



## 埋設配管のき裂による放射性物質の 漏えいへの対応について

Activities on the Leakage of Radioactive Substances  
from Buried Pipe with Cracking

亀山 恭彦 箭内 智博 黒澤 昭彦 浅野 典一  
檜山 和久 楠 秀彦 深作 秋富

Yasuhiko KAMEYAMA, Tomohiro YANAI, Akihiko KUROSAWA, Norikazu ASANO  
Kazuhisa HIYAMA, Hidehiko KUSUNOKI and Akitomi FUKASAKU

大洗研究開発センター  
照射試験炉センター  
原子炉施設管理部

Department of JMTR Operation  
Neutron Irradiation and Testing Reactor Center  
Oarai Research and Development Center

June 2011

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

## 埋設配管のき裂による放射性物質の漏えいへの対応について

日本原子力研究開発機構

大洗研究開発センター照射試験炉センター原子炉施設管理部

亀山 恭彦、箭内 智博、黒澤 昭彦、浅野 典一、檜山 和久、楠 秀彦、深作 秋富

(2011年3月31日受理)

材料試験炉（以下「JMTR」という）は、発電用原子炉などで使用する燃料や材料の照射試験を行う施設であり、平成18年から改修工事のため、原子炉の運転を停止している。

JMTR施設の居室実験室建家におけるホット実験室では水分析等を行い、放射線管理室では放射線管理用試料の調製及び測定等を行っている。これらの部屋で発生する手洗い水、試料水、洗浄水等の廃液は埋設配管を通して、ホット機械室の廃液タンクに貯留される。

汚水配管（放射性物質は含まない）の更新を行うために作業をしていた時に、管理区域外（屋外）で放射性物質を含む廃液を通す埋設配管の塩化ビニル製フランジ部にき裂を発見した。

周囲の土壌の放射性物質濃度の測定を実施した結果、微量の放射性核種（セシウム137及びコバルト60）が検出された。

本報告では、埋設配管からの漏えいの発生原因、是正処置及びその後の対策等についてまとめた。

## Activities on the Leakage of Radioactive Substances from Buried Pipe with Cracking

Yasuhiko KAMEYAMA, Tomohiro YANAI, Akihiko KUROSAWA, Norikazu ASANO  
Kazuhisa HIYAMA, Hidehiko KUSUNOKI and Akitomi FUKASAKU

Department of JMTR Operation  
Neutron Irradiation and Testing Reactor Center  
Oarai Research and Development Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received March 31, 2011)

The Japan Materials Testing Reactor (JMTR) is a testing reactor dedicated to the irradiation tests of materials and fuels. The JMTR has been in a shutdown period since 2006 for its refurbishment, and will restart in 2011.

Water analysis and so on are carried out in the hot experimental room, and sample preparation and measurement for the radiation management are carried out in the radiation control room. The waste fluid such as hand-wash water, sample water, washing water generated in these rooms is transferred to the waste tank in the hot machine room through the buried pipe. The crack was found at the flange of the buried pipe when sewerage works were carried out. The flange is located in a non-controlled area. A small amount of radionuclide (cesium 137 and cobalt 60) was detected as a result of radioactivity measurement from the surrounding soil.

In this report, the cause of the leakage from the buried pipe, the countermeasure and the prevention measure are summarized.

Keywords: JMTR, Leakage, Buried Pipe, Crack, Countermeasure, Prevention Measure

目 次

1. はじめに .....	1
2. 埋設配管のき裂の発生状況 .....	2
3. 原因調査 .....	2
3.1 調査方法 .....	2
3.2 調査結果 .....	2
3.3 考察 .....	4
4. 環境への影響等 .....	5
5. 対策 .....	6
6. 再発防止のための対応 .....	6
7. まとめ .....	7

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Crack on a buried pipe .....	2
3. Cause investigation .....	2
3.1 Investigation methods .....	2
3.2 Investigation results .....	2
3.3 Consideration .....	4
4. Effect on the environment .....	5
5. Countermeasures .....	6
6. Prevention measure .....	6
7. Summary .....	7

## 1. はじめに

JMTR 施設では、平成 22 年 10～11 月の予定で、居室実験室建家に接続された放射性物質を含む廃液を通す埋設配管の下に敷設されている汚水配管（放射性物質は含まない）の更新を行うため、管理区域外（屋外）で周囲の土壌を取り除く作業を実施中、平成 22 年 10 月 5 日 10 時 40 分頃、放射性物質を含む廃液を通す埋設配管の塩化ビニル製フランジ部にき裂を発見した。

そのため、汚水配管の更新に係る作業を中断し、周囲の土壌の放射性物質濃度の測定を実施した結果、微量の放射性核種（セシウム 137 及びコバルト 60）が検出されたため、原子炉等規制法及び放射線障害防止法に基づき、原因調査及びその対応について検討を行い、法令報告（大臣報告）を行った（第 1 報を 10 月 14 日に報告し、最終報を 12 月 3 日に報告した）。

本報告では、埋設配管からの漏えいに係る是正処置、漏えいの発生原因及びその後の対策等についてまとめた。

## 2. 埋設配管のき裂の発生状況

居室実験室建家に接続された汚水配管の更新を行うため、新規の汚水配管を埋設配管の下側に敷設する工事をしていった。このため、ホット実験室脇（管理区域外）のアスファルト舗装部を切断し、撤去した後、埋設配管を覆っているコンクリート製U字溝周辺まで重機で掘削し、U字溝が確認されてからは、スコップによる手掘りで深さ約 1m まで周囲の土壌を取り除く作業を行っていた。10月5日において、手掘りでの掘削後にU字溝を取り除いたところ、作業担当者が、放射性物質を含む廃液を通す埋設配管の塩化ビニル配管（125A、外径：約 140mm）のフランジ部にき裂を発見した。居室実験室建家及びき裂の発見された埋設配管の位置を Fig.1 に、埋設配管接続部の概略図を Fig.2 示す。この時点ではき裂からの廃液の滴下は認められなかったが、フランジ部直下及び約 30cm 下流（廃液タンク）側の配管直下の 2ヶ所の土壌を採取し、一つにまとめて放射能を測定した結果、微量な  $^{137}\text{Cs}$  及び  $^{60}\text{Co}$  が検出された。

## 3. 原因調査

### 3.1 調査方法

放射性物質を含む廃液を通す埋設配管の塩化ビニル製フランジのき裂の発生した状況から、埋設配管の塩化ビニル製フランジにき裂が発生する要因として、フランジ部の施工不良、U字溝の干渉等があるため、機械的応力、化学的影響及び経年変化を想定し調査を行った。調査の内容を Fig.3に示す。

### 3.2 調査結果

放射性物質を含む廃液を通す埋設配管の塩化ビニル製フランジのき裂の発生した原因について、Fig.3のフローに従って調査を行った。その結果を次に示す。

#### 1) 機械的応力

##### ①U字溝の干渉

埋設配管と配管を覆っていたU字溝とが干渉して、塩化ビニル製フランジに過大な応力が発生した可能性があるため、塩化ビニル製フランジ及び鋼製フランジの外表面並びにU字溝コンクリート構造物の内外表面を観察したところ、大きな外力が加わったと推定される有意な傷等は確認されなかった。

