

平成29年度  
高レベル放射性廃棄物等の  
地層処分に関する技術開発事業  
処分システム工学確証技術開発

報告書  
(第1分冊)

人工バリア品質/健全性評価手法の構築  
オーバーパック

平成30年3月

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

本報告書は、経済産業省からの委託研究として、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した、平成29年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 処分システム工学確証技術開発の開発成果を取りまとめたものです。

## 報告書の構成

平成29年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 処分システム工学確証技術開発の報告書は、以下の分冊により構成されている。

当該報告書	分冊名	報告書の標題
○	第1分冊	処分システム工学確証技術開発 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック
	第2分冊	処分システム工学確証技術開発 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材
	第3分冊	人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築
	第4分冊	処分システム工学確証技術開発 モニタリング関連技術の整備

# 目 次

第 1 章	はじめに .....	1-1
1.1	本事業の背景および目的 .....	1-1
1.2	本事業の構成および全体計画 .....	1-1
1.2.1	研究開発項目の構成 .....	1-1
1.2.2	本事業における設定課題と 5 年間の計画 .....	1-1
1.3	人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック .....	1-3
1.3.1	背景および目的 .....	1-3
1.3.2	5 年間の研究開発計画 .....	1-3
1.3.3	平成 29 年度の実施内容 .....	1-5
第 2 章	健全性評価のための研究開発課題の設定 .....	2-1
2.1	設計要件および定置される環境条件 .....	2-1
2.1.1	設計要件 .....	2-1
2.1.2	環境条件 .....	2-1
2.2	オーバーパックの健全性確保の考え方 .....	2-5
2.2.1	破損形態および破損モード .....	2-5
2.3	腐食評価 .....	2-8
2.3.1	寿命評価における前提条件 .....	2-8
2.3.2	これまでの腐食評価に関する研究開発 .....	2-9
2.3.3	腐食現象に影響をおよぼす因子 .....	2-10
2.3.4	腐食評価の考え方 .....	2-11
2.4	構造評価 .....	2-11
2.4.1	材料劣化事象の検討 .....	2-11
2.4.2	構造評価の考え方 .....	2-13
2.4.3	構造評価に関する研究開発課題の整理 .....	2-18
2.5	まとめ .....	2-20
2.5.1	腐食評価 .....	2-20
2.5.2	構造評価 .....	2-20
第 3 章	現象理解の腐食試験 .....	3-1
3.1	試験目的および概要 .....	3-1
3.1.1	試験の目的 .....	3-1
3.1.2	試験の位置づけ .....	3-2
3.1.3	5 ヶ年計画 .....	3-16
3.2	工学規模試験の実施 .....	3-19
3.2.1	幌延 URL における工学規模試験の実施 .....	3-19
3.2.2	地上施設における工学規模試験の実施 .....	3-28
3.3	工学規模試験装置の解体・分析 .....	3-37

3.3.1	幌延 URL における工学規模試験装置の解体.....	3-37
3.3.2	幌延 URL における工学規模試験の測定・分析結果.....	3-84
3.3.3	地上における工学規模試験装置の解体.....	3-101
3.3.4	地上における工学規模試験の測定・分析結果.....	3-127
3.3.5	模擬オーバーパック 3次元計測結果の評価.....	3-143
3.4	小規模要素試験の実施.....	3-154
3.4.1	不均質条件試験.....	3-154
3.4.2	経時変化確認試験.....	3-172
3.5	腐食挙動の評価.....	3-196
3.5.1	溶接部の腐食挙動.....	3-196
3.5.2	腐食想定シナリオ.....	3-199
3.5.3	腐食の進展.....	3-206
3.6	腐食計測技術の適用性確認調査.....	3-208
3.6.1	同一環境下センサー性能確認試験.....	3-208
3.6.2	かまぼこ型腐食試験片.....	3-208
3.6.3	3電極式センサー.....	3-218
3.6.4	薄膜レジストメトリー.....	3-218
3.6.5	電気抵抗/ポテンシャルドロップ法.....	3-220
3.6.6	インピーダンス (EIS) 法.....	3-221
3.6.7	まとめ.....	3-241
3.7	まとめ.....	3-243
第4章	メカニズム解明の腐食試験.....	4-1
4.1	概要.....	4-1
4.2	溶接部材料因子の影響評価.....	4-2
4.2.1	概要.....	4-2
4.2.2	耐食性評価試験から課題の抽出.....	4-2
4.2.3	化学成分を統一した溶接試験体の作製[2].....	4-3
4.3	電気化学的手法による溶接金属選択腐食評価.....	4-5
4.3.1	定電位分極による選択腐食の再現試験[2].....	4-5
4.3.2	試験片の部位による腐食電位の測定.....	4-8
4.3.3	2電極間の電位差の測定.....	4-13
4.3.4	まとめ.....	4-15
第5章	溶接部の残留応力改善手法.....	5-1
5.1	背景および目的.....	5-1
5.2	解析方法および解析条件.....	5-1
5.2.1	解析方法.....	5-1
5.2.2	解析条件.....	5-2
5.2.3	解析モデルの検討.....	5-5

5.3	溶接部の残留応力解析 .....	5-6
5.3.1	溶接時の温度解析 .....	5-6
5.3.2	溶接残留応力解析 .....	5-7
5.4	溶接残留応力低減解析 .....	5-10
5.4.1	解析条件.....	5-10
5.4.2	熱処理条件の設定のための予備解析.....	5-12
5.4.3	溶接残留応力改善のための温度解析.....	5-18
5.4.4	溶接残留応力改善のための応力解析.....	5-20
5.5	本章のまとめ.....	5-23
第6章	溶接部の非破壊検査技術の信頼性向上.....	6-1
6.1	背景および目的.....	6-1
6.2	溶接欠陥の寸法および位置の測定値に対する安全係数の検討.....	6-1
6.2.1	欠陥寸法誤差の分析方法の事例.....	6-1
6.2.2	自然欠陥の寸法および位置の測定精度のデータ整理.....	6-2
6.2.3	超音波シミュレーションによる測定精度の妥当性検討.....	6-17
6.3	複数欠陥の検出および測定精度に関する検討.....	6-34
6.3.1	解析モデル及び解析条件.....	6-34
6.3.2	解析結果.....	6-38
6.4	検査手順の設定.....	6-41
6.4.1	PhA法の探傷試験要領および留意点.....	6-41
6.5	本章のまとめ.....	6-49
第7章	炭素鋼の脆化量予測.....	7-1
7.1	背景および目的.....	7-1
7.2	照射試験による炭素鋼の損傷量の把握.....	7-1
7.2.1	炭素鋼の脆化因子におよぼす溶接の影響の検討.....	7-1
7.2.2	炭素鋼の脆化因子におよぼす照射速度の影響の検討.....	7-33
7.2.3	炭素鋼の脆化因子におよぼす照射速度の影響の検討.....	7-34
7.2.4	照射損傷量と硬さの増加量の関係.....	7-46
7.2.5	破壊靱性値の低下量と硬さの増加量の関係.....	7-48
7.3	炭素鋼の照射損傷量の予測.....	7-50
7.3.1	炭素鋼の照射脆化予測モデル.....	7-51
7.3.2	計算結果.....	7-56
7.3.3	オーバーパックの照射損傷量の予測.....	7-66
7.4	炭素鋼の破壊靱性値の低下量の推定.....	7-69
7.5	本章のまとめ.....	7-69
第8章	オーバーパックの強度評価.....	8-1
8.1	背景および目的.....	8-1
8.2	強度評価方法.....	8-2

8.2.1	破損形態および破損モード .....	8-2
8.2.2	強度評価方法 .....	8-3
8.3	解析条件および解析モデル .....	8-5
8.3.1	解析条件 .....	8-5
8.3.2	解析モデル .....	8-5
8.4	有限要素法による強度評価 .....	8-6
8.4.1	偏圧を考慮した崩壊荷重（崩壊発生時の外圧の算出） .....	8-6
8.4.2	偏圧を考慮した崩壊荷重（未溶接部を起点とした破損） .....	8-16
8.4.3	平蓋形状を対象とした溶接欠陥を起点とした破損 .....	8-23
8.5	本章のまとめ .....	8-30
第9章	まとめ .....	9-1
9.1	オーバーパックの健全性評価手法の構築 .....	9-1
9.2	現象理解の腐食試験 .....	9-1
9.3	メカニズム解明の腐食試験 .....	9-1
9.4	溶接部の残留応力改善手法 .....	9-2
9.5	溶接部の非破壊検査技術の信頼性向上 .....	9-2
9.6	炭素鋼の脆化量予測 .....	9-2
9.7	オーバーパックの強度評価 .....	9-2

## 目 次

図 2.1.2-1	オーバーパック-緩衝材界面の環境の模式図.....	2-3
図 2.2.1-1	オーバーパックの蓋構造の例.....	2-5
図 2.2.1-2	オーバーパックの破損形態.....	2-6
図 2.3.2-1	酸化性雰囲気での浸漬試験による TIG 溶接試験片の選択腐食.....	2-9
図 2.3.3-1	オーバーパックの腐食に寄与する因子の例.....	2-10
図 2.3.3-2	オーバーパック溶接部の不均一性.....	2-11
図 2.3.3-3	MAG 溶接部の選択腐食における溶接材料への Ni 添加の効果.....	2-11
図 2.4.2-1	軟鋼の応力ひずみ線図の模式図.....	2-14
図 2.4.2-2	応力拡大係数と限界き裂寸法の関係の模式図.....	2-15
図 2.4.2-3	オーバーパックの構造評価のフローチャート.....	2-16
図 2.4.2-4	強度評価のフローチャート.....	2-17
図 2.4.2-5	欠陥評価のフローチャート.....	2-18
図 2.4.3-1	構造評価に関する研究開発課題の整理.....	2-19
図 3.1.2-1	地上試験、地下試験、試験条件等を考慮した各試験の位置付け.....	3-5
図 3.1.2-2	試験条件検討；環境系／試験系の因子.....	3-7
図 3.1.2-3	幌延町所在地、幌延 URL、350m 調査坑道平面図.....	3-10
図 3.1.2-4	深度 350 m 調査坑道 平面図.....	3-11
図 3.1.2-5	試験坑道 5 (A-A') 断面および試験体等イメージ図.....	3-11
図 3.1.2-6	工学規模試験 模擬オーバーパック構造及び外観.....	3-12
図 3.1.2-7	工学規模試験 埋込型 3 電極センサー・外形図及び外観.....	3-12
図 3.1.2-8	幌延 URL 工学規模試験 センサー配置 (3 次元イメージ).....	3-13
図 3.1.2-9	幌延 URL 工学規模試験 外観・センサー配置図.....	3-14
図 3.1.2-10	幌延 URL 工学規模試験 試験体設置状況.....	3-15
図 3.2.1-1	幌延 URL 工学規模試験 3 電極式腐食センサー腐食速度計測値の経時変化 .....	3-20
図 3.2.1-2	幌延 URL 工学規模試験 3 電極式腐食センサー腐食速度計測値に基づく腐食深 さの経時変化.....	3-21
図 3.2.1-3	幌延 URL 工学規模試験 3 電極センサーを使用したインピーダンスの全周波数 計測 Fitting 結果 (位相差) (941 日目).....	3-22
図 3.2.1-4	幌延 URL 工学規模試験 3 電極センサーを使用したインピーダンスの全周波数 計測 (Bode 線図) (941 日目).....	3-22
図 3.2.1-5	幌延 URL 工学規模試験 3 電極センサーにおける $R_p^{-1}$ (1mHz) の経時変化 .....	3-23
図 3.2.1-6	幌延 URL 工学規模試験 試験坑道 5 溶存酸素量.....	3-24
図 3.2.1-7	幌延 URL 工学規模試験 試験坑道 5 溶存二酸化炭素量.....	3-24
図 3.2.1-8	幌延 URL 工学規模試験 地下水の組成.....	3-25

図 3.2.1-9	幌延 URL 地下水の Na/Cl 比 (左) と Na/IC 比 (右)	3-25
図 3.2.1-10	幌延 URL 工学規模試験 地下水の pH	3-26
図 3.2.1-11	幌延 URL 工学規模試験 試験体温度測定結果	3-27
図 3.2.1-12	幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック電位 (亜鉛照合電極基準) の経時変化	3-28
図 3.2.2-1	地上工学規模試験 3 電極式腐食センサー腐食速度計測値の経時変化	3-29
図 3.2.2-2	地上工学規模試験 3 電極式腐食センサー腐食速度計測値に基づく腐食深さの経時変化	3-30
図 3.2.2-3	地上工学規模試験 交流インピーダンスセンサーによる $R_p^{-1}$ の測定結果	3-31
図 3.2.2-4	地上工学規模試験 溶液抵抗 測定結果	3-31
図 3.2.2-5	地上工学規模試験 電気二重層容量の経時変化	3-33
図 3.2.2-6	地上工学規模試験 注水量	3-34
図 3.2.2-7	地上工学規模試験 模擬地下水の組成	3-35
図 3.2.2-8	地上工学規模試験 模擬地下水の pH	3-35
図 3.2.2-9	地上工学規模試験 試験体温度測定結果	3-36
図 3.2.2-10	地上工学規模試験 模擬オーバーパック電位 (亜鉛照合電極基準) の経時変化	3-37
図 3.3.1-1	幌延 URL 工学規模試験 作業場所位置図	3-38
図 3.3.1-2	幌延 URL 工学規模試験 試験孔配置図 (試験坑道 5)	3-39
図 3.3.1-3	幌延 URL 工学規模試験 試験装置詳細図	3-41
図 3.3.1-4	幌延 URL 工学規模試験 搬送容器詳細図	3-42
図 3.3.1-5	幌延 URL 工学規模試験 搬送容器外観	3-43
図 3.3.1-6	幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (1/9)	3-44
図 3.3.1-7	幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (2/9)	3-45
図 3.3.1-8	幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (3/9)	3-46
図 3.3.1-9	幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (4/9)	3-47
図 3.3.1-10	幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (5/9)	3-48
図 3.3.1-11	幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (6/9)	3-49
図 3.3.1-12	幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (7/9)	3-50
図 3.3.1-13	幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (8/9)	3-51
図 3.3.1-14	幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (9/9)	3-52
図 3.3.1-15	幌延 URL 工学規模試験 試験装置解体前	3-53
図 3.3.1-16	幌延 URL 工学規模試験 ヒータ停止状況	3-54
図 3.3.1-17	幌延 URL 工学規模試験 解体前環境測定状況 (溶存酸素量測定)	3-54
図 3.3.1-18	幌延 URL 工学規模試験 記録用固定カメラ設置状況	3-54
図 3.3.1-19	幌延 URL 工学規模試験 試験体固定フレームの撤去	3-55
図 3.3.1-20	幌延 URL 工学規模試験 投入口カバーの取外し (3 か所)	3-56
図 3.3.1-21	幌延 URL 工学規模試験 上部隙間充填ベントナイト撤去	3-56

図 3.3.1-22	幌延 URL 工学規模試験	試験体側センサケーブル切断 .....	3-56
図 3.3.1-23	幌延 URL 工学規模試験	試験孔側部の珪砂・地下水の回収状況 (1/2) ...	3-57
図 3.3.1-24	幌延 URL 工学規模試験	試験孔側部の珪砂・地下水の回収状況 (2/2) ...	3-57
図 3.3.1-25	幌延 URL 工学規模試験	土圧計、ACM センサー回収 .....	3-57
図 3.3.1-26	幌延 URL 工学規模試験	試験孔側部の珪砂・地下水の回収完了 .....	3-58
図 3.3.1-27	幌延 URL 工学規模試験	アイボルト付投入口カバー取付け (3 か所) ....	3-58
図 3.3.1-28	幌延 URL 工学規模試験	ヒータ引抜き・撤去 .....	3-58
図 3.3.1-29	幌延 URL 工学規模試験	シリコンオイル抜き取り (手動ポンプ使用) ....	3-59
図 3.3.1-30	幌延 URL 工学規模試験	M12 アイボルト付模擬オーバーパック蓋取付け	3-59
図 3.3.1-31	幌延 URL 工学規模試験	上蓋コーキング材撤去 .....	3-59
図 3.3.1-32	幌延 URL 工学規模試験	試験体吊上げ、スぺーサセット .....	3-60
図 3.3.1-33	幌延 URL 工学規模試験	上蓋 Φ33 穴のコーキング材撤去 .....	3-60
図 3.3.1-34	幌延 URL 工学規模試験	M30 アイボルト取付け (4 か所) .....	3-60
図 3.3.1-35	幌延 URL 工学規模試験	試験体の吊上げ .....	3-61
図 3.3.1-36	幌延 URL 工学規模試験	試験体外観撮影 .....	3-61
図 3.3.1-37	幌延 URL 工学規模試験	試験孔壁面の状態 .....	3-62
図 3.3.1-38	幌延 URL 工学規模試験	搬送のための試験体のラップ養生 .....	3-62
図 3.3.1-39	幌延 URL 工学規模試験	試験体を搬送容器に収納 .....	3-62
図 3.3.1-40	幌延 URL 工学規模試験	搬送容器をハンドパレットに搭載 .....	3-63
図 3.3.1-41	幌延 URL 工学規模試験	搬送容器の坑道内搬送 (深度 350m 東立坑接続部 まで) .....	3-63
図 3.3.1-42	幌延 URL 工学規模試験	搬送容器の地下 350 m 坑道からの搬出 .....	3-64
図 3.3.1-43	幌延 URL 工学規模試験	地上解体場所 (西建屋) へ搬送 .....	3-64
図 3.3.1-44	幌延 URL 工学規模試験	搬送容器から試験体の取出し .....	3-65
図 3.3.1-45	幌延 URL 工学規模試験	模擬オーバーパック転倒防止の取付け .....	3-65
図 3.3.1-46	幌延 URL 工学規模試験	緩衝材ブロック周辺の砂撤去 .....	3-65
図 3.3.1-47	幌延 URL 工学規模試験	上部ベントナイト撤去 .....	3-66
図 3.3.1-48	幌延 URL 工学規模試験	センサケーブル切断 .....	3-66
図 3.3.1-49	幌延 URL 工学規模試験	ターンバックル取外し .....	3-66
図 3.3.1-50	幌延 URL 工学規模試験	吊具取付け、上蓋取外し .....	3-67
図 3.3.1-51	幌延 URL 工学規模試験	押さえリング取外し .....	3-67
図 3.3.1-52	幌延 URL 工学規模試験	模擬オーバーパックに撮影方向表の貼付け .....	3-67
図 3.3.1-53	幌延 URL 工学規模試験	解体前試験体外観撮影 .....	3-68
図 3.3.1-54	幌延 URL 工学規模試験	ラップ養生 .....	3-68
図 3.3.1-55	幌延 URL 工学規模試験	緩衝材の解体 .....	3-69
図 3.3.1-56	幌延 URL 工学規模試験	緩衝材のサンプリング (水分量測定用) .....	3-69
図 3.3.1-57	幌延 URL 工学規模試験	3 電極センサー回収 .....	3-70
図 3.3.1-58	幌延 URL 工学規模試験	緩衝材ブロック 模擬オーバーパック側表面状態	

.....	3-70
図 3.3.1-59 幌延 URL 工学規模試験 緩衝材ブロック 模擬オーバーパック側表面状態 (2/3) .....	3-71
図 3.3.1-60 幌延 URL 工学規模試験 緩衝材ブロック 模擬オーバーパック側表面状態 (3/3) .....	3-72
図 3.3.1-61 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック外観撮影 (現場洗浄前) ....	3-73
図 3.3.1-62 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック現場洗浄 (水洗い：精製水) .....	3-74
図 3.3.1-63 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック乾拭き・アルコール塗布 ....	3-74
図 3.3.1-64 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック現場洗浄完了 .....	3-74
図 3.3.1-65 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック外観撮影 (現場洗浄後) ....	3-75
図 3.3.1-66 幌延 URL 工学規模試験 スキャナによる模擬オーバーパック表面撮影 ....	3-76
図 3.3.1-67 幌延 URL 工学規模試験 輸送のための防錆養生 (防錆紙) .....	3-76
図 3.3.1-68 幌延 URL 工学規模試験 木箱収納、木箱蓋締め .....	3-76
図 3.3.1-69 幌延 URL 工学規模試験 試験孔底部の珪砂・地下水の回収 .....	3-77
図 3.3.1-70 幌延 URL 工学規模試験 試験孔底部の珪砂・地下水の回収完了 .....	3-77
図 3.3.1-71 幌延 URL 工学規模試験 試験孔 1 開口部養生 (木蓋設置) .....	3-78
図 3.3.1-72 幌延 URL 工学規模試験 片付け完了 .....	3-78
図 3.3.1-73 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック脱錆フロー .....	3-80
図 3.3.1-74 幌延 URL 工学規模試験 脱脂作業・高圧洗浄作業 .....	3-81
図 3.3.1-75 幌延 URL 工学規模試験 脱錆処理 .....	3-81
図 3.3.1-76 幌延 URL 工学規模試験 脱錆工程終了時の模擬オーバーパック (浸漬 5 分後) .....	3-82
図 3.3.1-77 幌延 URL 工学規模試験 脱錆・防錆処理後の模擬オーバーパック .....	3-83
図 3.3.1-78 幌延 URL 工学規模試験 局在腐食箇所 .....	3-84
図 3.3.2-1 幌延 URL 工学規模試験 埋込式 3 電極センサー位置と角度の関係 .....	3-85
図 3.3.2-2 スキャナ撮影機器 (模擬オーバーパック 最上部の周方向表面撮影時の外観) .....	3-86
図 3.3.2-3 幌延 URL 工学規模試験 画像結合後の模擬オーバーパック表面スキャン画像 (幌延現地撮影・酸洗前) .....	3-87
図 3.3.2-4 スキャナ撮影機器 (模擬オーバーパック 最上部周方向撮影時の外観) および作業状況 .....	3-88
図 3.3.2-5 幌延 URL 工学規模試験 画像結合後の模擬オーバーパック表面スキャン画像 (酸洗後) .....	3-89
図 3.3.2-6 幌延 URL 工学規模試験 酸洗後模擬オーバーパック試験体 腐食深さ分布 (全測定値) .....	3-91
図 3.3.2-7 幌延 URL 工学規模試験 酸洗後模擬オーバーパック試験体 腐食深さ分布 (絶縁塗装部と腐食深さが 0 より大きな測定値を除去) .....	3-92

図 3.3.2-8	幌延 URL 工学規模試験	模擬オーバーパック試験体 表面スキャン画像	....3-93
図 3.3.2-9	幌延 URL 工学規模試験	酸洗後模擬オーバーパック試験体 腐食深さ分布と酸洗前表面スキャン画像の比較	.....3-94
図 3.3.2-10	幌延 URL 工学規模試験	酸洗後模擬オーバーパック試験体 腐食深さ分布と酸洗後表面スキャン画像の比較	.....3-95
図 3.3.2-11	幌延 URL 工学規模試験	サンプリング間隔	.....3-96
図 3.3.2-12	幌延 URL 工学規模試験	緩衝材の採取位置	.....3-97
図 3.3.2-13	幌延 URL 工学規模試験	緩衝材の膨潤	.....3-99
図 3.3.2-14	幌延 URL 工学規模試験	緩衝材の有効粘土密度	.....3-100
図 3.3.2-15	幌延 URL 工学規模試験	緩衝材の透水係数	.....3-100
図 3.3.3-1	地上工学規模試験	試験装置詳細図	.....3-102
図 3.3.3-2	地上工学規模試験	試験装置外観	.....3-103
図 3.3.3-3	地上工学規模試験	解体作業ハンドリングフロー (1/7)	.....3-103
図 3.3.3-4	地上工学規模試験	解体作業ハンドリングフロー (2/7)	.....3-104
図 3.3.3-5	地上工学規模試験	解体作業ハンドリングフロー (3/7)	.....3-105
図 3.3.3-6	地上工学規模試験	解体作業ハンドリングフロー (4/7)	.....3-106
図 3.3.3-7	地上工学規模試験	解体作業ハンドリングフロー (5/7)	.....3-107
図 3.3.3-8	地上工学規模試験	解体作業ハンドリングフロー (6/7)	.....3-108
図 3.3.3-9	地上工学規模試験	解体作業ハンドリングフロー (7/7)	.....3-109
図 3.3.3-10	地上工学規模試験	砂層の回収	.....3-110
図 3.3.3-11	地上工学規模試験	試験体取出し	.....3-111
図 3.3.3-12	地上工学規模試験	模擬オーバーパック吊架台の設置	.....3-111
図 3.3.3-13	地上工学規模試験	試験体取出し直後外観	.....3-112
図 3.3.3-14	地上工学規模試験	試験体接続部の破損	.....3-112
図 3.3.3-15	地上工学規模試験	砂層撤去後試験体外観 270°付近	.....3-113
図 3.3.3-16	地上工学規模試験	試験体下部ブロック間境界面 (270° No.1~4 付近)	3-113
図 3.3.3-17	地上工学規模試験	緩衝材ブロックの解体	.....3-114
図 3.3.3-18	地上工学規模試験	模擬オーバーパック設置 3 電極センサーの回収 (緩衝材ブロック No.7~8 付近)	.....3-114
図 3.3.3-19	地上工学規模試験	模擬オーバーパック-緩衝材ブロック間の珪砂層	....3-115
図 3.3.3-20	模擬オーバーパック-緩衝材ブロック間の砂状物質の XRD	.....	3-115
図 3.3.3-21	地上工学規模試験	緩衝材ブロックのサンプリング	.....3-116
図 3.3.3-22	地上工学規模試験	緩衝材ブロック 模擬オーバーパック側表面状態 (1/3)	.....3-117
図 3.3.3-23	地上工学規模試験	緩衝材ブロック 模擬オーバーパック側表面状態 (2/3)	.....3-118
図 3.3.3-24	地上工学規模試験	緩衝材ブロック 模擬オーバーパック側表面状態 (3/3)	.....3-119

図 3.3.3-25	地上工学規模試験	緩衝材除去後の模擬オーバーパック外観.....	3-120
図 3.3.3-26	地上工学規模試験	現場洗浄.....	3-121
図 3.3.3-27	地上工学規模試験	現場洗浄後の模擬オーバーパック外観.....	3-122
図 3.3.3-28	地上工学規模試験	模擬オーバーパックスキャン作業.....	3-123
図 3.3.3-29	地上工学規模試験	木箱梱包作業.....	3-123
図 3.3.3-30	地上工学規模試験	脱錆処理.....	3-124
図 3.3.3-31	地上工学規模試験	脱錆工程終了時（浸漬 5 分後）.....	3-124
図 3.3.3-32	地上工学規模試験	脱錆・防錆処理後の模擬オーバーパック.....	3-125
図 3.3.3-33	地上工学規模試験	酸洗後模擬オーバーパック木箱梱包作業.....	3-126
図 3.3.4-1	地上工学規模試験	埋込式 3 電極センサー位置と角度の関係.....	3-127
図 3.3.4-2	地上工学規模試験	スキャナ撮影機器（模擬オーバーパック試験体最上部の周方向表面撮影時の外観）.....	3-128
図 3.3.4-3	地上工学規模試験	画像結合後の模擬オーバーパック表面スキャン画像（酸洗前）.....	3-129
図 3.3.4-4	地上工学規模試験	スキャナ撮影機器（模擬オーバーパック試験体最上部周方向撮影時の外観）および作業状況.....	3-130
図 3.3.4-5	地上工学規模試験	画像結合後の模擬オーバーパック表面スキャン画像（酸洗後撮影）.....	3-131
図 3.3.4-6	地上工学規模試験	酸洗後模擬オーバーパック試験体 腐食深さ分布（全測定値）.....	3-133
図 3.3.4-7	地上工学規模試験	酸洗後模擬オーバーパック試験体 腐食深さ分布（絶縁塗装部と 20 $\mu$ m より大きな凸部を除去）.....	3-134
図 3.3.4-8	地上工学規模試験	模擬オーバーパック試験体 表面スキャン画像.....	3-135
図 3.3.4-9	地上工学規模試験	酸洗後模擬オーバーパック試験体 腐食深さ分布と酸洗前表面スキャン画像の比較.....	3-136
図 3.3.4-10	地上工学規模試験	酸洗後模擬オーバーパック試験体 腐食深さ分布と酸洗後表面スキャン画像の比較.....	3-137
図 3.3.4-11	地上工学規模試験	サンプリング設置位置.....	3-138
図 3.3.4-12	地上工学規模試験	緩衝材の採取位置.....	3-139
図 3.3.4-13	地上工学規模試験	砂層撤去後試験体外観 270°付近.....	3-141
図 3.3.4-14	地上工学規模試験	緩衝材の有効粘土密度.....	3-141
図 3.3.4-15	地上工学規模試験	緩衝材の透水係数.....	3-142
図 3.3.4-16	地上工学規模試験	クーポン試験片の腐食量.....	3-142
図 3.3.5-1	模擬オーバーパックの平均腐食深さ、最大腐食深さ分布解析(模式図).....		3-143
図 3.3.5-2	幌延 URL 工学規模試験	模擬オーバーパック 40 区画の平均/最大腐食深さ、最大/平均比.....	3-145
図 3.3.5-3	地上工学規模試験	模擬オーバーパック 40 区画の平均/最大腐食深さ、最大/平均比.....	3-146

図 3.3.5-4	幌延 URL 工学規模試験	レプリカ 3 次元レーザーによる深さ計測	3-147
図 3.3.5-5	幌延 URL 工学規模試験	3 電極式センサーの評価手順	3-149
図 3.3.5-6	幌延 URL 工学規模試験	回収 3 電極式センサーのベントナイトブロックが付いた状態での腐食速度計測	3-150
図 3.3.5-7	幌延 URL/地上工学規模試験	模擬オーバーパックの 3 電極式センサーの腐食速度計測、および、時間積分による平均腐食深さの経時変化	3-151
図 3.3.5-8	幌延工学規模試験	回収後の 3 電極式センサーの腐食生成物分析	3-152
図 3.3.5-9	幌延 URL 工学規模試験	3 電極式センサーの酸洗後の外観および 3D 計測状況	3-153
図 3.4.1-1	不均質条件試験	試験装置イメージ	3-154
図 3.4.1-2	不均質条件試験	外観・センサー配置図	3-155
図 3.4.1-3	不均質条件試験	試験装置積算注水量	3-158
図 3.4.1-4	不均質条件試験	模擬地下水の組成	3-158
図 3.4.1-5	不均質条件試験	模擬地下水の pH	3-159
図 3.4.1-6	不均質条件試験	模擬オーバーパック表面温度	3-159
図 3.4.1-7	クーポン試験片の平均腐食量と緩衝材ブロックの透水係数の関係		3-161
図 3.4.1-8	不均質条件試験	交流インピーダンスセンサーによる Rp-1 の計測結果 (10mHz による計測)	3-162
図 3.4.1-9	不均質条件試験	3 次元計測フローチャート	3-163
図 3.4.1-10	不均質条件試験	軸方向測定位置	3-164
図 3.4.1-11	不均質条件試験	周方向測定位置 (上部側から見た場合)	3-164
図 3.4.1-12	不均質条件試験	2 次元マトリクス上のコンター図 (不均質条件試験用模擬オーバーパックの腐食試験前と腐食試験・酸洗後の形状変化量)	3-166
図 3.4.1-13	不均質条件試験	母材、溶接部の平均腐食量	3-167
図 3.4.1-14	不均質条件試験	試料全体の 3 次元形状計測結果に基づくヒストグラム	3-168
図 3.4.1-15	不均質条件試験	母材の 3 次元形状計測結果に基づくヒストグラム	3-169
図 3.4.1-16	不均質条件試験	溶接部の 3 次元形状計測結果に基づくヒストグラム	3-169
図 3.4.1-17	不均質条件試験	模擬オーバーパック試験体表面のスキャン画像 (1/2)	3-170
図 3.4.1-18	不均質条件試験	模擬オーバーパック試験体表面のスキャン画像 (2/2)	3-171
図 3.4.2-1	工学規模試験装置と経時変化確認試験 (小規模要素試験) の対応		3-174
図 3.4.2-2	経時変化確認試験	装置構成概要図	3-175
図 3.4.2-3	経時変化確認試験	模擬オーバーパック試験片の形状図	3-176
図 3.4.2-4	経時変化確認試験	平均腐食深さの時間依存性	3-179
図 3.4.2-5	ベントナイト中における炭素鋼の腐食速度時間依存性の先行試験		3-179
図 3.4.2-6	経時変化確認試験	平均腐食深さ、最大腐食深さの経時変化	3-180
図 3.4.2-7	経時変化確認試験	平均腐食深さと最大腐食深さの関係	3-180
図 3.4.2-8	経時変化確認試験	試験片取り出し時(付着物除去後、酸洗前)の外観	3-181
図 3.4.2-9	経時変化確認試験	試験片及びベントナイトの状況	3-182

図 3.4.2-10	経時変化確認試験	3次元計測フローチャート	.....	3-183
図 3.4.2-11	経時変化確認試験	軸方向測定位置	.....	3-184
図 3.4.2-12	経時変化確認試験	ならい測定方向測定位置	.....	3-184
図 3.4.2-13	経時変化確認試験	腐食試験前後の形状比較 (試験開始後 18 ヶ月)	.....	3-185
図 3.4.2-14	経時変化確認試験	腐食試験前後の形状比較 (試験開始後 24 ヶ月)	.....	3-185
図 3.4.2-15	経時変化確認試験	試験後試験片の外観 (試験開始後 18 ヶ月)	.....	3-187
図 3.4.2-16	経時変化確認試験	3次元計測による腐食前後形状変化量のカラーコンター図 (試験開始後 18 ヶ月)	.....	3-188
図 3.4.2-17	経時変化確認試験	試験後試験片の外観 (試験開始後 24 ヶ月)	.....	3-189
図 3.4.2-18	経時変化確認試験	3次元計測による腐食前後形状変化量のカラーコンター図 (試験開始後 24 ヶ月)	.....	3-190
図 3.4.2-19	経時変化確認試験	測定範囲全体 (母材・溶接部含む) の腐食試験前と酸洗浄 後の差分値によるヒストグラム (試験開始後 18 ヶ月)	.....	3-191
図 3.4.2-20	経時変化確認試験	母材の腐食試験前と酸洗浄後の差分値によるヒストグラム (試験開始後 18 ヶ月)	.....	3-192
図 3.4.2-21	経時変化確認試験	溶接部の腐食試験前と酸洗浄後の差分値によるヒストグラ ム (試験開始後 18 ヶ月)	.....	3-192
図 3.4.2-22	経時変化確認試験	測定範囲全体 (母材・溶接部含む) の腐食試験前と酸洗浄 後の差分値によるヒストグラム (試験開始後 24 ヶ月)	.....	3-193
図 3.4.2-23	経時変化確認試験	母材の腐食試験前と酸洗浄後の差分値ヒストグラム (試験 開始後 24 ヶ月)	.....	3-193
図 3.4.2-24	経時変化確認試験	溶接部の腐食試験前と酸洗浄後の差分値によるヒストグラ ム (試験開始後 24 ヶ月)	.....	3-194
図 3.4.2-25	経時変化確認試験、および、工学規模試験 (幌延 URL/地上)	模擬オーバー パックにおける平均腐食深さの経過時間依存性	.....	3-195
図 3.4.2-26	経時変化確認試験、および、工学規模試験 (幌延 URL/地上)	平均腐食深さ と最大孔食深さの関係	.....	3-195
図 3.5.1-1	幌延 URL 工学規模試験	母材と溶接部の平均腐食量と最大腐食量の比較	.....	3-196
図 3.5.1-2	地上工学規模試験の母材と溶接部の平均腐食量と最大腐食量の比較	.....	.....	3-197
図 3.5.1-3	不均質条件試験	母材と溶接部の平均腐食量と最大腐食量の比較	.....	3-198
図 3.5.1-4	経時変化試験	母材と溶接部の平均腐食量と最大腐食量の比較 (18 ヶ月)	.....	3-198
図 3.5.1-5	経時変化試験	母材と溶接部の平均腐食量と最大腐食量の比較 (24 ヶ月)	.....	3-199
図 3.5.2-1	幌延 ULR 工学規模試験	模擬オーバーパックの 40 区画ごとの平均腐食深さ、 最大腐食深さの累積確率	.....	3-204
図 3.5.3-1	工学規模試験 (幌延 URL/地上)	模擬オーバーパックにおける平均腐食深さの経 過時間依存性	.....	3-206

図 3.5.3-2	経時変化確認試験、および、工学規模試験（幌延 URL/地上） 平均腐食深さと最大孔食深さの関係（再掲） .....	3-207
図 3.6.1-1	同一環境下センサー性能確認試験用腐食セルの組み立ての概念 .....	3-208
図 3.6.2-1	試験セルの構成 .....	3-210
図 3.6.2-2	試験片形状（模擬オーバーパックから採取し鉄製試験片の例） .....	3-211
図 3.6.2-3	気密試験状況.....	3-211
図 3.6.2-4	給水配管例 .....	3-212
図 3.6.2-5	セル内のベントナイトブロック・試験片設置方法.....	3-213
図 3.6.2-6	アクリル板固定用のネジ.....	3-213
図 3.6.2-7	試験セルの準備手順 .....	3-214
図 3.6.2-8	同一環境下センサー性能確認試験後の試験片の状況 .....	3-215
図 3.6.2-9	ベントナイトの状況による腐食性の比較（1,000h） .....	3-217
図 3.6.3-1	3電極式センサーのセンサー部 .....	3-218
図 3.6.4-1	レジストメトリー計測用薄膜試験片の形状 .....	3-219
図 3.6.4-2	レジストメトリーの試験開始状況（注水前） .....	3-220
図 3.6.5-1	電気抵抗/ポテンシャルドロップ法用試験片 .....	3-220
図 3.6.6-1	腐食試験装置.....	3-222
図 3.6.6-2	プローブ電極の模式図 .....	3-222
図 3.6.6-3	#1プローブで測定された EIS（41日まで） .....	3-225
図 3.6.6-4	#1プローブで測定された EIS（406日まで） .....	3-226
図 3.6.6-5	#2プローブで測定された EIS（41日まで） .....	3-227
図 3.6.6-6	#2プローブで測定された EIS（406日まで） .....	3-228
図 3.6.6-7	プローブの2電極間の電位差.....	3-229
図 3.6.6-8	10kHzのインピーダンス変化.....	3-229
図 3.6.6-9	1mHzのインピーダンスの逆数の経時変化 .....	3-230
図 3.6.6-10	#1プローブの EIS と等価回路の（右図）によるフィッティング結果.....	3-230
図 3.6.6-11	カーブフィッティングにより決定した電荷移動抵抗 $R_{ct}$ とその逆数の経時変化 #1プローブ .....	3-231
図 3.6.6-12	#3プローブで測定された EIS .....	3-233
図 3.6.6-13	#4プローブで測定された EIS .....	3-234
図 3.6.6-14	両プローブの EIS の比較.....	3-235
図 3.6.6-15	プローブの2電極間の電位差.....	3-236
図 3.6.6-16	2電極式腐食モニター（10mHz,10kHz）と EIS 測定装置 solatron（1mHz） との比較.....	3-237
図 3.6.6-17	#3プローブの EIS とフィッティング結果.....	3-238
図 3.6.6-18	#4プローブの EIS とフィッティング結果.....	3-239
図 3.6.6-19	カーブフィッティングにより決定した電荷移動抵抗 $R_{ct}$ の逆数の経時変化 .....	3-240

図 4.2.3-1	同一母材から製作した溶接試験体.....	4-4
図 4.2.3-2	溶接部の断面マクロ観察.....	4-4
図 4.3.1-1	試験片採取位置.....	4-5
図 4.3.1-2	電気化学試験用プローブ模式図.....	4-5
図 4.3.1-3	製作した試験用プローブの外観.....	4-6
図 4.3.1-4	定電位分極時の電流の経時変化と試験前後の電位.....	4-7
図 4.3.1-5	分極後の EBW 試験片の外観（左：試験直後、右：脱スケール後）.....	4-7
図 4.3.1-6	分極後の TIG 試験片の外観（左：試験直後、右：脱スケール後）.....	4-7
図 4.3.1-7	形状測定結果.....	4-8
図 4.3.2-1	溶接試験体から採取した腐食試験片の模式図.....	4-9
図 4.3.2-2	EBW 材の溶接金属分極用の試験片.....	4-9
図 4.3.2-3	EBW 母材部の分極曲線 計測結果.....	4-10
図 4.3.2-4	EBW 溶接金属部の分極曲線 計測結果.....	4-10
図 4.3.2-5	TIG 母材部の分極曲線 計測結果.....	4-11
図 4.3.2-6	TIG 溶接金属部の分極曲線 計測結果.....	4-11
図 4.3.2-7	EBW の母材と溶接金属部の分極曲線の比較.....	4-12
図 4.3.2-8	TIG の母材と溶接金属部の分極曲線の比較.....	4-12
図 4.3.3-1	2 電極間の電位差の測定状況.....	4-13
図 4.3.3-2	極間の電位差測定結果の相関図.....	4-14
図 5.2.1-1	残留応力低減解析の実施手順.....	5-1
図 5.2.2-1	オーバーパック（平蓋形状）の概略図.....	5-3
図 5.2.2-2	ヤング率.....	5-3
図 5.2.2-3	線膨張係数.....	5-4
図 5.2.2-4	母材（SF340A）の応力-ひずみ線図.....	5-4
図 5.2.2-5	溶接金属（TGS50）の応力-ひずみ線図.....	5-5
図 5.2.3-1	温度解析モデル（45 度モデル）.....	5-6
図 5.2.3-2	溶接部の溶接パス分割図（全 17 パス）.....	5-6
図 5.3.1-1	温度解析結果（14 パス目溶接時の温度分布図）.....	5-7
図 5.3.2-1	溶接残留応力解析結果（半径方向応力分布図）.....	5-7
図 5.3.2-2	溶接残留応力解析結果（周方向応力分布図）.....	5-8
図 5.3.2-3	溶接残留応力解析結果（軸方向応力分布図）.....	5-8
図 5.3.2-4	溶接金属部の深さ方向応力分布図（半径方向応力）.....	5-9
図 5.3.2-5	溶接金属部の深さ方向応力分布図（周方向応力）.....	5-9
図 5.3.2-6	溶接金属部の深さ方向応力分布図（軸方向応力）.....	5-10
図 5.4.1-1	ヒータおよび断熱材および冷却部の配置.....	5-11
図 5.4.1-2	各冷却条件における熱伝達率の温度依存性.....	5-12
図 5.4.2-1	予備解析に用いた平蓋オーバーパック解析モデル（温度解析モデル）.....	5-14
図 5.4.2-2	ヒータおよび冷却部の配置.....	5-14

図 5.4.2-3	EIHSI 法施工後の溶接金属内部の残留応力分布 (トライアル 1)	5-15
図 5.4.2-4	EIHSI 法施工後の溶接金属内部の残留応力分布 (トライアル 2)	5-15
図 5.4.2-5	EIHSI 法施工後の溶接金属内部の残留応力分布 (トライアル 3)	5-16
図 5.4.2-6	EIHSI 法施工後の溶接金属内部の残留応力分布 (トライアル 4)	5-16
図 5.4.2-7	EIHSI 法施工後の溶接金属内部の残留応力分布 (トライアル 5)	5-17
図 5.4.2-8	EIHSI 法施工後の溶接金属内部の残留応力分布 (トライアル 6)	5-17
図 5.4.2-9	EIHSI 法施工後の溶接金属内部の残留応力分布 (トライアル 7)	5-17
図 5.4.2-10	40 mm 深さまで圧縮となる EIHSI 法予備解析結果の比較	5-18
図 5.4.3-1	温度解析モデル (45 度モデル)	5-18
図 5.4.3-2	急冷開始時および急冷終了時の温度分布	5-19
図 5.4.3-3	ガラス固化体の温度履歴	5-19
図 5.4.4-1	温度解析モデル (30 度モデル)	5-20
図 5.4.4-2	EIHSI 法施工による半径方向応力分布の変化	5-21
図 5.4.4-3	EIHSI 法施工による周方向応力分布の変化	5-21
図 5.4.4-4	EIHSI 法施工による軸方向応力分布の変化	5-21
図 5.4.4-5	EIHSI 法施工後の溶接部の残留応力分布	5-22
図 6.2.2-1	試験体外観	6-3
図 6.2.2-2	溶接試験体のイメージ図	6-4
図 6.2.2-3	欠陥番号および欠陥付与位置	6-5
図 6.2.2-4	EDM スリット上下端部の深さ位置測定結果	6-16
図 6.2.2-5	EDM スリットの溶接線方向始末端位置測定結果	6-16
図 6.2.3-1	実欠陥のモデル化方法とシミュレーション解析モデルの例	6-19
図 6.2.3-2	超音波の入射方法	6-19
図 6.2.3-3	厚さ 190 mm 自然欠陥模擬試験体 X = 139 mm 断面のモデル化	6-20
図 6.2.3-4	厚さ 190 mm 自然欠陥模擬試験体 X = 166 mm 断面のモデル化	6-21
図 6.2.3-5	厚さ 190 mm 自然欠陥模擬試験体 X = 184 mm 断面のモデル化	6-22
図 6.2.3-6	厚さ 190 mm 自然欠陥模擬試験体 X = 227 mm 断面のモデル化	6-23
図 6.2.3-7	X = 139 mm 断面のモデルにおけるシミュレーション解析結果 (セクター走査)	6-24
図 6.2.3-8	X = 139 mm 断面の欠陥を 50 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (セクター走査)	6-24
図 6.2.3-9	X = 139 mm 断面の欠陥を 100 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (セクター走査)	6-25
図 6.2.3-10	X = 166 mm 断面のモデルにおけるシミュレーション解析結果 (セクター走査)	6-25
図 6.2.3-11	X = 166 mm 断面の欠陥を 50 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (セクター走査)	6-26
図 6.2.3-12	X = 166 mm 断面の欠陥を 100 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (セクター走査)	6-26

シミュレーション解析結果（セクター走査） .....	6-26
図 6.2.3-13 X = 184 mm 断面の欠陥を 100 mm 下方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果（セクター走査） .....	6-27
図 6.2.3-14 X = 184 mm 断面の欠陥を 150 mm 下方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果（セクター走査） .....	6-27
図 6.2.3-15 X = 277 mm 断面のモデルにおけるシミュレーション解析結果（セクター走査） .....	6-28
図 6.2.3-16 X = 277 mm 断面の欠陥を 50 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果（セクター走査） .....	6-28
図 6.2.3-17 X = 139 mm 断面のモデルにおけるシミュレーション解析結果（FMC/TFM） .....	6-29
図 6.2.3-18 X = 139 mm 断面の欠陥を 50 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果（FMC/TFM） .....	6-29
図 6.2.3-19 X = 139 mm 断面の欠陥を 100 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果（FMC/TFM） .....	6-30
図 6.2.3-20 X = 166 mm 断面のモデルにおけるシミュレーション解析結果（FMC/TFM） .....	6-30
図 6.2.3-21 X = 166 mm 断面の欠陥を 50 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果（FMC/TFM） .....	6-31
図 6.2.3-22 X = 166 mm 断面の欠陥を 100 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果（FMC/TFM） .....	6-31
図 6.2.3-23 X = 184 mm 断面の欠陥を 100 mm 下方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果（FMC/TFM） .....	6-32
図 6.2.3-24 X = 184 mm 断面の欠陥を 150 mm 下方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果（FMC/TFM） .....	6-32
図 6.2.3-25 X = 277 mm 断面のモデルにおけるシミュレーション解析結果（FMC/TFM） .....	6-33
図 6.2.3-26 X = 277 mm 断面の欠陥を 50 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果（FMC/TFM） .....	6-33
図 6.3.1-1 近接欠陥モデルの模式図 .....	6-35
図 6.3.1-2 超音波シミュレーションモデルにおける探触子の位置 .....	6-36
図 6.3.1-3 浅い欠陥の付与位置（解析モデル：横波用） .....	6-36
図 6.3.1-4 深い欠陥の付与位置（解析モデル：縦波用） .....	6-37
図 6.3.2-1 2 MHz 横波斜角法におけるスリット高さ 4 mm および 8 mm の結果（探触子の位置 50） .....	6-39
図 6.3.2-2 2 MHz 横波斜角法におけるスリット高さ 4 mm および 8 mm の結果（探触子の位置 80） .....	6-39
図 6.3.2-3 2 MHz 縦波斜角法におけるスリット高さ 4 mm および 8 mm の結果 .....	6-40

図 6.3.2-4	2 MHz から 5 MHz 縦波斜角法におけるスリット高さ 4 mm の結果	6-41
図 6.4.1-1	電子走査の条件の例	6-45
図 6.4.1-2	集束の条件の設定例	6-46
図 6.4.1-3	測定範囲の設定例	6-46
図 6.4.1-4	グレーティングロープの影響の確認方法の例	6-47
図 7.2.1-1	炭素鋼溶接試験体の硬さ分布	7-2
図 7.2.1-2	2.8MeV Fe イオンによる損傷量の深さ分布	7-4
図 7.2.1-3	母材部 (0.05%Cu) の未照射材とイオン照射材のフェライト相の硬さの分布	7-5
図 7.2.1-4	HAZ (0.05%Cu) の未照射材とイオン照射材のフェライトサイドプレートの硬さの分布	7-6
図 7.2.1-5	溶接部 (0.20%Cu) の未照射材とイオン照射材の粒界フェライトの硬さの分布	7-7
図 7.2.1-6	イオン照射に伴う母材部、HAZ および溶接部の硬さの変化	7-8
図 7.2.1-7	FIB による微小試料の採取の例	7-9
図 7.2.1-8	微小試料の分割の例	7-9
図 7.2.1-9	試験片の針状加工の方法	7-10
図 7.2.1-10	母材部 (0.05%Cu) 試験片のアトムマップ	7-12
図 7.2.1-11	HAZ (0.05%Cu) 試験片のアトムマップ	7-13
図 7.2.1-12	溶接部 (0.20%Cu) 試験片のアトムマップ	7-14
図 7.2.1-13	第一近接間距離の頻度分布 (母材部 (0.05%Cu))	7-15
図 7.2.1-14	第一近接間距離の頻度分布 (HAZ (0.05%Cu))	7-16
図 7.2.1-15	第一近接間距離の頻度分布 (溶接部 (0.20%Cu))	7-17
図 7.2.1-16	第一近接間距離の平均値の変化	7-18
図 7.2.1-17	HAZ (0.05%Cu) のイオン照射材 (90°C、1 dpa) の Mn、Si、Cu 原子マップ (左) と溶質クラスタマップ (右) の比較	7-21
図 7.2.1-18	溶接部 (0.20%Cu) の未照射材の Mn、Si、Cu 原子マップ (左) と溶質クラスタマップ (右) の比較	7-22
図 7.2.1-19	溶接部 (0.20%Cu) のイオン照射材 (90°C、1 dpa) の Mn、Si、Cu 原子マップ (左) と溶質クラスタマップ (右) の比較	7-23
図 7.2.1-20	HAZ (0.05%Cu) のイオン照射材と溶接部 (0.20%Cu) の未照射材およびイオン照射材の溶質クラスタのサイズ分布	7-24
図 7.2.1-21	HAZ (0.05%Cu) のイオン照射材と溶接部 (0.20%Cu) の未照射材およびイオン照射材の溶質クラスタの組成分布	7-25
図 7.2.1-22	転位ループの明視野像と暗視野像 (B = [011]) 母材 (0.05%Cu)、イオン照射材 (90°C、1 dpa)	7-27
図 7.2.1-23	転位ループの明視野像と暗視野像 (B = [011]) HAZ (0.05%Cu)、イオン照射材 (90°C、1 dpa)	7-28
図 7.2.1-24	転位ループの明視野像と暗視野像 (B = [011]) 溶接部 (0.20%Cu)、イオン照	

射材 (90°C、1 dpa) .....	7-29
図 7.2.1-25 転位ループの平均直径と数密度 .....	7-30
図 7.2.1-26 転位ループの $Nl_{dl}$ .....	7-32
図 7.2.1-27 硬さの増加量と転位ループの $Nl_{dl}$ との関係 .....	7-32
図 7.2.1-28 硬さの増加量と溶質クラスタの $V_f$ との関係.....	7-33
図 7.2.3-1 90°C で 0.01 dpa まで電子線照射およびイオン照射した FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu) の硬さの分布.....	7-36
図 7.2.3-2 90°C で 0.01 dpa までの電子線照射およびイオン照射に伴う FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu) と炭素鋼 (0.5%Cu) の硬さの変化.....	7-37
図 7.2.3-3 FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu) 試験片の原子マップ.....	7-38
図 7.2.3-4 FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu) の原子マップと溶質クラスタマップの比較.....	7-40
図 7.2.3-5 FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu) の溶質クラスタの直径分布.....	7-41
図 7.2.3-6 FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu) の溶質クラスタの組成分布.....	7-41
図 7.2.3-7 転位ループの明視野像と暗視野像 ( $B = [011]$ ) .....	7-43
図 7.2.3-8 転位ループの平均直径と数密度 .....	7-44
図 7.2.3-9 転位ループの $Nl_{dl}$ .....	7-45
図 7.2.3-10 硬さの増加量と転位ループの $Nl_{dl}$ との関係 .....	7-46
図 7.2.3-11 硬さの増加量と溶質クラスタの $V_f$ との関係.....	7-46
図 7.2.4-1 硬さの増加量 $\Delta H$ と転位ループと溶質クラスタによるせん断強度の増加値 $\Delta\tau$ の 関係.....	7-48
図 7.2.5-1 超微小硬さの増加量と破壊靱性値の低下量の関係.....	7-50
図 7.3.1-1 核生成エネルギーの集合体サイズ依存性.....	7-52
図 7.3.1-2 反応速度論モデルの概要.....	7-55
図 7.3.2-1 各欠陥濃度の照射量依存性 .....	7-57
図 7.3.2-2 銅-空孔集合体の濃度変化.....	7-58
図 7.3.2-3 欠陥集合体の数密度、平均直径および平均組成の照射量依存性 .....	7-58
図 7.3.2-4 イオン照射による欠陥集合体形成の実験値と計算値の比較 .....	7-62
図 7.3.2-5 イオン照射による降伏応力変化の実験値と計算値の比較.....	7-63
図 7.3.2-6 降伏応力変化の計算値の照射温度依存性.....	7-63
図 7.3.2-7 電子線照射による欠陥集合体形成の実験値と計算値の比較 .....	7-65
図 7.3.2-8 電子線照射による降伏応力変化の実験値と計算値の比較.....	7-65
図 7.3.3-1 オーバーパックの脆化量とイオンおよび電子線による照射脆化量の関係の模式 図.....	7-66
図 7.3.3-2 オーバーパックにおける照射による欠陥集合体形成の照射量依存性 .....	7-68
図 7.3.3-3 オーバーパック (炭素鋼) の降伏応力増加量の照射量依存性.....	7-69
図 7.3.3-1 オーバーパックの減肉による形状の変化.....	8-2
図 8.2.1-1 破損モードと強度評価方法[1] .....	8-3
図 8.2.2-1 弾完全塑性応力・ひずみ曲線による塑性崩壊の考え方 .....	8-4

図 8.2.2-2	2倍勾配法	8-5
図 8.3.2-1	オーバーパック形状 (単位: mm)	8-6
図 8.4.1-1	解析モデル (単位: mm、 $t = 10 \sim 110$ mm)	8-7
図 8.4.1-2	境界条件	8-7
図 8.4.1-3	2倍勾配法を適用する際に用いる参照点と変位の方向	8-8
図 8.4.1-4	要素分割 ( $t = 10$ mm)	8-9
図 8.4.1-5	2倍勾配法の適用 ( $S_y = 200$ MPa、詳細メッシュ使用)	8-10
図 8.4.1-6	塑性崩壊時の形状と相当応力分布 ( $S_y = 200$ MPa、詳細メッシュ使用)	8-10
図 8.4.1-7	崩壊荷重に及ぼすメッシュサイズの影響 ( $S_y = 200$ MPa)	8-11
図 8.4.1-8	板厚に対する崩壊荷重の変化 (詳細メッシュ使用)	8-12
図 8.4.1-9	正規化崩壊荷重 (詳細メッシュ)	8-13
図 8.4.1-10	境界条件の変更	8-14
図 8.4.1-11	板厚に対する崩壊荷重の変化	8-14
図 8.4.1-12	板厚に対する崩壊荷重の変化 (偏圧の影響)	8-15
図 8.4.2-1	解析モデル (単位: mm)	8-17
図 8.4.2-2	圧力と変位の関係 ( $S_y = 200$ MPa)	8-18
図 8.4.2-3	塑性崩壊時の形状と相当応力分布 ( $S_y = 200$ MPa)	8-19
図 8.4.2-4	外圧による崩壊荷重 ( $S_y = 200$ MPa)	8-20
図 8.4.2-5	接触条件を付与したモデル	8-21
図 8.4.2-6	外圧による崩壊荷重	8-21
図 8.4.2-7	外圧による崩壊荷重 (偏圧の影響、 $S_y = 200$ MPa)	8-22
図 8.4.3-1	き裂深さと溶接深さの定義 (単位: mm)	8-24
図 8.4.3-2	溶接欠陥に対する強度評価用のメッシュ分割 ( $a = 40$ mm、 $w = 60$ mm)	8-25
図 8.4.3-3	外圧を負荷した場合の応力拡大係数	8-27
図 8.4.3-4	100 MPa の残留応力を負荷した場合の応力拡大係数	8-28
図 8.4.3-5	100 MPa の残留応力を負荷した場合の正規化応力拡大係数	8-28
図 8.4.3-6	残留応力を負荷した場合の相当応力分布	8-29
図 8.4.3-7	許容残留応力と亀裂深さの関係	8-29

## 表 目 次

表 1.2.2-1 5年間の研究開発計画 .....	1-2
表 1.3.2-1 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパッカーの5カ年の研究開発計画 .....	1-4
表 2.1.1-1 オーバーパッカーの技術要件（基本的なバリア性能の確保） .....	2-1
表 2.1.2-1 緩衝材間隙水中の化学種の濃度範囲とpHの範囲（計算値） [3].....	2-3
表 2.1.2-2 オーバーパッカー埋設後に想定される負荷の種類と発生条件 .....	2-4
表 2.2.1-1 構造物の破損モード .....	2-7
表 2.2.1-2 オーバーパッカーの破損形態と破損モード .....	2-8
表 2.4.1-1 埋設後の炭素鋼オーバーパッカーで想定される材料劣化事象 .....	2-12
表 2.4.1-2 原子力発電所で経年劣化管理が必要な事象 .....	2-12
表 3.1.2-1 試験条件検討；環境系の因子と試験条件への反映 (1/2).....	3-8
表 3.1.2-2 試験条件検討；環境系の因子と試験条件への反映 (2/2).....	3-9
表 3.1.2-3 幌延 URL 工学規模試験 センサー・計測機器種類及び数量.....	3-13
表 3.1.3-1 処分システム工学確証技術開発；人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパッカー 5カ年計画案（平成29年度改訂） .....	3-18
表 3.2.2-1 地上工学規模試験 腐食速度換算係数算出結果 .....	3-32
表 3.2.2-2 地上工学規模試験 調製した模擬地下水の組成 .....	3-34
表 3.3.1-1 幌延 URL 工学規模試験 解体工程表（実績） .....	3-39
表 3.3.1-2 幌延 URL 工学規模試験 解体工事 主要数量表.....	3-40
表 3.3.1-3 幌延 URL 工学規模試験 JISZ2371:2000 記載方法と本試験での除去方法の差異 .....	3-79
表 3.3.1-4 幌延 URL 工学規模試験 脱錆作業使用溶液の成分 .....	3-79
表 3.3.2-1 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパッカー表面のスキャン撮影項目 .....	3-85
表 3.3.2-2 幌延 URL 工学規模試験 採取試料の湿潤密度、乾燥密度、含水比、体積含水率 .....	3-98
表 3.3.3-1 地上工学規模試験 解体工程表 .....	3-101
表 3.3.4-1 地上工学規模試験 模擬オーバーパッカー表面のスキャン撮影項目 .....	3-127
表 3.3.4-2 地上工学規模試験 採取試料の湿潤密度、乾燥密度、含水比、体積含水率.....	3-140
表 3.3.5-1 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパッカー 40区画の平均/最大腐食深さ、最大/平均比 .....	3-144
表 3.3.5-2 地上工学規模試験 模擬オーバーパッカー 40区画の平均/最大腐食深さ、最大/平均比 .....	3-144
表 3.3.5-3 幌延 URL/地上工学規模試験 模擬オーバーパッカー 40区画の平均/最大腐食深さ、最大/平均比の比較 .....	3-147
表 3.3.5-4 幌延 URL 工学規模試験 レプリカ+レーザー3D計測と接触式3D計測の対比 .....	3-148

表 3.3.5-5	幌延 URL/地上工学規模試験 3電極式センサー部 3D 計測結果	3-153
表 3.4.1-1	不均質条件試験 測定項目	3-157
表 3.4.1-2	不均質条件試験 採取試料の湿潤密度、乾燥密度、含水比及び体積含水率	3-160
表 3.4.1-3	不均質条件試験 腐食速度換算係数算出結果	3-163
表 3.4.1-4	不均質試験の物質収支	3-167
表 3.4.2-1	経時変化確認試験 関連仕様（試験装置・試験手順など）	3-173
表 3.4.2-2	経時変化確認試験 試験マトリックス	3-173
表 3.4.2-3	経時変化確認試験 模擬地下水の化学組成	3-174
表 3.4.2-4	経時変化確認試験 平均腐食深さ、最大腐食深さの時間依存性	3-178
表 3.5.2-1	腐食シナリオ	3-202
表 3.5.2-2	腐食シナリオと実際の結果の比較	3-205
表 3.6.2-1	模擬地下水組成	3-209
表 3.6.2-2	試験片の重量変化からの腐食の見積	3-217
表 3.6.7-1	緩衝材中での各計測技術の評価まとめ	3-242
表 4.2.2-1	溶接手法ごとの浸漬試験の結果	4-2
表 4.2.3-1	SM400B の化学成分	4-3
表 4.2.3-2	化学成分分析結果	4-4
表 4.3.1-1	定電位分極後の試験片の減肉量の相対評価	4-8
表 4.3.3-1	2 極間の電位差測定の結果 (mV)	4-14
表 5.2.2-1	解析に用いた値	5-2
表 5.4.1-1	平成 28 年度に実施した EIHSI 法の予備解析条件	5-10
表 5.4.1-2	トライアル 1~3 の PWHT 条件の詳細加熱条件	5-11
表 5.4.2-1	各解析ケースのヒータの加熱条件と保温時間および冷却領域の冷却条件	5-13
表 6.2.2-1	試験体 A 表面からの FMC-TFM による欠陥座標および寸法測定結果	6-6
表 6.2.2-2	試験体 A 裏面からの FMC-TFM による欠陥座標および寸法測定結果	6-7
表 6.2.2-3	試験体 B 表面からの FMC-TFM による欠陥座標および寸法測定結果	6-8
表 6.2.2-4	試験体 A 表面からのフェーズドアレイ法による欠陥座標および寸法測定結果	6-9
表 6.2.2-5	試験体 A 裏面からのフェーズドアレイ法による欠陥座標および寸法測定結果	6-10
表 6.2.2-6	試験体 B 表面からのフェーズドアレイ法による欠陥座標および寸法測定結果	6-11
表 6.2.2-7	深さ位置測定精度	6-13
表 6.2.2-8	溶接線方向測定精度 (FMC/TFM)	6-14
表 6.2.2-9	溶接線方向測定精度 (フェーズドアレイ法)	6-15
表 6.3.1-1	超音波シミュレーションの主な条件	6-35
表 6.4.1-1	アレイ探触子の推奨例 (PhA 法)	6-45
表 7.2.1-1	炭素鋼溶接試験体の化学組成 (wt%)	7-2

表 7.2.1-2	イオン照射試験のマトリクス	7-3
表 7.2.1-3	各試験体の照射実績	7-4
表 7.2.1-4	クラスタ解析結果のまとめ	7-20
表 7.2.1-5	転位ループの平均直径と数密度	7-26
表 7.2.1-6	硬さの増加量とマイクロ組織	7-31
表 7.2.2-1	イオン照射試験のマトリクス	7-34
表 7.2.2-2	各試験体の照射実績	7-34
表 7.2.3-1	イオン照射試験のマトリクス	7-35
表 7.2.3-2	各試験体の照射実績	7-35
表 7.2.3-3	クラスタ解析結果のまとめ	7-39
表 7.2.3-4	転位ループの平均直径と数密度	7-42
表 7.2.3-5	硬さの増加量とマイクロ組織	7-45
表 7.2.4-1	試験材料と照射条件および照射試験片の分析結果	7-48
表 7.2.5-1	破壊靱性試験と硬さ測定の結果	7-49
表 7.3.1-1	反応速度論モデルのパラメータ	7-54
表 7.3.2-1	最適化された反応速度論モデルのパラメータ	7-61
表 8.3.1-1	物性値	8-5
表 8.4.2-1	未溶接部を起点とした破壊に対する健全性評価の解析パターン	8-16
表 8.4.3-1	溶接欠陥に対する構造強度の解析条件	8-24

# 第1章 はじめに

## 1.1 本事業の背景および目的

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って放射性廃棄物が既に発生しており、その処理・処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物等の地層処分については、事業実施に向けた取組が進められており、処分技術のさらなる信頼性の向上にむけた基盤技術の開発が、事業の段階的なプロセスを考慮して実施されている。

これまでに、処分場の操業期間中におけるガラス固化体のオーバーパックへの封入・検査技術、オーバーパックの周囲に設置される緩衝材の施工技術及び人工バリアのモニタリング技術等の要素技術について、必要となる基盤技術が整備されてきた。今後、さらなる処分技術の信頼性向上のためには実際の深部地下環境での活用を通して、これらの工学的な要素技術の信頼性を高める必要がある。さらに、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえ、操業期間中における自然災害である巨大地震や巨大津波等の安全対策に関する基盤技術の整備も喫緊の課題となっている。

平成 27 年 5 月には“特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針”が改定され、「国および関係研究機関は、最終処分の安全規制・安全評価のために必要な研究開発、深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発及び最終処分技術の信頼性の向上に関する技術開発等を積極的に進めていくものとする。」ということが示された[1]。

本事業では、平成 25 年度から 5 年程度の期間で処分場の操業期間中から人工バリア定置後の再冠水過程を考慮して人工バリアの製作・施工技術およびモニタリング技術等の工学技術を、地下研究施設等を活用して確証していくとともに、自然災害に対する操業期間中の工学的対策に関する基盤技術の整備を行う。

## 1.2 本事業の構成および全体計画

### 1.2.1 研究開発項目の構成

上記の目的を達成するために、本事業は以下の 5 つの研究開発項目で構成されている。各研究開発項目の内容については、それぞれの分冊に記載する。

- 1) (第 1 分冊) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック
- 2) (第 2 分冊) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材
- 3) (第 3 分冊) 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築
- 4) (第 4 分冊) モニタリング関連技術の整備
- 5) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発※

※平成 27 年度に取りまとめを実施した。

### 1.2.2 本事業における設定課題と 5 年間の計画

本事業では、地層処分における工学技術に対する信頼性を向上させるために、人工バリアのうちのオーバーパックおよび緩衝材の品質／健全性評価手法の構築やモニタリング関連技術の整備、自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発に取り組む。人工バリアに要求さ

れる機能は、それぞれが単独で達成するものではなく、各要素が相互に影響をおよぼし合い、人工バリアシステムとしての要求機能が達成される。そのため、平成 27 年度からは、周辺岩盤挙動を含めて人工バリアの長期挙動を評価するための手法の構築に向けた取り組みを開始した。本事業の 5 年間の年度展開を表 1.2.2-1 に示す。

一般的な構造物とは異なり、オーバーパックと緩衝材に対しては定置後の検査や必要に応じた補修を行うことが想定されていない。そのため、オーバーパックと緩衝材の品質/健全性は、定置前の段階で確認しておく必要がある。また、処分場の掘削・操業期間から人工バリア定置後の地下水位の回復に至る擾乱期（再冠水過程）には、緩衝材の流出や地下水の浸潤による状態変化などによる機能変化も想定される。したがって、検査や補修を必要とせずに人工バリアの健全性を確保するためには、定置後に想定される機能変化を考慮した上で要求される機能を満足できる設計を行い、製作・検査・施工の各プロセスで品質管理を実施することによりそれらの品質を保証する必要がある。

一方で、定置後の人工バリアの性能を確認するためには、処分場の環境条件を把握する必要がある。また、処分場の環境条件を把握することは、処分場閉鎖の判断要因の一つとして利用されることも考えられる。閉鎖後長期の安全性を確実にするために、処分事業が先行するフィンランドやスウェーデンでは、性能確認プログラムの一部としてモニタリングを位置付けた取り組みが進められている。

さらに、処分場の操業期間中に生じる自然災害に対しては、想定される災害事象に対する安全確保対策について検討しておくことが重要となる。

本事業では、長期間の健全性を有する人工バリアシステムの工学的実現性を示すために、オーバーパック、緩衝材、人工バリアの長期挙動、モニタリング、自然災害に対する安全対策の 5 つの検討項目について研究開発を進める。

表 1.2.2-1 5 年間の研究開発計画

	H25	H26	H27(計画更新)	H28	H29
(1) 処分システム工学確証技術開発					
1) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築—オーバーパック	・判断指標の抽出 ・健全性評価モデル案の作成 ・研究開発計画策定	・判断指標に影響する劣化事象の抽出	・破壊評価に基づく限界欠陥寸法の提示	・材料劣化を考慮した品質評価法の提案	・品質評価/健全性評価手法の提案 ・健全性判断指標および基準値設定の考え方の例示
2) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築—緩衝材	・緩衝材の品質評価項目の抽出 ・研究開発計画策定	・エロージョンによる性能劣化事象(流入量、液種)の定量化	・ウォーターマネジメント(人工注水、グラウト等)の実施方法・課題の提案	・緩衝材の設計・施工仕様策定に資する指標範囲の提示	
3) 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築			・試験研究計画の立案 ・遠心力模型試験による加速データの取得、および要素試験による解析パラメータの取得	データの検証および長期挙動評価手法への課題の提示	再冠水後の試験データによる長期挙動の評価方法論、および検証データの提示
3) モニタリング関連技術の整備	・性能確認モニタリングの課題抽出 ・研究開発計画策定	・操業安全等に関するモニタリングの課題抽出	・地下調査施設による地中無線モニタリング技術の確証	・性能確認モニタリング結果反映方法提案	・実現可能な技術選択肢による人工バリア等のモニタリング計画の例示
(2) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発	・検討手法等の適用性の確認 ・研究開発計画策定	・火災事象に対する人工バリアの健全性の把握	・火災事象に対する施設計画時の制約事項等の提案		

### 1.3 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック

#### 1.3.1 背景および目的

オーバーパックには、少なくとも 1,000 年間以上は放射性核種を閉じ込める機能が要求されている。この機能を確保するために、オーバーパックの板厚は、腐食代 40 mm と遮へい厚さ 150 mm (耐圧厚さ 110 mm を含む) の合計の 190 mm という仕様例が示されている[2]。腐食代は、埋設後の酸化性雰囲気における酸素量に対応する厚さと 1,000 年間の低酸素雰囲気での腐食速度から求められる厚さの合計として設定された。また、遮へい厚さは、地下水の放射線分解による炭素鋼の局部腐食の進展を防止するために設定された。耐圧厚さは、発電用原子力設備に関する構造等の技術基準の第 2 種容器で規定されている公式に基づいて設定された。

ガラス固化体を挿入したオーバーパックの胴体と蓋の接合方法の一つとして、溶接が検討されている[3]。オーバーパックの封入方法としての溶接の適用性は、実規模大の模擬オーバーパックを対象としたアーク溶接、電子ビーム溶接などを用いた溶接試験により確認されている。一方で、溶接試験体を用いた腐食試験では、溶接部で局部的な腐食が生じる可能性があること、溶接部の断面画像からは、ボイドなどの溶接欠陥が生じる可能性があることが確認された[3]。溶接部の局部的な腐食は、オーバーパックの寿命を短くする可能性があり、また、溶接欠陥の大きさによっては 1,000 年より以前に破損を生じる可能性がある。一般的な構造物では、供用中の検査や補修によりその健全性を確保しているが、オーバーパックには埋設後の検査や補修は想定されていない。そのため、オーバーパックは定置前の段階で少なくとも 1,000 年間は健全であることを確認する必要がある。

本章では、実際の地下深部を想定した複合系でのオーバーパック溶接部の耐食性評価試験を実施するとともに、材料の劣化予測方法の検討、非破壊検査による欠陥検出精度の向上に関する検討を実施した。それらの結果に基づき、腐食評価と構造評価を合わせたオーバーパックの健全性評価手法を構築し、判断指標の具体化に向けて検討を進めた。

#### 1.3.2 5 年間の研究開発計画

平成 26 年度までの研究開発成果を踏まえて、平成 27 年度に更新した 5 年間の研究開発計画を表 1.3.2-1 に示す。

表 1.3.2-1 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパッカーの5カ年の研究開発計画

	H25	H26	H27	H28	H29
① 5年間の研究計画立案	課題抽出・整理 全体計画立案		進捗確認、計画更新		
② 構造・腐食評価を合わせた健全性評価・判断指標の提示					
健全性評価	詳細計画検討 文献調査	健全性評価モデルの検討・判断指標の提示に向けた要素を提示			
③ 溶接部耐食性評価試験					
i. 単純系・長期的な腐食挙動の把握	長期浸漬試験 維持管理	腐食測定系の妥当性確認	緩衝材と腐食挙動の関係評価	還元性雰囲気浸漬試験評価 10年間の腐食速度、水素濃度	
ii. 複雑系での耐食性評価	計画立案、試験体製作、 装置製作、予備試験	試験装置構築 データ取得開始	地下研での腐食試験における センサー類の妥当性確認	試験片寸法が耐食性評価試験結果に及ぼす 影響の評価	複雑系における腐食挙動の提示
iii. 地下施設を活用した耐食性評価試験		試験装置構築 地下研への設置、試験開始	初期（定置直後）の 腐食挙動の取得	再冠水後の腐食挙動取得	再冠水後の腐食挙動取得
iv. メカニズム解明のための腐食試験	詳細計画検討	材料因子（溶接組織） の影響調査	材料因子（化学成分） の影響調査	溶接組織と化学成分の 耐食性への影響度の比較	材料因子を考慮した溶接技術 への工学的対策の提示
		緩衝材の密度差が電気化学挙動の関連調査		緩衝材性状の腐食への寄与の検討	
④ 材料劣化を考慮した品質評価手法の検討					
材料劣化	詳細計画検討	劣化事象の抽出			
	インベントリ評価	OP線量評価	照射脆化メカニズムの検討	照射脆化メカニズムの検討 脆化量予測手法の検討	照射脆化メカニズムの検討 脆化量予測手法の検討
	照射脆化に関する 文献調査	照射脆化予測のための方法論 の検討			
	水素脆化の課題抽出	ガス移行挙動評価の取り込み	水素脆化予測のための方法論 の検討	水素脆化メカニズムの検討	水素脆化メカニズムの検討 脆化量予測手法の検討
⑤ 非破壊検査による欠陥検出精度の定量化					
非破壊検査精度定量化	欠陥位置、寸法測定 誤差の解析的検討 模擬OP試験体の 溶接欠陥寸法測定	測定精度向上に関する検討 （開口寸法の影響）	測定精度向上に関する検討 近接した欠陥の測定分解能に 関する検討	測定精度向上の検討 複数欠陥の検討	複数欠陥のモデル化 検査手順の検討
	・判断指標の抽出 ・健全性評価法案提示 ・研究開発計画策定	・破壊評価に基づく限界欠陥 寸法の提示 ・判断指標に影響する劣化事 象の抽出	・材料劣化を考慮できる 健全性評価法案の提示	・材料劣化を考慮した品質評 価法の提案	・品質評価／健全性評価法の 提案 ・説明性のある長期健全性判 断指標の提示

### 1.3.3 平成 29 年度の実施内容

#### (1) オーバーパック健全性評価手法の構築

オーバーパックに想定される全ての破損モード（延性破壊、脆性破壊などの壊れ方）による破損を防止するための健全性評価手法を構築した。

#### (2) 現象理解の腐食試験

地下環境におけるオーバーパックの溶接部に生じる腐食現象を把握するため、平成 26 年度に開始した幌延深地層研究センターの地下 350 m 調査坑道でのオーバーパック溶接部腐食試験および地上施設での工学規模試験の試験装置を解体し、模擬オーバーパック表面の分析を実施して炭素鋼溶接部の腐食試験データを取得した。

#### (3) メカニズム解明の腐食試験

単純系での腐食試験では、酸化性／還元性雰囲気での浸漬試験や、SCC 感受性評価試験など実施し、これまでに溶接部の均一／不均一腐食、腐食速度、割れ感受性などに係わる知見を拡充することで、製作されたオーバーパックの腐食挙動を評価してきた。オーバーパックの閉じ込め性は数千年から数万年以上の非常に長い期間で要求される機能ではあるが、実際に挙動を評価出来るのは極初期の部分だけである。そのため、溶接部の選択的な腐食のメカニズムを解明することを目的として、金属組織ごと（母材、溶接金属、HAZ）の局所的な分極曲線の取得、およびそれらの部位間での電位差の測定を実施した。

#### (4) 溶接部の残留応力改善のための熱処理条件の取得

腐食割れの発生を防止するために、有限要素法により外面誘導加熱応力改善法（EIHSI）を模擬した解析を実施した。溶接深さは 90 mm とし、溶接後の残留応力分布を求め、加熱条件や急冷条件をパラメータとして、腐食代に相当する板厚 40 mm の範囲を圧縮残留応力に改善するための熱処理条件を取得した。

#### (5) 溶接部の非破壊検査技術の信頼性向上

超音波探傷試験により検出される欠陥寸法および位置を定量化することを目的として、超音波探傷試験結果の分析および超音波シミュレーションを実施した。探傷試験の分析結果から、測定誤差に対する標準偏差を求め、フェーズドアレイ法では、測定値に 4.1 mm を加算することにより信頼区間 90%で欠陥寸法を定量化することができた。また、フェーズドアレイ法による測定手順を整理した。

#### (6) 炭素鋼の脆化量予測に関する検討

放射線の照射による炭素鋼の破壊靱性値の低下量を推定することを目的として、照射による損傷量を予測するためのモデル解析と炭素鋼の脆化因子を調べるための照射試験を実施した。モデル解析では、1,000 年間の照射により生成されるクラスタや転位ループなどのマイクロ組織の変化を反応速度論などにより予測した。照射試験では、炭素鋼の脆化因子および欠陥生成に対する照

射条件の依存性などを調査し、解析による照射損傷量の予測結果と材料試験の結果から、1,000年後の破壊靱性値の低下量を予測した。

(7) オーバーパックの強度評価

オーバーパックの構造健全性を評価するため、塑性崩壊に対する強度、および未溶接部や溶接欠陥を起点とした破壊を評価するための破壊駆動力を算出した。とくに、溶接深さを全板厚よりも小さくした場合の影響に着目するとともに、外圧に対しては偏圧の影響を考慮した。

## 第1章 参考文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁, 特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針, 平成 27 年 5 月 22 日閣議決定, (2015).
- [2] 核燃料サイクル開発機構: 地層処分研究開発第 2 次取りまとめにおける緩衝材間隙水化学の評価、JNC-TN8400-99-078 (1999).
- [3] Asano, H., and Aritomi, M., Long-term integrity of waste package final closure for HLW geological disposal, (I) Points at issue concerning 1,000 Years containment capability of overpack, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.42, No.5 (2005), pp.470-479.

## 第2章 健全性評価のための研究開発課題の設定

構造物が健全であることを判断するためには、構造物の使用環境での破損形態（どの部位がどのように破損するか）を想定し、それぞれの破損形態に対して考えられる破損モード（局部腐食、延性破壊、脆性破壊などの壊れ方）を考慮して、全ての破損形態に対して破損が生じないと判断された場合に、構造物の健全性が確認されたことになる。一般的な構造物の場合、定期的な検査や補修により、その健全性を確保している。しかし、オーバーパックには定置後の検査や補修を行うことは想定されていない。

本章では、定置後の検査や補修を必要とせずに、要求される閉じ込め期間中にオーバーパックが健全であることを判断するための健全性評価手法について検討する。最初に、オーバーパックの破損形態および破損モードを想定し、次に、全ての破損形態に対して破損を防止するための研究開発課題を設定する。

### 2.1 設計要件および定置される環境条件

#### 2.1.1 設計要件

オーバーパックには、「発熱が著しい期間の廃棄体と地下水の接触防止」の安全機能が設定されている[1]。安全機能に影響を与える事象としては、貫通孔の発生、変形、破壊があり、これらを防止あるいは影響を低減するための技術要件として、耐食性、構造健全性、溶接部耐食性・構造健全性が設定されている。また、長期健全性の維持および工学的実現性の確保に関する技術要件も設定されている。

オーバーパックの安全機能は、母材および溶接部ともに「耐食性」と「構造健全性」の2つの技術要件を満足することで確保できる。したがって、オーバーパックの健全性評価手法は「腐食評価」と「構造評価」の2つの観点に基づいて構築する。

表 2.1.1-1 オーバーパックの技術要件（基本的なバリア性能の確保）

安全機能		技術要件
放射性物質の 浸出の抑制	発熱が著しい期間の	耐食性
	廃棄体と地下水接触	構造健全性
	の防止	溶接部耐食性・構造健全性

#### 2.1.2 環境条件

##### (1) 地下水組成

わが国の代表的な地質環境における地下水組成として、以下の組成が挙げられている[2]。

リファレンスケース：

安全評価の解析において、様々な解析ケースの比較の基準とする参考ケース

降水系還元性高 pH 型モデル地下水

Fresh-reducing-high-pH Groundwater (FRHP)

地質環境変更ケース：

リファレンスケースに対して、地質環境を変化させた想定ケース

海水系還元性高 pH 型モデル地下水

**Saline-reducing-high pH Groundwater (SRHP)**

地質環境変更ケース：

コンクリート支保工を用いる場合を想定、セメント材料と反応した **FRHP** 地下水

変動シナリオ：

リファレンスケースで想定した基本的な将来記述、基本シナリオに対して、地層の隆起を考慮するなどシナリオを変化させたケース

降水系酸化性高 pH 型モデル地下水

**Fresh-oxidizing-high-pH Groundwater (FOHP)**

参考地下水：

・ 降水系還元性低 pH 地下水

**Fresh-reducing-low-pH Groundwater (FRLP)**

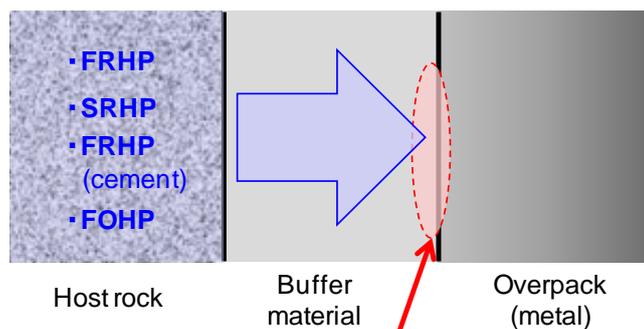
・ 海水系還元性低 pH 地下水

**Saline-reducing-low-pH Groundwater (SRLP)**

・ 高炭酸系還元性中性型モデル地下水

**Mixing-reducing-neutral -pH Groundwater (MRNP)**

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、ガラス固化体－オーバーパック－緩衝材－周辺岩盤という多重バリアシステムが構築されている。このような系では図 2.1.2-1 のような環境にオーバーパックが曝されることになる。温度はガラス固化体からの発熱量と緩衝材－岩盤への熱伝達量が平衡状態になったところで決まる。地下環境は基本的には低酸素雰囲気であることから、溶存酸素は操業期間中に外部から持ち込まれたものである。腐食で重要な間隙水組成は、地下水が緩衝材中を浸潤してオーバーパックに到達した溶液の組成である。オーバーパックが接触する緩衝材中の間隙水組成については、化学平衡計算が行われており[2]、それを基にした緩衝材間隙水中の化学種の濃度範囲と pH の範囲が示されている[3]。処分場の候補地が未定であるが、わが国で想定される地下水組成に基づく間隙水の化学成分が表 2.1.2-1 のように整理されていることから、この表の成分や濃度を元にして試験条件を設定し試験結果を拡充しておけば、処分場が何れの場所に建設されたとしてもオーバーパックの腐食挙動はその範囲内に収まると考えられる。



**腐食に対する環境因子**

図 2.1.2-1 オーバーパッカー緩衝材界面の環境の模式図

表 2.1.2-1 緩衝材間隙水中の化学種の濃度範囲と pH の範囲（計算値） [3]

化学種	濃度範囲 (mol L <sup>-1</sup> )
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / CO <sub>2</sub> / H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	< 7.3 x 10 <sup>-2</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	< 6.1 x 10 <sup>-2</sup>
HS <sup>-</sup> / H <sub>2</sub> S	< 9.2 x 10 <sup>-1</sup>
Cl <sup>-</sup>	< 5.9 x 10 <sup>-1</sup>
P (total)	< 2.9 x 10 <sup>-6</sup>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.0
NH <sub>3</sub>	< 1.6 x 10 <sup>-4</sup>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	< 5.1 x 10 <sup>-3</sup>
B (total)	< 1.7 x 10 <sup>-3</sup>
pH	5.9 ~ 8.4

(2) 負荷条件

地層処分の安全評価で設定されている基本シナリオでは、1,000 年以降、腐食の進展にともない外圧がオーバーパッカーの強度を上回った時点で変形して開口することが考えられている。オーバーパッカーに作用する負荷は、埋設後の外圧、溶接部の残留応力、操業時の吊り上げなどで自重により発生する負荷が考えられる。埋設後の負荷の種類、発生条件および重要度は、表 2.1.2-2 のように整理されている [4]。オーバーパッカー埋設後に作用する負荷は、①岩盤クリープ、②地下水静水圧、③腐食膨張、④緩衝材の膨張、⑦残留応力が重要であるとされている。⑨地震の影響では、揺れによる加速度の効果について、予測される最大級の地震動を考慮する必要があるとされ、その他の負荷については、考慮する必要性は小さいと報告されている。

表 2.1.2-2 オーバーパック埋設後に想定される負荷の種類と発生条件  
(文献[4]から抜粋)

発生時期	原因	発生プロセス	重要度
通常時 地下水シナリオ	①岩盤のクリープ変形による緩衝材の圧密反力	閉鎖後、岩盤のクリープ変形によって緩衝材に緩やかに圧密反力が作用し、外圧が OP に生じる。	大
	②地下水静水圧	地下水の水頭圧により、緩衝材を媒体として OP に水圧が生じる。	大
	③腐食膨張	OP が腐食することにより、OP 体積が増大し、緩衝材－OP 間で圧力が生じる。	大
	④緩衝材の膨張	緩衝材が地下水と接触し体積が膨張することにより、その膨張圧で OP に外圧が生じる。	大
	⑤ガス発生	OP の腐食により 2 次生成物としてガスが発生し、緩衝材内に密閉されガス圧が生じる。	小
	⑥固化体からの熱応力	処分時、ガラス固化体発熱量は約 350W/本と考えられ、収納後、熱伝導により OP は温度分布を持つ。このため、局部的に熱膨張により OP に局部応力が発生する。	小
	⑦残留応力	蓋及び胴部を溶接後に熱処理が施せない場合には、溶接部の熱収縮により、残留応力が発生し、局部的に応力が常に発生している状況となる。	大
	⑧地熱による熱応力	地熱により表面より加熱された OP が温度勾配を有することにより、熱応力が発生する。	小
事故時 天然事象シナリオ	⑨地震／断層活動	地震・断層活動による地下水位の低下や岩盤の破碎等の事象が考えられ、これにより水圧の上昇や緩衝材を介した OP への力の伝達が発生する可能性がある。	中
	⑩火山／火成活動	地温の上昇、熱水対流系の形成により熱応力が発生する可能性が考えられる。	小
	⑪気候／海水準変動	気温の上昇や低下による海水面の変動、凍結による不透水層の形成等により、地下水圧が上昇する可能性が考えられる。	小
	⑫隆起／沈降／浸食	プレート運動に起因する地殻応力場により隆起や沈降等が生じる。	小

## 2.2 オーバーパックの健全性確保の考え方

構造物の健全性を確保するためには、対象となる構造物の破損形態（どの部位がどのように破損するか）を想定し、それぞれの破損形態に対して考えられる破損モード（延性破壊、脆性破壊などの壊れ方）を具体化する。そして、想定される全ての破損モードに対して、破損が生じないと判断された場合には、対象となる構造物の健全性が確認されたことになる。

### 2.2.1 破損形態および破損モード

#### (1) 破損形態

オーバーパックにガラス固化体を収納した後は、溶接により封入することが考えられている[1]。オーバーパックの蓋構造の例を図 2.2.1-1 に示す[7]。溶接材料の使用や熱影響などにより、溶接部は母材とは異なる材料組成や強度になる。また、溶接時の熱影響により溶接残留応力が発生することが報告されている[8][9][10]。

オーバーパックで想定される破損形態を図 2.2.1-2 に示す。オーバーパックでは、3つの破損形態が想定される。一つ目は、外圧などの負荷に対して母材部分の変形が進み、最終的に貫通する破損である。この破損形態を「欠陥を起点としない破損」と呼ぶことにする。2つ目は、溶接部のルート部や未溶着部（板厚に対して溶接をしていない部分）を起点とした破損である。3つ目は、溶接時に発生する可能性があるボイドなどの溶接欠陥を起点とした破損である。

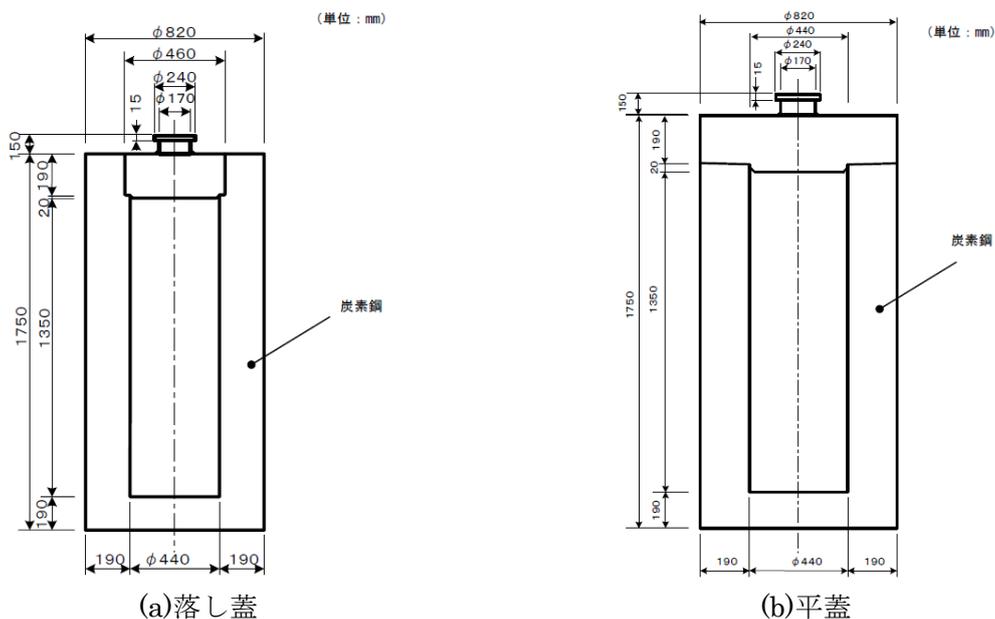
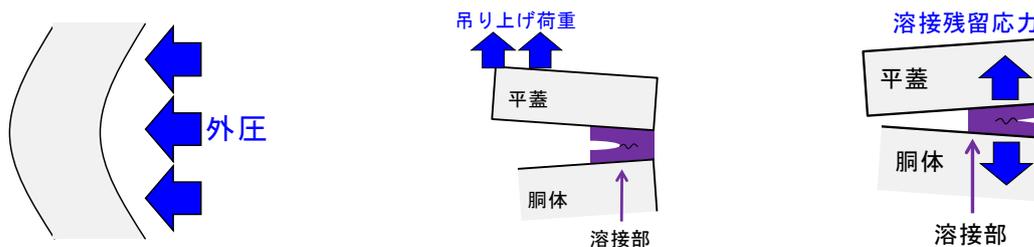


図 2.2.1-1 オーバーパックの蓋構造の例



(a)欠陥を起点としない破損 (b)未溶接部を起点とした破損 (c)溶接欠陥を起点とした破損

図 2.2.1-2 オーバーパックの破損形態

## (2) 破損モード

一般的な構造物で想定される破損モードを表 2.2.1-1 に示す。オーバーパックに作用する負荷は、地上施設から地下施設に搬送して定置するまでの自重により発生する負荷、埋設後の外圧、溶接部の残留応力が考えられる。これらの負荷に対して、オーバーパックで想定される破損モードを表中に●印で示した。

塑性崩壊は構造物断面で生じる延性破壊で、破損する断面における平均的な応力(実断面応力)が破損の駆動力となる。断面全体が変形する塑性崩壊に対し、弾塑性破壊と脆性破壊では切欠きや欠陥などの局所を起点として、き裂が発生・進展する。したがって、弾塑性破壊と脆性破壊に対する破壊評価においては、局所的な力の大きさを表す J 積分と応力拡大係数が破壊の駆動力として用いられる。どの破壊モードが出現するかは、材料や構造、使用条件などに依存する。また、同じ材料を対象とした場合でも、き裂の大きさ、材料の脆化度によって破壊モードが変化する場合がある。一般的な構造物の設計では、構造物には欠陥が存在しないこと、または欠陥が十分に小さいことが前提とされているため、欠陥を起点とした弾塑性破壊と脆性破壊は想定されない。しかし、オーバーパックではガラス固化体から放射線が放出されるため、遠隔操作による溶接方法が検討されており、溶接部において欠陥が存在しない、または十分小さいという想定が成立しない場合も考慮する必要がある[11]。厚板の溶接を行う場合は、比較的大きな溶接欠陥が発生し、それを起点とした弾塑性破壊や脆性破壊が発生する可能性がある。また、未溶接部も切欠きやき裂と同様に応力集中が生じ、弾塑性破壊や脆性破壊の起点となり得る。

一般的な構造物では疲労による破損が想定されることがある。国内最大級の地震動を想定した 3 次元地震動応答解析により、オーバーパックに作用する負荷は最大 1.69 MPa であり、地震時に人工バリアと周辺地盤が一体となって振動することから、オーバーパックに大きな応力変化は生じない結果が得られている[6]。発電用原子力設備規格設計・建設規格で用いられている炭素鋼の設計疲労線図では、応力に対して二倍、繰返し回数に対して二十倍の安全係数が考慮されており、最小引張強さ  $S_u$  が 550 MPa 以下の炭素鋼の疲労限度は、84 MPa と規定されている[12]。オーバーパックに大きな応力変化は生じないこと及び設計疲労線図で規定される疲労限度に比べてオーバーパックに作用する負荷が十分に小さいことから、板厚 190mm のオーバーパックに対して疲労による破損は考慮する必要はない。

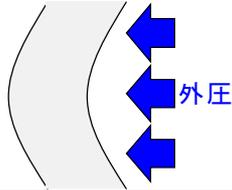
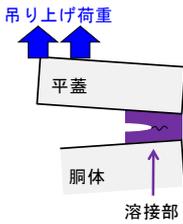
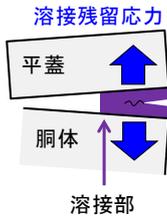
以上により、オーバーパックに想定される破損形態に対する破損モードは、表 2.2.1-2 のように整理できる。

表 2.2.1-1 構造物の破損モード

変形様式	破損モード	主な特徴	
静的破壊 (変動の小さい 負荷による破壊)	弾性	脆性破壊	原子結合が破断される瞬時破壊
		●応力腐食割れ	引張負荷下での割れ発生/進展
	弾塑性	●延性破壊	ボイドの発生、成長、合体
		●塑性崩壊/座屈	圧縮荷重が限界値を超えたときに急激に変形が進む破壊
		●崩壊	圧縮荷重の増加とともに変形が進む破壊
クリープ破壊	高温下でのひずみの増加		
動的破壊 (変動の大きい 負荷による破壊)	弾性	弾性破壊	衝撃荷重下での破壊
		高サイクル疲労*	繰返し負荷によるき裂発生/進展
	弾塑性	●弾塑性破壊	衝撃荷重下で塑性変形を伴う破壊
		低サイクル疲労*	繰返し負荷によるき裂発生/進展
その他	●腐食	全面腐食	
		局部腐食	
	●欠陥を起点 とした破損	き裂発生/進展	

●：オーバーパックで想定される破損モード

表 2.2.1-2 オーバーパックの破損形態と破損モード

破損形態	破損時期	破損モード
欠陥を起点としない破損 	作業中	延性破壊
	埋設後	塑性崩壊
		局部腐食
未溶接部を起点とした破損 	作業中	延性破壊
		弾塑性破壊
	埋設後／作業中	塑性崩壊
	埋設後	脆性破壊
溶接欠陥を起点とした破損 	埋設後	脆性破壊

## 2.3 腐食評価

### 2.3.1 寿命評価における前提条件

HLW 第2次取りまとめにおいて示された炭素鋼オーバーパックの板厚の設定において、オーバーパックの安全機能である“発熱が著しい期間にガラス固化体と地下水との接触を防止”に対して1,000年間以上の閉じ込め機能が要求されている。炭素鋼は地下処分環境で腐食するため、腐食による減肉量を考慮して40mmの腐食代が設定されている。炭素鋼製のオーバーパックが腐食代を確保することにより期待される寿命を達成するためには、以下の点が前提条件となる。

- ① 処分環境においてオーバーパックの外表面が均一に腐食する。
- ② 全腐食量、または腐食速度が取得できる。
- ③ 応力腐食割れや水素脆化等の局所的な腐食による破損が発生しない。
- ④ 不均一腐食や割れが発生する場合、その程度が正確に予測できる。

一方で、寿命評価では以下の点に留意する必要がある。

- ⑤ 溶接部の化学成分、金属組織の不均一性による不均一腐食や割れの発生
- ⑥ 緩衝材の不均一な膨潤（環境の不均一性）による不均一腐食や割れの発生

### 2.3.2 これまでの腐食評価に関する研究開発

前項の①から⑥に対して、これまでに実施された試験の経緯を以下に整理した。

HLW 第 2 次取りまとめにおける炭素鋼オーバーパックスの検討では、基本的に炭素鋼母材を対象としている。①の均一腐食については緩衝材共存環境では pH により炭素鋼は不動態化しないことを示し、②については酸化性雰囲気での浸漬試験より酸素による全腐食量を、低酸素雰囲気での浸漬試験より平均腐食速度を求め、腐食代の設定のための根拠とした。③の局所的な破損については既往の文献調査や鋼中水素濃度の観点からの検討により、炭素鋼では生起しないものとしている。④について、酸化性雰囲気での不均一性は試験片の形状計測の結果から極値統計を用いて推定した最大腐食深さ、低酸素雰囲気での腐食速度は腐食の局在化を考慮して速度から求めた厚さの 2 倍を採用している。

⑤については、平成 16 年度より遠隔操作技術高度化開発で製作した模擬オーバーパック溶接試験体に対する腐食試験を実施した。その結果、アーク溶接では酸化性雰囲気における浸漬試験で溶接部の選択腐食が発生した。このような溶接部の局所的な不均一腐食は母材の腐食の不均一性よりも大きくなることが示唆された。図 2.3.2-1 は TIG 溶接試験片の酸化性雰囲気における試験結果の一例である。このように材料自体の不均一性が腐食挙動に影響をおよぼす可能性がある。

⑥については、これまでに実施された腐食試験は、地層処分環境に曝露されたオーバーパックに生じると想定される腐食現象を個別に評価することを目的とした、小型試験片を使用した実験室規模の試験が中心であった。試験環境も人工海水や調整した溶液といった単純なもので、より精緻な腐食現象の把握を目的としていた。しかしながら実際のオーバーパックは長さが 1,750 mm 程度、直径が 840 mm であり、数センチ四方の試験片と比較しても表面積に大きな差がある。周囲の緩衝材も施工方式によっては、製作時の密度差や緩衝材同士の隙間などの不均一性が存在するため、オーバーパック全表面が必ずしも同一の環境になっているとは限らない。この系の不均一性がオーバーパックの腐食挙動におよぼす影響も考慮する必要がある。

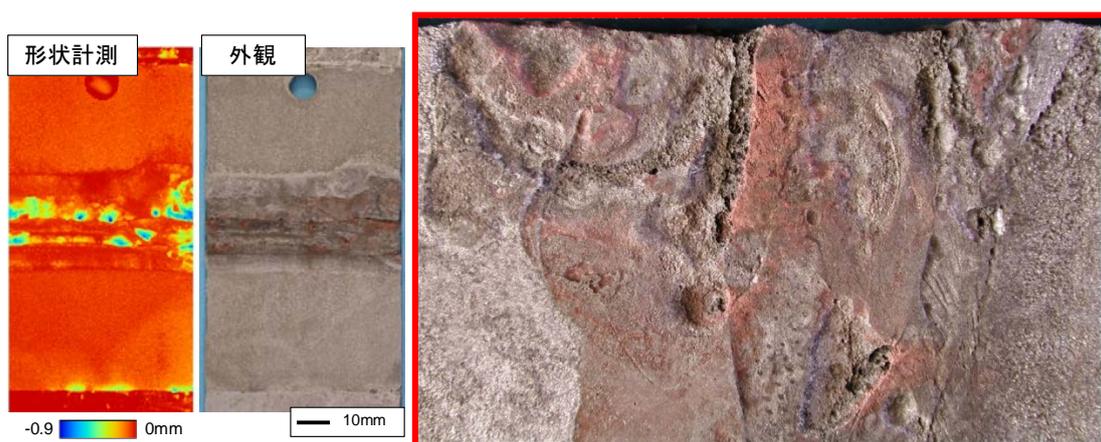


図 2.3.2-1 酸化性雰囲気での浸漬試験による TIG 溶接試験片の選択腐食

### 2.3.3 腐食現象に影響をおよぼす因子

腐食とは、金属材料をある環境に曝露した時、その系における熱力学的なエネルギーの差により起こる現象である。例えば、鉄(Fe)と酸素(O<sub>2</sub>)をある温度で共存させた場合、Fe と O<sub>2</sub> のエネルギーの総和と、それらの化合物である酸化鉄 (FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> など) のエネルギーの総和が小さくなる方向に反応が進む。この場合、酸化物のエネルギーの方が低いため、発熱を伴って鉄は酸化する。このように腐食現象は材料と環境の組み合わせで生じるため、材料因子と環境因子の観点から整理することが重要である。図 2.3.3-1 に炭素鋼製オーバーパックスの腐食におよぼす材料因子と環境因子の関係を示した。

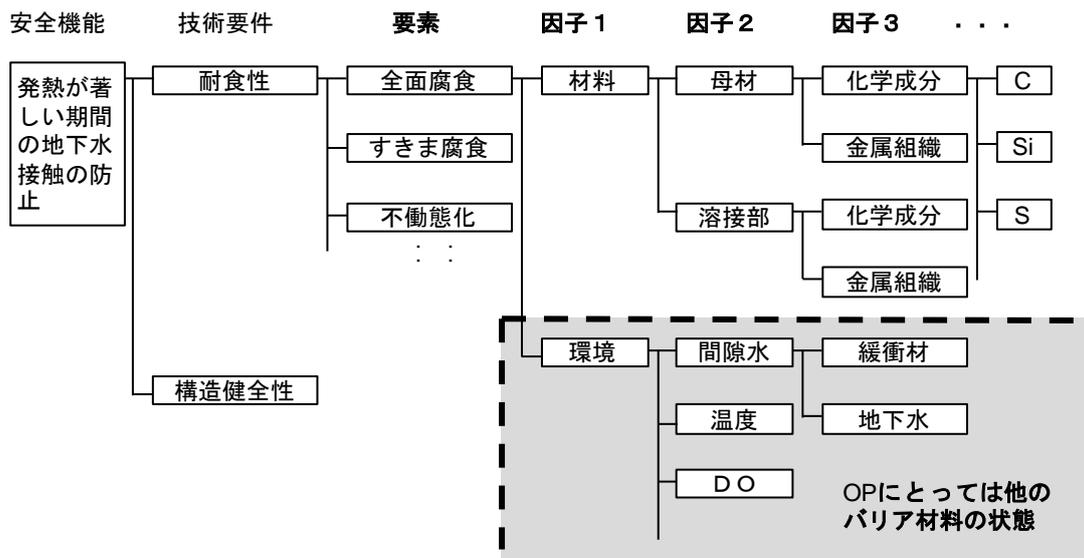


図 2.3.3-1 オーバーパックスの腐食に寄与する因子の例

HLW 第 2 次取りまとめでは、圧力容器用炭素鋼鍛工品 (SFVC1) や溶接用圧延材 (SM400) などに対して種々の腐食試験が実施された。溶接性を考慮したこれらの炭素鋼は亜共析鋼であり、全面がフェライトとパーライトで占められる。一方、溶接部は図 2.3.3-2 のように溶接組織だけではなく、アーク溶接時に溶接材料を使用したことにより、化学成分も母材と異なる。この不均一性が図 2.3.2-1 に示した選択腐食の要因となっている。一方で溶接材料に 0.25%Ni を添加すると図 2.3.3-3 のように選択腐食が改善する事実もある。

溶接部を含む金属組織は、化学成分、溶接時の最高到達温度、冷却速度等によって変化するが、これら 3 つの要素が既知であれば、連続冷却変態線図 (CCT 曲線 : Continuous Cooling Transformation diagram) を作成すればある程度予測は可能になる。

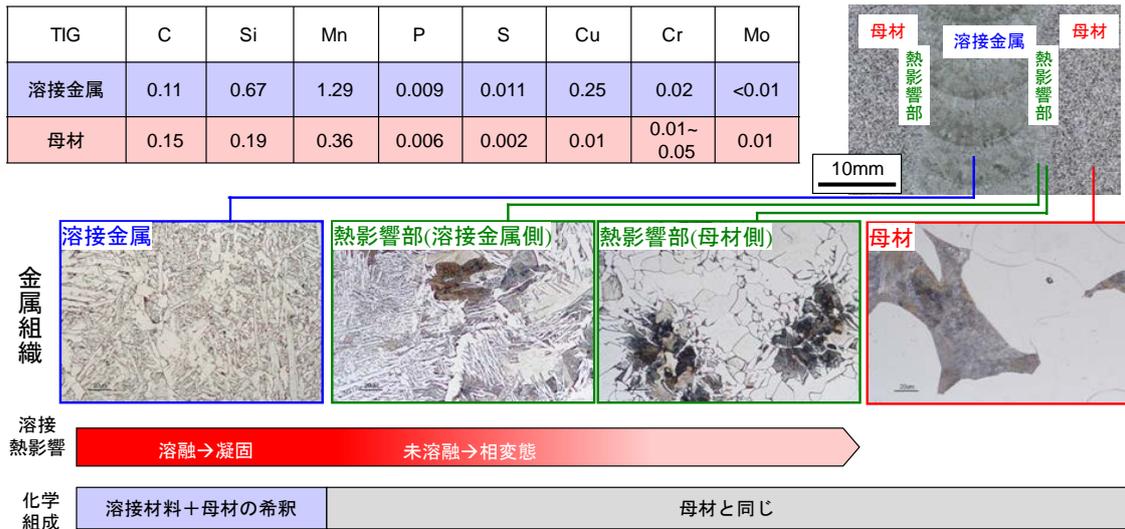


図 2.3.3-2 オーバーパック溶接部の不均一性

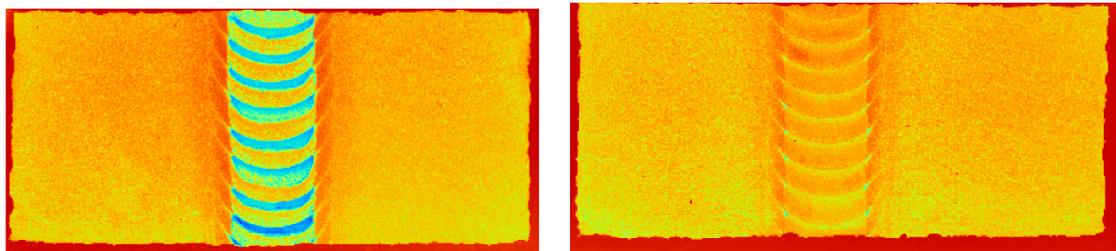


図 2.3.3-3 MAG 溶接部の選択腐食における溶接材料への Ni 添加の効果

### 2.3.4 腐食評価の考え方

炭素鋼オーバーパックの腐食評価では、期待される寿命を達成するための腐食代の設定、およびその根拠を提示することが目的となる。そのためには使用環境下で全面腐食挙動を示すこと、その際の腐食総量または腐食速度が把握できること、この2つが重要である。

金属材料の腐食は、環境因子と材料因子の組み合わせで生じる。地層処分場の建設地が決定していない現段階の検討では、材料因子は Generic な値を用いるより他ない。一方で材料因子は、母材の成分、溶接材料の有無または成分、入熱を支配する溶接手法といった設計・製作工程である程度制御可能である。

化学成分や溶接組織といった材料因子の違いによっても、全面腐食時の均一／不均一性が生じる。設計・製作工程で制御できる材料因子の観点から、それらの影響を体系的に整理することが重要である。

## 2.4 構造評価

### 2.4.1 材料劣化事象の検討

埋設後のオーバーパックの材料自体は、時間の経過にともない徐々に劣化することが考えられる。この劣化により材料強度が低下する場合には、閉じ込め期間が終了する以前にオーバーパッ

クが破損する可能性がある。そのため、オーバーパックに想定される材料劣化事象を抽出し、埋設後に想定される材料劣化事象を特定する。

埋設後のオーバーパックに想定される材料劣化事象は、文献[4]では表 2.4.1-1 のように整理されている。これらの劣化事象のうち疲労によるき裂の発生、成長については、埋設後のオーバーパックには繰り返しの負荷（疲労負荷）は作用しないことから、オーバーパックの健全性を評価する上で考慮する必要はない。ガラス固化体からの放射線の照射や腐食で生じる水素の吸収による脆化については、防止することは難しい。したがって、放射線の照射および水素の吸収による脆化の 2 つが、オーバーパックの強度に影響をおよぼす材料劣化事象と考えられる。脆化とは、放射線の照射などにより材料内に微細な組織変化が生じ、材料が硬くなり脆くなる現象である。通常、炭素鋼などの金属材料は、荷重が加わると伸びる性質を有していて、荷重を加え続けると伸びが増加して、最終的に破断する。一方で、脆化量が大きくなると、荷重に対する材料の伸びが小さくなり、例えば、ガラスのように伸びずに割れるようになる。そのため、材料中にき裂などの欠陥が存在する場合に脆化が生じると、その欠陥を起点として材料が破損しやすくなる。

また、既存の構造物の中でも相対的に長期間の健全性が要求される原子力発電所について、その劣化事象を調査した。表 2.4.1-2 に原子力発電所で経年劣化管理が必要とされている劣化事象を示す[13]。原子力発電所の管理すべき 4 つの経年劣化事象の中で、オーバーパックの埋設条件で想定されるものとしては、中性子照射脆化と照射誘起応力腐食割れになる。照射誘起応力腐食割れのような局部腐食については、その発生を防止できる環境または材料を選定する必要がある。

以上の事から、オーバーパック埋設後に材料強度に影響をおよぼす材料劣化事象は、放射線照射と水素吸収による脆化のみであると考えられる。

表 2.4.1-1 埋設後の炭素鋼オーバーパックで想定される材料劣化事象  
(文献[4]から材料劣化事象を抽出して整理)

外荷重発生ケース	材料劣化事象
岩盤クリープ変形＋地下水静水圧＋ 腐食膨張圧＋緩衝材膨張圧＋残留応力	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ き裂発生、成長</li> <li>・ 中性子照射脆化</li> <li>・ 水素脆化</li> </ul>

表 2.4.1-2 原子力発電所で経年劣化管理が必要な事象  
(文献[13]からオーバーパックに想定される事象を抽出して整理)

経年劣化管理事象
低サイクル疲労
中性子照射脆化
照射誘起応力腐食割れ
高サイクル熱疲労

## 2.4.2 構造評価の考え方

構造物を壊す力（破壊の駆動力）が材料の耐える力（破壊抵抗）を超えると、構造物は破損する。つまり、構造物の破損は、破壊の駆動力と破壊抵抗の大きさを比較して、破壊抵抗の方が小さいことを確認することで防止できる。したがって、オーバーパックに作用する最大の負荷（破壊の駆動力）よりもオーバーパックの破壊抵抗の方が大きいことを確認することで、力学的にオーバーパックが健全であることを判断することができる。ここでは、破損という現象を破壊の駆動力と破壊抵抗の2つに着目して検討することで、オーバーパックの健全性を確保する方法について検討する。

### (1) 破壊の駆動力と破壊抵抗

オーバーパックの溶接部には、溶接欠陥が発生する可能性があることが報告されている[14]。構造物中にき裂状の欠陥がない場合に比べて、き裂状の欠陥がある場合には、材料の破壊抵抗が低下し、より小さい負荷で構造物が破損する。材料中に欠陥が存在する場合と欠陥が存在しない場合では、構造物の破壊の駆動力と破壊抵抗が異なる。そのため、材料中に欠陥がない場合とある場合の破壊の駆動力と破壊抵抗について以下で述べる。

#### 1) 材料中に欠陥がない場合

金属材料に負荷を加えると変形し、負荷の大きさとともに変形が大きくなり、最終的に破断する。引張試験などで得られる軟鋼の応力ひずみ線図を模式的に図 2.4.2-1 に示す。図の縦軸および横軸は、それぞれ応力  $\sigma$  とひずみ  $\epsilon$  を表していて以下の式で定義される。

$$\text{応力 } \sigma = \frac{P}{A} \quad \text{式(2.4.2-1)}$$

$$\text{ひずみ } \epsilon = \frac{l - l_0}{l} \quad \text{式(2.4.2-2)}$$

ここで、 $P$ は荷重、 $A$ は断面積、 $l$ は変形前の長さ、 $l_0$ は変形後の長さである。金属材料に荷重（応力）を加えると、最初は応力に対してひずみが直線的に増加する。この部分を弾性域と呼び、荷重を除荷すれば変形は元の状態に戻る。さらに応力を増加させて弾性域を超えると、応力は増加せずにひずみだけが增加する。この部分を降伏点と呼ぶ。降伏点を超えて応力を増加させると、塑性変形を生じてひずみが大きく増加する。応力ひずみ線図の中で最大の応力を示す点を引張強さと呼ぶ。引張強さを超えると応力は減少するがひずみは増加し、最終的に金属材料は破断する。つまり、き裂などの欠陥がない場合の構造物の破壊の駆動力と破壊抵抗は次のようになる。

#### 【材料中に欠陥がない場合】

破壊の駆動力： 応力 (MPa)

破壊抵抗： 降伏点や引張強さなど (MPa)

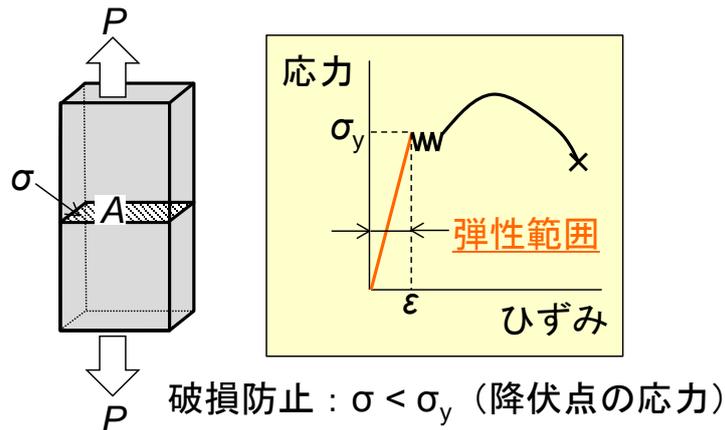


図 2.4.2-1 軟鋼の応力ひずみ線図の模式図

2) 材料中に欠陥がある場合

金属材料に相対的に大きなき裂状の欠陥がある場合には、き裂の先端に応力が集中するため、材料の強度が低下する。き裂を含む材料の強度は、材料力学では評価することができないため、破壊力学などを用いて評価される。実際に、原子力発電所の圧力容器や配管などでは、検査でき裂が発見された場合に破壊力学を用いて進展評価、破壊評価が行われている[15]。線形破壊力学では、以下の式で定義される応力拡大係数  $K$  が破壊の駆動力として用いられる。

$$K = F\sigma\sqrt{\pi a} \quad \text{式(2.4.2-3)}$$

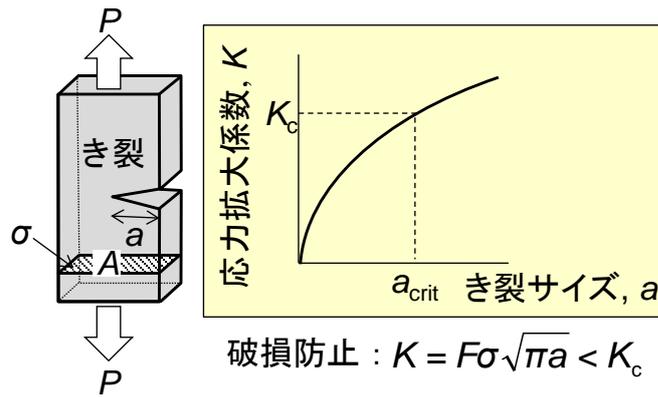
ここで、 $F$  は形状係数、 $a$  はき裂長さを表す。応力拡大係数は、構造物の形状および作用する応力、き裂の大きさによって決定される。また、破壊抵抗は、Compact tension 試験片 (CT 試験片) などを用いた破壊靱性試験により得られる破壊靱性値  $K_{Ic}$  となる。そして、その健全性に影響があると判断された場合には必要に応じて補修して、その健全性を確保している。

応力拡大係数と限界き裂寸法との関係を模式的に図 2.4.2-2 に示す。構造物に作用する応力が一定の場合、き裂サイズとともに応力拡大係数は増加する。そして、応力拡大係数  $K$  が破壊靱性値  $K_{Ic}$  に等しくなる時のき裂サイズが、その構造物の限界き裂寸法になる。したがって、構造物に作用する応力が把握できている場合には、検査で測定したき裂サイズが限界き裂サイズより小さければ構造物は破損せず、その欠陥は無害と判断できる。

【材料中に欠陥がある場合】

破壊の駆動力 : 応力拡大係数 (MPa·m<sup>0.5</sup>)

破壊抵抗 : 破壊靱性値 (MPa·m<sup>0.5</sup>)



( $K$ :応力拡大係数、 $K_c$ :破壊靱性値、 $a_{crit}$ :限界き裂寸法)

図 2.4.2-2 応力拡大係数と限界き裂寸法の関係の模式図

(2) 構造評価の考え方

構造物にき裂などの欠陥が存在しない場合には、例えば、降伏点を越える応力が作用しなければ構造物は塑性変形しないため、破損することはない。また、オーバーパックの溶接部に存在する可能性のある溶接欠陥は、ボイド状や割れなど幾つかの種類欠陥が想定される。ただし、欠陥の先端の形状が鋭いほど応力集中は大きくなるため、オーバーパックの健全性を評価する上では、全ての欠陥をき裂（先端の曲率半径がゼロ）とみなして評価することが、応力的に最も厳しい条件になる。したがって、オーバーパックの健全性を確保するための構造評価では、図 2.4.2-3 に示すように、欠陥が存在しない場合の強度評価と欠陥が存在する場合の欠陥評価の 2 つの場合を考慮すれば十分である。図中の赤字は破壊の駆動力、青字は破壊抵抗を表している。強度評価では、オーバーパックに作用する応力  $\sigma$  が設計応力  $\sigma_A$  より小さくなるように板厚を設定する。欠陥評価では、欠陥をき裂とみなして、き裂先端の応力拡大係数  $K$  が破壊靱性値  $K_c$  より小さいことを確認することで、強度的にオーバーパックが健全であることを保証することができる。オーバーパックの候補材料の一つである炭素鋼は、埋設環境の温度では延性破壊をされると考えられるが、安全側に脆性破壊を想定して欠陥評価を行う。

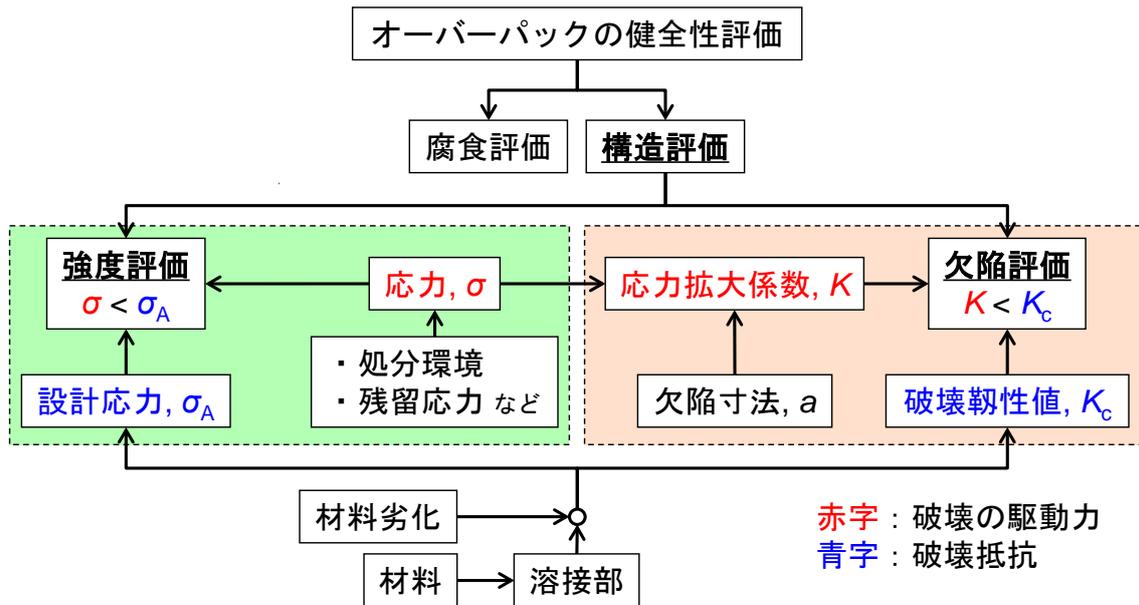


図 2.4.2-3 オーバーパックの構造評価のフローチャート

### 1) 強度評価

HLW 第 2 次取りまとめでは、オーバーパックの設計に「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（昭和 55 年通商産業省告示第 501 号）」[15]の第 2 種容器（日本機械学会発電用原子力設備規格 設計・建設規格[12]（以下、設計・建設規格）におけるクラス MC に対応）の規定が準用されている。そして、蓋部と胴部の許容応力（設計応力）が設定され、必要な板厚は 110 mm に設定されている。

告示 501 の第 2 種容器および設計・建設規格のクラス MC 容器の設計では、その方法として公式による設計（design by formula）が採用されている。一方でクラス 1 容器等の設計では、解析による設計（design by analysis）が採用されていて、詳細な構造解析に基づく応力評価および構造物の設計を実施することができる。

オーバーパックの強度評価のフローチャートを図 2.4.2-4 に示す。強度評価のフローチャートは、荷重条件および材料劣化の検討から、以下の結果に基づいて作成した。

- ① オーバーパックに繰り返しの負荷は作用しない  
→疲労負荷が加わらないため、疲労破壊は考慮しない
- ② オーバーパックに生じる材料劣化事象は、放射線照射および水素吸収による脆化のみ  
→脆化により材料の降伏応力や引張強さは増加するため、強度評価では材料劣化は考慮する必要はない
- ③ 溶接部の残留応力は変形の拘束により生じるため、材料が塑性変形すると残留応力は解放され、静的強度におよぼす影響は小さい  
→溶接残留応力は強度評価では考慮しない

図 2.4.2-4 の左側は破壊抵抗を求める流れ、右側は破壊の駆動力を求める流れを表している。

強度評価における破壊抵抗は、降伏応力、引張強さ、崩壊荷重などが考えられる。ただし、オーバーパックには長期間の健全性が要求されるため、閉じ込め期間中のオーバーパックの変形は弾性範囲に抑えておくべきと考えられる。そのため、強度評価における破壊抵抗は降伏応力とし、降伏応力に裕度を考慮して設計応力  $\sigma_D$  とする。裕度の大きさは、埋設後の環境などの不確実性を考慮して決定する必要がある。降伏応力は、引張試験などの材料試験を行うことで取得することができる。一般的に、溶接部の降伏応力や引張強さは母材よりも大きいいため、強度評価では溶接部に対しても母材の材料強度を用いるほうが安全側の評価となる。強度評価における破壊の駆動力は応力であり、オーバーパックの形状や板厚、処分環境の外圧などを入力条件として、有限要素解析などによりその大きさを求めることができる。そして、オーバーパックに作用する最大応力  $\sigma_{max}$  が設計応力  $\sigma_D$  よりも小さいことを確認して強度評価は終了となる。最大応力  $\sigma_{max}$  が設計応力  $\sigma_D$  よりも大きければ、オーバーパックの設計（板厚）を見直し、再び応力解析を実施して、最大応力と設計応力を比較する。

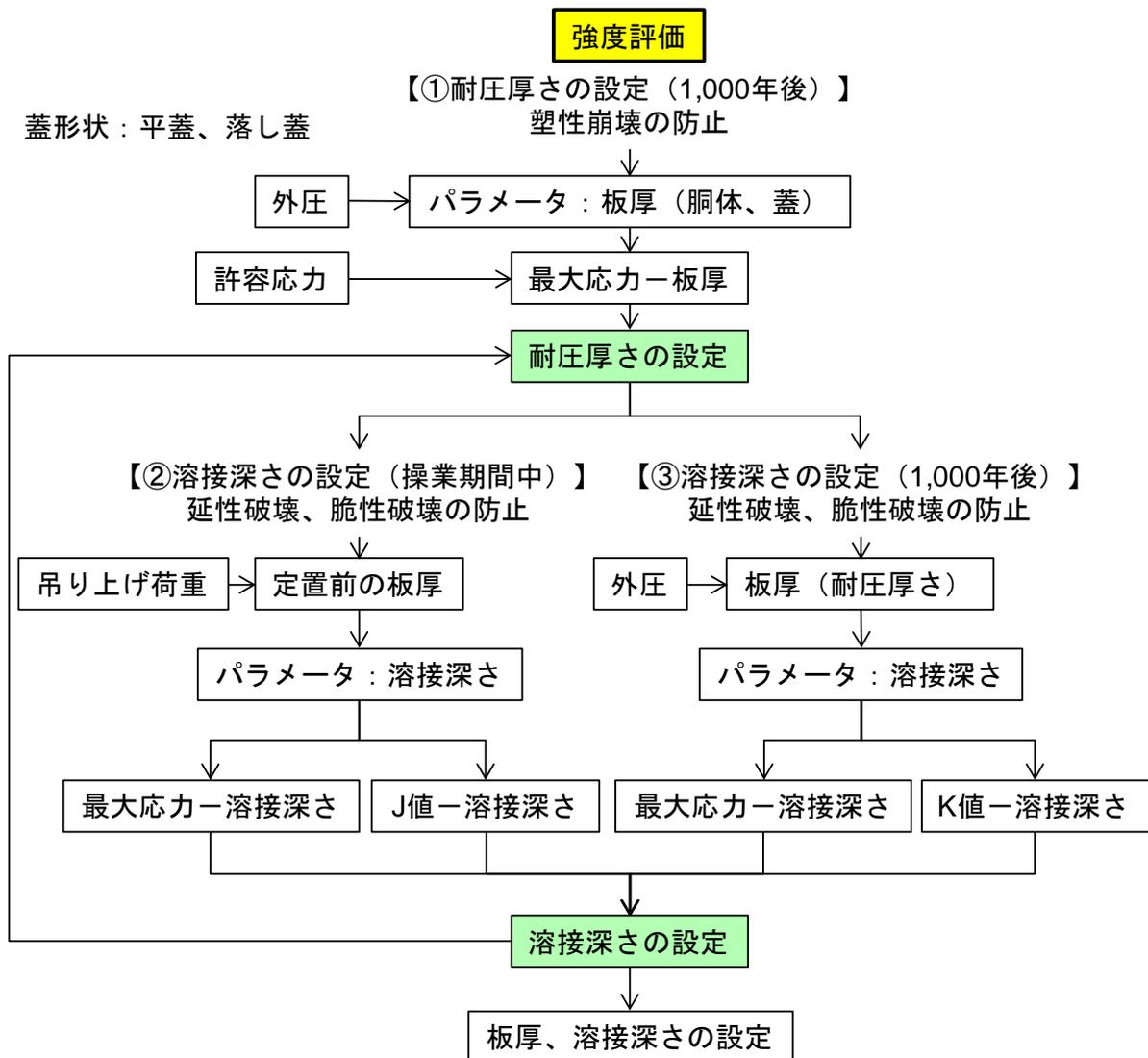


図 2.4.2-4 強度評価のフローチャート

## 2) 欠陥評価

オーバーパックに対する欠陥評価のフローチャートを図 2.4.2-5 に示す。欠陥評価では、最初に、破壊力学的手法により限界き裂寸法  $a_{crit}$  を算出する。また、オーバーパック溶接部の超音波探傷の結果から得られた欠陥形状を考慮して欠陥をモデル化し、モデル欠陥寸法  $a_{mod}$  を決定する。そして、限界き裂寸法よりもモデル化された欠陥寸法が小さければ ( $a_{crit} > a_{mod}$  ならば)、その欠陥がオーバーパックの健全性におよぼす影響は無視できるほど小さいと判断できる。

限界き裂寸法を算出するためには、破壊の駆動力である応力拡大係数 ( $K$  値) と破壊抵抗である破壊靱性値 ( $K_c$ ) を取得する必要がある。 $K$  値は、有限要素解析などにより算出することができる。解析では、溶接部にき裂状の欠陥をモデル化し、き裂先端の応力拡大係数 ( $K$  値) を求める。溶接欠陥としては、ボイドや介在物など様々な種類、形状のものが考えられるが、構造物にとって最も応力状態が厳しくなるき裂 (先端の曲率半径がゼロで鋭く尖ったもの) を解析の対象とする。 $K_c$  は材料試験により測定することができる。ただし、閉じ込め期間中には放射線照射および水素吸収により材料が脆化する可能性がある。材料が脆化すると破壊靱性値が低下するため、将来の脆化量を予測し、破壊靱性値に考慮しておく必要がある。また、脆化量の予測精度に対する誤差や地下環境での不確実性を考慮して、適切な裕度を設定して破壊靱性値を決定する。

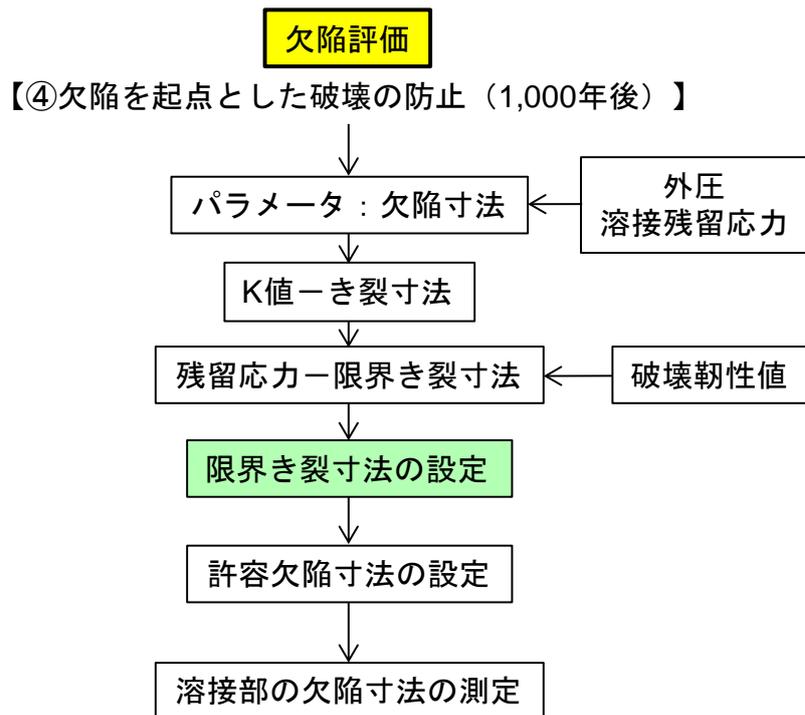


図 2.4.2-5 欠陥評価のフローチャート

### 2.4.3 構造評価に関する研究開発課題の整理

図 2.4.2-3 に示したオーバーパックの構造評価のフローチャートと強度評価 (図 2.4.2-4) および欠陥評価 (図 2.4.2-5) のフローチャートから、構造評価に関する研究開発課題を整理すると図 2.4.3-1 に示すようになる。

強度評価では、オーバーパックの応力集中部の最大応力  $\sigma_{max}$  が設計応力  $\sigma_D$  より小さいことを

確認する。 $\sigma_{max}$  は、想定される処分環境に対して有限要素解析などにより求めることができる。また、 $\sigma_D$  はオーバーパックスの候補材が決まれば、材料試験により取得した材料強度に裕度を考慮して設定する。

欠陥評価では、オーバーパックスの溶接部のモデル欠陥寸法  $a_{mod}$  が、限界き裂寸法  $a_{crit}$  よりも小さいことを確認する。溶接部の欠陥寸法  $a$  は、超音波探傷試験などの非破壊検査により測定する。超音波探傷試験については、これまで継続的な研究開発を続けており、板厚 190 mm 全層を対象とした探傷試験を実施し、欠陥の検出限界寸法に関する実験データを取得している。今後は、欠陥の寸法や位置の定量方法や測定誤差の向上について検討する必要がある。 $a_{mod}$  の設定には、溶接部におけるき裂先端の応力拡大係数と候補材料の破壊靱性値から、限界き裂寸法を求める必要がある。オーバーパックス埋設後の長期間では、材料が脆化する可能性があるため、その脆化量の予測方法を構築する必要がある。

以下に構造評価における研究開発課題を示す。

【研究開発課題 1】 オーバーパックスの破損防止

- ・ 想定される破損の防止方法の検討
- ・ 溶接部の限界き裂寸法の設定

【研究開発課題 2】 破壊靱性値の低下量の予測

- ・ 照射損傷メカニズムに基づく脆化量予測のための解析手法の構築
- ・ 照射試験による炭素鋼の脆化因子の調査
- ・ 損傷量の予測結果と材料試験の結果から破壊靱性値の低下量の予測

【研究開発課題 3】 超音波探傷法による溶接欠陥寸法および位置の定量化

- ・ 欠陥寸法の定量化方法の検討
- ・ 検査手順および測定条件の例示

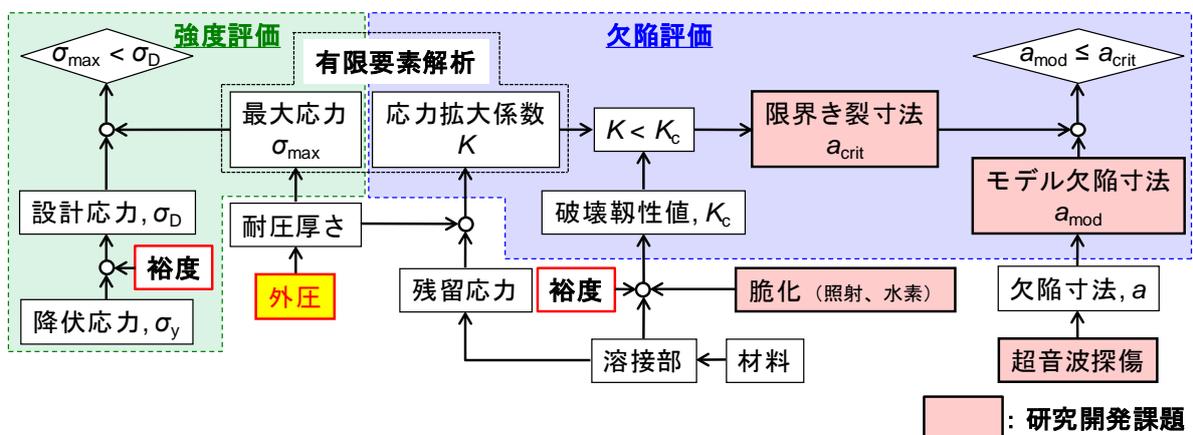


図 2.4.3-1 構造評価に関する研究開発課題の整理

## 2.5 まとめ

### 2.5.1 腐食評価

炭素鋼オーバーパットの腐食評価では、期待される寿命を達成するための腐食率の設定、およびその根拠を提示することが目的となる。そのためには使用環境下で局所的な腐食による破損が生じずに全面腐食挙動を示すこと、その際の腐食総量または腐食速度が把握できることの2つが重要である。金属材料の腐食は環境因子と材料因子の組み合わせで生じる。しかしながら、現状では実際の処分サイトが決まっていないことから、環境条件は Generic なものをリファレンスとする。一方、材料因子は、母材の成分、溶接材料の有無または成分、入熱を支配する溶接手法といった設計・製作工程である程度制御可能である。

腐食挙動の把握、腐食メカニズムの解明を通じて、オーバーパットの設計、製作方法の設定に反映させることを念頭に、研究課題を以下のように設定した。

#### 【研究開発課題 1】 オーバーパットの腐食の現象理解

- ・ 実験室規模の単純系での腐食試験
- ・ 地上／地下施設での複雑系での腐食試験

#### 【研究開発課題 2】 腐食メカニズムの解明

- ・ 金属組織の違いが腐食挙動におよぼす影響の調査
- ・ 緩衝材の施工品質が腐食挙動におよぼす影響の調査

#### 【研究開発課題 3】 腐食割れの発生防止

- ・ 溶接残留応力の改善のための熱処理条件の取得

### 2.5.2 構造評価

オーバーパットに想定される破損形態は、欠陥を起点としない破損、未溶接部を起点とした破損、溶接欠陥を起点とした破損の3つがあり、それぞれの破損形態に対する全ての破損モードを抽出した。通常時に想定される使用環境では、作業中の吊り上げ荷重、埋設後の外圧、溶接部の残留応力がオーバーパットの破損を引き起こす負荷となるため、これらの負荷により想定される破損モードの発生を防止するための構造評価フローを構築した。構造評価は、強度評価と欠陥評価で構成され、それぞれの評価では、破損を引き起こす負荷（駆動力）よりも破損に対する抵抗が大きいことを確認することで破損を防止することができる。ただし、埋設後の環境では、放射線照射および水素吸収による脆化が生じる可能性があるため、埋設後の材料強度（破壊靱性値）の低下量を把握しておく必要がある。また、溶接時に生じる可能性のあるボイドなどの欠陥については、超音波探傷法などによる非破壊検査で寸法を測定し、破損を引き起こさない寸法以下であることを確認することで、溶接欠陥を起点とした破損を防止することができることを示した。

構築した構造評価フローから研究開発課題を以下のように設定した。

**【研究開発課題 1】** オーバーパックの破損防止

- ・ 想定される破損の防止方法の検討
- ・ 溶接部の限界き裂寸法の設定

**【研究開発課題 2】** 破壊靱性値の低下量の予測

- ・ 照射損傷メカニズムに基づく脆化量予測のための解析手法の構築
- ・ 照射試験による炭素鋼の脆化因子の調査
- ・ 損傷量の予測結果と材料試験の結果から破壊靱性値の低下量の予測

**【研究開発課題 3】** 超音波探傷法による溶接欠陥寸法および位置の定量化

- ・ 欠陥寸法の定量化方法の検討
- ・ 検査手順および測定条件の例示

## 第 2 章 参考文献

- [1] 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の安全確保（2010 年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－、NUMO-TR-11-01 (2011).
- [2] 核燃料サイクル開発機構：地層処分研究開発第 2 次取りまとめにおける緩衝材間隙水化学の評価、JNC-TN8400-99-078 (1999).
- [3] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性地層処分研究開発第 2 次取りまとめ 分冊 2 地層処分の工学技術、JNC-TN1400 99-022 (1999).
- [4] 三菱重工業株式会社：オーバーパックの構造健全性に関する研究（核燃料サイクル開発機構研究委託内容報告書）、JNC TJ8400 99-050 (1999).
- [5] 核燃料サイクル開発機構：深部地下空洞および内部構造物の振動挙動に関する研究(2)、JNC TN8400 99-055 (1999).
- [6] 山本陽一、鈴木覚、佐藤伸、伊藤浩二：地震動が地層処分システムの人工バリアに及ぼす影響検討、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)、Vol.71、No.4、pp.I\_963-I\_973 (2015).
- [7] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 17 年度 地層処分技術調査等事業 遠隔操作技術高度化開発 報告書（1 / 3）(2006).
- [8] Asano, H., Sawa, S., and Aritomi, M., Long-term integrity of waste package final closure for HLW geological disposal, (II) Applicability of TIG Welding Method to Overpack Final Closure, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.42, No.6 (2005), pp.573-587.
- [9] Asano, H., Maeda, K., and Aritomi, M., Long-term integrity of waste package final closure for HLW geological disposal, (III) Applicability of Electron Beam Welding to Overpack Final Closure, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.43, No.2 (2006), pp.206-221.
- [10] Asano, H., and Ito T., Long-term integrity of waste package final closure for HLW geological disposal, (V) Applicability of MAG Welding Method to Overpack Final Closure, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.45, No.9 (2008), pp.899-909.
- [11] Asano, H., and Aritomi, M., Long-term integrity of waste package final closure for HLW geological disposal, (I) Points at issue concerning 1,000 Years containment capability of overpack, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.42, No.5 (2005), pp.470-479.
- [12] 日本機械学会：発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2012 年版）＜第 I 編 軽水炉規格＞、JSME S NC1-2012 (2012).
- [13] 日本原子力学会：日本原子力学会標準 原子力発電所の高経年化対策実施基準：2011（追補 2）、AESJ-SC-P005:2011 (2011).
- [14] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 1 分冊）－遠隔操作技術高度化開発－（2013).

- [15] 通商産業省資源エネルギー庁・公益事業部原子力発電安全管理課編：解説／原子力設備の技術基準（1994）.

## 第3章 現象理解の腐食試験

平成 25 年度からの基盤研究として実施すべき研究開発課題として、オーバーパックスの設計・製作・施工・搬送・定置、および長期挙動等の諸判断指標の提示に向けた長期健全性評価モデルの構築、モデルを裏付けるデータの拡充、論理的説明の付与が提案されている。本研究ではこれを受けてモデルの構築および理論的説明の付与に資するオーバーパックスの腐食挙動に係わる知見を、さらに実処分環境に即した試験系で取得するため、平成 25 年度に複雑系における溶接部耐食性評価試験の試験計画を立案した。そして模擬オーバーパックス溶接試験体の製作、原子力機構幌延深地層研究センター（URL）の地下 350m 調査坑道への試験孔の掘削、試験装置の構築に必要な知見を取得するための予備試験を実施した。平成 26 年度より、実地下環境である幌延 URL において工学規模の試験体を用いた試験を開始した。

平成 27 年度は、幌延 URL での工学規模の試験を継続して実施するとともに、地上施設において、幌延 URL での工学規模試験と同一スケールの工学規模試験装置を製作し、試験を開始した。また、幌延 URL での工学規模試験ではガラス固化体からの発熱状況を再現するためにヒータ設備を新たに設置し、模擬オーバーパックス表面近傍での温度を約 80℃として試験を継続している。また同様に、地上施設の工学規模試験でも加熱条件での試験を可能とするためにヒータ設備の製作と設置を行った。これらの工学規模試験を補完するため、小規模要素試験として工学規模試験で使用する模擬オーバーパックス溶接試験体と同様の試験体を用いた経時変化確認と不均質条件試験の 2 つの試験を実施した。また、測定方法や基準電極の耐久性を調査する腐食計測技術検証試験等も合わせて実施した。これらにより長期健全性評価に資するための実地下環境とオーバーパックス溶接部を考慮した腐食に係わる知見の整備を進めた。

平成 28 年度は、幌延 URL および地上施設の工学規模試験を継続するとともに、経時変化試験の試験体を取り出し、経時的な変化を調べた。また、不均質条件試験装置を解体し、緩衝材ブロックに設置した施工時の隙間の有無による腐食挙動の差や溶接部と母材の腐食挙動の差を調べた。今回の不均質条件試験装置の解体手順を検証し、平成 29 年度に実施した、幌延 URL および地上施設の工学規模試験の解体計画に反映させた。

平成 29 年度は、幌延 URL および地上施設の工学規模試験装置を解体し、腐食量を評価するとともに、経時変化試験や不均質条件試験の結果と合わせ、溶接部付模擬オーバーパックスの腐食挙動を評価した。

### 3.1 試験目的および概要

#### 3.1.1 試験の目的

平成 25 年度からの基盤研究として抽出された研究開発課題にオーバーパックスの設計・製作・施工・搬送・定置、および長期挙動等の諸判断指標の提示に向けた長期健全性評価モデルの構築、モデルを裏付けるデータの拡充、論理的説明の付与が提案されている。本試験はこの提案を受けて腐食評価モデルの構築および理論的説明の付与に資するオーバーパックスの腐食挙動、特にオーバーパックス溶接部の腐食挙動に係わる知見を、より実処分環境に即した試験系で取得することを

目的とした。

このため平成 25 年度に複雑系における溶接部耐食性評価試験の試験計画を立案し、その試験計画に従い模擬オーバーパック溶接試験体の製作、幌延 URL の地下 350m の試験坑道 5 の試験孔 1 に試験装置を構築して試験データを蓄積した。この幌延 URL の地下 350m 調査坑道での工学規模試験(以下、「幌延 URL 工学規模試験」または「地下工学規模試験」という)は、現地の地質、地下水条件だけではなく試験坑道の施工や試験坑道の維持活動、近傍での他の試験の影響等も受ける複雑な試験環境となっていた。

幌延 URL 工学規模試験は、平成 26 年度に試験体の現地への搬入と設置および計測を開始し、平成 27 年度は、平成 26 年度の試験を通じて得られたデータおよび知見を基に、一部試験装置の改良を施した。また、ガラス固化体からの発熱を想定したオーバーパックの表面温度の 80℃の状態を再現するために、模擬オーバーパック内部へヒータ設備を設置した。平成 28 年度には「幌延 URL 工学規模試験」または「地下工学規模試験」の引き続き実施した。また不均質条件試験の解体・分析および、経時変化試験の解体・分析を実施した。

この幌延 URL における工学規模試験の試験系は、前記のような複雑な試験環境であった。このため試験系内の状態を明らかにしようとする自体、慎重に実施する必要がある。このような状況を考慮すると幌延 URL における工学規模試験から得られるデータのみでは腐食挙動の評価が困難となることが想定されたため、幌延 URL での工学規模試験と同様の試験系を地上の試験施設内で再現し、地上の制御された試験環境での試験を実施した(「地上工学規模試験」または「地上施設工学規模試験」という)。さらにこれらの試験を補完するために、工学規模試験よりも小型のスケールでの小規模要素試験(以下「小規模要素試験」という)や地上の試験室内で実施する比較的小さな規模での試験(以後「地上ラボ試験」という)を併せて実施した。「小規模要素試験」は「経時変化確認試験」と「不均質条件試験」の 2 種類の試験系での試験であり、「地上ラボ試験」は計測装置の試験環境の特性把握や、幌延 URL での工学規模試験と地上施設工学規模試験、小規模要素試験で得られたデータより、それら試験系内での状況を想定するための試験等を実施している。また、これら一連の試験と並行して他の産業界および in-situ での腐食速度等が計測可能な技術の調査を行い、3 大学で検討されている腐食計測機構について選定し、技術的内容について検討した。

### 3.1.2 試験の位置づけ

#### (1) 試験の基本方針

本研究は腐食評価モデルの構築および理論的説明の付与に資するオーバーパックの腐食挙動、特にオーバーパック溶接部の腐食挙動に係わる知見を、より実処分環境に即した試験系で取得することを目的とした。

この目的を効率的に実施するために以下の基本方針を設定した。

- 幌延 URL での工学規模試験と地上施設工学規模試験の双方の有機的な連携
  - ◇ 幌延 URL での工学規模試験と地上施設工学規模試験の双方の特性や試験の位置付け、役割等を明確化し、効率的に試験を実施する。
  - ◇ 幌延 URL での工学規模試験と同一規模の地上施設工学規模試験実施

- 地下試験結果の検証および補完
  - 現象理解の促進：5年間の地下試験挙動を地上で再現
  - 実規模地上試験は5年間に複数シリーズ実施し、多様な試験条件へ対応
- 試験計画の精度の向上：
- ◇ 目的に応じた各種スケールの小規模要素試験、地上ラボ試験（※1）及び工学規模試験（地上）（※2）の実施
    - ※1 地上ラボ試験：共通試験体、腐食環境設定試験、腐食速度計測システム検証試験、計測装置の環境条件に対する特性把握、地下水分析等
    - ※2 工学規模試験（地上）：地下試験設備と同一規模の地上試験の実施
      - 基礎現象の確認
      - 試験条件の設定
      - 計測装置等の有効性の確認および改良
  - ◇ 各年度備試験結果の次年度以降の試験計画への反映
    - 基礎現象の確認
    - 試験条件の確認
  - ◇ 多様な条件での小規模要素試験、地上ラボ試験を実施、試験結果の次年度計画への反映
- 一般産業や、研究機関等での先端技術の積極的な導入

## (2) 各試験の位置づけ

これまでに取得されたオーバーパック溶接部の耐食性評価試験は、溶接試験体から採取した小型の試験片を用いて実施されている。検討項目は第2次取りまとめにて示されたオーバーパック母材の腐食シナリオを基本としたものである。また着目した腐食現象をより明瞭に把握するために、試験は主に溶液環境で実施され、緩衝材が共存する場合は、緩衝材を溶液で飽和させた後に試験が行われている。

このように、実際のオーバーパックや想定される地下処分環境と比較して小型、かつ均一・単純な試験系で取得された知見に基づく評価がされているのが現実である。

以上のように現状では実際のオーバーパックや想定される地下処分環境と比較して小型、かつ均一・単純な試験系で取得された知見に基づく評価がなされおり、溶接部を含むオーバーパックの品質評価の信頼性の向上のためには、より実環境に近い系での試験が必要である。

このような状況を鑑み、本研究では溶接部を含むオーバーパックの品質評価の信頼性向上のために、より実環境に近い系での試験が必要と考えた。ただし、実際の環境を模擬した条件下での実験系はその試験系設置の技術的な困難さと共に、複数の現象が複雑に絡み合っているために現象の理解も容易ではない。そこで地下環境下での実験系に加え、地下環境下で発現する個々の現象の理解を促進するために、地上において地下試験条件を模擬した地上施設内での工学規模の試験系の実験と小規模要素試験及び地上ラボ試験を並行して実施することとした。

試験条件の選定では以下のような項目を想定した。

- 従前から実施されている単純系での腐食試験結果の地下環境下での妥当性の確認

- 試験片の寸法効果（現象の局在化、etc.）
- 管理された複雑系での腐食挙動の把握
- 地下試験施設で使用する試験系の挙動理解の補完

試験系の設定に当たっては以下に着目し試験条件の設定を行った。

- 試験系の寸法：
  - ◇ 地上ラボ試験； 数 cm オーダーの試験片を対象
  - ◇ 小規模要素試験； 数 10cm オーダーの小型試験体
  - ◇ 工学規模試験； 実スケール（実オーバーパックの長さを考慮）等
- 試験系の温度条件：
  - ◇ 地下温度
  - ◇ ガラス固化体の発熱を想定した発熱温度(オーバーパック表面 80°C)
- 地下水環境：
  - ◇ 実地下水
  - ◇ 地上試験では実地下水の組成を考慮した模擬地下水
- 応力条件：
  - ◇ 地圧
  - ◇ 水圧
  - ◇ 緩衝材膨潤圧等
  - ◇ 応力発生時間等の考慮
- 幌延 URL の構成要素：
  - ◇ 周辺岩盤条件
  - ◇ 支保工（コンクリート）
  - ◇ 緩衝材（ベントナイト+珪砂）影響等

図 3.1.2-1 に本研究での溶接部を含めたオーバーパックの試験体の寸法と試験条件の複雑化の関係を示す。図 3.1.2-1 の左上の「単純系での腐食試験」に対して実際の処分ではオーバーパック寸法はメートルオーダーであり、より大きな寸法でかつ、より複雑な環境条件となっている（図 3.1.2-1 右下の部分）。たとえば、異なる条件の例は試験に用いる試験片の寸法と実際の人工バリアの寸法の違い（図 3.1.2-1 に赤で示した部分）や熱-水-応力-化学などの環境影響の違い（図 3.1.2-1 に青で示した部分）等である。

腐食試験は地下の複雑な環境で実施することが理想的ではあるが、この複雑な処分環境を全て再現して実験することは現実には困難である。そのため、本研究では「単純系での腐食試験」と実環境での試験の条件の違いをつなぐために試験片のスケールが数 10 cm オーダーの「小規模要素試験」（図 3.1.2-1 中央左上の部分）と数 10 cm 以上の「工学規模試験」（図 3.1.2-1 中央右の部分）の 2 つの試験系を定義した。

「小規模要素試験」は、試験の目的により数 cm の試験片から数 10 cm オーダーの試験片を用い、単純な環境条件や複数の環境条件をパラメータとして腐食挙動に関する基礎的なデータの収集を行う。例えば、実際のオーバーパックの長さの 1/3 程度の長さの模擬オーバーパック等を用

いて想定する環境下での溶接部の腐食挙動データを取得する試験等である。

「工学規模試験」は、数 10 cm 以上の試験片を対象とする。本研究では実際のオーバーパックと同様の長さの試験体を用いて実験を行った。試験環境は幌延深地層研究センターの地下深度 350 m の試験坑道 5 を利用して地下環境下での腐食挙動試験を実施した。ただし、実際の地下環境での試験では、環境条件の制御が困難なことや試験途中での状況の確認が困難なことから、地下環境と同様の試験装置を地上で製作し、両者の実験を並行して行った。この地下と地上の「工学規模試験」を並行して行うことにより地下環境の複雑条件と環境制御の可能な地上試験の双方の比較と試験条件の補完を行った。

これらの系列以外に「地上ラボ試験」を定義した(図 3.1.2-1 左下の部分)。「地上ラボ試験」は腐食速度計測装置の精度の確認や、腐食挙動試験条件の設定の確認等に用い、「小規模要素試験」や「工学規模試験」の試験系全体を技術的にサポートする位置づけとした。

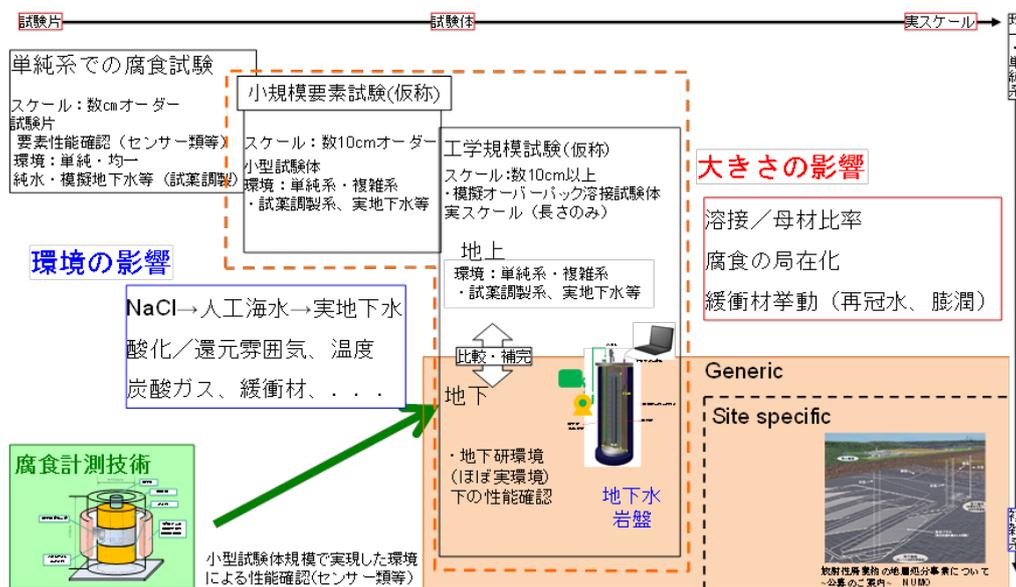


図 3.1.2-1 地上試験、地下試験、試験条件等を考慮した各試験の位置付け

### (3) 試験条件

幌延 URL と地上施設の工学規模試験、小規模要素試験、地上ラボ試験のそれぞれの試験条件を設定するために、試験条件を「時間軸」に対して「環境系」と「試験系」に分類し、それぞれの地下環境下の状態を想定した。次にそれらの状態に対して各試験系でどのような条件を試験系に反映させるかの分析、検討を行った。

「環境系」と「試験系」が試験条件へ与える影響を検討するために図 3.1.2-2 に示すように環境系と試験系の因子分類を行った。これらの因子について「環境系」の因子とそれらが試験条件に与える影響及び工学規模試験、小規模要素試験、地上ラボ試験のそれぞれに反映する試験条件として表 3.1.2-1 にまとめた。また、表 3.1.2-2 に「試験系」の因子が試験条件に与える影響と各試験に反映する試験条件をまとめた。

「環境系」は T-H-M-C(熱・水・応力・化学)の因子に加えてガラス固化体からの放射線影響 (R)

と人工バリア内部に発生するとガス影響（G）について分析、検討を行った。

「試験系」は“人工バリア”、“試験装置”、“支保工”に分類した。人工バリアのオーバーパックについては材質、溶接方法、寸法に分類し、緩衝材については材質・密度、施工方法、寸法に分類した。試験装置は試験容器とセンサーに分類した。また、支保工には吹付コンクリート、鋼製支保工、ロックボルト、防水シート等、グラウト、プラグに周辺地山の最も人工バリア側の EDZ（掘削影響領域）について検討を行った。

センサーについてはその計測目的ごとに「腐食センサー」と「環境センサー」の2つの分類を定義した。「腐食センサー」はセンサー設置位置で腐食速度等を直接計測することを目的としたセンサーとし、「環境センサー」は腐食状態に影響を与える環境状態の測定を目的としたセンサーとした。例えば後述する3電極センサーは、設置した位置で腐食速度を直接測定することを目的としているため「腐食センサー」とし、温度や化学的環境の pH、Eh 及び緩衝材ブロック中等の地下水の浸潤状態を測定する含水比センサー等は腐食挙動に影響を与える環境状態を測定することを目的としているため「環境センサー」に分類した。

ただし、ACM センサーのように、それを設置した地点の浸潤状況を測定する目的の場合には「環境センサー」となるが、その地点での腐食速度をとらえることを目的とした場合には「腐食センサー」となる。

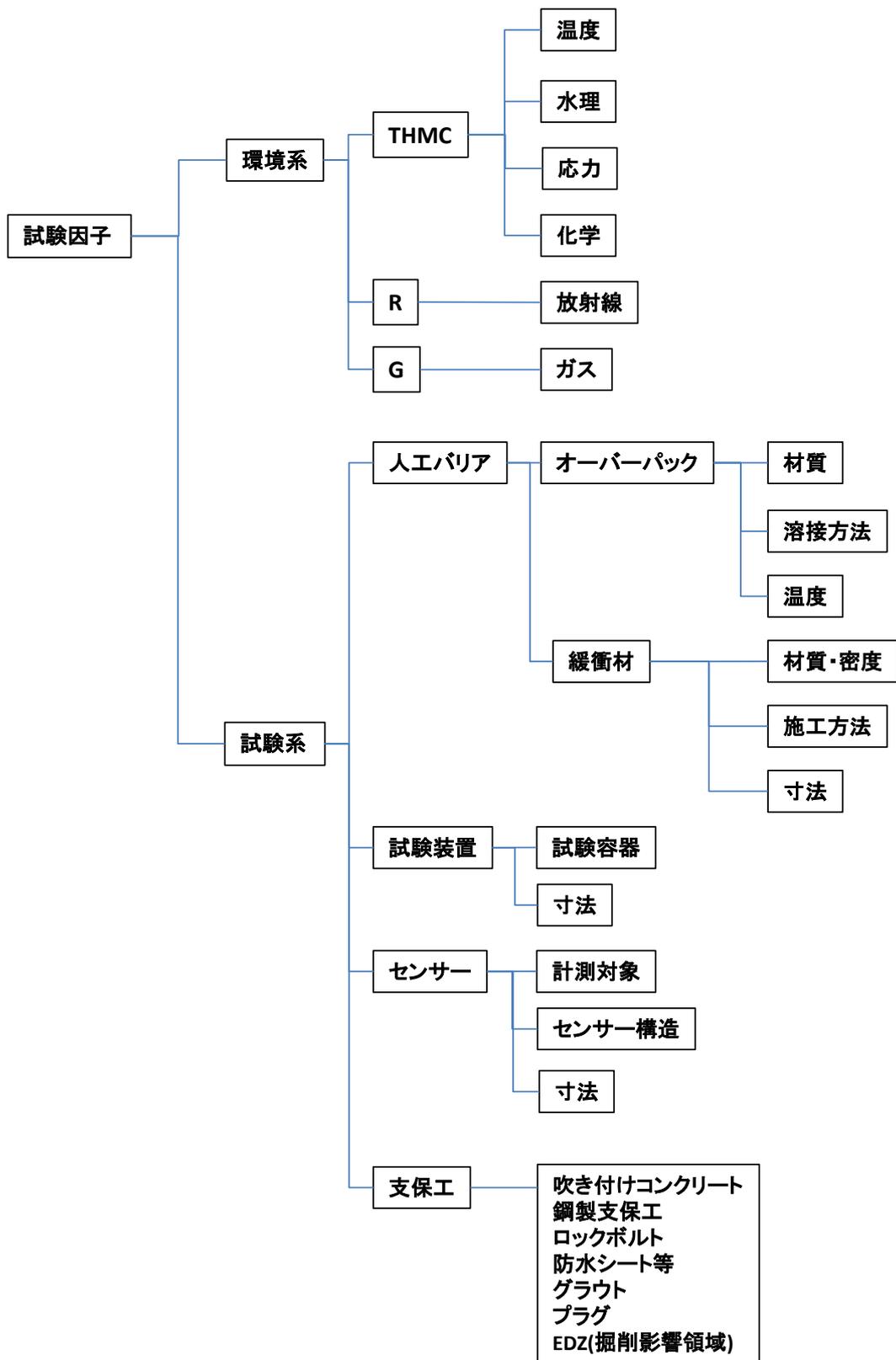


図 3.1.2-2 試験条件検討；環境系／試験系の因子

表 3.1.2-1 試験条件検討；環境系の因子と試験条件への反映 (1/2)

環境系／試験系の因子		想定される地層処分環境 / 人工バリエータブル		環境系／試験系の腐食挙動への影響検討 (試験条件への反映)	工学規模試験		小規模要素試験		地上ラポ試験	
		—	腐食挙動へ影響する内容		地下試験(模擬)	地上試験(大洗)	経時変化確認試験(短尺OP)	パラメータ化	3電極式腐食センサ確認試験	
時間軸		評価期間: 0 ~ 1,000年		<ul style="list-style-type: none"> <li>・エネ庁設置時期に対応して最大4年間実施可能。</li> <li>・ある程度の環境を設定した腐食試験系に於いて、数年間の試験で定常状態に移行した後は、その挙動に大きな変化は生じず、長期の腐食挙動の傾向把握が十分に可能(東北大・遼遠教授コメント)。</li> <li>⇒ 工学規模試験では、試験期間を有効に用いるために幌延での試験は開始済。今後、ヒータ設置予定。大洗はヒータ準備後、できるだけ速やかに試験開始予定。</li> <li>・小規模要素試験で時間をパラメータとする場合には、時間経過中の腐食状況評価を行うために試験体は2体以上必要であるが、例えば1体は半年と1年の試験で再利用する等試験方法を工夫する。</li> <li>・地上ラポ試験は試験対象により、適宜、試験期間を設定する。</li> </ul>	約3年	最大2年半	半年～最大3年	◎(半年後、1年後、2年後の3点)	3ヶ月～最大2年	
環境系	THMC	温度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・廃棄体発熱温度</li> <li>・地温</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・約100℃から60℃へ漸減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・JNC HLW第2次取りまとめ分冊2(JNC TN1400 99-022)、JNC HLWH17年度とりまとめ分冊2(JNC-TN1400 2005-015)等で標準的に参照する温度を80℃としている。</li> <li>⇒ 加熱を伴う試験の温度を80℃に統一する。</li> <li>・セナサ性能確認には非加熱状態の幌延深地層研究センター・350m深度・坑道5の試験孔内温度の近似値を設定することで、試験孔内の初期腐食挙動との比較が可能。</li> <li>⇒ 既存調査データ15℃を参考として設定する。</li> </ul>	20℃未満(制御なし)→80℃	室温(季節変化)→80℃	地下試験条件相当	×(80℃)	15℃に制御
		水理	<ul style="list-style-type: none"> <li>・岩盤を流れる地下水流速</li> <li>・緩衝材内流速</li> </ul>	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地下水の動きは主に動水勾配と岩盤自体の透水性に支配される。地下深部での動水勾配は緩やかであると推定される。例えばJNC HLW第2次取りまとめ分冊1(JNC TN1400 99-021)では深度500～1500mの領域では動水勾配の分布は大部分が0.01～0.04である。また透水係数は地下深部では<math>10^{-12} \sim 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}</math>オーダーの幅を有している。</li> <li>⇒ 緩衝材周囲に流速を与えない。</li> <li>・JNC HLW第2次取りまとめ分冊2(JNC TN1400 99-022)より、想定している緩衝材仕様では海水影響や温度影響等を考慮しても<math>10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}</math>以下の透水係数となると想定されている。このため緩衝材内部は拡散場が保たれると想定される。⇒ 高密度の緩衝材ブロックを用いることにより、緩衝材内部は拡散場とする。ブロック間のすき間はパラメータとなりうる。</li> </ul>	同左、必要に応じて別途、給水	給水ノズルから給水(圧縮ベントナイトの側面、上面)	給水ノズルから給水	○(均一/不均一給水)	給水ノズルから給水(圧縮ベントナイトの上面)
		応力	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材膨潤圧</li> <li>・オーバーバック腐食膨脹圧</li> <li>・静水圧</li> <li>・岩盤クリーブ等</li> </ul>	・外圧	<ul style="list-style-type: none"> <li>・JNC HLW第2次取りまとめ分冊2(JNC TN1400 99-022)等では、長期的には緩衝材膨潤圧、オーバーバック腐食膨脹圧、静水圧、岩盤クリーブ等の荷重が発生し、最大でオーバーバックに硬岩岩盤で10.7MPa、軟岩系岩盤で6.8MPaの外圧が発生すると想定している。⇒ 人工バリエータブルの操作期間内では地下水は回復せず、また、その間にはオーバーバック腐食量が小さいため、外力として無視できる。緩衝材からの膨潤圧も浸潤した部分のみからの反力であり大きくない。試験では緩衝材ブロックからの初期の膨潤圧のみを想定する。</li> </ul>	ベントナイト膨潤圧	同左	ベントナイト膨潤圧	×(ベントナイト膨潤圧は拘束)	なし(ベントナイト膨潤圧はN <sub>2</sub> ガス密閉空間に開放)
		化学	<ul style="list-style-type: none"> <li>・天水由来の淡水又は海水由来の地下水</li> <li>・緩衝材の透過水組成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・酸化性雰囲気→還元性雰囲気</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・JNC HLW第2次取りまとめ分冊2(JNC TN1400 99-022)等では、長期的には廃棄物周囲は還元性になると想定されている。また、操作期間は1パネルの操作期間は100ヶ月を想定している。この操作期間は換気、排水が行われるため、人工バリエータブル近傍の雰囲気は操作活動の影響を受けることが想定される。</li> <li>・工学規模試験・地下試験・嫌気性地下水移流・飽和と炭素鋼腐食により実際の処分環境と同様の雰囲気の変移が生じる。</li> <li>・小規模要素試験・地上ラポ試験等実装室規模試験: OP試験体・緩衝材に供給する模擬地下水の還元性維持により、工学規模試験・地下試験と同様、酸化環境から還元環境への遷移と還元環境維持を行う。</li> <li>・工学規模試験・地上試験・地下試験と同様の還元性維持が望ましいものの、実際には困難と思われるが、溶存酸素濃度極力下げのために窒素によるパブリングも検討する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・同左(上部は酸化環境影響?)</li> <li>・現地での雰囲気の確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・酸化雰囲気(特に脱酸素)</li> <li>・大洗での現地レベルでの雰囲気再現(幌延が完全な還元性でない想定した場合)</li> </ul>	窒素によるパブリングを検討	×(還元性)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大気中で組立・密閉後に脱酸素を給水、気相脱気(H<sub>2</sub>)</li> <li>・GB内(Eh&lt;-200mV)環境でのACMセンサーの検証およびクープンによる腐食試験</li> </ul>
R	放射線	<ul style="list-style-type: none"> <li>・廃棄体γ線(2mGy/hr)</li> <li>・中性子線(0.03mGy/hr)</li> </ul>	・照射酸化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・JNC HLW第2次取りまとめ分冊2(JNC TN1400 99-022)にて、酸化が最も顕著となるOP内表面を対象にγ・n線による1000年間の照射影響を評価した結果、dpa(原子弾き出し数)を保守的に見積もっても、延性脆性遷移温度(DBTT)はOPの使用温度数十度から数百度に対して十分低く、OPの酸化は機能発揮上無視できることが予測されている。酸化に伴う割れが生じなければ腐食形態が変化しないことから、ここでは考慮しないこととする。(RWMC般案件H25-H26年度短分システム工学→オーバーバック)にて第2次取りまとめの評価方法調査(軽水炉向け評価の流用による課題提起)と最新コード・核データライブラリによる再評価が実施されている。</li> </ul>	考慮せず	同左	同左	×	考慮せず	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・水の放射線分解による影響</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・放射線分解生成物(酸化性化学種)の生成で炭素鋼腐食は加速される前提として、OP厚さが酸化性化学種の腐食影響を受けにくいよう、設計段階で保守的に設定される(第2次取りまとめ分冊2)。ここで、酸化性化学種と溶液環境由来の腐食影響を分離できないことから、ここでは水の放射線分解は考慮しないこととする。</li> </ul>	考慮せず	同左	同左	×	考慮せず		
G	ガス	<ul style="list-style-type: none"> <li>・発生ガス組成: 水素ガス</li> </ul>	・ガス蓄圧	<ul style="list-style-type: none"> <li>・炭素鋼の還元性環境での長期試験で、腐食減量評価で0.1～0.4μm/年、水素ガス濃度評価で約0.05μm/年(H<sub>2</sub>ガス換算で約0.2L/m<sup>2</sup>/年)の実績がある。(Ref: 還元性環境での炭素鋼腐食に起因するガス発生量評価(RWMC-TRJ-03001))</li> <li>・発生水素ガス移行解析で、ほぼ全量が閉鎖状態に移動する(蓄積圧が0)とされており、腐食挙動評価において考慮不要と考える。(Ref: 地層処分におけるガスの拡散・移行に関する検討 JNC TN8400 99-045)</li> </ul>	考慮せず	同左	同左	×	考慮せず	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・発生ガス圧力</li> </ul>	・外圧	<ul style="list-style-type: none"> <li>・発生した高圧の水素ガス圧(140.630atm)によるカソード反応抑制の可能性に係る計算値の報告例がある(腐食メカニズムに基づく炭素鋼オーバーバックの腐食モデル開発(I) JNC-TN8410-93-299:1993)</li> <li>・ガス圧が上がると腐食が抑制される傾向となることから、保守的な条件設定のためにも、ここでは考慮しないこととする。</li> </ul>	考慮せず	同左	同左	×	考慮せず	

表 3.1.2-2 試験条件検討；環境系の因子と試験条件への反映 (2/2)

環境系/試験系の因子		想定される地層処分環境 / 人工バリエーション		環境系/試験系の腐食挙動への影響検討 (試験条件への反映)	工学規模試験		小規模要素試験		地上ラブリ試験	
		—	腐食挙動へ影響する内容		地下試験(模擬)	地上試験(大洗)	経時変化確認試験(短尺OP)	パラメータ化	3電極式腐食センサ複合試験	
人工バリエーション	オーバーバック	材質	炭素鋼、銅、チタン	・母材材質	・母材材質はHLW第2次取りまとめ等にあるとおり、単一の材料で考慮すべき各種設計要件を満足する可能性が高く、構造物や放射線受け材として十分な使用実績も有している炭素鋼とする。特に腐食評価実績との比較評価が期待できるSFVC1の鍛造材を採用する。 ・模擬深地層研究計画 地下研究施設整備(第二期)等事業 要求水準書(H22年度・JAEA版)のOP腐食試験のOP試験体母材SFVC1を参考に設定。	SFVC1相当鍛造材	同左	同左	×(約400mmの短尺)	STPT370(高温配管用炭素鋼鋼管)母材
		溶接方法	・TIG、MAG等	・溶接部金属組成	・溶接部金属組成は、地層処分時の適用が検討されて腐食評価実績もあるSFVC1相当材に対するTIG溶接(溶材:TGS-50)を選定し、溶接条件も統一することで既存データとの比較評価が期待できる。 ・溶接方法は複数候補あるものの、ここではまず既存のTIG溶接評価結果をReferenceとするためにTIG溶接を選定する。	SFVC1相当鍛造材母材/溶接部(φ100×1200mmL、縦シーム2本) / TIG溶接	同左	400mmを除き同左	×(溶接方法:TIG、溶材:TGS-50、溶接条件統一)	—
		寸法	・厚さ190mm	・母材寸法	・長尺方向は実機OP寸法相当とし、径はJAEA版のOP腐食試験との比較評価を主目的として同一のφ100mmとする(要求水準書を参照)。 ・小規模要素試験は、約300mm長さの短尺試験体を採用し、長尺方向の分布評価を犠牲にする代わりに試験体数・評価試験数を増やす方針とする。 ・母材面は実機では機械加工ママのためこれを基本とするが、ラボスケール又はJAEA模擬OP腐食試験の#600研面との比較のためパラメータ化を検討する。 ・腐食挙動の不均質性が再現できる寸法を考慮する。(※腐食進展の局在性評価を100×100mmの表面でモデル実験した例(T.Fukuda and M. Akashi: A Gumbel Distribution Model for Assessing~, R.N.Parkins: Eds. NACE International(1994))があり、400mmの短尺でも不均質性評価は十分可能となる。	母材/溶接部(φ100×1200mmL、縦シーム2本)、溶接・機械加工後研削等実施しない	母材/溶接部(φ100×1200mmL、縦シーム2本)、溶接・機械加工後#600研削実施	母材/溶接部(φ100×400mmL、縦シーム2本)、溶接・機械加工後研削等実施しない	○(表面加工状態:機械加工後研削有無)	—
	緩衝材	材質・密度	・ベントナイト	・(クニゲルVI相当)70%+珪砂30%	・JNC HLW第2次取りまとめ分#2(JNC TN1400 99-022)等ではクニゲルVI相当のベントナイトと珪砂の混合物をリファレンス材料としている。⇒同様の材料仕様を試験条件とする。	同左	同左	同左	◎(圧縮ベントナイトブロックに設けたスリット種類の影響・スリットなしとの比較)	圧縮ベントナイトブロック、ただし、下部側は砕いた圧縮ベントナイト
		施工方法	・ブロック、原位置でん、ベレット、吹付等	・緩衝材とのOPの接触状態 ・緩衝材のすき間(緩衝材間)	・JNC HLW第2次取りまとめ分#2(JNC TN1400 99-022)等では乾燥密度1.6Mg/m <sup>3</sup> 以上をリファレンスとしている。また、RWMC 遠隔高度化研究等では実物規模緩衝材ブロック製作実績として密度1.6Mg/m <sup>3</sup> 以上の製作実績がある。⇒同様の乾燥密度を試験条件とする。	・1.6Mg/m <sup>3</sup> ~	同左	同左	・1.6Mg/m <sup>3</sup> ~	・1.0Mg/m <sup>3</sup> ~
		寸法	・厚さ700mm	—	・JNC HLW第2次取りまとめ分#2(JNC TN1400 99-022)、RWMC 遠隔高度化研究等々ではブロック、原位置吹付、吹付け工法、CIPによる一体型等の製作検討が行われている。⇒実物規模緩衝材ブロック製作実績を考慮し、ブロック型の緩衝材を用いる。ブロックによりOPと緩衝材、緩衝材と周辺岩盤のすき間を考慮する。また、緩衝材の接触面を考慮する。 ・JNC HLW第2次取りまとめ分#2(JNC TN1400 99-022)等ではリファレンスの緩衝材厚さは700mmを想定している。⇒試験規模に合わせた緩衝材厚さとする。	厚さ100mm	同左	同左	同左	100mm以下
	試験装置	試験容器	—	—	・緩衝材飽和・膨潤を考慮した体積拘束を前提とする。工学規模試験・地下試験では地下坑道内試験孔に上部固定蓋を使用し試験体と緩衝材ブロックを拘束する。地上試験・小規模要素試験・ラボ試験では水平方向と試験体軸方向の拘束のため、一定の強度を持つ材料製の容器と押さえ蓋を使用する。 ・OP試験体と緩衝材ブロック・その支持材料(ケイ砂等)を収納可能な設計寸法を設定する。	周辺岩盤・押さえ蓋	試験容器・押さえ蓋	試験容器・押さえ蓋	×(拘束条件統一)	円筒形試験容器・押さえ蓋(密閉)
		センサー	—	—	・試験容器、センサー設置による場の試験系の乱れ等(容器・センサー材質、センサーケーブルによる水連など)	オーバーバックと同一長さ	オーバーバックと同一長さ	短尺	×(400mmで統一)	数cm
		計測対象	—	—	・3電極式腐食センサ:連続・オンラインモニタリング実施目的で選定 ・熱電対:腐食センサ位置の温度測定目的で設置 ・参照電極:試験環境に対応した試験体の電位連続・オンラインモニタリングのために設置 ・3電極式センサ:緩衝材・OP試験体の接触面近傍配置のため、OP試験体埋込型と緩衝材埋込型小型センサの2種類を選定 ・熱電対:接点設置のため極細径、かつ強度担保のためモールド保護ケース保護構造を採用する。 ・参照電極:環境の水分量の影響を受けずに連続測定するため、地中配管電位測定等で実績のある参照電極を採用する。	★3電極式腐食センサ ★ACMセンサ ・熱電対 ・照合電極	★3電極式腐食センサ ★ACMセンサ ・熱電対 ・照合電極	使用センサ類については目的に応じて検討す ★3電極式腐食センサ ★ACMセンサ ・熱電対	○(ACMセンサのみを基本とし、3電極式腐食センサとの併用条件も追加)	★3電極式腐食センサ ・熱電対
	支保工	吹付コンクリート	・コンクリート材料	・地下水の化学組成	・措置き定置方式では、処分坑道周辺に支保工が設置される。このためオーバーバックへ接触する地下水は支保工影響を受けている	考慮せず	同左	同左	同左	同左
鋼製支保工		・鋼製材料	・地下水の化学組成	・措置き定置方式では、人工バリエーションは緩衝材に設置される。その場合にはオーバーバックへ接触する地下水は、措置き定置方式に比べて支保工の影響は低いと想定される。支保工が設置される場合には、その使用部材材質と使用量を考慮してその影響度合いを考慮する必要がある。 ⇒措置き定置方式を想定し、支保工は考慮しない。						
ロックボルト		・鋼製材料	・地下水の化学組成	—						
防水シート等		・石油由来材料	・地下水の化学組成	—						
グラウト		・コンクリート材料、粘土系材料等	・地下水の化学組成	—						
プラグ		・コンクリート材/金属材料	・地下水の化学組成	—						
EDZ(掘削影響領域)	・ニアフィールドの流速	・地下水の化学組成	—	—	—	—	—	—	—	
各試験で得られる成果					実処分環境に近い地下での溶接部腐食挙動、センサー適用性	制御環境での溶接部腐食挙動、センサー適用性	制御環境での試験期間パラメータとした溶接部腐食挙動	・評価期間(〜2年の腐食速度の経時変化) ・スリット有無とスリット形状の影響 ・給水の均一/不均一性	膨潤ベントナイト中の3電極式腐食センサによる腐食速度の連続計測	
模擬試験の補完事項					—	環境条件制御 模擬取り出し方法、取り出し後評価方法	環境条件制御 試験中間時の溶接部腐食挙動(実測)	—	環境条件制御 腐食の連続モニタリングの成否性、および定量性	

#### (4) 幌延 URL 工学規模試験の環境

幌延 URL 工学規模試験は JAEA の幌延試験坑道内に試験体を埋設し、実環境下での模擬オーバーパックの腐食状況を把握することを目的とした。

幌延 URL 工学規模試験は北海道幌延町に位置する JAEA の幌延深地層研究センター内にて行った。図 3.1.2-3 に幌延町の所在と幌延深地層研究センターの地下試験施設の概要及び幌延 URL 工学規模試験を実施している地下 350m 調査坑道の試験坑道 5 の位置を示す。

