

別添

JMTR 施設内 C トレンチの廃液移送管表面からの  
汚染検出について

平成 25 年 7 月

独立行政法人日本原子力研究開発機構

## 目 次

1. 件名	1
2. 事象発生の日時	1
3. 事象発生の場所	1
4. 状況	1
5. 環境への影響	2
6. Cトレンチ内廃液移送管の概要	2
7. 原因調査	2
8. 処置及び対策	11

## 図 表

表 1	ウエス中のトリチウム測定結果	13
表 2	時系列	14
表 3	SFC 排水貯槽のサンプリング結果	15
表 4	使用材料の分析結果	15
表 5	SFC 排水貯槽送水履歴	16
図 1	大洗研究開発センター施設配置図	17
図 2	JMTR 施設全体配置図	18
図 3	SFC 廃液移送管概要図	19
図 4	SFC 廃液移送管の状況	20
図 5	測定箇所及び測定結果	21
図 6	X線 CT 撮影（コンピュータ断層撮影）結果	22
図 7	にじみを確認した配管部分を切り出した後の状況	23
図 8	にじみを確認した部分の内表面の状況	24
図 9	C トレンチ内の温度及び湿度	25
図 10	にじみ箇所の金相試験結果	26
図 11	にじみ箇所近傍の強制破断後の破面観察結果	27
図 12	粒界割れ破面の元素分析結果	28
図 13	電子線マイクロアナリシス装置による元素分析結果 (にじみ箇所外面側)	29
図 14	電子線マイクロアナリシス装置による元素分析結果 (にじみ箇所内面側)	30
図 15	鋭敏化の測定結果	31
図 16	SFC 廃液移送管のにじみ発生の要因分析	32

参考資料 SFC 系廃樹脂移送配管からの漏えいについて

## 1. 件名

JMTR 施設内 C トレンチの廃液移送管表面からの汚染検出について

## 2. 事象発生の日時

発生日時 平成 24 年 10 月 19 日（金） 14 時 41 分頃

確認日時 平成 24 年 10 月 25 日（木） 11 時 20 分

## 3. 事象発生の場所

JMTR 施設 C トレンチ内廃液移送管（非管理区域）

## 4. 状況

独立行政法人日本原子力研究開発機構大洗研究開発センターに設置されている材料試験炉（以下「JMTR」という。）施設（図 1 及び図 2 参照）では、排水貯槽の排水ポンプ、主要弁、廃液移送管等の排水系統の健全性を確認するための自主検査を毎年実施しており、平成 24 年度は 7 月 4 日から実施していた。この自主検査の一環として、10 月 19 日からは、SFC プール<sup>※1</sup>（使用済燃料切断プール）排水貯槽の排水ポンプ及び廃液移送管（図 3 参照）の自主検査を実施していた。

この検査は、SFC プールに純水を供給し、プール水をオーバーフローさせて SFC 排水貯槽に水をため、排水ポンプにより排水を貯留する施設（タンクヤード）に送水し、排水ポンプ及び廃液移送管の異常の有無を確認するものである。

10 月 19 日 14 時 36 分頃に排水ポンプを起動し、廃液移送管に通水し、漏えいがないことを確認していたところ、14 時 41 分頃に JMTR 原子炉建家からタンクヤードまで続いている C トレンチ内（非管理区域）の廃液移送管の外表面に僅かなにじみとそのにじみが下の配管外表面に滴った水滴を確認した（図 4 参照）。そのため、14 時 43 分頃、排水ポンプを停止したところ、配管表面からのにじみは止まった。にじみ箇所を特定し、廃液移送管の外表面のにじみ及び水滴が付いた箇所を拭き取ったウエスを放射線測定器（サーベイメータ及びゲルマニウム半導体検出器）で測定した結果、放射性核種は検出されなかった。また、ウエスで拭き取った後の廃液移送管の外表面と水滴が付いた箇所のろ紙を用いたスマヤ検査（液体シンチレーションカウンタ）でも放射性核種は検出されなかった（図 5 参照）。以上のことから法令報告事象に該当しないと判断した。そして、C トレンチ内のにじみを確認した箇所周辺を一時管理区域に設定し、紫外線硬化型の FRP<sup>※2</sup> シートをにじみ箇所に取り付けることにより、漏えい防止のための措置を行った。

※1 Spent Fuel Cutting Pool の略。使用済燃料切断プールは、燃料要素の上部と下部の構造材（アルミニウム）の切断に使用するものであり、ウランが含まれている燃料部分を切断することはない。

※2 Fiber Reinforced Plastics（繊維強化プラスチック）の略。ガラス繊維などの繊維をプラスチックの中に入れて強度を向上させた複合材料。

その後、ウエス中の微量のトリチウムの有無を確認する方法について検討し、10月24日から、ビニール袋に保管したウエスに純水 100cc を加えトリチウム量の測定を開始し、10月25日にかけて5回測定した。その結果、最大 61Bq のトリチウムを確認した（表1参照）。これにより、10月25日11時20分にCトレンチ内廃液移送管の外表面におけるにじみは「核燃料物質等が管理区域外で漏えいしたとき」に該当する法令報告事象と判断した。

時系列を表2に示す。

## 5. 環境への影響

モニタリングポストの指示値に変動はなかったことから、本事象による環境への影響はなかった。

## 6. Cトレンチ内廃液移送管の概要

SFC 廃液移送管は、昭和43年に設置した総延長約100m、外径60.5mm、肉厚2.8mmのステンレス鋼（SUS27（現在のJIS規格ではSUS304に相当））製の配管である。当該配管の点検については、外観点検を1月ごとに実施するとともに、当該配管を含むCトレンチ内の廃液移送管の自主検査を1年ごとに実施している。

当該配管が敷設されているCトレンチは、地下（床面が地下約5mの位置）に設置された長さ約100m、幅約4.0m、高さ約4.3mの断面が四角形をしたトンネル状のコンクリート構造である。

当該配管は、送水の有無に関係なく、排水ポンプ出口弁の直近に設置してある逆止弁<sup>※3</sup>で密閉されており、常時廃液で満たされている。また、廃液の温度は、常温（夏期約25℃、冬期約12℃）である。

SFC プールで使用された廃液は、JMTR 原子炉施設内のホットラボ建家内に設置する SFC 排水貯槽に貯留される。その後、廃液は排水ポンプ（吐出圧力：0.27MPa）により SFC 廃液移送管を通じて、タンクヤードにある廃液タンクに送水する。また、廃液タンクに貯留した廃液は、廃棄物管理施設に送水される。

今回の事象が発生する前の外観点検、自主検査において、当該配管の外表面には、傷及び漏えいはなかった。当該配管による廃液の移送は、年に数回程度で、直近では、平成23年10月21日の自主検査の一環として廃液を移送したが、その際は健全であった。

※3 配管内を流れる液体が、逆方向へ流れようとするのを止めるための弁。

## 7. 原因調査

にじみが発生した箇所を特定するため、まず、当該箇所を含む配管を切り出し、配管の外表面及び内表面の外観を確認し、非破壊検査として X 線 CT 検査<sup>※4</sup>を実施した。その結果、図6に示すように、周方向の欠陥を確認した。なお、切り出した配管には、にじみが発生した箇所の他、漏れはないが2箇所の欠陥があることを確認した。

その後、にじみ発生原因の特定のため、当該配管の据付け・施工状況、使用環境について調査するとともに、腐食及び割れの観点から、にじみが発生した箇所を調査した。調査内容を以下に示す。

なお、当該配管の平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による影響の有無については、東北地方太平洋沖地震時に JMTR 原子炉建家(地下 2m)において観測された加速度を用いて当該配管の耐震評価を実施した結果、配管に加わった応力は最大 180MPa であり、当該配管の材質 (SUS304) の弾性範囲(205MPa 以下)であったことから、東北地方太平洋沖地震による影響はなかったことを確認している。

※4 X線を利用して物体を 360 度全方向に対して走査し、そのデータをコンピュータを用いて処理し、物体の内部の状況を 3 次元のグラフィックスとして表示し、物体の内部の様子を調べる装置。

## 7.1 据付け・施工状況の調査

当該配管の据付け・施工に起因する原因として、配管材質不良、溶接施工不良、不適切な据付け及び外的損傷がある。これらの調査を実施した結果を以下に示す。

### 7.1.1 配管材質不良の調査

設計・製作に基づく施工において、配管の材料が設計と異なると強度不足や異物が混入した場合に欠陥等が発生する可能性がある。そのため、設計どおりの材料が使用されていることを確認するため、材料成分を調査した。

当該配管の材料は、要求事項として、JIS 規格の SUS304 材 (配管設置当時の規格は SUS27) を使用することとなっており、要求事項を満足していることを確認するため、切り出した配管の一部を使用して材料分析を行った。

その結果、表 4 に示すとおり、使用材料は JIS 規格の SUS304 材を使用しており、配管材質の不良はないことを確認した。

### 7.1.2 溶接施工不良の調査

溶接条件の不適切な管理により、溶接時に過度な入熱<sup>※5</sup>があると残留応力<sup>※6</sup>の発生や溶接熱影響部<sup>※7</sup>に Cr (クロム) 欠乏層が発生し、耐食性が低下し (鋭敏化<sup>※8</sup>)、腐食及び割れが発生する可能性がある。そのため、外観観察、溶接条件の確認及び鋭敏化度測定を行った。

外観観察の結果、にじみが発生した箇所の外表面は、図 4 に示すように、全体的にステンレス鋼特有の半光沢の金属色を呈し、にじみを確認した溶接部近傍の外表面部分には変色が見られ、にじみ箇所周辺を含む周方向全体に斑点が観察されたが、割れは確認されなかった。なお、にじみが発生した部分は、溶接熱影響部である。

にじみを確認した配管の内表面については、図 7 及び図 8 に示すように、溶接裏波<sup>※9</sup>に沿って約 10mm 幅の帯状の腐食生成物<sup>※10</sup>が広がっており、その帯状の外側輪郭に沿って、不連続の点状の割れ及び連続した割れを確認した。また、溶接条件として溶接施工時に過度な入熱があった場合に見られる溶接裏波の溶けだれ<sup>※11</sup>が確認された。

そのため、過度な入熱による鋭敏化の状況を確認するため、鋭敏化度測定を実施した結果、溶接の熱影響部の再活性化率<sup>※12</sup>は、約2～6%であり、鋭敏化（再活性化率1%以上）していることが確認された。

なお、配管内表面には、溶接ビード<sup>※13</sup>脇に変色が見られたが、スラッジ等の異物は確認されず、それ以外の部分には、無光沢の金属色を呈していた。

- ※5 溶接入熱とも言われ、溶接を行う際に、外部から溶接部（溶接金属及び熱影響部を含んだ部分の総称）に与えられる熱量のこと。
- ※6 外から作用していた力が全て取り除かれた後に部材や構造物の内部に残存している応力であり、ここでは、溶接の際に発生した応力が残留応力である。
- ※7 溶接の熱で母材の組織や機械的性質に変化を生じた部分をいう。
- ※8 オーステナイト系ステンレス鋼（SUS304, 316等）が450～850℃の熱履歴を持つと、結晶粒中のCrが結晶粒界にCr炭化物として析出し、結晶粒界近傍のCr濃度が低下し耐食性が低下する現象。
- ※9 片側溶接（片側だけから行う溶接）において、裏側に形成される整った波形の溶接ビードのことである。
- ※10 配管などの材料の腐食によって生成された物質。一般的なものとして錆などがある。
- ※11 溶接時に母材及び溶接棒が溶け過ぎて垂れたもの。過度な入熱があった可能性がある。
- ※12 鋭敏化の定量値として表示され、鋭敏化の進行状況を確認することに使われる。
- ※13 溶接した部分にできる溶接材料が凝固した縞状の痕跡。

### 7.1.3 不適切な据付けの調査

据付け時の無理な位置合わせにより過大な応力が生じ、割れが発生する可能性がある。その状況を確認するため、外観観察を行った。

その結果、当該配管に変形はなく、配管切り出し後のCトレンチ内の当該配管の状況からも現場合合わせを行った場合に見られるずれなどは確認されなかった。

### 7.1.4 外的損傷の調査

施工時の物理的衝撃により表面損傷を受けて腐食が発生する可能性がある。その状況を確認するため、外観観察を行った。

その結果、当該配管の外表面にはへこみ等はなく、物理的衝撃を受けた場合に見られる打痕や傷は確認されなかった。

## 7.2 使用環境の調査

使用環境に起因する原因として、使用状況、外部環境及び内部環境がある。これらの調査を実施した結果を以下に示す。

### 7.2.1 使用状況の調査

ポンプ吐出圧力による振動で配管に応力が繰り返し加わることにより、割れが発生する可能性がある。そのため、運転記録等からポンプ吐出圧力及びポンプの異常の有無を確認した。

その結果、廃液の送水頻度は、排水のために年数回流される程度であり、運転時のポンプ吐出圧力は0.27MPa程度であり、設計値(0.3MPa)未満で管理されていることを確認した。また、SFC排水ポンプの年次点検の記録から、試験運転時における目視及び触診において異常な振動



が発生していなかったことも確認した。

以上の結果から、疲労による割れが発生する使用状況ではないことを確認した。

### 7.2.2 外部環境の調査

海岸付近からの飛散による海塩粒子等の配管外表面への付着及び湿潤大気環境にさらされることにより応力腐食割れ<sup>※14</sup>が発生する可能性がある。

そのため、C トレンチ内が湿潤大気環境であるかどうかを確認するため、温度及び湿度を調査するとともに、当該配管表面への海塩粒子の付着の有無についての測定を行った。

C トレンチ内の温度及び湿度の調査の結果、図9に示す平成24年11月から平成25年6月までの測定データから、平均温度は約16℃、平均湿度は約65%であるため、湿潤大気環境<sup>※15</sup>（温度：16～20℃、湿度：40～60%、空気の流れがない）であることを確認した。

当該配管表面への海塩粒子の付着の有無については、配管表面をぬれウエスで拭き取り、これを純水に浸し、浸した水を水質計で測定した。その結果、塩化物イオンが検出されたことから、海塩粒子が付着していることを確認した。

以上の結果から、C トレンチ内は、地下にあるため温度変化はあまりないが、湿度は外気の状態に影響されること、また、屋外に比べて空気が滞留しやすいことから、結露と乾燥が繰り返されている環境にある。したがって、当該配管の外表面に付着した塩化物イオンは、結露と乾燥が繰り返されることにより配管表面に濃縮され、応力腐食割れが起りやすい環境となっていた。

※14 ステンレス鋼などの材料が特定の環境下で引張応力を受けると、一定時間後に割れが生じる現象。

※15 温度16～20℃、湿度40～60%において、乾燥と結露を繰り返す環境。

### 7.2.3 内部環境の調査

腐食性の高い廃液が配管内に長期間滞留していると、配管内から腐食が発生する可能性がある。そのため、廃液の当該配管内での滞留期間、当該配管内部の雰囲気及び水質を調査した。

その結果、廃液の当該配管内での滞留期間については、これまでの運転記録を確認した結果、廃液は最長で1年間滞留していたことを確認した。

当該配管内部の雰囲気については、6.項「C トレンチ内廃液移送管の概要」に示すとおり、常時、廃液で満たされた状態であることを確認した。

廃液の水質については、SFC 排水貯槽に貯留している廃液中の水質を測定した結果、表3に示すとおり、塩化物イオン濃度は0.044mg/l、電気伝導率は33.4μS/cm、pHは6.48であり、スラッジの堆積の原因となるシリカの濃度は1.44mg/lであり、純水中に含まれるシリカの濃度(2mg/l>)とほとんど変わらなかった。

なお、SFC 排水貯槽に貯留される廃液は、SFC プール、No.3 カナル<sup>※16</sup>の水（純水）のオーバーフロー水、機器ドレン水（純水）等である。

以上の結果から、廃液の水質については、腐食性の高いものではないことを確認した。参考までに、廃液の温度は、常温（夏期約25℃、冬期約12℃）であった。



※16 炉プールとホットラボ建家を連絡する水路であり、SFC プールと繋がって設置されている。使用済燃料や照射されたキャプセル等の運搬用水路となっている。

### 7.3 腐食の調査

にじみが発生した箇所の状況を確認するため、腐食の観点からの調査を実施した。腐食の形態としては全面腐食、粒界腐食、すきま腐食、孔食、微生物誘起腐食、水滴落下・もらい錆、異種金属接触腐食、流れ加速型腐食、エロージョン・コロージョン及びキャビテーション・エロージョンがある。これらの調査を実施した結果を以下に示す。

#### 7.3.1 全面腐食の調査

耐食性を持つ薄い酸化膜（不動態皮膜<sup>※17</sup>）が形成しにくい環境（pH、温度）になっていると、配管の内表面又は外表面が均一に腐食する可能性がある。そのため、外観観察により、配管の外表面又は内表面が均一に腐食していないかどうかを確認した。