##### ②フランジ部の施工不良

フランジの施工不良により、塩化ビニル製フランジに過大な応力が発生した可能性があるため、フランジ部及び配管の状態を調査した。

塩化ビニル製フランジの外表面を観察した結果、外部衝撃痕は確認されなかった。次に、塩化ビニル製フランジを切り出し、フランジ部を分割して、き裂部分の状態を観察した。塩化ビニル製フランジの分割後の外観写真をFig.4,5に示す。き裂は、Fig.4に示すボルト

番号で4番から8番にかけて生じていた。

き裂の状態を観察した結果、フランジの補強リブ根元の滑らかな面を起点として、しわ状の様子が観察された内面側に向かって進行していた。また、き裂の起点部には、Fig.6に示すように疲労痕が観察された。

### ③重量物の通過

重量物の通過により塩化ビニル製フランジに過大な応力が発生する可能性があるため、工事車両の通過等を、平成元年度以降の作業記録、聞き取りにより調査した結果、表面のアスファルトを除去した状態で重量物が通過した事実は認められなかった。

### ④掘削作業時の外力

掘削作業時の外力により、塩化ビニル製フランジに過大な応力が発生する可能性があるため、今回の汚水配管設備等更新工事及び掘削作業を伴う工事について、作業記録、聞き取りにより調査した結果、塩化ビニル製フランジに過大な応力を加えたと推定される事象は無かった。

### ⑤過大な水圧

配管に過大な圧力を加える等の不適切な使用により、塩化ビニル製フランジに過大な応力が発生する可能性について、平成元年度以降の使用実績の調査を行った結果、配管システムを加圧した実績はなかった。

### ⑥地震による外力

地震による外力により応力が発生する可能性があるため、平成元年から平成22年10月までの間に発生した、大洗地区、水戸地区及び鉾田地区における地震の最大加速度の値を使用し、埋設配管に発生する応力を算定した結果、配管にかかる応力は塩化ビニルの引張降伏強さを十分下回るものであり、塩化ビニル製フランジに過大な応力が発生するような影響はないことを確認した。

### ⑦高温排水による外力

高温水の排水により変形し、応力が発生した可能性について、平成元年度以降の排水の記録、配管の変形の有無を調査した結果、高温水の排水履歴はないこと、塩化ビニル製フランジ部分に変形は認められないことを確認した。

## 2) 化学的影響

### ①腐食性液体の排水

腐食性液体の排水については、調査の結果、平成元年度以降、腐食性液体を排水した履歴はなく、塩化ビニル製フランジ部近辺の塩化ビニル配管内面にも腐食等の異常は認められなかった。

## 3) 経年劣化

### ①紫外線による劣化

紫外線による劣化については、フランジ部分は地表より約70cmの土壤中にあるため、塩化ビニル製フランジの強度に有意な劣化を及ぼすような紫外線による影響は無かった。

### ②気温変化による劣化

気温変化による劣化の可能性があるので、気象庁の気象統計情報より平成元年から平

成22年10月までの大洗町、水戸市及び鉾田市の気温の統計を調査した結果、塩化ビニル製フランジの強度に有意な劣化を及ぼすような気温変化は無かった。

なお、配管内が常時液体で満たされることはないので、内部の液体の凍結による破損は考えられない。

### ③耐用年数を超えた使用

耐用年数に関しては、適切な施工が行われ、使用温度範囲内で使用される場合、メーカーのカタログによると50年以上の使用が可能であることから、今回の使用期間(約22年)は十分に耐用年数内である。

## 3.3 考察

塩化ビニル製フランジの外面側に過大な応力が発生した原因は次のように推測される。まず、塩化ビニル製フランジに接続されていた鋼製フランジに、塩化ビニル製フランジとの接続で使用すべき全面座フランジ(接合面の全面を平面に仕上げたフランジ)ではなく、小平面座フランジ(接合面のボルトの穴の内側に円形の平面座を設けたフランジ)が用いられていた。塩化ビニル製フランジとの接続に用いられていた小平面座フランジをFig.7に示す。小平面座フランジを用いた場合には、塩化ビニル製フランジの接続面に曲げの応力が発生する。次に、フランジ間に使用されていたパッキンを観察した結果、Fig.8に示すようにボルトの干渉痕が認められ、ほぼ全ての接続ボルトの締付けが過剰であったことがわかった。また、塩化ビニル配管と鋼管との芯ずれを調査した結果、Fig.9に示すように接続ボルトを外した状態で、両配管は約9mmの芯ずれが確認された。鋼製フランジと塩化ビニル製フランジの中心がずれた状態での無理な接続を行ったために、フランジ部にさらなる応力が発生していたと判断される。

フランジ部の施工不良の観点からは、上記の3つの複合要因により塩化ビニル製フランジに発生した曲げ応力でフランジ補強リブ根元が疲労し、疲労の蓄積により発生した微細なクラックを起点として、き裂に発展したと推測する。き裂発生 の推定状況をFig.10に示す。

き裂が生じた塩化ビニル製フランジ部を切り出して詳細に観察した結果をFig.11に示す。内面には土、錆のような堆積物が認められた。塩化ビニル製フランジの下側のき裂面には水垢のような汚れが認められた。以上の観察結果より、き裂は最近に発生したものではないと判断した。塩化ビニル製フランジの製造メーカーにより、き裂部分の詳細な観察を行ったが、観察結果からは、き裂の発生時期を特定することはできなかった。き裂の発生時期は、最後に水張りによる漏えい検査を行った平成11年3月11日以降と推定される。

#### 4. 環境への影響等

漏えいによる影響の範囲を推定するため、フランジき裂部の周辺の土壌を採取して放射能濃度を測定した。土壌のサンプリングに当たっては、地表面より約1mの掘削面を基準面とした。き裂発見当日は、この基準面において4ヶ所、当該フランジ部直下の土壌及びフランジから約30cm下流側の配管直下の土壌サンプリングを行った。測定結果では、検出下限値以上の放射能濃度を認めた位置は、塩化ビニル製フランジ直下の1ヶ所のみであった。発見当日の土壌サンプリング箇所と測定結果をFig.12に示す。

後日、フランジき裂部直下を中心として、約55cmの半径内で水平方向の土壌を12ヶ所サンプリングし、測定を行った。また、垂直方向の広がりを知るために、7ヶ所で、基準面から深さ方向に10cm刻みで土壌をサンプリングし、測定を行った。き裂箇所周辺の土壌サンプリング箇所と測定結果（水平方向）をFig.13に、き裂箇所周辺の土壌サンプリング箇所と測定結果（垂直方向）をFig.14に示す。調査の結果、半径約30cm、深さ約90cmの範囲で、検出下限値以上の放射能濃度が認められた。

