

低レベル放射性廃棄物輸送容器蓋固定用ボルト折損事象の
原因究明および再発防止対策について

平成 27 年 8 月 19 日

原燃輸送株式会社

目 次

1. はじめに	1
2. 事象の概要	3
3. 輸送容器の使用状況	5
4. 原因の調査	8
5. 原因の検討	11
6. 原因の特定	16
7. 再発防止対策	23
8. 水平展開	25
9. 外部有識者による検討委員会レビュー	27
10. 品質マネジメントシステムの観点からの主な問題点と再発防止対策について	28
11. まとめ	29

添付資料

添付－1	蓋固定用ボルト折損に係る F T 図
添付－2－1	折損したボルトの破断面観察
添付－2－2	追加破断面観察、拡散性水素測定
添付－3	蓋固定用ボルト折損（破壊モード）に係る F T 図
添付－4	文献調査
添付－5	非破壊検査および断面観察
添付－6	外部有識者による検討委員会
添付－7	低レベル放射性廃棄物輸送容器蓋固定用ボルト折損事象の原因究明 および再発防止対策について（品質マネジメントシステム編）

1. はじめに

全国の原子力発電所で発生した低レベル放射性廃棄物（以下「LLW」という。）※¹は、当社が保有する LLW-2 型輸送容器（以下「輸送容器」という。）※²（図 1.1 参照）に収納され、発電所から青森県六ヶ所村の日本原燃(株)低レベル放射性廃棄物埋設センター（以下「埋設施設」という。）まで輸送される。

当該輸送容器は、IP-2 型輸送物の技術基準を満足するように設計・製作されている。当社は、危険物船舶運送及び貯蔵規則（以下「危規則」という。）に基づく「IP-2 型輸送物の基準に係る承認書」および核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則（以下「外運搬規則」という。）に基づく「IP-2 型輸送物の基準に係る認定書」を取得している。

平成 27 年 2 月 16 日、原燃輸送(株) LLW 輸送容器管理センター（以下「管理センター」という。）にて空輸送容器の点検・保守時に 1 本の蓋固定用ボルト（以下「蓋ボルト」という。）※³が折損していることを確認した。その後、平成 27 年 6 月 25 日までに管理センターおよび発電所にて計 5 本の蓋ボルトが折損していることを確認した。

上記状況を受けて、当社は蓋ボルト折損の原因および対策措置を講じるまで、当該輸送容器を輸送に使用することを見合わせることを決定し、関係規制当局へ状況を報告した。

また、本件について当社は、平成 27 年 6 月 27 日に、国土交通省から蓋ボルト折損の原因究明および再発防止対策の検討を行うこと、再発防止対策の有効性が国土交通省に認められるまで輸送を差し控えることの指示文書を受領している。

なお、本事象は空輸送容器の点検中に確認されたものであり、法令に基づく技術上の基準などに抵触するものではない。

LLW 輸送では、点検・保守および使用前点検を行った輸送容器に LLW を収納後、蓋ボルトが折損していないことを確認しており、これまで実施された輸送において、外部への放射性物質の漏えいなどはなく、安全に輸送は実施された。

※¹：原子力発電所の運転に伴い発生する液体状や固体状の廃棄物で放射線レベルの低いもの（低レベル放射性廃棄物）を専用の 200 リットルドラム缶に均質・均一に固型化したものや、セメント系充填材（モルタル）を充填し固型化したもの。

※²：LLW を 8 本収納し、輸送するための専用容器であり、タイプ I とタイプ II の型式がある。※⁴、※⁵

※³：輸送容器の 4 ケ所で蓋と本体を固定している。

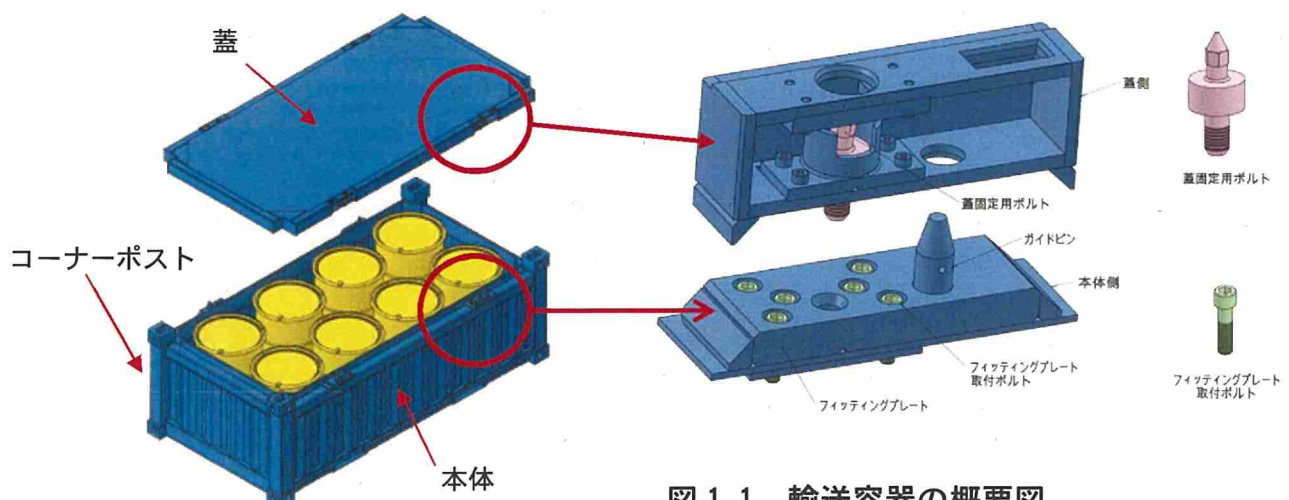
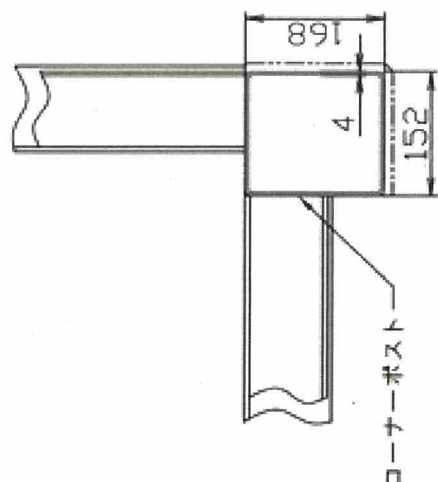


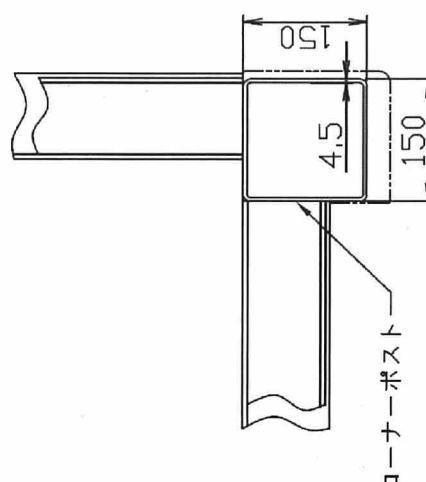
図 1.1 輸送容器の概要図

- ※4 タイプⅠ：LLW-2型輸送容器に変更する際に蓋のみ新造し、LLW-1型輸送容器本体を流用したもの。
 タイプⅡ：蓋および本体を新規に製造したもの。
 (タイプⅠ、Ⅱは、下図に示すように本体4隅のコーナーポストの断面寸法は異なる)



新蓋交換容器

LLW-2型輸送容器(タイプⅠ)

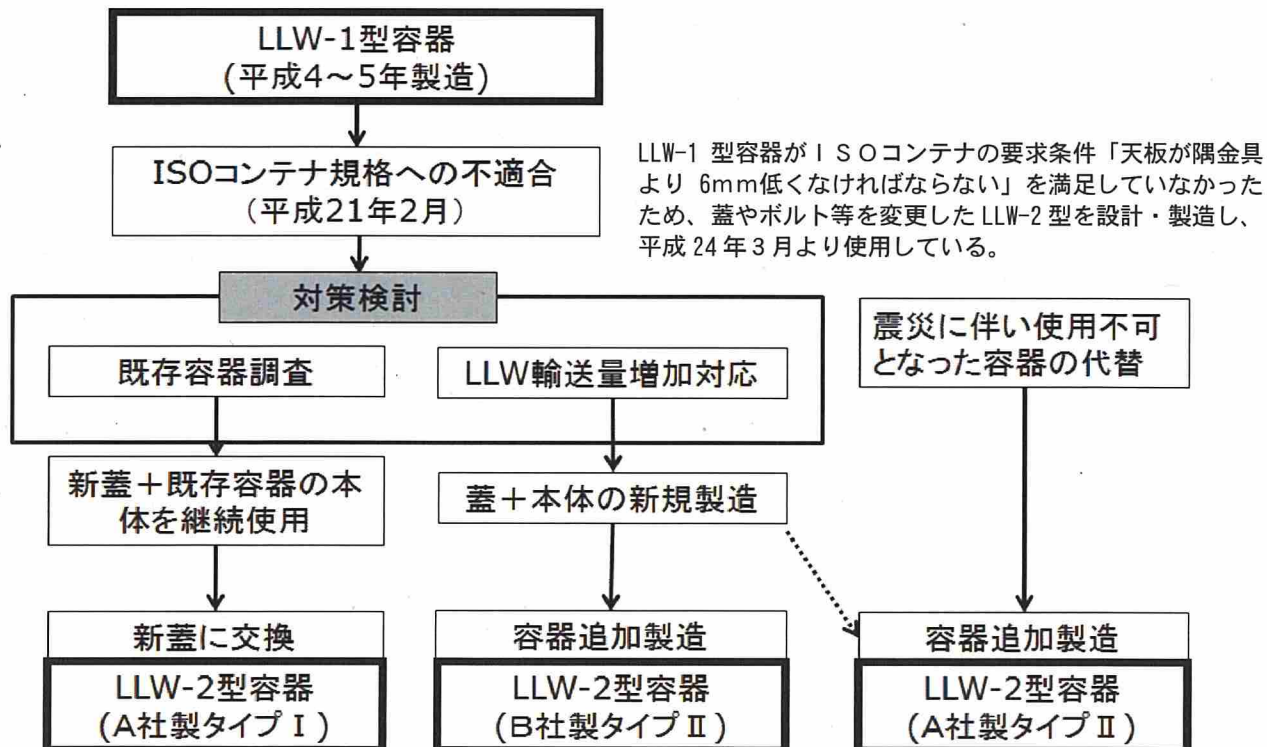


新規製造容器

LLW-2型輸送容器(タイプⅡ)

(単位：mm)

※5 容器設計の変遷



輸送容器の製造時期は以下のとおり (容器の製造に合わせて蓋ボルトも製作)。

- ①B社製タイプⅡ (平成23年10月～平成24年3月)
- ②A社製タイプⅠ (平成24年2月～平成26年1月)
- ③A社製タイプⅡ (平成25年10月～平成26年3月)

2. 事象の概要

平成 27 年 2 月 16 日の蓋ボルト折損確認から関係当局への報告までの時系列を表 2.1 に示す。また、折損した蓋ボルトを写真 2.1 に示す

表 2.1 蓋ボルト折損事象に係る時系列

日付	内容
平成 27 年 2 月 16 日	・ 管理センターにて空輸送容器 (No. 21892) の点検・保守時に蓋ボルト 1 本が折損していることを、当社作業員が確認。
平成 27 年 2 月 24 日	・ 当社よりボルトメーカーに当該蓋ボルトの分析を依頼。 (当該輸送容器の蓋ボルトを製造したメーカーとは他のボルトメーカー)
平成 27 年 4 月 11 日	・ ボルトメーカーより分析結果を受領。 (遅れ破壊の可能性が示された)
平成 27 年 6 月 9 日	・ 蓋ボルト折損事象を「不適合」と判断し、6 月 18 日社内に通知。
平成 27 年 6 月 22 日	・ 関西電力(株) 美浜発電所にて空輸送容器 (No. 21063) の使用前点検時に蓋ボルト 1 本の折損を発電所作業員が確認。
平成 27 年 6 月 25 日	・ 管理センターにて空輸送容器 (No. 22697) の点検・保守時に蓋ボルト 1 本の折損を当社作業員が確認。 ・ 本事象を受け、緊急時対策本部を立ち上げ、管理センターにて同タイプの輸送容器 13 個の追加確認を実施した結果、さらに 2 個の空輸送容器 (No. 21463, 22986) にて蓋ボルト各 1 本が折損していることを当社作業員が確認。
平成 27 年 6 月 26 日	・ 関係当局 (国土交通省および原子力規制庁) に対し事象を報告。



写真 2.1 折損した蓋ボルト (No. 21892)

平成 27 年 2 月 16 日以降の輸送実績を表 2.2 に、8 月 19 日現在の輸送容器の所在を表 2.3 にそれぞれ示す。

表 2.2 輸送実績（平成 27 年 2 月 16 日～6 月 26 日）

発電所	輸送個数	内訳
伊方発電所	45 個	タイプ I (A 社): 45 個
柏崎刈羽原子力発電所	211 個	タイプ I (A 社): 50 個 タイプ II (A 社): 161 個
高浜発電所※	190 個	タイプ I (A 社): 182 個 タイプ II (A 社): 8 個
女川原子力発電所	62 個	タイプ I (A 社): 62 個
大飯発電所※	185 個	タイプ I (A 社): 185 個
美浜発電所※	167 個	タイプ I (A 社): 65 個 タイプ II (A 社): 97 個 タイプ II (B 社): 5 個
浜岡原子力発電所	155 個	タイプ II (A 社): 155 個
合 計	1015 個	タイプ I (A 社): 589 個 タイプ II (A 社): 421 個 タイプ II (B 社): 5 個

※：空輸送容器を屋外で保管していた発電所

表 2.3 輸送容器の所在（平成 27 年 8 月 19 日現在）

所 在	LLW-1 型 (A 社)	LLW-2 型			合 計
		タイプ I (A 社)	タイプ II (A 社)	タイプ II (B 社)	
管理センター	0 個	812 個	151 個	395 個	1358 個
管理センター (管理対象外容器) ※	0 個	5 個	1 個	9 個	15 個
東海第二発電所	97 個	0 個	0 個	0 個	97 個
柏崎刈羽原子力発電所	0 個	181 個	69 個	0 個	250 個
浜岡原子力発電所	0 個	0 個	2 個	0 個	2 個
志賀原子力発電所	0 個	60 個	0 個	60 個	120 個
美浜発電所	0 個	152 個	44 個	35 個	231 個
大飯発電所	0 個	20 個	54 個	146 個	220 個
高浜発電所	0 個	35 個	0 個	150 個	185 個
島根原子力発電所	0 個	155 個	1 個	0 個	156 個
伊方発電所	0 個	140 個	0 個	0 個	140 個
玄海原子力発電所	0 個	215 個	0 個	0 個	215 個
敦賀発電所	0 個	0 個	86 個	94 個	180 個
埋設施設	0 個	62 個	158 個	11 個	231 個
合計	97 個	1837 個	566 個	900 個	3400 個

※：輸送に使用しない等の理由により管理対象から外している容器

3. 輸送容器の使用状況

(1) 使用状況

輸送容器は、管理センターにて屋外で保管し、発電所配送前に所定の点検・保守作業を行い、空の状態専用の運搬船（青栄丸）にて発電所に輸送される。なお、点検・保守作業後は輸送まで屋内にて保管される。

発電所に届いた輸送容器は、発電所により屋内、または屋外にて一時保管される。輸送容器にドラム缶を収納した後は、輸送まで屋内にて保管される。

輸送容器は、各発電所から青栄丸にて青森県六ヶ所村むつ小川原港まで海上輸送され、その後むつ小川原港より埋設施設に陸上輸送され、ドラム缶の取り出し後、空の輸送容器は管理センターに戻り、屋外保管される。

輸送容器は、約1年のサイクルで使用されているが、輸送容器の運用状況によっては長期間（1～2年）保管される容器もある。

輸送容器の運用の流れを図3.1に示す。

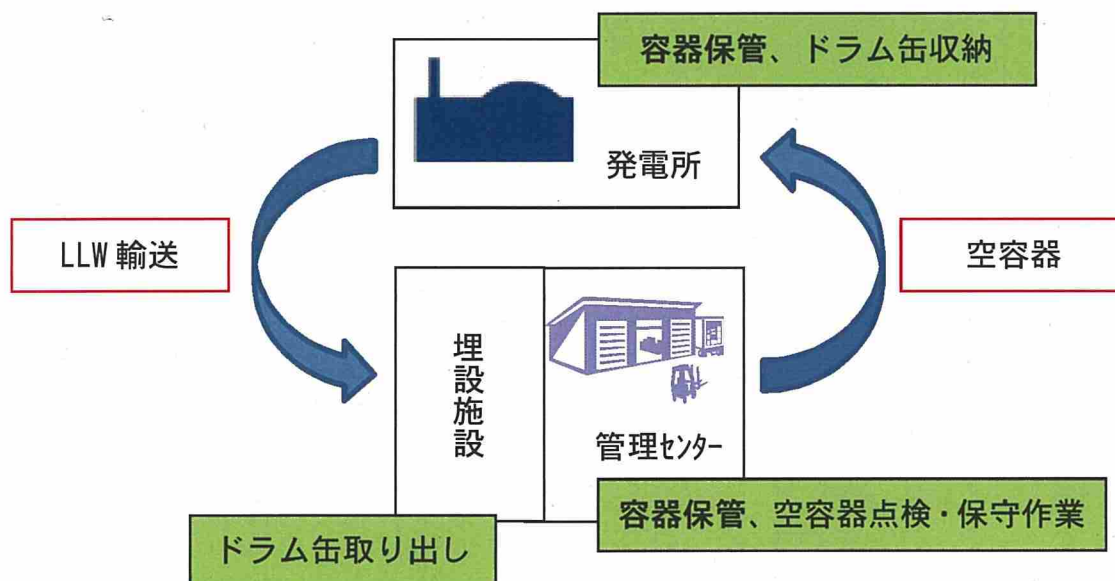


図 3.1 輸送容器の運用の流れ

輸送容器の蓋ボルトはドラム缶収納の有無によらず、 $147\text{N}\cdot\text{m} \pm 20\%$ のトルクで締め付けられた状態で保管されている。また、校正されたトルクレンチを用い、適切な締め付けトルクで締め付けているため、蓋ボルトに過大な荷重をかけてしまうことはない。保管中の蓋ボルトへの締め付け状態を図3.2に示す。

また、蓋の開閉は、管理センターにおける点検・保守作業、発電所におけるドラム缶収納作業、埋設施設におけるドラム缶の取り出し作業時のみ実施しており、蓋ボルトの取り扱い頻度は多くない。

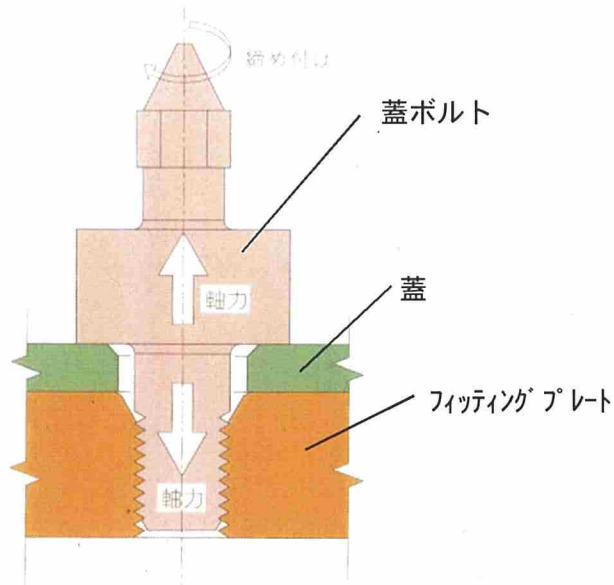


図 3.2 輸送容器の蓋ボルト締め付状態

(2) 保管環境

屋外保管の場合、写真 3.1 に示すように蓋ボルトは、直接風雨を受ける環境下に置かれた状態になる。



写真 3.1 管理センターにおける空輸送容器屋外保管状況

LLW-2 型輸送容器は、外側から蓋ボルトの締め付け状態を目視にて容易に確認できるようにするため、LLW-1 型輸送容器に取り付けられていた緊締装置側面を覆うカバーを設けていない。

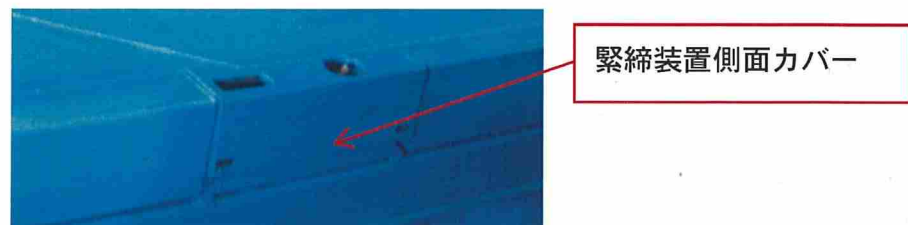


写真 3.2 LLW-1 型輸送容器の緊締装置側面カバー

蓋ボルト部に水が浸入する経路を図 3. 3 に示す。

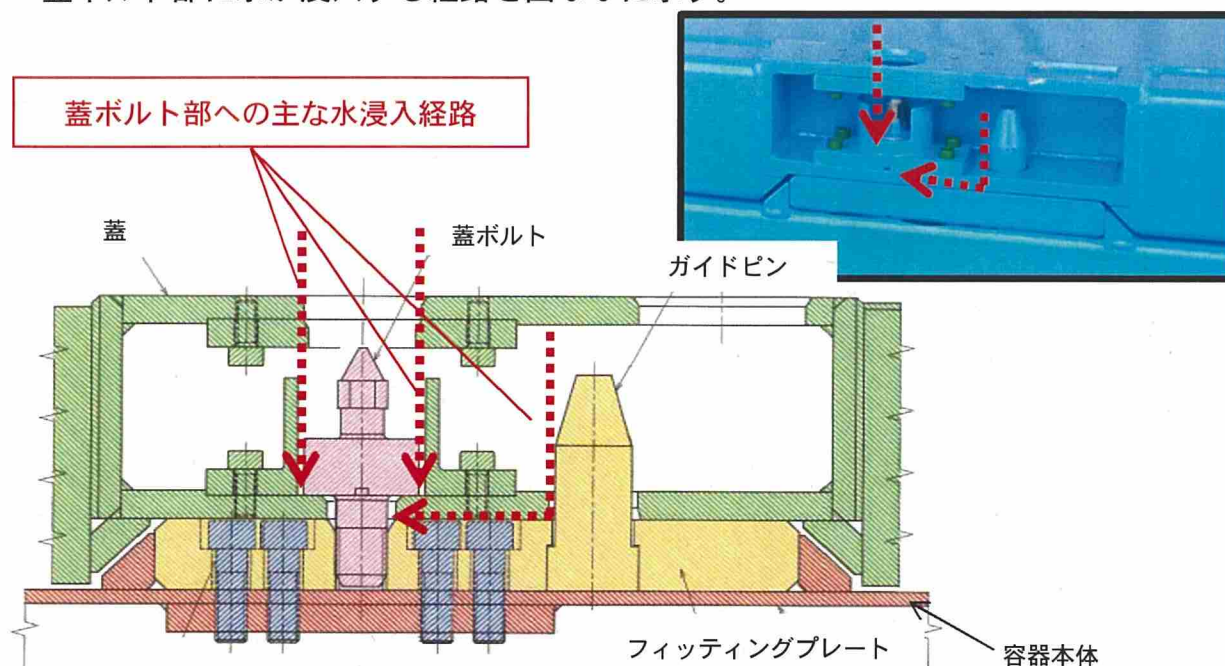


図 3. 3 蓋ボルト部への水浸入経路

(3) 取り扱い状況

輸送容器の取り扱いにあたっては、写真 3. 3 に示すようにフォークリフトにて容器下端部のフォークポケット、またはクレーンにて容器上部 4 隅の上部隅金具を用いているため、蓋ボルトに過大な荷重はかからない。



写真 3. 3 輸送容器取り扱い状況

海上輸送では、青栄丸船倉内に設けた専用のセルガイドで隅金具を保持して行っている。また、陸上輸送では、輸送トラックの専用架台と容器下部 4 隅の下部隅金具を連結して行っている。そのため、輸送中には蓋ボルトに過大な荷重はかからない。

