

別添

JMTR 施設内 C トレンチの第 4 排水系配管からの  
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. 事象発生場所	1
4. 状況	1
5. 環境への影響	2
6. Cトレンチ内第4排水系配管の概要	2
7. 原因調査	2
8. 処置及び対策	12

## 図 表

表 1	測定結果	13
表 2	時系列	14
表 3	使用材料の材料分析	15
表 4	第 4 排水系配管内廃液のサンプリング結果	15
表 5	第 4 排水系の運転履歴	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	第 4 排水系配管概要図	19
図 4	第 4 排水系配管の状況	20
図 5	欠陥部付近の状況	21
図 6	配管内表面の外観観察結果	22
図 7	C トレンチ内の温度及び湿度	23
図 8-1	タール状の付着物、配管の溶接金属部及び 母材内の欠陥部、スラッジの分析結果(その 1)	24
図 8-2	タール状の付着物、配管の溶接金属部及び 母材内の欠陥部、スラッジの分析結果(その 2)	25
図 9	漏えい箇所金の金相試験結果	26
図 10	漏えい箇所近傍の金属組織の SEM 観察結果	27
図 11	第 4 排水系配管の漏えい発生の要因分析	28

参考資料 JMTR 施設内 C トレンチの廃液配管の今後の対応について

## 1. 件名

JMTR 施設内 C トレンチの第 4 排水系配管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 11 月 8 日 (木) 18 時 39 分頃

確認日時 平成 24 年 11 月 9 日 (金) 10 時 30 分

## 3. 事象発生の場所

JMTR 施設 C トレンチ内第 4 排水系配管 (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) においては、平成 24 年 10 月 25 日に原子炉等規制法に基づく法令報告を行った「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」に係る類似配管の健全性確認の一環として、その廃液移送管と同じく C トレンチ内に敷設された放射性物質を含む可能性のある廃液を移送する配管の調査を実施していた。

平成 24 年 11 月 8 日 18 時 10 分頃から原子炉建家内の手洗い水等を貯留する第 4 排水系貯槽から排水を貯留する施設 (タンクヤード) に送水する第 4 排水系配管 (図 3 参照) の浸透探傷検査<sup>※1</sup>を行うための準備として、配管の外表面を観察していたところ、配管の溶接部近傍にタール状の黒色付着物を確認し、この黒色付着物をワイヤーブラシで取り除き、ウエスで拭き取ったところ、水滴が落ちるのを確認した (18 時 39 分頃)。漏えいした全量は、およそ 14 cm<sup>3</sup>であった。なお、き裂等は、目視では確認できなかった (図 4 参照)。

その後、19 時 05 分～19 時 55 分の間、水滴のサンプリングを行い、20 時 02 分にゲルマニウム半導体検出器により測定を開始した。その結果、21 時 42 分時点で、有意な放射性核種は検出されなかった。なお、水滴のサンプリング後は、漏えい箇所到自己融着テープを巻き付けて漏えい防止の応急措置を行った。

漏えい箇所の上流にある第 4 排水系貯槽中の水のサンプリング測定 (ゲルマニウム半導体検出器) の結果からも、有意な放射性核種は検出されなかった。さらに、漏えい水のサンプリング試料の詳細測定 (11 月 9 日 7 時 14 分) の結果においても、有意な放射性核種は検出されなかった (表 1 参照)。

※1 材料表面に開口している微細な傷やすきま等の欠陥を見つけるための検査の一つで、浸透液、洗浄液、現像液の 3 種類の探傷剤を用いる。具体的には、微細な傷やすきまに浸み込む力の強い性質を持った浸透液を材料表面に塗り、次に表面の欠陥に浸み込んでいる部分以外の浸透液を除去するための洗浄液で表面を拭き取り、その後、欠陥の中に残った浸透液を表面に浮き上がらせるための現像液を塗り、欠陥の位置が目視で分かるようにして、欠陥を見つける検査である。

一方、液体シンチレーションカウンタによる漏えい水のサンプリング試料の測定結果から、トリチウム ( $7.6 \times 10^{-1} \text{Bq/cm}^3$ ) が検出され、漏えい箇所の上流にある第 4 排水系貯槽中の水のサン

プリング試料の測定結果からもトリチウム ( $4.6 \times 10^{-1} \text{Bq/cm}^3$ ) が検出された (表 1 参照)。なお、トリチウムについては、排水中の濃度限度 ( $60 \text{Bq/cm}^3$ ) 未満である。

以上を踏まえて、11月9日10時30分に原子炉等規制法に定める「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。

表 2 に時系列を示す。

## 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 トレンチ内第 4 排水系配管の概要

当該配管は、総延長約 144m、外径 89.1mm、肉厚 4.0mm の配管であり、JMTR 原子炉建家地下 4 階 (地下 21.3m) にある第 4 排水系貯槽から原子炉建家外の C トレンチを通り、タンクヤードまで敷設されている。

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>※2</sup>で密閉されており、廃液で常時満たされている。また、廃液の温度は、常温 (夏期約 25℃、冬期約 12℃) である。

第 4 排水系貯槽に貯留される廃液は、原子炉建家内で発生した手洗い水 (上水) 及び熱交換器二次側ドレン水等 (ろ過水<sup>※3</sup>) であるが、貯槽内部を目視にて確認したところ、貯槽底部にスラッジ<sup>※4</sup>が確認されている。当該廃液は、排水ポンプ (吐出圧: 約 0.35MPa) により、当該配管を通じて、タンクヤードにある廃液タンクに送水され、その後、廃棄物管理施設に送水される。

本事象が発生した箇所は C トレンチ内の直管部であり、全長約 74m、直管部の勾配は、JMTR 原子炉建家からタンクヤードに向かって 0.6% (登り勾配) である。なお、当該配管は、平成 22 年 2 月に更新しており、その際、JMTR 再稼働後の運転を見据えて、炭素鋼特有の腐食形態である全面腐食を考慮し、配管の材質をこれまでの炭素鋼製 (SGP) から耐食性に優れたステンレス鋼製 (SUS304) に変更している。

※2 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。

※3 河川よりくみ上げた水をろ過しただけの水のこと。飲料水と違い、殺菌や消毒などを行っていない水である。主に工場の冷却水などの工業用水として使用される。

※4 水中にあった錆や不純物等が、配管の下部に蓄積し、泥状になったもの。

## 7. 原因調査

当該配管から漏えい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>※5</sup>を実施した。その結果、図 5 に示すように溶接ビード<sup>※6</sup>上に軸方向の長さを持った欠陥を確認した。また、切り出し

た配管には、漏えいが発生した箇所その他、1箇所の欠陥があることを確認した。

その後、漏えい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、漏えいが発生した箇所の状況を調査した。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23MPa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。

※5 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。

※6 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 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、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。

当該配管はステンレス鋼のSUS304TP材を用いることとなっており、配管の材料が設計どおりであることを確認するため、施工時の材料検査証明書を確認した。その結果、SUS304TP材を用いていることを確認した。また、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、表3に示すとおり、使用材料はJIS規格のSUS304TP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

溶接条件の不適切管理により、過度な入熱<sup>※7</sup>があると残留応力<sup>※8</sup>の発生や溶接熱影響部<sup>※9</sup>にCr(クロム)欠乏層が発生し、耐食性が低下し(鋭敏化<sup>※10</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、溶接条件の確認を行った。

外観観察の結果、漏えいが発生した配管の外表面は、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しており、変色や錆は見られなかった。

漏えいが発生した配管の内表面については、図6に示すように、錆等は確認されなかったが、黄みを帯びたスラッジ及び錆こぶのようなものが観察され、溶接裏波<sup>※11</sup>及びその近傍に変色が見られた。

溶接条件については、施工要領及び施工記録を確認した結果、施工要領どおりに実施されていたことを確認した。なお、溶接材料としては、オーステナイト系ステンレス鋼 TIG 溶接棒 (WEL TIG 308) を使用していることを確認した。

- ※7 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。
- ※8 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。
- ※9 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。
- ※10 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。
- ※11 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。

### 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ため、外的損傷はない。

## 7.2 使用環境の調査

使用環境に起因する原因調査は使用状況、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、排水のために年に数回流される程度であり、運転時のポンプ吐出圧力は、0.35MPa 程度であり、設計値(0.4MPa)未満で管理されていることを確認した。また、第4排水系排水ポンプの年次点検の記録から、試験運転時の配管の振動は $2\mu\text{m}$ であり、JIS規格の振動の判断基準 ( $50\mu\text{m}$ 以下) ※12 の範囲内であることを確認した。

