

原子力発第05249号
平成18年 2月 9日

愛媛県知事
加戸守行 殿

四国電力株式会社
取締役社長 常盤 百樹

伊方発電所第2号機 第5高圧給水加熱器漏えい検査における
不具合他1件に係る報告書の提出について

平成17年12月に発生しました伊方発電所第2号機 第5高圧給水加熱器漏えい検査における不具合他1件につきまして、その後の調査結果がまとまりましたので、安全協定第11条第2項に基づき、別添のとおり報告いたします。

今後とも伊方発電所の安全・安定運転に取り組んでまいりますので、ご指導賜りますようお願い申し上げます。

以 上

伊方発電所第2号機
安全注入テストラインドレン配管からの漏えいについて

平成18年2月
四国電力株式会社

1. 件名

伊方発電所第2号機安全注入テストラインドレン配管からの漏えいについて

2. 事象発生の日時

平成17年12月20日 17時23分頃

3. 事象発生の原子炉施設

原子炉冷却系統設備 安全注入テストラインドレン配管

4. 事象発生時の運転状況

第18回定期検査中(平成17年9月5日より)

5. 事象発生の状況

伊方発電所第2号機(定格電気出力566MW)は、第18回定期検査において、安全注入系配管の一部取替工事に伴う配管の通水確認を実施したところ、平成17年12月20日17時23分頃、安全注入系配管に接続している安全注入テストラインのドレン配管から少量の1次系水が漏えいしていることを確認した。

漏えいは、同日18時10分に停止し、漏えい水は全て床面の排水口から排水を回収する格納容器サンプBへ回収された。漏えい量は、約2.5リットルと推定される。その後、当該部分の配管および弁を取り替え、1月13日漏えいのないことを確認し通常状態に復旧した。

なお、本事象による作業員の被ばくや周辺環境への放射能の影響はなかった。

(添付資料-1)

6. 時系列

12月20日

16時00分	安全注入系配管の通水確認準備開始
48分	高圧注入ポンプ2A起動
53分	高圧注入ポンプ2A停止(配管等の状況確認)
17時23分	安全注入テストラインドレン配管より漏えい確認
24分	当該ライン隔離開始
38分	当該ライン隔離完了
18時10分	漏えい停止
1月10日	配管および弁の取り替え完了
1月13日	漏えいがないことを確認し通常状態に復旧

7. 状況調査

漏えい箇所について、外観点検、浸透探傷検査（以下、「PT」という。）および付着塩分量測定により状況を調査した。

（1）外観点検

漏えい箇所の外観点検の結果、ドレン配管とドレン弁2 - 8906との溶接端部近傍にひび割れが認められた。

また、当該ドレン配管近傍の支持構造物（Uボルト）等の状況を調査した結果、変形等の問題は認められなかった。

（添付資料 - 2）

（2）外面PT

外面からのPTの結果、ドレン配管とドレン弁2 - 8906の溶接端部近傍の60°～180°（上流側からみて配管上部を0°基準）に長さ約28mmの有意な指示を確認した。

（添付資料 - 3）

（3）付着塩分量測定

当該部近傍の付着塩分量を測定した結果、管理値以下であり問題は認められなかった。

8. 金属調査

当該部を切り出して金属調査を実施し、ひび割れの形態等を確認した。

（1）内面PT結果

内面からのPTの結果、ドレン配管とドレン弁2 - 8906の溶接端部近傍の60°～180°（上流側からみて配管上部を0°基準）に長さ約18mmの有意な指示を確認した。

（添付資料 - 4）

（2）破面マクロ観察結果

破面マクロ観察の結果、

- ・ ひび割れの破面で外表面側に錆びている領域が確認されたことから、起点は外表面であると考えられる
- ・ ひび割れの破面は平坦である

ことが確認された。

（添付資料 - 5）

（3）断面ミクロ観察結果

断面ミクロ観察の結果、ひび割れは、ソケット溶接部の溶接端部の母材側を通過して直線的に進展した、枝分かれのない粒内割れであること、また、起点と

推定される外表面側のひび割れ近傍には溶接欠陥等の異常はないことを確認した。

(添付資料 - 6)

(4) 破面SEM (走査型電子顕微鏡) 観察結果

破面のSEM観察の結果、ひび割れの破面には、溶接端部の配管母材側外表面を起点としたひび割れの進展が認められた。

ひび割れの破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が確認された。また、ひび割れ進展部および貫通部付近では、ストライエーションが確認された。

なお、オーステナイト系ステンレス鋼の塩化物応力腐食割れに特有な羽毛状破面およびその他の材料欠陥等は認められなかった。

(添付資料 - 7)

(5) 硬度測定結果

硬度測定を実施した結果、ひび割れ発生部近傍は、一般部と比べて高いことが確認された。

(添付資料 - 8)

(6) 破面EPMA (電子線マイクロアナライザー) 結果

EPMAによる成分分析を行った結果、外表面近傍のひび割れの破面にはオーステナイト系ステンレス鋼の塩化物応力腐食割れの原因となる塩素は確認されなかった。

(添付資料 - 9)

以上から、ひび割れには、疲労破面の特徴である平坦な破面および粒内割れ、およびオーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が確認され、また、ひび割れ進展部および貫通部付近では、ストライエーションが認められることから、溶接端部の母材側外表面から内面側へ進展した、繰り返し応力による疲労損傷であると推定される。

また、ひびの起点部は錆びている領域が認められたことから今定検以前にひび割れが発生していたものと推定される。

9. 詳細調査

以上の状況から、疲労損傷の発生要因について調査を実施した。

(1) 製造履歴

当該ドレン配管および弁の材料証明書を調査した結果、問題ないことを確認した。

また、溶接施工記録を調査した結果、当該部はソケット溶接形状であり、施工方法および検査に問題ないことを確認した。

なお、当該ドレン配管とドレン弁は、最新の改良型溶接継手に比べると、溶接端部の応力が集中し、比較的疲労強度が低いソケット溶接形状であった。

(2) 運転履歴

- a . 運転記録により、前サイクルのプラント運転中の高圧注入ポンプの定期運転時においては、ポンプの運転状態に異常のないことを確認した。
- b . 過去の定期検査時に、高圧注入系統の試運転として燃料取替用水タンク～高圧注入ポンプ～安全注入テストライン～燃料取替用水タンクの循環系統を構成して高圧注入ポンプを起動した際に、安全注入テストラインの逃がし弁 2 - 8 8 6 5 が動作したことがあったことを確認した。当時の調査の結果、逃がし弁動作の原因は、安全注入系配管の一部に空気が滞留したことにより大きな圧力変動が生じたものと考えられたため、これをできるだけ抑制するよう、定期検査時の水張り後の最初の高圧注入ポンプ起動時は、出口弁を徐々に開とするよう操作手順を改善していた。

(3) 今回の配管通水確認時の状況調査

a . 配管・機器の状況調査

今回の通水確認時の状況を調査した結果、当該ドレン弁近傍(約30cm)に設置してある逃がし弁 2 - 8 8 6 5 が動作し、大きな流動音がしていたことを確認した。

また、逃がし弁の取出配管は 3 / 4 B の小口径配管であるが逃がし弁に対する有効な支持構造物はなかった。このため、逃がし弁の動作時には、近傍のドレン配管に大きな振動が発生していたものと推定される。

(添付資料 - 1 0)

b . 系統構成調査

今回の通水確認時の系統構成を調査した結果、原子炉容器側への注入ライン弁および当該ドレン配管の下流側の安全注入テストライン弁とともに閉止しており、流れが無い状態で高圧注入ポンプの出口圧力が当該ドレン配管へ負荷される系統構成であった。

このため、空気溜まりが解消されず圧力変動による逃がし弁の動作が発生しやすい状況であった。

(添付資料 - 1 1)