4. 原因の調査

4. 1 調査フローおよび調査検討実績

(1) 調査フロー

蓋ボルト折損原因検討の調査手順を図 4. 1. 1 に示す。

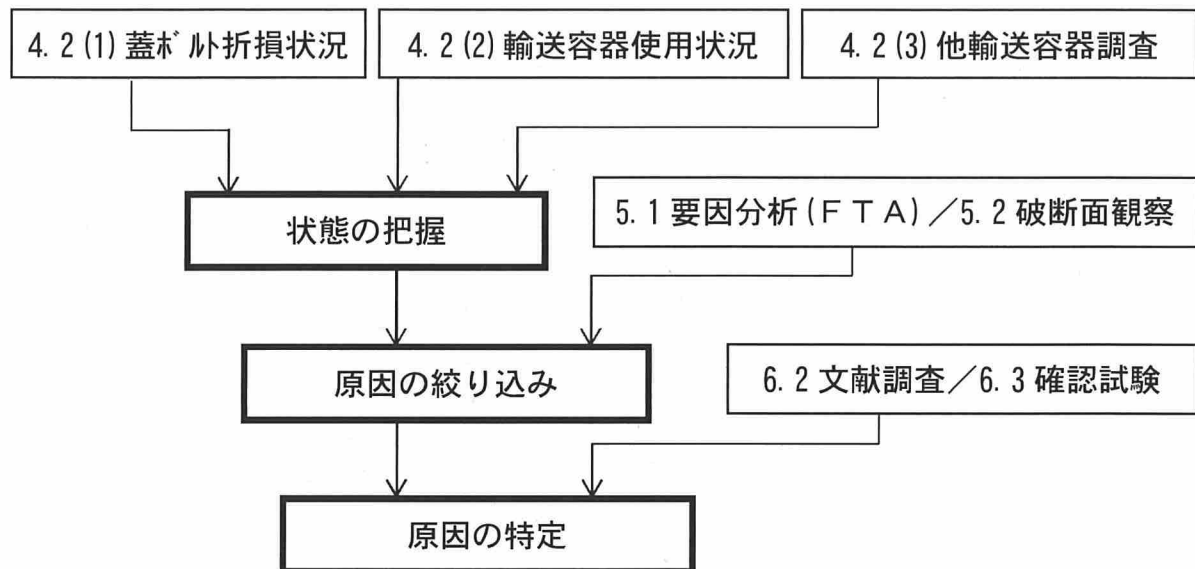


図 4. 1. 1 蓋ボルト折損原因検討の調査手順

(2) 調査検討実績

調査検討の実績を表 4. 1. 1 に示す。

表 4. 1. 1 調査検討実績

	6月	7月			8月		
蓋ボルト折損状況・ 輸送容器使用状況調査		■					
輸送容器調査		■		■	■		
要因分析 (FTA)		■	■	■			
破断面観察		■		■			
文献調査		■	■	■			
確認試験			■	■	■		

4. 2 蓋ボルト折損状況の調査

(1) 蓋ボルト折損状況

蓋ボルト折損は、管理センターで4本、発電所で1本の折損が確認されている。折損確認時の状況を以下に示す。蓋ボルト折損位置を図4.2.1に示す。

◆ 管理センター

1本目 (No. 21892) : 蓋ボルトをラチェットレンチで緩めていたら急に力が抜けた。
(一部トルクが残っていた)

3～5本目 (No. 22697, 21463, 22986) : 素手で蓋ボルトが緩められた。
(トルクはかかっていたいなかった)

◆ 発電所

2本目 (No. 21063) : 素手で蓋ボルトが緩められた。(トルクはかかっていたいなかった)

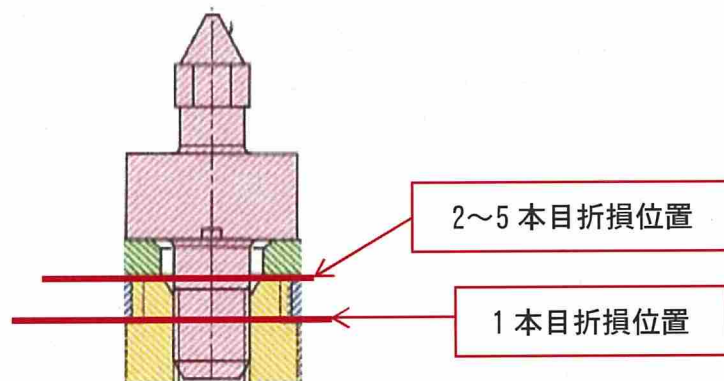


図4.2.1 蓋ボルト折損位置

(2) 輸送容器使用状況

蓋ボルトが折損した輸送容器の情報を表4.2.1に示す。

表4.2.1 蓋ボルトが折損した輸送容器の情報

No.	確認日	場所	容器No.	本数	確認時の フタの有無	製造メーカー	使用開始日	輸送容器使用履歴			
								管理センター屋外保管期間	管理センター点検日	発電所輸送実績 (受入～払出)	
1	H27.02.16	管理センター	21892 (タイプI)	1本	○	A社	H25.06.19	1回目	H25.06.19～H25.06.26	H25.06.27 (以降、屋内保管)	H25.10.08～H26.05.15
								2回目	H26.06.06～H27.02.15	H27.02.16 (以降、屋内保管)	H27.03.02～
2	H27.06.22	発電所	21063 (タイプI)	1本	×	A社	H24.10.30	1回目	H24.10.30～H25.01.06	H25.01.07 (以降、屋内保管)	H25.04.14～H26.04.25
								2回目	H26.06.06～H26.08.24	H26.08.25 (以降、屋内保管)	H26.09.13～
3	H27.06.25	管理センター	22697 (タイプI)	1本	×	A社	H25.10.09	—	H25.10.09～H27.06.25	—	—
								—	—	—	—
4	H27.06.25	管理センター	21463 (タイプI)	1本	×	A社	H25.09.17	—	H25.09.17～H27.06.25	—	—
								—	—	—	—
5	H27.06.25	管理センター	22986 (タイプI)	1本	×	A社	H25.06.25	1回目	H25.06.25～H25.06.26	H25.06.27 (以降、屋内保管)	H25.10.08～H26.05.16
								2回目	H26.06.03～H27.06.25	—	—

- ・ 蓋ボルトが折損した輸送容器はいずれもA社製タイプIである
- ・ 3個は輸送に使用されたが、2個は、管理センターに納入された後、一度も輸送に使用されていない
- ・ いずれの輸送容器も蓋ボルトは所定のトルクで締め付けられている
- ・ これらの輸送容器は特定の製造時期に偏っているものではない

蓋ボルトの折損のあった輸送容器の屋外保管期間を表 4. 2. 2 に示す。

表 4. 2. 2 蓋ボルト折損輸送容器の屋外保管期間

No.	容器 No.	屋外保管期間（累計）
1	21892	約 11 ヶ月
2	21063	約 21 ヶ月
3	22697	約 21 ヶ月
4	21463	約 22 ヶ月
5	22986	約 15 ヶ月

（３）管理センターにおける他輸送容器調査

管理センターにある 1358 個全ての輸送容器を調査し、上述折損蓋ボルト以外に折損がないことを確認した。

表 4. 2. 3 管理センターにおける調査結果

輸送容器種類	調査個数（ボルト本数）
タイプⅠ（Ａ社）	812 個（3248 本）
タイプⅡ（Ａ社）	151 個（ 604 本）
タイプⅡ（Ｂ社）	395 個（1580 本）
合 計	1358 個（5432 本）

5. 原因の検討

蓋ボルト折損の原因を検討するため要因分析（F T A）および折損した蓋ボルトの破面観察を行い、原因の絞り込みを行った。

5. 1 要因分析（F T A）

蓋ボルト折損の原因を漏れなく検討するため、考えられる項目として、「設計」、「製造」、「保守」、「環境」、「運用」、「人的要因」の6つの観点から要因を抽出し、要因分析図（F T 図）に取り纏めた。（添付－1 参照）

（1）設計に係る事項

設計については、輸送容器の構造、遮蔽、風雨密性、使用環境および輸送容器のタイプによる相違について検討した。

a) 構造

構造では、蓋、本体に大別した後、その構成部材について、材料、強度、形状、締付力、表面処理、異種金属の接触による電位差等の要素毎に要因を分析した。

その結果、「形状」、「蓋ボルトの材料強度区分」、「耐腐食性」を要因として抽出した。なお、蓋ボルトの強度区分以外の、各部材の材料、強度、締付力、表面処理、異種金属の接触による電位差等については蓋ボルト折損の要因とならないことを確認した。

＜要因－①＞「形状」

要因とした理由：

蓋ボルトの締結状態を目視にて容易に確認できるように緊締装置側面カバーを設けない設計としており、LLW-1 型輸送容器以上に雨水、雪との接触が避けられない構造である。

＜要因－②＞「蓋ボルトの材料強度区分」

要因とした理由：

強度が高い蓋ボルト（強度区分 12.9）にのみ折損が確認されているため、要因として抽出した。

また、LLW-1 型輸送容器では蓋ボルトの強度区分は 10T（10.9 相当）であった。LLW-2 型輸送容器では、A 社製は 12.9、B 社製は 9.8 とした。（表 5.1 参照）

表 5.1 蓋ボルト仕様比較表

		LLW-1 型 輸送容器	LLW-2 型輸送容器		
			タイプ I (A 社)	タイプ II (A 社)	タイプ II (B 社)
材料	材質	SNCM 447	SCM435H	SCM435H	SCM435H
	強度区分※	10T (10.9 相当)	12.9	12.9	9.8

※：JIS B 1051 に規定されている、機械的及び物理的性質の区分であり、12.9 が最も強度が高い

b) 使用環境

使用環境では、耐腐食性、使用環境温度について要因を分析した。

その結果、「耐腐食性」を要因として抽出した。なお、使用環境温度については蓋ボルト折損の要因とならないことを確認した。

＜要因－③＞「耐腐食性」

要因とした理由：

輸送容器本体は、塗装により保護されている。緊締装置部は、雨水、雪との接触が避けられない構造であり、折損した蓋ボルトにおいても錆が見られることから、蓋ボルト折損の要因として抽出した。

c) 遮蔽、風雨密性、輸送容器タイプによる相違

遮蔽、風雨密性に係る機能は蓋ボルト折損の要因とならないことを確認した。

また、輸送容器タイプにより設計上の相違がある部位は蓋ボルト折損の要因とはならないことを確認した。

(2) 製造に係る事項

製造については、構造、ロットによる影響について検討した。

a) 構造

構造では、蓋、本体、本体・蓋嵌め合い、タイプによる相違に大別した後、その構成部材に区別して材料、寸法、外観等の要素毎の要因を分析した。

材料、寸法、外観、表面処理、締め付けは各検査により要求仕様を満足していることが確認されており、蓋ボルト折損の要因とならないことを確認した。

なお、今回蓋ボルト折損が認められた輸送容器は、特定の製造時期に偏っていない。

b) ロットによる影響

折損のあった蓋ボルトは、特定の製造ロットに偏っておらず、ロットによる影響は蓋ボルトの折損の要因とならないことを確認した。

(3) 保守に係る事項

保守については、点検（検査）、保守（メンテナンス）、補修（修理）について検討した。

本体・蓋、蓋ボルト、ガスケット等の各構成部材について点検・保守・補修に係るマニュアルを定めている。点検では、変形、腐食、割れ、漏水がないことの確認や間隙測定等を、保守では、板金、塗装、錆除去等を実施している。また、折損した蓋ボルトに補修の実績はない。

これらの活動が蓋ボルト折損の要因とはならないことを確認した。

(4) 環境に係る事項

環境については、保管状況、塩害、温度変動について検討した。

a) 保管状況

管理センターでは、空輸送容器の保守前は屋外保管、点検・保守後は屋内保管している。

発電所では、多くは屋内保管であるが、空輸送容器搬送後からドラム缶の収納前までは屋外保管している発電所もある。

折損した蓋ボルト5本は、全て管理センターでの屋外保管期間が存在する。

保管状況では、「屋外保管」を要因として抽出した。

<要因④>「屋外保管」

要因とした理由：

屋外に保管している状態では、緊締装置部は雨水、雪等に曝されることになる。また、折損が確認された蓋ボルトには、発錆が見られる。

なお、屋内保管は、緊締装置部が雨水に曝されることがない環境であり、蓋ボルト折損の要因とならない。

b) 塩害

輸送中、屋外保管中における腐食進行を助長する塩分付着について検討した結果、「塩害」を要因として抽出した。

<要因⑤>「塩害」

要因とした理由：

緊締装置部は輸送中や屋外保管中に海塩粒子が付着し得る環境にある。また、折損が確認された蓋ボルトには、発錆が見られる。

c) 温度変動

輸送容器の使用環境による温度変動に対する蓋ボルトの折損への影響はなく要因とならないことを確認した。

(5) 運用に係る事項

運用については、蓋ボルトの取り扱い、嵌め合い、衝撃荷重、輸送・取り扱い中の振動、疲労破壊について検討した。

a) 蓋ボルトの取り扱い

蓋ボルトの取り扱いでは、トルク管理、作業員の過誤、蓋ボルトの固着について要因を分析した。

蓋ボルトの締付トルクの管理は、適正な締付トルク（147N・m±20%）が記載されているマニュアルにてルール化されていること、作業は作業責任者等の下で実施しておりボルトに過剰な力が加わる取り扱いをしていないことを確認した。

また、折損した蓋ボルトの上部は、素手または適切な工具でスムーズに取り外せて

おり固着はなく、蓋ボルトの取り扱いが蓋ボルト折損の要因とはならないことを確認した。

b) 嵌め合い、衝撃荷重、輸送・取り扱い中の振動、疲労破壊

嵌め合いに異常はないことを確認した。衝撃荷重、輸送・取り扱い中の振動、疲労破壊については、輸送容器に過度な荷重や振動等を受けた事象がなかったため、蓋ボルト折損の要因とはならないことを確認した。

(6) 人的要因に係る事項

人が意図的に蓋ボルトを折損させることについて、製造時、取り扱い時について検討した。

a) 製造時における人的要因

製造時に可能性がある材料への異物混入、材料記録の捏造、故意の傷について要因として分析した。

材料の異物混入や材料記録の捏造については、輸送容器製造メーカーは、適切な品質管理システムを構築しており起こらない。念のため、折損した蓋ボルトの成分分析や金相観察、硬さ測定等を実施し、要求仕様を満足していることを確認した。

また故意に蓋ボルトを傷つけることについては、製造時の外観検査にて確認していることから、製造時の人的要因は蓋ボルト折損の要因とならないことを確認した。

b) 保管、取り扱い時における人的要因

管理センターは、埋設施設内の立入制限がなされている区域にあり、外部の不審者が立ち入っていなかったことは、埋設施設の入門記録に該当が無いことにより確認した。また、管理センターは昼間は作業員がおり、夜間は施設の監視員によりパトロールされている。作業は常時作業責任者を含む複数名で行われており、故意に損傷を与えることはできない。以上より、故意に蓋ボルトを折損させることがなかったことから、蓋ボルト折損の要因とならないことを確認した。

(7) まとめ

蓋ボルト折損に至る要因として、「設計」、「製造」、「保守」、「環境」、「運用」、「人的要因」の6つの観点から要因分析を行った結果、「設計」および「環境」が、蓋ボルト折損に至る要因であると抽出された。

- ・「設計」に係る事項では「形状」、「蓋ボルトの材料強度区分」、「耐腐食性」
- ・「環境」に係る事項では「屋外保管」、「塩害」

5. 2 破断面観察

折損した 5 本の蓋ボルトについて破断面の観察を行った。(添付－ 2 － 1、添付－ 2 － 2 参照)

破断面の観察結果より、5 本のうち 4 本について脆化が進んでいたことを示す粒界割れが認められた。(表 5. 2 参照)

表 5. 2 破断面の観察結果 (まとめ)

No.	輸送容器 No.	破断面観察結果
1	21892	◎
2	21063	○
3	22697	×
4	21463	○
5	22986	◎

◎：破面から直ぐに判断 ○：追加観察破面から判断 ×：破面からの判断は困難

6. 原因の特定

5. 1項の要因分析（F T A）結果より、材料強度区分の変更（設計）と腐食（環境）に係る項目が要因として抽出した。また、5. 2項の破断面観察結果から5本中4本の破断面に粒界割れを確認した。

原因が、設計や環境に絞り込まれたため、蓋ボルトの破壊モードについて全て洗い出し、要因の有無について、蓋ボルトの破壊モードに限定したF T Aを行い、原因の特定を行った。

また、今回の蓋ボルト折損の原因特定に繋がるような文献の調査および確認試験を行い、原因について検討を行った。

6. 1 蓋ボルトの破壊モードの比較による要因有無の検討

ボルトの破壊要因に着目し、蓋ボルト折損に対して考え得る「静的破壊」、「疲労破壊」、「遅れ破壊」、「低温脆性」、「応力腐食割れ」の破壊モードを洗い出し、要因分析（F T A）を行った。（添付—3 参照）

要因分析（F T A）の結果、「静的破壊」、「疲労破壊」、「低温脆性」、「応力腐食割れ」のいずれも考えにくく、今回の事象は「遅れ破壊」によるものと整理した。

◆ 静的破壊

静的破壊とは、ボルトに大きな荷重がかかり折損する破壊モードである。今回の事象は以下の理由により、静的破壊ではない。

- ・過剰なトルクや作業員の過誤による過大な締め付けは無い。
- ・材料の強度不足はなく、規格を満足した材料を使用している。
- ・輸送容器本体との蓋の嵌め合わせ不良により過大な荷重がかかることは無い。

◆ 疲労破壊

疲労破壊とは、小さい荷重を繰り返し受けボルトが折損する破壊モードである。今回の事象は以下の理由により、疲労破壊ではない。

- ・輸送・取り扱い中の振動によらず、使用歴の少ない輸送容器の蓋ボルトが保管中に折損している。
- ・破断面観察にて、疲労破壊特有のビーチマーク（貝殻模様）が見られない。

◆ 遅れ破壊

遅れ破壊とは、高強度鋼が静的荷重下で水素脆化により突然脆性的に折損する破壊モードである。今回の事象は以下の理由により、遅れ破壊の可能性はある。

- ・折損した蓋ボルトには引張強さが1200MPa以上の高強度鋼を使用している。
- ・蓋ボルトは風雨に曝される環境にあり、表面が腐食し水素が供給されていたものと考えられる。
- ・保管中、輸送中ともに147N・m±20%のトルクで締め付けており、常に蓋ボルトに荷重が作用している。

◆ 低温脆性

低温脆性とは、材料が温度低下により脆化し、衝撃荷重によりボルトが折損する破壊モードである。今回の事象は以下の理由により、低温脆性ではない。

- ・使用環境における最低温度は -5°C 程度であり、蓋ボルトの材料は -20°C でも使用可能である。
- ・輸送容器は慎重に扱われており、蓋ボルト折損のあった輸送容器表面に異常な傷もないことから、蓋ボルトに衝撃荷重がかかる事象は発生していない。

◆ 応力腐食割れ

応力腐食割れは、引張り応力下で局所的な腐食が進展し、ボルトが折損する破壊モードである。今回の事象は以下の理由により、応力腐食割れではない。

- ・蓋ボルトは常に $147\text{N}\cdot\text{m}\pm 20\%$ のトルクで締め付けられており、応力が作用している状態であったが、炭素鋼は通常の雨水等による腐食環境下では応力腐食割れは生じないことが知られている。

6. 2 文献調査

5本中4本の破断面に脆化が進んでいたことを示す粒界割れが認められたことから、脆化に着目して各種文献調査を行った。その結果、強度区分が高い蓋ボルトについては水素脆化により突然脆性的に破壊する「遅れ破壊」を生じやすいことがわかった。また、脆化の原因となる水素は、腐食により供給されることを確認した。(添付－4 参照)

鋼道路橋等の接合に使用されている高力ボルトにおいて、遅れ破壊が原因となる脱落が多く発生し、既に1980年頃には損傷ボルト数を調査した文献や高力ボルトの使用が制限されていることもあり、土木や建築分野等では「遅れ破壊」は認知されていた。

「遅れ破壊」は材料強度、使用環境、応力状態の三つの要素が複合して生じることがわかった。

6. 3 確認試験

今回の事象が「遅れ破壊」であることを確認するため、また、7. 再発防止対策および8. 水平展開の有効性を確認するために以下の試験を実施した。

(1) 「遅れ破壊」有無の確認 (添付－5 参照)

蓋ボルトの折損が確認された輸送容器の他の折損の無い3本の蓋ボルト(同環境、同材料の蓋ボルト)について、非破壊検査および断面観察により確認した結果、不完全ねじ部に、深さ約 $30\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ 程度の蓋ボルト径方向に対して直角の欠陥が認められた。これは、他の一般的なボルトにも確認できる製造時や取扱時に付いた傷と考えられ、必ずしも「遅れ破壊」と関連するものではない。

併せて、8. 水平展開で説明するフィッティングプレート取付ボルトについても、同様の試験を実施した結果、蓋ボルトで認められたような欠陥は確認されなかった。

(2) 拡散性水素量測定 (添付 2 - 2 参照)

今回折損が確認された蓋ボルトの折損時の拡散性水素量を推定するため、管理センターに保管中のタイプⅠの輸送容器から蓋ボルト (強度区分 12.9) を抜き取り、拡散性水素量を測定した。

併せて、7. 再発防止対策の有効性を確認するためにタイプⅡの輸送容器の蓋ボルト (強度区分 9.8) を、8. 水平展開の有効性を確認するためにフィッティングプレート取付ボルト (強度区分 12.9) を抜き取り、同様に拡散性水素量を測定した。

測定結果は、表 6.3.1 のとおりであり、いずれのボルトにも拡散性水素が侵入しており、強度区分の違いにより拡散性水素の侵入量に大きな違いは認められなかった。

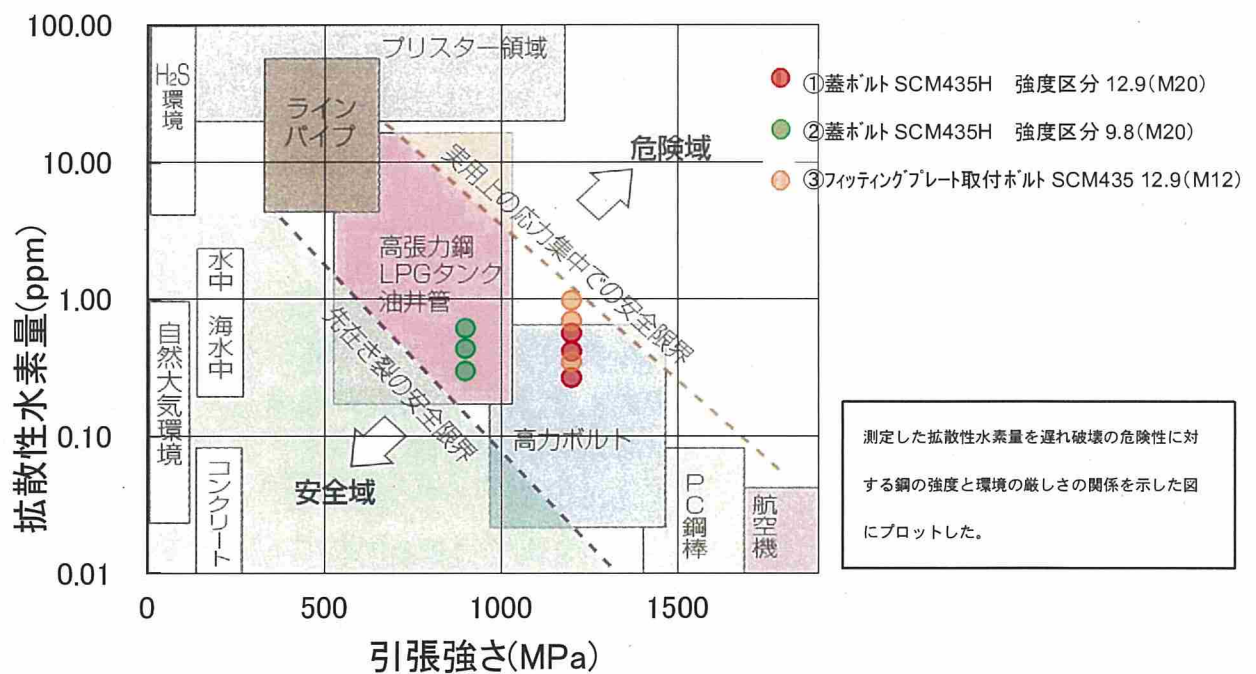
また、測定した拡散性水素量を遅れ破壊の危険性に対する鋼の強度と環境の厳しさの関係を示した図にプロット (図 6.3.1 参照) すると、蓋ボルト (強度区分 9.8) は、安全域に近く、遅れ破壊に対する安全性が高くなったことを確認した。