その結果、当該配管に局所的な錆は見られたが、全面腐食の場合に見られる外表面及び内表面に均一に錆が発生していないことを確認した（7.1.2 項「溶接施工不良の調査」参照）。

※17 金属の表面にできる耐食性を持つ薄い酸化膜であり、内部を酸による腐食や、酸化などから保護する。

#### 7.3.2 粒界腐食の調査

溶接時の熱影響により溶接部近傍が鋭敏化して粒界の耐食性が低下し、粒界の優先的な腐食が発生する可能性がある。そのため、金相試験<sup>※18</sup>として結晶組織の観察及び破面観察を実施し、欠陥部の金属組織を調査した。

その結果、図 10 に示すように、欠陥部の金属組織は、溶接部から約 10mm の位置近傍の配管の外表面から内表面に向かって分岐を伴いながら進展する細かいき裂（2 次き裂<sup>※19</sup>）を伴う割れが、貫通している状況であった。

次に、割れの性状を確認するため、この割れの近傍部分を強制破断させ、走査型電子顕微鏡<sup>※20</sup>により破面観察<sup>※21</sup>を行った結果、図 11 に示すように、破面は強制破断した一部の延性破面（ゴルフボール表面のような多数の窪みが見える状態）<sup>※22</sup>を除き、ほぼ全面に、分岐を伴う明瞭な粒界割れ<sup>※23</sup>が観察された。

以上の結果から、にじみを確認した箇所の金属組織は、粒界腐食の場合に見られる粒界に沿った腐食の形状ではなく、粒界を進展する細かいき裂（2 次き裂）を含む割れであった。

※18 電子顕微鏡等を使用して金属の組織や析出物の状態を観察する試験。

※19 主な割れから分岐する細かいき裂。

※20 試料に電子線が当たると、その部位から形状に応じた 2 次電子が発生する。発生した 2 次電子の数を検出器でカウントすることで試料の形状を観察する。

※21 破面とは、金属が折れた際に現れる面である。今回行った破面部の観察は、外観観察及び配管内面に割れが認められた箇所から試料を採取して強制破断した破面の性状を確認した。

※22 延性破壊（物体に引張力を加えた場合に、物体が引き延ばされ、その後破壊に至ること）を起こした破面（金属材料

が折れた時に現れる面)。強制破断した部分の破面は延性破面となる。

※23 金属は微小な結晶粒が集合している組織であり、結晶粒と隣接する結晶粒の間を割れが進展する現象。

### 7.3.3 すきま腐食の調査

配管内面への付着物又は堆積物により生じるすきま部分とすきまのない部分との間に電位差が生じることにより、インク壺状の腐食が発生する可能性がある。そのため、外観観察により配管内表面の付着物又は堆積物の有無を確認するとともに、金相試験として結晶組織の観察及び破面観察を実施し、欠陥部の金属組織を調査した。

外観観察の結果、にじみを確認した箇所の内表面には溶接裏波に沿って約 10mm 幅の帯状の腐食生成物が広がっており、その帯状の外側輪郭に沿って不連続の点状の割れが確認されたが、すきま腐食の場合に見られる付着物又は堆積物はないことを確認した(7.1.2 項「溶接施工不良の調査」参照)。

金相試験の結果、溶接部から約 10mm の位置近傍の外表面から内表面に向かって結晶粒界を進展する細かいき裂(2 次き裂)を含む割れは確認したが、すきま腐食に特有のインク壺状の腐食形態は確認されなかった(7.3.2 項「粒界腐食の調査」参照)。

### 7.3.4 孔食の調査

塩化物イオンがある環境下において、塩化物イオンの濃縮が起これると、特に溶接部等で局部的に小さな孔のような腐食(孔食)が発生する可能性がある。

そのため、外観観察により、配管の外表面及び内表面の状況を確認するとともに、金相試験として結晶組織の観察及び破面観察を実施し、欠陥部の金属組織を調査した。

外観観察の結果、にじみ箇所周辺を含む配管外表面の周方向全体に斑点が観察され、配管内表面には、溶接裏波に沿って約 10mm 幅の帯状の腐食生成物が見られ、その外側輪郭に沿って、不連続の点状の割れ及び連続した割れが観察されたが、孔食の場合に見られる局所的な小さな孔はないことを確認した(7.1.2 項「溶接施工不良の調査」参照)。

金相試験の結果、溶接部から約 10mm の位置近傍の外表面から内表面に向かって結晶粒界を進展する細かいき裂(2 次き裂)を含む割れが認められたが、孔食に特有の局所的な小さな孔は確認されなかった(7.3.2 項「粒界腐食の調査」参照)。

以上のことから、粒界を進展する 2 次き裂を伴う粒界割れが見られたため、孔食ではない。

### 7.3.5 微生物誘起腐食の調査

配管内に腐食を起こす微生物を含む廃液が長期滞留することによりインク壺状の腐食(微生物誘起腐食)が発生する可能性がある。そのため、外観観察により配管の外内表面の状況を確認するとともに、金相試験として結晶組織の観察及び破面観察を実施し、欠陥部の金属組織を調査した。

外観観察の結果、にじみを確認した箇所の内表面には溶接裏波に沿って約 10mm 幅の帯状の腐食生成物が広がっており、その帯状の外側輪郭に沿って不連続の点状の割れが確認されたが、

微生物誘起腐食の場合に見られる付着物や堆積物はないことを確認した（7.1.2 項「溶接施工不良の調査」参照）。

金相試験の結果、溶接部から約 10mm の位置近傍の外表面から内表面に向かって結晶粒界を進展する細かいき裂（2 次き裂）を含む割れは確認したが、微生物誘起腐食に特有のインク壺状の腐食形態は確認されなかった（7.3.2 項「粒界腐食の調査」参照）。

### 7.3.6 水滴落下・もらい錆の調査

配管表面に付着物や錆が認められる場合、当該配管の上部から落下する水滴や錆の付着により腐食が発生する可能性がある。そのため、外観観察により配管外表面の腐食状況を確認した。

その結果、当該配管の表面には錆などが見られたが、当該配管の表面には上部から落下する水滴や錆が付着した痕跡はなかった（7.1.2 項「溶接施工不良の調査」参照）。

### 7.3.7 異種金属接触腐食の調査

配管に他の金属が接触することにより腐食が発生する可能性がある。そのため、外観観察により、当該配管に他の金属が接触していないかどうかを確認した。

その結果、当該配管に他の金属が接触しておらず、異種金属接触腐食がないことを確認した（7.1.2 項「溶接施工不良の調査」参照）。

### 7.3.8 流れ加速型腐食の調査

流れ加速型腐食は、流体が継続的かつ高流速で流れる配管に生じる腐食で、材料（ステンレス鋼では発生しにくい）、流体の流れ（流速及び乱流の有無）、環境（流体の温度等）の因子が重なり合うと、腐食と物理作用の相乗効果により減肉が生じる可能性がある。そのため、外観観察により、配管内面が減肉していないかどうかを調査した。

その結果、図 7 及び図 8 に示すように、配管内表面は減肉しておらず、流れ加速型腐食ではないことを確認した。

### 7.3.9 エロージョン・コロージョンの調査

エロージョン・コロージョンは、流体が継続的かつ高流速で流れる配管に発生する局部腐食であり、流体及び砂などの固体粒子が管壁に衝突することにより配管が損耗（減肉）する可能性がある。そのため、外観観察により、配管内面が損耗していないかどうかを調査した。

その結果、図 7 及び図 8 に示すように、配管内表面は損耗しておらず、エロージョン・コロージョンではないことを確認した。

### 7.3.10 キャビテーション・エロージョンの調査

キャビテーション・エロージョンは、流体が継続的かつ高流速で流れる配管に発生する腐食であり、流体中に発生する圧力差によって発生して圧潰する気泡により強い圧力波を生じ配管を局所的に損耗（減肉）する可能性がある。そのため、外観観察により、配管内面が損耗して

いないかどうかを調査した。

その結果、図 7 及び図 8 に示すように、配管内表面には局所的な損耗は発生しておらず、キャビテーション・エロージョンではないことを確認した。

## 7.4 割れの調査

にじみが発生した箇所を確認するため、割れの観点からの調査を実施した。割れの形態としては、応力腐食割れ、水素脆化割れ及び腐食疲労がある。これらの調査を実施した結果を以下に示す。

### 7.4.1 応力腐食割れの調査

応力が加わった状態において、温度、湿度、塩化物イオン濃度が高いなどの環境下にあると腐食が発生する可能性がある。そのため、金相試験として結晶組織の観察及び破面観察を実施し、欠陥部の金属組織を調査し、元素分析を行い配管外表面の腐食生成物中の塩化物イオン濃度を確認し、鋭敏化度測定を行い溶接部からの熱影響を調査し、残留応力の評価を実施し、溶接部近傍に応力が加わっていたかどうかを確認した。

金相試験の結果、溶接部から約 10mm の位置近傍の外表面から内表面に向かって結晶粒界を進展する細かいき裂（2 次き裂）を含む割れがあり、にじみ箇所近傍の破面は、強制破断した一部の延性破面を除き、ほぼ全面に分岐を伴う明瞭な粒界割れが観察された（7.3.2 項「粒界腐食の調査」参照）。

X 線光電子分光装置<sup>※24</sup>を用いた元素分析の結果、にじみ箇所の粒界割れ破面の腐食生成物及びにじみ箇所近傍の配管外表面に付着していた腐食生成物から塩化物イオンが検出された（図 12 参照）。また、電子線マイクロアナリシス装置<sup>※25</sup>により、にじみ箇所の元素分析を行った結果、図 13、14 に示すように、にじみを確認した箇所の配管の外表面及び内表面ともに、鋭敏化が著しい場合に検出される Fe、Cr、Ni の偏析は観察されず、溶接母材<sup>※26</sup>部及び熱影響部においても Fe、Cr、Ni の偏析は観察されなかった。

鋭敏化度測定については、粒界割れが生じた部分、切り出す前の配管の上部を 0° とした場合に約 180° となる部分及び溶接熱影響を受けていない部分から試料を採取し、電気化学的再活性化測定法<sup>※27</sup>により実施した結果、図 15 に示すように、溶接の熱影響部の再活性化率は、約 2～6%であり、鋭敏化度を示す有意な値（1%以上）であり、粒界割れが生じた部分の鋭敏化を確認した。この結果から、通常は溶接部付近にのみ起きる鋭敏化の領域が、溶接時における過度な入熱により、溶接部から約 10mm 離れた領域まで広がっているものと推定した。

溶接部の溶接残留応力の評価においては、溶接ビードの施工状況を基に、有限要素法<sup>※28</sup>による溶接残留応力解析を実施した結果、溶接部から 10～20mm 離れた外表面及び溶接部近傍の内表面に比較的高い引張残留応力が発生すること、溶接部近傍の外表面では圧縮残留応力が発生することを確認した。

以上の結果から、当該事象は応力腐食割れであることを確認した。なお、この応力腐食割れは、C トレンチは湿潤大気環境であり、この環境が作用した結果、発生したものであることか



ら、湿潤大気応力腐食割れ<sup>\*29</sup>である。

- ※24 対象物に X 線を当てると、原子軌道の電子が励起されることにより光電子が放出されるが、その際の光電子エネルギーは物質によって異なる。この原理を利用して光電子のエネルギーを測定することにより、成分を分析する装置のこと。
- ※25 試料に電子線を照射すると、電子と物質は強い相互作用を起こし、様々な電磁波が放出される。中でも特性 X 線は元素ごとに固有の波長を持っている。この特性 X 線を検出することによって、物質に含まれる元素の特定する装置のこと。
- ※26 溶接により接合される材料のこと。SFC 廃液移送管については、SUS27(現在の JIS 規格では SUS304 に相当)である。
- ※27 電極などをセットし、活性態域から不動態域へとアノード分極させた後、再び活性態域へ逆掃引する。この過程で得られた溶解電流値の比(再活性化率 :  $I_r / I_a$ )から鋭敏化度を評価する測定法。
- ※28 構造解析に用いられている数値解析手法の一つ。
- ※29 応力腐食割れは、環境、材料、応力の 3 条件が揃った時に発生する。湿潤大気応力腐食割れは、そのうちの環境として、湿潤大気環境の影響によるもの。

#### 7.4.2 水素脆化割れの調査

廃液が高温になると応力発生下において発生した水素が材料内に侵入して水素脆化割れが発生する可能性がある。そのため、運転記録等から水素が発生する環境かどうかを調査した。

その結果、廃液の温度を上げて送水した記録は確認されず、廃液は常温であったことを確認した。したがって、配管内の廃液の状態は、水素脆化割れが生じるような水素の発生する可能性のある高温になることはないことを確認した。

#### 7.4.3 腐食疲労の調査

温度、湿度、塩化物イオン濃度が高いなどの環境下でのポンプの断続的な運転などにより繰り返し応力を受けると、腐食部分の強度低下が起こり割れ等が発生する可能性がある。そのため、運転記録等から、運転時のポンプ吐出圧力及びポンプの異常の有無を確認し、金相試験として結晶組織の観察及び破面観察を実施し、欠陥部の金属組織を調査した。

運転記録を確認した結果、廃液の送水頻度は、排水のために年数回流される程度であり、運転時のポンプ吐出圧力は 0.27MPa 程度であり、設計値 (0.3MPa) 未満で管理されていることを確認した。また、SFC 排水ポンプの年次点検記録から、試験運転時における目視及び触診において異常な振動が発生していなかったことも確認した (7.2.1 項「使用状況の調査」参照)。

金相試験の結果、溶接部から約 10mm の位置近傍の外表面から内表面に向かって結晶粒界を進展する細かいき裂 (2 次き裂) を含む割れは確認したが、腐食疲労に特徴的なストライエーション(疲労破壊時に現れる縞状の模様)が見られなかった (7.3.2 項「粒界腐食の調査」参照)。

#### 7.5 原因調査の結果

以上の調査の結果を図 16 に示す。

当該配管の据付・施工については、溶接施工時に溶接部への過度の入熱が確認され、溶接部とその近傍に鋭敏化が確認され、使用環境については、C トレンチは湿潤大気環境にあり、当該配管外表面には、海塩粒子が付着していることを確認しており、応力腐食割れが発生しやすい状況にあった。

にじみが発生した箇所の腐食又は割れの形態を調査した結果、応力腐食割れに特有の粒界割れを確認するとともに、にじみ箇所の粒界割れ破面の腐食生成物及びにじみ箇所近傍の配管外表面には、塩化物イオンが確認された。

したがって、SFC 廃液移送管表面のにじみが発生した原因は、オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) <sup>※30</sup> 製の SFC 廃液移送管に溶接による残留引張応力が加わった状況において、海塩粒子を含む雰囲気<sup>30</sup>の湿潤大気環境下の C トレンチ内にある当該配管の外表面に結露と乾燥が交互に繰り返され、塩化物が濃縮されたことにより、応力腐食割れが発生したことによるものであり、当該配管のにじみ発生箇所のき裂は、配管外表面から進展した湿潤大気応力腐食割れであった。

※30 ステンレス鋼は耐食性を向上させる目的で主にクロムとニッケルを含有させた合金鋼であり、代表鋼種には、クロムを 18%とニッケルを 8%加えた SUS304 がある。

## 8. 処置及び対策

### 8.1 処置

にじみ発生箇所を切り出した後の当該配管の補修については、当該配管と同等の材料 (SUS304) の配管に取り替える。この溶接を行う際には、施工管理として溶接時の入熱過多による溶けだれの発生防止や溶け込み不足を防止するための対策を実施する。溶接後は、溶接部の放射線透過検査<sup>※31</sup>等を実施し、溶接施工が確実に行われていることを確認する。

また、C トレンチ内の SFC 廃液移送管については、全ての溶接部について放射線透過検査等を行い、健全性を確認する。確認の結果、異常を確認した箇所については、補修計画を立案し計画的に補修を行う。

さらに、湿潤大気応力腐食割れの発生条件である湿潤大気環境、材料及び応力の条件のうち、湿潤大気環境条件を取り除くため、C トレンチ内の SFC 廃液移送管の溶接部及びその近傍にある錆を除去し、溶接部及びその近傍に湿潤大気応力腐食割れ抑制効果のある錆止め塗料<sup>※32</sup>を塗布する。

※31 放射線透過検査は、非破壊検査の一種で、放射線を材料に照射し、材料内部を透過させて、それが材料背後にある写真用フィルムや蛍光板に投影することにより、内部の欠陥や構造を調べる検査。

※32 この塗料は、「腐食性イオン固定化剤」と呼ばれる材料が配合され、ステンレス鋼に応力腐食割れが発生する原因となる塩化物イオンを、この「イオン固定化剤」で吸着・固定化し、無害化するものである。なお、この塗料は、国内の原子力施設でも採用されている。

### 8.2 対策

C トレンチ内に敷設されているステンレス鋼製の廃液配管の溶接部については、放射線透過検査等を行い、健全性を確認する。確認の結果、異常を確認した箇所については、補修計画を立案し計画的に補修を実施する。