(4) ひび割れ発生・進展評価

以上の状況から、定期検査時において、高圧注入ポンプの起動に伴い、配管内空気溜まりによる圧力変動が生じ、それに伴う逃がし弁の動作により振動が発生する可能性が考えられることから、振動による疲労損傷の可能性について評価した結果、振動に伴う発生応力は 5 7 . 9 ~ 7 6 . 8 MP a となり、疲労限 (4 1 ~ 5 6 MP a) を超え、ひび割れが発生・進展する可能性があること

を確認した。

(添付資料 - 12)

10. 推定原因

以上の調査結果から、

- ・当該ドレン配管とドレン弁はソケット溶接形状であり、溶接端部に応力が集中し、比較的疲労強度が低い形状であったこと
- ・今回の通水確認時は、改善された手順により高圧注入ポンプを起動したが、通水試験のために安全注入テストライン弁を閉止しており、空気溜まりによる圧力変動の影響を受けやすい系統構成であったこと
- ・当該ドレン配管の近傍には、高圧仕様の逃がし弁が設置されており、逃がし弁が動作した場合には大きな振動が当該ドレン配管に発生することにより、過去の定期検査時の逃がし弁の動作によりひび割れが発生し、進展・貫通に至ったと推定される。

11. 対策

- (1) 漏えいの生じたドレン配管およびドレン弁を新品に取り替えた。
なお、取替えにあたり、従来のソケット溶接継手から疲労強度の高い改良型溶接継手へ変更した。
- (2) 逃がし弁が動作した場合に周囲の配管に大きな振動が発生することを防止するため、安全注入テストライン逃がし弁に支持構造物を設置した。
- (3) 配管取り替え工事後の通水試験においては、圧力変動の影響を受けないよう安全注入テストライン弁を開とした状態で高圧注入ポンプを起動するとともに、出口弁を徐々に開とするように手順を改善したうえで試験を行い、異常のないことを確認した。
また、今後このような通水試験を行う場合にも、高圧注入ポンプの起動に際しては、空気溜まりによる圧力変動の影響を受けにくくするため、安全注入テストライン弁を開とした状態で高圧注入ポンプを起動するとともに出口弁を徐々に開とするようワンポイントレッスンを作成し関係者に周知した。
- (4) 当該安全注入テストライン以外の系統については、事象発生時の通水確認のような特殊な系統構成での運転操作を実施していないこと、および系統の圧力、配管の口径等の相違から、同様な事象が発生する可能性は低いと考えられるが、念のため、安全上重要な系統または放射性物質を含む系統であって、逃がし弁が動作した場合に振動の影響を受ける可能性のある箇所(取付配管の口径が小さく動作した場合に大きな振動の発生が懸念される高圧仕様の逃がし弁近傍の小口径配管ソケット溶接部)について、PTにより健全性を確認した。その他の系統に

ついても、次回定期検査において同様に健全性を確認する。また、逃がし弁が動作した場合の振動の影響を防止するための支持構造物の追加設置が有効な箇所について、次回定期検査において改造を行う。

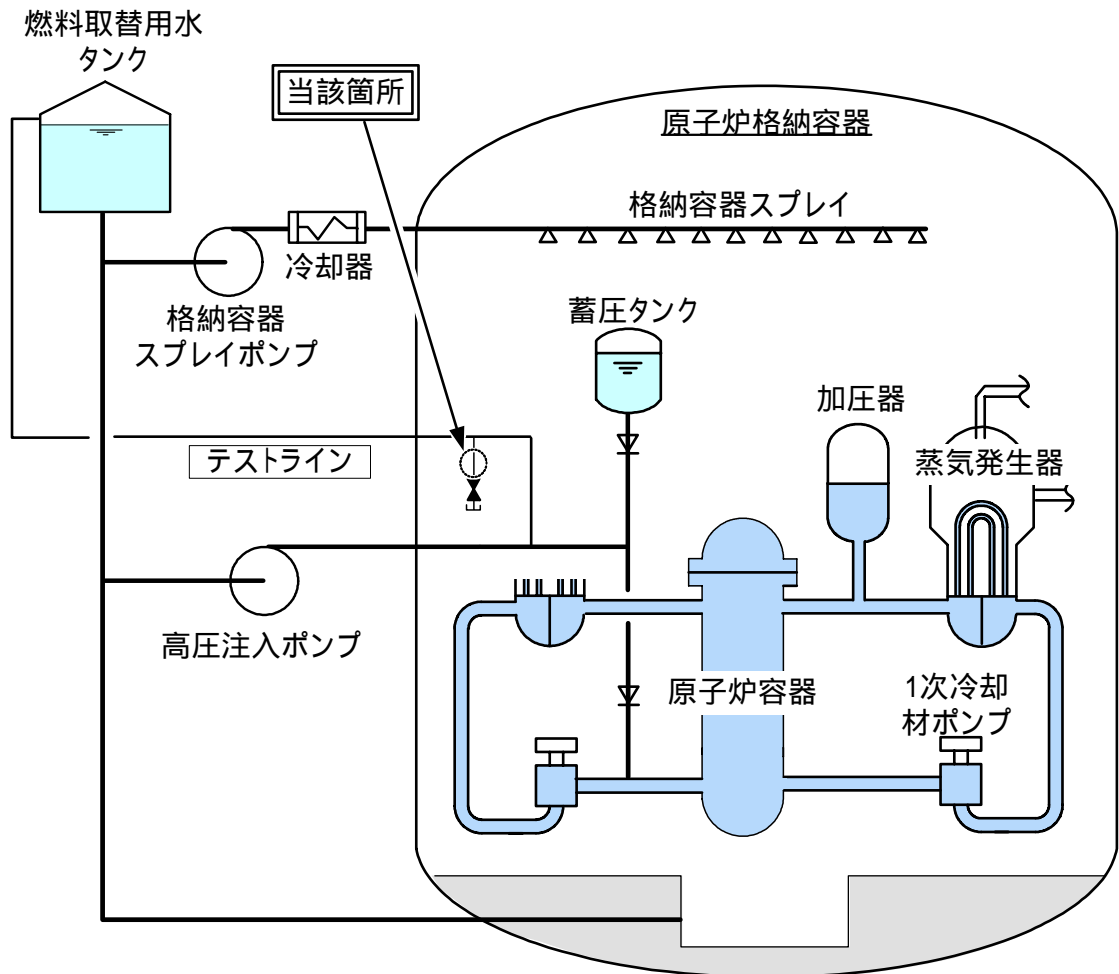
伊方1、3号機についても、次回定期検査にて同様な点検等を行うこととする。

以上

【添 付 資 料】

- 1 . 安全注入テストライン概略系統図・構造図
- 2 . 安全注入テストラインドレン配管 外観点検結果
- 3 . 安全注入テストラインドレン配管 浸透探傷検査結果
- 4 . 金属調査結果（内面浸透探傷検査）
- 5 . 金属調査結果（破面マクロ観察）
- 6 . 金属調査結果（断面ミクロ観察）
- 7 . 金属調査結果（破面SEM観察）
- 8 . 金属調査結果（硬度測定）
- 9 . 金属調査結果（破面EPMA）
- 10 . 安全注入テストライン配置図
- 11 . 安全注入系配管通水確認時の系統構成（事象発生時）
- 12 . 高サイクル疲労によるひび割れの発生に関する評価結果