なお、強度区分 9.8 の蓋ボルトは、約 20 年の使用実績において折損事例を経験しなかった LLW-1 型輸送容器の蓋ボルト (SNCM447) の強度区分 10T (10.9 相当) よりさらに強度区分が低い材料である。

表 6. 3. 1 各ボルトの拡散性水素量

種 類	拡散性水素量 (ppm)	輸送容器 No.
①蓋ボルト SCM435H 強度区分 12. 9 (M20)	0. 27	20086
	0. 41	21514
	0. 57	22894
②蓋ボルト SCM435H 強度区分 9. 8 (M20)	0. 43	25005
	0. 30	25460
	0. 61	25878
③フィッティングプレート取付ボルト SCM435 強度区分 12. 9 (M12)	0. 35	21514
	0. 69	
	0. 97	

※管理センターに屋外保管している輸送容器から抜き取ってきた 9 本の測定結果



(図の出典: 松山晋作: 遅れ破壊 日刊工業新聞社(1989))

図 6. 3. 1 拡散性水素量

6. 4 考察

(1) 遅れ破壊のメカニズム※

遅れ破壊とは、鋼材が引張強さ以下の負荷応力のもとである時間を経過したとき、外見上はほとんど塑性変形を伴うことなく、突然脆性的に破壊する現象である。これは、鋼材に侵入した水素により、鋼材の脆化が引き起こされることによるものとされている。

そのメカニズムは、水分等により鋼材の表面が腐食する場合、鉄の腐食反応で H^+ が生成され、 H^+ は鉄表面で還元され吸着水素となる。吸着水素の多くは H_2 となって大気中に放出されるが、一部が鋼中に拡散していく。(図 6. 4. 1 参照)

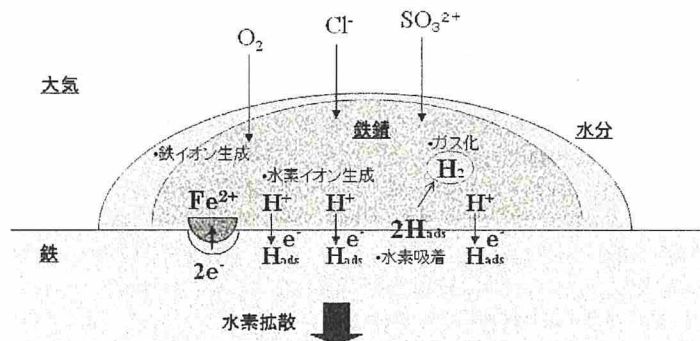


図 6. 4. 1 鉄の腐食反応と水素発生

(図の出典：高力ボルトの遅れ破壊特性評価ガイドブック P7-3)

水素による脆化のメカニズムには諸説あるが、鋼中に侵入した水素原子が鋼材の欠陥や粒界などの欠陥部分で水素ガスとなり部分的に高圧化することで起きるとの説がある。一般に水素脆化は高強度鋼で顕著であり、鋼材が脆化すると本来の引張強さ以下の応力でも亀裂が発生する。

亀裂が発生すると、応力の増加によりさらに水素が集中して亀裂が進展していき（図 6. 4. 2 参照）、亀裂がある面積に達すると、断面積の減少により負荷応力に耐え切れなくなり、遅れ破壊による破断が発生する。ここで、亀裂部分は脆性破面であり、最後に破断する部分は延性破面である。

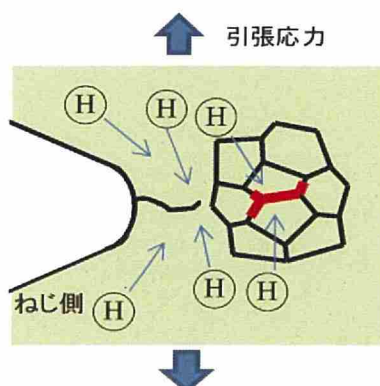


図 6. 4. 2 亀裂発生模式図

- ※参考文献 (1) 社団法人 日本鋼構造協会：高力ボルトの遅れ破壊特性評価ガイドブック
(2) 田中和明：最新金属の基本がわかる事典、秀和システム

(2) 今回の事象との関係

今回の事象と「遅れ破壊」のメカニズムの関係を整理した。以下に示すとおり、今回の状況は「遅れ破壊」を起こし得る状況にあったといえる。「遅れ破壊」のメカニズムを図 6. 4. 3 に示す。また、5 本のうち 4 本について脆化が進んでいたことを示す粒界割れが認められた。

① 材料強度

今回折損が確認された蓋ボルトは、いずれも強度区分 12. 9 (引張強さが 1200MPa 以上) の高強度材料を用いており、文献調査において遅れ破壊への注意が特に必要とされる強度であった。

② 腐食状況 (使用環境)

今回折損が確認された蓋ボルトには錆が確認されている。また、雨水、雪との接触が避けられない構造・使用環境にあったことから、水素脆化を引き起こす水素が存在する状況にあったと考えられる。

③ 応力状態

今回折損が確認された蓋ボルトは、いずれも規定トルク $147\text{N}\cdot\text{m} \pm 20\%$ で締結された状態で折損しており、応力が作用していた。

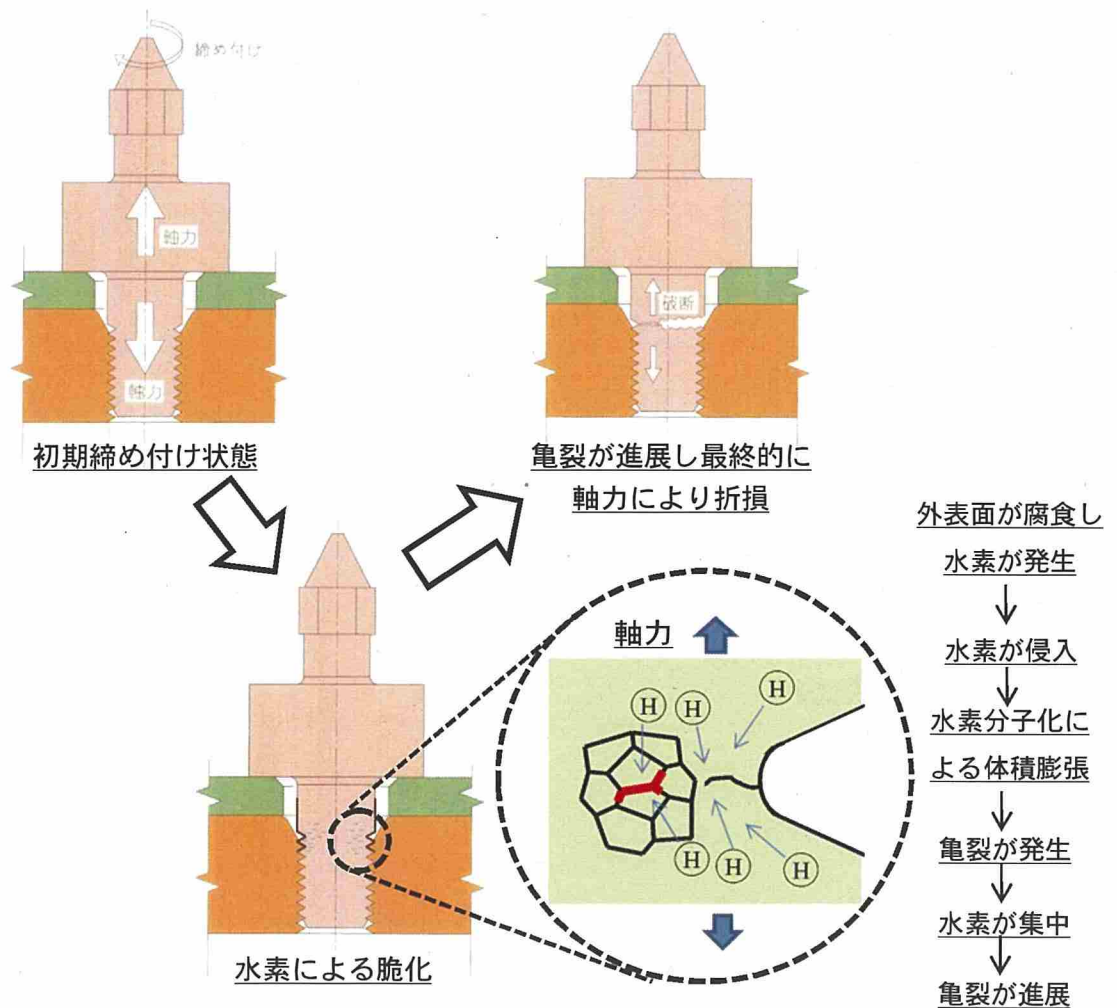


図 6. 4. 3 「遅れ破壊」のメカニズム

6. 5 まとめ

6. 1 項および 6. 2 項により、今回の事象が「遅れ破壊」と考えられることを確認した。

6. 3 項において、保管中の同タイプの輸送容器の蓋ボルトにより、遅れ破壊の原因となる拡散性水素の量を確認した結果、蓋ボルト（強度区分 12. 9）は、危険域に近いことを確認した。

6. 4 項により、遅れ破壊のメカニズムと今回の事象との関係を考察し、「材料強度」、「腐食状況（使用環境）」、「応力状態」について、遅れ破壊が起こり得る状況にあったことを確認した。

以上より、今回の事象を「遅れ破壊」と特定した。

7. 再発防止対策

蓋ボルト折損の原因は「遅れ破壊」であると特定された。「遅れ破壊」は材料強度、使用環境、応力状態の三つの要素が複合して生じるといわれているが、材料の強度区分を下げ遅れ破壊の感受性を下げることが最も有効な対策であると、外部有識者による検討委員会にて結論づけられた。（「9. 外部有識者による検討委員会レビュー」参照）

「遅れ破壊」の三つの要素に対する再発防止対策の考え方について以下に整理した。

➤ 材料強度

今回折損が確認された蓋ボルトの強度区分 12.9 は、文献において遅れ破壊への注意が特に必要とされる強度であり、強度区分を 9.8 に下げ、遅れ破壊の感受性を下げることに対応を図る。

➤ 使用環境

輸送容器は、雨水、雪等との接触が避けられない構造・使用環境にある。このため、水素脆化を引き起こす水素が存在する環境下にあったとしても、強度区分を下げ遅れ破壊の感受性を下げる対応を図る。

➤ 応力状態

蓋ボルトは、所定トルクで締め付けて使用しており常に応力がかかっているが、これまでと同様に適切な締め付け管理を行い、過大な応力が作用しないようにする。

原因の調査、検討、特定を通して判明した蓋ボルトの「遅れ破壊」に対して、外部有識者による検討委員会からの意見や文献調査の結果より、今回の「遅れ破壊」は、材料の強度区分を下げることで十分な再発防止対策になるとの結論を得た。

これを踏まえ、以下の対策を実施する。

（1）材料の改善

蓋ボルトの強度区分が 12.9 のものは 9.8 へ順次輸送前に変更する。

なお、材料の強度を下げた場合でも規定の締め付けトルクや輸送中に生じる荷重に対して十分な余裕を有していることを確認しており、ボルトの締め付け時には過大な締め付けトルクが作用しないように適切に管理する。

（2）ボルト点検

蓋ボルトおよびフィッティングプレートのねじ部については、管理センターにおいて清掃後に目視による外観点検で傷、割れ、凹み等が無いことを確認し、必要に応じてダイス・タップを用いてねじ部の欠損等がないことを確認する。ねじ部の錆（腐食）は、ワイヤーブラシ等を用いて除去する。

また、発電所におけるドラム缶収納時には蓋ボルトの点検を行い、異常のないことを確認する。

今後の更なる取り組みとして、蓋ボルトを締め付けた状態の輸送容器を屋外に設置し、定期的に蓋ボルトを抜き取り、その状況を確認し、必要に応じて供用中輸送容器の蓋ボルトを交換する等の措置を講じることとする。蓋ボルトの異常有無の確認方法として、過負荷による方法等も加え、適切な方法について今後検討する。

また、環境の更なる改善方策についても、事業者として継続的に検討していく。

8. 水平展開

8. 1 フィッティングプレート取付ボルト

蓋ボルトと同様な高強度の材料が使用され、輸送容器本体と蓋を締結するための機能を有するものとしてフィッティングプレート取付ボルトが抽出された。

これを踏まえ、以下の対策を実施する。

(1) 材料の改善

フィッティングプレート取付ボルトについては、折損した蓋ボルト位置のフィッティングプレートを取り外して確認した結果、折損は確認されなかったが、蓋ボルトと同様の強度区分 12.9 を使用していることから、強度区分を 12.9 から 9.8 に変更する。

フィッティングプレート取付ボルトは、通常締めたまま取り外すことはないことから、防食表面処理（表面コーティング）をボルト頭部だけでなく、ねじ部にも行い耐環境性の改善を行う。（写真 8.1 参照）



現状のボルト



ねじ部に防食表面処理をしたボルト例

写真 8.1 フィッティングプレート取付ボルトの防食表面処理外観

(2) ボルト点検

管理センターにて、抜き取りにてフィッティングプレート取付ボルトの折損の有無を点検する。

抜き取りの方法としては、屋外に保管されていた容器の内、保管期間（管理センターと発電所の合計期間）の長いものから 200 個(*)を選定する。

本点検結果に従い、発電所にて既にドラム缶を収納済みの輸送容器のフィッティングプレート取付ボルトは以下の処置を講ずる。

➤ フィッティングプレート取付ボルトの折損が確認されない場合

輸送前にフィッティングプレート取付ボルトの目視確認およびボルトヘッドの触診による確認を行ったうえで、輸送を行い、管理センターにてフィッティングプレート取付ボルトを交換する。

➤ フィッティングプレート取付ボルトの折損が確認された場合

発電所にてフィッティングプレート取付ボルトの交換を行い輸送する。

(*) フィッティングプレート取付ボルトの総本数約 80,000 本に対して、JIS Z9015-1 の抜き取り

検査方式の「きつい検査」の検査水準Ⅲを適用した場合、800 本（輸送容器 34 個分）となる。
万全を期すために、フィッティングプレート取付ボルト 4,800 本（輸送容器 200 個分）を点検する。

フィッティングプレート取付ボルトの点検・保守については、取り付けた状態でボルトヘッドの外観目視点検を行い、著しい錆や傷等が確認されたものについては、ボルトを取り外して点検、清掃、交換等を行う。

8. 2 その他のボルト

輸送容器に使用している強度区分 12.9 のボルトとして、ボルトガイドトッププレート取付ボルトおよびボルトガイドボトムプレート取付ボルトがある。これらのボルトは輸送容器本体と蓋を締結するための機能を有していないことから、水平展開は不要とした。

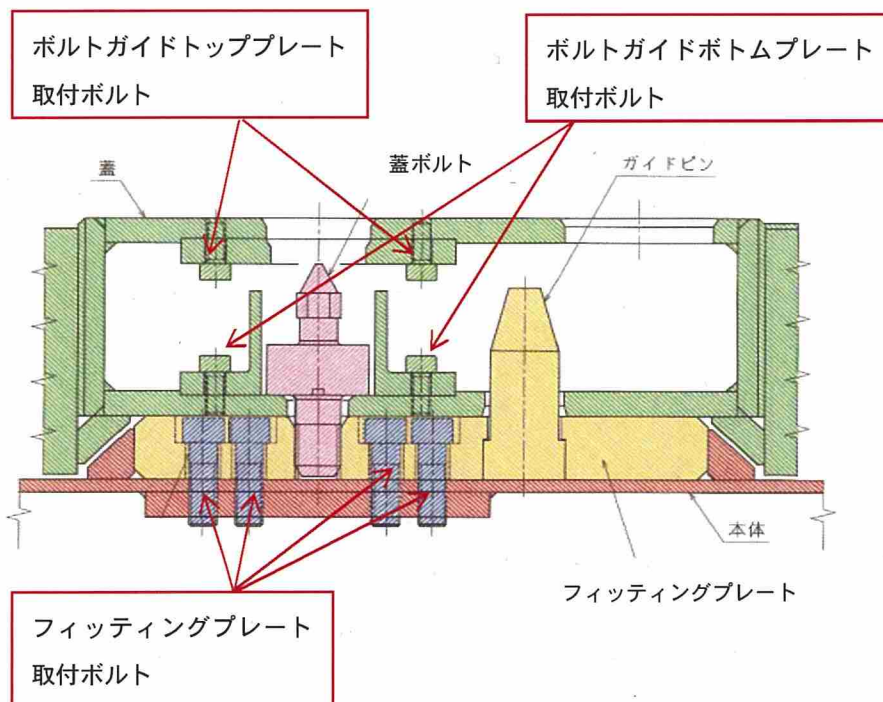


図 8.2.1 各ボルトの取付位置

9. 外部有識者による検討委員会レビュー

当社は、上記原因および再発防止対策等を検証するために、社内に外部有識者による検討委員会を設置し、「6. 原因の特定」、「7. 再発防止対策」および「8. 水平展開」について、委員のレビュー、ご助言をいただいた。（委員および略歴は添付－6 参照）

（1）開催日

- ・ 第1回 平成27年7月28日
- ・ 第2回 平成27年8月17日

（2）レビュー結果概要

a) 第1回

- ・ 今回の蓋ボルト折損事象は、「遅れ破壊」メカニズムによるものとする。
- ・ 今回の事象が顕在化した最大の要因は、ボルトの強度区分を上げたことである。
- ・ 対策についてはボルトの強度区分を 9.8 に下げて、「遅れ破壊」の感受性を下げることが最も有効である。

b) 第2回

- ・ 6. 3（1）「遅れ破壊」有無の確認 における蓋ボルト断面観察により確認された欠陥は、他の一般的なボルトにも確認できる製造時や取扱時に付いた傷と考えられ、必ずしも遅れ破壊と関連するものではない。
- ・ 折損した蓋ボルトの破面観察結果（5 本中 4 本に遅れ破壊の特徴である粒界割れが確認できる）等から蓋ボルトが折損した原因は遅れ破壊であると考えられる。折損に対する輸送容器タイプの違いによる影響は解明されていないが、遅れ破壊対策として蓋ボルトの強度区分を下げることは A 社製タイプⅡ容器に使用されている蓋ボルトも含めて全てのボルトに対して効果がある。
- ・ ドラム缶収納済み輸送容器の輸送前のフィッティングプレート取付ボルトに関する水平展開の考え方（管理センターにおけるフィッティングプレート取付ボルトの健全性を抜き取りで調査した上で判断する）については合理的と考えられる。

10. 品質マネジメントシステムの観点からの主な問題点と再発防止対策について

今回の事象に関し、品質マネジメントシステム上の観点から問題点を抽出し、その原因と再発防止対策を検討した。(添付－7 参照)

(1) 問題点

- a) LLW-2 型輸送容器蓋ボルトの採用にあたり、設計・製造段階における仕様（強度区分）変更のレビューが十分ではなかったこと。
- b) 不適合報告の遅れがあり、原子力に携わる事業者として、前広に社内外に情報共有する安全文化の意識が不十分であったこと。

(2) 再発防止対策

- a) 設計変更レビューの実施にあたっては、社内の設計・製造両部門に加え、必要に応じて、設計メーカーまたは社外専門家を含めることを手順書に明記する。
- b) 企業風土の観点から経営層は、不適合報告の遅れがないよう全社員に周知するとともに、報告が確実に実施されていることを確認する。
- c) 再発防止対策 a)、b) に係る安全文化醸成教育を全社員対象に実施する。
- d) 折損した蓋ボルトを社内に展示するなど、本事象から得られた教訓が風化しないようにする。

11. まとめ

- (1) 原因究明の結果、蓋ボルト折損の原因は、ボルトが腐食する際に発生した水素によって、とりわけ強度区分の高い鋼材に生じやすい「遅れ破壊」によるものと特定した。
 - (2) 材料の強度区分を下げることで十分な再発防止策になるとの結論を得た。これを踏まえ、以下の対策を実施することとした。
 - a) 材料の改善
蓋ボルト材料の強度区分を 12.9 から 9.8 に変更する。
 - b) ボルトの点検
供用中輸送容器の蓋ボルトについて清掃後に外観点検を行い、傷、割れ等がないことを確認し、ねじ部の錆（腐食）は、除去する。
- また、同じ高強度材のボルトを使用している、フィッティングプレート取付ボルトについても、強度区分を 12.9 から 9.8 に変更することとした。
- (3) 外部有識者による検討委員会により、原因の特定、再発防止対策、水平展開について、委員のレビュー、ご助言をいただいた。
 - (4) 本件に係る一連の品質マネジメントシステム活動を調査、レビューした結果、設計仕様変更時のレビュー不足等が問題点として抽出されたが、それらに対する改善策を実施し、品質マネジメントシステムの継続的改善に努めることとした。

当社としては、再発防止対策を速やかに進めるとともに、今回の経験を踏まえ、品質マネジメントシステムの継続的改善を図り、従業員に対する教育を実施し、再発防止に努めてまいります。

以 上

蓋ボルト折損に係るFT図

				判定理由・現在の状況	結果					
ボルト折損	設計	構造	蓋	天板・側板・補強材	材料	蓋の構造強度を見直しているが、蓋ボルト近傍の材料は変えておらず、蓋ボルトの折損に影響しない。	×			
					強度	蓋の構造強度を見直しているが、蓋ボルトの折損に影響しない。	×			
					形状	蓋ボルトの締結状態を目視にて確認できるように緊締装置カバーを取外しており、LLW-1型以上に雨水、雪との接触が避けられない構造である。	▲			
				蓋ボルト	材料	LLW-1型のSNCM447からLLW-2型のSCM435Hに材料を変更している。なお、両方とも一般的にボルトに使用されている適切な材料であるため、蓋ボルトの折損に影響しない。	×			
					材料 強度区分	折損が確認された蓋ボルトと折損が確認されない蓋ボルトでは強度区分に差があった。強度が高い強度区分12.9のボルトは、折損が確認されている。	▲			
					締付力	トルク締め(製造時のトルク値147N・m 応力141MPa)しているが、材料強度(応力1200MPa)と比較して十分下回るため締付けによる折損はない。	×			
					表面処理	リン酸塩皮膜処理は、蓋ボルトを熱処理・加工後に実施している。 (注: JIS B1051 2014 においては、りん酸塩皮膜処理を行った素材からボルトを製作する場合には、熱処理前に脱りん処理を行わなければならないとしている)	×			
					異種金属の接触による電位差腐食	SCM435HとSS400はいずれも鋼材であり、電位差腐食の影響はない。	×			
					形状	蓋ボルトは、締結に必要なネジ山が確保されており、蓋ボルト折損に影響しない。	×			
				ガスケット	材料・構造	シリコンゴム(材料)製のガスケットを蓋に取り付け風雨密性を確保する構造で、蓋ボルトの折損に影響しない。	×			
					反力	ガスケット反力は、蓋を締める事で発生する反力であり、締付力以上の反力は作用しない。	×			
			本体	本体(柱、隅金具等)	材料	LLW-1型の本体を流用しており、且つ蓋ボルト近傍の材料は変えておらず、蓋ボルトの折損に影響しない。	×			
					形状	タイプⅠは、構造を変更していないこと及び蓋ボルトの締結に影響を及ぼす形状ではない。なおタイプⅡは形状を一部変更しているが、蓋ボルトの締結に影響を及ぼすような箇所ではない。	×			
				フィッティングプレート用M12ボルト	材料	材料変更していない。また本体に固定しており、蓋ボルト折損に影響しない。	×			
					材料 強度区分	強度区分を変更しているが、蓋ボルト折損に影響しない。	×			
					締付力	トルク締め(参考値90N・m)により本体に固定しており、蓋ボルト折損に影響しない。	×			
					表面処理	防錆処置として表面処理を行っているが、蓋ボルト折損に影響しない。	×			
				フィッティングプレート	材料	フィッティングプレートは、材料変更はなく、本体に固定されており、蓋ボルト折損に影響しない。	×			
					強度	フィッティングプレートは、ボルト締結に必要な強度を有し本体に固定されており、蓋ボルト折損に影響しない。	×			
			使用性能	遮蔽	遮蔽機能はドラム缶の位置を保持する構造により確保されており、蓋ボルト折損に影響しない。				×	
					風雨密性はシリコンゴムによるシール機能で確保しているが、蓋ボルトの折損に影響しない。				×	
				使用環境	耐腐食性	容器本体は塗装により保護されている。ただし、緊締装置部は雨水、雪との接触が避けられない構造である。				▲
					使用環境温度	蓋ボルトは鋼製品であり、使用環境温度で蓋ボルト折損を発生させる熱変形等は発生しない。				×
				タイプによる相違	タイプⅠ	蓋のみを新規製造するが、蓋ボルト近傍の材料は変えておらず、また蓋ボルト近傍の寸法形状に変更が無いため、蓋ボルトの折損に影響しない。				×
					タイプⅡ	蓋・本体共にを新規製造するが、蓋ボルト近傍の材料は変えておらず、また蓋ボルト近傍の寸法形状に変更が無いため、蓋ボルトの折損に影響しない。				×

