C							
	58	U0201C							
	59	U0224C							
	60	U0227C							
	61	U0228C							
	62	U0211C							
	63	U0225C							

号外 (08. 5. 19) 機品管

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 (5/6)) 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

品質管理課
COMPONENT QUALITY CONTROL SECTION

RECORD NO. _____

プラント名 PLANT NAME	電力機油圧発電機 3号機		品名 ARTICLE NAME	1C 蒸気発生器	
工事番号 ORDER NO.	7-217204	図番 DWG. NO.	F3-0401001	検査員 検査員	5.5時 1102号機、 5.5時 1105号機
部品名 PART NAME	別紙参照	溶接番号 (チーク番号) WELD(CI)NO.	別紙参照	表面状態 SURFACE CONDITION	<input checked="" type="checkbox"/> 腐蝕 <input checked="" type="checkbox"/> クラック <input checked="" type="checkbox"/> 機械仕上
方法 Method	浸透材料 Penetrant Material			検査手順 Procedure	浸透液保持時間 Penetrant Time 20 min
	浸透液 Penetrant	洗淨液 Remover	現像液 Developer		
① 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-P116 Rev.6 C.1	
② 水洗性 Water Washable	Super Check G-T	Water	Super Check D-T(D-LT)	MSBNJ6-P116 Rev.6 C.2	
探傷例図 SKETCH <div style="text-align: center; font-size: 2em;">別紙参照</div>					
判定基準 ACCEPTANCE STD.	<input checked="" type="checkbox"/> 通産省令81号第12条		検査官 SURVEYOR	別紙参照	
判定結果 RESULT	<input checked="" type="checkbox"/> 合格 ACCEPT	探傷日付 DATE	別紙参照	課長 MANAGER	係長 HEAD
検査員 INSPECTOR	別紙参照				

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④
LIQUID PENETRANT EXAMINATION RECORD

3/7

NAME OF PLANT 関西電力株式会社高浜発電所第3号機
プラント名 関西電力株式会社高浜発電所第3号機
溶中 55神 1107号
溶液 55神 1105号

ARTICLE 品名	+ C 蒸気発生器		DWG. NO.	PJ-0401.010/16		
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	検査結果
W-010-10A~10C	下部胴 + 取合金物	開先	(S) W	55.12.11	[Redacted]	[Redacted]
		Edge Preparation	(S) W	55.12.3		
		裏ハツリ後 Back Chip	S W	/		
		溶接完了後 Finish Weld	S W	/		
[Redacted]	[Redacted]	開先	S W	/	[Redacted]	[Redacted]
		Edge Preparation	S W	/		
		裏ハツリ後 Back Chip	S W	/		
		溶接完了後 Finish Weld	S W	/		
W-011-1A,B	管板 + 90°ロングスリーブ	開先	(S) W	55.12.16	[Redacted]	[Redacted]
		Edge Preparation	(S) W	55.12.15		
		裏ハツリ後 Back Chip	S W	/		
		溶接完了後 Finish Weld	(S) W	56.3.26		
W-011-2A,B	管板 + 蓋板	開先	(S) W	55.12.16	[Redacted]	[Redacted]
		Edge Preparation	(S) W	55.12.15		
		裏ハツリ後 Back Chip	S W	/		
		溶接完了後 Finish Weld	(S) W	56.3.26		
W-012-6A~6C	中間胴 + 取合金物	開先	(S) W	55.5.18	[Redacted]	[Redacted]
		Edge Preparation	(S) W	55.5.15		
		裏ハツリ後 Back Chip	S W	/		
		溶接完了後 Finish Weld	S W	/		
W-013-C1-1~ W-013-1146-54	管板 + 伝熱管	開先	S W	/	[Redacted]	[Redacted]
		Edge Preparation	S W	/		
		裏ハツリ後 Back Chip	S W	/		
		溶接完了後 Finish Weld	S (W)	55.5.20		
[Redacted]	[Redacted]	開先	S W	/	[Redacted]	[Redacted]
		Edge Preparation	S W	/		
		裏ハツリ後 Back Chip	S W	/		
		溶接完了後 Finish Weld	S W	/		
W-016-5A,B	上部胴 吊り上げラゲ	開先	(S) W	55.6.25	[Redacted]	[Redacted]
		Edge Preparation	(S) W	55.6.25		
		裏ハツリ後 Back Chip	S W	/		
		溶接完了後 Finish Weld	S 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

原 号 — 種 — 申 啓

NAME OF PLANT プラント名	関西電力株式会社高浜発電所第3号機	CHECKED BY 確認	5/10/11
ORDER 系 工事番号	7482204 / 6100	関西電力	5/12/13
DWG 系 図面番号	F3-0401013	MHI 社内	5/10/14
NAME OF ARTICLE 品名	井 C 蒸気発生器		
試 験 条 件	TEST ITEM 試験の種類	<input type="checkbox"/> アトリウムテスト ATRIUM LEAK TEST <input type="checkbox"/> ハロゲンリークテスト HALOGEN LEAK TEST <input checked="" type="checkbox"/> 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)	
	HOLDING TIME 保持時間	2 hr. min	
	LEAK RATE LIMIT 判定基準	検知基準 5.0 × 10⁻⁴ cc/cc.hr. ②	
	USED DETECTOR 使用測定器	Varian 936-90, 936-40	
USED PRESSURE GAUGE 使用圧力計	No. Total 65873/ No. Total 638727		
DATE OF TEST 検査日		5/10/14	
		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			
(11 取立会和行の別紙層板図に示す) 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 (11/16) にて問題ないことを確認。			

#C 蒸気発生器 Heリークテスト記録

1. 2次側水汽深度

月日	時刻	深度(%)
5.10	9:30	75
5.11	8:40	78
5.12	8:45	75
5.13	8:40	78
5.14	8:40	70

2. 2次側圧力計指示値

月日	時刻	圧力計 627831 (MPa)	圧力計 6387-7 (MPa)
5.10	9:20	0.16	0.18
5.11	8:45	0.16	0.18
5.12	8:40	0.16	0.18
5.13	8:40	0.16	0.18
5.14	8:40	0.16	0.18

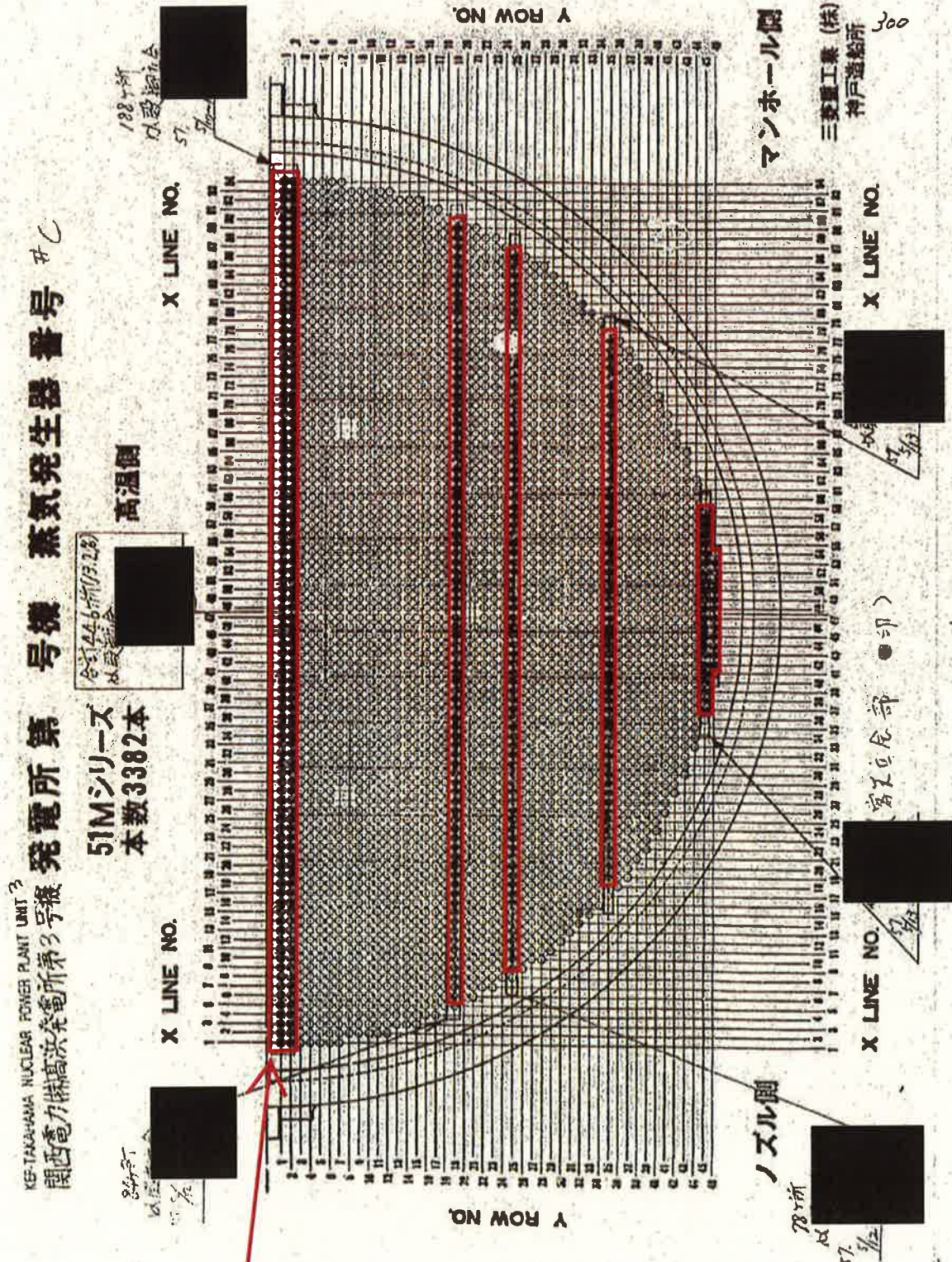
3. L/D 修正値 (使用 $S/L 1.2 \times 10^{-7} \text{Acc/sec}$)

月日	時刻	%1 (MPa/cm)	%2 (MPa/cm)	月日	時刻	%1 (MPa/cm)	%2 (MPa/cm)
5/10	13:30	1×10^{-9}	9.60×10^{-10}	5/14	11:40	—	9.23×10^{-10}
"	17:55	9.02×10^{-10}	1.11×10^{-9}				
"	18:40	8.82×10^{-10}	1.07×10^{-9}				
5/11	9:00	8.11×10^{-10}	1×10^{-9}				
"	11:40	7.06×10^{-10}	9.23×10^{-10}				
"	13:00	9.09×10^{-10}	1×10^{-9}				
"	16:00	9.37×10^{-10}	9.45×10^{-10}				
"	18:50	8.57×10^{-10}	9.6×10^{-10}				
5/12	9:00	9.52×10^{-10}	9.76×10^{-10}				
"	11:40	9.67×10^{-10}	9.67×10^{-10}				
"	13:00	8.76×10^{-10}	9.45×10^{-10}				
"	16:00	9.45×10^{-10}	9.52×10^{-10}				
"	18:30	8.95×10^{-10}	9.37×10^{-10}				
5/13	9:00	8.3×10^{-10}	9.7×10^{-10}				
"	11:40	8.88×10^{-10}	9.52×10^{-10}				
"	13:00	8.88×10^{-10}	9.23×10^{-10}				
"	15:30	8.88×10^{-10}	9.30×10^{-10}				
5/14	9:00	—	9.6×10^{-10}				

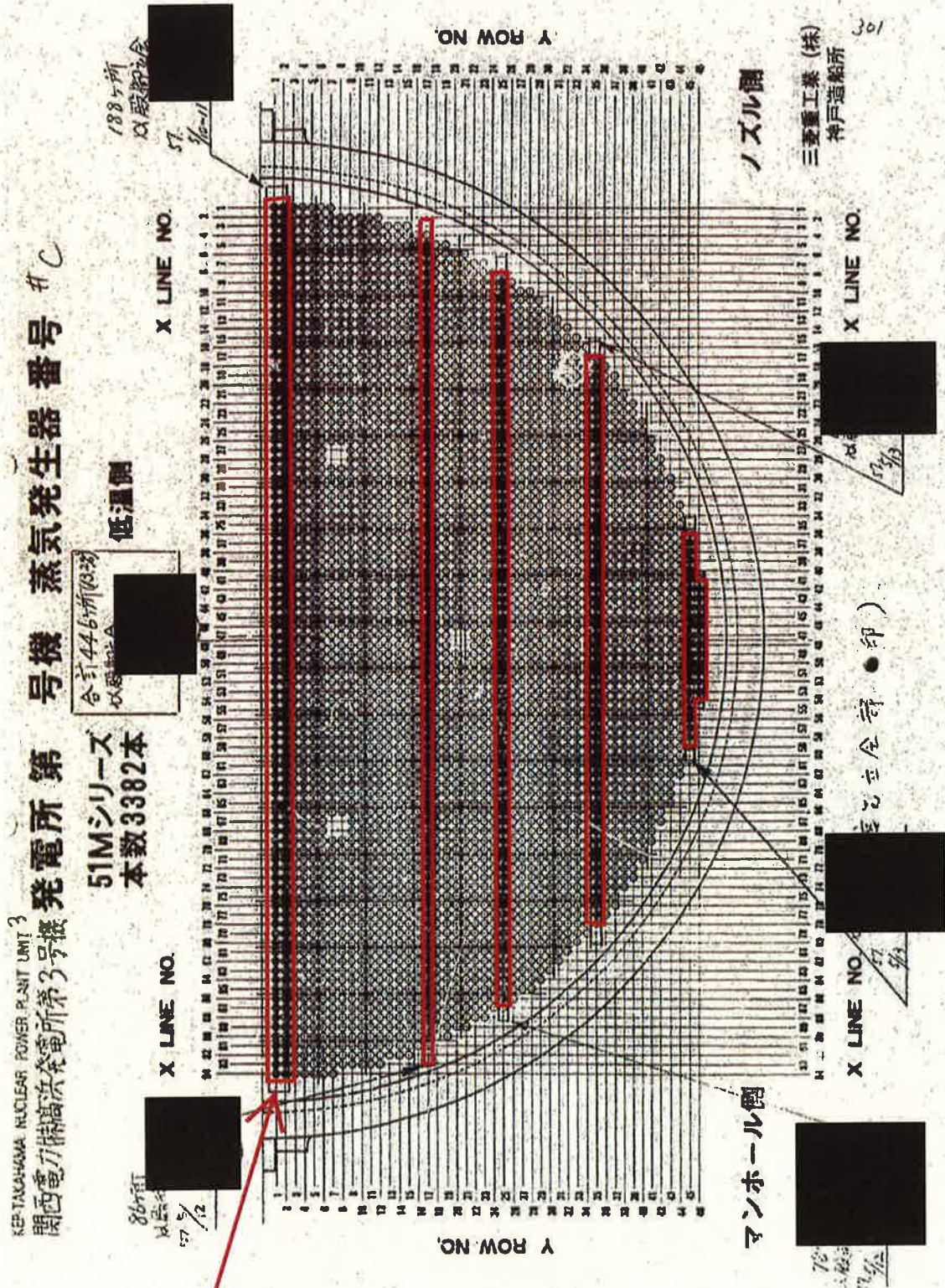
4. リーク管孔及びリーク量

アドレス		リーク量 (A/sec.)
INT. CHN	X Y	
		リーク無し

C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。



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（10/16）参照）



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（10/16）参照）

356

検査官
37.7.2

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

12

KANSAI-TAKAHAMA NUCLEAR POWER PLANT UNIT 3
発電所 関西電力高浜発電所第3号機
溶接 55 1105
神 1104 号機

NAME OF ARTICLE 品名		蒸気発生器 #c HDT							DWG. No 図番	F3-0101013 REVISE (2)
継手 番号	JOINT No	W-013 H1-43-41	W-013 H1-46-41	W-013 H1-43-42	W-013 H1-46-42	W-013 H1-43-43	W-013 H1-46-43	W-013 H1-43-44	W-013 H1-46-44	
施行法 番号	WELDING PROCEDURE No	433	193-1	433	193-1	433	193-1	433	193-1	
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)	S (TIG自動)	
材質 SPEC & P-No	MATERIAL SPEC & P-No	インコネル SB-163 インコネル	インコネル SB-163 インコネル	インコネル SB-163 インコネル	インコネル SB-163 インコネル	インコネル SB-163 インコネル	インコネル SB-163 インコネル	インコネル SB-163 インコネル	インコネル SB-163 インコネル	
溶加棒 溶接棒 心線 フラックス F-No	FILLER METAL ELECTRODE TILLER WIRE FLAX F-No									
棒径 棒 LOT No	ELECTRODE DLAMETER (mm) ELECTRODE LOT No									
溶接 姿勢	WELDING POSITION	H	H	H	H	H	H	H	H	
予熱 温度	PREHEAT TEMP. (℃)	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	行わない	
溶接 電流	CURRENT (A)	80~95	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	1	
	BEAD ビード	1	1	1	1	1	1	1	1	
シールド ガス	SHIELDING- GAS	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	
溶接 月日	WELDING DATE	4/17	4/17	4/17	4/17	4/17	4/17	4/17	4/18	
溶接士 名	WELDER NAME	B72	B72	B72	B72	B72	B72	B72	B213	
開先 形状	SHAPE OF EDGE. PREP.	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	

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。

RECORD OF PRESSURE TEST
耐圧試験成績書
(1次側)

器種 55 沖 1104号原

NAME OF PLANT 発電所名	関西電力高浜発電所第3号機		CHECKED BY	確 22
ORDER NO. 工事番号	7-482204-0100		MTI 通称名	58 1/3
DWG. NO. 図 番	73-0401001	LINE SPEC. NO.	関西電力	1/3
NAME OF ARTICLE 品 名	# C 蒸気発生器		MHI 内 内	1/3

TEST CONDITION 試 験 条 件	TEST ITEM: 試験の種類	<input type="radio"/> 水 HE: HYDROSTATIC TEST <input type="radio"/> 気 HE: AIR PRESSURE TEST <input type="radio"/> 水 保 留: 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: 塗 布 材	なし	
CALIBRATED DATE OF PRESSURE GAUGE: 圧力計校正月日		57. 12. 21 {1992-004 12073-1

DATE OF TEST: 検査日	昭和58年1月13日	RESULT: 結 果	良
-------------------	------------	-------------	---

略図または継手番号 (SKETCH OR JOINT NO. OF TESTED ARTICLE)

//// 部-次側耐圧 寸法・外観検査 良

① 圧力ゲージ 2個
② 壁温計測具 3本

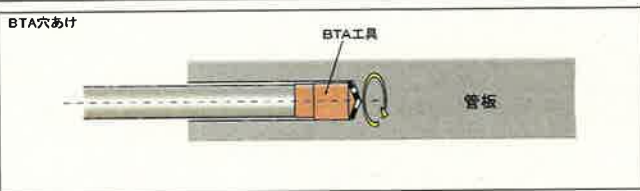
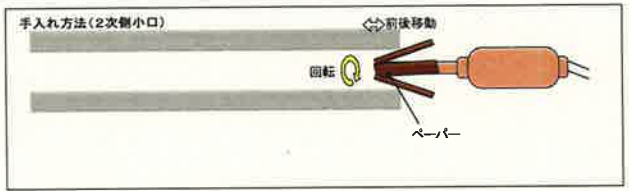
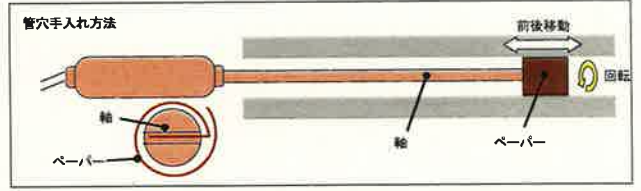
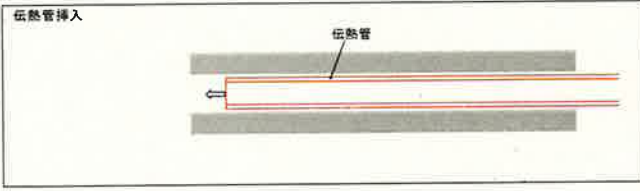
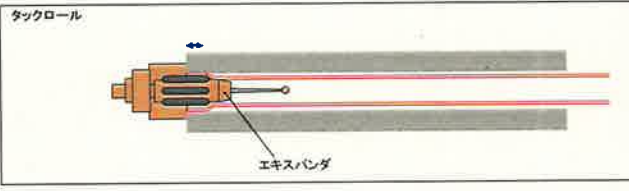
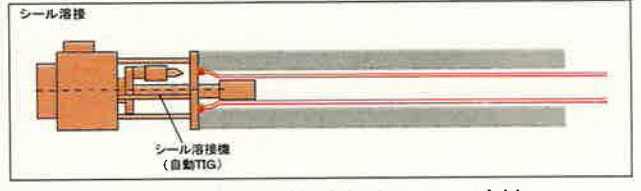
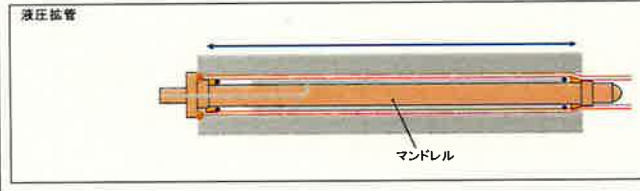
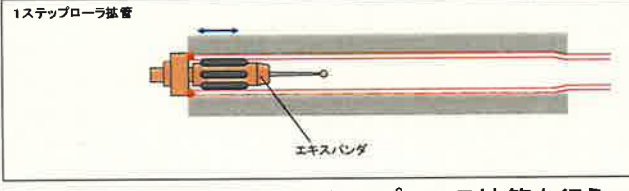
耐圧試験結果に問題がないことを確認。

蒸気発生器 内部点検子エツクシート No.15 及び洗浄		MSBUG6-AV 11(0) 23/24				
機器品質管理課						
発電所名	関西電力(株)高浜発電所第3号機	点検日付				
機器名	#C 蒸気発生器	点検者				
点検箇所	水室内 及び伝熱管	点検要領書				
		MSBUG6-AV 11				
略図及び点検結果						
<table border="1" style="margin: auto;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">点 検 項 目</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1) 溶接部ノロ, 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) 清届状態, 異物</td> </tr> </tbody> </table>			点 検 項 目	1) 溶接部ノロ, スパック, 脚長など 目視	2) 養生材撤去	3) 清届状態, 異物
点 検 項 目						
1) 溶接部ノロ, スパック, 脚長など 目視						
2) 養生材撤去						
3) 清届状態, 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