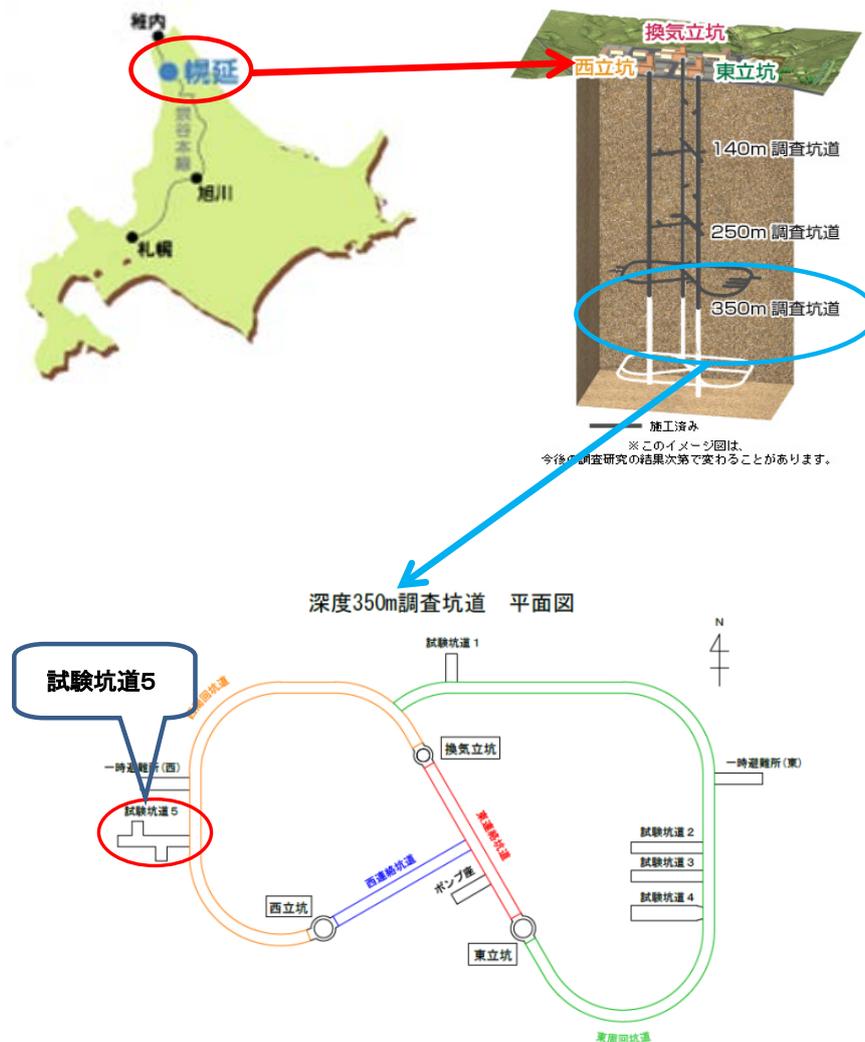


図 3.1.2-3 幌延町所在地、幌延 URL、350m 調査坑道平面図

#### (5) 幌延 URL 工学規模試験

幌延深地層研究センターの地下 350m 坑道内の西周回坑道に隣接する試験坑道 5 内の試験孔 1 に工学規模の試験体を設置した。試験坑道 5 の平面図を図 3.1.2-4 に示し、処分坑道 5 の断面と試験孔 1 に設置した試験体のイメージを図 3.1.2-5 に示す。幌延 URL 工学規模試験で使用した模擬オーバーパックは、3次元計測により初期形状を実測した。また試験終了まで3次元計測基準点が現地湧水で水没しないように模擬オーバーパック試験体に基準点を設けた延長管を設置した。模擬オーバーパックの構造及び外観を図 3.1.2-6 に示す。

模擬オーバーパックには原位置での腐食速度を直接計測することを目的に3電極センサーを設置している。3電極センサーの電極は、模擬オーバーパックの溶接金属から切り出して製作した。3電極センサーの外形図と外観を図 3.1.2-7 に示す。

幌延 URL 工学規模試験の試験体には、表 3.1.2-3 に示すセンサー類を設置した。図 3.1.2-8 に各センサーの配置のイメージを、図 3.1.2-9 にセンサー配置図を示す。

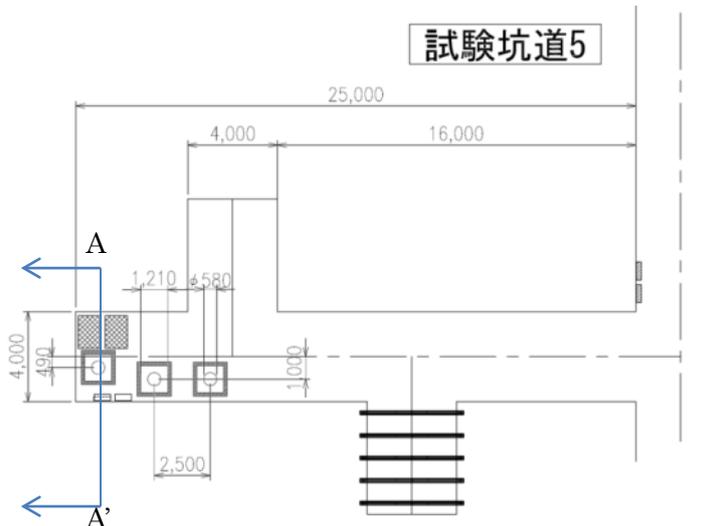


図 3.1.2-4 深度 350 m 調査坑道 平面図

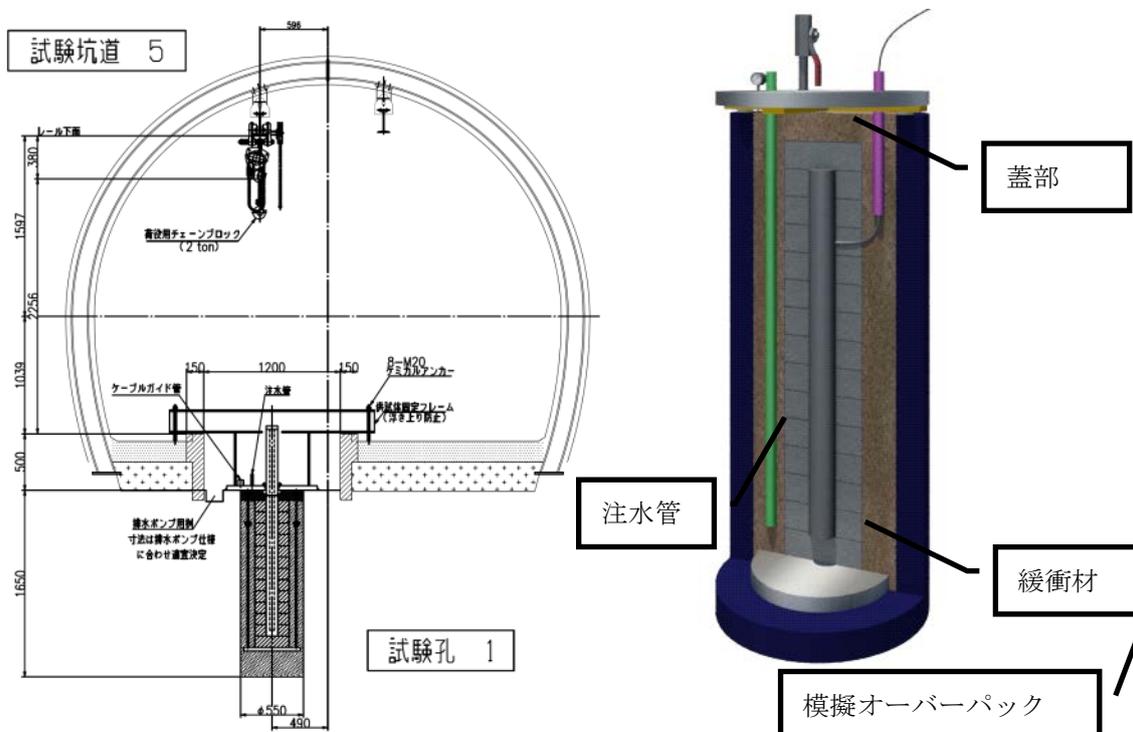


図 3.1.2-5 試験坑道 5 (A-A') 断面および試験体等イメージ図

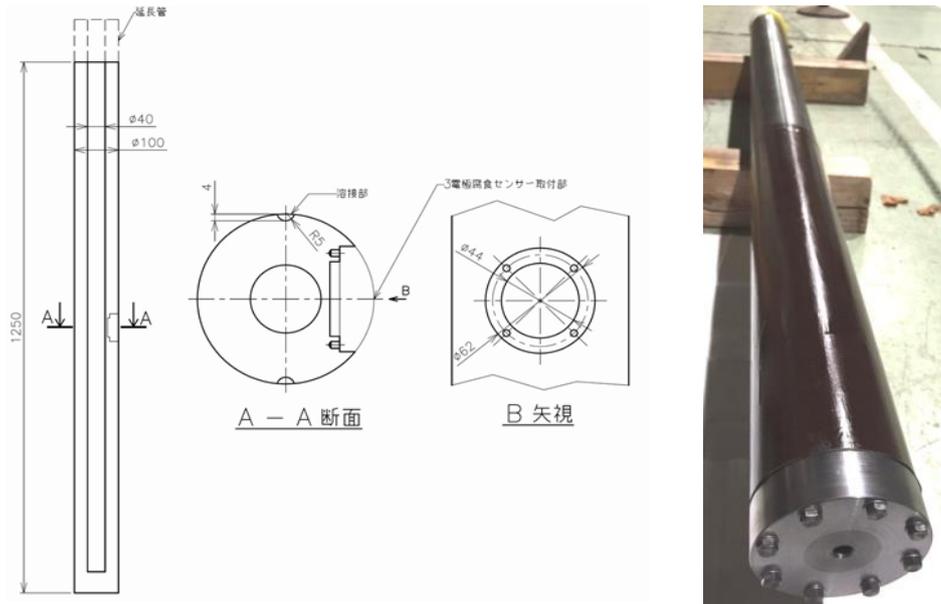


図 3.1.2-6 工学規模試験 模擬オーバーパック構造及び外観

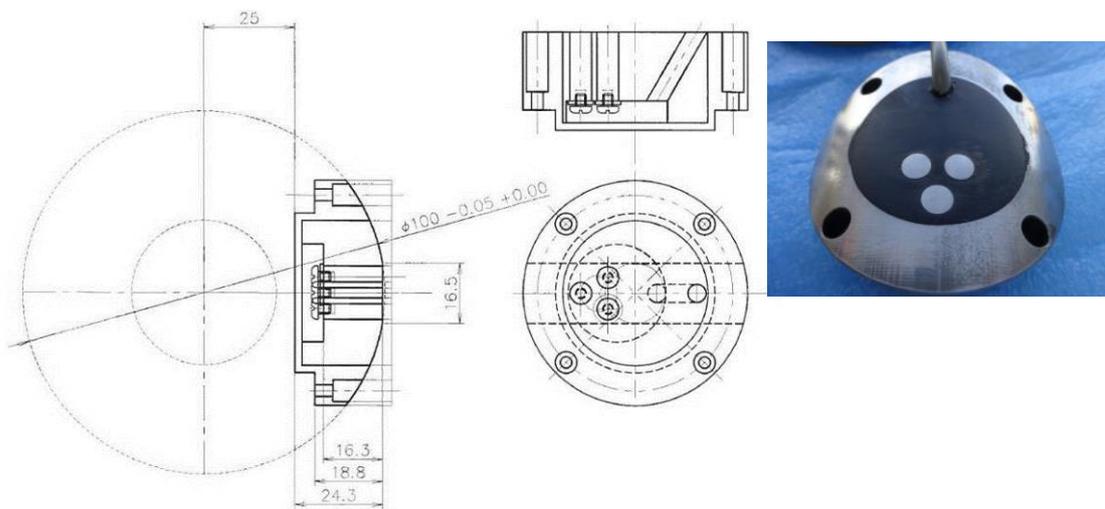


図 3.1.2-7 工学規模試験 埋込型 3 電極センサー・外形図及び外観

表 3.1.2-3 幌延 URL 工学規模試験 センサー・計測機器種類及び数量

センサー名称	計測対象	設置 個数	設置位置	備考
3電極センサー (JAEA)		1	・緩衝材ブロック(12段目)に埋設	地下試験のみ
3電極センサー	腐食速度	1	・模擬オーバーバック中央(緩衝材ブロック7段目付近)に設置	
小型3電極センサー (外付け)	腐食速度	2	・緩衝材ブロック(2段目、12段目)に埋設	
亜鉛照合電極	模擬オーバーバック試験体電位	1組	・模擬オーバーバックと導通 ・緩衝材ブロック(7段目)と砂層の境界	
ACMセンサー	腐食速度(緩衝材中設置) 濡れ検知用(砂層設置)	4	・緩衝材ブロック(2段目、7段目、11段目)に埋設 ・緩衝材ブロック(11段目)と砂層の境界	
熱電対	温度	3	・模擬オーバーバック中央(緩衝材ブロック7段目付近)の3電極センサー近傍に設置	
土圧計	土圧	1	・処分坑道壁面(緩衝材ブロック7段目付近)に設置	
含水率センサー	水分ポテンシャル	3	・中心方向から順に緩衝材ブロック内(6段目、7段目、8段目)に埋設	
pH・ORPセンサー	地下水中のpH 地下水中の酸化-還元電位	2	・注水管	

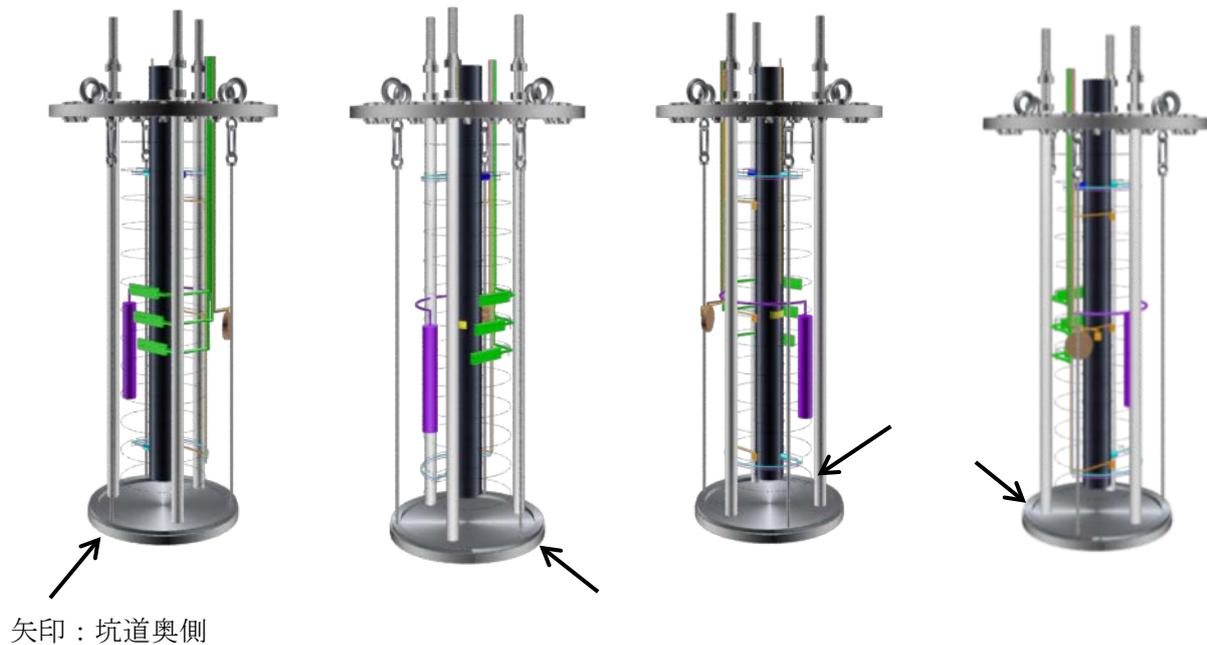


図 3.1.2-8 幌延 URL 工学規模試験 センサー配置 (3次元イメージ)

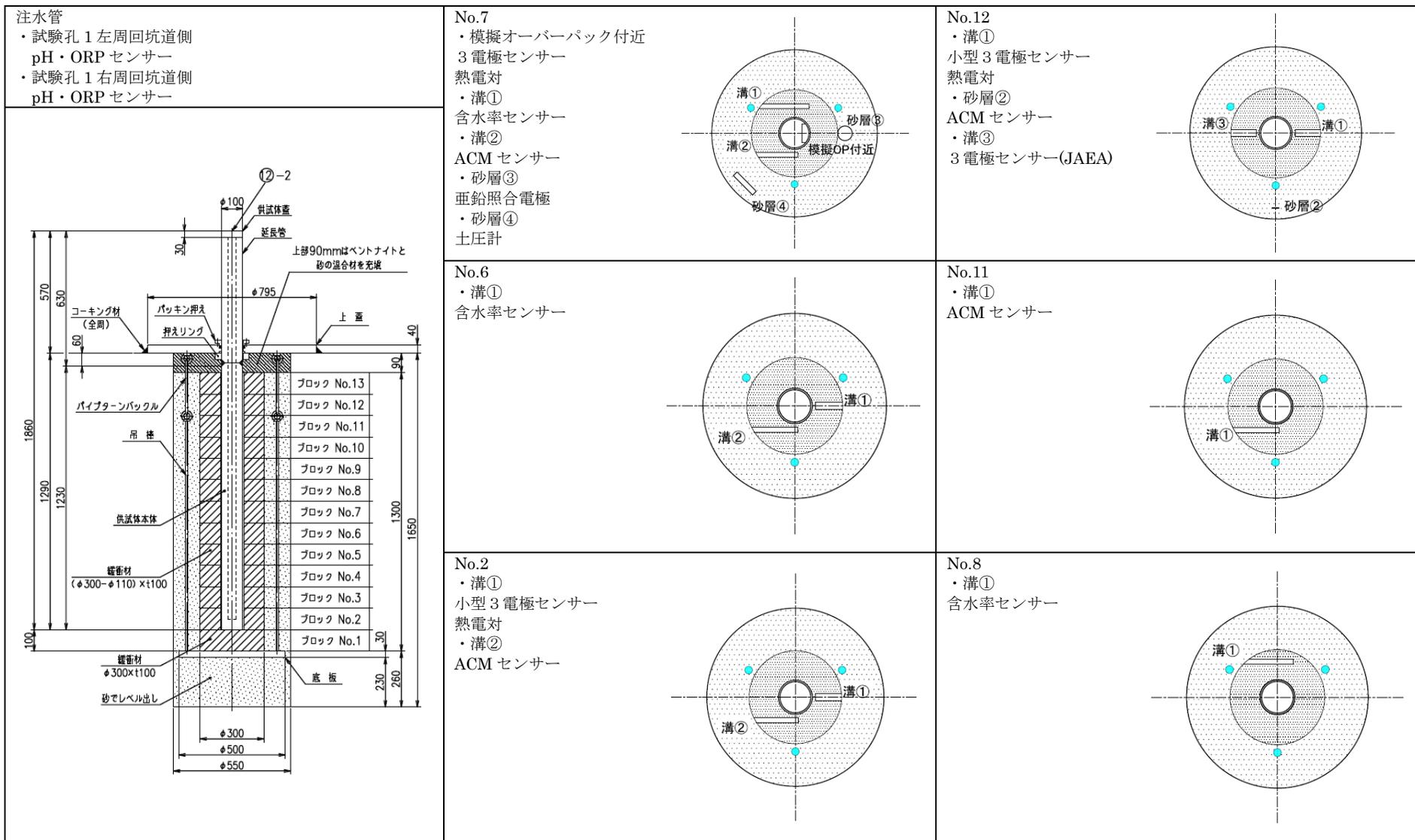


図 3.1.2-9 幌延 URL 工学規模試験 外観・センサー配置図

平成 26 年度に幌延 URL 工学規模試験装置を設置した。設置時の状況を図 3.1.2-10 に示す。

平成 27 年度は、平成 26 年度の試験を通じて得られたデータおよび知見より、一部試験装置の改善を施したとともに、ガラス固化体からの発熱を想定したオーバーパックの表面温度の 80℃の状態を再現するためのヒータ設備を模擬オーバーパック内部に設置した。平成 28 年度は、試験を継続して行い、設置した 3 電極腐食センサーに対して交流インピーダンス法による測定を実施した。



図 3.1.2-10 幌延 URL 工学規模試験 試験体設置状況

#### (6) 地上施設工学規模試験

幌延 URL 工学規模試験の試験系では、前記のように試験環境が複雑なっているため、試験系内の現状がどのような状態となっているかを解明すること自体に技術的なハードルが存在する。このため、幌延 URL 工学規模試験から得られるデータのみでは腐食挙動の評価に支障を来すことが想定されたため、幌延 URL 工学規模試験と同様の試験系を地上の試験施設内で再現し、地上の制御された試験環境での工学規模試験を実施した。

使用した模擬オーバーパック、緩衝材ブロック、センサー類は幌延 URL 工学規模試験と同様とした。また、地下水条件は幌延 URL 内で採取した地下水の組成を分析して模擬地下水を調製して用いた。ただし、地上施設工学規模試験では JAEA 殿で検討している 3 電極センサーは設置していないが、東京工業大学で開発されている交流インピーダンス法による腐食センサーを設置した。

#### (7) 小規模試験

工学規模試験ではその寸法のために試験の扱いが難しく、試験点数や試験ケース数を増やすのが困難などの試験条件の制約がある。このため、これらの条件を緩和しつつ試験条件をより広くすることや試験点数を増やすこと等に適した、さらに小型の試験系での試験を実施した。

平成 27 年度に実施した小規模要素試験で着目した条件は以下の 2 点である。

##### ◇ 経時変化確認試験

試験期間をパラメータとした経時変化確認試験を実施した。

試験系は模擬オーバーパックの一部を切り出した形状を試験片とし、試験時間をパラ

メータとして一定期間後に試験片を取り出し、直接、腐食状況を分析することとした。

#### ◇ 不均質条件試験

試験系内に不均質な状況が初期の腐食挙動にどのような影響を与えるかについて着目した。再現した条件は緩衝材ブロックとブロックの間に生じるブロック間の隙間により地下水とオーバーパックが即座に接触する部分と緩衝材により遅延されることによる接触までの時間差と、即座に地下水に接触する部分の水質と緩衝材を透過した部分の水質の違いによる不均質な条件を想定した。

試験系内に生じる模擬オーバーパックへ接する地下水条件の不均質性を強調するために、緩衝材ブロック間の隙間幅は想定されている隙間のうちの大きめの値を採用した。ただし、堅置き定置方式では緩衝材ブロックの定置作業が適切に管理された状態で行われていれば、ほとんど隙間が生じないという実績は得られている。

### (8) 地上ラボ試験

幌延 URL 工学規模試験で、腐食速度は直接測定することを目的に3電極センサーを設置した。この3電極センサーが各種の試験環境による特性を把握するために、実験室内を実施した。試験条件はベントナイト共存下での温度影響などを考慮した。

#### 3.1.3 5ヵ年計画

本研究は平成 25 年度に予備的な工学規模試験を地上で実施するとともに5ヵ年の試験計画を作成し検討を開始した。その後、試験データの蓄積を受け、本年度までの成果も踏まえて試験計画を見直した（表 3.1.3-1）。以下に、実施項目ごとの見直し内容を記載する。

#### (1) 地上ラボ試験

初期には温度・水質等、各種条件をパラメータとして、模擬オーバーパックの母材（炭素鋼）の他、特に溶接金属に着目した腐食挙動の評価試験を計画していた。実績では、条件の優先度を考慮して「経時変化」「系内の不均質性」に絞り込み、かつ実施する試験系を後述の「小規模要素試験」とした。

#### (2) 腐食計測技術の適用性確認調査

他の産業界、および原位置での腐食計測が実施可能な腐食計測技術について、地層処分事業への適用性を調査する。平成 25 年度は候補技術の検討段階であったが、平成 26 年度以降、薄膜レジストメトリー法（北海道大学）、直流電位差法（東北大学）、インピーダンス（EIS）法（東京工業大学）に調査対象を絞り込み、各腐食計測技術の適用性の調査を各大学に委託して実施している。平成 28 年度は、平成 27 年度に使用した装置を改良し、条件を統一した試験環境に各計測技術を適用し、比較評価を実施した。本年度は平成 28 年度の試験結果を踏まえ、試験装置の改良・変更し、試験を行った。また平成 29 年度以前の試験件結果から各計測技術の適用性をとりまとめた。

### (3) 小規模要素試験

小規模要素試験は、図 3.1.2-1 に示す「単純系での腐食試験」と、実機スケールに近い「工学規模試験」をつなぎ、両者のスケールの相違を補完することを目的として実施する。工学規模試験は長期試験継続が前提かつ途中での直接観察等による経過確認が困難であることに對し、小規模要素試験は工学規模試験よりも自由度が高く、工学規模試験のデータ評価の補完・支援に貢献することが期待できる。

平成 27 年度以降、各種の環境条件等試験パラメータのうち、重要度が高いと判断した「経時変化」「不均質性条件試験」をパラメータとした試験系を構築した。「経時変化」試験のパラメータは試験体の取り出しまでの時間で 3、6、12、24 ヶ月を前提としているが、途中経過の観察状況により必要により試験期間の見直すことがある。「不均質性条件試験」は、試験系内の場による不均質性や地下水との接触状況の不均質性等を同一試験体内に再現し、その試験条件の違いによる影響を把握する。平成 28 年度では不均質条件試験装置を解体し、解体方法及び模擬オーバーパックスの分析を行った。本年度は経時変化試験を解体・分析を行い、平成 28 年度以前の結果をとりまとめた。

### (4) 工学規模試験

工学規模試験は平成 25 年度に予備的な工学規模試験を地上で実施し、試験装置の特性把握と改善点の抽出を行った。これを受けて、平成 26 年度は幌延地下 350m の試験坑道 5 に工学規模試験装置を構築し試験データの蓄積を開始した。平成 27 年度よりガラス固化体からの発熱を想定したオーバーパックスの表面温度の 80℃の状態を再現するためのヒータ設備を模擬オーバーパックス内部に設置し、入熱を開始した。また地上施設においては幌延 URL 工学規模試験と同様の試験系再現した、地上工学規模試験を開始した。使用した模擬オーバーパックス、緩衝材ブロック、センサー類は幌延 URL 工学規模試験とほぼ同様としたが、JAEA 殿で検討している 3 電極センサーは設置せずに東京工業大学で開発されている交流インピーダンスによる腐食センサーを設置した。地下水条件については幌延 URL 内で採取した地下水の組成を分析して模擬地下水を調製して用いた。

平成 28 年度は幌延 URL での工学規模試験と地上施設での工学規模試験を継続して実施した。小規模要素試験のうち不均質条件試験については解体を行い、解体結果を基に平成 29 年度に実施する幌延 URL 及び地上施設での工学規模試験装置の解体計画の検討を行った。

本年度は幌延 URL 工学規模試験および地上工学規模試験の解体を行い、オーバーパックスの測定と分析を行い、他の試験系で得られた知見とともに複雑系での溶接部を付加したオーバーパックスの腐食挙動評価及び評価方法の検討を行った。

表 3.1.3-1 処分システム工学確証技術開発；人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック 5ヵ年計画案（平成29年度改訂）

実施項目		年度	H25	H26	H27	H28	H29	
複雑系でのオーバーバックの腐食健全性の検討	(1)地上ラボ試験	①共通試験体の設計製作	試験装置設計					
		②腐食モニタリングシステム検証試験	試験計画・装置設計 試験装置設備製作					
	(2)腐食計測技術の適用性確認調査	①薄膜レジストメトリー法	試験システム検討・性能確認試験 統一環境条件下の比較試験					
		②直流電位差法	試験システム検討・性能確認試験 統一環境条件下の比較試験					
		③インピーダンス(EIS)法	試験システム検討・性能確認試験 統一環境条件下の比較試験 工学規模試験への適用					
	(3)小規模要素試験	①地下試験条件模擬による地上試験設備の予備試験	試験装置装置設計 試験装置設備製作					
		②小規模要素試験（経時変化確認試験；OP溶接試験体・緩衝材の一部切出しによる）	試験装置設置 データ計測 (対象：OP溶接試験体一部切出しによる) 試験体解体・分析					
		③小規模要素試験（腐食計測技術適用性確認調査で検討した腐食速度センサを統一環境下で性能比較）	試験装置設置 データ計測 試験体解体・分析					
		④小規模要素試験（不均質条件試験）	試験装置設置 データ計測 試験体解体・分析					
	(4)工学規模試験	①地上での腐食試験 地下試験条件模擬による地上試験	1) 試験装置概念設計 2) 工学規模予備試験 3) 試験装置製作設計・製作 4) データ計測 5) 試験体解体・分析					
		②地下研究施設での腐食試験	1) 試験孔設計・施工 2) 試験装置設計・製作 3) 試験装置設置 4) ヒータ製作・設置 5) データ計測 6) 試験体解体・分析					
	(5)地上・地下試験データとの比較、分析、評価			地下・地上データの適宜比較検討				

平成29年度

## 3.2 工学規模試験の実施

### 3.2.1 幌延 URL における工学規模試験の実施

#### (1) 腐食挙動

##### 1) 3 電極センサーによる腐食速度測定結果

図 3.2.1-1 に 3 電極センサーによる腐食速度計測値の経時変化（試験開始から終了まで）を示す。3 電極センサーによる測定（電気化学ノイズ法。以後 ENA 法と称する。）データは、電流と電圧の経時変化であり、それぞれの標準偏差から腐食抵抗を求め、腐食速度を導出している。このとき、腐食に伴って観測される電流・電圧が一定の相関性のある状態で変化していることが前提となる。そのため、以下の 2 点によりデータの評価を行なった。

- ①：単位時間当たりの電流と電圧の変動幅の評価（生データの電気化学ノイズ成分を確認できるデータ点数として約 1,000 点を確保→約 16,000 点を採用）
- ②：電流・電圧の変動の相関性の評価（0.5 以上のみ採用）

平成 29 年度の計測では、ENA 法の適用のために取得した 1 秒間隔の電流サンプリング値が常に低く、約  $10^{-7}$  A 未満で ENA 法が適用不可なレベルであったことから、平成 28 年度と同様、単位時間当たりの電流と電圧の変動幅の評価に適さないデータ群の評価として、 $8.5 \times 10^{-8}$  A 未満の電流値に対し、腐食速度を  $1 \mu\text{m}/\text{年}$  と見なすこととした。

腐植速度は、以下の傾向を示すことが分かった。

- ・先に緩衝材中のセンサ（p2, p3）の腐食速度が含水の進展に伴って上昇
- ・遅れてオーバーパック試験体表面のセンサ（p1）の腐食速度が上昇
- ・緩衝材含水率一定の後、3 つすべてのセンサーで腐食速度は低下傾向を示す
- ・ヒータ加熱開始後に腐食速度増加後、数 10 日以内の短期間に腐食速度が減少

なお、グラフ中の p1、p2、p3 の腐食速度から推定される経時変化を実線で示す。破線は、徐々に腐食速度が低下する経時変化を模式的に示したものである。

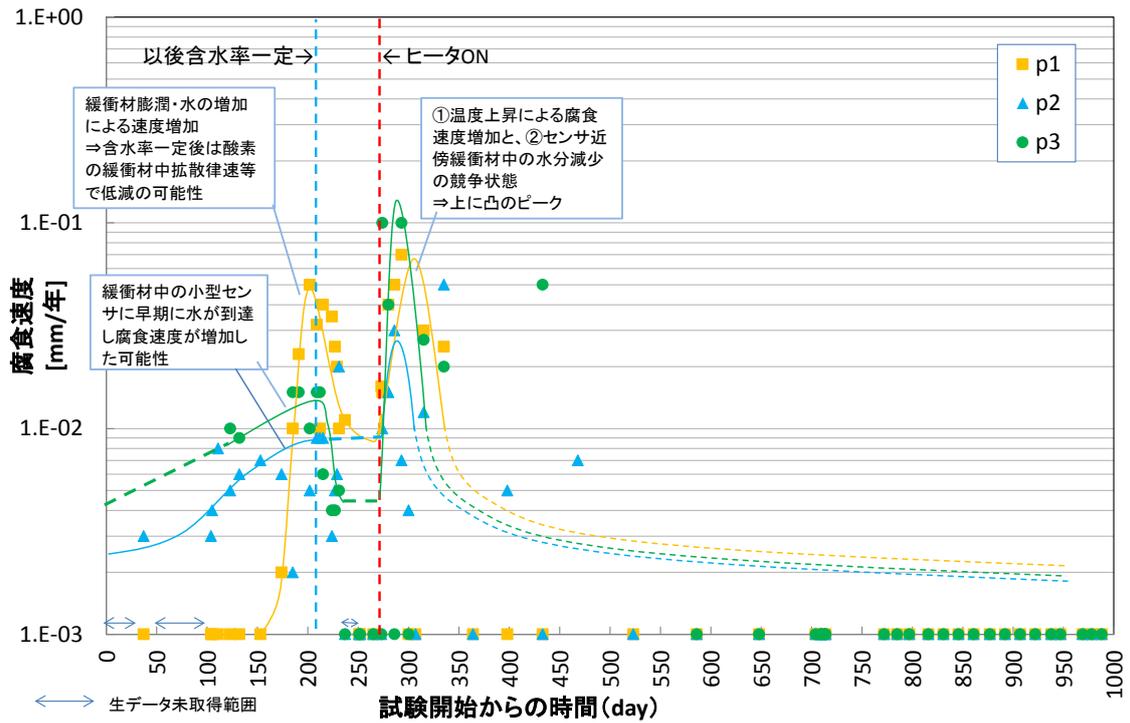


図 3.2.1-1 幌延 URL 工学規模試験 3 電極式腐食センサー腐食速度計測値の経時変化

2) 埋込式3電極センサーの腐食速度積分による腐食深さ

工学規模試験の3電極センサーのうち、埋込型センサ（図 3.2.1-1 の p1）を対象に、腐食深さの時間積分を計算した。計算結果を図 3.2.1-2 に示す。

計算は、図 3.2.1-1 に示した腐食速度を使用し、特定期間中の腐食深さ（微分値）と累積腐食深さ（積分値）を求めた。腐食深さの導出は、腐食速度と経過日数から台形近似で行った。

試験開始からの経過日数 400 日以後は、還元雰囲気中の腐食速度の文献値を参考に、 $2\mu\text{ m/y}$  で一定とする保守的な仮定のもとで計算した。

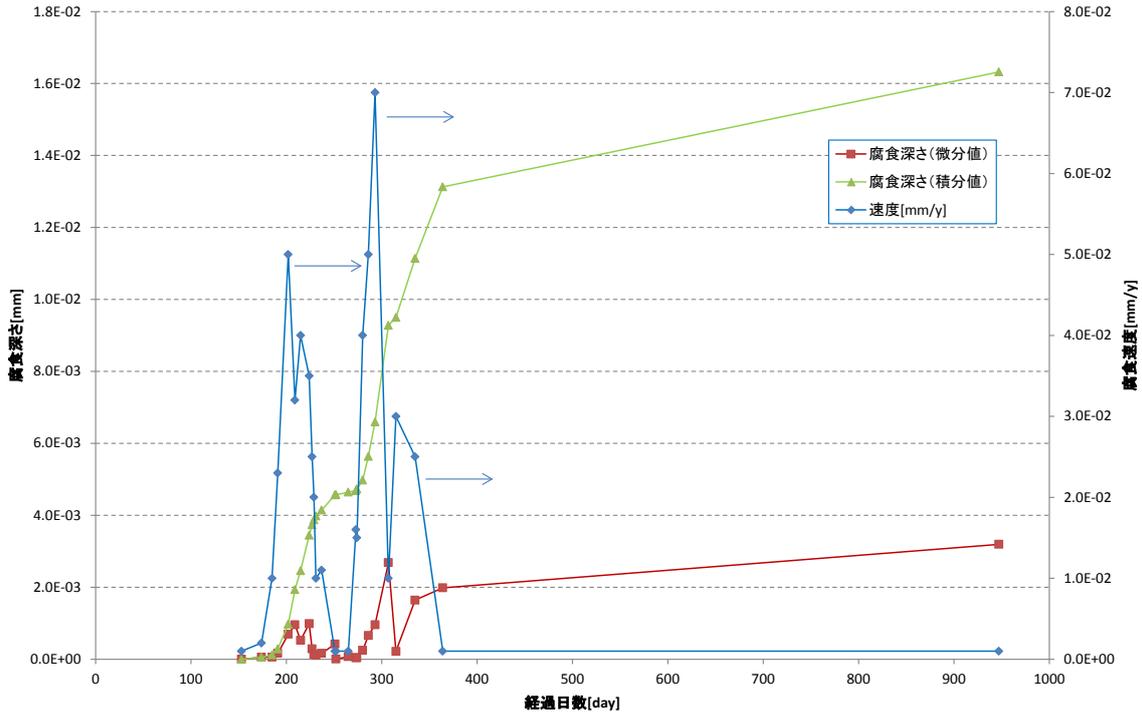


図 3.2.1-2 幌延 URL 工学規模試験 3電極式腐食センサー腐食速度計測値に基づく腐食深さの経時変化

### 3) インピーダンス法による計測

幌延 URL 工学規模試験において 700 日から 3 電極センサーの電極のうち任意の 2 点を選択し全周波数によるインピーダンス測定を行った。図 3.2.1-3 に 941 日目における全周波数計測における位相差を、図 3.2.1-4 には Bode 線図を示す。全周波数測定 (1mHz) までの計測では、低周波数側の位相が下がりきらない (極大値を持たないため) Fitting ができなかった (図 3.2.1-3)。このことは、腐食生成物の生成を示唆している[2]。

このため、1mHz における電荷移動抵抗 ( $R_p$ ) の逆数を腐食速度の指標として採用したが、位相差が極大値を持たないので、 $R_p^{-1}$  は真値に比べ高い値を示し、腐食速度としては、過大な評価となる。図 3.2.1-5 に 1mHz における電荷移動抵抗 ( $R_p$ ) の逆数の結果を示す。

上部センサーの  $R_p^{-1}$  は  $10^{-3} \Omega^{-1} \text{cm}^{-2}$  であり腐食速度に換算すると、 $100 \mu \text{m/y}$  程度になっており、過大に見積もられている可能性が高い。

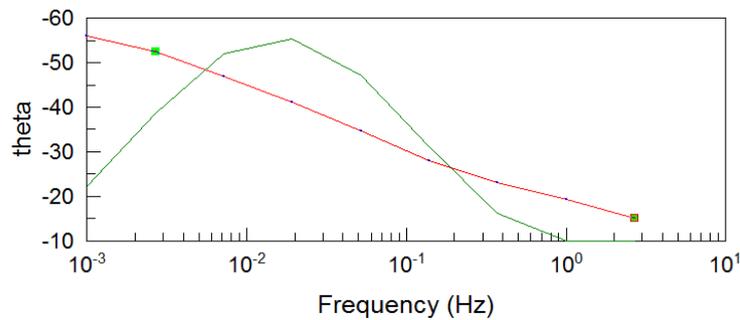


図 3.2.1-3 幌延 URL 工学規模試験 3 電極センサーを使用したインピーダンスの全周波数計測 Fitting 結果 (位相差) (941 日目)  
(赤線 : 入力値、緑線 : Fitting 結果)

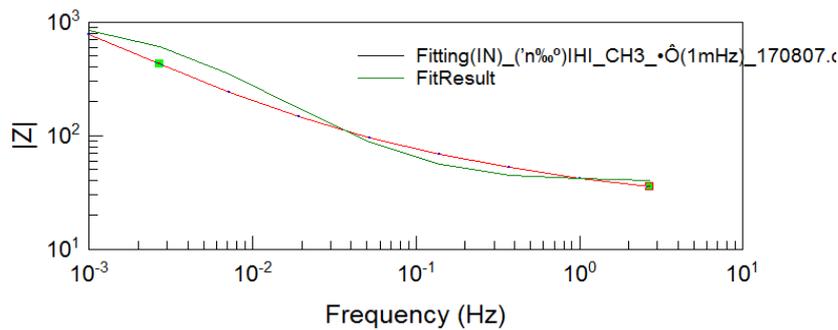


図 3.2.1-4 幌延 URL 工学規模試験 3 電極センサーを使用したインピーダンスの全周波数計測 (Bode 線図) (941 日目)

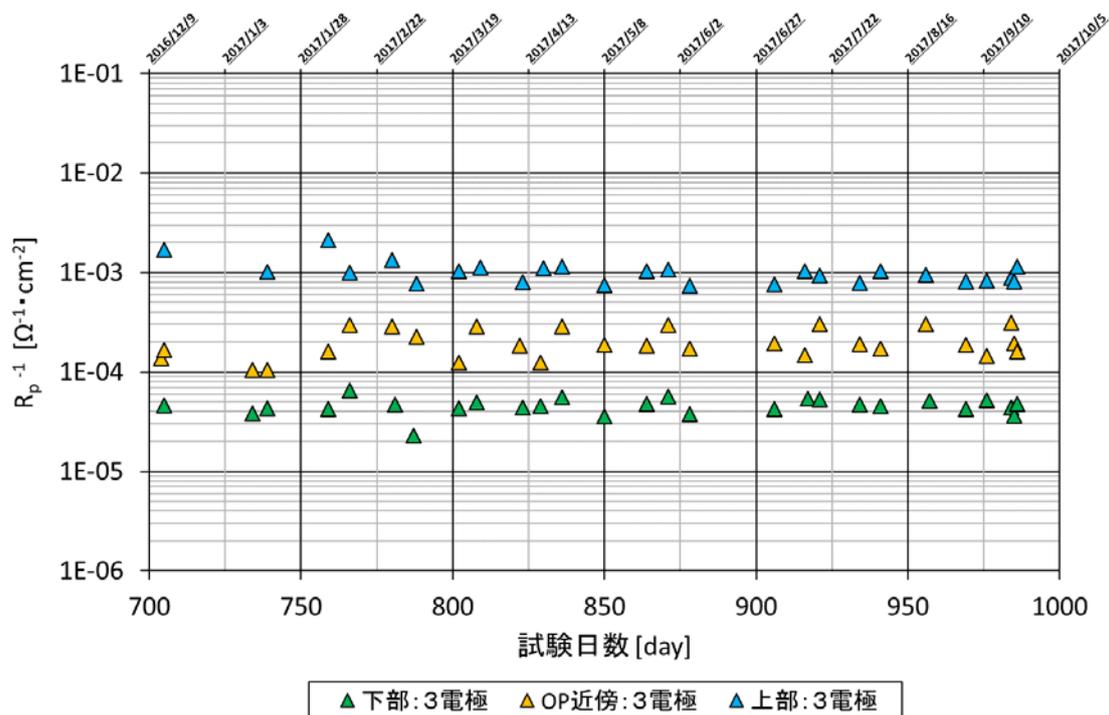


図 3.2.1-5 幌延 URL 工学規模試験 3 電極センサーにおける  $R_p^{-1}$  (1mHz) の経時変化

(2) 腐食環境

1) 溶存酸素、溶存二酸化炭素

幌延 URL 試験坑道 5 において各試験孔の溶存酸素及び溶存二酸化炭素の測定を行った。溶存酸素の測定結果を図 3.2.1-6 に示す。溶存酸素量は概ね 1ppm 以下であった。

溶存二酸化炭素量については図 3.2.1-7 に示す。通常の大気へ平衡時における溶存二酸化炭素量は、1~2ppm である。これに対し、試験孔 2 及び 3 では 10~50ppm、試験孔 1 の注水管では 200~600ppm となっている。これは、地下水中に湧いている気泡の影響であると考えられる。特に、密閉系の試験孔 1 の溶存二酸化炭素濃度は、開放系の試験孔 2 及び 3 に比べて大きくなった。

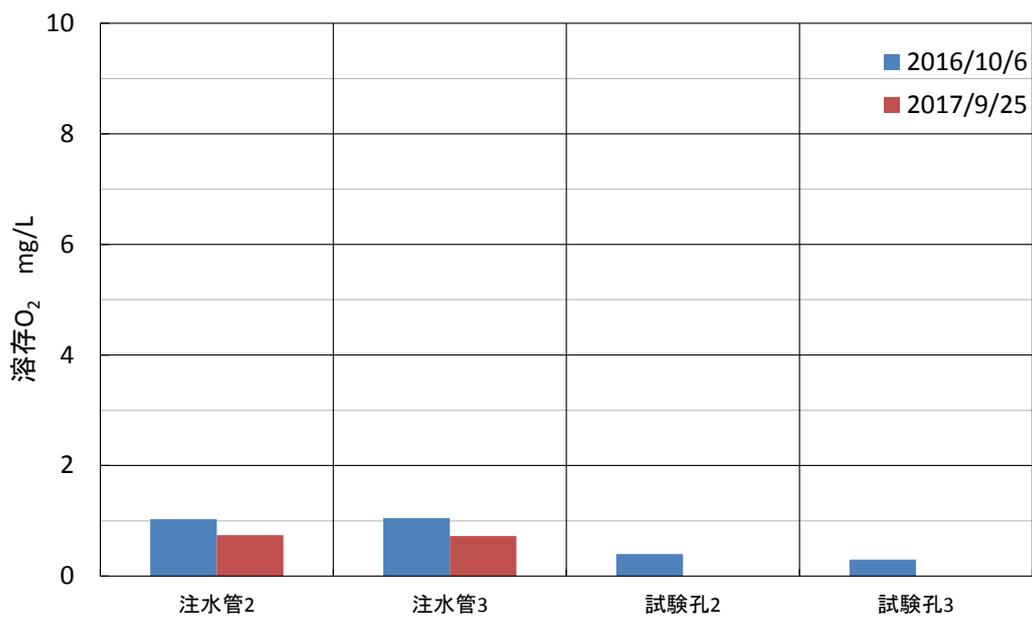


図 3.2.1-6 幌延 URL 工学規模試験 試験坑道 5 溶存酸素量

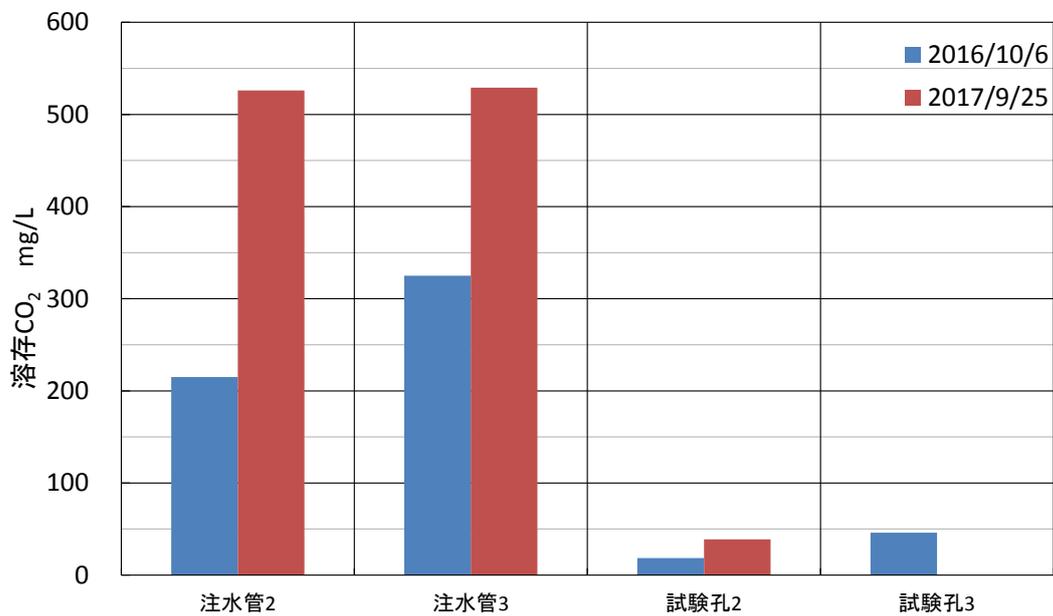


図 3.2.1-7 幌延 URL 工学規模試験 試験坑道 5 溶存二酸化炭素量

## 2) 地下水性状

幌延地下水は、海水起源と考えられ、図 3.2.1-8 に示すように、主成分は、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、無機炭素 (IC) で採水時期による変化認められない。昨年も報告したように、 $\text{Na}/\text{Cl}$  比は海水の組成比とほぼ同じとなった(図 3.2.1-9(左))。IC は、海水組成比より高濃度で含まれているが(図 3.2.1-9 右)、これは、図 3.2.1-7 に示すように溶存二酸化炭素が高いことと整合的である。図 3.2.1-10 に地下水分析時の計測した pH の結果を示すが、pH は 7.5~8 付近であった。

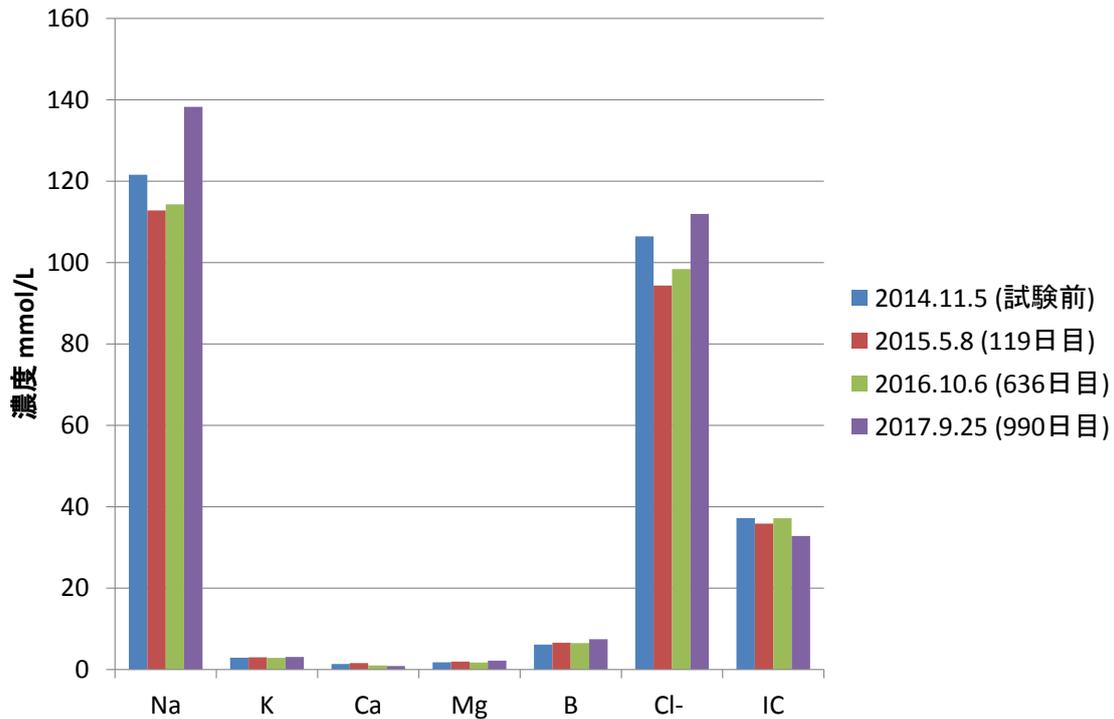


図 3.2.1-8 幌延 URL 工学規模試験 地下水の組成

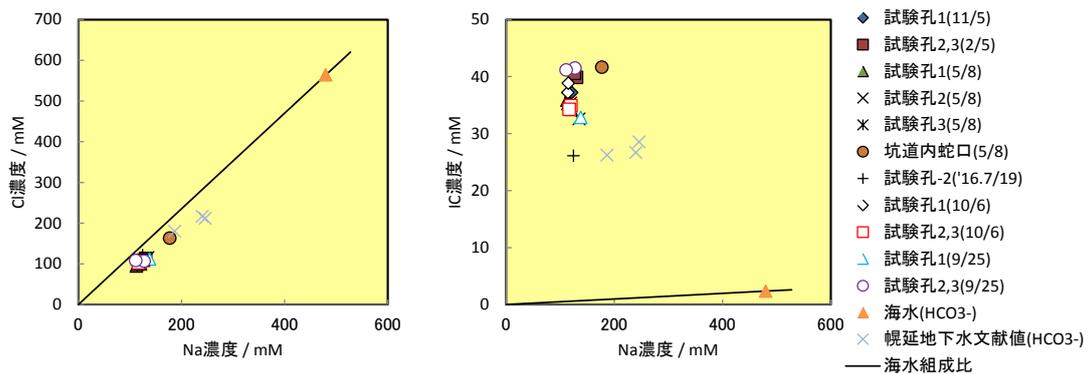


図 3.2.1-9 幌延 URL 地下水の  $\text{Na}/\text{Cl}$  比 (左) と  $\text{Na}/\text{IC}$  比 (右)

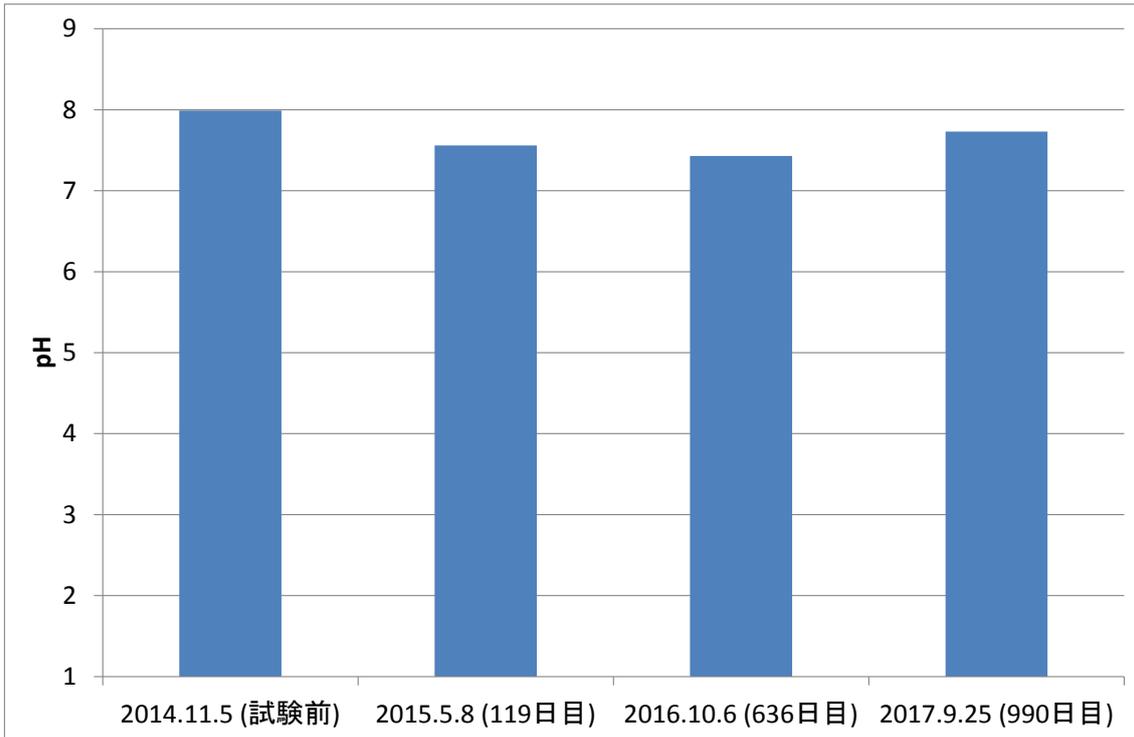


図 3.2.1-10 幌延 URL 工学規模試験 地下水の pH

### 3) 温度

図 3.2.1-11 に幌延 URL 工学規模試験の試験体の温度測定結果を示す。温度計は 3 電極センサー設置位置と同じであり、p1:模擬オーバーパック近傍、p2:緩衝材ブロック下部 (No.2)、p3:緩衝材ブロック (No.12) に設置した。また坑道内にも温度計を設置した。

約 150 日目に p2:緩衝材ブロック下部 (No.2) の温度計については計測不能となった。272 日目以降にヒータ稼働し、p1:模擬オーバーパック近傍に設置した温度計は 80°C を示し、p3:緩衝材ブロック (No.12) も 70°C 程度に上昇している。図 3.2.1-1 に示したように、3 電極センサーの出力から、オーバーパック表面に地下水が到達したのは、試験開始から約 150~200 日後であるので、地下水到達後は、初期の数十日程度を除いて、ほぼ 80°C で推移したことになる。また坑道内温度については試験孔 1 付近に換気設備があるためか、季節変動がみられた。

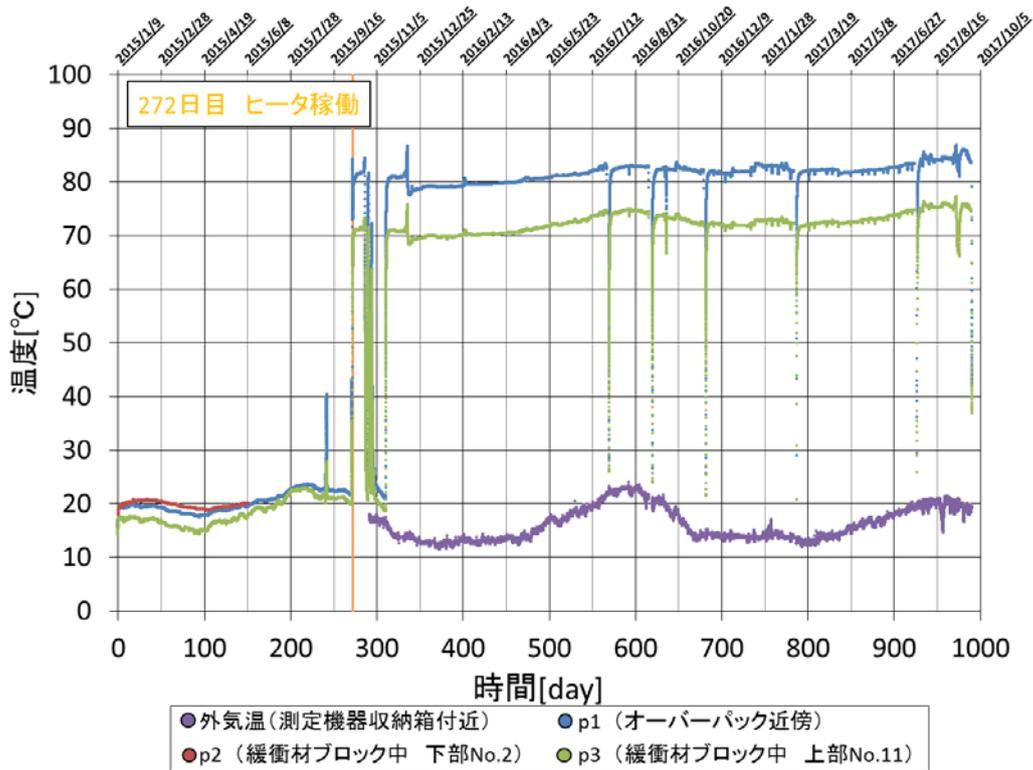


図 3.2.1-11 幌延 URL 工学規模試験 試験体温度測定結果

#### 4) 亜鉛照合電極

地下埋設環境での模擬オーバーパックの電位の経時変化を図 3.2.1-12 に示す。同電位は、模擬オーバーパックと同一試験孔内に設置した亜鉛照合電極を基準電位とした電位となる。試験開始後約 270 日に計測器に接続したアース影響を排除し、以後のデータは正しく計測されており、+0.3V vs. Zn オーダーの比較的高い電位を維持している。

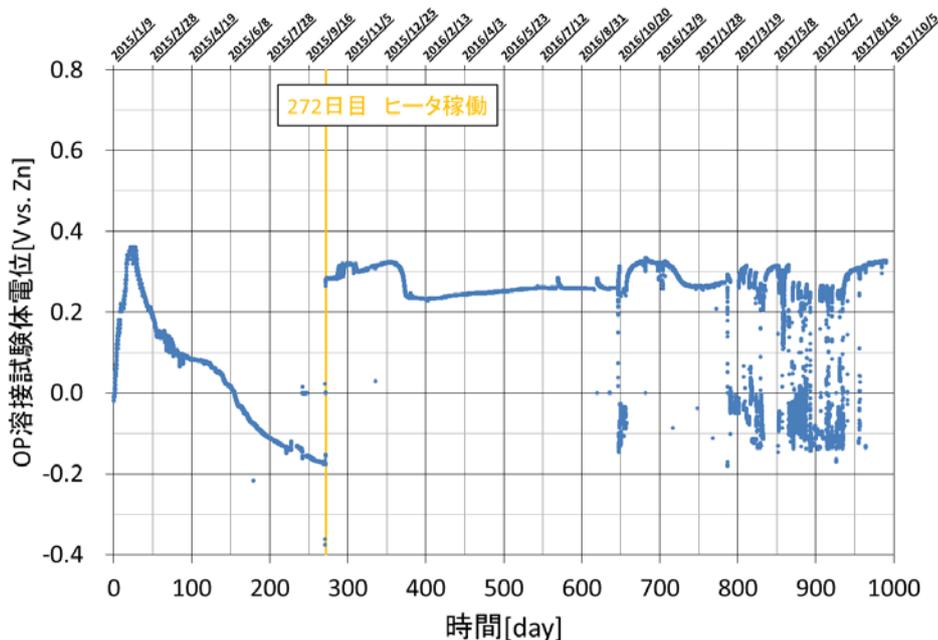


図 3.2.1-12 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック電位（亜鉛照合電極基準）の経時変化

### 3.2.2 地上施設における工学規模試験の実施

#### (1) 腐食挙動

##### 1) 3電極センサーによる腐食速度測定結果

図 3.2.2-1 に3電極式腐食センサーによる腐食速度計測値の経時変化を示す。初期の腐食速度は数百 $\mu\text{m}/\text{年}$ となる他は数十 $\mu\text{m}/\text{年}$ 程度またはそれより低い値となり、以下の傾向を示すことが分かった。

幌延 URL 工学規模試験装置同様、最初に緩衝材中のセンサ（p2, p3）の腐食速度が含水の進展に伴って上昇し、次に模擬オーバーパック試験体表面のセンサ（p1）の腐食速度が上昇していることが分かる。含水率一定となった後、若干低下傾向を示すことも幌延 URL 規模試験装置と同様である。幌延 URL 規模試験装置と異なる点として、試験開始から約120日経過以後、ヒータ加熱を開始するまでの間、電流値が $10^{-6}\text{A}$ の高い値を示すにもかかわらず電気化学ノイズ成分を確認できず、ENA法による腐食速度の算出ができない時期のあることが挙げられる。ヒータ加熱開始後にいったん上昇した後、数十日以内の比較的短期間に腐食速度が減少した。

なお、グラフ中の p1、p2、p3 の腐食速度から推定される経時変化を実線で示す。破線のうち、加熱開始前は腐食速度の算出ができない期間を一定の腐食速度と見なし、加熱開始後の徐々に低下する破線は、還元雰囲気中で腐食速度が低下する経時変化を模式的に示したものである。

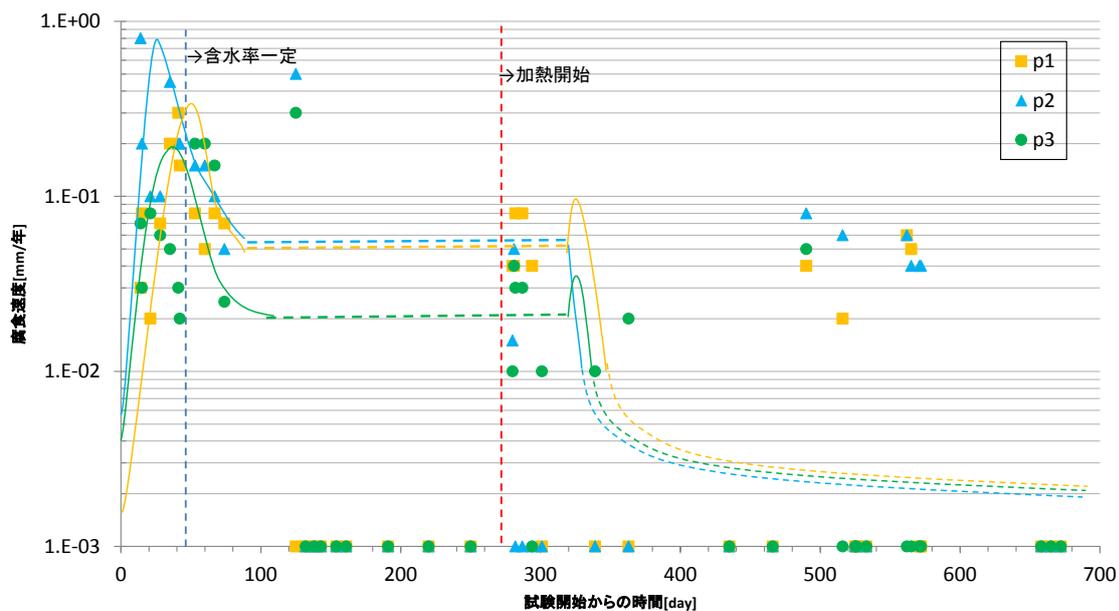


図 3.2.2-1 地上工学規模試験 3 電極式腐食センサー腐食速度計測値の経時変化

## 2) 埋込式 3 電極センサーの腐食速度積分による腐食深さ

工学規模試験の 3 電極センサーのうち、埋込型センサ（図 3.2.2-1 の p1）を対象に、腐食深さの時間積分を計算した。計算結果を図 3.2.2-2 に示す。

計算は、図 3.2.2-1 に示す腐食速度を使用し、特定期間中の腐食深さ（微分値）と累積腐食深さ（積分値）を求めた。腐食深さの導出は、腐食速度と経過日数から台形近似で行った。試験開始からの経過日数 400 日以後は、還元雰囲気中の腐食速度の文献値  $2 \mu \text{ m/y}$  で一定と仮定した。

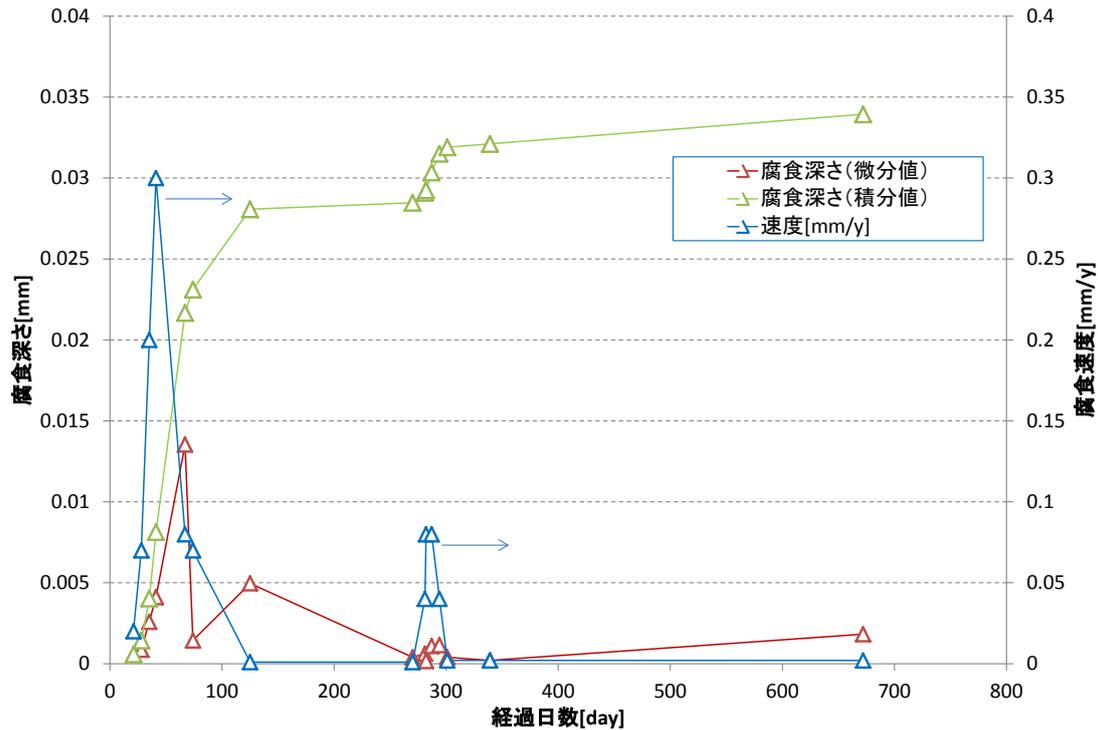


図 3.2.2-2 地上工学規模試験 3 電極式腐食センサー腐食速度計測値に基づく腐食深さの経時変化

### 3) 交流インピーダンスセンサーの計測結果

地上工学規模試験における、交流インピーダンスセンサーによる電荷移動抵抗 ( $R_p$ ) の逆数の測定結果を、図 3.2.2-3 に示す。上段設置のセンサーは、試験開始直後は  $R_p^{-1}$  の値が低かったが、試験体設置ヒータの試運転日の 250 日付近で値が大きく上昇し、他のセンサーとほぼ同じ  $10^{-3} \Omega^{-1} \text{cm}^{-2}$  となった。この 250 日付近の上部における  $R_p^{-1}$  の上昇は図 3.2.2-4 に示すように上段設置のセンサーの溶液抵抗が低下し、水が浸入したことが想定された。435 日付近で、電荷移動抵抗 ( $R_p$ ) の測定周波数を 10mHz から 1mHz に変更したところ、最終的に全センサーが  $2 \sim 5 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \text{cm}^{-2}$  程度で安定となった。

全周波数で計測した  $R_p^{-1}$  は、1mHz で計測した値より低い傾向となり、地上工学規模試験でも 1mHz による電荷移動抵抗の測定は、過大評価の傾向が認められた。

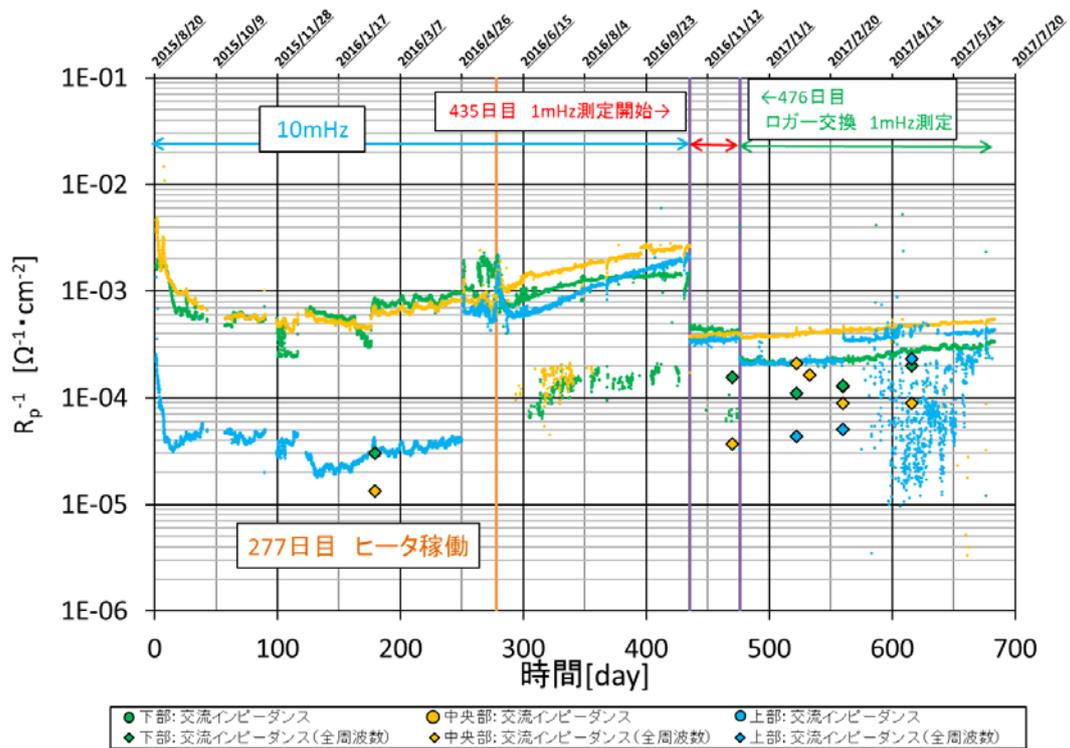


図 3.2.2-3 地上工学規模試験 交流インピーダンスセンサーによる  $R_p^{-1}$  の測定結果

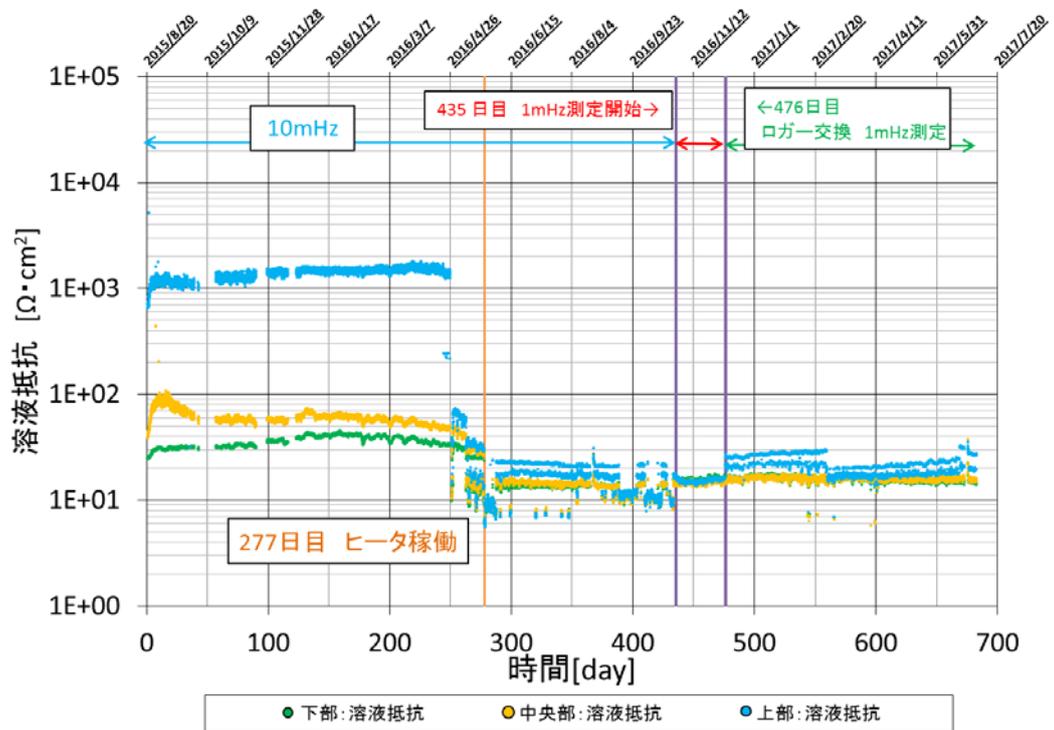


図 3.2.2-4 地上工学規模試験 溶液抵抗 測定結果

図 3.2.2-3 で示した  $R_p^{-1}$  は腐食速度に影響を与えることが知られている。腐食速度の算出式を以下に示す。

$$\text{腐食速度} = R_p^{-1} \times k \times \frac{\text{鉄原子量} \times \text{電極面積}}{\text{鉄の価数} \times 96500 \times \text{鉄密度}}$$

一般的に水溶液中で浸漬させた状態では、比例定数  $k$  は 0.02 程度[4]となるが、緩衝材共存下における比例定数  $k$  を、全周波数計測による  $R_p^{-1}$  と交流インピーダンスセンサーと同じ位置に設置したクーポン試験片腐食速度から評価した。

なお、全周波数によるインピーダンスの測定時期（開始から 560 日）と、クーポン試験片の取り出し時期は一致しないが、図 3.2.2-3 の測定結果において上部インピーダンス測定結果が安定していないものの、 $R_p^{-1}$  はほぼ一定であることから、腐食速度もほぼ一定であると仮定して、比例定数  $k$  を算出した。算出結果を表 3.2.2-1 に示す。

中央部及び上部の比例定数  $k$  は概ね 0.015～0.020 程度であり、水溶液中で浸漬させた状態での比例定数  $k$  は 0.02 とほぼ同じになった。

また全周波数測定結果から電気二重層容量を算出した。図 3.2.2-5 に電気二重層容量の経時変化を示す。179 日時点では下部で  $1,200 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ 、中央部で  $1,300 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  となった。なお上部は、位相の極大値が存在しなかったため算出できなかった。一般的な電気二重層容量の  $10 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  [5] に対して 120～130 倍程度となった。また 560 日時点では、下部で  $23,000 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  程度、中央部で  $65,000 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  程度、上部で  $45,000 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  程度となり、一般的な電気二重層容量の  $10 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  に対して電気二重層容量の 230～650 倍程度となった。179 日と 560 日で算出した電気二重層容量は下部で約 20 倍、中央部で 50 倍程度増加となった。これは電極面に生じた錆によって電気二重層容量が増加したためだと考えられる。

表 3.2.2-1 地上工学規模試験 腐食速度換算係数算出結果

	クーポン・ 交流インピーダンスセンサ 設置位置	$R_p^{-1}$ (560日時点) [ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ]	腐食速度	比例定数k
			クーポンより 算出 (672日時点)	
			[mm/yr]	
1	下部:緩衝材中(2段目)	1.29E-04	7.32E-03	0.005
2	中央部:緩衝材中(7段目)	8.95E-05	1.57E-02	0.015
3	上部:緩衝材中(11段目)	5.02E-05	1.18E-02	0.020

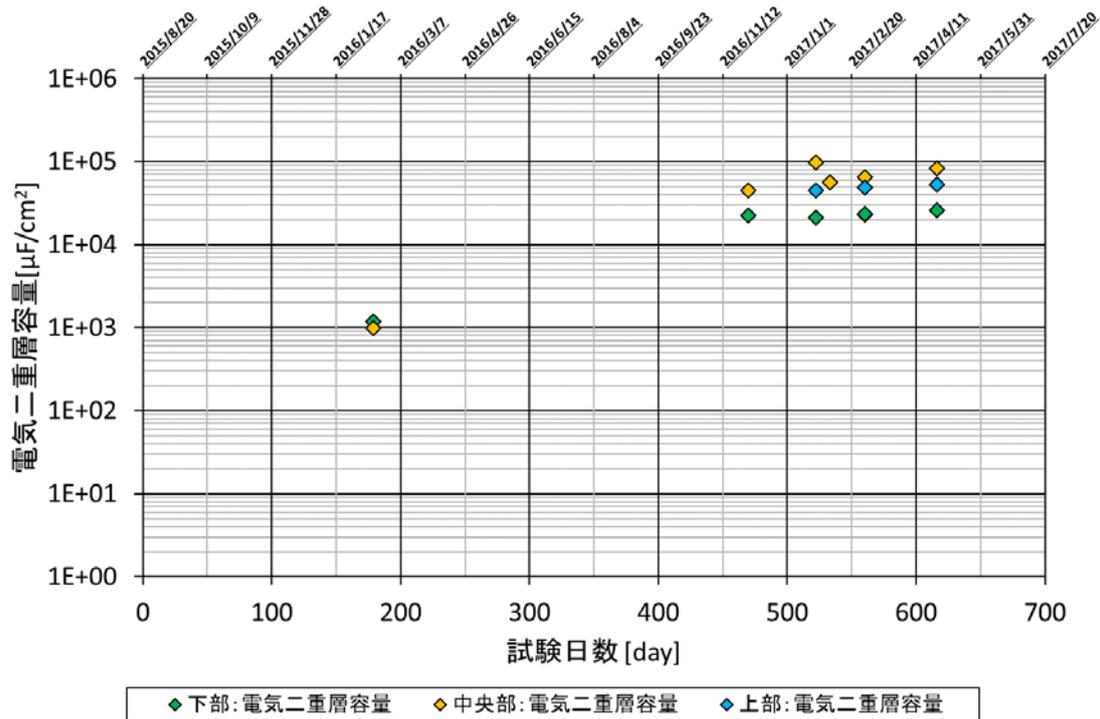


図 3.2.2-5 地上工学規模試験 電気二重層容量の経時変化

(2) 腐食環境

1) 模擬地下水注水量と組成

図 3.2.2-6 に地上工学規模試験装置への注水量を示す。試験装置への注水については、560 日目以降については特に行っていない。解体時の試験装置内の緩衝材についてはほぼ飽和状態にあったと考えられる。調製した模擬地下水の組成を、表 3.2.2-2 に示す。

試験期間中の各元素濃度の経時変化を図 3.2.2-7 に示す。なお、サンプリングは上部の給水ポットから行った。Ca と IC 濃度が徐々に低下し、試験開始後 20 日目ぐらいで一定となった。また、地下水中への鉄の溶出は認められなかった。Ca 及び IC 濃度が低下したことから、炭酸カルシウムの生成による沈殿が考えられる。pH の経時変化を図 3.2.2-8 に示すが、pH は 9 程度まで上昇した。

表 3.2.2-2 地上工学規模試験 調製した模擬地下水の組成

模擬地下水組成	濃度	
	(mg/L)	(mmol/L)
Na	2,642.4	114.89
Ca	33.8	0.84
K	182.7	4.67
Mg	44.0	1.81
B	73.0	6.75
Cl	3,433.0	96.70
IC	385.1	32.09
pH	7.93	25.2°C
Eh	333mV	25.0°C

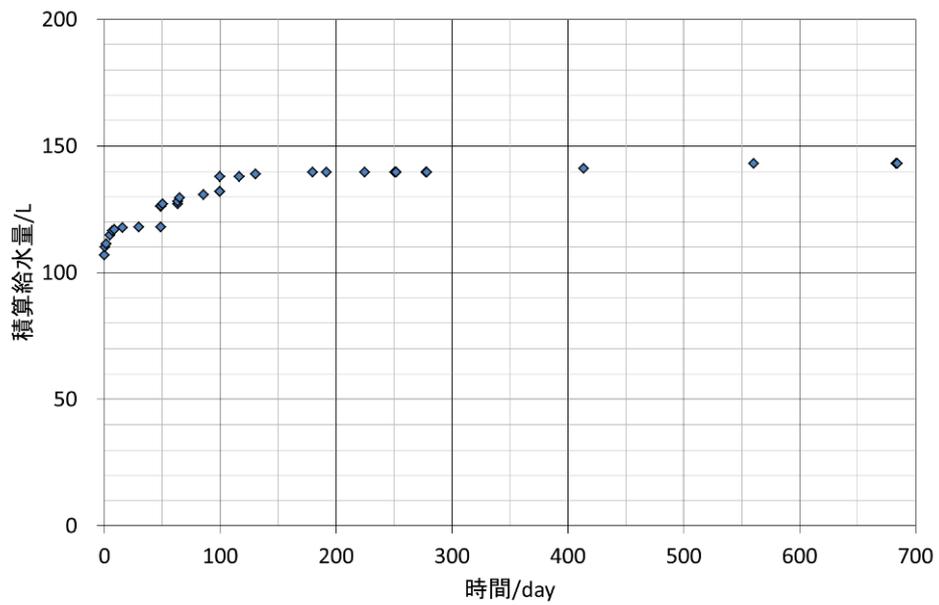


図 3.2.2-6 地上工学規模試験 注水量

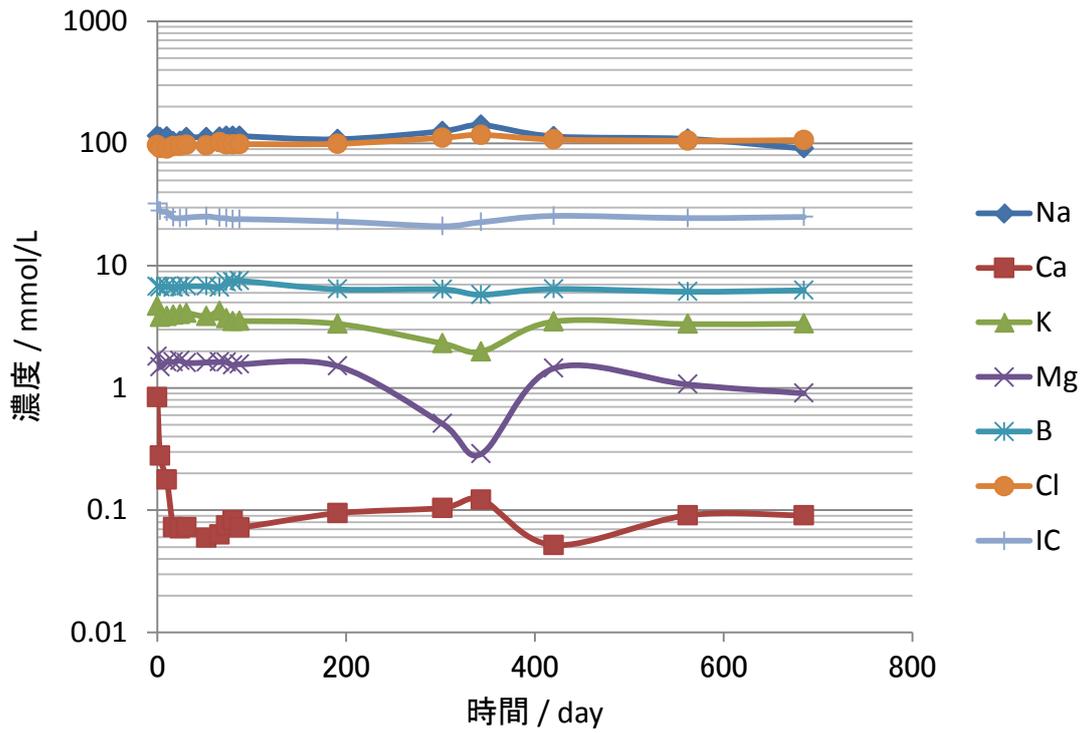


図 3.2.2-7 地上工学規模試験 模擬地下水の組成

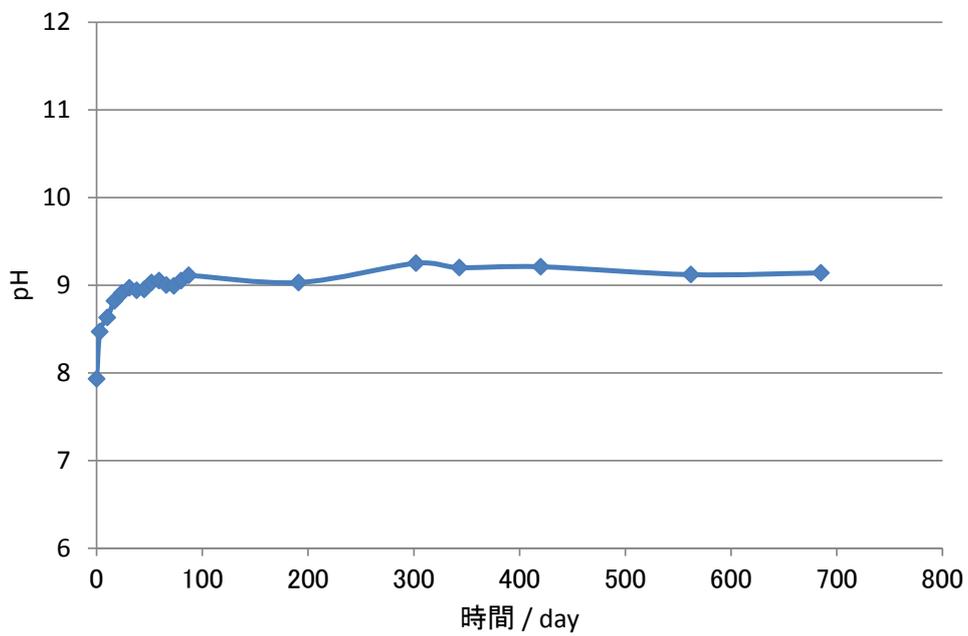


図 3.2.2-8 地上工学規模試験 模擬地下水の pH

## 2) 温度

図 3.2.2-9 に地上工学規模試験体の温度測定結果を示す。温度計は幌延 URL 工学規模試験と同様に 3 電極センサー設置位置と同じであり、p1:模擬オーバーパック近傍、p2:緩衝材ブロック下部 (No.2)、p3:緩衝材ブロック (No.12) に設置した。また坑道内にも温度計を設置した。

277 日目以降にヒータが稼働し、p1:模擬オーバーパック近傍に設置した温度計は 80°C を示し、p2:緩衝材ブロック下部 (No.2)、p3:緩衝材ブロック (No.12) についても 60°C 程度まで上昇している。また p2:緩衝材ブロック下部 (No.2)、p3:緩衝材ブロック (No.12) については外気による季節変動がみられた。

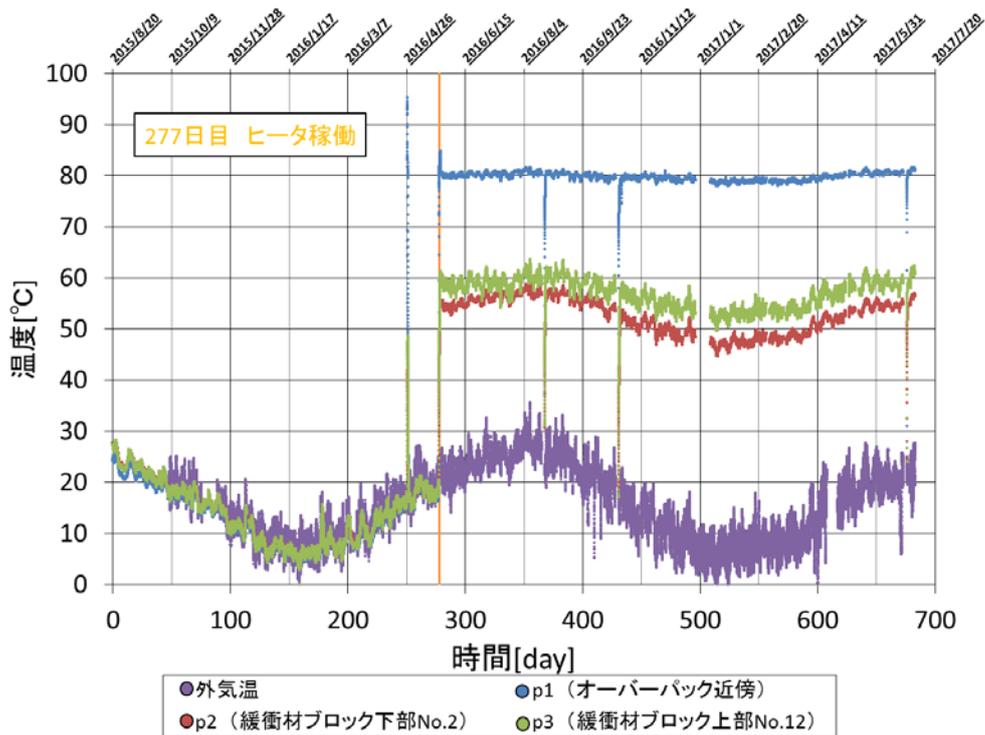


図 3.2.2-9 地上工学規模試験 試験体温度測定結果

## 3) 亜鉛照合電極

地上埋設環境での模擬オーバーパックの電位の経時変化を図 3.2.2-10 に示す。同電位は、地下試験と同様、模擬オーバーパックと同一試験孔内に設置した亜鉛照合電極を基準電位とした電位となる。

電位は試験開始後安定しており、測定環境にアース影響が無く、エレクトロメータによる電位差計測は正しく実施されていると考えられる。

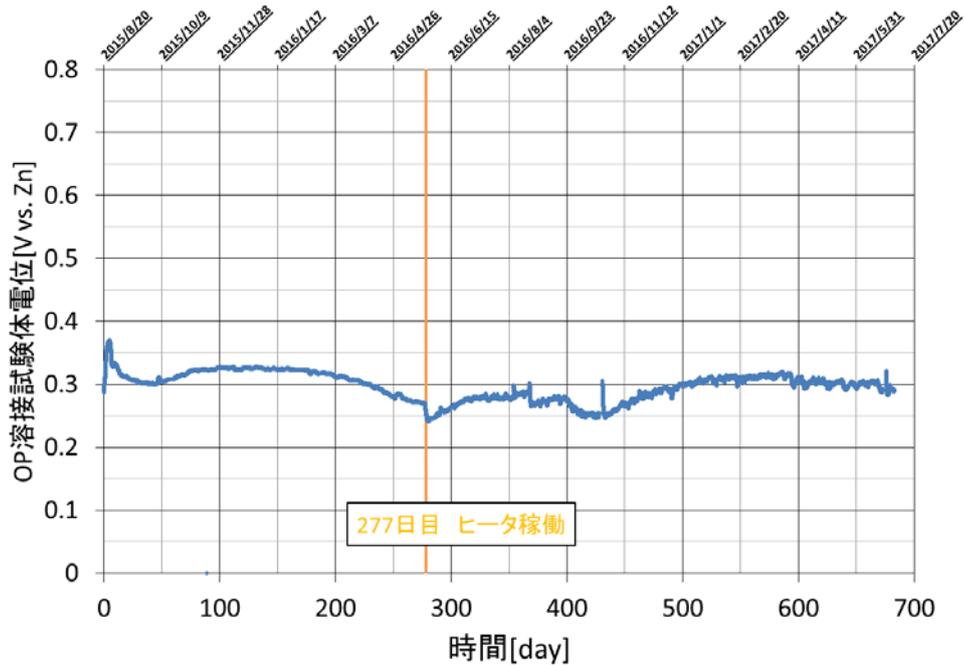


図 3.2.2-10 地上工学規模試験 模擬オーバーパック電位（亜鉛照合電極基準）の経時変化

### 3.3 工学規模試験装置の解体・分析

#### 3.3.1 幌延 URL における工学規模試験装置の解体

平成 28 年度に作成した解体・分析の計画および、平成 29 年度の実施した地上工学規模試験装置での経験を反映した解体計画に則り、幌延 URL において、試験装置を解体した。

##### (1) 試験装置解体

###### 1) 作業場所

幌延 URL における工学試験装置の解体作業は、地下 350m 坑道のうち試験坑道 5 および地上施設の西建屋で実施した（図 3.3.1-1）。試験坑道 5 では、平成 25 年度に掘削された 3 つの試験孔のうち、試験孔 1 が本業務の対象である。試験坑道 5 内の試験孔の配置図を図 3.3.1-2 に示す。

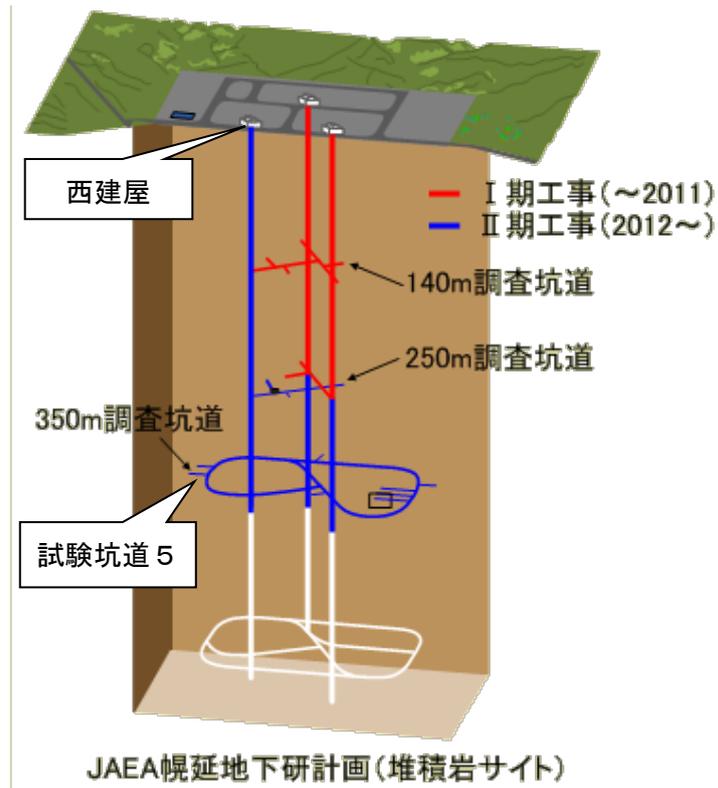
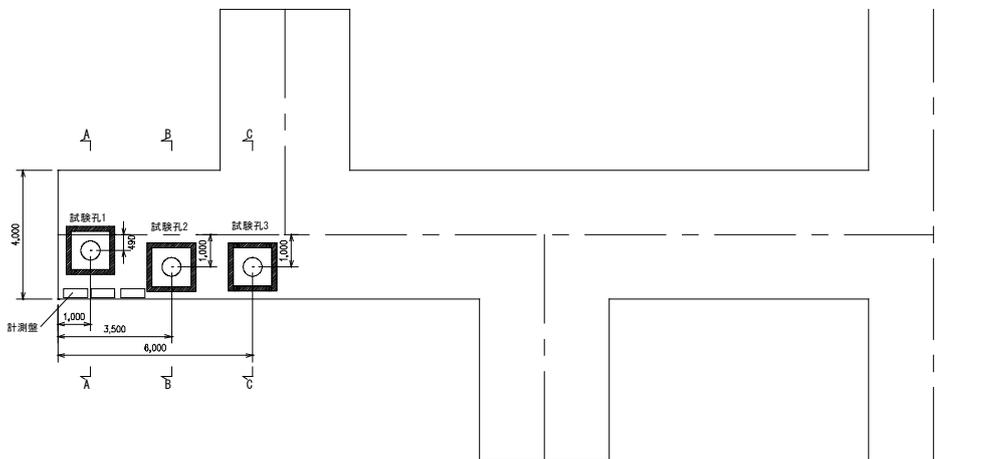
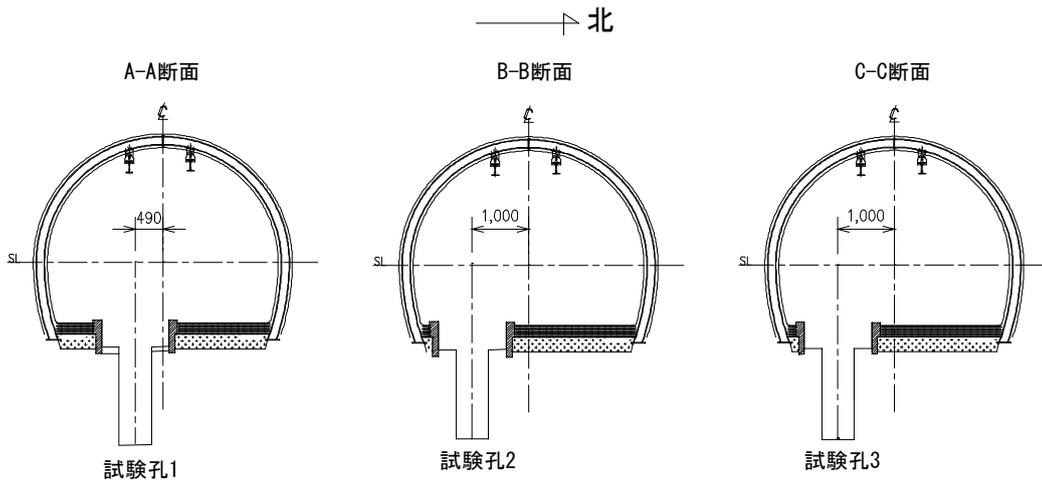


図 3.3.1-1 幌延 URL 工学規模試験 作業場所位置図



(a) 試験坑道 5 平面図



(b) 試験坑道 5 断面図

図 3.3.1-2 幌延 URL 工学規模試験 試験孔配置図 (試験坑道 5)

2) 作業工程

幌延 URL における工学試験装置の解体作業の実績工程表を表 3.3.1-1 に示す。

表 3.3.1-1 幌延 URL 工学規模試験 解体工程表 (実績)

作業日	9/25 (月)	9/26 (火)	9/27 (水)	9/28 (木)	9/29 (金)	10/2 (月)	10/3 (火)
解体事前作業	資機材搬入、 模擬オーバーバック転倒防止設置						
地下 (試験坑道 5) での解体作業		環境測定 試験体引き上げ 坑道内運搬他					
地上 (西建屋) での解体作業			試験体運搬 (坑道内→地上) 試験体蓋部解体他	試験体解体他			
片付け等作業					模擬オーバーバックの発送 (現場→分析場所)		

3) 主要数量表

幌延 URL における工学試験装置の解体作業の主要数量を表 3.3.1-2 に示す。

表 3.3.1-2 幌延 URL 工学規模試験 解体工事 主要数量表

項目	数量	単位	備考
解体事前作業	1	式	主要作業 ・坑道内（試験坑道5）：資機材搬入、記録用固定カメラの設置、環境測定ほか ・地上（西建屋）：資機材搬入、模擬オーバーパック転倒防止用設備設置ほか
地下（試験坑道5）での解体作業	1	式	主要作業 ・試験体の引上げ、搬送容器の坑道内の搬送ほか 作業に係る解体物・主要資機材の概略重量 ・試験体本体（模擬オーバーパック・緩衝材ブロック込み）：約 880kg×1 基 ・搬送容器：約 220kg×1 基 ・PC 収納箱：約 70kg×2 箱 ・3 電極センサーシステム用収納箱：約 40kg×1 箱 ・ヒータ用制御盤：約 35kg×1 基
地上（西建屋）での解体作業	1	式	主要作業 ・緩衝材の解体（13 段）、緩衝材ブロックのサンプリング、センサー回収ほか
片付け等作業	1	式	主要作業 ・模擬オーバーパックの発送、坑道内、地上の片付け

4) 試験装置詳細図、搬送容器詳細図

試験装置詳細図を図 3.3.1-3、搬送容器の詳細図を図 3.3.1-4 に、搬送容器外観を図 3.3.1-5 に示す。

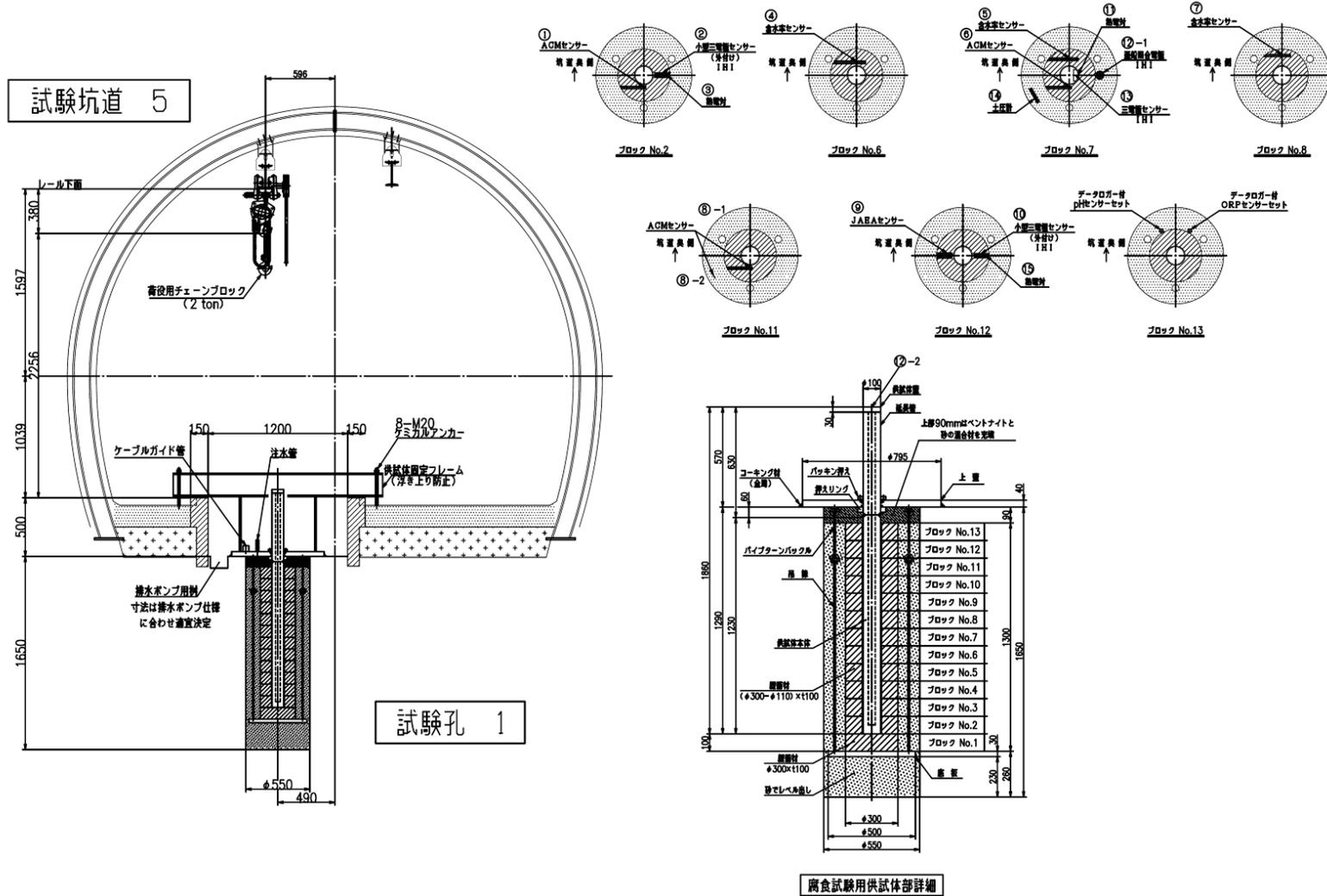


図 3.3.1-3 幌延 URL 工学規模試験 試験装置詳細図

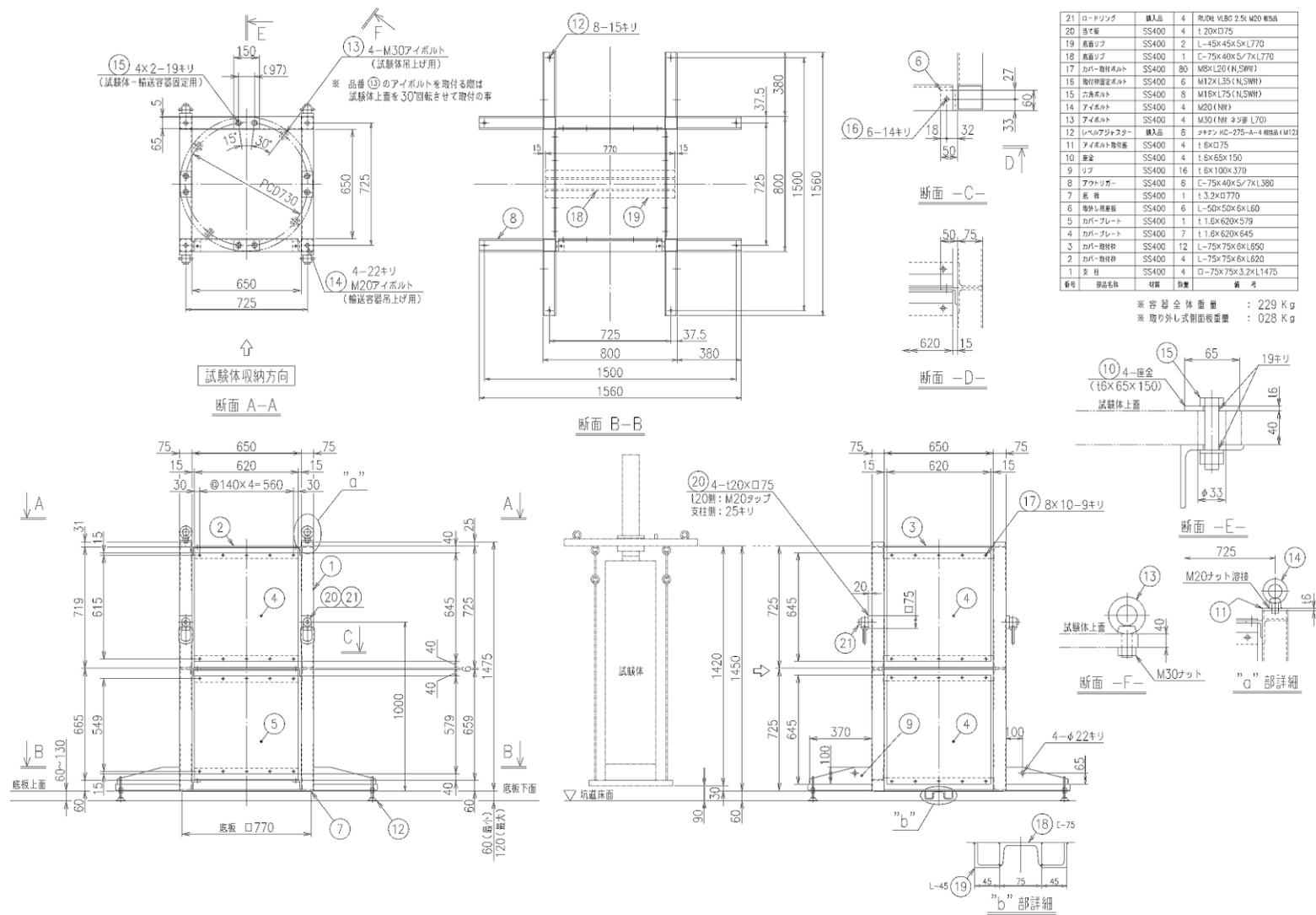


図 3.3.1-4 幌延 URL 工学規模試験 搬送容器詳細図



図 3.3.1-5 幌延 URL 工学規模試験 搬送容器外観

5) 解体ハンドリングフロー

幌延 URL 工学規模試験装置の解体のハンドリングフロー図を図 3.3.1-6～図 3.3.1-14 に示す。

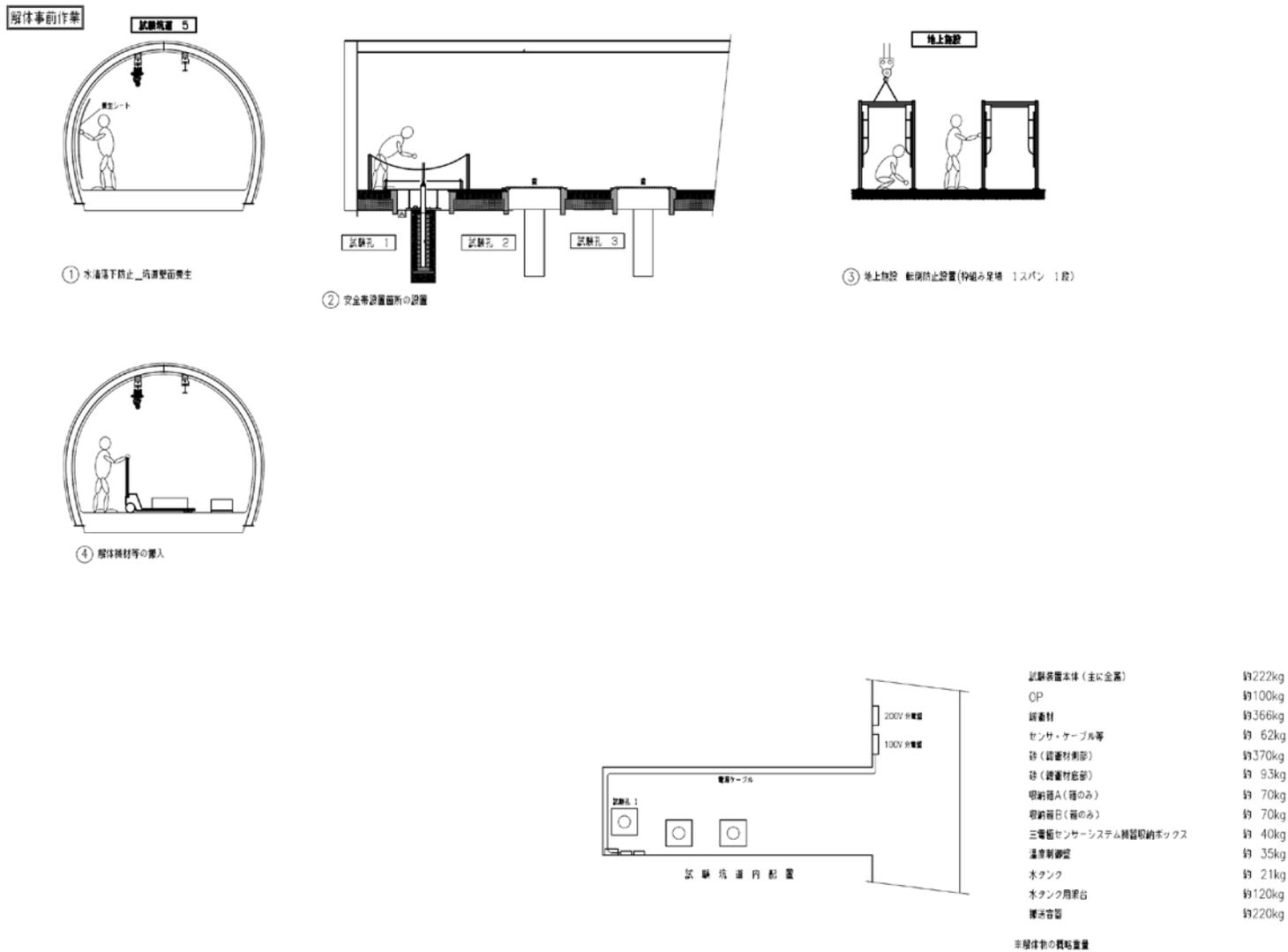


図 3.3.1-6 幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (1/9)

地下での解体

※以降、各工程ごとにホワイトボードを使用しての作業の撮影を行う

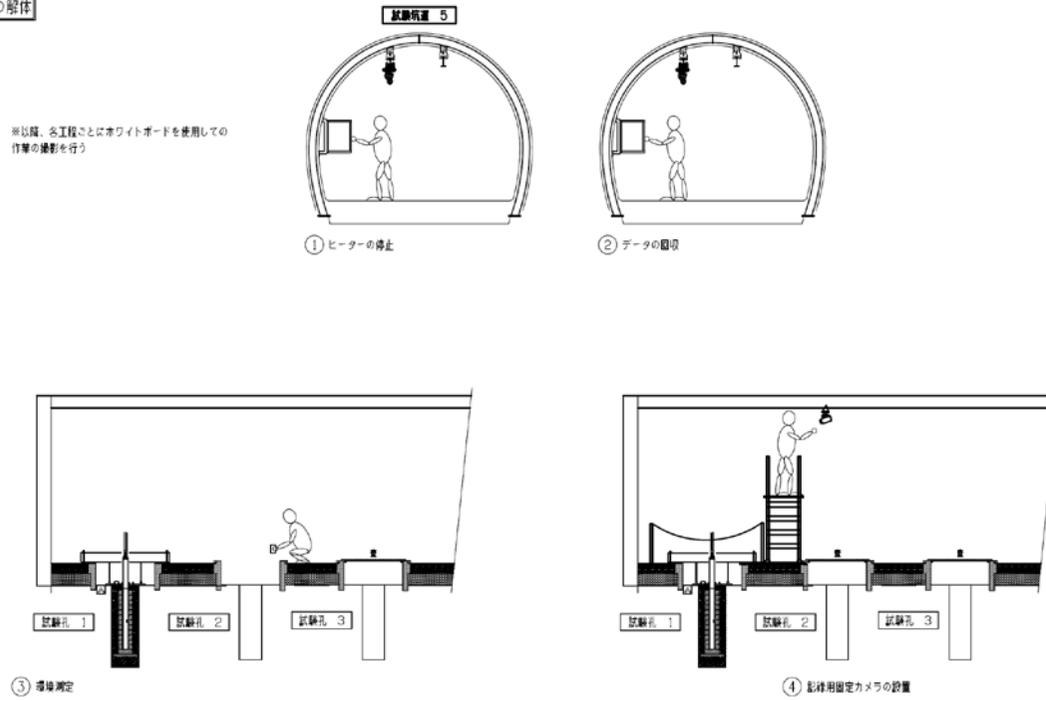


図 3.3.1-7 幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (2/9)

地下での解体

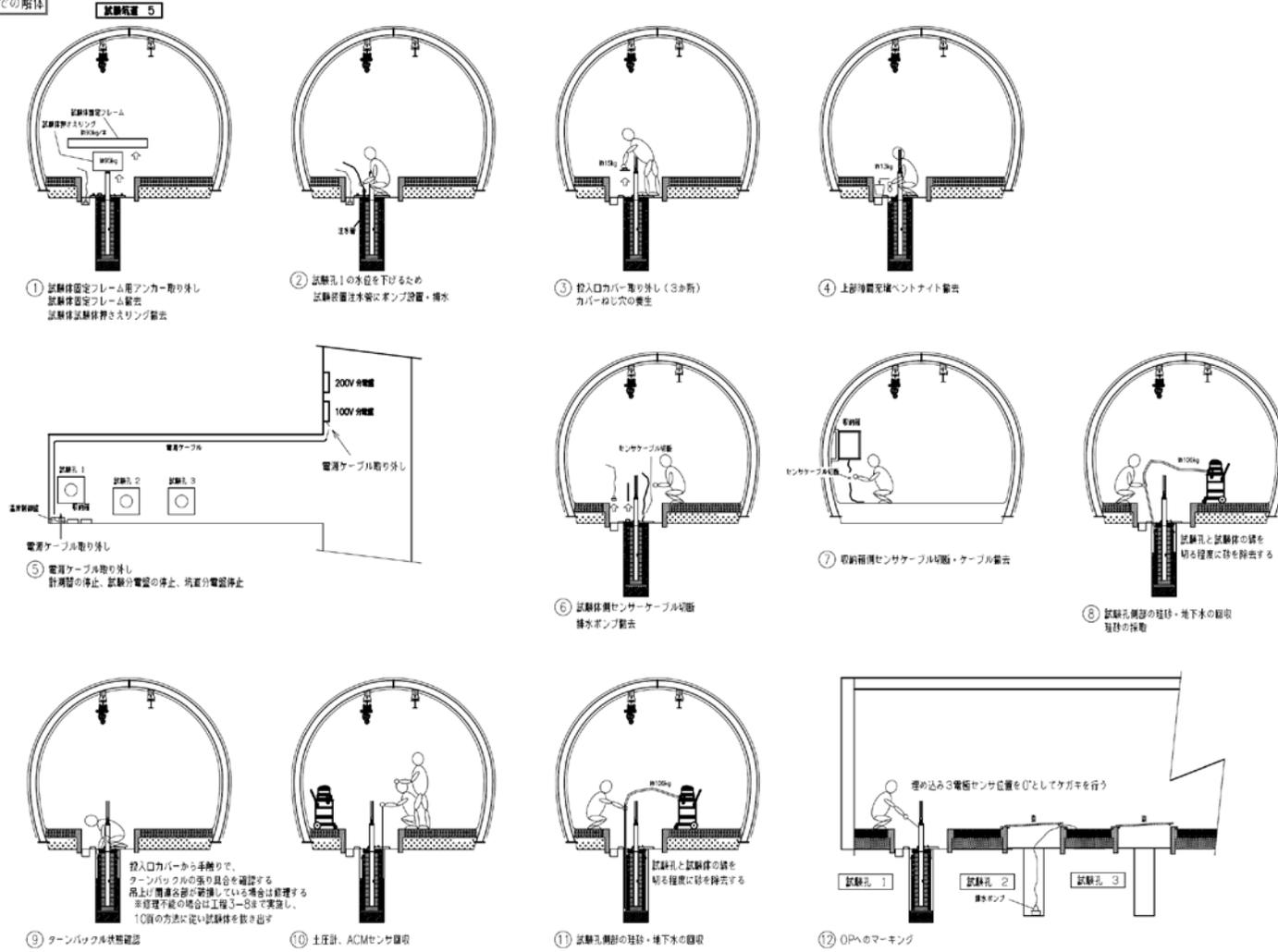


図 3.3.1-8 幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (3/9)

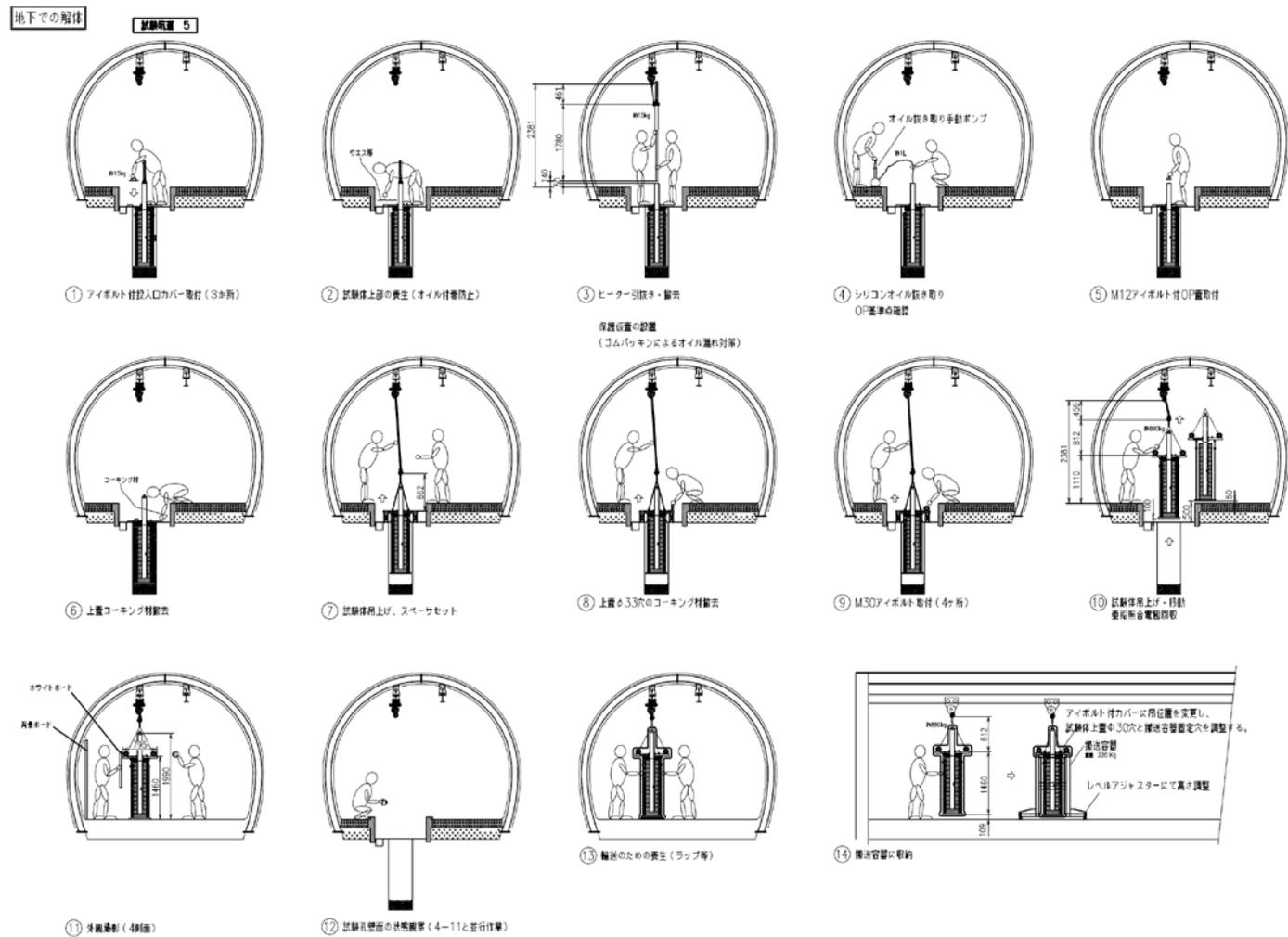
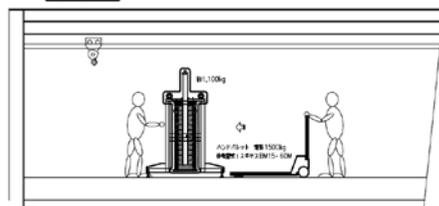


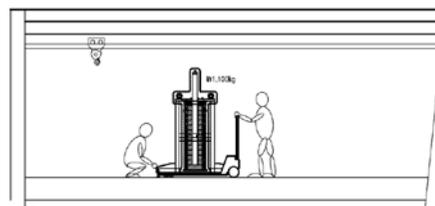
図 3.3.1-9 幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (4/9)

地下での解体

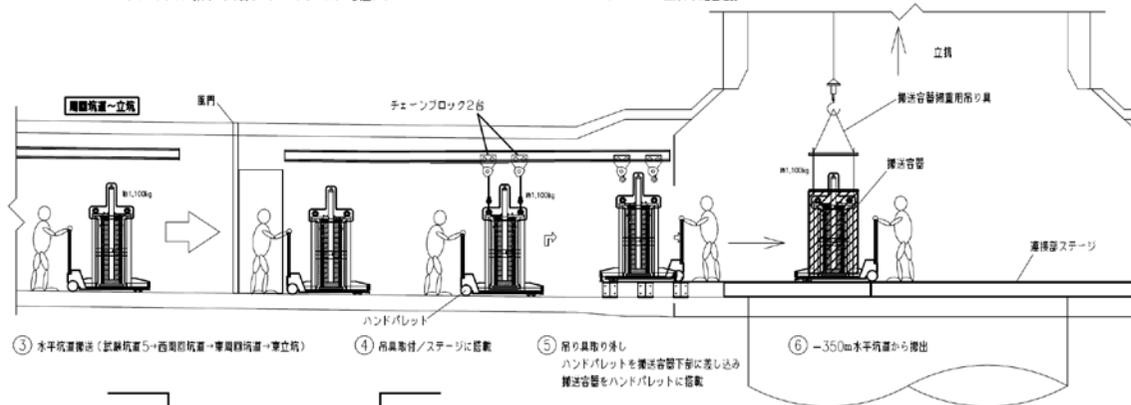
試験装置 5



① ハンドパレットを搬送容器下部に差し込み  
ハンドパレットが挿入できる高さレベルアジャスタで調整する



② 搬送容器をハンドパレットに搭載  
ハンドパレット上昇、安定性確認

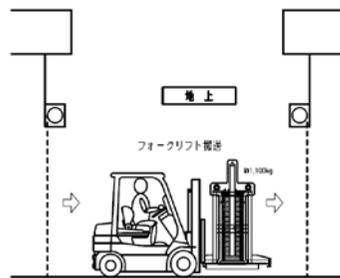


③ 水平搬送機法 (試験装置5→西側回航路→東側回航路→東立坑)

④ 吊具吊付/ステージに搭載

⑤ 吊り具取り外し  
ハンドパレットを搬送容器下部に差し込み  
搬送容器をハンドパレットに搭載

⑥ -35.0m水平坑道から搬出



⑦ 地上解体場所へ搬送 (試験体の振動及び転倒に注意して搬送する)

図 3.3.1-10 幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (5/9)

地上での解体

地上施設

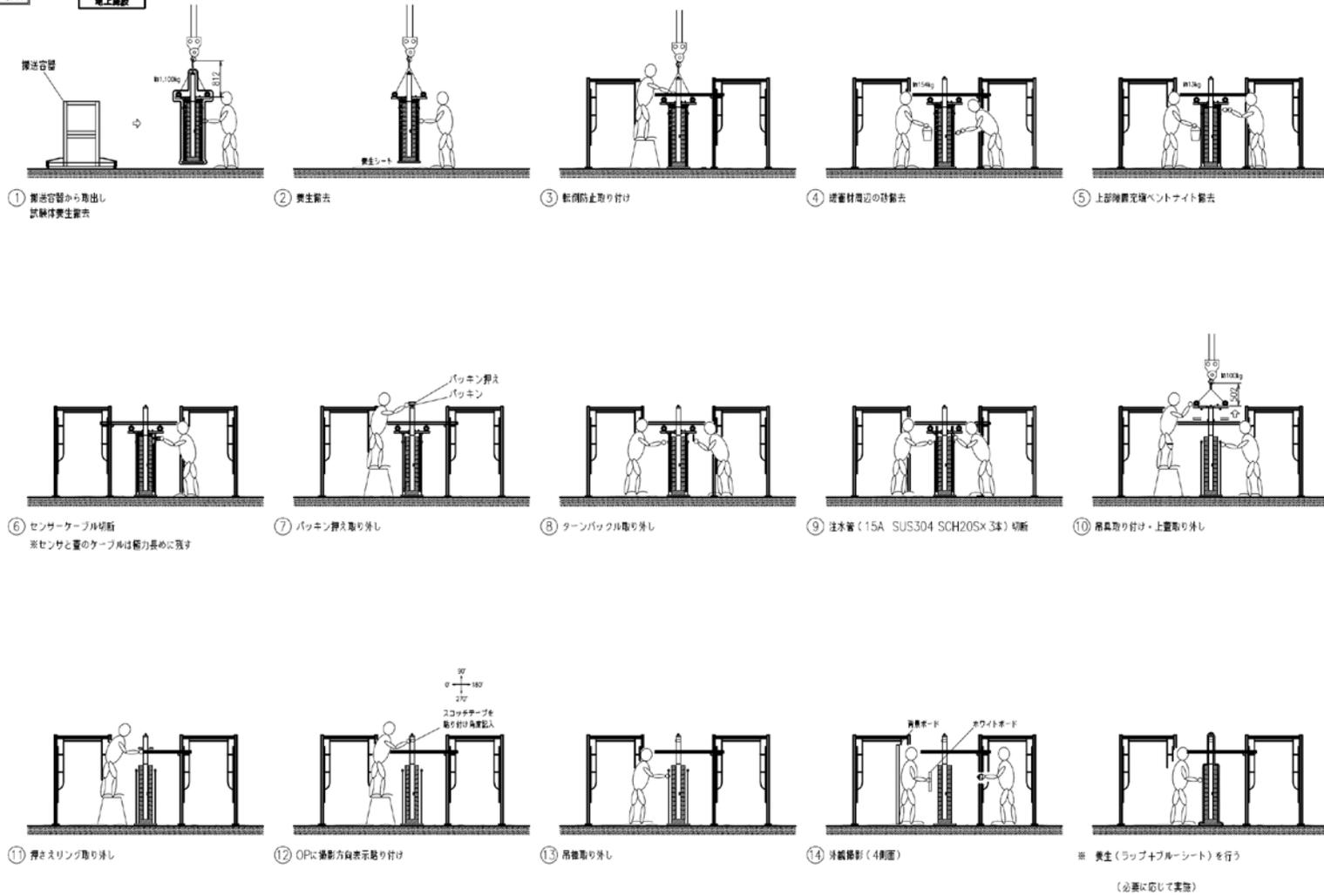


図 3.3.1-11 幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (6/9)

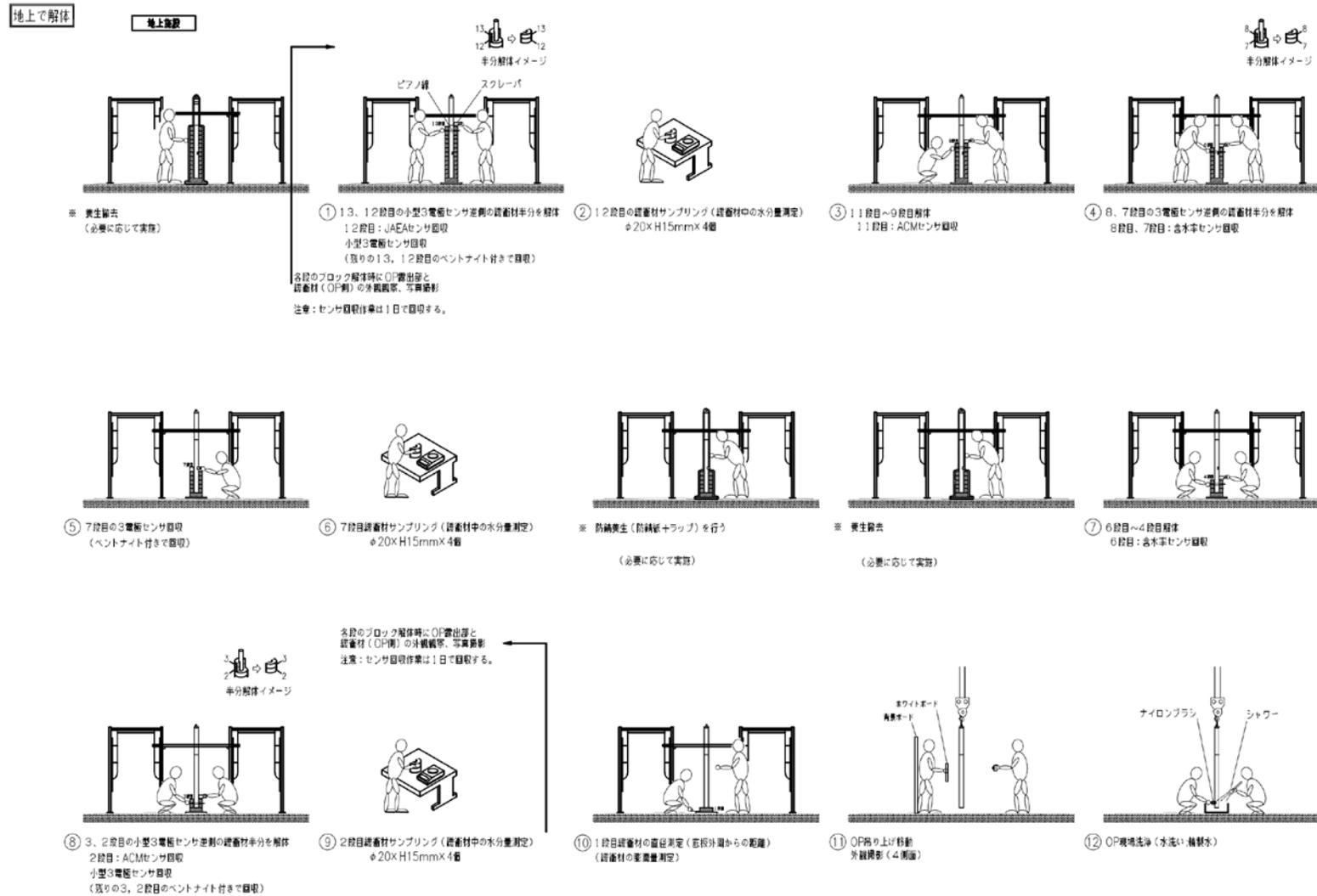


図 3.3.1-12 幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (7/9)

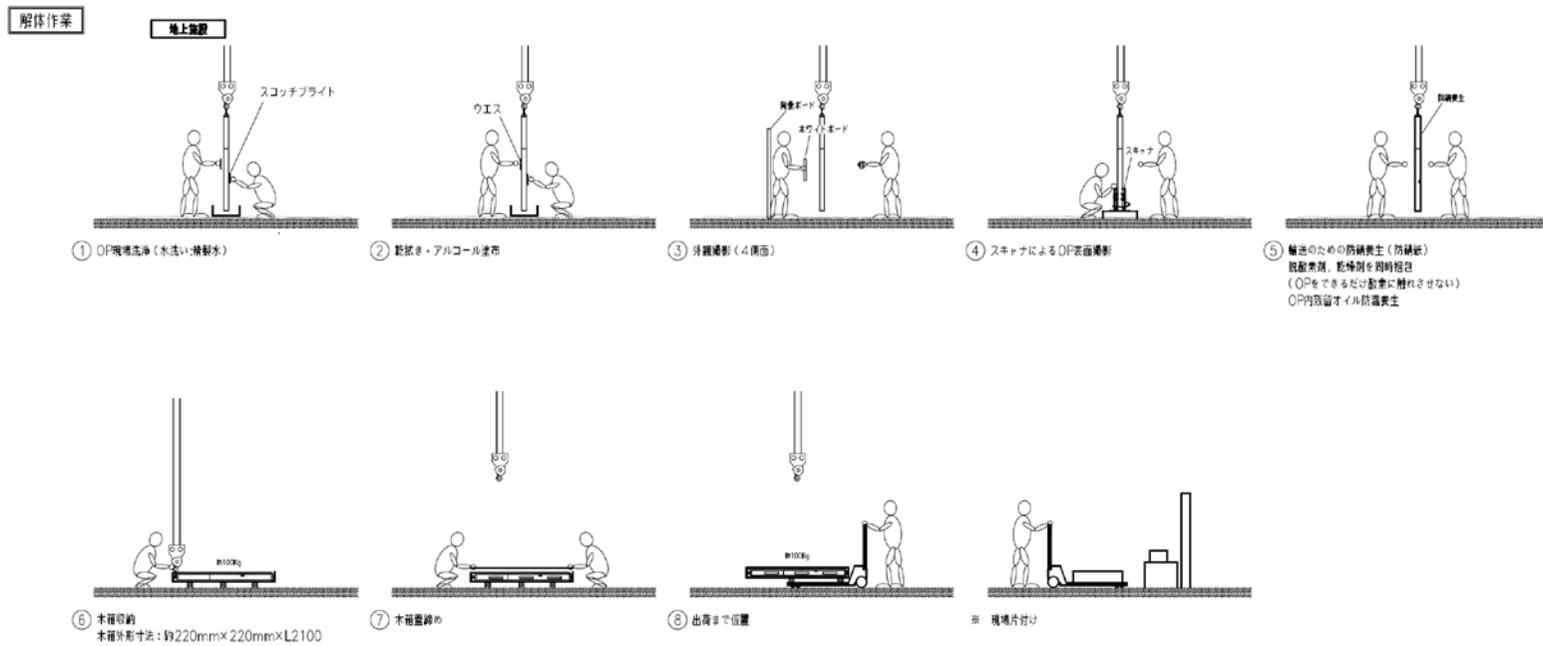


図 3.3.1-13 幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー（8/9）

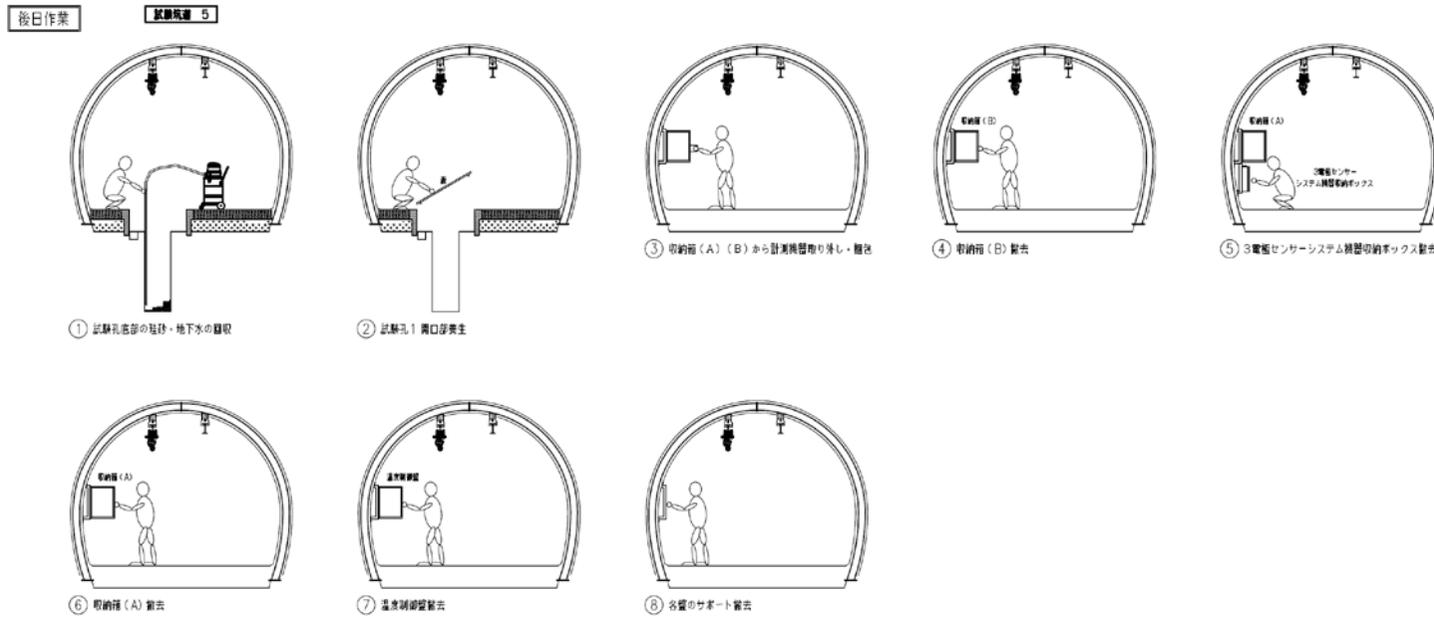


図 3.3.1-14 幌延 URL 工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (9/9)

## 6) 試験装置解体作業

### a 解体事前作業

解体事前作業として、試験坑道 5 における安全带設置個所の設置、地上施設（西建屋）における模擬オーバーパック転倒防止の設置および資機材の搬入作業等を実施した。事前に試験坑道 5 の作業場所を確認した結果、既に水滴防止処理（裏面排水材の設置）が施工されており、坑道壁面からの水滴落下がほぼ無い事から、坑道壁面養生のための水滴落下防止の設置作業は省略した。試験坑道 5 の試験装置解体前の写真を図 3.3.1-15 に示す。



(a) 全景



(b) 近景

図 3.3.1-15 幌延 URL 工学規模試験 試験装置解体前

### b 地下での解体

解体 1 日目に、地下（試験坑道 5）において、ヒータの停止、データ回収、環境測定および記録用固定カメラの設置等を実施した。ヒータ停止状況、環境測定状況および記録用固定カメラ設置状況の写真を図 3.3.1-16 から図 3.3.1-18 に示す。



図 3.3.1-16 幌延 URL 工学規模試験 ヒータ停止状況



図 3.3.1-17 幌延 URL 工学規模試験 解体前環境測定状況（溶存酸素量測定）



図 3.3.1-18 幌延 URL 工学規模試験 記録用固定カメラ設置状況

解体 2 日目に実施した作業手順を以下に示し、作業状況写真を図 3.3.1-19～図 3.3.1-41 に示す。

- a) 試験体フレーム用アンカー及び試験体固定フレーム、試験体固定押さえリングの取外し
- b) 試験孔 1 の試験装置の注水管からポンプによる排水
- c) 試験孔 1 の試験装置の投入カバー取外し（3 か所）
- d) 試験孔 1 の試験体上部隙間充填ベントナイトの撤去
- e) 電源ケーブルの取り外し、計測器の停止
- f) 試験体側センサケーブル切断、排水ポンプ撤去
- g) 収納箱側センサケーブル切断・ケーブル撤去

- h) 試験孔側部の珪砂・地下水の回収、珪砂採取
- i) ターンバックの状態確認
- j) 土圧計、ACM センサー回収
- k) 試験孔側部の珪砂・地下水の回収
- l) 模擬オーバーパックへのマーキング
- m) アイボルト付き投入口カバー取付け（3か所）
- n) 試験体上部の養生（オイル付着防止）
- o) ヒータ引抜き・撤去
- p) シリコンオイル抜き取り
- q) M12 アイボルト付模擬オーバーパック蓋の取付け
- r) 上蓋コーキング材の撤去
- s) 試験体吊上げ、スペーサセット
- t) 上蓋Φ33穴のコーキング材撤去
- u) M30 アイボルト取付け（4か所）
- v) 試験体の吊上げ・移動
- w) 外観撮影
- x) 試験孔壁面の状態観察
- y) 輸送のためのラップ養生
- z) 搬送容器への収納
- aa) 搬送容器をハンドパレットへ搭載、坑道内搬送



図 3.3.1-19 幌延 URL 工学規模試験 試験体固定フレームの撤去



図 3.3.1-20 幌延 URL 工学規模試験 投入口カバーの取外し (3か所)



図 3.3.1-21 幌延 URL 工学規模試験 上部隙間充填ベントナイト撤去



図 3.3.1-22 幌延 URL 工学規模試験 試験体側センサケーブル切断



図 3.3.1-23 幌延 URL 工学規模試験 試験孔側部の珪砂・地下水の回収状況 (1/2)



使用した掃除機

図 3.3.1-24 幌延 URL 工学規模試験 試験孔側部の珪砂・地下水の回収状況 (2/2)



図 3.3.1-25 幌延 URL 工学規模試験 土圧計、ACM センサー回収



図 3.3.1-26 幌延 URL 工学規模試験 試験孔側部の珪砂・地下水の回収完了



図 3.3.1-27 幌延 URL 工学規模試験 アイボルト付投入口カバー取付け（3か所）

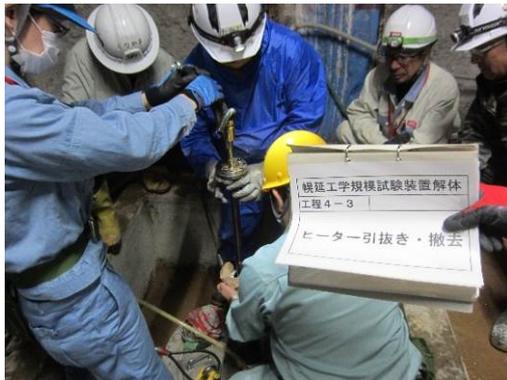


図 3.3.1-28 幌延 URL 工学規模試験 ヒータ引抜き・撤去



図 3.3.1-29 幌延 URL 工学規模試験 シリコンオイル抜き取り（手動ポンプ使用）



図 3.3.1-30 幌延 URL 工学規模試験 M12 アイボルト付模擬オーバーパック蓋取付け



図 3.3.1-31 幌延 URL 工学規模試験 上蓋コーキング材撤去



図 3.3.1-32 幌延 URL 工学規模試験 試験体吊上げ、スペーサセット



図 3.3.1-33 幌延 URL 工学規模試験 上蓋Φ33 穴のコーキング材撤去



図 3.3.1-34 幌延 URL 工学規模試験 M30 アイボルト取付け (4か所)



図 3.3.1-35 幌延 URL 工学規模試験 試験体の吊上げ



※113°付近については撮影スペースが確保できなかったため分割して撮影

図 3.3.1-36 幌延 URL 工学規模試験 試験体外観撮影



図 3.3.1-37 幌延 URL 工学規模試験 試験孔壁面の状態



図 3.3.1-38 幌延 URL 工学規模試験 搬送のための試験体のラップ養生



図 3.3.1-39 幌延 URL 工学規模試験 試験体を搬送容器に収納



図 3.3.1-40 幌延 URL 工学規模試験 搬送容器をハンドパレットに搭載



図 3.3.1-41 幌延 URL 工学規模試験 搬送容器の坑道内搬送（深度 350m 東立坑接続部まで）

解体 3 日目に実施した作業手順を以下に示し、作業状況写真を図 3.3.1-42～図 3.3.1-54 に示す。

- a) 搬送容器の地下 350m 坑道からの搬出
- b) 地上解体場所（西建屋）へ搬送
- c) 搬送容器から試験体の取出し
- d) 模擬オーバーパック転倒防止の取付け
- e) 緩衝材周辺の砂撤去
- f) 上部隙間充填ベントナイト撤去
- g) センサケーブル切断
- h) パッキン押さえ取外し
- i) ターンバックル取外し
- j) 吊具取付け・上蓋取外し
- k) 押さえリング取外し
- l) 模擬オーバーパックに撮影方向表示貼付け
- m) 吊棒取外し
- n) 外観撮影、養生



図 3.3.1-42 幌延 URL 工学規模試験 搬送容器の地下 350 m 坑道からの搬出



図 3.3.1-43 幌延 URL 工学規模試験 地上解体場所（西建屋）へ搬送



図 3.3.1-44 幌延 URL 工学規模試験 搬送容器から試験体の取出し



図 3.3.1-45 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック転倒防止の取付け



図 3.3.1-46 幌延 URL 工学規模試験 緩衝材ブロック周辺の砂撤去



図 3.3.1-47 幌延 URL 工学規模試験 上部ベントナイト撤去



図 3.3.1-48 幌延 URL 工学規模試験 センサケーブル切断



図 3.3.1-49 幌延 URL 工学規模試験 ターンバックル取外し



図 3.3.1-50 幌延 URL 工学規模試験 吊具取付け、上蓋取外し



図 3.3.1-51 幌延 URL 工学規模試験 押さえリング取外し



図 3.3.1-52 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパックに撮影方向表の貼付け



23°付近



113°付近



203°付近



293°付近

図 3.3.1-53 幌延 URL 工学規模試験 解体前試験体外観撮影



図 3.3.1-54 幌延 URL 工学規模試験 ラップ養生

解体4日目に実施した作業手順を以下に示し、作業状況写真を図 3.3.1-55～図 3.3.1-68 に示す。  
なお、各段のブロック解体時に実施した緩衝材ブロックの外観観察結果を図 3.3.1-58～図 3.3.1-60 に示す。

- a) 養生撤去、緩衝材解体
- b) 緩衝材のサンプリング
- c) ACM センサー・3 電極センサー回収
- d) 模擬オーバーパック吊上げ移動、模擬オーバーパック外観撮影（現場洗浄前）
- e) 模擬オーバーパック現場洗浄（水洗い：精製水）
- f) 模擬オーバーパック乾拭き、アルコール塗布
- g) 模擬オーバーパック外観撮影（現場洗浄後）
- h) スキャナによる模擬オーバーパック表面撮影
- i) 輸送のための防錆養生（防錆紙）
- j) 木箱収納、木箱蓋締め、現場片付け



図 3.3.1-55 幌延 URL 工学規模試験 緩衝材の解体



図 3.3.1-56 幌延 URL 工学規模試験 緩衝材のサンプリング（水分量測定用）



図 3.3.1-57 幌延 URL 工学規模試験 3 電極センサー回収

No		
13		
12	113° 付近	293° 付近
11		
	113° 付近	293° 付近
10		
	23° 付近	203° 付近
9		
	23° 付近	203° 付近

図 3.3.1-58 幌延 URL 工学規模試験 緩衝材ブロック 模擬オーバーパック側表面状態

No		
8	 <p data-bbox="507 389 632 421">113° 付近</p>	<p data-bbox="938 297 1270 329">3 電極センサー回収のため</p> <p data-bbox="1043 344 1165 376">画像なし</p> <p data-bbox="1037 392 1171 423">293° 付近</p>
7	 <p data-bbox="507 631 632 663">113° 付近</p>	 <p data-bbox="1037 631 1171 663">293° 付近</p>
6	 <p data-bbox="507 969 632 1001">23° 付近</p>	 <p data-bbox="1037 969 1171 1001">203° 付近</p>
5	 <p data-bbox="507 1256 632 1288">23° 付近</p>	 <p data-bbox="1037 1256 1171 1288">203° 付近</p>

図 3.3.1-59 幌延 URL 工学規模試験 緩衝材ブロック 模擬オーバーパック側表面状態 (2/3)

No		
4	 <p data-bbox="507 488 628 521">23° 付近</p>	 <p data-bbox="1034 488 1166 521">203° 付近</p>
3	 <p data-bbox="507 779 628 813">113° 付近</p>	 <p data-bbox="1034 958 1166 992">293° 付近</p>
2	 <p data-bbox="507 1048 628 1081">113° 付近</p>	
1		

図 3.3.1-60 幌延 URL 工学規模試験 緩衝材ブロック 模擬オーバーパック側表面状態 (3/3)



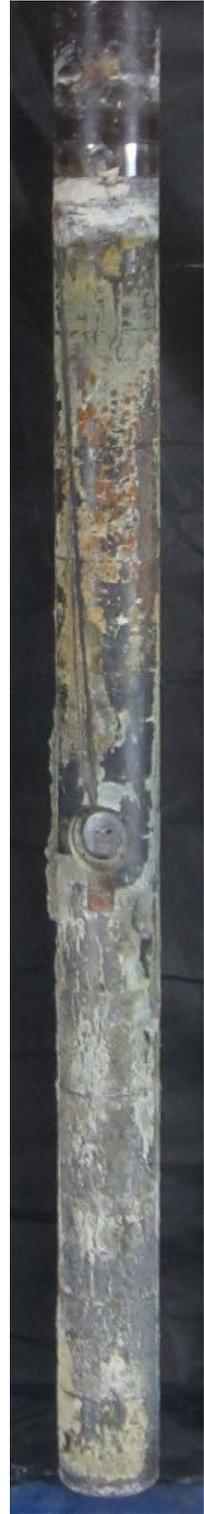
23°付近



113°付近



203°付近



293°付近

図 3.3.1-61 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック外観撮影（現場洗浄前）



図 3.3.1-62 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック現場洗浄（水洗い：精製水）



図 3.3.1-63 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック乾拭き・アルコール塗布



図 3.3.1-64 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック現場洗浄完了



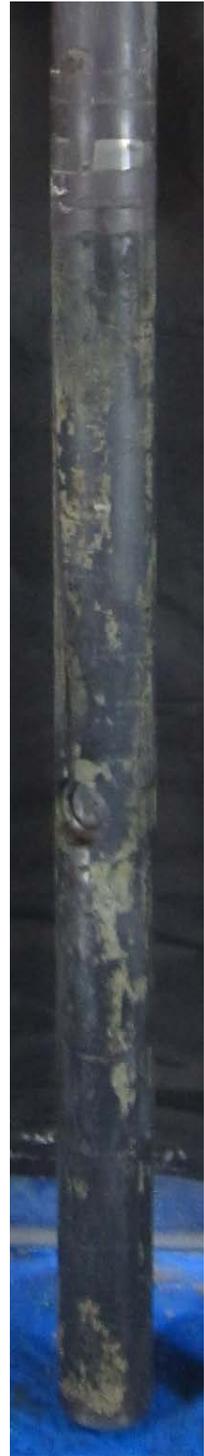
23°付近



113°付近



203°付近



293°付近

図 3.3.1-65 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック外観撮影（現場洗浄後）



図 3.3.1-66 幌延 URL 工学規模試験 スキャナによる模擬オーバーパック表面撮影



図 3.3.1-67 幌延 URL 工学規模試験 輸送のための防錆養生（防錆紙）



図 3.3.1-68 幌延 URL 工学規模試験 木箱収納、木箱蓋締め

c 片付け等作業

解体4日目以降に実施した片付け等作業の手順を以下に示し、作業状況写真を図 3.3.1-69～図 3.3.1-72 に示す。

- a) 試験孔底部の珪砂・地下水の回収
- b) 試験孔1 開口部養生
- c) 収納箱からの計測機器取出し
- d) 収納箱の撤去
- e) 作業エリアの片付け



図 3.3.1-69 幌延 URL 工学規模試験 試験孔底部の珪砂・地下水の回収



図 3.3.1-70 幌延 URL 工学規模試験 試験孔底部の珪砂・地下水の回収完了



図 3.3.1-71 幌延 URL 工学規模試験 試験孔 1 開口部養生（木蓋設置）



図 3.3.1-72 幌延 URL 工学規模試験 片付け完了

## (2) 模擬オーバーパットの脱錆処理

### 1) 模擬オーバーパットの脱錆処理方法

模擬オーバーパットの脱錆方法として、JISZ2371:2000 参考表 1 「科学的腐食除去方法」に記載されている塩酸ヘキサメチレンテトラミンによる鉄及び鋼の腐食除去方法を採用した。詳細を表 3.3.1-3 に示す。浸漬時間については、本試験が模擬オーバーパット表面の計測を目的としていることから、地金への影響を考慮し、目視により腐食除去を判断し、浸漬終了の目安とした。脱錆に使用した各種溶液の成分については表 3.3.1-4 に、模擬オーバーパットの脱錆フローを図 3.3.1-73 に示す。

表 3.3.1-3 幌延 URL 工学規模試験 JISZ2371:2000 記載方法と本試験での除去方法の差異

	JISZ2371:2000 記載 塩酸へキサメチレンテトラミンに よる鉄及び鋼の腐食除去方法	幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック腐食除去
薬品	塩酸 (JIS K 8180) 500mL とへキサメチレンテトラミン (JIS K 8847) 3.5g に蒸留水を加えて 1,000mL にする。	
時間	10 分	設定しない。 (目視による腐食除去の確認)
温度	20~25°C	

表 3.3.1-4 幌延 URL 工学規模試験 脱錆作業使用溶液の成分

	使用工程	成分
クールミン K-100	脱脂作業	<ul style="list-style-type: none"> <li>・グルコン酸ナトリウム (<math>C_6H_{11}O_7</math>) 含有率：2~3%</li> <li>・水酸化カリウム (KOH) 含有率：25~30%</li> </ul>
クールミン O4	脱錆液の中和及び防錆作業	<ul style="list-style-type: none"> <li>・リン酸水素二ナトリウム (<math>Na_2HPO_4</math>) 含有率：15%</li> <li>・ピロリン酸四カリウム (<math>K_4P_2O_3</math>) 含有率：15%</li> </ul>

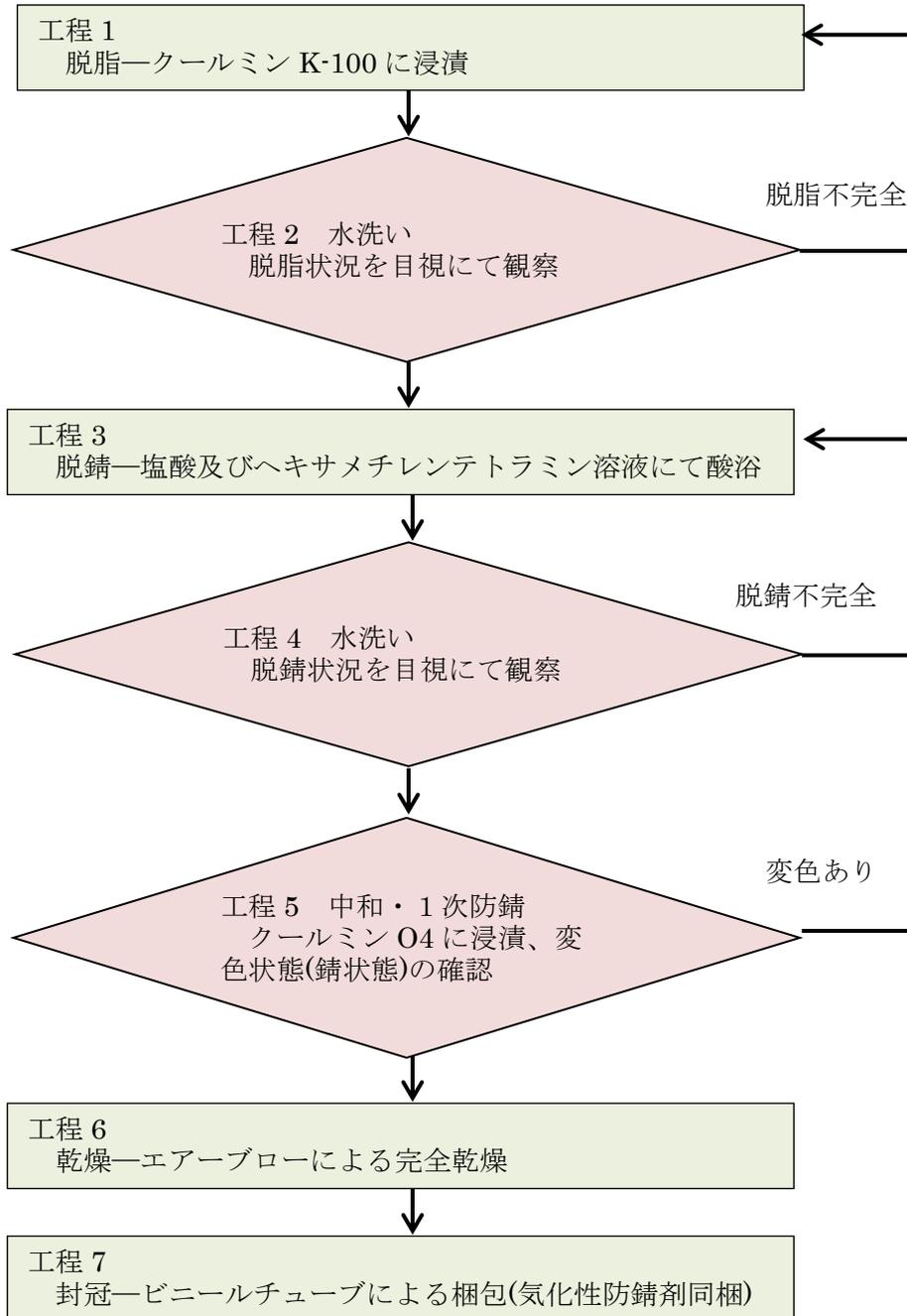


図 3.3.1-73 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック脱錆フロー

## 2) 脱錆処理作業

模擬オーバーパック表面をクールミン K-100 による脱脂処理及び脱脂処理後高圧洗浄を行った。作業の様子を図 3.3.1-74 に示す。



脱脂作業



脱脂後 高圧洗浄

図 3.3.1-74 幌延 URL 工学規模試験 脱脂作業・高圧洗浄作業

脱脂後、模擬オーバーパックを脱錆溶液に浸漬した。浸漬作業の様子を図 3.3.1-75 左に示す。図 3.3.1-75 右の様に浸漬直後から模擬オーバーパック表面から泡が生じた。

浸漬開始から 5 分後、図 3.3.1-76 の様に一度試験体を拔出し、高圧洗浄、防錆・中和処理後に表面の確認を行った。模擬オーバーパック表面から錆が除去され光沢が確認されたため脱錆作業を完了とした。



模擬オーバーパックの脱錆溶液への浸漬



脱錆の様子

図 3.3.1-75 幌延 URL 工学規模試験 脱錆処理



図 3.3.1-76 幌延 URL 工学規模試験 脱錆工程終了時の模擬オーバーパック（浸漬 5 分後）

脱錆作業終了後は模擬オーバーパック表面の塩酸及びヘキサメチレンテトラミン溶液中和及び防錆を目的としてクールミン O4 に浸漬させた。中和・防錆作業後の模擬オーバーパック表面を図 3.3.1-77 に示す。



23°付近

113°付近

203°付近

293°付近

図 3.3.1-77 幌延 URL 工学規模試験 脱錆・防錆処理後の模擬オーバーパック

模擬オーバーパック表面を観察した際に3電極センサー設置位置を0°基準とした場合、90°～270°に顕著な錆がみられた、については脱錆後に図 3.3.1-78 の様な局所的な腐食がみられた。



図 3.3.1-78 幌延 URL 工学規模試験 局在腐食箇所

### 3.3.2 幌延 URL における工学規模試験の測定・分析結果

#### (1) 模擬オーバーパックの表面スキャン

##### 1) 酸洗浄前

酸洗浄前の模擬オーバーパック表面のスキャン撮影を表 3.3.2-1 に示す箇所・撮影面で実施した。

表 3.3.2-1 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック表面のスキヤン撮影項目

機器、センサー 名称	撮影箇所 位置決めブロック段数	撮影面*	
		180° 側	0° 側
模擬オーバーパック 溶接試験体本体	6 段目 (最上段)	○	○
	5 段目	○	○
	4 段目	○	○
	3 段目	○	○
	2 段目	○	○
	1 段目	○	○
	ブロック無	○	○

※7 段、各 2 回計測で、計 14 回の撮影を行なった。

※各位置決めブロック段数にて、スキヤナ装置の高さを定め、撮影面は図 3.3.2-1 の C (180°) 側および A (0°) 側を起点とし、1 回あたり 360 度以上、計 2 回撮影を行なった。

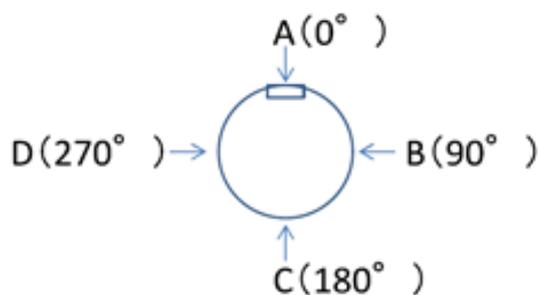


図 3.3.2-1 幌延 URL 工学規模試験 埋込式 3 電極センサー位置と角度の関係 (模擬オーバーパックを延長管側から見た場合の図)

撮影は、幌延深地層研究センター、西立坑建屋内で実施した。

図 3.3.2-1 の A 面 (0°) は埋め込み式 3 電極センサー設置側、B (90°) D (270°) 面は溶接部に相当する。C (180°) 面に撮影用目盛 (テープメジャー) を貼って表面をスキヤンすることで、軸方向の撮影画像と撮影位置の対応を示す画像を取得した。撮影用目盛で隠れる箇所は、撮影用目盛を剥がしてからスキヤン画像を取得して画像合成することで補完した。

模擬オーバーパック試験体表面の撮影機器の外観を図 3.3.2-2 に示す。このスキヤン機器は、表 3.3.2-1 に示すとおり模擬オーバーパック試験体表面の長手方向・計 7 分割での撮影に対応するため、6 つの位置決めブロックの積み上げ段数を変えることで、スキヤナの周方向移動時の高さを定めた。

表面のスキヤン画像は、ラインスキヤナを図 3.3.2-2 に示す把持回転治具に取り付け、手で支持用ドーナツ盤上を 360 度強回転させることで撮影した。

ブロック高さは、スキヤナの撮影幅より小さく設定しており、ブロックを 1 つ外すごとに撮影した画像は、その一部が重複する。このため、模擬オーバーパック試験体の周方向表面と同様、軸方向にもスキヤン画像を結合することを可能とした。

ブロック高さは、スキヤナの撮影幅より小さく設定しており、ブロックを 1 つ外すごとに撮影した画像は、その一部が重複する。このため、模擬オーバーパック試験体の周方向表面と同様、

軸方向にもスキャン画像を結合することを可能とした。画像結合後のスキャン画像を図 3.3.2-3 に示す。なお、同図の赤色の矢印で示す箇所の境界線は、ベントナイトブロックの接合面後述する酸洗後の画像（図 3.3.2-5）でも同様にブロックの接合面に一致する境界線を確認できる。

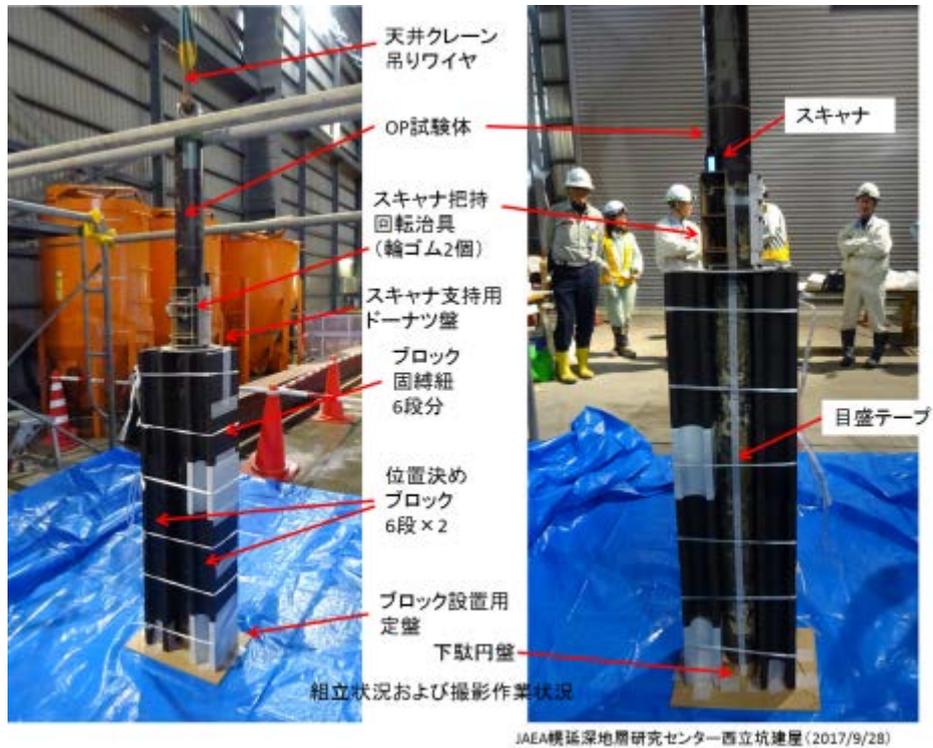


図 3.3.2-2 スキャナ撮影機器（模擬オーバーパック 最上部の周方向表面撮影時の外観）

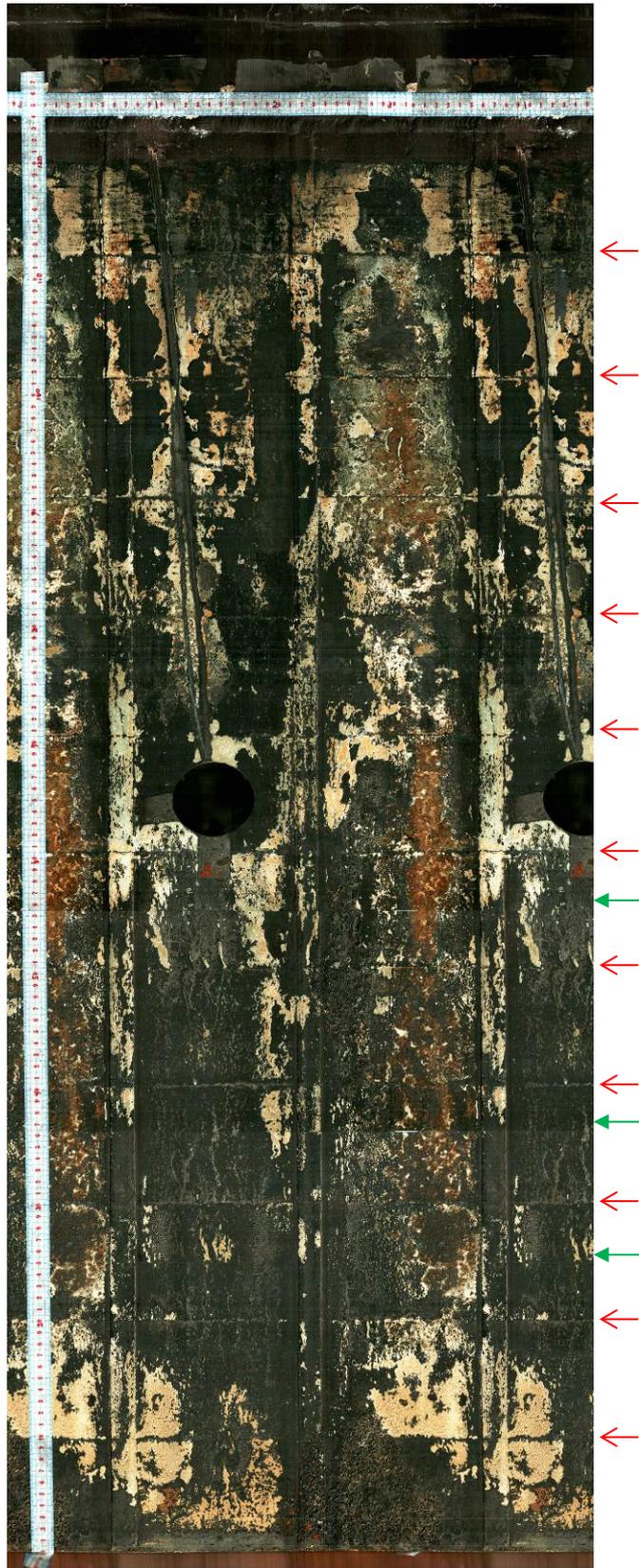


図 3.3.2-3 幌延 URL 工学規模試験 画像結合後の模擬オーバーパック表面スキャン画像（幌延  
現地撮影・酸洗前）

## 2) 酸洗浄後

酸洗浄後の模擬オーバーパック表面のスキャン撮影を、酸洗浄前と同一の機器を使用し、表 3.3.2-1 に示す箇所・撮影面で実施した。

模擬オーバーパック試験体表面の撮影機器の外観と作業状況を図 3.3.2-4 に示す。画像結合後のスキャン画像を図 3.3.2-5 に示す。

なお、同図の赤色の矢印で示す箇所の境界線は、酸洗浄前のスキャン画像（図 3.3.2-3）同様、ベントナイトブロックの接合面に相当する。緑色の矢印で示す画像結合に伴う境界線とは異なる。目視により、赤色の矢印で示す酸洗浄後の模擬オーバーパック試験体表面の接合面位置は、周辺と比べて腐食減量が小さいことを確認した。

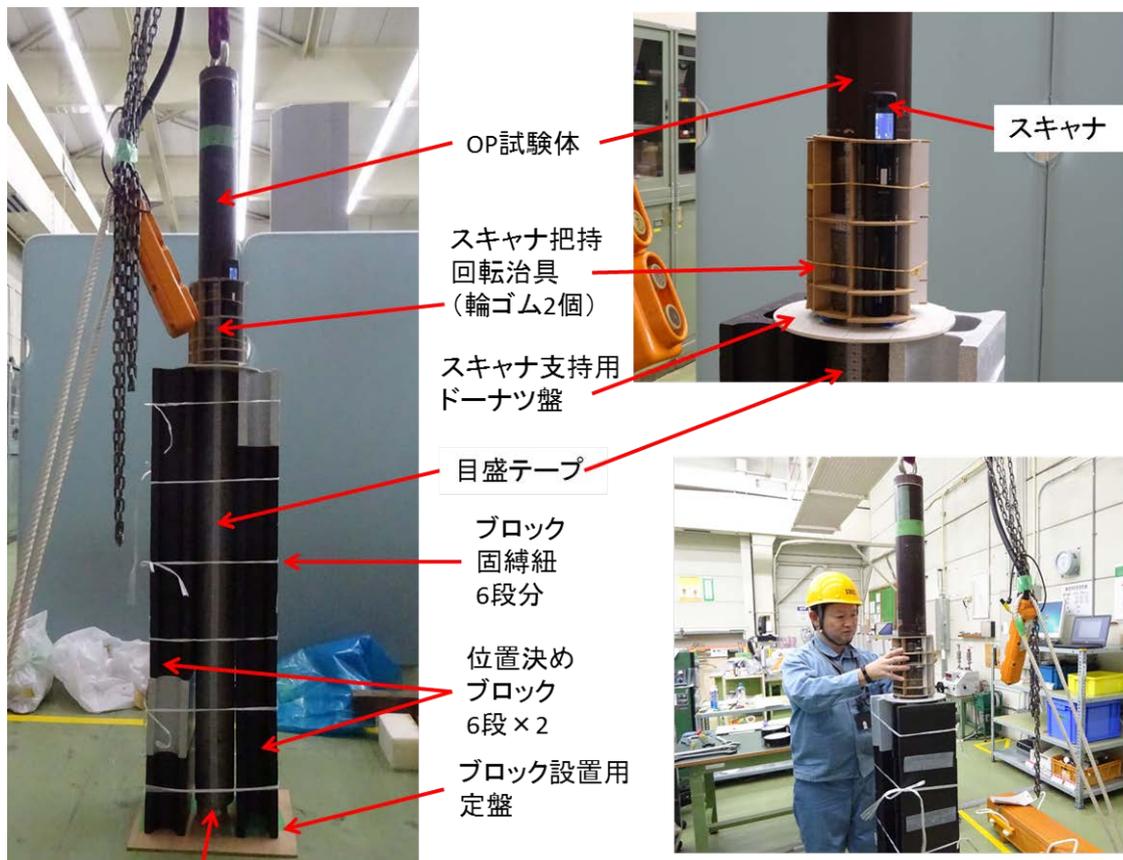


図 3.3.2-4 スキャナ撮影機器（模擬オーバーパック 最上部周方向撮影時の外観）および作業状況

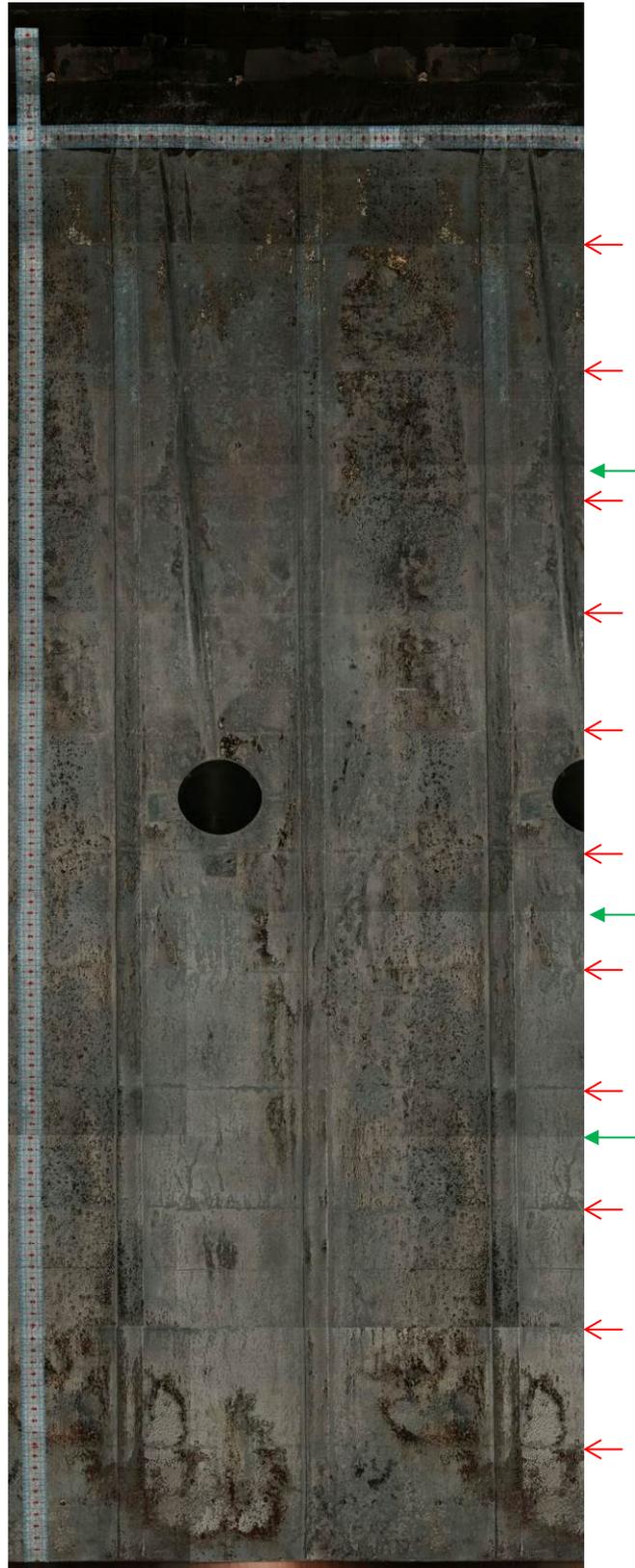


図 3.3.2-5 幌延 URL 工学規模試験 画像結合後の模擬オーバーパック表面スキャン画像（酸洗後）

## (2) 模擬オーバーパックの3次元計測

### 1) 実施内容

幌延 URL 工学規模試験用模擬オーバーパック試験体を対象に、以下の評価を行った。

- 3次元形状計測による腐食試験前後の形状変化（腐食深さ分布）の導出
- 酸洗前・酸洗後の模擬オーバーパック試験体表面スキャン画像撮影（腐食深さ分布との比較用）
- 腐食深さ分布とスキャン画像の比較

### 2) 3次元形状計測による腐食試験前後の形状変化（腐食深さ分布）

腐食試験前後の形状変化を3次元形状計測で評価し、腐食深さ分布を求めた。結果を図 3.3.2-6 と図 3.3.2-7 に示す。図 3.3.2-6 は計測した全データを含む。同図は、最上部の絶縁塗装部と、模擬オーバーパック試験体の酸洗浄で除去不可等の理由で残る  $20\mu\text{m}$  より大きな凸部を含む（なお、 $20\mu\text{m}$  は全腐食深さ評価値の頻度分布を参考に設定した）。これらを除いたデータを図 3.3.2-7 に示す。

横方向が測定角度、縦方向が模擬オーバーパック試験体下端からの距離に相当し、表内の数値の上下配置が模擬オーバーパック試験体の試験実施時の上下方向に対応する。

表内の値は腐食試験前後の座標変化（差分値）であり、腐食深さ分布を示す。

負の値は試験前後比較による減量、正の値は増量を示す。赤枠内に示す数値は溶接部上の測定値を示す。表内の値の大小に応じたカラーコンターを併せて示しており、青色は正の値、赤色は負の値に対応する。色の濃度増減が値の絶対値の大小に対応する。

なお、茶色で示す領域は3電極センサーの埋込部であり、形状は未測定である。

### 3) 模擬オーバーパック試験体表面のスキャン画像比較

酸洗前後の模擬オーバーパック試験体表面のスキャンデータを並べて比較した（図 3.3.2-8）。酸洗前、表面に緩衝材が強固に付着していた箇所にも局在化腐食の傾向がある。

### 4) 腐食深さ分布とスキャン画像の比較

カラーコンターと酸洗前（図 3.3.2-9）・酸洗後（図 3.3.2-10）のスキャン画像をそれぞれ比較した。コンター図の腐食深さが大きい箇所と、局在化腐食が生じている箇所は、緩衝材が強固に付着していた領域とほぼ一致している。

[単位: μm]