結果
○:直接原因となるもの
▲:複合する要因の一つになるもの
×:影響しないもの

製造	構造	蓋	天板・側板・補強材	材料	ミルシートにより要求仕様を満足していることを確認している。	×		
				寸法	寸法検査記録により、要求仕様(公差を含めた寸法)を満足していることを確認している。	×		
				外観	外観検査記録により、要求仕様(変形・割れのないこと)を満足していることを確認している。	×		
				蓋ボルト	材料	ミルシート等により要求仕様を満足していることを確認している。	×	
					寸法	寸法検査記録により、要求仕様(公差を含めた寸法)を満足していることを確認している。	×	
					外観	外観検査記録により、要求仕様(変形・割れのないこと)を満足していることを確認している。	×	
				ガスケット	材料	製品検査成績書により要求仕様を満足していることを確認している。	×	
					寸法	製品検査成績書により要求仕様を満足していることを確認している。	×	
					外観	外観検査記録により要求仕様(変形・割れがないこと)を満足していることを確認している。	×	
			本体	本体(柱、隅金具等)	材料	ミルシート等により要求仕様を満足していることを確認している。	×	
					寸法	寸法検査記録により、要求仕様(公差を含めた寸法)を満足していることを確認している。	×	
					外観	外観検査記録により、要求仕様を満足していることを確認している。	×	
					フィッティングプレート用 M12ボルト	材料	ミルシート等により要求仕様を満足していることを確認している。	×
						寸法	寸法検査記録により要求仕様(公差を含めた寸法)を満足していることを確認している。	×
						外観	外観検査記録により要求仕様を満足していることを確認している。	×
				表面処理		表面処理検査により、要求仕様を満足していることを確認している。	×	
				フィッティングプレート	材料	ミルシートにより要求仕様を満足していることを確認している。	×	
					寸法	寸法検査記録により、要求仕様(公差を含めた寸法)を満足していることを確認している。	×	
		外観	外観検査記録により、要求仕様(変形・割れのないこと)を満足していることを確認している。		×			
		本体・蓋 嵌め合い	寸法	各部の寸法検査および蓋・本体の組合せを確認しており、要求仕様を満足していることを確認している。	×			
			外観	外観検査で嵌め合いに異常がないことを確認しており、要求仕様を満足していることを確認している。	×			
			締付	蓋ボルトが規定トルクで締結できていることを確認しており、要求仕様を満足していることを確認している。	×			
		タイプによる相違	タイプⅠ	本体はLLW-Ⅰ型容器を流用し、蓋のみ新規製造。なお、製造時に外観、組付状態等を確認し、要求仕様を満足していることを確認している。	×			
			タイプⅡ	本体・蓋ともに新規製造。製造時に要求仕様を満足していることを確認している。	×			
		ロットによる影響					折損した5本のボルトは、3つのロット(ミルシート)から発生していることからロット依存性はない。	×
保守	点検 (検査)	本体・蓋	本体・蓋	外観点検	外観点検では、内外表面(パネル部、蓋部等)に変形、腐食、割れがないことを目視確認しており、点検は蓋ボルトの折損に影響しない。	×		
			蓋ボルト	外観点検	外観を目視により点検し、凹み、割れ、傷等がないことを確認している。また錆の発生状況を確認している。蓋ボルトのネジ部はダイス(ネジ山補修治具)を通してネジ部の欠け、潰れ等がないことを確認している。これらの点検は蓋ボルトの折損に影響しない。	×		
			ガスケット	外観点検	蓋部ガスケットの外観を目視により点検し、落下、はがれ、割れ等がないことを確認している。ガスケットを指で押し、割れ等がないことも確認している。これらの点検は蓋ボルトの折損に影響しない。	×		
			本体・蓋	水密性点検	輸送容器本体の洗浄後、蓋を取り外し、内部を目視により確認し、漏水がないことを確認している。水密性点検は蓋ボルトの折損に影響しない。	×		
				隙間点検	上部隅金具と蓋の隙間を測定し6mm以上あることを目視により確認している。間隙点検は蓋ボルトの折損に影響しない。	×		

となるもの
要因の一つになるもの

結果
○:直接原因となるもの
▲:複合する要因の一つになるもの
×:影響しないもの

環境	保守 (メンテナンス)	本体・蓋	本体・蓋	凹み箇所の保守	パネル部は必要に応じ板金作業および補修塗装(タッチアップ)を行っている。これらの保守は蓋ボルト折損に影響しない。	×	
				塗装保守	必要に応じ塗装保守を実施している。塗装保守は蓋ボルト折損に影響しない。	×	
			蓋ボルト	錆除去	蓋ボルト等のネジ部は、洗浄液又はスプレー式脱脂洗浄剤を塗布後、銅合金製ワイヤーブラシ、スコッチブライト等を使用し、油脂、傷、錆を除去することで、割れ等を見つけやすくなるが、割れの原因にはならないことから、蓋ボルト折損に影響しない。	×	
			ガスケット	取付状態確認	蓋部ガスケットの外観を目視により点検し、落下、はがれている場合は、蓋側のガスケット取付面へガスケットを均等に押し入れている。ガスケットに亀裂、破損、水密性点検にて漏水が確認された場合はガスケットを交換している。ガスケット保守は蓋ボルトの折損に影響しない。	×	
	補修 (修理)	本体・蓋	保守で対応できないものについて溶接補修等を実施するが、実績は無い。なお、補修後に嵌め合い確認をするため蓋ボルトの折損に影響しない。				×
	保管状況	空容器保守前	屋外保管	容器本体は塗装により保護されている。ただし、緊締装置部は雨水、雪との接触が避けられない構造である。			▲
			屋内保管	保守後は、屋内保管しており、雨水に曝される環境ではない。			×
		発電所搬送 突入り前	屋外保管の場合もある	容器本体は塗装により保護されている。ただし、緊締装置部は雨水、雪との接触が避けられない構造である。			▲
			屋内保管	低レベル放射性廃棄物(200Lドラム)を装荷した後は、屋内保管され、雨水に曝される環境ではない。			×
	温度変動	気温変化、日射	蓋ボルトは鋼製品であり、使用環境で蓋ボルト折損を発生させる熱変形等は発生しない。				×
塩害	海塩粒子等が付着しうる環境である。				▲		
運用	蓋ボルトの取扱い	トルク管理	適切なトルク管理を行うことが取扱説明書・輸送容器(LLW)保守管理指示書によりルール化されている。			×	
			作業員の過誤	作業員は作業責任者等の下で作業しており、また管理センターでは当日の作業前に検査責任者がトルク値を確認しており、人的過誤により過剰なトルクを加えることはない。			×
		ボルトの固着	異種金属による電位差腐食による固着	折損した蓋ボルトは、手で取外せたか、適切な工具を使用してスムーズに取外せており、固着しているボルトを過剰なトルクで折損させたものではない。			×
			表面腐食による固着	折損した蓋ボルトは、手で取外せたか、適切な工具を使用してスムーズに取外せており、固着しているボルトを過剰なトルクで折損させたものではない。			×
	嵌め合い	構造上、ガイド機能を有するガイドピンが蓋ボルト近傍についており、また蓋ボルトを締結する際は規定トルク値で締め付けられていることから、嵌め合いは蓋ボルト折損に影響しない。				×	
	衝撃荷重	蓋ボルトは、蓋、ガイド等で囲われた構造であり、蓋ボルトを折損させる衝撃荷重を直接付加できない構造である。また、マニュアルでも急激な衝撃を与えないよう定めている。また、荷重がかかる事故事例はない。				×	
	疲労破壊	使用歴の少ない保管中の容器の蓋ボルトが折損しており、繰り返し応力が発生していないことから疲労破壊ではない。また、破断面観察の結果、疲労破壊特有のビーチマーク(貝殻模様)が見られない。				×	
	輸送・取扱中の振動	輸送中、取扱中共に上または下部の隅金具(各4ヶ所)およびフォークポケットを用いて取扱っており、蓋ボルト折損に繋がるような取扱いはない。				×	
人的 要因	製造時における人的要因	材料への異物混入	粗悪な材料の可能性	ミルシート等により要求仕様を満足していることを確認している。			×
			材料記録の捏造	ミルシートの捏造	適切な品質管理の上で実施しており、捏造はないが、念のため折損したボルトの成分分析結果からボルトの要求仕様と比較して問題のないことを確認した。		
		熱処理記録の捏造		適切な品質管理の上で実施しており、捏造はないが、念のため折損したボルトの金相観察や硬さ測定を実施し、要求仕様を満足していることを確認した。			×
		故意の傷	製造時の外観検査により変形、割れがないことを確認している。			×	
	保管・取扱時における人的要因	故意にボルトを折損させる	LLW容器の保管、取り扱いを行う管理センターは、埋設施設内の立入制限がなされている区域にあり、外部の不審者が立ち入っていないことは、埋設施設の入門記録に該当が無いことにより確認した。また、管理センターは、昼間は作業員がおり、夜間は施設の監視員によりパトロールされている。作業は常時作業責任者を含む複数名で行っており、故意に損傷を与えることはできない。以上から、故意にボルトを折損させることがないことを確認した。				×

結果
○: 直接原因となるもの
▲: 複合する要因の一つになるもの
×: 影響しないもの

折損したボルトの破断面観察

折損したボルトの破断面観察



1. はじめに

折損した蓋ボルト (容器 No. 21892、21063、22697、21463、22986) の折損原因を分析するため、破断面の観察を行った。

2. 実施項目と実施要領

当社の施設へ折損したボルトを持ち込んで、以下に示す観察を実施した。

2.1. 蓋ボルトの切断

図1のように切断した。切断は、マイクロカッターにて切削油を掛けながら行った。切断後の試験片は、シールまたはマジックにてマークシフトを行った。

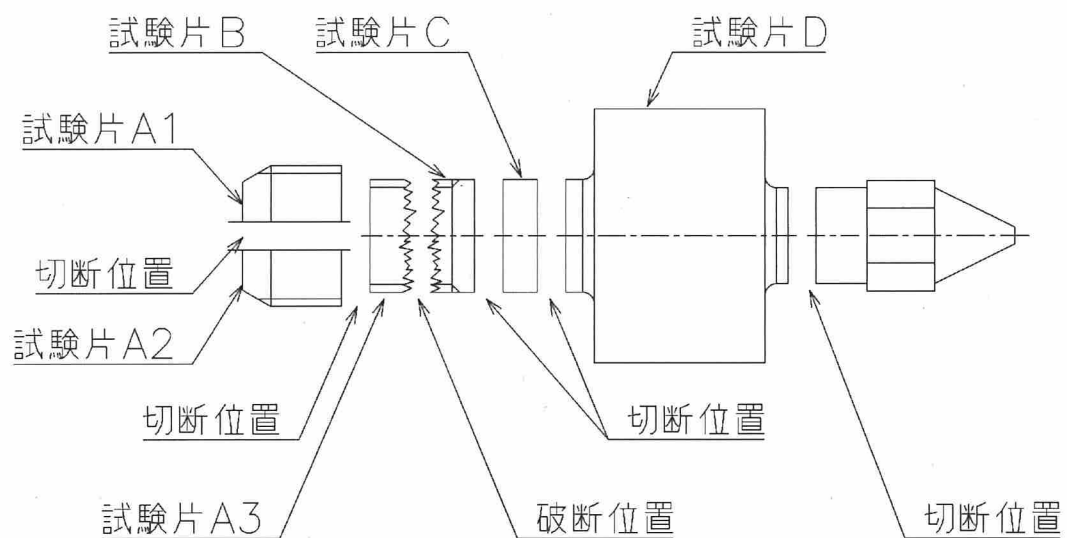


図1 切断状態

2. 1. 破断面のマクロ観察

図 1 の試験片 A3 および試験片 B を使用した。

エタノールに浸漬し、5 分程度超音波洗浄を行った。その後、5%硫酸に 1~2 分浸漬し、状態を確認しながら数回に分けて、過除錆にならないように除錆を行った。

除錆後、破断面の真上から写真撮影を行った。

2. 2. SEM 観察

マクロ観察で除錆を行った図 1 の試験片 A3 を使用した。

SEM 観察前に金のイオンスパッタリングを行い、SEM 観察し易い状態とした。

観察倍率は 500 倍とした。再撮影については、500 倍、750 倍または 1000 倍とした。

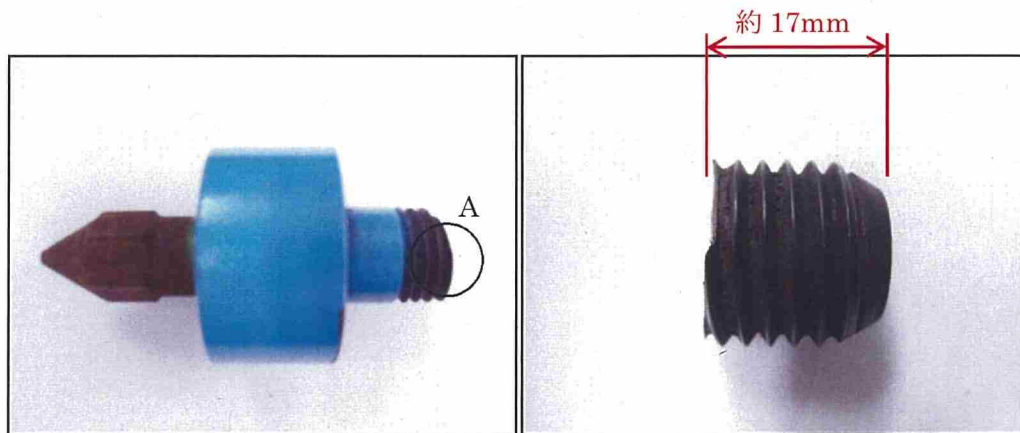
3. 調査結果

①容器 No. 21892 の折損ボルト

a. 破断状況

写真 21892-1 に容器 No. 21892 の折損ボルトの破断状態の外観写真を示す。破断は、ねじ先端より約 17mm の位置で発生している。

また、破断面から 1 山フランジ側に亀裂が認められる。



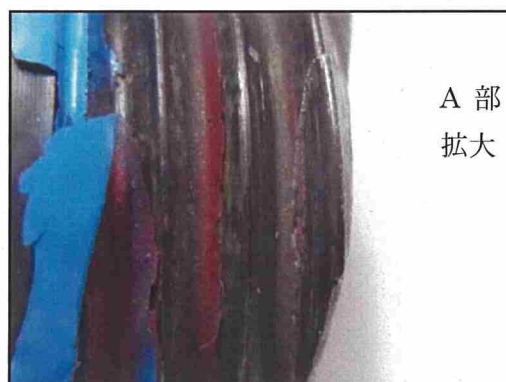
破断後外観（フランジ側）

破断後外観（ねじ側）



フランジ側破断面

ねじ側破断面



A 部
拡大

写真 21892-1 容器 No. 21892 の折損ボルトの破断状況

b. 破断面のマクロ観察

破断面のマクロ写真を写真 21892-2 に示す。



フランジ側

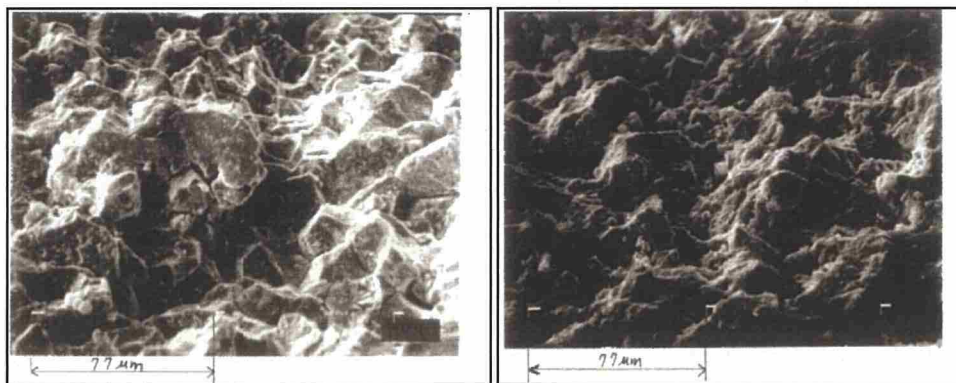
ねじ先端側

写真 21892-2 破断面のマクロ写真 (容器 No. 21892 の折損ボルト)

脆性破面部と延性破面部が認められる。

c. SEM 観察

写真 21892-2 の A 部および B 部の SEM 観察写真を写真 21892-3 に示す。



SEM 観察位置 A

SEM 観察位置 B

写真 21892-3 SEM 観察写真 (容器 No. 21892 の折損ボルト)

ねじ先端側試験片において、起点付近 A、中心部 B を選択し SEM 観察を行った。
A では、脆性破壊の粒界割れが確認でき、B では延性破壊のディンプルが確認できる。

d. 結果

容器 No. 21892 の折損ボルトの破断面からは、脆性破面部と延性破面部が認められる。

②容器 No. 21063 の折損ボルト

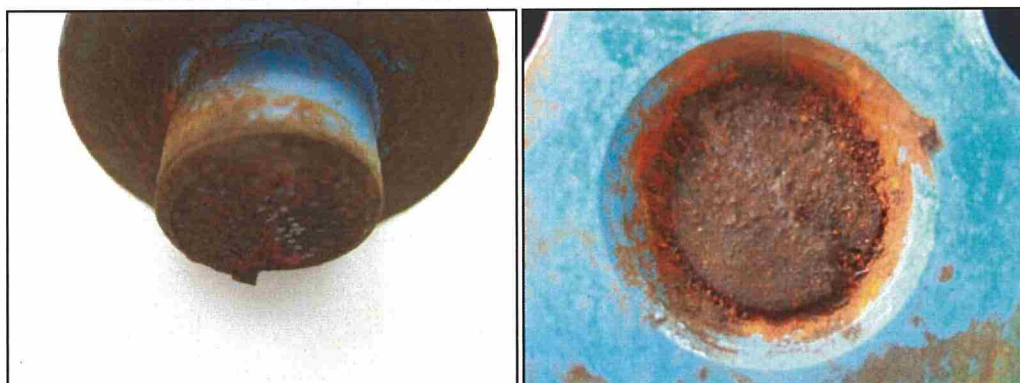
a. 破断状況

写真 21063-1 に容器 No. 21063 の折損ボルトの破断状態の外観写真を示す。破断は、ねじ先端より約 27mm（不完全ねじ部）の位置で発生している。



破断後外観（フランジ側）

破断後外観（ねじ側）



フランジ側破断面

ねじ側破断面

写真 21063-1 容器 No. 21063 の折損ボルトの破断状況

ねじ部分は、潤滑剤を浸透させながら端面から回転力を与えてフィッティングプレートから取り出した。

b. 破断面のマクロ観察

破断面のマクロ写真を写真 21063-2 に示す。



フランジ側

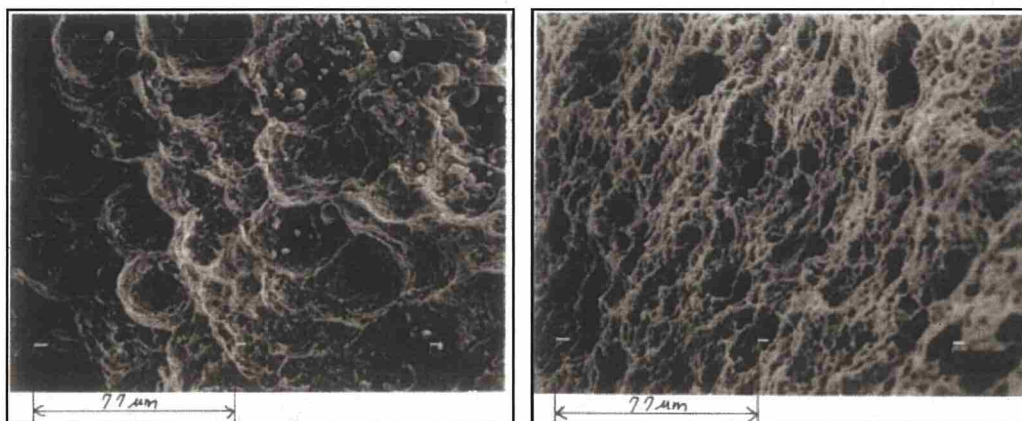
ねじ先端側

写真 21063-2 破断面のマクロ写真 (容器 No. 21063 の折損ボルト)

腐食が激しく、破断面を観察することは難しい。

c. SEM 観察

写真 21063-2 の A 部および B 部の SEM 観察写真を写真 21063-3 に示す。



SEM 観察位置 A

SEM 観察位置 B

写真 21063-3 SEM 観察写真 (容器 No. 21063 の折損ボルト)

ねじ先端側試験片において、起点付近 A、最終破断付近 B を選択し SEM 観察を行った。

A では、粒界破壊らしきもの (不明確) が見られる。B では延性破壊のディンプルが確認できる。さらに詳細に確認するため再撮影を行った。再撮影写真を写真 21063-4 に示す

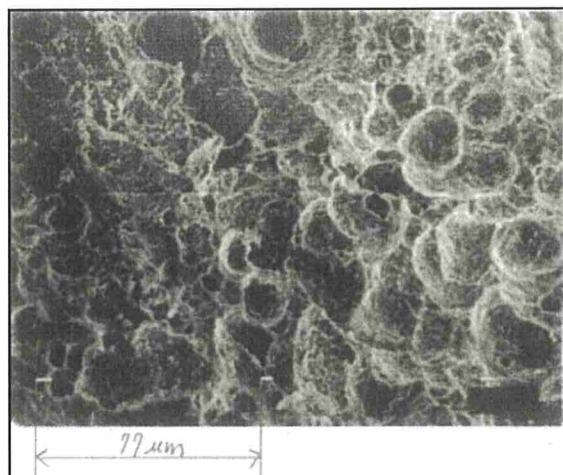


写真 21063-4 SEM 観察位置 A (容器 No. 21063 の折損ボルト) (再観察)