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。

※12 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。

### 7.2.2 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<sup>※13</sup>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、湿潤大気環境であるかどうかを確認するため、C トレンチの温度、湿度を調査するとともに、配管表面への海塩粒子の付着の有無についての調査を行った。

C トレンチ内の温度及び湿度は、図7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、平均温度が約16℃、平均湿度は約65%であるため、湿潤大気環境（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。

なお、当該配管外表面の漏えい箇所が付着していたタール状の黒色付着物は、黒色の土のようなものであり、これを分析した結果、図8-1に示すようにCr（クロム）、Fe（鉄）、C（炭素）、S（硫黄）及び塩化物イオンが検出された。これらのうち、Cr、Fe、Cは当該配管（SUS304）の構成成分であり、塩化物イオンは、C トレンチ内の雰囲気に含まれているものであり<sup>※15</sup>、Sは手洗い水等（ろ過水、上水）に含まれているものである。したがって、このタール状の黒色付着物は、硫化鉄（FeS）を主成分とするものである。なお、硫化鉄（FeS）は、腐食の進展に伴い、配管表面に析出する場合がある。

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

※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 C トレンチ内は、平均温度が16℃、平均湿度が65%であり、湿潤大気環境であることから、乾燥大気と水蒸気が混ざった環境である。この環境下では、結露による水膜形成と乾燥が繰り返されることにより、局部的に塩化物イオンが濃縮される。

### 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7か月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 トレンチ内第4排水系配管の概要」に示すとおり、廃液で常時満たされていた状態であることを確認した。

廃液の水質については、当該配管内に滞留していた廃液の水質を測定した結果、表4に示すとおり、pHは7.6、電気伝導率は382 $\mu$ S/cm、電解質<sup>※16</sup>である塩化物イオン濃度は34.3mg/lであり、



上水（pH：7.9、電気伝導率：210 $\mu$ S/cm、塩化物イオン濃度：20mg/l）と比較して、pH はほとんど変わらないが、電気伝導率と、塩化物イオン濃度は高い値であった。

スラッジの堆積の原因となるシリカの濃度は12.7mg/lであり、純水中に含まれるシリカの濃度（2mg/l>）と比較し高い値であった。また、第4排水系貯槽に貯留している廃液（ろ過水及び上水）には、微量ながらトリチウム（<sup>3</sup>H）が含まれている（表1参照）。

なお、当該配管の上流部である第4排水系貯槽に貯留される廃液は、原子炉建家内で発生した手洗い水（上水）及び、熱交換器二次側ドレン水等（ろ過水）であり、第4排水系貯槽内部には、スラッジが確認されている。

参考までに、平成24年10月25日に確認したSFC廃液移送管からの汚染検出事象に関しては、SFC廃液移送管内に滞留している廃液は、SFCプール<sup>※17</sup>のオーバーフロー水（純水）である。その水質検査を実施した結果、塩化物イオン濃度：0.044mg/l、電気伝導率：33.4 $\mu$ S/cm、pH：6.5であり、第4排水系配管内に滞留している廃液と比較して、塩化物イオン濃度、電気伝導率及びpHは十分に低い値であった。

以上の結果から、当該配管内には廃液が長期に滞留しており、その廃液の水質は、電気伝導率が高く、電解質である塩化物イオンが多い状態となっていた。そのため、シリカ<sup>※18</sup>（SiO<sub>2</sub>）などによるスラッジの堆積が、腐食の発生及び進行に影響を与えているものと推定した。

※16 水などの溶媒に溶かした際に、水の中で電荷を持った粒子（陽イオンと陰イオン）に電離して、その溶液が高い電気伝導性を持つようになる物質。（塩化物イオンなど）

※17 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）の切断に使用するためのものであり、ウランが含まれている燃料部分を切断することはない。

※18 二酸化ケイ素（SiO<sub>2</sub>）、もしくは二酸化ケイ素によって構成される物質の総称。

### 7.3 腐食の調査

漏えいが発生した箇所を確認するため、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>※19</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、配管の内表面又は外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、当該配管の外表面全面及び内表面全面に錆は見られなかったが、黄みを帯びたスラッジ及び錆こぶのようなものが確認された（7.1.2項「溶接施工不良の調査」参照）。

※19 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>※20</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9に示すように、欠陥部の金属組織は、配管の内表面付近では狭く、配管の溶接金属部及び母材の内部で広がったすきま腐食又は微生物誘起腐食に特徴的な形状であるインク壺状<sup>※21</sup>であり、溶接金属部は図10に示すようにデンドライト状<sup>※22</sup>の金属組織となっており、母材の溶接熱影響部は、オーステナイト状金属組織となっていた。また、粒界腐食に特徴的な粒界に沿った腐食の形状は確認されなかった。

※20 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。

※21 入口が小さく内部が広がっている形の孔。

※22 金属が凝固する際にできる柱状に成長した組織のような状態。

### 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、さらに、腐食性要因が含まれているかを確認するために水質検査及びスラッジに含まれている元素の分析並びに微生物の有無を確認するための電気化学測定<sup>※23</sup>を行った。

外観観察の結果、漏えいが発生した箇所の内表面には黄みを帯びたスラッジの堆積が見られた(7.1.2項「溶接施工不良の調査」参照)。

金相試験の結果、欠陥部の金属組織は、配管の内表面付近では狭く、配管の溶接金属部及び母材の内部で広がったすきま腐食又は微生物誘起腐食に特徴的な形状であるインク壺状となっていた(7.3.2項「粒界腐食の調査」参照)。

第4排水系配管内に滞留していた廃液の水質検査の結果、塩化物イオン及びシリカ等が検出されたため、シリカなどによるスラッジの堆積により、塩化物イオンが濃縮され、腐食の発生及び進行に影響を与えているものと推定される(7.2.3項「内部環境の調査」参照)。

また、スラッジに含まれている元素分析の結果、図8-2に示すようにCr(クロム)、Fe(鉄)、C(炭素)、P(リン)、Zn(亜鉛)、Mg(マグネシウム)、Si(ケイ素)及びCa(カルシウム)が検出された。これらのうち、Cr、Fe、Cは、当該配管の材料(SUS304)の構成元素であり、P、Zn、Mg、Si、Caは、廃液に含まれるものである(Zn、Mgは手洗い水、Pはリン酸( $H_3PO_4$ )、Siはシリカ( $SiO_2$ )、Caは炭酸カルシウム( $CaCO_3$ )として、ろ過水に含まれるもの)。

したがって、スラッジは、廃液中にイオンの状態で存在しているシリカ、浮遊物として存在している金属粒子が、沈殿物となって配管内面底部に堆積したものである。

電気化学測定として、当該廃液について、煮沸したものとそうでないものの2種類の溶液の電位を測定した結果、時間経過に伴う2つの溶液の電位の違いはほとんどなく、微生物が含まれて

いる場合に観察されるような電位の変化は見られなかったことから、微生物による影響は確認されなかった。

以上の結果から、当該事象は、配管内の廃液が滞留した状態で、廃液中にイオンの状態で存在しているシリカ、浮遊物として存在している金属粒子が、沈殿物となって配管溶接部等に堆積し（スラッジ）、配管の溶接部にある窪みとスラッジの間に微小なすきまが生じ、スラッジと配管内表面の間に電位差が発生し、配管内表面の溶接部又は溶接熱影響部に腐食が進展したすきま腐食であることを確認した。

※23 腐食特性や腐食挙動を評価するための測定法。具体的には、基準電極とステンレス鋼電極（測定電極）を溶液に入れ、基準電極に対するステンレス鋼の自然浸漬電位の経時変化を測定する。

#### 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。さらに、廃液に腐食性要因が含まれているかを調べるために水質検査を実施した。

外観観察の結果、配管外表面は、全体的にステンレス鋼特有の半光沢の金属色をしており、孔、割れ等は見られなかったが、配管内表面には、スラッジの堆積が見られた(7.1.2項「溶接施工不良の調査」参照)。

金相試験の結果、欠陥部の金属組織は、配管の内表面付近では狭く、配管の溶接金属部及び母材の内部で広がった、すきま腐食又は微生物誘起腐食に特徴的な形状であるインク壺状となっており、孔食の場合に特徴的な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)。