湿潤大気応力腐食割れの発生条件である湿潤大気環境、材料及び応力の条件のうち、湿潤大気環境条件を取り除くため C トレンチ内に敷設されているステンレス鋼製の廃液配管の溶接部

及びその近傍にある錆を除去し、溶接部及びその近傍に湿潤大気応力腐食割れ抑制効果のある錆止め塗料を塗布する。

これらの対策の後は、毎年 1 回廃液移送管に塗布した湿潤大気応力腐食割れ抑制効果のある錆止め塗料の状況を確認し、塗料の剥離などが観察された場合には当該部分に塗料を塗布するなどの対応を行う。なお、これらの対応については、JMTR 施設の運転保守の管理要領である JMTR 運転手引に定め、実施していく。

参考までに、平成 25 年 4 月 16 日に発生した SFC 廃樹脂移送配管からの漏えいに関する原因調査の状況を参考資料に示す。



表1 ウエスの中トリチウム測定結果

測定日	放射性核種	測定	試料	放射能(Bq)	放射線測定器
平成 24 年 10 月 24 日	<sup>3</sup> H	1 回目	1	$2.1 \times 10^1$ (検出下限値: $1.4 \times 10^1$ )	液体シンチレ ーションカウ ンタ LSC-7200
			2	$4.5 \times 10^1$ (検出下限値: $1.5 \times 10^1$ )	
			3	$6.1 \times 10^1$ (検出下限値: $1.5 \times 10^1$ )	
			4	$5.4 \times 10^1$ (検出下限値: $1.5 \times 10^1$ )	
10 月 25 日		2 回目 (第 1 回浸出) *	A	$3.0 \times 10^1$ (検出下限値: 7.8)	
		3 回目 (第 2 回浸出) *	B	$1.4 \times 10^1$ (検出下限値: 7.7)	
		4 回目 (第 3 回浸出) *	C	検出下限値未満 (検出下限値: 7.6)	
		5 回目 (第 4 回浸出) *	D	検出下限値未満 (検出下限値: 7.5)	

\* : ウエス中残存トリチウム量評価のため実施したもの。なお、ウエスからの試料採取手順は次のとおり。

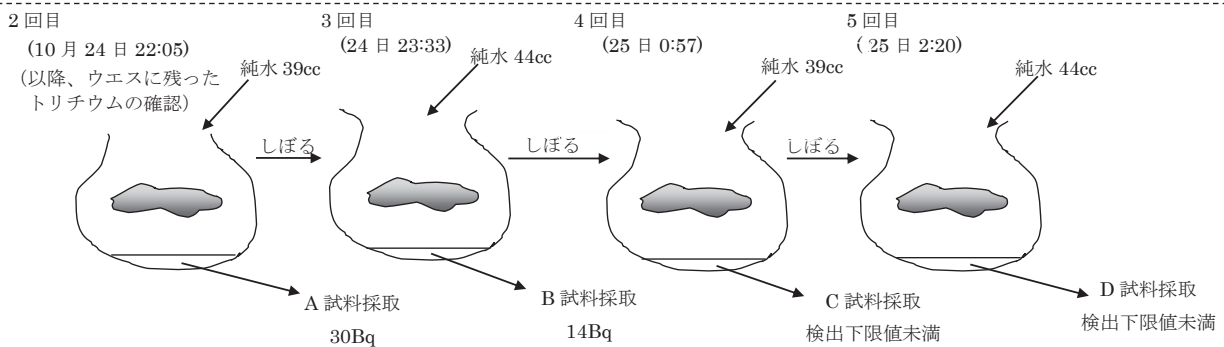
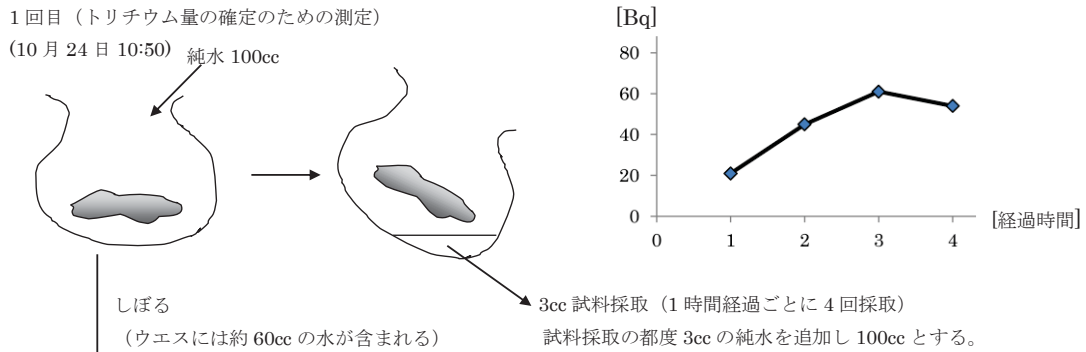


表2 時系列

日付	時間	内容
平成 24 年 10 月 19 日	14:36	自主検査の実施のため排水ポンプ起動
	14:41	C トレンチ内の廃液移送管から僅かなにじみとその下の配管ににじみから滴った水滴を確認
	14:43	排水ポンプ停止
	15:00	目視により、にじみ箇所の特定
	15:35	にじみ及び水滴を拭き取ったウエスをサーベイメータで測定した結果、有意な汚染は認められなかった。
	17:04	にじみ及び水滴を拭き取ったウエスをゲルマニウム半導体検出器で測定した結果、放射性核種は検出されなかった。
	17:53	にじみ及び水滴があった箇所をスミヤロ紙で拭き取り分析した結果、放射性核種は検出されなかった。
10 月 20 日～ 23 日	—	保管していたウエス中の微量のトリチウムの有無を確認する方法等について検討
10 月 24 日	10:50	ウエス中の微量のトリチウムを純水へ浸出を開始
	17:59	ウエス中のトリチウム量測定 (21～61Bq)
	22:05	ウエス中残存トリチウム量評価のための第 1 回浸出開始 (A)
	23:33	ウエス中残存トリチウム量評価のための第 2 回浸出開始 (B)
10 月 25 日	0:57	ウエス中残存トリチウム量評価のための第 3 回浸出開始 (C)
	2:20	ウエス中残存トリチウム量評価のための第 4 回浸出開始 (D)
	7:22	A 試料の測定終了 (30Bq) *
	7:53	B 試料の測定終了 (14Bq) *
	8:24	C 試料の測定終了 (検出下限値未満)
	8:55	D 試料の測定終了 (検出下限値未満)
	11:20	C トレンチ内廃液移送管から核燃料物質等が管理区域外に漏えいしたと判断した。

\* : 前の測定のしぼり残りに含まれているトリチウム量を超えるものではないことから、ウエスから新たに浸出したトリチウムではないと考えられる。

表3 SFC排水貯槽のサンプリング結果

測定項目	測定日	測定結果	測定器
pH	平成24年11月16日	6.48	pH計 (東亜電波工業、HM-30)
電気伝導率	平成24年11月16日	33.4 $\mu$ S/cm	電気伝導率計 (東亜 DKK、CM-30)
塩化物イオン濃度 (Cl <sup>-</sup> )	平成24年11月16日	0.044 mg/l	イオンクロマトグラフ (島津製作所、HIC-10Asp)
シリカ濃度 (SiO <sub>2</sub> )	平成25年6月20日	1.44 mg/l	デジタルウォーターアナライザー (供立理化学研究所、DPM)
放射能濃度	<sup>60</sup> Co	平成24年11月15日 5.297 $\times 10^{-3}$ Bq/cm <sup>3</sup> (検出下限値： 2.563 $\times 10^{-3}$ Bq/cm <sup>3</sup> )	Ge半導体検出器 (キャンベラジャパン、DSA-1000)
	<sup>134</sup> Cs	平成24年11月15日 検出下限値未満 (検出下限値： 3.140 $\times 10^{-3}$ Bq/cm <sup>3</sup> )	Ge半導体検出器 (キャンベラジャパン、DSA-1000)
	<sup>137</sup> Cs	平成24年11月15日 検出下限値未満 (検出下限値： 3.894 $\times 10^{-3}$ Bq/cm <sup>3</sup> )	Ge半導体検出器 (キャンベラジャパン、DSA-1000)
	<sup>3</sup> H	平成24年11月20日 85.7 Bq/cm <sup>3</sup>	液体シンチレーションカウンタ (アロカ、AccuFLEX Lsc7200)

表4 使用材料の分析結果

項目	化学成分 (%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
JIS規格におけるSUS304の規格値※	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	8.00～ 11.00	18.00～ 20.00
SFC廃液移送管の分析値	0.08	0.81	1.23	0.032	0.003	9.22	18.55

※SUS304TPの規格値

表 5 SFC 排水貯槽送水履歴

年度	送水日	送水量(m <sup>3</sup> )
平成 18 年度	平成 19 年 1 月 31 日	11.3
平成 19 年度	平成 19 年 5 月 25 日	6.7
	平成 19 年 5 月 29 日	11.7
	平成 19 年 5 月 30 日	14.5
	平成 19 年 12 月 14 日	1.3
平成 20 年度	平成 20 年 5 月 30 日	15.2
	平成 20 年 11 月 6 日	1.4
平成 21 年度	平成 21 年 8 月 26 日	17.1
	平成 22 年 2 月 5 日	4.7
平成 22 年度	平成 22 年 12 月 3 日	17.1
平成 23 年度	平成 23 年 10 月 21 日	7.7
平成 24 年度	平成 24 年 10 月 19 日	1.9