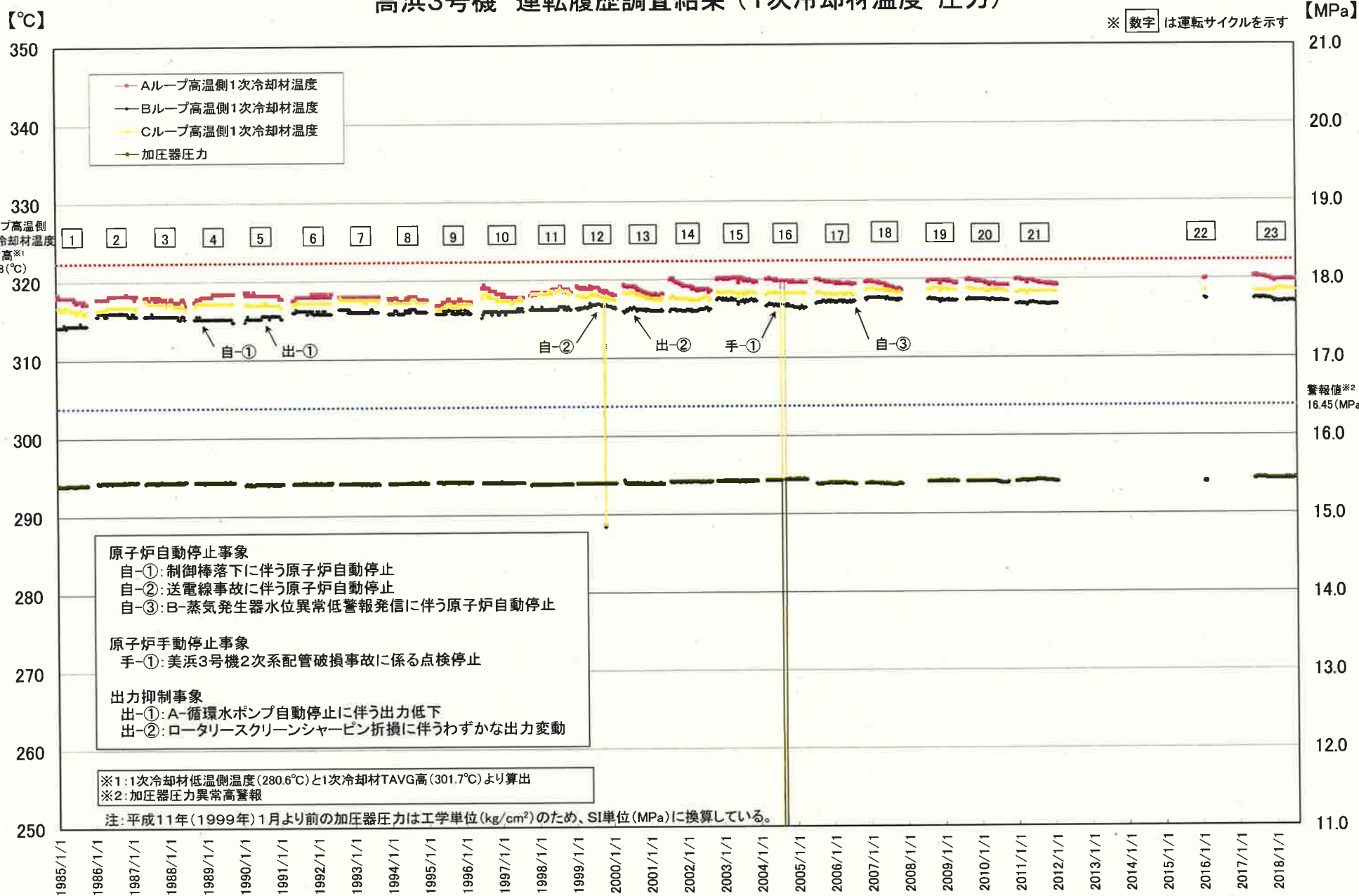
製造手順、要領について関係者への聞き取りにより調査を行った。

<p>1. 管穴加工</p>  <p>BTA 穴あけ</p> <p>BTA工具</p> <p>管板</p> <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>  <p>手入れ方法(2次側小口)</p> <p>前後移動</p> <p>回転</p> <p>ペーパー</p> <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>  <p>管穴手入れ方法</p> <p>前後移動</p> <p>回転</p> <p>軸</p> <p>ペーパー</p> <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>  <p>伝熱管挿入</p> <p>伝熱管</p> <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>  <p>タックロール</p> <p>エキスパンダ</p> <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>  <p>シール溶接</p> <p>シール溶接機(自動TIG)</p> <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>  <p>液圧拡管</p> <p>マンドレル</p> <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>  <p>1ステップローラ拡管</p> <p>エキスパンダ</p> <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>

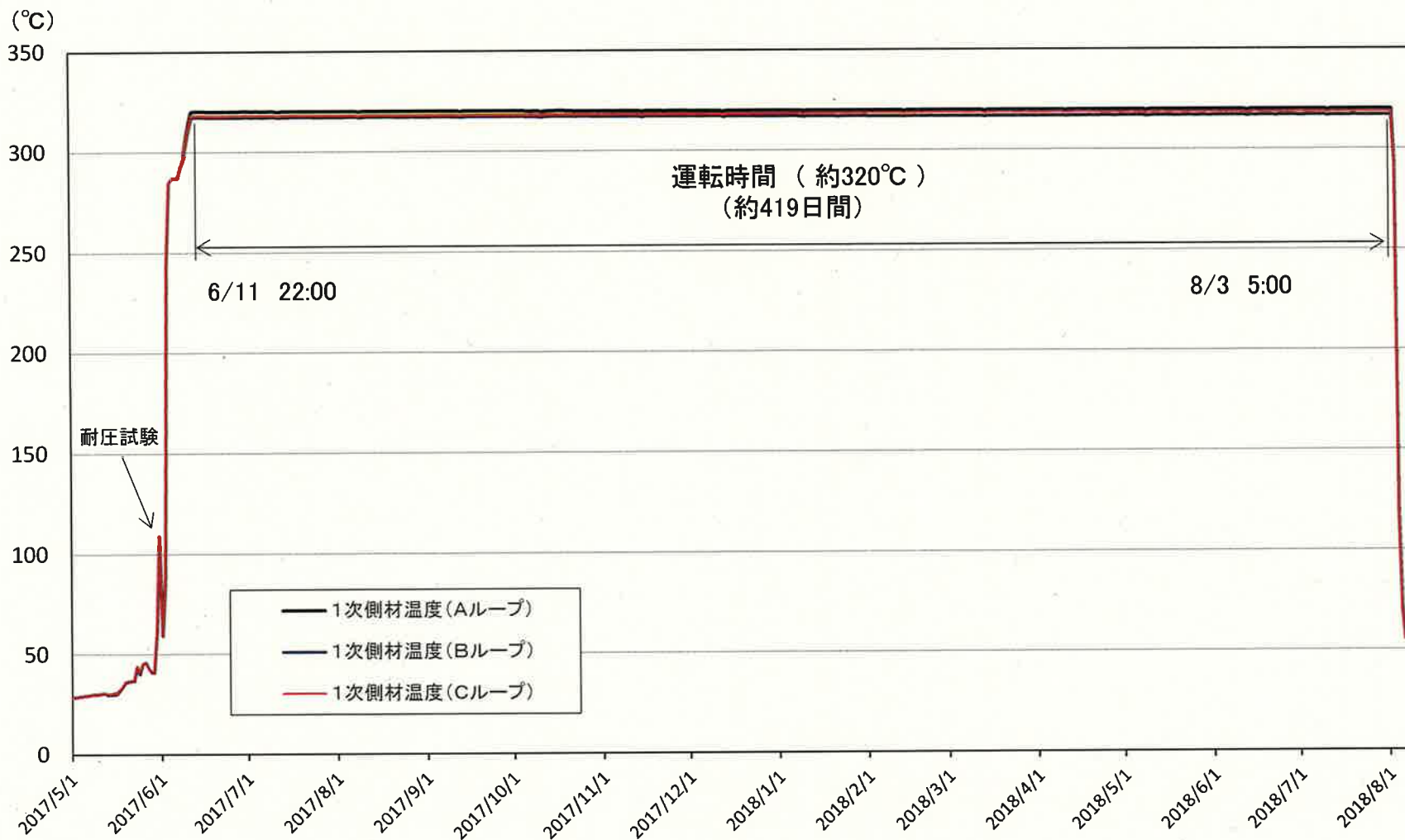
*1: 深さ方向に穴加工をしながら穴の内面を仕上げる工具 *2: 浸透探傷試験

高浜3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）

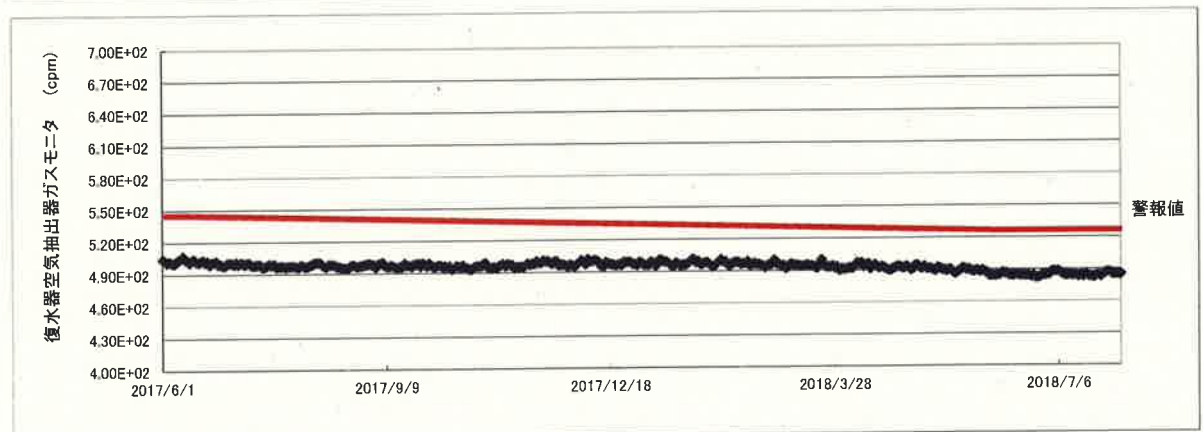
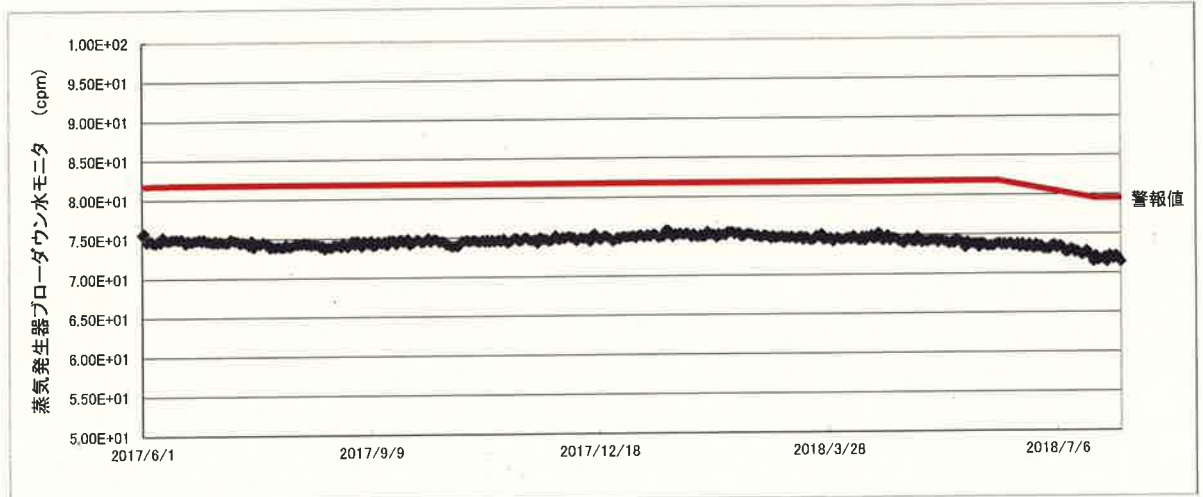
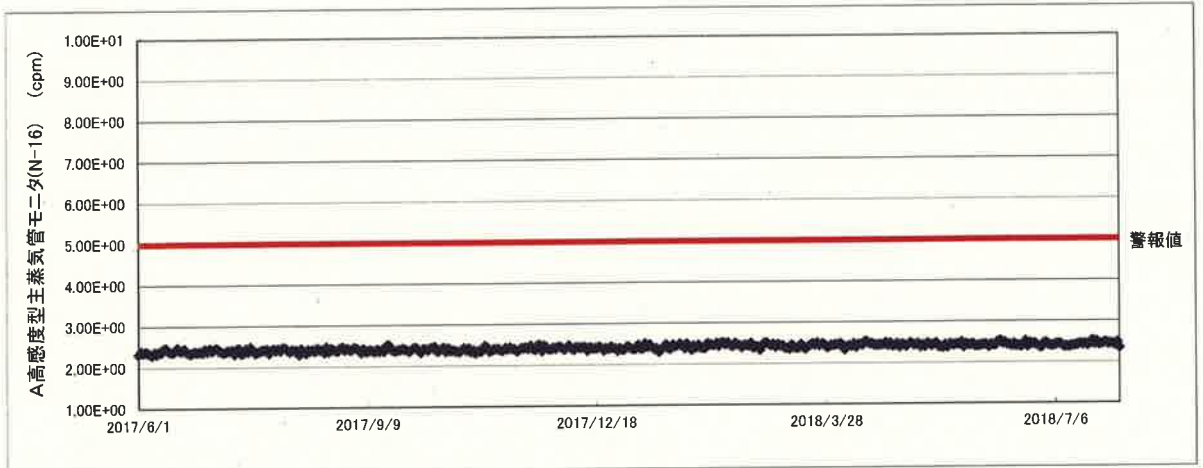
高浜3号機 運転履歴調査結果 (1次冷却材温度・圧力)



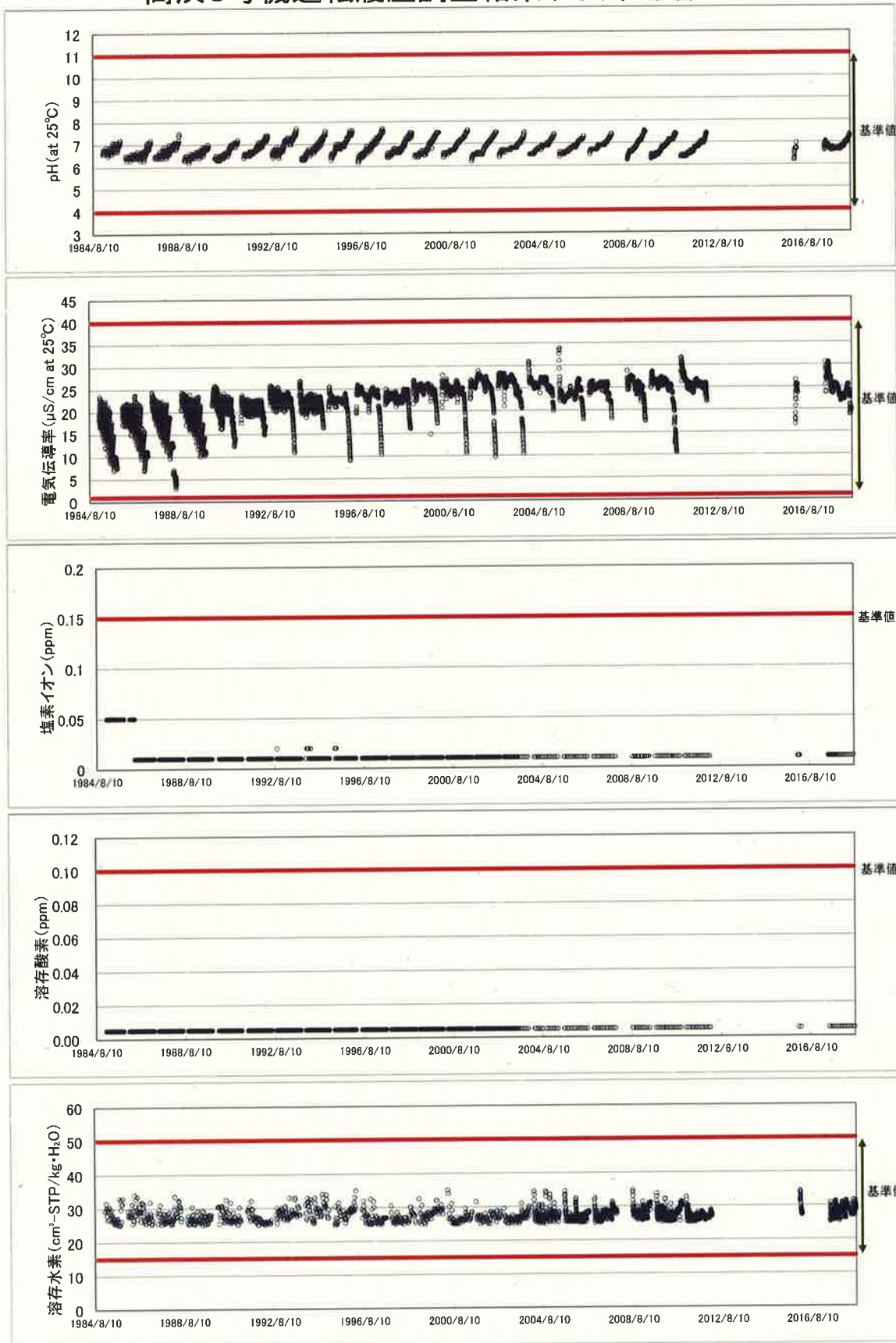
高浜3号機 第23サイクル運転履歴調査結果(1次冷却材温度)



高浜3号機第23サイクル運転履歴調査結果(放射線監視装置)



高浜3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値

項目	基準値
pH	4~11 (at25°C)
電気伝導率	1~40 μS/cm(at25°C)
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3号機 蒸気発生器 材料検査記録

MP No	KTN-3/111	7
巻数	58・7・2	4



検査記録

関西電力(株)高浜発電所第3号機

C 蒸気発生器

(2/2 分冊)

㊦ 最終検査
昭和58年/月28日

㊦ 最終検査
昭和58年/月24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

作 成 昭和58年 5 月 12 日

圖書 番号

UGG33066 2/2

番号

直接検査
申請番号 55神1104号機

工事番号 7-482204/c100

再検査
依頼番号 55神1105号機

枚数	送付先	注文主	熱機関協会	適宜局	現地QC	検
471 枚	15 *5日	IP	IP	IP	2P	

検査番号(機品番)

発電所名： 関西電力(株)高浜発電所第3号機

品名： # C 蒸気発生器 溶申番号55神1104 号原
 溶依番号55神1105 号原

材料試験成績書目次

図番	符号	部品名	頁
FJ-0401006	01	水室鏡	1~63
"	02, 03	ドレン管	64~65
"	04	セーフエンド	66~69
"	05, 06	当て板	70
"	09	ナットプレート	70
"	10, 11	ヘリサート	71~73
FJ-0401008	01	ホールドダウンリング	74~76
FJ-0401009	01, 02	仕切板, 仕切バー	77~82
"	03, 04	当て板	77~82
"	05	六角穴付ボルト	83~86
FJ-0401010	01	管板	87~96
"	02	吊金物	172 試品
"	03, 04	下部胴	97~104
"	05	取合金物	105~107
"	06	取合金物	108~111
"	07	トラニオン	172 試品
FJ-0401011	01	吹出用内管	112
"	02	90°ロングエルボ	113
"	03	蓋板	114~116
"	04 ~ 06	チューブレンブロック	117
"	07	スリーブ	118
"	08	蓋栓	119
"	09	裏当金	119
FJ-0401012	01, 02	中間胴	120~127
"	03 - 05	円錐胴	128~137
"	06	トラニオン	138~143
"	07	取合金物	105~107
FJ-0401013	J1 - 46	伝熱管	144~262
FJ-0401016	01 ~ 03	上部胴	263~274
"	04 ~ 07	上部鏡	275~280
"	08	吊り上げラック	278 ~ 280
"	09	当て板	281~283
"	10	サポートバンド	284~286



SUMITOMO METAL INDUSTRIES, LTD.
STEEL TUBE WORKS

AMAGASAKI, JAPAN

MITSUBISHI HEAVY IND. LTD.

KONE SHIPYARD & ENGINE WORKS

Customer: **NUE3713(01-46)** 7482204 ZK 111101-01-46(SC)
Mill Work No. **NUE3713(01-46)**

MHI Spec. ZKE0957-2 MSB2K-70-36-6

INSPECTION RESULT

検査成績表

MARKER CODE
10

No. **NUE3713 (01-46)**

Date: **SEPT. 20, 1981**

Article 品名 **Seamless Ni-Cr-Fe Alloy U Bend Tubes (Cold Drawn)**
Specification 規格 **ASME SB163**
Size 寸法 **22.23 1.27 19419-24020**
O.D. 外径 mm Wall 厚 mm Length 長さ mm
Quantity 数量 **3382** 51306
No. of Pieces 枚数 Weight 重量 kg

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**

Hydrostatic Test 水圧試験 220 kg/cm ²	Surface & Dimensions 表面、寸法	Flattening 扁平	Flaring 押広	Bending 曲げ	Chemical Analysis 化学成分 %													
					Tensile Properties 引張試験			Analysis									Fe	Hardness
GOOD	GOOD	GOOD	GOOD		Yield point or Tensile Strength MPa (ksi) kg/cm ² (kgf/cm ²)	Elongation % (50.8mm)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	%	HRB		
					Min. 最小 24.6	56.2	30							72.0	14.0	6.0	-	
					Max. 最大 25	56	30	.15	.5	1.0	.015	.5		72.00	14.00	10.00		
					MIN.			.15	.50	1.00	.030	.015	.50		17.00	10.00	92	
					MAX.													
					*MHI Requirement:-----			Co	≤	.02		P	≤	.025		C	≤	.04

SUMITOMO METAL INDUSTRIES, LTD.
STEEL TUBE WORKS

Surveyor 氏名 _____
(Agency or Company)

(Signature)



伝熱管の製造番号 (C蒸気発生器の伝熱管の
チャージ番号) が、添付資料-6 (5/16) に記
載の番号と整合していることを確認。

Nippon Steel Industries, Ltd.
Steel Tube Works

ATTACHMENT TO INSPECTION RESULT

Mill Work No: HUE 3713 (16-18)

No. HUE 3713 (16-18) -2

Date: SEPTEMBER 28, 1981

(ATTACHED SHEET)

Test No.	Tensile Properties		Chemical Analysis %							Hardness			
	Yield Point KSDX (kg/cm ²)	Tensile Strength KSDX (kg/cm ²)	Elongation (%) in 50.8 mm	C	Si	Mn	P	S	Cu		Ni	Cr	Fe
Std.	min.	max.	30	.15	.5	1.0		.015	.5	72.0	14.0	6.0	
D090205	35.4	74.5	43	.027	.32	.31	.008	.001	.01	74.55	15.90	8.52	.010
	35.6	74.7	44	.027	.32	.32	.009	.001	.01	74.50	15.95	8.37	.012
	35.1	74.0	43	.028	.33	.32	.009	.001	.01	74.30	16.15	8.45	.011
	35.0	74.0	44	.026	.33	.30	.008	.001	.01	74.20	16.20	8.47	.016
D090805	35.8	75.0	44	.026	.33	.31	.009	.001	.01	74.00	16.35	8.50	.014
	35.2	74.2	42	.028	.32	.30	.008	.001	.01	74.60	16.05	8.17	.014
D073001	34.9	73.8	44	.029	.30	.30	.009	.001	.01	74.90	15.95	8.05	.015
	35.2	74.2	43	.029	.30	.30	.009	.001	.01	74.95	15.85	8.09	.015
	35.6	75.4	43	.029	.31	.30	.009	.001	.01	74.95	15.85	8.09	.015
	35.2	75.0	43	.029	.31	.30	.009	.001	.01	74.95	15.85	8.09	.015
	35.0	74.9	43	.029	.31	.30	.008	.001	.01	74.95	15.80	8.12	.015
	35.8	74.7	43	.027	.30	.30	.008	.001	.01	74.20	16.20	8.50	.012
D091205	35.8	74.7	43	.027	.30	.31	.009	.001	.01	74.20	16.20	8.52	.013
	35.8	75.1	44	.025	.35	.30	.007	.001	.01	74.85	15.70	8.27	.014
D090405	35.2	73.8	41	.025	.36	.32	.009	.001	.01	74.50	15.90	8.58	.013
	36.3	75.3	42										

今回信号指示が検出された伝熱管 (添付資料-6 (7/16) 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 SEPTEMBER. 28, 1981

Size 608.88 21,157
R mm Length mm

Order No. 7482204ZK11101-18-SC
Quantity 86 No. of Pieces Weight Kg
1,290

Mill Work No. WUE 3713-18

Lot No.	Pipe No.	Lot No.	Pipe No.	Lot No.	Pipe No.
301	13C, 14C, 17C, 19C, 21C, 24C, 25C, 26C, 27C, 30C,	U02	27C, 28C, 30C,		
S01	13C, 15C,	U97	01C, 02C, 04C, 05C,		
S02	13C, 42C,		06C, 09C, 11C, 12C,		
U01	01C, 03C, 04C, 05C, 07C, 08C, 09C, 10C, 11C, 12C, 13C, 14C, 15C, 16C, 17C, 18C, 19C, 20C, 21C, 22C, 23C, 24C,	U98	01C, 04C, 05C, 06C,		
			09C, 12C, 16C, 20C,		
		242	21C		
		D06	15C,		
U02	01C, 02C, 03C, 04C, 05C, 06C, 07C, 08C, 09C, 10C, 11C, 12C, 13C, 14C, 15C, 16C, 17C, 18C, 19C, 20C, 21C, 23C, 24C, 25C, 26C,	J07	28A, 35A,		
			09B,		

今回信号指示が検出された伝熱管（添付資料-6 (7/16) に記載の伝熱管の管No.）が、添付資料-10 (5/6) 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、ピットイング、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は維持されている。

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

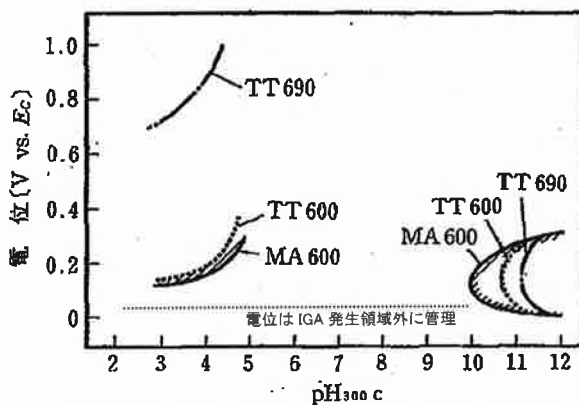
1次冷却材は加圧されているので、伝熱管内では沸騰による不純物濃縮が起こることではなく、かつ還元性雰囲気を維持。