安全注入テストライン概略系統図・構造図



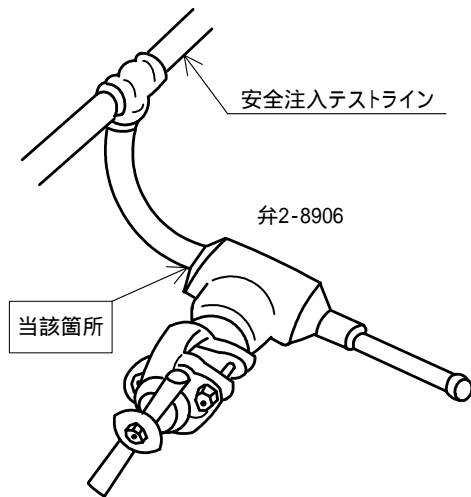
当該箇所

弁 2-8906

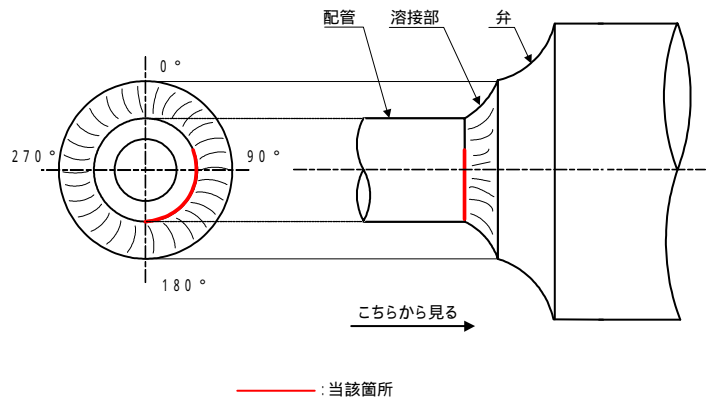
最高使用圧力	11.4MPa
最高使用温度	150
材質	SUS304TP
外径	約 27mm
厚さ	約 4mm

型式	玉型弁
材質	SUS316
呼径	3/4 B

安全注入テストラインドレン配管 外観点検結果



安全注入テストラインドレン配管構造図



安全注入テストラインドレン配管状況図



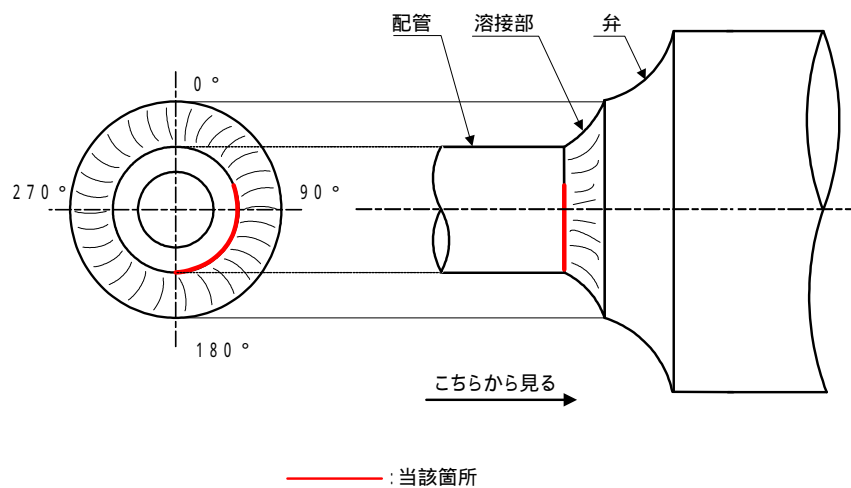
上から見た写真



側面から見た写真

外観点検の結果、ドレン配管と弁 2-8906 との溶接端部近傍にひび割れが認められた。また、当該配管廻りの配管・弁および支持構造物に変形等の問題は認められなかった。

安全注入テストラインドレン配管 浸透探傷検査結果

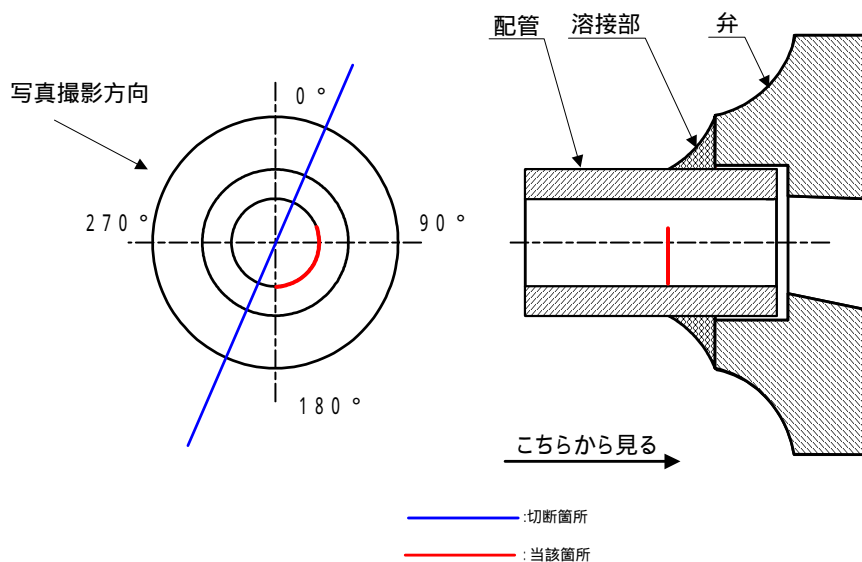


安全注入テストラインドレン配管状況図



外面からの浸透探傷検査の結果、弁と配管の溶接端部 60° ~ 180° の位置にて、長さ約 28mm の有意な指示が認められた。

金属調査結果(内面浸透探傷検査)