廃液の水質については、当該配管内に滞留していた廃液の水質を測定した結果、表4に示すとおり、pHは7.6、電気伝導率は $382\mu\text{S}/\text{cm}$ 、電解質である塩化物イオン濃度は $34.3\text{mg}/\ell$ であり、上水(pH:7.9、電気伝導率: $210\mu\text{S}/\text{cm}$ 、塩化物イオン濃度: $20\text{mg}/\ell$ )と比較して、電気伝導率と塩化物イオン濃度は高く、上水に比較して腐食性が高いことを確認した。

また、スラッジの堆積の原因となるシリカの濃度は $12.7\text{mg}/\ell$ であり、純水中に含まれるシリカの濃度( $2\text{mg}/\ell$ )と比較し高い値であり、腐食の発生及び進行に影響を与えているものと推定される(7.2.3項「内部環境の調査」参照)。

以上の結果から廃液は腐食性の要因が認められたが、欠陥部の金属組織はすきま腐食又は微生物誘起腐食に特徴的な形状であるインク壺状であったため、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に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。さらに、腐食性要因が含まれているかを確認するために水質検査、スラッジに含まれている元素の分析及び、微生物の有無を確認するため電気化学測定を行った。

外観観察の結果、漏えいが発生した箇所の内表面には黄みを帯びたスラッジの堆積が見られた(7.1.2項「溶接施工不良の調査」参照)。

金相試験の結果、欠陥部の金属組織は、配管の内表面付近では狭く、配管の溶接金属部及び母材の内部で広がったすきま腐食又は微生物誘起腐食に特徴的な形状であるインク壺状となっていた(7.3.2項「粒界腐食の調査」参照)。

第4排水系配管内に滞留していた廃液の水質検査の結果、塩化物イオン、シリカ等が検出されたため、シリカなどによるスラッジの堆積により、塩化物イオンが濃縮され、腐食の発生及び進行に影響を与えているものと推定される(7.2.3項「内部環境の調査」参照)。

また、スラッジに含まれている元素分析の結果、Cr(クロム)、Fe(鉄)、C(炭素)、P(リン)、Zn(亜鉛)、Mg(マグネシウム)、Si(ケイ素)及びCa(カルシウム)が検出され、これらは廃液中にイオンの状態で存在しているシリカ及び浮遊物として存在している金属粒子が、沈殿物となって配管内面底部に堆積したものである(7.3.3項「すきま腐食の調査」参照)。

電気化学測定として、当該廃液について、煮沸したものとそうでないものの2種類の溶液の電位を測定した結果、時間経過に伴う2つの溶液の電位の違いはほとんどなく、微生物が含まれている場合に観察されるような電位の変化は見られなかったことから、微生物による影響は確認されなかった(7.3.3項「すきま腐食の調査」参照)。

### 7.3.6 水滴落下・もらい錆びの調査

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、外観観察より配管外表面の腐食状況を確認した。

その結果、全体的にステンレス鋼特有の半光沢の金属色をしており、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は接触しておらず、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6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6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、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6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

漏えいが発生した箇所の状況を確認するため、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ことで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た。

その結果、欠陥部の金属組織は、配管の内表面付近では狭く、配管の溶接金属部及び母材の内部で広がったすきま腐食又は微生物誘起腐食に特徴的な形状であるインク壺状となっていた（7.3.2項「粒界腐食の調査」参照）。また、破面観察の結果、金属表面はデンドライト状であり、粒界割れや粒内割れを示す金属組織は観察されなかったことから応力腐食割れではないことを確認した。

### 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、0.35MPa程度であり、設計値(0.4MPa)未満で管理されていることを確認した。また、第4排水系排水ポンプの年次点検の記録から、試験運転時の配管の振動は $2\mu\text{m}$ であり、JIS規格による振動の判断基準( $50\mu\text{m}$ 以下)<sup>※12</sup>の範囲内であり、当該配管に異常な振動がなく、繰り返し応力を受けていないことを確認した(7.2.1「使用状況の調査」参照)。

金相試験の結果、欠陥部の金属組織は、配管の内表面付近では狭く、配管の溶接金属部及び母材の内部で広がったすきま腐食又は微生物誘起腐食に特徴的な形状であるインク壺状であり、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(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11に示す。

当該配管の据付け・施工については、当該配管の漏えいに関する要因は確認されず、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、応力腐食割れが発生しやすい状況にあったが、応力腐食割れに特徴的な粒界割れや粒内割れに特徴的な粒界破壊の金属組織は観察されなかった。一方、内部環境については、配管内の廃液は、原子炉建家内で発生した手洗い水(上水)及び、熱交換器二次側ドレン水等(ろ過水)であり、スラッジが堆積しやすく、電解質が多い廃液であった。

漏えいが発生した箇所の腐食又は割れの形態を調査した結果、すきま腐食又は微生物誘起腐食に特徴的なインク壺状の形状になっており、廃液の電気化学測定の結果から、微生物は確認されなかった。

したがって、第4排水系配管の漏えいが発生した原因は、当該配管内に滞留している廃液に含まれているイオンの状態で存在しているシリカ及び浮遊物として存在している金属粒子が、配管内に沈殿し、スラッジとなって配管内に堆積した結果、配管溶接部とスラッジの間にすきまが生じ、これによりスラッジと配管内表面の間に電位差が発生し、配管内表面の溶接部又は溶接熱影響部に腐食が進展したすきま腐食であった。

なお、すきま腐食は、腐食の進行速度が速く、最大 $10\text{mm}/\text{年}$ <sup>※24</sup>で腐食が進行することが知られている。

※24 腐食防食協会編，材料環境学入門，丸善，p.273（1993年）

## 8. 処置及び対策

### 8.1 処置

漏えい発生部位の切り出し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>※25</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。

すきま腐食の発生を防止するためには、配管内にろ過水を含む廃液を長期間滞留させないことであるため、当該配管に勾配を設ける。直管部の勾配は、6項「C トレンチ内第4排水系配管の概要」に示すとおり、JMTR 原子炉建家からタンクヤードに向かって0.6%（登り勾配）とする。その上で、排水ポンプ出口弁の直近に設置してある逆止弁の後にドレン弁を設置し、配管内の廃液が抜ける構造に変更する。さらに、配管内に残った微量の廃液によるすきま腐食防止対策として送水頻度を増やす。これによりすきま腐食を防止する。

なお、C トレンチ内は湿潤大気環境であり、配管の材質がオーステナイト系ステンレス鋼で残留応力があると、SFC 廃液移送管<sup>※26</sup>のように湿潤大気応力腐食割れが発生する可能性がある。そのため、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る第4排水系配管の溶接部及びその近傍の錆を落とし、湿潤大気応力腐食割れ抑制効果のある錆止め塗料<sup>※27</sup>を塗布する。

※25 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。

※26 SFC 廃液移送管のじみは、湿潤大気環境下において、オーステナイト系ステンレス鋼の溶接による引張残留応力が加わっていたことによる湿潤大気応力腐食割れであった。

※27 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たもので、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、無害化させるものである。なお、この塗料は、国内の原子力施設でも採用されているものである。

### 8.2 対策

当該配管と同様にろ過水を含む廃液を流したことがあり、廃液が配管内に滞留する構造のステンレス鋼製の廃液移送配管については、放射線透過検査を行い、配管の溶接部の状況を確認し、減肉を確認した場合には、必要に応じて補修又は交換を行う。

その後、ろ過水を含む廃液を流す配管については、配管内に廃液が滞留しない構造に変更し、配管内に残った微量の廃液によるすきま腐食防止対策として送水頻度を増やす。さらに、その他の廃液配管については、ろ過水を含む廃液を混入させることがないようにすることを JMTR 施設の運転保守の管理要領である JMTR 運転手引に定める。