周囲土壌は埋め戻しの土壌で、コンクリートのかげらや、砂利などがあり、試料採取ができない箇所が何箇所もあったため、検出下限値以上の放射能濃度が認められた範囲を十分に含むように、周囲の土壌（き裂中心から水平方向半径約30cm～40cm、深さ約120cm範囲）を撤去し、鉄製容器に回収した。その後、新たに周囲土壌撤去後の底部付近の土壌を4ヶ所で採取し、測定を行った結果、検出下限値以上の放射能濃度は検出されなかった。周囲の土壌回収後の底部付近の土壌サンプリング箇所と測定結果をFig.15に示す。

このことより、塩化ビニル製フランジ部のき裂発生に伴う漏えいの影響範囲は、限定的であった。また、き裂発見当日のモニタリングポストデータに変動はなかった。作業員の身体及び工具等に汚染は無かった。従って、本事象による作業員や環境への影響はなかった。

## 5. 対策

今回の塩化ビニル製フランジのき裂発生を踏まえ、居室実験室建家の排水設備については、管理区域外への漏えい防止を確実にするため、現在の屋外配管は撤去して、新規に配管を敷設する。今回、敷設する配管は、ステンレス鋼配管にし、フランジを用いない構造として、漏えいの防止を図り、硬質塩化ビニル管で覆い、ステンレス鋼配管から硬質塩化ビニル管内への漏えいは、ホット機械室内の柵で受けるようにする。その柵については、日常点検を行い、ステンレス鋼配管からの漏えいを監視する。また、ステンレス鋼配管については漏えいのないことを毎年1回の頻度で点検する。

## 6. 再発防止のための対応

居室実験室建家の排水設備に係る点検については、組織としてマニュアル化に対する考慮が不足しており、業務が十分に引き継がれなかった。このため、手引き等に点検の目的、方法、頻度等について明記し、教育により周知徹底することで確実な業務の引継ぎを図った。

また、竣工図等の図書については系統別に整理するなど、その管理方法の見直しを行った。

これまでの対応としては、今回の事象の原因となった塩化ビニル製フランジの施工に係る不備について、工事の経緯及び管理に係る問題点の教育を行った。排水設備等の放射性物質を取り扱う設備の工事を行う場合には、再発防止のため、受注者の技術的能力・経験等の確認を確実に行うとともに、工事の要求事項に対する施工計画の妥当性について担当課長がレビューし、その記録を保存するよう文書に定めた。

## 7. まとめ

き裂が発生した原因を調査した結果、フランジ接続の施工当時において、塩化ビニル配管と鋼管との芯がずれていたこと、ステンレス製配管と塩化ビニル製配管のフランジ接続において塩化ビニル製フランジを使用していたこと（一般にはステンレス製フランジを使用する）、フランジボルトの締め付けが過剰となっていたことにより、塩化ビニル製フランジに曲げ応力が生じ、き裂が発生したことがわかった。

再発防止のための対応として、図書について管理方法の見直し、塩化ビニル製フランジの施工に係る不備について教育を実施した。

現在、き裂が発見された塩化ビニル製フランジ及び埋設配管を交換する作業の準備を進めており、交換工事は、4月～5月にかけて実施する予定である。なお、今回の交換工事においては、今後、同じ事象が発生しないよう、き裂が発生した塩化ビニル製フランジ及び埋設配管と同種のものについても合わせて交換する予定である。

本報は、埋設配管からの漏えいに係る是正処置、漏えいの発生原因及びその後の対策等についてまとめたものである。

更新工事は平成23年4月から予定されており、工事の施工にあたっては、適用を受ける関係法令等を遵守し、工事の円滑な進行を図ることはもとより、安全意識の高揚に努め、事故・災害を防止する事が重要である。