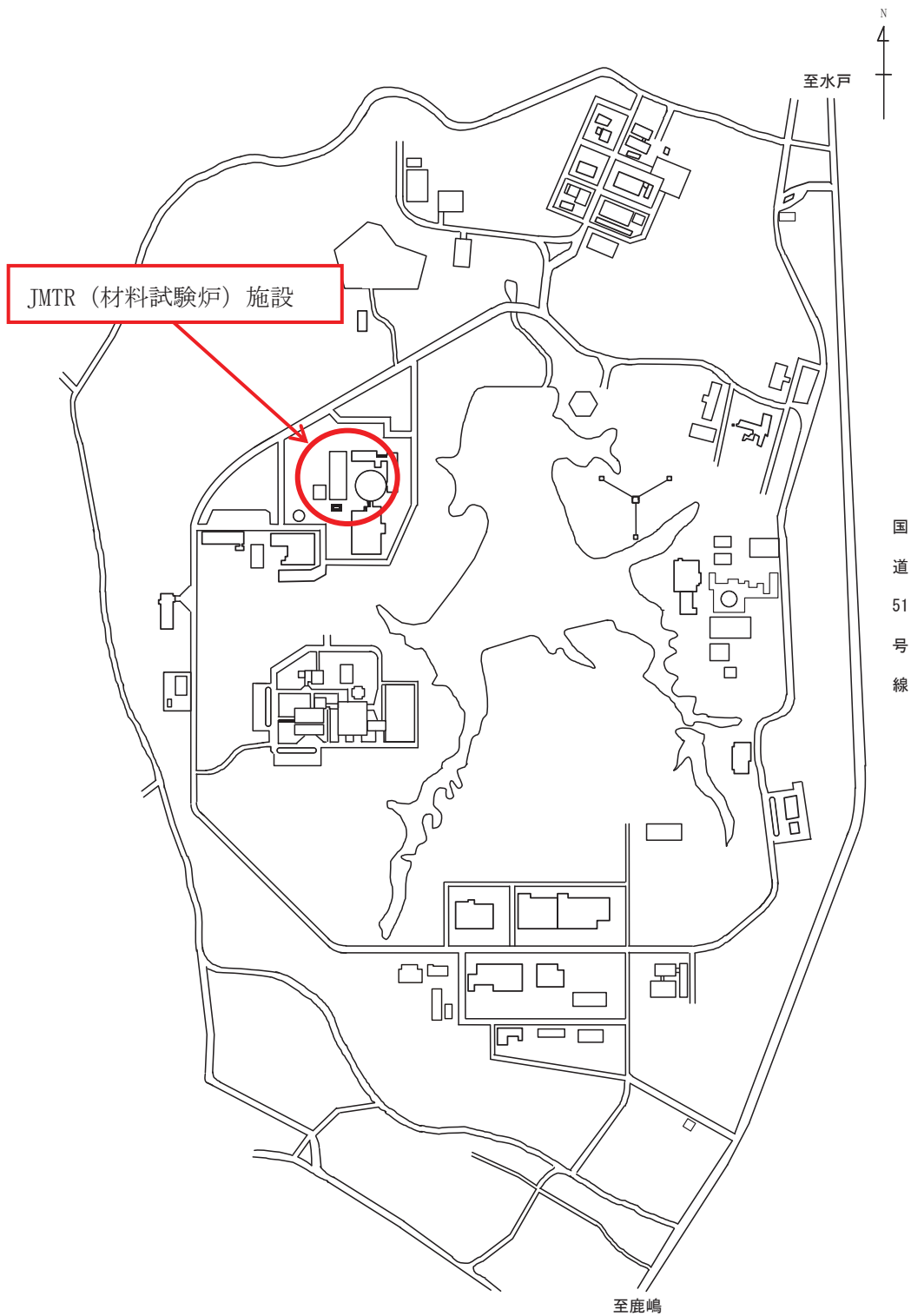


図1 大洗研究開発センター施設配置図

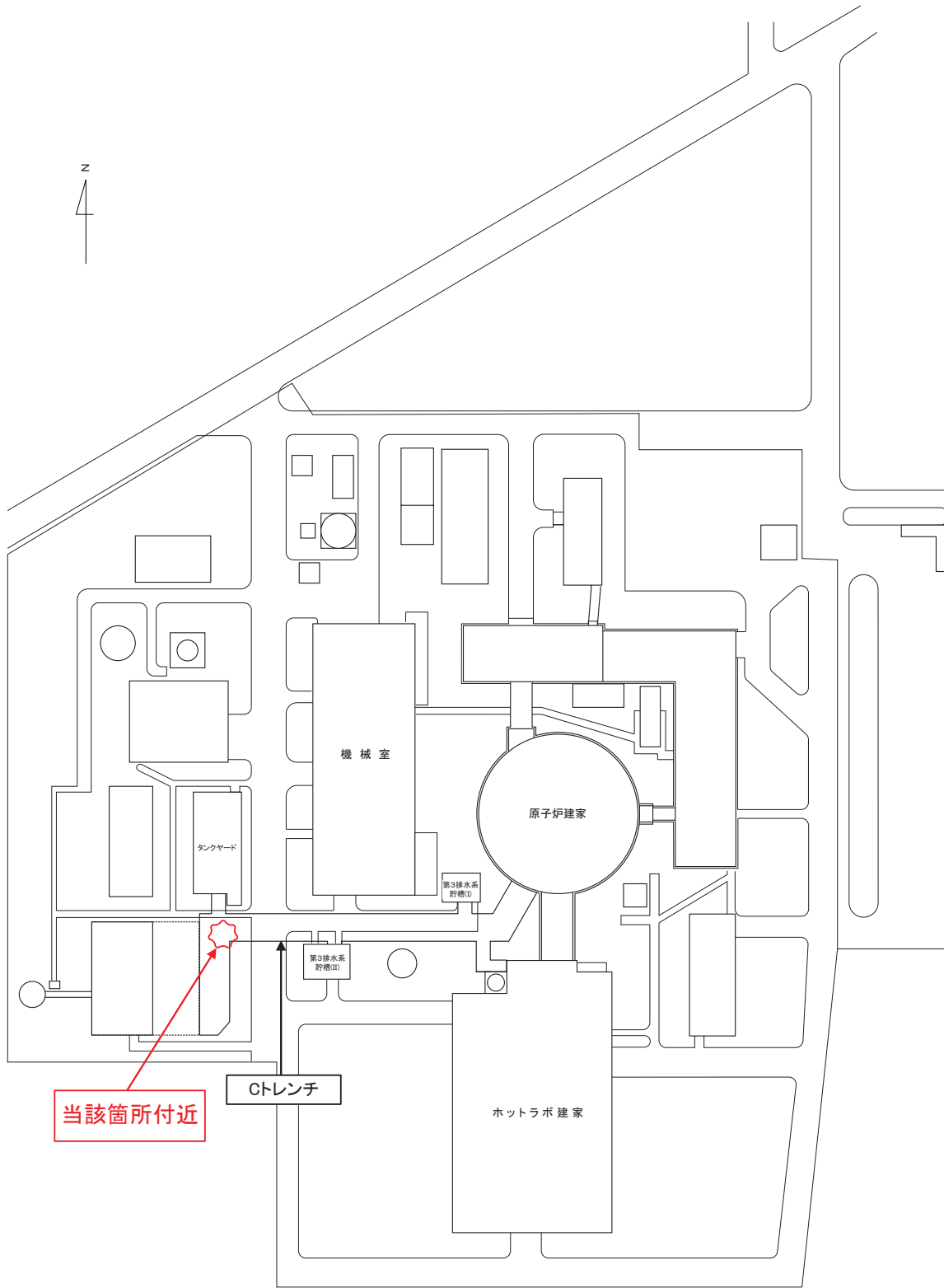
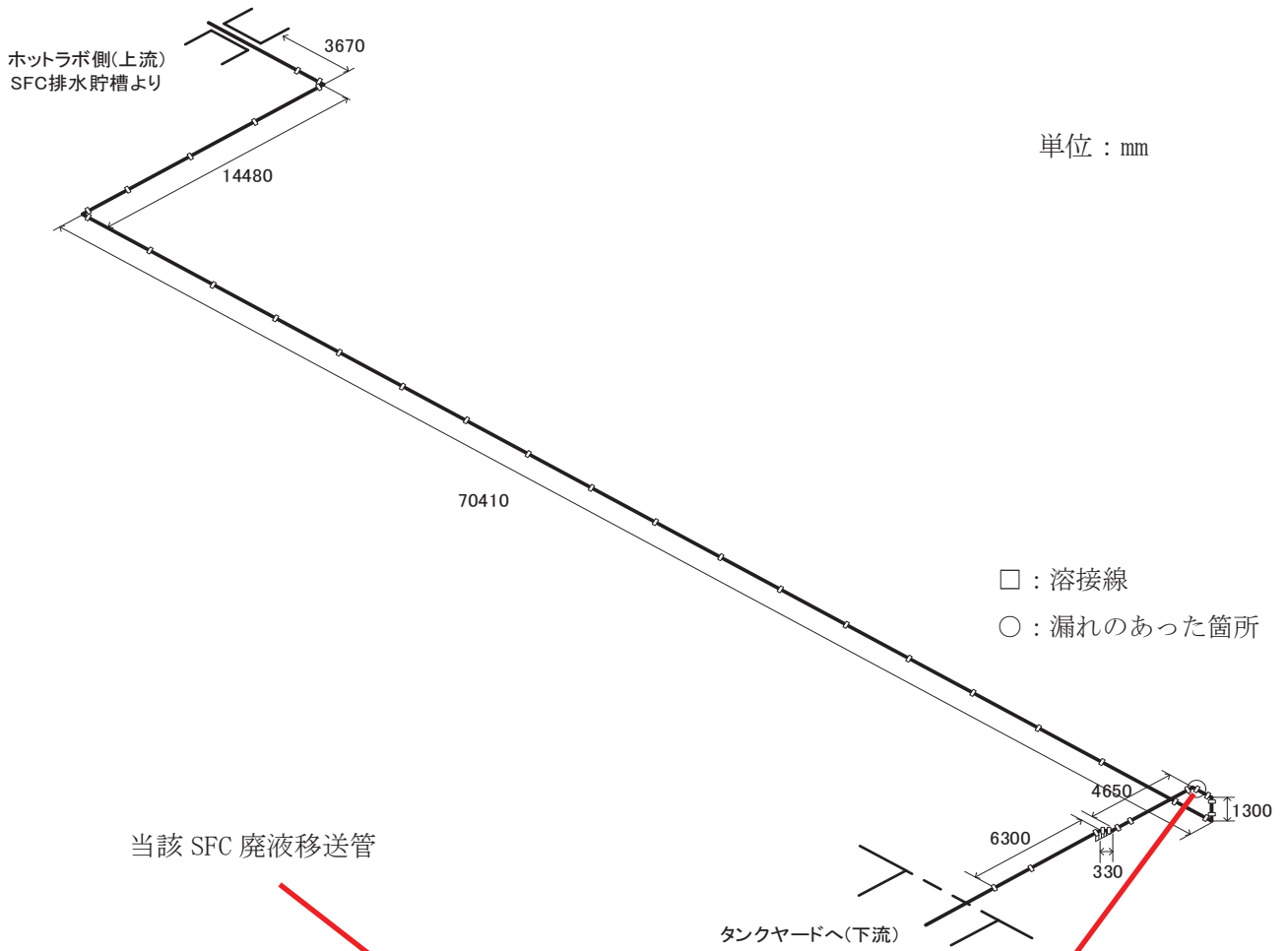


図2 JMTR 施設全体配置図

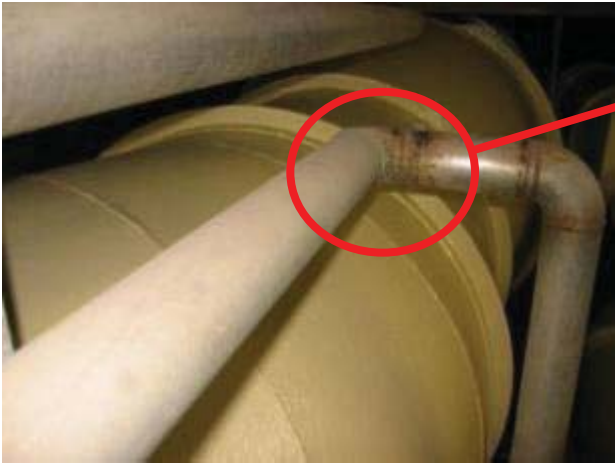


C トレンチ内外観

図 3 SFC 廃液移送管概要図



にじみがあった箇所



にじみがあった箇所の拡大

廃液移送管部付近



C トレンチ内部

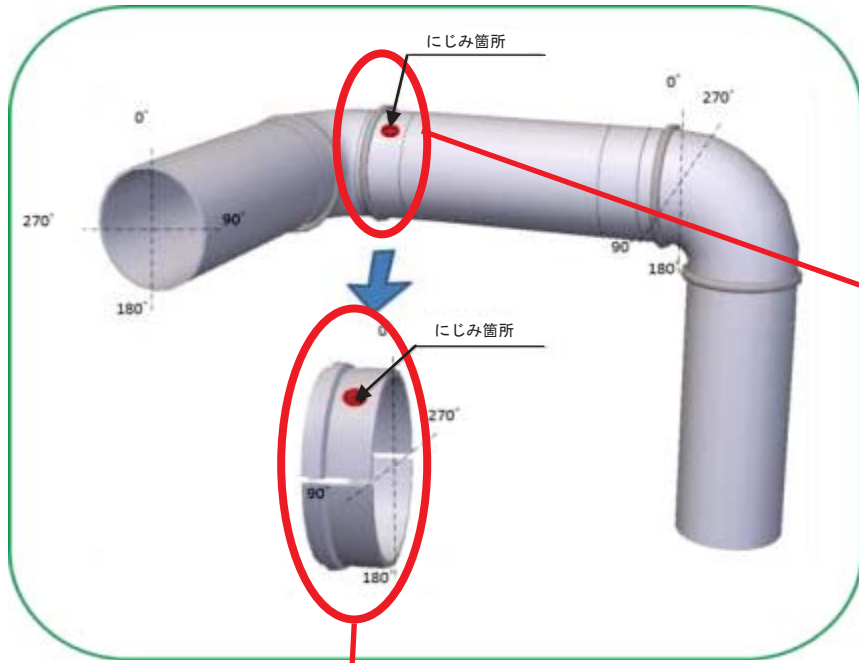
図 4 SFC 廃液移送管の状況



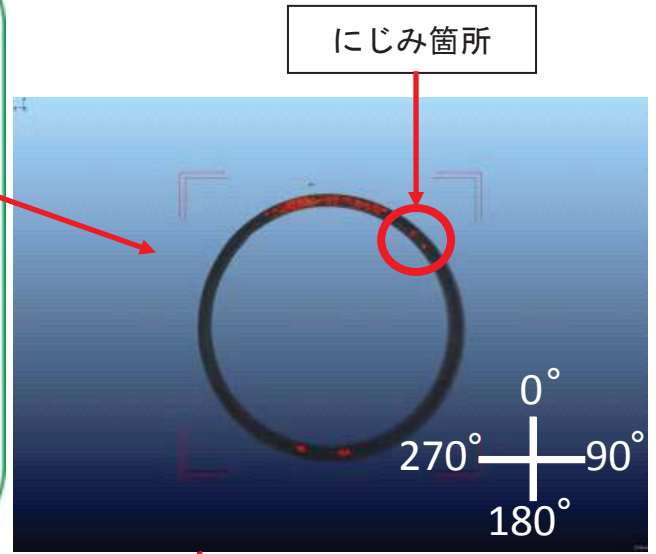
測定箇所	測定線種 (核種)	表面密度(Bq/cm <sup>2</sup> )※	放射線測定器
①②	$\beta$ ( $\gamma$ )	検出下限値未満 (検出下限値 : $2.7 \times 10^{-1}$ )	GM 表面汚染検査計 SB-337L
	$^{60}\text{Co}$	検出下限値未満 (検出下限値 : $1.4 \times 10^{-1}$ )	$\gamma$ 線波高分析装置 SEIKO EG&G 製 GEM Ge(Li)
	$^{137}\text{Cs}$	検出下限値未満 (検出下限値 : $1.4 \times 10^{-1}$ )	$\gamma$ 線波高分析装置 SEIKO EG&G 製 GEM Ge(Li)
①	$^3\text{H}$	検出下限値未満 (検出下限値 : $4.7 \times 10^{-1}$ )	液体シンチレーションカウンタ LSC-7200
②		検出下限値未満 (検出下限値 : $5.6 \times 10^{-1}$ )	