参考までに JMTR 施設内 C トレンチの廃液配管の今後の対応について、参考資料に示す。

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
第4排水系 配管漏えい 水	<sup>60</sup> Co	検出下限値未満 (検出下限値 : $1.9 \times 10^{-1}$ )*1	γ線波高分析装置 ゲルマニウム半導体検出器 型式 GEM-15190
		検出下限値未満 (検出下限値 : $1.5 \times 10^{-2}$ )*2	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 : $2.0 \times 10^{-1}$ )*1	γ線波高分析装置 ゲルマニウム半導体検出器 型式 GEM-15190
		検出下限値未満 (検出下限値 : $1.5 \times 10^{-2}$ )*2	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 : $2.4 \times 10^{-1}$ )*1	γ線波高分析装置 ゲルマニウム半導体検出器 型式 GEM-15190
		検出下限値未満 (検出下限値 : $1.8 \times 10^{-2}$ )*2	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	$7.6 \times 10^{-1}$ (検出下限値 : $1.1 \times 10^{-1}$ )	液体シンチレーションカウンタ 型式 LSC-7200
第4排水系 貯槽の水	<sup>60</sup> Co	検出下限値未満 (検出下限値 : $3.8 \times 10^{-3}$ )	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 : $3.8 \times 10^{-3}$ )	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 : $3.7 \times 10^{-3}$ )	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>3</sup> H	$4.6 \times 10^{-1}$ (検出下限値 : $1.1 \times 10^{-1}$ )	液体シンチレーションカウンタ 型式 LSC-7200

\*1 : 平成24年11月8日21時42分測定終了

\*2 : 11月9日7時14分測定終了



表2 時系列

日付	時間	内容
平成24年 11月8日	18:10頃	Cトレンチ内、第4排水系配管の浸透探傷検査を開始
	18:35頃	第4排水系配管の浸透探傷検査1箇所目終了
	18:39頃	2箇所目の浸透探傷検査を行うための準備として黒色付着物をワイヤーブラシで取り除き、ウエスで拭き取ったところ、第4排水系配管から漏えいを確認
	19:50	発生箇所：スミヤ測定結果、汚染なし。線量当量率測定結果、異常なし。 JMTR 放管モニタ（排気モニタ、室内ダストモニタ及びエリアモニタ）異常なし
	20:02	ゲルマニウム半導体検出器により測定を開始
	21:25	漏えい箇所の応急措置を開始
	21:40	漏えい箇所の応急措置を完了
	21:42	漏えい水のサンプリング試料をゲルマニウム半導体検出器で測定し、放射性核種が検出されなかったことを確認
	21:49	第4排水系貯槽中の水のサンプリング試料を液体シンチレーションカウンタで測定し、排水中の濃度限度未満のトリチウムを確認
	22:00	漏えい水のサンプリング試料を液体シンチレーションカウンタで測定し、排水中の濃度限度未満のトリチウムを確認
	22:18	第4排水系貯槽中の水のサンプリング試料をゲルマニウム半導体検出器で測定し、放射性核種が検出されなかったことを確認
11月9日	7:14	漏えい水のサンプリング試料をゲルマニウム半導体検出器で詳細測定し、放射性核種が検出されなかったことを確認
	10:30	Cトレンチ内第4排水系配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。

表3 使用材料の材料分析

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
第4排水系配管の更新時における材料検査証明書の記載値1 (S06042-101)	0.08	0.38	1.80	0.033	0.007	8.56	18.57
第4排水系配管の更新時における材料検査証明書の記載値2 (S97650-001)	0.05	0.38	1.82	0.030	0.001	8.15	18.56
第4排水系配管の材料分析値1	0.04	0.37	1.81	0.033	0.008	8.62	18.59
第4排水系配管の材料分析値2	0.04	0.38	1.84	0.035	0.008	8.73	18.62

※SUS304TP の規格値

表4 第4排水系配管内廃液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12月12日	7.6	pH計 (東亜電波工業、HM-30)
電気伝導率	平成24年12月12日	382 $\mu$ 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25年1月16日	34.3mg/l	イオンクロマトグラフ (島津製作所、HIC-10Asp)
硝酸化物イオン濃度 (No <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	平成25年1月16日	7.9mg/l	イオンクロマトグラフ (島津製作所、HIC-10Asp)
硫化物イオン濃度 (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	平成25年1月16日	28.7mg/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	12.7 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)

表5 第4排水系の運転履歴

受入日	受入量(m <sup>3</sup> )
平成19年 5月 14日	41.8
平成19年 5月 21日	8.8
平成19年 9月 20日	6.9
平成19年 10月 31日	0.1
平成19年 11月 1日	15.5
平成19年 11月 5日	0.6
平成20年 8月 29日	11.4
平成20年 9月 18日	29.5
平成20年 9月 22日	13.7
平成20年 9月 29日	9.9
平成20年 11月 10日	1.5
平成20年 11月 11日	0.9
以下配管更新後	
平成22年 3月 15日	7.1
平成22年 10月 5日	12.0
平成22年 10月 15日	2.5
平成23年 4月 4日	13.2
平成23年 4月 8日	14.2
平成23年 6月 1日	13.9
平成23年 9月 9日	10.9
平成23年 10月 25日	0.6
平成23年 10月 26日	27.3
平成23年 12月 21日	14.3
平成24年 7月 4日	3.0
合 計	259.6