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

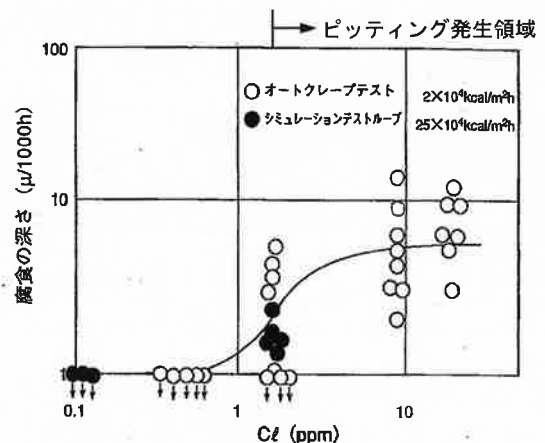
- ・ 粒界腐食割れ (IGA) ※1
- ・ ピitting ※2

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で用いている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。

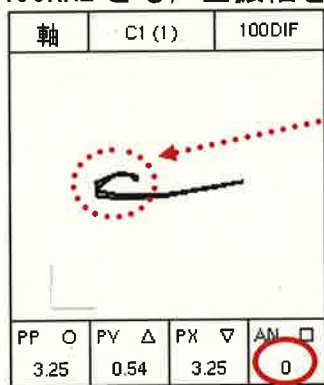
したがって、位相角が100kHz、400kHzとも 0° 近くでないことおよび巻きのないことを確認する。

3. 評価結果

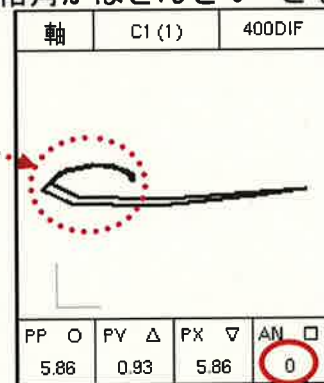
今回のC-SG(X43-Y18)ECT信号は、400kHzにおいて内面きずの特徴を示す位相角を有している。また、100kHzリサージュ波形は、局所変形の信号の特徴と明らかに異なる。以上から、局所変形と見られるような信号は認められなかった。

(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。



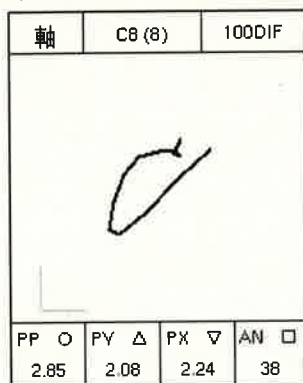
位相角



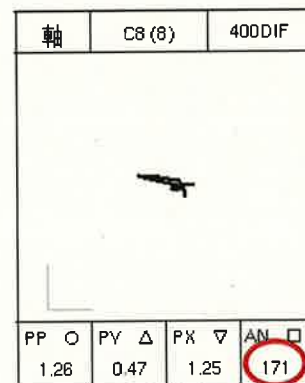
位相角

(今回の信号 C-SG X43-Y18)

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。



100kHz



400kHz

位相角

エロージョン*1の発生可能性評価

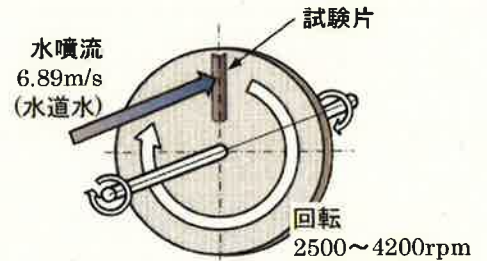
1. 目的

S G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

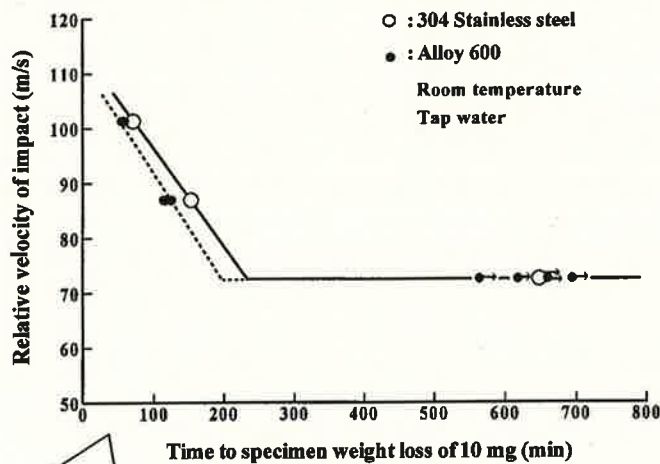
ウォータージェットテスト（常温）によりエロージョン発生限界流速を求め、実機流速と比較する。

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ない。



（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

$$\text{相対速度} = \sqrt{(\text{水噴流速})^2 + (\text{試験片の周速})^2}$$
 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3号機第12回および高浜4号機第11回定期検査時

抜管調査結果について

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 1 2 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) 断面マイクロ観察

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^(註) 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/mm²(38 kg/mm²)程度、通常管穴供試体ではトルク不足の場合353 N/mm²(36 kg/mm²)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/mm²(32 kg/mm²)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) 従来の見解

0.1 mm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/mm²(38 kg/mm²)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。

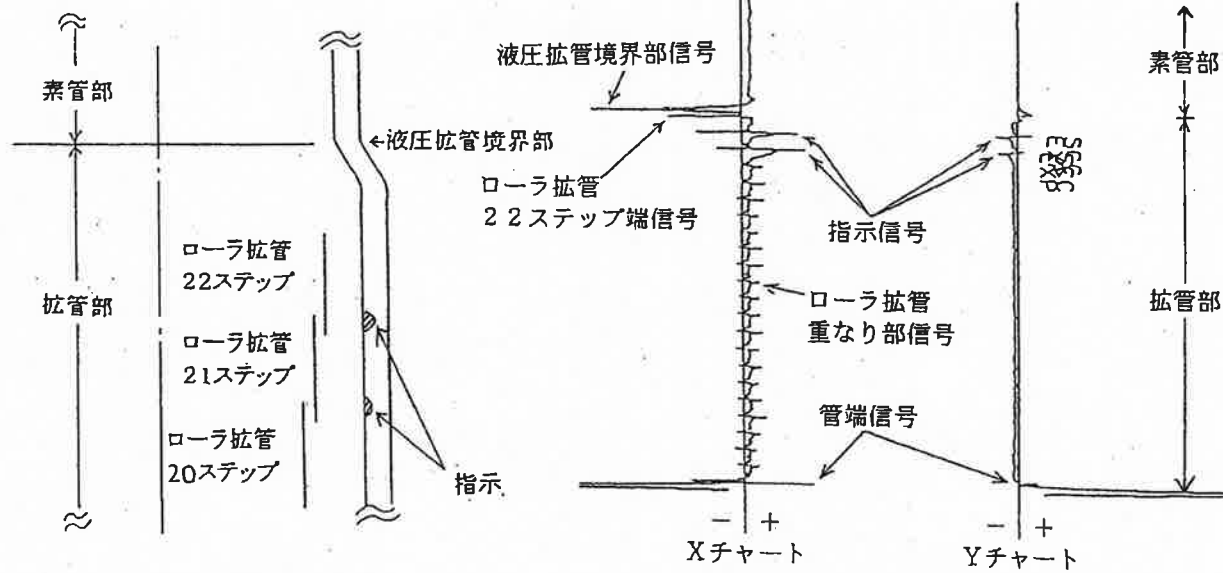
以 上

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

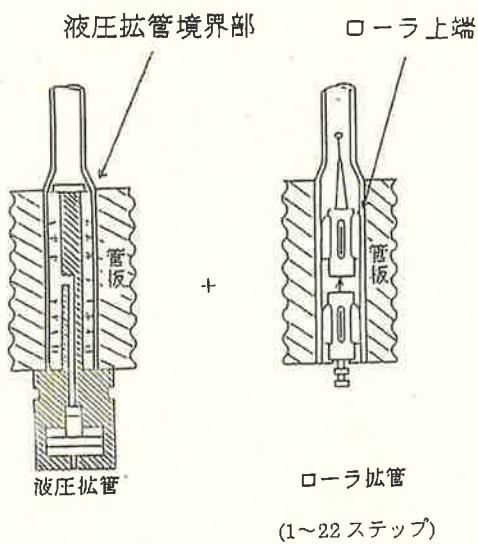
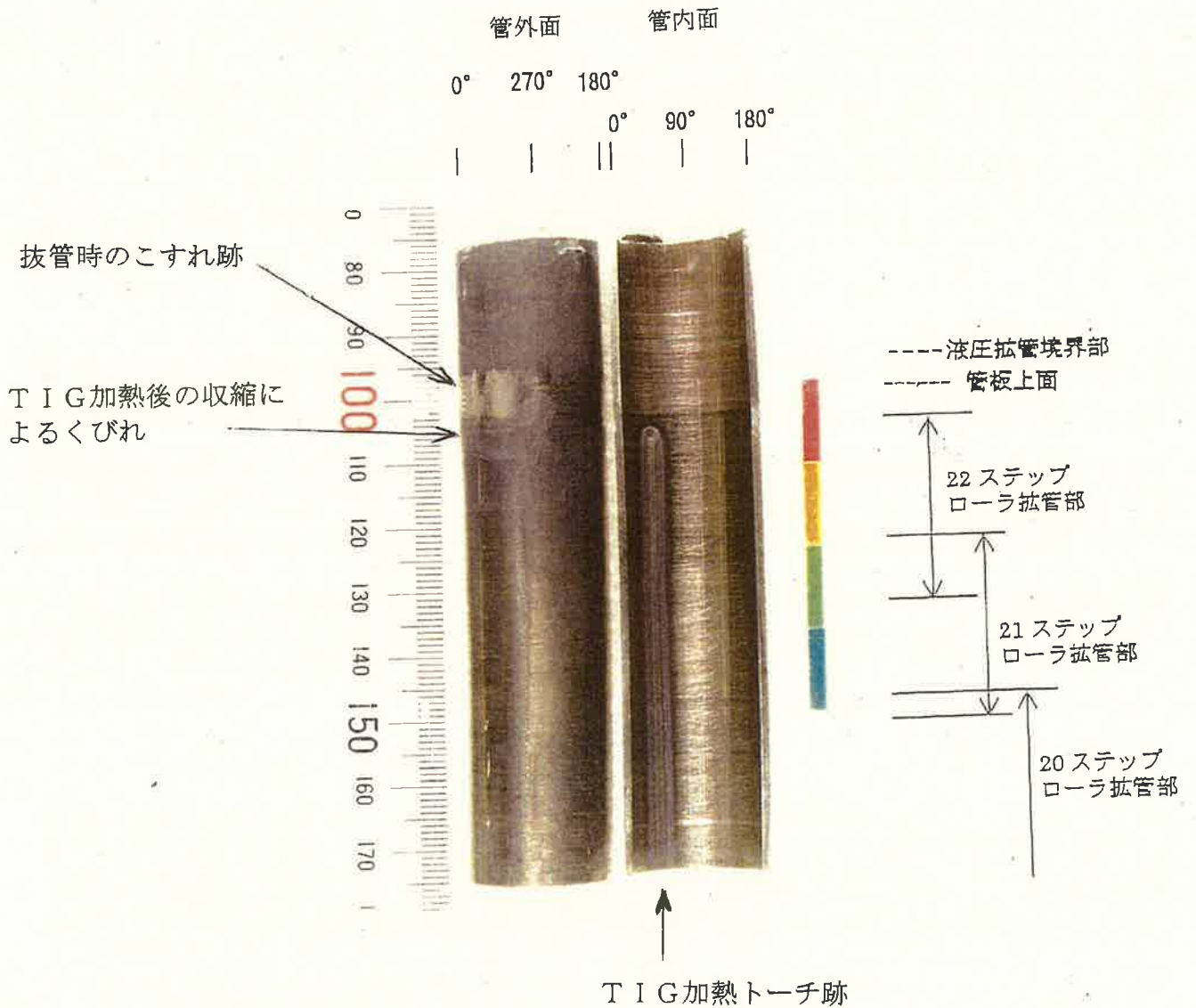
B号機X85-Y28



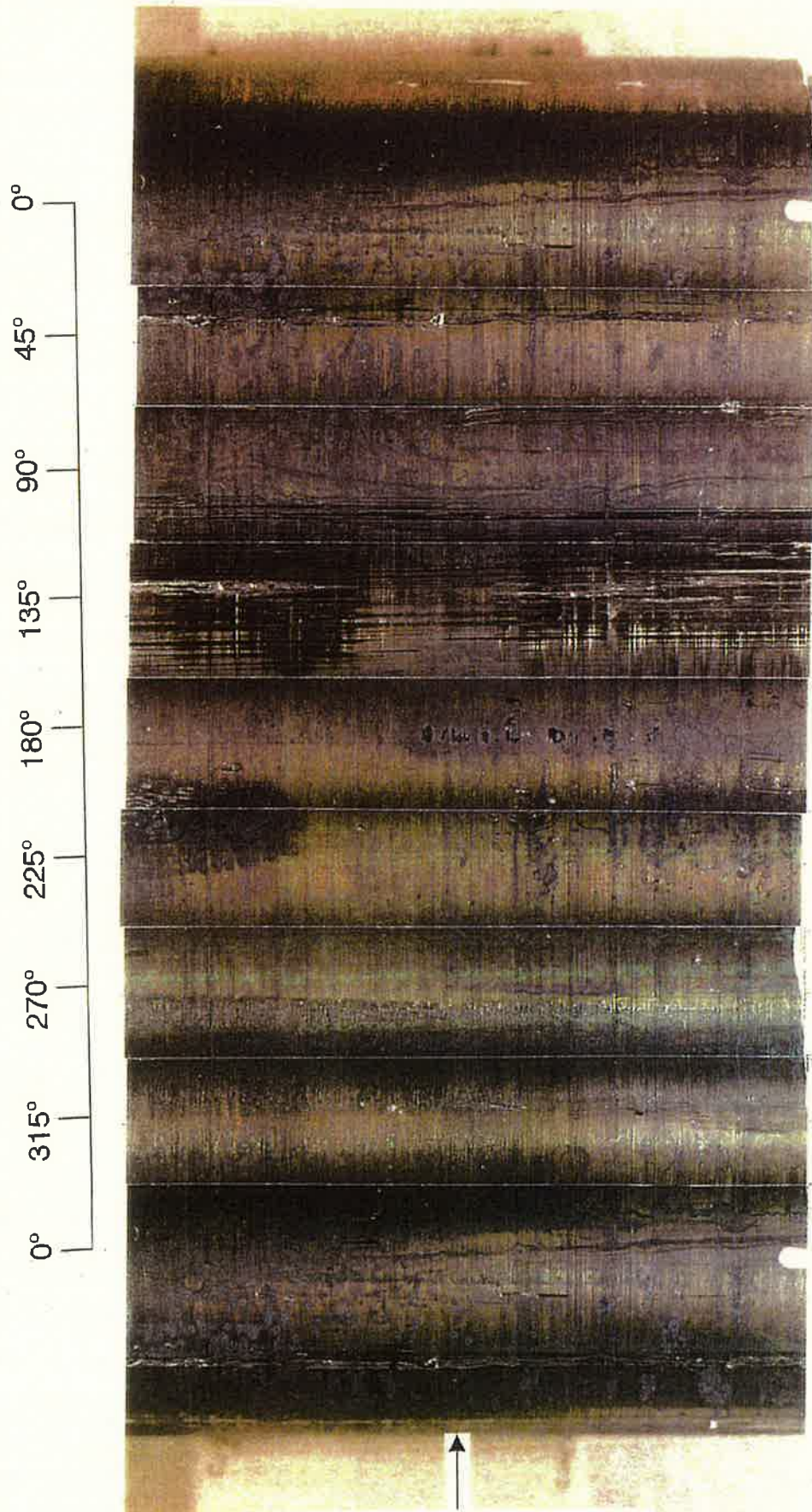
指示位置推定図

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)



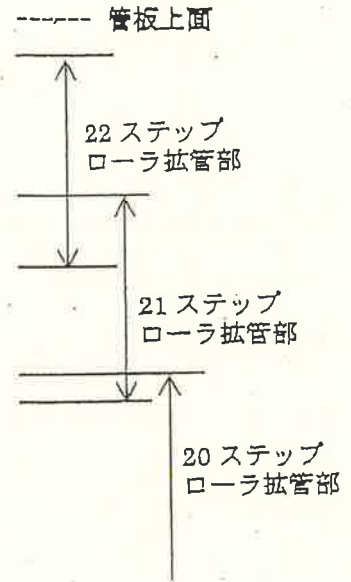
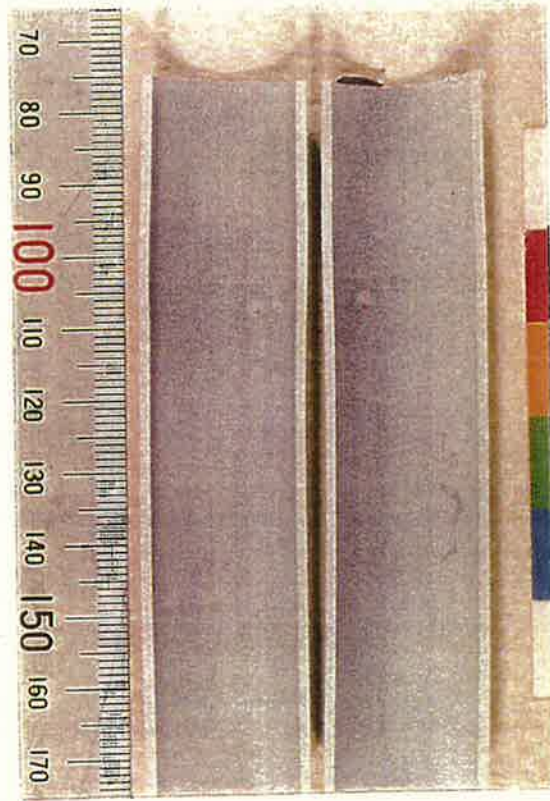
抜管時のこすれ跡

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)

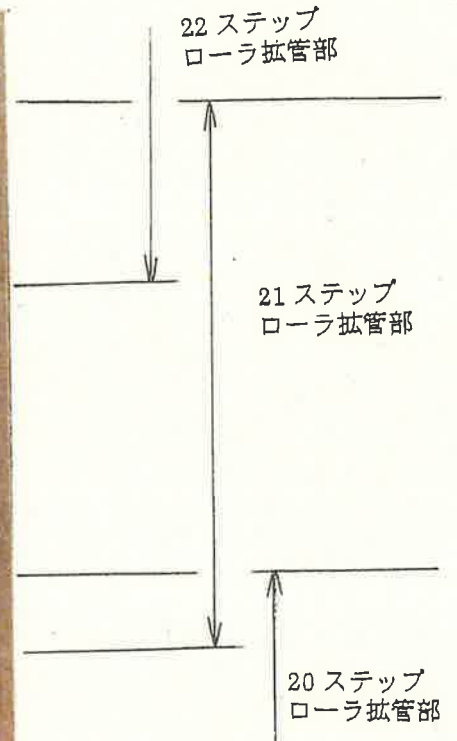
180° 270° 0° 90° 180°
 | | | | |



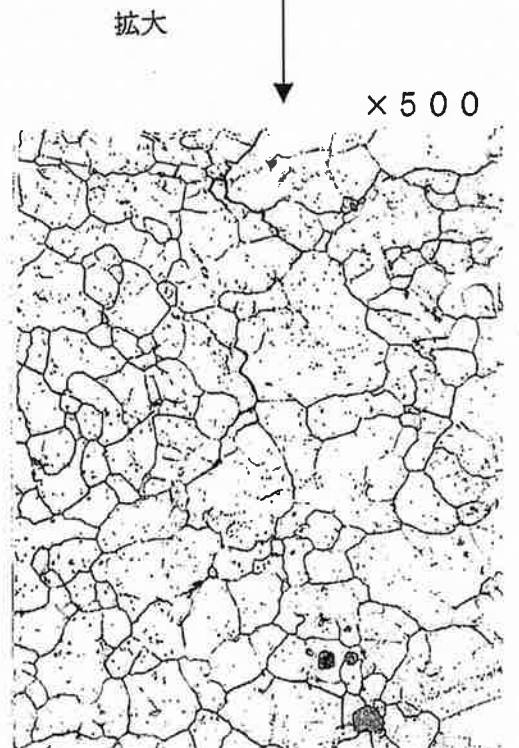
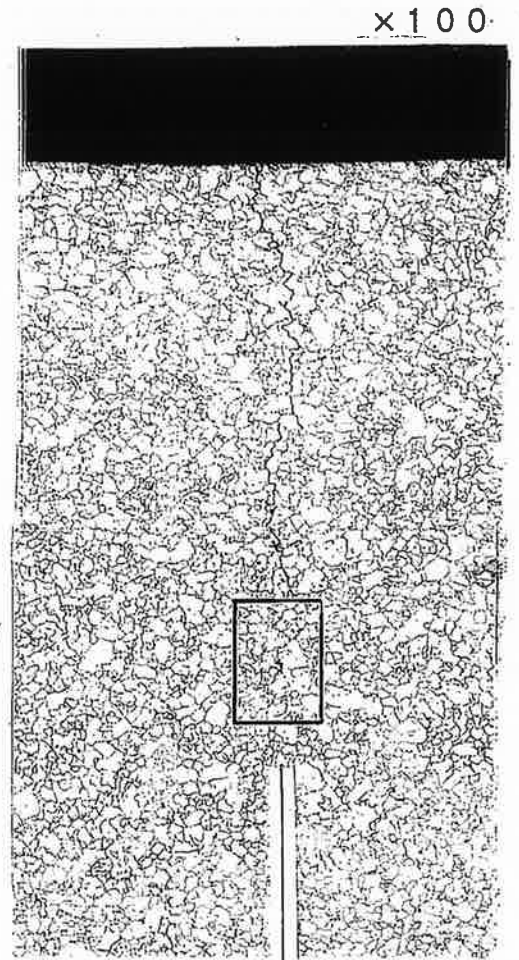
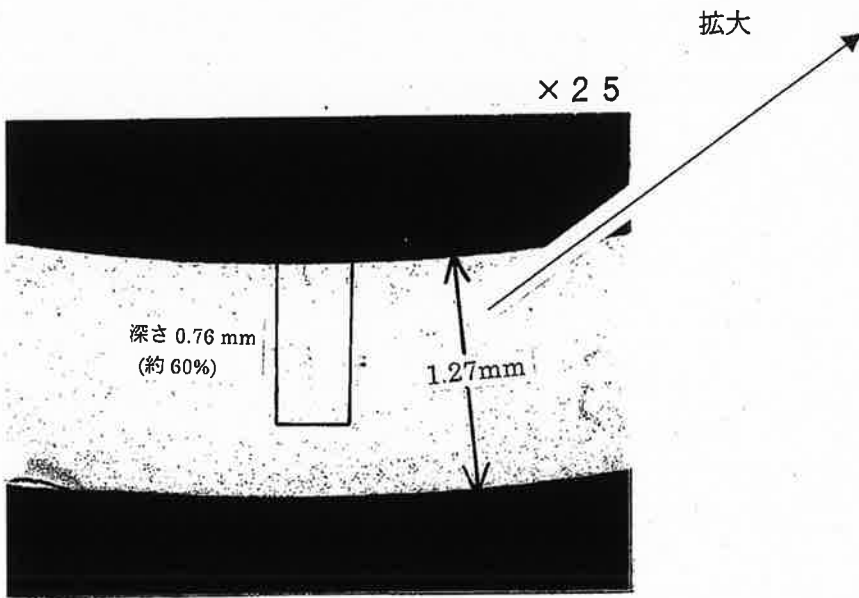
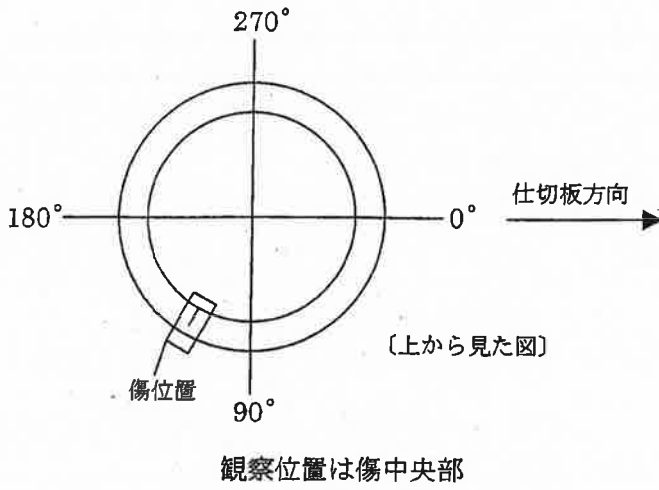
0° 90° × 2.5 180°