※測定日 : 平成 24 年 10 月 19 日

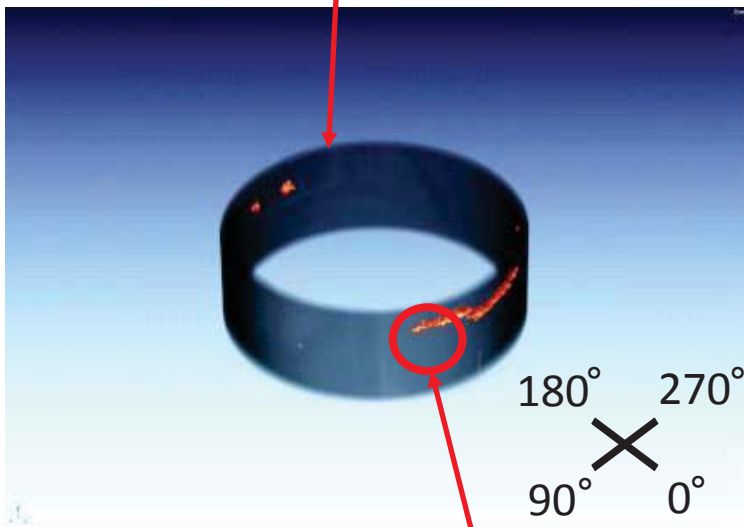
図 5 測定箇所及び測定結果



切り出した配管



にじみ付近の断面画像



三次元的に示したもの

にじみ箇所

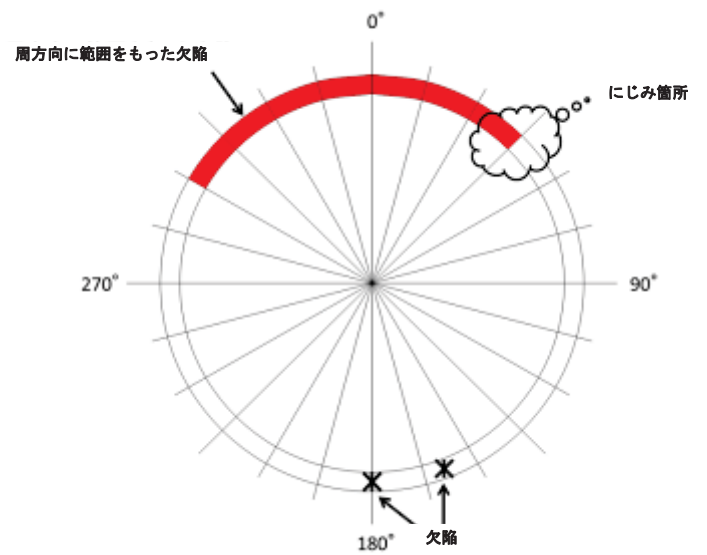


図6 X線CT撮影(コンピュータ断層撮影)結果

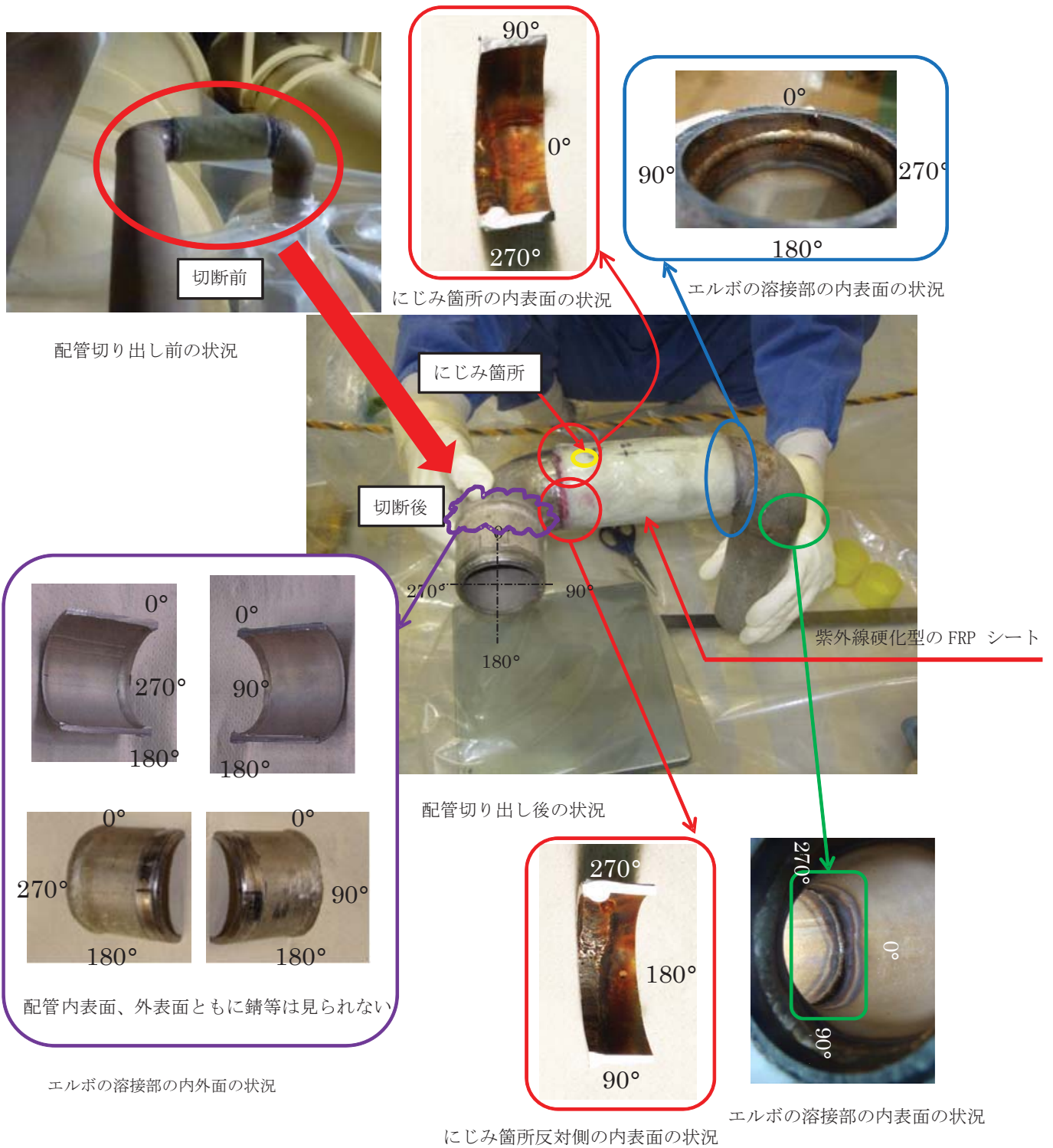


図7 にじみを確認した配管部分を切り出した後の状況



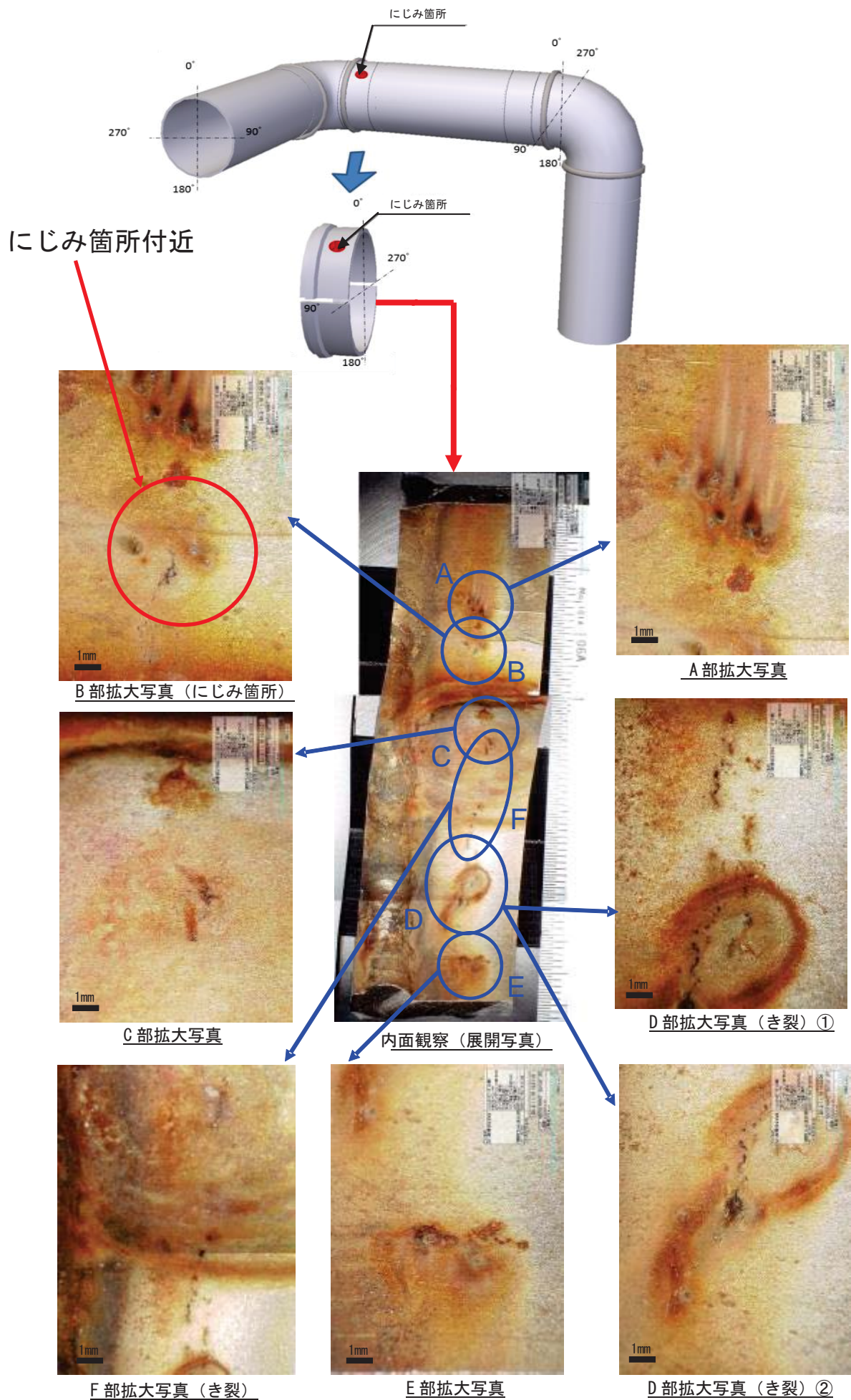


図8 にじみを確認した部分の内表面の状況

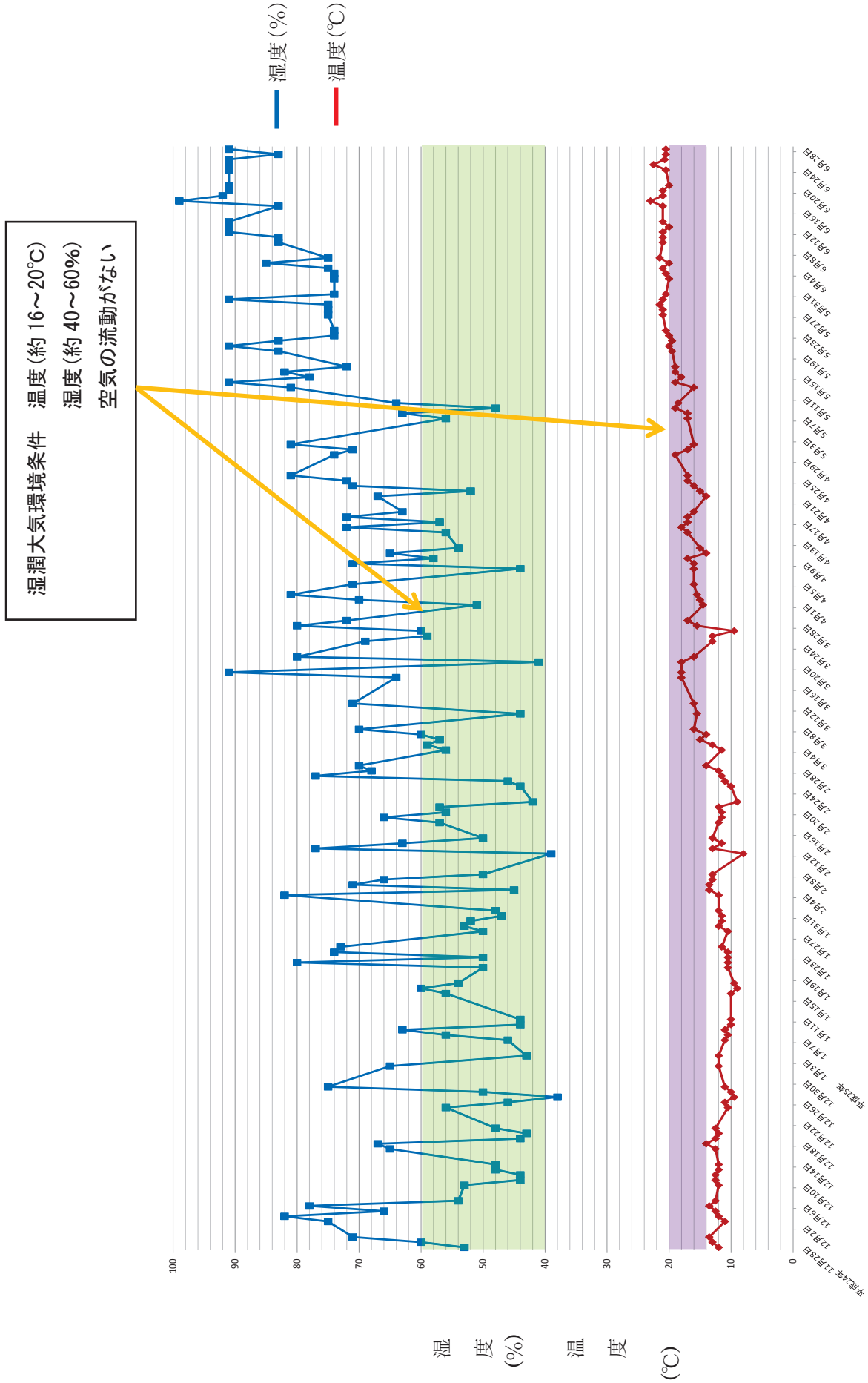


図9 Cトレンチ内の温度及び湿度

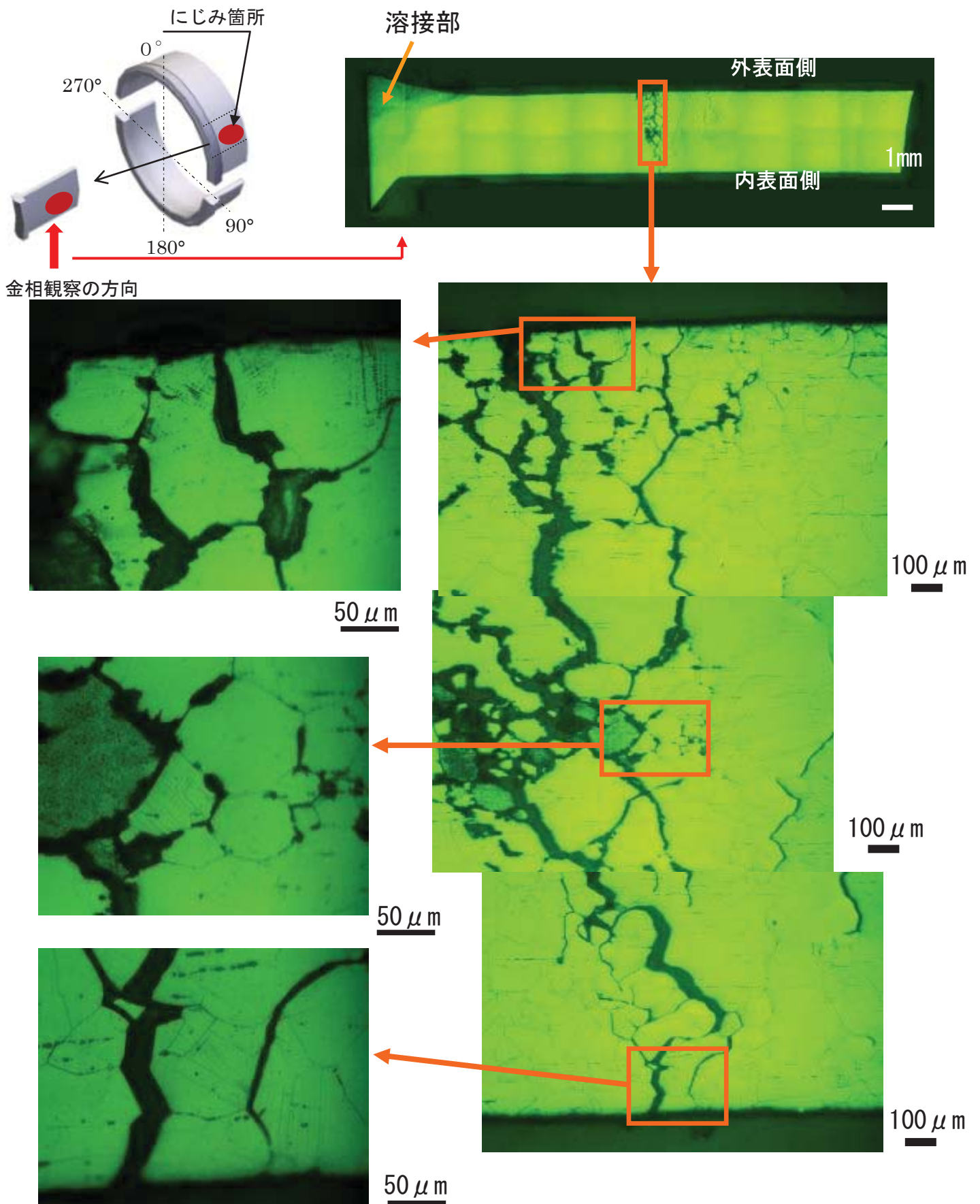
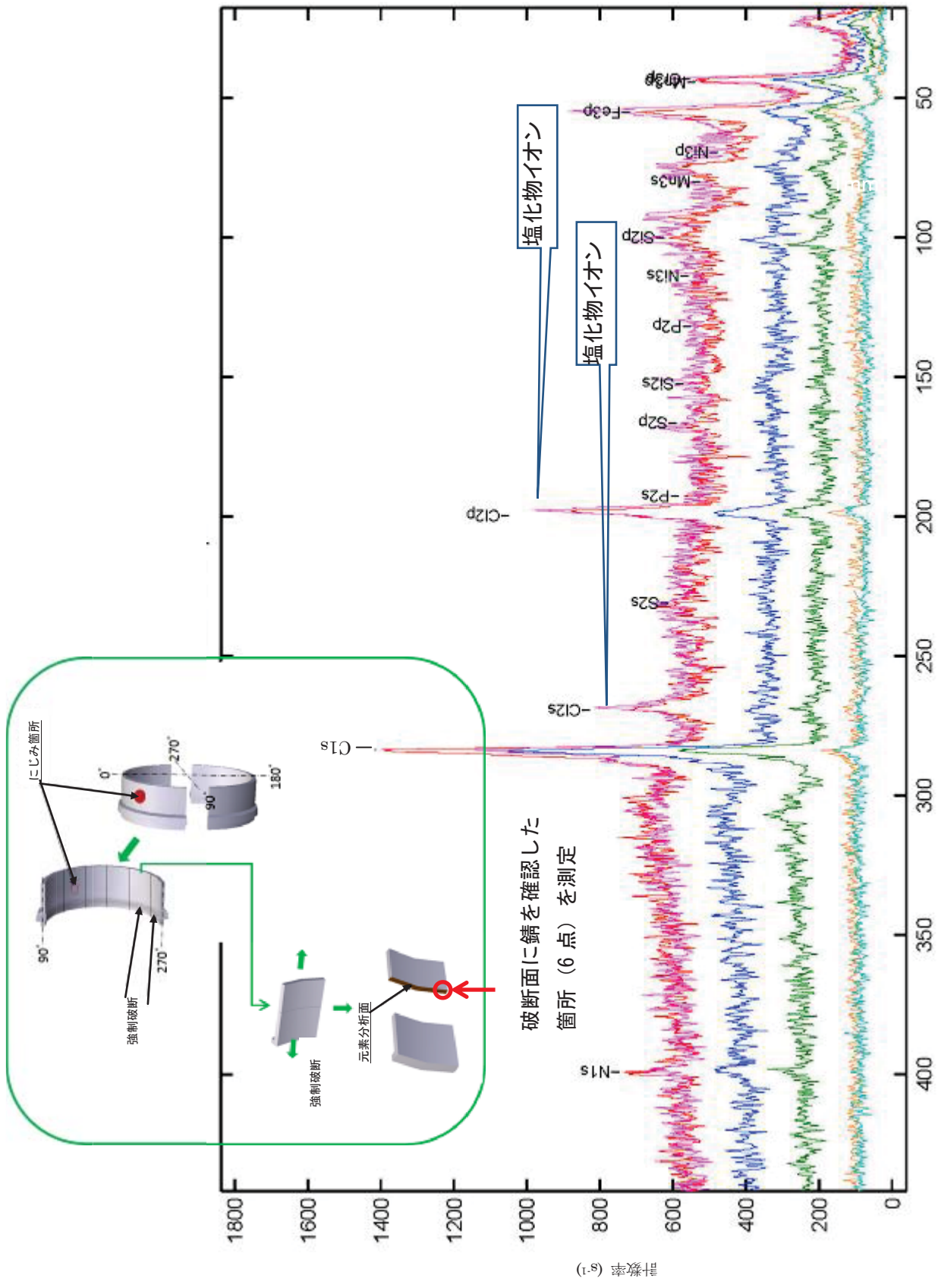


図 10 にじみ箇所の金相試験結果





図 11 にじみ箇所近傍の強制破断後の破面観察結果



結合エネルギー (eV)