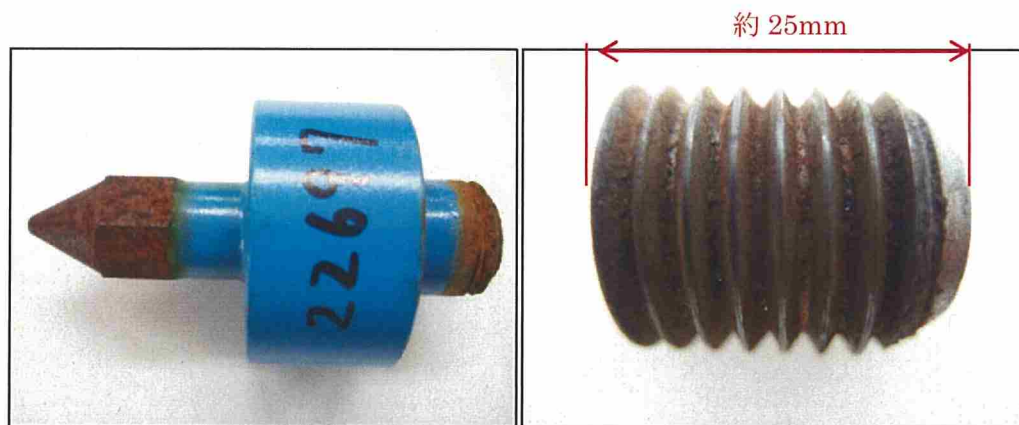
d. 結果

浸食が激しく、明確な破面の観察には至らなかった。

③容器 No. 22697 の折損ボルト

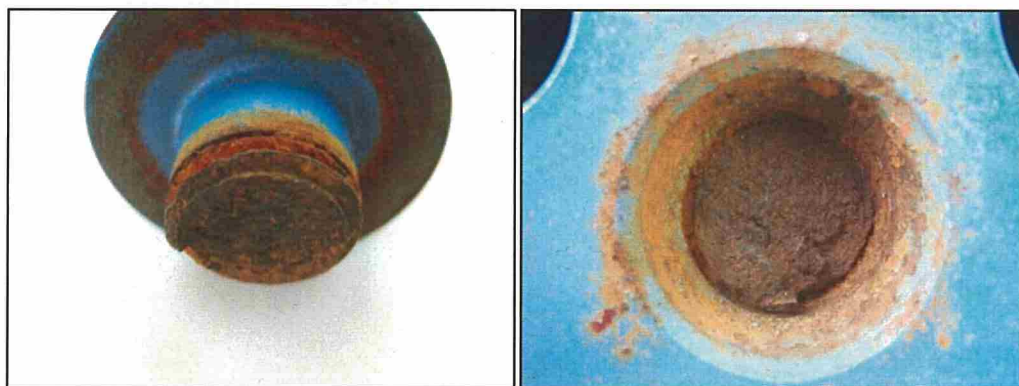
a. 破断状況

写真 22697-1 に容器 No. 22697 の折損ボルトの破断状態の外観写真を示す。
破断は、ねじ先端より約 25mm の位置で発生している。



破断後外観（フランジ側）

破断後外観（ねじ側）



フランジ側破断面

ねじ側破断面

写真 22697-1 容器 No. 22697 の折損ボルトの破断状況

ねじ部は、潤滑剤を浸透させながら端面から回転を与えたが、取り出すことが出来なかったため、フィッティングプレートを切断して取出した。その時、試験体は切断しないように行った。

b. 破断面のマクロ観察

破断面のマクロ写真を写真 22697-2 に示す。



フランジ側

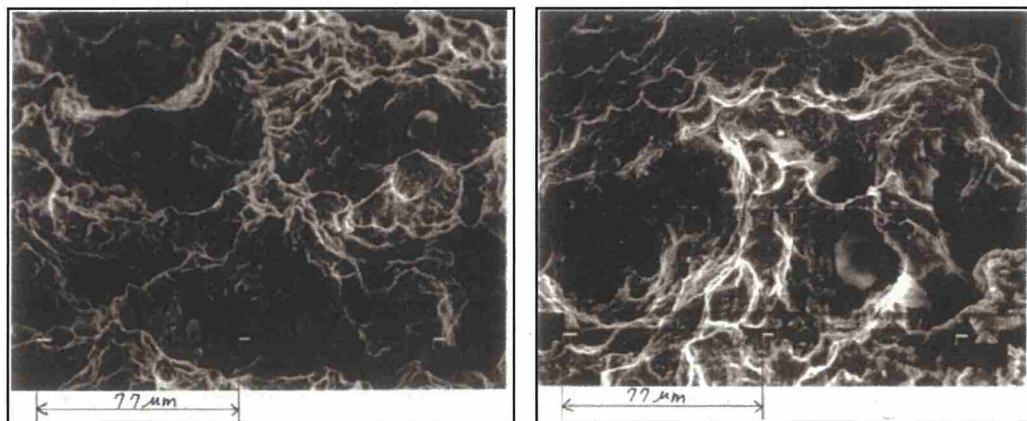
ねじ先端側

写真 22697-2 破断面のマクロ写真 (容器 No. 22697 の折損ボルト)

腐食が激しく、破断面を観察することは難しい。

c. SEM 観察

写真 22697-2 の A 部および B 部の SEM 観察写真を写真 22697-3 に示す。



SEM 観察位置 A

SEM 観察位置 B

写真 22697-3 SEM 観察写真 (容器 No. 22697 の折損ボルト)

ねじ先端側試験片において、起点付近 A、最終破断付近 B を選択し SEM 観察を行った。

腐食で破断面が浸食されており、特徴的な破断面が確認できなかったため、さらに詳細に確認するため再観察を行った。再撮影写真を写真 22697-4 に示す

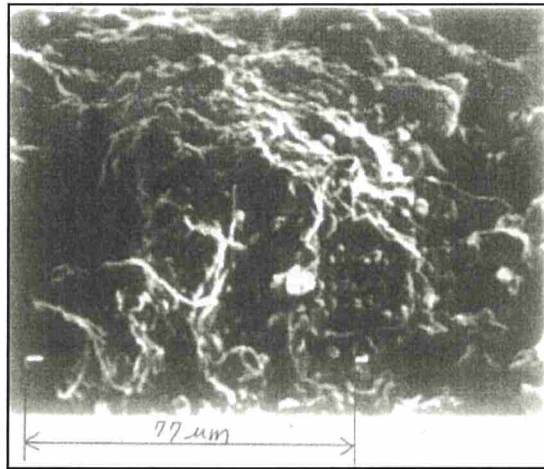


写真 22697-4 SEM 観察位置 A (容器 No. 22697 の折損ボルト) (再観察)

再観察においても、明確な破断面の観察には至らなかった。

d. 結果

容器 No. 22697 の折損ボルトの破断面は、腐食が進行しており明確な破断面の観察には至らなかった。

④容器 No. 21463 の折損ボルト

a. 破断状況

写真 21463-1 に容器 No. 21463 の折損ボルトの破断状態の外観写真を示す。

破断は、ねじ先端より約 22mm の位置で発生している。

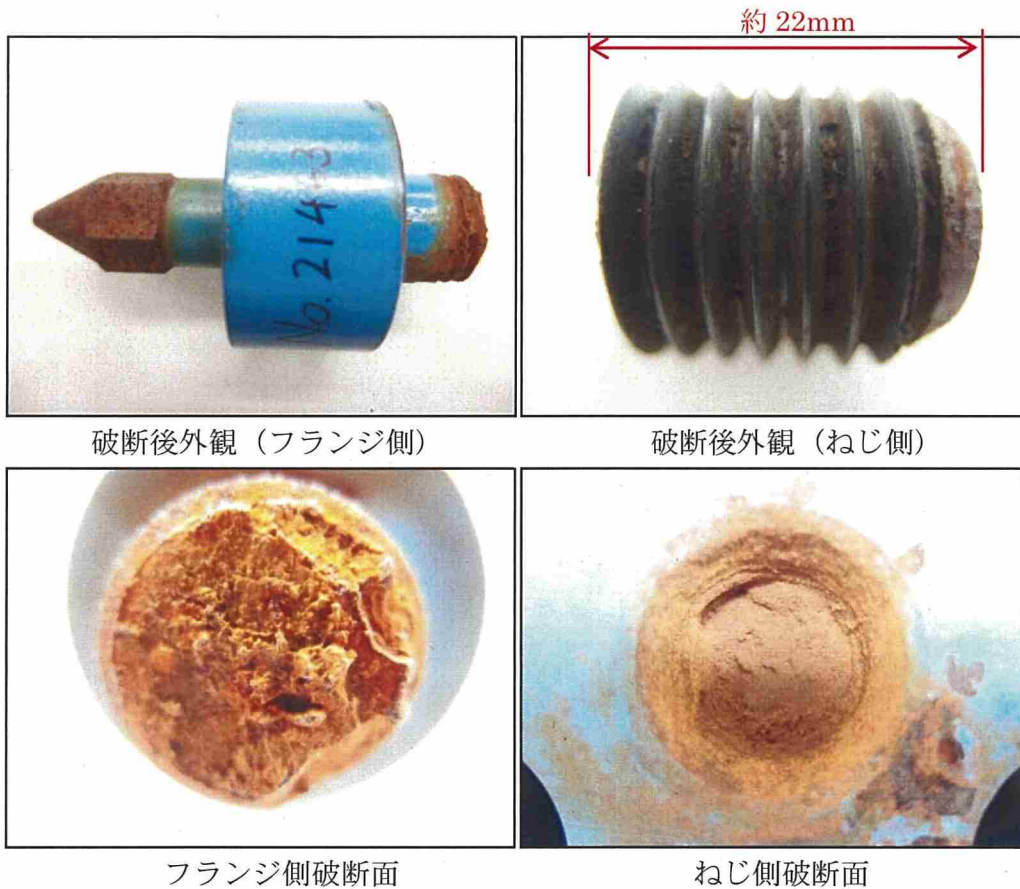


写真 21463-1 容器 No. 21463 の折損ボルトの破断状況

ねじ部は、潤滑剤を浸透させながら端面から回転を与えたが、取り出すことが出来なかったため、フィッティングプレートを切断して取出した。その時、試験体は切断しないように行った。

b. 破断面のマクロ観察

破断面のマクロ写真を写真 21463-2 に示す。

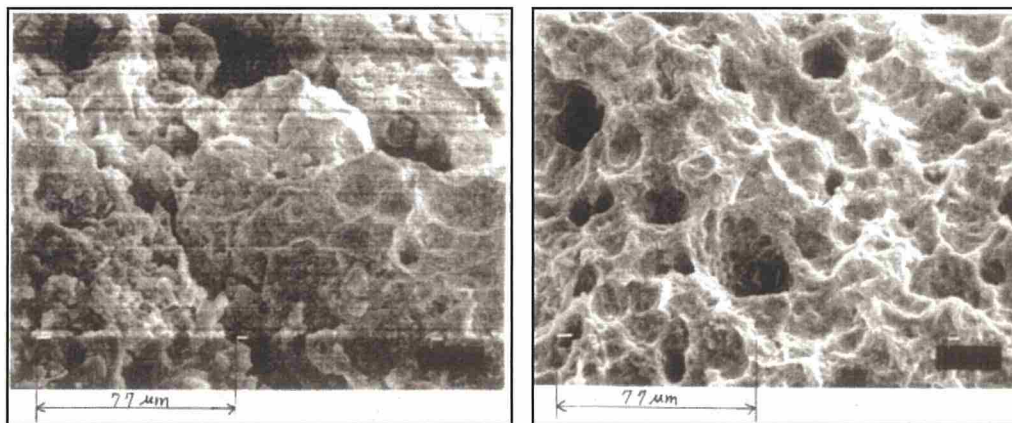


フランジ側
ねじ先端側
写真 21463-2 破断面のマクロ写真 (容器 No. 21463 の折損ボルト)

腐食が激しく、破断面を観察することは難しい。

c. SEM 観察

写真 21463-2 の A 部および B 部の SEM 観察写真を写真 21463-3 に示す。



SEM 観察位置 A
SEM 観察位置 B
写真 21463-3 SEM 観察写真 (容器 No. 21463 の折損ボルト)

ねじ先端側試験片において、起点付近 A、最終破断付近 B を選択し SEM 観察を行った。

腐食で破断面が浸食されており、特徴的な破断面が確認できなくなったため、さらに詳細に確認するため再観察を行った。再撮影写真を写真 21463-4 に示す。

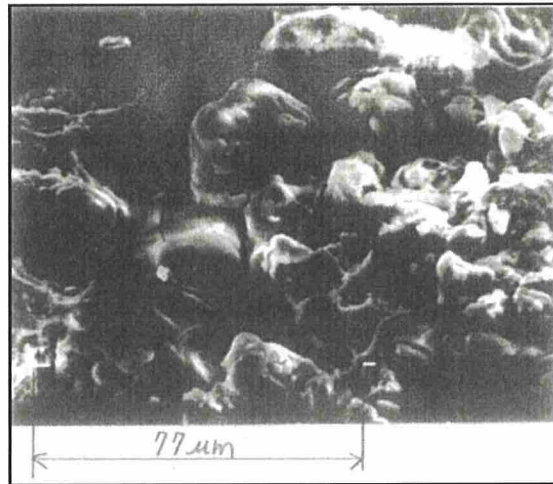


写真 21463-4 SEM 観察位置 A (容器 No. 21463 の折損ボルト) (再撮影)

d. 結果

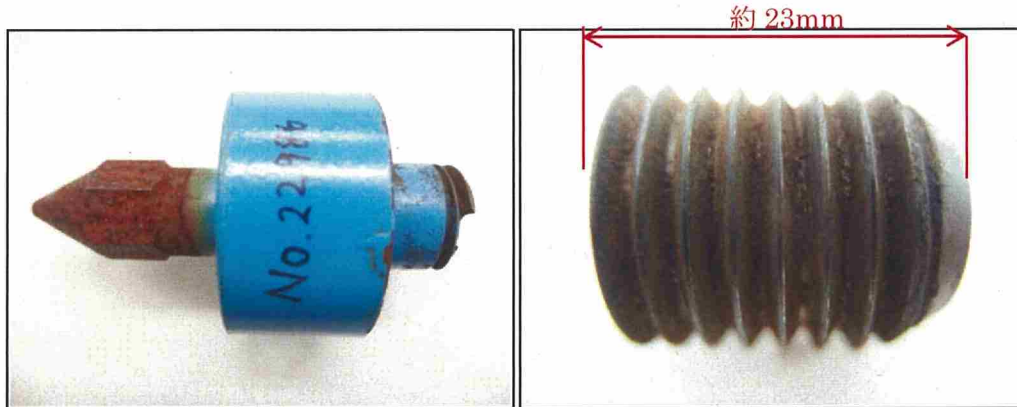
粒界破壊らしきものが見られるが、明確な破面の観察には至らなかった。

⑤容器 No. 22986 の折損ボルト

a. 破断状況

写真 22986-1 に容器 No. 22986 の折損ボルトの破断状態の外観写真を示す。

破断は、ねじ先端より約 23mm の位置で発生している。



破断後外観（フランジ側）

破断後外観（ねじ側）



フランジ側破断面

ねじ側破断面

写真 22986-1 容器 No. 22986 の折損ボルトの破断状況

ねじ部分は、潤滑剤を浸透させながら端面から回転力を与えてフィッティングプレートから取り出した。

b. 破断面のマクロ観察

破断面のマクロ写真を写真 22986-2 に示す。



フランジ側

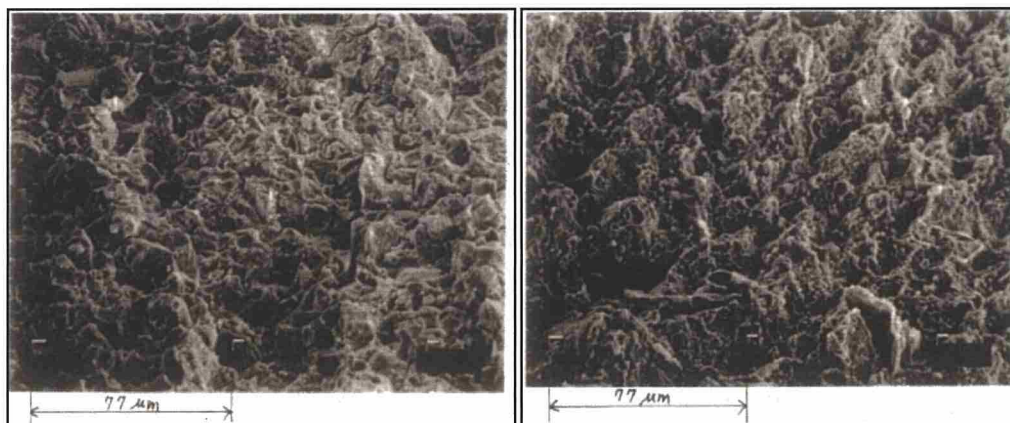
ねじ先端側

写真 22986-2 破断面のマクロ写真 (容器 No. 22986 の折損ボルト)

脆性破面部と延性破面部が認められる。

c. SEM 観察

写真 1 の A 部および B 部の SEM 観察写真を写真 22986-3 に示す。



SEM 観察位置 A

SEM 観察位置 B

写真 22986-3 SEM 観察写真 (容器 No. 22986 の折損ボルト)

ねじ先端側試験片において、起点付近 A、最終破断付近 B を選択し SEM 観察を行った。A では、脆性破壊の粒界割れが確認でき、B では延性破壊のディンプルが確認できる。

d. 結果

容器 No. 22986 の折損ボルトの破断面からは、脆性破面部と延性破面部が認められる。

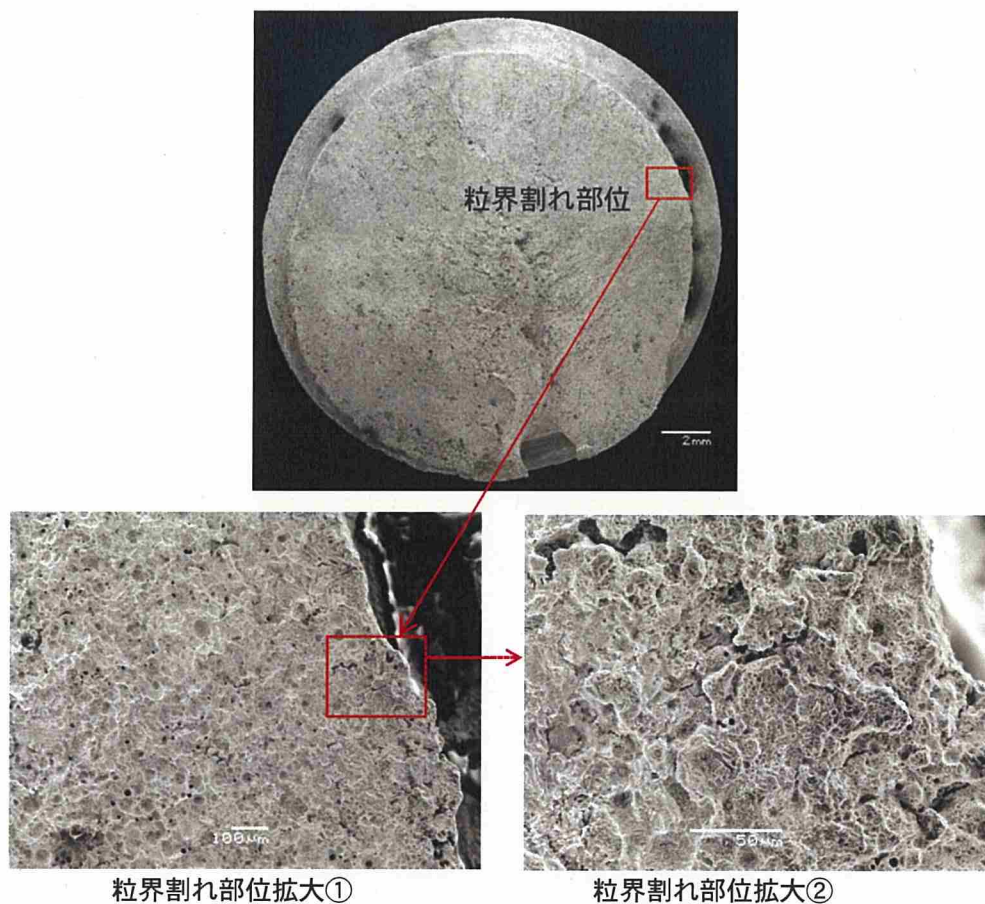
追加破断面観察、拡散性水素測定

追加破断面観察、拡散性水素測定



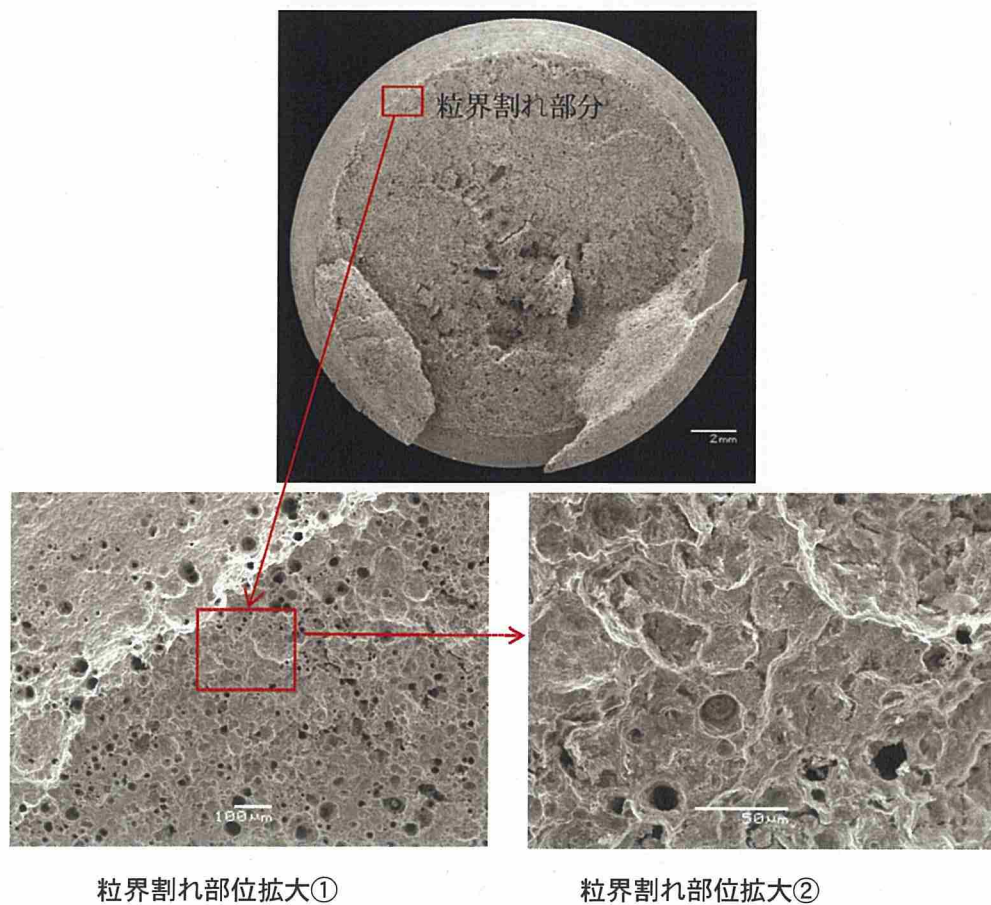
1. 破断面観察 (容器 No21063、22697、21463)

(1) 容器 No21063:再撮影により、ねじ底表面には、一部粒界割れが認められた。



(2) 容器 No22697:再撮影を試みたが、腐食損傷が激しいため明瞭には判断できなかった。

(3) 容器 No21463:再撮影により、ねじ底表面には、一部粒界割れが認められた。

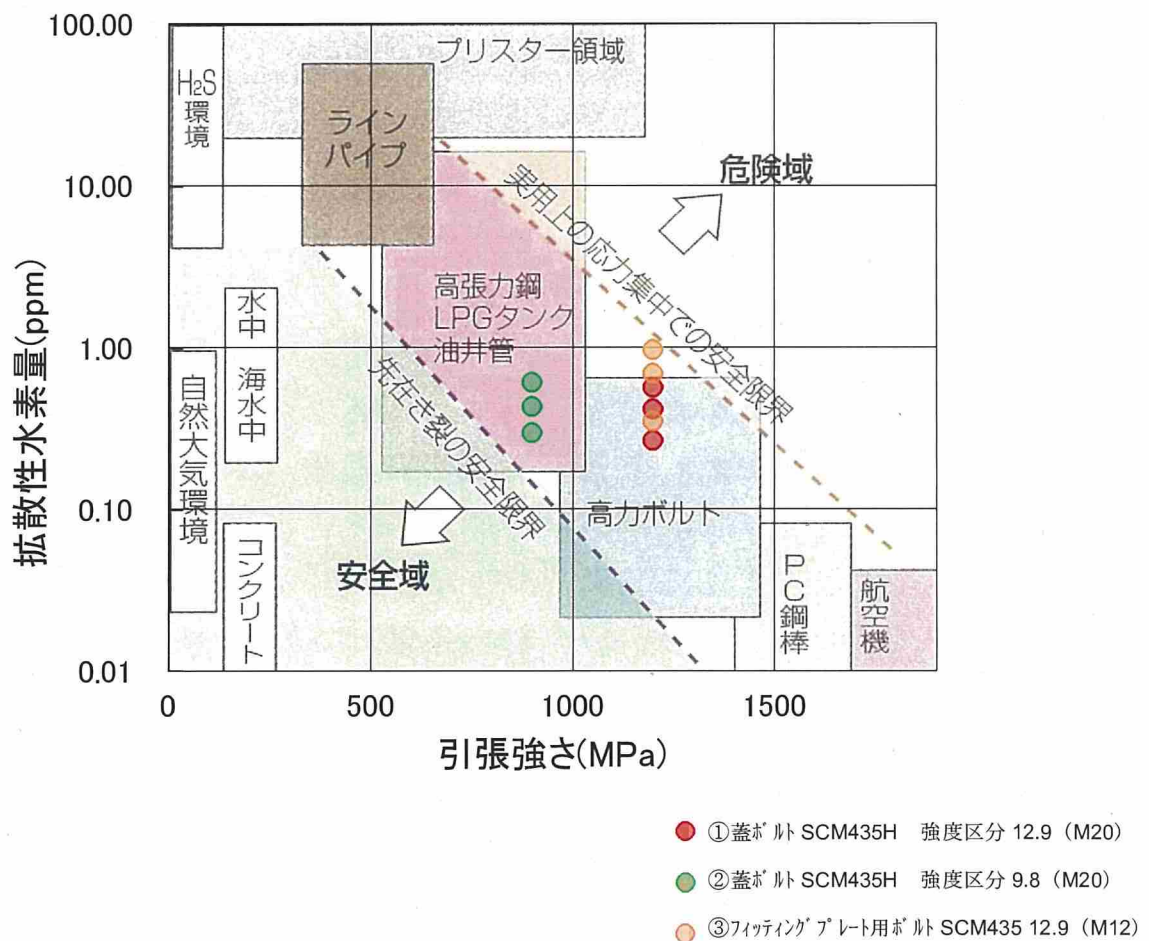


2. 拡散性水素量測定

(1) 各ボルトの拡散性水素量

種類	拡散性水素 (ppm)
①蓋ボルト SCM435H 強度区分 12.9 (M20)	0.27
	0.41
	0.57
②蓋ボルト SCM435H 強度区分 9.8 (M20)	0.43
	0.30
	0.61
③フィッティングプレート取付用ボルト SCM435 強度区分 12.9 (M12)	0.35
	0.69
	0.97