		測定角度 [°]																																		
		348.8	337.5	326.3	315.0	303.8	292.5	281.3	270.0	258.8	247.5	236.3	225.0	213.8	202.5	191.3	180.0	168.8	157.5	146.3	135.0	123.8	112.5	101.3	90.0	78.8	67.5	56.3	45.0	33.8	22.5	11.3	0.0			
下端からの距離 [mm]	1215	-11	-8	-19	0	48	172	109	61	90	106	61	34	36	14	-19	-3	-12	-21	2	26	23	77	72	67	158	88	29	61	49	23	-10	-14	15		
	1195	-46	-36	-37	-27	-14	34	10	18	19	-1	-35	-2	-2	-39	-37	-9	-34	-35	-41	-38	-29	-27	-23	-49	18	-7	-89	-24	80	-50	-56	-45	-42		
	1175	-40	-18	-32	-29	350	-22	2	-10	-50	-14	-46	-13	7	-17	-10	2	-10	-6	-2	-7	-6	-2	-4	-35	2	-1	-83	-15	-17	-34	-34	-31	-42		
	1155	-13	-7	3	7	-14	-8	33	2	-93	-5	-26	0	0	-26	-17	-4	-37	-16	-14	-4	1	-13	-16	-30	-24	-7	-77	-15	-8	-20	-15	-8	-12		
	1135	-15	-4	-9	-10	-10	15	-13	8	-49	22	-45	-5	-29	-21	-17	-3	-11	-14	-11	0	-12	-14	-16	-57	3	-13	-73	-22	-7	-2	-30	-10	-13		
	1115	-15	-16	-3	40	1	-4	-10	35	-84	-9	-41	2	13	-9	-15	-5	-13	-9	-38	-15	-12	-9	-8	-40	-12	-1	-49	-16	-6	-20	-22	-20	-27		
	1095	-22	-14	-9	-3	2	-2	-6	54	-54	-4	-52	-14	8	-45	100	126	-22	-27	-29	-21	-18	-27	-19	-67	-14	1	-44	-7	-4	-16	-19	-18	-25		
	1075	-22	-21	-22	-19	18	-15	-8	-8	-119	-26	-39	128	-6	-70	-74	-23	-45	-14	-18	-14	-5	-7	-21	-14	13	6	-13	14	-1	-26	-19	-31	-31		
	1055	-18	-10	-9	5	6	11	-9	22	-64	-11	-25	2	-39	-67	-31	-37	-29	-48	-38	-32	179	-44	-44	-44	-3	-18	-32	-42	-19	-35	-22	13	-20		
	1035	-53	-34	-27	-19	-21	-22	-12	-7	110	-25	193	-1	-8	-52	127	-73	-93	174	-10	-13	-1	-2	-4	-19	6	-3	-26	-33	-25	-33	-47	-38	-51		
	1015	-16	-31	-21	-29	-28	-21	-10	-16	-83	-21	-54	-17	-31	-60	-39	-14	-55	-50	-34	-17	-13	-25	-11	-9	-8	-5	4	-11	-15	-11	-31	-24	-22		
	995	-18	-20	-15	-15	-16	-19	-19	-11	-86	-31	-14	-13	-6	-40	-31	-36	-29	-27	-25	-20	-17	-44	-15	-39	-9	1	5	-9	-9	17	-20	-26	-35		
	975	-45	-29	-27	-23	-24	-11	20	-9	-91	-28	-73	0	0	-27	-21	-111	-50	-53	-23	-19	-14	-31	-34	-38	-23	-64	-4	-33	-27	-22	-32	-31	-38		
	955	-35	-43	-27	-34	-21	-24	-19	-28	-105	-16	-61	-14	-3	-42	-38	-58	-68	-19	-39	-37	-19	-6	-7	-23	21	-19	9	-28	-22	-11	-24	-22	-29		
	935	-34	-16	-28	-30	-16	-16	-26	-1	-94	-21	-41	30	-10	-47	-30	-51	-45	-28	-29	-22	-20	-30	-18	-29	22	109	10	-20	-15	-12	-15	-14	-25		
	915	-30	-26	-23	-19	-25	-15	2	-6	-107	-12	-38	-6	-2	-33	-24	-15	-62	-39	-35	-25	-17	-11	-24	-24	16	102	1	-25	-14	-18	-28	-35	-22		
	895	-19	-32	-28	-27	-29	-23	-8	-7	-102	-13	-15	-10	-7	-57	-29	-10	-32	-29	-22	-89	-18	-9	-24	-33	7	110	0	-13	-22	-14	-19	-16	-19		
	875	-35	-34	-38	-36	-29	-29	-3	-4	-109	-16	-74	-25	0	-36	-28	-93	-42	-47	-36	-63	-17	-9	-18	-26	10	-43	-5	-36	-29	-26	-26	-25	-31		
	855	-57	-39	-44	-27	-18	-18	-8	-7	-56	-41	-27	9	-41	-25	-30	-79	-104	-71	-36	-39	-8	-5	-20	-15	4	-12	-16	-37	-26	-40	-37	-38	-41		
	835	-51	-51	-39	-31	-33	-24	-33	-10	-98	-33	-77	-37	-17	-64	-63	-1	-83	-71	-35	-11	-10	-9	-56	-18	5	-70	1	-29	-18	-44	-27	-33	-36		
	815	-38	-35	-37	-33	-53	-22	-18	-22	-132	-10	-43	-31	1	-43	-68	-17	-81	-154	-36	-34	0	1	-45	-24	1	-67	-36	-31	-22	-40	-48	-53	-38		
	795	-43	-25	-32	-36	-11	-15	-16	-4	-116	-3	-61	-39	-13	-41	-37	-23	-38	-63	-51	-22	-19	-44	-44	-49	-16	2	-4	-47	-15	-28	-28	-36	-39		
	775	-45	-57	-34	-52	-27	-52	-19	-29	-132	-3	-33	-16	7	-30	-77	-42	-75	-125	-117	-46	-30	-14	-47	-47	8	-22	7	-31	-87	-56	-55	-38	-52		
	755	-33	-35	-29	-38	-14	-18	-2	-15	-120	-17	-35	0	-9	-55	-37	-40	-82	-60	-26	-40	-17	-33	-22	-44	-10	-40	-8	-49	-23	-29	-25	-20	-40		
735	-26	-32	-85	-51	-27	-78	-26	-17	-104	-21	-46	-14	-26	-46	-53	-20	-49	-47	100	-40	-17	-2	-43	-48	3	11	3	-7	-12	-33	-16	-12	-34			
715	-31	-22	-56	-9	-62	-4	9	5	-100	-1	-87	-20	-2	-84	-20	-11	-75	-5	-110	-49	-27	-18	-20	-47	-35	-13	-2	-38	-35	-45	-23	-17	-38			
695	-28	-13	-57	-37	-40	-10	-13	-4	-111	-12	-50	-41	-58	-42	-55	-46	-43	-43	-22	-27	-17	-26	-61	-47	-10	-25	-1	-25	-43	-62	-21	-13	-31			

		353.4	342.8	332.2	321.6	311.0	300.4	289.9	279.3	268.7	258.1	247.5	236.9	226.3	215.7	205.1	194.6	184.0	173.4	162.8	152.2	141.6	131.0	120.4	109.9	99.3	88.7	78.1	67.5	56.9	46.3	35.7	25.1	14.6	4.0	
下端からの距離 [mm]	675												-49	-71	-6	-13	-11	-15	-18	-16	-36	58	-24	-20	-18	-49	-31	3	-11	-11						
	655												-49	-71	-6	-13	-11	-15	-18	-16	-36	58	-24	-20	-18	-49	-31	3	-11	-11						
	635												-49	-71	-6	-13	-11	-15	-18	-16	-36	58	-24	-20	-18	-49	-31	3	-11	-11						
	615												-49	-71	-6	-13	-11	-15	-18	-16	-36	58	-24	-20	-18	-49	-31	3	-11	-11						
	595	-24	-30	-16	-29	-49	-12	-27	-19	-8	-114	-4	-37	-3	-7	-43	-42	-41	-63	-43	-34	-20	-54	-9	-34	-45	13	-68	1	-42	-7	-9	-43	-42	-13	
	575	-31	-31	-48	-28	-28	-65	-31	-4	-1	-95	-7	-31	-2	-35	-34	-166	-15	-21	-23	-33	-42	-16	-9	-43	-47	-5	-20	1	-62	-4	-15	-34	-17	-6	
	555	-12	-17	-26	-21	-25	-31	0	-23	4	-101	4	-50	-27	-23	-31	-73	-42	-32	-31	43	-38	-26	-21	-36	-52	-11	-53	0	-40	-8	4	-32	-16	-1	
	535	-14	-14	-20	-31	-62	-9	1	-11	1	-89	-4	-33	-4	-53	-41	-41	-26	-32	-38	-19	-28	-32	-16	-12	-12	9	-25	-27	-68	4	7	-30	-17	-3	
	515	-16	-19	-21	-52	-42	-54	4	-5	11	-84	-2	-76	-29	-10	-32	-42	-62	-57	-51	-23	-23	-35	-25	-27	-53	-7	-7	-6	-62	-20	-1	-38	-24	-7	
	495	-30	-33	-39	-29	-33	-34	-23	-19	-12	-97	-10	-47	-11	-17	-34	-89	-20	-29	-119	-48	-2	-2	-39	9	-50	11	16	13	-32	-28	3	-38	-25	-18	
	475	-14	-20	-7	-39	-21	-54	-31	-41	7	-84	-4	-37	-16	-8	-53	-55	-27	-39	-32	-38	-27	-26	-37	-23	-36	1	-32	2	-35	-1	-10	-28	-18	-24	
	455	-17	-18	-14	-25	-32	-12	-9	-4	13	-94	-10	-27	-33	3	-35	-21	-17	-32	-56	-22	-33	-46	-25	-16	-31	-13	-63	-4	-44	-4	-11	-51	-35	-6	
	435	-39	-33	-11	-28	-37	-71	-45	14	-12	-15	-7	-76	-10	-5	-47	-23	-17	-81	-43	-32	-43	-56	-24	-14	-69	1	0	-1	-51	-5	-7	-50	-46	-32	
	415	-43	-34	-34	-39	-67	-22	-13	-13	-7	11	-2	-17	-14	17	176	-2	-79	-21	-30	-12	-23	-136	5	2	-12	-18	2	-6	-49	-25	-25	-49	-57	-43	
	395	-30	-25	-37	-12	-15	-80	-27	-43	-12	-83	-9	-38	-12	-6	-36	-27	-16	-39	-27	-22	-118	-16	-7	-2	-45	-4	9	9	-43	3	-2	-33	-22	-27	
	375	-37	-25	-44	-52	-13	-22	-45	-41	2	12	-15	-35	-29	-5	-32	-18	105	-50	-31	-25	-41	-33	-8	-21	-41	-6	6	2	-44	-14	-11	-42	-52	-17	
	355	-32	-26	-33	-39	-23	-23	-27	-32	-1	8	-4	-39	-13	-38	-28	-22	-34	-25	-61	-20	-51	-26	-36	-8	-19	8	5	-3	-43	-12	-2	-61	-27	-18	
	335	-37	-22	-13	-13	-45	-74	-4	-15	19	20	1	-30	7	-19	-62	-20	-51	-58	-50	-49	-75	18	-53	-12	-26	9	-5	-56	-19	-12	-44	-55	-18		
	315	-30	-47	-16	-31	-24	-15	-59	-4	6	10	-54	-32	-5	2	-37	-18	-15	-49	-26	-16	-84	-53	-24	-27	-16	4	-33	-1	-40	-16	-6	-51	-23	-23	
	295	-45	-13	-39	-23	-24	-12	-50	17	7	12	-5	-34	-6	-15	-36	-32	-16	-49	-25	-19	-48	-19	-12	-9	-22	6	-4	6	-35	3	7	-29	-23	-17	
	275	-30	-33	-32	-30	-23	-23	-28	-76	-12	4	-15	-42	-3	-6	-72	-51	-2	-44	-40	-4	-6	-85	1	-14	-47	20	-27	7	-35	-4	-15	-58	-25	-16	
	255	-37	-36	-29	-18	-20	-15	-41	-6	2	-25	-33																								





図 3.3.2-8 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック試験体 表面スキャン画像  
(左：酸洗前、右：酸洗後)

測定位置 [mm]		腐食深さ [mm]		酸洗後 [mm]	
100	100	0.0	0.0	0.0	0.0
100	110	0.0	0.0	0.0	0.0
100	120	0.0	0.0	0.0	0.0
100	130	0.0	0.0	0.0	0.0
100	140	0.0	0.0	0.0	0.0
100	150	0.0	0.0	0.0	0.0
100	160	0.0	0.0	0.0	0.0
100	170	0.0	0.0	0.0	0.0
100	180	0.0	0.0	0.0	0.0
100	190	0.0	0.0	0.0	0.0
100	200	0.0	0.0	0.0	0.0
100	210	0.0	0.0	0.0	0.0
100	220	0.0	0.0	0.0	0.0
100	230	0.0	0.0	0.0	0.0
100	240	0.0	0.0	0.0	0.0
100	250	0.0	0.0	0.0	0.0
100	260	0.0	0.0	0.0	0.0
100	270	0.0	0.0	0.0	0.0
100	280	0.0	0.0	0.0	0.0
100	290	0.0	0.0	0.0	0.0
100	300	0.0	0.0	0.0	0.0
100	310	0.0	0.0	0.0	0.0
100	320	0.0	0.0	0.0	0.0
100	330	0.0	0.0	0.0	0.0
100	340	0.0	0.0	0.0	0.0
100	350	0.0	0.0	0.0	0.0
100	360	0.0	0.0	0.0	0.0
100	370	0.0	0.0	0.0	0.0
100	380	0.0	0.0	0.0	0.0
100	390	0.0	0.0	0.0	0.0
100	400	0.0	0.0	0.0	0.0
100	410	0.0	0.0	0.0	0.0
100	420	0.0	0.0	0.0	0.0
100	430	0.0	0.0	0.0	0.0
100	440	0.0	0.0	0.0	0.0
100	450	0.0	0.0	0.0	0.0
100	460	0.0	0.0	0.0	0.0
100	470	0.0	0.0	0.0	0.0
100	480	0.0	0.0	0.0	0.0
100	490	0.0	0.0	0.0	0.0
100	500	0.0	0.0	0.0	0.0
100	510	0.0	0.0	0.0	0.0
100	520	0.0	0.0	0.0	0.0
100	530	0.0	0.0	0.0	0.0
100	540	0.0	0.0	0.0	0.0
100	550	0.0	0.0	0.0	0.0
100	560	0.0	0.0	0.0	0.0
100	570	0.0	0.0	0.0	0.0
100	580	0.0	0.0	0.0	0.0
100	590	0.0	0.0	0.0	0.0
100	600	0.0	0.0	0.0	0.0
100	610	0.0	0.0	0.0	0.0
100	620	0.0	0.0	0.0	0.0
100	630	0.0	0.0	0.0	0.0
100	640	0.0	0.0	0.0	0.0
100	650	0.0	0.0	0.0	0.0
100	660	0.0	0.0	0.0	0.0
100	670	0.0	0.0	0.0	0.0
100	680	0.0	0.0	0.0	0.0
100	690	0.0	0.0	0.0	0.0
100	700	0.0	0.0	0.0	0.0
100	710	0.0	0.0	0.0	0.0
100	720	0.0	0.0	0.0	0.0
100	730	0.0	0.0	0.0	0.0
100	740	0.0	0.0	0.0	0.0
100	750	0.0	0.0	0.0	0.0
100	760	0.0	0.0	0.0	0.0
100	770	0.0	0.0	0.0	0.0
100	780	0.0	0.0	0.0	0.0
100	790	0.0	0.0	0.0	0.0
100	800	0.0	0.0	0.0	0.0
100	810	0.0	0.0	0.0	0.0
100	820	0.0	0.0	0.0	0.0
100	830	0.0	0.0	0.0	0.0
100	840	0.0	0.0	0.0	0.0
100	850	0.0	0.0	0.0	0.0
100	860	0.0	0.0	0.0	0.0
100	870	0.0	0.0	0.0	0.0
100	880	0.0	0.0	0.0	0.0
100	890	0.0	0.0	0.0	0.0
100	900	0.0	0.0	0.0	0.0
100	910	0.0	0.0	0.0	0.0
100	920	0.0	0.0	0.0	0.0
100	930	0.0	0.0	0.0	0.0
100	940	0.0	0.0	0.0	0.0
100	950	0.0	0.0	0.0	0.0
100	960	0.0	0.0	0.0	0.0
100	970	0.0	0.0	0.0	0.0
100	980	0.0	0.0	0.0	0.0
100	990	0.0	0.0	0.0	0.0
100	1000	0.0	0.0	0.0	0.0



図 3.3.2-9 幌延 URL 工学規模試験 酸洗後模擬オーバーパック試験体 腐食深さ分布と酸洗前表面スキャン画像の比較

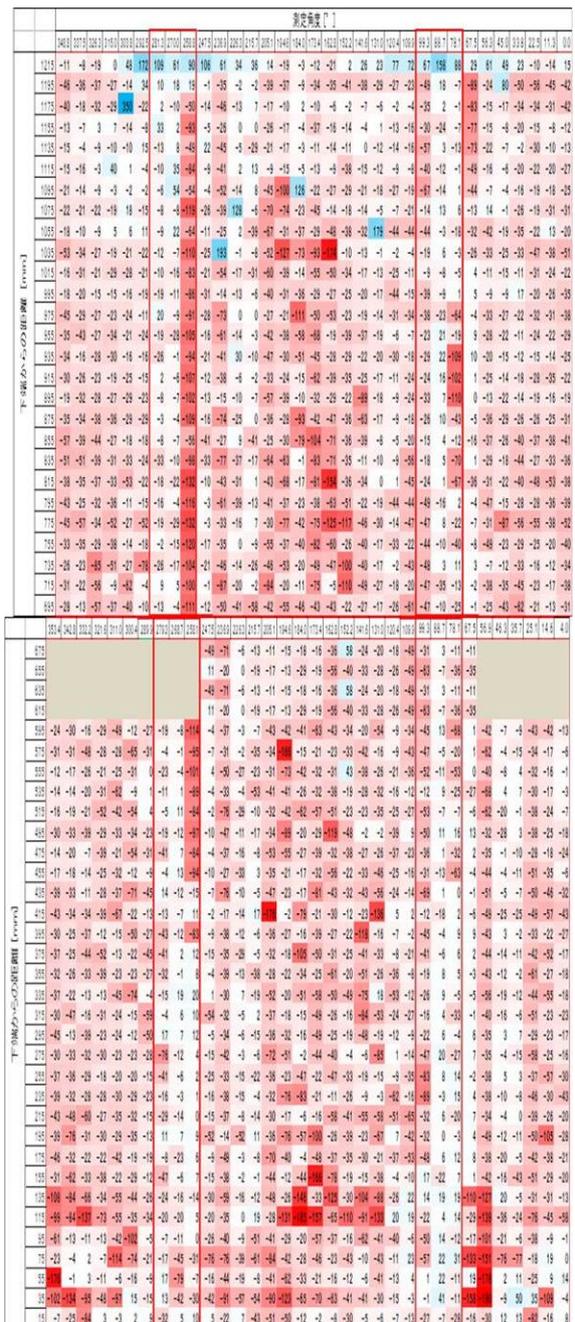


図 3.3.2-10 幌延 URL 工学規模試験 酸洗後模擬オーバーパック試験体 腐食深さ分布と酸洗後表面スキャン画像の比較

(3) 緩衝材ブロック含水率測定結果

試験装置全体の緩衝材ブロックの径方向の含水率を調べるため、Φ20 mm×15 mm のサンプリング容器を用いて、図 3.3.2-11 に示す 4 か所をサンプリングした。また、試験装置の高さ方向の含水率を調べるため、サンプリングは、試験装置の上段・中段・下段の 3 か所で行った。試験装置全体における緩衝材の採取位置を図 3.3.2-12 に示す。表 3.3.2-2 に、測定結果を示す。緩衝材の上下及び径方向で、湿潤密度、乾燥密度、含水比、体積含水率に大きな差は認められない。後述の地上工学規模試験装置では、緩衝材上部の膨潤が大きかったが (3.3.4(3) 参照)、幌延 URL

では、地下水は側面からほぼ均一に緩衝材内に浸入したことを示唆している。また、体積含水率は 0.4~0.45 程度であり、緩衝材の膨潤はほとんど認められなかった (図 3.3.2-13)。このため、緩衝材の有効粘土密度は、1.3 Mg/m<sup>3</sup>程度 (図 3.3.2-14) で一定となり、有効粘土密度から計算した透水係数も概ね  $2\sim 4 \times 10^{-11}$  m/s となった (図 3.3.2-15)。

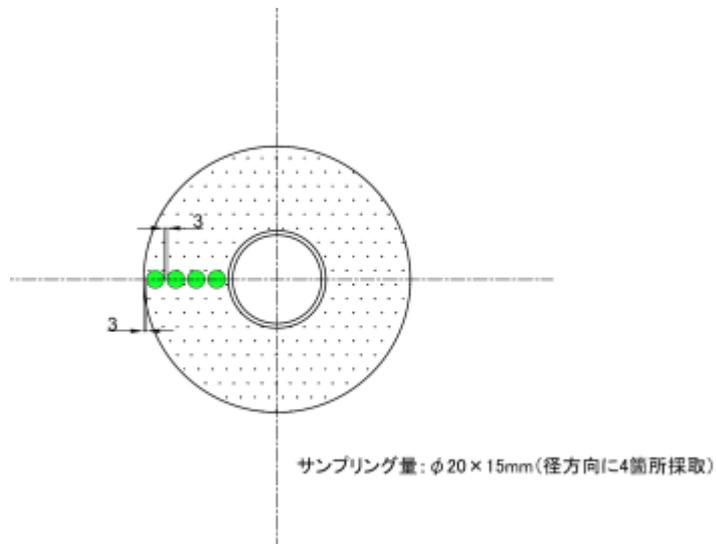


図 3.3.2-11 幌延 URL 工学規模試験 サンプリング間隔

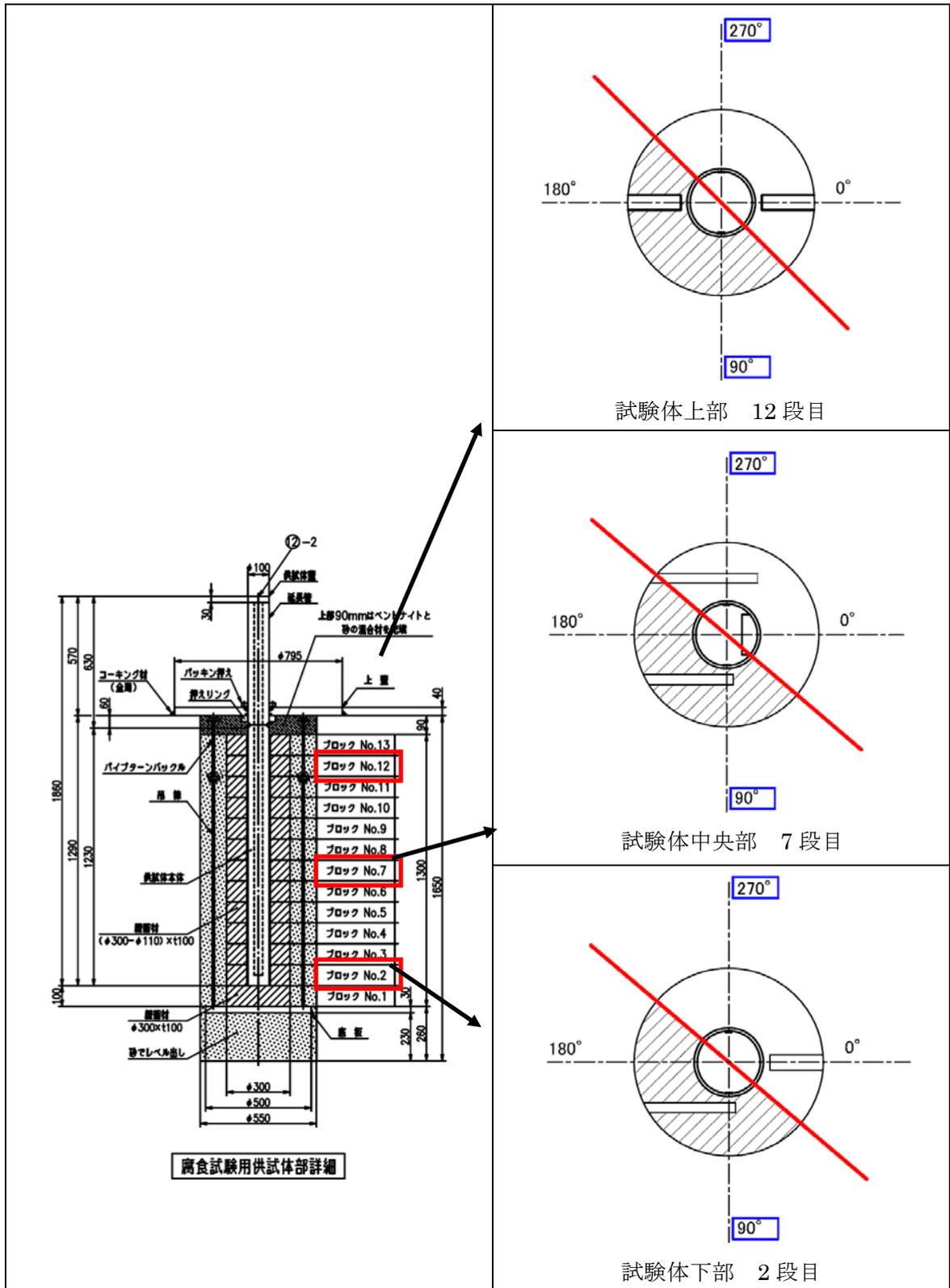


図 3.3.2-12 幌延 URL 工学規模試験 緩衝材の採取位置

表 3.3.2-2 幌延 URL 工学規模試験 採取試料の湿潤密度、乾燥密度、含水比、体積含水率

試料の採取部位	サンプラー 番号	模擬OP壁面 からの距離 (mm)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水比	体積含水率	有効 粘土密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]	透水係数 [m/s]	備考	
12段目	予定 (変更後)	A-11	10	1.98	1.56	0.271	0.423	1.326	1.968E-11	-
		A-12	40	1.95	1.51	0.290	0.438	1.274	2.756E-11	-
		A-13	70	1.96	1.52	0.289	0.439	1.282	2.630E-11	-
		A-14	90	1.99	1.55	0.283	0.439	1.316	2.107E-11	-
	予備1 (45°W)*	A-21	10	1.98	1.54	0.289	0.445	1.303	2.299E-11	-
		A-22	40	1.91	1.46	0.305	0.446	1.228	3.639E-11	-
		A-23	70	1.97	1.52	0.298	0.452	1.283	2.606E-11	-
		A-24	90	1.90	1.43	0.322	0.462	1.199	4.268E-11	-
	予備2 (45°E)*	A-31	10	1.98	1.51	0.314	0.474	1.273	2.777E-11	-
		A-32	40	1.93	1.47	0.317	0.465	1.230	3.596E-11	-
		A-33	70	1.93	1.48	0.305	0.452	1.245	3.297E-11	-
		A-34	90	1.88	1.42	0.318	0.453	1.188	4.520E-11	-
	平均		10	1.98	1.54	0.291	0.447	1.301	2.332E-11	-
			40	1.93	1.48	0.304	0.450	1.244	3.314E-11	-
			70	1.95	1.51	0.297	0.447	1.270	2.833E-11	-
			90	1.92	1.47	0.308	0.451	1.234	3.514E-11	-
7段目	予定 (変更後)	B-11	10	2.05	1.62	0.266	0.432	1.391	1.238E-11	-
		B-12	40	1.96	1.53	0.281	0.429	1.293	2.455E-11	-
		B-13	70	1.95	1.52	0.281	0.426	1.284	2.596E-11	-
		B-14	90	1.91	1.48	0.291	0.432	1.246	3.273E-11	-
	予備1 (45°W)*	B-21	10	1.91	1.47	0.300	0.441	1.232	3.550E-11	-
		B-22	40	1.92	1.49	0.293	0.437	1.253	3.145E-11	-
		B-23	70	1.92	1.49	0.291	0.432	1.251	3.184E-11	-
		B-24	90	1.92	1.48	0.300	0.443	1.243	3.328E-11	-
	予備2 (45°E)*	B-31	10	1.99	1.57	0.265	0.417	1.341	1.778E-11	-
		B-32	40	1.96	1.53	0.283	0.433	1.292	2.459E-11	-
		B-33	70	1.91	1.48	0.288	0.428	1.248	3.234E-11	-
		B-34	90	1.92	1.48	0.295	0.438	1.248	3.233E-11	-
	平均		10	1.98	1.55	0.277	0.430	1.321	2.042E-11	-
			40	1.95	1.51	0.286	0.433	1.279	2.674E-11	-
			70	1.92	1.50	0.287	0.429	1.261	2.995E-11	-
			90	1.92	1.48	0.296	0.438	1.246	3.278E-11	-
2段目	予定 (変更後)	C-11	10	1.90	1.45	0.311	0.450	1.213	3.949E-11	-
		C-12	40	1.95	1.51	0.288	0.436	1.279	2.675E-11	-
		C-13	70	1.93	1.49	0.293	0.438	1.259	3.030E-11	-
		C-24	90	1.89	1.43	0.327	0.467	1.193	4.409E-11	-
	予備1 (45°W)*	C-21	10	1.92	1.47	0.306	0.451	1.237	3.445E-11	-
		C-22	40	1.96	1.53	0.285	0.435	1.292	2.466E-11	-
		C-33	70	1.97	1.54	0.279	0.430	1.304	2.284E-11	-
		C-23	90	1.95	1.53	0.280	0.428	1.290	2.493E-11	-
	予備2 (45°E)*	C-31	10	1.91	1.46	0.309	0.450	1.220	3.801E-11	-
		C-32	40	1.95	1.50	0.296	0.445	1.266	2.906E-11	-
		C-33	70	1.95	1.51	0.294	0.442	1.270	2.827E-11	-
		C-34	90	1.88	1.43	0.315	0.451	1.196	4.320E-11	-
	平均		10	1.91	1.46	0.309	0.450	1.223	3.728E-11	-
			40	1.95	1.51	0.290	0.439	1.279	2.678E-11	-
			70	1.95	1.51	0.289	0.437	1.278	2.701E-11	-
			90	1.91	1.46	0.307	0.448	1.226	3.669E-11	-

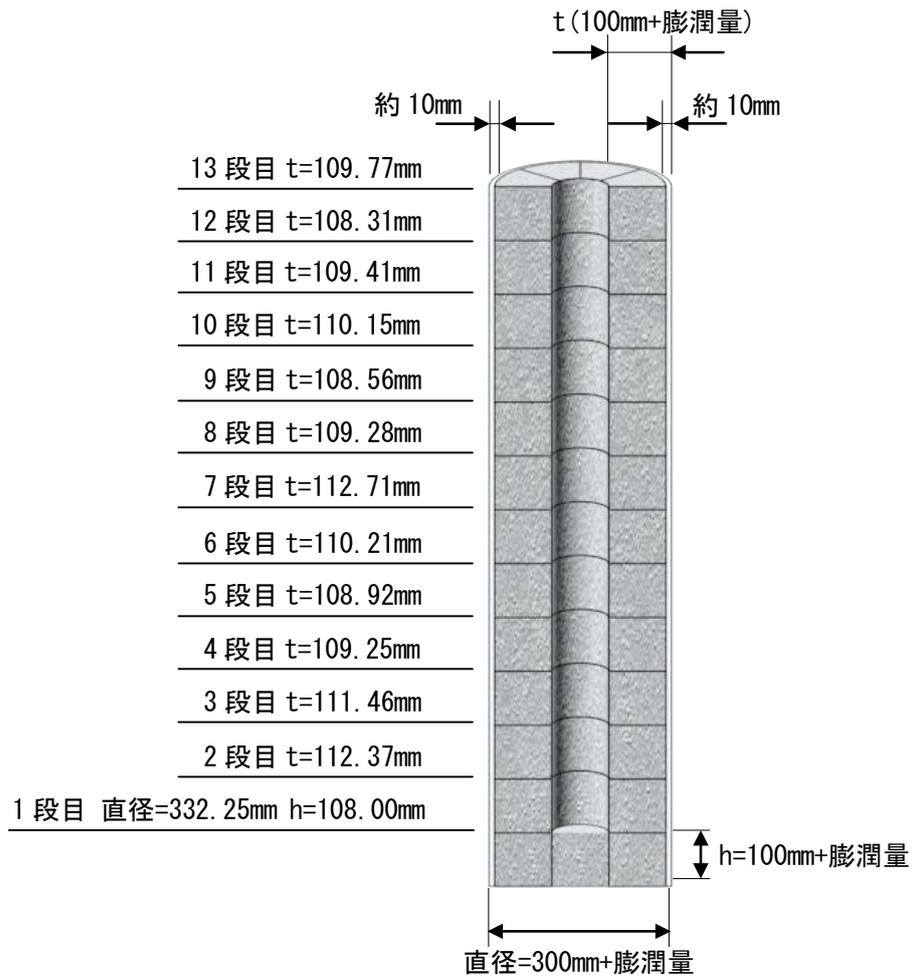


図 3.3.2-13 幌延 URL 工学規模試験 緩衝材の膨潤

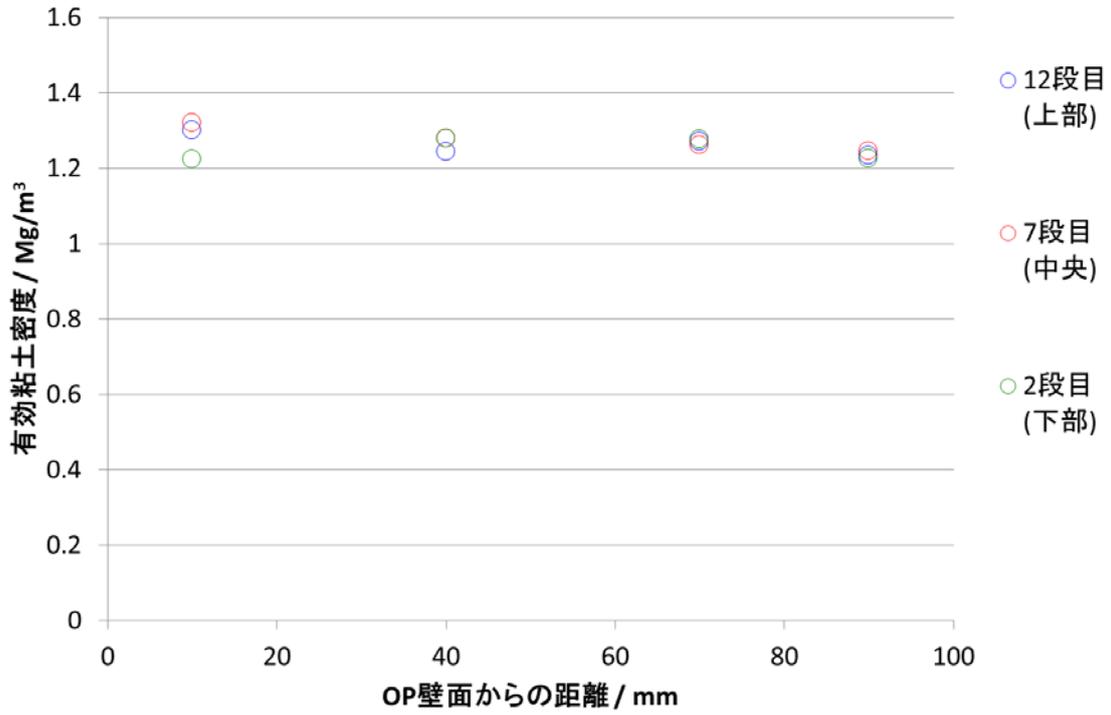


図 3.3.2-14 幌延 URL 工学規模試験 緩衝材の有効粘土密度

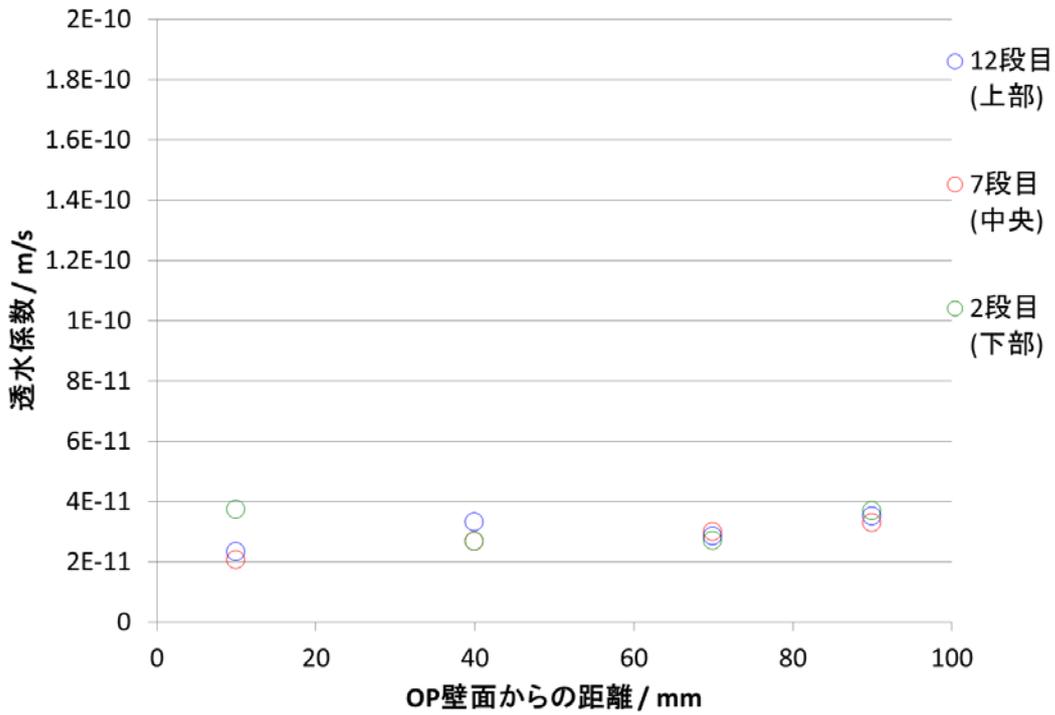


図 3.3.2-15 幌延 URL 工学規模試験 緩衝材の透水係数

### 3.3.3 地上における工学規模試験装置の解体

平成 28 年度に作成した解体・分析の計画および解体計画に則り、試験装置を解体した。

#### (1) 試験装置解体

##### 1) 作業工程

地上工学規模試験装置の解体作業の実績工程表を表 3.3.3-1 に示す。

表 3.3.3-1 地上工学規模試験 解体工程表

作業日	7/3 (月)	7/4 (火)	7/5 (水)	7/6 (木)	7/7 (金)
解体事前作業	■				
解体作業		■	■	■	■
スキャン作業					■
片付け等作業					■

##### 2) 試験装置詳細図、搬送容器詳細図

地上工学規模試験装置詳細図面および外観を図 3.3.3-1 および図 3.3.3-2 に示す。地上試験は幌延 URL 工学試験とは異なり試験装置は地表面から高い位置に設置した。

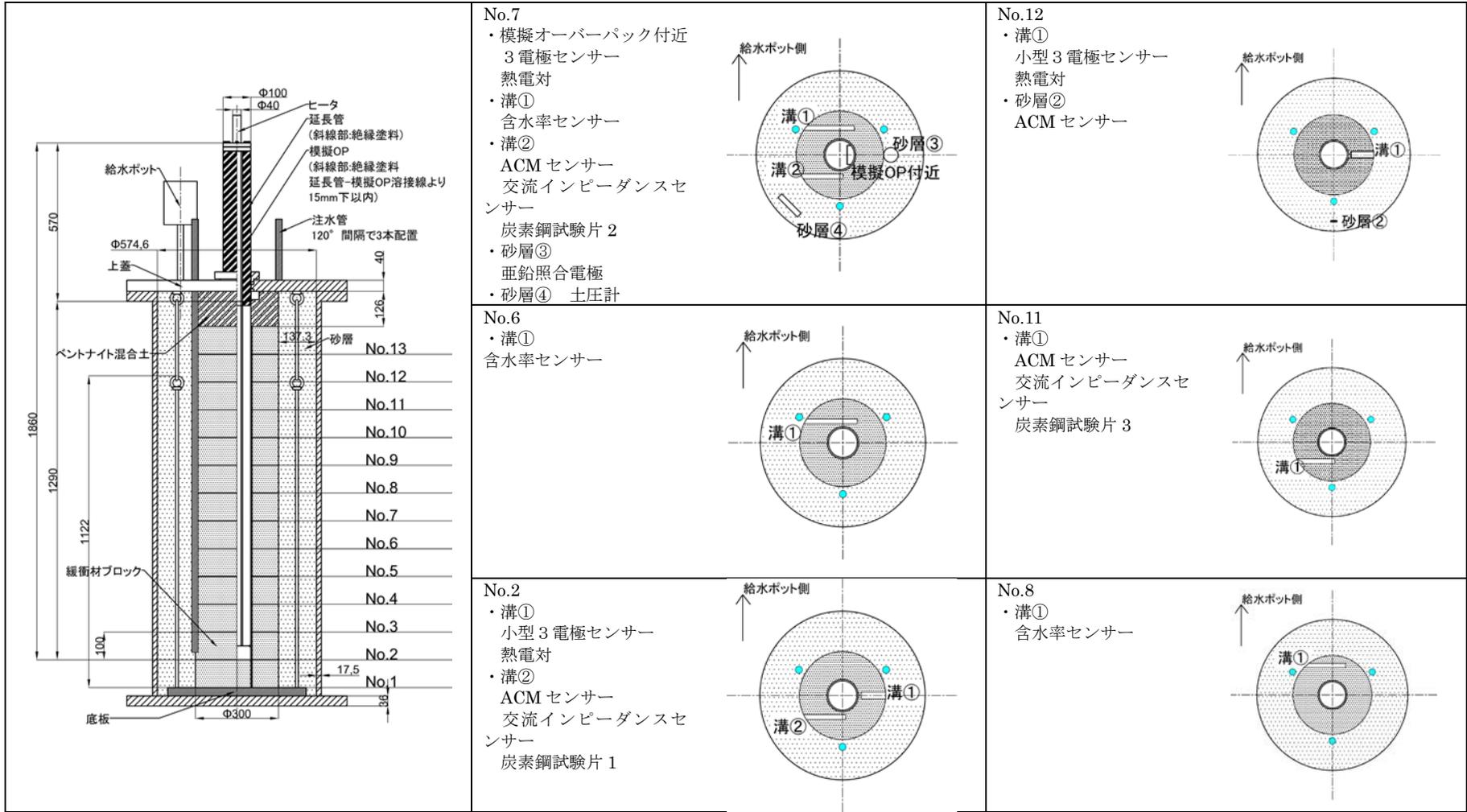


図 3.3.3-1 地上工学規模試験 試験装置詳細図



図 3.3.3-2 地上工学規模試験 試験装置外観

### 3) 解体ハンドリングフロー

地上工学規模試験装置の解体ハンドリングフロー図を図 3.3.3-3～図 3.3.3-9 に示す。

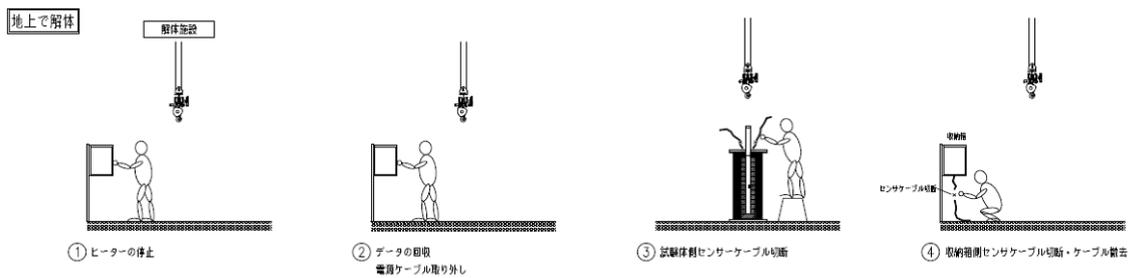


図 3.3.3-3 地上工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (1/7)

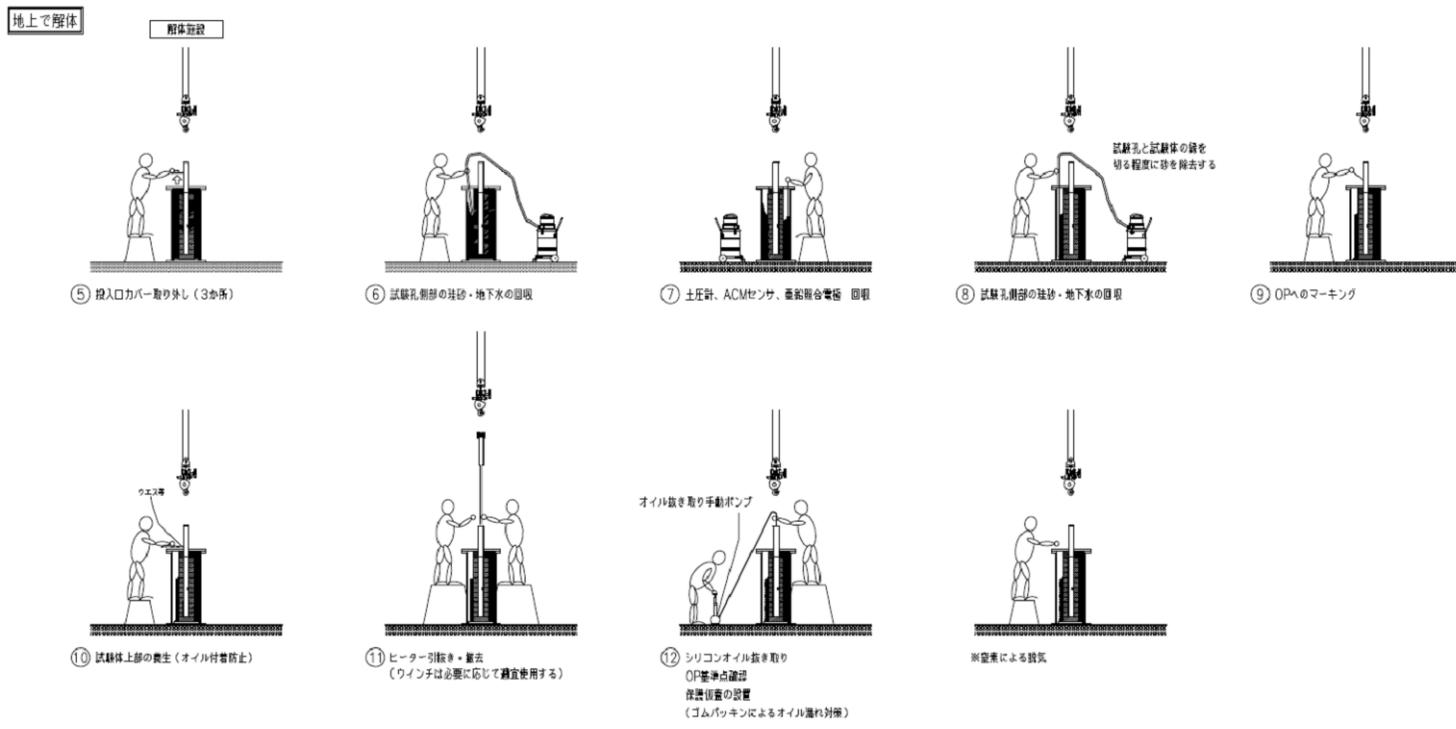


図 3.3.3-4 地上工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー（2/7）

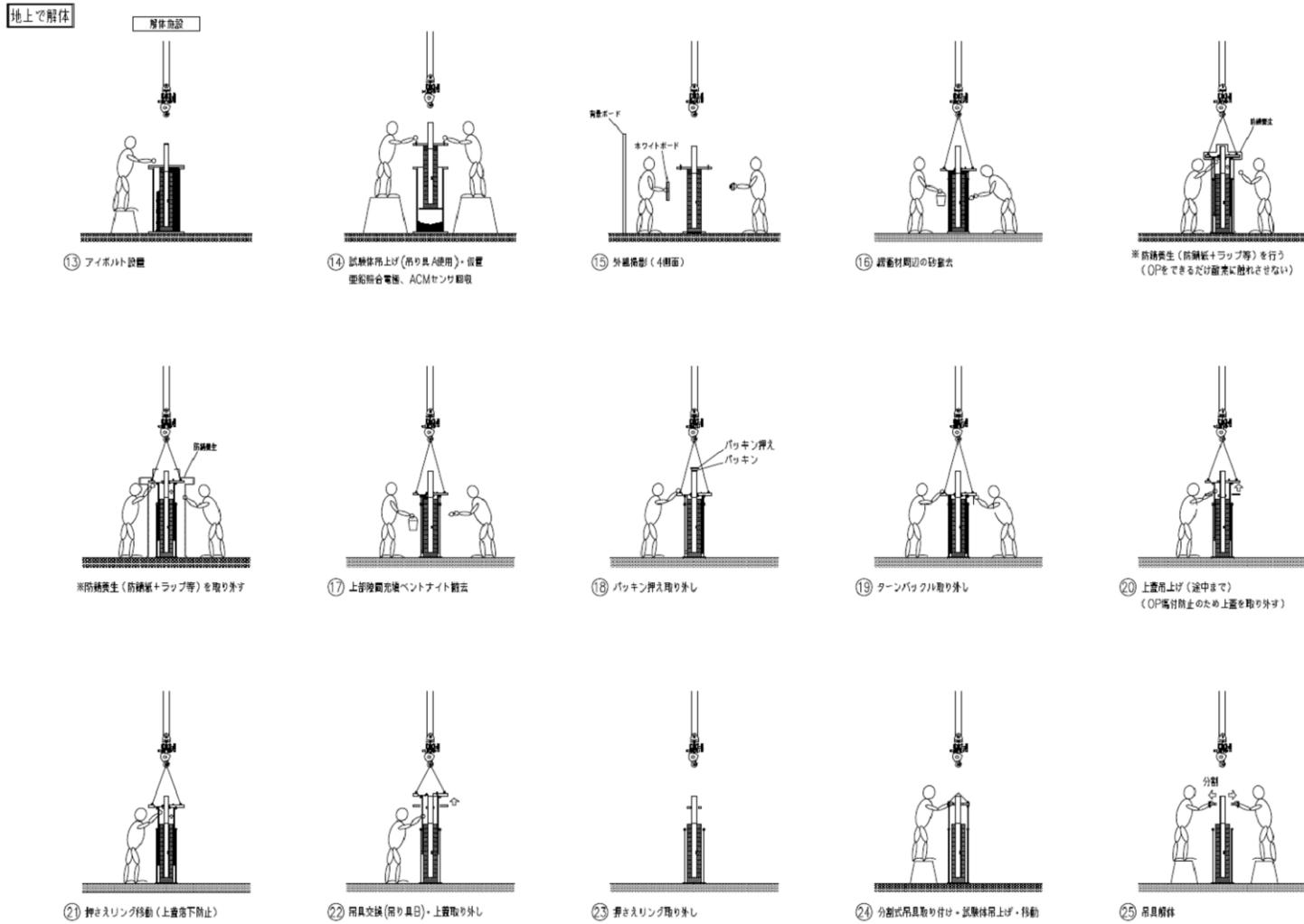


図 3.3.3-5 地上工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (3/7)

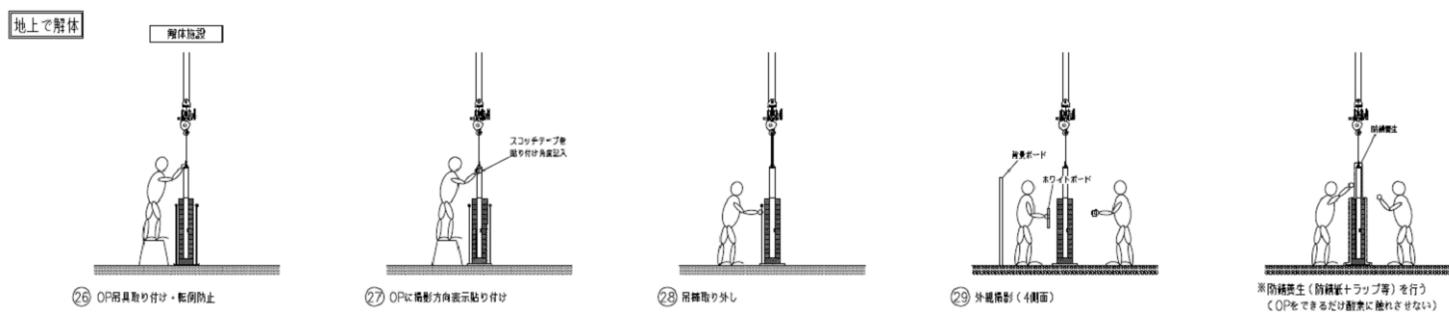


図 3.3.3-6 地上工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー（4/7）

地上で解体

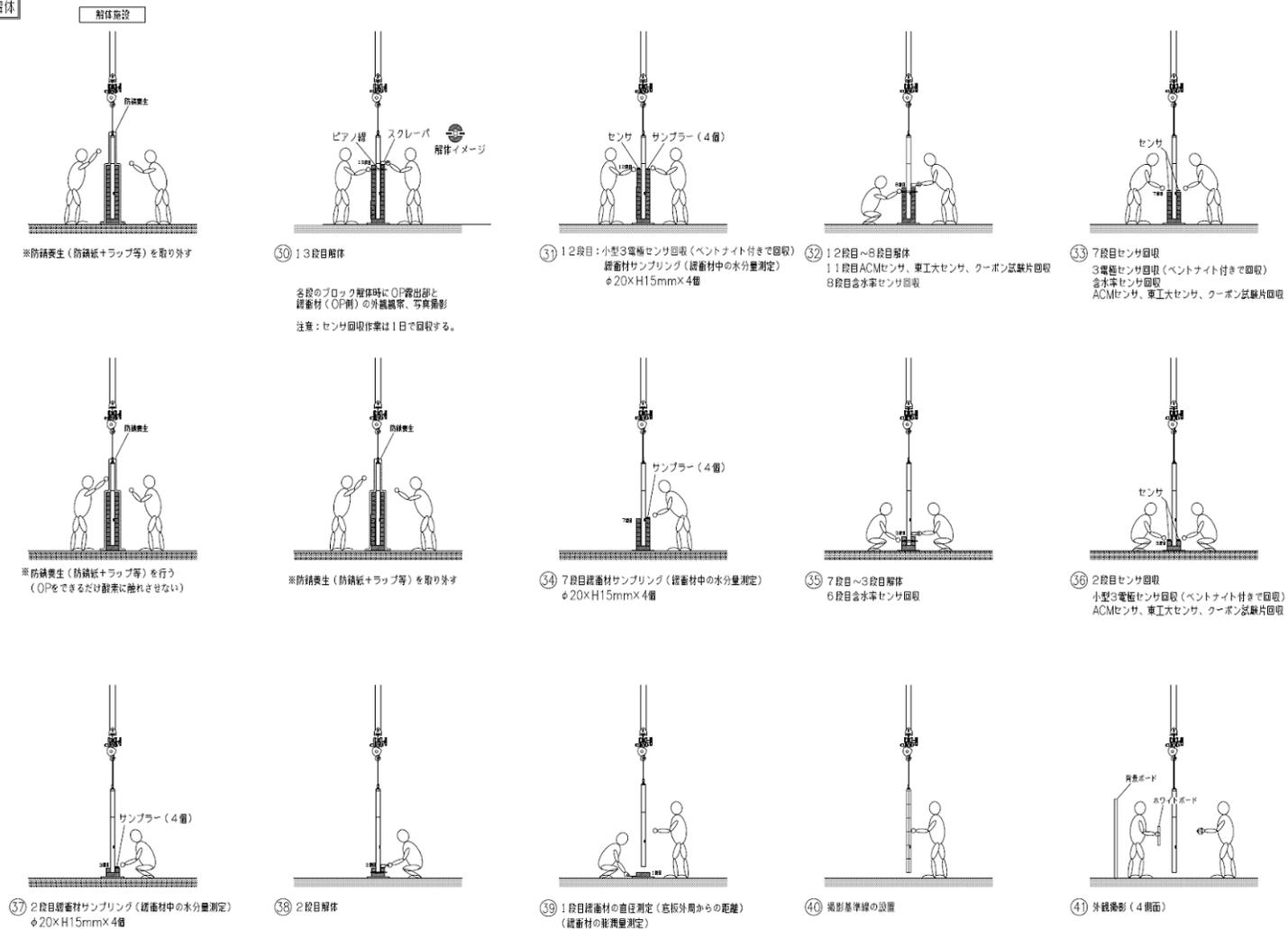


図 3.3.3-7 地上工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (5/7)

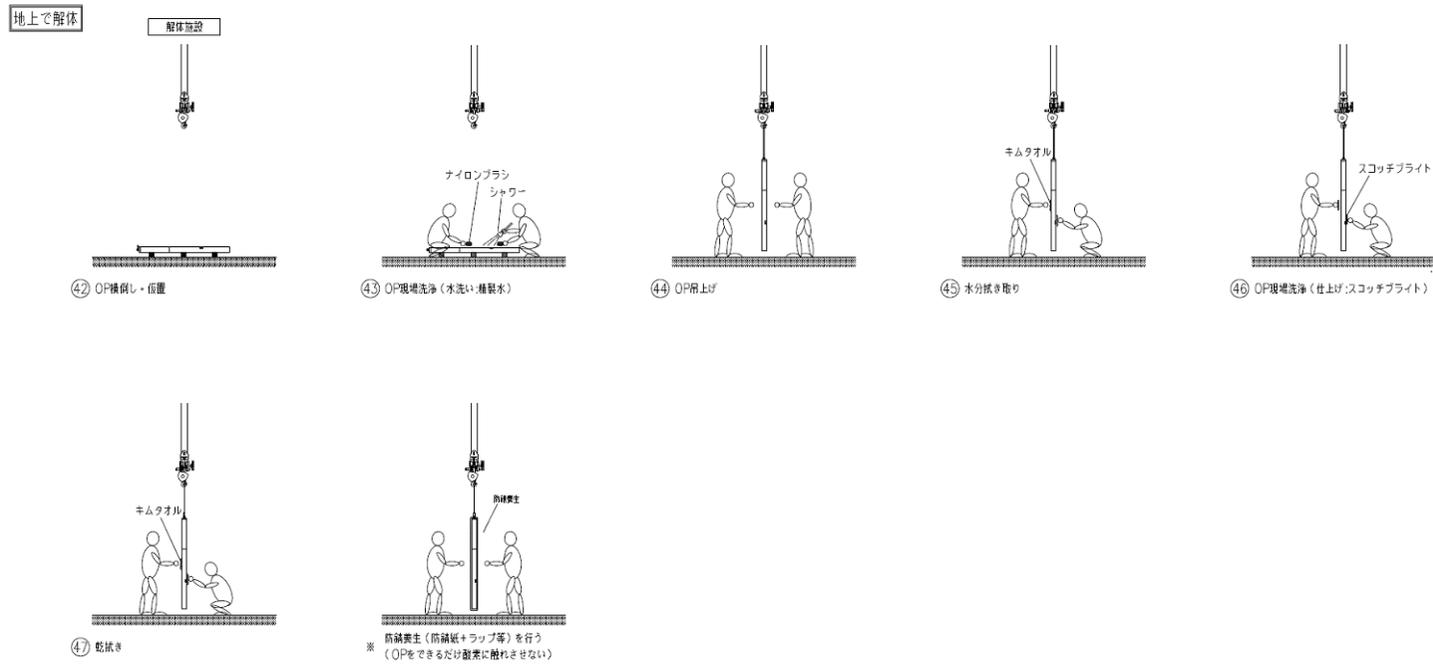


図 3.3.3-8 地上工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー (6/7)

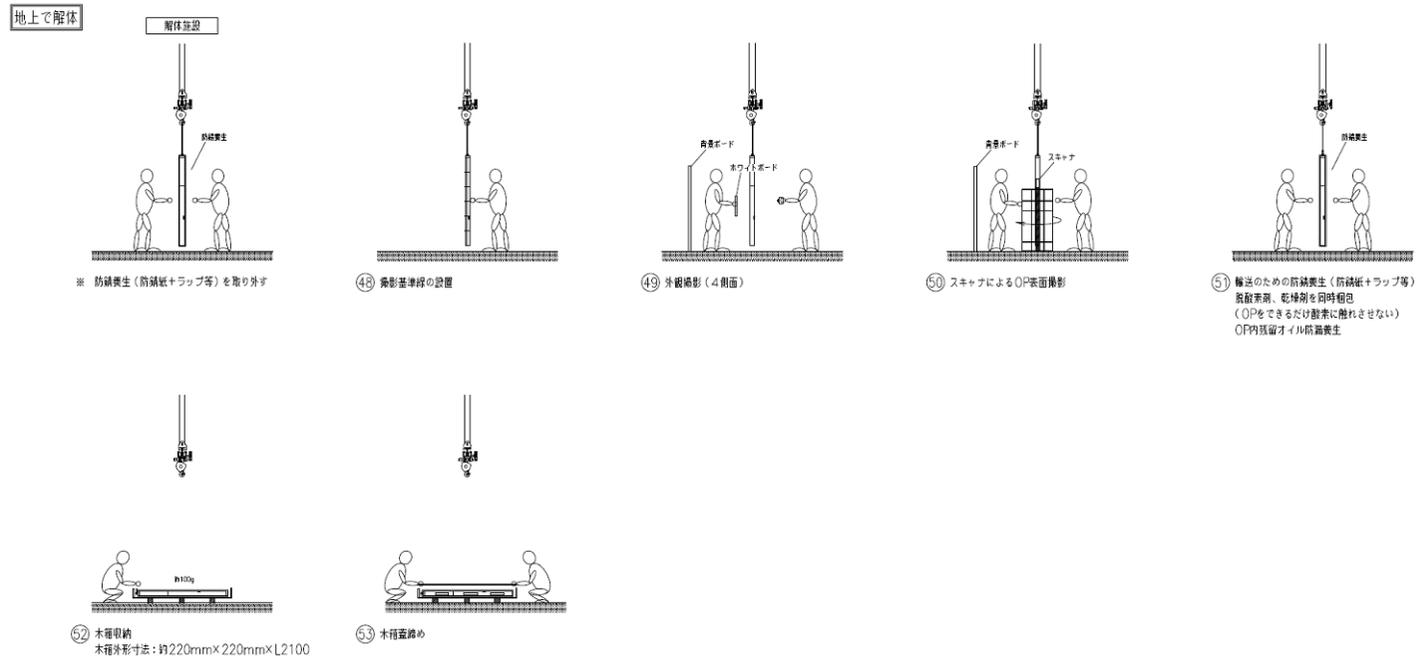


図 3.3.3-9 地上工学規模試験 解体作業ハンドリングフロー（7/7）

#### 4) 試験装置解体作業

地上工学規模試験装置の解体作業についてはハンドリングフローに従って実施した。砂層回収の様子を図 3.3.3-10 に示す。



図 3.3.3-10 地上工学規模試験 砂層の回収

砂層回収後、図 3.3.3-11 の様に試験体を模擬処分孔から取り出した。取出した試験体は転倒防止のために吊架台（図 3.3.3-12）へ固定した。



図 3.3.3-11 地上工学規模試験 試験体取出し



図 3.3.3-12 地上工学規模試験 模擬オーバーパック吊架台の設置

模擬処分孔から取出直後の試験体の外観を図 3.3.3-13 に示す。外観確認時に試験体蓋部と試験体底板をつなぐ S 字フックの一部が図 3.3.3-14 左の様にフック部分が腐食し破断していた。

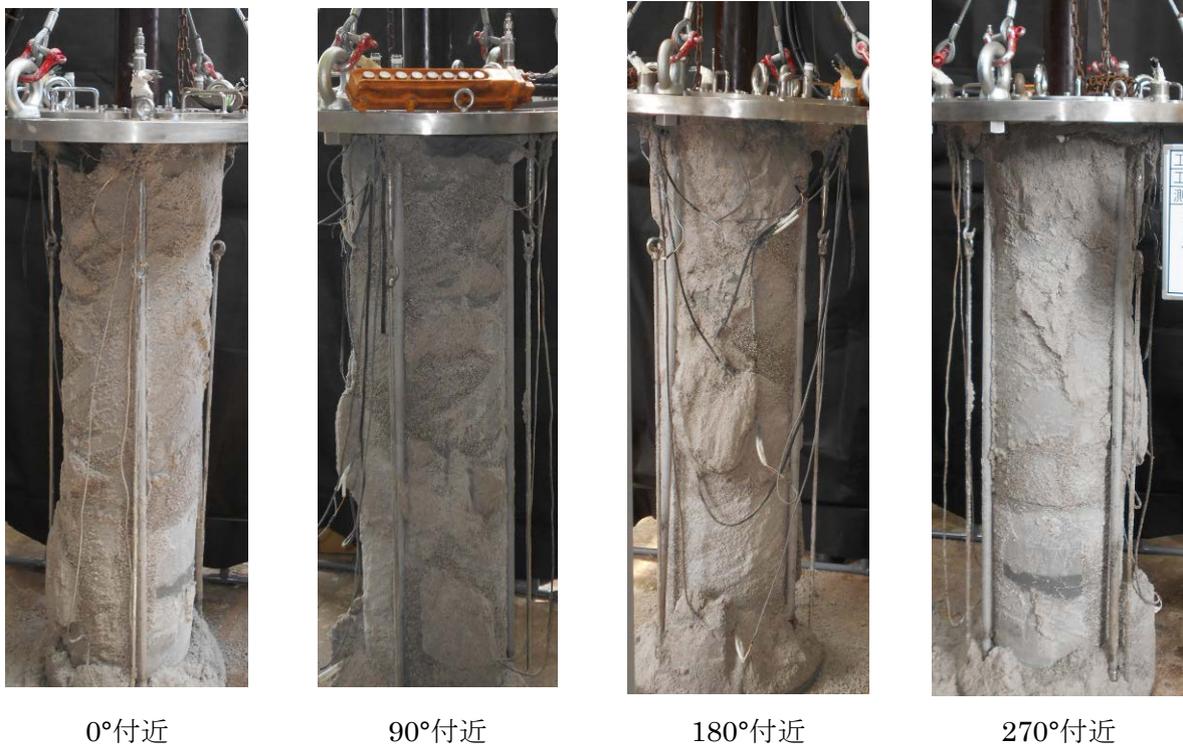


図 3.3.3-13 地上工学規模試験 試験体取出し直後外観



試験体の砂層を撤去した図 3.3.3-15 に砂層撤去後の試験体外観を示す。緩衝材ブロックは上段部ほど膨潤が大きく図 3.3.3-16 に示す様に上段部の膨潤が大きく、下へ向かうに従って膨潤が小さい結果となった。またに試験体下部緩衝材ブロック (No.1~No.4 付近) については小さくブロック間の境界および高さ方向にひびが確認できた。



図 3.3.3-15 地上工学規模試験 砂層撤去後試験体外観 270°付近  
(黄色線：緩衝材最大径部分)



図 3.3.3-16 地上工学規模試験 試験体下部ブロック間境界面 (270° No.1~4 付近)  
(黄色矢印：ブロック境界面)

緩衝材ブロックはスクレーパーを使用して1段ごとに解体を行った。解体の様子を図 3.3.3-17 に示す。また、図 3.3.3-18 のように緩衝材ブロック No.7~8 付近に模擬オーバーパック表面に設置した3電極センサー+電極付近緩衝材ブロックの回収を行った。



緩衝材切断作業



センサー回収作業

図 3.3.3-17 地上工学規模試験 緩衝材ブロックの解体



3電極センサー取外し作業



3電極センサー回収後 模擬オーバーパック

図 3.3.3-18 地上工学規模試験 模擬オーバーパック設置3電極センサーの回収（緩衝材ブロック No.7~8 付近）

緩衝材ブロック No.7 の解体時に、図 3.3.3-19 の様に緩衝材ブロックと模擬オーバーパックのクリアランスに珪砂と思われる堆積物がみられた。この堆積物を、模擬オーバーパックに付着した部分と緩衝材の内側に付着した部分とに分取して XRD を測定したところ (図 3.3.3-20)、主成分は  $\text{SiO}_2$  であり緩衝材外側の珪砂が、緩衝材ブロックと模擬オーバーパックのクリアランスに堆積したものと判明した。珪砂層は緩衝材ブロックの膨潤圧によって落雁状の塊となって模擬オーバーパックに付着していた。また珪砂層下の模擬オーバーパック表面には黒錆が生じていた。



珪砂層除去前

珪砂層除去後

図 3.3.3-19 地上工学規模試験 模擬オーバーパック—緩衝材ブロック間の珪砂層

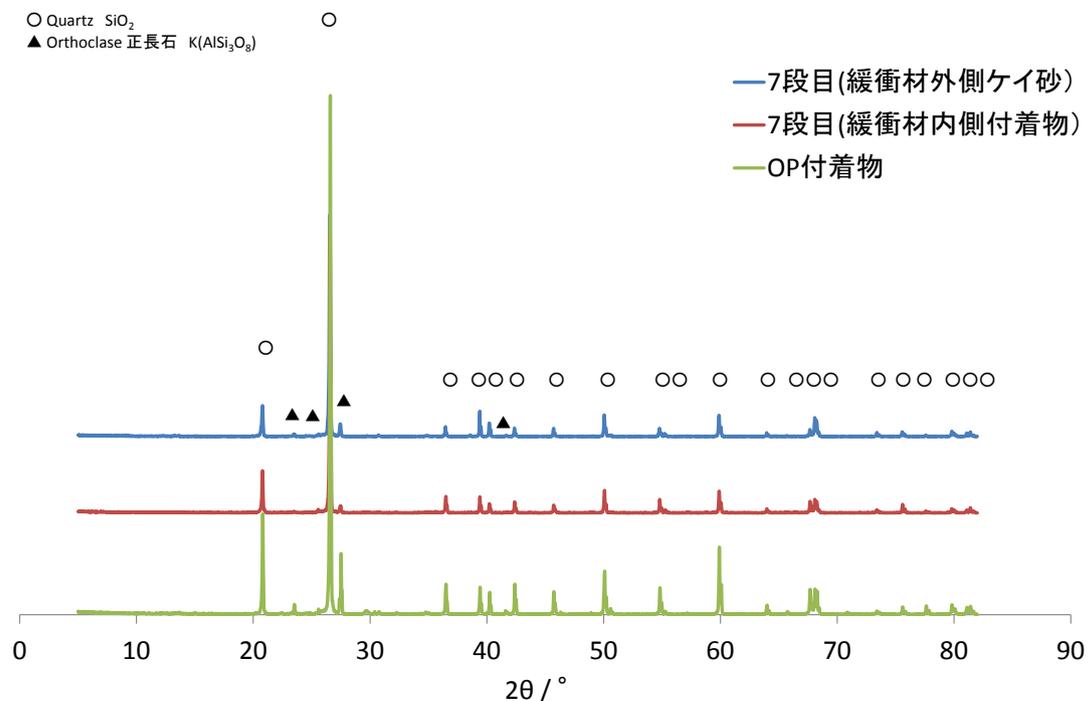


図 3.3.3-20 模擬オーバーパック—緩衝材ブロック間の砂状物質の XRD

緩衝材ブロック No.11、No.7、No.2 については緩衝材ブロックの採取を行った。サンプリングの様子を、図 3.3.3-21 に示す。



サンプラーの挿入



サンプルの切り出し

図 3.3.3-21 地上工学規模試験 緩衝材ブロックのサンプリング

解体後の緩衝材ブロックの模擬オーバーパック側表面状態を図 3.3.3-22～図 3.3.3-24 に示す。

No		
13	 <p data-bbox="528 629 600 663">0° 側</p>	 <p data-bbox="1046 483 1142 517">180° 側</p>
12	 <p data-bbox="528 629 600 663">0° 側</p>	 <p data-bbox="1046 730 1142 763">180° 側</p>
11	 <p data-bbox="528 1010 600 1043">0° 側</p>	 <p data-bbox="1046 1010 1142 1043">180° 側</p>
10	 <p data-bbox="528 1256 600 1290">0° 側</p>	 <p data-bbox="1046 1256 1142 1290">180° 側</p>
9	 <p data-bbox="528 1503 600 1536">0° 側</p>	 <p data-bbox="1046 1503 1142 1536">180° 側</p>

図 3.3.3-22 地上工学規模試験 緩衝材ブロック 模擬オーバーパック側表面状態 (1/3)

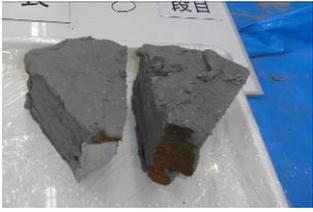
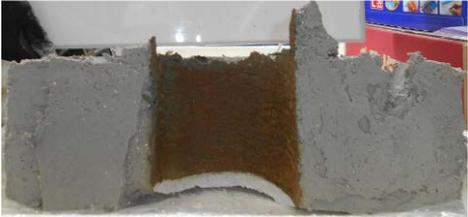
No		
8	 <p data-bbox="528 488 603 521">0° 側</p>	 <p data-bbox="1046 488 1145 521">180° 側</p>
7	<p data-bbox="403 611 735 741">3 電極センサー回収のため 画像なし 0° 側</p>	 <p data-bbox="1046 779 1145 813">180° 側</p>
6	 <p data-bbox="528 1070 603 1104">0° 側</p>	 <p data-bbox="1046 1070 1145 1104">180° 側</p>
5	 <p data-bbox="528 1361 603 1395">0° 側</p>	 <p data-bbox="1046 1361 1145 1395">180° 側</p>

図 3.3.3-23 地上工学規模試験 緩衝材ブロック 模擬オーバーパック側表面状態 (2/3)

No		
4	 <p data-bbox="528 533 603 566">0° 側</p>	 <p data-bbox="1046 533 1145 566">180° 側</p>
3	 <p data-bbox="528 1037 603 1070">0° 側</p>	 <p data-bbox="1046 824 1145 857">180° 側</p>
2	 <p data-bbox="528 1037 603 1070">0° 側</p>	 <p data-bbox="1046 1115 1145 1149">180° 側</p>
1		

図 3.3.3-24 地上工学規模試験 緩衝材ブロック 模擬オーバーパック側表面状態 (3/3)

緩衝材ブロックを除去後の模擬オーバーパックを図 3.3.3-25 に示す。模擬オーバーパック 3 電極センサー設置箇所から上と下では錆の生成が異なっている。



図 3.3.3-25 地上工学規模試験 緩衝材除去後の模擬オーバーパック外観

図 3.3.3-26 に示す様にイオン交換水を用いて、ブラシとスコッチブライトで模擬オーバーパック表面の緩衝材ブロックや珪砂を除去する現場洗浄を実施した。除去後は表面の水分を除去する為にアルコール塗布を行った。現場洗浄後の模擬オーバーパックの外観を図 3.3.3-27 に示す。



スコッチブライトによる洗浄



アルコール塗布作業

図 3.3.3-26 地上工学規模試験 現場洗浄



0°付近



90°付近



180°付近



270°付近

図 3.3.3-27 地上工学規模試験 現場洗浄後の模擬オーバーパック外観

模擬オーバーパック現場洗浄後、スキャナ装置を用いて模擬オーバーパック表面の外観撮影を行った。スキャン作業を図 3.3.3-28 に示す。撮影方法及び仕様機材については 3.3.4(1) に示す。スキャン作業実施後、模擬オーバーパックの防錆紙による防錆処理を施し、木箱へ梱包を行った。梱包作業を図 3.3.3-29 に示す。



図 3.3.3-28 地上工学規模試験 模擬オーバーパックスキャン作業



図 3.3.3-29 地上工学規模試験 木箱梱包作業

## (2) 模擬オーバーパットの脱錆処理

### 1) 模擬オーバーパットの脱錆処理方法

地上工学規模試験模擬オーバーパットの脱錆処理については幌延 URL 工学規模試験と同様の方法で脱錆処理を実施した。(詳細は 3.3.1(2) 参照)

### 2) 脱錆処理

塩酸及びヘキサメチレンテトラミン溶液による脱錆工程を図 3.3.3-30 に示す。浸漬開始から 5 分後、図 3.3.3-31 の様に模擬オーバーパット表面から錆が除去され光沢が確認されたため脱錆作業を完了とした。



模擬オーバーパットの脱錆溶液への浸漬



脱錆の様子

図 3.3.3-30 地上工学規模試験 脱錆処理

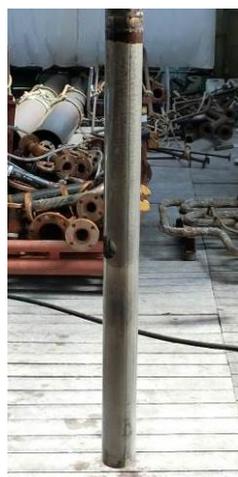


図 3.3.3-31 地上工学規模試験 脱錆工程終了時 (浸漬 5 分後)

脱錆作業終了後は模擬オーバーパック表面の塩酸及びヘキサメチレンテトラミン溶液中中和及び防錆を目的としてクールミン O4 に浸漬させた。中和・防錆処理作業後の地上工学規模試験模擬オーバーパックの外観を図 3.3.3-32 に示す。



0°付近

90°付近

180°付近

270°付近

図 3.3.3-32 地上工学規模試験 脱錆・防錆処理後の模擬オーバーパック

模擬オーバーパックを乾燥後、防錆フィルムで梱包し、木箱へ収納した。木箱梱包作業を図 3.3.3-33 に示す。



図 3.3.3-33 地上工学規模試験 酸洗後模擬オーバーパック木箱梱包作業

### 3.3.4 地上における工学規模試験の測定・分析結果

#### (1) 模擬オーバーパックの表面スキャン

##### 1) 酸洗浄前

酸洗浄前の模擬オーバーパック表面のスキャン撮影を表 3.3.4-1 に示す箇所・撮影面で実施した。これは、幌延 URL 工学規模試験用の模擬オーバーパック試験体で実施した撮影(表 3.3.2-1)と同一箇所・撮影面に相当する。

表 3.3.4-1 地上工学規模試験 模擬オーバーパック表面のスキャン撮影項目

機器、センサー 名称	撮影箇所 位置決めブロック段数	撮影面*	
		180°側	0°側
模擬オーバーパック 溶接試験体本体	6 段目 (最上段)	○	○
	5 段目	○	○
	4 段目	○	○
	3 段目	○	○
	2 段目	○	○
	1 段目	○	○
	ブロック無	○	○
※ 7 段、各 2 回計測で、計 14 回の撮影を行なった。 ※ 各位置決めブロック段数にて、スキャナ装置の高さを定め、撮影面は図 3.3.4-1 の C (180°) 側および A (0°) 側を起点とし、1 回あたり 360 度以上、計 2 回撮影を行なった。			

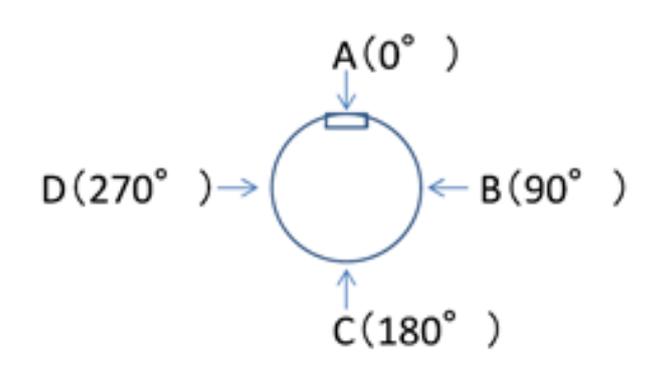


図 3.3.4-1 地上工学規模試験 埋込式 3 電極センサー位置と角度の関係  
(模擬オーバーパックを延長管側から見た場合の図)

幌延 URL 工学規模試験用の模擬オーバーパック試験体同様、図 3.3.4-1 の A 面 (0°) は埋め込み式 3 電極センサー設置側、B (90°) D (270°) 面は溶接部に相当する。C (180°) 面に撮影用目盛 (テープメジャー) を貼って表面をスキャンし、軸方向距離と撮影位置の対応を示す画像を取得した。

模擬オーバーパック試験体表面の撮影機器の外観を図 3.3.4-2 に示す。このスキャン機器は、幌延 URL 工学規模試験用の模擬オーバーパック試験体同様、表 3.3.4-1 に示すとおり模擬オーバーパック試験体表面の長手方向・計 7 分割での撮影に対応し、表面のスキャン画像は、ラインスキャナを図 3.3.4-2 に示す把持回転治具に取り付け、手動で支持用ドーナツ盤上を 360 度強回転

させることで撮影した。ブロック高さを順次減らしながら、一部重複するスキャン画像を撮影し、画像結合する手法も、幌延 URL 工学規模試験用の模擬オーバーパック試験体同様に採用した。

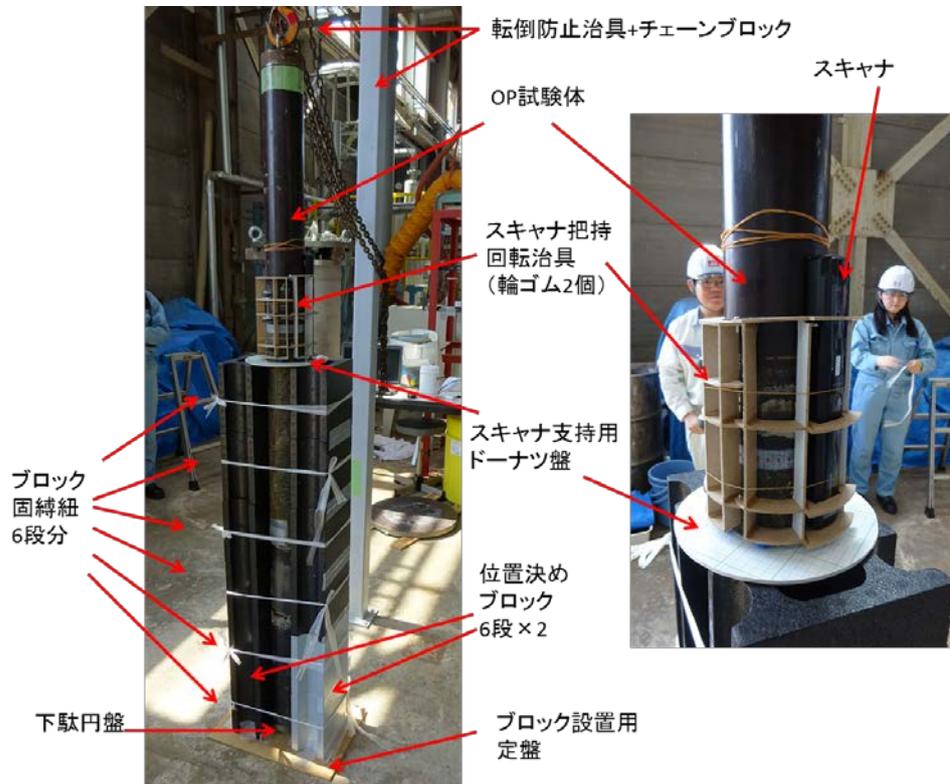


図 3.3.4-2 地上工学規模試験 スキャナ撮影機器（模擬オーバーパック試験体最上部の周方向表面撮影時の外観）

画像結合後のスキャン画像を図 3.3.4-3 に示す。なお、同図の緑色の矢印で示す境界線状の部分は、結合前画像の明るさの違いが原因であり、腐食状態の相違を示すものではない。

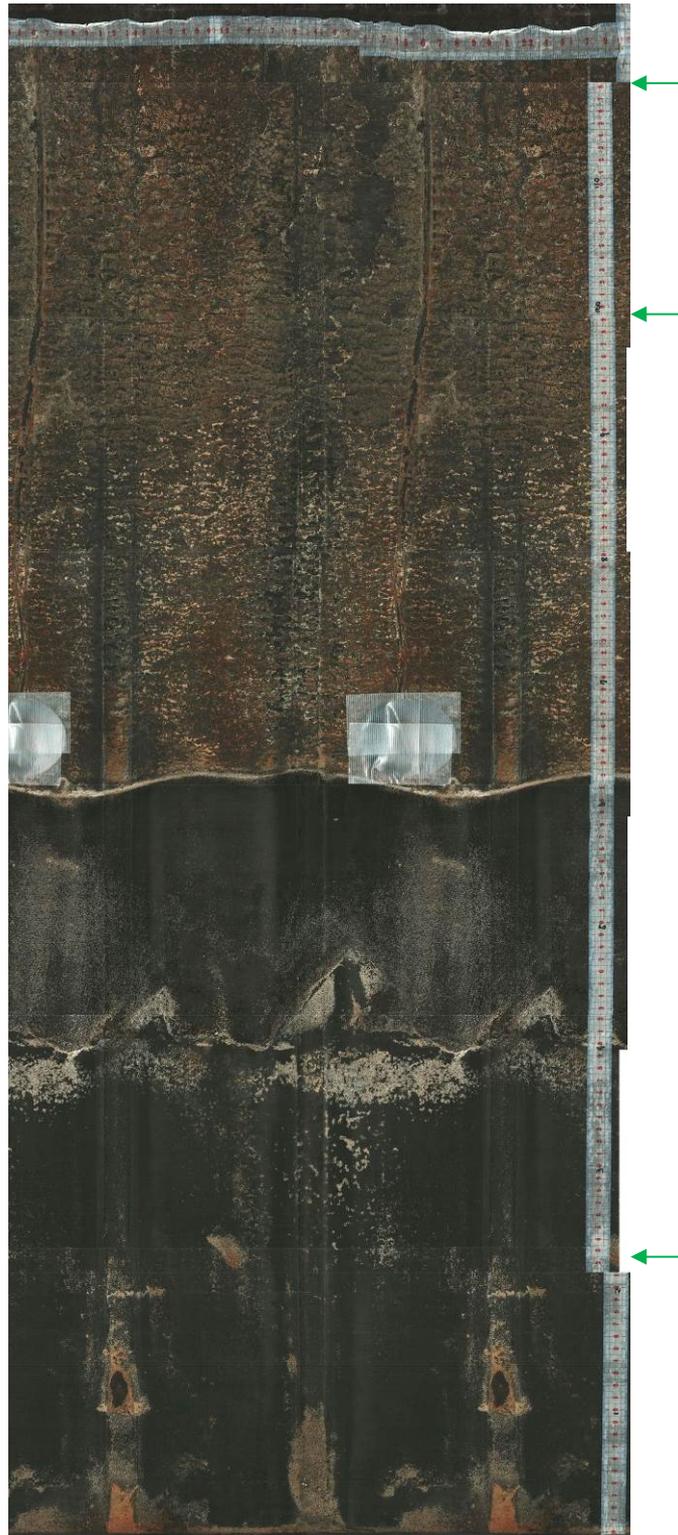


図 3.3.4-3 地上工学規模試験 画像結合後の模擬オーバーパック表面スキャン画像（酸洗前）

## 2) 酸洗浄前

酸洗浄後のオーバーパック表面のスキャン撮影を、酸洗浄前と同一の機器を使用し、表 3.3.4-1 に示す箇所・撮影面で実施した。撮影は、IHI 横浜事業所内で実施した。

模擬オーバーパック試験体表面の撮影機器の外観と作業状況を図 3.3.4-4 に示す。

画像結合後のスキャン画像を図 3.3.4-5 に示す。なお、同図の緑色の矢印で示す箇所は、画像結合に伴う境界線であり、腐食状態の相違を示すものではない。

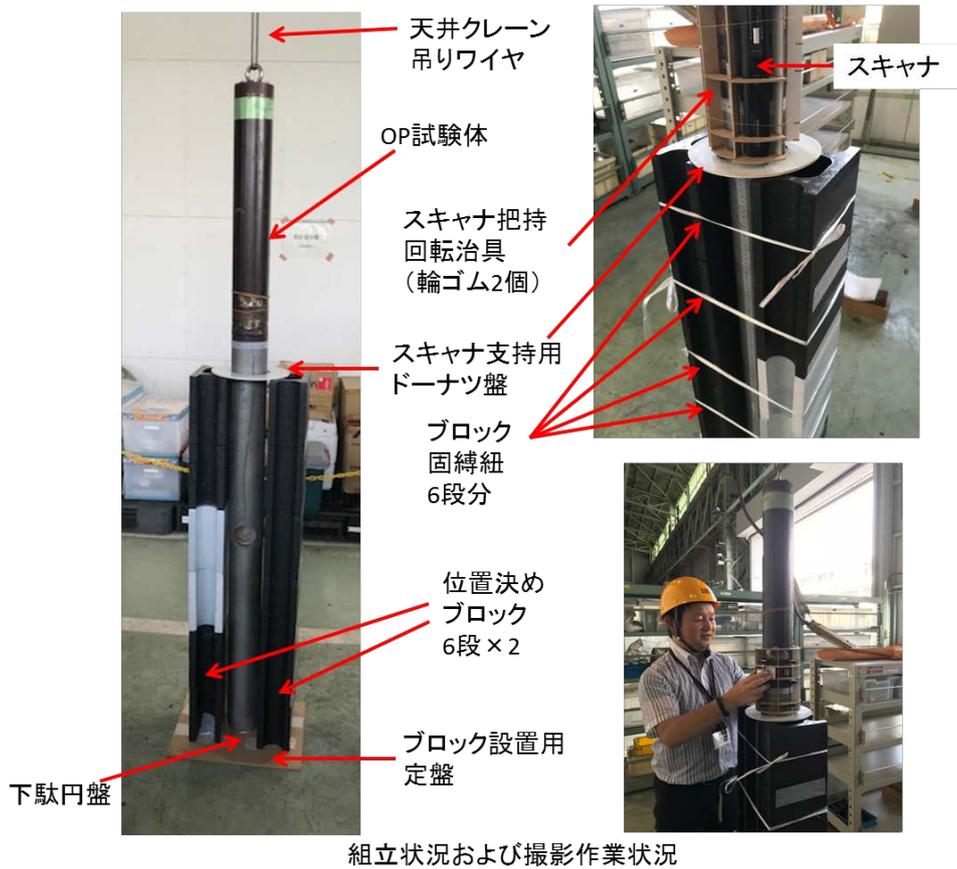


図 3.3.4-4 地上工学規模試験 スキャナ撮影機器（模擬オーバーパック試験体最上部周方向撮影時の外観）および作業状況

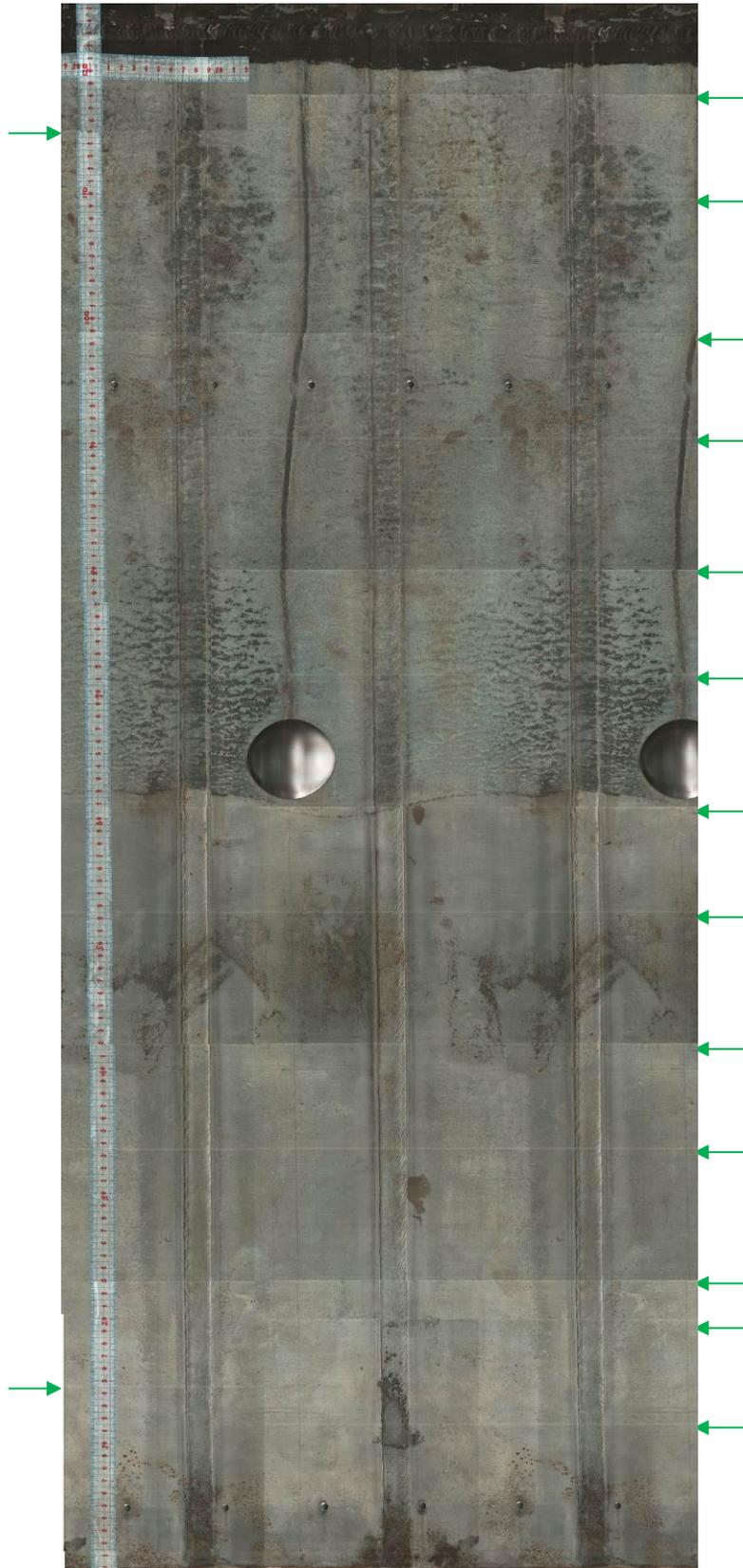


図 3.3.4-5 地上工学規模試験 画像結合後の模擬オーバーパック表面スキャン画像（酸洗後撮影）

## (2) 模擬オーバーパックスの3次元計測

### 1) 実施内容

地上工学規模試験用模擬オーバーパックス試験体を対象に、以下の評価を行った。

- 3次元形状計測による腐食試験前後の形状変化（腐食深さ分布）値の導出
- 酸洗前・酸洗後の模擬オーバーパックス試験体表面スキャン画像撮影（腐食深さ分布との比較用）
- 腐食深さ分布とスキャン画像の比較

### 2) 3次元形状計測による腐食試験前後の形状変化（腐食深さ分布）

腐食試験前後の形状変化を3次元形状計測で評価し、腐食深さ分布を求めた。結果を図 3.3.4-6 と図 3.3.4-7 に示す。図 3.3.4-6 は計測した全データを含む。同図は、最上部の絶縁塗装部と、模擬オーバーパックス試験体の酸洗浄で除去不可等の理由で残る  $20\mu\text{m}$  より大きな凸部を含む（なお、 $20\mu\text{m}$  は全腐食深さ評価値の頻度分布を参考に設定した）。これらを除いたデータを図 3.3.4-7 に示す。同図の緑色は最上部の絶縁塗装部、黄色は  $20\mu\text{m}$  より大きな凸部である。

横方向が測定角度、縦方向が模擬オーバーパックス試験体下端からの距離に相当し、表内の数値の上下配置が模擬オーバーパックス試験体の試験実施時の上下方向に対応する。

表内の値は腐食試験前後の座標変化（差分値）であり、腐食深さ分布を示す。

負の値は試験前後比較による減量、正の値は増量を示す。赤枠内に示す数値は溶接部上の測定値を示す。表内の値の大小に応じたカラーコンターを併せて示しており、青色は正の値、赤色は負の値に対応する。色の濃度増減が値の絶対値の大小に対応する。

なお、茶色で示す領域は3電極センサーの埋込部であり、形状は未測定である。

### 3) 模擬オーバーパックス試験体表面のスキャン画像比較

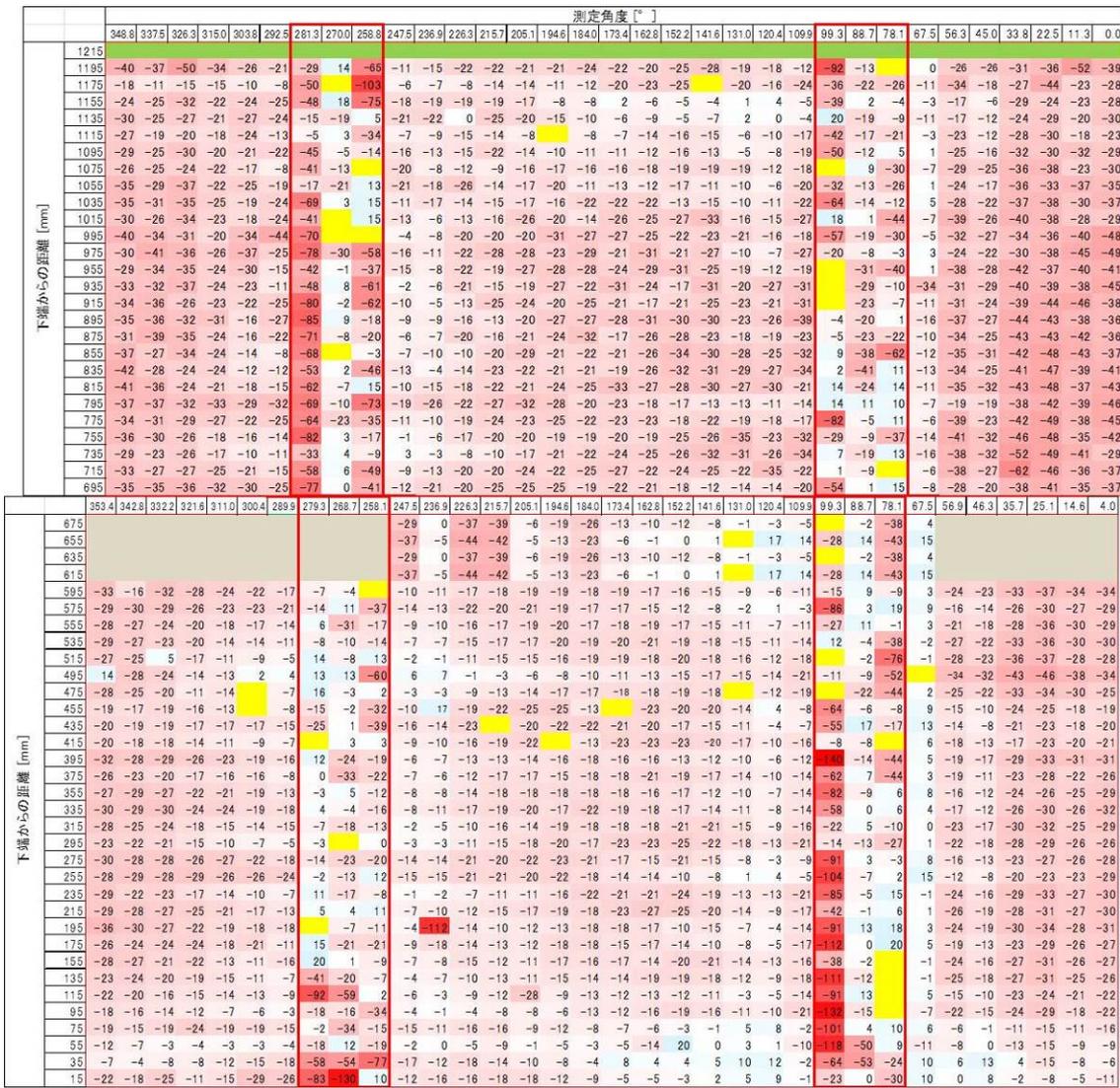
酸洗前後の模擬オーバーパックス試験体表面のスキャンデータを並べて比較した（図 3.3.4-8）。酸洗前後とも、埋込型3電極センサーの取り付け位置（前述の茶色で示す領域）から上と下の領域では、表面の状態が異なる。酸洗前、上の領域では茶色（ベントナイト固着部分含む）・黒色の部分が混在し、下の領域ではほぼ黒色となっていた。酸洗後、上の領域では、溶接部に沿った母材と溶接部上に局在化腐食を目視で確認した。下の領域では、ほぼ全面腐食が生じ、腐食深さは、腐食試験開始前の模擬オーバーパックス試験体の機械加工痕が目視確認できるほど小さいことを確認した。

### 4) 腐食深さ分布とスキャン画像の比較

カラーコンターと酸洗前（図 3.3.4-9）、酸洗後（図 3.3.4-10）のスキャン画像をそれぞれ比較した。埋込型3電極センサー取り付け位置より上と下の領域で比較し、上で腐食深さが大きく、下で小さいことを確認した。



[単位:  $\mu\text{m}$ ]



凡例：  
 コンター・赤色：腐食減量（負の値）  
 コンター・青色：増量（付着物等による凸部・正の値）  
 コンター・黄色：> +20 $\mu\text{m}$ ：未評価値（付着物影響等）  
 コンター・緑色：評価範囲外  
 赤色枠：溶接部、茶色領域：3電極センサー埋込部・形状未測定  
 注：角度表記は上半分 33 分割、下半分 34 分割で実施したことを反映

図 3.3.4-7 地上工学規模試験 酸洗後模擬オーバーパック試験体 腐食深さ分布（絶縁塗装部と 20 $\mu\text{m}$  より大きな凸部を除去）



図 3.3.4-8 地上工学規模試験 模擬オーバーパック試験体 表面スキャン画像  
(左：酸洗前、右：酸洗後)

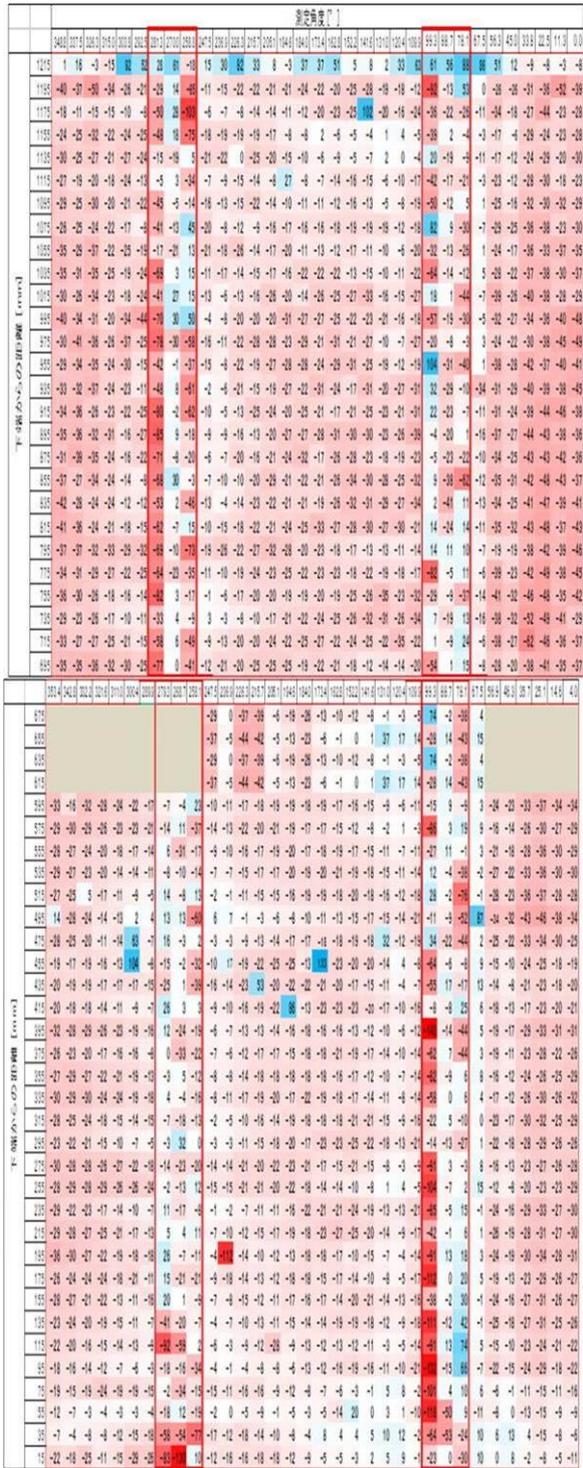


図 3.3.4-9 地上工学規模試験 酸洗後模擬オーバーパック試験体 腐食深さ分布と酸洗前表面スキャン画像の比較

T- 腐食深さの分布 [mm]		T- 腐食深さの分布 [mm]	
1	0.0	1	0.0
2	0.0	2	0.0
3	0.0	3	0.0
4	0.0	4	0.0
5	0.0	5	0.0
6	0.0	6	0.0
7	0.0	7	0.0
8	0.0	8	0.0
9	0.0	9	0.0
10	0.0	10	0.0
11	0.0	11	0.0
12	0.0	12	0.0
13	0.0	13	0.0
14	0.0	14	0.0
15	0.0	15	0.0
16	0.0	16	0.0
17	0.0	17	0.0
18	0.0	18	0.0
19	0.0	19	0.0
20	0.0	20	0.0
21	0.0	21	0.0
22	0.0	22	0.0
23	0.0	23	0.0
24	0.0	24	0.0
25	0.0	25	0.0
26	0.0	26	0.0
27	0.0	27	0.0
28	0.0	28	0.0
29	0.0	29	0.0
30	0.0	30	0.0
31	0.0	31	0.0
32	0.0	32	0.0
33	0.0	33	0.0
34	0.0	34	0.0
35	0.0	35	0.0
36	0.0	36	0.0
37	0.0	37	0.0
38	0.0	38	0.0
39	0.0	39	0.0
40	0.0	40	0.0
41	0.0	41	0.0
42	0.0	42	0.0
43	0.0	43	0.0
44	0.0	44	0.0
45	0.0	45	0.0
46	0.0	46	0.0
47	0.0	47	0.0
48	0.0	48	0.0
49	0.0	49	0.0
50	0.0	50	0.0
51	0.0	51	0.0
52	0.0	52	0.0
53	0.0	53	0.0
54	0.0	54	0.0
55	0.0	55	0.0
56	0.0	56	0.0
57	0.0	57	0.0
58	0.0	58	0.0
59	0.0	59	0.0
60	0.0	60	0.0
61	0.0	61	0.0
62	0.0	62	0.0
63	0.0	63	0.0
64	0.0	64	0.0
65	0.0	65	0.0
66	0.0	66	0.0
67	0.0	67	0.0
68	0.0	68	0.0
69	0.0	69	0.0
70	0.0	70	0.0
71	0.0	71	0.0
72	0.0	72	0.0
73	0.0	73	0.0
74	0.0	74	0.0
75	0.0	75	0.0
76	0.0	76	0.0
77	0.0	77	0.0
78	0.0	78	0.0
79	0.0	79	0.0
80	0.0	80	0.0
81	0.0	81	0.0
82	0.0	82	0.0
83	0.0	83	0.0
84	0.0	84	0.0
85	0.0	85	0.0
86	0.0	86	0.0
87	0.0	87	0.0
88	0.0	88	0.0
89	0.0	89	0.0
90	0.0	90	0.0
91	0.0	91	0.0
92	0.0	92	0.0
93	0.0	93	0.0
94	0.0	94	0.0
95	0.0	95	0.0
96	0.0	96	0.0
97	0.0	97	0.0
98	0.0	98	0.0
99	0.0	99	0.0
100	0.0	100	0.0



図 3.3.4-10 地上工学規模試験 酸洗後模擬オーバーパック試験体 腐食深さ分布と酸洗後表面  
スキャン画像の比較

### (3) 緩衝材ブロック含水率測定結果

幌延 URL での試験と同様、緩衝材の径方向および試験装置の高さ方向で、 $\Phi 20 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  の容器を用いてサンプリングを行った (図 3.3.4-11、図 3.3.4-12 参照)。表 3.3.4-2 に、測定結果を示す。緩衝材の上部ほど、乾燥密度が低く体積含水率が高い傾向が認められた。これは、試験体上部の緩衝材の膨潤が大きい外観 (図 3.3.4-13) と一致しており、上部クリアランスから、模擬地下水が浸入したためと思われる。一方、径方向では、湿潤密度、乾燥密度、含水比、体積含水率に大きな差は認められない。このため、緩衝材の有効粘土密度は下段ほど高くなり (図 3.3.4-14)、透水係数は上部ほど高く (約  $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ )、下部ほど低い (約  $2 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ ) となった (図 3.3.4-15)。

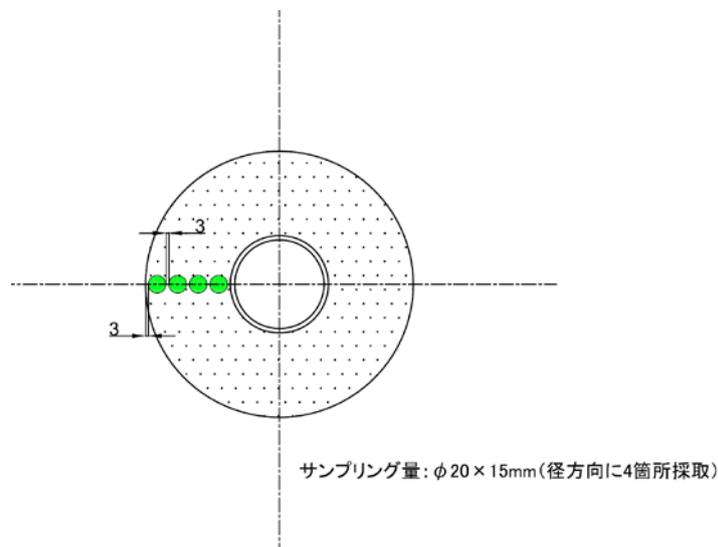


図 3.3.4-11 地上工学規模試験 サンプリング設置位置

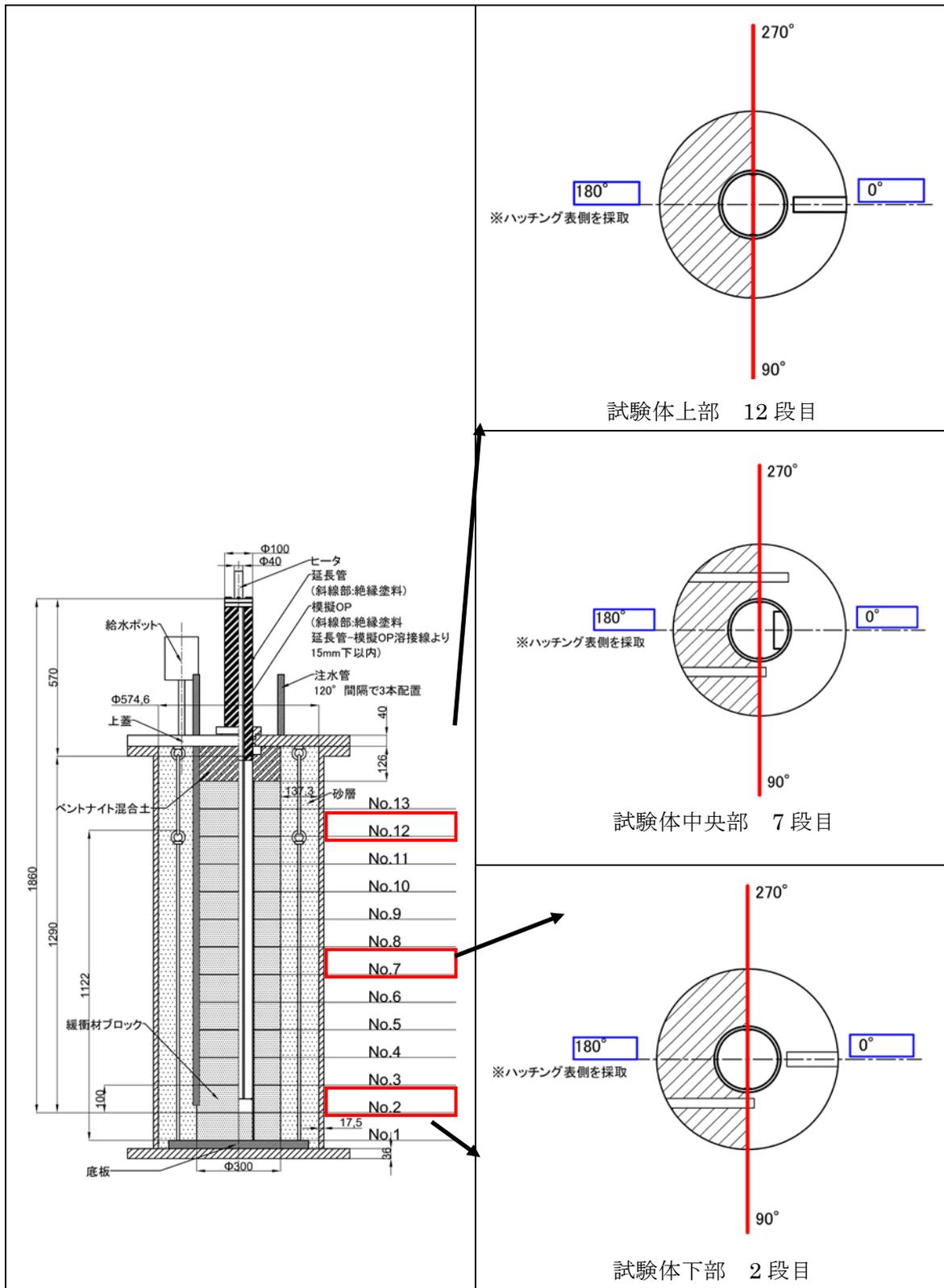


図 3.3.4-12 地上工学規模試験 緩衝材の採取位置

表 3.3.4-2 地上工学規模試験 採取試料の湿潤密度、乾燥密度、含水比、体積含水率

試料の採取部位		サンプラー 番号	模擬OP壁面 からの距離 (mm)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水比	体積含水率	有効 粘土密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]	透水係数 [m/s]
下から 12段目 上面	予定 (変更後)	A-11	10	1.73	1.19	0.454	0.539	0.960	1.105E-10
		A-12	40	1.76	1.22	0.445	0.542	0.989	1.022E-10
		A-13	70	1.78	1.23	0.446	0.549	1.002	9.807E-11
		A-14	90	1.75	1.19	0.468	0.556	0.962	1.100E-10
	予備1 (45°E)*	A-21	10	1.77	1.22	0.445	0.545	0.994	1.004E-10
		A-22	40	1.82	1.24	0.460	0.572	1.014	9.447E-11
		A-23	70	1.75	1.21	0.450	0.543	0.979	1.050E-10
		A-24	90	1.74	1.19	0.463	0.550	0.962	1.100E-10
	予備2 (45°W)*	A-31	10	1.80	1.29	0.393	0.507	1.058	8.099E-11
		A-32	40	1.77	1.23	0.437	0.539	1.004	9.748E-11
		A-33	70	1.78	1.24	0.432	0.537	1.012	9.513E-11
		A-34	90	1.76	1.21	0.456	0.552	0.981	1.044E-10
	平均 (n=3)		10	1.76	1.23	0.431	0.530	1.004	9.747E-11
			40	1.78	1.23	0.447	0.551	1.002	9.805E-11
			70	1.77	1.23	0.443	0.543	0.998	9.942E-11
			90	1.75	1.20	0.462	0.553	0.968	1.082E-10
下から 7段目 上面	予定	B-11	10	1.87	1.44	0.299	0.431	1.204	4.157E-11
		B-12	40	1.93	1.50	0.285	0.429	1.268	2.860E-11
		B-13	70	1.92	1.50	0.283	0.424	1.263	2.954E-11
		B-14	90	1.90	1.46	0.305	0.444	1.221	3.774E-11
	予備1 (20°E)*	B-21	10	1.90	1.45	0.315	0.455	1.210	4.005E-11
		B-22	40	1.94	1.50	0.292	0.439	1.267	2.880E-11
		B-23	70	1.95	1.52	0.281	0.426	1.285	2.584E-11
		B-24	90	1.92	1.47	0.310	0.455	1.231	3.575E-11
	平均 (n=2)		10	1.89	1.44	0.307	0.443	1.207	4.081E-11
			40	1.94	1.50	0.289	0.434	1.268	2.870E-11
			70	1.93	1.51	0.282	0.425	1.274	2.765E-11
			90	1.91	1.46	0.307	0.449	1.226	3.674E-11
下から 2段目 上面	予定	C-11	10	1.99	1.58	0.260	0.412	1.350	1.670E-11
		C-12	40	1.98	1.59	0.247	0.392	1.356	1.597E-11
		C-13	70	1.97	1.58	0.251	0.396	1.344	1.743E-11
		C-24	90	1.95	1.54	0.270	0.415	1.302	2.309E-11
	予備1 (45°E)*	C-21	10	1.99	1.58	0.257	0.406	1.348	1.696E-11
		C-22	40	2.02	1.62	0.242	0.394	1.392	1.225E-11
		C-33	70	1.99	1.59	0.248	0.396	1.360	1.549E-11
		C-23	90	2.00	1.59	0.258	0.410	1.354	1.623E-11
	平均 (n=2)		10	1.99	1.58	0.259	0.409	1.349	1.683E-11
			40	2.00	1.61	0.245	0.393	1.374	1.402E-11
			70	1.98	1.58	0.250	0.396	1.352	1.644E-11
			90	1.97	1.56	0.264	0.413	1.328	1.944E-11



図 3.3.4-13 地上工学規模試験 砂層撤去後試験体外観 270° 付近  
(黄色線：緩衝材最大径部分) (再掲)

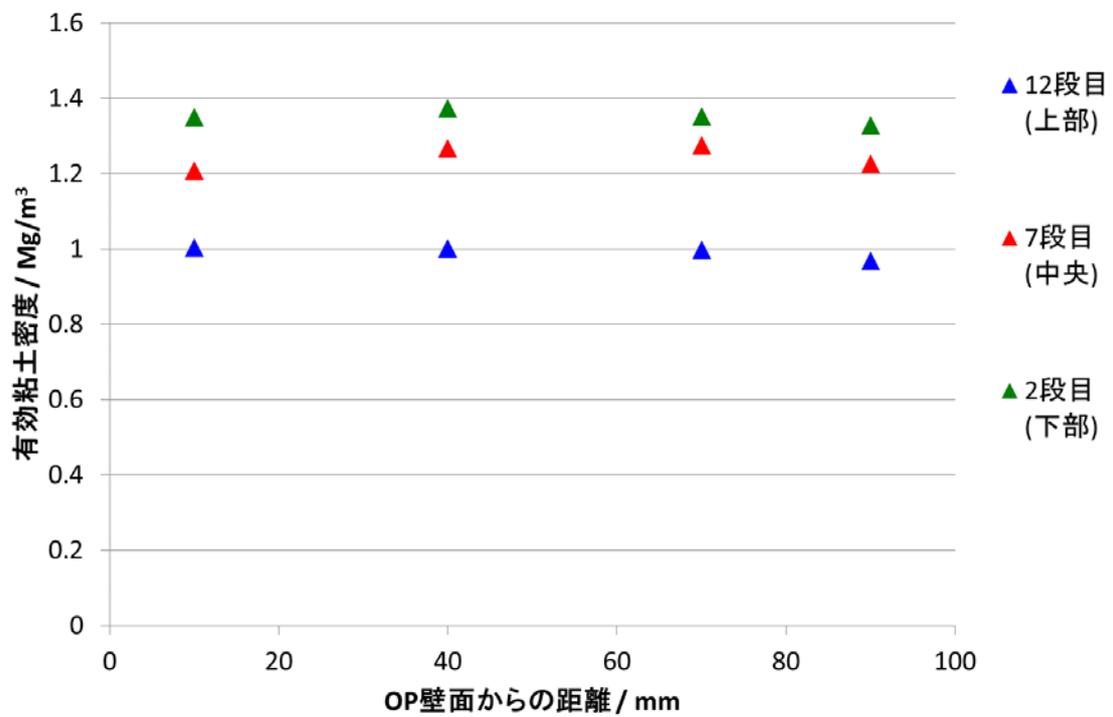


図 3.3.4-14 地上工学規模試験 緩衝材の有効粘土密度

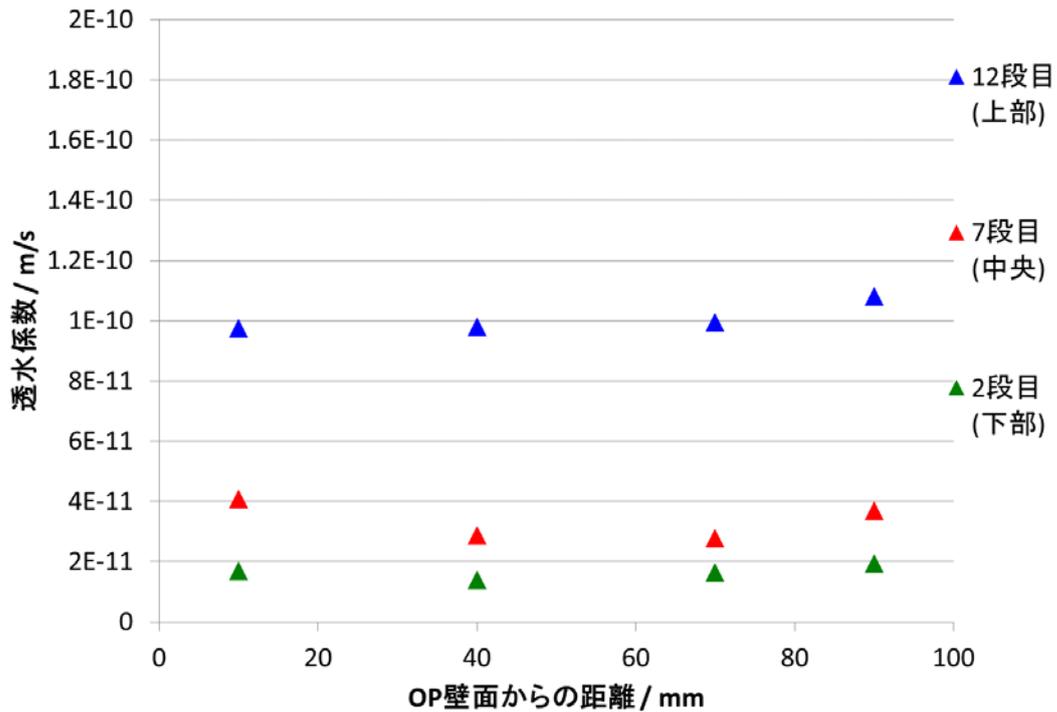


図 3.3.4-15 地上工学規模試験 緩衝材の透水係数

(4) クーポン試験による腐食速度測定結果

緩衝材の2段目、7段目、11段目の内側から40 mm付近に模擬オーバーパックと同じ材質の炭素鋼で作製したクーポン試験片(30 mm×20 mm×2 mm)を設置して腐食量を計測した。結果を、図 3.3.4-16 に示す。腐食量は、13 μm~30 μmでオーダーとしては、模擬オーバーパック自身の腐食量と一致している。

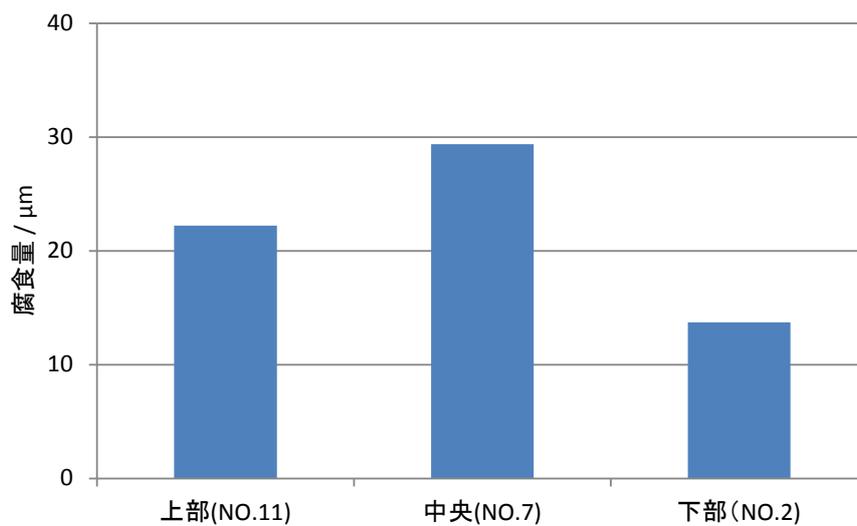


図 3.3.4-16 地上工学規模試験 クーポン試験片の腐食量

### 3.3.5 模擬オーバーパック 3次元計測結果の評価

#### (1) 模擬オーバーパックの平均腐食深さ、最大腐食深さ分布解析

模擬オーバーパックの平均腐食深さ、最大腐食深さ分布解析を模式的に図 3.3.5-1 に示す。模擬オーバーパックを周方向に 4 分割(図 3.3.5-1 右図に示す分割)、軸方向に 10 分割(図 3.3.5-1 左図に示す地上・地下工学規模試験用模擬オーバーパック試験体の 3 次元計測の範囲を試験体長さ方向で 10 分割)、合計 40 分割として、それぞれの平均腐食深さ、 $d_{ave}$ 、最大腐食深さ、 $d_{max}$ 、および、最大腐食深さ/平均腐食深さ比、 $d_{max}/d_{ave}$  を算出した。1 つの分割面は経時変化確認試験の試験片上評価面積の約 2 倍に相当する。幌延 URL 工学規模試験模擬オーバーパック 40 区画の平均/最大腐食深さ、孔食指数を表 3.3.5-1、および図 3.3.5-2 に、地上工学規模試験の模擬オーバーパック 40 区画の平均/最大腐食深さ、最大腐食深さ/平均腐食深さ比を表 3.3.5-2、および図 3.3.5-3 に、幌延 URL、地上工学規模試験の模擬オーバーパック 40 区画の平均/最大腐食深さ、最大腐食深さ/平均腐食深さ比の平均、最大、および最少を比較して表 3.3.5-3 に示す。平均腐食深さ、最大腐食深さ、最大腐食深さ/平均腐食深さ比ともに、その平均値は幌延 URL 工学規模試験の方が地上工学規模試験よりも若干大きい。また、下端部で最大腐食深さが大きい、周方向(角度)によって腐食深さが異なる、平均腐食深さが浅い所で最大腐食深さ/平均腐食深さ比が大きくなる、などの特徴が認められた。

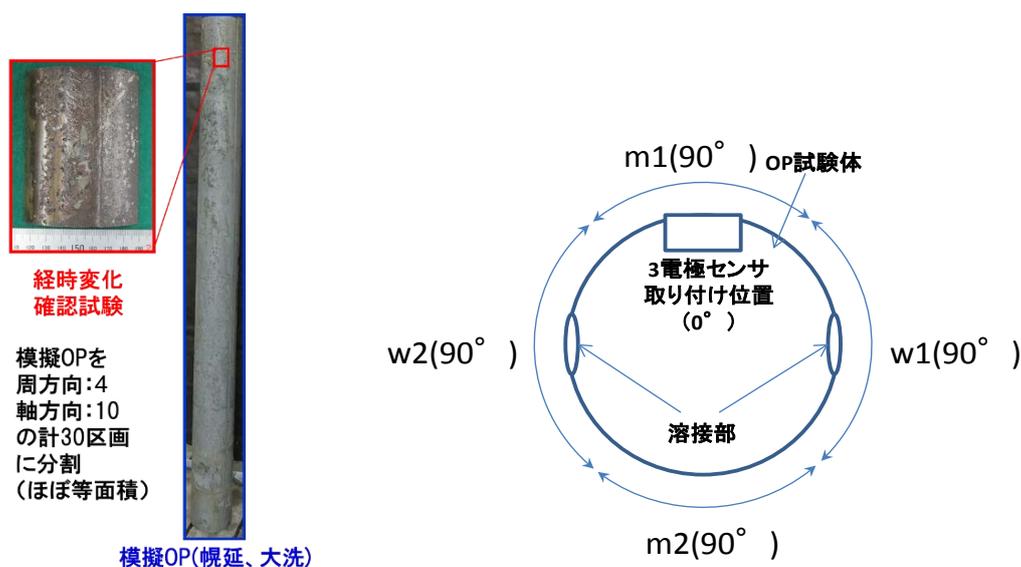


図 3.3.5-1 模擬オーバーパックの平均腐食深さ、最大腐食深さ分布解析(模式図)

表 3.3.5-1 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック 40 区画の平均/最大腐食深さ、最大/平均比

単位：平均・最大は[ $\mu$ m]、最大/平均は無次元

幌延OP	w1			m1			w2			m2		
	平均	最大	最大/平均									
1	-22.9	-93.2	4.08	-20.4	-99.7	4.88	-24.3	-88.6	3.64	-23.0	-55.9	2.43
2	-30.0	-118.6	3.95	-41.5	-174.2	4.20	-20.1	-63.5	3.16	-27.0	-53.2	1.97
3	-30.4	-108.5	3.56	-39.4	-103.5	2.63	-25.2	-110.3	4.38	-27.9	-57.2	2.05
4	-37.9	-131.8	3.48	-50.1	-154.4	3.08	-29.6	-86.5	2.92	-37.5	-84.6	2.25
5	-34.3	-111.4	3.25	-30.6	-110.1	3.60	-28.6	-63.4	2.22	-32.6	-61.5	1.89
6	-32.3	-114.1	3.53	-39.7	-166.3	4.19	-28.8	-67.9	2.36	-23.5	-52.0	2.21
7	-29.6	-93.6	3.16	-37.5	-176.3	4.70	-28.1	-136.1	4.84	-28.6	-56.5	1.98
8	-25.0	-76.0	3.04	-34.3	-84.2	2.46	-25.6	-84.6	3.30	-29.4	-61.4	2.09
9	-25.0	-58.9	2.35	-43.1	-166.0	3.85	-37.5	-127.0	3.39	-37.4	-107.9	2.88
10	-37.6	-114.0	3.03	-50.2	-185.2	3.69	-49.0	-189.7	3.87	-49.8	-176.0	3.54

表 3.3.5-2 地上工学規模試験 模擬オーバーパック 40 区画の平均/最大腐食深さ、最大/平均比

単位：平均・最大は[ $\mu$ m]、最大/平均は無次元

大洗OP	w1			m1			w2			m2		
	平均	最大	最大/平均	平均	最大	最大/平均	平均	最大	最大/平均	平均	最大	最大/平均
1	-23.4	-102.8	4.40	-14.5	-28.2	1.95	-18.8	-91.8	4.89	-28.3	-51.8	1.83
2	-24.5	-77.8	3.17	-20.3	-33.0	1.63	-21.0	-64.4	3.06	-34.4	-48.9	1.42
3	-23.1	-84.8	3.67	-24.3	-33.7	1.39	-25.0	-62.2	2.49	-37.7	-48.1	1.28
4	-23.5	-82.2	3.51	-23.0	-32.9	1.43	-25.5	-82.0	3.22	-37.7	-51.5	1.37
5	-26.6	-76.5	2.88	-17.5	-42.3	2.42	-19.9	-53.7	2.70	-37.6	-62.3	1.66
6	-14.6	-60.4	4.13	-16.4	-21.2	1.30	-18.8	-85.5	4.55	-29.3	-45.8	1.57
7	-13.9	-39.2	2.81	-18.3	-25.3	1.39	-21.7	-140.2	6.48	-22.8	-33.8	1.48
8	-13.7	-26.9	1.97	-18.1	-24.8	1.37	-19.1	-103.9	5.43	-26.2	-32.0	1.22
9	-14.8	-112.2	7.59	-16.4	-27.1	1.65	-21.9	-112.0	5.11	-26.7	-36.4	1.36
10	-21.7	-130.2	6.01	-9.8	-27.7	2.83	-29.2	-131.6	4.51	-14.4	-29.0	2.02

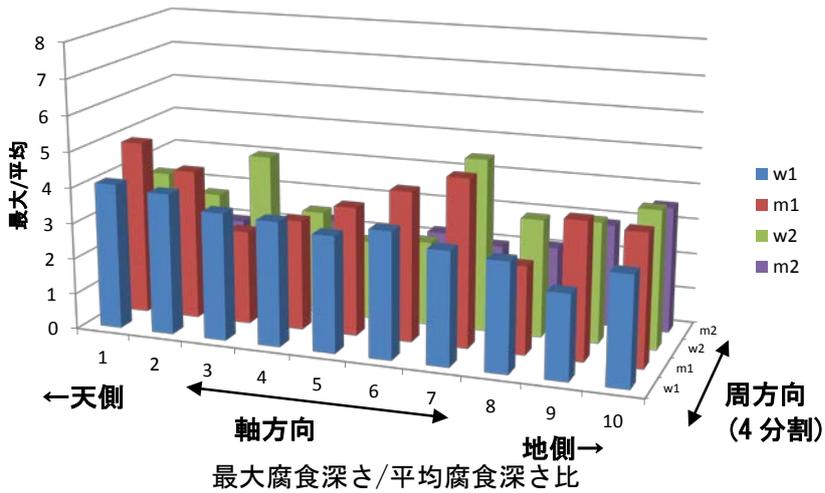
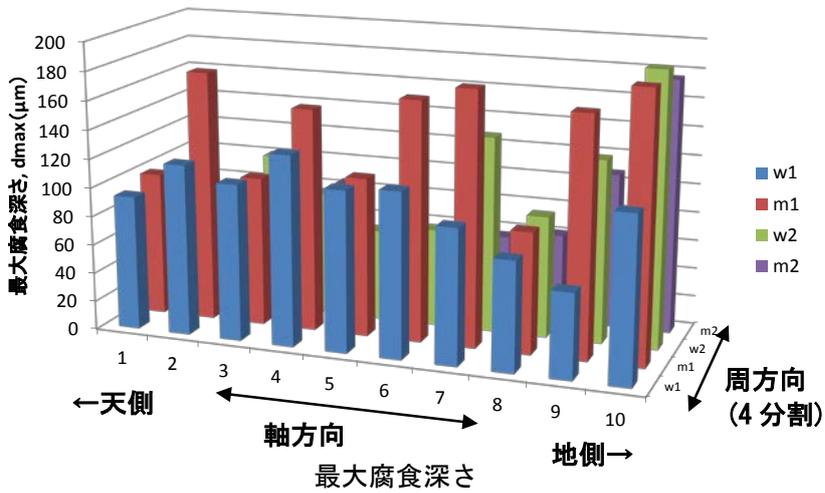
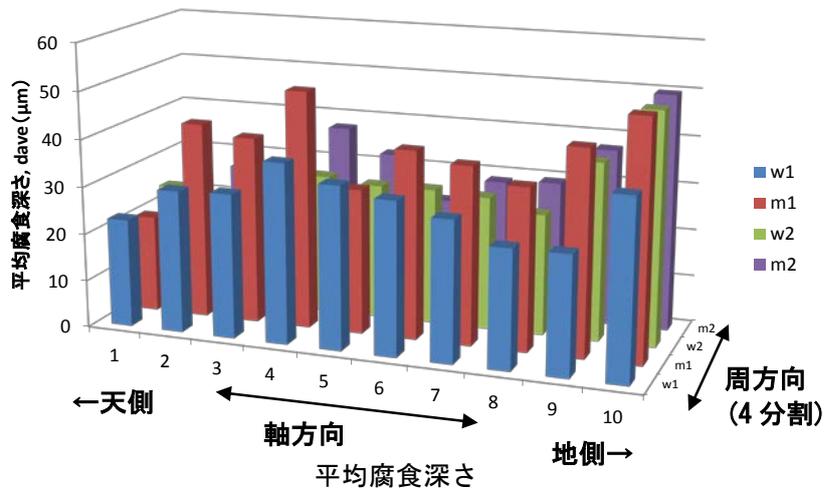


図 3.3.5-2 幌延 URL 工学規模試験 模擬オーバーパック 40 区画の平均/最大腐食深さ、最大/平均比

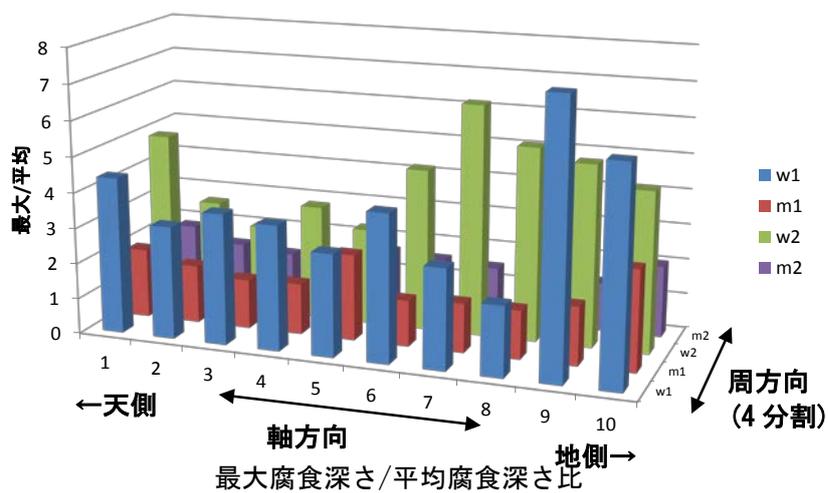
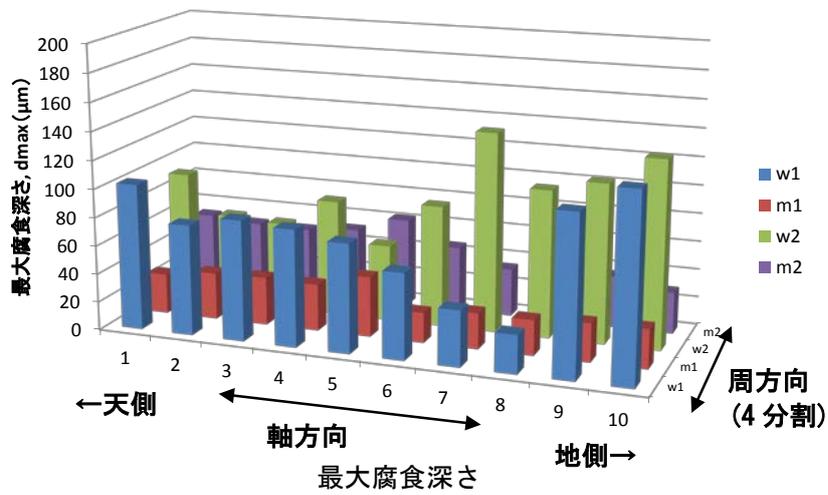
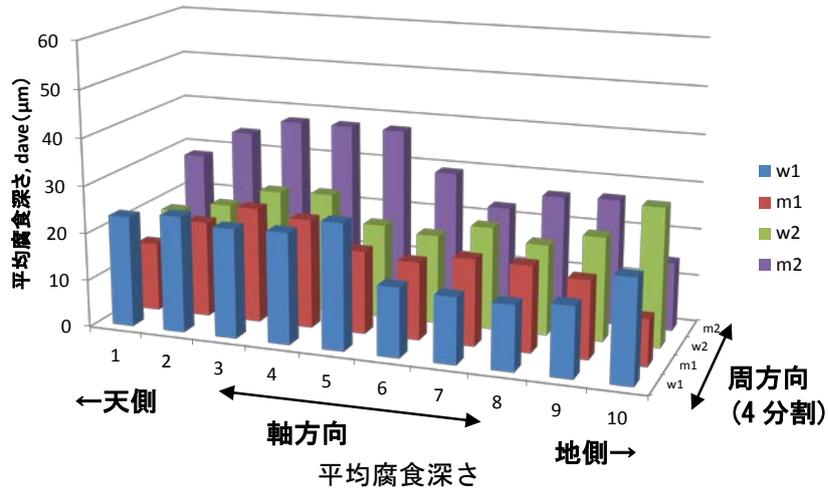


図 3.3.5-3 地上工学規模試験 模擬オーバーパック 40 区画の平均/最大腐食深さ、最大/平均比

表 3.3.5-3 幌延 URL/地上工学規模試験 模擬オーバーパック 40 区画の平均/最大腐食深さ、  
最大/平均比の比較

		幌延	大洗
平均 dave ( $\mu\text{m}$ )	最大	50.2	37.7
	平均	32.6	22.3
	最小	20.1	9.8
最大 dmax ( $\mu\text{m}$ )	最大	189.7	140.2
	平均	105.6	61.4
	最小	52.0	21.2
最大/平均 (dmax/dave)	最大	4.88	7.59
	平均	3.20	2.88
	最小	1.89	1.22

(2) レプリカ 3次元レーザーによる腐食深さとの対比

幌延 URL 工学規模試験模擬オーバーパックに生じた腐食は細かい凹凸を伴った孔食状を呈しているエリアが認められ、均一・全面腐食、および、なだらかな凹凸を伴う腐食の局在化を前提としたプローブ( $\phi 8\text{mm}$ )の接触式の 3次元計測ではカバーしきれない。一方、3次元レーザー計測の計測視野は 1mm 以下と狭いこと、および、そのエリア内での凹凸によって平均、および、最大の凹凸を算出するため、凹み(の偏差値)は過小評価される可能性が有り、それぞれの計測法には一長一短がある。したがって、幌延 URL 工学規模試験模擬オーバーパックから代表的な 10 点を選定してレプリカ樹脂 ( $\mu\text{m}$  単位の微細形状を型取り可能な精密転写樹脂) で採取し、レーザー計測器で 3次元形状を計測した。深さ計測の状況を図 3.3.5-4 に示す。結果を同一位置の接触式による実測値と対比した。レプリカ+レーザー 3D 計測と接触式 3D 計測の対比を表 3.3.5-4 に示す。

個別計測点において、レプリカ 3D レーザー計測の方が接触式 3D 計測による腐食深さの方が深い傾向があり、選定した 10 視野でレーザー 3D 計測を 3(母材)~9 か所(溶接部)計測した結果は、同じ座標位置の接触式 3D 測定実測値とあまり対応していない。10 視野の平均 :  $137\mu\text{m}$  に対して  $29\mu\text{m}$ (接触式平均:図 3.5.1-1)と約 5 倍深くなっている。一方、10 視野の最大 :  $560\mu\text{m}$  に対して  $190\mu\text{m}$ (接触式最大:図 3.5.1-1)と約 3 倍深くなっている。

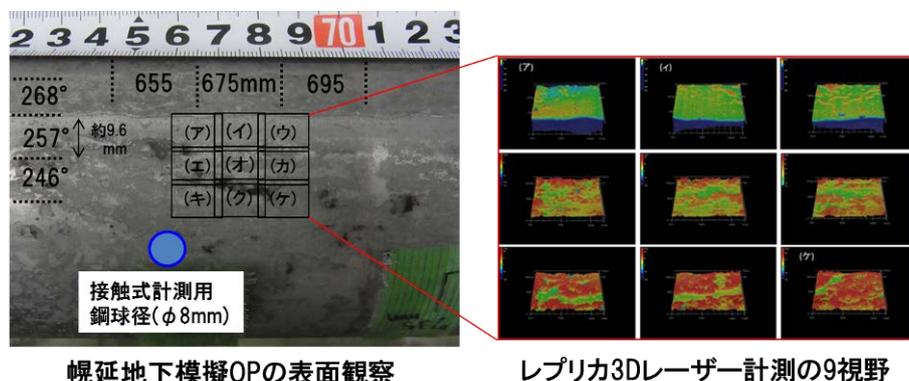


図 3.3.5-4 幌延 URL 工学規模試験 レプリカ 3次元レーザーによる深さ計測

表 3.3.5-4 幌延 URL 工学規模試験 レプリカ+レーザー3D 計測と接触式 3D 計測の対比

	レプリカ+レーザー3D						接触式3D		
	垂直位置	角度	調整	レプリカ+3D高さ(凸)			3D深さ(凹)	垂直位置	角度
	mm	°		μm			μm	mm	°
1	50	240		111	59	85	-44	55	236.9
2	100	185		199	83	160	-20	95	184.0
3	240	90	-	31	24	15	-3	235	88.7
			depo	169	102	124			
			+	233	294	159			
4	300	185		560	69	110	-16	295	184.0
5	400	90	-	21	13	15	-4	395	88.7
			depo	71	98	66			
			+	438	352	355			
6	675	185		379	161	241	-18	675	184.0
7	800	270	-	48	31	31	-4	795	270.0
			depo	67	51	57			
			+	96	80	70			
8	880	225		472	389	284	-25	875	226.3
9	1000	270	depo	75	47	50	-11	995	270.0
			+	52	30	30			
10	1150	225		164	75	74	0	1155	226.3
平均				137			-15	-	

(3) 幌延 URL 工学規模試験にて回収した 3 電極式センサーの調査

幌延 URL 工学規模試験模擬オーバーパック用 3 電極式センサーの評価手順を図 3.3.5-5 に示す。センサー表面にベントナイトが付いた状態で回収し、1) 回収した 3 電極式センサーの腐食速度測定、2) 腐食生成物の分析を行った後に、付着生成物を除去、および、酸洗浄を実施し、3) 形状計測（3次元レーザー計測）を行った。



図 3.3.5-5 幌延 URL 工学規模試験 3 電極式センサーの評価手順

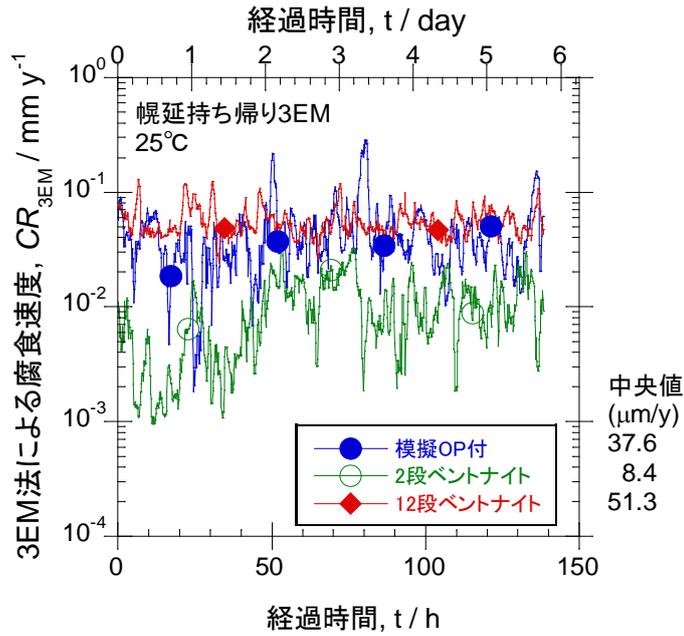
1) 3 電極式センサーによる腐食の見積

幌延 URL 工学規模試験にて回収した 3 電極式センサーのベントナイトブロックが付いた状態での腐食速度計測状況を図 3.3.5-6 に、幌延 URL および地上工学規模試験模擬オーバーパック用の 3 電極式センサーの腐食速度計測、および、時間積分による平均腐食深さの経時変化を図 3.3.5-7 に示す。なお、低腐食速度下では  $2\mu\text{m/y}$  で算出している。

3 電極式腐食モニタリング自体は健全で、回収後は幌延での比較的速い腐食速度と同等レベルの腐食速度であった。



2 段目                      12 段目                      本体設置  
 (a) ベントナイト付きの3電極式センサーの回収状況



(b) ベントナイト付きの3電極式センサーの計測状況

図 3.3.5-6 幌延 URL 工学規模試験 回収3電極式センサーのベントナイトブロックが付いた状態での腐食速度計測

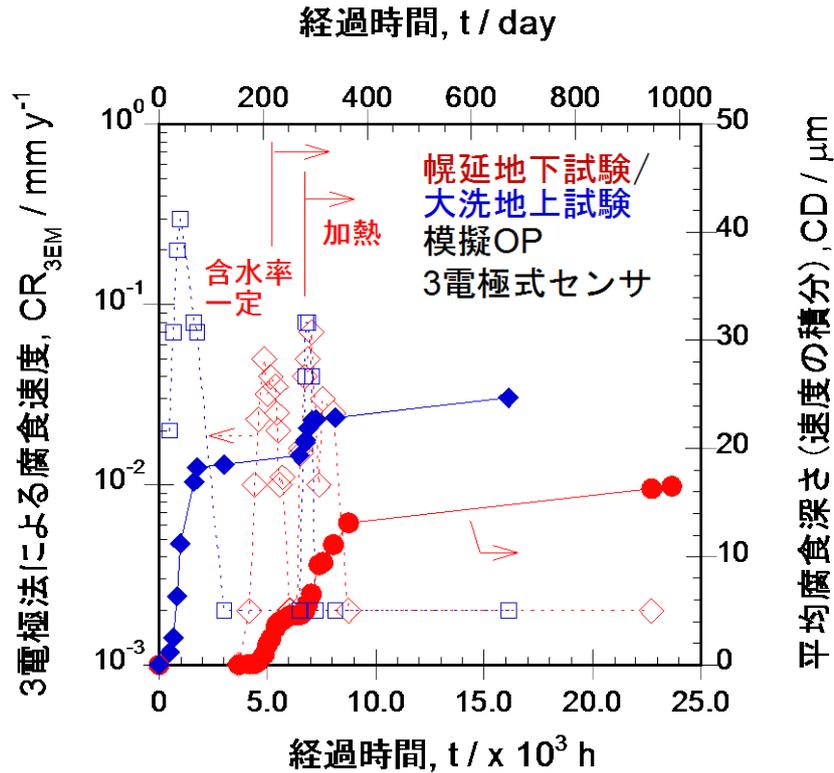
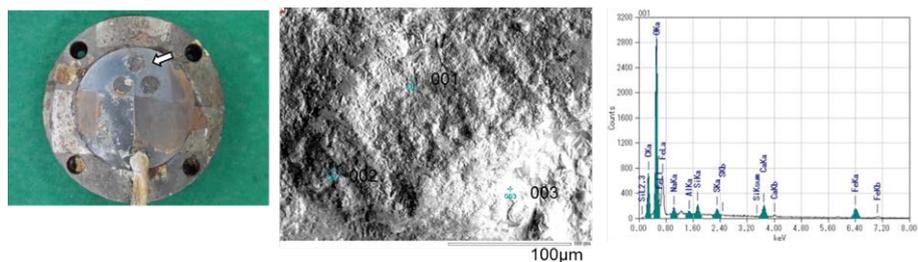


図 3.3.5-7 幌延 URL/地上工学規模試験 模擬オーバーパックの3電極式センサーの腐食速度計測、および、時間積分による平均腐食深さの経時変化

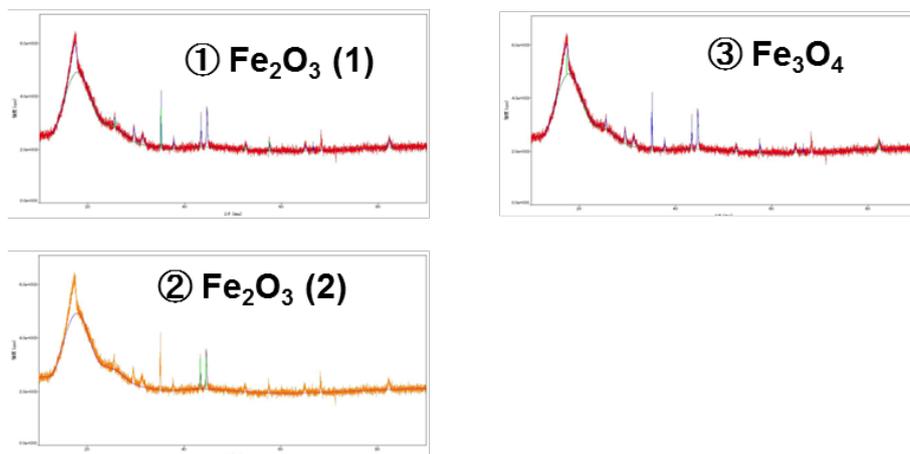
2) 幌延 URL 工学規模試験回収後の3電極式センサーの腐食生成物分析

幌延 URL 工学規模試験より回収した3電極式センサーの腐食生成物分析結果を図 3.3.5-8 に示す。Na、Ca は模擬地下水、および、ベントナイト由来、Si はベントナイト由来、C は炭酸 (CO<sub>2</sub>, NaHCO<sub>3</sub>) 由来である。また、S も強く検出された。一方、XRD 解析で Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の生成が確認されたが、炭酸鉄は確認されなかった。なお、3電極式センサーは嵩高が高く、そのまま分析装置に挿入できなかつたため、地上工学規模試験で回収したセンサーは、測定を見送った。幌延 URL 工学規模試験のセンサーに対しては、切断方法を工夫し、試験片面を樹脂カバーで覆うことで被水を回避して裏面を切断し、嵩高を減らして装置に挿入した。なお、3電極式センサーの試験片面側の樹脂を割って金属試験片を取り出す方法も検討したが、後述の3次元計測に支障(樹脂面が基準面)があるため、3次元計測を優先することとした。



	C	O	Na	Al	Si	S	Ca	Fe	合計(質量%)
1	15.33	41.23	1.05	0.29	1.38	1.22	5.2	34.3	100
2	15.56	31.73	1.73	0.37	1.72	2.21	3.99	42.69	100
3	13.66	32.22	1.79	0.36	1.77	1.91	4.96	43.33	100
4	11.80	43.05	2.85	2.70	7.55	2.47	3.22	26.56	100
5	13.98	41.04	2.02	0.39	1.77	2.86	4.99	32.94	100
6	14.84	39.89	1.56	0.37	1.29	2.21	7.22	32.82	100

(a) SEM-EDX 分析



(b) XRD 解析

図 3.3.5-8 幌延工学規模試験 回収後の3電極式センサーの腐食生成物分析

3) 3電極式センサーの形状計測

3電極式センサーの酸洗後の外観および3D計測状況を図 3.3.5-9 に、3電極式センサー部3D計測結果を表 3.3.5-5 に示す。

平均すると、地上工学規模試験の方が幌延 URL 工学規模試験の方が3電極式センサーの腐食深さが大きい。なお、電極ごと、場所ごとに、腐食深さはばらついている。

表 3.3.5-5 幌延 URL/地上工学規模試験 3電極式センサー部3D計測結果

3電極式センサ		平均深さ	
		μm	
		幌延	大洗
R型 中央	1	-189	-124
	2	-135	-80
	3	-40	-102
小型 2段目	1	-53	-78
	2	-21	-54
	3	-16	-118
小型 12段目	1	-90	-76
	2	-87	-82
	3	-2	-114
平均		-70	-92

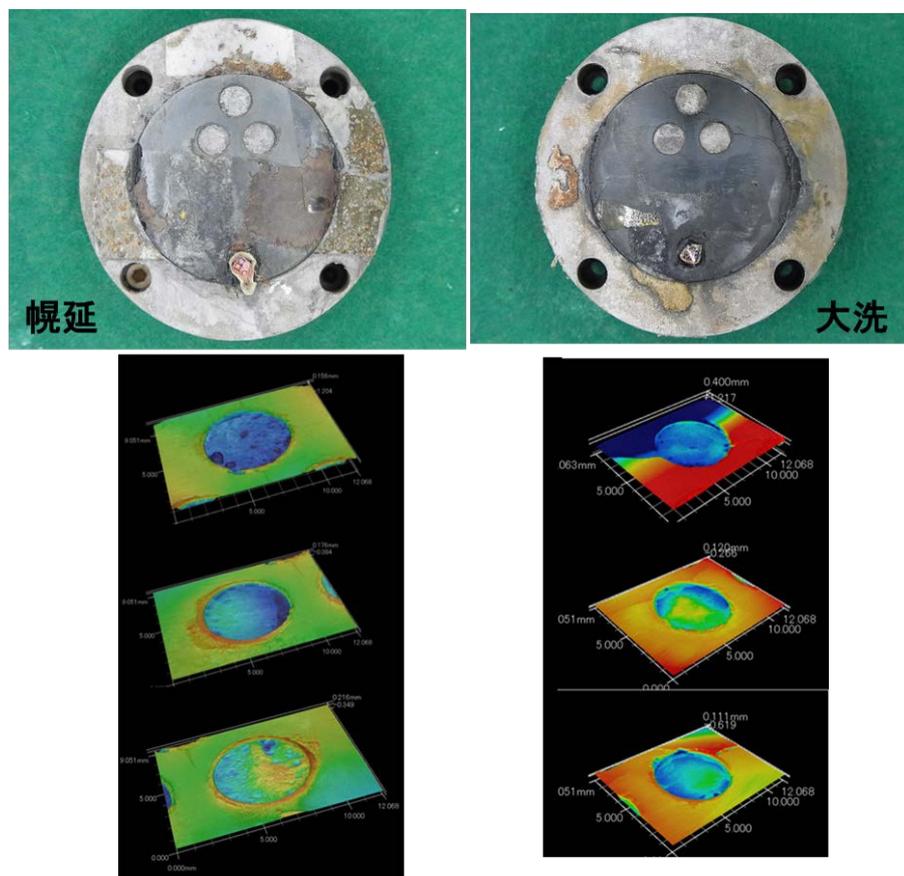


図 3.3.5-9 幌延 URL 工学規模試験 3電極式センサーの酸洗後の外観および3D計測状況

### 3.4 小規模要素試験の実施

#### 3.4.1 不均質条件試験

本試験の目的は、試験系内に不均質な状況を再現するために小型化した試験装置を用いた実験系を製作した。想定した不均質条件は緩衝材ブロックの製作誤差や定置誤差などにより、緩衝材ブロック定置後に最終的に人工バリアとしての緩衝材ブロックの定置時に生じるブロック間の隙間を想定し、緩衝材ブロック溶接線接触部の片側にはブロック間の隙間をモデル化した貫通部を設け、反対側には隙間がない状態を再現した。

不均質条件試験用オーバーパック腐食試験設備は、基本的に地上施設用工学規模試験装置の高さ方向のみ小型化したものである。以下の機器で構成される。

- ① 模擬オーバーパック
- ② 加熱装置
- ③ 緩衝材ブロック
- ④ センサー及び計測機器
- ⑤ その他付属装置 注水設備、模擬処分孔、砂層、押さえ蓋

不均質条件試験装置のイメージを図 3.4.1-1 に、不均質条件試験装置概要図を図 3.4.1-2 に示す。

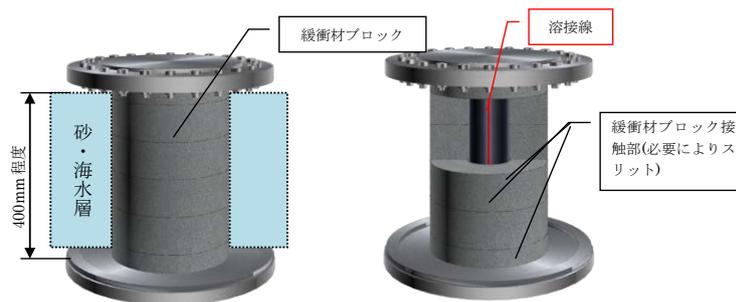
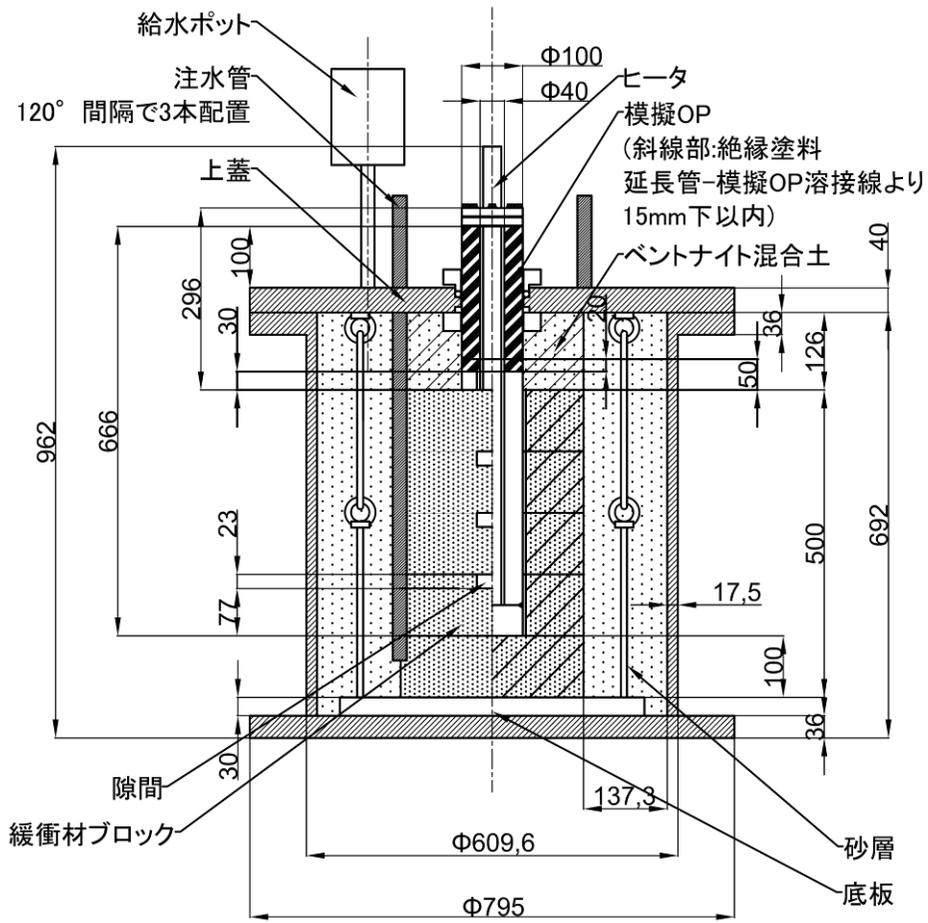


図 3.4.1-1 不均質条件試験 試験装置イメージ



単位[mm]

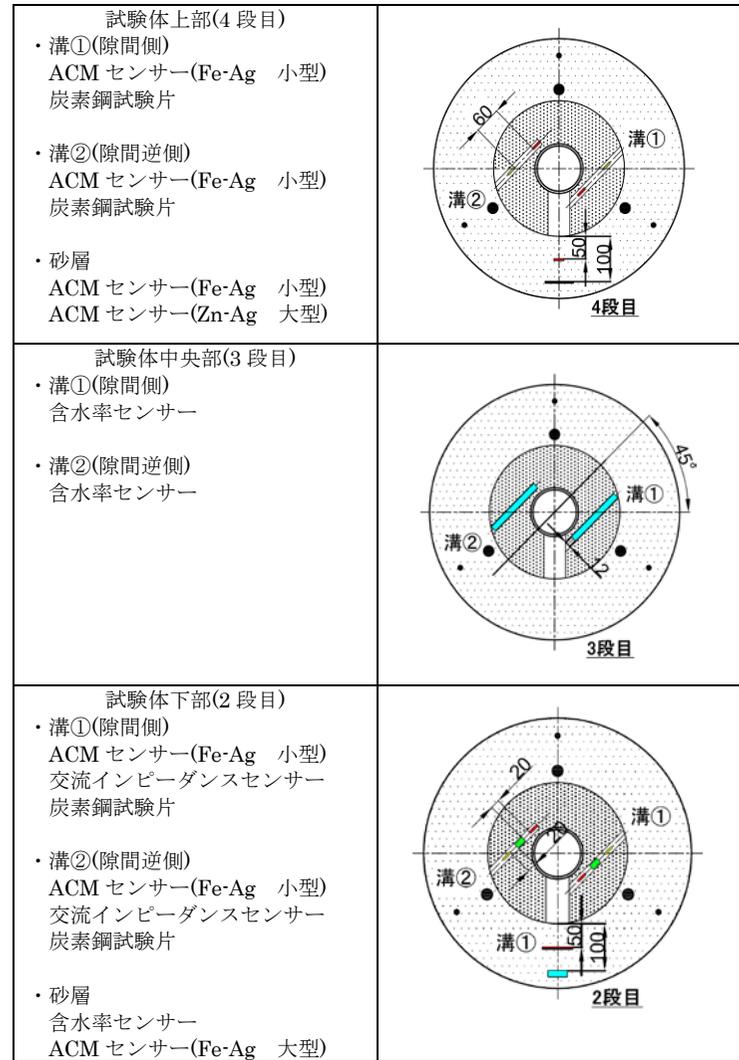


図 3.4.1-2 不均質条件試験 外観・センサー配置図

(1) 測定項目

1) 施工時の隙間の有無による腐食量の差

緩衝材ブロックに設置した施工時の隙間の有無による腐食挙動の差を確認するため、以下の項目について施工時の隙間側と反対側の比較を行った。

- ① 緩衝材ブロック及び模擬オーバーパックの状態。
- ② 緩衝材ブロック含水率：施工時の隙間の有無による径方向の含水率の差を計測。
- ③ 3次元計測：施工時の隙間側、反対側について縦方向3か所の腐食量を評価。
- ④ クーポン試験片の重量変化：施工時の隙間側と反対側に設置したクーポン試験片の重量変化から腐食量を求めた。

2) 各種計測・分析項目

a 物質収支の確認

3次元計測による腐食量と、装置組立時に装置内に持ち込まれた酸素量の関係から、物質収支を確認した。

b 80℃における母材と溶接部の腐食挙動の差

80℃における模擬オーバーパック本体と溶接部（隙間の無い側）の腐食量から母材と溶接部の腐食挙動を比較した。

不均質条件試験にて測定を行う項目について以下の表 3.4.1-1 に示す。

表 3.4.1-1 不均質条件試験 測定項目

不均質条件試験 測定項目		解体作業時必須作業
施工時の隙間の有無による腐食量の差	①目視による緩衝材ブロック及び模擬オーバーパックの状態確認	模擬オーバーパックの目視観察、写真撮影
	②緩衝材ブロック含水率	施工時の隙間側、反対側溶接部付近の緩衝材ブロックのサンプリング
	③模擬オーバーパックの3次元計測	施工時の隙間の位置、腐食箇所のマーキング
	④クーポン試験片による腐食量測定	脱錆後、クーポン試験片の重量測定
物資収支の確認	—	—
80℃における母材と溶接部の腐食挙動の差	模擬オーバーパックの3次元計測	模擬オーバーパックの目視観察、写真撮影
特異的な腐食箇所があった場合の対応	模擬オーバーパックの3次元計測 緩衝材ブロック含水率	当該部及び比較箇所の緩衝材ブロックのサンプリング

(2) 測定・分析結果

1) 模擬地下水注水量と組成

図 3.4.1-3 に不均質条件試験装置への注水状況を示す。150 日以降についてはほぼ給水量は増加していない。注水した模擬地下水の組成は、地上工学規模試験装置と同じである（表 3.2.2-2 参照）。図 3.4.1-4 に模擬地下水組成の経時変化を示すが、ほぼ一定となり、地下水中への鉄の溶出は認められなかった。pH の経時変化を図 3.4.1-5 に示すが、pH は 9 程度まで上昇した。これは、緩衝材と接触したことによると思われる。また模擬オーバーパック表面温度の経時変化を図 3.4.1-6 に示す。温度は大よそ 80℃で推移した。

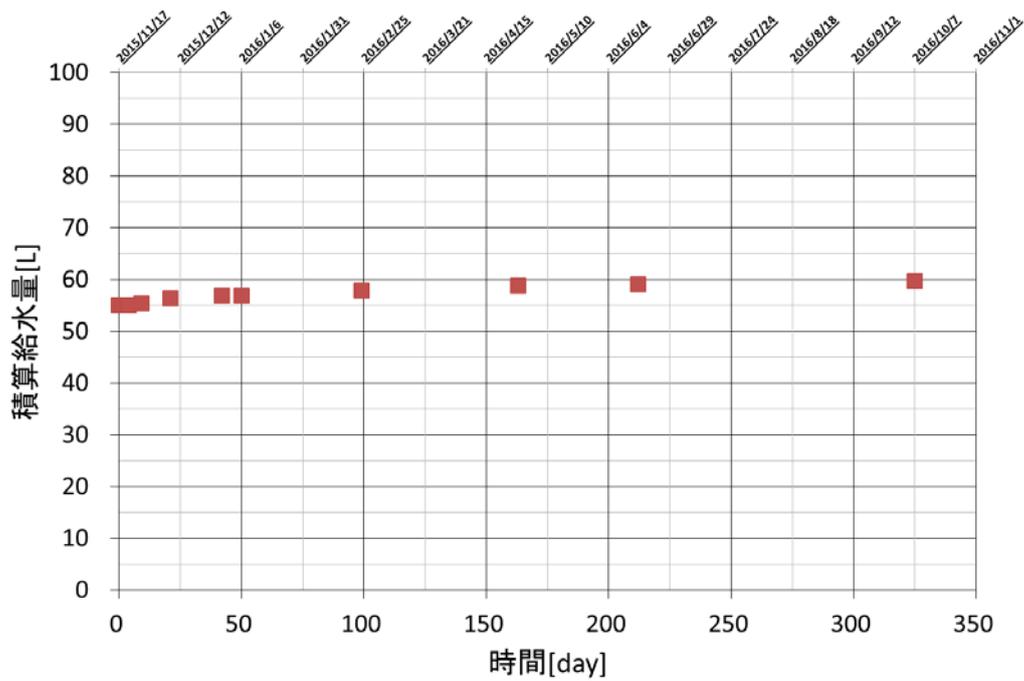


図 3.4.1-3 不均質条件試験 試験装置積算注水量

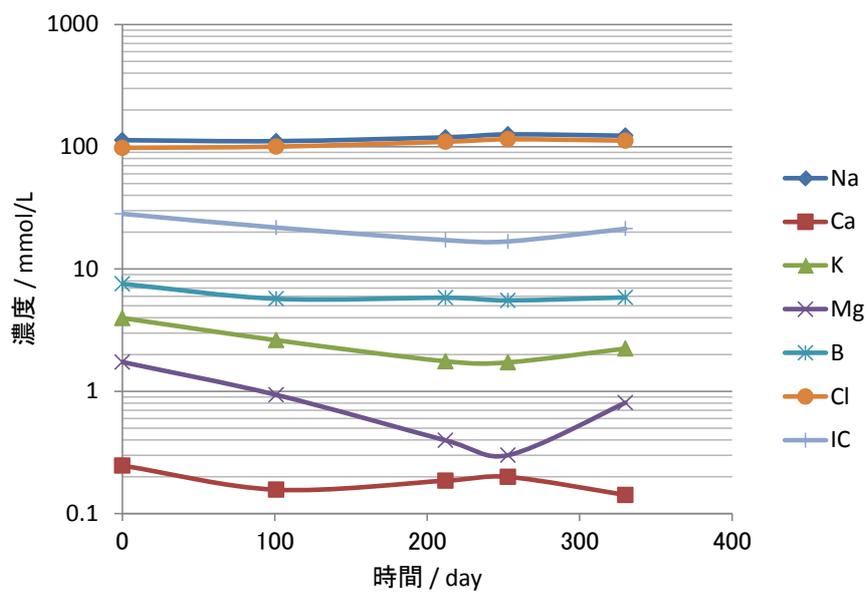


図 3.4.1-4 不均質条件試験 模擬地下水の組成

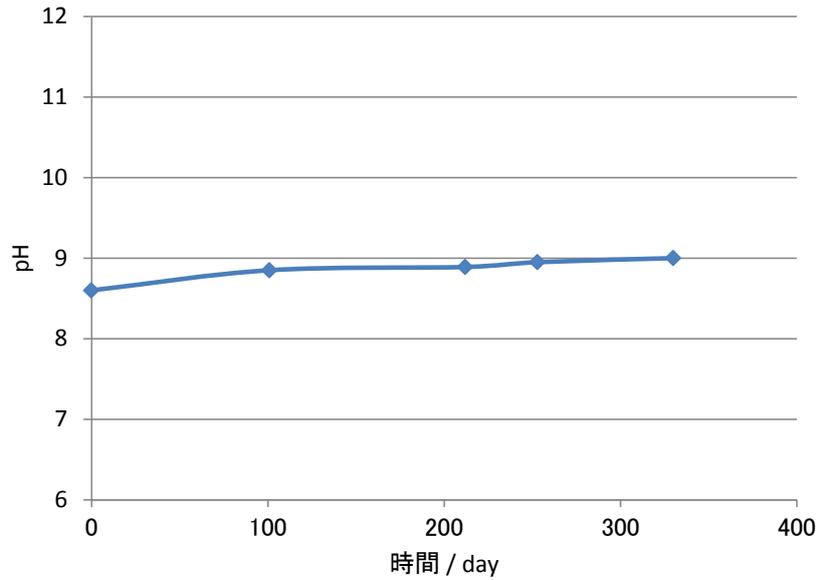


図 3.4.1-5 不均質条件試験 模擬地下水の pH

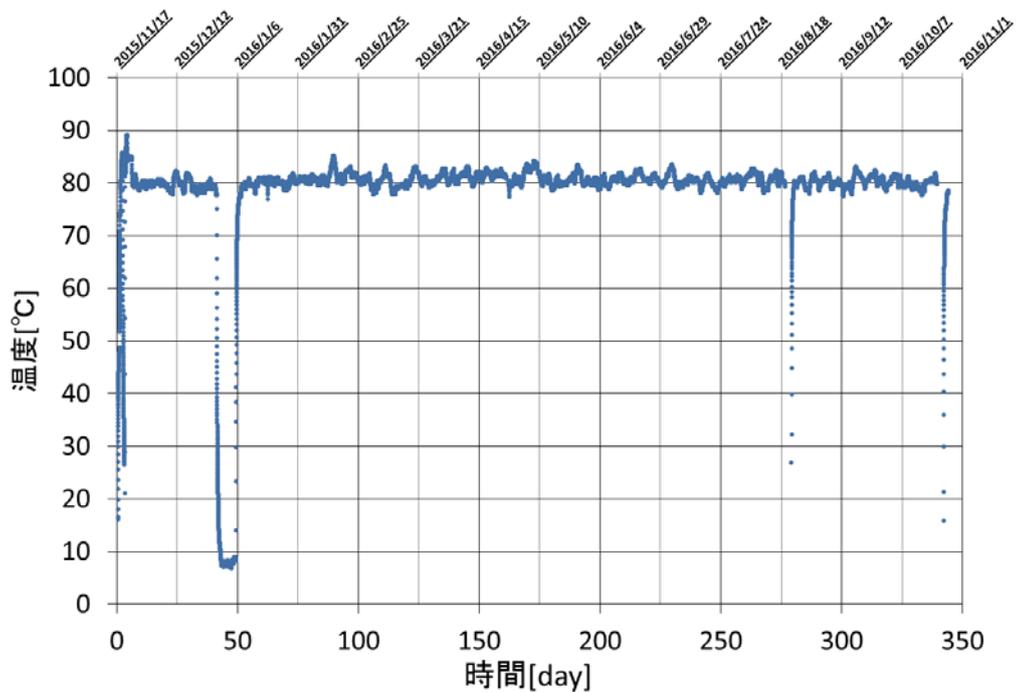


図 3.4.1-6 不均質条件試験 模擬オーバーパック表面温度

## 2) 緩衝材ブロック含水率測定結果

表 3.4.1-2 に、測定結果を示す。緩衝材ブロックである隙間の直下と隙間の反対側では、いずれも下段ほど乾燥密度がより大きかった。これは、緩衝材ブロックへ水が浸潤するとともに、緩衝材ブロックの自重による圧密が進行したためと考えられる。隙間の反対側では、緩衝材ブロックの外周側から水が浸潤したため、外側ほどより膨潤し、乾燥密度が低く、含水比（重量含水率）が高くなったと考えられる。一方、隙間の直下では、上方の隙間からも水が浸潤したため、隙間

の反対側よりも膨潤が促進され、乾燥密度が低くなった。また、同部位は外側からよりも隙間からの浸潤の影響を強く受けたため、径方向に乾燥密度の差異が見られなかった。

表 3.4.1-2 不均質条件試験 採取試料の湿潤密度、乾燥密度、含水比及び体積含水率

試料の採取部位		模擬OP壁面からの距離 (mm)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水比	体積含水率
4段目 (上段)	隙間の 反対側	10	1.68	1.12	0.504	0.564
		40	1.72	1.16	0.489	0.566
		70	1.73	1.16	0.496	0.574
		90	1.66	1.06	0.570	0.603
	隙間の 直下	10	1.65	1.03	0.602	0.620
		40	1.69	1.10	0.531	0.586
		70	1.66	1.05	0.579	0.608
		90	1.73	1.12	0.550	0.615
3段目 (中段)	隙間の 反対側	10	1.86	1.38	0.341	0.472
		40	1.91	1.39	0.370	0.515
		70	1.82	1.31	0.394	0.514
		90	1.77	1.23	0.442	0.543
	隙間の 直下	10	1.77	1.20	0.477	0.571
		40	1.76	1.24	0.425	0.525
		70	1.77	1.24	0.426	0.529
		90	1.75	1.19	0.467	0.557
2段目 (下段)	隙間の 反対側	10	1.93	1.51	0.282	0.424
		40	1.91	1.48	0.294	0.434
		70	1.90	1.45	0.313	0.452
		90	1.87	1.39	0.343	0.477
	隙間の 直下	10	1.77	1.30	0.354	0.462
		40	1.84	1.36	0.353	0.479
		70	1.83	1.34	0.362	0.485
		90	1.82	1.30	0.395	0.516

### 3) クーポン試験による腐食速度測定結果

不均質試験の緩衝材ブロック中に設置したクーポン試験片の平均腐食量と、緩衝材のブロックの透水係数の関係を、図 3.4.1-7 に示す。乾燥密度が小さい、上段の腐食量が大きい傾向があるものの、後述 (3.4.1(2)5) の3次元計測による模擬オーバーパックの腐食量と概ね一致した (特に下段の腐食量は、 $7 \mu\text{m/y}$  で3次元計測による母材の腐食量と一致している)。乾燥密度から計算した透水係数は、クーポンの腐食量と相関があるように見えるが、その差はわずかであり緩衝材密度が腐食に及ぼす影響は小さい。

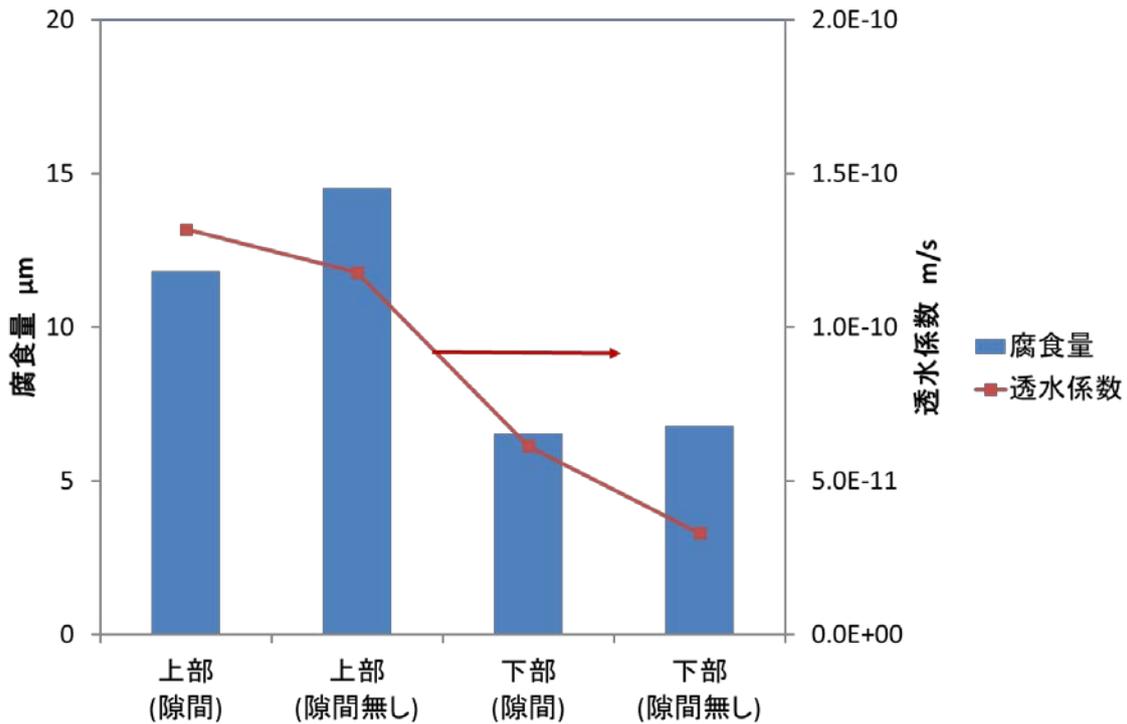


図 3.4.1-7 クーポン試験片の平均腐食量と緩衝材ブロックの透水係数の関係

### 4) 交流インピーダンス計測結果

図 3.4.1-8 に、不均質条件試験における交流インピーダンスの測定結果 (10mHz による計測) を示す。また、90 日目に全周波数計測を行ったので、その結果も図示した (図中▲のプロット)。全周波数での計測から求めた  $R_p^{-1}$  は  $10^{-4} \Omega^{-1}\text{cm}^{-2}$  程度であり、地上工学規模試験の結果同様、10mHz による電荷移動抵抗の計測では、 $R_p^{-1}$  は過大評価をしているものの、 $R_p^{-1}$  は隙間の有無に関わらず、概ね同じ値 ( $10^{-3} \Omega^{-1}\text{cm}^{-2}$ ) であり、隙間の有無は腐食速度に大きな影響を与えていないことが示唆される。