図 12 粒界割れ破面の元素分析結果

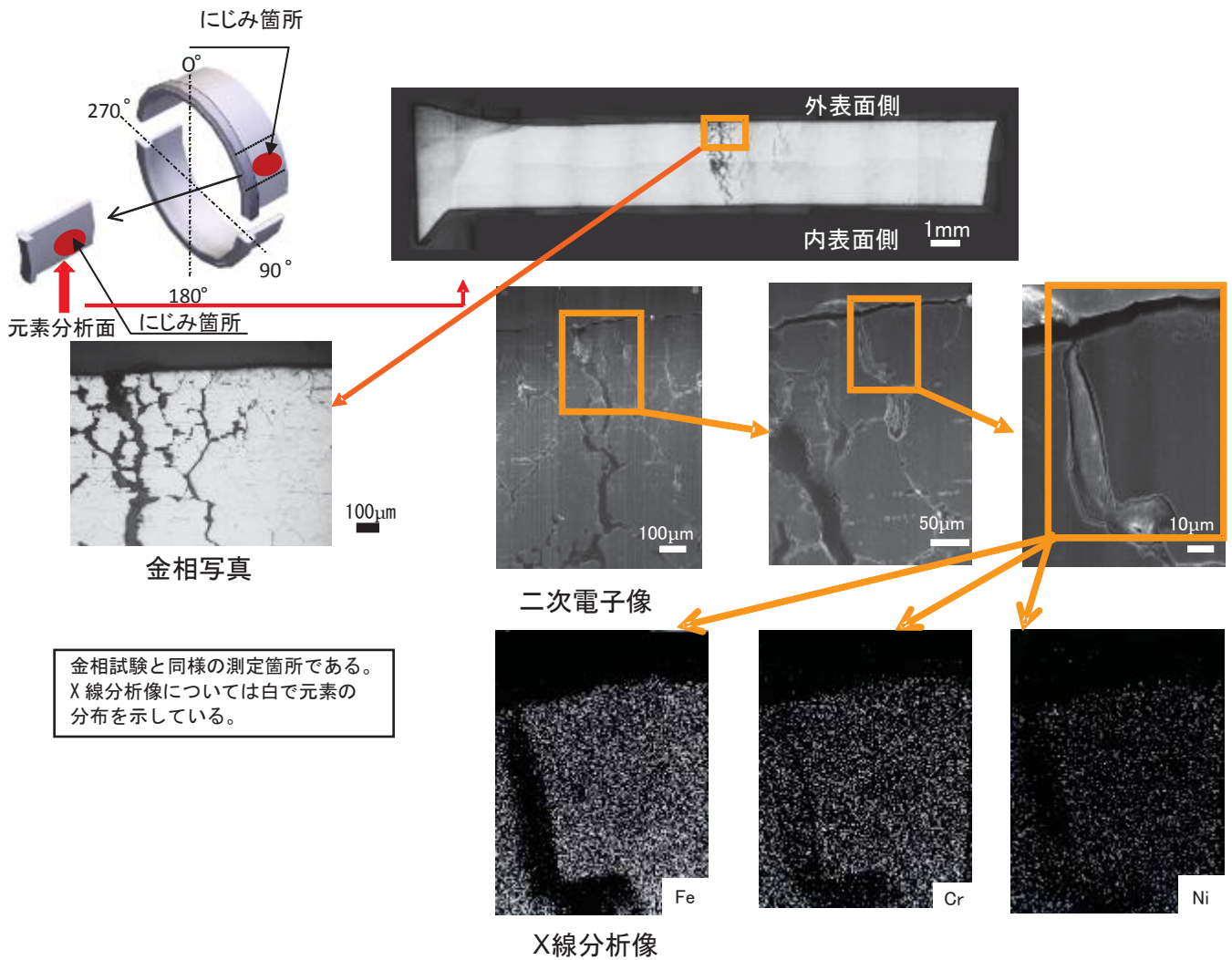


図13 電子線マイクロアナリシス装置による元素分析結果（にじみ箇所外面側）



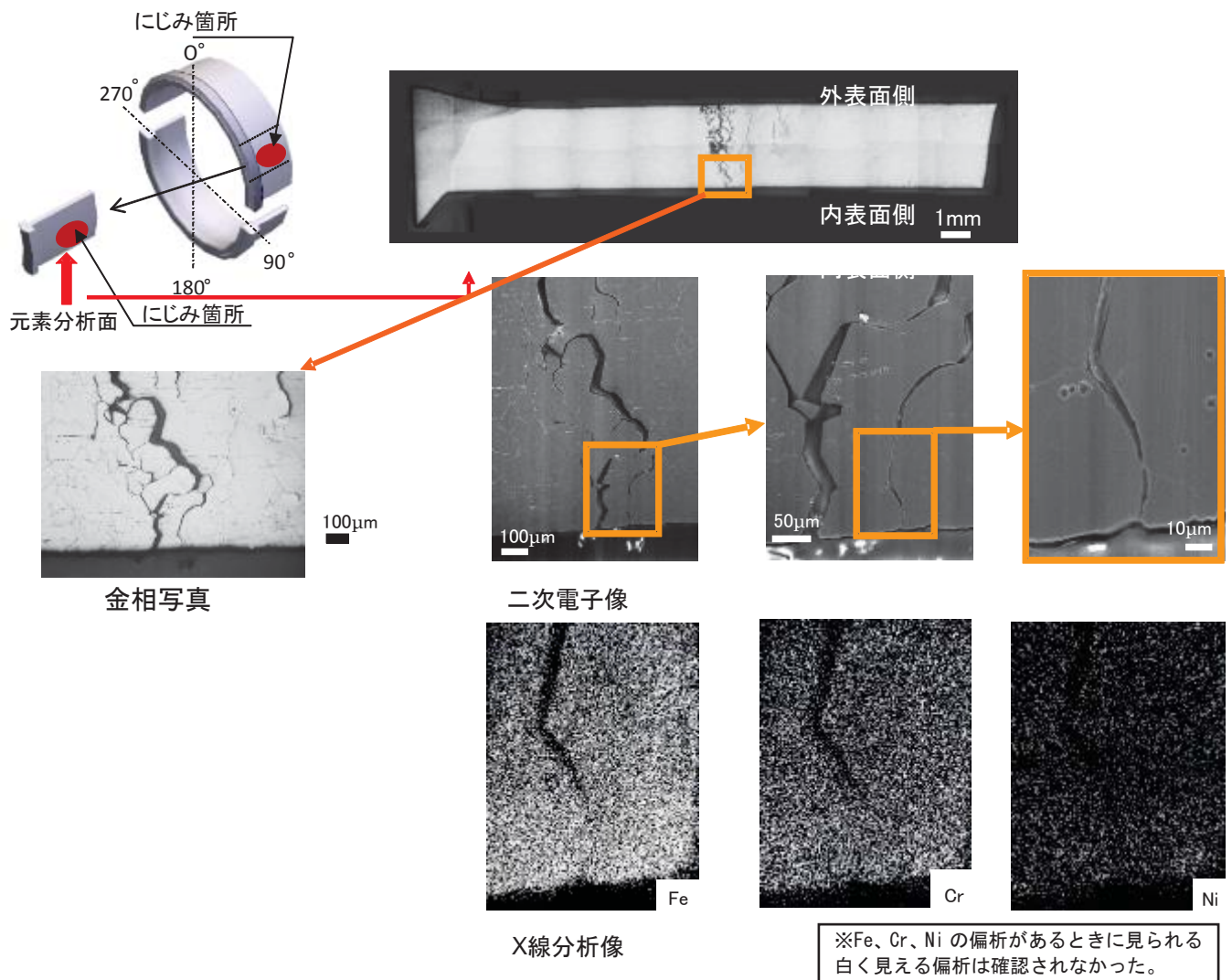
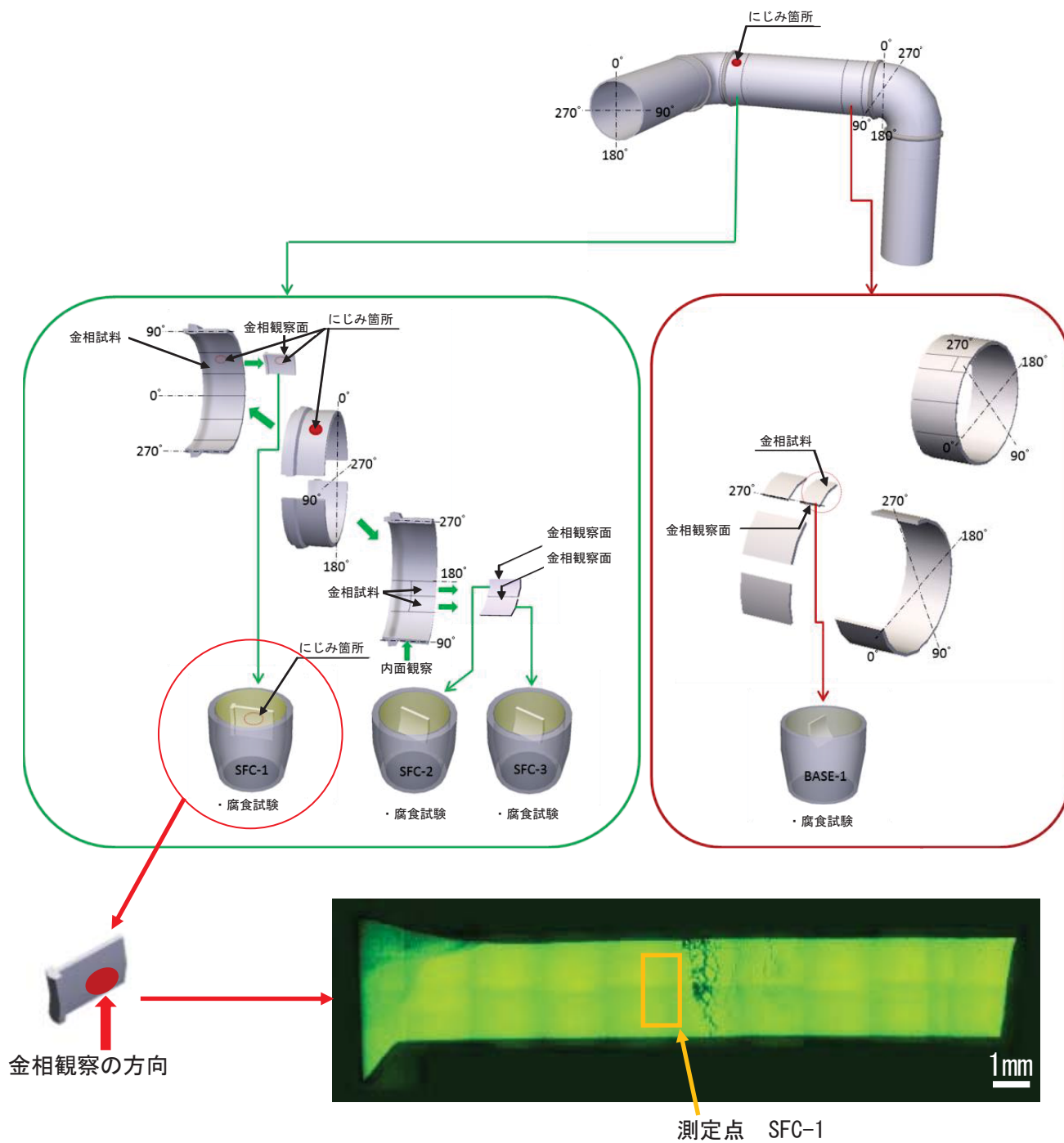


図14 電子線マイクロアナリシス装置による元素分析結果 (にじみ箇所内面側)



測定点	測定箇所	再活性化率(%)
SFC-1	にじみ箇所の近傍	1.556
SFC-2		5.519
SFC-3		2.072
BASE-1	にじみ箇所の同一配管の反対側の溶接部近傍	0.357

図 15 鋭敏化の測定結果

発生事象	異常発生の原因		要因の概要	調査項目	調査結果	判定
SFC廃液移送管からの にじみ確認	1) 据付け・施工	配管材質不良	設計・製作に基づき施工において、配管の材料が設計仕様と異なると、強度不足や異物の混入が懸念され、欠陥等が発生する可能性。	材料成分	配管の材料がJIS規格のSUS304材の要求事項を満足していることを確認するため、切り出した配管の一部について材料分析を行った。その結果、使用材料はJIS規格のSUS304材の要求事項を満足していることを確認した。	×
		溶接施工不良	溶接条件の不適切管理により、過度な入熱が発生し、残留応力や溶接熱影響部にCr欠乏層が発生し、耐食性が低下する現象(鋭敏化)によって、腐食及び割れが発生する可能性。	外観観察 溶接条件 (鋭敏化度測定)※1	外観観察の結果、にじみを確認した溶接部近傍の外表面部分には変色が見られ、にじみ箇所周辺を含む周方向全体に斑点が観察された。配管内面については、溶接裏波に沿って帯状の腐食生成物が広がり、その外側輪郭に沿って、不連続の点状の割れ及び連続した割れを確認した。また、溶接条件については、外観観察から溶接施工時に過度な入熱があった場合に見られる溶接裏波の溶けだれが確認された。鋭敏化度を測定した結果、溶接の熱影響部は鋭敏化していることが確認された。	○
		不適切な据付け	据付け時の無理な位置合わせのため過大な応力が生じ、割れが発生する可能性。	外観観察	当該配管に変形はなく、位置合わせを行った場合に見られるずれなどは確認されなかった。	×
		外的損傷	施工時の物理的衝撃により表面損傷を受けて腐食が発生する可能性。	外観観察 (非破壊検査)※2	当該配管の外表面にはへこみ等はなく、物理的衝撃を受けた場合に見られる打痕や傷は確認されなかった。	×
	2) 使用環境	使用状況	ポンプ吐出圧力による振動で疲労を引き起こし、割れが発生する可能性。	運転記録等	運転記録から廃液の送水頻度は年に数回程度であり、運転時のポンプ吐出圧力は0.27MPa程度であり、設計値(0.3MPa)未満で管理されていることを確認し、SFC排水ポンプの年次点検の記録から、試験運転時における目視及び触診において異常な振動が発生していなかったことを確認した。	×
		外部環境	海岸付近からの飛散による海塩粒子等の配管外表面への付着及び湿潤大気環境により応力腐食割れが発生する可能性。	OTレンチ内の温度、湿度 表面付着塩類の測定	OTレンチ内の温度、湿度を調査した結果、湿潤大気環境(温度:16~20℃、湿度:40~60%、空気の流動がない。)であることを確認した。また、当該配管外表面への海塩粒子の付着の有無については、配管外表面に塩化物イオンが検出されたため、海塩粒子が付着していることを確認した。以上から、応力腐食割れが起こりやすい環境となっていた。	○
		内部環境	腐食性の高い廃液が配管内に長期間滞留していると、配管内から腐食が発生する可能性。	配管内雰囲気 水質検査	配管内雰囲気については、当該配管内には常時、廃液で満たされており、これまでの運転記録を確認した結果、最長で1年間滞留していた。廃液の水質検査を実施した結果、純水とほぼ同じであり、腐食性の高いものではないことを確認した。なお、当該配管を流れる廃液は、SFCプール、No.3カナルの水(純水)のオーバーフロー水、機器ドレン水(純水)等であり、廃液の温度は、常温(夏期約25℃、冬期約12℃)であった。	×
	3) 腐食	全面腐食	耐食性を持つ薄い酸化膜(不動態皮膜)が形成しにくい環境(pH、温度)により、表面が均一に腐食する可能性。	外観観察	当該配管に局部的な錆は見られたが、全面腐食の場合に見られる外表面及び内表面に均一に錆が発生していないことを確認した。	×
		粒界腐食	溶接熱影響により溶接部近傍が鋭敏化して粒界の耐食性が低下し、粒界の優先的な腐食が発生する可能性。	金相試験 (水質検査)※3 (元素分析)※4 (鋭敏化度測定)※1	欠陥部の金属組織は、粒界腐食の場合に見られる粒界に沿った腐食の形状ではなく、粒界を進展する細かいき裂(2次き裂)を含む割れであった。	×
		すきま腐食	配管内面への付着物及び堆積物により生じるすきま部分とすきまのない部分との間に電位差が生じることによりインク壺状の腐食が発生する可能性。	外観観察 金相試験 (水質検査)※3 (元素分析)※4 (電気化学測定)※5	外観観察の結果、配管内に付着物や堆積物は見られなかった。金相試験の結果、結晶粒界を進展する細かいき裂(2次き裂)を含む割れは確認したが、すきま腐食又は微生物誘起腐食に特有のインク壺状の腐食形態は確認されなかった。	×
		孔食	塩化物イオンがある環境下において、塩化物イオンの濃縮が起こり、特に溶接部等で局部的に小さな孔のような腐食が発生する可能性。	外観観察 金相試験 (水質検査)※3 (元素分析)※4	外観観察の結果、配管外表面のにじみ箇所周辺を含む周方向全体に斑点が観察され、配管内表面の溶接裏波に沿った帯状の腐食生成物の外側輪郭に沿って、不連続の点状の割れ及び連続した割れが観察されたが、金相試験の結果からは、粒界を進展する細かいき裂(2次き裂)を含む割れは確認したが、孔食に特有の小さな孔のような腐食形態は確認されなかった。	×
		微生物誘起腐食	配管内に腐食を起こす微生物を含む廃液が長期間滞留することによりインク壺状の腐食が発生する可能性。	外観観察 金相試験 (水質検査)※3 (元素分析)※4 (電気化学測定)※5	外観観察の結果、配管内に付着物や堆積物は見られなかった。金相試験の結果、結晶粒界を進展する細かいき裂(2次き裂)を含む割れは確認したが、すきま腐食又は微生物誘起腐食に特有のインク壺状の腐食形態は見られなかった。	×
		水滴落下 もらい錆	配管表面に付着物や錆が認められる場合、当該配管の上部から落下する水滴や錆の付着により腐食が発生する可能性。	外観観察	外観観察から当該配管の表面に錆は見られたが、当該配管の上部に配管等はなく、上部から水滴や錆は落下した痕跡はなかった。	×
		異種金属接触腐食	配管に他の金属が接触することにより、腐食が発生する可能性。	外観観察	当該配管に他の金属は接触していないことを確認した。	×
		流れ加速型腐食	流体が継続的かつ高流速で流れる配管に起きる腐食。材料、流体の流れ(流速)、環境(流体の温度等)の因子が重なり合って生じ、腐食と物理作用の相乗効果による減肉が生じる可能性。	外観観察	外観観察から配管内表面が減肉していないことを確認した。	×
		エロージョン コロージョン (摩耗腐食)	流体が継続的かつ高流速で流れる配管に起きる腐食。流体及び砂などの固体粒子が管壁に衝突することで配管が損耗する可能性。	外観観察	外観観察から配管内表面が損耗していないことを確認した。	×
		キャビテーション エロージョン (キャビテーション損傷)	流体が継続的かつ高流速で流れる配管に起きる腐食。流体中に発生する圧力差によって発生・圧潰する気泡が強い圧力波を生じることにより配管が損耗する可能性。	外観観察	外観観察から配管内表面が損耗していないことを確認した。	×
	4) 割れ	応力腐食割れ	応力がかかった状態において、温度、湿度、塩化物イオン濃度が高いなどの環境下にあると腐食が発生する可能性。	金相試験 元素分析 鋭敏化度測定 残留応力評価	金相試験の結果、応力腐食割れ特有の結晶粒界を進展する細かいき裂(2次き裂)を含む粒界割れを確認した。また、配管外表面の元素分析の結果、塩化物イオンが確認された。溶接部の鋭敏化度測定を行った結果、鋭敏化しているのが確認された。残留応力の解析を行った結果、欠陥部近傍に引張残留応力が確認された。以上から、当該事象は応力腐食割れである。なお、OTレンチは湿潤大気環境であり、この環境が作用した結果、当該配管は、湿潤大気応力腐食割れである。	○
		水素脆化割れ	高温での使用及び応力発生下において材料から発生した水素が材料内に侵入して水素脆化割れが発生する可能性。	運転記録等	配管内の廃液の温度は常温であり、水素脆化割れが生じるような水素の発生する可能性のある高温になっていないことを確認した。	×
		腐食疲労	温度、湿度、塩化物イオン濃度が高いなどの環境下でポンプの断続的な運転などにより繰返し応力を受けると、腐食部分の強度低下が起こり割れ等が発生する可能性。割れた断面にストライエーション(疲労破壊時に現れる縞状の模様)が見られる。	運転記録等 金相試験	運転記録を確認した結果、廃液の送水頻度は、年に数回程度であり、運転時のポンプ吐出圧力は0.27MPa程度であり、設計値(0.3MPa)未満で管理されていることを確認した。また、SFC排水ポンプの年次点検記録から、異常な振動が発生していなかったことも確認した。金相試験の結果、結晶粒界を進展する細かいき裂(2次き裂)を含む割れは確認したが、腐食疲労に特徴的なストライエーション(疲労破壊時に現れる縞状の模様)は見られなかった。	×

