

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
ーオーバーパック

平成29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、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－オーバーパックの開発成果を取りまとめたものです。

報告書の構成

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	緒言	1-1
1.1	本事業の背景および目的	1-1
1.1.1	背景	1-1
1.1.2	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	全体計画	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	目的	1-3
1.3.2	5ヵ年間の研究開発計画	1-3
1.3.3	平成28年度の実施内容	1-5
第2章	オーバーパックの健全性評価手法の構築	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	試験目的及び概要	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ヵ年計画	3-15
3.2	工学規模試験の実施	3-18

3.2.1	幌延 URL における工学規模試験の実施	3-18
3.2.2	地上における工学規模試験の実施	3-30
3.3	小規模要素試験の実施	3-39
3.3.1	不均質試験	3-39
3.3.2	測定項目	3-41
3.3.3	解体手順・作業工程の検討	3-42
3.3.4	解体の実施	3-48
3.3.5	模擬オーバーパックの外観観察、および腐食減肉量の測定	3-62
3.4	工学規模試験装置の解体分析計画	3-78
3.4.1	幌延 URL での工学規模試験装置の解体分析計画	3-79
3.4.2	分析項目の検討	3-82
3.4.3	幌延 URL での工学規模試験装置の解体工程	3-83
3.4.4	幌延 URL での工学規模試験装置解体作業における必要機器及び治具の設計	3-97
3.4.5	地上工学規模試験装置の解体分析計画	3-103
3.4.6	分析項目の検討	3-104
3.4.7	地上工学規模試験装置の解体工程	3-105
3.4.8	地上工学規模試験装置解体作業における必要機器	3-110
3.5	腐食計測技術の適用性確認調査	3-111
3.5.1	概要	3-111
3.5.2	同一環境下センサー性能確認試験	3-111
3.5.3	3 電極式センサー（工学規模試験で採用）	3-117
3.5.4	薄膜レジストメトリー	3-118
3.5.5	電気抵抗/ポテンシャルドロップ法	3-131
3.5.6	インピーダンス（EIS）法	3-168
3.5.7	腐食計測技術の適用性確認調査における 3 電極式、薄膜レジストメトリー、電気抵抗/ポテンシャルドロップ法、および、インピーダンス法の比較	3-184
3.6	まとめ	3-187
第 4 章	メカニズム解明の腐食試験	4-1
4.1	実施目的	4-1
4.2	これまでの実施内容	4-1
4.2.1	平均腐食速度の評価	4-1
4.2.2	水素吸収挙動の評価	4-2
4.2.3	浸漬試験計画の見直し	4-2
4.3	試験方法	4-3
4.3.1	浸漬試験	4-3
4.3.2	試験片の取り出し	4-7
4.3.3	評価、分析方法	4-8
4.4	試験結果	4-15

4.4.1	緩衝材共存環境における炭素鋼腐食生成物の分析結果	4-15
4.4.2	腐食挙動の評価	4-35
4.4.3	炭素鋼水素分析結果	4-52
4.5	まとめ	4-64
第5章	溶接部の残留応力改善手法の検討	5-1
5.1	背景および目的	5-1
5.2	残留応力低減のための予備解析の実施	5-1
5.2.1	平蓋オーバーパックの形状	5-1
5.2.2	予備解析	5-4
5.3	溶接残留応力低減解析	5-15
5.3.1	解析手順	5-15
5.3.2	解析モデル	5-15
5.3.3	解析結果	5-15
5.4	まとめ	5-18
第6章	オーバーパックの強度に関する検討	6-1
6.1	背景および目的	6-1
6.1.1	背景	6-1
6.1.2	目的	6-2
6.2	構造健全性確保の考え方	6-2
6.2.1	破壊形態および破壊モードの想定	6-2
6.2.2	破壊強度評価方法	6-4
6.3	解析の基本条件	6-6
6.3.1	解析方法	6-6
6.3.2	解析モデル	6-6
6.3.3	想定した荷重	6-6
6.4	解析の実施	6-7
6.4.1	板厚と崩壊荷重の関係の整理	6-7
6.4.2	溶接深さをパラメータとした破損防止	6-16
6.4.3	外圧による崩壊解析	6-24
6.4.4	まとめ	6-25
6.4.5	溶接欠陥に対する構造強度	6-30
6.4.6	複数の溶接欠陥に対する強度の検討	6-37
6.5	まとめ	6-42
第7章	炭素鋼の脆化量予測に関する検討	7-1
7.1	はじめに	7-1
7.2	照射損傷量の予測モデルの構築	7-1
7.2.1	欠陥集合体の核生成	7-2
7.2.2	反応速度論モデル	7-3

7.2.3	計算結果および考察	7-5
7.3	照射試験による脆化因子の把握	7-12
7.3.1	脆化因子におよぼす材料組成の影響	7-12
7.3.2	脆化因子におよぼす照射速度の影響	7-48
7.4	炭素鋼の破壊靱性に関する検討	7-67
7.4.1	試験材	7-67
7.4.2	引張試験	7-68
7.4.3	破壊靱性試験	7-71
7.4.4	硬さ試験	7-75
7.5	板厚の影響	7-77
7.5.1	目的	7-77
7.5.2	計算コードおよび計算条件	7-78
7.5.3	計算結果	7-79
7.5.4	オーバーパック内の照射計算とはじき出し計算	7-82
7.5.5	オーバーパックにおけるはじき出し損傷計算	7-88
7.6	まとめ	7-90
第8章	溶接部の非破壊検査技術の信頼性向上	8-1
8.1	背景および目的	8-1
8.2	実施内容の概要	8-1
8.3	超音波探傷試験用の溶接試験体の製作	8-1
8.3.1	溶接試験体の概要	8-1
8.4	欠陥寸法および位置の測定精度向上に関する検討	8-4
8.4.1	目的	8-4
8.4.2	実施計画	8-4
8.4.3	試験条件	8-5
8.4.4	探傷試験結果	8-8
8.4.5	測定結果の評価	8-17
8.5	複数欠陥の検出および測定精度に関する検討	8-24
8.5.1	目的	8-24
8.5.2	実施計画	8-24
8.5.3	シミュレーション解析の解析モデル及び解析条件	8-24
8.5.4	シミュレーション解析結果及び評価	8-27
8.6	溶接欠陥寸法の測定および断面マクロ調査	8-40
8.6.1	目的	8-40
8.6.2	溶接試験体の切断条件	8-40
8.6.3	溶接欠陥の断面マクロ写真	8-42
8.6.4	溶接欠陥寸法の実測値	8-42
8.7	まとめ	8-43

第9章	まとめ.....	9-1
9.1	オーバーパック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の検討.....	9-2
9.5	オーバーパックの強度に関する検討.....	9-2
9.6	炭素鋼の脆化量予測に関する検討.....	9-2
9.7	溶接部の非破壊検査技術の信頼性向上	9-3

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	2-20
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	3-4
図 3.1.2-2	試験条件検討；環境系／試験系の因子	3-6
図 3.1.2-3	幌延町所在地、幌延 URL、350m 調査坑道平面図	3-9
図 3.1.2-4	深度 350m 調査坑道 平面図	3-10
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	3-10
図 3.1.2-6	模擬オーバーパック構造及び外観	3-11
図 3.1.2-7	埋込型 3 電極センサー・外形図及び外観	3-11
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）	3-12
図 3.1.2-9	幌延 URL 工学規模試験 外観・センサー配置図	3-13
図 3.1.2-10	幌延 URL 工学規模試験 試験体設置状況	3-14
図 3.2.1-1	幌延 URL 試験坑道 5 溶存酸素量	3-19
図 3.2.1-2	幌延 URL 試験坑道 5 溶存二酸化炭素量	3-19
図 3.2.1-3	幌延地下水の組成	3-20
図 3.2.1-4	幌延地下水と海水の Na と Cl 濃度の比較	3-20
図 3.2.1-5	幌延 URL pH の分析結果	3-21
図 3.2.1-6	幌延 URL pH 測定結果	3-21
図 3.2.1-7	幌延 URL Eh 測定結果	3-22
図 3.2.1-8	幌延 URL 工学規模試験 3 電極センサー近傍温度測定結果	3-23
図 3.2.1-9	模擬オーバーパック電位（亜鉛照合電極基準）の経時変化	3-24
図 3.2.1-10	幌延 URL 工学規模試験 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	3-25
図 3.2.1-11	電流値の変動にノイズ状の動きを確認できない例	3-27

図 3.2.1-12	分極曲線による腐食速度の測定下限値の評価	3-27
図 3.2.1-13	抽出される生データ例と電流・電圧間の相関プロット	3-28
図 3.2.1-14	抽出過程で不採用となる生データと相関プロット	3-28
図 3.2.1-15	3電極式腐食センサー腐食速度計測値の経時変化（再評価後）	3-29
図 3.2.2-1	地上工学規模試験装置積算給水量	3-32
図 3.2.2-2	地上工学規模試験 模擬地下水組成の経時変化	3-33
図 3.2.2-3	地上工学規模試験 pH の経時変化	3-33
図 3.2.2-4	地上工学規模試験 緩衝材ブロック中の温度測定結果	3-34
図 3.2.2-5	地上工学規模試験 オーバーパック電位（亜鉛照合電極基準）の経時変化	3-35
図 3.2.2-6	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	3-36
図 3.2.2-7	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	3-37
図 3.2.2-8	地上工学規模試験 交流インピーダンスセンサー測定結果	3-38
図 3.3.1-1	不均質試験 試験装置イメージ	3-39
図 3.3.1-2	不均質試験 外観・センサー配置図	3-40
図 3.3.3-1	不均質試験 試験装置解体手順	3-44
図 3.3.3-2	不均質試験 緩衝材ブロックサンプリング位置	3-45
図 3.3.3-3	不均質試験 現場での模擬オーバーパックの防錆処理	3-46
図 3.3.3-4	不均質試験 脱錆作業時の注意点	3-47
図 3.3.4-1	不掃除機外観（Suiden 社製 G クリーン 万能型）	3-48
図 3.3.4-2	珪砂+模擬地下水除去による縁切り作業	3-48
図 3.3.4-3	オイルポンプ外観（Meltec 製 手動式オイルチェンジャー OC-060）	3-49
図 3.3.4-4	オイル抜きの様子	3-49
図 3.3.4-5	試験体の試験容器からの取り出し	3-50
図 3.3.4-6	底板上のケイ砂の除去作業	3-50
図 3.3.4-7	架台への固定の様子	3-51
図 3.3.4-8	蓋部の取外し作業	3-51
図 3.3.4-9	蓋部撤去後の試験体	3-52
図 3.3.4-10	緩衝材ブロック除去作業	3-53
図 3.3.4-11	緩衝材ブロック採取作業	3-54
図 3.3.4-12	緩衝材ブロック切断解体後の様子（4 段目 90°付近）	3-55
図 3.3.4-13	緩衝材ブロック撤去後の模擬オーバーパック	3-56
図 3.3.4-14	スコッチブライトによる洗浄作業	3-57
図 3.3.4-15	水分除去作業	3-57
図 3.3.4-16	現場洗浄後の模擬オーバーパック	3-58
図 3.3.4-17	防錆処理後模擬オーバーパックの梱包作業	3-59
図 3.3.4-18	クールミン K-100 による脱脂作業	3-59
図 3.3.4-19	脱錆工程（左：浸漬直後、右：浸漬 3 分後）	3-60
図 3.3.4-20	脱錆工程終了時（浸漬 5 分後）	3-60

図 3.3.4-21	中和・防錆作業.....	3-61
図 3.3.4-22	脱錆・防錆処理後の模擬オーバーパック	3-61
図 3.3.5-1	オーバーパック試験体表面のスキャン画像取得装置による画像撮影状況	3-63
図 3.3.5-2	オーバーパック表面の展開図.....	3-64
図 3.3.5-3	不均質試験 3次元計測フローチャート	3-65
図 3.3.5-4	接触式による3次元計測の様子 (φ8mmプローブ (左)・φ1.5mmプローブ (右))	3-65
図 3.3.5-5	軸方向測定位置.....	3-66
図 3.3.5-6	周方向測定位置 (上部側から見た場合)	3-66
図 3.3.5-7	オーバーパック表面の展開図上に記した形状計測結果.....	3-67
図 3.3.5-8	母材・溶接部の平均腐食量	3-68
図 3.3.5-9	母材部の3次元形状計測結果に基づくヒストグラム	3-69
図 3.3.5-10	溶接部の3次元形状計測結果に基づくヒストグラム	3-69
図 3.3.5-11	有効粘土密度と透水係数	3-72
図 3.3.5-12	不均質試験 乾燥密度と有効粘土密度	3-73
図 3.3.5-13	不均質試験 含水比 (重量含水率)	3-74
図 3.3.5-14	不均質試験 体積含水率.....	3-75
図 3.3.5-15	不均質試験装置の緩衝材ブロック中クーポン試験片、模擬オーバーパックの模 式図.....	3-76
図 3.3.5-16	不均質試験 溶接部の緩衝材ブロック隙間の有無と腐食量の関係	3-76
図 3.3.5-17	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	3-77
図 3.4.1-1	幌延 URL 350m 坑道平面図.....	3-80
図 3.4.1-2	幌延 URL 試験坑道 5 試験孔 1 付近 (2016年12月7日撮影)	3-80
図 3.4.1-3	幌延 URL 350m 周回坑道 (2016年7月6日撮影)	3-81
図 3.4.1-4	幌延 URL 350m 西立坑風門 (2016年7月6日撮影)	3-81
図 3.4.1-5	幌延 URL 東立坑ステージ (2016年11月29日撮影)	3-81
図 3.4.3-1	幌延 URL 工学規模試験装置解体 地下解体案 (1/8)	3-84
図 3.4.3-2	幌延 URL 工学規模試験装置解体 地下解体案 (2/8)	3-85
図 3.4.3-3	幌延 URL 工学規模試験装置解体 地下解体案 (3/8)	3-86
図 3.4.3-4	幌延 URL 工学規模試験装置解体 地下解体案 (4/8)	3-87
図 3.4.3-5	幌延 URL 工学規模試験装置解体 地下解体案 (5/8)	3-88
図 3.4.3-6	幌延 URL 工学規模試験装置解体 地下解体案 (6/8)	3-89
図 3.4.3-7	幌延 URL 工学規模試験装置解体 地下解体案 (7/8)	3-90
図 3.4.3-8	幌延 URL 工学規模試験装置解体 地下解体案 (8/8)	3-91
図 3.4.3-9	幌延 URL 工学規模試験装置解体 地上解体案 (1/5)	3-92
図 3.4.3-10	幌延 URL 工学規模試験装置解体 地上解体案 (2/5)	3-93
図 3.4.3-11	幌延 URL 工学規模試験装置解体 地上解体案 (3/5)	3-94
図 3.4.3-12	幌延 URL 工学規模試験装置解体 地上解体案 (4/5)	3-95

図 3.4.3-13	幌延 URL 工学規模試験装置解体 地上解体案 (5/5)	3-96
図 3.4.4-1	幌延 URL 工学規模試験解体 吊り治具 A	3-98
図 3.4.4-2	幌延 URL 工学規模試験装置解体 仮置き台	3-99
図 3.4.4-3	幌延 URL 工学規模試験装置解体 吊り治具 B	3-100
図 3.4.4-4	幌延 URL 工学規模試験装置解体 吊り治具 C	3-101
図 3.4.4-5	幌延 URL 工学規模試験装置解体 試験体輸送容器	3-102
図 3.4.5-1	地上工学規模試験 試験の様子	3-103
図 3.4.7-1	地上工学規模試験装置解体 (1/4)	3-106
図 3.4.7-2	地上工学規模試験装置解体 (2/4)	3-107
図 3.4.7-3	地上工学規模試験装置解体 (3/4)	3-108
図 3.4.7-4	地上工学規模試験装置解体 (4/4)	3-109
図 3.5.2-1	同一環境下センサー性能確認試験セル	3-113
図 3.5.2-2	アクリル板固定用のネジ	3-114
図 3.5.2-3	ベントナイトの切断例	3-114
図 3.5.2-4	ベントナイトの設置手順	3-115
図 3.5.2-5	ベントナイト、珪砂を詰めたセル	3-115
図 3.5.2-6	密閉手順	3-116
図 3.5.2-7	同一環境下センサー性能確認試験装置の組み立て	3-116
図 3.5.3-1	3電極式センサーのセンサー部	3-117
図 3.5.3-2	3電極式センサーによる腐食速度の経時変化	3-117
図 3.5.4-1	試験体および試験セル	3-119
図 3.5.4-2	保温容器に納めたセルと計測装置	3-120
図 3.5.4-3	(a)試験中の蓋部の様子、(b)試験終了後、解体時の様子	3-121
図 3.5.4-4	試験終了後の試料。(a) R1-3 (b) R4-6(フィルタ紙被覆)(c)R4-6(フィルタ紙除去)	3-122
図 3.5.4-5	温度補償用鉄箔試料 (R1, R4) の電気抵抗 (R1, R4) および温度 (環境温度 T1, ベントナイト温度 T2) の経時変化	3-123
図 3.5.4-6	鉄箔試料 (R1~R6) の電気抵抗の経時変化 (破線は縦軸を 20 倍)	3-123
図 3.5.4-7	曝露鉄箔試料 (R2, R3, R5, R6) の相対抵抗の経時変化 (R2/R1, R3/R1, R5/R4, R6/R4)	3-124
図 3.5.4-8	抵抗変化から計算した鉄箔試料厚さの経時変化	3-124
図 3.5.4-9	2電極間の(a)インピーダンスおよび(b)位相の経時変化	3-125
図 3.5.4-10	2電極間のカップリング電流の経時変化	3-125
図 3.5.4-11	薄膜型センサー	3-127
図 3.5.4-12	薄膜レジストメトリーによる計測結果(1/4)	3-127
図 3.5.4-13	薄膜レジストメトリーによる計測結果(2/4)	3-128
図 3.5.4-14	薄膜レジストメトリーによる計測結果(3/4)	3-129
図 3.5.4-15	薄膜レジストメトリーによる計測結果(4/4)	3-130

図 3.5.5-1	炭素鋼オーバーパックに生じうる腐食モードとその因果時系列[10]	3-132
図 3.5.5-2	DCPD 法による腐食モニタリング概要	3-134
図 3.5.5-3	腐食パターンの仮定	3-135
図 3.5.5-4	図 3.5.5-3 の腐食パターンにおいて DCPD 法で得られる電位差の理論値	3-136
図 3.5.5-5	図 3.5.5-4 より算出した半径による CR_{ave} と CR_{max} の算出方法	3-136
図 3.5.5-6	複数の線径の試験片による DCPD モニタリング例	3-137
図 3.5.5-7	試験片の概略図	3-141
図 3.5.5-8	作成した試験片($\phi 0.1\text{mm}$ 、長さ 200mm)	3-141
図 3.5.5-9	試験セルと DCPD 測定装置	3-142
図 3.5.5-10	試験セル外観	3-142
図 3.5.5-11	脱不動態化 pH(pHd)の炭酸イオン濃度依存性と腐食モニタリング試験条件の選定[3]	3-143
図 3.5.5-12	試験①と②の DCPD 測定結果	3-144
図 3.5.5-13	試験①と②の DCPD 測定結果より算出した試験片半径	3-145
図 3.5.5-14	試験条件①と③の DCPD 測定結果	3-145
図 3.5.5-15	試験①と③の DCPD 測定結果より算出した試験片半径	3-146
図 3.5.5-16	試験①の試験後試験片	3-146
図 3.5.5-17	試験③の試験後試験片	3-147
図 3.5.5-18	試験条件③と④の DCPD 測定結果	3-147
図 3.5.5-19	試験③と④の DCPD 測定結果より算出した試験片半径	3-148
図 3.5.5-20	埋設容器の模式図	3-152
図 3.5.5-21	試験セル概略図	3-152
図 3.5.5-22	腐食モニタリングセンサ	3-153
図 3.5.5-23	補強後の試験片被覆部	3-153
図 3.5.5-24	樹脂埋め試験片	3-154
図 3.5.5-25	センサーと測定機器の接続	3-154
図 3.5.5-26	試験装置外観	3-155
図 3.5.5-27	試験終了時のベントナイトの様子	3-156
図 3.5.5-28	センサー周囲のベントナイト	3-156
図 3.5.5-29	DCPD 測定結果(1 回目)	3-157
図 3.5.5-30	DCPD 測定結果より算出したセンサー炭素鋼膜厚(1 回目)	3-157
図 3.5.5-31	ベントナイト除去後のセンサ(左)と樹脂埋め試験片(右)	3-158
図 3.5.5-32	センサー上部の破断箇所	3-158
図 3.5.5-33	試験終了時のベントナイトの様子(2 回目)	3-159
図 3.5.5-34	センサー周囲のベントナイト(2 回目)	3-159
図 3.5.5-35	DCPD 測定結果(2 回目)	3-160
図 3.5.5-36	DCPD 測定結果より算出したセンサー炭素鋼膜厚(2 回目)	3-160
図 3.5.5-37	ベントナイト除去後のセンサ(左)と樹脂埋め試験片(右)	3-161

図 3.5.5-38	センサー破断箇所と未破断で貫通している箇所の例	3-162
図 3.5.5-39	DCPD 測定結果の一部拡大図(1 回目)	3-163
図 3.5.5-40	DCPD 測定結果の一部拡大図(2 回目)	3-163
図 3.5.5-41	DCPD 測定結果の一部拡大図	3-164
図 3.5.5-42	ポテンシャルドロップ法による PDM 出力の経時変化	3-166
図 3.5.5-43	ポテンシャルドロップ法の測定後の薄膜センサー、ベントナイト	3-167
図 3.5.5-44	小型 ACM センサー出力の経時変化	3-167
図 3.5.6-1	腐食試験装置	3-171
図 3.5.6-2	プローブ電極模式図	3-171
図 3.5.6-3	# 1 プローブで測定された EIS	3-172
図 3.5.6-4	# 2 プローブで測定された EIS	3-173
図 3.5.6-5	# 1 と # 2 プローブの EIS の比較	3-174
図 3.5.6-6	2 電極間の電位差	3-175
図 3.5.6-7	高周波数 (10kHz) のインピーダンスの経時変化 ベントナイトの抵抗に相当	3-176
図 3.5.6-8	低周波数 (1mHz) のインピーダンスの逆数の経時変化 腐食速度の指標	3-177
図 3.5.6-9	腐食モニターにより測定された高周波数 (10kHz) のインピーダンスの経時変化	3-178
図 3.5.6-10	腐食モニターにより測定された低周波数 (1mHz) のインピーダンスの逆数の経時変化	3-179
図 3.5.6-11	腐食モニター (Corrosion Monitor) と全周波数測定 (Solatron) の比較 (1mHz のインピーダンス)	3-180
図 3.5.6-12	インピーダンス用センサの設置状況	3-181
図 3.5.6-13	R_s 、および、 R_c の経時変化	3-183
図 3.5.6-14	インピーダンス法による腐食速度の経時変化	3-183
図 3.5.7-1	腐食計測技術の適用性確認調査における 3 電極式、薄膜レジストメトリーの比較	3-185
図 3.5.7-2	腐食計測技術の適用性確認調査における電気抵抗/ポテンシャルドロップ法、インピーダンス法の比較	3-186
図 4.3.1-1	還元性雰囲気浸漬試験片切出し位置および寸法	4-3
図 4.3.1-2	還元性雰囲気浸漬試験用チタンカラム	4-4
図 4.3.1-3	カラム組み立て状況	4-5
図 4.3.2-1	試験片取り出し状況	4-7
図 4.3.3-1	回収時の試料の様子	4-8
図 4.3.3-2	試験片の回収状況の例 : SW-TIG-5 (T5301)	4-9
図 4.3.3-3	各分析におけるゾーン区分 (単位 : mm)	4-9
図 4.3.3-4	炭素鋼のレーザーラマン分光分析	4-11
図 4.4.1-1	EPMA マッピング測定結果の例 : SW-TIG-5 (T5301)	4-16

図 4.4.1-2	EPMA マッピング測定結果の例：FW-EBW-5 (E5104)	4-17
図 4.4.1-3	FESEM 観察および EDS 分析結果の例：SW-TIG-5 (T5301)	4-19
図 4.4.1-4	腐食被膜分析 (XRD) の試験片の例 (E5301)	4-21
図 4.4.1-5	XRD 測定結果 (人工海水、5 年、溶接付き)	4-22
図 4.4.1-6	XRD 測定結果 (人工海水、5 年、母材単独)	4-22
図 4.4.1-7	XRD 測定結果 (人工海水、10 年、溶接付き：TIG を除く)	4-23
図 4.4.1-8	XRD 測定結果 (人工海水、10 年、母材単独)	4-23
図 4.4.1-9	XRD 測定結果 (人工淡水、5 年、溶接付き)	4-24
図 4.4.1-10	XRD 測定結果 (人工淡水、5 年、母材単独)	4-24
図 4.4.1-11	XRD 測定結果 (人工淡水、10 年、溶接付き)	4-25
図 4.4.1-12	XRD 測定結果 (人工淡水、10 年、母材単独)	4-25
図 4.4.1-13	μ -XRD(T5301：SW-TIG-5)と同条件の XRD(T5302)の測定結果例	4-28
図 4.4.1-14	μ -XRD(T5202：FW-TIG-10)と同条件の XRD(T5207)の測定結果例	4-29
図 4.4.1-15	参照試料のラマンスペクトル	4-31
図 4.4.1-16	国際データベース(RRUFF)における参照データ (1)	4-32
図 4.4.1-17	国際データベース(RRUFF)における参照データ (2)	4-33
図 4.4.1-18	ラマン分光分析の測定結果の例：SW-MAG-10 (M5109)	4-34
図 4.4.1-19	ラマン分光分析の測定結果の例：FW-MAG-10 (M5104)	4-34
図 4.4.2-1	平均減肉深さの比較 (人工海水、5 年)	4-44
図 4.4.2-2	平均減肉深さの比較 (人工海水、10 年)	4-44
図 4.4.2-3	平均減肉深さの比較 (人工淡水、5 年)	4-45
図 4.4.2-4	平均減肉深さの比較 (人工淡水、10 年)	4-45
図 4.4.2-5	還元性雰囲気における平均腐食速度の推移	4-46
図 4.4.2-6	還元性雰囲気における平均減肉深さの推移 (SSW：人工海水)	4-47
図 4.4.2-7	還元性雰囲気における平均減肉深さの推移 (SFW：人工淡水)	4-48
図 4.4.2-8	平均減肉深さの推移に対するべき乗則による近似 (TIG)	4-48
図 4.4.2-9	平均減肉深さの推移に対するべき乗則による近似 (EBW)	4-49
図 4.4.2-10	平均減肉深さの推移に対するべき乗則による近似 (MAG)	4-49
図 4.4.2-11	浸漬期間 1 年以後の平均減肉深さ変化の傾きの算出 (TIG)	4-50
図 4.4.2-12	浸漬期間 1 年以後の平均減肉深さ変化の傾きの算出 (EBW)	4-50
図 4.4.2-13	浸漬期間 1 年以後の平均減肉深さ変化の傾きの算出 (MAG)	4-51
図 4.4.3-1	水素抽出曲線の測定結果 (人工海水、5 年浸漬)	4-53
図 4.4.3-2	水素抽出曲線の測定結果 (人工海水、10 年浸漬)	4-54
図 4.4.3-3	水素抽出曲線の測定結果 (人工淡水、5 年浸漬)	4-55
図 4.4.3-4	水素抽出曲線の測定結果 (人工淡水、10 年浸漬)	4-56
図 4.4.3-5	拡散性水素濃度の推移 (人工海水)	4-59
図 4.4.3-6	拡散性水素濃度の推移 (人工淡水)	4-59
図 4.4.3-7	水素抽出曲線($\sim 600^{\circ}\text{C}$)と全水素量分析の比較 (人工海水、5 年浸漬)	4-62

図 4.4.3-8	水素抽出曲線(~600°C)と全水素量分析の比較 (人工海水、10年浸漬)	4-63
図 4.4.3-9	水素抽出曲線(~600°C)と全水素量分析の比較 (人工淡水、5年浸漬)	4-63
図 4.4.3-10	水素抽出曲線(~600°C)と全水素量分析の比較 (人工淡水、10年浸漬)	4-64
図 5.2.1-1	平蓋形状のオーバーパック	5-2
図 5.2.1-2	溶接残留応力解析結果 (半径方向応力分布図)	5-2
図 5.2.1-3	溶接残留応力解析結果 (周方向応力分布図)	5-3
図 5.2.1-4	溶接残留応力解析結果 (軸方向応力分布図)	5-3
図 5.2.2-1	比熱.....	5-5
図 5.2.2-2	熱伝導率.....	5-6
図 5.2.2-3	ヤング率.....	5-6
図 5.2.2-4	線膨張係数.....	5-7
図 5.2.2-5	母材 (SF340A) の応力-塑性ひずみ線図.....	5-7
図 5.2.2-6	溶接金属 (TGS50) の応力-塑性ひずみ線図.....	5-8
図 5.2.2-7	H27年度の平蓋オーバーパック解析モデル (温度解析モデル)	5-10
図 5.2.2-8	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)	5-10
図 5.2.2-9	ヒーター、断熱材および冷却領域の配置	5-11
図 5.2.2-10	各冷却条件における熱伝達率の温度依存性.....	5-11
図 5.2.2-11	トライアル1 PWHT条件におけるガラス固化体の温度履歴	5-12
図 5.2.2-12	トライアル1 溶接金属内部における各方向残留応力	5-12
図 5.2.2-13	トライアル2 溶接金属内部における各方向残留応力	5-13
図 5.2.2-14	トライアル3 溶接金属内部における各方向残留応力	5-13
図 5.2.2-15	トライアル4 溶接金属内部における各方向残留応力	5-14
図 5.3.2-1	H27年度の平蓋オーバーパック解析モデル (応力解析モデル)	5-15
図 5.3.3-1	ガラス固化体の温度履歴.....	5-16
図 5.3.3-2	急冷開始時および急冷終了時の温度分布	5-16
図 5.3.3-3	EIHSI法施工による半径方向応力分布の変化	5-17
図 5.3.3-4	EIHSI法施工による周方向応力分布の変化.....	5-17
図 5.3.3-5	EIHSI法施工による軸方向応力分布の変化.....	5-17
図 5.3.3-6	溶接金属内部における残留応力分布.....	5-18
図 6.1.1-1	オーバーパックの減肉による形状の変化	6-2
図 6.2.1-1	破壊モードと強度評価方法[1].....	6-3
図 6.2.2-1	弾完全塑性応力・ひずみ曲線による塑性崩壊の考え方.....	6-5
図 6.2.2-2	2倍勾配法.....	6-5
図 6.3.2-1	オーバーパック形状	6-6
図 6.4.1-1	解析モデル (単位: mm、t = 60 ~ 190 mm)	6-7
図 6.4.1-2	境界条件.....	6-8
図 6.4.1-3	2倍勾配法を適用する際に用いる参照点と変位の方向	6-8
図 6.4.1-4	要素分割 (t = 190 mm)	6-10

図 6.4.1-5	2倍勾配法の適用($S_y = 300$ MPa、詳細メッシュ使用).....	6-10
図 6.4.1-6	塑性崩壊時の形状と相当応力分布 ($t = 190$ mm、 $S_y = 300$ MPa)	6-11
図 6.4.1-7	崩壊荷重に及ぼすメッシュサイズの影響 ($S_y = 300$ MPa)	6-11
図 6.4.1-8	板厚に対する崩壊荷重の変化 (詳細メッシュ使用)	6-13
図 6.4.1-9	塑性崩壊時の形状と相当応力分布 ($S_y = 300$ MPa)	6-13
図 6.4.1-10	正規化極限荷重 (詳細メッシュ)	6-14
図 6.4.1-11	境界条件の変更.....	6-15
図 6.4.1-12	肉厚に対する極限荷重の変化.....	6-15
図 6.4.2-1	「吊り上げ荷重による崩壊解析」および「吊り上げ荷重による弾塑性解析」の解析モデル (単位: mm)	6-18
図 6.4.2-2	「外圧による崩壊解析」の解析モデル (単位: mm)	6-18
図 6.4.2-3	負荷 (自重) と変位の関係($S_y = 0.5$ MPa)	6-20
図 6.4.2-4	塑性崩壊時の形状と相当応力分布 (変形を 1,000 倍して表示、 $S_y = 0.5$ MPa)	6-21
図 6.4.2-5	自重を支えるのに求められる限界の降伏強度	6-22
図 6.4.2-6	解析に用いた応力・ひずみ曲線	6-23
図 6.4.2-7	J 積分値と溶接深さの関係	6-24
図 6.4.4-1	圧力と変位の関係($S_y = 300$ MPa)	6-26
図 6.4.4-2	塑性崩壊時の形状と相当応力分布 ($S_y = 300$ MPa)	6-27
図 6.4.4-3	埋設後の外圧による塑性崩壊 ($S_y = 300$ MPa)	6-28
図 6.4.4-4	「外圧による崩壊解析」の解析モデル (接触条件を付与したモデル)	6-28
図 6.4.4-5	埋設後の外圧による塑性崩壊.....	6-29
図 6.4.4-6	塑性崩壊時の形状と相当応力分布	6-29
図 6.4.5-1	き裂深さと溶接深さの定義 (単位: mm)	6-31
図 6.4.5-2	溶接欠陥に対する強度評価用のメッシュ分割 ($a = 50$ mm、 $w = 80$ mm)	6-32
図 6.4.5-3	外圧を負荷した場合の応力拡大係数.....	6-34
図 6.4.5-4	100 MPa の残留応力を負荷した場合の応力拡大係数.....	6-35
図 6.4.5-5	100 MPa の残留応力を負荷した場合の正規化応力拡大係数.....	6-35
図 6.4.5-6	残留応力を負荷した場合の相当応力分布	6-36
図 6.4.5-7	許容残留応力とき裂深さの関係	6-36
図 6.4.6-1	近接する 2 つの欠陥のモデル化方法.....	6-37
図 6.4.6-2	き裂深さと溶接深さの定義 (単位: mm)	6-38
図 6.4.6-3	複数の溶接欠陥に対する強度評価用のメッシュ分割	6-38
図 6.4.6-4	近接するき裂の応力拡大係数 ($a = 50$ mm、 $w = 110$ mm)	6-40
図 6.4.6-5	残留応力を負荷した場合の相当応力分布	6-40
図 6.4.6-6	近接するき裂の応力拡大係数 ($a = 50$ mm)	6-41
図 7.2.1-1	核生成エネルギーの集合体サイズ依存性	7-3
図 7.2.2-1	反応速度論モデルの概要.....	7-5

図 7.2.3-1	各欠陥濃度の照射量依存性	7-6
図 7.2.3-2	銅-空孔集合体の濃度変化.....	7-7
図 7.2.3-3	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.....	7-7
図 7.2.3-4	0.001dpa における銅-空孔集合体の平均直径の損傷速度依存性.....	7-8
図 7.2.3-5	0.001dpa における銅-空孔集合体の数密度の損傷速度依存性	7-8
図 7.2.3-6	0.001dpa における銅-空孔集合体の平均組成の損傷速度依存性.....	7-9
図 7.2.3-7	0.001dpa における転位ループの平均直径の損傷速度依存性.....	7-9
図 7.2.3-8	0.001 dpa における転位ループの数密度の損傷速度依存性	7-10
図 7.2.3-9	オーバーパックにおける欠陥集合体の平均直径の照射量依存性.....	7-11
図 7.2.3-10	オーバーパックにおける欠陥集合体の数密度の照射量依存性.....	7-11
図 7.2.3-11	オーバーパック材の降伏応力増加量の照射量依存性	7-12
図 7.3.1-1	溶製後の炭素鋼 (0.5wt%Cu)	7-13
図 7.3.1-2	圧延後の炭素鋼 (0.5wt%Cu) の外観および組成分析片と試験体の切り出し位置	7-13
図 7.3.1-3	溶製後の FeMnSiCu 合金	7-13
図 7.3.1-4	圧延後の FeMnSiCu 合金の外観および組成分析用試験片と試験体の切り出し位置.....	7-13
図 7.3.1-5	金相観察結果	7-14
図 7.3.1-6	試験体の外観	7-14
図 7.3.1-7	2.8MeV Fe ²⁺ イオンによる損傷量の深さ分布	7-17
図 7.3.1-8	試験体を取り付けた照射ステージの外観	7-17
図 7.3.1-9	未照射およびイオン照射した炭素鋼のフェライト相の硬さの分布	7-19
図 7.3.1-10	イオン照射に伴う炭素鋼の硬さの変化と Cu 含有量による違い.....	7-20
図 7.3.1-11	FeMnSiCu 合金の未照射材とイオン照射材の硬さの分布	7-21
図 7.3.1-12	イオン照射に伴う FeMnSiCu 合金の硬さの変化.....	7-22
図 7.3.1-13	EBSD 測定結果 (炭素鋼、0.1 dpa)	7-24
図 7.3.1-14	EBSD 測定結果 (炭素鋼、1 dpa)	7-24
図 7.3.1-15	EBSD 測定結果 (FeMnSiCu 合金、0.1 dpa)	7-25
図 7.3.1-16	EBSD 測定結果 (FeMnSiCu 合金、1 dpa)	7-25
図 7.3.1-17	FIB による微小試料の採取の例	7-26
図 7.3.1-18	微小試料の分割の例	7-26
図 7.3.1-19	試験片の針状加工の方法.....	7-26
図 7.3.1-20	炭素鋼試験片アトムマップ (炭素鋼(0.5%Cu)、90°C、0.1 dpa 照射材) ..	7-29
図 7.3.1-21	炭素鋼試験片アトムマップ (炭素鋼(0.5%Cu)、90°C、0.1 dpa 照射材) ..	7-30
図 7.3.1-22	炭素鋼試験片アトムマップ (炭素鋼(0.5%Cu)、90°C、1 dpa 照射材)	7-30
図 7.3.1-23	炭素鋼試験片アトムマップ (炭素鋼(0.5%Cu)、90°C、1 dpa 照射材)	7-31
図 7.3.1-24	FeMnSiCu 合金試験片アトムマップ (FeMnSiCu 合金、90°C、0.1 dpa 照射材)	7-32

図 7.3.1-25	FeMnSiCu 合金試験片アトムマップ (FeMnSiCu 合金、90°C、1 dpa 照射材)	7-33
図 7.3.1-26	FeMnSiCu 合金試験片アトムマップ (FeMnSiCu 合金、未照射材)	7-33
図 7.3.1-27	炭素鋼 (0.5%Cu) MnSiCu マップ (左) とクラスタマップ (右) の比較	7-34
図 7.3.1-28	FeMnSiCu 合金の MnSiCu マップ (左) とクラスタマップ (右) の比較	7-34
図 7.3.1-29	炭素鋼 (0.5%Cu) と FeMnSiCu 合金のクラスタのサイズ分布	7-35
図 7.3.1-30	炭素鋼 (0.5%Cu) と FeMnSiCu 合金のクラスタ組成の分布	7-36
図 7.3.1-31	EBSD 測定結果 (炭素鋼)	7-40
図 7.3.1-32	EBSD 測定結果 (FeMnSiCu 合金)	7-41
図 7.3.1-33	90°C で 0.1 dpa 照射した炭素鋼のマイクロ組織の明視野像と暗視野像[8]	7-42
図 7.3.1-34	90°C で 0.1 dpa 照射した炭素鋼の暗視野像の拡大図[8]	7-43
図 7.3.1-35	転位ループの明視野像 (B = [011])	7-44
図 7.3.1-36	転位ループの平均直径と数密度の照射に伴う変化	7-45
図 7.3.1-37	転位ループのNdの照射に伴う変化	7-47
図 7.3.1-38	硬さの増加量と転位ループのNdとの関係	7-47
図 7.3.1-39	硬さの増加量と溶質クラスタのVfとの関係	7-47
図 7.3.2-1	試験体の外観	7-48
図 7.3.2-2	電子ビーム照射室の外観	7-49
図 7.3.2-3	照射試験用治具	7-49
図 7.3.2-4	照射試験用治具のスキューンへの取付け状況	7-50
図 7.3.2-5	90°C で 0.01 dpa まで電子線照射、イオン照射した炭素鋼の硬さ分布	7-52
図 7.3.2-6	90°C で 0.01 dpa まで電子線照射、イオン照射した FeCu 合金の硬さ分布	7-52
図 7.3.2-7	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硬さの変化	7-53
図 7.3.2-8	炭素鋼試験片のアトムマップ (電子線照射材)	7-54
図 7.3.2-9	炭素鋼試験片のアトムマップ (イオン照射材)	7-55
図 7.3.2-10	FeCu 合金試験片のアトムマップ (電子線照射材)	7-55
図 7.3.2-11	FeCu 合金試験片のアトムマップ (イオン照射材)	7-56
図 7.3.2-12	炭素鋼 (0.5%Cu) の MnSiCu マップ (左) とクラスタマップ (右)	7-57
図 7.3.2-13	FeCu 合金 (0.5%Cu) の Cu マップ (左) とクラスタマップ (右)	7-58
図 7.3.2-14	炭素鋼 (0.5%Cu) と FeCu 合金 (0.5%Cu) のクラスタのサイズ分布	7-59
図 7.3.2-15	炭素鋼 (0.5%Cu) と FeCu 合金 (0.5%Cu) のクラスタの組成分布	7-60
図 7.3.2-16	EBSD 測定結果	7-62
図 7.3.2-17	転位ループの明視野像 (B = [011])	7-63
図 7.3.2-18	転位ループの平均直径と数密度	7-64
図 7.3.2-19	転位ループのNd	7-66
図 7.3.2-20	硬さの増加と転位ループのNdとの関係	7-66
図 7.3.2-21	硬さの増加量と溶質クラスタのVfとの関係	7-66
図 7.4.1-1	圧延状況	7-67

図 7.4.1-2	圧延後の板材の外観	7-67
図 7.4.1-3	試験片採取位置.....	7-68
図 7.4.2-1	引張試験片	7-69
図 7.4.2-2	応力ひずみ曲線.....	7-69
図 7.4.2-3	加工度と 0.2%耐力の関係	7-70
図 7.4.2-4	加工度と引張強さの関係.....	7-70
図 7.4.2-5	加工度と伸びの関係	7-70
図 7.4.2-6	加工度と絞りの関係	7-71
図 7.4.2-7	加工度と降伏比 (0.2%耐力/引張強さ) の関係.....	7-71
図 7.4.3-1	破壊靱性試験片.....	7-73
図 7.4.3-2	破壊靱性試験後の破面.....	7-73
図 7.4.3-3	J-R 曲線	7-74
図 7.4.3-4	加工度と破壊靱性値 (J _Q) の関係	7-75
図 7.4.4-1	加工度とビッカース硬さの関係	7-76
図 7.4.4-2	加工度と超微小硬さの関係	7-76
図 7.4.4-3	ビッカース硬さと超微小硬さの関係.....	7-76
図 7.4.4-4	ビッカース硬さおよび超微小硬さと破壊靱性の関係	7-77
図 7.5.2-1	ガラス固化体およびオーバーパック解析モデルと線源分布	7-79
図 7.5.3-1	ガラス固化体中の中性子源強度の時間推移.....	7-80
図 7.5.3-2	中性子線源スペクトル (ガラス固化体冷却期間依存)	7-80
図 7.5.3-3	ガラス固化体中の光子源強度の時間推移	7-81
図 7.5.3-4	ガンマ線源スペクトル (ガラス固化体冷却期間依存)	7-82
図 7.5.4-1	中性子束のオーバーパック内強度分布	7-85
図 7.5.4-2	オーバーパック内の中性子エネルギースペクトルの位置依存.....	7-85
図 7.5.4-3	オーバーパック内の中性子フルエンス(1 万年累積)の位置依存.....	7-86
図 7.5.4-4	光子束のオーバーパック内強度分布 (つづきガンマ線源当りで規格化)	7-88
図 7.5.5-1	中性子によるはじき出し損傷評価結果	7-90
図 8.3.1-1	溶接試験体 A のイメージ図.....	8-2
図 8.3.1-2	試験体の EDM スリット付与位置 (赤 : 深さ 2 mm, 青 : 深さ 5 mm)	8-2
図 8.3.1-3	溶接試験体 B のイメージ図.....	8-3
図 8.3.1-4	開先深さ 50 mm の EDM スリット付与位置.....	8-3
図 8.3.1-5	開先深さ 40 mm の EDM スリット付与位置.....	8-3
図 8.3.1-6	余盛研削後の溶接試験体 A と溶接試験体 B の外観写真	8-4
図 8.4.3-1	FMC-TFM に使用する探傷装置	8-7
図 8.4.3-2	フェーズドアレイ法に使用する装置.....	8-7
図 8.4.3-3	FMC-TFM 画像化範囲	8-8
図 8.4.4-1	測定結果の表示方法	8-15
図 8.4.4-2	座標の定義.....	8-15

図 8.4.4-3	欠陥番号.....	8-16
図 8.4.4-4	FMC-TFM における指示範囲読み取りのための二値化画像の例	8-17
図 8.5.3-1	シミュレーション解析における解析モデルの断面.....	8-25
図 8.5.3-2	欠陥高さ測定精度及び分解能の把握のための解析モデル.....	8-26
図 8.5.3-3	欠陥長さ測定精度及び分解能の把握のための解析モデル(1).....	8-26
図 8.5.3-4	欠陥長さ測定精度及び分解能の把握のための解析モデル(2).....	8-27
図 8.5.3-5	欠陥長さ測定精度及び分解能の把握のための解析モデル(3).....	8-27
図 8.5.4-1	横穴に対するシミュレーション解析結果 (縦波斜角 45°、Y=50mm)	8-30
図 8.5.4-2	横穴に対するシミュレーション解析結果 (縦波斜角 45°、Y=100mm)	8-30
図 8.5.4-3	横穴に対するシミュレーション解析結果 (縦波斜角 45°、Y=150mm)	8-31
図 8.5.4-4	横穴に対するシミュレーション解析結果 (縦波斜角 30°、Y=60mm)	8-31
図 8.5.4-5	横穴に対するシミュレーション解析結果 (横波斜角 70°、Y=90mm)	8-32
図 8.5.4-6	スリットに対するシミュレーション解析結果 (縦波斜角 45°、Y=50mm) .	8-32
図 8.5.4-7	スリットに対するシミュレーション解析結果 (縦波斜角 45°、Y=100mm)	8-33
図 8.5.4-8	スリットに対するシミュレーション解析結果 (縦波斜角 45°、Y=150mm)	8-33
図 8.5.4-9	スリットに対するシミュレーション解析結果 (縦波斜角 30°、Y=60mm) .	8-34
図 8.5.4-10	スリットに対するシミュレーション解析結果 (横波斜角 70°、Y=90mm)	8-34
図 8.5.4-11	深さ 180mm、マトリックスアレイ FMC-TFM での隣接欠陥に対する シミュレーション解析結果	8-35
図 8.5.4-12	深さ 180mm、リニアアレイでの隣接欠陥に対するシミュレーション解析結果	8-36
図 8.5.4-13	深さ 40mm、マトリックスアレイ FMC-TFM での隣接欠陥に対する シミュレーション解析結果	8-37
図 8.5.4-14	深さ 40mm、リニアアレイでの単独欠陥に対するシミュレーション解析結果	8-38
図 8.5.4-15	深さ 180mm、マトリックスアレイ FMC-TFM での単独欠陥に対する シミュレーション解析結果	8-39
図 8.5.4-16	深さ 180mm、リニアアレイでの単独欠陥に対するシミュレーション解析結果	8-39
図 8.5.4-17	深さ 40mm、マトリックスアレイ FMC-TFM での単独欠陥に対する シミュレーション解析結果	8-40
図 8.5.4-18	深さ 40mm、リニアアレイでの単独欠陥に対するシミュレーション解析結果	8-40
図 8.6.2-1	溶接試験体の切断位置.....	8-41
図 8.6.2-2	座標の定義.....	8-41
図 8.6.2-3	欠陥座標の定義 (yz 面)	8-41

表 目 次

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.....	3-7
表 3.1.2-2	試験条件検討；試験系の因子と試験条件への反映.....	3-8
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.....	3-12
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 年計画案(平成 27 年度改訂).....	3-17
表 3.2.1-1	幌延 URL 工学規模試験 センサー・計測機器種類及び数量.....	3-18
表 3.2.2-1	地上工学規模試験 センサー・計測機器種類及び数量.....	3-30
表 3.2.2-2	地上工学規模試験 腐食環境.....	3-31
表 3.2.2-3	調製した模擬地下水の組成	3-32
表 3.3.2-1	不均質試験 測定項目.....	3-42
表 3.3.3-1	不均質試験 試験装置解体手順	3-43
表 3.3.3-2	不均質試験 JISZ2371:2000 記載方法と本試験での除去方法の差異	3-47
表 3.3.3-3	不均質試験 脱錆作業使用溶液の成分	3-47
表 3.3.5-1	採取試料の湿潤密度、乾燥密度、含水比及び体積含水率の測定結果及び有効粘土密度、透水係数の算出結果.....	3-71
表 3.4.2-1	工学規模試験 測定分析項目	3-82
表 3.4.4-1	幌延 URL 工学規模試験装置解体 必要機材一覧.....	3-97
表 3.4.6-1	地上工学規模試験 測定分析項目	3-104
表 3.4.8-1	地上工学規模試験装置解体 必要機材一覧.....	3-110
表 3.5.2-1	模擬地下水組成.....	3-114
表 3.5.5-1	地層処分環境における炭素鋼の腐食挙動	3-133
表 3.5.5-2	Fe ワイヤの化学組成[wt%].....	3-141
表 3.5.5-3	模擬地下水組成[ppm].....	3-143
表 3.5.5-4	腐食モニタリング試験条件	3-143
表 3.5.5-5	CR _{ave} と CR _{max} の算出結果[mm/y].....	3-144
表 3.5.5-6	模擬地下水組成[ppm].....	3-155

表 3.5.5-7	CR _{ave} と CR _{max} の算出結果[mm/y]	3-162
表 3.5.6-1	インピーダンス測定の設定条件	3-182
表 3.5.6-2	インピーダンス計測の出力例	3-182
表 4.3.1-1	還元性雰囲気での腐食試験実施状況（腐食速度評価）	4-6
表 4.3.1-2	還元性雰囲気での腐食試験実施状況（水素分析）	4-6
表 4.3.3-1	水素抽出曲線測定（API-MS）の試料採取位置	4-13
表 4.3.3-2	全水素量分析（不活性ガス融解法）の試料採取位置	4-14
表 4.4.1-1	EDS 分析で推定された腐食生成物・鉱物の例	4-20
表 4.4.1-2	検出された主な腐食生成物	4-26
表 4.4.2-1	外観観察と形状測定結果（人工海水、5年、溶接付き）	4-36
表 4.4.2-2	外観観察と形状測定結果（人工海水、10年、溶接付き）	4-37
表 4.4.2-3	外観観察と形状測定結果（人工淡水、5年、溶接付き）	4-38
表 4.4.2-4	外観観察と形状測定結果（人工淡水、10年、溶接付き）	4-39
表 4.4.2-5	試験片の重量減少と平均減肉深さ（人工海水、5年）	4-41
表 4.4.2-6	試験片の重量減少と平均減肉深さ（人工海水、10年）	4-41
表 4.4.2-7	試験片の重量減少と平均減肉深さ（人工淡水、5年）	4-42
表 4.4.2-8	試験片の重量減少と平均減肉深さ（人工淡水、10年）	4-42
表 4.4.2-9	腐食量評価の結果（平均減肉深さと腐食速度）	4-43
表 4.4.2-10	平均減肉深さの推移のべき乗則による近似と浸漬1年以後の変化の傾き	4-51
表 4.4.3-1	水素抽出曲線測定での水素濃度分析結果（人工海水、5年浸漬）	4-57
表 4.4.3-2	水素抽出曲線測定での水素濃度分析結果（人工海水、10年浸漬）	4-57
表 4.4.3-3	水素抽出曲線測定での水素濃度分析結果（人工淡水、5年浸漬）	4-58
表 4.4.3-4	水素抽出曲線測定での水素濃度分析結果（人工淡水、10年浸漬）	4-58
表 4.4.3-5	全水素量分析での水素濃度分析結果（人工海水、5年浸漬）	4-60
表 4.4.3-6	全水素量分析での水素濃度分析結果（人工海水、10年浸漬）	4-61
表 4.4.3-7	全水素量分析での水素濃度分析結果（人工淡水、5年浸漬）	4-61
表 4.4.3-8	全水素量分析での水素濃度分析結果（人工淡水、10年浸漬）	4-62
表 5.2.2-1	温度解析に用いた熱境界条件	5-5
表 5.2.2-2	各解析ケースのヒーターの加熱条件と保温時間および冷却領域の冷却条件	5-9
表 5.2.2-3	トライアル1~3のPWHT条件の詳細加熱条件	5-9
表 6.3.1-1	物性値	6-6
表 6.4.2-1	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	6-17
表 6.4.2-2	炭素鋼の応力・ひずみ曲線の定数および破壊靱性値	6-23
表 6.4.5-1	溶接欠陥に対する構造強度の解析条件（溶接深さ w とし裂深さ a の組み合わせ、○：解析実施、×：解析実施せず）	6-31
表 7.2.2-1	反応速度論モデルにおけるパラメータ	7-4
表 7.3.1-1	炭素鋼の化学組成（wt%）	7-13
表 7.3.1-2	FeMnSiCu 合金の化学組成（wt%）	7-13

表 7.3.1-3	イオン照射試験のマトリクス.....	7-16
表 7.3.1-4	各試験体の照射実績.....	7-16
表 7.3.1-5	クラスタ解析結果のまとめ.....	7-29
表 7.3.1-6	bcc 金属における転位ループのバーガースベクトル \mathbf{b} と逆格子ベクトル \mathbf{g} の組み合わせによる転位ループのコントラストの変化.....	7-38
表 7.3.1-7	転位ループの平均直径と数密度.....	7-39
表 7.3.1-8	硬さの増加量とマイクロ組織.....	7-46
表 7.3.2-1	FeCu 合金の化学組成 (wt%).....	7-48
表 7.3.2-2	クラスタ解析結果のまとめ.....	7-57
表 7.3.2-3	転位ループの平均直径と数密度.....	7-61
表 7.3.2-4	硬さの増加量とマイクロ組織.....	7-65
表 7.4.1-1	素材 (SM400) のミルシート値.....	7-67
表 7.4.1-2	冷間圧延加工の結果.....	7-67
表 7.4.2-1	引張試験の結果.....	7-69
表 7.4.3-1	破壊靱性試験の結果.....	7-72
表 7.5.3-1	高速ガンマ線割合 (ガラス固化体冷却期間依存).....	7-81
表 7.5.4-1	中性子束のオーバーパック内強度分布.....	7-83
表 7.5.4-2	オーバーパック内の中性子フルエンス(1 万年累積)の位置依存.....	7-84
表 7.5.4-3	光子束のオーバーパック内強度分布 (ガンマ線源当りで規格化).....	7-87
表 7.5.5-1	中性子によるはじき出し損傷評価結果.....	7-89
表 8.4.3-1	FMC-TFM 探傷条件.....	8-6
表 8.4.3-2	フェーズドアレイ法探傷条件.....	8-6
表 8.4.4-1	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.....	8-9
表 8.4.4-2	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.....	8-10
表 8.4.4-3	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.....	8-11
表 8.4.4-4	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、寸法測定結果....	8-12
表 8.4.4-5	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、寸法測定結果....	8-13
表 8.4.4-6	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、寸法測定結果....	8-14
表 8.4.5-1	深さ 100mm 程度以内の深さ方向欠陥位置測定精度の比較.....	8-19
表 8.4.5-2	深さ 100mm 程度より深い範囲の深さ方向欠陥位置測定精度の比較.....	8-20
表 8.4.5-3	深さ 100mm 程度以内の溶接線方向測定精度 (FMC-TFM).....	8-21
表 8.4.5-4	深さ 100mm 以内の溶接線方向測定精度 (フェーズドアレイ法).....	8-21
表 8.4.5-5	深さ 100mm より深い範囲の溶接線方向測定精度 (FMC-TFM).....	8-22
表 8.4.5-6	深さ 100mm より深い範囲の溶接線方向測定精度 (フェーズドアレイ法).....	8-22
表 8.4.5-7	計画値に対する深さ 100mm 以内の溶接線方向測定精度 (FMC-TFM).....	8-23
表 8.4.5-8	計画値に対する深さ 100mm 以内の溶接線方向測定精度 (フェーズドアレイ法).....	8-23
表 8.5.3-1	超音波の種類、屈折角及び入射位置.....	8-25

表 8.5.3-2	音速および密度.....	8-25
表 8.5.4-1	欠陥高さ測定精度、分解能把握のためのシミュレーション解析の評価結果.	8-29
表 8.5.4-2	欠陥長さ測定精度、分解能把握のためのシミュレーション解析の評価結果.	8-29
表 8.6.4-1	実測した溶接欠陥の座標 (試験体 A)	8-42
表 8.6.4-2	実測した溶接欠陥の座標 (試験体 B)	8-43

第1章 緒言

1.1 本事業の背景および目的

1.1.1 背景

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。

1.1.2 目的

上記状況を踏まえ、平成 25 年度から 5 年程度の期間で処分場の操業期間中における人工バリアの製作・施工技術及びモニタリング技術等の工学技術を、地下研究施設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ため、平成 28 年度からは成果普及に取り組む。
今年度の成果普及の内容は、章末の添付資料 1-1 に記載した。

1.2.2 全体計画

本事業では、人工バリアのうちのオーバーパック及び緩衝材の品質／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。

一般的な構造物とは異なり、地層処分の人工バリアは埋設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。埋設後の検査や補修を必要とせず人工バリアの健全性を確保するためには、想定される劣化事象を考慮した上で要求される機能を満足する設計を行い、製作・検査・施工の各プロセスで品質管理を実施する必要がある。各プロセスで品質が確保されていることを判断するためには指標が必要になる。一方で、人工バリアが健全であることを判断するためには、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。そのためには、人工バリアおよびモニタリングに関する個別および境界の課題を抽出し、相互に共有され検討を進める必要がある。さらに、処分場の操業期間中に大規模な自然災害が発生することが考えられる。処分場の操業期間中の安全確保のためには、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。

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は、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、それぞれの境界にある課題や個々の成果などを共有しつつ研究開発を進める。

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 目的

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する。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る。

1.3.2 5カ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 カ年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（位置直後）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 28 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形態（どの部位がどのように破損するか）を想定して、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を防止するための健全性評価手法を構築する。また、オーバーパックが健全であることを判断するための指標の提示に向けた検討を実施する。

(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試験を継続して実施し、炭素鋼溶接部の腐食試験データを取得する。また、不均質試験装置を解体し、緩衝材ブロックの施工時に生じる可能性がある隙間の有無による腐食挙動の変化を調べる。今回の不均質試験装置の解体手順は、平成 29 年度に実施予定の地上施設および幌延 URL の工学規模試験の解体計画に反映する。

(3) メカニズム解明の腐食試験

オーバーパック候補材料である炭素鋼の低酸素環境下における腐食挙動に及ぼす溶接の影響を把握するために、平成 17 年度から実施している長期浸漬試験（5 年間および 10 年間）の試験片を取出し、腐食速度および水素吸収量を測定するとともに腐食生成物などの分析を実施する。

(4) 溶接部の残留応力低減手法の検討

局部腐食の発生防止および溶接欠陥を起点とした破損を防止するために、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する。平成 27 年度に実施した平蓋形状の溶接残留応力分布を入力条件とする。加熱方法や冷却方法をパラメータとして、腐食代に相当する 40mm を圧縮残留応力に改善するための熱処理条件を取得し、EIHSI による残留応力の低減効果を確認する。

(5) オーバーパックの強度に関する検討

板厚や降伏応力などをパラメータとした有限要素解析により破壊評価を実施し、現状の耐圧厚さに対する裕度を確認するとともに、健全性を確保するために必要な溶接深さを求める。また、溶接部に複数の欠陥が存在する場合の破損を防止するために、複数欠陥のモデル化方法を提示する。

(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する。モデル解析では、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

などにより調べる。照射試験では、イオン照射および電子線照射により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する。また、オーバーパックの脆化量に対する余裕を把握するために、燃焼度の高い使用済燃料の再処理により発生するガラス固化体を対象として、オーバーパックの照射量を解析により求める。

(7) 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、超音波探傷試験および超音波シミュレーションを実施する。探傷データの分析には、最新の全波形収録開口合成法を適用して、従来のフェーズドアレイ法などを用いた測定結果と比較するとともに、測定誤差を定量的に把握する。

添付資料 1-1

操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発に
関する成果普及

学会発表 1

学会名：日本原子力学会 2016 年秋の大会

日 時：2016 年 9 月 7 日（水）～9 月 9 日（金）

場 所：久留米シティプラザ（福岡県久留米市六ツ門町 8-1）

題 目：自然災害に対する操業期間中の地層処分施設の安全対策

（副題）人工バリアに対する火災影響評価の検討

著 者：（原環センター）○山川浩光，蓮井昭則，川久保政洋，朝野英一

（IHI）ディアク リーヘルマン，高倉大典，岩田裕美子，川上進

○は口頭発表者

発表内容：

自然災害を起因とした火災に対する放射線安全の観点から、人工バリア（ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材）の影響評価の方法（火災シナリオの設定、燃焼解析、伝熱・応力解析）について以下の内容を説明し、解析を踏まえた検討結果を発表した。

火災シナリオの設定では、地下の処分坑道においてガラス固化体を封入したオーバーパックを処分孔（堅置き）に定置した後に、風速、緩衝材の有無の条件下において定置・搬送装置のバッテリーが発火するシナリオを想定した。

燃焼解析では、想定した火災シナリオに基づいて米国の国立標準技術研究所が開発した解析ソフトウェア **Fire Dynamics Simulator (FDS)** を用いて、労働安全衛生規則、ずい道等建設工事における換気技術指針等を考慮した処分坑道内の風速を仮定（0.5m/s、2.0m/s）し、実施した。火災発生から 200～1,000 秒の間では、風速が 2.0m/s の場合に高い発熱量を示し、最大で約 90MW の発熱量が生じる結果となった。また、風速が 0.5m/s の場合は、高温領域は坑道上部近辺に限られるものの、風速が 2.0m/s になると炎が坑道全体に広がり高温領域が全断面に広がることを確認した。

伝熱・応力解析では、構造解析で広く用いられている汎用 FEM コード **ABAQUS (Ver.6-12-1)** を用いて燃焼解析から得られた加熱曲線から伝熱解析及び応力解析を実施し、人工バリア等への火災影響の評価を行った。伝熱解析の結果では、オーバーパックの上部近傍において 1,000°C 超の最高温度に到達するものの、他の部分は 200°C 以下であり、内部のガラスの温度上昇は約 1.5°C にとどまった。緩衝材の定置後では、オーバーパック、ガラス固化体への大きな温度上昇は見られなかった。

応力解析の結果では、オーバーパックに応力の上昇がみられるが、火災が収まり温度が低下すると火災前の初期応力分布に近い状態まで戻ることを確認した。

以上の解析結果より、想定した火災シナリオでは、オーバーパックの破損はなく、放射性物質が漏えいする可能性はない。

また、地下施設において火災が発生した場合、坑道内という限られた空間であるため、燃料の量より燃焼に要する酸素量で発熱量が決まる。また、火災によるガラス固化体への熱影響に対してオーバーパック、緩衝材が熱影響を軽減する安全対策になると発表した。

学会発表 2

学会名：日本原子力学会 2017 年春の年会

日 時：2017 年 3 月 27 日（月）～3 月 29 日（水）

場 所：東海大学湘南キャンパス（神奈川県平塚市北金目 4-1-1）

題 目：自然災害に対する操業期間中の地層処分施設の安全対策

（副題）火災時における安全対策の検討

著 者：（原環センター）○山川浩光，蓮井昭則，川久保政洋，朝野英一

○は口頭発表者

発表内容：

自然災害を起因とした火災に対する作業員の安全確保の観点から、地層処分場の地下坑道において火災が発生した場合を想定し、3 次元流体解析ソフトを用いた坑道内の温度分布、一酸化炭素等の拡散範囲を解析で求め、火災に対する安全対策の検討結果を発表した。

1. 安全対策の検討

鉱山などでは、通気をコントロールするために設けられた仕切り（風門）が、燃焼に必要な酸素の供給を抑えることで、火災の影響を低減する対策になっている例がある。そこで、簡略化した処分坑道のモデルを作成し、火災発生時に熱および一酸化炭素などが拡散する範囲を解析により求めた。そして、処分坑道の上部に風門をモデル化した場合の安全対策としての効果を検討することとした。

解析シナリオでは、延長 1,000m の処分坑道の間地点において、搬送装置などの車両火災が発生することを想定した。解析条件は、換気設備を稼働（ケース 1：風速 0.3m/s）、換気設備を停止（ケース 2：0.01 m/s）、換気設備を稼働し風門を設置（ケース 3：風速 0.3m/s）の 3 ケースとした。

解析結果より、ケース 1 とケース 2 を比較すると、風上側は風速に関係なく拡散範囲が狭く、風下側はケース 1 の方が坑道全体に拡散していることを確認できた。ケース 1 は風速が速いことから、酸素が供給されて燃焼が継続し、より多くの一酸化炭素が発生して風下側に拡散した結果と考えられる。

また、風門を設置（ケース 3）することによって風門より風上側に一酸化炭素が拡散することを抑えられた。

従って、坑道全体を遮断せずに坑道の上部に風門を設置することは、作業員の避難経路を確保しつつ、一酸化炭素の拡散を抑制する有効な安全対策の 1 つになると発表した。

第2章 オーバーパックの健全性評価手法の構築

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設計要件および使用される環境条件を整理する。次に、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健全性評価手法を構築する。

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 廃棄体と地下水接触 の防止	耐食性
		構造健全性
		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)

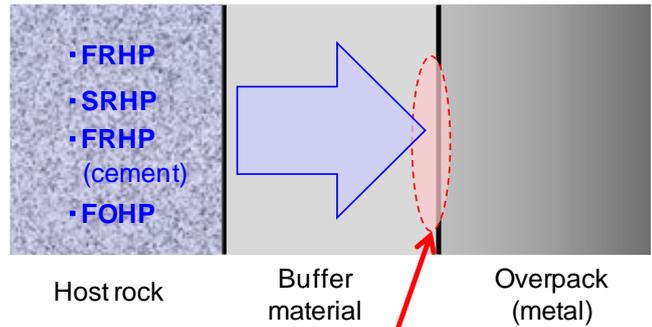
・ 海水系還元性低 pH 地下水

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 オーバーパック－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 ⁻¹)
HCO ₃ ⁻ / CO ₂ / H ₂ CO ₃	< 7.3 x 10 ⁻²
SO ₄ ²⁻	< 6.1 x 10 ⁻²
HS ⁻ / H ₂ S	< 9.2 x 10 ⁻¹
Cl ⁻	< 5.9 x 10 ⁻¹
P (total)	< 2.9 x 10 ⁻⁶
NO ₃ ⁻	0.0
NH ₃	< 1.6 x 10 ⁻⁴
NH ₄ ⁺	< 5.1 x 10 ⁻³
B (total)	< 1.7 x 10 ⁻³
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ク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。オーバーパックに作用する負荷は、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]。オーバーパック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。

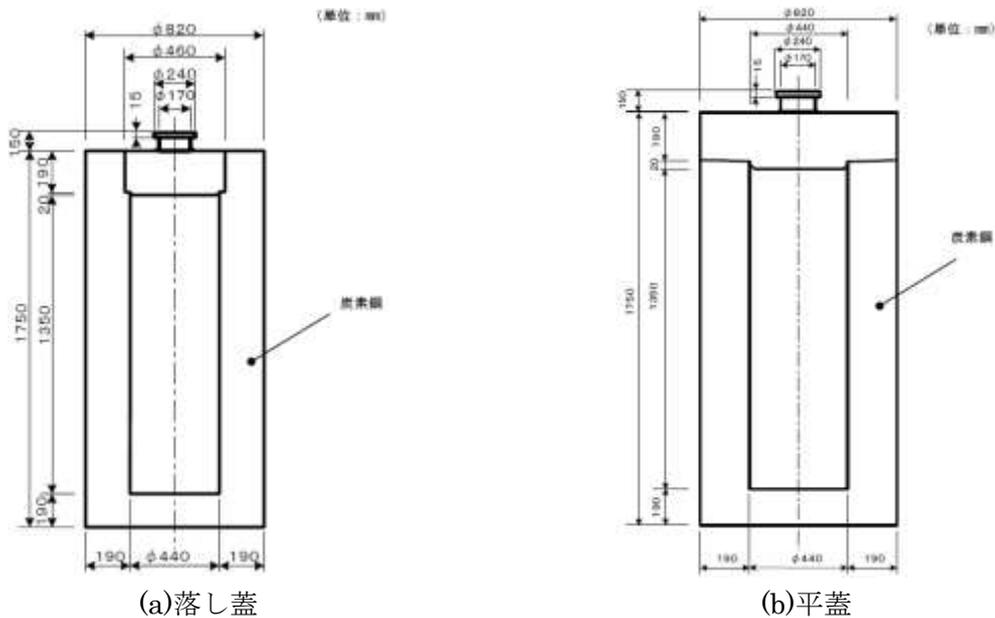
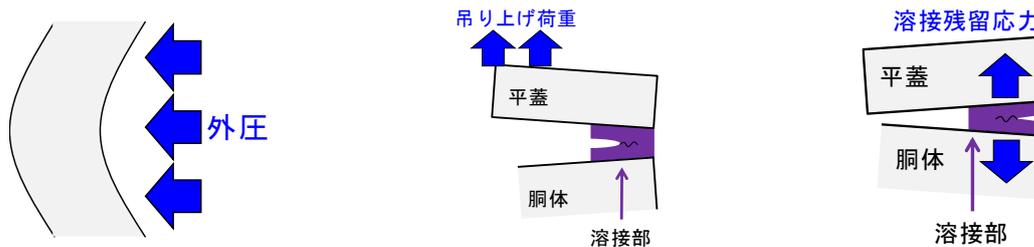


図 2.2.1-1 オーバーパックの蓋構造の例



(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。

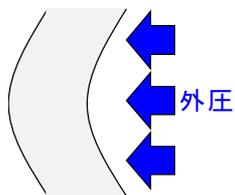
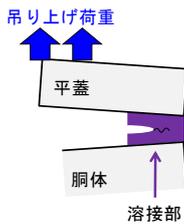
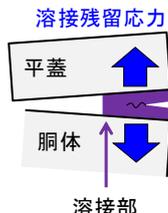
以上により、オーバーパックに想定される破損形態に対する破損モードは、表 2.2.1-2 のように整理できる。

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	ポイドの発生、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40 mm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。

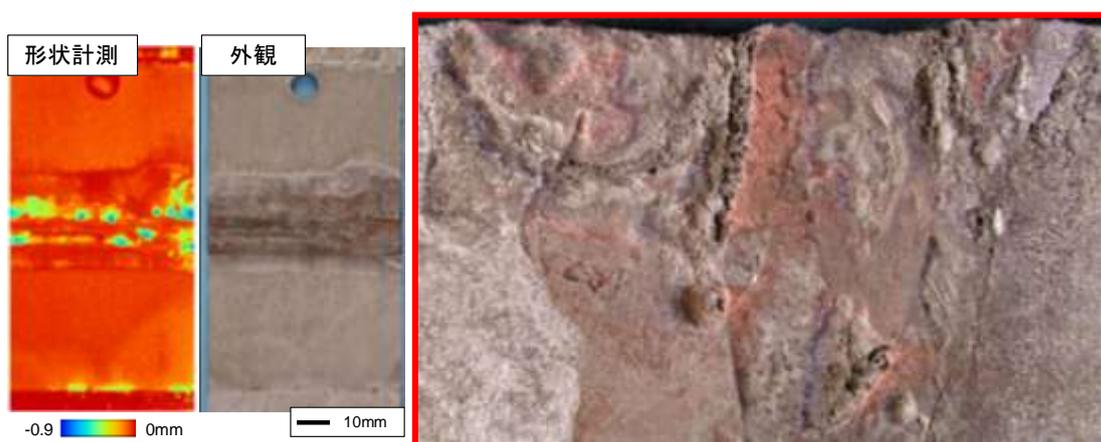


図 2.3.2-1 酸化性雰囲気での浸漬試験による TIG 溶接試験片の選択腐食

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(O₂)をある温度で共存させた場合、Fe と O₂ のエネルギーの総和と、それらの化合物である酸化鉄 (FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄ 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。

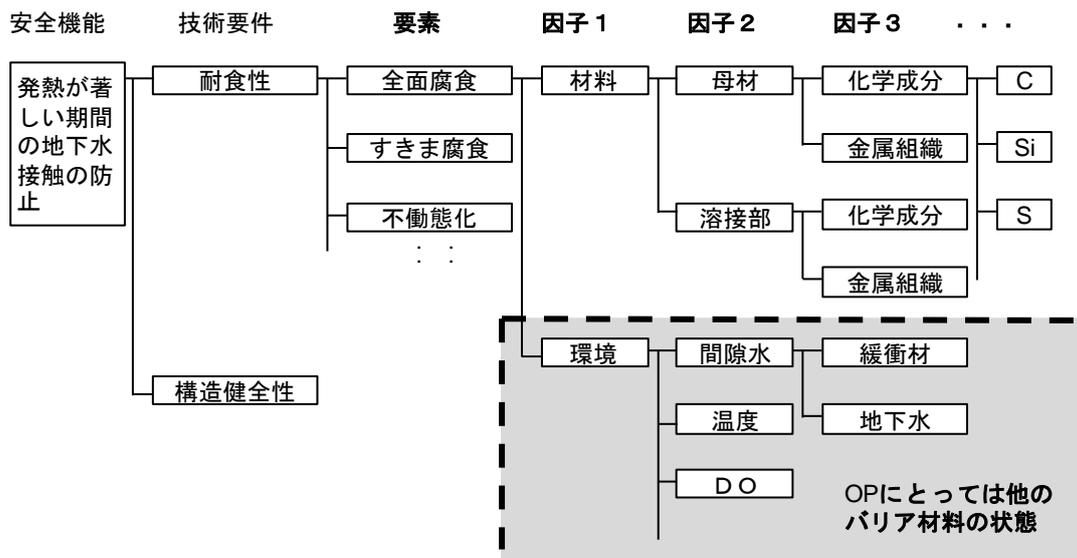


図 2.3.3-1 オーバーパックスの腐食に寄与する因子の例

HLW 第 2 次取りまとめでは、压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。

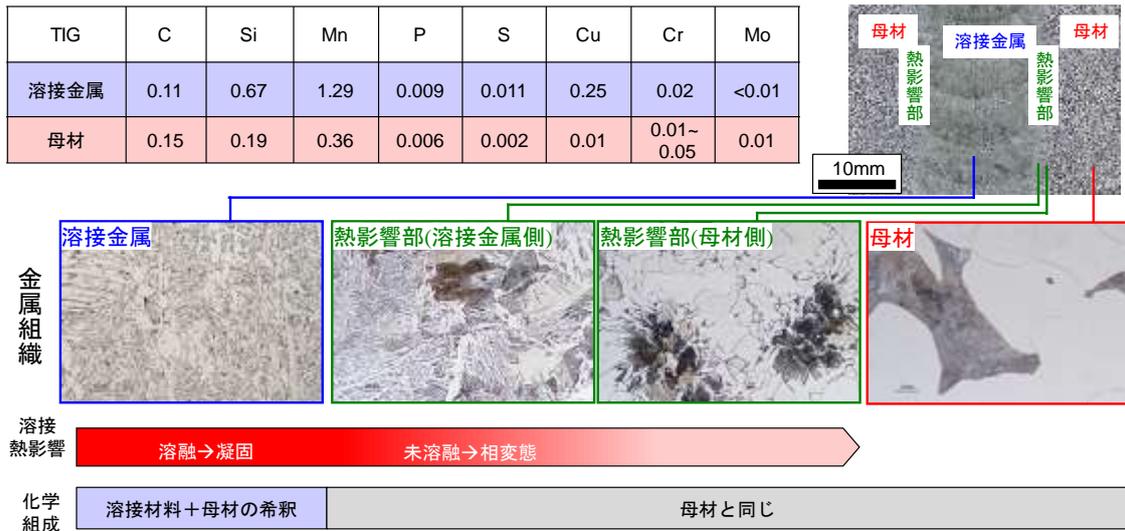


図 2.3.3-2 オーバーパック溶接部の不均一性

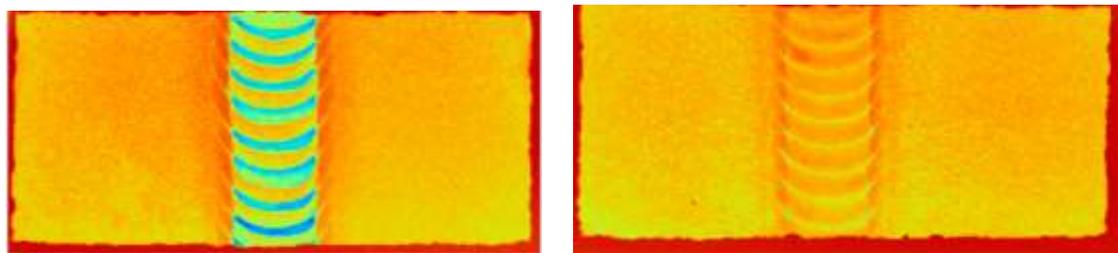


図 2.3.3-3 MAG 溶接部の選択腐食における溶接材料への Ni 添加の効果

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"> ・ き裂発生、成長 ・ 中性子照射脆化 ・ 水素脆化

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 σ とひずみ ε を表していて以下の式で定義される。

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

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

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)

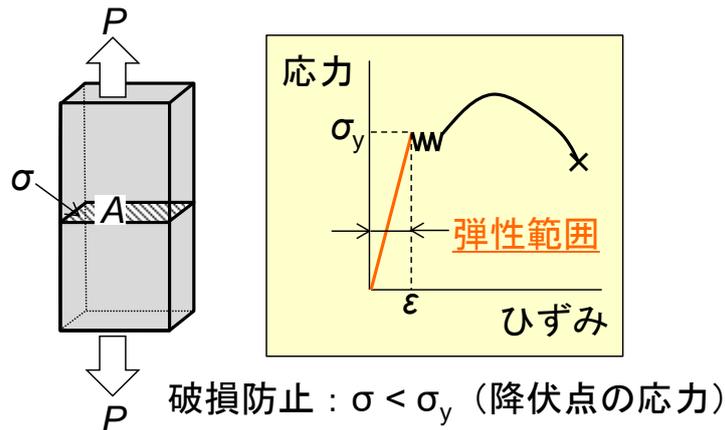


図 2.4.2-1 軟鋼の応力ひずみ線図の模式図

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。

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

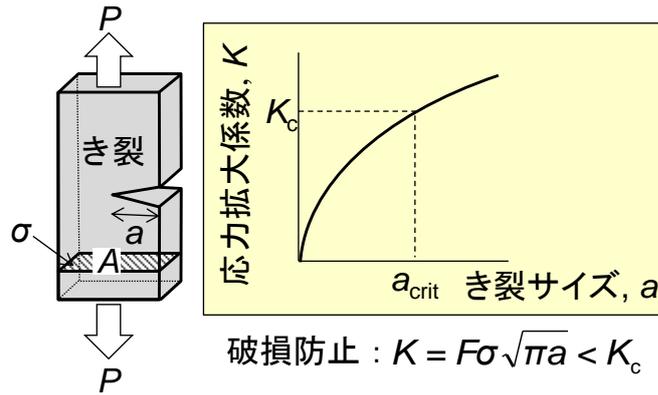
ここで、 F は形状係数、 a はき裂長さを表す。応力拡大係数は、構造物の形状および作用する応力、き裂の大きさによって決定される。また、破壊抵抗は、Compact tension 試験片 (CT 試験片) などを用いた破壊靱性試験により得られる破壊靱性値 K_{Ic} となる。そして、その健全性に影響があると判断された場合には必要に応じて補修して、その健全性を確保している。

応力拡大係数と限界き裂寸法の間を模式的に図 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 \cdot m^{0.5})

破壊抵抗 : 破壊靱性値 (MPa \cdot m^{0.5})



(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 σ が設計応力 σ_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。

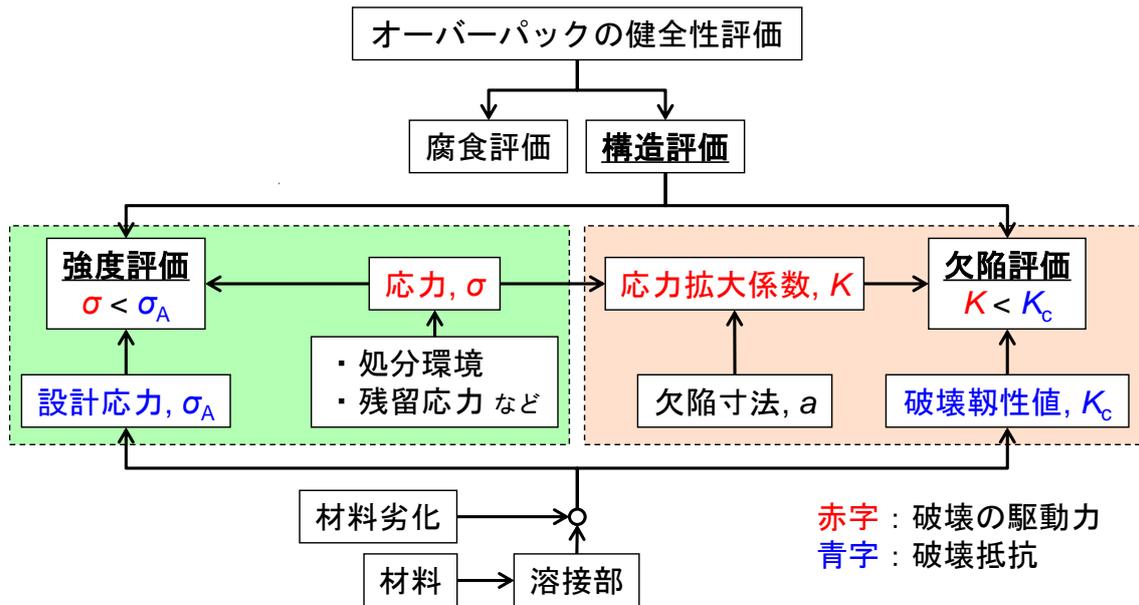


図 2.4.2-3 オーバーパックの構造評価のフローチャート

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、想定される破損モードを防止する観点から、荷重条件および材料劣化を考慮して作成した。

- 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
→溶接残留応力は脆性破壊以外では考慮しない

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。設計時に考

慮する安全係数の大きさは、埋設後の環境などの変動幅を考慮して決定する必要がある。破壊抵抗となる降伏応力や破壊靱性値は、引張試験や破壊靱性試験などの材料試験により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やJ積分値などであり、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破壊の駆動力が破壊抵抗よりも小さいことを確認して強度評価は終了となる。

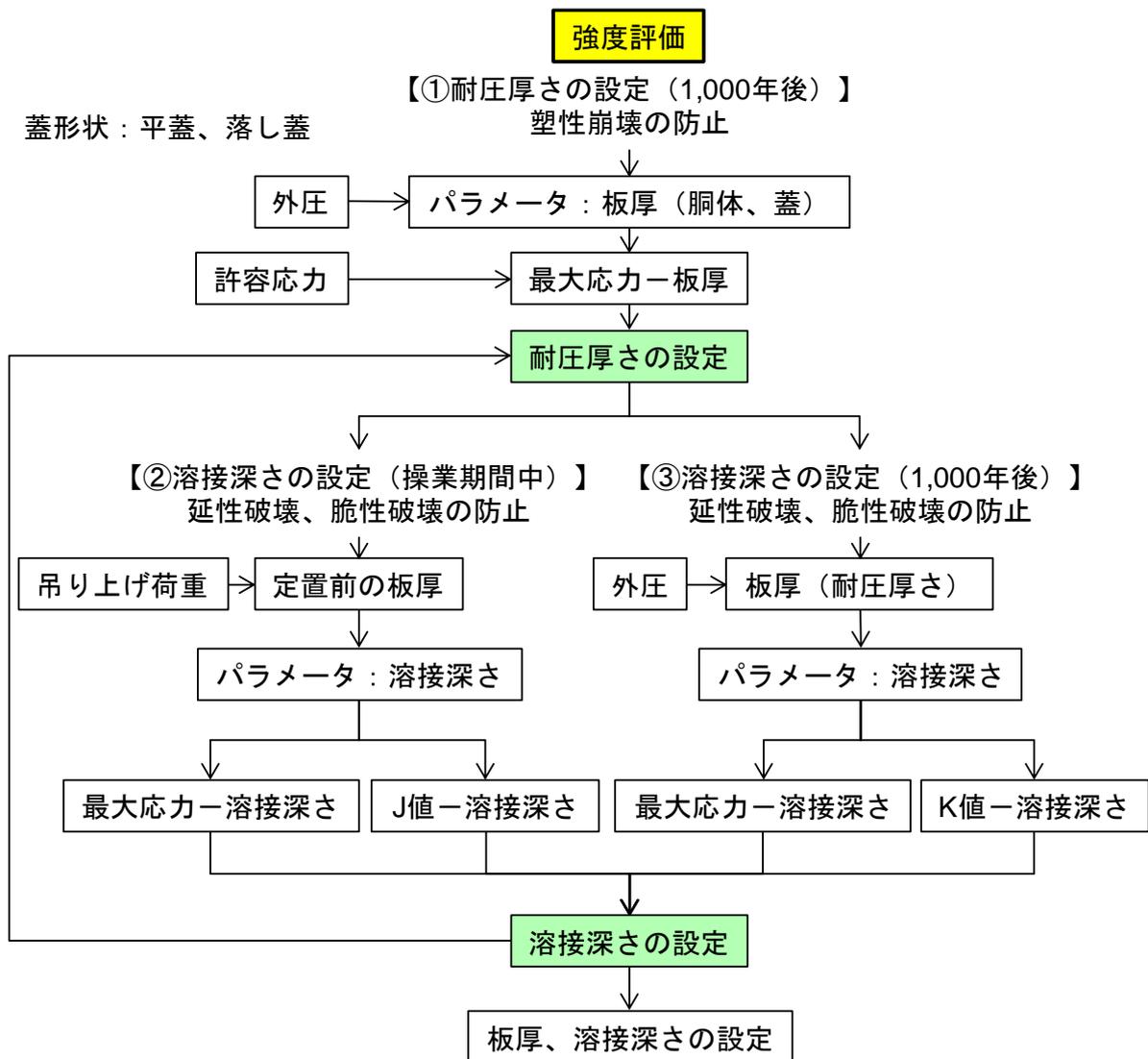


図 2.4.2-4 強度評価のフローチャート

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、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_{Ic}) 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_{Ic} 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。

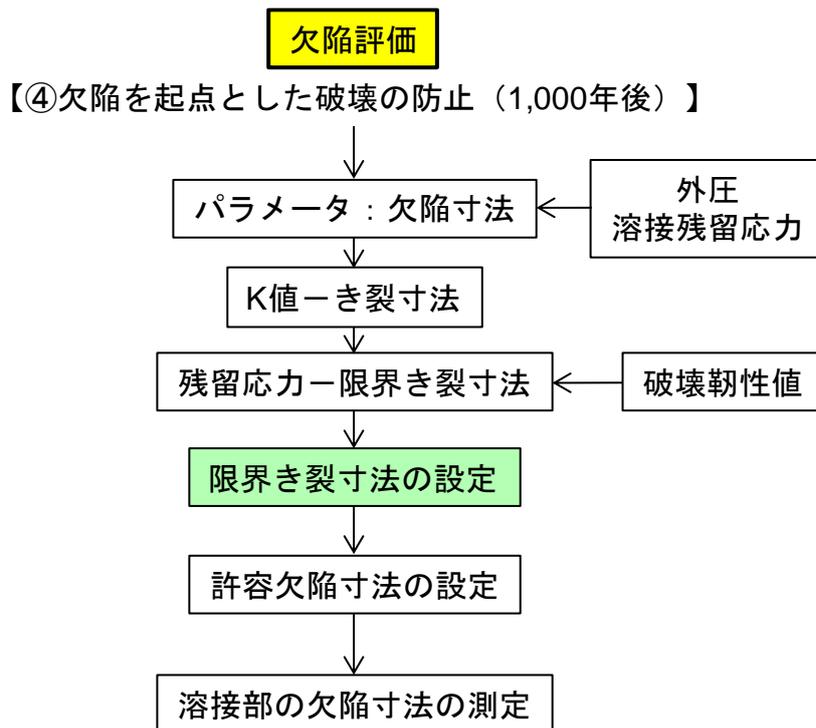


図 2.4.2-5 欠陥評価のフローチャート

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 σ_{\max} が設計応力 σ_D より小さいことを確認する。 σ_{\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、 σ_D はオーバーパック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】 オーバーパックの破損防止

- ・ 想定される破損の防止方法の検討
- ・ 残留応力低減手法の検討
- ・ 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
- ・ 炭素鋼の脆化因子の調査
- ・ オーバーパック照射線量の検討

【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

- ・ 欠陥寸法および位置の測定誤差の定量化
- ・ 近接欠陥を対象とした欠陥定量化方法の検討
- ・ 検査手順および測定条件の例示

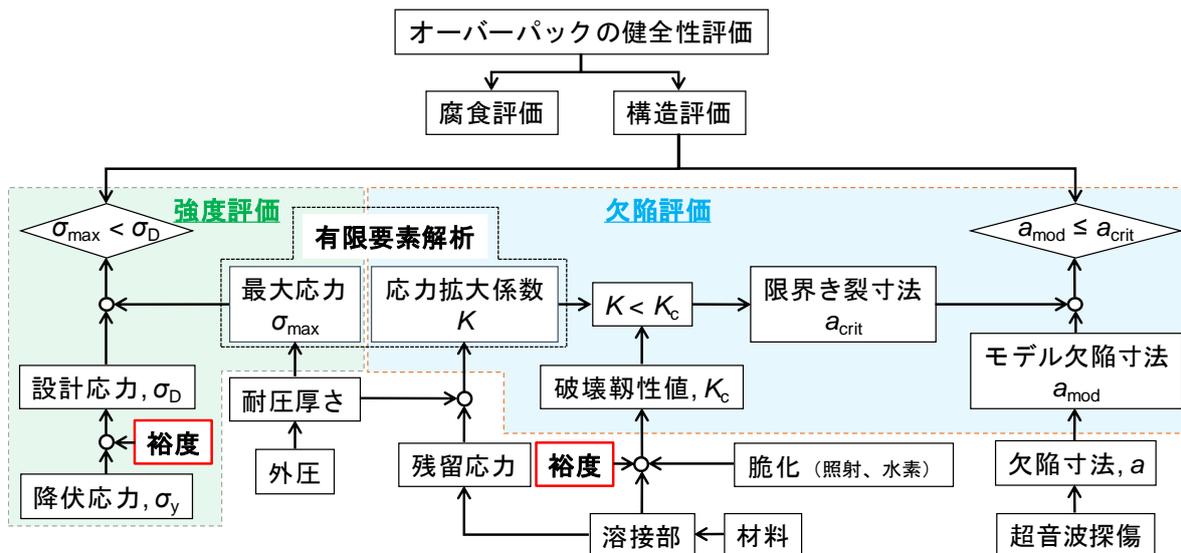


図 2.4.3-1 構造評価に関する研究開発課題の整理

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、オーバーパックの設計、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】 オーバーパックの腐食の現象理解

- ・ 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

2.5.2 構造評価

オーバーパック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ク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
- ・ 残留応力低減手法の検討
- ・ 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
- ・ 炭素鋼の脆化因子の調査
- ・ オーバーパック照射線量の検討

【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

- ・ 欠陥寸法および位置の測定誤差の定量化
- ・ 近接欠陥を対象とした欠陥定量化方法の検討
- ・ 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：オーバーパックス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, pp.573-587 (2005).
- [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, pp.206-221 (2006).
- [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, pp.899-909 (2008).
- [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, pp.470-479 (2005).
- [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ー設備を新たに設置し、模擬オーバーパック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ー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溶接部を考慮した腐食に係わる知見の整備を進めている。

本年度は、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。また、今回の不均質試験装置の解体手順を検証し、平成 29 年度に予定している、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。

3.1 試験目的及び概要

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ている。

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ている。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 での工学規模試験」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る。

幌延 URL での工学規模試験は、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ー設備を設置した。

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る。このため試験系内の状態を明らかにしようとする事自体、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 での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事が想定されたため、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を続けている。

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ている。

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

- 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
- 地下施設の構成要素：
 - ◇ 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。

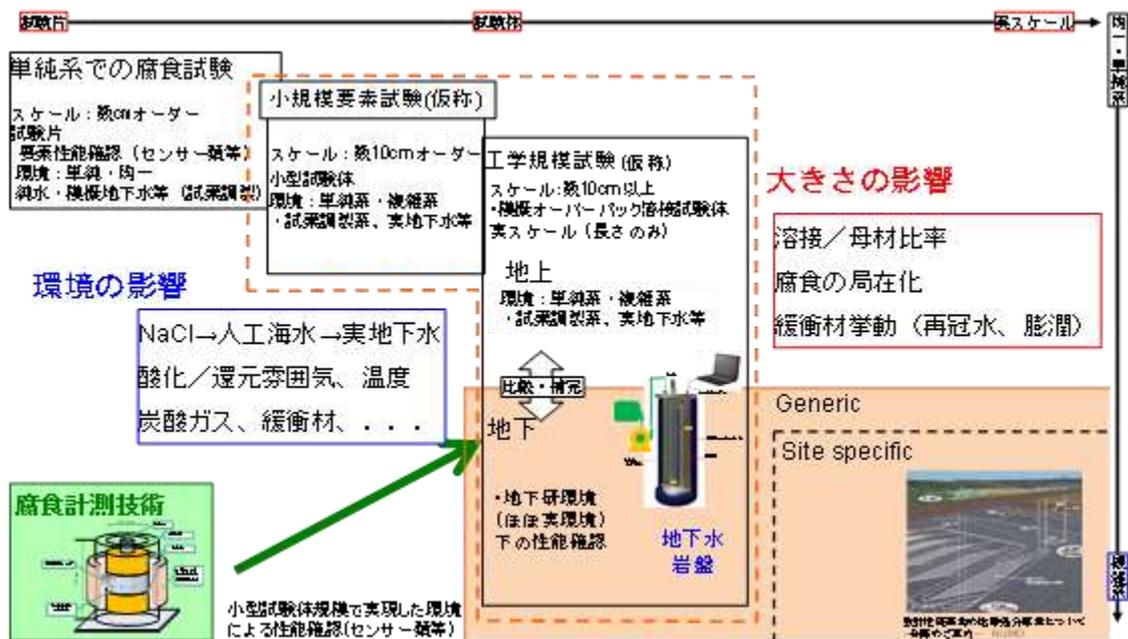


図 3.1.2-1 地上試験、地下試験、試験条件等を考慮した各試験の位置付け

(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」に分類している。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。

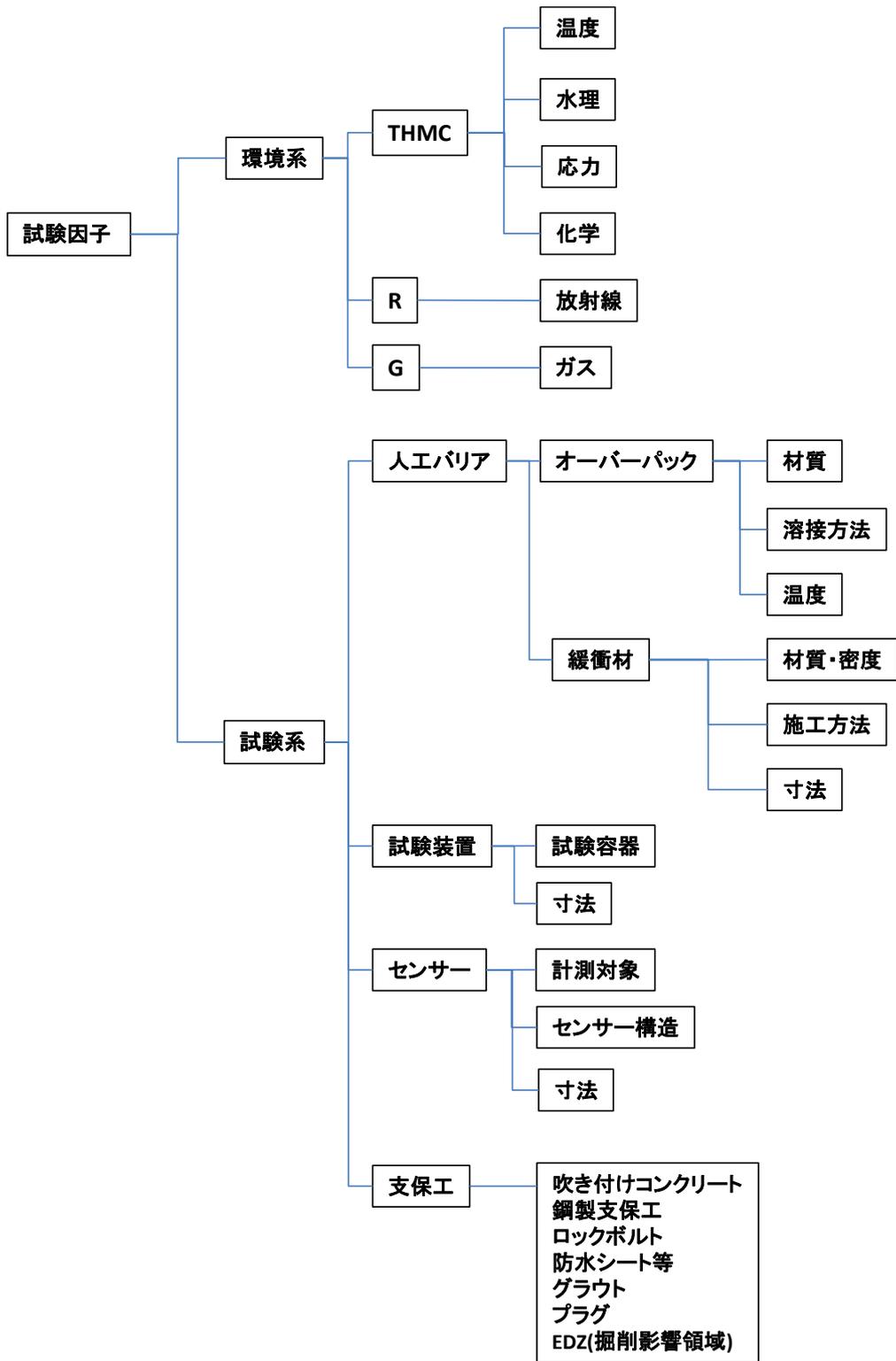


図 3.1.2-2 試験条件検討；環境系／試験系の因子

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

環境系／試験系の因子		想定される地層処分環境 / 人工バリア仕様		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		地上ラボ試験
		—	腐食挙動へ影響する内容		地下試験(検証)	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"> ・4年程度の計画とする。 ・ある定常的な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。 ⇒ 工学規模試験では、試験期間を有効に用いるために検証での試験は開始済。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。 ・小規模要素試験で時間をパラメータとする場合には、時間経過毎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。 ・地上ラボ試験は試験対象により、適宜、試験期間を設定する。 	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	温度	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体発熱温度 ・地温 	<ul style="list-style-type: none"> ・約100℃から60℃へ漸減 	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 ⇒加熱を伴う試験の温度を80℃に統一する。 ・セナサ性能確認には非加熱状態の検証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。 ⇒既存調査データ15℃を参考として設定する。 	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"> ・岩盤を流れる地下水流速 ・緩衝材内流速 	—	<ul style="list-style-type: none"> ・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10⁻¹²～10⁻⁶m/sオーダーの幅を有している。 ⇒緩衝材周囲に流速を与えない。 ・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10⁻¹⁰m/s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る。 	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)
	THMC 応力	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・外圧 	<ul style="list-style-type: none"> ・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系岩盤で10.7MPa、軟岩系岩盤で8.8MPaの外圧が発生すると想定している。⇒人工バリア設置後の操業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。 	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 ₂ ガス密閉空間に開放)
	化学	<ul style="list-style-type: none"> ・天水由来の淡水又は海水由来の地下水 ・緩衝材の透過水組成 	<ul style="list-style-type: none"> ・酸化性雰囲気→還元性雰囲気 	<ul style="list-style-type: none"> ・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、操業期間は1パネルの操業期間は100ヶ月を想定している。この操業期間は換気、排水が行われるため、人工バリア近傍の雰囲気は操業活動の影響を受けることが想定される。 ・工学規模試験・地下試験: 還元性地下水移流、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。 ・小規模要素試験・地上ラボ試験等実験室規模試験: 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なう。 ・工学規模試験・地上試験: 地下試験同様の還元性維持が望ましいもの、実際には困難と思われるが、溶存酸素濃度極力下げたために窒素によるパブリングも検討する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左(上部は酸化環境影響?) ・酸化雰囲気(特に脱気せず) ・大洗での現地レベルでの雰囲気再現(検証が完全な還元性でない想定した場合) 	窒素によるパブリングを検討検討	×(還元性)	<ul style="list-style-type: none"> ・大気中で組立・密閉後に脱気水を給水、気相脱気(HI) ・GB内(Eh<-200mV)環境でのACMセンサーの検証およびクーボンによる腐食試験 	
R 放射線	放射線	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体γ線(2mGy/hr) ・中性子線(0.03mGy/hr) 	<ul style="list-style-type: none"> ・照射酸化 	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 	考慮せず	同左	同左	×	考慮せず
			<ul style="list-style-type: none"> ・水の放射線分解による影響 	<ul style="list-style-type: none"> ・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。 	考慮せず	同左	同左	×	考慮せず
G ガス	ガス	<ul style="list-style-type: none"> ・発生ガス組成: 水素ガス 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス蓄圧 	<ul style="list-style-type: none"> ・炭素鋼の還元性環境での長期試験で、腐食減量評価で0.1～0.4 μm/年、水素ガス濃度評価で約0.05 μm/年(H₂ガス換算で約0.2L/m²/年)の実績がある。(Ref: 還元性環境での金属腐食に起因するガス発生量評価(RWMC-TFJ-030011)) ・発生水素ガス移行解析で、ほぼ全量が周辺岩盤に移動する(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られる。(Ref: 地層処分場におけるガスの拡散・移行に関する検討 JNC TN8400 99-045) 	考慮せず	同左	同左	×	考慮せず
			<ul style="list-style-type: none"> ・発生ガス圧力 	<ul style="list-style-type: none"> ・外圧 	<ul style="list-style-type: none"> ・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0、JNC-TN6410-93-299,1993) ・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。 	考慮せず	同左	同左	×

表 3.1.2-2 試験条件検討；試験系の因子と試験条件への反映

環境系／試験系の因子		想定される地層処分環境 / 人工バリア仕様		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		地上ラボ試験		
		—	腐食挙動へ影響する内容		地下試験(概延)	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		
人工バリア	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、構造材や放射線遮蔽へり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。 ・概延深地層研究計画 地下研究施設整備(第Ⅱ期)等事業 要求水準書(H22年度・JAEA)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可能である。 ・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	400mmL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概延OP腐食試験の#600研磨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 Gunbel Distribution Model for Assessing ^① , 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。 ・地層処分実施時には余剰部の切削・研磨は実施されないと考えられる。余剰部ママの腐食試験データの拡充が必要なことから、特に処理を行わない。また、既存の溶接部腐食試験は溶接断面の#600研磨にて実施されており、これらとの比較のため溶接部研磨の有無のパラメータ化を検討する。	母材/溶接部(φ100×1200mmL、縦シーム2本)、溶接・機械加工後研磨等実施しない	母材/溶接部(φ100×1200mmL、縦シーム2本)、溶接・機械加工後研磨等実施しない	母材/溶接部(φ100×400mmL、縦シーム2本)、溶接・機械加工後研磨等実施しない	○(表面加工状態:機械加工後研磨有無)	—	
	緩衝材	材質・密度	・ベントナイト	・(クニゲルVI相当)70%+珪砂30% ・1.6Mg/m ³ ~	・JNC HLW第2次取りまとめ分冊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ア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。 ・JNC HLW第2次取りまとめ分冊2(JNC TN1400 99-022)等では乾燥密度1.6Mg/m ³ 以上をリアレンスとしている。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 ³ 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	同左	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、原位置充てん、ペレット、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次取りまとめ分冊2(JNC TN1400 99-022)、RWMC 遠隔高度化研究等ではブロック、原位置充填、吹付工法、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次取りまとめ分冊2(JNC TN1400 99-022)等ではリア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。	ブロック	同左	同左	同左	同左	ブロック又は充てん
		寸法	・厚さ700mm	—	—	厚さ100mm	同左	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て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・押さえ板(密閉)	
		計測対象	—	—	・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道など) ・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	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	
		センサー	—	—	・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:狭部設置のため極細径、かつ強度担保のためモールド保護とシース保護構造を採用する。 ・参照電極:環境の水分量の変動に影響を受けずに連続測定するため、地中電位測定等で実績のある参照電極を採用する。 ・3電極式センサ:埋込型φ62mm、小型φ20mm ・熱電対:モールド型φ1.65mm、シース型φ3.2mm ・参照電極:φ40mm	★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中 ★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	・横置き定置方式では、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 ・縦置き定置方式では、人工バリアは標高に設置される。その場合にはオーバーバックへ接触する地下水は、横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。 ⇒縦置き定置方式を想定し、支保工は考慮しない。	考慮せず	同左	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	—	—	—	—	—	—	—	
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	—	—	—	—	—	—	—	
ブラダ	・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(ラック)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		
概延試験の補完事項				—	—	環境条件制御 概延取り出し方法、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立性、および定量性		

(4) 幌延 URL での工学規模試験の環境

幌延 URL での工学規模試験は 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ている。

地下施設での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 での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。

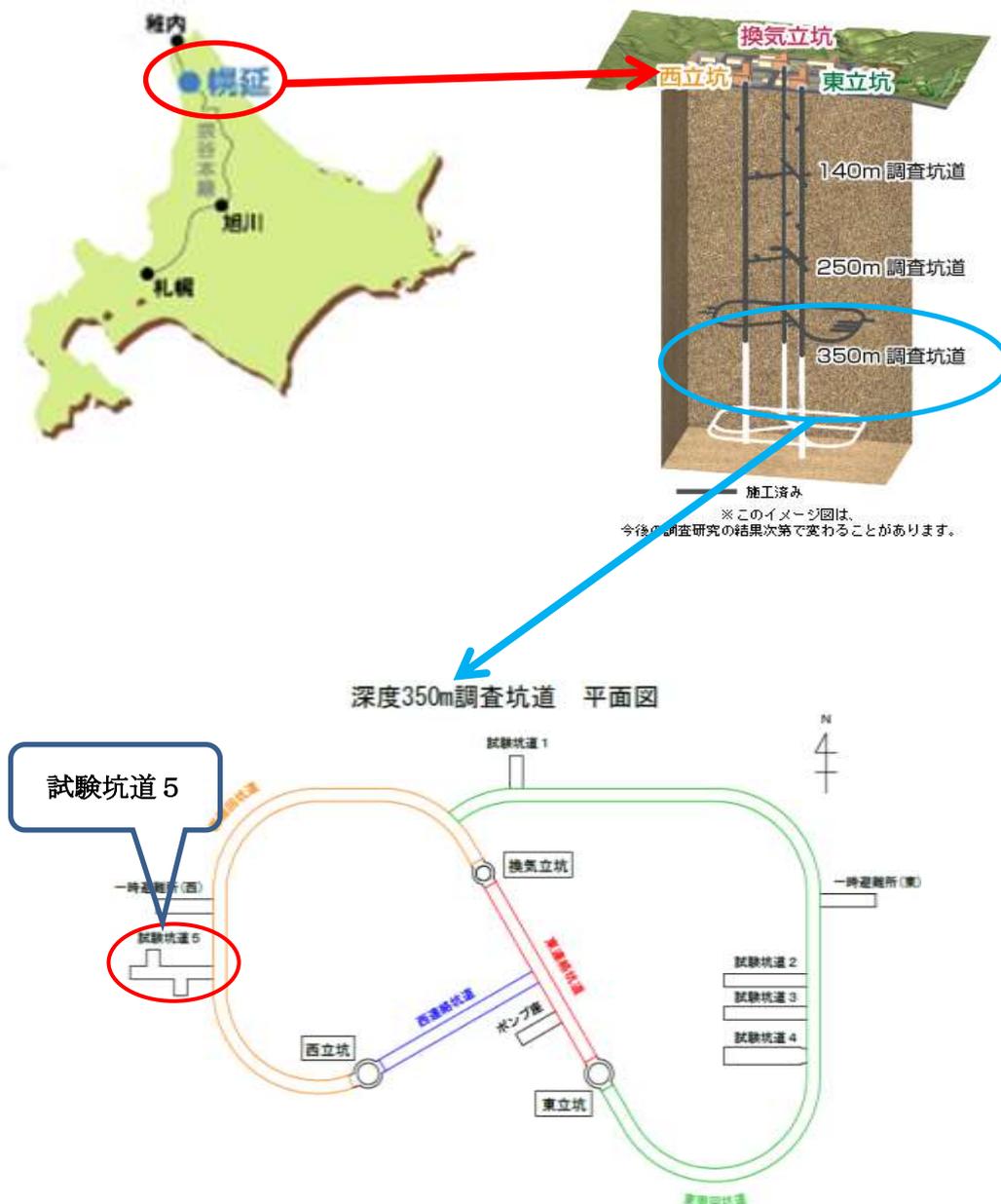


図 3.1.2-3 幌延町所在地、幌延 URL、350m 調査坑道平面図

(5) 幌延 URL での工学規模試験

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。

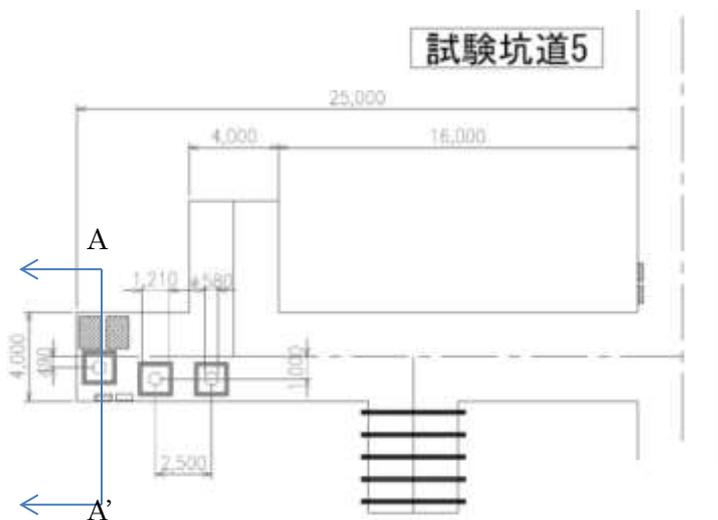


図 3.1.2-4 深度 350m 調査坑道 平面図

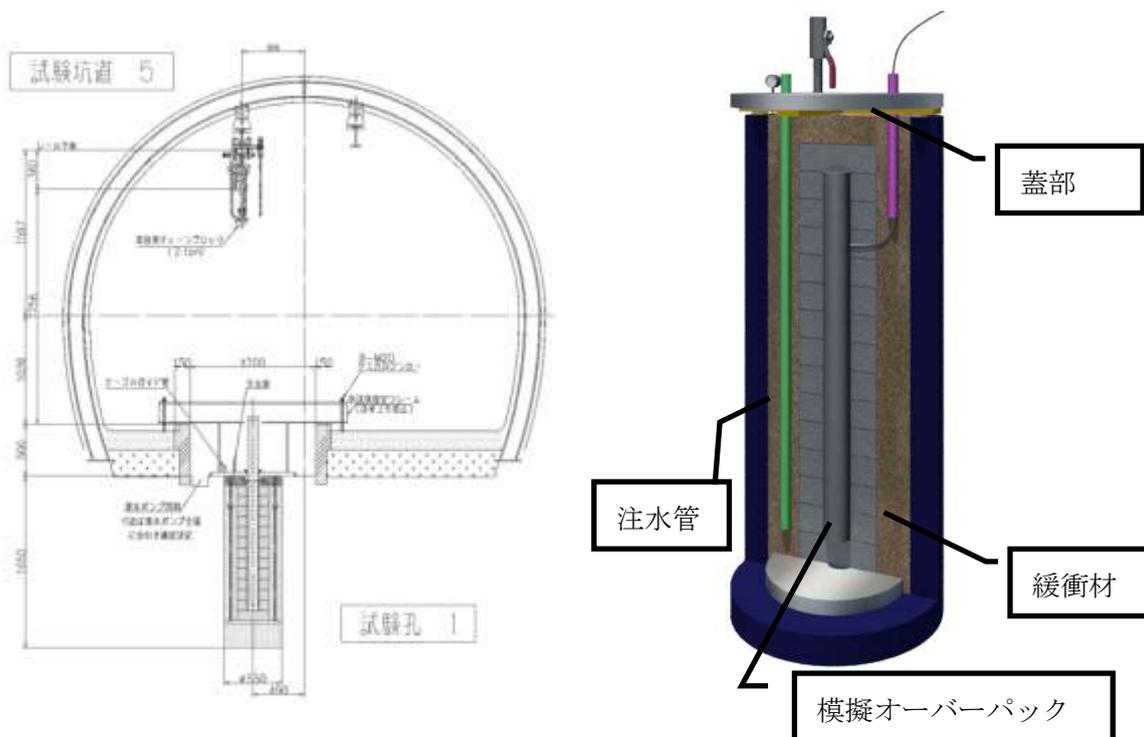


図 3.1.2-5 試験坑道 5(A-A')断面および試験体等イメージ図

幌延 URL での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ている。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。

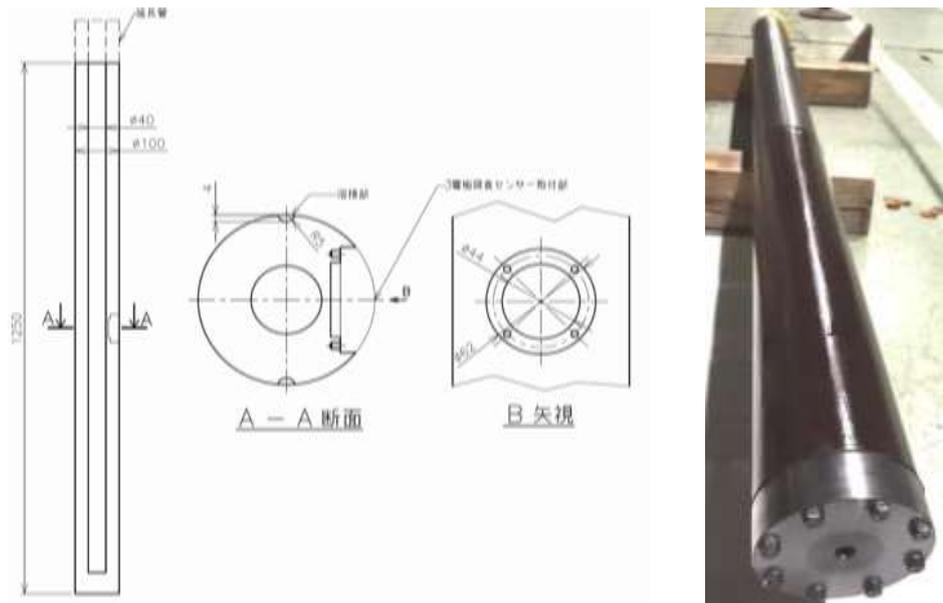


図 3.1.2-6 模擬オーバーパック構造及び外観

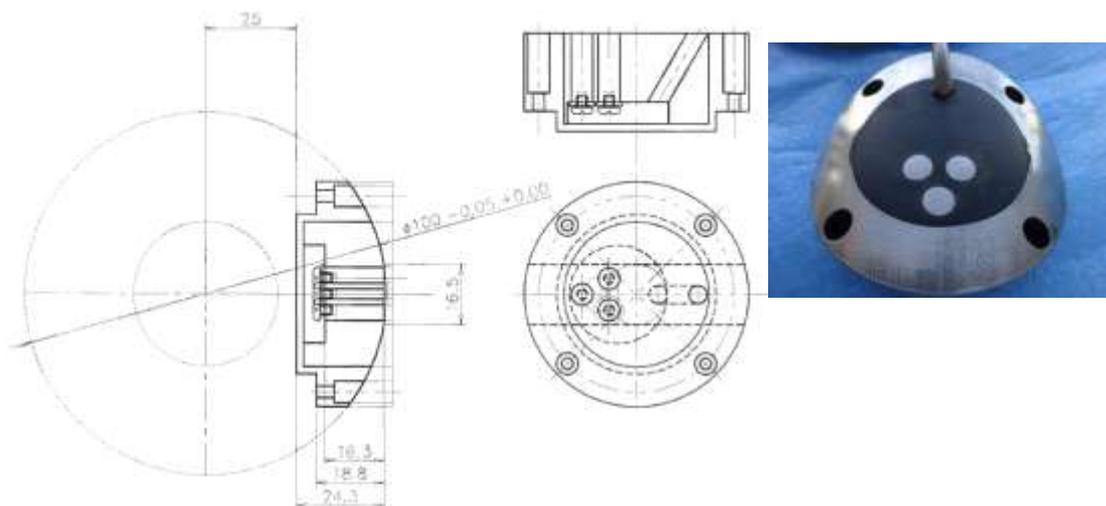


図 3.1.2-7 埋込型3電極センサー・外形図及び外観

幌延 URL での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ている。各センサーの配置のイメージを図 3.1.2-8 に示し、図 3.1.2-9 にセンサー配置図を示す。また、各センサーの計測対象等は後節に示す。

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	

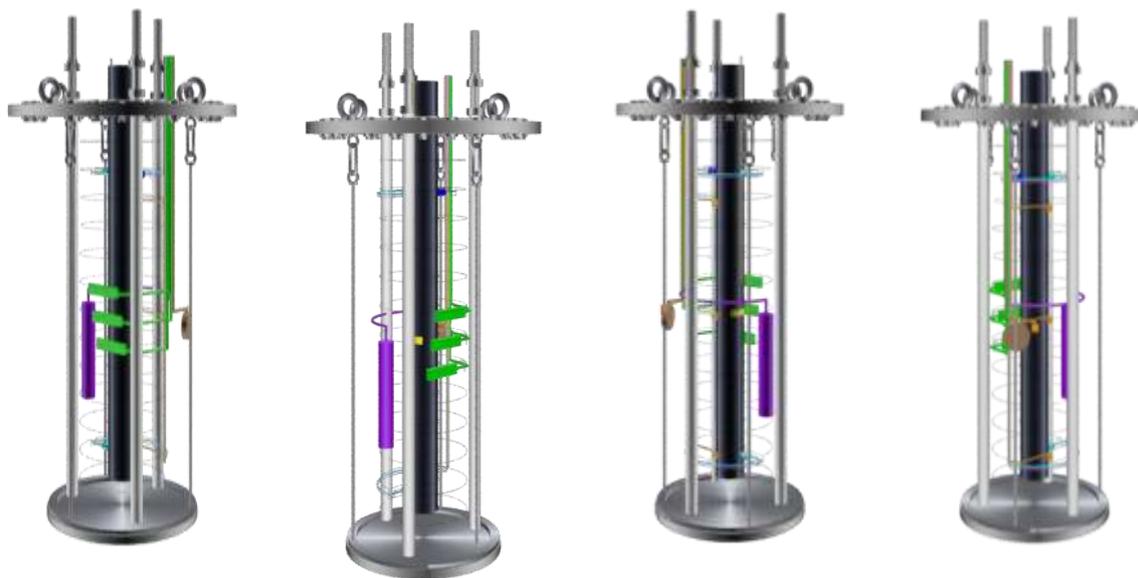


図 3.1.2-8 幌延 URL 工学規模試験 センサー配置 (3次元イメージ)

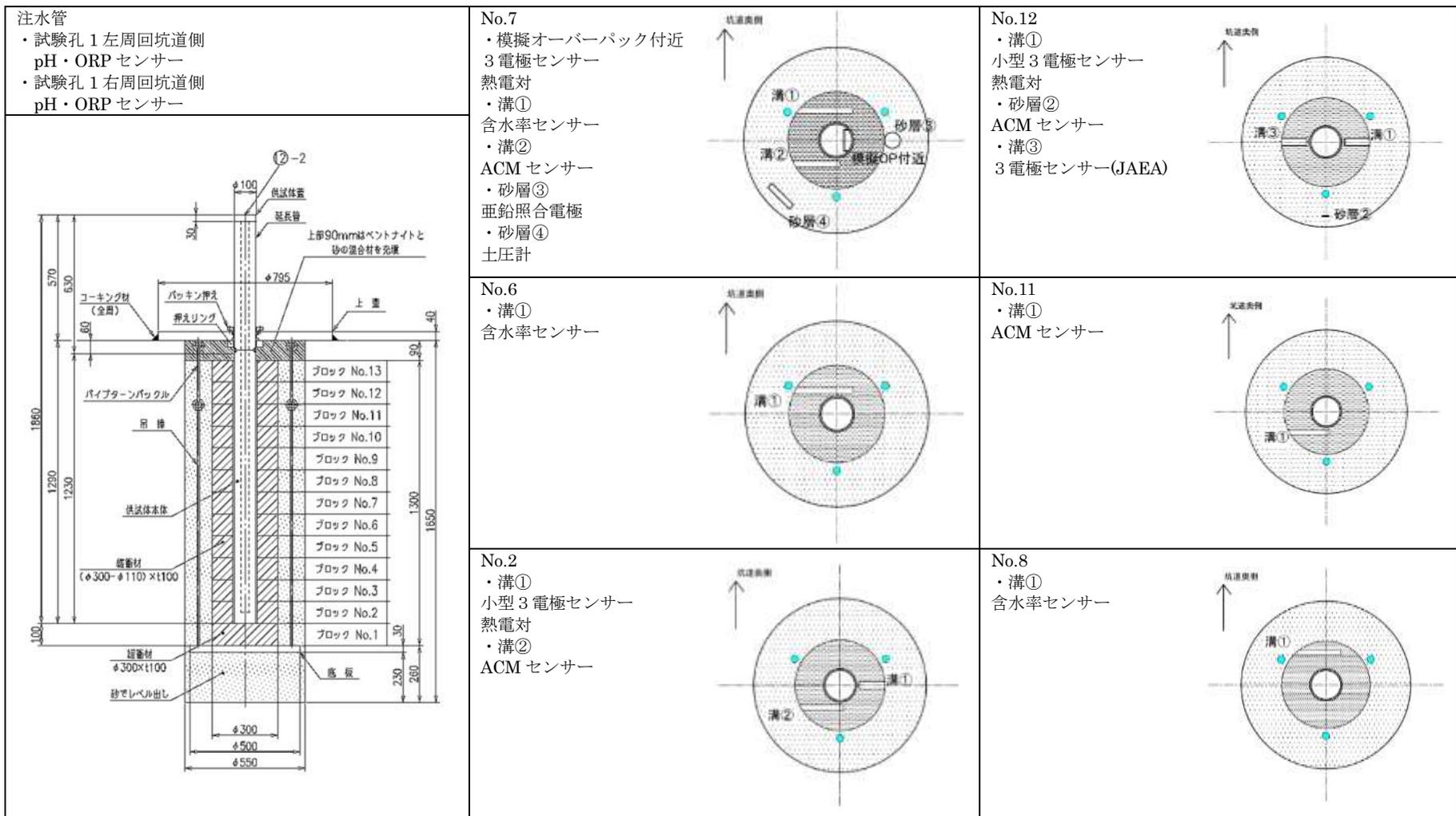


図 3.1.2-9 幌延 URL 工学規模試験 外観・センサー配置図

幌延 URL での工学規模試験装置の設置は平成 26 年度に実施した。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°C の状態を再現するためのヒーター設備を模擬オーバーパック内部に設置した。



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 での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 での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 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 での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 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ている。

(7) 小規模要素試験

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ている。

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、縦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 での工学規模試験で、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ている。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、実験室内を実施している。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ている。

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(本年度)以降は、条件を統一した試験環境に各計測技術を適用し、比較評価を実施する。

(3) 小規模要素試験

小規模要素試験は、「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直接観察等による経過確認が困難であることに対し、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。

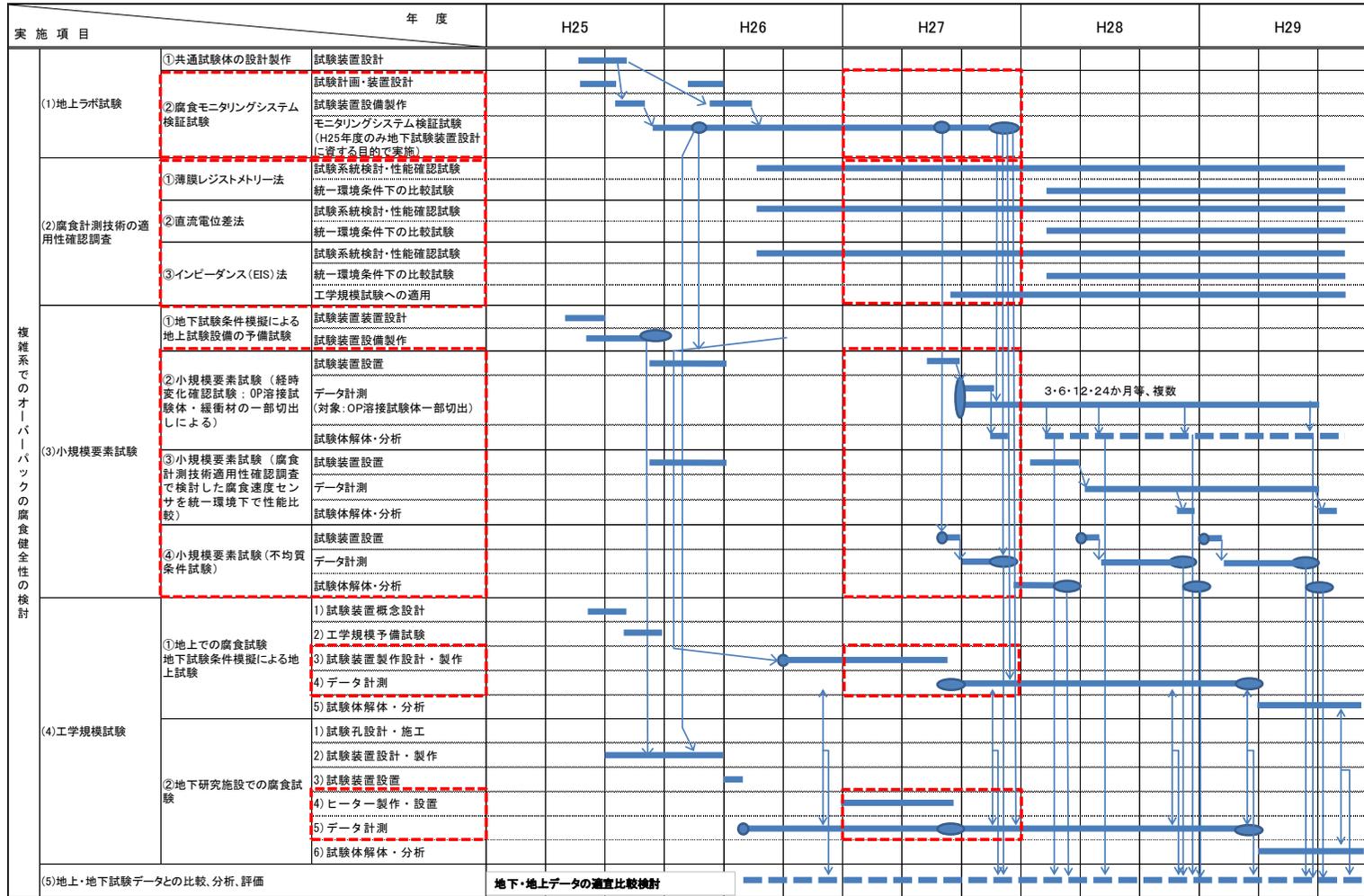
(4) 工学規模試験

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ている。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ている。また、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の表面温度の 80℃の状態を再現するためのヒーター設備を模擬オーバーパック内部に設置し、入熱を開始している。

平成 27 年度は幌延 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 での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 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による腐食センサーを設置している。

これらの工学規模試験は継続してデータ測定と分析を行い、平成 29 年度に試験体を解体し、実際の腐食量を計測し、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の腐食挙動評価及び評価方法の検討を行う。

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年計画案(平成27年度改訂)



平成27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) 装置構成

幌延 URL に設置した工学規模試験装置の設置センサーを表 3.2.1-1 に示す。

表 3.2.1-1 幌延 URL 工学規模試験 センサー・計測機器種類及び数量

	機器名称	計測対象	設置 個数
①	3 電極センサー (JAEA)		1
②	3 電極センサー	腐食速度	1
③	小型 3 電極センサー (外付け)	腐食速度	2
④	亜鉛照合電極	模擬オーバーパック試験体電位	1 組
⑤	ACM センサー	腐食速度 (緩衝材中設置)	3
		濡れ検知用 (砂層設置)	1
⑥	熱電対	温度	3
⑦	土圧計	土圧	1
⑧	含水率センサー	水分ポテンシャル	3
⑨	pH・ORP センサー	地下水中の pH	2
		地下水中の酸化・還元電位	

(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 3.2.1-1 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 3.2.1-2 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 200~300ppm 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。

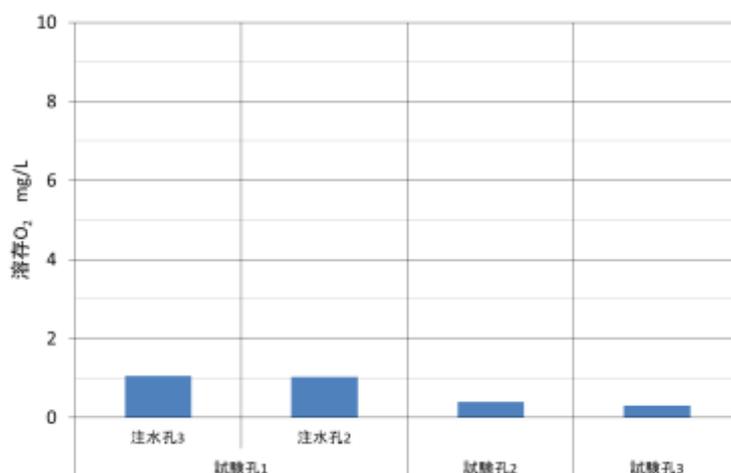


図 3.2.1-1 幌延 URL 試験坑道 5 溶解酸素量

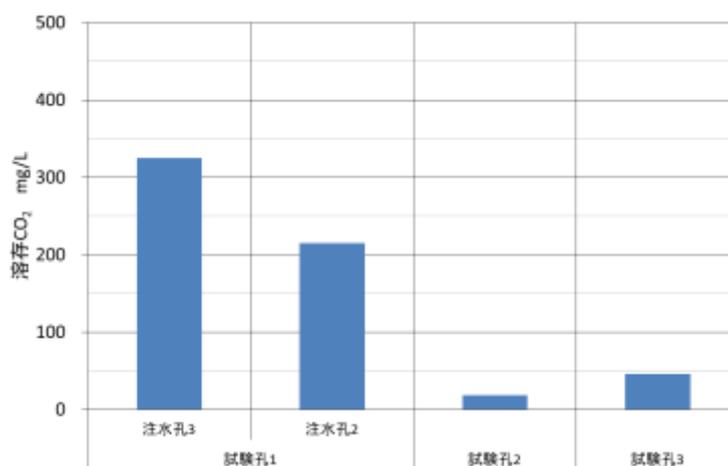


図 3.2.1-2 幌延 URL 試験坑道 5 溶解二酸化炭素量

2) 地下水性状

図 3.2.1-3 に、地下水組成を示すが、主成分は、Na⁺、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、Na/Cl 比は海水の組成比とほぼ同じとなった。このことから、地下水中の Na 及び Cl については海水由来であると考えられる (図 3.2.1-4)。図 3.2.1-5 に地下水分析時の計測した pH の結果を、図 3.2.1-6 に、幌延 ULR の注水管に設置した pH 系での測定結果を示す。幌延 URL での計測された pH は、計測開始から 500 日以降ではノイズが大きく、計測出来なかったが、採水して測定した pH に変化は認められなかった。図 3.2.1-7 に Eh の計測結果を示すが、-500mv 付近で安定して

いた。

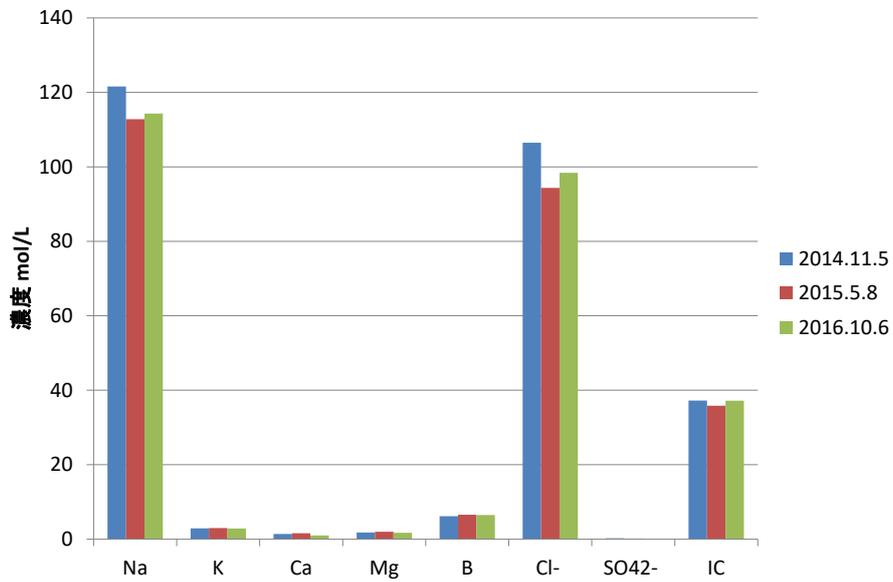


図 3.2.1-3 幌延地下水の組成

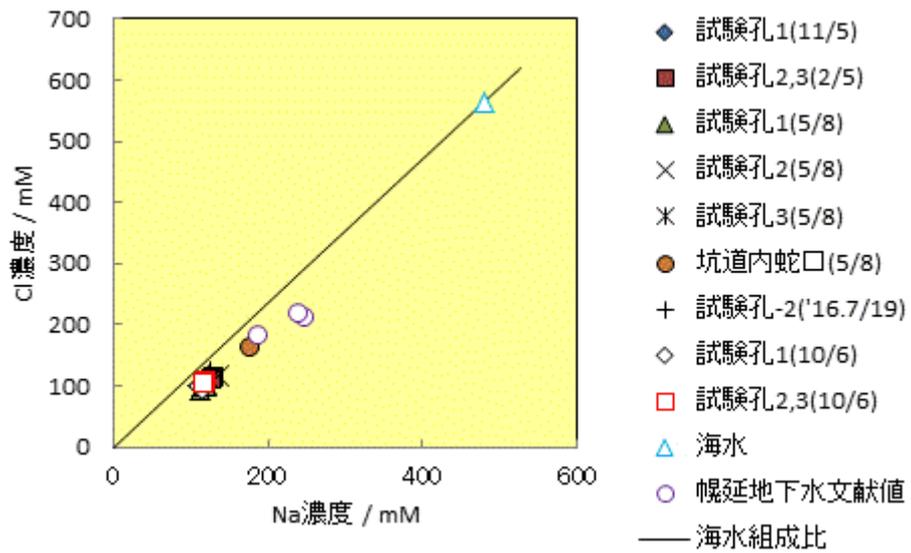


図 3.2.1-4 幌延地下水と海水の Na と Cl 濃度の比較

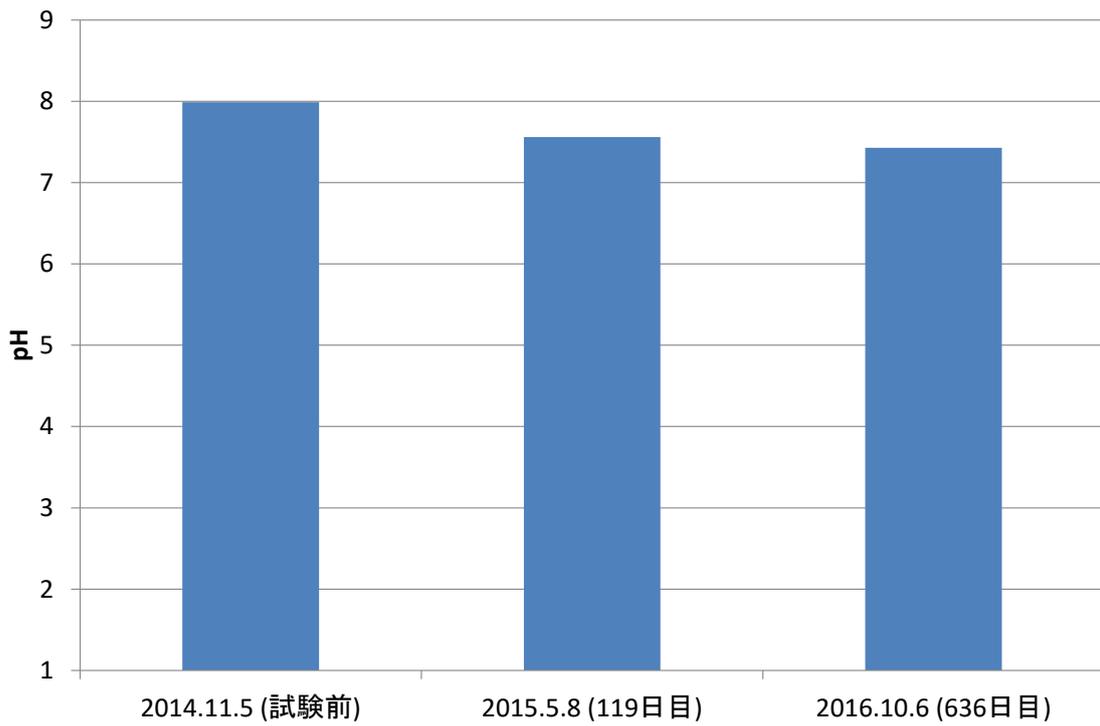


図 3.2.1-5 幌延 URL pH の分析結果

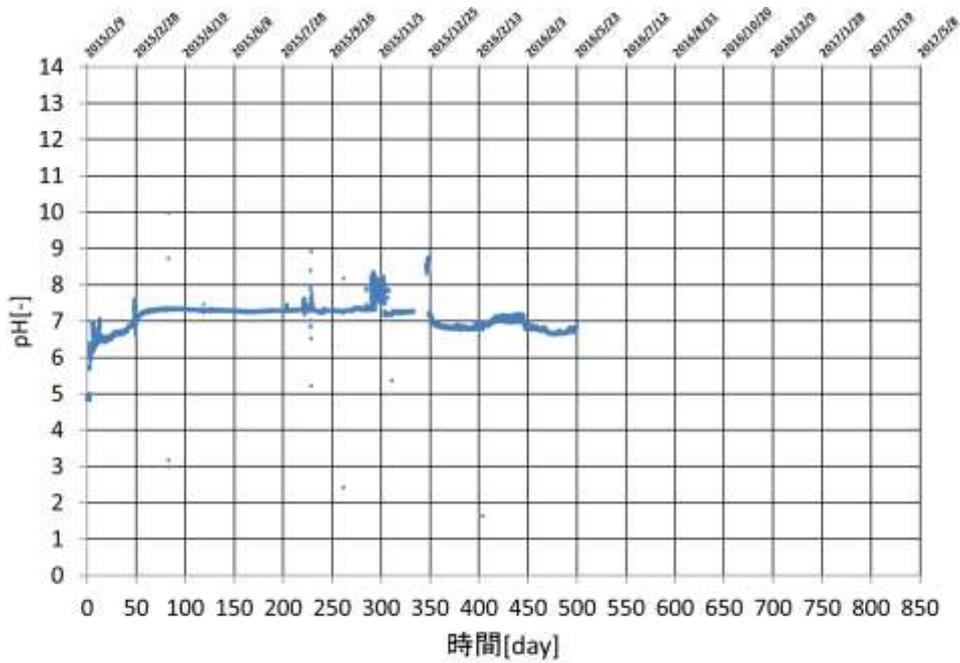


図 3.2.1-6 幌延 URL pH 測定結果

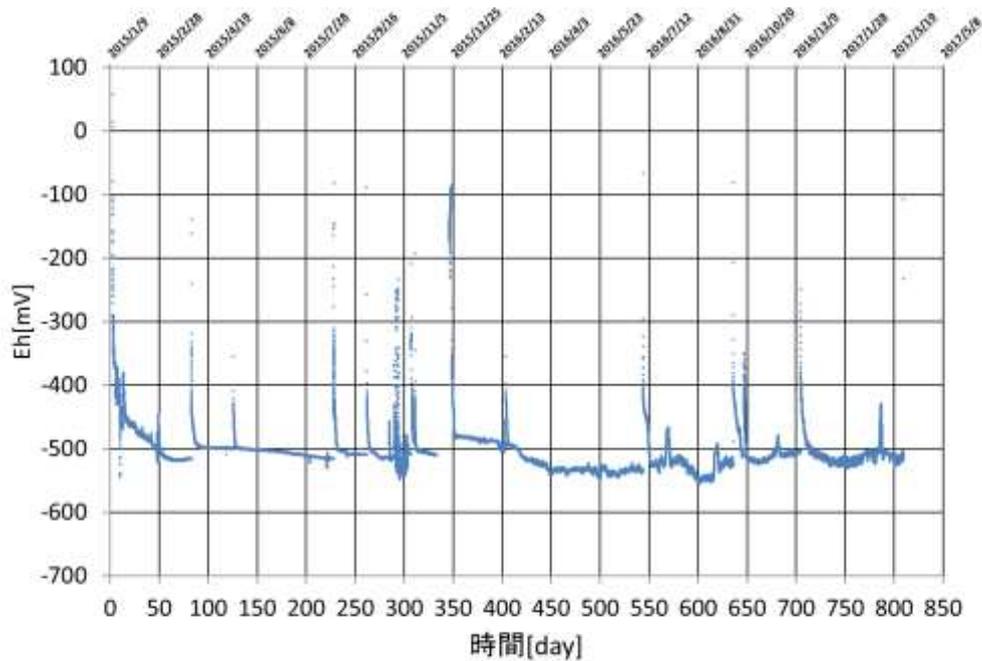


図 3.2.1-7 幌延 URL Eh 測定結果

3) 温度

幌延 URL 工学規模試験装置に設置した 3 か所の 3 電極式腐食センサー設置位置における温度の測定結果を図 3.2.1-8 に示す。20℃前後の温度推移は地下水の温度変動と試験体深さ方向の温度分布を反映している。70～80℃への温度変化は、模擬オーバーパック内に設置した加熱ヒーターによる温度変化（模擬オーバーパック表面 80℃）を反映している。

試験開始後 300 日前後の温度の低減や、550 日以後に見られるスパイク状の温度低下は、試験装置を設置した地下研究施設の計画停電等によるものである。

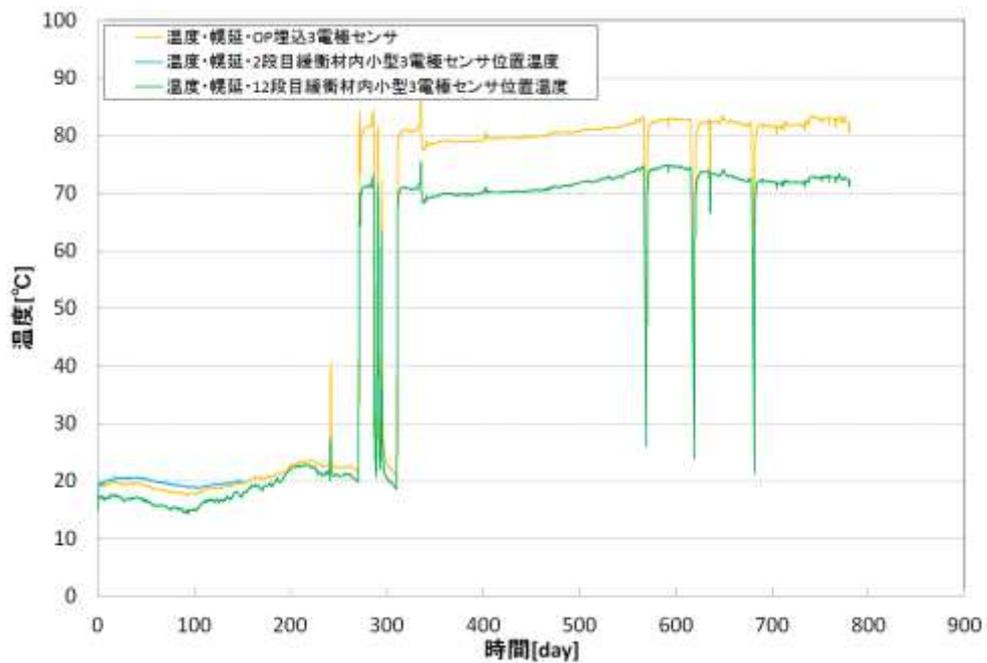


図 3.2.1-8 幌延 URL 工学規模試験 3 電極センサー近傍温度測定結果

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 3.2.1-9 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。

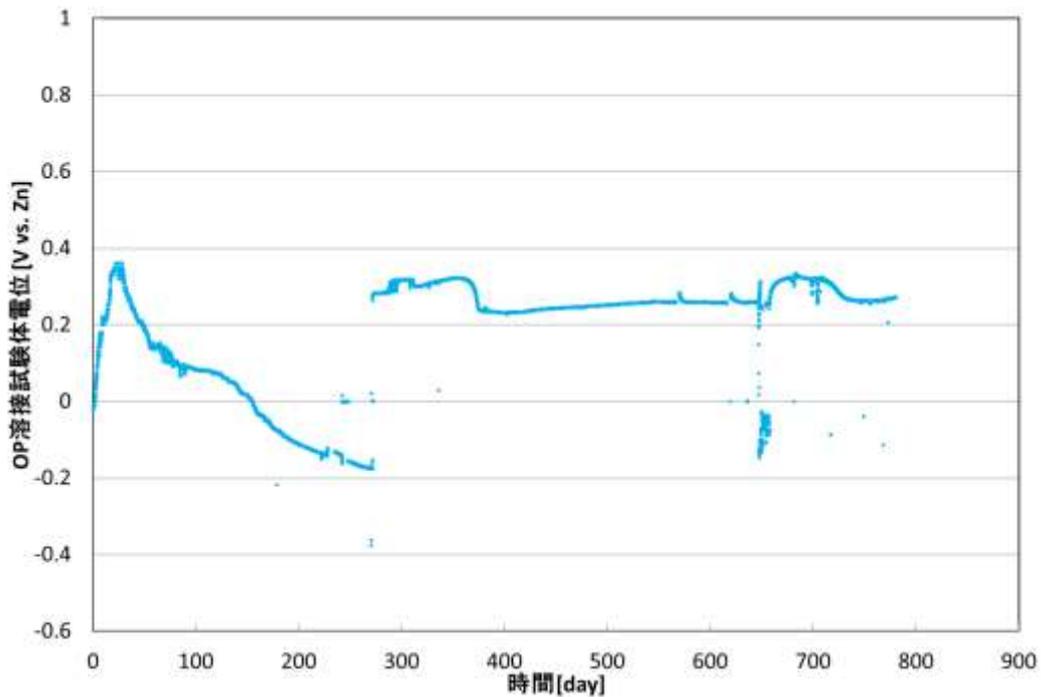


図 3.2.1-9 模擬オーバーパック電位（亜鉛照合電極基準）の経時変化
 （幌延 URL 工学規模試験）

(3) 腐食速度の経時変化

図 3.2.1-10 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（試験開始から開始後約 700 日まで）を示す。試験開始から約 120～170 日経過後から腐食速度が増加し、その後数 $100 \mu\text{m}/\text{年}$ の速い腐食速度が継続している。3 電極センサーが低酸素濃度の還元雰囲気では低い腐食速度を示す一方、酸化性雰囲気中において高い腐食速度を示すことは、本センサーの化学プラントの環境変化の検知における実績と、本検討で実施したラボスケール試験で確認済みである。

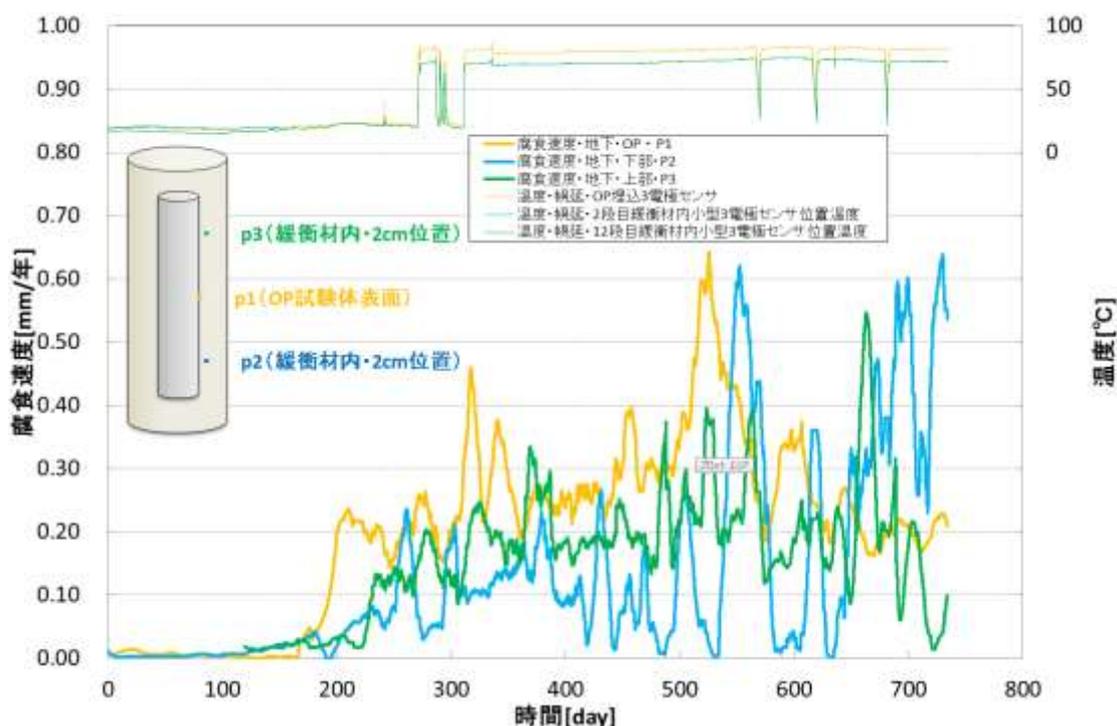


図 3.2.1-10 幌延 URL 工学規模試験 3電極式腐食センサーによる腐食速度計測値の経時変化

上述の3つの3電極センサーは試験開始から約170日経過以降、ヒーターによる加熱の有無によらず全て高い腐食速度を示している。しかし、オーバーパック埋込型・小型センサーとも高い含水率の緩衝材ブロック中にあり、酸素の供給は緩衝材ブロック中の拡散律速で制限されている可能性が高い。よって、高い腐食速度は別の要因によると判断し、要因分析を実施し、次項に示すデータの再評価を行なった。

(4) 3電極センサーの電流・電圧測定データによる再評価

1) 背景

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することが前提となる。2015年度の報告書に示すとおり、クーポン試験片による腐食速度と3電極センサーによる腐食速度の比較から、室温条件のラボスケール試験で脱気環境における数十 μm /年の腐食速度を求められることを確認済みである。

但し、特定の環境では電流・電圧のいずれかの変動が著しく小さくなる、又はノイズ等環境影響で電流・電圧の相関性が低減し、正しい腐食速度が得られない現象が確認されている。工学規模試験装置内の3電極センサーは、以下の条件がラボ試験と異なり、測定中の環境がラボ試験とは異なる可能性がある。

- ・初期に緩衝材ブロックとの隙間がある（オーバーパック埋込型センサー）
- ・低密度緩衝材ブロック中への埋込を行なっている（小型センサー）
- ・ヒーターで模擬オーバーパック試験体を加熱している（両センサー）

3電極センサーによる電流・電圧の測定値から腐食速度を導出するプログラムコードは、上述の、①電流・電圧のいずれかの変動が著しく小さくなる、②ノイズ等環境影響で電流・電圧の相関性が低減した際、自動的にこれらを排除しない仕様となっている。①と②は通常の腐食環境で生じる可能性が低く、部分的に生じても標準偏差でキャンセルできることから、同仕様が採用されている。

よって、工学規模試験装置内で①又は②が長時間継続すると、誤った腐食速度が導出される可能性があることから、1秒間隔で計測器が出力する電流・電圧データ（以後生データと称する。）を再評価し、ENA法による正しいデータ取得が可能なデータに基づいた評価を行なった。

2) 再評価方法

再評価は以下の①・②で行なった。①・②とも表計算ソフトウェアの統計関数機能で実現し、一定の評価上の客観性を確保した。

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点以上の確保→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）

なお後述のとおり、見直し後の腐食速度は時間経過とともに減少が進み、電流値はENA法が適用不可なレベルに低下したことから、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、分極曲線作成による測定下限値の評価を行った。

具体的には、目視確認した電流・電圧の変動のうち、図3.2.1-11の縦軸は電流[A]または電圧[V]、横軸は計測日時）のように電流値の変動が小さく、標準偏差（腐食速度）の算

出に適さないデータを選別するため、対応する電圧値と共に図 3.2.1-12 に示す分極曲線を作成した。この結果から、 $8.5E-8[A]$ (約 $10^{-7}[A]$) 未満の電流値は、腐食速度が $1 \mu m/\text{年}$ 未満と見なすこととした。

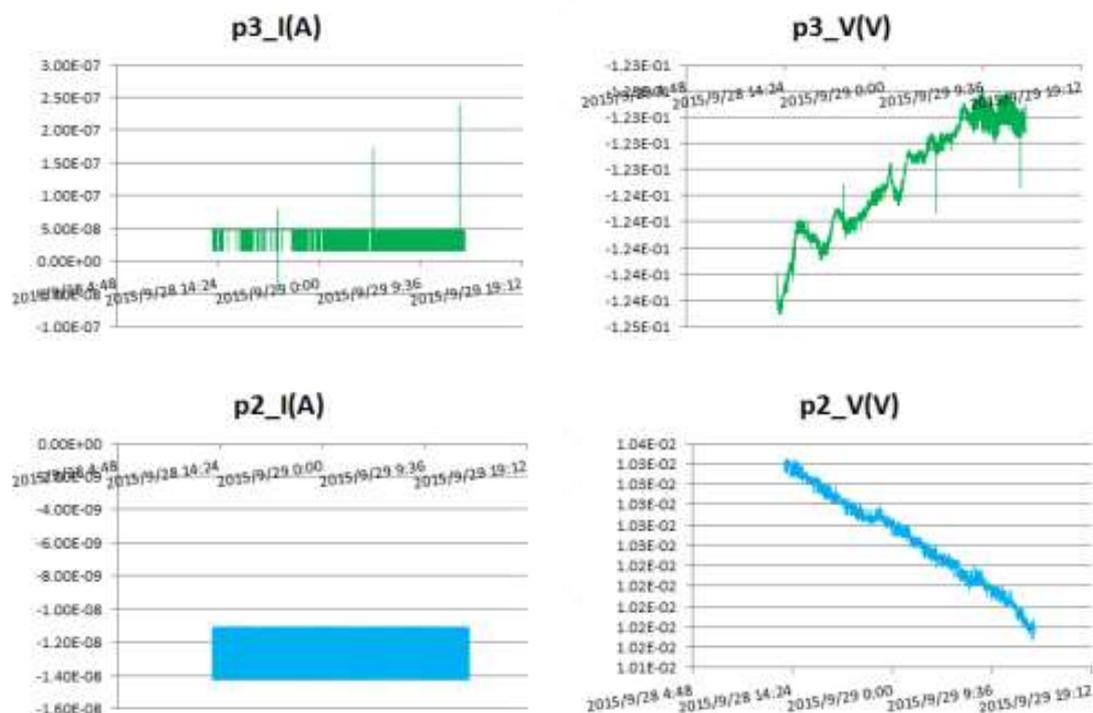


図 3.2.1-11 電流値の変動にノイズ状の動きを確認できない例

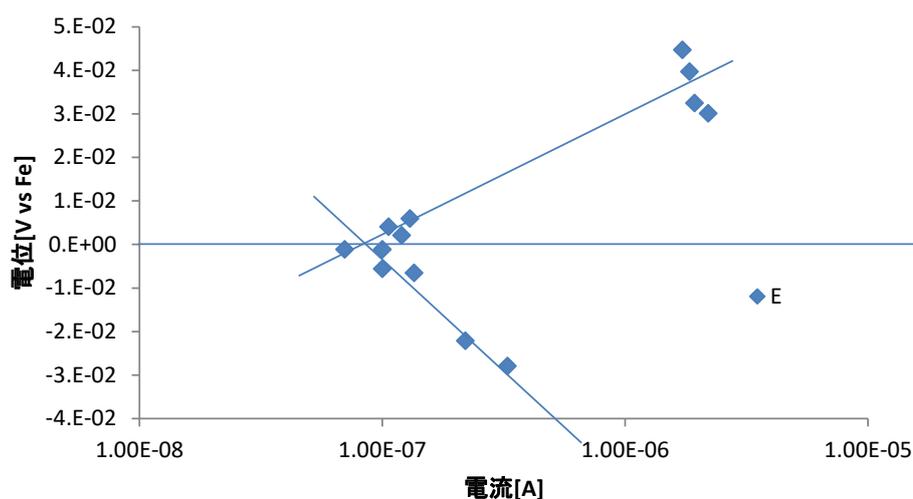


図 3.2.1-12 分極曲線による腐食速度の測定下限値の評価

3) データ処理例

電流・電圧変動のデータ例を図 3.2.1-13 と図 3.2.1-14 に示す。図左上は縦軸が電流[A]、横軸が計測日時、図右上は縦軸が電圧[V]、横軸が計測日時、下段の図は電流と電圧の相関性確認を目的としており、縦軸が電流、横軸が電圧である。相関性評価の結果、図 3.2.1-13 のようにデータ幅と電流・電圧間の相関性が十分高いデータを腐食速度算出用として抽出し、図 3.2.1-14 に例示する相関性の低いデータは腐食速度算出に適さないと判断して除外した。

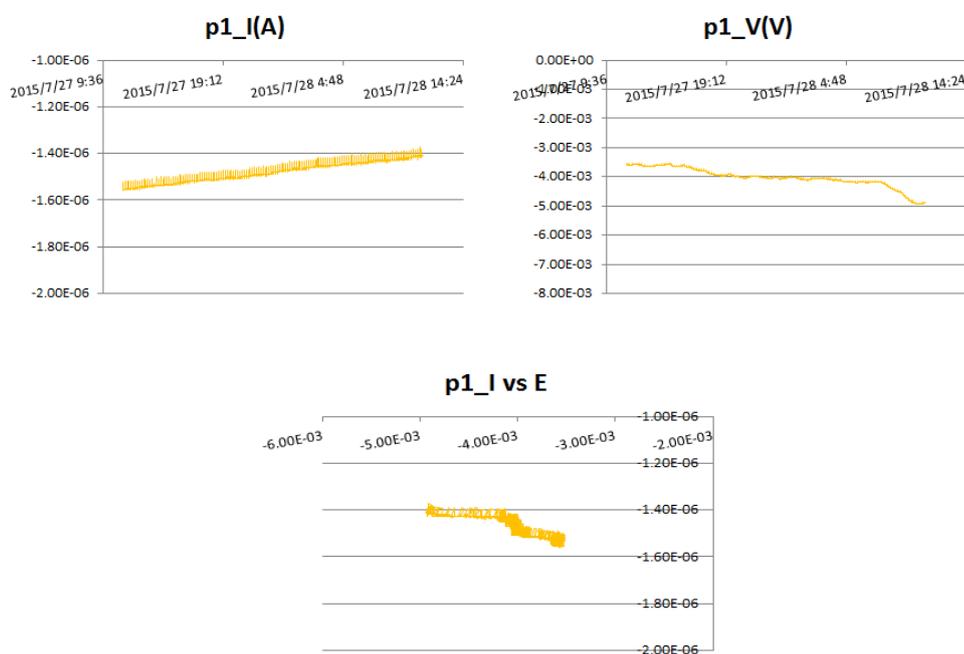


図 3.2.1-13 抽出される生データ例と電流・電圧間の相関プロット

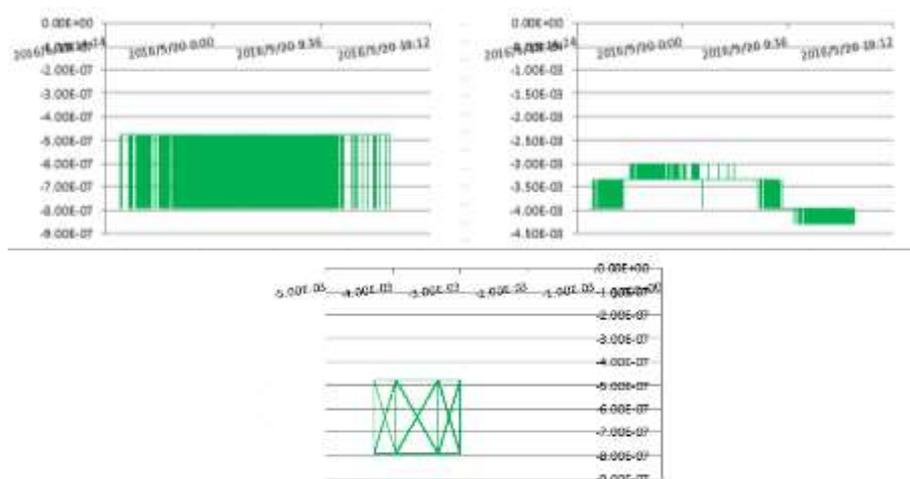


図 3.2.1-14 抽出過程で不採用となる生データと相関プロット

4) 再評価後の腐食速度

再評価の結果得た腐食速度の経時変化を図 3.2.1-15 に示す。再評価前のデータが試験期間中の長期間数百 $\mu\text{m}/\text{年}$ を示していたのに対し、再評価後では高くても数十 $\mu\text{m}/\text{年}$ 程度となり、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 (CH2,3) 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 (CH1) 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
- ・ヒーター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

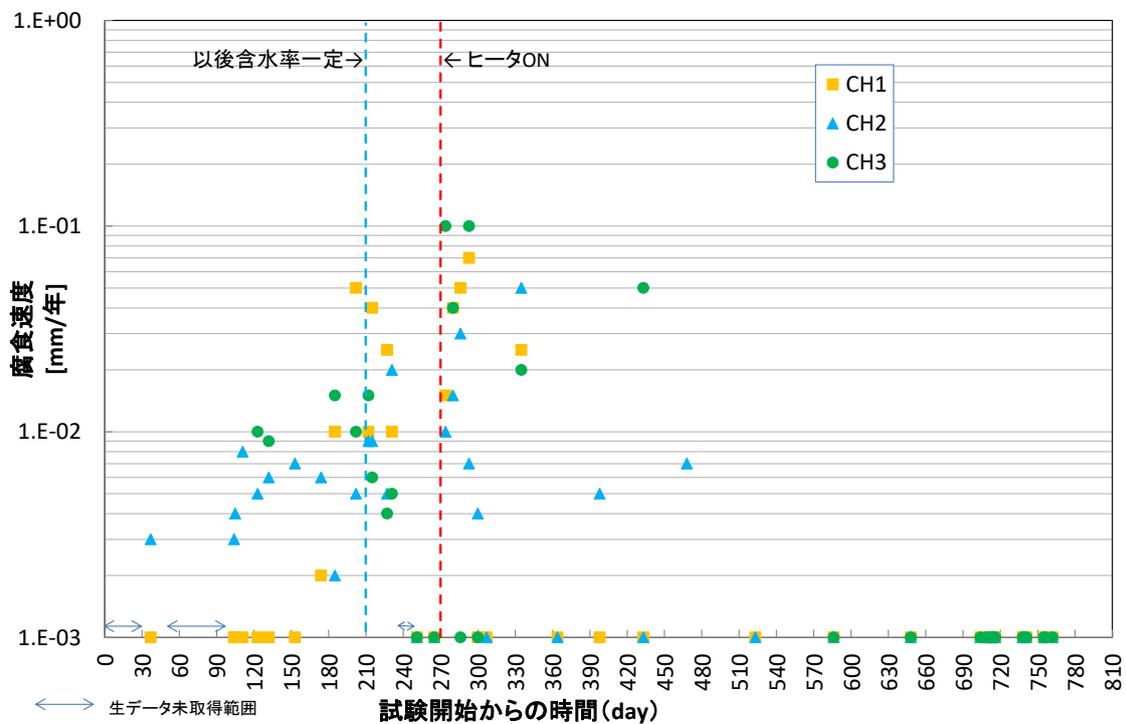


図 3.2.1-15 3 電極式腐食センサー腐食速度計測値の経時変化 (再評価後)

(幌延 URL 工学規模試験)

3.2.2 地上における工学規模試験の実施

(1) 装置構成

地上に設置した工学規模試験装置は幌延 URL に設置した試験装置を模擬している、試験体は地下試験と同様のものを使用し、幌延 URL の試験孔をと同一寸法で製作した模擬試験孔に設置している。また使用する地下水は幌延 URL の地下水を分析して、成分調整を行った模擬地下水を製作した。

地上工学規模試験装置に設置したセンサーを表 3.2.2-1 に示す。

表 3.2.2-1 地上工学規模試験 センサー・計測機器種類及び数量

	機器名称	計測対象	設置 個数
①	3 電極センサー	腐食速度	1
②	小型 3 電極センサー (外付け)	腐食速度	2
③	亜鉛照合電極	模擬オーバーパック試験体電位	1
④	ACM センサー	腐食速度 (緩衝材ブロック中設置)	3
		濡れ検知用 (砂層設置)	1
⑤	熱電対	温度	3
⑥	土圧計	土圧	1
⑦	含水率センサー	水分ポテンシャル	3
⑧	交流インピーダンスセンサー	腐食速度	3
⑨	炭素鋼試験片	腐食量	3
	(クーポン試験片)	(試験前後の重量変化から導出)	

(2) 腐食環境

1) 溶存酸素、溶存二酸化炭素

地上工学規模試験に使用する脱酸素済模擬地下水中の溶存酸素及び溶存二酸化炭素量を表 3.2.2-2 にまとめる。また参考値として不均質試験装置解体時に測定した溶存酸素量を記載する。

表 3.2.2-2 地上工学規模試験 腐食環境

溶存 二酸化 炭素量	[mg/L]	2.0	
溶存 酸素量	[mg/L]	2.9	窒素バブリング後（試験開始時の模擬地下水中溶存酸素量に相当）
		2.0~2.5	参考値： 不均質試験装置解体時に測定

2) 模擬地下水注水量と組成

図 3.2.2-1 に、積算給水量を示す。150 日以降ほとんど給水量は増えていない。表 3.2.2-3 に、調製した模擬地下水の組成を示す。試験期間中の各元素濃度の経時変化を図 3.2.2-2 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 3.2.2-3 に示すが、pH は 9 程度まで上昇した。