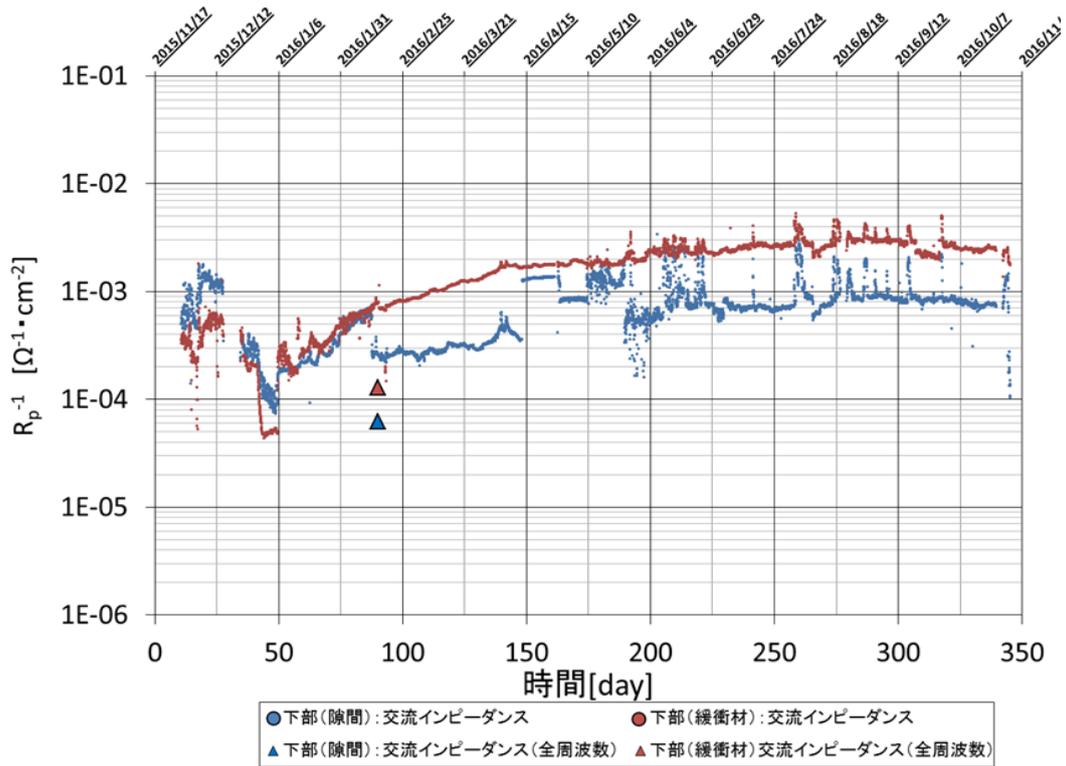


図 3.4.1-8 不均質条件試験 交流インピーダンスセンサーによる  $R_p^{-1}$  の計測結果 (10mHz による計測)

腐食速度は  $R_p^{-1}$  に比例することが知られている。腐食速度の算出式を以下に示す。

$$\text{腐食速度} = R_p^{-1} \times k \times \frac{\text{鉄原子量} \times \text{電極面積}}{\text{鉄の価数} \times 96500 \times \text{鉄密度}} \quad \text{式(3.4.1-1)}$$

一般的に水溶液中で浸漬させた状態では、比例定数  $k$  は 0.02 程度[4]となるが、緩衝材共存下における比例定数  $k$  を、全周波数計測による  $R_p^{-1}$  と交流インピーダンスセンサーと同じ位置に設置したクーポン試験片腐食速度から評価した。なお、全周波数によるインピーダンスの測定時期 (開始から 90 日) と、クーポン試験片の取り出し時期 (開始から 345 日) は一致しないが、図 3.4.1-8 の測定結果において 10mHz での測定結果ではあるものの、 $R_p^{-1}$  はほぼ一定であることから、腐食速度もほぼ一定であると仮定して、比例定数  $k$  を算出した。算出結果を表 3.4.1-3 に示す。

比例定数  $k$  は 0.019~0.040 程度であり、水溶液中で浸漬させた状態での比例定数  $k$  は 0.02 とほぼ同じだった。

3.2.1(1)3)と同様に 90 日目の全周波数測定結果から電気二重層容量を算出した。電気二重層容量は緩衝材貫通側で  $500 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  程度、緩衝材中で  $2,600 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  程度であった。一般的な電気二重層容量の  $10 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  に対して、今回計測した電気二重層容量は 50~260 倍程度あった。これは鏽による疑似容量が含まれたためと考えられる。

表 3.4.1-3 不均質条件試験 腐食速度換算係数算出結果

	クーポン・ 交流インピーダンスセンサ 設置位置	$R_p^{-1}$ (90日時点)	クーポンより 算出した腐食速度 (345日時点)	比例定数 k
		$[\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}]$	$[\text{mm}/\text{yr}]$	
1	下部(2段目:緩衝材貫通側)	3.23E-05	6.94E-03	0.019
2	下部(2段目:緩衝材中)	1.56E-05	7.21E-03	0.040

5) 模擬オーバーパック 3次元計測結果

a 目的・特徴

本計測は模擬オーバーパックを対象として表面形状を3次元座標点群として測定する。測定を腐食試験の前後で実施することで、均一腐食を前提とした試験前後の形状変化を予定試験期間中に想定される微量な腐食量として定量的に求めることを目的とする。

本試験では不均質条件を与えるためにスリット形状を模擬オーバーパック上に与えることから、腐食試験前の測定と同様、該当部分（ブロック継ぎ目部、スリット部）の測定ピッチを増やし、高い解像度で測定した。

b 測定方法

図 3.4.1-9 に示す手順で計測および評価を実施した。図 3.4.1-10、図 3.4.1-11 の測定位置で3次元座標を計測し合計 1,440 点を計測した。図 3.4.1-9 に示す「本体のポイント計測(全体)」は図 3.4.1-10 の上に示す 20mm ピッチの計測、「本体のポイント計測(部分)」は図 3.4.1-10 の下に示す 5mm ピッチ・3か所の計測を示す。

高解像度の測定は、工学規模試験用の模擬オーバーパックと同様、長手方向 20mm ピッチの基本計測に対し 5mm ピッチにして実施した。

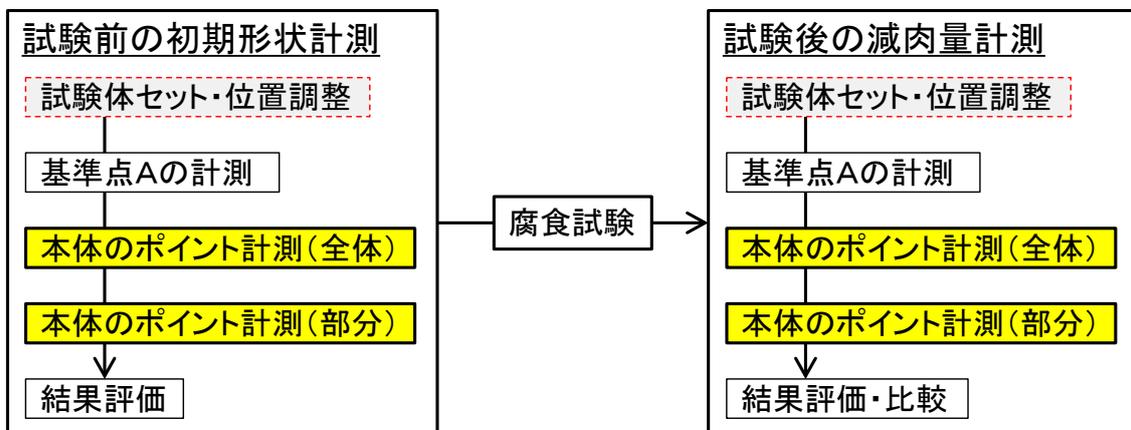


図 3.4.1-9 不均質条件試験 3次元計測フローチャート

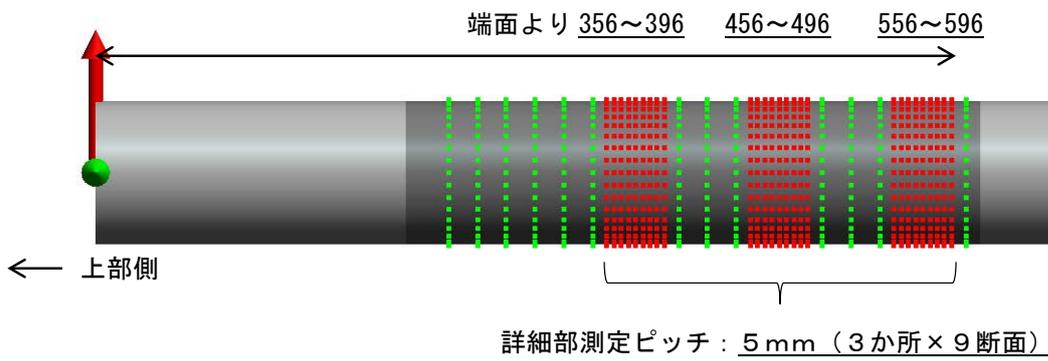
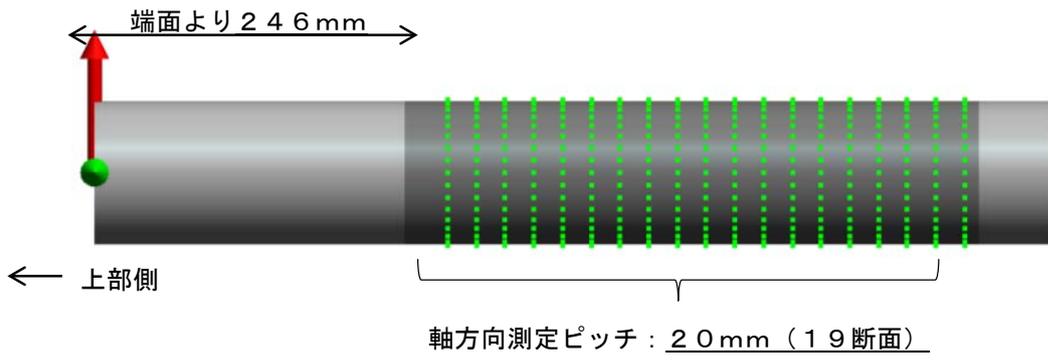


図 3.4.1-10 不均質条件試験 軸方向測定位置

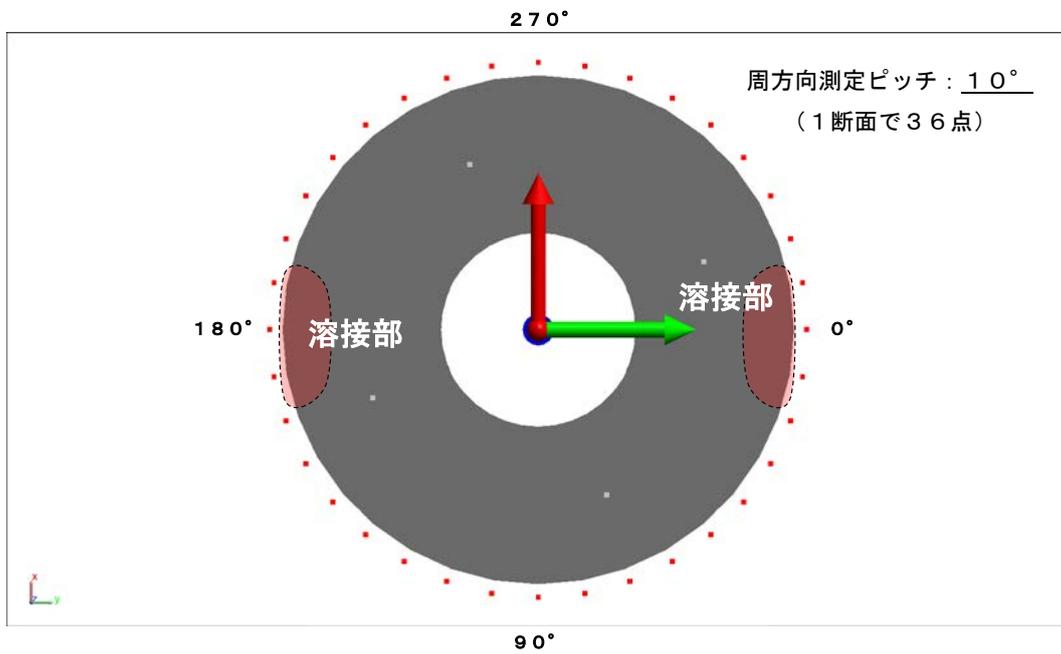


図 3.4.1-11 不均質条件試験 周方向測定位置 (上部側から見た場合)

### c 測定結果

- ・座標変化による腐食量の確認（2次元マトリクスコンター図による比較）

不均質条件試験用模擬オーバーパットの腐食試験前と腐食試験・酸洗後の形状変化量を2次元マトリクス上のコンター図に展開して図 3.4.1-12 に示す結果を得た。横軸は測定角度（単位： $^{\circ}$ ）、縦軸は測定始点からの軸方向の距離（単位： $\text{mm}$ ）とする。

変化量は、腐食試験前と腐食試験・酸洗後の測定3次元座標間の距離から算出した。

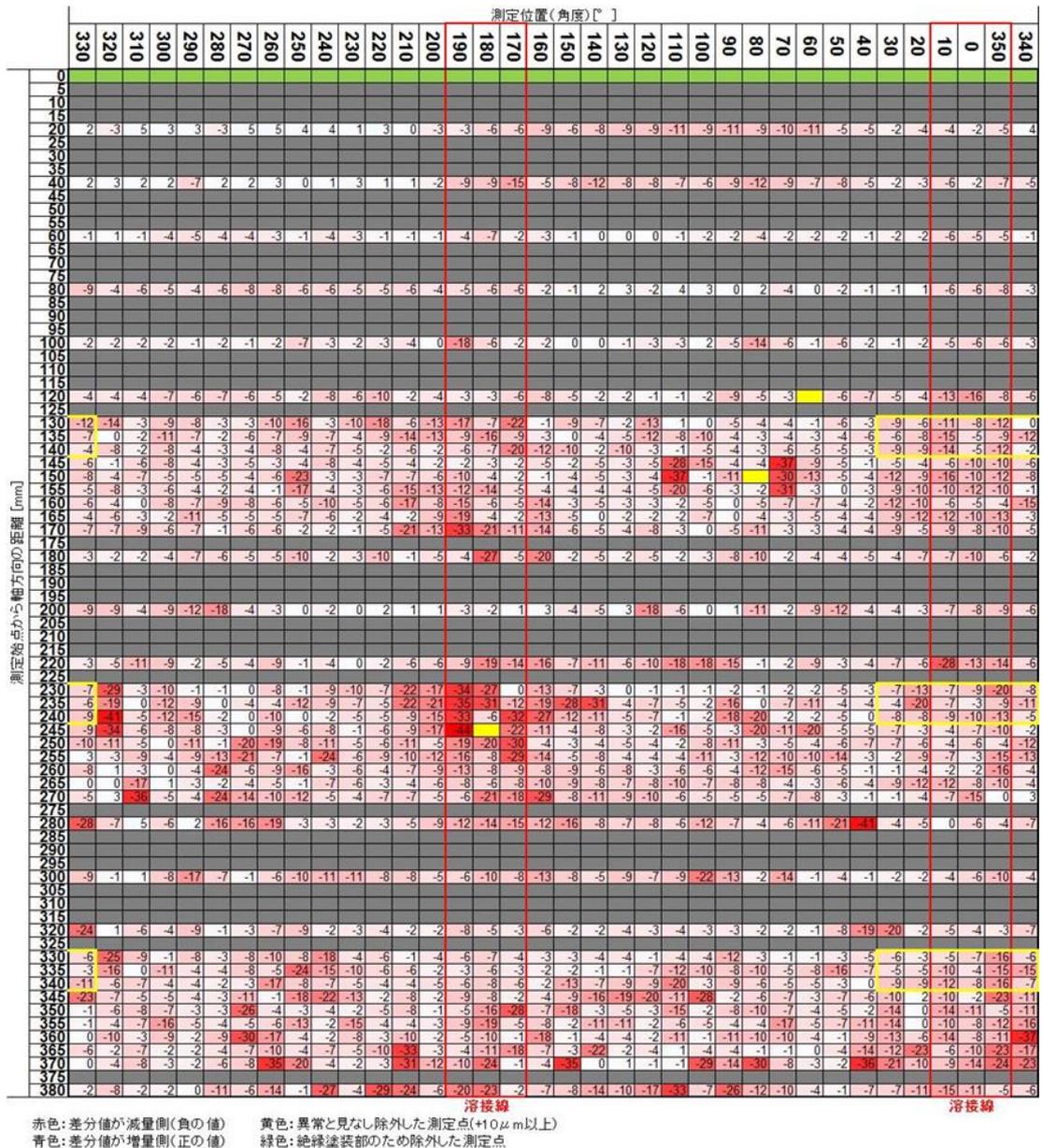
青は増量（数値は+）、赤は減量（数値は-）を示す。なお、数値の単位は $\mu\text{m}$ とする。色の濃さは値の絶対値に比例する。なお、色の濃さと値の対応はコンター図の描画ソフトウェアが対象データの存在範囲から自動的に決定しており、対応関係を数値で示すことはできない。

未測定の座標も5mmピッチの測定箇所縦横比を変えないために併せて灰色で表示した。溶接金属部の測定座標は、赤色の実線で囲った。また、周囲と比較して突出した増量幅を示すデータ3点は異常値とみなし、図上で灰色とした。

図 3.4.1-12 に、増量側最大値 $5\mu\text{m}$ 、減量側最小値 $-44\mu\text{m}$ 、平均値 $-7\mu\text{m}$ を併記した。

図 3.4.1-13 に、不均質条件試験における模擬オーバーパットの母材部分及び隙間を施さなかった溶接部分の平均腐食量を示す。母材の計測箇所は、1,198箇所ですべて計測箇所の83%を占めているので、全体の腐食量とほとんど変わらない $7\mu\text{m}$ になった。隙間の無い溶接部の平均腐食量は $11\mu\text{m}$ 、隙間側で $10\mu\text{m}$ となり差異は認められなかった。

鉄の腐食が、 $\text{Fe} + 1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$  で進行すると仮定した場合の酸素物質収支の計算結果を表 3.4.1-4 に示す。試験期間は、343日であり、この間に腐食した鉄のモル数は $0.13\text{mol}$ となり、腐食した鉄の1/2のモル数が、腐食により消費された酸素となるので、消費された酸素は $0.06\text{mol}$ ( $1.41\text{L}$ )となる。この酸素量は、ほぼ装置内の酸素量に匹敵する。この間、表 3.4.1-4 に示すように模擬オーバーパットの周辺は、緩衝材に施した隙間から模擬地下水が回り込み、緩衝材が均一に膨潤し、酸素濃度の濃淡がほとんど無いため、均一に腐食していると考えられる。ベントナイトには空隙に含まれる酸素量の最大4倍程度の酸素が吸着している可能性がある[6]。この場合、系内の酸素を消費するのに、さらに数年要することになる。



異常点除く	
最大	5 μm
最小	-44 μm
平均	-7 μm
標準偏差	6.7 μm

図 3.4.1-12 不均質条件試験 2次元マトリクス上のコンター図 (不均質条件試験用模擬オーバーパットの腐食試験前と腐食試験・酸洗後の形状変化量)

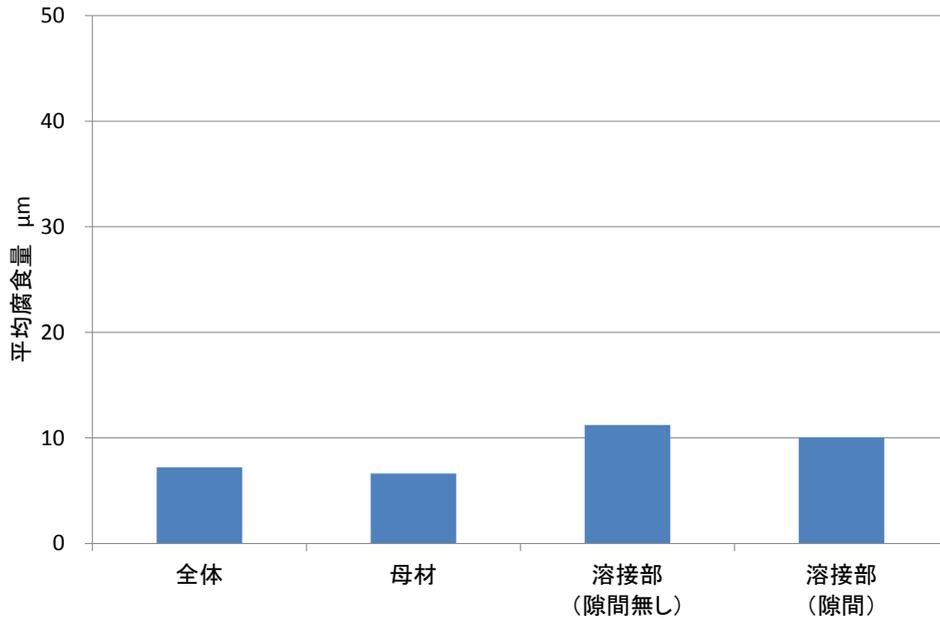


図 3.4.1-13 不均質条件試験 母材、溶接部の平均腐食量

表 3.4.1-4 不均質試験の物質収支

反応式	$\text{Fe} + 1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$	
鉄比重	7.8	$\text{g/cm}^3$
腐食速度	7.7E-04	$\text{cm/y}$
OP面積	1256	$\text{cm}^2$
腐食体積/年	0.96	$\text{cm}^3/\text{y}$
腐食重量/年	7.50	$\text{g/y}$
試験日数	343	日
腐食した鉄	0.13	mol
必要酸素( $\text{O}_2$ )	0.06	mol
	1.41	L
緩衝材間隙空気	7.67	L
緩衝材間隙酸素	1.53	L
消費日数	372	日

・座標変化による腐食量の確認（ヒストグラムによる比較）

比較方法

図 3.4.1-12 に示す腐食量を用いてヒストグラムを作成する。さらに、ヒストグラムを①溶接部、②母材、③全体平均に分けて作成し、これを腐食試験前後で比較することで、模擬オーバーパック表面のエリアごとの変化を捉え、試験体表面全体（溶接部・母材）が均一に腐食減量したのか、選択的に減量したのか等を把握する。

定結果に基づくヒストグラム

腐食試験前後の模擬オーバーパックを対象とした3次元計測結果に基づき、ヒストグラムを作成した。母材・溶接部を含む全体の結果を図 3.4.1-14 に、母材の結果を図 3.4.1-15 に、溶接部の結果を図 3.4.1-16 に示す。横軸は、測定結果（円筒から測定点までの距離）を  $1\mu\text{m}$  区間で分類したデータ区間であり、縦軸はその出現点数（頻度）を示す。

図 3.4.1-12 の腐食量平均値  $-7\mu\text{m}$  に対し、試料全体及び母材の座標変化は、 $-2$  から  $-4\mu\text{m}$  に高頻度に出現しており、全体の約 30%を占めている（図 3.4.1-14、図 3.4.1-15）。また、溶接部の座標変化（図 3.4.1-16）は、計測ポイントが少ないため分布がややブロードになっているものの、 $-2$  から  $-6\mu\text{m}$  で、全体の約 38%を占めている。よって、模擬オーバーパック全体で同程度の均一腐食が生じたと考えられる。

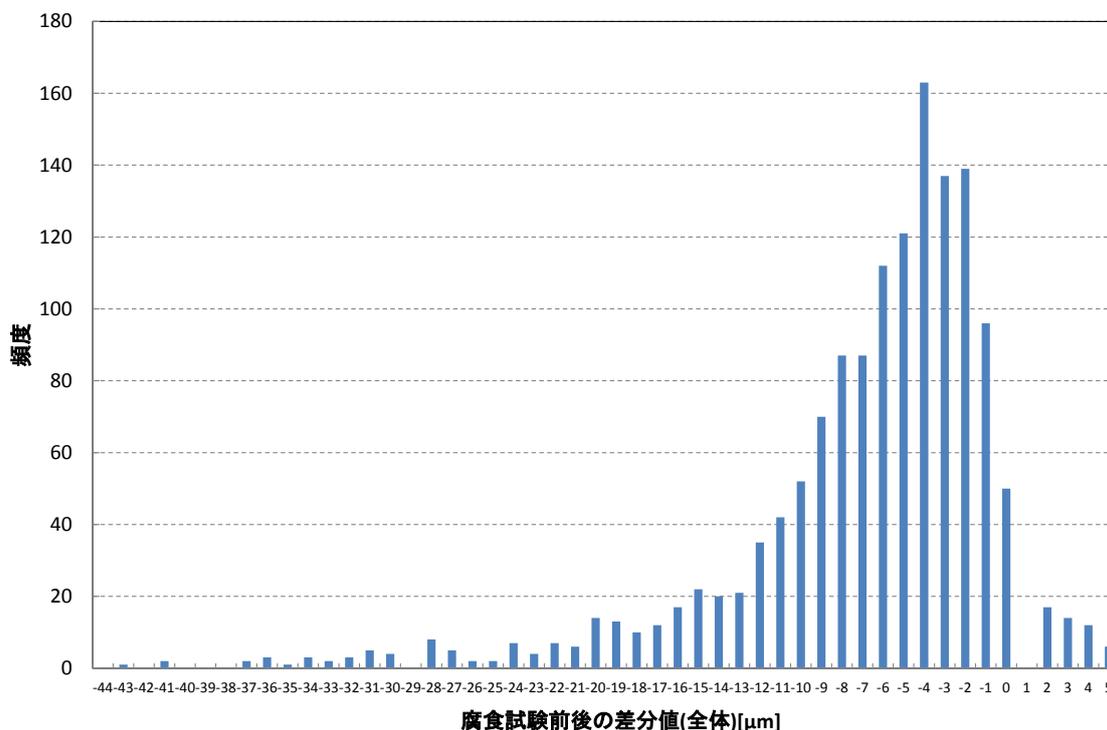


図 3.4.1-14 不均質条件試験 試料全体の3次元形状計測結果に基づくヒストグラム

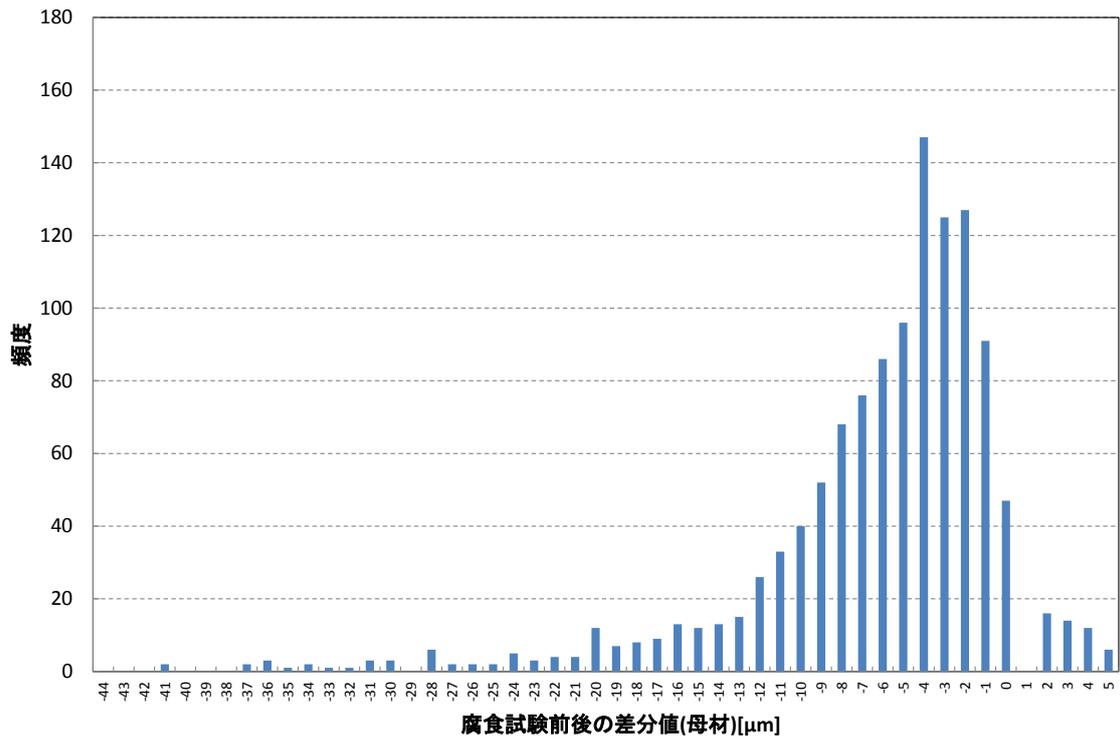


図 3.4.1-15 不均質条件試験 母材の3次元形状計測結果に基づくヒストグラム

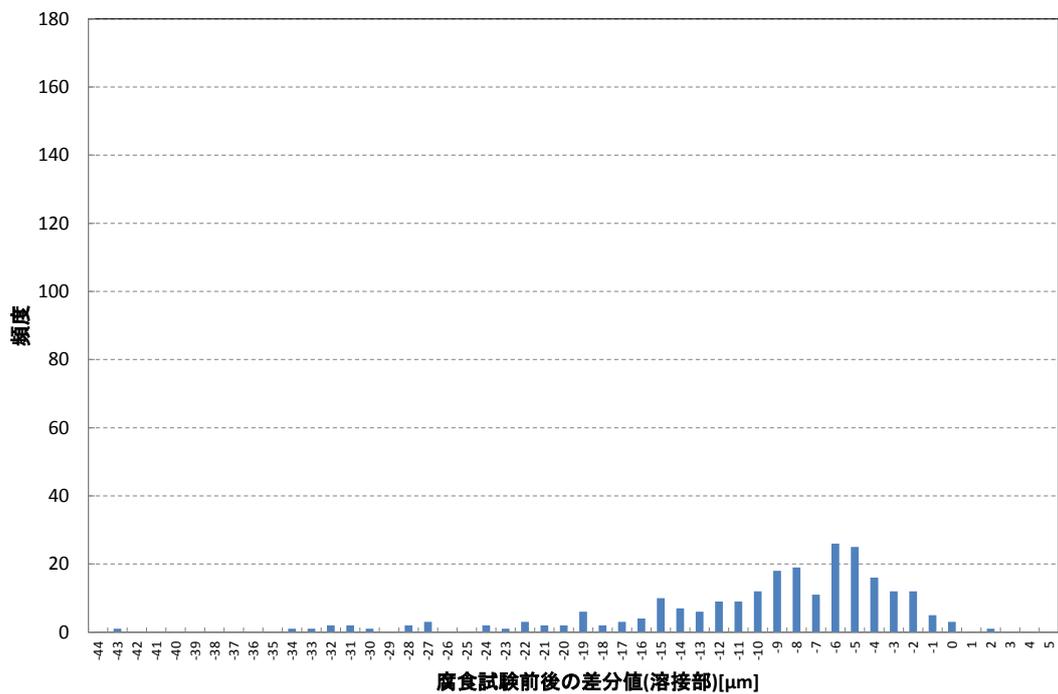


図 3.4.1-16 不均質条件試験 溶接部の3次元形状計測結果に基づくヒストグラム

・ 模擬オーバーパック試験体表面のスキャン画像取得と3次元形状計測結果との比較

スキャナで撮影・画像結合で作成した模擬オーバーパックの連続表面画像を図 3.4.1-12 に重ねた図を図 3.4.1-17 に示す。同図のマトリクスに色を付けたコンター図を図 3.4.1-18 に示す。図中の赤色の枠は溶接金属、黄色の枠は緩衝材ブロックのスリット位置に対応する。

緩衝材ブロックの継ぎ目・スリット部、溶接線と母材間等に腐食状態の相違は見られないことを確認した。また、コンター図の色が濃い部分とスキャン画像のうち色が濃い部分の傾向がほぼ一致しており、3次元形状計測が正しく行われたことを示唆する結果となった。母材、溶接部、緩衝材で特異的に腐食している箇所は見当たらず、模擬オーバーパックは、全面腐食していると考えられる。また、溶接部で隙間を施した部分(図中黄色で囲った部分)の腐食量はその周辺部分と明確な差は無く、緩衝材の不均一性は隙間部で特異的に腐食が進行している箇所は見当たらず、緩衝材の隙間などの不均一性は、模擬オーバーパックの腐食に顕著な影響は及ぼしていないと考えられる。

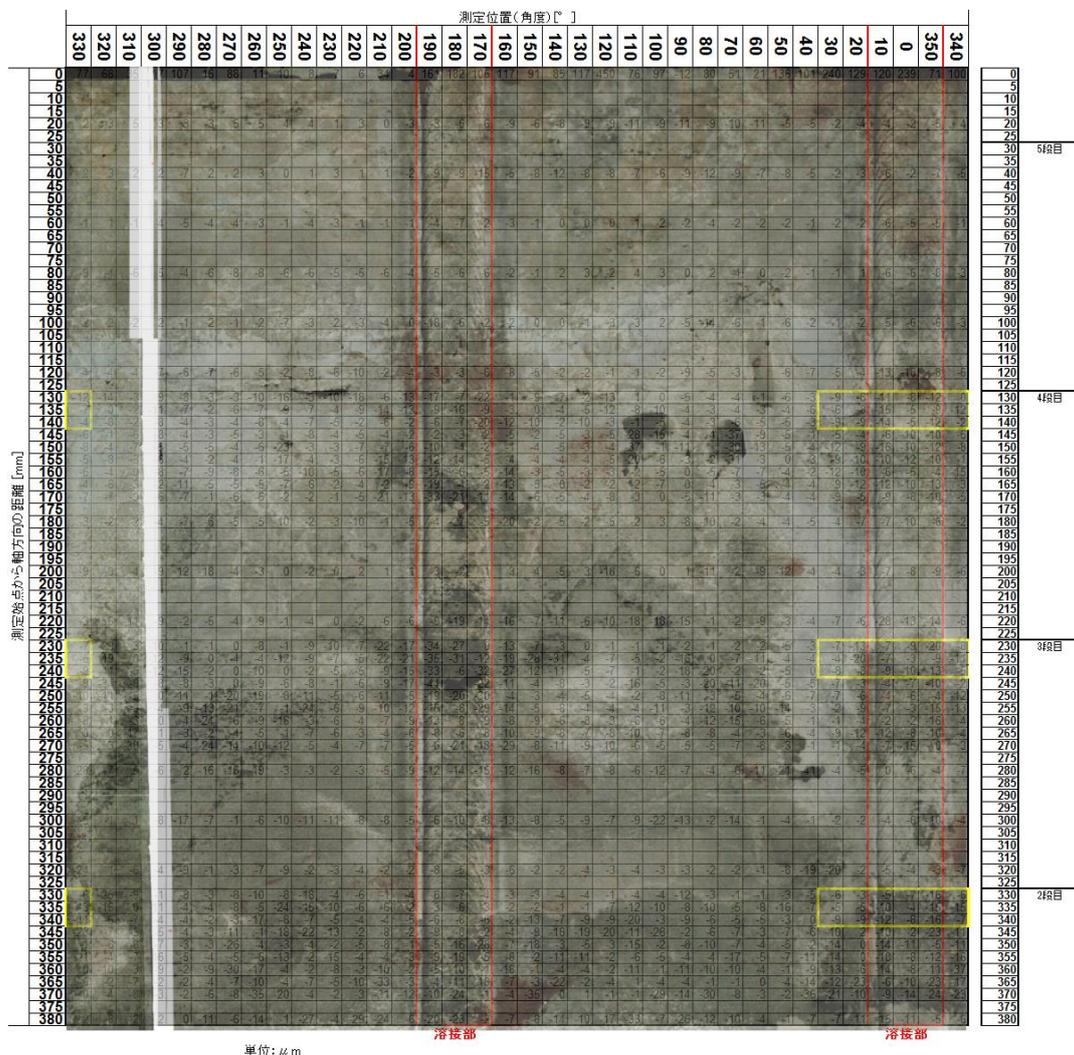


図 3.4.1-17 不均質条件試験 模擬オーバーパック試験体表面のスキャン画像 (1/2)

(3次元計測による腐食前後比較値・溶接線位置・緩衝材スリット位置・ブロック継ぎ目位置等を併記)



### 3.4.2 経時変化確認試験

#### (1) 試験の位置づけと装置

工学規模試験では、緩衝材膨潤に伴う模擬オーバーパック表面への緩衝材の接触履歴が腐食(局在化)に影響する可能性がある。この確認を目的として経時変化確認試験を実施する。工学規模試験装置と経時変化確認試験(小規模要素試験)の対応を図 3.4.2-1 に、試験装置・試験手順などの主な仕様を表 3.4.2-1 に示すように、工学規模試験装置の一部を切り出した状態を再現した試験装置を複数用意し、試験期間をパラメータとし一定期間後に模擬オーバーパックを取り出しこれを直接観察することで、工学規模試験の緩衝材膨潤に伴う模擬オーバーパック表面と緩衝材面の接触状態の履歴の影響に相当する情報を定量的に得ることが可能となる。試験マトリックスを表 3.4.2-2 に示す。また、ベントナイト平衡水到達確認試験では、試験装置内の珪砂側から供給した模擬地下水がベントナイトを通過して模擬オーバーパック表面に到達する時間の確認のため、目視で水分が到達したことを確認した。本試験は模擬オーバーパックの腐食挙動を把握する試験ではないため、模擬オーバーパックは透明樹脂で製作した。腐食試験期間は給水開始からの期間を示す。

経時変化確認試験装置の構成を図 3.4.2-2 に、炭素鋼製模擬オーバーパックから採取した試験片の形状を図 3.4.2-3 に示す。試験片は溶接部が試験片の中央に位置するように採取した。装置は以下の手順で製作した。

- ① 切断した緩衝材ブロックとステンレス製経時変化確認試験容器との間の止水を目的として、2~3mm程度のすきまにベントナイト粉を詰めた
- ② 炭素鋼製模擬オーバーパックから溶接部を含む試験片を採取して容器端部に設置した
- ③ ヒータを設置して模擬オーバーパックを裏面から加熱できるようにする一方、溶接部の試験片頂部と緩衝材ブロックが接触した状態で反対側に給水・保水用の珪砂層を設けた
- ④ 試験系全体を還元性雰囲気(低酸素のための窒素パージ、低溶存酸素のための脱気給水)とするための密閉および緩衝材ブロック上部からの水の経路を塞ぐ作業を行なった

試験に供する模擬地下水は、表 3.4.2-3 に示す幌延地下水の組成から決定された工学規模試験と同じものを用いた。試験は、25℃に設定した実験室(ただし、長期休暇、停電時など管理できない期間を除く、室温)内に静置して実施し、試験片表面に水が到達したことを確認したのちに、加熱を開始した。

表 3.4.2-1 経時変化確認試験 関連仕様（試験装置・試験手順など）

項目	内容
腐食評価試料	溶接部を含む模擬オーバーパック（SFVC1 相当炭素鋼鍛造材）の一部を切り出して使用
加熱方法	模擬オーバーパック端面からの加熱（模擬オーバーパック表面溶接部で 80℃制御。カートリッジヒータを使用。）
緩衝材ブロック	圧縮ベントナイト（ベントナイト 70%+珪砂 30%）ブロック使用 乾燥密度 1.6Mg/m <sup>3</sup> 、厚さ 100mm （すきまはベントナイト粉末を充填）
使用センサー	熱電対（温度制御用）、ACM センサー（ベントナイト平衡水の模擬オーバーパック表面への到達確認）、含水率センサー（同上）
腐食量・選択腐食等の評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 外観観察</li> <li>・ 3次元形状計測（探触子接触式）</li> </ul>
ベントナイト平衡水の模擬オーバーパック表面への到達確認 （ベントナイト平衡水到達確認試験）	模擬オーバーパックを透明樹脂で代替した装置を用意し、目視、および、ACM センサー、含水率センサーで水到達を確認

表 3.4.2-2 経時変化確認試験 試験マトリックス

腐食試験期間				備考
計画（ヶ月）	実績（ヶ月）	給水開始から解体(h)	加熱開始から解体(h)	
-	1.4	1,000	-	追加
-	3.5	2,496	-	追加
3	5.5	3,984	-	-
6	10.2	7,392	3,408	-
12	13.4	9,582	5,598	-
18	19.1	13,757	9,773	-
24	23.1	16,608	12,624	-

表 3.4.2-3 経時変化確認試験 模擬地下水の化学組成

模擬地下水組成(設定値)	濃度(ppm)
NaCl	5,200
NaHCO <sub>3</sub>	3,000
CaCl <sub>2</sub>	180
KCl	230
MgCl <sub>2</sub>	190
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	410

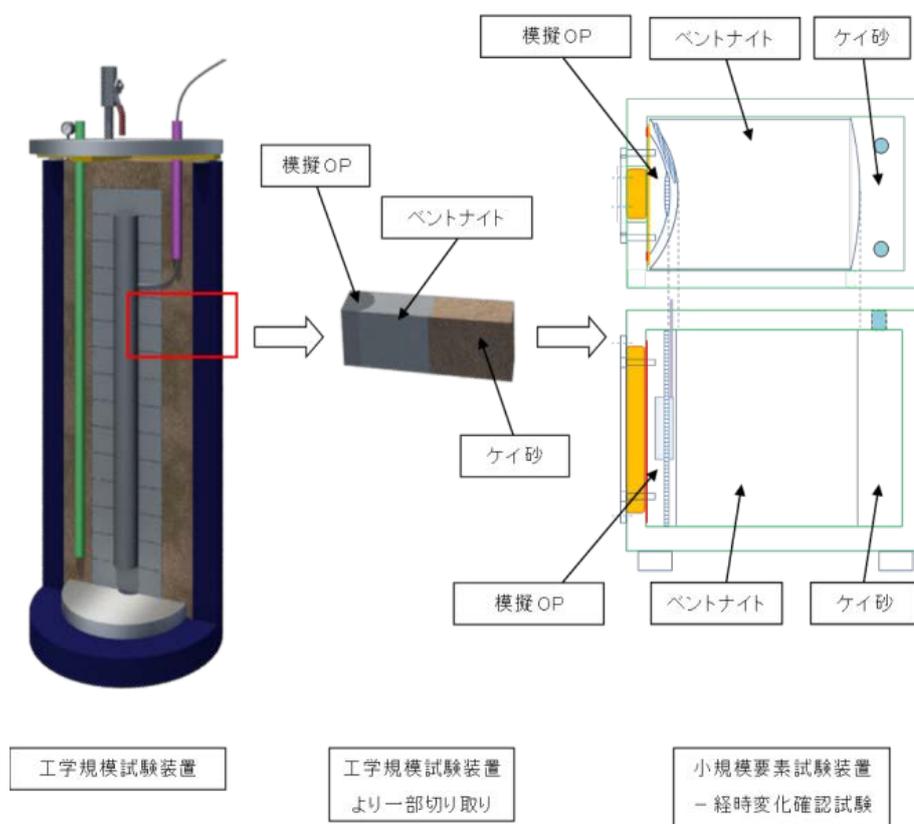


図 3.4.2-1 工学規模試験装置と経時変化確認試験（小規模要素試験）の対応

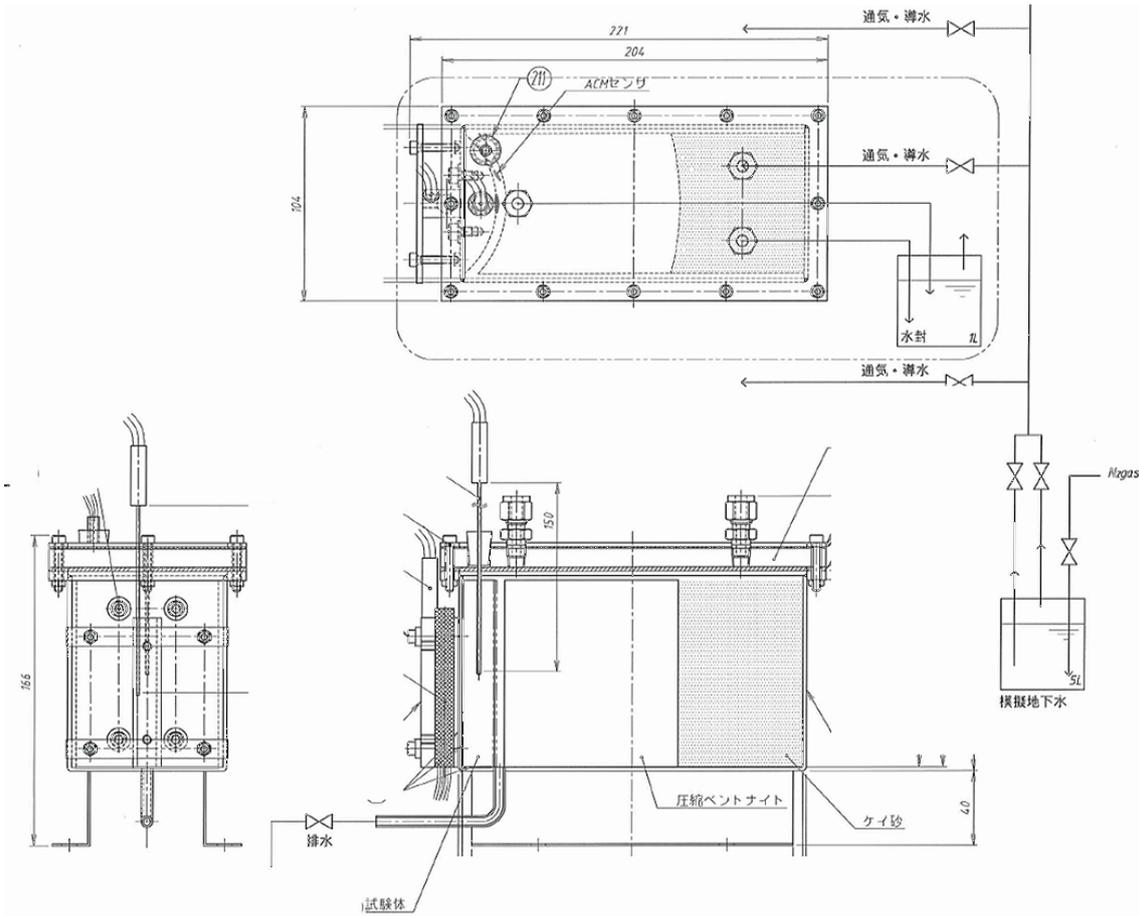
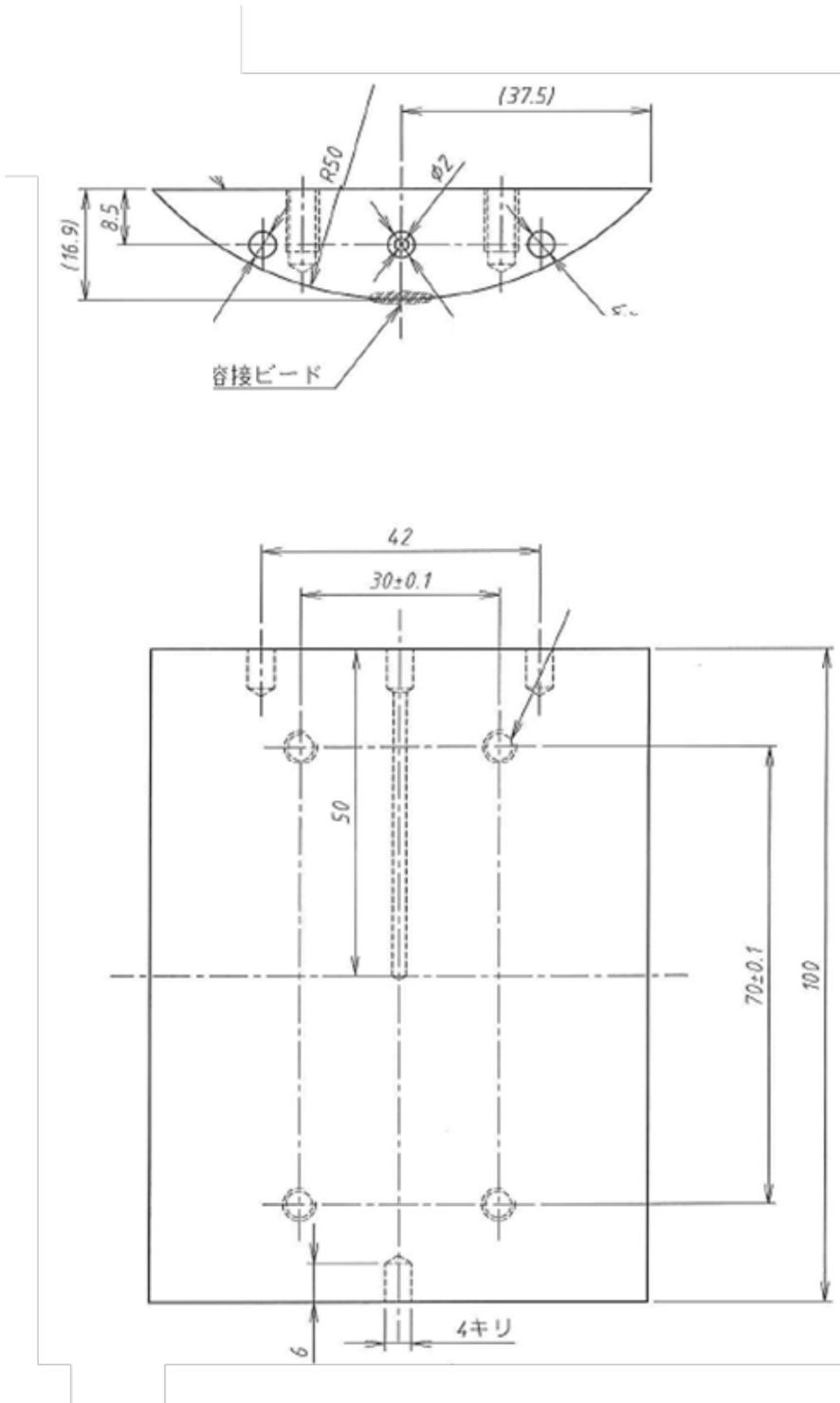


図 3.4.2-2 経時変化確認試験 装置構成概要図



単位:[mm]

図 3.4.2-3 経時変化確認試験 模擬オーバーパック試験片の形状図

## (2) 試験結果

経時変化確認試験の平均腐食深さ、最大腐食深さの時間依存性を表 3.4.2-4 に、平均腐食深さの時間依存性を図 3.4.2-4 に示す。試験装置を解体し、腐食量を測定した評価に基づいて評価する。平成 29 年度に実施する同一環境下センサー性能確認試験の試験時間に合わせて、1,000h の試験を追加した。2,496h, 3,984h における平均腐食深さ (dave) から、

$$dave(\mu m) = 0.015 \times t(h) - 50$$

となり、t 軸切片は 3,333h であった。すなわち、試験開始後 2,000h を経過して試験片表面に厚さ 100mm の緩衝材ブロックを透過した脱気模擬地下水が到達することで腐食環境が整い、定常的に腐食が進展した。その際、一部に腐食の局在化が起きて、最大部の腐食深さは平均より 1 桁大きくなっていることを平成 28 年度の評価で確認済みである。

さらに、80℃で 2,190h 経過した、合計 9,582h 経過後の試験片の dave は 64 $\mu$ m であり、さらに、9,582h、13,757h、16,608h 経過後の dave から、この間の平均腐食進展速度は 28.2 $\mu$ m/y と算出された。ベントナイト中における炭素鋼の腐食速度時間依存性の先行試験結果[7][8]と、その時間積分による腐食深さの時間依存性を図 3.4.2-5 に示すように 2,000~10,000h で 10~20 $\mu$ m/y であるから、低酸素環境における炭素鋼の平均的な腐食速度のオーダーの少し高めの領域に入っている。

経時変化確認試験における平均腐食深さと最大腐食深さの経時変化を図 3.4.2-6 に、平均腐食深さと最大腐食深さの関係をベントナイト中における炭素鋼の平均腐食深さと最大腐食深さの関係[9]に重ねて図 3.4.2-7 に示す。最大腐食深さは 1mm 前後で、試験時間が長くなっても、深く成長する兆しは認められなかった。試験した範囲で先行試験結果よりも平均、最大腐食深さともに大きい側である。先行試験に於いて、平均腐食深さの増加に伴い最大腐食深さはより深くなり、最大腐食深さ / 平均腐食深さ比、dmax/dave も大きくなり、dmax/dave が 10 を超えるようになる。経時変化確認試験における結果は、その外挿線上にあった。したがって、経時変化確認試験で実施した圧縮ベントナイトブロックを用いた試験でも、試験容器内でベントナイト粉を詰めて圧縮した試験と同様な腐食が起きていると判断できる。

経時変化確認試験の取り出し時（付着物除去後、酸洗前）の外観を図 3.4.2-8 に、経時変化確認試験の試験片及びベントナイトの状況を図 3.4.2-9 に示すように、試験ごとに試験片の状況が変わっている。すなわち、ベントナイトブロックの内部や周囲の気相から湿り気がもたらされるまでは、図 3.4.2-8 の 1,000h のように発錆が認められなかった。湿り気、および透水の状況、および、加熱の影響が時間の経過とともに変化していったことを反映して、初期には圧縮ベントナイトブロック中から持ち込まれた酸素とベントナイト中を透過した脱気模擬水が供給されて、高溶存酸素下の酸化性の腐食環境に曝されていたが、試験片裏面側からの 1 方向の温度分布を持った加熱に伴い、試験片と接触するベントナイト側からの脱水に併せて脱気が進行して、高温の低溶存酸素下の還元性環境に移行していったと考えられる。ただし、高温、低溶存酸素濃度下に長時間静置され続けたことによって、一部の試験(セット)に於いては若干大き目の腐食環境となったものが生じたと考えられる。

以上のことから、経時変化確認試験で得られた炭素鋼の腐食挙動は、以下に纏められる。

- ① 水パスを完全に塞ぐ形で圧縮ベントナイトを設置し、片側から脱気模擬水を注入し、1,000h

(1.4ヶ月) 経過後には発錆が認められないが、約3ヶ月経過後に炭素鋼製模擬オーバーパック(小型、かまぼこ型)試験片表面に水が到達した。したがって、圧縮ベント内の水溶性化学種、空隙の空気などが試験片表面に供給された。

- ② 3ヶ月で水が試験片面へ到達したと見做されることから、試験片の裏面側から加熱し、試験片を80℃に保持した。ベントナイト中に温度勾配が発生し、試験片表面から50mmで50℃、100mm(珪砂との境界)で40℃程度となった。室温は25℃であった。
- ③ 10ヶ月経過時点での試験片を観察した結果、機械加工の凹凸が残存する部分がある一方、局所的な凹み(腐食)が認められた。また、ベントナイト側が10mm程度の厚さまで茶色く変色していた。すなわち、水の到達の不均一に伴うベントナイトの膨潤による接触の違い、水質、およびその環境の差異などによって、全面・均一腐食にはならず、腐食の局在化が発生した。
- ④ 13ヶ月経過時点では、
  - ・ 試験片表面が黒色の硬い被膜に覆われていたことから、マグネタイト( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )が生成
  - ・ ベントナイトの表面も黒色の被膜で、解放直後は緑色であったことから、低酸素濃度環境となったことが推察される。
- ⑤ さらに時間が経過した19ヶ月、および、23ヶ月経過時点では、
  - ・ 試験片を80℃に加熱してから1年以上経過しており、圧縮ベントナイトブロック内で平衡状態に達して、試験片表面/加熱源側の脱水が進んだため、腐食の進展性が低下する傾向にあった。

表 3.4.2-4 経時変化確認試験 平均腐食深さ、最大腐食深さの時間依存性

給水開始から解体(h)	加熱開始から解体(h)	平均腐食深さ( $\mu\text{m}$ )	最大腐食深さ( $\mu\text{m}$ )
1,000	-	0	0
2,496	-	0	0
3,984	-	29	847
7,392	3,408	62	1147
9,672	5,598	64	889
13,757	9,773	73	363
16,608	12,624	93	951

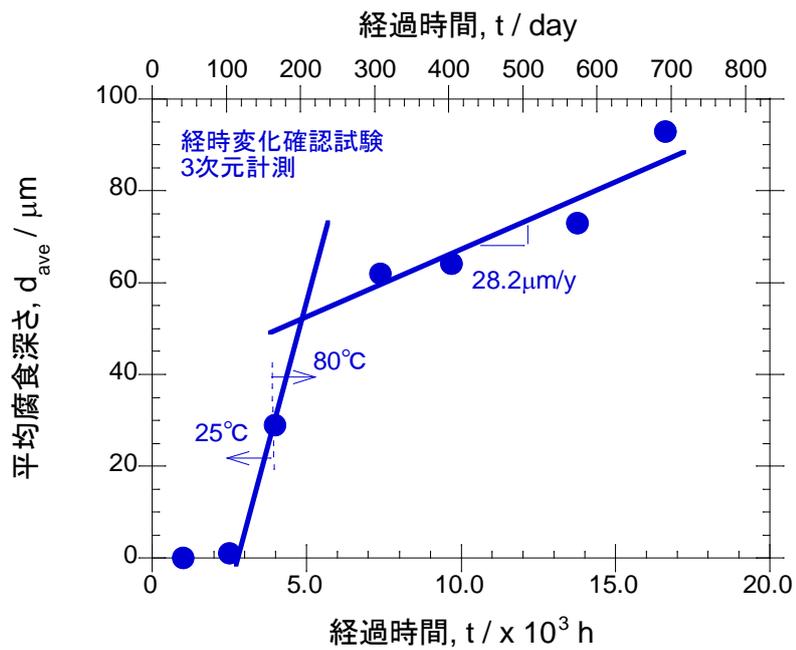


図 3.4.2-4 経時変化確認試験 平均腐食深さの時間依存性

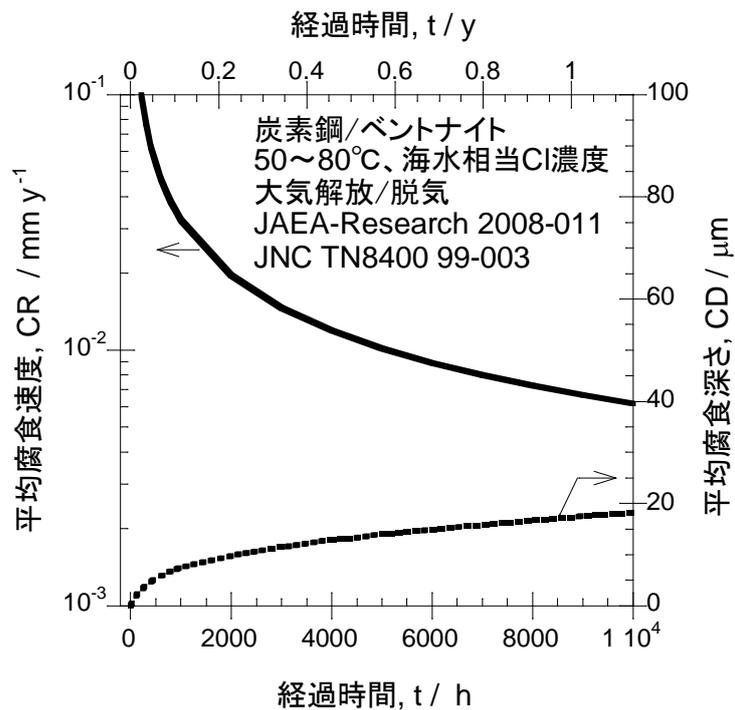


図 3.4.2-5 ベントナイト中における炭素鋼の腐食速度時間依存性の先行試験

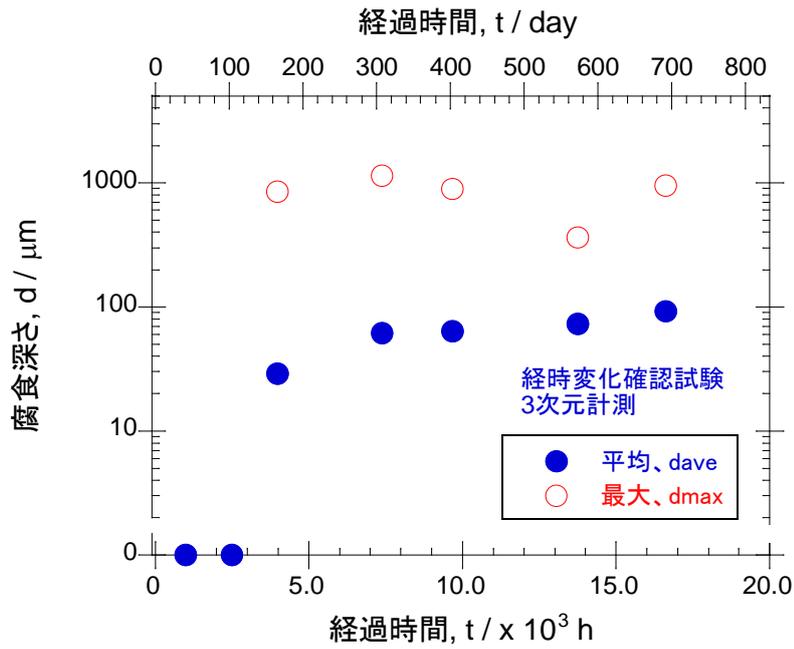


図 3.4.2-6 経時変化確認試験 平均腐食深さ、最大腐食深さの経時変化

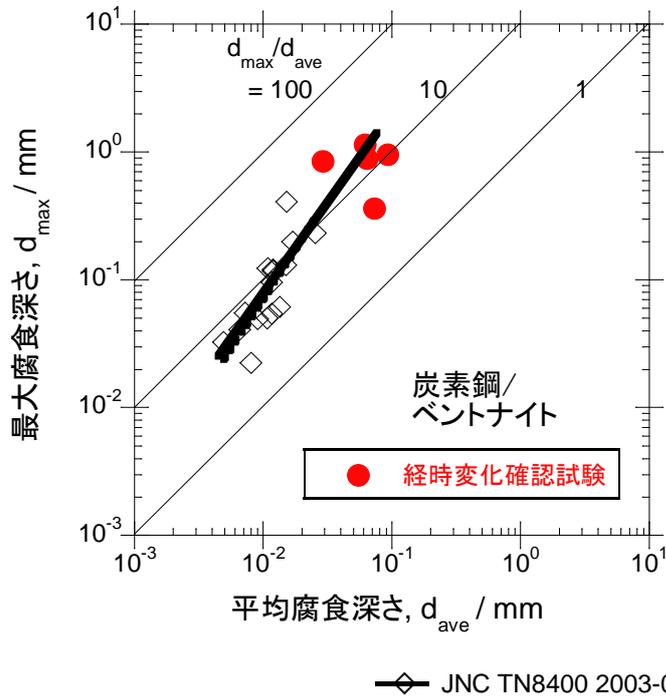


図 3.4.2-7 経時変化確認試験 平均腐食深さと最大腐食深さの関係

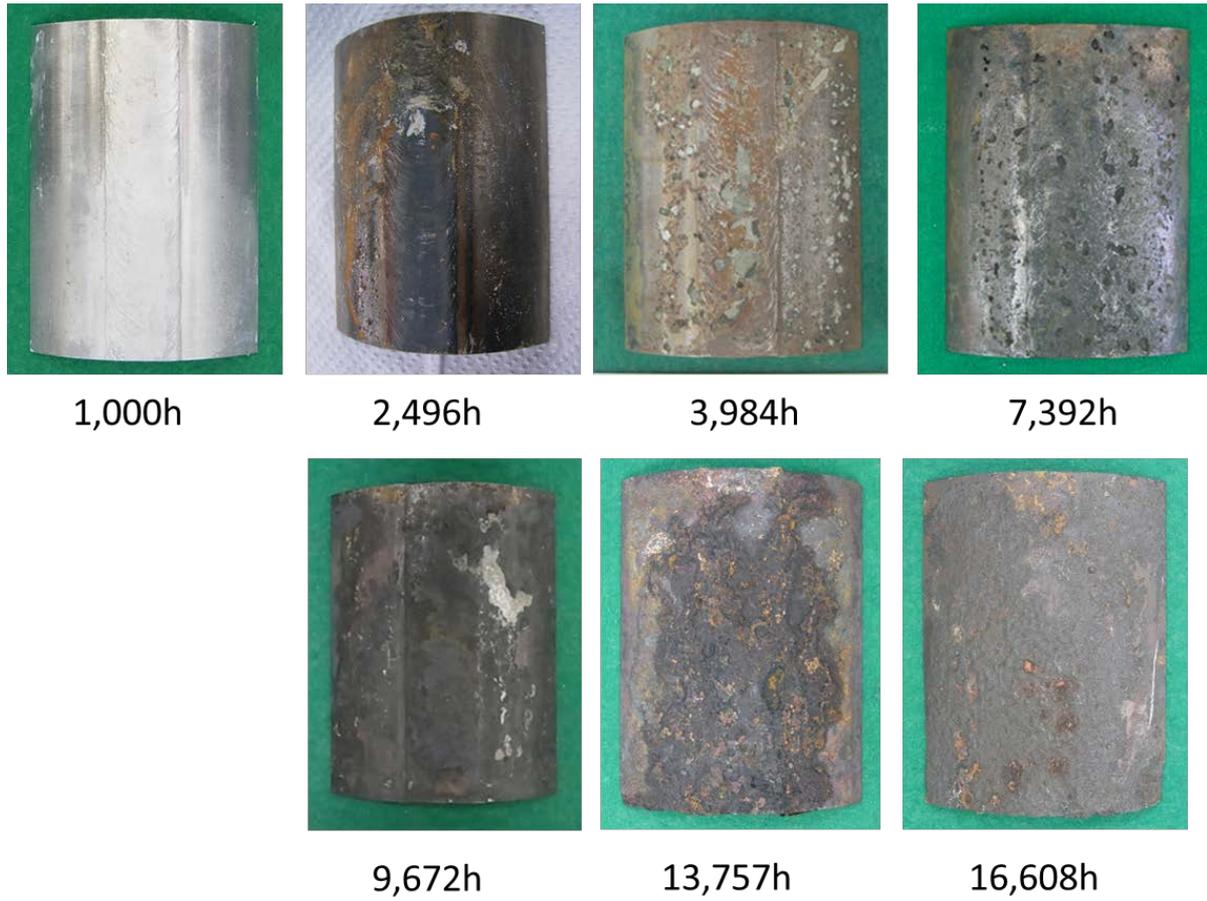


図 3.4.2-8 経時変化確認試験 試験片取り出し時(付着物除去後、酸洗前)の外観



取り出しまま  
試験片/ベントナイトブロック

付着物除去後  
7,392h

酸洗後



取り出しまま  
試験片/ベントナイトブロック

付着物除去後  
9,672h

酸洗後



取り出しまま  
試験片/ベントナイトブロック

付着物除去後  
13,757h

酸洗後



取り出しまま  
試験片/ベントナイトブロック

付着物除去後  
16,608h

酸洗後

図 3.4.2-9 経時変化確認試験 試験片及びベントナイトの状況

### (3) 模擬オーバーパック 3次元計測結果

#### 1) 目的

本計測は模擬オーバーパックを対象として表面形状を3次元座標点群として測定する。測定を腐食試験の前後で実施することで、試験前後の形状変化を試験期間中に想定される微量な腐食量として定量的に求めることを目的とする。

#### 2) 測定の特徴

測定済みの工学規模試験用模擬オーバーパックは大型であるため5mm間隔の比較的広い測定ピッチとして試験体全体の形状測定を実施したのに対し、経時変化確認試験用の模擬オーバーパックは小型のため、面に沿った0.02mm間隔の細かい測定による計測結果を基に0.5mm間隔の結果に変換した結果を示す。

なお、採用した3次元形状計測の手法は接触式のCMM（Coordinated Measuring Machine）法であり、球状の探触子（プローブ）を物理的に測定対象に接触させることで高い精度（分解能：5μm未満）の3次元座標を導出している。

#### 3) 測定対象

試験開始後3、6、12ヶ月経過後試料の計測は平成28年度に実施済みである。平成29年度は、試験開始後18ヶ月・24ヶ月経過後に取り出した模擬オーバーパックを測定対象とした。

#### 4) 測定方法

図3.4.2-10に示す手順で計測および評価を実施する。図3.4.2-11～図3.4.2-12に示す5mmピッチの断面位置で試験体表面の細かい測定を行い、3次元座標を取得する。

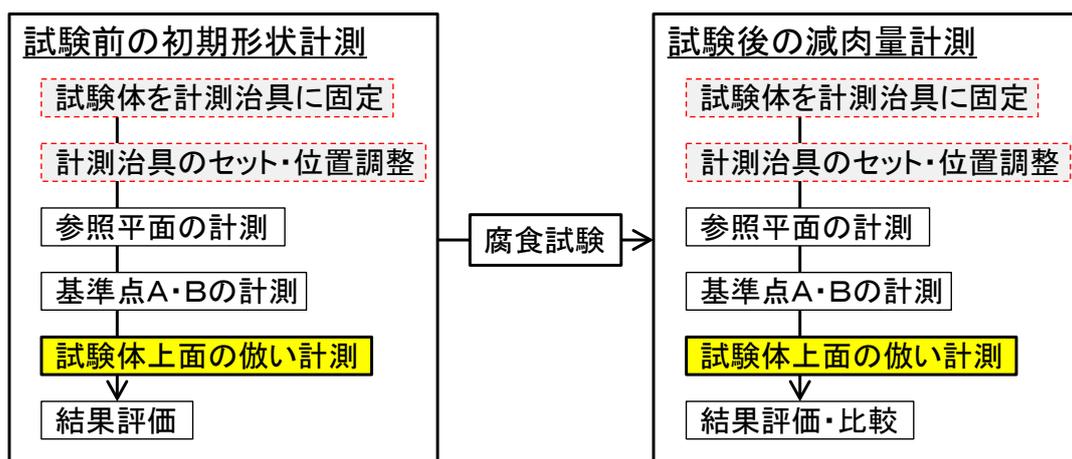


図 3.4.2-10 経時変化確認試験 3次元計測フローチャート

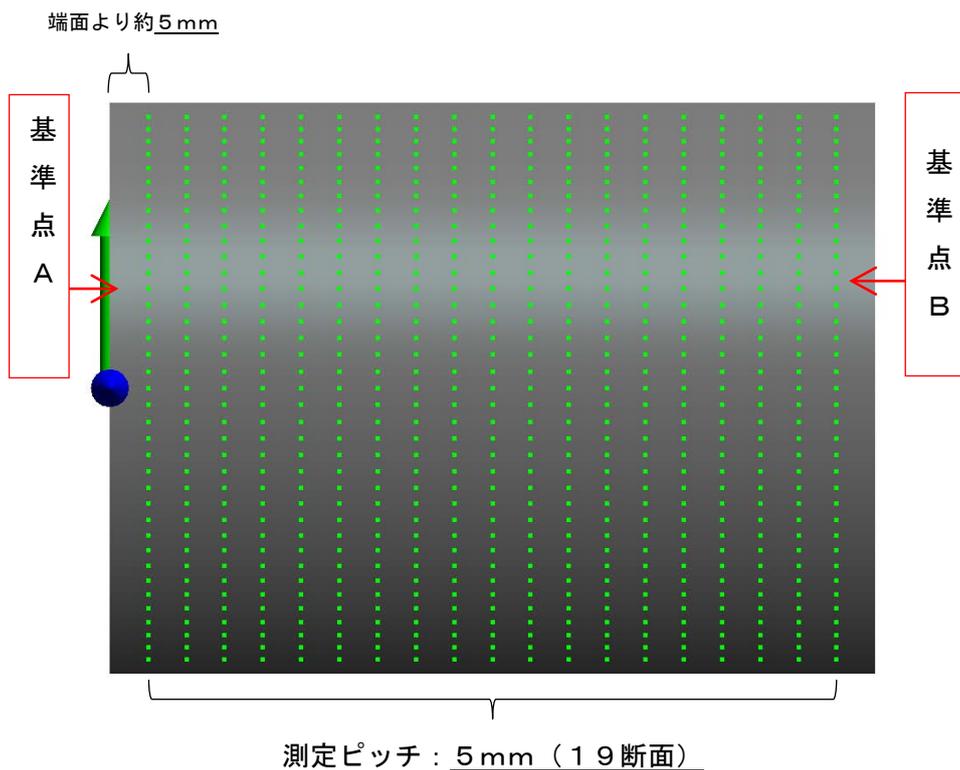


図 3.4.2-11 経時変化確認試験 軸方向測定位置

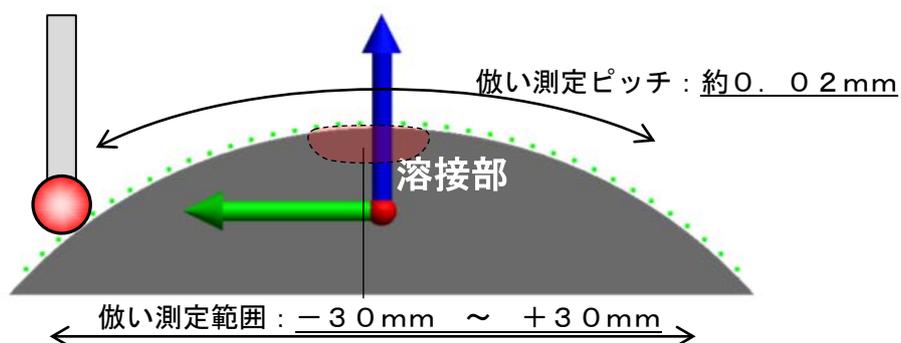


図 3.4.2-12 経時変化確認試験 ならい測定方向測定位置

## 5) 測定結果

### a 試験前後の形状変化の確認

試験開始後 18 ヶ月・24 ヶ月経過の模擬オーバーパックの 3 次元計測結果（形状データ）を腐食試験前の形状データと重ねて図 3.4.2-13・図 3.4.2-14 に示す。図では、上端面から 5~95mm 位置の試験前後の測定データを 1mm のオフセットで同一図上に表示した。この表示は、試験実施中の模擬オーバーパック試験体を下端面側から見た断面に相当する。

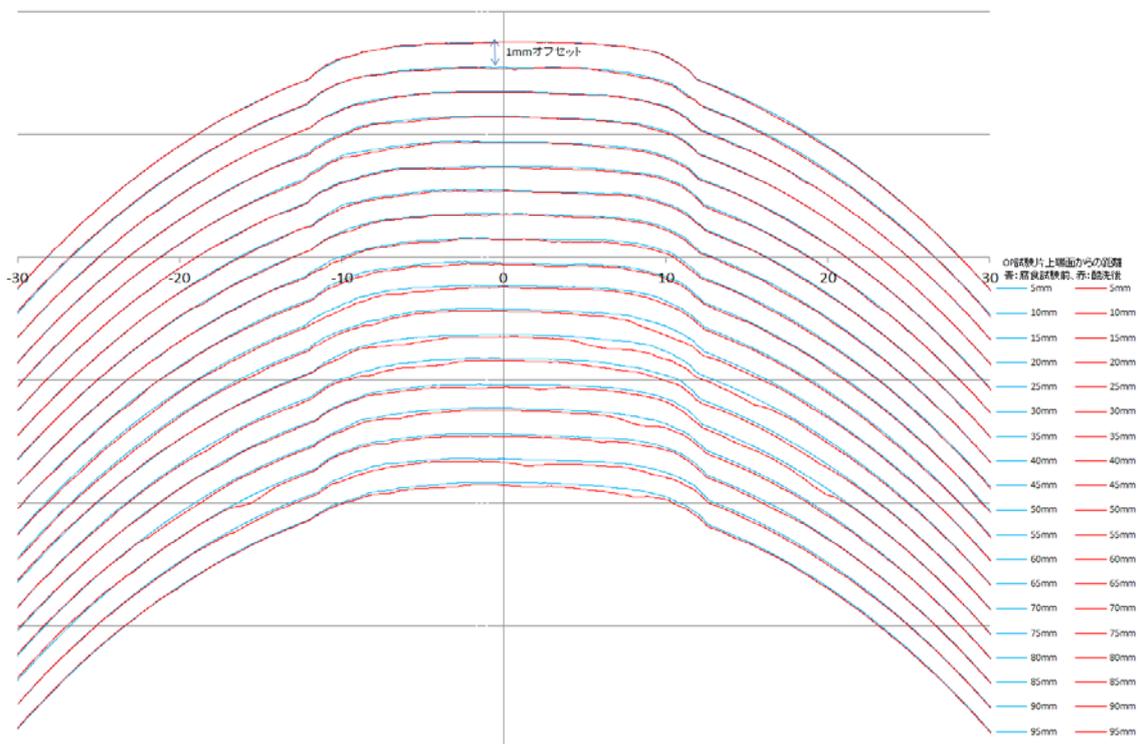


図 3.4.2-13 経時変化確認試験 腐食試験前後の形状比較 (試験開始後 18 ヶ月)

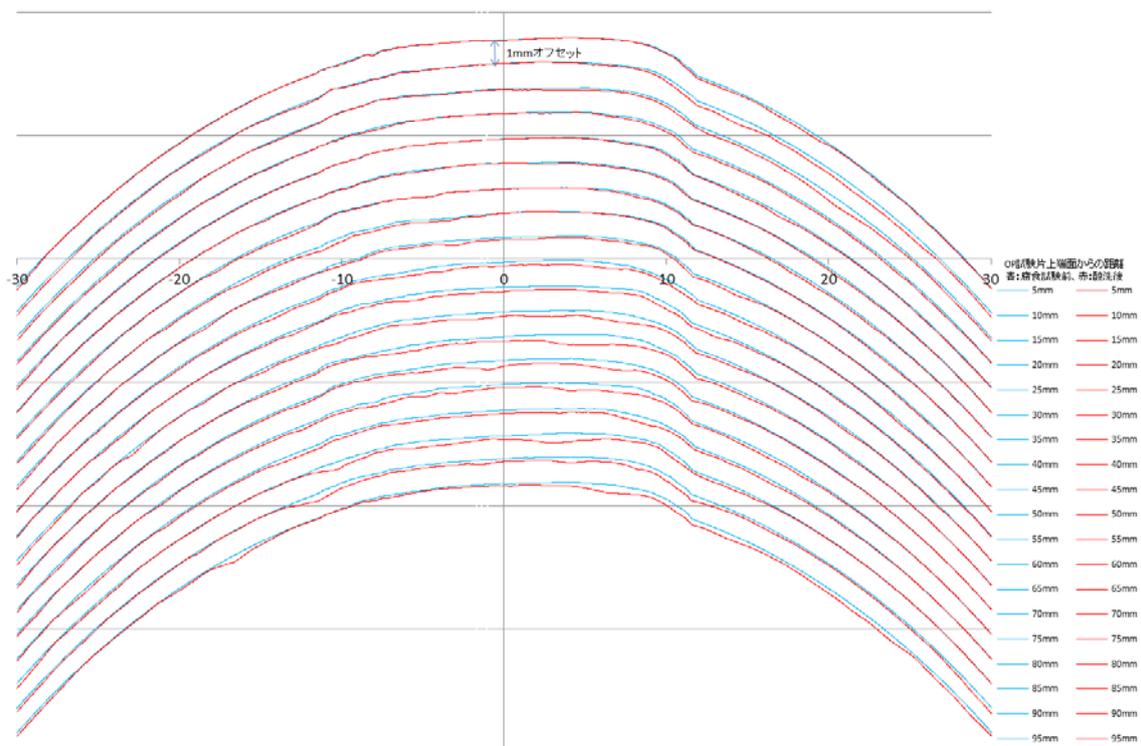


図 3.4.2-14 経時変化確認試験 腐食試験前後の形状比較 (試験開始後 24 ヶ月)

b 座標変換による腐食量の確認（2次元マトリクスコンター図による比較）

試験開始後18ヶ月・24ヶ月の模擬オーバーパック試験体の外観を、図 3.4.2-15と図 3.4.2-17、同試験体の3次元形状計測に基づく腐食前後の形状変化とカラーコンター図を、図 3.4.2-16と図 3.4.2-18に示す

模擬オーバーパック試験体では、図上に示す点線部分が形状計測の測定範囲に対応し、同試験体の変化量を示すカラーコンター図と上下左右が一致するように図示している。なお、周方向の測定範囲は、プローブを模擬オーバーパック試験体へ斜めに接触させることによる誤差の拡大を防ぐため、試験体の両端（中央から±37.5mm）ではなく、中央から±30mmの範囲（赤色の破線内）とした。

カラーコンター図では、模擬オーバーパック試験体の腐食試験前と腐食試験・酸洗後の形状変化量を2次元マトリクス上のコンター図に展開した。横軸は上端面からの距離（単位：mm）、縦軸はならい測定方向に沿った0.5mm間隔の評価位置を示す。

変化量は、腐食試験前と腐食試験・試験後の測定、3次元座標間の距離から算出した。

カラーコンター図では、100、200、500、800 $\mu$ mを区間として図中に示すカラーバー同様の色で識別している。



図 3.4.2-15 経時変化確認試験 試験後試験片の外観（試験開始後 18 ヶ月）  
（写真下側が試験実施中上側に相当する。点線は 3 次元計測の測定範囲。）

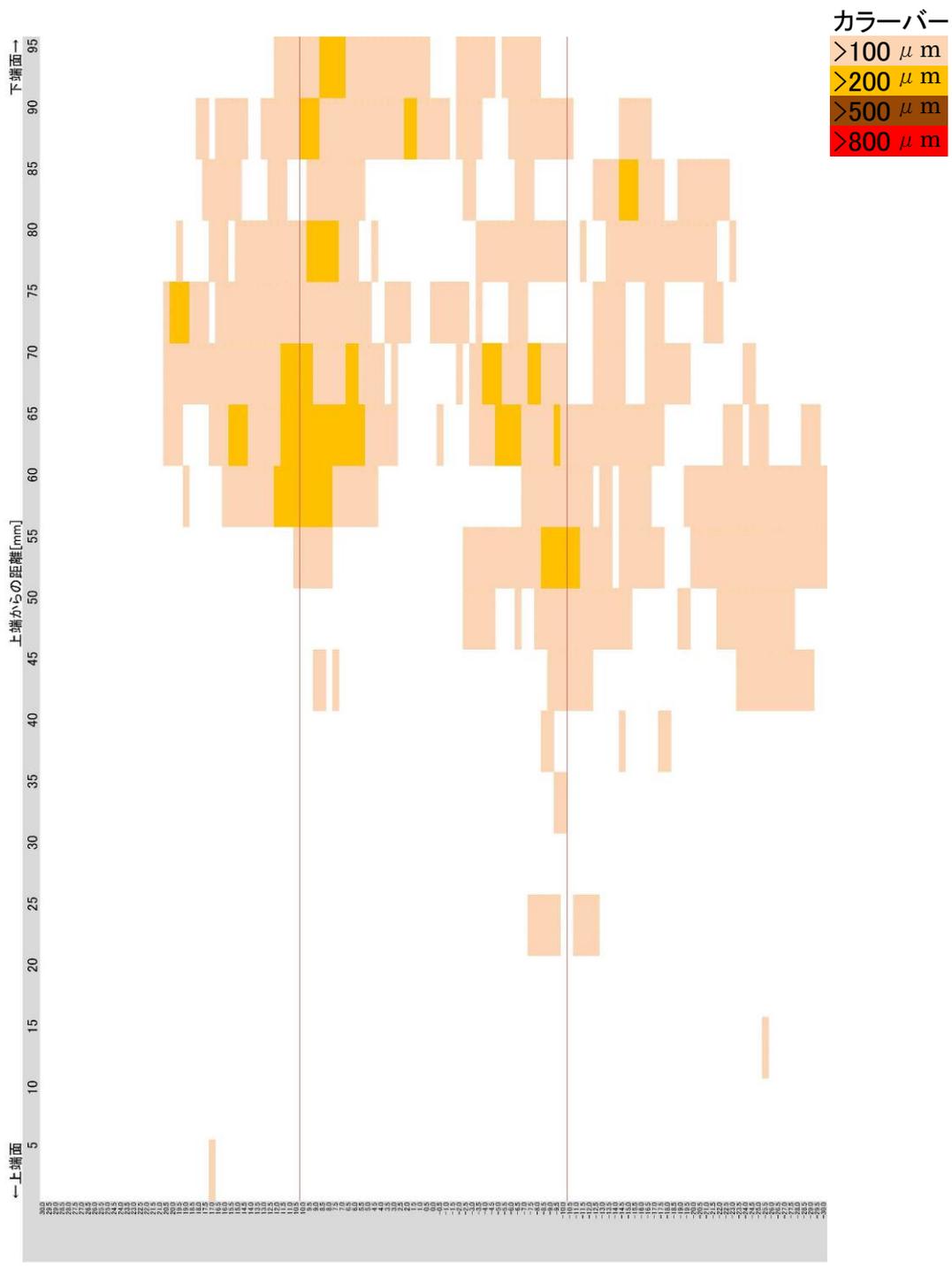


図 3.4.2-16 経時変化確認試験 3次元計測による腐食前後形状変化量のカラーコンター図（試験開始後 18 ヶ月）  
 （本図下が上端面、上が下端面、赤枠は溶接部に相当）

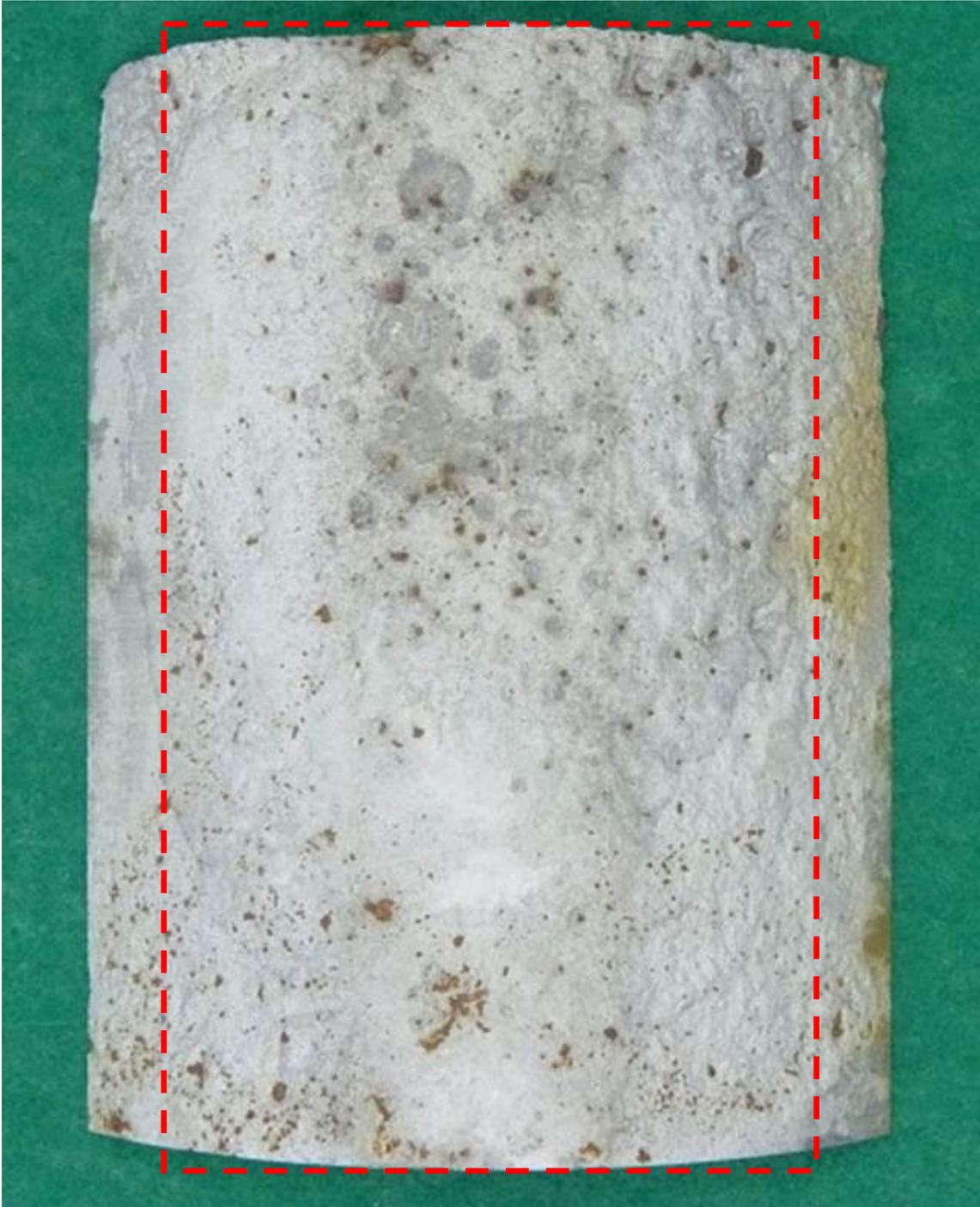


図 3.4.2-17 経時変化確認試験 試験後試験片の外観（試験開始後 24 ヶ月）  
（写真下側が試験実施中上側に相当する。点線は 3 次元計測の測定範囲。）

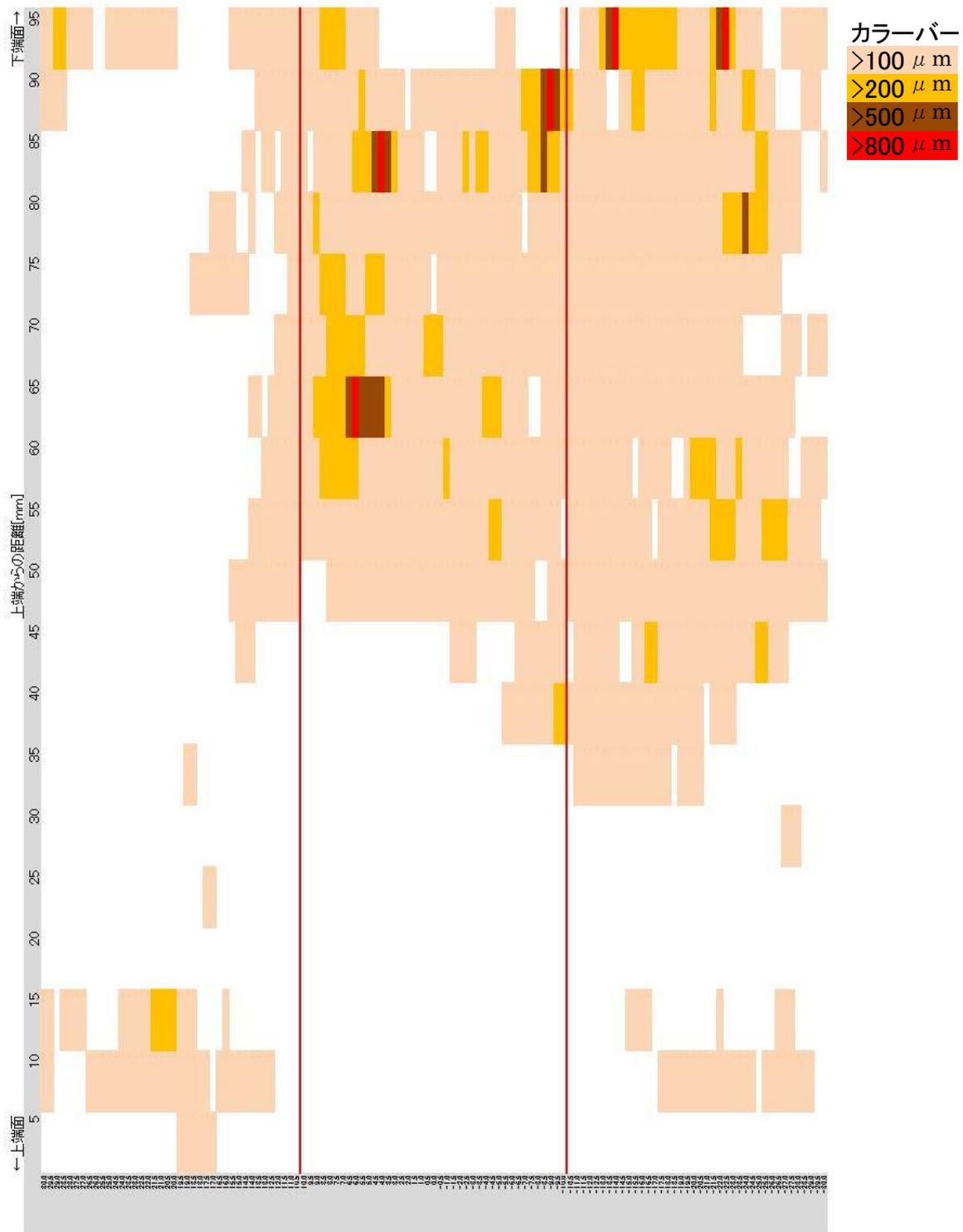


図 3.4.2-18 経時変化確認試験 3次元計測による腐食前後形状変化量のカラーコンター図（試験開始後24ヶ月）  
 （本図下が上端面、上が下端面、赤枠は溶接部に相当）

- ヒストグラム比較による平均的な腐食量の確認
- 比較方法

試験開始後 18 ヶ月・24 ヶ月経過の模擬オーバーパック試験体の試験前との比較結果（図 3.4.2-16・図 3.4.2-18）に示す座標変化値を用いてヒストグラムを作成する。さらに、ヒストグラムを①全体、②母材、③溶接部、に分けて作成し、これを腐食試験前後で比較することで、模擬オーバーパック試験体表面のエリアごとの変化を捉え、試験体表面全体（溶接部・母材）が均一に腐食減量したのか、選択的に減量したのか等の情報を得ることが可能となる。

- 測定結果に基づくヒストグラム

腐食試験前後の模擬オーバーパック試験体を対象とした 3 次元計測結果に基づき、ヒストグラムを作成した。

試験期間 18 ヶ月の模擬オーバーパック試験体の全体（母材＋溶接部）、母材のみ、溶接部のみのヒストグラムは、それぞれ図 3.4.2-19、図 3.4.2-20、図 3.4.2-21 に対応する。試験期間 24 ヶ月の模擬オーバーパック試験体の全体（母材＋溶接部）、母材のみ、溶接部のみのヒストグラムは、それぞれ図 3.4.2-22、図 3.4.2-23、図 3.4.2-24 に対応する。

横軸は、測定結果（試験前後の変化量）を  $3\mu\text{m}$  区間で分類したデータ区間であり、縦軸はその出現点数（頻度）を示す。

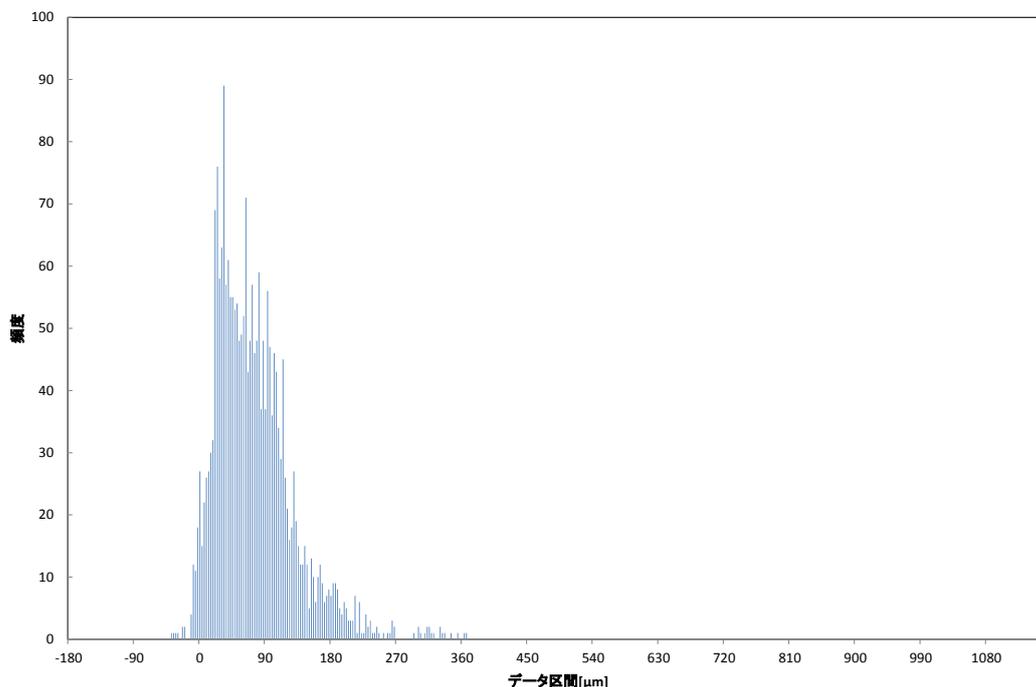


図 3.4.2-19 経時変化確認試験 測定範囲全体（母材・溶接部含む）の腐食試験前と酸洗浄後の差分値によるヒストグラム（試験開始後 18 ヶ月）

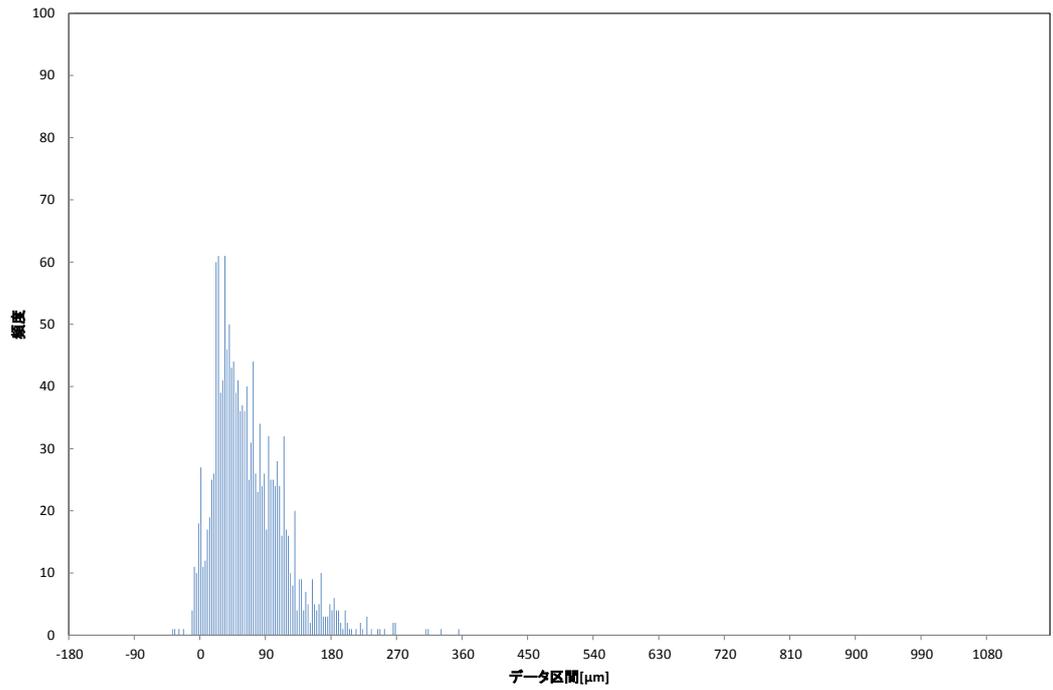


図 3.4.2-20 経時変化確認試験 母材の腐食試験前と酸洗浄後の差分値によるヒストグラム (試験開始後 18 ヶ月)

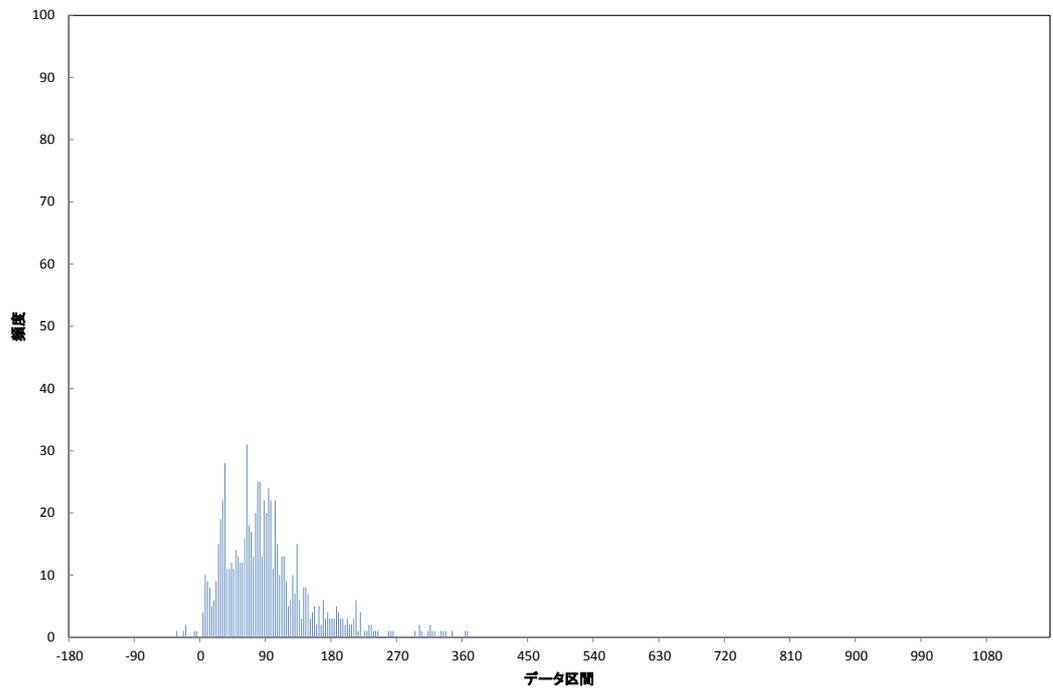


図 3.4.2-21 経時変化確認試験 溶接部の腐食試験前と酸洗浄後の差分値によるヒストグラム (試験開始後 18 ヶ月)

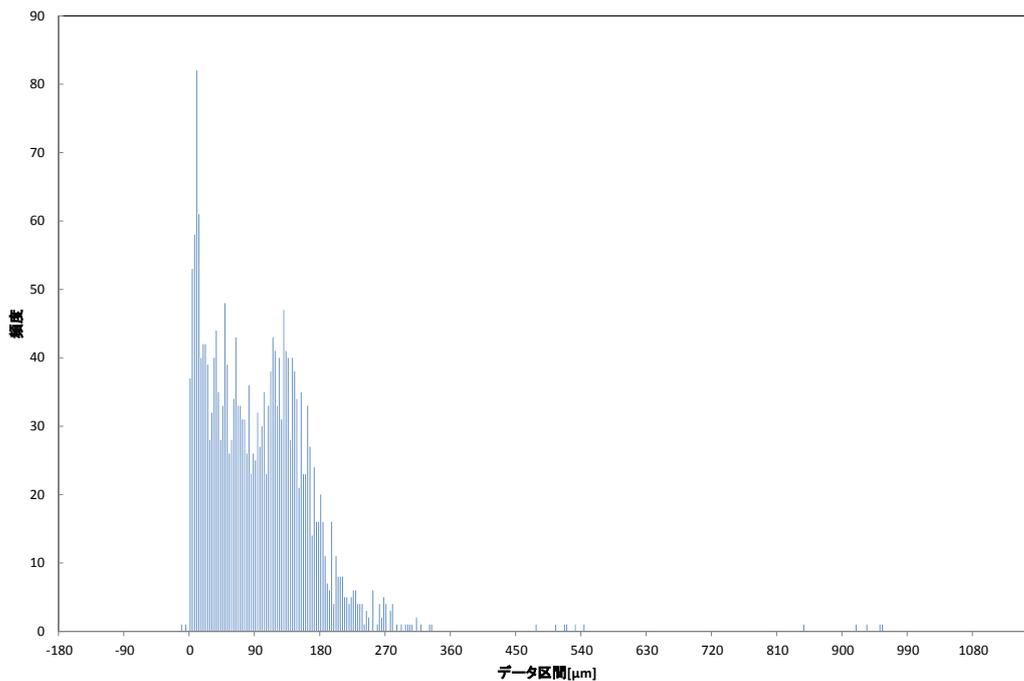


図 3.4.2-22 経時変化確認試験 測定範囲全体（母材・溶接部含む）の腐食試験前と酸洗浄後の差分値によるヒストグラム（試験開始後 24 ヶ月）

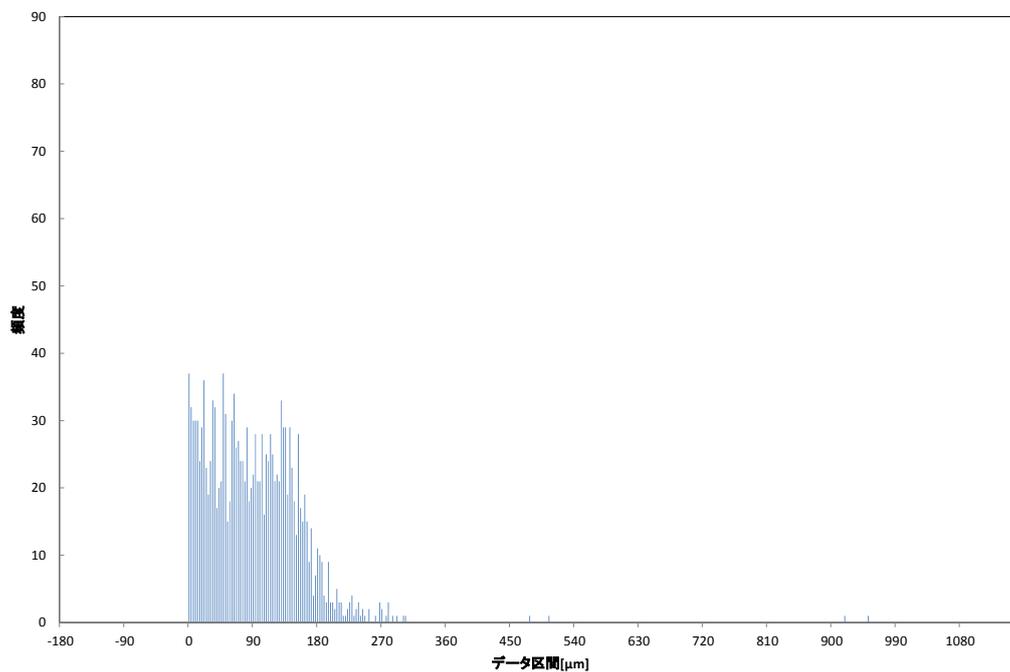


図 3.4.2-23 経時変化確認試験 母材の腐食試験前と酸洗浄後の差分値ヒストグラム（試験開始後 24 ヶ月）

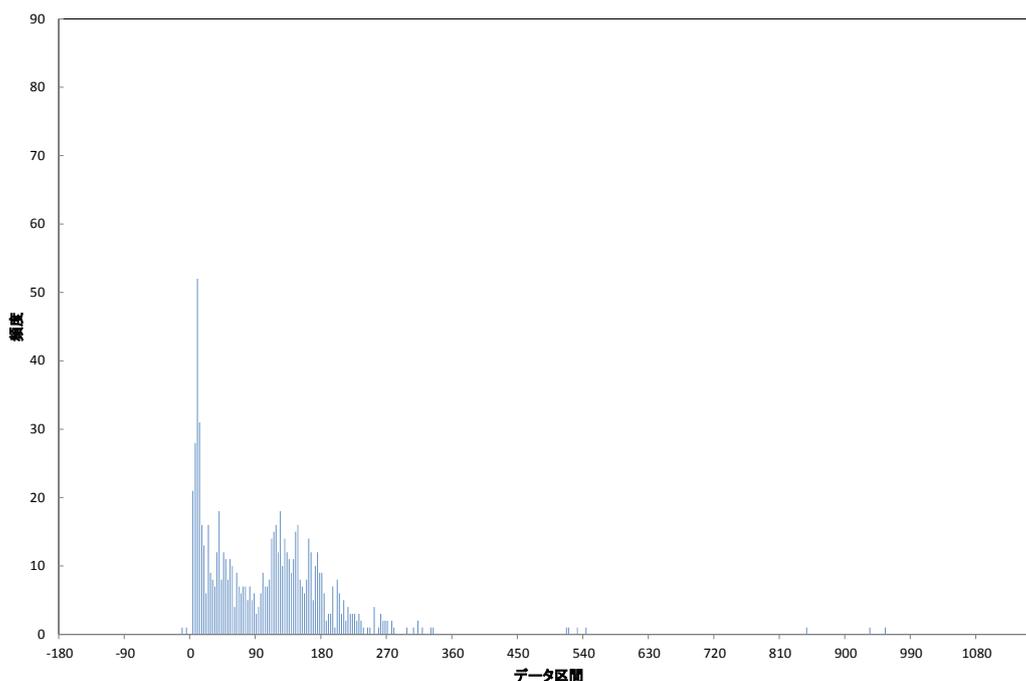


図 3.4.2-24 経時変化確認試験 溶接部の腐食試験前と酸洗浄後の差分値によるヒストグラム  
(試験開始後 24 ヶ月)

(4) 経時変化確認試験と工学規模試験（幌延 URL/地上）模擬オーバーパックとの比較

経時変化確認試験、および、工学規模試験（幌延 URL/地上）模擬オーバーパックにおける平均腐食深さの経過時間依存性を図 3.4.2-25 に、平均腐食深さと最大孔食深さの関係を図 3.4.2-26 に示す。

経時変化確認試験における平均腐食深さは、工学規模試験（幌延 URL/地上）、および、先行ベントナイト試験 VIII,IX と比較して、大きい。なお、経時変化確認試験は平均、最大ともに大きめであるが、平均と最大の関係は先行知見の延長線上にあり、従来からの知見の範囲に収まっている。

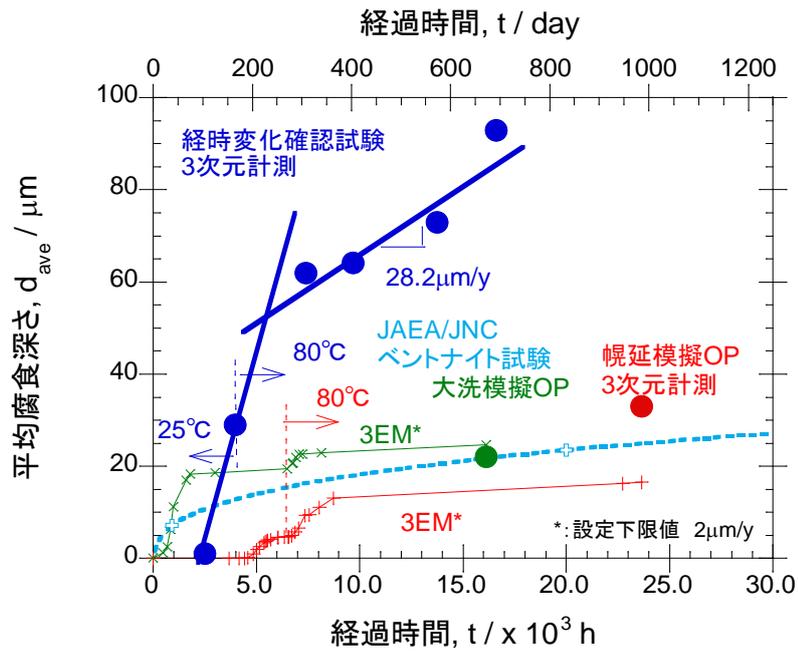


図 3.4.2-25 経時変化確認試験、および、工学規模試験（幌延 URL/地上） 模擬オーバーパックにおける平均腐食深さの経過時間依存性

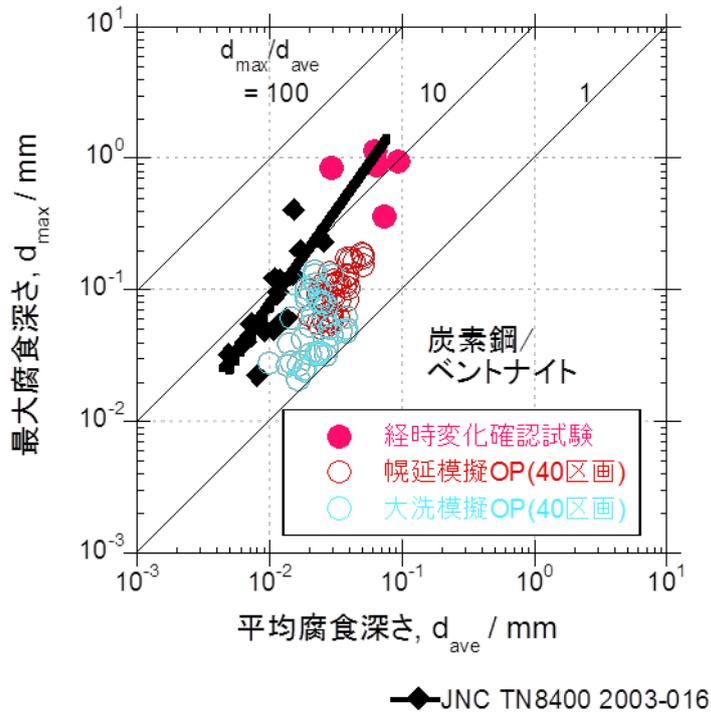


図 3.4.2-26 経時変化確認試験、および、工学規模試験（幌延 URL/地上） 平均腐食深さと最大腐食深さの関係

### 3.5 腐食挙動の評価

#### 3.5.1 溶接部の腐食挙動

##### (1) 幌延 URL および地上工学規模試験における溶接部と母材の腐食挙動の比較

図 3.5.1-1 に、幌延 URL 工学規模試験の母材と溶接部の平均腐食量と最大腐食量の比較を示す。平均腐食量及び最大腐食量は、模擬オーバーパック全体と上部下部に分けた各部の結果も示している。母材の計測点数は全体の約 84%になるので、母材と全体の平均腐食量は、ほぼ同じ約  $32 \mu\text{m}$  となった。溶接部全体の平均腐食量は、 $34 \mu\text{m}$  となり、概ね母材の腐食量と一致している。最大腐食量と平均腐食量の比も 3~6 程度で、母材と溶接部で大きな差は認められなかった。

図 3.5.1-2 に、地上工学規模試験の母材と溶接部の平均腐食量と最大腐食量の比較を示す。全体の母材と溶接部の平均腐食量はそれぞれ、 $20 \mu\text{m}$  と  $33 \mu\text{m}$  となった。この差は、溶接部の計測点数は全体の 16%程度であり、腐食量の大きなところが影響が、母材部と比べ相対的に大きくなったためと考えられる。計測点の約 84%を占める母材の上部の平均腐食量は、 $24 \mu\text{m}$ 、下部では  $17 \mu\text{m}$  となった。これについては、試験体下部の緩衝材とのクリアランス部分に珪砂が入った影響と考えられる。最大腐食量と平均腐食量の比は 2~7 程度であった。

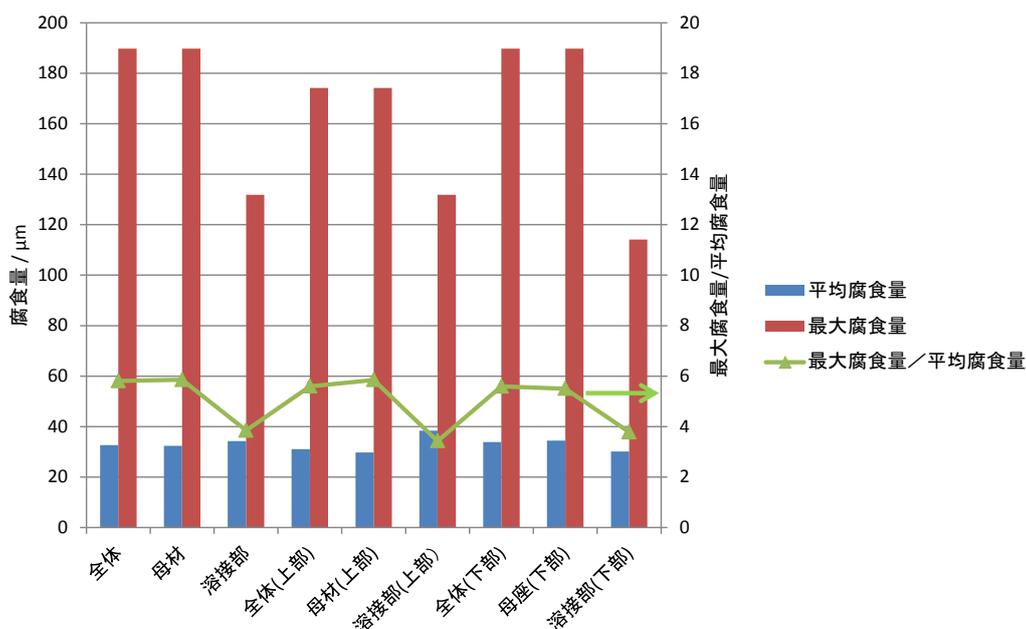


図 3.5.1-1 幌延 URL 工学規模試験 母材と溶接部の平均腐食量と最大腐食量の比較

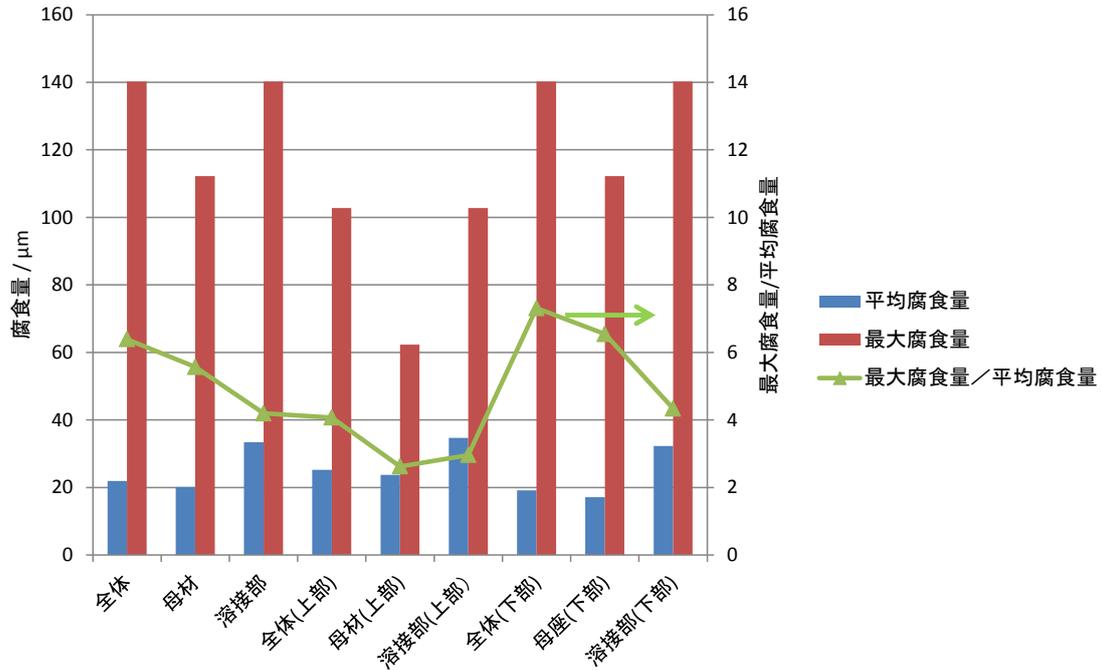


図 3.5.1-2 地上工学規模試験の母材と溶接部の平均腐食量と最大腐食量の比較

(2) 不均質条件試験における溶接部と母材の腐食挙動の比較

不均質条件試験における模擬オーバーパックの母材と溶接部の平均腐食量と最大腐食量の比較を、図 3.5.1-3 に示す。不均質条件試験では溶接部分に隙間を施しているため、隙間の有無による結果に分けて記載した。母材の計測箇所は、1,198 箇所を全計測箇所の 83%を締めているので、全体の腐食量とほとんど変わらない  $7\mu\text{m}$  になった。隙間の無い溶接部の平均腐食量は  $11\mu\text{m}$ 、隙間側で  $10\mu\text{m}$  となり差異は認められなかった<sup>1</sup>。

<sup>1</sup> 隙間を施した側で、最大腐食量が小さくなっている。計測点数が少ないため、断言できないが、後述 (3.5.2(5)) のように、模擬オーバーパックと緩衝材にクリアランスがある方が、腐食の局在化が少ない傾向にあるので、隙間を設けた部分で最大腐食量が小さくなった可能性がある。

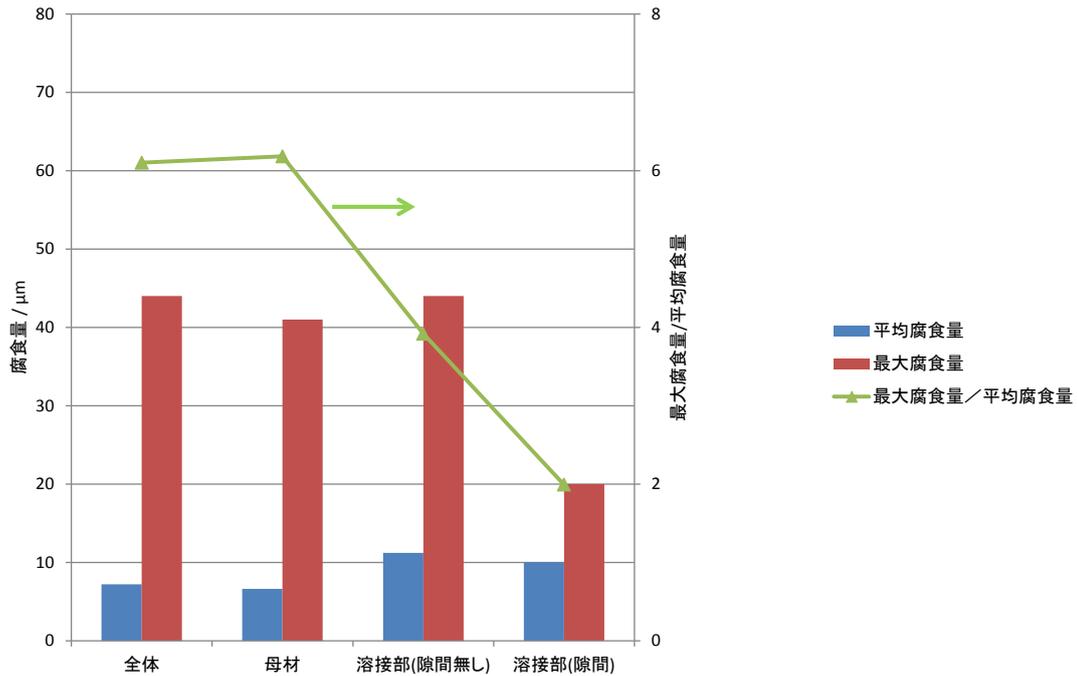


図 3.5.1-3 不均質条件試験 母材と溶接部の平均腐食量と最大腐食量の比較

(3) 経時変化試験における溶接部と母材の腐食挙動の比較

図 3.5.1-4 と図 3.5.1-5 に、経時変化試験の 18 ヶ月と 24 ヶ月の母材と溶接部の平均腐食量と最大腐食量の比較を示す。経時変化試験では母材部の全体に対する計測割合 66%程度である、すなわち、幌延 URL 等での試験に比べ、溶接部に計測点数の割合が高い。このため、母材と溶接部で平均腐食量や最大腐食量の差はより小さい傾向になった。

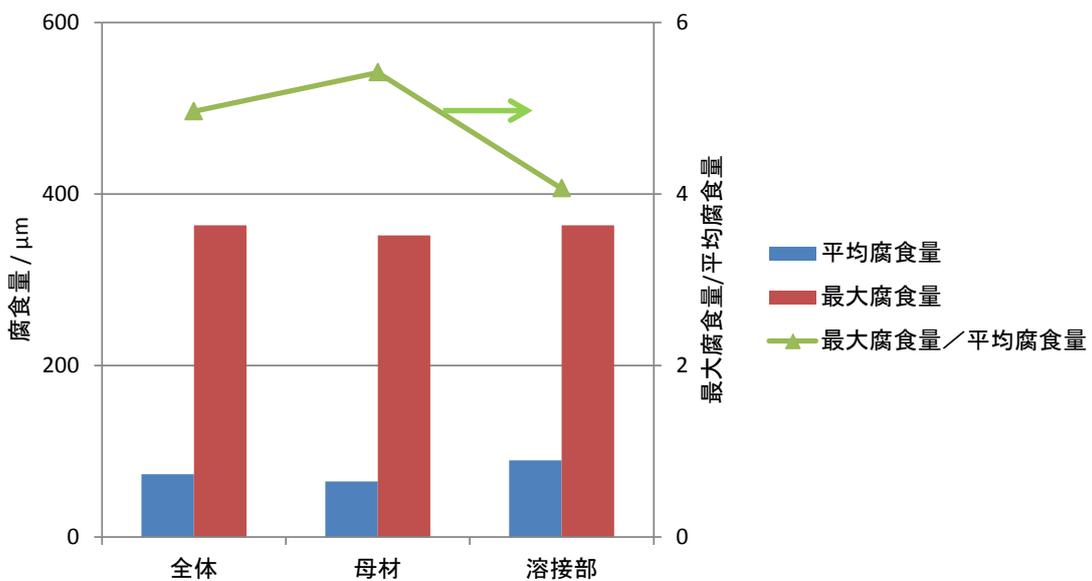


図 3.5.1-4 経時変化試験 母材と溶接部の平均腐食量と最大腐食量の比較 (18 ヶ月)

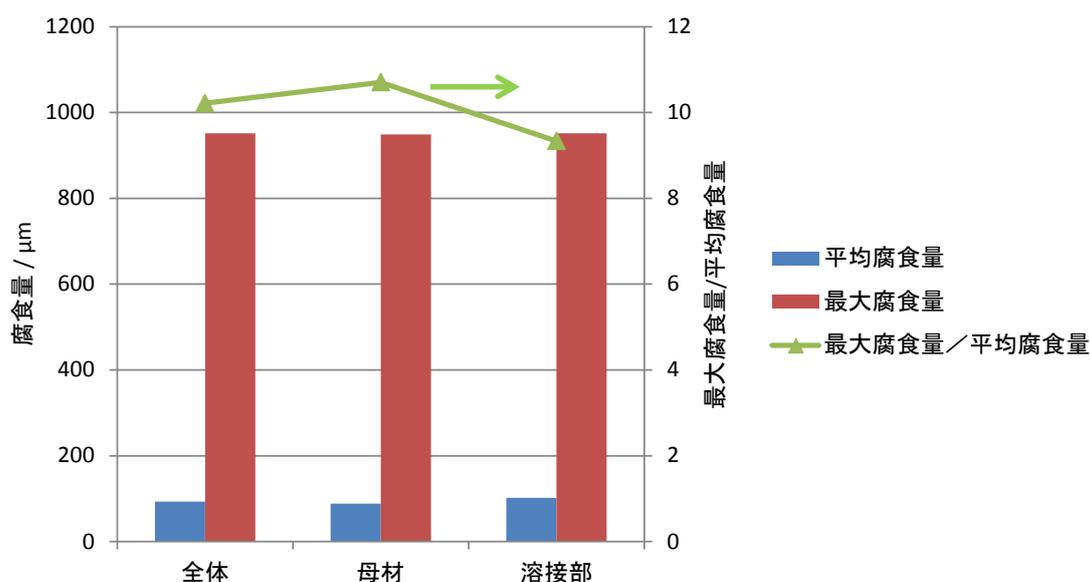


図 3.5.1-5 経時変化試験 母材と溶接部の平均腐食量と最大腐食量の比較 (24 ヶ月)

#### (4) まとめ

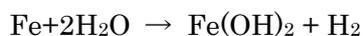
以上の結果から、溶接部が部材と比較し、腐食量が大きという明確な傾向は認められなかった。

### 3.5.2 腐食想定シナリオ

H12 レポート I によると、炭素鋼の腐食は、埋設後の冠水直後から、緩衝材および埋め戻し材に取り込まれた酸素が間隙水中に溶解し、オーバーパックは、酸素腐食支配の腐食が始まる。



緩衝材および埋め戻し材に取り込まれた酸素が消費した後は、還元雰囲気での腐食が継続する。



低溶存酸素濃度下での炭素鋼の平均腐食速度は、経時的に低下し環境条件の不確実性を考慮し  $10 \mu\text{m/y}$  と仮定している。しかしながら、以上の検討は、着目した腐食現象をより明瞭に把握するために、小さな試験片を用い、溶液環境や緩衝材を溶液で飽和させた試験で行われている。

しかしながら、実際の環境では、試験体規模や環境、施工の影響により、微視的には不均質な場になっていることも想定される。これにより、腐食の進展シナリオが変わる可能性がある。実際の環境として、緩衝材ブロック定置方式を採用した場合の、想定されるシナリオを、以下に列挙する。

### (1) 基本シナリオ

Case a：上記、H12 レポートのシナリオに則り、初期の腐食は、処分場に持ち込まれた酸素により進行し、酸素枯渇後は、 $0.1\sim 10\ \mu\text{ m/y}$  で全面腐食が進展する。

### (2) 試験体規模の影響

Case b：リファレンスケースのオーバーパックの形状は、直径 820 mm、高さが 1,730 mmの円柱状である I。オーバーパックが大型化することで、微視的にオーバーパックの表面の環境が異なることで、腐食の局在化が顕在化する可能性がある。

### (3) 環境影響

Case c：オーバーパック領域の地下水の Eh は、母岩の地下水組成の影響を受けた緩衝材間隙水中に存在する酸化剤の濃度と還元剤の濃度によって定まるので、処分場に想定以上の酸化剤を含む地下水が流入した場合は、地下水流入量に応じて想定以上の腐食が進行する。また、地下水の pH の上昇割合は母岩や緩衝材中の炭酸系イオン等の間隙水共存イオン濃度により異なるものとなるが、高 pH 化、炭酸塩などの増加等によって炭素鋼が不動態化し、孔食、隙間腐食などの局部腐食を生じることが考えられる。

Case d：埋設後の冠水直後から、緩衝材および埋め戻し材に取り込まれた酸素が間隙水中に溶解し、オーバーパックの腐食が始まる。深成岩堅置き型の処分では、酸素がすべて腐食によって消費されると仮定すると、オーバーパック 1 体当たりの腐食量は 590mol であることから、その平均腐食深さは、1.5mm となるとされているが、処分場建設時の大気開放の期間が長くなる等、想定を上回る酸素と接触し、初期の腐食速度が想定を上回る。

Case e：チタンカラム等の小型の試験では、緩衝材と試験片は圧密されて、均一に接触しているが、ブロック定置方式を想定した場合、実環境においては、緩衝材とオーバーパックを密着させて設置することは困難となるため、緩衝材の膨潤の不均一性により、オーバーパックとの接触が不均質となり、腐食の局在化が進行する可能性もある

### (4) 施工影響

Case f：ブロック定置方式において、緩衝材ブロック作製時の不良や、緩衝材定置時の施工不良により、緩衝材ブロックに隙間が生じ、オーバーパックに早期に接役する部分が生じ腐食が局在化する可能性がある。

### (5) 腐食想定シナリオと試験結果

#### 1) 腐食想定シナリオと試験条件の関係

これまで実施してきた試験について、上記各シナリオで腐食が進展した場合に、想定される結果の関係を、表 3.5.2-1 に示す。

①Case a の基本シナリオが進展する場合、隙間の有無や環境のバラツキの腐食に及ぼす影響は小

さく、従来の知見と一致した結果が得られる。

- ②Case b では、試験規模が大きくなるほど（模擬オーバーパックが大型化するほど）腐食の局在化が認められることになる。
- ③Case c では、地下水組成を制御していた、経時変化試験、不均質条件試験、地上工学試験では、腐食速度は、従来の知見と一致し、全面腐食が進行し腐食速度は $\sim 10 \mu \text{m/y}$ となる。一方、幌延 URL 工学規模試験では、二酸化炭素の吹き出しが観察されており、これが腐食に影響し、極端に大きな腐食速度や局部腐食が進展する。
- ④Case d は、いずれの試験も大気開放の期間は短く、幌延 URL 工学規模試験を含め早期に空隙を地下水で置換したため、大量の酸素と接触した可能性は低い。腐食挙動の経時変化のデータが得られた幌延 URL、および遅効工学規模試験の模擬オーバーパックに設置した3電極式腐食センサーによる腐食速度の時間積分、および、経時変化確認試験の結果から、埋設初期の酸化性環境では腐食速度が比較的速く、時間の経過とともに、および、加熱によって還元性環境に変化して、それに伴って腐食速度が低減したことが、定量的に示されたので、本フェーズでのシナリオとしては想定しない。
- ⑤Case e では、Case b と同じような局在化が生じるが、試験規模と無関係に、緩衝材とオーバーパックの接触の不均一性で、全面腐食が進行する部分と腐食が局在する部分が生ずる。
- ⑥Case f では、緩衝材に隙間を設けた、不均質条件試験で腐食の局在化あるいは、極端に大きな腐食速度が計測されることになる。

表 3.5.2-1 腐食シナリオ

ケース	想定シナリオ		想定される結果				備考
			経時変化	不均質	地上	地下	
Case a)	基本シナリオ	初期の腐食は、処分場に持ち込まれた酸素により進行し、酸素枯渇後は、0.1~10 $\mu\text{m}/\text{y}$ で腐食が進展する。	全面腐食 腐食速度~10 $\mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度~10 $\mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度~10 $\mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度~10 $\mu\text{m}/\text{y}$	隙間の有無や環境のパラツキの腐食に及ぼす影響は小さい。従来の知見と整合する。
Case b)	試験規模影響	試験体（オーバーバック）が大型化することで、表面が分極し腐食の局在化が進行する	全面腐食 腐食速度~10 $\mu\text{m}/\text{y}$	腐食の局在化	腐食の局在化	腐食の局在化	試験体を大型化することで、腐食の局在化が顕在化する
Case c)	環境影響1	処分場に想定以上の酸化剤を含む地下水あるいは高pHの地下水が流入し、地下水流入量に応じて腐食が進行する。	全面腐食 腐食速度~10 $\mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度~10 $\mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度~10 $\mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度 >>10 $\mu\text{m}/\text{y}$ 腐食の局在化	地下水組成及び注水量を制御している地上試験と、環境を制御出来ない地下試験で結果が異なる。
Case d)	環境影響2 (施工影響)	処分場建設時の大気開放の期間が長くなる等、想定を上回る酸素と接触し、初期の腐食速度が想定を上回る。	全面腐食 腐食速度~10 $\mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度~10 $\mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度~10 $\mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度 >>10 $\mu\text{m}/\text{y}$ 腐食の局在化	いずれの装置も大気開放の期間は短く、地下試験を含め早期に空隙を地下水で置換したため、大量の酸素と接触した可能性は低く、本フェーズでのシナリオとしては想定しない。
Case e)	環境影響3	ブロック配置方式を想定した場合、緩衝材とオーバーバックの接触が不均質となり、オーバーバックの表面が分極し腐食の局在化が進行する	腐食の局在化する可能性	腐食の局在化する可能性	腐食の局在化する可能性	腐食の局在化する可能性	Case b)と同じような局在化が生じるが、試験規模と無関係に、オーバーバック表面に全面腐食が進行する部分と腐食が局在する部分が生ずる。
Case f)	施工影響	ブロック配置方式において、緩衝材設置時の施工不良で、オーバーバックが早期に接液し、腐食が局在化する。	全面腐食 腐食速度~10 $\mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度 >>10 $\mu\text{m}/\text{y}$ 腐食の局在化	全面腐食 腐食速度~10 $\mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度~10 $\mu\text{m}/\text{y}$	施工を不良を想定した不均質試験で腐食の局在化あるいは、極端に大きな腐食速度が計測される。

## 2) 腐食想定シナリオと試験結果

表 3.5.2-2 に、表 3.5.2-1 のシナリオと実際の結果の比較を示す。一部分を除き、すべての試験で、平均的には、腐食速度は  $10 \mu \text{ m/y}$  程度となり、腐食は、従来の知見通り、基本シナリオ (Case a) で進展していると考えられる。しかしながら、一部の経時変化試験と幌延 URL 規模試験および地上試験の上部の緩衝剤が付着した部分で、腐食の局在化が進展しており、部分的には、従来の知見と異なる現象も認められた。試験体規模の影響を確認するため、幌延 URL における工学規模試験で使用した模擬オーバーパックを経時変化確認試験用試験片とほぼ同一の面積になるように区画を分けた各区画の平均腐食深さ、最大腐食深さの累積確率を図 3.5.2-1 に示す。平均腐食深さの最小： $7.8 \mu \text{ m}$ 、中央値： $27.6 \mu \text{ m}$ 、最大： $45.6 \mu \text{ m}$  で約 5.9 倍、最大腐食深さの最小値と最大値の比は約 5.0 倍であった。一般に、試験体規模が大きくなるに伴って、平均、および、最大腐食深さは大きくなることが知られており、この 40 区画のばらつきも、それを指示しており、想定を超えた腐食の局在化は認められなかった (case b の影響は小さい)。

地下水組成及び注水量を制御している地上試験と、環境を制御出来ない幌延 URL 工学規模試験で結果が概ね一致していることから case c の影響も小さい。また、強制的に水の通り道を設けた不均質条件試験や、模擬オーバーパック上部の隙間から、水が浸入した地上工学規模試験では、緩衝材が内側から膨潤し、模擬オーバーパックと均質に接触したと考えられ、腐食の局在化は認められなかった (case f の影響も小さい)。

以上から、case e の影響すなわち、試験規模と無関係に、緩衝材ブロックと模擬オーバーパックの接触の不均一性で、全面腐食が進行する部分と腐食が局在する部分が生じたと考えられる。

模擬オーバーパックと緩衝材ブロックのクリアランスに地下水が浸入した不均質条件試験や、クリアランスに珪砂が入り模擬オーバーパックと緩衝材の付着が阻害された地上工学規模試験の下部は、緩衝材との過度な付着が妨げられ腐食量が相対的に小さくなっていたことから、強制的に珪砂等でオーバーパックと緩衝材のクリアランスを埋めるような施工が、初期の腐食に有効な可能性がある。

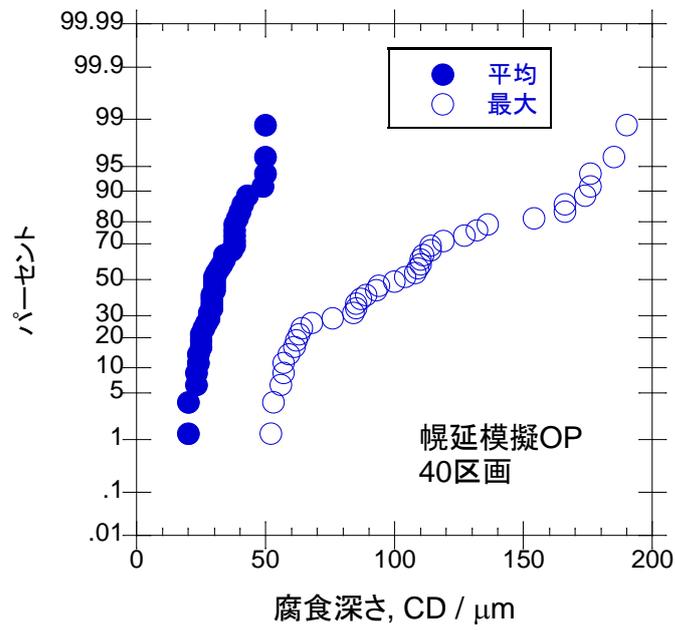


図 3.5.2-1 幌延 ULR 工学規模試験 模擬オーバーパックの 40 区画ごとの平均腐食深さ、最大腐食深さの累積確率

表 3.5.2-2 腐食シナリオと実際の結果の比較

ケース	想定シナリオ		想定される結果					考察
			経時変化	不均質	地上	地下	備考	
Case a)	基本シナリオ	初期の腐食は、処分場に持ち込まれた酸素により進行し、酸素枯渇後は、 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$ で腐食が進展する。	全面腐食 腐食速度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$	隙間の有無や環境のバラツキの腐食に及ぼす影響は小さい。 <b>従来の知見と整合する。</b>	一部分を除き、すべての試験で、 <b>平均的</b> には、腐食速度は $10 \mu\text{m}/\text{y}$ 程度と言える。
Case b)	試験規模影響	試験体（オーバーバック）が大型化することで、表面が <b>分極</b> し腐食の局在化が進行する	全面腐食 腐食速度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$	腐食の局在化	腐食の局在化	腐食の局在化	試験体を <b>大型化</b> することで、 <b>腐食の局在化</b> が顕在化する	不均質試験で、腐食の局在化が認められない。また、地上試験では、クリアランス部の珪砂の有無に腐食量が異なり、サイズの影響より環境の影響が示唆されることから、試験規模の <b>影響は小さい</b> 。
Case c)	環境影響1	処分場に想定以上の <b>酸化剤</b> を含む地下水あるいは <b>高pH</b> の地下水が <b>流入</b> し、地下水流入量に応じて腐食が進行する。	全面腐食 腐食速度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度 $>> 10 \mu\text{m}/\text{y}$ 腐食の局在化	地下水組成及び注水量を制御している地上試験と、環境を制御出来ない地下試験で結果が異なる。	実地下水の溶存酸素濃度は1ppm以下である。一方、実地下水の溶存二酸化炭素濃度は非常に高い(数百ppm)が、緩衝材がほとんど膨潤していないことから、大量の二酸化炭素がオーバーバックと接触した可能性は低く、 <b>影響は小さい</b> 。
Case d)	環境影響2 (施工影響)	処分場建設時の <b>大気開放</b> の期間が <b>長くなる</b> 等、想定を上回る酸素と接触し、初期の腐食速度が想定を上回る。	全面腐食 腐食速度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度 $>> 10 \mu\text{m}/\text{y}$ 腐食の局在化	いずれの装置も <b>大気開放</b> の期間は <b>短く</b> 、地下試験を含め早期に空隙を地下水で置換したため、大量の酸素と接触した可能性は低く、本フェーズでのシナリオとしては <b>想定しない</b> 。	
Case e)	環境影響3	<b>ブロック定置方式</b> を想定した場合、緩衝材とオーバーバックの <b>接触が不均質</b> となり、オーバーバックの表面が分極し腐食の局在化が進行する	腐食の局在化する可能性	腐食の局在化する可能性	腐食の局在化する可能性	腐食の局在化する可能性	Case b)と同じような <b>局在化</b> が生じるが、 <b>試験規模と無関係</b> に、オーバーバック表面に全面腐食が進行する部分と腐食が局在する部分が生ずる。	強制的に <b>水の通り道</b> を設けた <b>不均質試験</b> では緩衝材が膨潤する前にクリアランスに <b>均一に模倣地下水が侵入</b> し腐食が進行した。一方、 <b>地下試験</b> では <b>部分的</b> に緩衝材が <b>接触</b> した部分の腐食が進行した。 <b>地上試験</b> では珪砂(及び模倣地下水)が侵入しオーバーバックとの <b>接触が阻害</b> された部分の腐食が小さかった。
Case f)	施工影響	<b>ブロック定置方式</b> において、 <b>緩衝材設置時の施工不良</b> で、オーバーバックが早期に接液し、腐食が局在化する。	全面腐食 腐食速度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度 $>> 10 \mu\text{m}/\text{y}$ 腐食の局在化	全面腐食 腐食速度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$	施工を不良を想定した不均質試験で腐食の局在化あるいは、極端に大きな腐食速度が計測される。	不均質試験の結果、腐食量が従来の知見と同等であったことから、 <b>影響は小さい</b> 。
<b>実際の結果</b>								
			全面腐食 腐食速度 $>> 10 \mu\text{m}/\text{y}$ 腐食の局在化	全面腐食 腐食速度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$	上部の腐食速度がやや速い 全面腐食 腐食速度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$	全面腐食 腐食速度 $\sim 10 \mu\text{m}/\text{y}$ 腐食の局在化	一部分を除き、すべての試験で、概ね <b>全面腐食</b> が進行していた。部分的に、緩衝材が付着した部分で <b>腐食が局在化</b> していたが、長期的には緩衝材の膨潤が進み、オーバーバックと均一に付着するようになると、腐食は緩衝材中の地下水の拡散速度に依存するようになり、いずれは、 <b>全面腐食に移行</b> すると思われる。	

### 3.5.3 腐食の進展

工学規模試験（幌延 URL/地上）模擬オーバーパックにおける平均腐食深さの経過時間依存性を図 3.5.3-1 に示す様に、幌延 URL における工学規模試験、地上における工学規模試験ともに、平均して数百～千 h で  $20\sim 30\ \mu\text{m}$  の非常にゆっくりとした速度で腐食が進展しており、JAEA および JNC が実施したベントナイト中の長期腐食試験の挙動とも一致している。

平均腐食深さと最大孔食深さの関係を図 3.5.3-2 に示す様に、この系では腐食の局在化が生じて、平均腐食深さの増大に伴って最大腐食深さが大きくなり、その比で表わされる最大腐食深さ / 平均腐食深さ比、Pf も大きくなった。これらの関係も JAEA および JNC が実施したベントナイト中の長期腐食試験の挙動とも一致している。

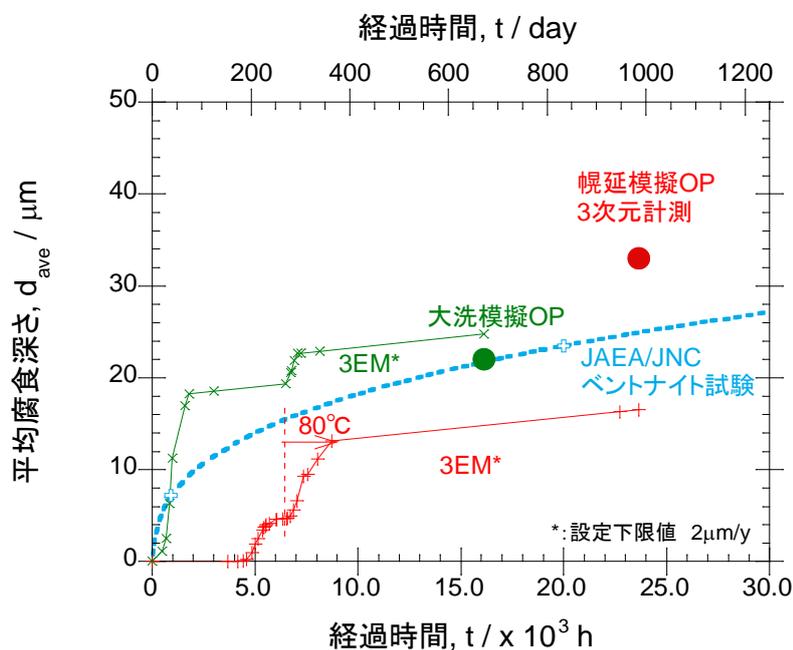


図 3.5.3-1 工学規模試験（幌延 URL/地上）模擬オーバーパックにおける平均腐食深さの経過時間依存性

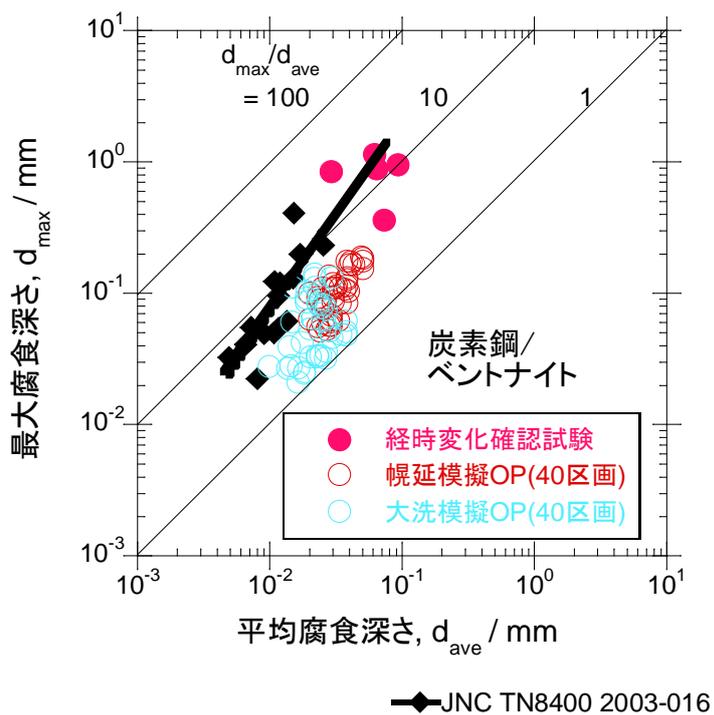


図 3.5.3-2 経時変化確認試験、および、工学規模試験（幌延 URL/地上） 平均腐食深さと最大孔食深さの関係（再掲）

### 3.6 腐食計測技術の適用性確認調査

#### 3.6.1 同一環境下センサー性能確認試験

平成 28 年度に実施した試験で、各方法で、それぞれ、溶存酸素を含む含水ベントナイト中における炭素鋼の腐食現象の状態監視が可能であることを確認した。

共研に供した環境（主として圧縮ベントナイトの含水に要する待ち時間の節約のため用いた混練ベントナイト）中で、

- 腐食試験装置系として評価に供せることを確認した。
- 腐食速度が大きく、特に（感度を高めるために）薄型センサーの寿命が短かった。
- 腐食が局在化する傾向が認められた。

これらの知見を踏まえ、本年度の試験に際して、以下の方針に則り、試験系を改良・変更した。同一環境下センサー性能確認試験用腐食セルの組み立ての概念を図 3.6.1-1 に示す。

- 実施工で対応不能な所作（脱気）はしない。
- 施工上で持ち込む酸素は許容する。
- 新たな酸素は遮断する。

この変更によって、感度向上を目的として薄膜型センサーを用いる薄膜レジストメトリー法、および、電気抵抗/ポテンシャルドロップ法において、過渡期に耐える/ $\sim$ 百 $\mu\text{m}$ の腐食が計測可能であると期待される。なお、共通の試験時間として、1,000h を設定した。

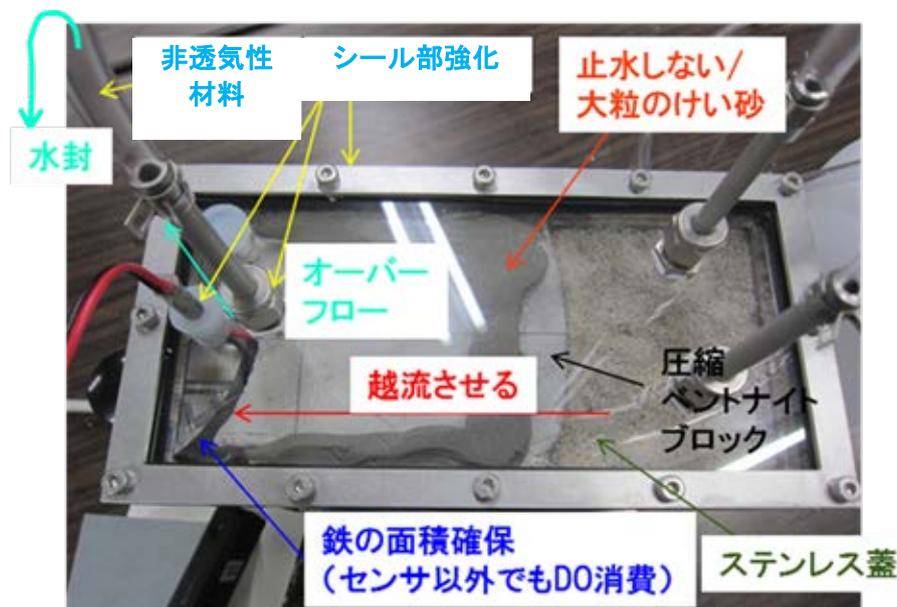


図 3.6.1-1 同一環境下センサー性能確認試験用腐食セルの組み立ての概念

#### 3.6.2 かまぼこ型腐食試験片

##### (1) 試験法の概念

地中埋設容器の腐食センシングを目的として埋設容器周囲のベントナイトを模擬した試験容器中に各種センサーを設置し、種々センサーの特徴比較をする。

新たにステンレス蓋により気密性を向上し外部からの酸素混入を低減した。また、より実機環

境に近づけるため、ベントナイトによる止水を廃し試験初期に模擬地下水が試験片面に流れ込む  
 方案とした。

## (2) 試験容器

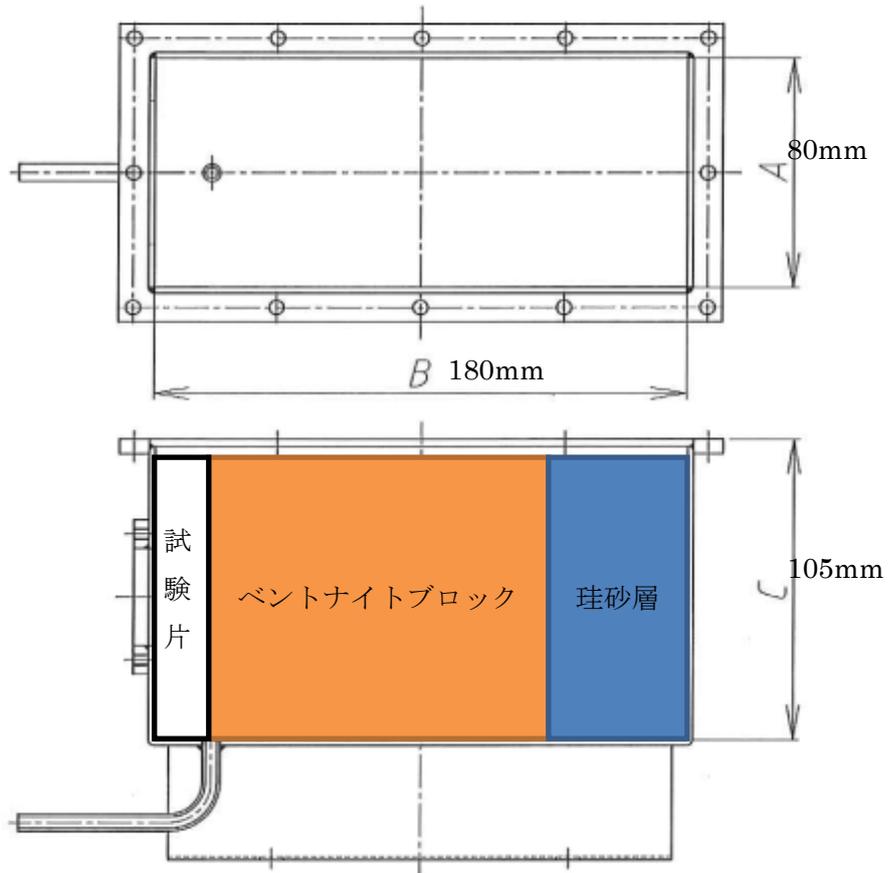
埋設容器周辺は地下水が流入しており、埋設容器表面は珪砂層・ベントナイト層を通過した地  
 下水とベントナイトに曝される。本試験セルは工学規模試験装置の埋設容器表面からベントナイ  
 ト層・珪砂層を模擬したものであり図 3.6.2-1 に示す形状である。模擬オーバーパックから採取  
 した鉄製試験片形状を図 3.6.2-2 に示す。

完全密閉（圧縮ベントナイトブロック、珪砂など、予め、セル内に持ち込まれた酸素を除き、  
 密閉後に新たに外部から酸素を持ち込まない）性を高めるため、蓋部を改造し、ステンレス、も  
 しくは、ペット樹脂製とし、樹脂パッキンを新品に交換した。さらに、コネクタ部をシリコン栓  
 から金属コネクタ（スエジロックなど）に変更した。密閉性確認のため、図 3.6.2-3 に示すよう  
 に、試験セル内に珪砂を充填した状態で真空ポンプを使用して減圧（ $-0.5\text{MPa}$ ）し、24h にわた  
 って圧力変動が無いことを確認した。

鉄製試験片、もしくは、厚さ 10mm のかまぼこ型（平板状）アクリル製試験片表面にセンサー  
 を取り付けることで埋設容器表面のセンシングを模擬する。なお、工学規模試験の模擬オーバー  
 パックとそれを模擬した経時変化確認試験では圧縮ベントナイトブロック表面全面が鉄（模擬オ  
 ーパック）と接触するので、本試験においても、センサー部以外のアクリル製試験片表面の  
 曲面に鉄箔などを張り付けて鉄の腐食による溶存酸素を消費させる。

表 3.6.2-1 模擬地下水組成

成分	濃度 [ppm]	濃度 [M]
NaCl	5,200	$8.90 \times 10^{-2}$
NaHCO <sub>3</sub>	3,000	$3.60 \times 10^{-2}$
CaCl <sub>2</sub>	180	$1.60 \times 10^{-3}$
KCl	230	$3.10 \times 10^{-3}$
MgCl <sub>2</sub>	190	$2.00 \times 10^{-3}$
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	410	$6.60 \times 10^{-3}$



- 試験体：各種センサー設置（予め、試験体にセンサー類を設置）
- ベントナイトブロック：粉末ベントナイトと珪砂を 7 : 3 で混合し圧縮成形
- 混練ベントナイト：上記ブロックの原料を模擬地下水で混練したもの
- 珪砂：5号珪砂と3号珪砂を 1 : 1 で混合したもの
- 模擬地下水：組成を表 3.6.2-1 に示す。窒素バブリングし脱気して使用する。

図 3.6.2-1 試験セルの構成

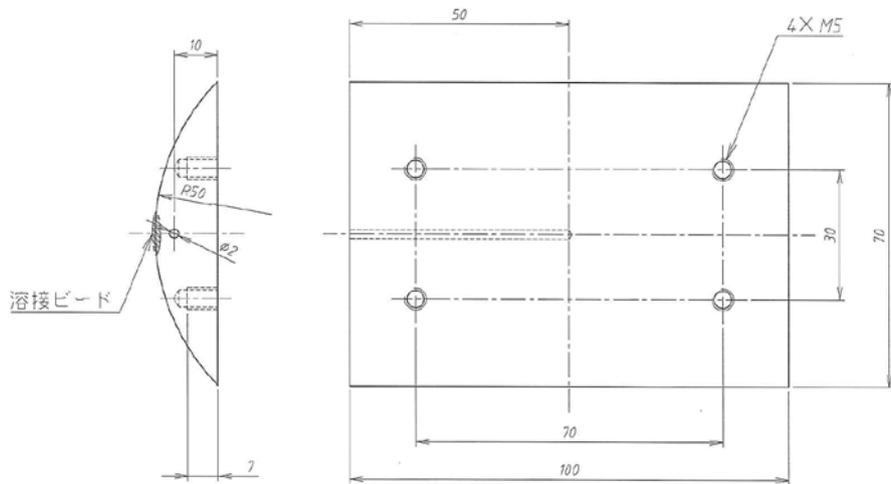


図 3.6.2-2 試験片形状（模擬オーバーパックから採取し鉄製試験片の例）

### 気密試験



図 3.6.2-3 気密試験状況

### (3) 試験条件、および、手順

図 3.6.2-4 に試験セルの給水系統を示す。今回の条件ではベントナイト中に含まれる酸素以外を系内に持ち込ませないため、模擬地下水・セル内の窒素パージができるようにした。また、セル内のベントナイトブロック・試験片は図 3.6.2-5 の様に設置した。

アクリル板にセンサーおよび重量減測定用の炭素鋼を設置する。設置後アクリル板を試験セルに絶縁ネジで固定する。図 3.6.2-6 の様に絶縁ネジは手締めでゴムワッシャの抵抗があるところまで一旦締め、その後六角レンチで3回転させ固定する。ボルトは4か所あるため均等に締める。配線等が必要な場合はこの時点でセル内の配線を済ませておく。

ベントナイトブロックを設置する。図 3.6.2-7 (a)の様に排水用の穴があるため、テフロンメッシュなどでふさぐ。ベントナイトブロック底面にあらかじめ 1mm 程度練ベントナイトを塗りつけ、図 3.6.2-7 (b)のようにセルに押し付けることで固定する。この時試験片との隙間ができないように注意する。ブロック設置後、図 3.6.2-7 (c)のようにセル内に珪砂を投入する。セルを振動させるなどして、ブロック側面の隙間にも十分珪砂を詰めること。その後図 3.6.2-7 (d)のようにフランジ面摺り切り一杯まで珪砂を敷き詰める。

ガスケットをフランジに設置、ステンレス製の蓋を取り付けボルトで固定する。容器内を密閉後、配管を取り付ける。配管の設置後、給水タンク内に模擬地下水を入れタンクも密閉する。この時、給水バルブがしまっていることを確認してからタンク内に注水する。試験装置・タンクの密閉後、窒素ガスによる地下水・セル内の脱気を行う。セル・地下水タンクの排気側バルブを開け、窒素ガスを導入する。1日以上窒素パージを行い、セル内、地下水中の酸素量を低減する。窒素導入バルブを閉じ、地下水給水バルブを開けセル内に注水する。本セルでは内部が目視できないため、セル側水封に地下水がオーバーフローした時点で給水バルブを閉じ、注水完了とする。注水完了後、水封側のバルブも閉じセル内を密閉する。

その後ベントナイトブロックが膨潤し、止水が完了するまで1ヶ月程度保持する。給水バルブを開いてもオーバーフローが確認できなければ、止水が完了したと判断する。その後は給水バルブを開状態に保持し、差圧で注水を続ける。

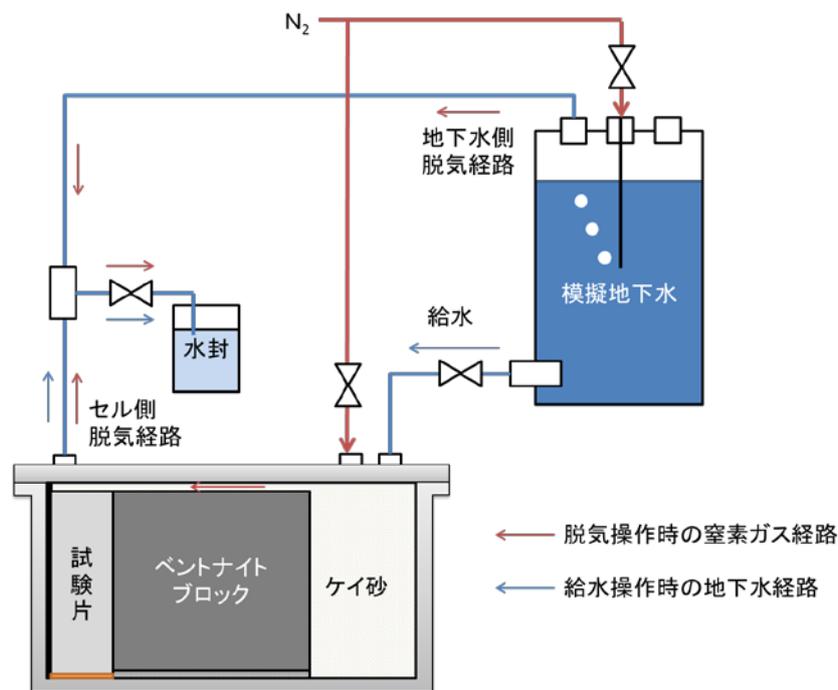


図 3.6.2-4 給水配管例

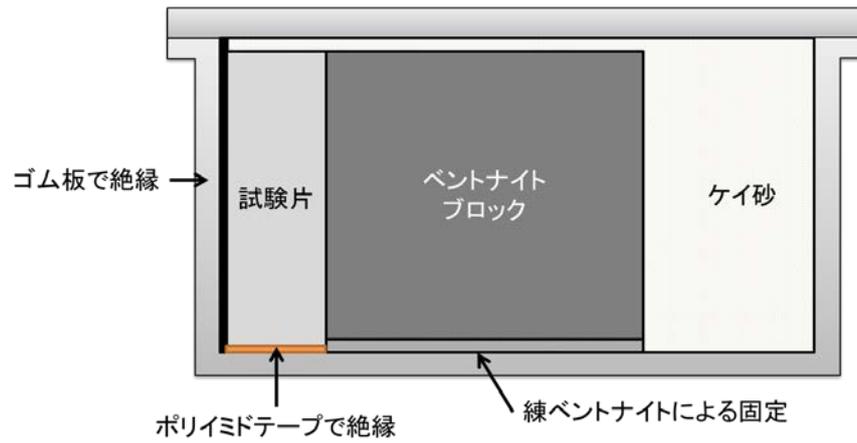


図 3.6.2-5 セル内のベントナイトブロック・試験片設置方法



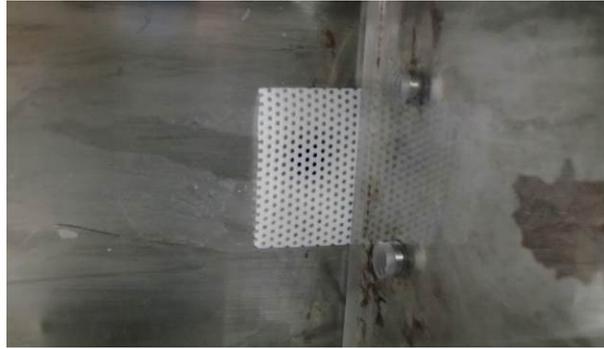
締める前

(ゴムワッシャは変形無)



締めた後

図 3.6.2-6 アクリル板固定用のネジ



(a) 排水穴の養生



(b) ベントナイトブロックの設置



(c) ベントナイトブロックの設置



(d) ベントナイトブロックの設置

図 3.6.2-7 試験セルの準備手順

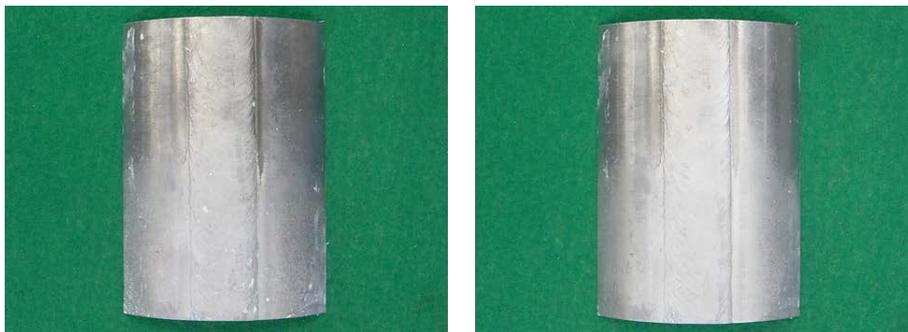
#### (4) 試験結果

同一環境下センサー性能確認試験（圧縮ベントナイト、完全脱気、止水無し、1,000h）後の試験片の状況を図 3.6.2-8 に示す。

試験片取出し状態のまま、および、水洗後の外観観察では明確な腐食は認められなかった。なお、止水が不十分であれば、軽微なベントナイトの付着に伴う着色が認められることがある。



(a) ベントナイトブロックの設置



取り出しまま

ブラシ洗浄後

(b) 試験片の状況

図 3.6.2-8 同一環境下センサー性能確認試験後の試験片の状況

## (5) ベントナイトの状況による腐食性の比較

(a)圧縮ベントナイト、止水無し：同一環境下センサー性能確認試験（2017年度）の条件、(b) 圧縮ベントナイト、止水有：経時変化確認試験の条件、および、(c)圧縮ベントナイト、事前含水：同一環境下センサー性能確認試験（2016年度）の条件（いずれも、25℃/加温せず）における1,000h経過後のベントナイトの状況による腐食性の比較を図 3.6.2-9 に示す。

(a)圧縮ベントナイト、止水無しの場合、試験セル組立後の N<sub>2</sub> パージで、試験片表面を含む空隙からは酸素が追い出されている。注水とともに越水して試験片、および、圧縮ベントナイトの表面は、脱気模擬地下水と接触する。試験片を取り出した時点では試験片表面に含水ベントナイトが付着しているが、炭素鋼製試験片には、顕著な腐食減肉は認められない。脱気模擬地下水（脱気中性水）中の炭素鋼の腐食速度は10 μm/年オーダーであるから、平均して1 μm/1,000年程度の腐食が見込まれる。このオーダーの腐食は、小型試験片の重量および、深さ/板厚変化、もしくは、同一環境下センサー性能確認試験で検討をした各種センサーなどで定量するものであって、かまぼこ型試験片の重量変化（約500gであるから1kgレンジの計測なので、0.01g単位で計測。実際、試験前後で0.28gの重量増が認められ、重量変化からの腐食量の算出は不能）、経時変化確認試験で用いたような接触式3次元計測の試験前後の座標の差異からの算出では、定量性が確保できないレベルである。

(b)圧縮ベントナイト、止水有の場合、試験片取出し視点で試験片の表面には明るいさび色のベントナイトの付着が認められた。圧縮ベントナイトブロックと容器との間を混練ベントナイトで止水しているため越水はしないものの、N<sub>2</sub> パージによっても試験片側の脱酸素が十分であるか否か、不明である。さらに、注水後に、止水のための混練ベントナイト経由で湿分が供給された可能性もある。一方、厚さ100mmの圧縮ベントナイトブロックを透過した模擬地下水が試験片面に到達するのは、経時変化確認試験の結果から約3,000h後であるから、1,000hの時点では圧縮ベントナイトそのものの腐食への影響は認められないと推測される。試験片御重量変化からの腐食の見積を表 3.6.2-2 に示すように、1,000hの試験による腐食減量は0.02gで、0.14 μmに相当する。なお、引き続き実施した酸洗浄の影響（0.34 μm）の方が大きい。

したがって、完璧な止水状態が成立しない場合以外では、止水有の方が、とりあえずの腐食環境が整うケースが考えられる。しかしながら、水分の供給量は少なく、炭素鋼が深さ方向に有為な腐食をすることは無く、変色のみで留まる。

(c)圧縮ベントナイト、事前含水の場合、圧縮ベントナイトブロックを大気中（バケツ内）で模擬地下水に長期間浸漬して十分に含水させたもの（含水率：25%程度）を10cm角に切断したものを試験片とともに容器に詰めている。また、設置の時点で試験片全面にすきま無く含水ベントナイトが接触する。したがって、試験開始と同時に酸素を含む湿ったベントナイトと接するため、腐食環境に置かれる。

試験片全体としては顕著な腐食は認められていないが、幾つかの局所的な凹みが確認された。2016年度に実施した試験では数百時間オーダーで50 μm厚さの箔状のセンサーを用いたレジストメトリー法、直流電位差法での腐食計測が、箔の局所的な溶出によって測定が終了していることから、この系では、腐食の局在化傾向があることが確認された。

表 3.6.2-2 試験片の重量変化からの腐食の見積

圧縮ベントナイト 止水有	重量	重量変化	試験片表面積	減肉量
	m(g)	$\Delta m(g)$	( $cm^2$ )	( $\mu m$ )
試験前	543.42	-	186.40	-
洗浄後	543.40	0.02	-	0.14
酸洗後	543.35	0.05	-	0.34



(a) 圧縮ベントナイト  
止水無し

(b) 圧縮ベントナイト  
止水有

(c) 圧縮ベントナイト  
事前含水

図 3.6.2-9 ベントナイトの状況による腐食性の比較 (1,000h)

### 3.6.3 3電極式センサー

図 3.6.3-1 に示す標準型の 3 電極式センサーの周りのステンレス製ガイドを取り外し、 $\phi 8\text{mm}$  の 3 式の電極を固定しているテフロン製の筒部を試験セルの亚克力板に丸穴を開けて通して、面一になるように接着剤で固定した。計測・記録は地下、および、地上試験で実績のある装置と同一仕様の計測・記録器を用いた。

3 電極式センサーによる腐食速度 ( $\text{CR}_{3\text{EM}}$ ) の測定結果から、試験開始直後から  $0.05\text{mm/y}$  以下の低速度を示していたが、 $150\text{h}$  を超えた時点から  $\text{CR}_{3\text{EM}}$  が  $\sim 1\text{mm/y}$  程度まで大きな値を示すデータも出現して、個々の  $\text{CR}_{3\text{EM}}$  は結構な幅を示すようになった。すなわち、同一環境下センサー確認試験評価用の 3 電極式センサー部は  $150\text{h}$  後に腐食環境が整い、 $\sim 1\text{mm/y}$  程度までの速度で腐食の進行を検出した。

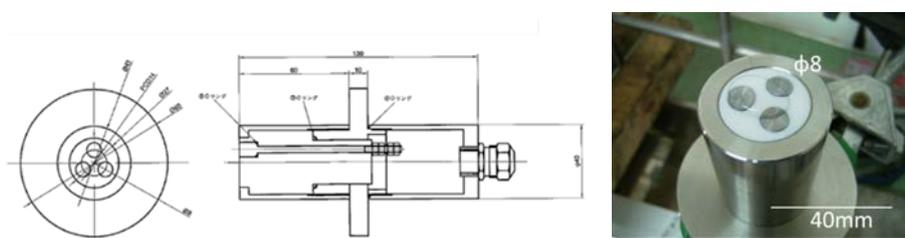


図 3.6.3-1 3 電極式センサーのセンサー部

### 3.6.4 薄膜レジストメトリー

#### (1) 成果の概要

2016 年度に遠隔での使用を想定した小型低コスト低消費電力の計測装置を開発し、SS 製模擬環境セル中の圧縮ベントナイト、事前含水に埋没した炭素鋼箔の腐食モニタリングに適用した。計測では、セル内脱気が不十分で 10 日前後で鋼箔試料が腐食断線したため、2017 年度は密閉性等を改善した試験環境（セル）にて再計測を行った。計測系は、DC 測定を用い、低抵抗化にともなう回路見直しとともに、回路、ファームウェアの簡略化を図った。ベントナイトブロックに対して十分な止水(経時変化確認試験と同等の状況)を施したところ、2016 年度の試験と同程度の速い腐食進行が認められた。

したがって、同一環境下センサー性能確認試験の仕様に合わせ、ベントナイトブロックと試料間にすきま確保 (1cm) することで注水時に試料表面は直ちに接水させた。また、 $\text{N}_2$  ガス流通による系内脱気強化を図った。また、レジストメトリー測定法を直流計測から交流計測に変更した。接水後 7 日および、規定の  $1,000\text{h}$  (40 日) 到達時点でも腐食進行(肉厚減少)は確認できず、炭素鋼の腐食性は非常に低く、レジストメトリー法による測定が非常に有効出ることを確認した。

#### (2) レジストメトリー計測用薄膜試験片

レジストメトリー計測用薄膜試験片は、図 3.6.4-1 に示す(株)シュリンクス製の電気抵抗式腐食計測器、SRCM-301 向けの標準仕様の試験片 (材料: SPCC 冷間圧延鋼板、膜厚 (板厚):  $200\ \mu\text{m}$ 、センサー部幅:  $0.2\text{mm}$ 、長さ:  $140\text{mm}$ 、四端子法により接触抵抗などキャンセルするための回路/端子構成) を採用した。

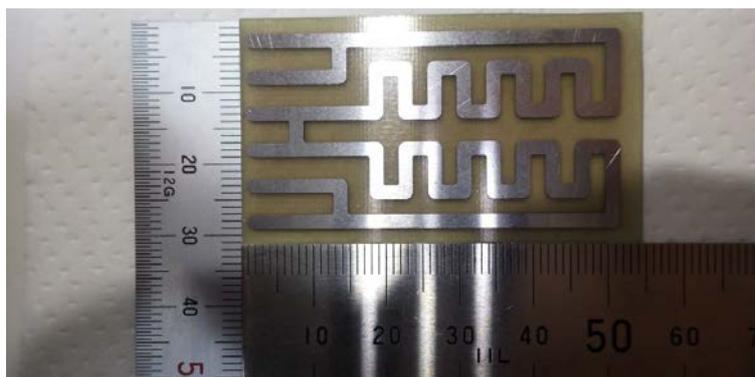


図 3.6.4-1 レジストメトリー計測用薄膜試験片の形状

### (3) 試験方法

箔厚さが 200  $\mu\text{m}$  となり電気抵抗が大幅に低下したため、試料に対し昨年度よりも大きな電流 (0.1 A) を流して有意の電圧応答を得るように回路の見直しを行った。2 枚の基板、計 4 つの箔試料に直流電流を印加して試料両端の電位差を測定した。多機能計測モジュール (Digilent 社製 Analog Discovery 2) を使用した。本製品は作動電圧入力、ファンクションジェネレータ、デジタル入出力、外部正負電源出力などを備え、PC に USB 接続して Javascript でプログラム制御できる。直流電流法では薄膜試料の電気抵抗が良好に計測できなかつたため、交流計測とした。印加交流は 330 Hz、100 mVp-p とした。

### (4) 試験状況

注水前のレジストメトリーの試験開始状況を図 3.6.4-2 に示す。同一環境下センサー性能確認試験の仕様に合わせた (b) 圧縮ベントナイト、止水無し、では、注水前の N<sub>2</sub> ガスパージによって空間は十分に脱酸素 (ただし、圧縮ベントナイトブロックが含有する酸素は別) され、注水とともに容器と圧縮ベントナイトブロックとの間から速やかに脱気された模擬地下水がセンサー表面に到達する。

レジストメトリー法による計測結果では、周期的凹凸は温度の日周期変化によるものと考えられる。接水後 1,000h (40 日) でも腐食進行 (肉厚減少) は確認できず、(a) 圧縮ベントナイト、止水無しの系では、炭素鋼の腐食性は非常に低く、レジストメトリー法による測定が非常に有効であることがわかった。成果を以下にまとめる。

- 地下埋設模擬環境セル中における厚さ 200 $\mu\text{m}$  の SPCC 薄膜試料の腐食挙動をレジストメトリーで評価した。厚膜化による試料抵抗の低下に伴いレジストメトリーの感度が低下したため、改善が必要である。
- セル内の脱酸素が不十分な系では腐食が進行し、その速度を in-situ 測定できた。しかしセル密閉度を上げて十分に脱酸素した系では腐食速度が低下し、計測期間 (44 日) 内で有意の腐食量は感度不足で測定できなかった。
- ベントナイトブロックからの酸素放出が確認できた。



(a) 圧縮ベントナイト、止水有                      (b) 圧縮ベントナイト、止水無し  
 図 3.6.4-2 レジストメトリーの試験開始状況（注水前）

### 3.6.5 電気抵抗/ポテンシャルドロップ法

#### (1) 成果の概要

2016 年度に採用した印加電流（±100mA）が高かったこと、感度の観点から初期膜厚（50 μm）が薄かったこと、および、事前含水ベントナイトの腐食性が高かったことが相まって、試験開始後 391h 後から急激に電位差が上昇し、430h 程度で断線により試験を終了した。2017 年度は、印加電流を最小限の小さな値（500 μA）とし、膜厚増加（200 μm）、および、圧縮ベントナイト、止水無しの条件で試験した。

給水直後の腐食速度は大きいものの時間の経過とともに減少し、約 10 日後に 0.01mm/y 以下となり、規定の 1,000h 経過時点での板厚減少は 1 μm 程度であった。圧縮ベントナイト、止水無しの系では、炭素鋼の腐食性は非常に低く、電気抵抗/ポテンシャルドロップ法による測定が非常に有効であることを確認した。

#### (2) 電気抵抗/ポテンシャルドロップ法用試験片

電気抵抗/ポテンシャルドロップ法用試験片は、レジストメトリー計測用薄膜試験片と共通化し、同一の(株)シュリンクス製の電気抵抗式腐食計測器、SRCM-301 向けの標準仕様の試験片を用いた。電気抵抗/ポテンシャルドロップ法用試験片を図 3.6.5-1 に示すように、腐食回路と温度補償回路に分け、温度補償回路側はエポキシ系樹脂で被覆して腐食を防止した。

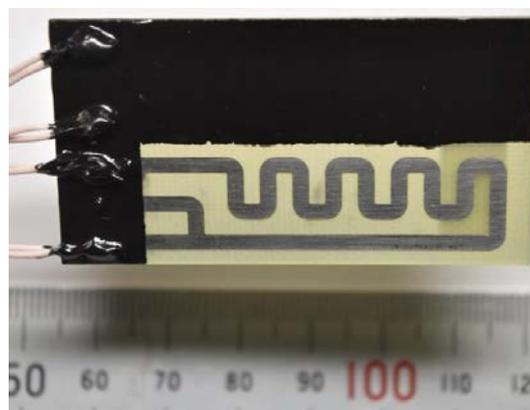


図 3.6.5-1 電気抵抗/ポテンシャルドロップ法用試験片

### (3) 試験方法

ソースメータ（電流印加）： $I = 500 \mu A$ 、±反転：10s ごと、ナノボルトメータ（電位差測定）は、A/D 積分時間：1PLC（0.02s）で移動平均無し、ロガー設定はサンプリング周期：0.1s とした。腐食回路で測定される電位差、 $V_{sen}$ 、および、温度補正回路で測定される電位差、 $V_{ref}$  から、炭素鋼経路の厚さ、 $D$  は、

$$D = \alpha \times V_{ref} / V_{sen} \times D_0$$

で求められる。ここで、実際の測定では、センサーの寸法誤差やリード線のはんだ付け部抵抗が原因で、試験開始直後の  $V_{ref} / V_{sen}$  は 1 となら（つまり試験開始直後の  $D$  は  $200 \mu m$  になら）ため、補正係数  $\alpha$  を導入して試験開始（模擬地下水の越水確認）から 2 分間の測定による  $D$  の平均値が  $200 \mu m$  になるように設定し、 $\alpha = 0.957$  とした。

生データを 0.1s 間隔、熱起電力補正データを 20s 間隔（±の 1 組から 1 つのデータを決定）で採取し、移動平均データを求め、最終的に 1/100 にデータを間引いて 2,000s（約 0.5h）を抽出した。