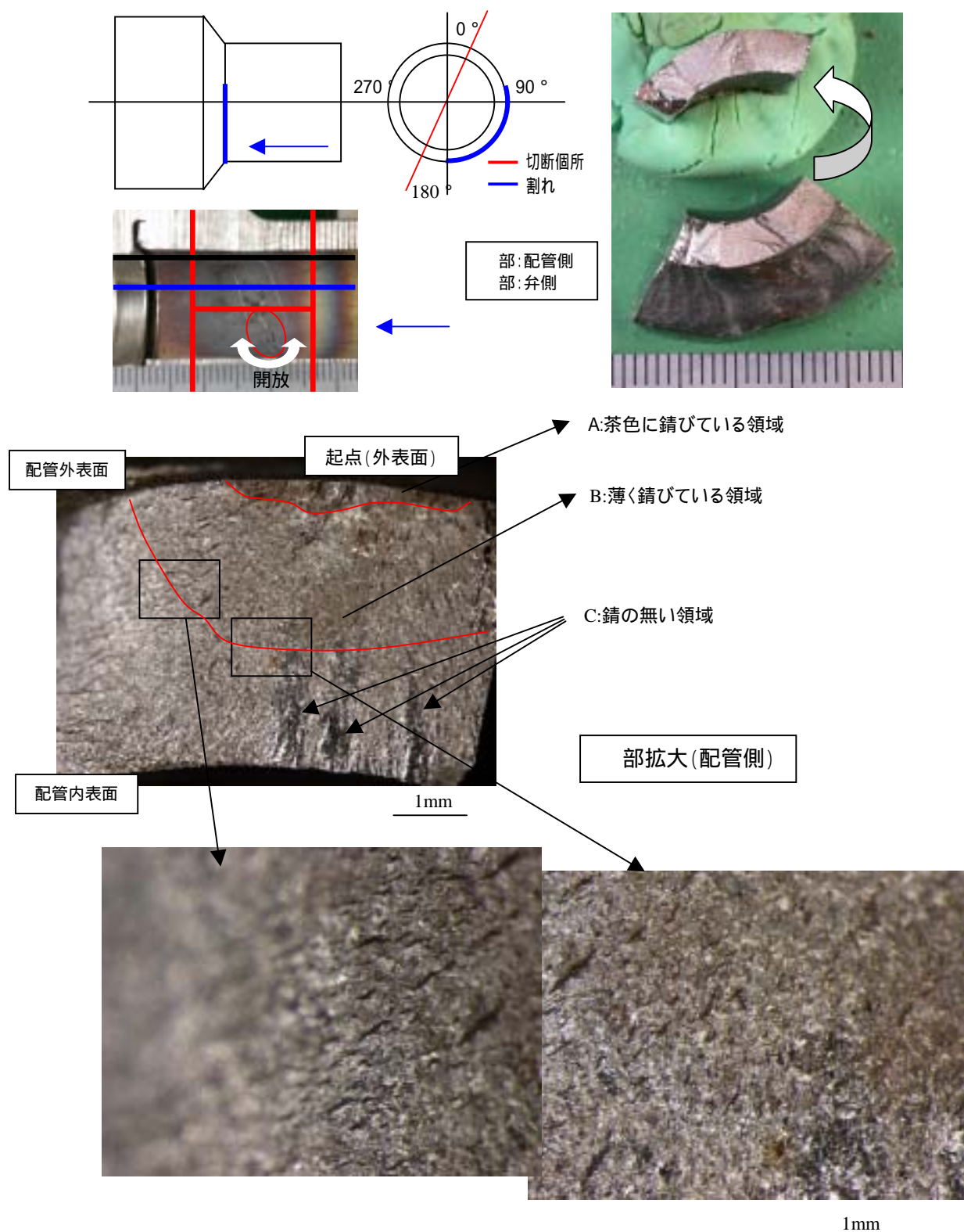


安全注入テストラインドレン配管断面図



内面の浸透探傷検査の結果、弁と配管の溶接端部 $60^{\circ} \sim 180^{\circ}$ の位置にて、長さ約 18mm の有意な指示が認められた。

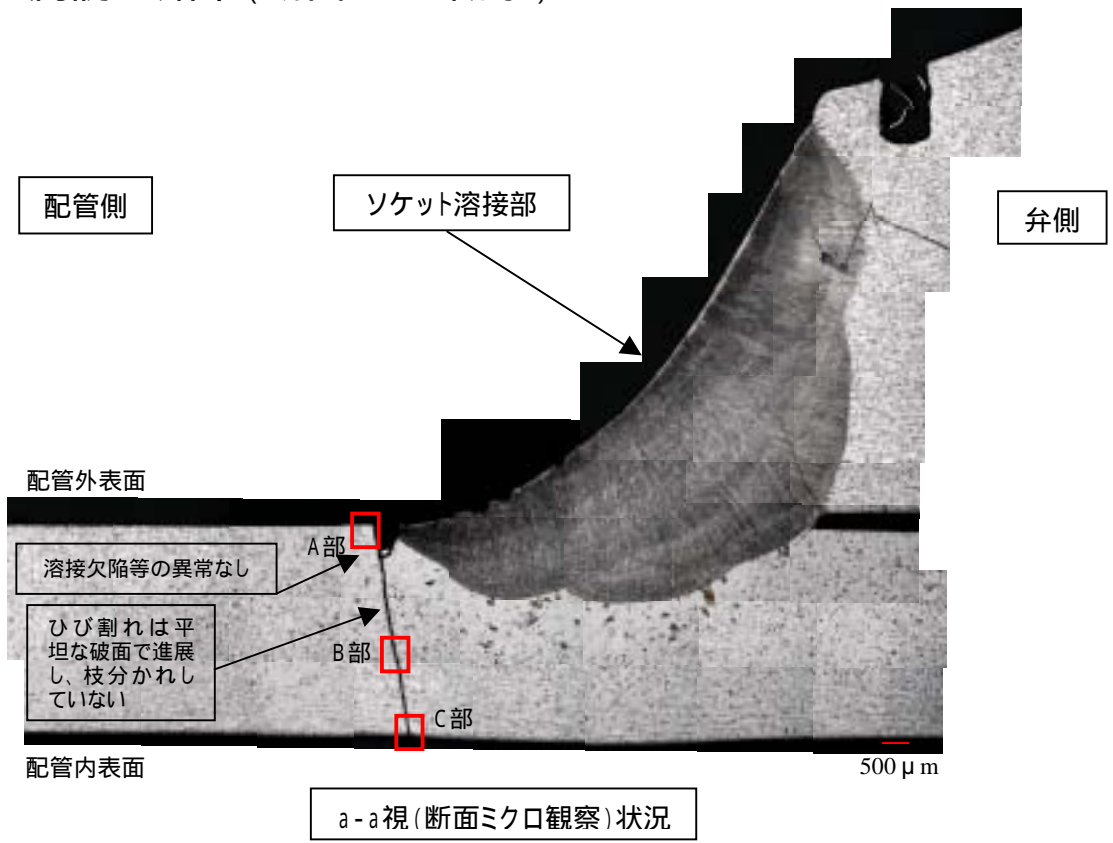
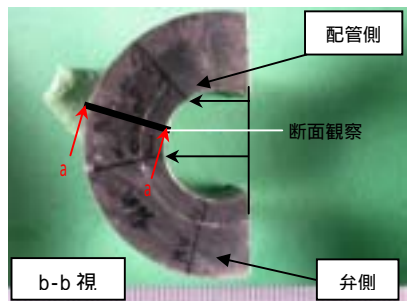
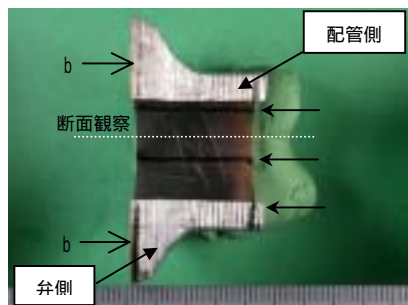
金属調査結果(破面マクロ観察)



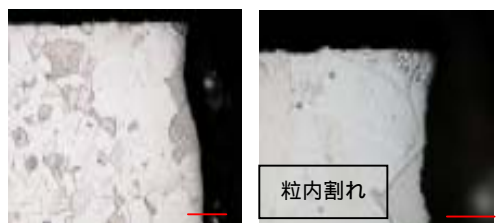
【観察結果】

- ・ひび割れの破面で外表面側に錆びている領域が確認されたことから、起点は外表面であると考えられる。
- ・ひび割れの破面は平坦である。

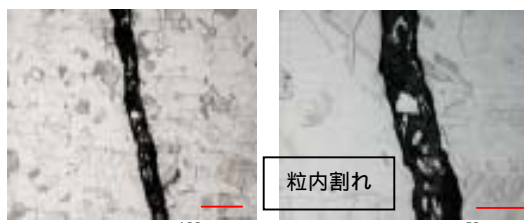
金属調査結果(断面ミクロ観察)