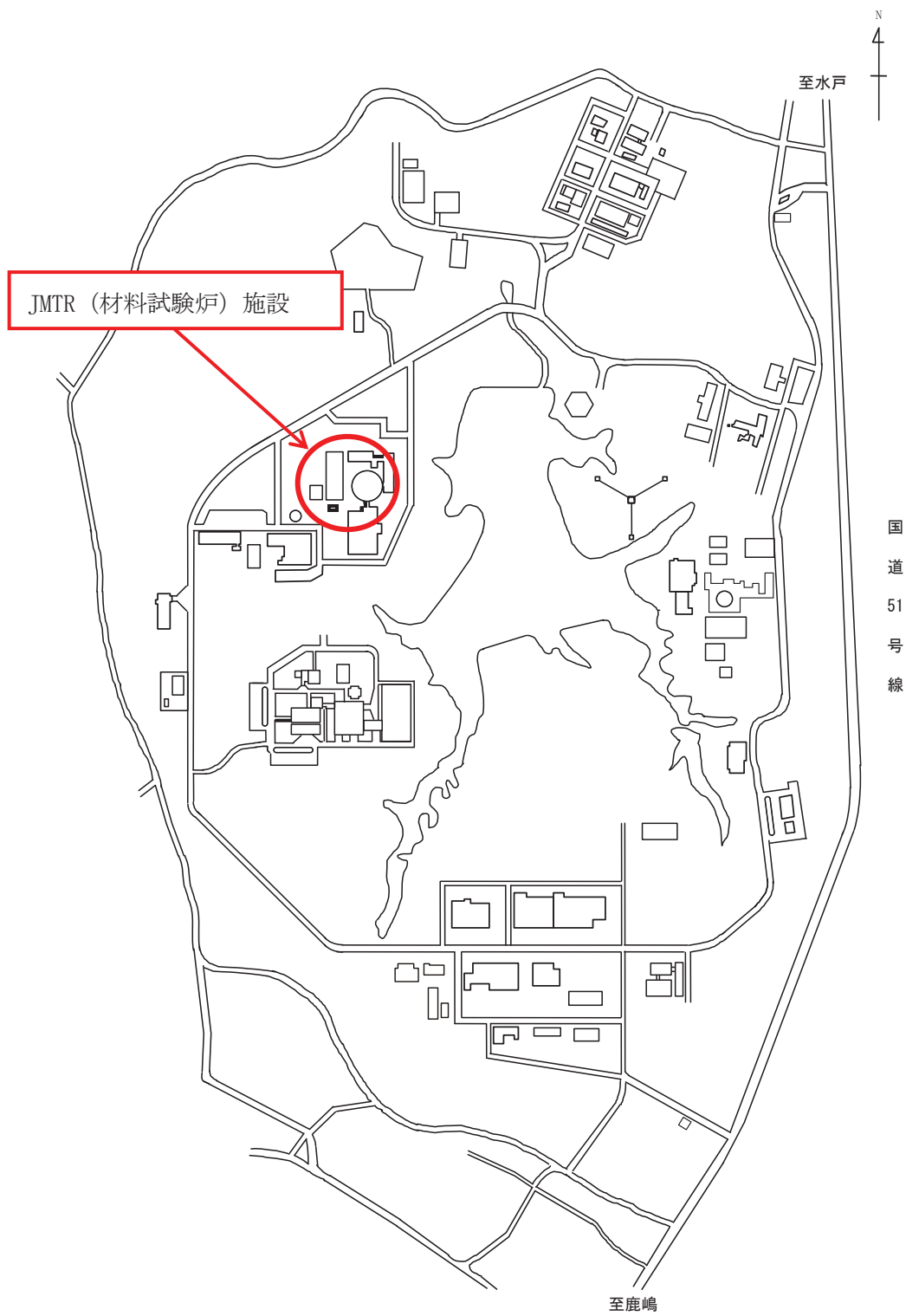


図 1 大洗研究開発センター施設配置図

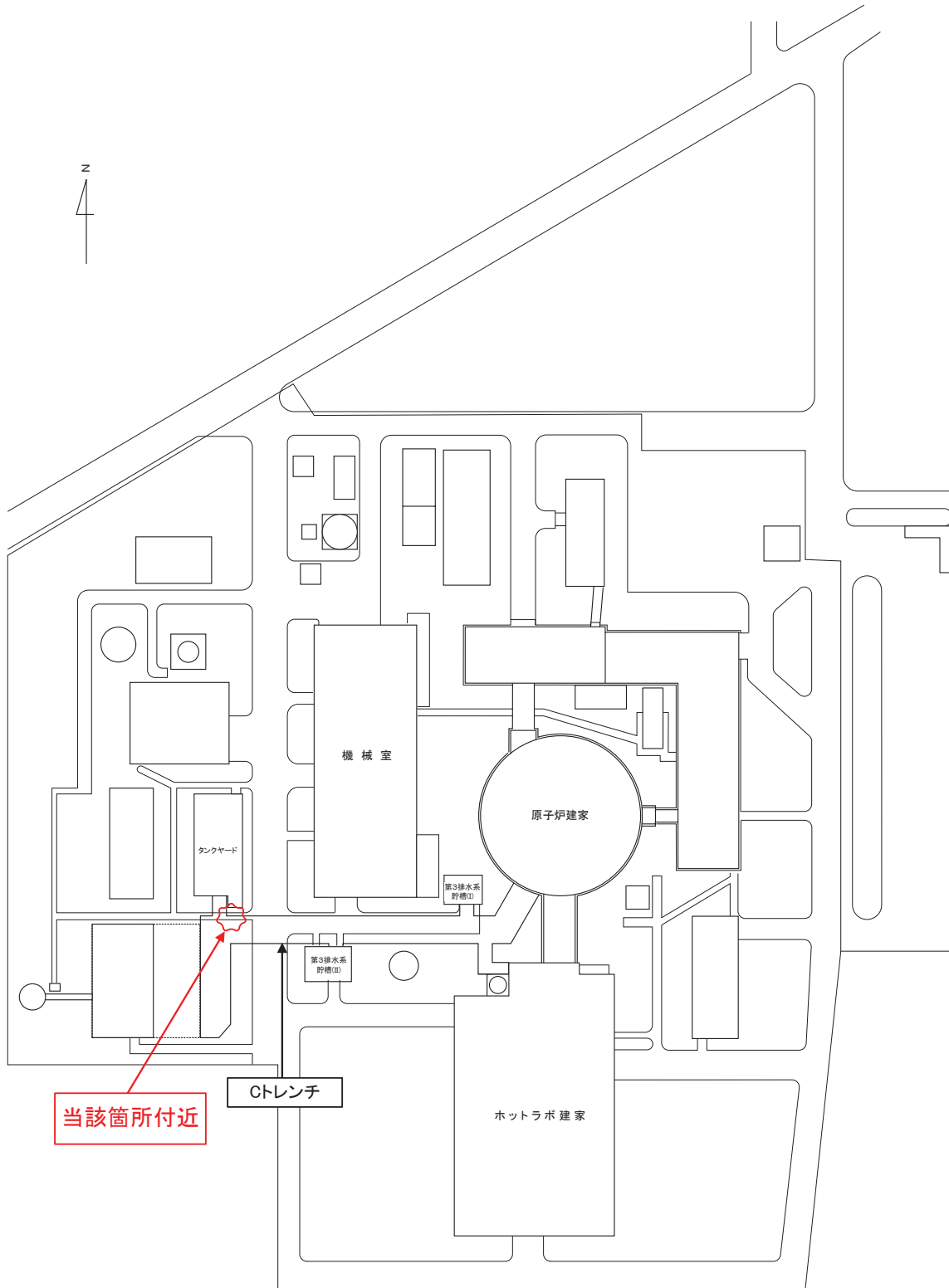