### (4) 試験状況

電気抵抗/ポテンシャルドロップ法による腐食減量、および、腐食速度の経過時間依存性から、給水直後の腐食速度は大きいものの時間の経過とともに減少し、約 10 日後に  $0.01 mm/y$  以下となり、規定の 1,000h 経過時点での板厚減少は  $1 \mu m$  程度であった。圧縮ベントナイト、止水無しの系では、炭素鋼の腐食性は非常に低く、電気抵抗/ポテンシャルドロップ法による測定が非常に有効であることを確認した。

## 3.6.6 インピーダンス（EIS）法

### (1) はじめに

平成 28 年度に、実験室レベルでの小型腐食試験装置を使い、ベントナイト中に埋め込んだプローブ電極により、電気化学インピーダンス法の原理に基づき、第 1 回目の炭素鋼の腐食モニタリングを開始し、平成 29 年度まで継続した。また、平成 29 年度には、同型腐食試験装置により、第 2 回目の腐食モニタリングを新規に実施した。第 1 回、第 2 回の腐食モニタリング結果を報告する。

### (2) 実験方法

腐食試験装置の図面と腐食モニタリングに使用したプローブ電極の模式図を、図 3.6.6-1 と図 3.6.6-2 にそれぞれ示す。腐食試験装置は、電極プローブ側からベントナイト層、珪砂層からなる。第 1 回モニタリングでは、ベントナイト層内は電極プローブ側近傍に乾いたベントナイトを珪砂側に湿潤ベントナイトを詰めた。第 2 回モニタリングでは、最初から腐食を進行させるようにプローブ側近傍にも湿潤ベントナイトを詰めた。

腐食モニタリングプローブとして、2枚の炭素鋼板（SM400B、5mm×10mm）をエポキシ樹脂中に2mmの間隔で平行に埋め込み、電極表面を800番のエメリー紙で研磨して使用した。このプローブ2個を図3.6.6-1の腐食試験装置の図面左端の壁面に固定した。このセルの2電極間に微小振幅の交流電圧を印加し、そのときの交流電流応答からインピーダンスを計測した。周波数範囲は10kHz～1mHz、交流振幅を10mVとした。測定にはSolatron製の電気化学インピーダンス測定システムを用いた。また、シュリンクス製の腐食モニターを用い、高周波数10kHz、低周波数10mHz（一部1mHz）の2点周波数のインピーダンスを1時間毎に計測した。

本報告書では、第1回腐食モニタリングに使用したプローブを#1プローブ、#2プローブ、第2回目の腐食モニタリングに使用したプローブを#3プローブ、#4プローブと呼ぶ。

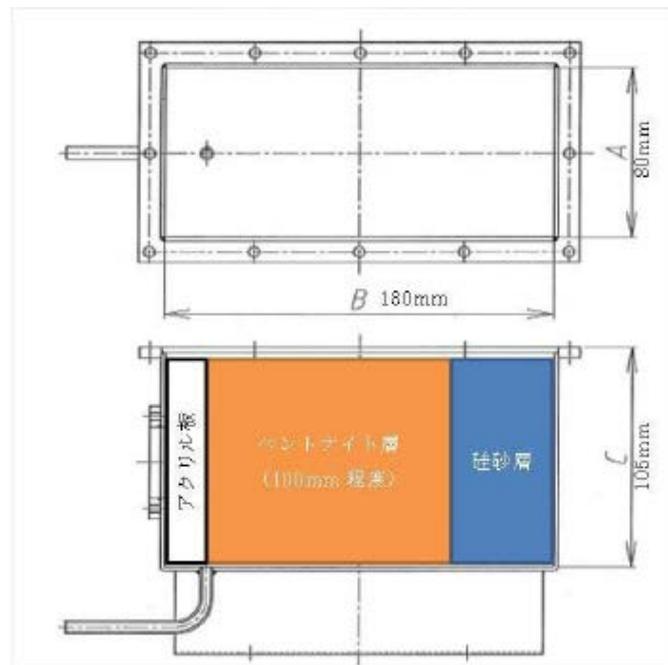


図 3.6.6-1 腐食試験装置

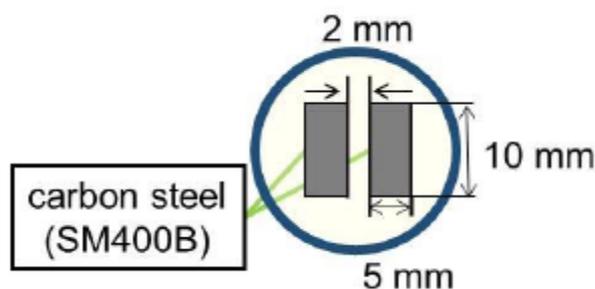


図 3.6.6-2 プローブ電極の模式図

### (3) 実験結果

#### 1) 第1回腐食モニタリング

ベントナイト中の炭素鋼の電気化学インピーダンス (EIS) 特性 (#1プローブ) を、図 3.6.6-3 と図 3.6.6-4 示す。図 3.6.6-3 が平成 28 年度に報告した 41 日までの初期データで、図 3.6.6-4

は 26 日、49 日そして 406 日のデータを示す。プローブ電極埋設後 26 日目で EIS 測定が可能となった。約 1 ヶ月後まで測定ができなかったのは、水がプローブ近傍までくるのに時間がかかったためと考えられる。

図 3.6.6-3 の # 1 プローブの EIS を見ると、電荷移動抵抗  $R_{ct}$  と容量  $C$  の並列回路に溶液抵抗  $R_s$  が直列に接続した最も単純な等価回路によりインピーダンス特性を説明することができる。高周波数領域に  $40\sim 50 \Omega\text{cm}^2$  程度の溶液抵抗、すなわちベントナイト中に含まれる間隙水の抵抗があらわれる。また、中間周波数領域には容量成分があらわれ、低周波数領域には  $10^4 \Omega\text{cm}^2$  程度の電荷移動抵抗があらわれている。一般的に電気二重層容量は数  $10 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  である。ここで測定される容量は、数  $\text{mF}/\text{cm}^2$  と、電気二重層容量の数 100 倍となることから、錆による疑似容量が含まれているものと思われる。また、経時変化をみると、高周波数の溶液抵抗は時間変化しないが、低周波数の電荷移動抵抗は時間とともに増加する傾向を示す。電荷移動抵抗の逆数は腐食速度の指標となることから、これは腐食速度が時間とともに小さくなることを意味している。図 3.6.6-4 を見ると、406 日のインピーダンス特性も初期のものと同様であることがわかる。

図 3.6.6-5、図 3.6.6-6 には、# 2 プローブで測定された EIS 特性である。図 3.6.6-5 が初期 41 日まで、図 3.6.6-6 が 406 日までのデータである。明らかに # 1 プローブと特性が異なる。本来、両プローブは同じ EIS を示すはずであるが、高周波数領域を除き、全体的にインピーダンスの絶対値は # 1 プローブに比べ小さく、位相の変化も明確な最小値を示さず、周波数の減少とともに徐々に増加している。高周波数の溶液抵抗は両プローブほぼ同じ値をとることから、水の入り方には違いがないものと思われる。

図 3.6.6-7 は 2 電極式セルの 2 電極間の電位差のプロットである。この図から、# 1 プローブは初期に多少大きい期間があるが、ほぼ数  $\text{mV}$  以内の電位差となっている。一方、# 2 プローブの電位差は最大で  $80\text{mV}$  程度生じている。同じ炭素鋼でもまったく同じように腐食が進行することは稀であり、2 つの電極にはある程度の電位差が存在することは十分考えられるが  $80\text{mV}$  はかなり大きい電位差である。# 2 プローブには大きな直流電流が流れた状態で EIS 測定をしていることになる。EIS 測定に印加する交流電圧振幅は  $10\text{mV}$  であることから、この電位差はかなり大きいことがわかる。直流成分が大きいことが EIS 特性にどのような影響を及ぼすかは明確ではないが、これも両プローブ電極の挙動の違いの原因になっている可能性がある。我々の過去のベントナイト中での EIS 測定の経験から、# 1 プローブの結果が典型的な EIS 特性と考えられる。

溶液抵抗および電荷移動抵抗の逆数（腐食速度の指標）を EIS 測定データから読み取り、図 3.6.6-8、図 3.6.6-9 にプロットした。ここでは  $10\text{kHz}$  のインピーダンス ( $Z_{10\text{kHz}}$ ) を溶液抵抗、 $1\text{mHz}$  のインピーダンス ( $Z_{1\text{mHz}}$ ) を電荷移動抵抗とした。溶液抵抗 (図 6 41) は初期徐々に水の侵入により減少し、# 1 では約 100 日で一定となるが、# 2 では絶対値は # 1 と同程度であるが、不安定な挙動をとる。また腐食速度の指標である  $1/Z_{1\text{mHz}}$  は、# 1、# 2 ともに時間とともに減少するが、# 1 のほうが早く減少した。以上より、# 2 プローブは電極に問題があるか、あるいは 2 電極間で腐食環境（腐食状況）が異なる可能性があり、以降は # 1 プローブの結果を中心に考察する。

平成 28 年度の報告書では、 $1\text{mHz}$  のインピーダンスを電荷移動抵抗とし、その逆数を腐食速度の指標としたが、図 3.6.6-5、図 3.6.6-6 の EIS からわかるように、 $1\text{mHz}$  の周波数のインピー

ダンスでは電荷移動抵抗を過小評価することになる。言い換えると、腐食速度を過大評価することになる。正確な電荷移動抵抗を決定するためには、最適な等価回路を選択し、得られた EIS をカーブフィッティングすることにより電荷移動抵抗を決定することが望ましい。炭素鋼／ベントナイト界面の等価回路を、図 3.6.6-10 に示す。得られた EIS 特性から、電荷移動抵抗  $R_{ct}$ 、溶液抵抗  $R_s$  および CPE (Constant Phase Element) からなる等価回路が最適と考えられる。ここで CPE は電気二重層容量の代わりにフィッティングの際に用いられるパラメータである。図 3.6.6-10 には # 1 プローブで得られた 26 日、49 日、406 日の実験値 (シンボル) とフィッティング (実線) 結果である。フィッティング結果を見ると、等価回路が妥当であることがわかる。フィッティングにより求めた電荷移動抵抗  $R_{ct}$  とその逆数  $1/R_{ct}$  を時間に対してプロットしたのが図 3.6.6-11 である。腐食速度は約 25 日から測定可能になり、30 日まで減少する傾向を示し、その後、ほぼ一定となった。この一定値は約  $1/R_{ct} = 1.5 \times 10^{-5} \Omega^{-1} \text{cm}^{-2}$  であり、Stern-Geary 式 ( $i_{corr} = k/R_{ct}$ ,  $k: 0.020\text{V}$ ) から腐食電流密度  $i_{corr}$  を求めると、約  $0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  となり、年間の腐食減肉量に換算すると約  $3 \mu\text{m}/\text{year}$  となる。この腐食速度は、我々の研究室でこれまでに測定したベントナイト中 (室温) での最小腐食速度 (約  $2 \mu\text{m}/\text{year}$ ) とほぼ一致し、水との反応に移行し、腐食が定常状態になったと考えられる。平成 28 年度の報告書の時点では 41 日経過だったので、まだ溶存酸素と反応が続いていた。

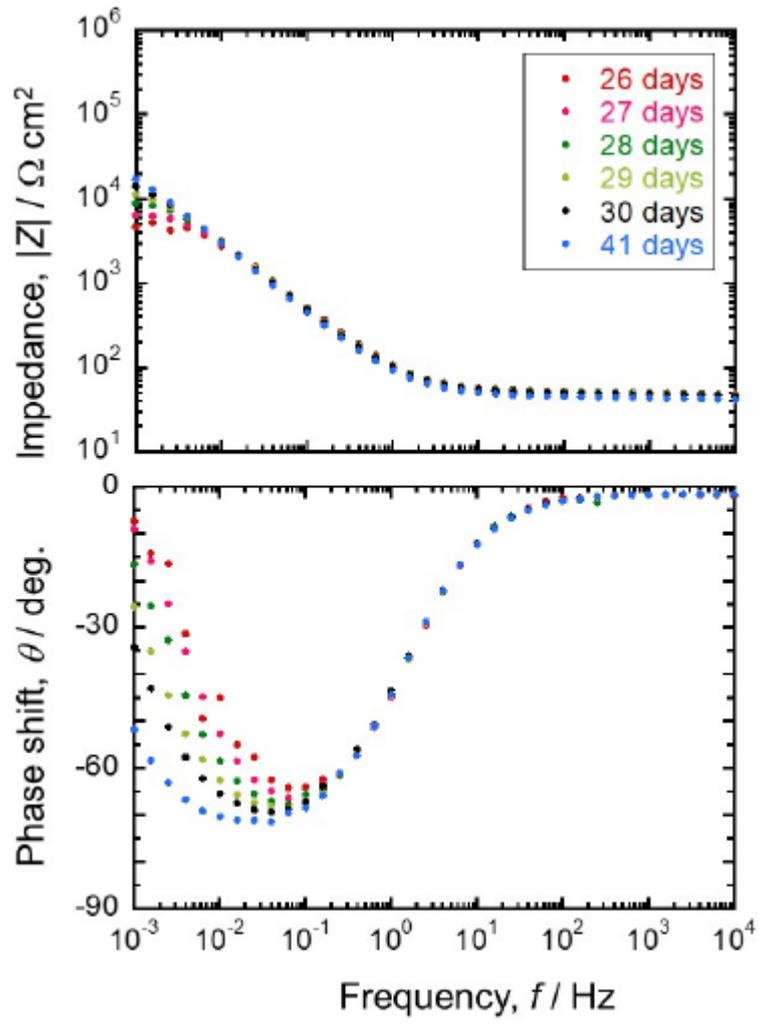


図 3.6.6-3 #1プローブで測定された EIS (41 日まで)

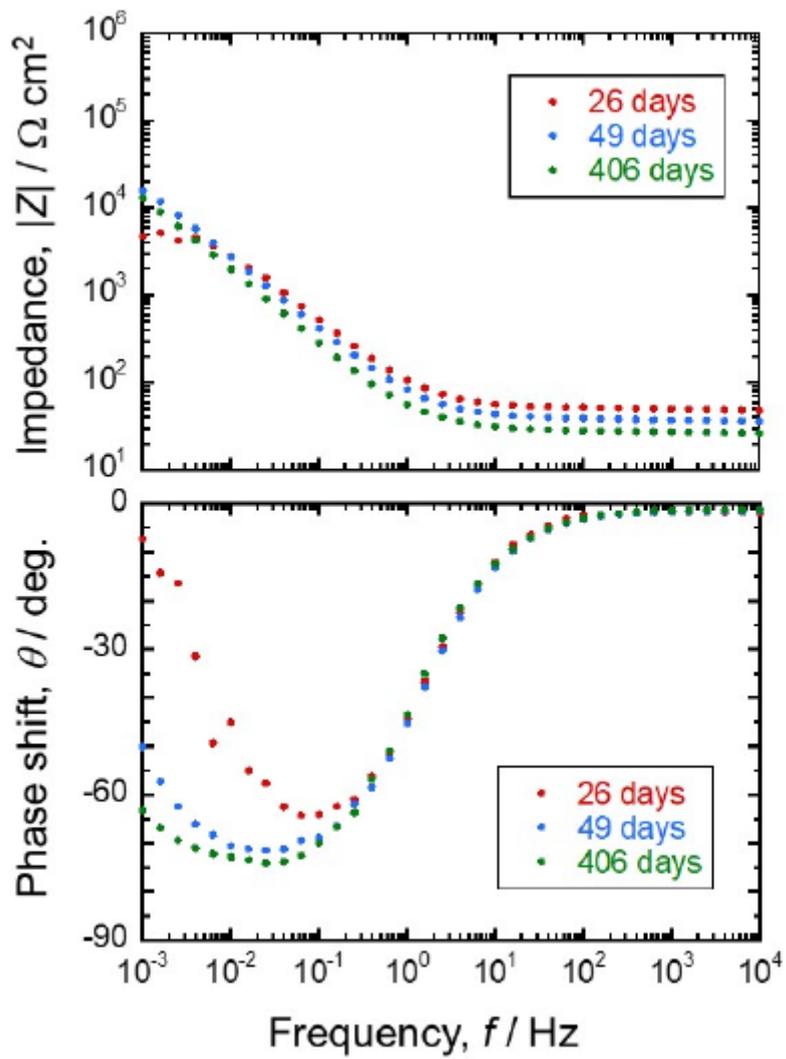


図 3.6.6-4 #1 プローブで測定された EIS (406 日まで)

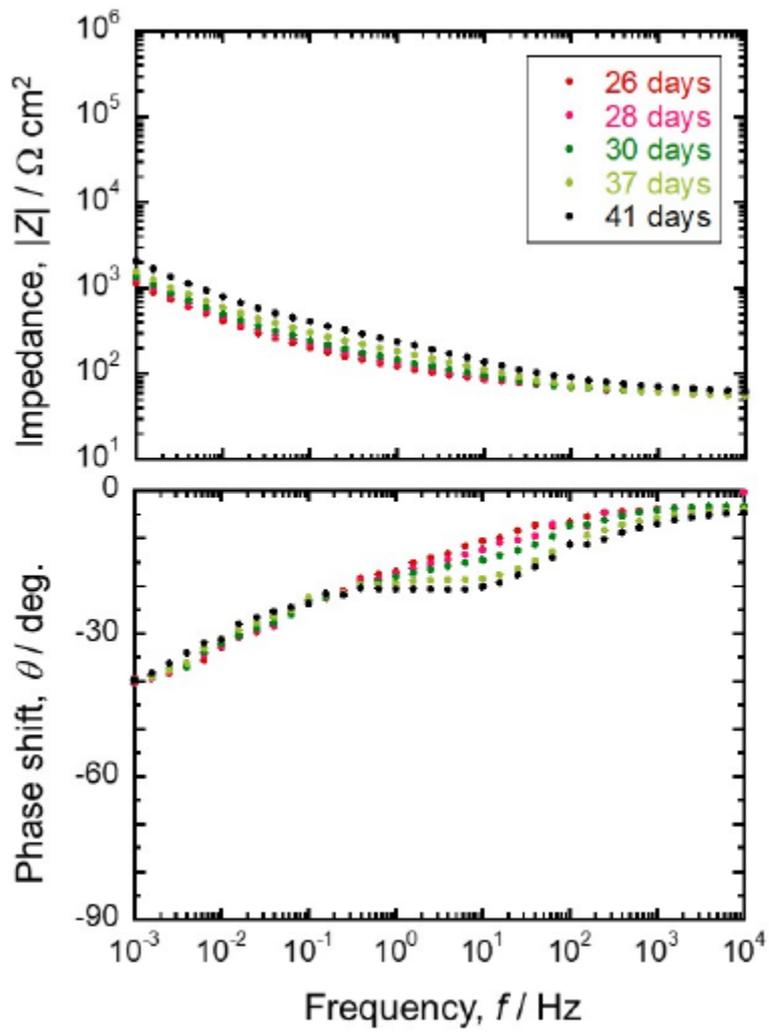


図 3.6.6-5 #2プローブで測定された EIS (41 日まで)

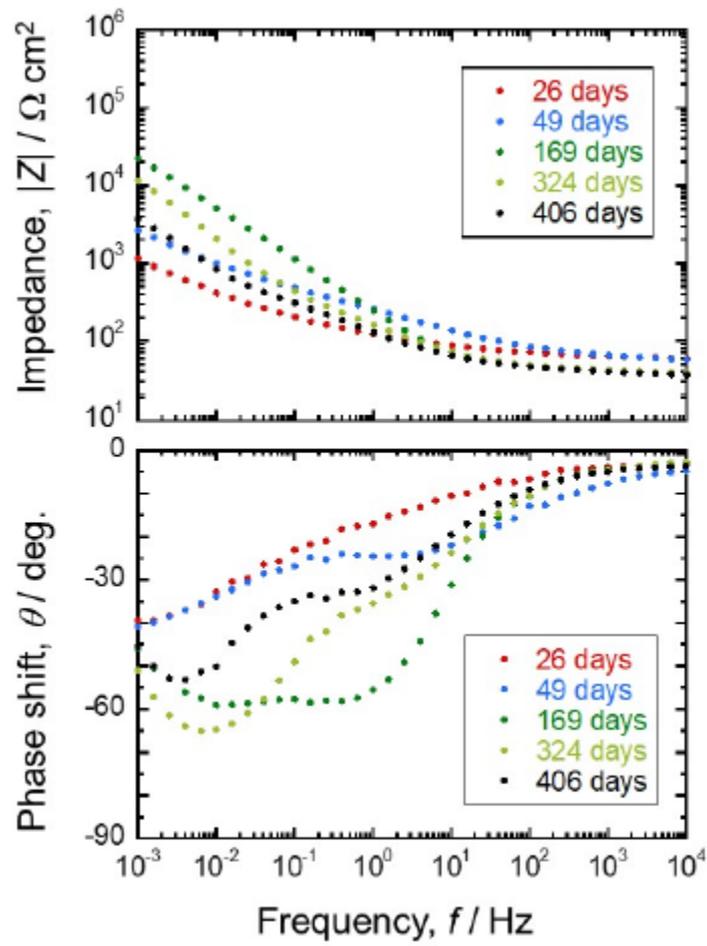


図 3.6.6-6 #2 プロブで測定された EIS (406 日まで)

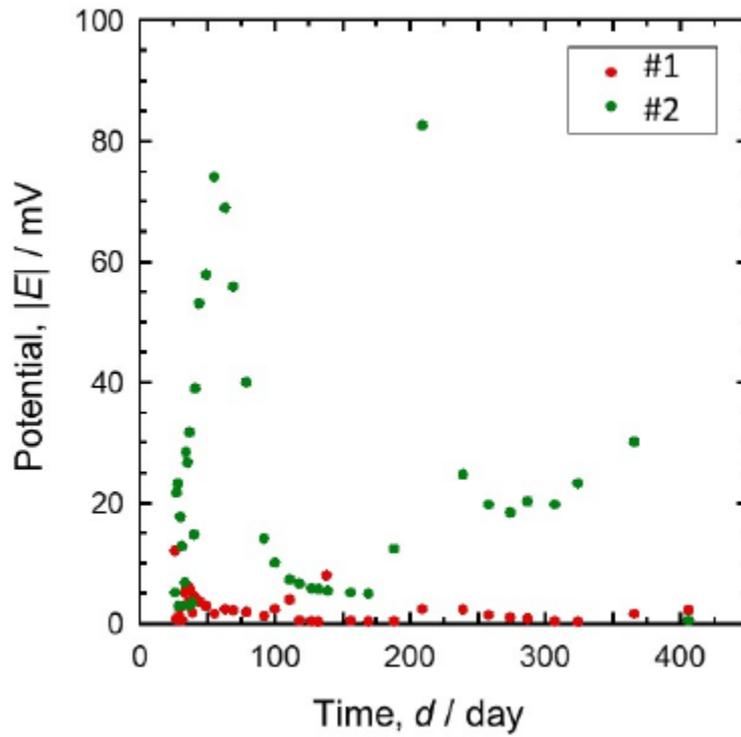


図 3.6.6-7 プローブの2電極間の電位差

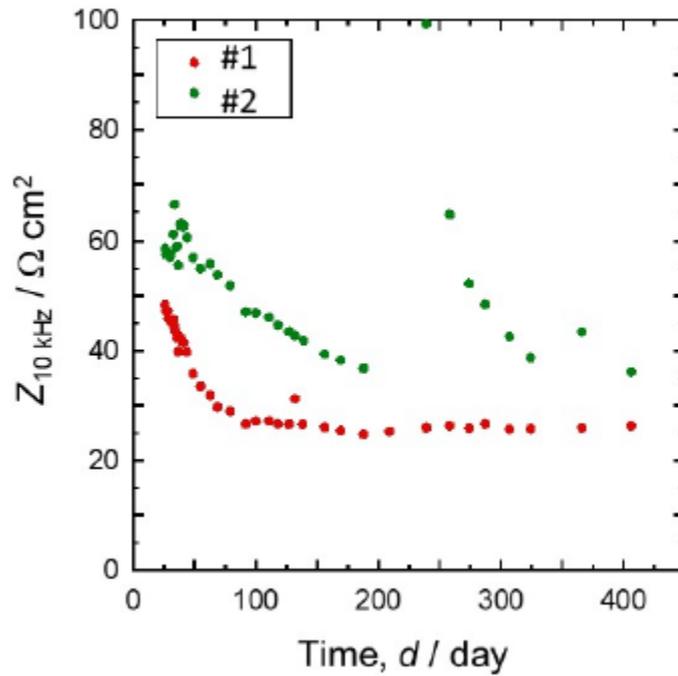


図 3.6.6-8 10kHz のインピーダンス変化

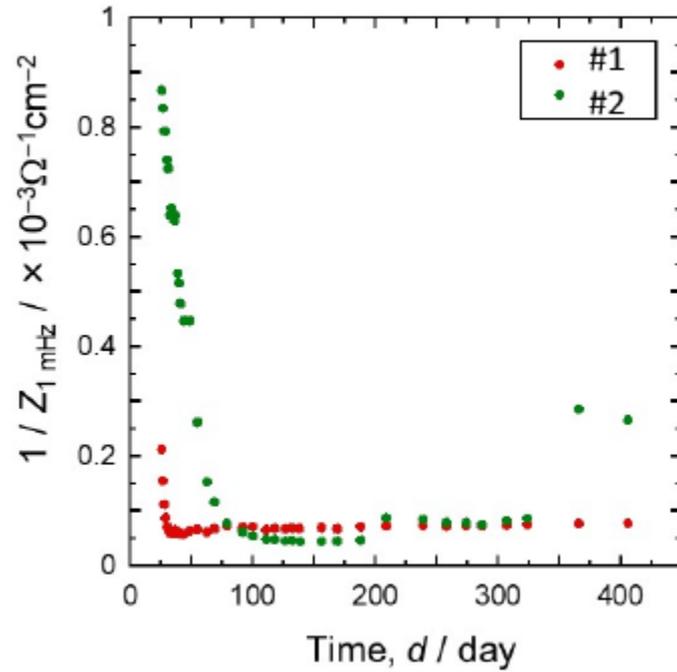


図 3.6.6-9 1mHz のインピーダンスの逆数の経時変化

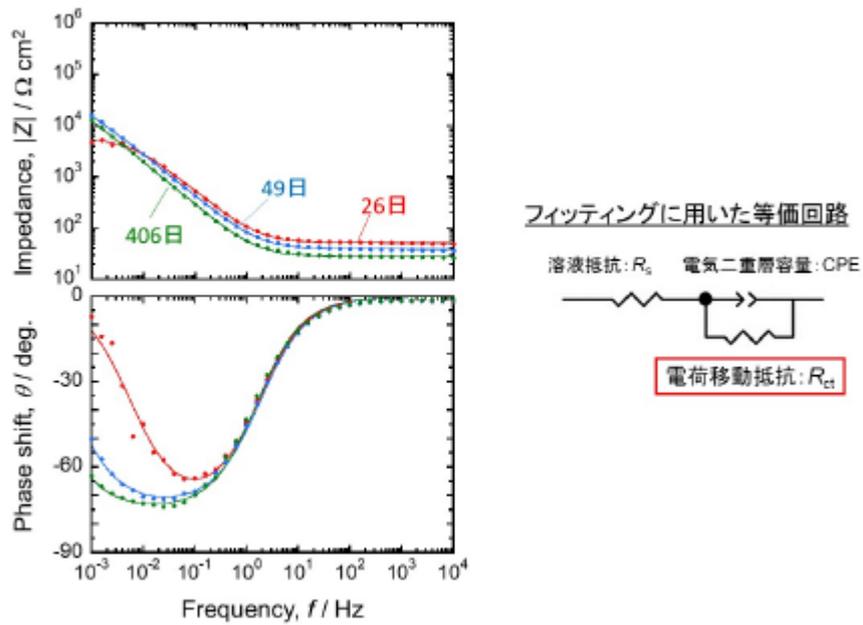


図 3.6.6-10 #1 プロブの EIS と等価回路の (右図) によるフィッティング結果

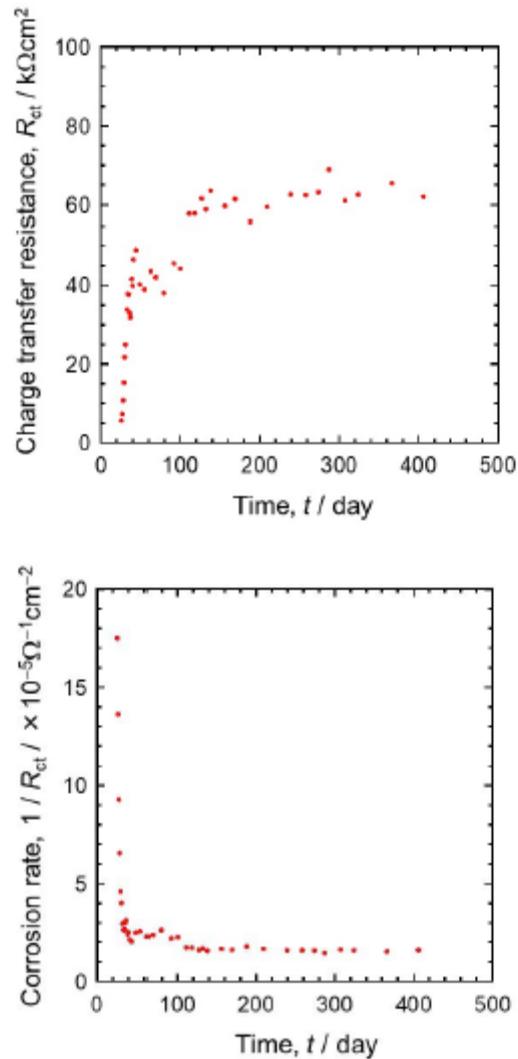


図 3.6.6-11 カーブフィッティングにより決定した電荷移動抵抗  $R_{ct}$  とその逆数の経時変化#1 プローブ

## 2) 第2回腐食モニタリング

同様な腐食装置（図 3.6.6-1）と炭素鋼のプローブ（図 3.6.6-2）により、モニタリングの再現性を確認するため、平成 29 年度に再度、腐食モニタリングを実施した。図 3.6.6-12 および図 3.6.6-13 は # 3 および # 4 プローブにより測定された EIS である。両プローブともに、時定数 1 の典型的なインピーダンス特性を示すことがわかる。これらの結果は第 1 回目のモニタリングにおける # 1 プローブの結果とよく一致している。腐食速度に関する低周波数のインピーダンスは時間の経過とともに増加している様子がとらえられている。また、図 3.6.6-14 には # 3 と # 4 のプローブの比較を示す。第 1 回モニタリングと異なり、第 2 回では両プローブの結果がほぼ一致していることがわかる。両プローブの 2 電極間の電位差を見ると（図 3.6.6-15）、初期を除き、ほぼ 5mV 以内であることがわかる。すなわち、すべての電極が同じように腐食が進行していることを表している。以上より、両電極間の電位差が小さいこと（<5mV）が信頼性の高いモニタリ

ングの条件と言える。

次に、腐食モニター（シュリンクス製）と電気化学測定装置（ソーラトロン製）の違いについて示したのが図 3.6.6-16 である。腐食モニターは高周波数（本実験では 10kHz）と低周波数（本実験では 10mHz）の 2 点周波数を連続的に自動測定し、腐食速度を監視する装置である。図 3.6.6-16 から、高周波数の 10kHz の変化（溶液抵抗）は腐食モニターと電気化学装置でよく一致する。一方、低周波数は腐食モニターが 10mHz 設定であったため、電気化学装置（1mHz）より小さな値をとっている。途中で腐食モニターの周波数を 1mHz に切り替えると両者はほぼ同様な値を示した。前述したように、電気化学装置により全周波数のインピーダンスを測定し、得られたデータを等価回路によりフィッティングして正確な腐食速度を推定する方法が推奨されるが、環境変化等による腐食速度の変化をモニタリングするだけなら腐食モニターは自動計測が可能なことから有効な手段と言える。

#3 と #4 プローブで得られた結果について、図 3.6.6-10 の等価回路によりカーブフィッティングした結果を図 3.6.6-17、図 3.6.6-18 に示す。測定点がシンボル、フィッティング結果が実線で表されている。フィッティングにより決定した  $R_{ct}$  の逆数をプロットしたのが図 3.6.6-19 である。第 2 回モニタリングでは、水分を含むベントナイトを導入したため、初日から測定が可能であった。それに伴い、腐食速度の急激な減少（酸素消費による）は約 5 日で終了し、その後、腐食速度は緩やかに減少し、60 日の時点でも僅かに減少し続けている。ただし、60 日後の  $1/R_{ct}$  はすでに  $2 \times 10^{-5} \Omega^{-1} \text{cm}^{-2}$  まで減少しており、第 1 回目のモニタリングから考えると、60 日でほぼ定常状態、すなわち水との反応に近づいていることがわかる。

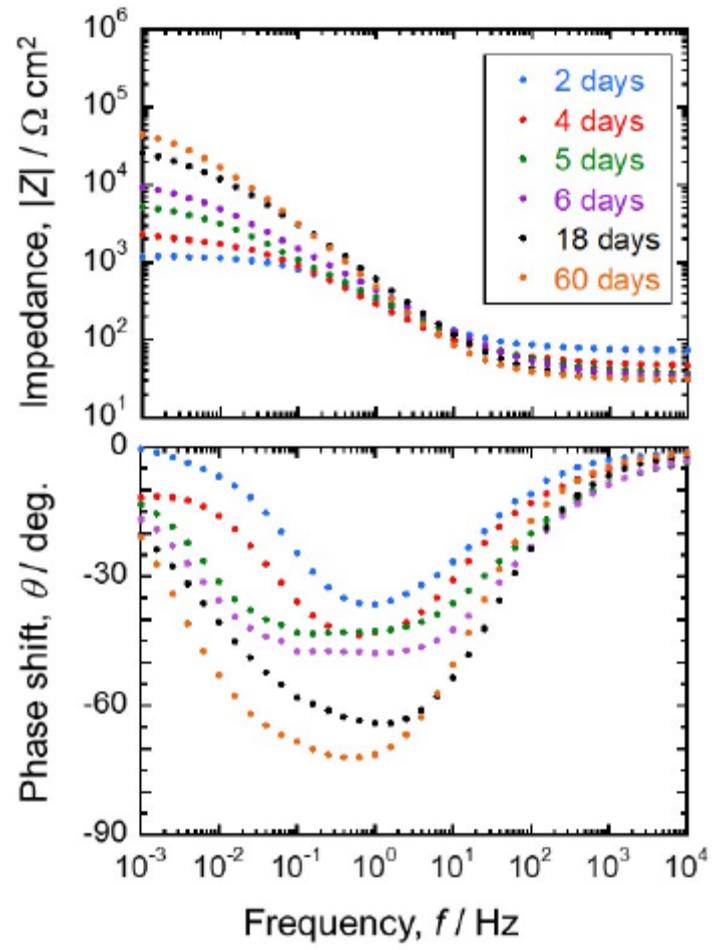


図 3.6.6-12 #3 プローブで測定された EIS

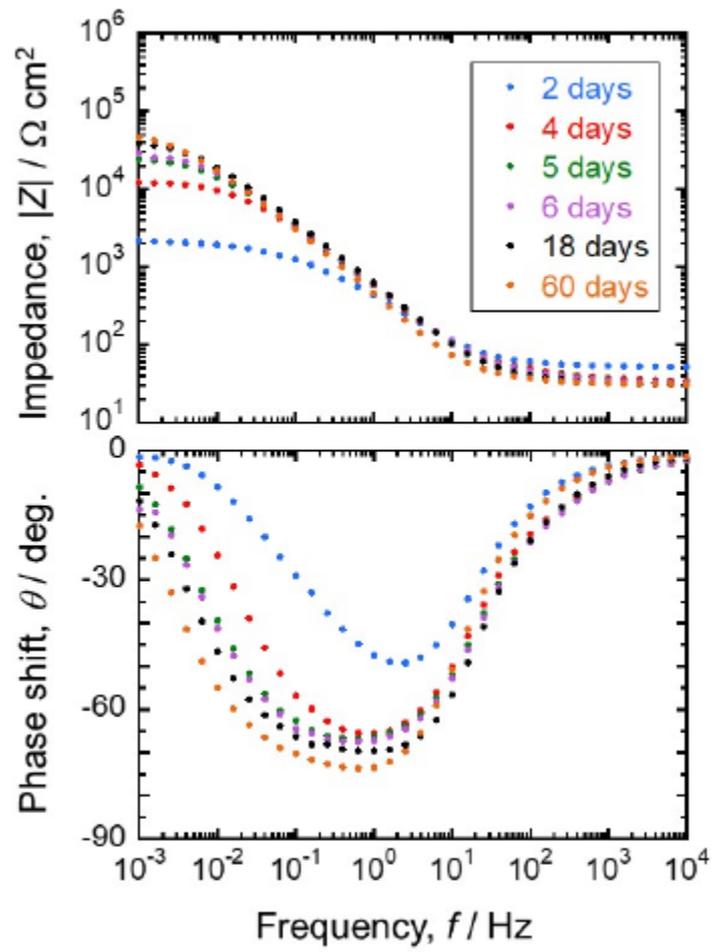


図 3.6.6-13 #4 プローブで測定された EIS

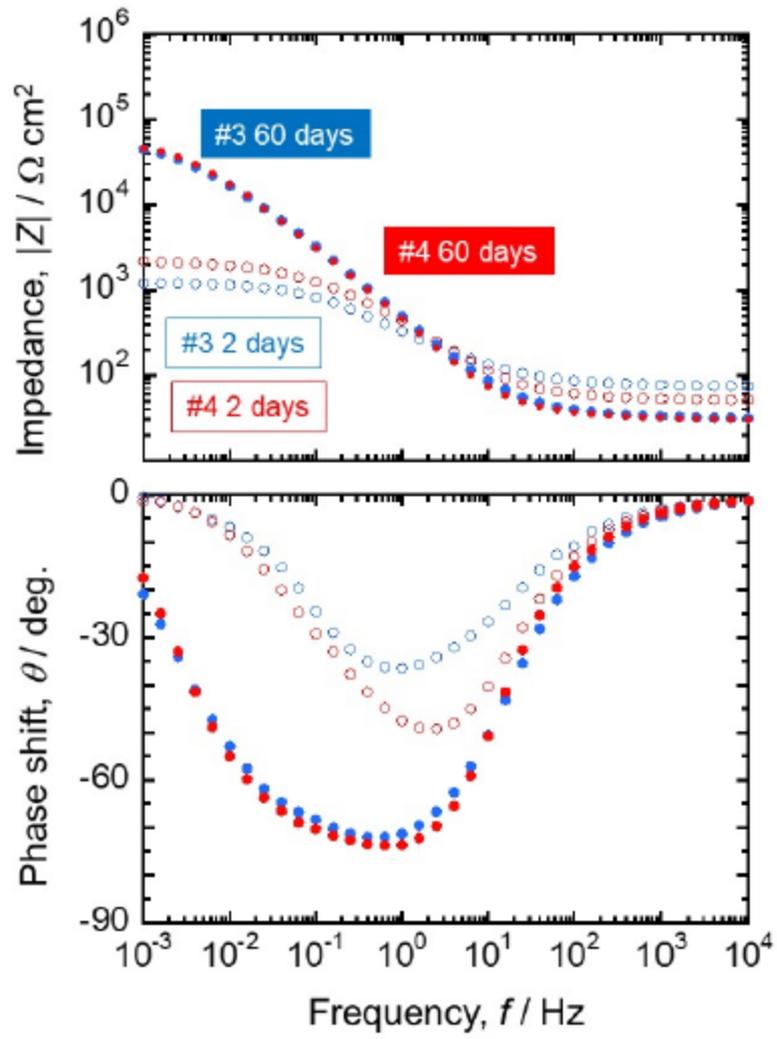


図 3.6.6-14 両プローブの EIS の比較

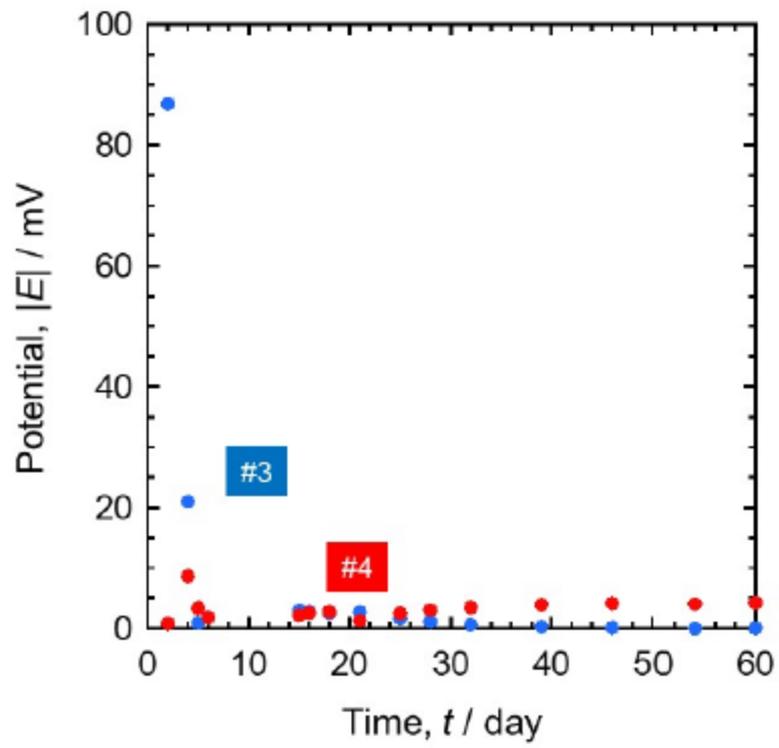


図 3.6.6-15 プローブの2電極間の電位差

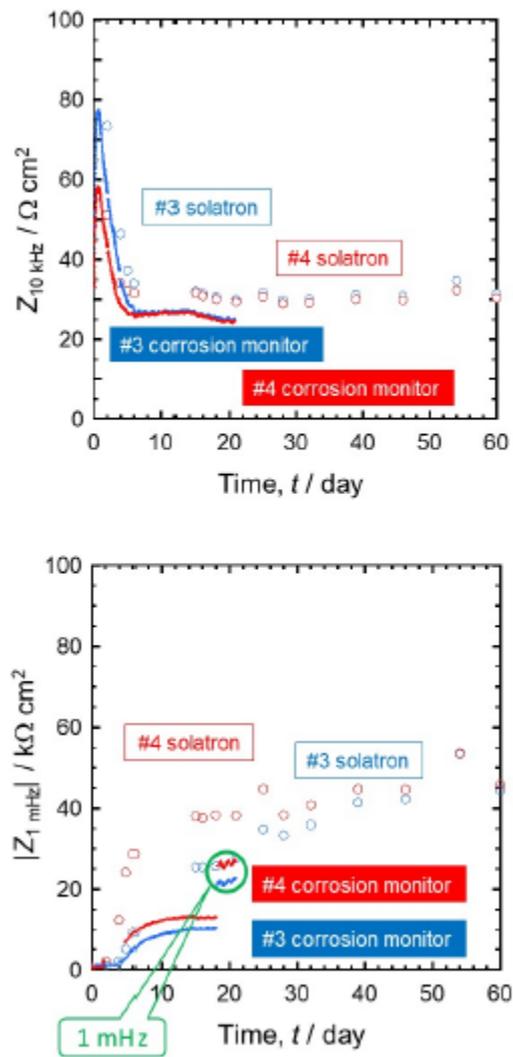


図 3.6.6-16 2電極式腐食モニター（10mHz,10kHz）と EIS 測定装置 solatron（1mHz）との比較

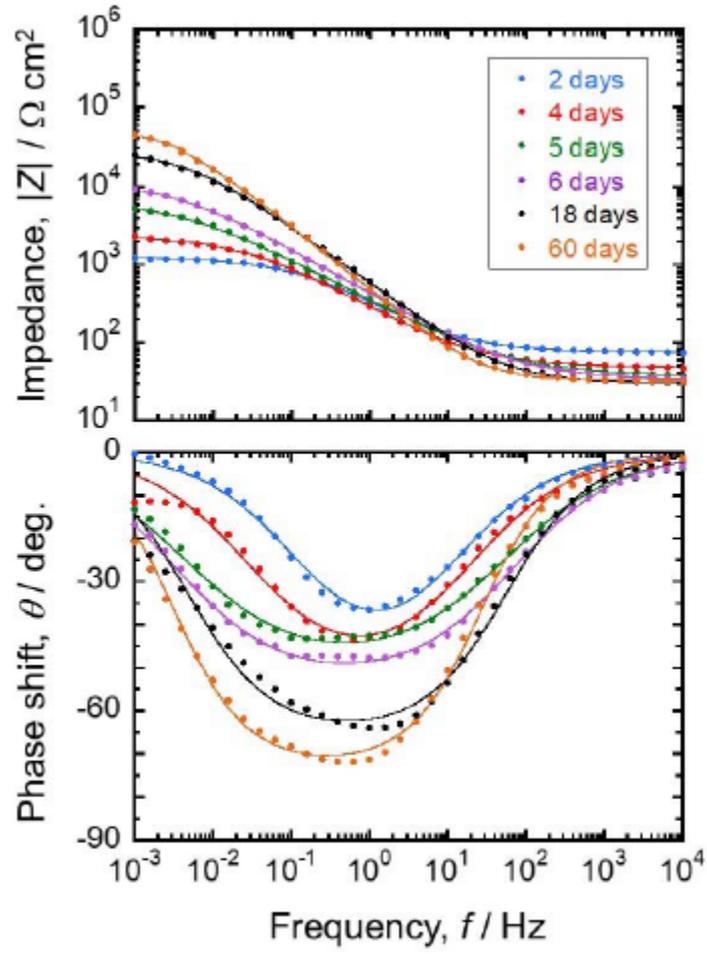


図 3.6.6-17 #3 プロブの EIS とフィッティング結果

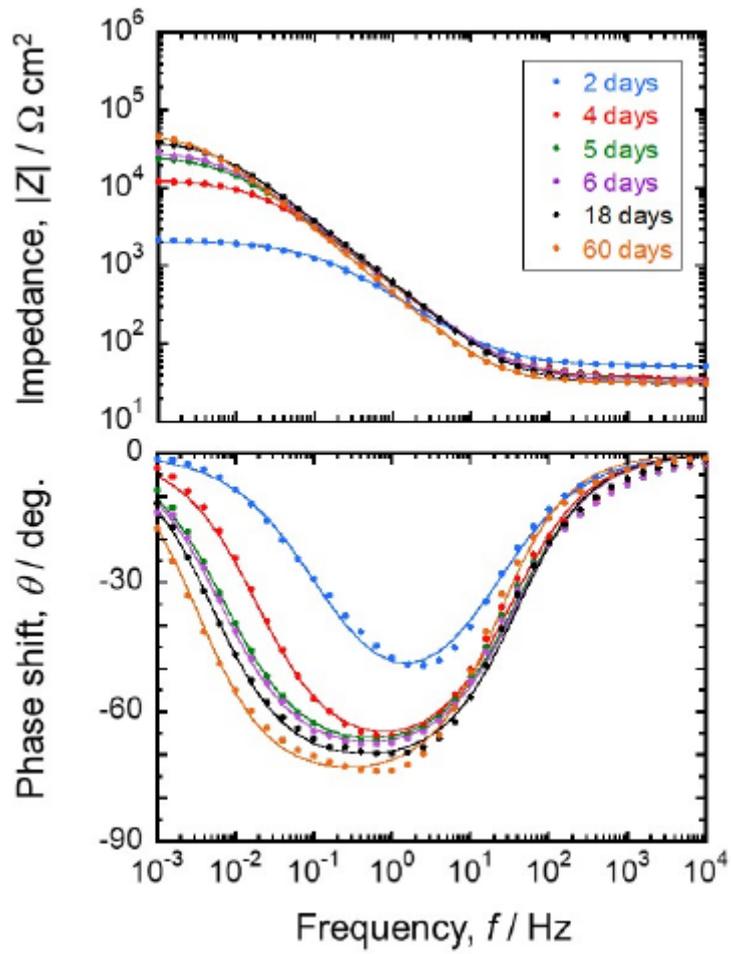


図 3.6.6-18 #4 プロブの EIS とフィッティング結果

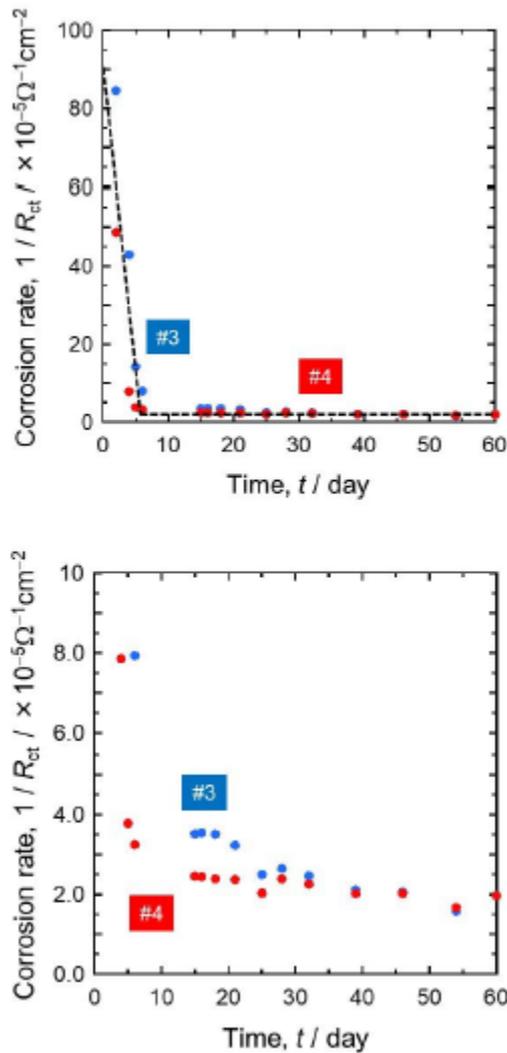


図 3.6.6-19 カーブフィッティングにより決定した電荷移動抵抗  $R_{ct}$  の逆数の経時変化  
(下の図は拡大)

#### (4) まとめ

第1回腐食モニタリングでは、プローブの不具合あるいは腐食装置の環境の不均一性から、2個のうち#2プローブは不安定な出力であったが、#1プローブで約400日の腐食モニタリングに成功した。また、第2回目の腐食モニタリングでは、最初から腐食が進行するような環境を設定したため、2個のプローブともにほぼ同様なモニタリング結果を示した。モニタリングの結果、炭素鋼の腐食速度は、腐食反応により酸素が消費され、炭素鋼表面から酸素拡散層が成長するため、時間とともに減少する。特に腐食開後5日間が腐食速度の減少は著しい。100日程度経過すると腐食は定常状態となり、水との腐食に移行する様子がモニタリングできた。電気化学インピーダンス法は、ベントナイト環境での炭素鋼の腐食モニタリング、特に、埋設初期の酸素消費型腐食から水素発生型腐食への移行をモニタリングするのに適した方法である。

### 3.6.7 まとめ

薄膜レジストメトリー法と電気抵抗/ポテンシャルドロップ法は、試験体に一定の電流を付与した時の電圧の変化で試験体側の電気抵抗の変化を検出する方法で、原理は同じである。薄膜レジストメトリー法は、主として微量な全面腐食を精度良く検出する方法として発展をしてきており、薄膜であることが感度上重要と考えられている。電位抵抗/ポテンシャルドロップ法は、SCC き裂の進展など局所的な変化を精度良く検出する方法として発展してきており、CT 試験片など大きな体積を持つ試験体への適用が多く、より、広範囲の試験体、および、環境系での展開が容易である。いずれも、試験片の環境に接する面全体の減肉による電気抵抗の変化を検出しているため、1 か所でも溶断されると計測が終了するため、試験片の厚さなどの初期設定の選択が重要である。

3 電極式腐食モニタリング法は、1 本の電極を共用して1 対の試験片間の短絡電流、および、もう1 対の試験片間の浸漬電位の時系列データを取得し、両者の標準偏差の商からノイズ抵抗を算出しているため、外部からの電圧付与が無い。これに対し、インピーダンス法は、1 対の電極間に正弦波の電圧を付与した時の応答からインピーダンスを算出しており、いずれも、電気化学挙動を直接捉える方法である。防爆などの観点などを嫌う場合、および、化学プラントなど実環境での長期にわたる挙動の追跡には3 電極式、高精度での計測を優先すればインピーダンス法が有利として、それぞれ、計測法が選択されている。

3 電極法による実プラントの挙動の追跡においては、腐食速度の精度には重きを置かず、むしろ、異常な腐食の生起を検出することに主眼を置いて発展してきた。したがって、検出限界以下の腐食速度を定める等の運用が必要となる。インピーダンス法は主に、実験室試験、および、その延長上でのフィールド測定が行われているが、化学プラントなど実環境での長期間の適用は、ほとんど、行われていない。

以上のことから、適用した4つの計測方法には、それぞれ特徴がある。緩衝材中での適用を考えた場合の各計測技術の特徴を表 3.6.7-1 にまとめた。計測可能範囲は、概ね  $1\mu\text{m/y}$  以上であり、1,000 年間で 10mm の腐食量の計測に相当する。また、各センサーとも特異な腐食挙動を検出できるような応答性は有していると考えられる。薄膜レジストメトリー法と電気抵抗/ポテンシャルドロップ法は、水が無い条件でも計測が可能であり、オーバーパックを定置した直後の計測も可能と考えられる。インピーダンス法は、電極間に電圧を印加し、応答を見るため、外乱ノイズの影響を受けにくい一方、外乱源になり得る。3 電極法では、実環境での計測ができるが、外乱影響を受けやすい特徴がある。3 電極法やインピーダンス法は、幌延 URL や地上工学規模試験、不均質試験に用い、年単位レベルではあるが、緩衝材中で使用した実績がある。薄膜レジストメトリー法は、感度と耐久性はトレードオフの関係になるため、計測期間や計測精度、検出限界等の条件を考慮した、ある特定期間のモニタリングに適していると考えられる。3 電極法やインピーダンス法は、実操業での異常値検出に適用できると思われる。

表 3.6.7-1 緩衝材中での各計測技術の評価まとめ

	計測条件	緩衝材中の性能				操作性など	実用例など
		計測範囲	応答性	外乱の影響	機械的耐久性		
薄膜レジストリ法	試験片の薄膜厚さに応じて、必要最低限の定電流を印加した時の電位応答から算出	>1 μm/y	○	水の有無に関わらず計測可能	○: 機器 △~×: センサ(薄膜のため感度とトレードオフ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・減肉のメカニズムに拠らず、均一に減肉する材料の減肉速度をを(平均的な減肉として)感度良く検出する方法で、薄膜の厚さが薄いほど感度が高まる</li> <li>・したがって、感度と寿命はトレードオフの関係</li> <li>・オームの法則に従っており、原理は極めてシンプルであるが、温度補償などを加えた工夫がされている</li> </ul>	感度と寿命がトレードオフの関係になるため、操業後の特定期間のモニタリングへの適用が考えられる
電気抵抗/ポテンシャルドロップ法	試験片の厚さ(最小断面部断面積)に応じて、必要最低限の定電流を印加した時の電位応答から算出	>1 μm/y (正味の検出限界が1 μmオーダー)	○	水の有無に関わらず計測可能	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・オームの法則を用いる点は薄膜レジストリ法と同様であるが、き裂進展など、局在化した劣化を感度良く、定量的に捉える手法として進歩してきた(最も減肉したところの減肉量/速度として算出)</li> <li>・試験片の厚さ(最小断面部断面積)に応じて、必要最低限の定電流を印加</li> <li>・き裂進展の分野では1 μm/500h程度(&gt;0.1 μm/y)で検出限界以下と扱うことが多く、通常は、試験後に破面のSEM観察などで実際のき裂の深さを実測して照合することがセットで発展</li> </ul>	原子カプラントで炉水を分岐させるループを設け、き裂進展試験片の状態監視を試験的に行っている例がある
インピーダンス法	1mHzでの電荷移動抵抗計測 ----- 10mHzでの電荷移動抵抗計測 ----- 全周波数計測	>1 μm/y	○	○ 電極間に電圧を印加し、応答を見るため、外乱ノイズの影響を受けにくい一方、外乱源になり得る。	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・適切な電荷移動抵抗を計測する周波数(1mHz,10mHz)を選ぶことで、in-situでの腐食速度の評価が可能。</li> <li>・溶液抵抗の計測により、水の有無等の把握が可能</li> <li>・全周波数計測は、精度および感度は高いが、in-situの腐食速度評価は難しい</li> </ul>	実操業での異常値検出に適用できると思われる
3電極法	同一材料の3本の電極間の1対の短絡電流、および1対の電位を連続計測	10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>0</sup> mm/y (テストクーポンとの参照・実証されている範囲)	○	× 外部からの電圧の印加が無い場合、実環境ままの計測ができる(外乱源にならない)一方、外乱影響を受けやすい。	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・基礎研究として3電極法(ASTM G199-09)の適用を考える例は無く、実機/実操業での異常値検出(操業管理)が目的。よって、低速度領域下での腐食速度の定量性を重視した計測ではない。</li> <li>・製品を購入・設置により、容易に計測可能</li> <li>・腐食速度の算出に用いる腐食係数の代表値が組み込まれているが、材料と溶液によって決まる係数であるから固定値ではない</li> <li>・センサにブロック(厚肉体)を用いるため、長寿命化が図れる</li> </ul>	化学プラントで状態監視に適用されており(操業変動による腐食性出現時のアラームなど)、実操業での異常値検出に適用できると思われる

### 3.7 まとめ

工学規模試験装置（幌延 URL、地上工学規模試験）を解体し、これまでセンサーで計測した結果及び解体後の腐食量を計測した結果を基に腐食挙動を評価したところ、幌延 URL における工学規模試験、地上における工学規模試験ともに、平均して数百～千 h で  $20\sim 30\ \mu\text{m}$  の非常にゆっくりとした速度で腐食が進展しており、JAEA および JNC が実施したベントナイト中の長期腐食試験の挙動とも一致した。

併せて、幌延 URL での腐食の経時的な変化を推定するために実施した経時変化試験及び、緩衝材の施工不良を想定した不均質試験の結果も踏まえて、複雑系での腐食挙動を調べた。3次元計測による溶接部と母材部の腐食量は、経時変化試験、不均質条件試験、地上工学規模試験、幌延 URL 工学規模試験で明確な差は認められなかった。また、不均質条件試験、地上工学規模試験、幌延 URL 工学規模試験において、平均的な腐食速度は概ね  $10\ \mu\text{m/y}$  程度となり、腐食は、H12 レポート I で想定されたシナリオに則り進行したと考えられる。しかしながら、一部の経時変化試験と幌延 URL 工学規模試験および地上試験の上部の緩衝材ブロックが付着した部分で、腐食の局在化が進展しており、部分的には、従来の知見と異なる現象も認められた。これらは、緩衝材とオーバーパックの接触の不均一性で、全面腐食が進行する部分と腐食が局在する部分が生じたと考えられることから、強制的に珪砂等で緩衝材とオーバーパックのクリアランスを埋めるような施工が、初期の腐食に有効な可能性がある。なお、長期的には緩衝材の膨潤が進み、オーバーパックと均一に付着するようになると、腐食は緩衝材中の地下水の拡散速度に依存するようになり、いずれは、全面腐食に移行すると思われる。

腐食計測技術の適用性として in-situ な腐食計測が実施可能な腐食計測技術について、地層処分事業への適用性の調査を実施した。適用した4つの計測方法には、それぞれ特徴があるが、緩衝材中での適用を考えた場合、計測可能範囲は概ね  $1\ \mu\text{m/y}$  以上である。これは、1,000年間で10mmの腐食量の計測に相当する。また、各センサーとも特異な腐食挙動を検出できるような応答性は有していると考えられる。薄膜レジストメトリー法と電気抵抗/ポテンシャルドロップ法は、水が無い条件でも計測が可能であり、オーバーパックを定置した直後の計測も可能と考えられる。インピーダンス法は、電極間に電圧を印加し、応答を見るため、外乱ノイズの影響を受けにくい一方、外乱源になり得る3電極法では、実環境での計測ができるが、外乱影響を受けやすい特徴がある。3電極法やインピーダンス法は、幌延 URL や地上工学規模試験、不均質試験に用い、年単位レベルではあるが、緩衝材中で使用した実績がある。薄膜レジストメトリー法は、感度と耐久性はトレードオフの関係になるため、計測期間や計測精度、検出限界等の条件を考慮した、ある特定期間のモニタリングに適していると考えられる。3電極法やインピーダンス法は、実操業での異常値検出に適用できると思われる。

### 第3章 参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－分冊2 地層処分の工学技術、JNC TN 1410 99 022 (1999).
- [2] 西村俊弥、片山英樹、野田和彦、小玉俊明、乾湿繰り返し環境における炭素鋼の腐食挙動に与える NaCl-MgCl<sub>2</sub>系塩化物の影響、材料と環境、Vol.49、No.1、pp.45-51 (2000).
- [3] 平成28年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック 報告書 (2017).
- [4] 平成26年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック 報告書(2015).
- [5] Nishikata, A., Ichihara, Y. and Tsuru, T., An Application of Electrochemical Impedance Spectroscopy to Atmospheric Corrosion Study, Corrosion Science, 37, No.6, pp.897-911 (1995).
- [6] 動力炉・核燃料開発事業団、オーバーパックの候補材量選定と炭素鋼オーバーパックの寿命評価、PNC TN8410 92-139 (1992).
- [7] 谷口直樹、川崎学、内藤守正、緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動の実験的検討-I、JAEA-Research 2008-011 (2008).
- [8] 核燃料サイクル開発機構、圧縮ベントナイト中における炭素鋼の腐食形態と腐食速度の評価 (研究報告)、JNC TN8400 99-003 (1999).
- [9] 弱アルカリ性およびアルカリ性環境における炭素鋼オーバーパックの局部腐食進展挙動 (研究報告) JNC TN8400 2003-016 (2003).

## 第4章 メカニズム解明の腐食試験

### 4.1 概要

単純系での腐食試験では、酸化性／還元性雰囲気での浸漬試験や、SCC 感受性評価試験など実施し、これまでに溶接部の均一／不均一腐食、腐食速度、割れ感受性などに係わる知見を拡充することで、製作されたオーバーパックの腐食挙動を評価してきた[1]。オーバーパックの閉じ込め性は数千年から数万年以上の非常に長い期間で要求される機能ではあるが、実際に挙動を評価出来るのは極初期の部分だけである。このような初期の挙動で長期健全性を評価する場合の弊害については実際の腐食試験においても以下のような項目が課題として挙げられている。

#### ✓ 酸化性雰囲気での浸漬試験より

本年度分析した 365 日間の浸漬試験の結果は、昨年度分析した 400 日間の結果と大きな差が生じた。しかしながら両者の浸漬期間の差において、大きな差が生じる要因が明らかになっていない。自然浸漬試験の結果のみで工学的対策の効果を評価するには、試験点数を増やすなどの更なる対応が必要と考えられる。今後は溶接試験体の材料因子に着目した腐食メカニズムの観点からの評価を実施し、品質改善手法の妥当性を提示することが必要である。

#### ✓ 還元性雰囲気での浸漬試験より

現在実施中の還元性雰囲気での浸漬試験は、最長 10 年間の腐食挙動および腐食に伴う水素吸収挙動の取得を目的として実施している。しかしながらオーバーパックに期待される閉じ込め期間である 1000 年間と比較すると、ごく初期の腐食挙動を把握したに過ぎない。今後は長期浸漬試験の適切な維持管理を実施すると共に、溶接試験体の材料因子に着目した腐食メカニズムの観点からの評価も実施することが重要である。特に腐食に伴って発生する水素が材料の脆化におよぼす影響については、鋼中の水素が最大でどの程度まで上昇するのかを明らかにする必要がある。

#### ✓ 応力腐食割れ感受性評価より

炭素鋼溶接部の SCC 感受性が高くなるとされる炭酸塩／重炭酸塩環境かでの感受性評価試験において、溶液単独の場合では濃度の低下に伴って感受性も低下し、地下処分環境で想定される濃度では SCC 感受性は消失する。しかしながら、緩衝材共存環境では低濃度になっても試験片にクラックなどが認められる。この現象について、緩衝材が感受性を上昇させる因子として働いているのか、緩衝材共存環境で電圧を印加する電気化学的な加速試験方法によるものなのか判断が出来ない。緩衝材が感受性を上昇させる要因として働くのであれば、人工バリアの長期健全性評価上重要な課題となるが、実験手法によるものであるならば、適切な方法で再度検証を行なう必要が生じる。

以上をまとめると、以下の検討すべき項目が抽出される。

- ・ 溶接試験体の材料因子に着目した腐食メカニズムの観点からの評価
- ・ 鋼中水素濃度の経時変化を評価する手法
- ・ 緩衝材共存環境下における電気化学試験の手法の妥当性評価

ここに挙げた以外にもメカニズムの観点から評価すべき課題はあると考えられるが、本事業ではこれらのうち、耐食性におよぼす材料因子の影響、および腐食評価試験におよぼす緩衝材の影響から検討を開始した。

## 4.2 溶接部材料因子の影響評価

### 4.2.1 概要

人工バリア品質評価技術の開発において実施した溶接部の品質改善手法検討では、TIG(Tungsten Inert Gas welding)やMAG(Metal Active Gasi といったアーク溶接で製作したオーバーパック溶接試験体の溶接金属で発生した選択腐食に対して工学的対策を検討した。この検討では、溶接材料の改良を対策技術として提示するとともに、溶接金属にNiを0.25%程度添加すると選択腐食が改善されることを実験的に示した。

### 4.2.2 耐食性評価試験から課題の抽出

平成22年度に実施した、改良溶接材料の電気化学試験による品質改善手法の検討では、溶接部で選択的に腐食をする部位は、多層盛り溶接時に次パスの熱影響を受けていない原質部であることが示された。この現象は従来溶接材料では顕著であるが、Niを添加した改良溶接材料の溶接試験体でも生じた。このことから化学成分が同じである場合、溶接部の腐食挙動は金属組織に依存することが示唆された。

これまでに実施した、酸化性/低酸素雰囲気での浸漬試験より、各溶接手法の特徴と腐食挙動の関係を表4.2.2-1にまとめた。低酸素性雰囲気での浸漬試験では溶接手法による腐食挙動に差はみられず、酸化性雰囲気における浸漬試験でのみ腐食の均一/不均一挙動に違いが生じた。

表 4.2.2-1 溶接手法ごとの浸漬試験の結果

溶接方法	化学成分	組織構成	酸化性雰囲気	還元性雰囲気
TIG	溶接材料の影響あり	多層盛り 原質部/再熱部	溶接部にて 選択腐食が発生	溶接部-母材間で 顕著な差は生じない
MAG	溶接材料の影響あり	多層盛り 原質部/再熱部	溶接部にて 選択腐食が発生	溶接部-母材間で 顕著な差は生じない
EBW	母材と同じ	1パス 原質部	溶接部-母材間で 顕著な差は生じない	溶接部-母材間で 顕著な差は生じない

アーク溶接手法である TIG や MAG と、EBW を比較した場合、両者の大きな違いは溶接材料の使用による母材と溶接金属の化学成分の違い、および溶接組織の構成である。酸化性雰囲気での浸漬試験において、EBW のみ均一な腐食挙動を示し、TIG や MAG では溶接部の選択腐食が発生したが、これらは化学成分と組織の違いに起因するものと考えられる。一方でアーク溶接にて生じた選択腐食は、溶接金属内での均一／不均一腐食であり、局所的な偏析を除けば化学成分に大きな差は無いにも関わらず発生している。この2つが示唆するところは、均一／不均一腐食は化学成分と組織の違いによって生じるものであるが、組織の違いのみでも生じることである。

化学成分と金属組織、この2つの大きな因子について溶接部の均一／不均一腐食におよぼす影響を評価するためには、両者を分離して個別に評価する必要がある。しかしながら化学成分は溶接手法に、金属組織は化学成分と入熱履歴に依存するものであり、通常の溶接方法では分離して検討することが難しい。

#### 4.2.3 化学成分を統一した溶接試験体の作製[2]

アーク溶接材料は溶接作業時の入熱を考慮して、目的の機械的特性が得られるように添加元素の設計がなされている。MAG(Metal Active Gas welding)の場合は脱酸素材としての Mn や Si が添加されている。不活性ガスを使用し施工する TIG(Tungsten Inert Gas welding)の場合、溶接部の機械的特性を無視すれば、任意の化学成分の溶接材料で施工が可能であると考えられる。また非消耗電極であるから、ホットワイヤー施工やワイヤーの耐食性を除けば Cu コーティングも不要となる。この特性を利用して以下しめす工程で化学成分を揃え溶接組織が異なる試験片作製法を考案した。

##### (1) 溶接試験

同一の化学成分を持ち、組織が異なる試験片を以下の手順で作製した。

- ① 溶接試験体母材の調達： 溶接施工性を考慮し、試験の目的に合うように母材の候補材料を選定する。
- ② TIG 溶接ワイヤーの作製： ①の母材を伸線加工し、アーク溶接用ワイヤーを作製する。
- ③ TIG 溶接試験： ①の母材に対して②のワイヤーで TIG 溶接を施し、母材と同一の化学成分を有する多層盛り溶接金属を得る。
- ④ EBW 溶接試験： ①の母材に対し EBW を実施し、母材と同一の化学成分を有する 1 パスの溶接金属を得る。

本試験は溶接金属の材料因子の影響を調査することが主目的である。そのため母材については JIS G 3106 SM400B とした。表 4.2.3-1 に調達した SM400B のミルシート値を示す。

表 4.2.3-1 SM400B の化学成分

JIS G3106 SM400B	C	Si	Mn	P	S
素材 Inspection sheet	0.14	0.21	1.11	0.016	0.004
JIS 規格値 50mm < t ≤200mm	≤ 0.22	≤ 0.35	0.60~1.50	≤ 0.035	≤ 0.035

(2) 溶接簿の試験体の性状

同一母材から製作した溶接試験体の外観を図 4.2.3-1 に示す。このように製作した溶接試験体は、溶接時の偏析の影響を除けば、表 4.2.3-2 に示すように、母材、ワイヤ（溶接材料）、溶接金属のいずれの部位の化学成分も同一となる。EBW は貫通溶接を実施したため、溶接部は 1 層 1 パス溶接である。一方、TIG は 1 層 1 パスで 19 層の溶接で 60mm の U 字開先内を溶接した。溶接試験後、外観観察、浸透探傷試験を行い、大きな欠陥が無い部位から腐食試験片を切りだした。溶接部の断面マクロ観察結果を図 4.2.3-2 に示す。

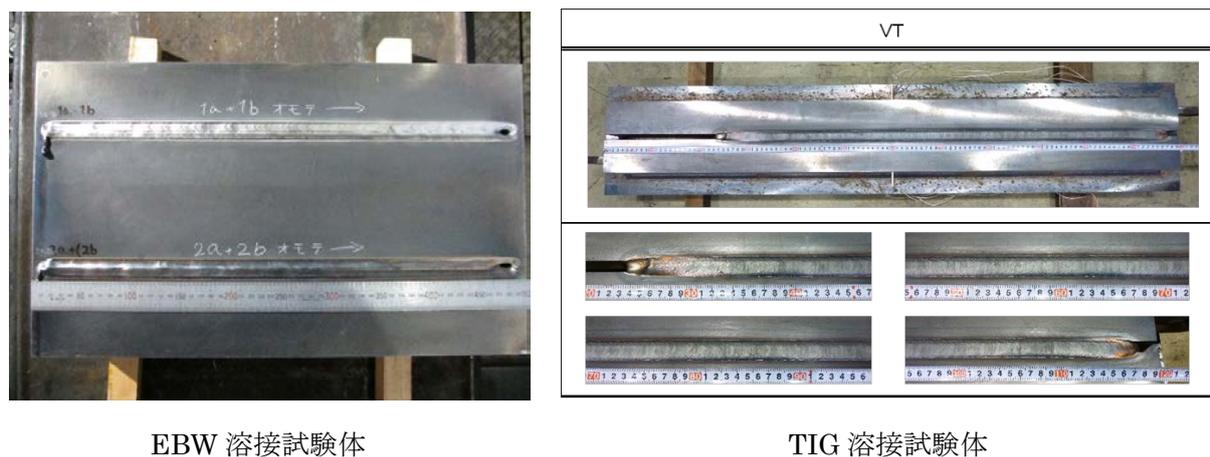


図 4.2.3-1 同一母材から製作した溶接試験体

表 4.2.3-2 化学成分分析結果

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti
母材	0.15	0.21	1.12	0.019	0.004	0.01	<0.01	0.02	<0.01	0.001
ワイヤ	0.16	0.21	1.14	0.020	0.004	0.01	0.01	0.02	<0.01	0.001
溶接金属	0.15	0.21	1.12	0.020	0.004	0.01	<0.01	0.02	<0.01	0.001

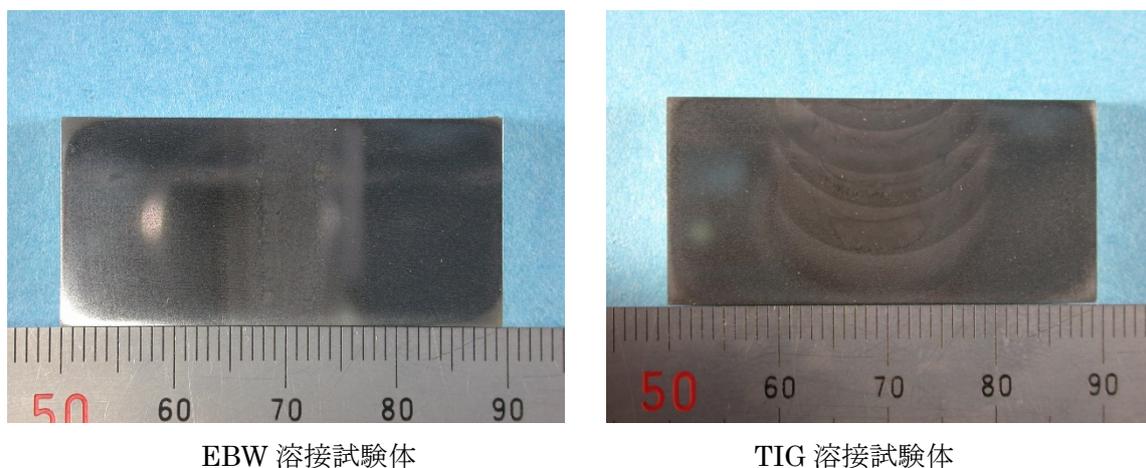


図 4.2.3-2 溶接部の断面マクロ観察

### 4.3 電気化学的手法による溶接金属選択腐食評価

#### 4.3.1 定電位分極による選択腐食の再現試験[2]

酸化性雰囲気下における浸漬試験ではアーク溶接金属部では選択的な腐食が確認されたことを受け、溶接材料に Ni を微量添加する品質改善手法の検討を実施した[4]。この検討では通常では数カ月間の浸漬試験期間を経て明らかになる溶接部の選択腐食挙動を迅速に再現するために、電気化学的手法による加速試験を採用した。本検討でもこの手法を採用し、母材と同一の化学成分を有し、溶接組織が異なる場合の選択腐食挙動の評価を実施した。

##### (1) 試験用プローブの作製

溶接試験体から図 4.3.1-1 に示す位置で試験片を採取した。試験片表面を耐水研磨紙で#2500相当まで研磨し、裏面にリード線をはんだ付けし、補強のためアクリル系樹脂（デュラルコ）で固定した。さらに電極有効部の 20mm×30mm を残して表裏面ともにマスキング材（フロンマスク）を塗布した。

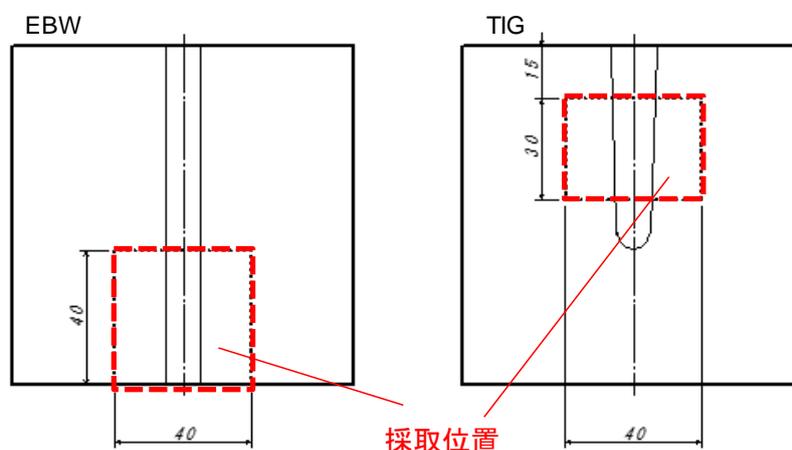


図 4.3.1-1 試験片採取位置

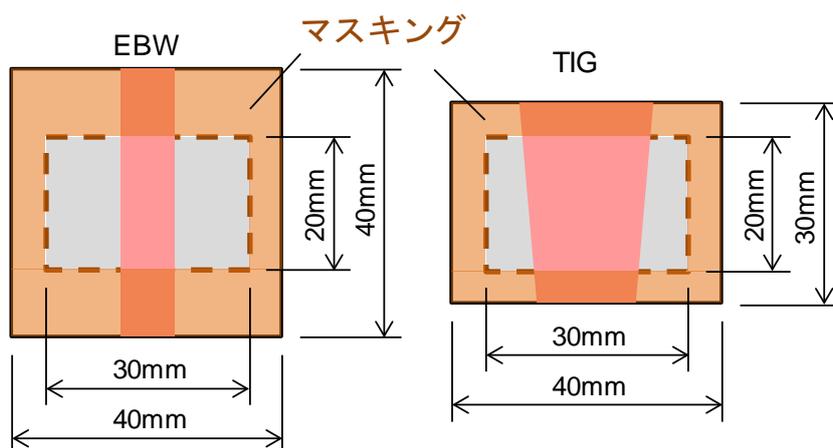
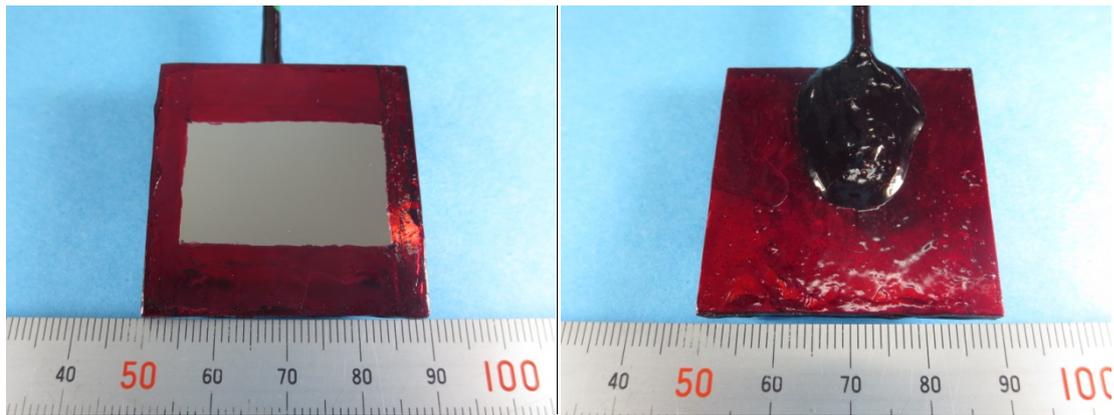
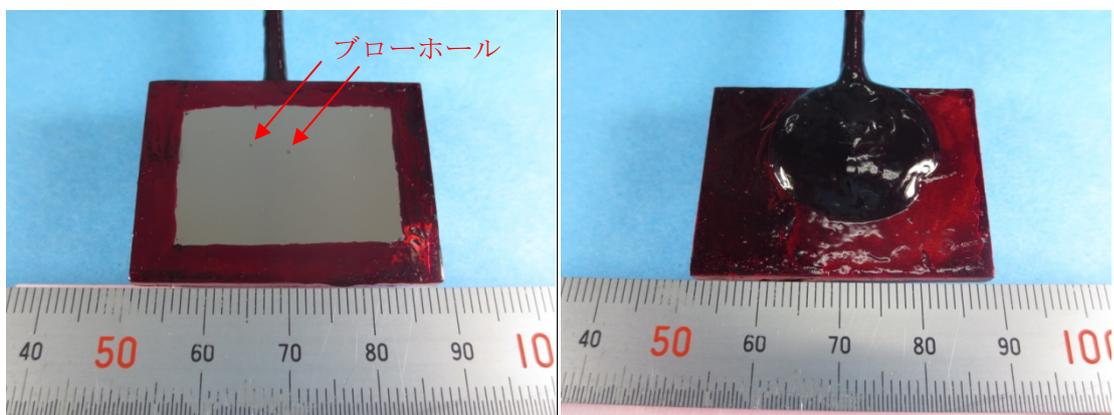


図 4.3.1-2 電気化学試験用プローブ模式図



EBW 溶接試験体（電極表面）

EBW 溶接試験体（裏面）



TIG 溶接試験体（電極表面）

TIG 溶接試験体（裏面）

図 4.3.1-3 製作した試験用プローブの外観

## (2) 試験条件

定電位分極による試験手法は過年度に実施した手法を踏襲した[3]。試験溶液は人工海水 (ASTM D1141) で、試験用プローブ、参照電極の飽和カロメル電極 (SCE: Saturated Calomel Electrode)、補助電極の Pt 板とともにセパラブルフラスコ内に封入した。マントルヒーターで 80°C に昇温した後、 $-650\text{mV}_{\text{SCE}}$  で 100h の定電位分極を実施した。試験の前後に自然電位の測定も合わせて実施した。

100h の定電位分極の後セルを解体して試験片を取り出し、錆の付着状況を記録した。腐食インヒビター (朝日化学工業製 イビット No.2S) を添加した 5% HCl にて腐食生成物を除去後、外観観察およびレーザー変位計による表面形状計測を実施した。

## (3) 試験結果

定電位分極時の電流の経時変化をに 図 4.3.1-5、図 4.3.1-6 に 100h の分極後の EBW および TIG 試験片の外観を、図 4.3.1-7 にレーザー変位計による形状計測の結果を示す。EBW では溶接金属部全体の高さが低く、溶接金属が選択的に腐食する傾向が見られた。EBW は一層一パス溶接さえており、試験片内の溶接金属はすべて原質部である。

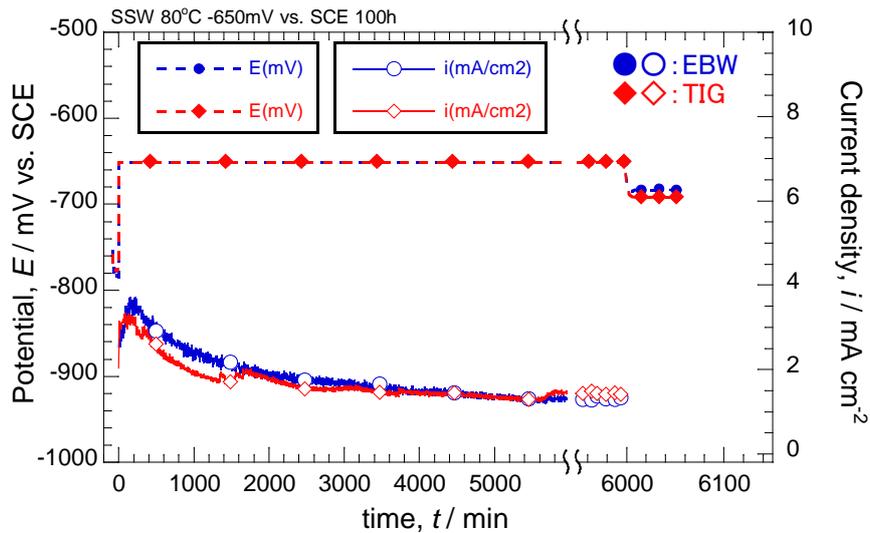


図 4.3.1-4 定電位分極時の電流の経時変化と試験前後の電位

一方 TIG の場合は、溶接パスに対応するように、縞状の腐食痕が確認されたが、溶接時の熱電対の温度計測結果から TIG は何回にもわたり溶接熱影響を受けているため、組織は単純に原質部／再熱部とはならない。今回の試験片はすべて同一の化学成分であること、EBW の試験結果より、TIG で激しい減肉が確認された部分は再熱部に対応すると考えられる。

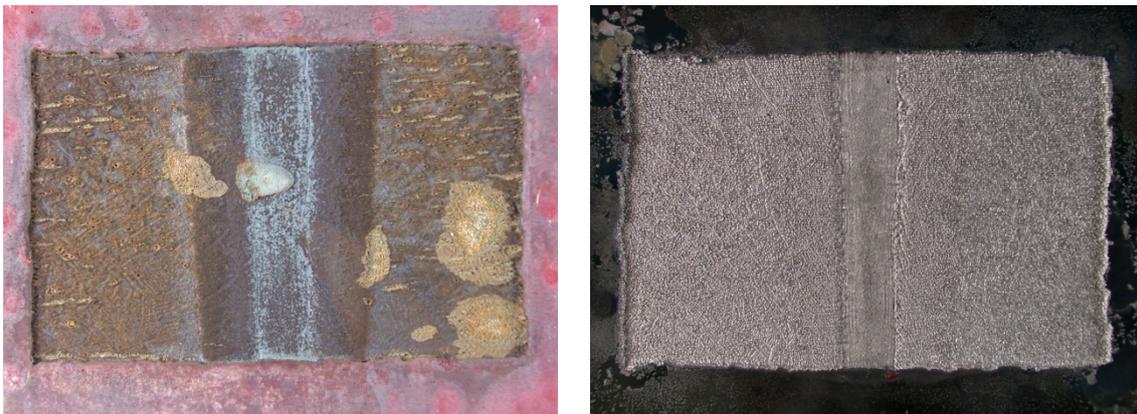
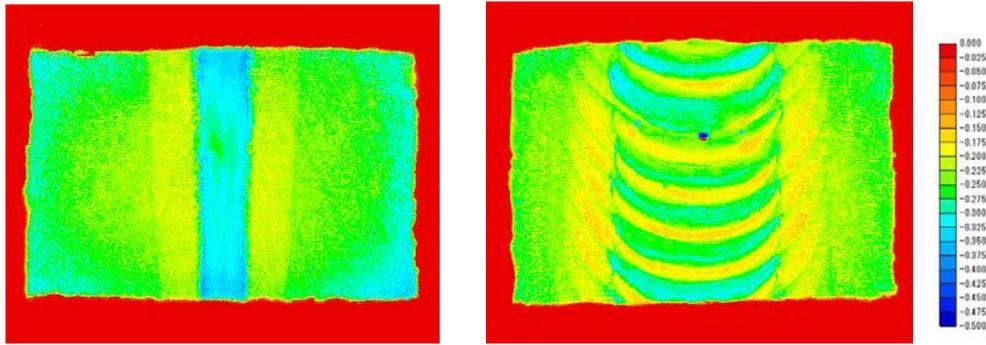


図 4.3.1-5 分極後の EBW 試験片の外観 (左：試験直後、右：脱スケール後)



図 4.3.1-6 分極後の TIG 試験片の外観 (左：試験直後、右：脱スケール後)



EBW 試験片

TIG 試験片

図 4.3.1-7 形状測定結果

定電位分極による溶接部の選択的な腐食の再現試験は、試験片全体をある電位に保持し、腐食のし易さの差で評価するものである。図 4.3.1-7 に示した-650mVvs. SCE, 100h 保持後形状計測から、各試験片上の溶接時の入熱に起因する腐食挙動をまとめたものを表 4.3.1-1 に示す。形状計測の結果から各組織の腐食の程度を相対的に示すと、母材よりも減肉が見られる箇所は溶接部の原質部である。EBW は1層1パスでの溶接のため、試験体中央部の溶接部は全て原質部となる。TIG は多層盛溶接のため、溶着金属が一旦凝固した部位は原質部となり、EBW と同じように減肉が発生する。一方、凝固し次のパスで再加熱された部位（再熱部）、熱影響部（Heat Affected Zone : HAZ）が最も減肉が少ない。一旦凝固し再加熱された TIG 再熱部や両者の HAZ は、化学成分が等しいにも関わらず、耐食性が母材よりも向上する傾向が認められた。

表 4.3.1-1 定電位分極後の試験片の減肉量の相対評価

溶接方法	母材	溶接部		
		熱影響部(HAZ)	溶着金属 (再熱)	溶着金属 (原質)
TIG	○	◎	△	△
EBW	○	◎	◎	△

#### 4.3.2 試験片の部位による腐食電位の測定

前項で実施した定電位分極は、試験片全面がある電位に保持される。材料を腐食環境に浸漬した場合の浸漬電位（ここでは腐食電位： $E_{corr.}$ ）と保持した電位との差、過電圧 $\eta$ が腐食現象の駆動力となる。定電位分極で生じた腐食量の差と、各部位の浸漬電位を比較するため、分極曲線を取得し、ターフェル外挿法で求めた。

##### (1) 試験用プローブの作製

試験用プローブは 4.3.1(1)に示したものを基本形とした。

溶接試験体から採取した腐食試験片の表面に現れる組織の模式図を図 4.3.2-1 に示す。

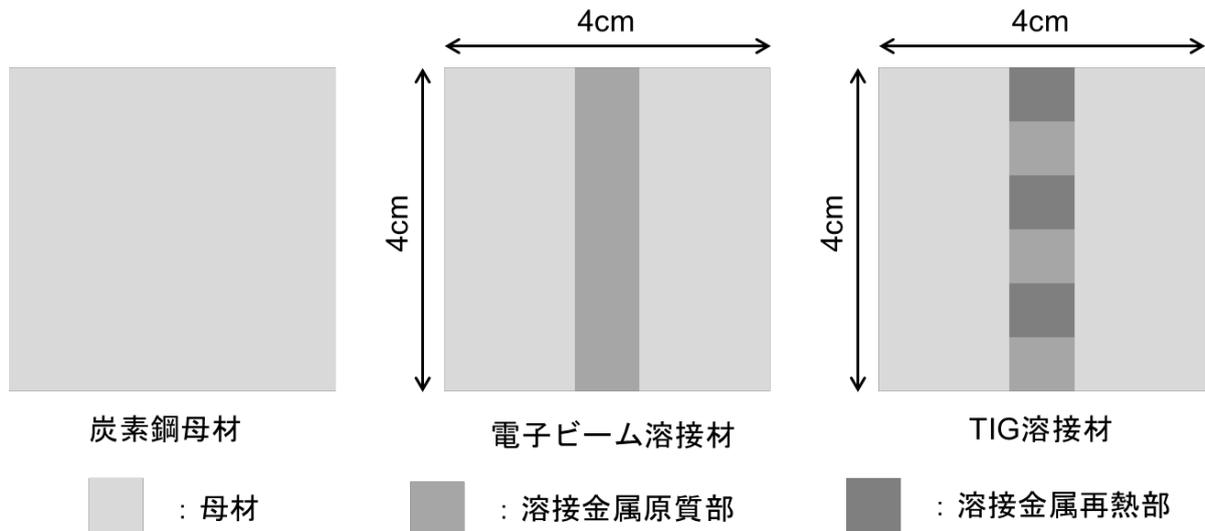


図 4.3.2-1 溶接試験体から採取した腐食試験片の模式図

EBW 材は貫通溶接を行ったため、腐食試験中央に電子ビームが通過した際に熔融し、凝固した溶接金属が存在する。TIG 材は 60mm の U 字開先を 1 層 1 パス 19 層で溶接したため、原質部と再熱部が交互に存在する。このような試験片に対し、試験の目的に合わせてマスキングを施すことで目的の部位を分極試験に供した。

EBW 材のマスキングの例を図 4.3.2-2 に示す。試料を研磨し軽くエッチングし溶接金属の位置を確認する。塗布型のマスキング材で試験片に窓を形成し、乾燥させた後に有効面積を計測した。

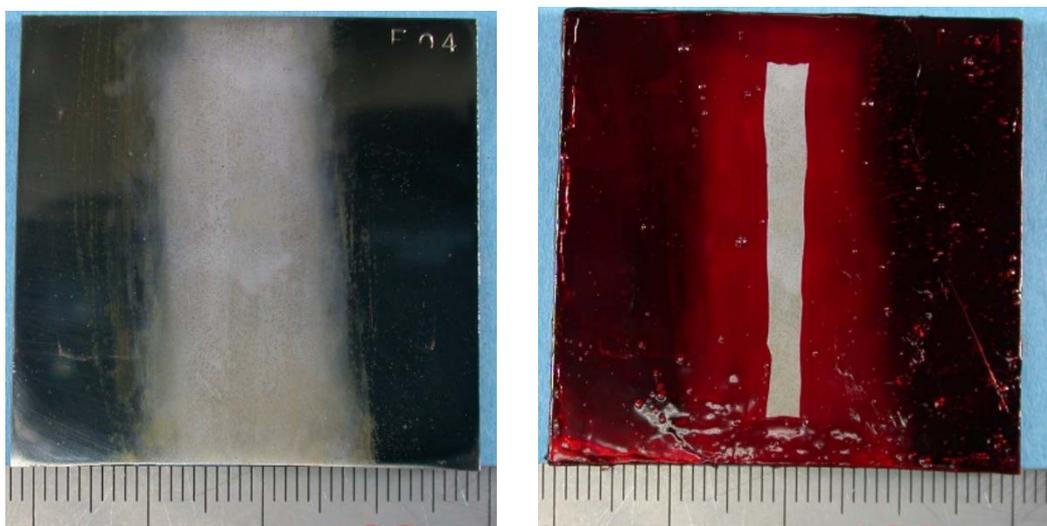


図 4.3.2-2 EBW 材の溶接金属分極用の試験片

#### 1.1.1.1 試験条件

大気雰囲気での分極試験を実施した。セパラブルフラスコに人工海水を注入し、空気をバブリングしながら 80℃まで加温する。80℃に到達後、参照電極 (SCE)、補助電極と共に試験片を組み込む。試験前の浸漬電位を計測し、同電位分極を実施した。

(2) 試験結果

1) EBW 材の分極曲線

図 4.3.2-3 に EBW 母材部の分極曲線を示す。再現性を確認するため6点計測したが、概ね一致した。得られた分極曲線からターフェル外挿法で腐食電位を求めたところ-685mV<sub>SCE</sub>であった。

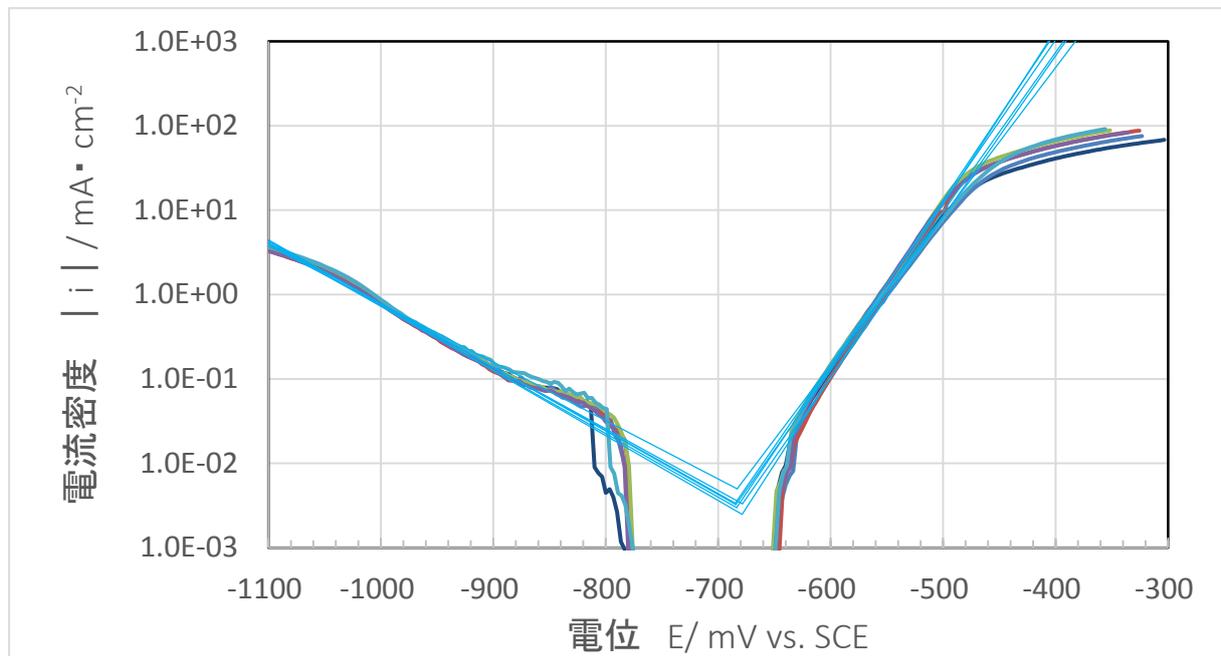


図 4.3.2-3 EBW 母材部の分極曲線 計測結果

図 4.3.2-4 に EBW 溶接金属部の分極曲線を示す。腐食電位は-790~-760mV<sub>SCE</sub>と幅を持ち、母材と比較して 50~100mV 低い値を示した。

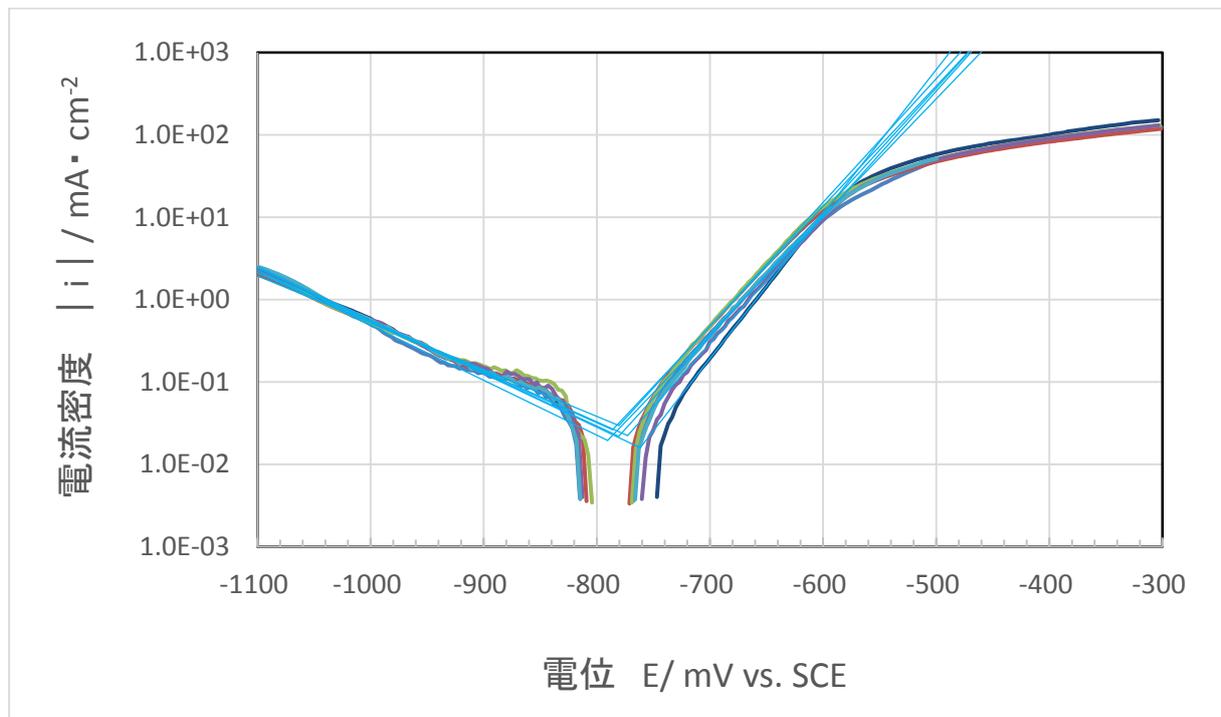


図 4.3.2-4 EBW 溶接金属部の分極曲線 計測結果

## 2) TIG 材の分極曲線

図 4.3.2-5 に TIG 母材部の分極曲線を示す。腐食電位は-750~-730mV<sub>SCE</sub>であった。同一材料である EBW 母材と比較して 50mV 低い値を示した。

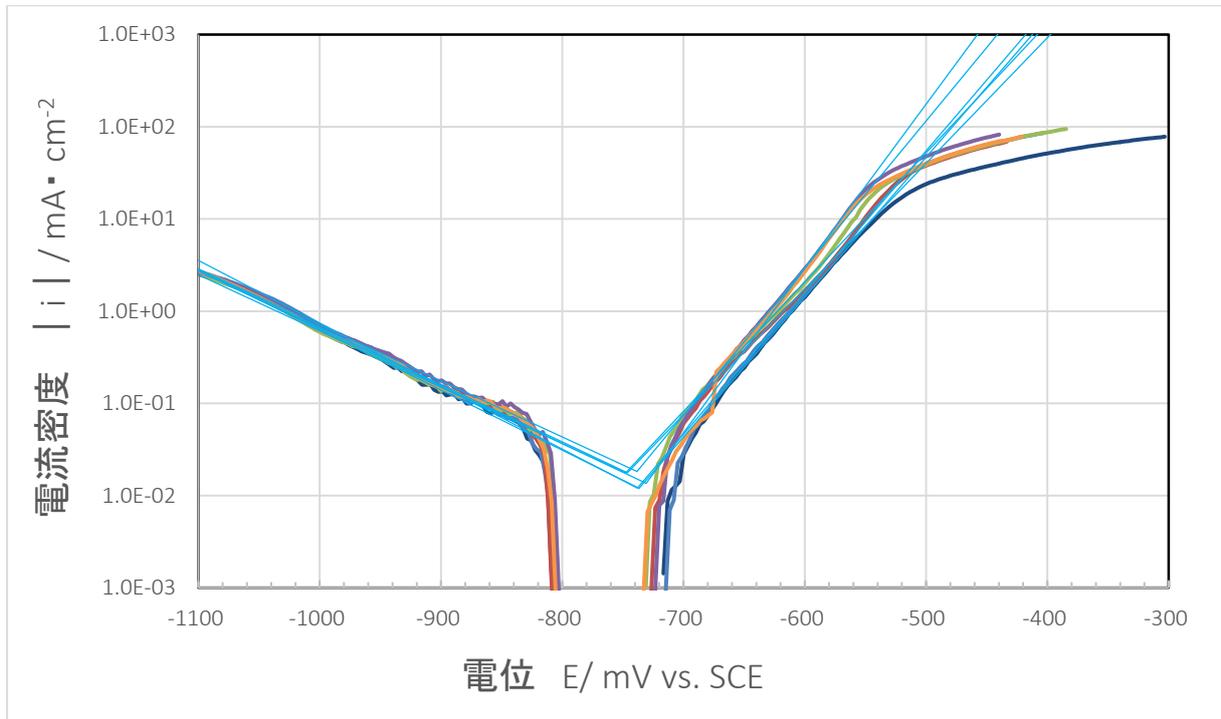


図 4.3.2-5 TIG 母材部の分極曲線 計測結果

図 4.3.2-6 に TIG 溶接金属部の分極曲線を示す。アノード分極曲線が試験片によってばらつきが見られ、腐食電位は-770~-760mV<sub>SCE</sub>であった。

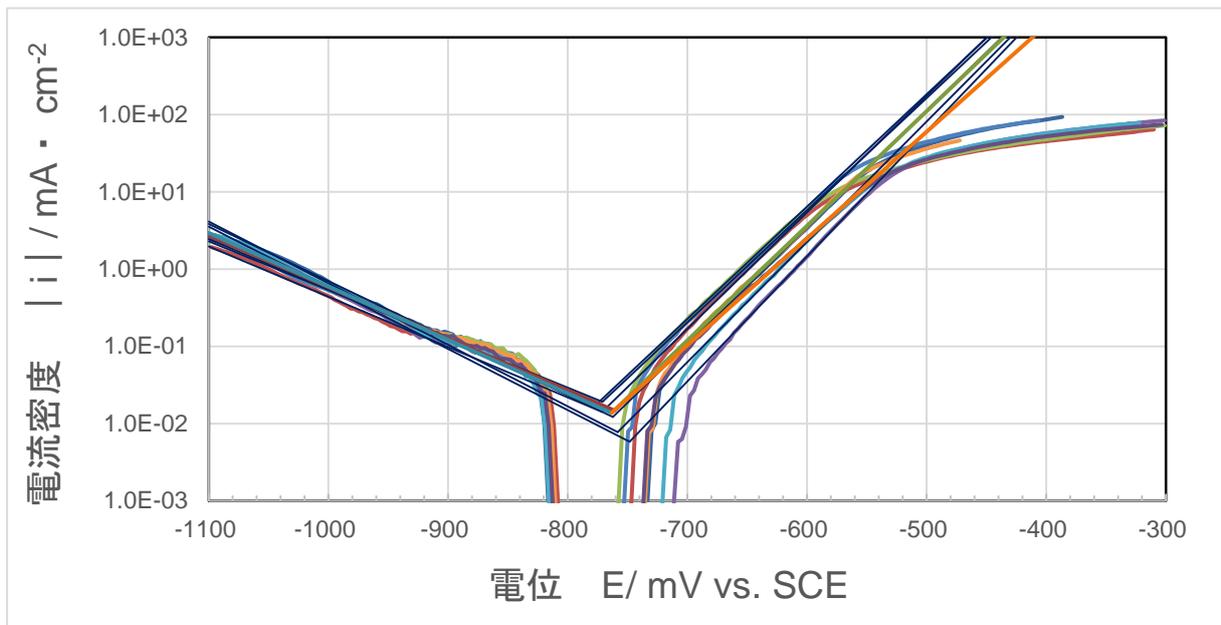


図 4.3.2-6 TIG 溶接金属部の分極曲線 計測結果

### 3) 母材と溶接部の比較

EBW 材の母材部と溶接金属部の代表例を示したものを図 4.3.2-7 に示す。溶接金属部の腐食電位が母材と比較して $-100\text{mV}$ 程度低い。このため、 $-650\text{mV}_{\text{SCE}}$ で定電位分極を行うと溶接金属部が優先的に溶解する。

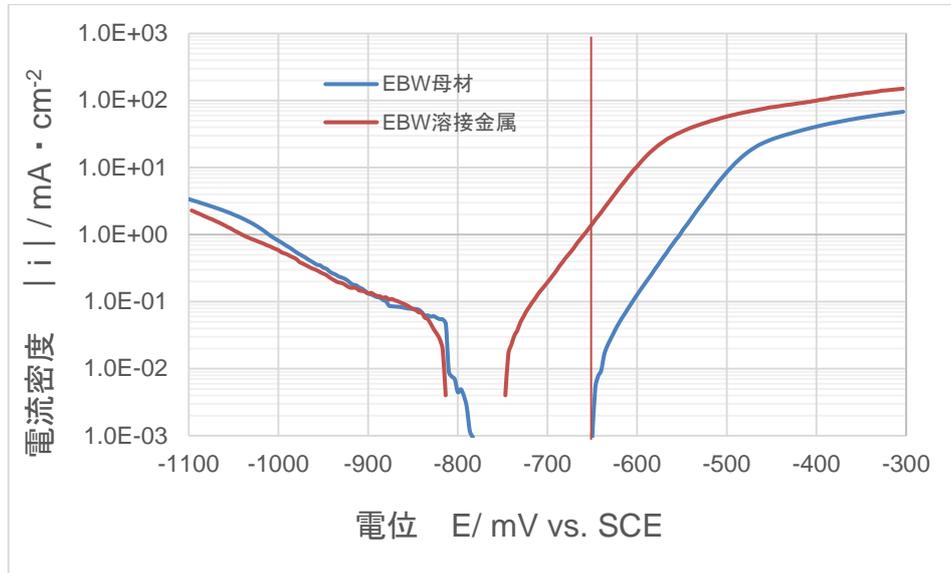


図 4.3.2-7 EBW の母材と溶接金属部の分極曲線の比較

TIG 材の母材部と溶接金属部の代表例を示したものを図 4.3.2-8 に示す。溶接金属部の腐食電位が母材と比較してわずかに低い。これは溶接金属部ので原質部と再熱部で挙動が異なり、平均化されたためと考えられる。

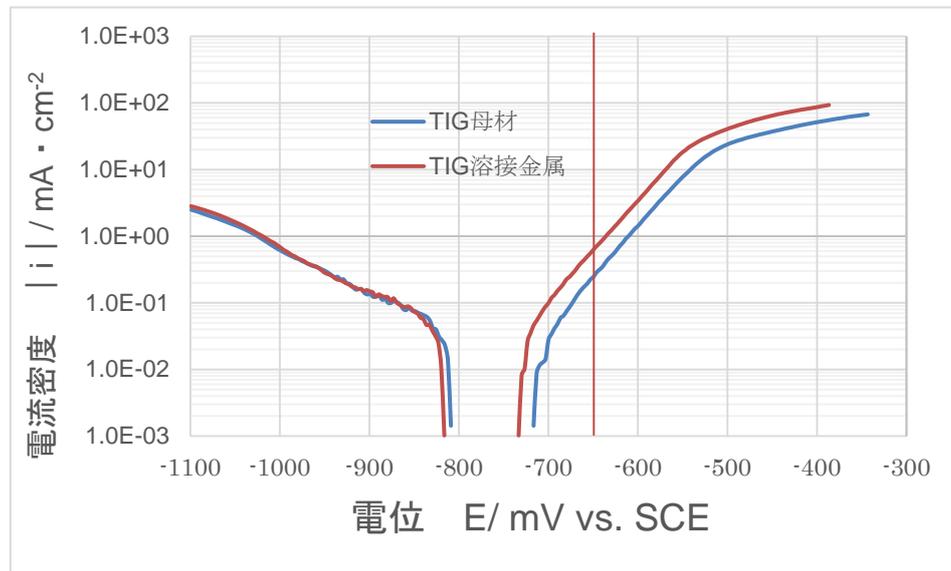


図 4.3.2-8 TIG の母材と溶接金属部の分極曲線の比較

TIG 母材と EBW 母材は同一の後半から製作したにも関わらず、腐食電位に  $50\text{mV}$  以上の差が見られた。

### 4.3.3 2電極間の電位差の測定

#### (1) 目的

分極曲線の測定の結果、母材と溶接金属部で腐食電位に差があり、定電位分極時の過電圧 $\eta$ が異なることで溶接部が選択的に溶解することが示された。実際の処分環境では外部から強制的にある電位に保持されるよりは、部位ごとの電位差によるガルバニック対による選択的な腐食が考えられる。そこで母材、熱影響部、溶接金属の3種類の電極を作成し、同一の溶液に浸漬した2電極間の電位差をエレクトロメーターで計測した。

#### (2) 試験方法

試験条件は4.3.2 空気のバブリングを行うと測定値の変動が大きくなり、値の読み取りが困難であったことから、本試験ではバブリングは実施せずに大気開放下で測定した。またバブリングによる攪拌がないために、溶液全体の温度制御が困難であると考えられたことから、加熱は行わずに室温で実施することとした。

毎回の測定前に試料表面を耐水研磨紙（#2500相当）で研磨し、速やかに試験容器へのセットを行い、測定を開始するようにした。図4.3.3-1に測定の様子を示す。

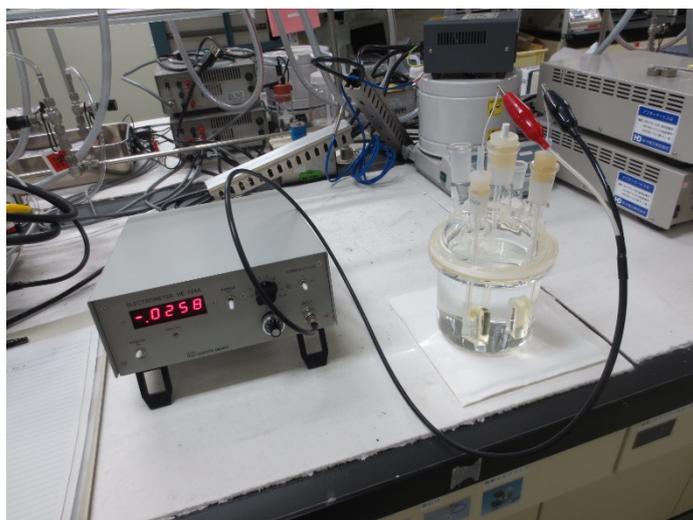


図 4.3.3-1 2電極間の電位差の測定状況

測定値には経時的な変動が見られたが、浸漬後約5～15分経過し、ドリフトが概ね安定した段階で数値を読み取ることとした。溶接の各部位ごとの相違は明確には確認しにくいことが予想されたことから、溶接金属、HAZ、母材のそれぞれについて、同一の試料を5回繰り返して測定し(N=5)、数値のばらつきの程度を確認することとした。

#### (3) 測定結果

表4.3.3-1に2電極間の電位差測定の結果を示す。繰り返し5回実施した測定の平均値および標準偏差も併せて示した。には、これらの結果の相関図を模式的に示した。2電極式での測定のため参照電極での規格化が行えないことから、ここでは母材に対する溶接金属およびHAZの電位を第1縦軸（左側）に、また溶接金属に対するHAZの電位を第2縦軸（右側）に取って、前者の

溶接金属の5回の測定の前平均値を後者の基準(0mV)にすることによって、全体の関連を図示した。母材に対する溶接金属の電位は5回のばらつきが少なく、いずれの測定でもマイナス側にシフトし、溶接金属の方が-20mV程度低い傾向を示した。一方、溶接金属に対するHAZの電位はいずれもプラス側を示したが、測定値のばらつきも大きい。母材に対するHAZの電位はマイナス側とプラス側の両方がある。但し、その平均値は0mVに近く、本測定においては母材とHAZの間にあまり有意な差が生じていないと考えたほうが良いように思われる。また、母材と溶接金属のそれぞれから比較したHAZの電位は概ね整合することが確認された。

以上のように、測定値にばらつきがあり厳密な比較は難しいが、平均値から見た電位の関する全体的な相関としては、母材とHAZは溶接金属よりも貴(20mV程度)であり、母材とHAZにはあまり有意な差が認められないという傾向があるものと思われる。このことは定電位分極ではEBWの溶接金属で腐食が進み、HAZや母材では比較的起こりにくいという選択腐食性を支持する知見であると言える。

表 4.3.3-1. 2極間の電位差測定の結果 (mV)

N	1	2	3	4	5	平均値	標準偏差
母材に対する溶接金属の電位	-21	-21	-14	-27	-22	-21	4
母材に対するHAZの電位	-14	+3	+6	+6	-13	-2	9
溶接金属に対するHAZの電位	+24	+6	+24	+22	+38	+23	10

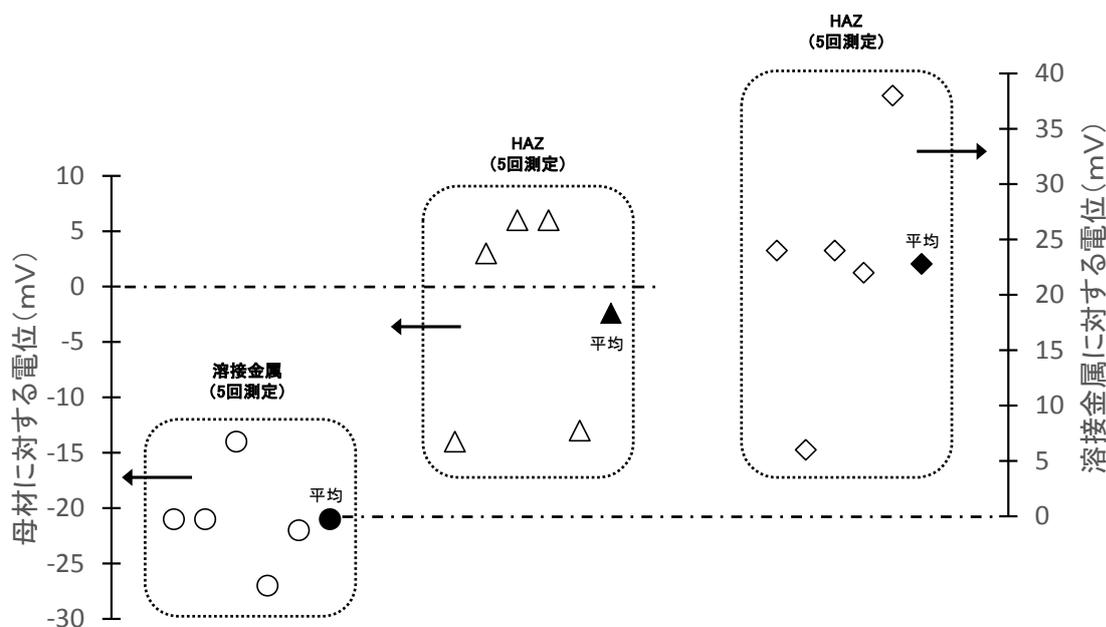


図 4.3.3-2 極間の電位差測定結果の相関図

(塗りつぶしなしは5回の測定値、塗りつぶしありはその平均値を示す)

#### 4.3.4 まとめ

溶接部の選択的な腐食のメカニズムを解明するために、金属組織ごと（母材、溶接金属、HAZ）の局所的な分極曲線の取得、およびそれらの部位間での電位差の測定を実施した。

分極曲線の取得では、同一の化学成分では溶接金属の腐食電位が母材と比べて低くなる傾向がある。このため、定電位分極による加速試験では、過電圧 $\eta$ が大きくなる溶接金属が優先的に腐食すると考えられる。

一方、2電極間の電位差では母材とHAZは溶接金属よりも貴であることを示唆する結果が得られた。この結果は溶接部の選択腐食の現象と整合する。同一化学成分であっても、溶接時の入熱により金属組織が異なることで、電位に差が生じ、両者間でマクロな腐食電池の形成によって溶接金属でFeの溶解が促進されると考えられる。

分極試験についても、TIG溶接部の原質部と再熱部の間の差について評価する等、さらに測定環境や条件の検討を加え、測定データの信頼性を高めることが重要と考えられる。

#### 第4章 参考文献

- [1] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 24 年度地層処分調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発）報告書（第 2 分冊）、2013 年 3 月
- [2] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 26 年度地層処分技術調査等事業（処分システム工学確証技術開発）報告書（第 1 分冊）、2015 年 3 月
- [3] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 22 年度地層処分調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発）報告書（第 2 分冊）、2011 年 3 月
- [4] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 21 年度地層処分調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発）報告書（第 2 分冊）、2010 年 3 月

## 第5章 溶接部の残留応力改善手法

### 5.1 背景および目的

原環センターでは平成 24 年度までに、オーバーパックの製作・施工性に関する検討を実施し、溶接封入技術や非破壊検査技術の適用性を示すとともに、溶接部の腐食評価および封入技術として溶接手法の妥当性を示された。平成 25 年度からの基盤研究として実施すべき研究開発課題として、オーバーパックの設計・製作・施工・搬送・定置、および長期挙動等の判断指標の提示に向けた長期健全性評価モデルの構築、モデルを裏付けるデータの拡充、論理的説明の付与を挙げた。平成 28 年度までに、落とし蓋形状および平蓋形状のオーバーパックを対象として、溶接部の残留応力分布を求め、溶接後熱処理（PWHT：Post Weld Heat Treatment）および外面誘導加熱応力改善法（EIHSI：External Induction Heating Stress Improvement）により残留応力を低減するための熱処理条件を求めた。

本章では、局部腐食の発生を防止することを目的として、平蓋形状のオーバーパックの溶接後の残留応力分布を求め、EIHSI により腐食代に相当する範囲の残留応力を圧縮応力に改善する条件を設定する。

### 5.2 解析方法および解析条件

#### 5.2.1 解析方法

平蓋形状のオーバーパックの溶接部残留応力分布を初期条件として、腐食代に相当する 40 mm 程度の範囲の溶接残留応力を圧縮応力に改善するための熱処理条件を解析により求める。残留応力改善手法は EIHSI 法とし、汎用有限要素解析コード Abaqus を用いて、EIHSI 法における熱処理条件の検討を行う。

解析手順を図 5.2.1-1 に示す。最初に溶接深さを 1 ケース設定し、溶接後の残留応力分布を求める。次に、溶接後の残留応力分布を対象として複数の熱処理条件で予備解析を実施し、加熱および急冷条件を設定する。その熱処理条件に基づき EIHSI の本解析を実施する。

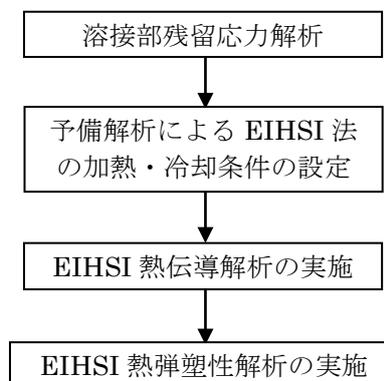


図 5.2.1-1 残留応力低減解析の実施手順

## 5.2.2 解析条件

対象とするオーバーパックの蓋形状は、図 5.2.2-1 に示す平蓋形状を対象[1]とし、溶接方法は TIG 溶接とする。溶接深さは 90 mm とした。解析に用いる材料物性値は平成 27 年度に実施した解析に基づいて設定した[2]。解析に用いた値を表 5.2.2-1 および図 5.2.2-2 から図 5.2.2-5 に示す。

表 5.2.2-1 解析に用いた値

項目	単位	ガラス		キャニスター内 上部空気層		キャニスター (SUS)		キャニスター/OP間 空気層		OP (SF340A)		OP外側	空気層
		温度 (°C)	値	温度 (°C)	値	温度 (°C)	値	温度 (°C)	値	温度 (°C)	値	温度 (°C)	値
輻射率	-	-	0.9	-	-	-	0.45	-	-	-	0.56	-	-
熱伝導率	kW/m・K	26.85	1.10E-03	26.85	2.61E-05	26.85	1.60E-02	26.85	2.61E-05	20.00	4.98E-02	-	-
		126.85	1.24E-03	126.85	3.31E-05	126.85	1.65E-02	126.85	3.31E-05	100.00	4.96E-02	-	-
		226.85	1.37E-03	226.85	3.95E-05	326.85	1.90E-02	226.85	3.95E-05	200.00	4.84E-02	-	-
		326.85	1.49E-03	326.85	4.56E-05	526.85	2.25E-02	326.85	4.56E-05	400.00	4.32E-02	-	-
		-	-	426.85	5.13E-05	726.85	2.57E-02	426.85	5.13E-05	600.00	3.86E-02	-	-
		-	-	526.85	5.69E-05	-	-	526.85	5.69E-05	800.00	3.24E-02	-	-
熱伝達率	kJ/s・m <sup>2</sup> ・K	-	-	-	-	-	-	-	-	1400.00	3.24E-02	-	-
		-	-	-	1.00E+02	-	-	-	1.00E+02	-	-	26.85	2.73E-03
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	126.85	6.63E-03
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	226.85	7.88E-03
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	326.85	8.65E-03
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	426.85	9.08E-03
比熱	kJ/kg・K	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	526.85	9.40E-03
		26.85	0.73	26.85	1.007	26.85	0.499	26.85	1.007	20.00	0.463	-	-
		126.85	0.89	126.85	1.015	126.85	0.511	126.85	1.015	100.00	0.479	-	-
		226.85	1.02	226.85	1.031	326.85	0.556	226.85	1.031	200.00	0.504	-	-
		326.85	1.12	326.85	1.052	526.85	0.62	326.85	1.052	300.00	0.538	-	-
		-	-	426.85	1.076	726.85	0.644	426.85	1.076	400.00	0.584	-	-
		-	-	526.85	1.099	-	-	526.85	1.099	500.00	0.638	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	600.00	0.713	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	700.00	0.875	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	730.00	0.964	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	735.00	2.117	-	-
発熱量	kJ/s・m <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	3.67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
密度	kg/m <sup>3</sup>	20.00	2.23E+03	26.85	1.176	26.85	7.92E+03	26.85	1.176	20.00	7.84E+03	-	-
		-	-	126.85	0.882	126.85	7.89E+03	126.85	0.882	-	-	-	-
		-	-	226.85	0.705	326.85	7.81E+03	226.85	0.705	-	-	-	-
		-	-	326.85	0.589	526.85	7.73E+03	326.85	0.589	-	-	-	-
		-	-	426.85	0.504	726.85	7.64E+03	426.85	0.504	-	-	-	-
		-	-	526.85	0.441	-	-	526.85	0.441	-	-	-	-

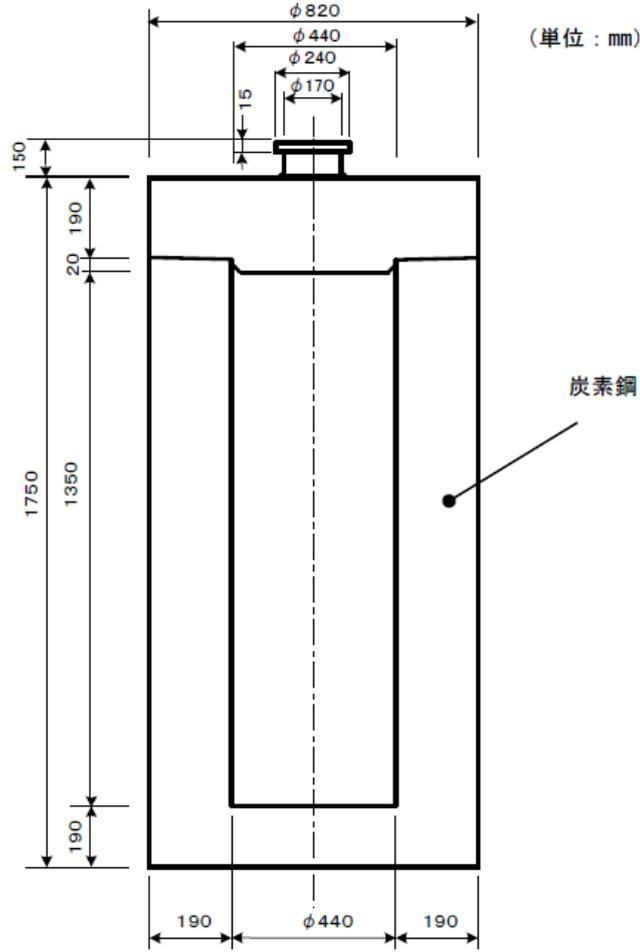


図 5.2.2-1 オーバーパック（平蓋形状）の概略図

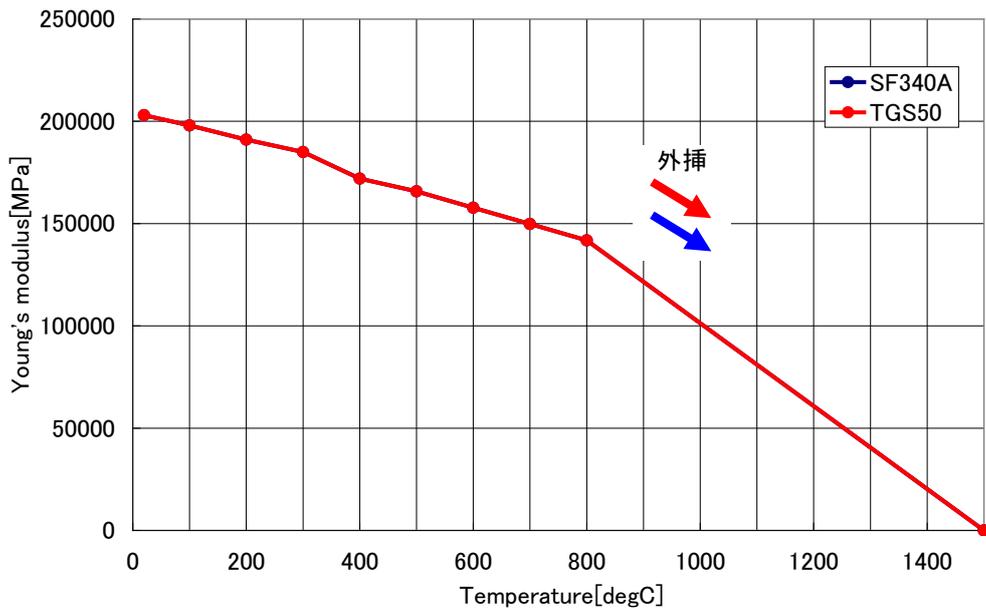


図 5.2.2-2 ヤング率

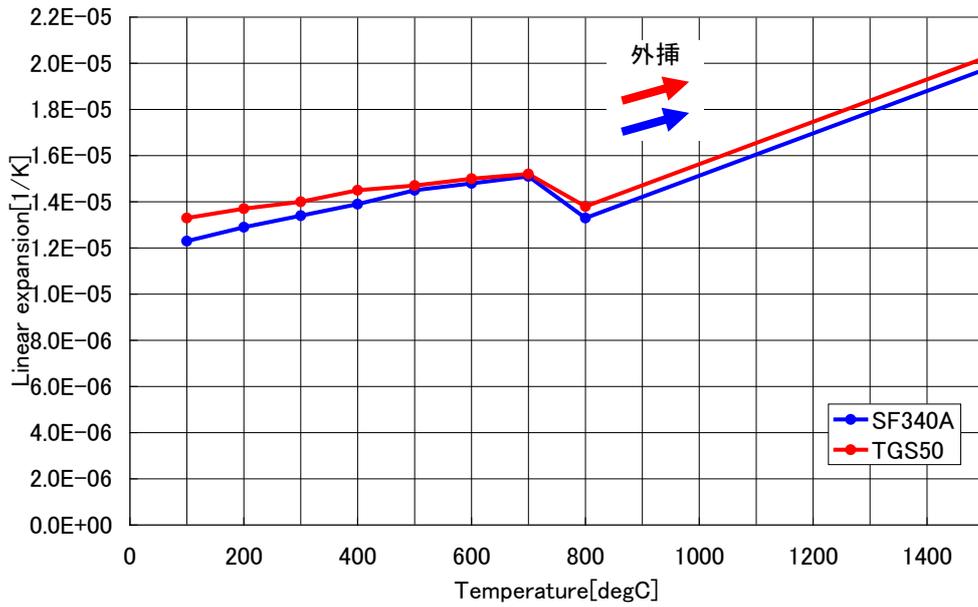


図 5.2.2-3 線膨張係数

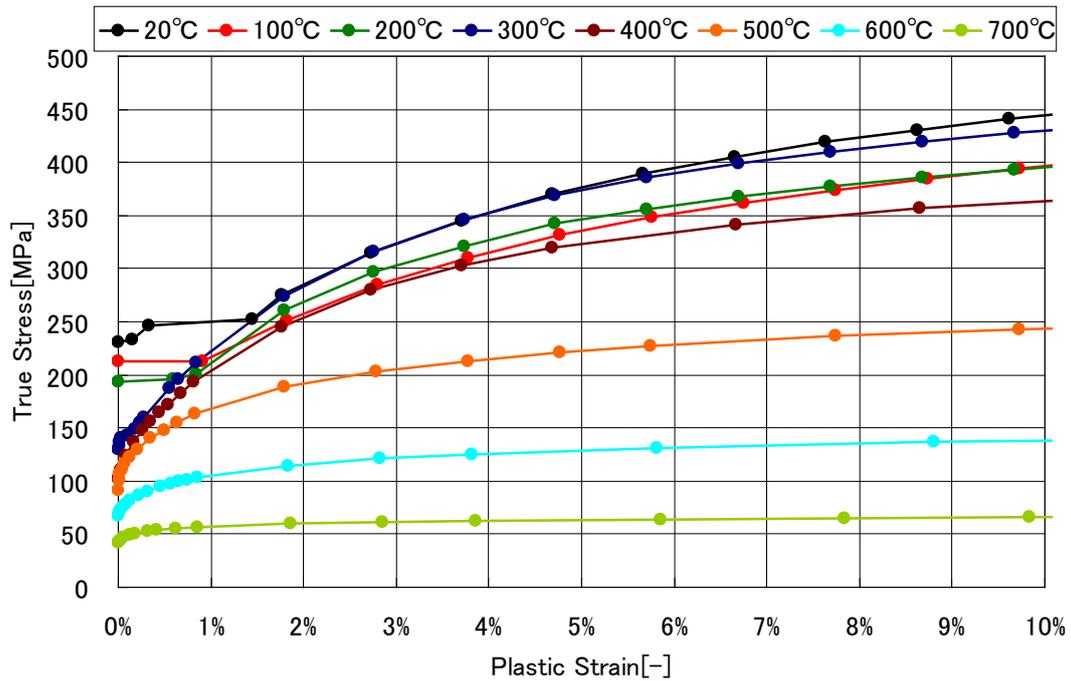


図 5.2.2-4 母材 (SF340A) の応力-ひずみ線図

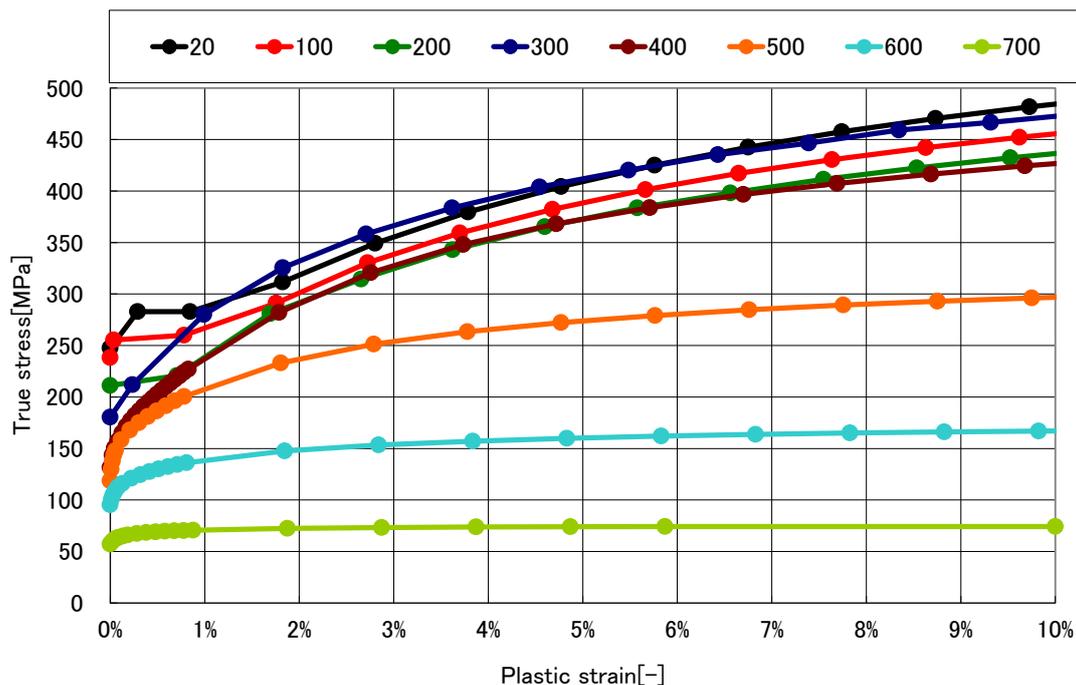


図 5.2.2-5 溶接金属 (TGS50) の応力-ひずみ線図

### 5.2.3 解析モデルの検討

解析モデルおよび解析手順は、平成 27 年度に実施した開先深さ 190 mm の平蓋形状オーバーパックの溶接残留応力解析モデル[1]を参考とした。温度解析は 45 度モデル、応力解析は中間の 30 度分を使用したモデルとした。図 5.2.3-1 に、今回解析対象とした開先深さ 90 mm の平蓋オーバーパックの解析モデルを示す。また、図 5.2.3-2 に溶接部のパス分割図を示す。

以下に溶接残留応力解析の手順を示す。

- ① ガラス固化体の発熱を考慮したオーバーパックの初期温度解析
  - ・ガラス固化体の発熱量 (3.67 kJ/s・m<sup>3</sup>) を考慮し、定常熱伝導解析で初期温度分布を算出
  - ・ガラス固化体とオーバーパック間の空気層をモデル化し、熱授受を考慮
  - ・解析に用いる空気熱物性値および熱境界条件は表 5.2.2-1 に準拠
- ② ガラス固化体の発熱と溶接施工条件を考慮した温度解析
  - ・積層手順は図 5.2.3-2 に示す積層図を模擬
  - ・溶接は中断せず、初層から最終層まで一気に溶接
- ③ ②の温度解析結果を用いた溶接残留応力解析
  - ・積層時のアニールの効果を考慮 (850°C以上になる領域の塑性ひずみをゼロにする)

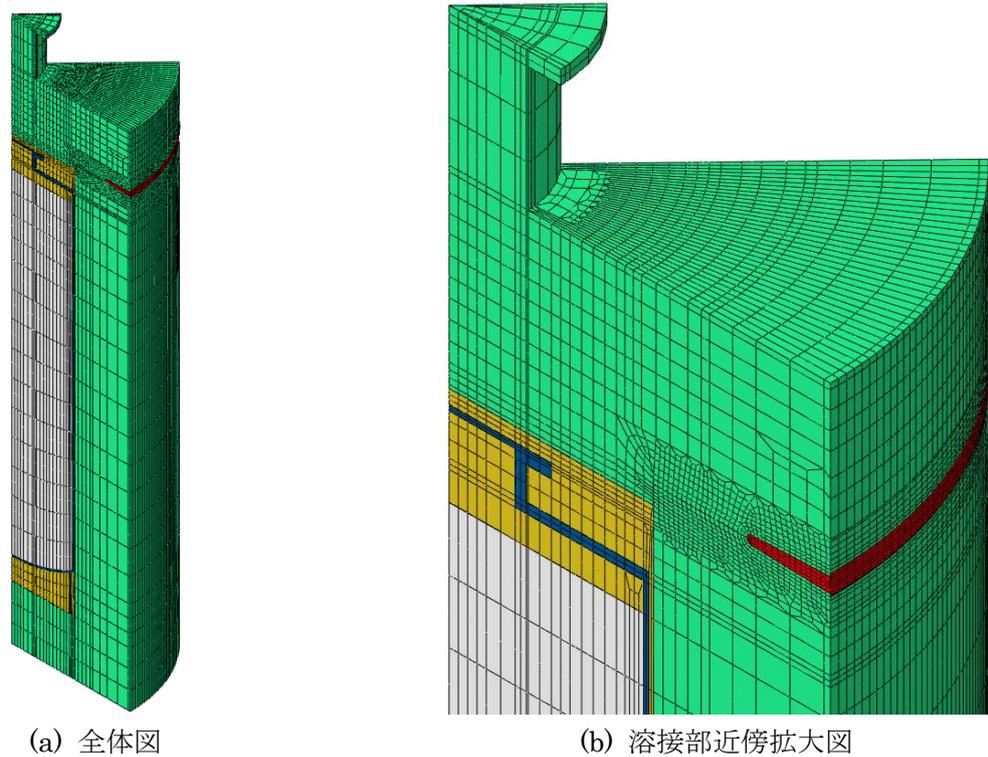


図 5.2.3-1 温度解析モデル（45度モデル）

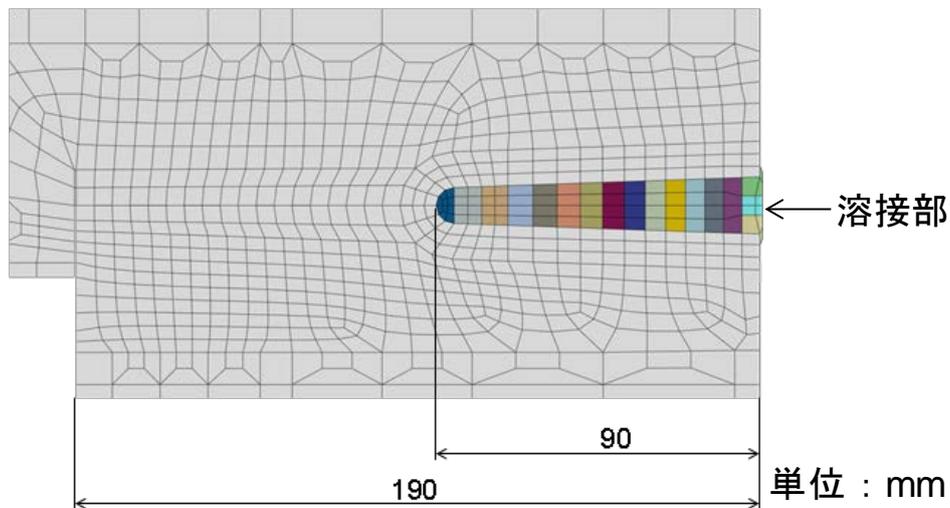
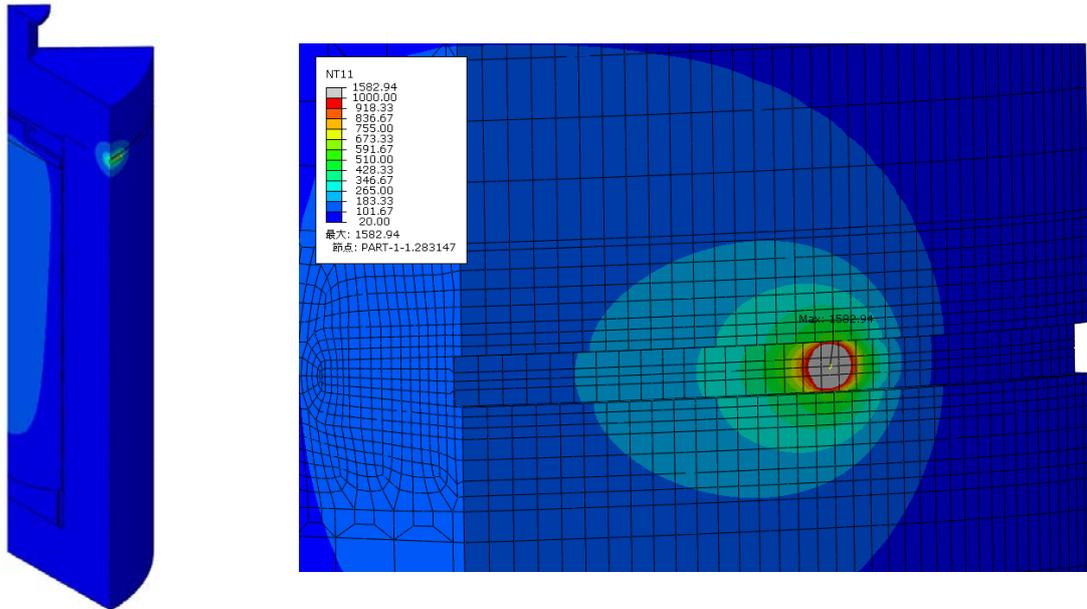


図 5.2.3-2 溶接部の溶接パス分割図（全 17 パス）

### 5.3 溶接部の残留応力解析

#### 5.3.1 溶接時の温度解析

溶接施工条件を模擬した熱伝導解析結果のうち、14 パス目の溶接を行っている時の温度コンター図を図 5.3.1-1 に示す。図に示すように、熱伝導解析においては溶接熱源の移動を考慮し、非定常解析により温度時刻歴を計算した。なお、図 5.3.1-1 (a)は熱源が周方向の端部（解析モデルへの入熱開始時）にあるときの温度分布を示し、図 5.3.1-1 (b)は熱源が周方向中央部付近にある時の温度分布を示している。



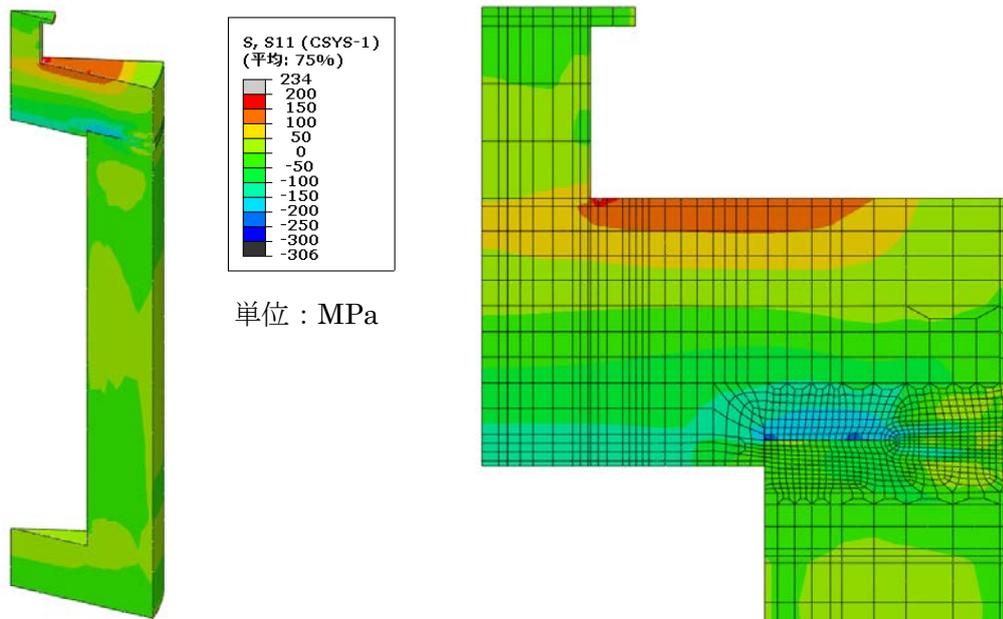
(a) 全体図

(b) 溶接部拡大図

図 5.3.1-1 温度解析結果 (14 パス目溶接時の温度分布図)

### 5.3.2 溶接残留応力解析

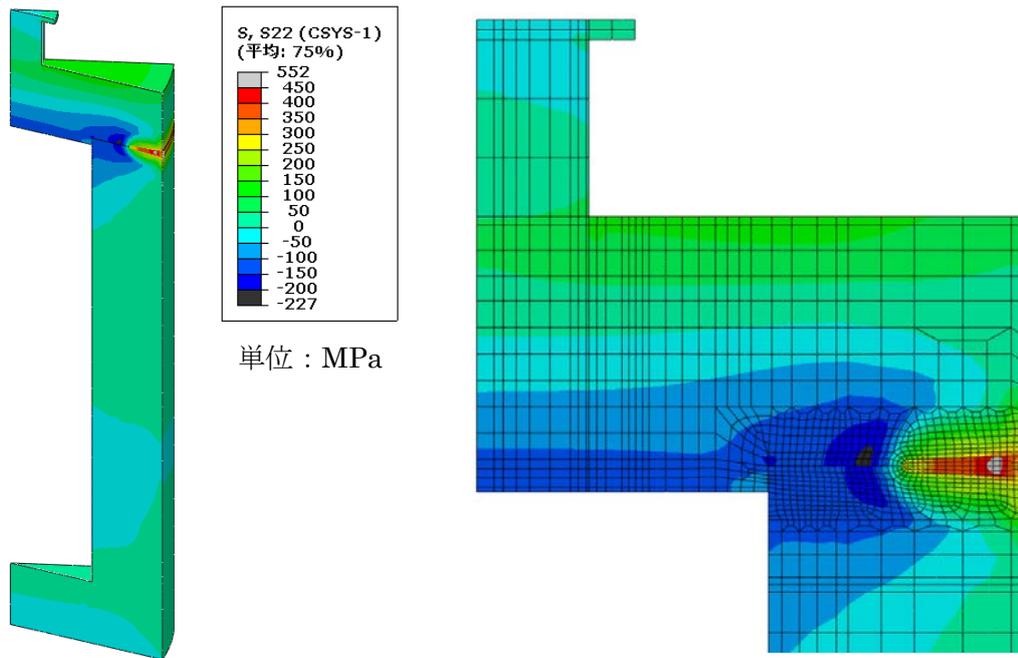
応力解析は、熱伝導解析で求めた温度の時刻歴データを用いて、熱弾塑性解析により溶接残留応力を計算した。応力解析結果として、図 5.3.2-1 から図 5.3.2-3 に溶接後の半径方向応力、周方向応力および軸方向応力コンター図を示す。また、図 5.3.2-4 から図 5.3.2-6 に溶接金属部の残留応力を外表面から深さ方向にプロットしたグラフを示す。



(a) 全体図 (15 度断面)

(b) 溶接部近傍拡大図 (15 度断面)

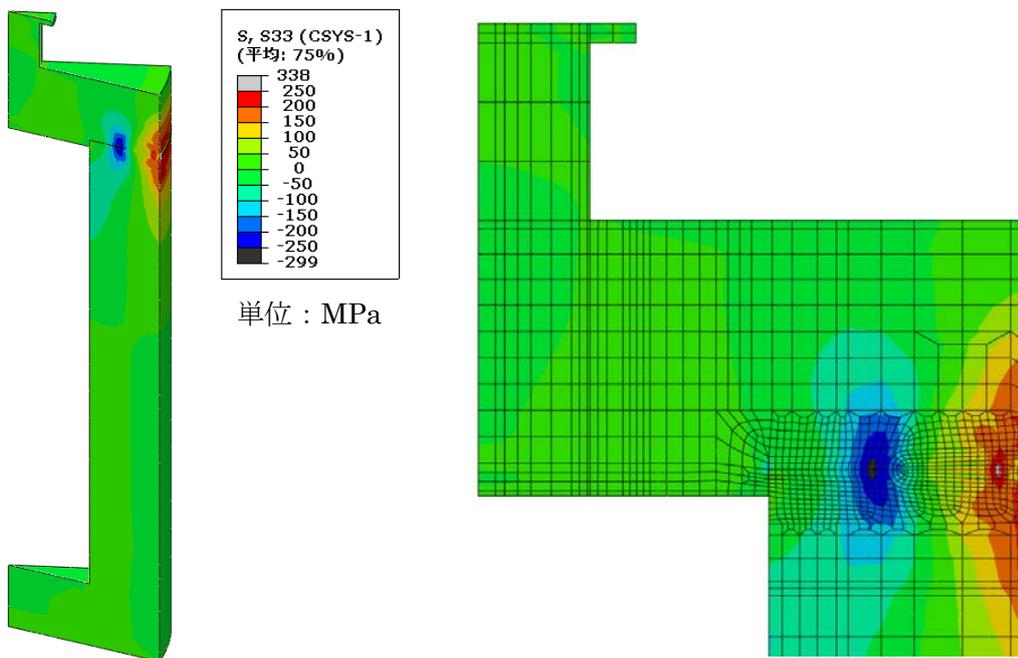
図 5.3.2-1 溶接残留応力解析結果 (半径方向応力分布図)



(a) 全体図 (15 度断面)

(b) 溶接部近傍拡大図 (15 度断面)

図 5.3.2-2 溶接残留応力解析結果 (周方向応力分布図)



(a) 全体図 (15 度断面)

(b) 溶接部近傍拡大図 (15 度断面)

図 5.3.2-3 溶接残留応力解析結果 (軸方向応力分布図)

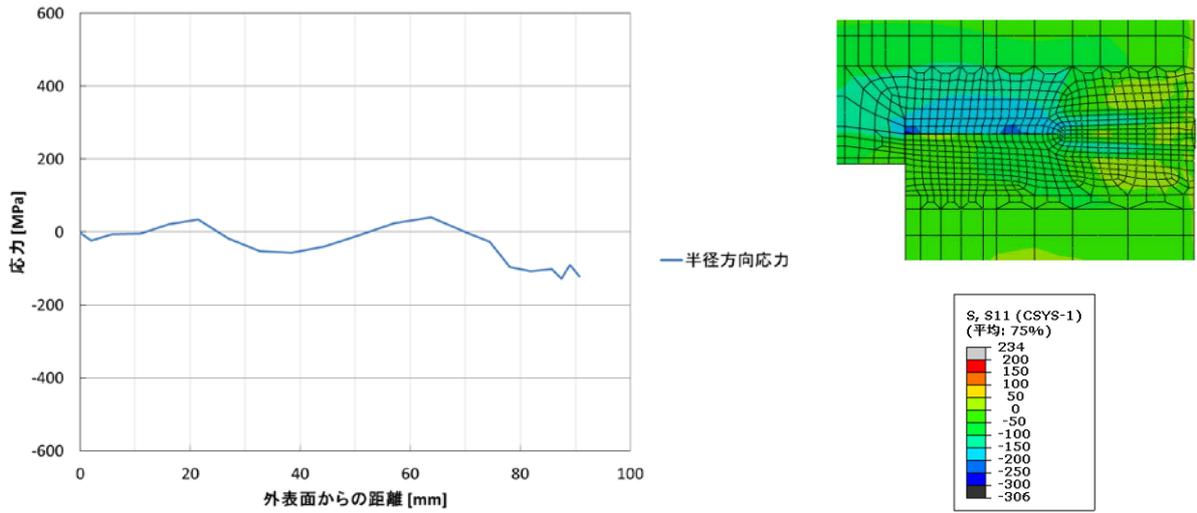


図 5.3.2-4 溶接金属部の深さ方向応力分布図（半径方向応力）

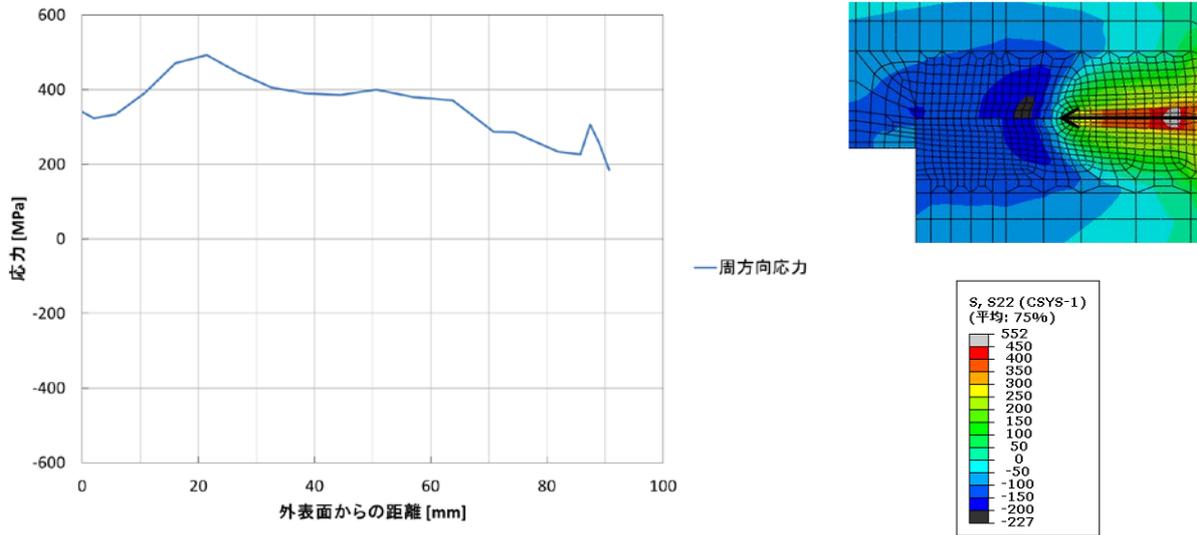


図 5.3.2-5 溶接金属部の深さ方向応力分布図（周方向応力）

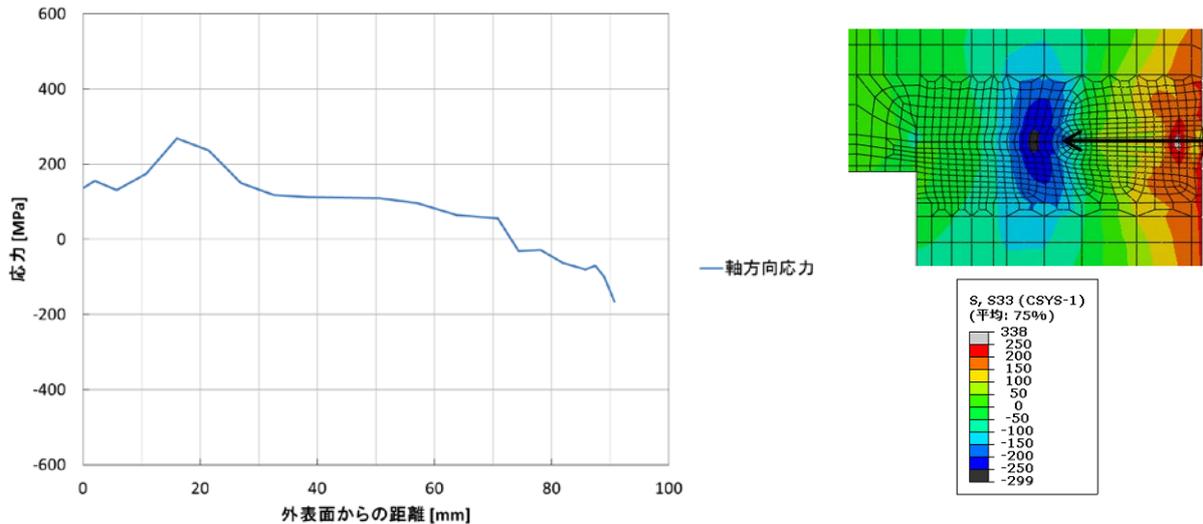


図 5.3.2-6 溶接金属部の深さ方向応力分布図（軸方向応力）

## 5.4 溶接残留応力低減解析

### 5.4.1 解析条件

溶接部の残留応力に対して、外面誘導加熱応力改善法（EIHSI 法）を用いた残留応力低減効果の解析を行う。EIHSI 法による残留応力低減解析の検討においては、平成 28 年度に実施した開先深さ 190 mm の平蓋オーバーパックの EIHSI 法の解析手順[3]に準拠し、周方向約 10 度部分を取り出したモデルを用いた予備解析による EIHSI 法のパラメータ検討、および予備解析で定めたパラメータの組合せを用いた 30 度モデルによる本解析を実施することとした。平成 28 年度に実施した平蓋オーバーパックの EIHSI 法の予備解析の解析条件を表 5.4.1-1 と表 5.4.1-2 および図 5.4.1-1 と図 5.4.1-2 に示す。本検討における EIHSI 加熱および急冷条件は、これらを参考として設定し解析を実施した。具体的な解析条件については後述する。

表 5.4.1-1 平成 28 年度に実施した EIHSI 法の予備解析条件

解析ケース	加熱条件			保温時間 (注1)	冷却条件(注2)			
	Heater 1	Heater 2	Heater 3		急冷部	領域2	領域1	
トライアル1	PWHT	PWHTと同様の条件			-	スプレー冷却	自然空冷	自然空冷
	0.25W/mm <sup>2</sup>	0.250	0.250	0.250	-	スプレー冷却	自然空冷	自然空冷
	0.50W/mm <sup>2</sup>	0.500	0.500	0.500	-	スプレー冷却	自然空冷	自然空冷
トライアル2	PWHT	PWHTと同様の条件			-	スプレー冷却	スプレー冷却	自然空冷
	0.25W/mm <sup>2</sup>	0.025	0.250	0.010	-	スプレー冷却	スプレー冷却	自然空冷
	0.50W/mm <sup>2</sup>	0.025	0.500	0.010	-	スプレー冷却	スプレー冷却	自然空冷
トライアル3	PWHT	PWHTと同様の条件			-	ラミネー冷却	ラミネー冷却	自然空冷
	0.25W/mm <sup>2</sup>	0.025	0.250	0.010	-	ラミネー冷却	ラミネー冷却	自然空冷
トライアル4	15分	0.025	0.250	0.010	15分	スプレー冷却	スプレー冷却	自然空冷
	20分	0.025	0.250	0.010	20分	スプレー冷却	スプレー冷却	自然空冷
	30分	0.025	0.250	0.010	30分	スプレー冷却	スプレー冷却	自然空冷

注 1 : Heater2 加熱面が 600℃前後を維持するように加熱

注 2 : 急冷は 600 秒

急冷後は底面を除く外面を自然空冷（5時間）

表 5.4.1-2 トライアル 1~3 の PWHT 条件の詳細加熱条件

	Stepの時間 [s]		Heater1	Heater2	Heater3
			[ W/mm <sup>2</sup> ]		
Step 1	14580	開始時	0.025	0.018	0.010
		終了時	0.025	0.033	0.020
Step 2	11454.5	開始時	0.025	0.034	0.020
		終了時	0.025	0.021	0.020

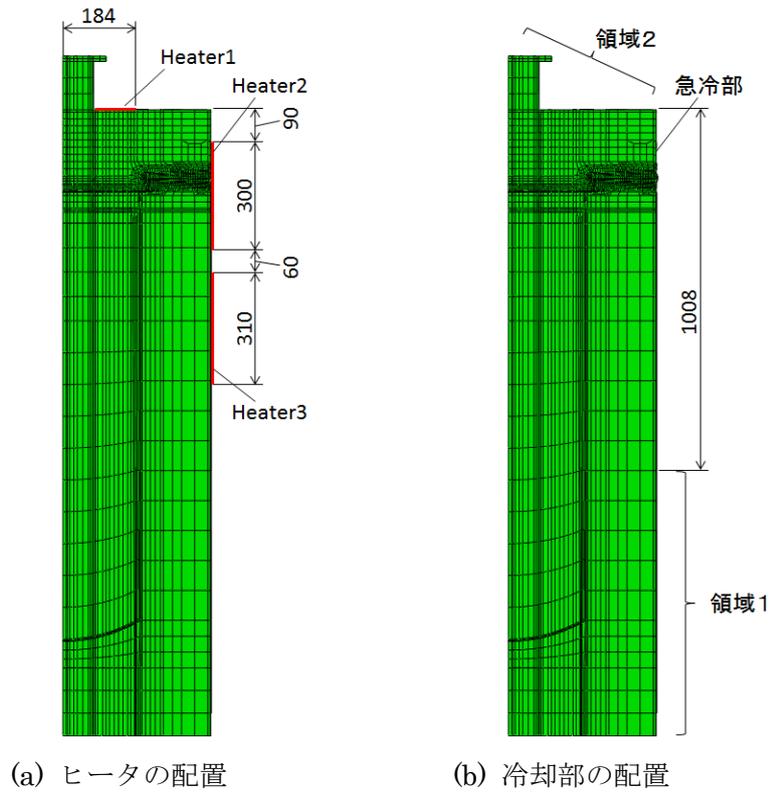


図 5.4.1-1 ヒータおよび断熱材および冷却部の配置

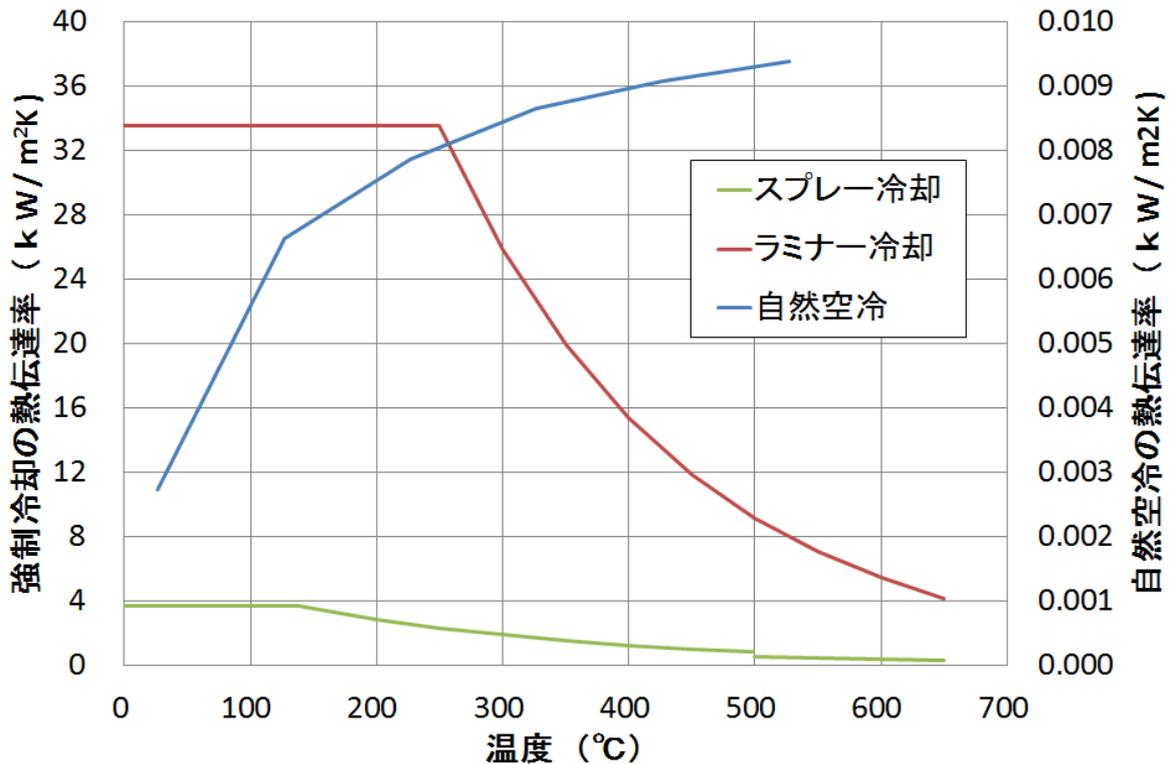


図 5.4.1-2 各冷却条件における熱伝達率の温度依存性

#### 5.4.2 熱処理条件の設定のための予備解析

平成 28 年度に実施した平蓋形状のオーバーパックでの EIHSI 法による残留応力低減解析の手順と物性値[2]に準拠し、予備解析を実施した。予備解析では、5.3.2 項で求めた残留応力分布に対して、加熱方法（入熱量）と冷却方法（熱伝達条件）について、加熱時の入熱量や急冷時の熱伝達率などをパラメータとして、以下の手順により腐食代に相当する 40 mm 程度の部分を圧縮応力に改善する熱処理条件を検討した。

##### (1) 解析手順

- ① ガラス固化体の発熱を考慮したオーバーパックの初期温度解析
  - ・ガラス固化体の発熱量（3.67 kJ/s・m<sup>3</sup>）を考慮し、定常熱伝導解析で初期温度分布を算出
  - ・ガラス固化体とオーバーパック間の空気層をモデル化し、熱授受を考慮
  - ・解析に用いる空気の熱物性値および熱境界条件は表 5.2.2-1 に準拠
- ② ガラス固化体の発熱と EIHSI 施工条件を考慮した温度解析
  - ・EIHSI 施工条件を模擬した非定常熱伝導解析の実施
  - ・ガラス固化体の温度は制限温度（500°C）以下とする
- ③ の温度解析結果を用いた溶接残留応力解析
  - ・解析に用いるオーバーパックの機械的特性値は、平成 28 年度の蓋部模擬溶接試験体の残留応力解析[3]に用いた値を使用した。（図 5.2.2-2 から図 5.2.2-5 参照）

## (2) 解析モデルと解析ケース

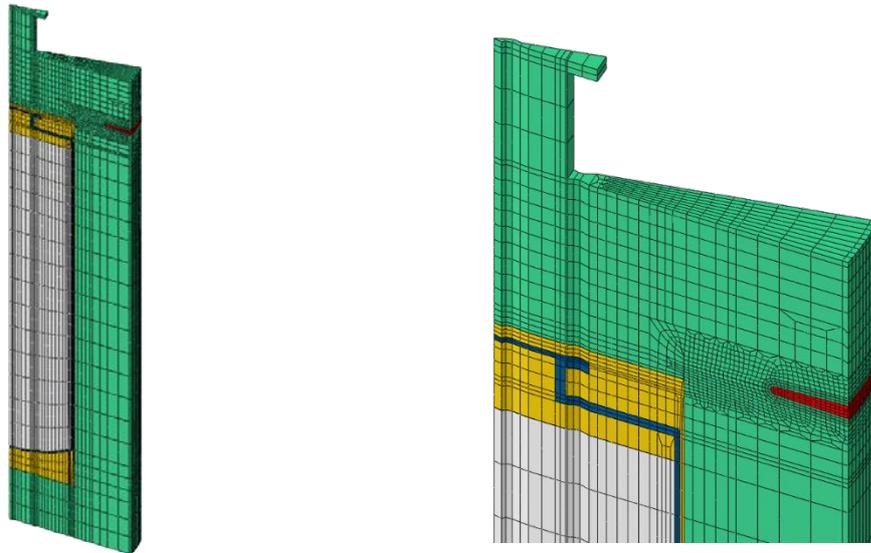
予備解析では、EIHSI 法の入熱量や冷却方法などの施工パラメータの組合せについて検討するため、図 5.2.3-1 に示す溶接残留応力解析に用いた 3 次元モデルのうち、図 5.4.2-1 に示す周方向約 10° 部分をとりだしたモデルを用いて、EIHSI 法の施工を模擬した解析を行った。

表 5.4.2-1 に予備解析で実施した解析ケースの一覧を示す。予備解析では、平成 28 年度の検討で選定した EIHSI 施工条件、すなわち表 5.4.1-1 におけるトライアル 4 の保温時間 30 分のケースを初期検討条件とし、ヒータの加熱条件と保温時間および冷却領域の冷却条件を変更することで、初期残留応力分布がどのように改善されるかについて比較を行った。加熱時のヒータ位置および冷却時の急冷領域の位置を図 5.4.2-2 に示す。冷却時の急冷方法としては噴霧（スプレー）冷却、噴流（ラミナー）冷却を想定し、急冷部以外については自然対流による自然空冷とした。それぞれの冷却方法における熱伝達率は、平成 28 年度の EIHSI 解析で用いた値（図 5.4.1-2 参照）を用いた。

トライアル 1 は平成 28 年度に選定した EIHSI 条件であるが、加熱時の表面温度が目安としている 600°C を超える結果（623°C）となったため、トライアル 2 では加熱部の温度を下げるために Heater2 の入熱を下げるるとともに、蓋部の温度が下がりすぎないように Heater2 のサイズを大きくした。トライアル 3 はトライアル 2 において入熱が微小である Heater1 と Heater3 の入熱をゼロにするとともに、加熱後の保温時間を変えた解析ケース群、トライアル 4 は Heater2 の入熱を下げて加熱時間を変えた解析ケース群、トライアル 5 は急冷方法を変えた解析ケース群、トライアル 6 は Heater2 および Heater3 の入熱を変えた解析ケース群、トライアル 7 はトライアル 6 の入熱条件の下、冷却時の領域 2 の冷却を自然空冷にしつつ急冷時間を変えた解析ケース群である。

表 5.4.2-1 各解析ケースのヒータの加熱条件と保温時間および冷却領域の冷却条件

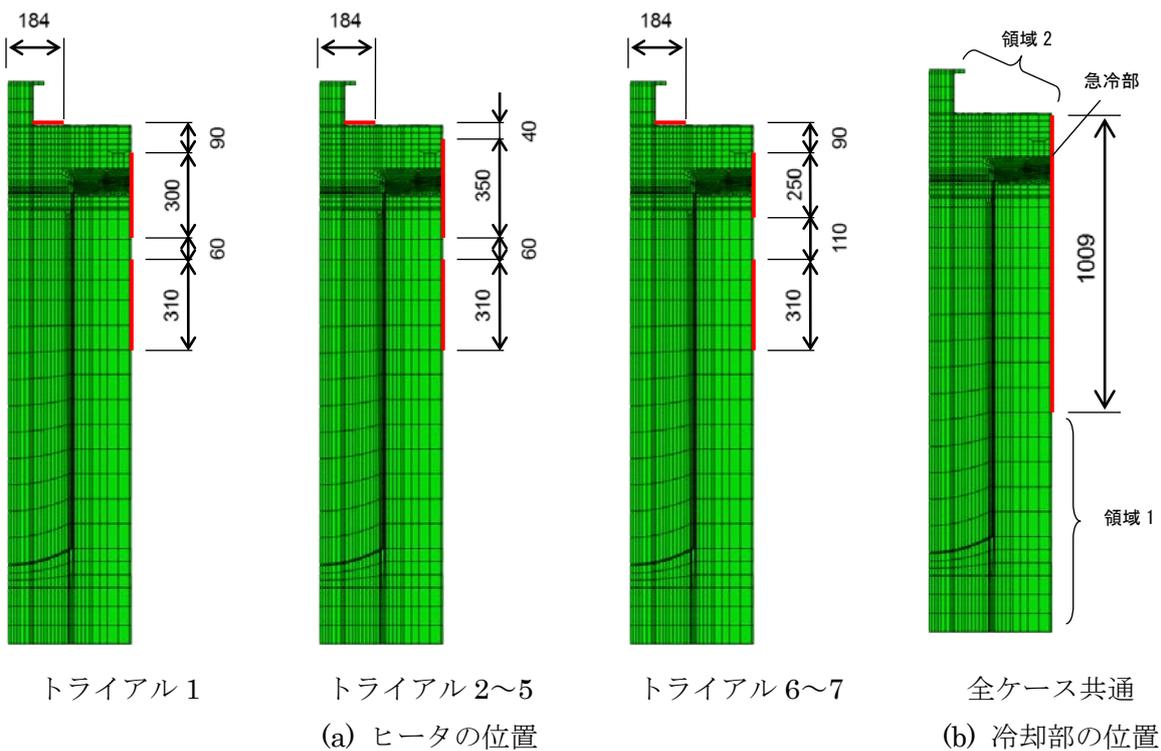
解析ケース	加熱条件			加熱時間	保温時間	冷却条件				
	Heater 1	Heater 2	Heater 3			急冷部	領域 2	領域 1	急冷時間	
[W/mm <sup>2</sup> ]										
トライアル 1	0.025	0.25	0.01	10分	30分	スプレー冷却	スプレー冷却	自然空冷	10分	
トライアル 2	0.025	0.24	0.01	10分	30分	スプレー冷却	スプレー冷却	自然空冷	10分	
トライアル 3	-1	0	0.24	0	10分	30分	スプレー冷却	スプレー冷却	自然空冷	10分
	-2	0	0.24	0	10分	60分	スプレー冷却	スプレー冷却	自然空冷	10分
	-3	0	0.24	0	10分	10分	スプレー冷却	スプレー冷却	自然空冷	10分
トライアル 4	-1	0	0.192	0	10分	60分	スプレー冷却	スプレー冷却	自然空冷	10分
	-2	0	0.192	0	15分	60分	スプレー冷却	スプレー冷却	自然空冷	10分
トライアル 5	-1	0	0.24	0	10分	60分	ラミナー冷却	ラミナー冷却	自然空冷	10分
	-2	0	0.24	0	10分	60分	スプレー冷却	スプレー冷却	自然空冷	2分
トライアル 6	-1	0	0.24	0	10分	60分	スプレー冷却	スプレー冷却	自然空冷	10分
	-2	0	0.24	0.1	10分	60分	スプレー冷却	スプレー冷却	自然空冷	10分
	-3	0	0.24	0.15	10分	60分	スプレー冷却	スプレー冷却	自然空冷	10分
トライアル 7	-1	0	0.24	0.15	10分	60分	スプレー冷却	自然空冷	自然空冷	10分
	-2	0	0.24	0.15	10分	60分	スプレー冷却	自然空冷	自然空冷	5分



(a) モデル全体

(b) 溶接部近傍拡大図

図 5.4.2-1 予備解析に用いた平蓋オーバーパック解析モデル（温度解析モデル）



トライアル 1

トライアル 2～5

トライアル 6～7

全ケース共通

(a) ヒータの位置

(b) 冷却部の位置

図 5.4.2-2 ヒータおよび冷却部の配置

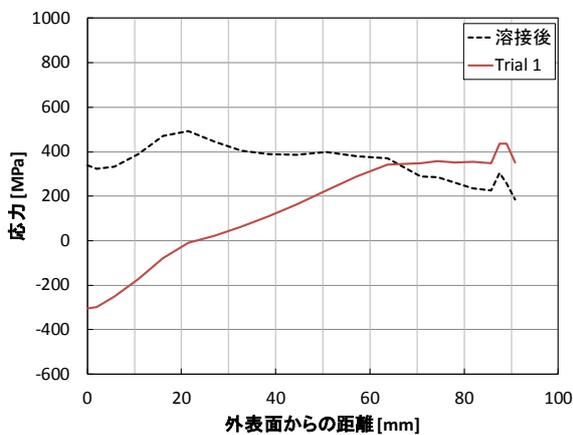
### (3) 解析結果

各解析ケースの温度解析の結果から応力解析により得られた周方向および軸方向の残留応力分布図を図 5.4.2-3 から図 5.4.2-9 に示す。トライアル 1 から 7 の解析ケース（全 14 ケース）の解析を実施した結果、以下のことが分かった。

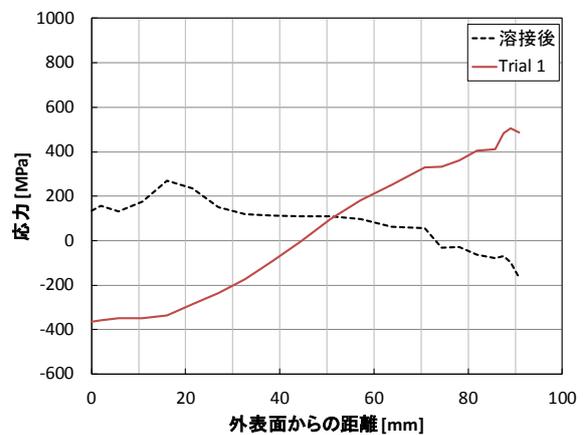
- 外表面近傍の周方向と軸方向の応力分布を比較すると、軸方向応力に比べて周方向応力の応力分布が圧縮応力になりにくかった。
- 周方向応力、軸方向応力ともに外面から 40 mm 深さまで圧縮応力に改善できるのは、トライアル 3-2、トライアル 4-2、およびトライアル 5-1 の 3 ケースであった。これらの 3 ケースにおける周方向応力と軸方向応力の比較を図 5.4.2-10 に示す。

図 5.4.2-10 より、トライアル 5-1 が周方向に最も深くまで圧縮応力にすることができることがわかったが、ここでは以下の理由により、トライアル 3-2 を本解析の条件として選定することとした。

- トライアル 5-1 は急冷方法としてラミナー冷却（噴流冷却）を想定しているケースであり、外周全体を均一に冷却することがスプレー冷却に比べて難しいと考えられる。
- トライアル 4-2 は、トライアル 3-2 に比べ、加熱時間が長い。

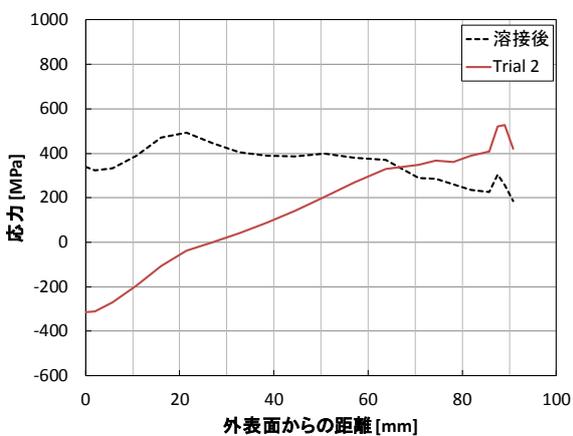


(a) 周方向

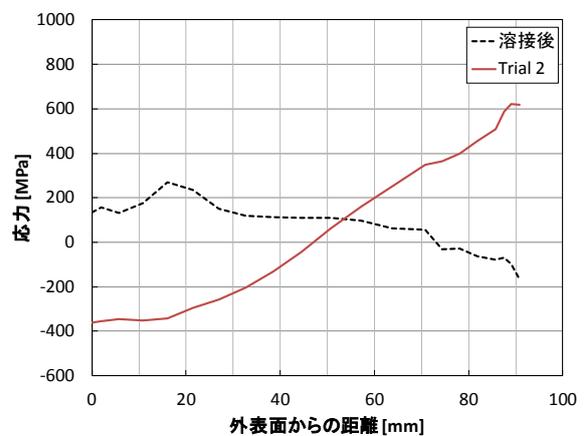


(b) 軸方向

図 5.4.2-3 EIHISI 法施工後の溶接金属内部の残留応力分布（トライアル 1）

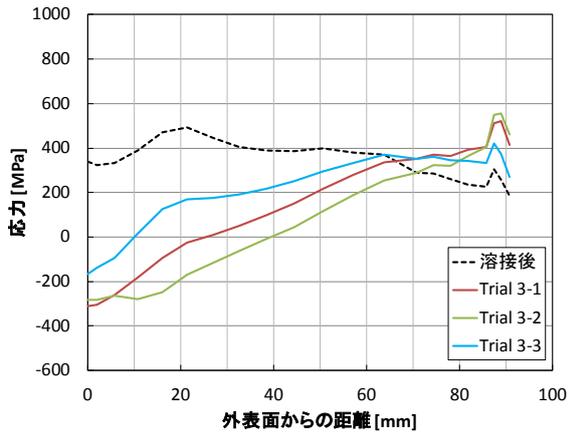


(a) 周方向

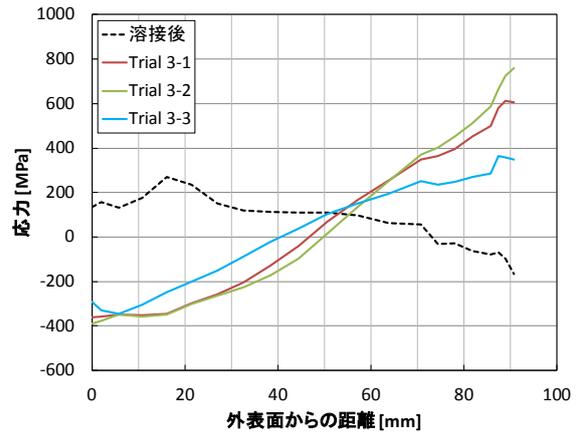


(b) 軸方向

図 5.4.2-4 EIHISI 法施工後の溶接金属内部の残留応力分布（トライアル 2）

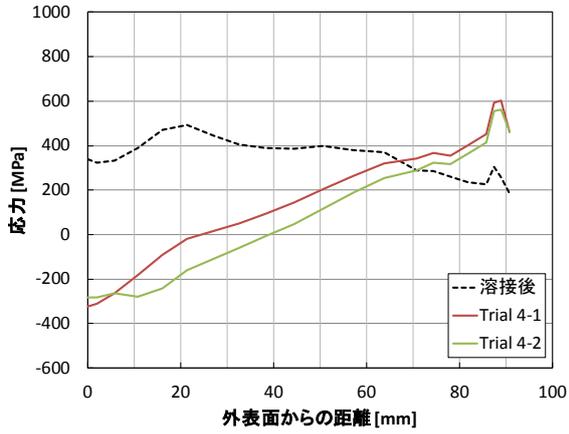


(a) 周方向

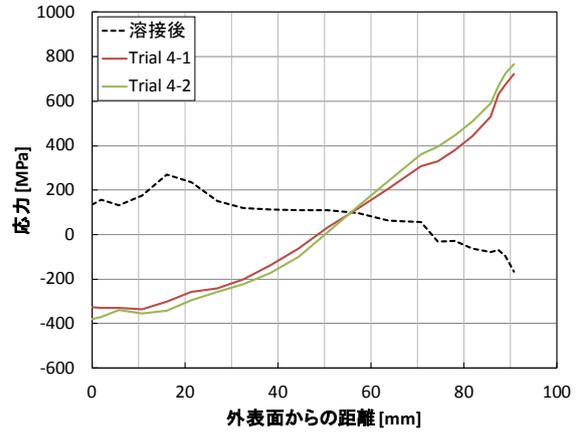


(b) 軸方向

図 5.4.2-5 EIHSI 法施工後の溶接金属内部の残留応力分布 (トライアル 3)