a-a 視 (断面ミクロ観察) 状況



A部拡大



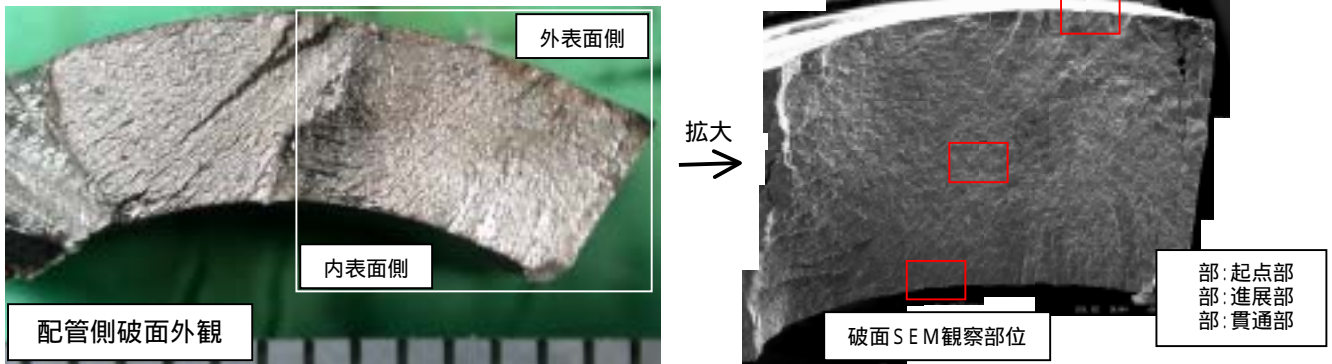
B部拡大



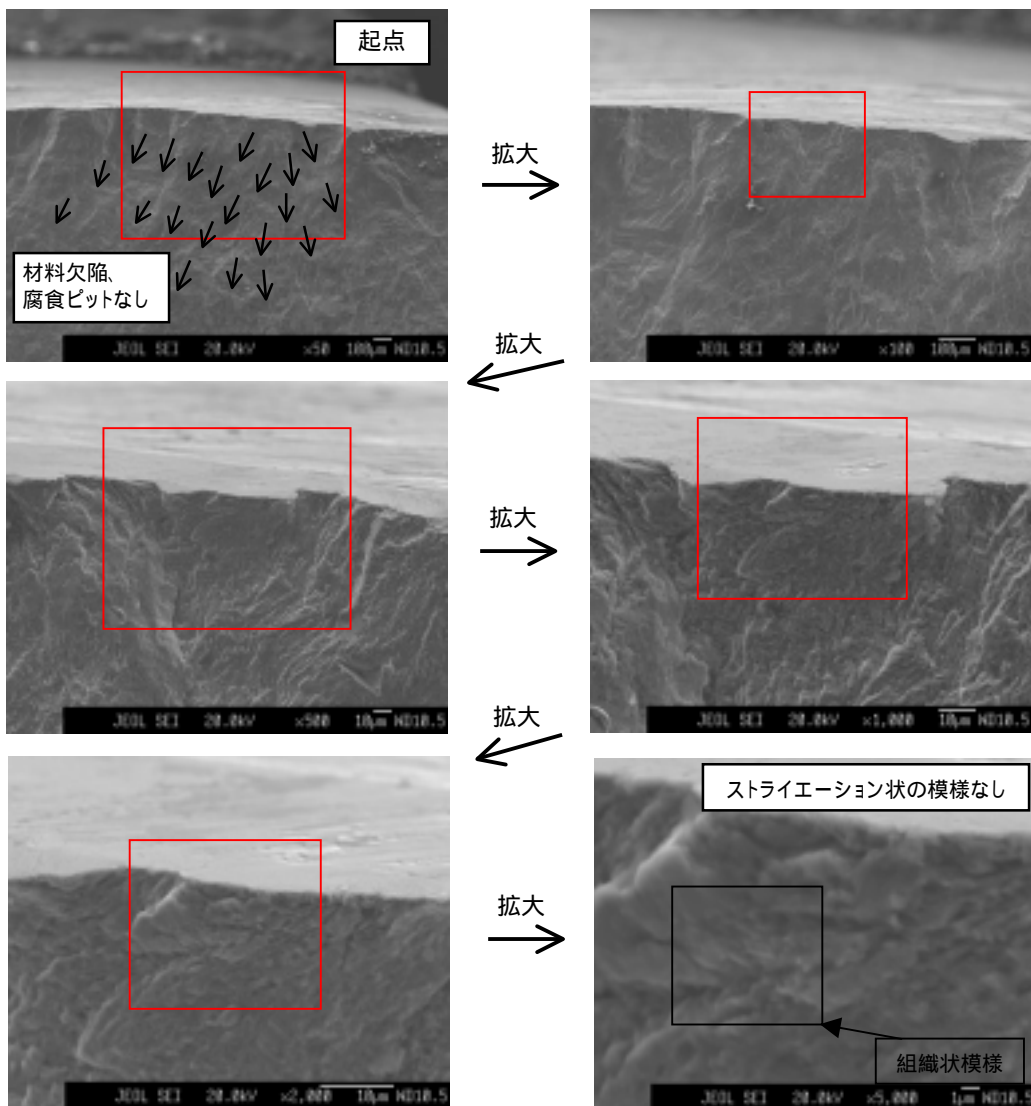
C部拡大

【観察結果】
 ・ひび割れは、ソケット溶接部の溶接端部の母材側を通っている。
 ・ひび割れは、直線的に進展しており、枝分かれのない、粒内割れが認められた。
 ・起点と推定される外表面側のひび割れ近傍には、溶接欠陥等の異常は認められなかった。

金属調査結果 (破面SEM観察)



部拡大

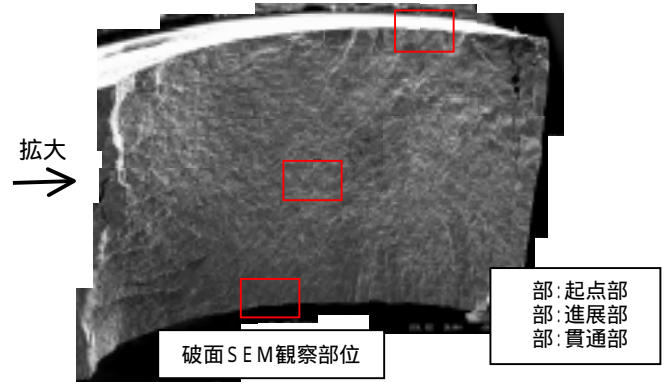
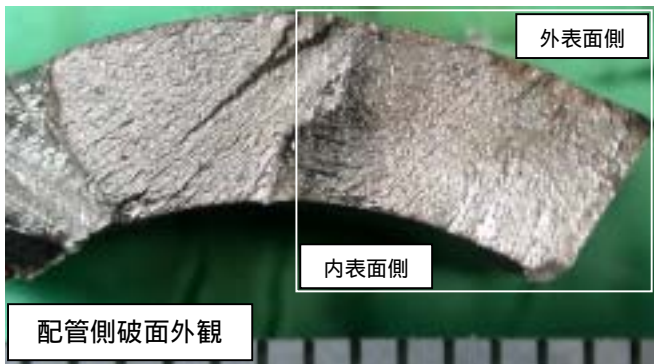


→ : ひび割れの進展方向 (金属組織の流れ方向とほぼ一致) を示す

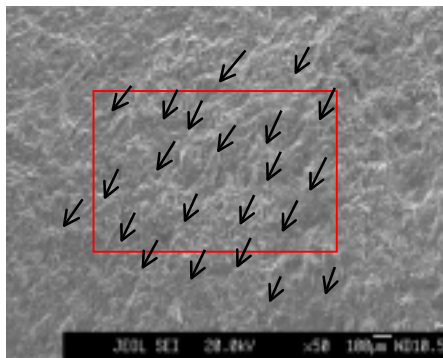
【観察結果】

- ・外表面側を起点としたひび割れの進展が認められた。
- ・溶接端部の外表面において、材料欠陥、腐食ピット等は認められなかった。
- ・破面は粒内割れで、低応力の高サイクル疲労割れに特有な組織状模様が確認された。
- ・ストライエーション状の模様は認められなかった。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

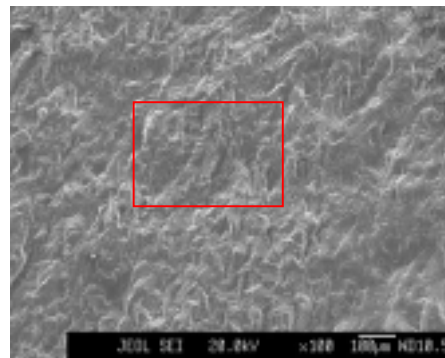
金属調査結果 (破面SEM観察)