管板上面から
約 30mm 下方
↓

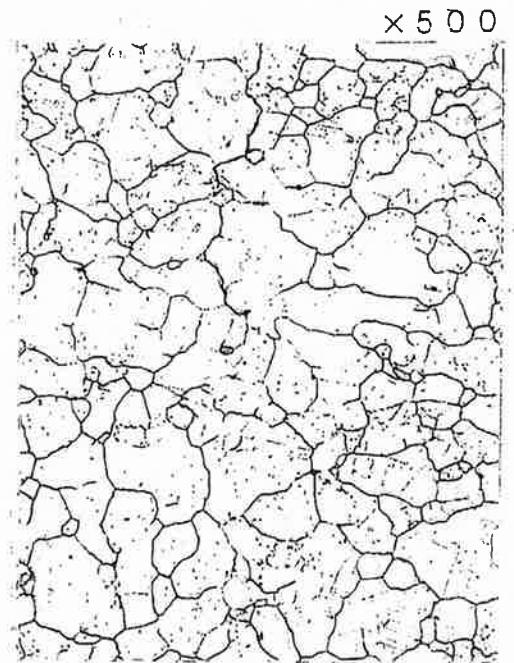
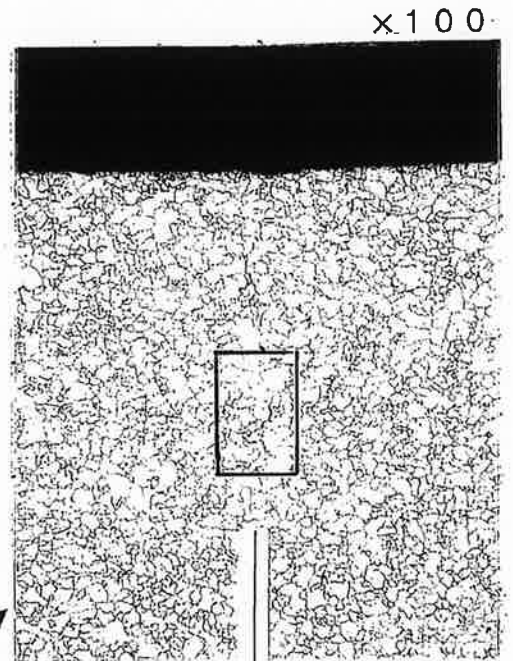
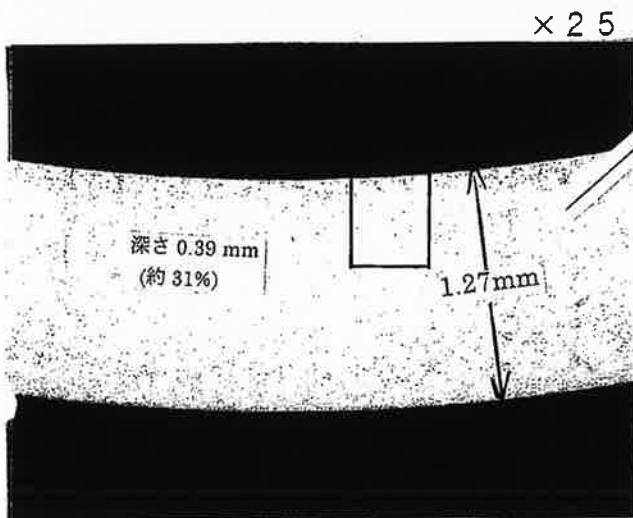
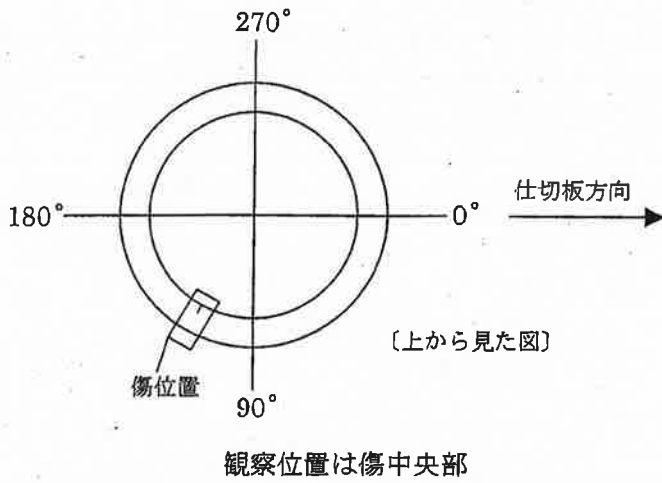
管板上面から
約 56mm 下方
↓



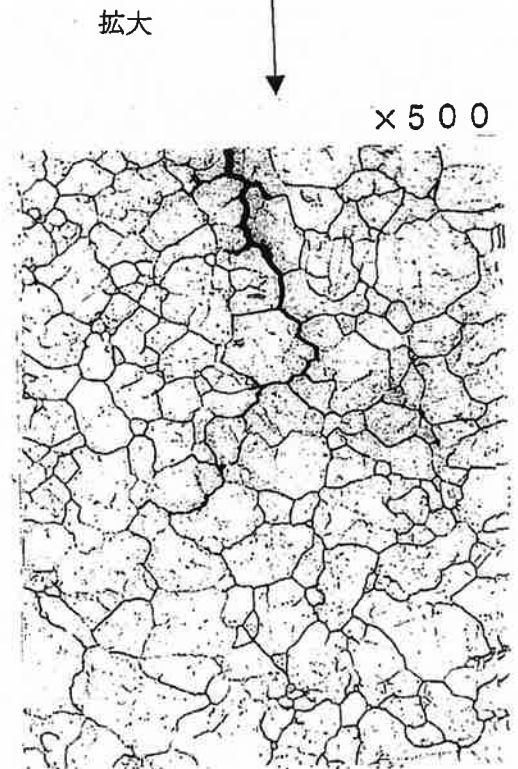
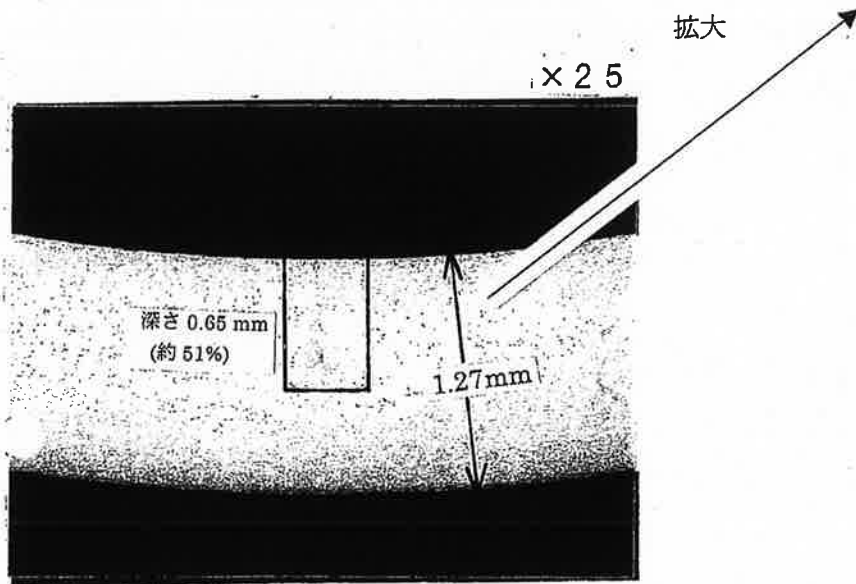
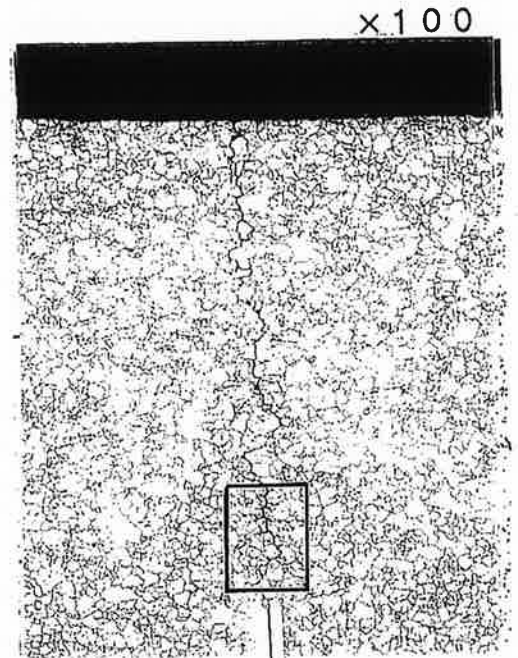
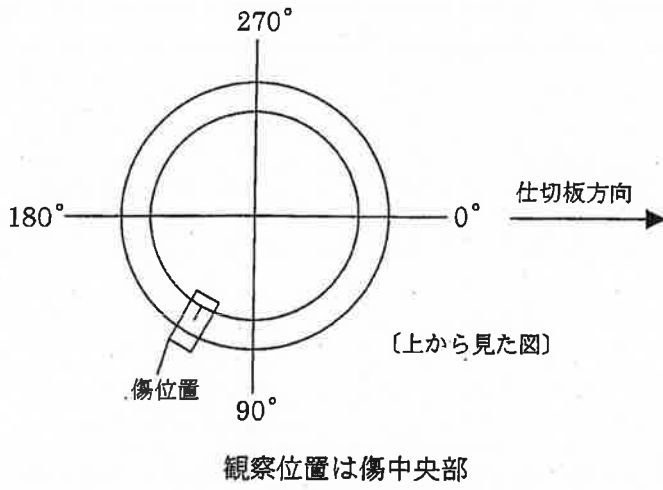
抜管調査結果 (断面マイクロ観察)
(管板上面より約30mm下方 約4mmの損傷)



抜管調査結果 (断面マイクロ観察)
(管板上面より約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

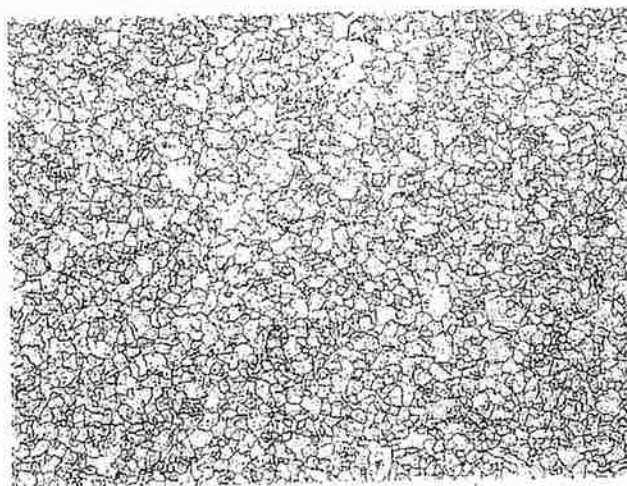
化学成分	分 析 方 法
C	JIS G1211 高周波誘導加熱炉燃焼—赤外線吸収法
Si	JIS G1212 モリブドけい酸青吸光光度法
Mn	JIS G1213 過よう素酸ナトリウム酸化吸光光度法
P	JIS G1214 モリブドリン酸青吸光光度法
S	JIS G1215 燃焼—高周波誘導加熱赤外線吸収法
Cr	JIS G1217 過マンガン酸カリウム酸化過マンガン酸カリウム滴定法
Fe	JIS G1258 誘導結合プラズマ発光分光分析法
Cu	JIS G1258 誘導結合プラズマ発光分光分析法
Al	JIS G1258 誘導結合プラズマ発光分光分析法
Ti	JIS G1258 誘導結合プ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

	B-SG X85-Y28
	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

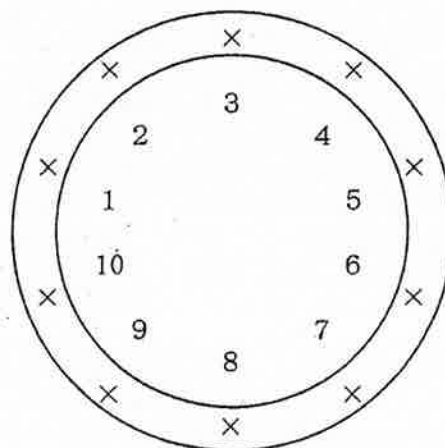
	B-SG X85-Y28
1	173
2	173
3	167
4	169
5	166
6	173
7	173
8	170
9	170
10	171
範囲	166~173
平均	171*

(*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

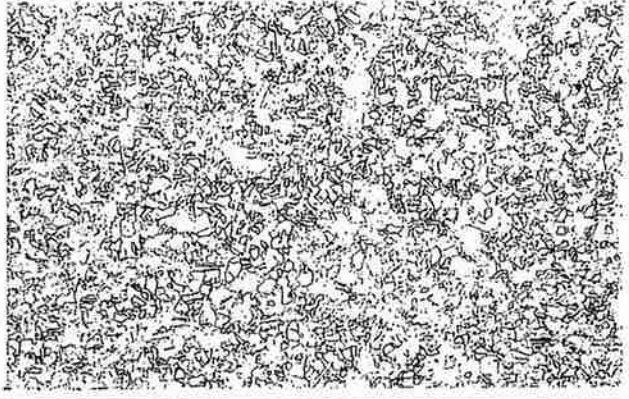

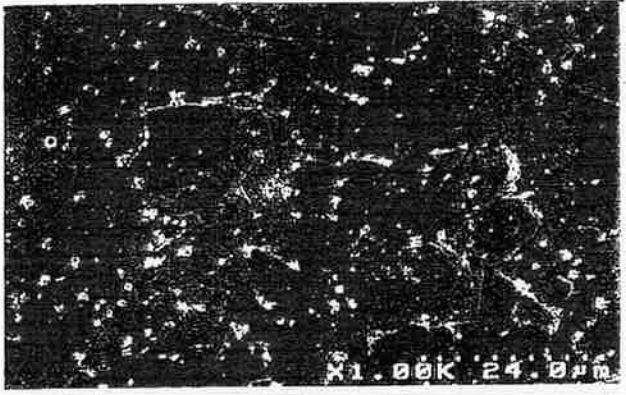
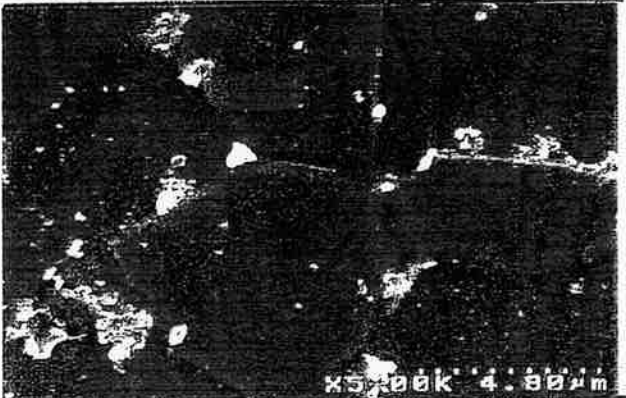


測定条件

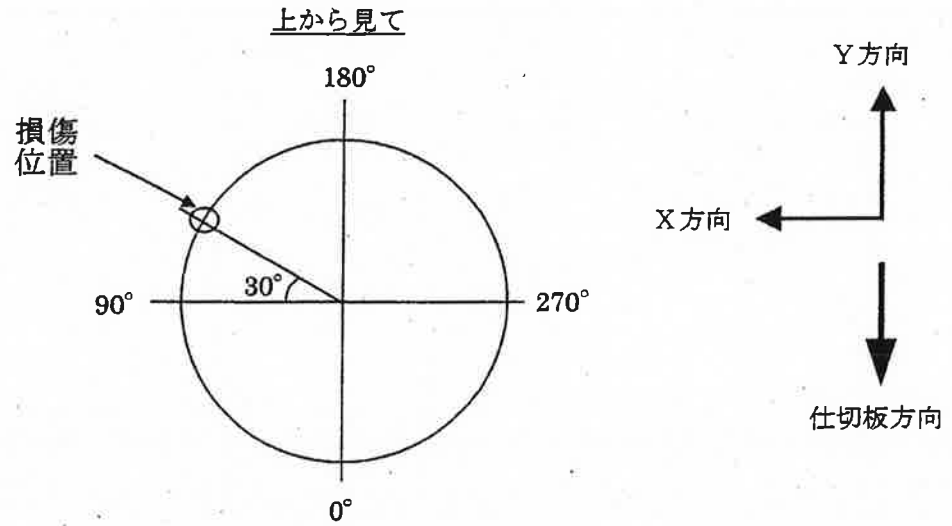
ビッカース硬さ
荷重: 1 kg

抜管調査結果 (材料分析)

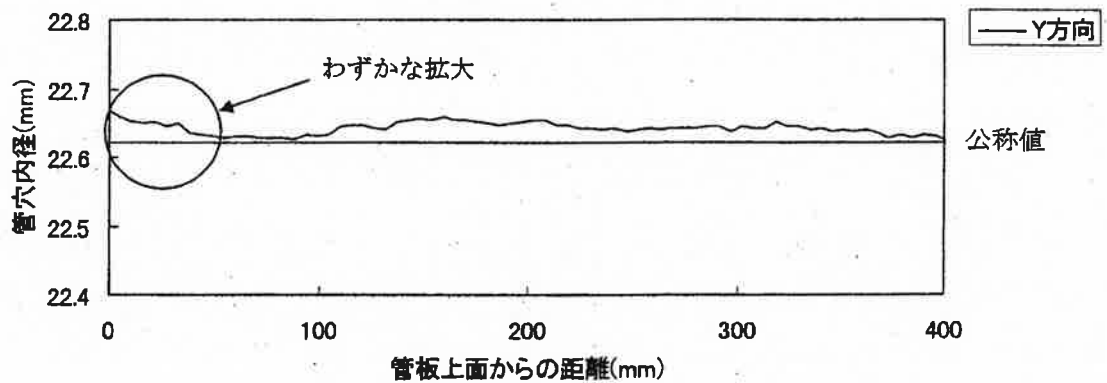
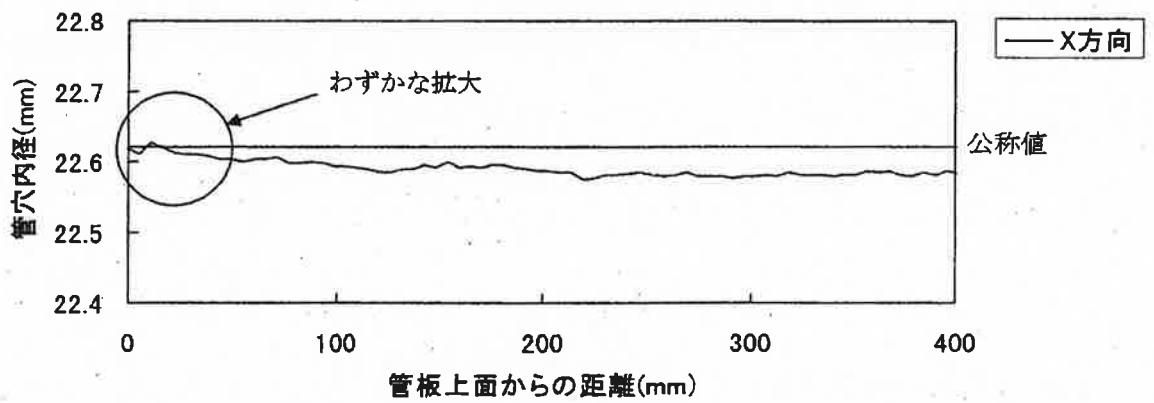
金属組織観察結果

供試管	観察方法	観察倍率	金属組織
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。

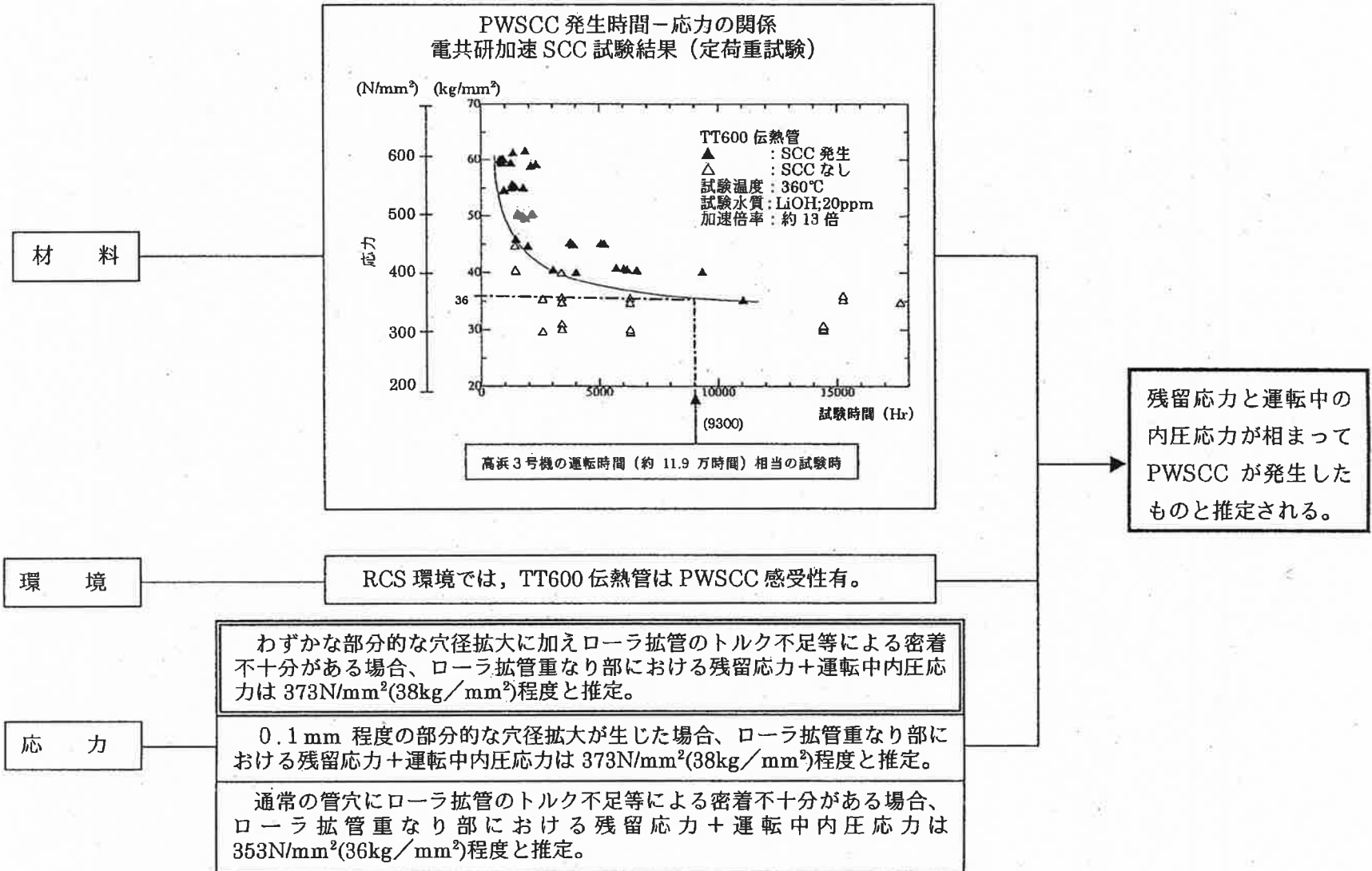
ポリチオン酸試験結果

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			~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			~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 65mm の1/3周溝			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			~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			~294 N/mm ² (~30 kg/mm ²)