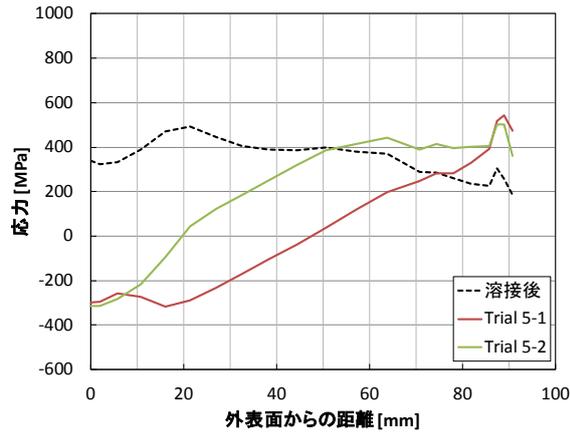


(a) 周方向

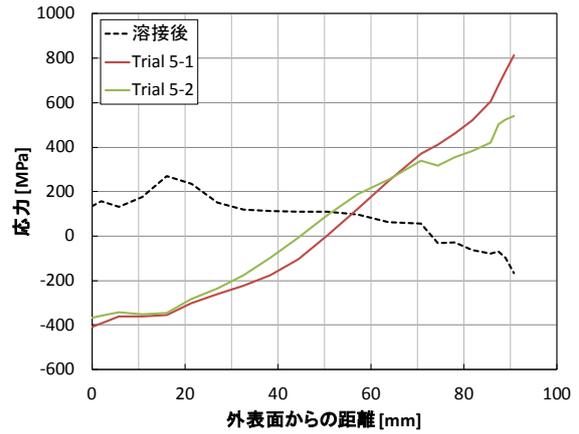


(b) 軸方向

図 5.4.2-6 EIHSI 法施工後の溶接金属内部の残留応力分布 (トライアル 4)

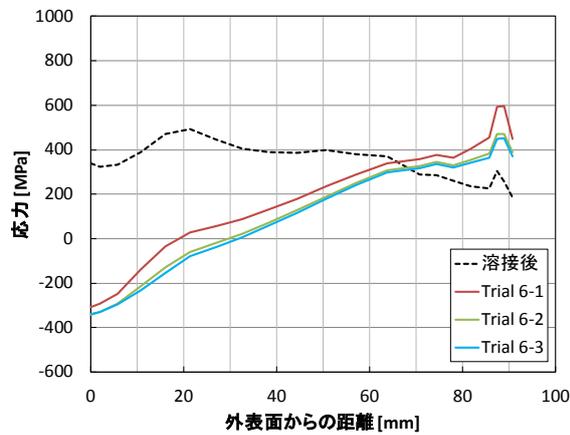


(a) 周方向

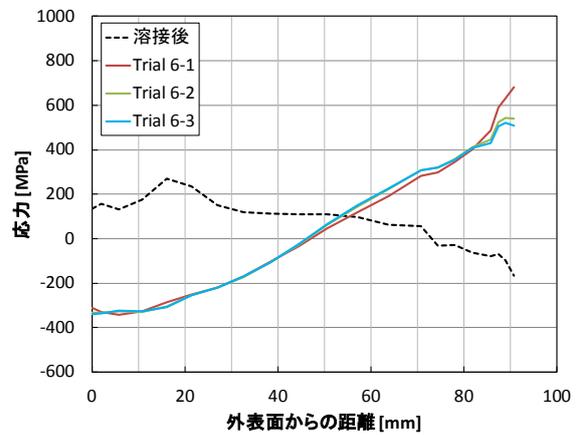


(b) 軸方向

図 5.4.2-7 EIHSI 法施工後の溶接金属内部の残留応力分布 (トライアル 5)

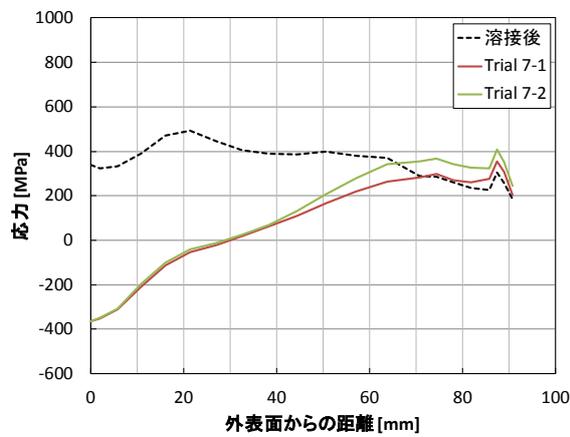


(a) 周方向

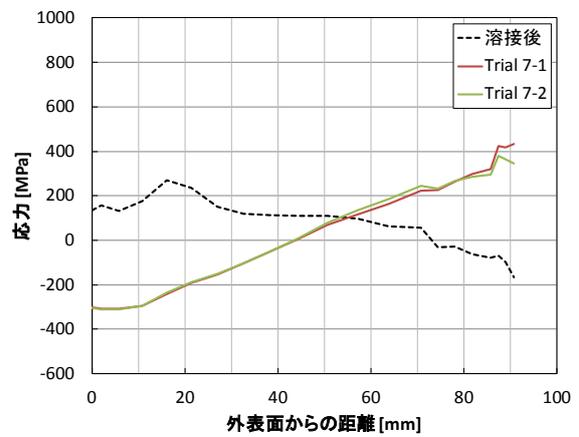


(b) 軸方向

図 5.4.2-8 EIHSI 法施工後の溶接金属内部の残留応力分布 (トライアル 6)

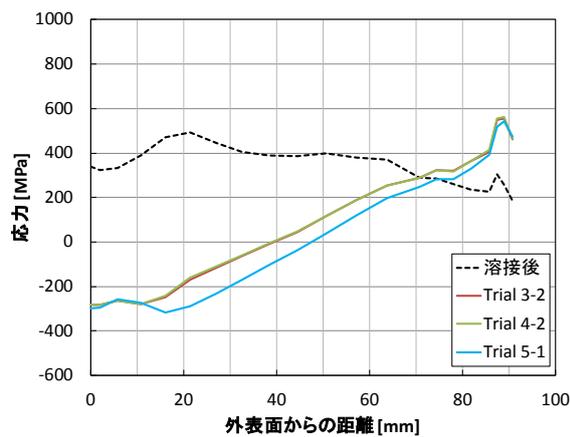


(a) 周方向

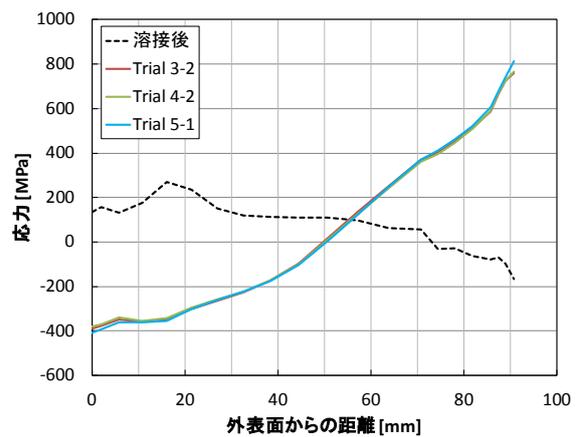


(b) 軸方向

図 5.4.2-9 EIHSI 法施工後の溶接金属内部の残留応力分布 (トライアル 7)



(a) 周方向



(b) 軸方向

図 5.4.2-10 40 mm 深さまで圧縮となる EIHSI 法予備解析結果の比較

### 5.4.3 溶接残留応力改善のための温度解析

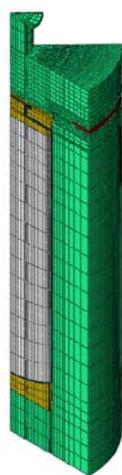
予備解析で選定した熱処理条件で EIHSI 法を施工したときの残留応力分布を計算するために、まず、溶接残留応力解析に用いた 3 次元モデルを使用して温度解析を行った。

#### 1) 解析手順

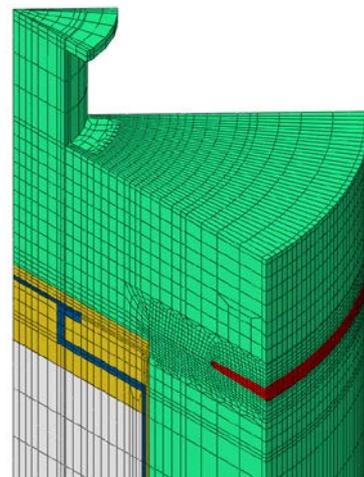
予備解析と同様の解析手順で本解析を実施した。EIHSI 法の施工条件は、予備解析のトライアル 3-2 とした。

#### 2) 解析モデル

解析モデルは、溶接残留応力解析で使用した実規模の解析モデルとした。温度解析に用いた 45 度モデルを図 5.4.3-1 に示す。



(a) 全体図



(b) 溶接部近傍の拡大図

図 5.4.3-1 温度解析モデル (45 度モデル)

### 3) 解析結果

温度解析で得られた急冷開始時、および急冷終了時の温度分布を図 5.4.3-2 に示す。また、図 5.4.3-2 に示す①と②の位置における EIHSI 法施工中のガラス固化体の温度履歴を図 5.4.3-3 に示す。同図より、ガラス固化体の最高到達温度は 227°C であり、制限温度である 500°C 以下に抑えられていることが確認できた。

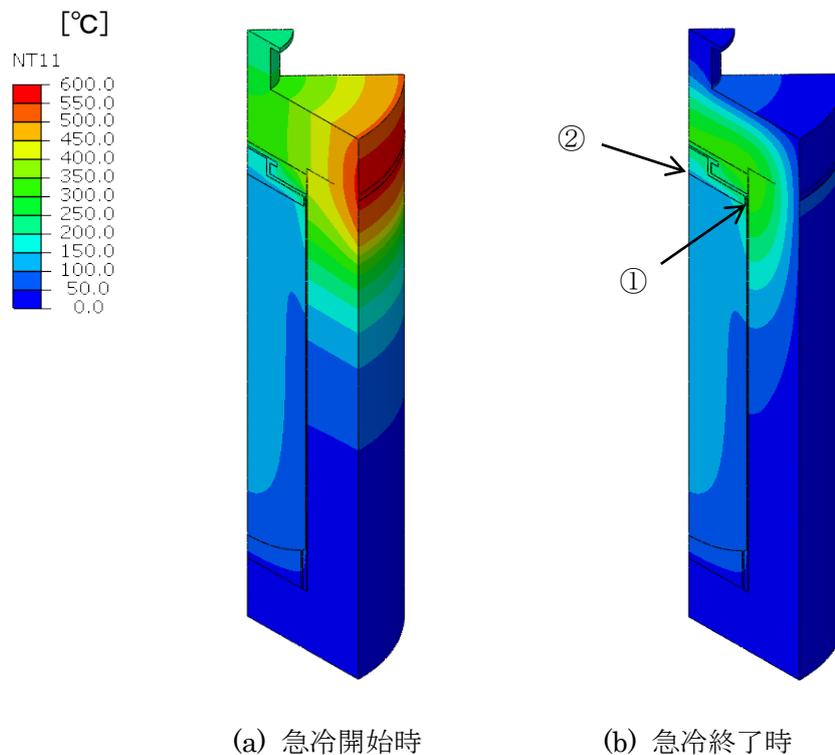


図 5.4.3-2 急冷開始時および急冷終了時の温度分布

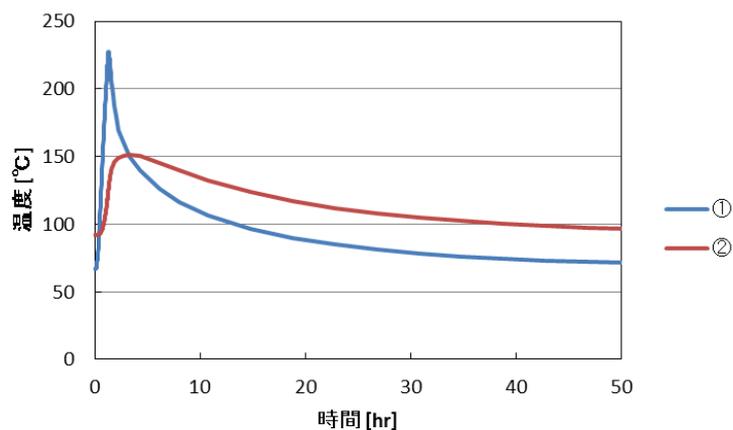


図 5.4.3-3 ガラス固化体の温度履歴  
(①、②の位置は図 5.4.3-2 に対応)

#### 5.4.4 溶接残留応力改善のための応力解析

予備解析で選定した熱処理条件で腐食代に相当する 40 mm 程度の範囲の溶接残留応力が圧縮応力に改善されていることを確認するため、溶接残留応力解析に用いた 3 次元モデルを使用した解析を行った。

##### 1) 解析手順

予備解析と同様の解析手順で本解析を実施した。

##### 2) 解析モデル

解析モデルは、溶接残留応力解析で使用した実規模の解析モデルとした。応力解析に用いた 30 度モデルを図 5.4.4-1 に示す。

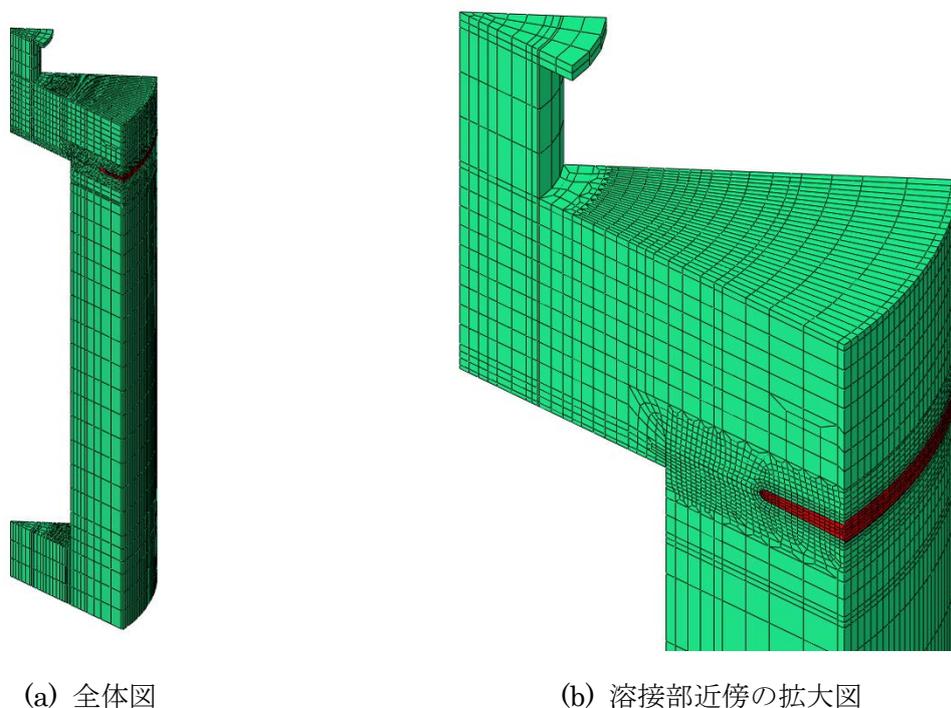
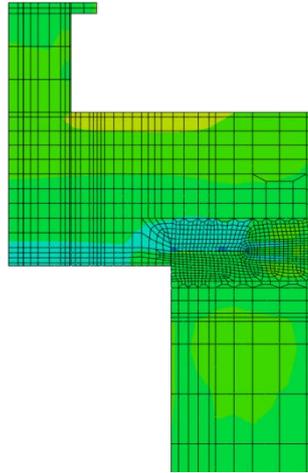
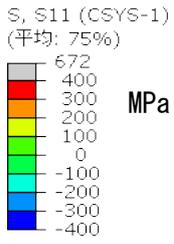


図 5.4.4-1 温度解析モデル (30 度モデル)

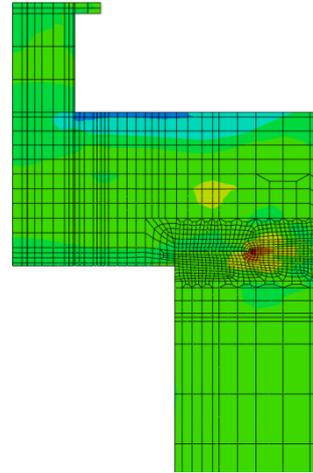
##### 3) 解析結果

応力解析から得られた半径方向応力、周方向応力および軸方向応力の分布図を図 5.4.4-2 から図 5.4.4-4 に示す。また、溶接金属内部の残留応力分布を図 5.4.4-5 に示す。

溶接残留応力解析に使用した実規模の 3 次元モデルを用い、予備解析で選定した計算条件（トライアル 3-2）にて EIHSI 法の解析を行ったところ、軸方向応力、周方向応力ともに外表面から 40 mm 程度の深さまで圧縮応力となり、予備解析結果とほぼ同等の残留応力分布が得られた。径方向応力は引張応力となっているが、この方向の応力成分は脆化割れの駆動力とはならない。

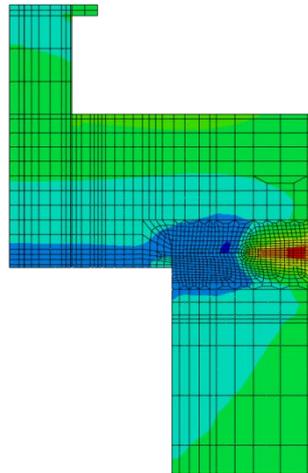
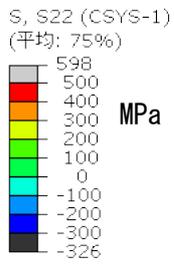


(a) 溶接後

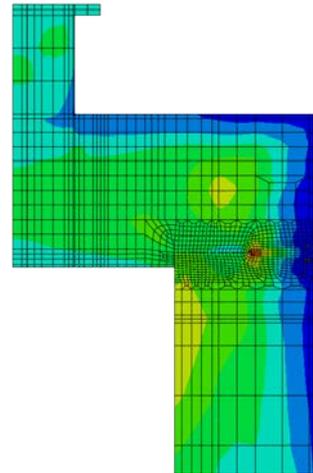


(b) EIHSI 法施工後

図 5.4.4-2 EIHSI 法施工による半径方向応力分布の変化

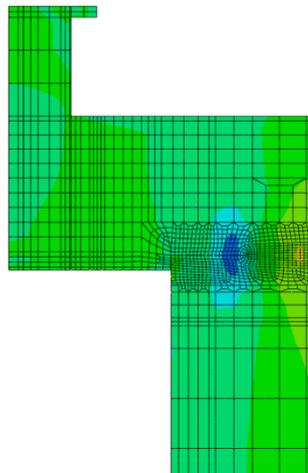
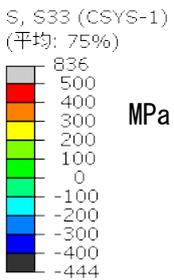


(a) 溶接後

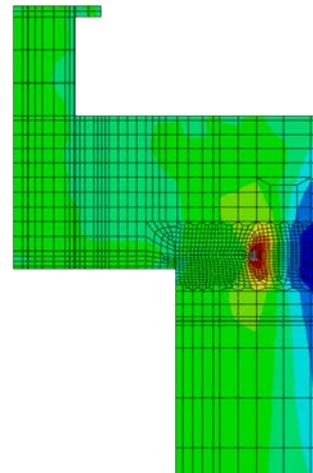


(b) EIHSI 法施工後

図 5.4.4-3 EIHSI 法施工による周方向応力分布の変化

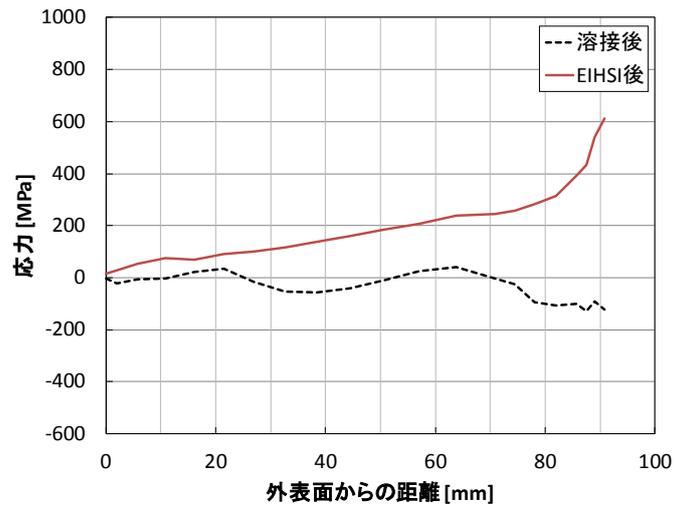


(a) 溶接後

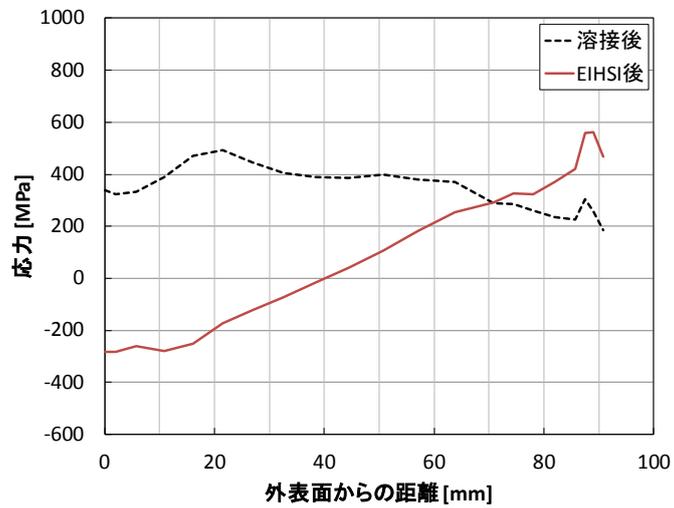


(b) EIHSI 法施工後

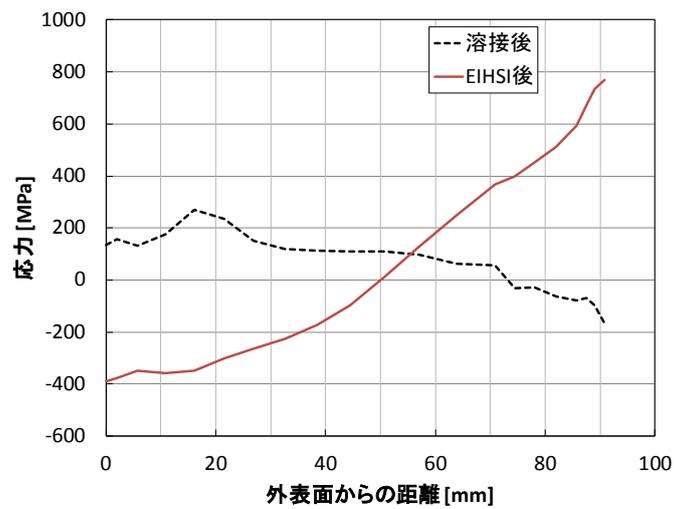
図 5.4.4-4 EIHSI 法施工による軸方向応力分布の変化



(a) 半径方向



(b) 周方向



(c) 軸方向

図 5.4.4-5 EIHSI 法施工後の溶接部の残留応力分布

## 5.5 本章のまとめ

開先深さ 90 mm の平蓋形状のオーバーパックを対象に溶接部残留応力解析、および EIHSI 法解析により EIHSI 法による残留応力低減効果を確認した。

その結果、溶接部で懸念される溶接残留応力に起因する外表面からの応力腐食割れを想定する場合に寄与が大きいと考えられる軸方向応力について、EIHSI 法の施工により腐食代に相当する外表面から 40 mm の深さまで圧縮応力場に改善することができた。複数の予備解析を通じて、周方向応力についても軸方向応力と同時に外表面から 40 mm の深さまで圧縮応力場に改善する EIHSI 法の条件を確認することができた。

EIHSI 法による外面の応力改善の原理は、加熱後に外面を急冷することで急冷部に引張塑性ひずみを発生させ、冷却後に圧縮応力にするものである。軸方向残留応力分布は、溶接金属部の断面で引張応力と圧縮応力が釣り合うように分布するため、外面を圧縮応力にすることで内部は引張応力になる。

今回選定した EIHSI 法の施工条件では、軸方向応力が外面では圧縮応力となったため、溶接金属内部・外表面から 90 mm 位置では 767 MPa の引張応力となった。しかし、仮に初層付近に溶接欠陥が存在し、そこを起点にき裂が発生したとしても、周方向に局所的なき裂であれば溶接金属内部の応力分布に大きな変化は生じず、溶接金属の外面側(外面から 50 mm 深さより浅い部分)では圧縮応力場となっているため、破壊には至らないと考えられる。ただし、軸方向と周方向の両方の応力のピーク値が大きいため、局所き裂が生じた場合の影響についてさらなる検討が必要である。今後、残留応力ピーク値の低減方法の検討が課題となる。

今後、実証試験としてオーバーパックのフルスケールモデルに対する溶接後および EIHSI 法の施工後、深さ方向の応力分布を実測し、実測結果を解析結果と比較することで、残留応力低減解析の適用性を確認する必要がある。

## 第5章 参考文献

- [1] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 17 年度地層処分技術調査等 遠隔操作技術高度化調査報告書 (1/3) (2006).
- [2] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 27 年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発のうち 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック (2016).
- [3] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発のうち 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック (2017).

## 第6章 溶接部の非破壊検査技術の信頼性向上

### 6.1 背景および目的

平成24年度までに、オーバーパックの製作・施工に関する検討を実施し、封入技術や非破壊検査技術の適用性を示すとともに、封入技術として溶接手法の適用性を確認した。平成25年度からは、オーバーパックが想定される期間の閉じ込め機能を有することを判断するための指標、指標に対する許容値を提示するための検討を実施している。

オーバーパックの健全性に影響をおよぼす要因の一つとして、溶接時に発生する可能性のある溶接欠陥が考えられる。オーバーパックは、定置後の検査や補修が想定されていないため、定置前の溶接部の検査により溶接欠陥の寸法や位置を測定する必要がある。測定された溶接欠陥が許容欠陥寸法よりも小さければ、その欠陥は無害と判断することができる。したがって、オーバーパックの健全性を判断するために、超音波探傷法により測定される欠陥寸法と位置の誤差を把握することが重要になる。

超音波探傷により測定される欠陥寸法および位置には測定誤差が含まれ、欠陥寸法の測定値が実欠陥寸法より小さい、すなわち過小評価する場合には非保守側の評価となる可能性があり、逆に測定値の方が大きく過大評価する場合には、保守側の評価となるものの検査で不合格となるオーバーパックが増え、作業上の問題となる可能性がある。したがって、オーバーパックの健全性を判断するためには、超音波探傷による測定値の精度と信頼性を確認することが必要である。本章では、超音波探傷法による溶接欠陥の寸法および位置を定量化するとともに、測定精度を向上させることを目的とする。

### 6.2 溶接欠陥の寸法および位置の測定値に対する安全係数の検討

#### 6.2.1 欠陥寸法誤差の分析方法の事例

非破壊検査による欠陥のサイジング精度について、過去のプロジェクトにおける深さサイジング測定におけるサイジング精度評価を例に挙げ、その評価方法について述べる。

平成7年度から16年度までの間実施された「超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度の確認」(以下、UTS)では、原子力発電所の主要機器に対する供用期間中検査(ISI)で主に適用されている超音波探傷試験(UT)の欠陥検出およびサイジングの評価が行われた[1]。UTSでは欠陥深さサイジング精度について欠陥深さ測定の誤差平均( $\mu$ )、標準偏差( $\sigma$ )、RMS誤差、回帰係数、相関係数を算出して評価を行っている。以下に各値について記す。

- ・ 誤差平均：深さ  $d_i$  の欠陥  $i$  に対する、UT 測定による深さ測定値 ( $m_i$ ) の誤差 ( $x_i = m_i - d_i$ ) の平均値(測定した欠陥数は  $n$ )。UT による深さ測定の誤差の傾向を表す。

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - d_i)}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{式(6.2.1-1)}$$

- ・標準偏差：UT による深さ測定値 ( $m_i$ ) の誤差の標準偏差。誤差平均  $\mu$  からの深さ測定値 ( $m_i$ ) のばらつきを表す。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(m_i - d_i) - \mu]^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad \text{式(6.2.1-2)}$$

- ・RMS 誤差：UT による深さ測定値 ( $m_i$ ) の平均二乗誤差の平方根 (Root Mean Squared Error。以下、RMS 誤差)。深さ測定値 ( $m_i$ ) の真の欠陥深さ  $d_i$  に対するばらつきを表す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - d_i)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad \text{式(6.2.1-3)}$$

- ・相関係数：欠陥深さ  $d_i$  と UT 測定による深さ測定値 ( $m_i$ ) の相関係数。欠陥深さ  $d_i$  と深さ測定線が等しい場合の線 (以下、理想線) からのばらつきを表す (1 に近づくほど、理想線に近づく)。なお、次式においては、 $\bar{d}$  は欠陥深さ  $d_i$  の平均値を表す。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \mu)(d_i - \bar{d})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - \mu)^2 \times \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}} \quad \text{式(6.2.1-4)}$$

- ・回帰定数：単回帰分析によって得られたフィット直線の傾き

UTS では電子力発電プラントの実機の圧力容器、配管を模擬した試験体を製作し、UT による欠陥深さ測定を行い、各部位におけるサイジング精度の評価が行われた。例として、原子炉圧力容器を想定した平板炭素鋼クラッド付疲労き裂付与試験体に対して、外面から探傷を行い、疲労き裂の深さのサイジングが行われ、淡回帰分析によるサイジングモデルが示されている。

また、平成 15 から平成 18 年に実施されたプロジェクト「低炭素ステンレス鋼の非破壊検査技術実証」(以下、NSA) において、直管ステンレス鋼における SCC 深さサイジング精度の評価が行われた[2]。それぞれ屈折角が固定された探触子を用いた現行 UT 法と、フェーズドアレイ (Phased Array、以下、PA) 探触子を用いた PA 法によって得られた SCC の深さのサイジング結果から、両手法が同等の SCC 深さサイジング精度を有していることが報告されている。

## 6.2.2 自然欠陥の寸法および位置の測定精度のデータ整理

昨年度、2 体の溶接試験体に付与した欠陥に対して FMC/TFM 及びフェーズドアレイ法により測定を実施し、断面観察による測定結果との比較を行った[3]。そして、上述の誤差分析方法を昨年度の測定結果に適用して、測定精度を整理した。

溶接試験体 2 体の外観を図 6.2.2-1 に示す。各々、溶接試験体 A および溶接試験体 B と呼称し、溶接試験体 A については表面側および裏面側から測定を行い、溶接試験体 B は表面側からのみ測定を行った。試験体の溶接部と表面側および裏面側の位置関係ならびに座標軸のイメージを図 6.2.2-2 に示す。試験体に導入された EDM スリットは溶接試験体 A では 16 個、溶接試験体 B では 8 個あり、それぞれ溶接欠陥を付与し、EDM スリットのみを対象として測定誤差を整理した。図 6.2.2-3 に各試験体における欠陥番号及び欠陥の付与位置（EDM スリットは図中に E1、E2…と表示）を示す。

昨年度実施した FMC/TFM 及びフェーズドアレイ法による測定の結果[3]から、測定精度の整理の対象とするデータを抜粋して表 6.2.2-1 から表 6.2.2-6 に示す。表中の指示番号は、試験体、探傷面、欠陥番号の組み合わせで付与した。測定精度を評価するために断面観察結果を真値として非破壊検査結果の評価を行うが、EDM スリットの溶接部側は溶け込みにより形状が不安定になっており、断面観察により真値を求めるのが困難である。このため、EDM スリットの溶接部側の端部エコーは対象外とした。対象外となる EDM スリットの溶接部側エコーは、表面側からの測定では上端エコー、裏面側からの測定では下端エコーとなる。また、溶接試験体 B については溶接線方向の長さを計測するための断面観察をしていないため、溶接試験体 B の溶接線方向の始端、終端及び長さの測定結果も対象外とした。

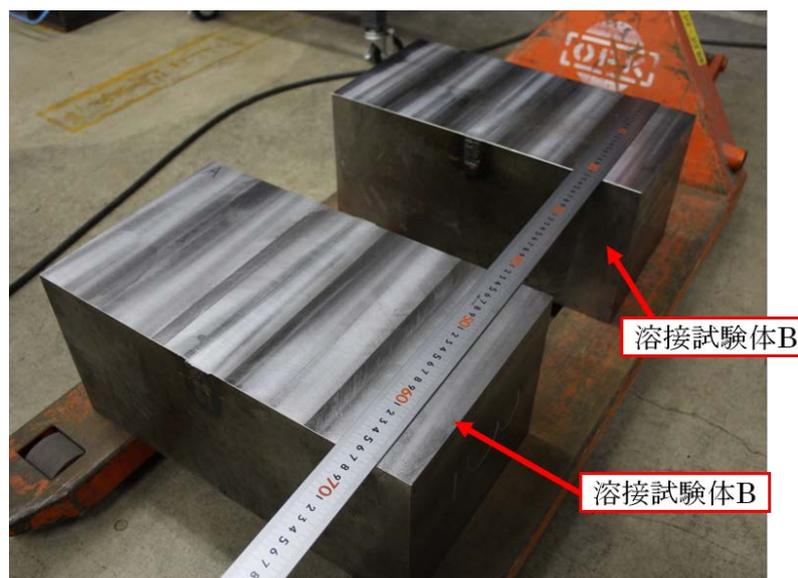


図 6.2.2-1 試験体外観

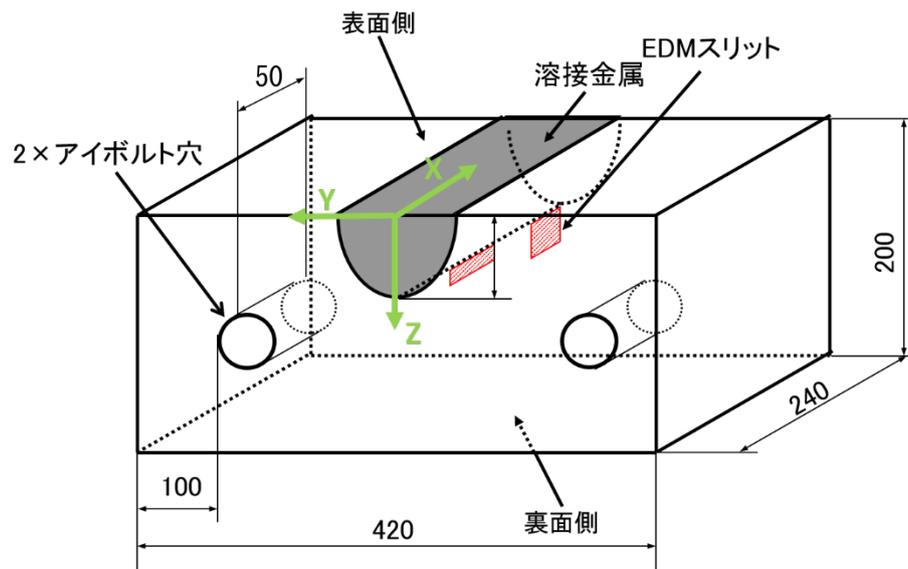
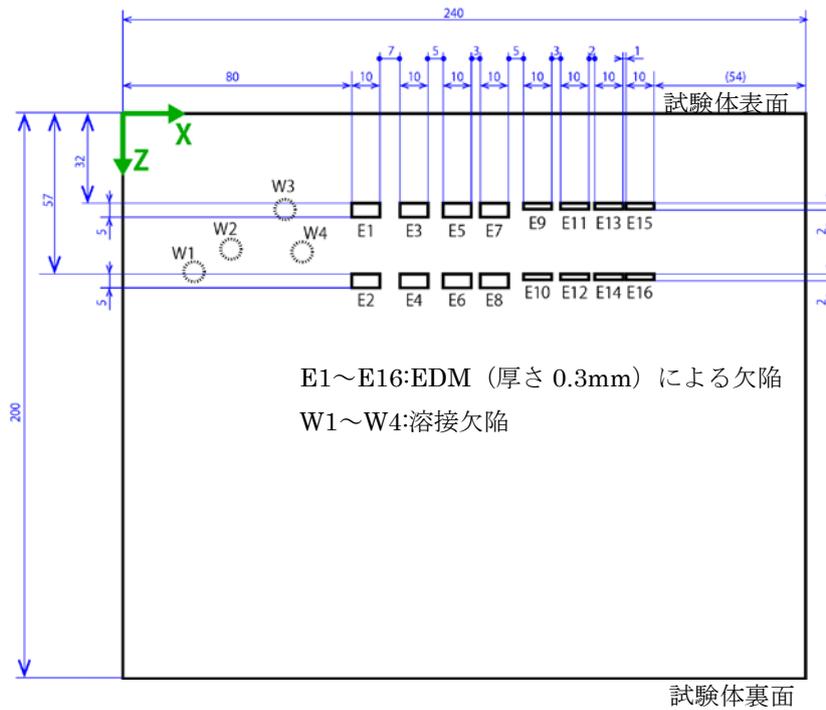
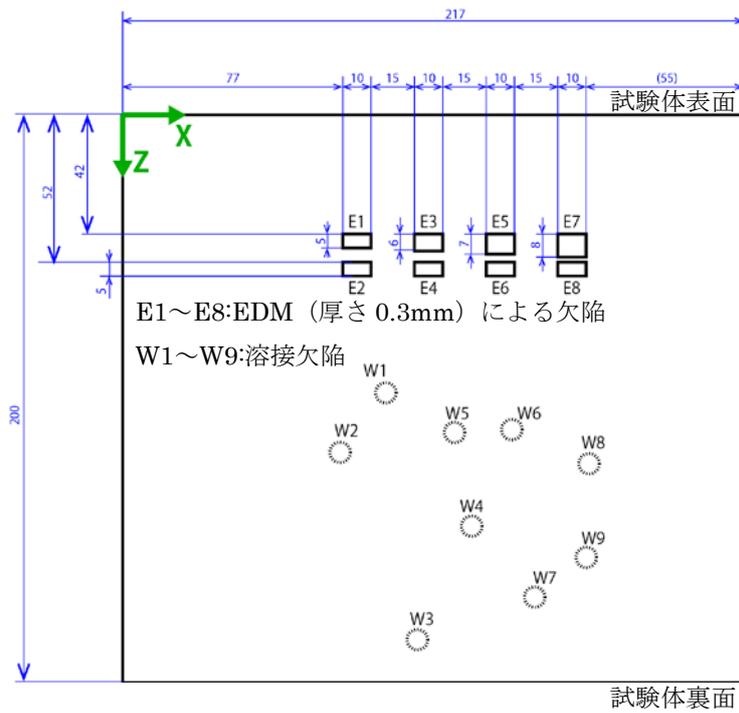


図 6.2.2-2 溶接試験体のイメージ図



(a) 試験体 A



(b) 試験体 B

図 6.2.2-3 欠陥番号および欠陥付与位置

表 6.2.2-1 試験体 A 表面からの FMC-TFM による欠陥座標および寸法測定結果

指示番号	上端・下端座標[mm]			高さ [mm]	始端 [mm]	終端 [mm]	長さ [mm]	備考
		X	Y					
IAU-E1	上端	/	/	/	80.3	92.3	12.0	
	下端	86.3	-3.3	37.9				
IAU-E2	上端	/	/	/	78.8	93.8	15.0	
	下端	86.3	-4.9	62.2				
IAU-E3	上端	/	/	/	95.3	-	-	終端: E5 と識別不可
	下端	102.8	-2.5	41.6				
IAU-E4	上端	/	/	/	95.3	107.3	12.0	
	下端	101.3	-5.8	62.6				
IAU-E5	上端	/	/	/	-	122.3	-	終端: E3 と識別不可
	下端	117.8	-2.9	39.5				
IAU-E6	上端	/	/	/	111.8	122.3	10.5	
	下端	117.8	-4.1	62.6				
IAU-E7	上端	/	/	/	-	137.3	-	
	下端	131.3	-2.9	42.0				
IAU-E8	上端	/	/	/	-	135.8	-	
	下端	131.3	-4.9	63.0				
IAU-E9	上端	/	/	/	143.3	150.8	7.5	
	下端	147.8	-3.3	36.2				
IAU-E10	上端	/	/	/	138.8	150.8	12.0	終端: X165 から測定
	下端	144.8	-5.4	60.1				
IAU-E11	上端	/	/	/	153.8	-	-	終端: E13 と識別不可
	下端	161.3	2.1	37.9				
IAU-E12	上端	/	/	/	-	-	-	終端: E14 と識別不可
	下端	159.8	-4.6	59.7				
IAU-E13	上端	/	/	/	-	174.8	-	始端: E11 と識別不可
	下端	168.8	-3.3	35.4				
IAU-E14	上端	/	/	/	-	-	-	始端・終端: E12、E16 と識別不可
	下端	170.3	-4.5	59.7				
IAU-E15	上端	/	/	/	180.8	186.8	6.0	
	下端	182.3	-3.3	36.2				
IAU-E16	上端	/	/	/	-	191.3	-	始端: E14 と識別不可
	下端	186.8	-4.9	60.6				
IAU-W1	上端	/	/	/				
	下端	/	/	/				
IAU-W2	上端	/	/	/				
	下端	/	/	/				
IAU-W3	上端	/	/	/				
	下端	/	/	/				
IAU-W4	上端	/	/	/				
	下端	/	/	/				

-: 検出不可もしくは算出不可

表 6.2.2-2 試験体 A 裏面からの FMC-TFM による欠陥座標および寸法測定結果

指示番号	上端・下端座標[mm]			高さ [mm]	始端 [mm]	終端 [mm]	長さ [mm]	備考	
		X	Y						Z
IAL-E1	上端	83.3	-0.1	36.4	/	80.3	87.8	7.5	
	下端	/	/	/					
IAL-E2	上端	83.3	-3.0	60.3	/	81.8	87.8	6.0	
	下端	/	/	/					
IAL-E3	上端	101.3	-1.4	38.8	/	96.8	105.8	9.0	
	下端	/	/	/					
IAL-E4	上端	99.8	-0.1	60.7	/	96.8	104.3	7.5	
	下端	/	/	/					
IAL-E5	上端	117.8	0.7	37.6	/	113.3	122.3	9.0	
	下端	/	/	/					
IAL-E6	上端	117.8	-3.0	60.7	/	113.3	-	-	終端:E8と識別不可
	下端	/	/	/					
IAL-E7	上端	131.3	-1.8	38.4	/	126.8	132.8	6.0	
	下端	/	/	/					
IAL-E8	上端	125.3	-0.5	61.5	/	-	132.8	-	始端:E6と識別不可
	下端	/	/	/					
IAL-E9	上端	-	-	-	/	-	-	-	検出不可
	下端	/	/	/					
IAL-E10	上端	143.3	0.7	61.1	/	-	-	-	始端・終端識別不可
	下端	/	/	/					
IAL-E11	上端	-	-	-	/	-	-	-	検出不可
	下端	/	/	/					
IAL-E12	上端	156.8	0.3	59.9	/	153.8	164.3	10.5	終端:E14と識別不可
	下端	/	/	/					
IAL-E13	上端	-	-	-	/	-	-	-	検出不可
	下端	/	/	/					
IAL-E14	上端	167.3	4.4	64.4	/	-	-	-	始端・終端:E12、E16と識別不可
	下端	/	/	/					
IAL-E15	上端	-	-	-	/	-	-	-	検出不可
	下端	/	/	/					
IAL-E16	上端	183.8	-0.1	61.5	/	-	186.8	-	始端:E14と識別不可
	下端	/	/	/					
IAL-W1	上端	/	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/					
IAL-W2	上端	/	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/					
IAL-W3	上端	/	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/					
IAL-W4	上端	/	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/					

-:検出不可もしくは算出不可

斜線:評価対象外

表 6.2.2-3 試験体 B 表面からの FMC-TFM による欠陥座標および寸法測定結果

指示番号	上端・下端座標[mm]			高さ [mm]	始端 [mm]	終端 [mm]	長さ [mm]	備考
		X	Y					
IBU-E1	上端							下端:E2 と識別不可
	下端	△	△	△				
IBU-E2	上端							上端:E1 と識別不可
	下端	84.8	-3.29	60.6				
IBU-E3	上端							下端:E4 と識別不可
	下端	△	△	△				
IBU-E4	上端							上端:E3 と識別不可
	下端	110.3	-3.70	60.6				
IBU-E5	上端							下端:E6 と識別不可
	下端	△	△	△				
IBU-E6	上端							上端:E5 と識別不可
	下端	132.8	0.42	61.4				
IBU-E7	上端							下端:E8 と識別不可
	下端	△	△	△				
IBU-E8	上端							上端:E7 と識別不可
	下端	162.8	-2.87	60.1				
IBU-W1	上端							
	下端							
IBU-W2	上端							
	下端							
IBU-W3	上端							
	下端							
IBU-W4	上端							
	下端							
IBU-W5	上端							
	下端							
IBU-W6	上端							
	下端							
IBU-W7	上端							
	下端							
IBU-W8	上端							
	下端							
IBU-W9	上端							
	下端							

△:信号は確認可能だが、隣接する反射源の信号の広がりの影響で信号の範囲を評価不可

—:検出不可もしくは算出不可

斜線:評価対象外

表 6.2.2-4 試験体 A 表面からのフェーズドアレイ法による欠陥座標および寸法測定結果

指示番号	上端・下端座標[mm]			高さ [mm]	始端 [mm]	終端 [mm]	長さ [mm]	備考
		X	Y					
IAU-E1	上端	/	/	/	80	-	-	始末端:隣接する欠陥と識別不可
	下端	85	0.0	37.1				
IAU-E2	上端	/	/	/	-	-	-	始末端:隣接する欠陥と識別不可
	下端	85	0.2	59.8				
IAU-E3	上端	/	/	/	-	-	-	始末端:隣接する欠陥と識別不可
	下端	100	0.2	37.2				
IAU-E4	上端	/	/	/	-	108	-	始末端:隣接する欠陥と識別不可
	下端	102	0.0	59.6				
IAU-E5	上端	/	/	/	-	-	-	始末端:隣接する欠陥と識別不可
	下端	118	-0.8	38.0				
IAU-E6	上端	/	/	/	113	-	-	始末端:隣接する欠陥と識別不可
	下端	119	0.4	60.1				
IAU-E7	上端	/	/	/	-	-	-	始末端:隣接する欠陥と識別不可
	下端	131	0.0	37.1				
IAU-E8	上端	/	/	/	-	-	-	始末端:隣接する欠陥と識別不可
	下端	129	-0.7	61.1				
IAU-E9	上端	/	/	/	-	-	-	下端:検出不可 始末端:隣接する欠陥と識別不可
	下端	-	-	-				
IAU-E10	上端	/	/	/	-	-	-	始末端:隣接する欠陥と識別不可
	下端	145	0.1	57.4				
IAU-E11	上端	/	/	/	-	-	-	下端:検出不可 始末端:隣接する欠陥と識別不可
	下端	-	-	-				
IAU-E12	上端	/	/	/	-	-	-	始末端:隣接する欠陥と識別不可
	下端	159	1.2	56.4				
IAU-E13	上端	/	/	/	-	-	-	下端:検出不可 始末端:隣接する欠陥と識別不可
	下端	-	-	-				
IAU-E14	上端	/	/	/	-	-	-	始末端:隣接する欠陥と識別不可
	下端	171	0.1	57.3				
IAU-E15	上端	/	/	/	-	-	-	下端:検出不可 始末端:隣接する欠陥と識別不可
	下端	-	-	-				
IAU-E16	上端	/	/	/	-	-	-	始末端:隣接する欠陥と識別不可
	下端	179	0.2	57.4				
IAU-W1	上端	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/				
IAU-W2	上端	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/				
IAU-W3	上端	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/				
IAU-W4	上端	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/				

-:検出不可もしくは算出不可

斜線:評価対象外

表 6.2.2-5 試験体 A 裏面からのフェーズドアレイ法による欠陥座標および寸法測定結果

指示番号	上端・下端座標[mm]			高さ [mm]	始端 [mm]	終端 [mm]	長さ [mm]	備考
		X	Y					
IAL-E1	上端	85	0.3	33.6	/	-	-	
	下端	/	/	/				
IAL-E2	上端	87	0.0	55.2	/	-	-	下端:検出不可
	下端	/	/	/				
IAL-E3	上端	102	-0.3	34.8	/	-	-	下端:検出不可 ※1
	下端	/	/	/				
IAL-E4	上端	102	0.0	49.6	/	-	-	下端:検出不可 ※1
	下端	/	/	/				
IAL-E5	上端	117	-0.3	34.8	/	-	-	※1
	下端	/	/	/				
IAL-E6	上端	117	-0.4	56.0	/	-	-	下端:検出不可 ※1
	下端	/	/	/				
IAL-E7	上端	130	-0.4	35.0	/	-	-	下端:検出不可 ※1
	下端	/	/	/				
IAL-E8	上端	130	-0.3	55.8	/	-	-	下端:検出不可 ※1
	下端	/	/	/				
IAL-E9	上端	145	-2.1	30.8	/	-	-	下端:検出不可 ※1
	下端	/	/	/				
IAL-E10	上端	145	0.1	55.0	/	-	-	下端:検出不可 ※1
	下端	/	/	/				
IAL-E11	上端	158	-2.1	30.8	/	-	-	下端:検出不可 ※1
	下端	/	/	/				
IAL-E12	上端	158	0.2	54.8	/	-	-	下端:検出不可 ※1
	下端	/	/	/				
IAL-E13	上端	170	-2.1	30.8	/	-	-	下端:検出不可 ※1
	下端	/	/	/				
IAL-E14	上端	170	0.2	54.7	/	-	-	下端:検出不可 ※1
	下端	/	/	/				
IAL-E15	上端	181	-2.1	30.8	/	-	-	下端:検出不可 ※1
	下端	/	/	/				
IAL-E16	上端	181	-0.3	55.7	/	-	-	下端:検出不可 ※1
	下端	/	/	/				
IAL-W1	上端	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/				
IAL-W2	上端	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/				
IAL-W3	上端	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/				
IAL-W4	上端	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/				

※1:他の EDM と識別不可、精度評価のため上端・下端座標については EDM 中心付近を測定する

-:検出不可もしくは算出不可

斜線:評価対象外

表 6.2.2-6 試験体 B 表面からのフェーズドアレイ法による欠陥座標および寸法測定結果

指示番号	上端・下端座標[mm]			高さ [mm]	始端 [mm]	終端 [mm]	長さ [mm]	備考
		X	Y					
IBU-E1	上端	/	/	/	/	/	/	※1
	下端	80	0.7	49.6	/	/	/	
IBU-E2	上端	/	/	/	/	/	/	※1
	下端	77	2.9	56.0	/	/	/	
IBU-E3	上端	/	/	/	/	/	/	※1
	下端	106	-0.3	48.6	/	/	/	
IBU-E4	上端	/	/	/	/	/	/	※1
	下端	108	-0.2	57.0	/	/	/	
IBU-E5	上端	/	/	/	/	/	/	※1
	下端	131	-0.7	50.2	/	/	/	
IBU-E6	上端	/	/	/	/	/	/	※1
	下端	133	0.9	56.0	/	/	/	
IBU-E7	上端	/	/	/	/	/	/	※1
	下端	156	-0.5	50.3	/	/	/	
IBU-E8	上端	/	/	/	/	/	/	※1
	下端	156	0.8	55.9	/	/	/	
IBU-W1	上端	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/	/	/	/	
IBU-W2	上端	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/	/	/	/	
IBU-W3	上端	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/	/	/	/	
IBU-W4	上端	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/	/	/	/	
IBU-W5	上端	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/	/	/	/	
IBU-W6	上端	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/	/	/	/	
IBU-W7	上端	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/	/	/	/	
IBU-W8	上端	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/	/	/	/	
IBU-W9	上端	/	/	/	/	/	/	
	下端	/	/	/	/	/	/	

※1:0.5mm ピッチリニアアレイプローブによる測定

-:検出不可もしくは算出不可

斜線:評価対象外

FMC/TFM およびフェーズドアレイ法による測定結果について、誤差の平均、誤差の標準偏差、RMS 誤差、相関係数、回帰定数を計算し、深さ位置の測定精度をまとめた結果を表 6.2.2-7 に、溶接線方向位置および長さの測定精度をまとめた結果を表 6.2.2-8 と表 6.2.2-9 に示す。表 6.2.2-7 に示している深さ位置の内、IAL-E1～E16 の測定値は表 6.2.2-1 および表 6.2.2-4 の測定値から試験体板厚相当の 200 mm を減算している。表 6.2.2-2 および表 6.2.2-5 は試験体裏面からの測定であり、測定結果を求める際には試験体基準の座標系を採用していた。本評価においては、回帰定数等で探傷面からの距離が意味を持つため、探傷面を基準とした座標系に変換する必要があり、Z 方向（板厚方向）の測定値の変換を行った。

表 6.2.2-9 においては解析に使用可能なサンプルが非常に少ないため、誤差の平均等の解析結果は全て算出不可とした。

図 6.2.2-4 および図 6.2.2-5 に断面観察結果を横軸、FMC/TFM 及びフェーズドアレイ法による測定結果を縦軸として測定結果を整理したグラフを示す。これらのグラフにおける回帰直線（各図中に破線及び点線で表示）の傾きが、表 6.2.2-7 および表 6.2.2-8 に示した回帰定数となる。

本試験では、溶接による溶け込みが不安定であったため、付与したスリットの溶接で埋めた部位の形状が不安定になった。これにより、同じスリット内で欠陥高さが大きく異なり、溶接で埋めた部位の欠陥深さ位置を求めることができなかった。しかし、スリットの溶接で埋めた部位と反対側の端部は形状が安定しており、深さ位置を求めることができたため、この端部での計測誤差を整理した。

欠陥の上端及び下端エコーの差から欠陥高さを求める場合、考慮すべき誤差要因は下記に分類される。

- ① キャリブレーション誤差等、上端及び下端の測定に同時に現れる誤差
- ② 欠陥の性状に起因する誤差（欠陥の傾き、形状等）や読み取り誤差等、上端及び下端の測定で独立に現れる誤差

高さ測定では上端と下端の差をとるため、①の誤差は相殺されて消え、②の誤差が残る。本測定では、一回のキャリブレーションですべての測定を実施したため、①に含まれるキャリブレーション誤差は主に「誤差平均値」として現れていると考えられる。このため、深さ測定の誤差を求めた本測定結果を基に、高さ測定における誤差を推量する場合、「誤差平均値」は相殺されるものと考え、読み取り誤差等により生じる「標準偏差」から求めるのが妥当と考える。

上端と下端の誤差の和として、高さ測定誤差を求めるため、上端及び下端の誤差を合算する。標準偏差の和は二乗和（2 乗した値の和の平方根）により求められる。本測定においては上端と下端の標準偏差（それぞれ $\sigma_a$ および $\sigma_b$ とする）は等しいと仮定するため、 $\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2} = \sqrt{2\sigma^2} \cong 1.41\sigma$ （ $\because \sigma_a = \sigma_b = \sigma$ ）と書ける。表 6.2.2-7 に示した深さ測定の標準偏差は、FMC/TFM で 2.6 mm、フェーズドアレイ法で 1.8 mm であるため、高さ測定の標準偏差は FMC/TFM で 3.7 mm、フェーズドアレイ法で 2.5 mm となる。さらに、信頼区間 90%を評価すると、標準偏差の約 1.65 倍であるから、FMC/TFM で 6.1 mm、フェーズドアレイ法で 4.1 mm となる。

信頼区間 90%とは、90%の確率で測定値がその範囲におさまることを示す。即ち、発生が予測される誤差の 9 割までを勘案して測定値を評価するならば、高さ測定値に対して FMC/TFM では 6.1 mm、フェーズドアレイ法では 4.1 mm を加算して評価することが妥当と考えられる。

表 6.2.2-7 深さ位置測定精度

		断面観察結果 [mm]	FMC/TFM 測定結果[mm]		フェーズドアレイ法測定結果[mm]	
			測定値	誤差	測定値	誤差
試験体 A 表面側	IAU-E1	35.9	37.9	2.0	37.1	1.2
	IAU-E2	59.7	62.2	2.5	59.8	0.1
	IAU-E3	37.5	41.6	4.1	37.2	-0.3
	IAU-E4	60.1	62.6	2.5	59.6	-0.5
	IAU-E5	37.2	39.5	2.3	38.0	0.8
	IAU-E6	61.0	62.6	1.6	60.1	-0.9
	IAU-E7	37.3	42.0	4.7	37.1	-0.2
	IAU-E8	60.1	63.0	2.9	61.1	1.0
	IAU-E9	32.9	36.2	3.3	-	-
	IAU-E10	57.1	60.1	3.0	57.4	0.3
	IAU-E11	-	37.9	-	-	-
	IAU-E12	-	59.7	-	56.4	-
	IAU-E13	-	35.4	-	-	-
	IAU-E14	-	59.7	-	57.3	-
	IAU-E15	-	36.2	-	-	-
	IAU-E16	56.9	60.6	3.7	57.4	0.5
試験体 A 裏面側	IAL-E1	164.1	163.6	-0.5	166.4	2.3
	IAL-E2	140.3	139.7	-0.6	144.8	4.5
	IAL-E3	162.5	161.2	-1.3	165.2	2.7
	IAL-E4	139.9	139.3	-0.6	150.4	5.7
	IAL-E5	162.8	162.4	-0.4	165.2	2.4
	IAL-E6	139.0	139.3	0.3	144.0	5
	IAL-E7	162.7	161.6	-1.1	165.0	2.3
	IAL-E8	139.9	138.5	-1.4	144.2	4.3
	IAL-E9	167.1	-	-	169.2	2.1
	IAL-E10	142.9	138.9	-4.0	145.0	2.1
	IAL-E11	-	-	-	169.2	-
	IAL-E12	-	140.1	-	145.2	-
	IAL-E13	-	-	-	169.2	-
	IAL-E14	-	135.6	-	145.3	-
	IAL-E15	-	-	-	169.2	-
	IAL-E16	143.1	138.5	-4.6	144.3	1.2
試験体 B 表面側	IBU-E1	46.6	-	-	49.6	3.0
	IBU-E2	57.0	60.6	3.6	56.0	-1.0
	IBU-E3	47.2	-	-	48.6	1.4
	IBU-E4	56.8	60.6	3.8	57.0	0.2
	IBU-E5	48.5	-	-	50.2	1.7
	IBU-E6	56.8	61.4	4.6	56.0	-0.8
	IBU-E7	49.9	-	-	50.3	0.4
	IBU-E8	56.2	60.1	3.9	55.9	-0.3
		誤差の平均値	/	1.4	/	1.4
		誤差の標準偏差	/	2.6	/	1.8
		誤差 RMS	/	2.9	/	2.3
		相関係数	1.00	/	1.00	/
		回帰定数	0.96	/	1.03	/

-:測定不可もしくは算出不可

表 6.2.2-8 溶接線方向測定精度 (FMC/TFM)

		断面観察結果 [mm]			FMC/TFM 測定結果 [mm]					
					測定値			誤差		
		始端	終端	長さ	始端	終端	長さ	始端	終端	長さ
試験体 A 表面側	IAU-E1	-	90.2	-	80.3	92.3	12.0	-	2.1	-
	IAU-E2	-	90.1	-	78.8	93.8	15.0	-	3.7	-
	IAU-E3	97.3	107.1	9.8	95.3	-	-	-2	-	-
	IAU-E4	97.1	107.0	9.9	95.3	107.3	12.0	-1.8	0.3	2.1
	IAU-E5	112.2	122.0	9.8	-	122.3	-	-	0.3	-
	IAU-E6	112.1	121.8	9.7	111.8	122.3	10.5	-0.3	0.5	0.8
	IAU-E7	125.4	-	-	-	137.3	-	-	-	-
	IAU-E8	125.4	-	-	-	135.8	-	-	-	-
	IAU-E9	-	-	-	143.3	150.8	7.5	-	-	-
	IAU-E10	-	-	-	138.8	150.8	12.0	-	-	-
	IAU-E11	-	-	-	153.8	-	-	-	-	-
	IAU-E12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAU-E13	-	-	-	-	174.8	-	-	-	-
	IAU-E14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAU-E15	-	-	-	180.8	186.8	6.0	-	-	-
	IAU-E16	-	-	-	-	191.3	-	-	-	-
試験体 A 裏面側	IAL-E1	-	90.2	-	80.3	87.8	7.5	-	-2.4	-
	IAL-E2	-	90.1	-	81.8	87.8	6.0	-	-2.3	-
	IAL-E3	97.3	107.1	9.8	96.8	105.8	9.0	-0.5	-1.3	-0.8
	IAL-E4	97.1	107.0	9.9	96.8	104.3	7.5	-0.3	-2.7	-2.4
	IAL-E5	112.2	122.0	9.8	113.3	122.3	9.0	1.1	0.3	-0.8
	IAL-E6	112.1	121.8	9.7	113.3	-	-	1.2	-	-
	IAL-E7	125.4	-	-	126.8	132.8	6.0	1.4	-	-
	IAL-E8	125.4	-	-	-	132.8	-	-	-	-
	IAL-E9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAL-E10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAL-E11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAL-E12	-	-	-	153.8	164.3	10.5	-	-	-
	IAL-E13	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAL-E14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAL-E15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAL-E16	-	-	-	-	186.8	-	-	-	-
誤差の平均値							-0.2	-0.2	-0.2	
誤差の標準偏差							1.2	2.0	1.5	
誤差 RMS							1.2	2.0	1.6	
相関係数				1.00	0.99	-				
回帰定数				1.10	1.00	-				

表 6.2.2-9 溶接線方向測定精度 (フェーズドアレイ法)

		断面観察結果 [mm]			フェーズドアレイ法測定結果 [mm]					
					測定値			誤差		
		始端	終端	長さ	始端	終端	長さ	始端	終端	長さ
試験体 A 表面側	IAU-E1	-	90.2	-	80	-	-	-	-	-
	IAU-E2	-	90.1	-	-	-	-	-	-	-
	IAU-E3	97.3	107.1	9.8	-	-	-	-	-	-
	IAU-E4	97.1	107.0	9.9	-	108	-	-	1.0	-
	IAU-E5	112.2	122.0	9.8	-	-	-	-	-	-
	IAU-E6	112.1	121.8	9.7	113	-	-	0.9	-	-
	IAU-E7	125.4	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAU-E8	125.4	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAU-E9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAU-E10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAU-E11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAU-E12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAU-E13	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAU-E14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAU-E15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAU-E16	-	-	-	-	-	-	-	-	-
試験体 A 裏面側	IAL-E1	-	90.2	-	-	-	-	-	-	-
	IAL-E2	-	90.1	-	-	-	-	-	-	-
	IAL-E3	97.3	107.1	9.8	-	-	-	-	-	-
	IAL-E4	97.1	107.0	9.9	-	-	-	-	-	-
	IAL-E5	112.2	122.0	9.8	-	-	-	-	-	-
	IAL-E6	112.1	121.8	9.7	-	-	-	-	-	-
	IAL-E7	125.4	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAL-E8	125.4	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAL-E9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAL-E10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAL-E11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAL-E12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAL-E13	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAL-E14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAL-E15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IAL-E16	-	-	-	-	-	-	-	-	-
誤差の平均値							-	-	-	
誤差の標準偏差							-	-	-	
誤差 RMS							-	-	-	
相関係数				-	-	-				
回帰定数				-	-	-				

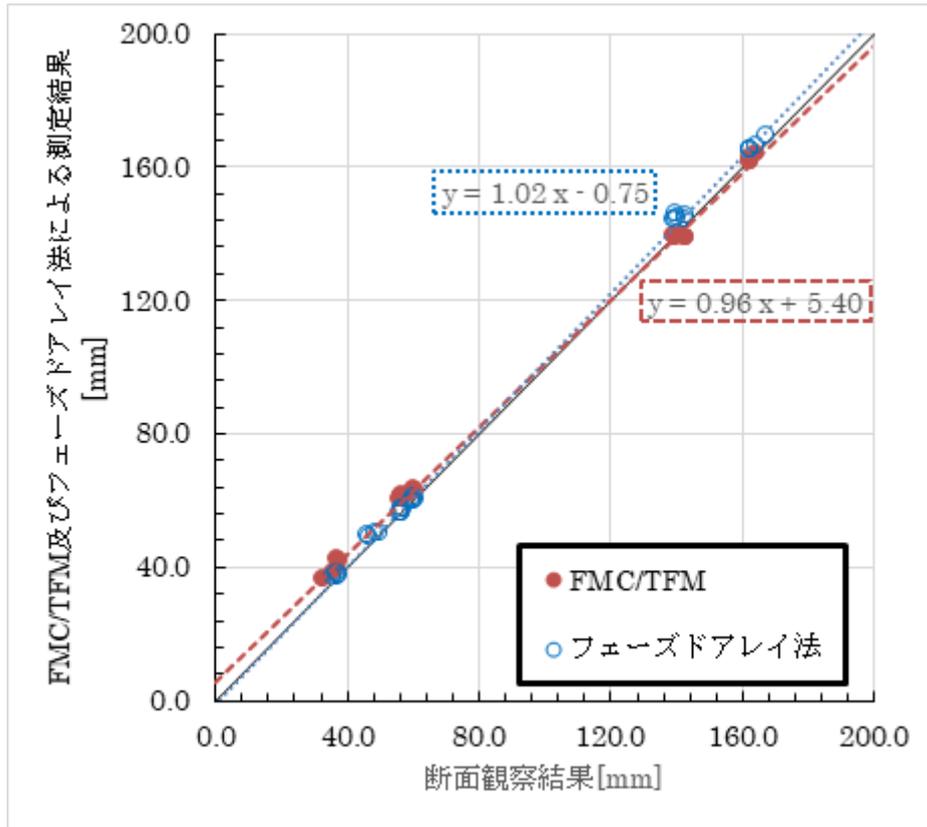


図 6.2.2-4 EDM スリット上下端部の深さ位置測定結果

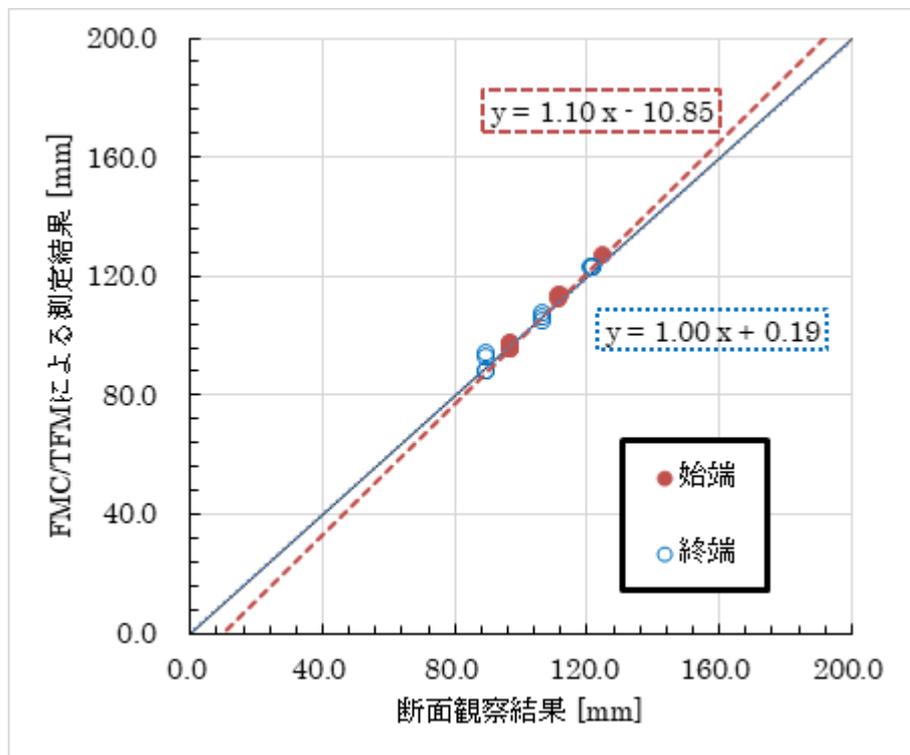


図 6.2.2-5 EDM スリットの溶接線方向始末端位置測定結果

### 6.2.3 超音波シミュレーションによる測定精度の妥当性検討

昨年度まで取得した自然欠陥に対する定量データの数量は 49 であり、そのうち-3 mm を超えた過小評価は 4 データであり、+3 mm を超えた過大評価は 21 データであった。これらのデータについて昨年度までの検討で高度化した要領の効果をシミュレーション解析で確認する。

昨年度までの検討で測定精度を高度化した探傷要領の効果を確認するため、実際の欠陥を基にした欠陥モデルを用いてシミュレーション解析により測定精度改善の効果を確認した。実際の欠陥を基にしたモデルとは、欠陥位置や欠陥寸法を調査した断面マクロ写真から、図 6.2.3-1 に示す様に欠陥部の画像を切り取り、その形状、寸法、位置をシミュレーションモデル内に再現したもの、あるいは欠陥の形状と寸法はそのままに、位置のみ変えてモデルを設定したものである。そして後述する探傷の要領・手順に従った探傷をシミュレーションで模擬し、シミュレーションで探傷結果を再現した。その模擬探傷結果を要領に従って評価した。ここでは、寸法計測までは行わず、画像の作成と読み取りまでの評価とする。

図 6.2.3-2 は超音波の入射方法を示した解析モデルである。図 6.2.3-2(a)は通常の斜角法の条件であり、図 6.2.3-2(b)は側面から超音波を入射する条件である。異なる方向からの探傷結果を総合的に評価することで、欠陥の見落としの低減、欠陥寸法の過小/過大評価の低減を図る。共にアレイ探触子を使用して、セクター走査による探傷あるいは FMC/TFM による探傷をシミュレーションした。アレイ探触子は、周波数 2 MHz、素子ピッチ 2 mm×32 素子の開口寸法 64 mm とした。鋼中の音速は縦波が 5,900 m/秒、横波が 3,200 m/秒、鋼の密度は  $7.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  とした。シミュレーション解析には市販の超音波探傷用三次元有限要素コード（伊藤忠テクノソリューションズ社製 ComWAVE）を使用した。PhA 法および FMC/TFM の方法は後述する要領案に準拠しており、セクター走査における角度の刻みは  $0.5^\circ$ 、また TFM による画像作成の刻みは 0.1 mm とし、高さ測定時の最小ステップを小さくした。

図 6.2.3-3 から図 6.2.3-6 には、各々モデル化した欠陥の断面写真と対象欠陥のモデル及び解析モデルに取り込んだ例を示す。図 6.2.3-3 は平坦で U 字型をした形状の欠陥であり、形状の影響により超音波が多重反射し下端側の深さ位置を深めに評価することがあった。側面からの探傷では形状の影響を受けにくいいため、過大評価の低減が期待できる。図 6.2.3-4 は高さ 1 mm 程度の微小な欠陥が隣接して存在する欠陥であり、分解能が低い探傷条件ではこれらを分離できず大きな欠陥と誤認識をする場合や隣接した欠陥を見落として過小評価することがあった。開口寸法が大きな探触子を用いた分解能向上により精度向上が期待できる。図 6.2.3-5 は高さ 3 mm 程度の欠陥に微小な欠陥が隣接したものである。この例でも隣接欠陥の分解能向上の効果をシミュレーション解析で確認する。図 6.2.3-6 は斜めの欠陥であり形状の影響で過大評価することがあった。ここでも側面からの探傷の追加による効果を確認する。解析モデルは、溶接ビードの幅が 40 mm 程度と想定し、溶接ビードの中央部に欠陥モデルを設置してシミュレーション解析を行った。

図 6.2.3-7 から図 6.2.3-16 はセクター走査のシミュレーション結果を示す(B スコープ画像)。各々図(a)は通常の斜角法の結果を、図(b)は側面からの探傷の結果である。図 6.2.3-7 は平坦な U 字形状の欠陥に対し集束距離 180 mm の設定でのシミュレーション解析結果である。図(a)に示す斜角法では、形状の影響で下端よりも深い位置に、超音波が多重反射して生じる虚像が確認できる。これを下端と誤認識すると高さを過大評価することになる。一方、図(b)に示す側面からの探

傷では、虚像は発生していない。また、ここには示していないが斜角法で溶接部の逆側（図の左側）から探傷した場合にも虚像は発生しておらず、分解能を向上させた複数方向からの探傷結果を総合的に評価することで、極端な過大／過小評価を低減できると言える。図 6.2.3-8 はこの欠陥の位置を 50 mm 上方に設置してシミュレーション解析を行った結果である。欠陥の位置が変わってもほぼ同様な結果であった。図 6.2.3-9 はさらに 50 mm 上方に設置したものである。ここでは、斜角法のみ集束距離を 100 mm の条件とした。この結果も前述のものと同様である。セクター走査では、評価の対象とする指示の深さに応じて集束距離を変える必要はあるものの、分解能を向上させた複数方向からの探傷結果を総合的に評価することで、極端な過大／過小評価の低減が期待できる。

図 6.2.3-10 は高さ 1 mm 程度の隣接した欠陥に対するシミュレーション解析結果である。この例では、斜角法の結果だけでは隣接した二つの指示が一つの面状欠陥の上下端なのか、それとも二つの欠陥なのかを判断することは困難であり、判断を誤ると過小／過大評価の原因となる。仮に一つの面状欠陥であった場合、側面からの探傷では振幅が大きい一つの指示になることが予想される。図(b)は振幅が比較的低い二つの指示になっており、これらの結果から二つの欠陥であると判断できる。図 6.2.3-11 および図 6.2.3-12 に示す様に、欠陥の位置によっては側面からの探傷で二つの指示が分離しない場合もあるが、波形の入れ替わりや振幅の情報から二つの欠陥と判断できると考えられる。図 6.2.3-12 から図 6.2.3-14 に示した隣接欠陥に対しても、同様の評価方法により、二つの隣接した欠陥であると判断できると考えられる。

図 6.2.3-15 および図 6.2.3-16 に示した斜めの欠陥では、図(a)に示す斜角法では若干湾曲した形状の影響で微弱な虚像が生じている。この探傷結果のみでは、この虚像を下端と判断せざるを得ないため過大評価することが想定される。一方、図(b)に示した側面からの探傷では、欠陥の位置に関わらず虚像は発生していない。また、ここには示していないが、通常の斜角法で溶接部の逆側（図の左側）から探傷した場合は振幅が低く、片側からの探傷だけでは欠陥を見落とすことが推測される。分解能を向上させた複数方向からの探傷結果により、欠陥の見落としや高さ測定誤差を低減できると考えられる。

図 6.2.3-17 から図 6.2.3-26 には、FMC/TFM でのシミュレーション解析結果を示す。欠陥モデルと探傷の方向は図 6.2.3-7 から図 6.2.3-16 と同様であるが、FMC/TFM では全ての位置で最適な集束がなされており、指示位置に応じて集束距離を設定しなおす必要はないことが特長である。得られた探傷結果（B スコープ画像）は、適切に集束を設定したセクター走査の B スコープ画像と同様であった。

今後、斜角法における溶接部の両側からの探傷データと側面からの探傷データを融合して立体的な欠陥像を評価することで、さらに信頼性の高い超音波探傷結果が得られるものと考えられる。

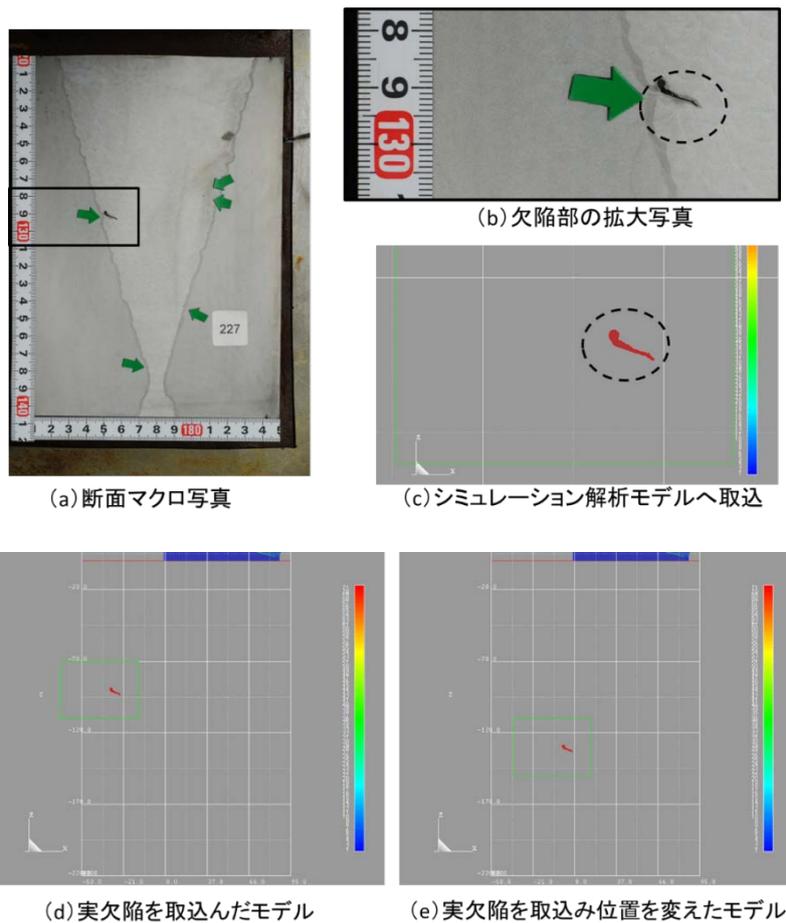


図 6.2.3-1 実欠陥のモデル化方法とシミュレーション解析モデルの例

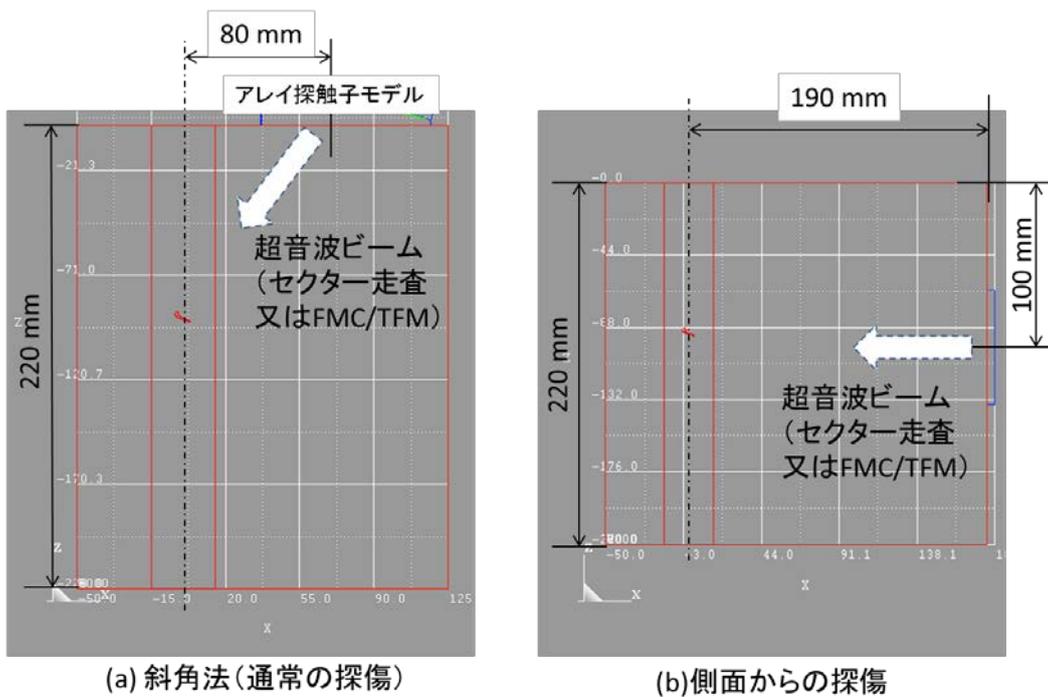
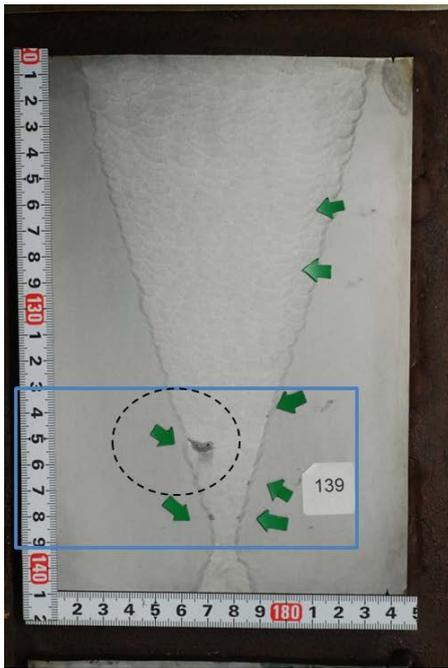
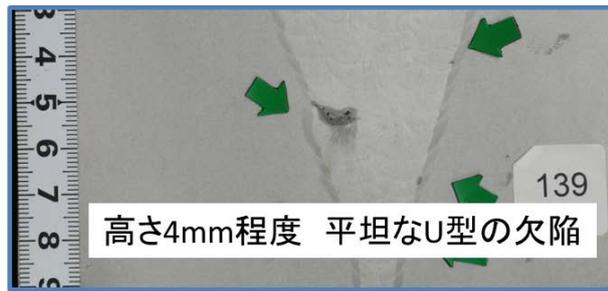


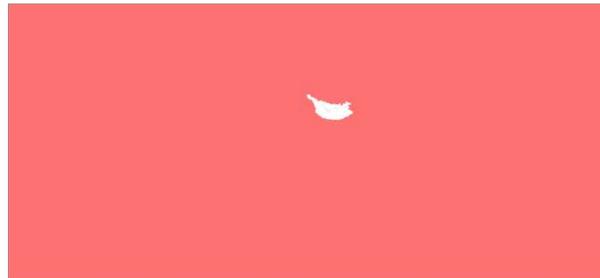
図 6.2.3-2 超音波の入射方法



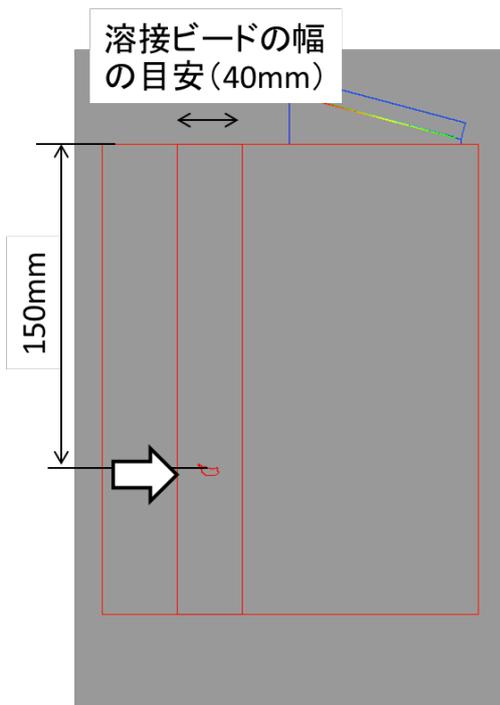
(a) 断面マクロ写真



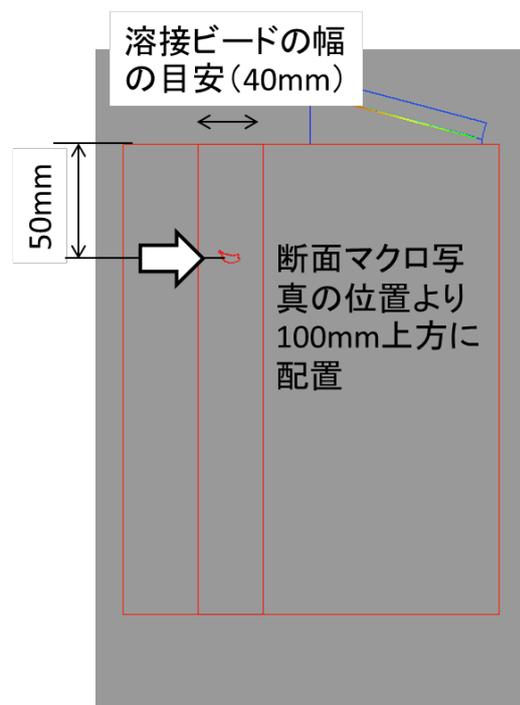
(b) 対象欠陥部の拡大図



(c) 対象欠陥のモデル

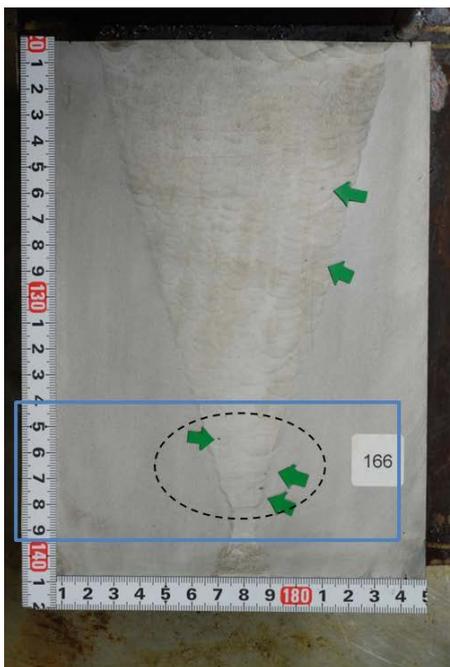


(d) 欠陥を取り込んだ解析モデル

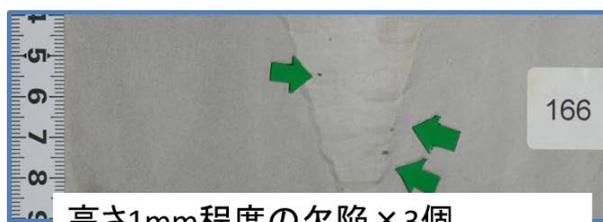


(e) 欠陥を移動して設置した解析モデル (100mm上方)

図 6.2.3-3 厚さ 190 mm 自然欠陥模擬試験体 X = 139 mm 断面のモデル化



(a) 断面マクロ写真

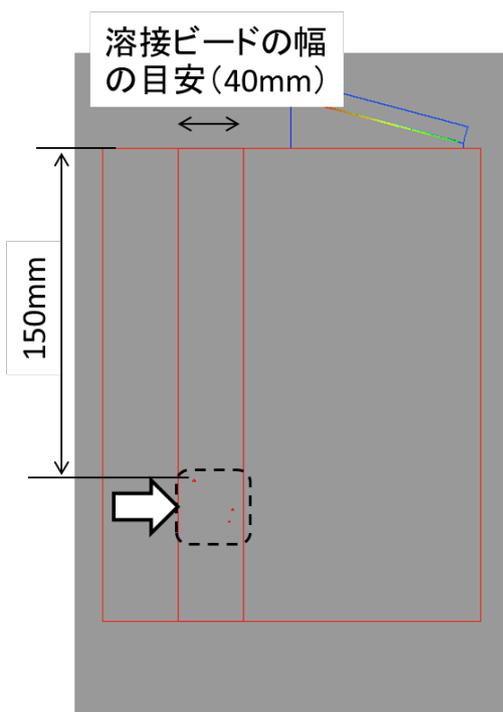


高さ1mm程度の欠陥×3個  
高さ方向: 5mm~15mm程度の間隔

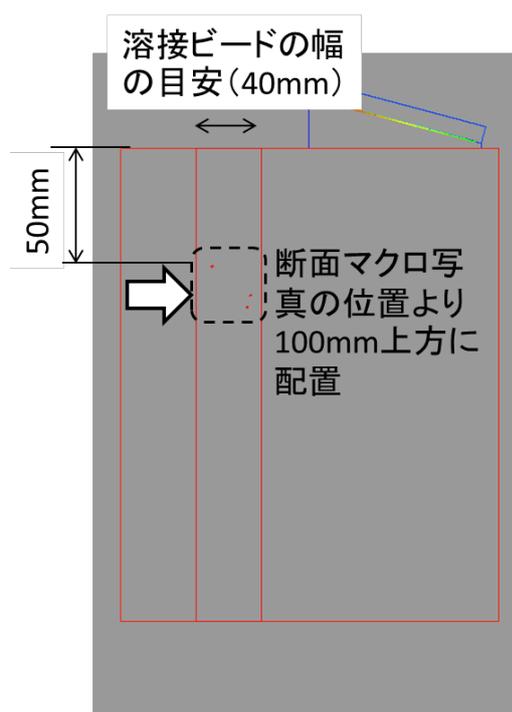
(b) 対象欠陥部の拡大図



(c) 対象欠陥のモデル

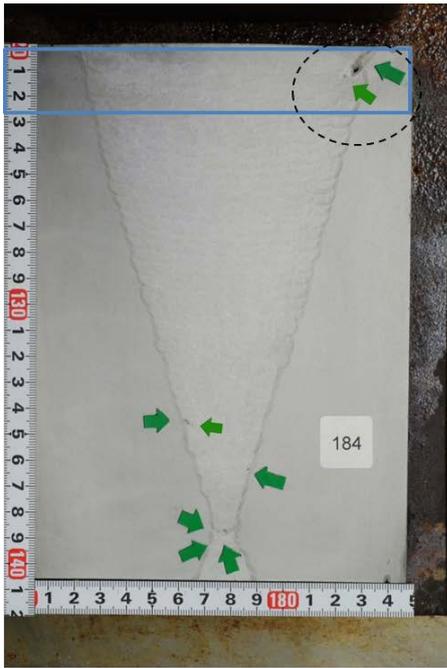


(d) 欠陥を取り込んだ解析モデル



(e) 欠陥を移動して設置した解析モデル  
(100mm上方)

図 6.2.3-4 厚さ 190 mm 自然欠陥模擬試験体 X = 166 mm 断面のモデル化



(a) 断面マクロ写真

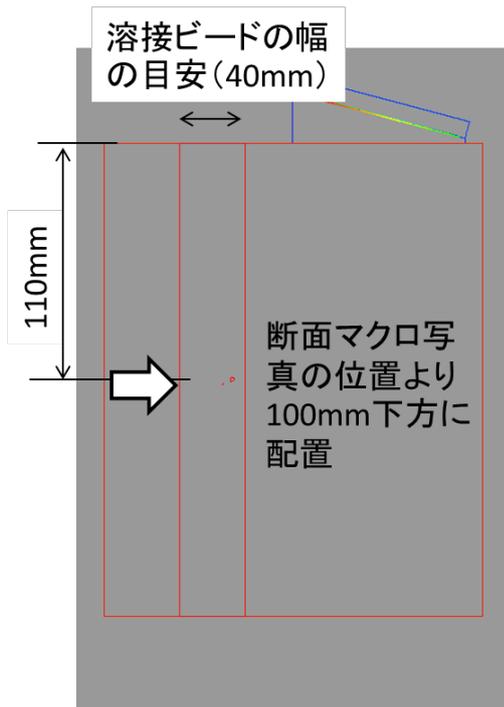


高さ3mm程度の欠陥に隣接した高さ1mmの欠陥 間隔3mm程度

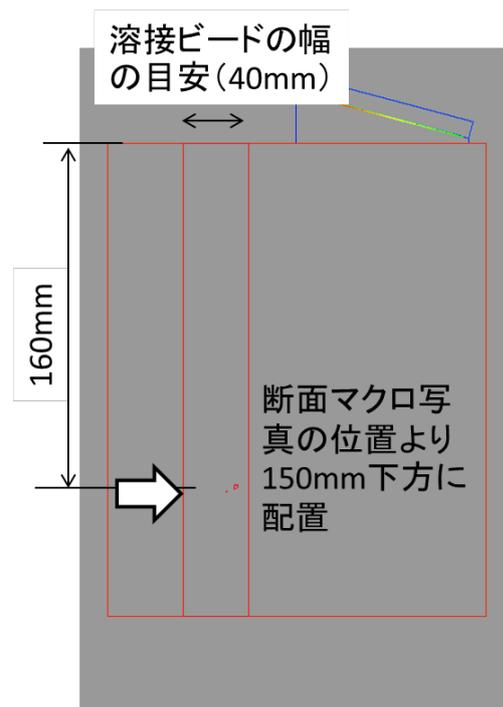
(b) 対象欠陥部の拡大図



(c) 対象欠陥のモデル

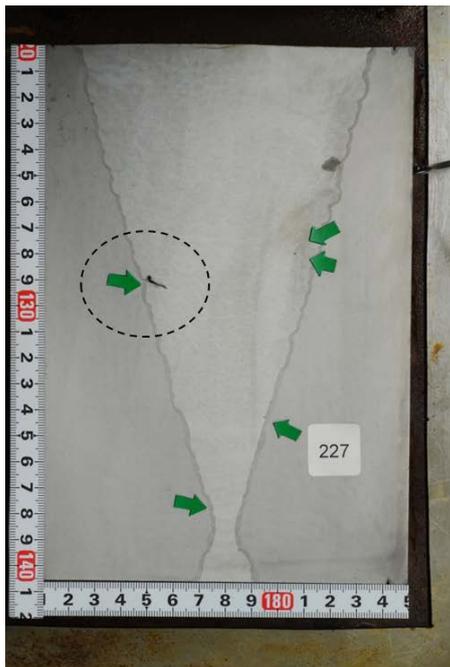


(d) 欠陥を移動して設置した解析モデル (100mm下方)

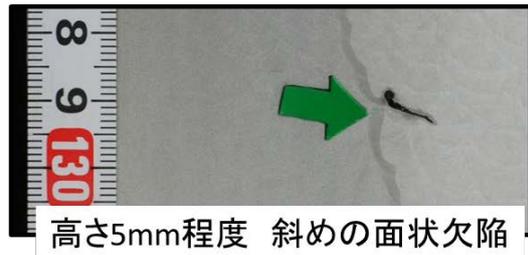


(e) 欠陥を移動して設置した解析モデル (150mm下方)

図 6.2.3-5 厚さ 190 mm 自然欠陥模擬試験体 X = 184 mm 断面のモデル化



(a) 断面マクロ写真

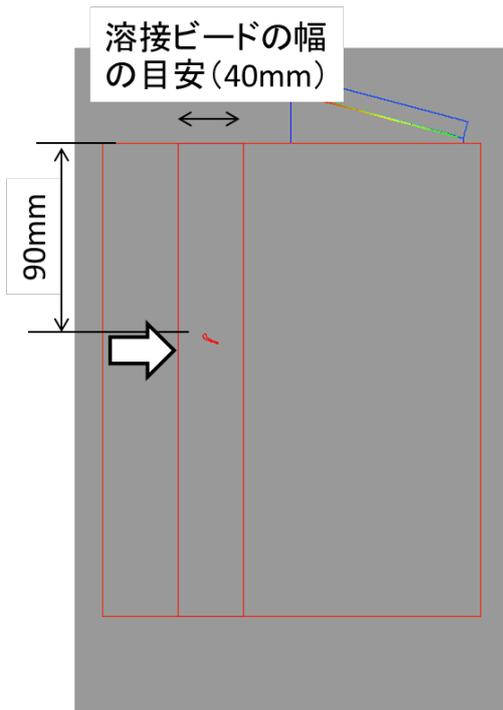


高さ5mm程度 斜めの面状欠陥

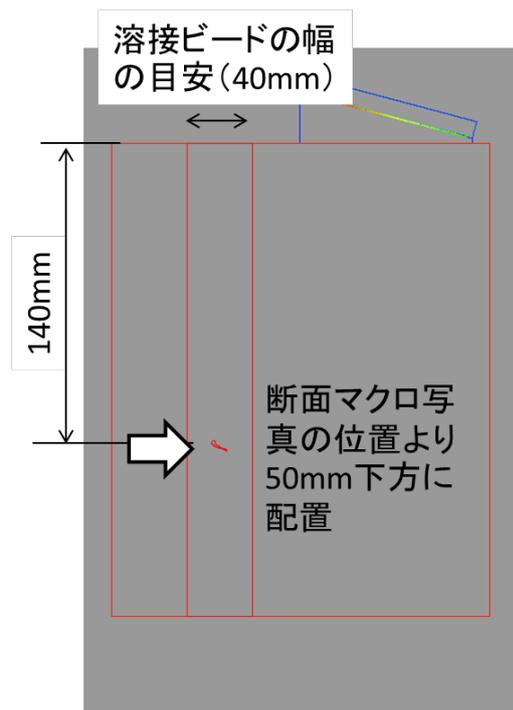
(b) 対象欠陥部の拡大図



(c) 対象欠陥のモデル

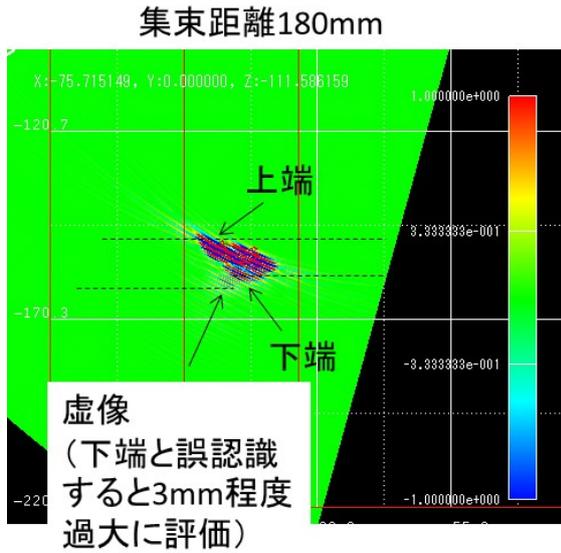


(d) 欠陥を取り込んだ解析モデル

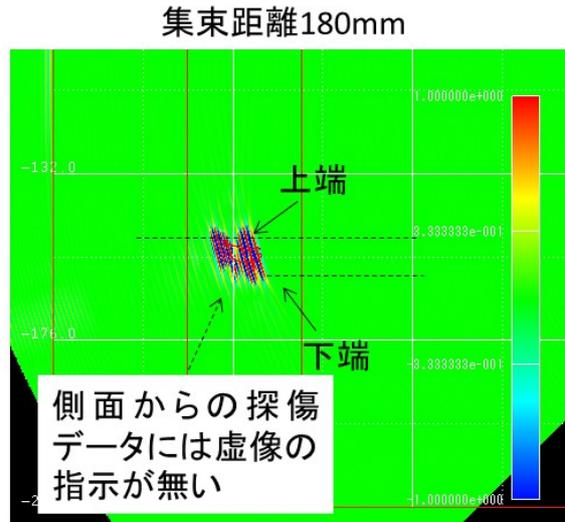


(e) 欠陥を移動して設置した解析モデル (50mm下方)

図 6.2.3-6 厚さ 190 mm 自然欠陥模擬試験体 X = 227 mm 断面のモデル化

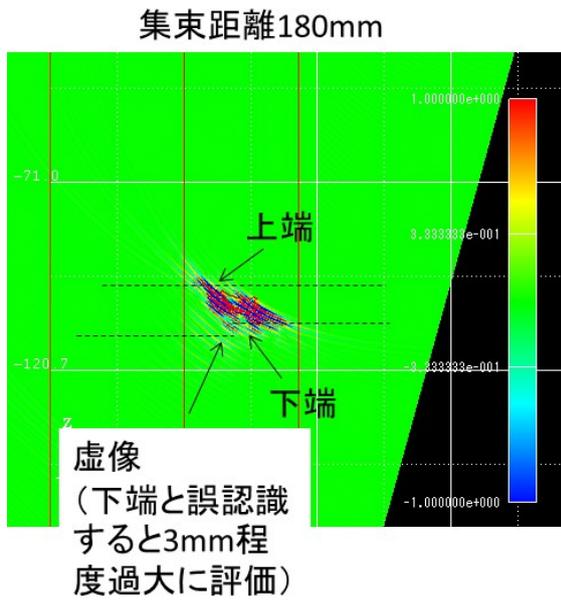


(a) 斜角法(通常のプロ傷)

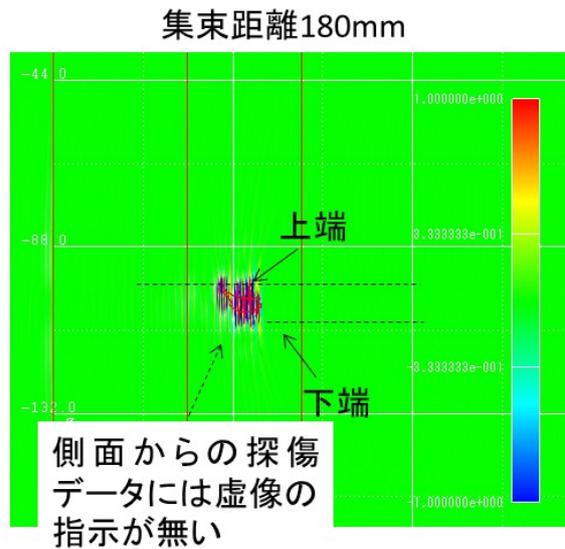


(b)側面からの探傷

図 6.2.3-7 X = 139 mm 断面のモデルにおけるシミュレーション解析結果 (セクター走査)



(a) 斜角法(通常のプロ傷)



(b)側面からの探傷

図 6.2.3-8 X = 139 mm 断面の欠陥を 50 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (セクター走査)

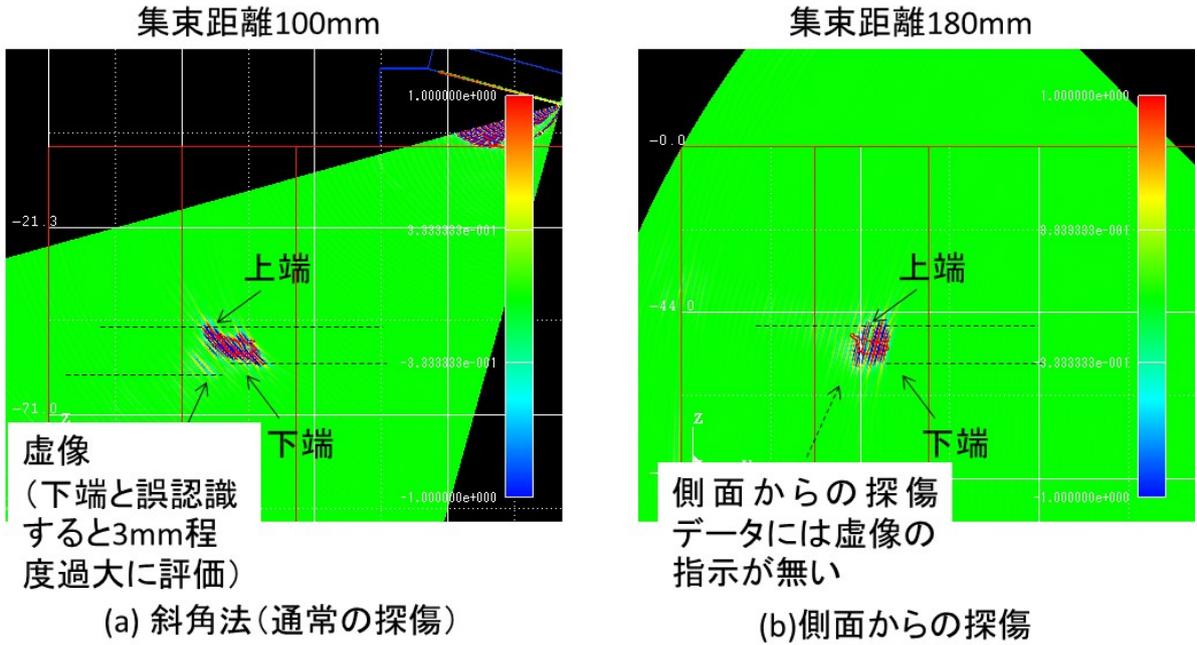


図 6.2.3-9 X = 139 mm 断面の欠陥を 100 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (セクター走査)

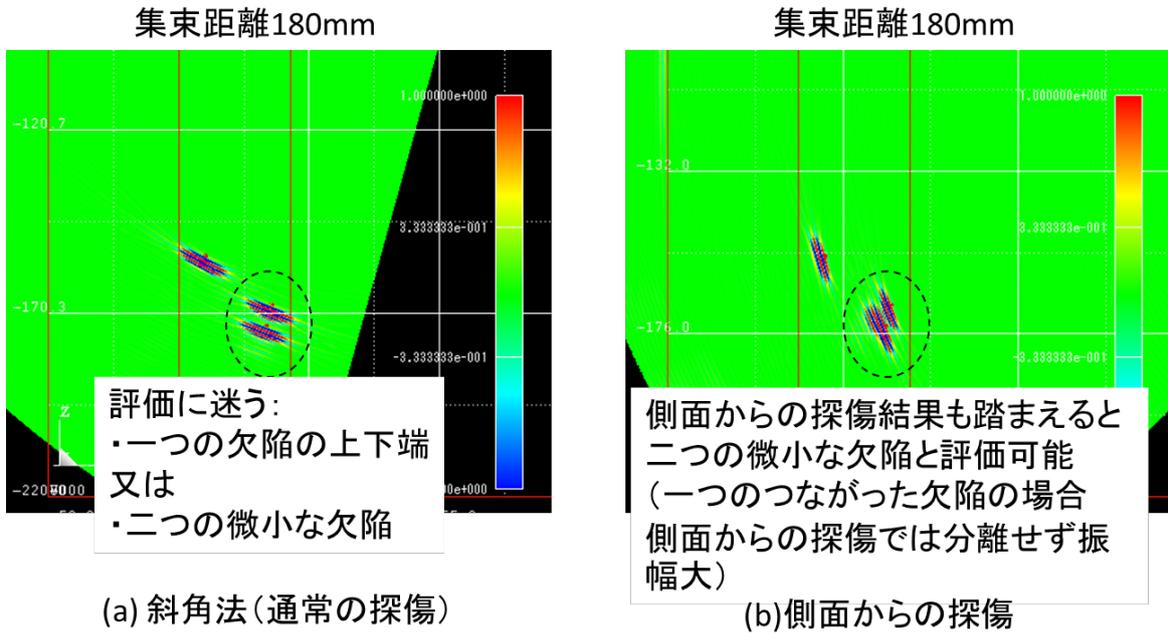


図 6.2.3-10 X = 166 mm 断面のモデルにおけるシミュレーション解析結果 (セクター走査)

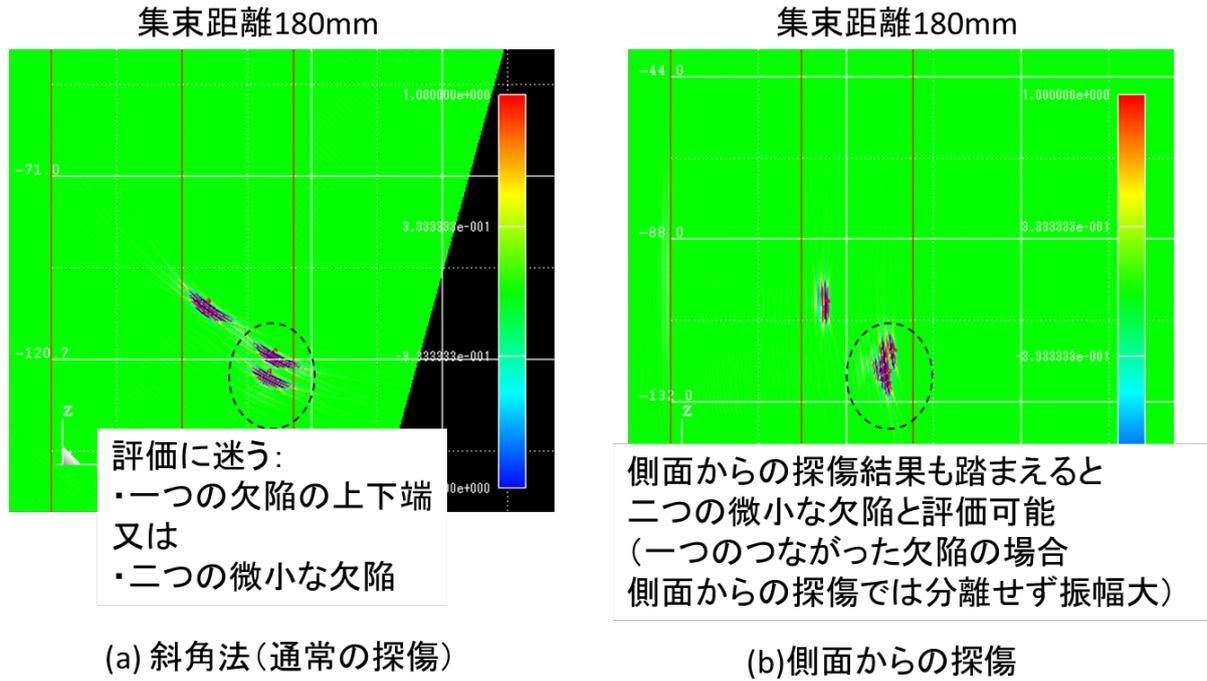


図 6.2.3-11 X = 166 mm 断面の欠陥を 50 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (セクター走査)

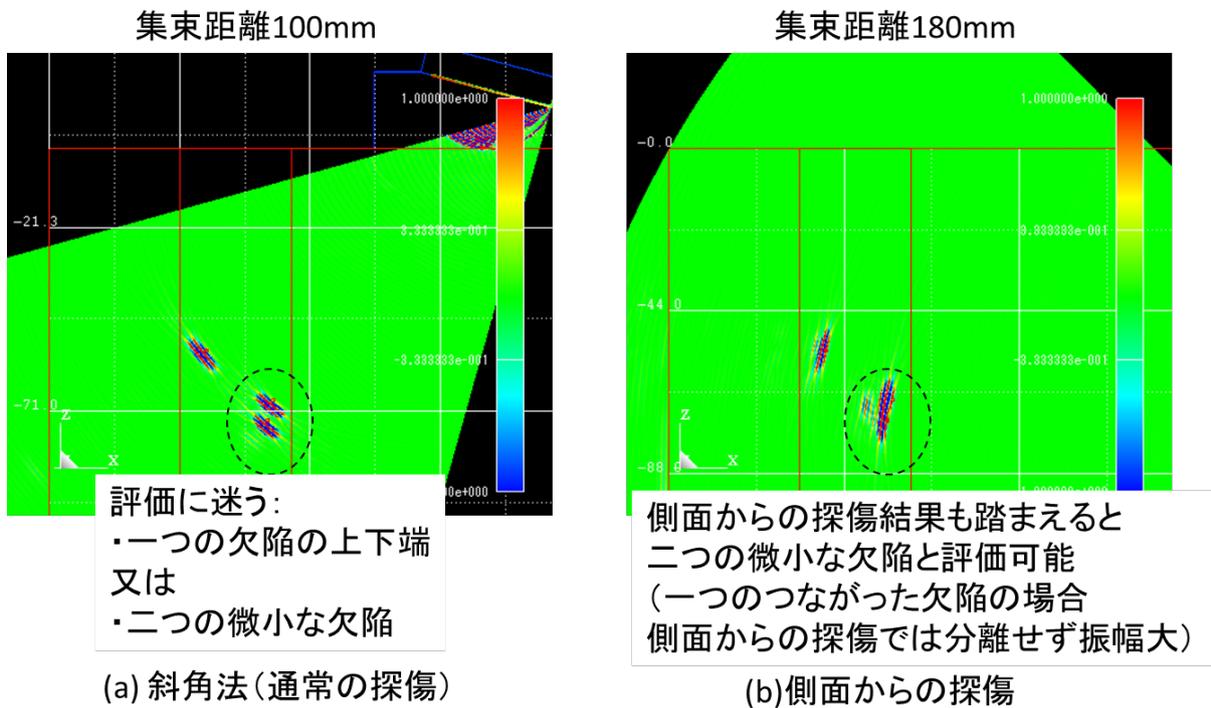


図 6.2.3-12 X = 166 mm 断面の欠陥を 100 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (セクター走査)

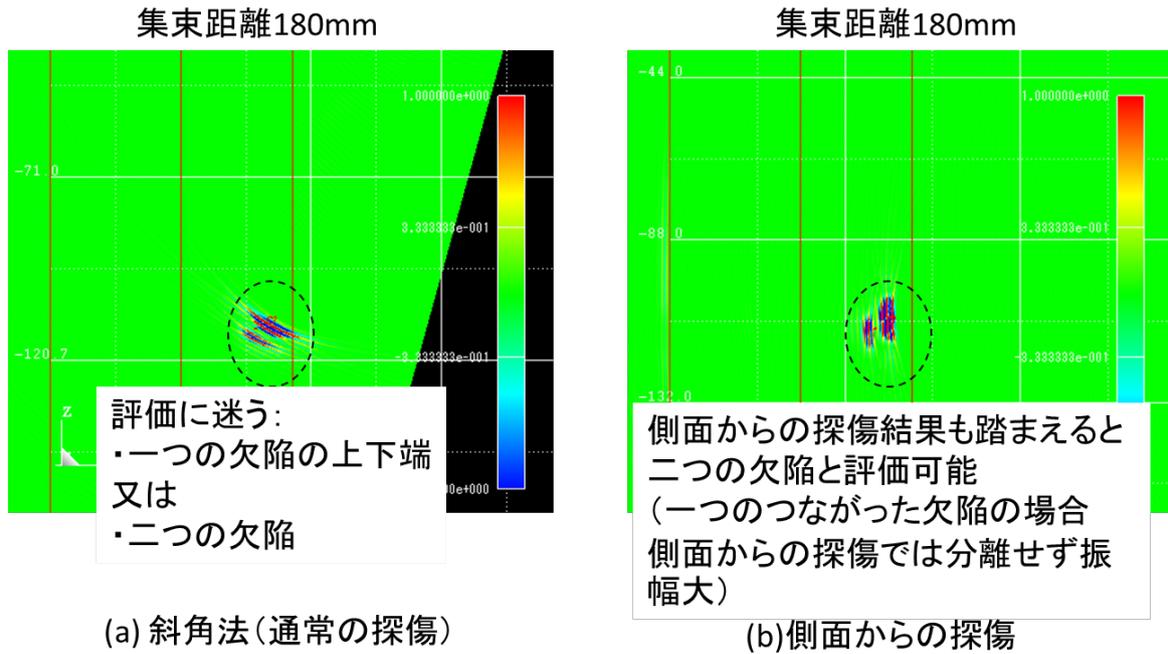


図 6.2.3-13 X = 184 mm 断面の欠陥を 100 mm 下方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (セクター走査)

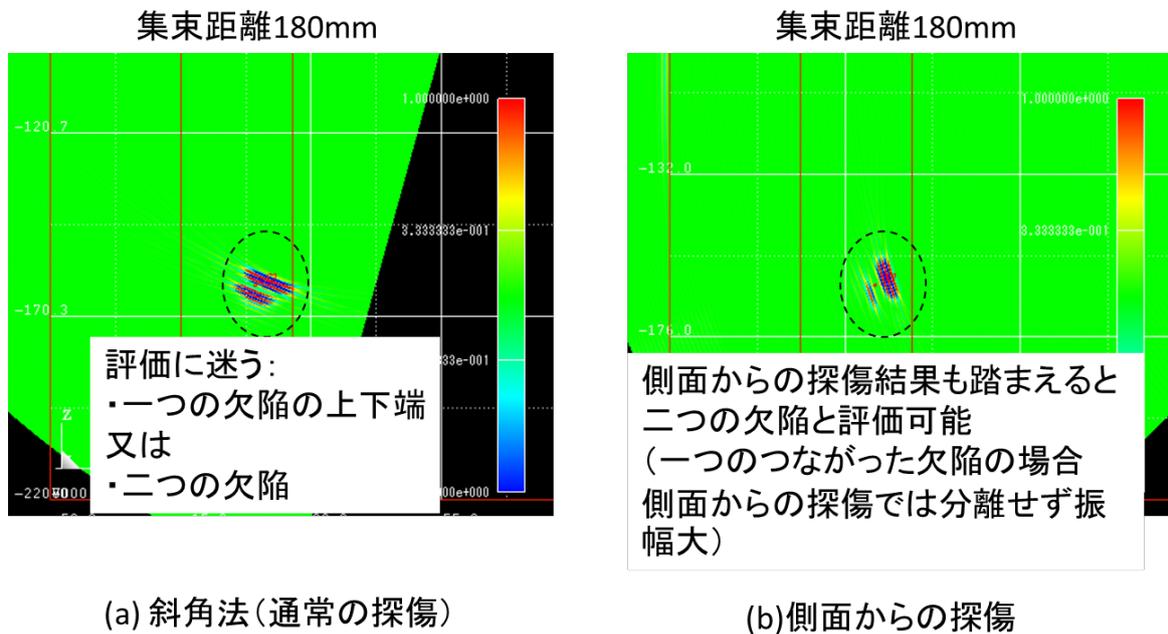
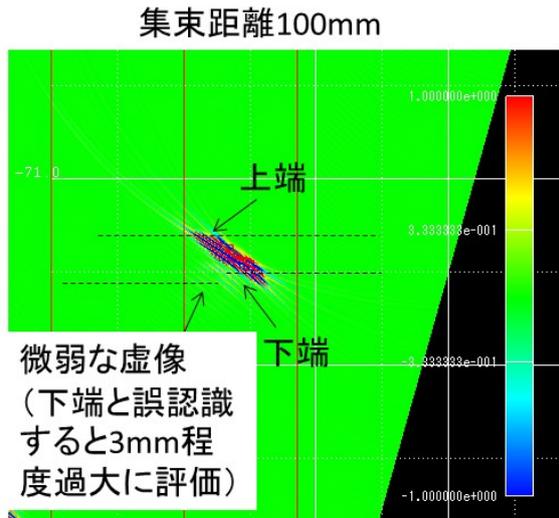
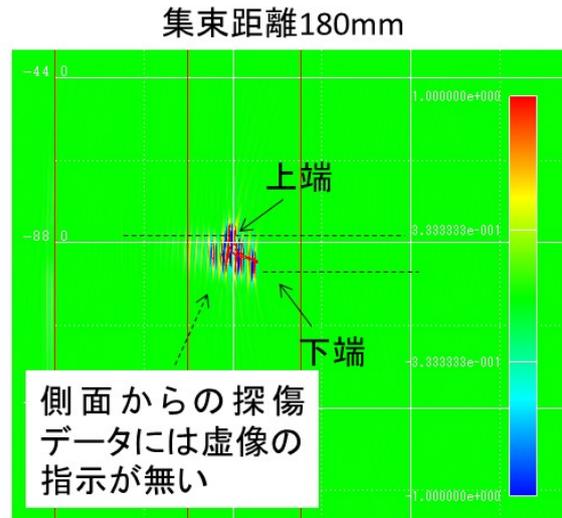


図 6.2.3-14 X = 184 mm 断面の欠陥を 150 mm 下方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (セクター走査)

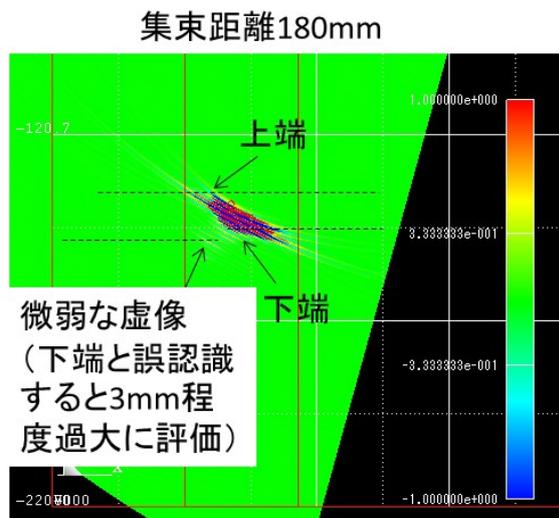


(a) 斜角法(通常の探傷)

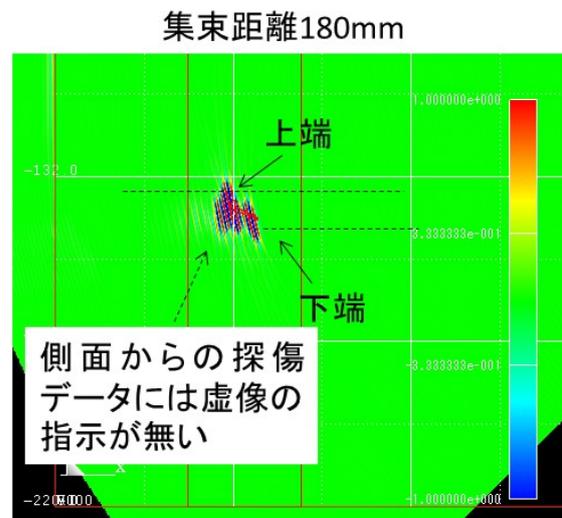


(b)側面からの探傷

図 6.2.3-15 X = 277 mm 断面のモデルにおけるシミュレーション解析結果 (セクター走査)



(a) 斜角法(通常の探傷)



(b)側面からの探傷

図 6.2.3-16 X = 277 mm 断面の欠陥を 50 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (セクター走査)

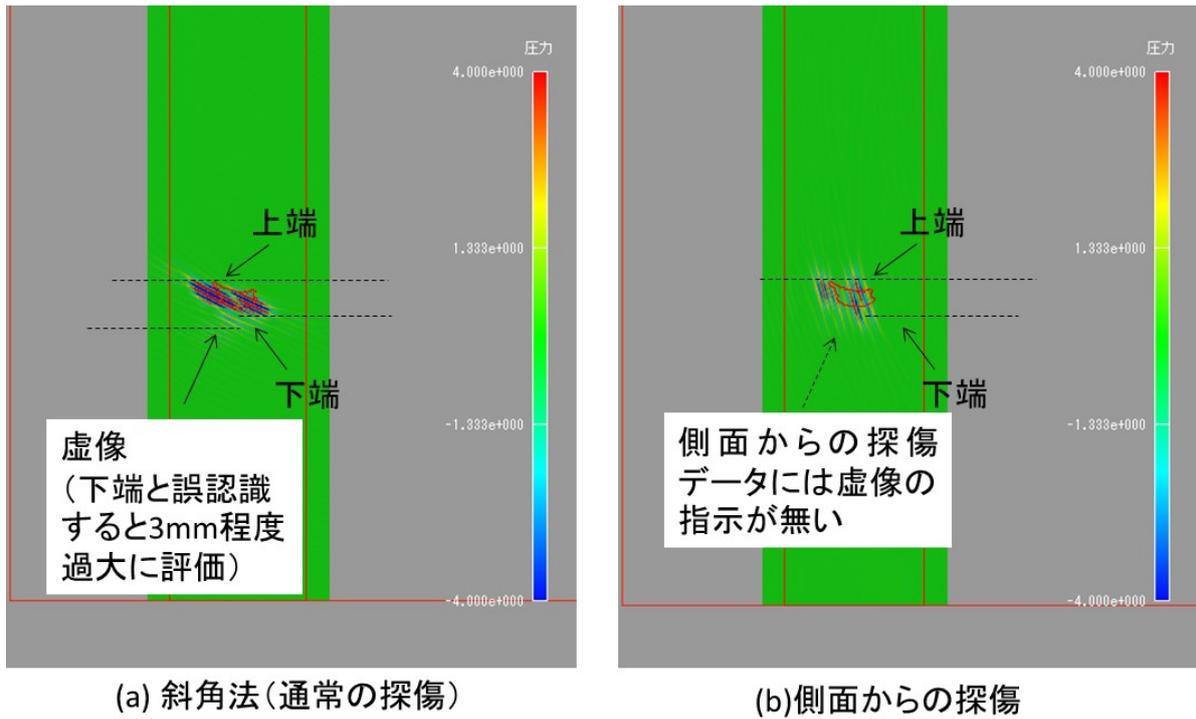


図 6.2.3-17 X = 139 mm 断面のモデルにおけるシミュレーション解析結果 (FMC/TFM)

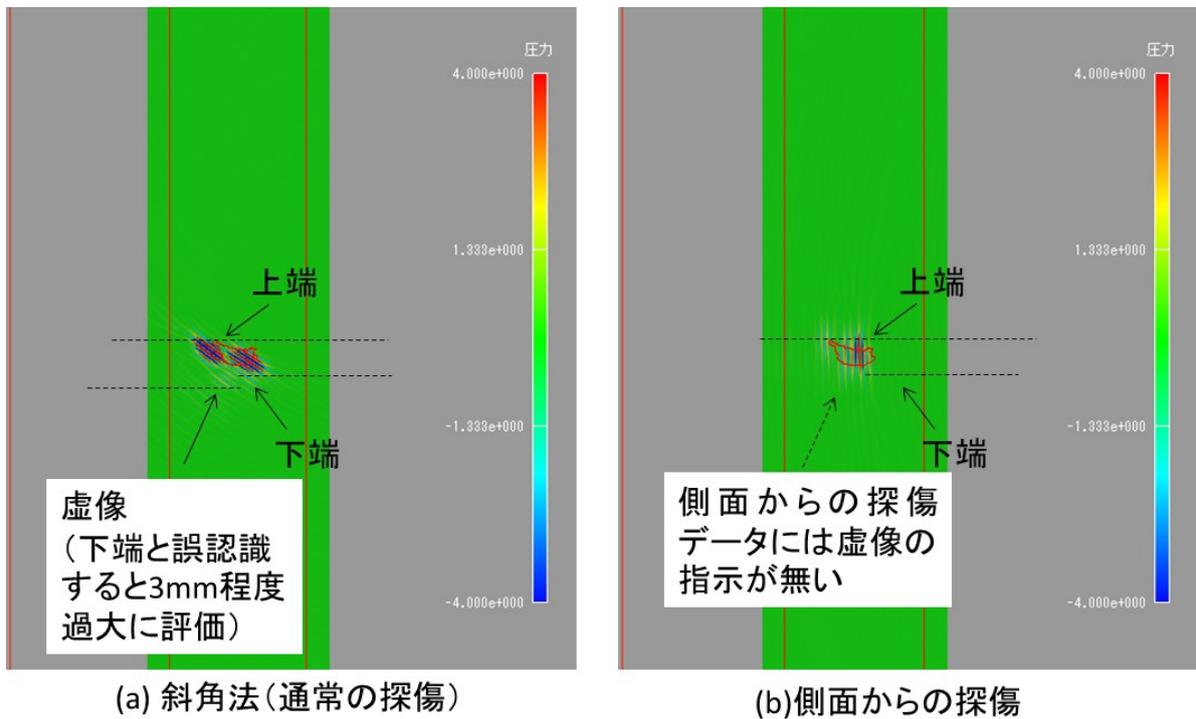


図 6.2.3-18 X = 139 mm 断面の欠陥を 50 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (FMC/TFM)

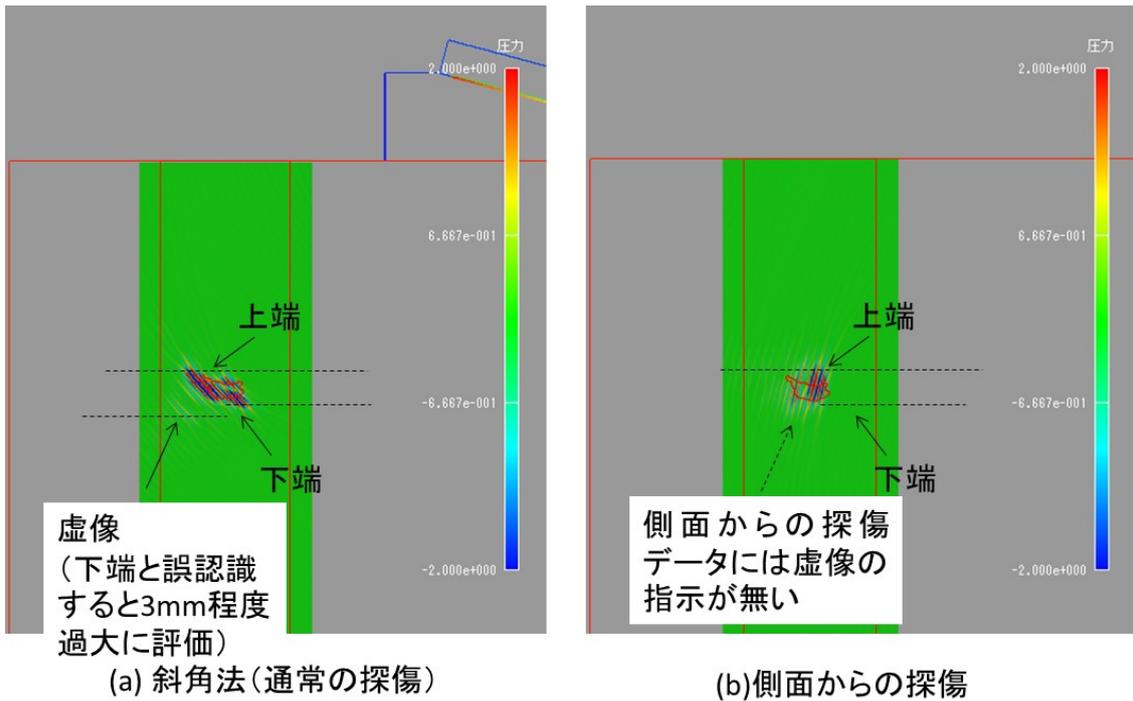


図 6.2.3-19 X = 139 mm 断面の欠陥を 100 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (FMC/TFM)

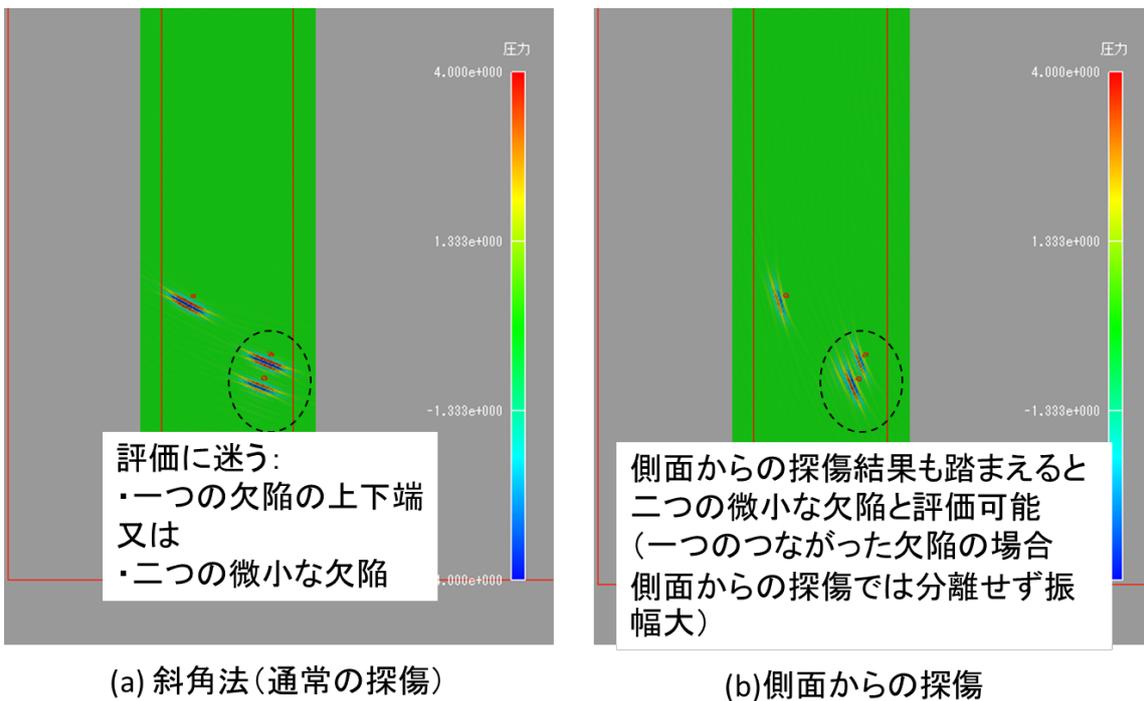


図 6.2.3-20 X = 166 mm 断面のモデルにおけるシミュレーション解析結果 (FMC/TFM)

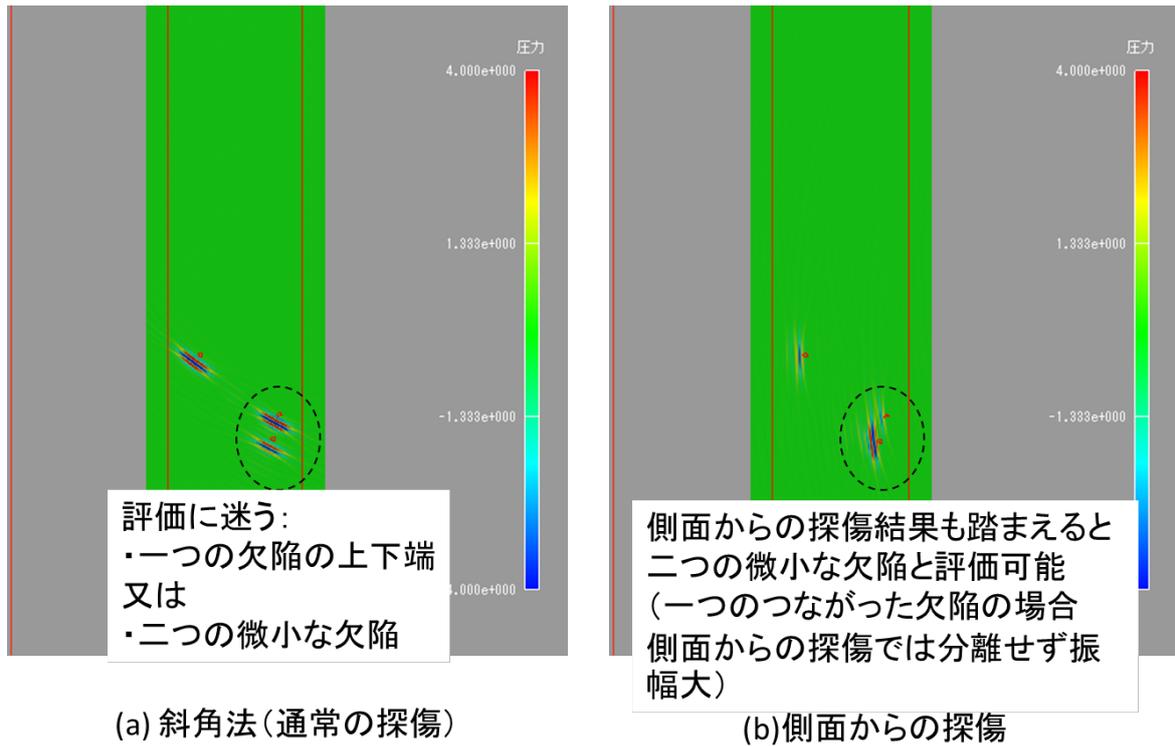


図 6.2.3-21 X = 166 mm 断面の欠陥を 50 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (FMC/TFM)

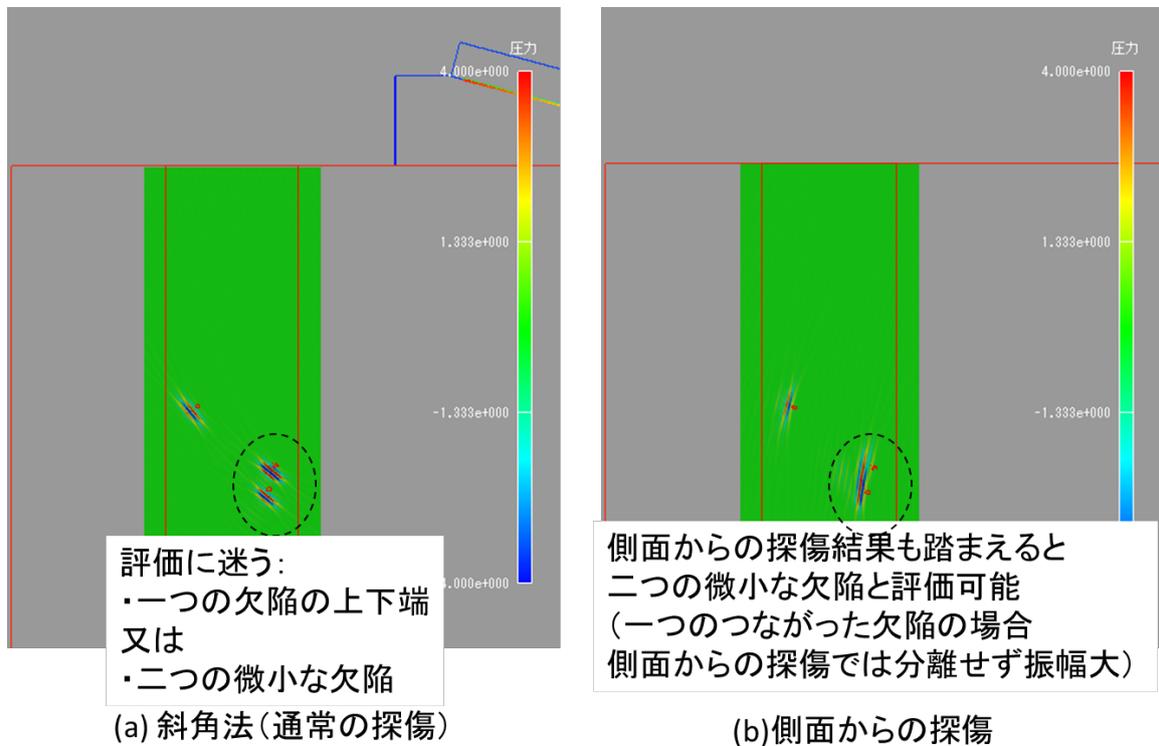


図 6.2.3-22 X = 166 mm 断面の欠陥を 100 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (FMC/TFM)

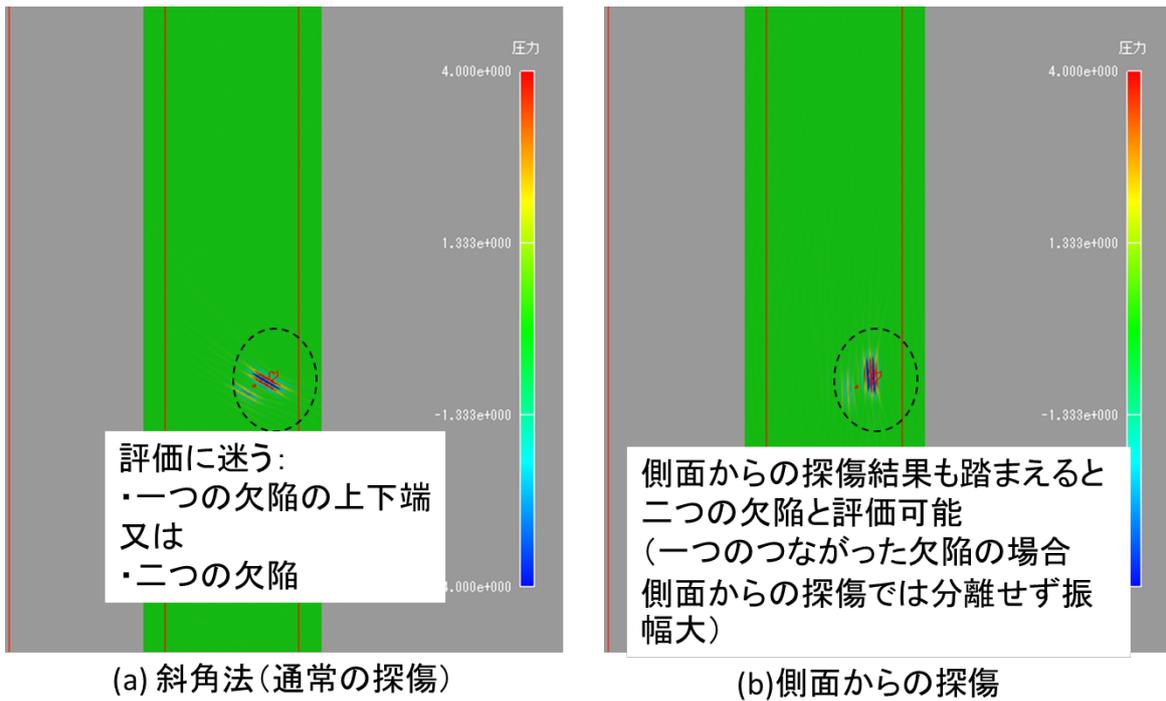


図 6.2.3-23 X = 184 mm 断面の欠陥を 100 mm 下方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (FMC/TFM)

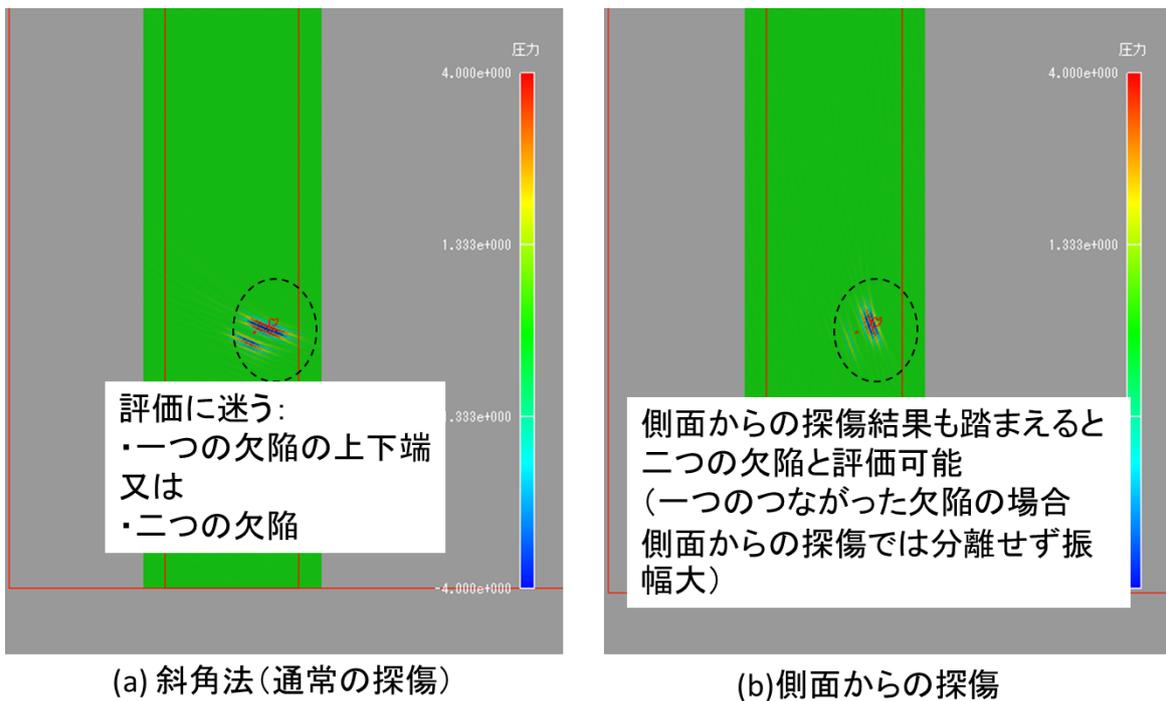


図 6.2.3-24 X = 184 mm 断面の欠陥を 150 mm 下方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (FMC/TFM)

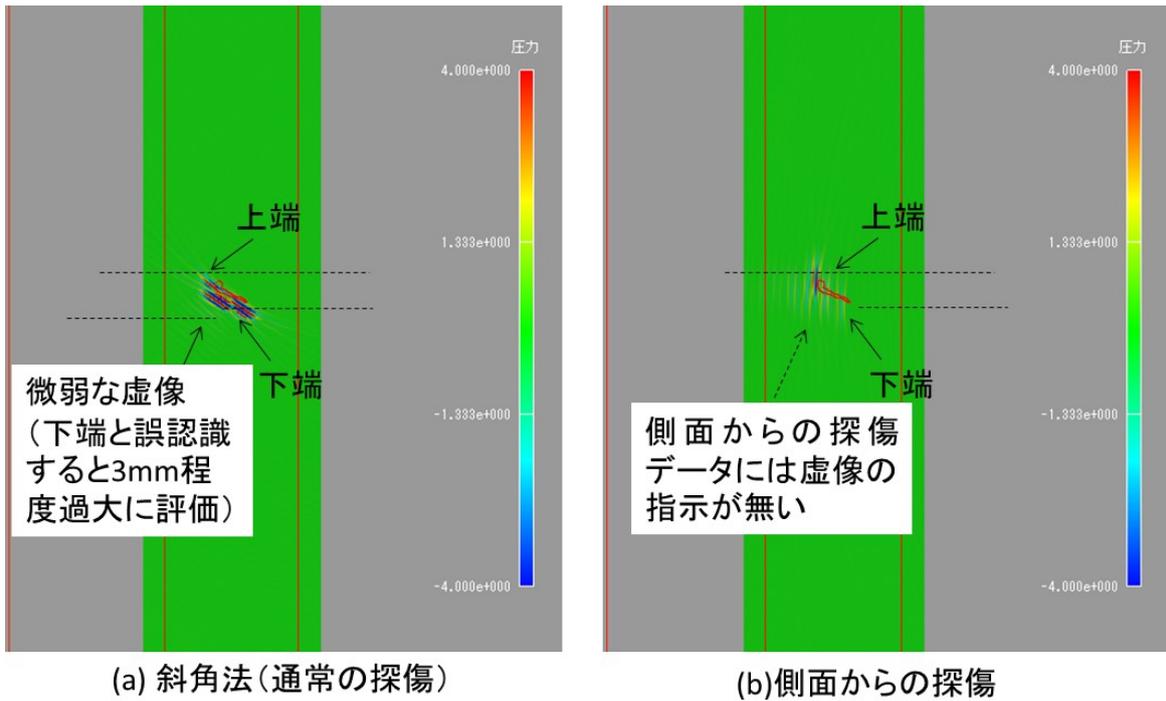


図 6.2.3-25 X = 277 mm 断面のモデルにおけるシミュレーション解析結果 (FMC/TFM)

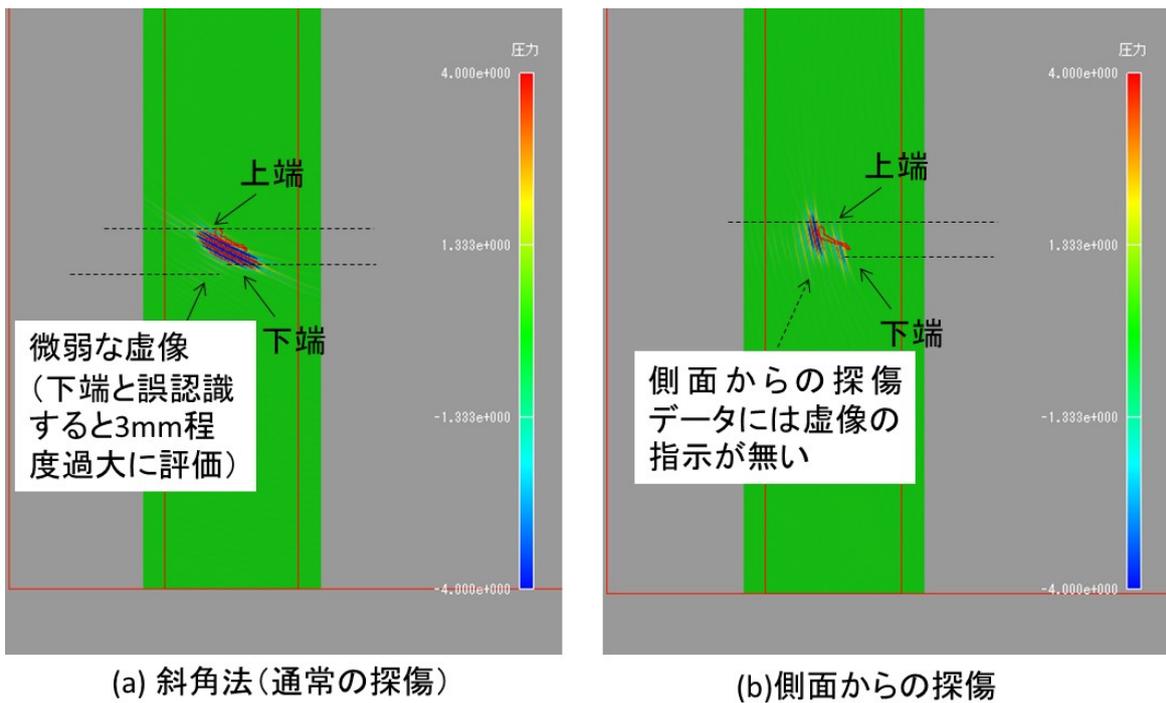


図 6.2.3-26 X = 277 mm 断面の欠陥を 50 mm 上方に設置したモデルにおけるシミュレーション解析結果 (FMC/TFM)

## 6.3 複数欠陥の検出および測定精度に関する検討

### 6.3.1 解析モデル及び解析条件

複数欠陥の検出および測定精度に関する検討において、近接する欠陥の間隔を変えた超音波シミュレーションを行い、 $0.7a$  ( $a$  は欠陥高さ) で近接欠陥の分離性を把握し、欠陥モデルの妥当性を評価した。近接欠陥に対する超音波シミュレーションのモデルを図 6.3.1-1 に示す。欠陥の深さ位置( $h$ )を変え、また  $a=4\text{ mm}$  および  $a=8\text{ mm}$  でシミュレーションを実施した。ここで、 $a=4\text{ mm}$  以上を選定した理由は、以前の検討において欠陥高さ  $2\text{ mm}$  では高さの定量が困難であったが  $4\text{ mm}$  程度になると高さ評価が可能であったことによる[4]。

表 6.3.1-1 に超音波シミュレーションの条件を示す。ここで、探触子の位置とは、図 6.3.1-2 に示すように探触子内の超音波ビームの中心線と欠陥の中心座標間との距離を示す。探触子の位置が 50 の場合、深さ  $10\text{ mm}$ 、 $40\text{ mm}$  および  $70\text{ mm}$  の欠陥に入射する角度 ( $\theta$ ) は各々約  $79^\circ$ 、約  $51^\circ$  および約  $36^\circ$  であり、探触子の位置が 80 の場合は、各々約  $82^\circ$ 、約  $63^\circ$  および約  $49^\circ$  で欠陥に入射する条件である。また、縦波斜角法において探触子の位置が 80 の場合、深さ  $70\text{ mm}$ 、 $110\text{ mm}$ 、 $150\text{ mm}$  および  $190\text{ mm}$  の欠陥に対して各々  $49^\circ$ 、 $36^\circ$ 、 $28^\circ$  および  $23^\circ$  で入射する条件である。

超音波の周波数は、横波が  $2\text{ MHz}$  (鋼中の波長：約  $1.6\text{ mm}$ )、縦波は  $2\text{ MHz}$  (鋼中の波長：約  $3\text{ mm}$ )、 $3\text{ MHz}$  (鋼中の波長：約  $2\text{ mm}$ )、 $4\text{ MHz}$  (鋼中の波長：約  $1.5\text{ mm}$ ) および  $5\text{ MHz}$  (鋼中の波長：約  $1.2\text{ mm}$ ) として、超音波の振動の種類または波長の違いによる隣接欠陥の分離性を確認した。浅い欠陥と深い欠陥を対象とした解析モデルを図 6.3.1-3 および図 6.3.1-4 に示す。この解析では、FMC/TFM での測定を模擬したシミュレーション解析を行うことで、欠陥深さ毎に最適な集束条件を選定した場合を想定して隣接欠陥の分離性を評価した。

シミュレーション解析で使用した音速等のパラメータは、鋼の縦波及び横波音速が各々  $5,900\text{ m/s}$  および  $3,230\text{ m/s}$ 、密度は  $7.9 \times 10^3\text{ kg/m}^3$ 、くさびの縦波及び横波音速が各々  $2,450\text{ m/s}$  および  $1,060\text{ m/s}$ 、密度は  $1.28 \times 10^3\text{ kg/m}^3$  とした。

表 6.3.1-1 超音波シミュレーションの主な条件

No.	欠陥深さ(h) mm	欠陥高さ(a) mm	近接距離 mm	超音波の振動の種 類／開口寸法 mm	探触子の 位置
1	10	4	2.8	横波／ 32	50 80
2		8	5.6		
3	40	4	2.8		
4		8	5.6		
5	70	4	2.8		
6		8	5.6		
7	70	4	2.8	縦波／ 64	80
8		8	5.6		
9	110	4	2.8		
10		8	5.6		
11	150	4	2.8		
12		8	5.6		
13	190	4	2.8		
14		8	5.6		

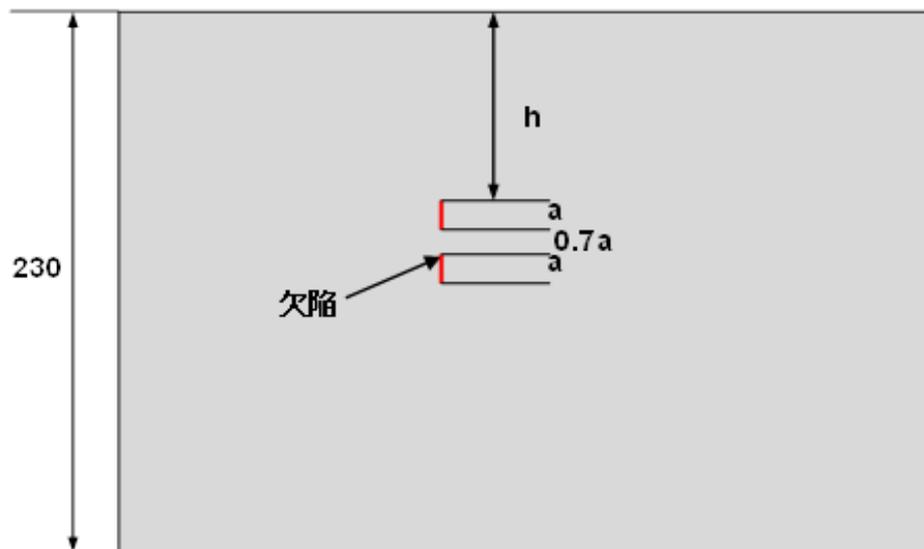


図 6.3.1-1 近接欠陥モデルの模式図

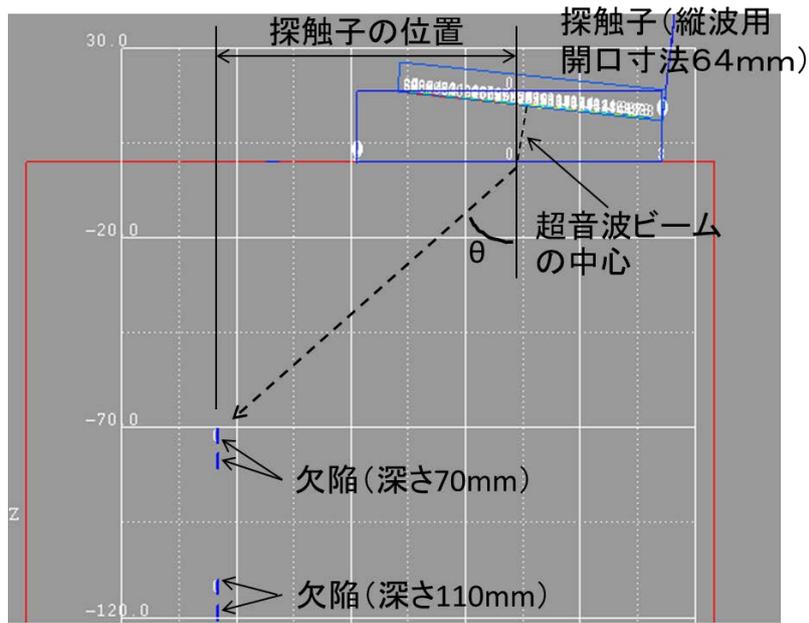


図 6.3.1-2 超音波シミュレーションモデルにおける探触子の位置

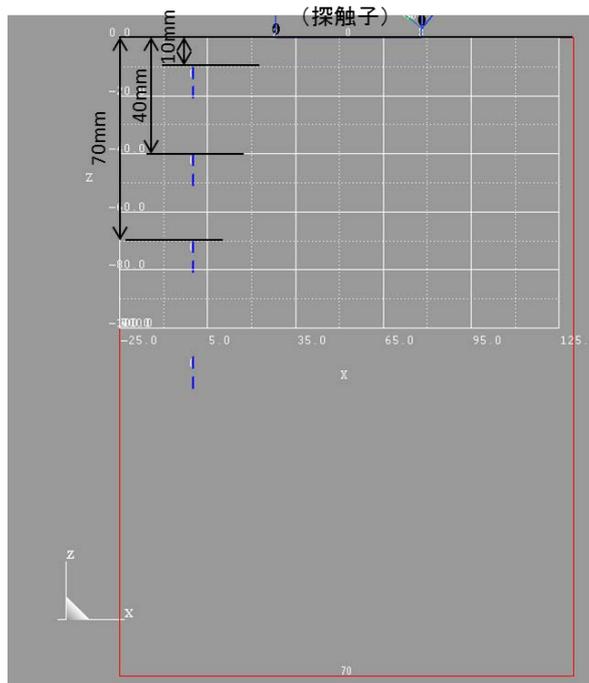


図 6.3.1-3 浅い欠陥の付与位置 (解析モデル：横波用)

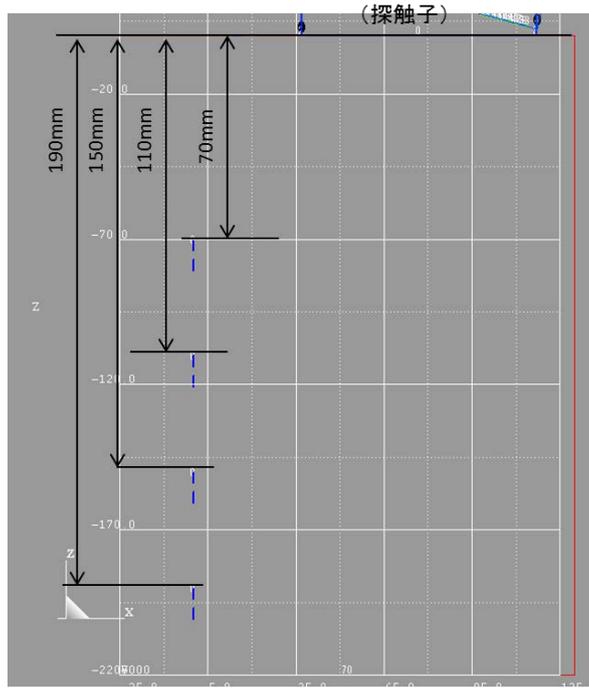


図 6.3.1-4 深い欠陥の付与位置 (解析モデル：縦波用)

### 6.3.2 解析結果

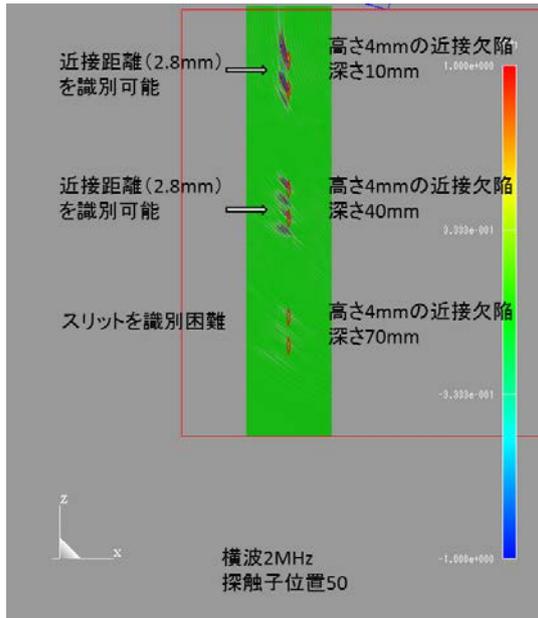
図 6.3.2-1 および図 6.3.2-2 は、周波数 2 MHz 横波斜角（鋼中の波長：約 1.6 mm）におけるスリット高さ 4 mm および 8 mm の解析結果である。各スリットの上端と下端の指示が確認でき、上側のスリットの下端と下側のスリットの上端が分離するかどうかで近接距離の識別可否を評価した。

スリット高さ 8 mm の場合は、近接した二つの欠陥を分離して評価可能であった。これは近接距離が波長の 2 倍（約 3.2 mm）以上あるため識別が可能であったと考えられる。ここで、波長の 2 倍とした理由は、送信パルスの持続時間が 2～3 波程度と推測されるためである。一方、スリット高さ 4 mm では探触子の位置 80 における深さ 10 mm を除き近接間隔 2.8 mm の識別が可能であった。近接距離 2.8 mm は波長の 2 倍と同程度であり、このあたりが分離の限界と考えられる。探触子の位置 80 における深さ 10 mm のスリットに対しては、ビーム中心での屈折角が約 82° であり、ビーム全体でも約 81°～84° と大きな角度で欠陥にあたる条件となっており、超音波の指向性が広く分解能が低下したために、近接距離の分離が困難であったと考えられる。探触子の位置 50 では、深さ 10 mm の場合でも近接距離 2.8 mm を識別可能であり、この時のビーム中心での屈折角は約 79° であるが、ビーム全体では約 74°～81° であり、探触子の位置 80 に比べれば指向性の低下の影響は小さいものと考えられる。また、探触子の位置 50 における深さ 70 mm のスリットに対しては、屈折角成分 36° であり、この条件では横波の強度が低く指示が不明瞭であったと考えられる。横波では有効な屈折角の範囲が存在し、約 40° から 80° 未満であると考えられる。

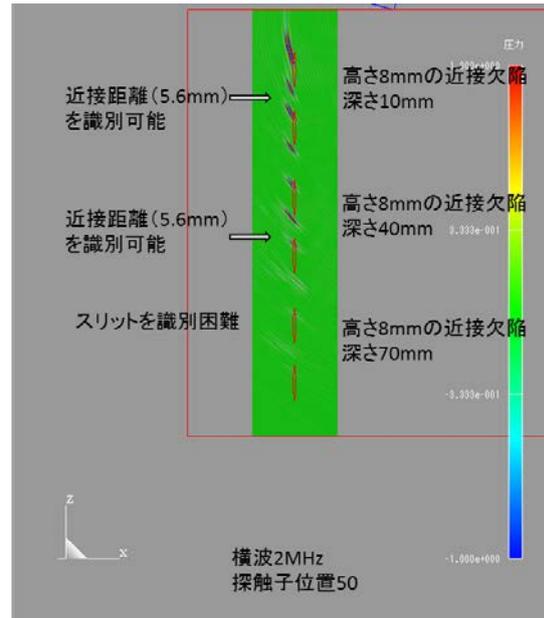
以上の結果より、横波斜角では屈折角成分の有効範囲が約 40°～80° 未満であり、その範囲にはいるように欠陥の位置に応じて探触子の位置を変える必要があるものの、周波数 2MHz の横波斜角法では、スリット高さ 4 mm において近接間隔 2.8 mm を識別可能と考えられる。

図 6.3.2-3 は、周波数 2 MHz 縦波斜角（鋼中の波長：約 3 mm）におけるスリット高さ 4 mm および 8 mm の解析結果である。各スリットの上端と下端の指示が確認でき、上側のスリットの下端と下側のスリットの上端が分離するかどうかで近接距離の識別可否を評価した。縦波の場合、横波に比べて波長が長いので、スリット高さ 8 mm での近接距離 5.6 mm は識別可能であったが、スリット高さ 4 mm での近接距離 2.8 mm はスリットの位置にかかわらず識別困難であった。これに対して、図 6.3.2-4 に示す様に、縦波の周波数が 3 MHz 以上（鋼中の波長：約 2 mm 以下）の場合では、スリット高さ 4 mm の近接距離 2.8 mm の識別が可能であった。

近接距離の識別に関して、 $a = 4.0$  mm において欠陥高さの 0.7 である近接距離 2.8 mm は、周波数 2 MHz 以上の横波ならびに周波数 3 MHz 以上の縦波で分離可能であることが確認された。

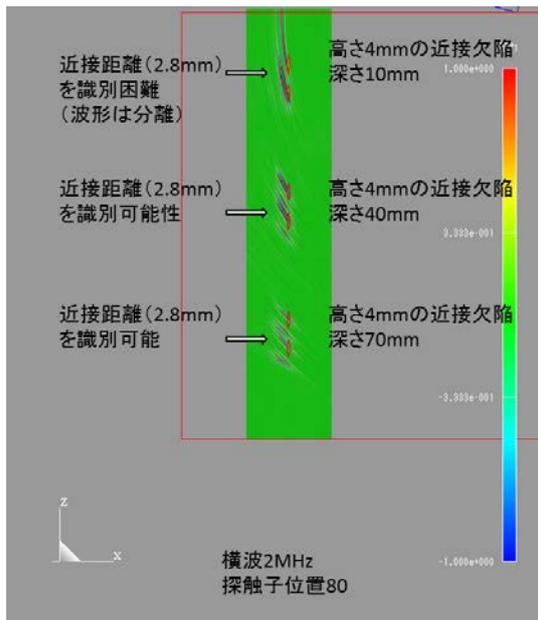


(a) スリット高さ 4 mm

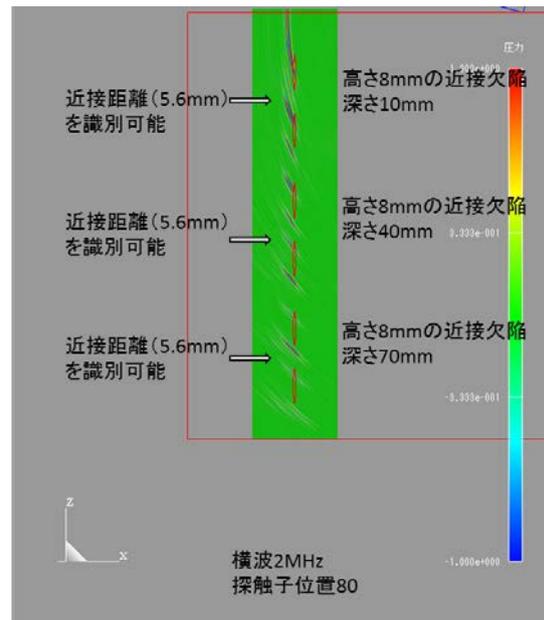


(b) スリット高さ 8 mm

図 6.3.2-1 2 MHz 横波斜角法におけるスリット高さ 4 mm および 8 mm の結果  
(探触子の位置 50)

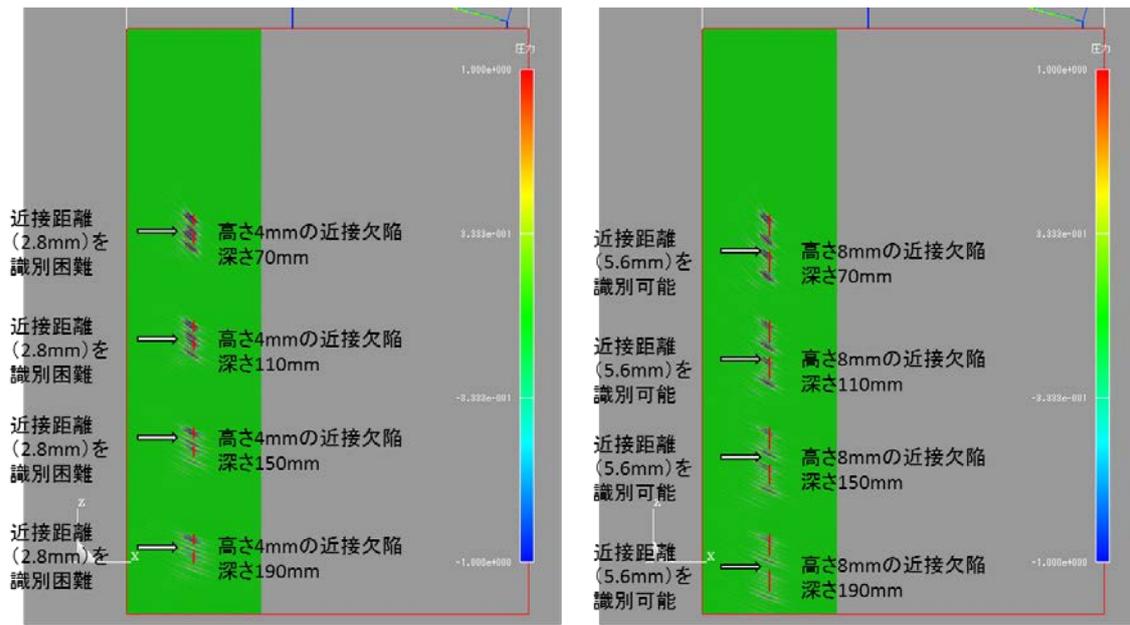


(a) スリット高さ 4 mm



(b) スリット高さ 8 mm

図 6.3.2-2 2 MHz 横波斜角法におけるスリット高さ 4 mm および 8 mm の結果  
(探触子の位置 80)



(a) スリット高さ 4 mm

(b) スリット高さ 8 mm

図 6.3.2-3 2 MHz 縦波斜角法におけるスリット高さ 4 mm および 8 mm の結果

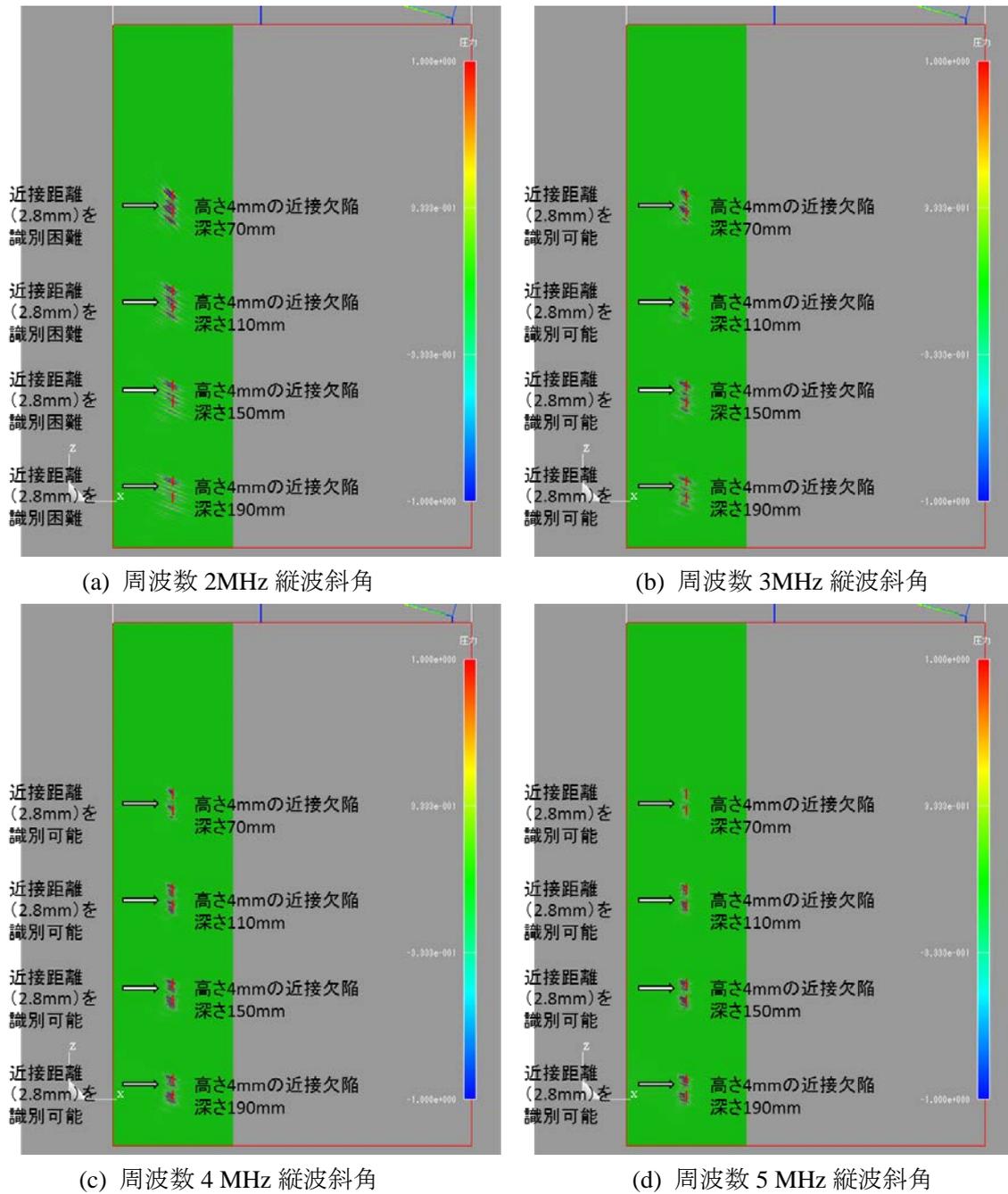


図 6.3.2-4 2 MHz から 5 MHz 縦波斜角法におけるスリット高さ 4 mm の結果

## 6.4 検査手順の設定

これまで検討してきた超音波探傷試験方法のうち、PhA（フェーズドアレイ）法による探傷試験方法について、探傷試験の要領と留意点等を整理した。

### 6.4.1 PhA 法の探傷試験要領および留意点

PhA法では、パルス反射法<sup>2</sup>の原理に基づいて欠陥の検出と欠陥寸法の定量（長さおよび高さの

<sup>2</sup> パルス反射法：送信された超音波パルスを反射後に受信する方法（JIS Z 2300 より）

サイジング)を行う。オーバーパック溶接部の探傷においては、探触子を前後走査<sup>3</sup>させる空間が十分に取れないことが想定されるため、前後走査に変わる方法として超音波ビームの屈折角を変えて送受信するセクター走査<sup>4</sup>を適用して、溶接部内全体に複数の角度の超音波ビームが伝わるような探傷方法を適用する。使用する超音波の振動の種類は、原則として表面側は横波をそれ以外は縦波を用いる。必要に応じて溶接線と探触子との間の距離を変えて板厚全体に超音波を伝搬させる方法とした。

使用する超音波の周波数は、本年度検討した近接欠陥の近接距離識別性を考慮し、横波の場合は2 MHz以上、縦波の場合は3 MHz<sup>5</sup>以上を推奨し超音波の減衰の程度や金属材料組織等に起因する信号(ノイズと呼ぶ)の影響を受けない範囲でできるだけ高い周波数(最大でも5 MHz程度、表面近傍では最大でも10 MHz程度)とした。

### (1) 適用範囲

本要領は炭素鋼オーバーパック溶接部に対するフェーズドアレイ法による超音波探傷試験に適用する。

### (2) 準拠図書、参考図書

- JIS Z 2300 非破壊試験用語
- JIS Z 2305 非破壊試験技術者の資格及び認証
- JIS Z 2345 超音波探傷試験用標準試験片
- JIS Z 3060 鋼溶接部の超音波探傷試験方法
- ASTM E2491 Standard Guide for Evaluating Performance Characteristics of Phased-Array Ultrasonic Testing Instruments and Systems
- ASTM E2700 Standard Practice for Contact Ultrasonic Testing of Welds Using Phased Arrays
- 日本電気協会技術規程 JEAC4207 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程

### (3) 技術者

フェーズドアレイ法を用いて炭素鋼オーバーパック溶接部の探傷に従事する技術者は、JIS Z 2305 に規定する超音波探傷試験(以下、探傷という)の資格者又はこれと同等の有資格者とし、探傷の原理およびフェライト系鋼の溶接部に関する知識をもち、かつ、その探傷について経験をもつ者とする。

---

<sup>3</sup> 前後走査：斜角法において溶接線に対して探触子を前後(溶接線に近づける/遠ざける)に移動する走査(JIS Z 2300 より)

<sup>4</sup> フェーズドアレイ探触子を用いて、送・受信を位相制御することによって同一平面で超音波ビームを扇形に移動させる走査方法(JIS Z 2300 より)

<sup>5</sup> 測定試験は主に2MHzを使用した。今年度検討した近接欠陥の近接距離の識別性を考慮し、縦波では3MHz以上とした

#### (4) 標準試験片及び対比試験片

使用する標準試験片は JIS Z 2345 に規定する A1 形系標準試験片とする。対比試験片は JIS Z 3060 に規定する RB-41 形系対比試験片とする。また必要に応じて ASTM E2491 に規定する試験片を使用する。

#### (5) フェーズドアレイ探傷装置の点検

##### 1) 定期点検

アレイ探傷器の性能の点検は、点検項目を選択し装置の購入時及び点検を行った日の翌月 1 日から起算して 12 か月以内ごとに点検し性能が維持されていることを確認する。

##### 2) 日常点検

探傷装置の日常点検は、点検項目を選定し作業開始時及び作業終了時に行う。必要とする性能を満たさない場合はその間の探傷結果を破棄し、必要な処置を行った後に再試験する。

#### (6) 探傷試験の計画

##### 1) 試験の時期

オーバーパックの検査計画に従い適切な時期に探傷試験を実施する。

##### 2) 試験の範囲

試験範囲は溶接金属及び溶接熱影響部を含む範囲を選定する。超音波の振動の種類は、原則として表面側を横波で、それ以外の範囲は縦波を使用する。また、境界部が重なるように試験範囲を設定する。

##### 3) 試験条件の選定

探傷に使用する中心周波数は、原則として横波を使用する場合は 2 MHz 以上、縦波を使用する場合は 3 MHz 以上で、超音波の減衰の程度や金属材料組織等に起因する信号（ノイズと呼ぶ）の影響を受けない範囲でできるだけ高い周波数（最大でも 5 MHz 程度、表面近傍では最大でも 10 MHz 程度）を選定する。

##### 4) アレイ探傷器及びソフトウェアの選定

使用するアレイ探触子は、後述する 6) で選定する電子走査方法及びアレイ探触子が使用できるものを選定する。本研究では、総素子数が最大で 32 個のアレイ探触子を使用した。縦波斜角法においては同仕様のアレイ探触子を左右に並べて配置して、各々送信と受信を分離して測定し、また溶接部を挟んで両側から同時に探傷した。したがって、32 ch×4 探触子が使用可能な最大 256 ch のアレイ探傷器を使用した。

##### 5) 音響結合方法及び接触媒質の選定

音響結合方法は直接接触法又はギャップ法を用いる。接触媒質はオーバーパック表面の温度でも蒸発や劣化しない液体やペースト状のものを選定する。

##### 6) 電子走査方法及び探触子、くさびの選定

電子走査の方法はセクター走査とする。探触子は使用する超音波の種類と対象とする探傷の範囲（深さ）を考慮して、セクター走査の振り角の範囲等から適した素子ピッチを選定する。表面から斜角探傷する場合、横波の振り角は約 40°～90°（装置の設定によっては 89°が最大となる場合がある）、縦波の振り角は約 15°～約 70°が望ましい。また、側面からの探傷では、縦波の振り

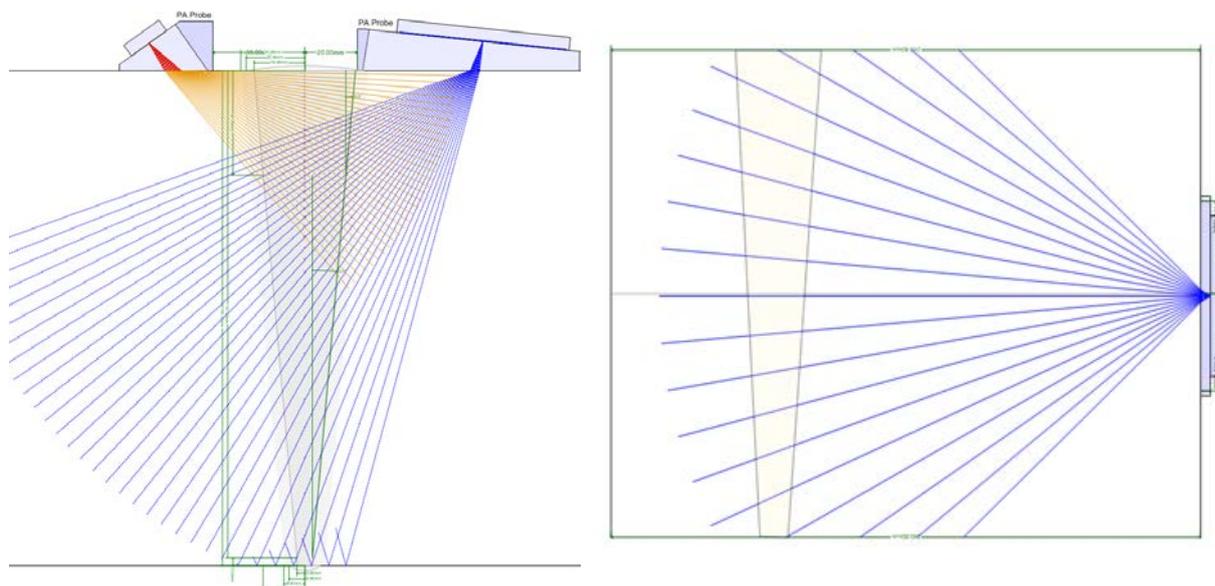
角を±45°の範囲とすることが望ましい。本研究で検討した探触子の推奨例を表 6.4.1-1 に示す。表 6.4.1-1 に示したアレイ探触子で電子走査する例を図 6.4.1-1 に示す。電子走査において、図 6.4.1-2 に示す様に溶接部内に設定する集束深さを可変にするため、角度毎に集束の条件を変えることが望ましい。

角度の刻み（ステップ）は、測定の目的が探傷（又は測定範囲全体の把握）か、高さ寸法測定かを考慮して、各々2°～0.5°の範囲で適切な値を設定する。

くさびの材質はオーバーパック表面の温度を考慮し、耐熱性があり音響特性が明らかな材料を使用する。本研究では、約 200°C 程度の耐熱性があるポリエーテルイミド系の材料を使用した。

表 6.4.1-1 アレイ探触子の推奨例 (PhA 法)

探傷面・探傷の範囲 (深さ)	周波数 (振動の種類)	素子ピッチ×総素子数	振り角
表面 表面～60 mm 程度	2 MHz (横波)	0.5 mm×32	40°～90°
表面 60 mm 程度～裏面	3 MHz (縦波)	2 mm×32	15°～70°
側面 150～220 mm	3 MHz (縦波)	2 mm×32	-45°～+45°



(a) 表面からの斜角探傷

(b) 側面からの探傷

図 6.4.1-1 電子走査の条件の例

角度毎に、溶接部内に集束するように設定

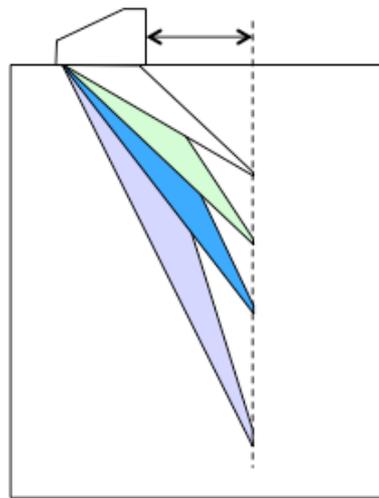


図 6.4.1-2 集束の条件の設定例

(7) 超音波探傷装置の設定及び調整

1) 測定範囲の設定

試験体の板厚、屈折角の範囲又は電子走査の角度範囲等を考慮し、試験範囲を満足するように測定範囲を設定する（図 6.4.1-3）。設定方法はビーム路程で設定するほか、画像化する範囲で設定してもよい。

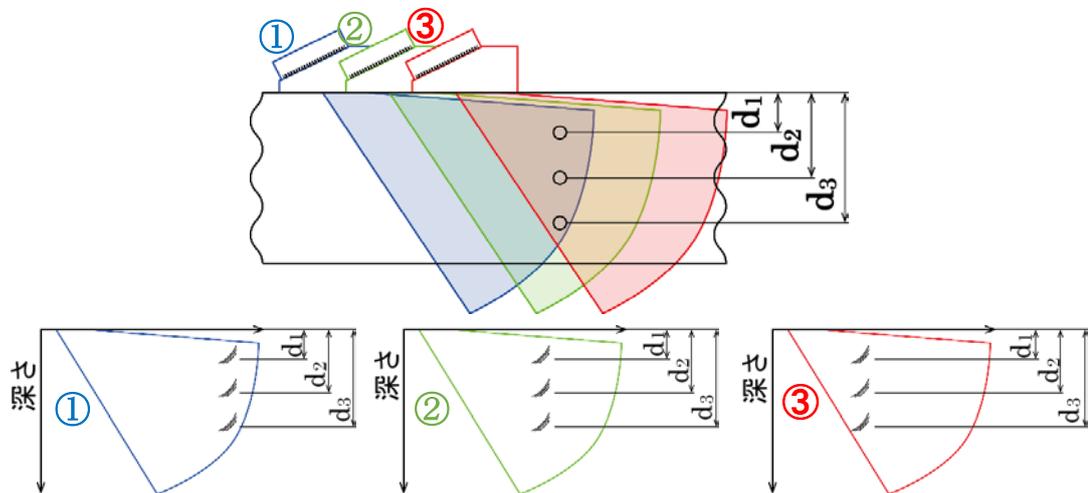


図 6.4.1-3 測定範囲の設定例

2) 探傷試験条件の設定

前述の(6)で選定した探傷方法に従い電子走査の範囲、ステップ、集束の条件等を設定する。

3) 基準感度及び探傷感度の設定

基準感度はφ3 mmの横穴からの反射波を所定の振幅値に設定したときの探傷期間とする。探

傷感度の調整は、 $\phi 3 \text{ mm}$  の横穴からの反射波の振幅を基準にして設定する。

#### 4) 検出レベルの設定

原則として $\phi 3 \text{ mm}$  の横穴からの反射波の振幅の 10% を超える信号を評価の対象とする指示とする。

### (8) 超音波探傷装置の確認

超音波探傷装置の確認は、探傷試験開始時及び終了時または定期的に確認する。試験結果に影響を及ぼす変動がある場合は適正な設定にしたのちに再度探傷試験を行う。

#### 1) 測定範囲の確認

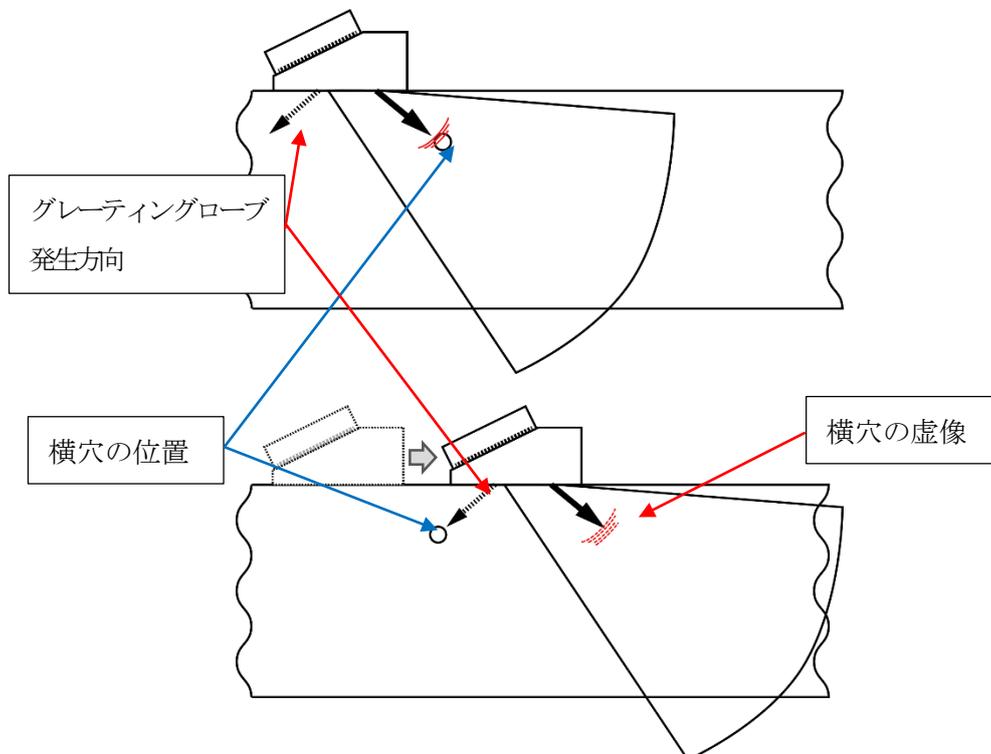
探傷試験と同じ条件（探触子、探触子ケーブル、くさび又は遅延材の有無、超音波の振動の種類、屈折角又は振り角、集束の設定及び試験体の温度等）で、全てのビームに対して測定範囲を確認する。測定範囲の確認では、位置が既知な反射源の指示位置を測定し深さ方向および水平方向の位置を確認する。

#### 2) 感度の確認

基準となる反射源からの信号又は疑似的な信号を用いて、感度の変動の有無を確認する。

#### 3) グレーティングローブの影響の確認

グレーティングローブの影響の確認方法及び確認後の処置を定め、グレーディングローブの影響の有無を確認する。グレーティングローブの影響の有無の確認方法の例を図 6.4.1-4 に示す。



グレーティングローブが発生している場合の例

図 6.4.1-4 グレーティングローブの影響の確認方法の例

## (9) 探傷

### 1) 探触子の走査方法

探傷は、アレイ探触子を溶接線方向に走査してデータの収録漏れがないように行う。

### 2) 探傷データの保管

探傷データは試験体、探傷の範囲、探傷の条件が同定できるようにしたうえで、電子データとして保管する。

## (10) きずの評価

### 1) 評価の対象とするきず

評価の対象とするきずは、検出レベルを超えて、断面内の同じ位置に 2 断面以上連続する指示とする。ただし明らかに形状等に起因する指示は評価の対象とはしない。

### 2) きず信号の振幅

きずからの信号が最大となる位置での信号の振幅をよみとる。

### 3) きずの指示長さ

きずの指示長さは、検出レベルを超える溶接線方向のきず指示の範囲を 1 mm 単位で測定した値とする。

### 4) きずの指示高さ

きずの指示高さ測定は、次に示す方法の中から選定する。

#### a 端部エコー法

端部エコー法 (JIS Z 3060 付属書 H 参照) によりきずの上端及び下端を読み取り高さを測定する。

#### b 画像上の指示範囲

端部エコーの検出が困難な場合に、きずからの信号の振幅が最大値から -6 dB となる範囲の板厚方向の指示範囲を読み取る。

## (11) 探傷結果の確認

探傷が正常に行われたかどうかを次に示すいずれかの方法により確認する。正常に行われていないと判断された場合は適正な設定にしたのちに再度探傷試験を行う。

- 1) 探傷画像上のデータの抜けや評価に支障を及ぼすノイズの有無の確認による方法
- 2) 探触子の接触状態の確認 (カップリングチェック) による方法
- 3) その他のあらかじめ適切と確認された方法

## (12) 記録

記録は次にうち必要な項目とする。

- 1) 試験の方法
- 2) 日付（年月日、時間）
- 3) 試験番号又は記号
- 4) 試験技術者の氏名又は署名及び資格
- 5) 使用した探傷装置の形式、仕様、確認または点検の日時
- 6) 使用した試験片、試験の条件
- 7) 評価の対象としたきずの位置、信号の振幅、指示長さ、指示高さ
- 8) その他の事項

## 6.5 本章のまとめ

①溶接欠陥の寸法および位置の測定に対する安全係数の検討、②複数欠陥の検出および測定精度に関する検討、③検査手順の設定について実施した。

溶接欠陥の寸法および位置の測定に対する安全係数の検討では、国内外のデータ整理方法の事例を示し、昨年度に実施した測定試験のデータをまとめた。その結果、データ数は少ないものの、高さ測定の標準偏差（ $\sigma$ ）は FMC/TFM で 3.7 mm、フェーズドアレイ法で 2.5 mm であった。そのため、90%信頼区間における標準偏差は FMC/TFM で 6.1 mm、フェーズドアレイ法で 4.1 mm であり、仮に 90%信頼区間で評価を行う場合、測定値に対して FMC/TFM であれば 6.1 mm、フェーズドアレイ法であれば 4.1 mm 加算して評価を行えばよいことになる。

複数欠陥の検出および測定精度に関する検討では、シミュレーション解析により近接欠陥の識別について評価を行い、欠陥高さ  $a = 4.0$  mm の 2 つの欠陥が  $a$  の 0.7 倍である近接距離 2.8 mm で存在する場合、周波数 2 MHz 以上の横波ならびに周波数 3 MHz 以上の縦波で分離可能であることが確認された。

また、検査手順の設定では、フェーズドアレイ法による探傷試験方法について、探傷試験の要領と留意点等を整理した。

## 第6章 参考文献

- [1] 独立行政法人 原子力安全基盤機構、原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書(超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度の確認に関するもの) [総括版]、05 基材報-0001 (2005).
- [2] 独立行政法人 原子力安全基盤機構、低炭素ステンレス鋼の非破壊検査技術実証に関する事業報告書：総括版 (2007).
- [3] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書(第1分冊) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築－オーバーパック (2017).
- [4] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 25 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書(第1分冊) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築－オーバーパック (2014).