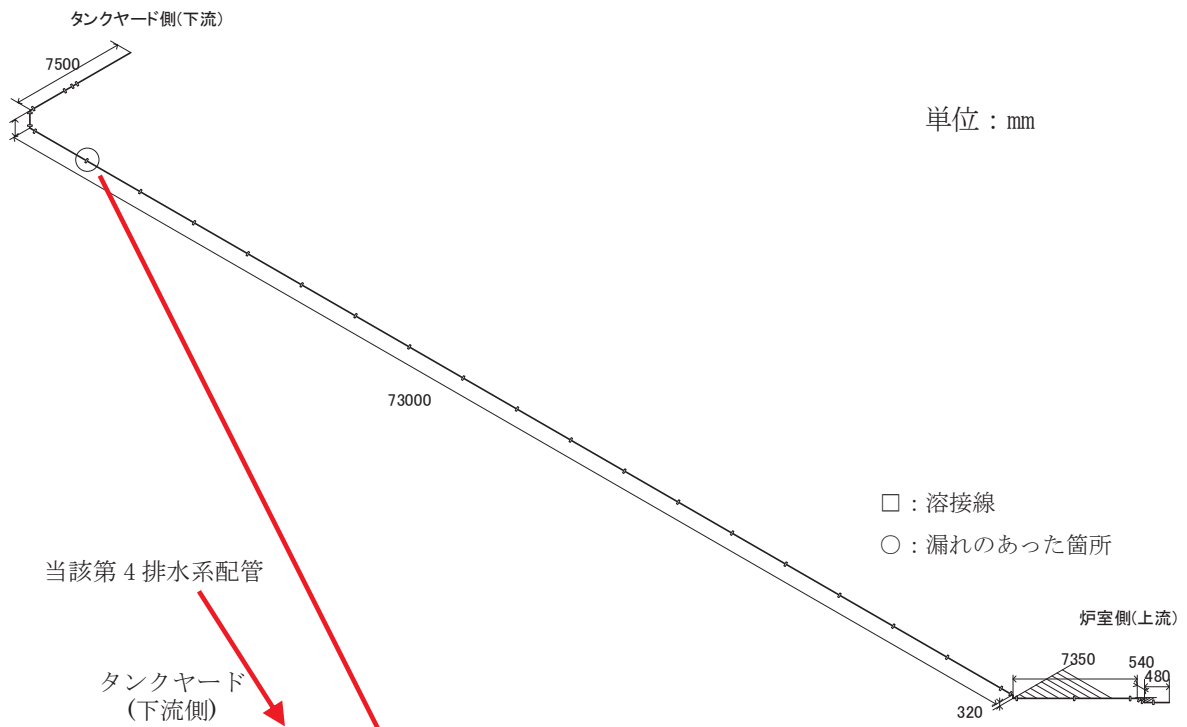
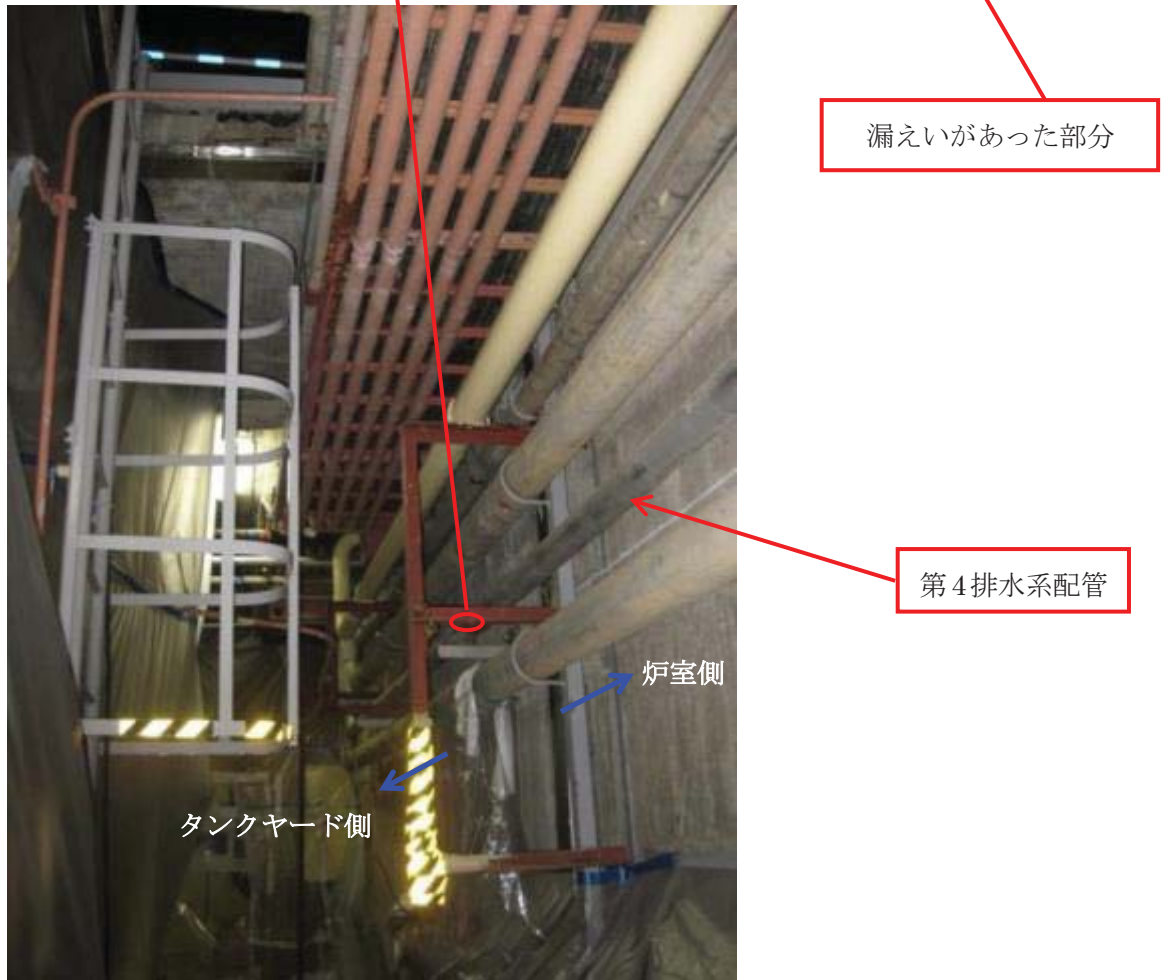
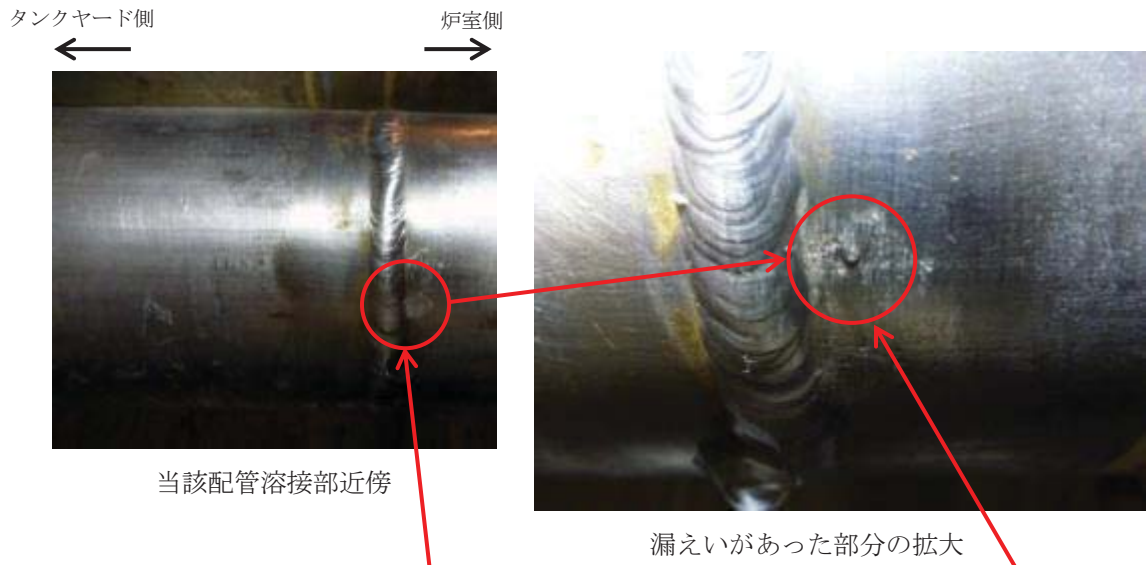