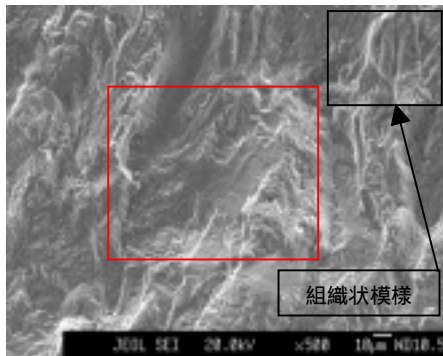
部拡大



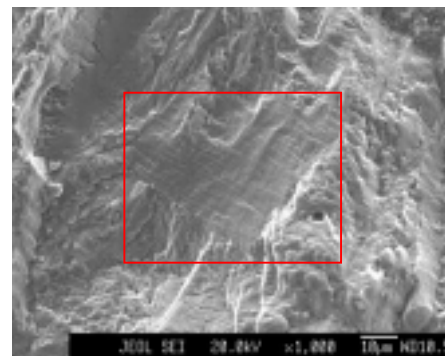
拡大



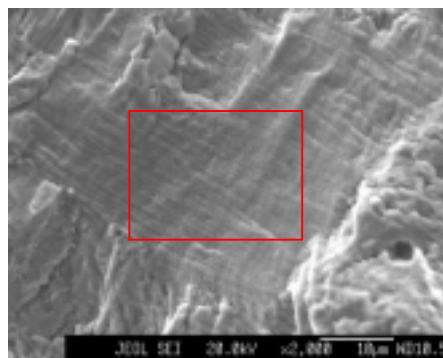
拡大



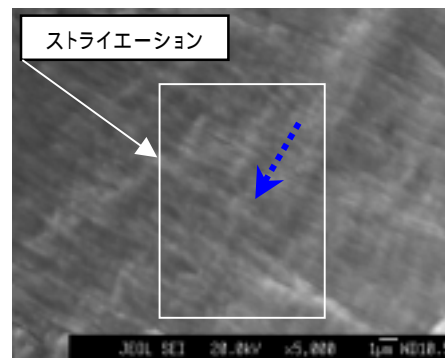
拡大



拡大



拡大



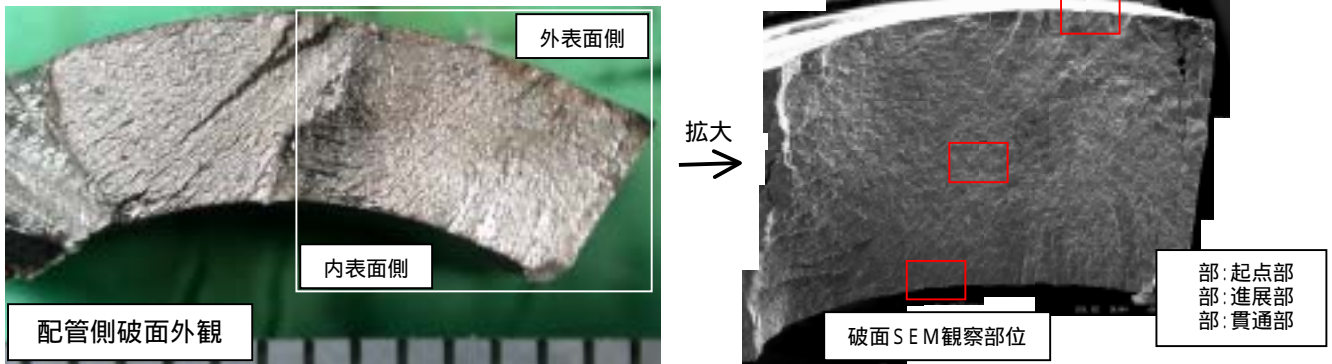
→ : ひび割れの進展方向 (金属組織の流れ方向とほぼ一致) を示す

.....▶ : ひび割れ破面先端部の進展方向を示す

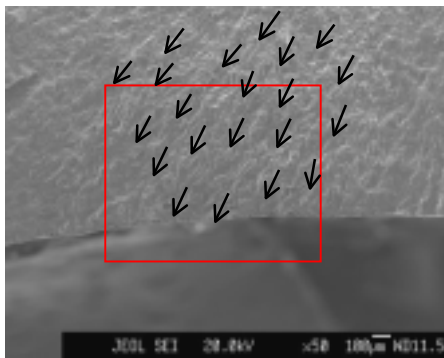
【観察結果】

- ・外表面から内表面側に向かうひび割れの進展が認められた。
- ・破面は粒内割れであり、低応力の高サイクル疲労割れに特有な組織状模様が確認された。一部、高倍率観察の結果、疲労破面に特有なストライエーションが認められた。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

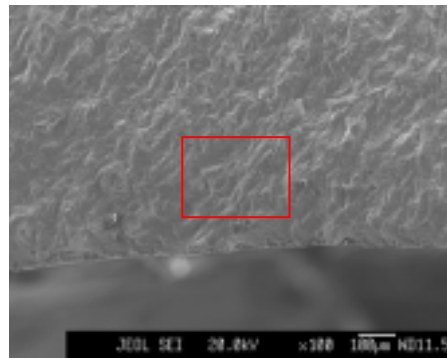
金属調査結果 (破面SEM観察)