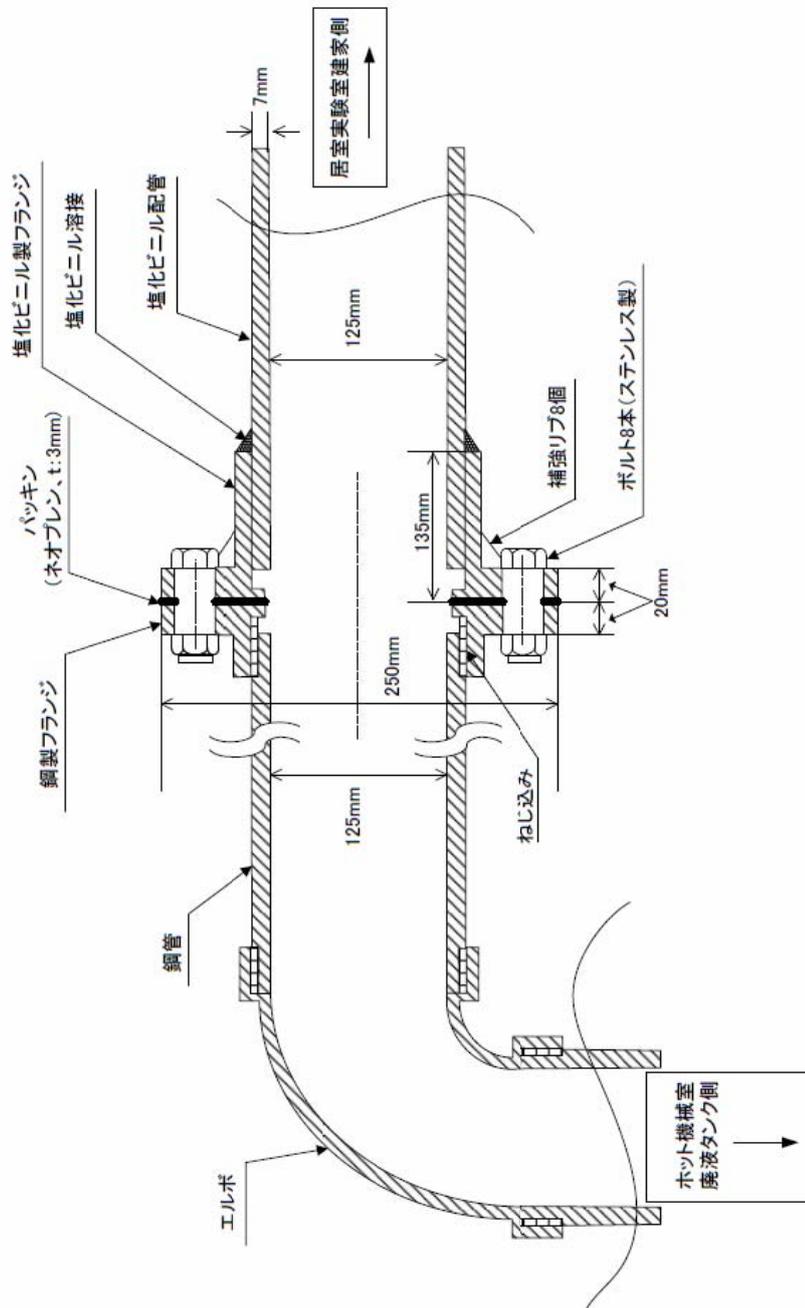


Fig.2 埋設配管接続部の概略図

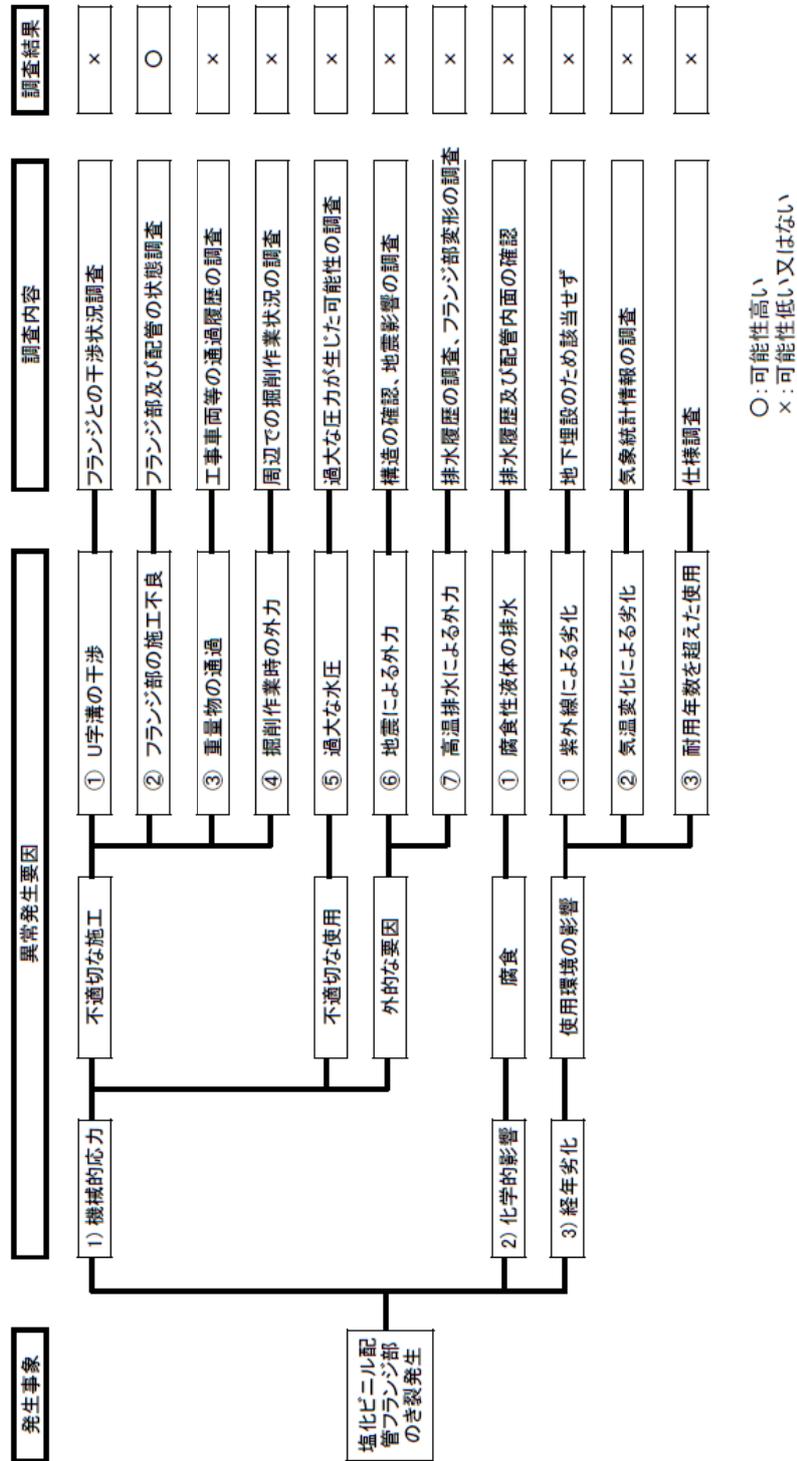


Fig.3 埋設配管の塩化ビニル製フランジにき裂が発生した原因の調査

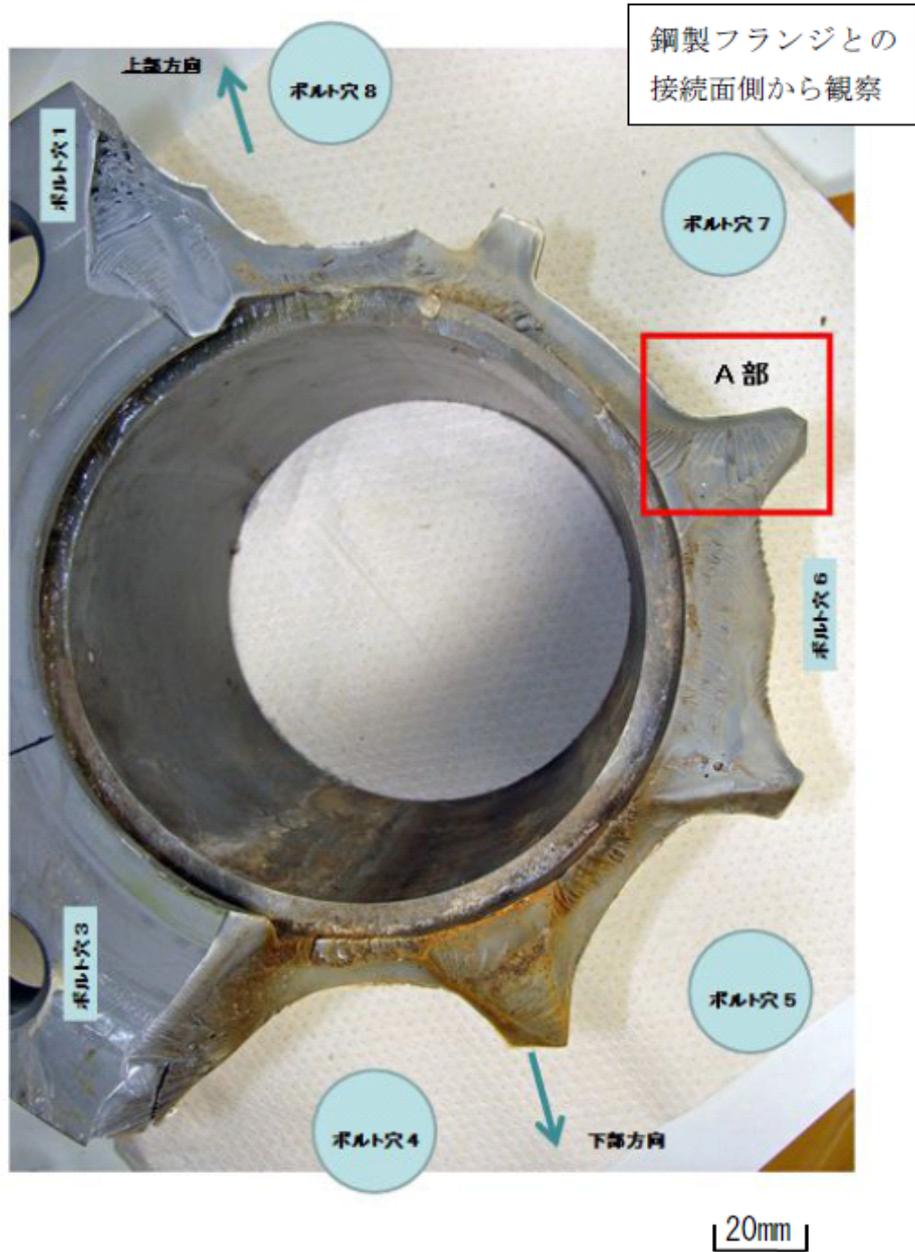