図2 JMTR 施設全体配置図



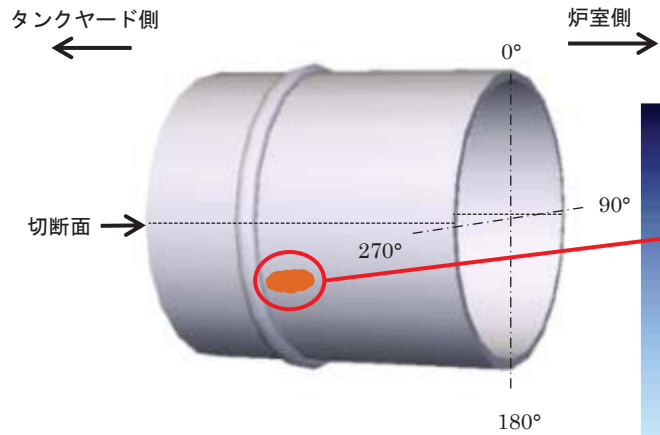
Cトレンチ内外観

図3 第4排水系配管概要図

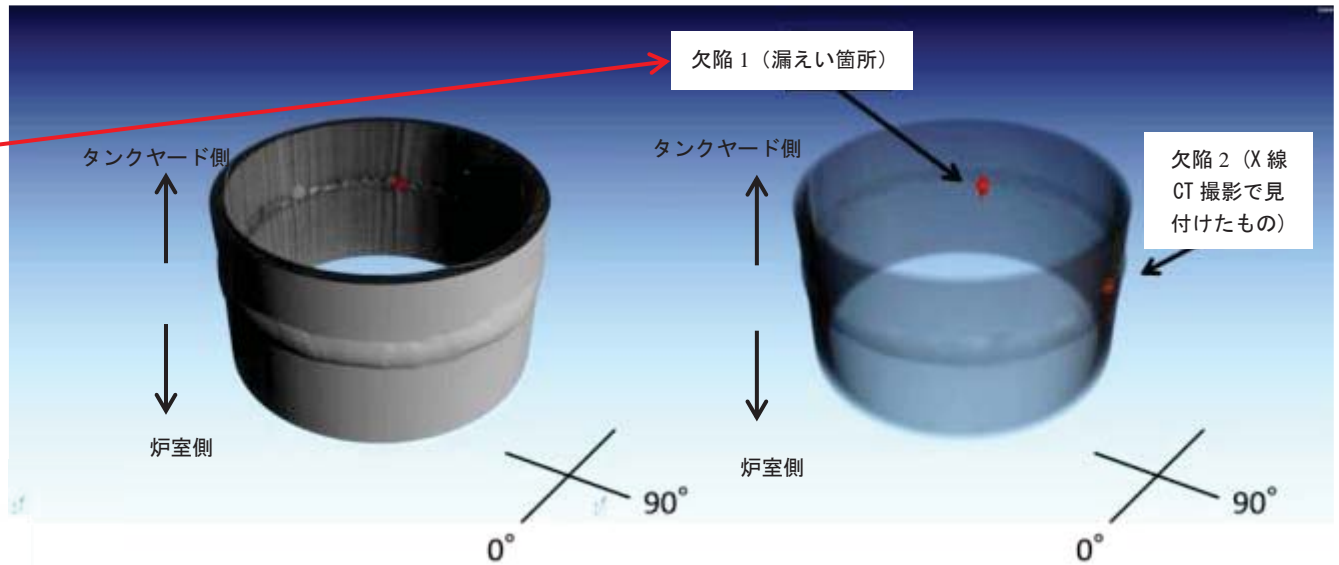


C トレンチ内第4排水系配管の状況

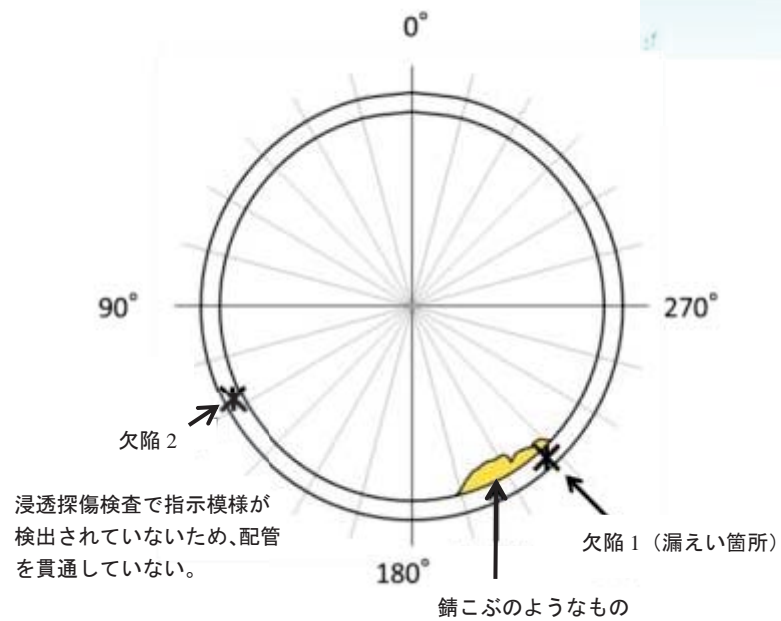
図4 第4排水系配管の状況



第4排水系配管を切り出した状況



X線CT撮影の写真



配管の断面の状況

	欠陥の寸法	
	半径方向	長さ方向
欠陥1 (漏えい箇所)	219° ~ 225°	10mm
欠陥2 (X線CT撮影で見付けたもの)	112° ~ 123°	7.8mm