※1 溶接時の過度な入熱があった場合に実施。  
 ※2 外表面にへこみ等を確認した場合に実施。  
 ※3 腐食の形態が確認された場合に実施。  
 ※4 配管内外表面に付着物等がある場合に実施。  
 ※5 すきま腐食及び微生物腐食に特徴的な形状であるインク壺状が確認された場合に実施。

○：可能性高い  
 ×：可能性低い又はない

図 16 SFC 廃液移送管のにじみ発生の要因分析

## SFC 系廃樹脂移送配管からの漏えいについて

1. 発生日時 平成 25 年 4 月 16 日（火） 10 時 08 分頃

2. 発生場所 JMTR 施設 C トレンチ内（一時管理区域）

### 3. 発生状況

独立行政法人日本原子力研究開発機構大洗研究開発センターに設置されている材料試験炉（以下「JMTR」という。）施設（図 1 参照）においては、平成 24 年 10 月 25 日及び 11 月 9 日に確認した 2 件の法令報告事象（SFC 廃液移送管及び第 4 排水系配管）に関連して、SFC 系廃樹脂移送配管を含む JMTR 施設の C トレンチ内に敷設されている廃液配管（13 本）について、それらの使用を中止し、湿潤大気応力腐食割れが発生していないかどうかの確認及び配管内の廃液の状況（スラッジが堆積しやすい廃液かどうか）の確認を実施してきた。

その後、健全性を確認した廃液配管から順次、通水試験を開始し、平成 25 年 4 月 15 日までに、13 本中 7 本の廃液配管の通水試験を完了し、平成 25 年 4 月 16 日に SFC 系廃樹脂移送配管の通水試験を実施したところ 4 箇所の漏えいを確認したため、通水試験を中止し、原因調査を開始した。

参考までに、配管から漏えいした廃液中に含まれていた放射性物質の量は、液体シンチレーションカウンタで測定した結果、トリチウムが約 100Bq/cm<sup>3</sup> 検出された。その他の放射性核種については、 $\gamma$  線波高分析装置及びゲルマニウム半導体検出器で測定した結果、検出下限値未満であった（表 1 参照）。

また、今回の通水に使用した SFC プール水中に含まれている放射性物質の量を液体シンチレーションカウンタで測定した結果、トリチウムが約 110Bq/cm<sup>3</sup> 検出された。その他の放射性核種については、 $\gamma$  線波高分析装置及びゲルマニウム半導体検出器で測定した結果、検出下限値未満であった（表 1 参照）。

時系列を表 2 に示す。

### 4. 環境への影響

モニタリングポストの指示値に変動はなかったことから、本事象による環境への影響はなかった。



## 5. C トレンチ内 SFC 系廃樹脂移送配管の概要

当該配管は、昭和 43 年に敷設した総延長約 63m、外径 89.1mm、肉厚 4.0mm のステンレス鋼(SUS27(現在の JIS 規格では SUS304 に相当))製で、SFC 循環系統から原子炉建家外の C トレンチを通り、使用済イオン交換樹脂を貯蔵する第 3 排水貯槽(Ⅰ)、(Ⅱ)まで敷設されている。

当該配管からの廃液は、平成元年 11 月に使用済イオン交換樹脂の貯蔵を増強するため、増設された第 3 排水系貯槽(Ⅱ)に送水される。なお、第 3 排水貯槽(Ⅰ)は常時、廃液等が流入しないように弁を閉止している。

当該配管を流れる廃液の温度は常温(夏期約 25℃、冬期約 12℃)であり、廃液送水後も配管内に廃液が滞留する構造になっている。廃液の送水頻度は、2~3 年に 1 回である(表 3 参照)。

なお、C トレンチは、地下(床面が地下約 5m の位置)に設置された長さ約 100m、幅約 4.0m、高さ約 4.3m の断面が四角形をしたトンネル状のコンクリート構造である。

## 6. 原因調査

現在、漏えいが発生した 4 箇所の配管部分を切り出し、腐食又は割れの形態の調査を行うとともに、当該配管の据付け・施工時、使用環境の調査等を実施している。

切り出した 4 箇所の配管部分については、外観観察及び X 線 CT 撮影を行い、図 2 に示す漏えい箇所 1 の割れ部分の破面観察(図 7 参照)及び漏えい箇所 2 の割れ部分の金相試験(図 8 参照)を実施した。これまでの調査状況は次のとおり。

外観観察及び X 線 CT 撮影の結果から、4 箇所の配管部分の漏えい箇所には割れがあることを確認した(図 3~6 参照)。

漏えい箇所 1 の割れ部分を強制破断させ破面観察を実施した結果、図 7 に示すように破断面には明瞭な結晶粒の粒界破壊があり、粒界割れの様相を呈していることを確認した。

漏えい箇所 2 の割れ部分について、割れの形態を詳細に確認するため、割れ部分の強制破断は行わずに割れ部分が観察できるように切り出し、試料調整(樹脂による固定、研磨)を行い、金相試験として、結晶組織の観察を行った結果、図 8 に示すように配管の母材を貫通した割れが観察され、その割れは結晶粒に沿った割れとなっており、粒界割れであることを確認した。

また、使用環境に関しては、運転記録から廃液の送水頻度は 2~3 年に 1 回程度であること、年次点検の記録から、ポンプの運転時の吐出圧力は、0.28MPa であり、設計値(0.3MPa)の範囲内であり、ポンプの運転時の当該配管に加わる振動も、5 $\mu$ m 以下であり、JIS 規格\*による振動の判断基準(55 $\mu$ m 未満)を満足しており、疲労割れが発生する状況ではないことを確認した。また、内部環境については、配管内は廃液で満たされているが、腐食性の要因(高温水、低 pH、残留塩素等)は確認されず、配管内からの腐食は起こりに

くい環境であること、外部環境については、C トレンチ内の温度、湿度を測定した結果、湿潤大気環境（温度：16～20℃、湿度：40～60%、空気の流動がない。）であること、JIS規格に基づく表面付着塩類測定の結果、当該配管表面に海塩粒子が付着していることを確認した。

※ JIS B 8301：2000（遠心ポンプ、斜流ポンプ及び軸流ポンプ-試験方法）の附属書（参考）自吸ポンプの自吸性能試験方法による。

## 7. 今後の調査

今後は、引き続き、切り出した配管の破面観察、金相試験等を実施していく。なお、これまでの調査状況は図9のとおり。

## 添付図表

表 1 測定結果

表 2 時系列

表 3 SFC 系廃樹脂移送配管の運転履歴

図 1 JMTR 施設全体配置図

図 2 SFC 系廃樹脂移送配管の漏えい箇所

図 3 漏えい箇所 1 の外観及び X 線 CT 撮影の画像

図 4 漏えい箇所 2 の外観及び X 線 CT 撮影の画像

図 5 漏えい箇所 3 の外観及び X 線 CT 撮影の画像

図 6 漏えい箇所 4 の外観及び X 線 CT 撮影の画像

図 7 漏えい箇所 1 の強制破断後の破面写真

図 8 金相試験結果 (漏えい箇所 2)

図 9 SFC 系廃樹脂移送配管の漏えい発生の要因分析

表1 測定結果

測定対象	放射性核種	放射能濃度 (Bq/cm <sup>3</sup> ) ※	放射線測定器
SFC系廃樹脂 移送配管 漏えい水	<sup>60</sup> Co	検出下限値未満 (検出下限値 : $7.4 \times 10^{-3}$ )	γ線波高分析装置 ゲルマニウム半導体検出器 型式 GEM-15190
	<sup>134</sup> Cs	検出下限値未満 (検出下限値 : $8.0 \times 10^{-3}$ )	γ線波高分析装置 ゲルマニウム半導体検出器 型式 GEM-15190
	<sup>137</sup> Cs	検出下限値未満 (検出下限値 : $9.7 \times 10^{-3}$ )	γ線波高分析装置 ゲルマニウム半導体検出器 型式 GEM-15190
	<sup>3</sup> H	$1.0 \times 10^2$ (検出下限値 : $1.2 \times 10^{-1}$ )	液体シンチレーションカウンタ 型式 LSC-7200
SFC プール水	<sup>60</sup> Co	検出下限値未満 (検出下限値 : $6.0 \times 10^{-3}$ )	γ線波高分析装置 ゲルマニウム半導体検出器 型式 GMX-25200-P
	<sup>134</sup> Cs	検出下限値未満 (検出下限値 : $5.7 \times 10^{-3}$ )	γ線波高分析装置 ゲルマニウム半導体検出器 型式 GMX-25200-P
	<sup>137</sup> Cs	検出下限値未満 (検出下限値 : $5.9 \times 10^{-3}$ )	γ線波高分析装置 ゲルマニウム半導体検出器 型式 GMX-25200-P
	<sup>3</sup> H	$1.1 \times 10^2$ (検出下限値 : $1.2 \times 10^{-1}$ )	液体シンチレーションカウンタ 型式 LSC-7200

※測定日：平成25年4月16日

表 2 時系列

時間	内容
10 : 07	SFC 系廃樹脂移送配管の通水開始 (循環ポンプ起動)
10 : 08	SFC 系廃樹脂移送配管 (C トレンチ内) から漏えい確認 (1 箇所目)
10 : 08	循環ポンプ停止
10 : 20	養生したビニール袋をサーベイした結果、異常なし
10 : 28	SFC 系廃樹脂移送配管 (C トレンチ内) から漏えい確認 (2 箇所目)
10 : 36	SFC 系廃樹脂移送配管 (C トレンチ内) から漏えい確認 (3 箇所目)
10 : 50	SFC 系廃樹脂移送配管 (C トレンチ内) の全ての溶接部の確認完了 (3 箇所以外の漏えいなし)
11 : 37	水抜き開始
12 : 27	水抜き完了
14 : 18	SFC 系廃樹脂移送配管 (C トレンチ内) から漏えい確認 (4 箇所目)
15 : 40	SFC 系廃樹脂移送配管の再確認 (他は異常なし)

(平成 25 年 4 月 16 日)

表3 SFC系廃樹脂移送配管の運転履歴

受入日	受入量(m <sup>3</sup> )
平成 4年 12月 21日	7.0
平成 5年 1月 6日	13.0
平成 9年 6月 26日	7.6
平成 15年 5月 14日	9.3
平成 15年 5月 21日	3.5
平成 18年 4月 7日	6.4
平成 18年 4月 11日	14.0
平成 20年 2月 13日	16.9
平成 20年 2月 14日	6.4

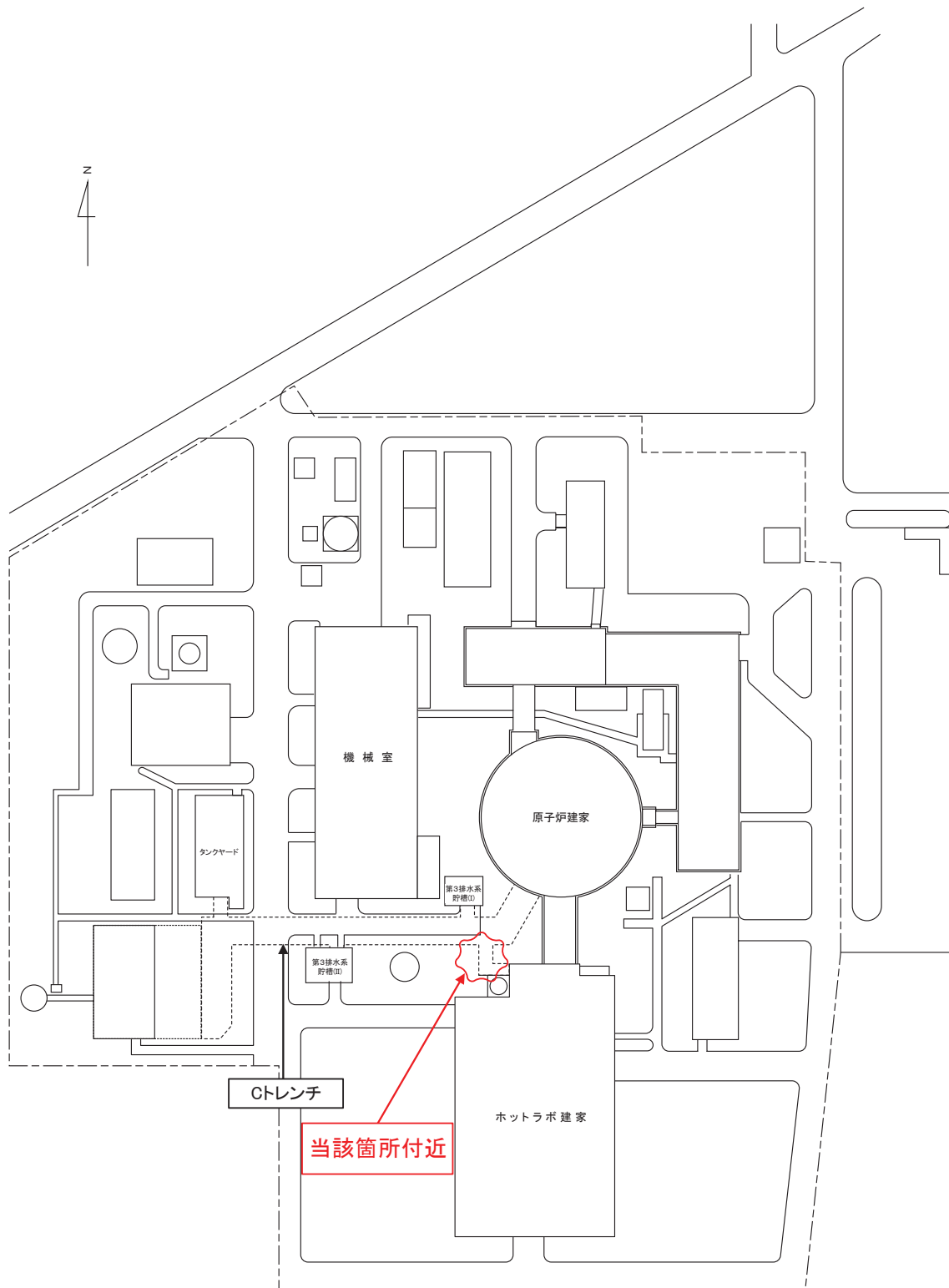
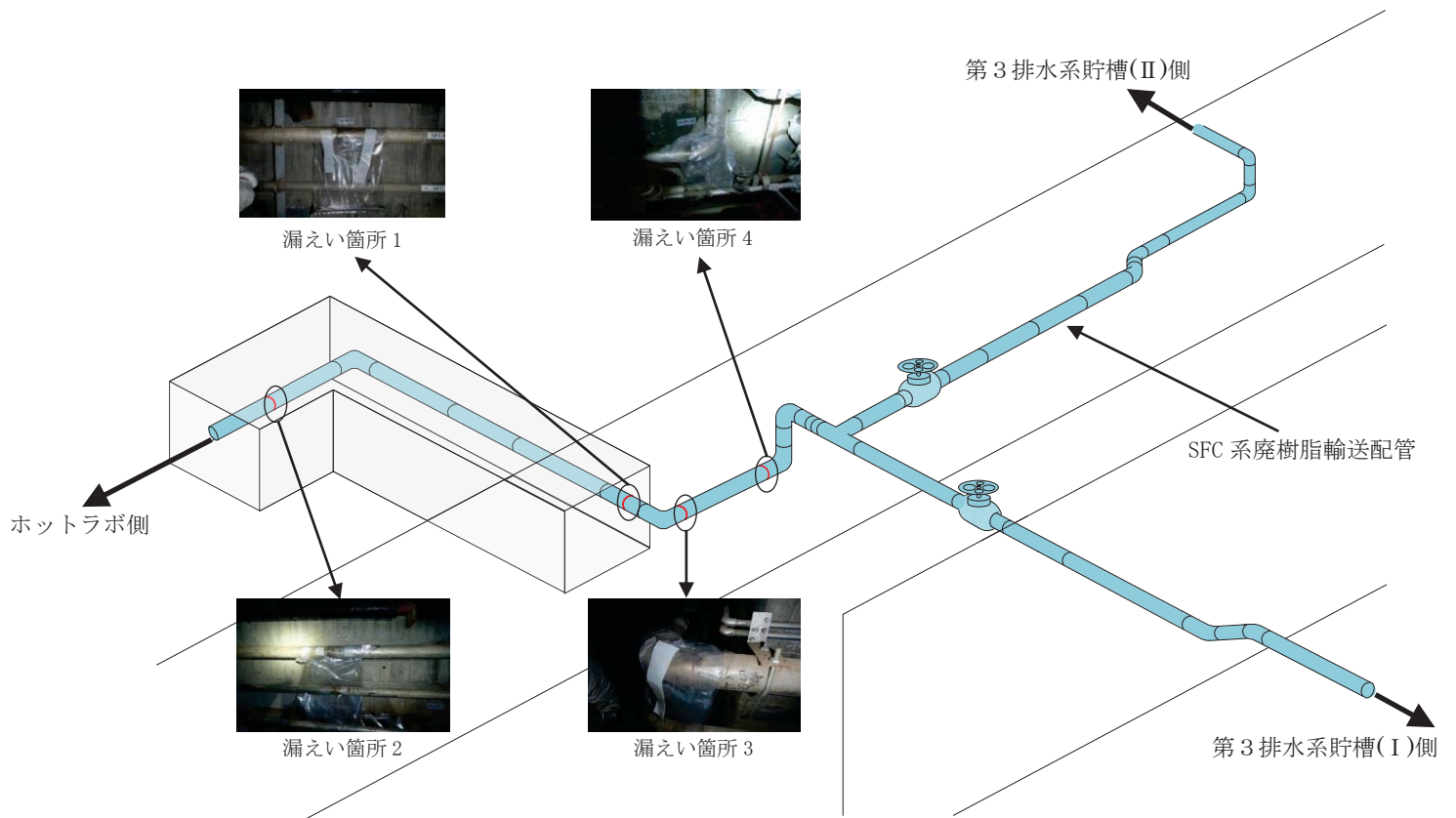