Fig.4 塩化ビニル製フランジの分割後の外観写真

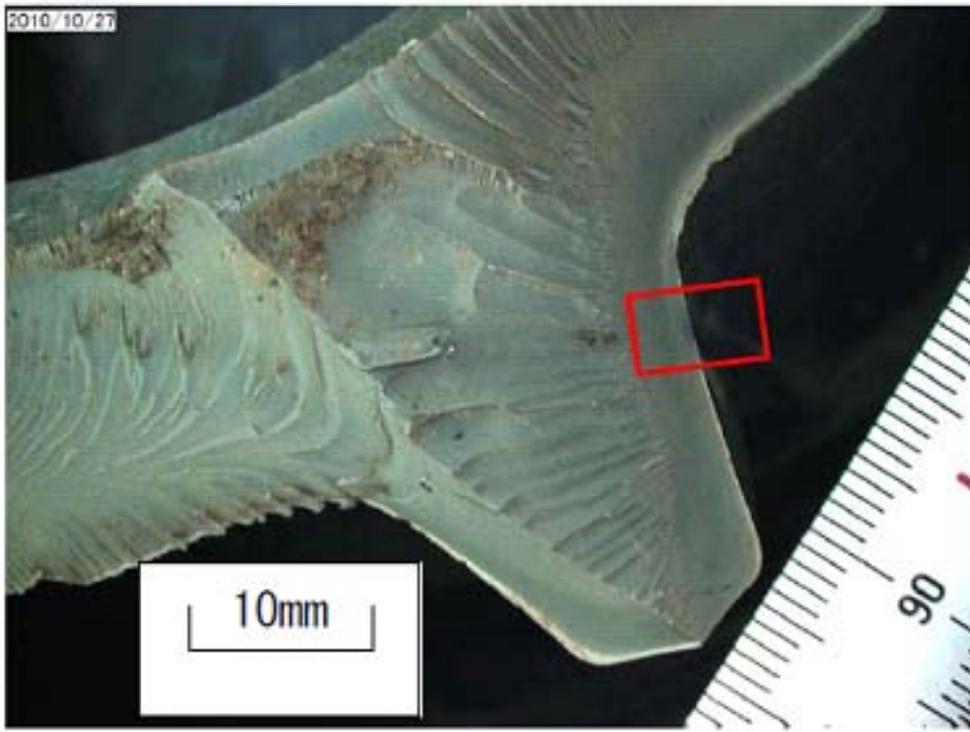


Fig.5 補強リブ根元の外面側表層(A部)

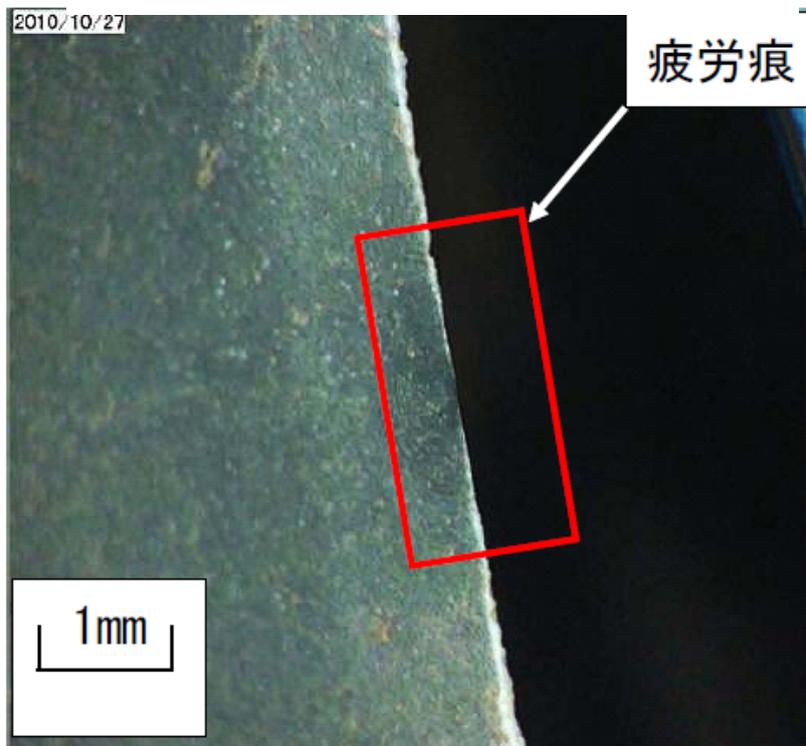


Fig.6 補強リブ付近に観察された疲労痕



Fig.7 鋼製フランジ(小平面座)