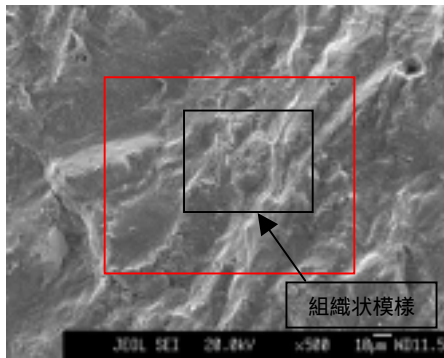
部拡大



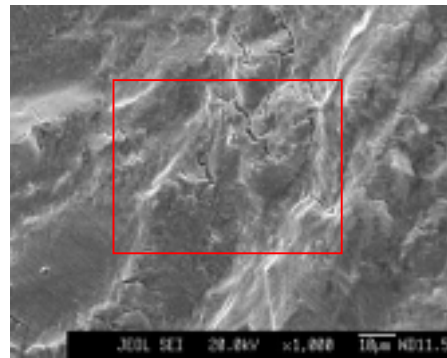
拡大



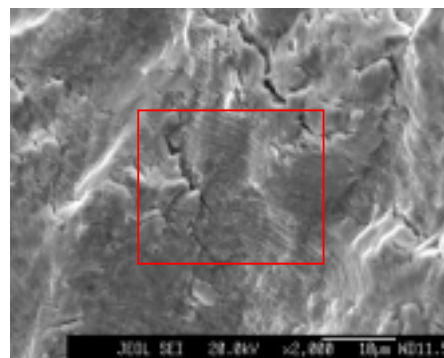
拡大



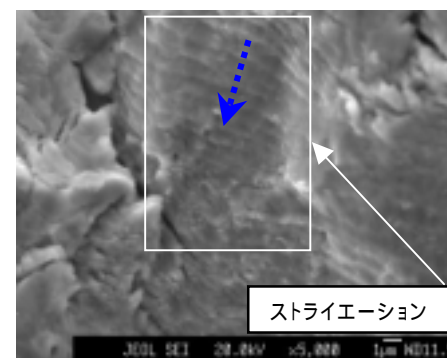
拡大



拡大



拡大



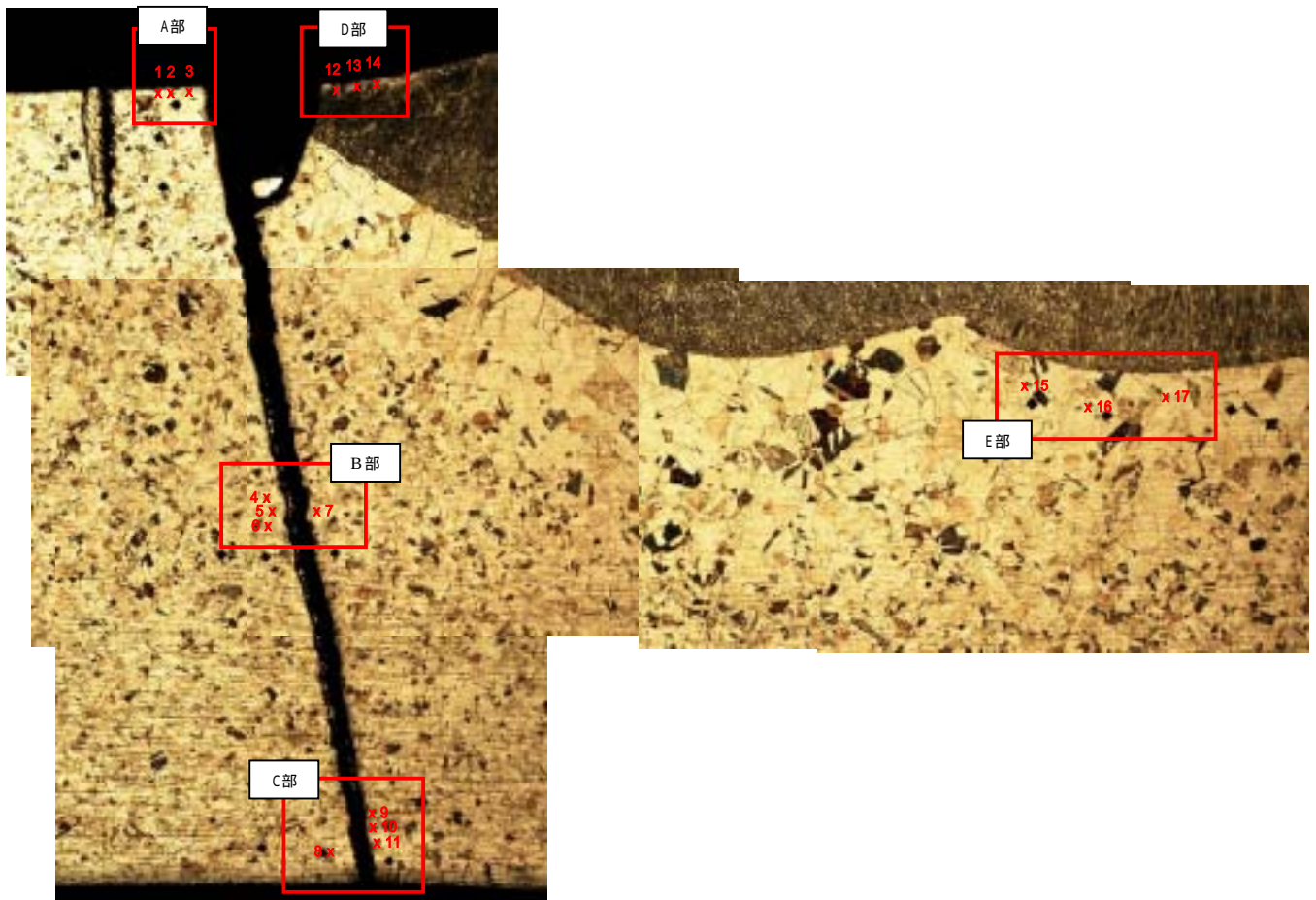
→ : ひび割れの進展方向 (金属組織の流れ方向とほぼ一致) を示す

..... : ひび割れ破面先端部の進展方向を示す

【観察結果】

- ・外表面から内表面側に向かうひび割れの進展が認められた。
- ・破面は粒内割れであり、低応力の高サイクル疲労割れに特有な組織状模様である。一部、高倍率観察の結果、疲労破面に特有なストライエーションが認められた。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

金属調査結果(硬度測定)



		硬度(ピッカース換算)	
		平均	最高
測定値	A部(ひび割れ起点部)	約 212	216
	B部(ひび割れ進展部)	約 200	207
	C部(ひび割れ貫通部)	約 217	230
	D部(ソケット溶接金属部)	約 189	201
	E部(配管母材熱影響部)	約 150	166
	一般部(配管側母材)	約 161	168
参考	ステンレス鋼 SUS304 規格値	-	200

【測定結果】

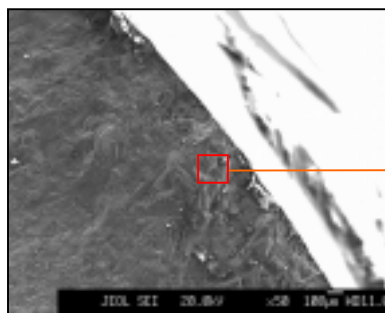
・ひび割れ発生部近傍の硬度を測定した結果、一般部と比べて高い値が確認された。

金属調査結果(破面E PMA)

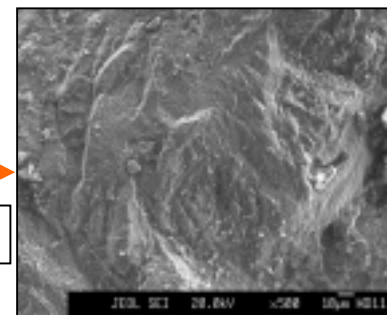
破面外観
(弁側)