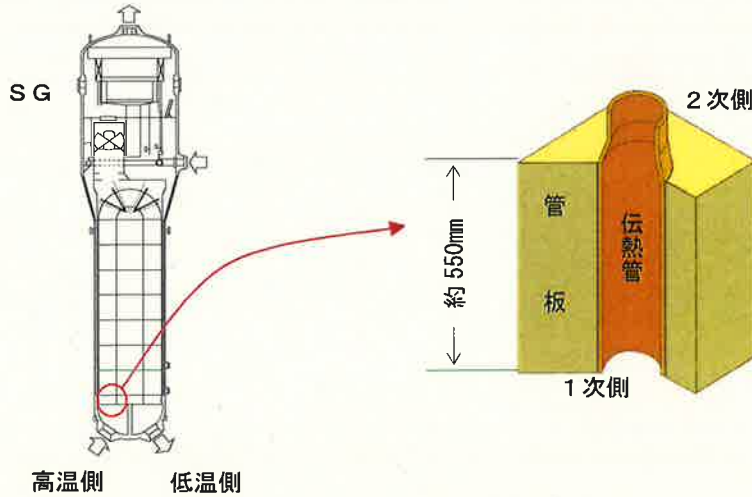
高浜 3 号機 蒸気発生器伝熱管損傷要因の検討



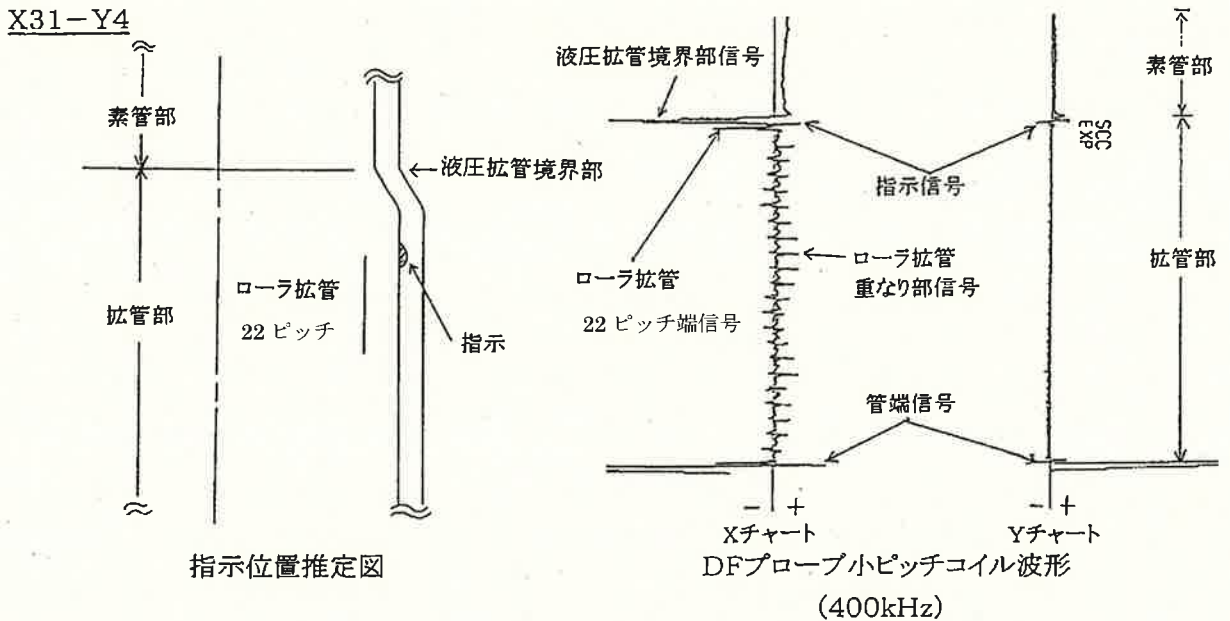
高浜4号機第11回定期検査時の抜管調査結果について

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

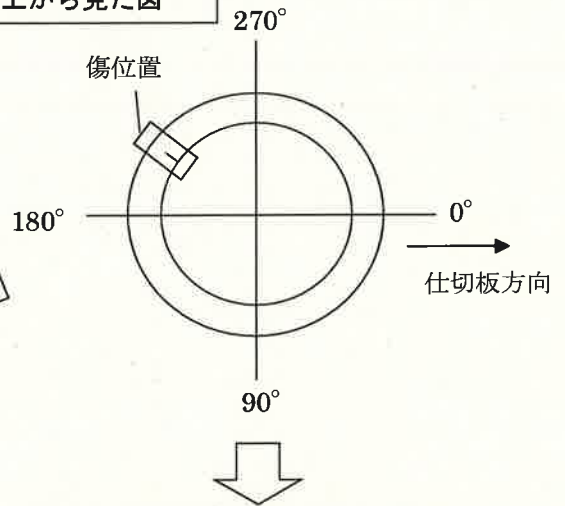
- ・400kHzのY信号がプローブの進行方向に対して「+→-」、X信号が「-→+」両振れする
- ・400kHzのY信号とX信号の振幅比 X振幅>Y振幅

3. 抜管調査結果

浸透探傷試験 (PT)



上から見た図

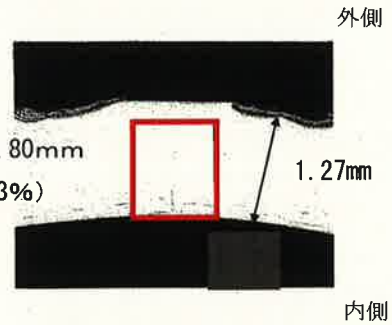


断面ミクロ観察

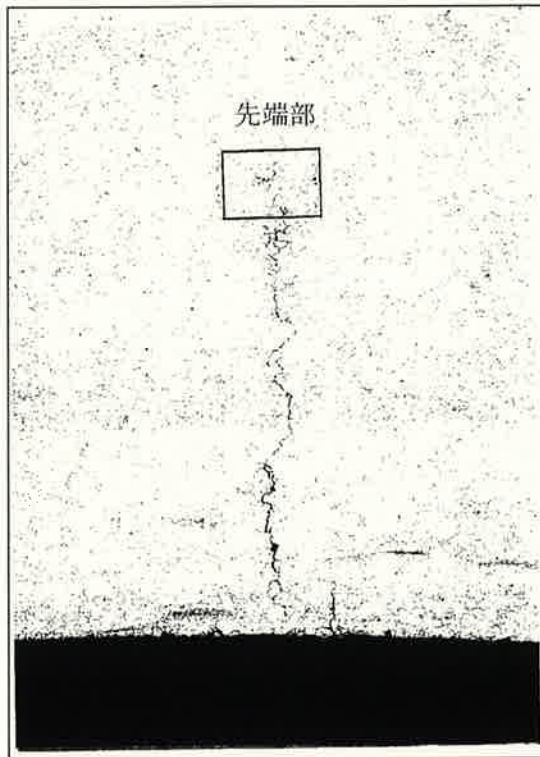
観察位置はきず中央部

【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管上端部に約
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。



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

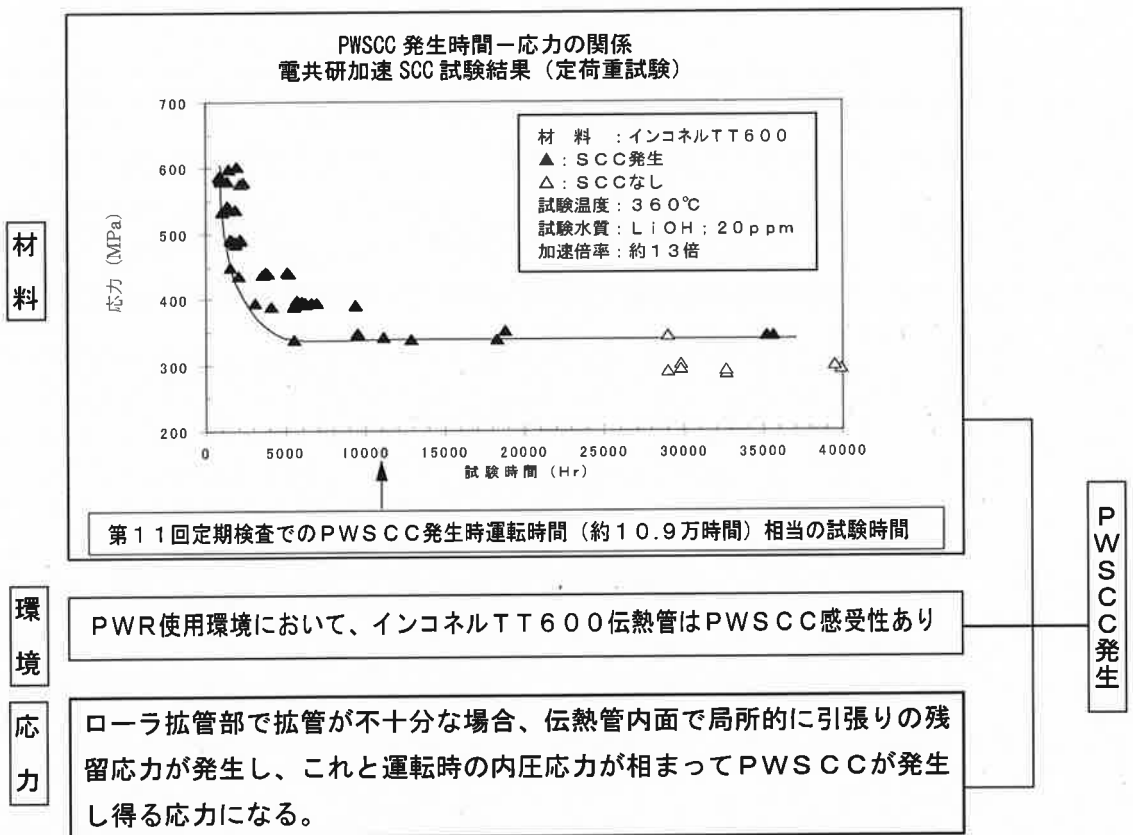
試験によりインコネルTT600伝熱管のPWSCC発生応力と発生時間の相関が得られている。

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 1 1 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部付近の外表面では、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拵管境界部及びローラ拵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63%)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、予歪リバーズUバ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、管板上面付近で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 32 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 38 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)

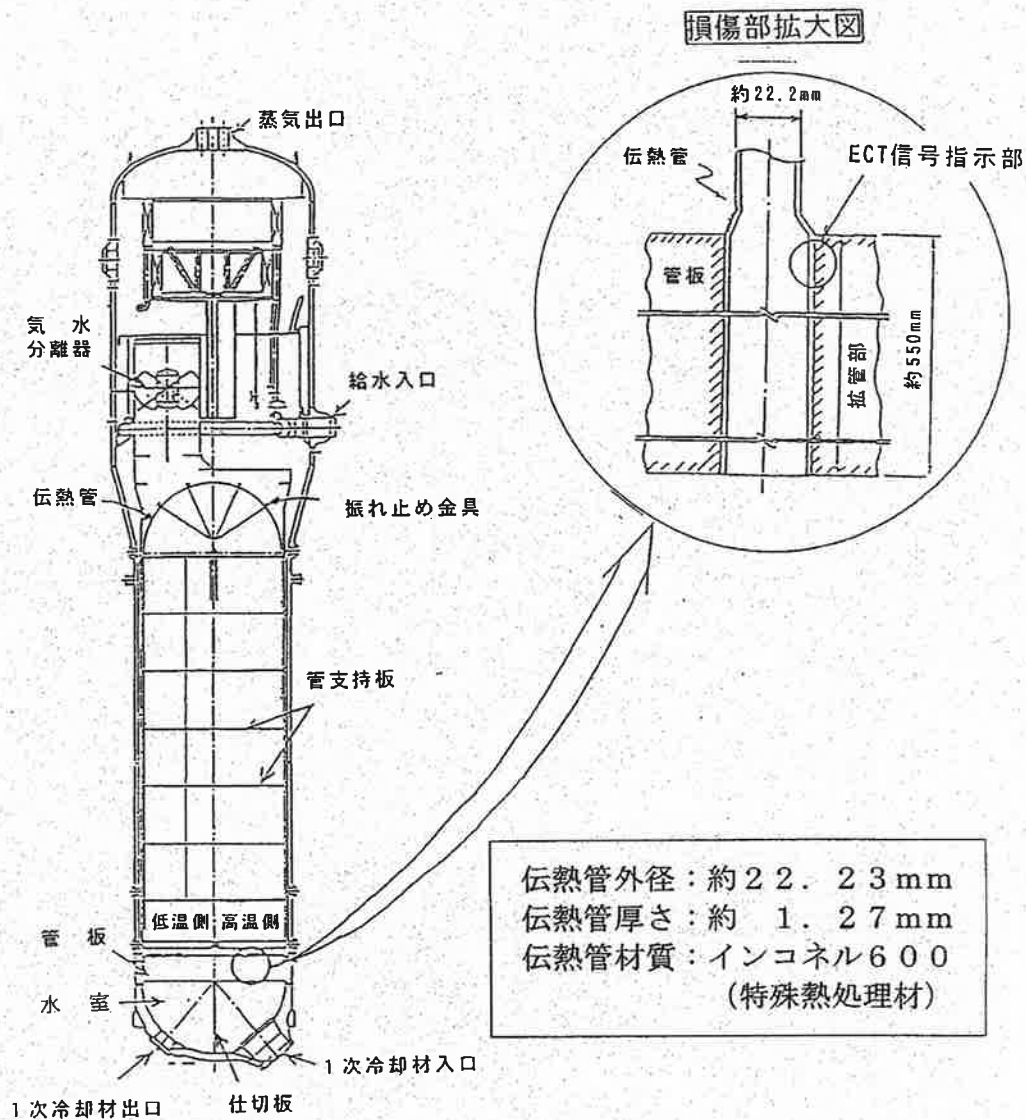
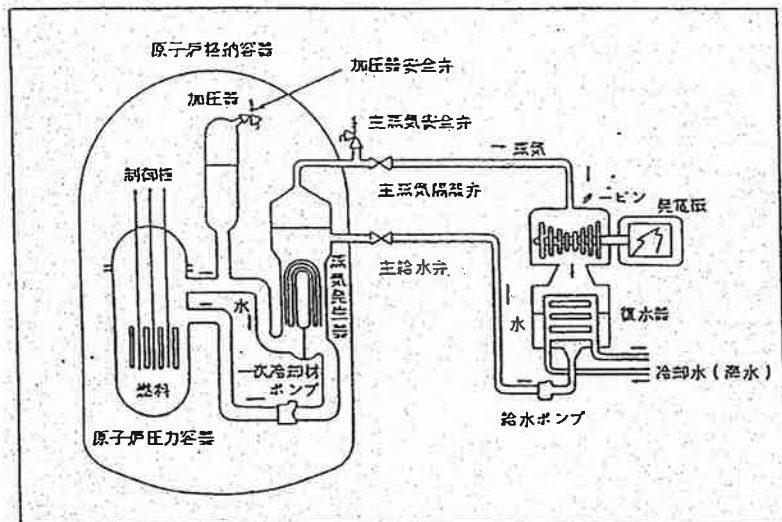
蒸気発生器	A	B	C	合計
今回施栓本数	0	0	4	4
既施栓本数	17	9	5	31
総施栓本数	17	9	9	35
施栓率 (%)	0.5	0.3	0.3	0.3