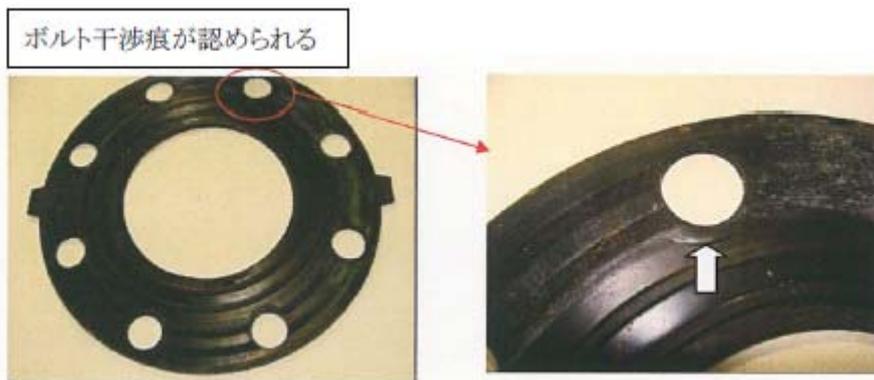


Fig.8 パッキン外観

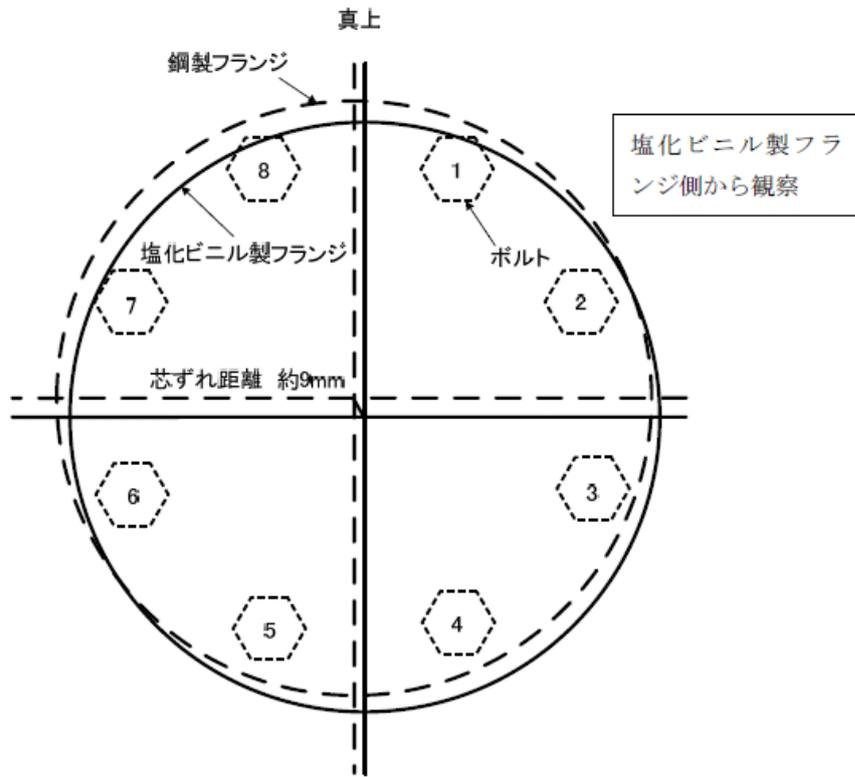
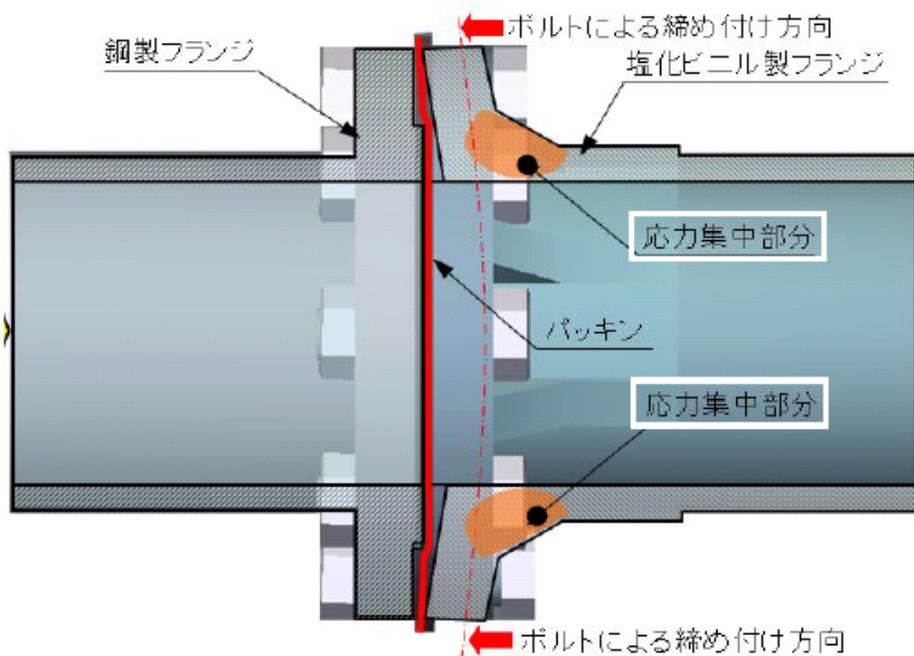


Fig.9 配管の芯ずれ



塩化ビニル製フランジ接続状態

Fig.10 フランジ部の接続状態



Fig.11 フランジ切断後に観察された内面及びき裂面の状態

き裂発見直後の土壌サンプリング結果(き裂箇所付近)

サンプリング位置	<sup>60</sup> Co		<sup>137</sup> Cs	
	濃度 (Bq/g(wet))	検出下限値 (Bq/g(wet))	濃度 (Bq/g(wet))	検出下限値 (Bq/g(wet))
き裂箇所直下	$3.3 \times 10^{-2}$	$4.4 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-2}$	$4.5 \times 10^{-3}$
き裂箇所下流側30cm	ND	$4.1 \times 10^{-3}$	ND	$4.1 \times 10^{-3}$

NDは検出下限値未満を表す。

き裂発見当日の土壌サンプリング結果(掘削範囲内)

サンプリング No.	き裂箇所からの距離 (cm)	<sup>60</sup> Co		<sup>137</sup> Cs	
		濃度 (Bq/g(wet))	検出下限値 (Bq/g(wet))	濃度 (Bq/g(wet))	検出下限値 (Bq/g(wet))
A	30	ND	$4.4 \times 10^{-3}$	ND	$3.9 \times 10^{-3}$
B	220	ND	$4.0 \times 10^{-3}$	ND	$4.0 \times 10^{-3}$
C	220	ND	$3.9 \times 10^{-3}$	ND	$4.5 \times 10^{-3}$
D	50	ND	$5.0 \times 10^{-3}$	ND	$4.4 \times 10^{-3}$

注) 土壌は、表面(地表面から約1m掘削した地点)から約5cmの深さまで採取

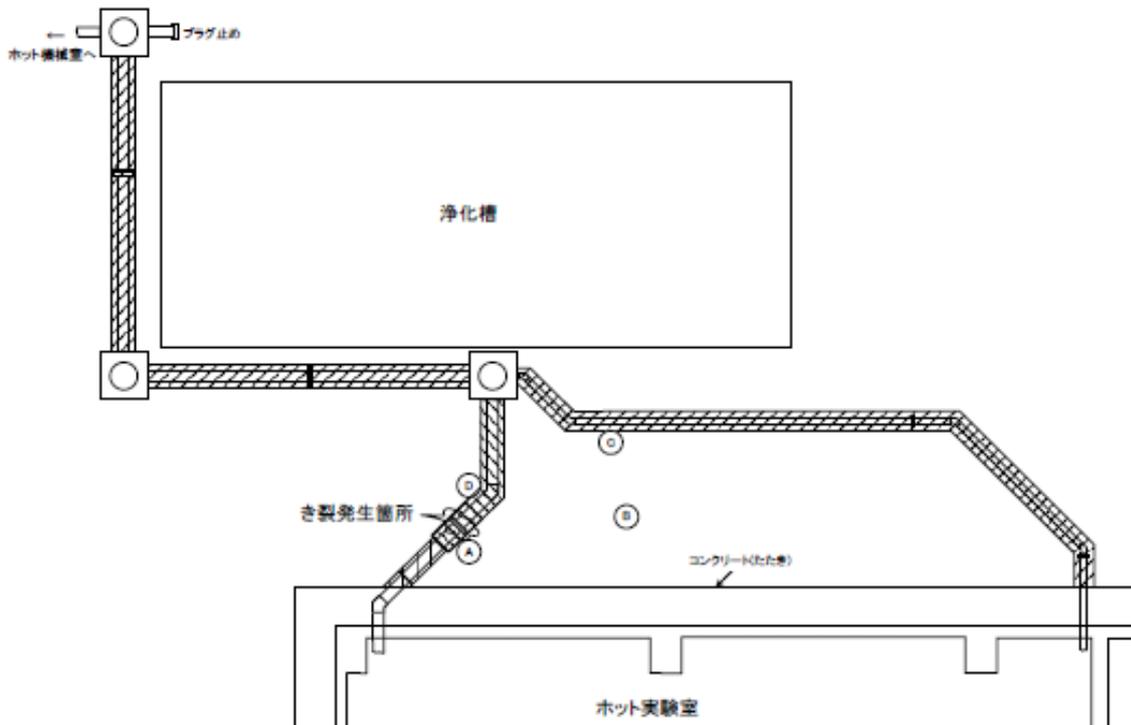


Fig.12 発見当日の土壌サンプリング箇所と測定結果

土壤サンプリング結果(水平方向)