(2) 松山晋作「遅れ破壊」日刊工業新聞社 (1989) P70 へのプロット



(3) まとめ

いずれのボルトにも拡散性水素が侵入しており、強度区分の違いにより拡散性水素の侵入量に大きな違いは認められなかった。

また、測定した拡散性水素量を松山晋作「遅れ破壊」日刊工業新聞社 (1989) P70 へプロットし、蓋ボルト (強度区分 9.8) は、安全域に近く、遅れ破壊に対する安全性が高いことを確認した。

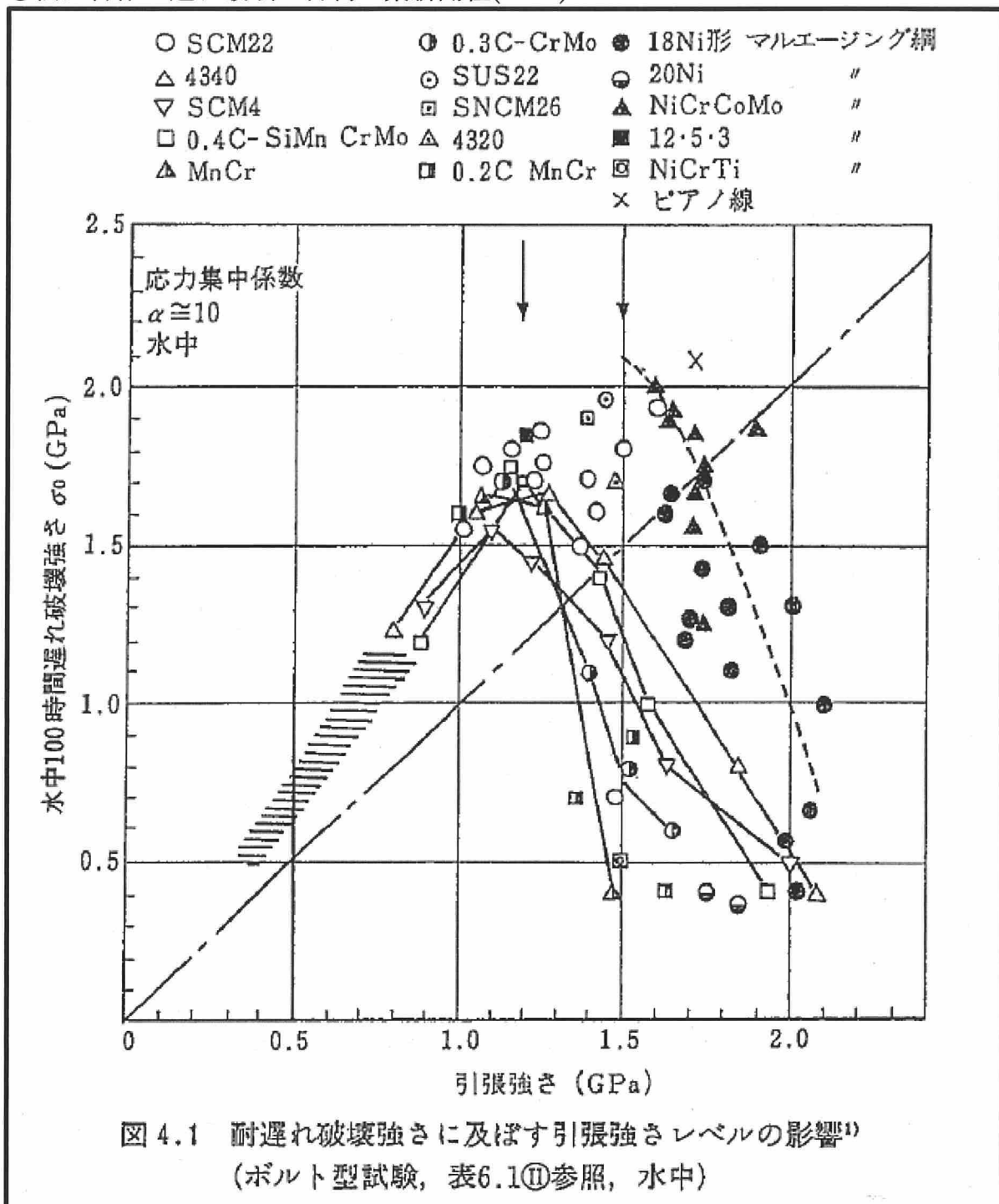
蓋ボルト折損(破壊モード)に係るFT図



結果
○:直接原因となるもの
▲:複合する要因の一つになるもの
×:影響しないもの

文献調査

○松山晋作：遅れ破壊 日刊工業新聞社(1989) P67



○松山晋作：遅れ破壊 日刊工業新聞社(1989) P68

引張強さで1.2GPa以上、硬さではHRC40以上になると破壊感受性が急増するのである。

○JIS B1051 (2014 年 9 月 22 日改正)

B 1051 : 2014(ISO 898-1 : 2013)

表 2－鋼材（続き）

注

- i) 強度区分 12. 9/12. 9 の製品を使用する場合には、注意が必要である。製造業者の技量、使用環境及び締付け方法を考慮しなければならない。環境によっては、めっきをしないおねじ部品でも、めっきしたものと同様な遅れ破壊を生じるおそれがある。

8. 遅れ破壊について

遅れ破壊とは、高強度鋼部品が静的な負荷応力を受けた状態で、ある時間を経過したとき、外見上はほとんど塑性変形を伴うことなく、突然脆性的に破壊する現象と言えます。

図 8-1 に、遅れ破壊したボルト破断面の写真を示します。破断面の特徴は、破壊の起点部付近に結晶粒間で破壊が進展する粒界破壊が認められることです。

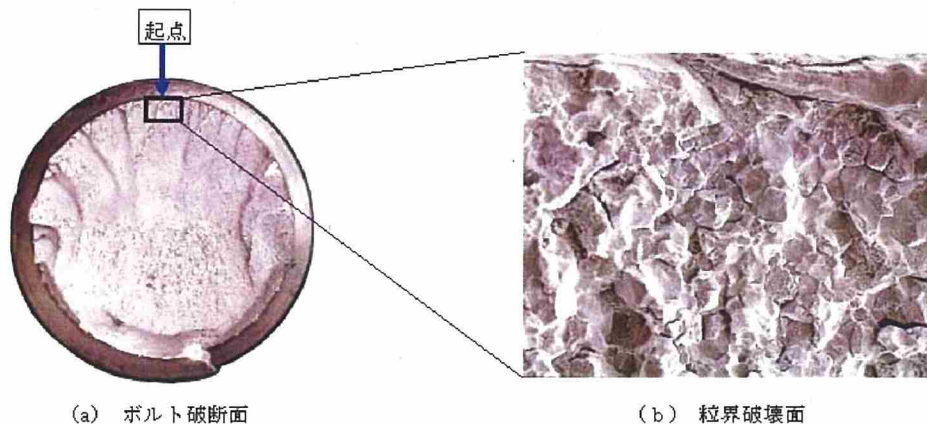


図 8-1. 遅れ破壊ボルトの破断面写真

8-1. 遅れ破壊の要因と破壊部位

破壊が弾性限界内でしかも静的な負荷応力の条件下で発生する場合は、腐食による応力面の断面欠損によるか、材質の脆化現象によるかのどちらかですが、遅れ破壊は後者によるものであり、その脆化現象は、水素脆性によるものと考えられています。遅れ破壊で問題とされる水素は、表面の腐食等により、外部から鋼中に侵入します。よって、下記のような使用環境においては、注意が必要です。

- ・ 屋外など湿潤環境に曝される場合
- ・ 表面腐食を助長するような溶剤等に曝される場合
- ・ 異種金属との接触（種類によっては局部電池を形成し、電食が発生）

ボルトは、不完全ねじ部、めねじとはめあった第一ねじ山部、頭部首下丸み部など形状的に応力集中を受けやすい部分があり、これらの部位で遅れ破壊が発生しやすくなります。

遅れ破壊したボルトの破断面に、粒界破壊が認められること等を確認した。また、遅れ破壊で問題とされる水素は、表面の腐食等により、外部から鋼中に侵入すること等を確認した。

非破壊検査および断面観察

非破壊検査および断面観察



【蓋ボルト】

1. はじめに

蓋ボルトの折損が確認された容器 (容器 No. 22697) に使用されていた非折損蓋ボルト 3 本について、折損した蓋ボルトと同様に遅れ破壊が進行しているか確認した。

2. 調査項目と調査要領

当社の施設へ非折損ボルトを持ち込み、以下に示す観察を実施した。

2.1 非破壊検査

- ・ ねじ部について JIS Z 2320-1、JIS Z 2320-2、JIS Z 2320-3 に従って磁粉探傷試験 (MT) を行った。
- ・ 磁化装置は、日本電機工業(株)製 JH-9664S を使用した。
- ・ 磁化方法は、軸通電法およびコイル法とした。検査前には、両端面を軽く研磨した。
- ・ 湿式蛍光磁粉 LY-30 (蛍光色：黄色) を使用した。
- ・ 攪拌：試験開始前に少なくとも 30 分間検査液を循環システムに通して運転し、サンプルのスクリーン上および槽の側面、または底に沈殿し得る全ての磁粉を十分に混合した。
- ・ 攪拌した検査液をノズルから直接シャワーした。
- ・ 紫外線照射装置は、据付式紫外線探傷灯 Black Light D-40 型を使用した。
- ・ 指示模様が出了場合、検出位置、方向等を記録した。

2.2 蓋ボルトの切断

図 1 のように切断した。切断は、マイクロカッターにて切削油を掛けながら行った。切断後の試験片は、シールまたはマジックにてマークシフトを行った。

非破壊検査において割れが確認された試験体については、割れを横断するように切断を行った。

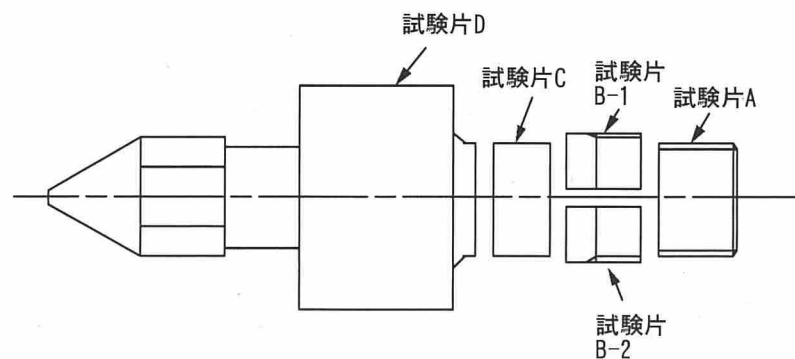


図 1 調査品の切断状態 (M20 蓋固定用ボルト)

2.3 ねじの軸方向断面観察

図1の試験片B-1を使用してねじの軸方向断面観察を行った。

ねじの軸方向断面が表面になるように樹脂埋めし、粒度240番から2000番の研磨紙まで段階的に研磨後、ダイヤモンド粒子を使用して鏡面仕上げを行った。

観察は光学顕微鏡を使用し、不完全ねじ部および完全ねじ部について行った。倍率は50倍とした。

また、測定顕微鏡を使用し、ねじの全体も観察した。倍率は10倍とした。

割れが検出された試験体は、割れの状況も観察した。

3. 調査結果

3.1 外観

切断前の蓋ボルトの外観を写真1～写真3に示す。

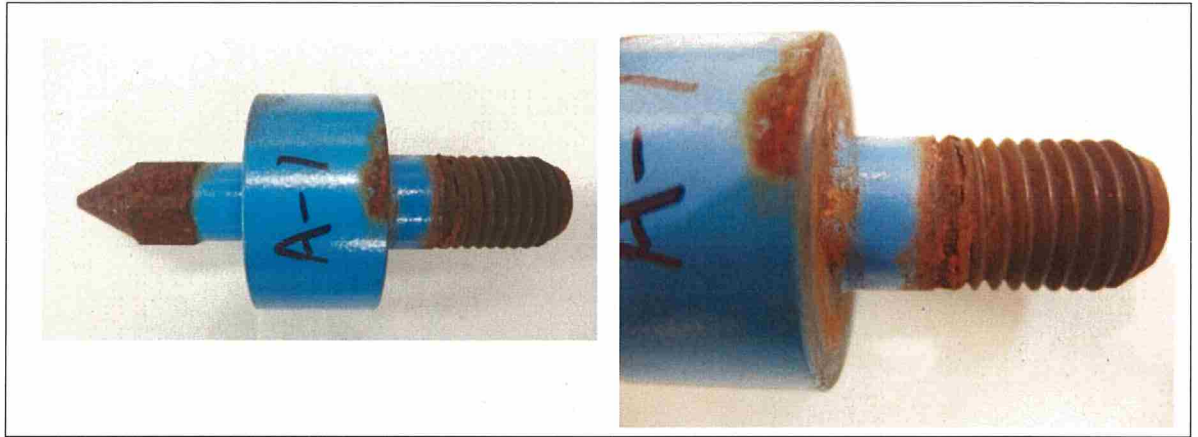


写真1 A-1の外観

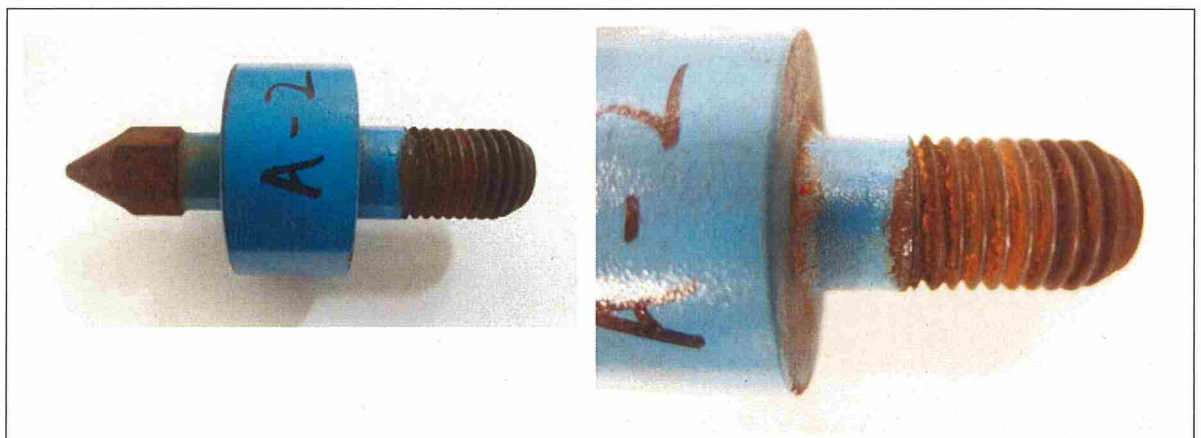


写真2 A-2の外観

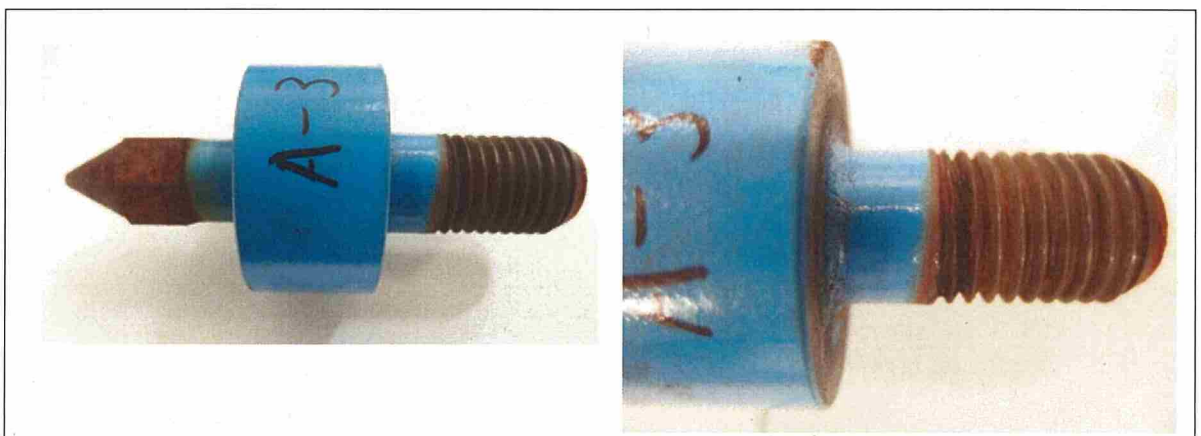


写真3 A-3の外観

3.2 非破壊検査（磁粉探傷試験）結果

磁粉探傷試験の写真 4～6 に示す。

いずれも不完全ねじ部に指示模様がみられる。

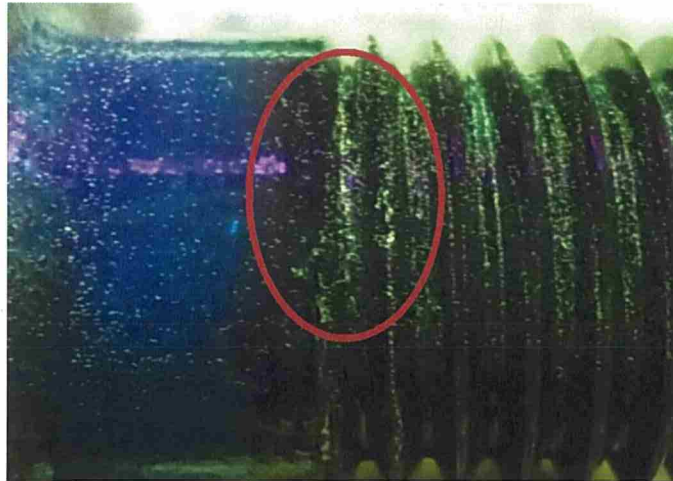


写真 4 A-1 磁粉探傷試験指示模様

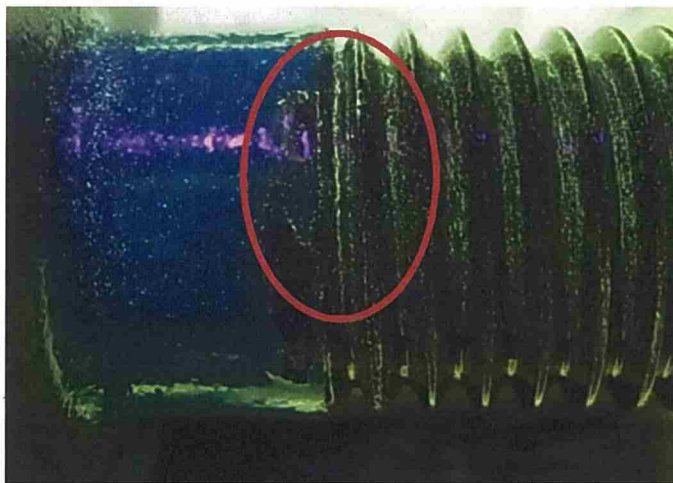


写真 5 A-2 磁粉探傷試験指示模様

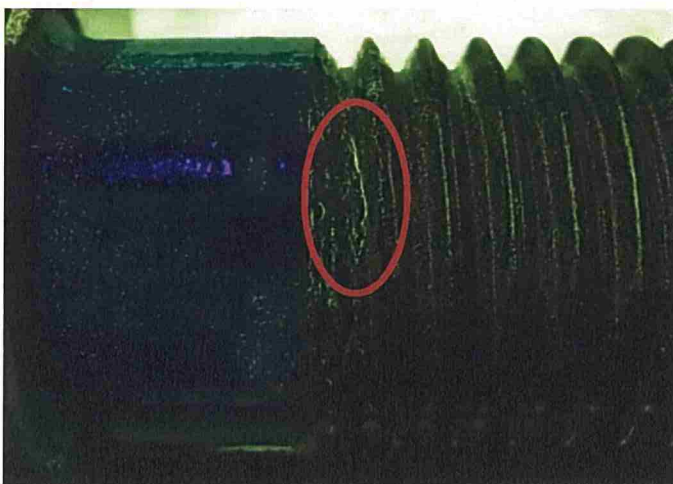


写真 6 A-3 磁粉探傷試験指示模様

3.3 ねじの軸方向断面観察

A-1 の欠陥部の写真を写真 7～9 に示す。

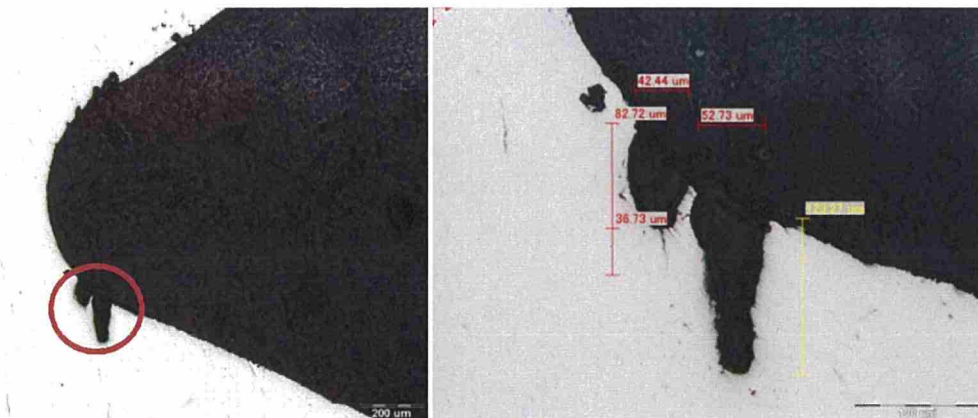


写真 7 完全ねじ（不完全ねじから 3 谷目）谷部断面（A-1）



写真 8 不完全ねじ谷部断面（A-1）（MT 指示模様部付近）

MT で指示模様が出たのは、緑丸部辺りと思われる



写真 9 不完全ねじ頂部断面（A-1）

A-2 の欠陥部の写真を写真 10～12 に示す。

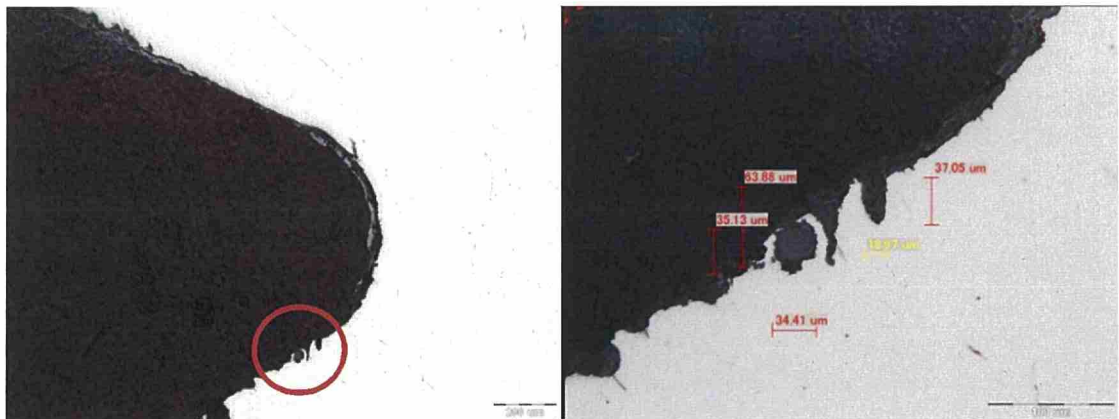


写真 10 完全ねじ（不完全ねじから 2 谷目）谷部断面（A-2）

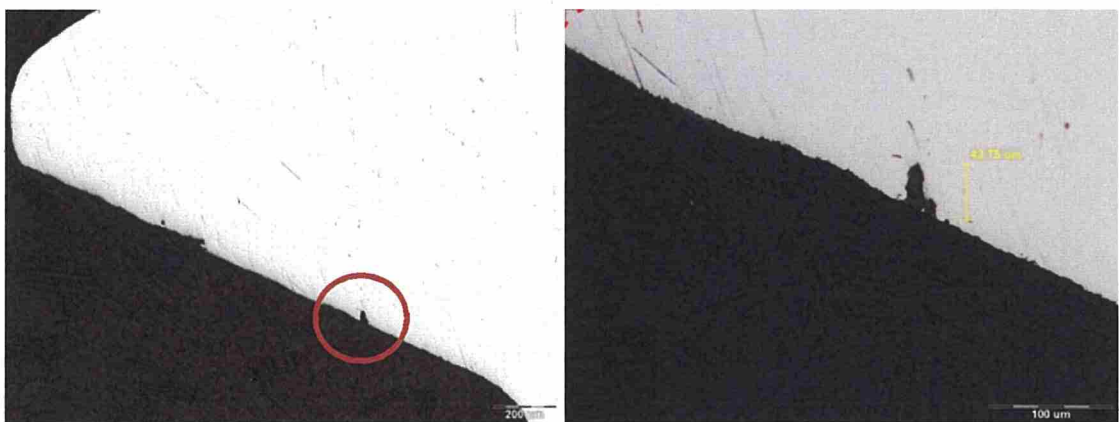


写真 11 完全ねじ（不完全ねじから 3 谷目）断面（A-2）



写真 12 不完全ねじ部断面（A-2）（MT 指示模様部付近）

MT で指示模様が出たのは、緑丸部辺りと思われる

A-3 の欠陥部の写真を写真 13～15 に示す。



写真 13 不完全ねじ頂部断面 (A-3)