表 3.2.2-3 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

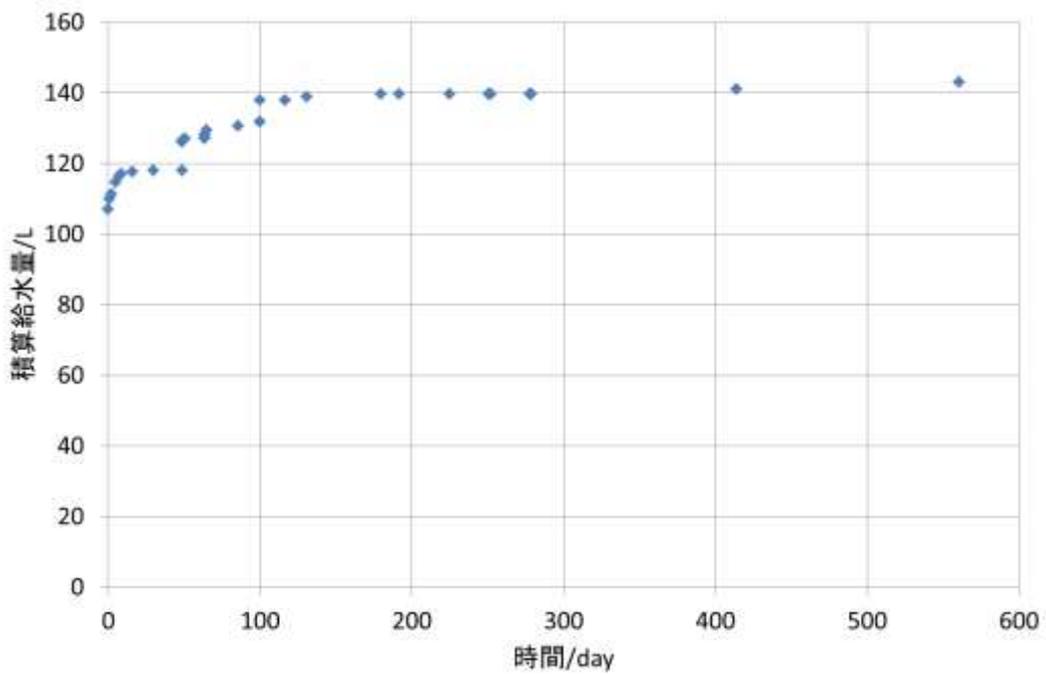


図 3.2.2-1 地上工学規模試験装置積算給水量

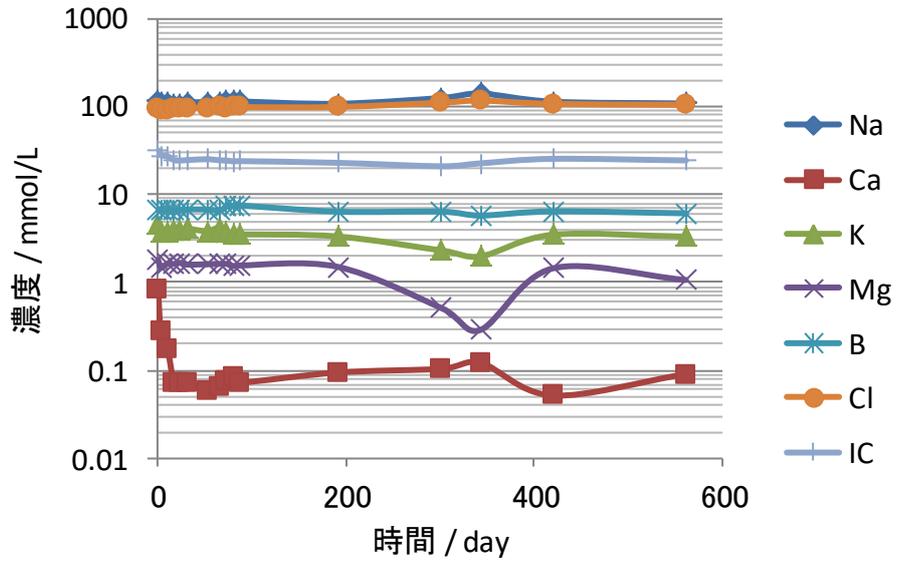


図 3.2.2-2 地上工学規模試験 模擬地下水組成の経時変化

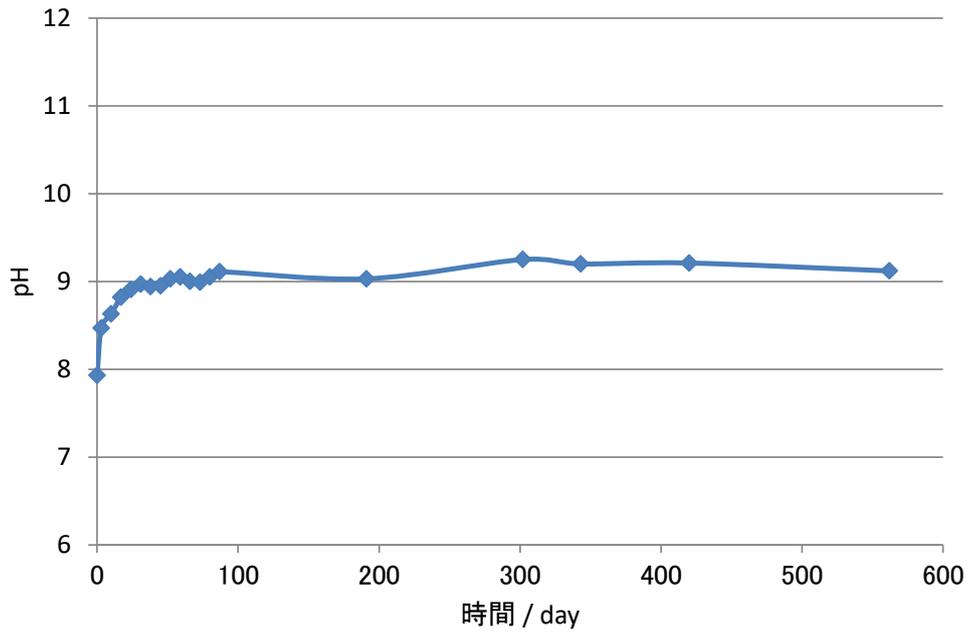


図 3.2.2-3 地上工学規模試験 pH の経時変化

3) 温度

地上工学規模試験装置に設置した3か所の3電極式腐食センサー設置位置における温度の測定結果を図 3.2.2-4 に示す。10～30℃前後の温度推移は試験装置の置かれた試験施設の室温を反映している。60～80℃への温度変化は、模擬オーバーパック内に設置した加熱ヒーターによる温度変化（模擬オーバーパック表面 80℃）を反映している。

試験開始後 350 日以後に複数見られるスパイク状の温度低下は、試験装置を設置した研究施設内電気設備の整備等によるものである。

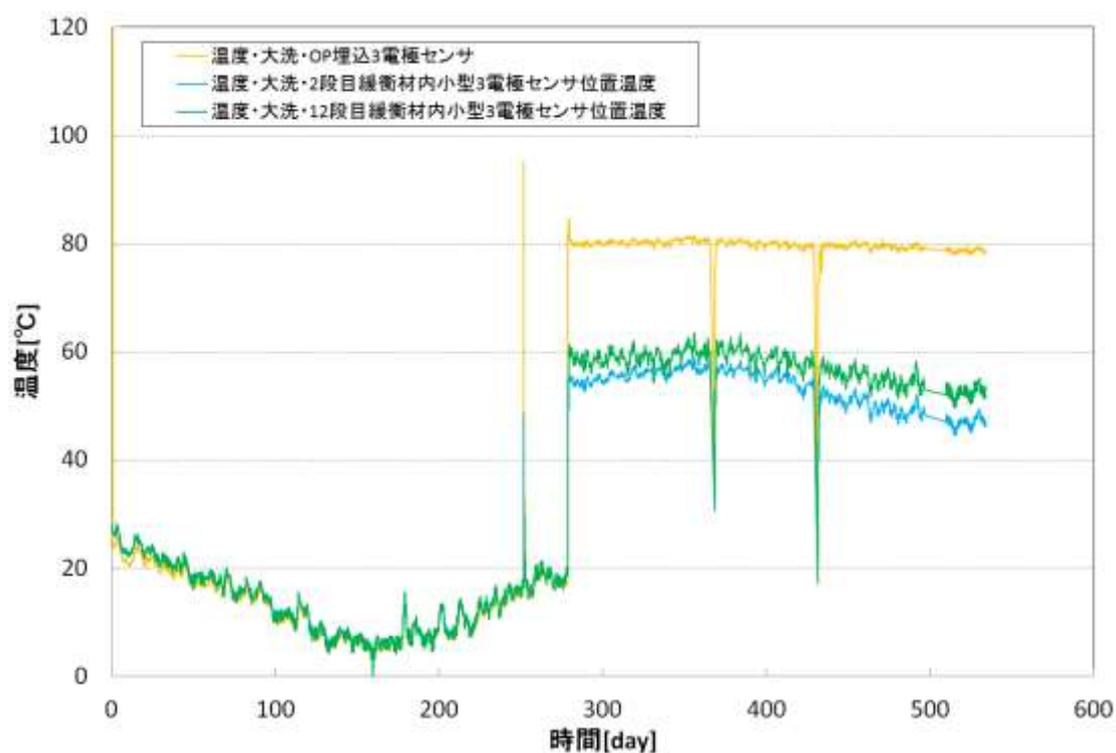


図 3.2.2-4 地上工学規模試験 緩衝材ブロック中の温度測定結果

4) 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 3.2.2-5 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。

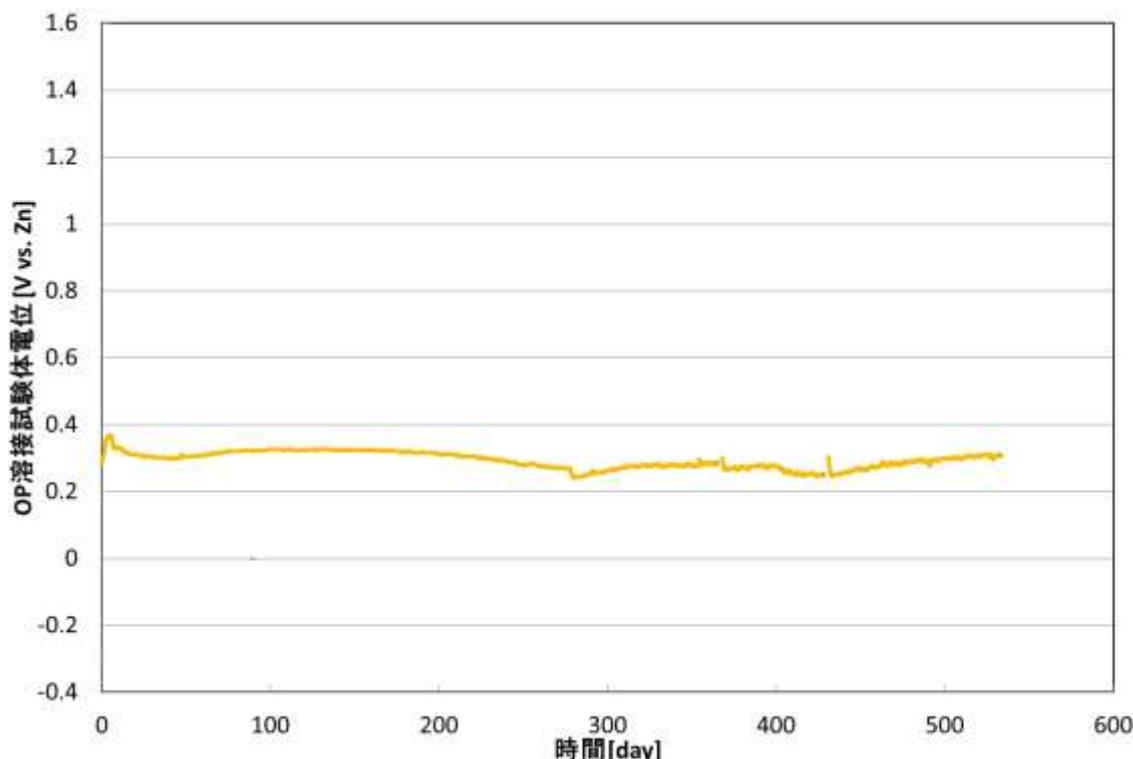


図 3.2.2-5 地上工学規模試験 オーバーパック電位（亜鉛照合電極基準）の経時変化

5) 3電極センサーの計測結果

(3) 腐食速度の経時変化

図 3.2.2-6 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。計測初期から腐食速度が高く、地下試験と傾向が異なる。センサーp2のみヒーターによる模擬オーバーパックの加熱後に腐食速度が増加している他、3つのセンサーとも数百 μm /年の速い腐食速度を示す傾向は地下工学規模試験装置と同様であることから、次項以降に示す確認試験と生データの再評価に基づく腐食速度の見直しを行なった。

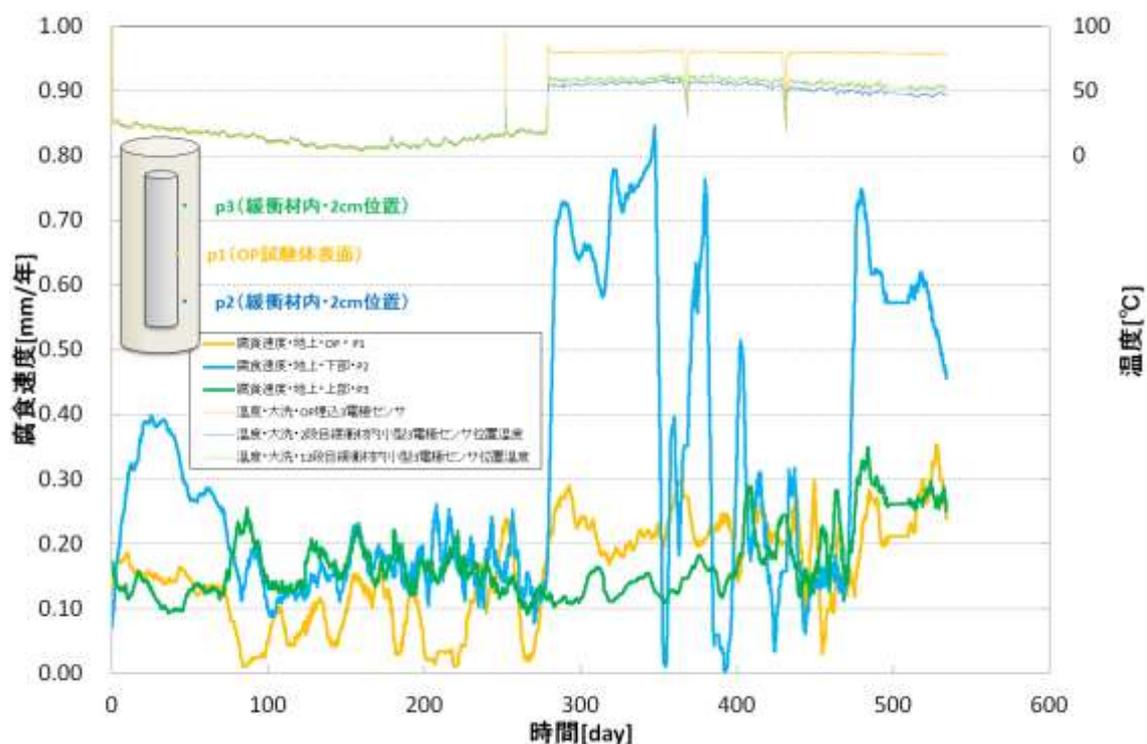


図 3.2.2-6 3電極式腐食センサーによる腐食速度計測値の経時変化
(地上工学規模試験)

1) 3電極センサーの電流・電圧測定データによる再評価

地下試験と同様、電流・電圧の生データの再評価から図 3.2.2-7 に示す腐食速度の経時変化を見直した。再評価前のデータが試験期間のほとんどで数百 $\mu\text{m}/\text{年}$ を示していたのに対し、再評価後では初期に数百 $\mu\text{m}/\text{年}$ 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。

地下工学規模試験装置同様、最初に緩衝材中のセンサ (CH2、3) の腐食速度が含水の進展に伴って上昇し、次にオーバーパック試験体表面のセンサ (CH1) 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地下工学規模試験装置と同様である。地下工学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、ヒーター加熱を開始するまでの間、電流値が 10^{-6}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。

ヒーター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。

2) 交流インピーダンスセンサーの計測結果

交流インピーダンスセンサーの測定結果を図 3.2.2-8 に示す。上段設置のセンサーについては 250 日付近で値大きく上昇し、他のセンサーとほぼ同じ R_p ($10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$) となった。試験体設置ヒーターの試運転日と重なる。ヒーター試運転の影響で水がセンサーに到達したのではないかと推定される。

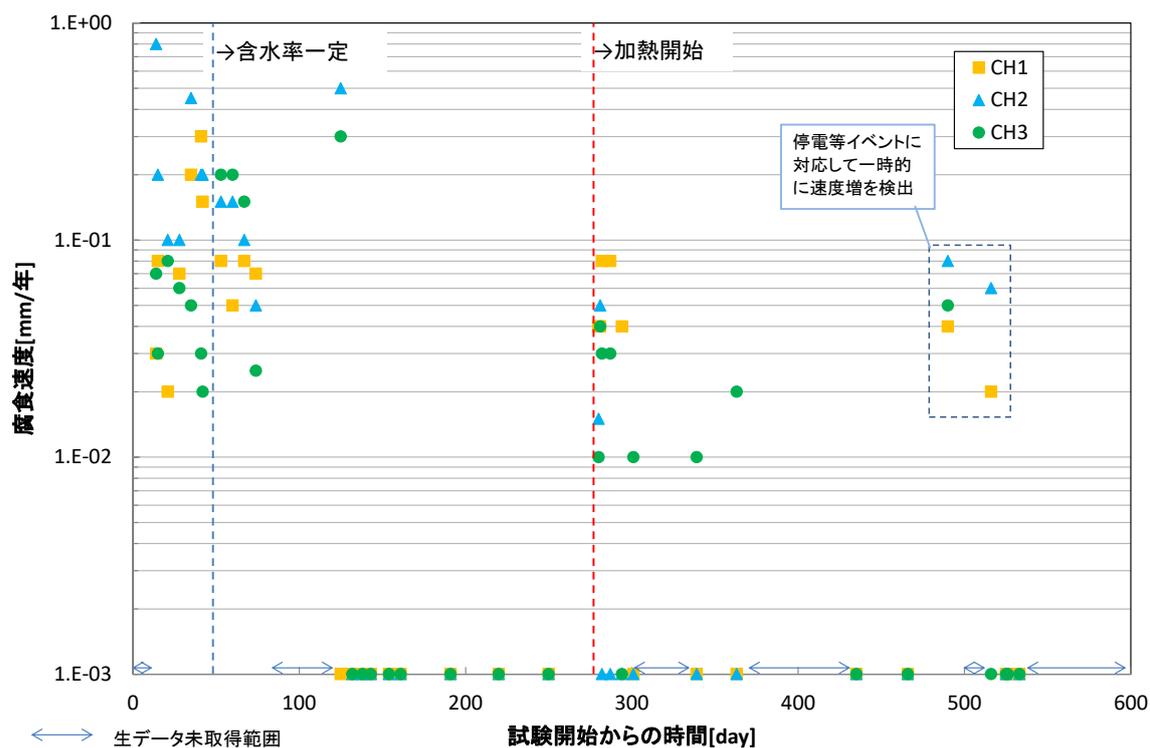


図 3.2.2-7 地上工学規模試験 3 電極式腐食センサー腐食速度計測値の経時変化

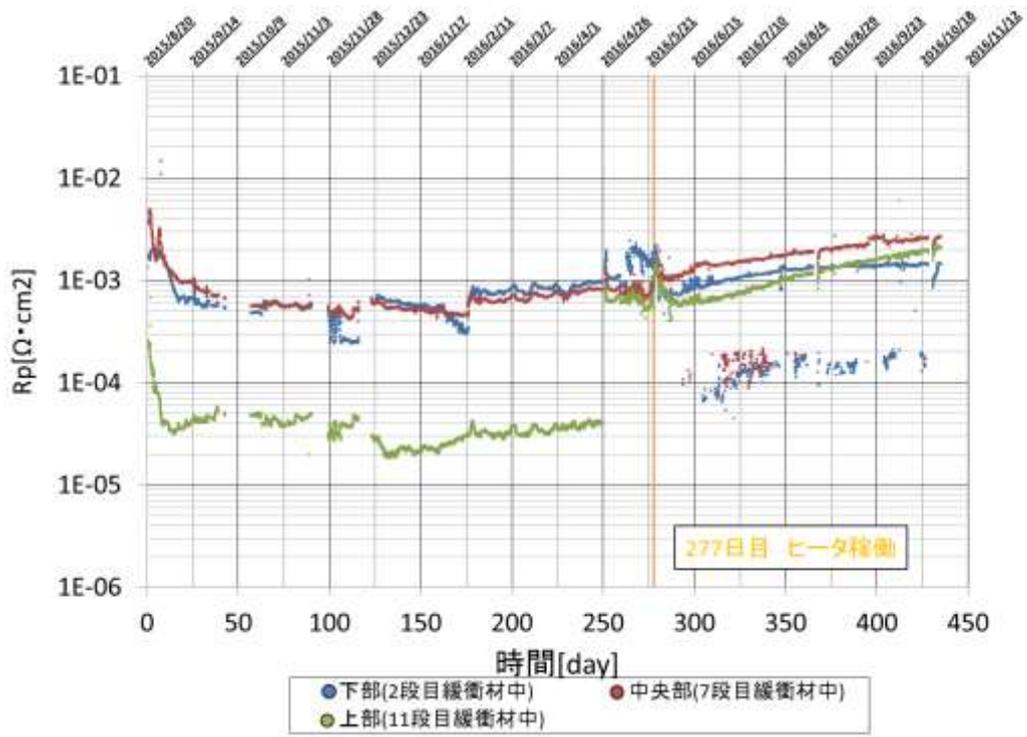


図 3.2.2-8 地上工学規模試験 交流インピーダンスセンサー測定結果

3.3 小規模要素試験の実施

3.3.1 不均質試験

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。不均質試験装置のイメージを図 3.3.1-1 に示す。

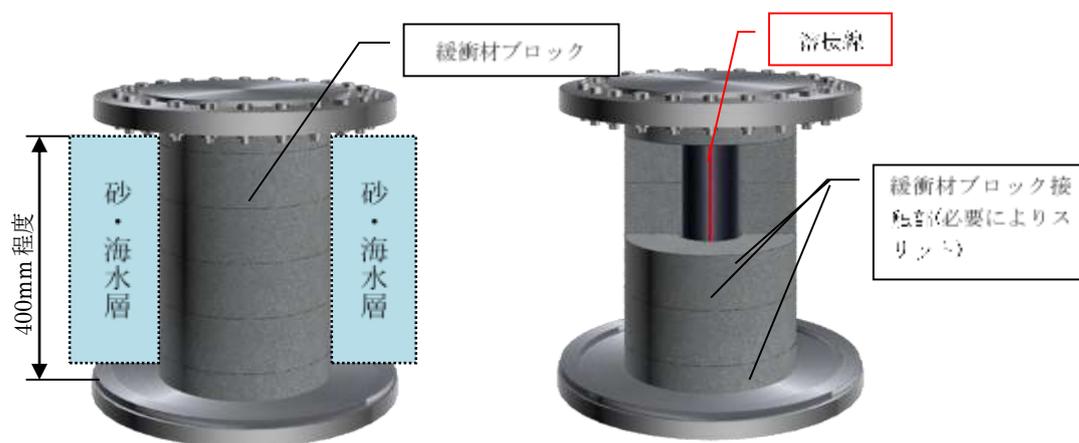
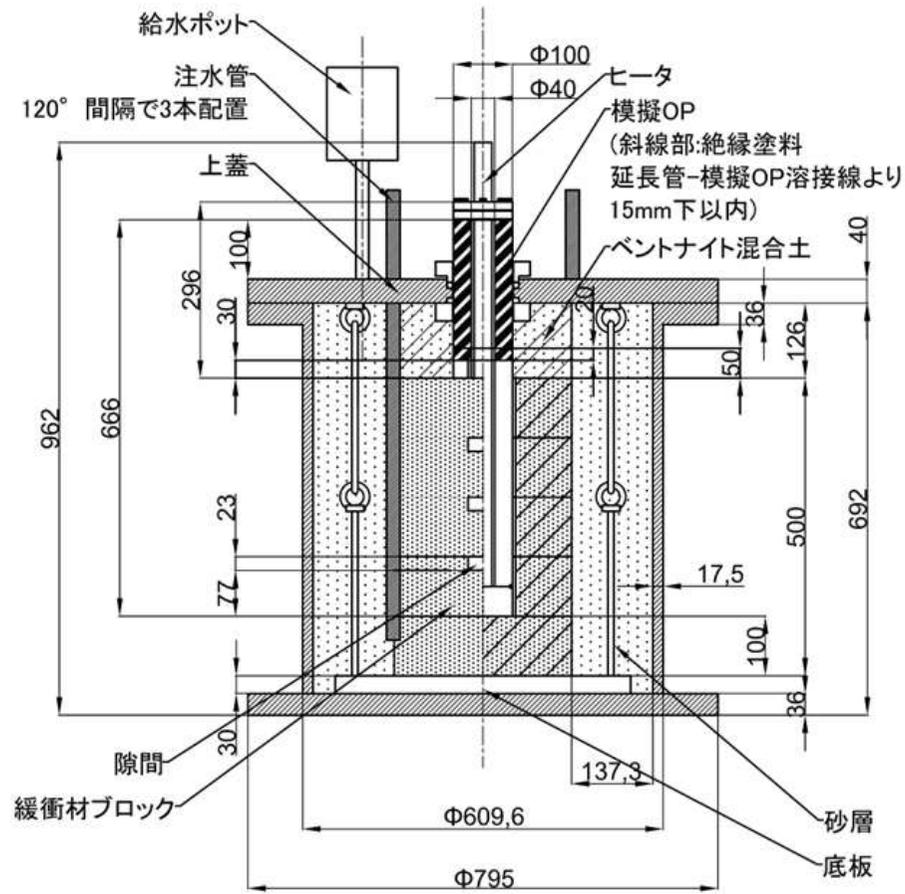


図 3.3.1-1 不均質試験 試験装置イメージ



<p>試験体上部(4段目)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・溝①(隙間側) ACM センサー(Fe-Ag 小型) 炭素鋼試験片 ・溝②(隙間逆側) ACM センサー(Fe-Ag 小型) 炭素鋼試験片 ・砂層 ACM センサー(Fe-Ag 小型) ACM センサー(Zn-Ag 大型) 	
<p>試験体中央部(3段目)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・溝①(隙間側) 含水率センサー ・溝②(隙間逆側) 含水率センサー 	
<p>試験体下部(2段目)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・溝①(隙間側) ACM センサー(Fe-Ag 小型) 交流インピーダンスセンサー 炭素鋼試験片 ・溝②(隙間逆側) ACM センサー(Fe-Ag 小型) 交流インピーダンスセンサー 炭素鋼試験片 ・砂層 含水率センサー ACM センサー(Fe-Ag 大型) 	

図 3.3.1-2 不均質試験 外観・センサー配置図

3.3.2 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う。

- 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箇所の腐食量を評価
- 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る。

(2) 各種計測・分析項目

1) 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する。

2) 特異的な腐食箇所があった場合の対応

施工時の隙間が存在しない箇所の炭素鋼は全面腐食すると想定されるが、解体時に特異的な腐食箇所が観察された場合は、周辺環境が腐食に影響を及ぼしたか否かを確認するため、特異的な腐食箇所の緩衝材ブロックをサンプリングし、含水率を測定する。また、比較のためその周辺の緩衝材ブロックもサンプリングする。

(3) 工学規模試験装置解体手順の確認及び改訂

次年度の工学規模試験装置の解体計画に反映させるため、解体時に以下の項目についても確認する。

- ① 解体時間を計測し、工学規模試験の解体計画に反映
- ② 緩衝材ブロックのサンプリング位置及びサンプリング方法の検証
- ③ 模擬オーバーパックの脱錆・養生方法の確認

ISZ2371:2000 法、参考表1「化学的腐食除去方法」に記載の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の検証及び防錆処理方法の検証。

- ④ 模擬オーバーパック脱錆、計測に伴う移送時の影響確認、防錆処理方法の検証。

不均質試験にて測定を行う項目について以下の表 3.3.2-1 不均質試験 測定項目に示す。

表 3.3.2-1 不均質試験 測定項目

不均質試験 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クーボン試験片による腐食量測定	脱錆後、クーボ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
工学規模試験装置解体手順の確認・改訂	①解体時間を計測し、工学規模試験の計画に反映	各解体作業時間の計測
	②緩衝材ブロックのサンプリング及びサンプリング方法の検証	—
	③模擬オーバーパックの脱錆・養生方法の確認	—
	④模擬オーバーパック脱錆、計測に伴う移送時の影響確認	模擬オーバーパックの表面撮影

3.3.3 解体手順・作業工程の検討

(1) 試験装置解体手順

表 3.3.2-1 不均質試験 測定項目の分析項目及び工学規模試験装置解体を見据えて、解体手順を検討した。検討した手順を表 3.3.3-1、図 3.3.3-1 に示す。

表 3.3.3-1 不均質試験 試験装置解体手順

1.試験装置解体準備		
No.	作業項目	作業内容
1-1	工具等準備	工具等の準備
1-2	珪砂・模擬地下水除去	掃除機を用いて模擬処分孔中の珪砂及び模擬地下水を除去する
1-3	ヒーターの停止	ヒーターを停止、冷却する。(冷却期間—半日～1日、目標温度 30℃)
1-4	模擬オーバーバックへ施工時の隙間の位置のマーキング	緩衝材ブロックの施工時の隙間側の絶縁塗料箇所を”↓”の打刻を行う。※高さ方向については設計値を基にして管理を行う。
1-5	計測機器の停止	各種計測機器を停止し、センサーをロガーより取り外す。
2.試験体解体		
No.	実施項目	作業内容
2-1	ヒーター撤去	模擬オーバーバックからヒーターを撤去する。
2-2	ヒーターオイルの除去	模擬オーバーバックからヒーターオイルを除去する。
2-3	試験体取出し	模擬処分孔より試験体を取り出す。
2-4	センサーの切断	蓋部と試験体設置センサー間のケーブルを切断する。
2-5	蓋部取外し	試験体から蓋部を取り外す。
2-6	緩衝材ブロック解体 (サンプリング位置検証)	試験体から緩衝材ブロックを除去する。(詳細は 3.3.3(2)参照) クーポン試験片を回収後、脱錆し腐食量を測定する。
2-7	模擬オーバーバックの脱錆 (現場) (現場脱錆方法検証)(養生・移送方法の検証)	スコッチブライト等で目立つ錆と付着した緩衝材ブロックを落とす。(詳細は 3.3.3(3)参照) 防錆処理後、酸洗浄現場へ移送する。
2-8	模擬オーバーバックの脱錆 (模擬オーバーバックの脱錆方法検証) (養生・移送方法の検証)	脱錆前に模擬オーバーバック外観を撮影する。 JISZ2371:2000 に則り脱錆を行う。(詳細は 3.3.3(4)参照) 移送の際は防錆処理を行う。
3.計測		
3-1	3次元計測	3次元計測を行う。 模擬オーバーバック外観を撮影する。
3-2	含水率測定	2-6 で採取した緩衝材ブロックの含水率測定を行う。
3-3	クーポン試験片の重量測定	2-6 で回収したクーポン試験片の重量測定を行う。

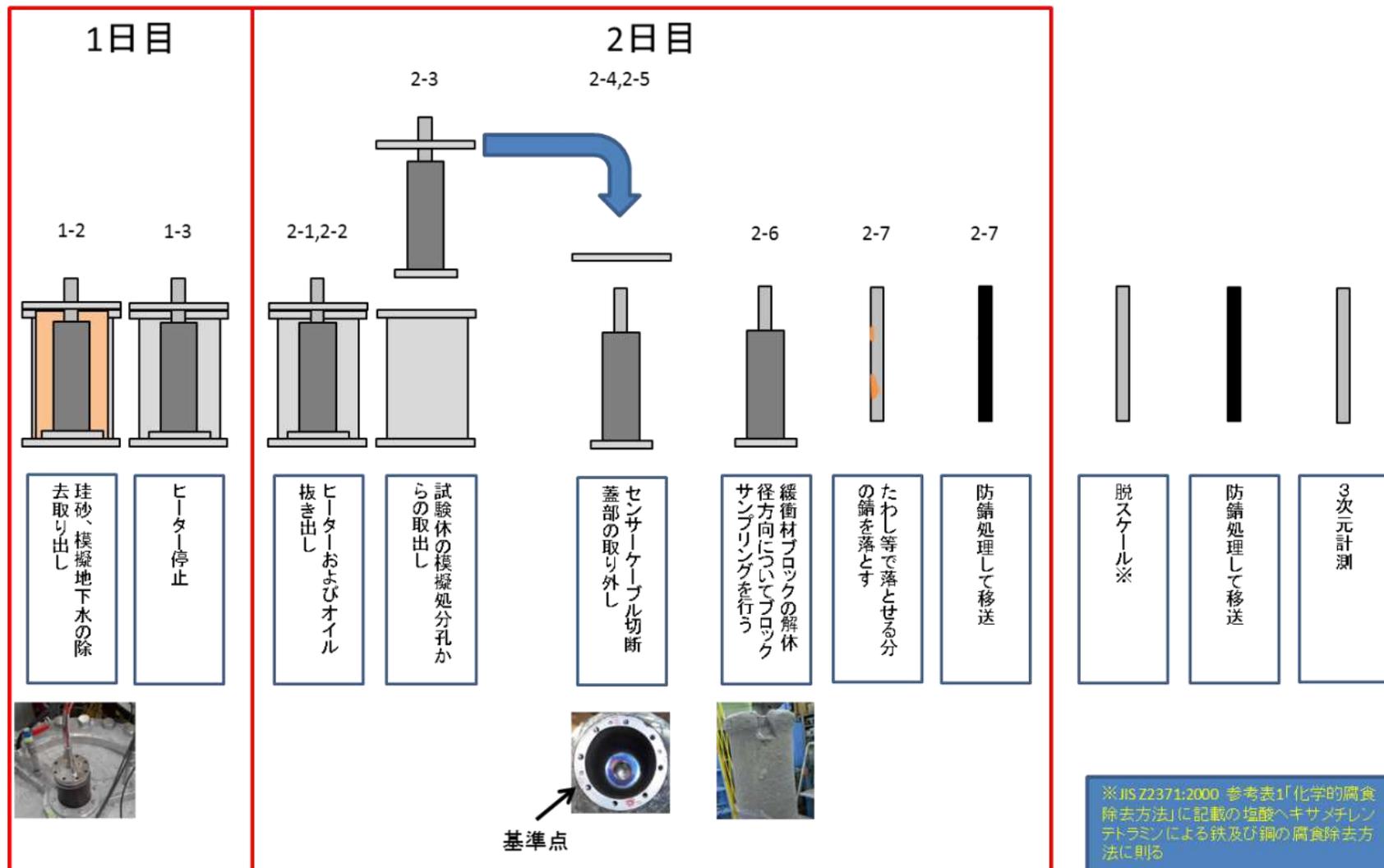


図 3.3.3-1 不均質試験 試験装置解体手順

(2) 緩衝材ブロックのサンプリング方法

緩衝材ブロックのサンプリングについては、試験装置の下から 2 段目、3 段目、4 段目で実施し、図 3.3.3-2 に示す様に緩衝材ブロックの隙間部分(図 3.3.3-2 A)、隙間部分(図 3.3.3-2 B)、隙間逆側(図 3.3.3-2 C)の 3 箇所で行い、各箇所の模擬オーバーパック壁面から 10mm、40mm、70mm、90mm の 4 箇所採取を行った。また模擬オーバーパックに顕著な錆が確認された場合はその接触箇所についてもサンプリングを行った。サンプリング方法は内径 20mm、高さ 15mm のステンレス製円筒サンプラーをブロックに押し込みコア抜きをした。

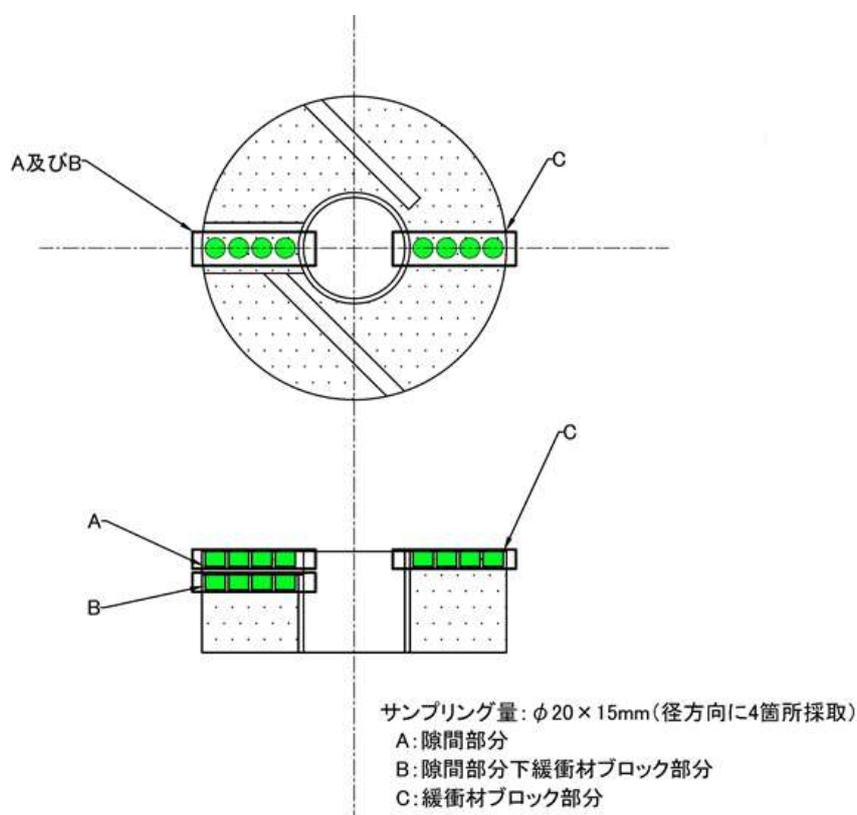


図 3.3.3-2 不均質試験 緩衝材ブロックサンプリング位置

(3) 現場における防錆処理方法

模擬オーバーパックの腐食状況を確認するという性質上、空気に触れる時間は極力避けなければならない。油による防錆処理の場合であるが、塗布作業時間や塗布ムラ、酸洗前に脱脂作業が必要になる。本試験では、一般的な機械部品の梱包時に使用される防錆紙を採用した。この防錆紙は密封状態であれば効果が大きくなるため、図 3.3.3-3 の様に模擬オーバーパックを防錆紙で梱包後、ラップで固定する形とした。

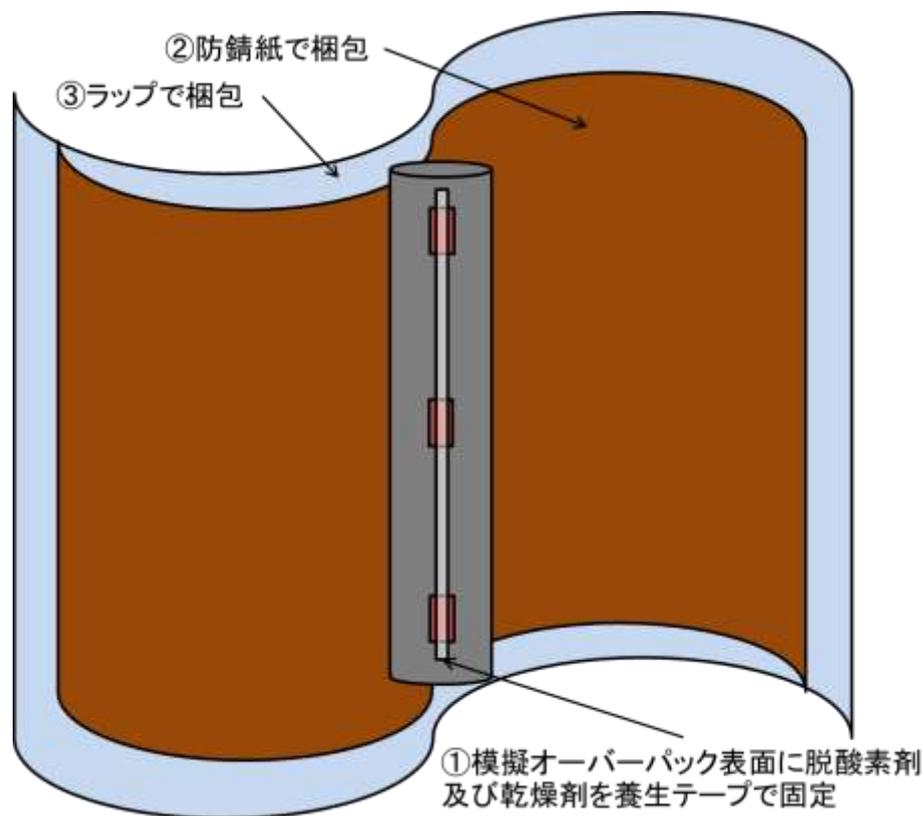


図 3.3.3-3 不均質試験 現場での模擬オーバーパックの防錆処理

(4) 模擬オーバーパックの脱錆、防錆方法

防錆模擬オーバーパックの脱錆方法として 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に沿って行った。浸漬時間については、本試験が模擬オーバーパック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て脱錆終了目安を目視による腐食の除去確認を行った。JIS の方法との差異については表 3.3.3-2、また脱錆作業時の注意点を図 3.3.3-4 にまとめた。

脱錆後の鉄表面は、大気中の空気によって徐々に酸化される。表面観察や形状計測作業を考慮すると、油による防錆は避ける必要がある。そこで、脱錆後の試験体表面にリン酸塩被膜を形成させる方法を採用した。

表 3.3.3-2 不均質試験 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	不均質試験 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	

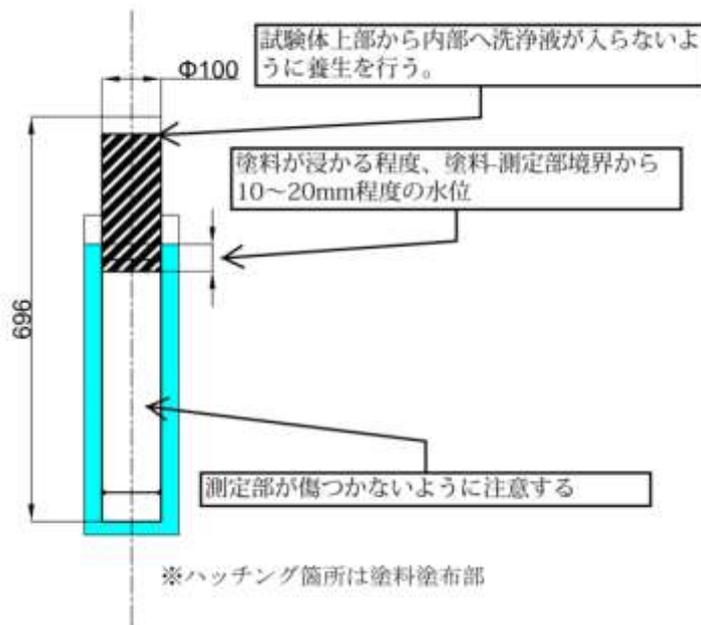


図 3.3.3-4 不均質試験 脱錆作業時の注意点

表 3.3.3-3 不均質試験 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"> グルコン酸ナトリウム(C₆H₁₁O₇) 含有率：2~3% 水酸化カリウム(KOH) 含有率：25~30%
クールミン O4	脱錆液の中和及び防錆作業	<ul style="list-style-type: none"> リン酸水素二ナトリウム(Na₂HPO₄) 含有率：15% ピロリン酸四カリウム 含有率：15%

3.3.4 解体の実施

解体計画、工程に基づき不均質腐食試験設備の解体を実施した。以下に各工程の作業状況を示す。

(1) 装置と試験体の縁切り作業

模擬試験孔外径部に設置した珪砂及び模擬地下水を図 3.3.4-1 の掃除機で除去した。除去の様子を図 3.3.4-2 に示す。珪砂及び模擬地下水の除去後にヒーター電源を停止、模擬オーバーパックの冷却を行った。



図 3.3.4-1 不掃除機外観 (Suiden 社製 Gクリーン 万能型)



図 3.3.4-2 珪砂+模擬地下水除去による縁切り作業

(2) 加熱用ヒーターオイルの除去

模擬オーバーパック冷却後、模擬オーバーパックに設置したヒーターを撤去し、ヒーターオイルの除去を行った。ヒーターオイルの除去には図 3.3.4-3 のオイルポンプを使用した。オイル除去の様子を図 3.3.4-4 に示す。



図 3.3.4-3 オイルポンプ外観 (Meltec 製 手動式オイルチェンジャー OC-060)



図 3.3.4-4 オイル抜きの様子

(3) 試験容器からの取り出し

模擬オーバーパックは、試験容器（模擬処分孔）から、緩衝材と一体となった状態で取り出し、架台上に定置した。定置の様子を図 3.3.4-5、図 3.3.4-6、図 3.3.4-7 に示す。試験体の取出し時には底板についた珪砂の除去、ブロックの膨潤状態の計測、緩衝材ブロックの付着した珪砂の採取を行った。その結果図 3.3.4-9 に示すように、試験状態のままで取り出せることが確認された。



図 3.3.4-5 試験体の試験容器からの取り出し



図 3.3.4-6 底板上のケイ砂の除去作業



図 3.3.4-7 架台への固定の様子

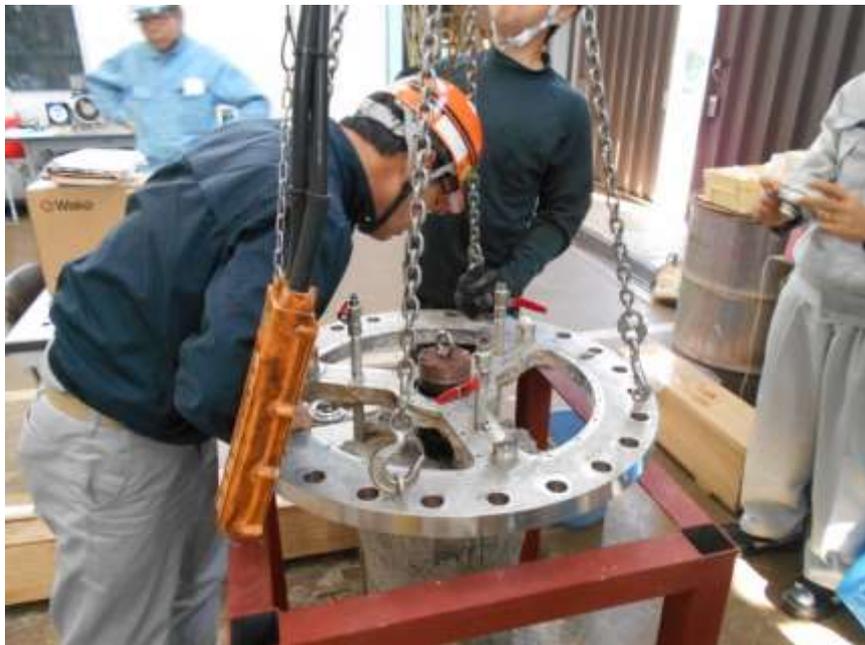


図 3.3.4-8 蓋部の取外し作業



0°
(溶接部、隙間側)



90°



180°
(溶接部、隙間逆側)



270°

図 3.3.4-9 蓋部撤去後の試験体

(4) 緩衝材の除去、サンプリング

試験体の緩衝材ブロックの撤去作業の様子を図 3.3.4-10 に示す。緩衝材ブロック撤去の際にはスコップを使用する方法とワイヤーを使用する方法の 2 種類で行った。



図 3.3.4-10 緩衝材ブロック除去作業

(上：スコップによる撤去作業、下：ワイヤーによる撤去作業)

また緩衝材ブロック撤去作業と同時に緩衝材ブロック中に設置したセンサー、クーポン試験片の回収及び緩衝材ブロックのサンプリングを行った。緩衝材ブロックサンプリングの様子を図 3.3.4-11 に示す。



図 3.3.4-11 緩衝材ブロック採取作業
(上：サンプラーの設置、下：採取作業)

(5) 模擬オーバーパックの処理（現場作業）

緩衝材ブロック撤去時の緩衝材ブロックの模擬オーバーパック接触面と模擬オーバーパック接触部を図 3.3.4-12 に示す。緩衝材ブロック内径面及び模擬オーバーパック表面は腐食生成物により黒ずんでおり、低酸素雰囲気は維持されていることが確認出来る。



図 3.3.4-12 緩衝材ブロック切断解体後の様子（4 段目 90° 付近）

（上:緩衝材ブロック内径側、下:模擬オーバーパック）

緩衝材ブロック撤去後の模擬オーバーパックを図 3.3.4-13 に示す。模擬オーバーパック表面には緩衝材ブロックが付着しており、ウエスでの拭き取りでは除去することが出来ない。



図 3.3.4-13 緩衝材ブロック撤去後の模擬オーバーパック

取出し直後模擬オーバーパック試験体（図 3.3.4-13）をたわしとスコッチブライトを用いて表面に付着した緩衝材ブロックの洗浄を行った。作業の様子を図 3.3.4-14、図 3.3.4-15 に示す。

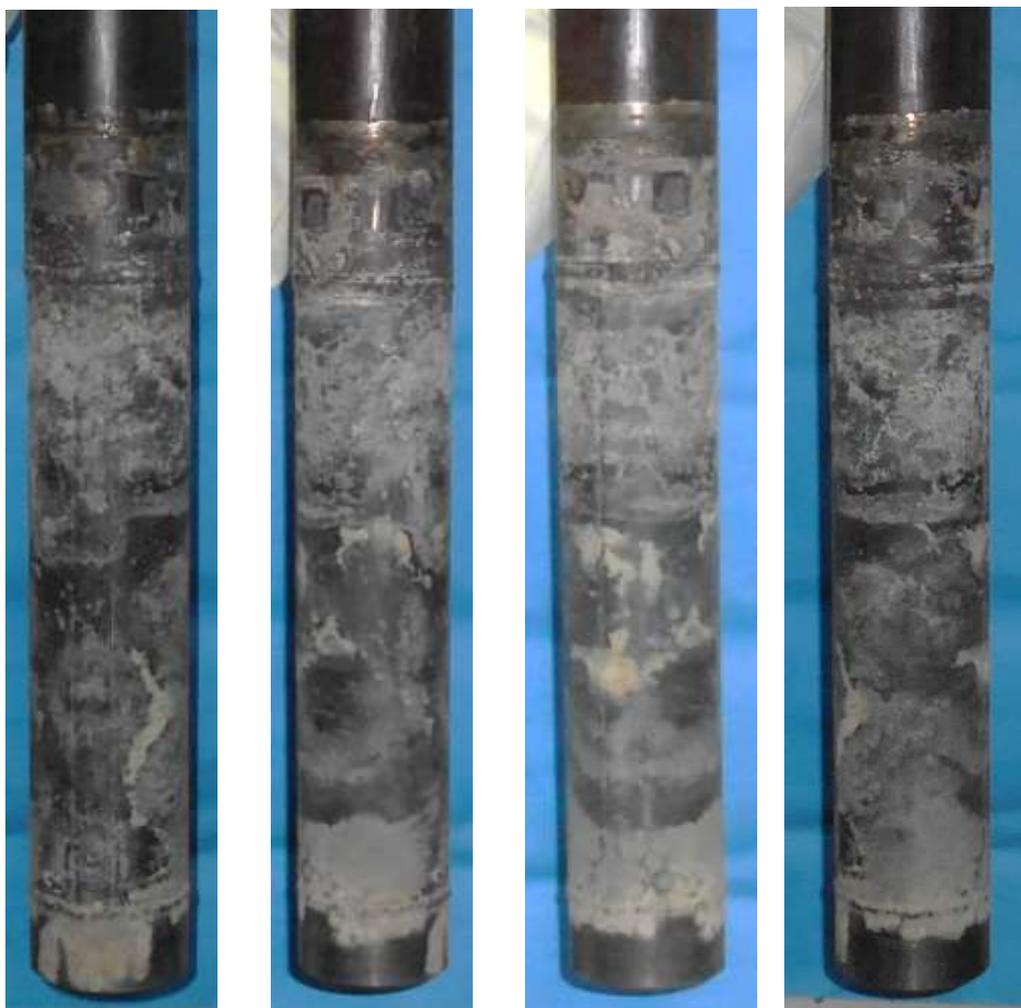


図 3.3.4-14 スコッチブライトによる洗浄作業



図 3.3.4-15 水分除去作業

洗浄作業は模擬オーバーパックの空気中の暴露時間による腐食の可能性があるため、短時間の作業に留めた。洗浄後は表面水分を拭き取り、エタノールで水分除去を行った。水分除去後の模擬オーバーパックの様子を図 3.3.4-16 に示す。



0°
(溶接部、隙間側)

90°

180°
(溶接部、隙間逆側)

270°

図 3.3.4-16 現場洗浄後の模擬オーバーパック

洗浄後の模擬オーバーパットの梱包については図 3.3.3-3 示す様に模擬オーバーパット表面に脱酸素剤及び乾燥剤を養生テープで固定し、防錆紙で包み、さらにラップで梱包した。梱包作業の様子を図 3.3.4-17 に示す。



図 3.3.4-17 防錆処理後模擬オーバーパットの梱包作業

(6) 模擬オーバーパットの脱錆、防錆処理

クールミン K-100 による脱脂処理及び脱脂処理の様子を図 3.3.4-18 に示す。脱脂後高圧洗浄機にて表面を洗浄した。



図 3.3.4-18 クールミン K-100 による脱脂作業

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 3.3.4-19、図 3.3.4-20 に示す。脱錆作業開始から 5 分程度で錆が除去された事を確認したため脱錆完了の判断は模擬オーバーパック表面部分から錆がなくなり、金属光沢が確認された状態とした。



図 3.3.4-19 脱錆工程（左：浸漬直後、右：浸漬 3 分後）



図 3.3.4-20 脱錆工程終了時（浸漬 5 分後）

（左：取出し直後、右：高圧洗浄後（模擬オーバーパック 0° 付近））

脱錆作業終了後、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・防錆作業の様子を図 3.3.4-21 に、中和・防錆作業後の模擬オーバーパックを図 3.3.4-22 に示す。



図 3.3.4-21 中和・防錆作業

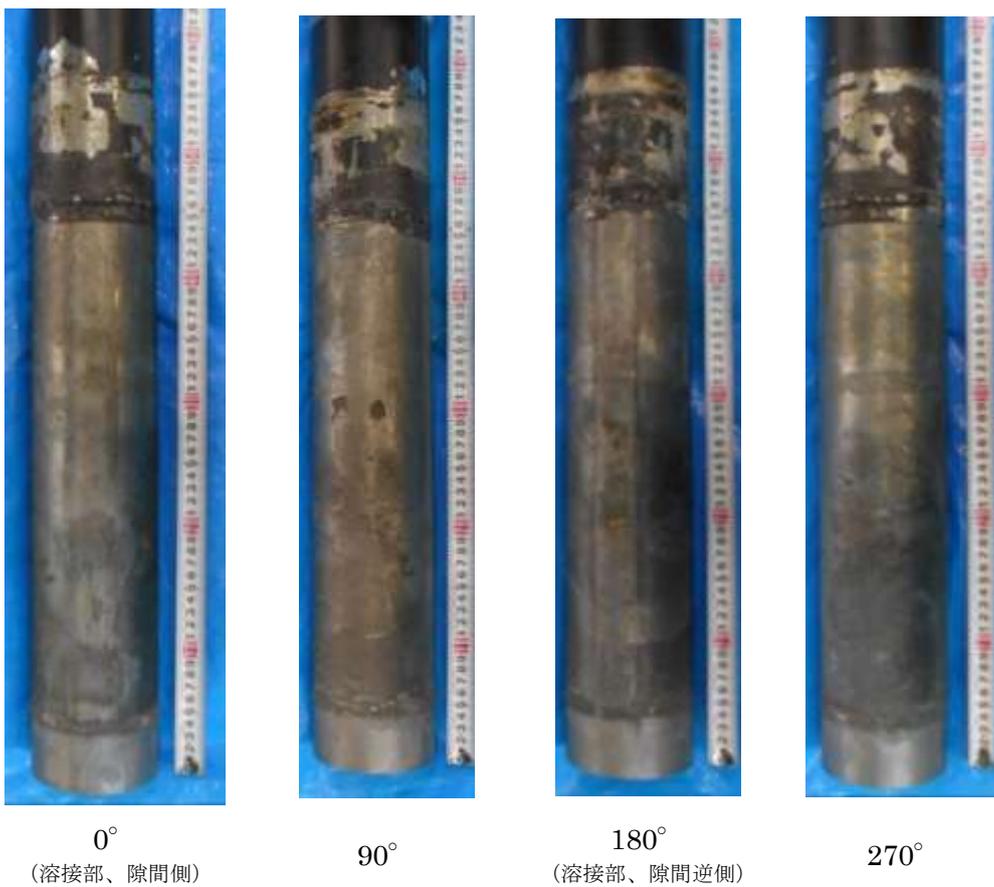


図 3.3.4-22 脱錆・防錆処理後の模擬オーバーパック

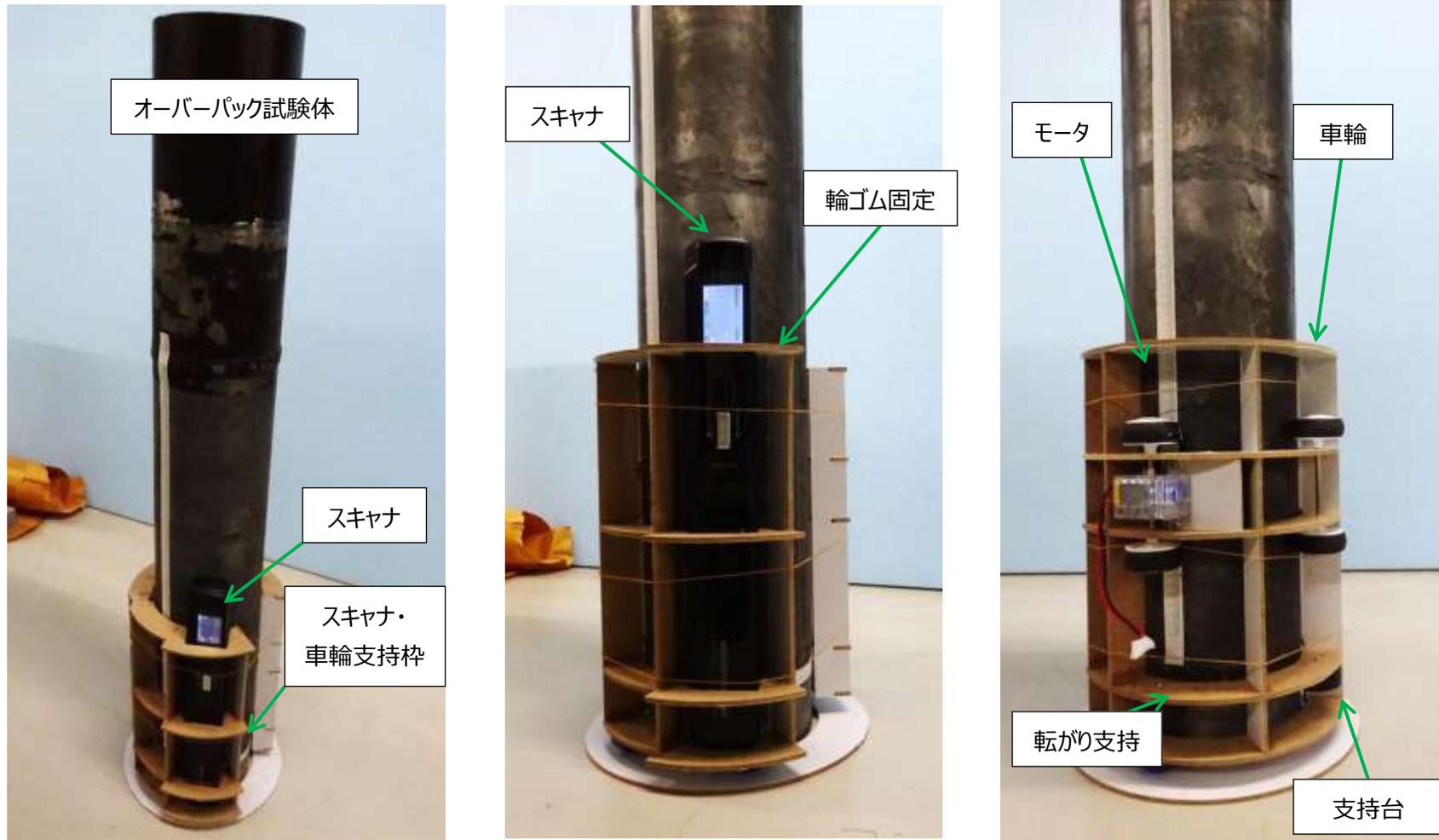
3.3.5 模擬オーバーパックの外観観察、および腐食減肉量の測定

(1) オーバーパック試験体の外観観察

模擬オーバーパックは円柱形状のため、通常のカメラによる外観撮影では図 3.3.4-22 のようになり、全体を捉えることが出来ない。そこでラインスキャナを用い、図 3.3.5-1 に示すようにオーバーパック試験体の表面を平面画像として取得した。使用したラインスキャナは一度に A4 用紙の範囲 (210×297mm) を平面画像として取得出来る。不均質試験の模擬オーバーパックの試験対象の面はφ100×L500mm の範囲のため、一段当たりの撮影幅を 150mm 程度として長さ方向は 4 分割、一段は 2 分割の合計 8 枚の画像として取得し、合成することで、模擬オーバーパック表面の展開図とした。

合成したオーバーパック表面の展開図を図 3.3.5-2 に示す。表面には試験片加工時の切削痕が残存している箇所が存在しており、試験期間中の腐食による減肉量は僅かであると考えられる。溶接部、母材部で腐食減肉量に差は見られなかった。またブロックの継ぎ目 (図中、赤い矢印の部分) や、スリット部 (図中、オレンジの枠内) といった周囲と環境が異なる部分についても局所的な腐食は生じていないことが、外観観察の結果分かった。

腐食減肉量については、形状計測を実施して定量化した。



取り付け状況

スキャナ取付部分拡大

自走用モータ+車輪取り付け部分拡大

図 3.3.5-1 オーバーパック試験体表面のスキャン画像取得装置による画像撮影状況

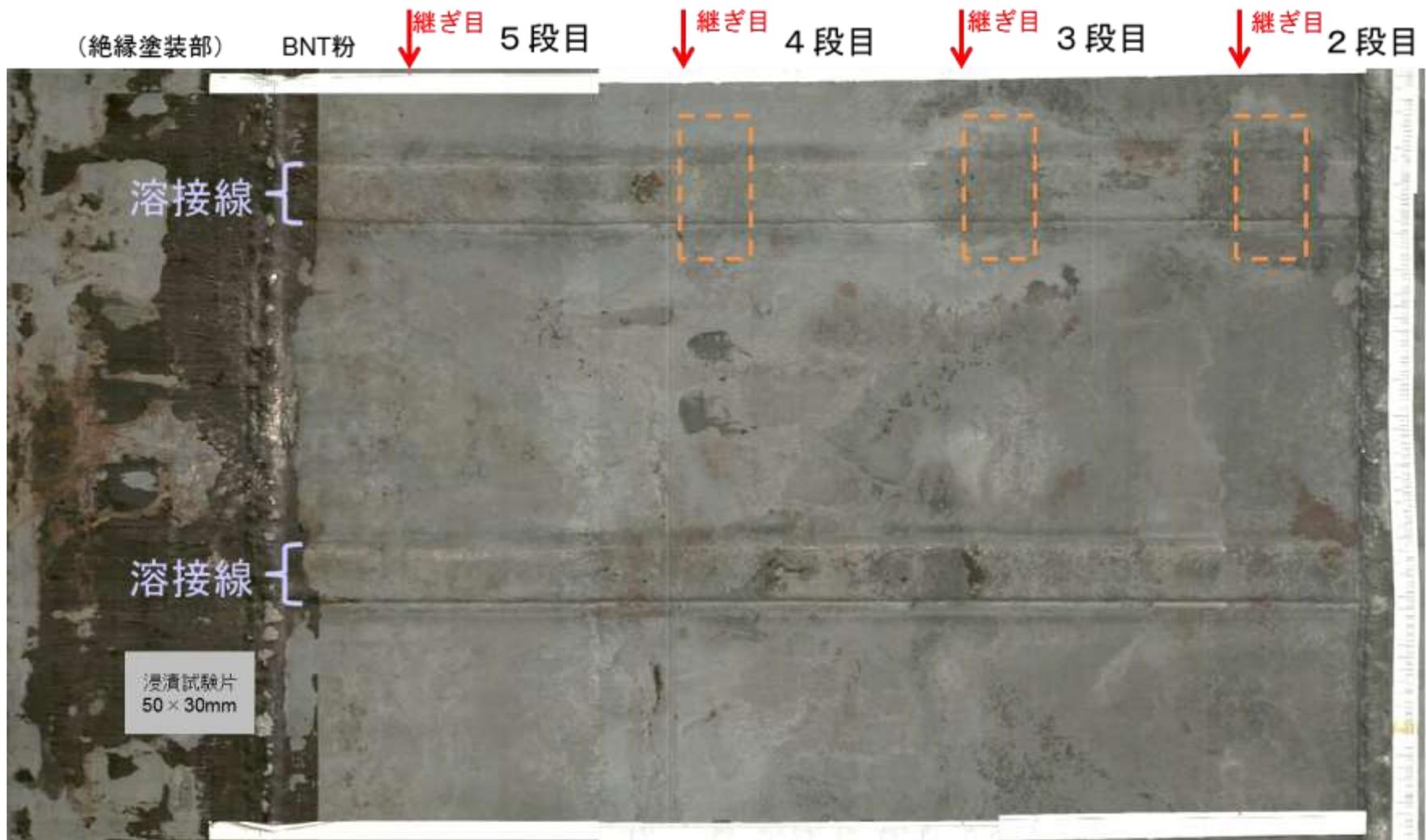


図 3.3.5-2 オーバーパック表面の展開図

(2) 模擬オーバーパック 3次元計測

模擬オーバーパックの腐食減肉量を定量化するため、表面形状を3次元座標点群として測定した。オーバーパックの形状は試験前にも計測しており、試験の前後で実施することで均質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を求めた。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。

1) 測定方法

図 3.3.5-3 に示す手順で計測および評価を実施した。図 3.3.5-5、図 3.3.5-6 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。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。

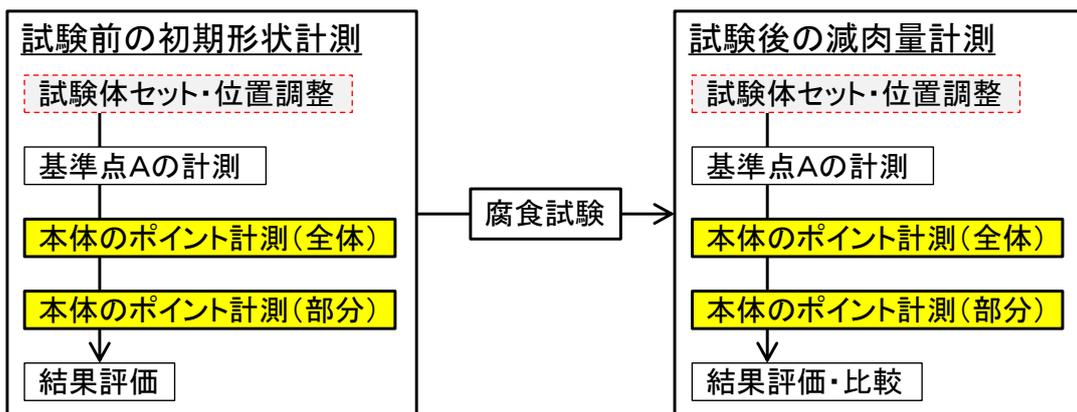


図 3.3.5-3 不均質試験 3次元計測フローチャート



図 3.3.5-4 接触式による3次元計測の様子 (φ8mmプローブ(左)・φ1.5mmプローブ(右))

(※図中の供試体は試験前のもの)

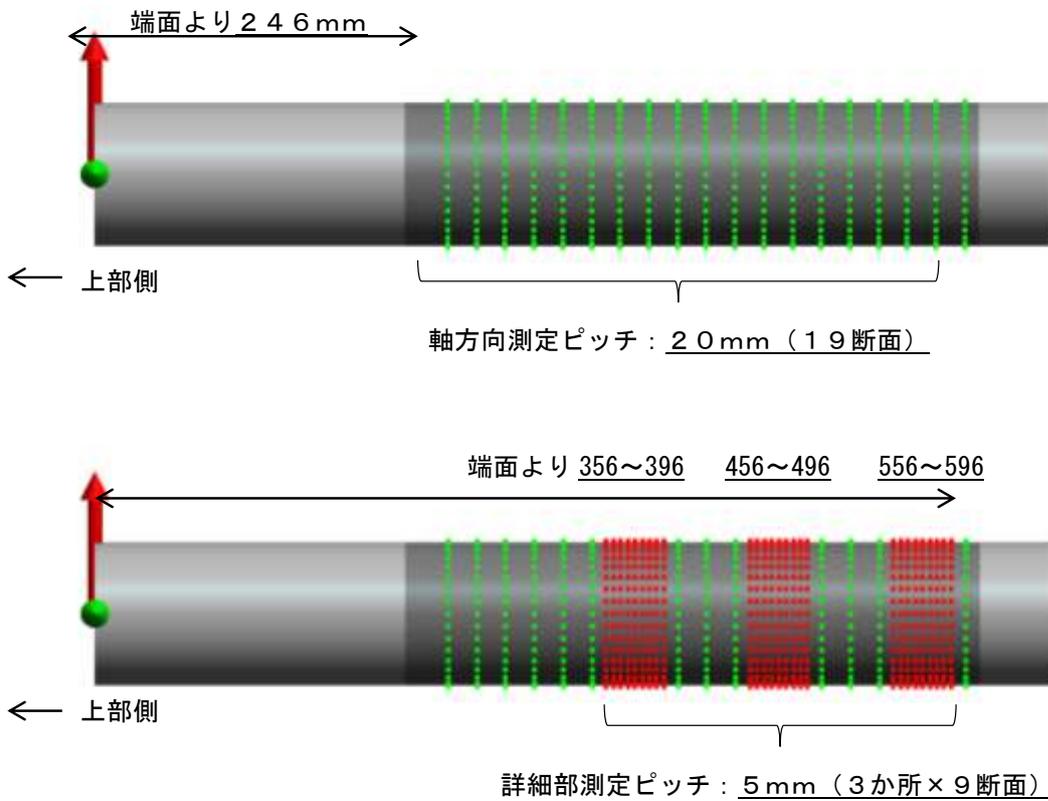


図 3.3.5-5 軸方向測定位置

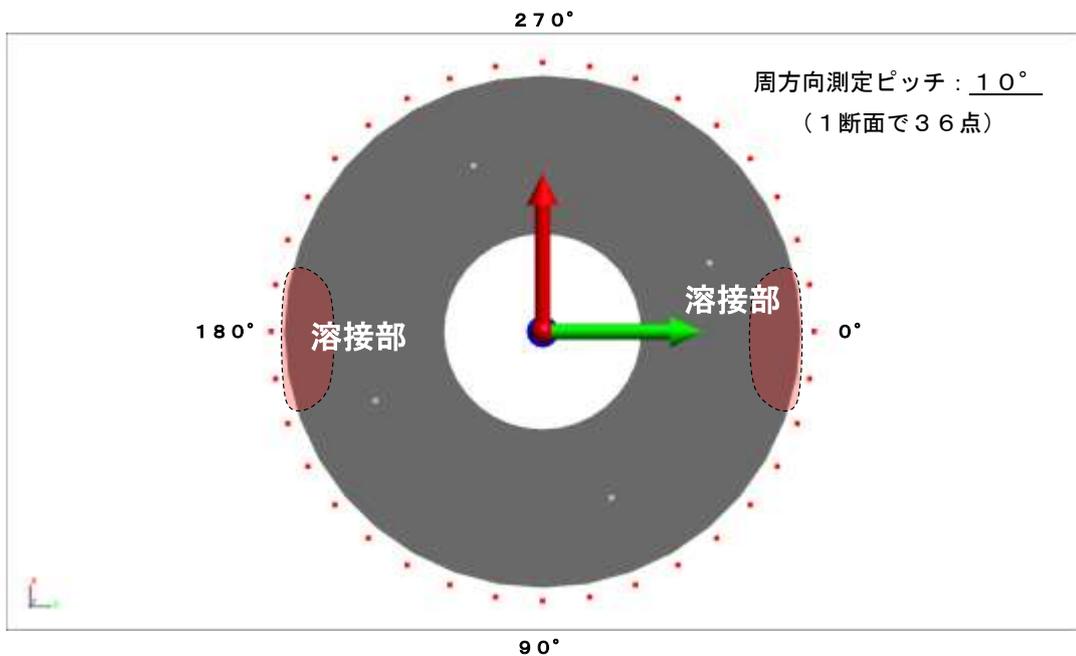


図 3.3.5-6 周方向測定位置 (上部側から見た場合)

2) 計測結果

模擬オーバーパック表面の展開図に 3D 計測結果を重ねたものを図 3.3.5-7 に示す。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、模擬オーバーパックは全面腐食していることを確認した。緩衝材の隙間などの不均質性は、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。

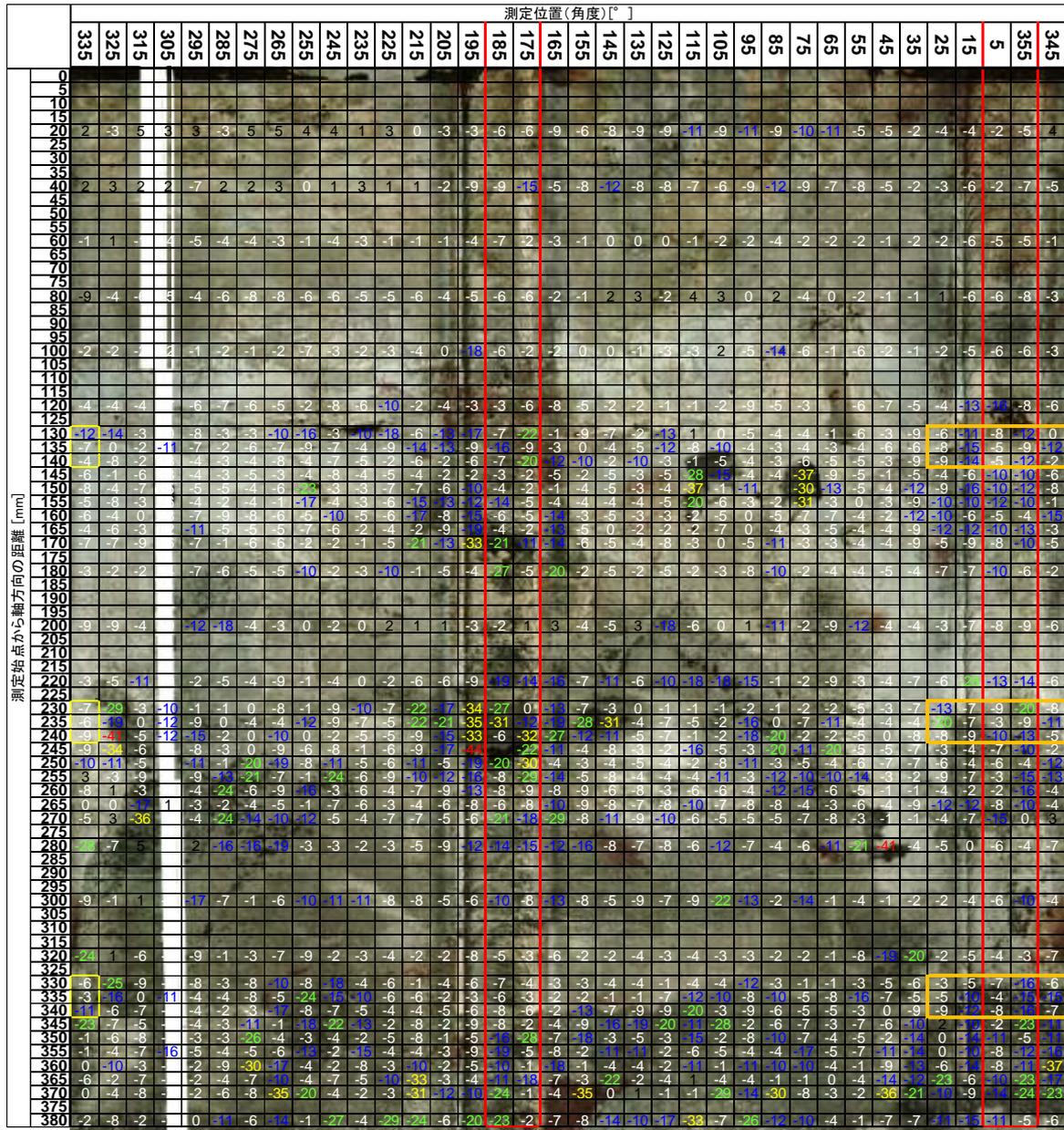


図 3.3.5-7 オーバーパック表面の展開図上に記した形状計測結果

腐食量 $d, \mu\text{m}$ 黒 : $0 < d$ 、白 : $-10 < d \leq 0$ 、青 : $-20 < d \leq -10$ 、
 緑 : $-30 < d \leq -20$ 、黄 : $-40 < d \leq -30$ 、赤 : $d \leq -40$

形状計測の結果より求めた、不均質試験における模擬オーバーパック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図 3.3.5-8 示す。母材の計測箇所は、1,120 箇所です。全計測箇所の 80%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。

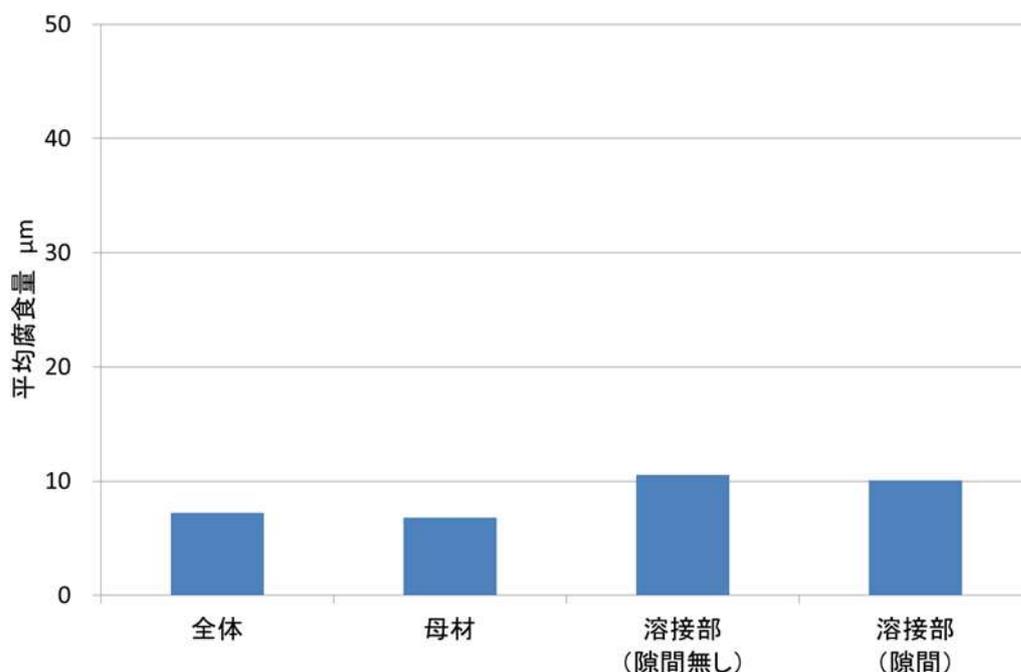


図 3.3.5-8 母材・溶接部の平均腐食量

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。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 3.3.5-8 の腐食量平均値 $7\mu\text{m}$ に対し、図 3.3.5-9 に示す母材の深さ分布は、 -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。一方、図 3.3.5-10 に示す溶接部の深さ分布は、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 37%を占めている。深さ分布にさが見られないことから、模擬オーバーパック全体で同程度の均質腐食が生じたと考えられる。

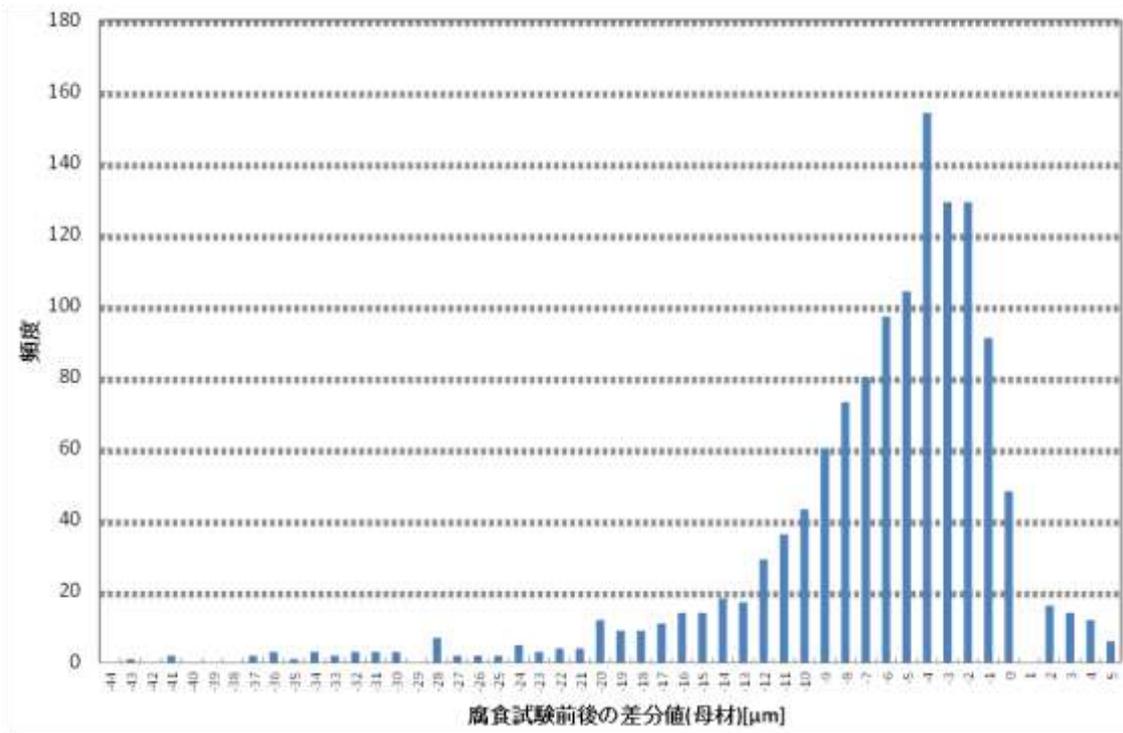


図 3.3.5-9 母材部の 3次元形状計測結果に基づくヒストグラム

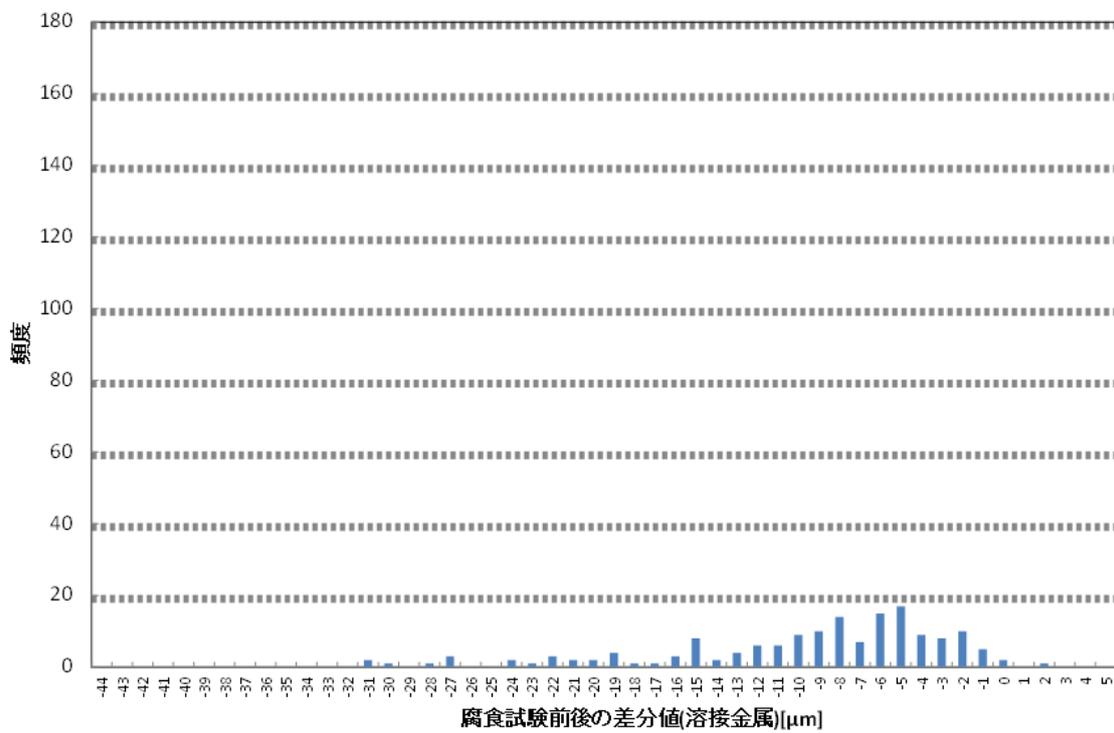


図 3.3.5-10 溶接部の 3次元形状計測結果に基づくヒストグラム

(3) オーバーパック周辺の環境条件

不均質状態の腐食試験では、緩衝材ブロックにスリットを設けて意図的に不均質な条件を設けた。オーバーパック周囲に生じた不均質性について、解体時に採取した各部位の緩衝材の乾燥密度を計測し、各部位の透水係数を求めた。

試験装置解体時に緩衝材試料を採取したが、図 3.3.3-2 に示した採取位置のうち、スリット部である A については砂層の珪砂が流入しており、乾燥密度の評価対象から除外した。サンプリング箇所の配合は製作時のままのベントナイト 70%と珪砂 30%であると仮定し、有効粘土密度を算出した。

図 3.3.5-12 にサンプリング部位の乾燥密度と有効粘土密度を示すが、位置によって密度に差が生じた。高さ方向の密度分布では下段が高く、段が低くなった。周方向の密度分布では模擬オーバーパック側が高く、外周側が低くなった。これは上段や外周側にはケイ砂やベントナイト粉末を充填したものの外側にある程度膨潤により変形したことによると考えられる。

有効粘土密度から図 3.3.5-11 示す人工海水中での有効粘度密度と透水係数の関係式 [1]により透水係数を算出した。各部位の計測結果、および算出した透水係数等を表 3.3.5-1 一覧にまとめた。

人工海水中での有効粘土密度と透水係数の関係式[1]

$$k = \exp(-25.64 + 8.29\rho_b - 5.689\rho_b^2)$$

k: 透水係数 ρ_b : 有効粘土密度

本試験では、緩衝材ブロック内に腐食挙動検証のための小型クーポンも合わせて設置した。図 3.3.5-15 に、不均質試験装置の緩衝材ブロックと模擬オーバーパックの模式図を示す。図には、クーポン試験片の設置位置及びクーポン試験片設置位置付近の緩衝材の乾燥密度も示した。図 3.3.5-16 に示すように、オーバーパックの腐食量は、隙間を施した部分と隙間が無い部分で明確な差は認められない。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は概ね不均一試験の模擬オーバーパックの腐食量と一致した。クーポン試験片の腐食量と乾燥密度から計算した透水係数の関係を図 3.3.5-17 に示すが、その差はわずかであった。

表 3.3.5-1 採取試料の湿潤密度、乾燥密度、含水比及び体積含水率の測定結果及び有効粘土密度、透水係数の算出結果

試料の採取部位		模擬OP壁面からの距離 [mm]	湿潤密度 [Mg/m ³]	乾燥密度 [Mg/m ³]	含水比 [-]	体積含水率 [-]	有効粘土密度 [Mg/m ³]	透水係数 [m/s]	
4段目 (上段)	隙間部分								
		砂層の珪砂が詰まっていた為、測定結果から除外した							
	隙間部分下 緩衝材ブロック部分	10	1.68	1.12	0.504	0.564	0.783	1.48E-10	
		40	1.72	1.16	0.489	0.566	0.810	1.45E-10	
		70	1.73	1.16	0.496	0.574	0.810	1.45E-10	
		90	1.66	1.06	0.570	0.603	0.740	1.50E-10	
	緩衝材ブロック部分	10	1.65	1.03	0.602	0.620	0.721	1.50E-10	
		40	1.69	1.10	0.531	0.586	0.773	1.48E-10	
		70	1.66	1.05	0.579	0.608	0.735	1.50E-10	
		90	1.73	1.12	0.550	0.615	0.783	1.48E-10	
	3段目 (中段)	隙間部分							
砂層の珪砂が詰まっていた為、測定結果から除外した									
隙間部分下 緩衝材ブロック部分		10	1.86	1.38	0.341	0.472	0.969	1.08E-10	
		40	1.91	1.39	0.370	0.515	0.974	1.07E-10	
		70	1.82	1.31	0.394	0.514	0.914	1.23E-10	
		90	1.77	1.23	0.442	0.543	0.861	1.36E-10	
緩衝材ブロック部分		10	1.77	1.20	0.477	0.571	0.838	1.40E-10	
		40	1.76	1.24	0.425	0.525	0.865	1.35E-10	
		70	1.77	1.24	0.426	0.529	0.868	1.34E-10	
		90	1.75	1.19	0.467	0.557	0.835	1.41E-10	
2段目 (下段)		隙間部分							
	砂層の珪砂が詰まっていた為、測定結果から除外した								
	隙間部分下 緩衝材ブロック部分	10	1.93	1.51	0.282	0.424	1.054	8.23E-11	
		40	1.91	1.48	0.294	0.434	1.034	8.83E-11	
		70	1.90	1.45	0.313	0.452	1.012	9.51E-11	
		90	1.87	1.39	0.343	0.477	0.973	1.07E-10	
	緩衝材ブロック部分	10	1.77	1.30	0.354	0.462	0.912	1.24E-10	
		40	1.84	1.36	0.353	0.479	0.951	1.13E-10	
		70	1.83	1.34	0.362	0.485	0.938	1.17E-10	
		90	1.82	1.30	0.395	0.516	0.913	1.24E-10	

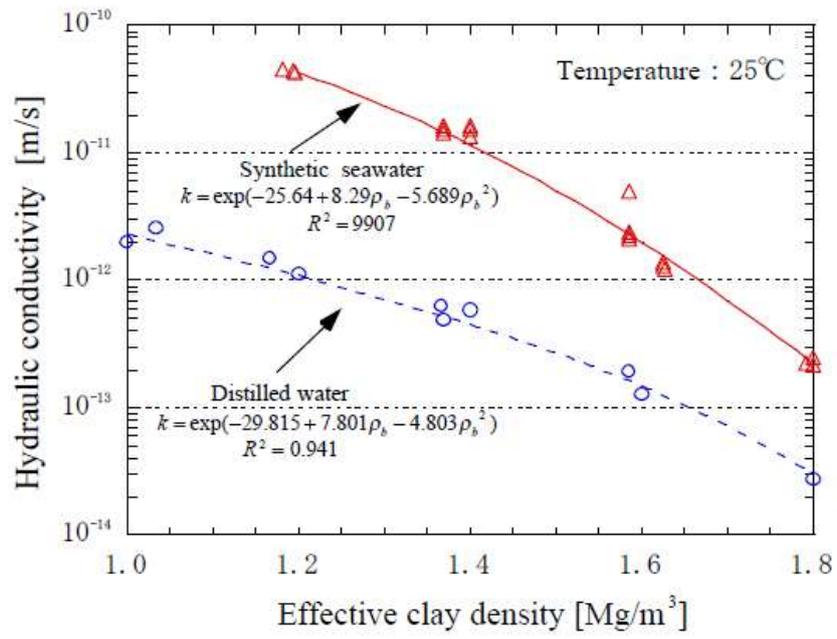


図 3.3.5-11 有効粘土密度と透水係数

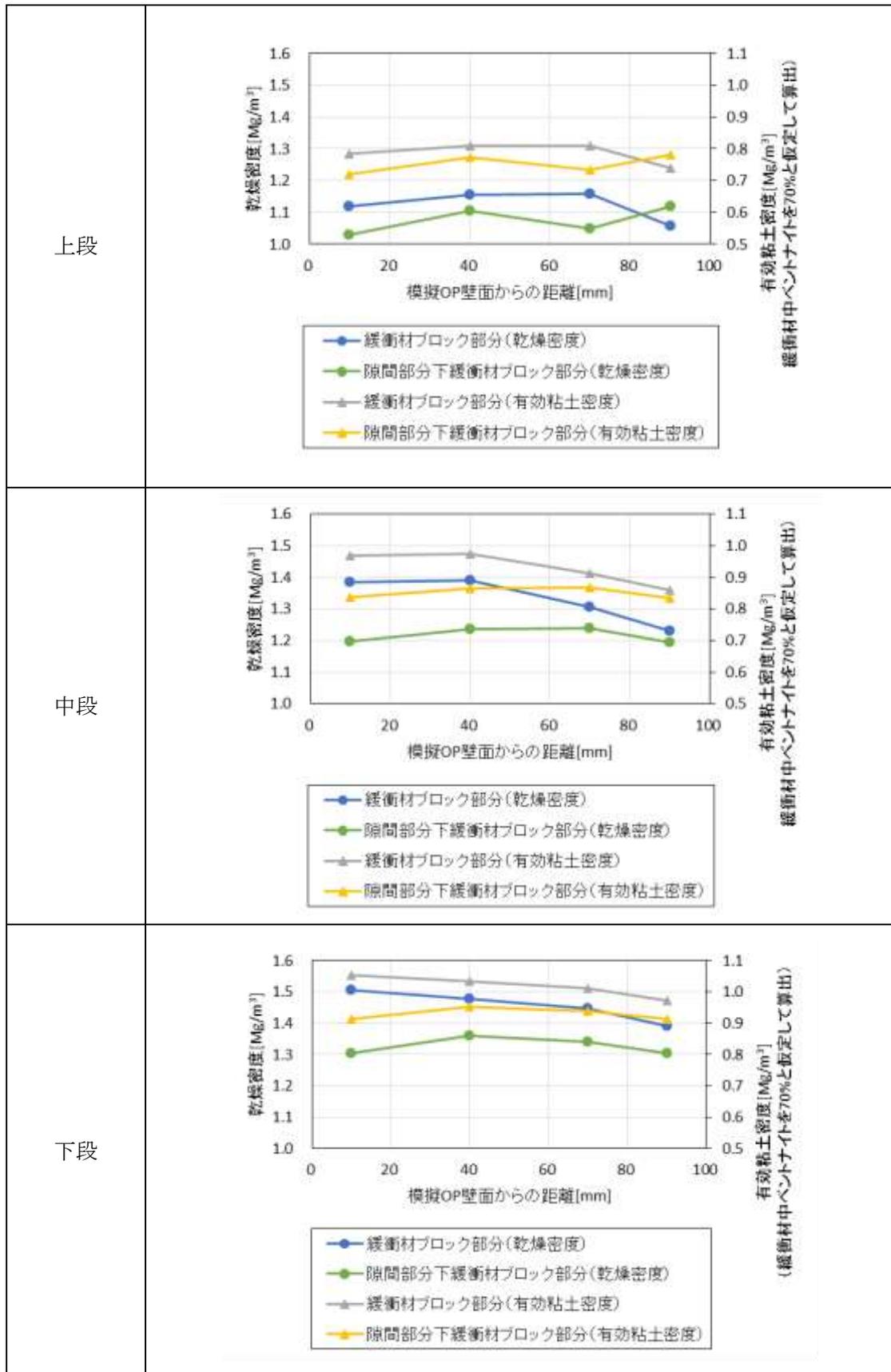


図 3.3.5-12 不均質試験 乾燥密度と有効粘土密度

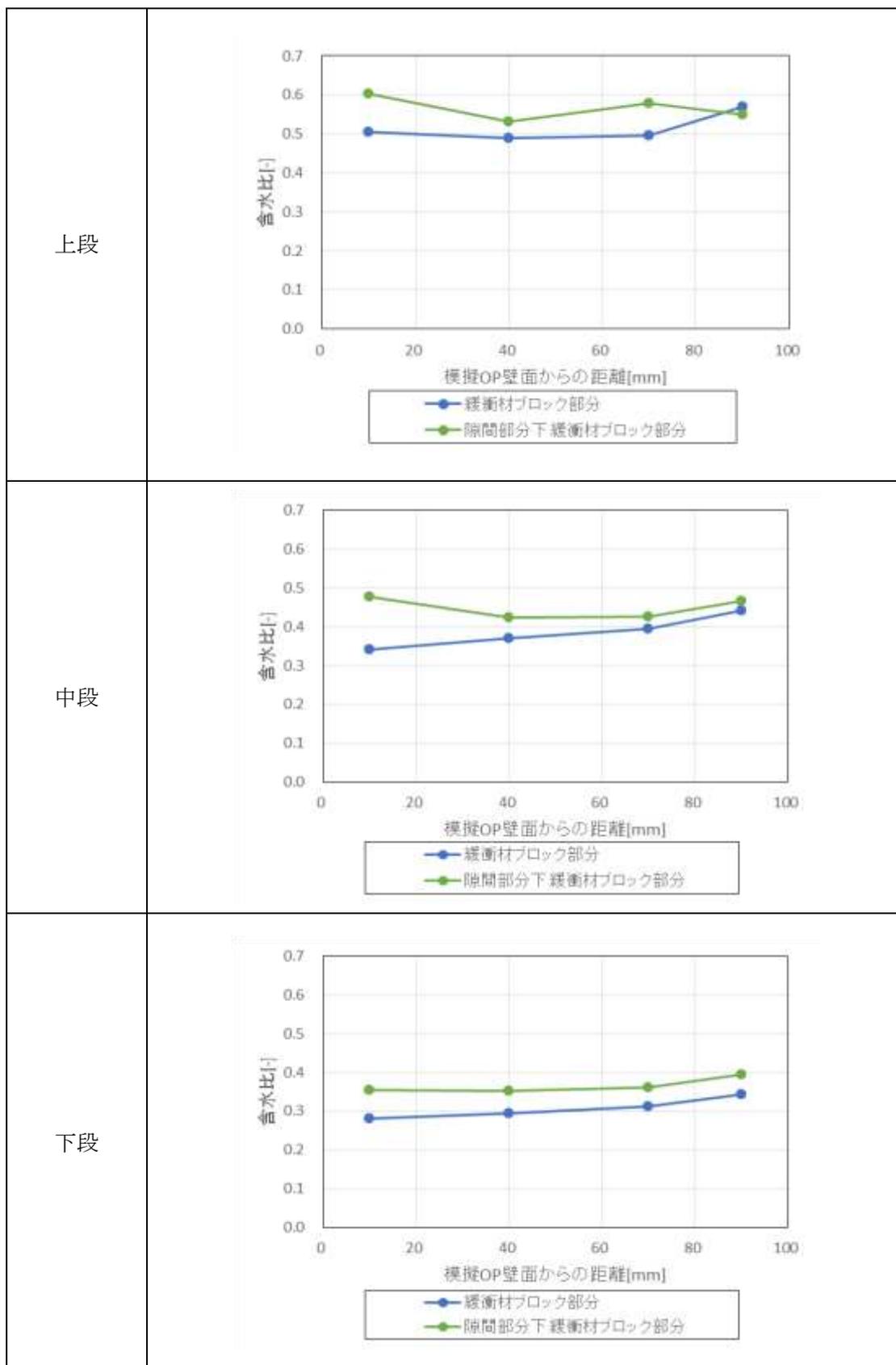


図 3.3.5-13 不均質試験 含水比（重量含水率）

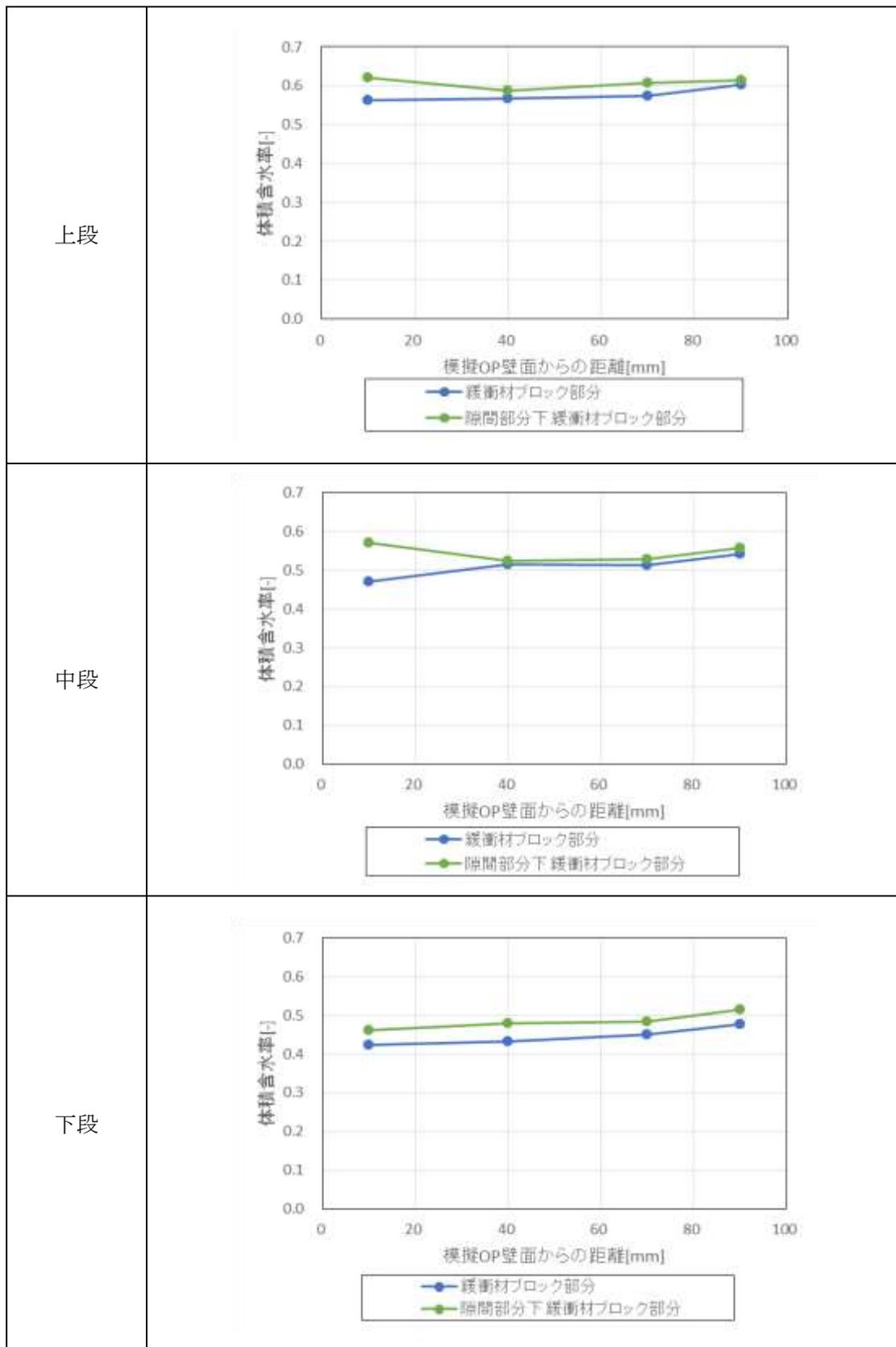


図 3.3.5-14 不均質試験 体積含水率

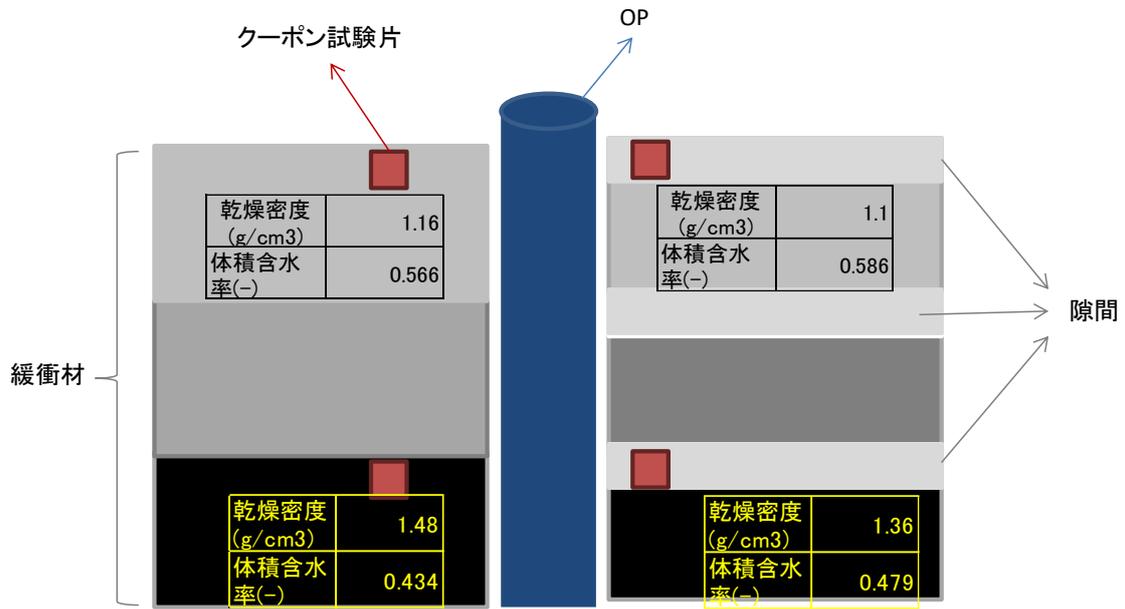


図 3.3.5-15 不均質試験装置の緩衝材ブロック中クーポン試験片、模擬オーバーパックスの模式図

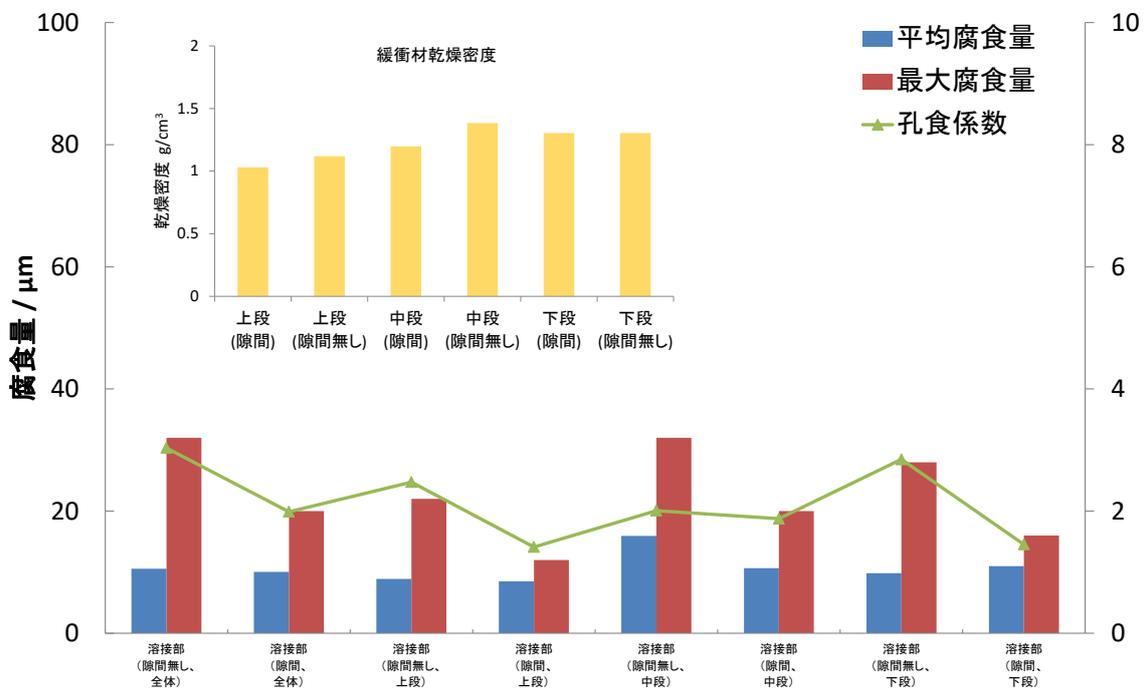


図 3.3.5-16 不均質試験 溶接部の緩衝材ブロック隙間の有無と腐食量の関係

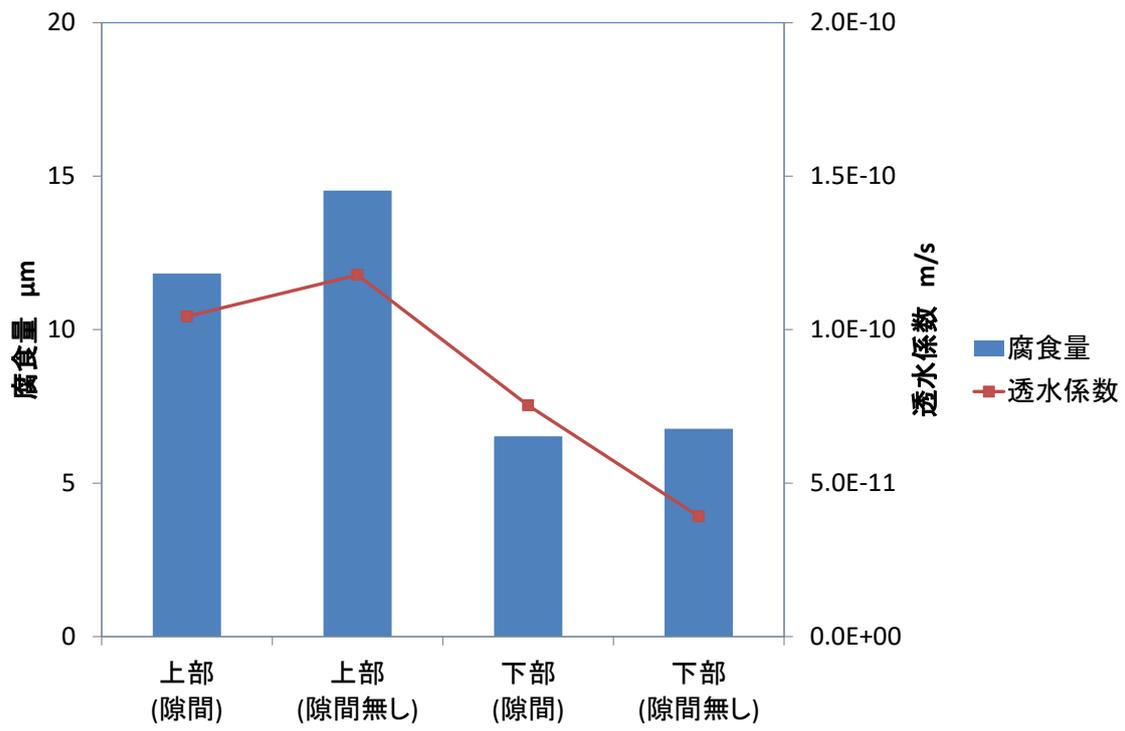


図 3.3.5-17 クーポン試験片の平均腐食量と緩衝材ブロックの透水係数の関係

3.4 工学規模試験装置の解体分析計画の検討

工学規模試験装置は幌延 URL に設置されている試験装置と、地上施設に設置されている試験装置の 2 体がある。このうち、地上施設の試験装置の解体を、幌延 URL の試験装置の解体に先立ち実施し、その知見を元に幌延 URL の工学規模試験装置の解体を支障なく実施することとした。本節では、この幌延 URL での工学規模試験及び地上工学規模試験装置の解体・分析計画を提示した。計画策定に当たり以下の点について考慮した。

- ①解体工程の作業の安全性を確保する。
- ②地上工学規模試験装置の解体の知見を幌延 URL の工学規模試験装置の解体計画に反映する。
- ③工学規模試験の解体・分析に必要な治具を抽出し、それら治具の概念設計を実施する。
- ④本年度に実施した、不均質試験の解体工程の知見を反映する。
- ⑤工学規模試験の実施場所から分析を行う場所までの影響を極力抑える工程とする。

幌延 URL の工学規模試験装置の解体では、現場での解体工程の主な作業は処分坑からの試験体（模擬オーバーパック、緩衝材）の抜き出し、試験体の緩衝材から模擬オーバーパックの分離、模擬オーバーパックの輸送がある。このうち、緩衝材と模擬オーバーパックの分離工程は、幌延 URL の試験坑道 5 で実施する場合(以後、「地下解体案」という)と、試験体を地上まで揚重・移送の後、地上のワークショップ内で実施する場合(以後、「地上解体案」という)が考えられるため、ここではそれぞれの作業工程に対してハンドリングフローと必要資機材等の抽出を行った。両工程の検討は後述するが、結論としては幌延 URL の工学規模試験装置の解体検討の結果、作業工程としては「地下解体案」と「地上解体案」の両者とも技術的に可能であることを確認している。また、不均質試験の解体時に、試験容器および緩衝材を除去した供試体が、輸送期間により顕著な影響が出るかどうかについて確認を行っている(第 3 章参照)。その結果では、適切に防錆措置を行えば、輸送、酸洗、三次元計測等の行為により顕著な影響が出ていないことを確認している。このことから作業工程による模擬オーバーパックへの影響は回避できると考えられる。これらからは、「地下解体案」と「地上解体案」のいずれでも、解体作業から試験体に顕著な影響を与えることは無いと判断した。さらに作業性の面から両者を比較した場合、「地下解体案」は処分坑道 5 の作業エリアが狭いことと、他の作業との錯綜や必要資機材の搬入作業等が増加することなど作業性は「地上解体案」より劣ると考えられる。また、安全性の面からは、

地下での作業時間を極力短くし、かつ、地下での作業員数を減らした方が、不測の事態が発生した場合の安全性が高いことより、地上のワークショップ内で模擬オーバーバックと緩衝材の分離実施する「地上解体案」が有利と考えられる。以上より、「地上解体案」を推奨する。ただし、今後の幌延 URL で立坑下部のステージが利用不可になった場合や、地上での解体作業が、試験体に対して何らかの理由により支障を来す場合には、「地下解体案」での作業の選択も可能である。

具体的な作業工程については、「幌延 URL での工学規模試験装置の解体工程」と、「幌延 URL での工学規模試験装置解体作業における必要機器及び治具の設計」として示した。

3.4.1 幌延 URL での工学規模試験装置の解体分析計画

(1) 幌延 URL の状況

平成 29 年度の幌延 URL の工学規模試験装置解体にあたって幌延 URL の現状について確認を行った。工学規模試験装置の設置している幌延 URL の試験坑道 5 が掘削されている深度 350m 坑道平面図を図 3.4.1-1 に示す。試験坑道 5 試験孔 1 付近の画像を図 3.4.1-2 に示す。350m 周回坑道の状況を図 3.4.1-3 に、風門の状況を図 3.4.1-4 に、立坑ステージの状況を図 3.4.1-5 に示す。これらの区間での試験体の搬送が可能なことを確認している。

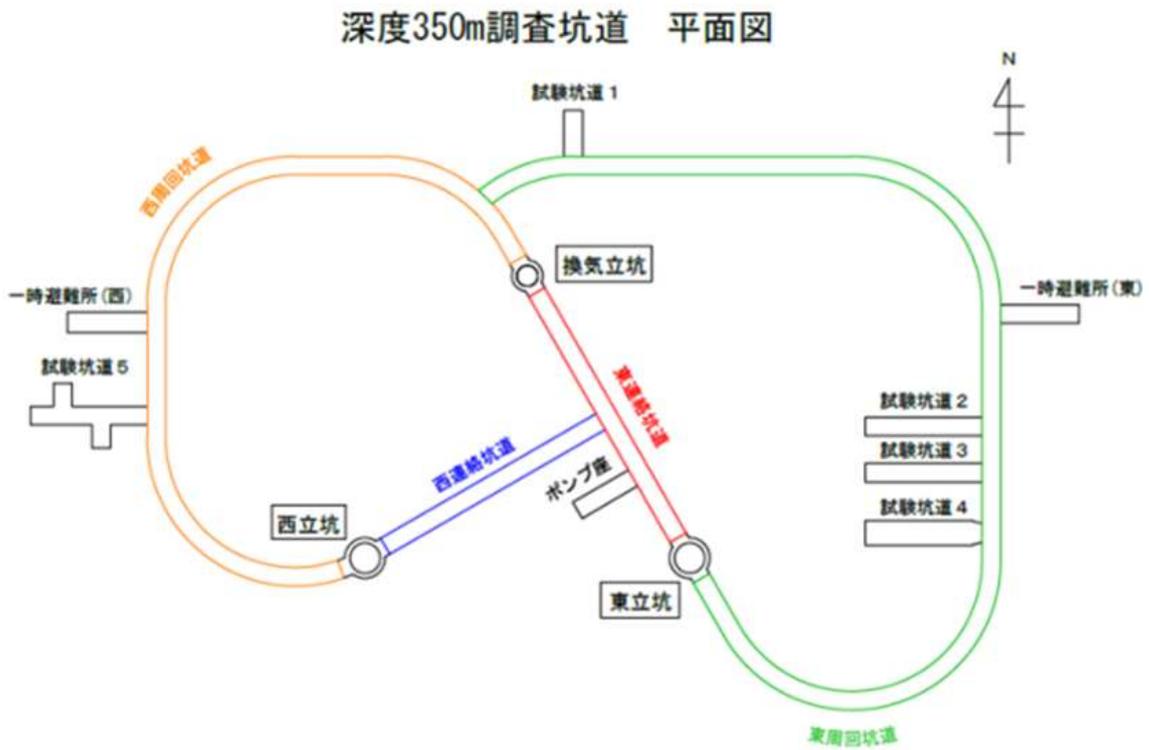


図 3.4.1-1 幌延 URL 350m 坑道平面図



図 3.4.1-2 幌延 URL 試験坑道 5 試験孔 1 付近 (2016 年 12 月 7 日撮影)



図 3.4.1-3 幌延 URL 350m 周回坑道 (2016年7月6日撮影)



図 3.4.1-4 幌延 URL 350m 西立坑風門 (2016年7月6日撮影)



図 3.4.1-5 幌延 URL 東立坑ステージ (2016年11月29日撮影)

3.4.2 分析項目の検討

工学規模試験については模擬オーバーパック加熱状態における母材と溶接部の腐食挙動の差、物質収支、特異な腐食箇所の周辺環境確認の3項目について分析及び必要な計測を行う。工学規模試験において分析項目及び分析に必要な計測項目を表 3.4.2-1 を示す。

(1) 母材と溶接部の腐食挙動の差

- 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：径方向の含水率の差を計測
- ③ 3次元計測：模擬オーバーパック腐食量を評価

(2) 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及び供給される酸素量から、物質収支を確認する。

(3) 特異的な腐食箇所の周辺環境の確認

不均質試験の結果から、模擬オーバーパック及び溶接部は全面腐食すると想定されるが、解体時に特異的な腐食箇所が観察された場合は、周辺環境が腐食に影響を及ぼしたか否かを確認するため、特異的な腐食箇所の緩衝材ブロックをサンプリングし、含水率を測定する。また比較のためその周辺の緩衝材ブロックもサンプリングする。

表 3.4.2-1 工学規模試験 測定分析項目

工学規模試験	測定項目	解体作業時必須作業
母材と溶接部の腐食挙動の差	①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
	②緩衝材ブロック含水率	緩衝材ブロックのサンプリング
物質収支の確認	—	—
特異的な腐食箇所の測定	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

3.4.3 幌延 URL での工学規模試験装置の解体工程

(1) 解体計画検討項目

幌延 URL での工学規模試験装置の解体の分析項目に対して考慮すべき項目以外に、幌延 URL において解体時に制限される項目及び、不均質試験装置解体結果からのフィードバック項目を考慮して検討する必要がある。以下に検討に必要な項目を示す。

- 1) 工学規模試験装置解体に対して考慮すべき項目
 - ① 作業時間の短縮
 - ② 設置センサーの回収
 - ③ 分析項目（3.4.2 参照）に対して必要な試料採取
- 2) 幌延 URL における解体時に制限される項目
 - ① 作業空間の制限
 - ② 作業時間の制限
 - ③ 使用機材の制限
- 3) 不均質試験装置解体結果からのフィードバックする項目

(2) 幌延 URL での解体計画

解体工程は幌延 URL の処分坑道 5 内で、模擬オーバーパックを処分孔から取り出した後、処分坑道 5 の現位置で緩衝材を除去し、模擬オーバーパックを梱包して地上まで搬送する場合と、模擬オーバーパックを処分孔から取り出した後、模擬オーバーパックと緩衝材を 1 体で地上に搬送して、地上施設のワークショップ内で緩衝材の除去を行う場合の 2 ケースについてそれらの解体工程を検討した。地下解体の解体フロー案を図 3.4.3-1～図 3.4.3-8 に示す。また地上解体の解体フロー案については一部が地下解体と同一の工程（図 3.4.3-1～図 3.4.3-3 の工程 24 まで）となる。地下解体フロー案を図 3.4.3-9～図 3.4.3-13 に示す。

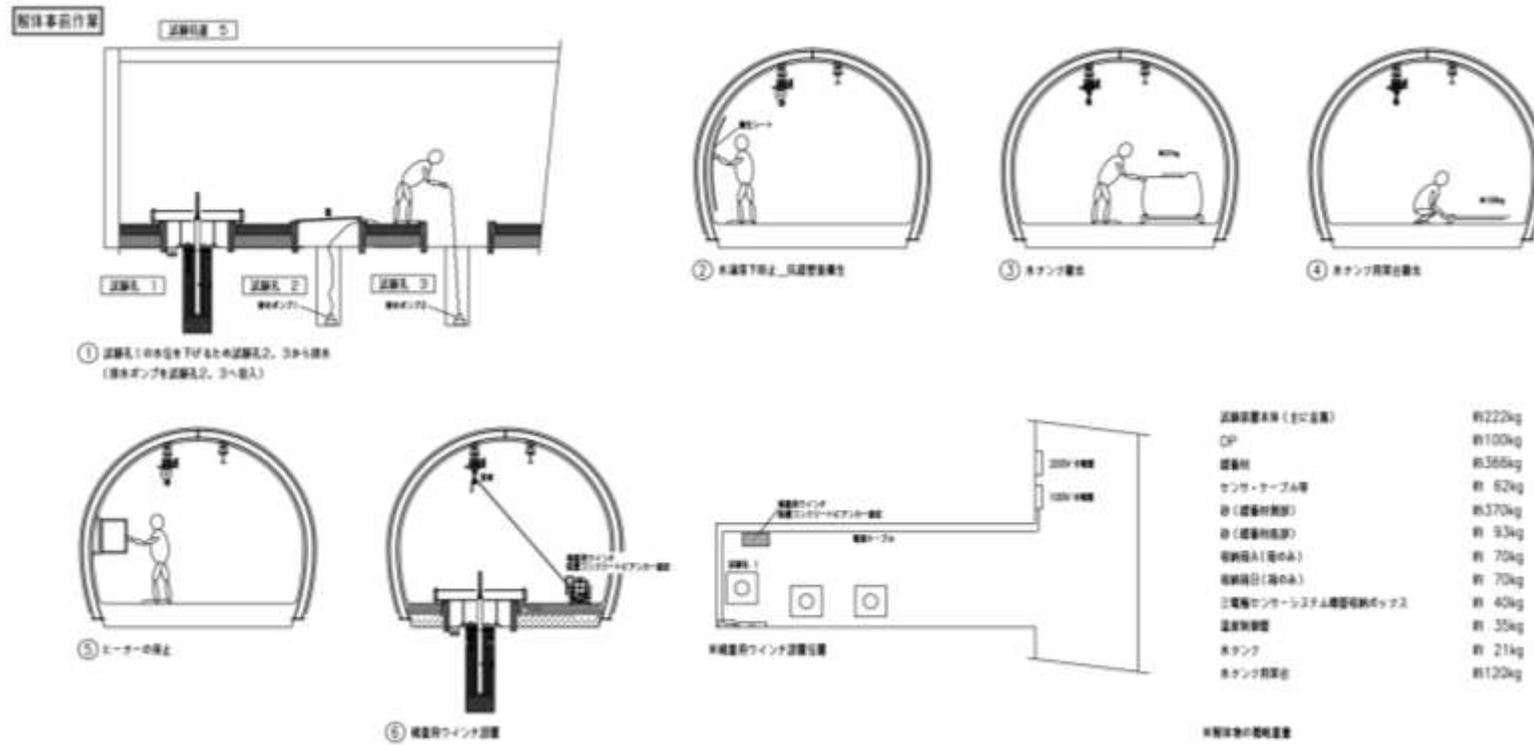


図 3.4.3-1 幌延 URL 工学規模試験装置解体 地下解体案（1 / 8）

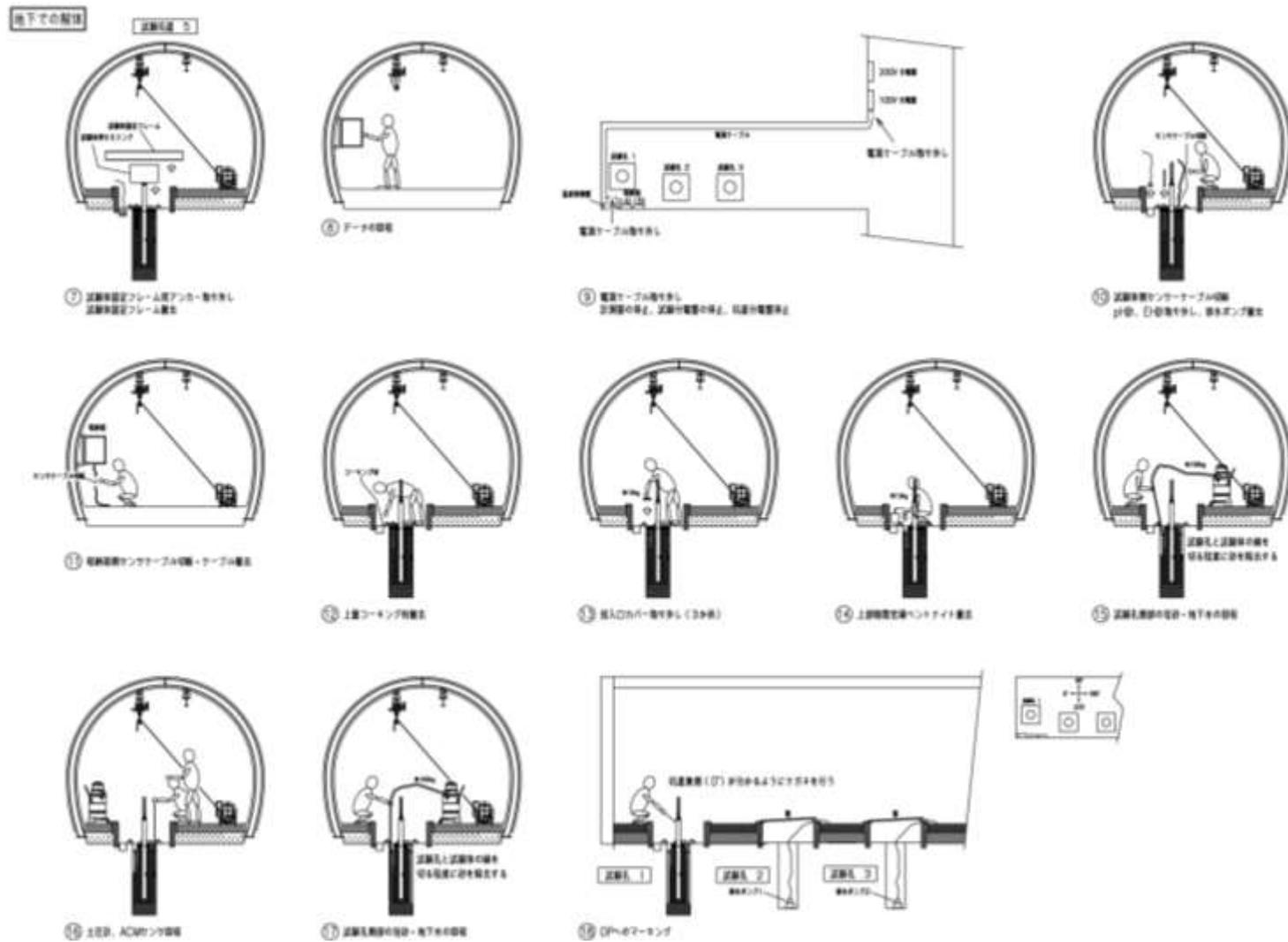


図 3.4.3-2 幌延 URL 工学規模試験装置解体 地下解体案 (2 / 8)

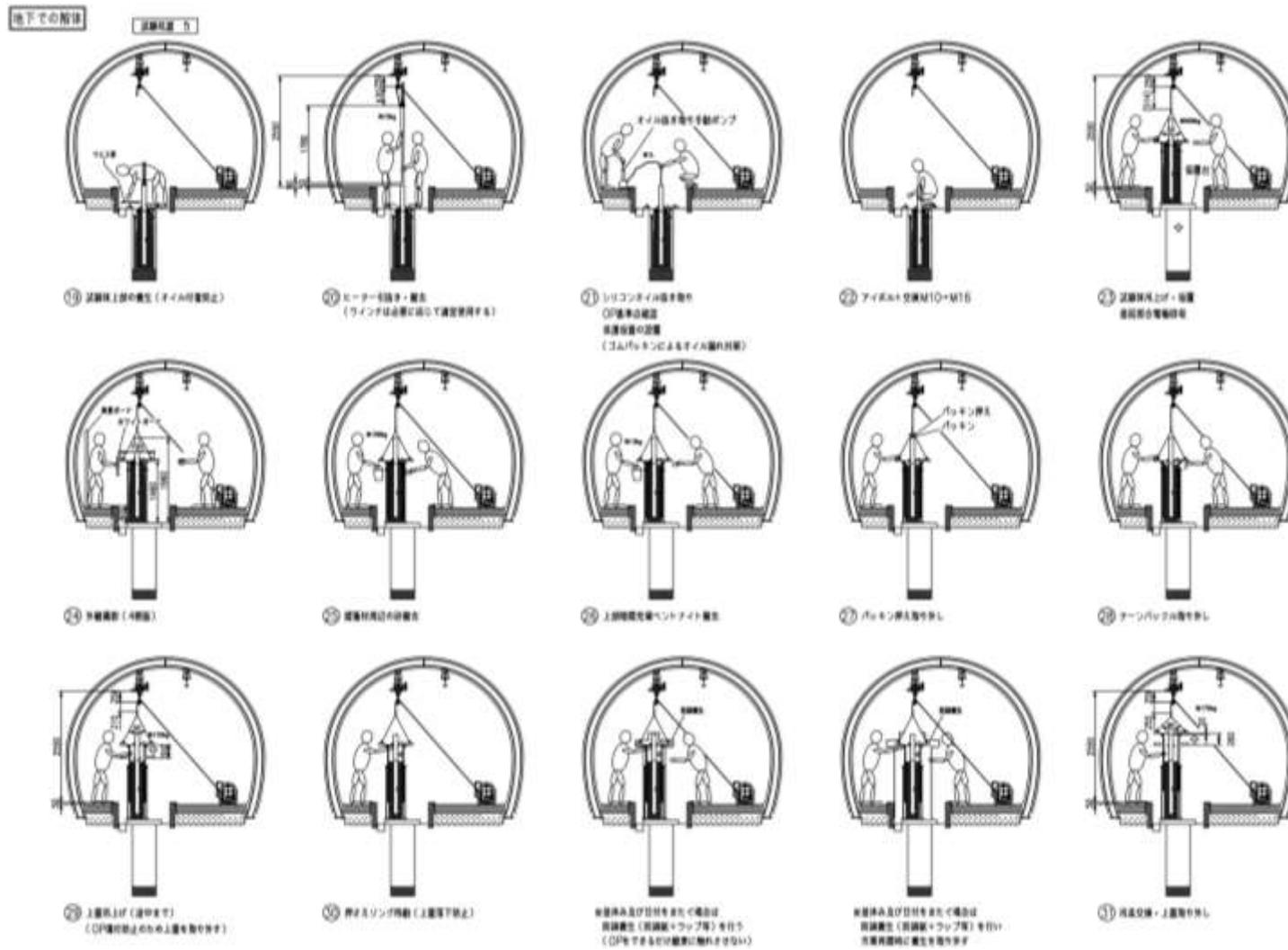


図 3.4.3-3 幌延 URL 工学規模試験装置解体 地下解体案（3 / 8）

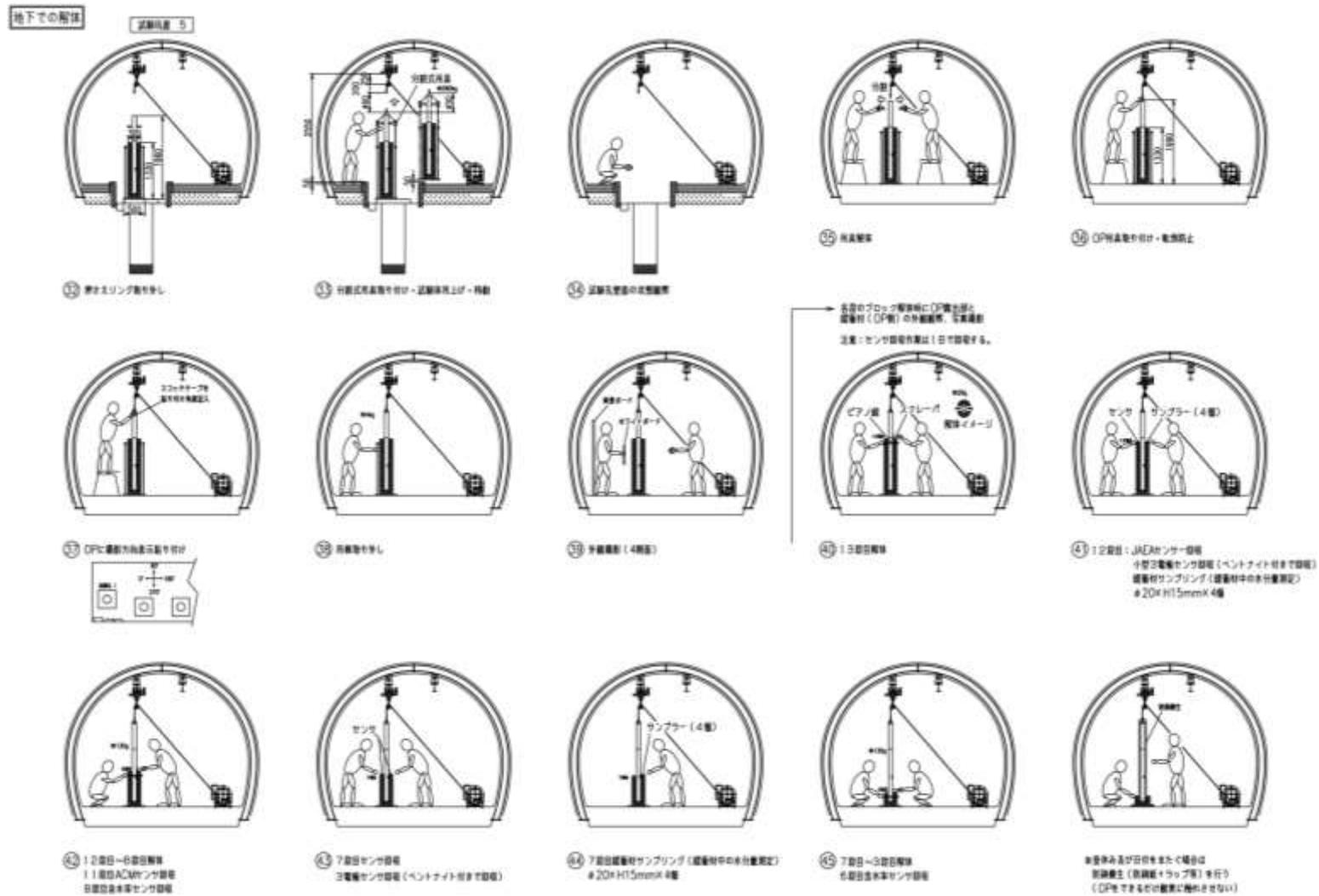


図 3.4.3-4 幌延 URL 工学規模試験装置解体 地下解体案（4 / 8）

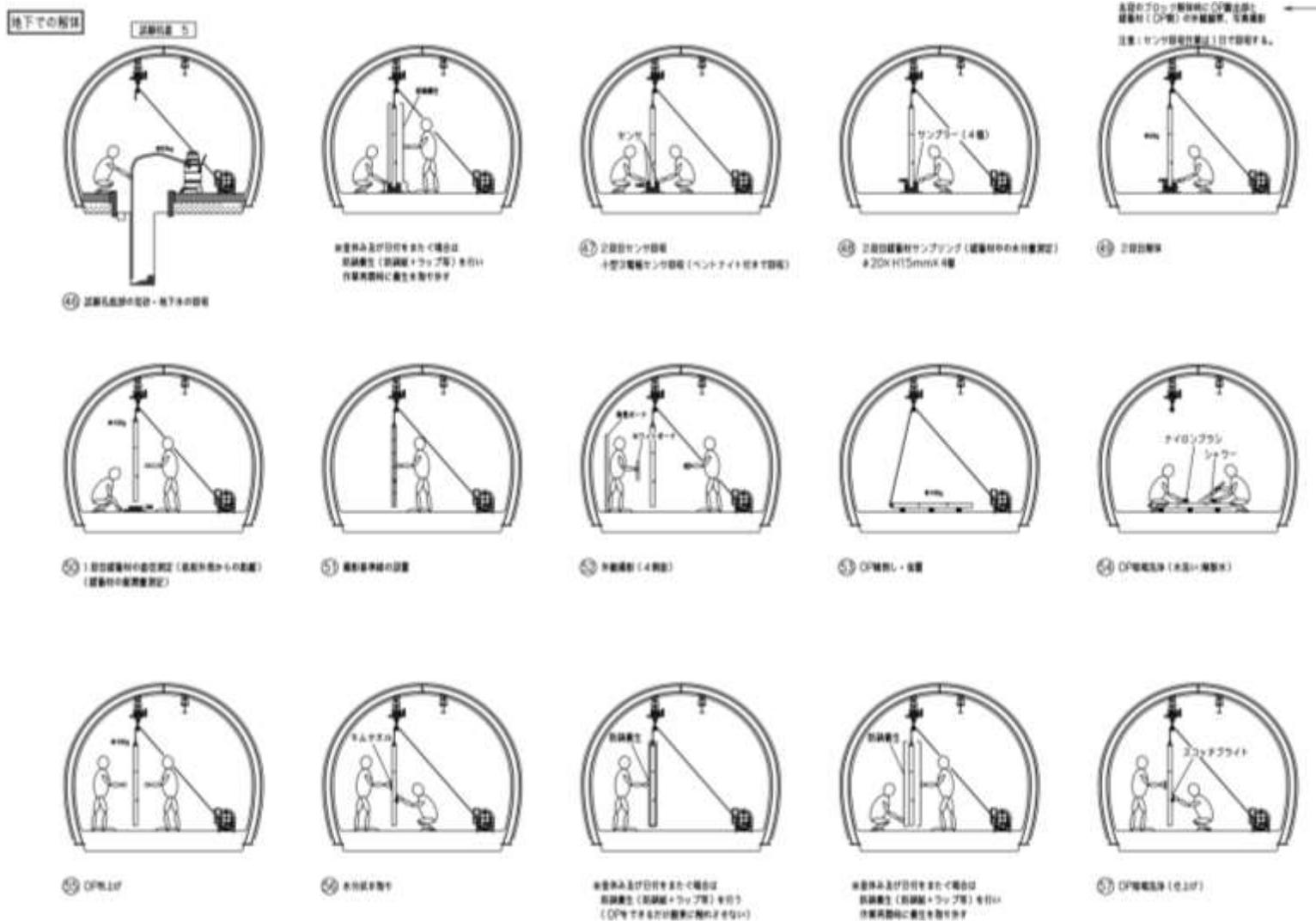


図 3.4.3-5 幌延 URL 工学規模試験装置解体 地下解体案 (5 / 8)

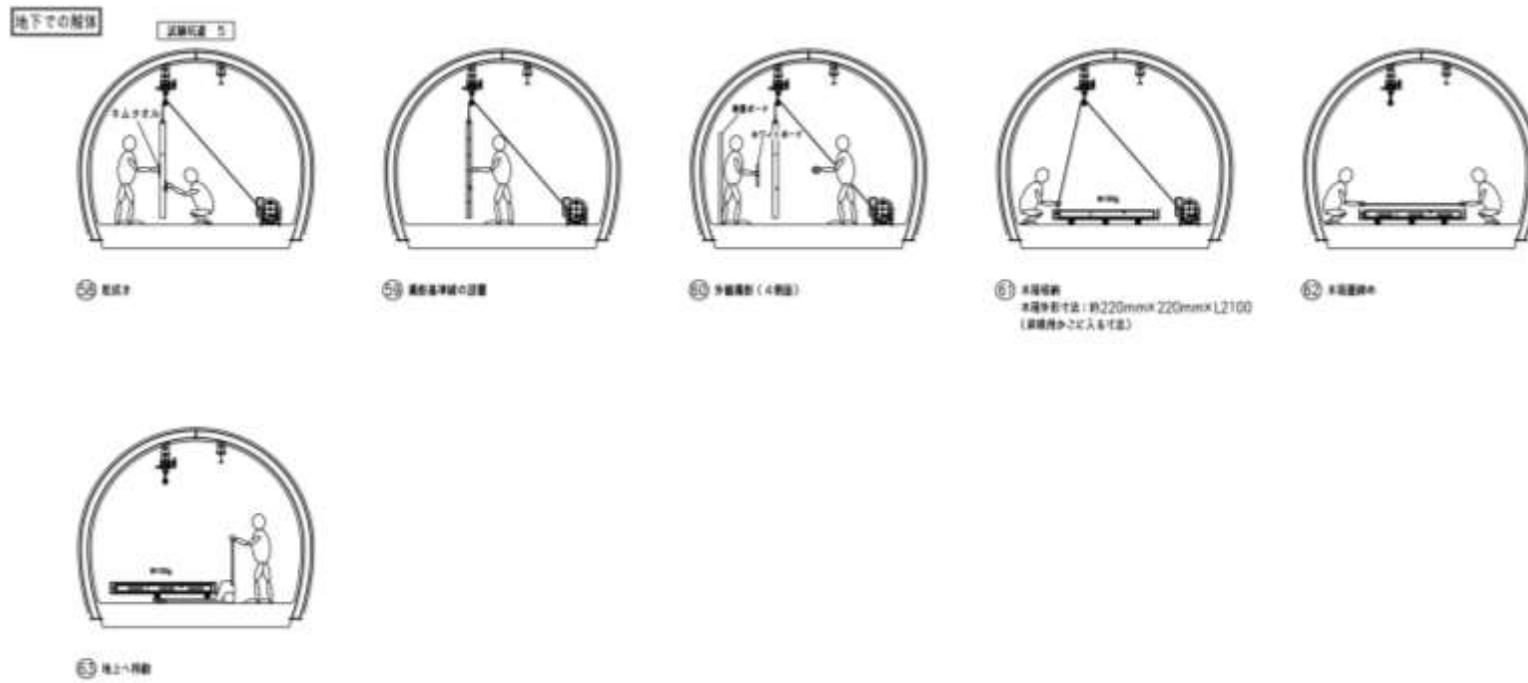


図 3.4.3-6 幌延 URL 工学規模試験装置解体 地下解体案 (6 / 8)

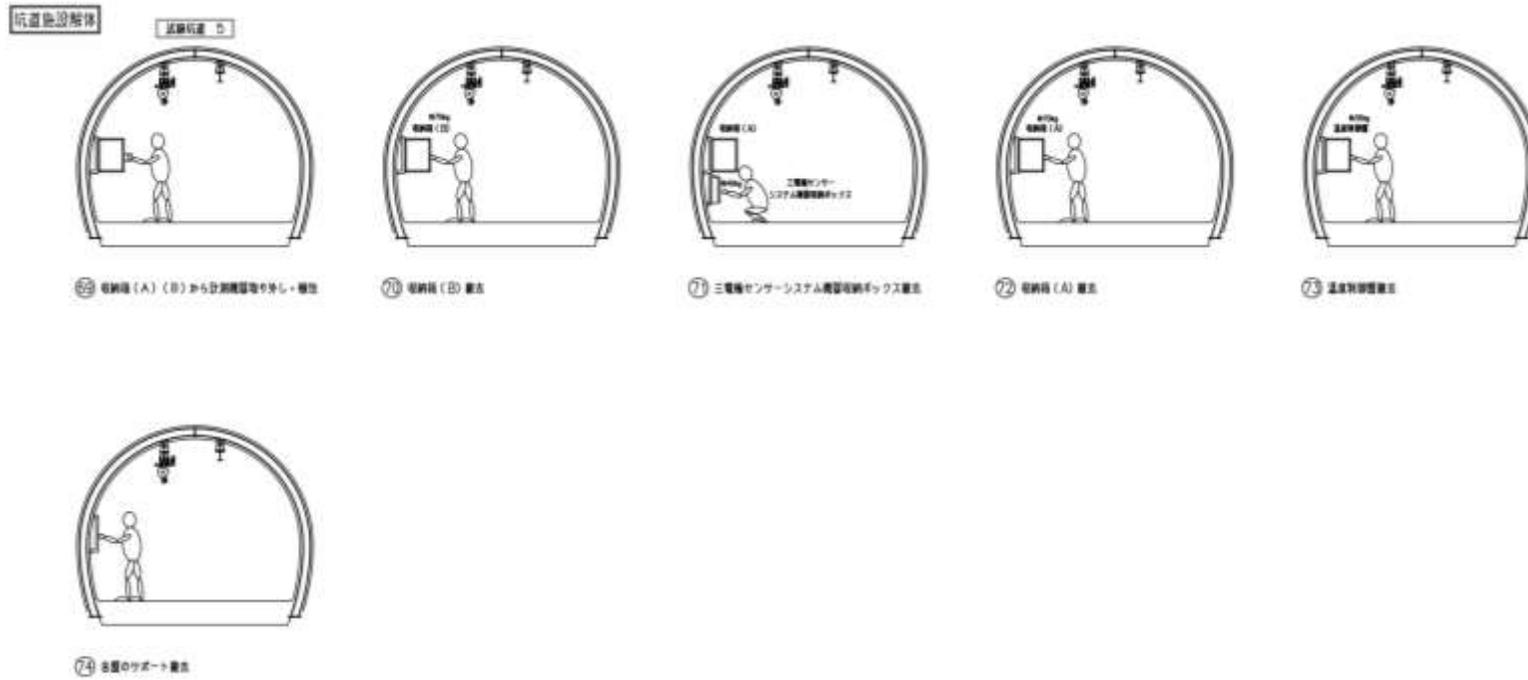


図 3.4.3-8 幌延 URL 工学規模試験装置解体 地下解体案 (8 / 8)

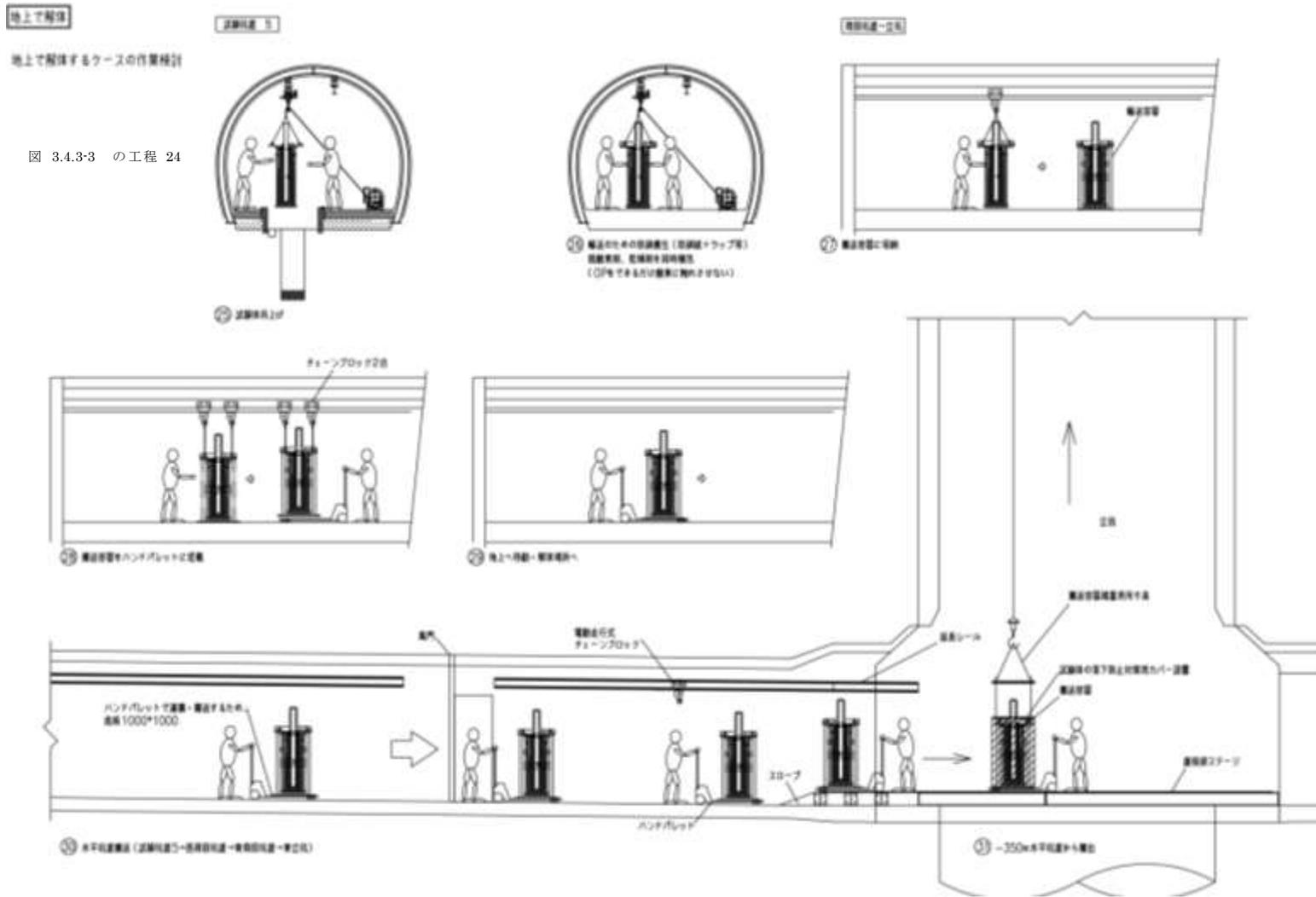


図 3.4.3-9 幌延 URL 工学規模試験装置解体 地上解体案 (1 / 5)

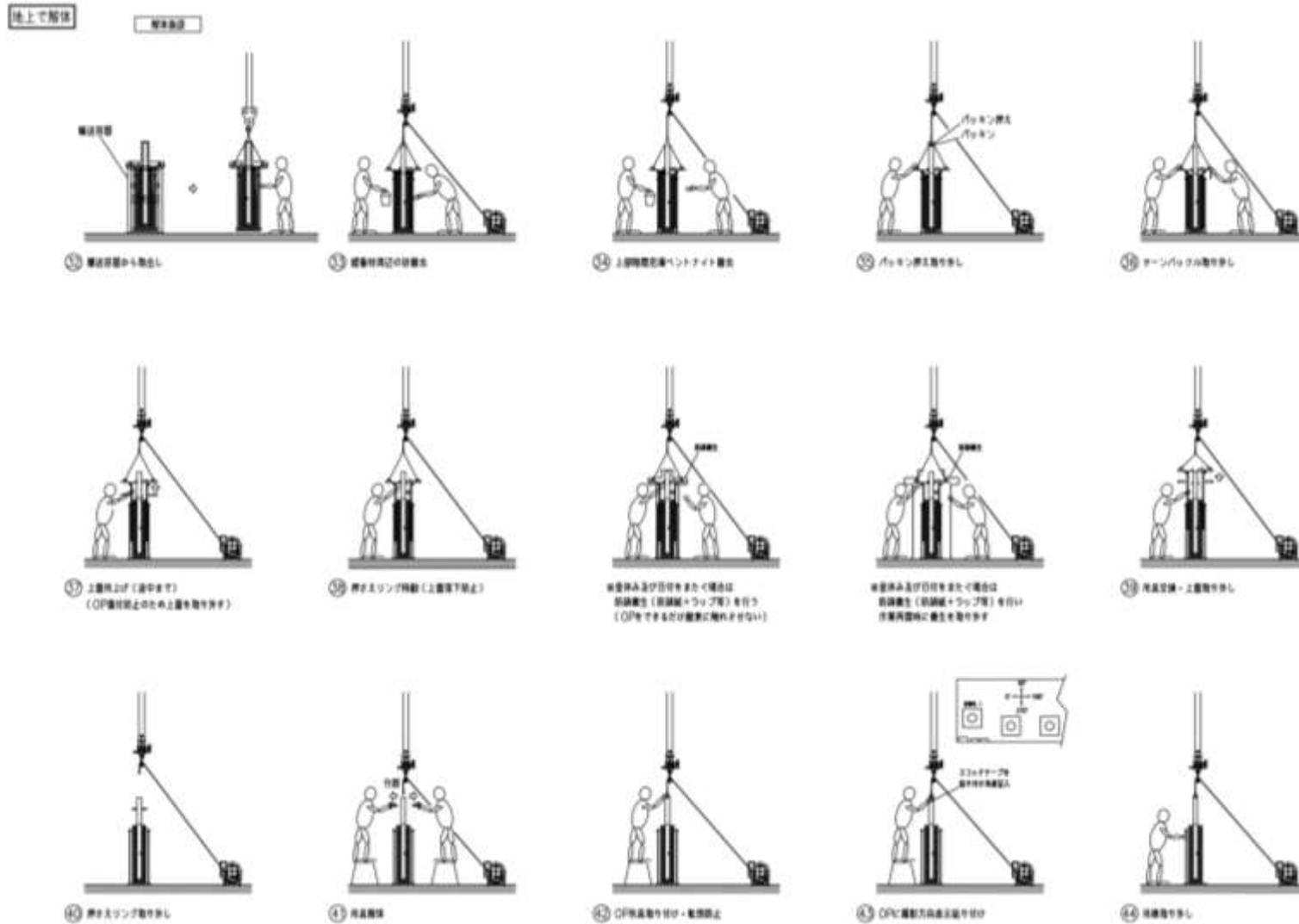


図 3.4.3-10 幌延 URL 工学規模試験装置解体 地上解体案 (2 / 5)

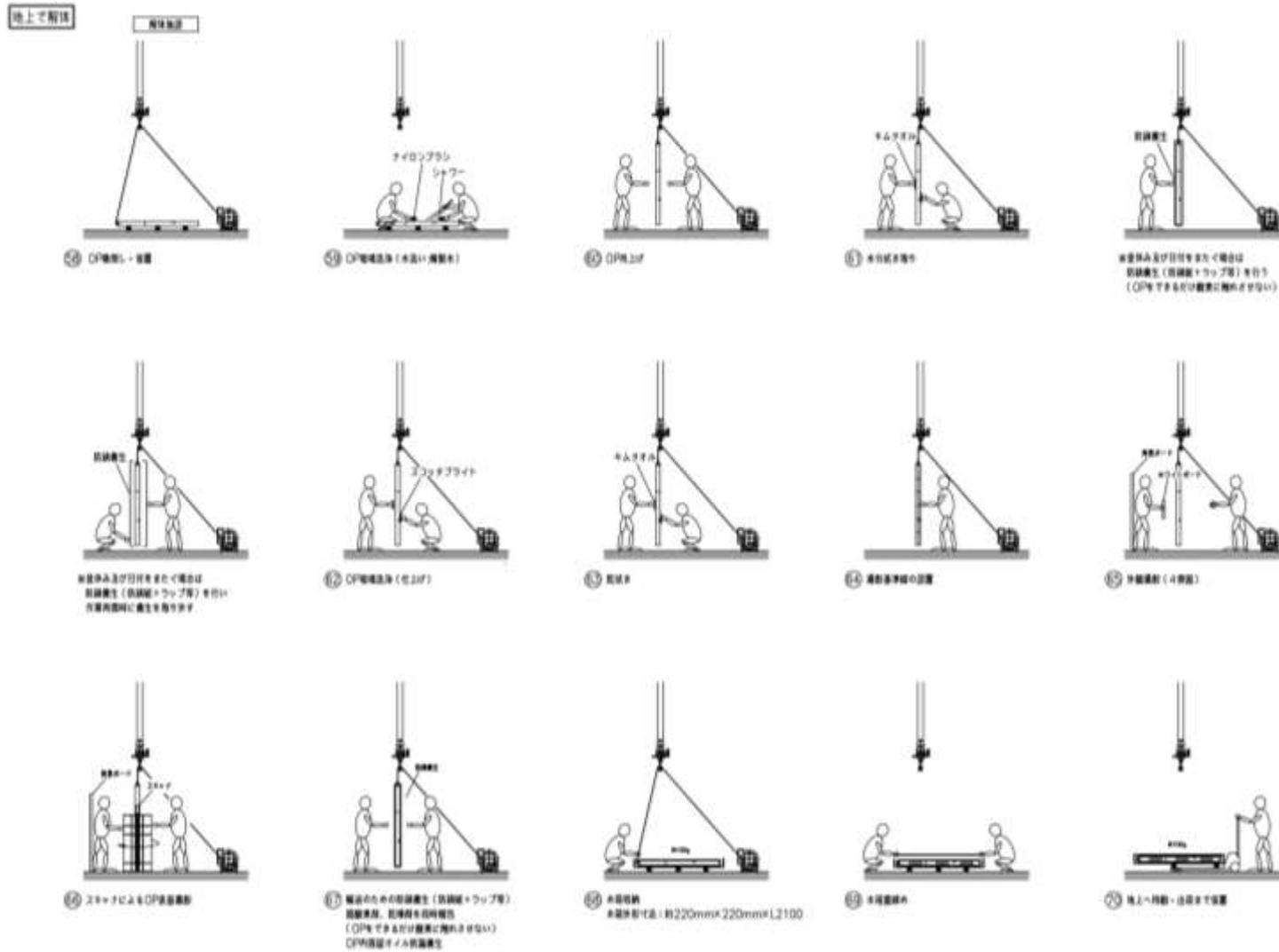


図 3.4.3-12 幌延 URL 工学規模試験装置解体 地上解体案 (4 / 5)

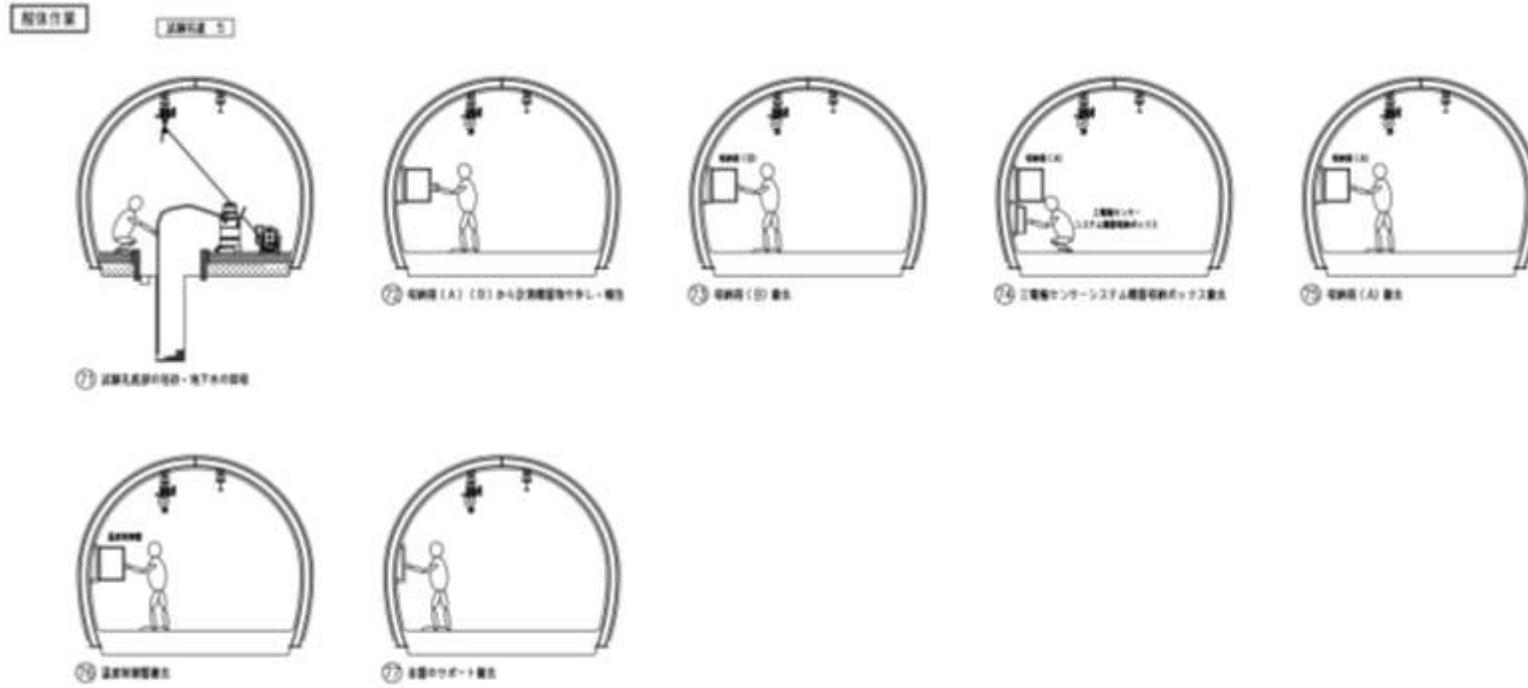


図 3.4.3-13 幌延 URL 工学規模試験装置解体 地上解体案 (5 / 5)

3.4.4 幌延 URL での工学規模試験装置解体作業における必要機器及び治具の設計

検討・作成したハンドリングフローから、必要機材と使用する作業工程をまとめた。必要機材を表 3.4.4-1 に示す。また表 3.4.4-1 で示した必要機材のうち設計が必要となるものについては、設計結果を図 3.4.4-1～図 3.4.4-5 に示す。

表 3.4.4-1 幌延 URL 工学規模試験装置解体 必要機材一覧

	品名	備考
1	排水ポンプ	
2	養生シート	
3	ウインチ	
4	アンカーボルト	
5	バケツ	
6	スコップ	
7	掃除機	
8	トング	
9	けがき針	
10	手動オイルポンプ	
11	吊り治具 A	図 3.4.4-1 に示す。
12	仮置き台	図 3.4.4-2 に示す。
13	背景ボード	
14	ホワイトボード	
15	デジタルカメラ	撮影に必要な照明、三脚等を含む
16	ビデオカメラ	固定用と移動用。複数方向からの記録。
17	防錆紙	
18	ラップ	
19	吊り治具 B	図 3.4.4-3 に示す
20	吊り治具 C	図 3.4.4-4 に示す
21	油性ペン・スコッチテープ	
22	ヘラ	
23	スクレーパー	
24	ピアノ線	
25	サンプラー	
26	ジップロック	
27	枕木	
28	ナイロンブラシ	
29	シャワーヘッド	
30	キムタオル	
31	スコッチブライト	
32	脱酸素剤	
33	乾燥剤	
34	木箱	約 220mm×約 220mm×L2,100mm
35	輸送容器	図 3.4.4-5 に示す 地上作業時に使用
36	ハンドパレット	地上作業時に使用
37	チェーンブロック	2 台
38	模擬オーバーパック表面撮影治具	
39	ハンディスキャナ	

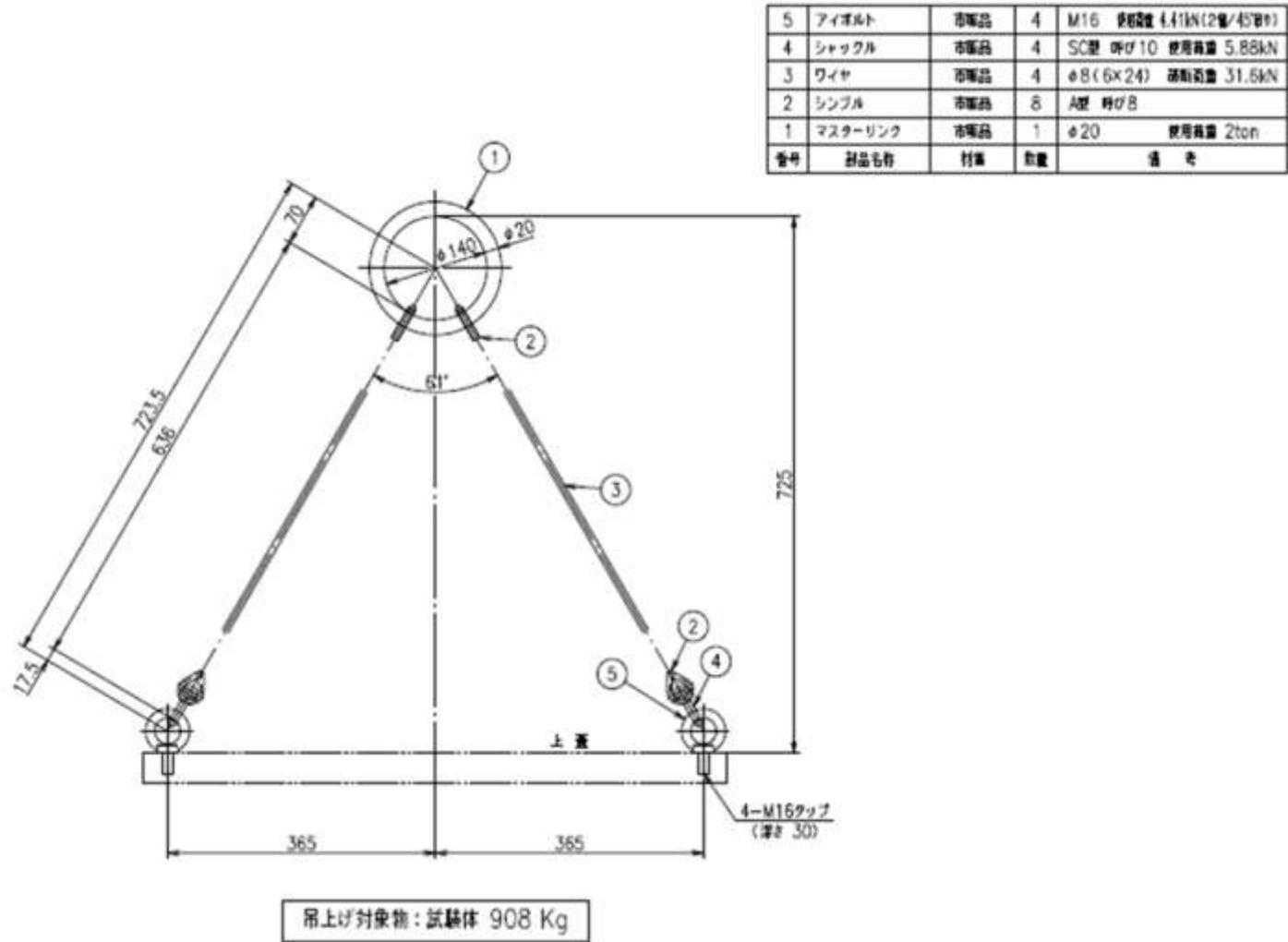
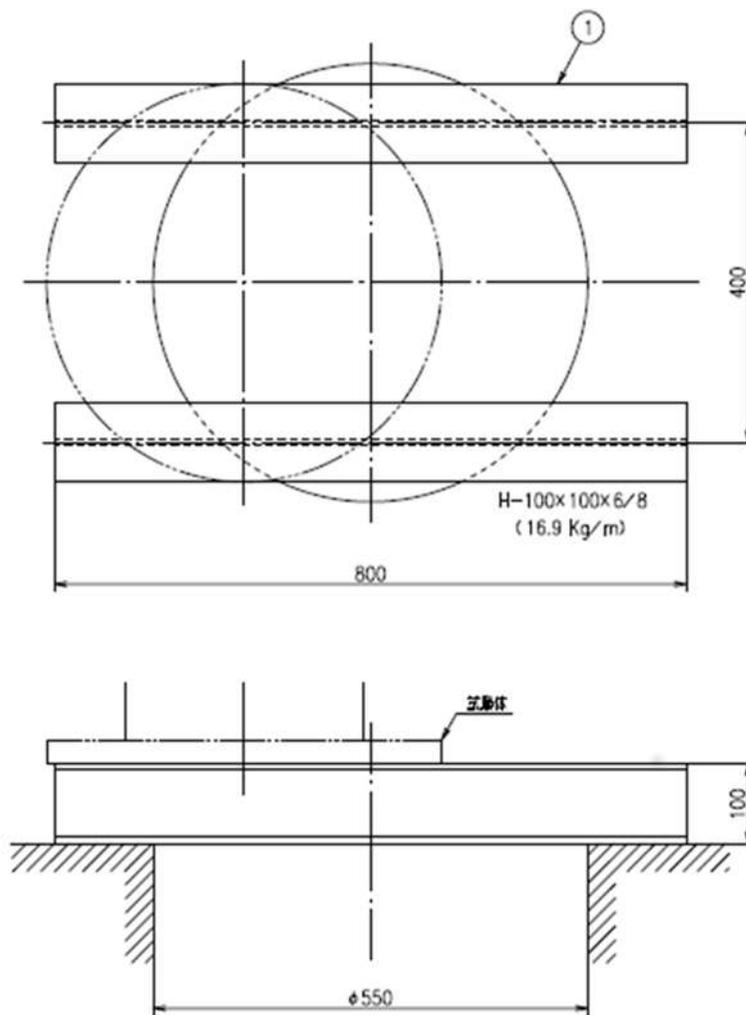