サンプリング No.	距離 (cm)	<sup>60</sup> Co		<sup>137</sup> Cs	
		濃度 (Bq/g(wet))	検出下限値 (Bq/g(wet))	濃度 (Bq/g(wet))	検出下限値 (Bq/g(wet))
①	15	$2.6 \times 10^{-2}$	$5.1 \times 10^{-3}$	$9.1 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-3}$
②	15	$1.1 \times 10^{-2}$	$4.2 \times 10^{-3}$	ND	$3.9 \times 10^{-3}$
③	20	$2.6 \times 10^{-2}$	$4.9 \times 10^{-3}$	ND	$4.7 \times 10^{-3}$
④	20	$9.7 \times 10^{-2}$	$3.9 \times 10^{-3}$	ND	$5.3 \times 10^{-3}$
⑤	25	ND	$4.1 \times 10^{-3}$	ND	$4.0 \times 10^{-3}$
⑥	25	ND	$4.2 \times 10^{-3}$	ND	$4.2 \times 10^{-3}$
⑦	35	ND	$4.0 \times 10^{-3}$	ND	$4.2 \times 10^{-3}$
⑧	35	ND	$4.5 \times 10^{-3}$	ND	$4.1 \times 10^{-3}$
⑨	30	ND	$4.0 \times 10^{-3}$	ND	$3.7 \times 10^{-3}$
⑩	30	ND	$4.1 \times 10^{-3}$	ND	$3.7 \times 10^{-3}$
⑪	55	ND	$4.1 \times 10^{-3}$	ND	$4.3 \times 10^{-3}$
⑫	55	ND	$4.5 \times 10^{-3}$	ND	$3.9 \times 10^{-3}$

注) NDは、検出下限値未満を表す。

距離は、き裂配管の中心から土壤採取箇所を中心まで。

土壤は、表面(地表面から約1m掘削した地点)から約5cmの深さまで採取

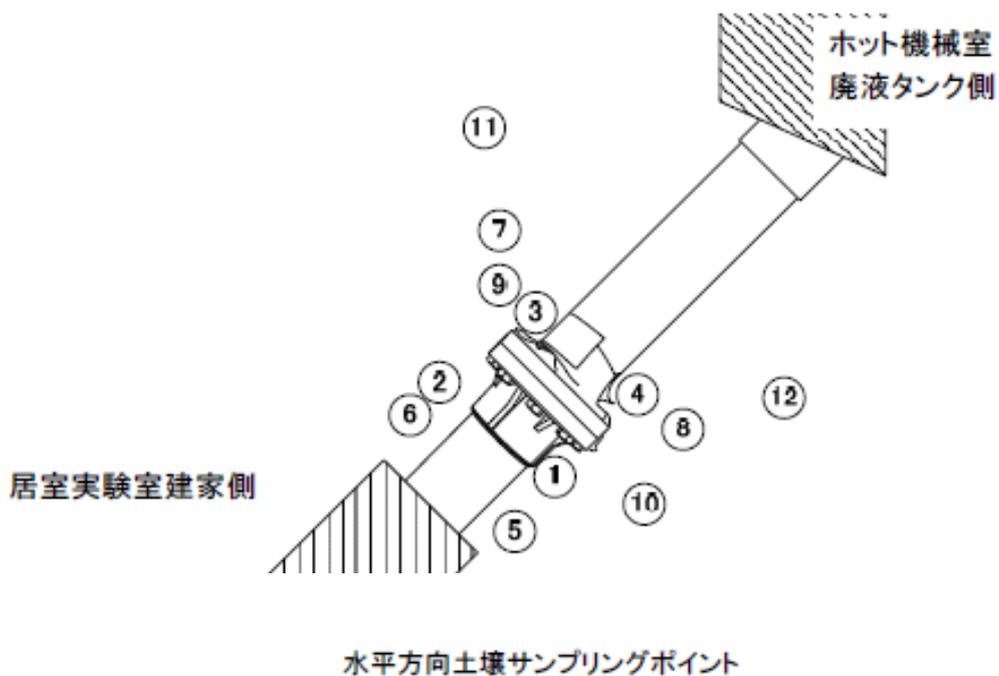


Fig.13 き裂箇所周辺の土壤サンプリング箇所と測定結果(水平方向)

土壌サンプリング結果(垂直方向)