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

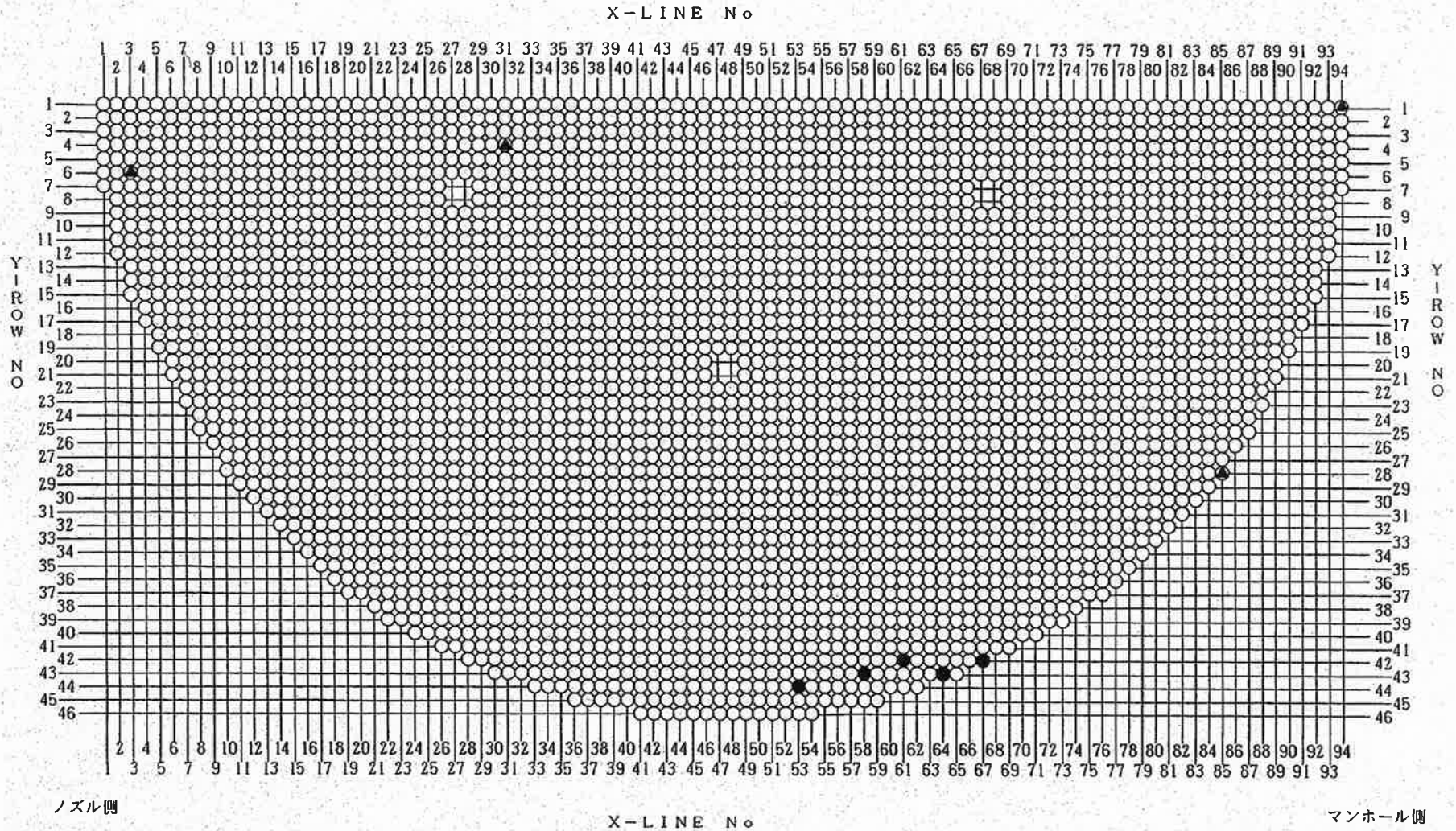
蒸気発生器伝熱管損傷発生箇所概要図



蒸気発生器伝熱管損傷位置を示す図

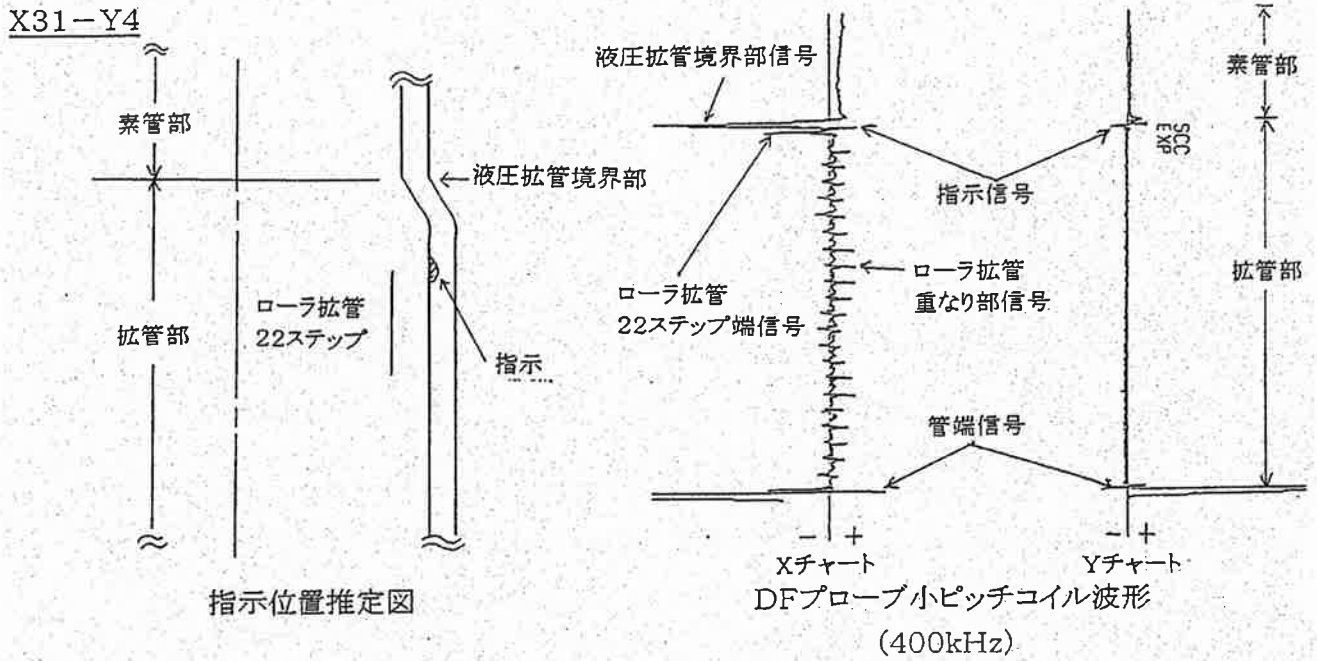
C - 蒸気発生器高温側

- ▲ : 今回損傷位置
- : 既栓取付位置

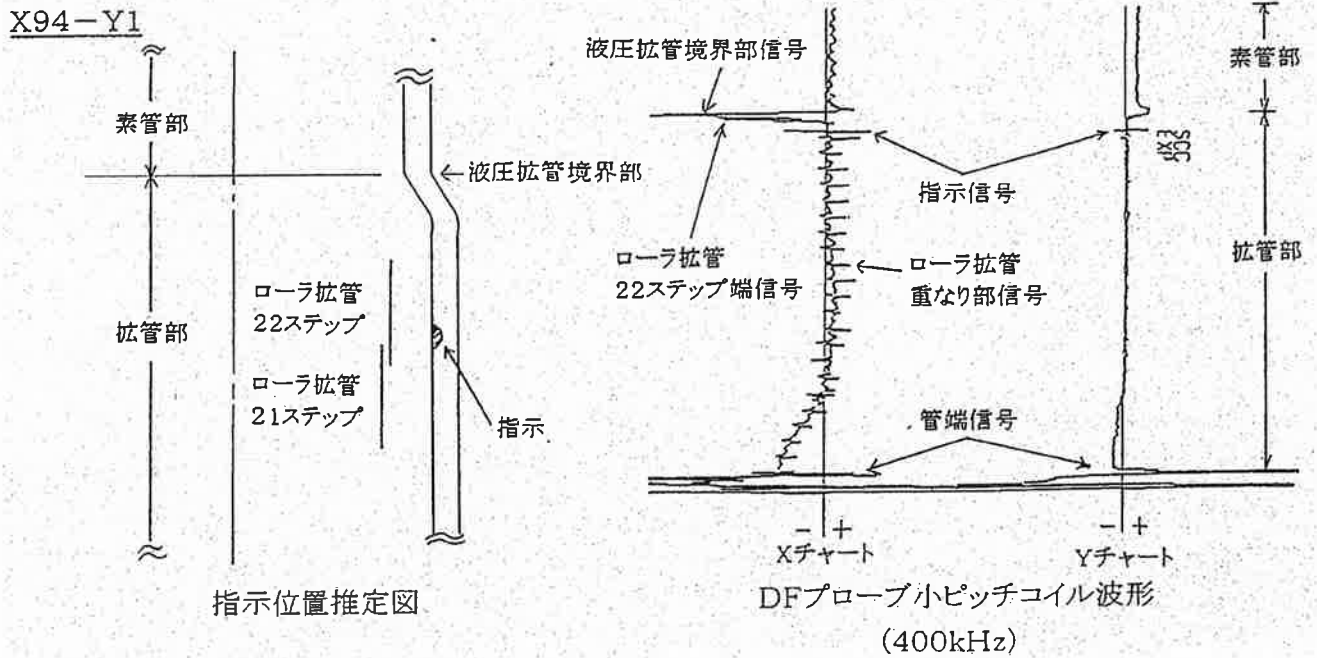


(1) 本図は蒸気発生器上部から見た位置を表す。

ECT信号波形と指示位置推定図



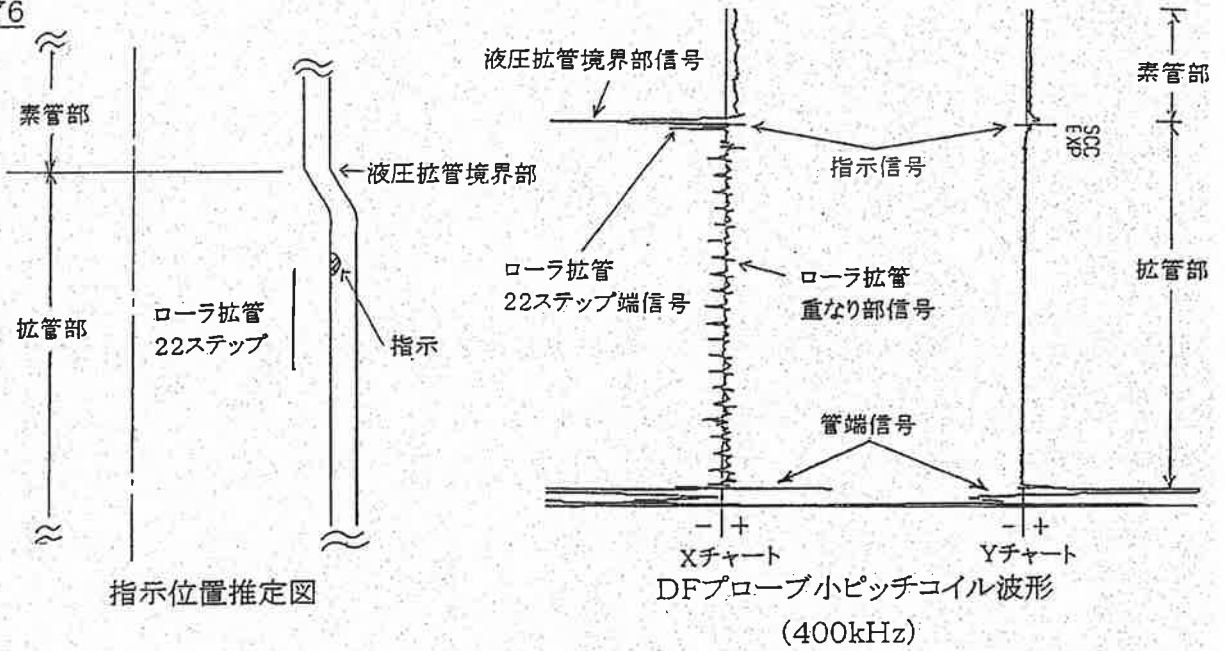
指示位置推定図



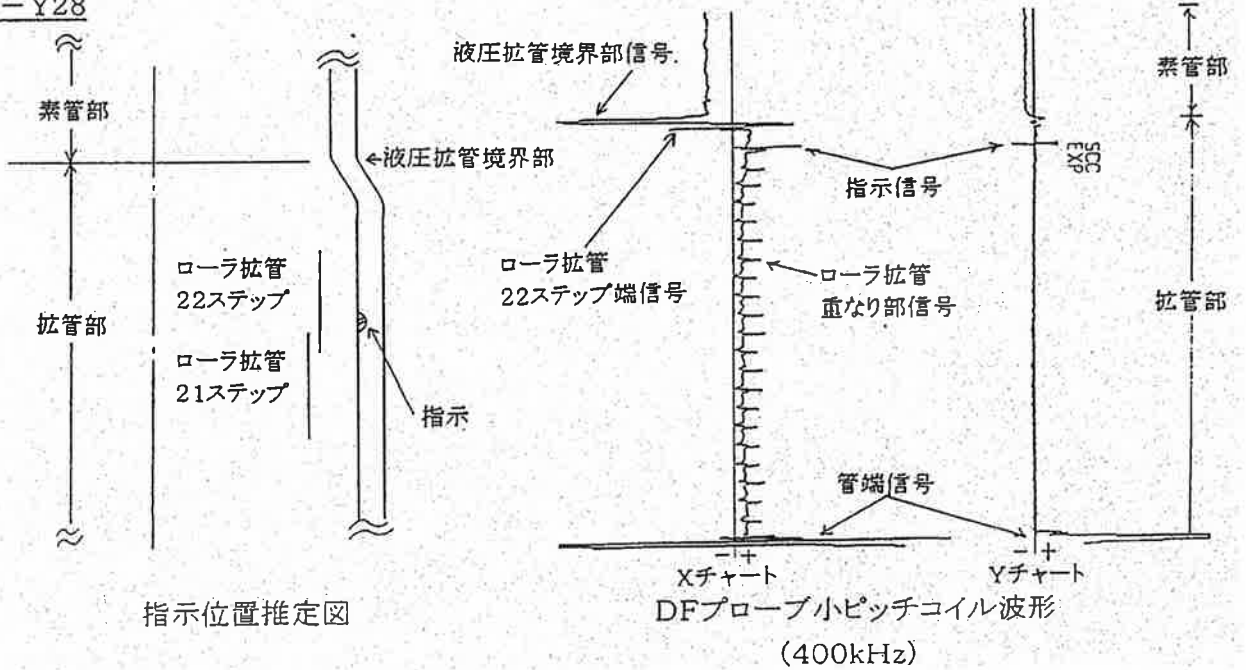
指示位置推定図

ECT信号波形と指示位置推定図

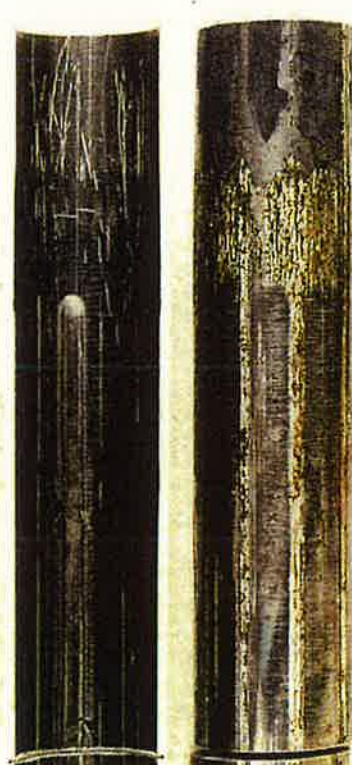
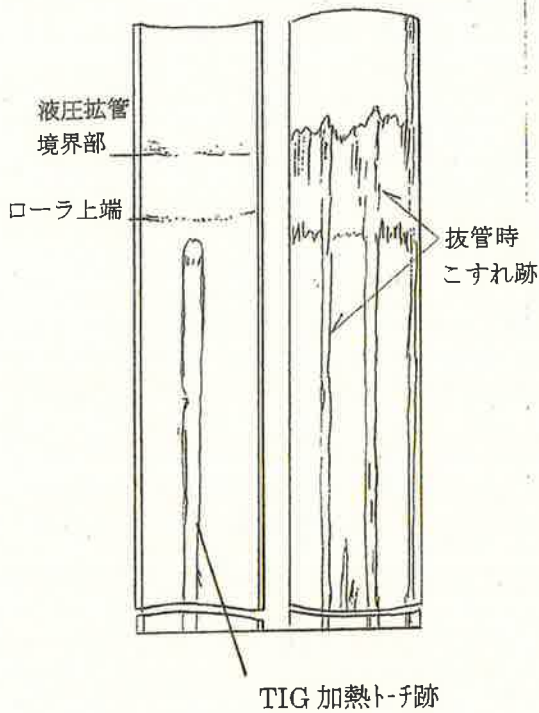
X3-Y6



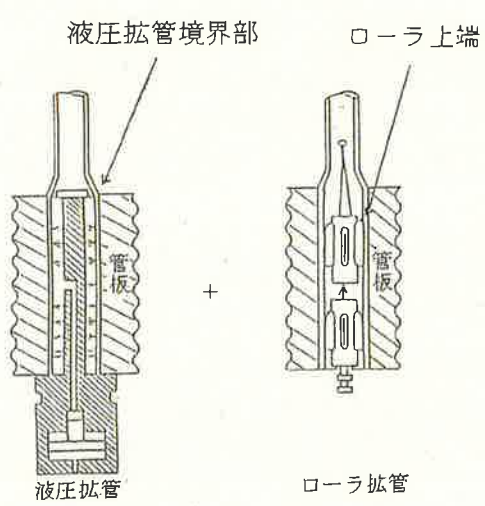
X85-Y28



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



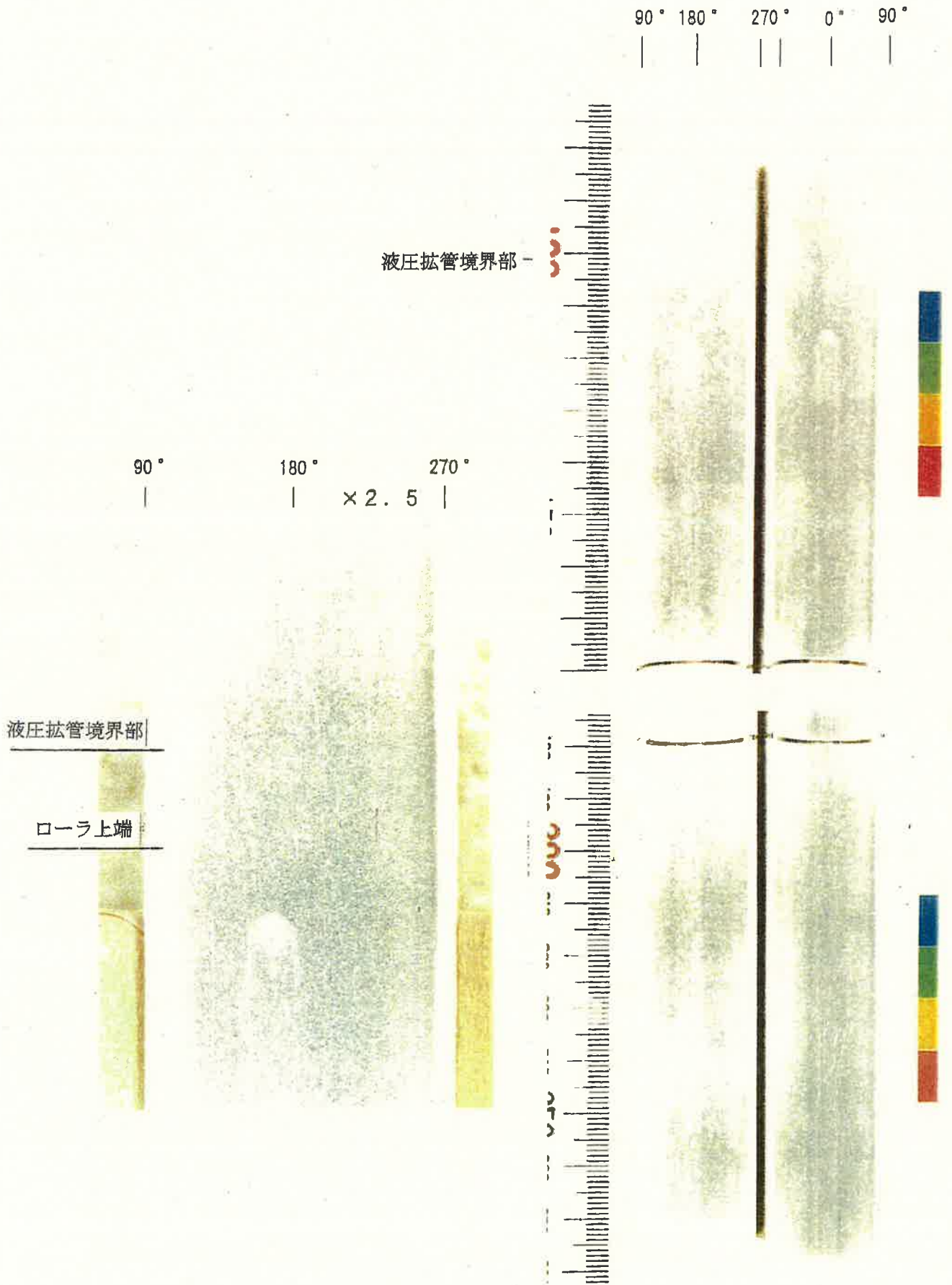
- 液圧拡張境界部
- ローラ上端
- 22ピッチ
- 21ピッチ
- 20ピッチ



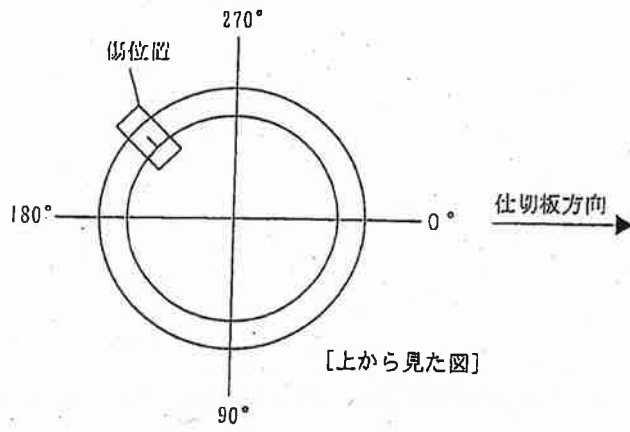
- 19ピッチ
- 18ピッチ
- 17ピッチ
- 16ピッチ



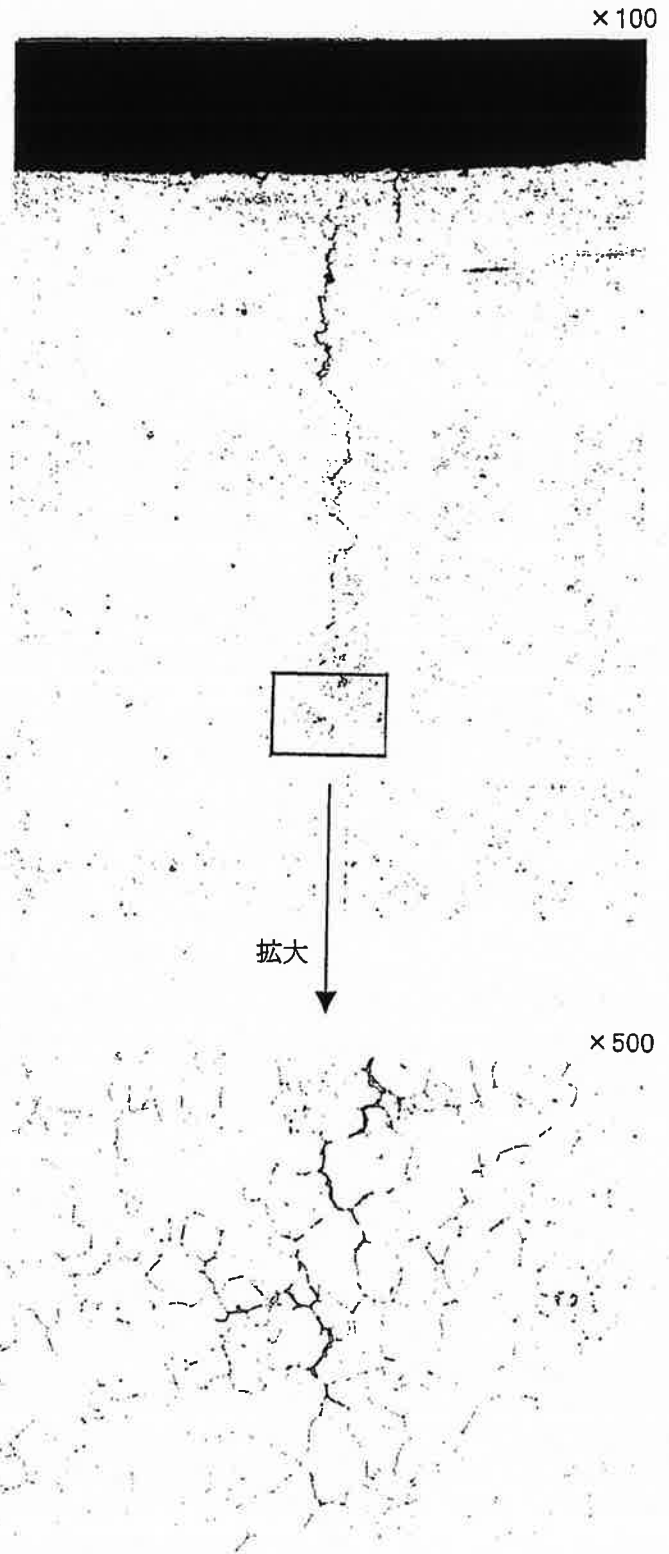
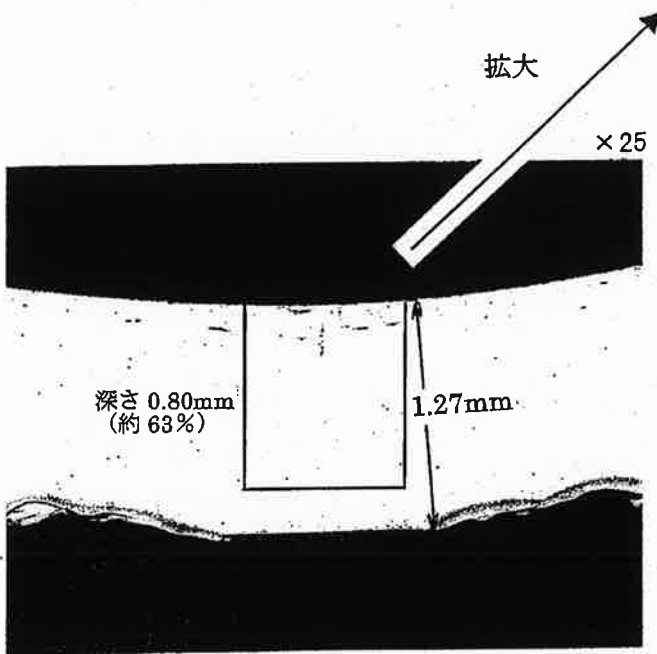
抜管調査結果 (外観観察)



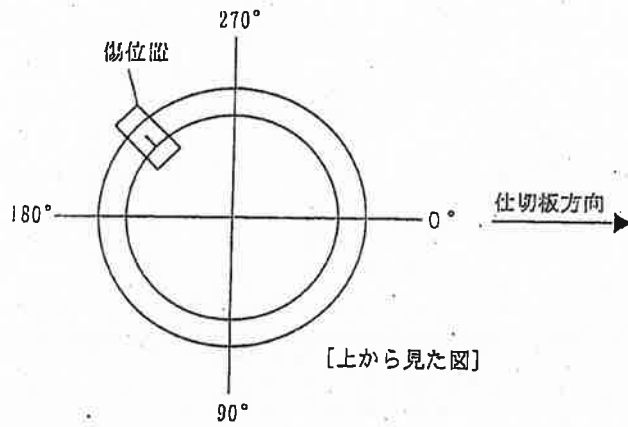
抜管調査結果 (浸透探傷試験)



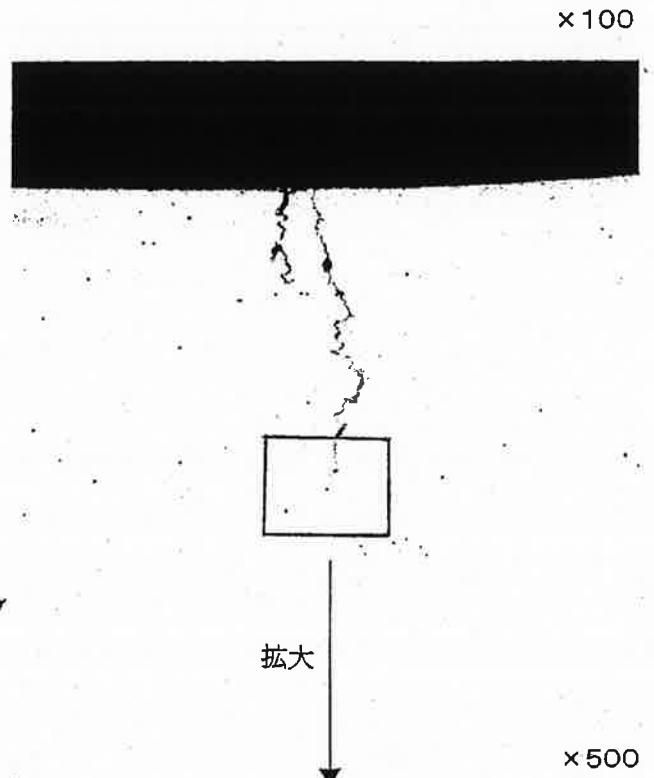
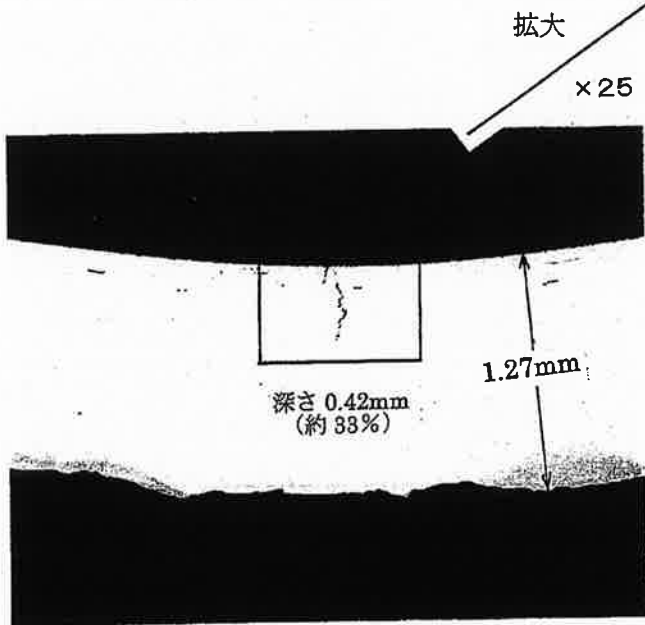
観察位置は傷中央部



抜管調査結果 (断面マイクロ観察)



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 (断面ミクロ観察)

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 モリブドリン酸青吸光光度法
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

	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
1 0	8.9
平均	9.1

代表的視野 (× 1 0 0)



抜管調査結果 (材料分析)

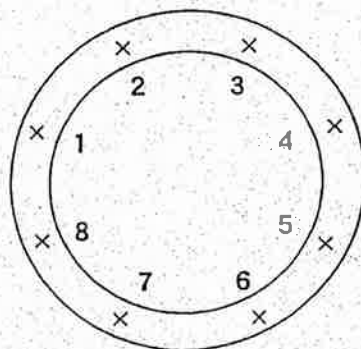
かたさ測定結果

	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



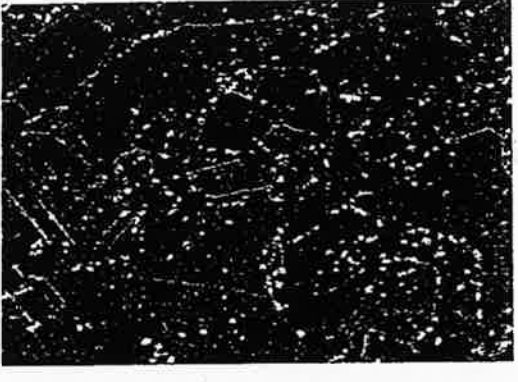
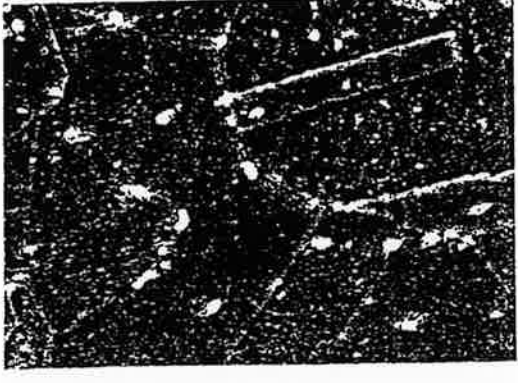
荷重：1Kg