図 3.4.4-1 幌延 URL 工学規模試験解体 吊り治具 A



1	仮置き台	SS400	2	H-100x100x6/8
番号	部品名称	材質	数量	備考

図 3.4.4-2 幌延 URL 工学規模試験装置解体 仮置き台

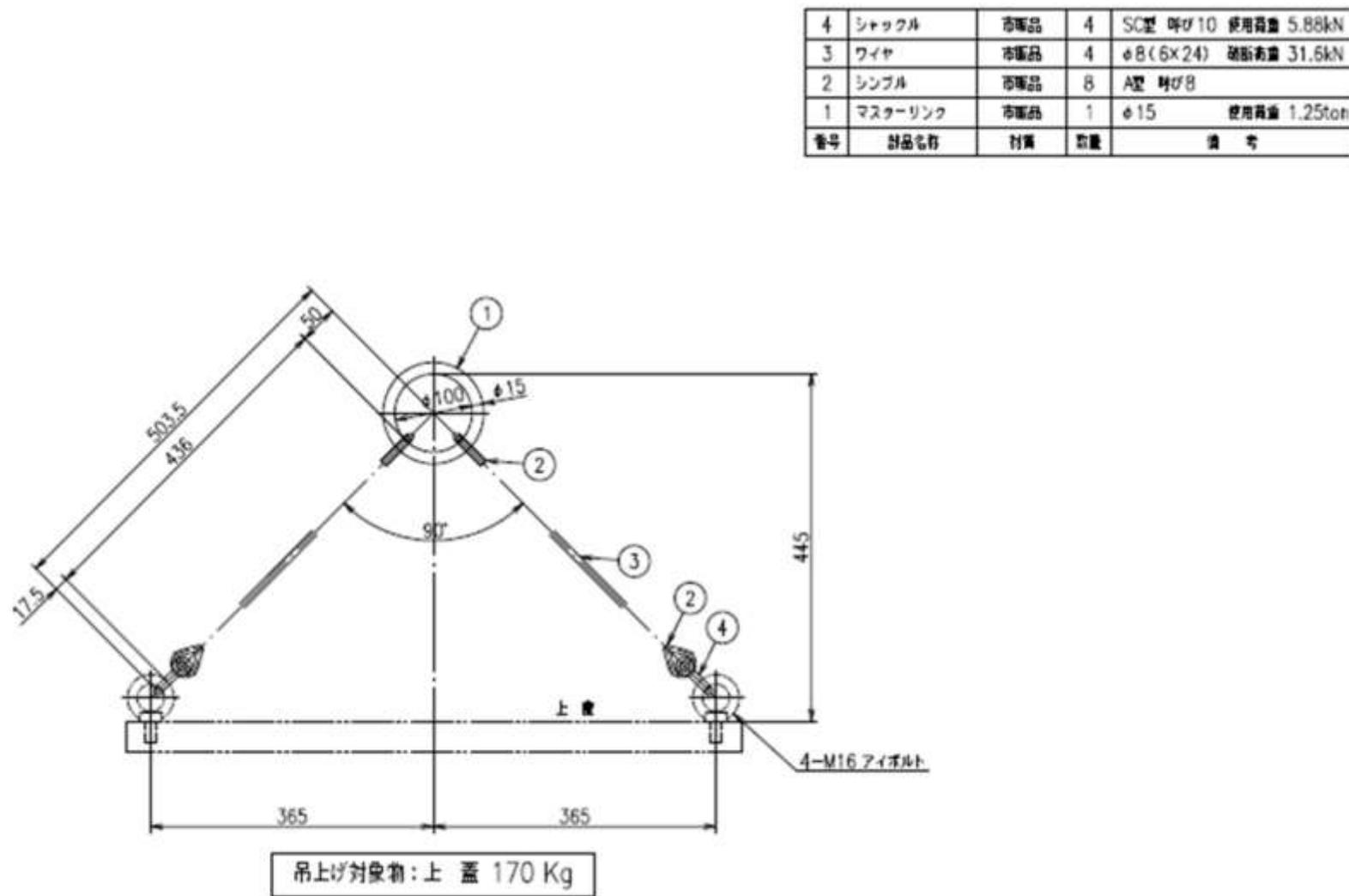


図 3.4.4-3 幌延 URL 工学規模試験装置解体 吊り治具 B

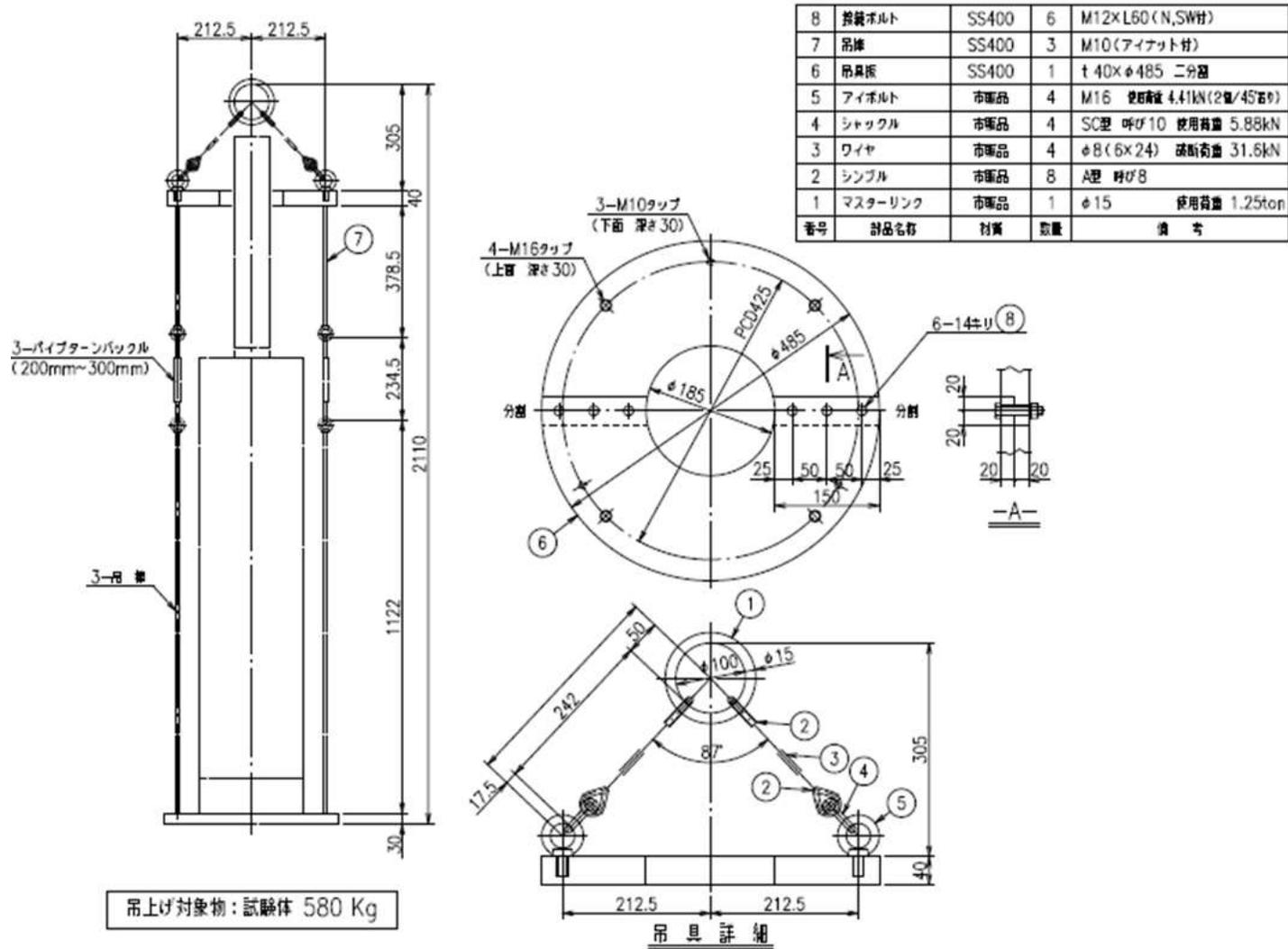


図 3.4.4-4 幌延 URL 工学規模試験装置解体 吊り治具 C

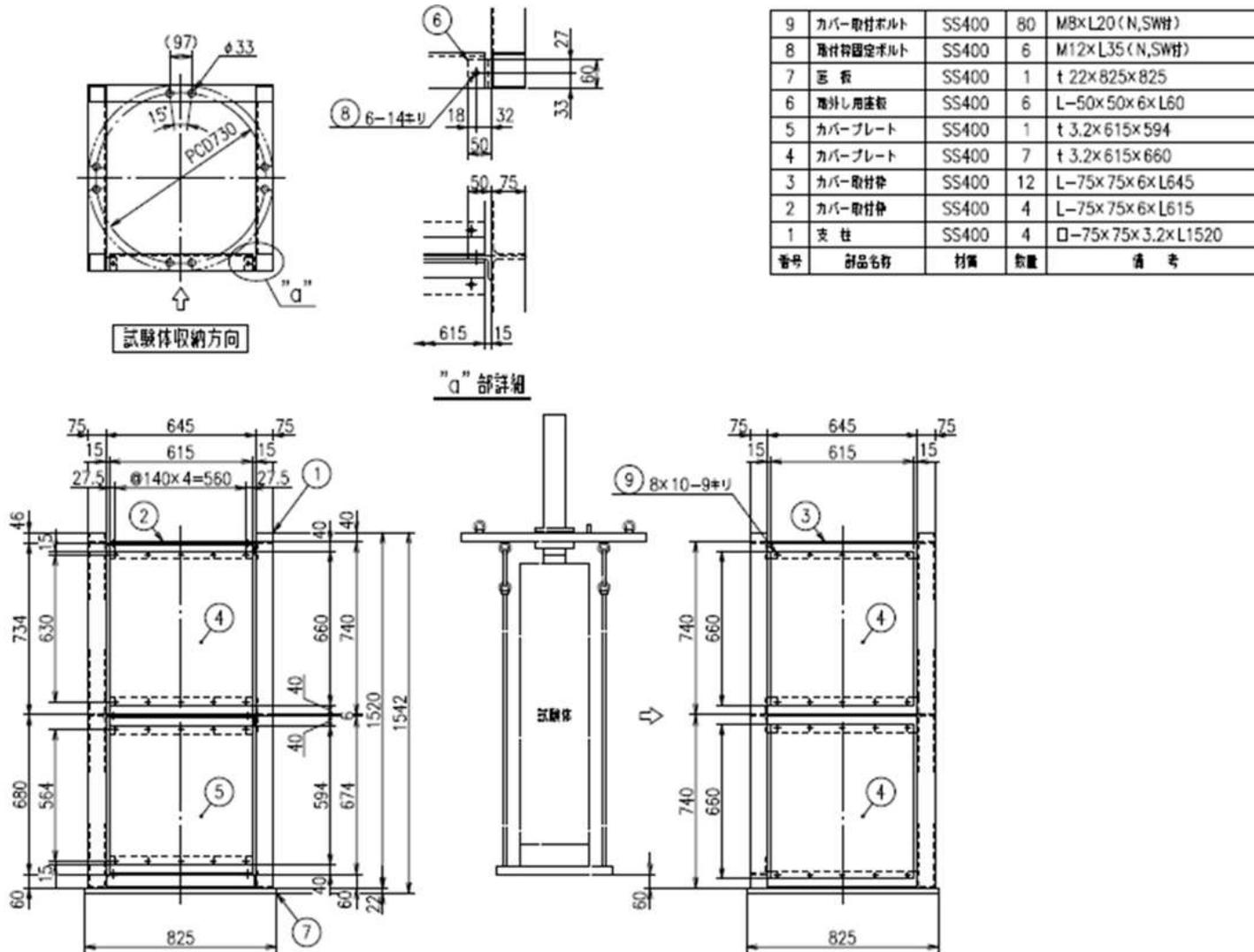


図 3.4.4-5 幌延 URL 工学規模試験装置解体 試験体輸送容器

3.4.5 地上工学規模試験装置の解体分析計画

(1) 地上施設の状況

地上工学規模試験装置は試験建屋内に平成 27 年 8 月に設置した。その後、幌延 URL の試験と同様に模擬地下水を浸潤させたのち、平成 28 年 5 月にヒーターの稼働を開始した。現在の試験状況を図 3.4.5-1 に示す。



図 3.4.5-1 地上工学規模試験 試験の様子

3.4.6 分析項目の検討

地上工学規模試験も幌延 URL 工学規模試験と同様に模擬オーバーパック加熱状態における母材と溶接部の腐食挙動の差、物質収支、特異な腐食箇所の周辺環境確認の3項目について分析及び必要な計測を行う。地上工学規模試験において分析項目及び分析に必要な計測項目を表 3.4.6-1 を示す。

(1) 母材と溶接部の腐食挙動の差

- 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：径方向の含水率の差を計測
- ③ 3次元計測：模擬オーバーパック腐食量を評価

(2) 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及び供給される酸素量から、物質収支を確認する。

(3) 特異的な腐食箇所の周辺環境の確認

不均質試験の結果から、模擬オーバーパック及び溶接部は全面腐食すると想定されるが、解体時に特異的な腐食箇所が観察された場合は、周辺環境が腐食に影響を及ぼしたか否かを確認するため、特異的な腐食箇所の緩衝材ブロックをサンプリングし、含水率を測定する。また比較のためその周辺の緩衝材ブロックもサンプリングする。

表 3.4.6-1 地上工学規模試験 測定分析項目

地上工学規模試験	測定項目	解体作業時必須作業
母材と溶接部の腐食挙動の差	①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
	②緩衝材ブロック含水率	緩衝材ブロックのサンプリング
物資収支の確認	—	—
特異的な腐食箇所の測定	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

3.4.7 地上工学規模試験装置の解体工程

(1) 解体計画検討項目

地上工学規模試験装置の解体について分析項目に対して考慮すべき項目以外に、不均質試験装置解体結果からのフィードバック項目を考慮して検討する必要がある。以下に検討に必要な項目を示す。

- 1) 工学規模試験装置解体に対して考慮すべき項目
 - ① 作業時間の短縮
 - ② 設置センサーの回収
 - ③ 分析項目（3.4.6 参照）に対して必要な試料採取
- 2) 不均質試験装置解体結果からのフィードバックする項目

(2) 解体計画

解体フロー案等を図 3.4.7-1～図 3.4.7-4 以降に示す。

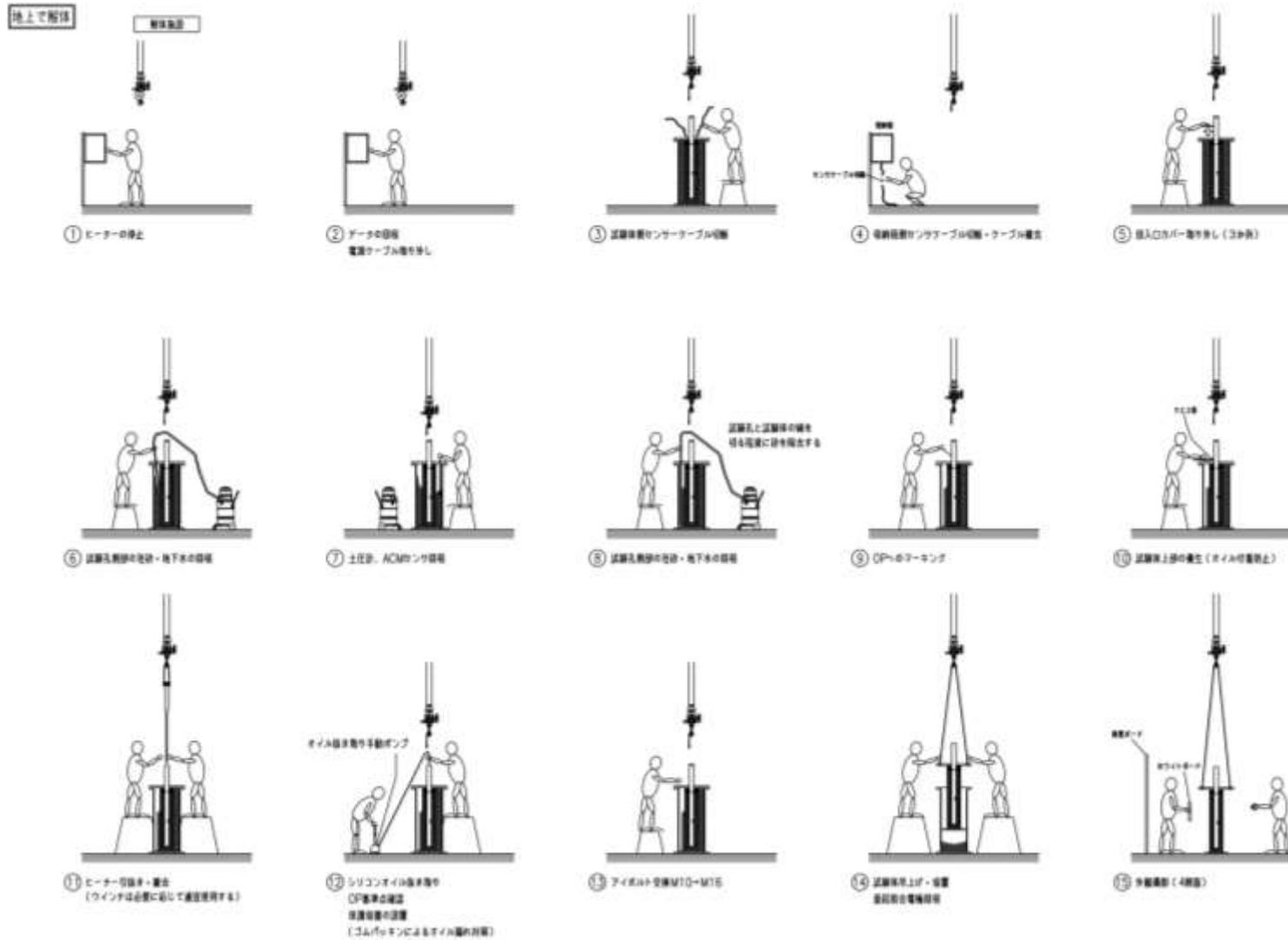


図 3.4.7-1 地上工学規模試験装置解体 (1/4)

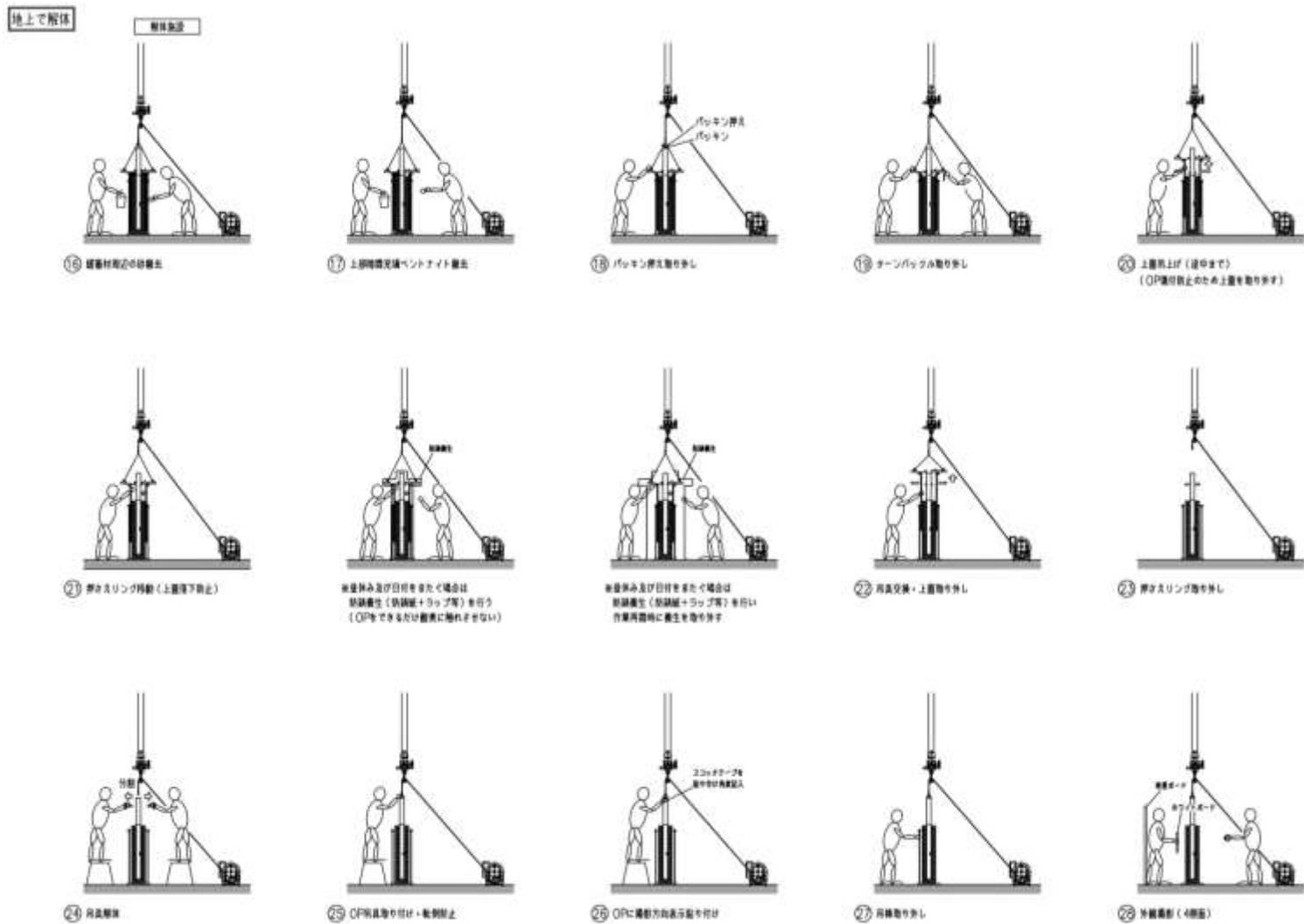


図 3.4.7-2 地上工学規模試験装置解体 (2 / 4)

3.4.8 地上工学規模試験装置解体作業における必要機器

3.4.7 にて検討・作成したハンドリングフローから、必要機材と使用する作業工程をまとめた。必要機材を表 3.4.8-1 に示す。

表 3.4.8-1 地上工学規模試験装置解体 必要機材一覧

	品名	備考
1	バケツ	
2	スコップ	
3	掃除機	
4	トンダ	
5	けがき針	
6	手動オイルポンプ	
7	背景ボード	
8	ホワイトボード	
9	デジタルカメラ	撮影に必要な照明、三脚等を含む
10	ビデオカメラ	固定用と移動用。複数方向からの記録。
11	防錆紙	
12	ラップ	
13	油性ペン・スコッチテープ	
14	ヘラ	
15	スクレーパー	
16	ピアノ線	
17	サンプラー	
18	ジップロック	
19	枕木	
20	ナイロンブラシ	
21	シャワーヘッド	
22	キムタオル	
23	スコッチブライト	
24	脱酸素剤	
25	乾燥剤	
26	木箱	約 220mm×約 220mm×L2,100mm
27	ハンドパレット	
28	チェンブロック	2 台
29	模擬オーバーパック表面撮影治具	
30	ハンディスキャナ	

3.5 腐食計測技術の適用性確認調査

3.5.1 概要

試験環境・条件を統一して試験を実施し、腐食計測技術の適用性確認調査における3電極式、薄膜レジストメトリー、電気抵抗/ポテンシャルドロップ法、および、インピーダンス法を用いて腐食挙動を計測した。4つの計測方法で腐食挙動を計測した結果、15～624hでイベントを検出した。各測定法によって、そのイベントの中身が異なり、3電極式は算出した腐食速度が有為な速度を示し始めた時間、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は薄膜の腐食が開始し電気抵抗が減少し始めた時間、および、全面溶出によって導通が取れなくなった時間、インピーダンスは計測が出来るようになった時間、もしくは、計測値の挙動に何らかの変化が認められた時間である。

適用した4つの計測方法には、それぞれ特徴がある。1) 3電極式は、ハードはタフであるが算出された腐食速度の中には不整合なものがあり、それらを除外する過程が必要な場合がある。2) 薄膜レジストメトリーは感度良く腐食の発生や進展が検出できるが、薄膜ゆえに、早い腐食速度、および、腐食が局在化する系では、薄膜センサーの最適化が必要となる。3) ほぼ同じ原理に基づくポテンシャルドロップ法は、早い腐食速度、および、腐食が局在化する系に対しても比較的容易に適用可能であるが、腐食速度を定量するためには独自の検定曲線などデータベースを構築する必要がある。4) インピーダンス法は、市販の実験用機器で精度良く測定結果が出力されるが、真の腐食挙動との対応を、別途、確認する必要がある。

3.5.2 同一環境下センサー性能確認試験

(1) 同一環境下センサー性能確認試験の概要

同一環境下センサー性能確認試験は、図 3.5.2-1 に示す経時変化確認試験用の非加熱型窓付き試験容器を用い、模擬オーバーパック試験片取付け位置に 10mmt のアクリル板を介して各種のセンサーを取り付けた。経時変化確認試験で用いた圧縮ベントナイトは、試験片表面が腐食環境になるまでに約3ヶ月(0.05mm/h程度の透水速度)を要したことから、予め、含水させたベントナイトの塊を用いた。すなわち、中空円筒状のベントナイトブロックを切断したものを珪砂中に埋め、大気中で模擬地下水中に浸漬をして数か月間静置したものを用いた。

アクリル板：各種センサー設置

北大：薄膜レジストメトリー

東北大：薄膜破断検知

東工大：インピーダンス

工学規模試験で採用：3電極式(ENA)

含水ベントナイト：圧縮ベントナイトブロックを模擬地下水に浸漬して含水

乾燥ベントナイト：粉末ベントナイトと珪砂を7:3で混合

珪砂：5号珪砂と3号珪砂を1:1で混合

模擬地下水：組成を表 3.5.2-1 に示す模擬地下水、窒素バブリングによる脱気

(2) 試験セルの準備、および、試験開始手順

試験セルの準備、および、試験開始手順を示す。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 3.5.2-2 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 箇所あるため均等に締める。

含水ベントナイトは図 3.5.2-3 の様にあらかじめ試験セル内寸よりもやや幅の小さい直方体に薄いステンレス板やタコ糸などで切断しておく。(L:100mm×w:75×h:110 程度。L、h はぎりぎりでも良いが、w は狭い方が設置しやすい) 切断したベントナイト表面には粉末ベントナイトをまぶしておき、セルへの付着を防ぐ。特に切断面はくっつきやすいため注意が必要である。

ベントナイト設置手順を図 3.5.2-4 に示す。(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。その後(b)のようにセンサー面を下にし、センサー表面に乾燥ベントナイトを押し固め、厚さ 10mm 程度になるように調整する。この時はテープなどで堰を作り、乾燥ベントナイトが漏れないようにする。(c)のように乾燥ベントナイトの上に含水ベントナイトブロックを乗せ上から軽く押し乾燥ベントナイトに押し付ける。セルを元の向きに戻し、ベントナイトブロックを上から押しつぶし隙間左右の隙間を埋める。この時にセンサーを結線し、測定を開始することを原則とする。

ここで、当初は乾燥ベントナイト層を設けず、直接センサーと含水ベントナイトを接触させる手順を想定していたが、1) 乾燥状態の腐食センサー出力=0 の状態から試験を開始したいとのニーズ、および、2) 装置組み立て時の操作性の観点から、10mm の乾燥ベントナイト層を設けることとした。圧縮ベントナイトの含水速度が 0.05mm/h 程度であるから粉末を詰めた 10mm のベントナイト層は 20~200h 程度で透過すると予想した。

ベントナイトを十分詰めたのち珪砂をベントナイトブロックの高さまで詰める。この時、ベントナイト層・珪砂層ともに試験セルフランジ部と面一になるように調整する。ベントナイト、珪砂を詰めたセルの状況を図 3.5.2-5 に示す。

密閉手順を図 3.5.2-6 に示すように、珪砂層側のベントナイトブロック上に含水ベントナイトの帯を載せ土手を作ることでベントナイトブロック・蓋の隙間を埋める。含水ベントナイトの帯はやや厚めにし、蓋との隙間が完全に埋まるようにする。

同一環境下センサー性能確認試験装置の組み立てを図 3.5.2-7 に示す。配管を取り付け、模擬地下水を注水する。ここでベントナイト層の止水部を越水し、センサー側まで模擬地下水が流れ込んだ場合は注水を中止し、密閉をやり直す。さらに必要であればベントナイトを掘り起し、最初からやり直す。注水後は排水側の配管チューブをピンチコックで閉じ、密閉を維持する。

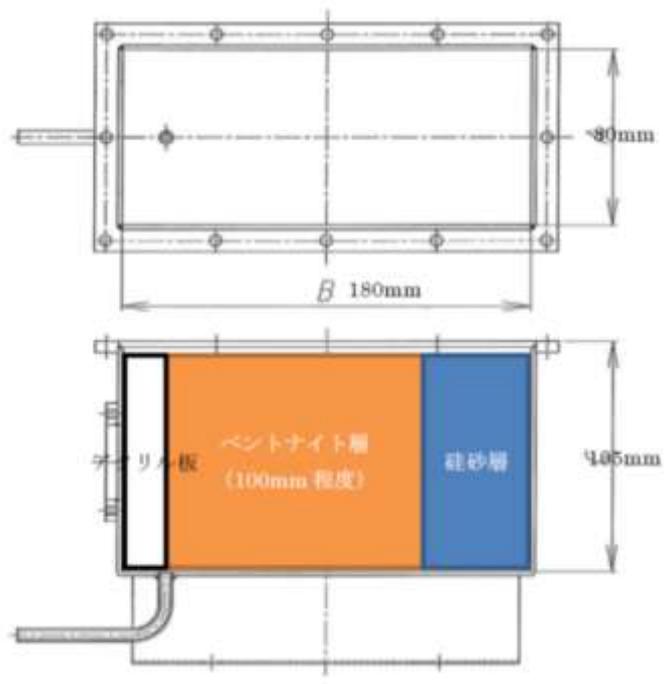


図 3.5.2-1 同一環境下センサー性能確認試験セル

表 3.5.2-1 模擬地下水組成

NaCl	5200 ppm	8.90E-02 M
NaHCO ₃	3000 ppm	3.60E-02 M
CaCl ₂	180 ppm	1.60E-03 M
KCl	230 ppm	3.10E-03 M
MgCl ₂	190 ppm	2.00E-03 M
H ₃ BO ₃	410 ppm	6.60E-03 M



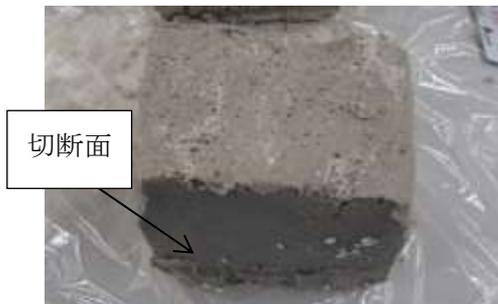
締める前

(ゴムワッシャは変形無)



締めた後

図 3.5.2-2 アクリル板固定用のネジ



切断まま



粉末ベントナイトをまぶした後

図 3.5.2-3 ベントナイトの切断例



(a)排水穴の養生



(b) 乾燥ベントナイトの設置



(c) ベントナイトブロックの設置

図 3.5.2-4 ベントナイトの設置手順



上から見たセル



横から見たセルフランジ部

図 3.5.2-5 ベントナイト、珪砂を詰めたセル



ベントナイトによる土手



密閉後（良い例）

図 3.5.2-6 密閉手順

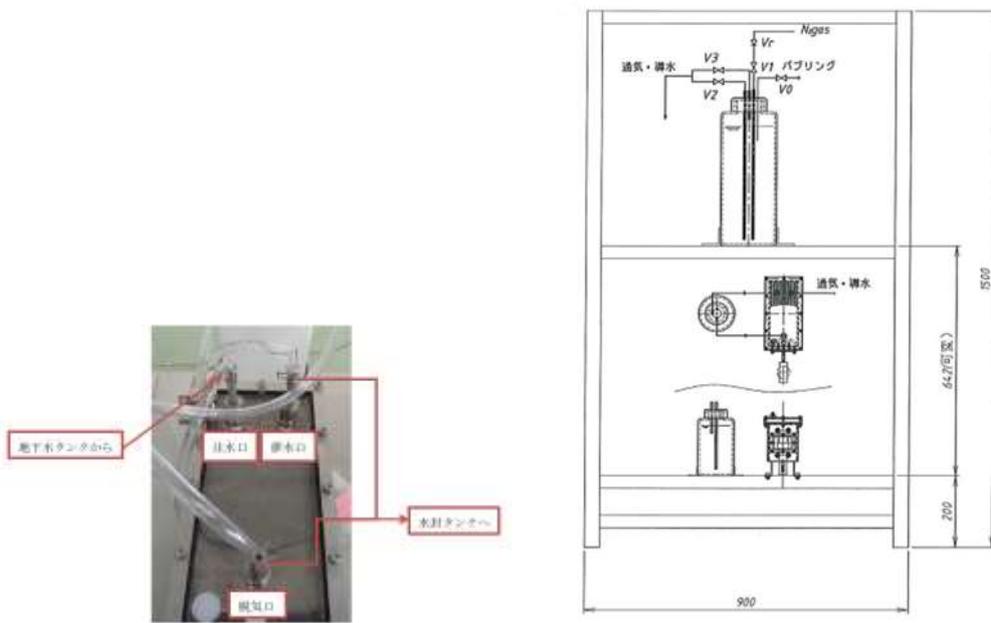


図 3.5.2-7 同一環境下センサー性能確認試験装置の組み立て

3.5.3 3電極式センサー（工学規模試験で採用）

図 3.5.3-1 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同一環境下センサー性能確認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 ($\text{CR}_{3\text{EM}}$) の経時変化を図 3.5.3-2 に示すように、試験開始直後から 0.05mm/y 以下の低速度を示していたが、 150h 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 150h 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。

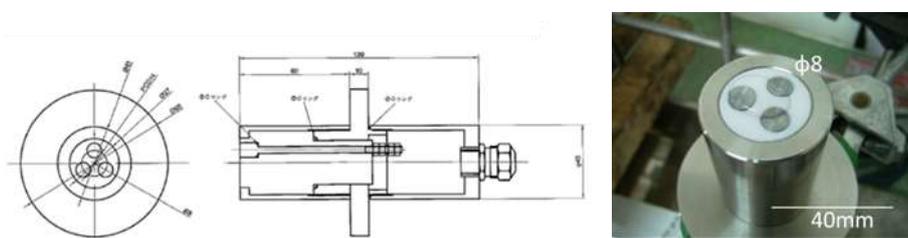


図 3.5.3-1 3電極式センサーのセンサー部

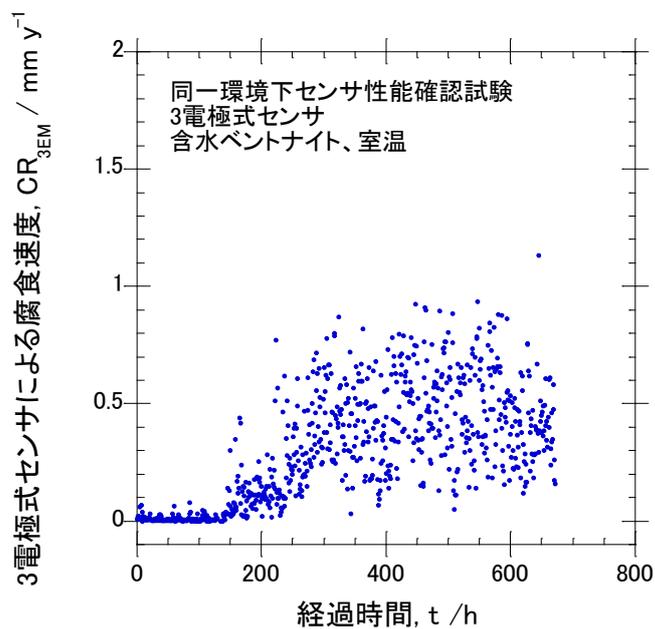


図 3.5.3-2 3電極式センサーによる腐食速度の経時変化

3.5.4 薄膜レジストメトリー

(1) 概要

平成 26 年に引き続き、放射性廃棄物の地下埋設用金属コンテナ候補材料である炭素鋼の地下埋設模擬環境計測用の腐食モニタリング装置を検討した。平成 26 年度は脱酸素環境中での膨潤ベントナイト環境を研究室のグローブボックス中に再現し、レジストメトリー、インピーダンス、浸漬電位等の計測法を用いて炭素鋼の腐食速度を定量評価した。溶存酸素濃度 0.01 mg L^{-1} 以下、 70°C の膨潤ベントナイト曝露環境において、鉄線は約 $19 \mu\text{m y}^{-1}$ の速度で減肉し、また腐食生成物は Fe_3O_4 、 FeOOH の他 FeS が検出された。本年度は、昨年度報告書の提案に基づき、実環境において使用可能な計測系の構築を行った。試験セルおよび曝露試料は同一環境下センサー性能確認試験用に設計された共通のものを使用し、計測系は平成 26 年度使用したものと同等の機能を持ち、かつ複数試料に対応し小型低コストのものを新たに開発した。

(2) 研究方法

試料および計測セルの概要を図 3.5.4-1 に示す。試料はガラスエポキシ基板上に製膜した冷間圧延鋼 (SPCC) 薄膜で、厚さ $20\mu\text{m}$ 、幅 1mm 、長さ約 200mm の線状パターン 3 つを同一基板上に作成し 3 試料とした。このうち 2 つの試料は膨潤ベントナイト環境に曝露し、もう 1 つは樹脂 (日新レジン社製アダプト 60L) で保護しレジストメトリー用の温度補償用試料とした。試験では 2 枚のガラスエポキシ基板、計 6 個の SPCC 箔試料を用いた。うち 1 枚は直接ベントナイトに接触させる試料 (R2、R3) と補償用試料 (R1)、もう 1 枚は表面を紙フィルタで被覆し間接的に膨潤ベントナイトに接触させる試料 (R5、R6) と補償用試料 (R4) とした。各薄膜試料の電気抵抗は実測でおよそ 0.7Ω であった。セルは本体がステンレス鋼製、蓋部および窓部がポリカーボネート製で、内部に腐食試験試料、参照電極、温度センサー、溶存酸素センサーヘッドを設置した後、あらかじめ水で膨潤させたベントナイトブロック、珪砂および乾燥ベントナイト粉末をいれてから蓋をし、内部を窒素置換してから珪砂側に脱気水を導入した。セル側面にはシリコンヒーターを取り付け、保温のために断熱容器に納めた (図 3.5.4-2)。しかし実際には常温でも腐食速度が速かったため、ヒーターを使用することはなかった。昨年度は市販のロックインアンプおよび周波数応答特性解析装置 FRA などを組み合わせて装置を構築したが、本年度はこれらの精密機器が使用できないフィールドでの使用を想定し、同等の機能を有する小型、省電力、低コストの専用回路を新規に設計した。測定項目は ① 6 つの薄膜試料 (R1~R6) の電気抵抗 (レジストメトリー) ② 4 つの曝露試料 (R2、R3、R5、R6) の浸漬電位 EOCV ③ 2 つの曝露試料間 (R2-R3、R5-R6) のカップリング電流 i_{CP2-3} 、 i_{CP5-6} ④ 2 つの曝露試料間 (R2-R3、R5-R6) のインピーダンス Z_{2-3} 、 Z_{5-6} および位相 P_{2-3} 、 P_{5-6} ⑤ 環境温度 T1 およびセル内膨潤ベントナイトの温度 T2 ⑥ セル内の溶存酸素濃度 であった。各測定項目に関する補足を記す。

- ① レジストメトリー: 各薄膜試料に直流定電流 10mA を流し、試料両端の電位差を計測した。
- ② 浸漬電位: Ag 線と Ag/AgCl インク (BAS 社製) をガラス管内に封止した Ag/AgCl 擬似参照電極を使用し、参照電極-各試料間の電位を計測した。
- ③ カップリング電流: 同一電位下での隣接曝露試料 (R2-R3 または R5-R6) 間に流れる電流

- を計測した。
- ④ インピーダンス：同一電位下での隣接曝露試料（R2-R3 または R5-R6）間の2電極間インピーダンスをワンチップインピーダンスアナライザ（AD社製 AD5933）を使用して計測した。AD5933は、周波数シンセサイザ DDS、離散高速フーリエ変換演算（FFT）機能、アナログ入出力（出力バッファ、電流-電圧変換）回路、プログラマブルゲインアンプ（PGA）などインピーダンス計測に必要な基本機能を内蔵する。これに必要な附加回路を追加した。
 - ⑤ 温度：温度センサー（MAXIM社製 DS18B20、1-wire I/F、同一バス上に複数のセンサーを配置可能）を計測基板上（室温 T1）とセル内ベントナイト中（T2）に設置した。
 - ⑥ 溶存酸素濃度：蛍光式酸素濃度センサー（Hach社製 LDO、HQ40d）のセンサーヘッドをセル壁に取り付け、これに接触した膨潤ベントナイトの溶存酸素（DO）値をモニターした。ただし、いったん膨潤ベントナイトにセンサーヘッドが接触すると、劣化して低DO側が正確に測れなくなる。本試験結果では一貫してDO値は大気開放状態に近い値を示したため、測定誤差は小さいと判断される。

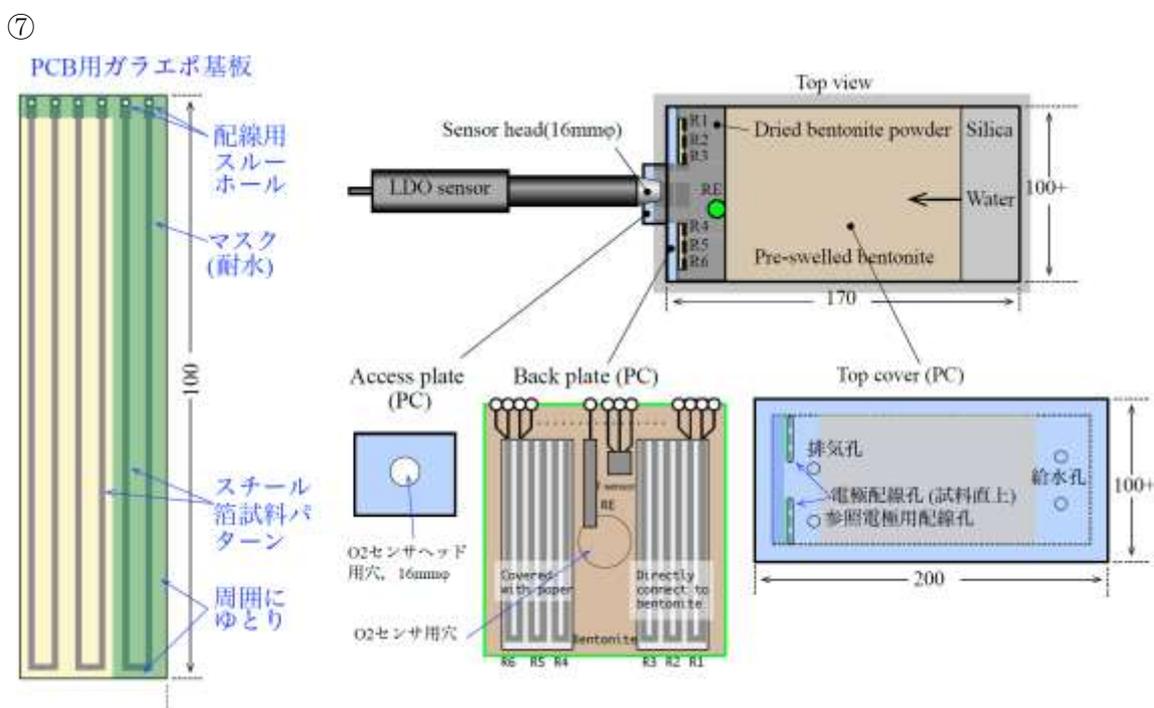


図 3.5.4-1 試験体および試験セル

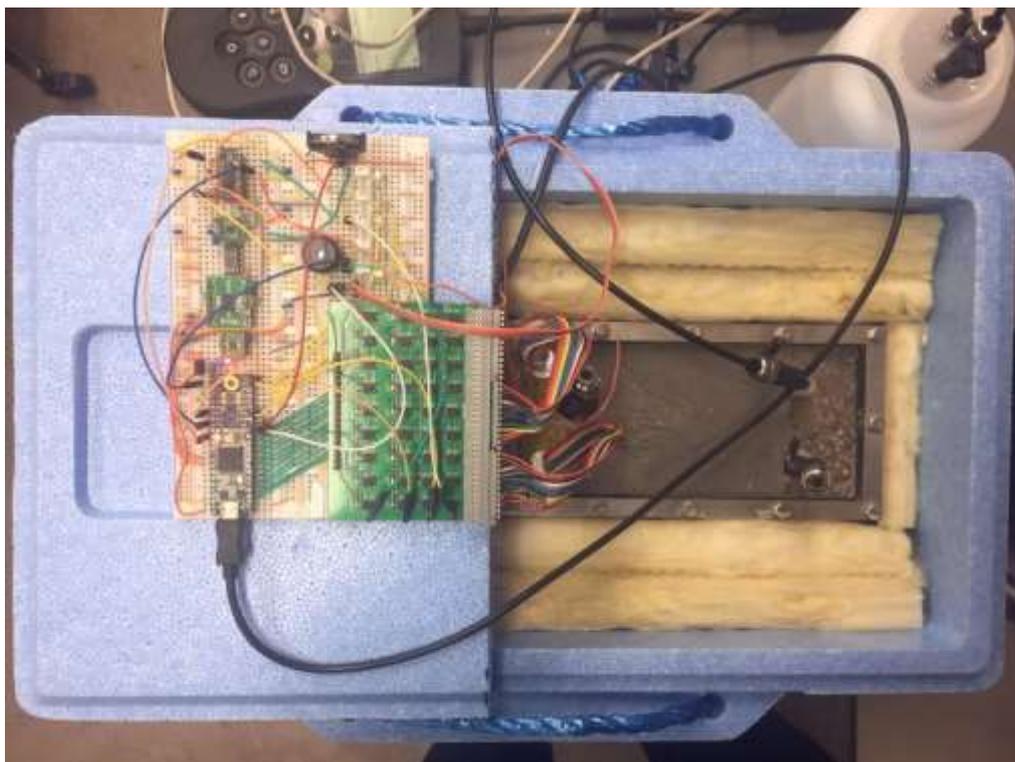


図 3.5.4-2 保温容器に納めたセルと計測装置

これらの計測は、各項目の計測を行う回路を、PhotoMOS リレーを介して、6 個の薄膜試料にルーティングすることを一定時間間隔で行った。本計測用に、専用のリレーマトリクス回路を設計しプリント基板を作成した。本実験では試料基板 2 枚計 6 試料を使用した。装置としては最大 3 枚計 9 試料まで対応できる。回路全体の制御には、32bit マイクロコントローラ (Teensy3.2、MK20DX256VLH7) を使用し、ファームウェア開発には Arduino IDE を使用した。このコントローラに内蔵する 16bit ADC (実質精度 13bit、作動入力 2ch、片入力 21ch)、DAC (12bit)、リアルタイムクロック (RTC) などの機能を本計測装置にそのまま使用した。計測データは USB 経由で PC に転送した。計測装置への電源 (5V) も USB 経由で供給しているが、装置全体の消費電流は 50mA 程度で、バッテリーで十分駆動可能である。また測定データは USB ポートからテキストとして出力されるため、PC 上に専用のソフトを必要とせずダムターミナルや無線回線経由で遠隔転送が可能である。

(3) 研究成果

1) 試験中および試験後のセルおよび試料

試験は 2017 年 1 月 12 日に試料の埋設、セルの密閉、水の導入作業を行い、データを 18 日間記録した。腐食速度が大きかったため、ヒーターは稼働させず室温のままとした。図 3.5.4-3 に試験中の蓋上部の状態、および試験終了後に解体中のベントナイトの状態を示す。上蓋から見ている限り試料付近のベントナイトは乾燥しているように見えたが、試験後にセルを解体すると、試料表面まで水が到達していた。図 3.5.4-4 に腐食試験後の試料の写真を示す。試料周囲および参照極周辺に膨潤したベントナイトが固着していた。ベントナイト直接接触試料 (R2、R3)、フィルタ紙被覆試料 (R5、R6) とともに、腐食による複数の断線箇所を確認した。R2、R3 は全面が赤錆で被覆され、赤錆は周囲のベントナイトにも転移していた。後述するレジストメトリーの結果より、R2、R3 は R5、R6 よりも早く断線しているため、赤錆下には金属状態の鋼はほとんど存続していないと推定される。また同一試料上では下部の方が腐食の程度が大きかった。一方 R5、R6 はフィルタ紙ならびにベントナイトに赤錆転写していたものの、フィルタ紙下の試料表面は金属光沢を維持しており、所々に溶解による断線箇所が見られた。樹脂で保護された R1、R4 は、ほとんど腐食はなかったが、所々にスポット状の発錆が見られたことから、樹脂による防水/防湿が不完全であることがわかった。



図 3.5.4-3 (a)試験中の蓋部の様子、(b)試験終了後、解体時の様子

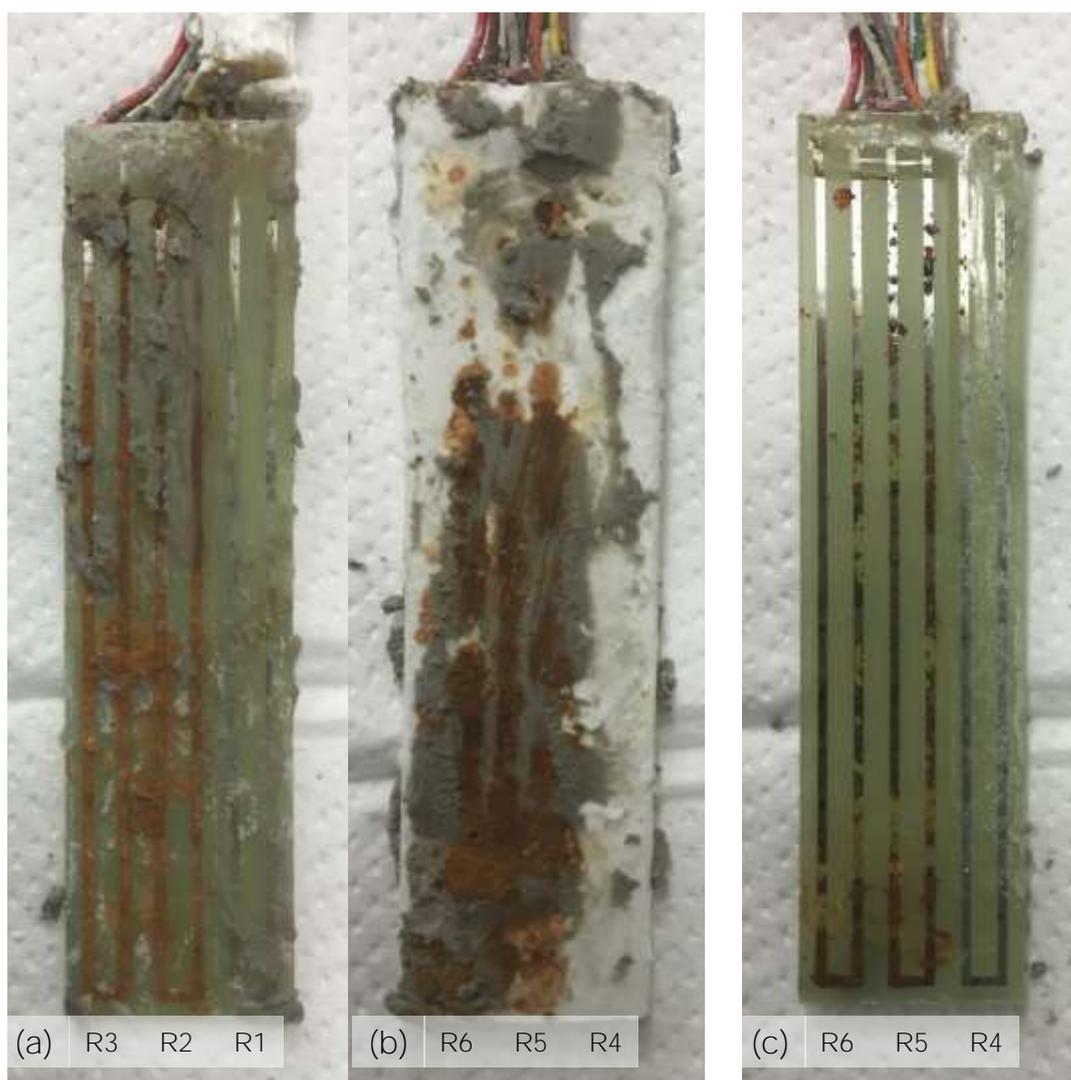


図 3.5.4-4 試験終了後の試料。(a) R1-3 (b) R4-6(フィルタ紙被覆)(c)R4-6 (フィルタ紙除去)

2) DO の経時変化

DO の経時変化は Hach 社の提供する PC 用ソフトウェアの不具合で記録できなかったため、以下に概要のみ記載する。セル内を N_2 置換することで DO 値は一旦低い値となったが、水導入およびセル密閉後の比較的早い段階で $2\sim 3\text{ mg L}^{-1}$ まで上昇し、翌日には大気開放と同水準の 8 mg L^{-1} まで上昇し、その後このレベルを維持した。おそらく事前に大気中で膨潤させたベントナイトブロックに溶解していた O_2 がセル内に放出されたと考えられる。

3) 曝露試料抵抗の経時変化

図 3.5.4-5 に室温 (T1) とベントナイト温度 (T2)、参照抵抗 (R1、R4) の経時変化を示す。T1 および T2 には日周期変動が見られ、実験室温の下がる週末には大きな温度の落ち込みがある。温度の変動幅は、ベントナイトの方が小さい。金属の電気抵抗は温度に対して正の依存性を持つため、R1、R4 には温度の日周期に対応した変動が見られる。なお R1、R4 ともに長期にわたる抵抗減少が見られるが、その成因は不明である。図 3.5.4-6 に各試料 R1~R6 の電気抵抗の経時変化を示す。抵抗の初期値は 0.7~0.8Ω 程度で、事前にテスターで計測した値と同程度である。曝露抵抗は埋設後のある時点 (R2 は 3 日後、R3 は 5 日後、R6 は 12 日後、R5 は 16 日後) で抵抗値が大きく増加した。試験後の試料の状況より、この付近で実際に試料が断線したと思われる。

各曝露試料の電気抵抗を、参照試料の抵抗で割った相対抵抗変化 = 曝露試料抵抗値 / 保護試料抵抗値 の経時変化を図 3.5.4-7 に示す。温度変動に対応した抵抗の変動が消滅していることがわかる。相対抵抗変化から求めた試料箔厚さの経時変化を図 3.5.4-8 に示す。全ての曝露試料が断線しているように見える。試験中、実際に外部からテスターで測定してもこれら試料の抵抗値が極めて大きいことが確認できた。ベントナイトに直接接触していた R2、R3 は、埋設初期から腐食が進行し断線に至ったように見える。一方フィルタ紙で被覆した R4、R5 は、腐食の顕在化に遅れがあり、またまた減肉速度も R2、R3 よりも遅いように見える。両者の違いが、曝露条件の違い (膨潤ベントナイトへの直接/間接接触) によるのか、水到達の時間差によるのかは現在のところ不明である。

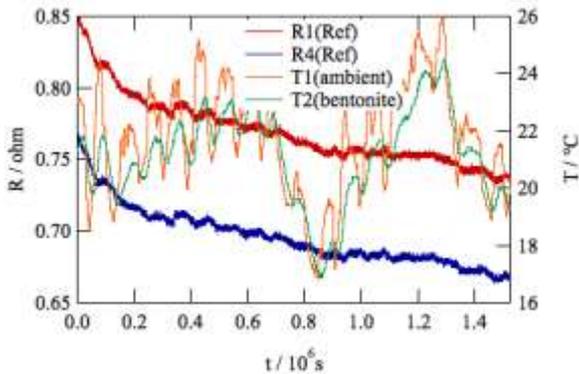


図 3.5.4-5 温度補償用鉄箔試料 (R1, R4) の電気抵抗 (R1, R4) および温度 (環境温度 T1, ベントナイト温度 T2) の経時変化

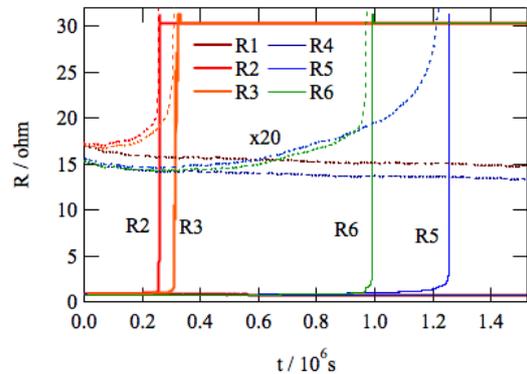


図 3.5.4-6 鉄箔試料 (R1~R6) の電気抵抗の経時変化 (破線は縦軸を 20 倍)

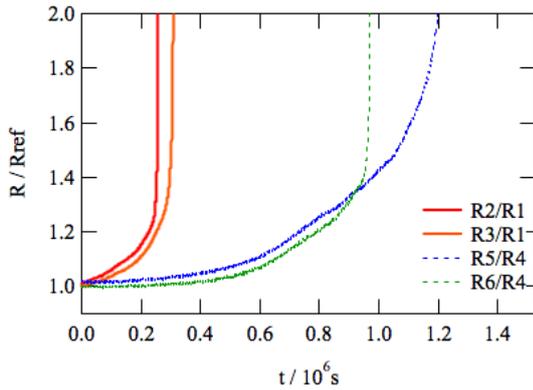


図 3.5.4-7 曝露鉄箔試料 (R2, R3, R5, R6) の相対抵抗の経時変化 (R2/R1, R3/R1, R5/R4, R6/R4)

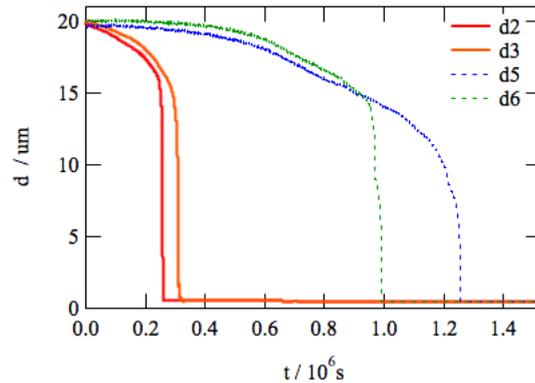


図 3.5.4-8 抵抗変化から計算した鉄箔試料厚さの経時変化

4) インピーダンスの経時変化

ワンチップインピーダンスアナライザ AD5933 を使用してのインピーダンス計測は、試行錯誤段階である。図 3.5.4-9 に、2つの曝露試料間 (R2-R3, R5-R6) の2電極インピーダンス (Z_{2-3} , P_{2-3} , Z_{5-6} , P_{5-6}) の計測結果を示す。印加交流電圧は 10 mV、計測周波数は 5 kHz、1 kHz、100 Hz の3点とし、各点で 10 回計測し平均化した。本来であれば、分極抵抗が顕在化する低い周波数に設定すべきだが、チップへ入力するマスタークロック (MCL) と計測可能周波数の間には一定の制限があり、広い周波数範囲で計測するためには回路を工夫する (MCL を可変とする) 必要がある。また計測されたインピーダンスの値が下限で底打ちしているのは、AD5933 のアナログ信号入力のダイナミックレンジが小さく、電極系のインピーダンスが測定下限以下となったためである。AD5933 のアナログ入力分解能は 12bit (4096) であり、波形解析を考慮すると実質 3桁以下の分解能しかない。これに対して一般的な電気化学系のインピーダンスは 5桁程度変動するため、入力部の増幅率を変えるなどダイナミックレンジを拡大するためのコンディショニング回路/プログラム構成の見直しが必要である。これらの制限を考慮した上で、ここで得られたインピーダンスの計測結果について以下の考察を行った。

Z_{2-3} と Z_{5-6} で挙動が異なり、 Z_{2-3} では 10Ms 以降でインピーダンスが増加している。試験後の R2, R3 では金属部がほとんど消失し、かつ表面はほとんどの表面は腐食生成物で被覆されていた。このため端子付近にわずかに残留した金属部分を通してインピーダンスが計測されることになり、また端子付近のベントナイトは乾燥気味であったことから、結果的にインピーダンスが大きくなったと推定される。これに対して Z_{5-6} では、金属光沢部分がかなり残っていることから、電荷移動抵抗がかなり小さく、上述のとおり計測下限以下の抵抗値を維持したと考えられる。

インピーダンス計測はレジストメトリーと異なり、試料断線降でも電極面積がある限り計測は可能であることから、レジストメトリーとインピーダンス応答を併用することで、腐食に関する相補的な情報が得られることが確認できた。

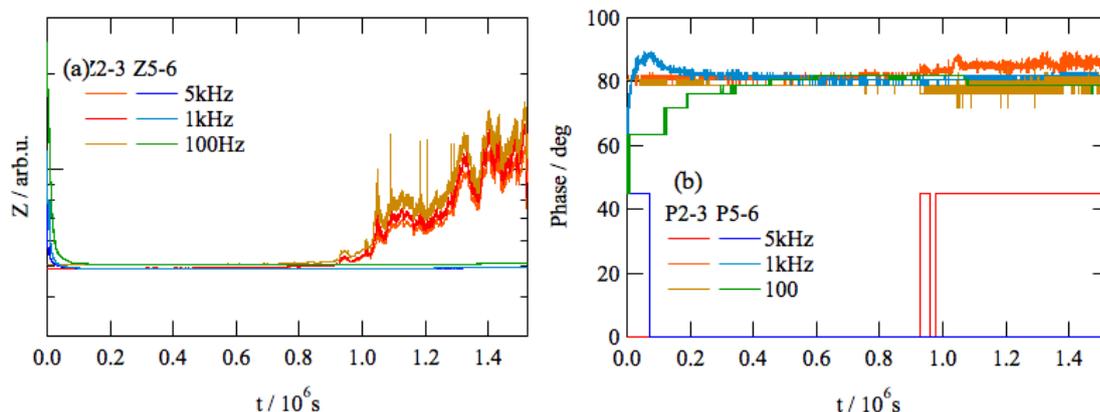


図 3.5.4-9 2 電極間の(a)インピーダンスおよび(b)位相の経時変化

5) カップリング電流の経時変化

図 3.5.4-10 に 2 つの曝露試料間 (R2-R3、R5-R6) の 2 電極カップリング電流 (i_{CP2-3} 、 i_{CP5-6}) の計測結果を示す。インピーダンスと同様、断線後も腐食反応に関与するカップリング電流が断線箇所以外で流れている。 i_{CP2-3} では腐食速度が大きくまた表面が腐食生成物で被覆されているため、カップリング電流は比較的小さいと推定される。これに対して i_{CP56} では、10 ks 付近でカップリング電流極性が反転した。図 3.5.4-8 の結果より、この付近で R6 が断線することで R5、R6 の電極面積比 (あるいは優勢な電極面の場所) が変わり電流分担状況が変化すると推定される。カップリング電流法では、腐食試料の場所 (環境) の違いによるアノード/カソード分担状況の違いが把握できるので、試料を深さ方向に配置すると、表層からの酸素供給速度の違い等によって分担状況がより顕在化すると推定される。

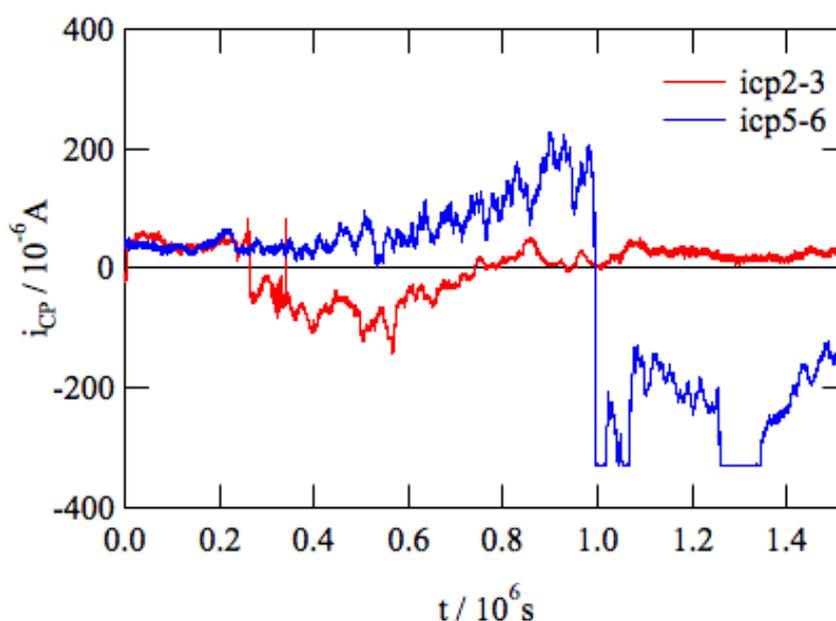


図 3.5.4-10 2 電極間のカップリング電流の経時変化

6) 開回路電位の経時変化

本系では各曝露電極の開回路電位 (E_{ocp}) も計測したが、記録された値は常にオーバーフローを示していた。試験後のセル解体において水が参照電極先端に到達していたようなので、電極自体に不具合があったと判断される。

(4) 結論

- ① 複数の曝露試料に対し、レジストメトリーによる腐食損失定量評価、インピーダンス、カップリング電流、浸漬電位計測による腐食状況を把握するほか、温度および溶存酸素濃度を計測する総合的な計測系を低コストで構築した。各計測項目に関して計測条件の調整や改善の必要は残っているが、概ね想定した機能を達成することができた。
- ② 試験セル内部を窒素ガスでパージして密閉したにもかかわらず、溶存酸素濃度が大気開放と同様な値となり、結果的に SPCC 薄膜試料の腐食が急速に進行し断線した。酸素は事前に大気中で膨潤させたベントナイトから供給されたと推定された。
- ③ 腐食速度は、膨潤ベントナイトに直接接触していた試料の方が、フィルタ紙を通して間接的に接していた試料よりも大きかった。試験後の膨潤ベントナイト直接接触試料表面はほとんど赤錆で覆われていたのに対し、フィルタ紙被覆試料は金属光沢を維持しており、溶出した鉄イオンが試料表面に蓄積せず膨潤ベントナイト側に移行して赤錆を形成していた。インピーダンスおよびカップリング電流には、各試料の腐食挙動の経時変化や曝露条件の違いによる腐食挙動の差が反映した。

(5) 同一環境下での試験

薄膜レジストメトリー用の薄膜センサーの仕様を図 3.5.4-11 (a)に示す。このセンサーに、(b)に示す処置を行った後、アクリル板に張り付け、図 3.5.2-1 に示す容器に設置し、所定の結線を行った。

薄膜レジストメトリーによる計測結果の出力状況の測定項目のうち、

- (1) 6つの薄膜試料 (R1~R6) の電気抵抗 (レジストメトリー)
- (2) 4つの曝露試料 (R2, R3, R5, R6) の浸漬電位 E_{ocp}
- (3) 2つの曝露試料間 (R2-R3, R5-R6) のカップリング電流 i_{CP2-3} , i_{CP5-6}
- (4) 2つの曝露試料間 (R2-R3, R5-R6) のインピーダンス Z_{2-3} , Z_{5-6} および位相 P_{2-3} ,

P5-6

- (5) 環境温度 T1 およびセル内膨潤ベントナイトの温度 T2

の監視画面を図 3.5.4-12 (b)に、図 3.5.4-12 (c)~(j)に温度、溶存酸素濃度、浸漬電位、電気抵抗 (レジストメトリー)、インピーダンス、および、短絡電流の経時変化を示す。

温度、および、溶存酸素濃度は、試験期間中を通じて、ほぼ安定していた。すなわち、溶存酸素濃度は大気平衡のままで、低減傾向は認められなかった。電気抵抗などは4対の試験片でそれぞれ、83.0(83.6)、183.3(263.5)、246.3(257.7)、295.0(309.3)hr でイベント (()内に終了時間)

が認められ、各イベント時間は、0.6、80.2、11.4、14.3h であった、このイベント時間で腐食が発生して膜厚 $50\mu\text{m}$ のセンサーを貫通するまでに要した時間と仮定すると、730、5.5、38、31mm/y と計算される。一方、インピーダンス測定では、55.6、250h 頃に、短絡電流ではその 1 対に 208(269)h に状況の変化が認められている。

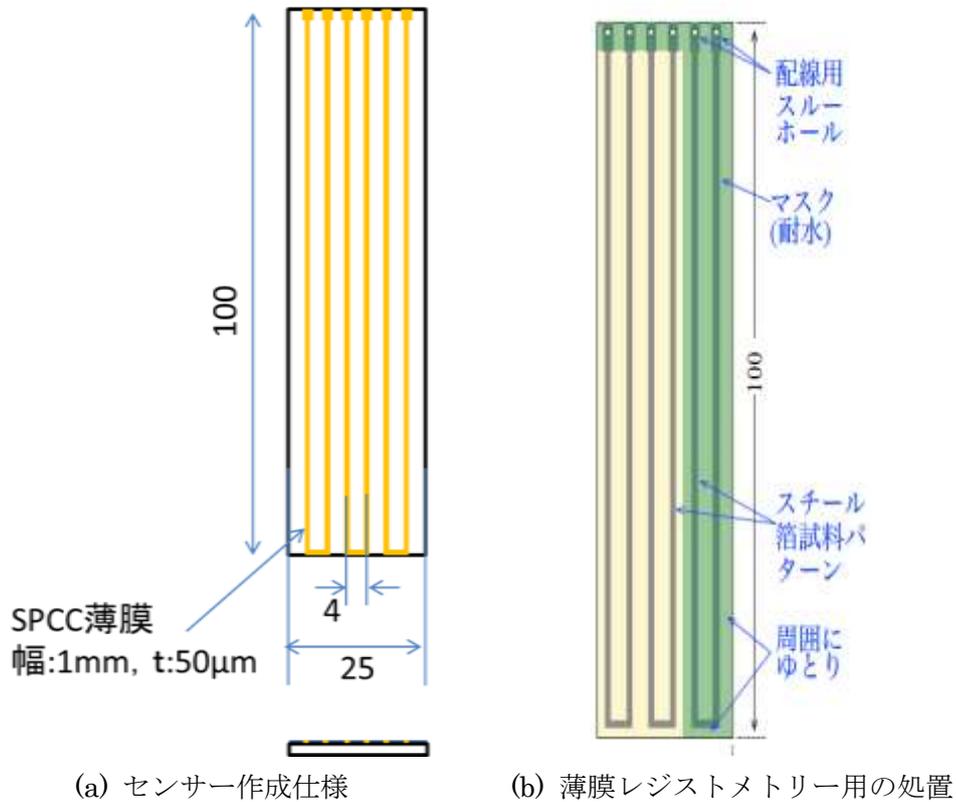


図 3.5.4-11 薄膜型センサー

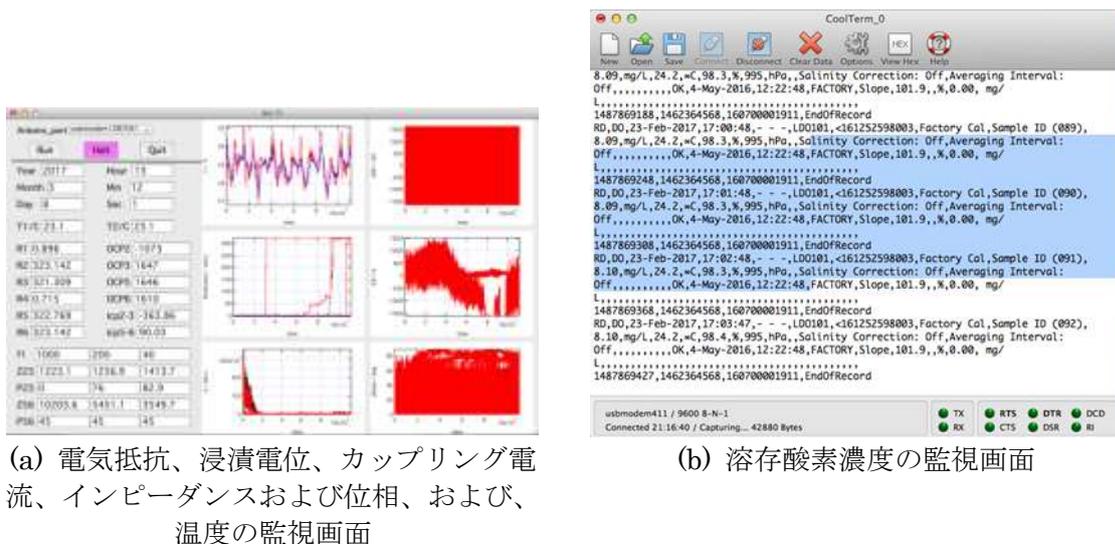
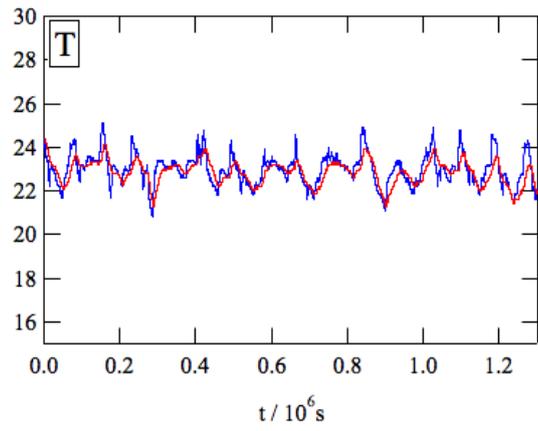
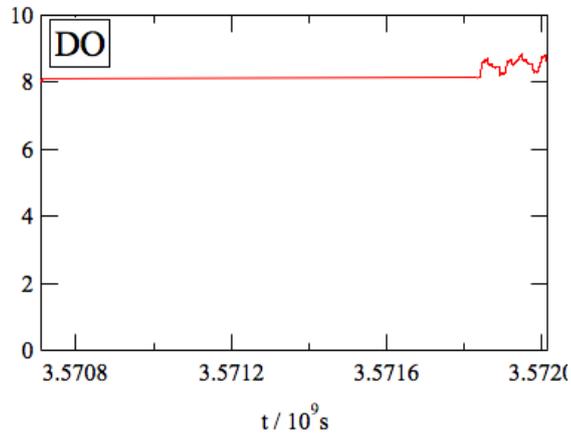


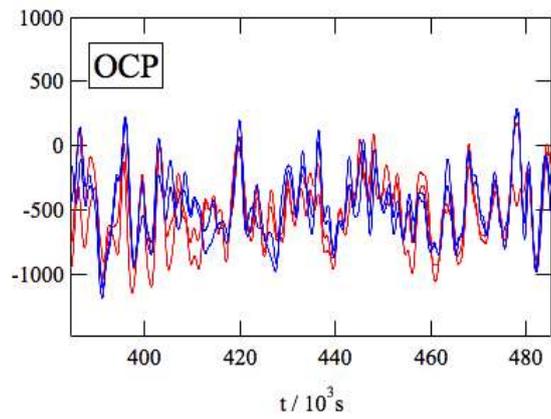
図 3.5.4-12 薄膜レジストメトリーによる計測結果(1/4)



(c) 温度の経時変化

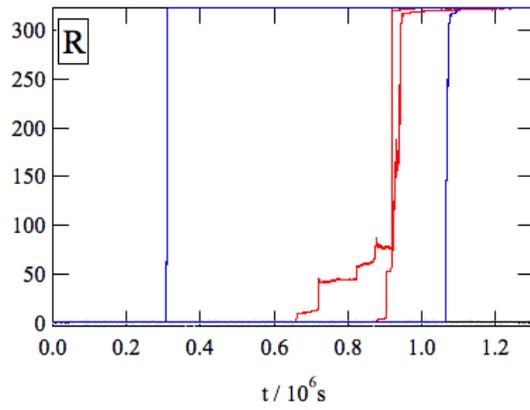


(d) DO の経時変化

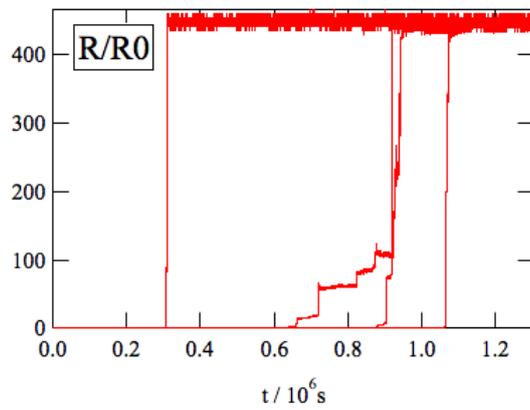


(e) 電位(OCP)の経時変化

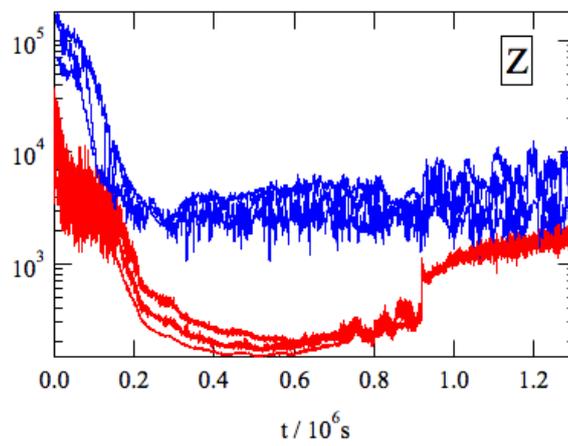
図 3.5.4-13 薄膜レジストメトリーによる計測結果(2/4)



(f) 電気抵抗 R の経時変化

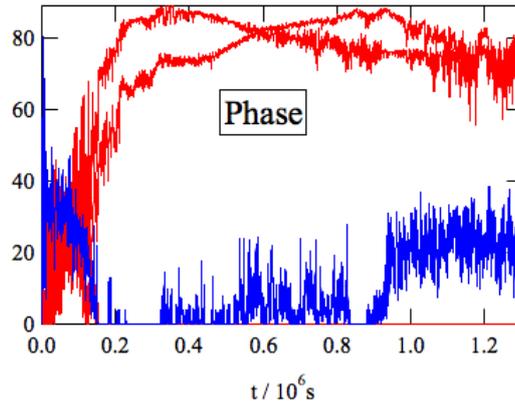


(g) 電気抵抗比(R/R0)の経時変化

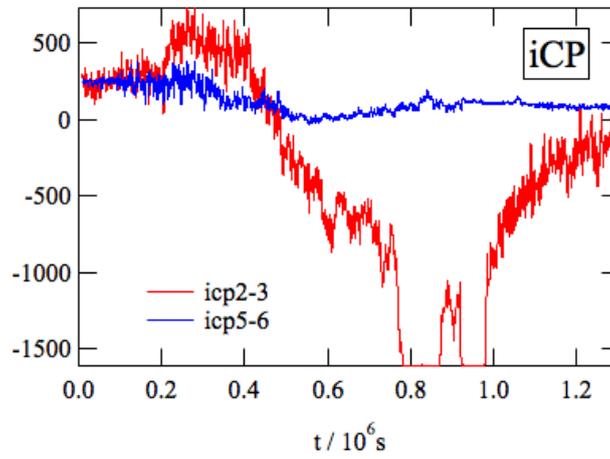


(e)インピーダンス(Z)の経時変化

図 3.5.4-14 薄膜レジストメトリーによる計測結果(3/4)



(f) インピーダンス(Phase)の経時変化



(g) カップリング電流(iCP)の経時変化

図 3.5.4-15 薄膜レジストメトリーによる計測結果(4/4)

3.5.5 電気抵抗/ポテンシャルドロップ法

(1) 地層処分環境と炭素鋼の腐食モード

腐食の観点から炭素鋼オーバーパックの長期健全性を考える際に重要となるのが、埋設初期の酸化性期間において炭素鋼が不動態化するか否かである。炭素鋼が不動態化する場合には、局部腐食の発生・進展により炭素鋼オーバーパックが期待された寿命を達成せずに短期間で破損する可能性が生じる(図 3.5.5-1)。第2次とりまとめによると、日本における地下水条件に対し緩衝材である圧縮ベントナイト中で炭素鋼は全面腐食の形態をとるとされている。しかし第2次とりまとめ以降、以下に示すケースでは炭素鋼が不動態化し、塩化物イオン等の環境条件によっては局部腐食が生起することで炭素鋼オーバーパックが短期破損に到る可能性が懸念されている[4]。

① ニアフィールド環境が想定以上に高 pH 化するケース

支保工建設の際に使用が検討されている低アルカリ性コンクリートが実際の施工においては部分的な使用に留まる可能性がある[5]ことや、湧水対策として地盤固化剤が使用されることで、地下水の pH が最大で 13 程度の強アルカリ化する可能性がある[7]。

② 地下水が十分に緩衝されないまま炭素鋼オーバーパックに接触するケース

緩衝材である圧縮ベントナイトブロックのすき間等が地下水の浸潤において短絡経路となり、十分な緩衝を受けていない高 pH な地下水がオーバーパックに接触する可能性がある[8]。

さらに、地下水中の炭酸塩濃度が高くなると、ベントナイトによる pH 緩衝効果が及びにくくなると共に、炭素鋼が不動態化する臨界 pH が低下し、炭素鋼が不動態化する pH 領域が広がることも報告されている[9]。したがって、礒崎による先行研究において、これらのシナリオを考慮した場合の炭素鋼の腐食モードの実験的検討が行われた[4]。その結果、表 3.5.5-1 に示した知見が得られ、塩化物イオン濃度等の環境条件によっては局部腐食が生起する可能性を考慮すべきであるとされている。

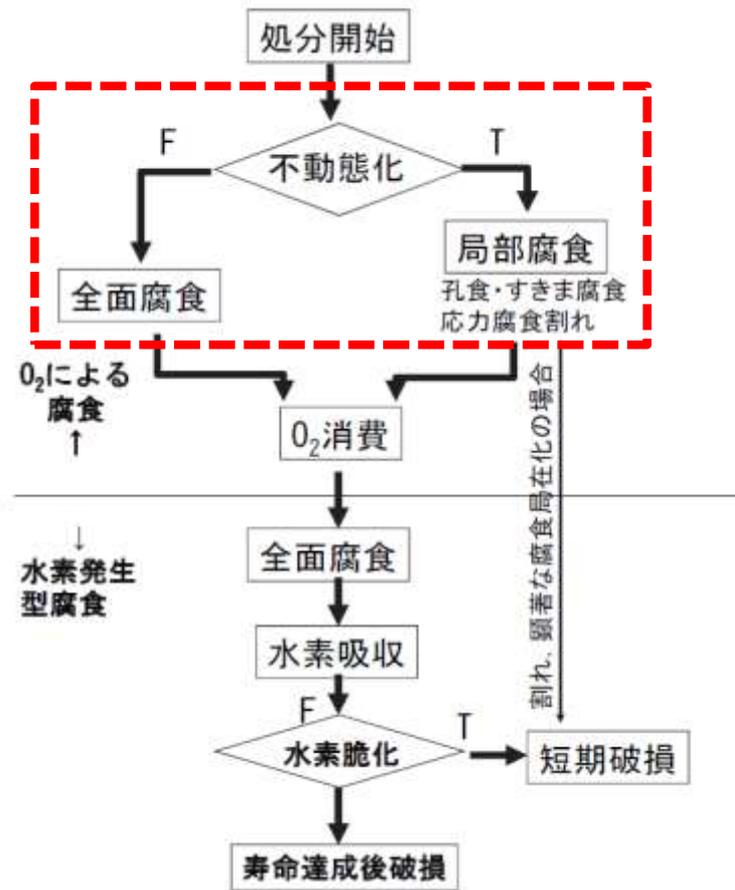


図 3.5.5-1 炭素鋼オーバーパックに生じうる腐食モードとその因果時系列[10]

表 3.5.5-1 地層処分環境における炭素鋼の腐食挙動

炭酸塩濃度[mol/L]	ニアフィールド環境が想定以上に高 pH 化するケース	地下水が十分に緩衝されないまま炭素鋼オーバーパックに接触するケース
0.1	不動態化する可能性は排除すべきではない	不動態化する可能性は排除すべきではない
0.01		
0		全面腐食

(2) オーバーパックの腐食モニタリング手法

後藤による先行研究において、直流電位差法(Direct-Current Potential Drop Method、DCPD 法)を用いた腐食モニタリング手法の適用性検討が行われており、DCPD 法により丸棒の減肉モニタリングが可能であることや DCPD 法と電気化学的腐食試験を併用し腐食をモニタリングすることが可能であることが確認されている[11]。さらに碓崎は、地層処分環境化において炭素鋼が不動態化する可能性を排除すべきではないという結果を受けて、平均腐食速度と最大腐食速度の両方を測定可能なモニタリング手法を提案している。

1) 直流電位差法(DCPD 法)の原理

直流電位差法は CT 試験片を用いた引張疲労試験において、き裂進展をモニタリングする手法として実用化されており、(1)式のオームの法則に基づいた手法である。

$$V = RI = \rho \frac{L}{A} \times I \cdots (1)$$

抵抗率 ρ 、長さ L の物体に電流 I を流すと、電流通過部両端の電位差 V は電流の通過断面積 A の変化に伴い変化する。したがって、電流通過部が腐食により減肉する際の電位差の変化を測定することで腐食量を求めることが出来る(図 3.5.5-2)。

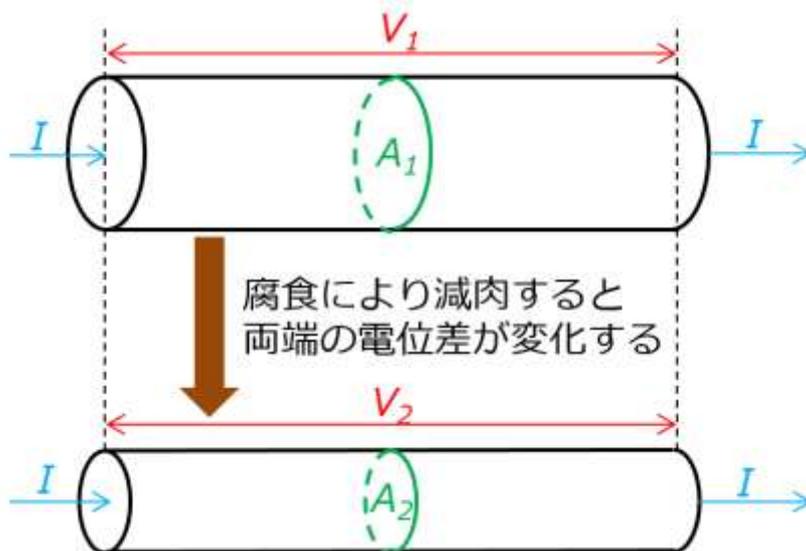


図 3.5.5-2 DCPD 法による腐食モニタリング概要

2) 平均腐食速度 CR_{ave} 及び最大腐食速度 CR_{max} の算出方法

実規模試験において平均腐食速度と最大腐食速度の両方を測定する手法として、模擬オーバーパックを直接モニタリングするのではなく、複数個のワイヤー状の試験片を模擬オーバーパックと共に埋設しモニタリングに使用する手法が提案されている。

この手法において、DCPD 法による腐食モニタリングから得られる情報は試験片の腐食に伴う電位差の変化と破断寿命である。破断寿命は電位差が無限大になり測定不能となることで判明する。

温度による抵抗率の変化を考慮したオームの法則はモニタリング試験片の断面形状により次の(2)、(3)式のように表される。

- ・試験片断面が半径 r の円の場合

$$V_t = \rho_T \{1 + \alpha(T_t - T)\} \frac{L}{\pi r_t^2} I \dots (2)$$

- ・試験片断面が幅 W 、厚さ D の長方形の場合

$$V_t = \rho_T \{1 + \alpha(T_t - T)\} \frac{L}{WD_t} I \dots (3)$$

t : 測定時間 V_t : 時刻 t における検出電位差 ρ_T : 温度 T における抵抗率
 α : 温度係数 T_t : 時刻 t における温度 r_t : 時刻 t における試験片半径
 D_t : 時刻 t における試験片厚さ

本試験では、(2)、(3)式における抵抗率 ρ は 20°C における文献値 $1.3 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ を用い、温度係数 α は 20°C と 200°C の抵抗率の文献値より算出した 3.88×10^{-3} を用いる [11]。

(2)、(3)式をもとに測定電位差 V_t よりその時刻の r_t や D_t が求められる。センサー試験片が均一に腐食する場合はこれらの経時変化のグラフの傾きが平均腐食速度 CR_{ave} となる。一方、セ

センサーに不均一/局部腐食が生じている場合は、センサーの破断を検知することでその破断寿命が得られ、初期半径や初期厚さを破断寿命で除することで最大腐食速度 CR_{max} を得る。

図 3.5.5-3 に $\phi 0.1\text{mm}$ 、長さ 200mm のワイヤー試験片の腐食の様子を 2 パターン仮定したものを示す。図 3.5.5-3 において、 $CR_{max} = 10CR = 15\text{mm/y}$ と仮定した場合の DCPD モニタリング測定の実験値を図 3.5.5-4 に示す。さらに、(2)式をもとに図 3.5.5-4 のグラフから算出した n の経時変化を図 3.5.5-5 に示す。実際の試験においてワイヤー試験片の腐食に不均一/局所性が存在する可能性を考慮すると、実際に得られる DCPD モニタリング結果は図 3.5.5-4 や図 3.5.5-5 中のパターン II のグラフと同様になる可能性が考えられる。したがって、本研究においてパターン II と同様のグラフが得られた場合には、図 3.5.5-5 中の測定期間初期のグラフの直線部分の傾きを CR_{ave} とする。

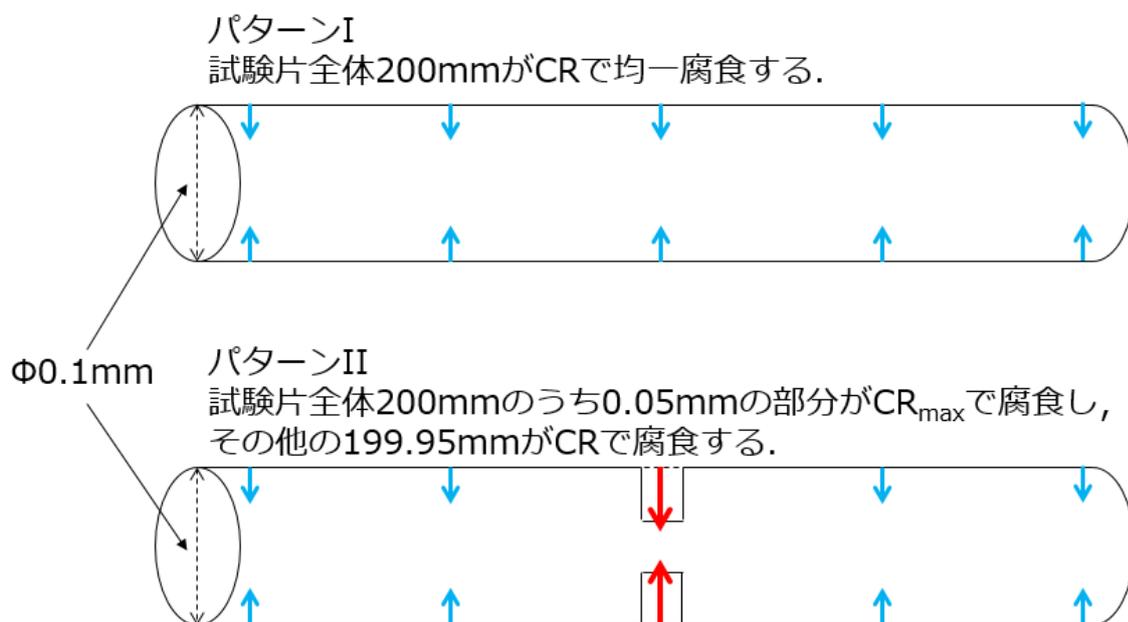


図 3.5.5-3 腐食パターンの仮定

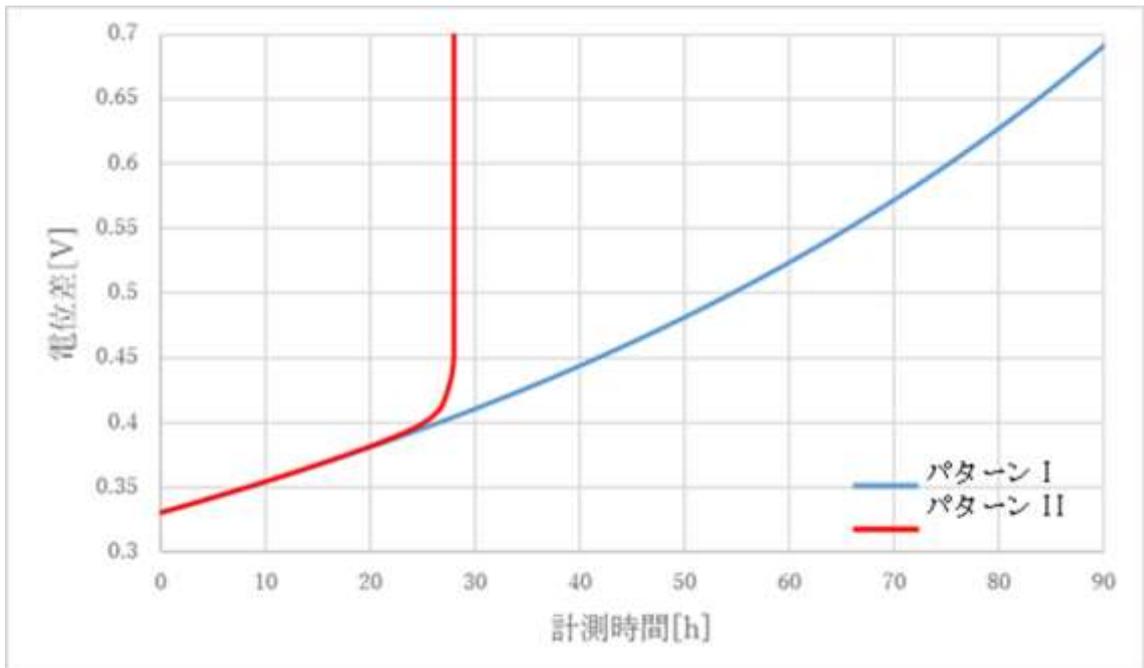


図 3.5.5-4 図 3.5.5-3 の腐食パターンにおいて DCPD 法で得られる電位差の理論値

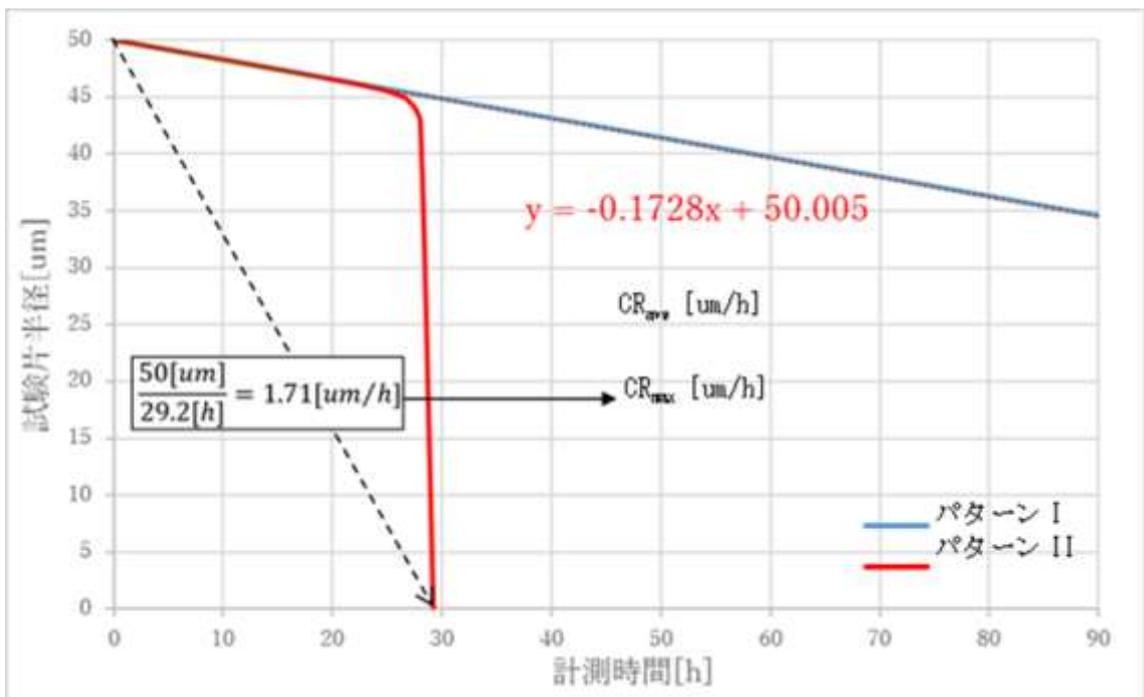


図 3.5.5-5 図 3.5.5-4 より算出した半径による CR_{ave} と CR_{max} の算出方法

3) 実規模試験における DCPD モニタリングの適用コンセプト

実規模試験においては、線径の異なるワイヤー試験片を複数用意し模擬オーバーパックと共に埋設しモニタリングを行う。埋設した各ワイヤー試験片は線径の小さいものから順に破断していく。モニタリング例を図 3.5.5-6 に示す。本コンセプトでは、まず最も線径の小さい試験片 A が破断し、このモニタリング結果より試験片 A による CR_{ave} と CR_{max} が求められる。その後、試験片 B、C と線径の小さい順に破断していく度に同様に CR_{ave} と CR_{max} を算出していくことで数年程度のモニタリングを継続して実施する。

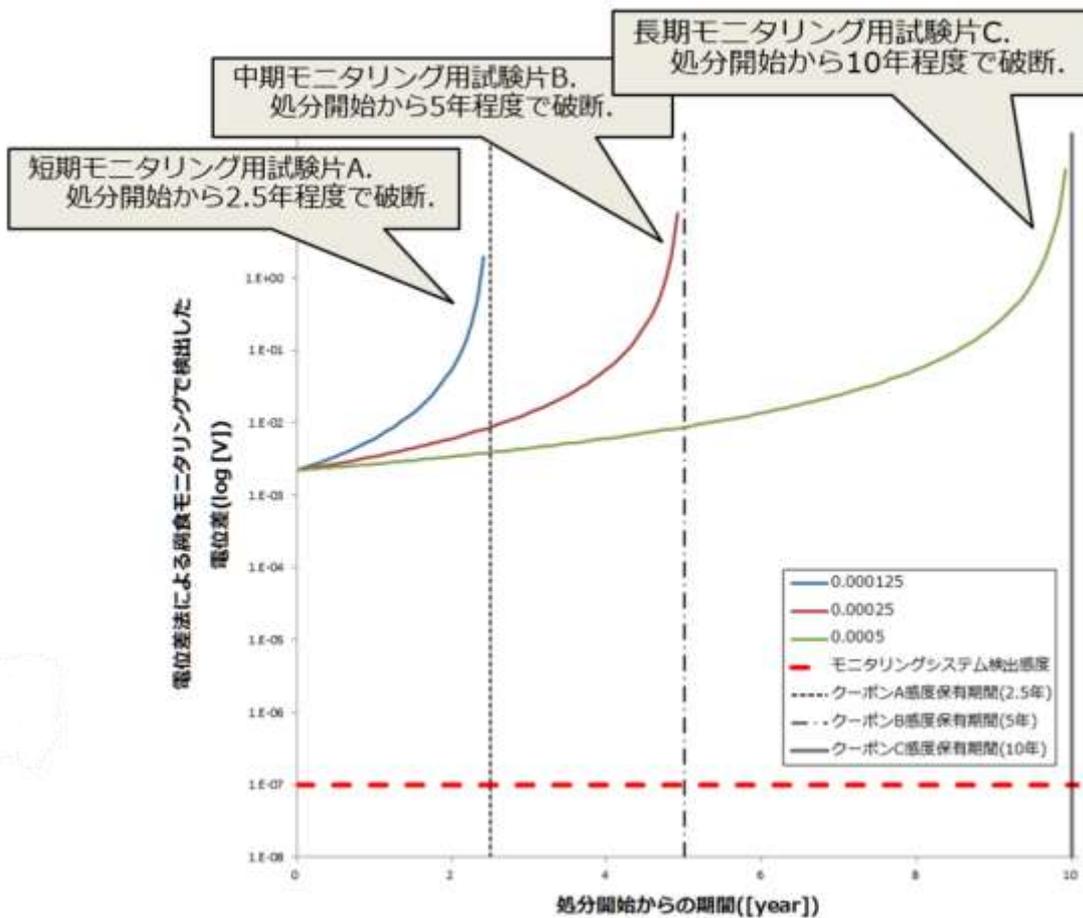


図 3.5.5-6 複数の線径の試験片による DCPD モニタリング例

(3) 本研究の目的及び方針

前項で述べた炭素鋼の腐食モニタリング手法は、現段階では提案のみに留まり、実際の適用性については未検討であるため、実規模試験において炭素鋼の腐食モニタリング手法として確立させるには、実験的な適用性の検討が必要である。そこで本研究では以下の 2 つの系で腐食モニタリング試験を行い、実際の腐食挙動が DCPD モニタリング結果にどのように現れているのかを明らかにすることを目的とした。

- ・ 純 Fe ワイヤを模擬地下水中に浸漬し、温度、pH、ならびに線径をパラメータとした腐食試験を実施してワイヤの減肉を DCPD 法によりモニタリングした。

- ・ オーバーパックの埋設環境を模擬した試験セルを用いて、炭素鋼薄膜試験片の含水ベントナイト中における腐食試験を実施して、試験片の減肉を DCPD 法によりモニタリングした。

(4) 模擬地下水中におけるワイヤ試験片の腐食モニタリング

本試験では、以下の 3 つの条件をパラメータとして模擬地下水中で Fe ワイヤを腐食させ、それに伴うワイヤの減肉を DCPD 法によりモニタリングし、各試験条件における実際の腐食挙動とモニタリング結果を比較した。

I. 温度

温度の差異により腐食速度にも差異が生じると考えられる。

II. pH

脱不動態化 pH(後述)を境に腐食の不均一度合いに差が生じると考えられる。

III. ワイヤの線径

ワイヤの線径を変えても測定される腐食速度は変化しないと考えられる。

1) 試験装置及び試験片

試験片の概略図を図 3.5.5-7 に、作製した試験片の写真を図 3.5.5-8 に示す。試験片は表 3.5.5-2 示す化学組成のニラコ社製 Fe ワイヤを用い、ワイヤの両端に丸型端子を接続したものを使用した。また、試験片と DCPD 測定用回路のリード線は丸型端子同士のネジ止めにより接続し、接続部を絶縁塗料で被覆した。試験セルと DCPD 測定装置の概略図を図 3.5.5-9 に、試験セルの外観を図 3.5.5-10 に示す。DCPD 法を用いるにあたり、電流はケースレー・インストルメンツ社製 2400 型ソースメータを用いて印加し、電位差の測定には同社の 2182 型または 2182A/J 型ナノボルトメータを使用した。異種金属接続部に生じる熱起電力を補正するため、電流は±100mA を 30 秒毎に切替える矩形波として印加した。また、試験片以外の外部抵抗の影響を小さくするために 4 端子法により DCPD 測定用回路を構成した。

2) 試験条件及び試験方法

試験溶液には表 3.5.5-3 に示す組成の模擬地下水を用い、NaOH を加えることで pH を調整した。また、pH の設定値は図 3.5.5-11 を参考に脱不動態化 pH より高い pH10 と低い pH8(未調整)に決定した。温度は室温で 20℃に調節し、温度条件を変える際には恒温槽により試験セル

の温度を調整した。また、各試験において試験セル内の温度は K 型熱電対で測定し記録した。表 3.5.5-4 に実施した試験の試験条件を示す。

(5) 試験結果及び考察

前述の方法により算出した試験①～④の平均腐食速度 CR_{ave} と最大腐食速度 CR_{max} を表 3.5.5-5 に示す。 CR_{ave} の算出は後述する図 3.5.5-13、図 3.5.5-15、図 3.5.5-19 のグラフの太く表示した部分の近似直線の傾きより算出した。

1) 温度を試験パラメータとした DCPD モニタリング結果

図 3.5.5-12 に試験条件①と②の DCPD モニタリング結果を示す。また、図 3.5.5-13 に図 3.5.5-12 より算出した試験片半径の経時変化を示す。まず、(2)式からわかるように、DCPD 法で測定される電位差は試験片の抵抗率の温度依存性と腐食速度の温度依存性の 2 つの影響を受けて変化すると考えられる。そして図 3.5.5-12 では温度が高い②のほうが①よりも電位差が大きくなっていると共に電位差の上昇が急になっている。これは温度が高くなることで炭素鋼の抵抗率が大きくなるため電位差が大きくなり、同時に温度が高くなり腐食速度が大きくなる(表 3.5.5-5)ことで電位差の時間変化が急になったと考えられる。本試験では熱電対で測定した試験セル内の温度と電位差の測定値から試験片の半径を算出し、さらに腐食速度を算出した。したがって、実規模試験においても DCPD モニタリングとは別に地下の温度を測定し(2)式における抵抗率の温度依存性による影響を補正することで、温度の変化による腐食速度の変化を DCPD 法でモニタリングすることが可能であると考えられる。

2) pH を試験パラメータとした DCPD モニタリング結果

図 3.5.5-14 に試験条件①と③の DCPD モニタリング結果を、図 3.5.5-15 に図 3.5.5-14 より算出した試験片半径の経時変化を示す。また、図 3.5.5-16 と図 3.5.5-17 に①と③それぞれの試験後の試験片の観察画像を示す。pH10 の③は pH8 の①と比較すると初期の電位差の増加は緩やかだが、その後は③のほうが①よりも先に電位差が急激に増加し破断を検知していた。算出した腐食速度については、 CR_{ave} は①のほうが大きくなっていったが CR_{max} については③のほうが大きくなっており、③のほうが CR_{ave} と CR_{max} の差が大きくなっていった。したがって、①と比較して③では破断部が他の部分よりも急激に腐食したと考えられる。一方で試験後の試験片の表面観察では、①は破断部付近が比較的均一に減肉しているのが確認されたが、③では破断部付近が急峻に細くなっているのが確認でき、破断部付近においては DCPD モニタリング結果により推測された腐食挙動と同様の傾向が見られた。

3) 線径を試験パラメータとした DCPD モニタリング結果

図 3.5.5-18 に試験条件③と④の DCPD モニタリング結果を示す。また、図 3.5.5-19 に図 3.5.5-18 より算出した試験片半径の経時変化を示す。図 3.5.5-18 からわかるように試験片の線径が③の 2 倍である④は破断時間が約 13 倍となり、図 3.5.5-19 における近似直線の傾きは

0.36 倍となっていた。算出した CR_{ave} と CR_{max} は共に④のほうが小さくなっており、試験片の線径が大きくなると得られる腐食速度が小さくなった。この要因として、まず試験片の表面加工の影響の差異が考えられる。したがって、試験に用いたワイヤーの組織観察を行い表面加工の影響を調査する必要がある。また、試験に用いる前にワイヤーの表面の一定の厚さを塩酸等で除去して試験に用いるなどの表面の加工の影響を除去できる試験方法を考案する必要がある。また、他の要因として電流の印加に伴うジュール熱による試験片の温度変化の影響が考えられる。本試験では熱電対を用いて試験セル内の模擬地下水温度を測定したが、実際にはジュール熱によって試験片や、そのごく近傍の温度が高くなっていた可能性が考えられる。この場合、試験片の線径によって発熱量が異なるので実際の試験片の温度は線径により差が生じると考えられる。したがって、サーモグラフィを用いるなど試験時の試験片の温度をより正確に測定する必要がある。さらに、線径に合わせて印加電流を変え、発熱量を等しくした腐食モニタリング試験を行うことでジュール熱の影響を除去できるのではないかと考えられる。

(6) まとめ

- ① 温度が高くなると抵抗率の温度依存性により測定される電位差が大きくなり、腐食速度の温度依存性により時間に伴う電位差の上昇が急になる。したがって実規模試験においては、DCPD モニタリングとは別に地下の温度を実時間モニタリングして抵抗率の温度依存性の影響を補正することにより、DCPD モニタリングによる腐食速度の評価制度を向上させることが可能と考えられる。
- ② pH_a よりも pH が高い場合は試験片の破断部が急峻に細くなり、 pH_a よりも pH が低い場合の試験片の破断部は比較的均一に減肉していた。また、これら 2 つの場合について破断部付近の腐食挙動を観察した限りにおいては、腐食の局在化が顕著な場合のほうが、DCPD モニタリングにより求めた平均腐食速度 CR_{ave} と最大腐食速度 CR_{max} の差が大きくなっていった。しかし、試験後の試験片全体の腐食状況の観察を行うことで、腐食の不均一性を定量化し DCPD 測定の結果と比較する必要がある。
- ③ DCPD 測定結果から得られた平均腐食速度 CR_{ave} 及び最大腐食速度 CR_{max} は、使用した試験片の線径によって異なる値をとった。したがって、実規模試験において線径の異なる複数の試験片を用いたモニタリングを行うには線径により腐食速度が異なる要因を明らかにする必要がある。

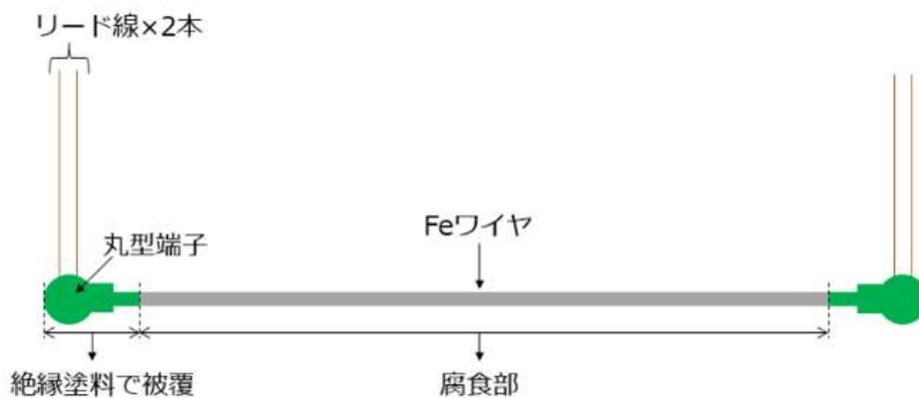


図 3.5.5-7 試験片の概略図

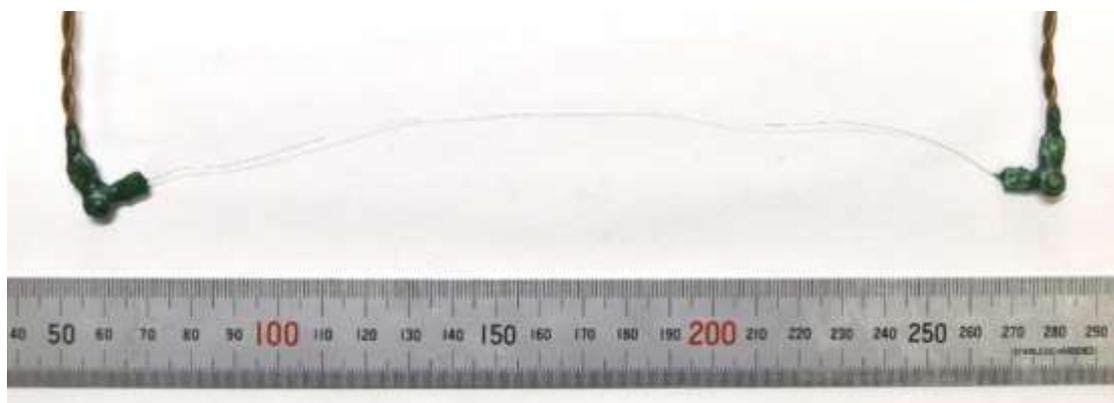


図 3.5.5-8 作成した試験片(φ0.1mm、長さ200mm)

表 3.5.5-2 Fe ワイヤの化学組成[wt%]

C	Al	Mn	P	S	Si	Fe
0.03	0.32	0.26	0.01	0.006	0.01	99.65

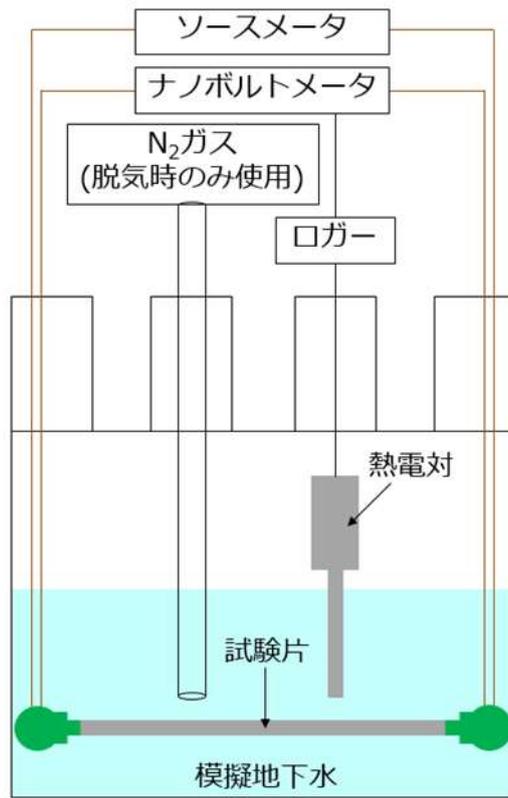


図 3.5.5-9 試験セルと DCPD 測定装置



図 3.5.5-10 試験セル外観

表 3.5.5-3 模擬地下水組成[ppm]

NaCl	NaHCO ₃	CaCl ₂	KCl	MgCl ₂	H ₃ BO ₃
5200	3000	180	230	190	410

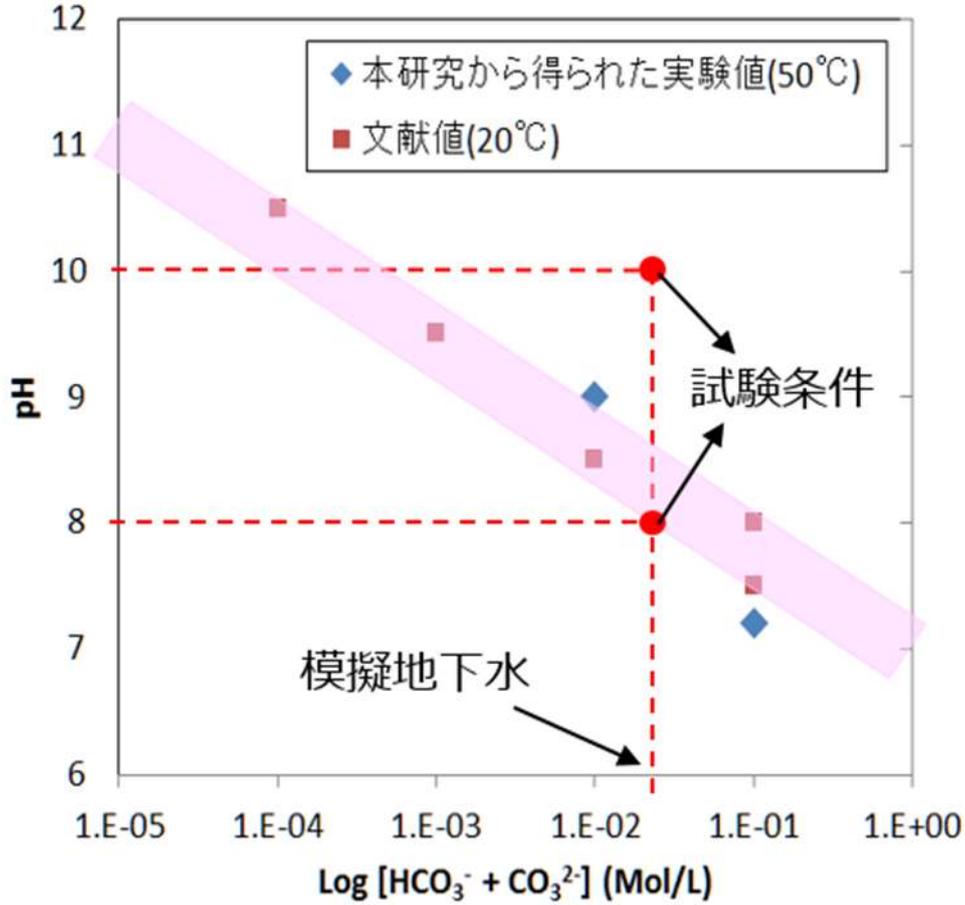


図 3.5.5-11 脱不動態化 pH(pHd)の炭酸イオン濃度依存性と腐食モニタリング試験条件の選定 [3]

表 3.5.5-4 腐食モニタリング試験条件

	試験片寸法[mm]		設定温度[°C]	pH		DO の条件
	半径	長さ		設定値	実測値	
①	0.1	200	20	8	8.11	大気開放
②	0.1	200	60	8	8.11	大気開放
③	0.1	200	20	10	9.97	大気開放
④	0.2	200	20	10	9.97	大気開放

表 3.5.5-5 CR_{ave} と CR_{max} の算出結果[mm/y]

	①	②	③	④
CR _{ave}	1.43	4.63	0.661	0.237
CR _{max}	17.9	97.9	63.2	9.64

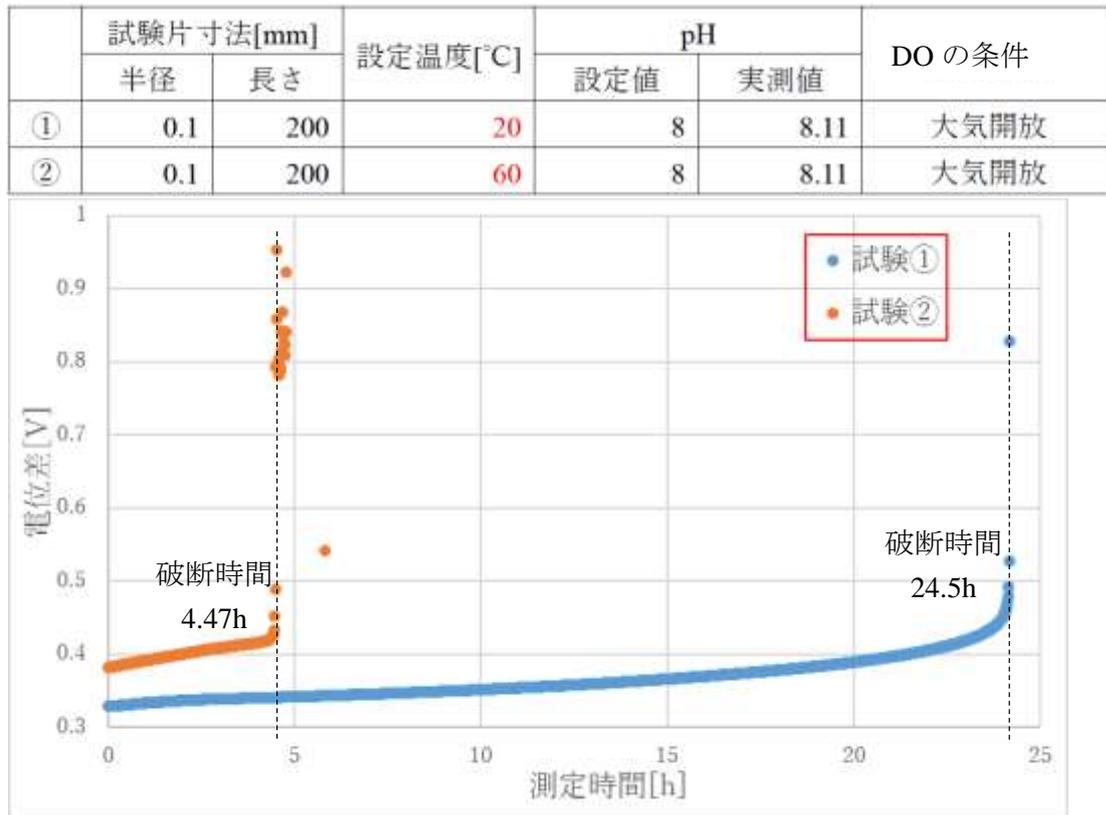


図 3.5.5-12 試験①と②の DCPD 測定結果

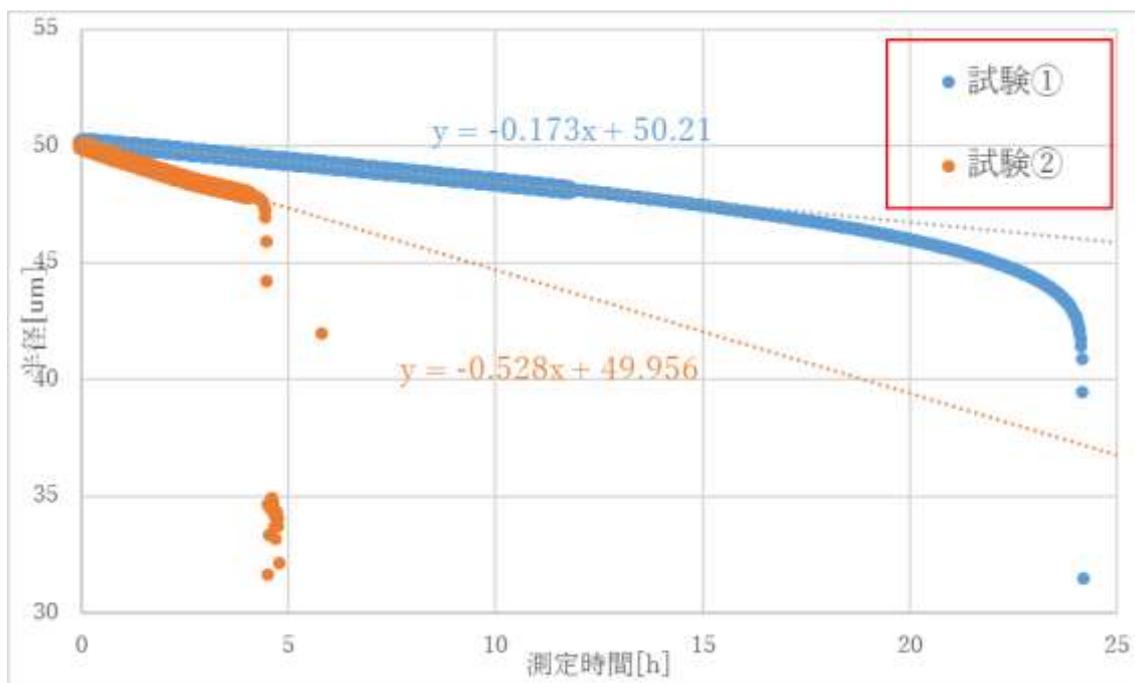


図 3.5.5-13 試験①と②の DCPD 測定結果より算出した試験片半径

	試験片寸法[mm]		設定温度[°C]	pH		DO の条件
	半径	長さ		設定値	実測値	
①	0.1	200	20	8	8.11	大気開放
③	0.1	200	20	10	9.97	大気開放

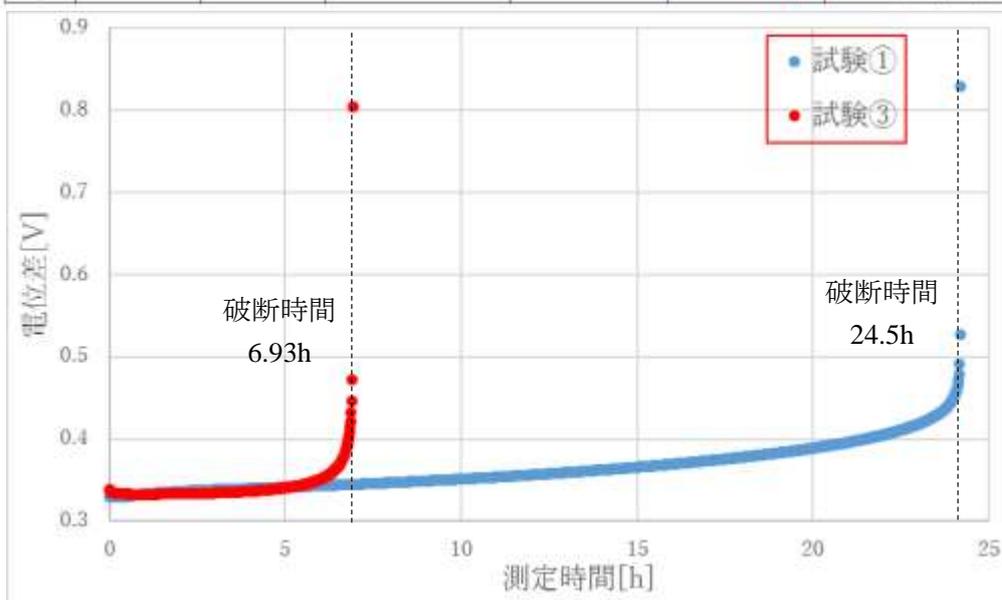


図 3.5.5-14 試験条件①と③の DCPD 測定結果

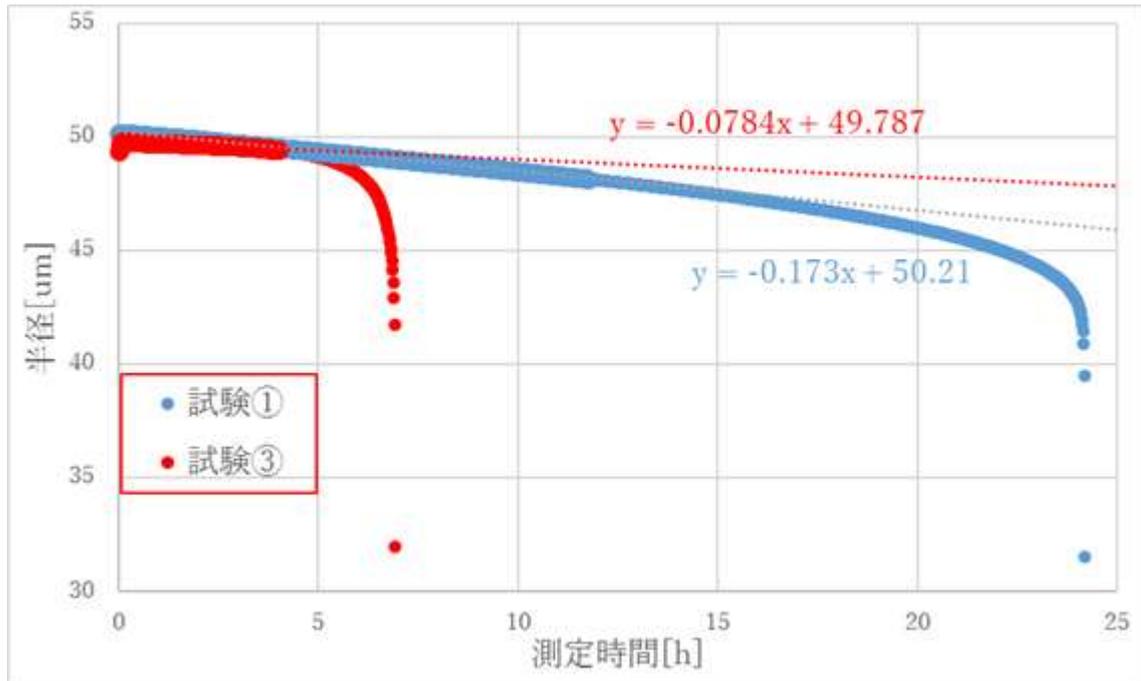


図 3.5.5-15 試験①と③の DCPD 測定結果より算出した試験片半径

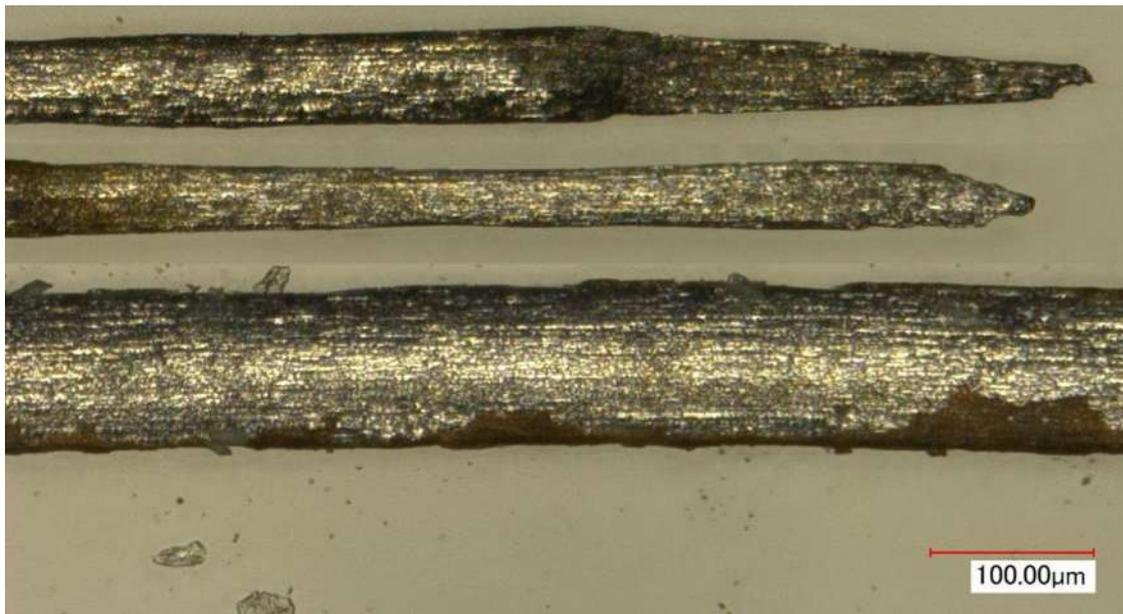


図 3.5.5-16 試験①の試験後試験片
(上)破断部 1 (中)破断部 2 (下)非破断部

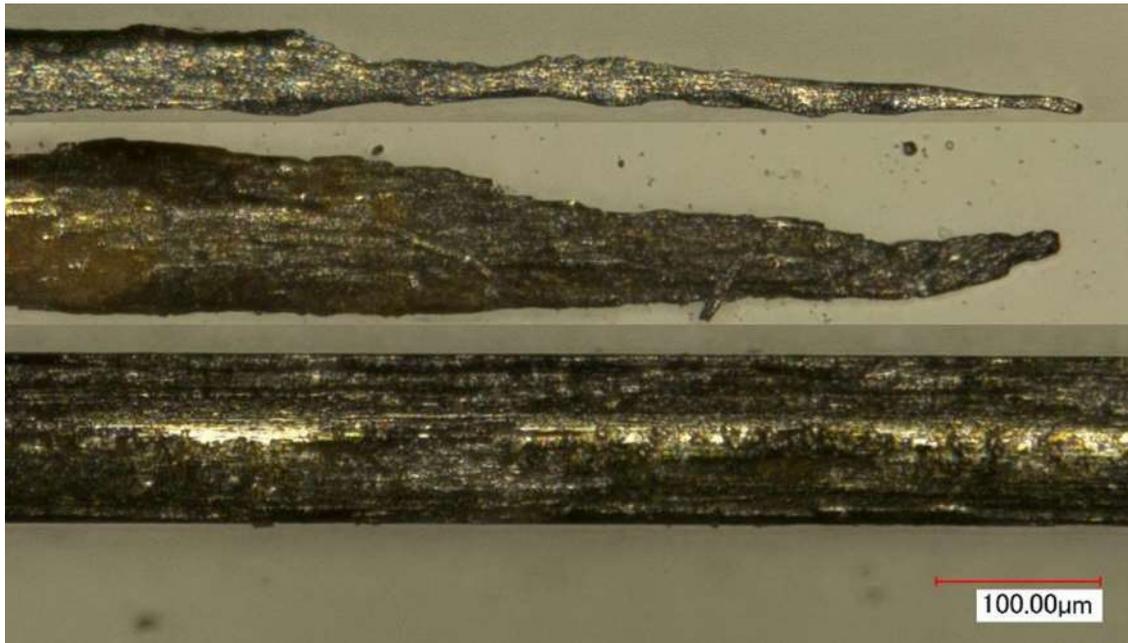


図 3.5.5-17 試験③の試験後試験片
(上)破断部 1 (中)破断部 2 (下)非破断部

	試験片寸法[mm]		設定温度[°C]	pH		DO の条件
	半径	長さ		設定値	実測値	
③	0.1	200	20	10	9.97	大気開放
④	0.2	200	20	10	9.97	大気開放

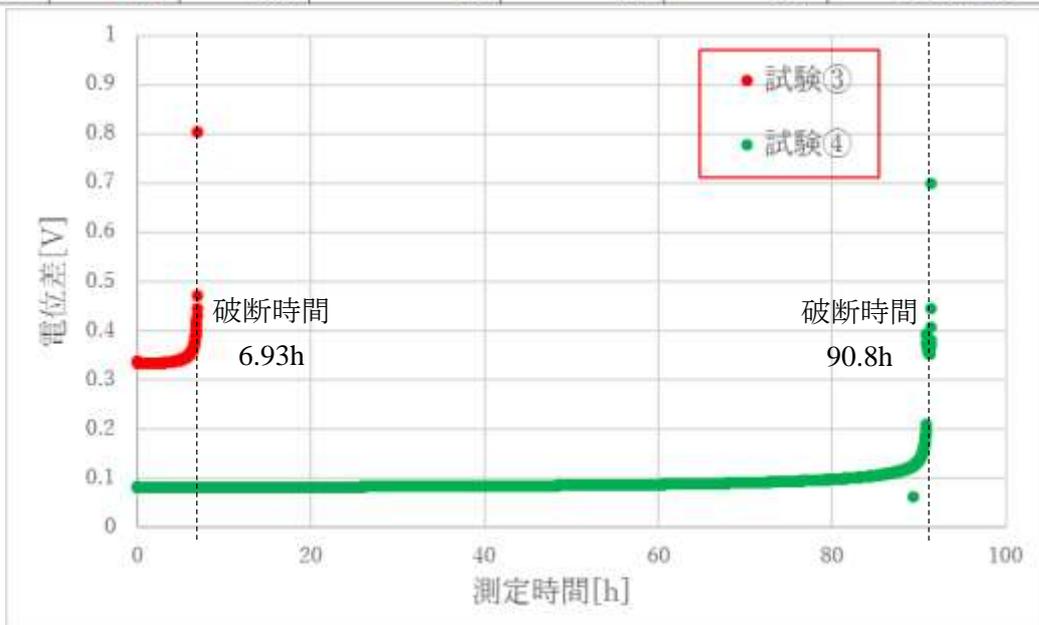


図 3.5.5-18 試験条件③と④の DCPD 測定結果

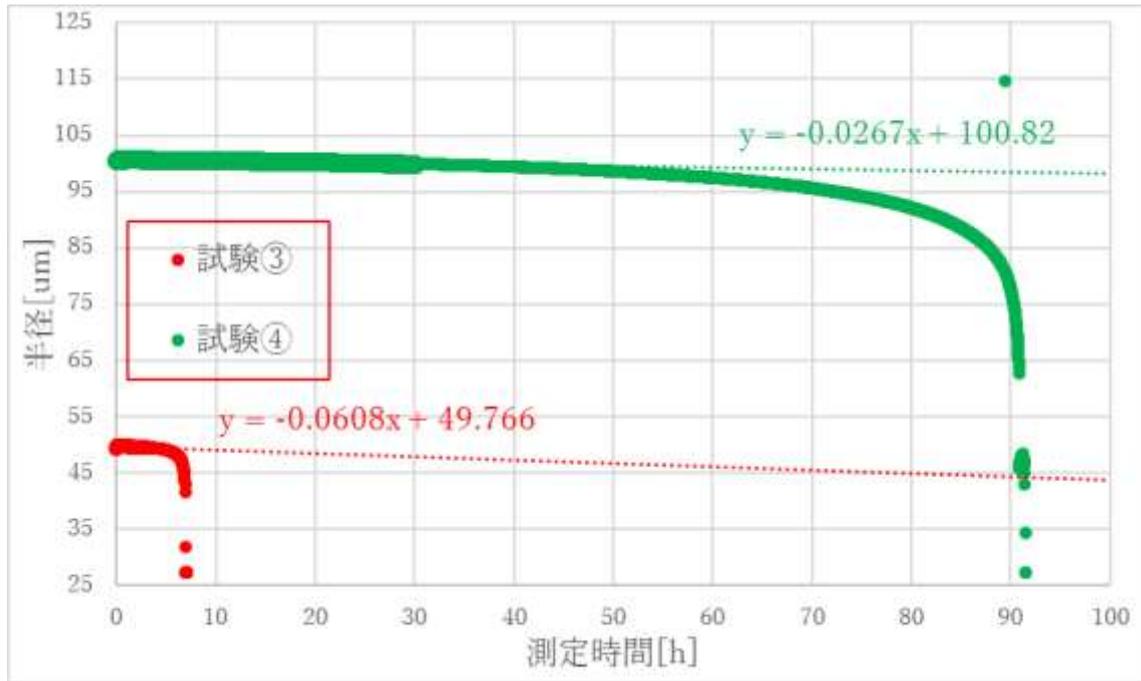


図 3.5.5-19 試験③と④の DCPD 測定結果より算出した試験片半径

(7) ベントナイト中における炭素鋼薄膜センサーの腐食モニタリング

本試験ではオーバーパックの埋設環境を模擬した試験セルにおいて炭素鋼薄膜センサーを腐食させ、それに伴う減肉を DCPD 法によりモニタリングし、実際の腐食挙動と DCPD 法によるモニタリング結果を比較した。

1) 試験セル

図 3.5.5-20 に示すようにオーバーパック(図中の OP)はその周辺にベントナイト層を設けさらにその周囲に珪砂層が設けてある。オーバーパック周辺は地下水が流入しており、オーバーパック表面は珪砂層・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。本試験で用いる試験セルは図 3.5.5-20 中の点線部分のオーバーパック表面からベントナイト層・珪砂層を模擬したものである。試験セルの概略図を図 3.5.5-21 に示す。試験セル内の珪砂層に模擬地下水を注水し、模擬地下水はベントナイト層を通じてアクリル板に至る。厚さ 10mm のアクリル板表面に腐食モニタリングセンサを取付けることでオーバーパック表面のモニタリングを模擬する。

2) 炭素鋼薄膜センサー及び樹脂埋め試験片

図 3.5.5-22 に炭素鋼薄膜センサーの概略図及び写真を示す。本センサーは炭素鋼(SPCC)薄膜の経路が樹脂基盤に埋まっており、センサー表面は平滑になっている。また、炭素鋼経路は幅 1mm、厚さ 0.05mm であり、リード線取付け部の被覆部を除いて長さ 193mm である。1 枚の基盤に 3 本の炭素鋼経路を作成しており、経路の各端部には 2 本のリード線がはんだ付けに

より接続されている。また、1 回目の試験後にセンサーのリード線取付け部の被覆の内側にも腐食が確認されたため、2 回目はリード線接続部をエポキシ系接着剤 Duralco 4525IP で被覆したセンサーを用いた(図 3.5.5-23)。本試験では前述のように腐食による炭素鋼薄膜の厚さ D の減肉を DCPD 法によりモニタリングする。また、センサーと一緒に図 3.5.5-24 に示す樹脂埋めした炭素鋼板材もベントナイトに埋設した。樹脂埋め試験片は含水ベントナイト層中で図 3.5.5-21 の点線で示した部分に埋設した。

3) DCPD 測定機器

DCPD 測定機器とセンサーの接続の概略図を図 3.5.5-25、試験装置の写真を図 3.5.5-26 に示す。DCPD 法を用いるにあたり、電流はケースレー・インスツルメンツ社製 2400 型ソースメータを用いて印加し、電位差の測定には同社の 2182 型または 2182A/J 型ナノボルトメータを使用した。異種金属接続部に生じる熱起電力を補正するため、電流は $\pm 100\text{mA}$ を 30 秒毎に切替える矩形波として印加した。また、試験片以外の外部抵抗の影響を小さくするために 4 端子法により DCPD 測定用回路を構成し、奇数ピンは電流印加のためソースメータに接続、偶数ピンは電位差測定のためナノボルトメータに接続した。

4) 試験条件

試験セル内のベントナイト層は試験片表面に粉末ベントナイトと珪砂を 7 : 3 で混合した乾燥ベントナイト層を 10mm 程度設け、次に幌延より採取した含水ベントナイトの層を 100mm 設ける。また、珪砂は 5 号珪砂と 3 号珪砂を 1 : 1 で混合したものを珪砂層を形成する。模擬地下水は表 3.5.5-6 に示す組成の模擬地下水を窒素脱気して用いた。

(8) 試験結果及び考察

1) ベントナイト層を透過せず水がセンサーに到達した場合の試験結果試験結果及び考察

1 回目の試験ではセンサーの設置後約 4 時間後に試験セルからの漏水が確認された。また、試験セル側面のアクリル窓内部には水が溜まっており、水封タンクから水が逆流した可能性が高いと考えられた。

1 回目の試験終了時のベントナイトの様子を図 3.5.5-27、図 3.5.5-28 に示す。次に DCPD 測定結果を図 3.5.5-29 に、図 3.5.5-29 から(3)式により算出したセンサーの炭素鋼膜厚の経時変化を図 3.5.5-30 に示す。また、図 3.5.5-31、図 3.5.5-32 に試験後のセンサーと樹脂埋め試験片の写真を示す。図 3.5.5-27 に示したようにセンサー取り出し時のベントナイト表面は完全に濡れており、含水ベントナイト層と乾燥ベントナイト層の区別が付かない状態であった。また、図 3.5.5-28 の取り出し後のセンサー周囲のベントナイトは内部まで含水し試験開始前の含水ベントナイトよりも軟らかい完全な粘土状であった。

図 3.5.5-29 において、左、中央両経路で 40~50 時間の間に電位差が急激に増加し経路が破断したことを検知している。また、図 3.5.5-31 に示した試験後のセンサーの表面は腐食生成物が付着している部分と光沢を持ち一見腐食していない部分が観察され、腐食に不均一性

がありセンサーの上下部分はとくに腐食し、図 3.5.5-32 に示すようにセンサーの経路消失部はセンサーの上部に集中していた。これはセンサーの上部がベントナイト層上に逆流してきた水の影響を最も受けたためであると考えられる。一方で、含水ベントナイト層に埋設した樹脂埋め試験片は表面が薄く変色している程度であり、センサーの腐食状況と明らかな差があった。この要因として樹脂埋め試験片はセンサーの中央部あたりの高さに埋設していたので、センサーの上下部ほどには腐食しなかった可能性が考えられる。また、他の要因としてセンサーと樹脂埋め試験片の加工の影響の差が原因である可能性が考えられる。

2) ベントナイト層を透過した地下水がセンサーに到達した場合の試験結果

2 回目の試験終了時のベントナイトの様子を図 3.5.5-33、図 3.5.5-34 に示す。次に DCPD 測定結果を図 3.5.5-35 に、図 3.5.5-35 から(3)式により算出したセンサーの炭素鋼膜厚の経時変化を図 3.5.5-36 に示す。また、図 3.5.5-37、図 3.5.5-38 に試験後のセンサーと樹脂埋め試験片の写真を示す。図 3.5.5-33 から分かるように、試験終了時でも含水ベントナイト層と粉末ベントナイト層が区別できる状態であり、図 3.5.5-34 のセンサー周辺のベントナイトは少し粘り気があるが触ると崩れるような状態であった。したがって、2 回目の試験ではベントナイトを透過した模擬地下水がセンサーと接触したと考えられる。

図 3.5.5-35 において試験開始から 391 時間後に電位差が急激に増加しその後は階段状に電位差が増加する様子が確認された。試験後のセンサーの表面は 1 回目の試験と同様に腐食生成物が付着している部分と一見腐食していない部分が観察され、腐食に不均一性があった。しかし、センサーの経路消失部は 1 回目とは異なり図 3.5.5-36(左)に赤枠で示したようにセンサー上に点在しており、上下部分と中央部の見た目の差は 1 回目の試験ほど顕著ではないように思われた。また、図 3.5.5-37 に示すように経路が破断はしていないが一部で貫通している様子が確認された。一方で樹脂埋め試験片はわずかに変色している部分が見られたが殆ど腐食していなかった。これは 1 回目と同様に樹脂埋め試験片の埋設位置やセンサーと樹脂埋め試験片の加工の影響の差が原因である可能性が考えられる。

3) センサーの腐食挙動と DCPD 測定結果の比較

図 3.5.5-29 と図 3.5.5-35 に示した 1 回目、2 回目の両試験結果において、DCPD 測定電位差が急激に増加しセンサー経路の破断を示し、試験後のセンサーの観察でも図 3.5.5-32 や図 3.5.5-38 のように経路が一部消失しているのが観察された。したがって、センサー経路全体のうち局所的に腐食が速く進行した部分が存在することを検知できたと考えられる。しかし、図 3.5.5-38 で確認されたような経路が破断する前に貫通した場合には、DCPD では貫通を検知できず貫通後にその孔が広がることで経路全体が破断して初めて検知されると考えられる。したがって、DCPD 測定で得られた破断時間よりも早く経路は貫通しており、実際の最大腐食速度は DCPD 測定から得られた値よりも大きかった可能性がある。また、DCPD 測定結果の電位差が急増する前の部分については、図 3.5.5-5 に示したように腐食の均一/不均一性が DCPD 信号に殆ど反映されていない可能性が考えられるため、本試験でセンサー全体

に見られた不均一な腐食についてどの範囲がどの程度腐食したのかを DCPD 法のみで評価するのは困難である。

1 回目と 2 回目の試験において算出した CR_{ave} と CR_{max} を表 3.5.5-7 に示す。また、各試験の炭素鋼膜厚の経時変化の一部を拡大した図をそれぞれ図 3.5.5-39 と図 3.5.5-40 に示す。これらの図からわかるように、両試験とも試験最初期にはグラフの傾きがほぼ 0 の状態から徐々に傾いていき、一定時間経過後からグラフが直線状になっており、本試験においては直線状の部分から CR_{ave} を算出した。しかし、初期の傾きが変化していく期間における腐食挙動についての検討が十分ではなく、今後検討を重ねより適切な CR_{ave} の算出方法を決める必要がある。図 3.5.5-41 に 2 回の試験の DCPD 測定結果を 0.07~0.17V の範囲で拡大したものを示す。図 3.5.5-41 において徐々に増加していった電位差の増加量が 2 回目の試験のほうが大きくなっている。これは、1 回目の試験ではセンサー上部の腐食が速く、2 回目に比べてセンサー全体の腐食による減肉が小さい状態で破断に至ったためではないかと考えられる。

4) まとめ

- ① DCPD 法により急な電位差の増加が計測され経路の破断を検知することで、局所的な腐食を検知することができた。しかし、腐食が薄膜を貫通しても経路が破断していない場合はその貫通を検知できず、貫通した孔が広がり経路が完全に破断することで初めて検出されると考えられる。
- ② 破断を検知する前の DCPD 信号については、腐食の不均一/局所性が殆ど反映されていないと考えられ、センサーのどの範囲がどの程度腐食したのかを DCPD 法のみで評価することは困難である。
- ③ DCPD モニタリングにより得られた炭素鋼膜厚のグラフの傾きから CR_{ave} を算出するとき、グラフのどの範囲の近似直線から CR_{ave} を算出するのが適切であるのかを検討し、 CR_{ave} の算出方法を決定する必要がある。

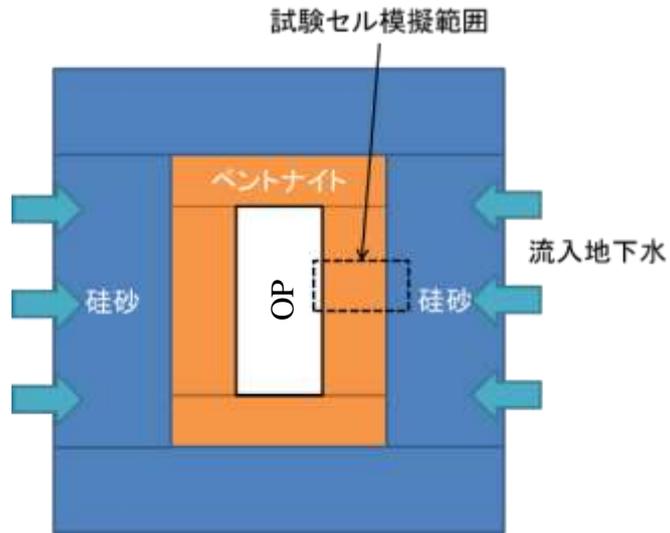


図 3.5.5-20 埋設容器の模式図

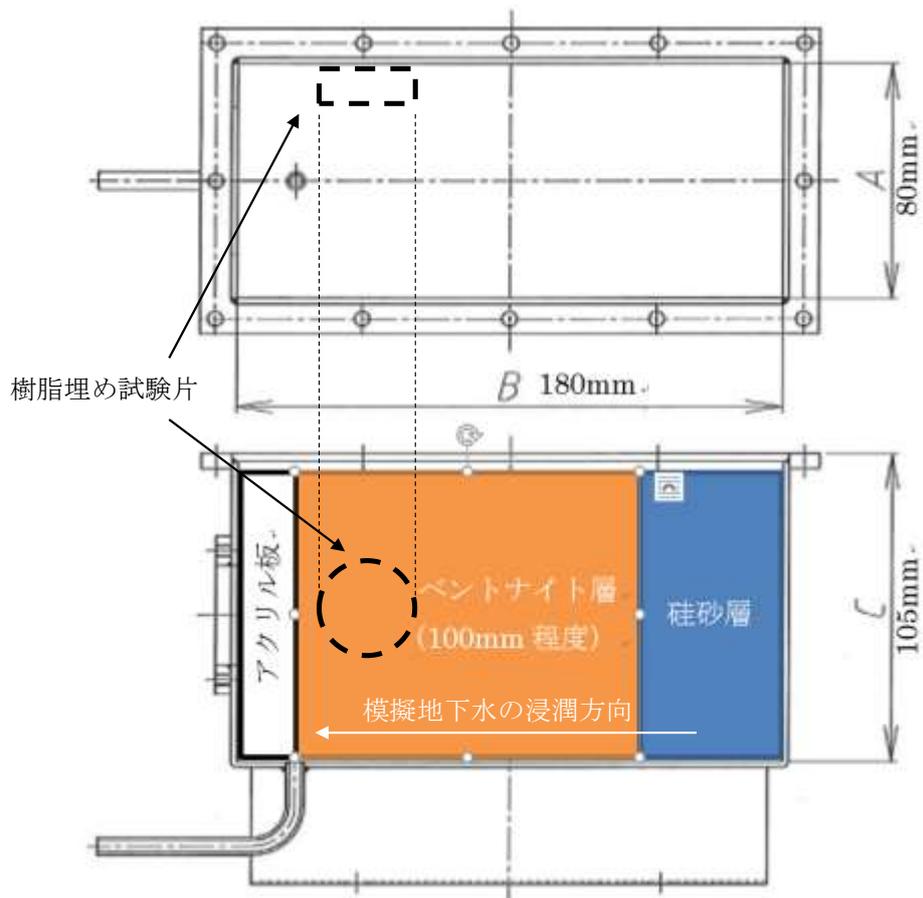


図 3.5.5-21 試験セル概略図

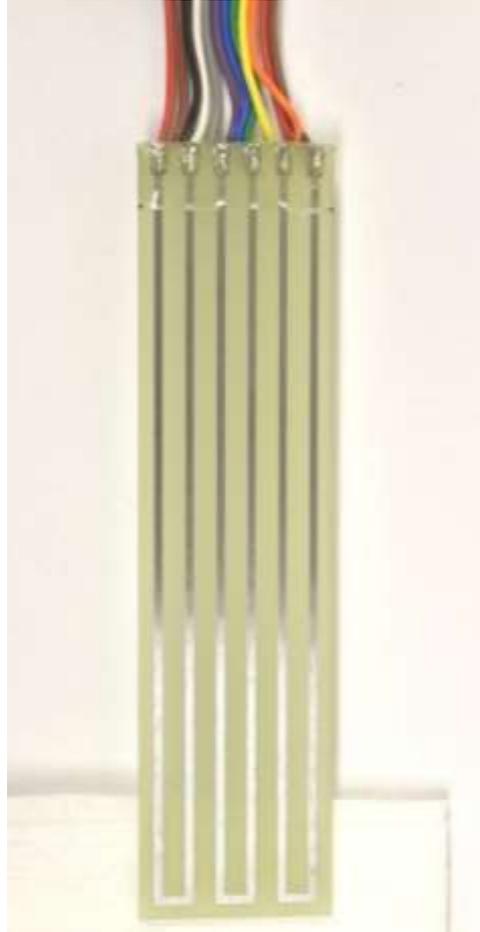
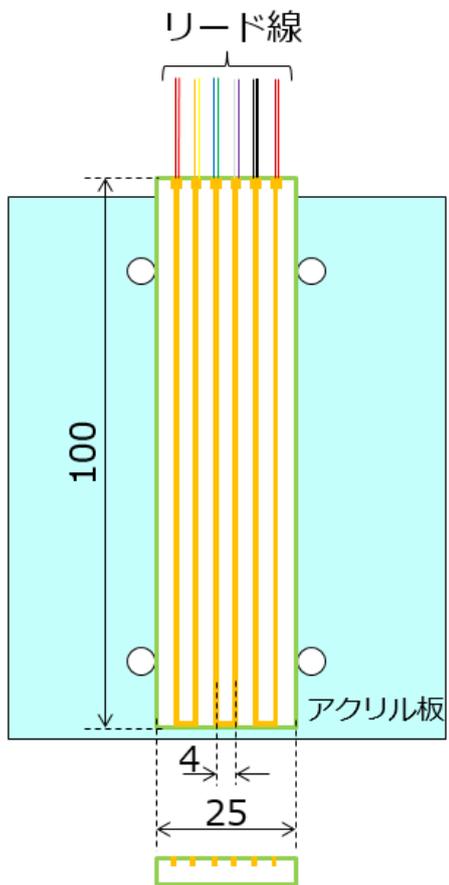


図 3.5.5-22 腐食モニタリングセンサ

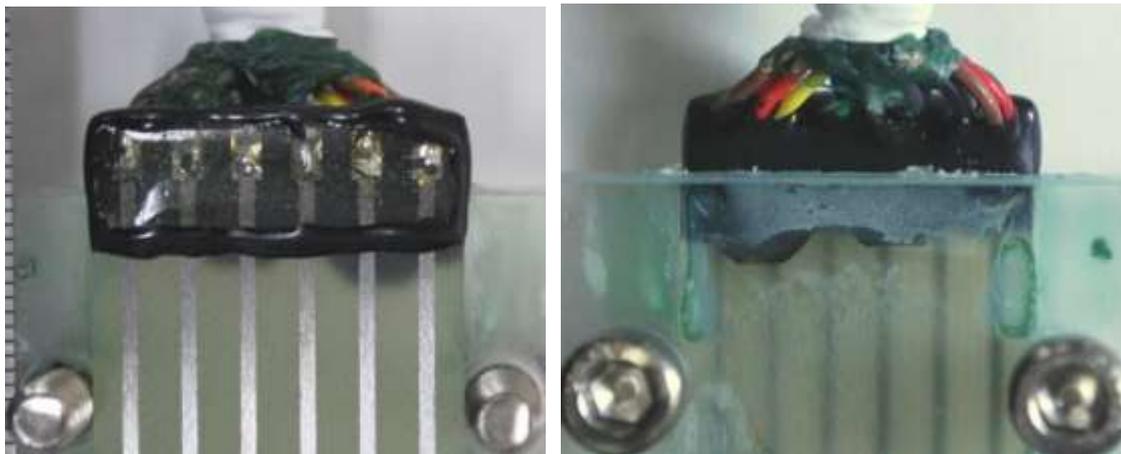


図 3.5.5-23 補強後の試験片被覆部

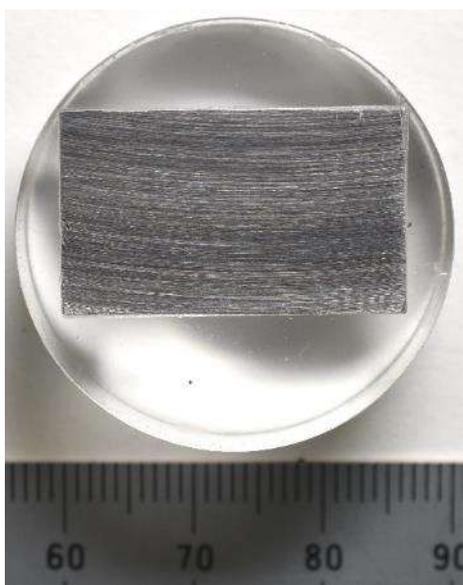
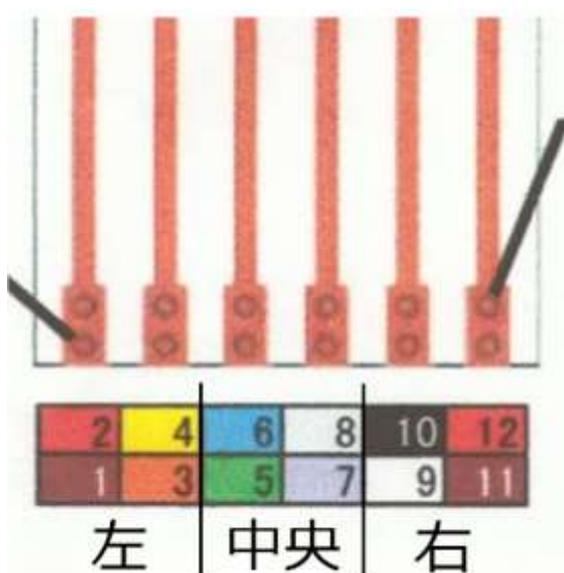
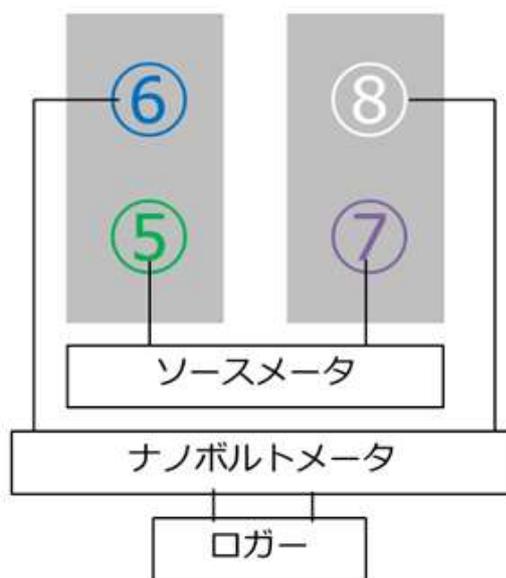


図 3.5.5-24 樹脂埋め試験片



(a)センサーのリード線



(b)接続例(中央経路)

図 3.5.5-25 センサーと測定機器の接続

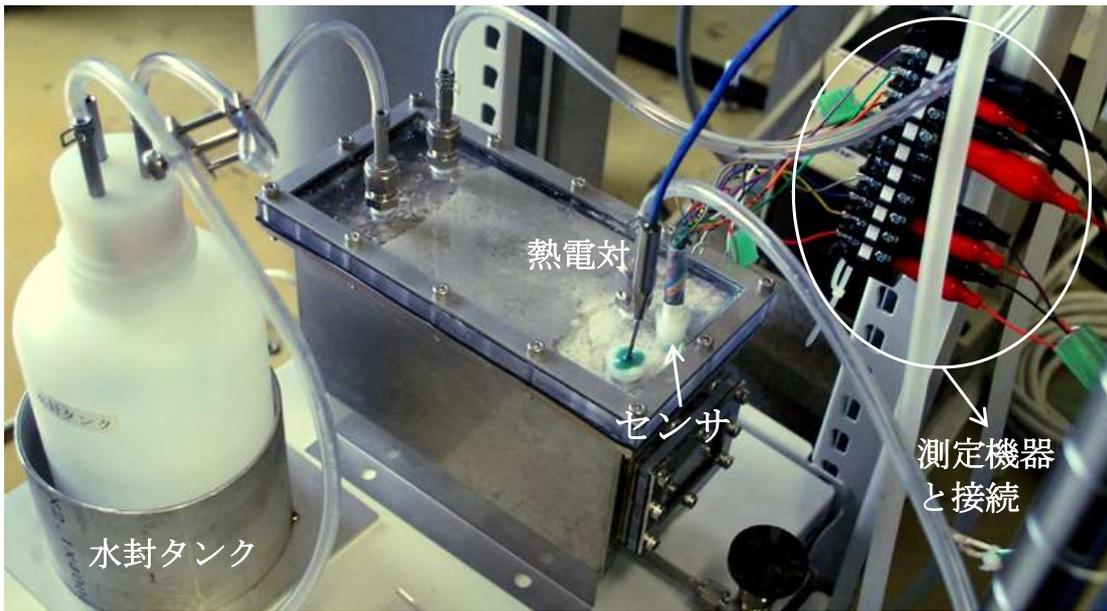


図 3.5.5-26 試験装置外観

表 3.5.5-6 模擬地下水組成[ppm]

NaCl	NaHCO ₃	CaCl ₂	KCl	MgCl ₂	H ₃ BO ₃
5200	3000	180	230	190	410



図 3.5.5-27 試験終了時のベントナイトの様子

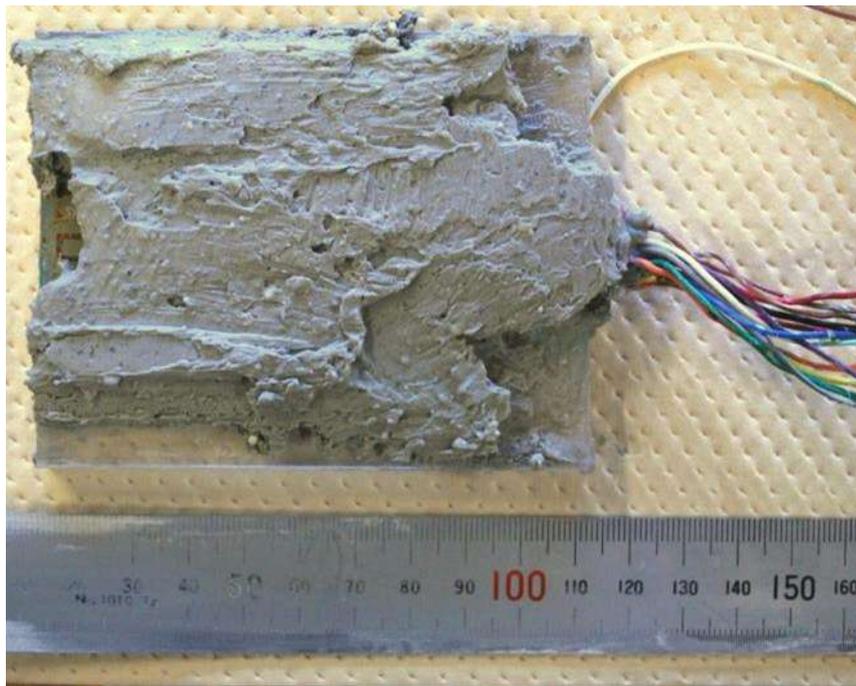


図 3.5.5-28 センサー周囲のベントナイト

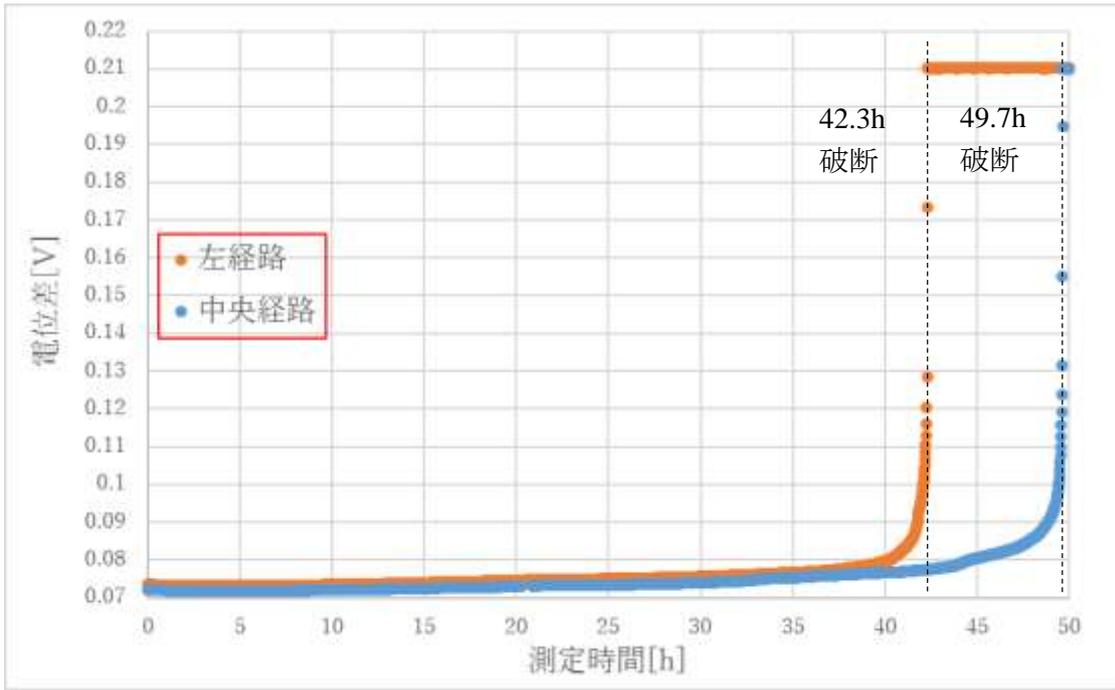


図 3.5.5-29 DCPD 測定結果(1 回目)

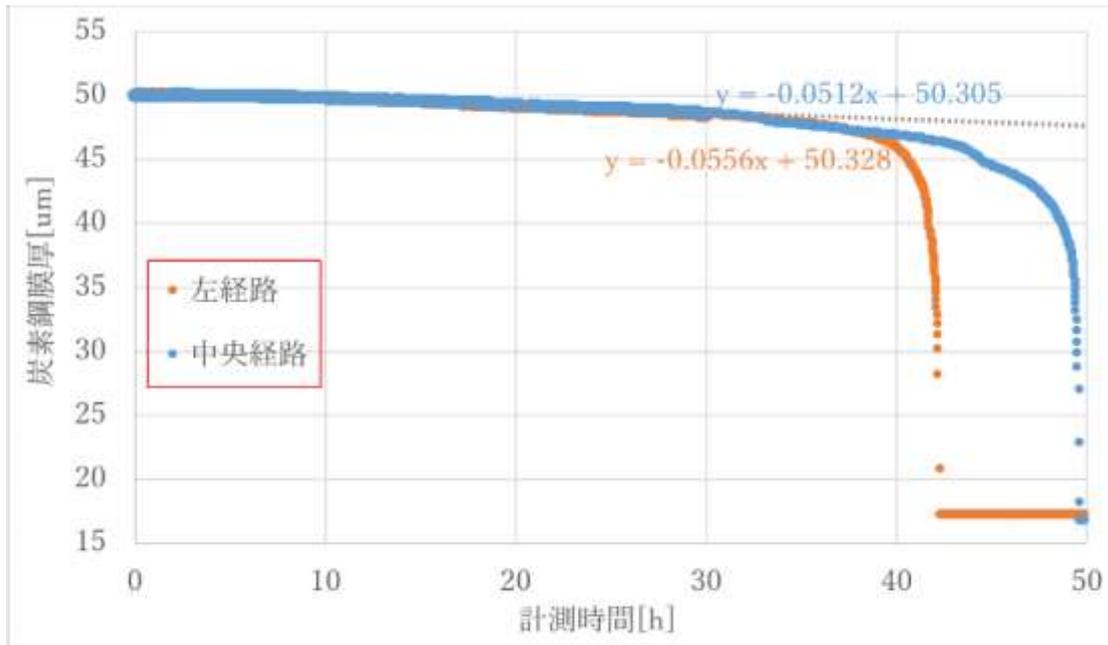


図 3.5.5-30 DCPD 測定結果より算出したセンサー炭素鋼膜厚(1 回目)