図5 欠陥部付近の状況



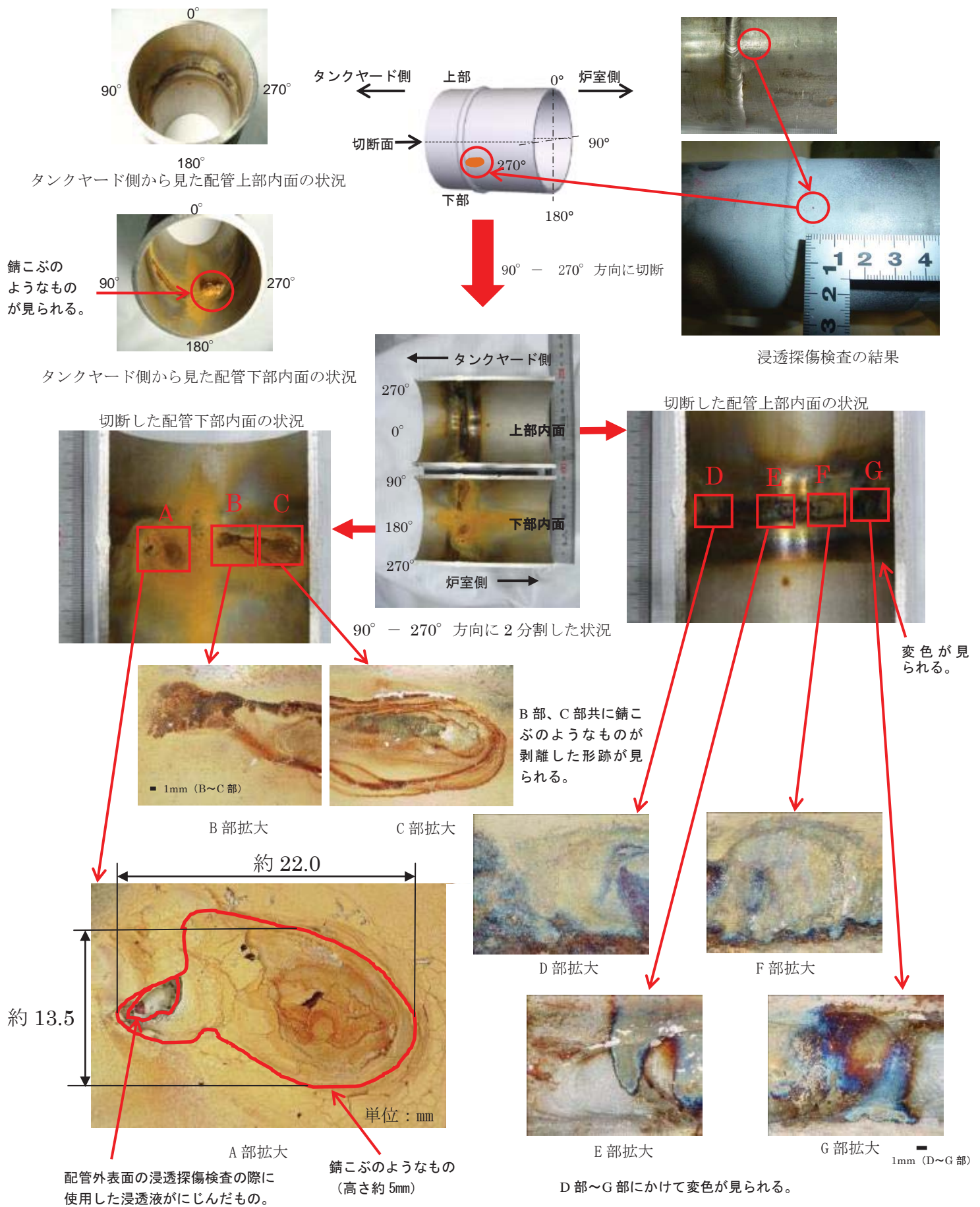


図6 配管内表面の外観観察結果

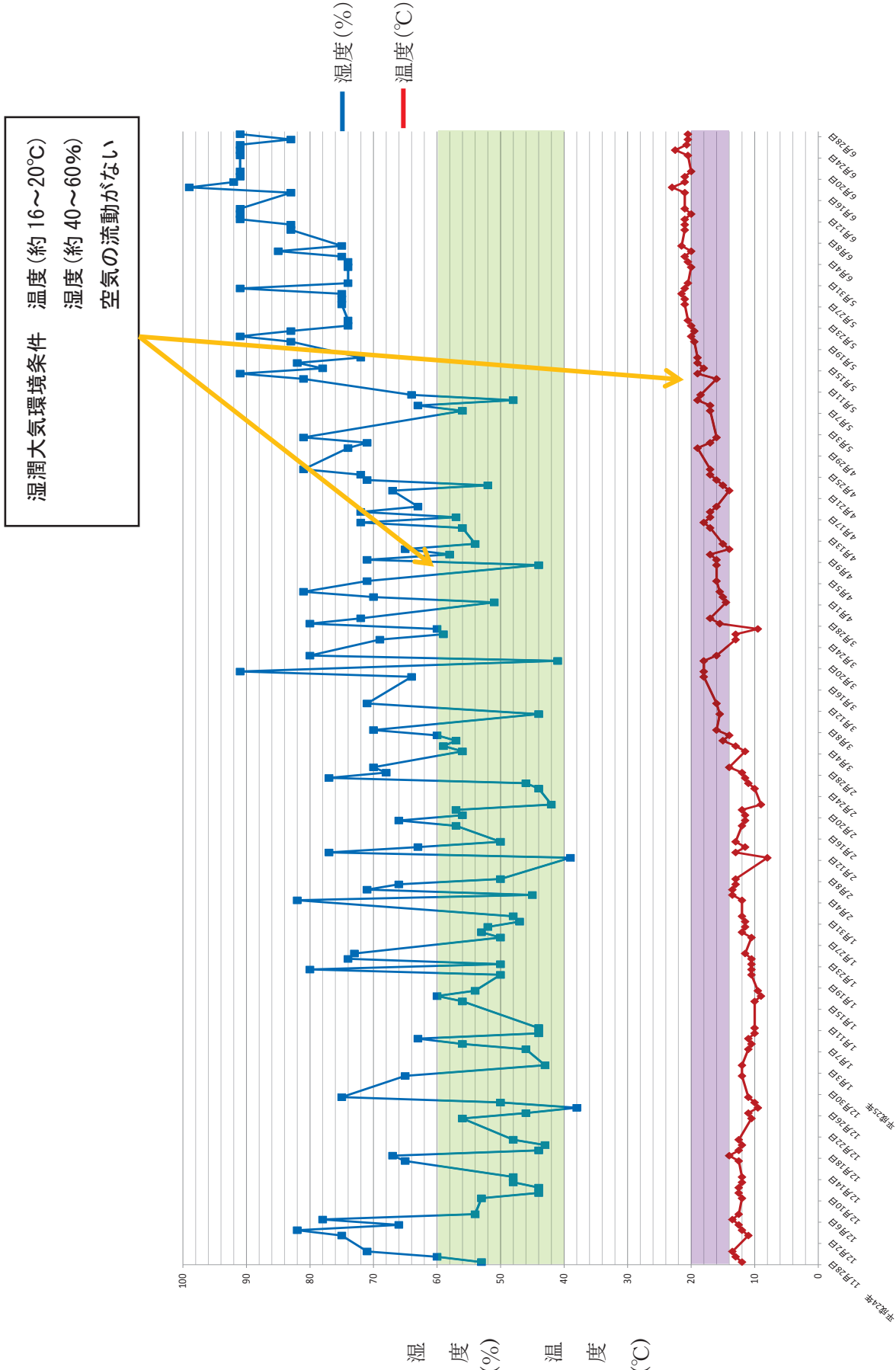
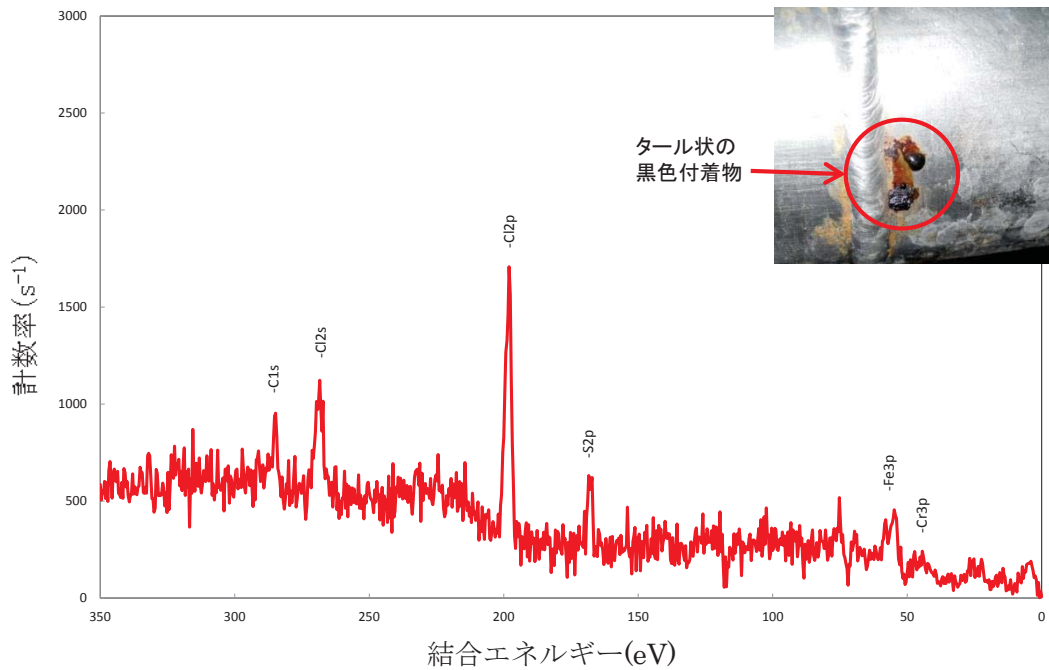
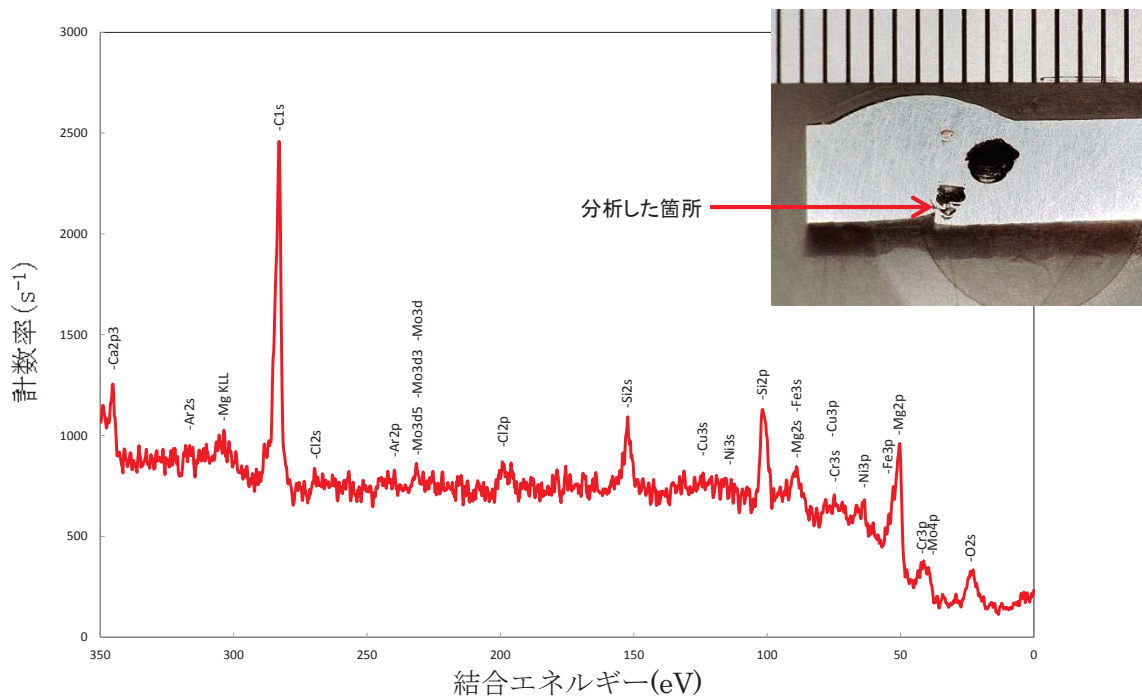


図7 Cトレンチ内の温度及び湿度

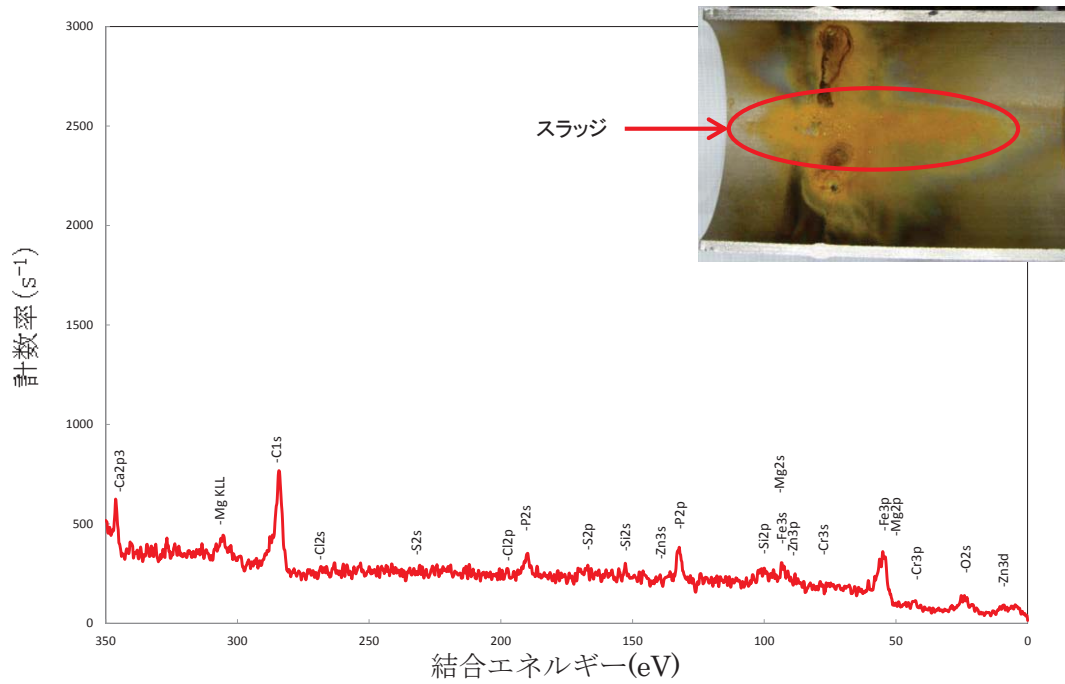


(1) タール状の付着物の分析結果



(2) 配管の溶接金属部及び母材内の欠陥部の分析結果

図 8-1 タール状の付着物、配管の溶接金属部及び母材内の欠陥部、スラッジの分析結果(その 1)



(3) スラッジの分析結果

図 8-2 タール状の付着物、配管の溶接金属部及び母材内の欠陥部、スラッジの分析結果(その2)