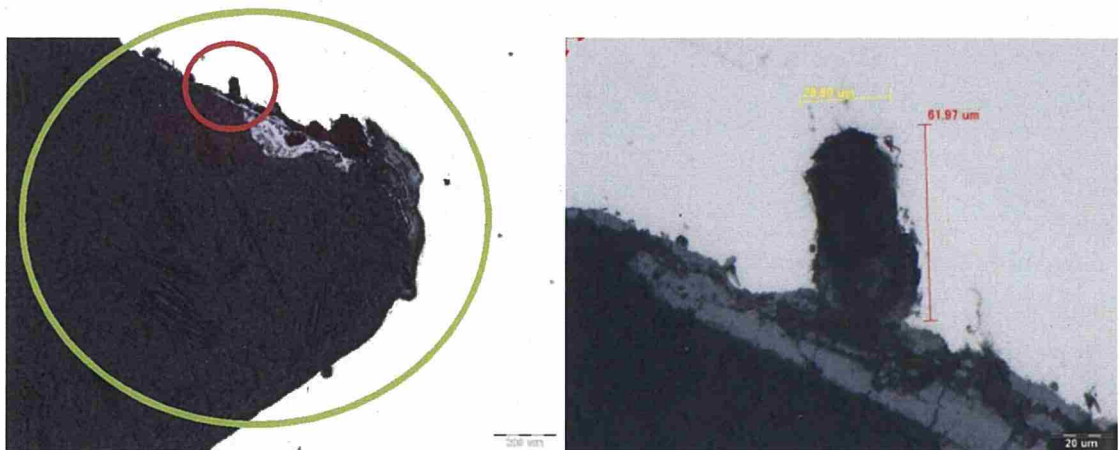


写真 14 不完全ねじ谷部断面 (A-3) (MT 指示模様部付近)

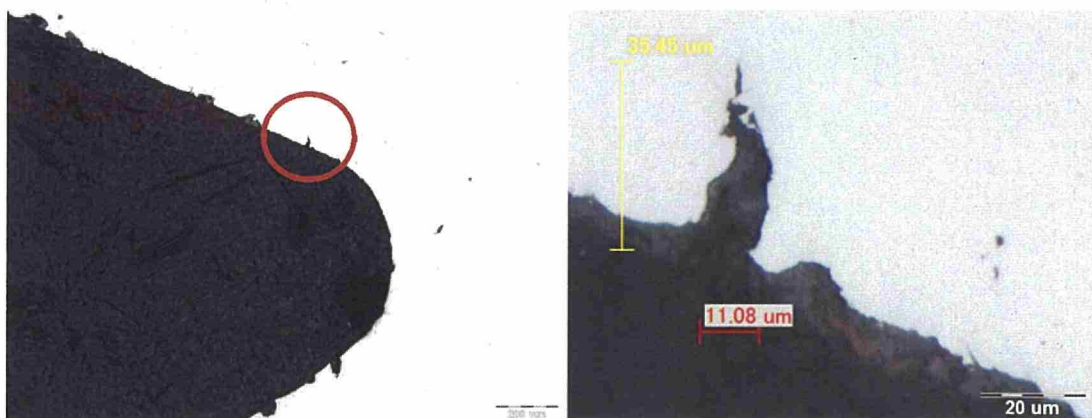


写真 15 不完全ねじ部から 1 谷目の断面 (A-3)

MT で指示模様が出たのは、緑丸部辺りと思われる

4. まとめ

非破壊検査（磁粉探傷試験）において指示模様が認められ、いずれも不完全ねじ部の谷に認められた。

その部分の断面を観察した結果、欠陥の深さ約 30～100 μ m 程度であった。

【フィッティングプレート取付ボルト】

1. はじめに

フィッティングプレート取付ボルト (容器 No. 21063) にも折損した蓋ボルトと同様に遅れ破壊が進行しているか確認した。

2. 調査項目と調査要領

協力企業の施設へボルトを持ち込み、以下に示す観察を実施した。

2.1 非破壊検査

- ・ ねじ部について JIS Z 2320-1、JIS Z 2320-2、JIS Z 2320-3 に従って磁粉探傷試験を行った。
- ・ 磁化装置は、日本電機工業(株)製 JH-9664S を使用した。
- ・ 磁化方法は、軸通電法およびコイル法とした。検査前には、両端面を軽く研磨した。
- ・ 湿式蛍光磁粉 LY-30 (蛍光色：黄色) を使用した。
- ・ 攪拌：試験開始前に少なくとも 30 分間検査液を循環システムに通して運転し、サンプルのスクリーン上および槽の側面、または底に沈殿し得る全ての磁粉を十分に混合した。
- ・ 攪拌した検査液をノズルから直接シャワーした。
- ・ 紫外線照射装置は、据付式紫外線探傷灯 Black Light D-40 型を使用した。
- ・ 指示模様が出了場合、検出位置、方向等を記録した。

2.2 切断

図 1 のように切断した。切断は、マイクロカッターにて切削油を掛けながら行った。

切断後の試験片は、シールまたはマジックにてマークシフトを行った。

非破壊検査において割れが確認された試験体については、割れを横断するように切断を行った。

切断後の試験片は、シールまたはマジックにてマークシフトを行った。

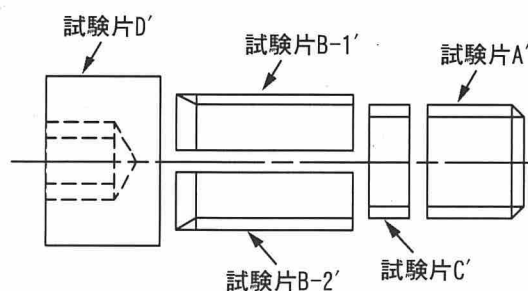


図 1 調査品の切断状態 (M12 フィッティングプレート固定用ボルト)

2.3 ねじの軸方向断面観察

図 1 の試験片 B-1'を使用してねじの軸方向断面観察を行った。

ねじの軸方向断面が表面になるように樹脂埋めし、粒度 240 番から 2000 番の研磨紙まで段階的に研磨後、ダイヤモンド粒子を使用して鏡面仕上げを行った。

観察は光学顕微鏡を使用し、不完全ねじ部および完全ねじ部について行った。倍率は 50 倍とした。

また、測定顕微鏡を使用し、ねじの全体も観察した。倍率は 10 倍とした。

割れが検出された試験体は、割れの状況も観察した。

3. 調査結果

3.1 外観

フィッティングプレート取付ボルトの外観を写真1～写真3に示す。



写真1 F-1の外観



写真2 F-2の外観



写真3 F-4の外観

3.2 非破壊検査（磁粉探傷試験）結果

磁粉探傷試験の結果、いずれも指示模様は確認できなかった。

状況写真を写真4～6に示す。

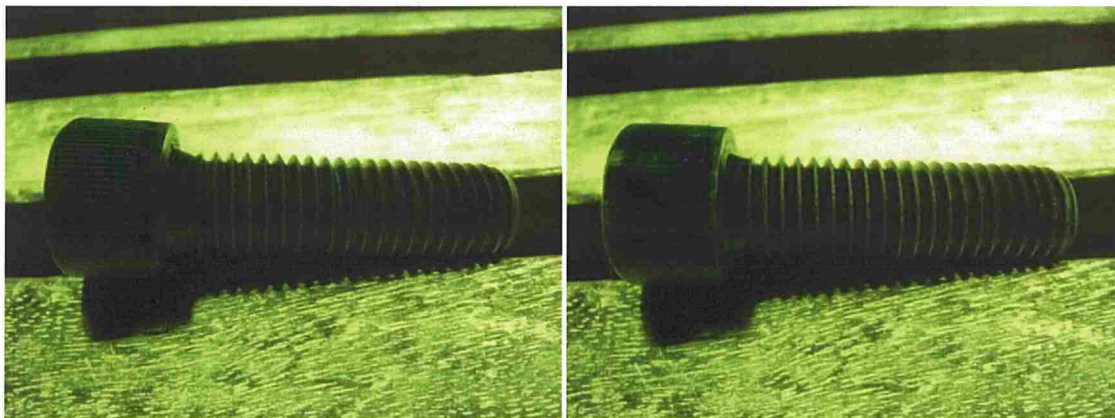


写真4 F-1 磁粉探傷試験

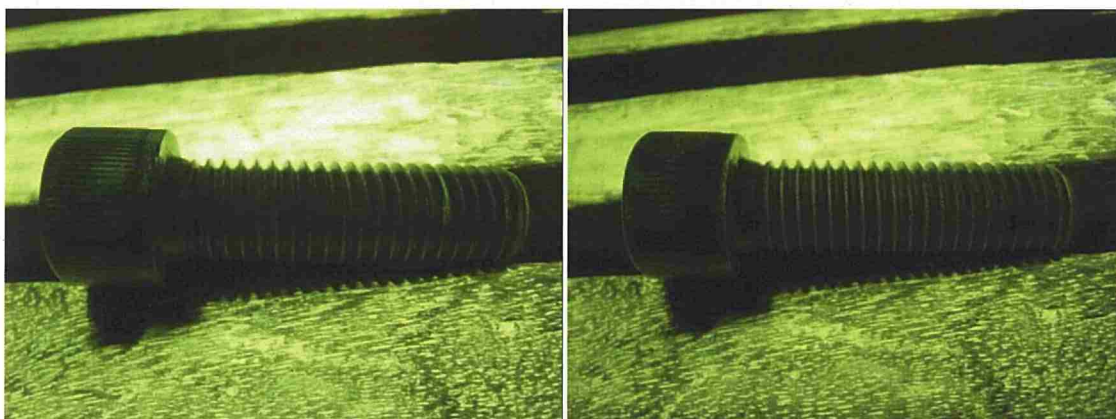


写真5 F-2 磁粉探傷試験

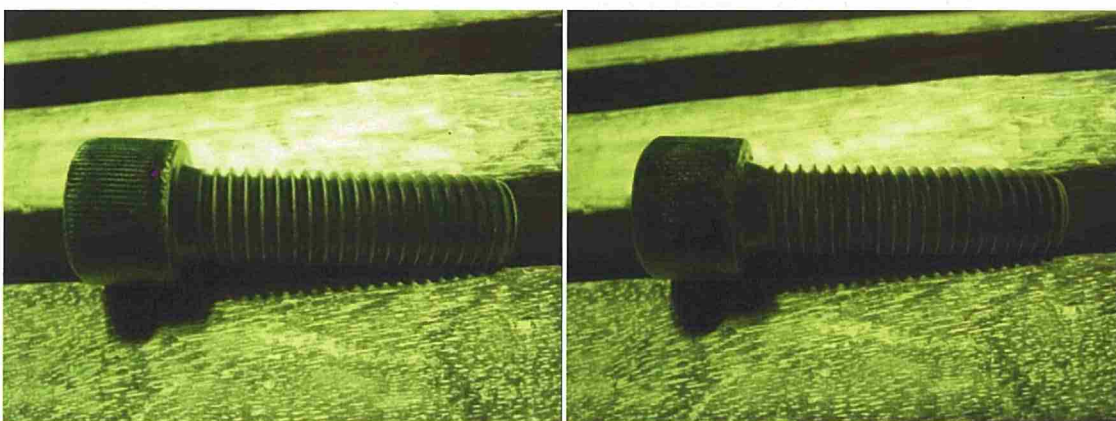


写真6 F-4 磁粉探傷試験

3.3 ねじの軸方向断面観察

ねじの軸方向断面写真を写真7～9に示す。

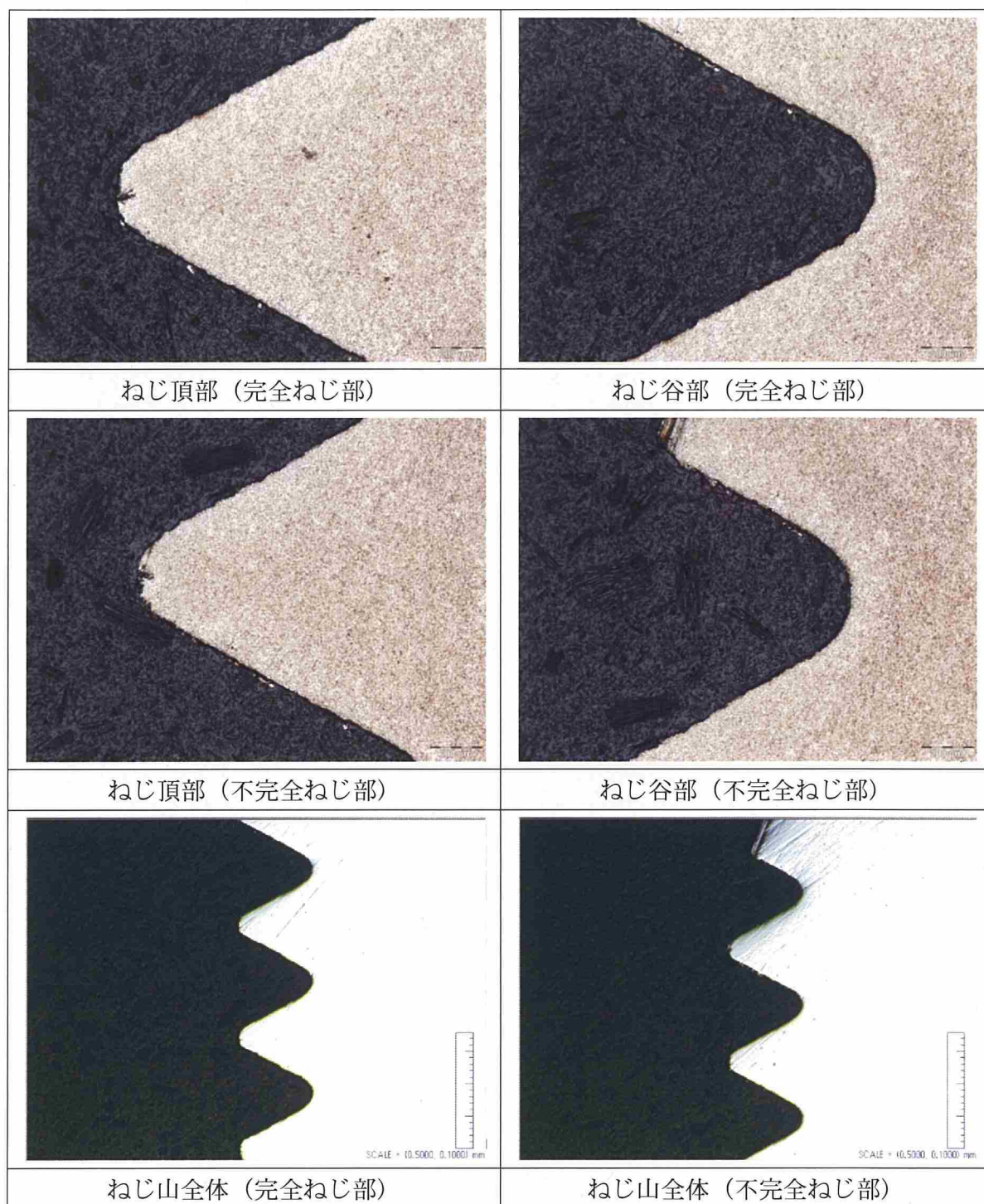


写真7 ねじ部断面写真 (F-1)

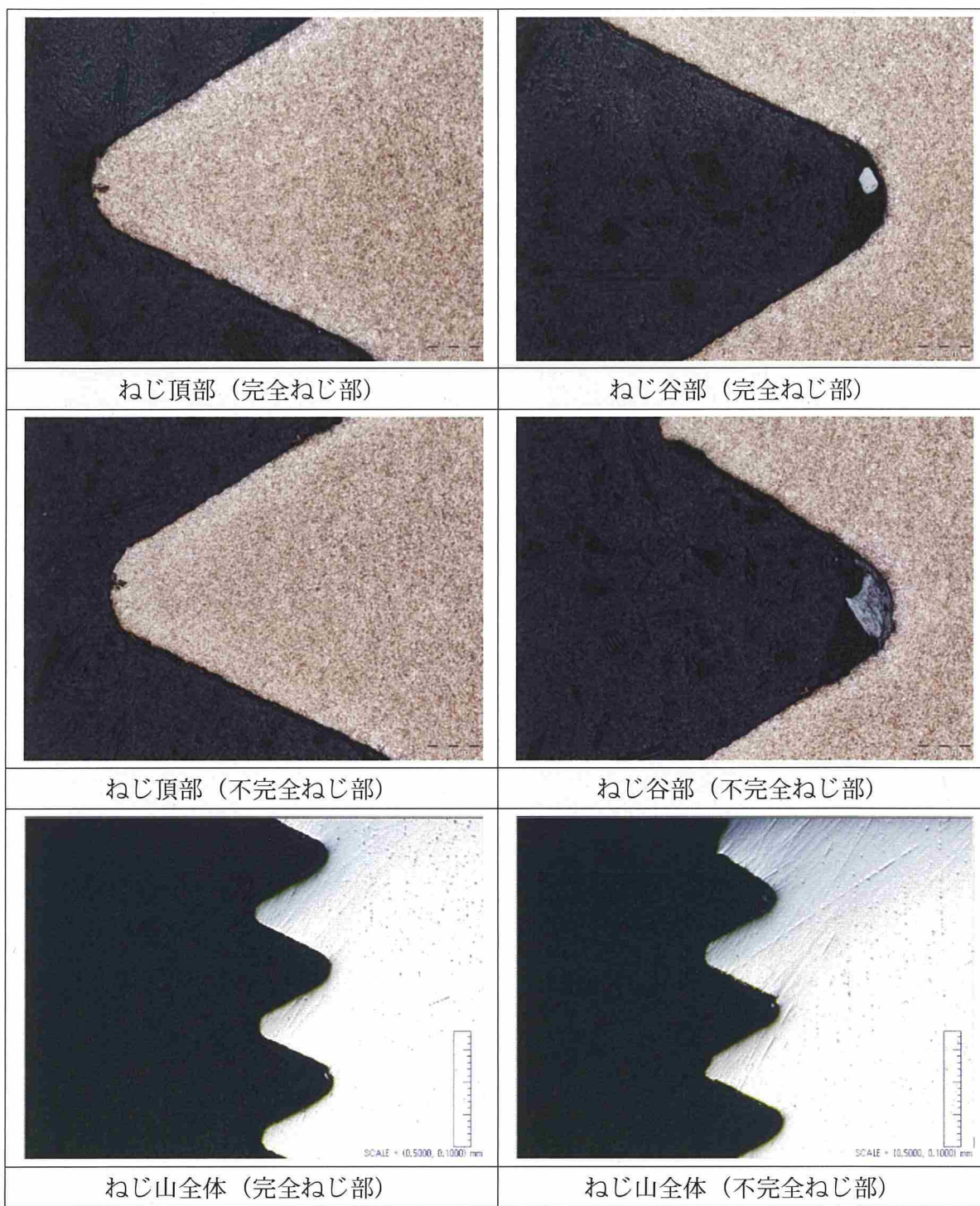


写真8 ねじ部断面写真 (F-2)

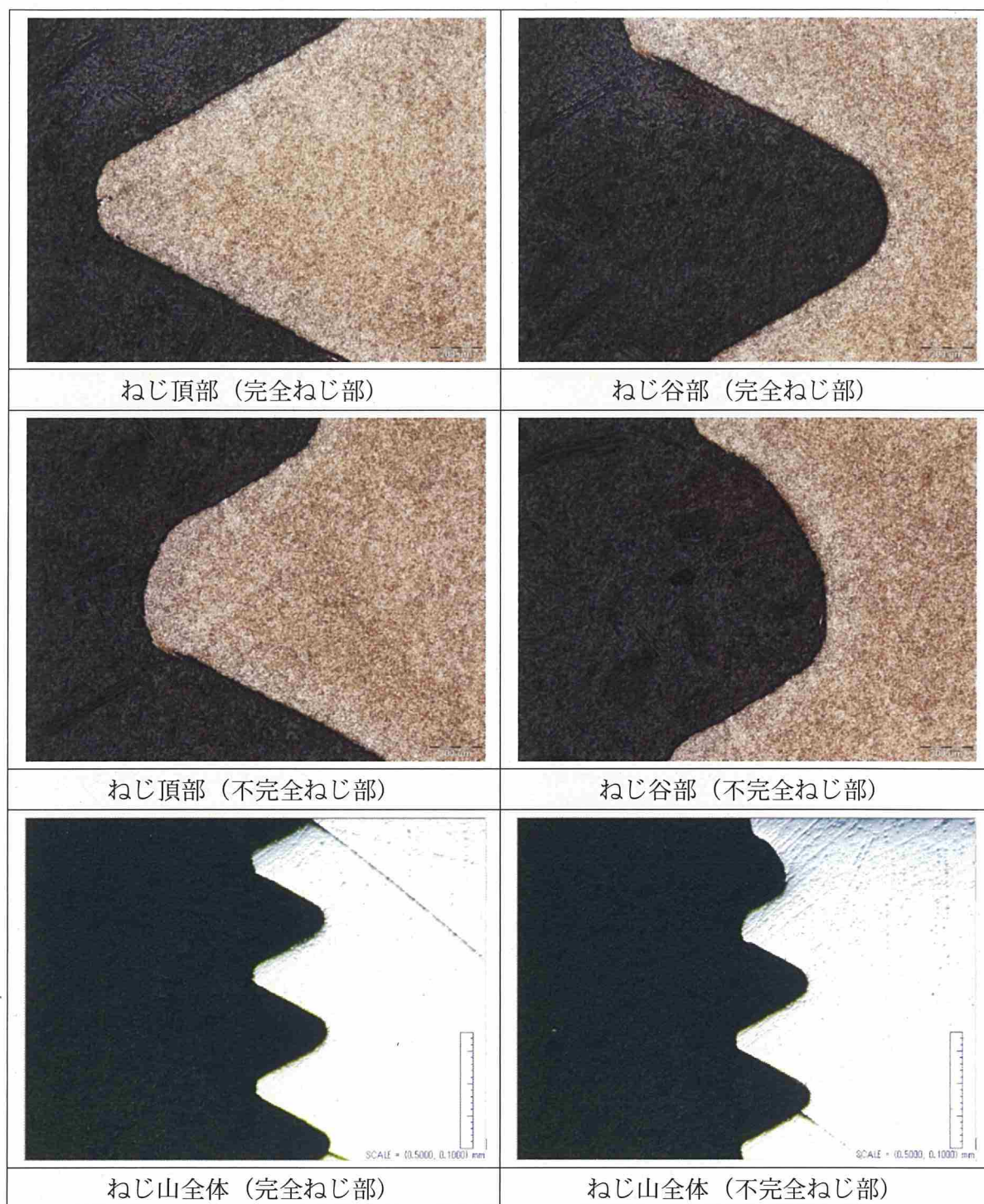


写真9 ねじ部断面写真 (F-3)