測定条件

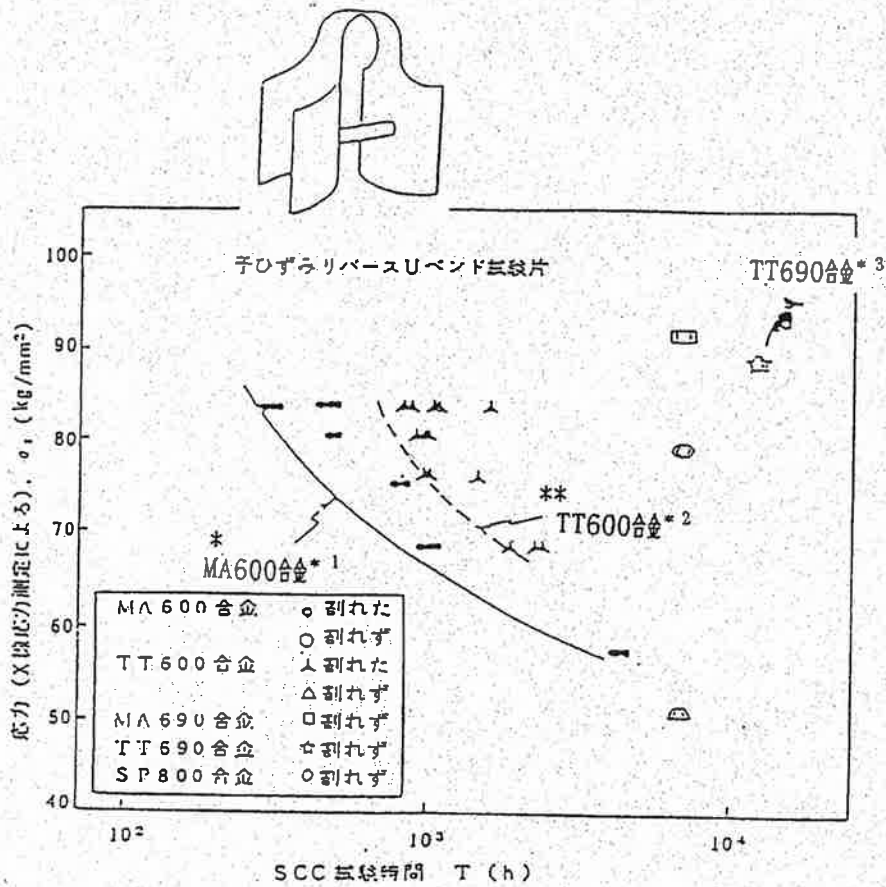
測定位置

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	

模擬RCS水中SCC試験結果



注*1 : MA600合金・インコル600合金

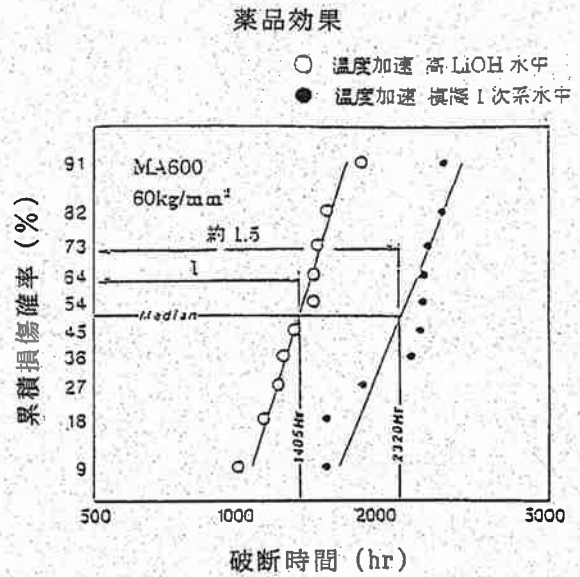
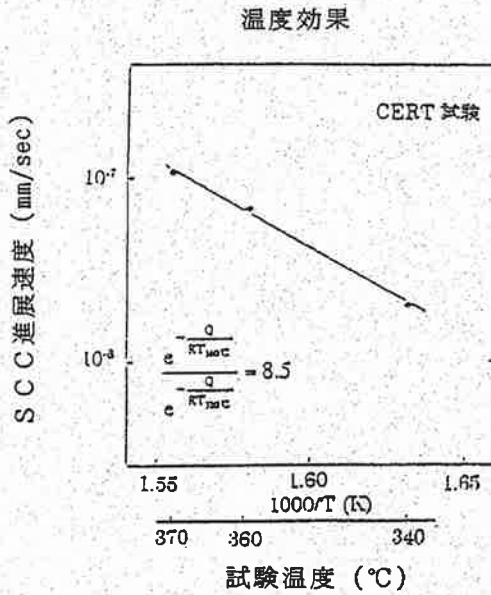
*2 : TT600合金・インコル600合金 (特殊熱処理)

*3 : TT690合金・インコル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

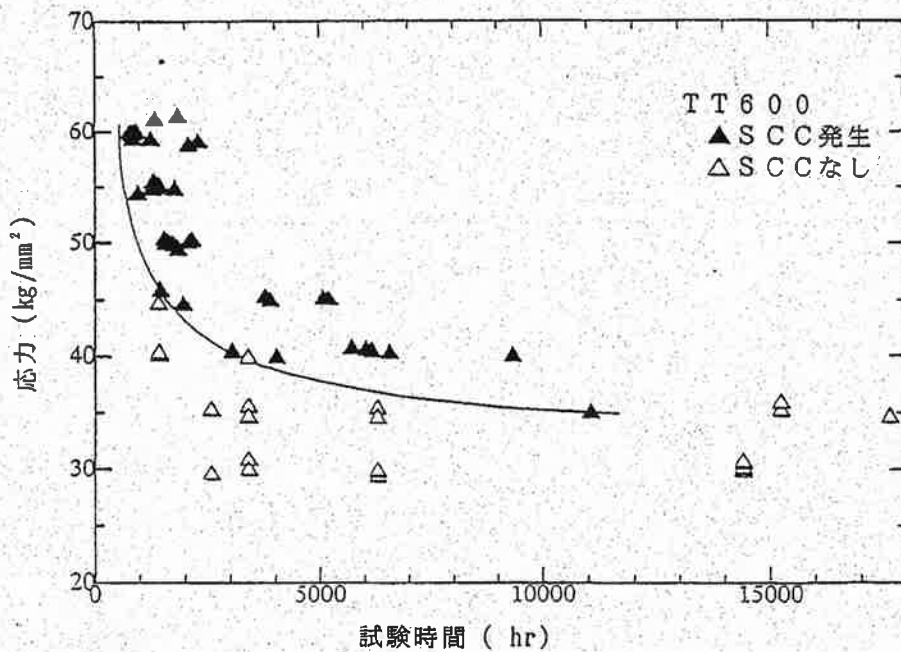
- ・ 温度 : 約 320°C (高温側) →
- ・ 水質 : 2 ppm LiOH

加速環境

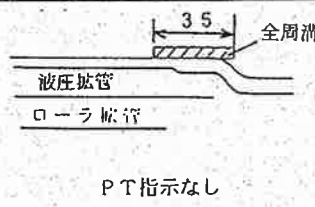
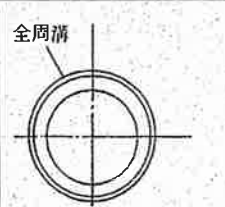
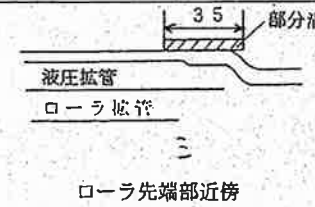
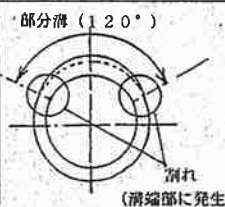
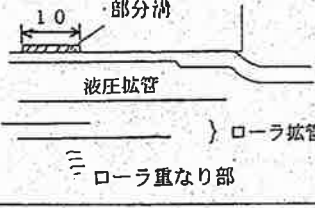
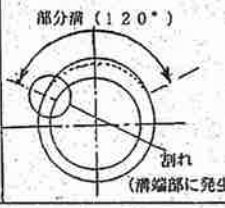
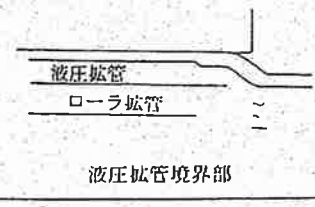

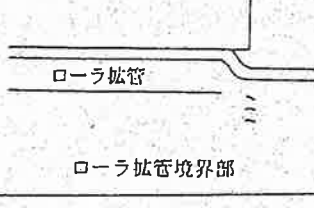
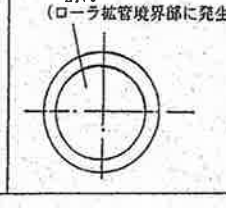
- ・ 温度 : 360°C
- ・ 水質 : 20 ppm LiOH

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

②改良加速試験による定荷重試験

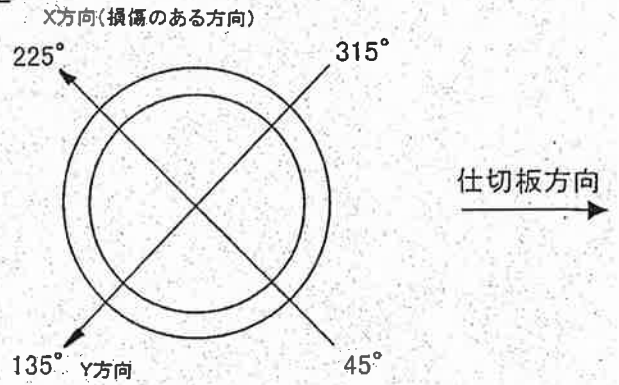


ポリチオン酸試験結果

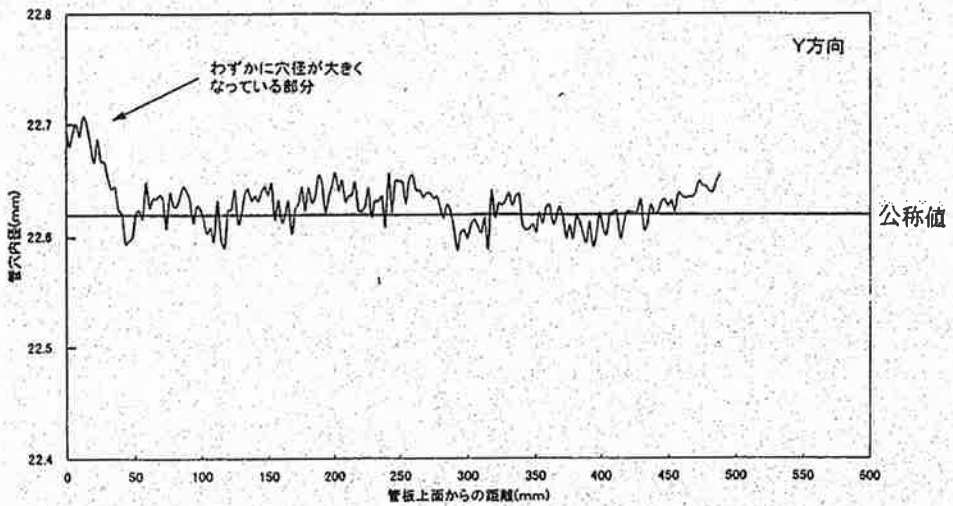
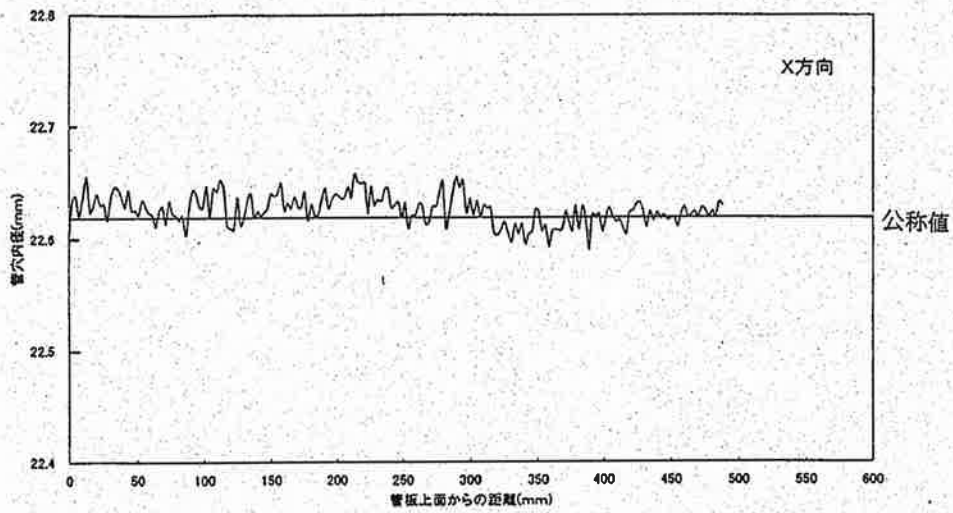
モデル	拡管法	管穴形状	PT指示時間 (Hr)	PT指示位置	PT指示位置 推定応力 σ (kg/mm ²)	
ローラ拡管不良 を模倣したモデル	液圧拡管 + ローラ拡管	ローラ先端部近傍に 0.05mm深さ、軸長さ35mm の全周溝	17 Hr で指示なし			32 以下
部分的な管板管穴拡大 を模倣したモデル	液圧拡管 + ローラ拡管	ローラ先端部近傍に 0.1mm深さ、軸長さ35mm の1/3周溝	13.5~14.5			~38
		ローラ拡管重なり部に 0.1mm深さ、軸長さ10mm の1/3周溝	13.5~14.5			~38
正常拡管モデル (参考)	液圧拡管 + ローラ拡管	溝なし	19~20			~30
	ローラ拡管	溝なし	10~11			~45

管板管穴内径調査結果

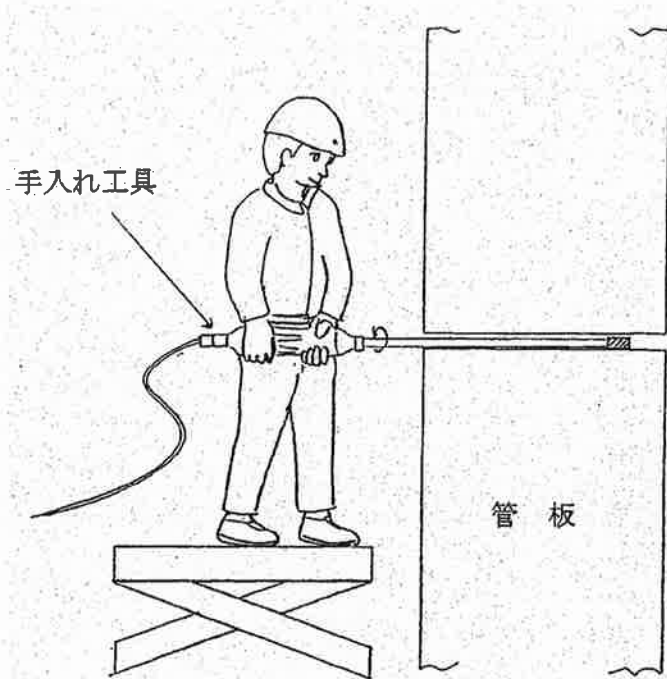
上から見て



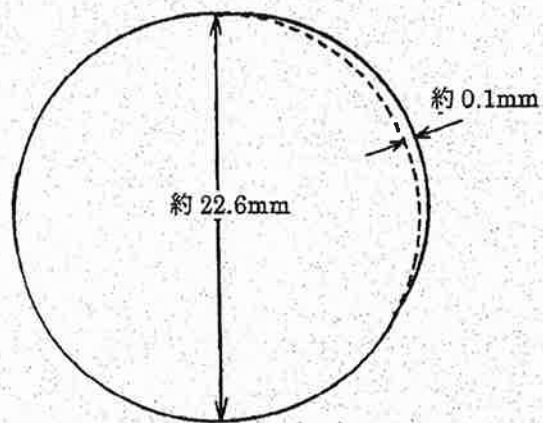
ひずみゲージ式内径計測装置による計測



(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。

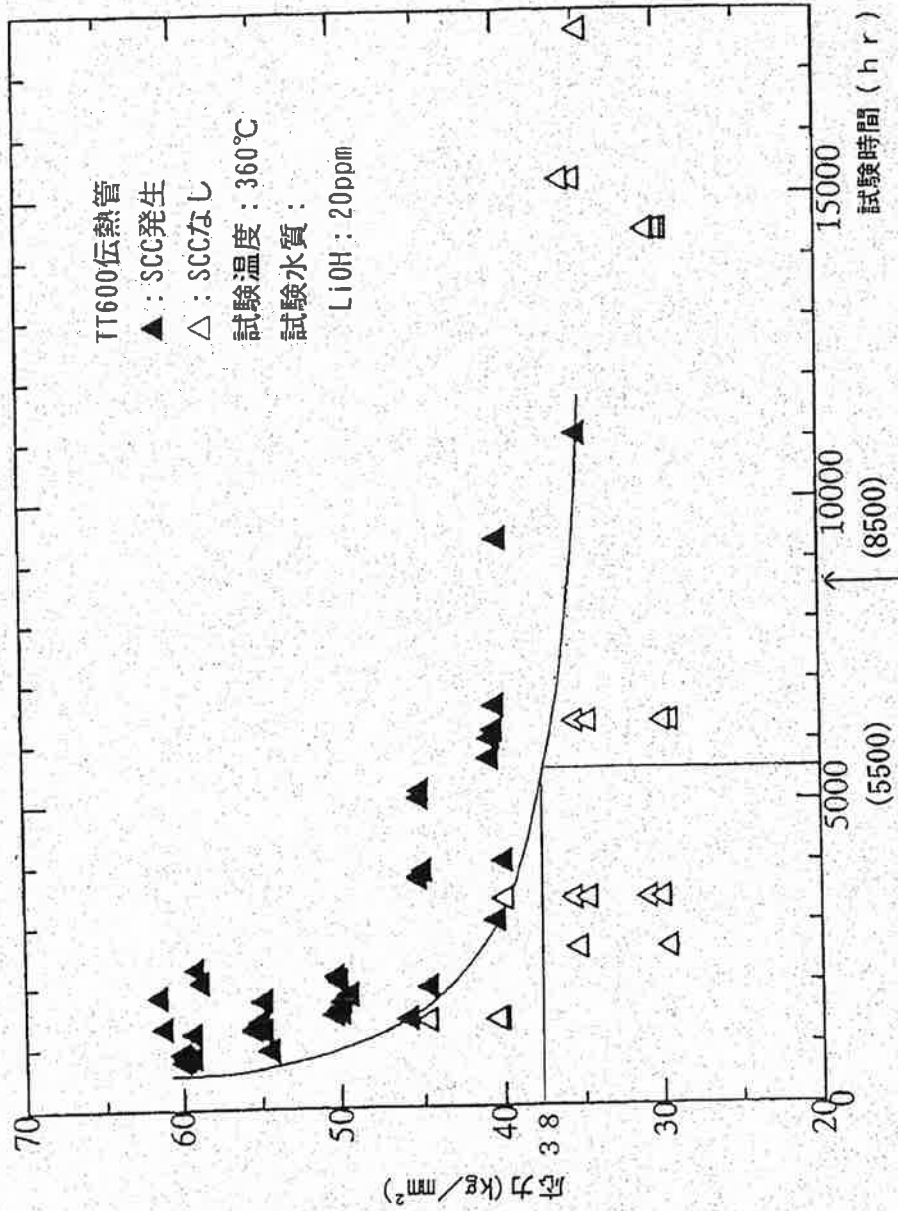


管板管穴手入れ作業状況



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

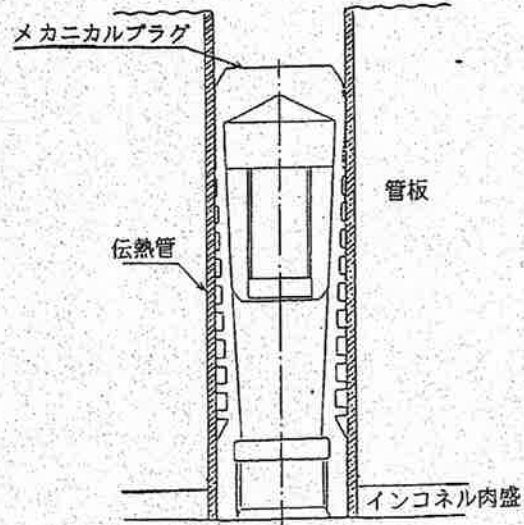


高浜4号機の運転時間相当 (実運転時間 : 約10.9万時間)

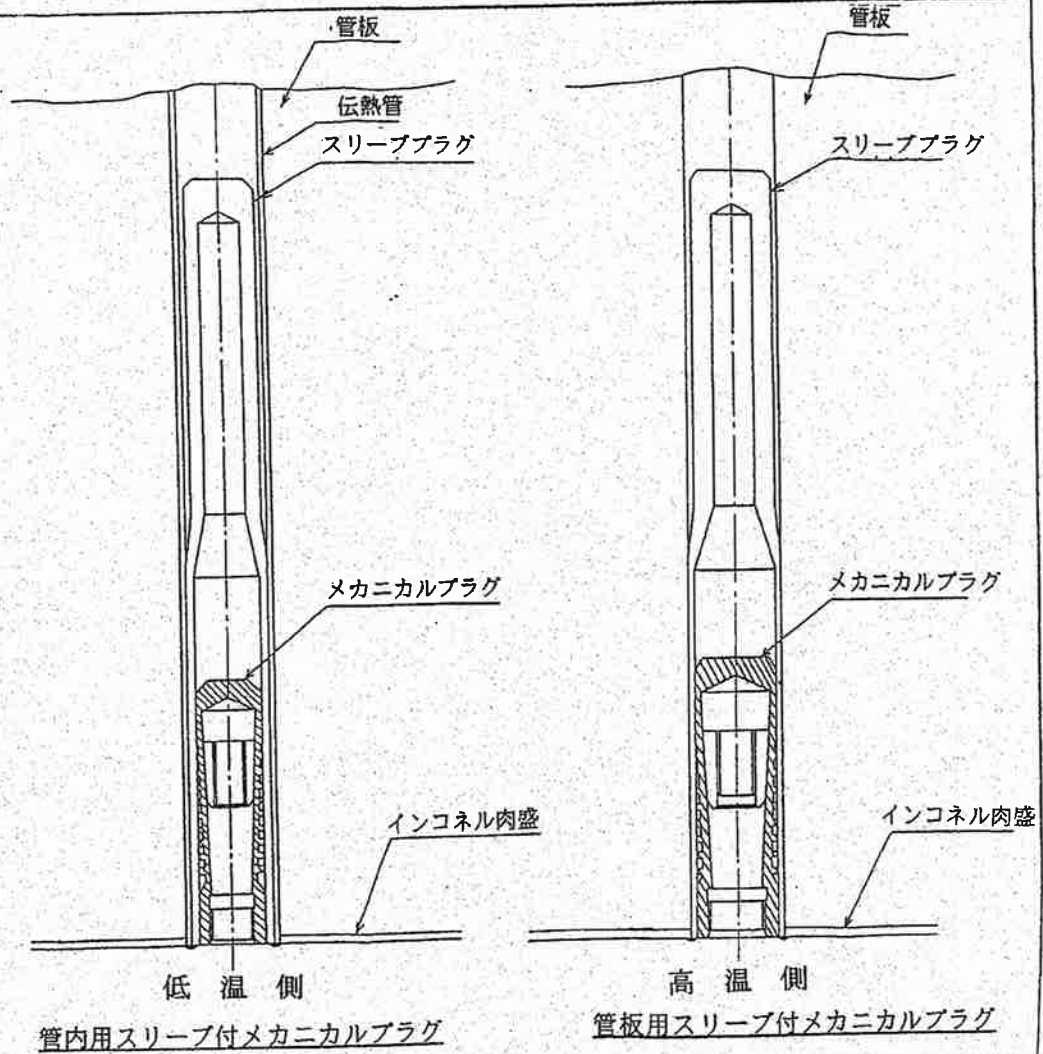
応力 3.8 kg/mm²での実機運転時間相当 約70,000時間 = 5500 × 8.5 (温度加速) × 1.5 (LiOH加速)

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

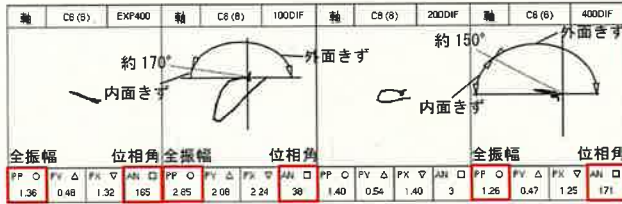


伝熱管番地：X31-Y4
 材 料：インコネル690合金

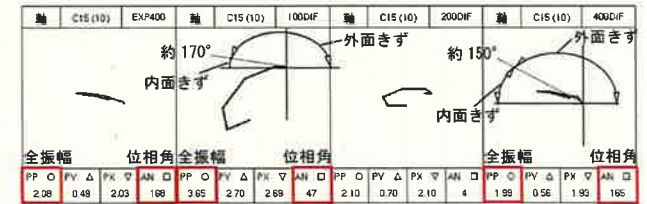


高浜3号機 第23回・第22回 定期検査時の信号指示の比較

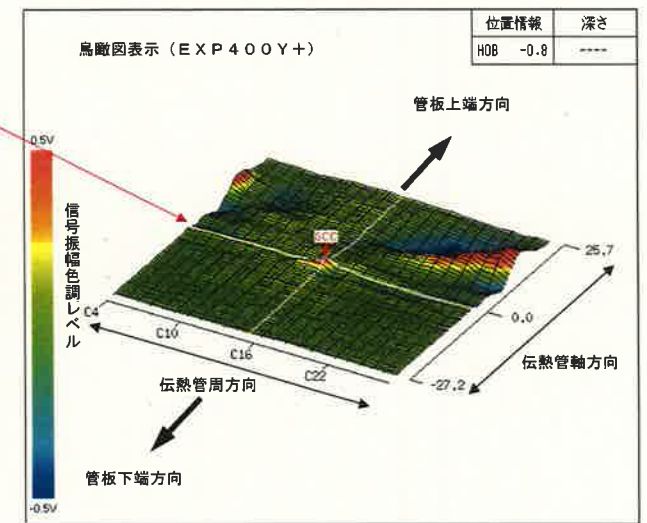
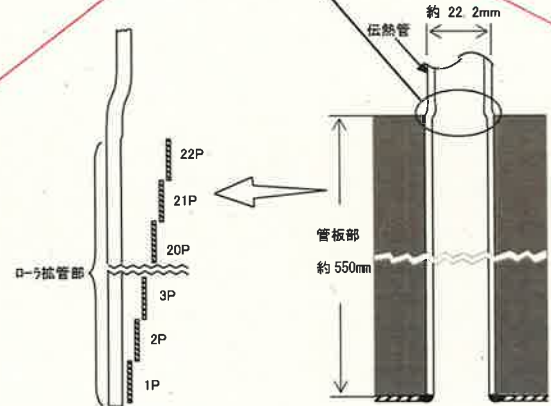
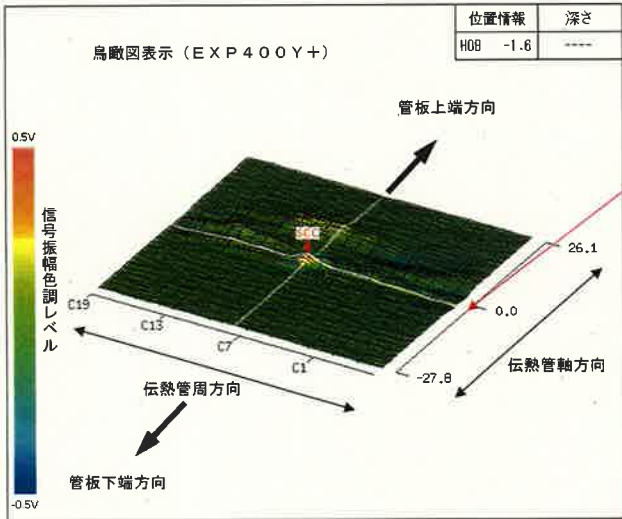
高浜3号機 第23回定期検査時
リサーチ波形 (C-SG X43-Y18)