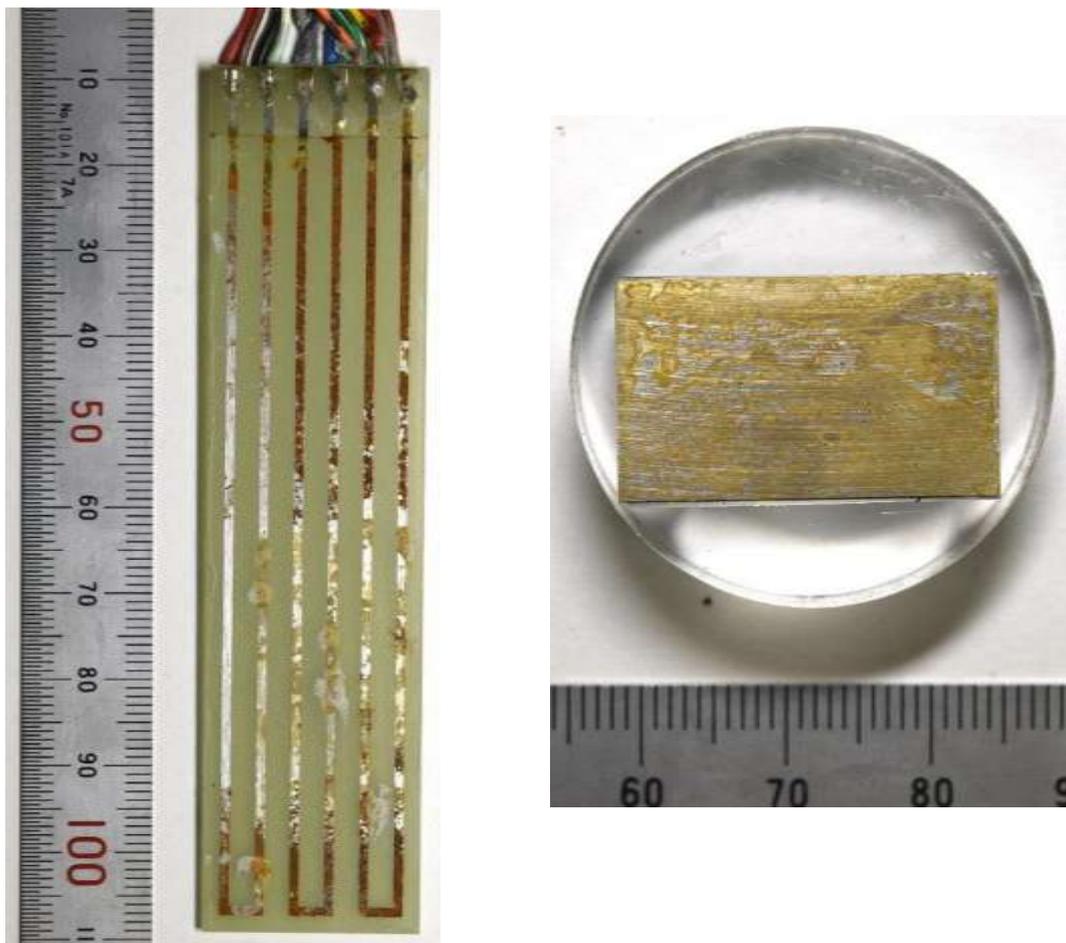


図 3.5.5-31 ベントナイト除去後のセンサ(左)と樹脂埋め試験片(右)

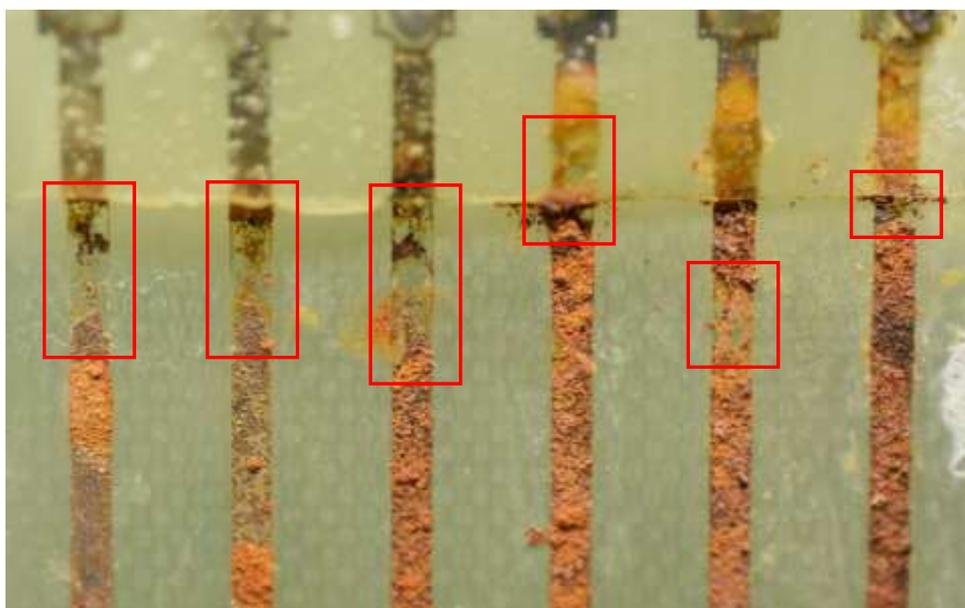


図 3.5.5-32 センサー上部の破断箇所



図 3.5.5-33 試験終了時のベントナイトの様子(2回目)



図 3.5.5-34 センサー周囲のベントナイト(2回目)

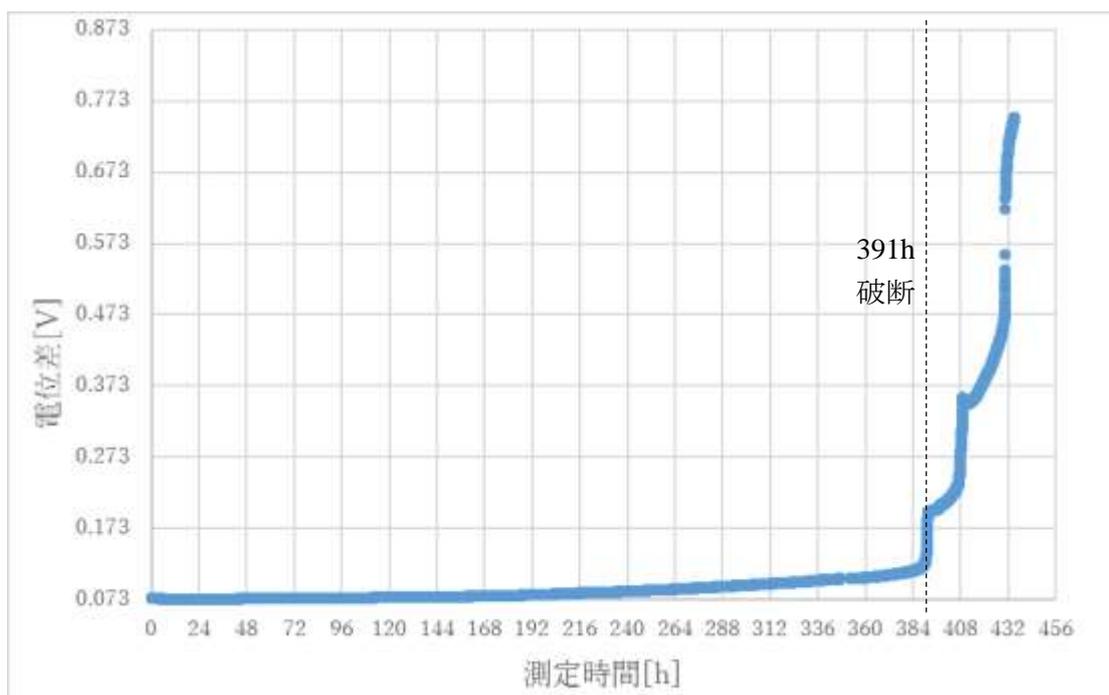


図 3.5.5-35 DCPD 測定結果(2 回目)

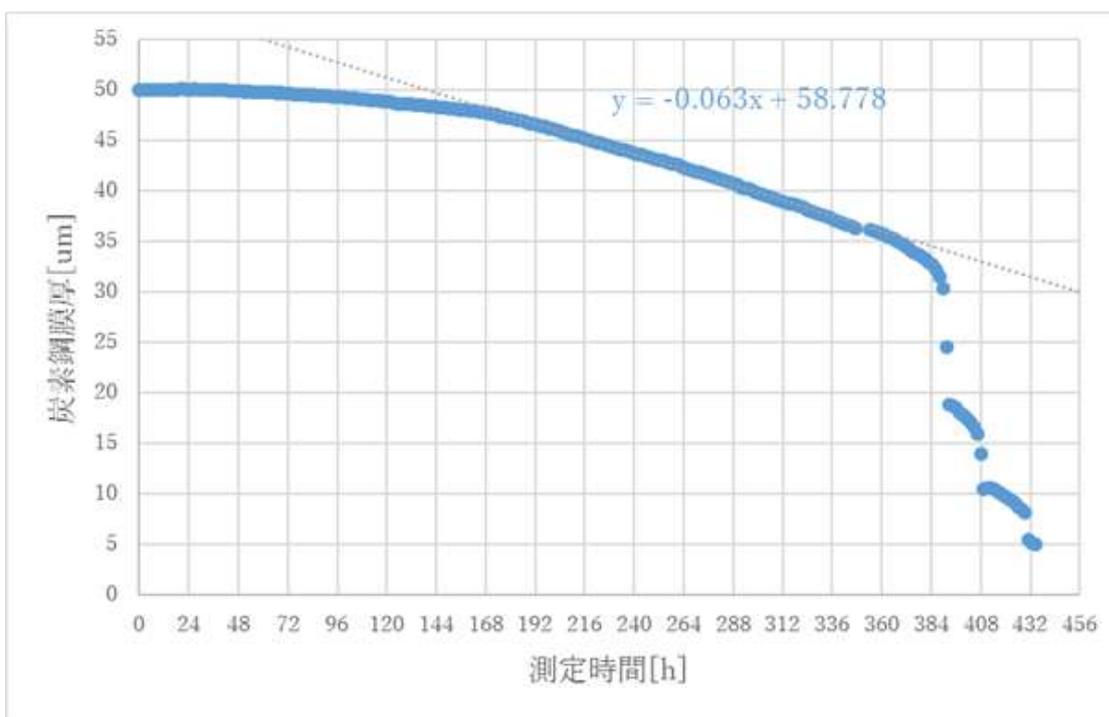


図 3.5.5-36 DCPD 測定結果より算出したセンサー炭素鋼膜厚(2 回目)

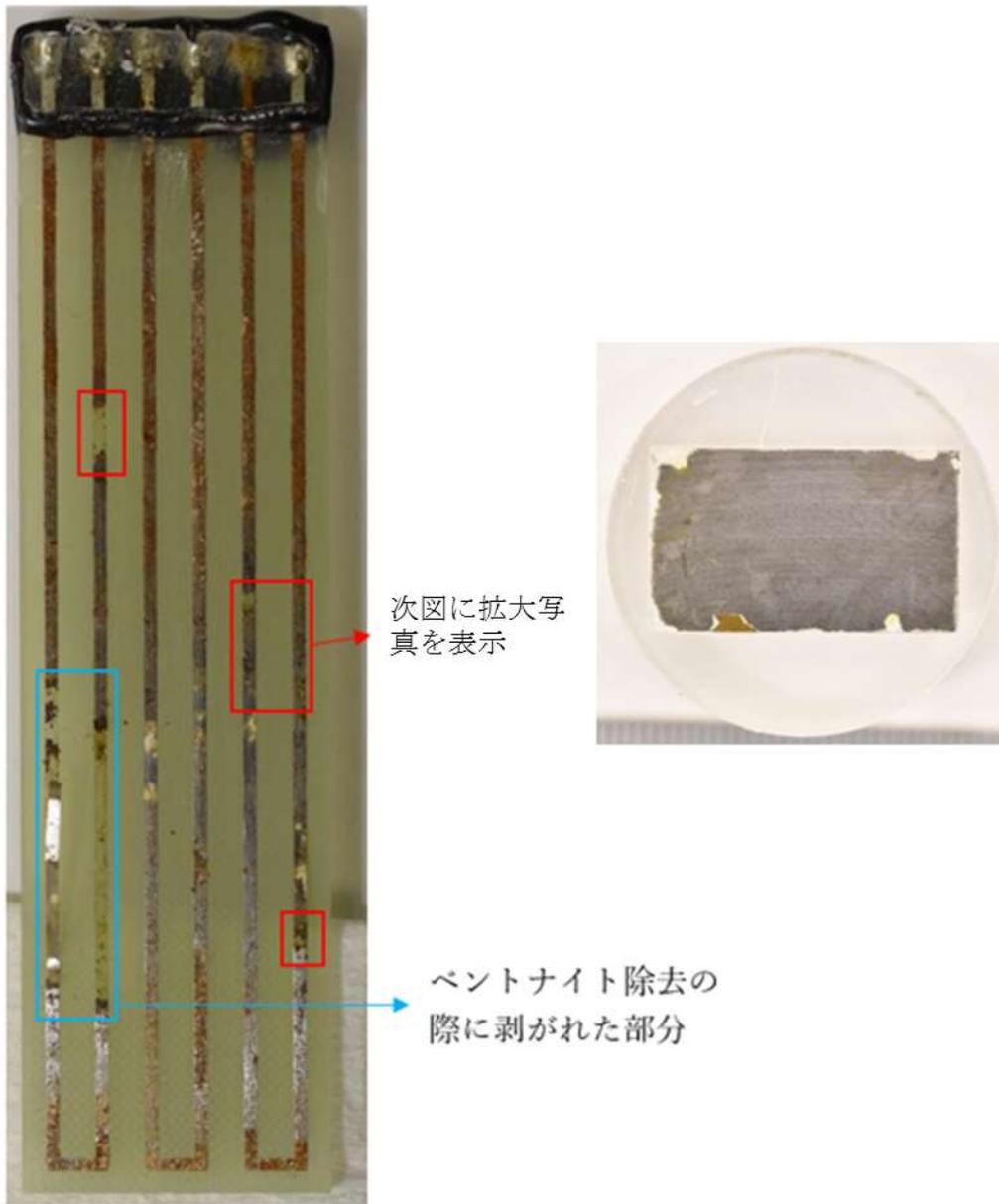


図 3.5.5-37 ベントナイト除去後のセンサ(左)と樹脂埋め試験片(右)

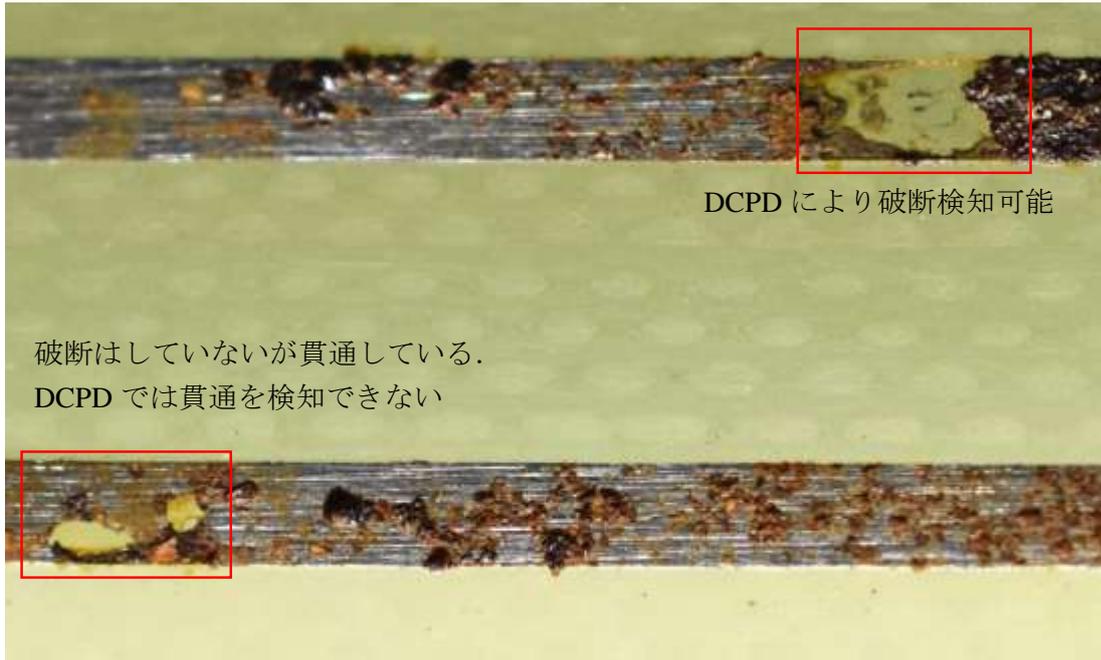


図 3.5.5-38 センサー破断箇所と未破断で貫通している箇所の例

表 3.5.5-7 CR_{ave} と CR_{max} の算出結果[mm/y]

	CR_{ave}	CR_{max}
1回目左経路	0.522	8.81
1回目中央経路	0.580	10.4
2回目	0.552	1.12

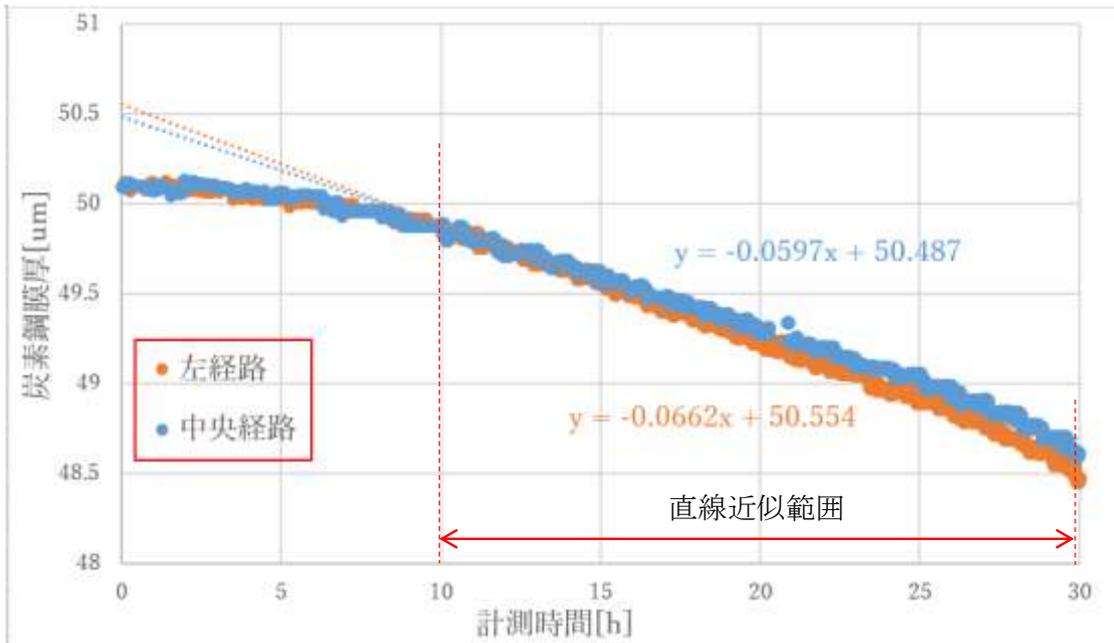


図 3.5.5-39 DCPD 測定結果の一部拡大図(1回目)

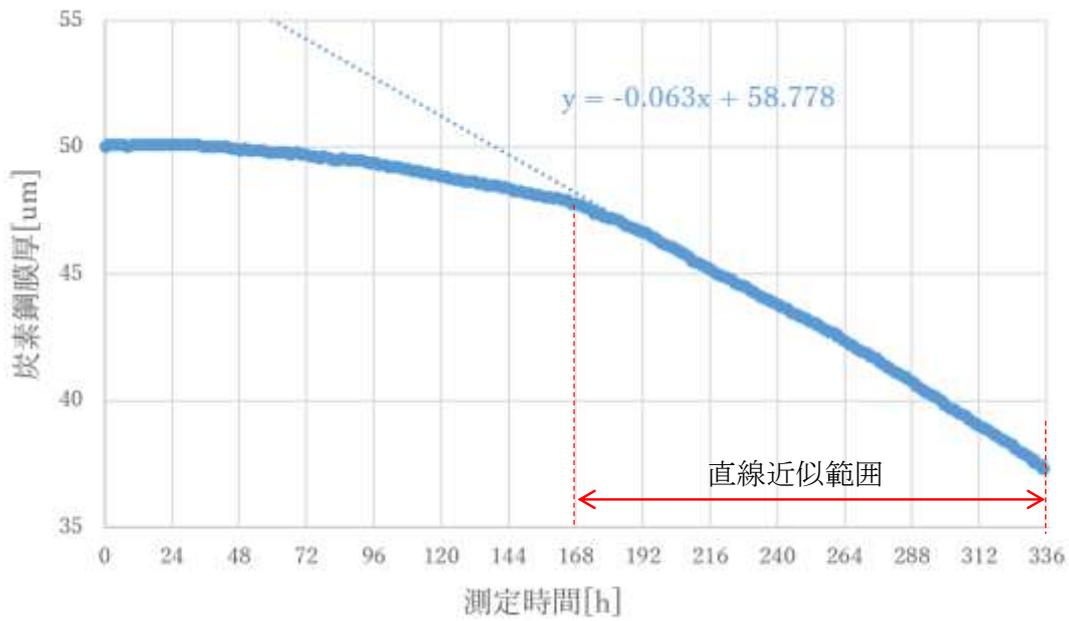


図 3.5.5-40 DCPD 測定結果の一部拡大図(2回目)

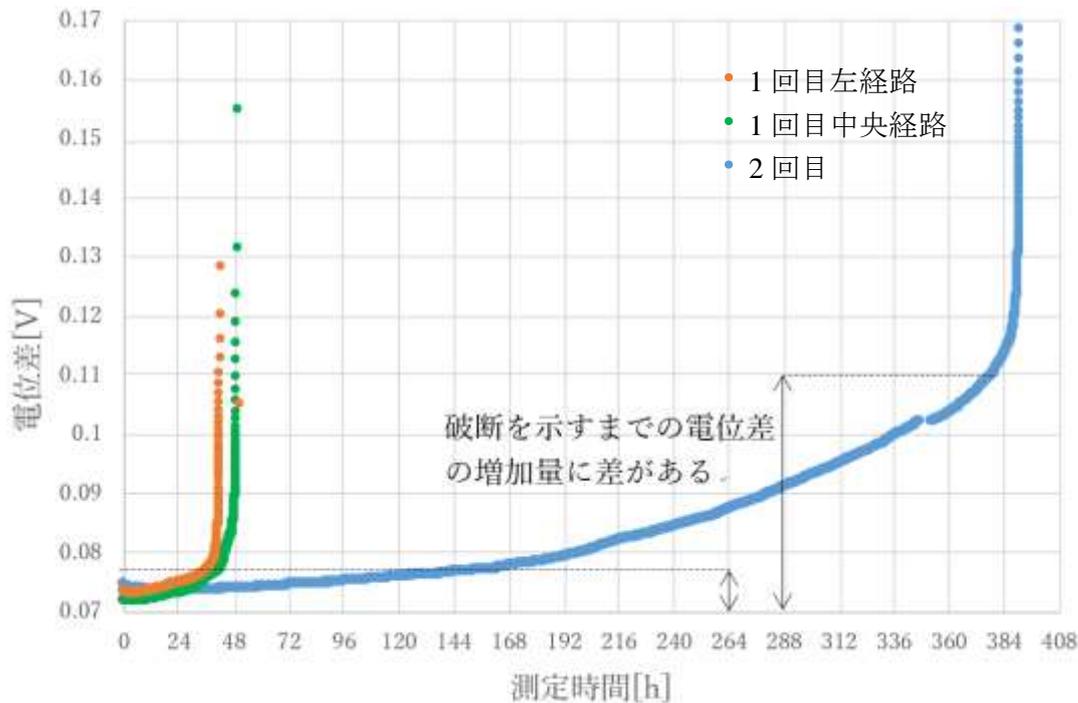


図 3.5.5-41 DCPD 測定結果の一部拡大図

(9) 結論

高レベル放射性廃棄物の地層処分の概要について述べ、その中で炭素鋼オーバーパックの腐食モニタリング技術が必要とされていることを述べた。さらに、先行研究において、炭素鋼の地層処分環境下での腐食モードについて検討し、地下において炭素鋼が不動態化する可能性は排除すべきではなく、塩化物イオン濃度等の環境条件によっては炭素鋼オーバーパックに局部腐食が生起する可能性を考慮すべきであるとの結論が得られていることを述べた。そして、全面腐食と局部腐食の両方に対応可能な腐食モニタリング手法として DCPD 法による腐食モニタリングが提案されており、提案された手法の実際の適用性を実験的に評価する必要があることを述べた。以上を踏まえて本研究の目的を設定した。

温度、pH、線径をパラメータとして模擬地下水中で Fe ワイヤを腐食させ、それに伴うワイヤの減肉を DCPD 法によりモニタリングし、各試験条件における実際の腐食挙動やモニタリング結果の比較を行い、以下の知見を得た。

- ① 温度が高くなると抵抗率の温度依存性により測定される電位差が大きくなり、腐食速度の温度依存性により時間に伴う電位差の上昇が急になる。したがって実規模試験においては、DCPD モニタリングとは別に地下の温度を実時間モニタリングして抵抗率の温度依存性の影響を補正することにより、DCPD モニタリングによる腐食速度の評価制度を向上させることが可能と考えられる。
- ② pH_a よりも pH が高い場合は試験片の破断部が急峻に細くなり、pH_a よりも pH が低い場合の試験片の破断部は比較的均一に減肉していた。また、これら 2 つの場合について破断部付近の腐食挙動を観察した限りにおいては、腐食の局在化が顕著な場合のほうが、DCPD

モニタリングにより求めた平均腐食速度 CR_{ave} と最大腐食速度 CR_{max} の差が大きくなっていった。しかし、試験後の試験片全体の腐食状況の観察を行うことで、腐食の不均一性を定量化し DCPD 測定の結果と比較する必要がある。

- ③ DCPD 測定結果から得られた平均腐食速度 CR_{ave} 及び最大腐食速度 CR_{max} は、使用した試験片の線径によって異なる値をとった。したがって、実規模試験において線径の異なる複数の試験片を用いたモニタリングを行うためには、線径により腐食速度が異なる要因を明らかにする必要がある。

オーバーパックの埋設環境を模擬した試験セルにおいて炭素鋼薄膜センサーを腐食させ、それに伴う減肉を DCPD 法によりモニタリングし、実際の腐食挙動と DCPD 法によるモニタリング結果の比較を行い、以下の知見を得た。

- ① DCPD 法により急な電位差の増加が計測され経路の破断を検知することで、局所的な腐食を検知することができた。しかし、腐食が薄膜を貫通しても経路が破断していない場合はその貫通を検知できず、貫通した孔が広がり経路が完全に破断することで初めて検出されると考えられる。
- ② 破断を検知する前の DCPD 信号については、腐食の不均一/局所性が殆ど反映されていないと考えられ、破断部以外の腐食挙動を DCPD 法のみで評価することは困難である。
- ③ DCPD モニタリングにより得られた炭素鋼膜厚のグラフの傾きから CR_{ave} を算出する際に、グラフのどの範囲の近似直線から CR_{ave} を算出するのが適切であるのかを検討し CR_{ave} の算出方法を決定する必要がある。

今後の課題

① 試験片あるいは試験方法に関する課題

- ・ センサーの炭素鋼薄膜経路が未破断であっても、厚さ方向に貫通した場合は CR_{max} として検出可能であることが望ましいことから、試験片形状の見直しを検討する。
- ・ 線径の異なるワイヤー試験片が異なる腐食速度を示した理由として、例えば加工の影響が考えられる。今後は試験片の組織観察を実施し、加工の影響が認められた場合は、試験に用いる前に熱処理あるいは化学的な手法により加工の影響を除去する必要がある。
- ・ ジュール熱によるワイヤーの温度上昇の影響については、試験片の温度をサーモグラフィ等でより正確に測定することで線径による温度差の有無を明らかにする必要がある。また、線形に合わせて異なる印加電流を与え、発熱量を等しくすることでジュール熱の影響を除去した試験ができると考えられる。

② 腐食挙動の評価方法に関する課題

- ・ 炭素鋼オーバーパックの健全性を保障するためには、ごく一部の局部あるいは不均一腐食による減肉と、全面的な均一腐食による減肉を分けて検知・評価可能であることが望ましい。今後は、腐食後の試験片の腐食挙動を定量的に評価し、DCPD 法で得られた結果との比較・

考察を通して、DCPD法を用いたモニタリングの利点とその限界を整理して提示するとともに、場合によっては他のモニタリング手法との併用についても検討する。

(10) 同一環境下での試験

図 3.5.4-11 に示す薄膜型センサーに定電流電源を接続し、所与の定電流 (10mA) を付与した時の電位を記録する装置で構成させるポテンシャルドロップ法 (PDM) の試験を実施した。

ポテンシャルドロップ法による PDM 出力の経時変化を図 3.5.5-42 に示す。試験開始当初から、0.01V 程度で安定していたが、130h を超えた時点から電圧が上昇傾向を示し、143h 後に顕著に 0.25V まで急激に上昇して微増し続けた。さらに、160h 後に、急激に上昇し制御不能となった。すなわち、160h の時点で薄膜型センサーが腐食によって断線したと考えられる。すなわち、試験開始後 143h 後に同一環境下腐食評価用薄膜センサー部の腐食環境が整い、143~160h の間に膜厚 50 μm の箔が溶出したとすると、50 μm / 17h、すなわち、局所的に、26mm/年と算出される。なお、初期から腐食したと仮定した 50 μm / 160h の見積の場合、2.7mm/年となる。試験開始から 330h 経過後に開放したポテンシャルドロップ法の測定後の薄膜センサー、および、ベントナイトの外観を図 3.5.5-43 に示す。樹脂コーティングした右端の 1 対を除いて、薄膜試験片は全体的に赤茶色に変色していて、局所的に全断面が溶出して断線していることを確認した。また、ベントナイト側にも赤茶色のさびが拡散して拡がっていた。下部に設けた重量測定用試験片は全面的に茶色くなっていないが、対向するベントナイト側には試験片と樹脂との境界部などがくっきり赤茶色になっていることから、 μm オーダーの腐食はすきま部などの特異部を中心に比較的広いエリアで起きていることが判った。小型 ACM センサー出力の経時変化を図 3.5.5-44 に示すように、0.5 μA 程度で安定しており、腐食性環境の変化をきたした時間などについての検出は無かった。

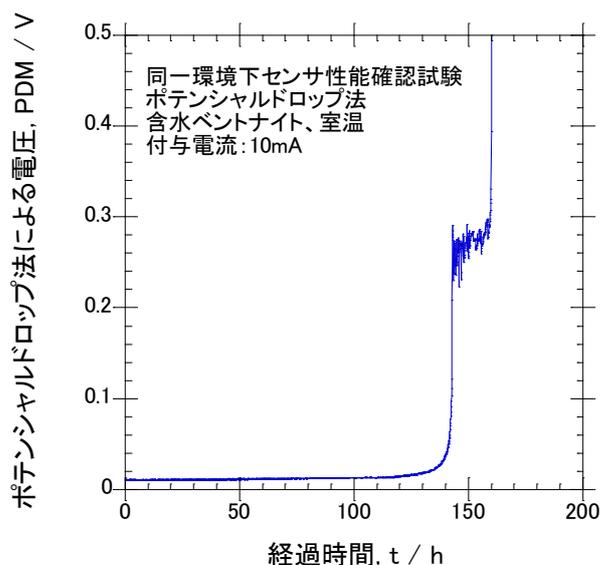


図 3.5.5-42 ポテンシャルドロップ法による PDM 出力の経時変化



図 3.5.5-43 ポテンシャルドロップ法の測定後の薄膜センサー、ベントナイト

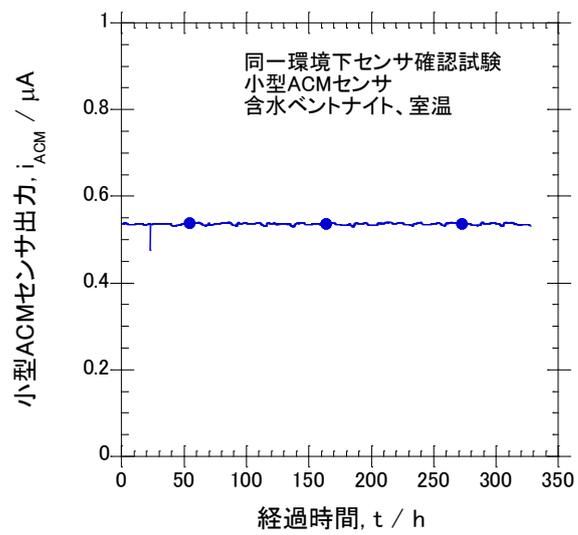


図 3.5.5-44 小型 ACM センサー出力の経時変化

3.5.6 インピーダンス (EIS) 法

平成 28 年度は、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、炭素鋼の腐食モニタリングを実施した。

(1) 装置構成

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 3.5.6-1 と図 3.5.6-2 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、珪砂層からなり、ベントナイト層内は電極プローブ側に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。プローブ電極は 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。このプローブ電極 2 個 (# 1 プローブ電極、# 2 プローブ電極) を図 3.5.6-1 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 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。昨年度の地上工学規模試験装置 (2015 年 8 月 19 日開始)、小規模試験装置 (2015 年 11 月 26 日開始) では、低周波数は 10mHz を使用したが、電荷移動抵抗を測定するためには、より低周波数でモニタリングするのが好ましいことが全周波数領域の電気化学インピーダンス (EIS) 特性からわかったので、今年度から低周波数を 1mHz と変更した。ベントナイト中では腐食速度の経時変化が比較的小さいので、測定に時間がかかる 1mHz でも問題がない。

(2) 実験結果

1) EIS 特性

ベントナイト中の炭素鋼の電気化学インピーダンス (EIS) 特性を図 3.5.6-3 と図 3.5.6-4 に示す。図 3.5.6-3 が # 1 プローブ電極、図 3.5.6-4 が # 2 プローブ電極の結果である。プローブ電極埋設後 26 日目で EIS 測定が可能となったため 26 日~41 日までの結果を示す。約 1 か月後まで測定ができなかった原因は、ベントナイトへの水の侵入に時間がかかったからと当初考えていたが、3.5.6(3)節で述べるように、腐食モニターではある程度初期から、不安定ながらも測定ができていることから、他の原因も含めて検討する必要がある。これについては 3.5.6(4)節でも考察する。

図 3.5.6-3 の # 1 プローブ電極の 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説明することができる。高周波数領域に 40~50Ω 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 10⁴F/ 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 10μF/ cm^2 である。ここで測定される容量は、数 mF/ cm^2 と、電気二重層容量の数 100 倍となることから、鏽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に時間変化はないが、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 3.5.6-4 の # 2 プローブ電極の EIS 特性をみると、明らかに # 1 プローブ電極のものとは異なる。本来、両プローブ電極は同じ 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 プローブ電極に比べ小さく、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、水の入り方に違いがないものと思われる。両プローブの EIS 違いについては現時点ではわからないが、# 2 プローブ電極のインピーダンスの絶対値がプローブ電極 1 に比べて小さいことから (図 3.5.6-5)、# 2 の腐食速度が大きいことが予想される。これについては試験終了後にプローブ電極を取り出し、詳細に調査する。

図 3.5.6-6 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、# 2 プローブ電極 (図中 CH2) の電位差が # 1 プローブ電極 (CH1) より大きいことがわかる。最大で 40mV 程度の電位差が生じている。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、腐食表面にはある程度の電位分布が存在することは十分考えられるが 40mV の電位差というのはかなり大きい。EIS 測定では、# 2 プローブ電極のほうが大きな直流電流が流れることになる。EIS 測定に印加する交流電圧振幅は 10mV 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。

過去のベントナイト中での EIS 測定の経験から、# 1 プローブ電極の結果が典型的な EIS 特性と考えられ、# 2 プローブ電極については、試験終了後に腐食の状態など詳細に調査して原因を明らかにする。

2) 全周波数測定 (EIS) により測定した溶液抵抗と電荷移動抵抗

溶液抵抗および電荷移動抵抗を図 3.5.6-3、図 3.5.6-4 の EIS 測定データから読み取り、プロットしたのが図 3.5.6-7、図 3.5.6-8 である。本来は Curve-fitting により各パラメータを決定することが望ましいが、本報告書では、3.5.6(3)節の腐食モニターの結果と比較するため、10kHz のインピーダンス ($Z_{10\text{kHz}}$) を溶液抵抗、1mHz のインピーダンス ($Z_{1\text{mHz}}$) を電荷移動抵抗とした。電荷移動抵抗は、図 3.5.6-8 を見る限り、# 1 プローブ電極ではわずかに過小評価 (腐食速度としては過大評価) することになる。図 3.5.6-7 から、溶液抵抗は # 1、# 2 プローブ電極ともに 40~70 Ωcm^2 の範囲にあり、ほぼ同じ値を示している。図 3.5.6-8 は $Z_{1\text{mHz}}$ の逆数 ($1/Z_{1\text{mHz}}$: 腐食速度の指標) を時間に対してプロットしているが、両プローブ電極で大きく異なる。いずれの場合も、時間とともに腐食速度は減少することがわかる。ここでは # 1 プローブ電極の結果を中心に考察する。腐食速度は 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 $R_{\text{ct}}=5 \times 10^{-5} \Omega^{-1} \text{cm}^{-2}$ であり、Stern-Geary 式 ($i_{\text{corr}} = k/R_{\text{ct}}$, $k: 0.020\text{V}$) から腐食電流密度 i_{corr} を求めると、約 $1 \mu \text{A}/\text{cm}^2$ となり、年間の腐食減肉量に換算すると約 0.01mm/year となる。この腐食速度は、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 0.002mm/year) に比べて約 5 倍であり、水との反応に移行して腐食速度が一定になったとは考えにくい。恐らく、ベントナイト中にはまだ多くの溶存酸素が残っていることが

予想され、まだ酸素との反応が主反応であると考えられる。平成 29 年度もこの測定を継続し、酸素の消費（腐食反応による）とともに腐食速度が低下するかを見極める。

(3) 腐食モニターにより測定した溶液抵抗と電荷移動抵抗

腐食モニターで得られた溶液抵抗 (Z_{10kHz}) の経時変化を図 3.5.6-9 に示す。この図からわかるように、腐食モニターでは 0 時間から溶液抵抗が測定可能となっており、 $30\sim 50\ \Omega\text{cm}^2$ の範囲をとっている。この値は全周波数測定で 25 日後に測定された溶液抵抗とほぼ同じ値であり、腐食モニターでは初期から溶液抵抗の測定が可能であったことを意味する。このことは、水はかなり初期からプローブ電極表面に存在していたことを示唆している。

図 3.5.6-10 には腐食モニターによる電荷移動抵抗 (Z_{1mHz}) の測定結果を示す。腐食モニターによる 1mHz のインピーダンス測定は極めて不安定である。多くの測定点が X 軸上 ($Z_{1mHz}=0$) にあり、ここで測定された異常値は、腐食モニターのケーブルをセルに繋がらない状態で表示されるインピーダンスの値であった。ただし、26 日後の腐食モニターの Z_{1mHz} の値を全周波数測定 (EIS) の 1mHz の値と比較すると (図 3.5.6-11)、腐食モニターには多数の異常値が計測されているが、正常と思われる値は全周波数測定で得られた値に近いことがわかる。すなわち、図 3.5.6-10 において、0~25 日までの期間でも腐食モニターで測定された異常値 ($Z_{1mHz}=0$) 以外の値はある程度信用できるものと思われる。そのように考えると、炭素鋼の腐食速度は、図 3.5.6-10 に示す破線のように、酸素の消費により、時間ともに減少してきていると考えられる。プロットの関係で $1/Z_{1mHz}$ の最大値を $2\times 10^{-3}\ \Omega^{-1}\text{cm}^2$ としているが、試験開始直後においては、これより大きな腐食速度が測定されている。

(4) 全周波数測定と腐食モニターの違い

全周波数測定装置では 25 日目まで” Current over”、” Potential over” などのエラーメッセージがあらわれ、測定された EIS はノイズが多く、測定が困難であった。また、26 日以降でも同様なエラーメッセージが、頻度はかなり減少したが、ときどき出る状態であった。現在はエラーメッセージが出なくなり問題なく測定ができるようになっている。一方、腐食モニターの測定では、エラーメッセージ機能がついていないため測定はできるが、前述したように測定値は多数の異常値を含み、正常な測定点は限られていた。つまり両測定ともに非常に不安定な状態での測定であったことは同様である。以上のことから、現時点で、水はある程度プローブ電極表面まで達しているが、電極/ベントナイト界面での含水率がかなり低いことが考えられる。これについては試験を継続して、その変化観察していくことと、実験終了後の調査により判明するものと思われる。

(5) まとめ

今年度は実験室内での腐食試験装置を使い約 40 日間の腐食試験を行った。これまでのベン
トナイト中での炭素鋼の EIS 測定あるいは腐食モニターによる測定と異なる挙動を示している
が、まだ、腐食が、酸素との反応から水との反応へと移行していないことが予測され、平成 29
年度も腐食のモニタリングを継続していく必要がある。

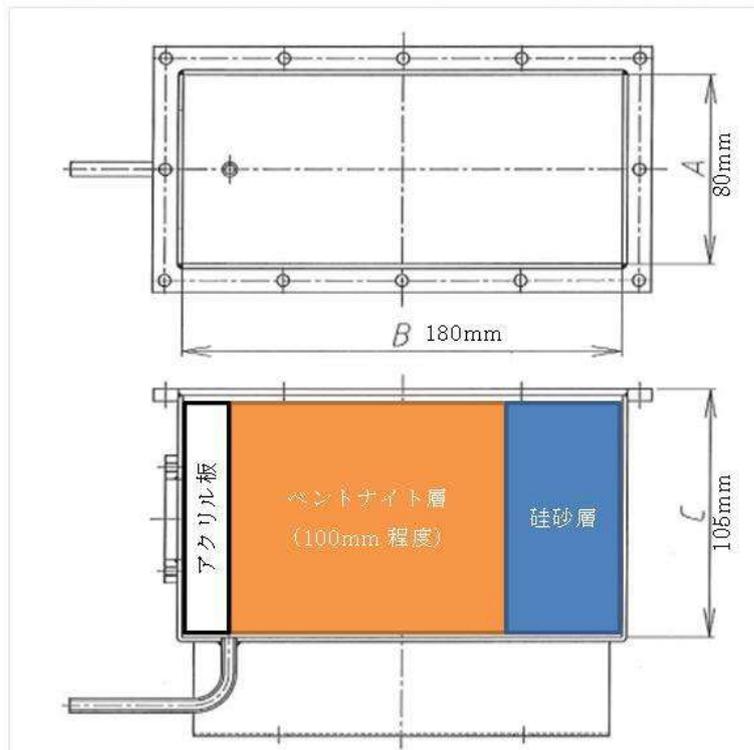


図 3.5.6-1 腐食試験装置

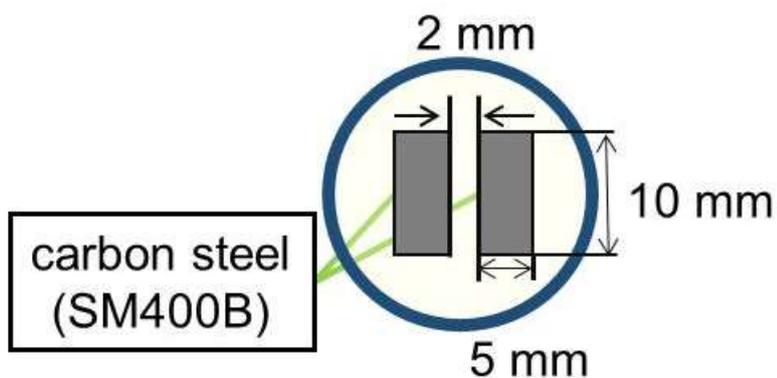


図 3.5.6-2 プローブ電極模式図

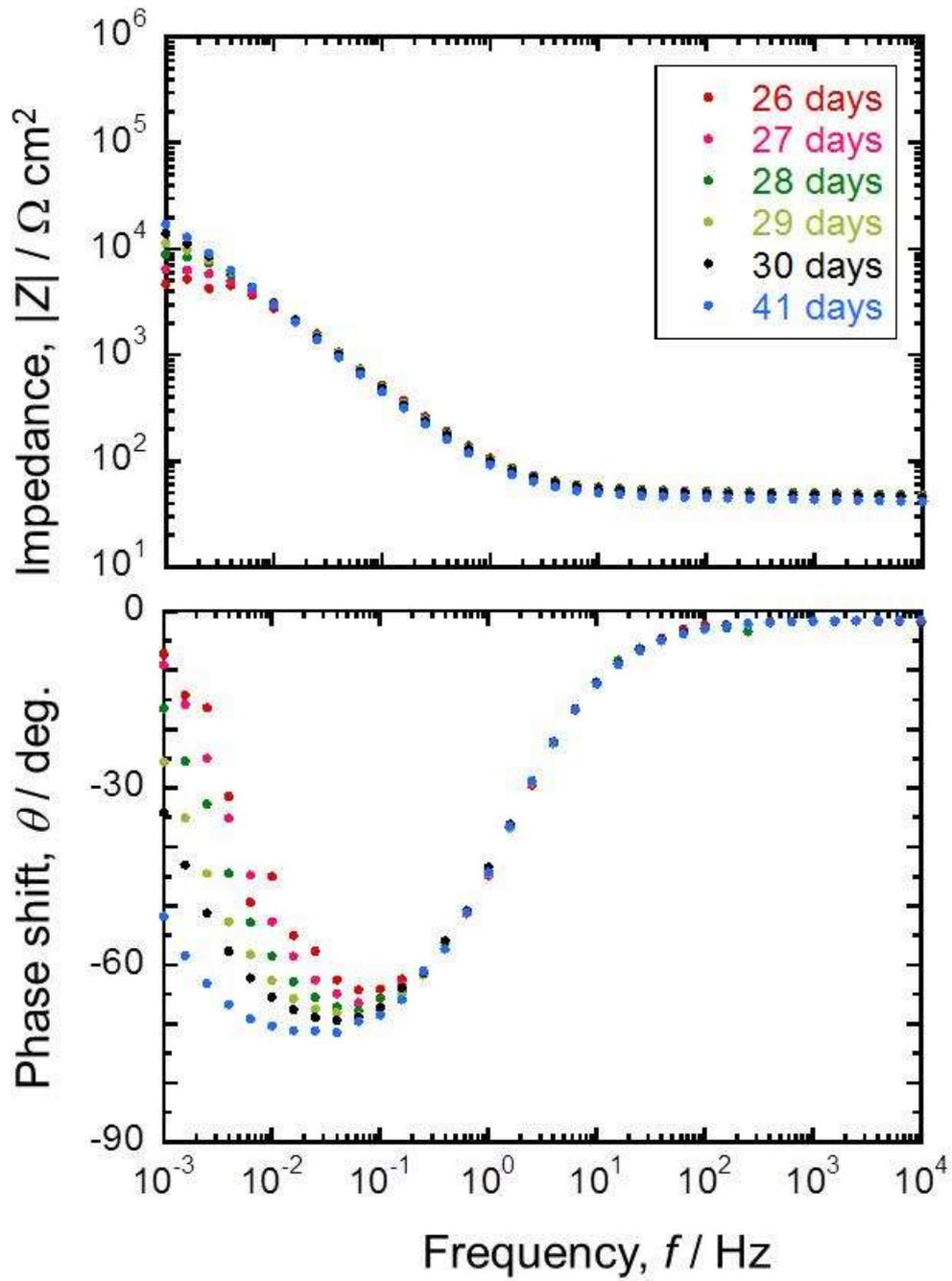


図 3.5.6-3 # 1プローブで測定された EIS

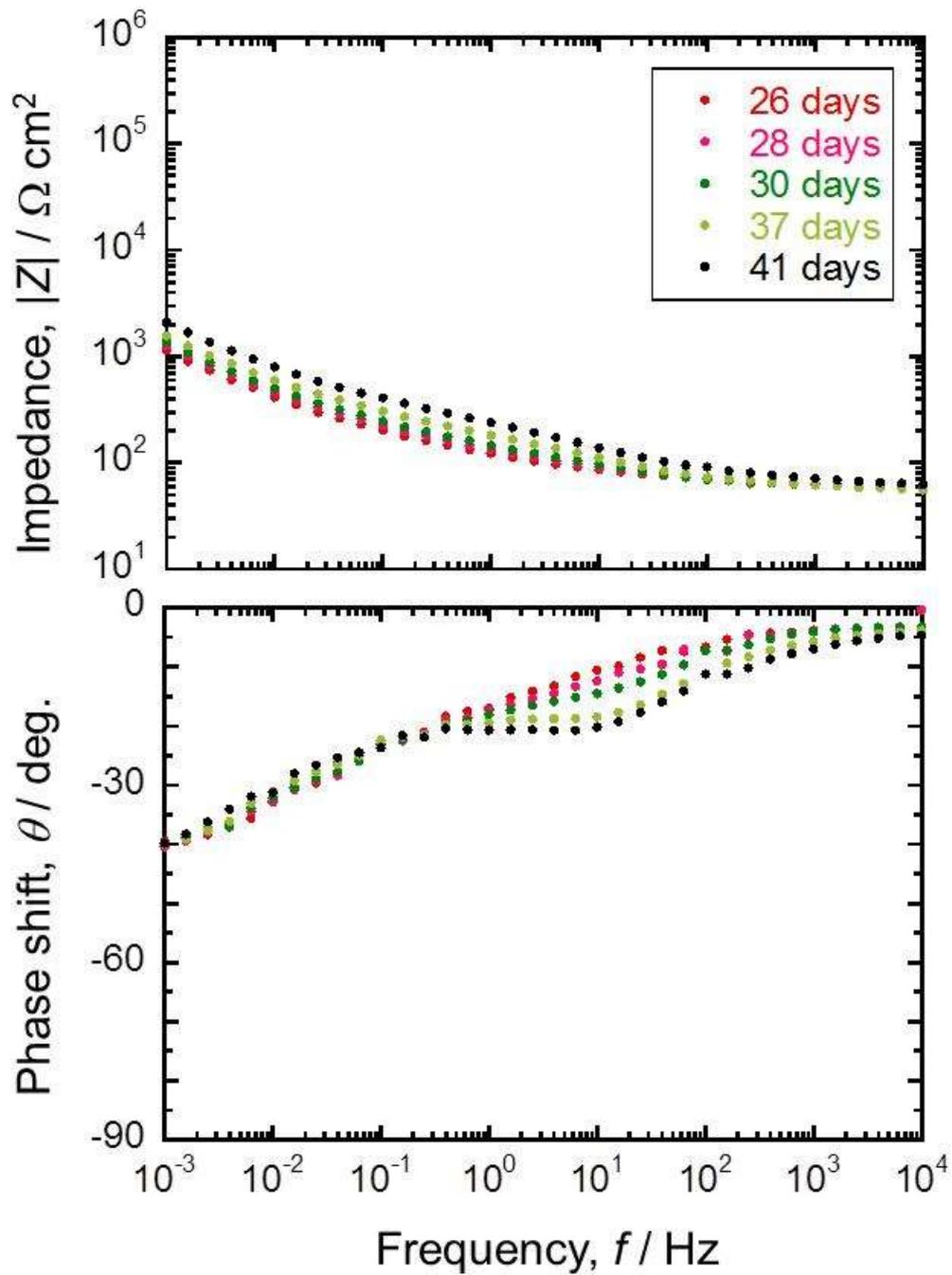


図 3.5.6-4 # 2プローブで測定された EIS

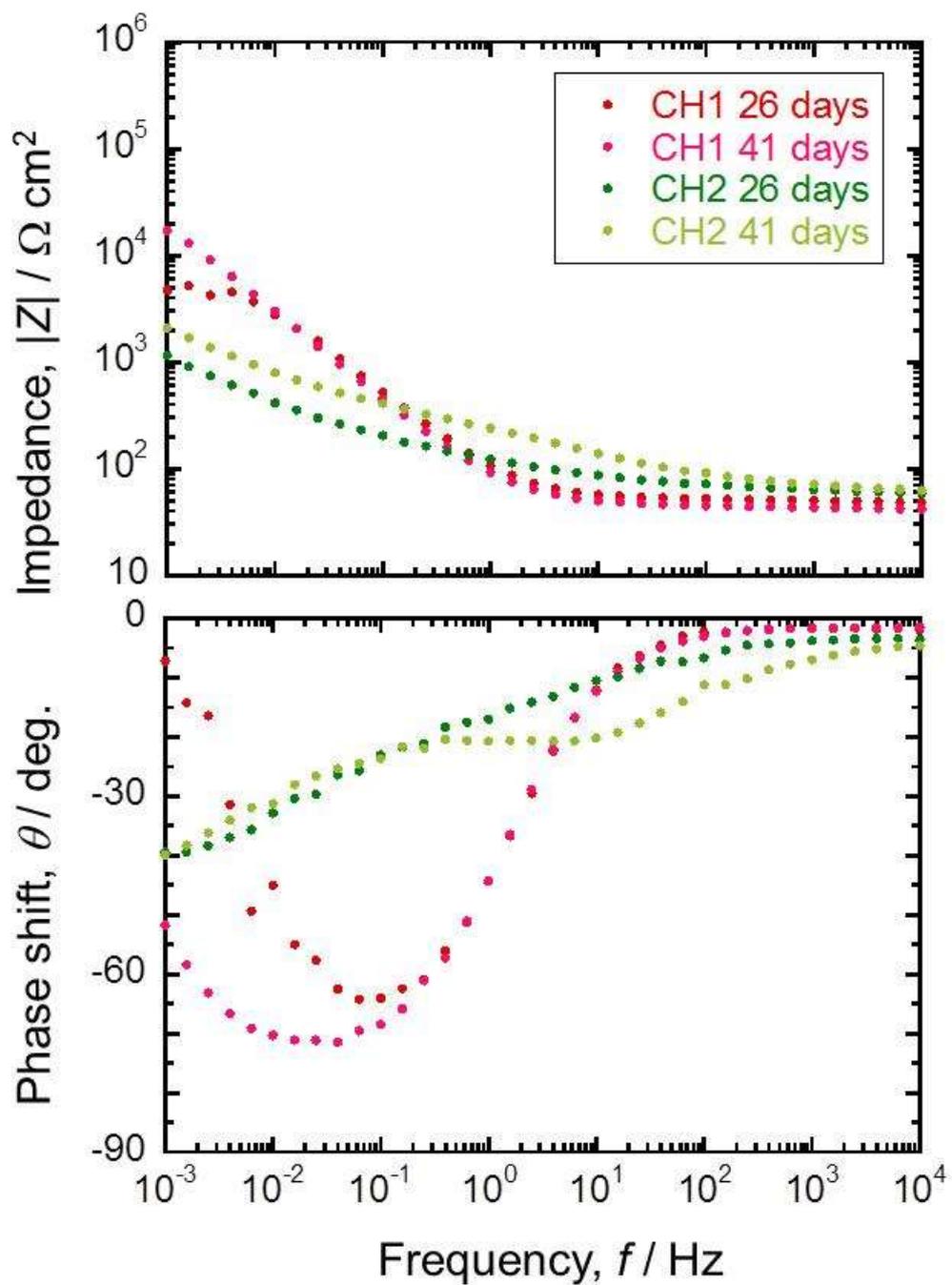


図 3.5.6-5 # 1 と # 2 プロブの EIS の比較

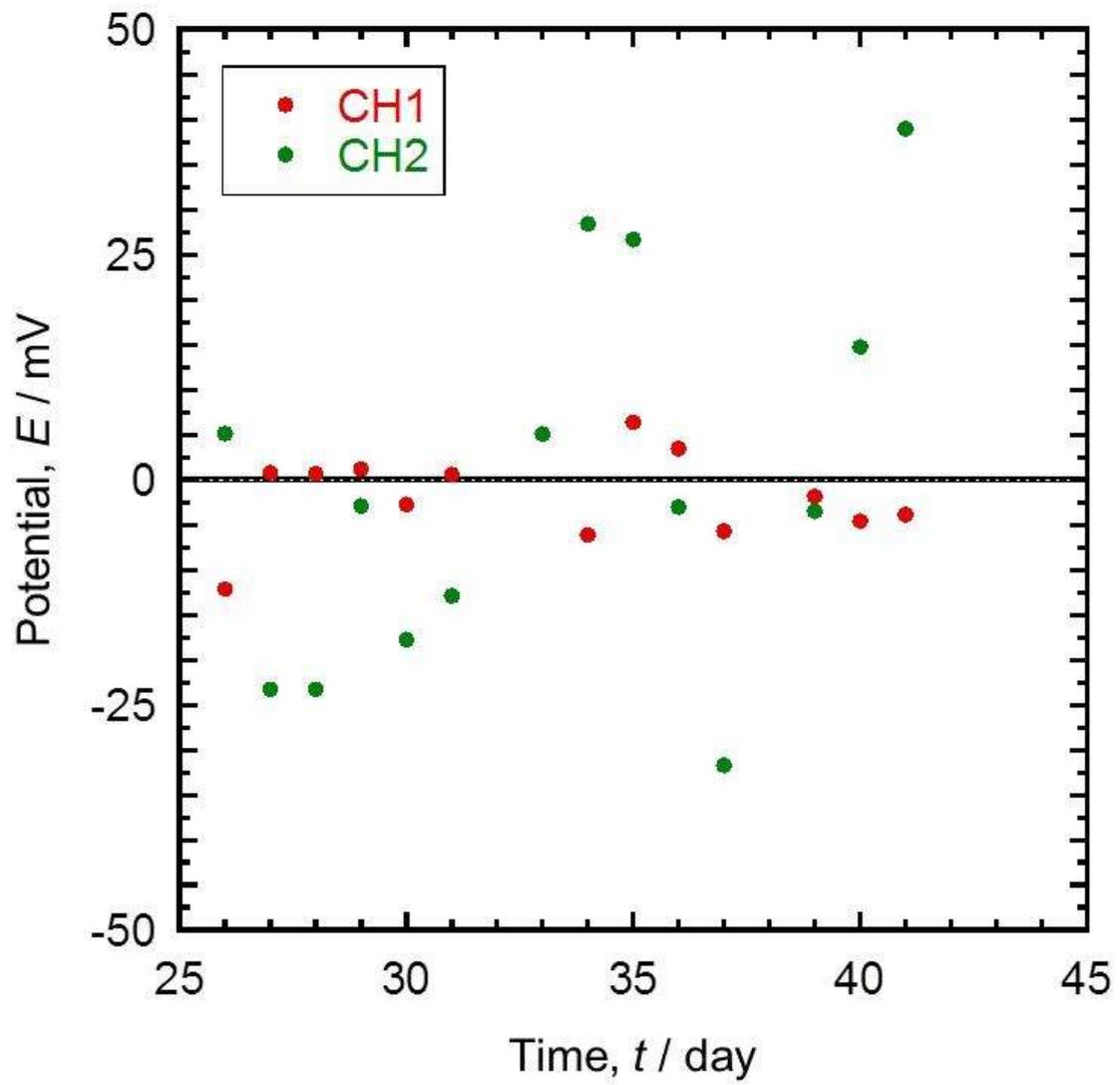


図 3.5.6-6 2 電極間の電位差

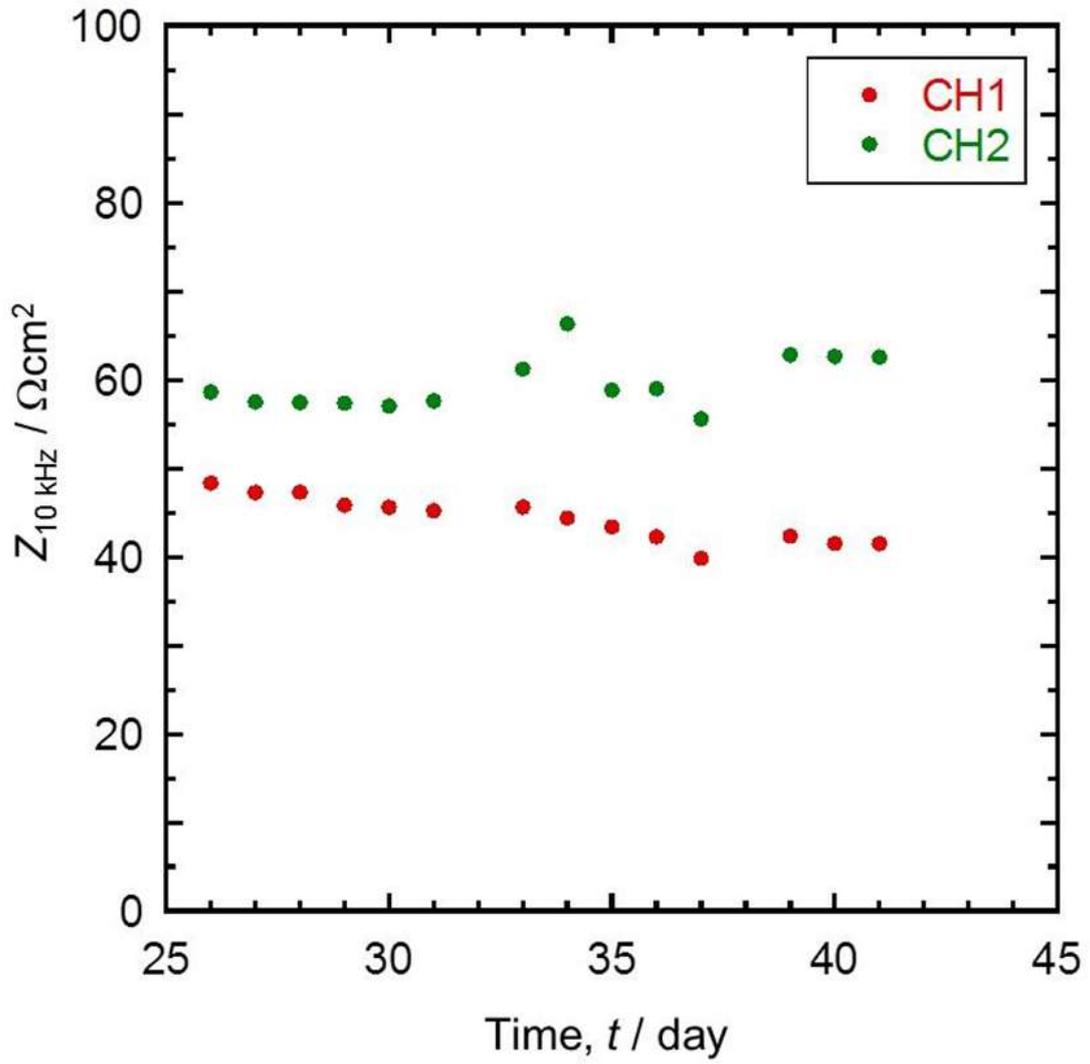


図 3.5.6-7 高周波数（10kHz）のインピーダンスの経時変化 ベントナイトの抵抗に相当

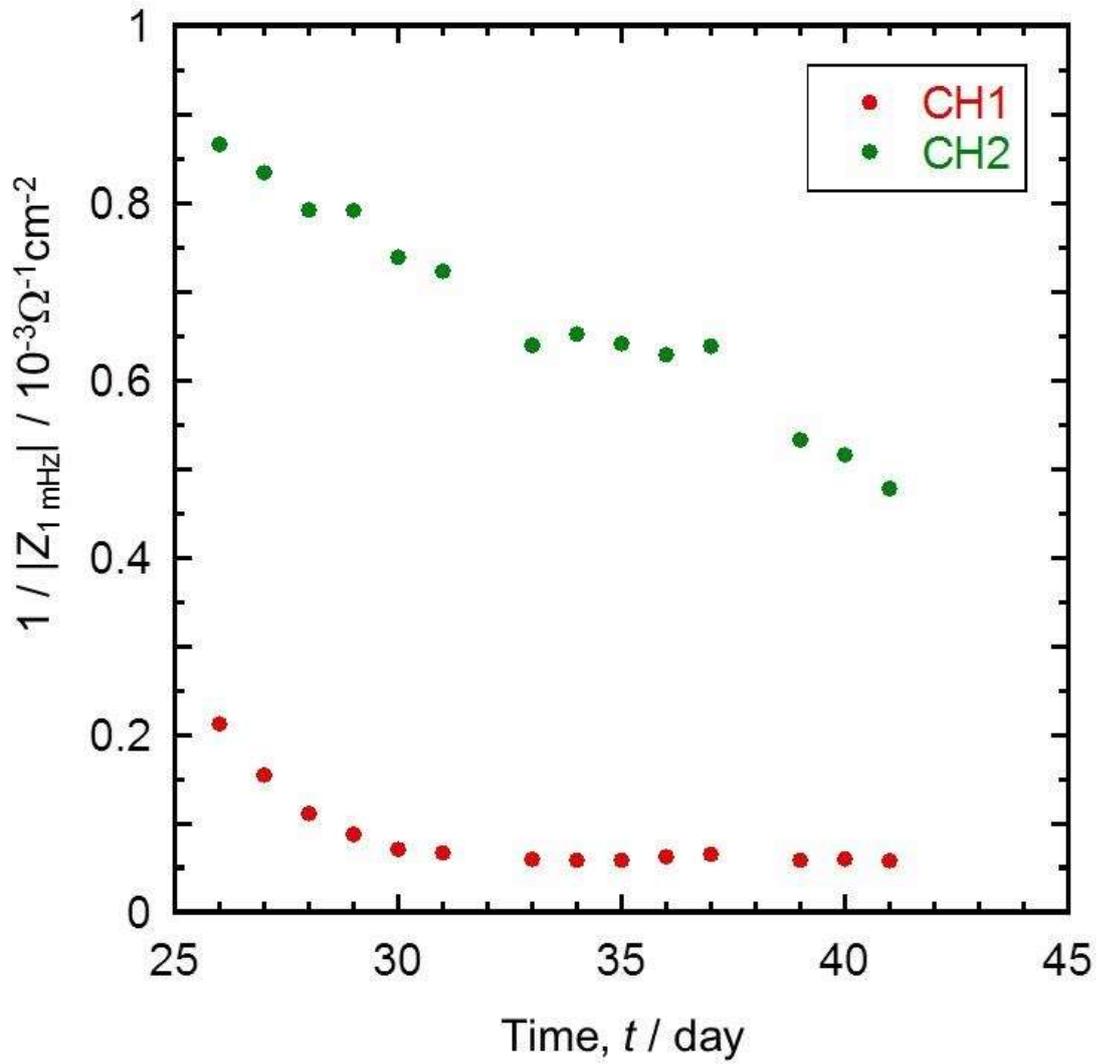


図 3.5.6-8 低周波数（1mHz）のインピーダンスの逆数の経時変化 腐食速度の指標

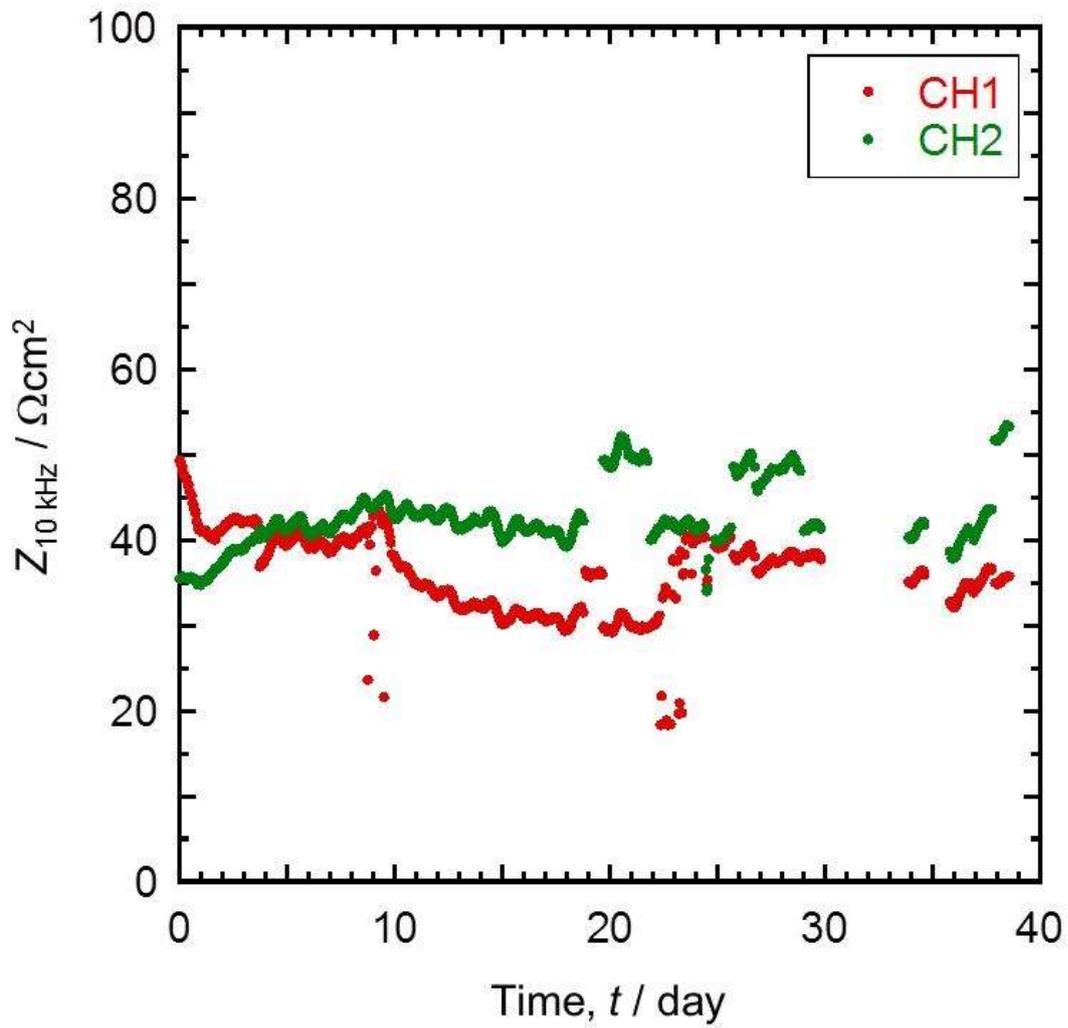


図 3.5.6-9 腐食モニターにより測定された高周波数 (10kHz) のインピーダンスの経時変化

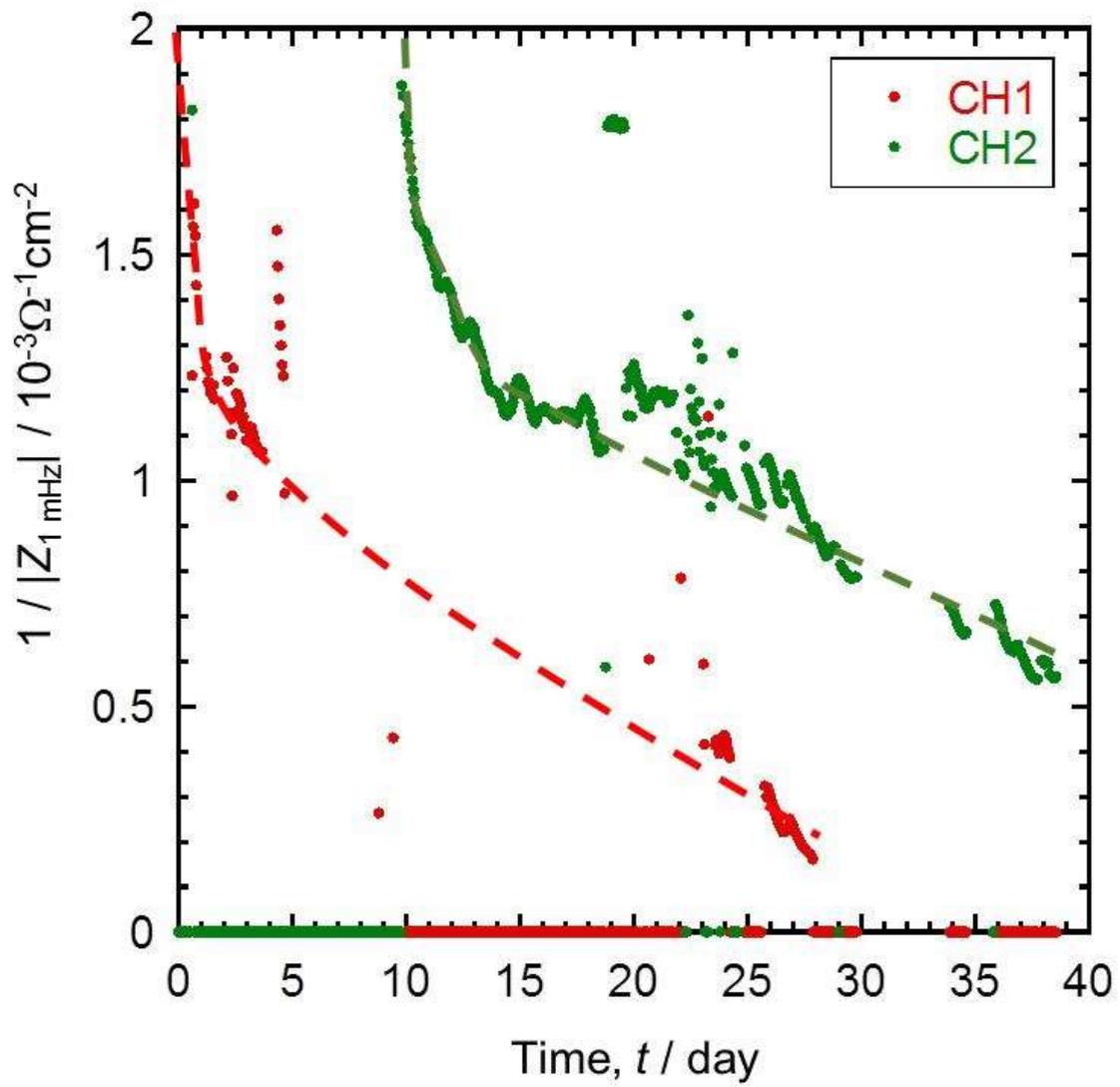


図 3.5.6-10 腐食モニターにより測定された低周波数（1mHz）のインピーダンスの逆数の経時変化

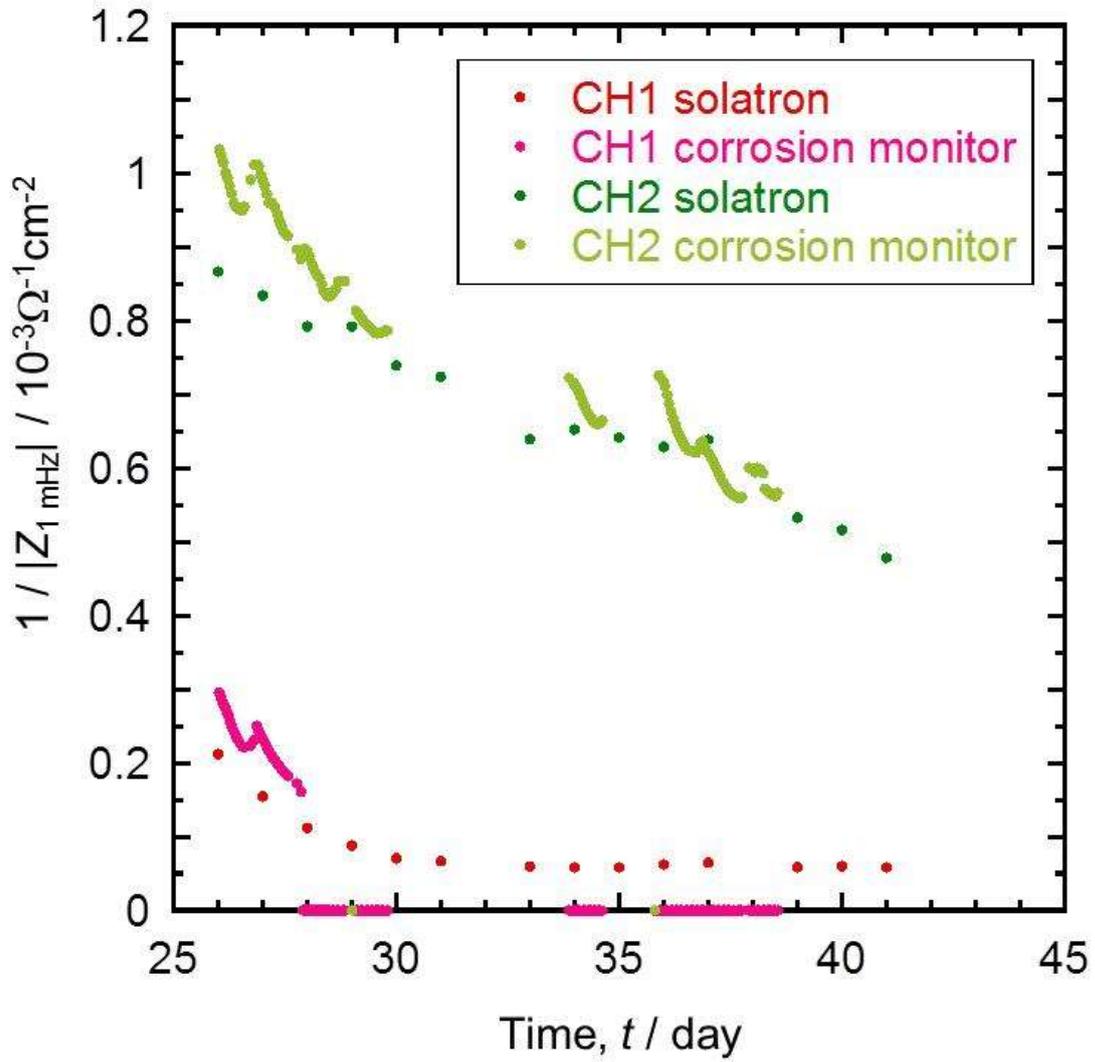


図 3.5.6-11 腐食モニター（Corrosion Monitor）と全周波数測定（Solatron）の比較（1mHzのインピーダンス）

(6) 同一環境下での試験

インピーダンス用センサの設置状況を図 3.5.6-12 に示すように、センサは 2 個設置した。インピーダンス測定の設定条件を表 3.5.6-1 に示す。なお、用いた測定装置は簡易型のインピーダンス測定装置で、2 周波数の固定型(高周波数側：10kHz、低周波数側：1m、10m、100mHz からの選択で、1mHz で実施)で、開始時間、界面容量、腐食抵抗、溶液抵抗、および、電位電流位相差が定期的 (60min に設定) に書きだされる。インピーダンス計測の出力例を表 3.5.6-2 に示す。

R_s 、および、 R_c の経時変化を図 3.5.6-13 に示すように、 R_s は ch1、ch2 とともに似た傾向を示した。一方、 R_c は、いずれも 50h を境に傾向が大きく変わったが、ch1 は R_c が小さく 104~105、ch2 は R_c が大きく 108~109 であった。インピーダンス法による腐食速度 (CREIS) の経時変化を図 3.5.6-14 に示す。なお、CR EIS は、 $0.026 \times (1/R_c)$ を mm/y 換算して求めた。ch1 は 0.1mm/y オーダーで定常腐食をしていると推察されるのに対して、ch2 は 10-6mm/y オーダーと小さく、a) 腐食環境が整っていない、もしくは、b) 腐食環境にあるものの一般的な R_c から CR への換算式 (係数) が使えない状況であると推察される。



図 3.5.6-12 インピーダンス用センサの設置状況

表 3.5.6-1 インピーダンス測定の設定条件

H_AMP=10mV	H_Freq=10kHz
L_AMP=50mV	L_Freq=1mHz
INTERVAL=60Min.	
L_CYCLES=1	SEL_CH=12

表 3.5.6-2 インピーダンス計測の出力例

H_AMP=10mV	L_AMP=50mV	H_Freq=10k	L_Freq=1m	INTERVAL=	L_CYCLES=	SEL_CH=12		
DATE TIME	CH.1						CH.2	
	Rs	Rc	Cdl	Phi	Rs	Rc	Cdl	Phi
2017/2/6 17:52	2977.2	6.06E+08	0.06uF	-17.9	3236.5	54840284	1.53uF	-34.5
2017/2/6 19:58	1804.2	5.52E+08	0.06uF	-19.9	2371.5	25871154	3.78uF	-33.8
2017/2/6 21:05	1793.7	7.13E+08	0.22uF	-51.5	1921.6	16674710	-8.16uF	-111.8
2017/2/6 22:12	1645.7	4.22E+08	0.27uF	-51.3	1889.6	27729690	-28.44uF	-103.7
2017/2/6 23:19	1114.6	1.93E+08	0.03uF	-48.7	1641.5	11445926	3.56uF	-191.6
2017/2/7 0:26	921.1	1.95E+08	0.57uF	-63.1	1516.5	11955258	-222.73uF	-93.7
2017/2/7 1:33	980.9	1.81E+08	0.27uF	-55.9	1554.8	4736597	-20.82uF	-150.3
2017/2/7 2:40	1231.4	91255472	0.41uF	-54.5	1477.1	9189816	-9.50uF	-143.7
2017/2/7 3:47	866.9	1.39E+08	0.13uF	-54	894.5	1.11E+08	0.82uF	-57.4
2017/2/7 4:54	1274.5	1.81E+08	0.38uF	-35.6	788.1	1.32E+08	2.57uF	-59.6
2017/2/7 6:01	886.6	27887500	23.53uF	-74.9	878.3	9479576	0.16uF	-3.7
2017/2/7 7:08	1211.5	60141920	8.71uF	-68.1	715.2	909481.4	-741.16uF	74
2017/2/7 8:15	1260.1	14114100	11.26uF	-40.9	706.5	1.37E+08	0.25uF	-49.5
2017/2/7 9:22	760.1	90467440	0.12uF	-35.2	1046.7	1.34E+08	0.22uF	-45.7
2017/2/7 10:29	903	18453660	0.06uF	-23.5	1059.8	1.29E+08	1.65uF	-46.3
2017/2/7 11:36	1277.1	3419860	0.30uF	-3.4	670.1	1.44E+08	0.64uF	-24.4
2017/2/7 12:43	1394.8	5697848	40.48uF	-49.5	738.9	98660568	0.74uF	-39.7
2017/2/7 13:50	1293.9	2090229	-76.13uF	40.2	664.7	1.22E+08	0.15uF	-41.3
2017/2/7 14:57	794.8	1672258	2.29uF	-1.3	606.7	1.33E+08	0.55uF	-38.8
2017/2/7 16:04	1136.3	858507.1	15.39uF	-10.6	962.3	1.3E+08	0.66uF	-27.7
2017/2/7 17:11	717.2	577372.5	14.26uF	-7.5	510.4	1.27E+08	0.40uF	-19.6
2017/2/7 18:18	735.4	600367.1	5.02uF	-3.5	495.9	99181808	0.07uF	-23.6
2017/2/7 19:25	750.1	323922	2.77uF	-4.7	918.2	80716928	0.02uF	-4.6
2017/2/7 20:32	669.8	411962.1	108.57uF	-12.7	466	4.43E+08	0.48uF	-46.3
2017/2/7 21:39	659.5	374755.6	58.44uF	-5.4	447.1	64699764	0.72uF	-15.4
2017/2/7 22:46	652.2	292243.7	37.46uF	-3.6	490.9	5E+08	0.38uF	-55.7
2017/2/7 23:53	636.6	328382.6	2.35uF	-7.8	489.2	2.48E+08	0.13uF	-29.1
2017/2/8 1:00	609.3	392297.1	40.83uF	-5.7	447.5	3.03E+08	0.14uF	-16.5
2017/2/8 2:07	568.6	230448.8	-26.87uF	1.4	433.5	2.51E+08	0.18uF	-19.7
2017/2/8 3:14	936.8	224109.3	8.74uF	-0.8	392.9	4.34E+08	0.20uF	-24.8
2017/2/8 4:21	927.7	146778.7	52.63uF	-3.2	432.2	4.38E+08	0.18uF	-25.7
2017/2/8 5:28	916.1	123439.4	179.49uF	-5.4	409.8	3.04E+08	0.03uF	-2
2017/2/8 6:35	609.2	105230.9	81.15uF	-2.7	408	4.05E+08	0.08uF	-9.5
2017/2/8 7:42	580.4	74806.6	91.39uF	-1.5	410	4.01E+08	0.05uF	-9.4
2017/2/8 8:49	597.3	57688.8	-24.24uF	0.5	865.6	3.13E+08	0.01uF	-10.9
2017/2/8 9:56	928.4	46059.3	218.10uF	-3.9	427.2	2.82E+08	0.03uF	-2.7
2017/2/8 11:03	579.5	40563.4	142.73uF	-1.4	467.8	1.57E+09	0.01uF	-3.7
2017/2/8 12:10	941.5	33770.1	52.39uF	-0.1	900.2	1.83E+09	0.01uF	-5.5
2017/2/8 13:17	587.3	31607.5	42.90uF	-0.4	496.4	1.68E+09	-0.01uF	2
2017/2/8 14:24	931.8	32012.9	58.71uF	0	507.7	1.6E+09	0.00uF	-4.7
2017/2/8 15:31	661.9	29432	314.87uF	-2.8	980.8	1.27E+09	0.00uF	0
2017/2/8 16:38	640.8	30170.8	37.50uF	-0.3	524.6	1.2E+09	0.02uF	-6.7
2017/2/8 17:45	624.6	34267.5	208.05uF	-3.2	473.5	1.17E+09	-0.01uF	2.7
2017/2/8 18:52	1011	37096.9	150.03uF	-4	495.9	1.37E+09	-0.00uF	0.2
2017/2/8 19:59	608.6	37814.6	878.57uF	-8.4	504.5	1.9E+09	0.00uF	-4.2
2017/2/8 21:06	599.9	45635.3	575.80uF	-9.2	483.7	1.75E+09	0.01uF	-2.2
2017/2/8 22:13	550.6	41403.2	731.11uF	-8.1	535	1.27E+09	0.01uF	-5.6

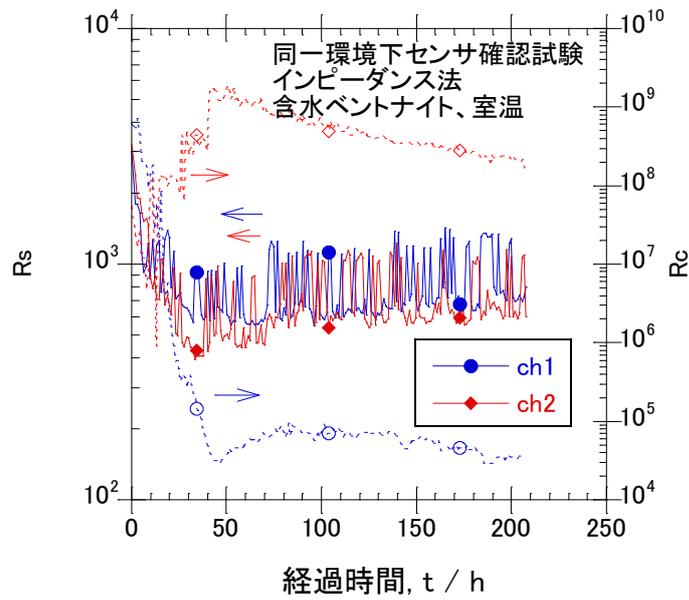


図 3.5.6-13 R_s 、および、 R_c の経時変化

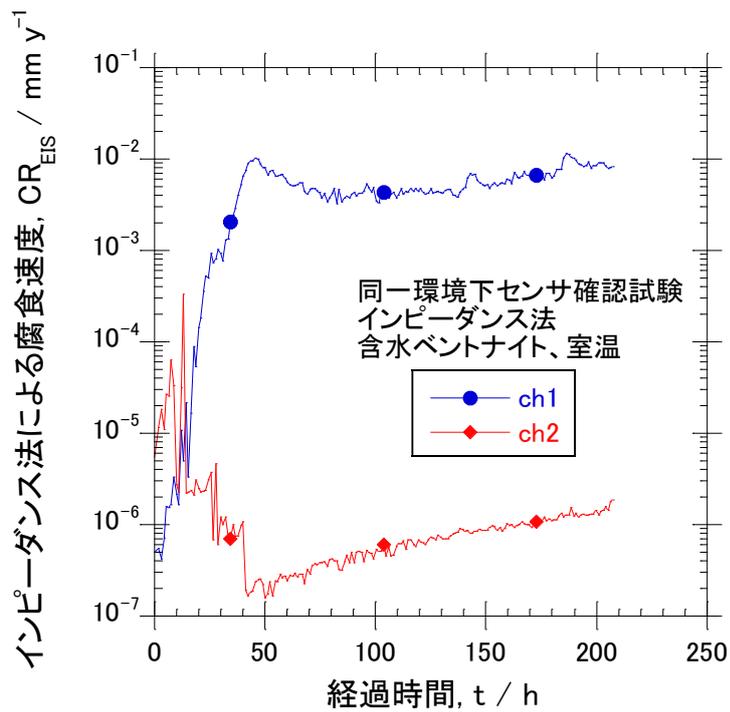


図 3.5.6-14 インピーダンス法による腐食速度の経時変化

3.5.7 腐食計測技術の適用性確認調査における3電極式、薄膜レジストメトリー、電気抵抗/ポテンシャルドロップ法、および、インピーダンス法の比較

腐食計測技術の適用性確認調査における3電極式、薄膜レジストメトリー、電気抵抗/ポテンシャルドロップ法、および、インピーダンス法を比較して、代表的な図を図 3.5.7-1 および図 3.5.7-2 に示す。

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、原理は同じであって、直接、腐食挙動を捉えるものではない。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。一方、電気抵抗/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。実際、本試験のように腐食が局在化し、かつ、比較的速い腐食速度を有する系で定量評価するためには試験片の厚さを厚くする必要があるが、薄膜インピーダンス法ではその感度の再見積などによる計測性の確認などが必要とされるが、ポテンシャルドロップ法では設定条件の微調整で良い。なお、いずれにしても、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、個々の位置での腐食状況は不明である。また、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。一方、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いるため、系に外乱要因を負荷していることになる。いずれも、電気化学挙動を直接捉える方法である。

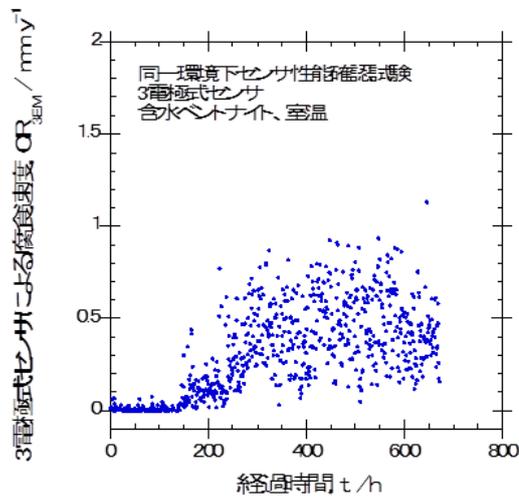
防爆などの観点など外乱因子を嫌う場合、および、化学プラントなど実環境での長期にわたる挙動の追跡には3電極式、外乱を許容する代わりに高精度での計測を優先すればインピーダンス法が有利として、それぞれ、計測法が選択されている。

3電極法による実プラントの挙動の追跡に於いては、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。さらに腐食（速度）の定量に際しては、クーポン試験片との比較による換算など、3電極法特有の使われ方を把握することが必要である。

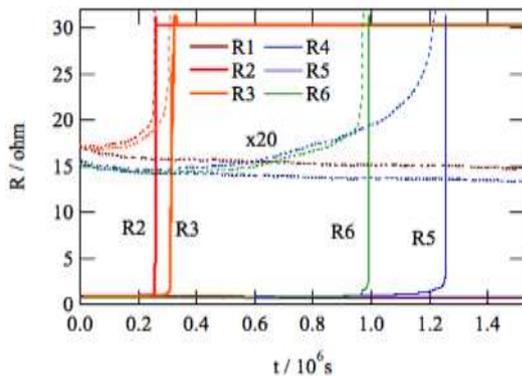
インピーダンス法は主に、実験室試験、および、その延長上でのフィールド測定が行われているが、化学プラントなど実環境での長期間の適用は、ほとんど、行われていない。

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。1) 3電極式のハードはタフであるが算出された腐食速度の中には不整合なものがあり、それらを除外する過程が必要な場合がある。2) 薄膜レジストメトリーは感度良く腐食の発生や進展が検出できるが、薄膜ゆえに、早い腐食速度、および、腐食が局在化する系では、薄膜センサの最適化が必要となる。3) ほぼ同じ原理に基づくポテンシャルドロップ法は、早い腐食速度、および、腐食が局在化する系に対し

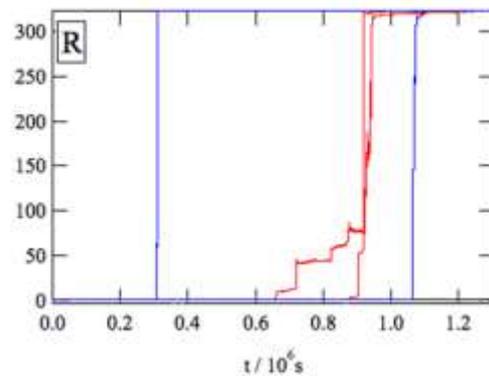
ても比較的容易に適用可能であるが、腐食速度を定量するためには独自の検定曲線などデータベースを構築する必要がある。4) インピーダンス法は、市販の実験用機器で精度良く測定結果が出力されるが、真の腐食挙動との対応を、別途、確認する必要がある。



(a) 3電極式センサによる ENA 法



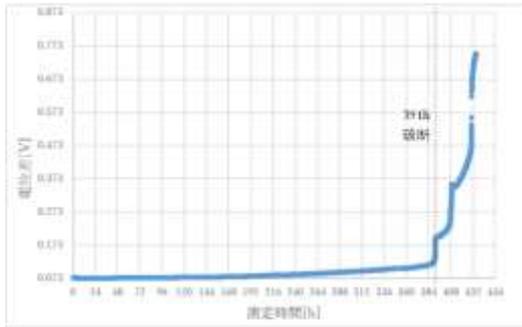
(i) 北大



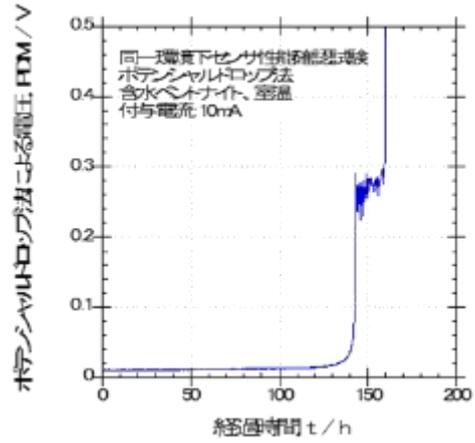
(ii) 同一環境下での試験

(b) 薄膜レジストメトリー法

図 3.5.7-1 腐食計測技術の適用性確認調査における 3 電極式、薄膜レジストメトリーの比較

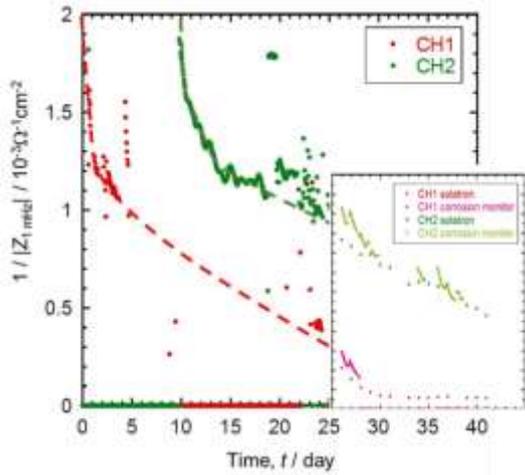


(i) 東北大

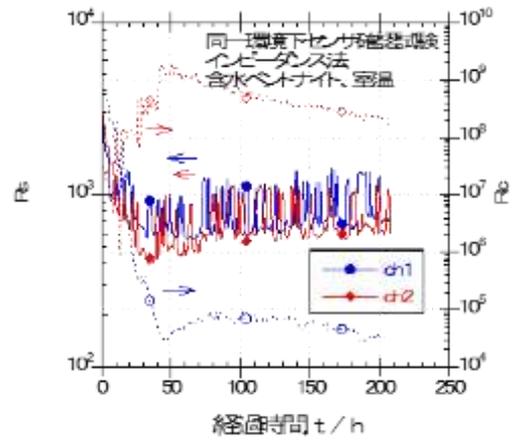


(ii) 同一環境下での試験

(a)電気抵抗ポテンシャルドロップ法



(i) 東工大



(ii) 同一環境下での試験

(b)インピーダンス法

図 3.5.7-2 腐食計測技術の適用性確認調査における電気抵抗/ポテンシャルドロップ法、インピーダンス法の比較

3.6 まとめ

工学規模試験（幌延 URL、地上工学規模試験）および小規模要素試験（不均質試験、経時変化試験）の実施、腐食計測技術の適用性検討について、平成 25 年度に立案した計画に基づき、継続して実施した。不均質試験装置の解体を通して、来年度解体予定の工学規模試験装置のうち、幌延 URL 試験装置の解体及び分析方法を検討した。

幌延 URL での試験では、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℃の状態での腐食速度の計測を継続すると共に、地下水の溶存酸素濃度および溶存炭酸ガス濃度を計測した。その結果溶存酸素は 1ppm 以下と非常に低かったが、溶存炭酸ガスは 200～300ppm となった。溶存炭酸ガスが腐食にどのような影響を及ぼすかは、次年度の解体時に確認する必要があるが、試験孔 2 に設置したクーポンの腐食量は H12 レポート[2]と整合的であった。また、3 電極センサーの電流・電圧測定データによる再評価を行い、約 10^{-7} A 未満の電流値は、腐食速度が $1\mu\text{m}$ /年未満と見なし、データ幅と電流・電圧間の相関性が十分高いデータを腐食速度算出用として抽出した。再評価後は、腐食速度は高くても数十 μm /年程度となった。地上工学規模試験装置でも、ガラス固化体からの発熱を想定して、ヒーターによる模擬オーバーパックスの加熱を開始した。幌延 URL 同様、3 電極センサーの再評価を行い、再評価後では初期に数百 μm /年となる他は、数十 μm /年程度またはそれより低い値となった。

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、不均質試験装置の解体を実施した。3次元計測による腐食量は、母材、溶接部、緩衝材に隙間を施した不均質部で大きな差異は認められず、7～11 μm 程度であり、全面腐食が進行していると考えられた。この値は、試験期間約 1 年における腐食量としては、H12 レポートで示された腐食量と整合的である。経時変化試験では、緩衝材膨潤に伴うオーバーパックス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とを踏まえ、この確認を目的として試験を実施した。小規模要素試験に属する不均質試験と経時変化試験で比較する際、装置仕様の違い（主に模擬地下水の水パス）に起因する試験片とベントナイトブロックの接触履歴・腐食環境の成立時期が異なることに留意した評価が必要となることが分かった。

不均質試験装置の解体時に、来年度の幌延 URL 試験装置の解体に反映させるため、① 工学規模試験装置解体手順の作成、② 緩衝材ブロックのサンプリング位置及びサンプリング方法の確認、③ 模擬オーバーパックスの脱錆・養生方法の確認、④ 模擬オーバーパックス脱錆、計測に伴う移送時の影響確認し、結果を元に、幌延 URL 試験装置の分析項目の洗出し、解体方法及び解体スケジュールの検討、解体治具の設計を実施し、ハンドリングフローを制作し、それらを元に解体計画を提示した。解体計画の前提は 5 月開始としており、検討の結果、この 5 月開始が遅れた場合には全体工程が数ヶ月遅延する可能性があるので注意を要する。

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。今年度は、統一試験環境・条件下の試験により、① 3 電極式、

②薄膜レジストメトリー、③電気抵抗/ポテンシャルドロップ法、および、④インピーダンス法を用いて腐食挙動を計測した。適用した4つの計測方法には、それぞれ特徴があり、1) 3電極式についてハードはタフであるが算出された腐食速度の中には不整合なものがあり、それらを除外する過程が必要な場合がある。2) 薄膜レジストメトリーは感度良く腐食の発生や進展が検出できるが、薄膜ゆえに、早い腐食速度、および、腐食が局在化する系では、薄膜センサーの最適化が必要となる。3) ほぼ同じ原理に基づくポテンシャルドロップ法は、早い腐食速度、および、腐食が局在化する系に対しても比較的容易に適用可能であるが、腐食速度を定量するためには独自の検定曲線などデータベースを構築する必要がある。4) インピーダンス法は、市販の実験用機器で精度良く測定結果が出力されるが、全周波数計測などで、腐食速度を計測する適切な周波数帯を選定し、真の腐食挙動との対応を別途確認する必要がある。これらにより長期健全性評価に資する、実地下環境における溶接部の腐食に係わる知見の整備を引き続き進める。

第3章参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構、緩衝材の飽和透水特性-II、－海水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響－、JNC TN8430 2003-002 (2003).
- [2] 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).
- [3] 碓崎裕晃、地層処分環境における炭素鋼オーバーパックスの腐食挙動に関する研究、東北大学大学院工学研究科 修士論文 (2016).
- [4] 栗原雄二他、幌延地層研究計画における処分技術に係わる原位置試験概念の検討、核燃料サイクル機構 研究報告 JNC TN8400 2004-002 (2004).
- [5] 小西一寛他、幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートの施工性に関する研究、JAEA-Research 2006-040 (2006).
- [6] 滝和夫他、地盤凝固剤による地下水汚染解析、水質汚濁研究第10巻 第4号、p260-268 (1987).
- [7] 藤田朝雄他、地層処分実規模設備整備事業における工学技術に関する研究 平成25年度、JAEA-Research 2014-031 (2014).
- [8] 谷口直樹、森本昌孝、本田明、ベントナイト中における炭素鋼の不動態化条件の検討、サイクル機構技報 No.4 1999.9 (1999).
- [9] 柴田雅博他、概要調査段階における設計・性能評価手法の高度化 NUMO-JAEA 共同研究報告書 (2012).
- [10] 後藤皓史、地層処分用オーバーパックス材料の腐食速度モニタリング技術に関する研究、東北大学工学部 卒業論文 (2015).
- [11] 日本機械学会、改定3版金属データブック、丸善株式会社、p121 (1993).

第4章 メカニズム解明の腐食試験

本章では、オーバーパック候補材料である炭素鋼の低酸素環境下（以下、還元性雰囲気）における腐食挙動に及ぼす溶接の影響を明らかにすることを目的とした耐食性試験について述べる。本試験は、長期浸漬試験として平成 17 年度から実施しており[1]、本年度、所定の期間（5 年間および 10 年間）の浸漬が終了したことにより、炭素鋼試験片の取り出しを実施した（ただし、10 年間浸漬する MAG 母材、水素分析用の試験片は平成 29 年度に取り出しを予定している）。ここでは、これらの炭素鋼試験片の分析評価結果を報告する。

4.1 実施目的

地球化学的な解析によれば、処分場の環境は閉鎖後数十年～数百年程度の時間で深部地下本来の酸素がほとんどない条件に戻るとされている[2]。このような還元性雰囲気において、炭素鋼の腐食形態は水の分解による水素発生反応をカソード反応とした式（4.1-1）に示す全面腐食型になると考えられている。



第 2 次とりまとめでは、様々な腐食試験の結果から、緩衝材共存還元性雰囲気における炭素鋼の平均腐食速度を $10\mu\text{m}/\text{y}$ と見積もっている。すなわち、オーバーパックにこの腐食速度を考慮した十分な「腐食代」を設ければ、1000 年に渡って放射性核種の閉じ込め性能を維持できている。この設計思想は炭素鋼という均一な材質（母材）を想定した場合であるが、実際のオーバーパックには材料組成や金属組織が異なる溶接部が存在しており、このような材料因子の影響によって、還元性雰囲気では不均一な腐食が生じることが懸念される。そこで、オーバーパックの長期健全性評価の信頼性向上の観点から、炭素鋼試験片（溶接付き試験片および母材単独試験片）を緩衝材中に設置し、還元性雰囲気中の溶液に浸漬する試験を平成 17 年度から開始した。

この試験では溶接部の耐食性（平均腐食速度）を確認し、また腐食に伴い発生する水素の影響（水素脆化）の検討のために、炭素鋼中への水素侵入挙動を把握してきた。本年度は、これまで還元性雰囲気中に維持・管理してきた浸漬試料が、所定の期間（5 年間および 10 年間）に達したことから、炭素鋼試験片の取り出しおよび分析評価を実施し、長期腐食挙動に関するデータの拡充を実施した（ただし、10 年間浸漬する MAG 母材単独の水素分析用の試験片は平成 29 年度に取り出しを予定している）。

4.2 これまでの実施内容

4.2.1 平均腐食速度の評価

材料組成や組織が異なる溶接部の腐食挙動を評価するため、『遠隔溶接高度化開発』で製作した TIG、EBW、MAG の 3 種類の溶接試験体について、溶接付き試験片および母材単独試験片の腐食挙動を確認した。平成 22 年度までに人工海水環境の 90 日間、1 年間、3 年間の 3 期間、お

よび人工淡水環境の1年間の浸漬試験片の評価を実施した。

浸漬前後の単位面積あたりの重量減少を浸漬期間で除した平均腐食速度は、溶接付きでも母材単独と概ね同等という傾向が得られ、浸漬3年経過後の腐食速度は溶接方法によらず数 $\mu\text{m/y}$ であった。

4.2.2 水素吸収挙動の評価

還元性雰囲気では炭素鋼の腐食に伴い水素が発生し、その一部が鋼中に侵入することが知られている。この水素は脆化割れを引き起こすことが懸念されるが、この割れは腐食代の確保では健全性を確保することが困難であるため、実環境で発生するか否かを評価することが重要である。炭素鋼は脆化を引き起こす臨界の水素濃度と材料強度の関係が実験的に知られており[3]、母材については腐食によって鋼中に侵入した水素量の評価から水素脆化の生起可能性は低いと考えられている[2]。しかしながら、溶接部は材料因子の相違によって、水素吸収挙動や水素脆化感受性が母材と異なる可能性がある。溶接部の水素吸収挙動として、浸漬試験に供した試験片中の拡散性水素量の分析を実施した。平成22年度までに、人工海水環境の30日間、90日間、1年間、3年間の4期間、および人工淡水環境の1年間の浸漬試験片の評価を実施した。

溶接部および母材ともに、浸漬3年経過後の水素濃度は0.1ppmを下回った。この値は炭素鋼母材や溶接部の強度から見積もられる臨界水素濃度と比較すると十分に小さく、溶接部の水素脆化の生起の可能性は低いと考えられた。なお浸漬初期において、TIGの溶接金属部の水素濃度が高くなる傾向がみられたが、溶接後熱処理(Post Weld Heat Treatment, PWHT)によって、他の溶接法や部位と同等の水素濃度まで低下することが確かめられている[4]。

4.2.3 浸漬試験計画の見直し

還元性雰囲気での緩衝材共存下の長期腐食挙動の把握を目的とした既報としては、炭素鋼母材の10年間の浸漬試験がある[5]。この試験では種々の環境における腐食量や腐食生成物の分析を実施しており、浸漬1年以降の腐食速度は $1\mu\text{m/y}$ を下回ると評価しており、腐食代の設定根拠である $10\mu\text{m/y}$ を満足する結果であった。この報告での緩衝材は第1次取りまとめで検討された乾燥密度 1.8g/cm^3 の純ベントナイトを想定しており[6]、本試験条件である第2次取りまとめの30wt%ケイ砂混合の 1.6g/cm^3 とは異なる条件である[2]。

上記の観点を踏まえ、緩衝材の仕様の相違に関する知見を拡充すること、および本研究の目的である溶接部については10年間程度を想定した長期的な腐食挙動の確認がなされていないことから、平成23年度に本浸漬試験の計画の見直しを実施した[7]。すなわち、本試験は浸漬3年以上を目処とした長期試験を念頭に平成17年度後半に開始したが、より長期のデータを効率良く取得するために、当初からの試料は10年間の浸漬を目標として試験片の取り出しを延引するとともに、5年間浸漬させる試験片を平成23年度に新たに追加して試験を開始した。今年度はこれらの炭素鋼試験片について分析した。ただし、10年間浸漬するMAGの母材単独、水素分析用の試験片は平成29年度に予定している。

4.3 試験方法

4.3.1 浸漬試験

(1) 試験片の作製と前処理

試験片は遠隔溶接高度化開発で製作した円筒型、円柱型の溶接試験体から機械加工により切り出した。図 4.3.1-1 に示すように、試験面（表側）が溶接試験体の外面側になるように、厚さを溶接試験体の半径方向、幅を周方向に合わせて採取した。腐食速度評価用の試験片は図 4.3.1-1 に示す幅 30mm、長さ 50mm、厚さ 2mm の平板型で、溶接付き試験片では長さ方向の中央部に溶接線が位置している。試験面の裏側に符号（試験片番号）を刻印し、各試験片の溶接試験体内での深さ方向の位置関係、および試験面（表側と裏側）を区別できるようにした。なお水素分析用試験片については、この試験片を 3 分割して幅 10mm、長さ 50mm、厚さ 2mm として用いた。

前処理として、試験片に付着した切削油や防錆油をアセトン中で約 10 分間超音波洗浄にて除去し、SiC 紙を用いて試験片両面を#800 まで乾式研磨した。さらにアセトン中で 10 分間超音波洗浄を行い、試験片表面の汚れを除去した。

研磨後、電子天秤を用いて試験片の重量を 3 回測定し、その平均値を試験片の初期重量として重量減少評価の基準値とした。またマイクロメーターで試験片の寸法（長さ、幅、厚さ）を計測した。

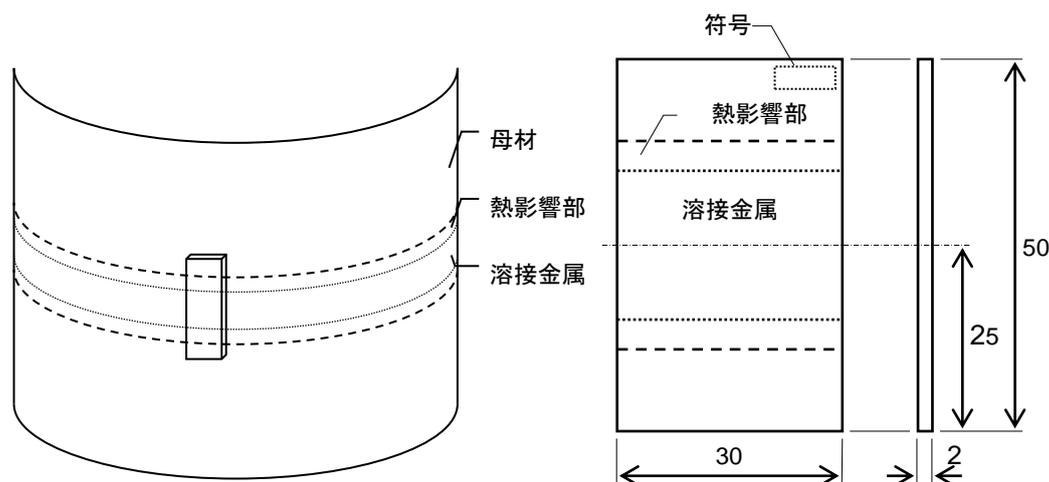


図 4.3.1-1 還元性雰囲気浸漬試験片切出し位置および寸法

(2) チタンカラムの組立て

緩衝材で取り囲まれた実際の処分環境を模擬するために、チタン製カラムを用いて緩衝材の充填を行った。試験片を詰めたカラムの断面を図 4.3.1-2 に示す。カラム構成部品、テフロン製カラーを中性洗剤で洗浄後、水道水、蒸留水の順にすすぎを行い、空気中または乾燥機（80℃以下）内で乾燥させた。試験片とカラム間を電氣的に絶縁するため、蓋板内面にテフロン製粘着テープを貼り付けるとともに（図 4.3.1-3 (a)）、テフロン製カラーを胴内側に装着した。蓋板にはチタンの窓とガラスフィルタを装着した。

ベントナイト（クニゲル V1：クミネ工業製月布産 Na 型ベントナイト）に 30wt% のケイ砂（3 号ケイ砂（瀬戸産）：5 号ケイ砂（西濠産）＝1：1）を均一に分散するように十分に混合後、

含水率を約 5%に調整したものを緩衝材として使用した。圧縮後の緩衝材の乾燥密度が 1.6g/cm^3 になるように、カラム容積と試験片体積を考慮して式(4.3.1-1)にて充填量 $M(\text{g})$ の緩衝材を求め、秤量した。

$$M = (\text{カラム容積}(\text{cm}^3) - \text{試験片の体積}(\text{cm}^3) \times 1.6(\text{g/cm}^3) / (1 - \text{含水率}(\%)) \quad \text{式 (4.3.1-1)}$$

底蓋板を取り付けたカラムに秤量した緩衝材の約 4 割を詰め、密度が 1.6g/cm^3 になるように治具を用いて油圧プレスで圧縮し、その上に試験片を設置した (図 4.3.1-3 (b))。さらに残りの緩衝材を詰めて圧縮し (図 4.3.1-3 (c))、ボルトで蓋板を固定した (図 4.3.1-3 (d))。

なお、腐食速度評価用および水素分析用の試験片ともに n 数は 3 として準備したが、寸法の関係から前者では 1 体のカラムに 1 枚を充填したのに対し (カラム 3 体/1 条件)、後者では 1 体のカラムに 3 枚を充填して使用した (カラム 1 体/1 条件)。

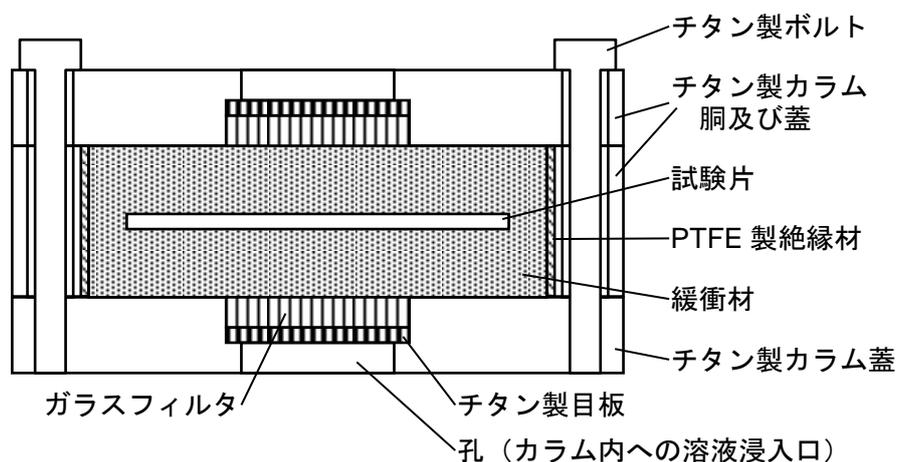


図 4.3.1-2 還元性雰囲気浸漬試験用チタンカラム



(a) 蓋内側をテフロンテープでマスキング



(b) 緩衝材の半量を圧縮後、水素分析用試験片を設置



(c) 油圧プレスで圧縮



(d) チタンボルトにて固定

図 4.3.1-3 カラム組み立て状況

(3) カラムの含水

試験溶液として海水系地下水を想定した ASTM 規格の人工海水と、希薄な地下水を想定した人工淡水 ($2.5\text{mM NaHCO}_3 + 2.5\text{mM NaCl}$) を用いた。調製した溶液は、低酸素濃度 ($\text{O}_2 < 0.1\text{ppm}$) の雰囲気制御グローブボックス内で 24 時間以上窒素ガスにより脱気した後を使用した。

組立てたカラムの内部の緩衝材等に含まれる酸素を除去するため、真空引きと窒素置換を 3 回交互に実施した後、再度真空引きして真空状態のまま 12 時間静置した。以後の操作は全て窒素雰囲気下で実施した。テフロン製の試験容器にカラムと脱気済みの試験溶液を入れた後、真空引き ($60\sim 65\text{mmHg}$) して 1 時間静置し真空含水を施した。その後、グローブボックス本体内でカラム全体が溶液に浸漬し、かつ、テフロン容器からあふれない量 (8 割程度) を目安に、試験片単位面積当たり一定量となるように容器内の溶液量を調整した後、容器の蓋を強く締めて密閉した。

(4) 試料の保管

処分場での緩衝材の内側は定置後約 10~20 年で最高温度に到達するとされており [8]、処分場閉鎖後の温度は実際には酸化性の期間と比べ、還元性の期間では低くなると予想される。一般的に温度が高い方が腐食速度は大きいとされ、保守的な評価条件となると考えられる。過去の研究事例等も考慮し、本試験での浸漬温度は 80°C とした。カラムを封入した容器外側に液面等をマーキングした後、吊り上げ用のワイヤを設置し、グローブボックス本体内に付設された 80°C の恒温槽内に容器を定置して試験開始とした。表 4.3.1-2、表 4.3.1-2 に試験の実施状況を示す。

表 4.3.1-1 還元性雰囲気での腐食試験実施状況（腐食速度評価）

条件	期間	TIG		EBW		MAG	
		母材	溶接付き	母材	溶接付き	母材	溶接付き
人工海水 +緩衝材	90日	●	●	●	●	●	●
	1年	●	●	●	●	●	●
	3年	●	●	●	●	●	●
	5年	○	○	○	○	○	○
	10年	○	×	○	○	○	○
人工淡水 +緩衝材	1年	●	●	●	●	●	●
	5年	○	○	○	○	○	○
	10年	○	○	○	○	○	○

●：これまでに報告済み ○：本年度報告

×：保管中の不具合で中断

表 4.3.1-2 還元性雰囲気での腐食試験実施状況（水素分析）

条件	期間	TIG		EBW		MAG	
		母材	溶接付き	母材	溶接付き	母材	溶接付き
人工海水 +緩衝材	90日	●	●	●	●	●	●
	1年	●	●	●	●	●	●
	3年	●	●	●	●	●	●
	5年	○	○	○	○	○	○
	10年	○	○	○	○	△	○
人工淡水 +緩衝材	1年	●	●	●	●	●	●
	5年	○	○	○	○	○	○
	10年	○	○	○	○	△	○

●：これまでに報告済み ○：本年度報告

△：平成29年度に予定

4.3.2 試験片の取り出し

(1) 浸漬の終了

所定期間が経過後、テフロン容器を恒温槽から取り出し、溶液の液面の位置を確認した。その後、グローブボックス外に移動して、カラムをテフロン容器から取り出した。蓋を固定しているボルトを緩めて蓋板を取り外し（図 4.3.2-1 (a)）、押し出しジグで中身を取り出した。

(2) 腐食速度評価用の試験片の取り出し

腐食速度評価用の試験片については、まず試験片に付着している外周の緩衝材をプラスチック製のヘラで除去した（図 4.3.2-1 (b)）。その後、緩衝材が付着した状態の試験片を純水で洗浄し、速やかに一晩以上真空乾燥した（図 4.3.2-1 (c)）。この操作は試験片表面まで直接緩衝材を剥ぎ取ると、試験片に傷をつけることが懸念されたこと、および試験片を乾燥させることによって、固着した緩衝材の剥離性が向上することによる。真空乾燥させた試験片は精密ヘラやピンセット等で物理的に緩衝材を注意深く剥離し、腐食被膜が概ね露出した状態で試験片を取り出した。

(3) 水素分析用の試験片の取り出し

水素分析用の試験片の場合は、拡散性水素の散逸を防ぐため事前に用意した液体窒素に試験片を含む緩衝材ごと速やかに浸漬した。凍結した緩衝材（および試験片）を液体窒素から取出し、緩衝材の側面をハンマーで叩いて砕き、試験片を回収した（図 4.3.2-1 (d)）。回収した試験片は液体窒素中またはフリーザー（-70℃）中で保管し、試料の搬送を含めて冷却状態の維持に留意した。



(a) 蓋板の取り外し



(b) 外周の緩衝材の除去



(c) 真空乾燥後の緩衝材が付着した試験片



(d) 冷却回収した水素分析用試験片

図 4.3.2-1 試験片取り出し状況

4.3.3 評価、分析方法

本年度取り出した試験片に対しては、過年度に取り出した試験片と同様に形状計測による腐食の均一性の確認、重量減少からの平均腐食速度の算出、および鋼中水素濃度の分析に加え、緩衝材共存環境で5年間と10年間に生成した被膜を構成する腐食生成物およびベントナイトの変質挙動も分析対象とした。

(1) 緩衝材共存環境における炭素鋼腐食生成物の分析

窒素雰囲気中で置換したアクリル製グローブボックス内でこのテフロン容器からカラムを取り出し、さらにカラムを解体して緩衝材内部の試験片を回収した。このテフロン容器からの試料回収では、図 4.3.3-1 に示すように圧密状態の緩衝材を液体窒素冷却によって凍結しフリーズドライした。試験片については窒素雰囲気中に保たれたバッグ内で保管した。試料の回収や前処理では、特に以下のような点に留意した。

- ・炭素鋼試験片は重量減少による腐食速度の算出や表面形状計測に供するので、試験片の基盤についてはそれらの測定に影響を与えないように取り扱う。
- ・上記の測定では腐食被膜は脱スケール操作して試験片から除去するので、必要に応じて腐食被膜を除去・分離してから精密分析に供することも検討する。

図 4.3.3-2 には一例として TIG 浸漬試験片の回収状況を示した。幅 30mm、長さ 50mm の腐食速度評価用の溶接付き試験片に対し、一度に全領域を測定対象とすることは困難であることから、図 4.3.3-3 のように試験片を区分 (Zone) し、EPMA 分析では $35 \times 35 \text{mm}^2$ 、FESEM-EDS 分析では Zone 1~4、 μ -XRD 分析では Zone 1 と 4、およびラマン分光分析では Zone1~4 のように分割し、全域をカバーするようにした。



図 4.3.3-1 回収時の試料の様子

(a: 浸漬状態のカラム b: カラムから取り出した緩衝材 c: 凍結乾燥した緩衝材)

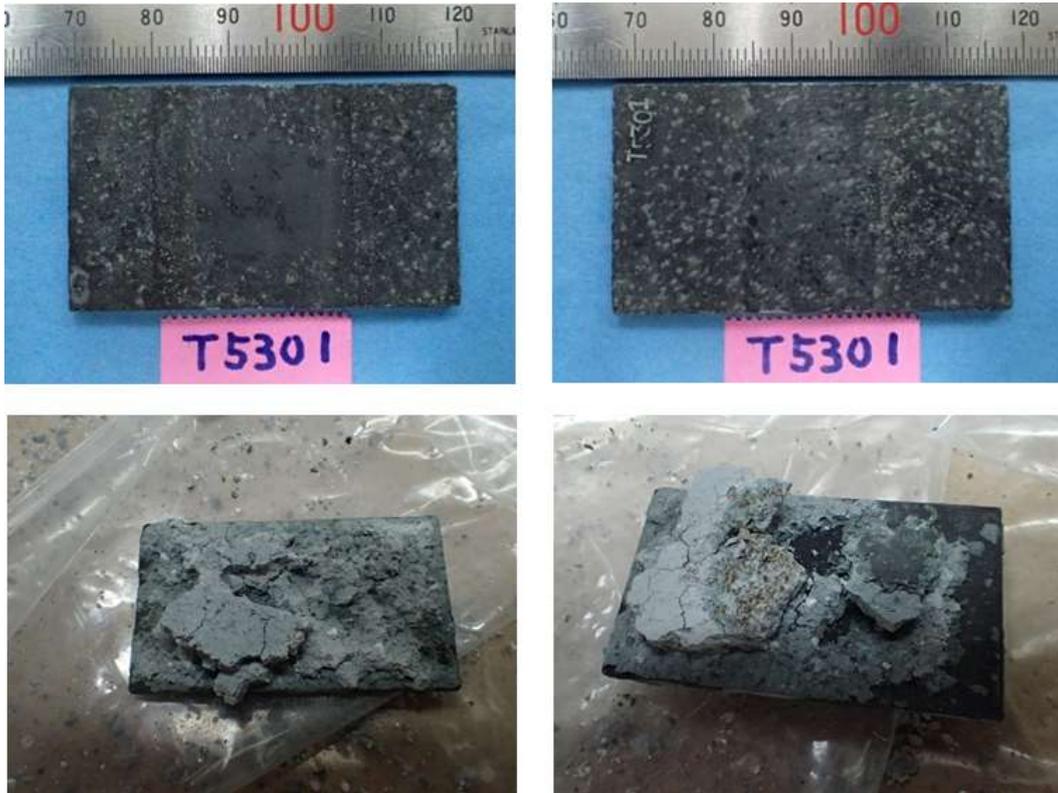


図 4.3.3-2 試験片の回収状況の例：SW-TIG-5 (T5301)

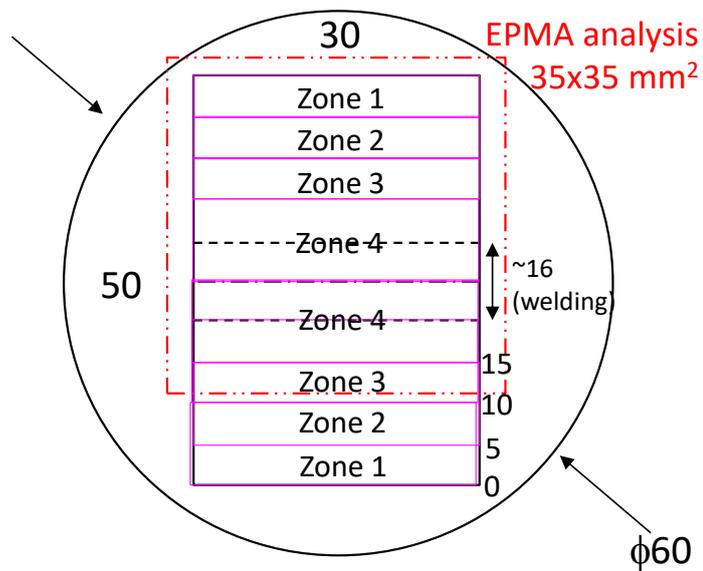


図 4.3.3-3 各分析におけるゾーン区分 (単位：mm)

取り出した試験片に対し、以下の項目の分析を実施した。

1) EPMA

EPMAにより、元素分布をステージスキャンによるマッピングモードで測定した。測定領域は母材、熱影響部、溶接金属部を含むエリアの $35 \times 35 \text{ mm}^2$ とした。測定に用いた電子線の加速電圧は 15 kV、照射電流は 20 nA である。測定元素は炭素鋼溶接試験片の化学成分を考慮し、Si, Al, Fe, Ni, Cu, Co, Cr, Mg, Ca, Na, K, C, Cl, O, S, SEI (二次電子線像), BEI (反射電子線像, COMPO 像) である。

2) FE-SEM

FE-SEMにより微細部を観察(産状観察)し、腐食生成物の性状を確認した。特異な部位が認められた場合には、EDSにより化学組成を分析した。

3) XRD

XRDの測定はリガク製 RINT2000 を用い、 $\text{CuK}\alpha$ 線、管電圧 40 kV、管電流 20mA、走査速度 $1.0^\circ / \text{min}$ の条件で実施した。黒色の腐食被膜は試験片に固着して露出しているが、その上層の灰色の緩衝材も完全には除去ないため、一部付着した状態で測定した。

4) μ -XRD

μ -XRDにより腐食生成物の同定および結晶性を評価した。腐食被膜が付着した試験片、または試験片から $500 \mu\text{m}$ の微小片をデザインカッターで切り出した被膜を測定試料とした。後者については、マイクロチップ(砂状)とし、 μ -XRDのマグネット式試料ホルダーに磁性により吸着固定した。さらに実態顕微鏡で観察しながら、チタンピンセットで砂状粒子を堆積して成型した。その堆積物の先端に 300 ミクロンの X 線ビームを導入し、回折によるデバイシェラーリングをイメージングプレートにて撮影し、 2θ 解析を行った。測定に際しては NIST-Si 標準試料を測定して、光学系のずれを補正した。

5) ラマン分光

ラマン分光分析により腐食被膜の化学形態の推定を実施した。回収した試験片を窒素ガス雰囲気グローブボックス内でガラスバイアルに封入し、この容器に入れた状態で測定した。これを Ar^+ レーザーを光源とするベンチトップのラマン分光測定装置で測定し、参照試料のスペクトルをもとに腐食被膜の解析を行った。図 4.3.3-4 に測定系の概要を示す。各試験片の測定は XYZ ステージを移動することで、試験片の母材側から Zone 1 (0~5mm)、Zone 2 (5~10mm)、Zone 3 (10~15mm)、Zone 4 (15~25mm: 溶接金属部) と区分した。照射レーザーは $0.1 \times 1.0 \text{ mm}$ の矩形ビームである。カメラレンズにより、試料表面からのラマン散乱光を集光し、バンドパスフィルターを通して分光器に導入して測定した。

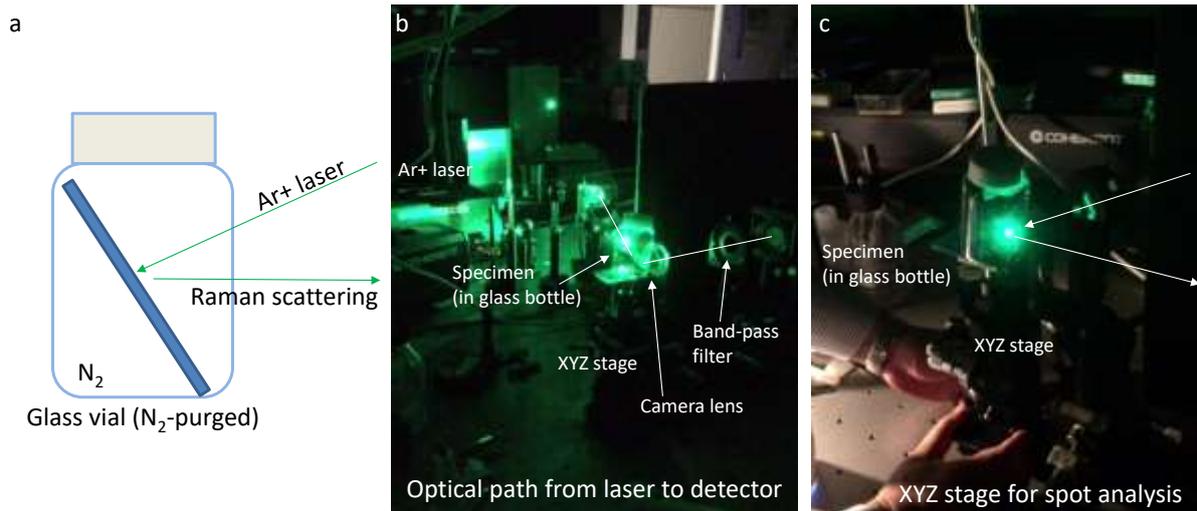


図 4.3.3-4 炭素鋼のレーザーラマン分光分析

(a: 試料容器の概念図、b: 光学パスの概観、c: 試料ステージと試料容器)

(2) 腐食挙動評価

1) 試験片の処理

被膜の分析後、試験片表面の腐食生成物を 5% HCl+0.3% イビット No.2S (インヒビター 朝日化学製) に浸漬し、超音波洗浄して腐食生成物を除去した。試験片を純水で洗浄し、常温で十分に乾燥させた。

2) 重量減による腐食速度の算出

電子天秤を用いて試験片の重量を 3 回測定し、平均値から重量減少を求めた。重量減少量を試験片面積で除して減肉深さを求めた後、時間に対してプロットしたグラフの傾きより腐食素読度を求めた。

3) 外観観察、表面形状計測

脱スケール後の試験片の外観撮影を行い、非接触 3 次元形状計測器によって試験片の表裏面の形状測定を実施して、局所的な腐食の有無を確認した。形状測定はキーエンス製高精度レーザー測定器 LT-9030M と神津精機製高精度形状測定システム K2-210 を用い、試験片縁辺に 1mm ずつ余裕を持たせた幅 28mm、長さ 48mm の範囲を 160 μ m ピッチで計測した。深度は ± 0.1 mm ($\pm 100 \mu$ m) の範囲を図示したが、歪みが大きい試験片については ± 0.3 mm ($\pm 300 \mu$ m) の範囲とした。

(3) 鋼中水素濃度の分析

溶接部を含む炭素鋼の水素脆化の可能性を評価するために、2 種類の測定方法で鋼中の水素分析を実施した。

1) 試験片の処理

回収した試験片は冷却状態の維持に留意して保管し、分析試料調製時は大気雰囲気、室温で極力短時間に湿式切断した。切断後の試料はフリーザーで保管し、測定開始前に #800 研磨紙で試料

表面の腐食生成物を除去し、アセトン洗浄と乾燥を行った後、それぞれの分析を実施した。溶接付き試験片（寸法：幅 10mm、長さ 50mm、厚さ 2mm）は 1 枚の試験片から、母材(B)、熱影響部(H)、溶接金属(W)の 3 箇所を切断・分割して、それぞれ分析に供した（水素抽出曲線測定と全水素量測定で 2 枚分析に供用した）。また、母材単独試験片（寸法：溶接付き試験片と同じ）は 1 枚の試験片から切断箇所をずらして 2 箇所採取し、水素抽出曲線測定と全水素量測定に供した（1 枚だけ両分析に供用した）。それぞれの分析方法での試料採取位置の詳細を表 4.3.3-1 と表 4.3.3-2 に示す。

2) 水素抽出曲線（拡散性水素量）の測定

水素抽出曲線は以下の昇温脱離水素分析法で測定した。

- ・測定方法：大気圧イオン化質量分析法

(API-MS 法：Atmospheric Pressure Ionization Mass Spectrometer)

- ・装置：日本エイピー愛誠大気圧イオン化質量分析装置 F L E X—MS 400

アルバック里甲製 赤外線ゴールドイメージ炉 RHL-E410P

- ・測定温度範囲：室温～600℃ 昇温速度：12 °C/min

- ・雰囲気：アルゴンガス(1L/min)

3) 全水素濃度の取得

全水素量は以下の方法で測定した。

- ・測定方法：不活性ガス融解法

- ・検知方法：熱伝導度検出器

- ・装置：LECO 社製 LH-404

表 4.3.3-1 水素抽出曲線測定 (API-MS) の試料採取位置

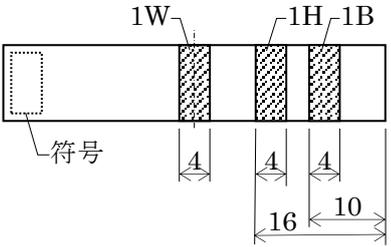
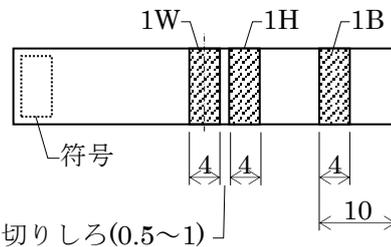
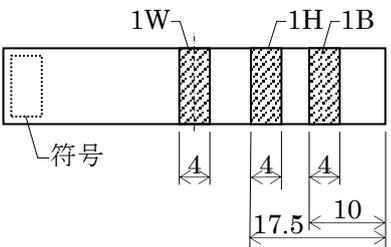
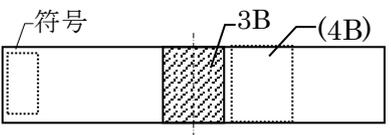
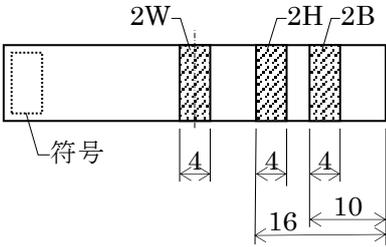
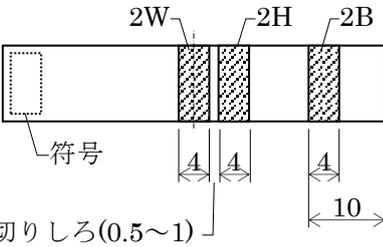
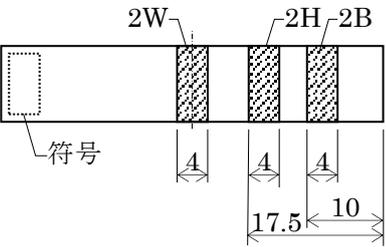
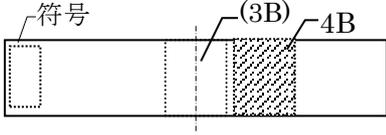
	試験片番号	試験溶液	試験期間	試料採取位置(中心線は端部から 25.0mm)
溶接付き	(TIG) Txxxx	人工海水 人工淡水	5 年間 10 年間	 <p>溶接金属 (1W) を試験片中央部、熱影響部 (1H)、母材 (1B) は所定位置から採取</p>
	(EBW) Exxxx	人工海水 人工淡水	5 年間 10 年間	 <p>溶接金属 (1W) を試験片中央部、熱影響部 (1H)、母材 (1B) は所定位置から採取</p>
	(MAG) Mxxxx	人工海水 人工淡水	5 年間 10 年間	 <p>溶接金属 (1W) を試験片中央部、熱影響部 (1H)、母材 (1B) は所定位置から採取</p>
母材単独	(TIG) TBxxxx (EBW) EBxxxx (MAG) MBxxxx	人工海水 人工淡水	5 年間 10 年間	 <p>試験片中央部から必要量を採取 (4B) 全水素量分析</p>

表 4.3.3-2 全水素量分析（不活性ガス融解法）の試料採取位置

	試験片番号	試験溶液	試験期間	試料採取位置(中心線は端部から 25.0mm)
溶接付き	(TIG) Txxxx	人工海水 人工淡水	5 年間 10 年間	 <p>溶接金属 (2W) を試験片中央部、熱影響部 (2H)、母材 (2B) は所定位置から採取</p>
	(EBW) Exxxx	人工海水 人工淡水	5 年間 10 年間	 <p>溶接金属 (2W) を試験片中央部、熱影響部 (2H)、母材 (2B) は所定位置から採取</p>
	(MAG) Mxxxx	人工海水 人工淡水	5 年間 10 年間	 <p>溶接金属 (2W) を試験片中央部、熱影響部 (2H)、母材 (2B) は所定位置から採取</p>
母材単独	(TIG) TBxxxx (EBW) EBxxxx (MAG) MBxxxx	人工海水 人工淡水	5 年間 10 年間	 <p>水素抽出曲線と同一試料から必要量を採取 (3B) 水素抽出曲線測定</p>

4.4 試験結果

4.4.1 緩衝材共存環境における炭素鋼腐食生成物の分析結果

腐食速度評価用の溶接付き試験片の各条件 1 枚については、緩衝材と接した炭素鋼試験片の腐食生成物の形態を詳細に評価するための分析を実施した。

(1) EPMA 分析 (添付資料 4-4_精密分析・EPMA)

ここでは例として、SW-TIG-5 (T5301)と FW-EBW-5 (E5104)の EPMA マッピング測定結果を図 4.4.1-1 と図 4.4.1-2 に示す。特徴として以下が挙げられる。

- ・ Cu については、TIG (およびここでは掲載していないが MAG) では溶接金属部で検出され、EBW では検出されない。これは溶加材の影響と考えられる。
- ・ 一方、Ni については、TIG (およびここでは掲載していないが MAG) では溶接金属部で濃度が低く、EBW では濃度変化がない。
- ・ Ca については、人工海水 (SW) では比較的明確に検出され、人工淡水 (FW) ではほとんど検出されない。これは溶液組成の影響と考えられ、Ca が固相側に取り込まれている可能性がある。
- ・ Si は比較的均一に分布している。炭素鋼にも Si は含まれるが、Al も比較的均一に分布していることを考えると、付着している緩衝材の影響も推測される。

以上のように、一部の元素については特徴的な分布が見られたが、全般的には腐食被膜よりも試験片基盤の影響を受けた結果であると考えられる。

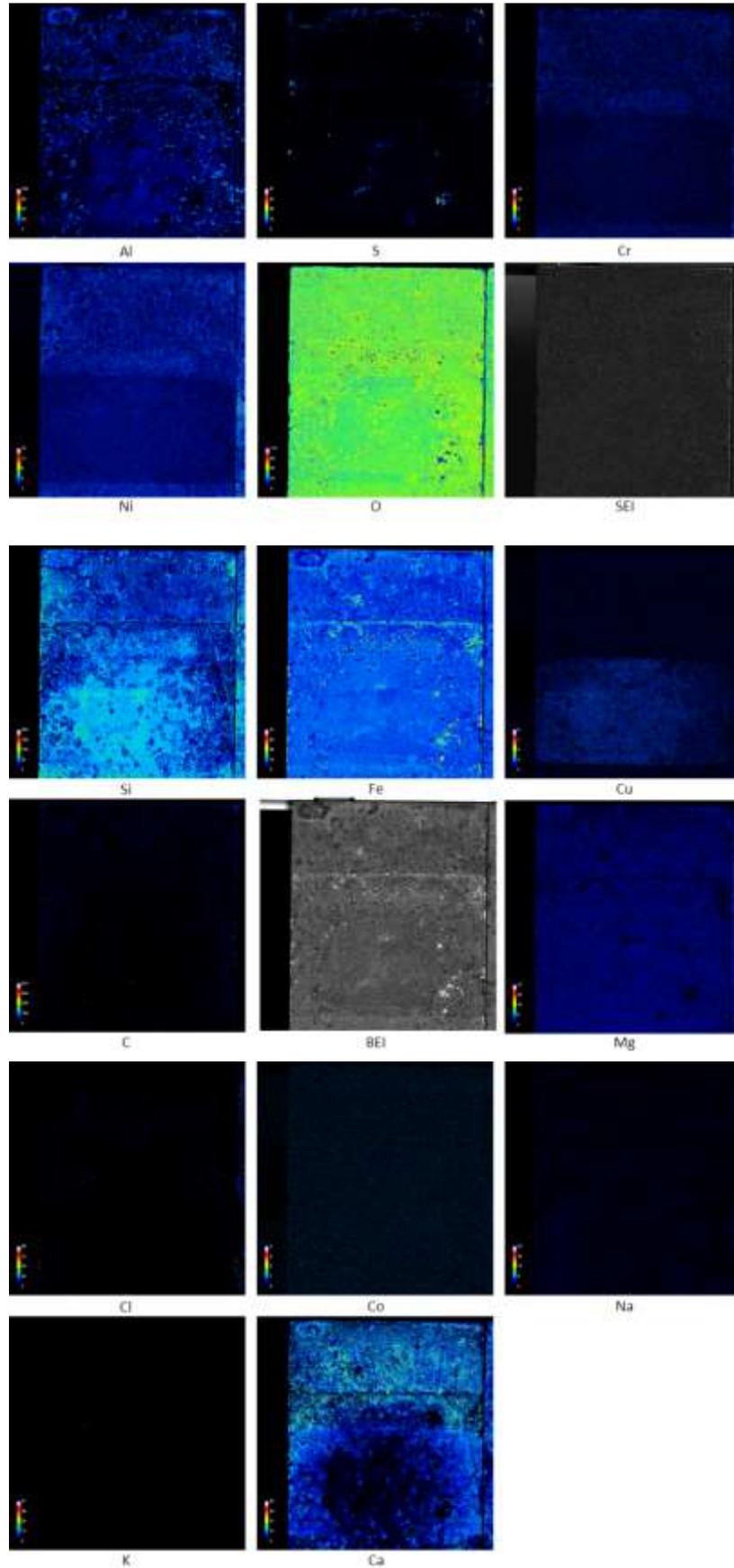


図 4.4.1-1 EPMA マッピング測定結果の例：SW-TIG-5 (T5301)

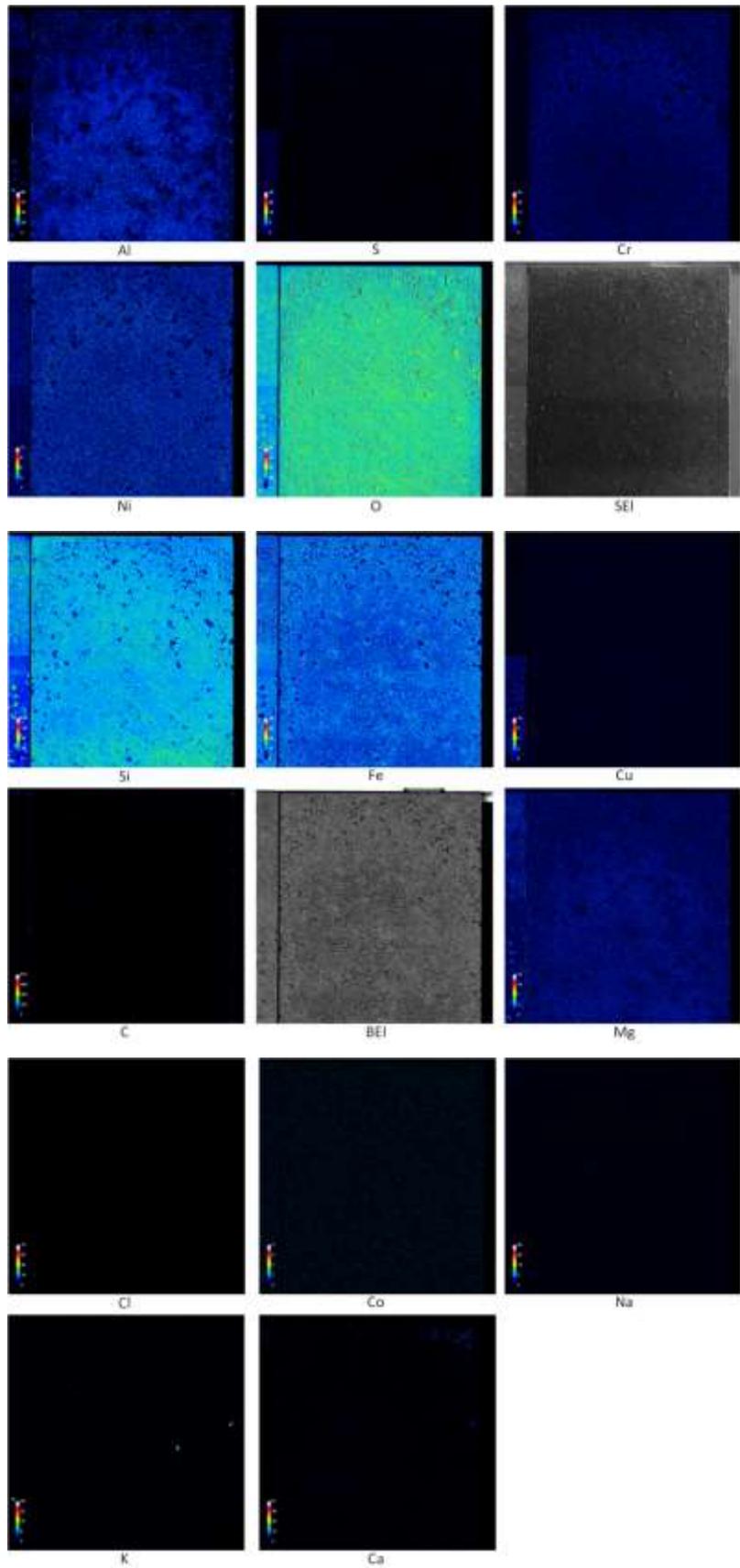


図 4.4.1-2 EPMA マッピング測定結果の例：FW-EBW-5 (E5104)

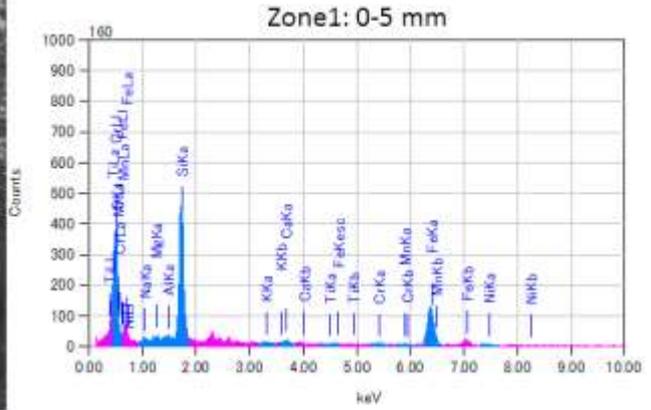
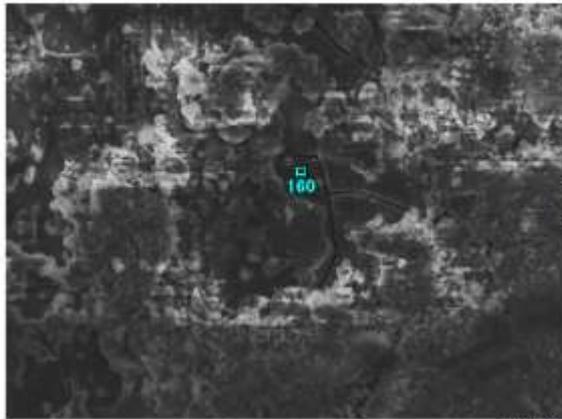
(2) FESEM 観察および EDS 分析 (添付資料 4-5_精密分析・FESEM-EDS)

FESEM により微細部を観察し、腐食生成物の性状を確認した。特異な部位が認められた場合には、EDS により化学組成を分析した。ここでは例として、SW-TIG-5 (T5301)における Zone1 での分析結果の一部を図 4.4.1-3 に示した。これらの分析では、化学組成から観察とした微細部での腐食生成物・鉱物の推定も行った。表 4.4.1-1 は、各試験片で推定された腐食生成物や鉱物の例をまとめたものである。

EDS の元素比率より、生成物を同定した。シデライトやウスタイト、鉄水酸化物のような鉄の腐食生成物が推定されるが、それ以外にも鉄サポナイト、ノントロナイト、クロライトやバーチェリンのような緩衝材のスメクタイトからの変質鉱物の可能性も推定されている。また、クォーツやフェロシライト、フェアライト、プラジオクレスのようなケイ酸塩鉱物も推定されており、これらはベントナイトやケイ砂に起因しているものと思われる。

なお、これらは局所的な分析であるため、試験片全体としての傾向は判断が難しいと思われるが、溶接による影響、すなわち Zone1~4 の間には顕著な相違は観察されていないと思われる。また、一般的に推定されているマグネタイトのような鉄酸化物があまり観察されていないのも、このような特異な分析対象部位の選び方による影響と考えられる。

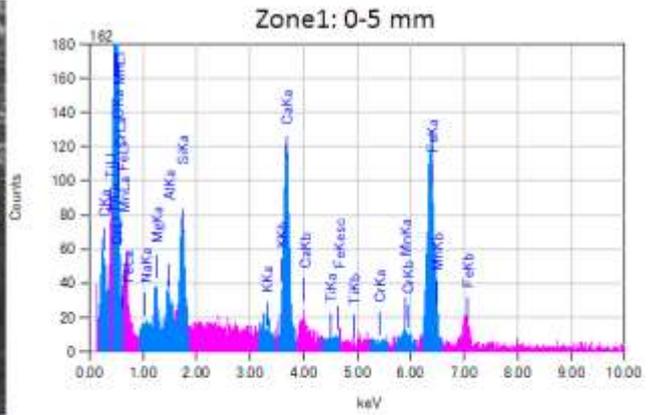
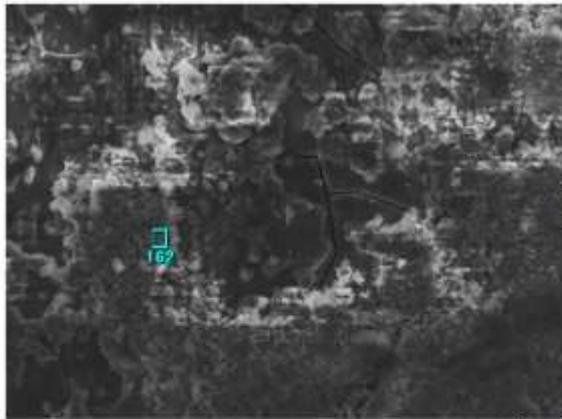
以上のように、試験片の腐食被膜の特異部位の微視的な分析からは、腐食生成物の他にスメクタイトの変質を示唆する鉱物も推定され、炭素鋼表面では緩衝材側との相互作用による、より複雑な反応過程を経て腐食被膜を形成している可能性が考えられる。



ZAF法 精密定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.3878
 主成分数: 6.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	Z
O		38.44						
Na K	1.041	1.21	0.27	1.74	Na2O	1.64	0.14	1.1025
Mg K	1.253	0.25	0.28	0.87	MgO	0.41	0.03	0.2256
Al K	1.486	0.47	0.28	0.87	Al2O3	0.88	0.05	0.5352
Si K	1.739	28.76	0.24	48.75	SiO2	44.42	1.95	26.9911
Ca K	2.312	0.23	0.19	0.19	K2O	0.27	0.02	0.4230
Ti K	4.508	0.05	0.26	1.07	CaO	0.91	0.04	1.2887
Cr K	5.411	0.21	0.50	0.19	Cr2O3	0.31	0.01	0.3939
Mn K	5.894	0.36	0.58	0.43	MnO	0.46	0.02	0.5325
Fe K	6.388	37.63	0.63	44.43	FeO	46.41	1.73	68.5958
Ni K	7.471	1.79	1.12	2.01	NiO	2.28	0.09	2.9427
合計		100.00		100.00		100.00	4.19	

Ferrosilite



ZAF法 精密定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.2761
 主成分数: 24.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	Z
C K	0.277	10.49	0.18	46.30	CO2	38.42	7.50	7.5010
O		44.67						
Na K	1.041	0.23	0.12	0.27	Na2O	0.30	0.03	0.2449
Mg K	1.253	1.17	0.10	2.67	MgO	1.84	0.41	1.3117
Al K	1.486	0.90	0.10	0.92	Al2O3	1.63	0.29	1.2322
Si K	1.739	2.19	0.11	4.31	SiO2	4.68	0.67	3.6937
Ca K	2.312	9.02	0.11	12.45	CaO	12.62	1.94	22.5432
Ti K	4.508	0.02	0.17	0.02	TiO2	0.03	0.00	0.0411
Cr K								
Mn K	5.894	1.28	0.26	1.27	MnO	1.63	0.20	2.5128
Fe K	6.388	39.08	0.28	29.78	FeO	38.67	4.63	60.9193
合計		100.00		100.00		100.00	15.72	

Siderite

図 4.4.1-3 FESEM 観察および EDS 分析結果の例 : SW-TIG-5 (T5301)

表 4.4.1-1 EDS 分析で推定された腐食生成物・鉱物の例

試料 ID	試験片 番号	Zone 1 (0 – 5 mm)	Zone 2 (5 – 10 mm)	Zone 3 (10 – 15 mm)	Zone 4 (15 – 25 mm)
SW-TIG-5	T5301	Ferrosilite Fe-saponite Siderite	Ferrosilite Wustite	Ferrosilite Wustite Fayalite	Fe-saponite Siderite Berthierine Quartz Plagioclase
FW-TIG-5	T5105	Ferrosilite Fe-saponite Siderite	Ferrosilite Fe-saponite Wustite	Fe-chlorite	Ferrosilite Fe-saponite Fe-chlorite Plagioclase Pyrite
FW-TIG-10	T5202	Ferrosilite	Fe-chlorite Berthierine	Ferrosilite Siderite Berthierine	Wustite Magnetite
SW-MAG-5	M5300	Fe-saponite Fe-chlorite Berthierine	Fe-chlorite Siderite	Fe-saponite Fe-chlorite Wustite Fe(OH) ₂ (Fe,Ca)(OH) ₂	Fe-saponite Fe-chlorite Fe(OH) ₂
SW-MAG-10	M5109	Siderite Wustite	Fe-chlorite	Berthierine Wustite	Fe-saponite Wustite Fe(OH) ₂
FW-MAG-5	M5303	Ferrosilite Nontronite	Fe-saponite Berthierine	Ferrosilite Fe-saponite Berthierine Fayalite	Fe-chlorite Berthierine
FW-MAG-10	M5104	Ferrosilite Fe-saponite Berthierine	Fe-saponite Berthierine Wustite	Ferrosilite Fe-saponite Fe-chlorite Fe(OH) ₂	Ferrosilite Fe-saponite Berthierine
SW-EBW-5	E5300	Fe-saponite Fe-chlorite	Ferrosilite Fe(OH) ₂	—	—
SW-EBW-10	E5201	Ferrosilite Fe-chlorite Siderite	Fe-chlorite Siderite K-feldspar	Ferrosilite Fe-saponite Quartz	Fe-saponite Fe-chlorite Berthierine
FW-EBW-5	E5104	Ferrosilite	Berthierine	Fe-saponite Berthierine Fayalite	Ferrosilite Fe-saponite Fe-chlorite Siderite Berthierine Pyrrhotite
FW-EBW-10	E5202	Ferrosilite	—	Ferrosilite	Ferrosilite Fe-saponite Fe-chlorite Berthierine Quartz

(3) XRD 分析

図 4.4.1-5～図 4.4.1-12 に各条件での測定結果を示す。結晶性の腐食生成物として主に FeCO_3 や Fe_3O_4 と推定されるピークが確認され、特に FeCO_3 については標準のピークよりも低角側に若干シフトする傾向があった。これは同様の浸漬試験でも確認されており[5]、不純物の固溶による結晶格子の膨張の影響が指摘されている。なおこの報告では還元雰囲気での 2 価 Fe の腐食生成物として、 FeCO_3 の他に $\text{Fe}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ が検出されているが、本試験では主成分としては確認されなかった。いずれの試験片でも Fe のピーク強度が大きい。母材単独試験片ではセメンタイト (Fe_3C) と推定されるピークが強度的には弱いもののいくつかの試験片で認められる。これは溶接部と母材における金属組織の相違（溶接部でのセメンタイトの減少）の情報を反映している可能性がある。また付着している緩衝材に起因すると思われる SiO_2 のピークも試験片によっては認められ、E5209（図 4.4.1-9）や TB5603（図 4.4.1-10）ではモンモリロナイトに帰属するピークも検出されている。

これらの測定で主に検出された腐食生成物を一覧表として表 4.4.1-2 にまとめた。 FeCO_3 は人工海水の溶接付き試験片にのみ確認された。その他については Fe_3O_4 と推定されたが、人工海水についてはピーク強度が弱く、腐食生成物の結晶性が低いことが推察される。その一方、人工淡水についてはいずれも Fe_3O_4 が主体であり、結晶性が高いことが考えられる。腐食生成物の化学形態は浸漬溶液の pH と密接に関連することが考えられる。そこでテフロン容器をグローブボックス外に移動し、カラムを取り出した後の溶液の pH を、参考値として表 4.4.1-2 に併記した。この pH は大気下、室温での値であり、また試験片近傍の間隙水の情報を正確に反映していないことに留意が必要であるが、人工海水では pH6.3～8.4 の範囲に分布して変動幅も大きい傾向にある。特に、3 枚いずれも FeCO_3 が検出された人工海水、5 年、溶接付き試験片は pH が最も低い環境であったことが推測される。一方、人工淡水では pH9.4～10.0 の範囲で安定しており、人工海水の条件に比較してアルカリ側の条件であったことが考えられる。 FeCO_3 と Fe_3O_4 が確認された今回の結果は、定性的には pH が要因の 1 つとして影響していると思われる。

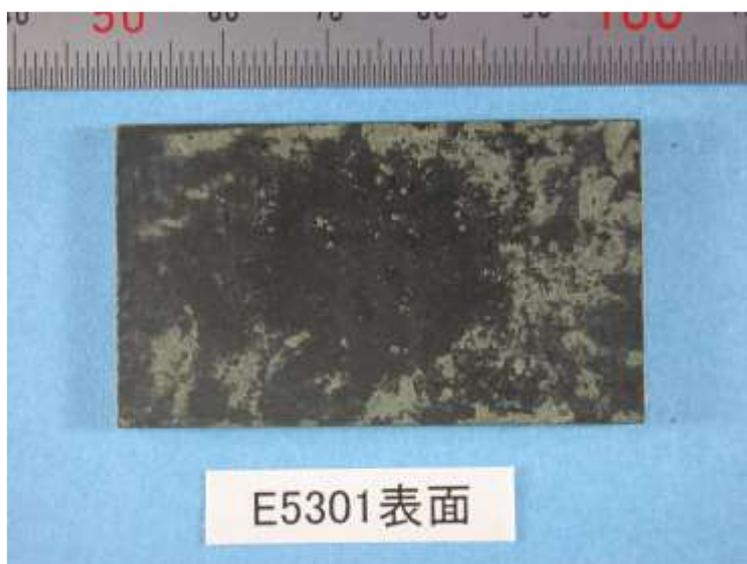


図 4.4.1-4 腐食被膜分析（XRD）の試験片の例（E5301）

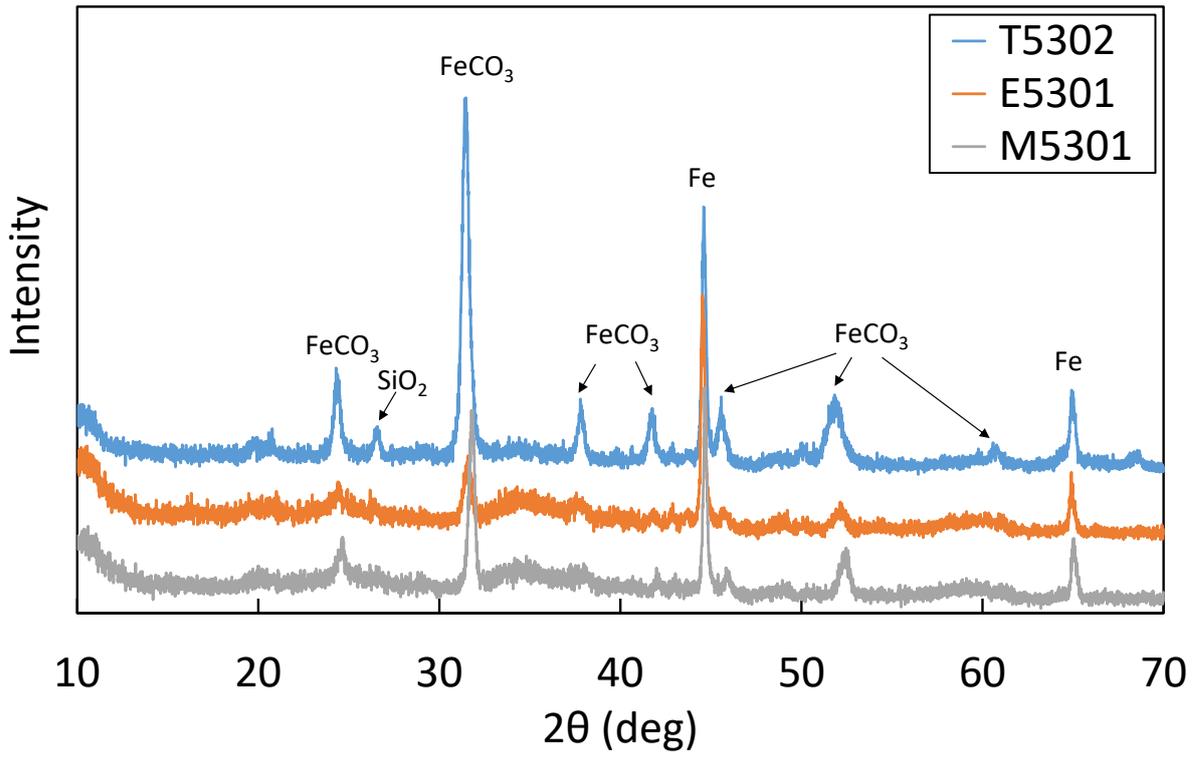


図 4.4.1-5 XRD 測定結果 (人工海水、5 年、溶接付き)

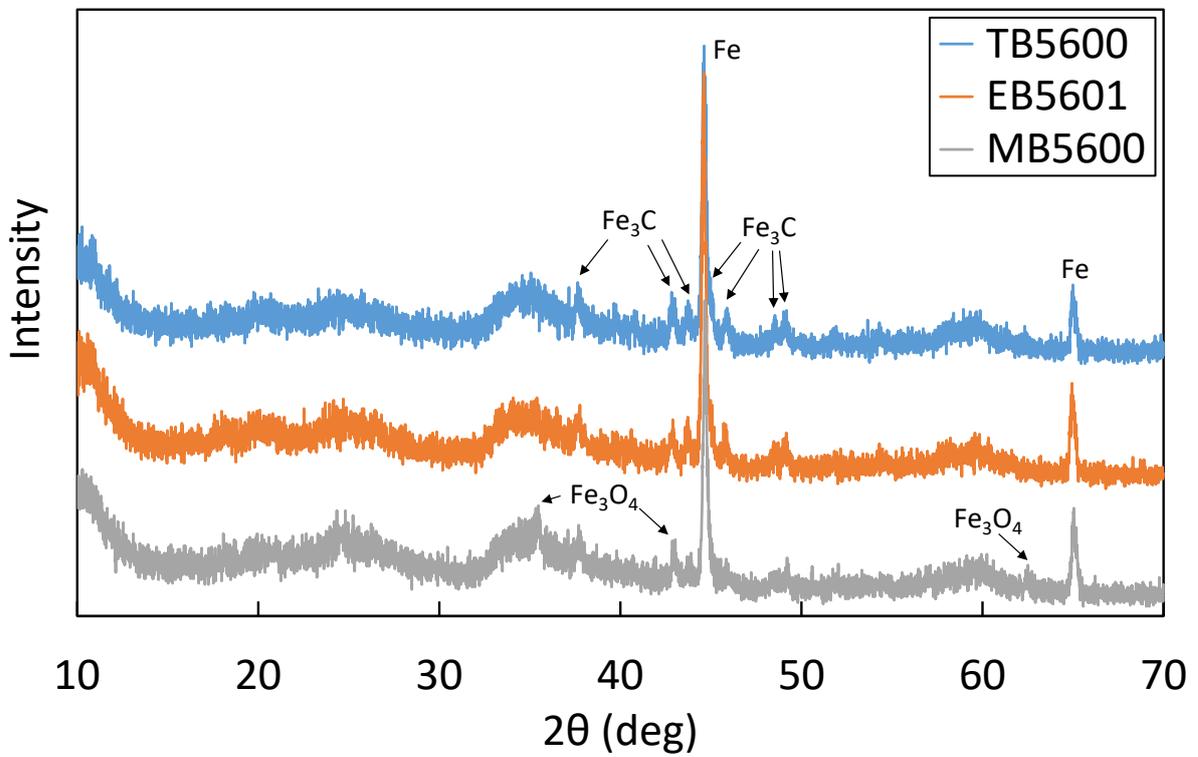


図 4.4.1-6 XRD 測定結果 (人工海水、5 年、母材単独)

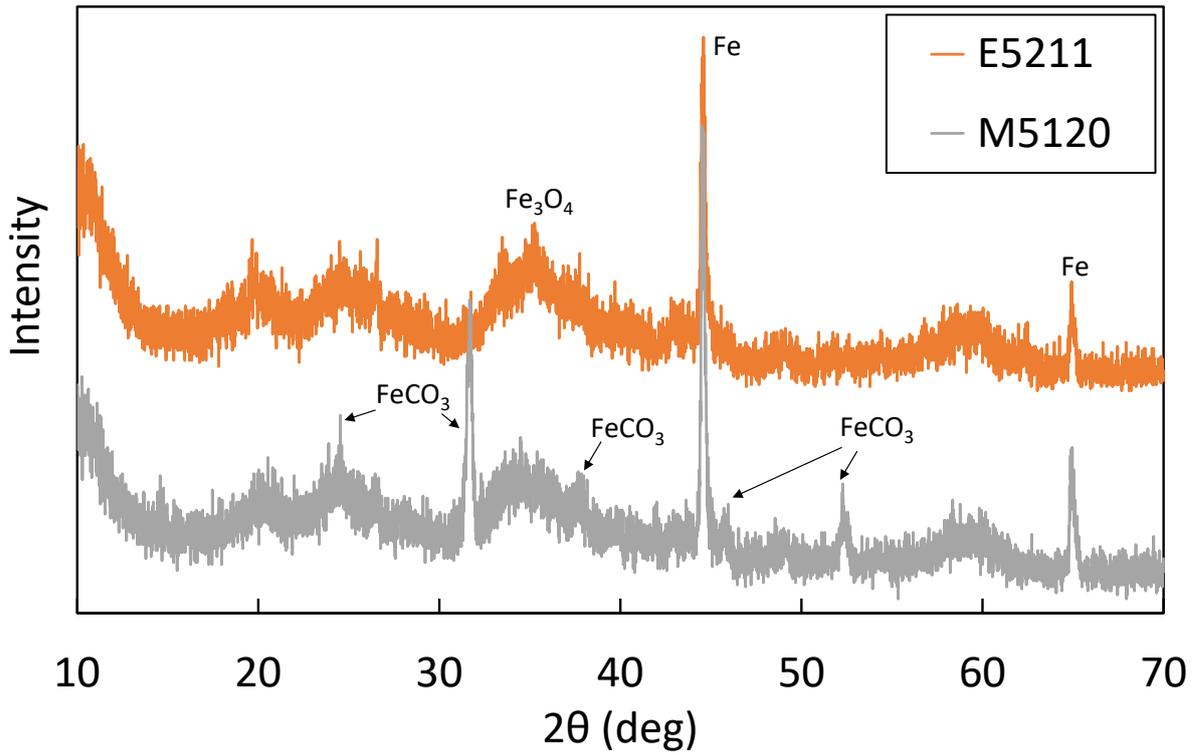


図 4.4.1-7 XRD 測定結果 (人工海水、10年、溶接付き：TIGを除く)