## 第7章 炭素鋼の脆化量予測

### 7.1 背景および目的

ガラス固化体から放出される放射線によりオーバーパックが脆化する場合、破壊靱性値の低下量の大きさによっては、その健全性に影響を及ぼす可能性がある。照射脆化は原子炉圧力容器について良く調べられているが、オーバーパックの照射条件は原子炉圧力容器に比べて低温度であり、低い照射速度で長期間に渡って照射される。このため、オーバーパックの照射条件に対応する照射データはなく、試験データに基づいた予測や原子炉圧力容器鋼について確立されている脆化予測式を拡張した予測も難しい。オーバーパックの脆化量を予測するためには、炭素鋼の脆化因子を調べ、解析によりマイクロ組織の変化量を求め、マイクロ組織の変化量と硬さの増加量および硬さの増加量と破壊靱性値の低下量の関係を用いて炭素鋼の破壊靱性値の低下量を予測する。

平成 27 年度は、マイクロ組織変化の解析モデルの構築に資する知見を得ることを目的として、炭素鋼の脆化因子の同定と脆化因子に対する材料組成、照射温度、照射速度および溶接の影響を実験により把握する 3 カ年の試験計画を立案した。また、炭素鋼と FeCu 合金にイオン照射を実施してマイクロ組織変化と硬化の関係を調べ、炭素鋼の脆化因子を同定するとともに、脆化因子に対する材料組成の影響として Cu 濃度による影響と照射温度の影響を把握した。

平成 28 年度は、炭素鋼の脆化因子に対する材料組成の影響として Mn と Si の影響を把握するとともに照射速度の影響を把握することを目的とし、Cu 濃度が 0.5wt% の炭素鋼とそのモデル合金の FeMnSiCu 合金を作製し、FeCu 合金と合わせて電子線照射およびイオン照射を実施し、マイクロ組織変化と硬化の関係を調べた。Mn と Si の添加や照射速度の減少は溶質クラスタの形成を促して硬化量を増加させることを明らかにした。また、オーバーパックの脆化量を推定するためには照射によるマイクロ組織変化と硬化の関係に加え、硬さと破壊靱性値の関係を把握する必要があることから、冷間圧延にて照射脆化による硬化を模擬した炭素鋼を用いて 90°C の大気中で引張試験と破壊靱性試験を実施し、加工硬化によって引張強度が増加し、破壊靱性が低下する傾向を明らかにした。

本年度は、炭素鋼の脆化因子に対する溶接の影響と照射速度の影響について検討した。また、平成 27 年度からの 3 カ年の試験で得られた結果について総合的に評価を行い、炭素鋼の脆化因子となるマイクロ組織変化量と硬化量の関係、脆化因子に対する材料組成、照射速度および溶接の影響を整理するとともに、照射による炭素鋼のマイクロ組織変化の解析結果から、1,000 年後のオーバーパックの脆化量を推定する考え方を示す。

### 7.2 照射試験による炭素鋼の損傷量の把握

#### 7.2.1 炭素鋼の脆化因子におよぼす溶接の影響の検討

##### (1) 試験材

###### 1) 炭素鋼溶接試験体

炭素鋼の MAG 溶接試験体[1]を試験材として用いた。溶接試験体の寸法は 120×60×5 mm である。母材部と溶接部および溶加材の化学組成[1]を表 7.2.1-1 に示す。金相組織を確認するため、

試験体表面を 1200 番までの SiC 研磨紙で湿式機械研磨した後、粒径 3  $\mu\text{m}$  のダイヤモンドパウダーで鏡面研磨した。その後、ナイトール（3%硝酸+97%エタノール）中に 1 秒間浸漬させた。また、試験体の長手方向に沿ってビッカース硬さ試験を荷重 1 kgf で実施し、硬さの変化を調べた。

硬さ試験の結果を図 7.2.1-1 に示す。硬さは母材部が最も小さく、平均値で 115 HV であった。また、最も硬い溶接部（原質部）では 176 HV であった。母材部から溶接部（原質部）までの間には溶接熱影響部（HAZ）、HAZ（細粒域）、HAZ（粗粒域）、溶接部（再熱部）が確認され、母材部から溶接部（原質部）に至るまでに連続的な硬さの増加が確認された。

表 7.2.1-1 炭素鋼溶接試験体の化学組成 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Fe
母材部	0.11	0.25	0.65	0.007	0.002	0.05	0.04	0.01	bal.
溶接部	0.082	0.58	1.07	0.010	0.014	0.20	0.03	<0.01	bal.
溶加材	0.10	0.76	1.37	0.010	0.014	0.24	—	—	bal.

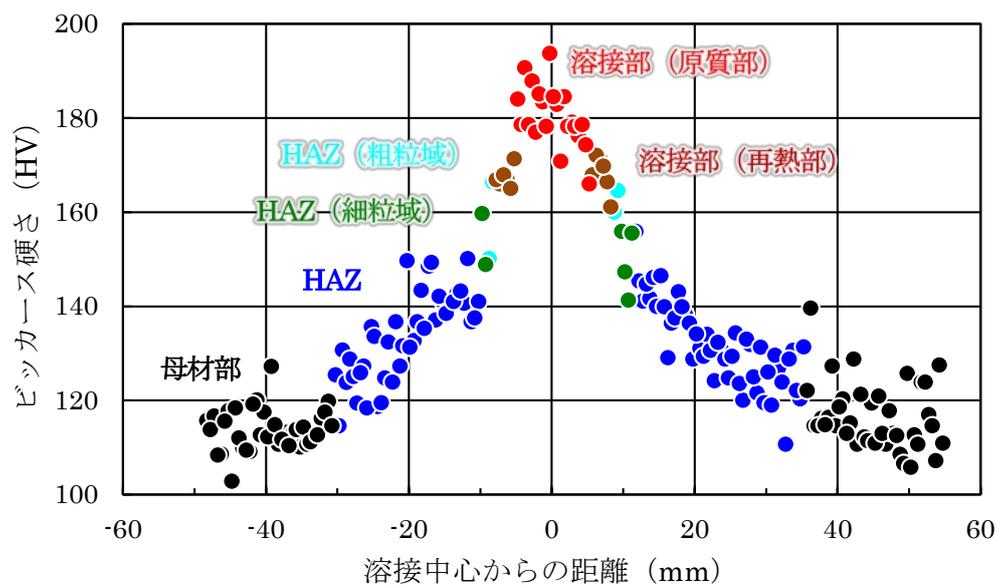


図 7.2.1-1 炭素鋼溶接試験体の硬さ分布

## 2) 試験体の作製

炭素鋼溶接試験体の母材部、HAZ、溶接部より、10×3×t1 mm の短冊状試験体を板厚方向に放電加工により 2 個ずつ計 6 個切り出した。HAZ と溶接部については、硬さが最も大きい粗粒域と原質部がそれぞれ試験体の中央となるように作製した。試験体表面と側面を 1200 番の SiC 研磨紙で湿式機械研磨した後、10×3 mm の片面を粒径 3  $\mu\text{m}$  のダイヤモンドパウダーとコロイダルシリカ（溶液状の粒径 0.04  $\mu\text{m}$  の研磨砥粒）で鏡面研磨した。その後、ナイトール中に 1 秒間浸漬させ、化学研磨により最表面の加工層を除去した。鏡面研磨を施した面を照射用の表面とした。

### 3) イオン照射試験

東京大学重照射研究設備 HIT のタンデトロン加速器を用いて、試験体表面に加速電圧 2.8 MeV で Fe イオン (Fe<sup>2+</sup>) を照射した。試験体の組成を Fe 単体とし、原子の弾き出しが生じるしきいエネルギーを 40 eV として損傷計算コード SRIM2013[2]を用いて計算した損傷量の深さ分布を図 7.2.1-2 図 3.3-1 に示す。なお、損傷量は最大値を 1 として規格化した。重イオン照射では、照射領域が表面から深さ 1 μm 程度の領域に限られ、損傷量が深さ方向に沿って異なる特徴がある。本照射では深さ 300 nm における損傷量と損傷速度で照射量と照射速度を定義した。照射条件として、温度は 90°C、照射速度は 1×10<sup>-4</sup> dpa/s、照射量は 1 dpa を目標値とした。表 7.2.1-2 に照射試験のマトリクスを示す。表 7.2.1-3 に照射試験中の平均値で各試験体の照射実績を示す。照射速度は目標値の 1×10<sup>-4</sup> dpa/s から最大 25%のずれが生じている場合があったが、平均値では 4%の誤差範囲内で目標値を満足した。

表 7.2.1-2 イオン照射試験のマトリクス

材料	温度	照射速度	照射量
母材部 (0.05%Cu)	90°C	1×10 <sup>-4</sup> dpa/s	1 dpa
HAZ (0.05%Cu)	90°C	1×10 <sup>-4</sup> dpa/s	1 dpa
溶接部 (0.20%Cu)	90°C	1×10 <sup>-4</sup> dpa/s	1 dpa

表 7.2.1-3 各試験体の照射実績

材料	試験体	熱電対	対応する ファラデー カップ	実績	目標値
母材部 (0.05%Cu)	試験体 1	溶接	ch.8 ch.13	0.99 dpa ( $9.9 \times 10^{-5}$ dpa/s) 1.00 dpa ( $1.0 \times 10^{-4}$ dpa/s)	1 dpa ( $1 \times 10^{-4}$ dpa/s)
	試験体 2	なし	ch.9 ch.14	1.01 dpa ( $1.0 \times 10^{-4}$ dpa/s) 1.00 dpa ( $1.0 \times 10^{-4}$ dpa/s)	1 dpa ( $1 \times 10^{-4}$ dpa/s)
HAZ (0.05%Cu)	試験体 1	溶接	ch.8 ch.13	1.00 dpa ( $1.0 \times 10^{-4}$ dpa/s) 1.03 dpa ( $1.0 \times 10^{-4}$ dpa/s)	1 dpa ( $1 \times 10^{-4}$ dpa/s)
	試験体 2	なし	ch.9 ch.14	0.98 dpa ( $9.8 \times 10^{-5}$ dpa/s) 0.96 dpa ( $9.6 \times 10^{-5}$ dpa/s)	1 dpa ( $1 \times 10^{-4}$ dpa/s)
溶接部 (0.20%Cu)	試験体 1	溶接	ch.8 ch.13	1.00 dpa ( $1.0 \times 10^{-4}$ dpa/s) 1.00 dpa ( $1.0 \times 10^{-4}$ dpa/s)	1 dpa ( $1 \times 10^{-4}$ dpa/s)
	試験体 2	なし	ch.9 ch.14	0.96 dpa ( $9.6 \times 10^{-4}$ dpa/s) 0.99 dpa ( $9.9 \times 10^{-5}$ dpa/s)	1 dpa ( $1 \times 10^{-4}$ dpa/s)

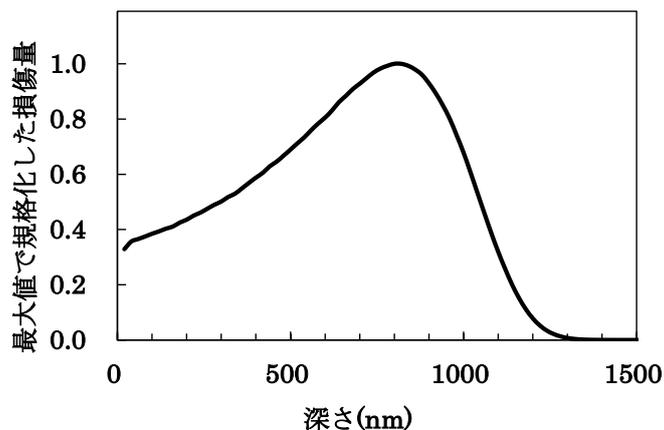


図 7.2.1-2 2.8MeV Fe イオンによる損傷量の深さ分布

## (2) 硬さ試験

### 1) 測定方法

超微小硬さ試験機（エリオニクス社製 ENT-2100）を用いて、試験体の硬さを測定した。圧子は三角錐形状であるバーコピッチ型を用いた。損傷量が深さ方向に分布を持つため、照射欠陥の形成は深さ方向に一律ではなく、硬さも深さ方向に異なると考えられる。超微小硬さ試験では、一般に広く用いられているビッカース硬さ試験と同様に、押し込み深さの 4 倍程度の深さまでの領域について平均的な硬さが評価される[3]。本試験では、試料表面より押し込み深さを 150 nm に制御して圧子を押し込み、硬さを測定した。また、硬さは圧痕形成面の結晶方位の影響を受けるため、100 以上の結晶粒について測定し、平均値を求めた。なお、測定は母材部についてはフェラ

イト相を、HAZ については粗粒域のフェライトサイドプレート、溶接部については原質部の粒界フェライトを対象に行った。

## 2) 測定結果

母材部 (0.05%Cu)、HAZ (0.05%Cu)、溶接部 (0.20%Cu) について、硬さの測定結果を図 7.2.1-3 から図 7.2.1-5 に示す。未照射材の硬さは母材部 < HAZ < 溶接部の順に大きくなっており、ビッカース硬さ試験の結果と対応した。照射後はそれぞれの部位で平均 1 GPa 程度の硬化が認められた。また、HAZ と溶接部では母材部に比べて硬さのばらつきの範囲が広がった。HAZ と溶接部は母材部に比べて組織が微細かつ複雑であるため、測定値のばらつきが大きくなったと推測される。

硬さの平均値と硬さの増加量（イオン照射材と未照射材の硬さの差分）を図 7.2.1-6 に示す。図中のエラーバーは測定値の最大と最小を示した。照射による硬さの増加量は HAZ < 溶接部 < 母材部の順に大きくなったが、照射前に最も硬さが大きかった溶接部が照射後も硬さが最大であった。

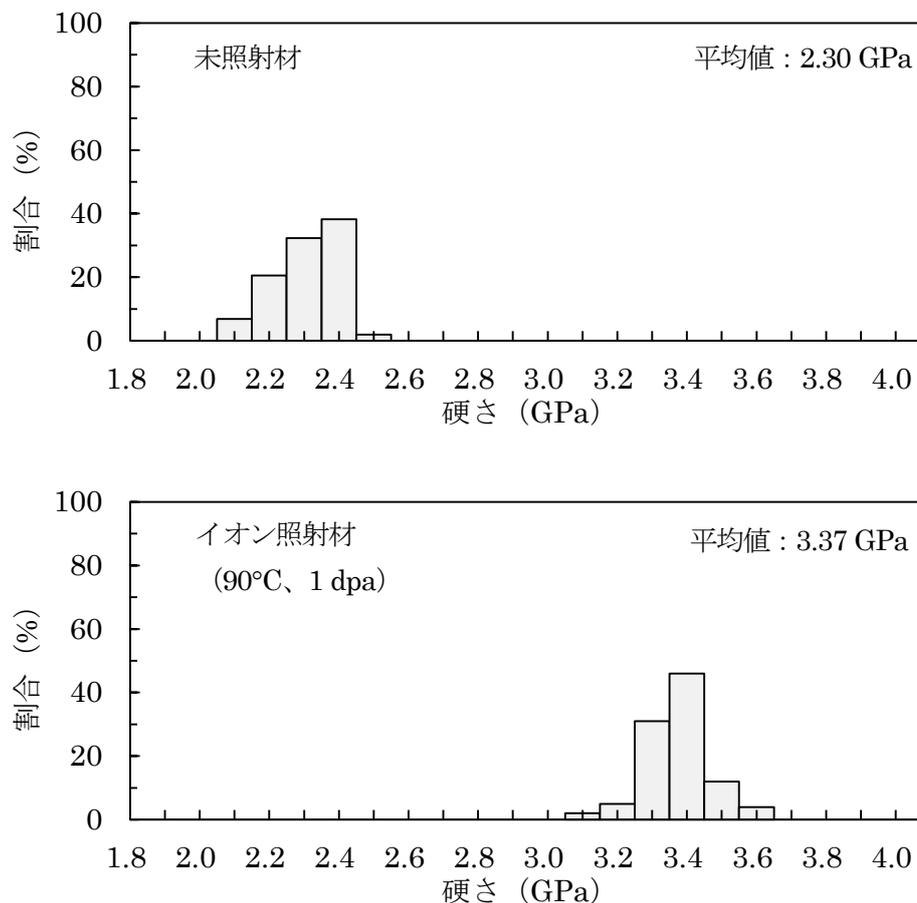


図 7.2.1-3 母材部 (0.05%Cu) の未照射材とイオン照射材のフェライト相の硬さの分布

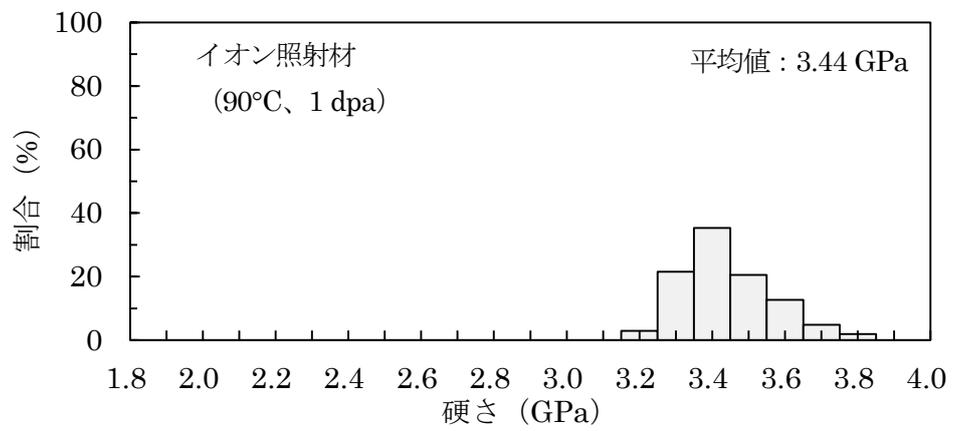
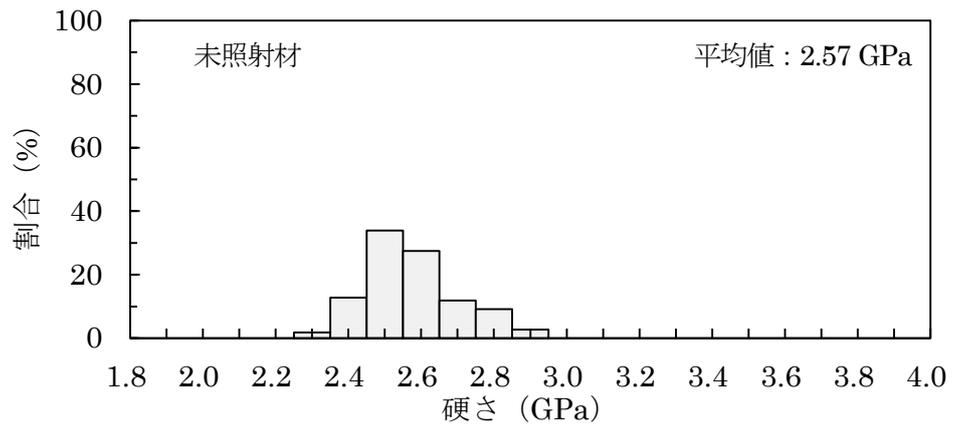


図 7.2.1-4 HAZ (0.05%Cu) の未照射材とイオン照射材のフェライトサイドプレートの硬さの分布

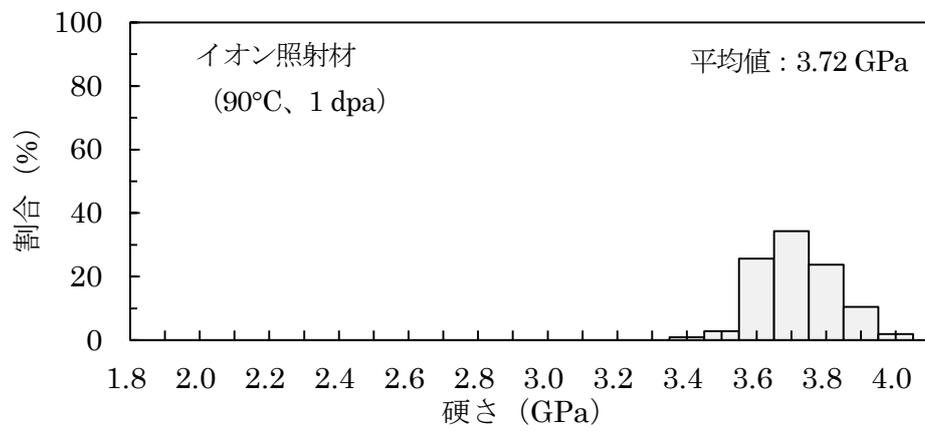
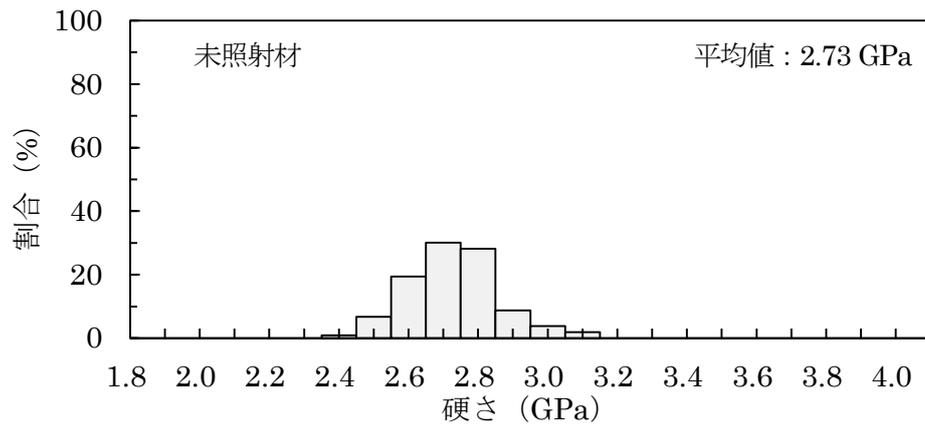


図 7.2.1-5 溶接部 (0.20%Cu) の未照射材とイオン照射材の粒界フェライトの硬さの分布

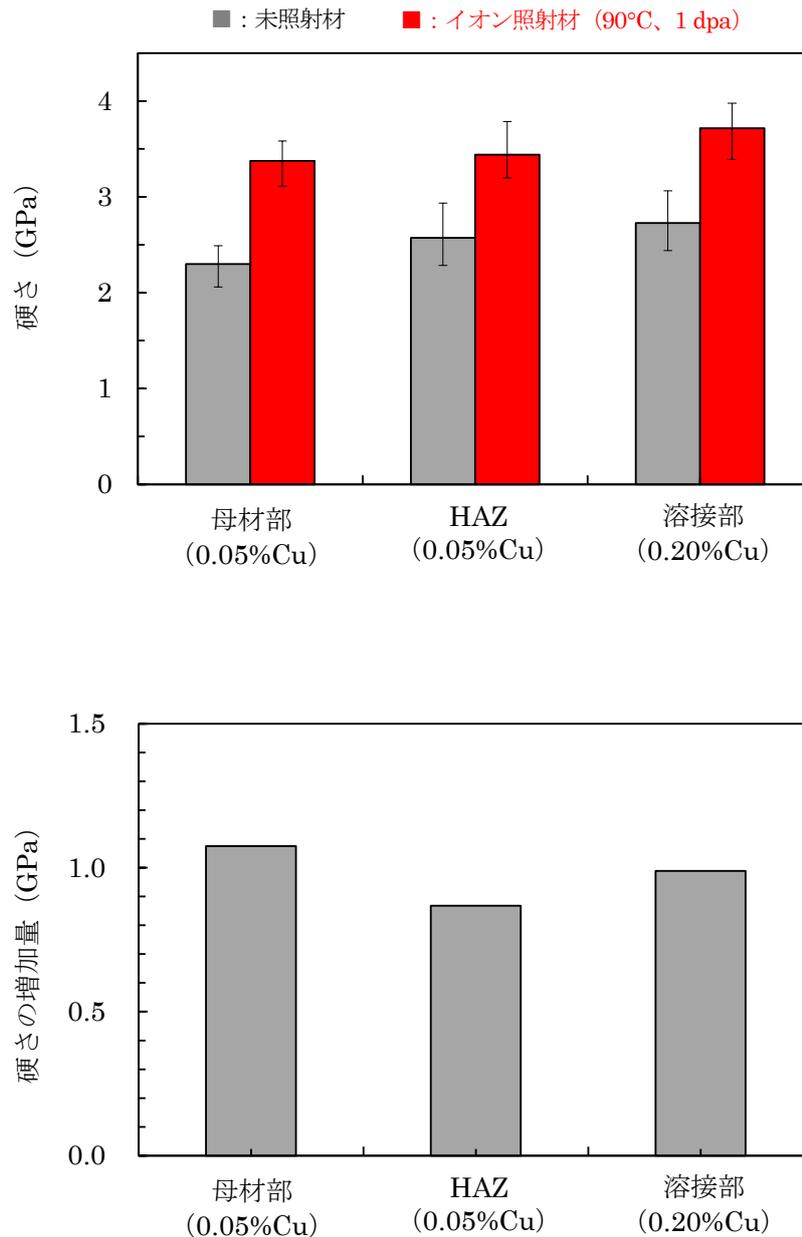


図 7.2.1-6 イオン照射に伴う母材部、HAZ および溶接部の硬さの変化

### (3) APT 分析

#### 1) 分析試験片の作製

母材部のフェライト相と HAZ のフェライトサイドプレートおよび溶接部の粒界フェライトを対象に APT 分析を実施した。まず、APT 分析用の試験片を作製するため、電子線後方散乱回折 (EBSD) 測定により試験体表面の結晶方位と粒界の位置を特定した。

#### a 微小試料の採取位置のマーキングおよびサンプリング

微小試料の採取位置を FIB-SEM のタングステン・デポジッション (W デポ) 機能を利用して

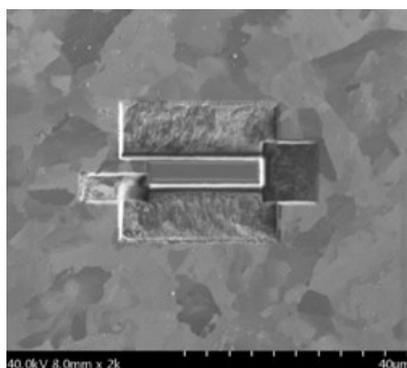
マスクングした。母材部 (0.05%Cu) と HAZ (0.05%Cu) および溶接部 (0.20%Cu) の未照射材とイオン照射材 (90°C、1 dpa) の微小試料に対して、管理用の ID として以下を設定した。

母材部 : CSBase-Unirrad-uS1, CSBase-1dpa-uS1

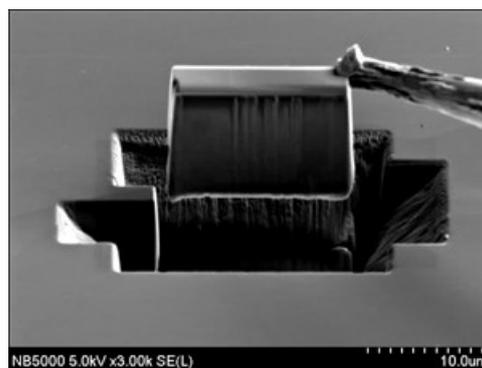
HAZ : CSHAZ-Unirrad-uS1, CSHAZ-1dpa-uS1

溶接部 : CSWeld-Unirrad-uS1, CSWeld-1dpa-uS1

FIB-SEM を用いて W デポによるマスクング部をサンプリングした。図 7.2.1-7 に例を示したように、厚さ約 3  $\mu\text{m}$ 、幅約 20  $\mu\text{m}$ 、高さ約 10  $\mu\text{m}$  の微小試料の周囲を Ga イオンビームによるスパッタリング加工で掘り下げた後、マイクロサンプリング機構を用いて試料をピックアップした。



(a) 周囲を掘り下げた様子



(b) ピックアップされた微小試料

図 7.2.1-7 FIB による微小試料の採取の例

#### b 微小試料の分割

図 7.2.1-7 に例を示したように、微小試料の端部にタングステン製の針状試料台 (W ニードル) の先端を W デポで仮固定した後、イオンビームによるスパッタリング加工で微小試料を分割した。なお、分割後に試料と W ニードルの接合部に対して追加の W デポを行い十分な接合強度が得られるようにした。同様な作業を繰り返すことで、1 個の微小試料から複数個の分析試験片を作製することが可能である。なお、それぞれの試験片に対して管理用の試験片 ID として、末尾に AP1、AP2・・・を追加設定した。

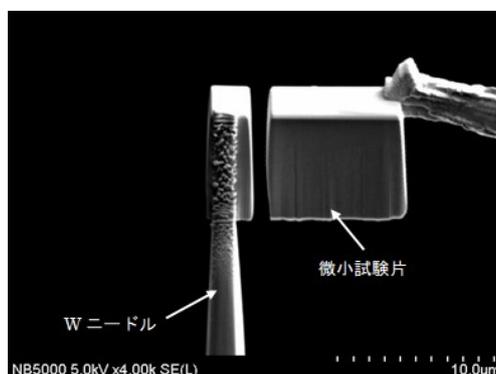
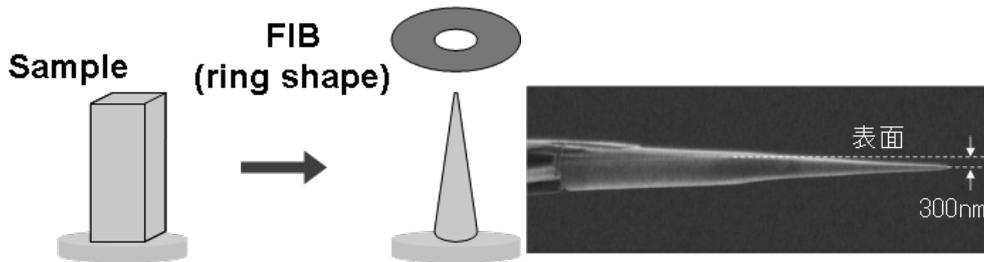


図 7.2.1-8 微小試料の分割の例

### c 分析試験片の形状加工

APT では観察する部分を曲率 50 nm 程度の針状に加工する必要がある。FIB-SEM の任意形状加工機構を使用して、APT 分析試験片を針状に加工した。図 7.2.1-9 に加工方法を示す。加工にはリング形状に操作した Ga イオンビームを用い、加工の進行に伴いリングの大きさとイオンビームの強度を小さくすることで、加工ビームの影響を極力排除しつつ曲率 50 nm 程度の針状に加工して試験片を作製した。また、イオン照射材については、針を試験体表面に平行に、かつ針の先端が深さ 300 nm に位置するように作製した。



(a) リング状のイオンビームを用いた加工 (b) 試験片の形状と照射面との関係

図 7.2.1-9 試験片の針状加工の方法

### 2) 測定方法

測定には局所電極型 3 次元アトムプローブ (CAMECA 製 LEAP 3000X HR) を用いた。測定は電圧パルスモードで実施した。標準の測定条件は、試料温度 50K、パルス比 0.15 である。

収集したデータは、質量/電荷比ごとに元素の種類を決定し、3 次元像形成処理 (測定したデータからアトムマップを再構築するコンピュータ処理) を行った。なお、3 次元像形成処理においては、アトムマップの z 方向長さを最適化するために、Evaporation Field = 30.0 V/nm と Image Compression Factor = 1.0 を用いた。

アトムプローブでは元素を決定する際に、イオンの質量/電荷比を用いる。多くの元素において、質量/電荷比は元素固有の値となるが、いくつかの元素では、異なる元素が同じ質量/電荷比を持つ。鉄鋼に含まれる元素の場合、質量数 58 の鉄とニッケルが同じ質量/電荷比を持つことになり、アトムプローブデータからは個々の原子がどちらの元素であるかを決定することは不可能である。バルク組成を調べる場合には、同じ質量/電荷比を持つ元素の濃度を同位体の存在比を基に配分することで値を求めることができるが、個々の元素を分離して評価する場合にはこの方法は妥当でない。今回研究に使用した試験体には Ni は含有されていないため、質量数 58 は Fe として取り扱った。

### 3) 測定結果

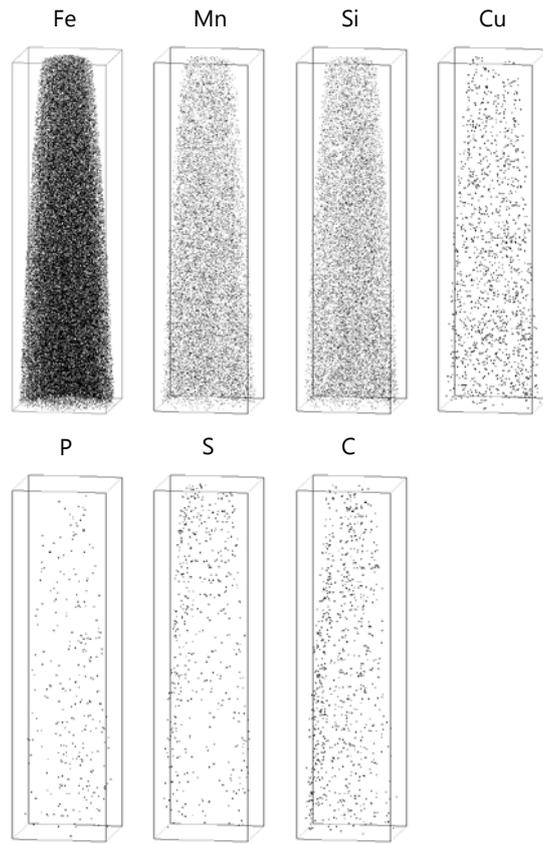
母材部 (0.05%Cu) について得られたアトムマップを図 7.2.1-10 に示す。Fe、Mn、Si、Cu、P、S、C についてマップを示した。なお、測定は各試験体について 2 本以上実施した。未照射材では溶質原子が集積している傾向は認められず、元素が均一に分布していることが確認された。イオン照射材については Mn と Si 原子に若干であるが濃度の高い箇所が散見され、原子が近接し

ている様子が認められたが、溶質クラスタが形成している様子は明確には認められなかった。

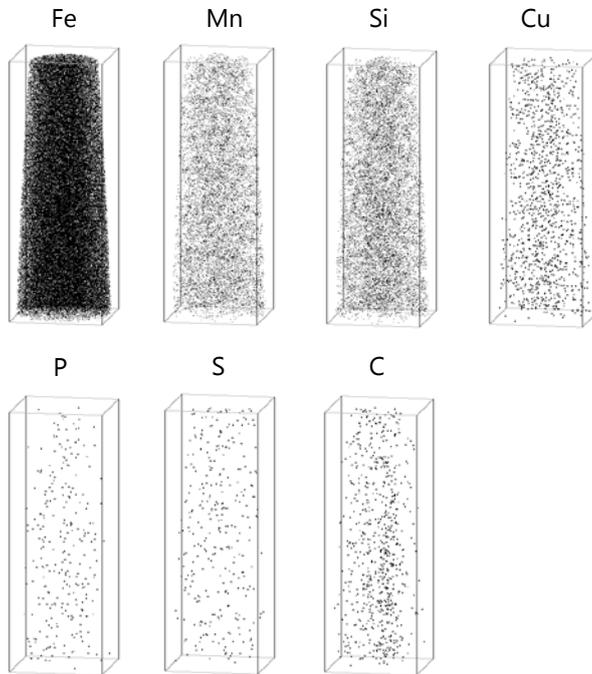
HAZ (0.05%Cu) について得られたアトムマップを図 7.2.1-11 に示す。母材部と同じく、Fe、Mn、Si、Cu、P、S、C についてマップを示した。母材部と同様に、イオン照射材では Mn と Si 原子に若干近接している様子が認められたが、溶質クラスタが形成している様子は明確には認められなかった。

溶接部 (0.20%Cu) について得られたアトムマップを図 7.2.1-12 に示す。母材部と同じく、Fe、Mn、Si、Cu、P、S、C についてマップを示した。未照射材では Mn と Si および Cu 原子ともに若干であるが濃度の高い箇所が散見され、原子が近接している様子が認められた。イオン照射材については未照射材よりも原子の近接が明確であるものの、溶質クラスタが形成している様子は明確には認められなかった。

母材部と HAZ ではイオン照射材で Mn と Si 原子が、溶接部では未照射材とイオン照射材で Mn と Si および Cu 原子がわずかに近接している様子が認められた。溶質原子の近接の程度を評価するため、測定データから Mn-Mn 原子、Si-Si 原子、Cu-Cu 原子ペアについて第一近接間距離を調べた。第一近接間距離の頻度分布の解析結果を図 7.2.1-13 から図 7.2.1-15 に示す。図中には原子をランダムに配置した場合の分布も示した。また、イオン照射材の分布とランダム分布との差分も示した。未照射材では、母材部の分布は Mn、Si、Cu 原子ともにランダム分布とほぼ一致しており、これらの原子がほぼ均一に分布していることがわかる。HAZ と溶接部については、分布のピークが若干であるがランダム分布に比べて短距離側に寄っている。これは溶接時の熱影響によって、原子の分布が均一な状態から偏りがある状態に変化したためと考えられる。なお、母材部と HAZ については、Cu 濃度が 0.05%と低いため、Cu 原子の分布に比較的大きなばらつきが認められた。イオン照射材では、母材部、HAZ、溶接部ともに、分布のピーク位置がランダム分布と比べて短距離側に変化した。ランダム分布との差分を見ると、第一近接間距離の短距離側の頻度が増加し、長距離側の頻度が減少しており、照射によって溶質原子同士が近接していることがわかる。図 7.2.1-16 に第一近接間距離の平均値を示す。Mn、Si、Cu 原子の第一近接間距離は、イオン照射により、平均値で 0.05 nm 程度減少した。母材部と HAZ では、第一近接間距離の平均値は未照射材とイオン照射材のそれぞれでほぼ同じであった。溶接部については、イオン照射による第一近接間距離の変化は母材部と HAZ に比べて小さかったが、絶対値は Mn、Si、Cu 原子の濃度が高いため、母材部と HAZ よりも小さくなった。イオン照射によって母材部と HAZ および溶接部で溶質原子が近接していることが明らかとなった。

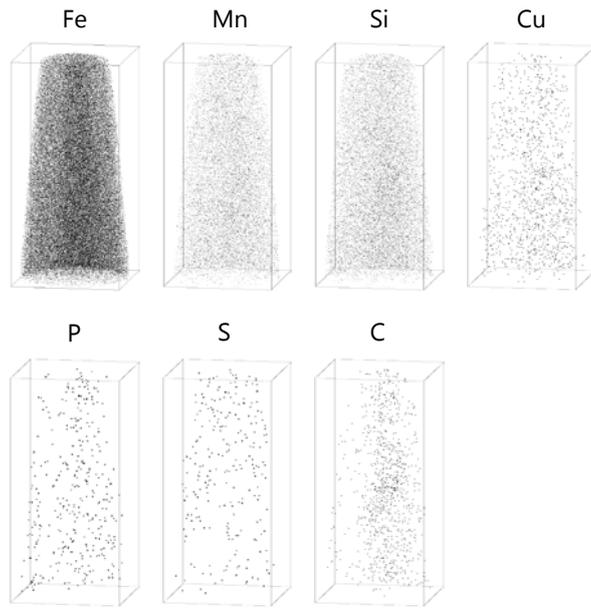


(a) 未照射材

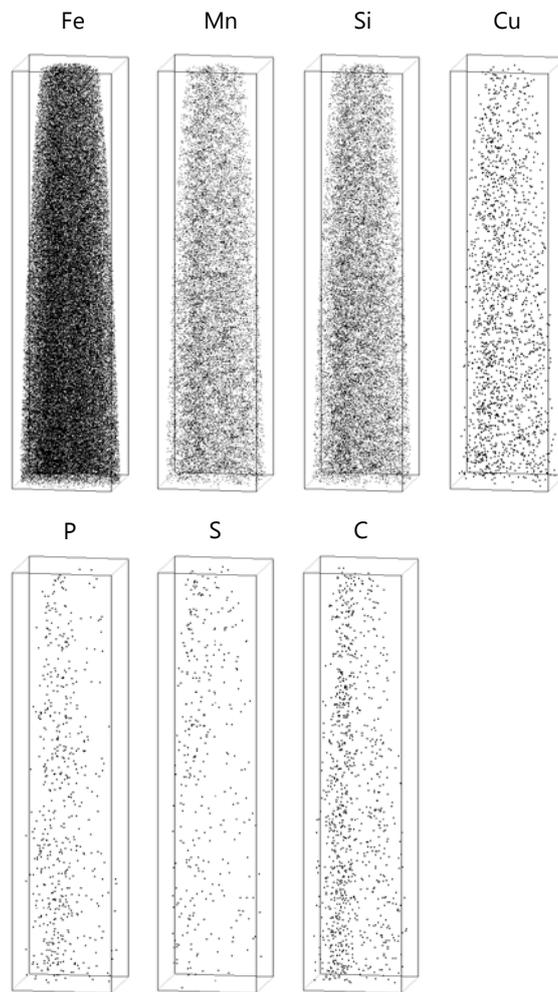


(b) イオン照射材 (90°C、1 dpa)

図 7.2.1-10 母材部 (0.05%Cu) 試験片のATOMマップ

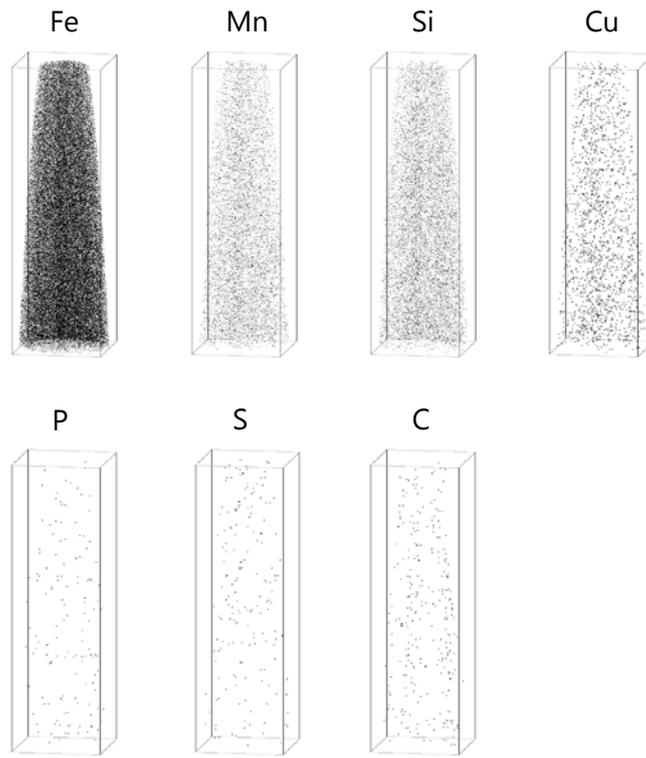


(a) 未照射材

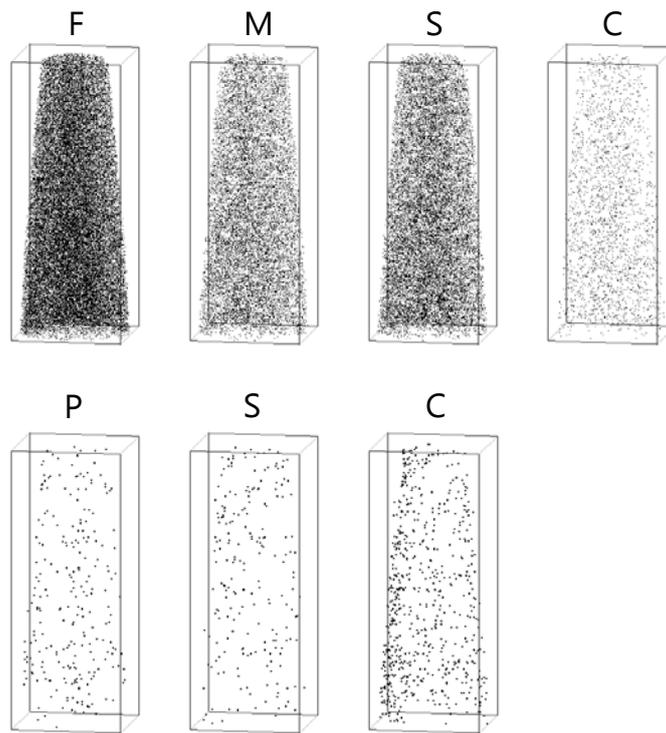


(b) イオン照射材 (90°C、1 dpa)

図 7.2.1-11 HAZ (0.05%Cu) 試験片のATOMマップ

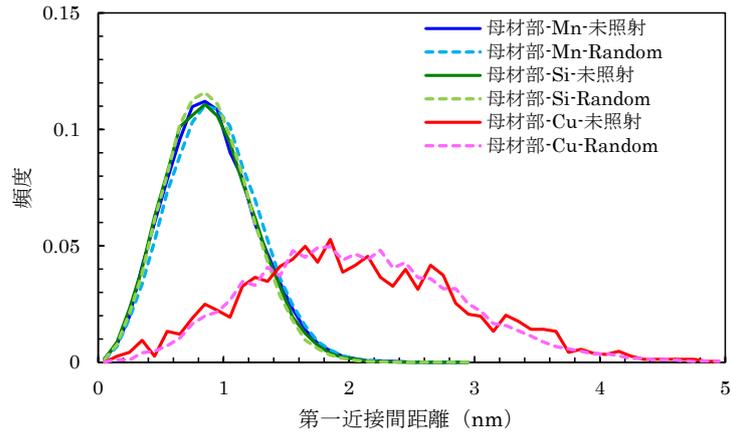


(a) 未照射材

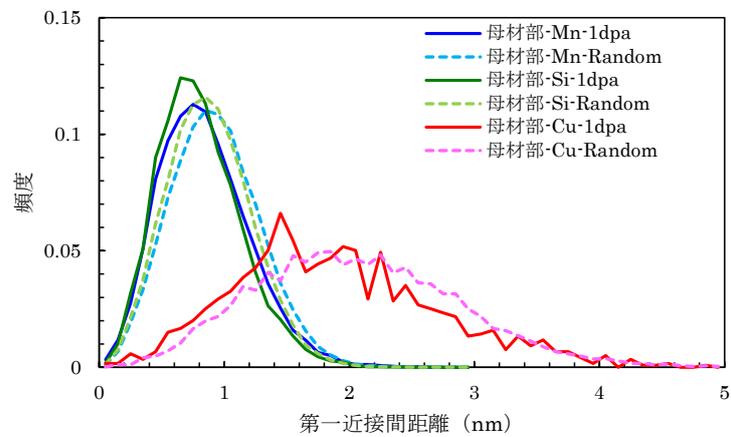


(b) イオン照射材 (90°C、1 dpa)

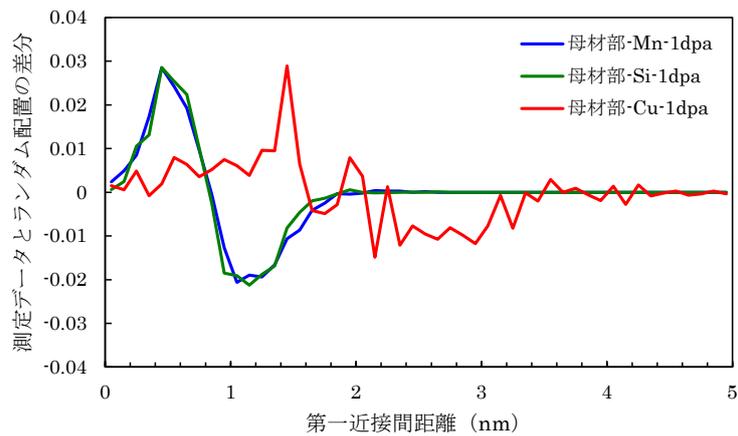
図 7.2.1-12 溶接部 (0.20%Cu) 試験片のATOMマップ



(a) 未照射材

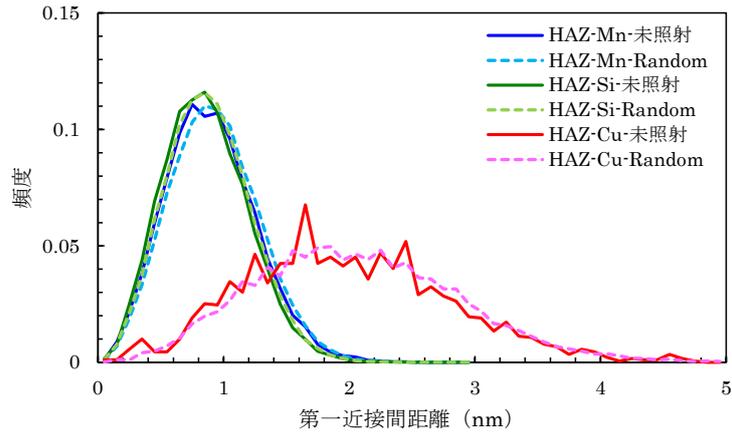


(b) イオン照射材 (90°C、1 dpa)

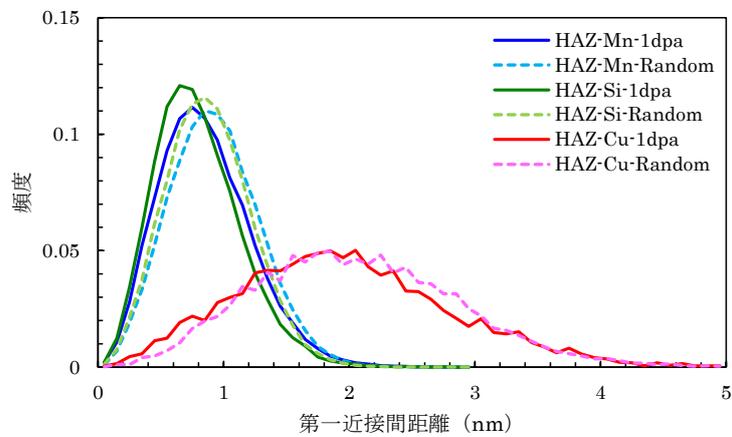


(c) ランダム配置を仮定した分布との差分

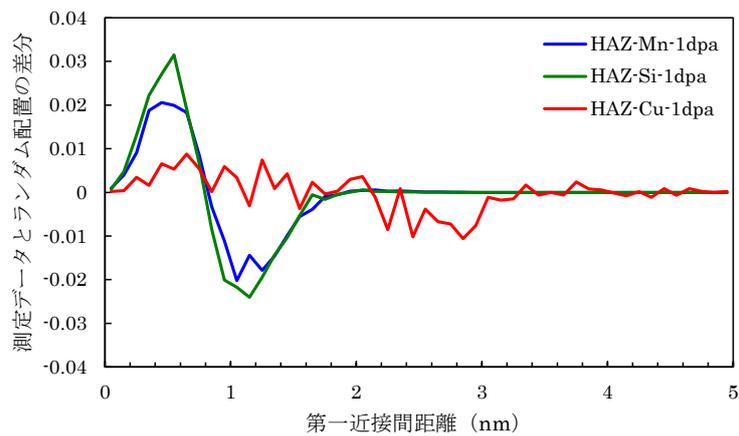
図 7.2.1-13 第一近接間距離の頻度分布 (母材部 (0.05%Cu))



(a) 未照射材

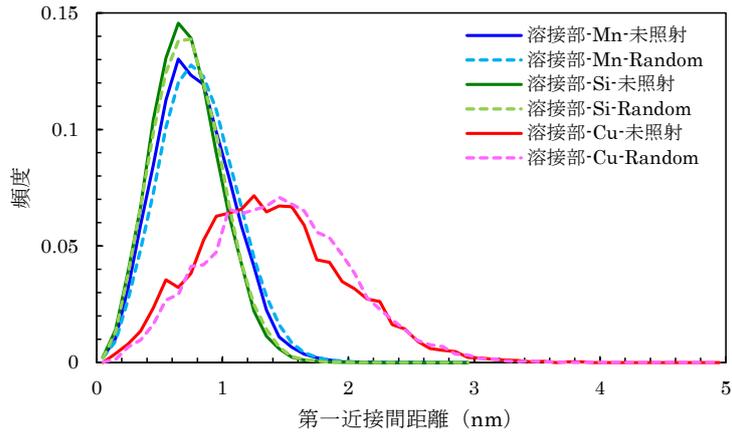


(b) イオン照射材 (90°C、1 dpa)

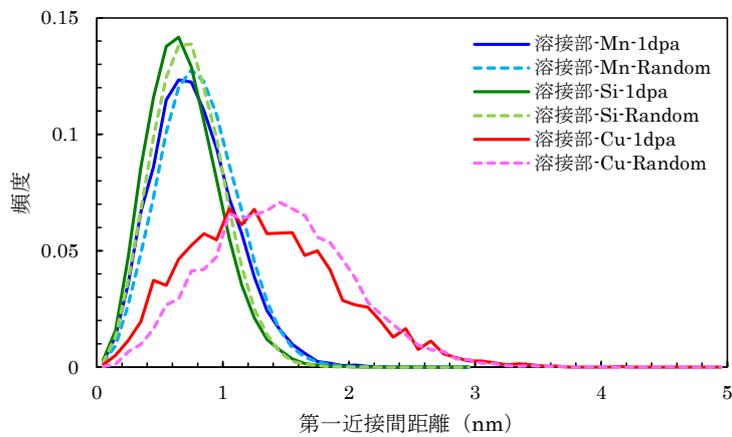


(c) ランダム配置を仮定した分布との差分

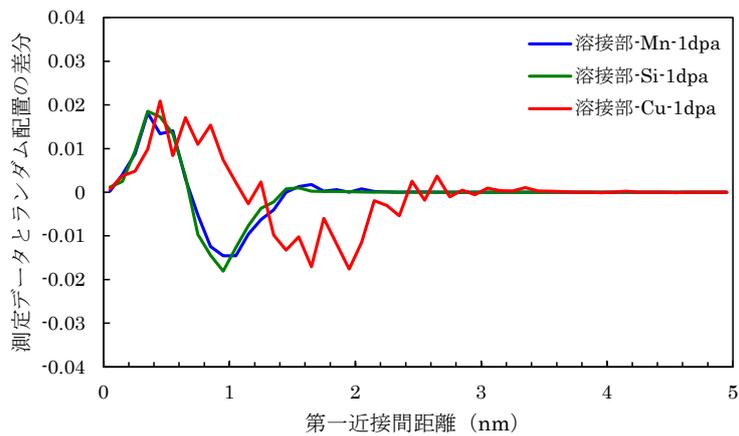
図 7.2.1-14 第一近接間距離の頻度分布 (HAZ (0.05%Cu))



(a) 未照射材



(b) イオン照射材 (90°C、1 dpa)



(c) ランダム配置を仮定した分布との差分

図 7.2.1-15 第一近接間距離の頻度分布 (溶接部 (0.20%Cu))

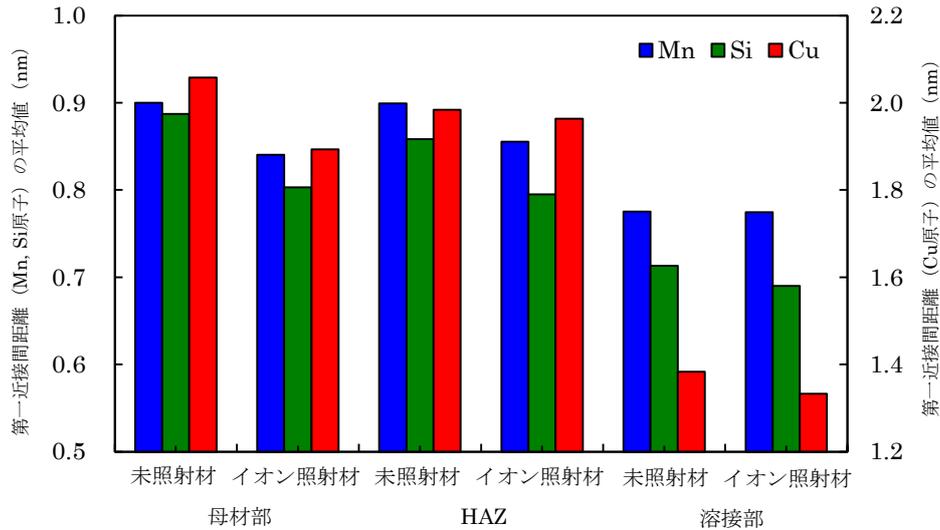


図 7.2.1-16 第一近接間距離の平均値の変化

#### 4) クラスタ解析

母材部、HAZ、溶接部ともにイオン照射により Mn、Si、Cu 原子が近接している傾向が認められたため、再帰的探索アルゴリズムに基づくクラスタ解析により、溶質原子のクラスタリングを定量的に検討した。この方法は、原子炉压力容器に中性子照射で形成する Cu リッチ析出物等のクラスタの解析に使用される方法である。

本解析の手順は、(1) クラスタを構成するコア原子を定義し、設定した距離（以下、コア原子連鎖距離と呼ぶ）以内にあるコア原子の連鎖からクラスタのコアを抽出する、(2) クラスタを構成するコア原子から設定した距離（以下、周辺原子抽出距離と呼ぶ）以内にあるその他の原子（以下、周辺原子と呼ぶ）を抽出する、(3) 周辺原子のうち設定した条件（一定の距離内にあるコア原子の数）に満たないものを取り除く。設定が必要なコア原子連鎖距離、周辺原子抽出距離、周辺原子の一部の除去条件の各パラメータについては、先の研究[4][5]で使用されたパラメータを参考にして、クラスタが適切に抽出できる値を設定した。コア原子は Mn、Si、Cu とし、コア原子連鎖距離と周辺原子抽出距離は 0.6 nm とし、周辺原子の一部の除去条件については 0.5 nm 以内に 2 個以下しかコア原子を含まない場合とした。また、クラスタとして扱うコア原子の最小数は 20 個とした。

クラスタの大きさはギニエ半径で定義した。n 個の原子で構成されるクラスタのギニエ半径 ( $r_g$ ) は次式で計算される。

$$r_g = \sqrt{\frac{5}{3}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2\}}{n}} \quad \text{式 7.2.1-1}$$

ここで、 $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$  はそれぞれ各原子の x、y、z 座標であり、 $x_0$ 、 $y_0$ 、 $z_0$  はクラスタの重心位置である。なお、解析により抽出されたクラスタのうちクラスタの重心から原子マップの外周までの

距離がギニエ半径以下のものは、クラスタの一部しか原子マップに含まれない可能性があるためにクラスタの大きさの評価には使用しなかった。また、回転楕円体形状のクラスタについては長軸方向にコア原子濃度分布を求めて 2 個以上のピークがある場合にも大きさの評価には使用せずデータ精度向上を図った。

クラスタ解析は、未照射材を含む図 7.2.1-10 から図 7.2.1-12 にアトムマップを示した測定データ全てについて実施した。表 7.2.1-4 にクラスタ解析結果をまとめる。未照射材については、母材部と HAZ では溶質クラスタは抽出されなかったが、溶接部では少数であるが溶質クラスタが抽出された。溶接部の未照射材のアトムマップや第一近接間距離の頻度分布からは溶質原子が近接している傾向が若干認められており、溶接時の熱影響によって溶質原子が近接し、原子濃度の高い箇所が溶質クラスタとして抽出された可能性が考えられる。イオン照射材については、母材部では溶質クラスタは抽出されなかったが、HAZ では少数抽出された。また、溶接部でも溶質クラスタが抽出された。

溶質クラスタが抽出された HAZ のイオン照射材と溶接部の未照射材およびイオン照射材について、Mn、Si、Cu 原子マップと溶質クラスタマップの比較を図 7.2.1-17 から図 7.2.1-19 にそれぞれ示す。HAZ のイオン照射材については、抽出されたクラスタの位置と Mn、Si、Cu 原子との対応は明確ではなく、溶質原子の高濃度の箇所が溶質クラスタとして抽出されたと推測される。溶接部については、未照射材では HAZ と同様に、抽出された溶質クラスタの位置と Mn、Si、Cu 原子との対応は明確ではなく、溶質原子の高濃度の箇所がクラスタとして抽出されたと推測される。イオン照射材では、抽出された溶質クラスタの位置は Mn、Si、Cu 原子の近接した部位を良く反映したものであった。

HAZ と溶接部で抽出された溶質クラスタのサイズ分布を図 7.2.1-20 に示す。なお、サイズ分布は抽出された溶質クラスタのうち、形状が球状のものを選定して評価しており、HAZ のイオン照射材については 5 個、溶接部の未照射材については 4 個、イオン照射材については 17 個の溶質クラスタについて評価した。HAZ と溶接部で溶質クラスタの直径の分布に大きな違いは認められず、ピーク位置は 2.0~2.5 nm の範囲にあった。HAZ では溶質クラスタの平均直径は 2.4 nm であり、数密度は  $2.7 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$  であった。溶接部については、未照射材で平均直径 2.4 nm、数密度  $6.8 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$  の溶質クラスタが抽出された。また、イオン照射材では、平均直径が 2.2 nm の溶質クラスタが数密度  $4.2 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$  で抽出された。溶接部では Mn、Si、Cu 濃度が母材部と HAZ に比べて 2 倍程度高くなっており、照射によって HAZ よりも 1 桁多く溶質クラスタが形成されたものと推測された。

HAZ と溶接部で抽出された溶質クラスタの組成分布を図 7.2.1-21 に示す。図中のクラスタ ID は、大きいほど直径が大きい溶質クラスタに対応する。なお、組成分布についても抽出された溶質クラスタのうち、球形状のものを対象に評価した。また、組成は溶質クラスタを構成する全原子数で各元素の原子数を除して求めた。HAZ、溶接部ともに、溶質クラスタのサイズと組成に明確な関係は認められなかった。クラスタの平均組成 (at%) は、HAZ のイオン照射材では Fe-15.0Mn-13.7Si-1.2Cu であり、溶接部の未照射材では Fe-15.3Mn-16.6Si-3.5Cu であり、イオン照射材では Fe-9.7Mn-16.9Si-2.3Cu であった。HAZ と溶接部では溶質クラスタの組成に大きな違いは認められなかった。

表 7.2.1-4 クラスタ解析結果のまとめ

材料	照射量 (dpa)	抽出 クラスタ数		溶質クラスタの性状				備考
		球形状	全て	平均直径 (nm)	数密度 ( $m^{-3}$ )	体積率	平均組成 (at%)	
母材部 (0.05%Cu)	未照射	—	—	—	—	—	—	クラスタは 抽出されず
	1.0	—	—	—	—	—	—	クラスタは 抽出されず
HAZ (0.05%Cu)	未照射	—	—	—	—	—	—	クラスタは 抽出されず
	1.0	5	7	2.4	$2.7 \times 10^{22}$	$2.1 \times 10^{-5}$	Fe-15.0Mn- 13.7Si-1.2Cu	
溶接部 (0.20%Cu)	未照射	4	4	2.4	$6.8 \times 10^{22}$	$4.7 \times 10^{-5}$	Fe-15.3Mn- 16.6Si-3.5Cu	
	1.0	17	31	2.2	$4.2 \times 10^{23}$	$2.5 \times 10^{-4}$	Fe-9.7Mn- 16.9Si-2.3Cu	

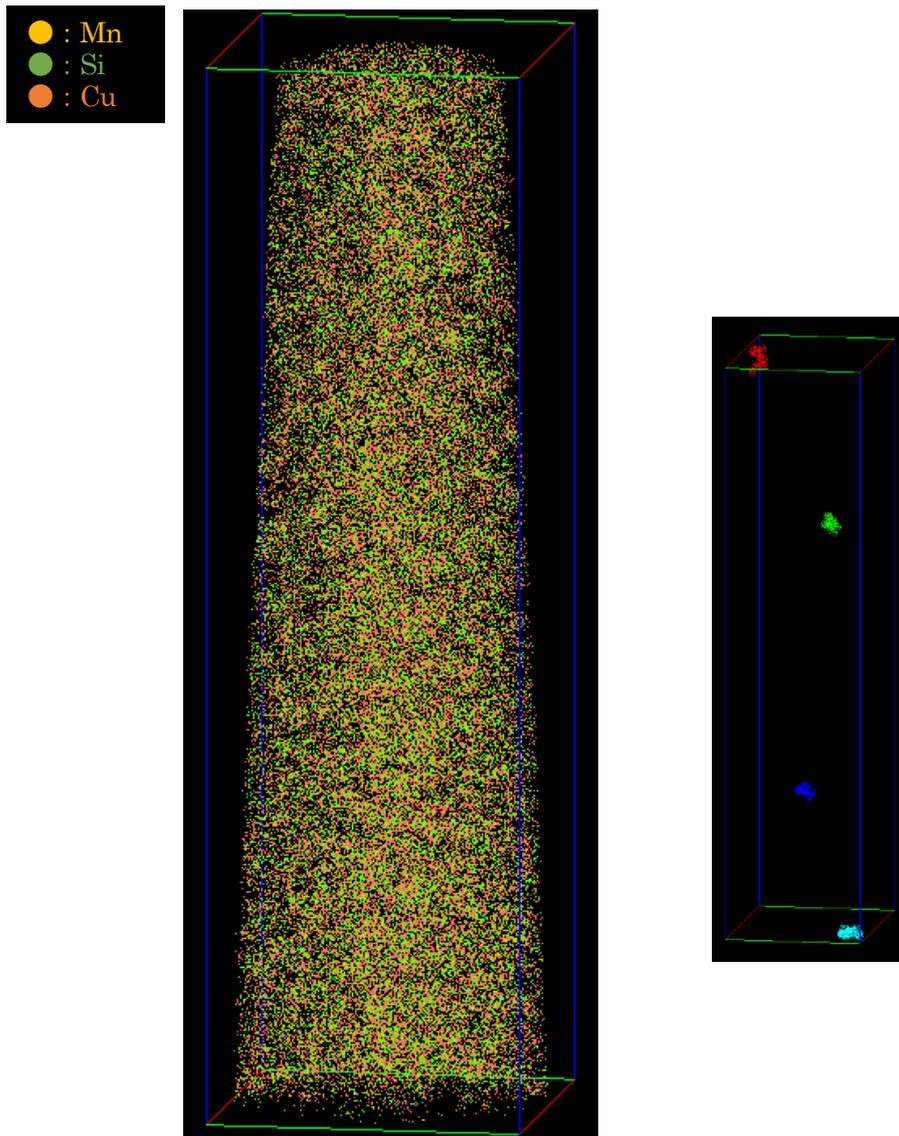


図 7.2.1-17 HAZ (0.05%Cu) のイオン照射材 (90°C、1 dpa) の Mn、Si、Cu 原子マップ (左) と溶質クラスタマップ (右) の比較

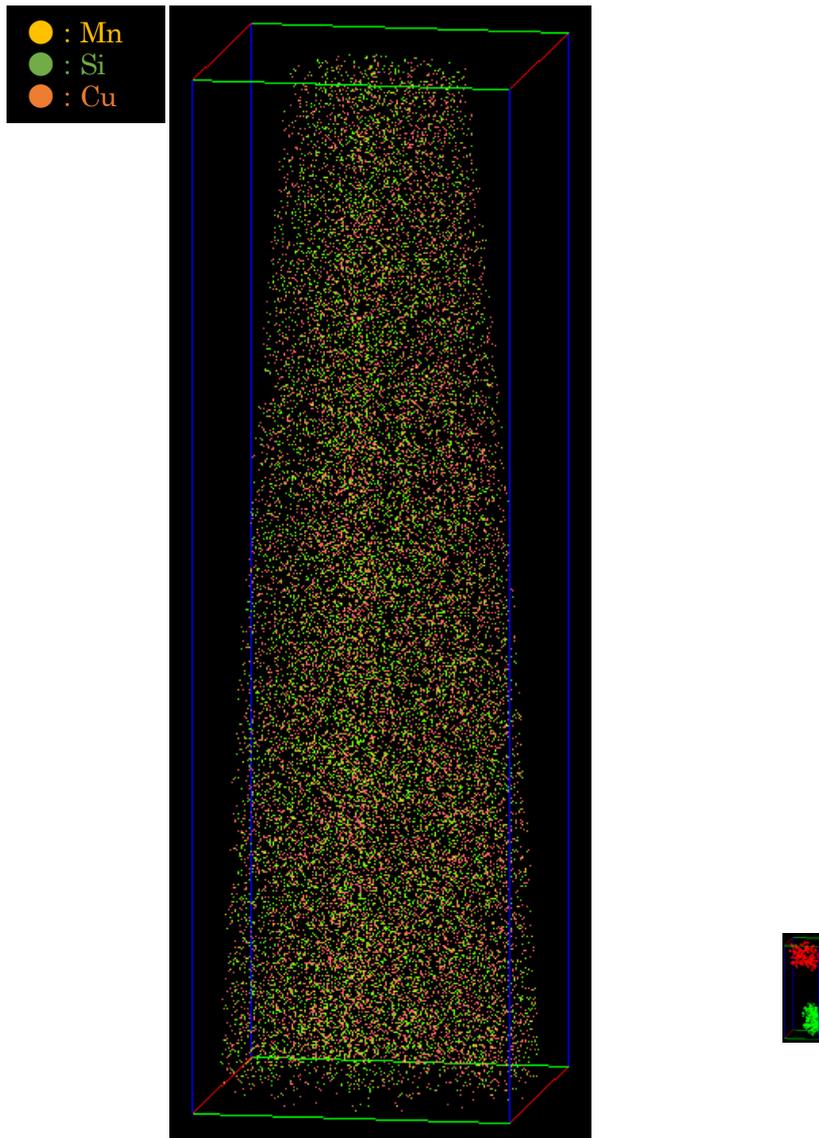


図 7.2.1-18 溶接部 (0.20%Cu) の未照射材の Mn、Si、Cu 原子マップ (左) と溶質クラスタマップ (右) の比較

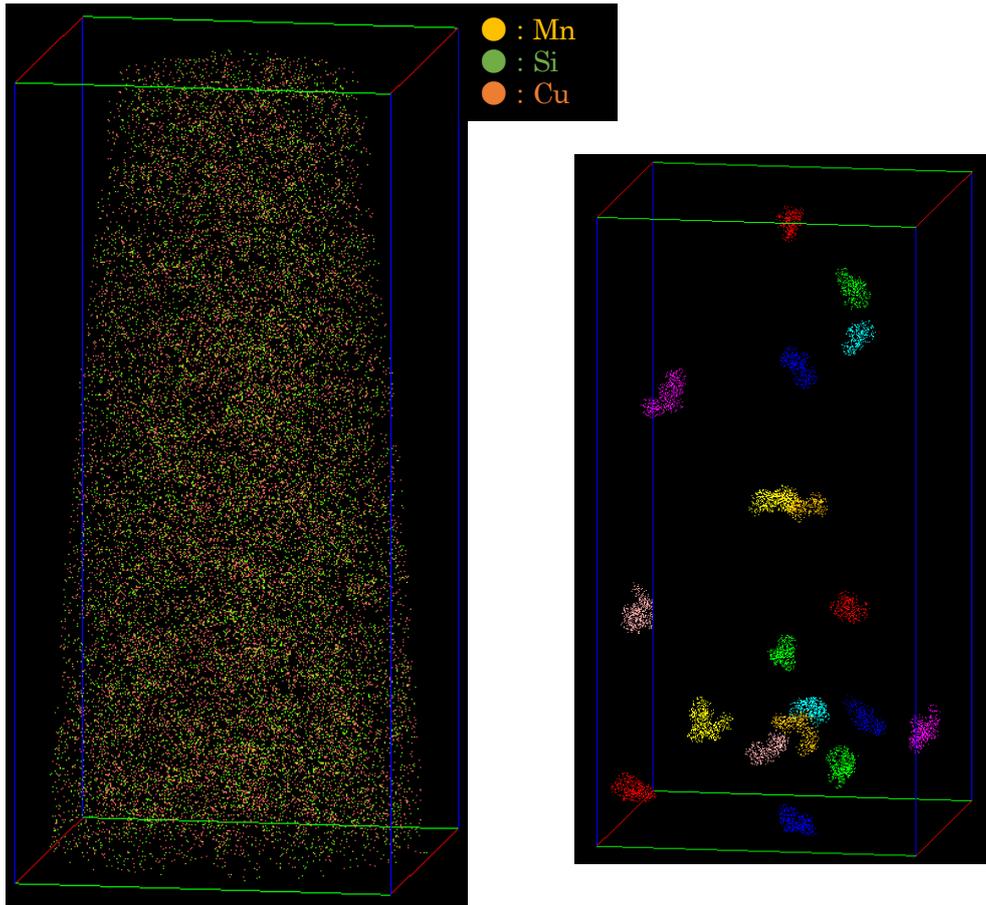
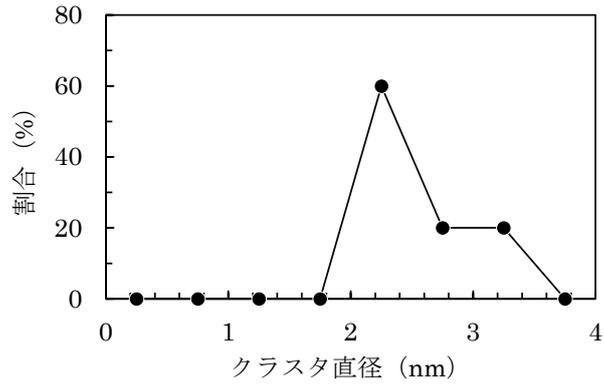
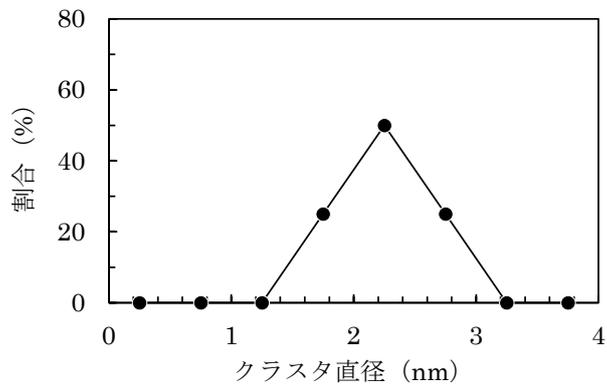


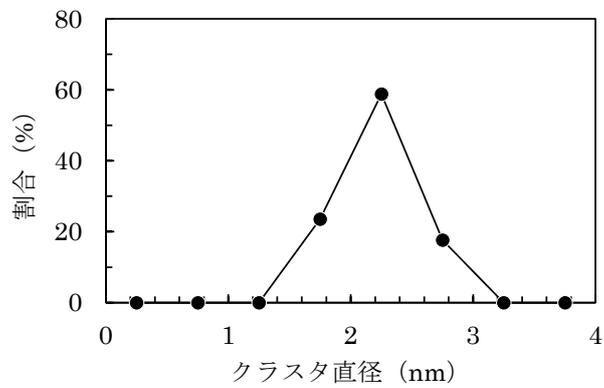
図 7.2.1-19 溶接部 (0.20%Cu) のイオン照射材 (90°C、1 dpa) の Mn、Si、Cu 原子マップ (左) と溶質クラスタマップ (右) の比較



(a) HAZ のイオン照射材 (90°C、1 dpa)

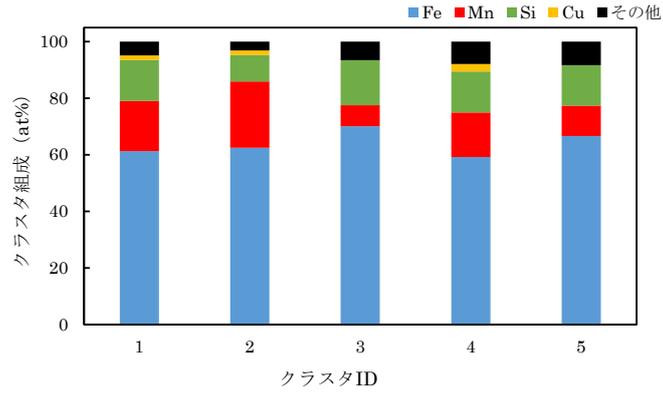


(b) 溶接部の未照射材

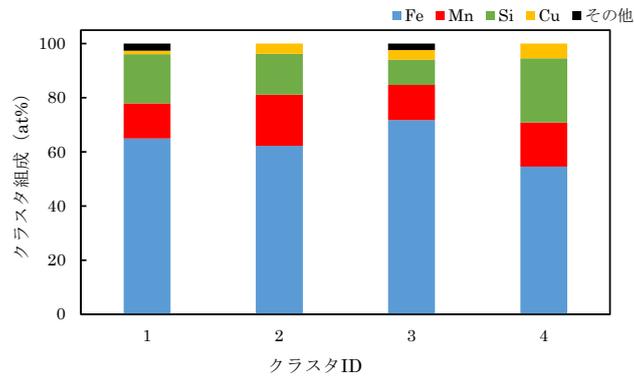


(c) 溶接部のイオン照射材 (90°C、1 dpa)

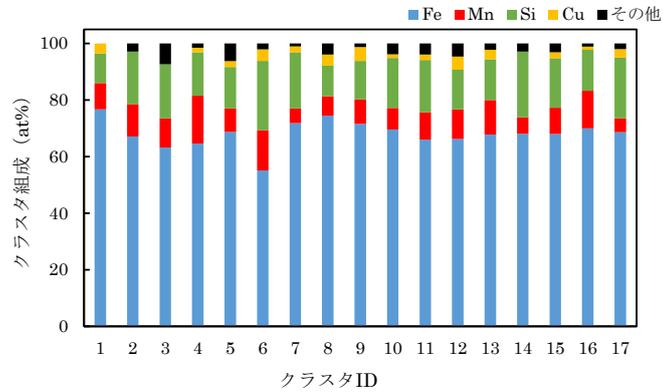
図 7.2.1-20 HAZ (0.05%Cu) のイオン照射材と溶接部 (0.20%Cu) の未照射材およびイオン照射材の溶質クラスタのサイズ分布



(a) HAZ のイオン照射材 (90°C、1 dpa)



(b) 溶接部の未照射材



溶接部のイオン照射材 (90°C、1 dpa)

図 7.2.1-21 HAZ (0.05%Cu) のイオン照射材と溶接部 (0.20%Cu) の未照射材およびイオン照射材の溶質クラスターの組成分布

#### (4) TEM 観察

##### 1) 観察試験片の作製

母材部のフェライト相と HAZ のフェライトサイドプレートおよび溶接部の粒界フェライトを対象に、イオン照射材について TEM 観察を実施した。TEM 観察用の試験片を作製するため、EBSD 測定で試験体表面の結晶方位と粒界の位置を特定した。EBSD 測定結果を元に、試験体表面から〈011〉方向が観察視野となるように  $10 \times 4 \mu\text{m}$  の領域を FIB 加工で切り出し、モリブデン製のメッシュに固定した後、表面から深さ 300 nm の領域が残るように FIB 加工で厚さ 100 nm 以下に薄膜化した。TEM 観察試験片の薄膜部に残った FIB 加工によるダメージ層は精密イオン研磨装置 (Gatan 製 PIPS 691) を用いて 0.5~2 kV の電圧条件で除去した。

##### 2) 観察方法

平成 27、28 年度に実施した TEM 観察と同様に、低合金鋼で微細な転位ループの観察に用いられる方法[6]により転位ループを観察した。

##### 3) 観察結果

転位ループの像を図 7.2.1-22 から図 7.2.1-24 に示す。これらの TEM 像は  $B = [011]$ 、 $g = [011]$  の回折条件で撮影した明視野像と暗視野像である。いずれの試料においても転位ループの形成が認められた。観察された転位ループの平均直径と数密度の評価結果を表 7.2.1-5 にまとめるとともに、図 7.2.1-25 に示す。なお、図中の値は 2 視野での平均値を用い、誤算範囲は測定値の最大値と最小値を示した。平均直径については、母材部と HAZ および溶接部ともに大きな違いは認められず、直径が 1~5 nm の転位ループが確認された。数密度については、HAZ が母材部と溶接部に比べて若干低い値になったものの、TEM 試料の膜厚評価における測定誤差を考慮すると、母材部と HAZ および溶接部で転位ループの数密度に大きな違いはないと考えられる。転位ループの形成状況については、母材部と HAZ および溶接部で大きな違いはないことがわかった。

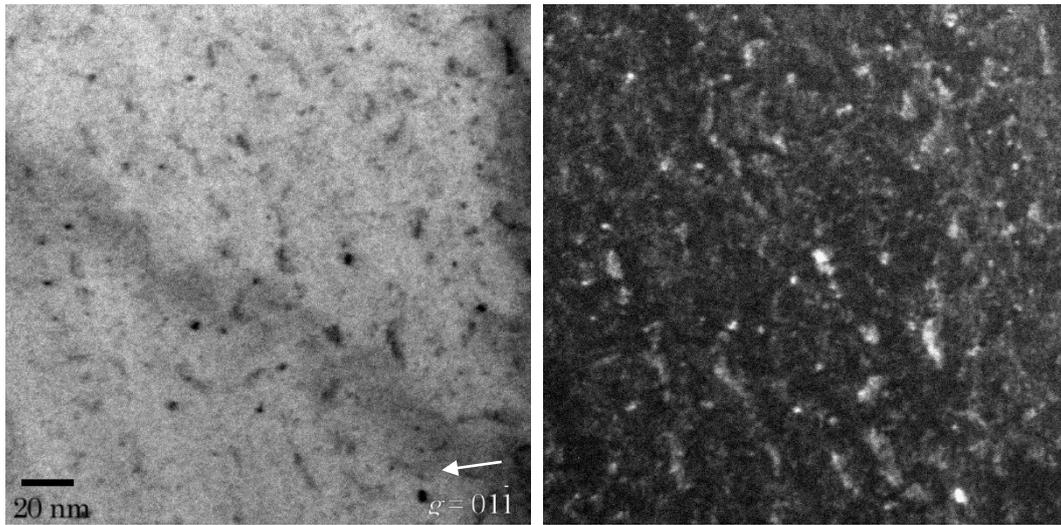
表 7.2.1-5 転位ループの平均直径と数密度

材料	照射量 (dpa)	視野	観察数	平均直径 (nm)	数密度 ( $\text{m}^{-3}$ )
母材部 (0.05%Cu)	1.0	1	13	2.4	$5.0 \times 10^{22}$
		2	19	2.4	$5.9 \times 10^{22}$
		平均	—	2.4	$5.5 \times 10^{22}$
HAZ (0.05%Cu)	1.0	1	11	2.7	$3.9 \times 10^{22}$
		2	14	2.0	$3.9 \times 10^{22}$
		平均	—	2.3	$3.9 \times 10^{22}$
溶接部 (0.20%Cu)	1.0	1	16	2.5	$7.8 \times 10^{22}$
		2	13	2.5	$2.7 \times 10^{22}$
		平均	—	2.5	$5.3 \times 10^{22}$

視野 1

明視野

暗視野



視野 2

明視野

暗視野

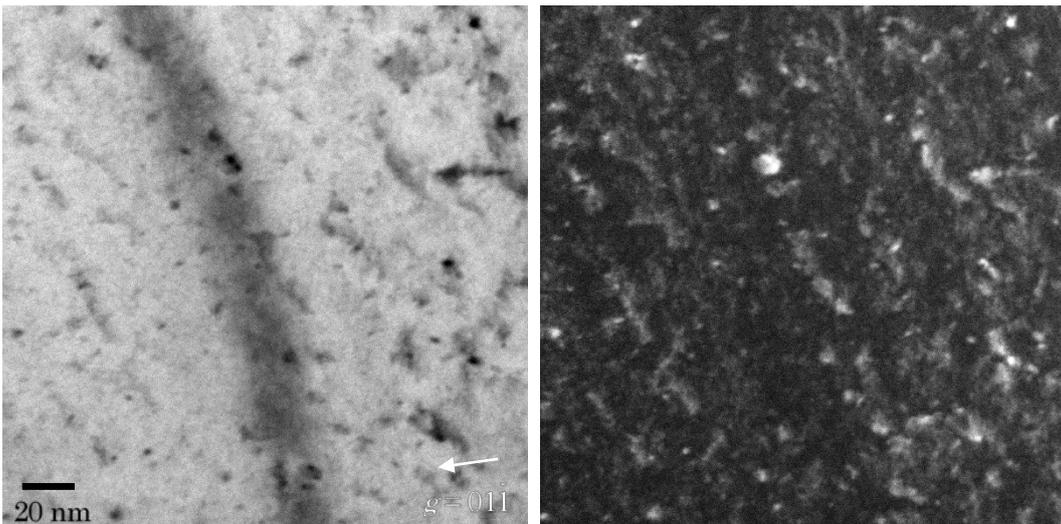


図 7.2.1-22 転位ループの明視野像と暗視野像 ( $B = [011]$ )  
母材 (0.05%Cu)、イオン照射材 (90°C、1 dpa)

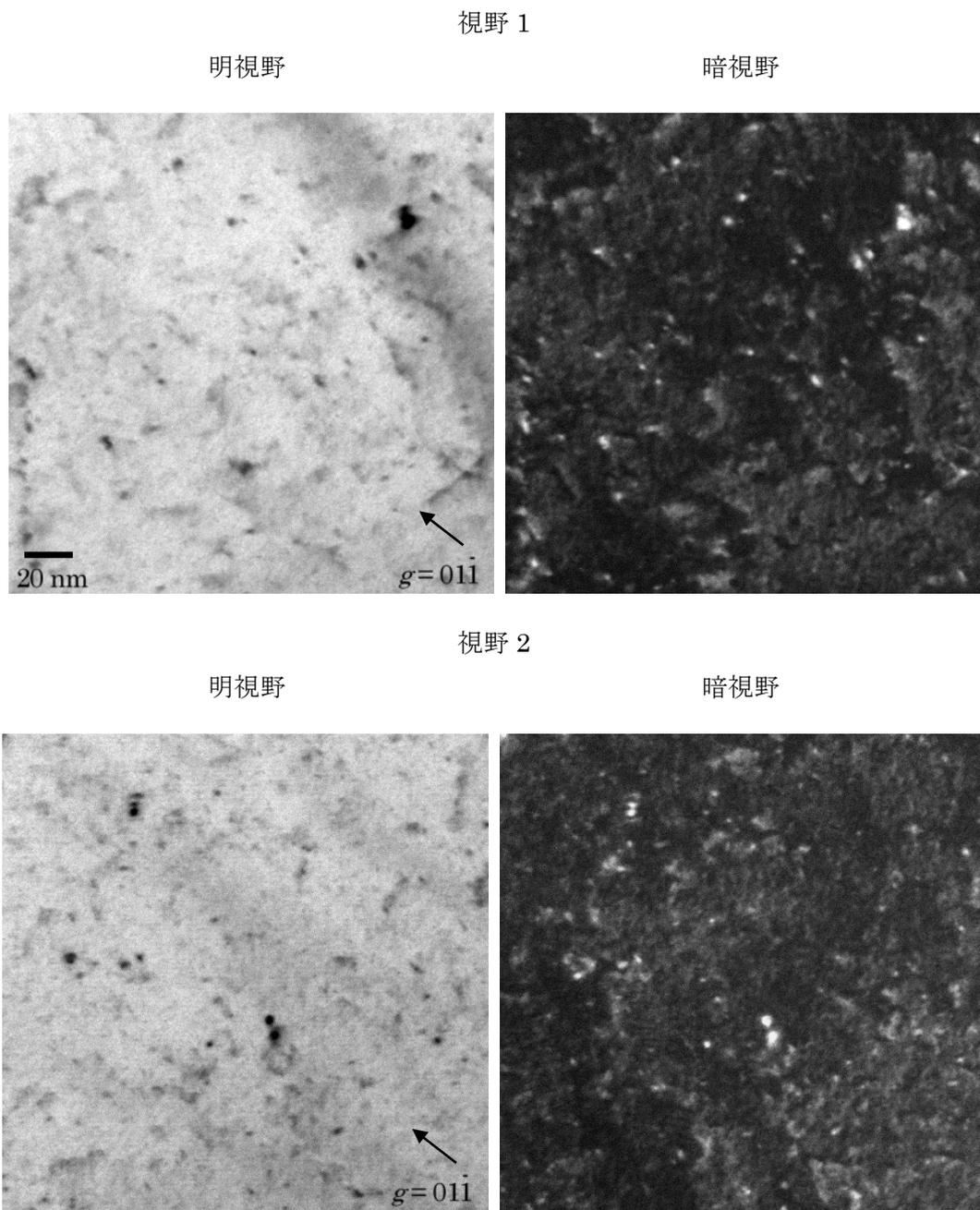


図 7.2.1-23 転位ループの明視野像と暗視野像 ( $B = [011]$ )  
HAZ (0.05%Cu)、イオン照射材 (90°C、1 dpa)

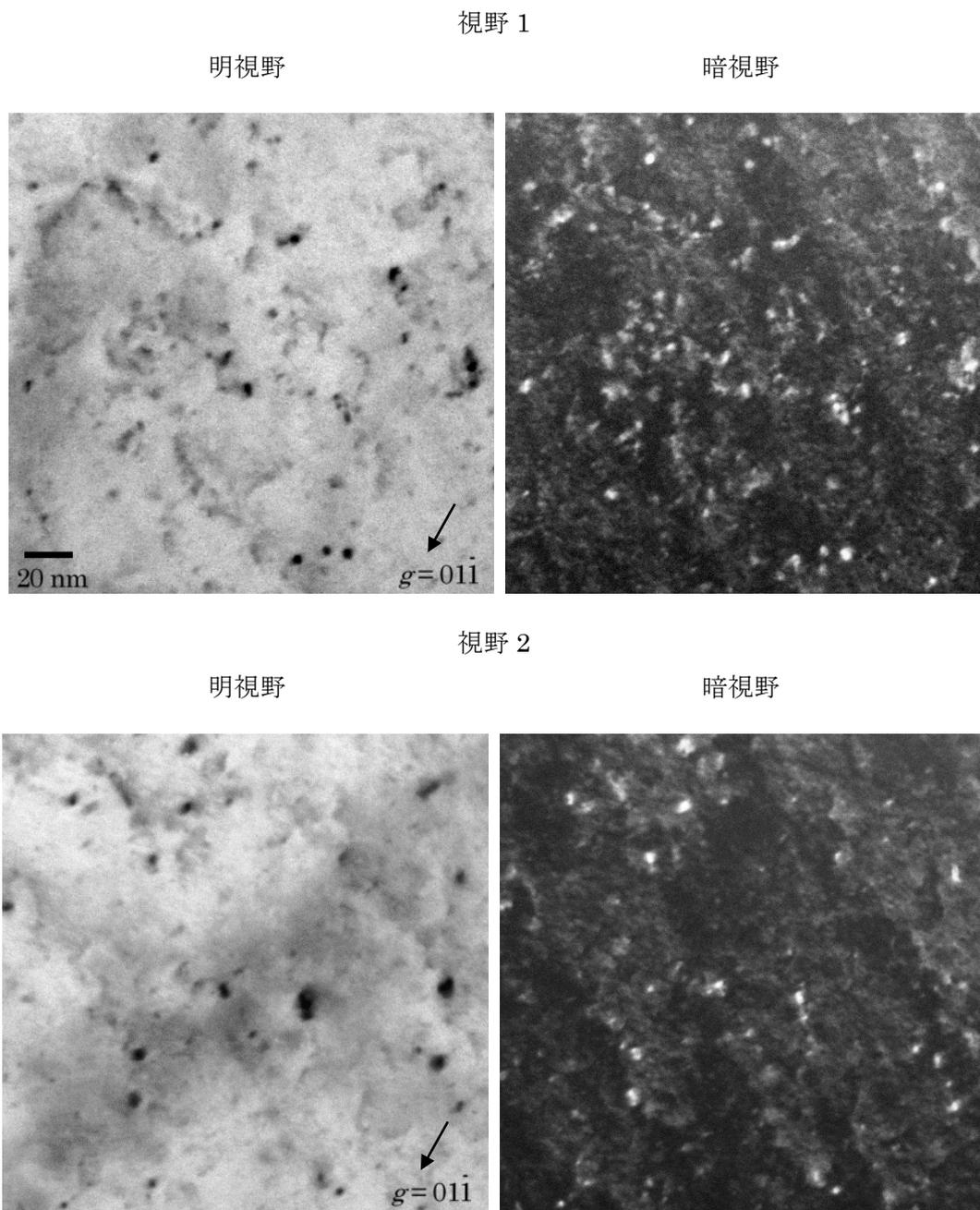


図 7.2.1-24 転位ループの明視野像と暗視野像 ( $B = [011]$ )  
 溶接部 (0.20%Cu)、イオン照射材 (90°C、1 dpa)

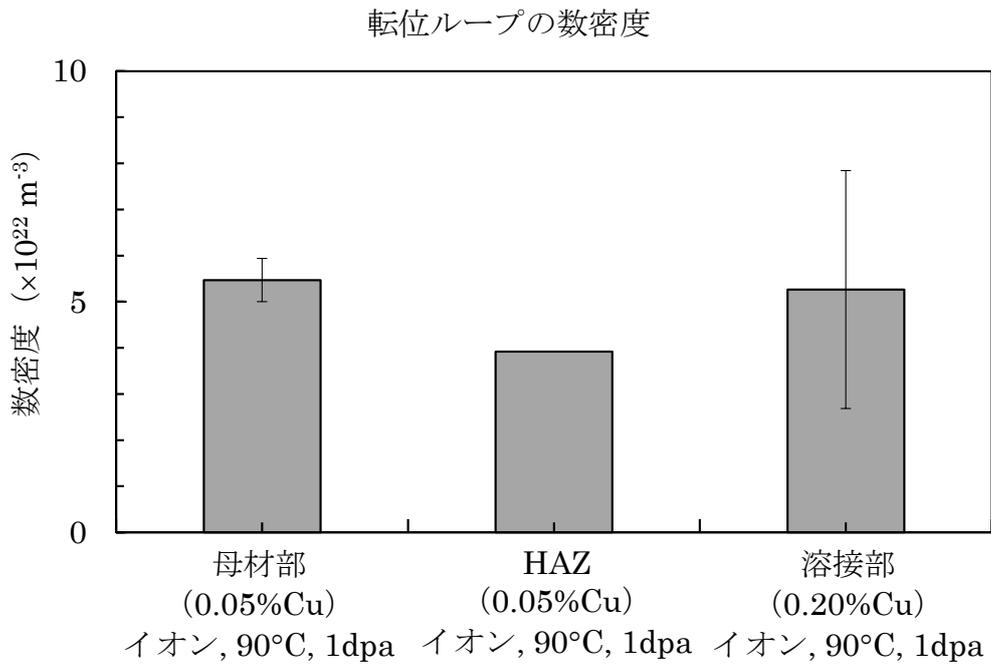
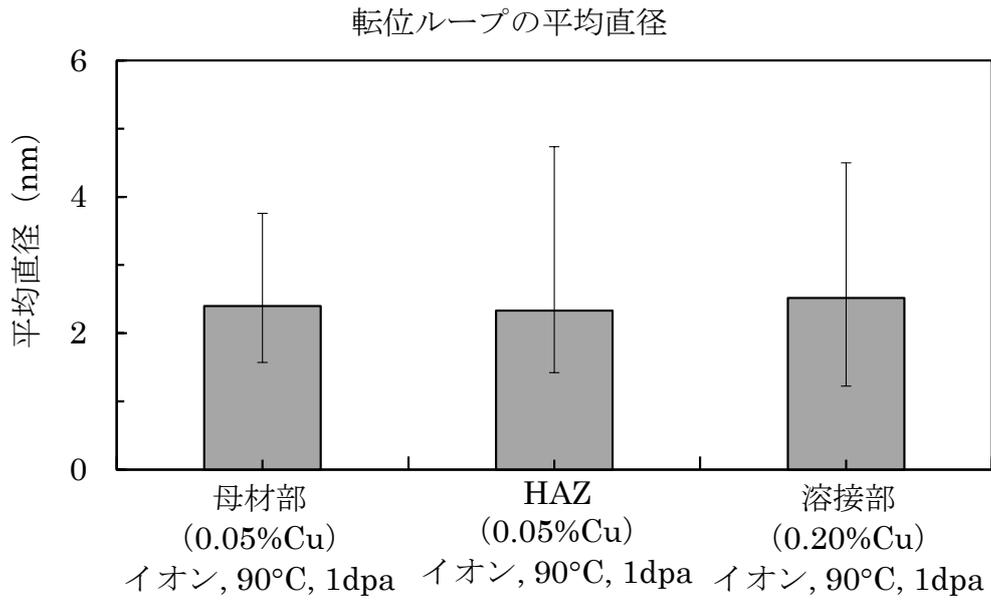


図 7.2.1-25 転位ループの平均直径と数密度

(5) ミクロ組織と硬さの関係の検討

照射量 1 dpa までのイオン照射により、炭素鋼溶接試験体の母材部 (0.05%Cu) と HAZ (0.05%Cu) および溶接部 (0.20%Cu) はともに硬化し、ミクロ組織には転位ループが形成するとともに HAZ と溶接部では Mn、Si、Cu 原子による溶質クラスタが確認された。照射による硬さの増加量とミクロ組織を表 7.2.1-6 にまとめた。

硬さの増加量と転位ループの形成量との関係を以下で検討する。転位ループの形成による硬化の指標として用いられる $\sqrt{N_l d_l}$  ( $N_l$ : 数密度、 $d_l$ : 平均直径) を母材部、HAZ および溶接部について図 7.2.1-26 に示す。母材部と HAZ および溶接部では転位ループの平均直径と数密度に大きな違いは認められていないため、 $\sqrt{N_l d_l}$ についても大きな違いはなく、転位ループが硬化に及ぼす寄与は同程度であることがわかる。硬さの増加量と転位ループの $\sqrt{N_l d_l}$ との関係を図 7.2.1-27 に示す。母材部と HAZ および溶接部での $\sqrt{N_l d_l}$ の違いはわずかであるが、硬さの増加量の大小関係と対応している。

硬さの増加量と溶質クラスタの形成量との関係を次に検討する。溶質クラスタの体積率 $V_f$ の平方根と硬さの増加量との関係を図 7.2.1-28 に示す。溶質クラスタが認められた HAZ と溶接部のイオン照射材 (90°C、1 dpa) については $\sqrt{V_f}$ が増加すると硬さの増加量も大きくなる対応関係が認められるが、溶質クラスタの形成が認められなかった母材部については HAZ と溶接部にみとめられた対応関係からは外れた位置にデータがプロットされる。溶質クラスタの形成は硬化に寄与するが、硬化の支配的要因ではないことがわかる。

炭素鋼溶接試験体にイオン照射し、硬化とミクロ組織変化の関係を調べた結果、硬さの増加量は母材部と HAZ および溶接部で大きく異ならず、その原因は主に転位ループの形成によるものであった。溶質クラスタは溶接時に熱影響を受けた HAZ と溶接部で形成が認められ、Mn、Si、Cu 濃度が高い溶接部で形成が顕著であった。イオン照射のような照射速度が速く、かつ温度が 90°C と比較的低温の照射条件では、微細な転位ループが形成し、溶質クラスタは形成し難いことがわかった。

表 7.2.1-6 硬さの増加量とミクロ組織

材料	照射量 (dpa)	硬さの増加量 (GPa)	転位ループ		溶質クラスタ		
			平均直径 (nm)	数密度 ( $m^{-3}$ )	平均直径 (nm)	数密度 ( $m^{-3}$ )	体積率
母材部 (0.05%Cu)	1.0	1.07	2.4	$5.5 \times 10^{22}$	—	—	—
HAZ (0.05%Cu)	1.0	0.87	2.3	$3.9 \times 10^{22}$	2.4	$2.7 \times 10^{22}$	$2.1 \times 10^{-4}$
溶接部 (0.20%Cu)	1.0	0.99	2.5	$5.3 \times 10^{22}$	2.2	$4.2 \times 10^{23}$	$2.5 \times 10^{-3}$

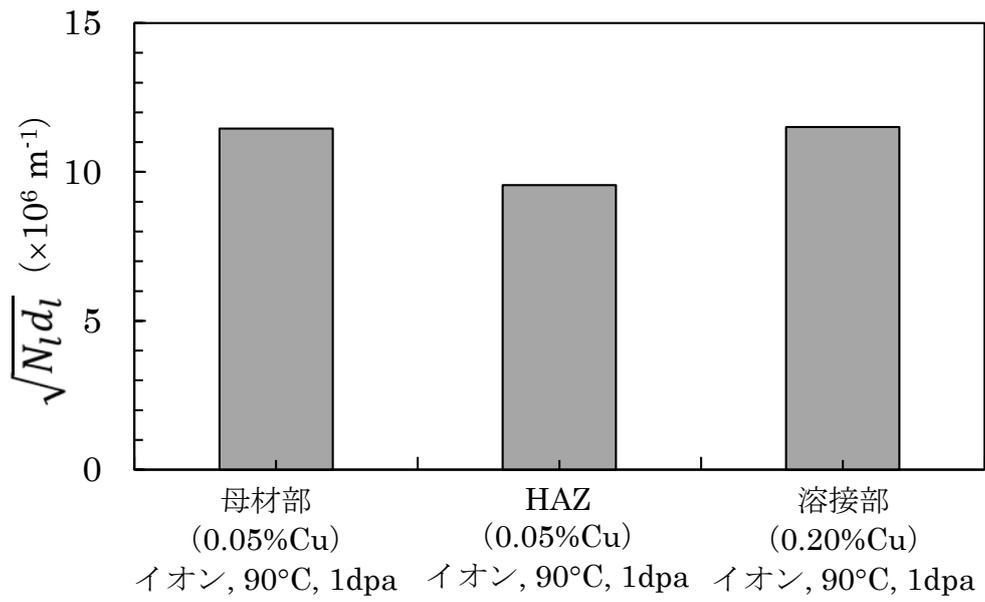


図 7.2.1-26 転位ループの $\sqrt{N_l d_l}$

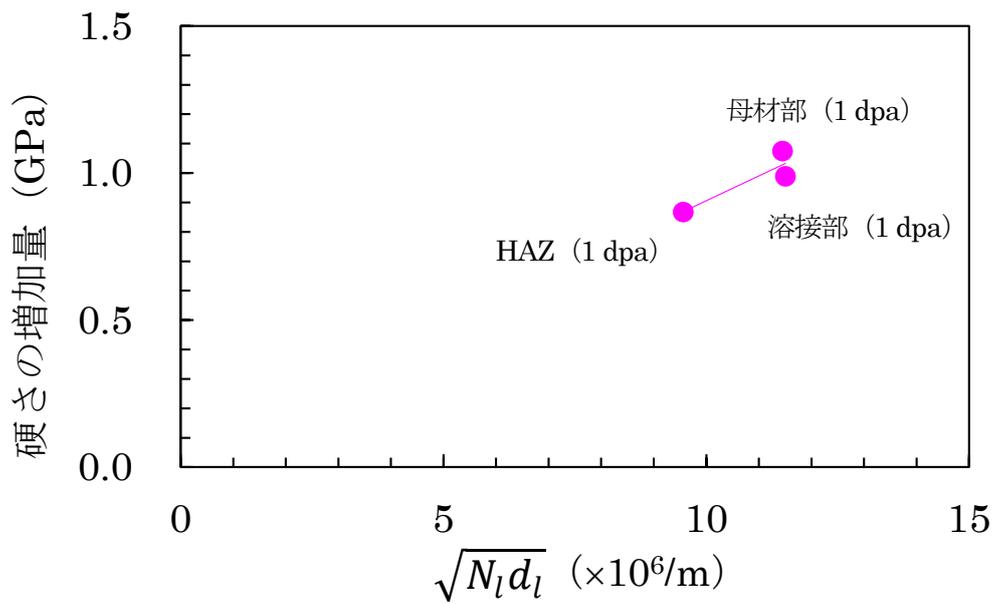


図 7.2.1-27 硬さの増加量と転位ループの $\sqrt{N_l d_l}$ との関係

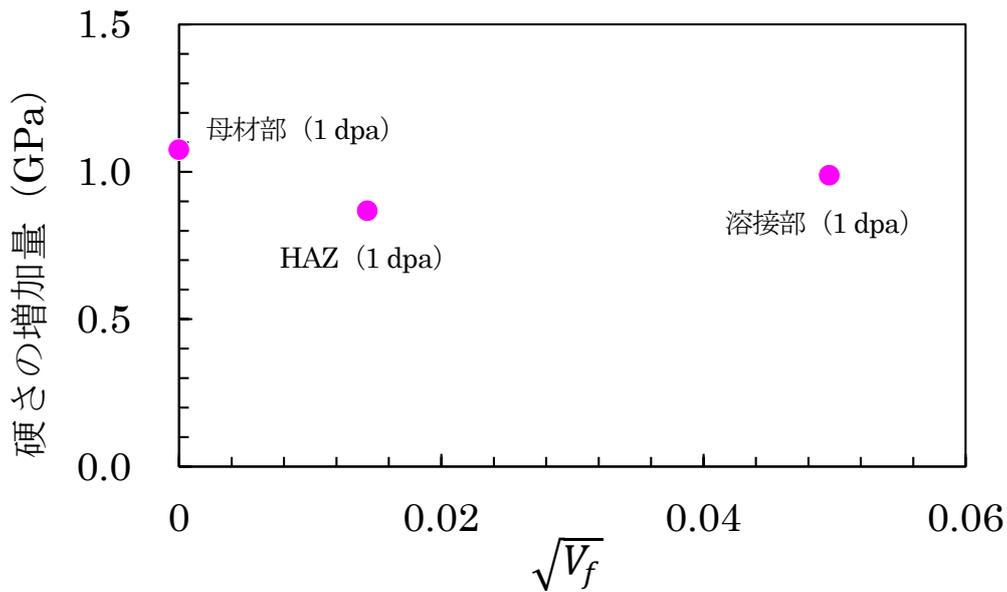


図 7.2.1-28 硬さの増加量と溶質クラスターの $\sqrt{V_f}$ との関係

## 7.2.2 炭素鋼の脆化因子におよぼす照射速度の影響の検討

### (1) 試験材

平成 28 年度に作製し、試験に用いた Cu 濃度 0.5wt% の FeMnSiCu 合金 (203×85×4.8 mm) [5] を試験材として用いた。本試験材はボタン溶解により作製した後、1150°C で 1 時間の余熱の後、900~1150°C の温度範囲で熱間圧延を実施して板材としている。

#### 1) 試験体の作製

FeMnSiCu 合金からイオン照射試験用として 10×3×1 mm の短冊状試験体を板厚方向に放電加工により 2 個切り出した。試験体の表面と側面を 1200 番までの SiC 研磨紙で湿式機械研磨した後、10×3 mm の片面を粒径 3 μm のダイヤモンドパウダーとコロイダルシリカで鏡面研磨し、照射用の表面とした。その後、ナイタール中に 1 秒間浸漬させ、化学研磨により最表面の加工層を除去した。

### (2) イオン照射試験

東京大学重照射研究設備 HIT のタンデトロン加速器を用いて、試験体表面に加速電圧 2.8 MeV で Fe イオンを照射した。照射条件は、電子線照射試験の実績をもとに温度を 90°C、照射速度を  $1 \times 10^{-4}$  dpa/s、照射量を 0.01 dpa を目標値とした。表 7.2.2-1 に照射試験のマトリクスを示す。

表 7.2.2-1 イオン照射試験のマトリクス

材料	照射温度	照射速度	照射量
FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu)	90°C	$1 \times 10^{-4}$ dpa/s	0.01 dpa

表 7.2.2-2 各試験体の照射実績

材料	試験体	熱電対	対応する ファラディ カップ	実績	目標値
FeCuMnSi 合金 (0.5%Cu)	試験体 1	溶接	ch.8	0.0087 dpa ( $8.7 \times 10^{-5}$ dpa/s)	0.01 dpa ( $1 \times 10^{-4}$ dpa/s)
			ch.13	0.0089 dpa ( $8.9 \times 10^{-5}$ dpa/s)	
	試験体 2	なし	ch.9	0.0105 dpa ( $1.1 \times 10^{-4}$ dpa/s)	0.01 dpa ( $1 \times 10^{-4}$ dpa/s)
			ch.14	0.0103 dpa ( $1.0 \times 10^{-4}$ dpa/s)	

### 7.2.3 炭素鋼の脆化因子におよぼす照射速度の影響の検討

#### (1) 試験材

平成 28 年度に作製し、試験に用いた Cu 濃度 0.5wt% の FeMnSiCu 合金 (203×85×t4.8 mm) [5] を試験材として用いた。本試験材はボタン溶解により作製した後、1150°C で 1 時間の余熱の後、900~1150°C の温度範囲で熱間圧延を実施して板材としている。

#### (2) 試験体の作製

FeMnSiCu 合金の試験材からイオン照射試験用として 10×3×t1 mm の短冊状試験体を板厚方向に放電加工により 2 個切り出した。試験体の表面と側面を 1200 番までの SiC 研磨紙で湿式機械研磨した後、10×3 mm の片面を粒径 3 μm のダイヤモンドパウダーとコロイダルシリカで鏡面研磨し、照射用の表面とした。その後、ナイトール中に 1 秒間浸漬させ、化学研磨により最表面の加工層を除去した。

#### (3) イオン照射試験

東京大学重照射研究設備 HIT のタンデトロン加速器を用いて、試験体表面に加速電圧 2.8 MeV で Fe イオンを照射した。照射条件は、電子線照射試験の実績をもとに温度を 90°C、照射速度を  $1 \times 10^{-4}$  dpa/s、照射量を 0.01 dpa を目標値とした。表 7.2.3-1 に照射試験のマトリクスを示す。試験体の温度は 90°C±1°C の範囲で制御した。

表 7.2.3-2 に照射試験中の平均値で試験体の照射実績を示す。試験体は 2 個同時に照射した。照射速度は目標値の  $1 \times 10^{-4}$  dpa/s から最大 23% のずれが生じている場合があったが、平均値では 13% の誤差範囲内で目標値を満足した。以降の硬さ試験と APT 分析および TEM 観察には、平均値で見た照射速度と照射量が目標値をほぼ満足する試験体 2 の下部側 (ch14) を供した。

表 7.2.3-1 イオン照射試験のマトリクス

材料	照射温度	照射速度	照射量
FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu)	90°C	1×10 <sup>-4</sup> dpa/s	0.01 dpa

表 7.2.3-2 各試験体の照射実績

材料	試験体	熱電対	対応する ファラディ カップ	実績	目標値
FeCuMnSi 合金 (0.5%Cu)	試験体 1	溶接	ch.8	0.0087 dpa (8.7×10 <sup>-5</sup> dpa/s)	0.01 dpa (1×10 <sup>-4</sup> dpa/s)
			ch.13	0.0089 dpa (8.9×10 <sup>-5</sup> dpa/s)	
	試験体 2	なし	ch.9	0.0105 dpa (1.1×10 <sup>-4</sup> dpa/s)	0.01 dpa (1×10 <sup>-4</sup> dpa/s)
			ch.14	0.0103 dpa (1.0×10 <sup>-4</sup> dpa/s)	

#### (4) 硬さ試験

##### 1) 測定方法

超微小硬さ試験機（エリオニクス製 ENT-2100）を用いて、試験体の硬さを測定した。測定方法の詳細は 7.2.1(2)に記載した通りである。なお、電子線照射材については、照射後に試験体表面を 1200 番までの SiC 研磨紙で湿式機械研磨した後、粒径 3 μm のダイヤモンドパウダーとコロイダルシリカで鏡面研磨し、ナイタール中に 1 秒間浸漬させて最表面の加工層を化学研磨により除去してから試験に供した。

##### 2) 測定結果

電子線照射材とイオン照射材の硬さの測定結果を図 7.2.3-1 に示す。図には平成 28 年度の電子線照射材の結果も併せて示した。電子線照射材では 3.0 GPa に硬さの頻度分布のピークが存在しているがイオン照射材では 2.9 GPa にピークがあり、同一の照射量では電子線照射の方がイオン照射に比べて硬さが大きくなった。

硬さの平均値と硬さの増加量（照射材と未照射材の硬さの差分）を図 7.2.3-2 に示す。図中には比較のため、平成 28 年度に試験した炭素鋼（0.5%Cu）の未照射材、イオン照射材および電子線照射材と FeMnSiCu 合金の未照射材の結果[5]も示した。なお、エラーバーは測定値の最大と最小を示した。電子線照射材の方が同一照射量のイオン照射材に比べて硬さの増加量が大きくなる傾向は、主要元素の化学組成が同じである炭素鋼でも認められている。また、FeMnSiCu 合金と炭素鋼では硬さの増加量はほぼ同じであった。

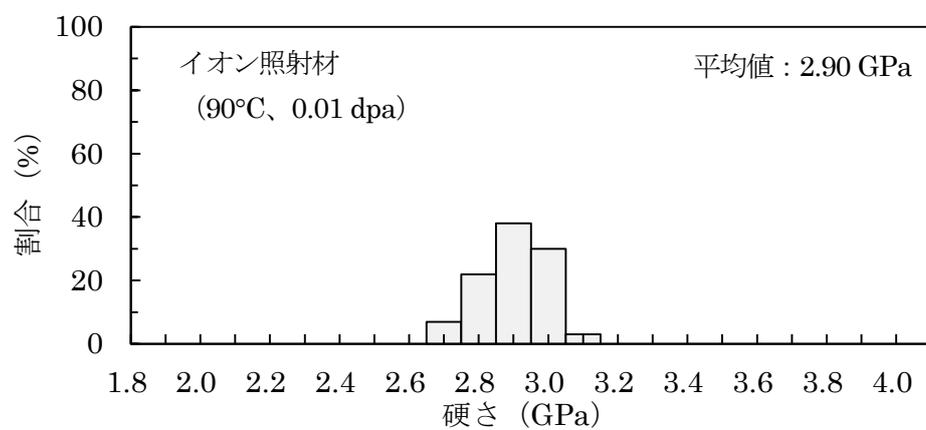
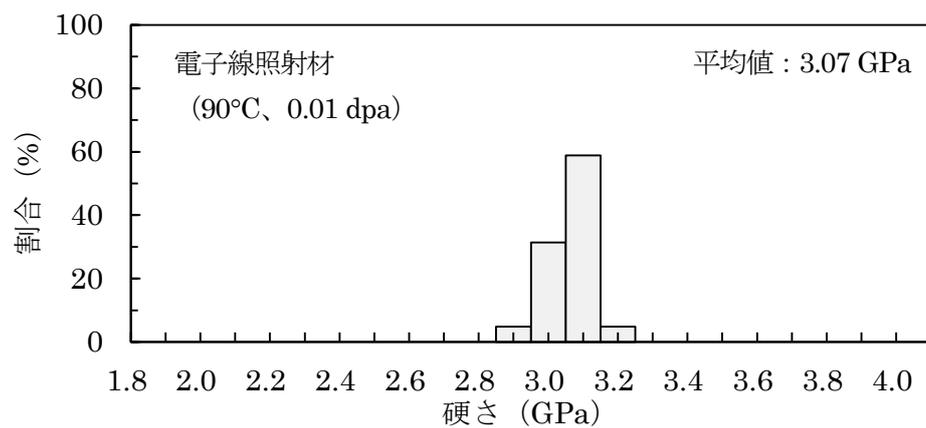


図 7.2.3-1 90°C で 0.01 dpa まで電子線照射およびイオン照射した FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu) の硬さの分布

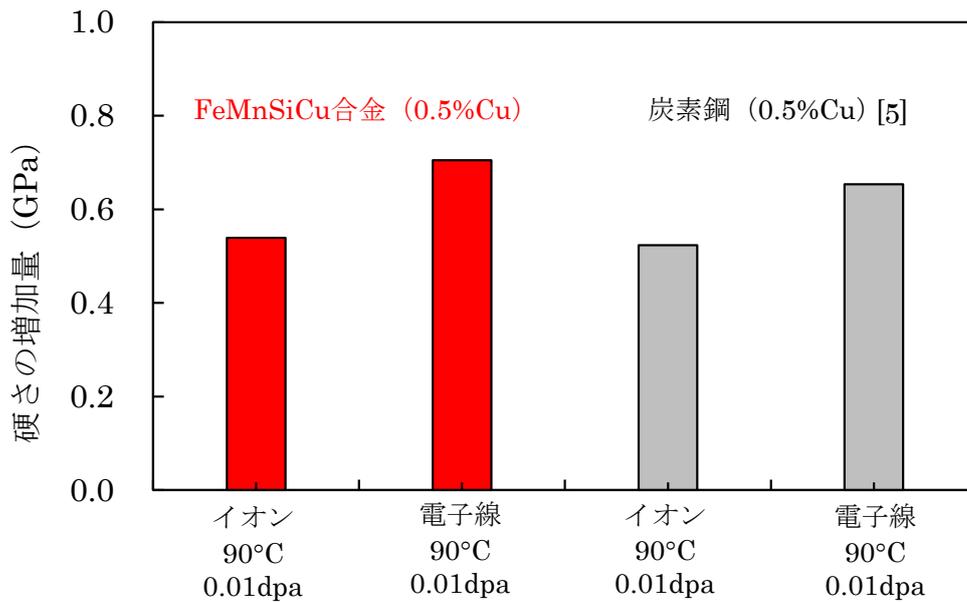
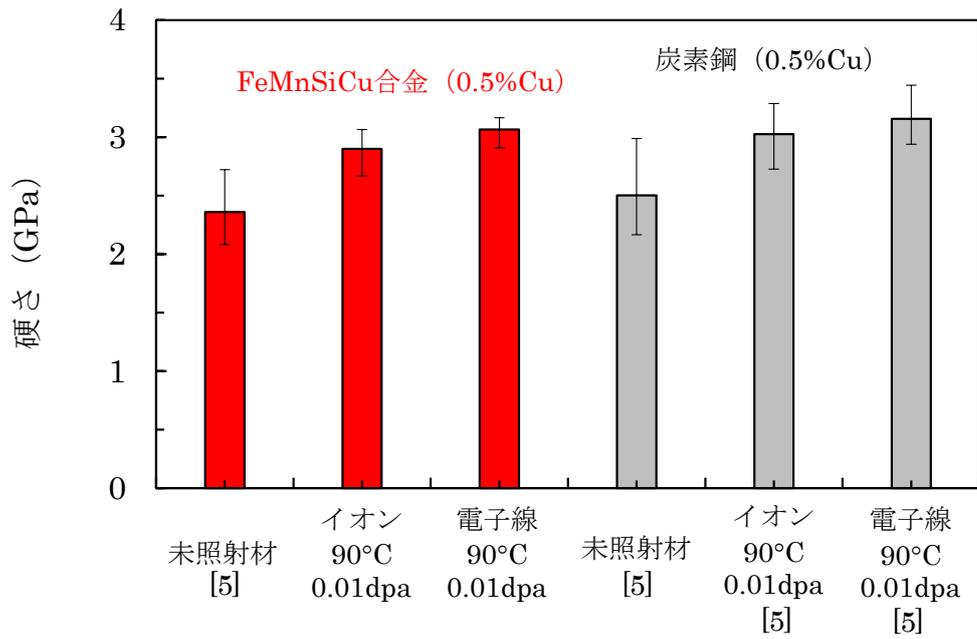


図 7.2.3-2 90°C で 0.01 dpa までの電子線照射およびイオン照射に伴う FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu) と炭素鋼 (0.5%Cu) の硬さの変化

## (5) APT 分析

### 1) 分析試験片の作製

試験体について APT 分析を実施した。分析試験片の作製の詳細については 7.2.1(3)1)に記載した通りである。作製した微小試料に対して管理用の ID として以下を設定した。

FeMnSiCu 合金 : FeMnSiCu-E-uS1, FeMnSiCu-I-uS1 (E : 電子線、I : イオン)

各微小試料から複数の APT 分析試験片を作製し、管理用の試験片 ID として、末尾に AP1、AP2・・・を追加設定した。

## 2) 測定方法

測定方法の詳細は 7.2.1(3)2)に記載した通りである。

## 3) 測定結果

FeMnSiCu 合金について得られたアトムマップを図 7.2.3-3 に示す。Fe、Mn、Si、Cu についてマップを示した。なお、測定は各試験材について 2 本以上実施しており、良好なマップが得られた 2 データを示した。電子線照射材、イオン照射材ともに明確なクラスタの形成は認められなかったが、電子線照射材については Mn と Si、Cu 原子が近接している様子が認められた。

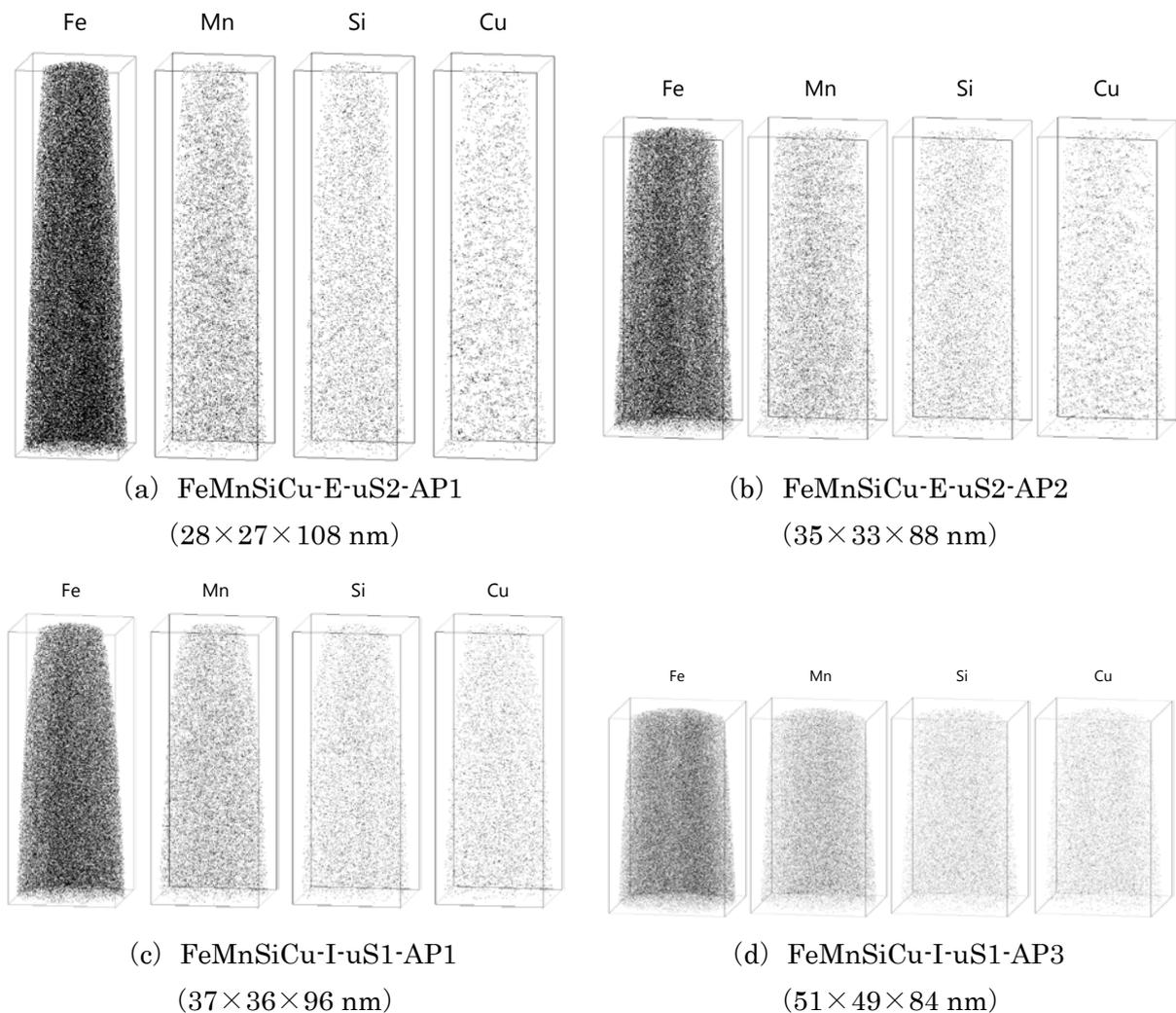


図 7.2.3-3 FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu) 試験片のアトムマップ

#### 4) クラスタ解析

電子線照射材では Mn、Si、Cu 原子が近接している傾向が認められたため、再帰的探索アルゴリズムに基づくクラスタ解析により、溶質原子のクラスタリングを定量的に検討した。解析方法の詳細は 7.2.1(3)4)に記載した通りである。コア原子を Mn、Si、Cu とし、コア原子連鎖距離と周辺原子抽出距離は 0.6 nm とし、周辺原子の一部の除去条件については 0.5 nm 以内に 2 個以下のコア原子を含まない場合とした。溶質クラスタとして扱うコア原子の最小数は 20 個とした。

クラスタ解析は、図 7.2.3-3 にアトムマップを示した測定データ全てについて実施した。表 7.2.3-3 にクラスタ解析結果をまとめる。電子線照射材、イオン照射材ともに溶質クラスタが抽出されたが、イオン照射材については少数であった。

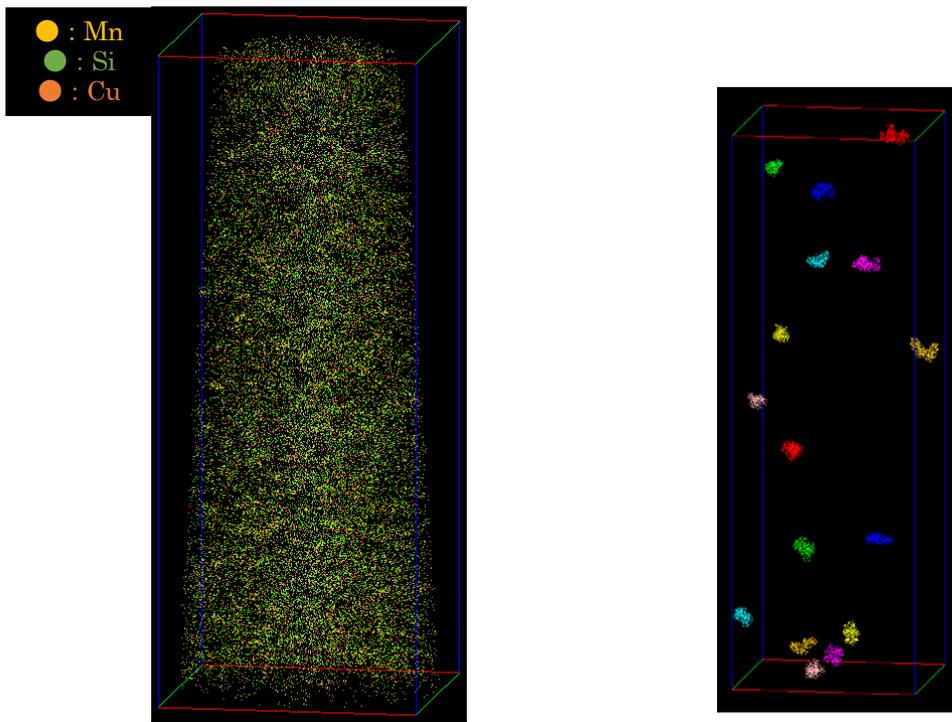
図 7.2.3-4 に Mn、Si、Cu 原子マップと溶質クラスタマップの比較を示す。電子線照射材では、抽出された溶質クラスタの位置は Mn、Si、Cu 原子の近接した部位を良く反映したものであった。イオン照射材については、抽出されたクラスタの位置と Mn、Si、Cu 原子との対応は明確ではなく、溶質原子の高濃度の箇所が溶質クラスタとして抽出されたと推測される。

抽出された溶質クラスタのサイズ分布を図 7.2.3-5 に示す。なお、サイズ分布は抽出された溶質クラスタのうち、形状が球状のものを選定して評価しており、電子線照射材については 35 個、イオン照射材では 2 個の溶質クラスタについて評価した。電子線照射材ではクラスタ直径の分布のピークは 1.5~2.0 nm にあり、平均値は 2.1 nm であった。イオン照射材についてはクラスタ直径の分布のピークは 2.0~2.5 nm にあり、平均値は 2.2 nm であった。イオン照射材では抽出されたクラスタの数が少ないことを考慮すると、電子線照射材とイオン照射材ではクラスタ直径に大きな違いは認められない。また、数密度については電子線照射材では  $3.8 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$  であり、イオン照射材では  $1.5 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$  であった。照射速度が低いほど、溶質クラスタの形成が促進されることが示唆された。

抽出された溶質クラスタの組成分布をそれぞれ図 7.2.3-6 に示す。クラスタ ID が大きいほど直径が大きなクラスタに対応する。なお、組成分布についても抽出された溶質クラスタのうち、球形のものを対象に評価した。クラスタの直径と組成に明確な関係は認められなかった。電子線照射材での平均組成 (at%) は Fe-12.5Mn-4.6Si-11.6Cu であり、イオン照射材では Fe-12.0Mn-5.6Si-9.0Cu であった。また、少数であるが、電子線照射材で Si を含まないクラスタも認められた。電子線照射材とイオン照射材で、溶質クラスタの組成分布に大きな違いは認められなかった。

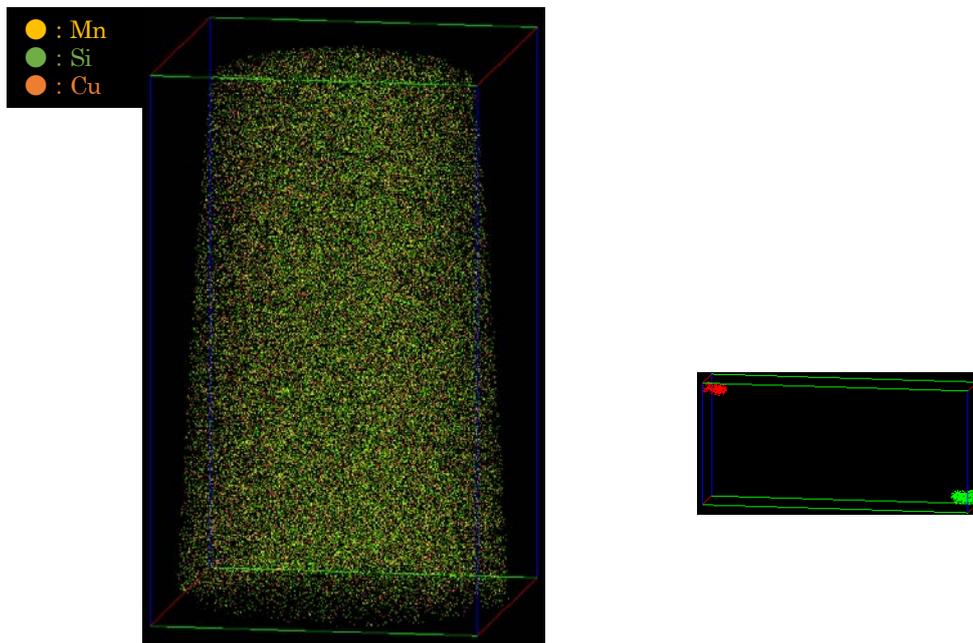
表 7.2.3-3 クラスタ解析結果のまとめ

材料	照射条件			抽出クラスタ数		平均直径 (nm)	数密度 ( $\text{m}^{-3}$ )	体積率	平均組成 (at%)
	照射 方法	照射速度 (dpa/s)	照射量 (dpa)	球形状	全て				
FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu)	電子線 照射	$1.8 \times 10^{-8}$	0.01	35	47	2.1	$3.8 \times 10^{23}$	$1.7 \times 10^{-3}$	Fe-12.5Mn- 4.6Si-11.6Cu
	イオン 照射	$1.0 \times 10^{-4}$	0.01	2	3	2.2	$1.5 \times 10^{22}$	$8.8 \times 10^{-5}$	Fe-12.0Mn- 5.6Si-9.0Cu



Mn、Si、Cu 原子マップ (左) と溶質クラスタマップ (右)

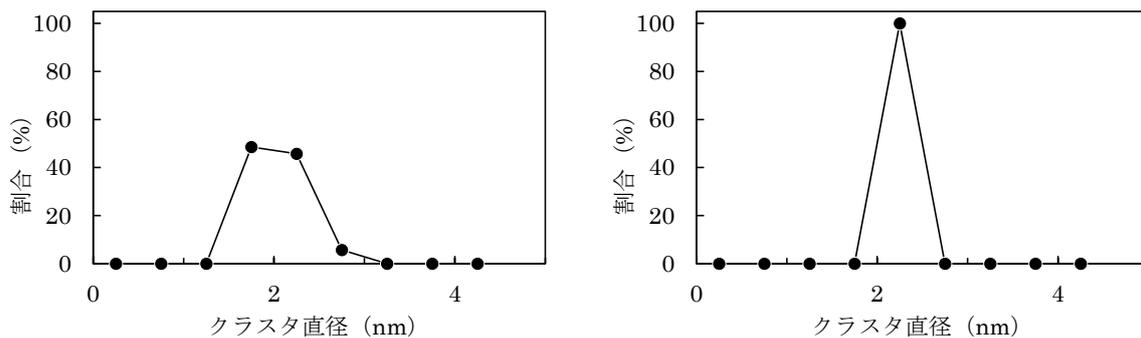
(a)電子線照射材 (90°C、0.01 dpa)



Mn、Si、Cu 原子マップ (左) と溶質クラスタマップ (右)

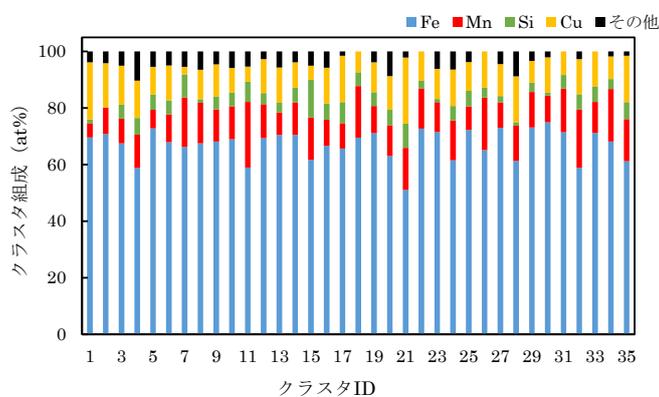
(b)イオン照射材 (90°C、0.01 dpa)

図 7.2.3-4 FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu) の原子マップと溶質クラスタマップの比較

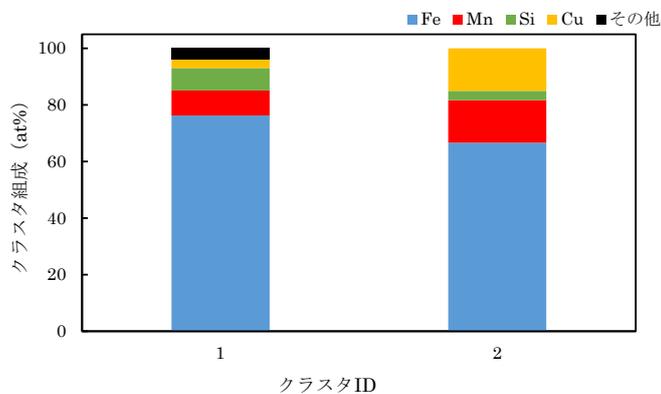


(a) 電子線照射材 (90°C、0.01 dpa) (b) イオン照射材 (90°C、0.01 dpa)

図 7.2.3-5 FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu) の溶質クラスタの直径分布



(a) 電子線照射材 (90°C、0.01 dpa)



(b) イオン照射材 (90°C、0.01 dpa)

図 7.2.3-6 FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu) の溶質クラスタの組成分布

## (6) TEM 観察

### 1) 観察試験片の作製

試験体を対象に TEM 観察を実施した。TEM 観察用の試験片を作製するため、EBSD 測定で試験体表面の結晶方位と粒界の位置を特定した。EBSD 測定条件の詳細は 7.2.1(3)1)に記載した通りである。EBSD 測定結果を基に、試験体表面から FIB 加工により TEM 観察試験片を作製した。

TEM 観察試験片の作製方法の詳細は 7.2.1(4)1)に記載した通りである。

2) 観察方法

詳細は 7.2.1(4)2)に記載したとおりである。

3) 観察結果

転位ループの明視野像と暗視野像を図 7.2.3-7に示す。これらのTEM像は $B = [011]$ 、 $g = [01\bar{1}]$ の回折条件で撮影した明視野像である。いずれの試料においても転位ループの形成が認められた。観察された転位ループの平均直径と数密度の評価結果を表 7.2.3-4 にまとめた。また、図 7.2.3-8 に転位ループの平均直径と数密度の比較を示す。図中の値は 2 視野の平均値を用いた。

電子線照射材とイオン照射材では、転位ループの平均直径と数密度に大きな違いは認められなかった。転位ループの形成に対する照射速度による違いは大きくないことが分かった。

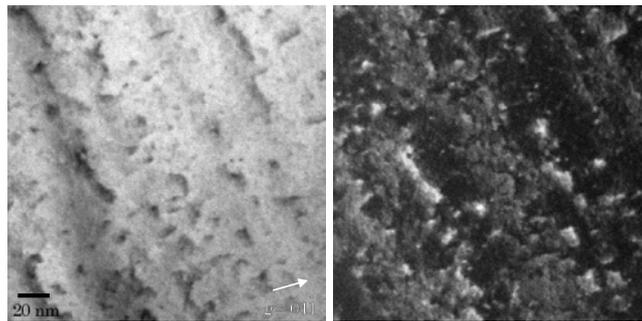
表 7.2.3-4 転位ループの平均直径と数密度

材料	照射方法	視野	観察数	平均直径 (nm)	数密度 ( $m^{-3}$ )
FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu)	電子線照射	1	12	2.1	$2.8 \times 10^{22}$
		2	11	1.9	$4.7 \times 10^{22}$
		平均	—	2.0	$3.8 \times 10^{22}$
	イオン照射	1	10	2.0	$3.8 \times 10^{22}$
		2	12	2.1	$3.0 \times 10^{22}$
		平均	—	2.1	$3.4 \times 10^{22}$

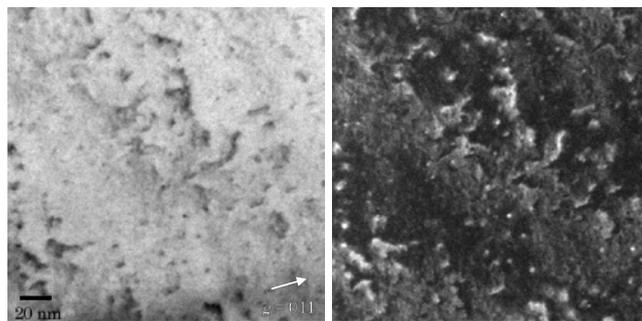
明視野

暗視野

視野 1



視野 2

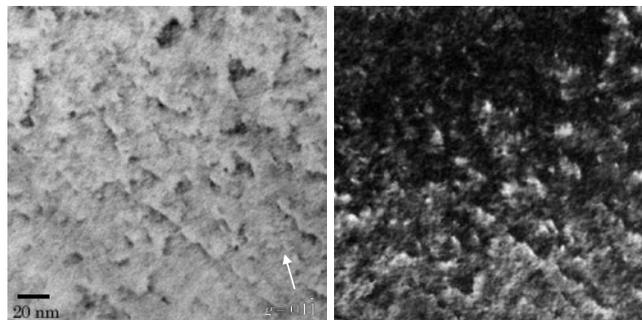


(a) FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu)、電子線照射材 (90°C、0.01 dpa)

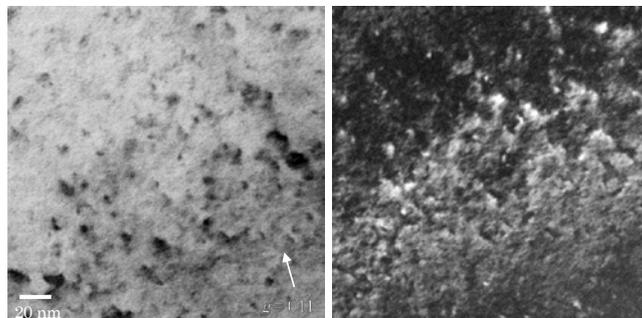
視野 1

明視野

暗視野



視野 2



(b) FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu)、イオン照射材 (90°C、0.01 dpa)

図 7.2.3-7 転位ループの明視野像と暗視野像 ( $B = [011]$ )

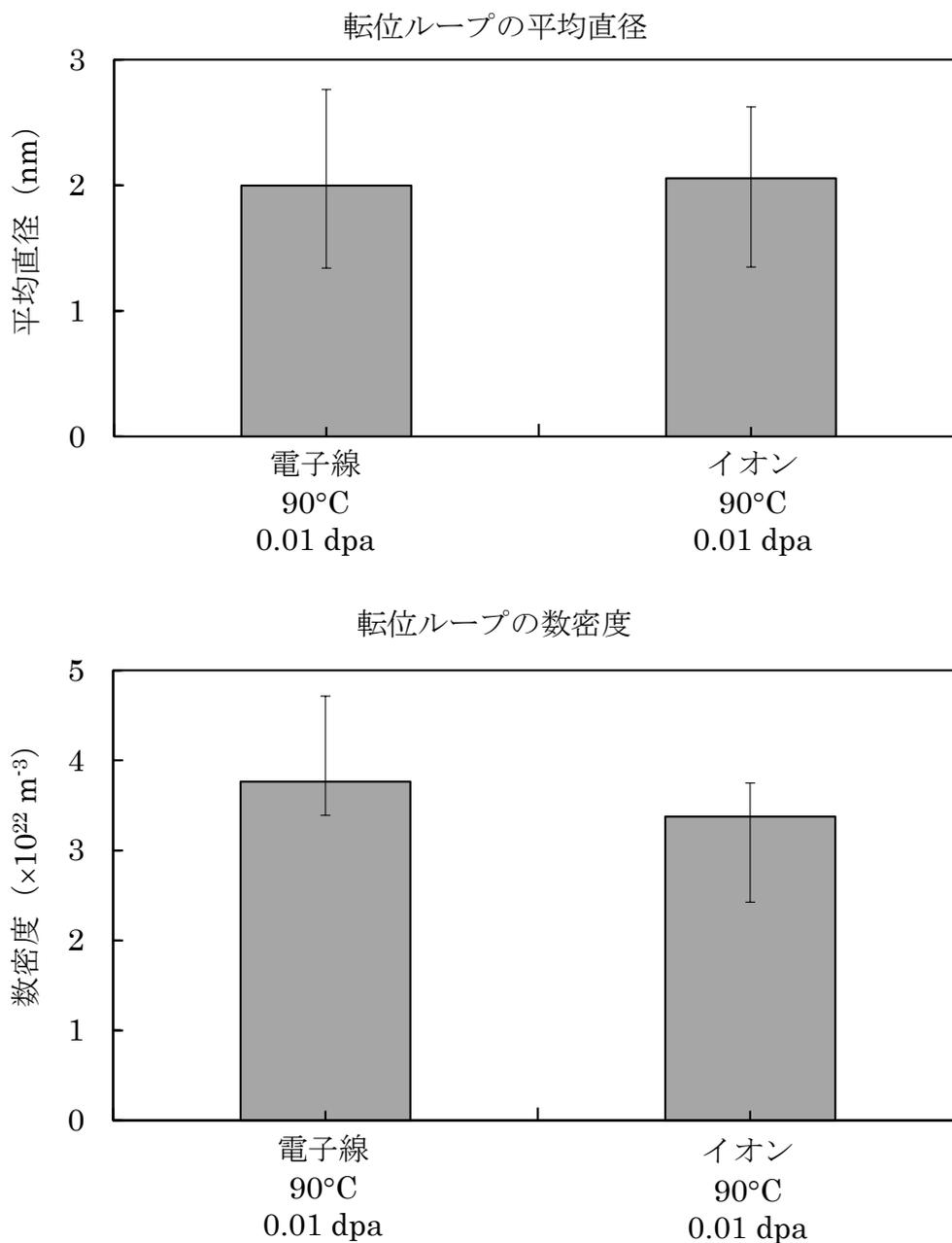


図 7.2.3-8 転位ループの平均直径と数密度

(7) ミクロ組織と硬さの関係の検討

電子線と Fe イオンにより 0.01 dpa まで照射損傷が導入された FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu) では、硬化するとともにミクロ組織には転位ループと溶質クラスタの形成が認められた。表 7.2.3-5 に硬さの増加量とミクロ組織をまとめて示す。硬さの増加量はイオン照射に比べて電子線照射の方が大きく、照射速度の低下は硬化量を増大させることが示唆された。7.2.1(5)に記載した方法を用いて、ミクロ組織と硬さの関係を以下に検討した。

転位ループの形成による硬化の指標である  $\sqrt{N_l d_l}$  ( $N_l$ : 数密度、 $d_l$ : 平均直径) を図 7.2.3-9 に示す。電子線照射材とイオン照射材では転位ループの平均直径と数密度に大きな違いは認められ

ていないため、 $\sqrt{N_l d_l}$ もほぼ同じ値であり、転位ループが硬化に及ぼす寄与は電子線照射とイオン照射で大きな違いはないことが分かる。硬さの増加量と転位ループの $\sqrt{N_l d_l}$ との関係を図 7.2.3-10 に示す。電子線照射材とイオン照射材での $\sqrt{N_l d_l}$ の違いはわずかであり、硬さの増加量の違いは転位ループの形成とは無関係であることが分かる。

硬さの増加量と溶質クラスターの形成の関係を次に検討する。溶質クラスターの体積率 $V_f$ の平方根と硬さの増加量との関係を図 7.2.3-11 に示す。 $\sqrt{V_f}$ が増加すると硬さの増加量も大きくなる対応関係が認められ、溶質クラスターの形成が硬化に寄与していることが分かる。照射速度の低下は、転位ループの形成については有意な影響を及ぼしていない可能性があるが、溶質クラスターの形成を促進しており、照射速度の低下による硬化量の増加は溶質クラスターの形成が促進されたことによるものと考えられる。

表 7.2.3-5 硬さの増加量とマイクロ組織

材料	照射条件			硬さの増加量 (GPa)	転位ループ		溶質クラスター		
	照射方法	照射速度 (dpa/s)	照射量 (dpa)		平均直径 (nm)	数密度 ( $m^{-3}$ )	平均直径 (nm)	数密度 ( $m^{-3}$ )	体積率
FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu)	電子線照射	$1.8 \times 10^{-8}$	0.01	0.71	2.0	$3.8 \times 10^{22}$	2.1	$3.8 \times 10^{23}$	$1.7 \times 10^{-3}$
	イオン照射	$1.0 \times 10^{-4}$	0.01	0.54	2.1	$3.4 \times 10^{22}$	2.2	$1.5 \times 10^{22}$	$8.8 \times 10^{-5}$

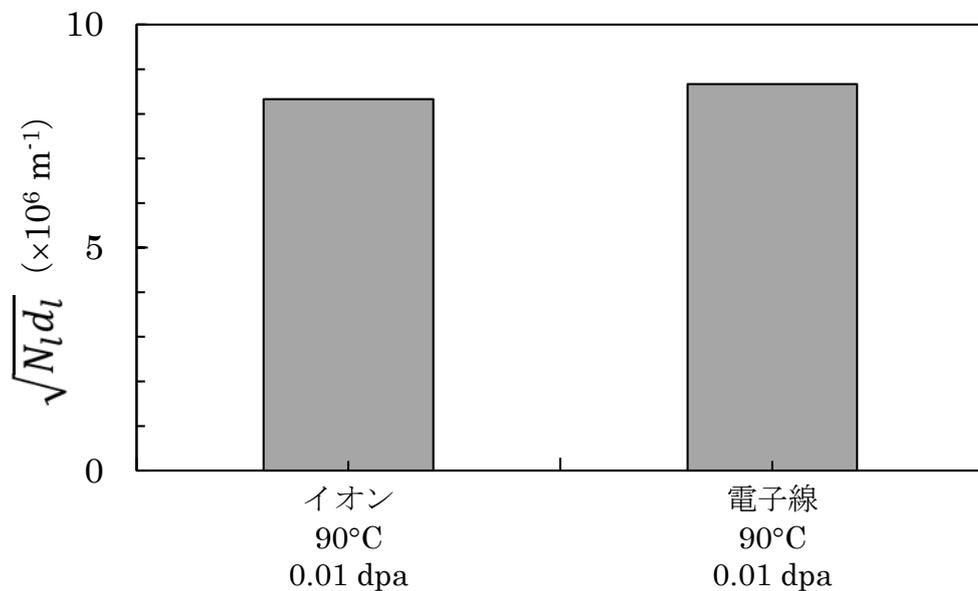


図 7.2.3-9 転位ループの $\sqrt{N_l d_l}$

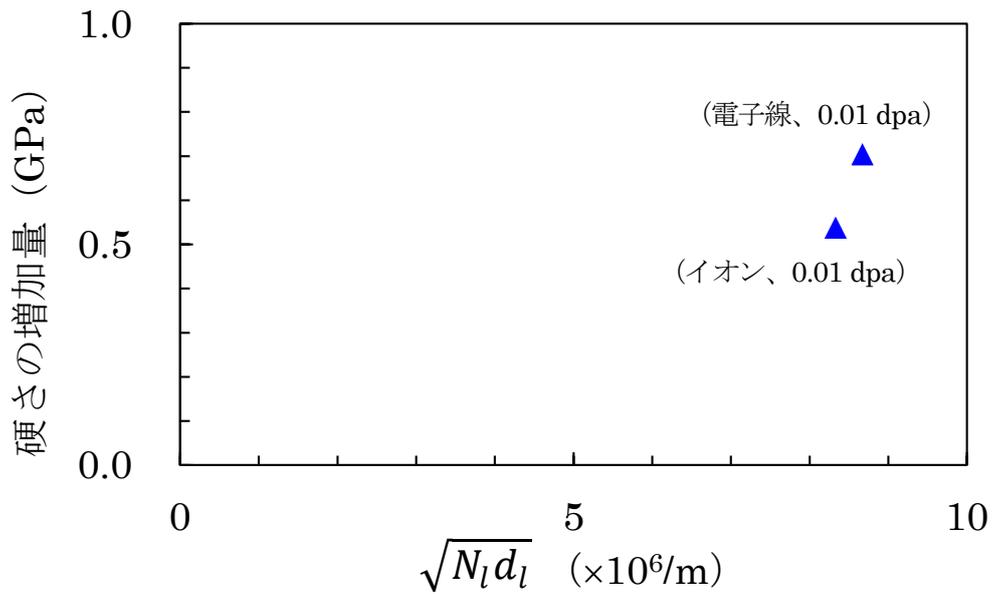


図 7.2.3-10 硬さの増加量と転位ループの $\sqrt{N_l d_l}$ との関係

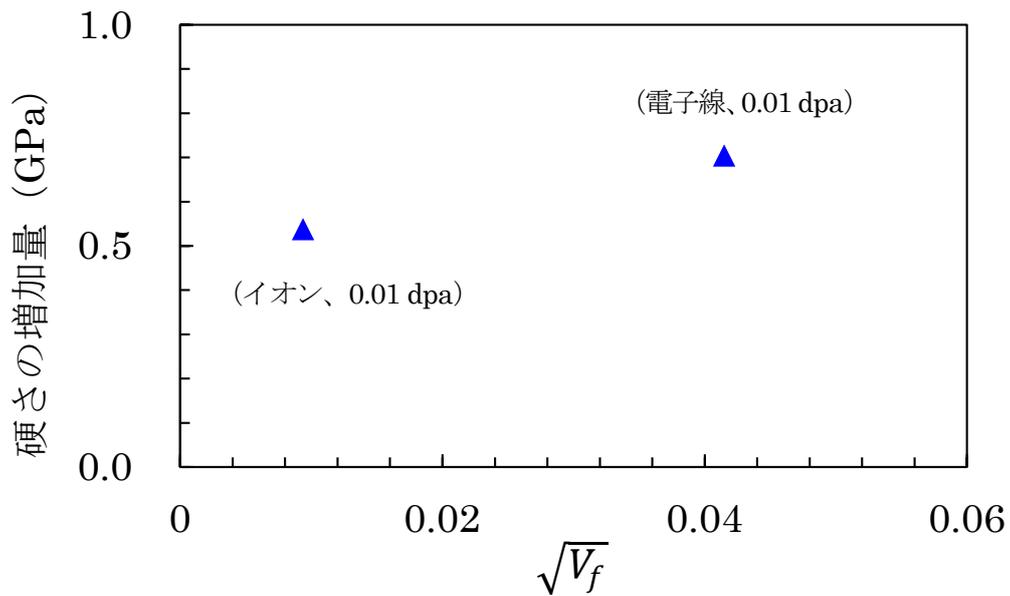


図 7.2.3-11 硬さの増加量と溶質クラスタの $\sqrt{V_f}$ との関係

#### 7.2.4 照射損傷量と硬さの増加量の関係

平成 27 年度から 29 年度までに実施した照射試験の結果から、炭素鋼の照射による損傷量と硬さの増加量の関係を整理した。試験材料は、炭素鋼 SM400B、炭素鋼 (MAG 溶接試験体) 炭素鋼 (0.5wt%Cu)、FeCu 合金 (0.5wt%Cu)、FeMnSiCu 合金を用いた。照射条件を表 7.2.4-1 に示す。

照射試験片に対して TEM 観察および 3 次元アトムプローブ分析を実施した結果、炭素鋼の脆

化因子として転位ループと溶質クラスタの形成が確認された[4]。2つの脆化因子が存在する場合、硬化に対するそれらの寄与は、せん断強度の増加量として式 7.2.4-1 のオロワンモデルで表すことができる。そのため、TEM 観察および3次元アトムプローブで測定した転位ループと溶質クラスタの数密度および平均直径を表 7.2.4-1 に示した。また、全ての試験片に対して超微小硬さ試験を実施した結果も併せて表 7.2.4-1 に示した。

$$\Delta\tau = \sqrt{(\Delta\tau_l)^2 + (\Delta\tau_c)^2} = \sqrt{(\alpha_l\mu b\sqrt{N_l d_l})^2 + (\alpha_c\mu b\sqrt{N_c d_c})^2} \quad \text{式 7.2.4-1}$$

ここで、 $\Delta\tau$ は硬化因子によるせん断強度の増加量であり、降伏応力の増加量に相当する。なお、添え字の l は転位ループを、c は溶質クラスタを示し、 $\Delta\tau_l$  と  $\Delta\tau_c$  はそれぞれの寄与分である。 $\alpha$  は欠陥の種類やサイズにより異なる硬化係数であり、転位ループについてはサイズに応じて 0.2 ~ 0.5 程度、溶質クラスタについては大きい物では 1 が用いられ、微細な物では 1 以下の値が用いられる[20]。 $N$  と  $d$  はそれぞれの欠陥の数密度と平均直径である。 $\mu$  は剛性率で、 $b$  はバーガースベクトルの大きさである。

式 7.2.4-1 を用いて求めた転位ループと溶質原子クラスタの形成によるせん断強度の増加値  $\Delta\tau$  と超微小硬さの増加量  $\Delta H$  の関係を図 7.2.4-1 に示す。硬化係数  $\alpha$  は、せん断強度の増加値  $\Delta\tau$  と硬さの増加量  $\Delta H$  との関係から最小二乗法により回帰直線を求め、決定係数  $R^2$  が最大となる値として、転位ループの硬化係数が 0.5、溶質クラスタが 0.05 と決定した。抽出された溶質クラスタはアトムマップ上では明確なクラスタとして認められておらず、硬化への寄与は小さいために硬化係数が小さくなったと考えられる。また、剛性率は 80 GPa とし、バーガースベクトルの大きさは 0.25 nm とした[8]。せん断強度の増加値  $\Delta\tau$  と超微小硬さの増加量  $\Delta H$  の関係は、以下の式で近似した。

$$\Delta H = 0.0094 \times \Delta\tau \quad \text{式 7.2.4-2}$$

表 7.2.4-1 試験材料と照射条件および照射試験片の分析結果

材料	照射条件					転位ループ		溶質クラスタ		硬さ		せん断強度の増加量			
	照射方法	温度 (°C)	照射量 (dpa)	照射速度 (dpa/s)	照射量 (dpa)	平均直径 (nm)	数密度 (/m³)	平均直径 (nm)	数密度 (/m³)	H (GPa)	ΔH (GPa)	Δτ (MPa)	Δτ <sub>l</sub> (MPa)	Δτ <sub>c</sub> (MPa)	
炭素鋼 (0.01%Cu)	未照射					0.001	0	0	0	2.21	0.00	0	0	0	
	Feイオン	90	0.1	1 × 10 <sup>-4</sup>	0.1	2.3	2.3E+22	2.2	1.7E+22	3.18	0.97	73	73	6	
			1	1 × 10 <sup>-4</sup>	1	2.1	5.6E+22	2.2	7.1E+22	3.20	0.98	110	109	13	
		290	0.1	1 × 10 <sup>-4</sup>	0.1	2.1	1.9E+22	2.2	1.9E+22	2.78	0.56	64	64	7	
			1	1 × 10 <sup>-4</sup>	1	2.1	3.1E+22	2.2	5.6E+23	3.09	0.88	88	81	35	
炭素鋼 (0.5%Cu)	未照射					0.001	0	0	2.0	2.9E+22	2.50	0.00	8	0	8
	Feイオン	90	0.01	1 × 10 <sup>-4</sup>	0.01	1.9	2.0E+22	2.4	7.6E+21	3.03	0.52	63	63	4	
			0.1	1 × 10 <sup>-4</sup>	0.1	2.1	3.1E+22	2.7	1.9E+22	3.46	0.96	82	81	7	
			1	1 × 10 <sup>-4</sup>	1	2.7	4.5E+22	2.3	1.9E+23	3.60	1.10	113	111	21	
		電子線	90	0.01	2 × 10 <sup>-8</sup>	0.009	2.3	4.1E+22	2.3	1.0E+23	3.16	0.65	97	96	15
FeMnSiCu合金 (0.5%Cu)	未照射					0.001	0	0	2.2	3.6E+21	2.36	0.00	3	0	3
	Feイオン	90	0.01	1 × 10 <sup>-4</sup>	0.01	2.1	3.4E+22	2.2	1.5E+22	2.90	0.54	84	83	6	
			0.1	1 × 10 <sup>-4</sup>	0.1	2.2	4.0E+22	2.2	7.5E+22	3.39	1.03	95	94	13	
			1	1 × 10 <sup>-4</sup>	1	2.3	4.8E+22	2.2	2.7E+23	3.61	1.25	107	105	24	
	電子線	90	0.01	2 × 10 <sup>-8</sup>	0.009	2.0	3.8E+22	2.1	3.8E+23	3.07	0.71	91	87	28	
FeCu合金 熱処理材 (0.5%Cu)	未照射					0.001	0	0	1.4	1.4E+23	2.10	0.00	14	0	14
	Feイオン	90	0.1	1 × 10 <sup>-4</sup>	0.1	2.1	4.7E+22	1.6	1.0E+24	3.02	0.92	106	98	40	
			1	1 × 10 <sup>-4</sup>	1	1.9	4.2E+22	1.6	1.8E+24	3.17	1.07	105	90	54	
炭素鋼溶接体 母材 (0.05%Cu)	未照射					0.001	0	0	0.0	0	2.30	0.00	0	0	0
炭素鋼溶接体 HAZ (0.05%Cu)	Feイオン	90	1	1 × 10 <sup>-4</sup>	0.95	2.4	5.5E+22	0.0	0	3.37	1.07	115	115	0	
			1	1 × 10 <sup>-4</sup>	0.95	2.3	3.9E+22	2.4	2.7E+22	3.44	0.87	96	96	8	
炭素鋼溶接体 溶金 (0.2%Cu)	未照射					0.001	0	0	2.4	6.8E+22	2.73	0.00	13	0	13
	Feイオン	90	1	1 × 10 <sup>-4</sup>	0.95	2.5	5.3E+22	2.2	4.2E+23	3.72	0.99	119	115	31	

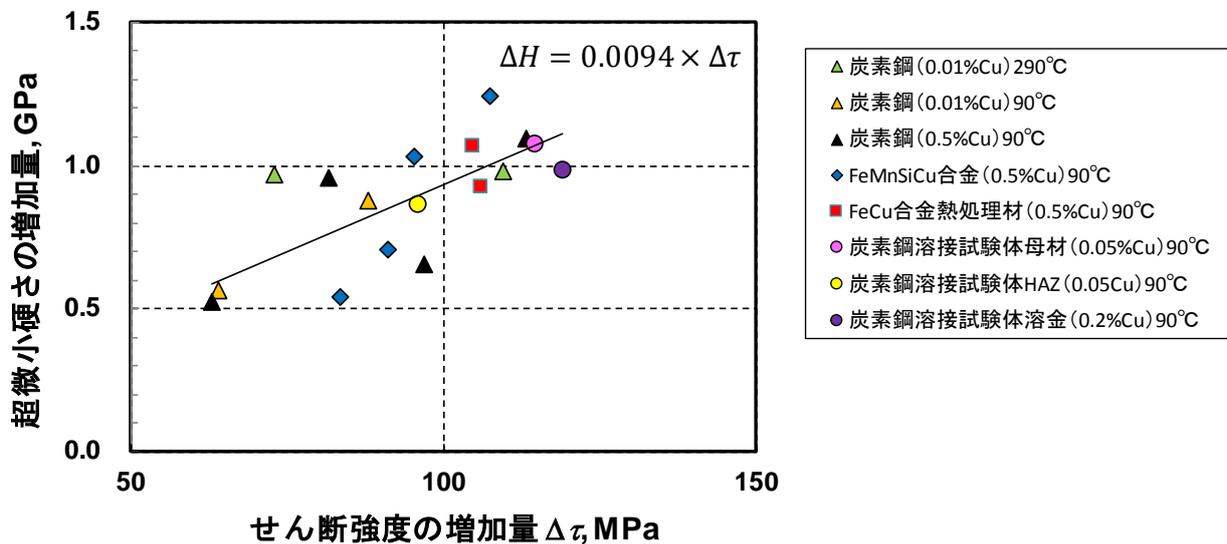


図 7.2.4-1 硬さの増加量ΔHと転位ループと溶質クラスタによるせん断強度の増加値Δτの関係

### 7.2.5 破壊靱性値の低下量と硬さの増加量の関係

平成 28 年度に実施した冷間圧延加工材（圧延率：5%～20%）を用いた破壊靱性試験と硬さ試験の結果[5]を整理した。破壊靱性試験の結果を表 7.2.5-1 に示す。全ての試験において、延性き裂進展量が前縁に沿って均一でなかったことから、Invalid 判定となった。したがって、弾塑性破

破壊靱性値は  $J_{IC}$  ではなく  $J_Q$  と表示した。また、加工のない CW0 の LT 方向については、延性が高く、制限荷重までに延性き裂が発生しなかったため、 $J_Q$  が得られなかった。表 7.2.5-1 に記載した破壊靱性値  $K$  は、 $J_Q$  を用いて式 7.2.5-1 から算出した。

$$K = \sqrt{\frac{J \times E}{(1 - \nu^2)}} \quad \text{式 7.2.5-1}$$

冷間加工材の硬さは、超微硬さ試験により測定した。超微小硬さ試験では、試料表面より押し込み深さを 150 nm に制御して圧子を押し込み、硬さを測定した。また、硬さは圧痕形成面の結晶方位の影響を受けるため、100 以上の結晶粒について測定し、それらの平均値を求めた。超微小硬さ試験の結果を表 7.2.5-1 に示す。

超微小硬さの増加量と破壊靱性値の低下量の関係を図 7.2.5-1 に示す。破壊靱性値についても LT 方向と TL 方向で大きな違いは認められていなかったため、双方のデータを併せて示した。なお、図中の実線は最小二乗法により求めた線形近似線である。硬さの増加に伴って、破壊靱性値の低下が認められた。せん断強度の増加値  $\Delta\tau$  と超微小硬さの増加量  $\Delta H$  の関係は、以下の式で近似した。

$$\Delta K = 321.88 \times \Delta H \quad \text{式 7.2.5-2}$$

表 7.2.5-1 破壊靱性試験と硬さ測定の結果

試験片	最大試験力 (kN)	$J_Q$ (kN/m)	$K^{(*1)}$ (MPam <sup>0.5</sup> )	超微小硬さ (GPa)
CW0-LT	48.1	$\geq 799^{(*2)}$	—	2.57
CW0-TL	45.6	589	368	2.60
CW5-LT	53.0	393	301	2.86
CW5-TL	49.0	455	325	2.78
CW10-LT	59.3	359	287	3.03
CW10-TL	61.7	338	281	2.95
CW15-LT	61.6	219	226	2.90
CW15-TL	61.4	186	208	2.95
CW20-LT	66.2	171	199	3.01
CW20-TL	65.0	174	201	3.08

(\*1)  $J_Q$  より換算した値

(\*2) 延性き裂が発生しなかった

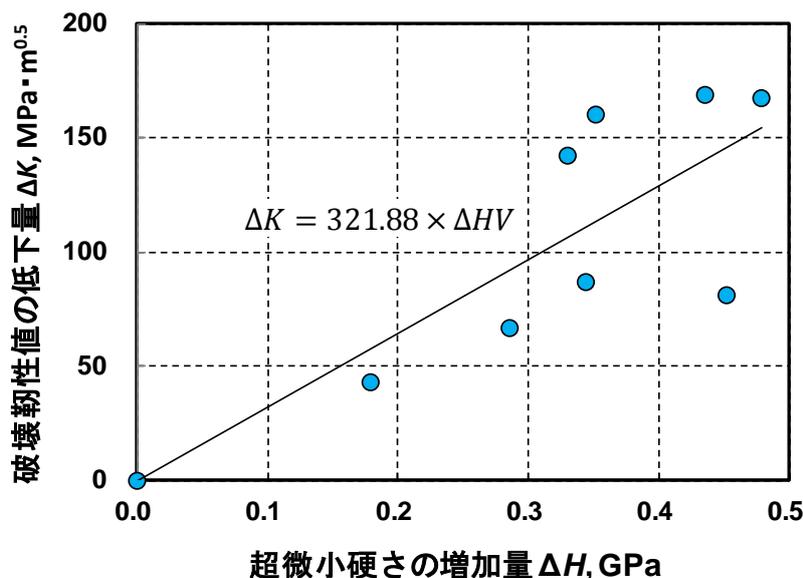


図 7.2.5-1 超微小硬さの増加量と破壊靱性値の低下量の関係

### 7.3 炭素鋼の照射損傷量の予測

照射脆化は、放射線の照射によって鉄鋼材料内のマイクロ構造が変化して生じる。照射脆化は、鉄鋼材料中において生じる、中性子線により直接的な原子はじき出し反応、およびガンマ線照射によりコンプトン効果や光電効果等により生じた電子による原子はじき出し反応に起因する。はじき出し反応により、材料内には空孔や格子間原子といった点欠陥が形成される。形成した点欠陥は拡散して、集合化し欠陥集合体を形成する。空孔集合体はボイドであり、格子間原子集合体は転位ループである。また、空孔は銅やマンガンなどの置換型原子の拡散に寄与し（空孔拡散機構）、照射により空孔濃度が上昇することで、置換型原子の拡散も活性化する。そして、銅などの置換型原子は集合化し、溶質原子析出物（クラスター）が形成される。材料の脆化は、このようにして形成された欠陥集合体が転位の運動を阻害することによって生じる。