高浜3号機 第22回定期検査時
リサーチ波形 (A-SG X16-Y26)



ECT信号指示部



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端部(22ピッチ)であり、高浜発電所3号機 第22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は原信号及び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3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



客先	課長	係長	A クラス	
			係	

関西電力(株)高浜発電所 3 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 13 年 7 月 31 日					
作業所図書番号	改訂										
KT3 - 13 - D112		0									
現地	客先	作業所	放管	機器	燃料	計装	検査	作責	控	関連資料図書番号	改訂
配布先	1	1							1		-
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	1 頁	関西電力(株) 高浜発電所 3号機	アイテム	照合者	原子力保全技術部 技術課						
函表	1 枚		2322924	H . .	課長		係長				
表紙共	194 枚		0100								
備考	原紙保管 原保技課			H . .	作成	平成 13 年 7 月 31 日					
配布先					出書	平成 13 年 7 月 31 日			改訂		
						RCS-010011				0	

No.	工具	施工アドレス		送り寸法	施工範囲 判定基準 (600+30mm)	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	
13	A	50	13	730	630	284	276	280	0.35	0.35	0.35	良	7月4日	11:06:09			
	B	48	13						0.36	0.35	0.35			良	11:10:45		
14	A	45	16	730	630	282	273	278	0.35	0.35	0.35	良	7月4日	11:16:06			
	B	43	16						0.35	0.35	0.35			良	11:20:42		
15	A	45	17	730	630	282	276	279	0.35	0.35	0.35	良	7月4日	11:21:38			
	B	43	17						0.35	0.35	0.35			良	11:26:14		
16	A	45	18	730	630	282	275	279	0.35	0.35	0.35	良	7月4日	11:26:48			
	B	43	18						0.35	0.35	0.35			良	11:31:24		
17	A	46	18	730	630	282	275	278	0.35	0.35	0.35	良	7月4日	11:32:00			
	B	44	18						0.35	0.35	0.35			良	11:36:36		
18	A	46	17	730	630	282	276	279	0.35	0.35	0.35	良	7月4日	11:37:08			
	B	44	17						0.35	0.35	0.35			良	11:41:44		
19	A	46	16	730	630	281	277	279	0.35	0.35	0.35	良	7月4日	11:42:15			
	B	44	16						0.36	0.35	0.35			良	11:46:50		
20	A	46	19	730	630	282	275	279	0.35	0.35	0.35	良	7月4日	11:48:25			
	B	44	19						0.36	0.35	0.35			良	11:53:01		
21	A	46	20	730	630	282	276	278	0.35	0.35	0.35	良	7月4日	11:53:33			
	B	44	20						0.36	0.35	0.35			良	11:58:09		
22	A	46	21	730	630	282	276	278	0.36	0.35	0.35	良	7月4日	11:58:42			
	B	44	21						0.36	0.35	0.35			良	12:03:18		
23	A	45	21	730	630	283	275	279	0.36	0.35	0.35	良	7月4日	12:03:52			
	B	43	21						0.36	0.35	0.36			良	12:08:28		
24	A	45	20	730	630	282	274	279	0.35	0.35	0.35	良	7月4日	12:09:10			
	B	43	20						0.35	0.35	0.35			良	12:13:46		
25	A	45	19	730	630	281	277	278	0.35	0.35	0.35	良	7月4日	12:14:21			
	B	43	19						0.36	0.35	0.35			良	12:18:57		

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 (4/4) を参照。

製品検査成績表

発行No. 9634

三菱重工業株式会社 御中

発行日2001年05月25日

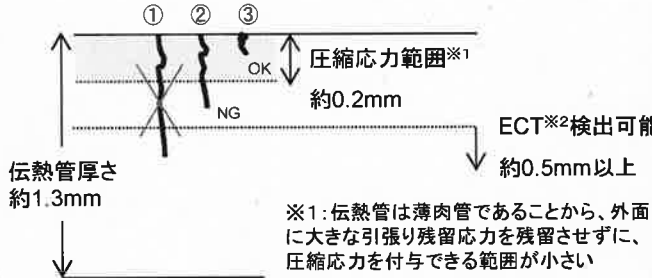
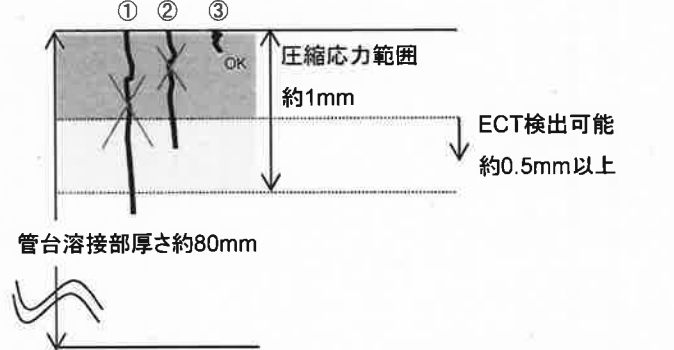
既往試験で使用したビーズ粒度 (#42~#80: 添付資料-15 (2/2) 参照) と同じであることを確認。

出荷日2001年05月25日

品名	FP-6 42-80
Lot No.	104202
出荷数量	200.00 kg

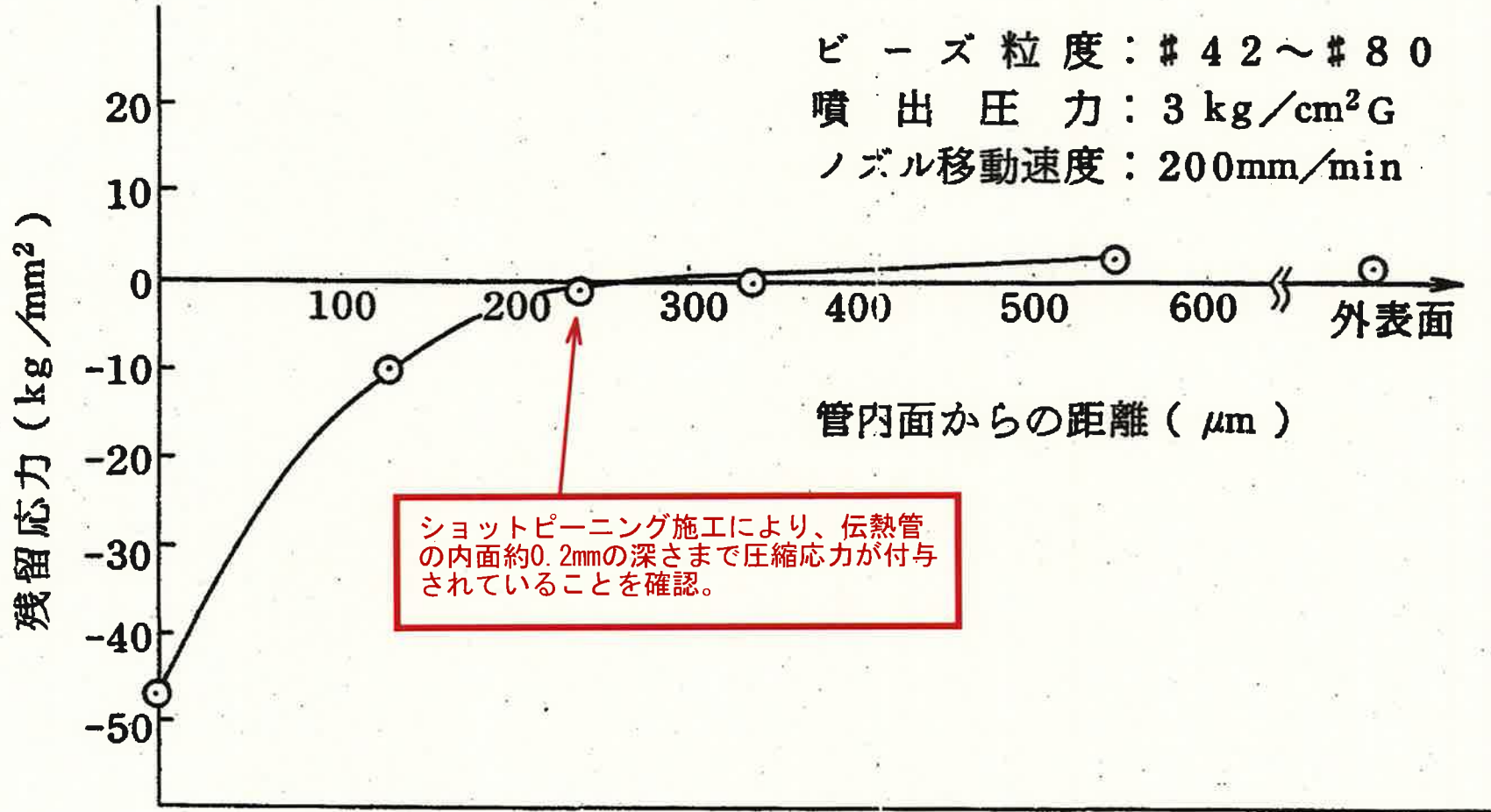
検査項目	測定値	規格
見掛密度 (g/cm ³)	4.54	
流動度 (g/50g)	16.8	
粒度分布 + 425 μm (%)	0.0	2.0 以下
粒度分布 + 355 μm (%)	14.3	
粒度分布 + 300 μm (%)	18.8	
粒度分布 + 250 μm (%)	30.9	
粒度分布 + 180 μm (%)	33.4	
粒度分布 - 180 μm (%)	2.6	5.0 以下
ニッケル量 [Ni] (%)	BAL.	BAL.
クロム量 [Cr] (%)	14.3	13.0 ~ 16.0
ボロン量 [B] (%)	3.26	2.50 ~ 3.50
シリコン量 [Si] (%)	4.49	3.70 ~ 4.70
鉄量 [Fe] (%)	3.14	5.00 以下
カーボン量 [C] (%)	0.65	0.60 ~ 0.70
コバルト量 [Co] (%)	0.02	
タンタル量 [Ta] (%)	0.005	
備考		

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3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>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

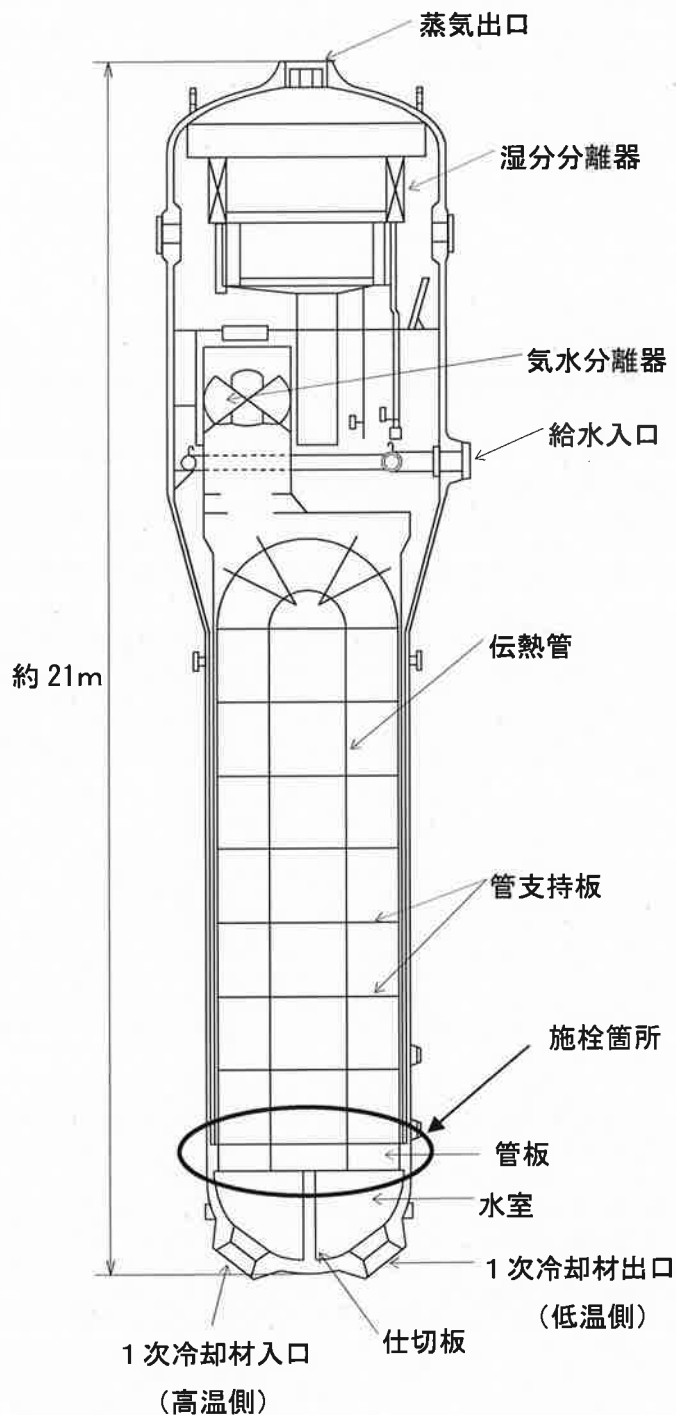
ショットピーニング施工管の周方向残留応力の管肉厚方向分布



ショットピーニング施工により、伝熱管の内面約0.2mmの深さまで圧縮応力が付与されていることを確認。

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3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	
使用前	0	0	1	1	製作時の傷
第1回定期検査 S60.11~S61.1	0	0	0	0	
第2回定期検査 S62.3~S62.5	0	0	0	0	
第3回定期検査 S63.7~S63.9	0	0	0	0	
第4回定期検査 H1.10~H2.1	7	12	4	23	※ AVB部摩耗減肉
第5回定期検査 H3.2~H3.5	1	1	0	2	AVB部摩耗減肉
第6回定期検査 H4.6~H4.8	0	0	0	0	
第7回定期検査 H5.9~H5.12	0	0	0	0	
第8回定期検査 H7.1~H7.4	0	0	0	0	
第9回定期検査 H8.3~H8.6	0	1	1	2	健全管の抜管調査
第10回定期検査 H9.8~H9.10	0	0	0	0	
第11回定期検査 H10.12~H11.1	0	0	0	0	
第12回定期検査 H12.2~H12.4	1	3	0	4	管板拡管部応力腐食割れ
第13回定期検査 H13.6~H13.8	5	7	5	17	管板拡管部応力腐食割れ
第14回定期検査 H14.9~H14.11	0	0	0	0	
第15回定期検査 H15.12~H16.3	94	110	107	311	旧 AVB 部摩耗減肉検出
第16回定期検査 H17.4~H17.7	0	0	0	0	
第17回定期検査 H18.8~H18.11	0	0	0	0	
第18回定期検査 H19.11~H20.8	0	0	0	0	
第19回定期検査 H21.5~H21.8	0	0	0	0	
第20回定期検査 H22.10~H22.12	0	0	0	0	
第21回定期検査 H24.2~H28.2	0	0	1	1	管板拡管部応力腐食割れ
第22回定期検査 H28.12~H29.6	1	0	0	1	管板拡管部応力腐食割れ
第23回定期検査 H30.8~	0	0	1	1	管板拡管部応力腐食割れ
合計	109	134	120	363	施 栓 率
					A : 3.2%
					B : 4.0%
					C : 3.5%
					全体 : 3.6%

・第5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3号炉

高経年化技術評価書

平成26年 1月

(平成27年10月一部変更)

関西電力株式会社

資料6-1 高浜発電所3号炉 高経年化技術評価に基づく長期保守管理方針(1/3)

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	管板拡管部および拡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。	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回監視試験の実施計画を策定する。	中長期

短期：平成27年1月17日からの5年間、中長期：平成27年1月17日からの10年間

高浜発電所3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12回定期検査時（1999年度～2000年度）および第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3号炉では第15回定期検査時（2003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3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3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考えられる。

しかしながら、ショットピーニング施工後の第21回定期検査時（2011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。

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。

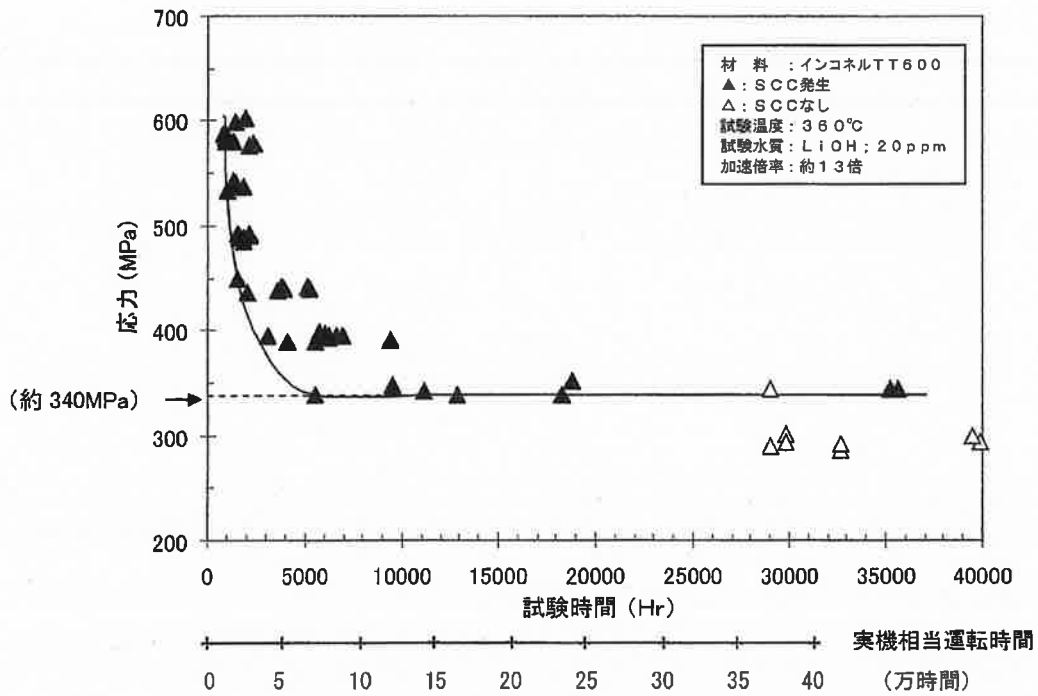


図2.3-8 蒸気発生器伝熱管材の定荷重応力腐食割れ (SCC) 試験結果
 (600系ニッケル基合金 (特殊熱処理材))

[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]

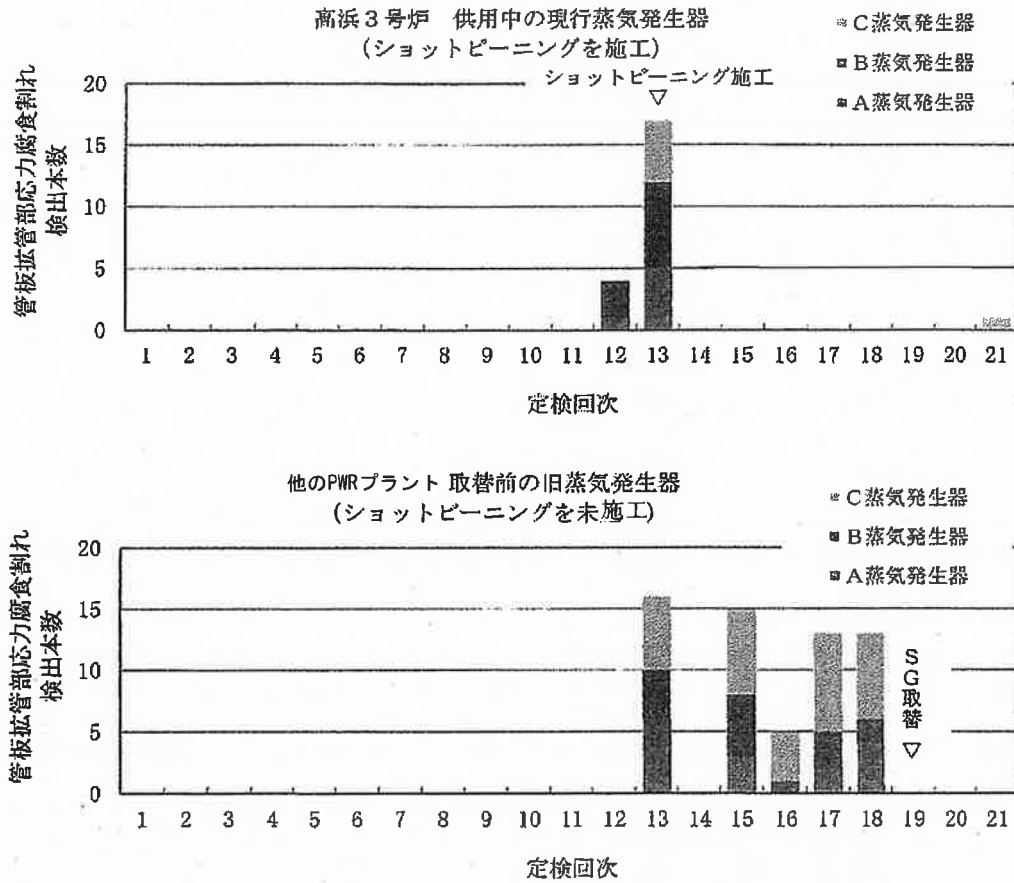


図2.3-9 国内蒸気発生器の管板拡管部応力腐食割れの検出状況
(600系ニッケル基合金(特殊熱処理材)、全厚液圧+全厚ローラ拡管採用プラント)

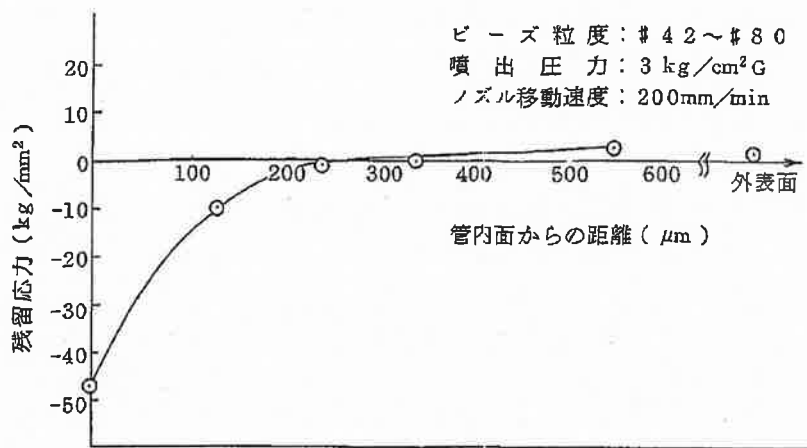


図2.3-10 ショットピーニング施工管の周方向残留応力の管肉厚方向分布
(X線法による測定)

[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12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12年4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	
部分的な 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)		部分溝 (120°) 	~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。
通常の管穴に 密着不十分を模擬		溝なし		割れ (ローラ拡管重なり部に発生)	~350MPa (~36kg/mm ²)	320℃	
部分的な管板管穴拡大に 密着十分を模擬	液圧拡管 + ローラ拡管 (トルク正常)	ローラ拡管先端部に 0.05mm深さ、軸長さ65mm の1/3周溝 (部分溝)		部分溝 (120°) 	310MPa以下 (32kg/mm ² 以下)	320℃	SCCが発生する可能性 は小さい。
[参考]							
部分的な 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)		部分溝 (120°) 	~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。
正常拡管		溝なし		割れ (液圧拡管境界部に発生)	~290MPa (~30kg/mm ²)	320℃	

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66%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36%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ベ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が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３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が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ベ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、管板拡張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。