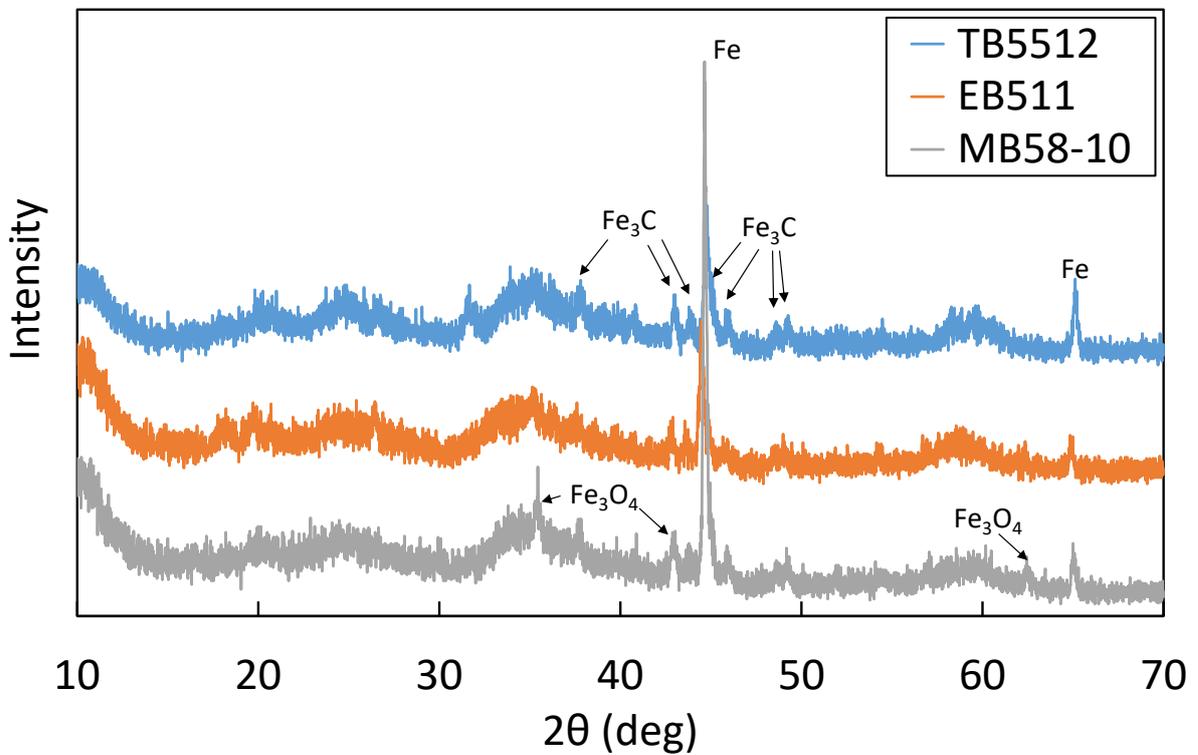


図 4.4.1-8 XRD 測定結果 (人工海水、10年、母材単独)

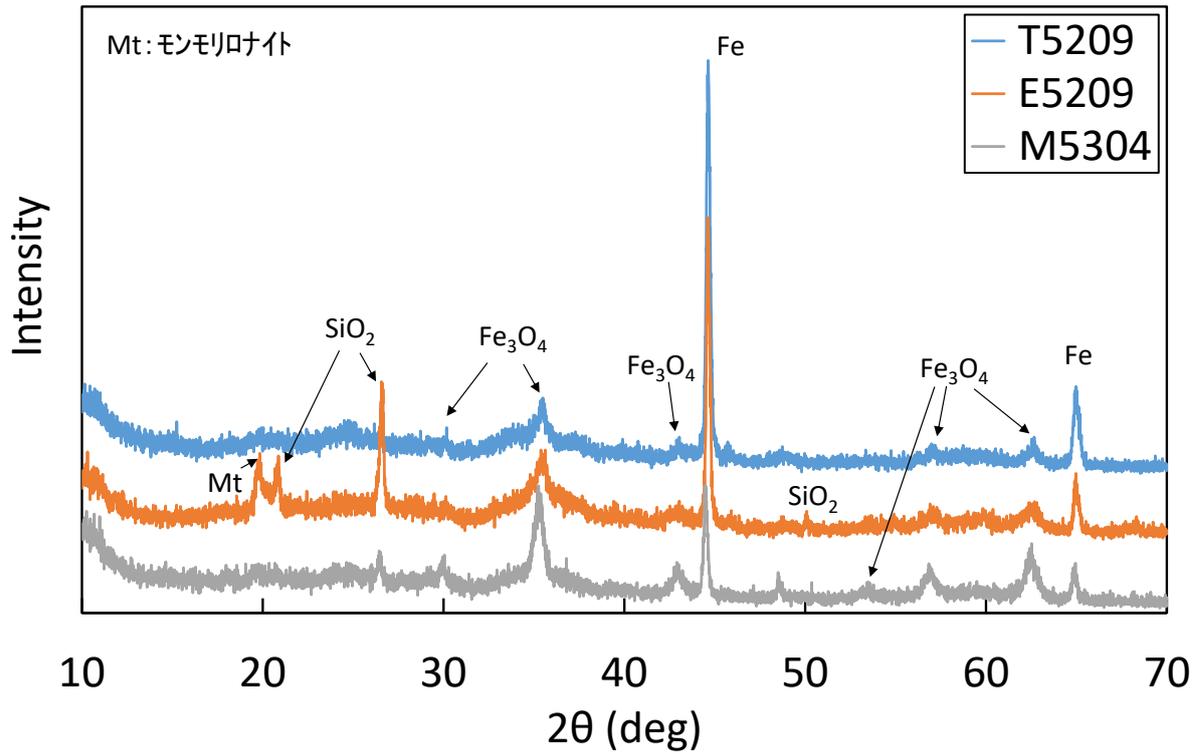


図 4.4.1-9 XRD 測定結果 (人工淡水、5年、溶接付き)

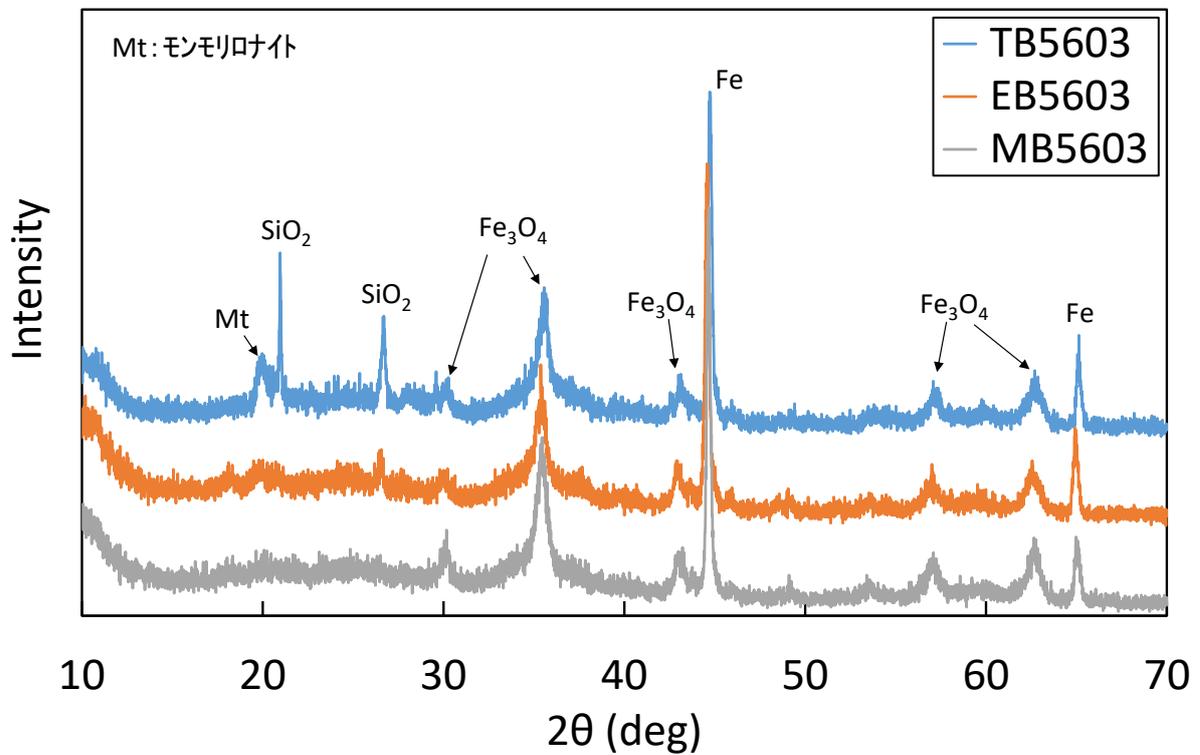


図 4.4.1-10 XRD 測定結果 (人工淡水、5年、母材単独)

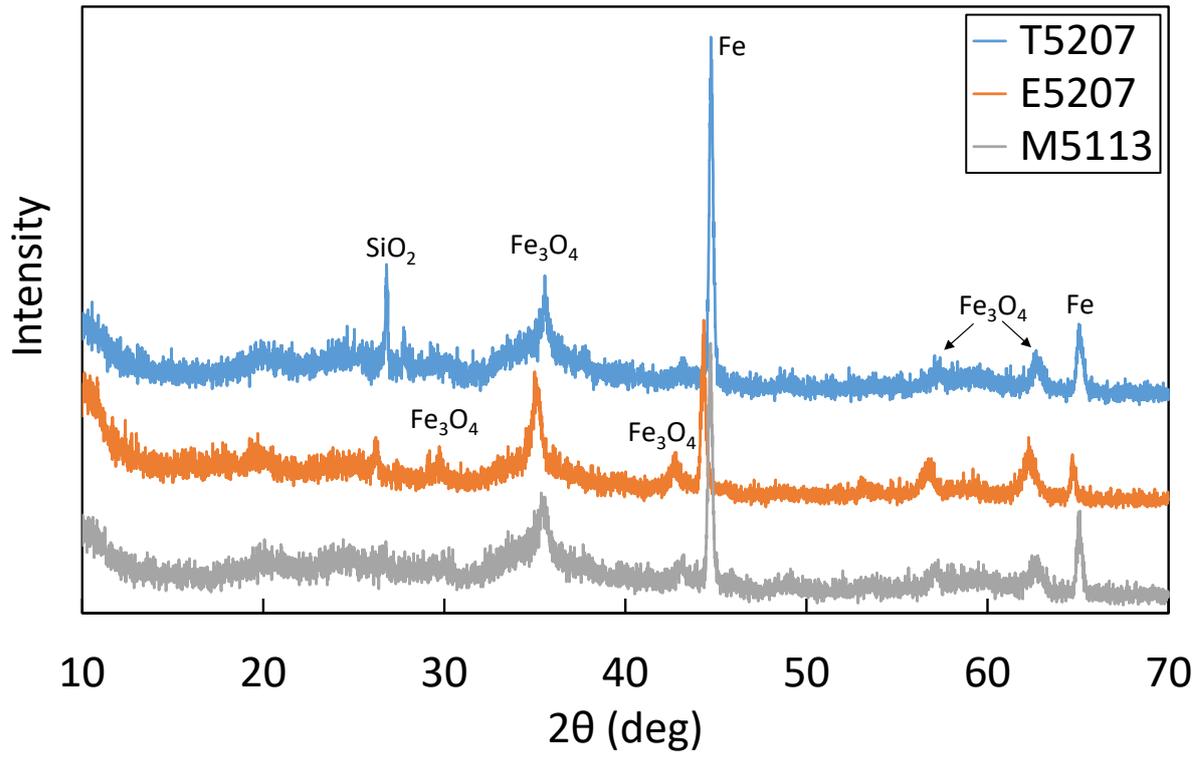


図 4.4.1-11 XRD 測定結果 (人工淡水、10年、溶接付き)

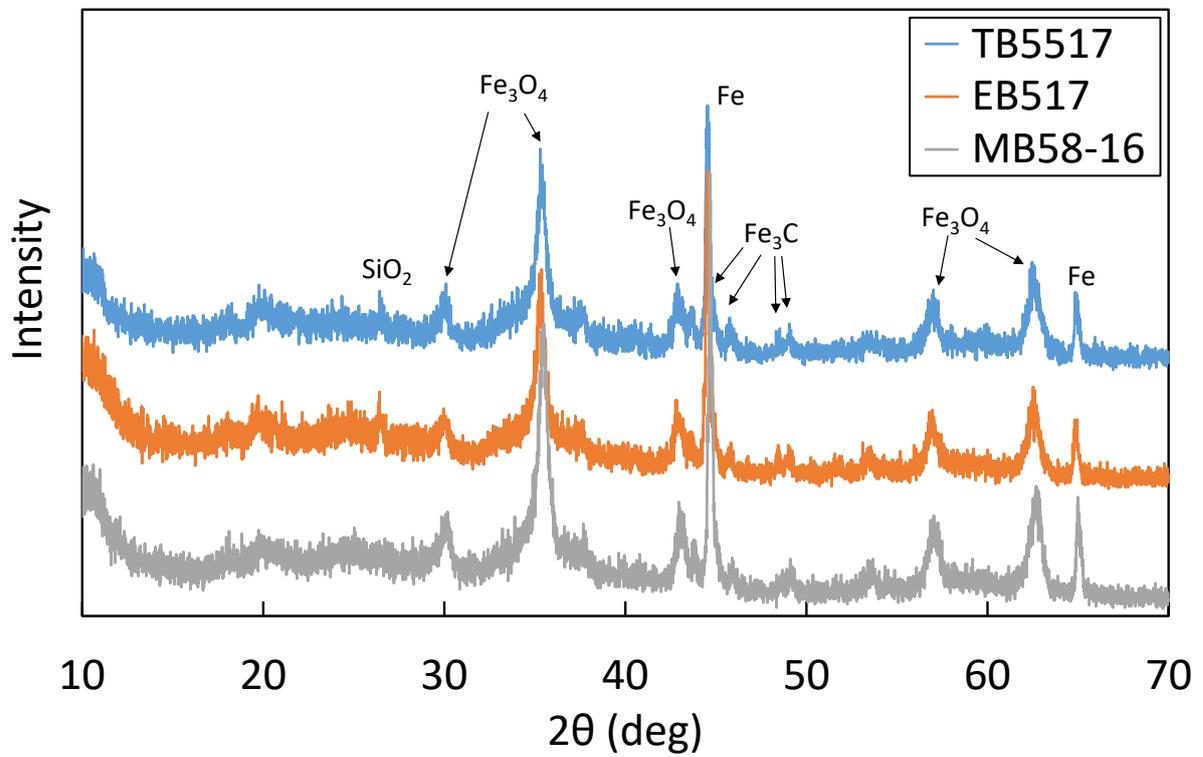


図 4.4.1-12 XRD 測定結果 (人工淡水、10年、母材単独)

表 4.4.1-2 検出された主な腐食生成物

試験溶液	試験期間	種類	材料	試験片番号	腐食生成物*1	参考 pH*2
人工海水	5 年	溶接付き	TIG	T5302	FeCO ₃	6.77
			EBW	E5301	FeCO ₃	6.61
			MAG	M5301	FeCO ₃	6.34
		母材単独	TIG	TB5600	Fe ₃ O ₄ (w)	8.16
			EBW	EB5601	Fe ₃ O ₄ (w)	8.42
			MAG	MB5600	Fe ₃ O ₄ (w)	8.33
	10 年	溶接付き	TIG	中断	中断	中断
			EBW	E5211	Fe ₃ O ₄ (w)	7.62
			MAG	M5120	FeCO ₃	7.65
		母材単独	TIG	TB5512	Fe ₃ O ₄ (w)	8.12
			EBW	EB511	Fe ₃ O ₄ (w)	8.24
			MAG	MB58-10	Fe ₃ O ₄	7.35
人工淡水	5 年	溶接付き	TIG	T5209	Fe ₃ O ₄	9.43
			EBW	E5209	Fe ₃ O ₄	9.46
			MAG	M5304	Fe ₃ O ₄	9.78
		母材単独	TIG	TB5603	Fe ₃ O ₄	9.56
			EBW	EB5603	Fe ₃ O ₄	9.87
			MAG	MB5603	Fe ₃ O ₄	9.61
	10 年	溶接付き	TIG	T5207	Fe ₃ O ₄	9.93
			EBW	E5207	Fe ₃ O ₄	9.75
			MAG	M5113	Fe ₃ O ₄	9.81
		母材単独	TIG	TB5517	Fe ₃ O ₄	9.95
			EBW	EB517	Fe ₃ O ₄	9.91
			MAG	MB58-16	Fe ₃ O ₄	9.75

*1 (w) : ピーク強度が低い

*2 室温、大気下で測定

(4) μ -XRD 分析 (添付資料 4-6_精密分析・ μ -XRD)

各試験片について、原則として母材部の Zone 1 (0~5mm : 試験片の縁辺部) と溶接金属部の Zone 4 (25mm : 試験片の中心部) の 2 箇所を測定した。全ての試験片の μ -XRD 分析の測定結果を添付資料 4-6 に示す。なおこれらの結果については、4.4 で実施した腐食被膜の XRD の測定結果についても同一条件で併せて掲載したので、3 本のチャートを重ね書きにしている (4.4 の XRD

測定のほうが、溶接金属部や母材部を含む試験片のより広い領域を測定している)。また表 4.4.1-1 のように EDS 分析で推定された腐食生成物・鉱物の例を参考にして、標準インデックスを付記している。

代表的な例として、図 4.4.1-13 には XRD でシデライトが検出されたケースを、また図 4.4.1-14 にはマグネタイトが検出されたケースを示した。XRD では基盤の Fe の影響が大きい、 μ -XRD では腐食被膜を切り出したケースでは、それがキャンセルされている。図 4.4.1-14 では、マグネタイトに関し μ -XRD と XRD とで比較的近い位置にピークが見られるが、図 4.4.1-13 の XRD でシデライトのように、 μ -XRD ではあまり検出されない場合もある。このように両者の測定結果は必ずしも整合しないケースがあり、これは測定の局所性の影響と考えられる。なお、 μ -XRD の測定ではシデライトやマグネタイトといった腐食生成物の他にも微弱なピークが観察されており、4.4 で推察されたようなウスタイト、鉄水酸化物といった腐食生成物やスメクタイトの変質鉱物を含む可能性も示唆される。

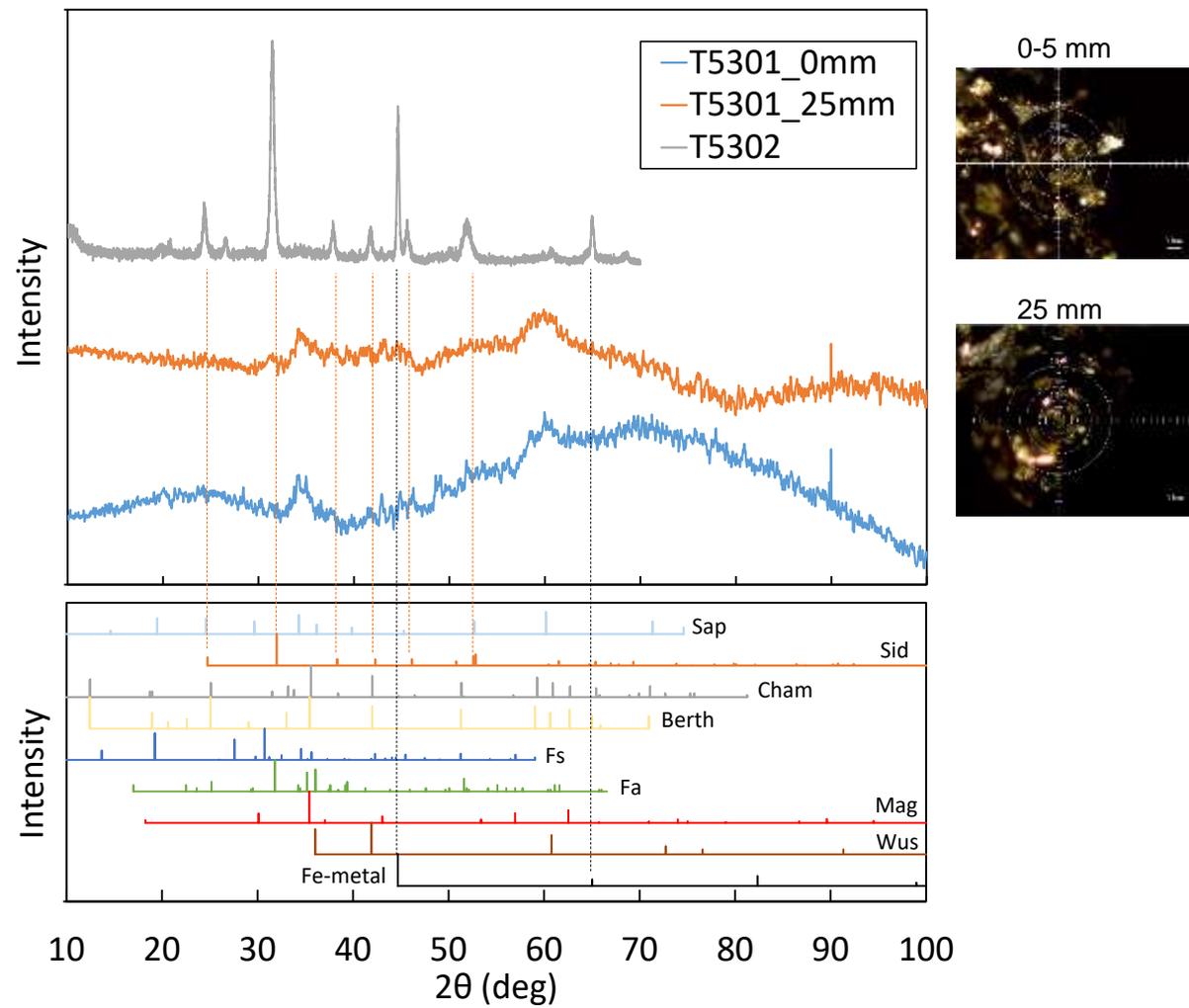


図 4.4.1-13 μ -XRD(T5301:SW-TIG-5)と同条件の XRD(T5302)の測定結果例
(0mm:母材部、25mm:溶接金属部)

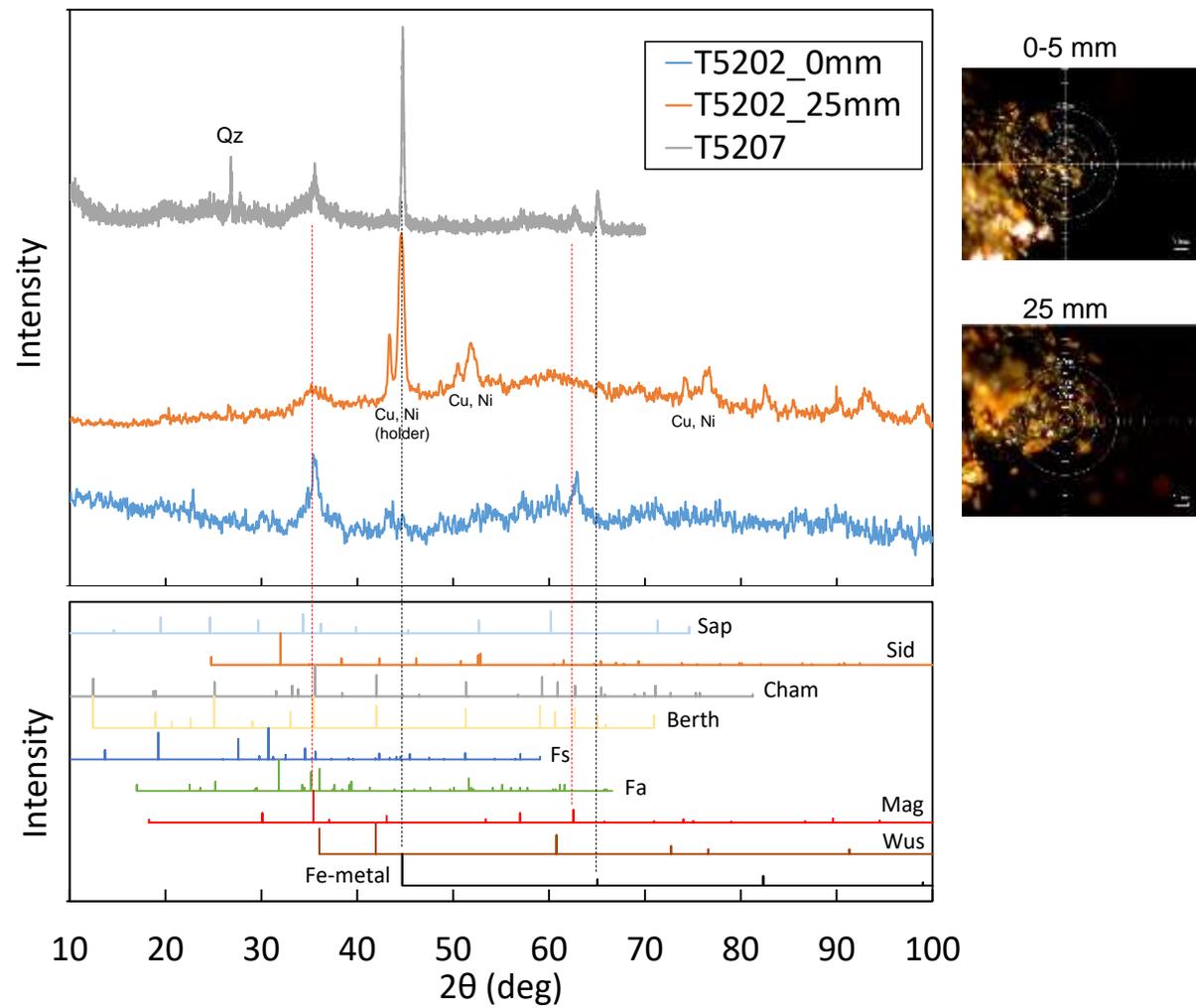


図 4.4.1-14 μ -XRD(T5202:FW-TIG-10)と同条件の XRD(T5207)の測定結果例
(0mm:母材部、25mm:溶接金属部)

(5) ラマン分光分析 (添付資料 4-7_精密分析・ラマン分光)

ラマン分光分析により腐食被膜の化学形態の推定を実施した。回収した試験片を窒素ガス雰囲気グローブボックス内でガラスバイアルに封入し、この容器に入れた状態で測定した。これをAr⁺レーザーを光源とするベンチトップのラマン分光測定装置で測定し、参照試料のスペクトルをもとに腐食被膜の解析を行った。図 4.3.3-4 に測定系の概要を示す。各試験片の測定はXYZステージを移動することで、試験片の母材側から Zone 1 (0~5mm)、Zone 2 (5~10mm)、Zone 3 (10~15mm)、Zone 4 (15~25mm : 溶接金属部) と区分した。照射レーザーは0.1×1.0 mmの矩形ビームである。カメラレンズにより、試料表面からのラマン散乱光を集光し、バンドパスフィルターを通して分光器に導入して測定した。

図 4.4.1-15 には参照試料としてマグネタイト、ウスタイト、鉄クロライトおよび試験未供与の炭素鋼試験片 (T6308、E601) の測定結果を示す。また図 4.4.1-16 と図 4.4.1-17 には、国際データベース (RRUFF) に掲載のマグネタイト、シデライト、鉄カンラン石 (Fayalite)、鉄珪輝石 (Ferrosilite)、バーチェリン、鉄クロライト (Chamosite) の参照データを示す。これらをもとにラマンスペクトルの帰属を行った。

全ての試験片のラマン分光分析の測定結果を添付資料 4-7 に示す。また測定結果の例として、図 4.4.1-18 には SW-MAG-10 (M5109) を、図 4.4.1-19 には FW-MAG-10 (M5104) をそれぞれ示した。これらはシデライトのピークが明瞭に確認されたケース (図 4.4.1-18) と、その対比のケース (図 4.4.1-19) として示した。4.4 の XRD 分析でも溶接付き試験片の人工海水条件において腐食生成物にシデライトが検出される傾向があったが、このラマン分光分析でも人工海水で比較的明瞭にシデライトが確認される傾向にある。その他のピークとして、ウスタイトや鉄クロライトと推定される波数にもピークが確認された。また、母材側と溶接金属側 (Zone の違い) の影響は生じていないと思われる。

なお、主体的に存在すると考えられたマグネタイトのピークは今回の測定ではあまり検出されず、この点については原因は良く分からない。またその一方で、今回参照試料として選んだ腐食生成物や鉱物には帰属されないピークも幾つか確認されており、これらの点を解明するためにはさらに詳細な検討が必要と思われる。

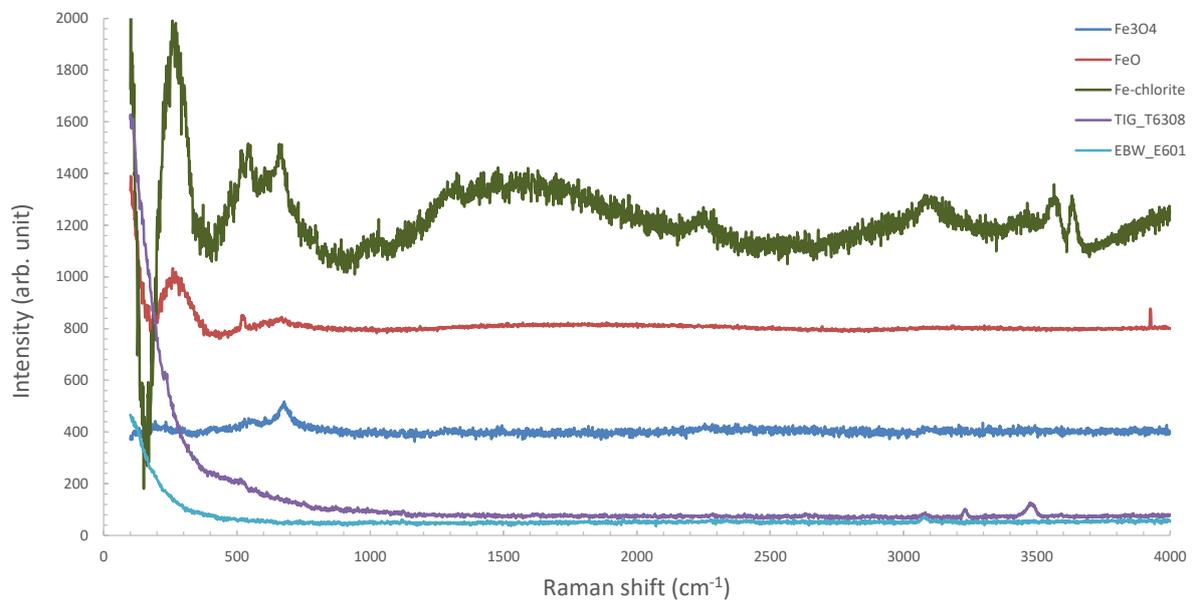


図 4.4.1-15 参照試料のラマンスペクトル

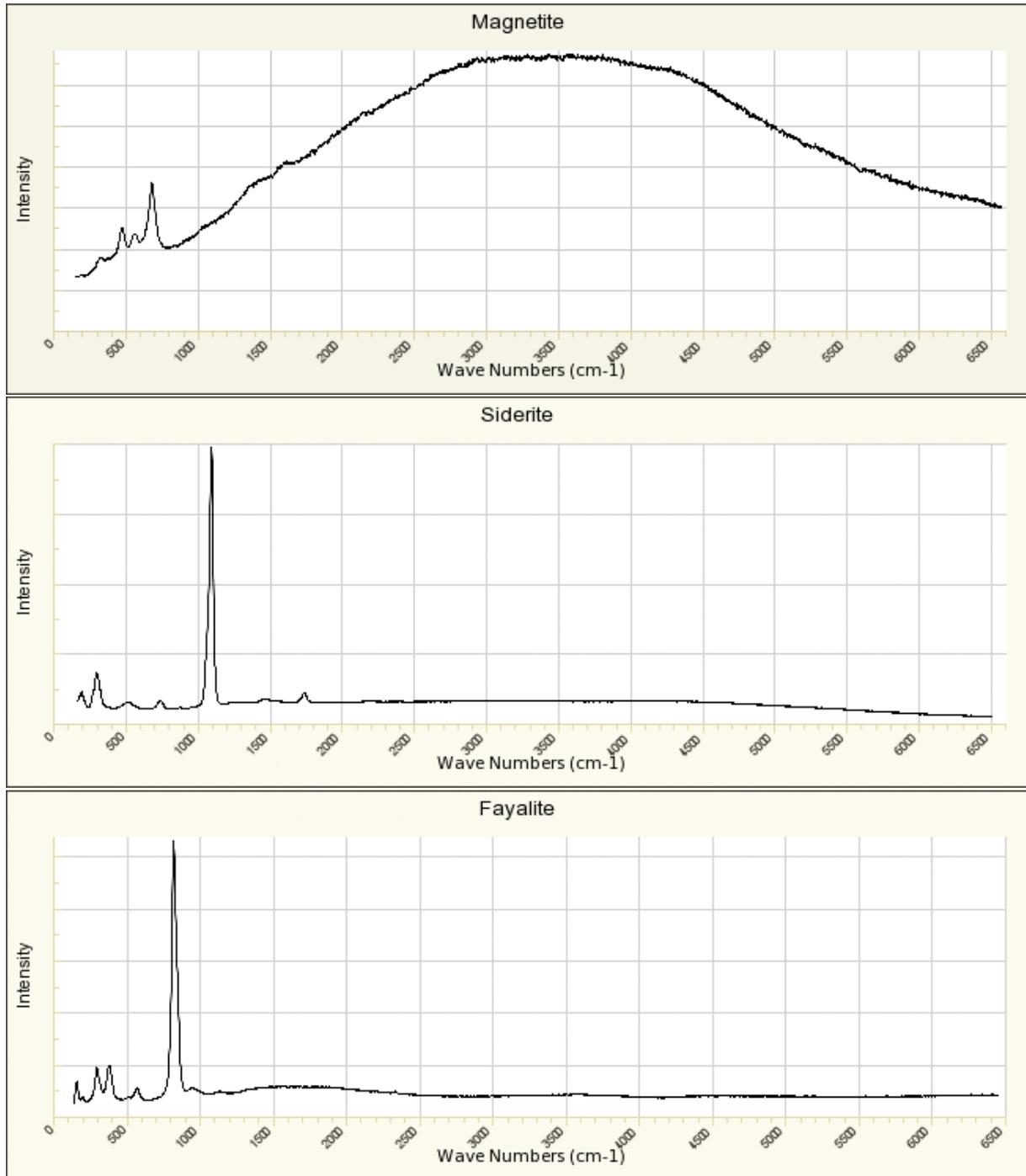


図 4.4.1-16 国際データベース(RRUFF)における参照データ (1)
(Magnetite、Siderite、Fayalite)

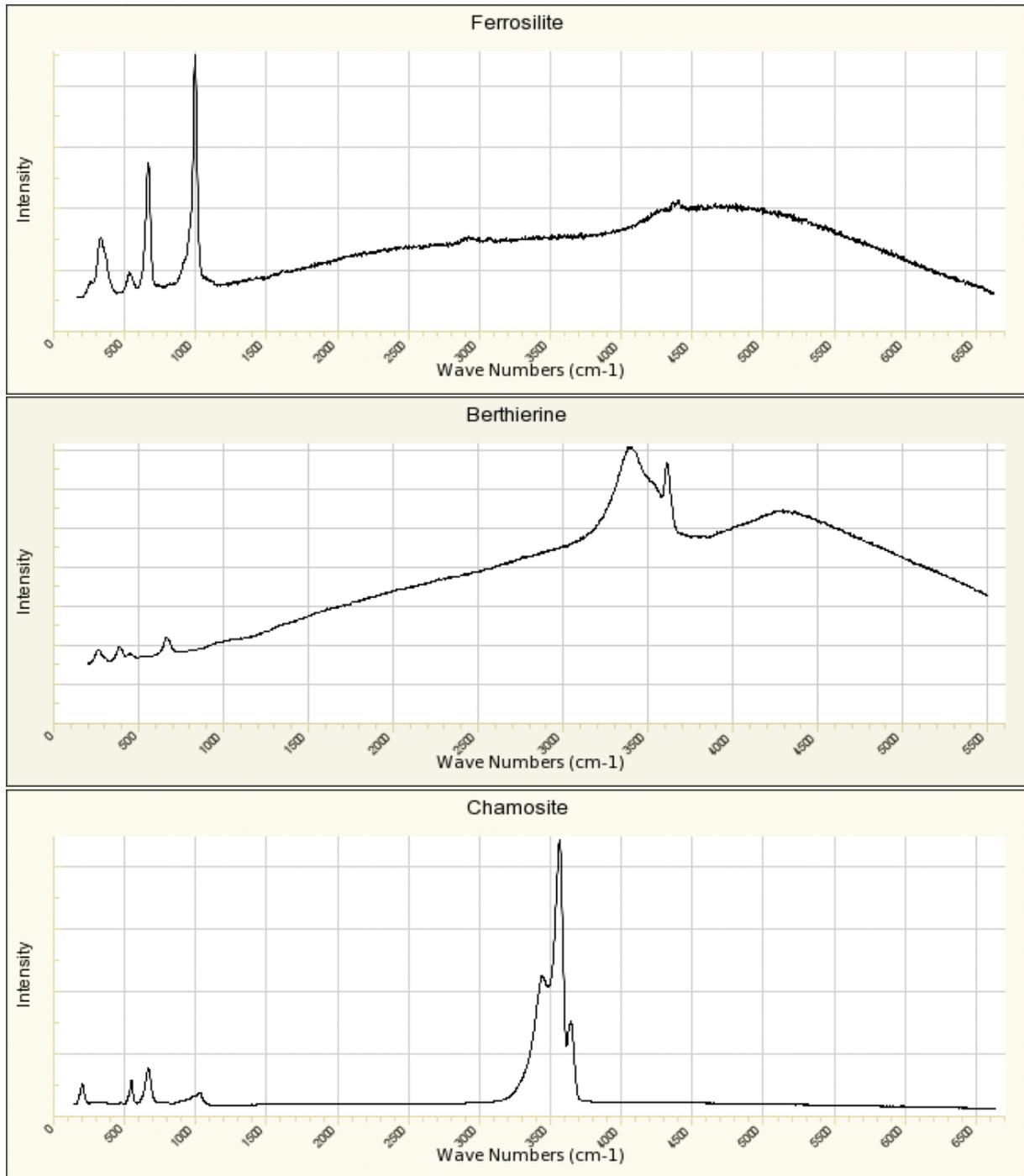


図 4.4.1-17 国際データベース(RRUFF)における参照データ (2)
(Ferrosilite、Berthierine、Chamosite)

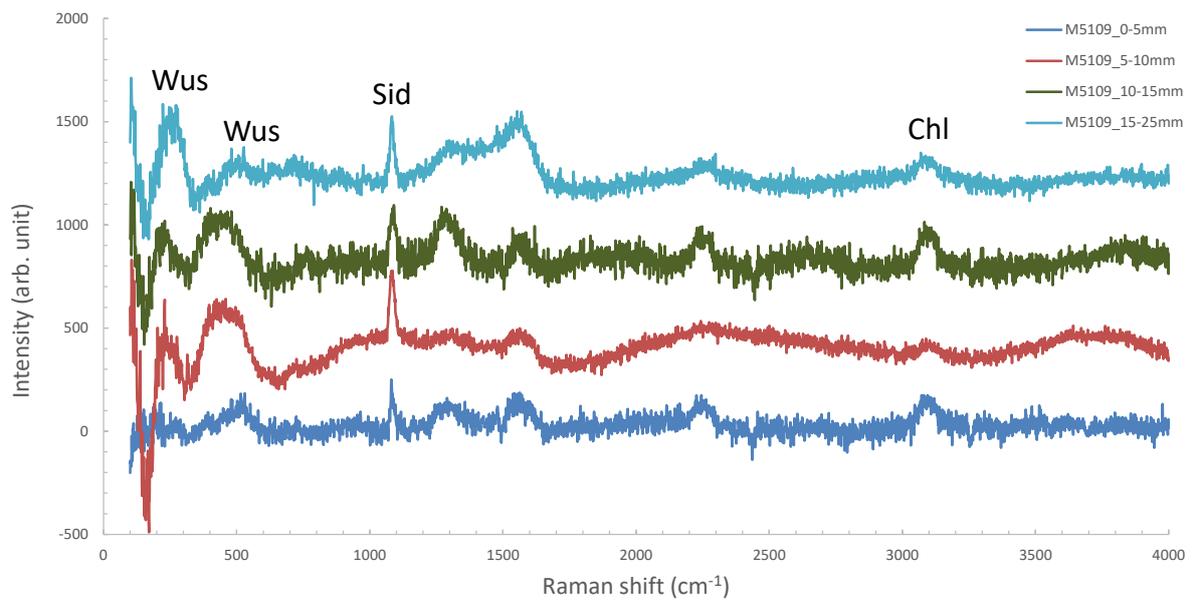


図 4.4.1-18 ラマン分光分析の測定結果の例：SW-MAG-10 (M5109)

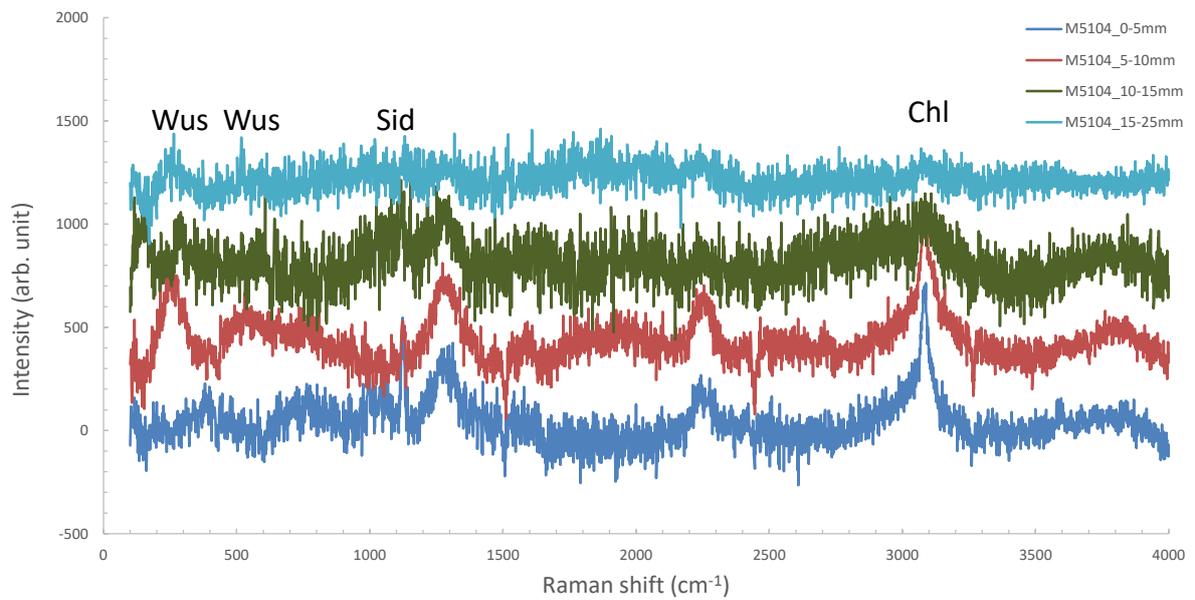


図 4.4.1-19 ラマン分光分析の測定結果の例：FW-MAG-10 (M5104)

(6) 被膜分析のまとめ

腐食速度評価用の溶接付き試験片の1枚について、緩衝材と接した炭素鋼試験片の腐食生成物の形態を詳細に評価する精密分析を実施した。EPMA分析ではCuなどに溶接金属部に特徴的な分布が見られたが、これは試験片基盤側の影響と考えられた。以下の分析を含め、腐食被膜については母材側と溶接金属部（Zoneの違い）とで、顕著な化学形態の相違は今回の測定では確認されなかった。FESEM観察およびEDS分析では、腐食被膜の特異部位の微視的な分析を行い、シデライトやマグネタイト以外の腐食生成物（例えばウスタイト）やスメクタイトの変質を示唆する鉱物も推定された。 μ -XRD分析でも、シデライトやマグネタイトといった腐食生成物の他にも微弱なピークが観察され、種々の腐食生成物や変質鉱物が含まれる可能性が示唆された。さらにラマン分光分析では、人工海水系でのシデライトの他に、ウスタイトや鉄クロライトと推定されるピークも検出された。XRD分析ではマグネタイトやシデライトを主体とする腐食被膜が確認されていた。一方、マグネタイトが μ -XRDではあまり検出されないなど、測定結果には必ずしも整合しない点がある。各物質が生成するpHやEh、温度等の条件からの検討が必要である。

4.4.2 腐食挙動の評価

(1) 外観観察と腐食面の形状測定結果（添付資料4-1_外観・形状測定）

溶接付き試験片の代表的な結果を抽出して表4.4.2-1～表4.4.2-4に示す。いずれの試験片も内部に黒色の腐食被膜が固着しているのがわかる。XRDの測定結果から、条件によっては Fe_3O_4 の他に FeCO_3 も検出されたが、外観の観察では被膜の色や状態に大きな違いは見られなかった。

脱スケール後の試験片の外観観察では、溶接付き試験片で溶接部と母材部とで様相の違いが認められた。これは溶接部の幅が広いTIGとMAGで比較的明瞭であった。また試験片によっては中央部に円状の痕跡が見られる。これはチタンカラムの孔（カラム内への溶液浸入口）の位置に相当しており、含水の過程で若干の影響があった可能性が推察された。

表 4.4.2-1 外観観察と形状測定結果（人工海水、5年、溶接付き）

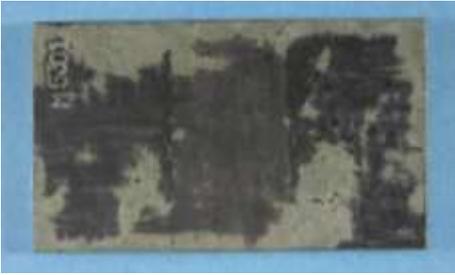
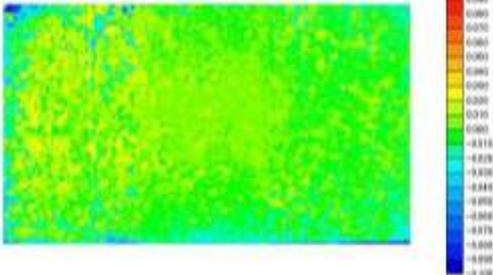
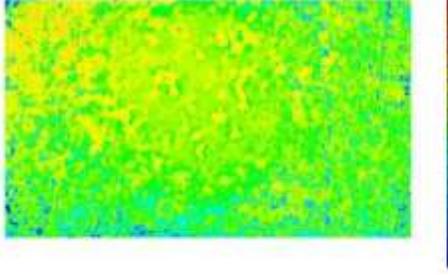
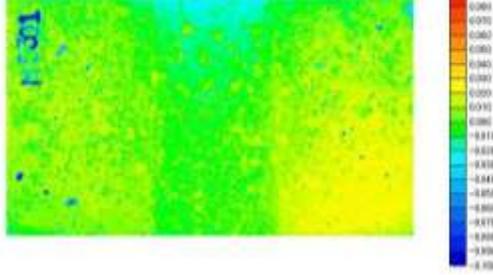
	TIG (T5300 表面)	EBW (E5301 表面)	MAG (M5301 裏面)
(a) 緩衝材剥離 (腐食被膜露出) 後の試験片			
(b) 脱スケール (腐食被膜除去) 後の試験片			
(c) 形状測定結果			

表 4.4.2-2 外観観察と形状測定結果（人工海水、10年、溶接付き）

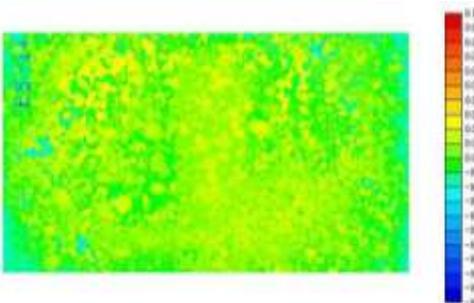
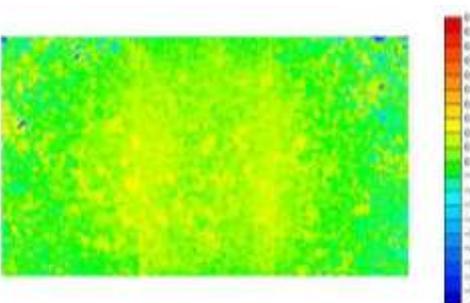
	TIG	EBW (E5211 裏面)	MAG (M5120 表面)
(a) 緩衝材剥離 (腐食被膜露出) 後の試験片	中断		
(b) 脱スケール (腐食被膜除去) 後の試験片	中断		
(c) 形状測定結果	中断		

表 4.4.2-3 外観観察と形状測定結果（人工淡水、5年、溶接付き）

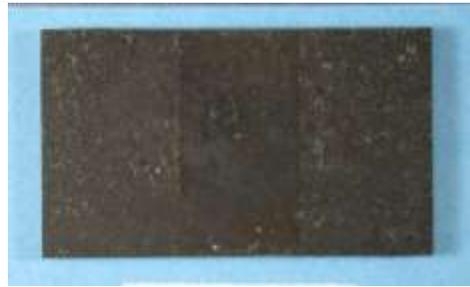
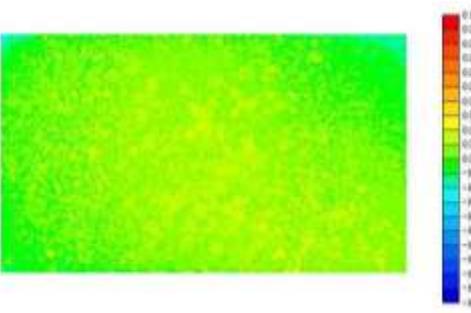
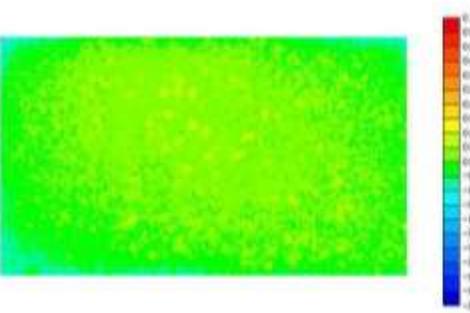
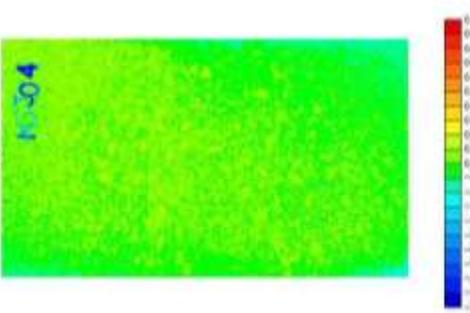
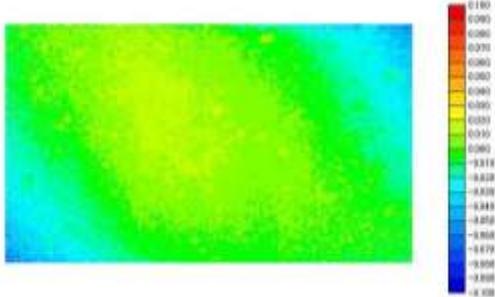
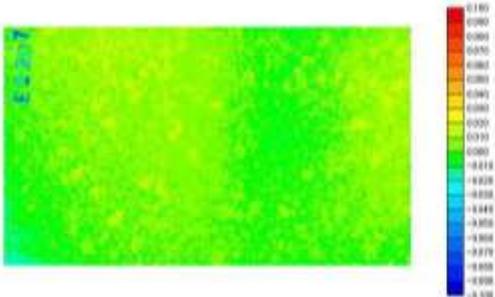
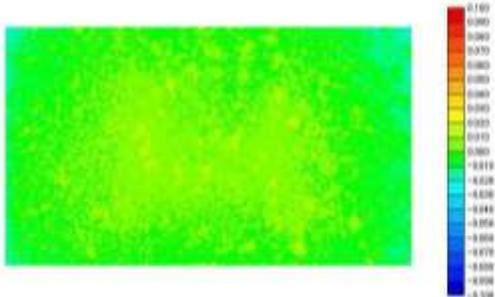
	TIG (T5303 表面)	EBW (E5303 表面)	MAG (M5304 裏面)
(a) 緩衝材剥離 (腐食被膜露出) 後の試験片			
(b) 脱スケール (腐食被膜除去) 後の試験片			
(c) 形状測定結果			

表 4.4.2-4 外観観察と形状測定結果（人工淡水、10年、溶接付き）

	TIG (T5207 表面)	EBW (E5207 裏面)	MAG (M5118 表面)
(a) 緩衝材剥離 (腐食被膜露出) 後の試験片			
(b) 脱スケール (腐食被膜除去) 後の試験片			
(c) 形状測定結果			

(2) 重量減による腐食速度の算出

形状計測の結果からは、多くの試験片が全面腐食の腐食形態であると考えられた。そこで表 4.4.2-5～表 4.4.2-8 に、浸漬前後の試験片の重量（ n 数 3 の平均値）、およびそれから算出される重量減少、試験片の面積で除した平均減肉深さを示す。また、平均減肉深さを試験期間で除して腐食速度に換算した値を表 4.4.2-9 に一覧表として示した。

上記の平均減肉深さを比較した結果を図 4.4.2-1～図 4.4.2-4 に示す。全体的な傾向として、平均減肉深さは（人工海水、10 年）>（人工海水、5 年）>（人工淡水、10 年）>（人工淡水、5 年）の順であり、人工淡水よりも人工海水で、また 5 年よりも 10 年で腐食が進行している。

溶液条件ごとに比較すると、まず人工淡水では溶接法の違い（TIG、EBW、MAG）による減肉深さの差は見られない。溶接の有無で比較すると、TIG 溶接付きの 5 年と MAG 溶接付きの 10 年で母材単独よりも若干腐食しているように見えるが、5 年と 10 年とで必ずしも傾向が整合しておらず、顕著な影響はないものとする。形状測定の結果でも、人工淡水では溶接付き試験片の溶接部に目立った変位は確認されておらず、局所的な腐食の発生やそれによる腐食量の増加は確認されなかったと考えられる。

表 4.4.2-9 に換算した腐食速度を確認すると、人工海水、5 年で $3.48\sim 4.91\ \mu\text{m/y}$ 、人工海水、10 年で $2.32\sim 3.29\ \mu\text{m/y}$ 、人工淡水、5 年で $2.53\sim 2.88\ \mu\text{m/y}$ および人工淡水、10 年で $1.40\sim 1.81\ \mu\text{m/y}$ であった。図 4.4.2-5 には、これらの値を含め過去に取得した平均腐食速度の推移を示す。試験開始 1 年程度までは比較的高い値を示すが、その後の漸次低下しているのがわかる。

今年度の結果（5 年および 10 年）についても、炭素鋼の長期挙動評価での腐食速度として見積もっている $10\ \mu\text{m/y}$ を十分に下回っており、低酸素雰囲気下では、溶接が炭素鋼オーバーパックの不均一な腐食の要因とならないことを確認した。

表 4.4.2-5 試験片の重量減少と平均減肉深さ（人工海水、5年）

人工海水、5年

種類	材料	試験片 番号	試験片重量(g)・平均値		重量変化		減肉深さ(mm)		
			試験前	試験後	(g)	(g/cm ²)	平均	分散	
溶接 付き	TIG	T5300	23.73198	23.03933	0.69265	0.02147	0.02728	0.02575	0.00169
		T5301	23.49028	22.82947	0.66081	0.02049	0.02604		
		T5302	23.62973	23.02264	0.60709	0.01884	0.02394		
	EBW	E5300	23.51005	22.92009	0.58996	0.01825	0.02319	0.02520	0.00176
		E5301	23.52480	22.85446	0.67033	0.02079	0.02642		
		E5302	23.62134	22.96243	0.65891	0.02046	0.02600		
	MAG	M5300	23.28782	22.71097	0.57685	0.01788	0.02272	0.02059	0.00185
		M5301	22.63161	22.13435	0.49726	0.01545	0.01963		
		M5302	22.73844	22.24486	0.49358	0.01528	0.01942		
母材 単独	TIG	TB5600	24.39550	23.74070	0.65480	0.01962	0.02494	0.02423	0.00064
		TB5601	24.28480	23.65146	0.63334	0.01895	0.02408		
		TB5602	24.46537	23.84233	0.62304	0.01864	0.02369		
	EBW	EB5600	24.70842	24.03298	0.67544	0.02024	0.02571	0.02538	0.00199
		EB5601	24.60614	23.99690	0.60924	0.01829	0.02324		
		EB5602	24.54455	23.83127	0.71329	0.02139	0.02718		
	MAG	MB5600	24.30981	23.81522	0.49459	0.01483	0.01885	0.01829	0.00067
		MB5601	24.44721	23.96135	0.48586	0.01453	0.01846		
		MB5602	24.44193	23.98186	0.46007	0.01381	0.01755		

表 4.4.2-6 試験片の重量減少と平均減肉深さ（人工海水、10年）

人工海水、10年

種類	材料	試験片 番号	試験片重量(g)・平均値		重量変化		減肉深さ(mm)		
			試験前	試験後	(g)	(g/cm ²)	平均	分散	
溶接 付き	TIG	T5201	23.02996	中断	-	-	-	-	-
		T5206	22.71127	中断	-	-	-		
		T5211	22.92013	中断	-	-	-		
	EBW	E5201	23.93852	23.15410	0.78442	0.02351	0.02988	0.02906	0.00071
		E5206	23.63151	22.87885	0.75266	0.02260	0.02872		
		E5211	24.07237	23.32200	0.75037	0.02250	0.02859		
	MAG	M5109	24.30053	23.44819	0.85234	0.02550	0.03240	0.03260	0.00051
		M5115	24.05116	23.18019	0.87097	0.02611	0.03318		
		M5120	24.32665	23.47831	0.84834	0.02536	0.03222		
母材 単独	TIG	TB5510	22.61648	21.73135	0.88513	0.02675	0.03399	0.03427	0.00059
		TB5511	22.72401	21.84235	0.88166	0.02665	0.03387		
		TB5512	22.78568	21.87555	0.91013	0.02750	0.03494		
	EBW	EB510	24.14759	23.33631	0.81128	0.02431	0.03088	0.03117	0.00083
		EB511	24.11512	23.31373	0.80139	0.02402	0.03053		
		EB512	23.81100	22.96896	0.84204	0.02527	0.03211		
	MAG	MB58-10	23.92010	23.26532	0.65478	0.01958	0.02488	0.02415	0.00063
		MB58-11	23.90584	23.28305	0.62279	0.01867	0.02372		
		MB58-12	24.03433	23.40710	0.62724	0.01876	0.02384		

表 4.4.2-7 試験片の重量減少と平均減肉深さ（人工淡水、5年）

人工淡水、5年

種類	材料	試験片 番号	試験片重量(g)・平均値		重量変化		減肉深さ(mm)		
			試験前	試験後	(g)	(g/cm ²)	平均	分散	
溶接 付き	TIG	T5105	22.74140	22.37366	0.36773	0.01111	0.01411	0.01478	0.00074
		T5209	22.84995	22.46801	0.38194	0.01153	0.01465		
		T5303	23.51150	23.11544	0.39605	0.01225	0.01557		
	EBW	E5104	23.95972	23.62774	0.33198	0.00996	0.01266	0.01344	0.00169
		E5209	23.63230	23.31013	0.32216	0.00966	0.01227		
		E5303	23.50037	23.10856	0.39182	0.01210	0.01537		
	MAG	M5303	22.66854	22.32429	0.34425	0.01063	0.01351	0.01341	0.00055
		M5304	22.83154	22.47738	0.35416	0.01094	0.01390		
		M5305	22.96745	22.64105	0.32640	0.01008	0.01281		
母材 単独	TIG	TB5603	24.47341	24.12905	0.34435	0.01026	0.01304	0.01298	0.00041
		TB5604	24.37802	24.04713	0.33089	0.00988	0.01255		
		TB5605	24.44275	24.09051	0.35224	0.01051	0.01336		
	EBW	EB5603	24.41668	24.07785	0.33883	0.01010	0.01284	0.01349	0.00096
		EB5604	24.53327	24.18937	0.34390	0.01025	0.01303		
		EB5605	24.42804	24.04328	0.38476	0.01149	0.01459		
	MAG	MB5603	24.37437	24.03112	0.34325	0.01026	0.01303	0.01361	0.00076
		MB5604	24.58472	24.23297	0.35175	0.01049	0.01332		
		MB5605	24.41550	24.03420	0.38130	0.01138	0.01447		

表 4.4.2-8 試験片の重量減少と平均減肉深さ（人工淡水、10年）

人工淡水、10年

種類	材料	試験片 番号	試験片重量(g)・平均値		重量変化		減肉深さ(mm)		
			試験前	試験後	(g)	(g/cm ²)	平均	分散	
溶接 付き	TIG	T5202	22.51817	22.10523	0.41294	0.01247	0.01585	0.01722	0.00167
		T5207	22.66068	22.22430	0.43638	0.01317	0.01674		
		T5212	23.07257	22.57429	0.49828	0.01502	0.01909		
	EBW	E5202	23.95600	23.52946	0.42655	0.01282	0.01629	0.01608	0.00062
		E5207	23.86425	23.46140	0.40286	0.01210	0.01538		
		E5212	23.69814	23.26354	0.43460	0.01303	0.01656		
	MAG	M5104	24.06006	23.58605	0.47401	0.01417	0.01800	0.01766	0.00057
		M5113	24.28020	23.83199	0.44821	0.01338	0.01701		
		M5118	24.14538	23.67315	0.47223	0.01414	0.01797		
母材 単独	TIG	TB5516	22.57291	22.10347	0.46944	0.01418	0.01802	0.01890	0.00163
		TB5517	22.56786	22.10163	0.46624	0.01409	0.01790		
		TB5518	22.68339	22.14152	0.54187	0.01636	0.02078		
	EBW	EB516	23.66854	23.24779	0.42074	0.01264	0.01606	0.01652	0.00053
		EB517	24.00119	23.55164	0.44955	0.01346	0.01711		
		EB518	24.09204	23.66108	0.43096	0.01291	0.01641		
	MAG	MB58-16	24.10734	23.72504	0.38230	0.01146	0.01456	0.01460	0.00018
		MB58-17	24.02038	23.63178	0.38861	0.01165	0.01480		
		MB58-18	24.07781	23.69804	0.37977	0.01137	0.01445		

表 4.4.2-9 腐食量評価の結果（平均減肉深さと腐食速度）

試験溶液	予定期間 (y)	種類	材料	符号(試験片番号)			平均減肉深さ(mm) (左記の試験片番号に対応)				実際の試験期間 (y)	腐食速度($\mu\text{m}/\text{y}$) (左記の試験片番号に対応)			
				試験片1	試験片2	試験片3	試験片1	試験片2	試験片3	平均		試験片1	試験片2	試験片3	平均
人工海水	5	溶接付き	TIG	T5300	T5301	T5302	2.73.E-02	2.60.E-02	2.39.E-02	2.58.E-02	5.25	5.20	4.96	4.56	4.91
			EBW	E5300	E5301	E5302	2.32.E-02	2.64.E-02	2.60.E-02	2.52.E-02	5.25	4.42	5.03	4.95	4.80
			MAG	M5300	M5301	M5302	2.27.E-02	1.96.E-02	1.94.E-02	2.06.E-02	5.25	4.33	3.74	3.70	3.92
		母材単独	TIG	TB5600	TB5601	TB5602	2.49.E-02	2.41.E-02	2.37.E-02	2.42.E-02	5.26	4.74	4.58	4.50	4.61
			EBW	EB5600	EB5601	EB5602	2.57.E-02	2.32.E-02	2.72.E-02	2.54.E-02	5.26	4.89	4.42	5.17	4.82
			MAG	MB5600	MB5601	MB5602	1.88.E-02	1.85.E-02	1.75.E-02	1.83.E-02	5.26	3.58	3.51	3.34	3.48
	10	溶接付き	TIG	T5201	T5206	T5211	中断	中断	中断	-	中断	中断	中断	中断	-
			EBW	E5201	E5206	E5211	2.99.E-02	2.87.E-02	2.86.E-02	2.91.E-02	10.42	2.87	2.76	2.74	2.79
			MAG	M5109	M5115	M5120	3.24.E-02	3.32.E-02	3.22.E-02	3.26.E-02	10.42	3.11	3.18	3.09	3.13
		母材単独	TIG	TB5510	TB5511	TB5512	3.40.E-02	3.39.E-02	3.49.E-02	3.43.E-02	10.42	3.26	3.25	3.35	3.29
			EBW	EB510	EB511	EB512	3.09.E-02	3.05.E-02	3.21.E-02	3.12.E-02	10.42	2.96	2.93	3.08	2.99
			MAG	MB58-10	MB58-11	MB58-12	2.49.E-02	2.37.E-02	2.38.E-02	2.41.E-02	10.42	2.39	2.28	2.29	2.32
人工淡水	5	溶接付き	TIG	T5105	T5209	T5303	1.41.E-02	1.47.E-02	1.56.E-02	1.48.E-02	5.14	2.75	2.85	3.03	2.88
			EBW	E5104	E5209	E5303	1.27.E-02	1.23.E-02	1.54.E-02	1.34.E-02	5.14	2.46	2.39	2.99	2.61
			MAG	M5303	M5304	M5305	1.35.E-02	1.39.E-02	1.28.E-02	1.34.E-02	5.14	2.63	2.70	2.49	2.61
		母材単独	TIG	TB5603	TB5604	TB5605	1.30.E-02	1.25.E-02	1.34.E-02	1.30.E-02	5.14	2.54	2.44	2.60	2.53
			EBW	EB5603	EB5604	EB5605	1.28.E-02	1.30.E-02	1.46.E-02	1.35.E-02	5.14	2.50	2.53	2.84	2.62
			MAG	MB5603	MB5604	MB5605	1.30.E-02	1.33.E-02	1.45.E-02	1.36.E-02	5.14	2.54	2.59	2.81	2.65
	10	溶接付き	TIG	T5202	T5207	T5212	1.58.E-02	1.67.E-02	1.91.E-02	1.72.E-02	10.42	1.52	1.61	1.83	1.65
			EBW	E5202	E5207	E5212	1.63.E-02	1.54.E-02	1.66.E-02	1.61.E-02	10.42	1.56	1.48	1.59	1.54
			MAG	M5104	M5113	M5118	1.80.E-02	1.70.E-02	1.80.E-02	1.77.E-02	10.42	1.73	1.63	1.72	1.69
		母材単独	TIG	TB5516	TB5517	TB5518	1.80.E-02	1.79.E-02	2.08.E-02	1.89.E-02	10.42	1.73	1.72	1.99	1.81
			EBW	EB516	EB517	EB518	1.61.E-02	1.71.E-02	1.64.E-02	1.65.E-02	10.42	1.54	1.64	1.57	1.59
			MAG	MB58-16	MB58-17	MB58-18	1.46.E-02	1.48.E-02	1.44.E-02	1.46.E-02	10.42	1.40	1.42	1.39	1.40

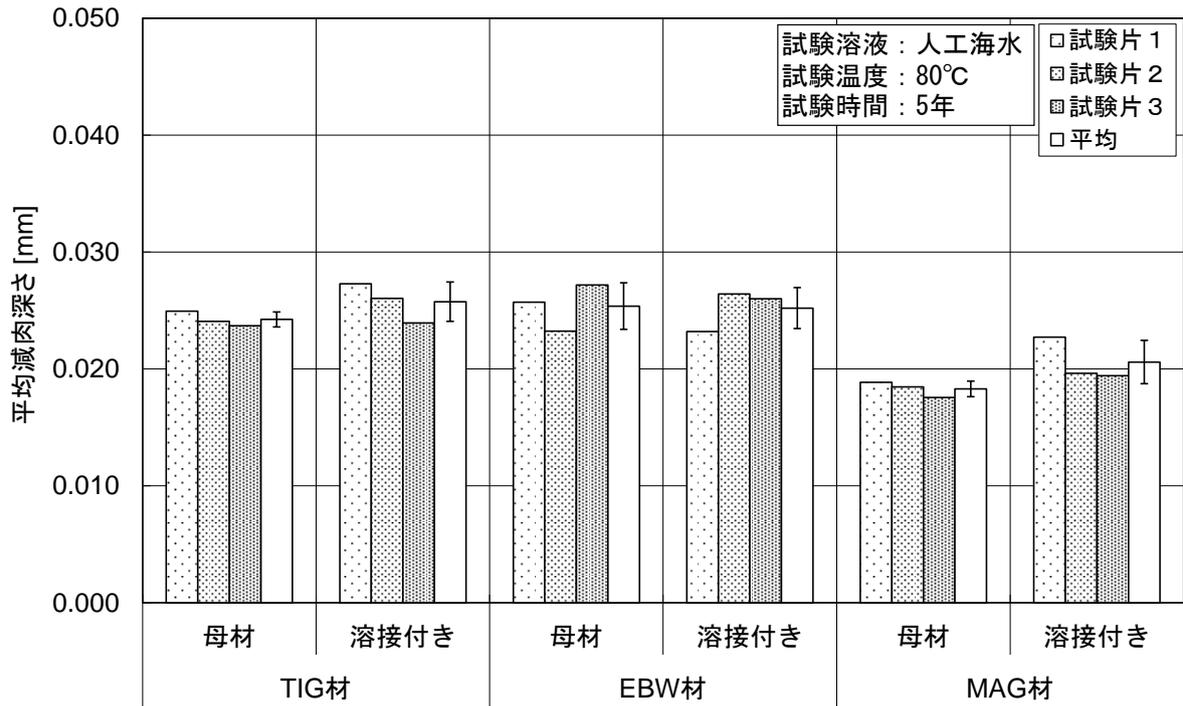


図 4.4.2-1 平均減肉深さの比較（人工海水、5年）

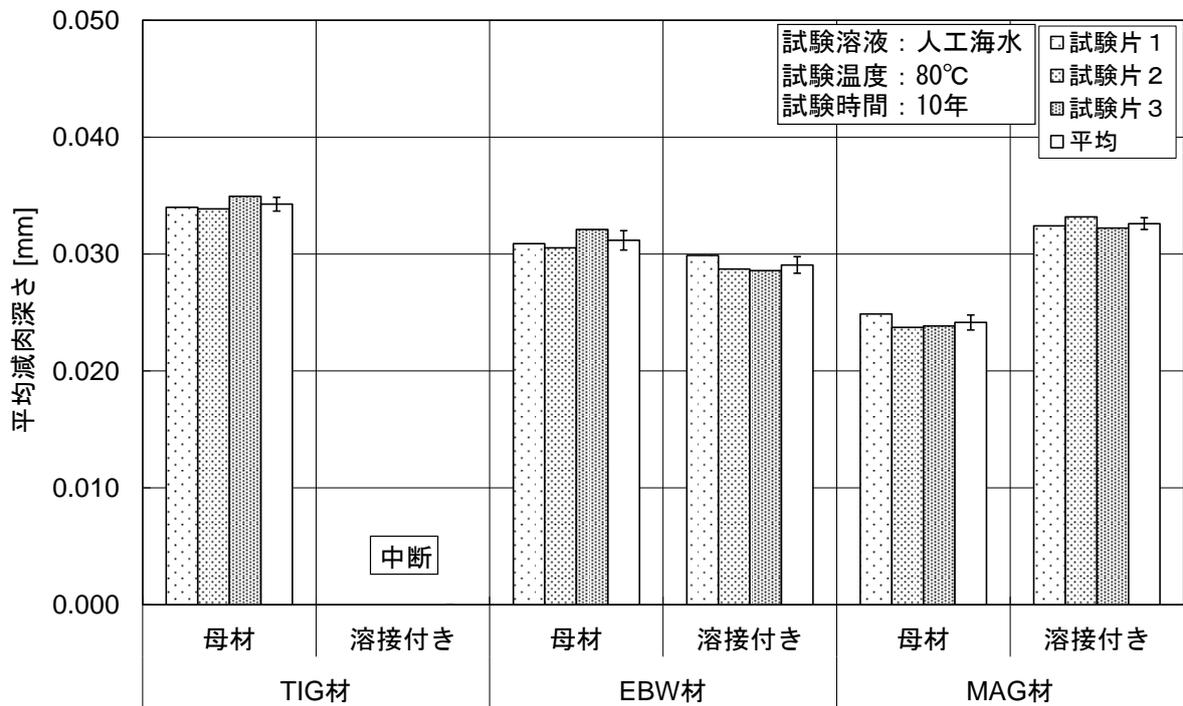


図 4.4.2-2 平均減肉深さの比較（人工海水、10年）

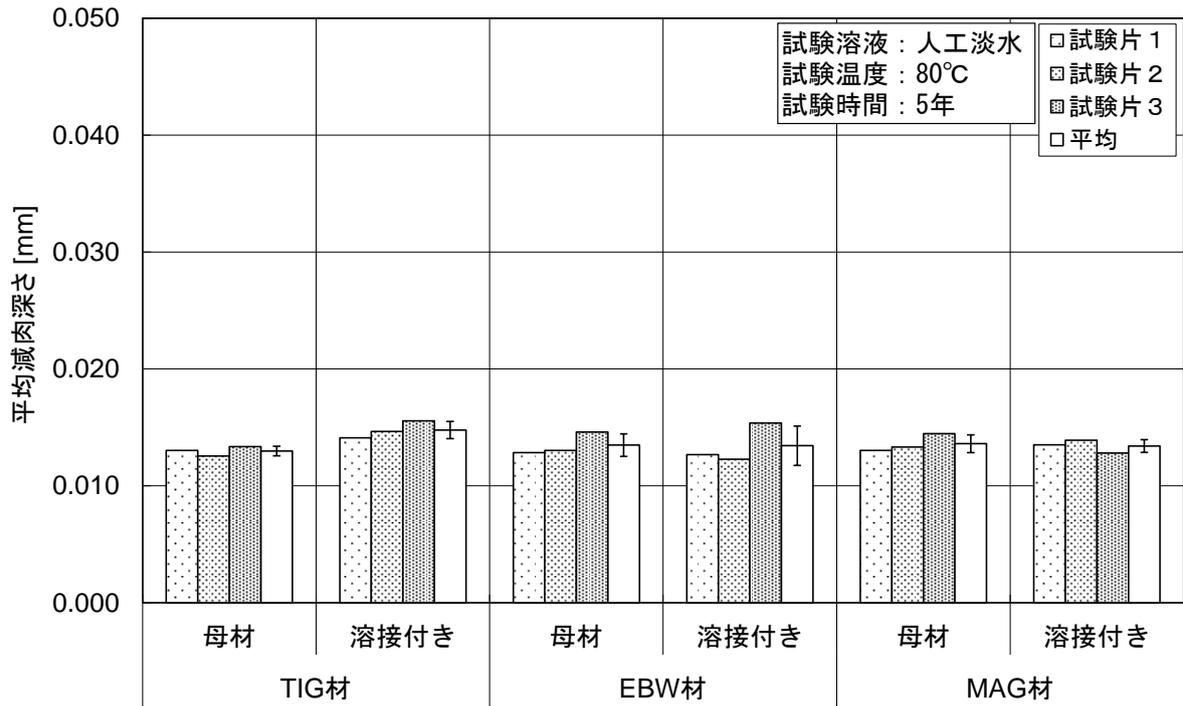


図 4.4.2-3 平均減肉深さの比較（人工淡水、5年）

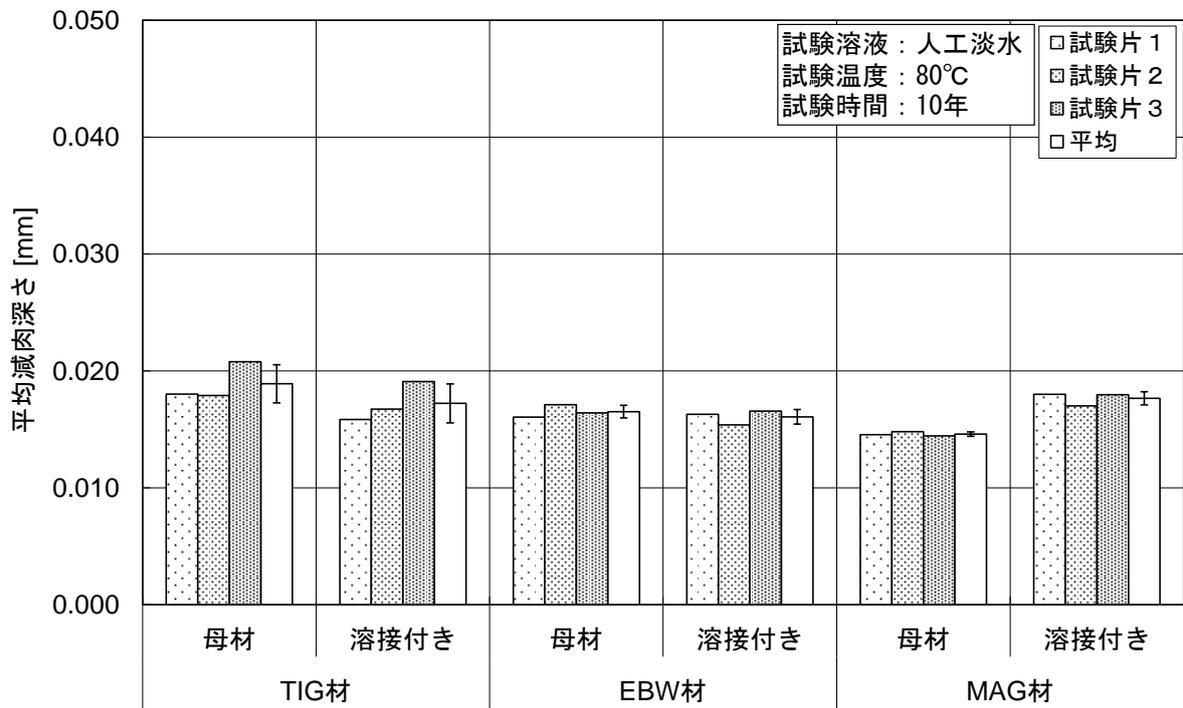


図 4.4.2-4 平均減肉深さの比較（人工淡水、10年）

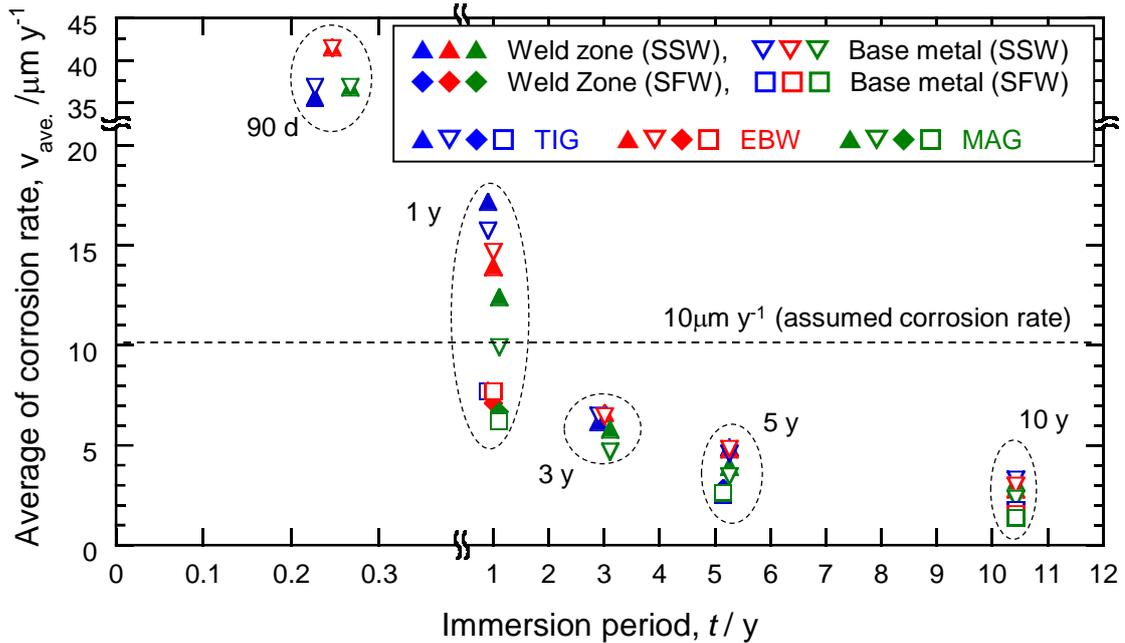


図 4.4.2-5 還元性雰囲気における平均腐食速度の推移
(浸漬前後の重量減少を浸漬期間で除した値として評価)

腐食減量を時間で除して得られる腐食速度は、試験開始初期の比較的大きな腐食の進展も含んだ評価となり、長期的な腐食挙動評価の観点からは保守性が担保される一方で、ある瞬間の値としては過剰な値であると考えられる。本試験でも確認されたように、浸漬期間が1年を超えると腐食の進展は抑制されるようになり、このような初期段階以後の腐食速度の推移も確認しておくことが重要と考えられる。

図 4.4.2-6 および図 4.4.2-7 には、人工海水と人工淡水とに分けて平均減肉深さ（n 数 3 の平均値）の推移を示した。全体的な傾向としては、上述のように人工海水のほうが人工淡水よりも腐食していることがわかる。人工海水での TIG と EBW では溶接付き試験片と母材単独試験片との相違は少なく、MAG についてはいずれの期間でも溶接付き試験片のほうが平均減肉深さが大きい。

なお、このような初期の腐食量と長期的な腐食抑制効果との関係の整理として、以下のような式で近似化する検討が行われている[5][10]。

$$Y = AX^B \quad Y: \text{平均減肉深さ} (\mu\text{m}) \quad X: \text{期間} (\text{y}) \quad \text{式 (4.4.2-1)}$$

ここで係数 A は腐食生成物による保護効果がほとんど生じていない状態での初期腐食速度に相当するパラメータ、また係数 B は腐食生成物による保護効果のパラメータに相当し、 $B < 1$ のべき乗則で近似して、平均減肉深さの増加が時間とともに鈍化する傾向を表現する。本式を適用して係数 A、B をフィッティングにより求めた結果を TIG、EBW、MAG ごとに図 4.4.2-8～図 4.4.2-10 に示すとともに、その値を表 4.4.2-10 にまとめた。いずれの条件でも両対数グラフで概

ね直線関係となり、 $X=1$ での Y が係数 A を、直線の傾きが係数 B を表している。これまで言及したように、人工海水の MAG を除いて溶接の有無によらず両者の近似の直線はほぼ一致している。いずれの条件でも人工淡水にくらべ人工海水のほうが初期の腐食速度のパラメータ A は大きく、抑制効果に関わるパラメータ B は若干小さい（抑制効果が大きい）ことがわかる。この傾向は初期の腐食量が大きいほど、形成される腐食被膜の保護性が大きいことを示しており、長期的な腐食速度はむしろ小さくなる可能性も示唆している。

このべき乗則による近似は長期的な腐食速度の低下を見積もることになるが、1000 年間にわたる長期的腐食挙動を評価する上では不確実性を伴うことが懸念されるため、より保守的な推定として（ただし、全浸漬期間で平均化するよりは現実的）、ある期間経過後には腐食速度が一定になると仮定した直線則による腐食速度の評価も行われている[5][10]。本試験でも浸漬期間が 1 年を超えると腐食の進展が抑制されたことから、この 1 年以後の平均減肉深さ変化の傾き（平均腐食速度）を図 4.4.2-11～図 4.4.2-13 に示すとともに（これらの図で人工海水の浸漬 90 日のデータは直線近似に用いていない）、その値を表 4.4.2-10 に併記した。人工淡水、 MAG の母材単独試験片で相関係数が若干低い、経時的に鈍化する平均減肉深さを線形で近似していることが影響している。傾きから求まる平均腐食速度は、人工海水で $1.50\sim 2.14\ \mu\text{m}/\text{y}$ 、人工淡水で $0.87\sim 1.17\ \mu\text{m}/\text{y}$ であり、重量減少量を浸漬期間で除した腐食速度と比較してさらに低いものとなった。腐食速度の時間的な減少には腐食生成物による保護効果が発現していると考えられ、初期腐食速度と腐食被膜の保護性には相関も認められた。このような被膜形成過程に及ぼす環境や材料因子の影響およびメカニズムなどについても、今後知見を深めていくことが重要と考える。

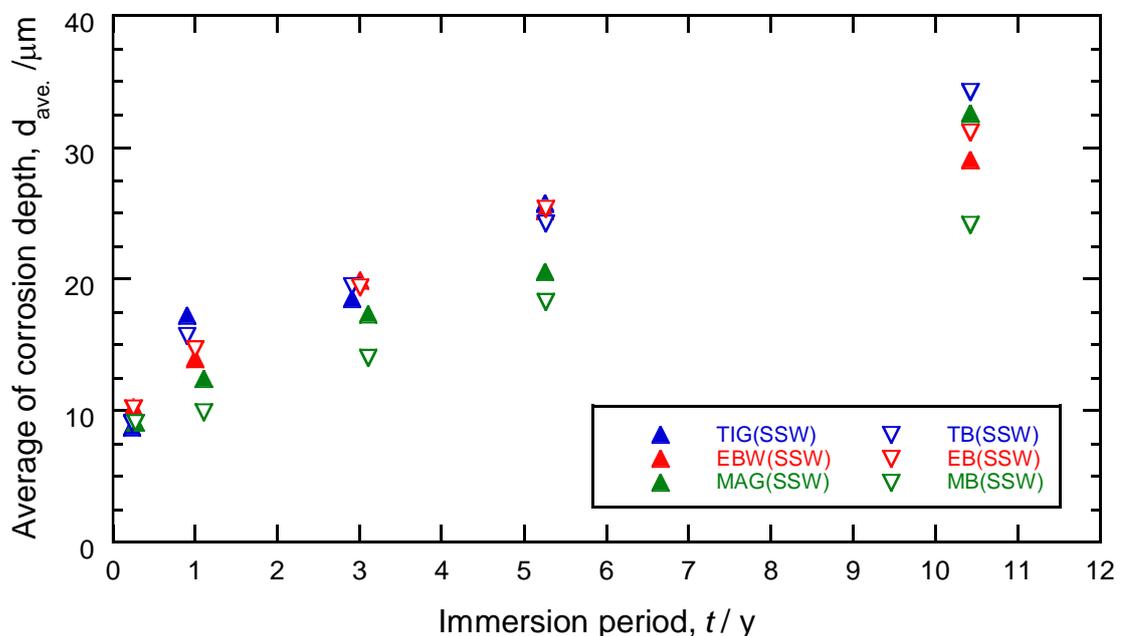


図 4.4.2-6 還元性雰囲気における平均減肉深さの推移（SSW：人工海水）
 (TIG, EBW, MAG：溶接付き、TB, EB, MB：母材単独)

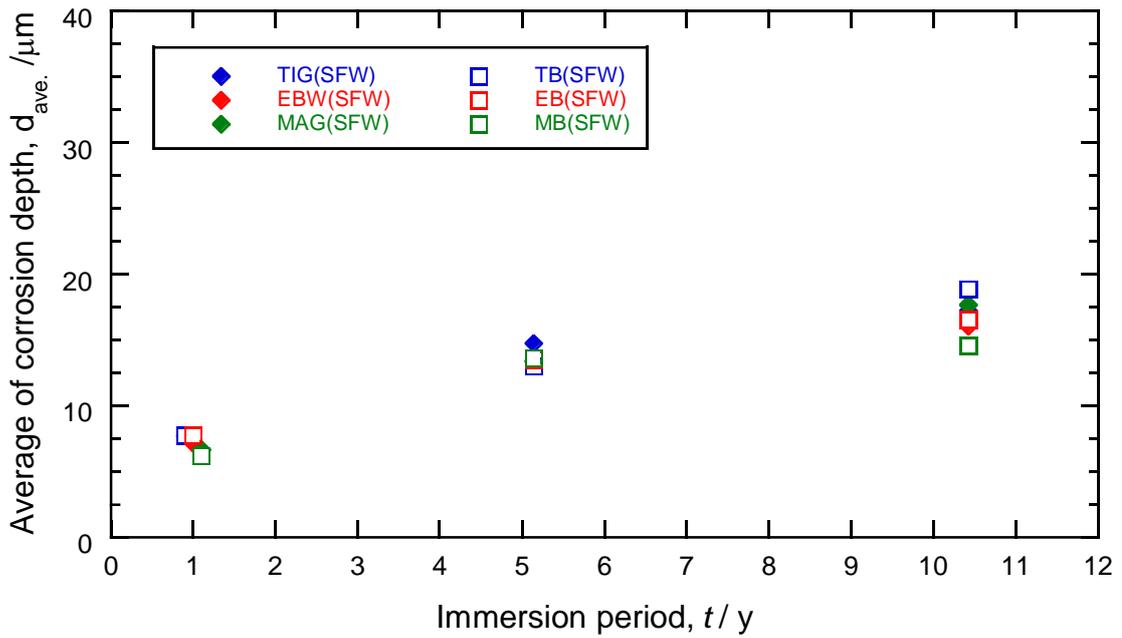


図 4.4.2-7 還元性雰囲気における平均減肉深さの推移 (SFW : 人工淡水)
(TIG, EBW, MAG : 溶接付き、TB, EB, MB : 母材単独)

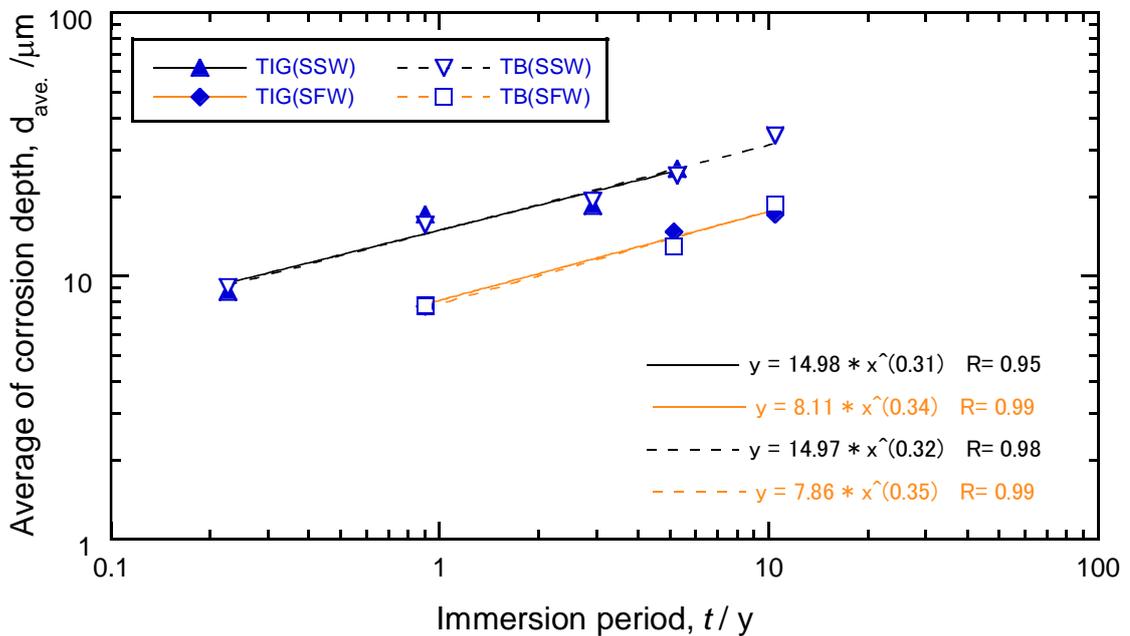


図 4.4.2-8 平均減肉深さの推移に対するべき乗則による近似 (TIG)
(TIG : 溶接付き、TB : 母材単独、SSW : 人工海水、SFW : 人工淡水)

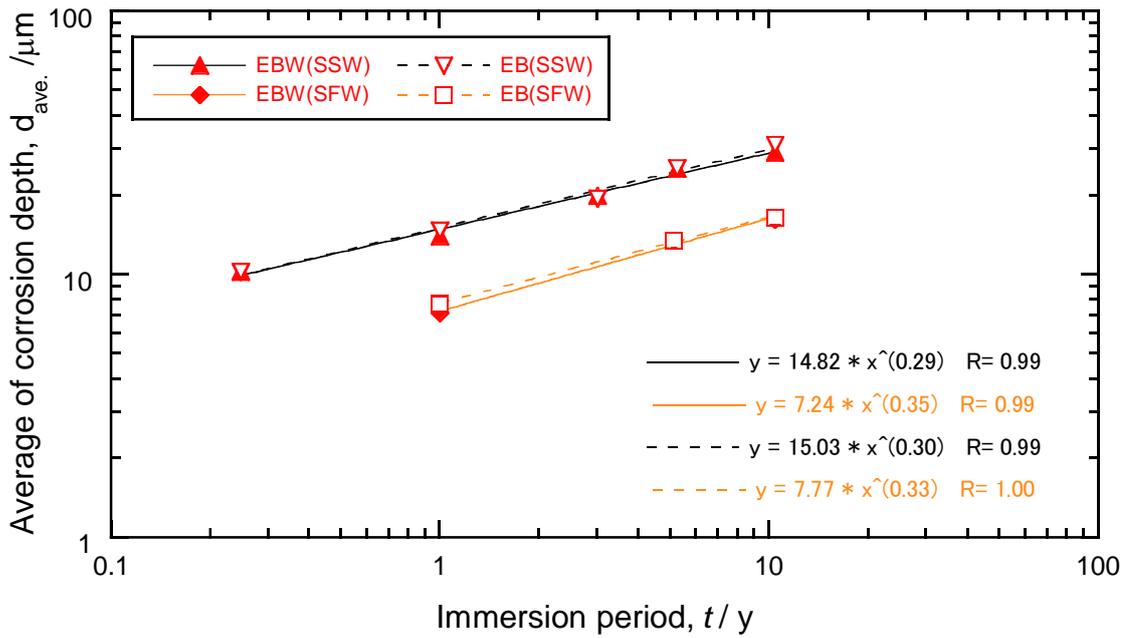


図 4.4.2-9 平均減肉深さの推移に対するべき乗則による近似 (EBW)
 (EBW : 溶接付き、EB : 母材単独、SSW : 人工海水、SFW : 人工淡水)

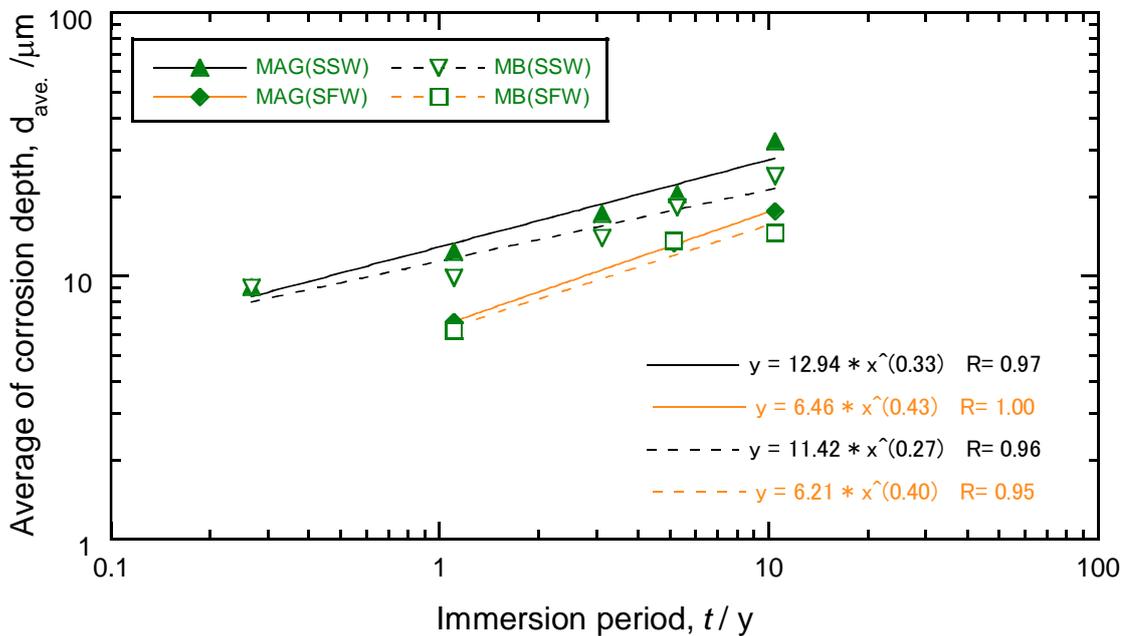


図 4.4.2-10 平均減肉深さの推移に対するべき乗則による近似 (MAG)
 (MAG : 溶接付き、MB : 母材単独、SSW : 人工海水、SFW : 人工淡水)

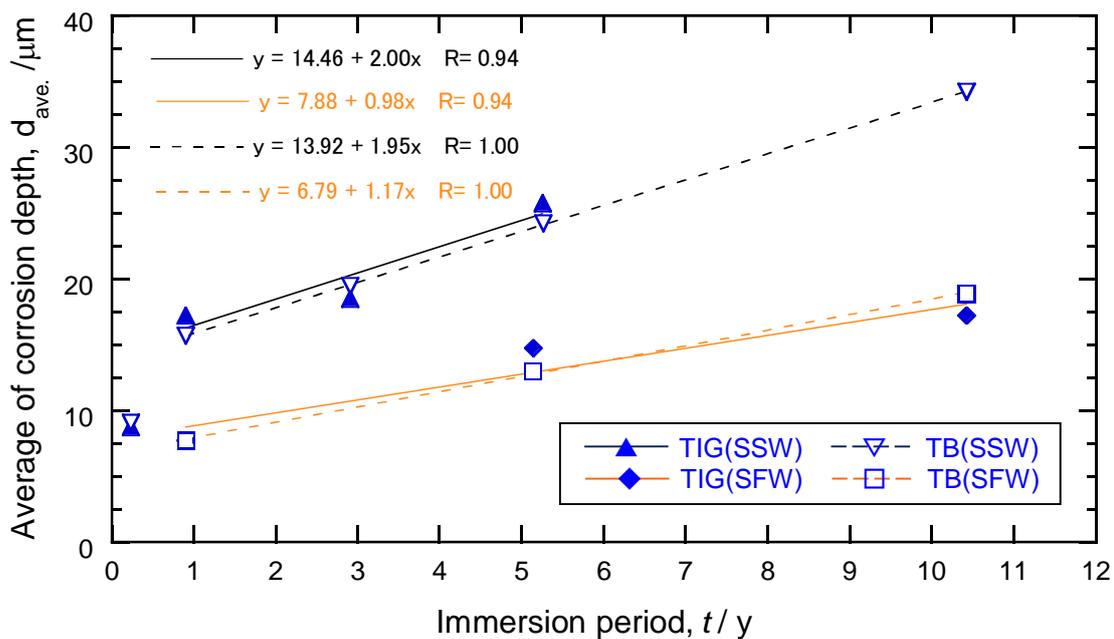


図 4.4.2-11 浸漬期間 1 年以後の平均減肉深さ変化の傾きの算出 (TIG)
(TIG : 溶接付き、TB : 母材単独、SSW : 人工海水、SFW : 人工淡水)

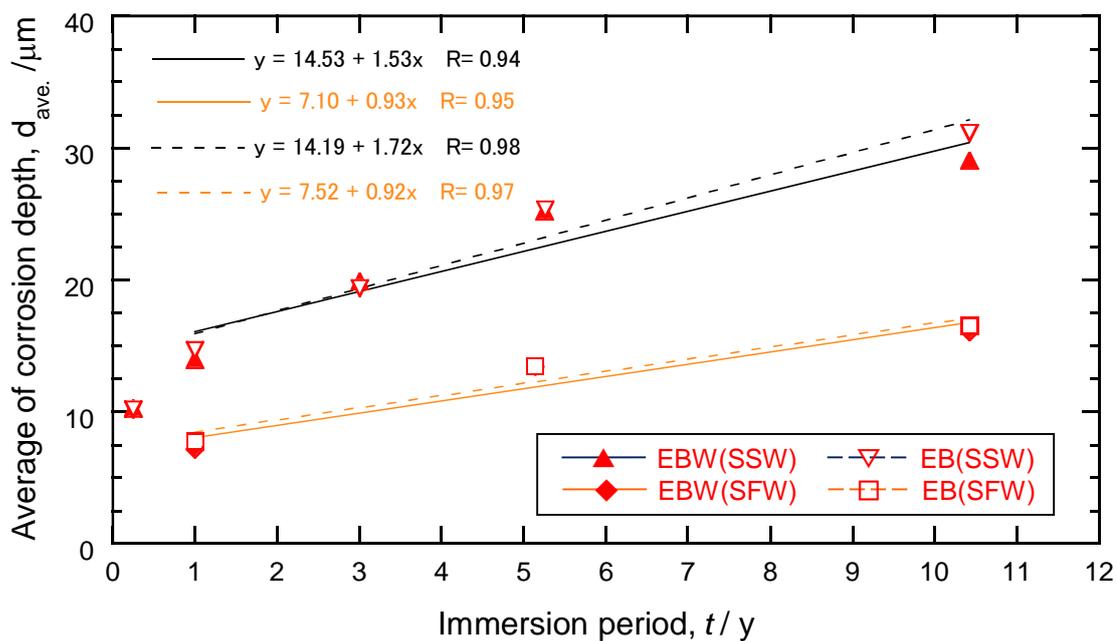


図 4.4.2-12 浸漬期間 1 年以後の平均減肉深さ変化の傾きの算出 (EBW)
(EBW : 溶接付き、EB : 母材単独、SSW : 人工海水、SFW : 人工淡水)

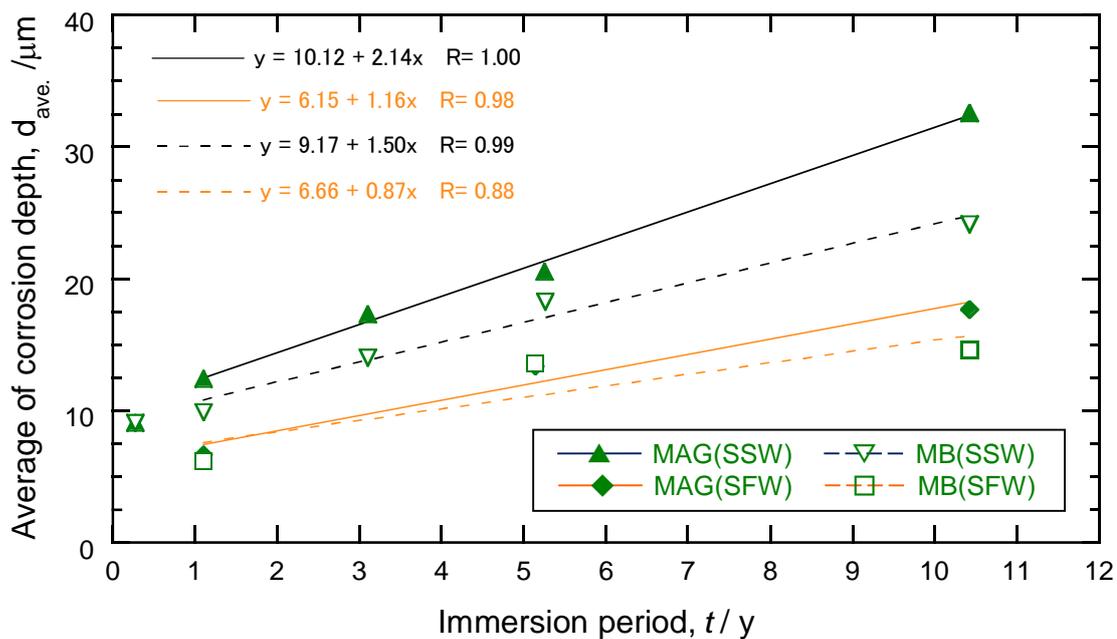


図 4.4.2-13 浸漬期間1年以後の平均減肉深さ変化の傾きの算出 (MAG)
(MAG : 溶接付き、MB : 母材単独、SSW : 人工海水、SFW : 人工淡水)

表 4.4.2-10 平均減肉深さの推移のべき乗則による近似と浸漬1年以後の変化の傾き

溶液	種類	材料	平均減肉深さの推移のべき乗則による近似		浸漬期間1年以後の 平均減肉深さ変化の 傾き = 平均腐食速度 ($\mu\text{m}/\text{y}$)
			$Y = AX^B$		
			Y : 平均減肉深さ (μm)	X : 期間 (y)	
			A	B	
人工海水	溶接付き	TIG	14.98	0.31	2.00
		EBW	14.82	0.29	1.53
		MAG	12.94	0.33	2.14
	母材単独	TIG	14.97	0.32	1.95
		EBW	15.03	0.30	1.72
		MAG	11.42	0.27	1.50
人工淡水	溶接付き	TIG	8.11	0.34	0.98
		EBW	7.24	0.35	0.93
		MAG	6.46	0.43	1.16
	母材単独	TIG	7.86	0.35	1.17
		EBW	7.77	0.33	0.92
		MAG	6.21	0.40	0.87

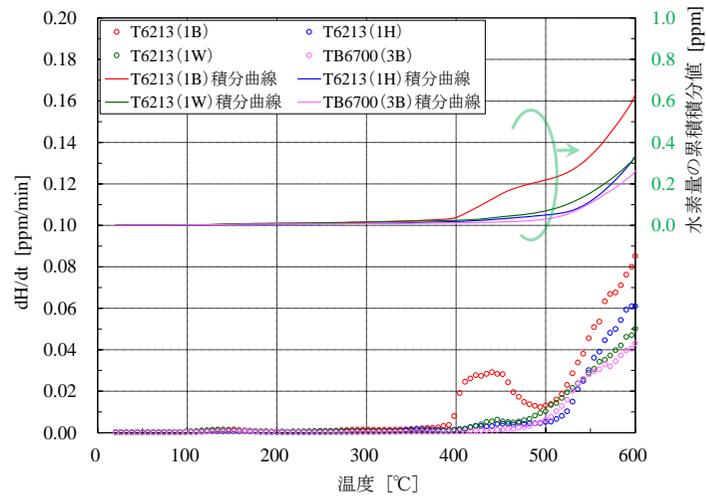
4.4.3 炭素鋼水素分析結果

(1) 水素抽出曲線の取得と拡散性水素量の推定（添付資料 4-2_水素抽出曲線）

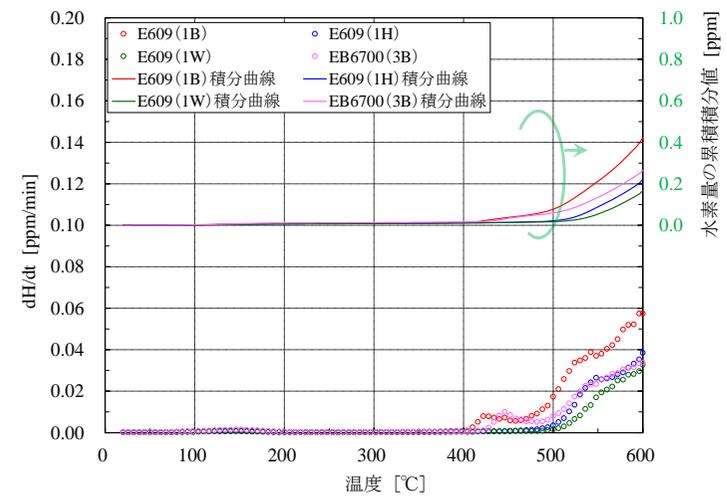
取得された水素抽出曲線を図 4.4.3-1～図 4.4.3-4 に示す。これらの図では、同条件で実施した溶接付き試験片（B：母材、H：熱影響部、W：溶接金属）と母材単独試験（B：母材）の4つの抽出曲線をまとめて図示し、また単位時間当たりの水素抽出量（dH/dt）とそれを積算した結果とを示している。いずれの水素抽出曲線でも共通している挙動として、約 400℃以上で濃度が急激に増加し、溶接付き試験片の母材部が最も濃度が高い点が挙げられる。なお、水素抽出曲線は室温～600℃の範囲で測定したが、上述の高温側で放出される非拡散性水素については炭素鋼の水素脆化に寄与しないことが確認されており、脆化評価の上で問題となるのは 100～200℃付近の低温側で放出される拡散性水素である。この領域の水素の放出はわずかであり、試験片の種類や採取位置による挙動の相違も明確には確認されなかった。250℃未満の温度で放出された水素量を拡散性水素とし、表 4.4.3-1～表 4.4.3-4 にその値を示す。またこれらの表には、測定終了時（600℃）までに放出された水素濃度も併記した。全放出水素濃度は上記のように全ての条件で溶接付き試験片の母材部で最も高い値を示すが、拡散性水素については溶接付き試験片の採取位置や母材単独試験片の間で明確な濃度の相違は見られなかった。拡散性水素濃度の値としては人工淡水、5年浸漬の TIG 試験片で若干高めであるが、最大でも 0.07ppm であり、これは溶接部の強度から求めた水素脆化に寄与する拡散性水素の臨界濃度よりも一桁小さい[4]。そのため、水素脆化による割れの発生の可能性は、溶接部を含めて低いと考えられる。

図 4.4.3-5 と図 4.4.3-6 には、それぞれ人工海水および人工淡水条件での、これまでの拡散性水素濃度の測定結果をまとめて示す。人工海水の浸漬初期において TIG の溶接金属部の水素濃度が高くなる傾向がみられたが、これも 1 年経過後は他の条件と同等の濃度として推移しており、また溶接後熱処理（Post Weld Heat Treatment, PWHT）によって、溶接した影響を低減できることも確かめられている[4]。それ以外の試験片については、溶接付き試験片の採取位置や母材単独試験片とで明確な相違は生じていない。これらは比較的一定の濃度で推移しており、水素発生に伴う水素の金属への吸収と金属からの水素の放出が均衡していることが推測される。なお、人工淡水についても人工海水と概ね同様の拡散性水素濃度の推移を示した。

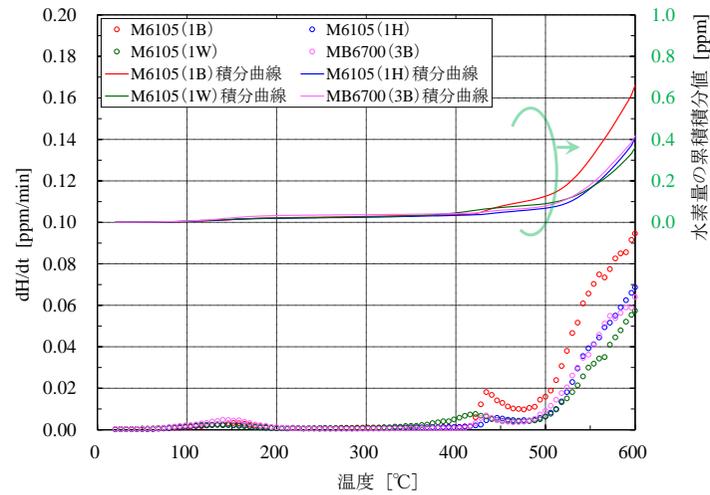
このように今年度新たに 5 年と 10 年の拡散性水素濃度のデータを追加したが、いずれの条件でも濃度は 0.1ppm を下回った。この値は臨界水素濃度と比較して十分に小さく、溶接部の水素脆化の生起の可能性は低いことが示された。



(a) TIG (T6213:溶接付き、TB6700:母材単独 B:母材、H:熱影響部、W:溶接金属)

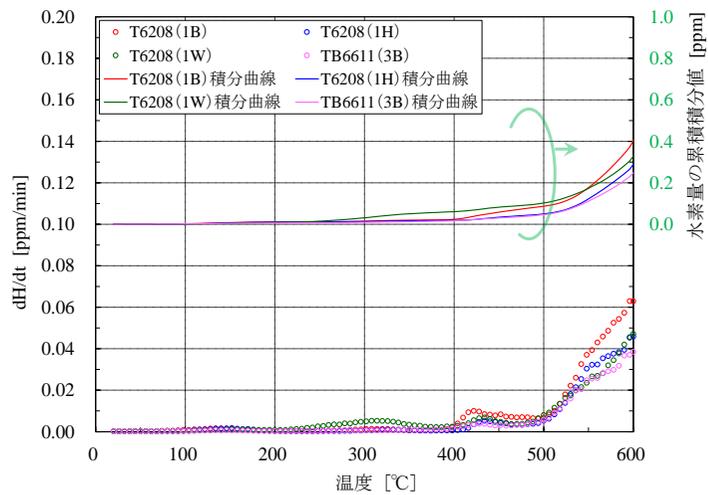


(b) EBW (E609:溶接付き、EB6700:母材単独 B:母材、H:熱影響部、W:溶接金属)

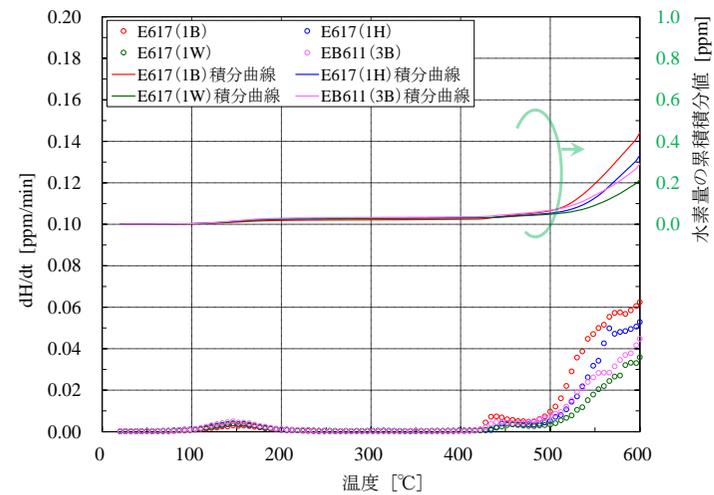


(c) MAG (M6105:溶接付き、MB6700:母材単独 B:母材、H:熱影響部、W:溶接金属)

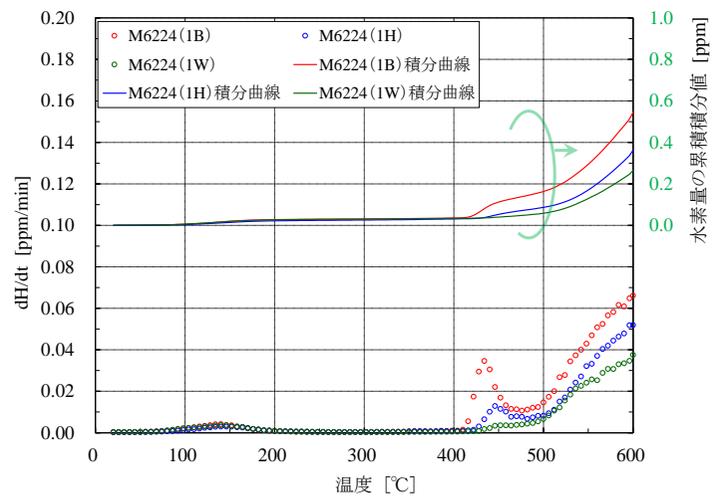
図 4.4.3-1 水素抽出曲線の測定結果 (人工海水、5年浸漬)



(a) TIG (T6208:溶接付き、TB6611:母材単独 B:母材、H:熱影響部、W:溶接金属)

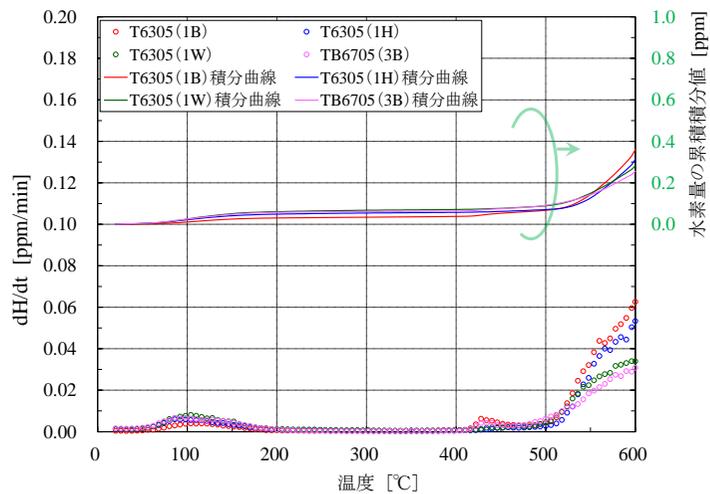


(b) EBW (E617:溶接付き、EB661:母材単独 B:母材、H:熱影響部、W:溶接金属)

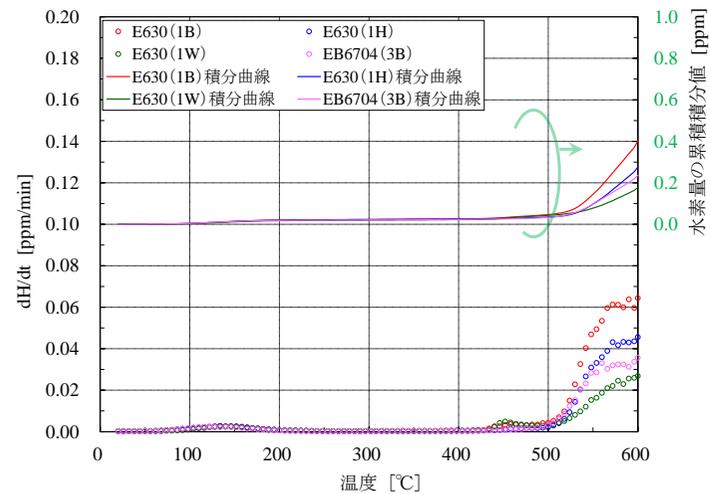


(c) MAG (M6224:溶接付き B:母材、H:熱影響部、W:溶接金属)

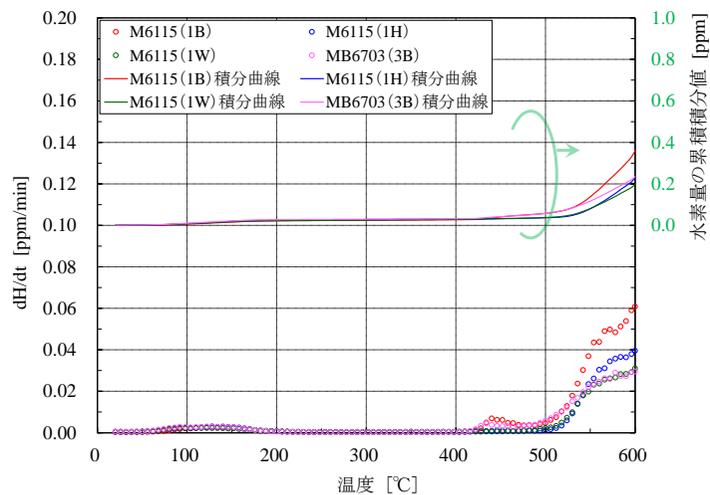
図 4.4.3-2 水素抽出曲線の測定結果 (人工海水、10年浸漬)



(a) TIG (T6305:溶接付き、TB6705:母材単独 B:母材、H:熱影響部、W:溶接金属)

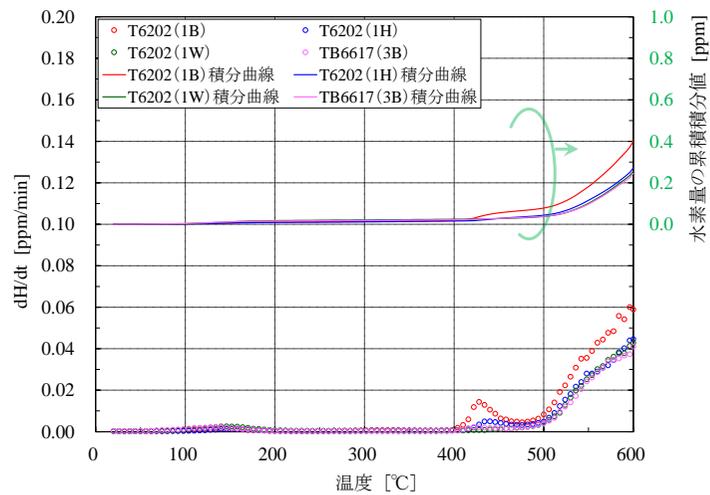


(b) EBW (E630:溶接付き、EB6704:母材単独 B:母材、H:熱影響部、W:溶接金属)

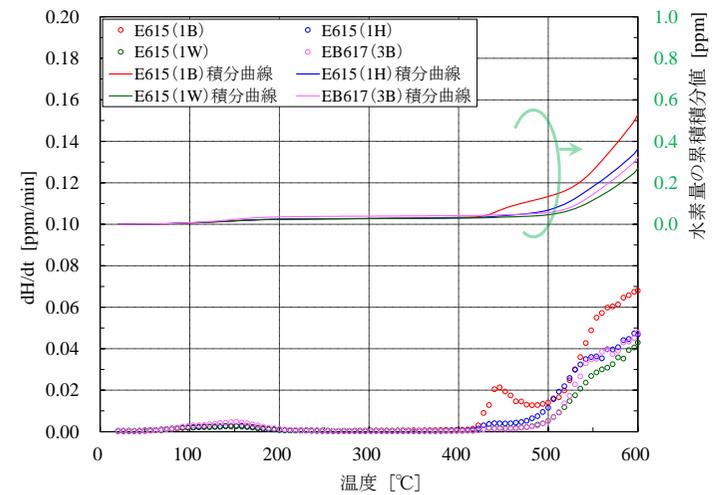


(c) MAG (M6115:溶接付き、MB6703:母材単独 B:母材、H:熱影響部、W:溶接金属)

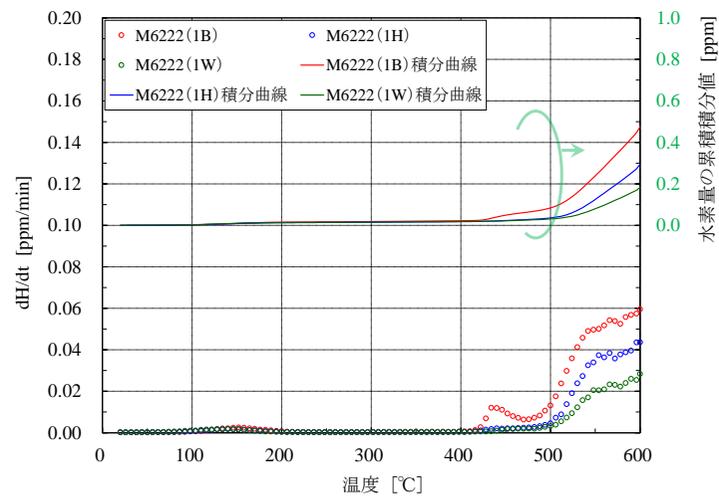
図 4.4.3-3 水素抽出曲線の測定結果 (人工淡水、5年浸漬)



(a) TIG (T6202:溶接付き、TB6617:母材単独 B:母材、H:熱影響部、W:溶接金属)



(b) EBW (E615:溶接付き、EB617:母材単独 B:母材、H:熱影響部、W:溶接金属)



(c) MAG (M6222:溶接付き B:母材、H:熱影響部、W:溶接金属)

図 4.4.3-4 水素抽出曲線の測定結果 (人工淡水、10年浸漬)

表 4.4.3-1 水素抽出曲線測定での水素濃度分析結果（人工海水、5年浸漬）

材料	種類	分析位置	試験片番号	試料重量 [g]	拡散性水素濃度 RT~250℃ [ppm]	全放出水素濃度 RT~600℃ [ppm]
TIG	溶接付き	母材	T6213(1B)	0.5728	0.011	0.635
		熱影響部	T6213(1H)	0.5910	0.007	0.337
		溶接金属	T6213(1W)	0.5872	0.012	0.333
	母材单独	—	TB6700(3B)	0.6360	0.008	0.263
EBW	溶接付き	母材	E609(1B)	0.6056	0.008	0.423
		熱影響部	E609(1H)	0.6225	0.008	0.222
		溶接金属	E609(1W)	0.5615	0.008	0.167
	母材单独	—	EB6700(3B)	0.6423	0.012	0.265
MAG	溶接付き	母材	M6105(1B)	0.5877	0.025	0.662
		熱影響部	M6105(1H)	0.6008	0.022	0.406
		溶接金属	M6105(1W)	0.5708	0.023	0.360
	母材单独	—	MB6700(3B)	0.6097	0.035	0.417

表 4.4.3-2 水素抽出曲線測定での水素濃度分析結果（人工海水、10年浸漬）

材料	種類	分析位置	試験片番号	試料重量 [g]	拡散性水素濃度 RT~250℃ [ppm]	全放出水素濃度 RT~600℃ [ppm]
TIG	溶接付き	母材	T6208(1B)	0.6027	0.012	0.404
		熱影響部	T6208(1H)	0.5883	0.012	0.289
		溶接金属	T6208(1W)	0.5874	0.014	0.329
	母材单独	—	TB6611(3B)	0.5822	0.007	0.249
EBW	溶接付き	母材	E617(1B)	0.5777	0.020	0.443
		熱影響部	E617(1H)	0.6050	0.027	0.333
		溶接金属	E617(1W)	0.6102	0.026	0.215
	母材单独	—	EB611(3B)	0.6171	0.031	0.291
MAG	溶接付き	母材	M6224(1B)	0.5692	0.029	0.546
		熱影響部	M6224(1H)	0.5853	0.024	0.363
		溶接金属	M6224(1W)	0.5984	0.029	0.265

表 4.4.3-3 水素抽出曲線測定での水素濃度分析結果（人工淡水、5年浸漬）

材料	種類	分析位置	試験片番号	試料重量 [g]	拡散性水素濃度 RT~250℃ [ppm]	全放出水素濃度 RT~600℃ [ppm]
TIG	溶接付き	母材	T6305(1B)	0.6034	0.032	0.361
		熱影響部	T6305(1H)	0.6120	0.052	0.314
		溶接金属	T6305(1W)	0.6116	0.065	0.282
	母材単独	—	TB6705(3B)	0.6279	0.060	0.256
EBW	溶接付き	母材	E630(1B)	0.6344	0.021	0.403
		熱影響部	E630(1H)	0.6572	0.022	0.276
		溶接金属	E630(1W)	0.6386	0.019	0.177
	母材単独	—	EB6704(3B)	0.6295	0.020	0.236
MAG	溶接付き	母材	M6115(1B)	0.6132	0.023	0.360
		熱影響部	M6115(1H)	0.6146	0.027	0.230
		溶接金属	M6115(1W)	0.5818	0.023	0.198
	母材単独	—	MB6703(3B)	0.6235	0.028	0.235

表 4.4.3-4 水素抽出曲線測定での水素濃度分析結果（人工淡水、10年浸漬）

材料	種類	分析位置	試験片番号	試料重量 [g]	拡散性水素濃度 RT~250℃ [ppm]	全放出水素濃度 RT~600℃ [ppm]
TIG	溶接付き	母材	T6202(1B)	0.5715	0.011	0.401
		熱影響部	T6202(1H)	0.5838	0.010	0.272
		溶接金属	T6202(1W)	0.5718	0.019	0.256
	母材単独	—	TB6617(3B)	0.5944	0.017	0.245
EBW	溶接付き	母材	E615(1B)	0.6108	0.026	0.531
		熱影響部	E615(1H)	0.6323	0.026	0.363
		溶接金属	E615(1W)	0.6583	0.026	0.269
	母材単独	—	EB617(3B)	0.6383	0.038	0.323
MAG	溶接付き	母材	M6222(1B)	0.5896	0.017	0.476
		熱影響部	M6222(1H)	0.6077	0.014	0.294
		溶接金属	M6222(1W)	0.6406	0.014	0.183

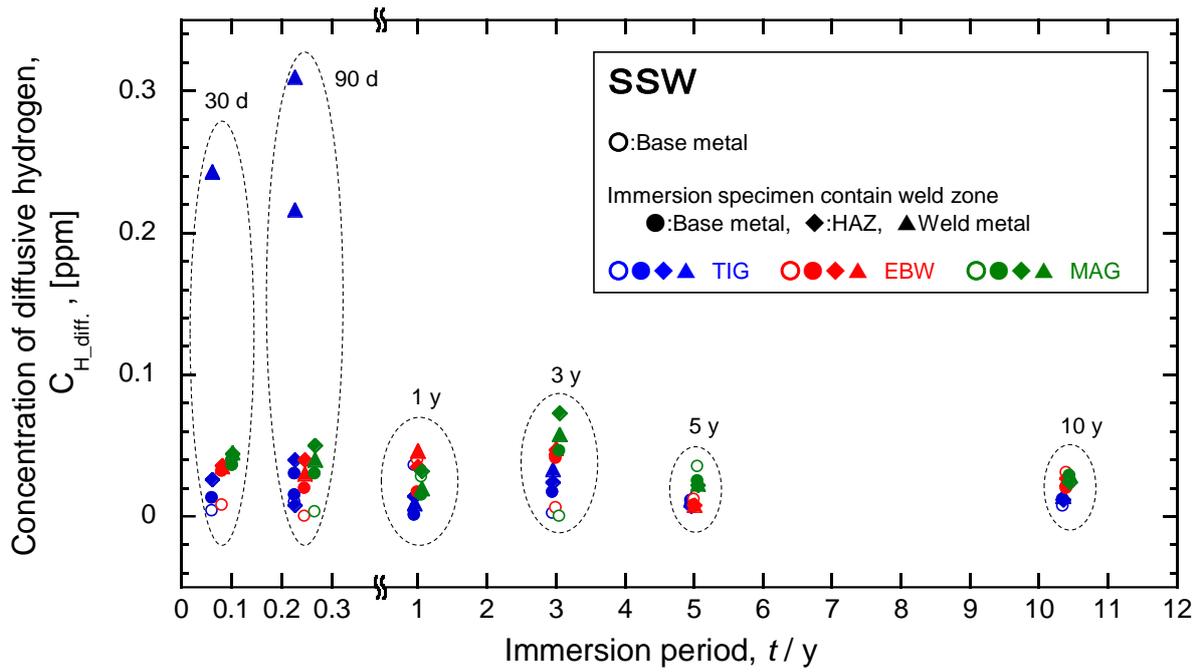


図 4.4.3-5 拡散性水素濃度の推移 (人工海水)

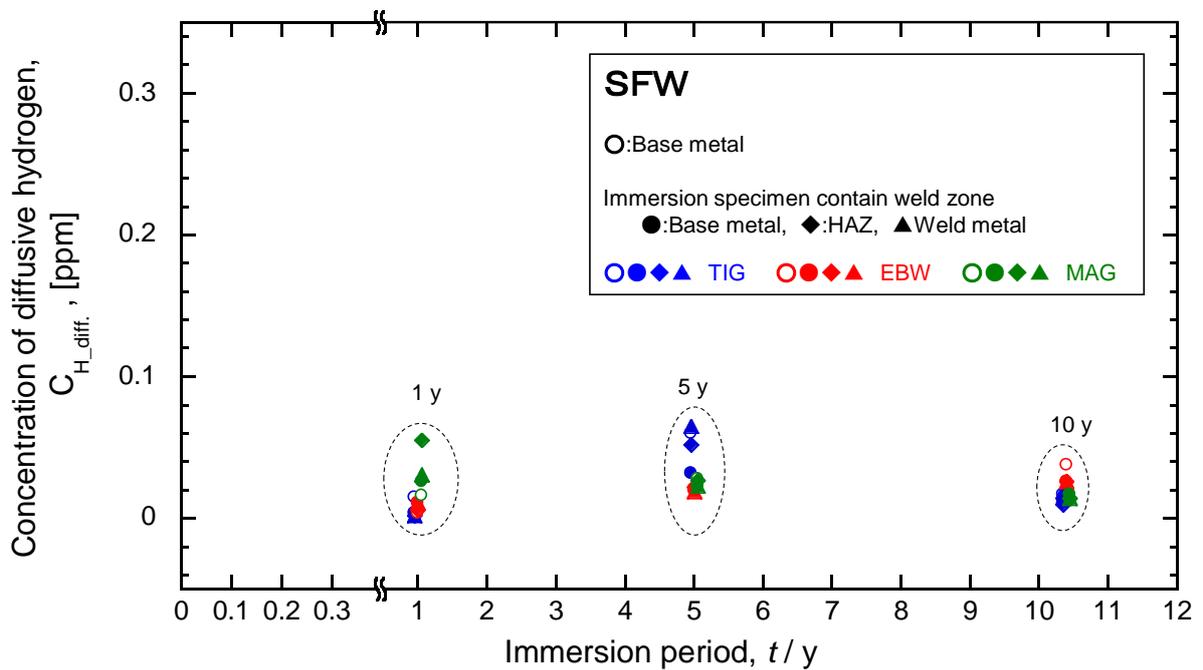


図 4.4.3-6 拡散性水素濃度の推移 (人工淡水)

(2) 全水素量の測定結果

全水素濃度の測定結果を表 4.4.3-5～表 4.4.3-8 に示す。またこの結果と水素抽出曲線分析で室温～600℃で放出された水素濃度（拡散性水素と非拡散性水素の和）とを図 4.4.3-7～図 4.4.3-10 に比較した。

人工海水の条件では水素抽出曲線分析よりも全水素量分析のほうが測定値が大きい傾向にある。これは 600℃から融解までに放出される水素量の差と解釈することができると思われる。しかし、その一方で人工淡水の条件では全般的に全水素量分析の値が小さく、水素抽出曲線分析との差はほとんど見られなかった。水素抽出曲線の傾向を確認すると、人工海水の条件（図 4.4.3-1、図 4.4.3-2）では 500℃から 600℃にかけてまだ水素の放出量が増加している段階であるが、人工淡水の条件（図 4.4.3-3、図 4.4.3-4）では概ねプラトーに達しつつあるようにも見受けられるように思われる。このような挙動の相違があるとすれば、人工淡水では 600℃までに多くの非拡散性水素が放出されているので、全水素量分析と差が生じていない可能性がある。腐食量評価では、人工淡水よりも人工海水のほうが腐食が進行することが確認されたが、その結果として人工海水のほうが水素の吸収量が多く、それが 600℃より高温側の非拡散性水素の形態として蓄積に寄与したことが可能性の 1 つとして考えられる。なお、ここで考察した非拡散性水素自体は炭素鋼の脆化には直接寄与しないと考えられるが、拡散性水素を含めた吸収水素全般の相関を明らかにするためには、上述のような吸収された水素の形態や吸収過程のメカニズム的な検討がさらに必要である。

表 4.4.3-5 全水素量分析での水素濃度分析結果（人工海水、5 年浸漬）

材料	種類	分析位置	試験片番号	試料重量 [g]	全水素濃度 [ppm]
TIG	溶接 付き	母材	T6304(1B)	0.5728	0.7
		熱影響部	T6304(1H)	0.5910	0.5
		溶接金属	T6304(1W)	0.5872	2.6
	母材単独	—	TB6700(3B)	0.6360	1.1
EBW	溶接 付き	母材	E613(1B)	0.6056	0.4
		熱影響部	E613(1H)	0.6225	0.3
		溶接金属	E613(1W)	0.5615	0.2
	母材単独	—	EB6700(3B)	0.6423	0.3
MAG	溶接 付き	母材	M6109(1B)	0.5877	1.4
		熱影響部	M6109(1H)	0.6008	1.0
		溶接金属	M6109(1W)	0.5708	2.2
	母材単独	—	MB6700(3B)	0.6097	1.5

表 4.4.3-6 全水素量分析での水素濃度分析結果（人工海水、10年浸漬）

材料	種類	分析位置	試験片番号	試料重量 [g]	全水素濃度 [ppm]
TIG	溶接 付き	母材	T6212(1B)	0.6027	1.2
		熱影響部	T6212(1H)	0.5883	0.6
		溶接金属	T6212(1W)	0.5874	0.9
	母材单独	—	TB6611(3B)	0.5822	0.5
EBW	溶接 付き	母材	E625(1B)	0.5777	1.3
		熱影響部	E625(1H)	0.6050	0.5
		溶接金属	E625(1W)	0.6102	0.4
	母材单独	—	EB611(3B)	0.6171	0.4
MAG	溶接 付き	母材	M6230(1B)	0.5692	2.1
		熱影響部	M6230(1H)	0.5853	0.6
		溶接金属	M6230(1W)	0.5984	2.9

表 4.4.3-7 全水素量分析での水素濃度分析結果（人工淡水、5年浸漬）

材料	種類	分析位置	試験片番号	試料重量 [g]	全水素濃度 [ppm]
TIG	溶接 付き	母材	T6307(1B)	0.6034	0.7
		熱影響部	T6307(1H)	0.6120	0.3
		溶接金属	T6307(1W)	0.6116	0.6
	母材单独	—	TB6705(3B)	0.6279	0.2
EBW	溶接 付き	母材	E633(1B)	0.6344	0.2
		熱影響部	E633(1H)	0.6572	0.2
		溶接金属	E633(1W)	0.6386	0.2
	母材单独	—	EB6704(3B)	0.6295	0.2
MAG	溶接 付き	母材	M6116(1B)	0.6132	0.1
		熱影響部	M6116(1H)	0.6146	0.3
		溶接金属	M6116(1W)	0.5818	0.2
	母材单独	—	MB6703(3B)	0.6235	0.1

表 4.4.3-8 全水素量分析での水素濃度分析結果 (人工淡水、10年浸漬)

材料	種類	分析位置	試験片番号	試料重量 [g]	全水素濃度 [ppm]
TIG	溶接付き	母材	T6210(1B)	0.5715	0.4
		熱影響部	T6210(1H)	0.5838	0.4
		溶接金属	T6210(1W)	0.5718	0.4
	母材单独	—	TB6617(3B)	0.5944	0.4
EBW	溶接付き	母材	E619orE623(1B)	0.6108	0.4
		熱影響部	E619orE623(1H)	0.6323	0.3
		溶接金属	E619orE623(1W)	0.6583	0.3
	母材单独	—	EB617(3B)	0.6383	0.2
MAG	溶接付き	母材	M6228(1B)	0.5896	0.2
		熱影響部	M6228(1H)	0.6077	0.2
		溶接金属	M6228(1W)	0.6406	0.2

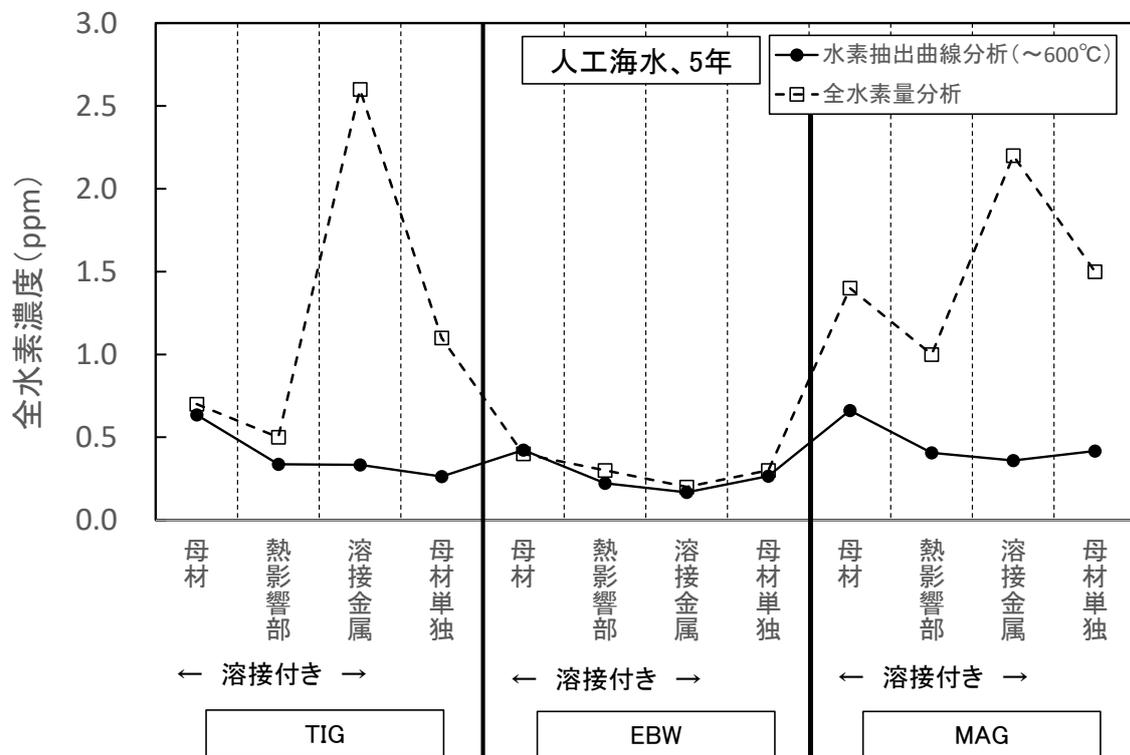


図 4.4.3-7 水素抽出曲線(~600°C)と全水素量分析の比較 (人工海水、5年浸漬)

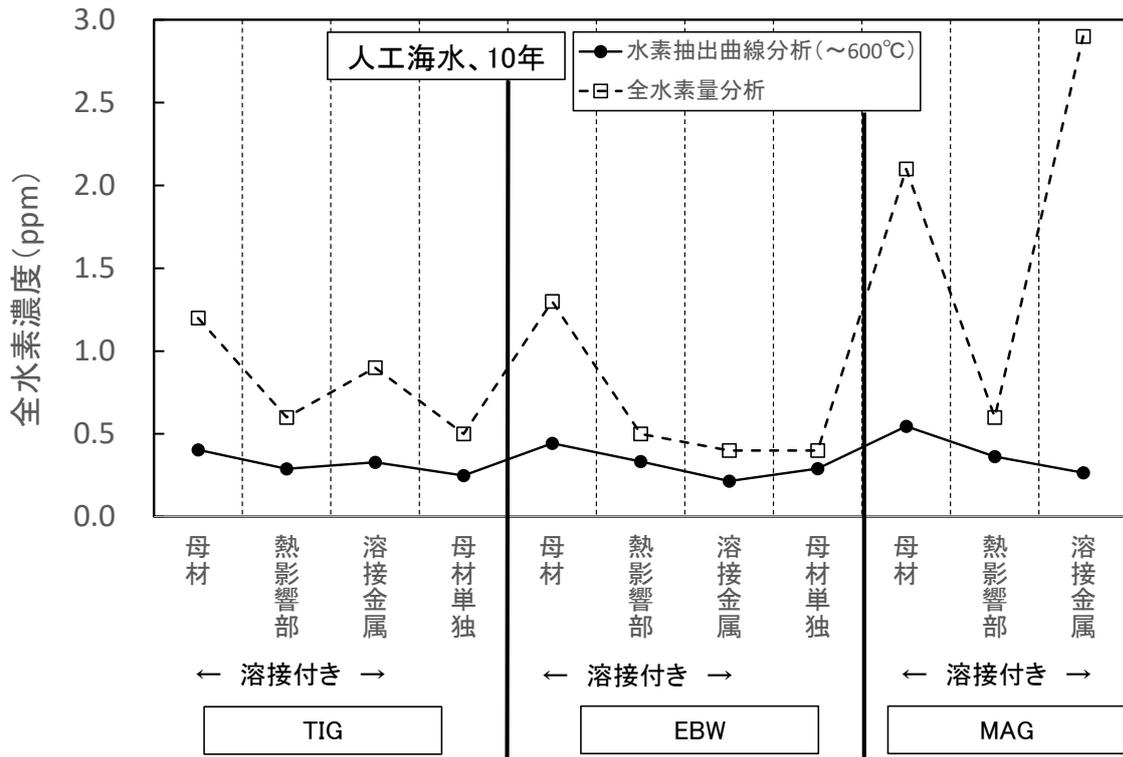


図 4.4.3-8 水素抽出曲線(~600°C)と全水素量分析の比較 (人工海水、10年浸漬)

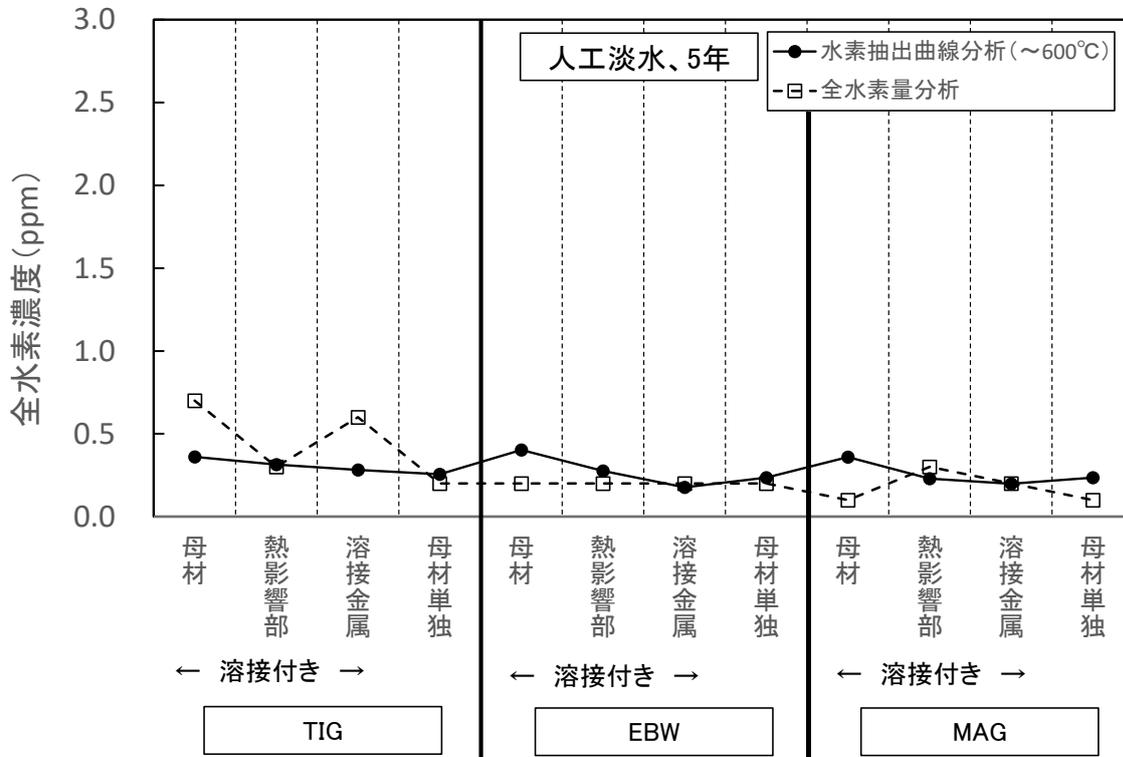


図 4.4.3-9 水素抽出曲線(~600°C)と全水素量分析の比較 (人工淡水、5年浸漬)

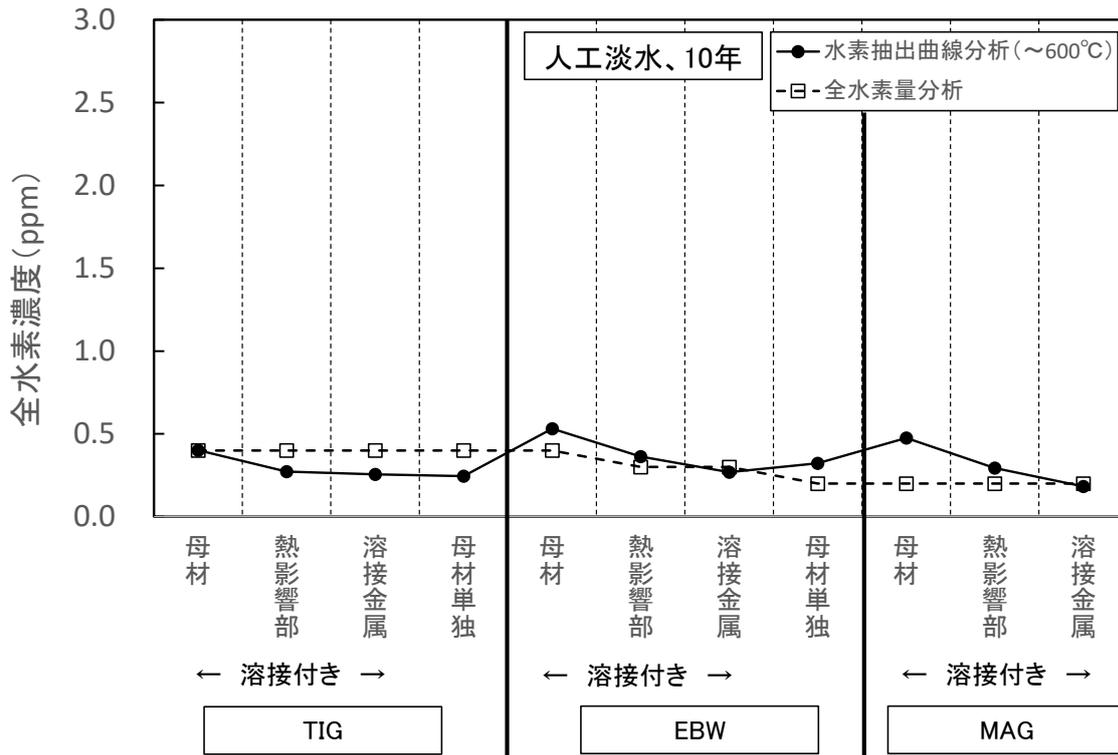


図 4.4.3-10 水素抽出曲線(~600°C)と全水素量分析の比較 (人工淡水、10年浸漬)

4.5 まとめ

緩衝材共存の低酸素雰囲気下での炭素鋼溶接部付き試験片 10年間の浸漬試験体を開封し、試験片の分析を実施した。その結果、以下の知見を得た。

- ・ 10年間の浸漬試験片の外観観察および形状計測の結果より、炭素鋼ならびに溶接部付き試験片ともにほぼ均一に腐食が進行していることを確認した。また腐食速度も数 $\mu\text{m}/\text{y}$ 程度であった。
- ・ 浸漬期間中に腐食により発生した水素の一部は鋼中に吸収されるが、浸漬5年から10年にかけてもその値は大きく変化しない。また濃度も0.05ppm程度であり、材料強度から推定される水素脆化の臨界水素濃度に対して十分な余裕があることを確認した。
- ・ 試験片表面の腐食生成物の分析を実施した。その結果、シデライトやマグネタイトが検出された。これらの生成物は炭素鋼表面を保護し、腐食速度を低下させるという報告もある。今後検出された腐食生成物について、緩衝材中での生成機構を含めた検討が必要である。

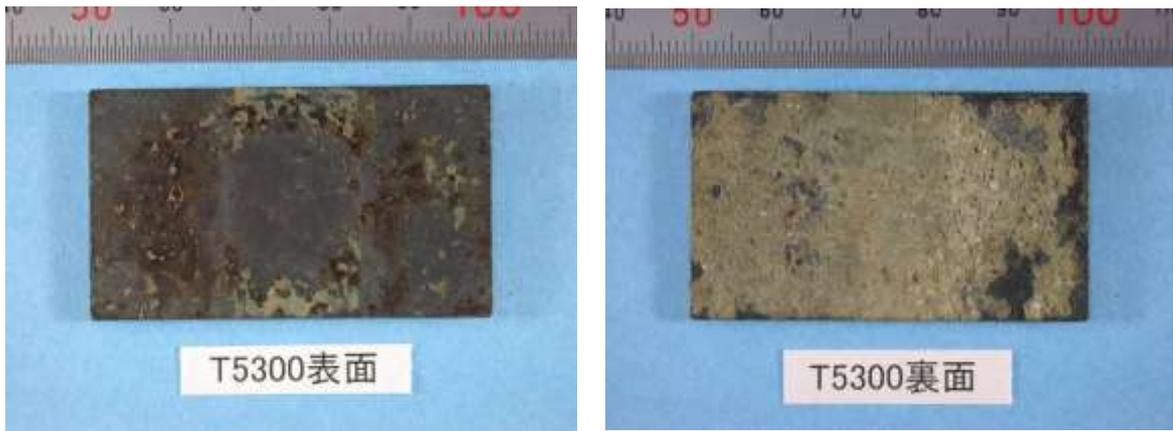
第4章参考文献

- [1] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 17 年度 地層処分技術調査等 バリア機能総合調査報告書－人工バリア特性体系化調査－ (2006).
- [2] 核燃料サイクル機構：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-,JNC-TN1400 99-022 (1999).
- [3] 松山晋作：遅れ破壊、日刊工業新聞社、(1989)
- [4] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 21 年度 地層処分技術調査等委託費 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－(1/2) (2010).
- [5] 谷口直樹、川崎学、内藤守正：材料と環境、59、418 (2010).
- [6] 動力炉・核燃料開発事業団、PNC TN1410 92-081、(1992).
- [7] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 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2分冊) －人工バリア品質評価技術の開発－(1/2) (2012).
- [8] 谷口航、岩佐健吾：JNC-TN8400 99-051 (1999).
- [9] 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).
- [10] 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-10年間の浸漬試験結果に基づく腐食進展挙動の検討-JAEA-Research 2008-011 (2008).
- [11] 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2分冊) －人工バリア品質評価技術の開発－(1/2) (2011).