これまで、オーバーパック材の照射脆化に関する研究の動向調査およびモンテカルロ法および反応速度論法を用いた材料内マイクロ構造変化の予測モデルの構築を行った。平成 26 年度は、オーバーパック材の照射脆化に関する研究の動向調査を行った[7]。オーバーパック材の照射脆化に関する先行研究は多くなく、長年の研究実績のある軽水炉圧力容器鋼の照射脆化を調査の対象とした。軽水炉圧力容器鋼の照射脆化を材料組織学的に見ると、照射により、ボイドや転位ループ、銅などの不純物元素の析出物等のナノレベルの微小欠陥集合体が形成し、それが転位運動の阻害要因となって材料の応力応答性の低下（いわゆる硬化や脆化）に至るとされている。現在の日本の原子力規制では、日本電気協会規程 JEAC4201-2007[9]-[12]に基づいた圧力容器鋼を対象とした脆化予測が行われている。しかしながら、JEAC4201-2007 の照射条件適応範囲は、軽水炉の照射条件（照射温度約 290°C、中性子照射フラックス  $1.0 \times 10^{11}$  n/cm<sup>2</sup>/s）であり、オーバーパックにおける照射条件[13]（照射温度 90°C、中性子照射フラックス  $3.5 \times 10^3$  n/cm<sup>2</sup>/s）と大きな乖離がある。特に注意すべき点は、中性子照射フラックスは軽水炉よりもオーバーパックの方が 8 桁も低いことである。なぜなら一般的に、中性子照射フラックスの低い条件ほど、中性子照射量

をそろえた場合の銅析出物（脆化種）の形成は相対的に促進されることが指摘されているからである[14]。すなわち、オーバーパックのように低照射速度の場合、軽水炉照射に比べて脆化は進行すると考えられる。

こうした課題を解決するためには、脆化の機構論に基づいてオーバーパックの照射条件での脆化予測に適用可能な新たな脆化予測法を開発する必要がある。平成 27 年度は、オーバーパック材の脆化の発生メカニズムをサブナノレベルで検討し、脆化種形成の予測に関する検討を行った[4]。具体的には、Fe 中 Cu リッチ析出物（銅-空孔集合体）の核生成プロセスをモンテカルロ法によりモデリングし、Cu リッチ析出物形成の損傷速度および照射温度依存性を明らかにした。このシミュレーションモデルでは、照射脆化の機構論を詳細に取り入れているため、広い照射条件の範囲で、脆化を表現できることが期待される。このモンテカルロシミュレーションによる結果として、中性子フラックスが低く、損傷速度が低い照射場では銅原子集合体が多く形成され、脆化が進むという傾向を再現することができた。また、オーバーパックの照射脆化を材料試験炉や電子線照射で模擬する場合は、形成される欠陥集合体の組成が異なることが分かった。

しかしながら、このモンテカルロ法を用いたシミュレーションモデルは、銅リッチ析出物の核生成について詳細に記述するものの、転位ループの形成については考慮していない。また、定常状態を仮定して得た欠陥濃度を用いており、析出物形成により変化するマトリクス中の欠陥濃度は表現しきれていない。そこで平成 28 年度は、反応速度論を用いて照射脆化予測モデルの構築を行った[5]。これにより、銅-空孔集合体だけでなく転位ループの形成も同時に考慮し、さらに析出物形成によって変化する欠陥濃度も表現できるようになった。照射による材料内マイクロ構造変化をより現実的にモデリングすることに成功した。本年度は、平成 28 年度に構築した反応速度論モデルのパラメータを調整し、照射試験結果を再現できるように照射脆化予測モデルの改良を行う。

### 7.3.1 炭素鋼の照射脆化予測モデル

#### (1) 欠陥集合体の核生成

照射脆化の要因である欠陥集合体の形成過程を核生成理論により表現する。核生成理論は、過飽和水蒸気から水滴が生成する現象および過冷却水が氷となる現象の詳細を扱う理論である。ここでは、系の自由エネルギーを液滴サイズの関数として記述し、あるサイズ（臨界サイズ）まで成長すると核生成したとして、核生成した液滴は安定に成長すると考える。材料照射損傷の場合では、液滴を欠陥集合体に置き換えて考えて、欠陥集合体の核生成について議論する。

図 7.3.1-1 に欠陥核生成エネルギーと集合体サイズの関係を模式的に示す。集合体サイズは、集合体の中に含まれる点欠陥の数により表している。核生成エネルギー $\Delta G$ は、欠陥がばらばらに点欠陥として存在した場合と集合体となって存在した場合のエネルギー差である。欠陥のサイズに対し、核生成エネルギーは極大値を持つ。極大値における集合体のサイズを臨界サイズと呼ぶ。臨界サイズまで成長した欠陥集合体においては、集合体から流出する欠陥のフラックスの平均 $\overline{j^{OUT}}$ より流入する欠陥のフラックスの平均 $\overline{j^{IN}}$ の方が大きくなるため、集合体は安定に成長する。臨界サイズよりも小さい集合体（エンブリオ）は、 $\overline{j^{OUT}} > \overline{j^{IN}}$ であるため平均的には欠陥集合体は収縮する。したがって、流入と流出の差で示される正味の流入フラックスだけでは核生成は生じないことになってしまう。

従来のモデルは臨界サイズが照射条件によらず一定であるという仮定がなされてきた。しかしながら、点欠陥の濃度は照射条件により変化し、その結果、臨界サイズも変化する。臨界サイズは欠陥の核生成速度、すなわち形成速度に大きく関わる。そのため、照射条件により変化する臨界サイズをしっかりと記述することは、加速照射実験による脆化と実使用条件での脆化を関係付けるためには重要である。

欠陥の流入と流出の2つのイベントを区別して記述することで、平均的には起こらない核生成を取り扱えるようにし、照射条件により変化する臨界サイズを理論的に表現した。より詳細な物理理論により核生成のプロセスを取り扱い、欠陥集合体核生成の照射条件依存性を明らかにすることは、照射脆化モデリングにおける脆化種の形成を考えるうえで重要となる。

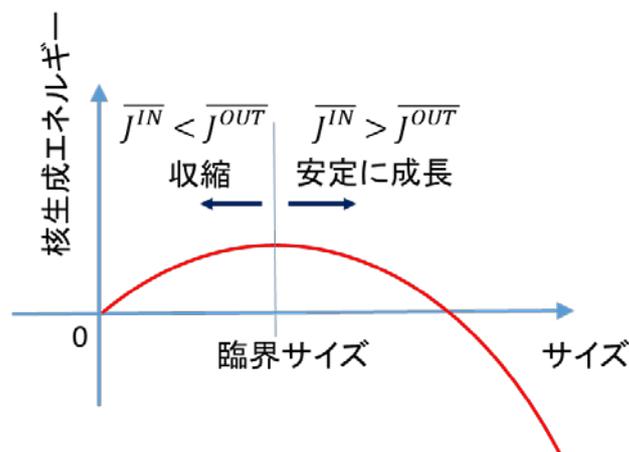


図 7.3.1-1 核生成エネルギーの集合体サイズ依存性

## (2) 反応速度論モデル

反応速度論とは、照射によって形成される点欠陥濃度および点欠陥が拡散して集まった集合体の濃度の時間変化を数式で示し、差分法により各欠陥濃度の時間発展を得る方法である。反応速度論は、原子はじき出し過程の時間スケール（～10<sup>-10</sup>秒）よりも長期の欠陥拡散過程（10<sup>-6</sup>秒～）の計算に用いることができるため、実験データとの比較が容易である。反応速度論モデルで用いられるパラメータは、原子スケールでのシミュレーション結果[15]や実験結果を用いることが多い。そのため、反応速度論モデルに分子動力学法を用いて評価されたエネルギー論を取り入れ、転位ループと溶質原子クラスター（銅-空孔集合体）の核生成プロセスを理論的に正しく扱うことが可能なモデルを構築した。モデルを構築するにあたって以下の仮定を行った。

- はじき出し損傷過程において自己格子間原子（SIA）と空孔が同数生成される。
- SIA と空孔、銅原子のみが材料中を拡散する。
- 欠陥の移動エネルギーは、実用鋼の実験結果[16][17]と同程度の値とする。
- 銅は空孔拡散機構で拡散するとし、拡散の活性化エネルギーは空孔の移動エネルギーと同じとする。
- 欠陥集合体は、格子間原子集合体（転位ループ）および銅-空孔集合体を取り扱う。

- 欠陥集合体のサイズは、集合体内部にある欠陥の数で定義する。
- 転位ループは円盤状として扱い、銅・空孔集合体は球状として扱う。
- 欠陥流出を表現するための欠陥集合体の各結合エネルギーは、分子動力学法による評価結果 [15]を用いる。
- 図 7.3.1-2 に示すように、溶質原子クラスター（銅・空孔集合体）は、集合体内部に存在する銅原子の数と空孔の数により、組成とサイズを定義する。例えば、図中の赤点は銅 1 つから成る欠陥であり、マトリクス中の 1 個の孤立した銅原子を意味する。青点は 1 個の孤立した空孔を意味する。 $V_3Cu_3$  は空孔 3 つ、銅原子 3 つから成る集合体を意味する。なお、ここでは集合体中の空孔数および銅原子数がそれぞれ 50 までの集合体を取り扱う。
- 図 7.3.1-2 中にあるように、銅・空孔集合体は SIA、空孔および銅原子の流入反応と流出反応を考慮する。集合体に空孔が流入すると、空孔が 1 つ増加するため集合体の組成は図中のグリッドの右方向に移動する。集合体から空孔が流出すると、空孔が 1 つ減少するため集合体の組成は図中のグリッドの左方向に移動する。集合体に SIA が流入すると空孔が 1 つ消滅するため、集合体の組成は図中のグリッドの左方向に移動する。集合体から SIA が流出すると空孔を 1 つ形成するため、集合体の組成は図中のグリッドの右方向に移動する。集合体に銅原子が流入すると、銅原子が 1 つ増加するため集合体の組成は図中のグリッドの上方向に移動する。集合体から銅原子が流出すると、銅原子が 1 つ減少するため集合体の組成は図中のグリッドの下方向に移動する。なお、空孔を含まない集合体への格子間原子の流入および空孔の流出、銅原子を含まない集合体からの銅の流出については考慮しない。
- 図 7.3.1-2 のグリッドを超えて大きく成長した集合体については、その集合体への各欠陥の流入および流出フラックスから平均サイズおよび平均組成の変化を追った。数密度に関しては、グリッドを超えた集合体の数から求めた。
- 転位ループは、格子間原子を 2 個含む集合体および不純物原子と格子間原子 1 個を臨界核として取り扱い、それ以上のサイズの集合体を転位ループとして定義した。不純物原子は炭素や窒素が相当する。ここでは、不純物原子を不動欠陥として仮定する。空孔および格子間原子の流入および流出フラックスから転位ループの平均直径および数密度の時間変化を追った（図 7.3.1-2）。
- 不純物原子と格子間原子の結合エネルギーは、格子間原子同士の結合エネルギーと同じとした。
- 点欠陥の消滅サイト（シンク）は転位線および材料表面を仮定し、SIA が優勢的に吸収される転位バイアスの効果を導入する。

以上の仮定のもと、点欠陥（格子間原子および空孔）の集合化や消滅、熱的解離を表現する反応速度式を図 7.3.1-2 のグリッドで示される集合体ごとに立てた。それぞれの式をギア法 [18]により数値積分し、欠陥濃度の経時変化を解いた。反応速度論モデルにおけるパラメータは表 7.3.1-1 に示すとおりである。また、反応速度論モデルにおいて調整するパラメータは以下の通りであり、これらのパラメータを実験条件に合わせて、実験結果を再現できるように調整する。

- 損傷速度 (dpa/s)
- 照射温度
- シンク強度 (転位密度)
- 銅の含有量
- 空孔および格子間原子の移動エネルギー
- 欠陥結合エネルギー
- 不純物原子の濃度

表 7.3.1-1 反応速度論モデルのパラメータ

格子定数	2.8665 Å [15]
格子間原子形成エネルギー	4.88 eV [15]
空孔形成エネルギー	1.70 eV [15]
銅原子形成エネルギー (置換型)	0.319 eV [15]
損傷効率	0.1 [19] (イオン照射) 1.0 (電子線照射)

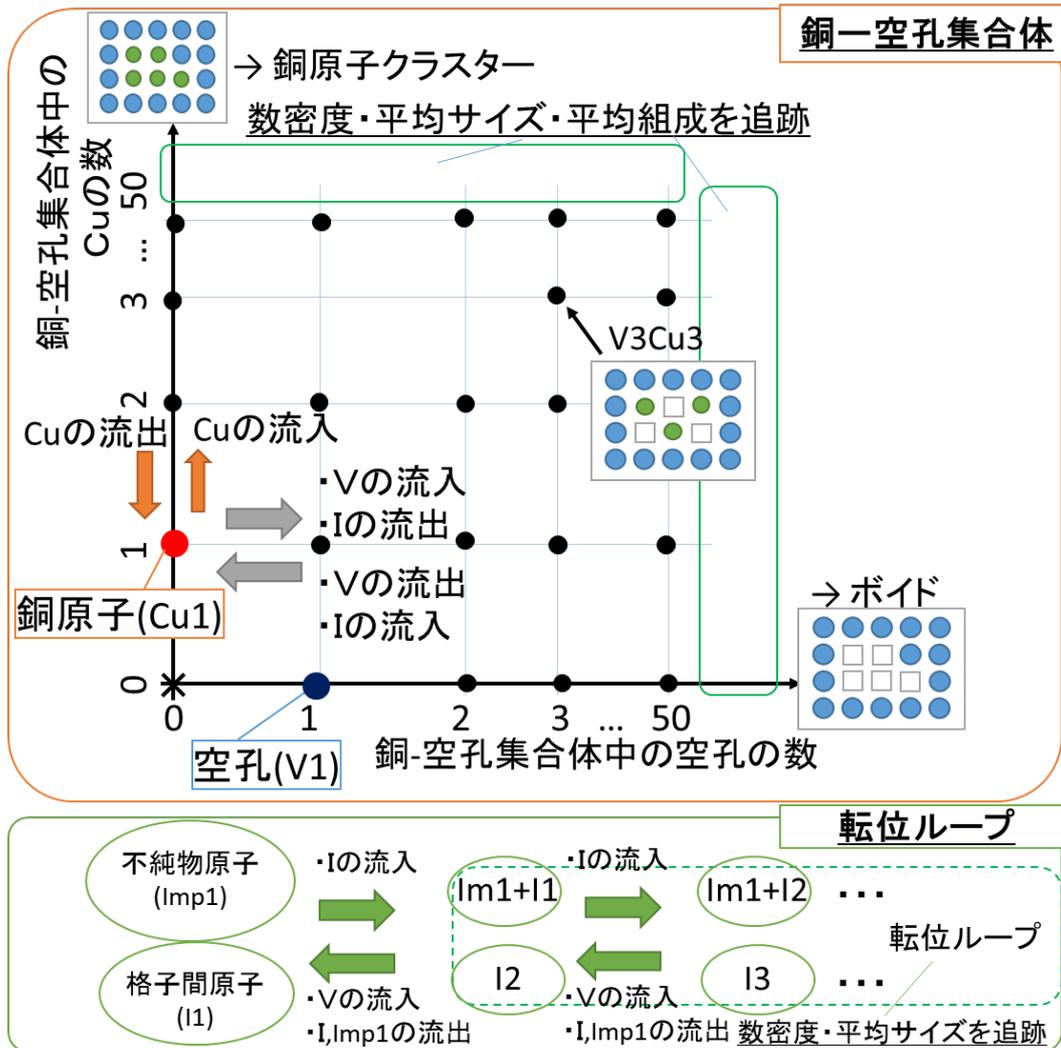


図 7.3.1-2 反応速度論モデルの概要

なお、硬化量および破壊靱性値は、昨年度までの知見や照射試験および文献調査を参考にして求める。照射欠陥の形成による硬化は、一般に Orowan モデル[20]を用いて算出される。Orowan モデルにおける降伏応力の増分への各欠陥集合体の寄与は以下の式により計算される。

$$\Delta\sigma_y^{\text{Loop}} = M\alpha_{\text{Loop}}\mu b\sqrt{N_{\text{Loop}}d_{\text{Loop}}} \quad \text{式(7.3.1-1)}$$

$$\Delta\sigma_y^{\text{Cluster}} = M\alpha_{\text{Cu-V cluster}}\mu b\sqrt{N_{\text{Cu-V cluster}}d_{\text{Cu-V cluster}}} \quad \text{式(7.3.1-2)}$$

ここで、 $\Delta\sigma_y^{\text{Loop}}$ は転位ループ形成による降伏応力の変化量、 $\Delta\sigma_y^{\text{Cluster}}$ は銅-空孔集合体の形成による降伏応力の変化量、 $N_{\text{Loop}}, N_{\text{Cu-V cluster}}$ は転位ループと銅-空孔集合体の平均直径、 $d_{\text{Loop}}, d_{\text{Cu-V cluster}}$ は転位ループと銅-空孔集合体の数密度である。 $\alpha_{\text{Loop}}$ は、転位ループの硬化指数であり 0.5 とし、 $\alpha_{\text{Cu-V cluster}}$ は、銅-空孔集合体の硬化指数であり 0.05 とした。 $\mu$ はせん断係数で

あり、76 GPa とした。b は転位のバーガースベクトルの大きさであり、0.28665 nm とした。M はテイラー因子であり、3.06 とした。照射にともなうマイクロ構造変化による材料の降伏応力  $\Delta\sigma_y^{\text{Total}}$  Pa の増加量は以下の式で求めることができる。

$$\Delta\sigma_y^{\text{Total}} = \sqrt{(\Delta\sigma_y^{\text{Loop}})^2 + (\Delta\sigma_y^{\text{Cluster}})^2} \quad \text{式(7.3.1-3)}$$

### 7.3.2 計算結果

#### (1) 照射による損傷量の計算結果の例

図 7.3.2-1 に、溶質原子クラスター（銅-空孔集合体）に関わる各欠陥の濃度（数密度）の時間変化を示す。照射条件は、電子線照射実験に相当する  $2 \times 10^{-8}$  dpa/s、90°C である。また、図中の Cu1 はマトリクス中の孤立した銅原子、Cu2 は銅原子が 2 つ集まった集合体、V1 はマトリクス中の孤立した空孔、V2 は空孔 2 つから成る集合体、V1Cu1 は空孔 1 つと銅原子 1 つから成る集合体、I1 はマトリクス中の孤立した格子間原子を意味する。空孔および格子間原子は照射により形成されるため、欠陥濃度は照射時間（照射量）の 1 乗に比例して増加する。空孔および格子間原子の濃度が上昇するにしたがい、欠陥集合体が形成され、その後、濃度は定常状態に達する。銅原子は最初から材料内に含まれているため、照射初期では銅原子濃度はマトリクス中の初期濃度であり、集合体が形成されるにつれてマトリクス中の孤立した銅原子の濃度は減少する。図 7.3.2-1 中には 6 種類の集合体のみを記述しているが、実際の計算では、銅-空孔集合体は空孔 50 個、銅原子 50 個を同時に含む集合体までの各サイズおよび組成での数密度の経時変化を計算している。図 7.3.2-2 は、転位ループに関わる各欠陥の濃度の時間変化を示す。I1 はマトリクス中の孤立した格子間原子、I2 は格子間原子が 2 個集まった集合体、Imp は不純物原子、I1Imp は格子間原子 1 つと不純物原子により構成される集合体、Loop は格子間原子 2 個以上の集合体および不純物原子と格子間原子 1 個以上から構成される集合体を意味する。照射により格子間原子 I1 が生成され、既に存在する不純物原子と結合して集合体が形成される。それに遅れて、格子間原子を 2 つ含む集合体 I2 の形成が始まる。各集合体の形成につれて転位ループの形成および不純物原子の消滅が確認できる。なお、格子間原子を 5 個含む集合体まで個別に計算を行っている。それを超えたサイズの集合体は数密度と平均直径を計算している。

各サイズと組成の集合体の濃度から、集合体の数密度、平均直径および平均組成を計算したものが図 7.3.2-3 である。図中には銅-空孔集合体だけでなく、転位ループの数密度と平均直径についても示してある。銅空孔集合体に関しては、銅原子を 20 個以上含む集合体から得た数密度、平均サイズおよび平均組成をプロットした。組成は、集合体中の銅原子の割合で定義した。組成が 1 であれば空孔を含まず銅原子だけで構成された集合体を意味する。照射量の増加に伴い、数密度および平均直径は増加し、定常状態に達する。転位ループについては、数密度は  $10^{-4}$  dpa の前後で変化率が異なる。これは、低照射量では不純物原子と格子間原子の結合による転位ループの形成が支配的であるのに対し、高照射量では不純物原子の枯渇により格子間原子同士の集合化による転位ループの形成が支配的になるためと考えられる。また、空孔や銅原子よりも格子間原子の移動エネルギーが低いため、比較的早い時間に格子間原子の集合体を形成する。そのため、転

位ループの数密度は比較的早期に増加して定常に達する。また、平均組成の結果から、銅原子多く含む集合体が形成されたのち、その集合体に空孔流入していることが分かる。このような結果は、陽電子消滅法による実験[21]において確認されている。また、損傷速度の低い照射場ではボイドより析出物が多く形成されるという実験結果[21]と一致する。本反応速度論モデルは一般に言われている照射脆化の傾向を表現できる。

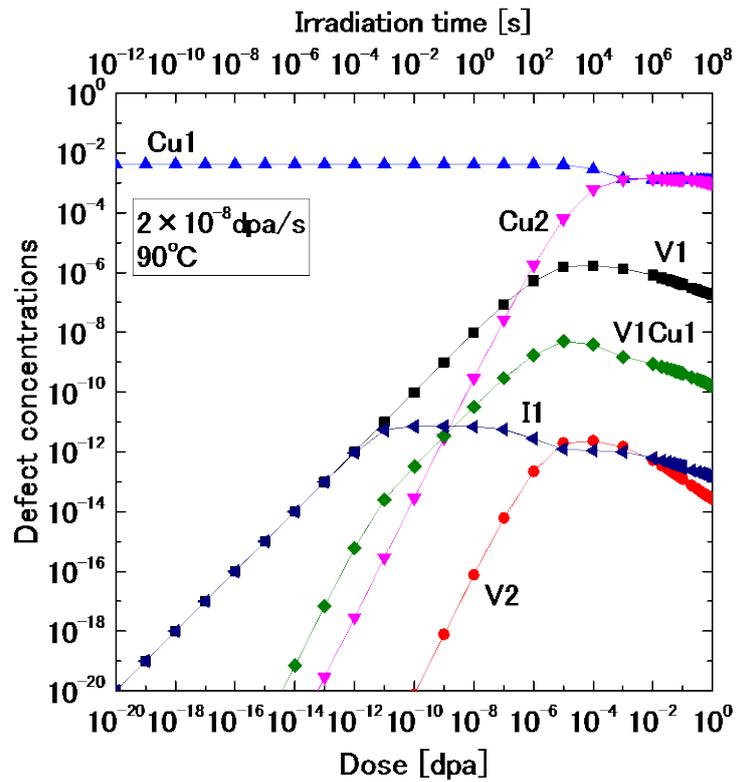


図 7.3.2-1 各欠陥濃度の照射量依存性

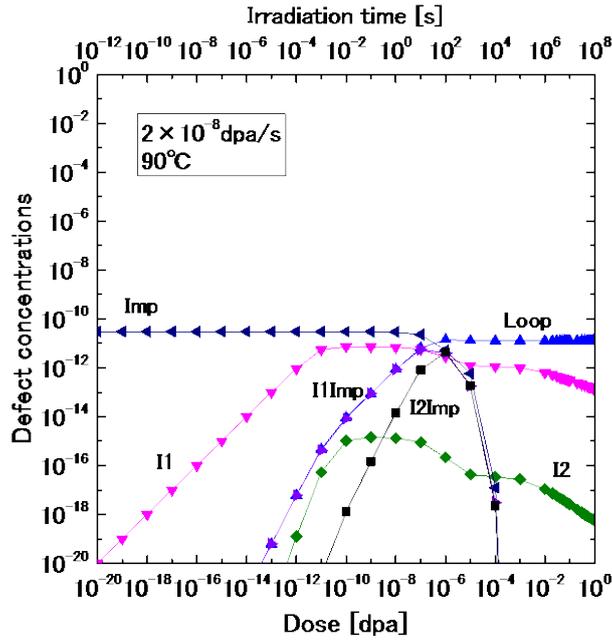


図 7.3.2-2 銅-空孔集合体の濃度変化

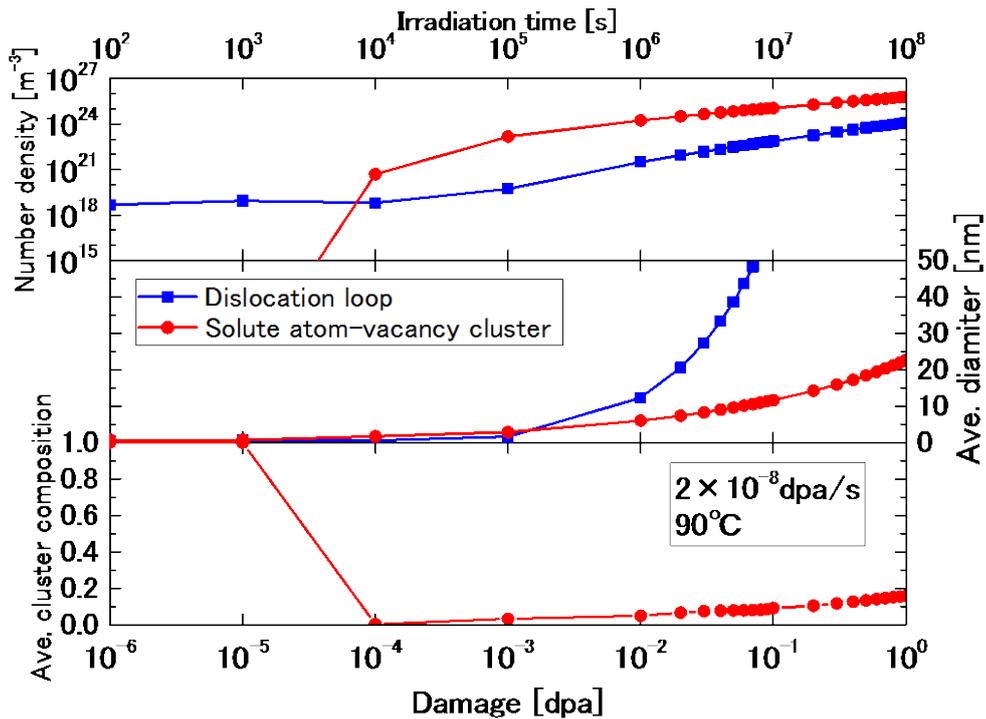


図 7.3.2-3 欠陥集合体の数密度、平均直径および平均組成の照射量依存性

## (2) 反応速度論モデルの最適化

反応速度論モデルにより 7.2 の照射試験の結果を再現できるよう、モデルのパラメータを調整して最適化を試みた。最適化の方針は、まず別途行われているイオン加速器による照射試験の結果に近づけるように計算パラメータを調整する。溶質原子クラスタおよび転位ループの平均直径

と数密度、硬さ分析の結果について試験結果と計算結果を合わせ込む。その後、イオン照射試験との比較で得たパラメータを使って、電子線照射試験の再現性について確認する。最後に、オーバーパックの照射損傷量を予測する。

照射試験におけるアトムプローブ分析方法や電子顕微鏡の観察結果と比較するため、計算における溶質原子クラスタは溶質原子を 20 個以上含む集合体と定義した。

実際に調整するパラメータは以下に示すとおりであり、照射温度、損傷速度および銅の含有量は照射試験片の分析値を使用する。

- 空孔および格子間原子、銅原子の移動エネルギー
- 欠陥結合エネルギー
- シンク強度（転位密度）
- 転位ループの形成に寄与する不純物原子の実効的な濃度
- 転位バイアス

空孔および格子間原子の移動エネルギーは、炭素等の元素により変化することが知られているため[22][23]、調整パラメータとする。なお、銅の拡散は空孔拡散機構とし、その移動の活性化エネルギーは空孔移動エネルギーと同じとする。

欠陥結合エネルギーは分子動力学法で得られた値を用いている。しかし、分子動力学シミュレーションで使われたポテンシャル関数の正確さ、添加元素、欠陥集合体の形状等の影響により分子動力学シミュレーションで得られた結合エネルギーと実際に鋼内部に形成された集合体が持つ結合エネルギーは異なる可能性がある。欠陥集合体からの点欠陥の解離は、結合エネルギーを使用してアレニウスの式により反応速度（解離速度）を求めるため、反応速度 $J^{\text{OUT}}$ と結合エネルギー $E_b$ には以下の関係がある。

$$J^{\text{OUT}} \propto \exp\left(-\frac{E_b}{kT}\right) \quad \text{式(7.3.2-1)}$$

ここで、 $k$ はボルツマン定数、 $T$ は温度（K）である。解析モデルには、分子動力学法で得られた結合エネルギー $E_b^{\text{MD}}$ を補正するためのパラメータ  $s$ を導入する。

$$E_b^{\text{Real}} = sE_b^{\text{MD}} \quad \text{式(7.3.2-2)}$$

ここで、 $E_b^{\text{Real}}$ は補正された結合エネルギーであり、パラメータ  $s$ により分子動力学法で得られた結合エネルギー $E_b^{\text{MD}}$ を定数倍変化させたことになる。また、本モデルでは転位ループとクラスタの 2 つを取り扱っているため、 $s_{\text{Loop}}$ と $s_{\text{Cluster}}$ の 2 つを取り扱い、照射温度が正確に管理できているイオン照射実験の結果を用いて、パラメータ $s_{\text{Loop}}$ と $s_{\text{Cluster}}$ を得た。

シンク強度については、転位および表面シンクを考慮する。イオン照射のような表面損傷では、転位だけでなく表面も点欠陥の吸収消滅サイトとして寄与することが知られている。また、転位

密度は測定範囲の違いによりバラつきが生じることを考慮し、シンク強度を調整パラメータとした。

転位バイアス  $B$  とは、転位線への空孔と格子間原子の捕獲率の違いであり以下の式で定義した。

$$B = \frac{Z_{sI} - Z_{sV}}{Z_{sI}} \quad \text{式(7.3.2-3)}$$

ここで、 $Z_s$  は転位線を想定したシンクの捕獲率であり、添え字  $I$  は格子間原子に対する捕獲率、添え字  $V$  は空孔に対する捕獲率を意味する。転位バイアスは、シミュレーション方法や材料中に含まれている元素等の様々な因子により変化することが知られている。この転位バイアスは、転位線だけでなく転位ループにも適用するため、 $B_{\text{Line}}$  と  $B_{\text{Loop}}$  の 2 つのパラメータを調節する。

マイクロ構造変化と硬さの関係において、欠陥集合体の数密度  $N$  と欠陥集合体の平均直径  $d$  の積の平方根  $\sqrt{Nd}$  が硬さと比例関係にあるとして上述したオロワンモデル等で使用される。求めるべき事項はオーバーパックの脆化量であるため、パラメータ調整は、照射によって形成される転位ループとクラスタの数密度と平均直径の計算値を実験結果に合わせるとともに、硬さ試験の実験結果と計算値も一致させるように行った。

イオン照射条件 (90°C、 $10^{-4}$  dpa/s) の実験結果を用いて計算パラメータの最適化を行った。計算で用いる照射温度および損傷速度は実験条件と同じとした。最適化にあたり、パラメータを数倍変化させると、クラスタおよび転位ループの数密度は数桁 (場合によっては数十桁) 異なる。このような中、実験結果に最も近い結果が得られた最終的なパラメータを表 7.3.2-1 に示す。計算における銅の含有量は、0.5wt% と実験条件にあわせた。なお、転位ループのバイアス  $B_{\text{Loop}}$  は、いくつかの値を与えて計算した。最適化された欠陥移動エネルギーは、空孔および格子間原子ともに実用鋼の実験結果で得られたものと同じ値となった。結合エネルギーについては、転位ループと格子間原子間の結合エネルギーを、分子動力学シミュレーションの結果よりも低めに設定する必要があることが分かった。これは、分子動力学シミュレーションが不純物を含まない体系であったことが原因の一つとして考えることができる。シンク強度は  $3 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$  となり、照射試験片の転位密度と同程度となった。

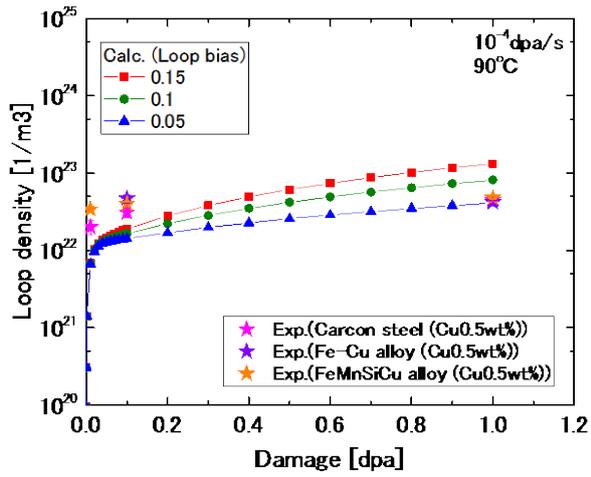
図 7.3.2-4 には、転位ループおよび溶質クラスタの数密度と平均直径について試験結果と計算結果を示している。なお、試験結果のエラーバーについては、転位ループおよびクラスタの平均直径の最大値と最小値である。試験結果の転位ループの数密度のエラーバーについては、2 視野の画像から数密度を取得しているため、それらの最大値と最小値である。計算値において、 $B_{\text{Loop}}$  を増加させると、転位ループへの格子間原子の流入が増えるため、転位ループの数密度と平均直径は増加する。したがって、転位ループの形成による脆化への貢献度は、転位ループのバイアス  $B_{\text{Loop}}$  の増加とともに増加することになる。

計算によって得られたマイクロ構造変化による、硬さの変化を上述のオロワンモデルにより表現した[20]。図 7.3.2-5 には降伏応力の増加量を照射量に対して示している。図中の赤線はクラスタ形成による脆化への寄与であり、青線は転位ループの形成による脆化への寄与である。また、星印およびエラーバーは実験で得られる微小硬さの平均値および最大値と最小値を上述の関係式に

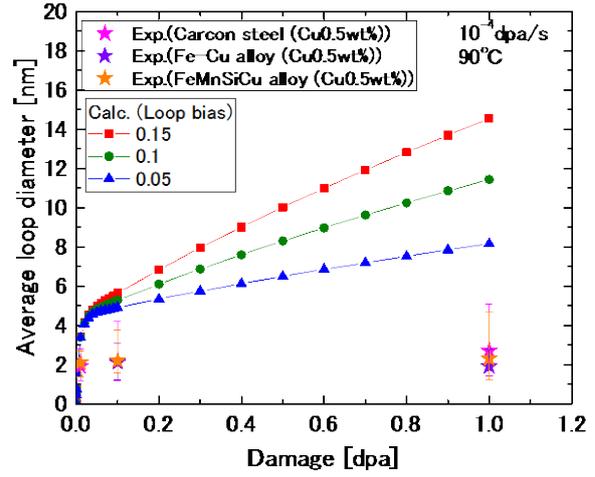
より降伏応力増加量に変換したものである。計算は試験を再現できており、イオン照射による実験では、転位ループの形成が脆化へ与える寄与が大きいことが分かる。図 7.3.2-6 は計算における照射温度を変化させたときの降伏応力の増分を示す。転位ループのバイアス $B_{Loop}$ が異なると、クラスターおよび転位ループの形成が異なるために降伏応力も数百 MPa 異なる。これは、計算では空孔流入を考慮しているため、空孔の寄与を把握できない試験結果よりも計算値が高くなったと考えられる。高照射量の照射効果予測を行う際は、過大評価する可能性がある。イオン照射条件（90°C、 $10^{-4}$  dpa/s）においては、図 7.3.2-4 に示すパラメータおよび転位ループのバイアス $B_{Loop}$ を 0.05 に設定することで、本計算モデルにより試験結果を再現できる。

表 7.3.2-1 最適化された反応速度論モデルのパラメータ

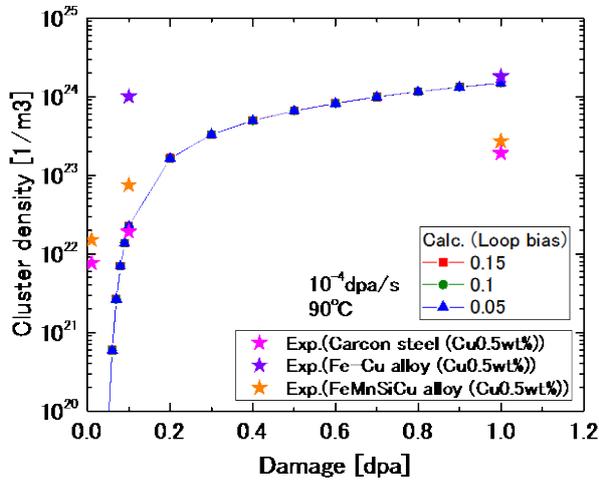
格子間原子移動エネルギー	0.3 [eV]
空孔移動エネルギー	0.74 [eV]
銅原子の拡散の活性化エネルギー	0.74 [eV]
転位ループの結合エネルギー調整パラメータ $S_{Loop}$	0.65
クラスターの結合エネルギー調整パラメータ $S_{Cluster}$	1.0
シンク強度（転位密度）	$3 \times 10^{13}$ [ $m^{-2}$ ]
転位ループの形成に寄与する不純物原子の実効的な濃度	$3 \times 10^{-11}$
転位線に関するバイアス $B_{Line}$	0.22
転位ループに関するバイアス $B_{Loop}$	0.05, 0.1, 0.15



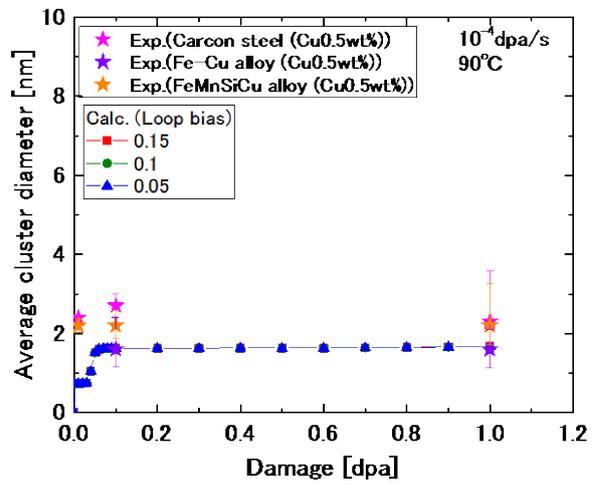
(a) 転位ループの数密度



(b) 転位ループの平均直径



(c) 溶質クラスタの数密度



(d) 溶質クラスタの平均直径

図 7.3.2-4 イオン照射による欠陥集合体形成の実験値と計算値の比較

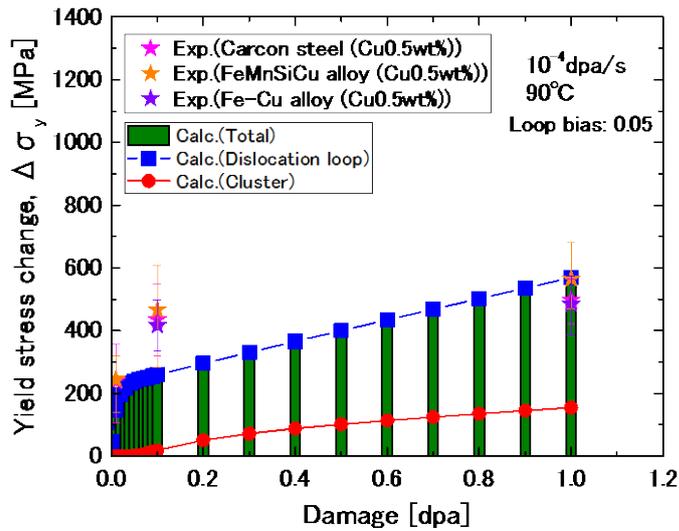


図 7.3.2-5 イオン照射による降伏応力変化の実験値と計算値の比較

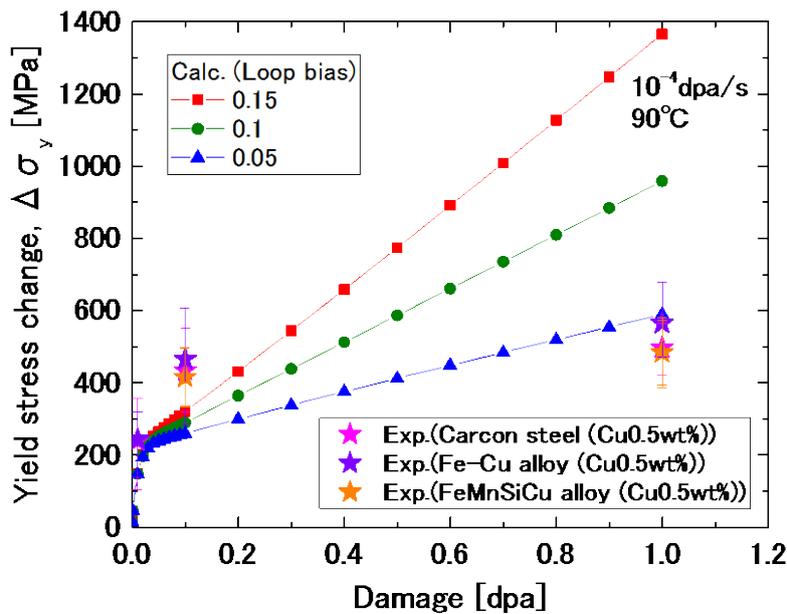


図 7.3.2-6 降伏応力変化の計算値の照射温度依存性

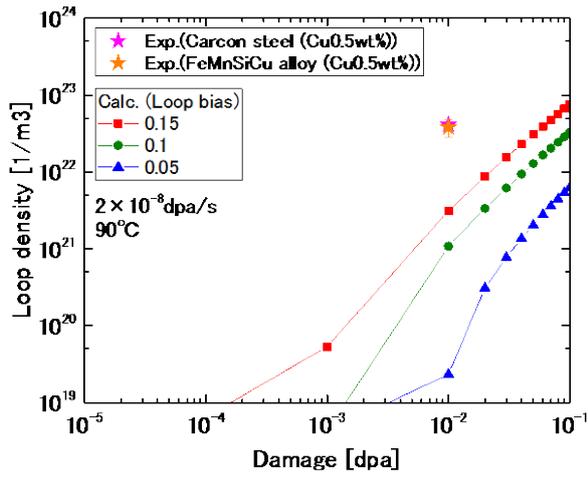
次に、表 7.3.2-1 に示すイオン照射試験で得られた反応速度論モデルのパラメータを用いて、損傷速度が 4 桁低い電子線照射による実験結果と計算結果を比較した。計算における損傷速度の設定値を実験値と同じ  $2 \times 10^{-8}$  dpa/s とし、照射温度は  $90^\circ\text{C}$  とした。

図 7.3.2-7 は転位ループおよび溶質クラスタの数密度と平均直径の計算値および試験値を照射量に対して示している。なお、試験結果のエラーバーについては、転位ループおよびクラスタの平均直径の最大値と最小値である。試験結果の転位ループの数密度のエラーバーについては、2 視野の画像から数密度を取得しているため、それらの最大値と最小値である。イオン照射試験を再現した転位ループのバイアス  $B_{\text{Loop}}$  を 0.05 にした計算結果では、クラスタの数密度は試験値と比

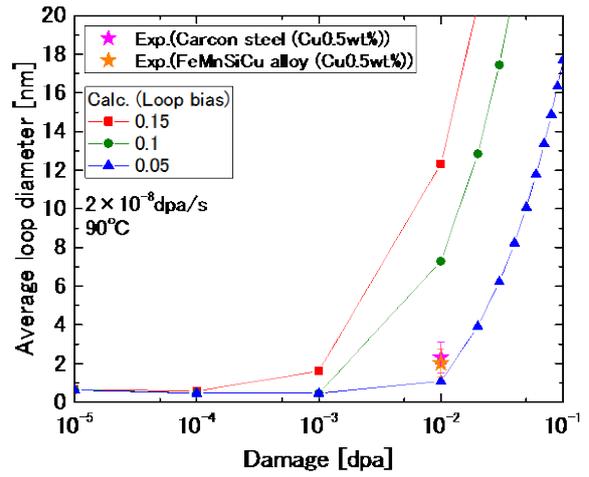
べて1桁高い。また、クラスタの平均直径は計算値が実験値を2~3倍上回っている。これらは、計算モデルにおける溶質原子クラスタに空孔を含むため、空孔の影響が生じることによる数密度と平均直径が大きくなったことが原因の一つとして考えられる。また、転位ループの数密度は試験よりも計算値が3桁ほど低い。なお、試験結果では転位ループの数密度について損傷速度依存性が大きく表れていない。計算において損傷速度依存性が現れたことについて考えると、損傷速度の違いにより同じ照射量でもイオン照射より電子線照射の方が4桁だけ照射時間が長くなる。この時間の違いによって格子間原子のシンクへの消滅反応はイオン照射試験と電子線照射試験で異なり、照射時間が長い電子線照射の方が多く吸収消滅反応が生じる。そのため、格子間原子の濃度は、同じ照射量でも電子線照射の方が低くなる。したがって、計算によって得られる、イオン照射により形成される転位ループの数密度よりも、電子線照射によって形成する転位ループの数密度の方が小さくなったと考えられる。このことから、さらに損傷速度の低いオーバーパックの照射条件では、格子間原子の拡散に十分な時間があるためシンクへの吸収消滅反応が生じて、転位ループはほぼ形成されないと考えることができる。

図 7.3.2-8 にはオロワンモデルによる降伏応力の増加量の計算値と硬さ試験で得られた結果を示す。図中の赤線はクラスタ形成による脆化への寄与であり、青線は転位ループの形成による脆化への寄与である。図 7.3.2-8 中の星印は微小硬さ試験結果を降伏応力増加量へ変換したものである。転位ループおよびクラスタの数密度が実験より低いものの、それらの平均サイズは実験よりも大きいため、降伏応力の増加量は計算値と実験値で近い値になっている。電子線照射では転位ループ形成による脆化への寄与が大きく、0.1 dpa 付近以降の照射量では、クラスタの寄与も大きくなる。

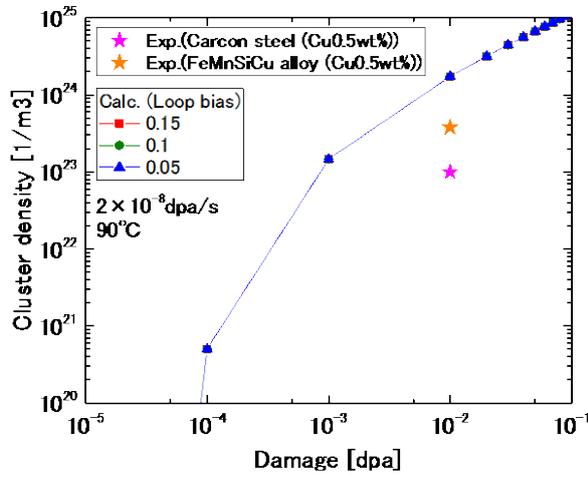
電子線照射実験は実験条件の管理が難しく、実験で生じるあいまいさが大きい。例えば、照射温度は、電子線による試験体等の発熱と冷却水の除熱のバランスにより管理している。冷却水最下流部の冷却水平均温度は90°Cであるもの、そこから6 cmほど上流側では条件によっては60°Cと低くなる。また、この温度管理に伴ってビーム強度を変化させるため損傷速度が1.5倍程度変化すること、総照射時間は172時間であるが3回に分けて照射していること等に起因する試験上のあいまいさが存在する。電子線照射条件(90°C、 $2 \times 10^{-8}$  dpa/s)における計算値と試験結果の比較により、予測計算には、転位ループおよびクラスタの数密度は1~3桁、直径については2~3倍程度のあいまいさが生じることが分かった。



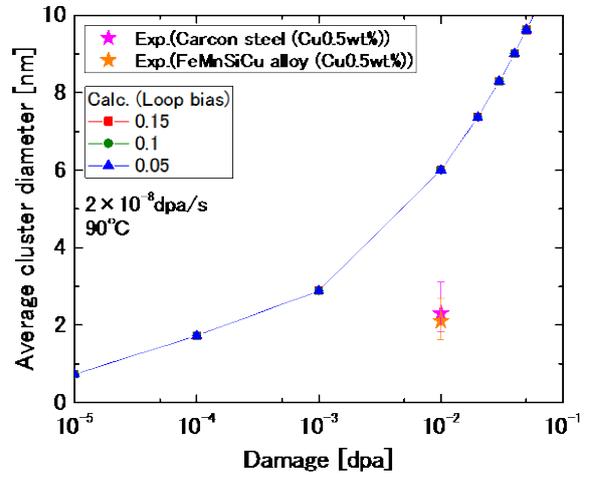
(a) 転位ループの数密度



(b) 転位ループの平均直径



(c) 溶質クラスタの数密度



(d) 溶質クラスタの平均直径

図 7.3.2-7 電子線照射による欠陥集合体形成の実験値と計算値の比較

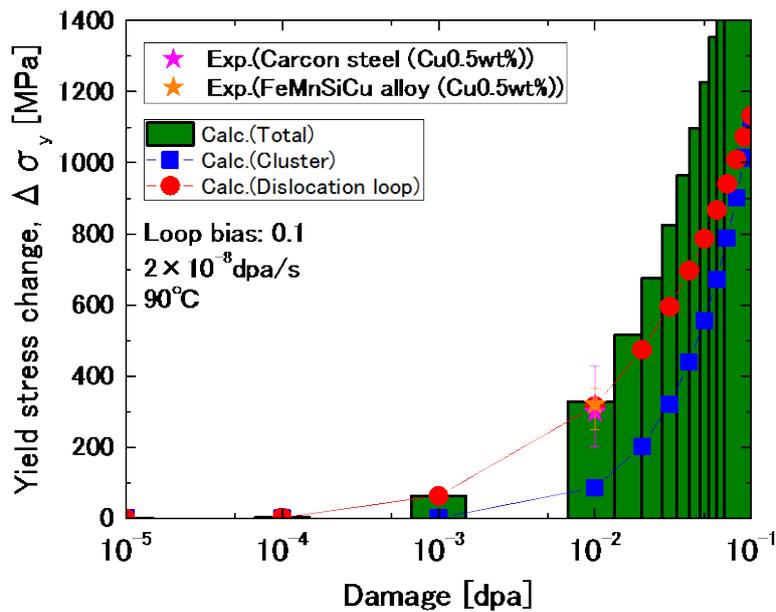


図 7.3.2-8 電子線照射による降伏応力変化の実験値と計算値の比較

### 7.3.3 オーバーパックの照射損傷量の予測

ここまで、イオン照射実験結果を表現できるように脆化予測モデルのパラメータを調節し、電子線照射実験の結果と計算結果の比較から、計算モデルによる予測には照射によって形成される転位ループおよびクラスタの数密度は1~3桁、平均直径は2~3倍程度のあいまいさが含まれることが分かった。これらのあいまいさがあることを念頭に、損傷速度を $10^{-16}$  dpa/s というオーバーパックの照射条件に合わせて計算を行い、脆化量を予測する。

イオン照射実験や電子線照射実験をもとにオーバーパックの脆化量を予測する方針を模式的に示したものが図 7.3.3-1 である。図中に示す星印の条件における脆化量は、試験を行うことで把握が可能である。イオン照射や電子線照射の損傷速度よりもオーバーパックの損傷速度の方が非常に小さい。損傷フラックスが低いほど、同じ照射量でも脆化が進むことが知られている。オーバーパックの照射条件は、イオン照射試験より12桁も損傷速度が低く、電子線照射試験より8桁も損傷速度が低いため、これらの試験での評価よりも脆化が進む可能性がある。一方で、イオン照射試験や電子線照射試験で得られる照射量は数ミリ dpa 以上であり、オーバーパック条件では1,000年間の照射量が $10^{-6}$  dpa と非常に小さいため、大きく脆化しない可能性もある。

これらの兼ね合いを試験結果のみで検討して、オーバーパック脆化量を予測することは困難である。特に、オーバーパックの照射条件は現実的な照射試験が不可能であり、脆化予測を行うには外挿性が求められる。外挿性を担保するには、照射脆化の機構論を取り扱う理論的モデルが必要である。反応速度論モデルは、照射脆化の物理を詳細に取り入れているため、外挿時においても妥当な予測ができると考えられる。この反応速度論モデルを用いてオーバーパックの照射損傷量を予測する。

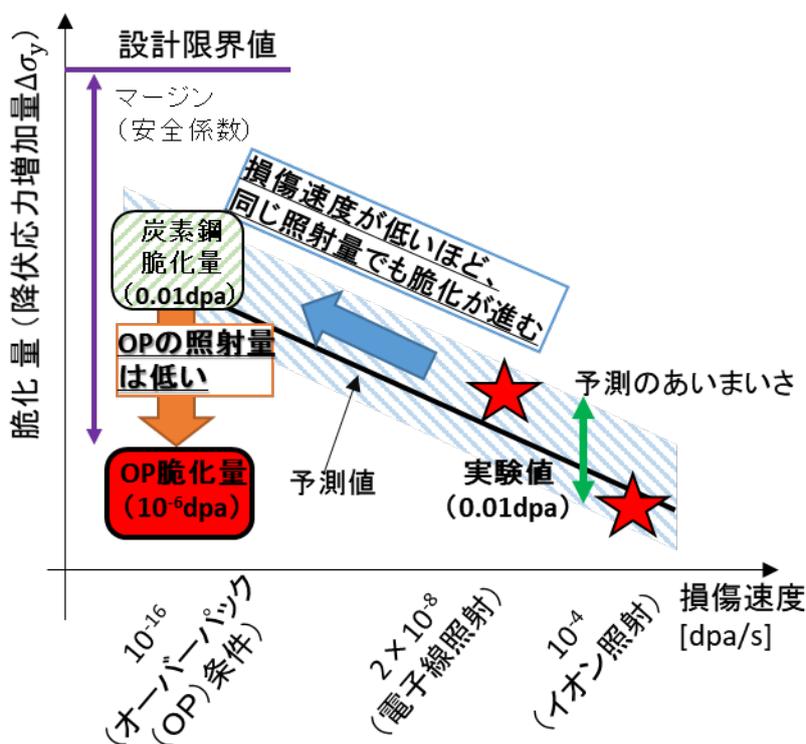
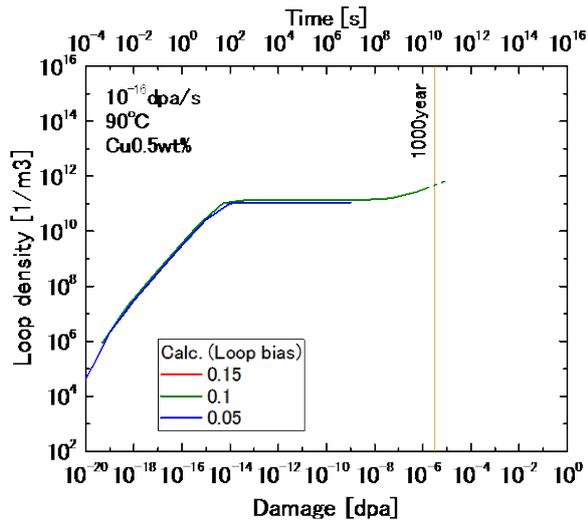


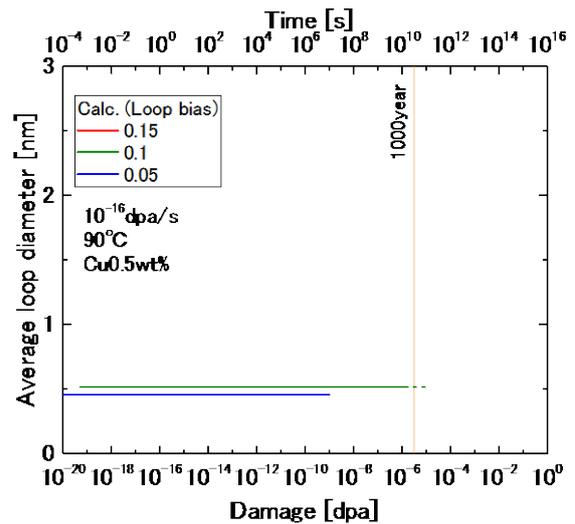
図 7.3.3-1 オーバーパックの脆化量とイオンおよび電子線による照射脆化量の関係の模式図

反応速度論モデルによりオーバーパックの照射条件（損傷速度  $10^{-16}$  dpa/s、照射温度  $90^{\circ}\text{C}$ ）における脆化量を算出した。図 7.3.3-2 に転位ループおよびクラスタの数密度と平均直径を示す。なお、1,000 年という長時間にわたる計算では、数値の発散により 1000 年まで到達できない場合がある。本計算モデルは、転位ループとクラスタの形成をモデリングしているため、これらの形成が確認された後の外挿は合理的であると考えられる。そこで、反応速度式を数値積分しても 1,000 年まで到達できない場合は、欠陥濃度の時間発展の傾きを維持したまま外挿して欠陥濃度を得た。転位ループバイアスが 0.1 の計算結果において、転位ループは 10 s まで形成されて飽和し、クラスタは  $10^9$  s 付近から形成され始めることから、転位ループとクラスタの両方の形成が確認されたため、1,000 年までの欠陥蓄積量を外挿により求めた。それでも、クラスタおよび転位ループの数密度は極めて低く、電子顕微鏡やアトムプローブ試験では確認できないほど小さい。すなわち、オーバーパックが 1,000 年間照射を受けても、マイクロ構造はほとんど変化しないと考えることができる。

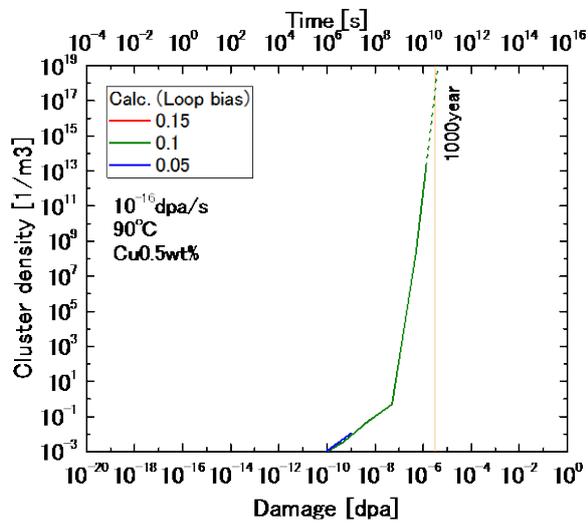
マイクロ構造変化の計算結果をもとに降伏応力の変化値を求めた。照射量に対する降伏応力増加量を図 7.3.3-3 に示す。転位ループおよびクラスタの形成に合わせて降伏応力も増加する。特に、 $10^9$  s 付近において、クラスタが形成し始めるために降伏応力が大きく増加する。また、照射試験と比較した結果から、転位ループおよびクラスタの数密度は 3 桁、それらの平均直径は 3 倍ほどあいまいさを持つことが示唆された。そこで、図 7.3.3-2 に示す計算で得られた転位ループおよびクラスタの数密度を 3 桁高くし、それらの平均直径を 3 倍にした時の降伏応力の増分についても図 7.3.3-3 中に示した。時間の増加とともに降伏応力は増加するものの、保守的に評価しても降伏応力の増分はオーバーパック処分後 1,000 年の時点で 48 kPa 程度であった。



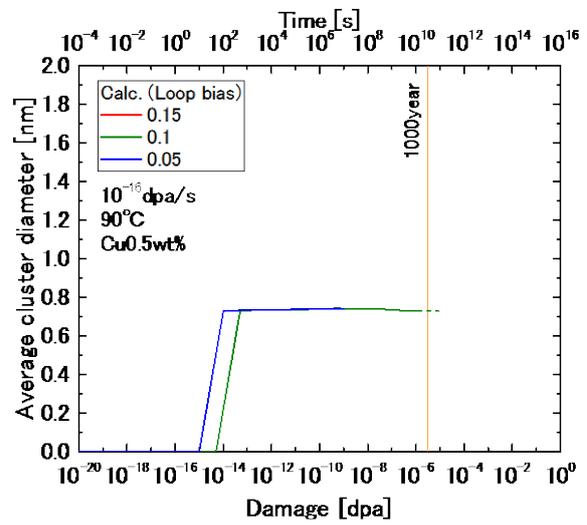
(a) 転位ループの数密度



(b) 転位ループの平均直径



(c) 溶質クラスタの数密度



(d) 溶質クラスタの平均直径

図 7.3.3-2 オーバーパックにおける照射による欠陥集合体形成の照射量依存性

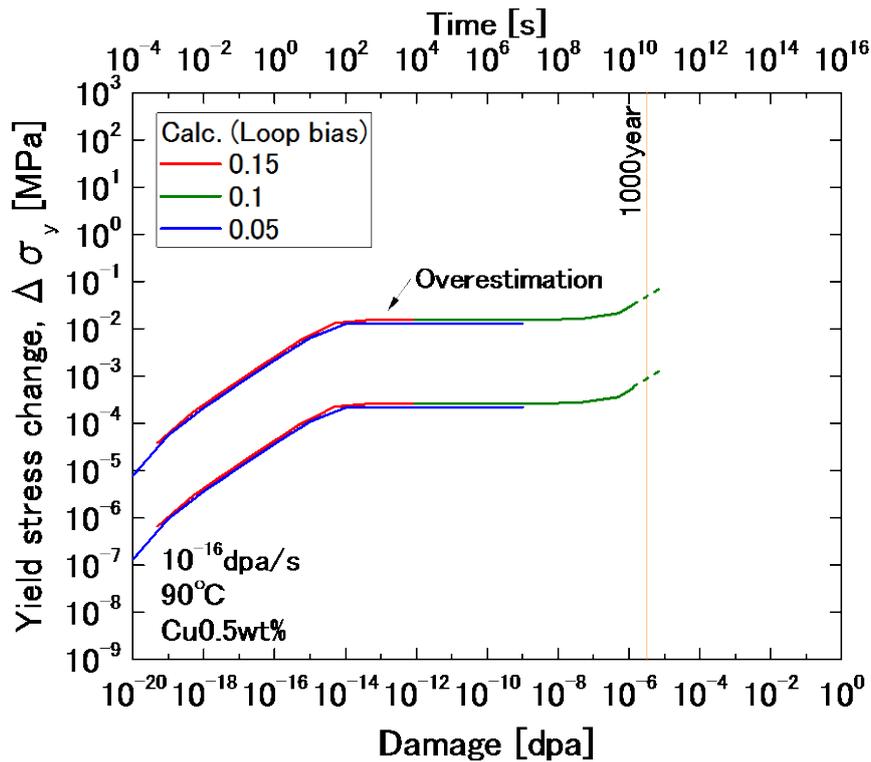


図 7.3.3-3 オーバーパック（炭素鋼）の降伏応力増加量の照射量依存性

#### 7.4 炭素鋼の破壊靱性値の低下量の推定

図 7.3.3-3 に示した炭素鋼の照射量と降伏応力の増加量の関係から、1,000 年後の降伏応力の増加量を保守的に見積もった結果、約 48 kPa となった。照射試験の結果から得られたせん断強度の増加量と硬さの増加量の関係（式 7.2.4-2）を用いると、1,000 年後の超微小硬さの増加量は  $4.51 \times 10^{-4}$  GPa となる。さらに、式 7.2.5-1 を用いると、1,000 年後の破壊靱性値の低下量は  $1.45 \times 10^{-1} \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  となった。表 7.2.5-1 に示した炭素鋼 SM400B の冷間圧延加工なしの破壊靱性値  $K$  は  $368 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  であったため、1,000 年間の破壊靱性値の低下量は無視できるほど小さいことがわかった。

#### 7.5 本章のまとめ

ガラス固化体から放出される放射線によるオーバーパック（炭素鋼）の破壊靱性値の低下量を予測することを目的として、照射試験片の TEM 観察と 3 次元アトムプローブ分析および解析による照射損傷量の予測を行った。得られた結果を以下に示す。

- 超微小硬さ試験による硬さ測定と APT および TEM によるマイクロ組織分析を実施した結果、Mn、Si、Cu 濃度が高い溶接部で溶質クラスターの形成が最も促進されることが分かった。また、照射速度の減少は溶質クラスターの形成を促進し、硬さの増加量を上昇させることが分かった。
- 3 年間の照射試験で得られた結果について総合評価を行い、炭素鋼の脆化因子に対する照射温度、材料組成、照射速度および溶接の影響を整理した。

- 照射試験に最も近い結果が得られた解析パラメータは、空孔移動エネルギーで 0.74 eV、格子間原子移動エネルギーで 0.3 eV であり、欠陥結合エネルギーを補正するパラメータ  $s$  は、転位ループについては 0.65、クラスタについては 1.0 であった。また、シンク強度は  $3 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$ 、転位ループの形成に寄与する不純物原子の実効的な濃度は 0.03 ppb、転位線に関するバイアス効果は 0.22、転位ループに関するバイアス効果は 0.05 であった。
- 上記のパラメータを用いて電子線照射試験の再現性について評価した結果、形成される転位ループおよびクラスタの数密度は 1~3 桁、平均直径は 2~3 倍程度異なり、解析による予測値には、このようなあいまいさが含まれることが分かった。
- 解析により求めた転位ループおよびクラスタの数密度を 3 桁、平均直径を 3 倍として保守的に損傷量を評価した場合でも、オーバーパックの照射条件で炭素鋼の 1,000 年間の降伏応力の増加量は最大で 48 kPa 程度であった。
- 照射に伴うマイクロ組織の変化量と硬さの増加量との関係を解析により求め、照射試験の結果から得られた損傷量と硬さの関係、照射材を模擬した冷間加工材を用いた破壊靱性試験と硬さ試験の結果を用いて埋設 1,000 年後のオーバーパックの脆化量を推定した結果、破壊靱性値の低下量は無視できるほど小さいことがわかった。

## 第7章 参考文献

- [1] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成19年度地層処分技術調査等委託 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書(第2分冊)－人工バリア品質評価技術の開発(2008).
- [2] J.F. Ziegler, J.P. Biersak, SRIM 2006, <<http://www.srim.org/>>.
- [3] 日本原子力学会「微小試験片材料評価技術」研究専門委員会編、微小試験片材料評価技術の進歩(1992).
- [4] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成27年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書(第1分冊) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築－オーバーパック(2016).
- [5] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成28年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書(第1分冊) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築－オーバーパック(2017).
- [6] K. Fujii, K. Fukuya, Characterization of defect clusters in ion-irradiated A533B steel, J. Nucl. Mat. 336, pp.323-330 (2005).
- [7] 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成26年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書(第1分冊) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築－オーバーパック(2015).
- [8] 日本金属学会編、改訂4版金属データブック.
- [9] 日本電気協会、原子炉構造材の監視 試験方法、JEAC 4201-2007(2007).
- [10] 日本電気協会、原子炉構造材の監視 試験方法、JEAC 4201-2007[2013年追補版](2013).
- [11] 曾根田直樹、土肥謙次ほか、軽水炉圧力容器鋼材の照射脆化予測法の式化に関する研究 - 照射脆化予測法の開発、電力中央研究所 報告書、研究報告:Q06019(2007).
- [12] 曾根田直樹、中島健一ほか、原子炉圧力容器鋼の照射脆化予測法の改良-高照射試験データの予測の改善、電力中央研究所 報告書、研究報告:Q12007(2013).
- [13] Hidekazu ASANO, Masanori ARITOMI, Long-Term Integrity of Waste Package Final Closure for HLW Geological Disposal, (VI) Consistency of the Structural Integrity Evaluation Model for the Weld Joint, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.47-1, pp.70-83, (2010).
- [14] Y. Nagai, T. Toyama, Y. Nishiyama, M. Suzuki, Z. Tang, and M. Hasegawa, Kinetics of irradiation-induced Cu precipitation in nuclear reactor pressure vessel steels, Applied Physics Letters, Vol.87, 261920, (2005).
- [15] K. Morishita, R. Sugano, B.D. Wirth, T. Diaz de la Rubia, Thermal stability of helium-vacancy clusters in iron, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, Vol. 202, pp. 76-81, (2015).
- [16] N. Hashimoto, H. Tanigawa, H. Kinoshita, S. Ohnuki, Multiple-beam irradiation effects in electron-beam-welded F82H joint, Journal of Nuclear Materials, Vol. 417, pp.

- 1009-1012, (2011).
- [17] N. Hashimoto, J. Tanimoto, T. Kubota, H. Kinoshita, S. Ohnuki, Analysis of helium and hydrogen effect on RAFS by means of multi-beam electron microscope, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 442, pp. S796-S799, (2013).
  - [18] S. D. Cohen and A. C. Hindmarsh, "CVODE, A Stiff/Nonstiff ODE Solver in C," *Computers in Physics*, Vol.10 (2), pp. 138-143, (1996).
  - [19] B.N. Singh, S.I. Golubov, H. Trinkaus, A. Serra, Yu.N. Osetsky and A.V. Barashev, Aspects of microstructure evolution under cascade damage conditions, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 251, pp. 107-122, (1997).
  - [20] Gary S. Was, *Fundamentals of Radiation Materials Science*, Springer, p.601, (2007).
  - [21] Q. Xu and T. Yoshiie, "Effects of damage rate on Cu precipitation in Fe–Cu model alloys under neutron irradiation", *Philosophical Magazine*, Vol. 91, pp.3716-3726, (2011).
  - [22] Chu-Chun Fu, E. Meslin, A. Barbu, F. Willaime and V. Oison, Effect of C on Vacancy Migration in  $\alpha$ -Iron, *Solid State Phenomena* Vol. 139, pp 157-164, (2008).
  - [23] Y. Abe, T. Suzudo, S. Jitsukawa, T. Tsuru and T. Tsukada, Effects of Carbon Impurity on Microstructural Evolution in Irradiated  $\alpha$ -Iron, *Fusion Science and Technology* Vol.62-1, pp.139-144, (2012).

## 第8章 オーバーパックの強度評価

### 8.1 背景および目的

『わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ』（以下、第2次取りまとめ）において、オーバーパックの候補材料や長期挙動を評価するための腐食シナリオが提示された。原環センターでは平成24年度までに、オーバーパックの製作・施工性に関する検討を実施し、溶接封入技術や非破壊検査技術の適用性を示すとともに、溶接部の腐食評価および封入技術として溶接手法の妥当性を示した。

現在想定されているオーバーパックは、190 mmの比較的大きな板厚を有している。そのため、蓋の溶接時には、溶接品質や検査精度などに対して、注意深い取扱いが要求される。そして、これまでのオーバーパックに対する健全性評価では、破壊モードとして溶接欠陥を起点とした脆性破壊を想定し、種々の欠陥サイズに対する応力拡大係数を解析することで、許容される溶接欠陥寸法、および許容される残留応力の大きさを検討してきた。

従来の検討では190 mmの全板厚に対して溶接を行うことを前提としてきた。しかし、オーバーパックに要求される機能を考えた場合、全板厚190 mmにわたって溶接を行う必要は必ずしもない可能性がある。オーバーパックの板厚は、遮蔽要求から決まる150 mmの板厚に減肉代を考慮したものである。そして、構造強度の観点からは110 mmの板厚が要求されている。ここで、110 mmまで減肉した状態を想定した場合、溶接部は110 mmの全板厚が結合されている必要はなく、ある程度の溶接部（結合部）が残存していれば、外圧等に対する強度が確保できる可能性がある。例えば、図7.3.3-1に示すように、20 mmの溶接結合部で構造強度が確保されるのであれば、外面から100 mmの深さまで溶接することで、減肉後も20 mmの溶接結合部が確保されることになる。溶接深さを小さくできれば、溶接が容易になり、溶接ならびに溶接後検査の品質向上が期待できる。そして、構造健全性の観点からは、溶接欠陥が少なくなることで、溶接欠陥を起点とした破壊のリスクが小さくなる。さらに、溶接深さが浅くなれば、照射量が相対的に大きくなる内面近傍での溶接部が減ることになる。外面から100 mmの溶接深さとすれば、内面からの溶接部までの距離を90 mm以上確保でき、溶接部での脆化量を減少させることができる。溶接欠陥を起点とした破壊では、照射脆化に起因する脆性破壊が問題となるが、脆化量が減少することで、脆性破壊のリスクが小さくなる。このように、溶接深さを浅くすることは、構造健全性および信頼性において大きなメリットをもたらす。平成28年度までに、超音波探傷試験で定量すべき欠陥寸法および許容される脆化量を把握することを目的とし、有限要素解析によりオーバーパック溶接部が破損しない溶接欠陥寸法や胴体の崩壊荷重などを求めた。

本章では、オーバーパックに要求されている閉じ込め期間中の強度に対する信頼性を向上させることを目的に取り組んだ。信頼性を向上させる手段として、溶接深さを現状想定している190 mmよりも浅くすることを想定する。そのため、溶接深さを変化させた場合の構造健全性を確保するために、弾塑性破壊および脆性破壊に対する強度を算出し、溶接検査時に許容される溶接欠陥寸法の検討を行った。塑性崩壊に対する強度を算出し、構造健全性上必要となる溶接深さを求めた。さらに、塑性崩壊を引き起こす外圧に偏圧が存在する場合の影響も検討した。

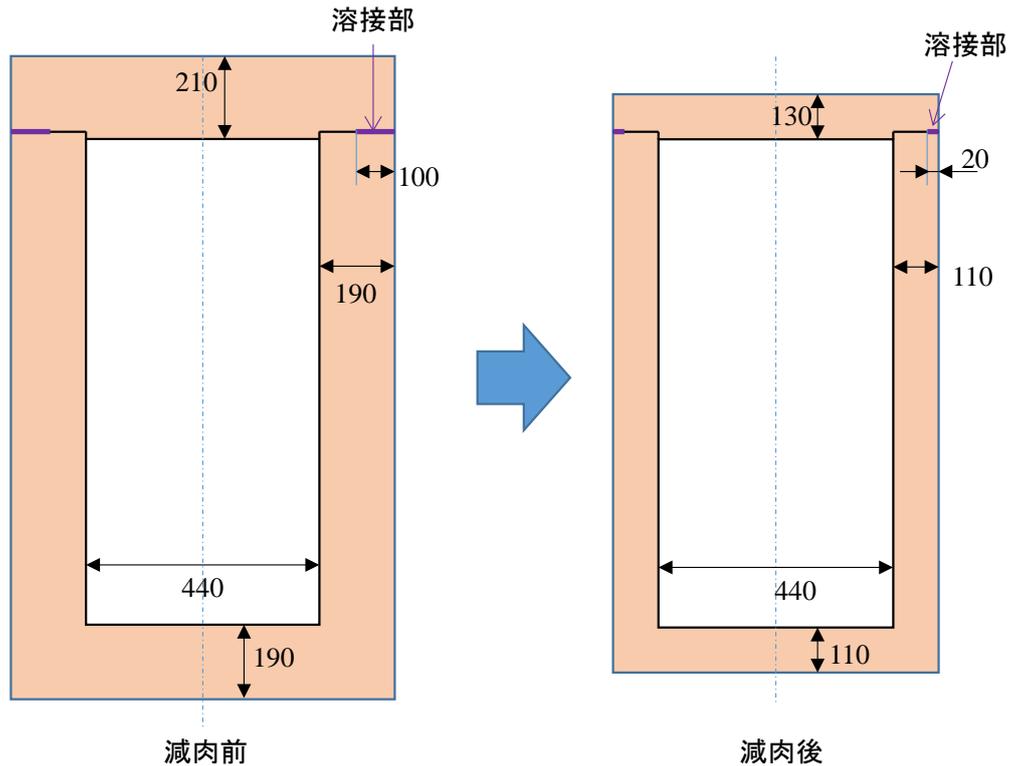


図 7.3.3-1 オーバーパックの減肉による形状の変化  
(平蓋において外面から 80 mm の減肉を想定)

## 8.2 強度評価方法

### 8.2.1 破損形態および破損モード

構造健全性評価では、対象となる構造物の破損形態（どの部位がどのように壊れるか）を想定し、それぞれの破損形態に対して考えられる破損モード（延性破壊、脆性破壊、疲労破壊などの壊れ方）をリストアップする。そして、想定する全ての破損形態に対して、破壊が生じないと判断された場合には、対象構造物の構造健全性が確認されたことになる。したがって、構造健全性評価では、破損形態と破損モードを適切に想定することが重要となる。

オーバーパックの破損モードとしては、図 8.2.1-1 に示すように塑性崩壊（座屈を含む）、弾塑性破壊、および脆性破壊の 3 つが考えられる[1]。塑性崩壊は構造物断面で生じる延性破壊で、破壊する断面における平均的な応力（実断面応力）が破壊の駆動力となる。断面全体が変形する塑性崩壊に対し、弾塑性破壊と脆性破壊では切欠きや欠陥などの局所を起点として、亀裂が発生・進展する。したがって、弾塑性破壊と脆性破壊に対する破壊評価においては、局所的な力の大きさを表す J 積分と応力拡大係数が破壊の駆動力として用いられる。どの破損モードが出現するかは、材料や構造、使用条件などに依存する。また、同じ材料を対象とした場合でも、亀裂の大きさ、材料の脆化度によって破損モードが変化する場合がある。一般的な機器設計では、構造物に欠陥がないこと、または欠陥が十分小さいことを前提としているため、欠陥を起点とした弾塑性破壊と脆性破壊は想定されない。しかし、オーバーパックでは、溶接部において欠陥がない、または十分小さいという想定が成立しない場合も考慮する必要がある。厚い板厚の溶接を行う場合

は、比較的大きな溶接欠陥が発生し、それを起点として弾塑性破壊や脆性破壊が発生する可能性がある。また、未溶接部（板厚に対して溶接をしていない部分）も切欠きや亀裂と同様に応力が集中し脆性破壊や弾塑性破壊の起点となり得る。

以上から、オーバーパックの構造健全性を確保するには、以下の3つの破壊形態（破壊モード）を想定し、それぞれに対して構造強度が十分であることを確認しておくことが求められる

- ① 欠陥を起点としない破壊（塑性崩壊）
- ② 溶接欠陥を起点とした破壊（塑性崩壊、弾塑性破壊、または脆性破壊）
- ③ 未溶接部を起点とした破壊（塑性崩壊、弾塑性破壊、または脆性破壊）

欠陥を起点としない場合の破壊モードは塑性崩壊となる。欠陥を起点とした場合は、塑性崩壊、弾塑性破壊および脆性破壊が想定される。

破壊モード	破壊モード	駆動力パラメータ	必要な材料特性
	塑性崩壊	荷重(応力)	降伏強度 引張強さ
	弾塑性破壊	J積分値 (J値)	J-R曲線 応力・ひずみ曲線 (J値算出のため)
	脆性力学	応力拡大係数 (K値)	破壊靱性値 ( $K_{Ic}$ )

図 8.2.1-1 破損モードと強度評価方法[1]

### 8.2.2 強度評価方法

構造健全性評価では、①欠陥を起点としない破損、②溶接欠陥を起点とした破損、および③未溶接部を起点とした破損の3つの破損形態全てを対象として破損の有無を判断する必要がある。そして、全ての破損形態に対して破損しないという判断がされれば、構造健全性が確認されたことになる。これらの破損形態には、塑性崩壊、弾塑性破壊、および脆性破壊の3つの破損モードが含まれる。破損の有無の判断（破損評価）では、破損を引き起こす力である破損の駆動力と、破損に対する材料強度を比較する。そして、材料強度が破損の駆動力よりも大きい場合に、破損が発生しないと判断される。それぞれの破損モードに対応した破損の駆動力と材料強度を図8.2.1-1に示す。具体的には、以下のように破損の有無を判断する。

塑性崩壊に対しては、弾完全塑性の応力・ひずみ曲線（図 8.2.2-1）を想定した有限要素解析に

より、崩壊荷重を推定する。実構造物の形状を模擬した有限要素モデルを作成し、想定される荷重を負荷する。これにより、最弱断面に応力が集中して変形が進む様子が模擬される。本研究では2倍勾配法[4]を用いて崩壊荷重を決定する。2倍勾配法では、図 8.2.2-2 に示すように、変形が大きな代表点の変位がしきい値（弾性変形の勾配を2倍した直線との交点）を超えた時点の荷重を崩壊荷重とする。

弾塑性破壊では駆動力として J 積分を用いる。J 積分は弾塑性の有限要素解析により算出するため材料の応力・ひずみ曲線を想定する必要がある。一方、材料強度としては、弾塑性破壊靱性 ( $J_{IC}$  または  $J-R$  曲線) が用いられる。弾塑性破壊では、破壊時に亀裂先端での塑性変形、延性亀裂進展における安定破壊から不安定破壊への遷移を考慮するため2パラメータ評価法[5]、または J-T 評価法[6]が適用される。

未照射の構造材料（炭素鋼など）では亀裂先端から延性亀裂が発生する弾塑性破壊が一般的な破壊モードとなるが[5]、照射により材料が硬化すると、弾塑性破壊から脆性破壊へと破壊モードが変化する。脆性破壊評価では、破壊駆動力に応力拡大係数を、材料強度に破壊靱性 ( $K_{IC}$ ) をとり、両者を比較することで破壊の有無を判断する。炭素鋼の場合、亀裂を起点とする破壊モードは弾塑性破壊か脆性破壊のいずれかになり、脆化の程度や亀裂寸法によって破壊モードは変化する。脆性破壊を想定して算出される破壊荷重は、弾塑性破壊を想定した場合よりも安全側になるので、本業務では安全側に脆性破壊を想定した。

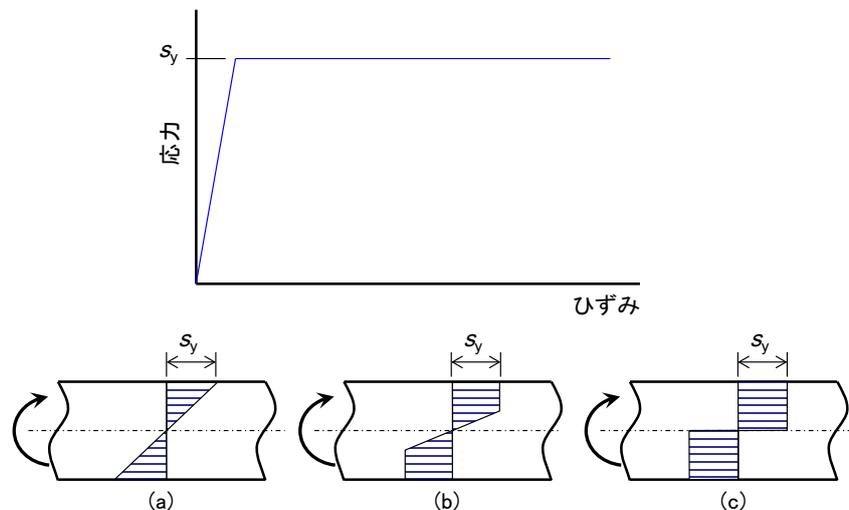


図 8.2.2-1 弾完全塑性応力・ひずみ曲線による塑性崩壊の考え方

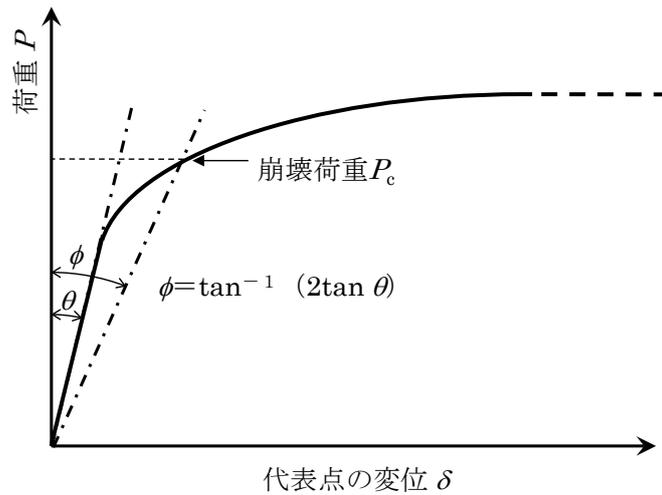


図 8.2.2-2 2倍勾配法

### 8.3 解析条件および解析モデル

#### 8.3.1 解析条件

破損解析のためには、弾性有限要素解析による応力拡大係数の算出、および弾塑性有限要素解析による崩壊解析が必要となる。本研究では、汎用有限要素解析コード **Abaqus** を用いた。また、解析に用いる基本的な物性を表 8.3.1-1 に示した。解析では、外圧と溶接残留応力を想定した。

表 8.3.1-1 物性値

温度 (°C)	縦弾性係数 (GPa)	ポアソン比 (-)
90	199	0.3

#### 8.3.2 解析モデル

解析の対象となるオーバーパック形状を図 8.3.2-1 に示す。オーバーパックの蓋形状は、落し蓋および平蓋を対象とした。オリジナルの板厚は、190 mm とするが、減肉を想定した場合や板厚を変化させた場合の解析も実施した。

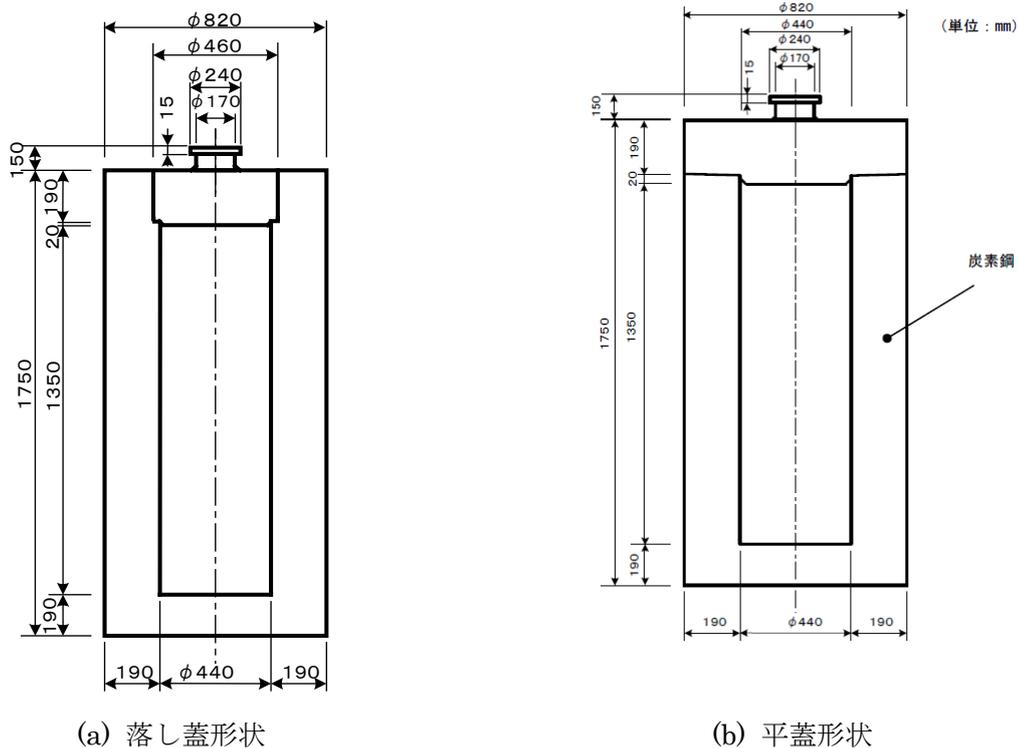


図 8.3.2-1 オーバーパック形状 (単位 : mm)

## 8.4 有限要素法による強度評価

### 8.4.1 偏圧を考慮した崩壊荷重 (崩壊発生時の外圧の算出)

埋設後におけるオーバーパックの破損を防止するために、軸方向および周方向の負荷の比率をパラメータとして崩壊計算を行う。胴体および蓋 (底板) の板厚と崩壊荷重の関係を求める。

8.2.1 で述べたように、オーバーパックの構造健全性を確保するには、①欠陥を起点としない破壊、②溶接欠陥を起点とした破壊、③未溶接部を起点とした破壊、の 3 つの破壊形態に対する構造強度が十分であることを確認する必要がある。本解析は、この内、①の欠陥を起点としない破壊に対する強度を調べることになる。

平成 28 年度の同様の解析では板厚は最小で 110 mm であったが、想定する板厚は 110 mm ~ 10 mm の範囲とする。解析における境界条件の影響を考慮するため、長手方向に対称としたモデルでも解析を行い、崩壊荷重に対する影響を調べる。

#### (1) 解析方法

解析では、オーバーパックをモデル化した図 8.4.1-1 を対象にした。解析上は、落とし蓋と平蓋は同じ形状と考えることができる。板厚  $t$  は 110 mm から最小 10 mm まで変化させた。軸方向および周方向の外圧を負荷し、崩壊荷重を算出する。解析の境界条件を図 8.4.1-2 に示す。解析対象の対称性を考慮し、軸対称の 1/2 モデルを適用した。モデルにおいて、蓋部の下部 20 mm の嵌合部の出っ張りは考慮しなかった。

外圧は胴部側面および上蓋上面より一様に負荷した。確認のため、下面にも外圧を負荷した場合を模擬した解析も実施した。

崩壊荷重の算出には、図 8.2.2-2 に示した 2 倍勾配法を適用する。2 倍勾配法では、荷重と変位の関係を用いるが、荷重には外圧を、モデルの代表点における変位を用いる。代表点（以後、参照点とよぶ）は、図 8.4.1-3 に示すように、上蓋中心部、または胴部長手中央部の変位を参照する。これら 2 つの参照点を用いて崩壊荷重（崩壊が発生する圧力）を算出し、いずれか小さい方の圧力を、その条件における崩壊荷重とした。

材料の変形特性として、降伏強度  $S_y$  の弾完全塑性モデルを仮定する。降伏強度としては、一般的な炭素鋼（SM400 など）の降伏強度から引張強さまでをカバーする 100、200、300、400 そして 500 MPa を適用した。

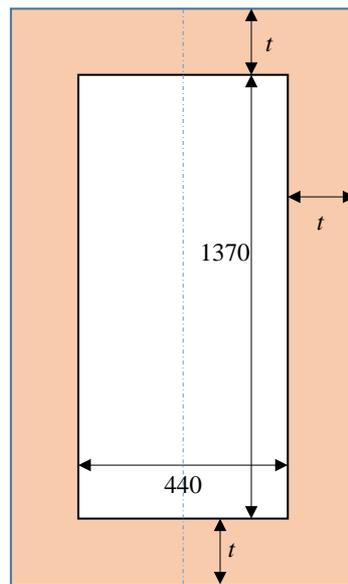


図 8.4.1-1 解析モデル（単位: mm、 $t = 10 \sim 110$  mm）

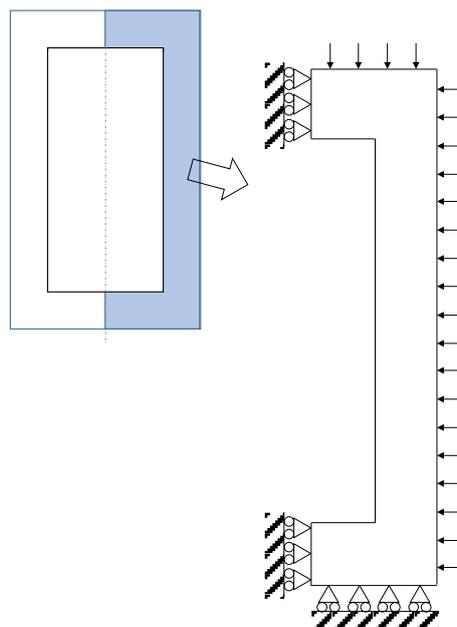


図 8.4.1-2 境界条件

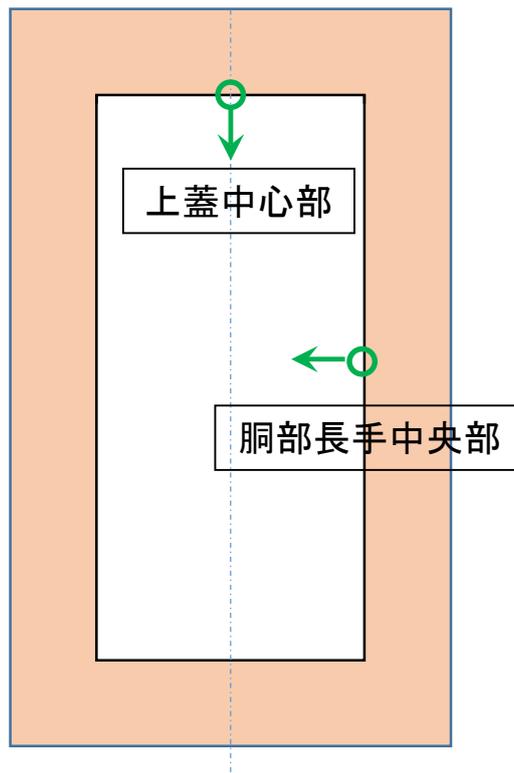


図 8.4.1-3 2倍勾配法を適用する際に用いる参照点と変位の方向

## (2) メッシュサイズの決定

本解析では、板厚の異なるモデルに対してメッシュを作成することになる。その際、要素形状を正方形として、1メッシュ当たりのサイズを固定としている。そのため、板厚が変化すると要素数も減少することになる。平成28年度の解析では、要素1辺の長さを2.5 mmとすることで、収束した結果が得られることを確認した。平成28年度の最小板厚は110 mmであったので、板厚方向の要素数は44個となる。一方、本解析では、最小板厚が10 mmで、同じ要素サイズを適用すると板厚方向の要素数は4個となり、メッシュサイズの影響が出てくる可能性がある。そこで、図8.4.1-4に示すメッシュ分割数を変えた3種類のモデルを用いて解析した。図では要素数が最も少なくなる板厚10 mmのモデルに対するメッシュを示している。メッシュH28は、平成28年度に適用したメッシュとなり、要素1辺の長さを2.5 mmとしている。それに対し、詳細メッシュでは要素1辺の長さを1 mm、極詳細メッシュでは0.5 mmとした。降伏強度は $S_y = 200$  MPaとして解析を行った。

図8.4.1-5に詳細メッシュを用いた場合の変位と圧力の関係を示す。解析の初期においては、変位が圧力に対して比例的に増加している。そして、圧力が大きくなると、圧力の増加が飽和し、変位のみが増加する塑性崩壊状態が模擬されている。図中の“ $P_L$ ”と示した位置は、2倍勾配法で崩壊荷重と判断された点を示す。解析では圧力を徐々に増加させながら解析を進めるが、崩壊荷重近傍ではわずかな荷重増加でも変位が大きく変化し、計算点(図8.4.1-5において“×”で記した点)が疎になる。崩壊荷重は、2倍勾配線と解析結果が交わる点に隣接する2つの計算点

の直線内挿により決定した。板厚が 110 mm および 10 mm の場合の崩壊時のモデルの変位と相当応力の分布を図 8.4.1-6 に示す。図中の「参照点」が 2 倍勾配法適用時に最初に崩壊条件を満足した点を示す。断面全体が降伏強度に到達すると荷重増加なしに変位が増加できるいわゆる塑性ヒンジ状態（図 8.2.2-1 の(c)の状態）となり、塑性崩壊と判断される。板厚  $t$  が 110 mm の場合は胴部が、板厚が 10 mm の場合は上蓋が塑性ヒンジ状態となった。

3 種のメッシュを用いた場合の板厚と崩壊荷重  $P_b$  の関係を図 8.4.1-7 に示す。板厚が小さくなるほど、崩壊荷重が減少している。崩壊荷重に対するメッシュ依存性は顕著でない。以後の解析では、詳細メッシュを用いた。

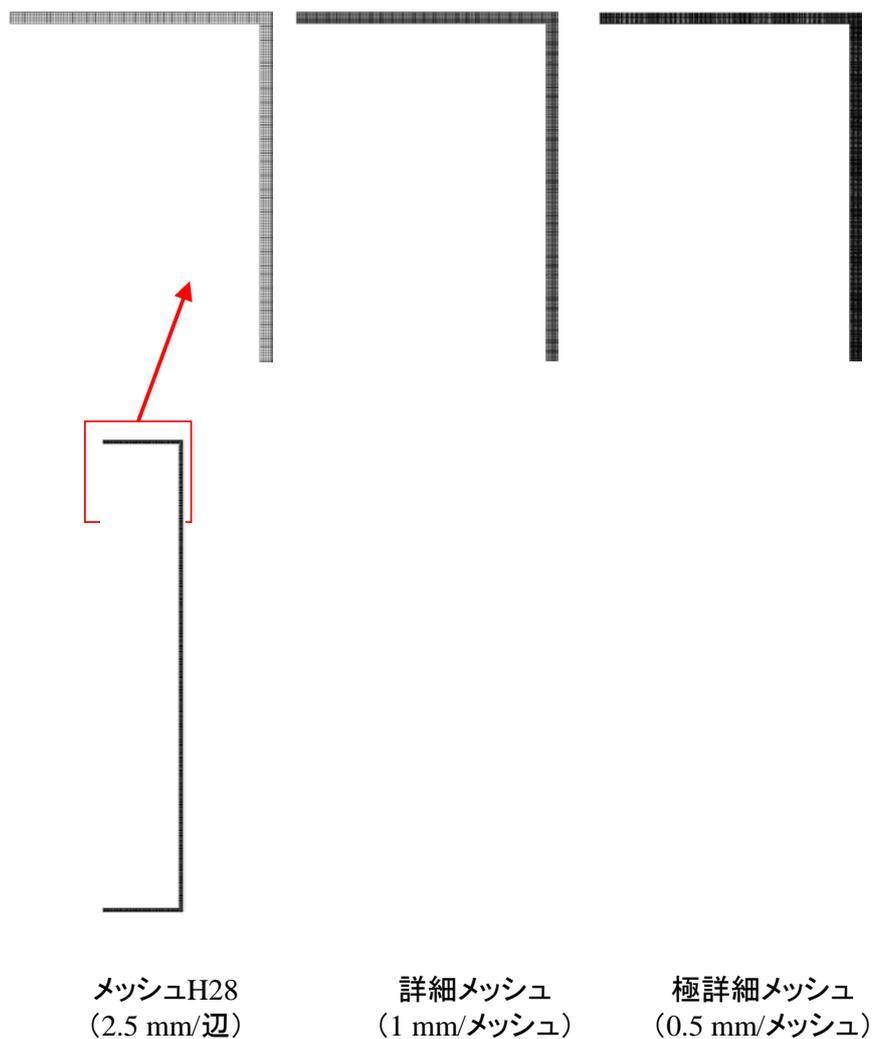


図 8.4.1-4 要素分割 ( $t = 10$  mm)

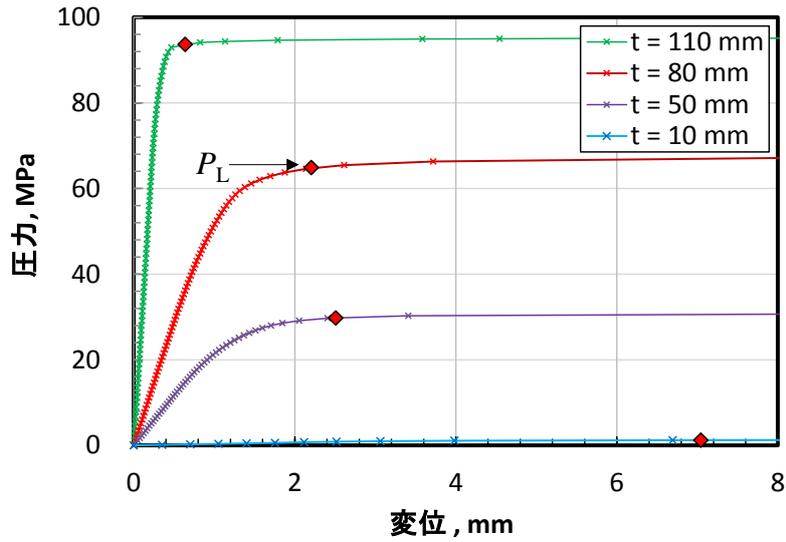


図 8.4.1-5 2倍勾配法の適用 ( $S_y = 200$  MPa、詳細メッシュ使用)

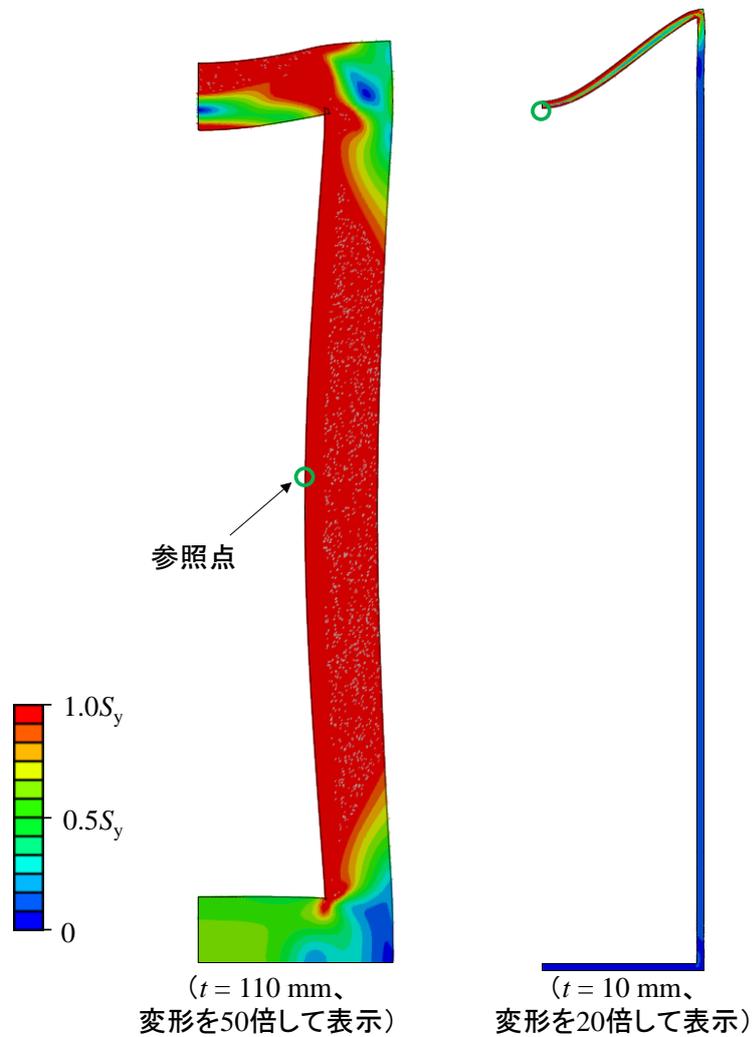


図 8.4.1-6 塑性崩壊時の形状と相当応力分布 ( $S_y = 200$  MPa、詳細メッシュ使用)

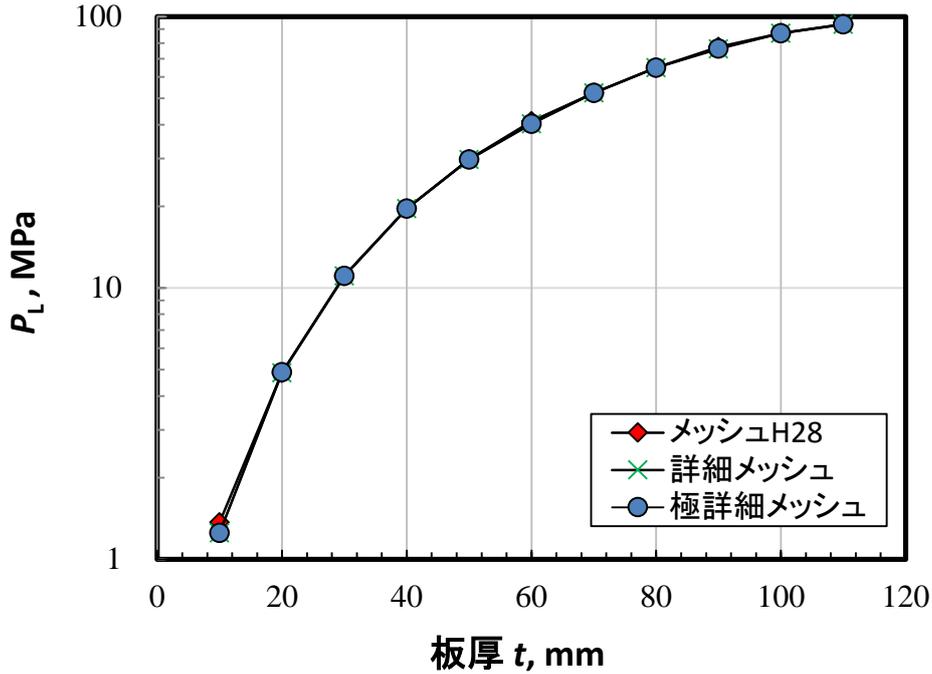


図 8.4.1-7 崩壊荷重に及ぼすメッシュサイズの影響 ( $S_y = 200$  MPa)

### (3) 板厚に対する崩壊荷重

板厚と崩壊荷重の関係を図 8.4.1-8 に示す。板厚が小さくなるとともに崩壊荷重が減少していることがわかる。そして、崩壊荷重は降伏強度にも依存した。降伏強度が  $S_y = 100$  MPa、板厚 10 mm の場合の崩壊強度が最も小さくなり、0.6264 MPa であった。オーバーパックに作用する外圧が 10.7 MPa (図中に赤線で表示) とすると、 $S_y = 100$  MPa の場合でも 50 mm の板厚があれば破損しないと判断される。

2 倍勾配法適用の変位を算出する際は、上蓋中心部、および胴部長手中央部の変位の 2 つを参照し、崩壊荷重の小さい方を採用した。板厚が 100 mm 以上の場合は、降伏強度によらず参照点は、胴部長手中央部であった。一方、板厚が 90 mm 以下の場合は、上蓋中心となった (図 8.4.1-6 参照)。

崩壊荷重に及ぼす降伏強度の影響を調べるために、崩壊荷重  $P_L$  を  $S_y$  で正規化したものを図 8.4.1-9 に示す。図からわかるように、 $P_L/S_y$  の値が  $S_y$  に依存していない。つまり、崩壊荷重は降伏強度に比例していることがわかる。以降、 $S_y = 200$  MPa について考察する。ちなみに、炭素鋼 SM400 の JIS 規格上の降伏強度は 195 MPa 以上となっている。

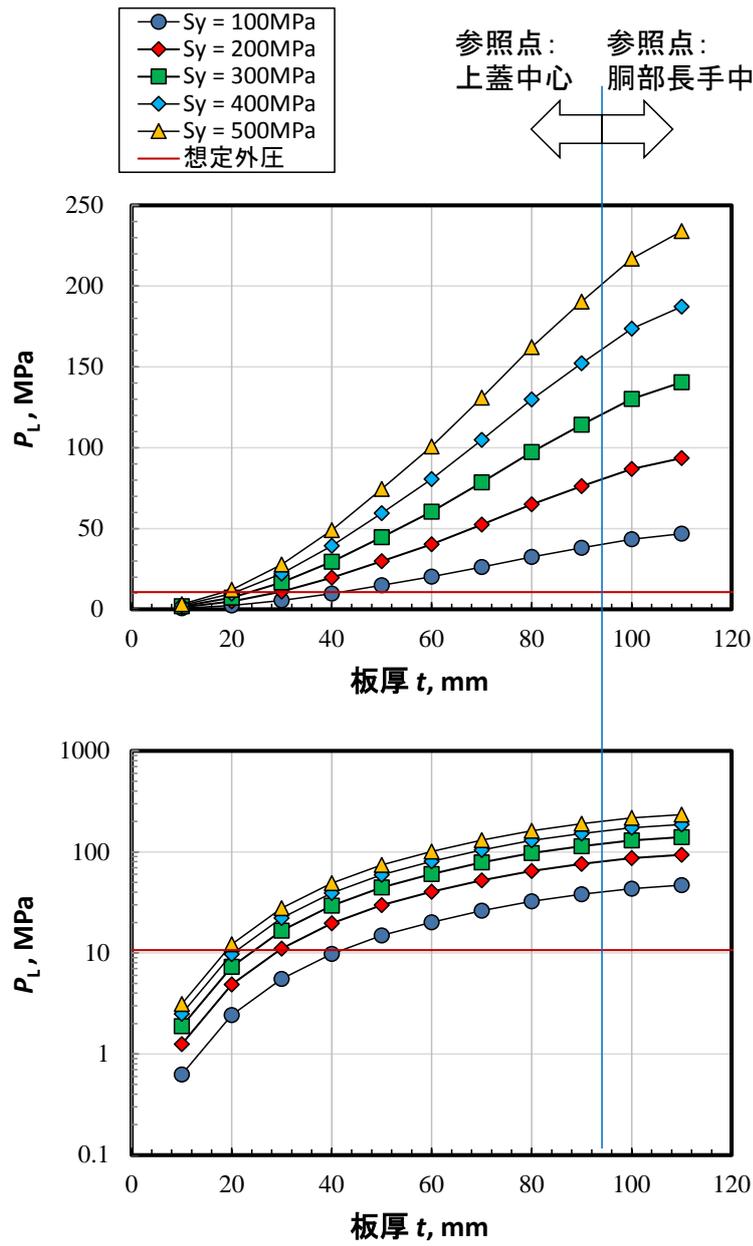


図 8.4.1-8 板厚に対する崩壊荷重の変化 (詳細メッシュ使用)

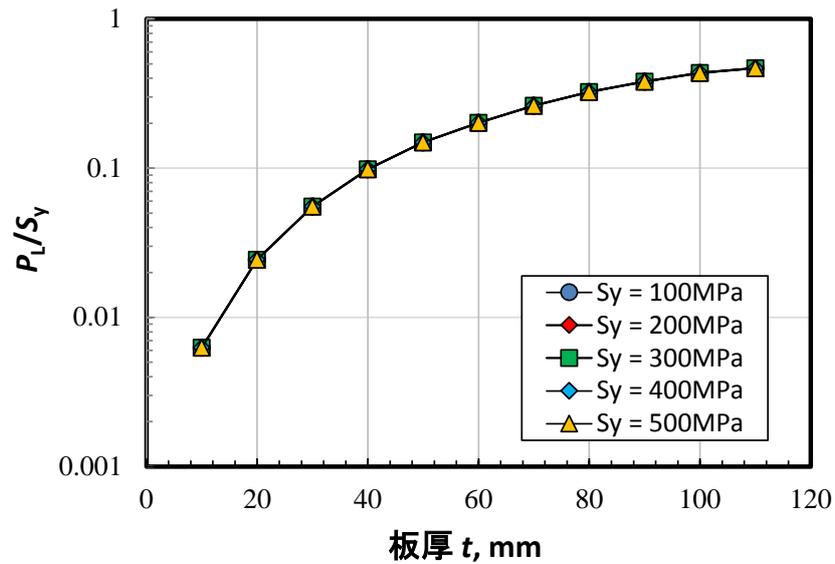


図 8.4.1-9 正規化崩壊荷重 (詳細メッシュ)

#### (4) 境界条件の影響

これまでの解析では、外圧を上蓋部と胴部側面にのみ負荷した。埋設状態においては、下面にも外圧がかかる可能性があり、崩壊荷重への影響も懸念される。そこで、下面にも圧力が負荷される状態を模擬した解析を行った。具体的には、図 8.4.1-10 に示すように、軸対称の 1/2 モデルから 1/4 に変更する。これにより、下面にも上面と同じ (対称) の条件が付与されることになる。

解析結果を図 8.4.1-11 に示す。図中に “×” で示した点が、1/4 軸対称モデルを適用した場合の崩壊荷重となる。1/2 軸対称モデルを適用した場合と明確な差は認められない。つまり、外圧が下蓋に作用した場合でも、得られる崩壊荷重の変化は小さい。

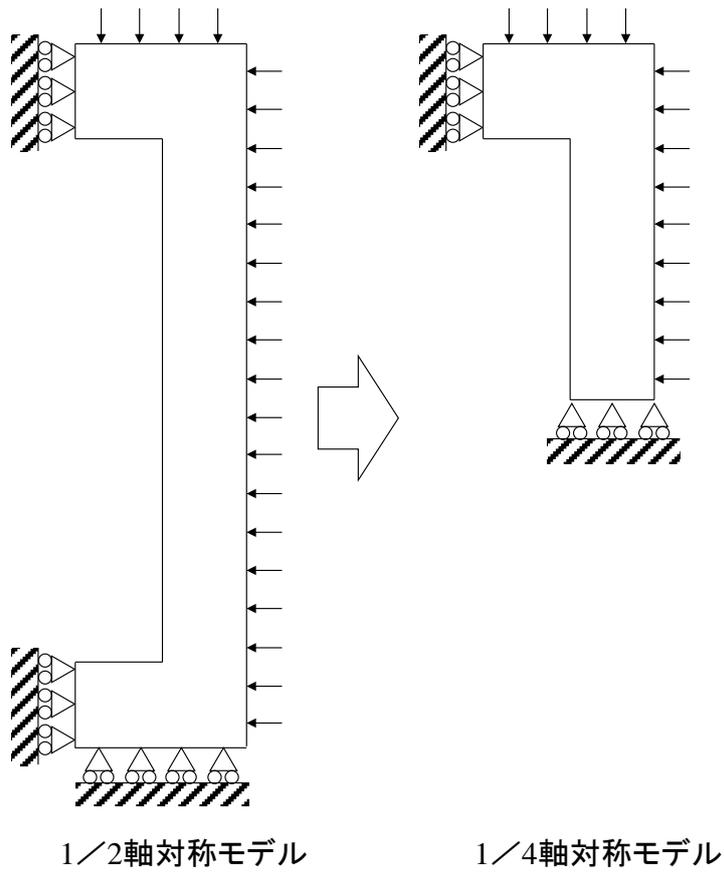


図 8.4.1-10 境界条件の変更

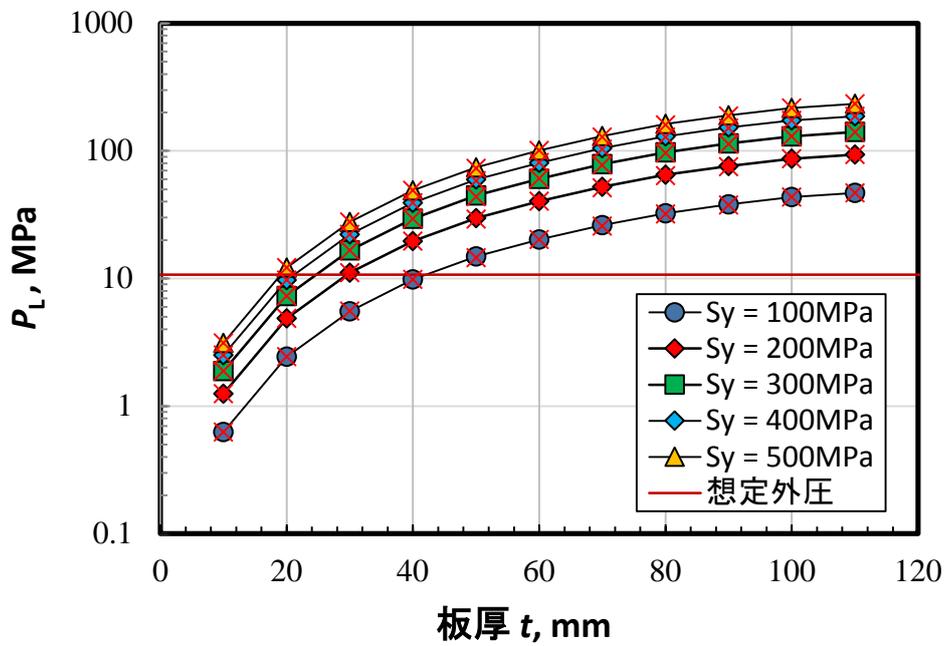


図 8.4.1-11 板厚に対する崩壊荷重の変化  
(境界条件の影響、“×”は1/4軸対称モデルを使用した結果)

(5) 偏圧の影響

軸方向の圧力  $P_a$  と周方向の圧力  $P_r$  の比率を、 $P_a/P_r = 0.2, 0.5, 1.0, 1.5$  および  $2.0$  とした場合の、板厚と崩壊荷重の関係を図 8.4.1-12 に示す。降伏強度  $S_y$  は  $200 \text{ MPa}$  とした。崩壊荷重 (圧力)  $P_L$  は、 $P_a$  と  $P_r$  の大きい方とした。板厚が小さくなるとともに崩壊荷重が減少する傾向は変わらないが、板厚が大きい場合、圧力比  $P_a/P_r$  が小さくほど崩壊荷重が小さくなった。一方、板厚が小さい場合の崩壊荷重の低下はないことから、偏圧による崩壊荷重の顕著な低下はないと判断できる。

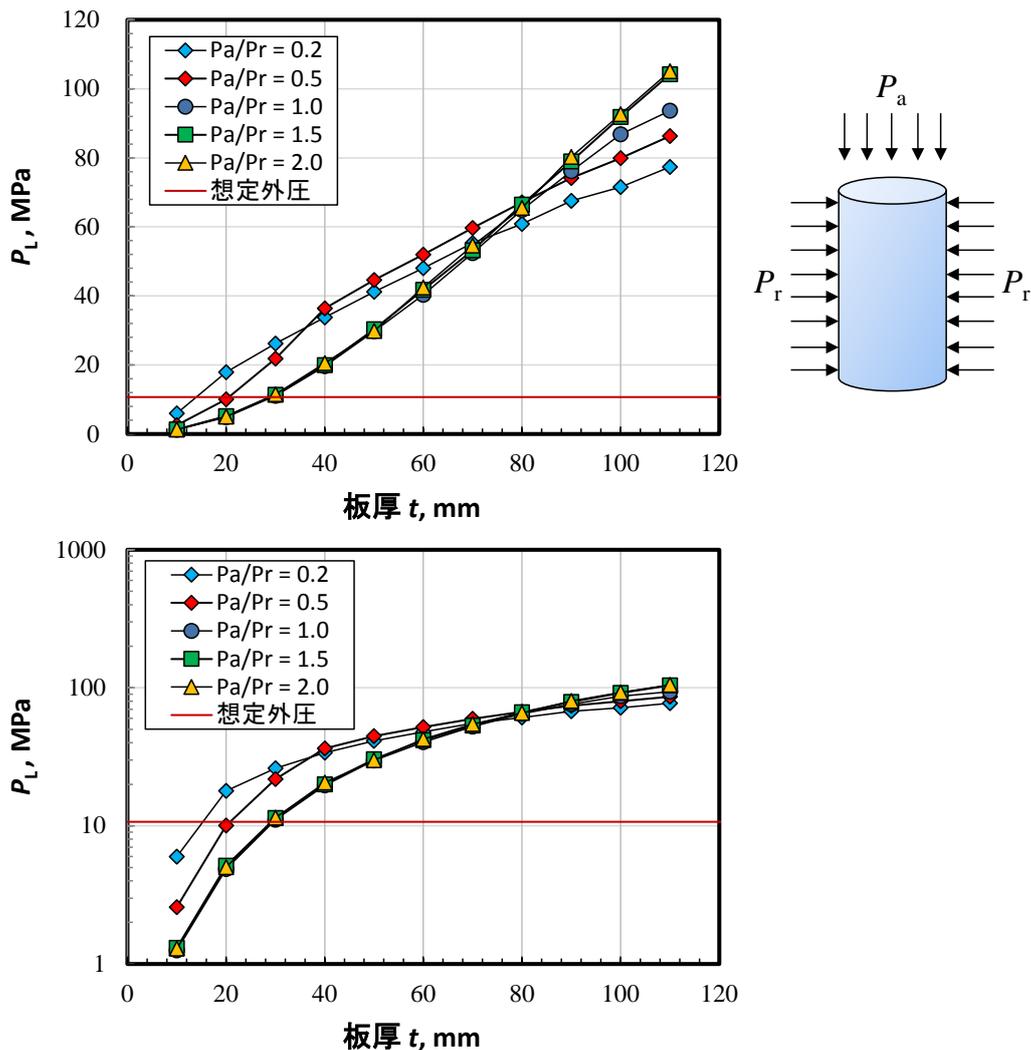


図 8.4.1-12 板厚に対する崩壊荷重の変化 (偏圧の影響)

(6) まとめ

塑性崩壊が発生する外圧 (崩壊荷重) と板厚の関係を調べた。その結果、降伏強度  $100 \text{ MPa}$ 、場合でも、板厚が  $50 \text{ mm}$  あれば崩壊しないことが示された。つまり、オーバーパックは外圧に対して十分な強度を有していると判断できる。また、崩壊荷重は降伏強度に対して比例的に変化した。

偏圧を考慮した解析では、崩壊荷重の顕著な低下は認められなかった。

#### 8.4.2 偏圧を考慮した崩壊荷重（未溶接部を起点とした破損）

8.2.1 で述べたオーバーパックの破壊形態（①欠陥を起点としない破壊、②溶接欠陥を起点とした破壊、③未溶接部を起点とした破壊）の内、③に対する強度を検討した。落とし蓋と平蓋のそれぞれに対して未溶接部を亀裂とみなし、その部位を起点とした破壊の有無を調べた。荷重の想定としては埋設後の外圧を想定する。未溶接部を亀裂と見なした破壊評価では溶接残留応力の影響は無視できる。

図 8.2.1-1 において説明した破壊モードとしては、溶接部先端（未溶接部との境界）を起点とした弾塑性破壊または脆性破壊、および塑性崩壊となる（表 8.4.2-1 参照）。未溶接部を起点とした破壊については、人工バリア品質／健全性評価手法の構築（オーバーパック）「溶接部の限界亀裂寸法の解析的検討」（平成 26 年度[7]および平成 27 年度[8]）において実施済みである。ここでは、安全側に脆性破壊による評価を行った。本解析では、「外圧による崩壊解析」を実施した。また、偏圧の影響も考慮した。

表 8.4.2-1 未溶接部を起点とした破壊に対する健全性評価の解析パターン

	荷重および破壊モード	想定される破壊形態	備考
埋設後	外圧による塑性崩壊	溶接部（未溶接部リガメント部）の塑性崩壊	本事業で実施
	外圧による弾塑性破壊または脆性破壊	未溶接部先端からの脆性破壊（弾塑性破壊含む）	照射硬化を考慮し、脆性破壊を想定 解析結果は、文献[7][8]の成果を参照

##### (1) 解析方法

解析モデルを図 8.4.2-1 に示す。平蓋と落とし蓋それぞれに対応したモデルを適用した。8.4.1 の解析同様、蓋部の下部 20 mm の嵌合部の出っ張りは考慮していない。板厚は、減肉を最大限に考慮し 110 mm とした。胴部側面および上蓋上面より一様な外圧を負荷し、崩壊荷重を算出した。平成 28 年度に適用した軸対称 1/2 モデル（図 8.4.1-4 のメッシュ H28）と同様の要素分割と境界条件を適用した。板厚 110 mm に対するこのメッシュ分割の妥当性は平成 28 年度に示されている。溶接深さ  $w$  を 10 ~ 110 mm の範囲で変化させながら解析を実施した。崩壊解析には 2 倍勾配法を適用した。降伏強度は 200 MPa とした。

崩壊荷重の算出には、図 8.2.2-2 の 2 倍勾配法を適用した。2 倍勾配法では、荷重と変位の関係を用いるが、荷重には外圧を、モデルの代表点における変位を用いる。代表点（参照点）は、図 8.4.1-3 に示すように、上蓋中心部、または胴部長手中央部の変位を参照する。これら 2 つの参照点を用いて崩壊荷重（崩壊が発生する圧力）を算出し、いずれか小さい方の圧力を、その条件における崩壊荷重とした。

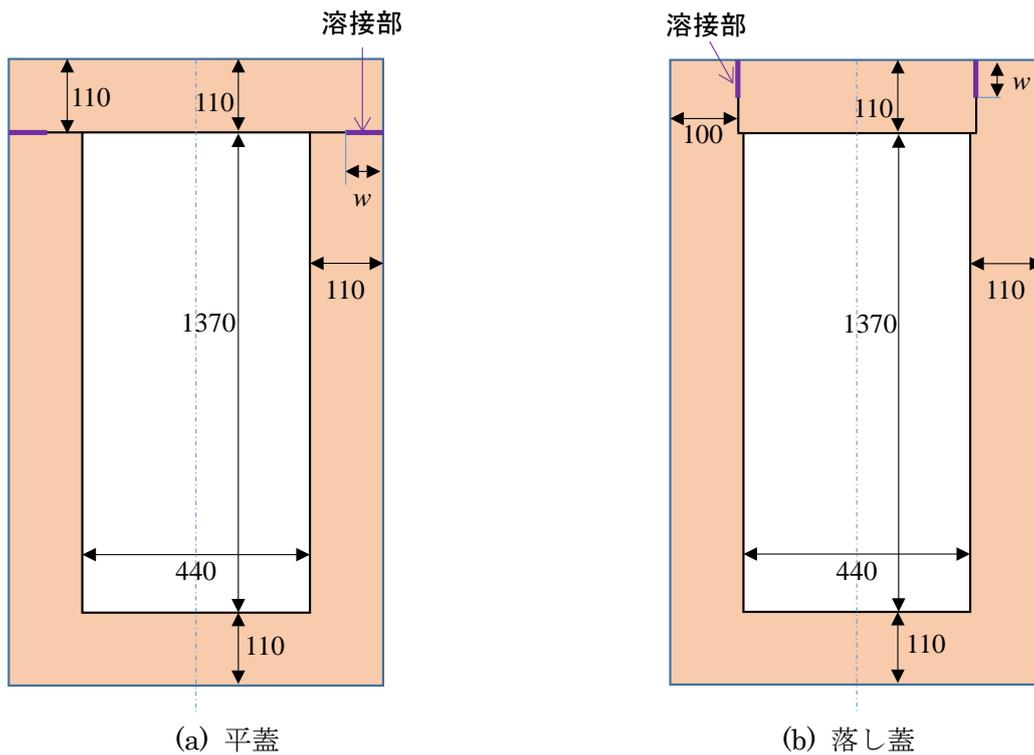
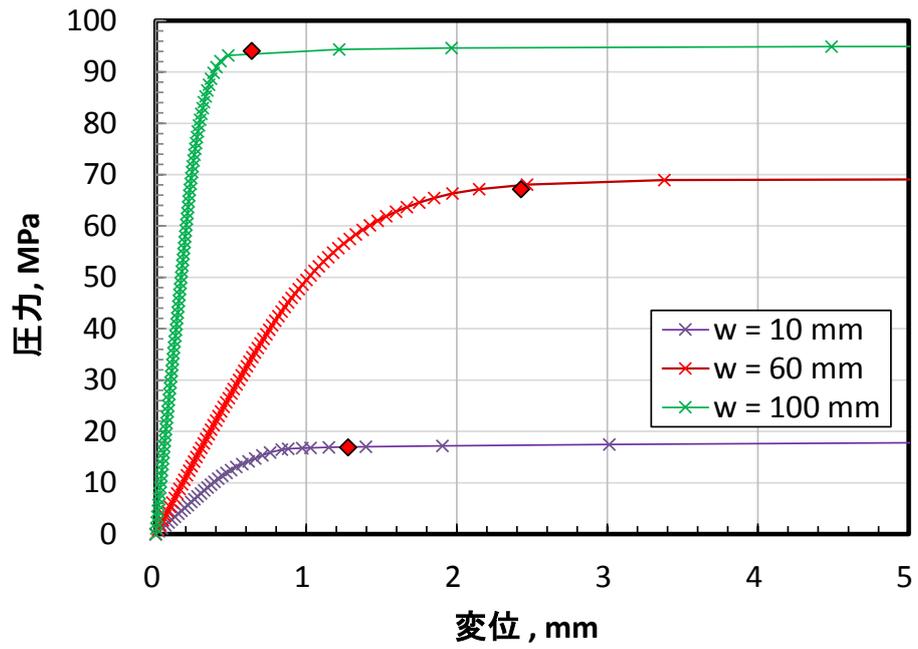


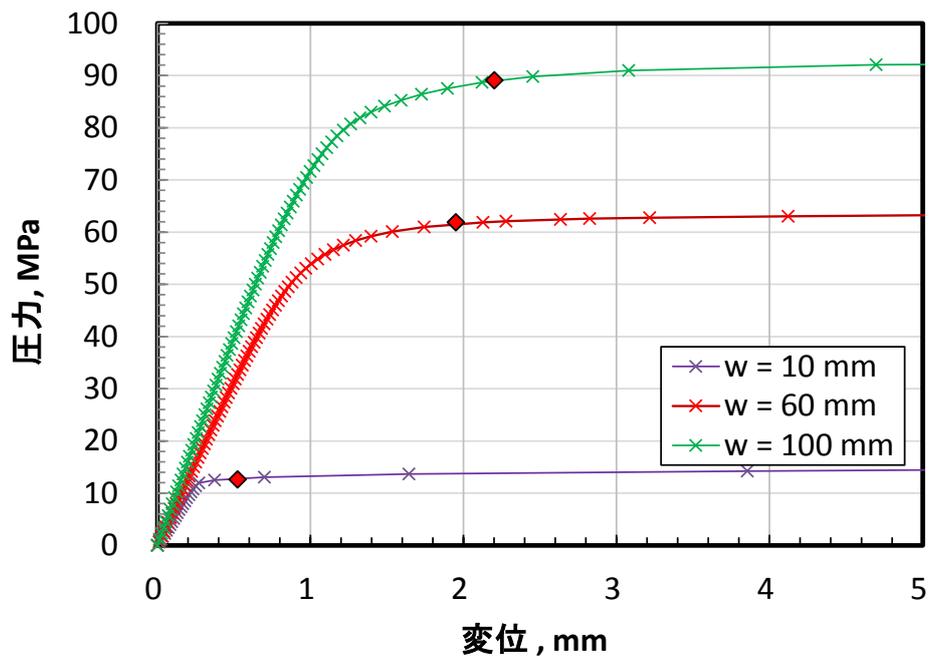
図 8.4.2-1 解析モデル (単位: mm)

## (2) 溶接深さの影響

図 8.4.2-2 は参照点の変位と荷重の関係を示す。溶接深さが小さくなると（未溶接部が大きくなると）、小さい外圧で崩壊していることがわかる。崩壊時の変形と相当応力分布を図 8.4.2-3 に示す。平蓋の溶接深さ  $w$  が 100 mm の場合は胴部長手中央が参照点となり、それ以外の場合は、落し蓋の場合を含め参照点は上蓋中心となった。平蓋、落し蓋いずれの場合も、溶接深さが小さくなると未溶接部の先端近傍に応力が集中し、最終的に未溶接部先端が塑性崩壊していることがわかる。崩壊荷重と溶接深さの関係を図 8.4.2-4 に示す。溶接深さが大きくなると、崩壊荷重が単調減少した。溶接深さが 10 mm の場合でも、想定される外圧 10.7 MPa より大きかった。



(a) 平蓋



(b) 落とし蓋

図 8.4.2-2 圧力と変位の関係 ( $S_y = 200$  MPa)

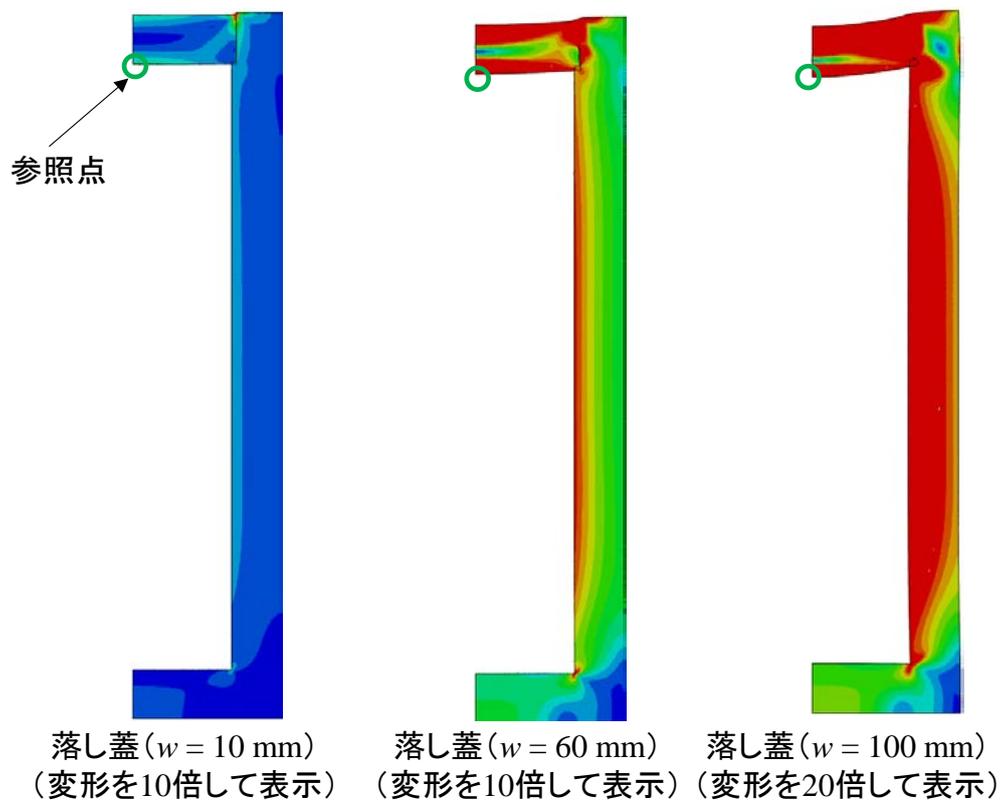
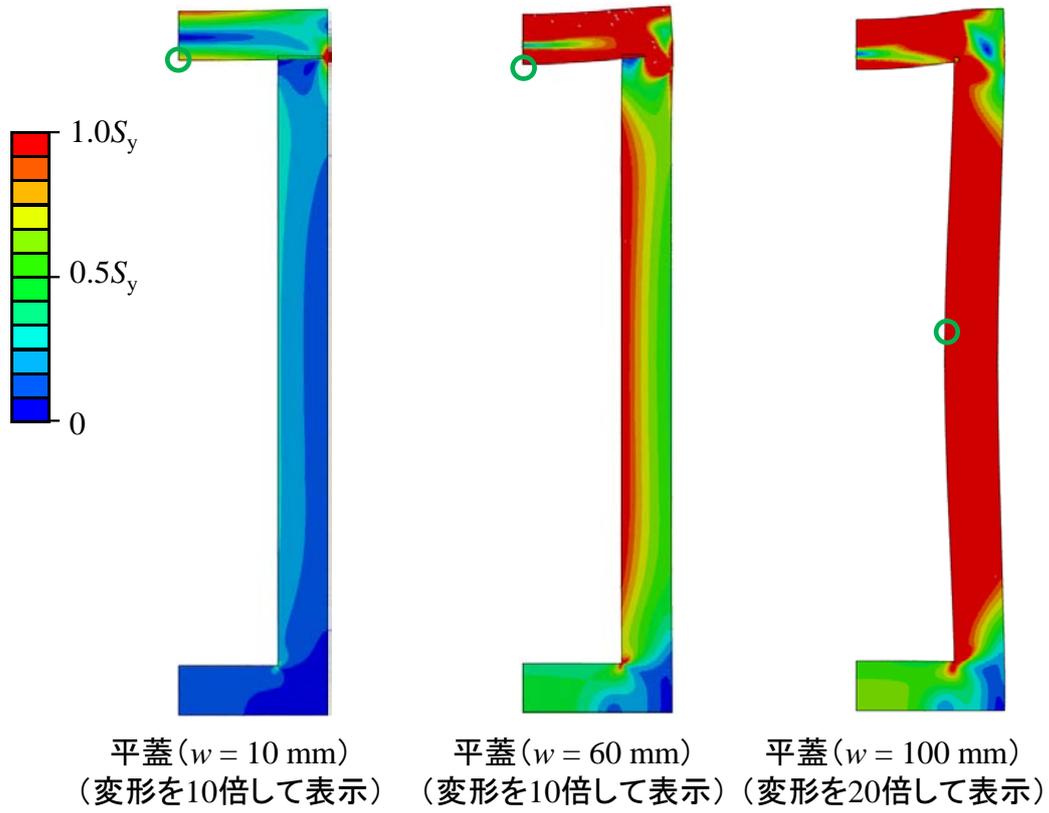


図 8.4.2-3 塑性崩壊時の形状と相当応力分布 ( $S_y = 200 \text{ MPa}$ )

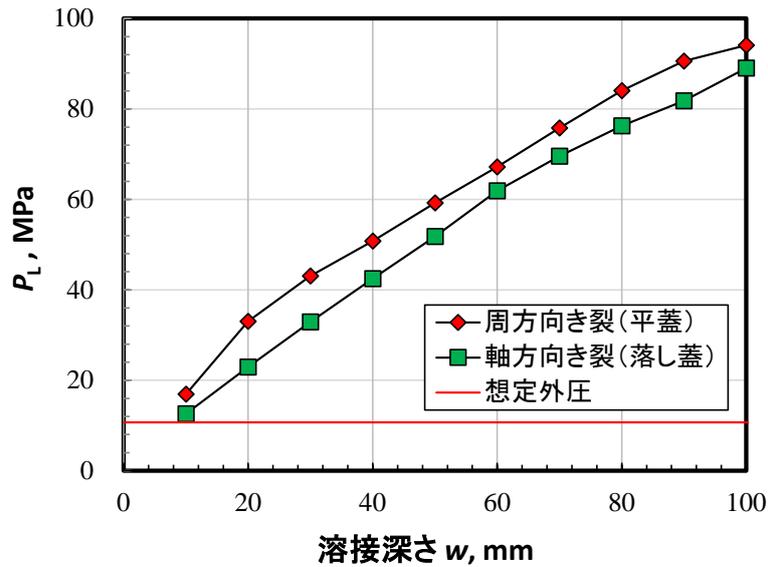


図 8.4.2-4 外圧による崩壊荷重 ( $S_y = 200$  MPa)

### (3) 接触の影響

図 8.4.2-3 の変形を見ると、未溶接部の表面が交差していることがわかる。解析上は、これらの表面の干渉が考慮されていないため、実際には起こりえない表面の交差が発生する。そこで、図 8.4.2-5 に示すように、表面同士が交差しないように制約条件を付与した解析を行った。具体的には、図中に赤線で示した表面に接触条件（摩擦は零）を考慮し、解析上、表面同士が干渉して交差しない状況を模擬した。図 8.4.2-6 に接触条件を考慮した場合の崩壊荷重を示す。平蓋の場合、崩壊荷重は溶接深さによらず一定となった。これは、未溶接部が密着したために、未溶接部の有無が崩壊荷重に影響しなかったことによる。崩壊荷重は 8.4.1 で実施した  $t = 110$  mm の解析結果とほぼ一致した。落し蓋の場合も、溶接深さが 40 mm 以上の場合は平蓋のそれと一致した。しかし、溶接深さが 30 mm より小さくなると崩壊荷重が減少した。ただし、崩壊荷重は接触を考慮しない場合よりも大きくなっている。

以上のことから、接触を考慮しない崩壊解析は安全側の評価結果をもたらすと考えられる。

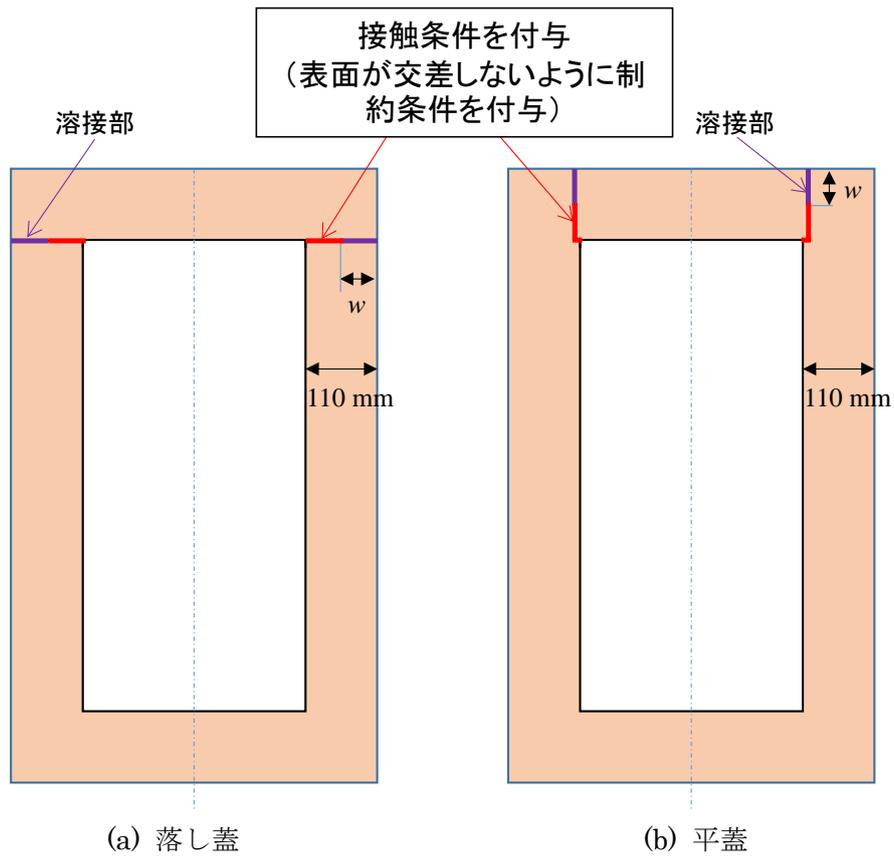


図 8.4.2-5 接触条件を付与したモデル

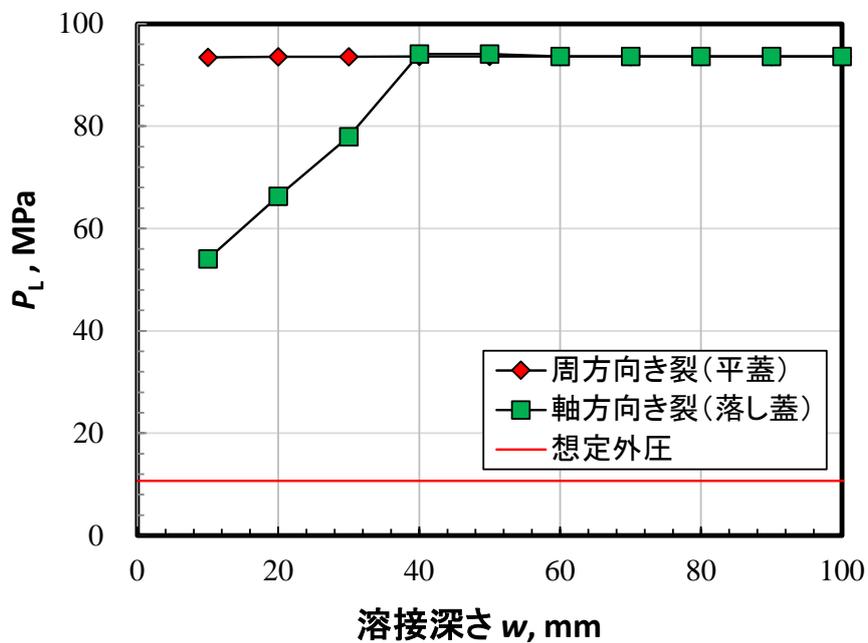
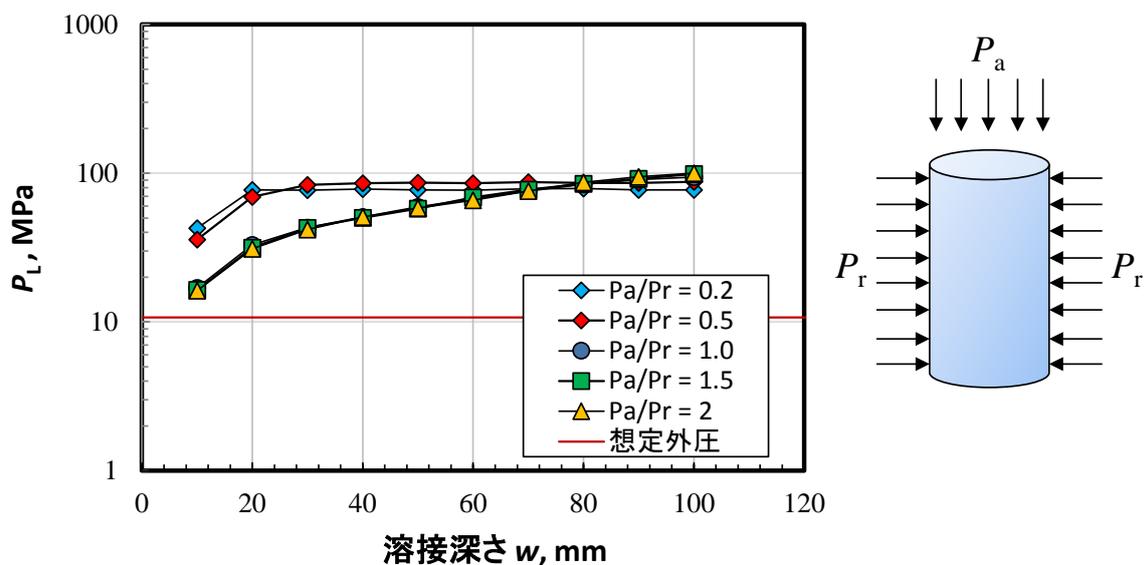


図 8.4.2-6 外圧による崩壊荷重

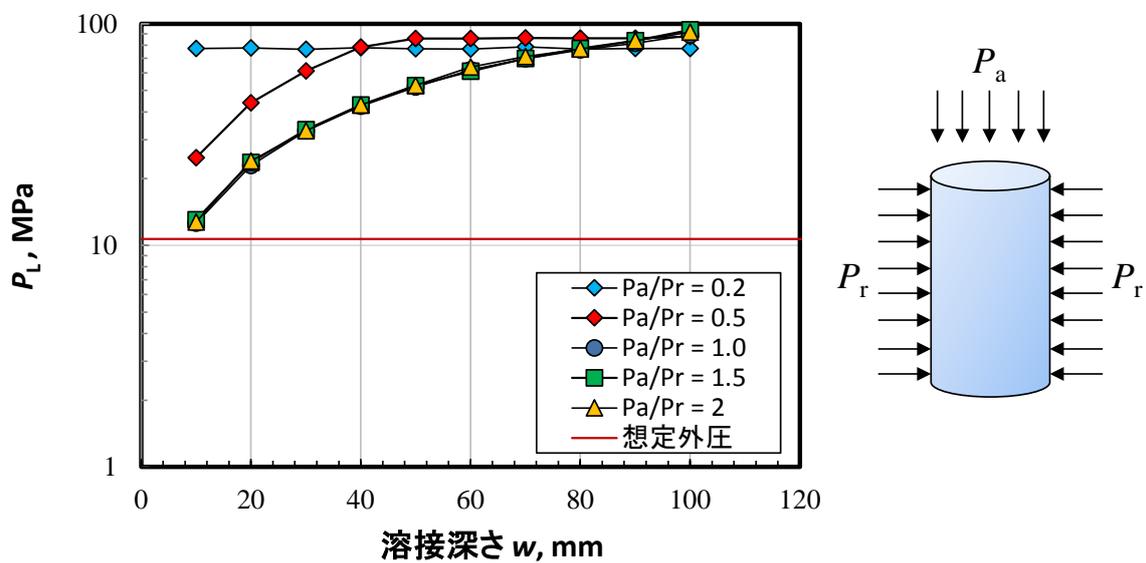
(未溶接部の表面同士が交差しないように接触条件を考慮、 $S_y = 200$  MPa)

#### (4) 偏圧の影響

軸方向の圧力  $P_a$  と周方向の圧力  $P_r$  の比率を、 $P_a/P_r = 0.2, 0.5, 1.0, 1.5$  および  $2.0$  とした場合の、溶接深さと崩壊荷重の関係を図 8.4.2-7 に示す。未溶接部の接触は考慮せず、降伏強度は  $S_y = 200 \text{ MPa}$  とした。崩壊荷重（圧力） $P_L$  は、 $P_a$  と  $P_r$  の大きい方とした。圧力比  $P_a/P_r$  が変化しても、 $P_a/P_r = 1.0$  の場合よりも崩壊荷重が大きく低下することはなかった。とくに、 $P_a/P_r < 1$  の場合は、崩壊荷重が増加する傾向を示した。



(a) 平蓋



(b) 落とし蓋

図 8.4.2-7 外圧による崩壊荷重（偏圧の影響、 $S_y = 200 \text{ MPa}$ ）

## (5) まとめ

本解析では、未溶接を亀裂と見なした場合の崩壊解析を実施した。平蓋、落し蓋いずれの場合も溶接深さが小さくなるほど崩壊荷重が低下した。しかし、溶接深さ 10 mm の場合でも、崩壊荷重は 10.7 MPa を下回ることはなかった。また、接触を考慮した場合の崩壊荷重は、考慮しない場合よりも大きくなった。

偏圧を考慮した解析では、崩壊荷重の顕著な低下は認められなかった。

### 8.4.3 平蓋形状を対象とした溶接欠陥を起点とした破損

8.2.1 で述べたオーバーパックの破壊形態（①欠陥を起点としない破壊、②溶接欠陥を起点とした破壊、③未溶接部を起点とした破壊）の内、②の溶接欠陥を起点とした破壊を発生させないための解析を行った。照射を受けた炭素鋼が対象となるので、破壊モードは脆性破壊を想定した。照射量が小さい場合は、弾塑性破壊（延性き裂を起点とした破壊）が発生する可能性もあるが、評価上は脆性破壊に対する破壊荷重の方が安全側となる。

残留応力および外圧が作用する状態で、溶接欠陥（き裂寸法）を変化させたときの応力拡大係数を算出する。そして、解析結果から、溶接後の検査で許容できる溶接欠陥寸法、または許容できる残留応力の大きさを示す。

#### (1) 解析方法

溶接欠陥を含む図 8.4.3-1 の平蓋形状のオーバーパックを対象に解析を行った。板厚は、減肉を最大限に想定して 110 mm とした。溶接欠陥は、半円形状の亀裂を溶接部に沿った形状とし、外面からの亀裂深さを  $a$  とした。溶接深さは、 $w$  を用いて定義した。そして、図 8.4.3-2 に示すように 3次元ソリッド要素（要素タイプ：C3D20）を用いて有限要素メッシュを作成した。このメッシュ分割方法の妥当性は、人工バリア品質／健全性評価手法の構築（オーバーパック）（平成 27 年度[8]）における「オーバーパックが破壊しない溶接深さおよび限界寸法解析」で検証済みである。

荷重は、オーバーパック外側から円周方向に 10.7 MPa の外圧を負荷した場合、およびオーバーパック上部から軸方向に 10.7 MPa の外圧を負荷した場合、および残留応力を負荷した場合とした。溶接残留応力分布については、100 MPa のような残留応力分布を仮定した。解析においては、残留応力は亀裂面に面圧として負荷した。

亀裂深さ  $a$  を最小 10 mm 最大 60 mm とし、溶接深さ  $w$  は表 8.4.3-1 のように設定した。メッシュ分割の制約により設定できる最小溶接深さ  $w$  は亀裂深さ  $a$  に対して  $w = a + 10 \sim 30$  mm となり、全部で 39 ケースとなる。応力拡大係数は亀裂先端からそれぞれ 7 経路について算出し、第 3 から第 7 経路の平均値を用いた。

表 8.4.3-1 溶接欠陥に対する構造強度の解析条件

(溶接深さ  $w$  と亀裂深さ  $a$  の組み合わせ、○：解析実施、×：解析実施せず)

溶接深さ $w$ / 亀裂深さ $a$	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm	80 mm	90 mm	100 mm	110 mm
10 mm	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
20 mm	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
30 mm	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○
40 mm	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○
50 mm	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○
60 mm	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○

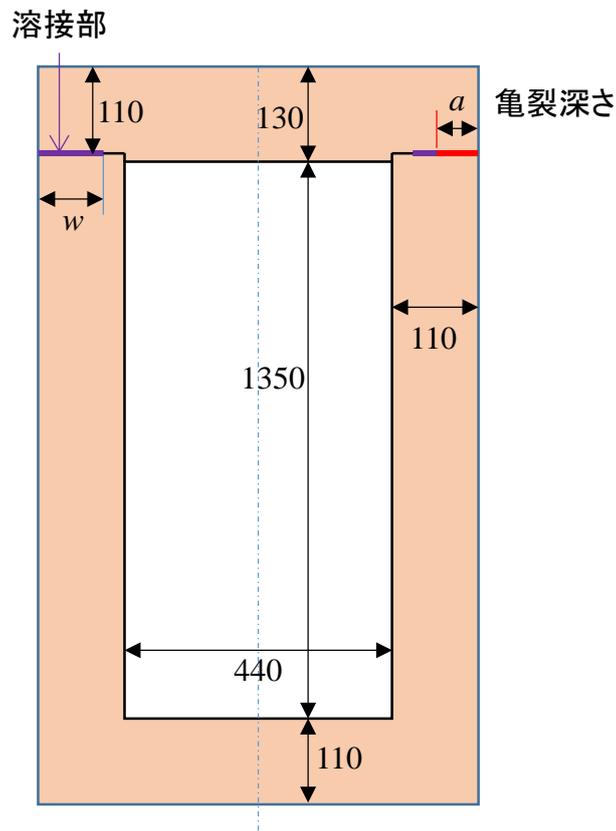


図 8.4.3-1 き裂深さと溶接深さの定義 (単位: mm)

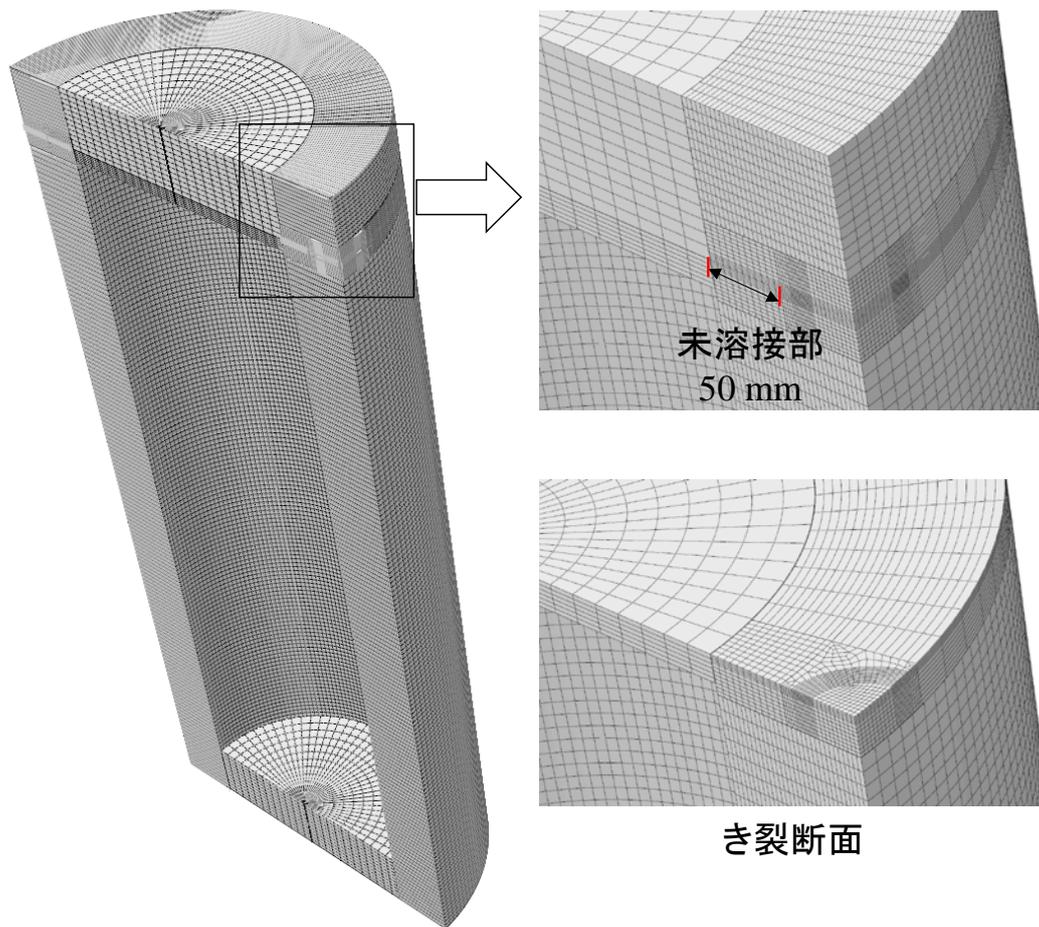


図 8.4.3-2 溶接欠陥に対する強度評価用のメッシュ分割 ( $a = 40 \text{ mm}$ 、 $w = 60 \text{ mm}$ )

## (2) 解析結果

外圧を荷した場合のモード I の応力拡大係数と亀裂深さの関係を図 8.4.3-3 に示す。外圧に対する応力拡大係数は相対的に小さく、溶接深さにかかわらず  $1 \text{ MPa m}^{0.5}$  より大きくなることはなかった。また、軸方向の外圧に対しては応力拡大係数が負となる場合もあった。以上の結果より、外圧により脆性破壊が発生することはないと考えられる。

残留応力を荷した場合のモード I の応力拡大係数と亀裂深さの関係を図 8.4.3-4 に示す。残留応力を荷した場合の応力拡大係数は  $10 \text{ MPa m}^{0.5}$  を超えている。また、亀裂深さ  $a$  が大きくなるほど応力拡大係数が増加した。一方、溶接深さに対する変化は顕著ではなかった。次式で正規化した正規化応力拡大係数  $f$  を図 8.4.3-5 に示す。

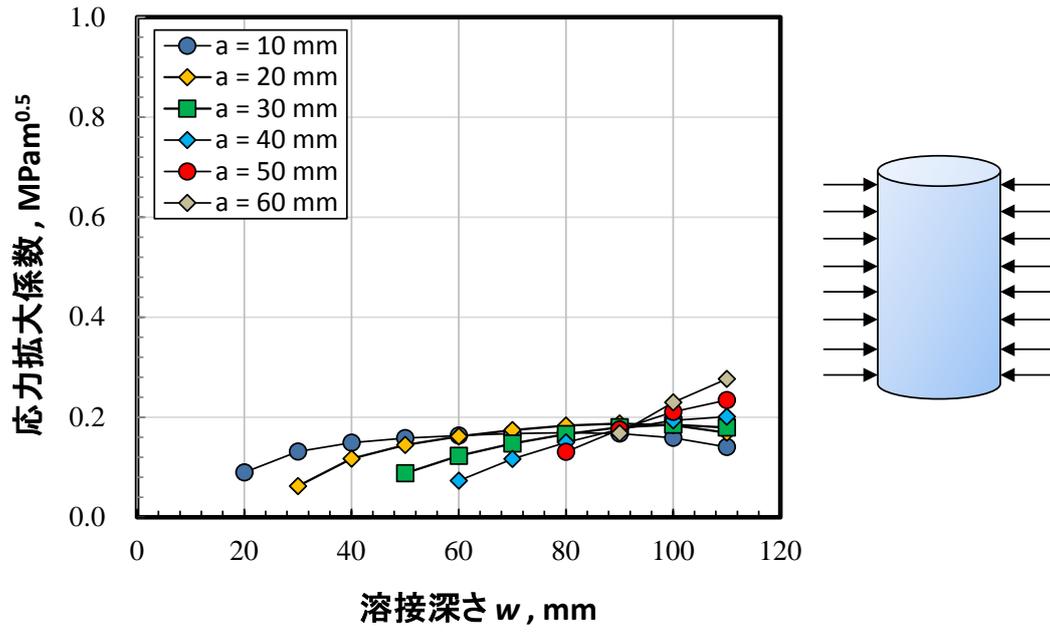
$$f = \frac{K}{\sigma_R \sqrt{\pi a}} \quad \text{式(8.4.3-1)}$$

$K$  は応力拡大係数、 $\sigma_R$  は残留応力を示し、 $\sigma_R = 100 \text{ MPa}$  を代入した。正規化残留応力は、亀裂深さや溶接深さにあまり依存しなかった。

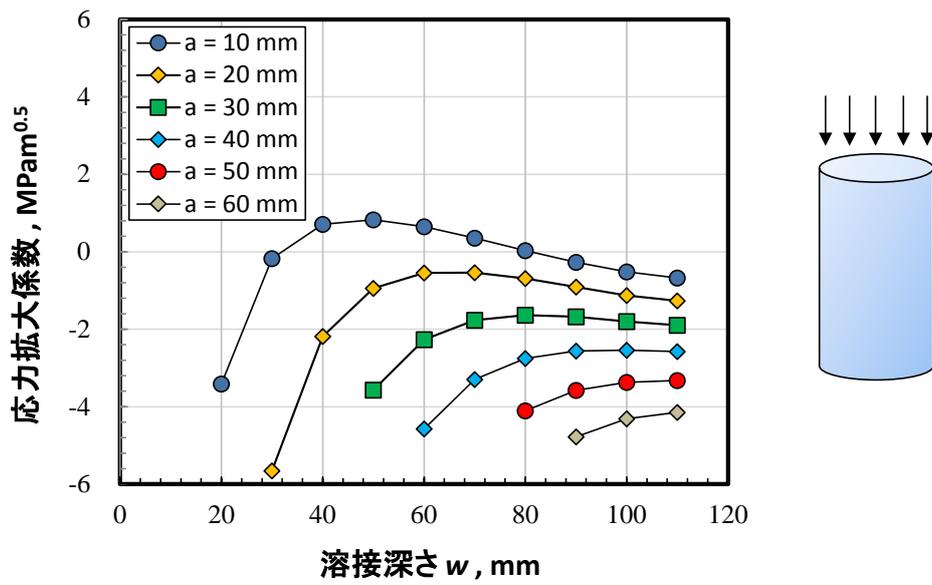
図 8.4.3-6 は、残留応力荷時の相当応力分布を示す。亀裂面に面圧を荷することで残留応

力を模擬しているため、応力は亀裂部分の近傍でのみ大きくなっている。そして、残留応力により亀裂が開口する方向に変形している。この図では溶接深さ  $w = 60 \text{ mm}$ （未溶接部  $50 \text{ mm}$ ）となっているが、未溶接部先端で応力集中している様子が確認できる。

図 8.4.3-4 の結果は  $100 \text{ MPa}$  の残留応力が作用する場合の応力拡大係数であり、破壊評価では破壊靱性の大小関係から破壊の有無を判断することになる。一方、実際の破壊靱性は照射量によって変化する。また、残留応力も溶接施工方法や熱処理によって必ずしも  $100 \text{ MPa}$  とはならない可能性もある。応力拡大係数は残留応力に対して比例することから、図 8.4.3-4 の結果から、破壊靱性値が与えられた場合に許容される残留応力を算出することができる。図 8.4.3-7 は、破壊靱性値として  $K_{Ic}$  が与えられた時、それぞれの亀裂深さで許容される残留応力の値を示す。外圧の影響は考慮していない。実線は  $w = 0$  の場合の結果を示し、中実のプロットは、表 8.4.3-1 において、各亀裂深さ条件において設定できる最小の  $w$  に対する応力拡大係数を用いた結果を示す。応力拡大係数は  $w$  が小さくなるほど大きくなるので、中実のプロットが安全側の結果をもたらす。実線と中実プロットはほぼ一致していることから、溶接深さの影響は無視できると考えられる。許容される残留応力は亀裂が浅いほど大きくなっている。この図を用いることで、許容される残留応力値の算出や検査で見つべき亀裂サイズを推定することができる。



(a) 円周方向に 10.7 MPa の外圧を負荷した場合



(b) 軸方向に 10.7 MPa の外圧を負荷した場合

図 8.4.3-3 外圧を負荷した場合の応力拡大係数

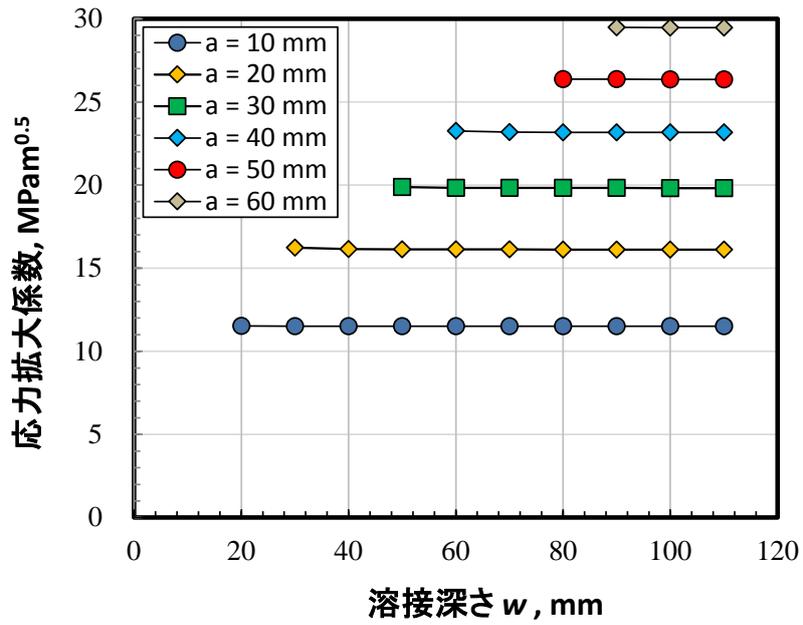


図 8.4.3-4 100 MPa の残留応力を負荷した場合の応力拡大係数

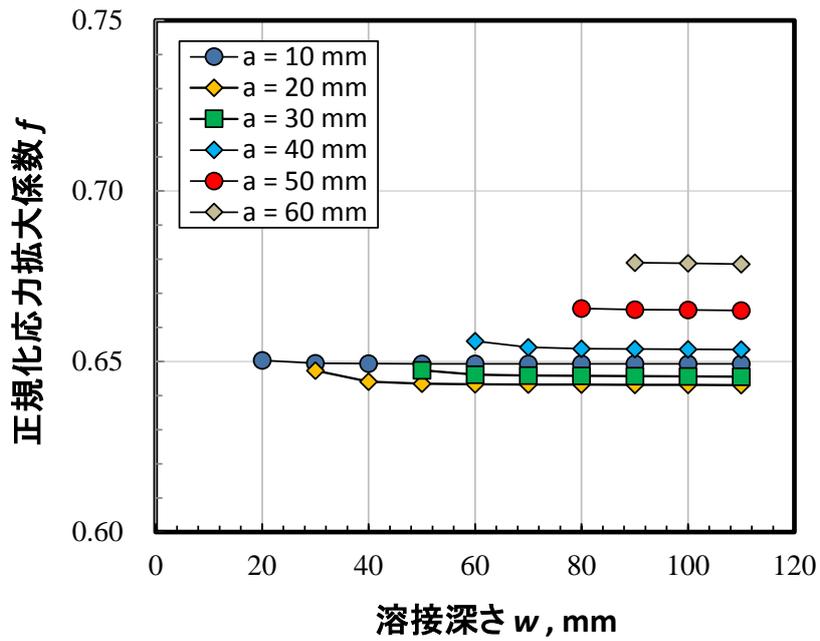


図 8.4.3-5 100 MPa の残留応力を負荷した場合の正規化応力拡大係数

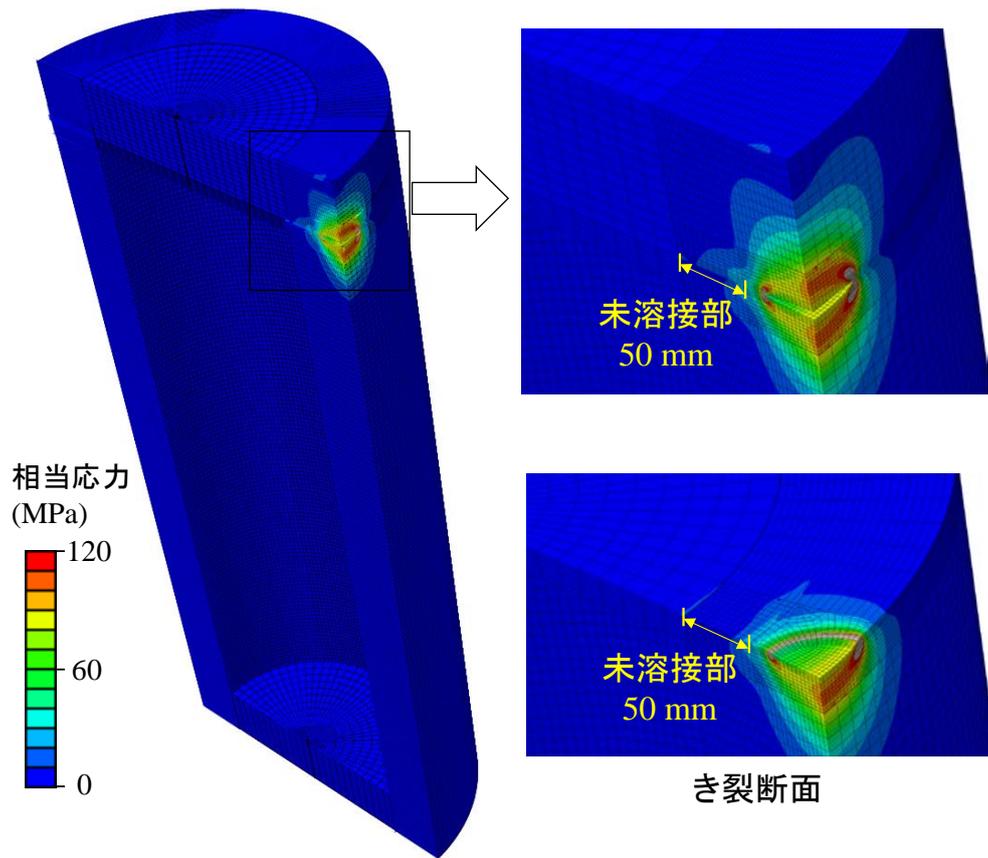


図 8.4.3-6 残留応力を負荷した場合の相当応力分布  
( $a = 40 \text{ mm}$ ,  $w = 60 \text{ mm}$ 、変形は 100 倍して表示)

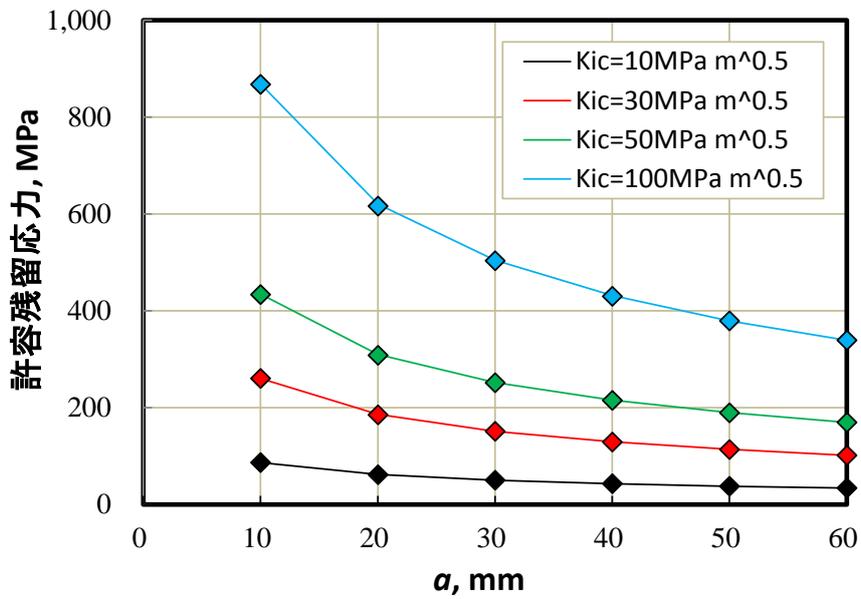


図 8.4.3-7 許容残留応力と亀裂深さの関係

### (3) まとめ

亀裂深さを変化させながら、脆性破壊の駆動力である応力拡大係数を算出した。外圧の破壊に対する影響は無視できるぐらいに小さく、溶接残留応力が主な駆動力となった。応力拡大係数に及ぼす溶接深さの影響はほとんどなかった。材料の破壊靱性値を与えることで、許容される残留応力値の算出や検査で発見すべき亀裂サイズを推定することができる。

### 8.5 本章のまとめ

本章では、オーバーパックの構造健全性を評価するため、塑性崩壊に対する強度、および未溶接部や溶接欠陥を起点とした破壊を評価するための破壊駆動力を算出した。とくに、溶接深さを全板厚よりも小さくした場合の影響に着目するとともに、外圧に対しては偏圧の影響を考慮した。結果は以下のように要約できる。

- ① 塑性崩壊が発生する外圧（崩壊荷重）と板厚の関係を調べた。その結果、降伏強度 100 MPa の場合でも、板厚が 50 mm あれば崩壊しないことが示された。つまり、オーバーパックは外圧に対して十分な強度を有していると判断できる。また、崩壊荷重は降伏強度に対して比例的に変化した。
- ② 未溶接を亀裂と見なした場合の崩壊解析を実施した。平蓋、落し蓋いずれの場合も溶接深さが小さくなるほど崩壊荷重が低下した。しかし、溶接深さ 10 mm の場合でも、崩壊荷重は 10.7 MPa を下回ることはなかった。
- ③ 崩壊解析において偏圧の影響を考慮した場合でも、崩壊荷重が顕著に低下することはなかった。
- ④ 脆性破壊の駆動力である応力拡大係数を算出したところ、外圧の破壊に対する影響は無視できるぐらいに小さく、溶接残留応力が主な駆動力であることがわかった。材料の破壊靱性値を与えることで、許容される残留応力値の算出や検査で発見すべき亀裂サイズを推定することができる。

## 第8章 参考文献

- [1] 釜谷昌幸、北條智博、望月正人、中性子照射を受けた原子炉容器炉内構造物の構造健全性（ステンレス鋼構造物の冷間加工による破壊強度変化）、日本機械学会論文集、Vol. 80、No.817 (2014).
- [2] 日本機械学会、発電用原子力設備規格設計・建設規格、JSME S NC1-2012、日本機械学会 (2012).
- [3] 三菱重工業株式会社、オーバーパックの構造健全性に関する研究（核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書）、JNC TJ8400 99-050 (1999).
- [4] 日本機械学会、発電用原子力設備規格 設計・建設規格 事例規格 弾塑性有限要素解析を用いたクラス1容器に対する強度評価の代替規定、JSME S NA-CC-005、日本機械学会 (2008).
- [5] 日本機械学会、発電用原子力設備規格維持規格、JSME S NA1-2012、日本機械学会 (2012).
- [6] 小林英男編、構造健全性ハンドブック、共立出版 (2005).
- [7] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書 第1分冊人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック (2015).
- [8] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書 第1分冊人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック (2016).

## 第9章 まとめ

### 9.1 オーバーパックの健全性評価手法の構築

定置後の検査や補修を必要とせずに、要求される閉じ込め期間中にオーバーパックが健全であることを判断するための健全性評価手法について検討した。そしてオーバーパックの破損形態および破損モードを想定し、全ての破損形態に対して破損を防止するための研究開発課題を設定した。

### 9.2 現象理解の腐食試験

工学規模試験装置（幌延 URL、地上工学規模試験）を解体し、これまでにセンサーで計測した結果および解体後の腐食量を計測した結果を基に腐食挙動を評価したところ、幌延 URL における工学規模試験、地上における工学規模試験ともに、平均して数百～千 h で  $20\sim 30\mu\text{m}$  の非常にゆっくりとした速度で腐食が進展しており、JAEA および JNC が実施したベントナイト中の長期腐食試験の挙動とも一致した。また、不均質条件試験、地上工学規模試験、幌延 URL 工学規模試験において、平均的な腐食速度は概ね  $10\mu\text{m/y}$  程度となり、腐食は、H12 レポート I で想定されたシナリオに則り進行したと考えられる。しかしながら、一部の経時変化試験と幌延 URL 工学規模試験および地上試験の上部の緩衝材ブロックが付着した部分で、腐食の局在化が進展しており、部分的には、従来の知見と異なる現象も認められた。これらは、緩衝材とオーバーパックの接触の不均一性で、全面腐食が進行する部分と腐食が局在する部分が生じたと考えられることから、強制的に珪砂等で緩衝材とオーバーパックのクリアランスを埋めるような施工が、初期の腐食に有効な可能性がある。なお、長期的には緩衝材の膨潤が進み、オーバーパックと均一に付着するようになると、腐食は緩衝材中の地下水の拡散速度に依存するようになり、いずれは、全面腐食に移行すると思われる。

### 9.3 メカニズム解明の腐食試験

溶接部の選択的な腐食のメカニズムを解明するために、金属組織ごと（母材、溶接金属、HAZ）の局所的な分極曲線の取得、およびそれらの部位間での電位差の測定を実施した。分極曲線の取得では、同一の化学成分では溶接金属の腐食電位が母材と比べて低くなる傾向がある。このため、定電位分極による加速試験では、過電圧が大きくなる溶接金属が優先的に腐食すると考えられる。

一方、2電極間の電位差では母材と HAZ は溶接金属よりも貴であることを示唆する結果が得られた。この結果は溶接部の選択腐食の現象と整合する。同一化学成分であっても、溶接時の入熱により金属組織が異なることで、電位に差が生じ、両者間でマクロな腐食電池の形成によって溶接金属で Fe の溶解が促進されると考えられる。分極試験についても、TIG 溶接部の原質部と再熱部の間の差について評価する等、さらに測定環境や条件の検討を加え、測定データの信頼性を高めることが重要と考えられる。

#### 9.4 溶接部の残留応力改善手法

開先深さ 90 mm の平蓋形状のオーバーパックを対象に溶接部残留応力解析、および EIHSI 法解析により EIHSI 法による残留応力低減効果を確認した。その結果、EIHSI 法の施工により腐食代に相当する外表面から 40 mm の深さを圧縮に改善する熱処理条件を取得することができた。今回選定した EIHSI 法の施工条件では、軸方向応力が外面では圧縮応力となったため、溶接金属内部・外表面から 90 mm 位置では 767 MPa の引張応力となった。しかし、仮に初層付近に溶接欠陥が存在し、そこを起点にき裂が発生したとしても、周方向に局所的なき裂であれば溶接金属内部の応力分布に大きな変化は生じず、溶接金属の外面側（外面から 50 mm 深さより浅い部分）では圧縮応力場となっているため、破損には至らないと考えられる。今後、実証試験としてオーバーパックのフルスケールモデルに対する溶接後および EIHSI 法の施工後における深さ方向の応力分布を測定し、解析結果の妥当性を確認する事が必要である。

#### 9.5 溶接部の非破壊検査技術の信頼性向上

溶接欠陥の寸法および位置の測定に対する安全係数の検討では、国内外のデータ整理方法の事例を示し、昨年度に実施した測定試験のデータをまとめた。その結果、高さ測定の標準偏差は FMC/TFM で 3.7 mm、フェーズドアレイ法で 2.5 mm であった。そのため、測定値に対して FMC/TFM であれば 6.1 mm、フェーズドアレイ法であれば 4.1 mm 加算することにより 90%信頼区間で欠陥寸法を定量化できることがわかった。複数欠陥の検出および測定精度に関する検討では、シミュレーション解析により近接欠陥の識別について評価を行い、欠陥高さ  $a = 4.0$  mm の 2 つの欠陥が  $a$  の 0.7 倍である近接距離 2.8 mm で存在する場合、周波数 2 MHz 以上の横波ならびに周波数 3 MHz 以上の縦波で分離可能であることが確認された。また、検査手順の設定では、フェーズドアレイ法による探傷試験方法について、探傷試験の要領と留意点等を整理した。

#### 9.6 炭素鋼の脆化量予測

ガラス固化体から放出される放射線によるオーバーパック（炭素鋼）の破壊靱性値の低下量を予測することを目的として、照射試験片の TEM 観察と 3 次元アトムプローブ分析および解析による照射損傷量の予測を行った。その結果、照射に伴うミクロ組織の変化量と硬さの増加量との関係を解析により求め、照射試験の結果から得られた損傷量と硬さの関係、照射材を模擬した冷間加工材を用いた破壊靱性試験と硬さ試験の結果を用いて埋設 1,000 年後のオーバーパックの脆化量を推定した結果、破壊靱性値の低下量は無視できるほど小さいことがわかった。

#### 9.7 オーバーパックの強度評価

オーバーパックの構造健全性を評価するため、塑性崩壊に対する強度および未溶接部や溶接欠陥を起点とした破壊を評価するための破壊駆動力を算出した。とくに、溶接深さを全板厚よりも小さくした場合の影響に着目するとともに、外圧に対しては偏圧の影響を考慮した。その結果、塑性崩壊が発生する外圧（崩壊荷重）と板厚の関係から、降伏強度が 100 MPa の場合でも、板厚が 50 mm あれば崩壊しないことが示された。つまり、オーバーパックは外圧に対して十分な強度を有していることがわかった。また、未溶接を亀裂と見なした場合の崩壊解析を実施し、平蓋、

落とし蓋いずれの場合も溶接深さが小さくなるほど崩壊荷重が低下したが、溶接深さ 10 mm の場合でも、崩壊荷重は 10.7 MPa を下回ることはなかった。