4. まとめ

非破壊検査（磁粉探傷試験）において指示模様は認められず、断面を観察した結果、蓋ボルトで認められたような腐食による欠陥は確認されなかった。

以上

外部有識者による検討委員会

委員略歴

渡邊 豊（わたなべ ゆたか）

【所属】

東北大学大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻 量子保全工学分野

【職名】

教授、総長特別補佐（震災復興推進担当）

山本 正弘（やまもと まさひろ）

【所属】

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

【職名】

原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究センター 副センター長

多田 英司（ただ えいじ）

【所属】

東京工業大学 大学院理工学研究科 物質科学専攻

【職名】

准教授

低レベル放射性廃棄物輸送容器蓋固定用ボルト折損事象の

原因究明および再発防止対策について

(品質マネジメントシステム編)

1. 原因調査

1. 1 調査体制

今回確認された蓋ボルト折損事象に関する不適合に対し、「品質保証規程」（品質マニュアル）および「不適合管理手順書」の規定に従い、原因調査、不適合処置および是正処置を進めている。具体的には手順書の定義に従い、平成27年6月18日に「蓋ボルト折損」および「報告遅れ」を不適合報告書として発行し、6月25日以降「重大不適合」に分類した。処置計画等については、都度マネジメントレビューである品質保証会議にて審議され、委員長である社長により決定される。実際の調査に関しては、社内の第三者的な立場の観点および不適合管理の責任箇所である品質管理部門で行った。

1. 2 調査対象

今回は、以下の三つの観点から調査した。

(1) 蓋ボルト折損

今回の事象はボルトの遅れ破壊によるが、直接原因としては、従来のボルトの強度区分を変更したことによるものであると考えている。については、ボルトの強度区分の変更に関する経緯およびボルト折損時の状況について調査した。

(2) 品質マネジメントシステム

今回の設計から製造に至るまでの、当社の品質マネジメントシステムへの適合性について調査した。

(3) 蓋ボルト折損事象確認後の情報連絡の遅れ

平成27年2月に1本目の事象が発生したにもかかわらず、社内の不適合報告が6月と遅かったことから、結果として関係箇所への報告が遅くなった。については、事象発生から関係箇所への報告に関する経緯を調査した。

1. 3 調査の実施

(1) 蓋ボルト折損

1) 調査方法

蓋ボルトの仕様が決定され、製造を進めていた平成22、23年当時のLLW輸送容器設計・製造時および蓋ボルト折損時に係る社内外関係者に聞き取り調査を行うとともに

に關係図書類の調査を行った。

2) 調査結果

①設計段階

- ・平成21年2月、東京電力㈱福島第二原子力発電所に保管されていた輸送容器のうち、国の輸送規則に基づく国際標準規格の貨物コンテナ規格（以下「ISO規格」という。）の基準の一部に適合していない輸送容器が発見されたため、その基準を満足する輸送容器を開発・製造することとしたが、その主要な設計要件は以下のとおりであった。
 - ・ 現行のインフラ（クレーン、輸送船、取扱装置等）で取扱可能なこと
 - ・ 既存の輸送容器をなるべく流用すること
 - ・ ISO規格に適合した蓋部を開発するが、それ以外については既存容器の基本設計を踏襲すること
- ・平成22年10月18日の当社の経営会議にて、容器設計メーカーに対し「LLW輸送容器の新設計および安全解析書作成業務（フェーズ1）（以下「設計委託（フェーズ1）」という。）を委託することとし、蓋固定のための緊締装置に対して、以下の観点で改良することとした。
 - ・ フィッティングプレートおよびその取付ボルトの腐食防止対策
 - ・ 蓋ボルトの材料の見直し
- ・平成22年11月時点の「設計委託（フェーズ1）」で提案された蓋ボルトの仕様は、LLW-1輸送容器で使用されたものと同じで、材料SNCM447、強度区分10T（現在の規格で10.9相当）が提案された。
- ・平成23年2月9日、SNCM447の流通性があまりよくなかったことから、容器設計メーカーおよびボルトメーカー（蓋ボルトの製造メーカーとは異なるメーカー）の助言も得ながら、コストや流通性等を考慮し、SNCM447とほぼ同等の性能を有するSCM435Hに材料を変更することとした。
- ・当社設計担当者も含めた関係者においては、ボルトの遅れ破壊に関する認識はなく、材料以外の機械的性能は旧仕様を踏襲するものと考えていたもので、材料変更時には強度区分に対しての議論は無く、SCM435Hと決定した。その結果を受けて、平成23年3月28日に制定した「低レベル放射性廃棄物輸送容器標準仕様書（以下、「標準仕様書」という。）」における蓋ボルトの仕様については、材料はSCM435H（JIS G 4052）又は相当品、備考として熱処理材とだけ記載していた。当時のJIS規格にボルトの遅れ破壊に関する記載はなかった。

②許認可段階

- ・平成23年4月27日に国土交通省および経済産業省に提出した「IP型輸送物の基準に係る認定申請書」においても、蓋ボルトの仕様については、材料SCM435H又は相当品との記載だけで、平成23年8月25日に経済産業省から「IP-2型輸送物の基準に係る認定書」および平成23年10月28日に国土交通省から「IP-2型輸送物の基準に係る承認書」をそれぞれ取得した。

③製造段階

- ・平成23年7月14日、標準仕様書に基づき、製造メーカー2社（以下2社をそれぞれ「A社（折損5本発見）」、「B社」という。）に当該輸送容器を発注した。
- ・平成23年10月4日、B社から蓋ボルトの承認申請図面REV. 1が提出され、これには材料SCM435H、焼入れ焼き戻し HB（硬度）269～331との記載があり、それで承認した。
- ・平成23年10月14日、ボルトメーカーの助言を得て、フィッティングプレート取付ボルトの仕様について、強度区分12.9（SCM材相当）および当該ボルトに防錆処置を施す旨を製造メーカー2社に指示した。強度区分12.9に関しては、当社製造担当者およびボルトメーカーによると、一般的な市販品の仕様に基づくものであった。
- ・平成23年11月1日、A社から蓋ボルト（材料SCM435H、強度区分10.9）の承認申請図面REV. 1が提出されたが、その後平成23年11月29日、強度区分が12.9に変更された図面REV. 2を受領した。当社がA社に対し変更を指示した明確な記録はなかったが、当時、承認申請図面REV. 1を見て当社製造担当者間において強度区分の変更を議論した記憶があること、当社製造担当者が強度区分を意識し始めたのはフィッティングプレート取付ボルトの強度区分12.9の話が出て以降であるとともに強度区分が高いものほど良いボルトであろうと考えていたことから、当社側からフィッティングプレート取付ボルトの強度区分に合わせた可能性が高いものと推定される。
- ・一方、B社においては、当社から標準仕様書記載以外の説明がなかったことから、機械的な強度に関しては、規格を参考にして蓋ボルトを製作（強度区分9.8）した。また、B社の図面に強度区分の記載がなかったことから、当社はコメントしなかった。
- ・聞き取りの結果、当時、ボルトメーカーを除く全ての関係者においては、ボルトの遅れ破壊に関する情報を認識していなかった。また、ボルトメーカーは、遅れ破壊に対

する知識はあったもののボルトが遅れ破壊しやすい環境で使用されるかどうかの認識がなかったことから、当社との間で遅れ破壊が話題になることはなかった。なお、ボルトメーカーとの調整は、専ら当社製造管理部門担当者間で行われた。

④蓋ボルト折損に至るまで

・平成27年2月16日の1本目の蓋ボルト折損は、平成4年にLLW輸送を開始して以来、初めての事象であった。従来より、手順書等に従い、空輸送容器点検時、実輸送容器へのドラム缶充填時および実輸送開始前において、蓋ボルトの健全性を目視等で確認しており、腐食等が大きい場合は予防保全的に取替えている。そのため、本事象が発生するまで、ボルト折損に関する知識・情報について特に必要性を感じなかったことから、結果として、遅れ破壊に関する知識がなかった。なお、フィッティングプレート取付ボルトに関しても折損事象はなかった。

また、原子力関係におけるボルトの遅れ破壊に関するトラブル事例は報告されていなかった。

(2) 品質マネジメントシステム

1) 調査方法

当社は、法令、顧客要求事項等への遵守を確実なものとするための仕組みとして、ISO9001に適合する品質マネジメントシステム（以下「QMS」という。）を構築し、平成11年にはISO9001の初回認証を取得し、現在も更新維持している。

QMSの最上位文書である「品質保証規程」（品質マニュアル）の品質方針において、法令遵守を宣誓し、適用法令を明記している。更に、組織図を明記し、それぞれの責任と権限を規定している。輸送容器の設計、製造、保守の管理に関する責任者は技術部長と規定している。

一方、ISO9001が要求する各プロセス（手順）についてはその概要等を同規程に定め、更に詳細が必要な手順については個々に手順書を策定している。

LLW輸送の設計、製造および保守に関連する手順書類は、以下のとおりである。

- ・ 輸送容器設計管理手順書
- ・ 輸送容器製造管理手順書
- ・ 輸送容器設計役務委託仕様書作成指示書
- ・ 安全解析の入出力チェック作業指示書
- ・ 輸送容器に係る設計者および検査員の教育・訓練における資格認定指示書
- ・ 製造管理担当グループ製造管理業務に関する作業指示書
- ・ 低レベル放射性廃棄物輸送容器の調達 標準仕様書

- ・ 輸送容器（ＬＬＷ）保守管理手順書
- ・ 輸送容器（ＬＬＷ）保守管理基準
- ・ 輸送容器（ＬＬＷ）保守管理指示書

不適合管理に関連する手順書類は以下のとおりである。

- ・ 品質保証規程
- ・ 不適合管理手順書
- ・ 内部監査手順書
- ・ ＬＬＷ－２型輸送容器の交換部品に係る基準

上記のＬＬＷ輸送の設計、製造に関わる手順書類および不適合管理に関する手順書類についてプロセス上の問題がないか調査した。

２）調査結果

- ・ ＬＬＷ輸送に関連する手順書類については、プロセスは明確になっており、記載内容の不備はなかったが、今回の事象を受けてより設計レビューの明確化を行なうのが望ましいとの判断に至った。
- ・ 不適合管理に関連する手順書類については、不適合報告対象の判断に迷う可能性があることがわかった。
- ・ 今回の主管部門においては、平成２４年１０月のＬＬＷ輸送に関する顧客の監査において文書類のレビューが不明確であるとの改善提案を受けていた。

（３）蓋ボルト折損事象確認後の情報連絡の遅れ

１）調査方法

平成２７年２月１６日の当社のＬＬＷ輸送容器管理センター（以下「管理センター」という。）における蓋ボルト折損の発見から、平成２７年６月２５日の５本目のボルト折損および関係箇所への連絡までの経緯を関係者への聞き取りおよび関係図書類の調査を行った。

２）調査結果

- ・ ２月１６日、管理センターで蓋ボルト１本目が発見された段階で、管理センターでは、作業手順に従い当該ボルトを新しいボルトに交換するとともに主管部門担当者に連絡した。主管部門担当者は以下の理由により、固有の事象※１と考え不適合の判断を行わず、原因究明を進めた。
 - ・ 空容器の点検中に確認されたことから、法令に基づく報告の義務※２はない

ものと認識していた。

- ・本事象は、初めてのことであり、保守・点検作業中に予測される程度の機器・部品の劣化・損傷と考え原因究明を優先することが妥当と考えた。
- ・管理センターにおけるボルトの外観確認について注意喚起を行った。

しかしながら、当該ボルトの折損が、輸送中に発生した場合の影響を考慮すると、この時点で不適合とすべきであった。

- ・2月24日、主管部門担当者は、ボルトメーカーに分析等（折損ボルトの外観検査、硬さ測定、マクロ写真およびミクロ写真による破断面観察）を依頼するとともに、ボルト製造時のデータ（ミルシート、熱処理条件）、ボルトの使用履歴等の調査を行った。
- ・4月11日、主管部門担当者は、ボルトメーカーから報告書（別添参照）を受領したが評価結果が緊急性を有するとは思わなかったため、他の業務を優先した。
- ・6月9日、主管部門担当者はボルトメーカーからの報告をもとに原因調査の速報を取りまとめ社内報告しようとした段階で主管部門長が本件は不適合とする方が適切と判断し、品質管理部門と相談の上、6月18日に不適合として社内通知し、遅れ破壊に関する文献調査等の原因分析を行なう予定としていた。
- ・6月22日、関西電力㈱美浜発電所より蓋ボルト1本折損（累計2本）の報告があったが、空容器の取扱中であったこと、および応急処置としてボルト等の取替作業や原因調査のために当該ボルトを取り寄せることを優先したため、対外的な対応への配慮に至らなかった。
- ・6月25日、管理センターで通常点検作業を実施していたところ、蓋ボルト1本の折損（累計3本）を発見したことから、緊急的にさらに確認したところ2本の折損報告（累計5本）があり、固有の事象ではない可能性が高いと判断し、緊急時対策本部を設置し、同日顧客である電力会社等に、翌日規制当局に同事象について連絡した。

※1：「固有の事象」とは、材料、使用環境、保管状況、負荷応力、施工状態等、悪い因子が重なることにより偶発的に発生した「当該ボルト単体」の特有事象

※2：「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第六十二条の三に規定する国土交通大臣への報告に関する規則」に報告事項が以下のとおり記載されている。

- 一 核燃料物質等の盗取又は所在不明が生じたとき。

- 二 核燃料物質等が異常に漏えいしたとき。
- 三 前二号のほか、核燃料物質等の運搬に関し人の障害（放射線障害以外の障害であって軽微なものを除く。）が発生し、又は発生するおそれがあるとき。

1. 4 原因調査結果

調査結果により、以下の問題があることが判明した。

①設計仕様変更時のレビュー不足【ISO9001 規格 7. 3. 7 項関連】

規格 7. 3. 7 項の「設計・開発の変更管理」は、「変更に対して、レビュー、検証および妥当性確認を適切に行い、その変更を実施する前に承認しなければならない」とあるが、設計および製造段階において、蓋ボルトに関しては、材料の変更についてのレビューはなされていたが、強度区分の変更についてのレビューが不十分だった。

②製造メーカー指示に関する社内手続き等の不備【ISO9001 規格 7. 3. 7 項関連 (4. 2. 4 項参照)】

規格 7. 3. 7 項の「設計・開発の変更管理」は、「変更のレビューの結果の記録、および必要な処置があればその記録を維持しなければならない」とあるが、製造段階での蓋ボルトの強度区分の変更において、製造メーカーとの情報連携に関する社内での承認手続きおよびその記録が残っていなかった。

③不適合事象に係る不適合処理意識の遅れ【当社「不適合管理手順書」6. 1. 3 項関連】

規格 8. 3 項の「不適合製品の管理」では「不適合製品の処理に関する管理者およびそれに関連する責任および権限を規定するために、“文書化された手順”を確立しなければならない」とあり、“文書化された手順”として当社は「不適合管理手順書」を定めている。「不適合管理手順書」6. 1. 3 項の「不適合の発生報告」では「不適合の発見者または主管部門は、発生事象の整理が出来次第、速やかに品質管理部門等に報告する」とあり、蓋ボルト折損に関する不適合報告はなされたが、事象発生段階において、不適合の認識が薄かったため、不適合報告が遅くなった。

また、推定原因は、以下のとおりである。

【推定原因①：設計仕様変更時のレビュー不足】

今回のLLW輸送容器の製造はISO規格への適合性対応だったため、蓋全体の改造に重点が置かれ、蓋ボルトに関してはコストや流通性等の観点から材料選択の検討はしたものの強度区分に対してはあまり注意が払われていなかった。

当時、当社および製造メーカーにおいてボルトの遅れ破壊についての知見は無く、ボルトの遅れ破壊を予見するのは非常に難しい状況だったと考えられる。

A社製の蓋ボルトの強度区分に関して、製造管理部門は単純に強度区分が高いものほ

ど良いボルトと考えていたことから、設計管理部門や設計メーカーのレビューを受けずに A 社製の蓋ボルトの強度区分を 12.9 に変更してしまった。

社内の技術力を向上するとともに、設計段階で社外の専門家の意見を仰いだり、製造段階では製造管理部門以外の関係者の意見を仰いで、予見可能性を高める努力が必要だったと思われる。

【推定原因②：製造メーカー指示に関する社内手続き等の不備】

製造管理部門が、A 社製の蓋ボルトの強度区分を 12.9 に変更した過程において、社内での承認手続きが明確でなく、A 社への情報連携に関する記録が残っていなかった。

【推定原因③：不適合事象に係る不適合処理意識の遅れ】

不適合報告の遅れに関しては、原子力に携わる事業者として、前広に社内外で情報共有すべきである安全文化の意識が不十分であったと考えられる。

また、不適合管理手順書で報告等がなされることになっているが、今回の事象発生時に発見者からの情報が主管部担当者に限定されていたことから、原因究明は必要と考え実施していたものの、不適合報告が必要であるとの判断ができなかった。適切に不適合判断ができるよう、主管部門長を含めた複数者で情報共有すべきであった。

2. 再発防止対策

【再発防止対策①：設計仕様変更時のレビュー不足】

- ・輸送容器設計関連の手順書類で、設計段階において、従来品と異なるものに設計変更する場合のレビューの方法について明確化すること、製造段階において、設計変更に影響する内容については必ずデザインレビューを実施すること、および各段階で予見可能性を高めるためにレビューのメンバーには社内の製造管理部門と設計管理部門のほかに、必要に応じて、設計メーカーまたは社外の専門家を含めることを明確化する。
- ・輸送容器製造関連の手順書類で設計に係る仕様変更がある場合は、設計管理部門等のレビューを受けることを明確にする。
- ・「輸送容器に係る設計者および検査員の教育・訓練における資格認定指示書」にて資格認定基準を見直す。
- ・上記について、全社員に周知する。
- ・昨年 5 月、技術系の組織変更を行い、2 部門に配属されていた輸送容器の専門家を一部門に集約し、設計の強化に取り組んでいる。
- ・昨年、技術継承の観点から技術図書（ノウハウ集）を作成しており、今回の蓋固定用ボルトの顛末を追記する。

【再発防止対策②：製造メーカー指示に関する社内手続き等の不備】

- ・適切に社内の承認手続きを実施し、他社と情報連携した場合は必ず文書を残すこと

を全社員に周知徹底する。

【再発防止対策③：不適合事象に係る不適合処理意識の遅れ】

- ・輸送容器保守関連の手順書類を改定し、保守、点検における事象に関して社内での報告事項を明確化する。
- ・「不適合管理手順書」を改定し、異常（不適合または不適合のおそれがあるもの）と判断して発見者または各部門長が他部門長に連絡する場合は、品質管理部門長にも報告することを徹底し報告漏れを防止した上で、輸送への影響のおそれ等があると判断した場合は、前広に顧客等へ報告する。
- ・不適合情報管理の手引き（カード）を作成し、全社員に配布する。
- ・企業風土の観点から経営層は、今回の事象が対外関係者および当社に対し非常に大きな影響を与えたことに鑑み、不適合報告の遅れがないよう全社員に訓示する。また、不適合報告遅れに関する安全文化醸成に係る教育を全社員対象に実施する。
- ・内部コミュニケーション向上のため、各部門は、再発防止や予防処置のためにどうすればよいか議論し、その結果を品質管理部門に報告する。
- ・原子力事業者における対外的なトラブル対応をニューシア等で調査する。
- ・折損ボルトを社内に展示するなど、今回の事象から得られた教訓が風化しないようにする。
- ・経営層は、不適合報告が確実に実施されていることをフォローアップ会議および品質保証会議で確認する。
- ・再発防止対策の妥当性評価のため、品質マネジメントシステム認証機関の審査を受審する。

以 上

別添

原燃輸送株式会社 御中

LLW-2 型輸送容器の蓋固定用ボルト破断について

平素は、格別のご高配を賜り誠にありがとうございます。

下記に調査依頼を頂きました破断ボルトの調査結果につきまして御報告させていただきます。
宜しく御査収下さいます様、お願い致します。

1. 破断製品

LLW-2 型輸送容器の蓋ボルト SCM435H (12.9) M20×102 1 本

2. 御使用状況

- ・ H25 年 6 月 : にて蓋交換工事を行い、LLW 管理センターに納入。
- ・ H25 年 6 月～10 月 : LLW 管理センター
- ・ H25 年 10 月～H26 年 5 月 : 大飯発電所
- ・ H26 年 5 月～6 月 : JNFL 埋設センター
- ・ H26 年 6 月～現在 : LLW 管理センター

なお、当該容器の部品交換等での緊締装置周りの交換・補修の実績はなく、シール関係のみ貼り替えの実績がある。

- ・ H25 年 2 月 : 危険物標識の剥れにより貼り替え
- ・ H26 年 7 月 : 危険物標識及び輸送物シールの仕様変更により貼り替え

3. 調査結果

3.1 外観

破断品の外観を写真 1 に示します。

また、①部の拡大を写真 2 に示します。



写真 1 破断品の外観



写真 2 ①部拡大

破断は、ねじ部先端から約 17mm の位置で発生しています。
破断部から 1 山フランジ側に亀裂が認められます。(写真 2)
塗装部以外には錆が発生しています。

3.2 軸部断面の硬さ分布

破断面から約 10mm フランジ側の断面（写真 1）で硬さの分布を測定致しました。
直径方向を直角に 2 方向測定しました。
測定結果を表 1 に示します。

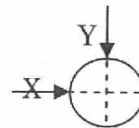


表 1 硬さ分布測定結果

中心からの距離 (mm)	X (HRC)	Y (HRC)
-8	42	42
-6	42	41
-4	42	41
-2	41	41
0	41	41
2	42	41
4	41	42
6	42	42
8	42	43

表面付近から中心までほぼ一様な硬さとなっています。
12.9 の硬さ要求は、満足しています。

3.2 破面観察

破面のマクロ写真を写真3及び写真4に示します。



写真3 破断面写真（ボルト先端側）



写真4 破断面写真（フランジ側）

写真3及び写真4において、黒線より左側が脆性破面、右側が延性破面となっています。

破面の SEM 写真を写真 5～6 に示します。

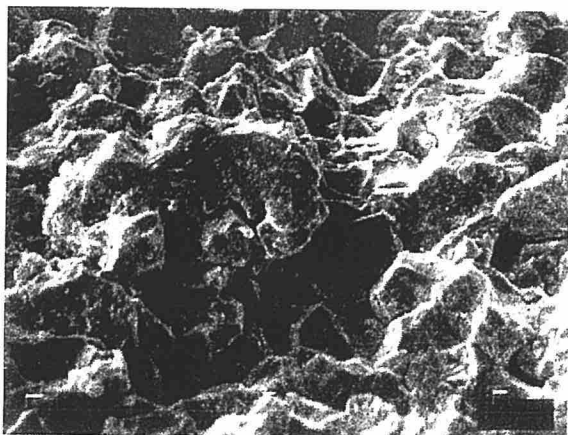


写真 5 写真 3 の A 部 SEM 写真 (×500)

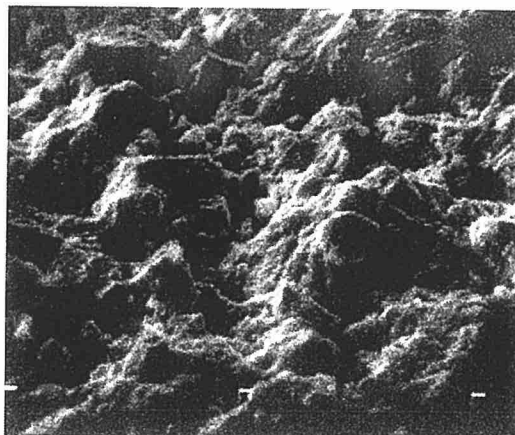


写真 6 写真 3 の B 部 SEM 写真 (×500)

A 部では粒界破壊がみられます。

B 部（中央付近）では延性破面となっています。

4. 考察

お送り頂いた破断ボルトの調査結果から、以下の様に推測致します。

破断は、応力の集中する位置であるめねじとの嵌合境界部と思われます。

破断面の SEM 観察の結果、写真 2 の A 部において粒界破壊がみられます。

詳細な御使用状況（使用環境（雰囲気）、締結力等）不明ですが、ボルトの強度や破面の状況から遅れ破壊により亀裂が進展し、断面積減少によって写真 3、4 の延性破面部で最終破断に至ったものと推測されます。

5. 対策

材料、使用環境、負荷応力、施工状態等、悪い因子が重なることにより遅れ破壊が発生致します。

対策として次のことが考えられます。

- ① ボルト強度が高い方が遅れ破壊に対する感受性が高いため、ボルトの強度を 12.9 から 8.8 に下げていただく方がリスクを低減できると考えます。（強度設計上の問題があるかもしれません）
- ② 施工状態の再確認（均等に締まっているか、緩み・締め過ぎが無い）
- ③ 腐食環境にある場合、腐食を抑制する。

以上