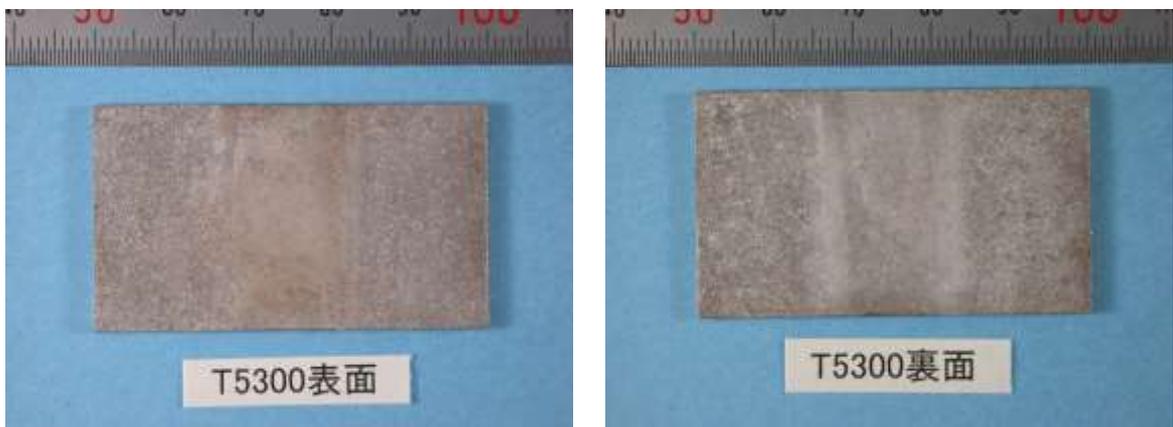
添付資料 4-1

外観観察および形状測定

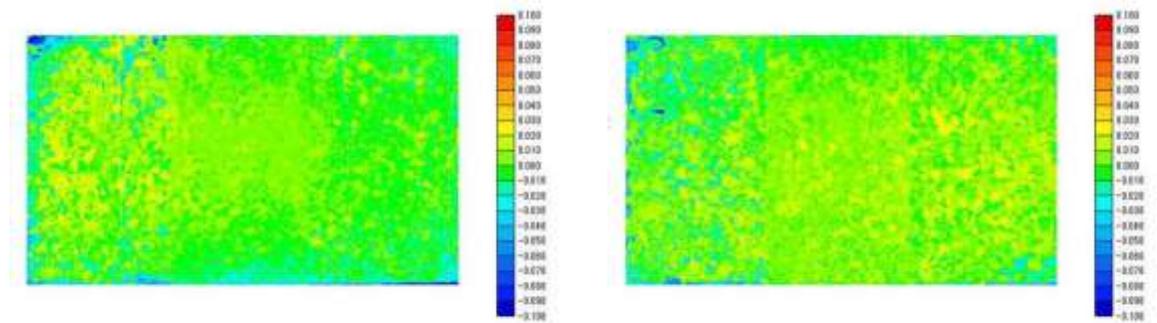
4.6 外観観察と腐食面の形状測定結果



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片



(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片



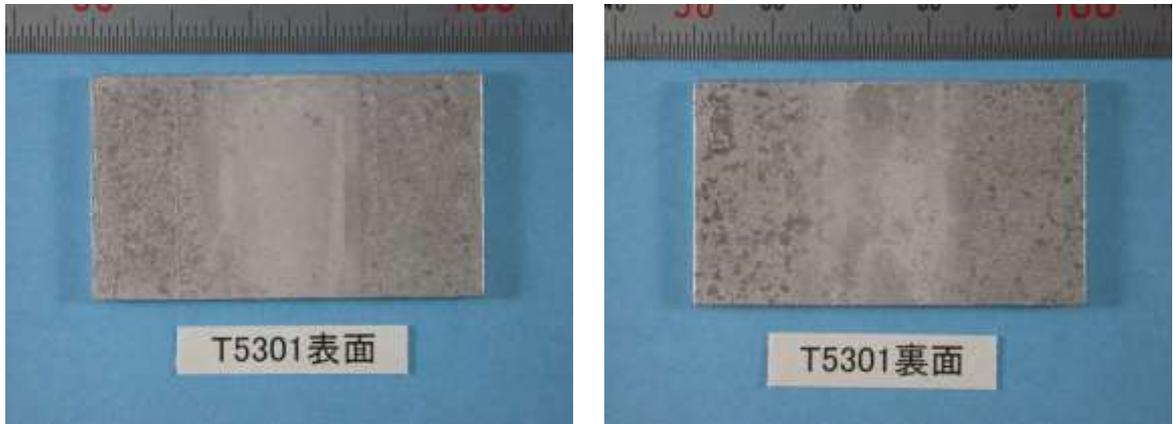
(c) 形状測定結果

添付図 8-1-1 外観観察と形状測定結果（T5300：人工海水、5年、溶接付き、TIG）

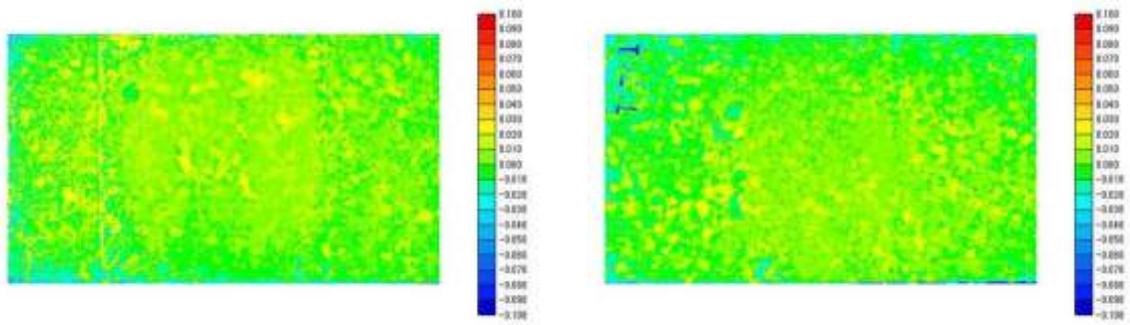
精密分析実施

精密分析実施

(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

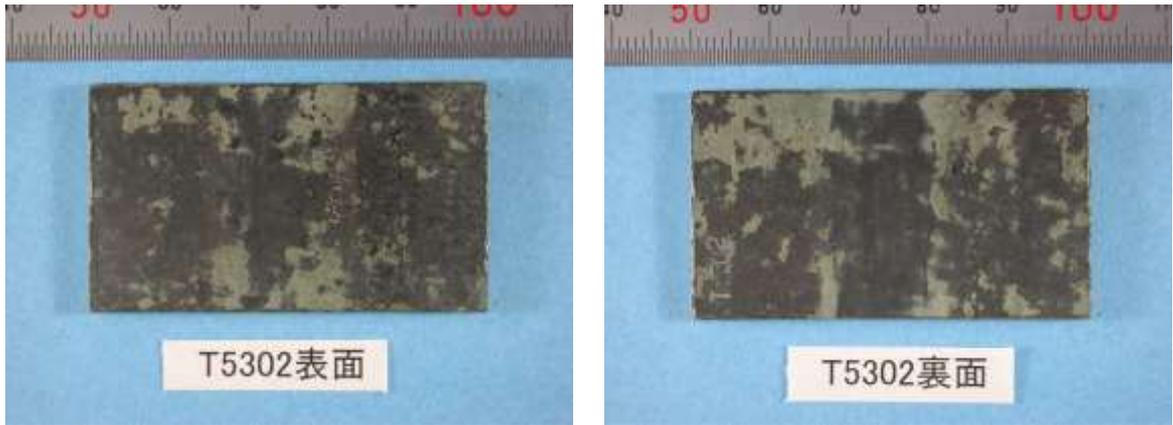


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

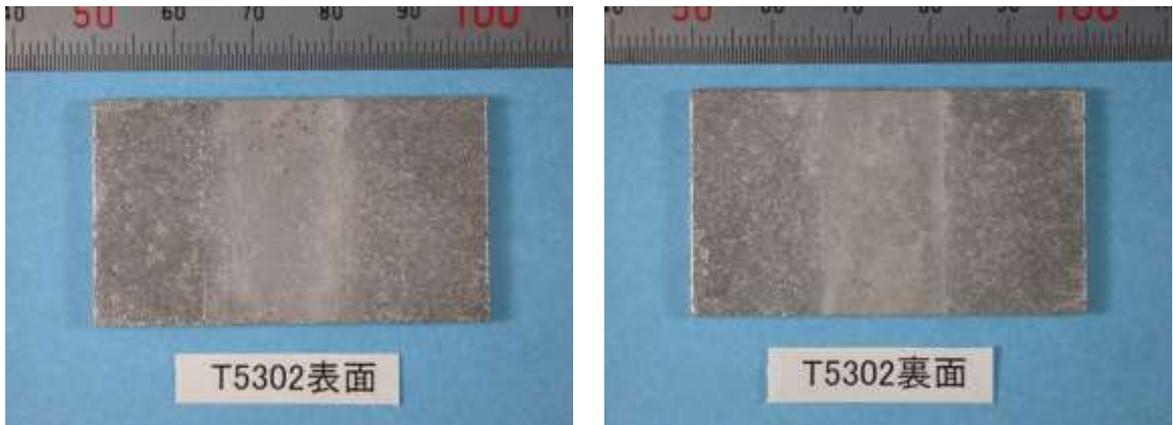


(c) 形状測定結果

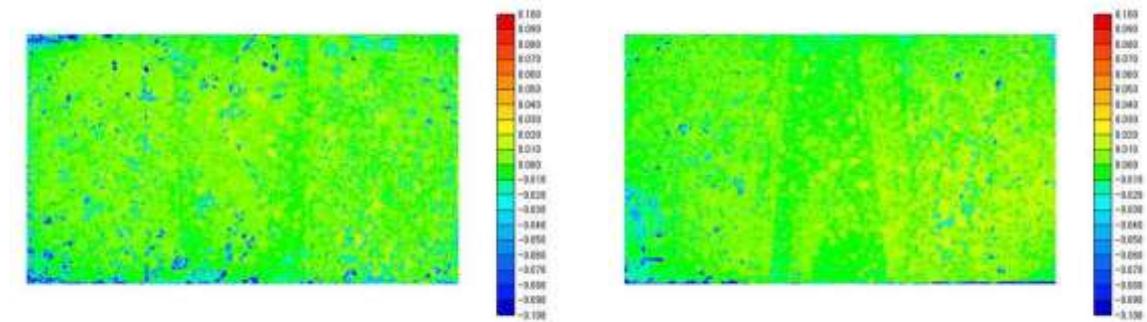
添付図 8-1-2 外観観察と形状測定結果（T5301：人工海水、5年、溶接付き、TIG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片



(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片



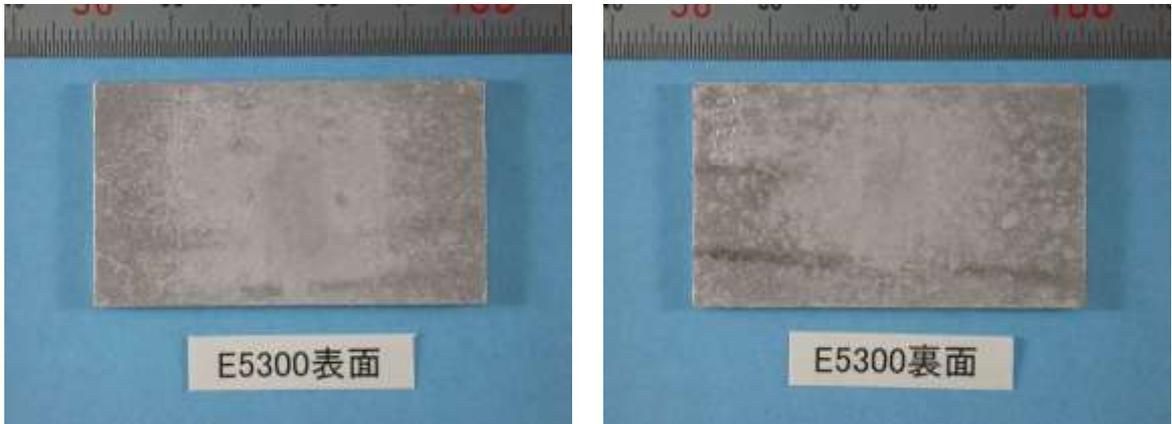
(c) 形状測定結果

添付図 8-1-3 外観観察と形状測定結果（T5302：人工海水、5年、溶接付き、TIG）

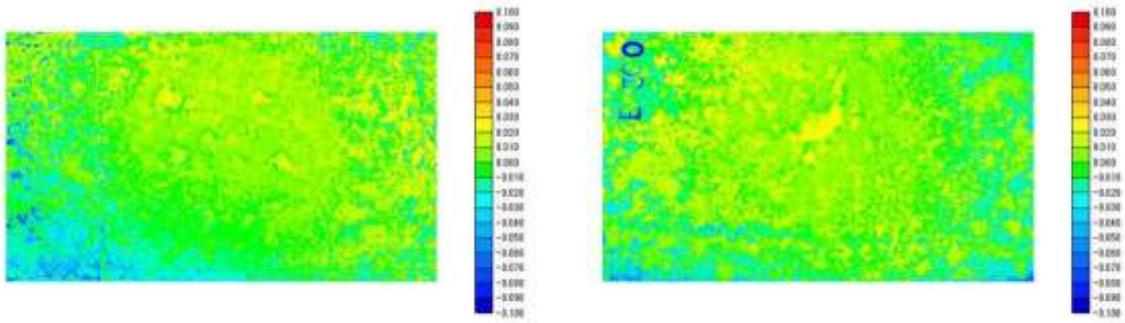
精密分析実施

精密分析実施

(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

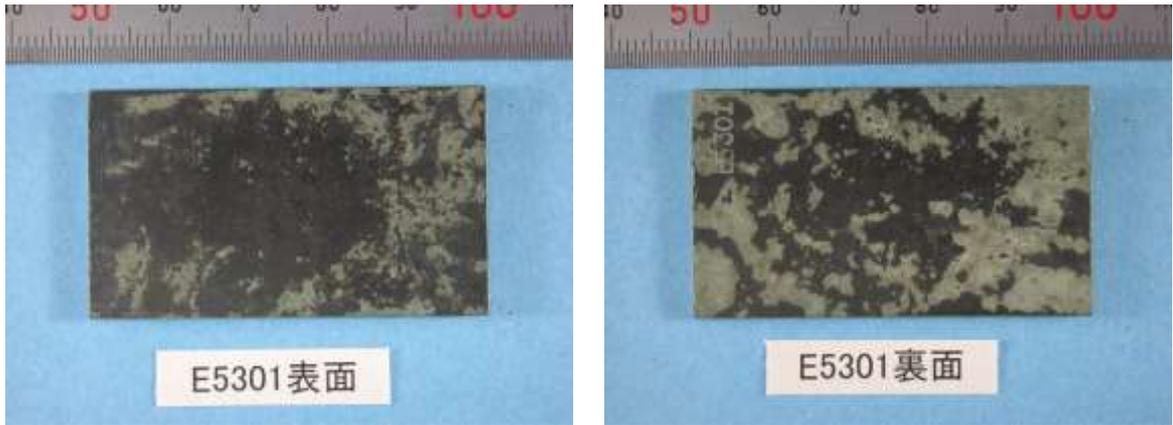


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

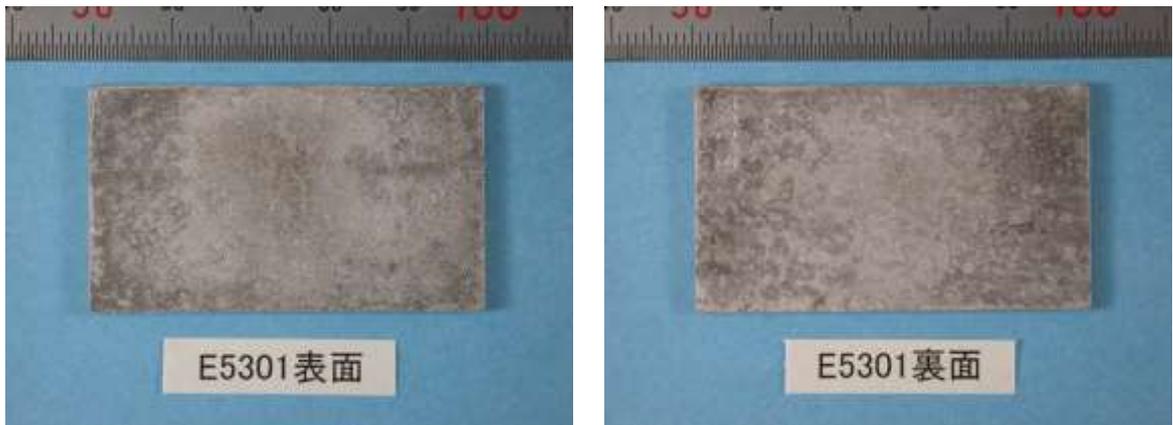


(c) 形状測定結果

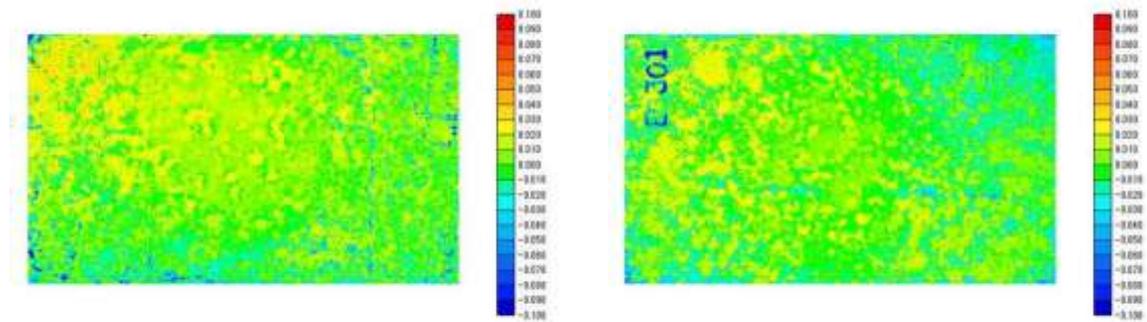
添付図 8-1-4 外観観察と形状測定結果（E5300：人工海水、5年、溶接付き、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

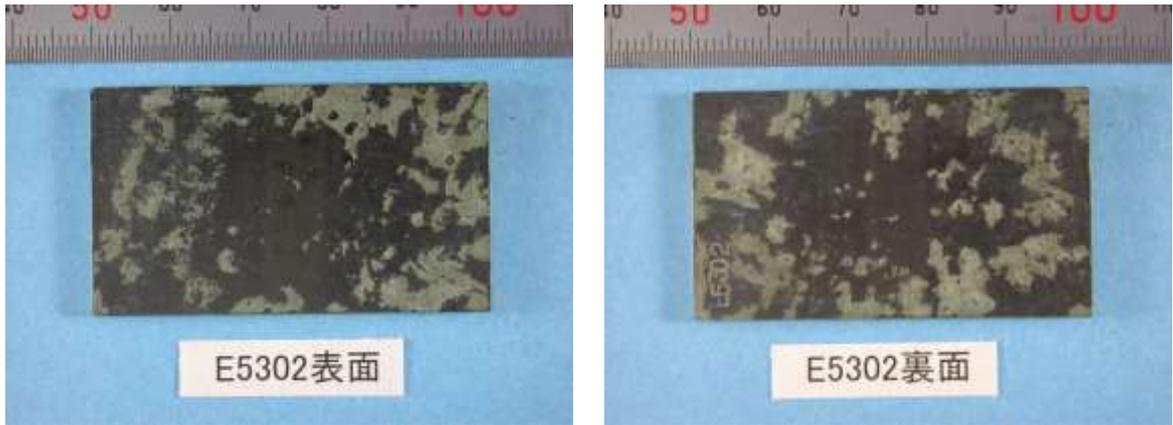


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

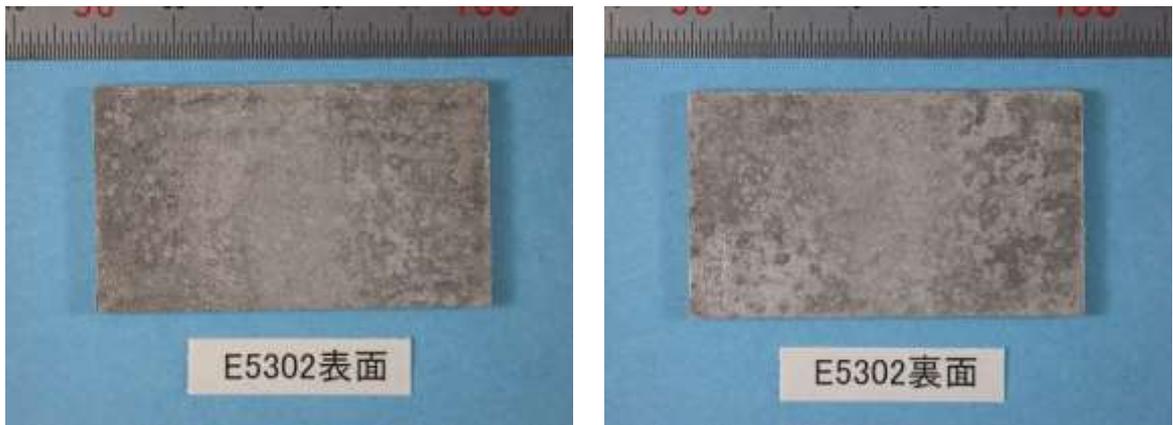


(c) 形状測定結果

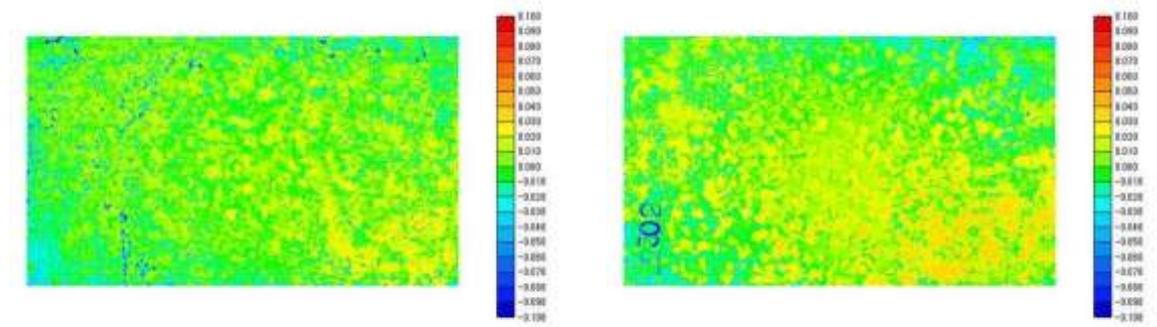
添付図 8-1-5 外観観察と形状測定結果（E5301：人工海水、5年、溶接付き、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片



(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片



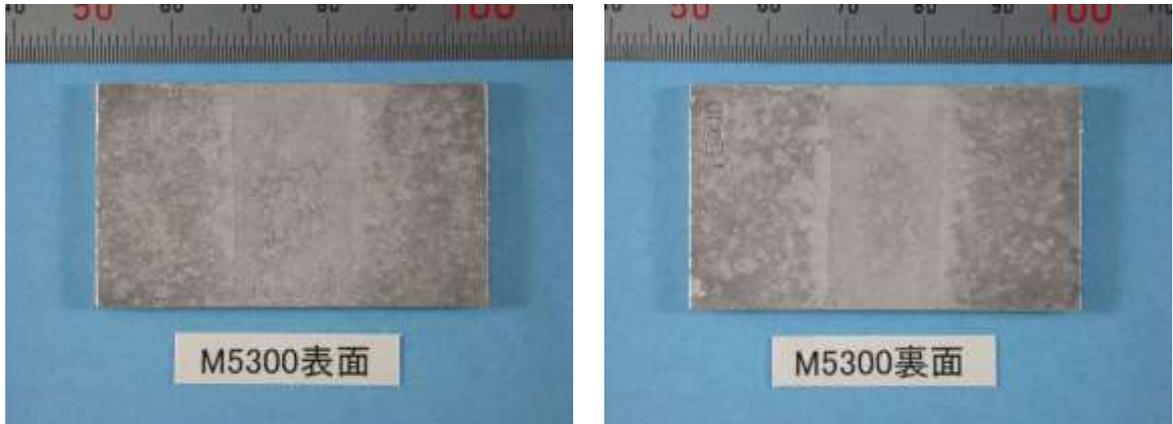
(c) 形状測定結果

添付図 8-1-6 外観観察と形状測定結果（E5302：人工海水、5年、溶接付き、EBW）

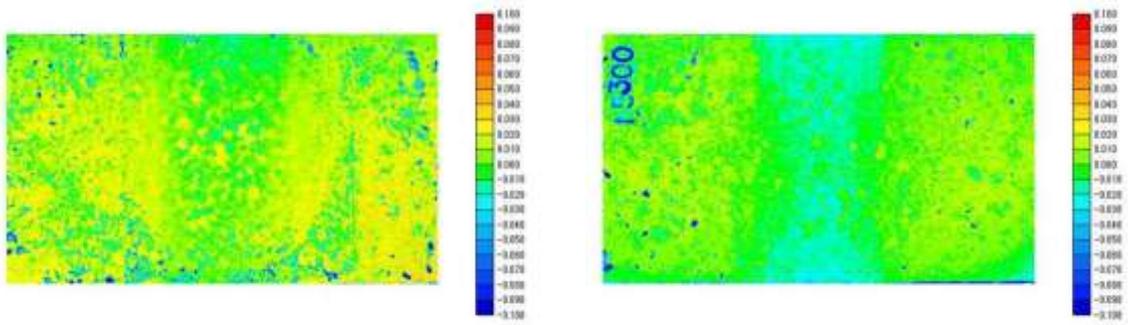
精密分析実施

精密分析実施

(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

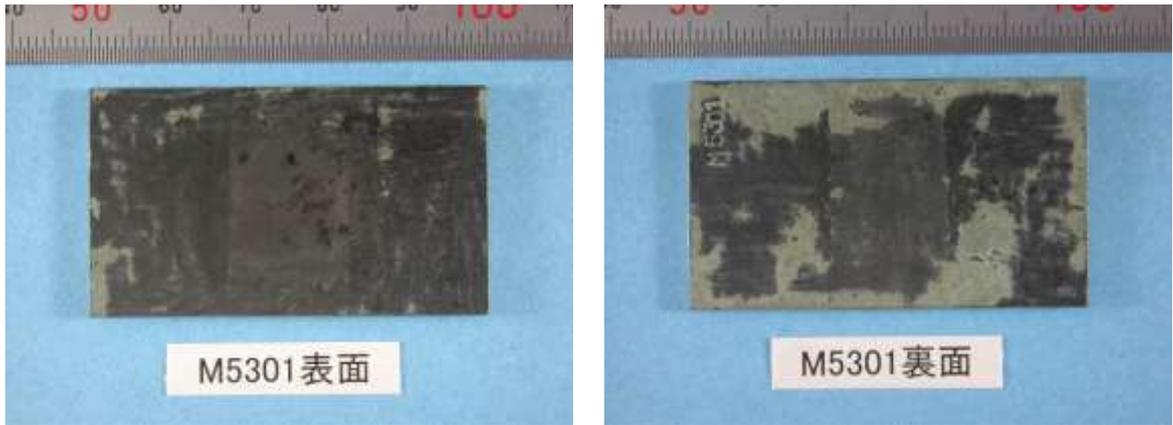


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

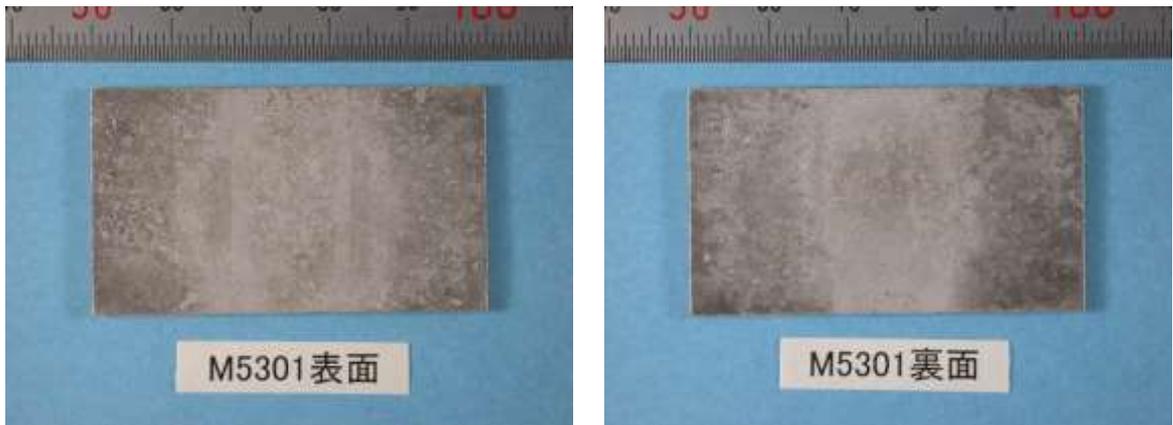


(c) 形状測定結果

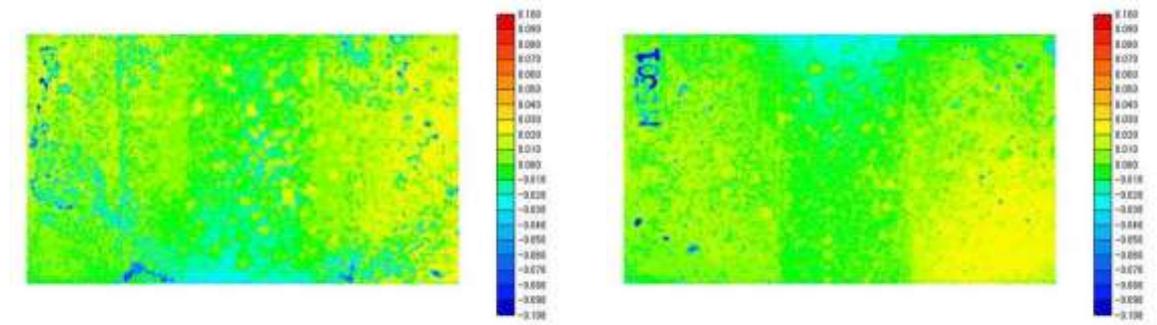
添付図 8-1-7 外観観察と形状測定結果（M5300：人工海水、5年、溶接付き、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

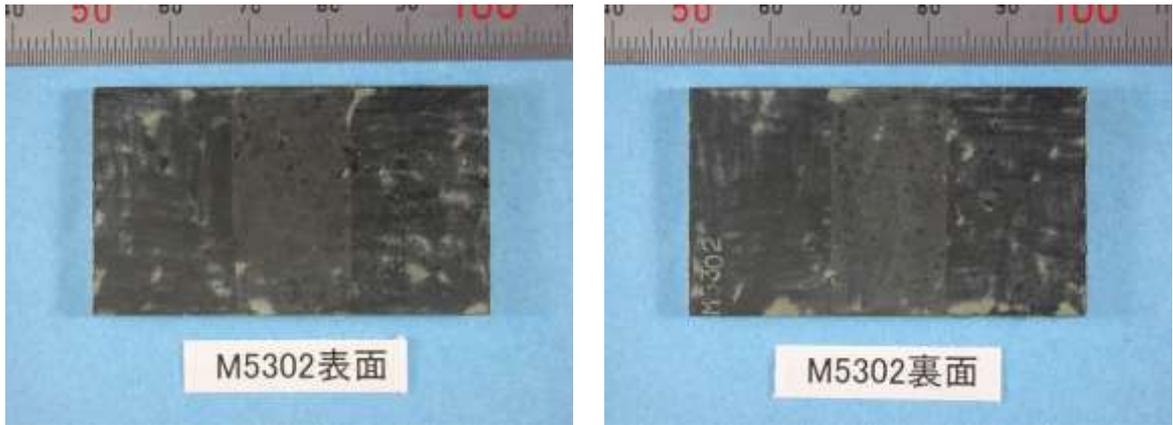


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

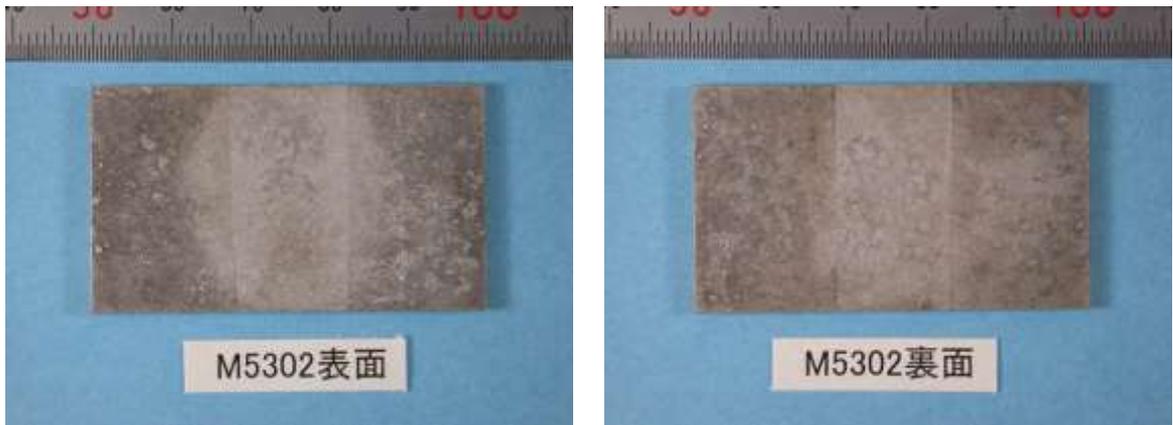


(c) 形状測定結果

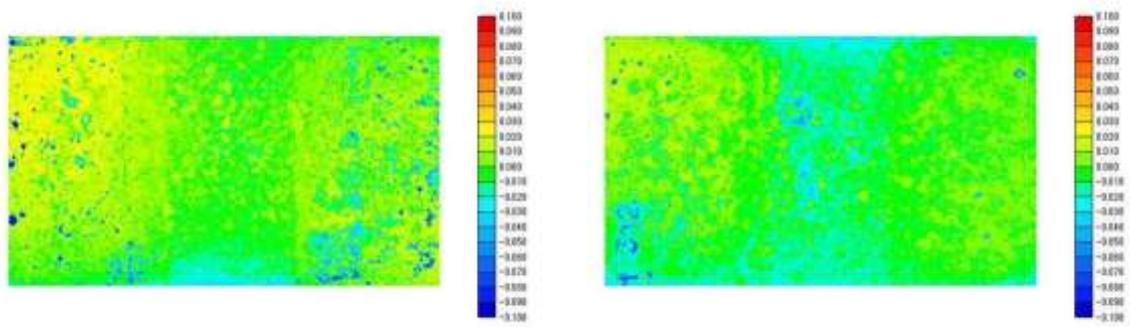
添付図 8-1-8 外観観察と形状測定結果（M5301：人工海水、5年、溶接付き、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

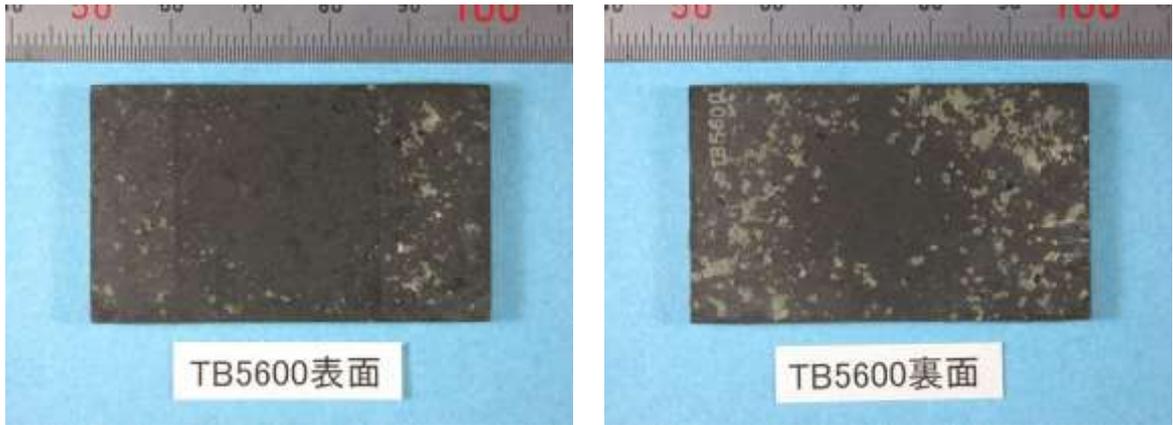


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

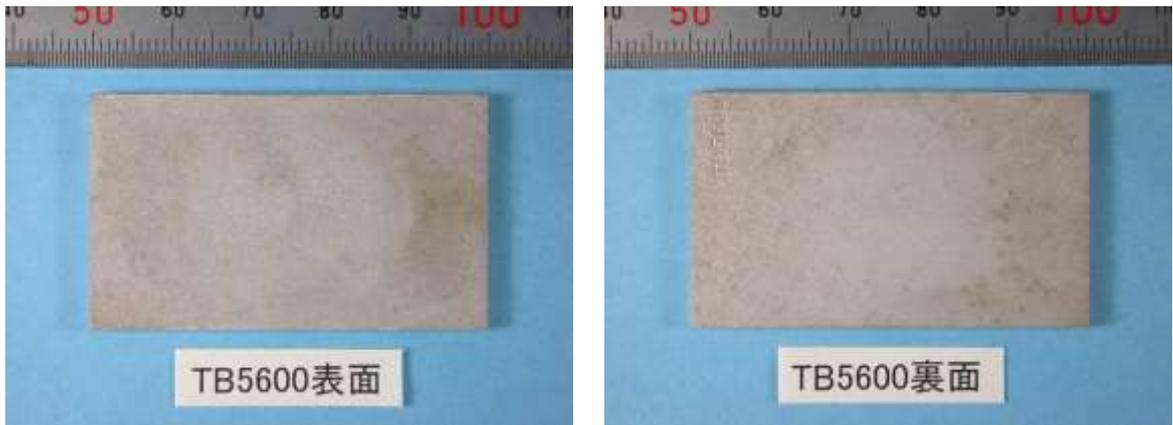


(c) 形状測定結果

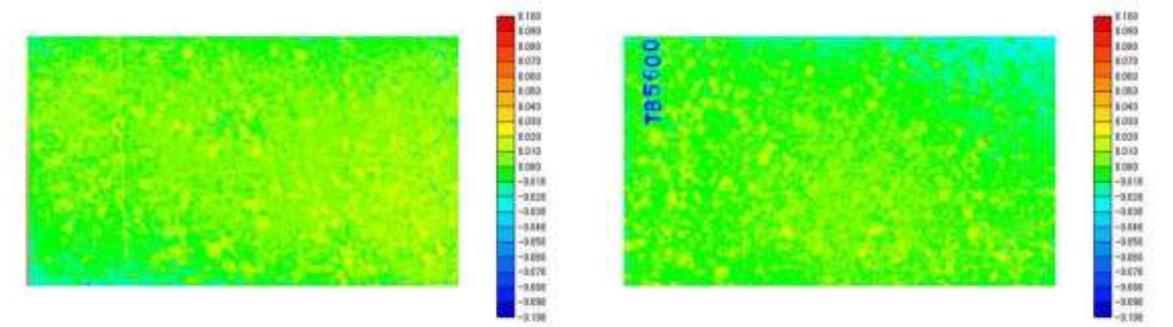
添付図 8-1-9 外観観察と形状測定結果（M5302：人工海水、5年、溶接付き、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

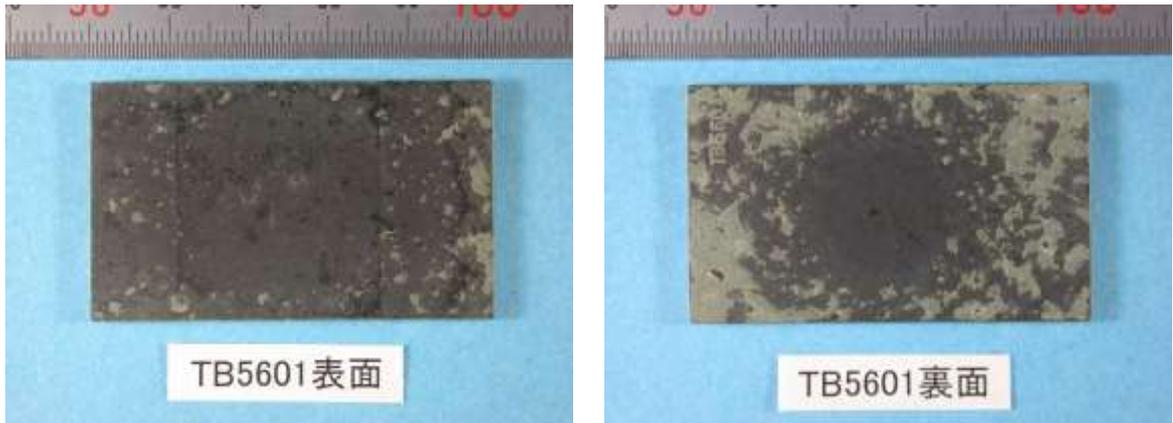


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

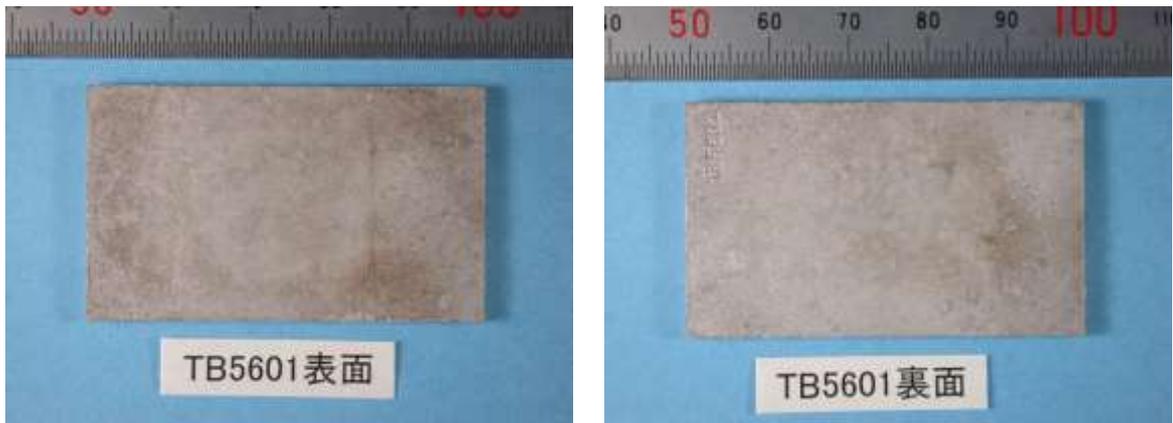


(c) 形状測定結果

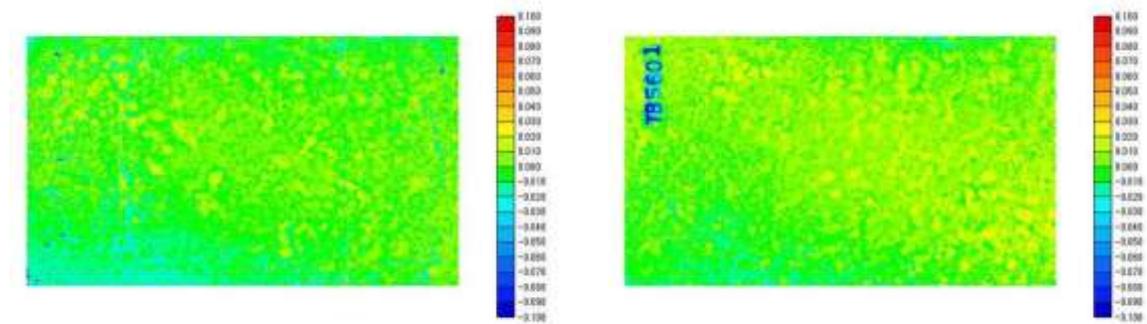
添付図 8-1-10 外観観察と形状測定結果（TB5600：人工海水、5年、母材単独、TIG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

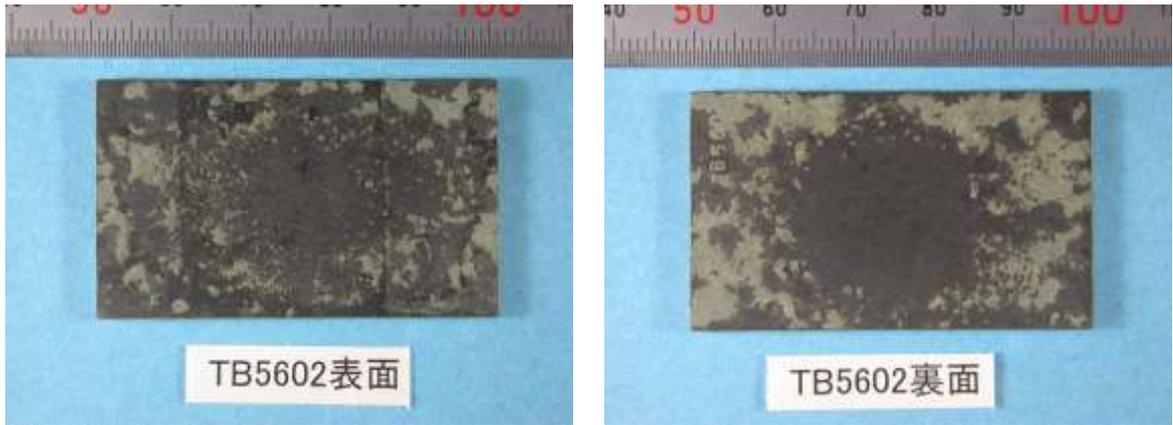


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

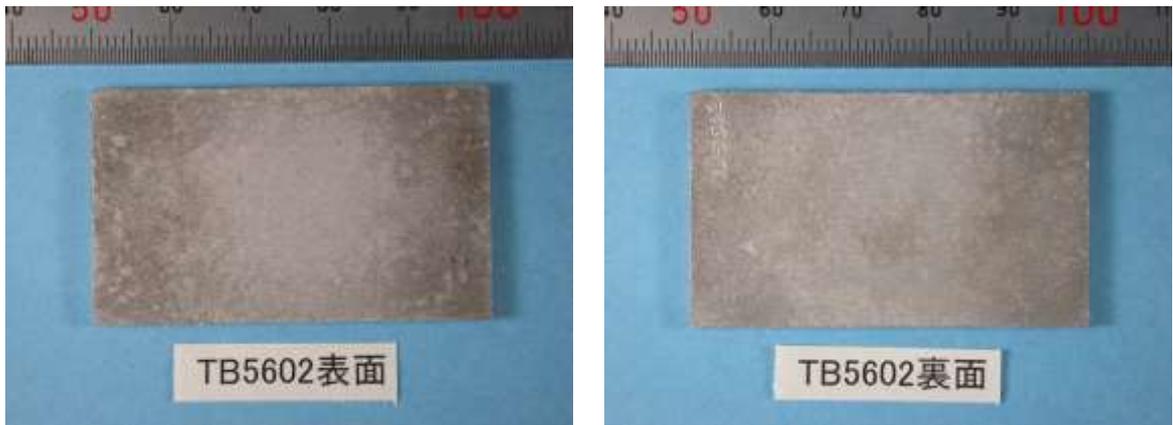


(c) 形状測定結果

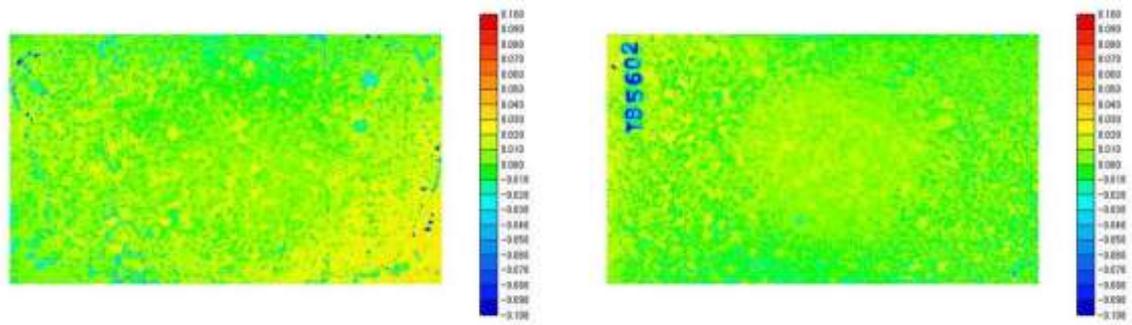
添付図 8-1-11 外観観察と形状測定結果（TB5601：人工海水、5年、母材単独、TIG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

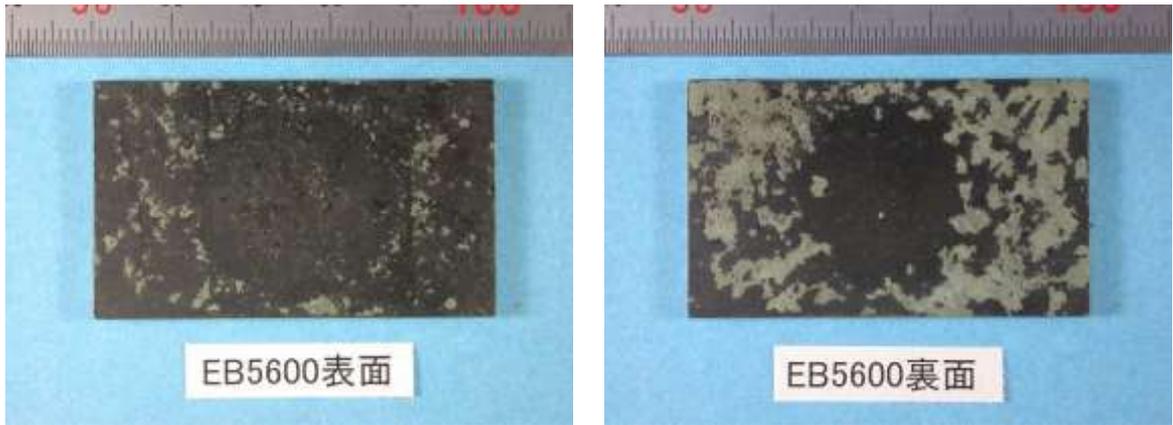


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

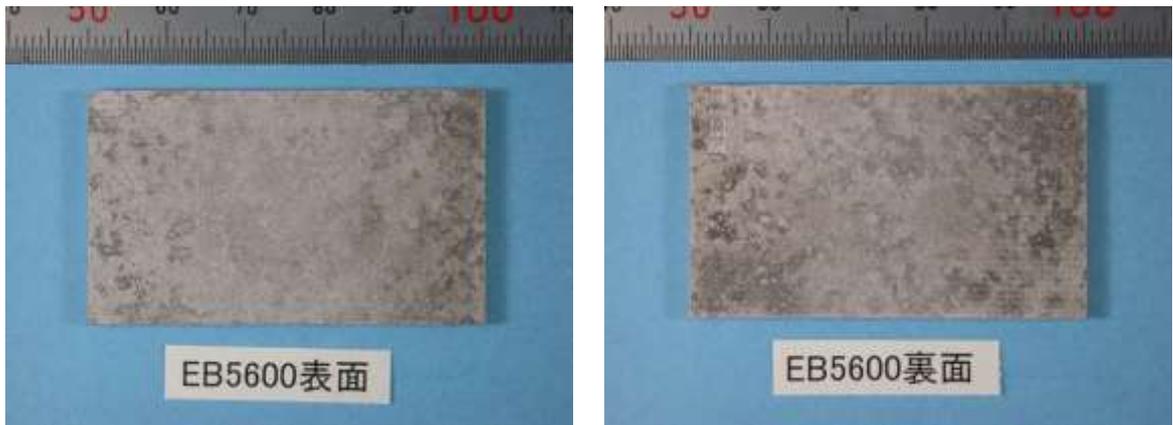


(c) 形状測定結果

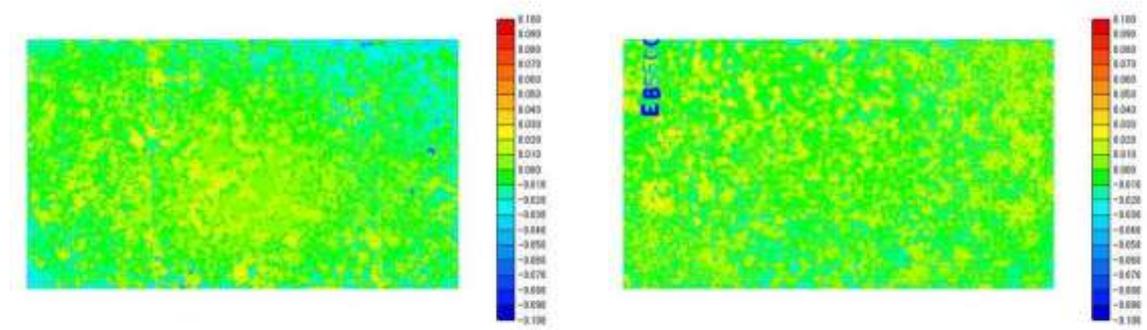
添付図 8-1-12 外観観察と形状測定結果（TB5602：人工海水、5年、母材単独、TIG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

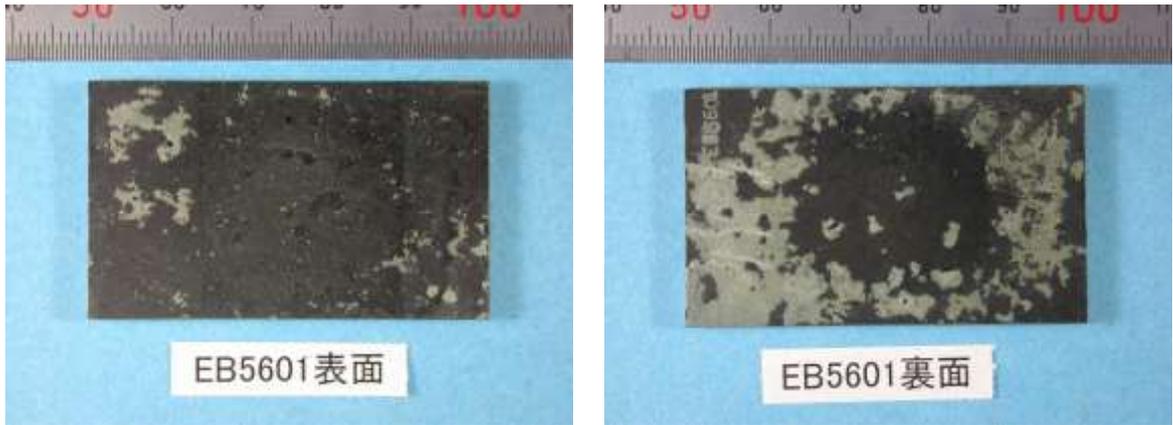


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

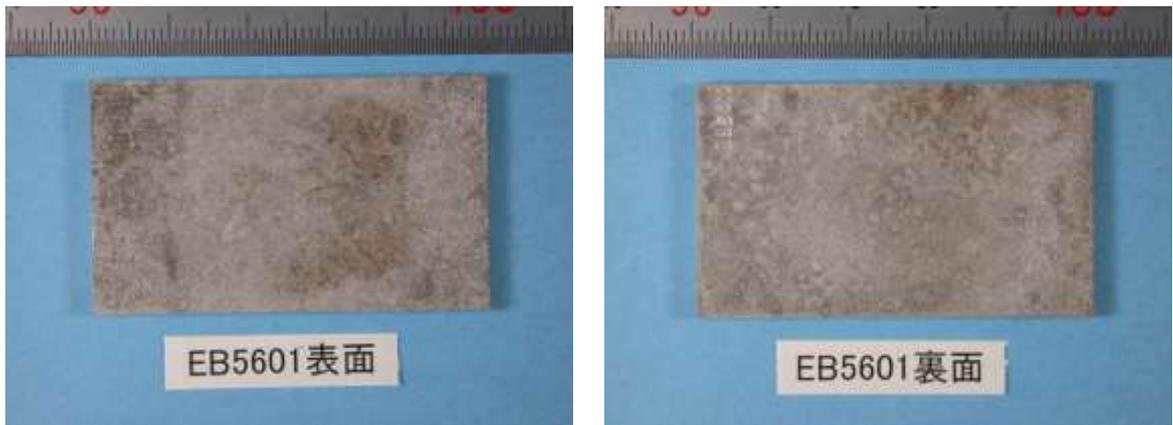


(c) 形状測定結果

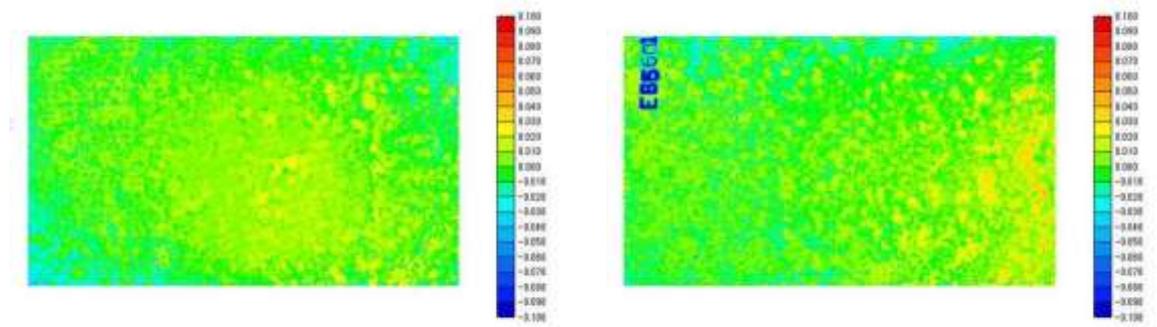
添付図 8-1-13 外観観察と形状測定結果（EB5600：人工海水、5年、母材単独、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

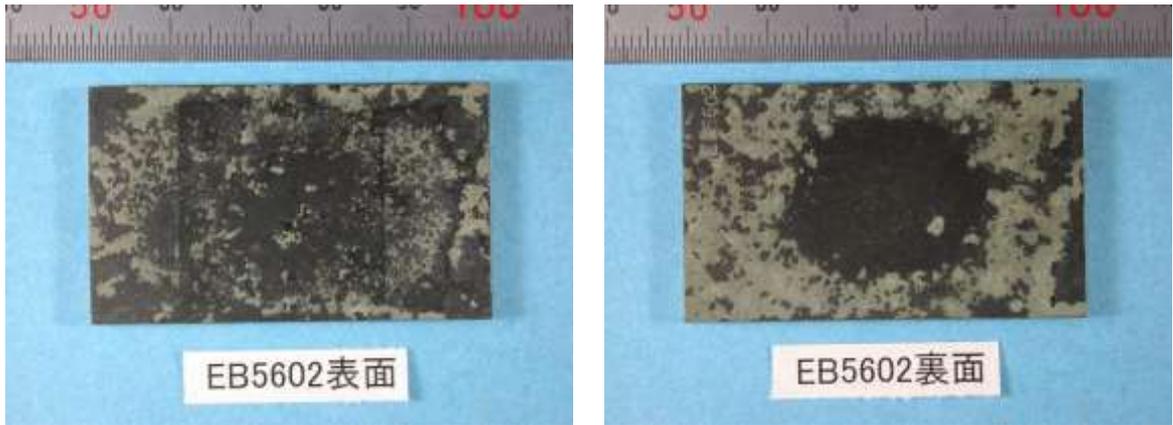


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

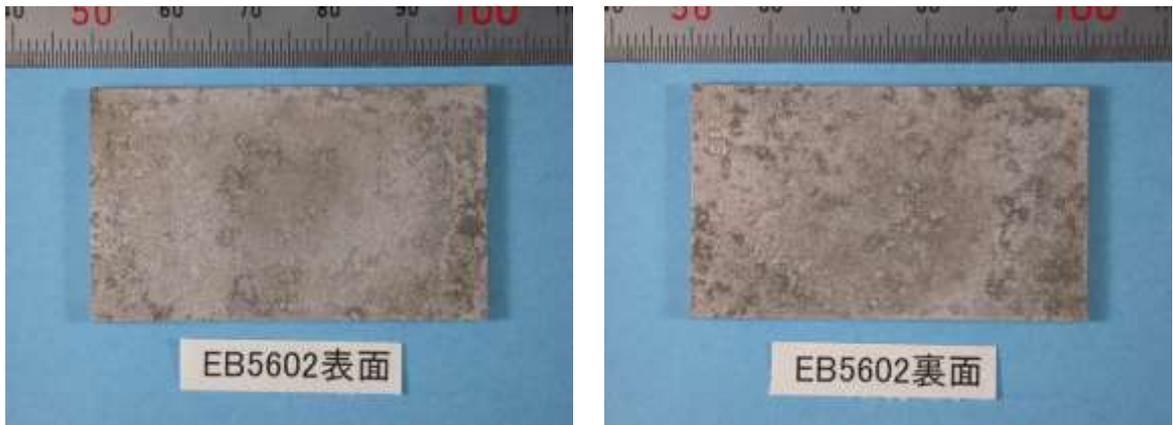


(c) 形状測定結果

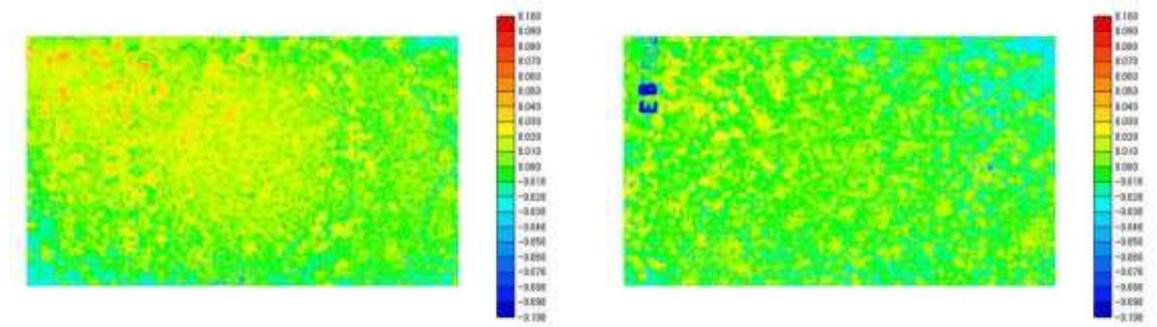
添付図 8-1-14 外観観察と形状測定結果（EB5601：人工海水、5年、母材単独、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

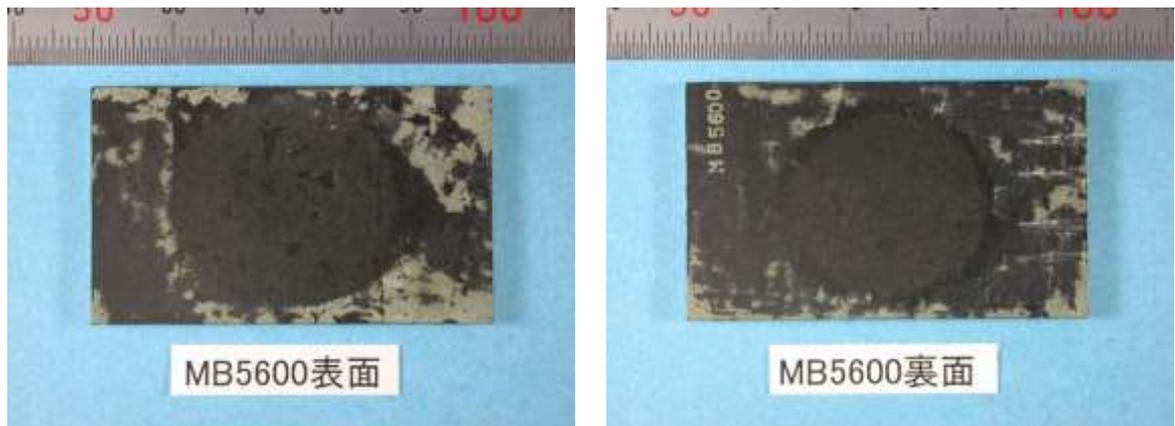


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

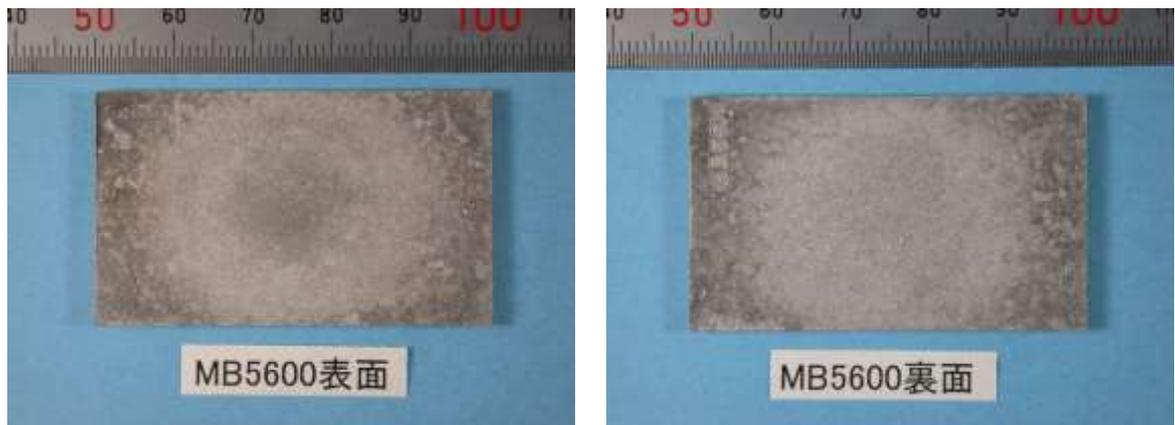


(c) 形状測定結果

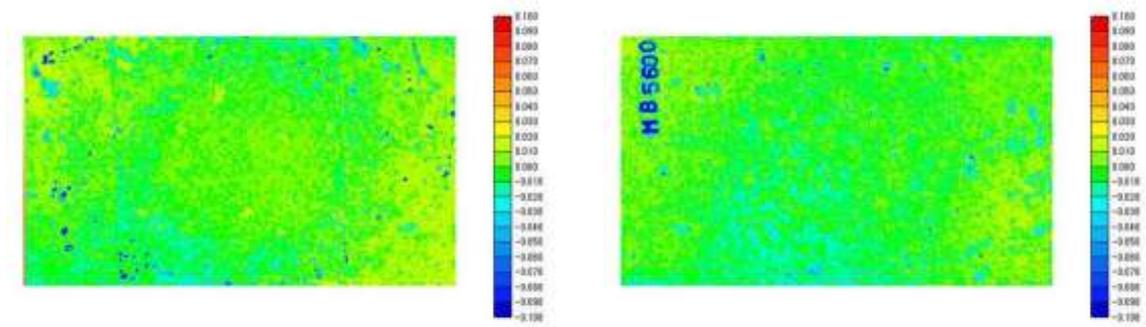
添付図 8-1-15 外観観察と形状測定結果（EB5602：人工海水、5年、母材単独、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

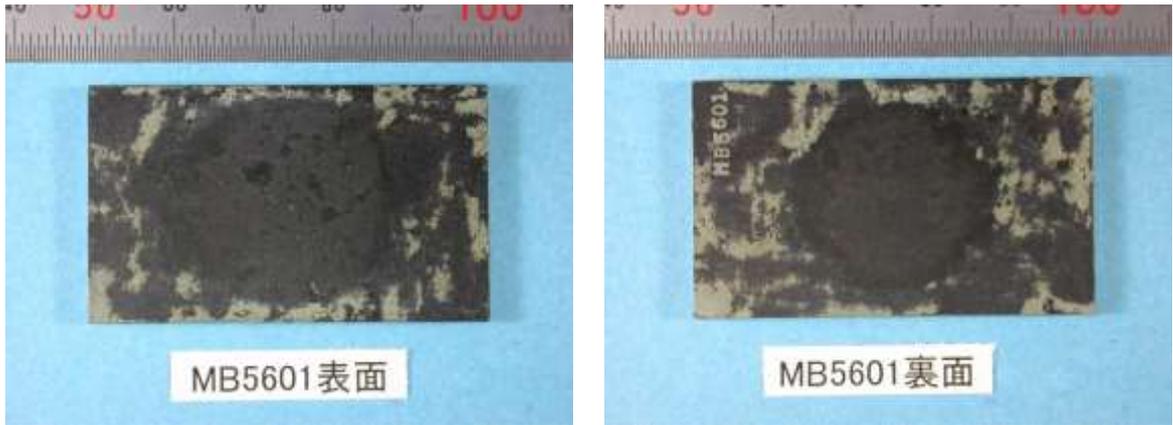


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

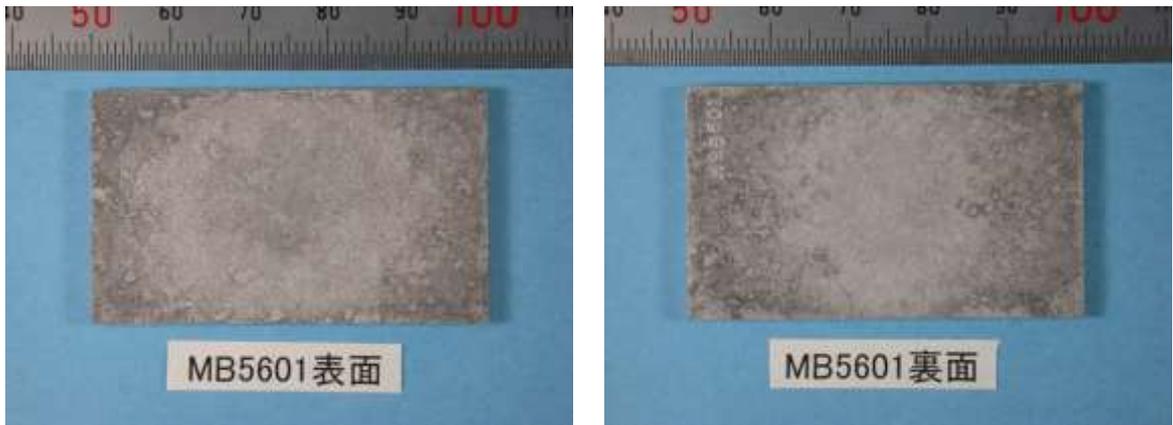


(c) 形状測定結果

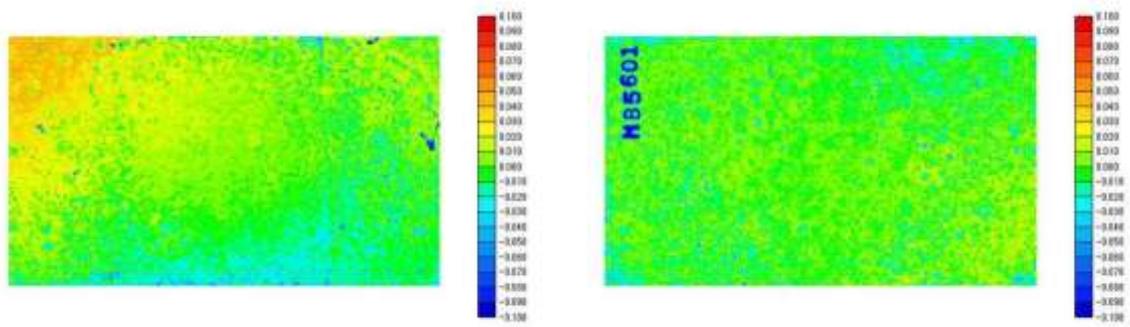
添付図 8-1-16 外観観察と形状測定結果（MB5600：人工海水、5年、母材単独、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

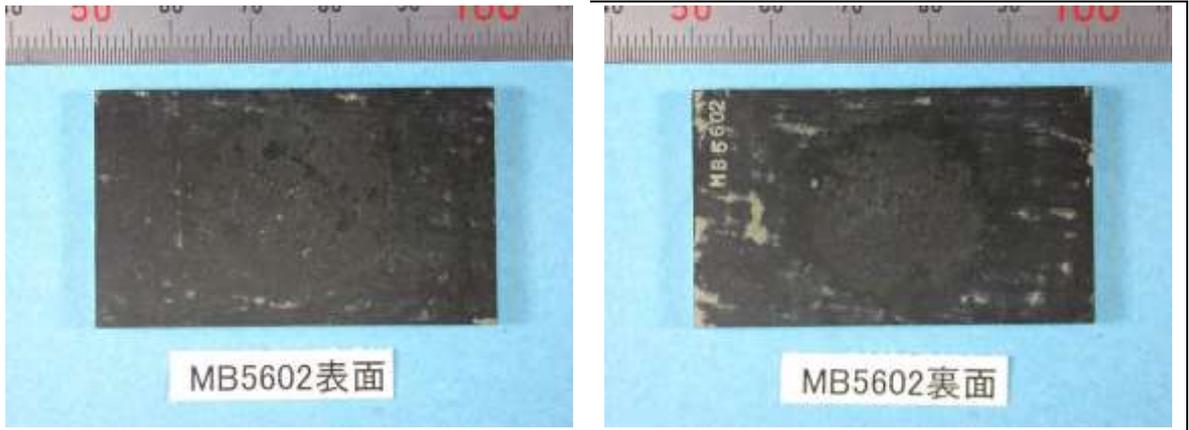


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

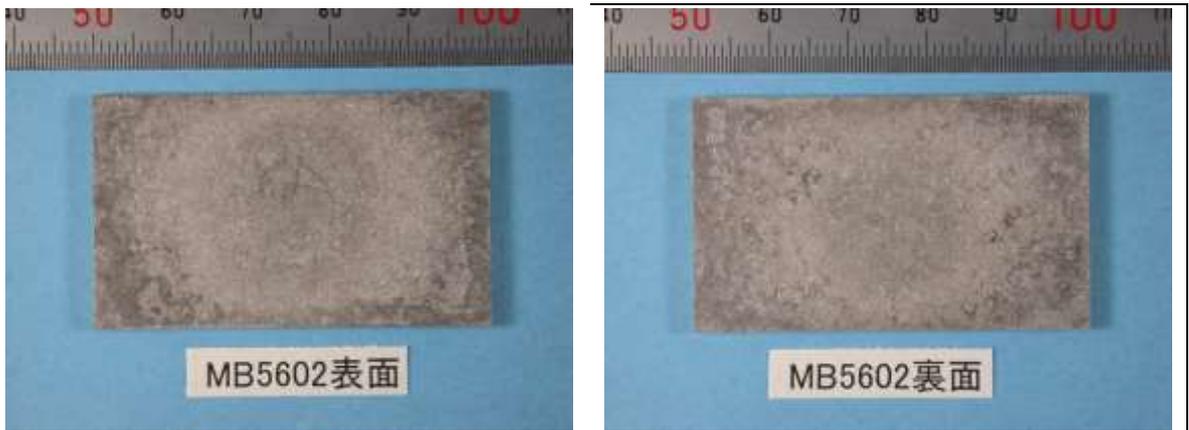


(c) 形状測定結果

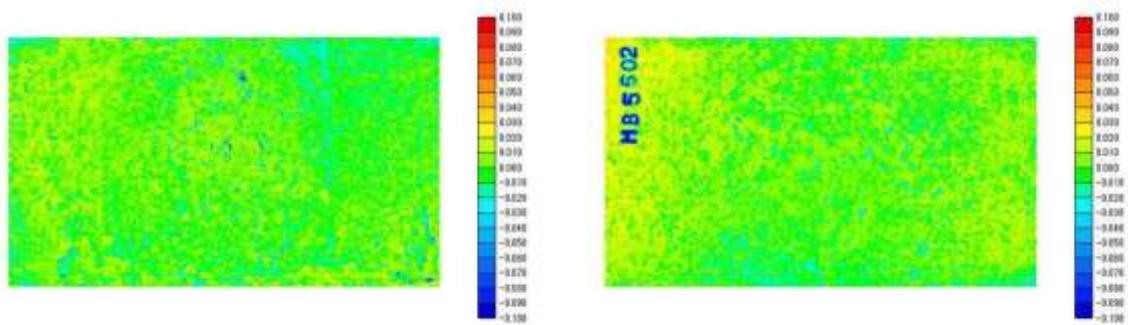
添付図 8-1-17 外観観察と形状測定結果（MB5601：人工海水、5年、母材単独、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片



(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片



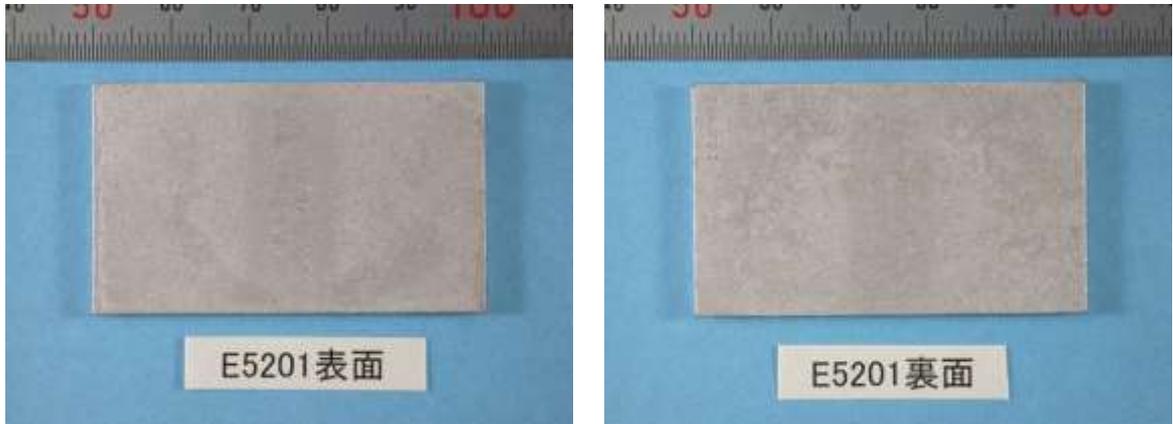
(c) 形状測定結果

添付図 8-1-18 外観観察と形状測定結果（MB5602：人工海水、5年、母材単独、MAG）

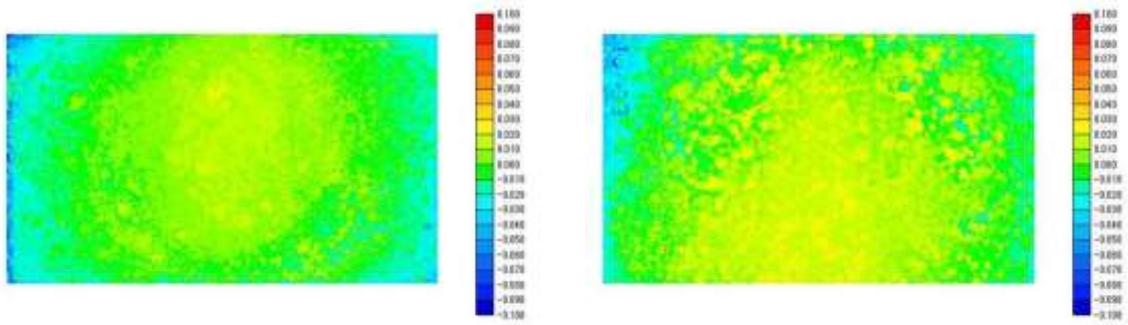
精密分析実施

精密分析実施

(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

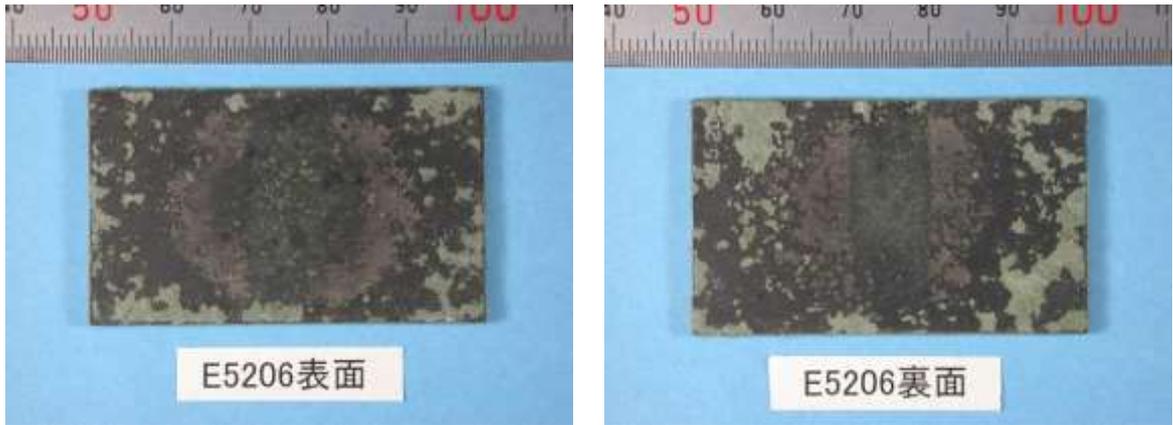


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

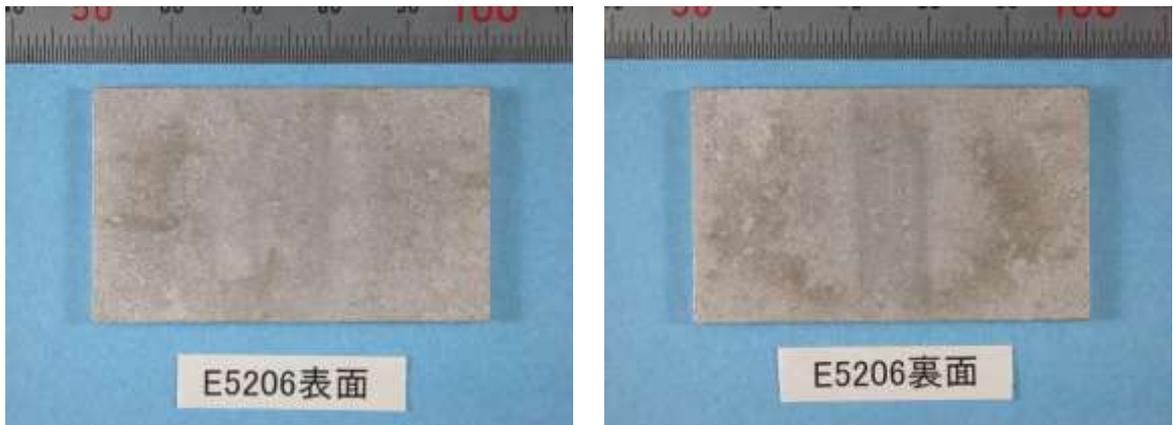


(c) 形状測定結果

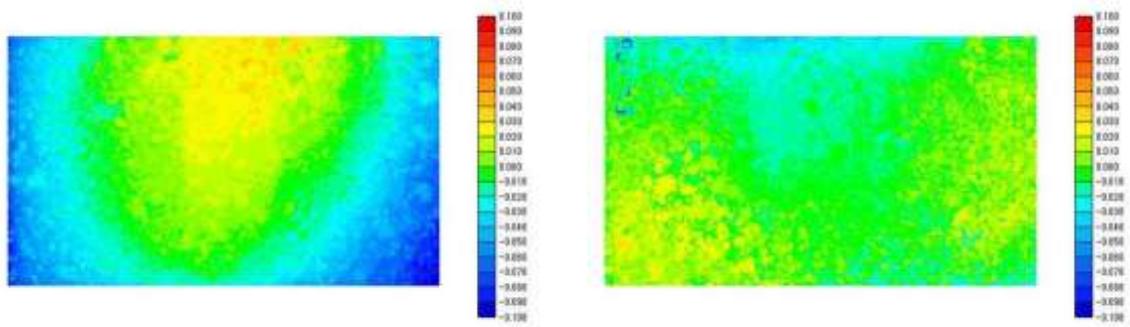
添付図 8-1-19 外観観察と形状測定結果（E5201：人工海水、10年、溶接付き、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

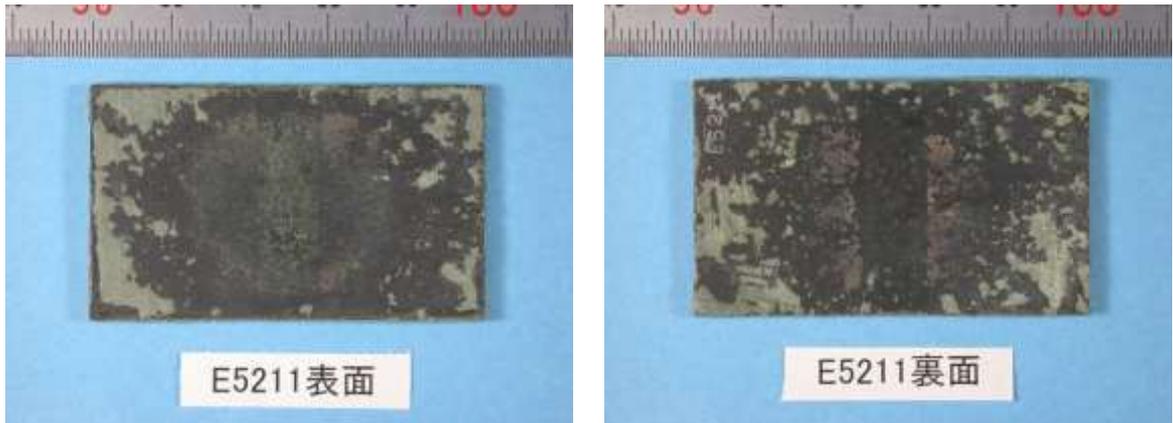


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

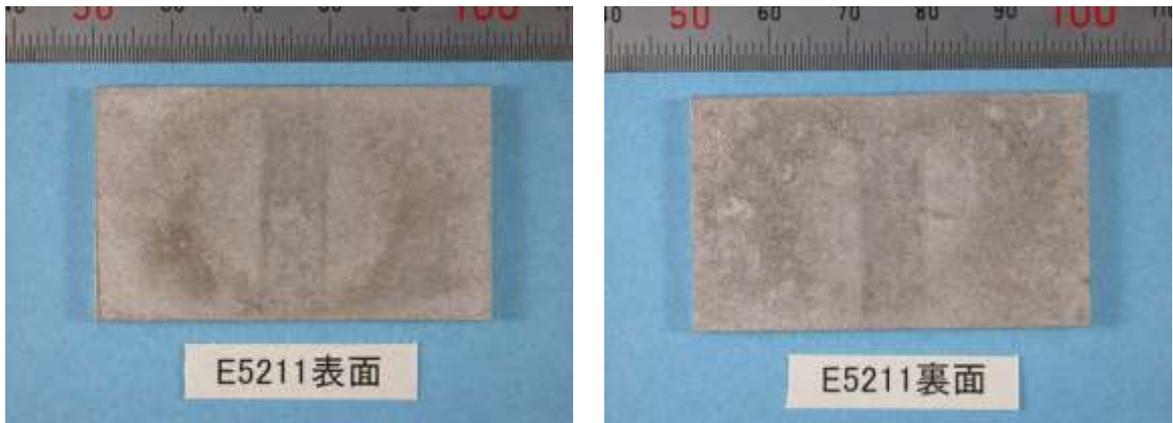


(c) 形状測定結果

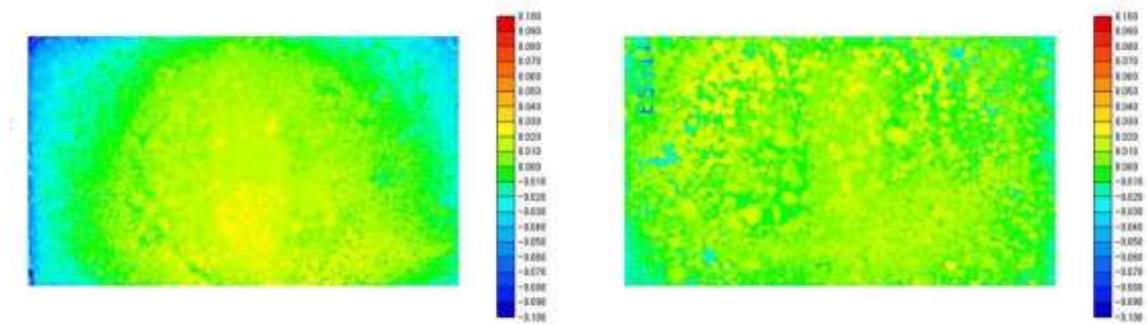
添付図 8-1-20 外観観察と形状測定結果（E5206：人工海水、10年、溶接付き、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片



(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片



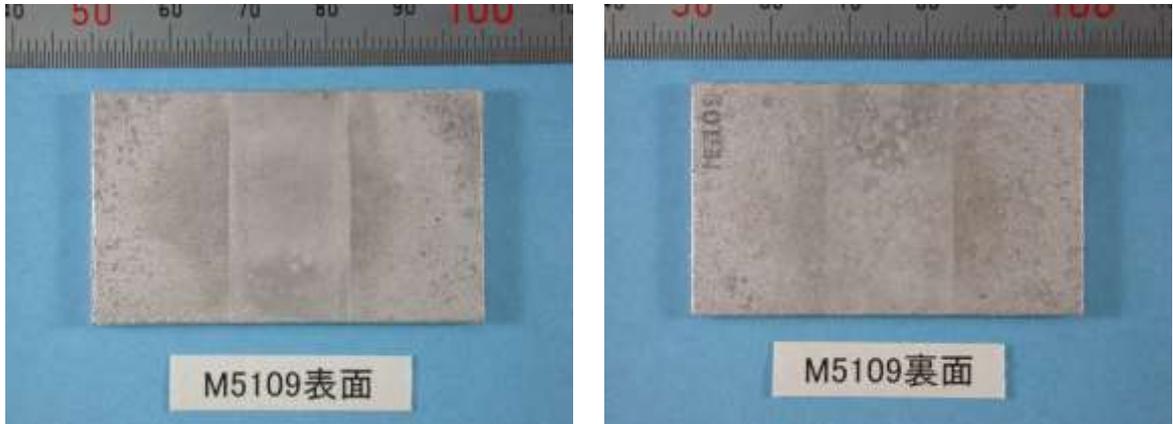
(c) 形状測定結果

添付図 8-1-21 外観観察と形状測定結果（E5211：人工海水、10年、溶接付き、EBW）

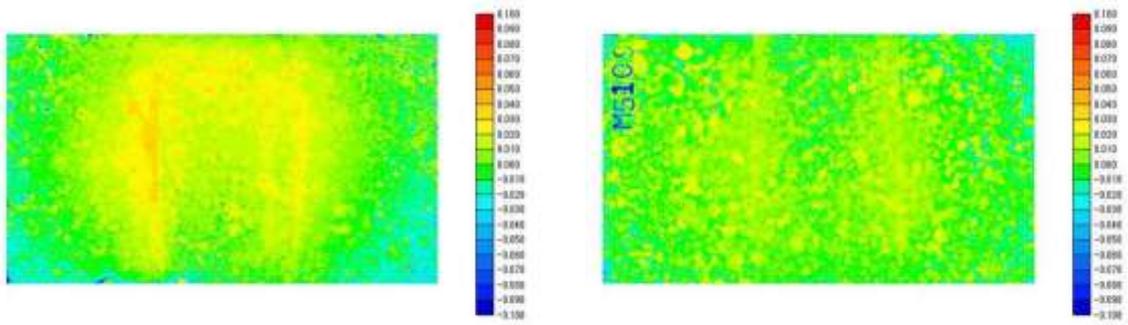
精密分析実施

精密分析実施

(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

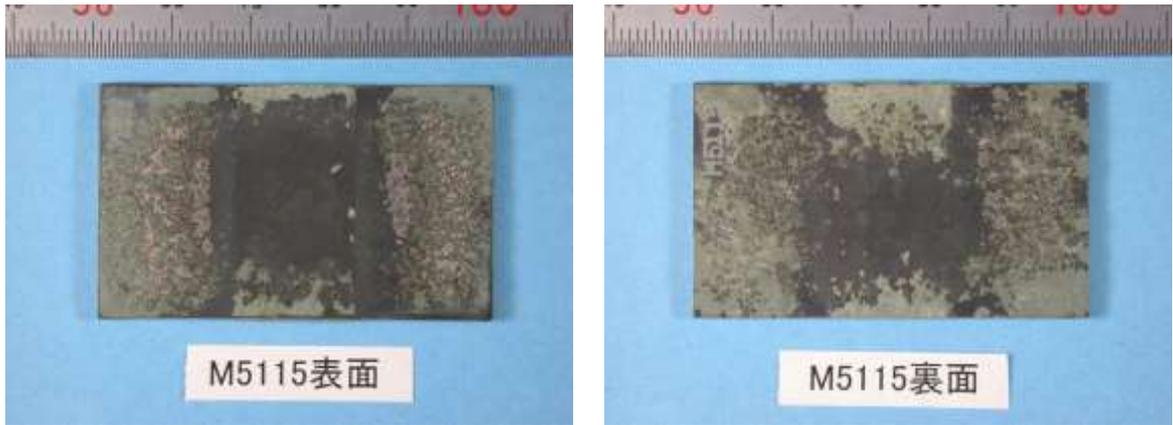


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

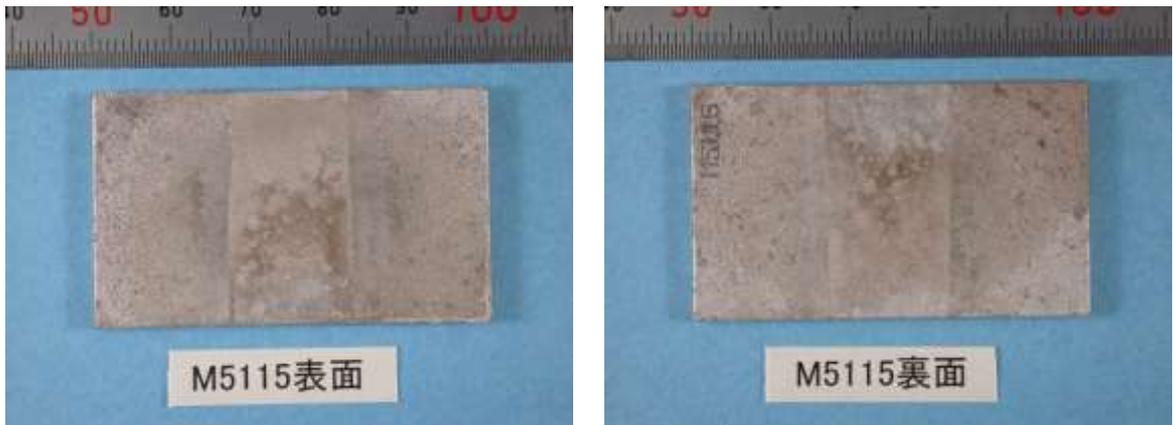


(c) 形状測定結果

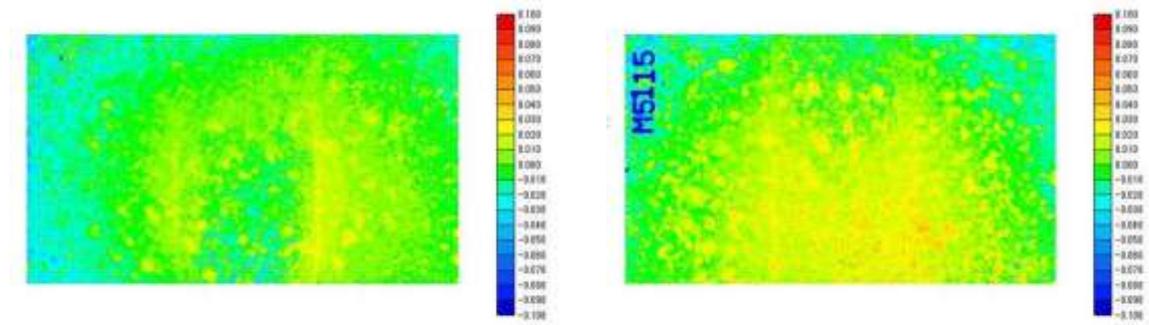
添付図 8-1-22 外観観察と形状測定結果（M5109：人工海水、10年、溶接付き、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

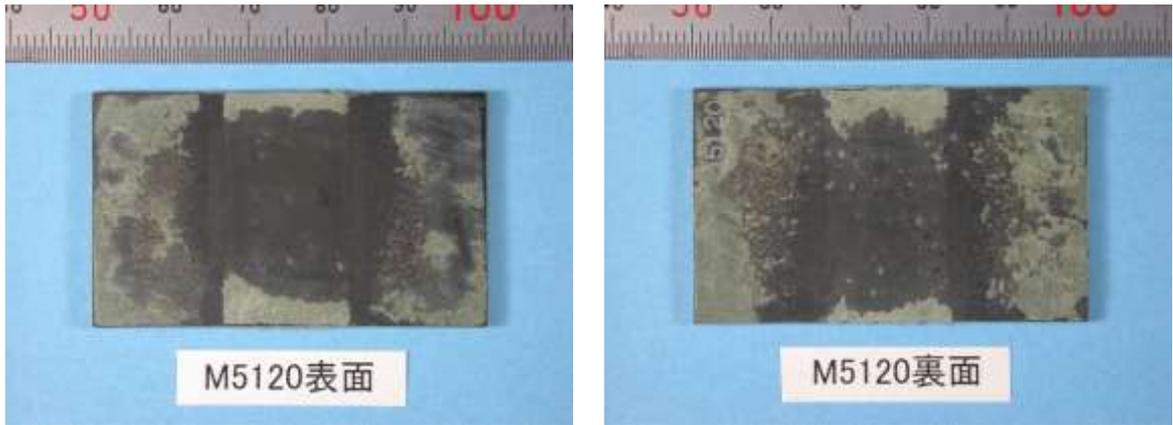


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

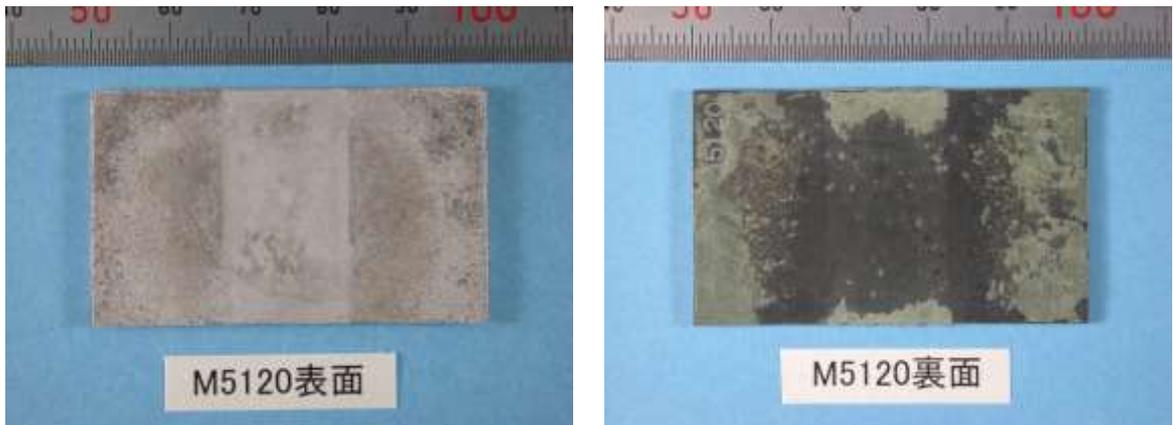


(c) 形状測定結果

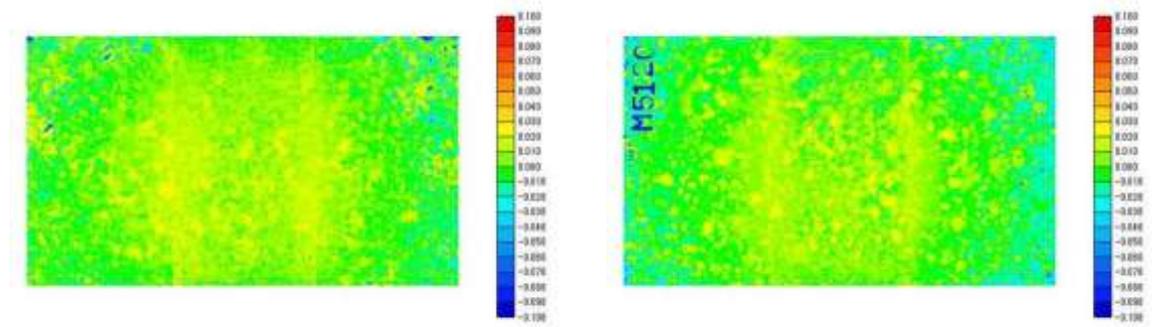
添付図 8-1-23 外観観察と形状測定結果（M5115：人工海水、10年、溶接付き、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

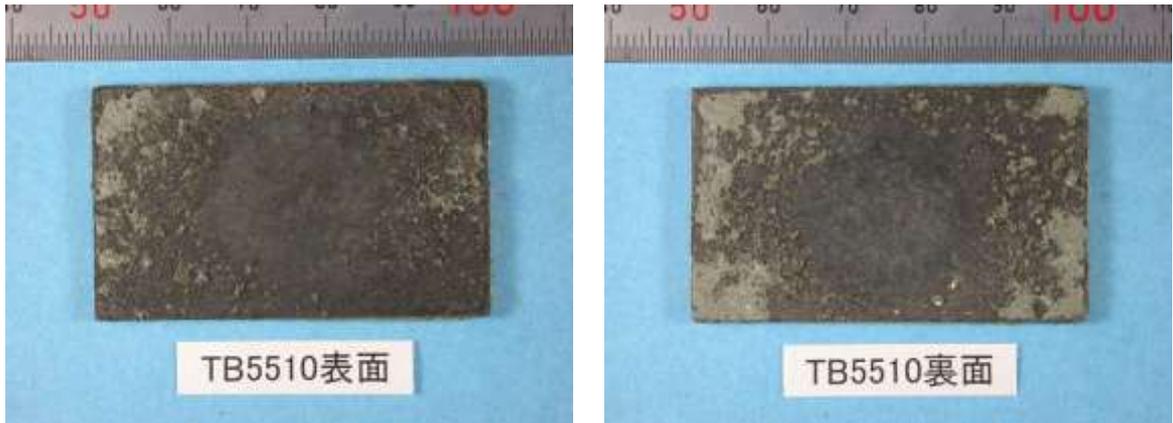


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

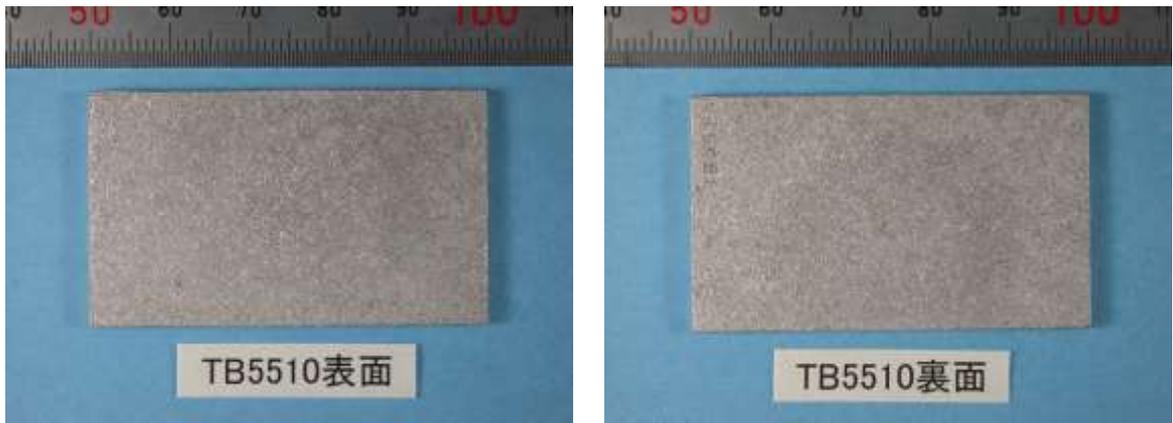


(c) 形状測定結果

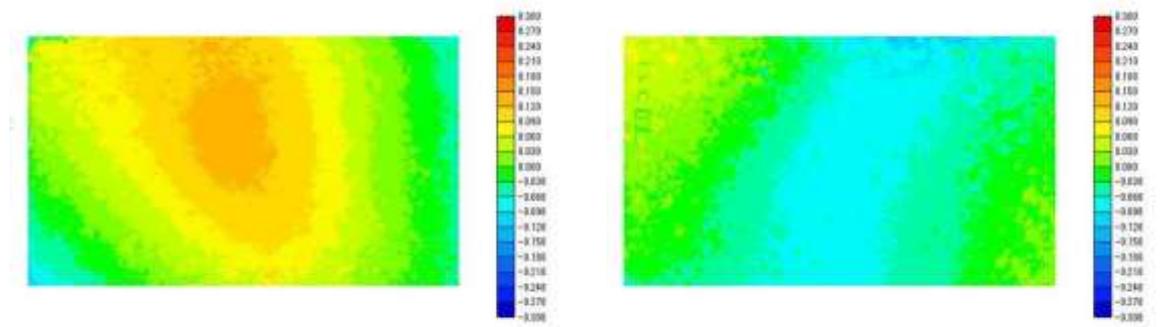
添付図 8-1-24 外観観察と形状測定結果（M5120：人工海水、10年、溶接付き、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

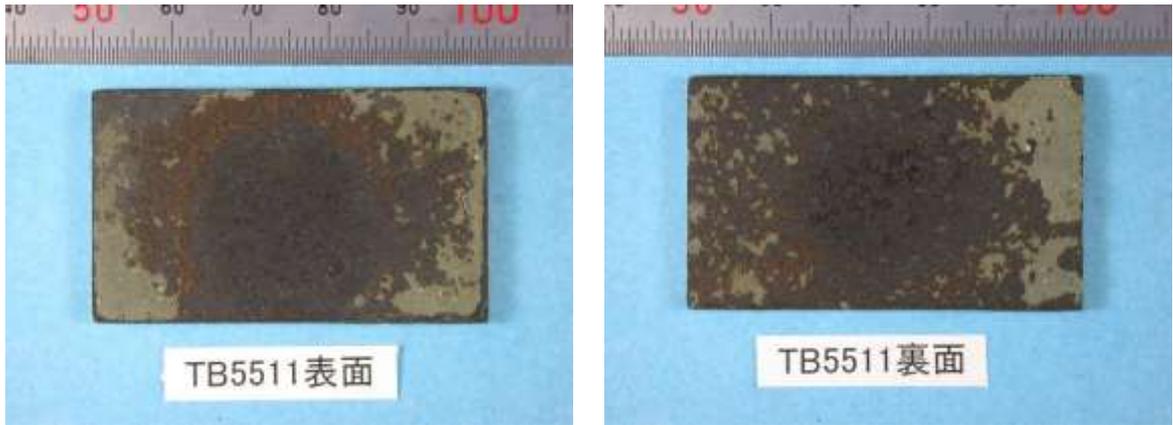


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

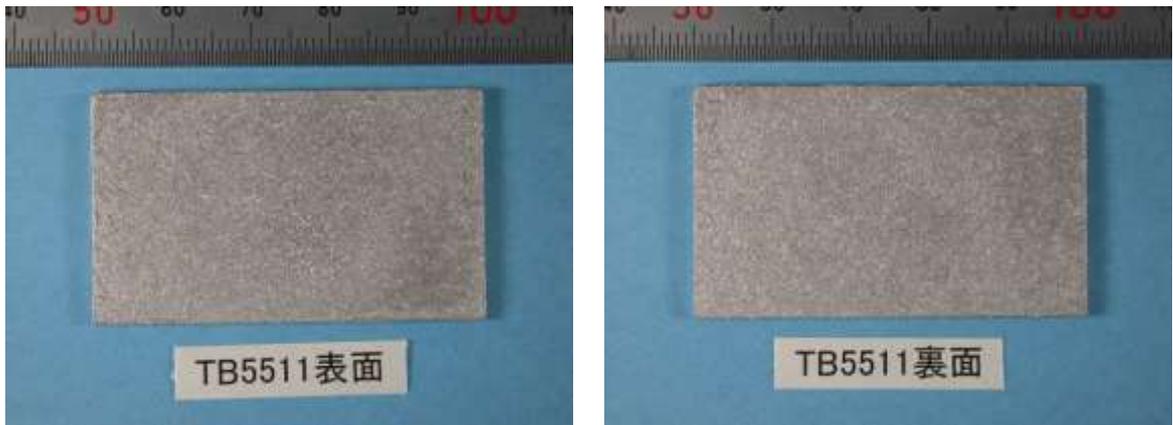


(c) 形状測定結果（*±300 μ m スケール）

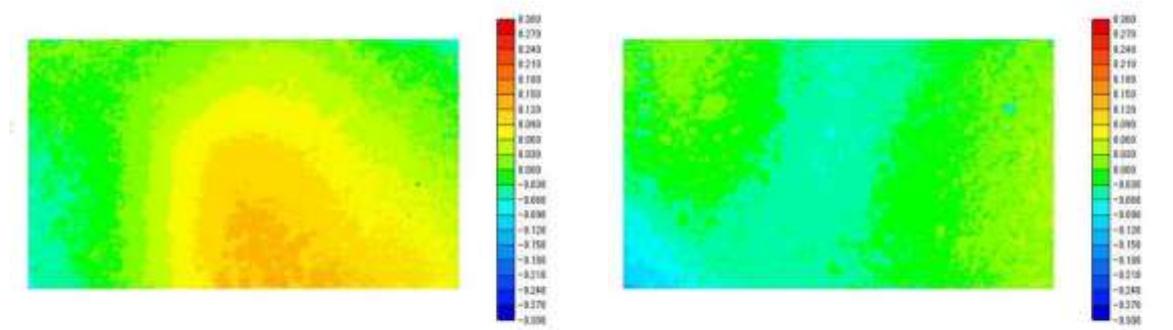
添付図 8-1-25 外観観察と形状測定結果（TB5510：人工海水、10年、母材単独、TIG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

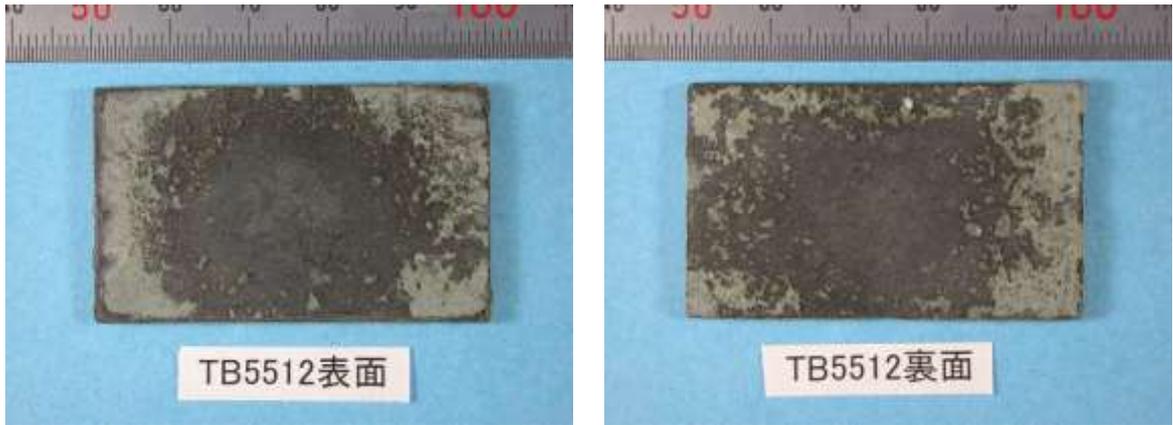


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

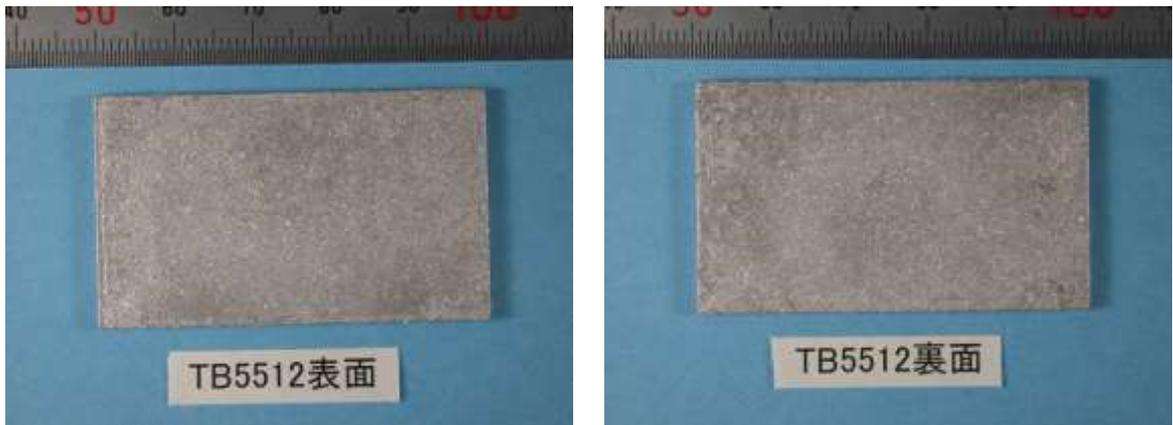


(c) 形状測定結果（* ±300 μ m スケール）

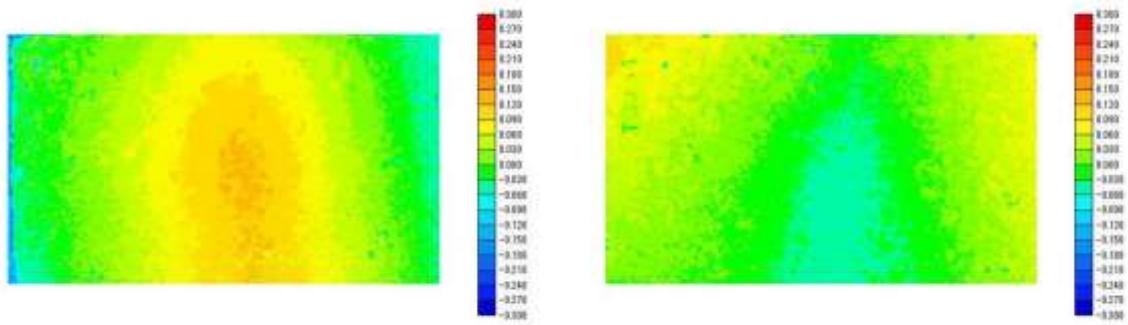
添付図 8-1-26 外観観察と形状測定結果（TB5511：人工海水、10年、母材単独、TIG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

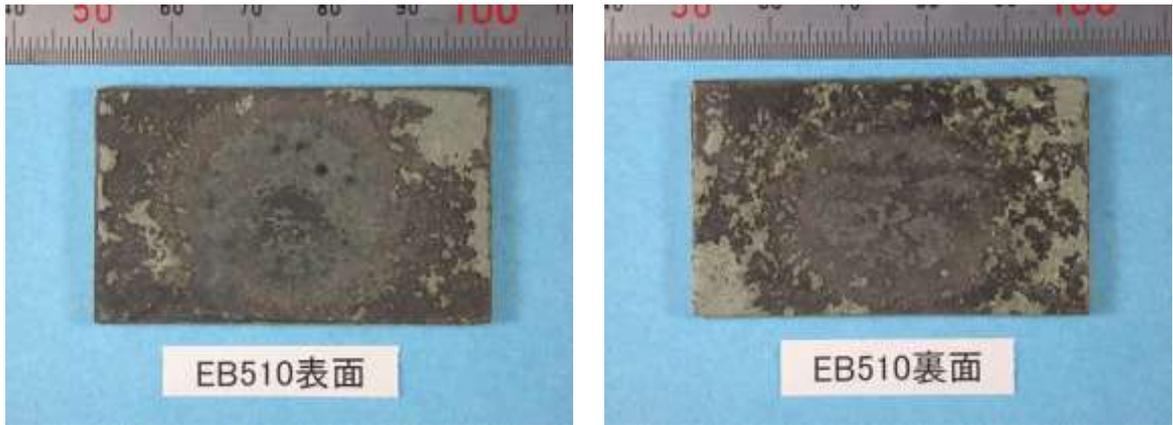


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

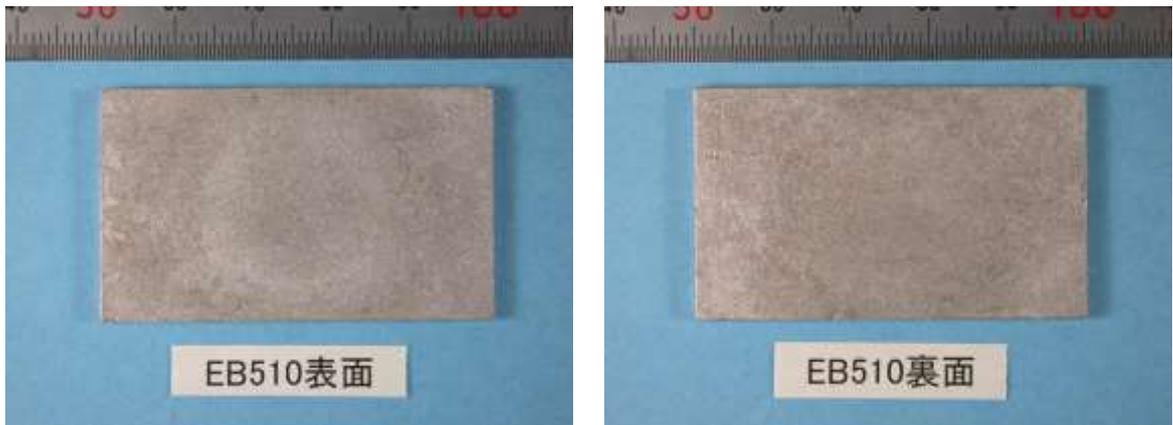


(c) 形状測定結果（* $\pm 300 \mu\text{m}$ スケール）

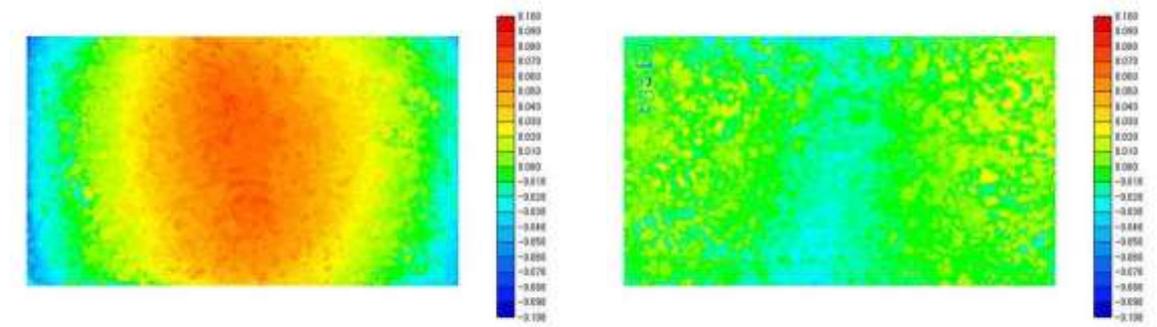
添付図 8-1-27 外観観察と形状測定結果（TB5512：人工海水、10年、母材単独、TIG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

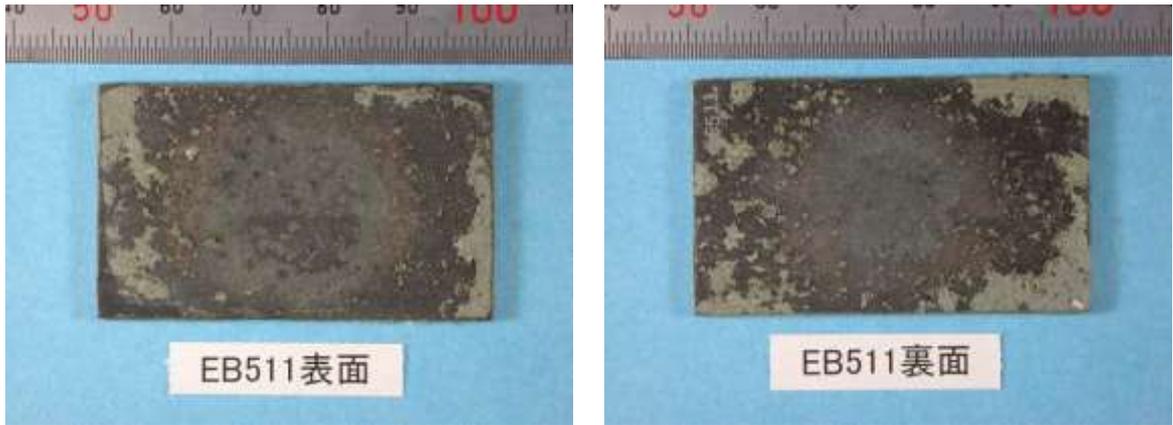


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

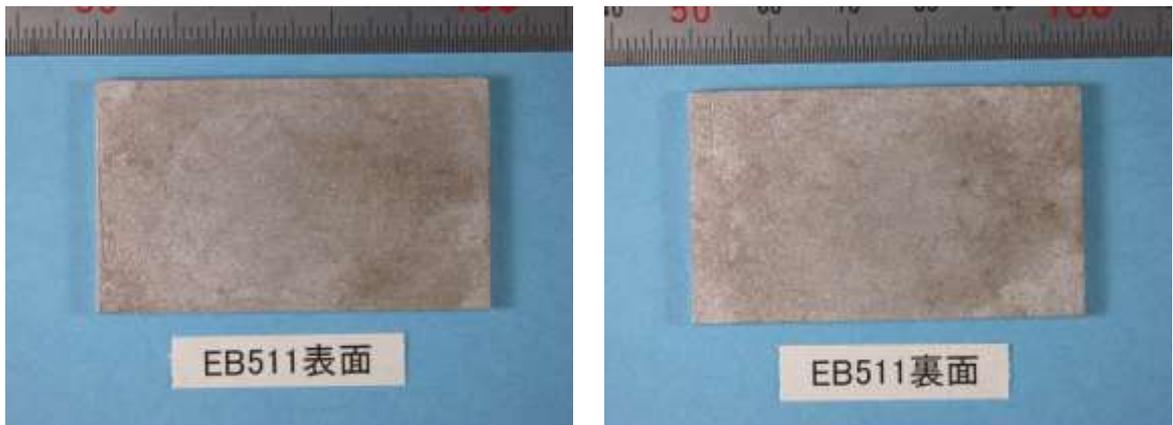


(c) 形状測定結果

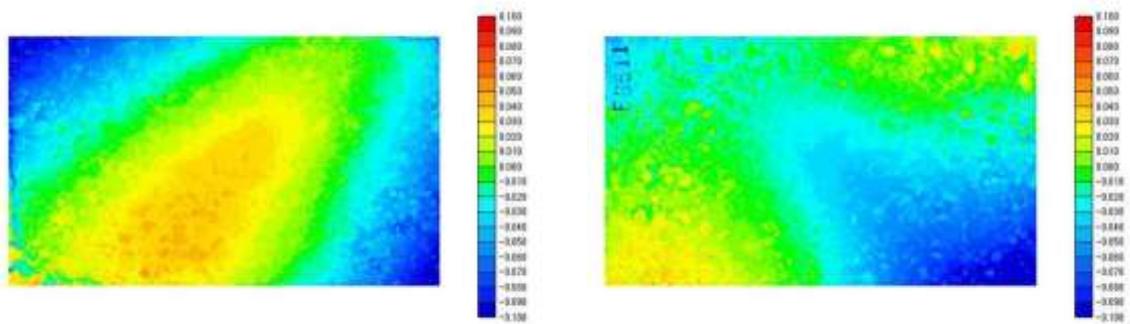
添付図 8-1-28 外観観察と形状測定結果（EB510：人工海水、10年、母材単独、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

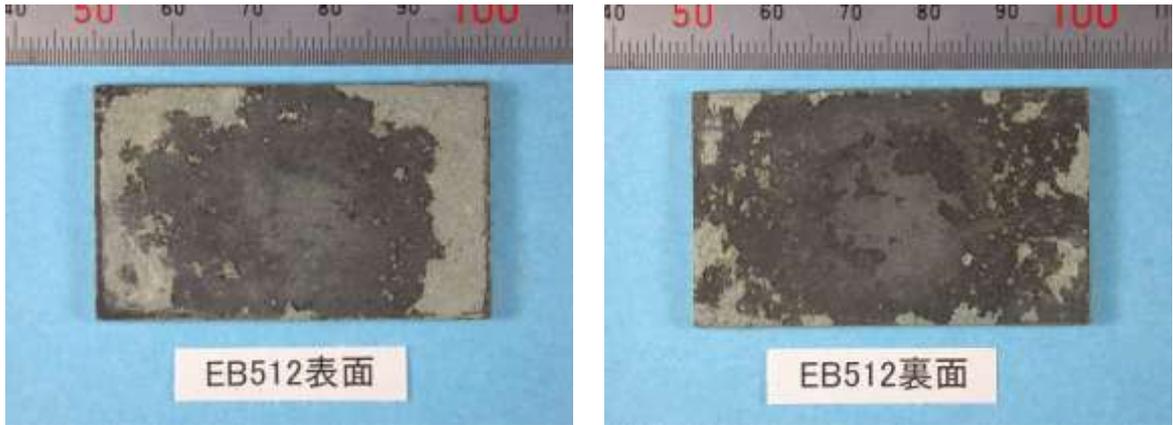


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

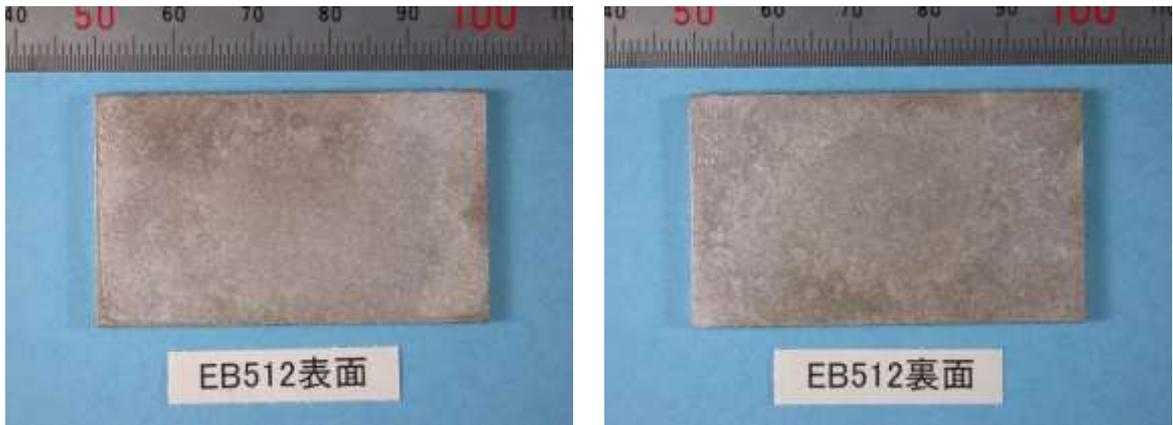


(c) 形状測定結果

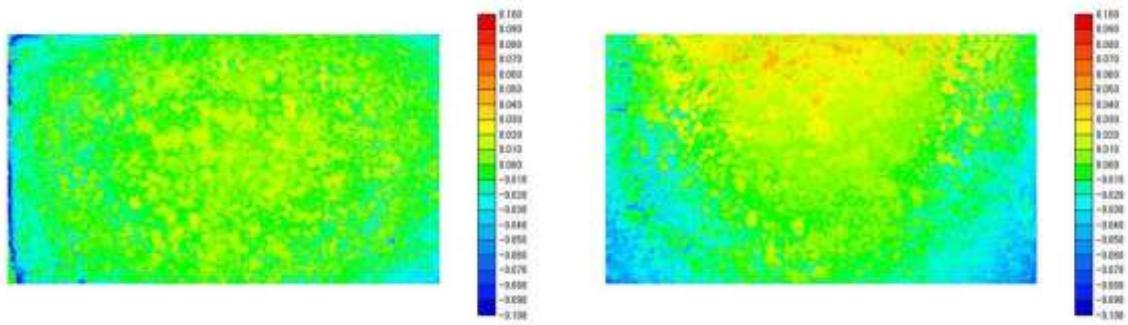
添付図 8-1-29 外観観察と形状測定結果（EB511：人工海水、10年、母材単独、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

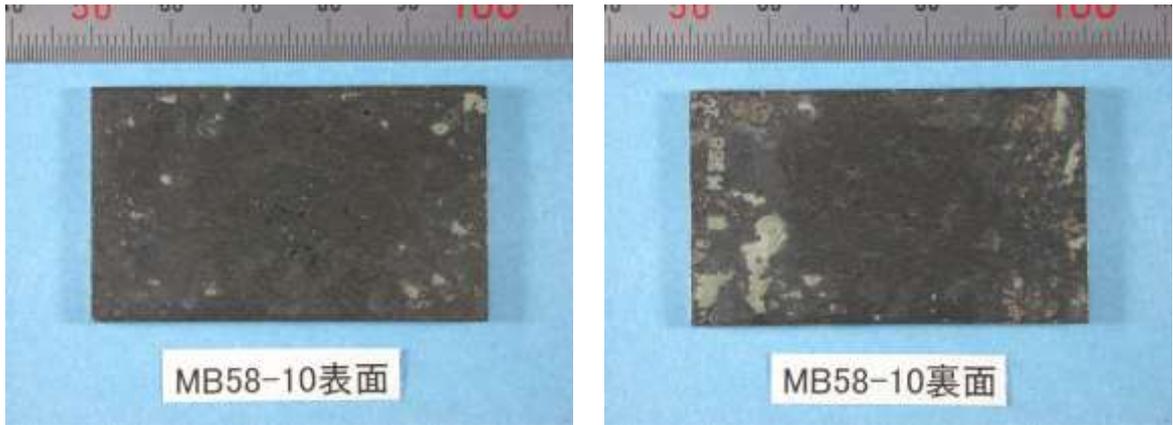


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

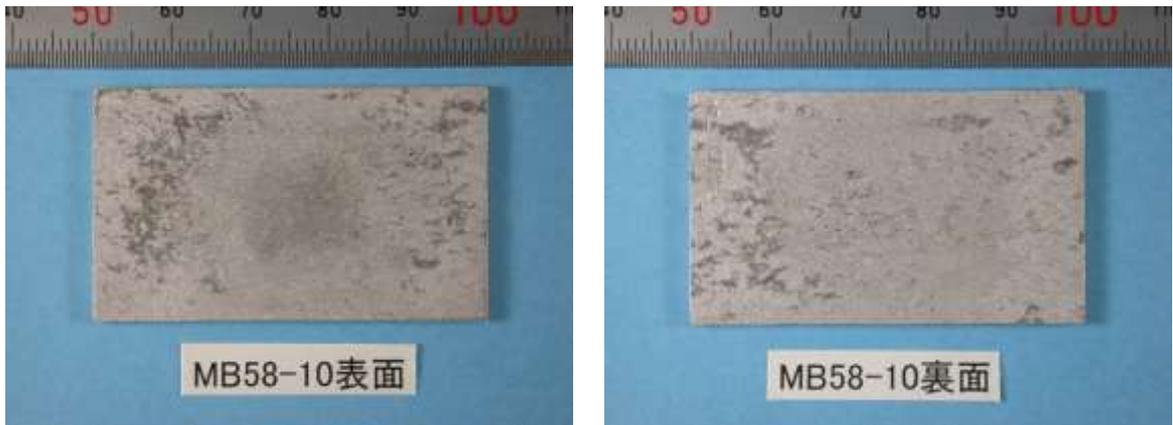


(c) 形状測定結果

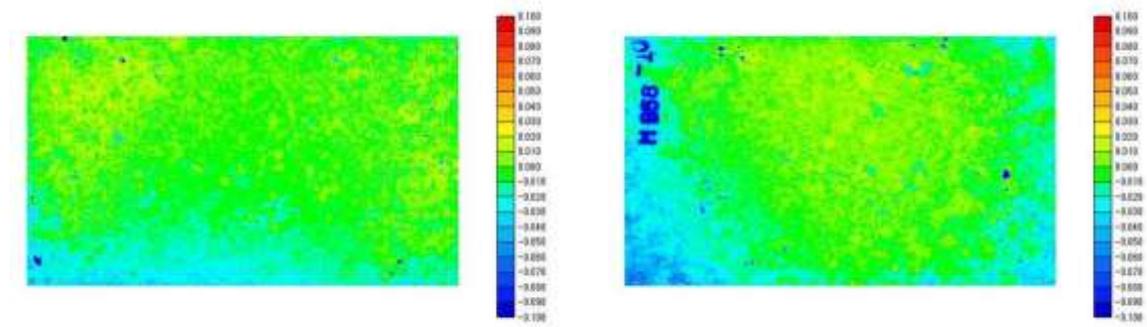
添付図 8-1-30 外観観察と形状測定結果（EB512：人工海水、10年、母材単独、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

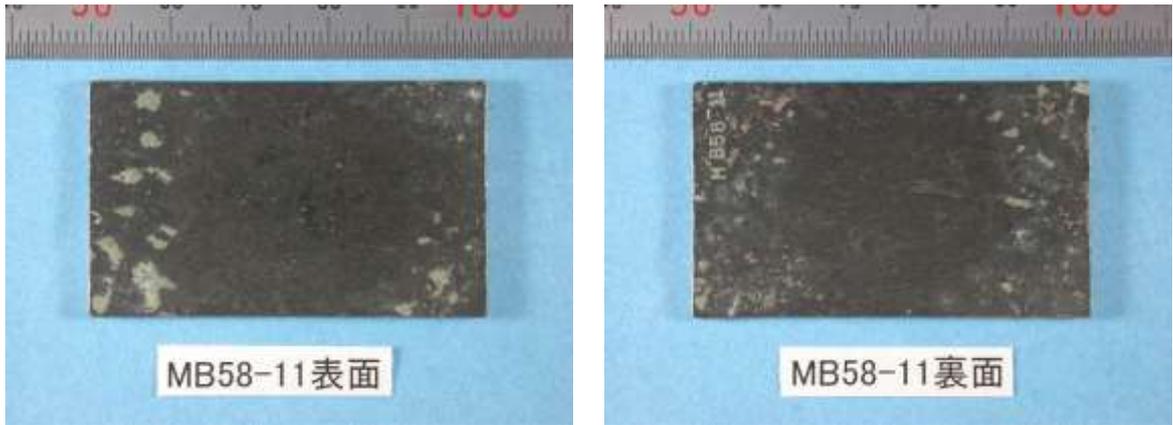


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

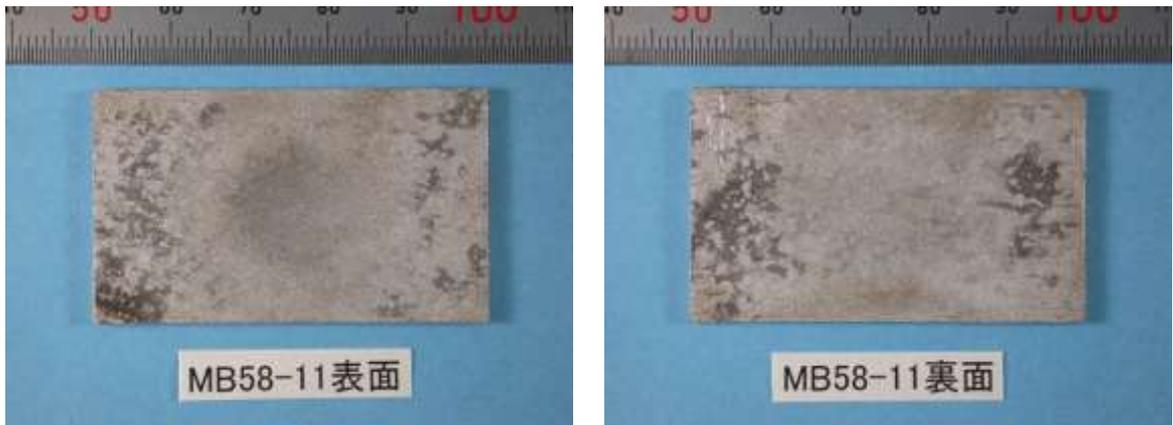


(c) 形状測定結果

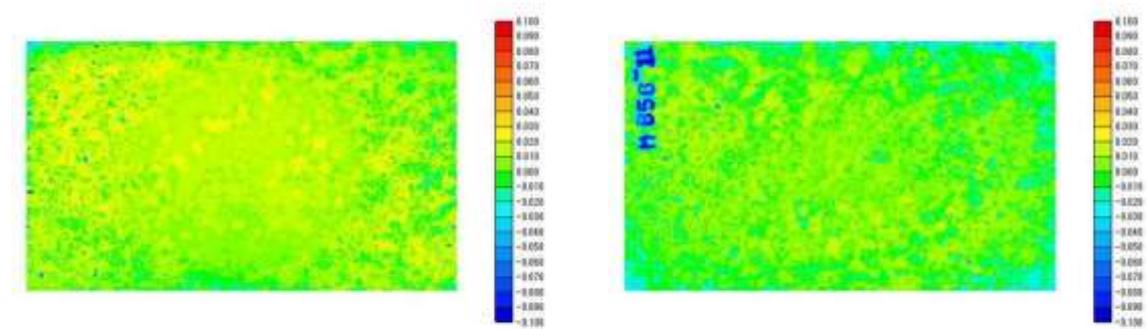
添付図 8-1-31 外観観察と形状測定結果（MB58-10：人工海水、10年、母材単独、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

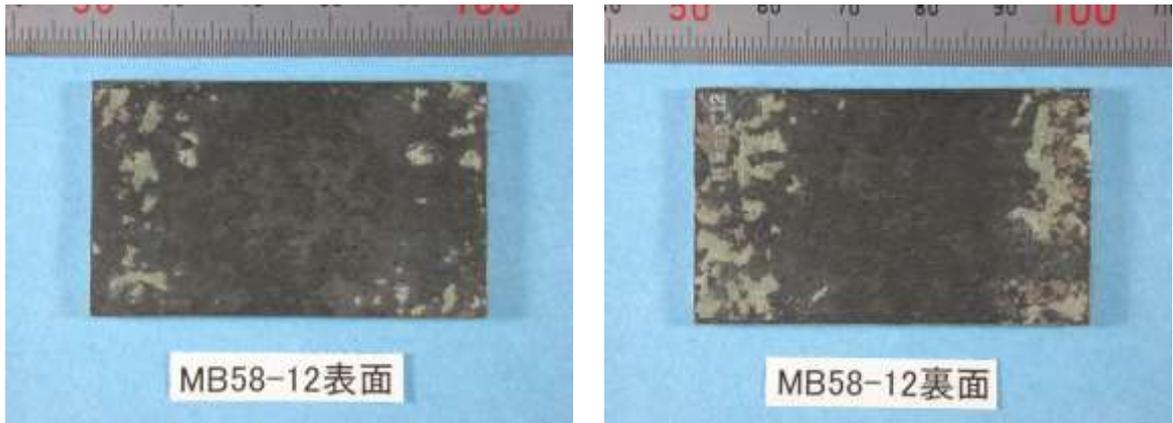


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

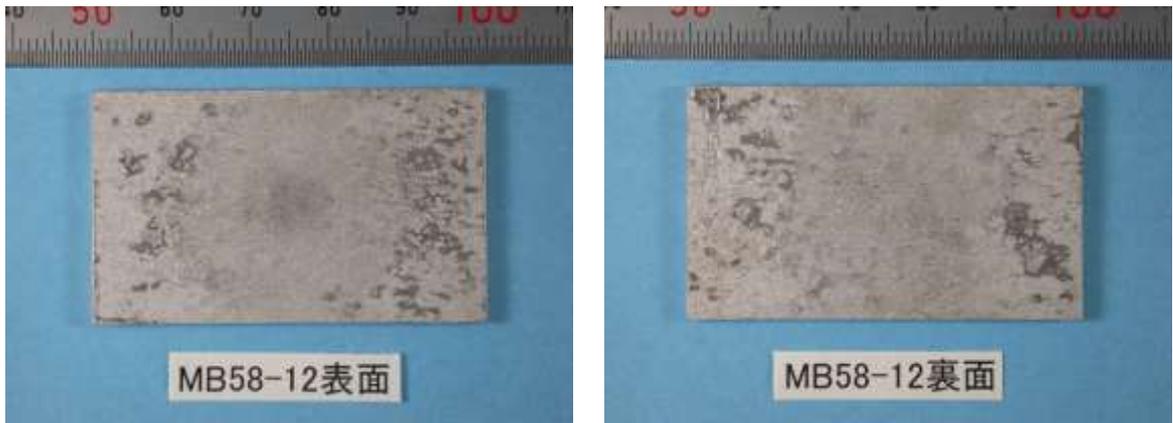


(c) 形状測定結果

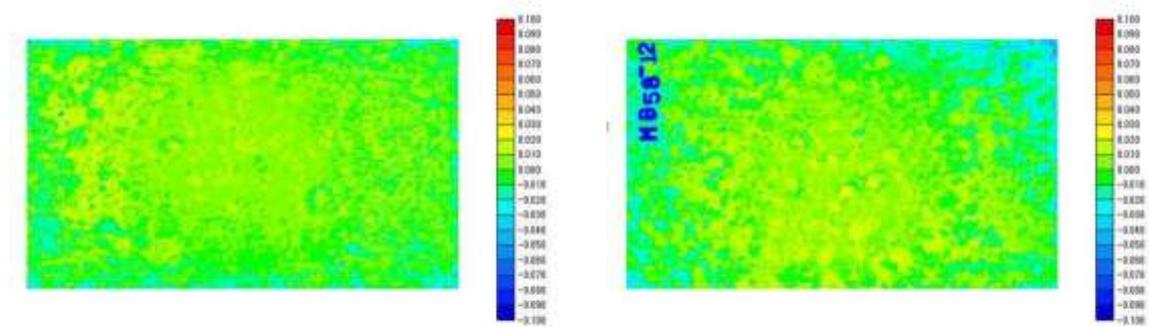
添付図 8-1-32 外観観察と形状測定結果（MB58-11：人工海水、10年、母材単独、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片



(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片



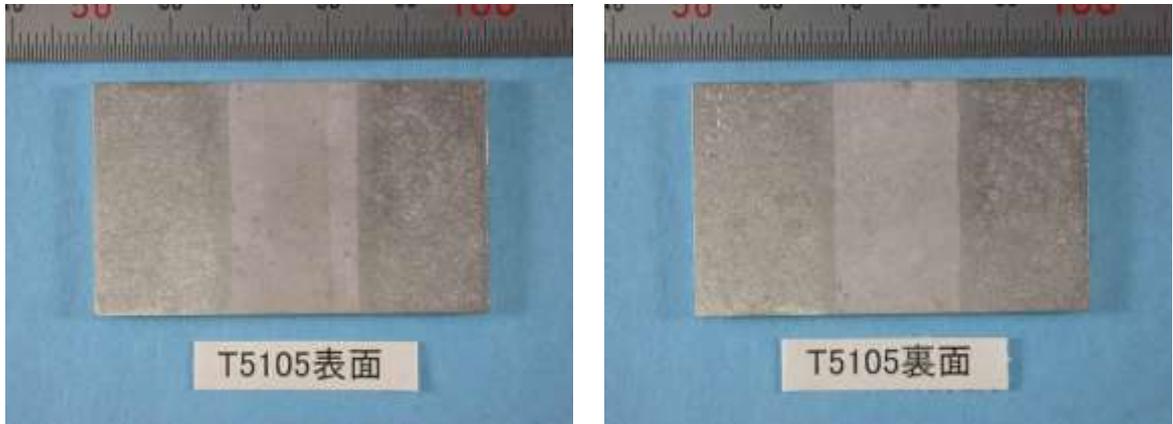
(c) 形状測定結果

添付図 8-1-33 外観観察と形状測定結果（MB58-12：人工海水、10年、母材単独、MAG）

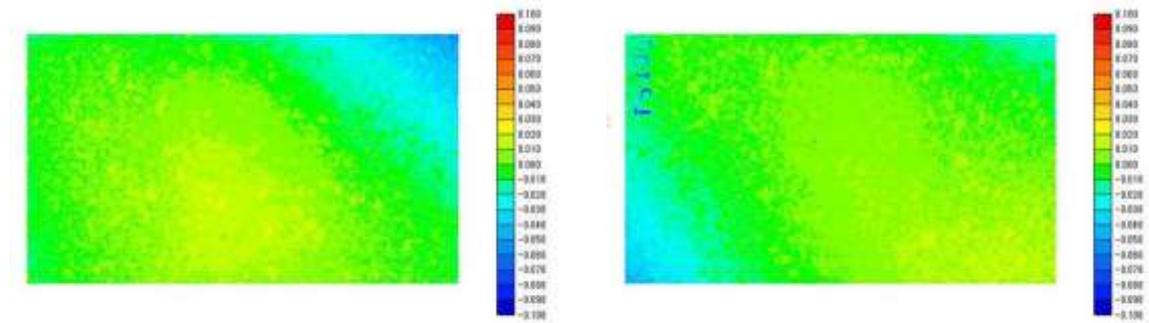
精密分析実施

精密分析実施

(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

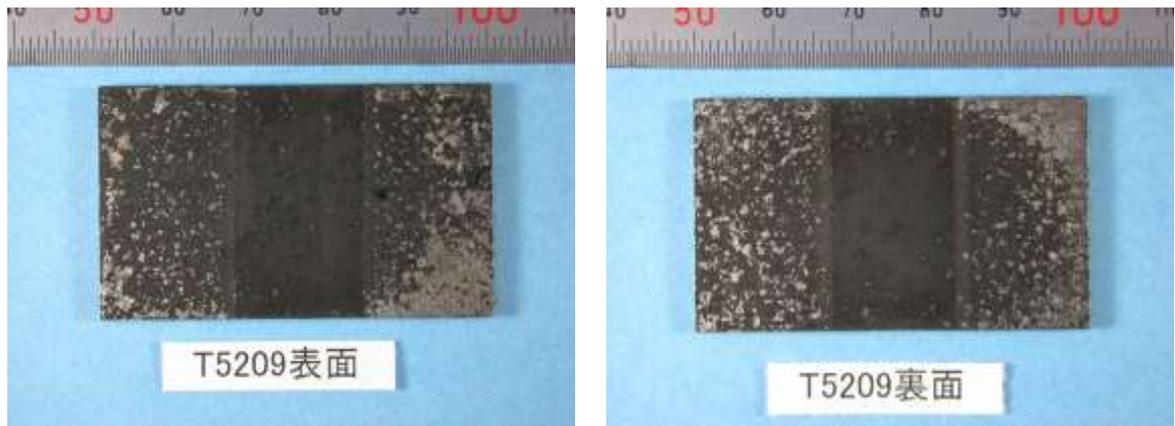


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

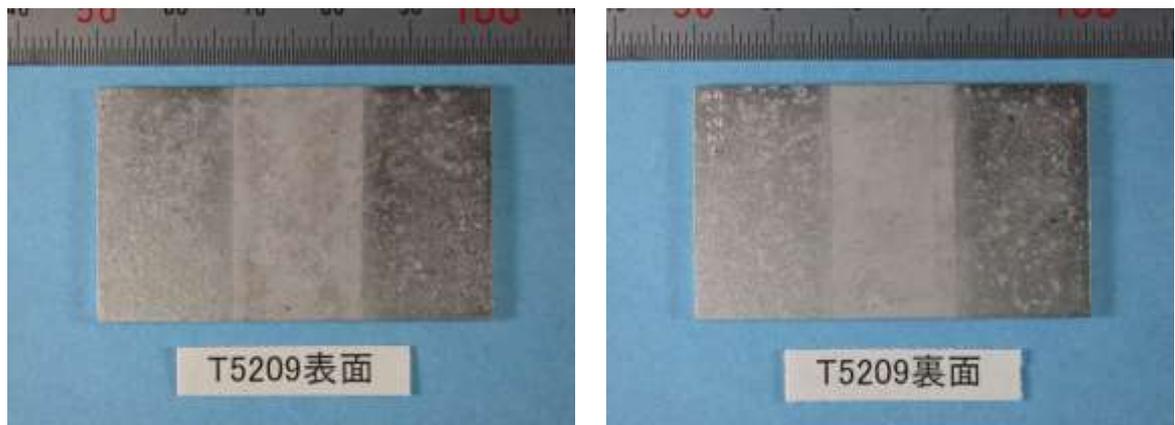


(c) 形状測定結果

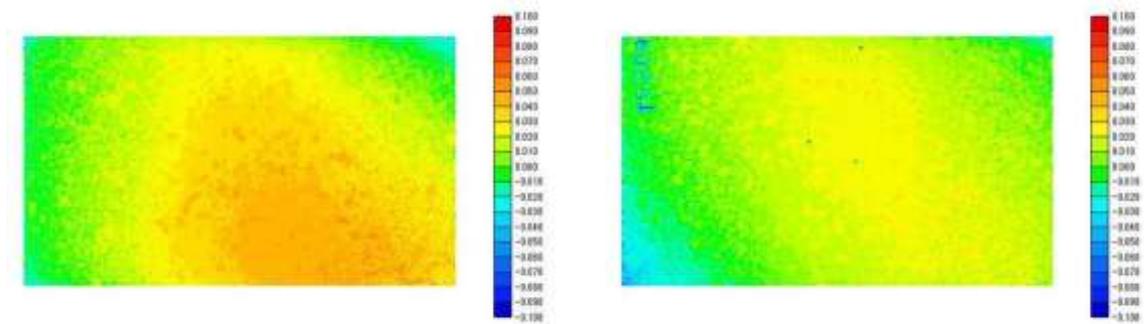
添付図 8-1-34 外観観察と形状測定結果（T5105：人工淡水、5年、溶接付き、TIG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

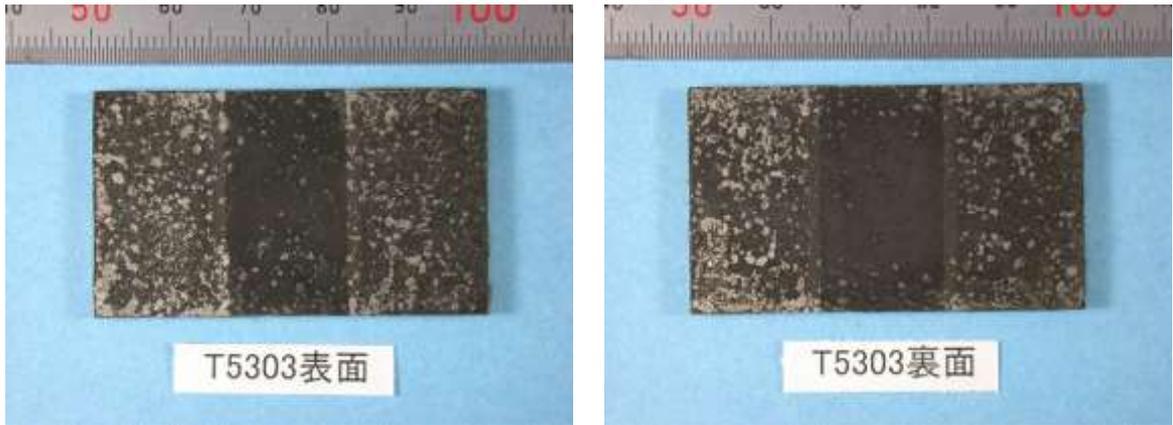


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

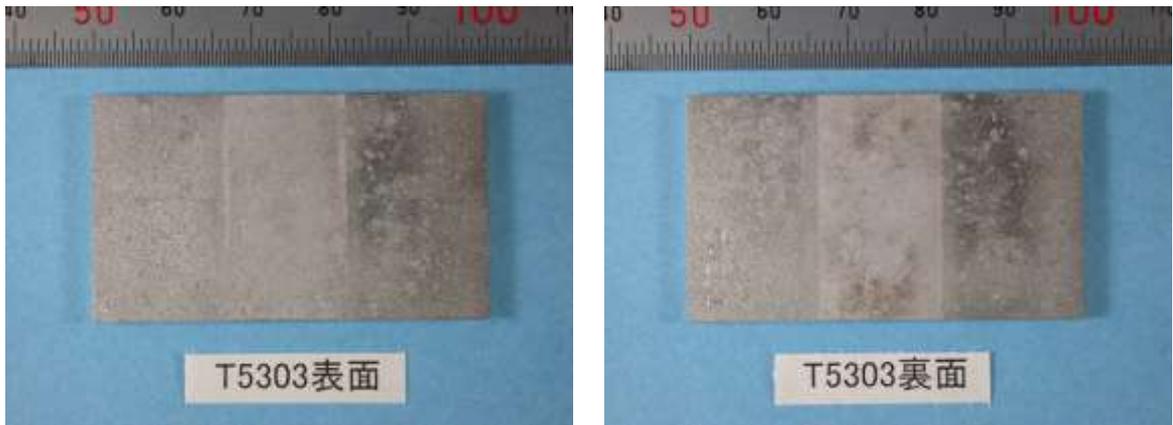


(c) 形状測定結果

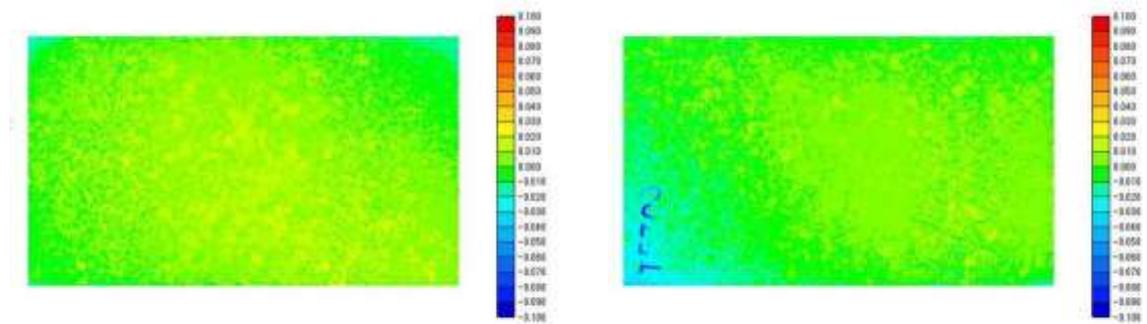
添付図 8-1-35 外観観察と形状測定結果（T5209：人工淡水、5年、溶接付き、TIG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片



(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片



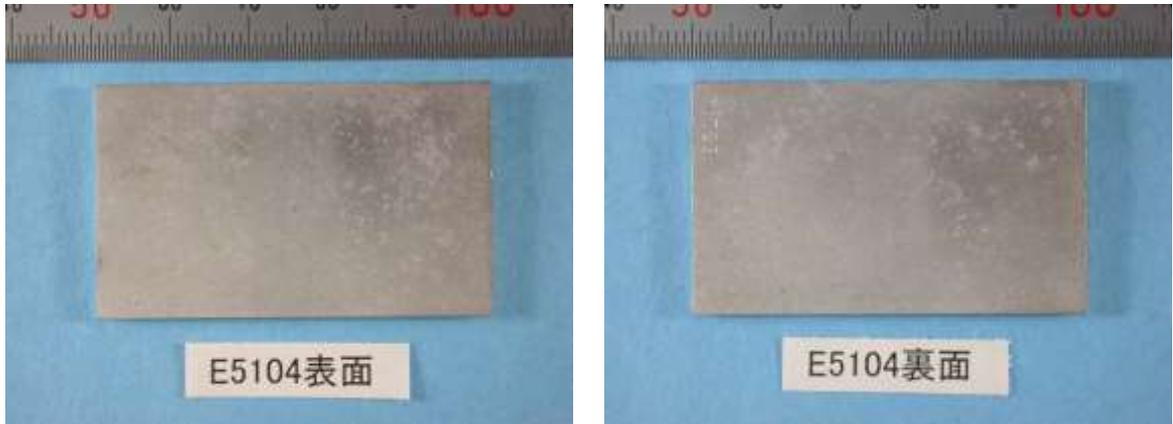
(c) 形状測定結果

添付図 8-1-36 外観観察と形状測定結果（T5303：人工淡水、5年、溶接付き、TIG）

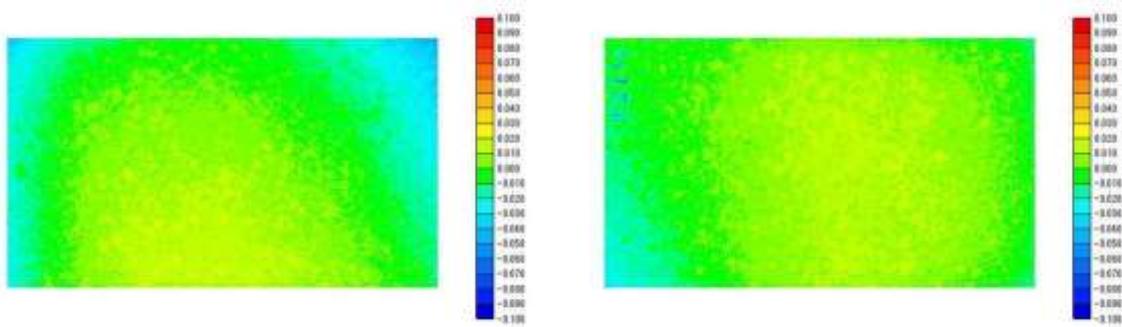
精密分析実施

精密分析実施

(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

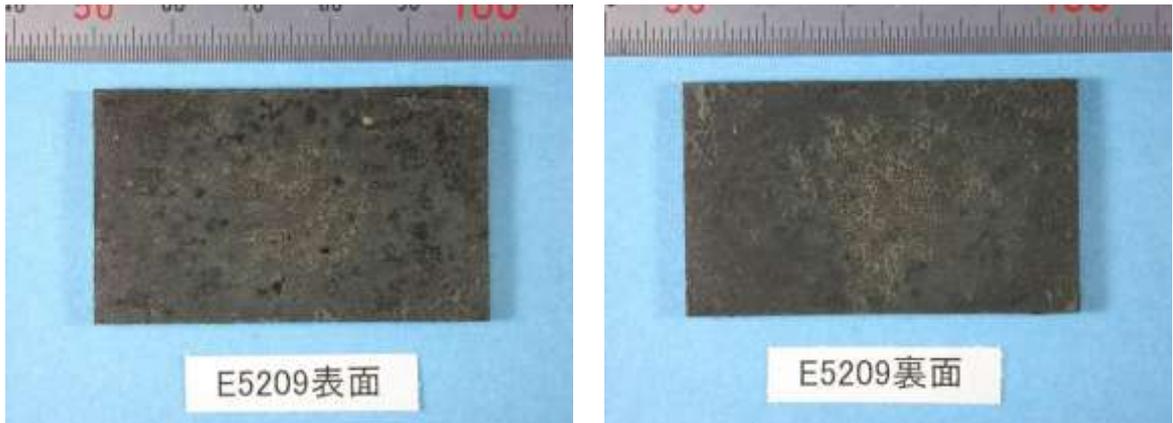


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

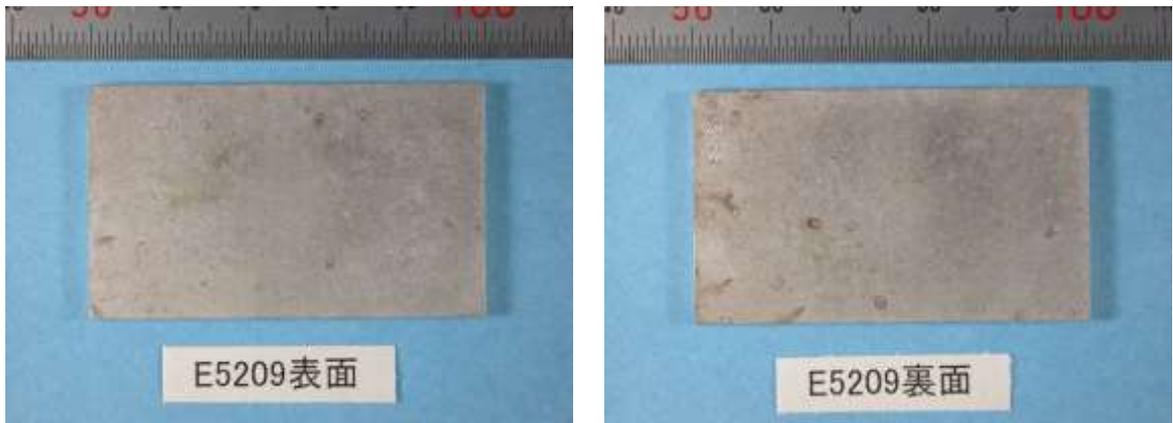


(c) 形状測定結果

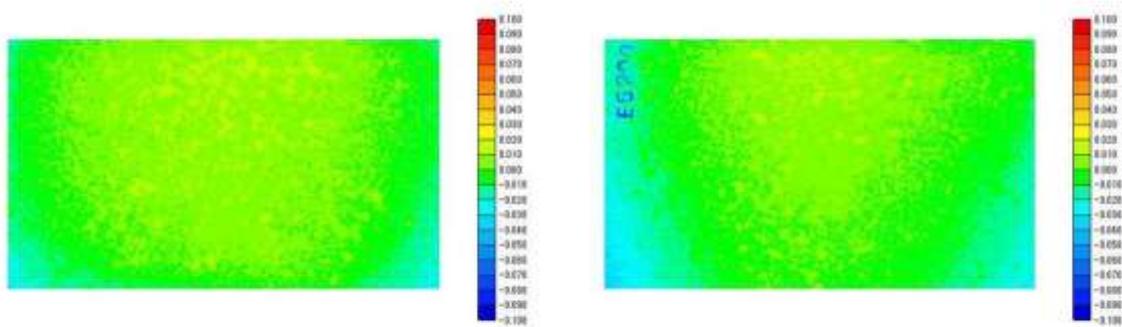
添付図 8-1-37 外観観察と形状測定結果（E5104：人工淡水、5年、溶接付き、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

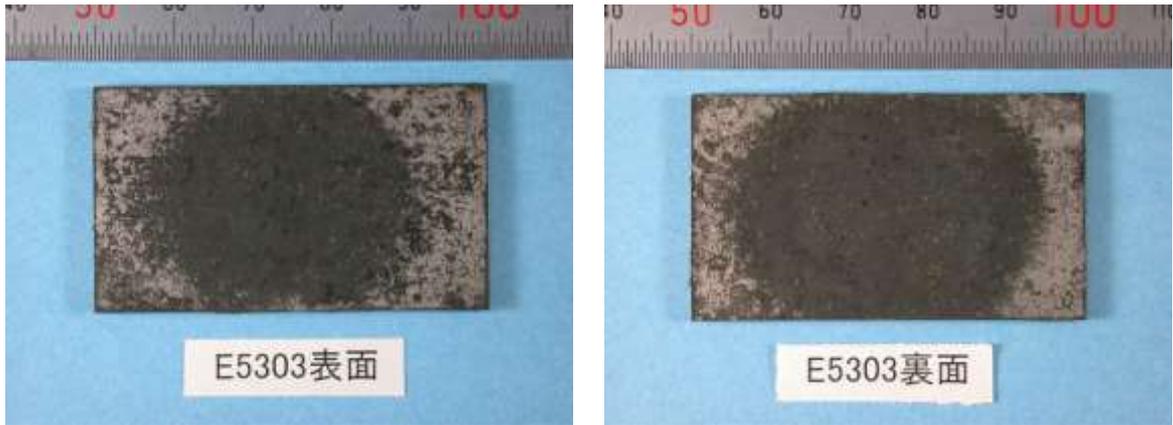


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

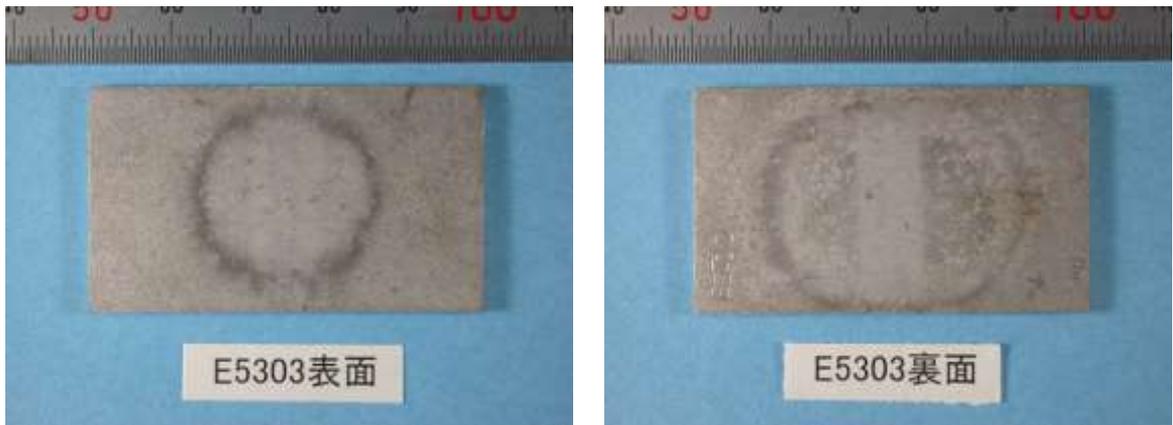


(c) 形状測定結果

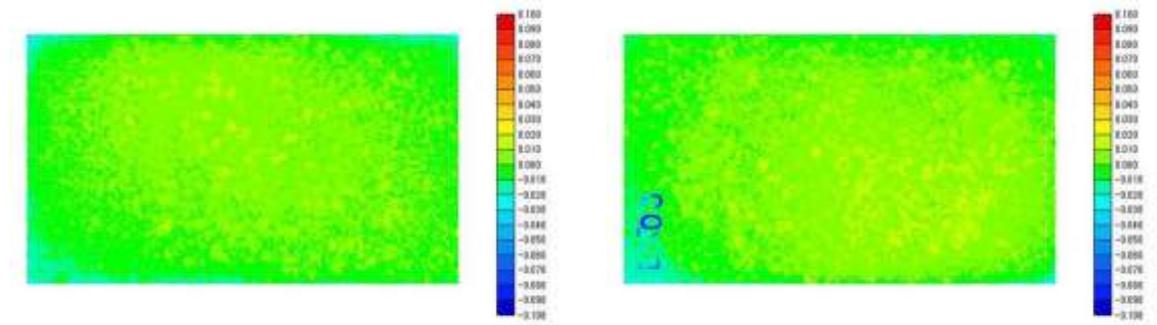
添付図 8-1-38 外観観察と形状測定結果（E5209：人工淡水、5年、溶接付き、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片



(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片



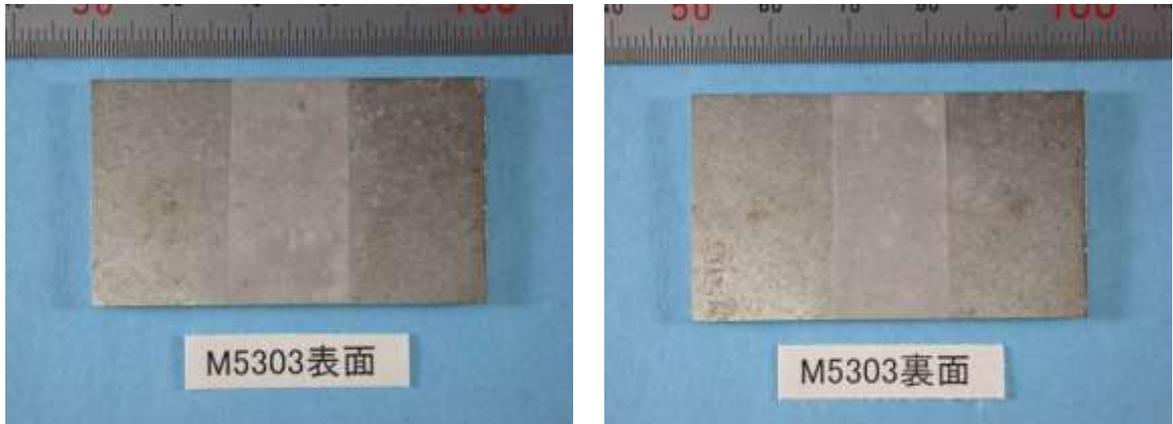
(c) 形状測定結果

添付図 8-1-39 外観観察と形状測定結果（E5303：人工淡水、5年、溶接付き、EBW）

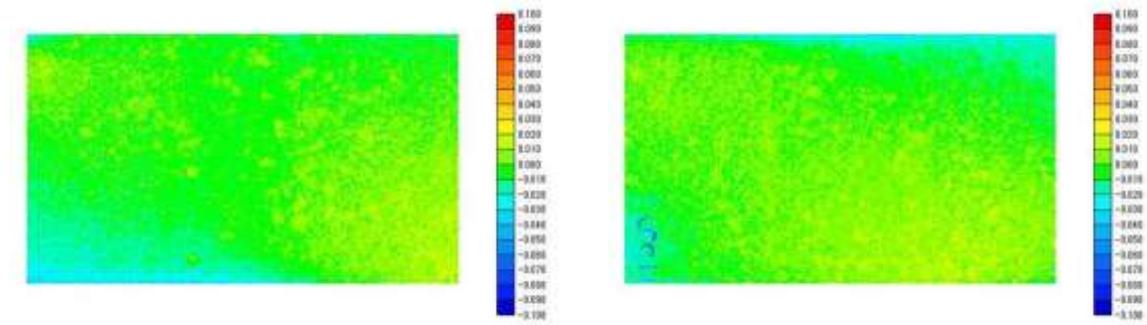
精密分析実施

精密分析実施

(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

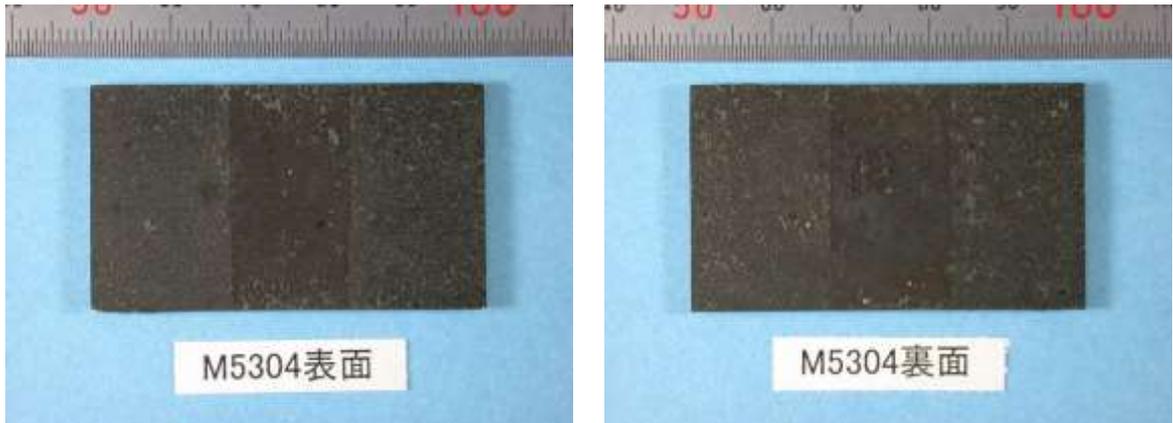


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

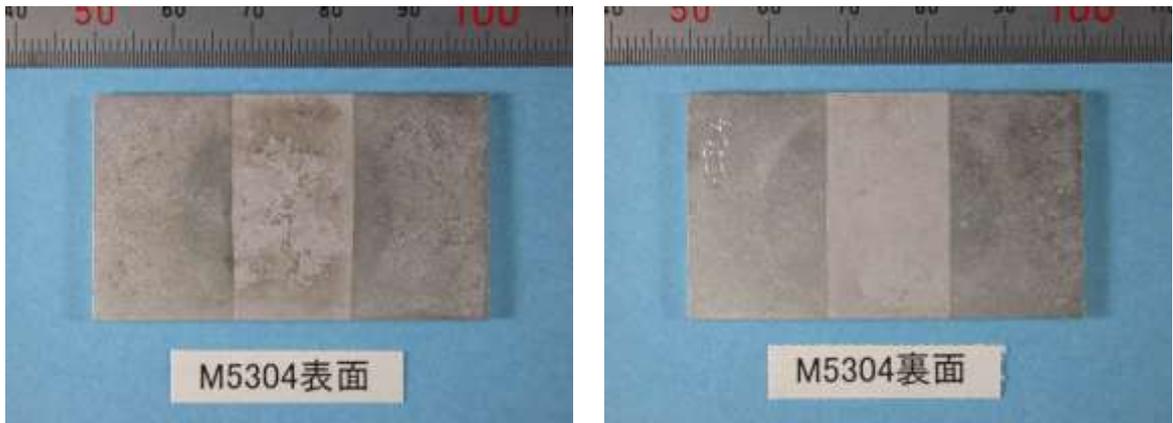


(c) 形状測定結果

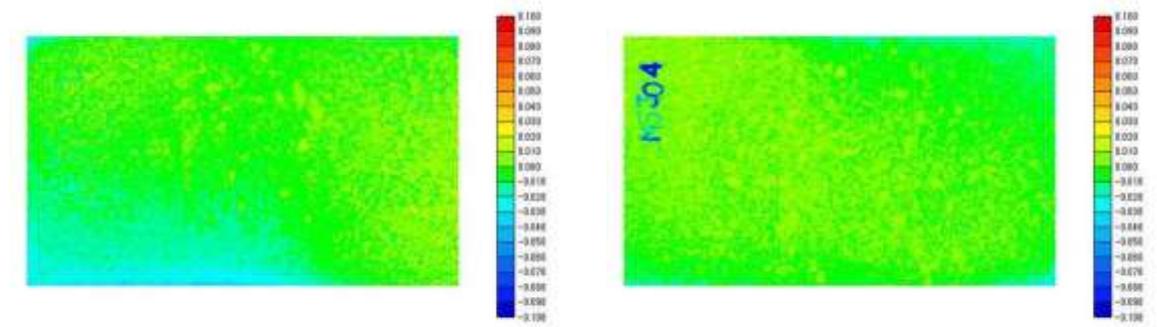
添付図 8-1-40 外観観察と形状測定結果（M5303：人工淡水、5年、溶接付き、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

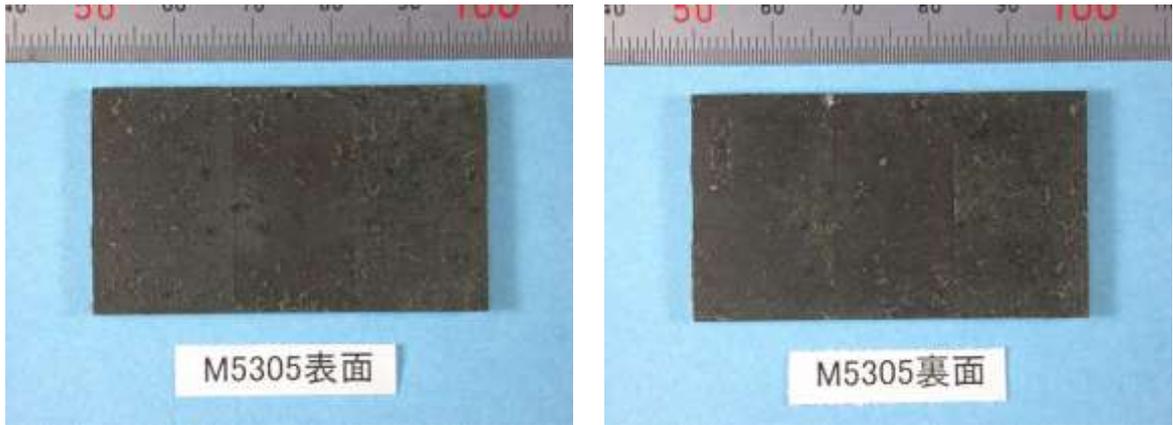


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

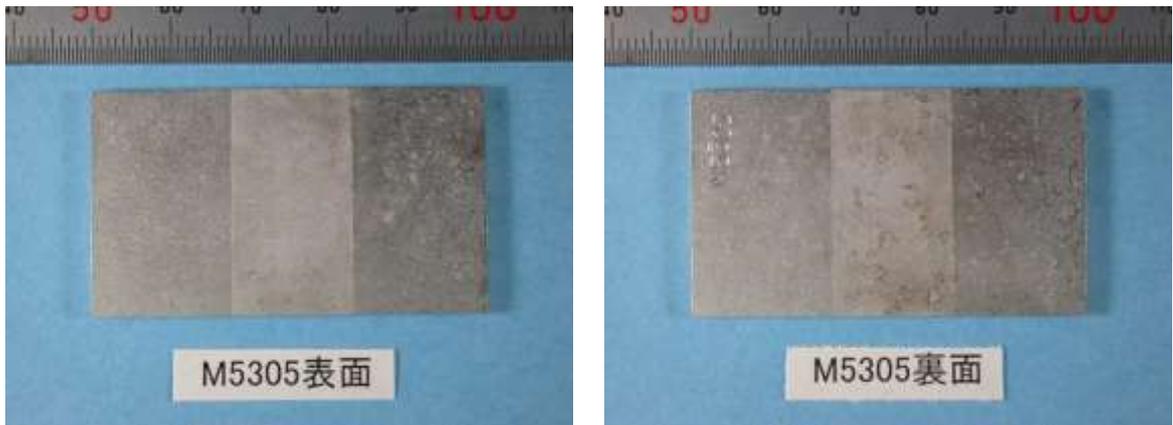


(c) 形状測定結果

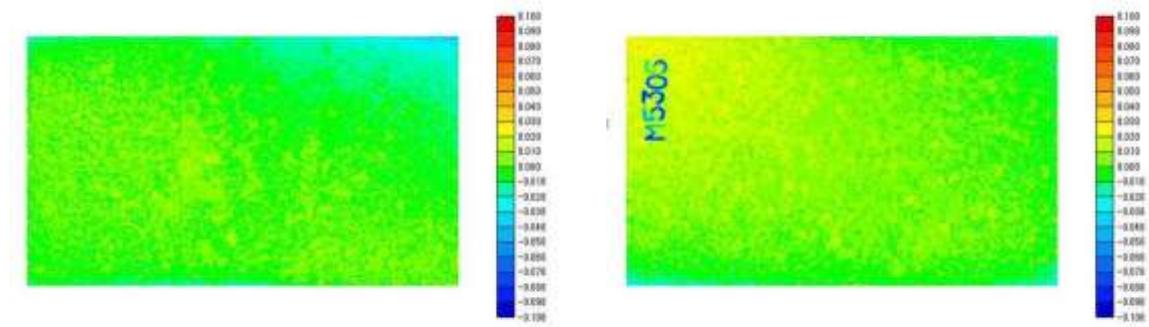
添付図 8-1-41 外観観察と形状測定結果（M5304：人工淡水、5年、溶接付き、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

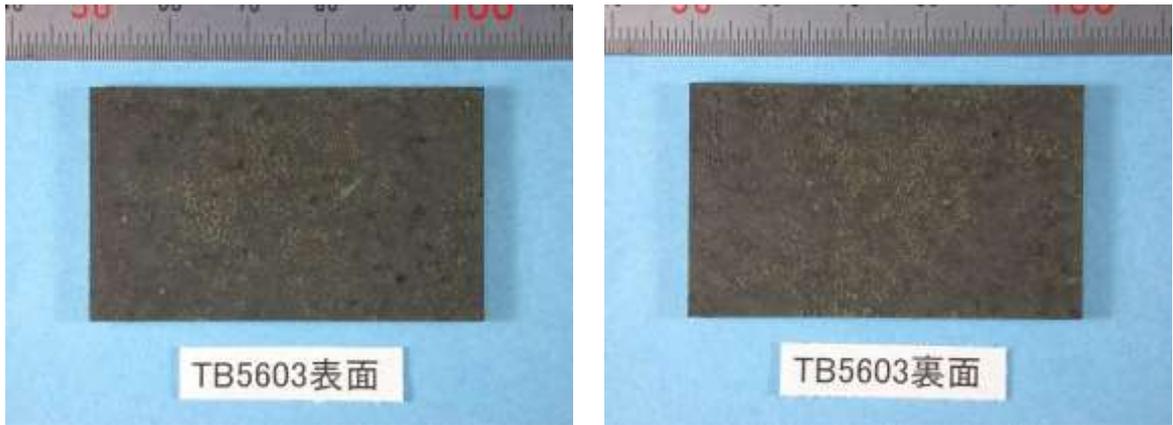


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

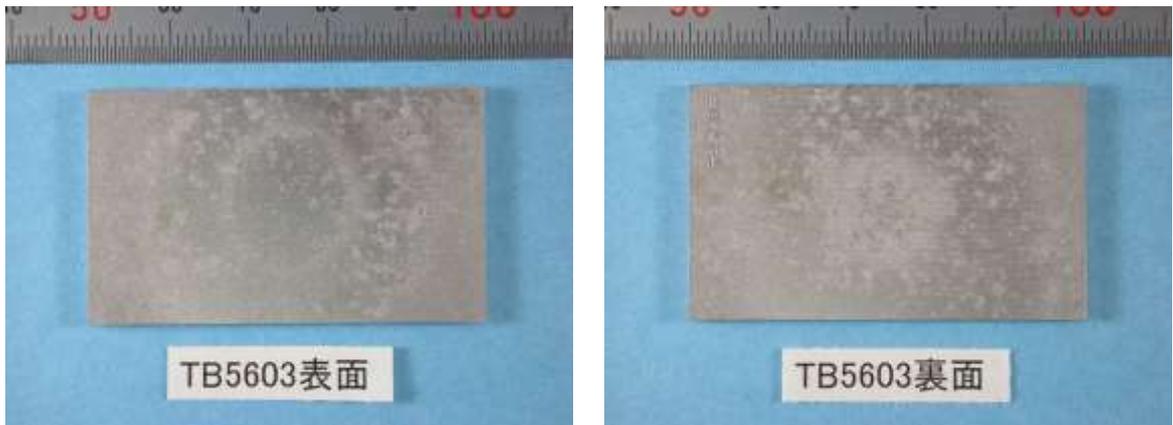


(c) 形状測定結果

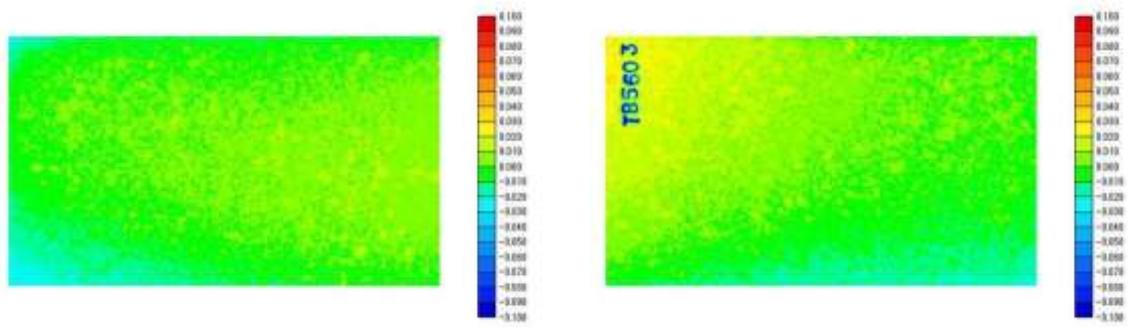
添付図 8-1-42 外観観察と形状測定結果（M5305：人工淡水、5年、溶接付き、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

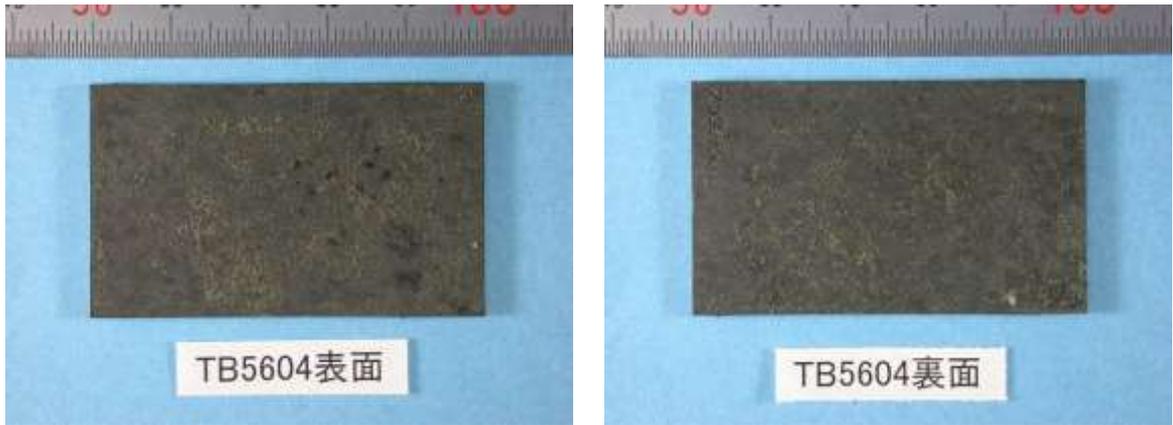


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

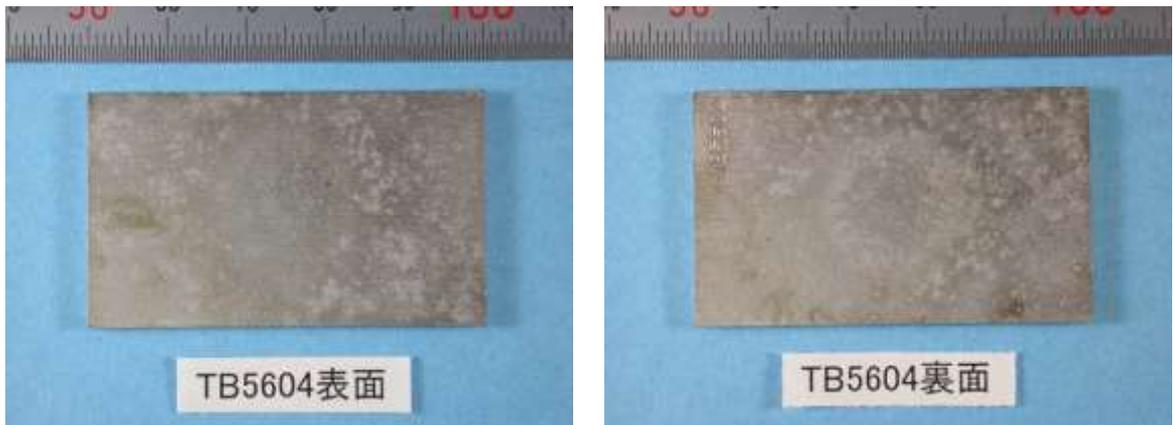


(c) 形状測定結果

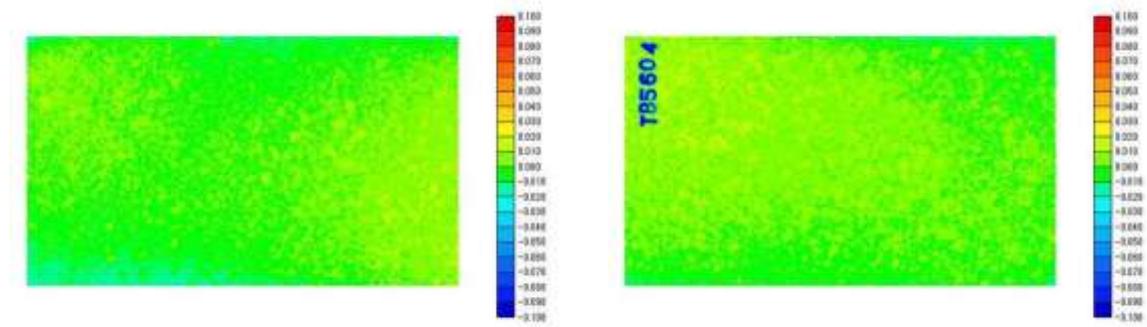
添付図 8-1-43 外観観察と形状測定結果（TB5603：人工淡水、5年、母材単独、TIG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