サンプリング No	距離 (cm)	深さ (cm)	<sup>60</sup> Co		<sup>137</sup> Cs	
			濃度 (Bq/g(wet))	検出下限値 (Bq/g(wet))	濃度 (Bq/g(wet))	検出下限値 (Bq/g(wet))
①'	16	0~10	$5.5 \times 10^{-2}$	$3.9 \times 10^{-3}$	$5.5 \times 10^{-3}$	$4.6 \times 10^{-3}$
		10~20	$5.1 \times 10^{-2}$	$4.0 \times 10^{-3}$	ND	$4.5 \times 10^{-3}$
		20~30	$5.0 \times 10^{-2}$	$3.7 \times 10^{-3}$	ND	$3.8 \times 10^{-3}$
		30~40	$6.3 \times 10^{-2}$	$7.1 \times 10^{-3}$	ND	$7.1 \times 10^{-3}$
		40~50	$1.7 \times 10^{-2}$	$4.2 \times 10^{-3}$	ND	$3.9 \times 10^{-3}$
		50~60	$1.3 \times 10^{-2}$	$3.8 \times 10^{-3}$	ND	$4.2 \times 10^{-3}$
		60~70	$7.1 \times 10^{-3}$	$6.6 \times 10^{-3}$	ND	$6.7 \times 10^{-3}$
		70~80	ND	$4.3 \times 10^{-3}$	ND	$4.4 \times 10^{-3}$
		80~90	$5.2 \times 10^{-3}$	$3.9 \times 10^{-3}$	ND	$4.1 \times 10^{-3}$
		土壌に石などがあったため採取できず				
②'	14	0~10	$5.9 \times 10^{-2}$	$4.3 \times 10^{-3}$	ND	$3.9 \times 10^{-3}$
		10~20	$4.7 \times 10^{-2}$	$5.2 \times 10^{-3}$	ND	$5.0 \times 10^{-3}$
		20~30	$4.7 \times 10^{-2}$	$4.5 \times 10^{-3}$	ND	$4.9 \times 10^{-3}$
		30~50	土壌に石などがあったため採取できず			
		50~60*1	ND	$1.0 \times 10^{-2}$	ND	$8.3 \times 10^{-3}$
		60~70	$9.0 \times 10^{-3}$	$4.1 \times 10^{-3}$	ND	$4.7 \times 10^{-3}$
		70~80	ND	$5.0 \times 10^{-3}$	ND	$4.1 \times 10^{-3}$
		80~100*2	ND	$4.1 \times 10^{-3}$	ND	$4.1 \times 10^{-3}$
100~110	ND	$5.2 \times 10^{-3}$	ND	$4.3 \times 10^{-3}$		
③'	28	0~10	ND	$4.0 \times 10^{-3}$	ND	$3.9 \times 10^{-3}$
		10~20	$1.9 \times 10^{-2}$	$5.3 \times 10^{-3}$	ND	$4.1 \times 10^{-3}$
		20~30	ND	$4.5 \times 10^{-3}$	ND	$3.4 \times 10^{-3}$
		30~40	ND	$5.8 \times 10^{-3}$	ND	$4.9 \times 10^{-3}$
		40~50	ND	$3.5 \times 10^{-3}$	ND	$3.6 \times 10^{-3}$
		50~60	ND	$5.4 \times 10^{-3}$	ND	$3.3 \times 10^{-3}$
		60~70	ND	$4.9 \times 10^{-3}$	ND	$4.1 \times 10^{-3}$
		70~80	土壌に石などがあったため採取できず			
		80~90	ND	$5.8 \times 10^{-3}$	ND	$3.9 \times 10^{-3}$
90~100	ND	$5.2 \times 10^{-3}$	ND	$4.9 \times 10^{-3}$		
④'	17	0~10	$4.3 \times 10^{-2}$	$5.7 \times 10^{-3}$	ND	$4.8 \times 10^{-3}$
		10~20	$7.5 \times 10^{-2}$	$4.6 \times 10^{-3}$	ND	$4.7 \times 10^{-3}$
		20~30	$5.0 \times 10^{-2}$	$4.2 \times 10^{-3}$	ND	$4.8 \times 10^{-3}$
		30~40	$1.8 \times 10^{-2}$	$5.4 \times 10^{-3}$	ND	$4.4 \times 10^{-3}$
		40~60	土壌に石などがあったため採取できず			
		60~70	$6.0 \times 10^{-3}$	$4.6 \times 10^{-3}$	ND	$4.0 \times 10^{-3}$
		70~80	$1.1 \times 10^{-2}$	$4.0 \times 10^{-3}$	ND	$4.0 \times 10^{-3}$
		80~90	ND	$4.8 \times 10^{-3}$	ND	$5.0 \times 10^{-3}$
90~100	ND	$4.5 \times 10^{-3}$	ND	$3.4 \times 10^{-3}$		
⑤'	40	0~10	ND	$4.0 \times 10^{-3}$	ND	$4.4 \times 10^{-3}$
		10~20	ND	$3.2 \times 10^{-3}$	ND	$3.5 \times 10^{-3}$
		20~30	ND	$3.2 \times 10^{-3}$	ND	$2.8 \times 10^{-3}$
		30~40	ND	$6.4 \times 10^{-3}$	ND	$3.6 \times 10^{-3}$
		40~50	ND	$3.8 \times 10^{-3}$	ND	$3.6 \times 10^{-3}$
		50~60	ND	$3.0 \times 10^{-3}$	ND	$2.8 \times 10^{-3}$
		60~70	土壌に石などがあったため採取できず			

\*1: 採取量が他の半分程度のため、検出下限値が大きい。

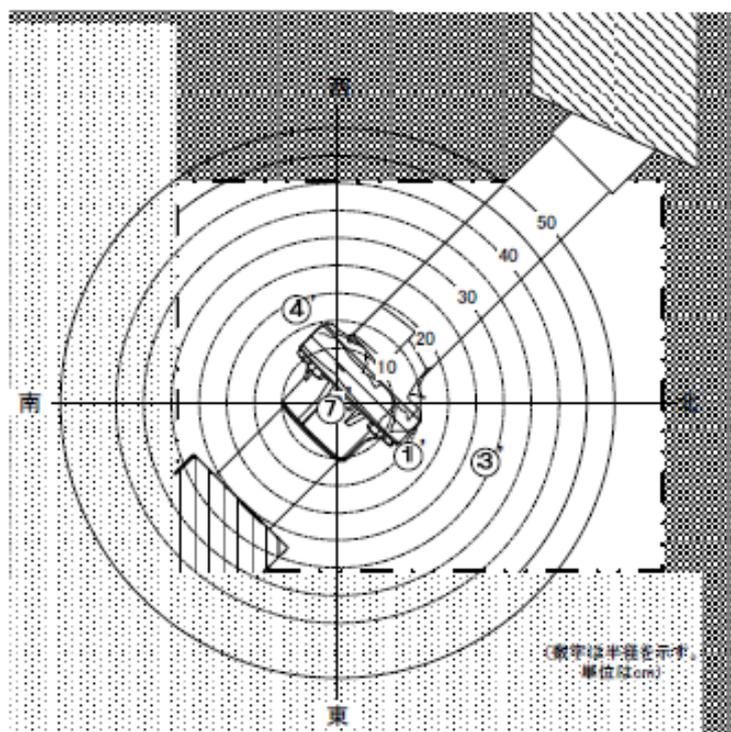
\*2: 試料の採取ができないため、20cmの範囲とした。

Fig.14 き裂箇所周辺の土壌サンプリング箇所と測定結果(垂直方向)

土壤サンプリング結果(撤去後)

サンプリング No.	深さ (cm)	<sup>60</sup> Co		<sup>137</sup> Cs	
		濃度 (Bq/g(wet))	検出下限値 (Bq/g(wet))	濃度 (Bq/g(wet))	検出下限値 (Bq/g(wet))
①'	120	ND	$4.7 \times 10^{-3}$	ND	$4.2 \times 10^{-3}$
③'	120	ND	$4.2 \times 10^{-3}$	ND	$4.1 \times 10^{-3}$
④'	120	ND	$4.1 \times 10^{-3}$	ND	$3.3 \times 10^{-3}$
⑦'	120	ND	$4.7 \times 10^{-3}$	ND	$4.1 \times 10^{-3}$

注) NDは、検出下限値未満を表す。



表面層は、地表面から約1m掘削した地点  
二点鎖線内の白抜き部分の土壤を撤去

Fig.15 周囲の土壤回収後の底部付近の土壤サンプリング箇所と測定結果

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立法メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C	K
光照度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg
酸素活性化	カタール	kat	s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間には同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s
表面張力	ニュートンメートル	N m
角速度	ニュートン毎メートル	N/m
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電表面電位	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電束密度, 電気変位	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
誘電率	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
透磁率	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎キログラム	J/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