図1 JMTR 施設全体配置図





(1) C トレンチ内の SFC 系廃樹脂移送配管の状況



(2) C トレンチ内の状況

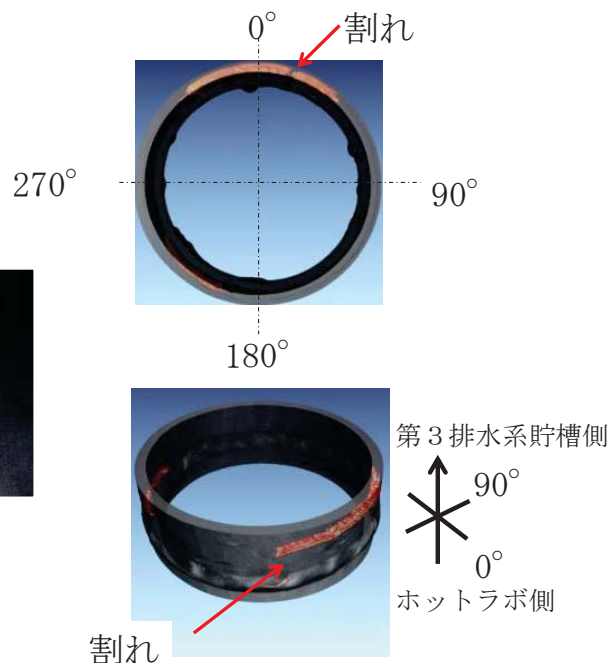
図 2 SFC 系廃樹脂移送配管の漏えい箇所



(a) 切出した配管

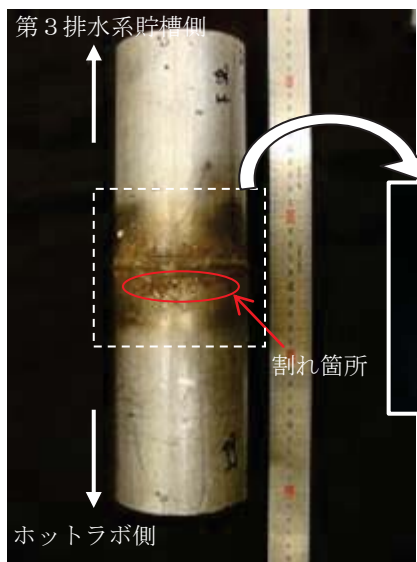


割れ箇所の裏側



(b) X線 CT 画像

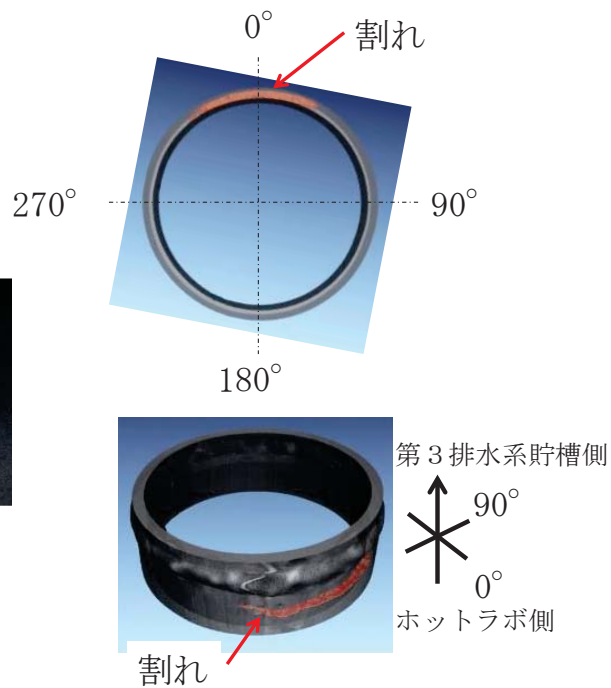
図3 漏えい箇所1の外観及びX線CT撮影の画像



(a) 切出した配管



割れ箇所の裏側



(b) X線 CT 画像

図4 漏えい箇所2の外観及びX線CT撮影の画像

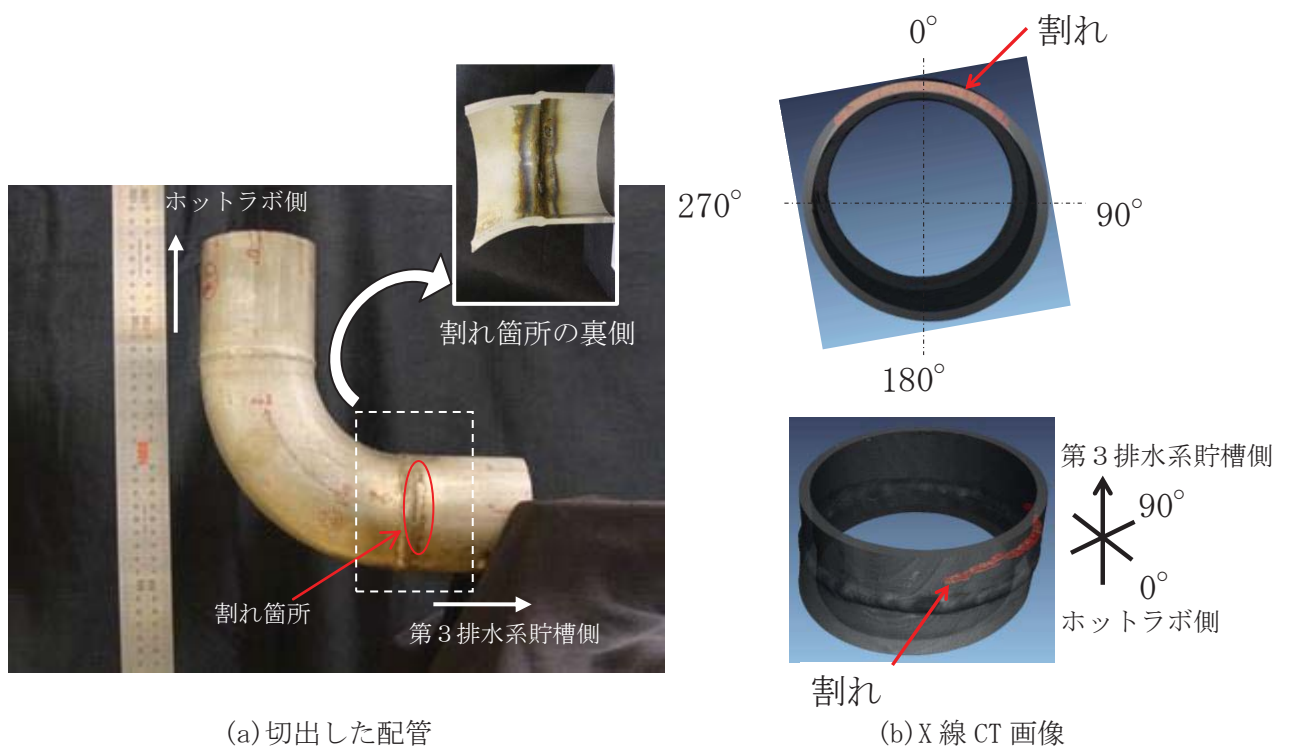


図5 漏えい箇所3の外観及びX線CT撮影の画像

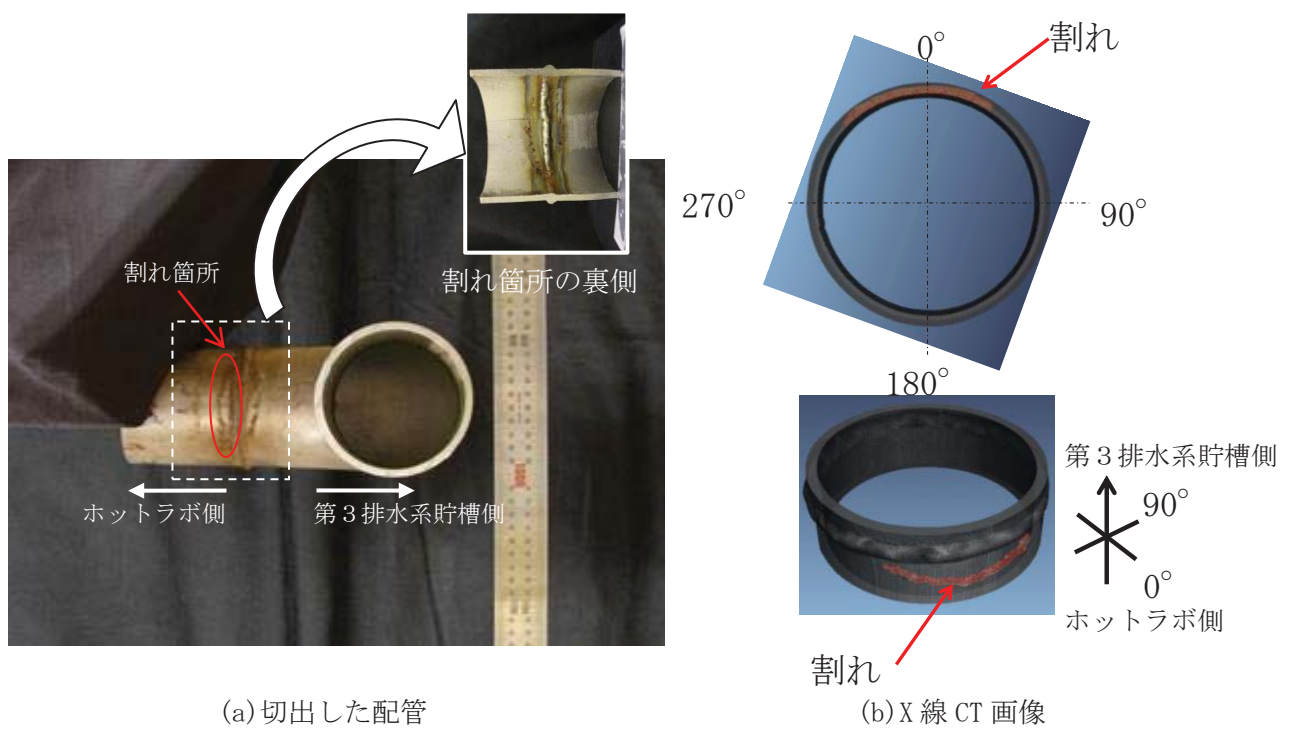


図6 漏えい箇所4の外観及びX線CT撮影の画像

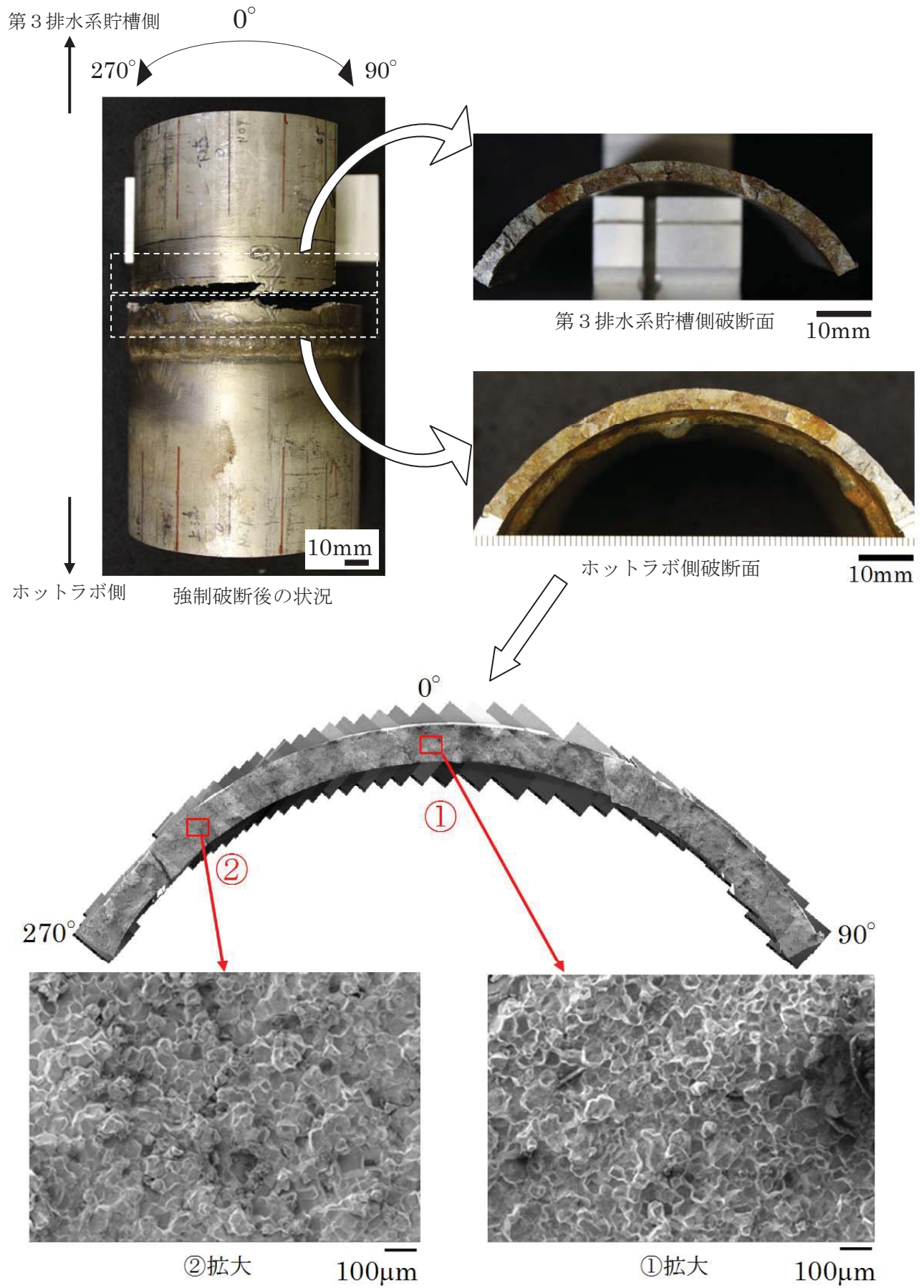


図7 漏えい箇所1の強制破断後の破面写真