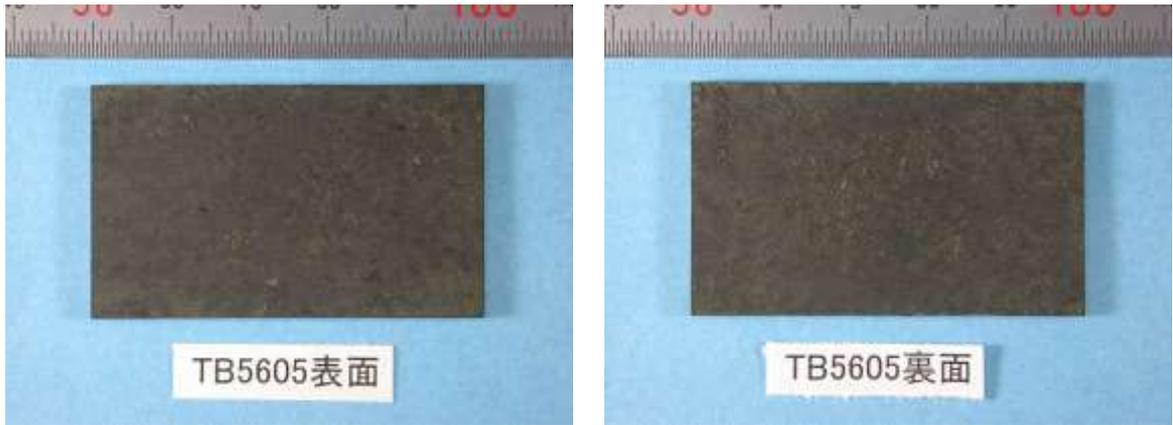


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

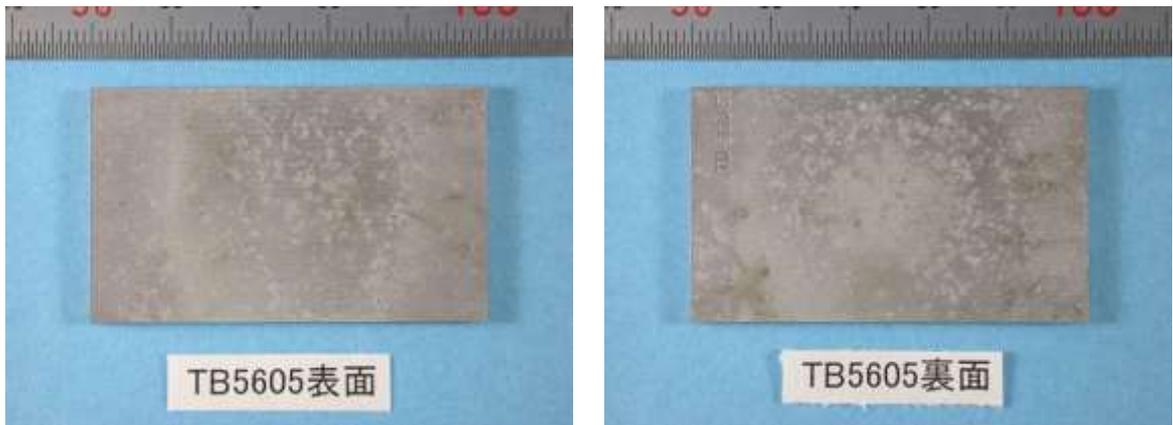


(c) 形状測定結果

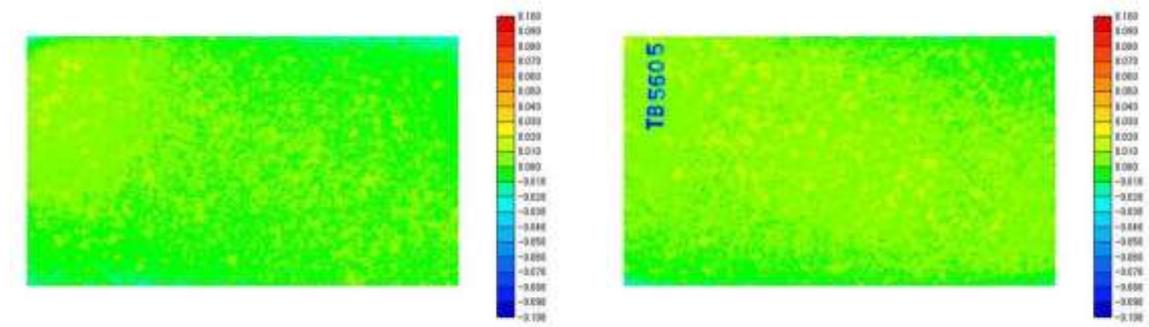
添付図 8-1-44 外観観察と形状測定結果（TB5604：人工淡水、5年、母材単独、TIG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

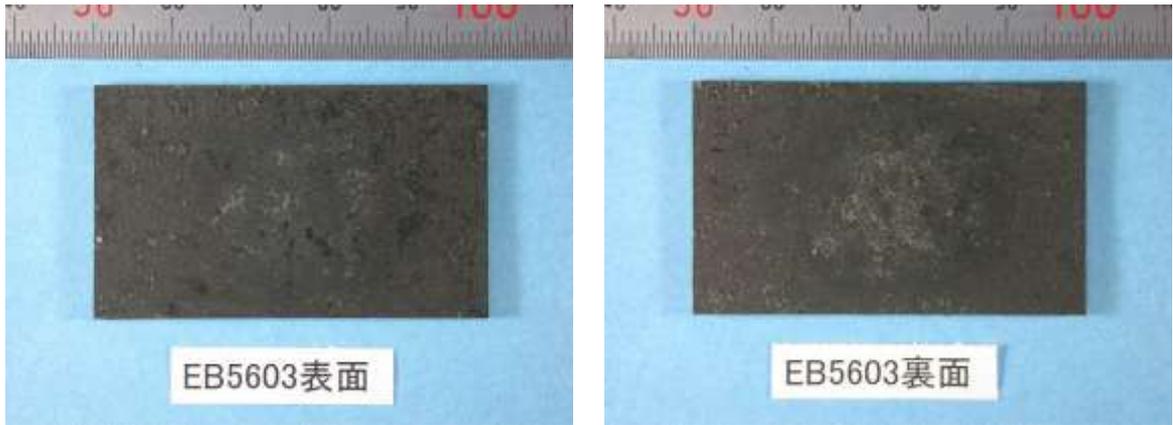


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

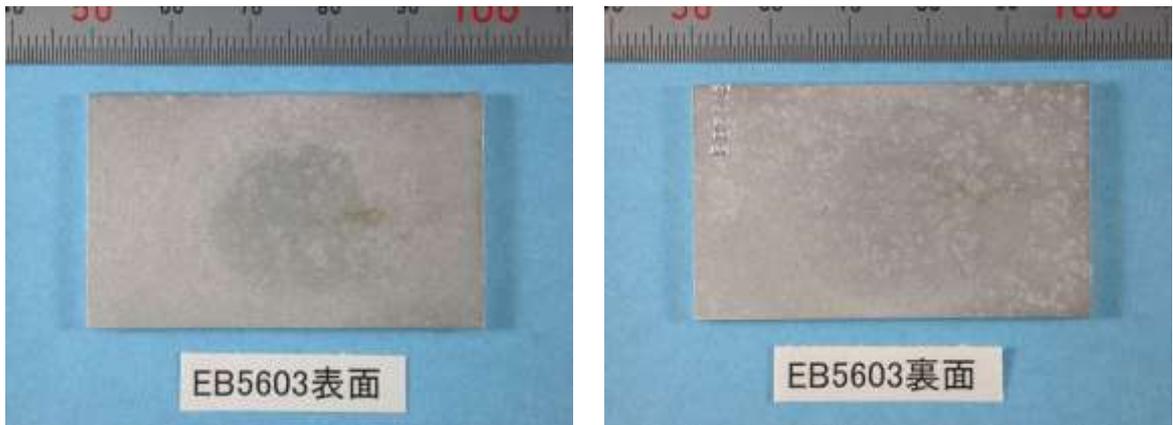


(c) 形状測定結果

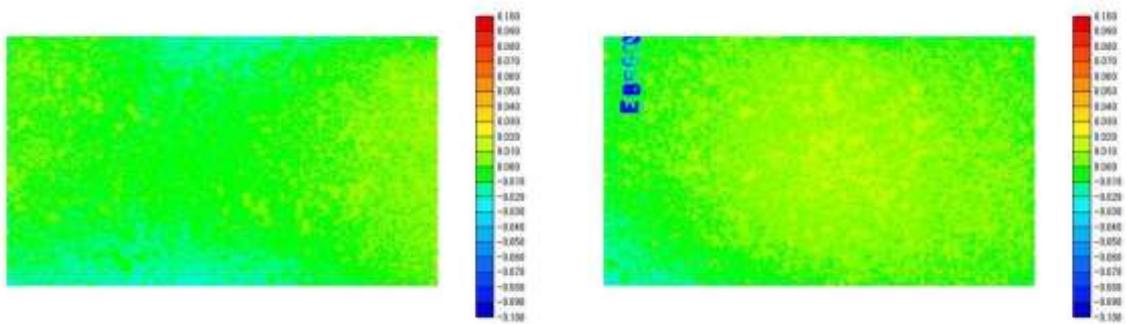
添付図 8-1-45 外観観察と形状測定結果（TB5605：人工淡水、5年、母材単独、TIG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

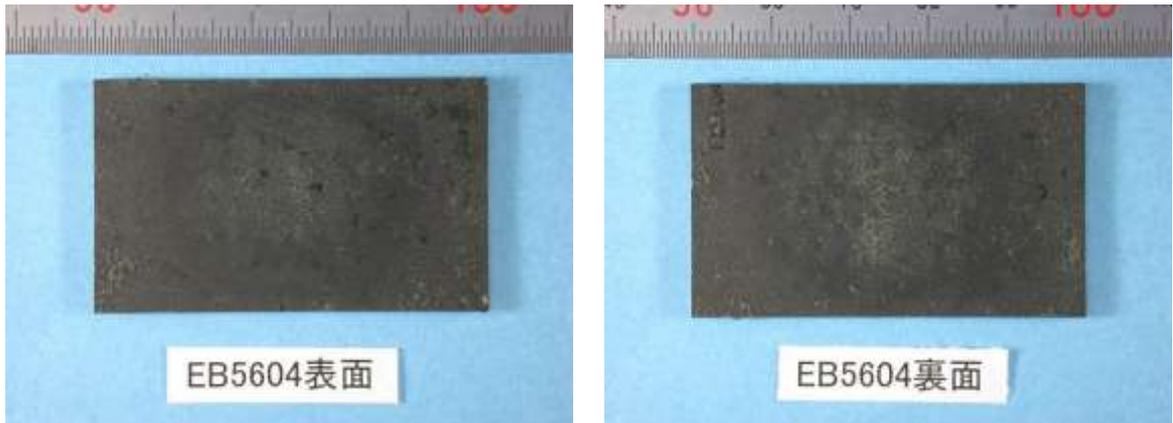


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

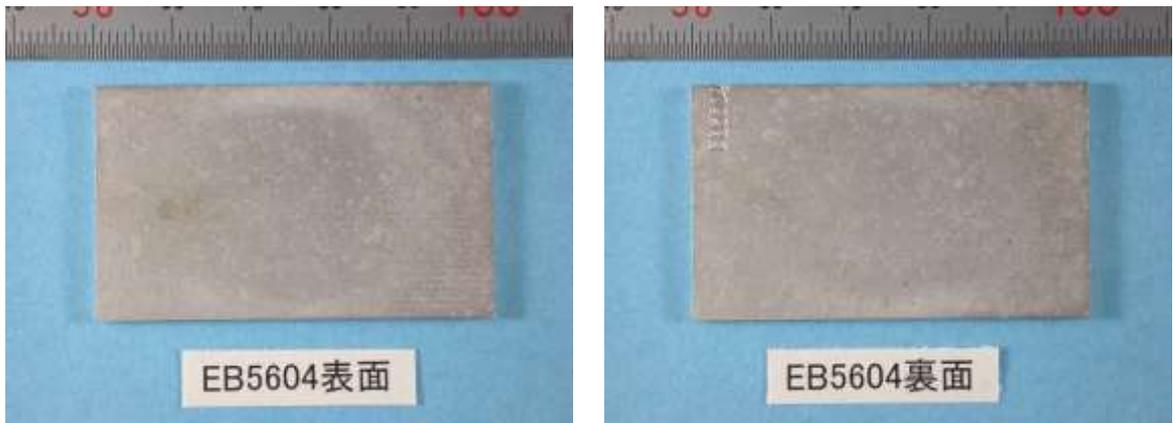


(c) 形状測定結果

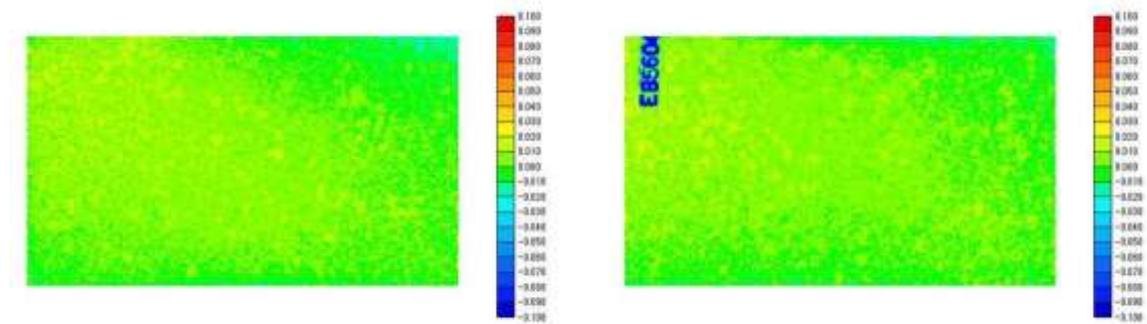
添付図 8-1-46 外観観察と形状測定結果（EB5603：人工淡水、5年、母材単独、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

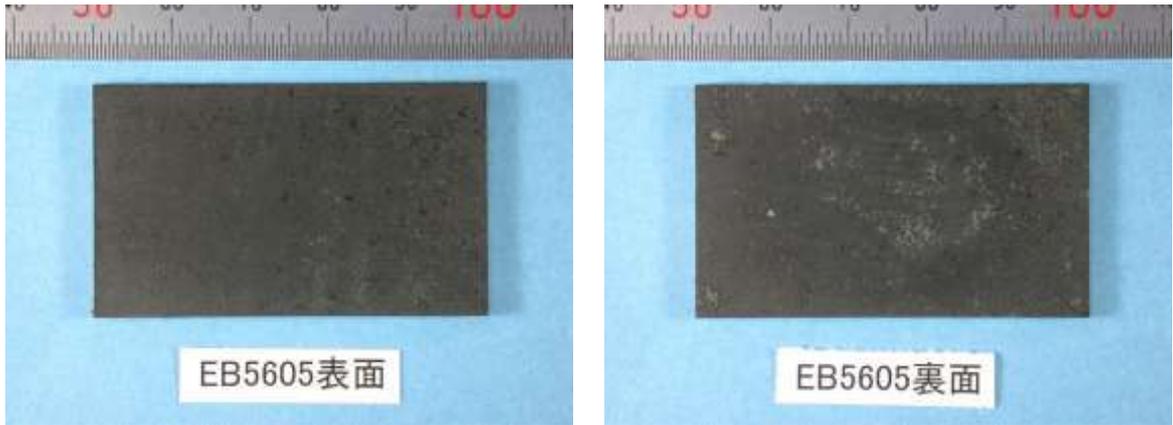


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

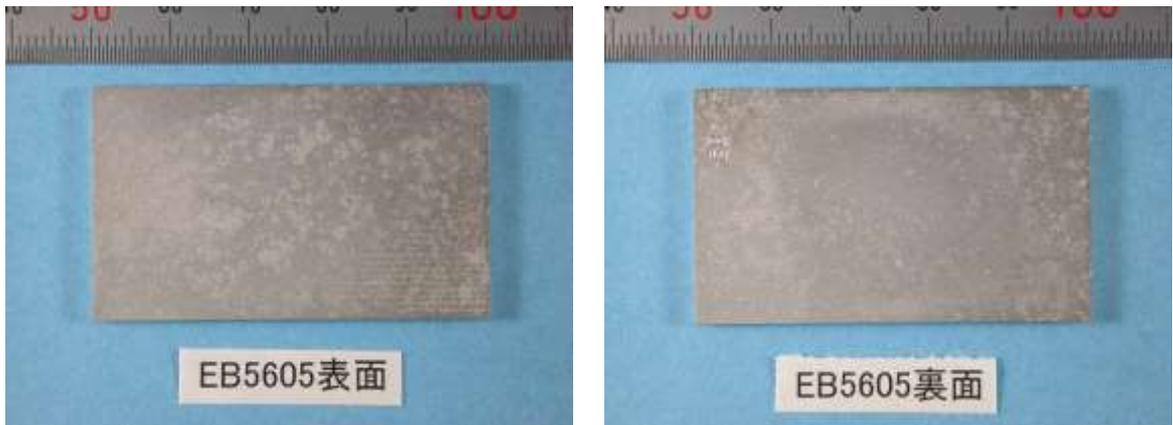


(c) 形状測定結果

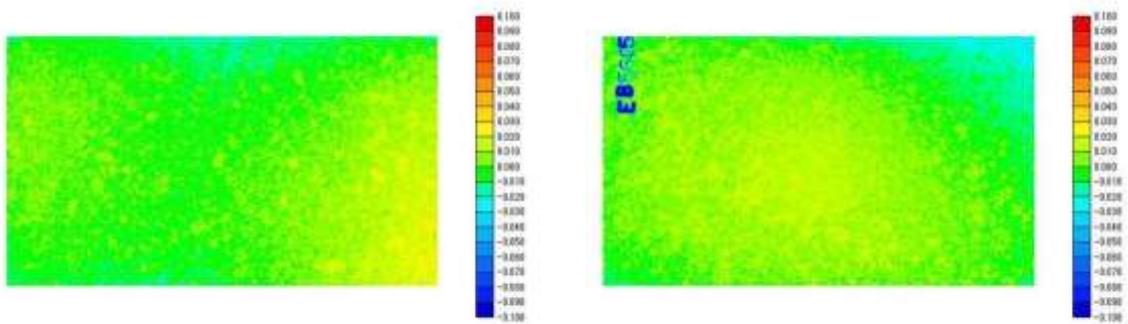
添付図 8-1-47 外観観察と形状測定結果（EB5604：人工淡水、5年、母材単独、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

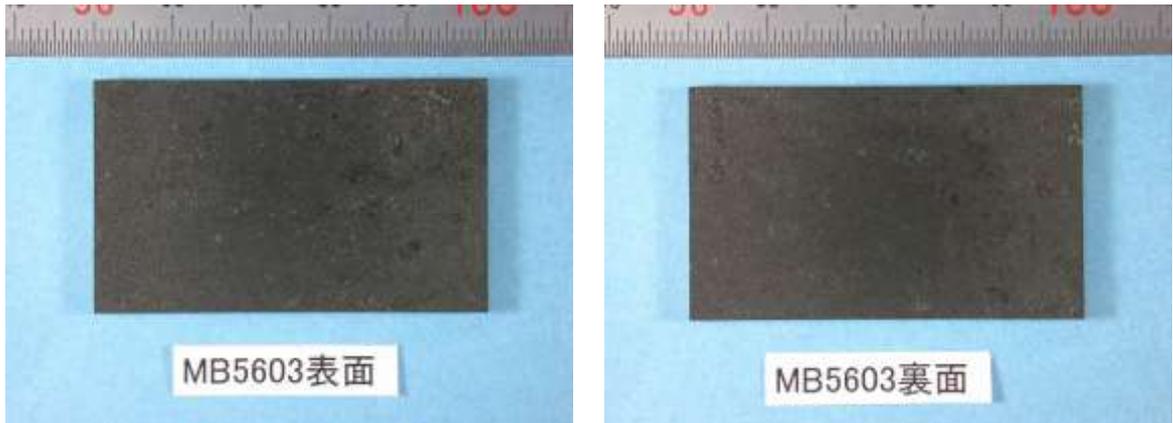


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

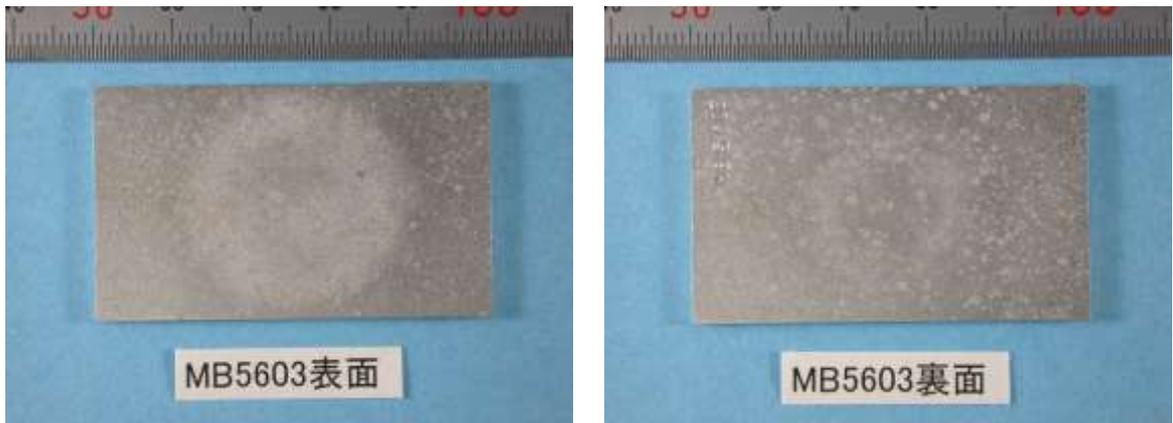


(c) 形状測定結果

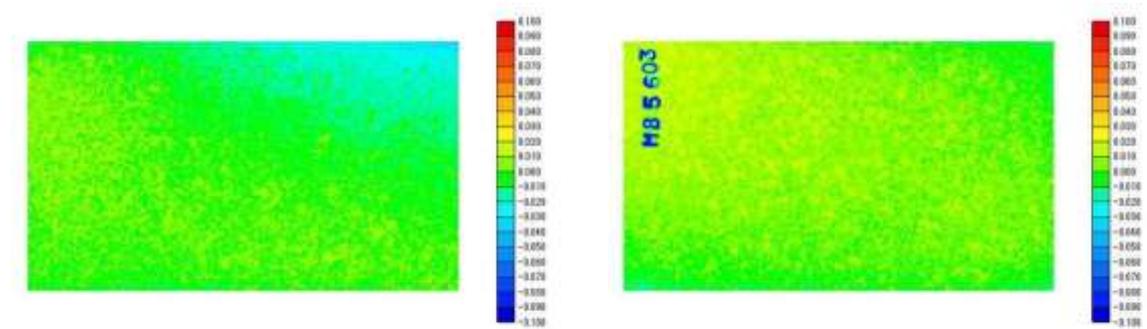
添付図 8-1-48 外観観察と形状測定結果（EB5605：人工淡水、5年、母材単独、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

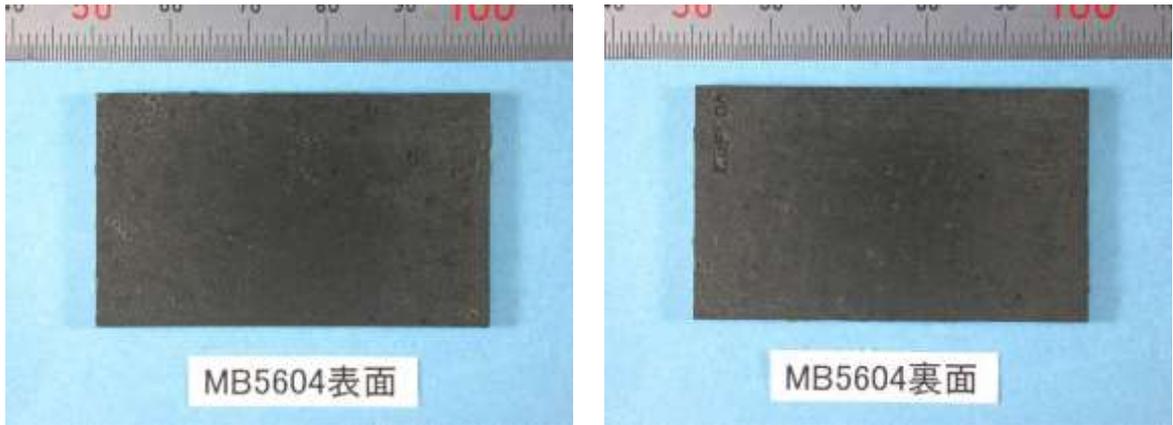


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

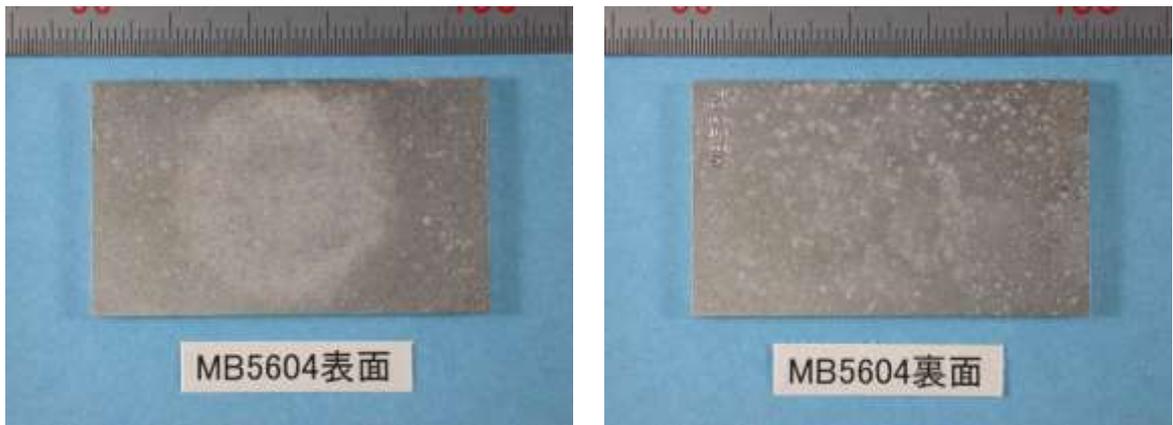


(c) 形状測定結果

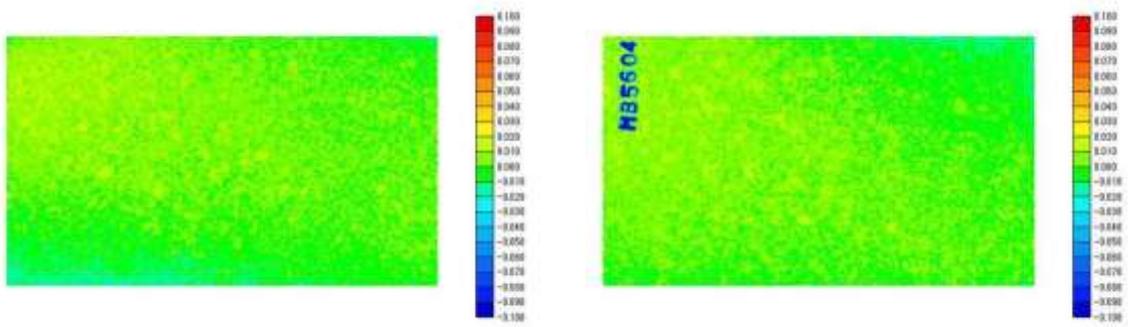
添付図 8-1-49 外観観察と形状測定結果（MB5603：人工淡水、5年、母材単独、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

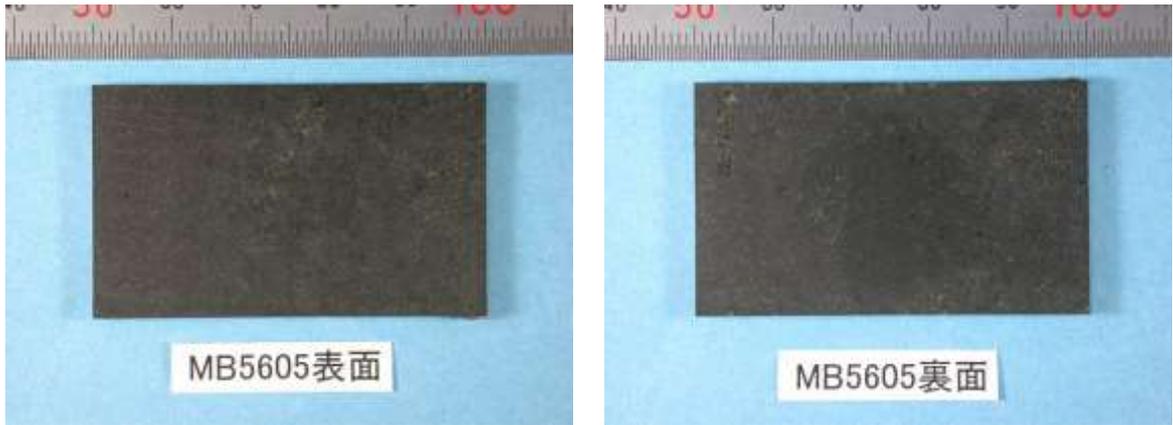


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

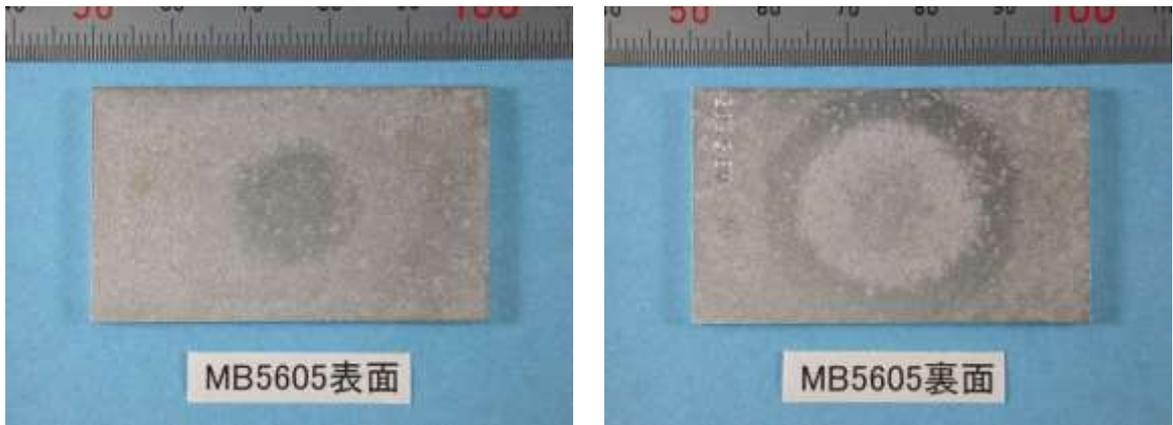


(c) 形状測定結果

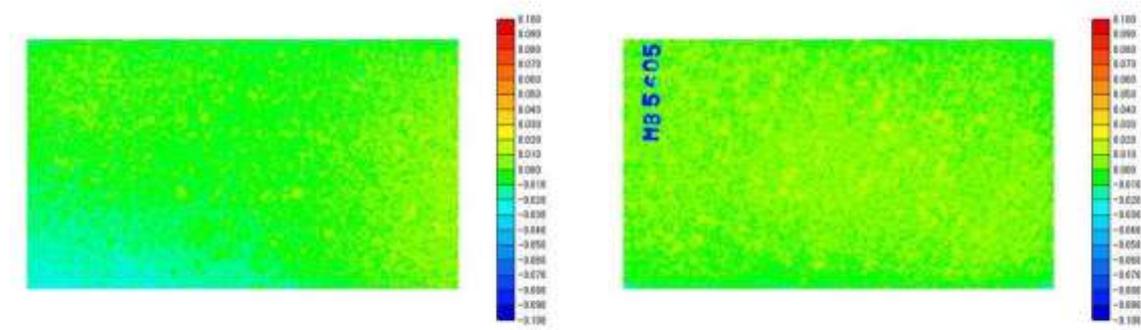
添付図 8-1-50 外観観察と形状測定結果（MB5604：人工淡水、5年、母材単独、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片



(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片



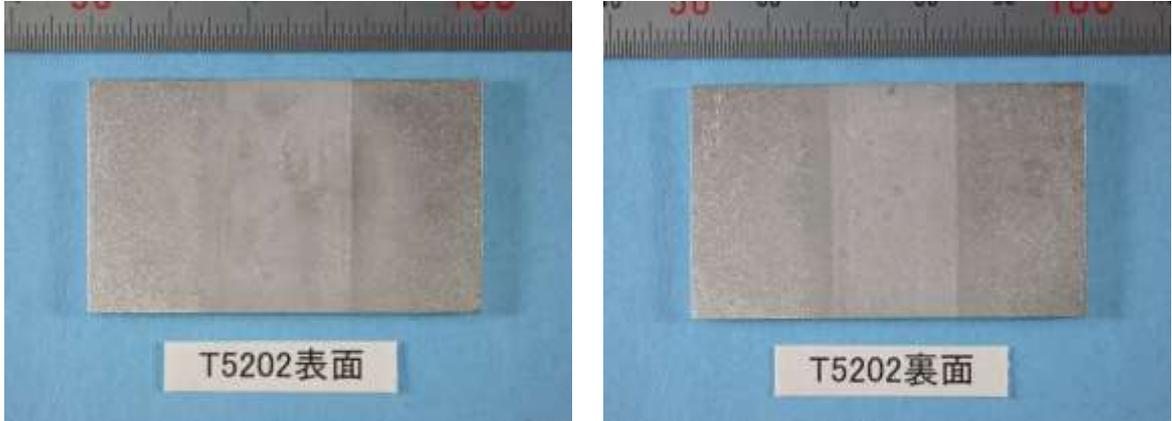
(c) 形状測定結果

添付図 8-1-51 外観観察と形状測定結果（MB5605：人工淡水、5年、母材単独、MAG）

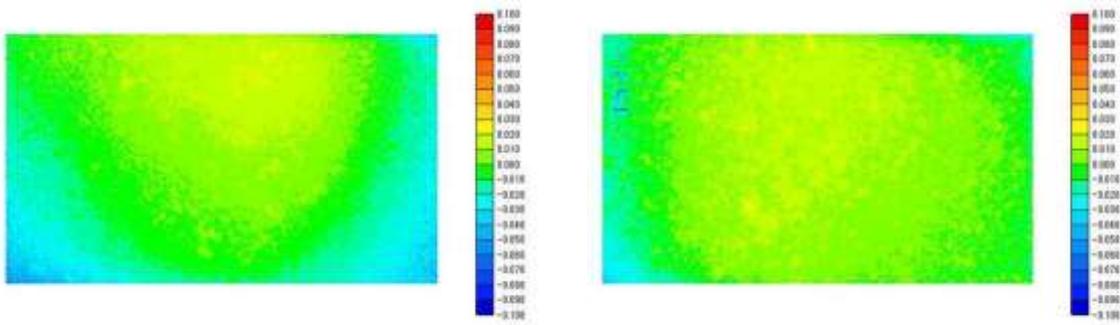
精密分析実施

精密分析実施

(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

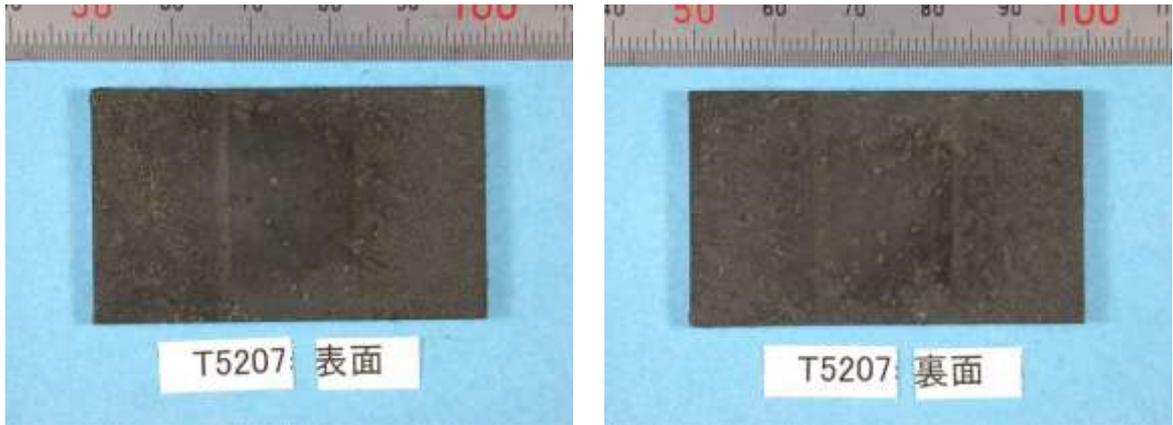


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

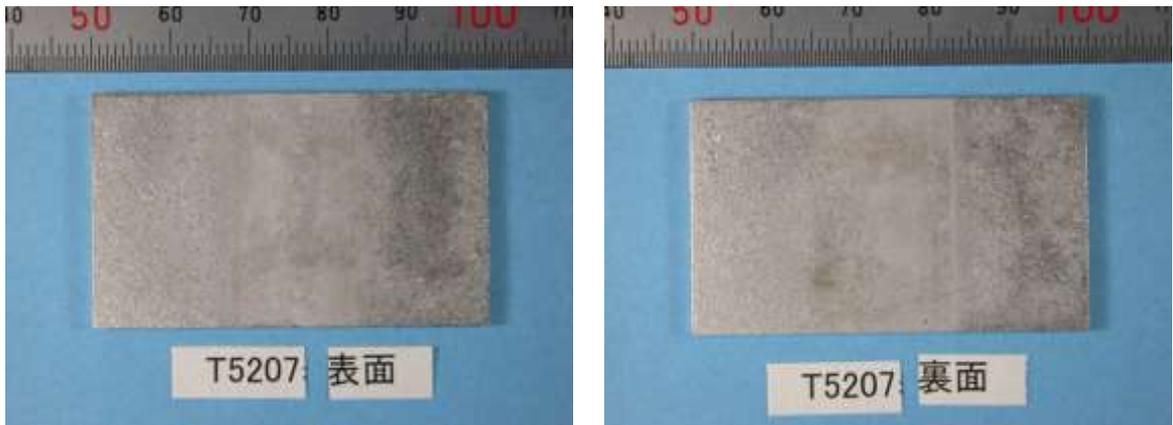


(c) 形状測定結果

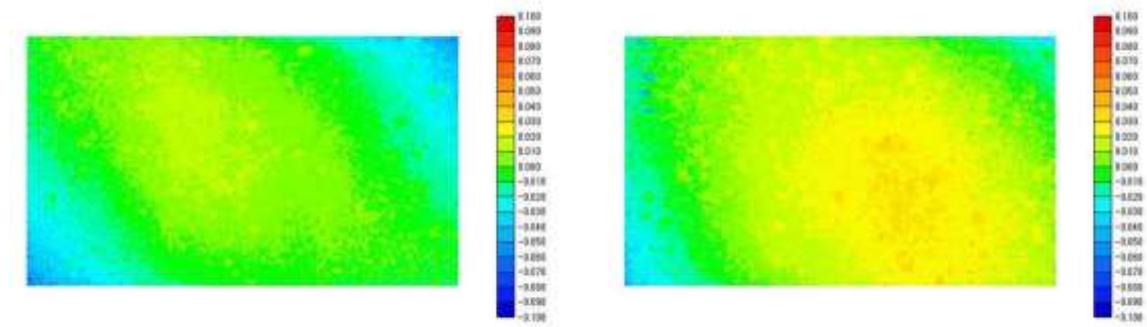
添付図 8-1-52 外観観察と形状測定結果（T5202：人工淡水、10年、溶接付き、TIG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

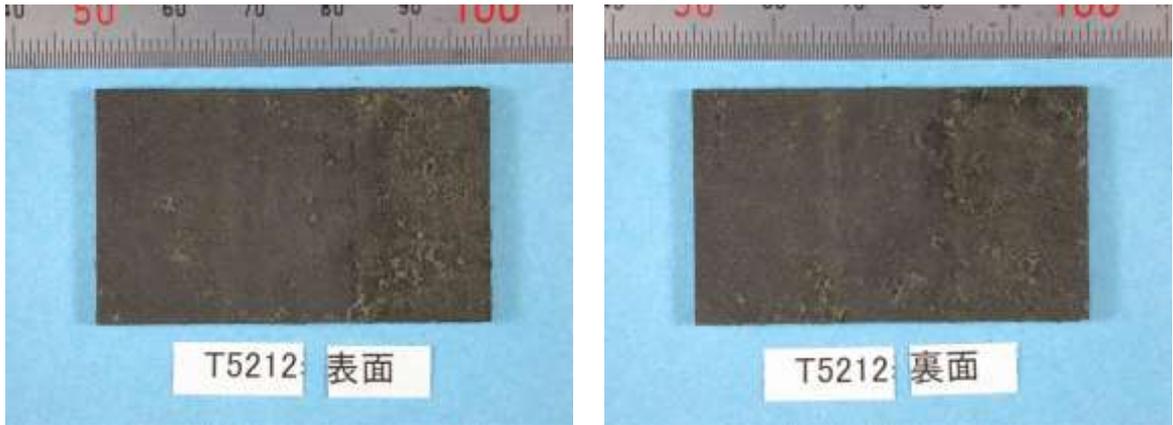


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

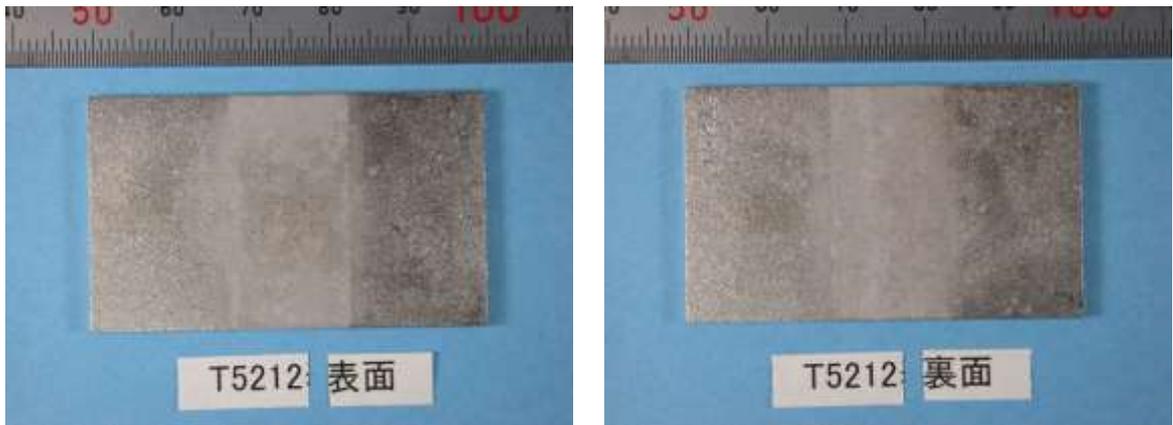


(c) 形状測定結果

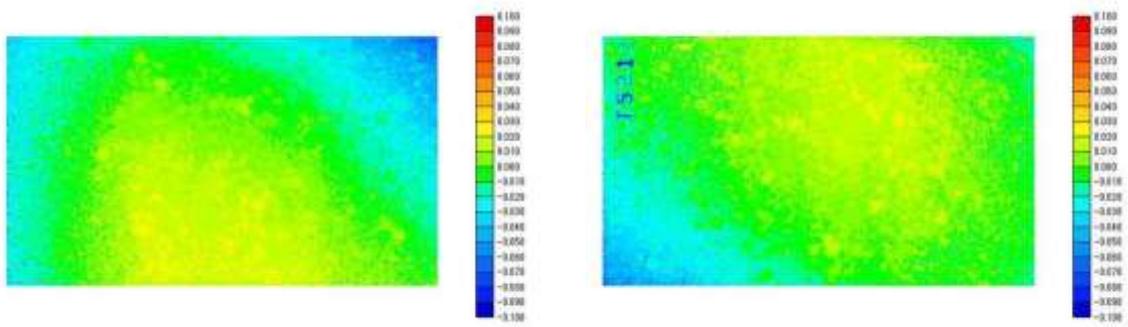
添付図 8-1-53 外観観察と形状測定結果（T5207：人工淡水、10年、溶接付き、TIG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片



(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片



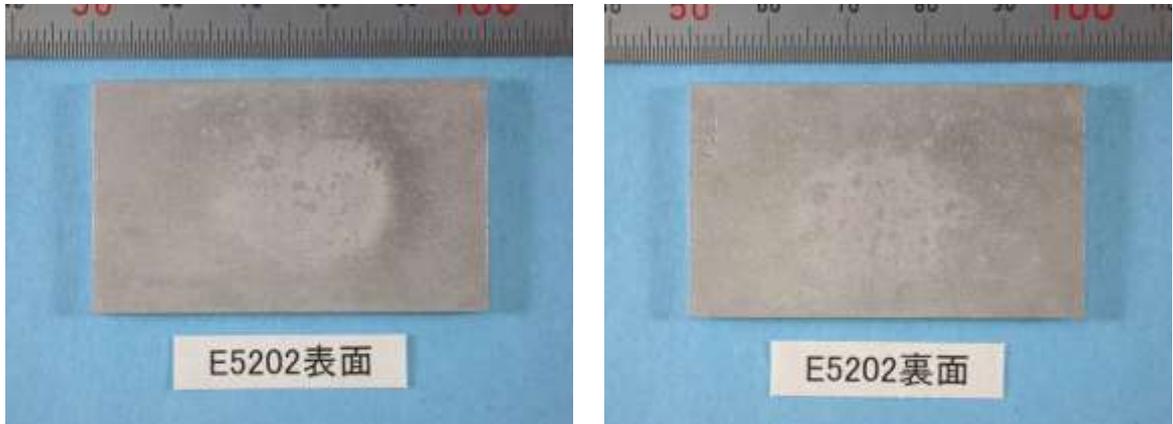
(c) 形状測定結果

添付図 8-1-54 外観観察と形状測定結果（T5212：人工淡水、10年、溶接付き、TIG）

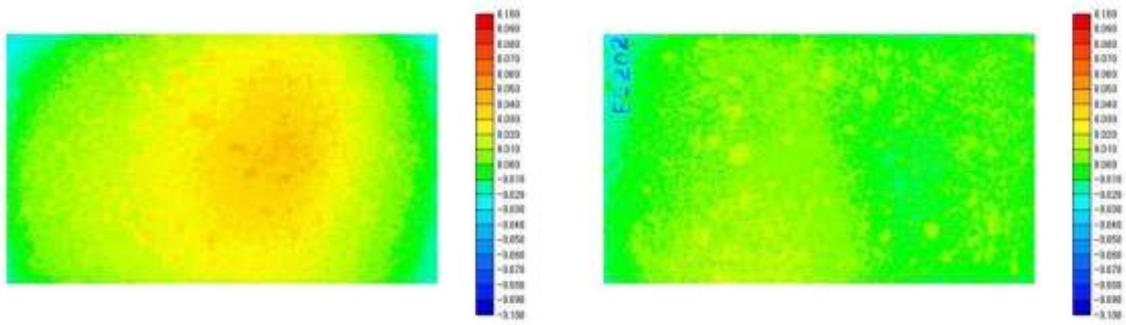
精密分析実施

精密分析実施

(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

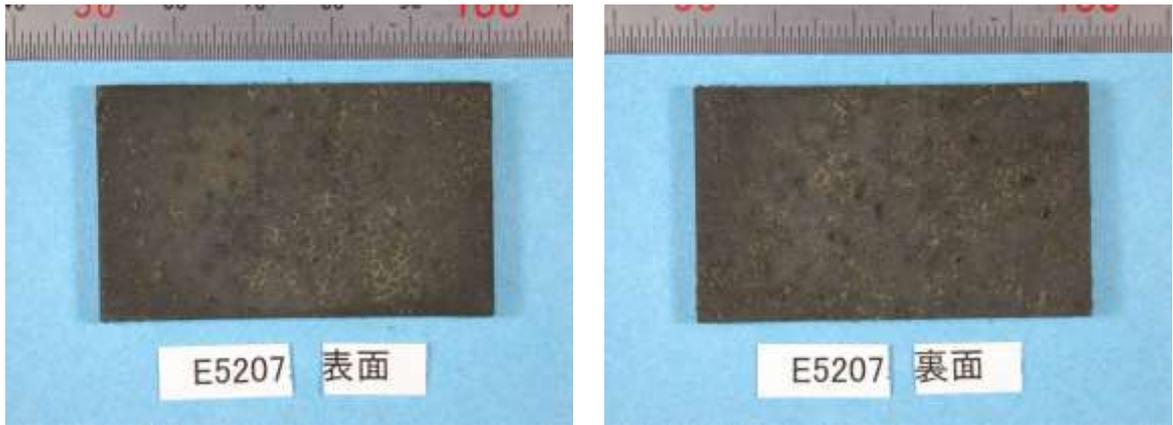


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

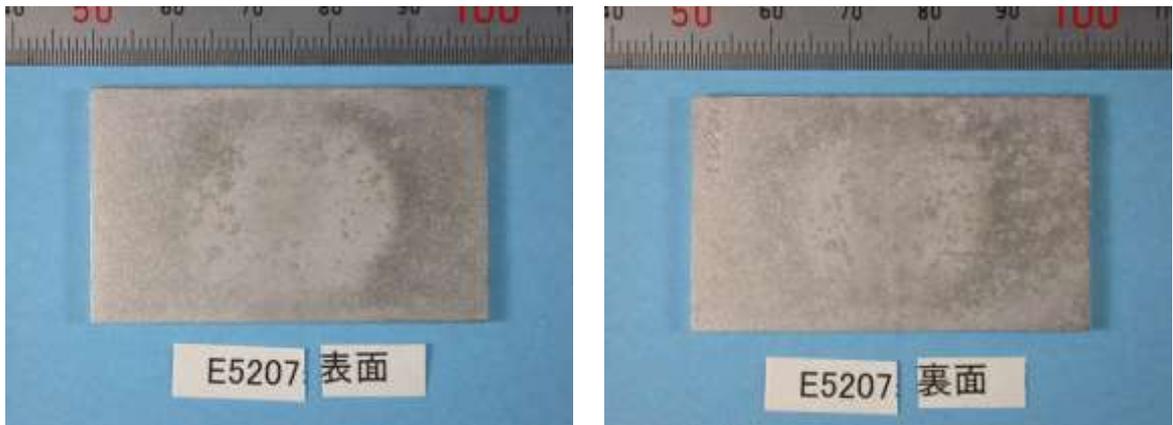


(c) 形状測定結果

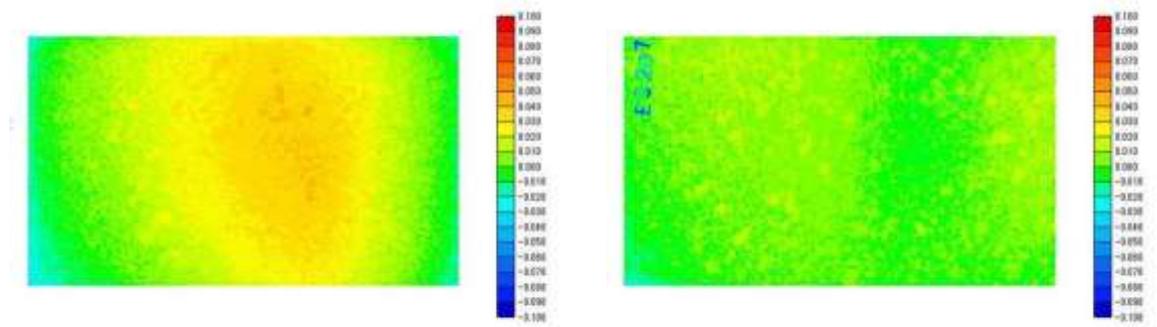
添付図 8-1-55 外観観察と形状測定結果（E5202：人工淡水、10年、溶接付き、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

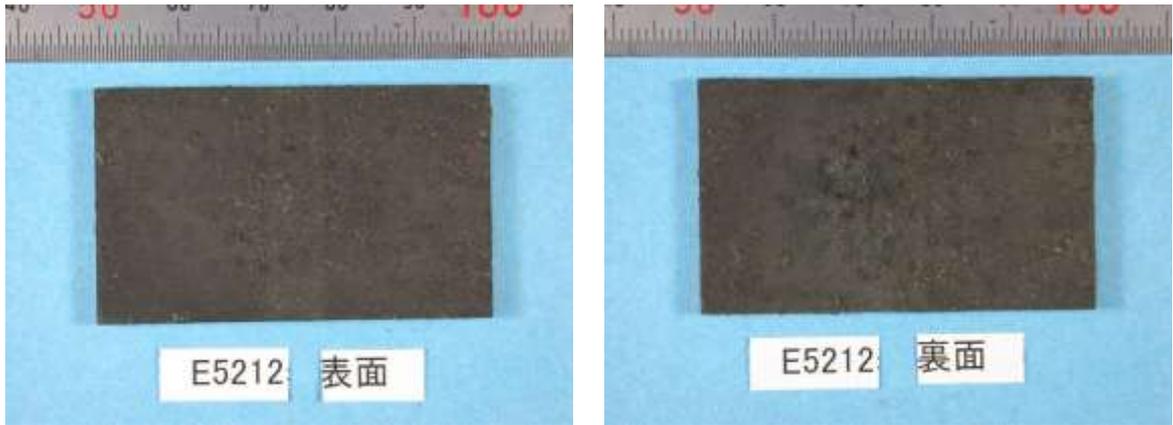


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

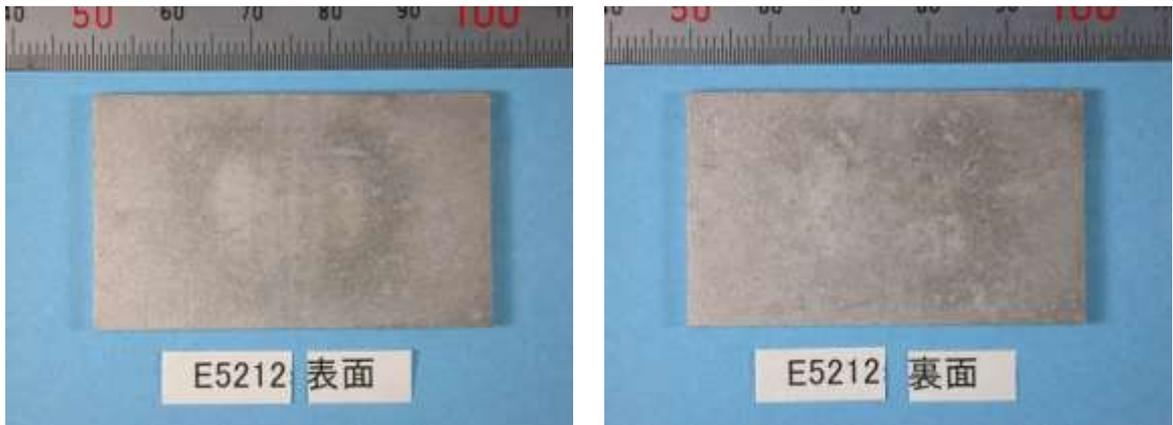


(c) 形状測定結果

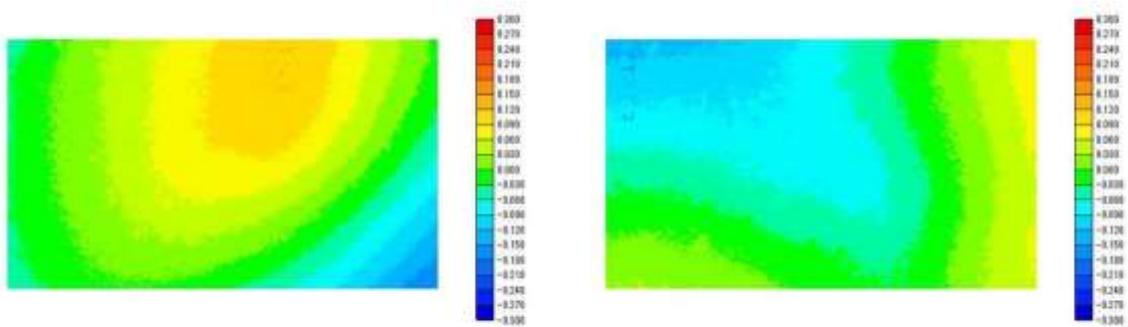
添付図 8-1-56 外観観察と形状測定結果（E5207：人工淡水、10年、溶接付き、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片



(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片



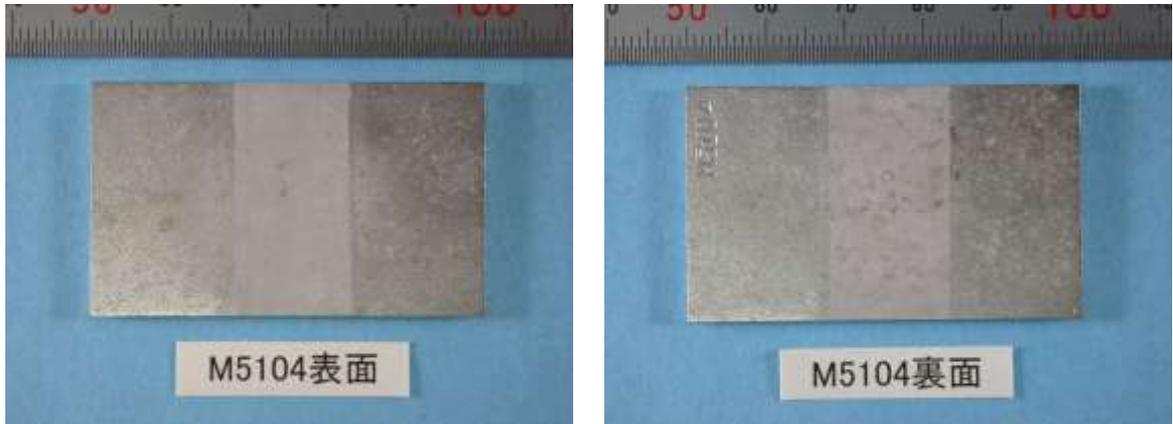
(c) 形状測定結果（* $\pm 300 \mu\text{m}$ スケール）

添付図 8-1-57 外観観察と形状測定結果（E5212：人工淡水、10年、溶接付き、EBW）

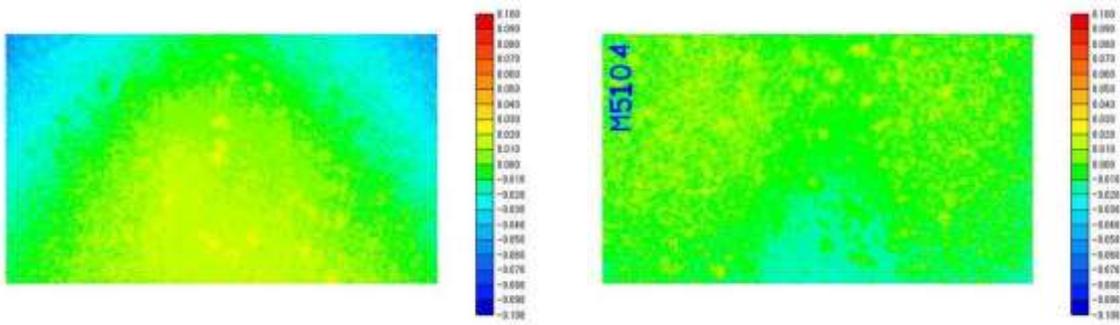
精密分析実施

精密分析実施

(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

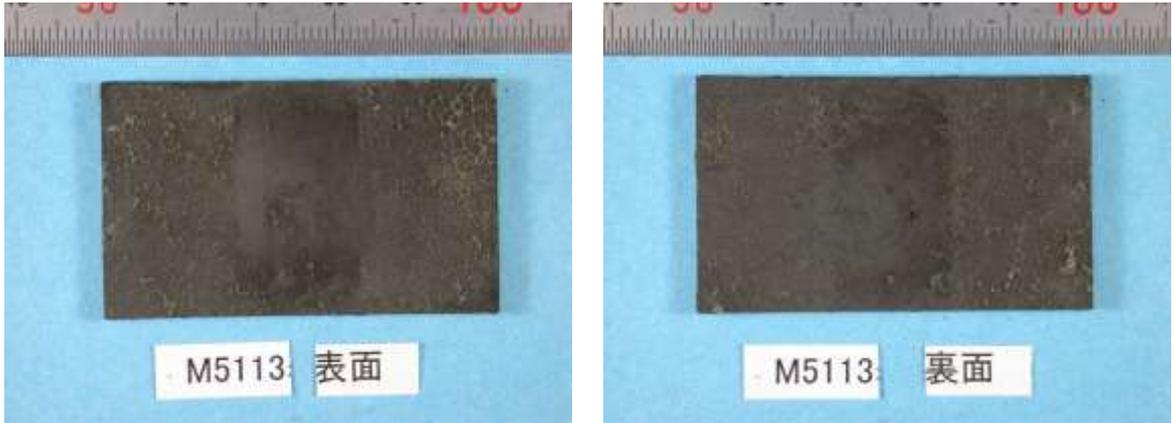


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

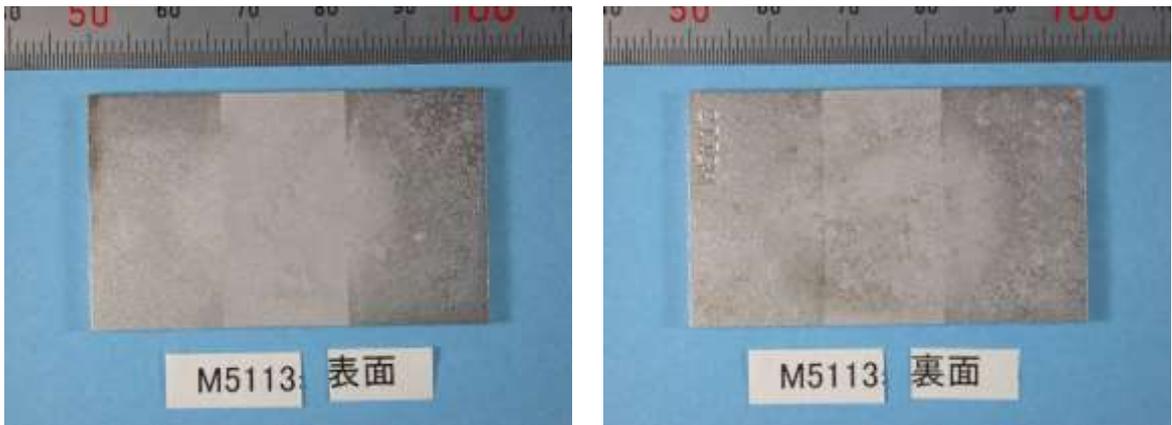


(c) 形状測定結果

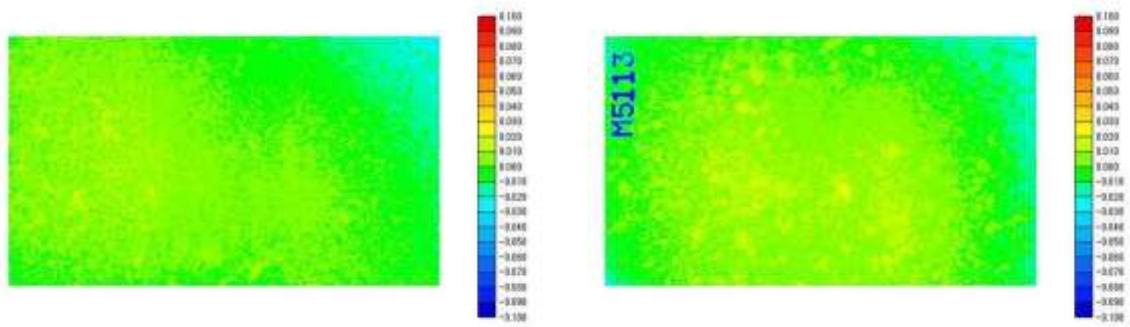
添付図 8-1-58 外観観察と形状測定結果（M5104：人工淡水、10年、溶接付き、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

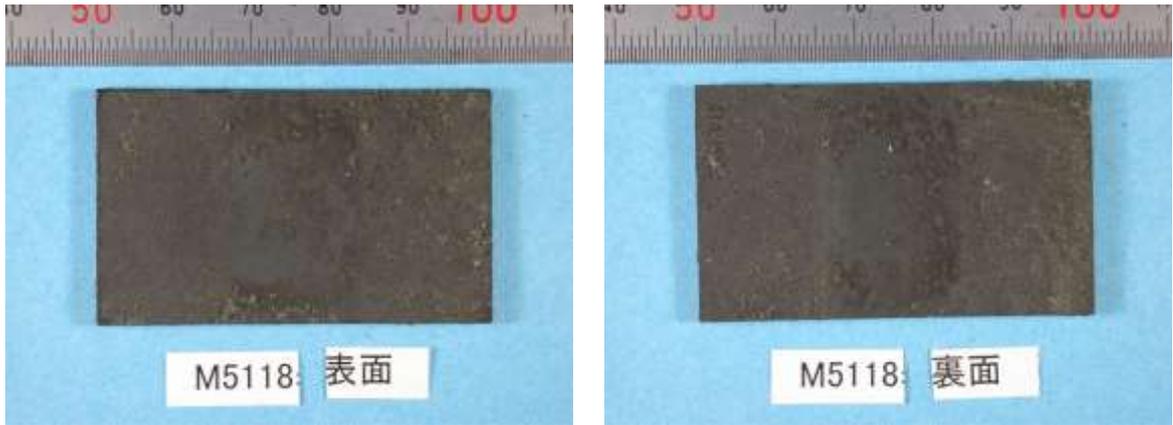


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

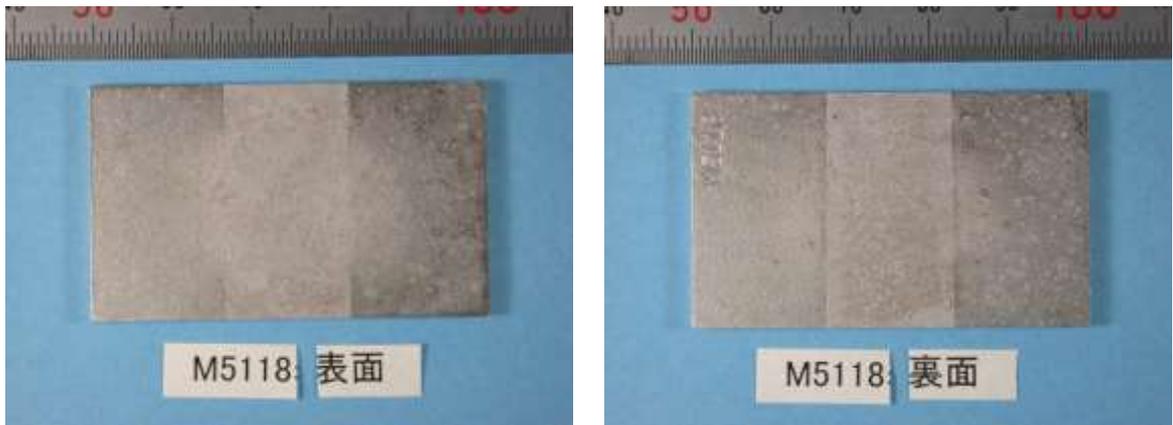


(c) 形状測定結果

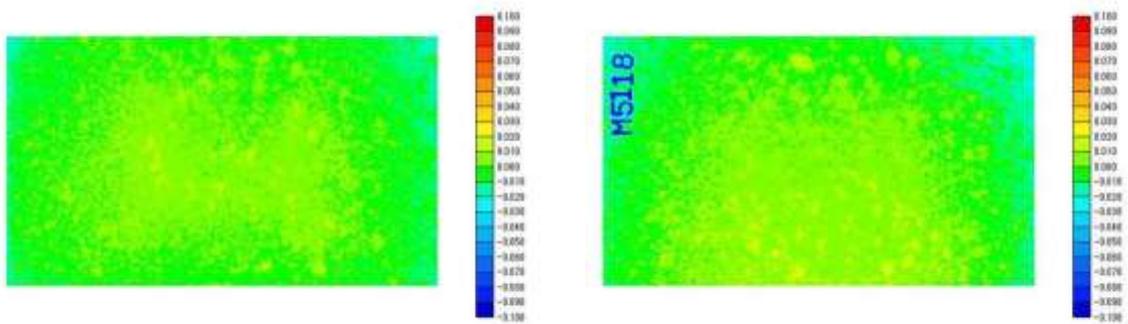
添付図 8-1-59 外観観察と形状測定結果（M5113：人工淡水、10年、溶接付き、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

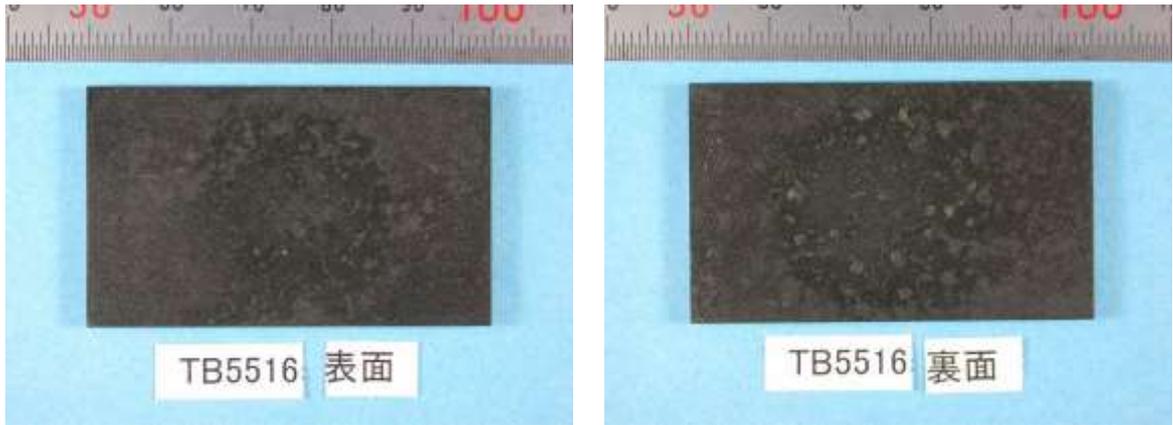


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

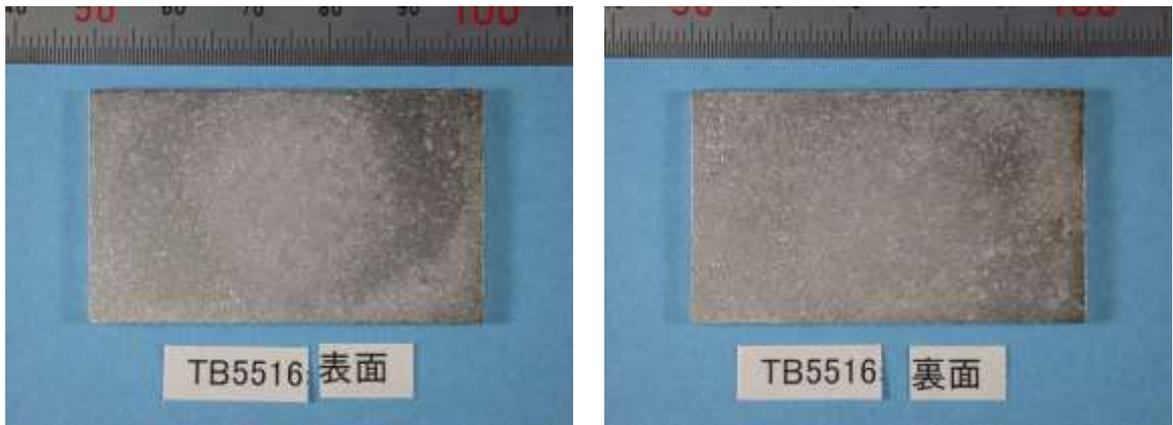


(c) 形状測定結果

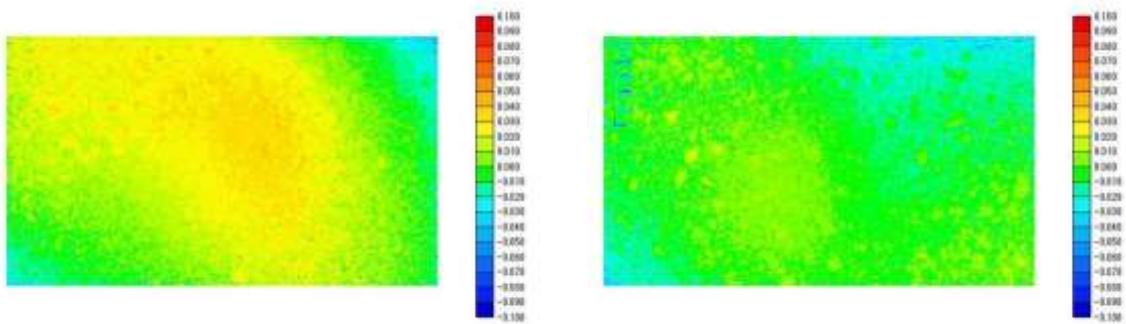
添付図 8-1-60 外観観察と形状測定結果（M5118：人工淡水、10年、溶接付き、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

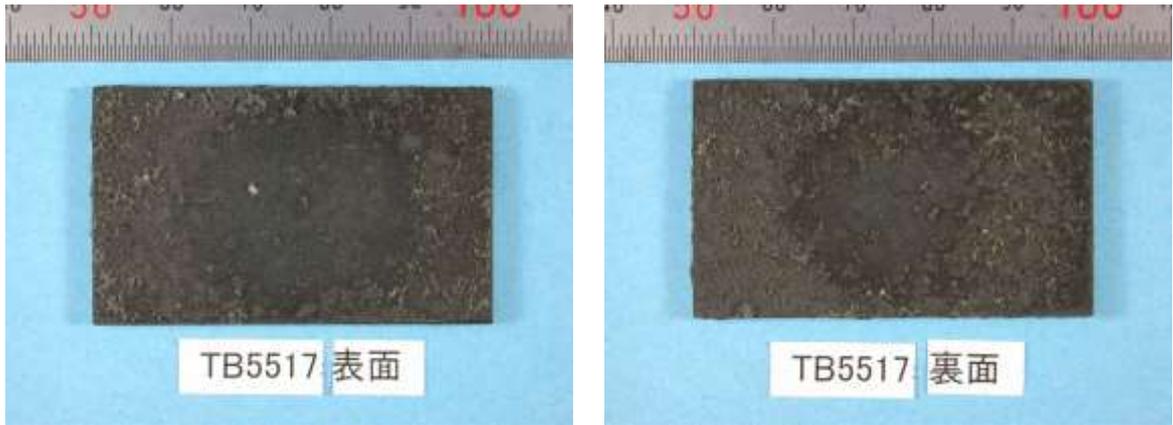


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

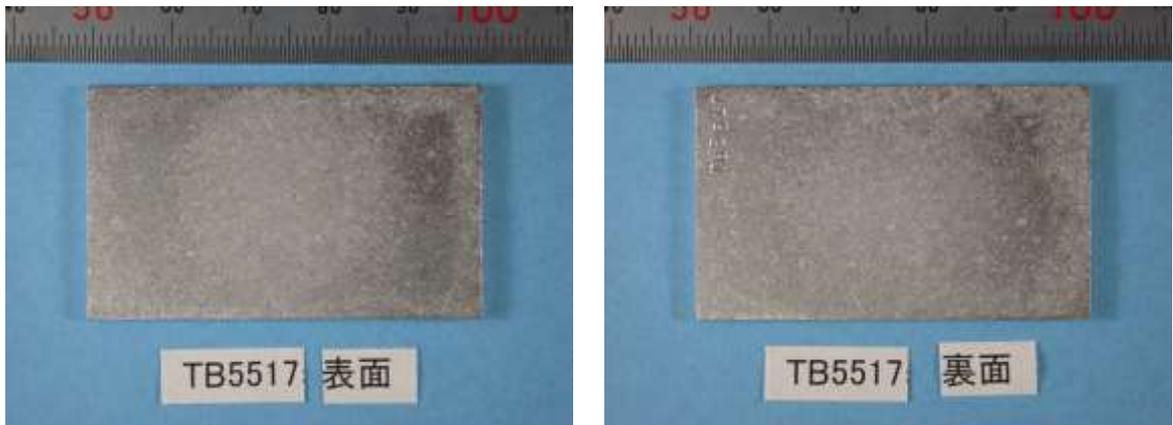


(c) 形状測定結果

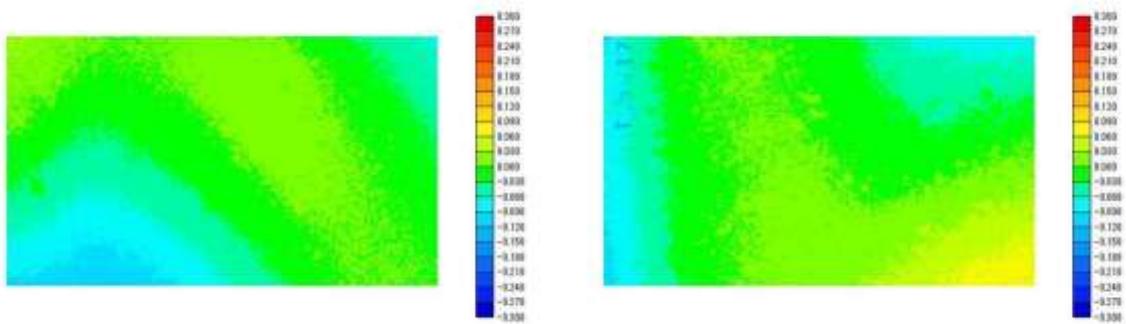
添付図 8-1-61 外観観察と形状測定結果（TB5516：人工淡水、10年、母材単独、TIG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

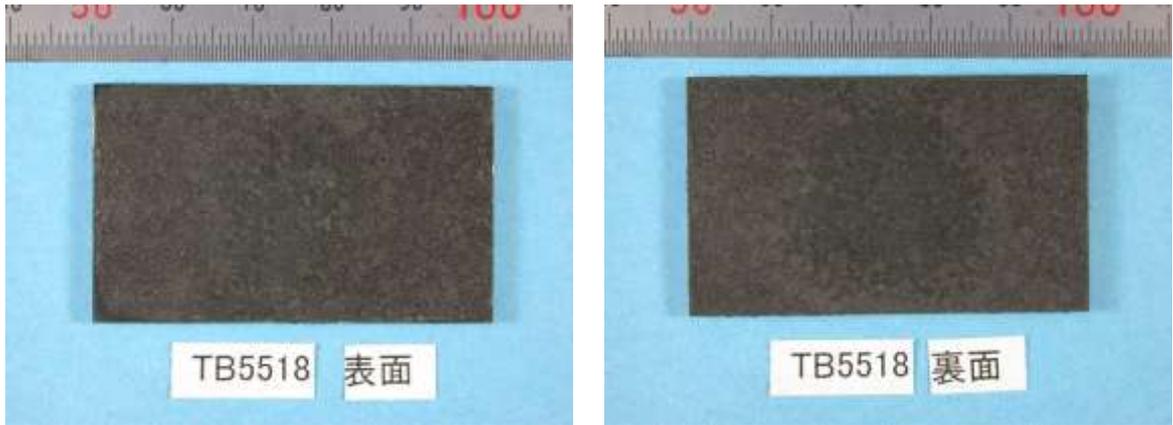


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

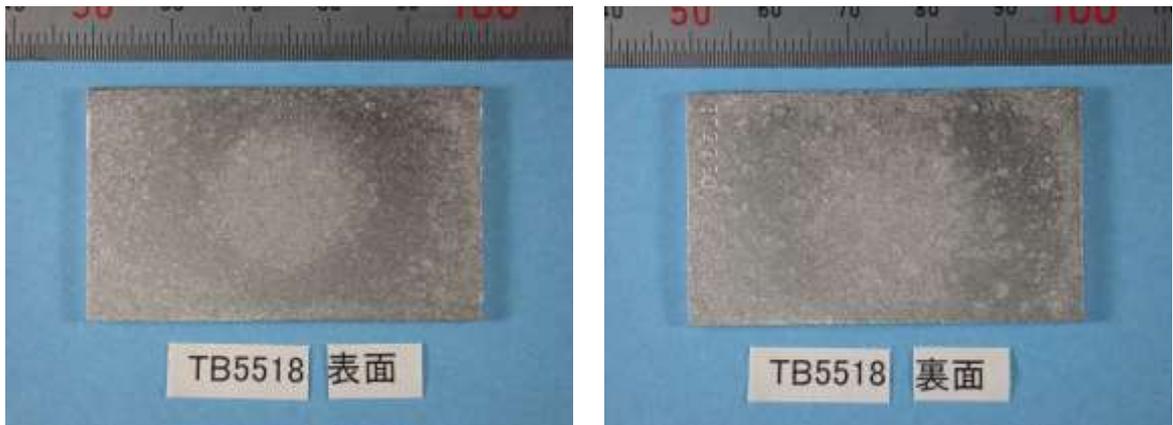


(c) 形状測定結果（* $\pm 300 \mu\text{m}$ スケール）

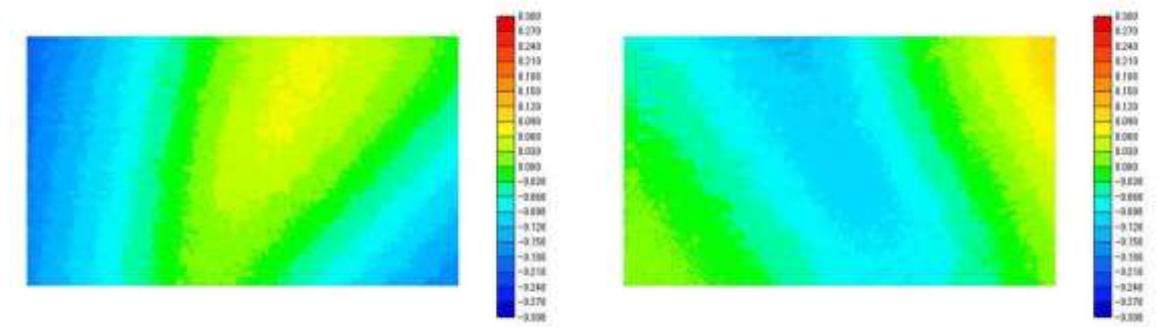
添付図 8-1-62 外観観察と形状測定結果（TB5517：人工淡水、10年、母材単独、TIG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

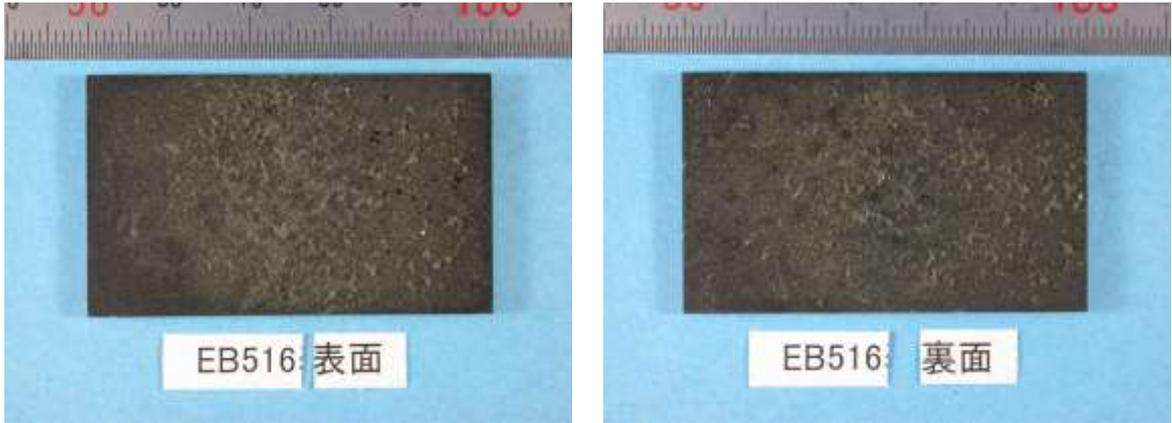


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

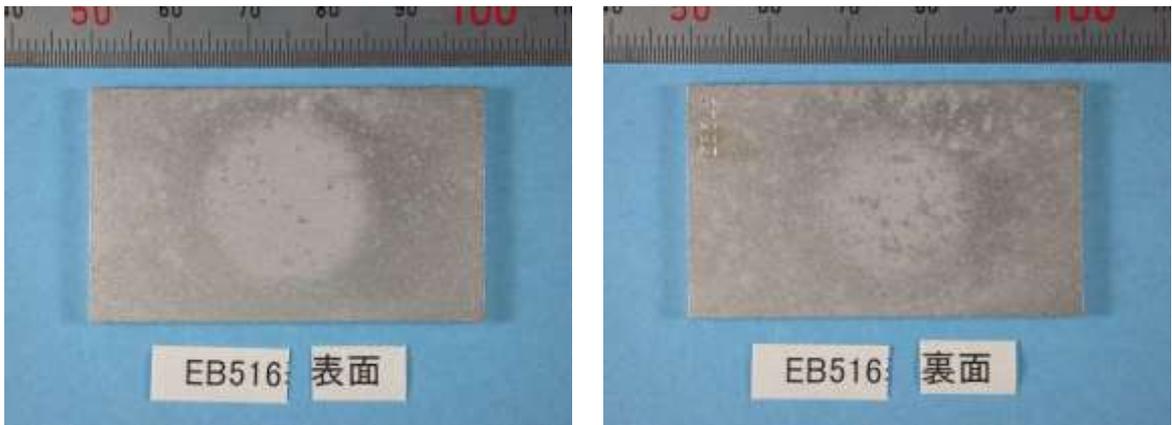


(c) 形状測定結果（* $\pm 300 \mu\text{m}$ スケール）

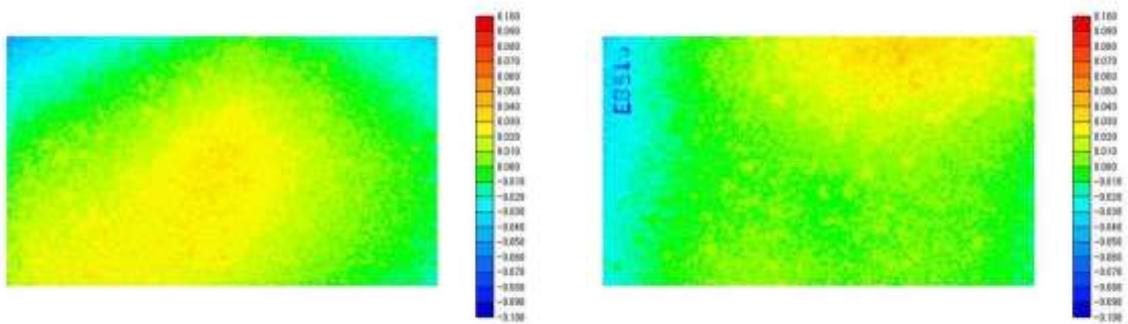
添付図 8-1-63 外観観察と形状測定結果（TB5518：人工淡水、10年、母材単独、TIG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

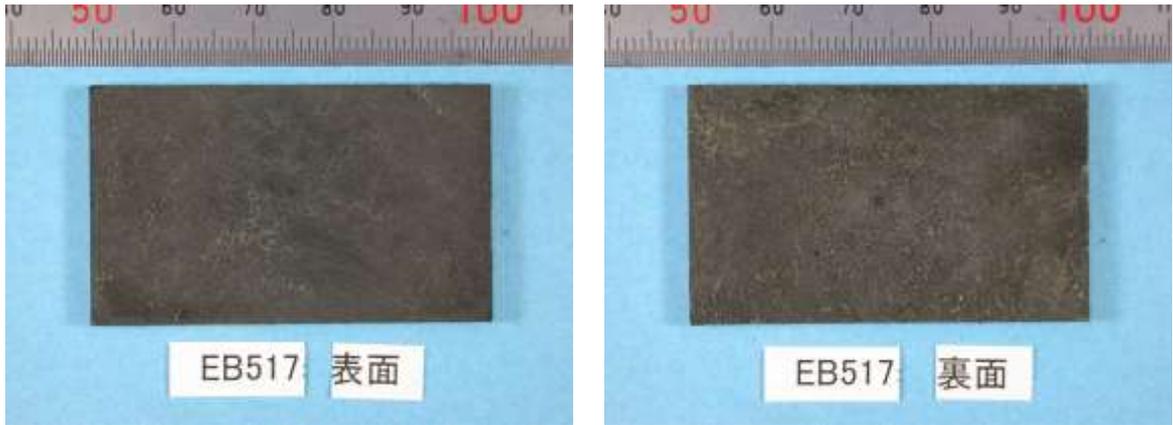


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

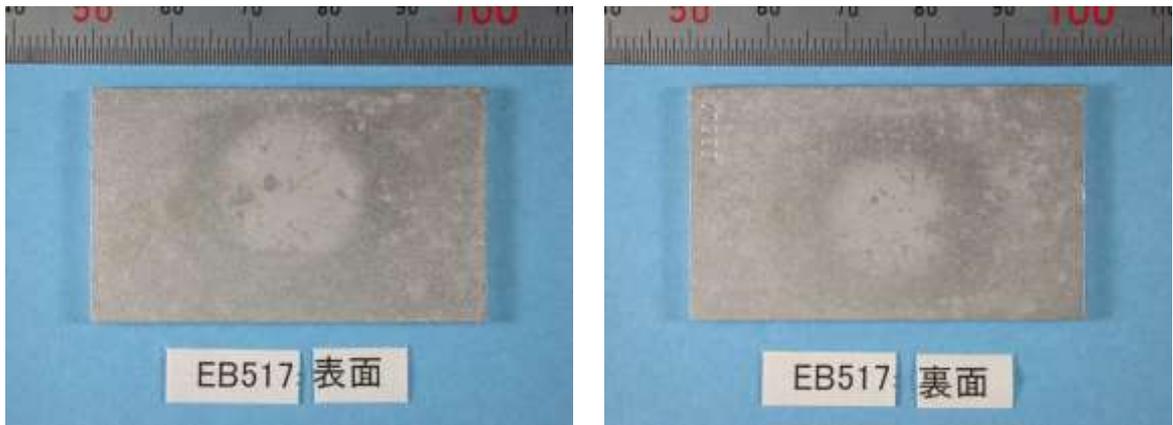


(c) 形状測定結果

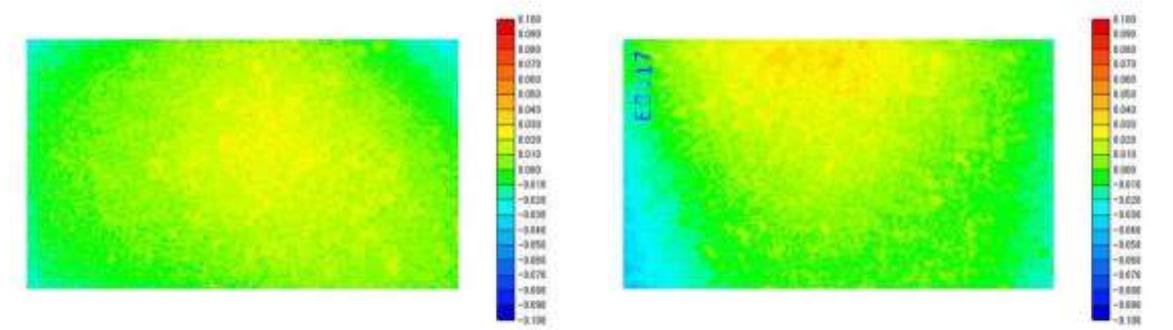
添付図 8-1-64 外観観察と形状測定結果（EB516：人工淡水、10年、母材単独、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

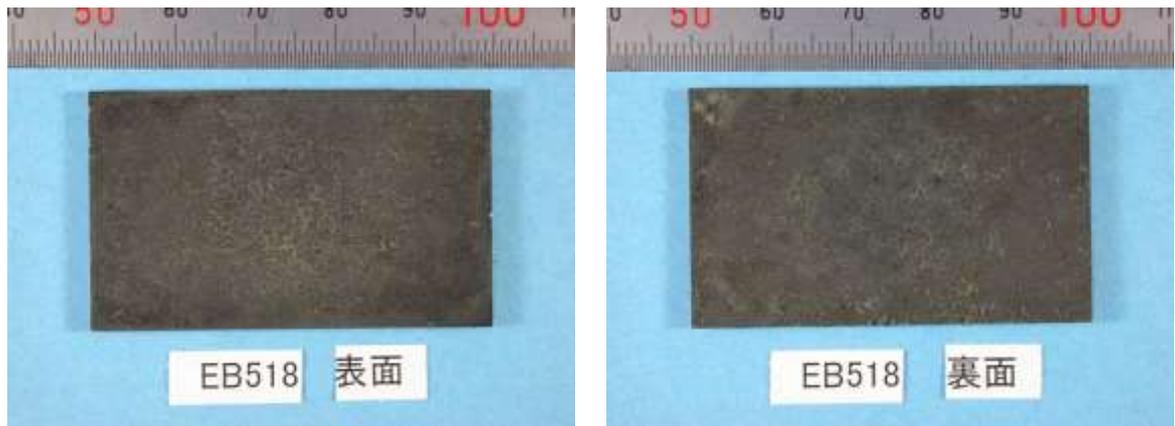


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

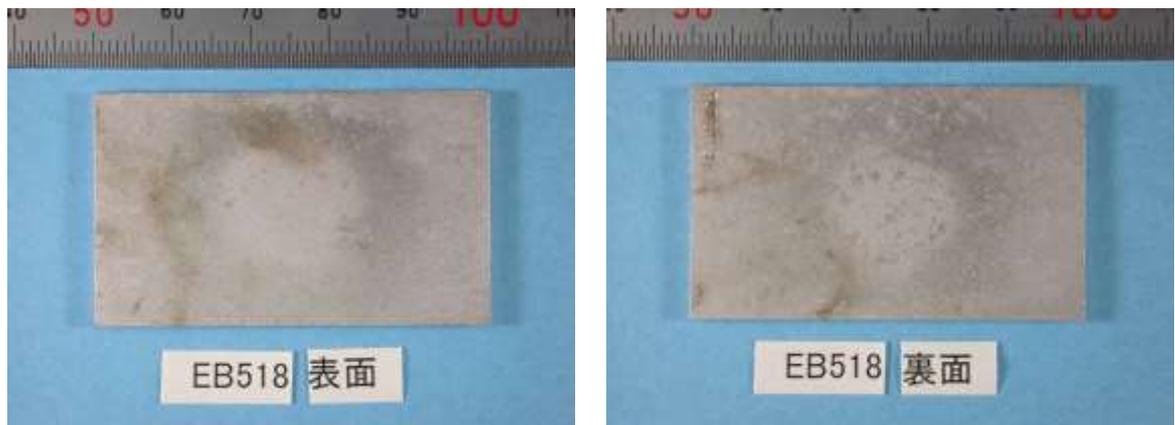


(c) 形状測定結果

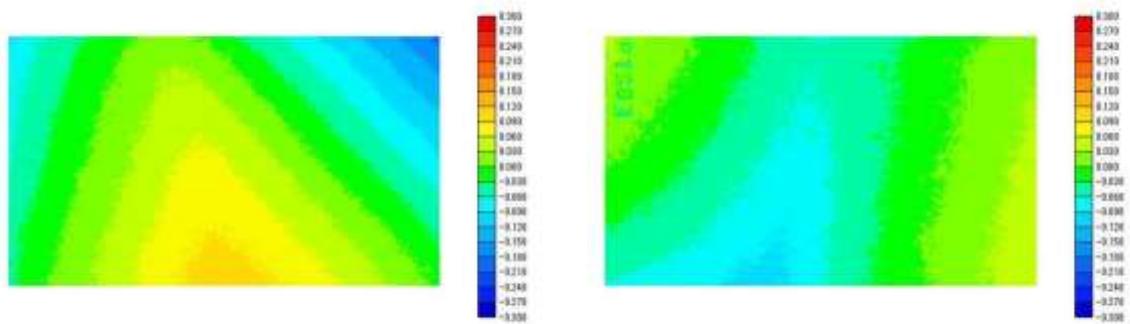
添付図 8-1-65 外観観察と形状測定結果（EB517：人工淡水、10年、母材単独、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

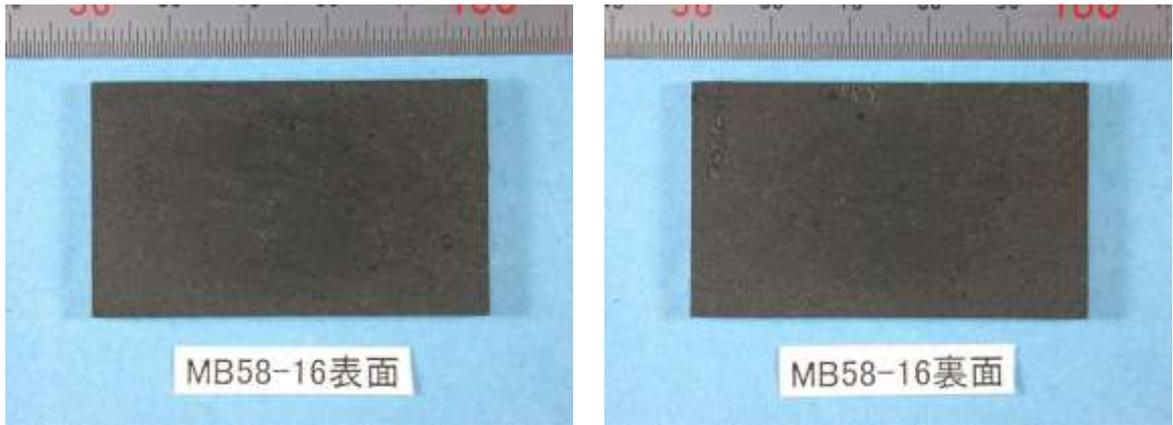


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

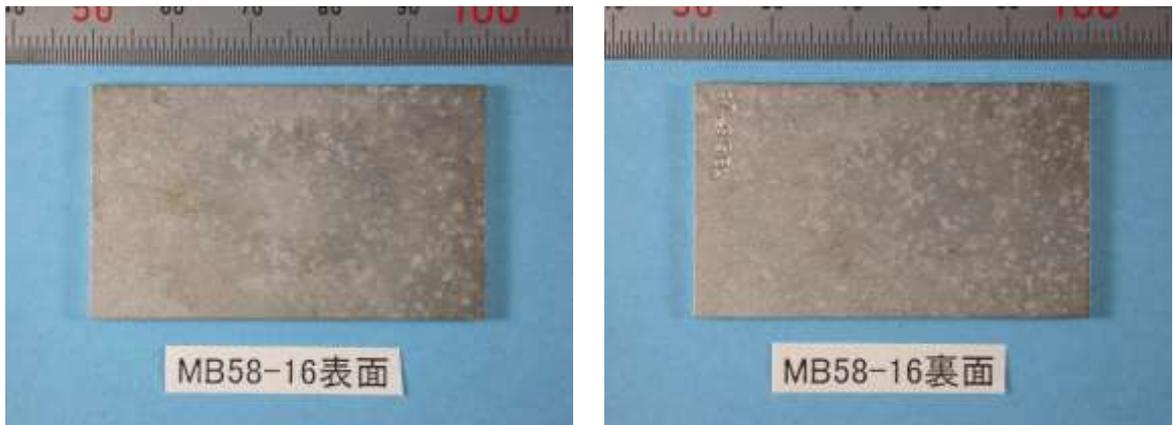


(c) 形状測定結果（* $\pm 300 \mu\text{m}$ スケール）

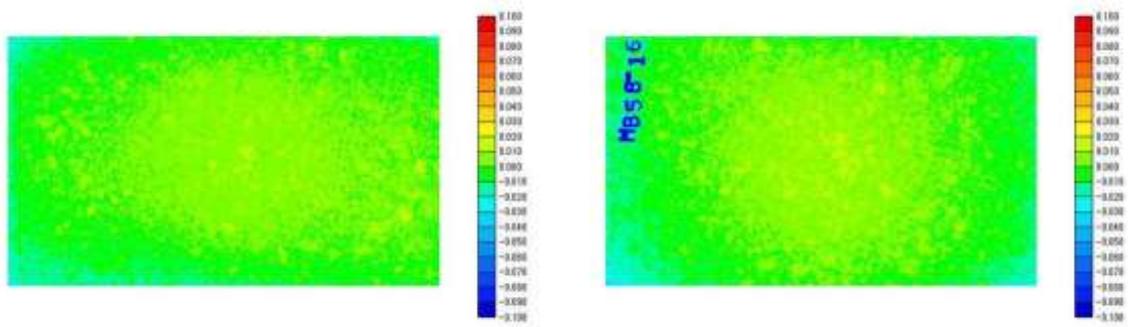
添付図 8-1-66 外観観察と形状測定結果（EB518：人工淡水、10年、母材単独、EBW）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

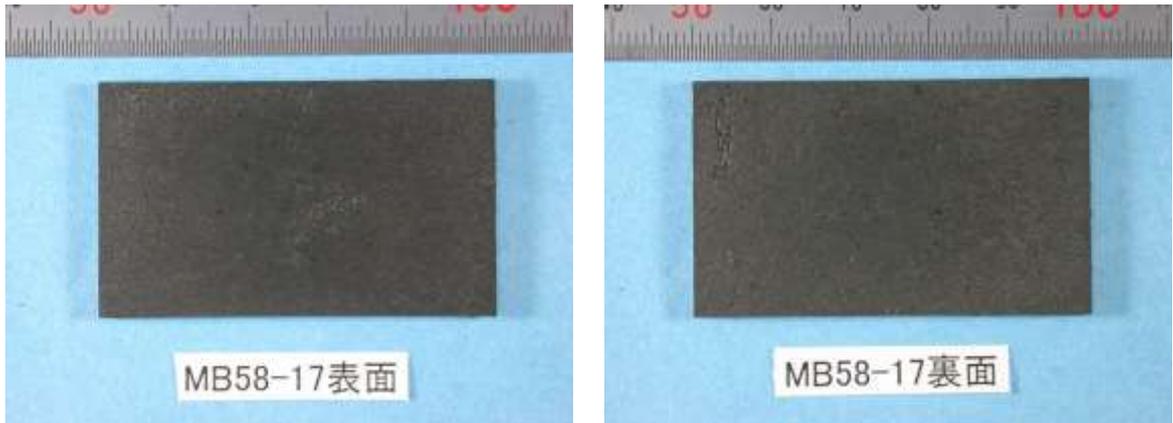


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

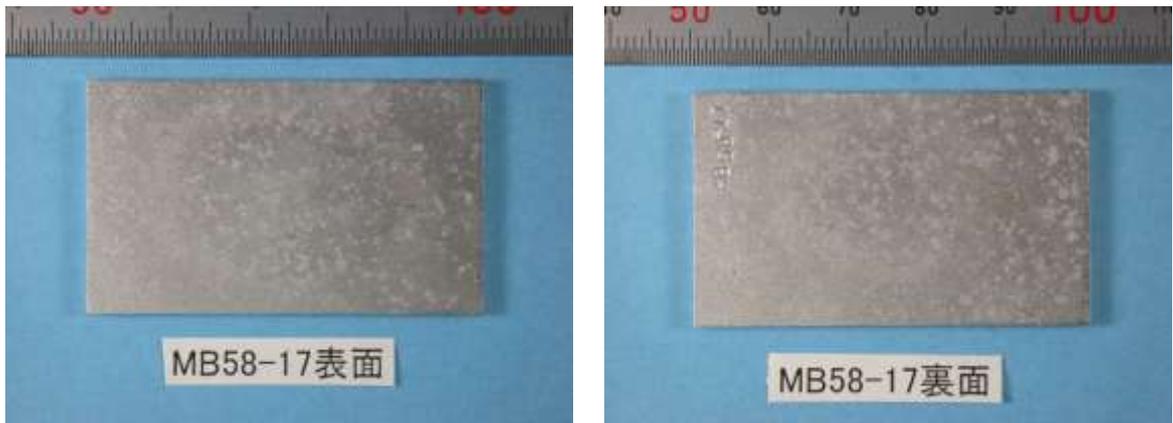


(c) 形状測定結果

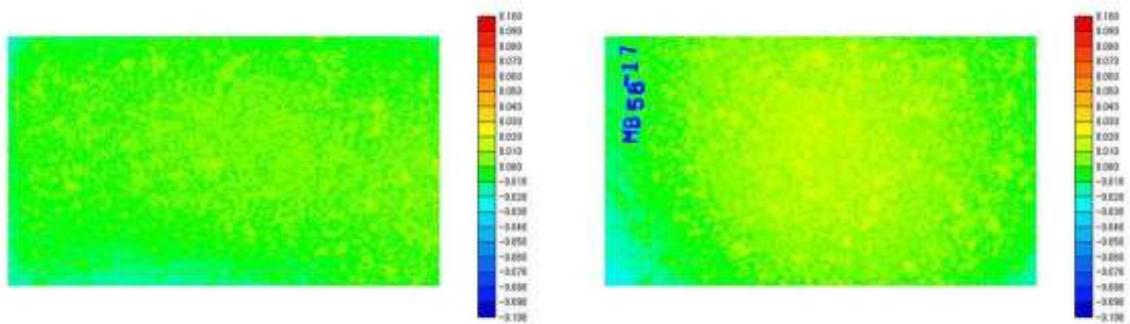
添付図 8-1-67 外観観察と形状測定結果（MB58-16：人工淡水、10年、母材単独、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片

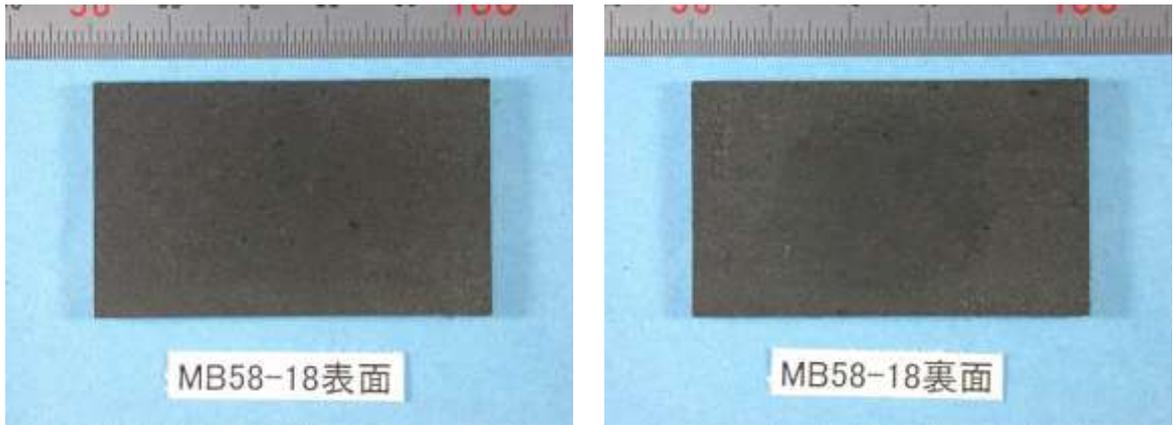


(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片

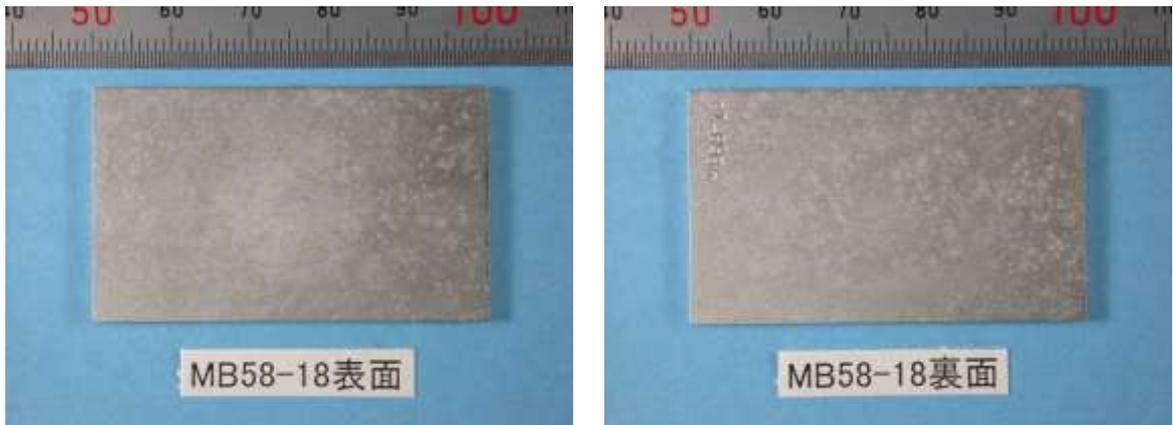


(c) 形状測定結果

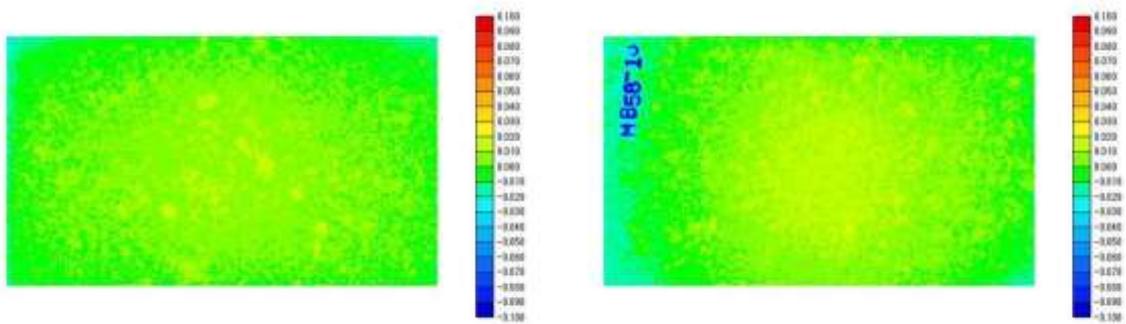
添付図 8-1-68 外観観察と形状測定結果（MB58-17：人工淡水、10年、母材単独、MAG）



(a) 緩衝材剥離（腐食皮膜露出）後の試験片



(b) 脱スケール（腐食皮膜除去）後の試験片



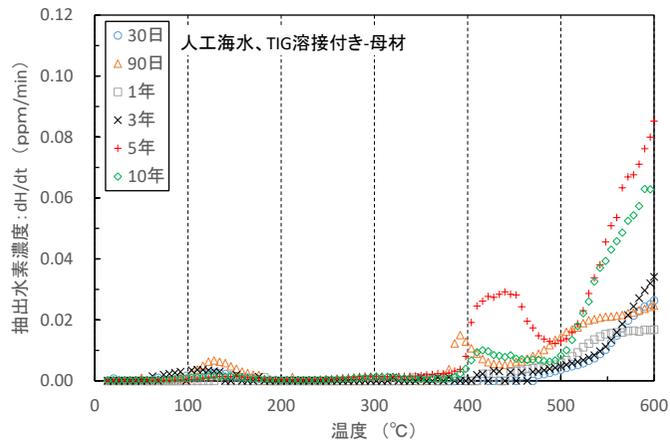
(c) 形状測定結果

添付図 8-1-69 外観観察と形状測定結果（MB58-18：人工淡水、10年、母材単独、MAG）

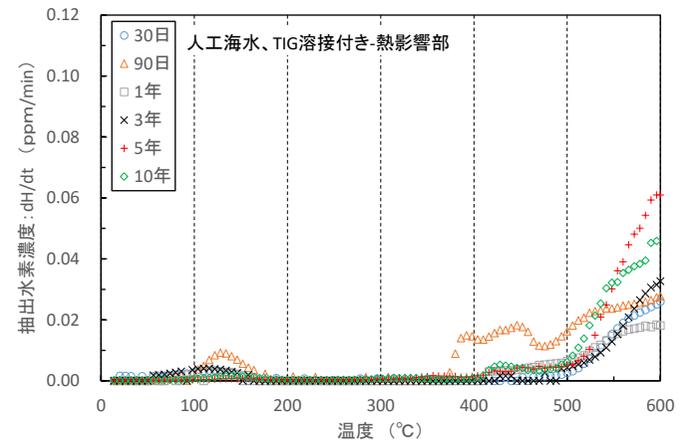
添付資料 4-2

水素抽出曲線 (SSW と SFW)

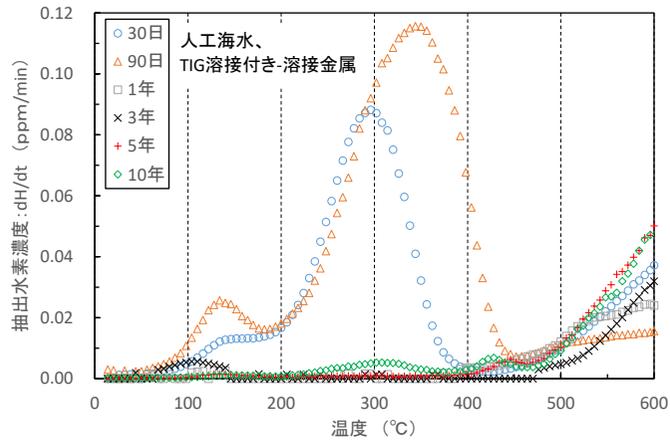
4.8 炭素鋼水素分析結果



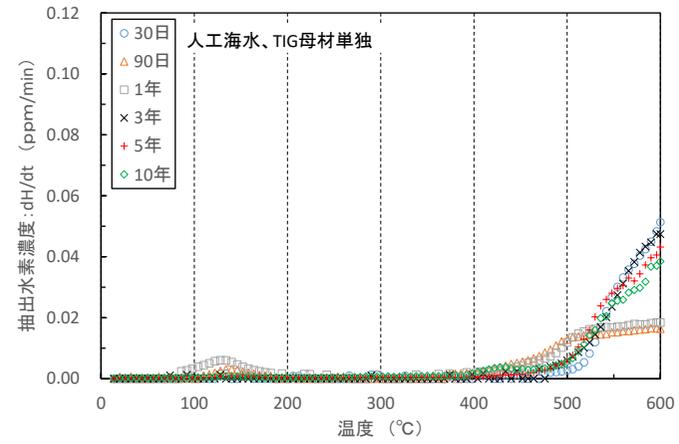
a)溶接付き試験片 (母材)



b)溶接付き試験片 (熱影響部)

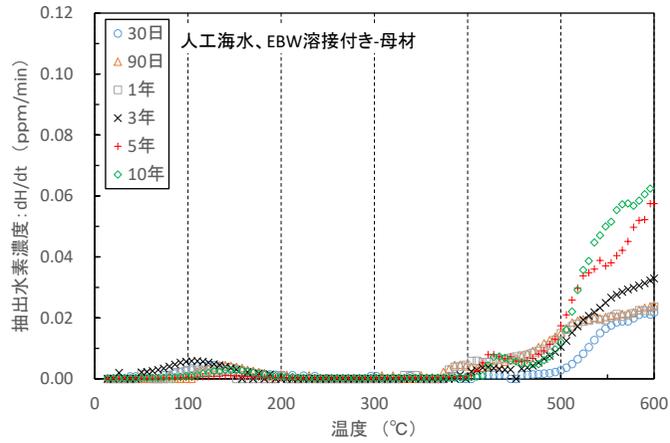


c)溶接付き試験片 (溶接金属)

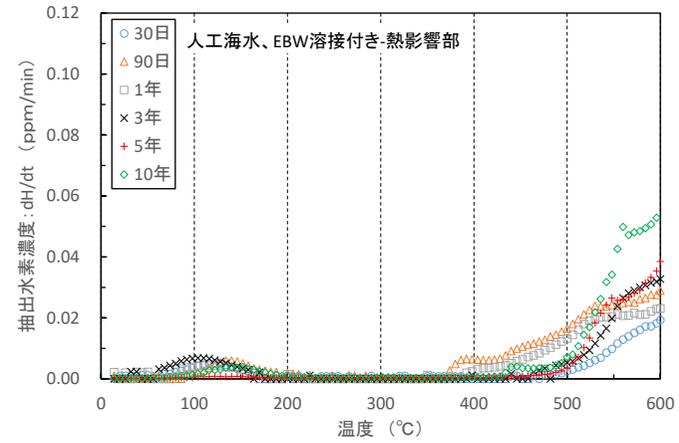


d)母材単独試験片

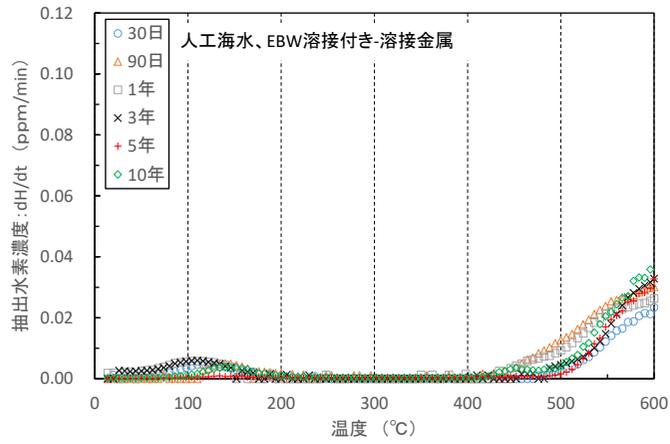
添付図 4-2-1 人工海水条件での TIG 試験片の水素抽出曲線の時間変化 (30 日～10 年)



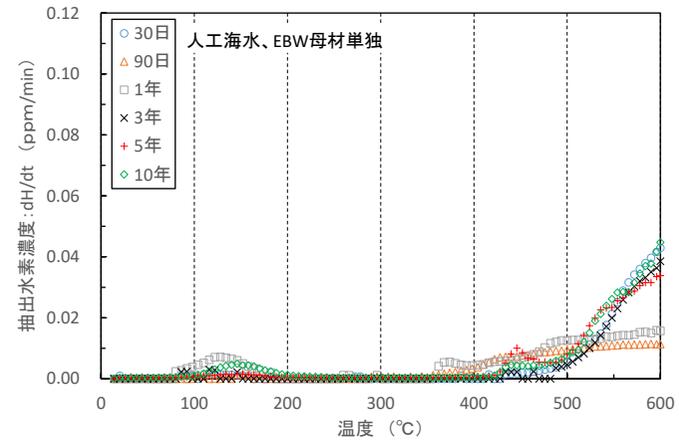
a)溶接付き試験片 (母材)



b)溶接付き試験片 (熱影響部)

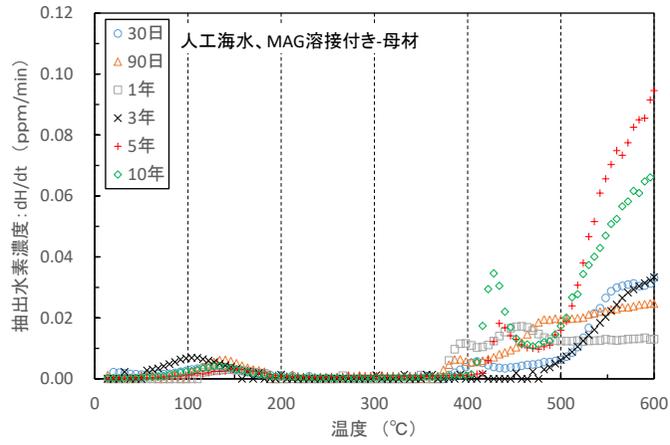


c)溶接付き試験片 (溶接金属)

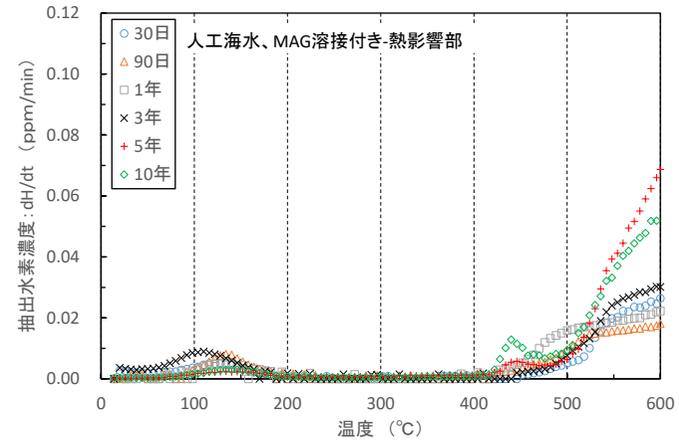


d)母材単独試験片

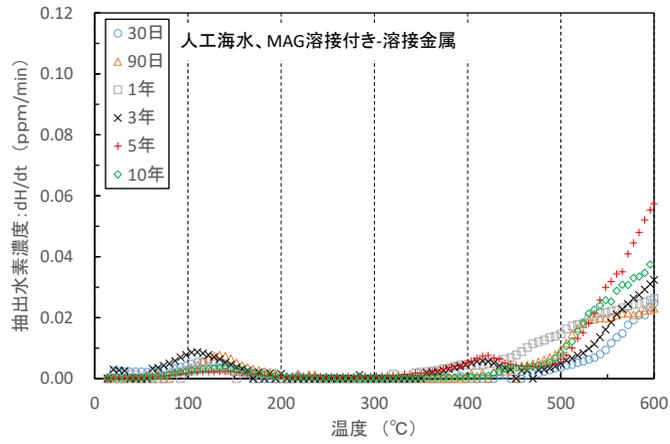
添付図 4-2-2 人工海水条件での EBW 試験片の水素抽出曲線の時間変化 (30 日~10 年)



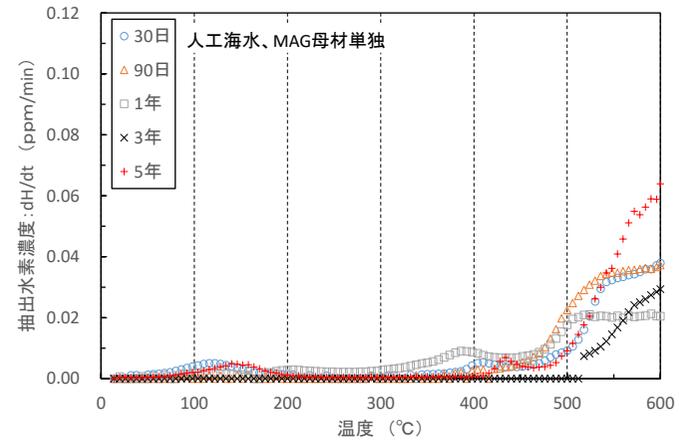
a)溶接付き試験片 (母材)



b)溶接付き試験片 (熱影響部)

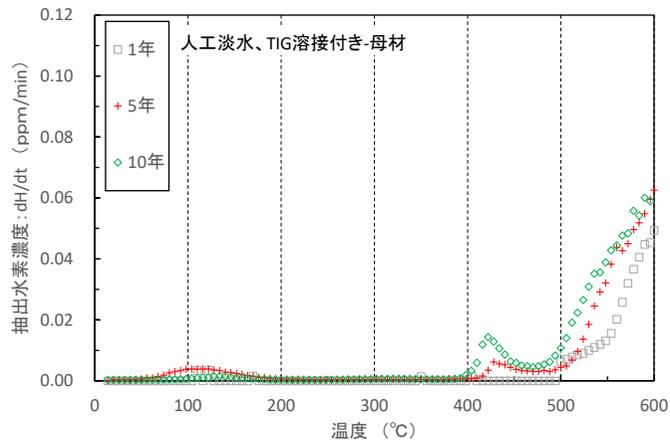


c)溶接付き試験片 (溶接金属)

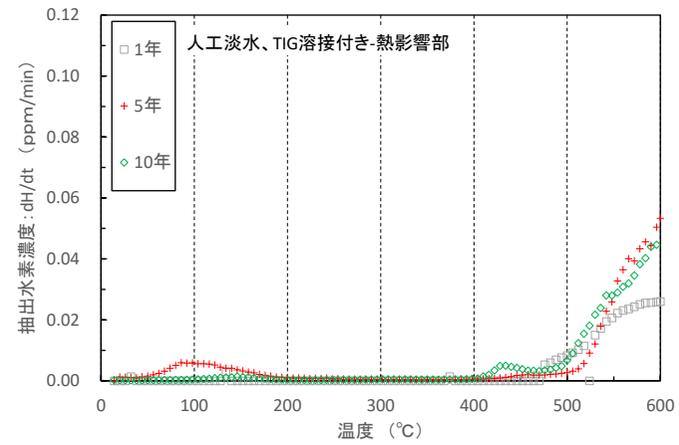


d)母材単独試験片

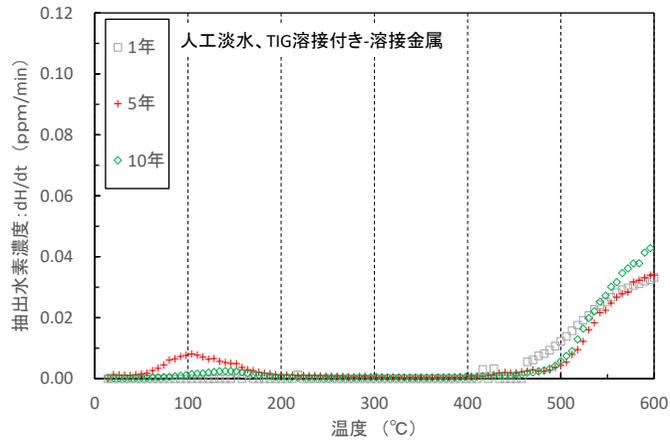
添付図 4-2-3 人工海水条件での MAG 試験片の水素抽出曲線の時間変化 (30 日~10 年)



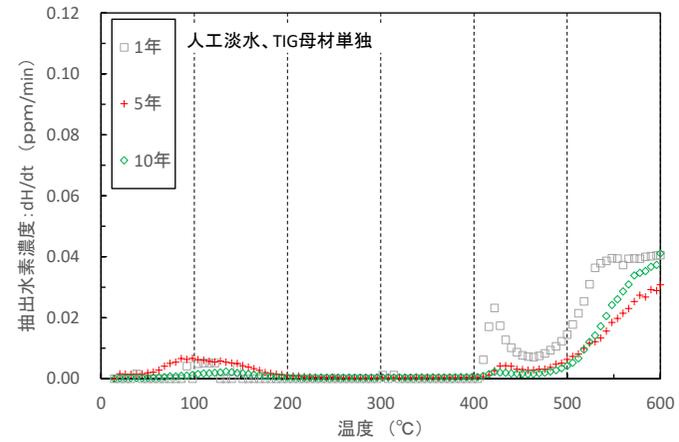
a)溶接付き試験片 (母材)



b)溶接付き試験片 (熱影響部)

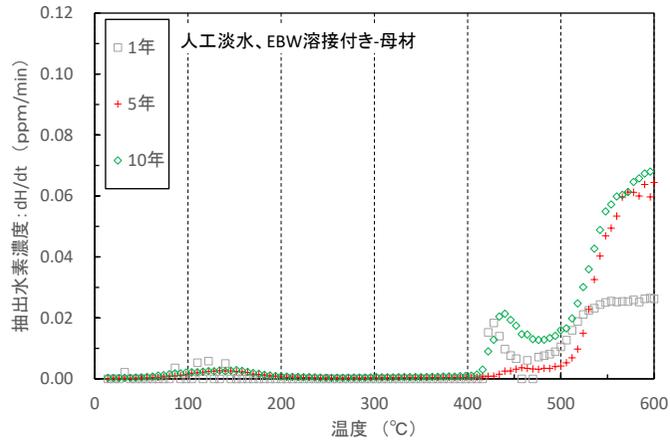


c)溶接付き試験片 (溶接金属)

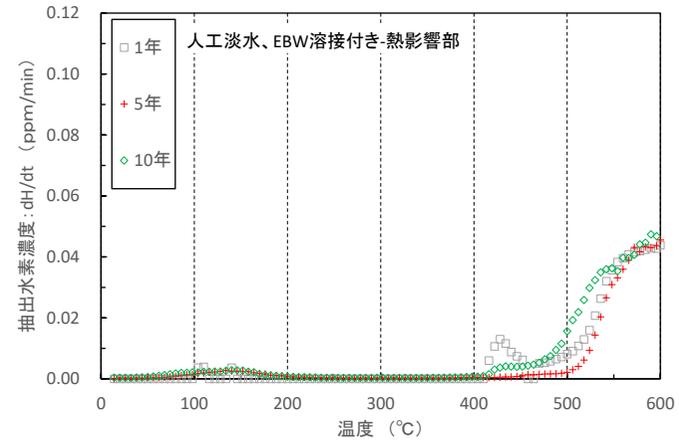


d)母材単独試験片

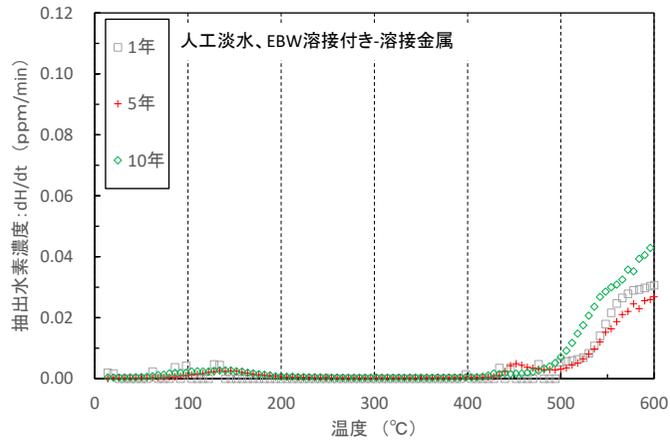
添付図 4-2-4 人工淡水条件での TIG 試験片の水素抽出曲線の時間変化 (1年～10年)



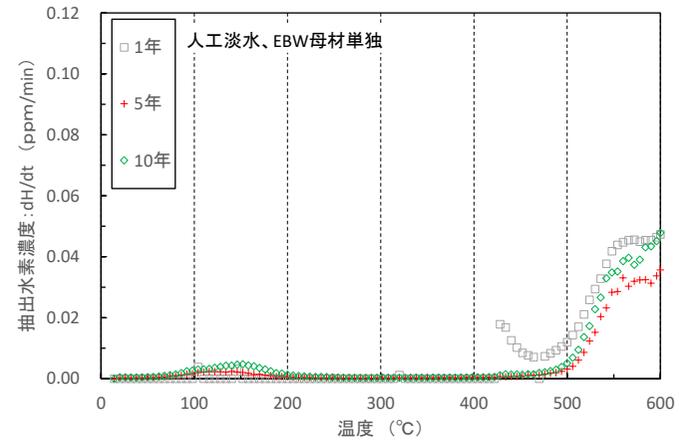
a)溶接付き試験片 (母材)



b)溶接付き試験片 (熱影響部)

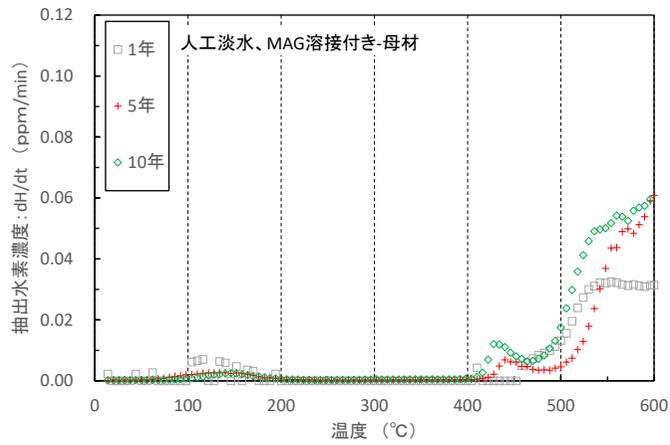


c)溶接付き試験片 (溶接金属)

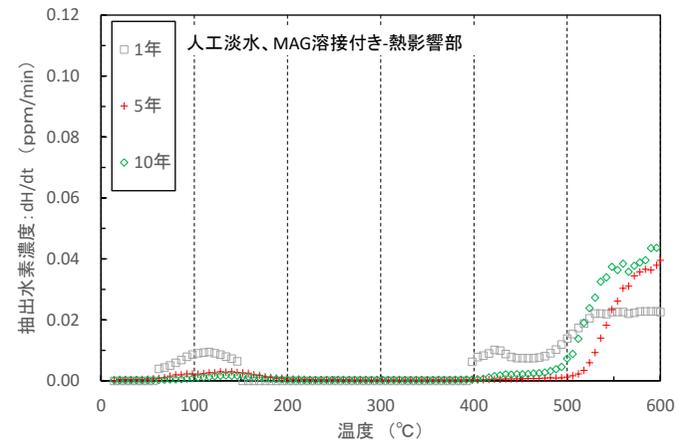


d)母材単独試験片

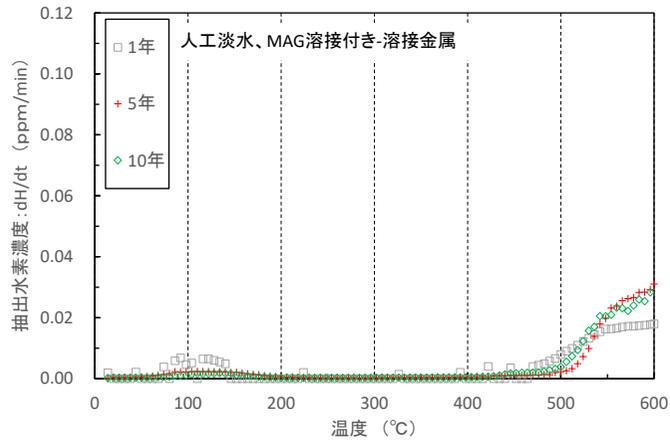
添付図 4-2-5 人工淡水条件での EBW 試験片の水素抽出曲線の時間変化 (1年~10年)



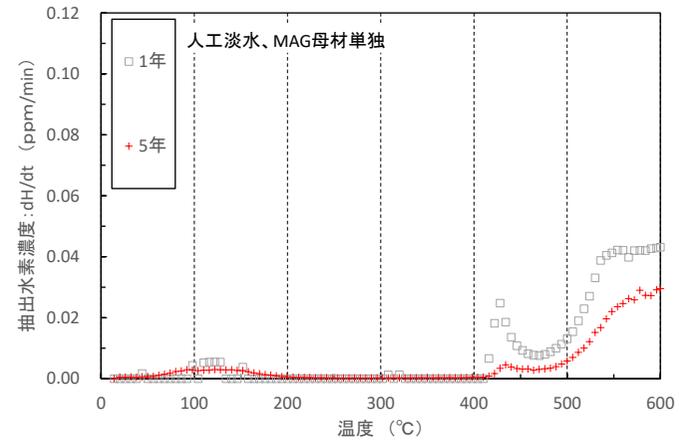
a)溶接付き試験片 (母材)



b)溶接付き試験片 (熱影響部)



c)溶接付き試験片 (溶接金属)



d)母材単独試験片

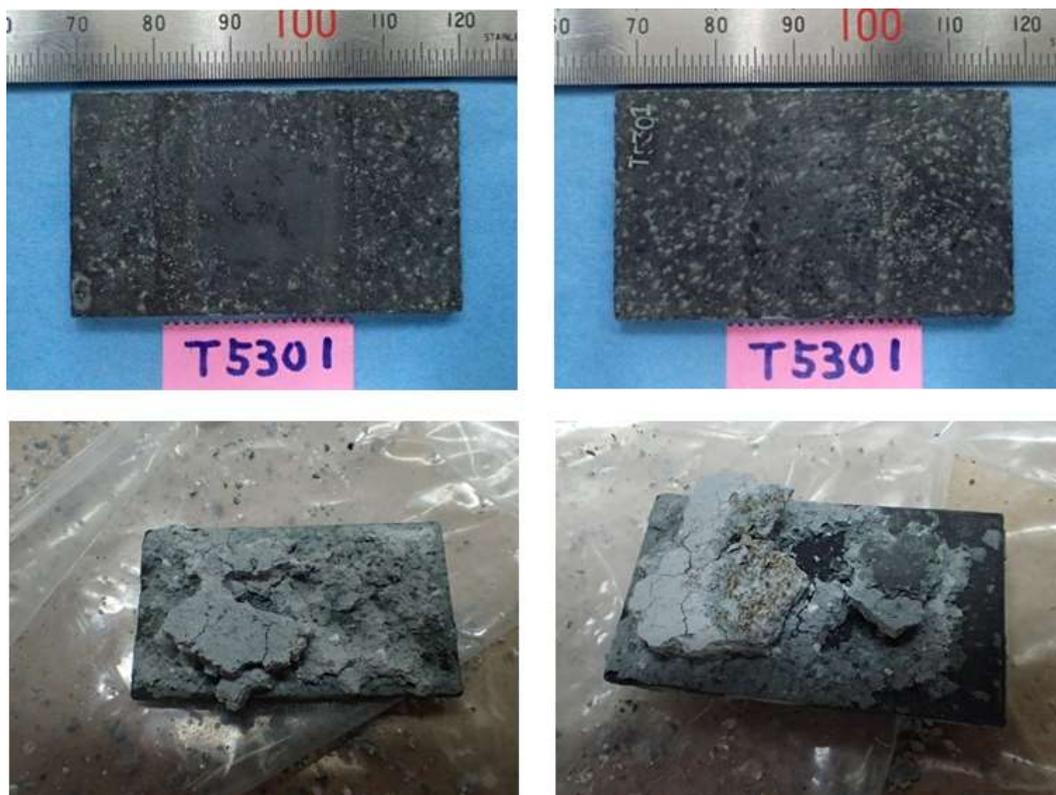
添付図 4-2-6 人工淡水条件での MAG 試験片の水素抽出曲線の時間変化 (1年~10年)

添付資料 4-3

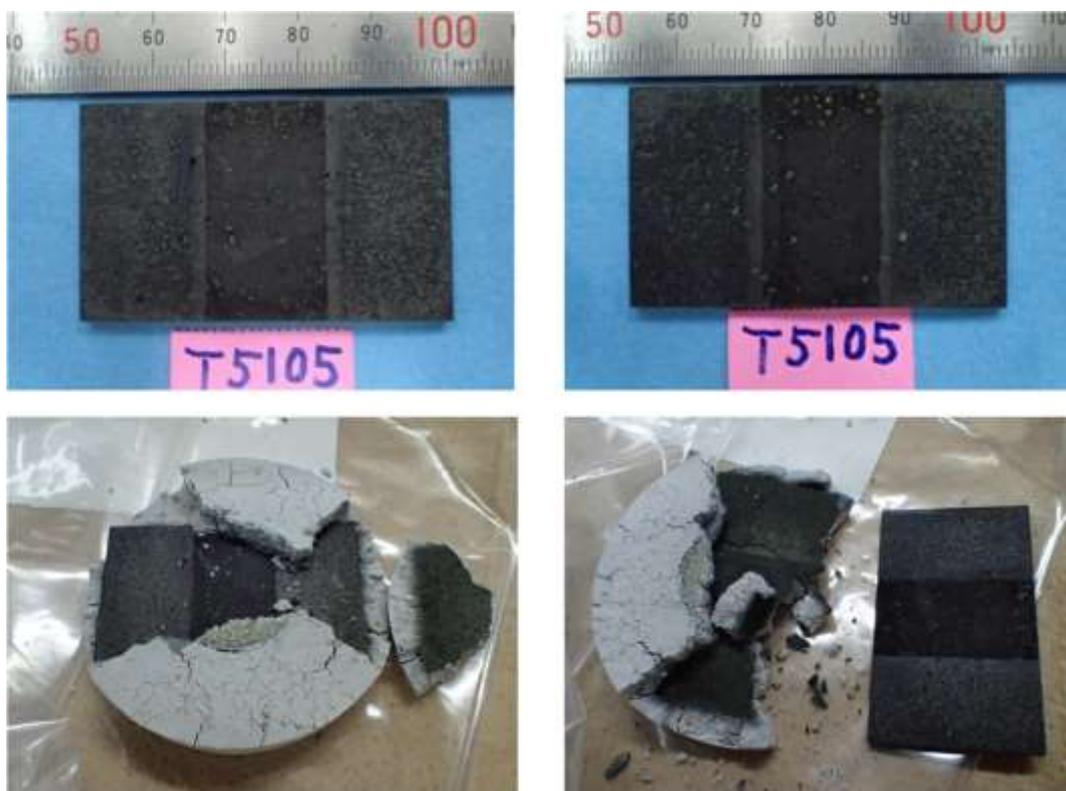
腐食生成物の分析結果

－分析対象の全試験片の回収状況－

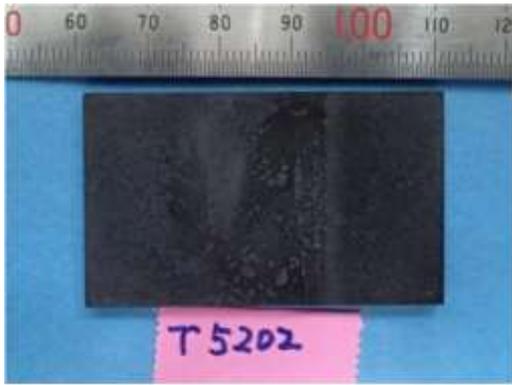
4.9 緩衝材共存環境における炭素鋼



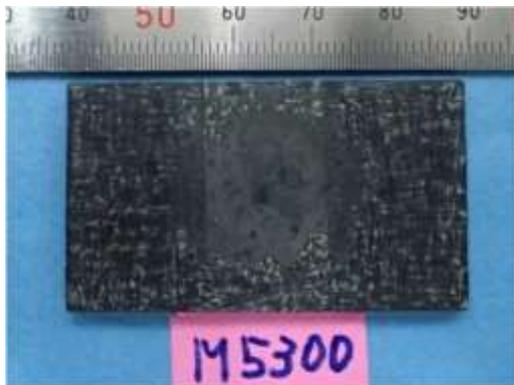
添付図 4-3-1 SW-TIG-5 (T5301)の回収状況



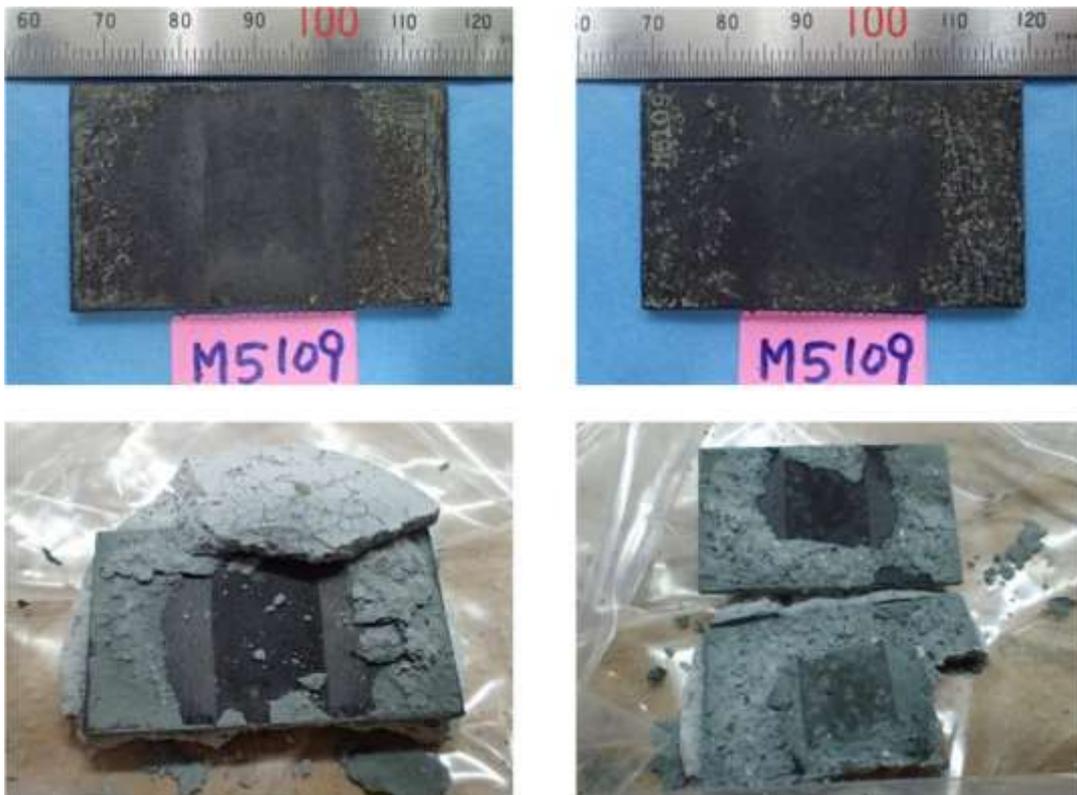
添付図 4-3-2 FW-TIG-5 (T5105)の回収状況



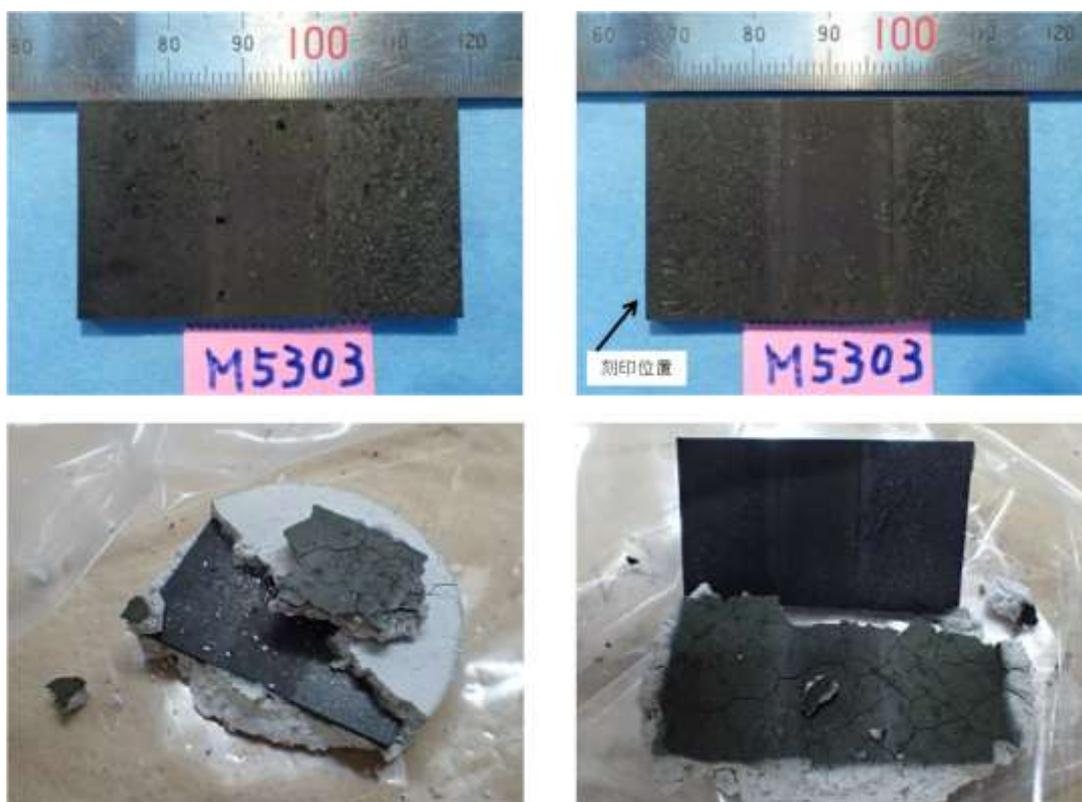
添付図 4-3-3 FW-TIG-10 (T5202)の回収状況



添付図 4-3-4 SW-MAG-5 (M5300)の回収状況



添付図 4-3-5 SW-MAG-10 (M5109)の回収状況



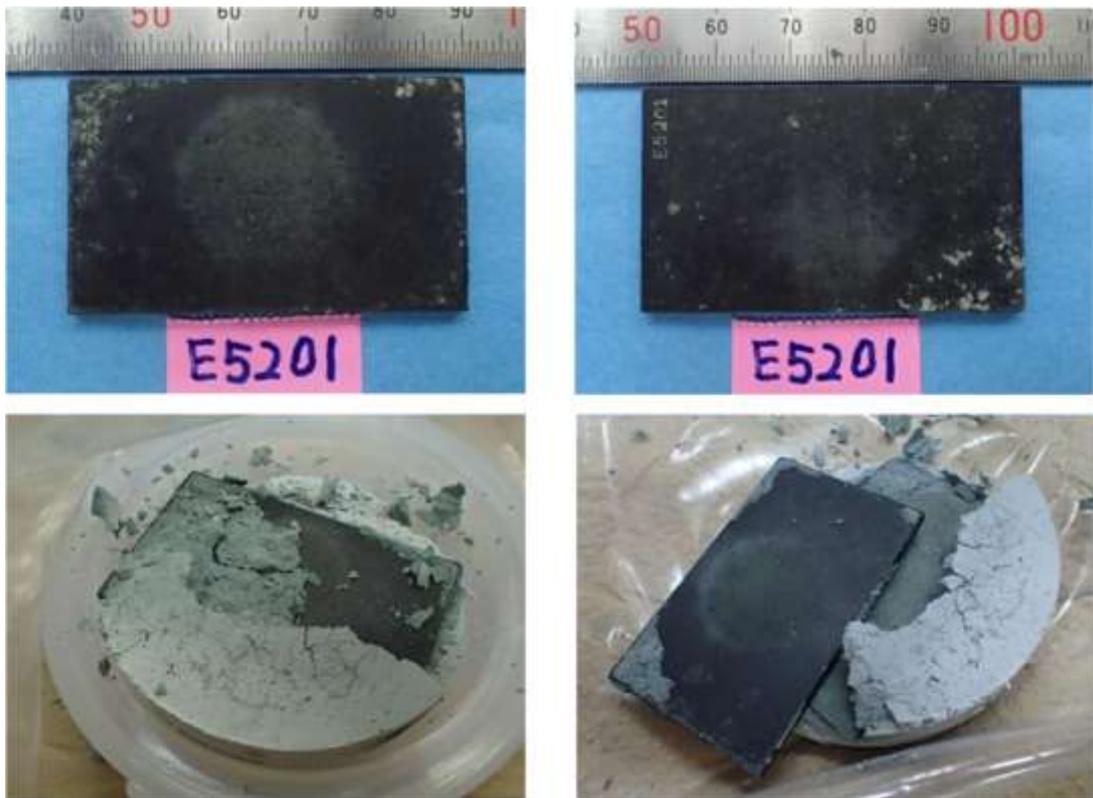
添付図 4-3-6 FW-MAG-5 (M5303)の回収状況



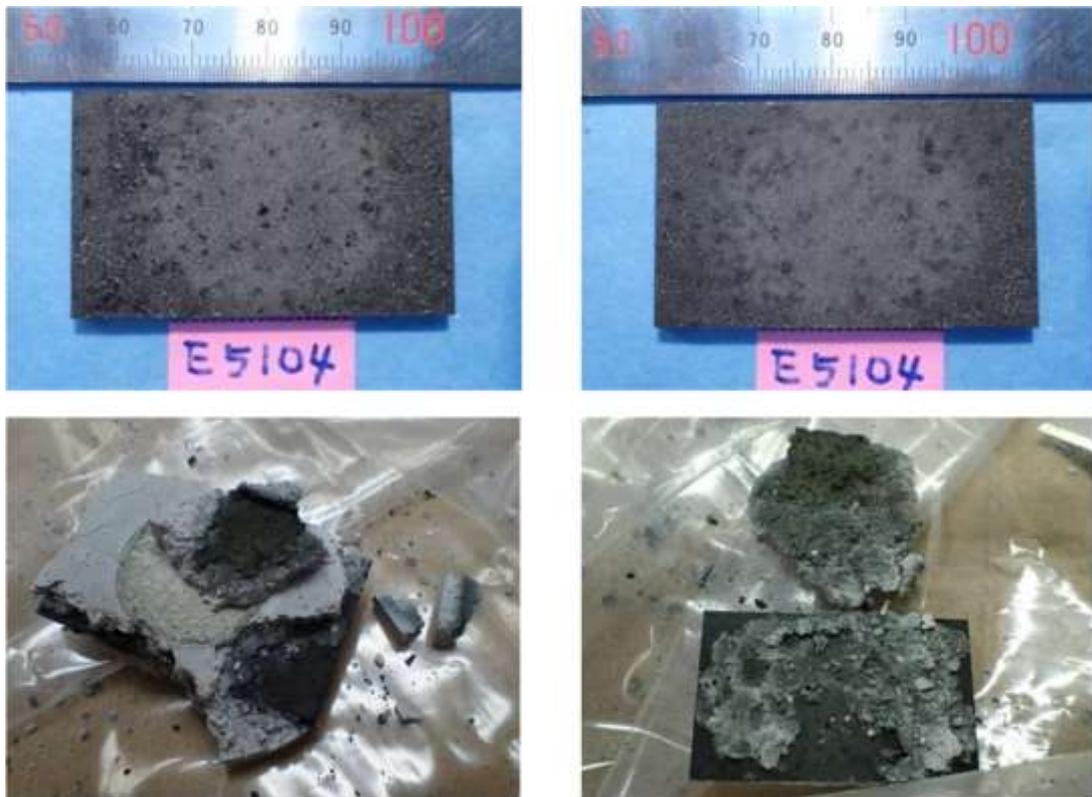
添付図 4-3-7 FW-MAG-10 (M5104)の回収状況



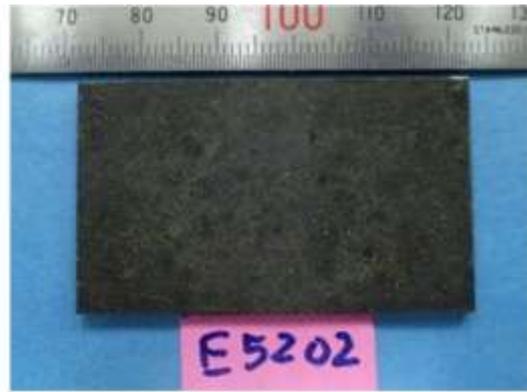
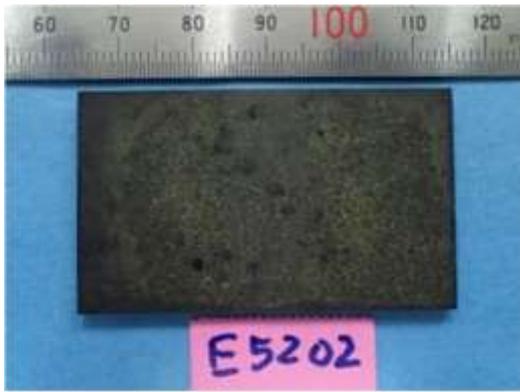
添付図 4-3-8 SW-EBW-5 (E5300)の回収状況



添付図 4-3-9 SW-EBW-10 (E5201)の回収状況



添付図 4-3-10 FW-EBW-5 (E5104)の回収状況



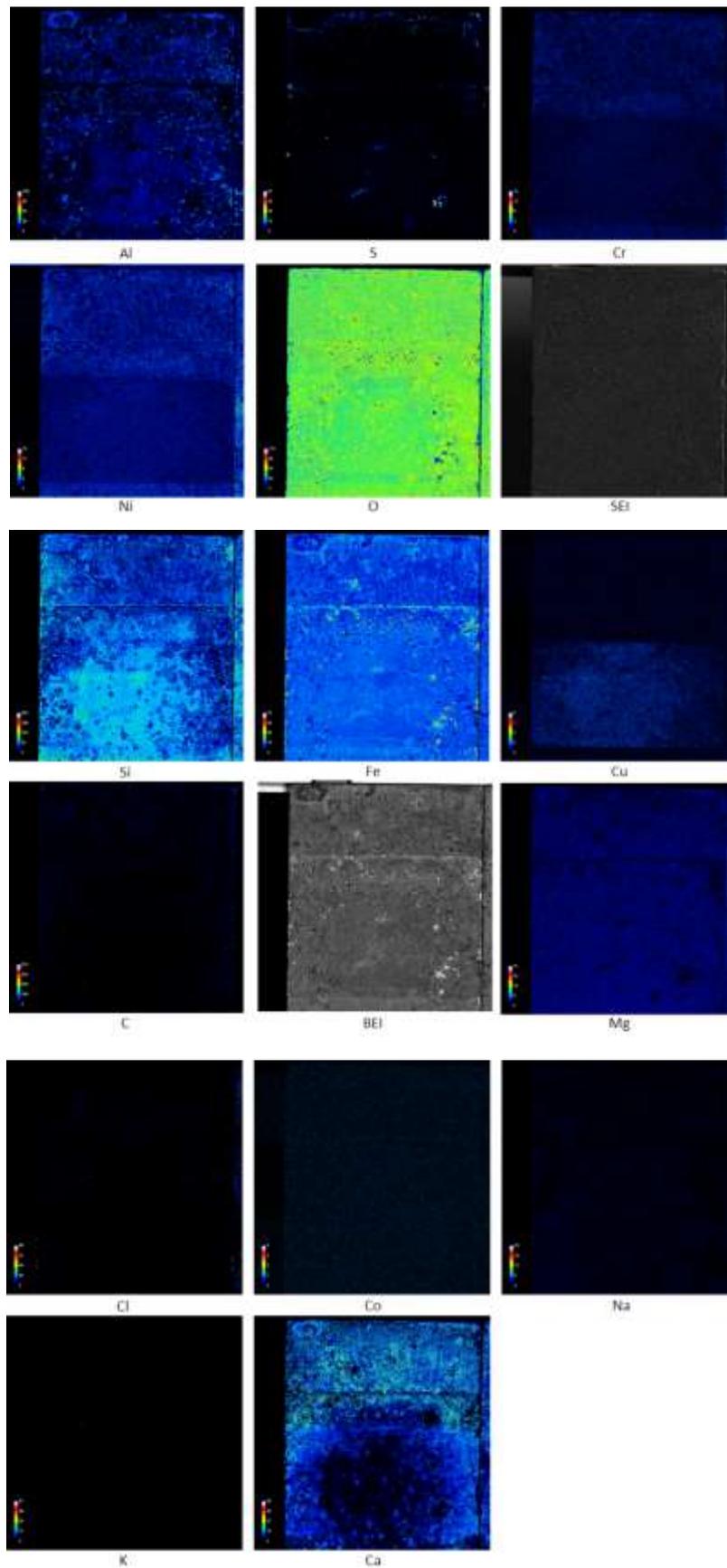
添付図 4-3-11 FW-EBW-10 (E5202)の回収状況

添付資料 4-4

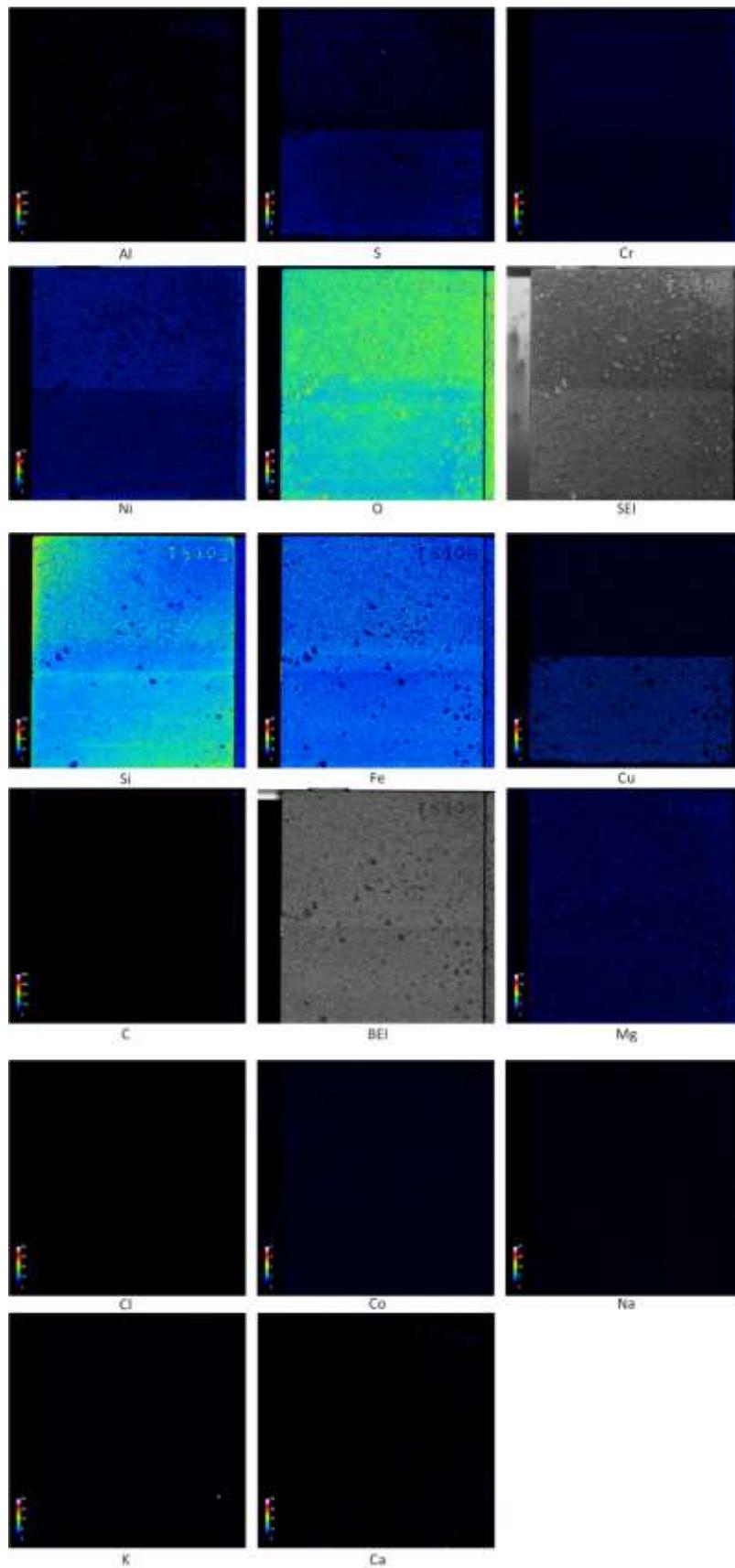
腐食生成物の分析結果

－EPMA 分析－

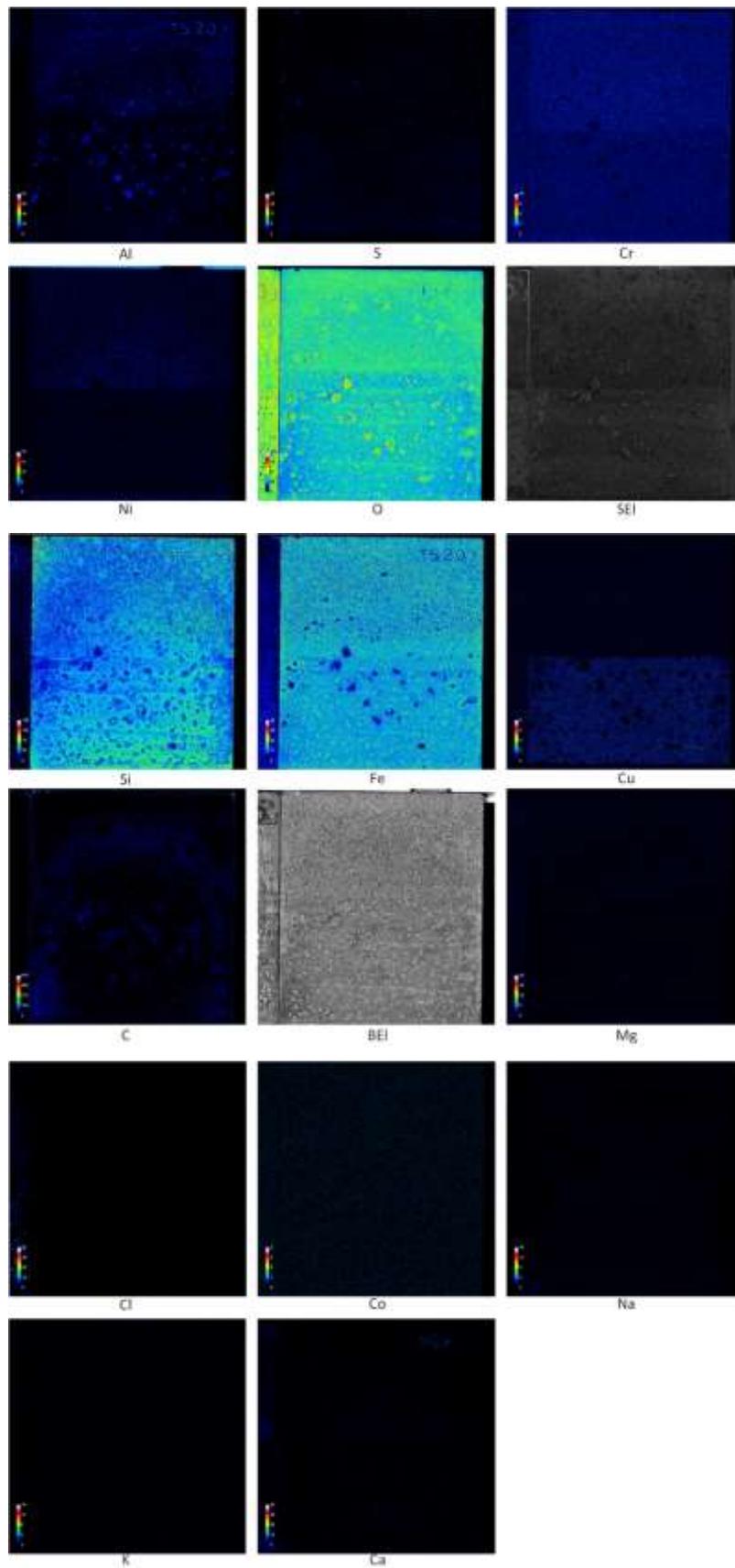
4.9 緩衝材共存環境における炭素鋼



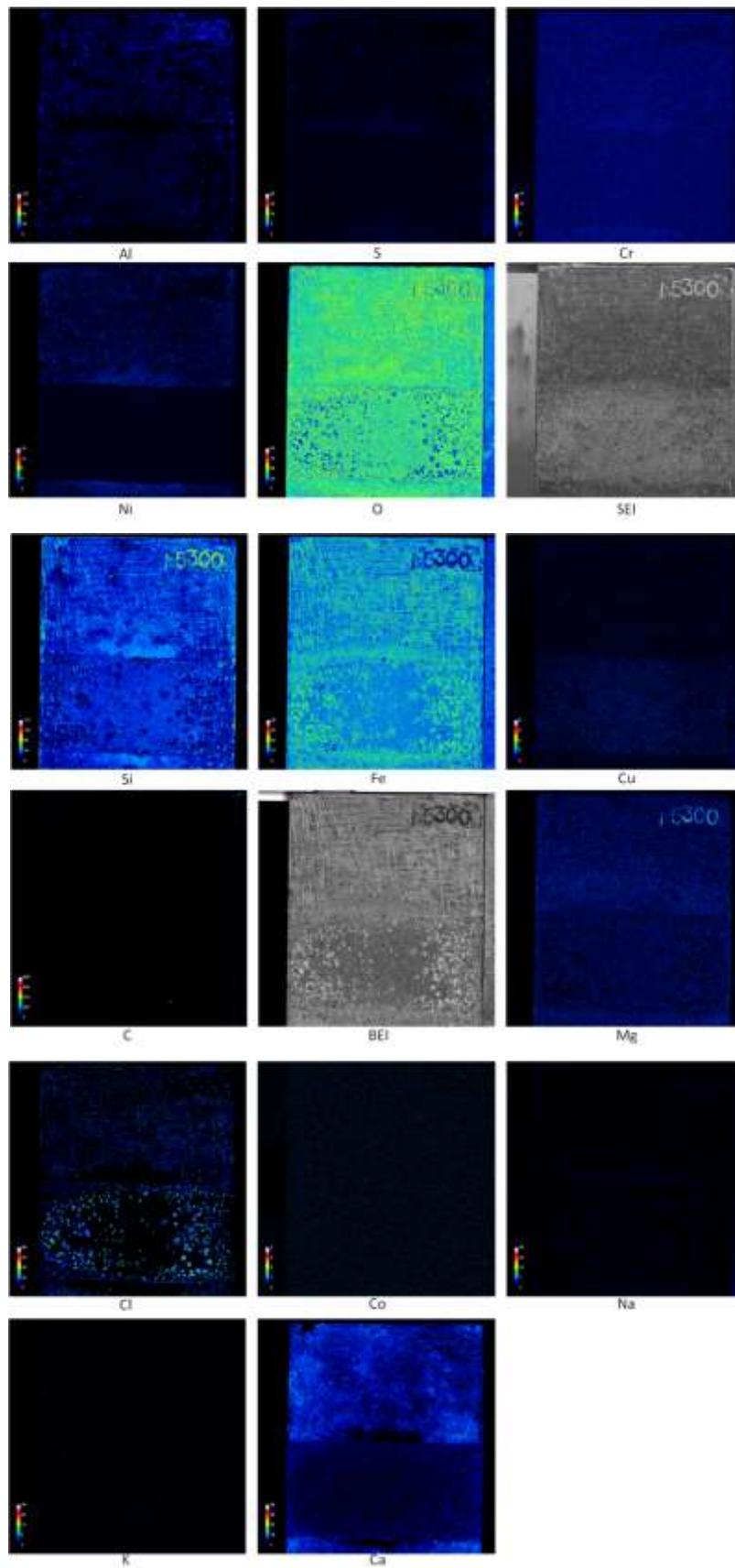
添付図 4-4-1 SW-TIG-5 (T5301)の EPMA マッピング測定結果