拡大
(SEM 像)
→



分析視野
→

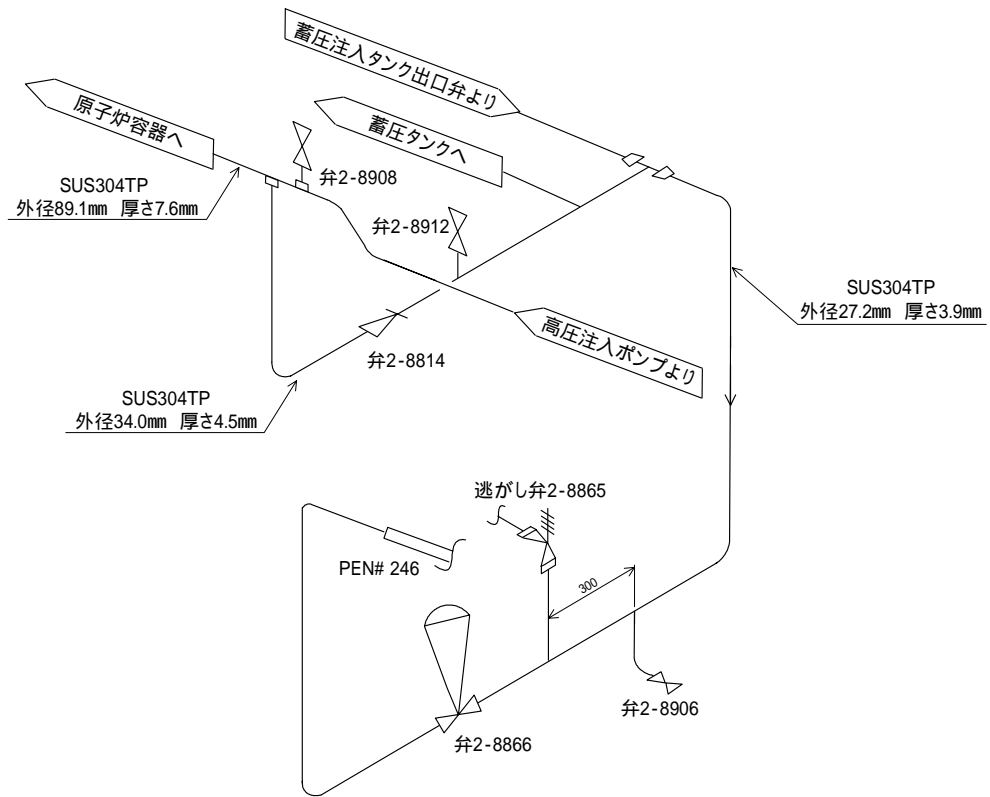


E PMA分析画像

Fe	Cr	Ni	Cl
C	O	Si	Mn
Mg	Ca	S	Zn

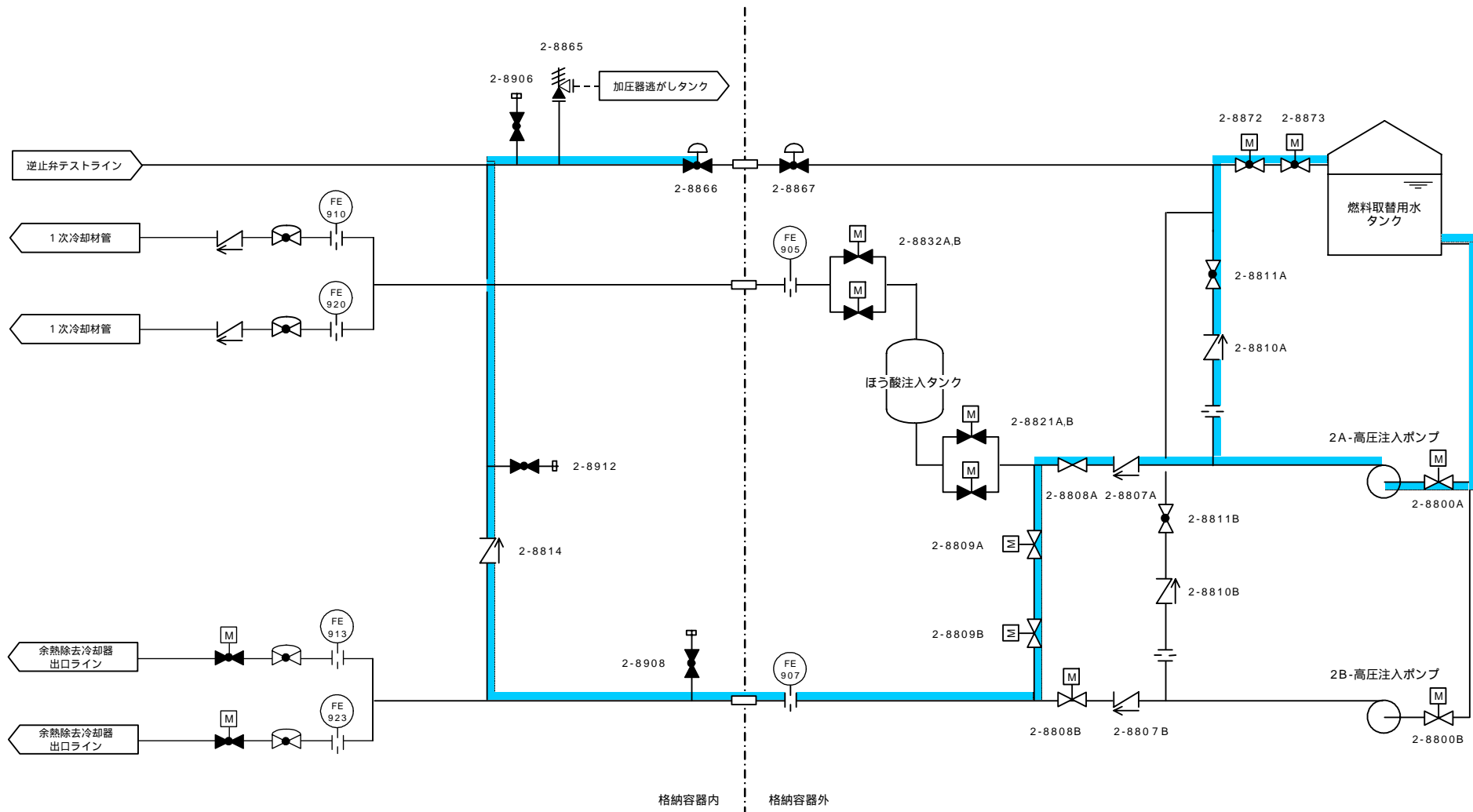
【観察結果】
 ・外表面近傍のひび割れの破面には、オーステナイト系ステンレス鋼の塩化物応力腐食割れの原因となる塩素は確認されなかった。(ひび割れ進展部、貫通部についても同様。)

安全注入テストライン配置図



逃がし弁は、当該ドレン配管の近傍に設置されている。

安全注入系配管通水確認時の系統構成(事象発生時)



事象発生時の系統構成を調査した結果、安全注入系配管の通水状態を模擬するために安全注入テストラインは弁(2-8866)で閉止しており、高圧注入ポンプの出口圧力が負荷される系統構成であり、圧力変動に伴い逃がし弁が動作しやすい状況であった。

高サイクル疲労によるひび割れの発生に関する評価結果

定期検査時において、高圧注入ポンプの起動に伴い、配管内空気溜まりによる圧力変動が生じ、それに伴う逃がし弁動作により振動が発生する可能性が考えられることから、この振動による変動応力により疲労破壊が発生する可能性について評価を実施した。

1. 逃がし弁振動レベルと損傷部発生応力との関係把握

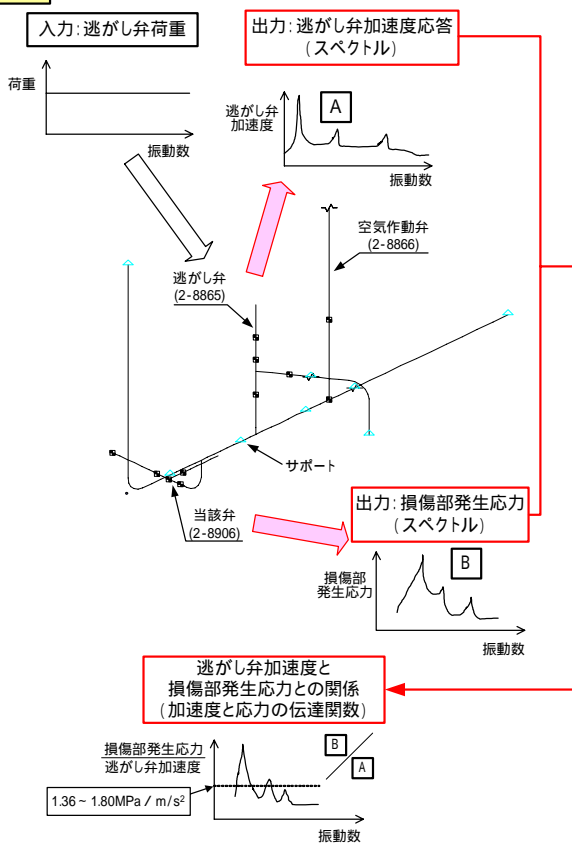
解析モデル作成
弁、配管系を梁要素、質量要素で、サポートをバネ要素でモデル化。



固有値解析
【目的】対象配管系の振動数、振動モードを把握。実機振動計測結果と解析結果を比較して解析モデルの妥当性を確認。
【結果】解析結果は計測結果と概ね一致。損傷部廻りの卓越振動数は約21Hz。



周波数応答解析
【目的】周波数応答解析により求めた[B] 損傷部発生応力を[A] 逃がし弁加速度応答で除すことにより、逃がし弁振動レベルと損傷部発生応力との関係を把握。
【結果】逃がし弁吹出しによるランダムな振動において、逃がし弁加速度が 1 m/s^2 (rms値) の場合、 $1.36 \sim 1.80\text{ MPa}$ (rms値) の応力が発生。



解析モデルおよび周波数応答解析のフロー

2. 疲労限の推定

材料の硬さ、使用温度、応力集中係数および平均応力（損傷部に常時発生している応力）の影響を考慮した損傷部の疲労限を金属調査結果等から推定。

疲労限: 41 ~ 56 MPa

3. 評価結果

逃がし弁吹出し時に損傷部に発生する変動応力(ピーク値)は疲労限を上回り、疲労破壊が発生し得ることを確認した。

逃がし弁加速度と損傷部発生応力との関係 (MPa / m/s ²)	逃がし弁加速度 [rms値] (m/s ²)	(= x)	(= x 3)	疲労限 (MPa)	疲労破壊の可能性
		損傷部に発生する変動応力 [rms値] (MPa)	損傷部に発生する変動応力 [ピーク値] (MPa)		
1.36 ~ 1.80	14.2	19.3 ~ 25.6	57.9 ~ 76.8	41 ~ 56	有り

rms値、ピーク値: 振動レベルを二乗し加算、それを加算時間で割ったものを二乗平均値(mean square value)、さらにその平方根をrms値 (root mean square) といふ。ピーク値は、rms値の3倍で求められる。