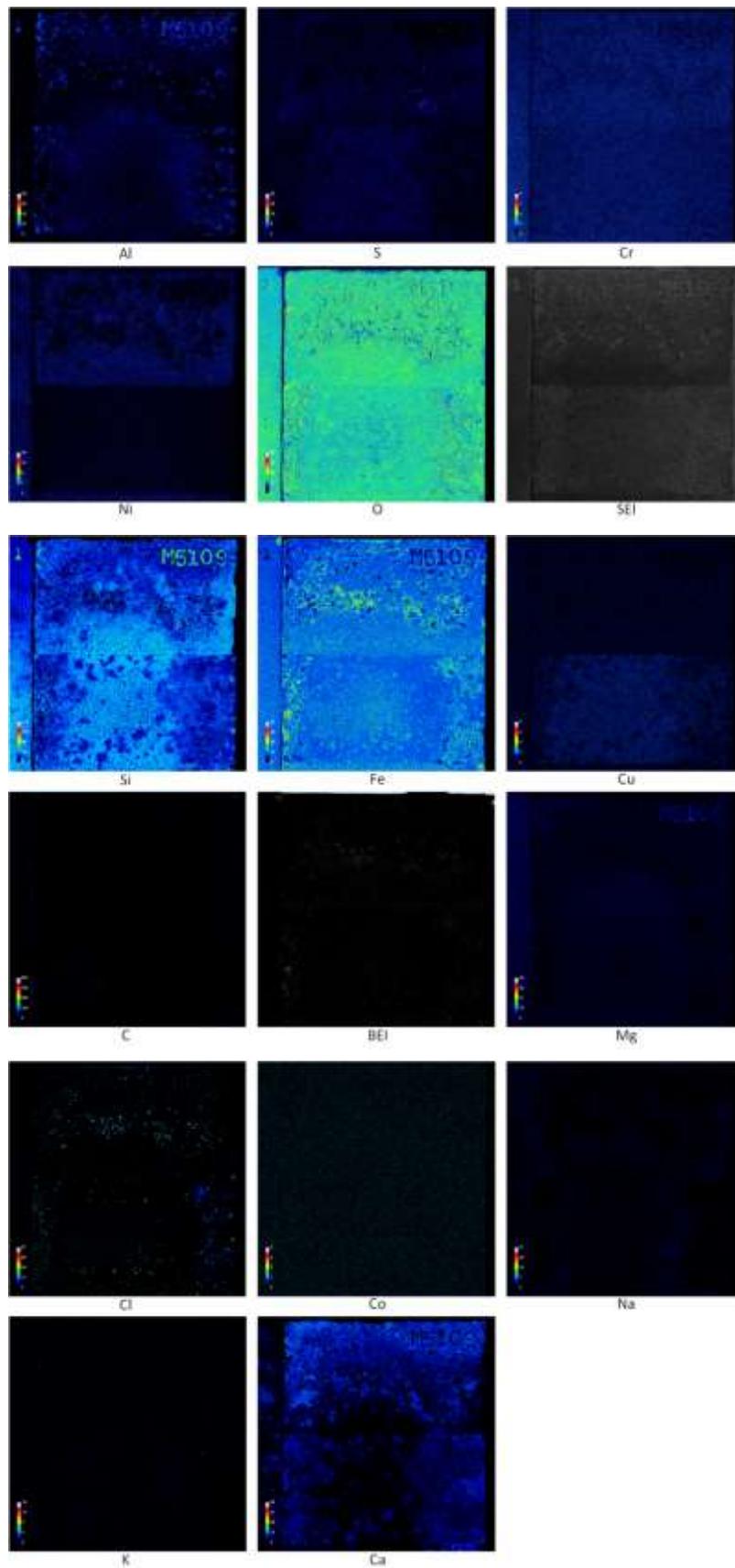
添付図 4-4-2 FW-TIG-5 (T5105)の EPMA マッピング測定結果



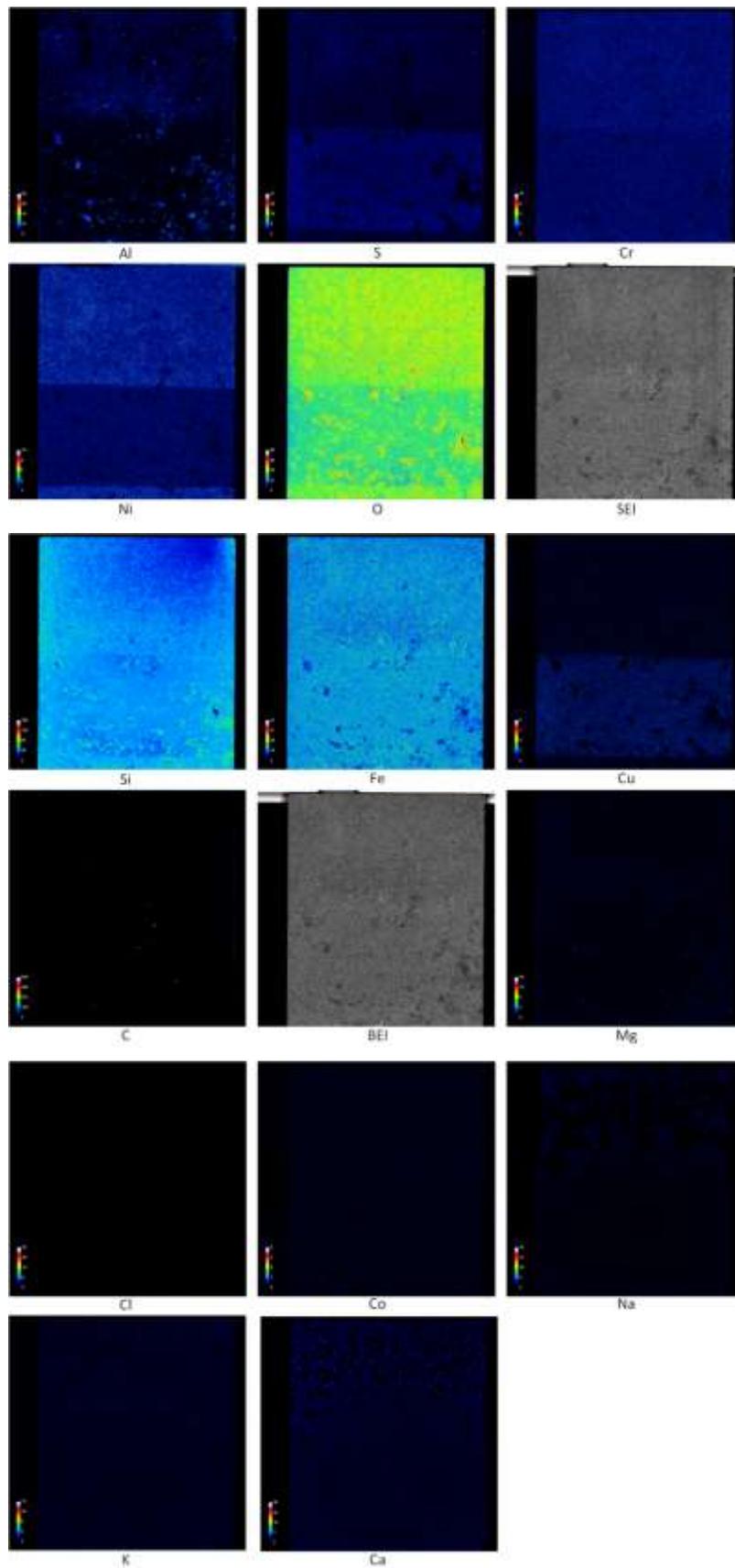
添付図 4-4-3 FW-TIG-10 (T5202)の EPMA マッピング測定結果



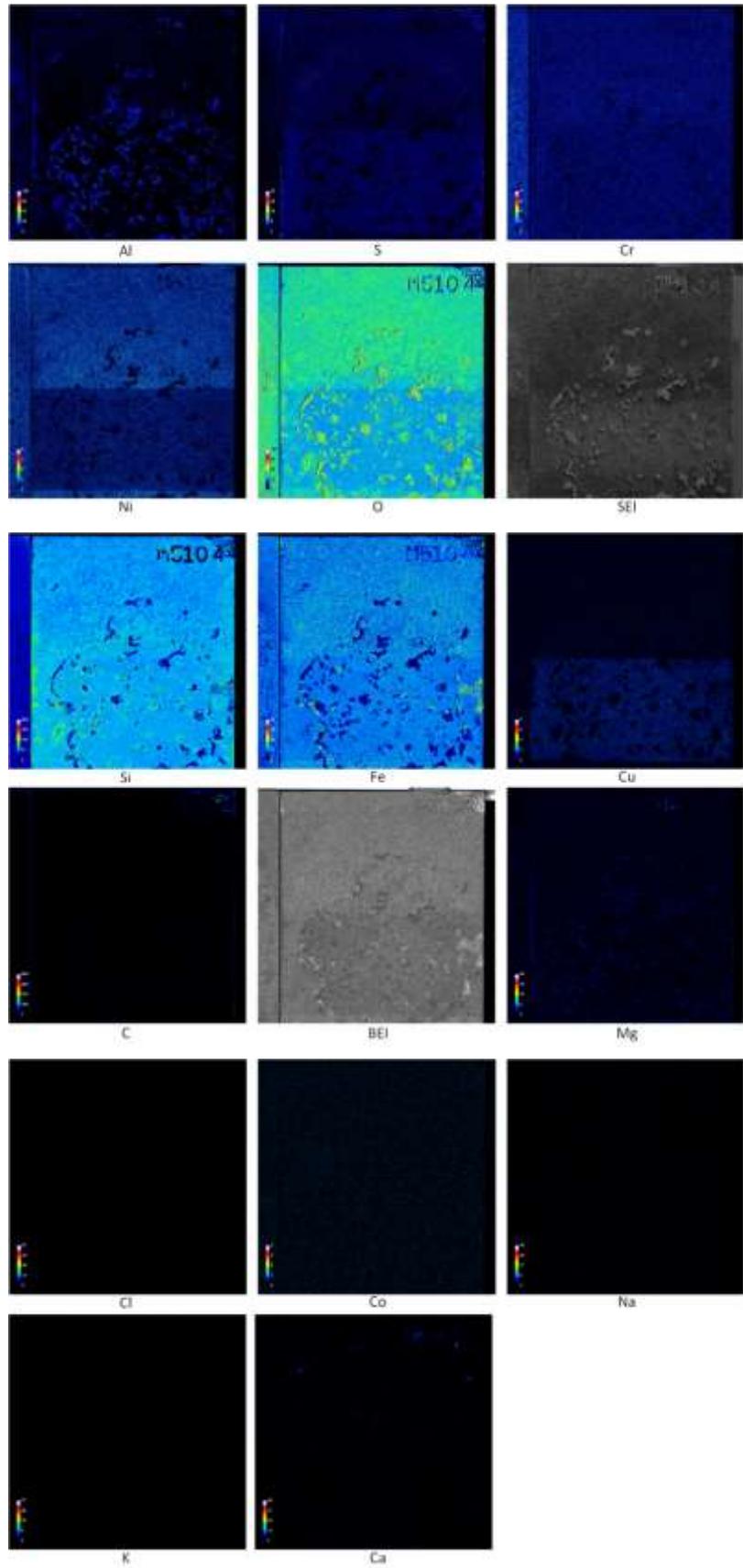
添付図 4-4-4 SW-MAG-5 (M5300)の EPMA マッピング測定結果



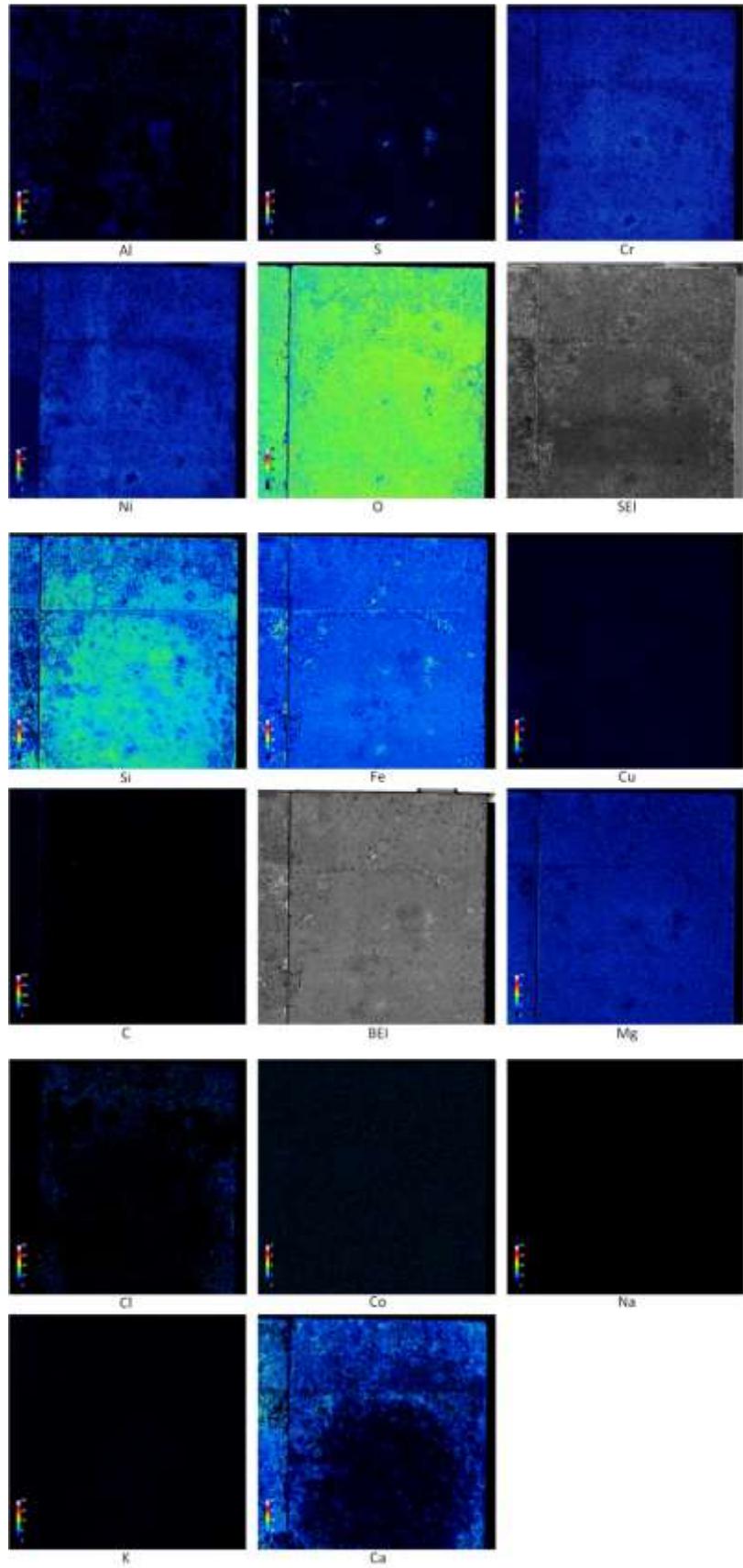
添付図 4-4-5 SW-MAG-10 (M5109)の EPMA マッピング測定結果



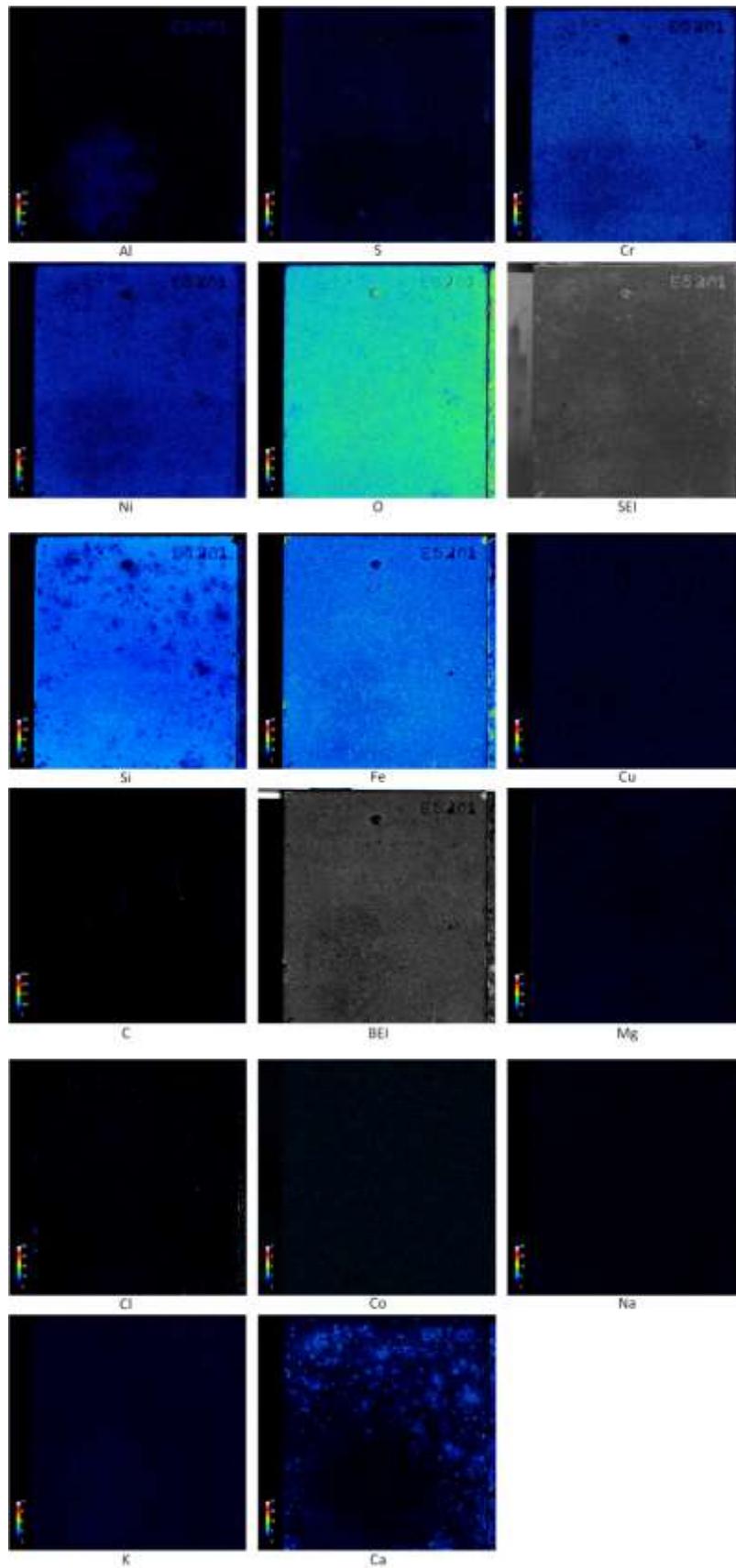
添付図 4-4-6 FW-MAG-5 (M5303)の EPMA マッピング測定結果



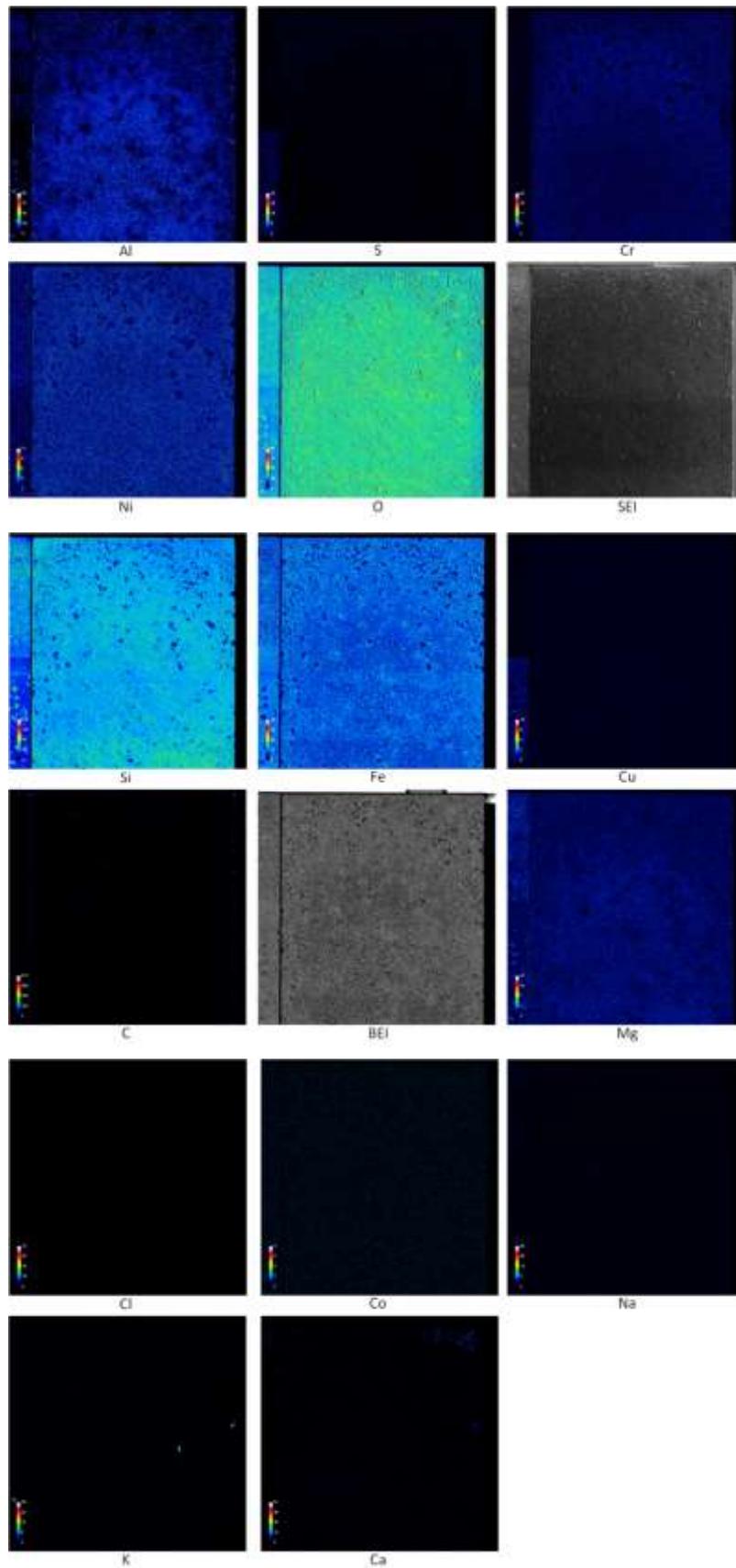
添付図 4-4-7 FW-MAG-10 (M5104)の EPMA マッピング測定結果



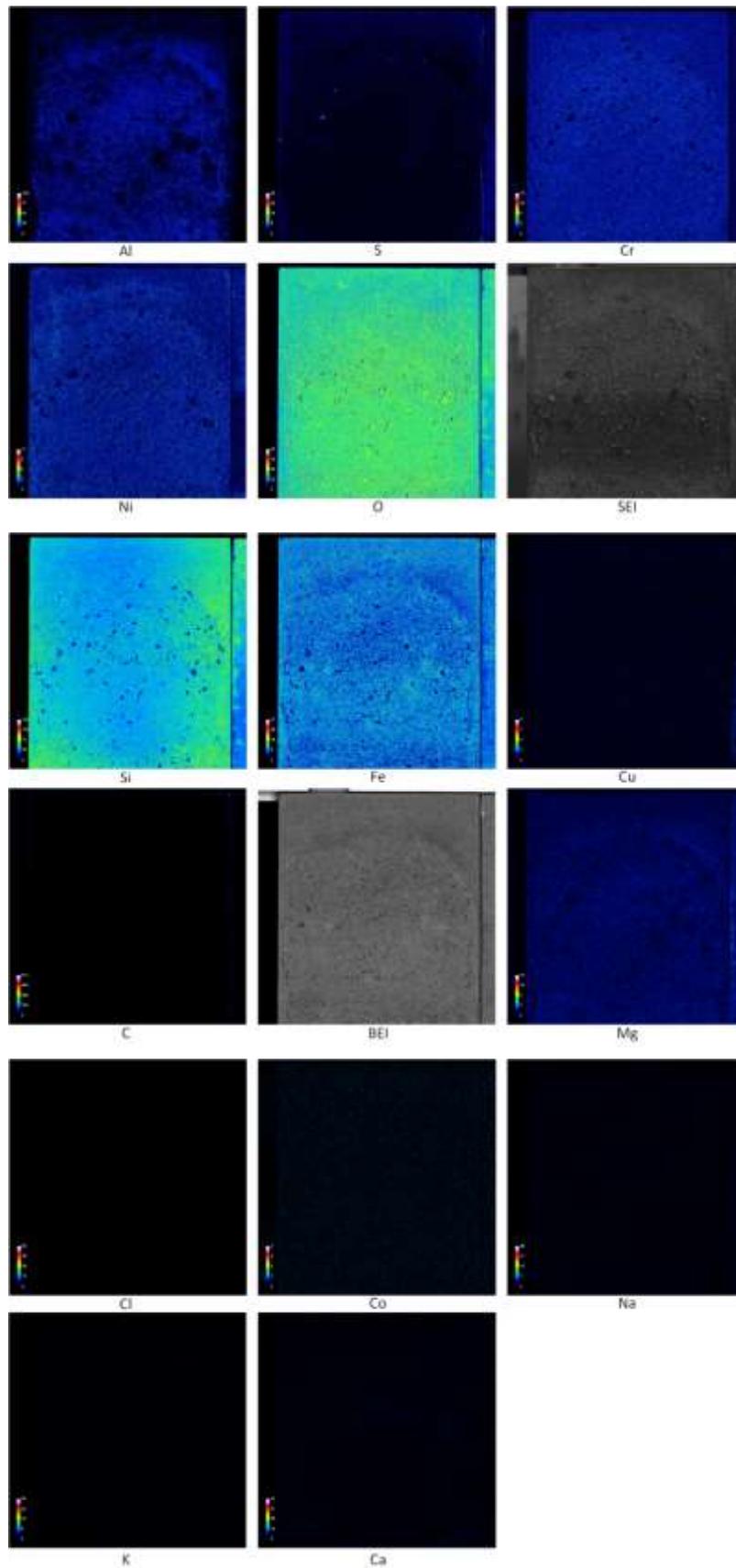
添付図 4-4-8 SW-EBW-5 (E5300)の EPMA マッピング測定結果



添付図 4-4-9 SW-EBW-10 (E5201)の EPMA マッピング測定結果



添付図 4-4-10 FW-EBW-5 (E5104)の EPMA マッピング測定結果



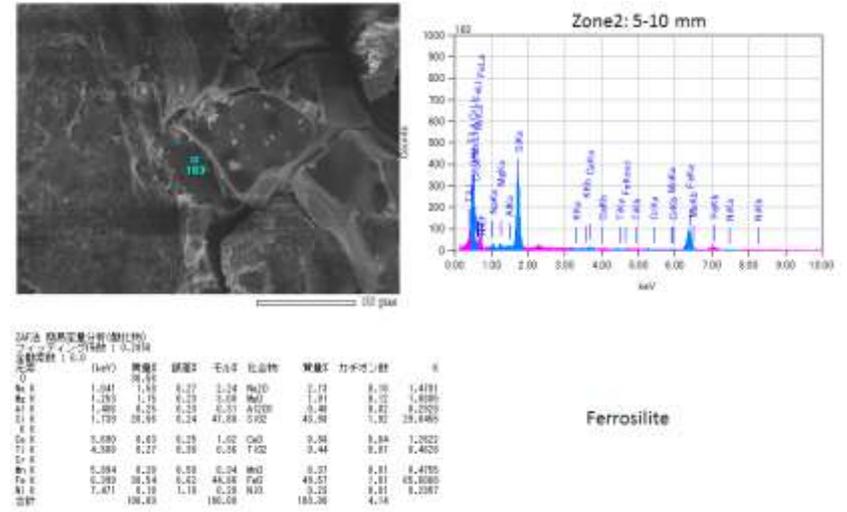
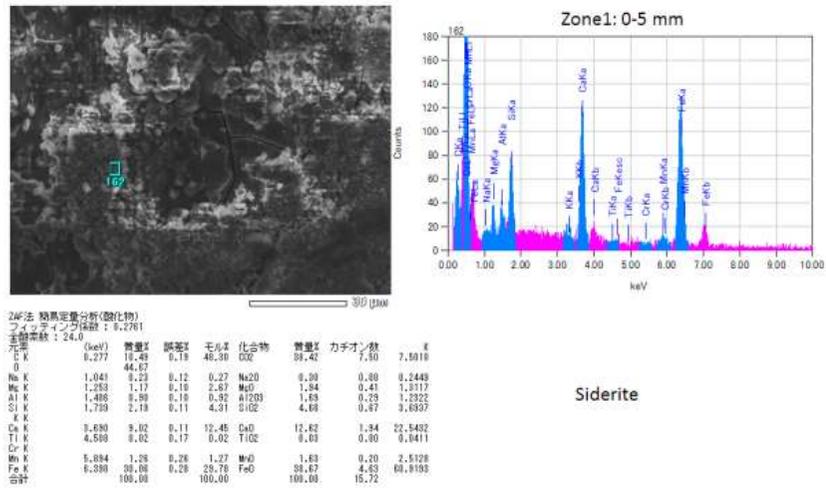
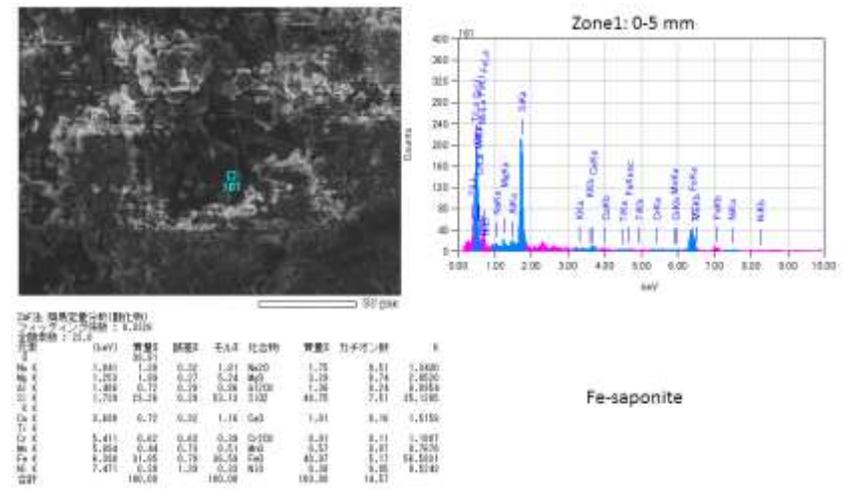
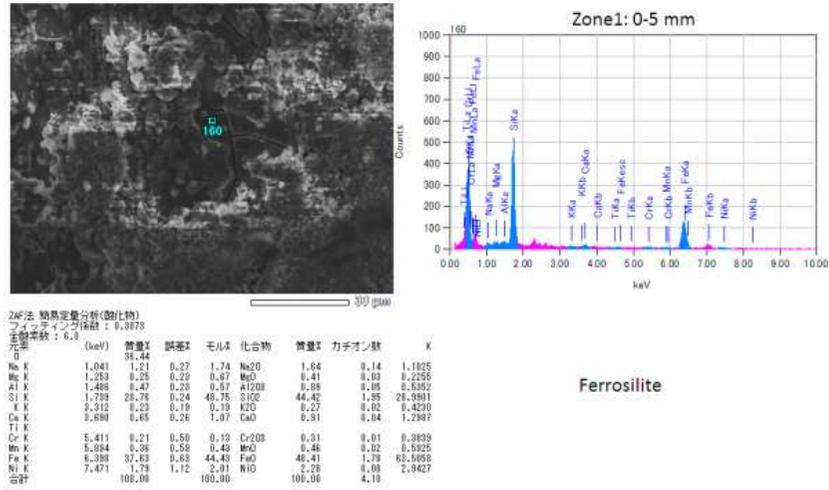
添付図 4-4-11 FW-EBW-10 (E5202)の EPMA マッピング測定結果

添付資料 4-5

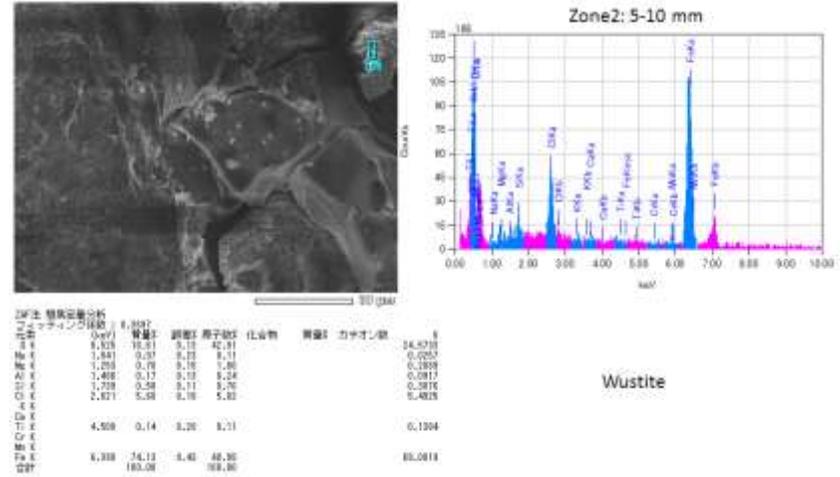
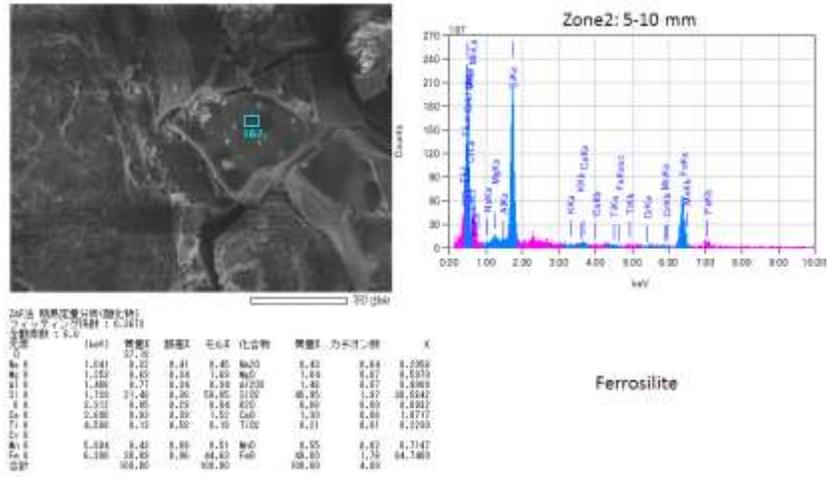
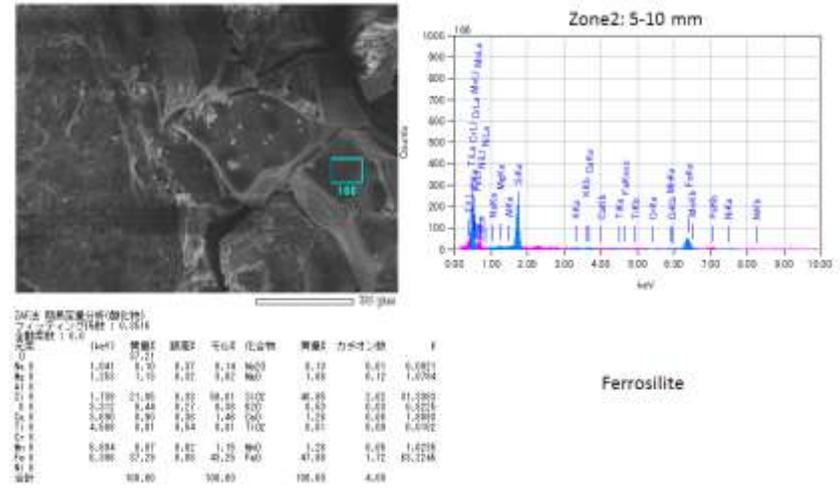
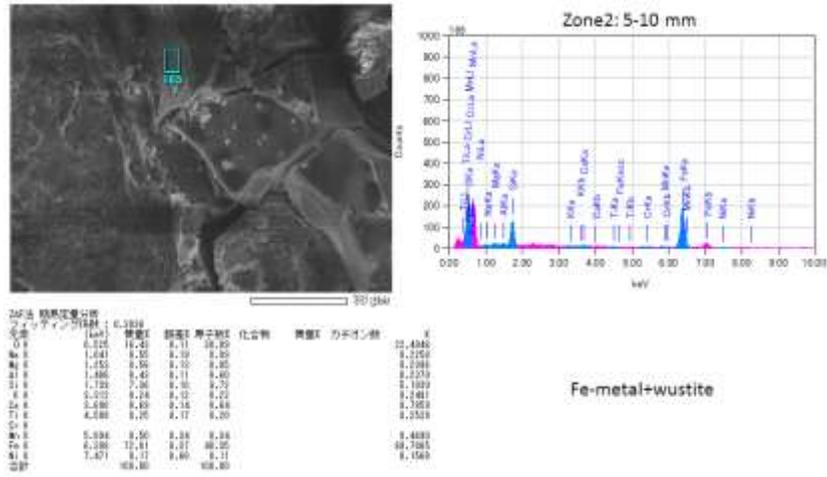
腐食生成物の分析結果

—FESEM 観察および EDS 分析—

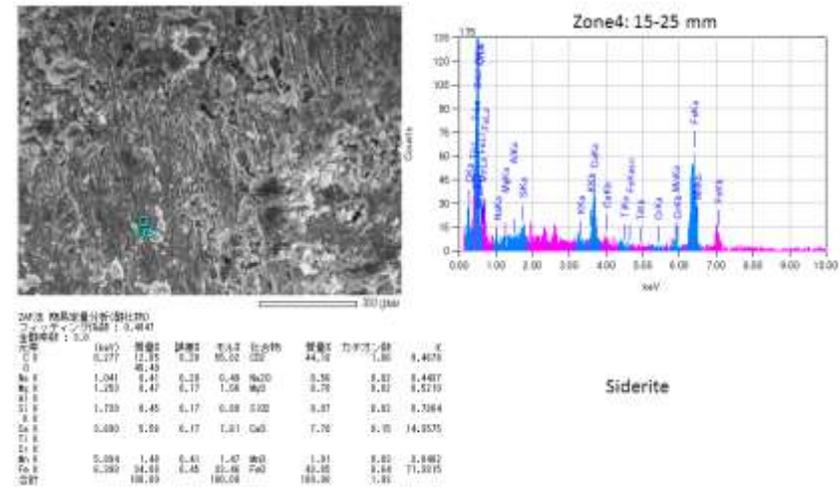
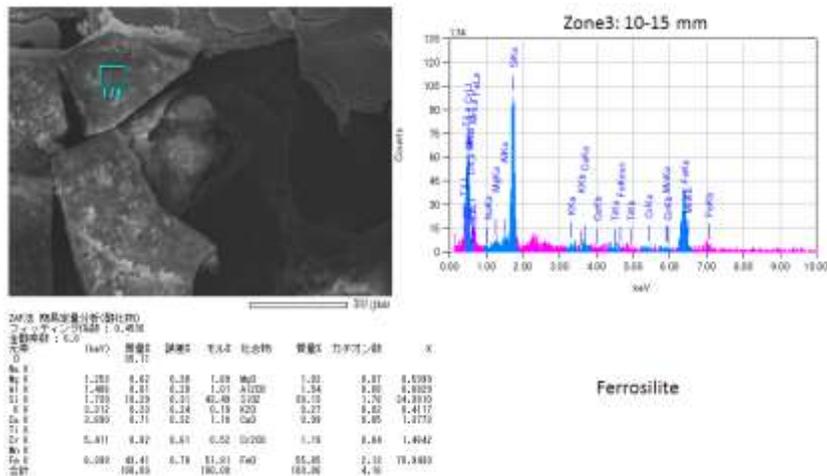
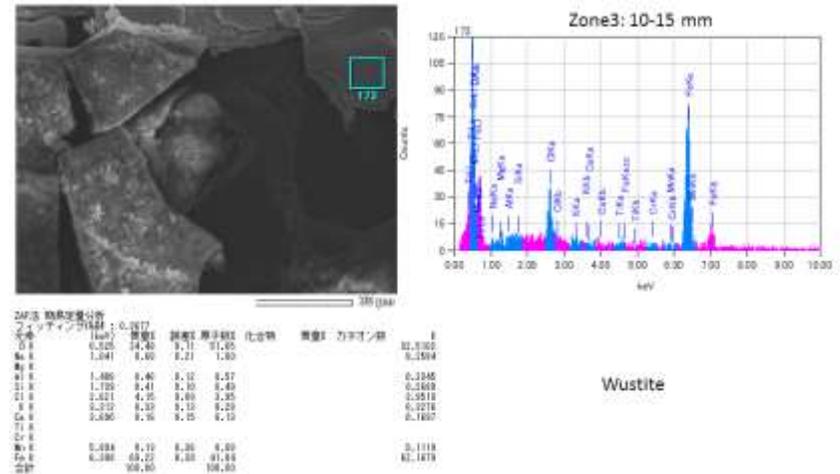
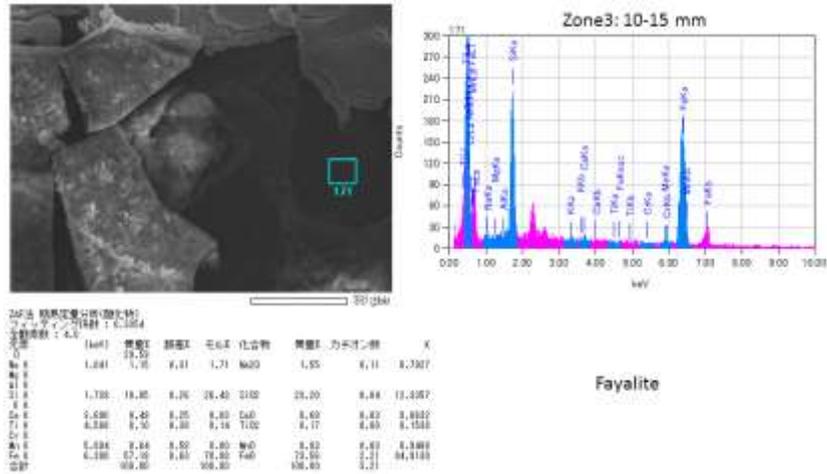
4.9 緩衝材共存環境における炭素鋼



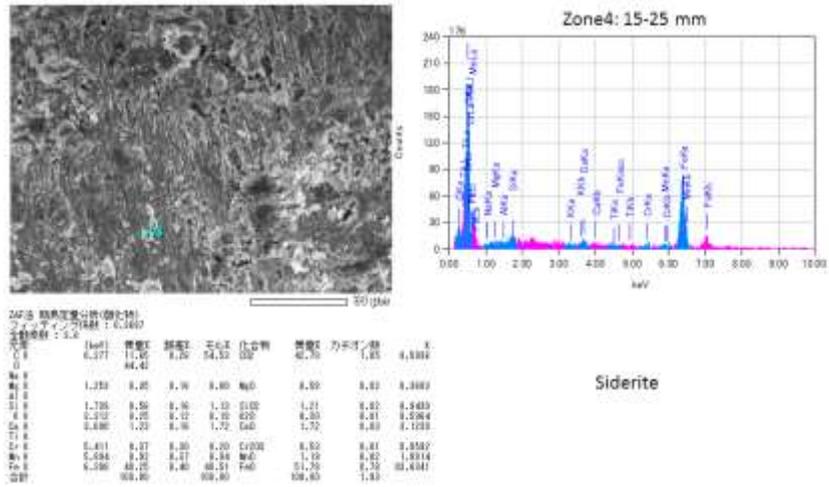
添付図 4-5-1 SW-TIG-5 (T5301)の FESEM 観察および EDS 分析 (1)



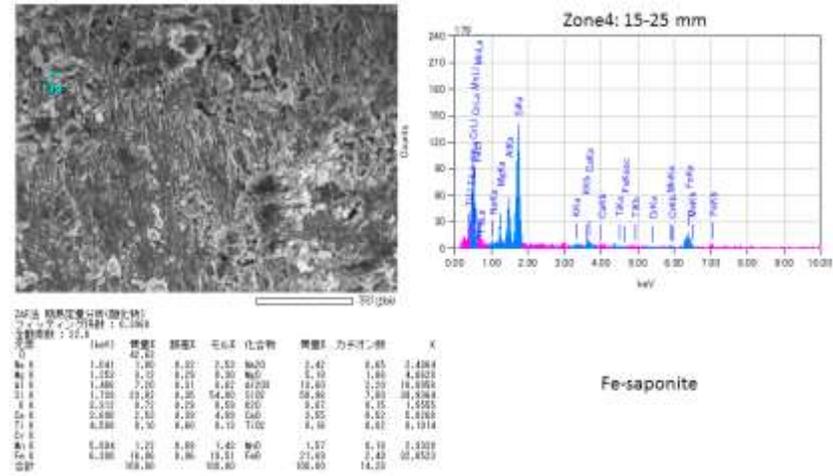
添付図 4-5-2 SW-TIG-5 (T5301)の FESEM 観察および EDS 分析 (2)



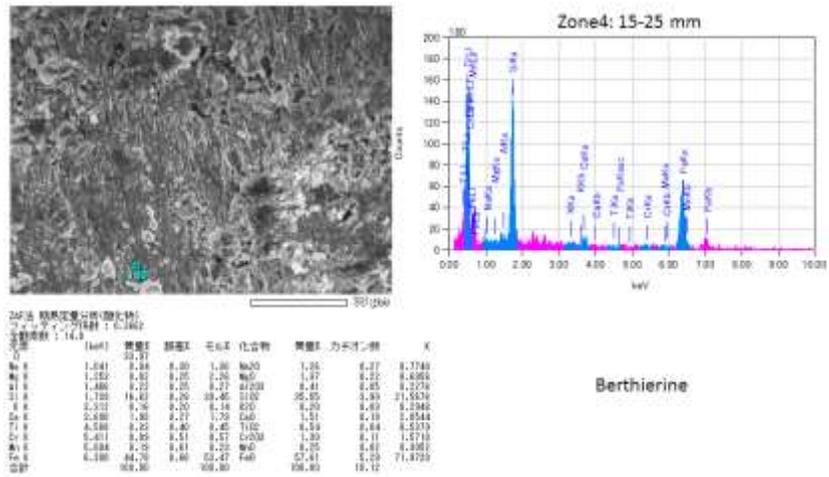
添付図 4-5-3 SW-TIG-5 (T5301)の FESEM 観察および EDS 分析 (3)



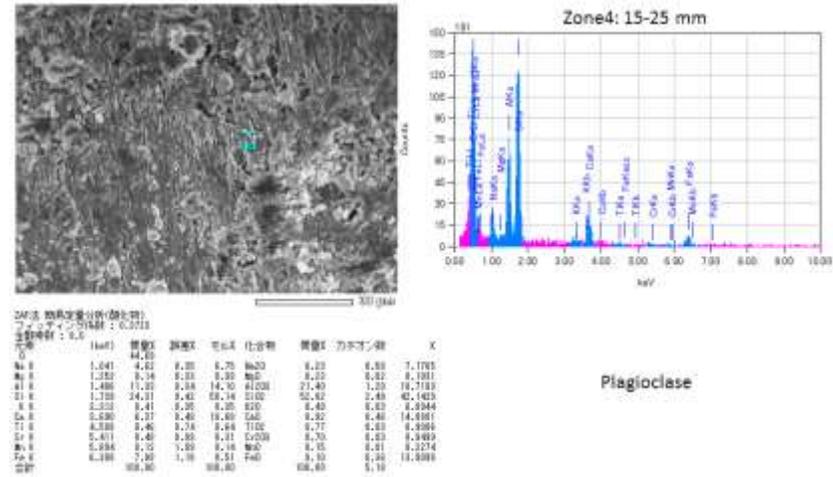
Siderite



Fe-saponite

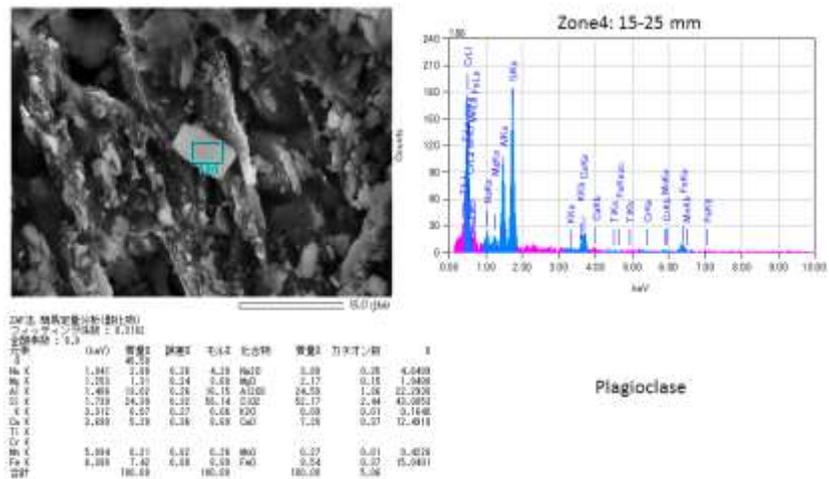
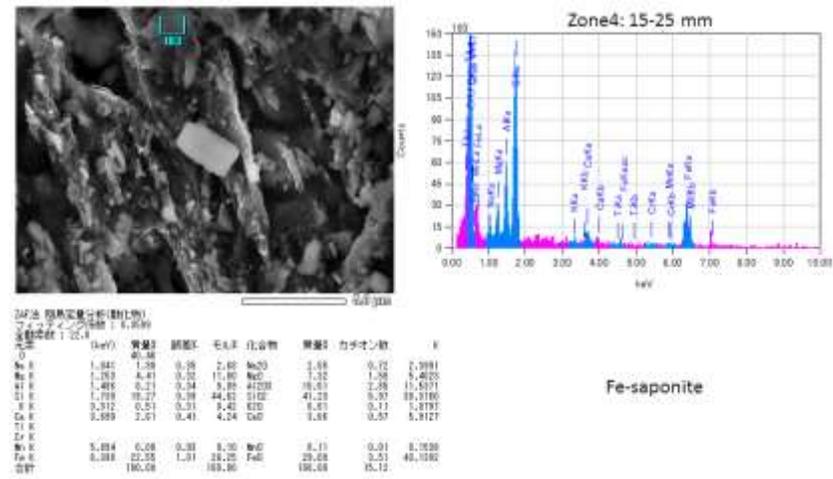
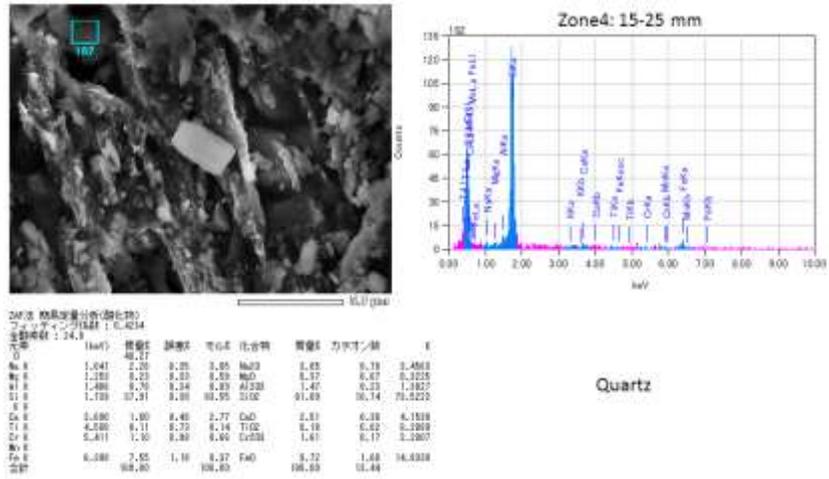


Berthierine

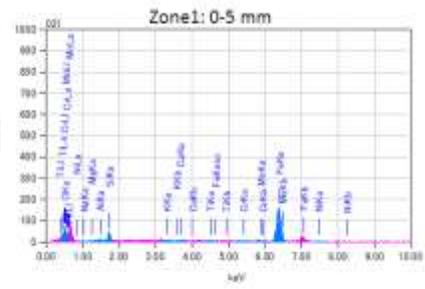
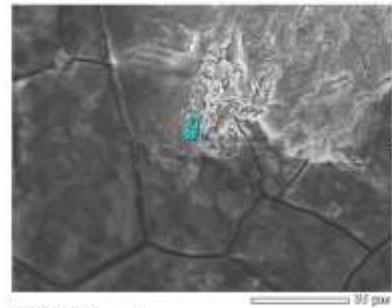


Plagioclase

添付図 4-5-4 SW-TIG-5 (T5301)の FESEM 観察および EDS 分析 (4)



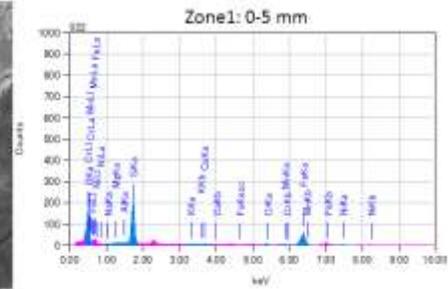
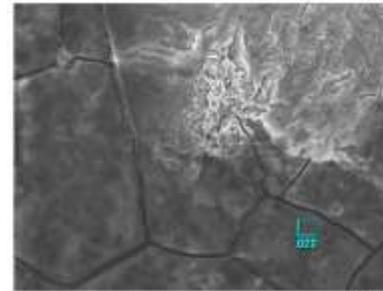
添付図 4-5-5 SW-TIG-5 (T5301)の FESEM 観察および EDS 分析 (5)



2AP法 結果定量分析(微化物)
 フェデーション(区画): 0.3121
 分析面積: 27.1

元素	Wt%	原子%	検出率	化合物	質量% 力平均値	Z
O	6.155	6.44	6.80	Na2O	8.173	8
Na	1.343	8.51	8.10	Na2O	8.173	11
Fe	1.552	8.16	8.10	FeO	8.247	26
S	1.490	6.47	6.80	S2O3	8.247	16
Ca	1.759	7.76	8.20	CaO	8.173	20
Si	2.317	6.15	6.80	SiO2	8.173	14
Co	2.889	6.19	6.10	CoO	8.342	27
Ti	4.166	6.85	6.10	TiO2	8.173	22
Cr	5.411	6.85	6.10	Cr2O3	8.314	24
Mn	5.944	1.47	6.10	MnO	8.173	25
Fa	6.388	16.44	6.10	FaO	8.173	26
Ni	7.471	6.80	6.80	NiO	8.247	28
合計	100.00	100.00				

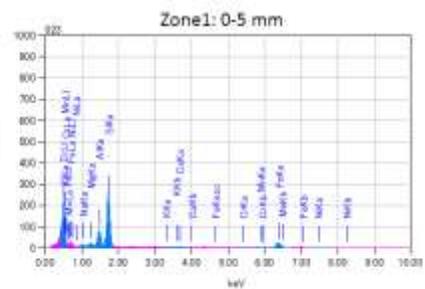
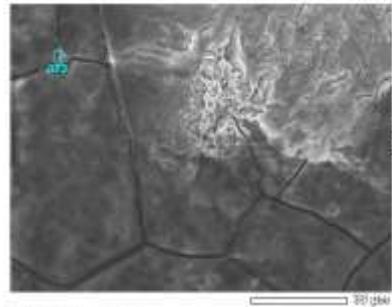
Fe-metal



2AP法 結果定量分析(微化物)
 フェデーション(区画): 1.6123
 分析面積: 27.1

元素	Wt%	原子%	検出率	化合物	質量% 力平均値	Z
O	27.41					
Na	1.552	8.17	8.17	Na2O	1.27	8
Fe	1.488	6.16	6.17	FeO	6.45	26
Si	1.788	17.88	8.20	SiO2	46.88	14
Ca	2.317	6.10	6.10	CaO	6.11	20
S	2.688	6.10	6.10	S2O3	6.80	16
Cr	5.411	1.29	6.10	Cr2O3	2.58	24
Mn	5.944	6.75	6.10	MnO	1.84	25
Fa	6.388	16.20	6.10	FaO	40.51	26
Ni	7.471	1.20	6.10	NiO	1.44	28
合計	100.00	100.00			14.47	

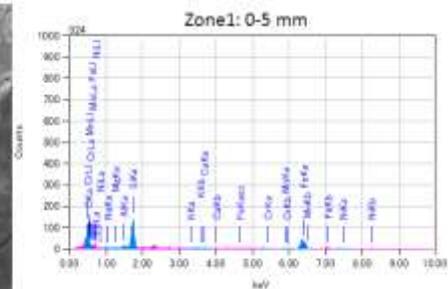
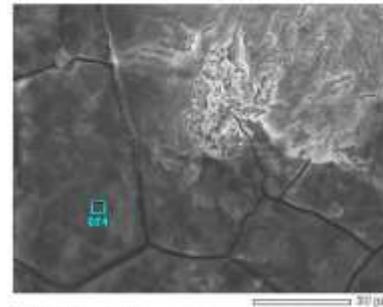
Fe-saponite



2AP法 結果定量分析(微化物)
 フェデーション(区画): 0.3123
 分析面積: 27.1

元素	Wt%	原子%	検出率	化合物	質量% 力平均値	Z
O	1.641	44.50				
Na	1.552	1.31	6.16	Na2O	1.65	8
Fe	1.488	7.85	6.10	FeO	2.51	26
Si	1.788	17.85	6.10	SiO2	24.46	14
Ca	2.317	6.10	6.10	CaO	59.62	20
S	2.688	6.10	6.10	S2O3	8.79	16
Cr	5.411	6.17	6.10	Cr2O3	6.85	24
Mn	5.944	16.79	6.10	MnO	21.89	25
Fa	6.388	16.70	6.10	FaO	31.89	26
Ni	7.471	6.17	6.10	NiO	6.32	28
合計	100.00	100.00			13.42	

Fe-saponite

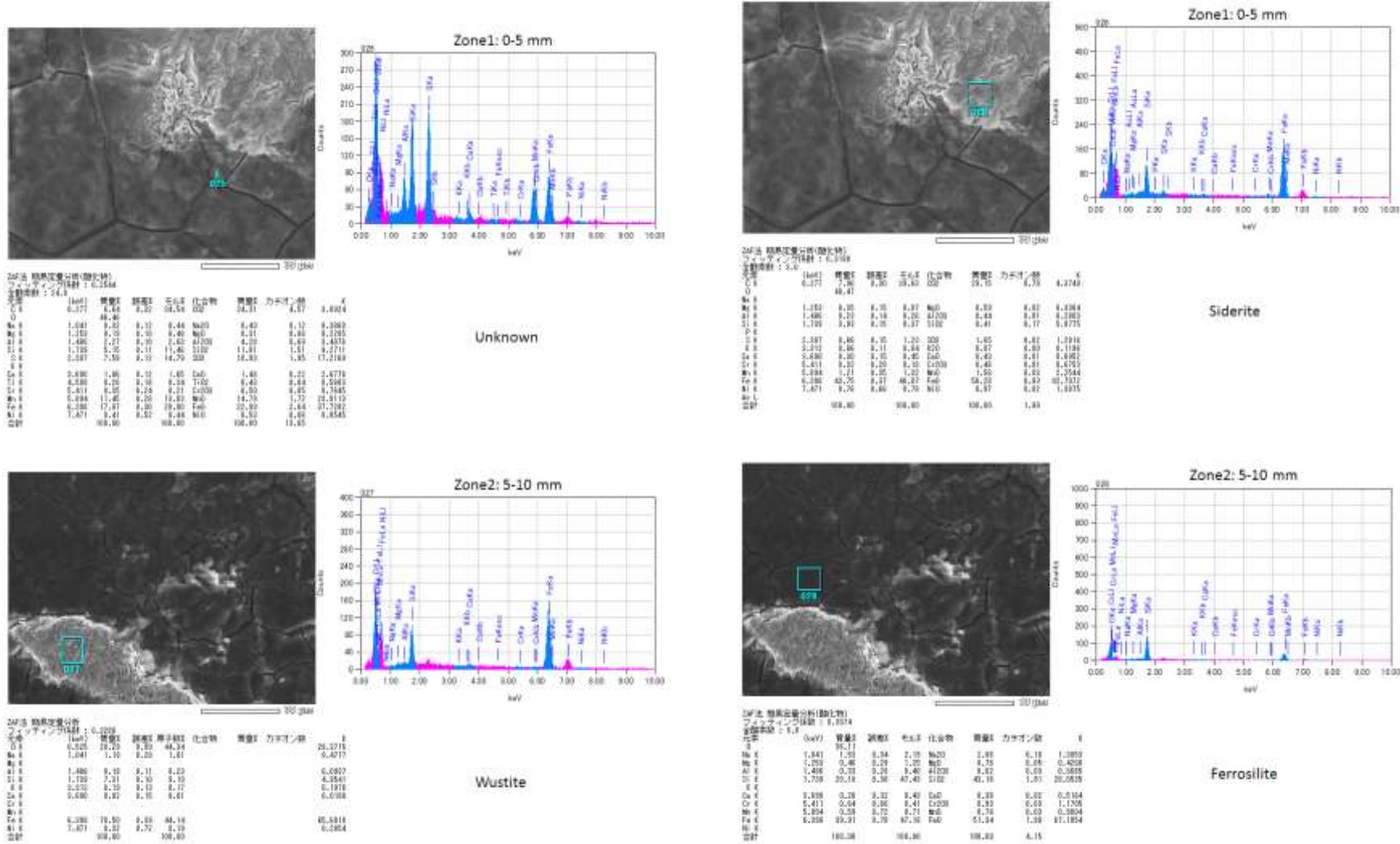


2AP法 結果定量分析(微化物)
 フェデーション(区画): 0.4231
 分析面積: 6.0

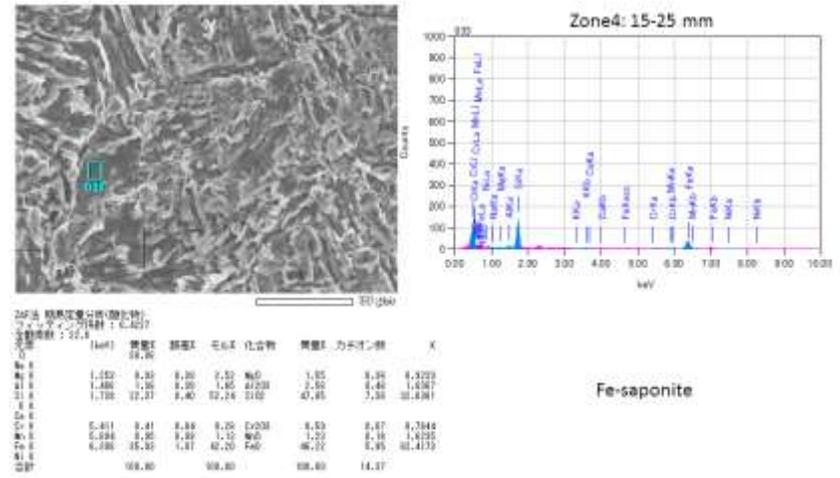
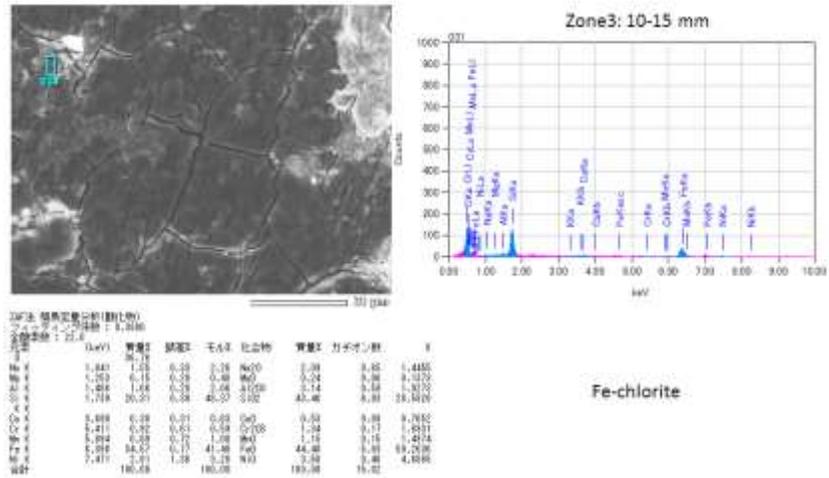
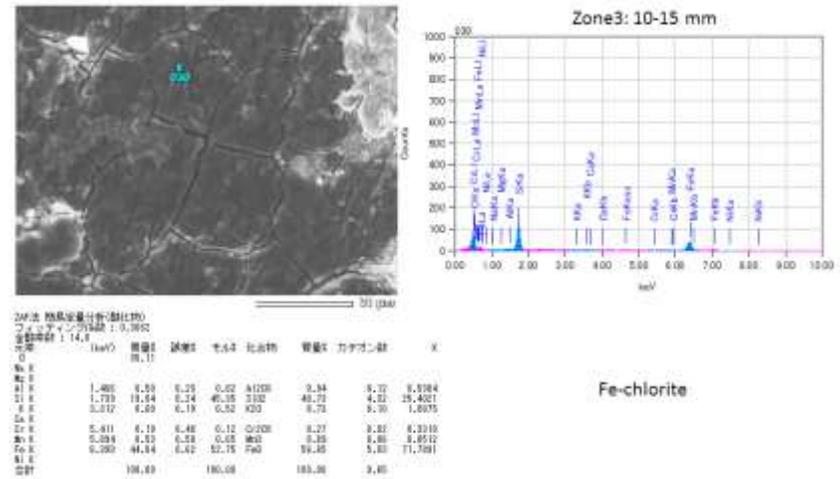
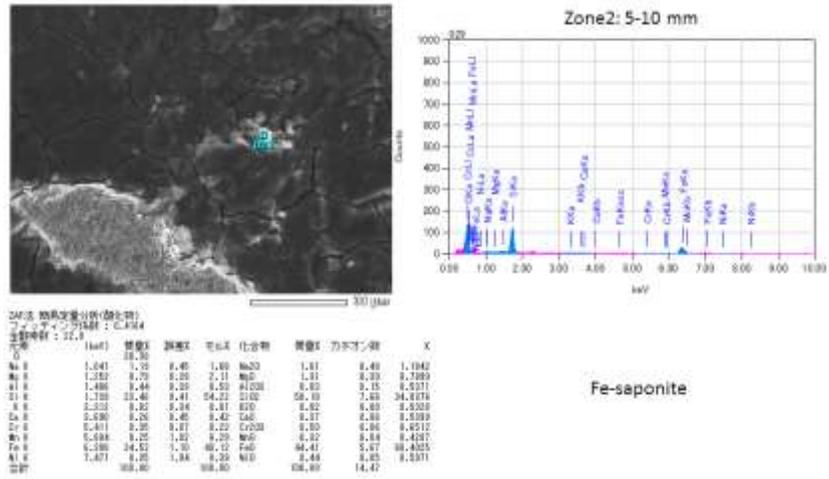
元素	Wt%	原子%	検出率	化合物	質量% 力平均値	Z
O	56.40					
Na	1.641	6.16	6.41	Na2O	6.40	8
Fe	1.319	6.85	6.10	FeO	6.81	26
Si	1.488	6.17	6.10	SiO2	6.71	14
Ca	1.788	18.71	6.10	CaO	44.43	20
S	2.688	6.10	6.10	S2O3	6.84	16
Cr	5.411	6.10	6.10	Cr2O3	6.84	24
Mn	5.944	6.46	6.10	MnO	6.89	25
Fa	6.388	16.51	6.10	FaO	32.58	26
Ni	7.471	6.17	6.10	NiO	1.92	28
合計	100.00	100.00			4.65	

Ferrosilite

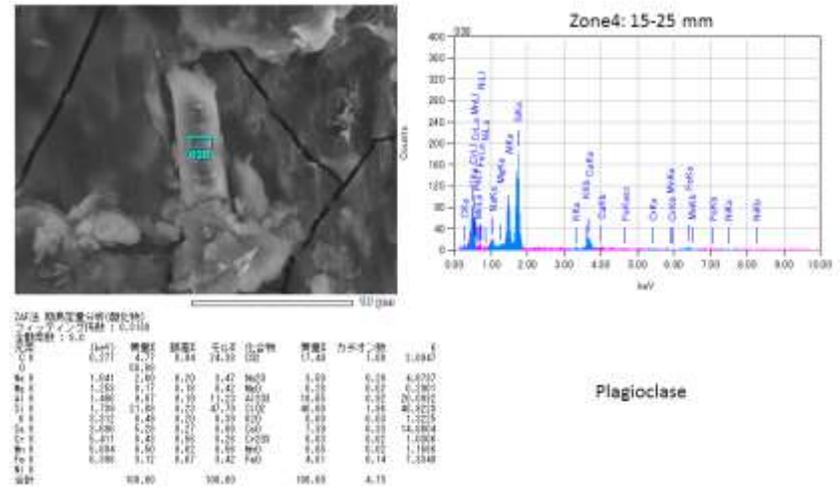
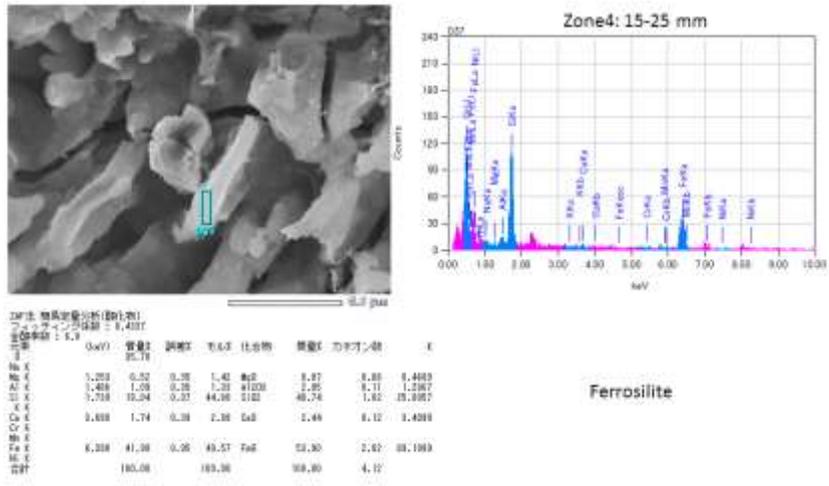
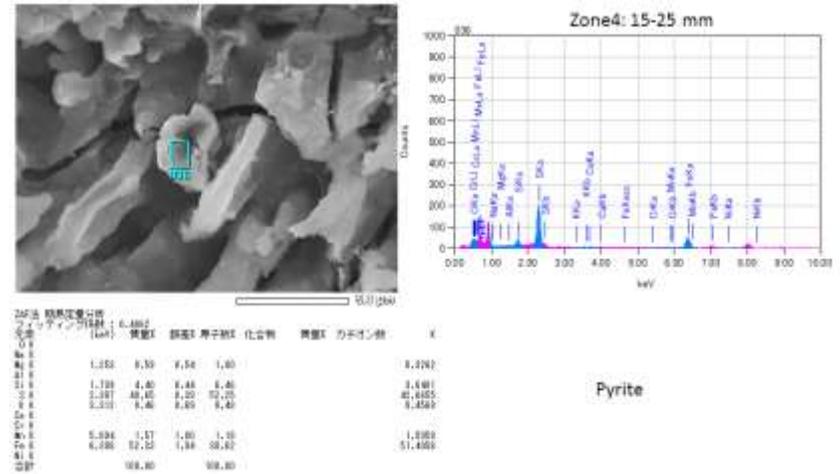
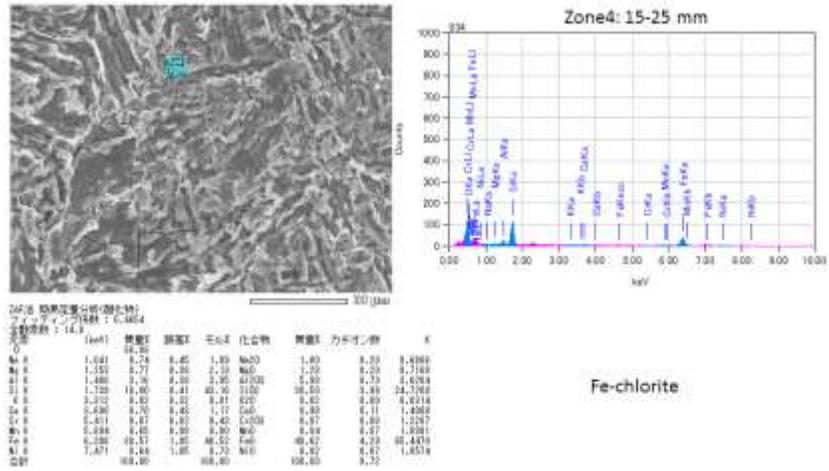
添付図 4-5-6 FW-TIG-5 (T5105)の FESEM 観察および EDS 分析 (1)



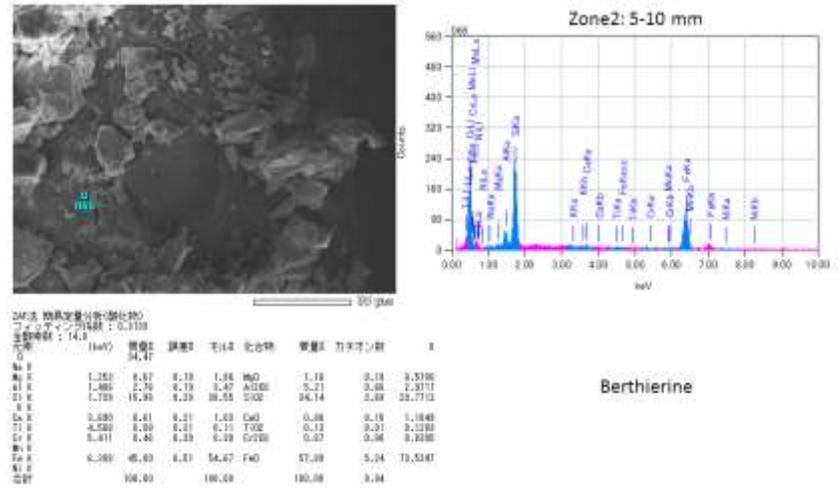
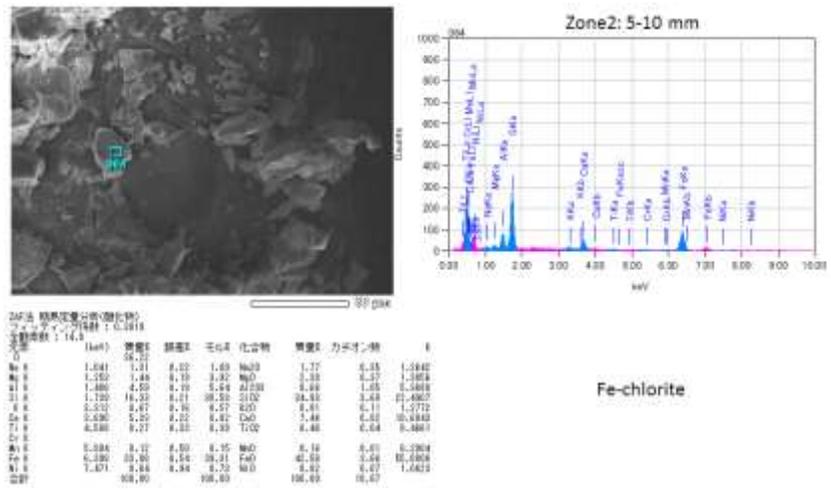
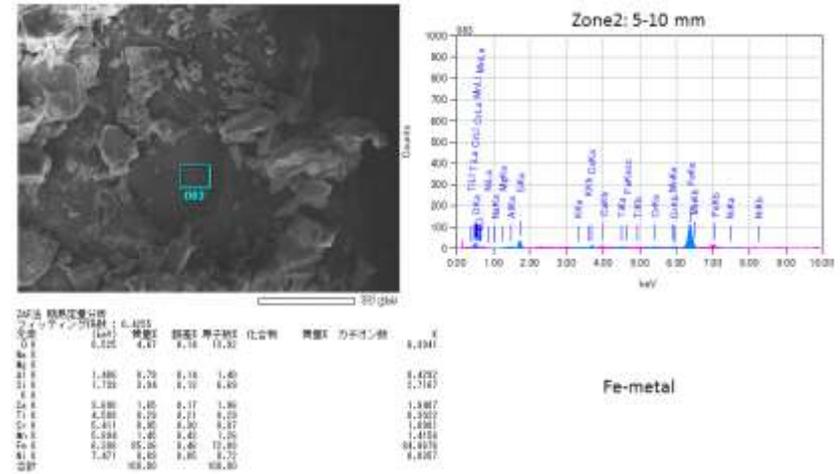
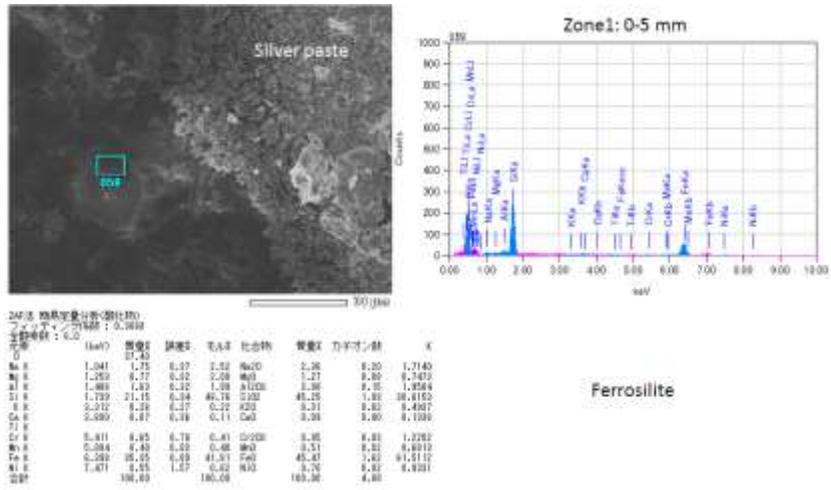
添付図 4-5-7 FW-TIG-5 (T5105)の FESEM 観察および EDS 分析 (2)



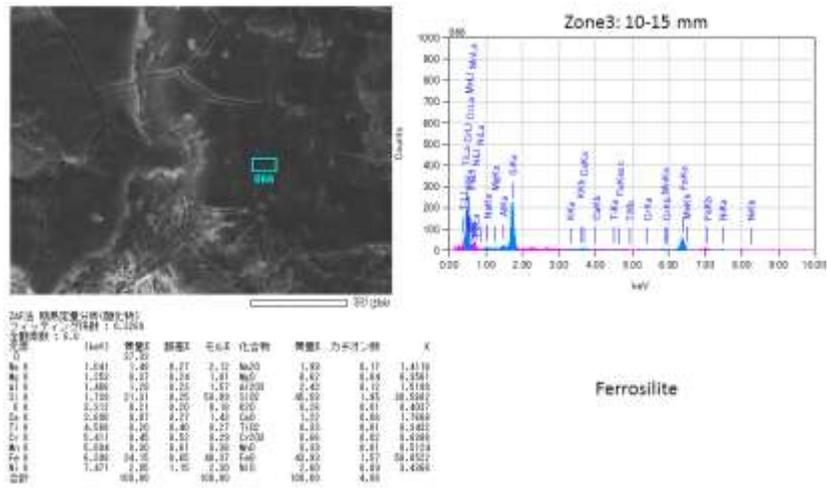
添付図 4-5-8 FW-TIG-5 (T5105)の FESEM 観察および EDS 分析 (3)



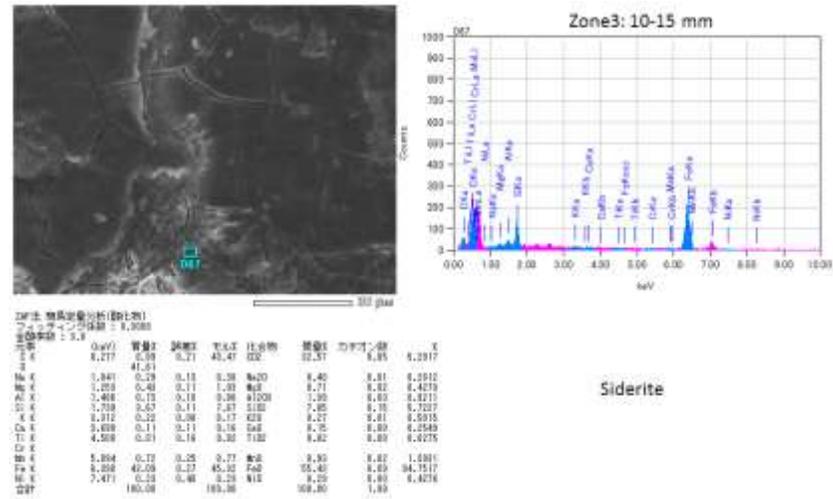
添付図 4-5-9 FW-TIG-5 (T5105)の FESEM 観察および EDS 分析 (4)



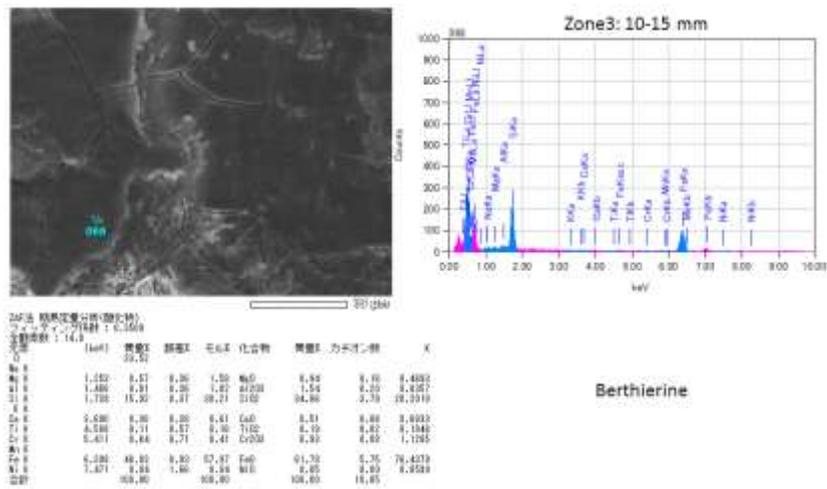
添付図 4-5-10 FW-TIG-10 (T5202)の FESEM 観察および EDS 分析 (1)



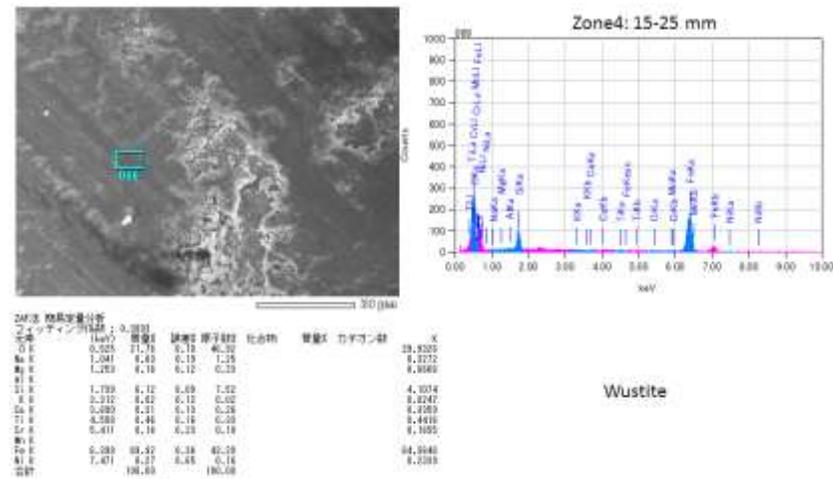
Ferrosilite



Siderite

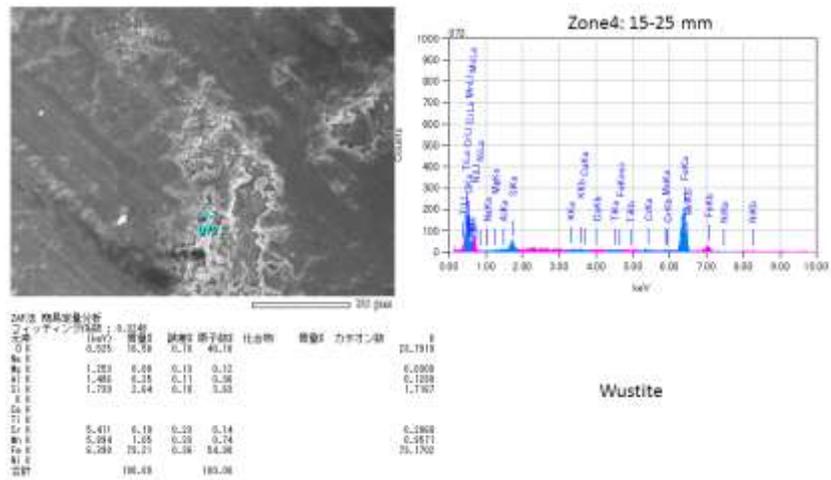
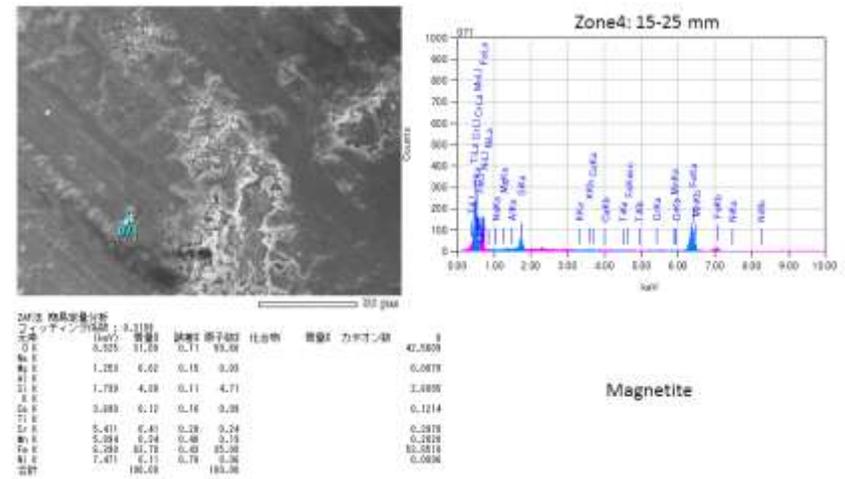
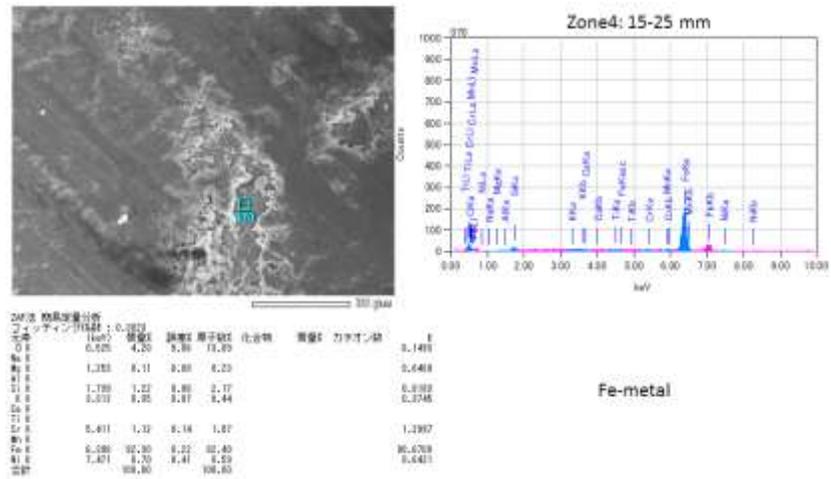


Berthierine

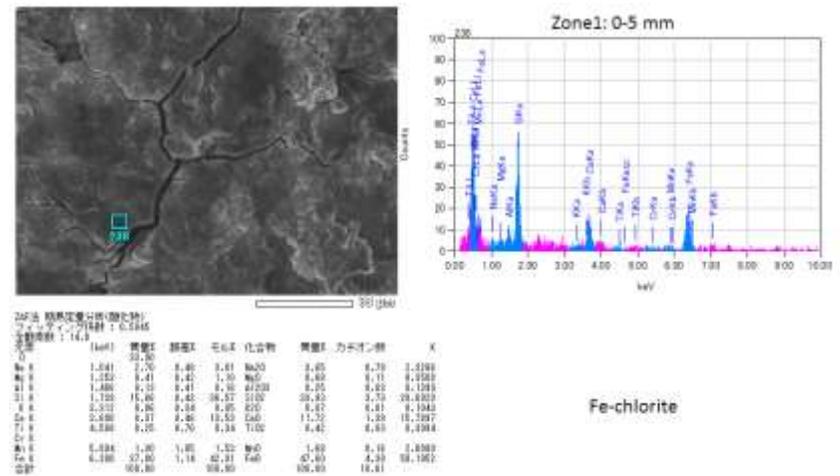
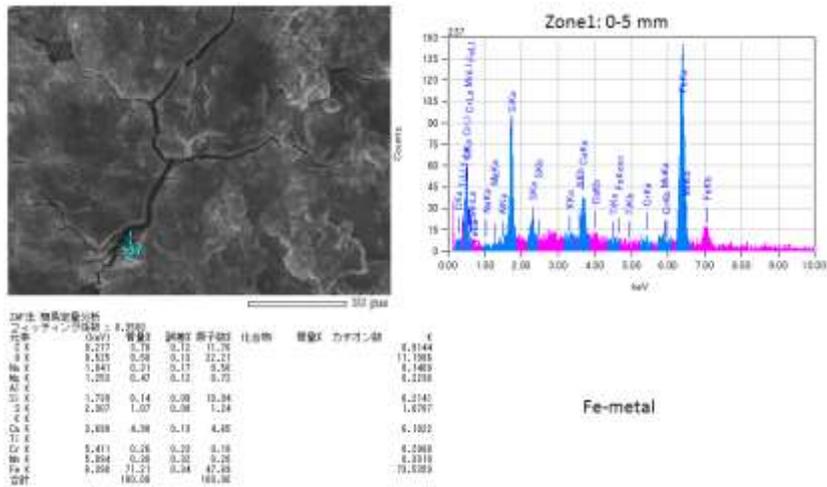
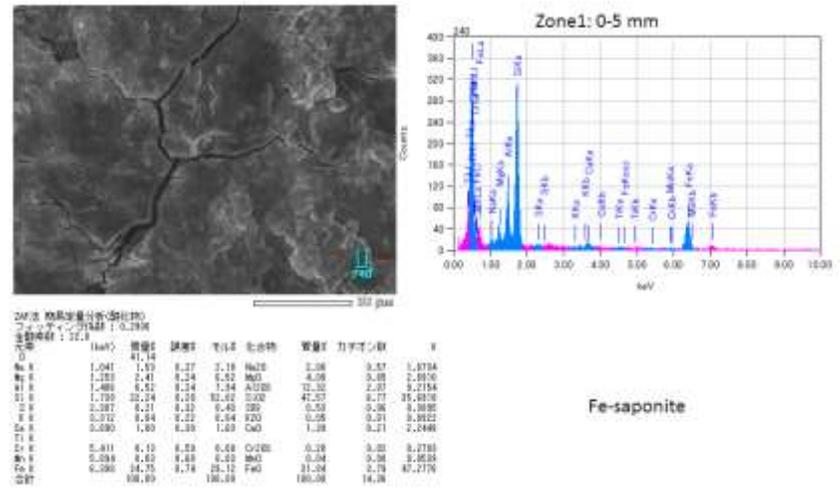
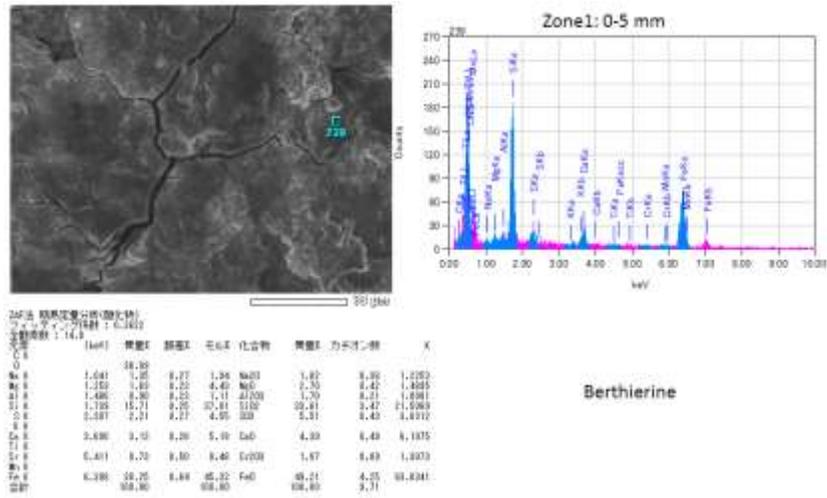


Wustite

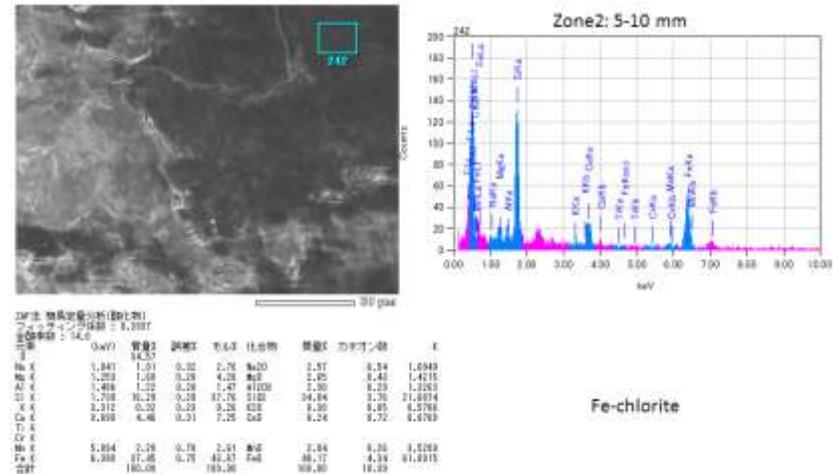
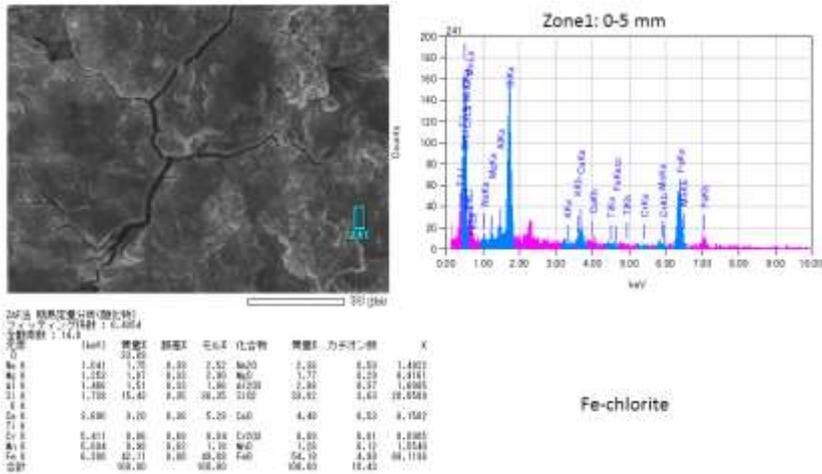
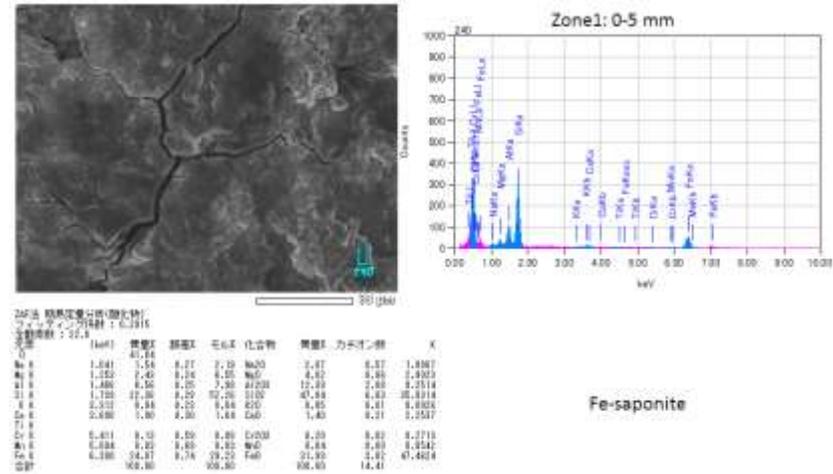
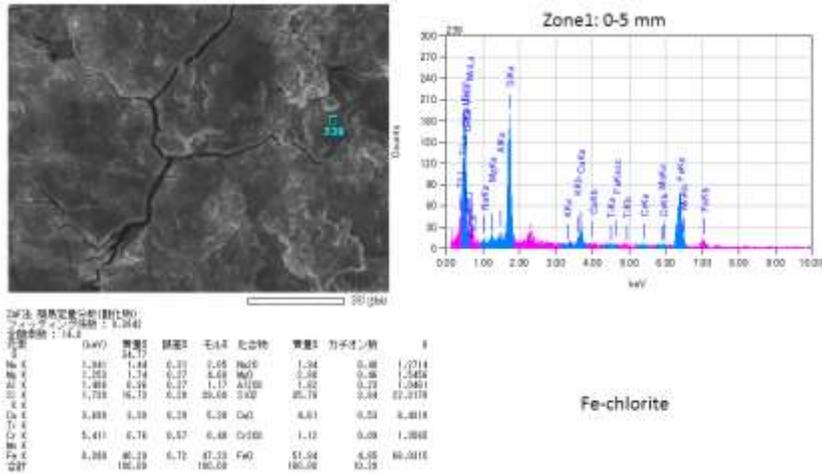
添付図 4-5-11 FW-TIG-10 (T5202)の FESEM 観察および EDS 分析 (2)



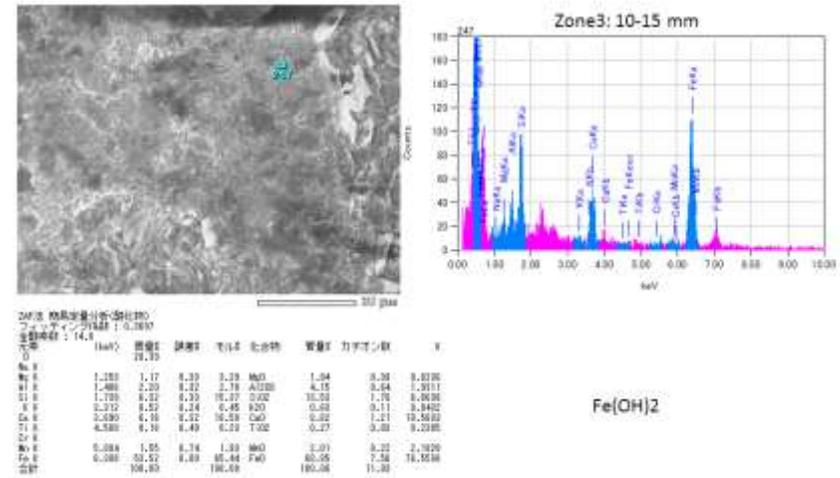
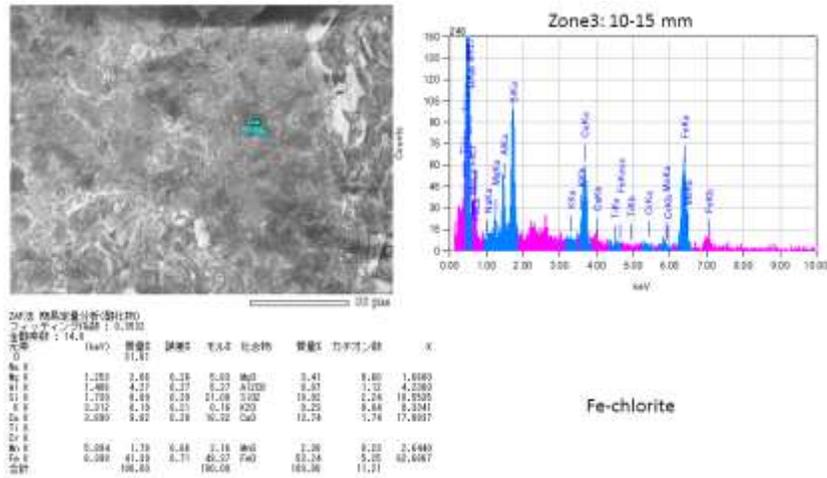
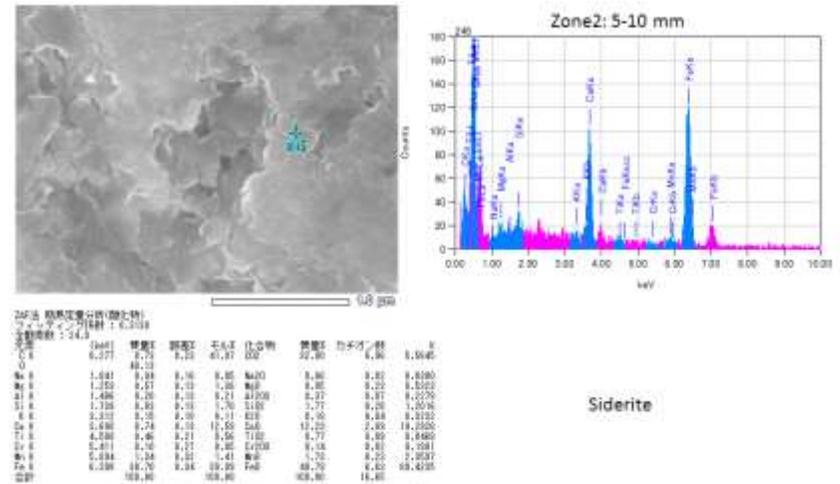
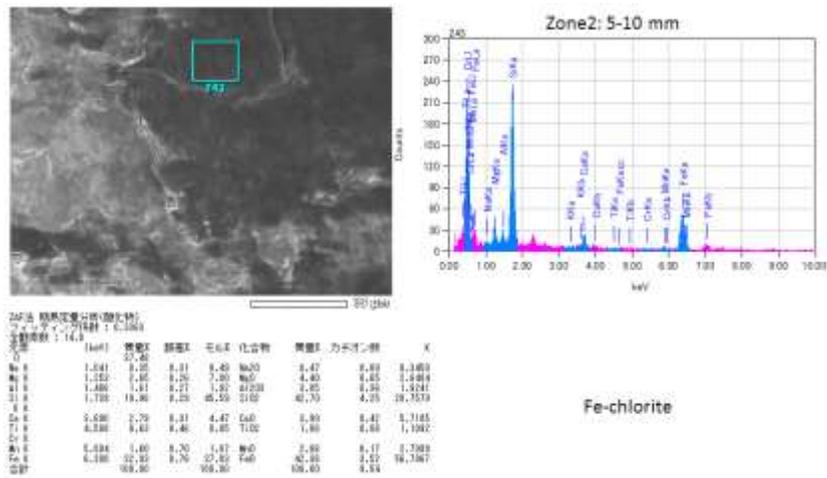
添付図 4-5-12 FW-TIG-10 (T5202)の FESEM 観察および EDS 分析 (3)



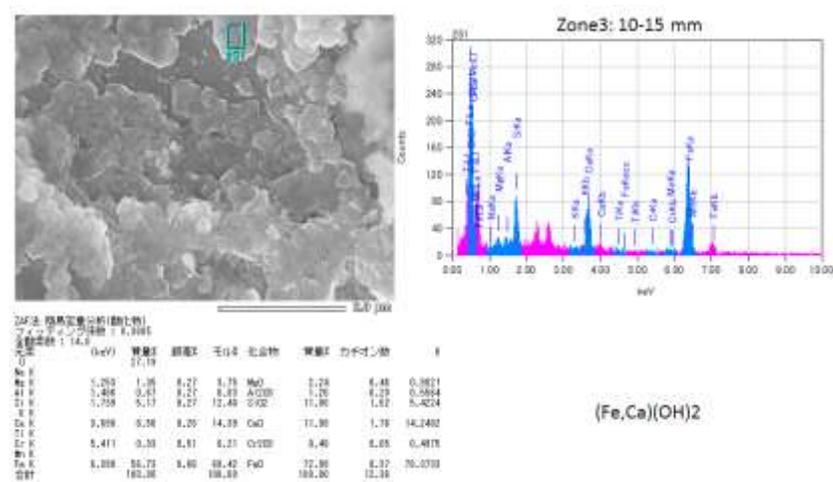
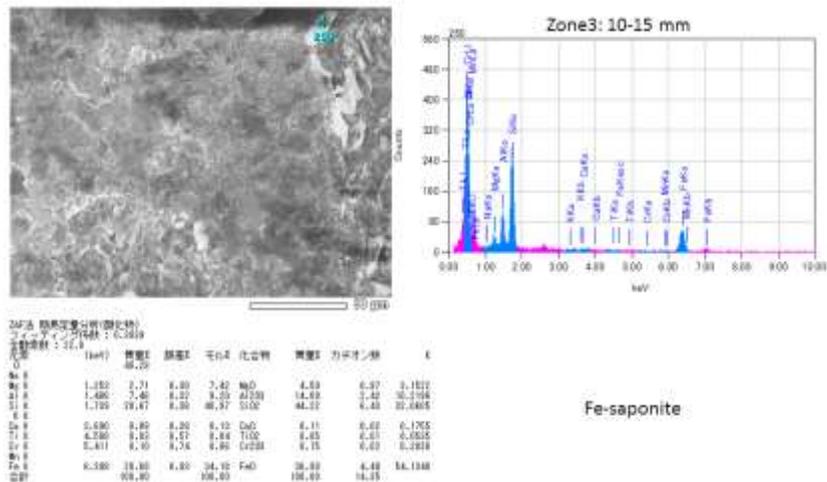
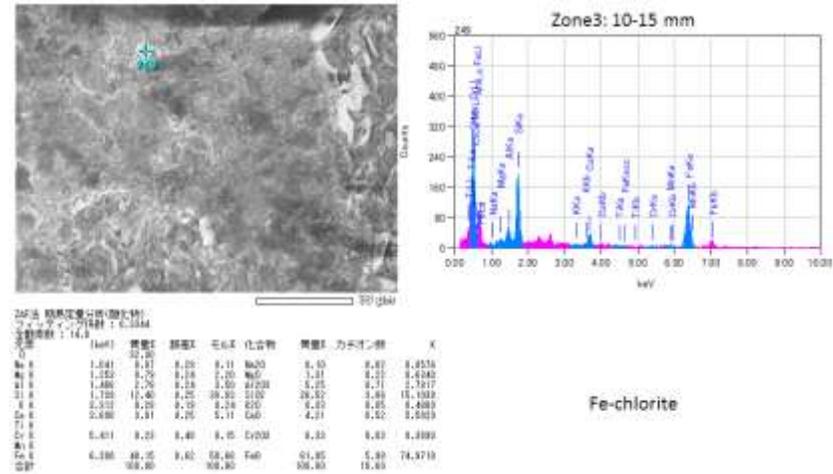
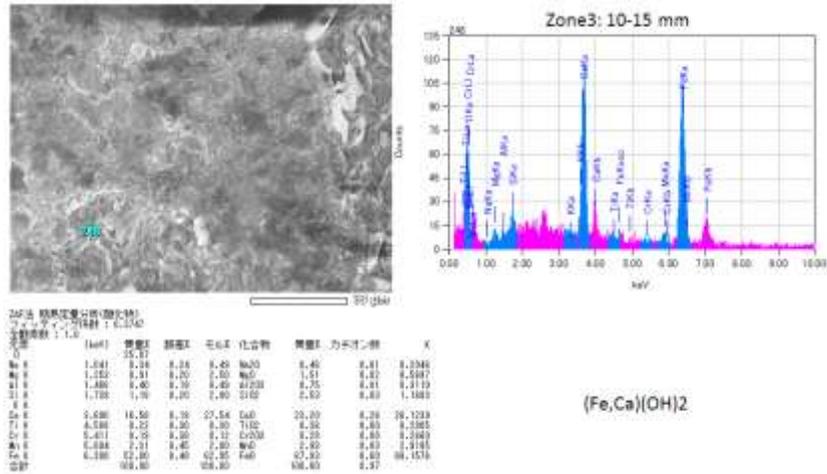
添付図 4-5-13 SW-MAG-5 (M5300)の FESEM 観察および EDS 分析 (1)



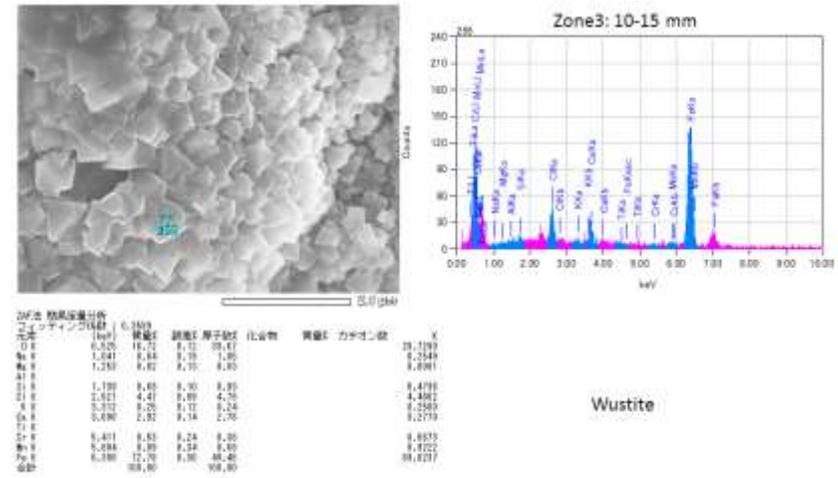
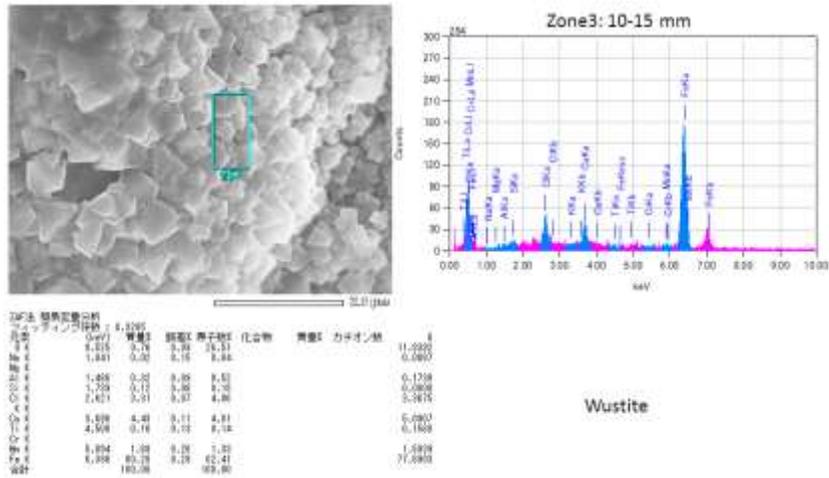
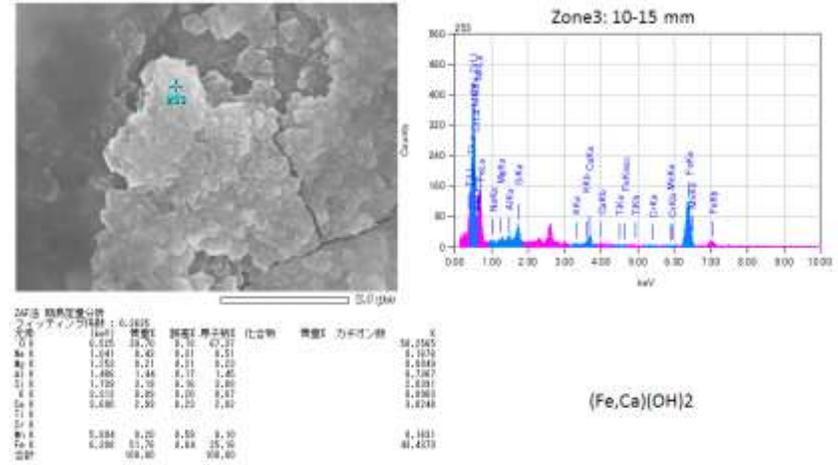
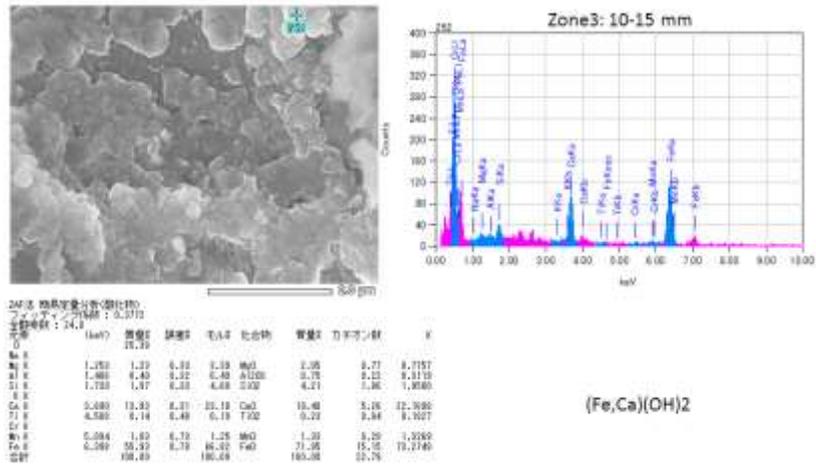
添付図 4-5-14 SW-MAG-5 (M5300)の FESEM 観察および EDS 分析 (2)



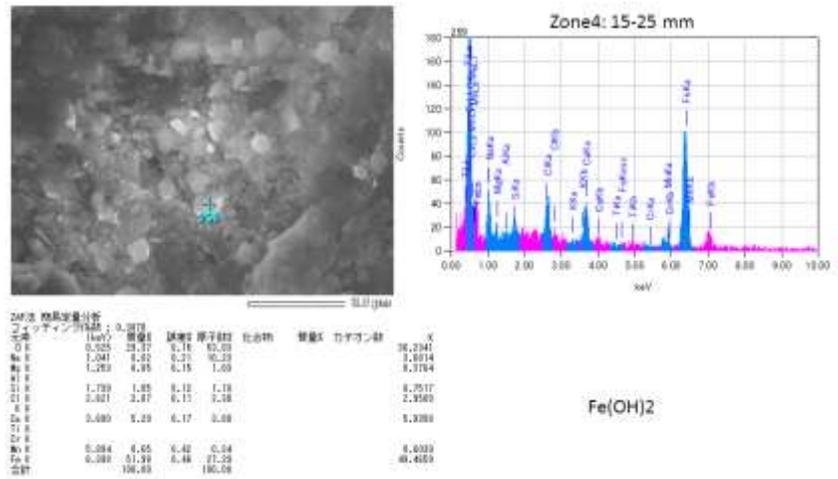
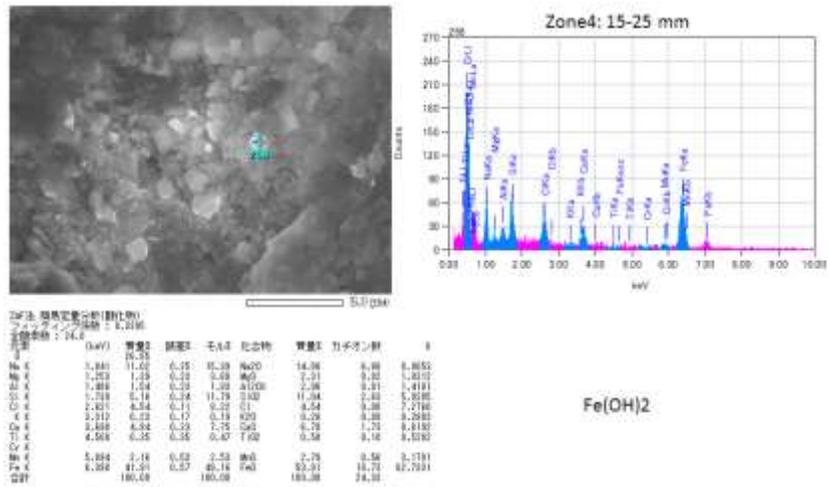
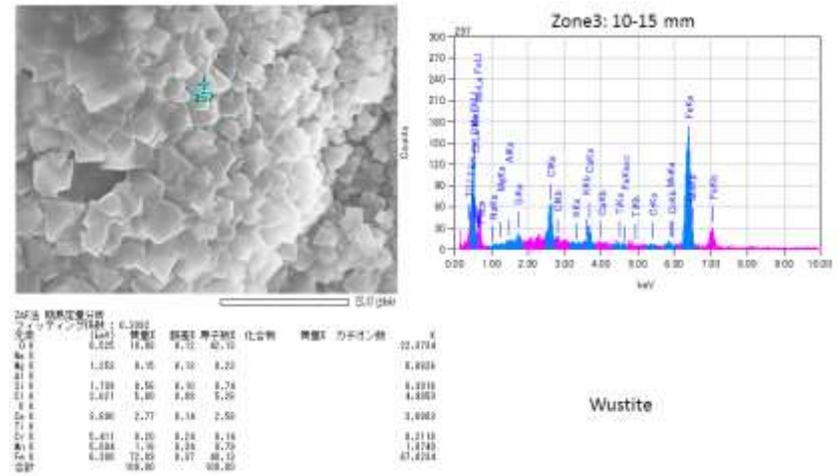
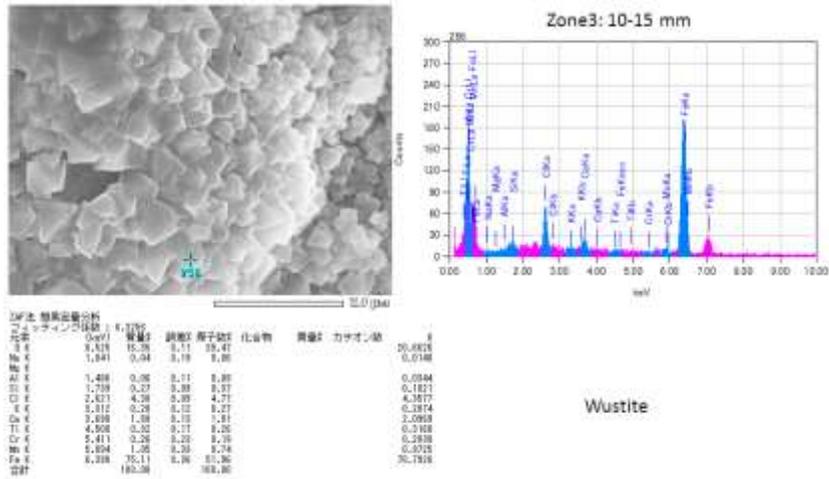
添付図 4-5-15 SW-MAG-5 (M5300)の FESEM 観察および EDS 分析 (3)



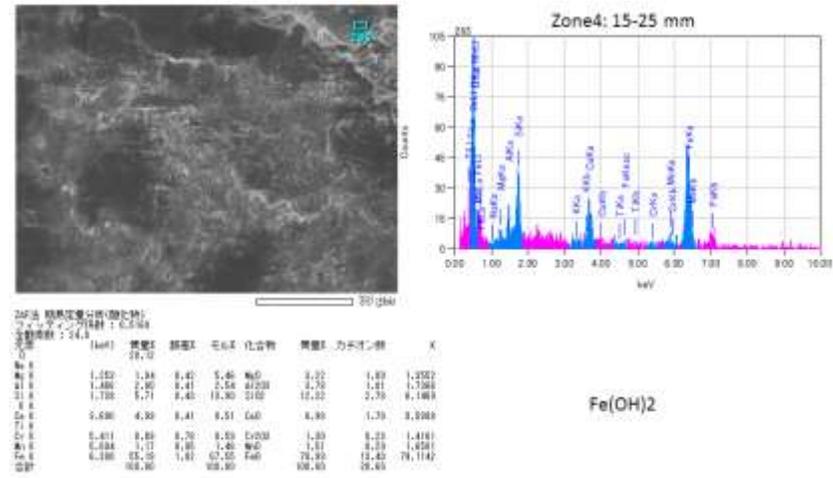
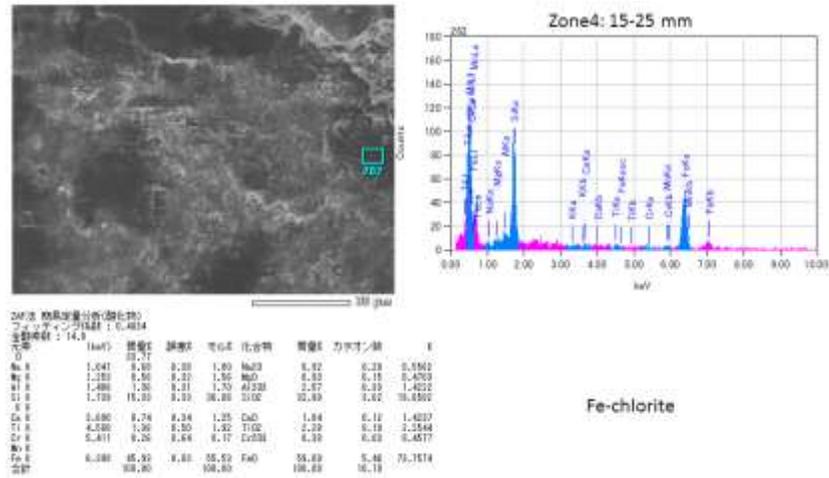
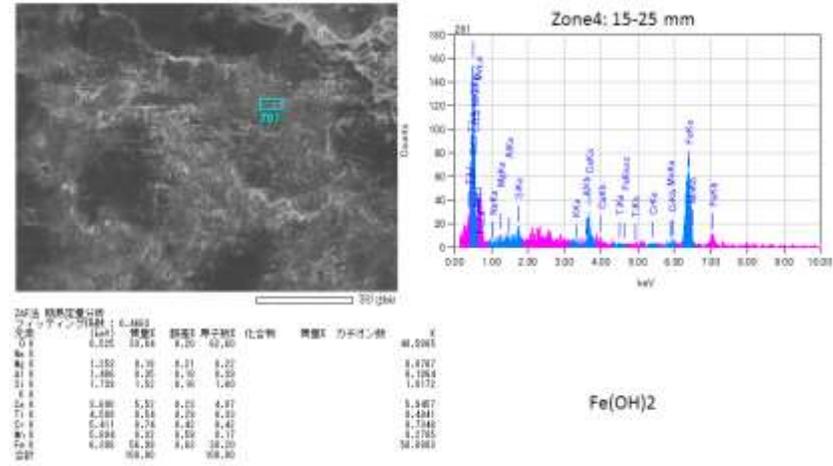
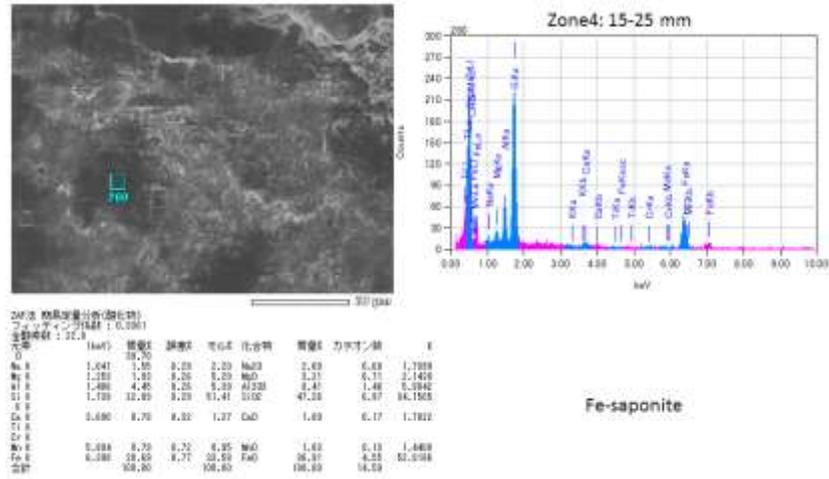
添付図 4-5-16 SW-MAG-5 (M5300)の FESEM 観察および EDS 分析 (4)



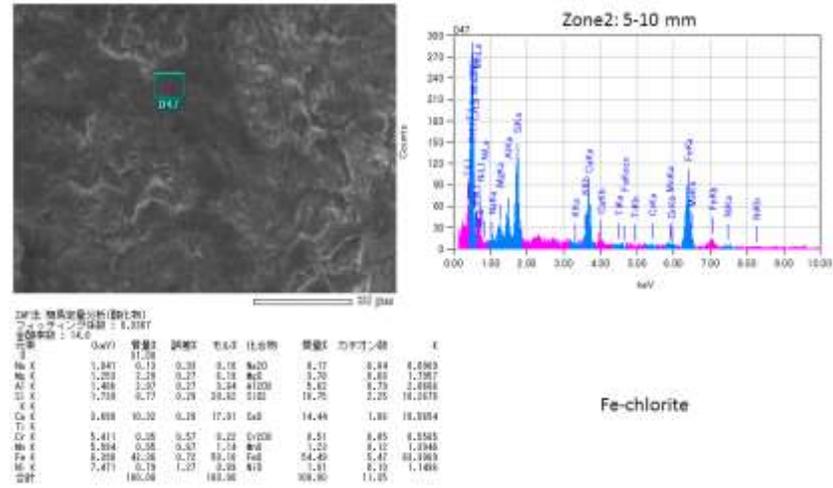
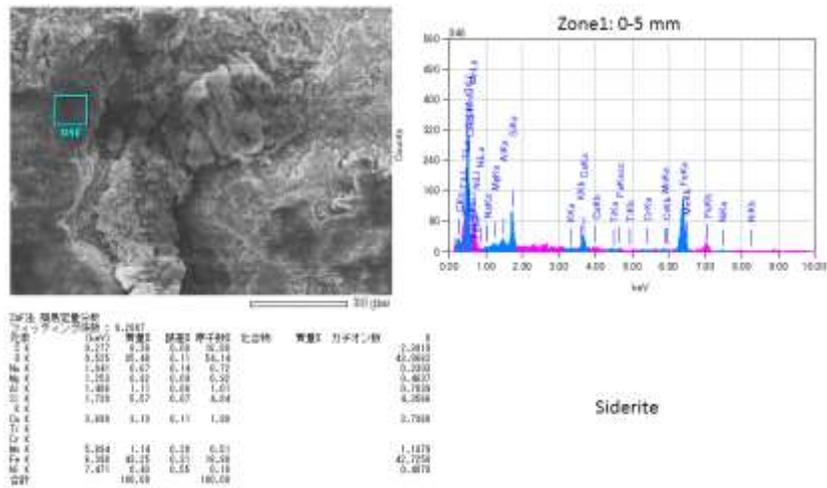
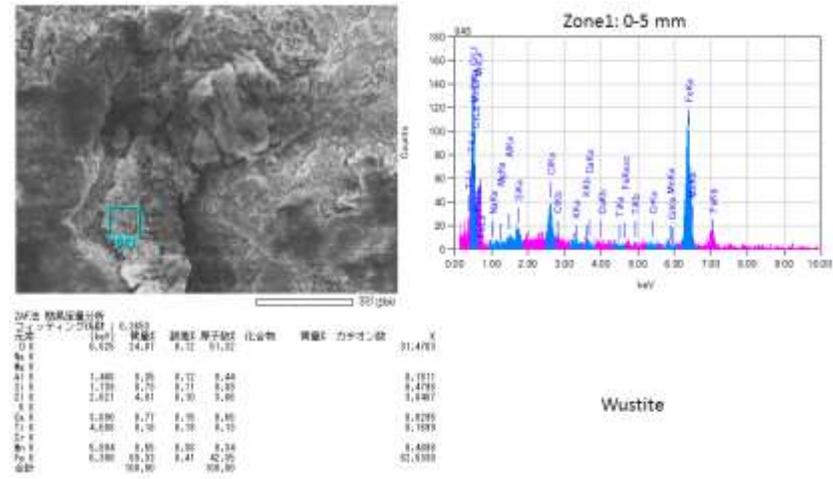
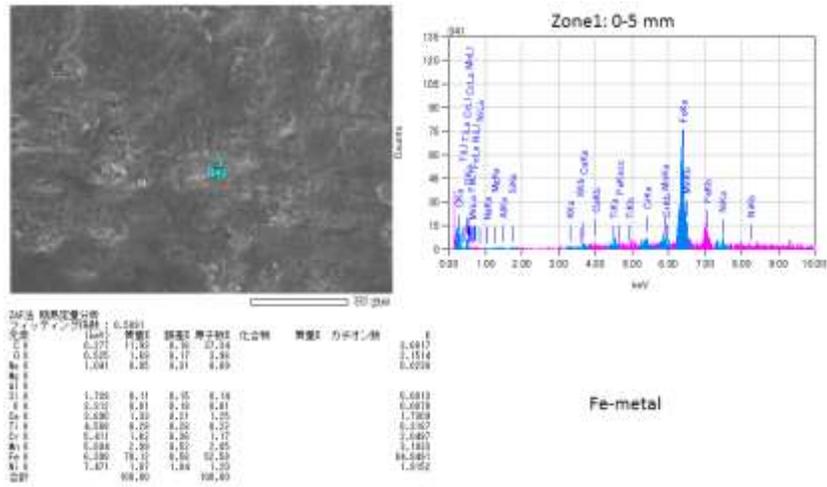
添付図 4-5-17 SW-MAG-5 (M5300)の FESEM 観察および EDS 分析 (5)



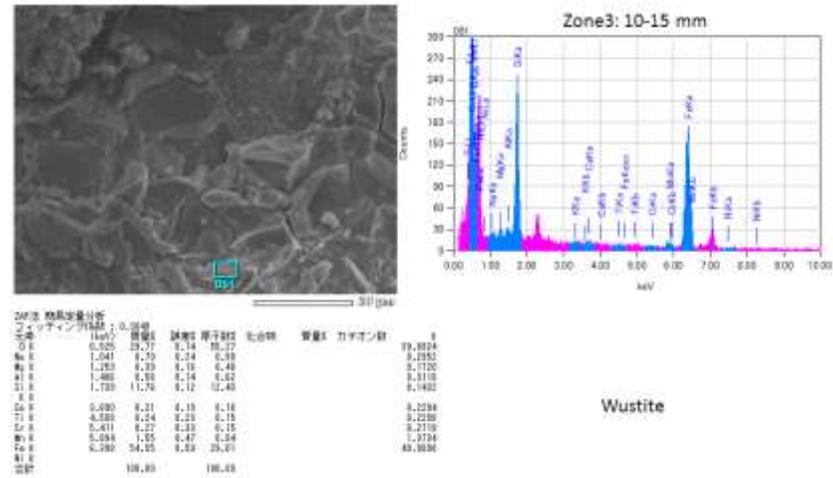
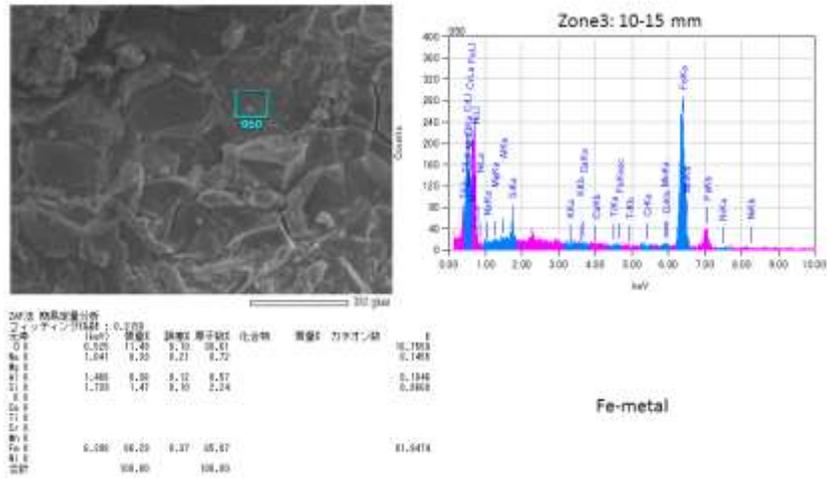
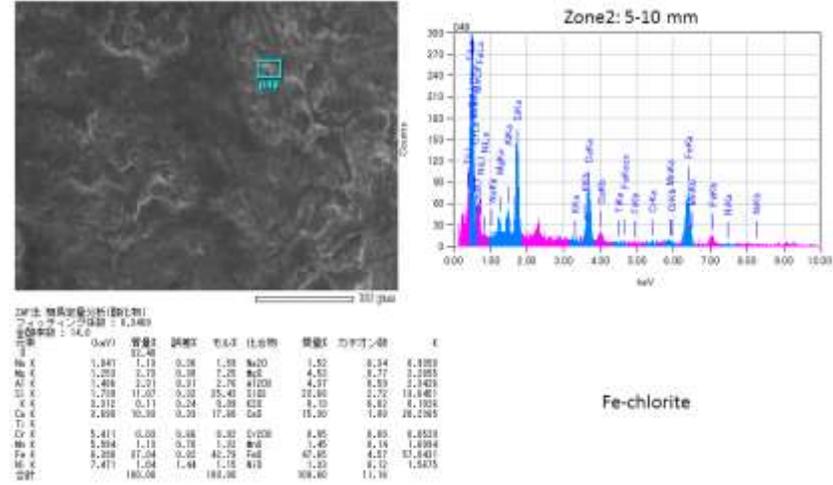
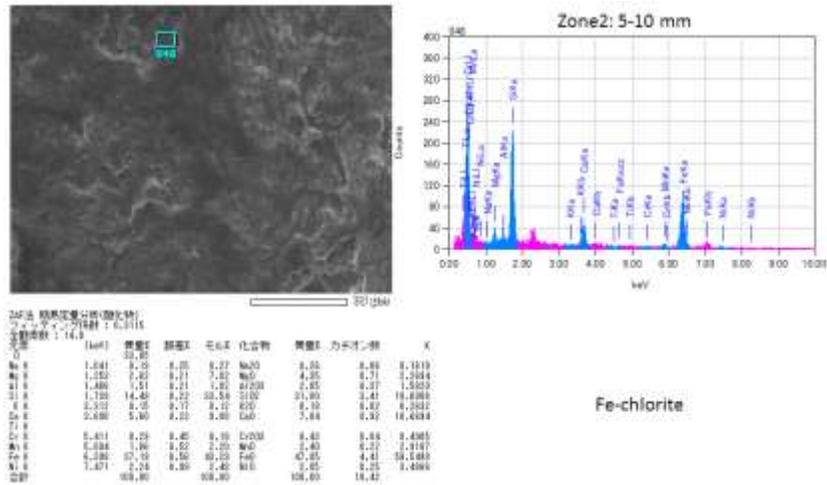
添付図 4-5-18 SW-MAG-5 (M5300)の FESEM 観察および EDS 分析 (6)



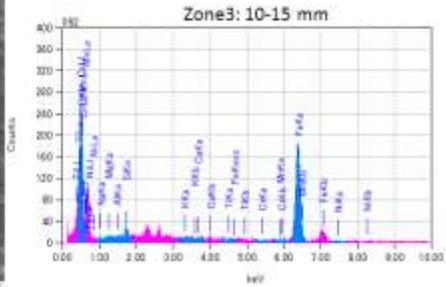
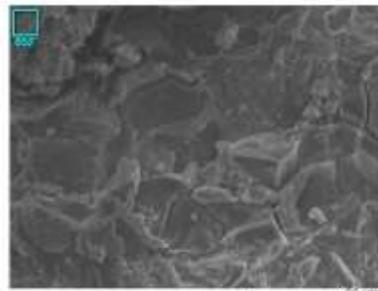
添付図 4-5-19 SW-MAG-5 (M5300)の FESEM 観察および EDS 分析 (7)



添付図 4-5-20 SW-MAG-10 (M5109)の FESEM 観察および EDS 分析 (1)



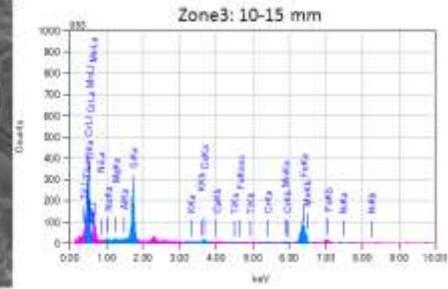
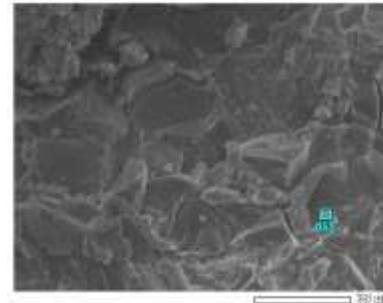
添付図 4-5-21 SW-MAG-10 (M5109)の FESEM 観察および EDS 分析 (2)



ZAF法 結果定量分析
フィッティング回数: 8,189回

元素	(keV)	質量%	原子%	化合物	質量%	力率(%)	X
O K	0.515	66.42	3.51	Fe ₂ O ₃			34.5127
Fe K	1.935	0.78	8.74				4,434.6
Si K	1.739	0.79	8.16				8,105.5
Al K	1.486	0.01	0.01				8,842.5
Ca K	1.739	1.04	8.52				8,844.4
Ca L	0.312	0.08	0.34				
Ti K							
Mn K							
Fe L	0.399	71.75	8.44	Fe ₂ O ₃			95,1705
Mg K	1.471	1.24	8.81				1,828.8
合計		180.08	100.83				

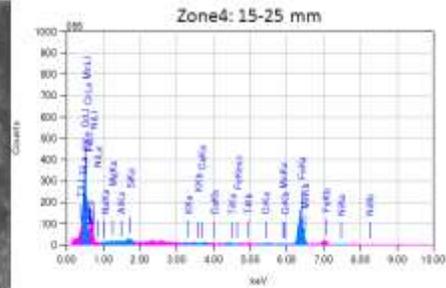
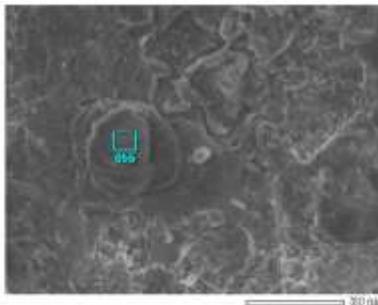
Wustite



ZAF法 結果定量分析(補正なし)
フィッティング回数: 1,614回

元素	(keV)	質量%	原子%	化合物	質量%	力率(%)	X
O	0.51	32.81					
Fe	1.941	1.29	8.35	Fe ₂ O ₃	1.89	8.45	1,186.7
Mg	1.352	8.51	8.80	FeO	8.84	8.14	8,423.2
Si	1.486	8.32	8.29	SiO ₂	8.81	8.80	8,237.9
Ca	1.739	16.40	8.30	CaO	25.81	1.89	21,937.9
Ca L							
Ca K	0.586	1.74	8.31	CaO	2.44	8.23	3,218.9
Ti K							
Mn K							
Fe L	0.484	1.87	8.72	FeO	1.22	8.13	1,891.2
Fe K	0.702	49.10	8.71	FeO	32.94	8.16	48,948.8
Ni K	1.421	0.20	1.27	NiO	1.25	8.11	1,927.7
合計		108.80	108.80	108.80	18.23		

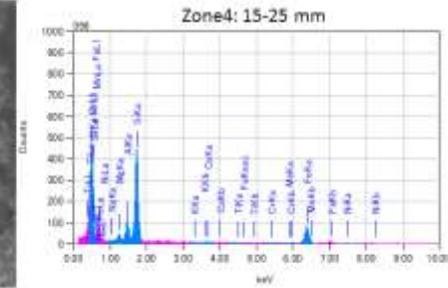
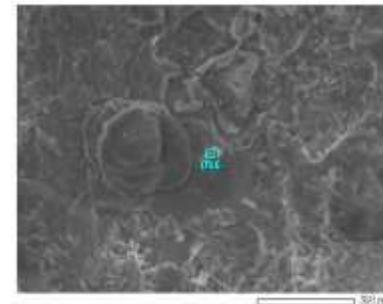
Berthierite



ZAF法 結果定量分析
フィッティング回数: 3,354回

元素	(keV)	質量%	原子%	化合物	質量%	力率(%)	X
O K	0.505	34.76	6.13	Fe ₂ O ₃			41,403.1
Fe K	1.933	8.47	8.17				8,172.9
Si K	1.739	8.85	8.19				8,397.1
Ca K							
Ca L	0.388	8.44	6.23				8,371.9
Ti K							
Mn K							
Fe L	0.399	81.69	6.58	Fe ₂ O ₃			81,616.7
合計		180.83	180.88				

Fe(OH)₂

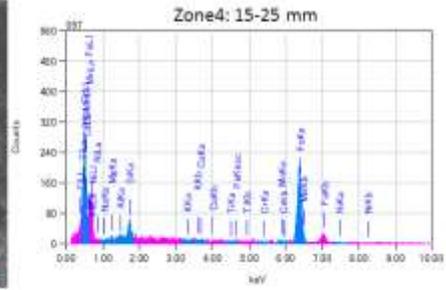
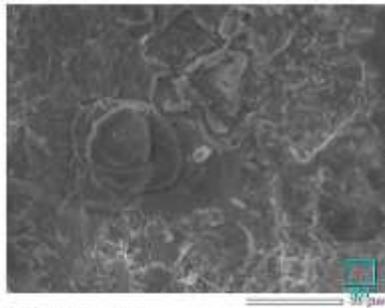


ZAF法 結果定量分析(補正なし)
フィッティング回数: 2,169回

元素	(keV)	質量%	原子%	化合物	質量%	力率(%)	X
O	0.51	62.32					
Fe	1.941	8.46	8.29	Fe ₂ O ₃	8.82	8.25	8,177.9
Mg	1.352	1.89	8.25	FeO	2.89	8.68	1,159.9
Si	1.486	8.41	8.36	SiO ₂	18.17	1.73	1,881.1
Ca	1.739	38.49	8.25	CaO	58.03	7.18	81,398.8
Ca L	0.320	8.71	8.28		8.25	8.65	8,459.8
Ca K	0.586	9.86	8.32	CaO	8.83	8.61	6,148.8
Ti K							
Mn K							
Fe L	0.389	38.46	8.77	FeO	34.84	8.69	46,557.8
Fe K	1.471	18.28	1.25	FeO	1.19	8.14	1,137.1
合計		108.80	108.80	108.80	18.68		

Fe-saponite

添付図 4-5-22 SW-MAG-10 (M5109)の FESEM 観察および EDS 分析 (3)

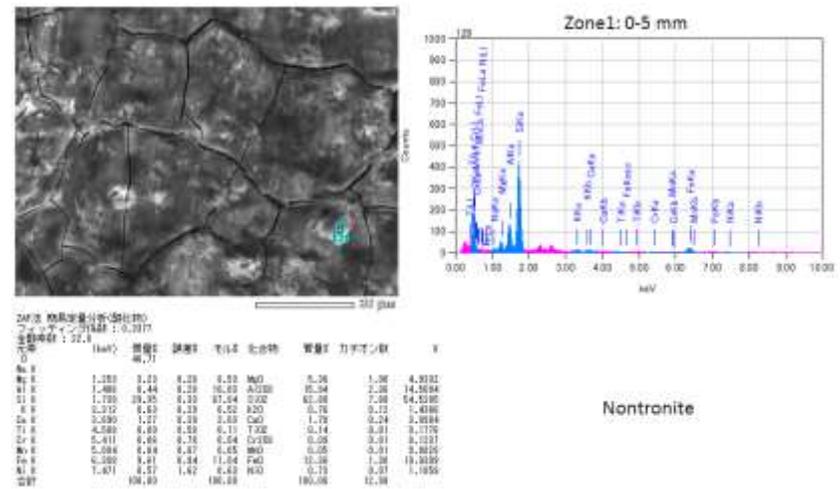
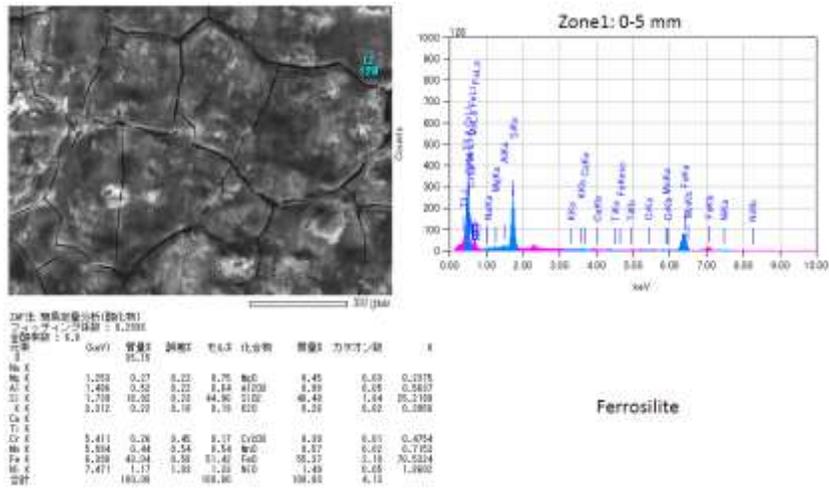
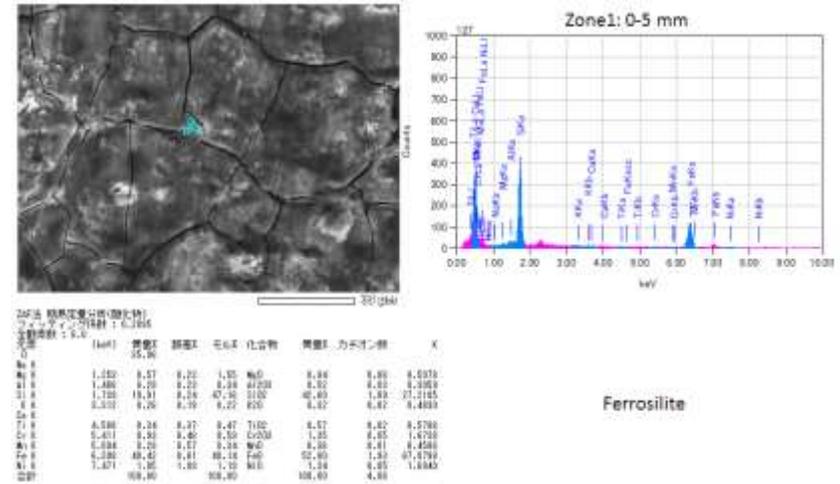
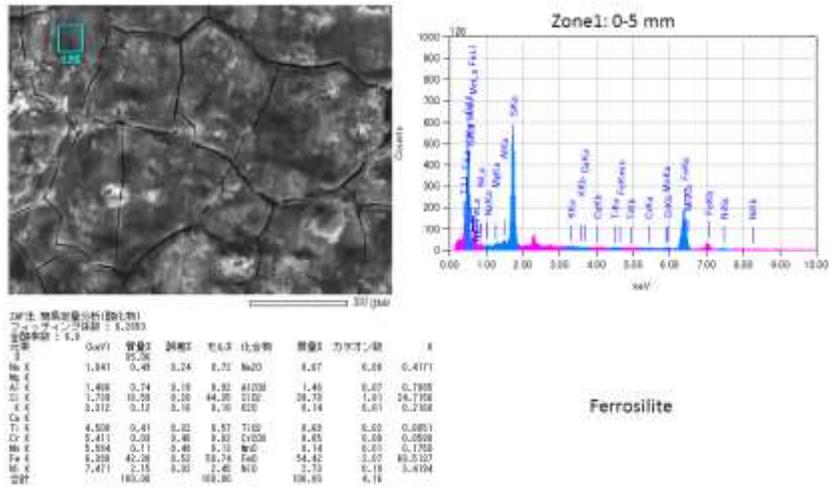


ZAF法 結果定数分析
 フィット率: 0.1214
 検出限: 0.0100

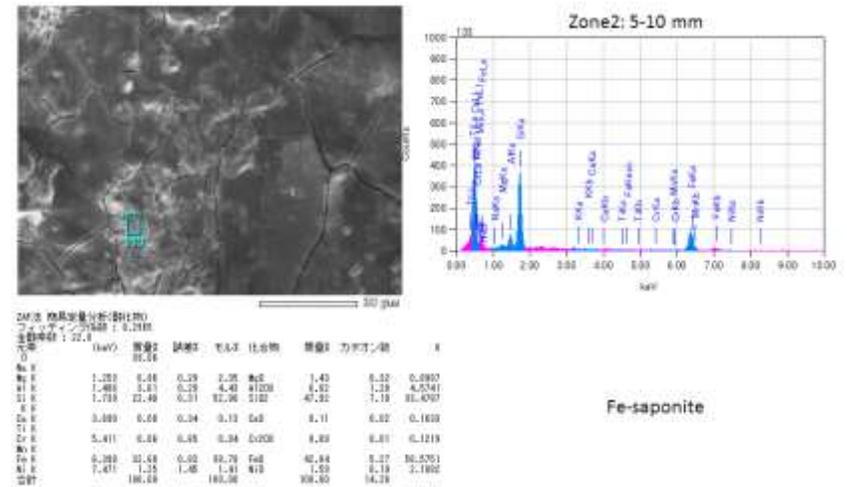
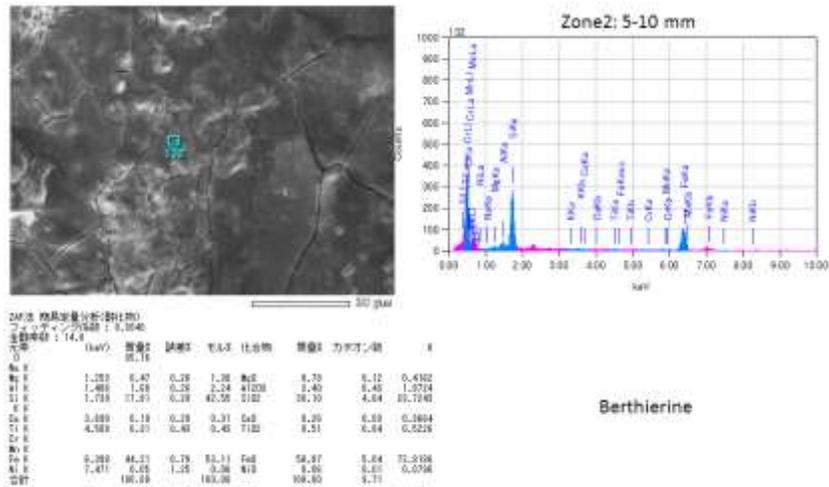
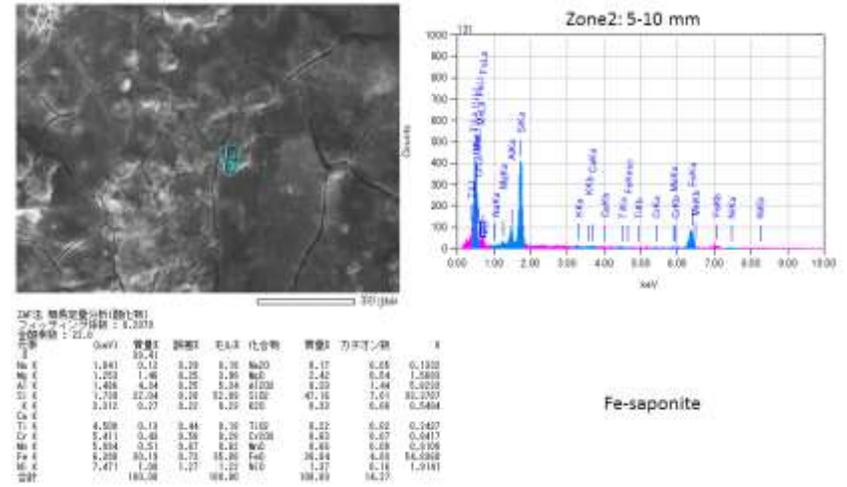
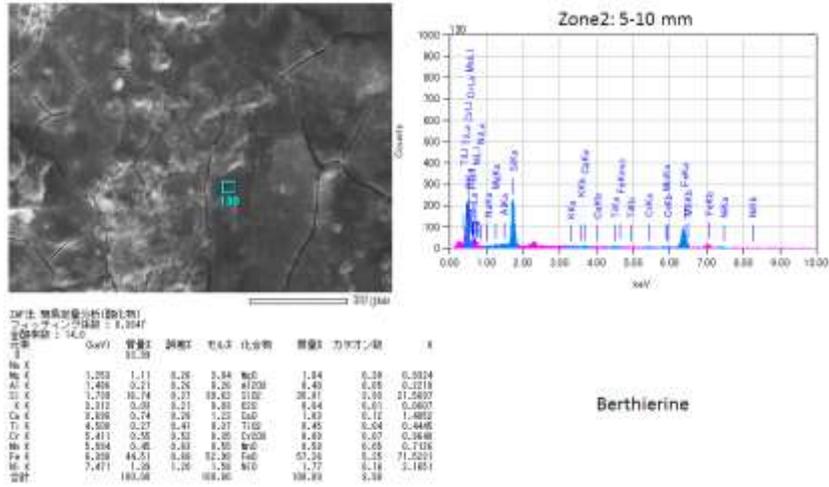
元素	検出率 (%)	原子比 (%)	化合物	検出率 (%)	原子比 (%)	X
O	6.025	13.41		9.88	68.24	33.5149
Fe	1.333	8.60		0.33	8.30	8.0981
Al	1.480	8.41		0.30	8.52	8.3376
Si	1.729	7.96		0.30	8.82	7.9993
Ca	0.680	8.40		0.10	8.34	8.4271
Ti	0.588	8.25		0.10	8.16	8.2223
Cr	0.411	8.33		0.22	8.33	8.1947
Mn	0.588	8.69		0.22	8.47	8.0982
Pb	0.290	7.13		0.18	8.89	8.1943
Ni	1.471	8.89		0.42	8.51	8.3476
合計	100.00			100.00		

Wustite

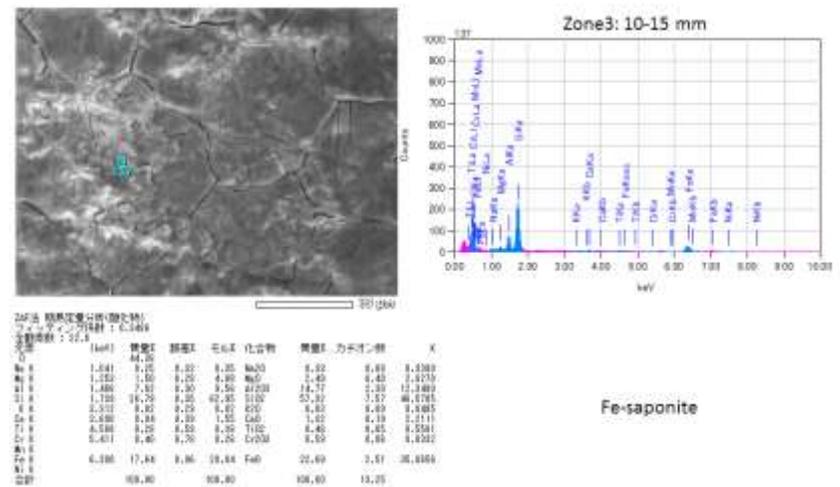
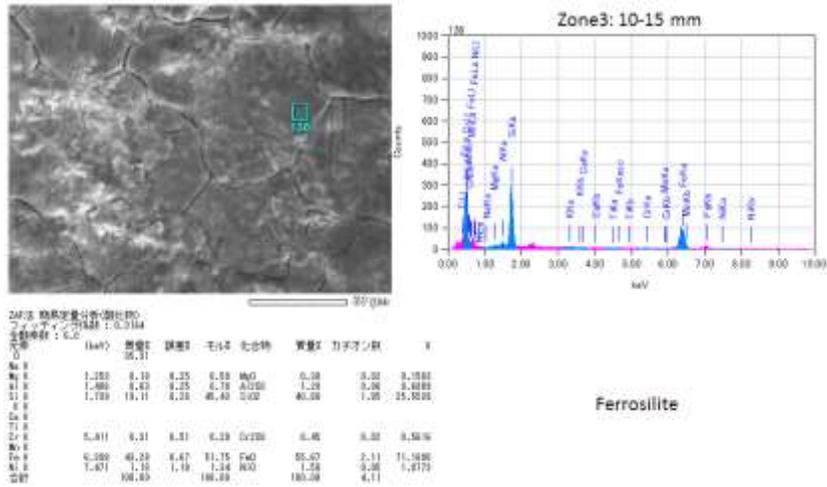
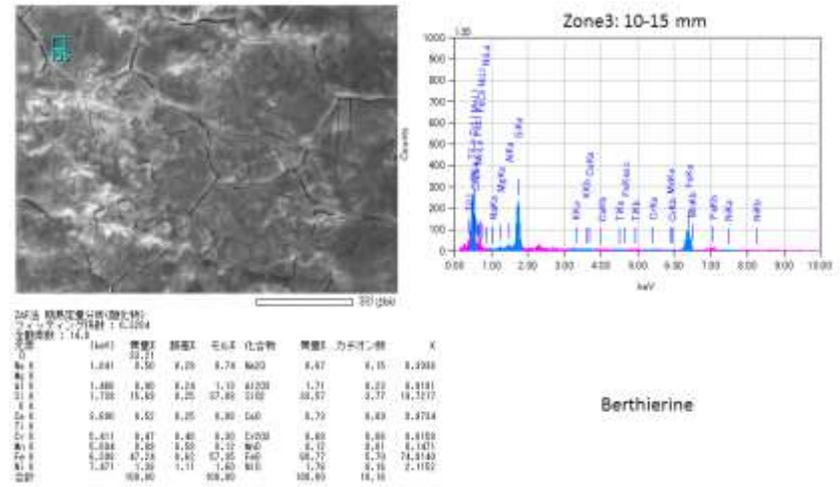
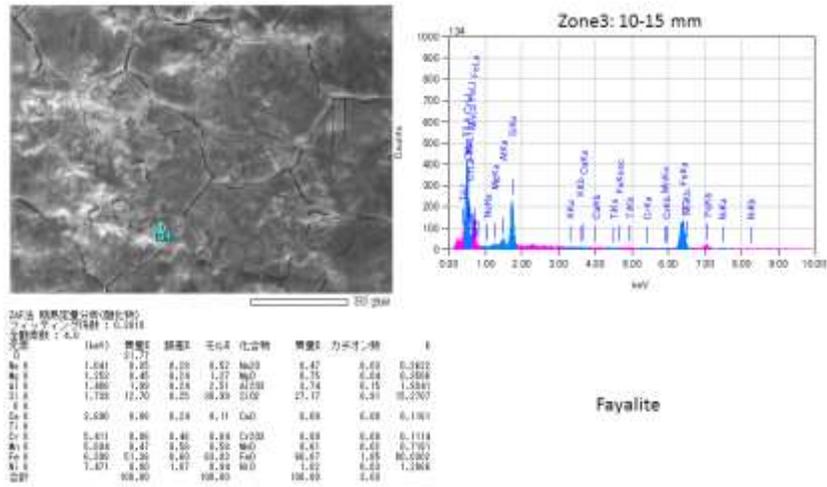
添付図 4-5-23 SW-MAG-10 (M5109)の FESEM 観察および EDS 分析 (4)



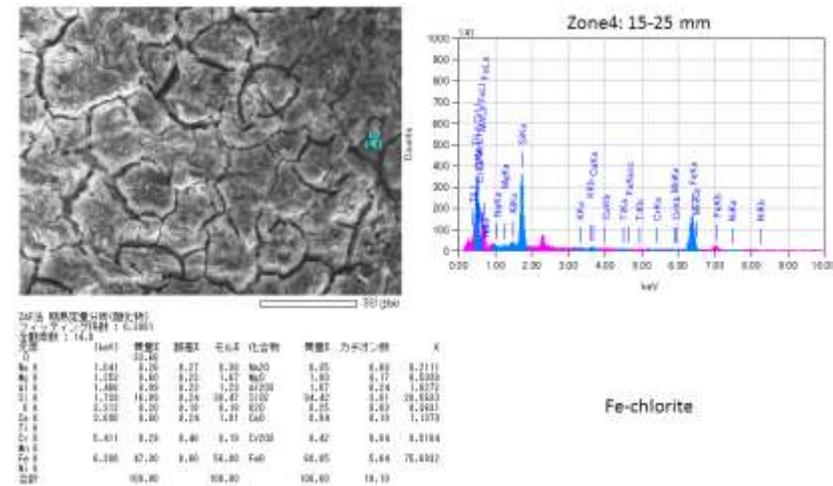
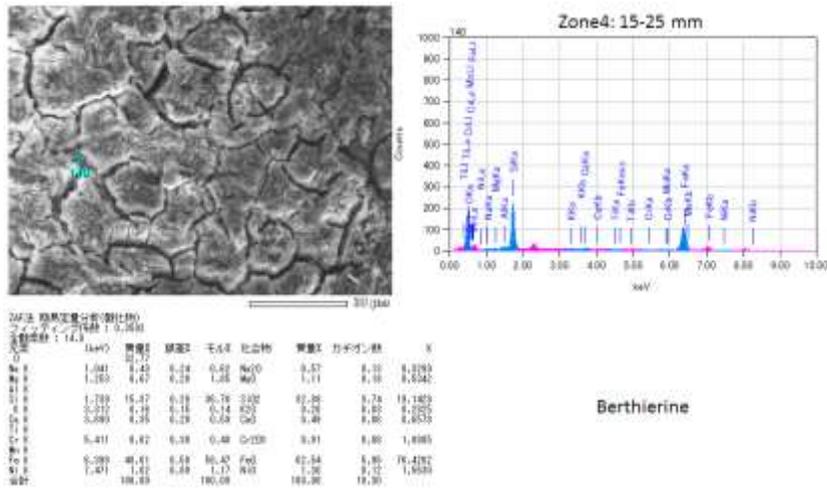
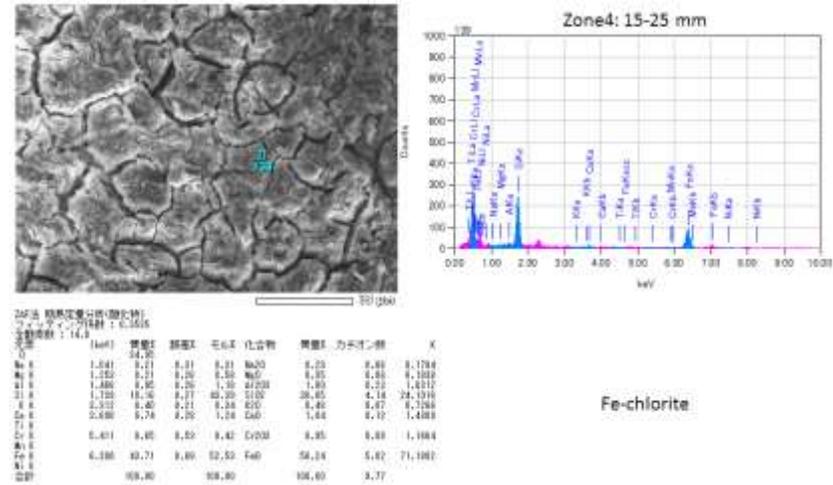
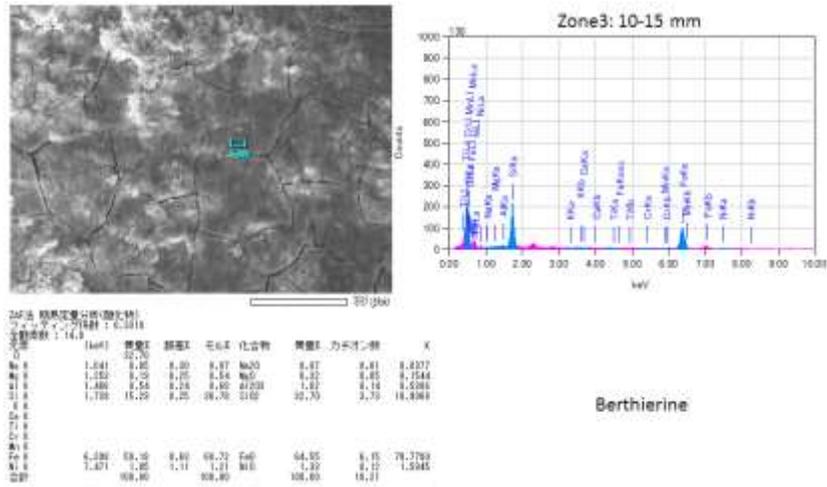
添付図 4-5-24 FW-MAG-5 (M5303)の FESEM 観察および EDS 分析 (1)



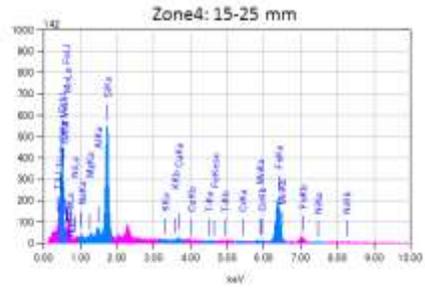
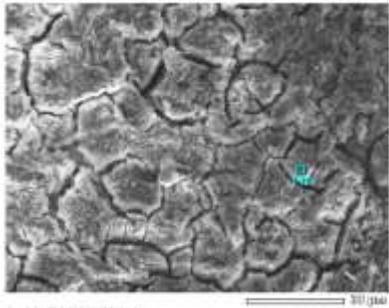
添付図 4-5-25 FW-MAG-5 (M5303)の FESEM 観察および EDS 分析 (2)



添付図 4-5-26 FW-MAG-5 (M5303)の FESEM 観察および EDS 分析 (3)



添付図 4-5-27 FW-MAG-5 (M5303)の FESEM 観察および EDS 分析 (4)



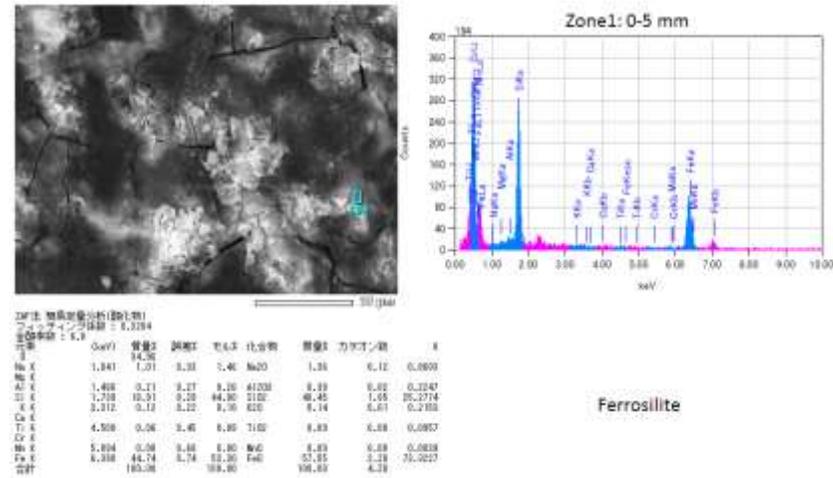
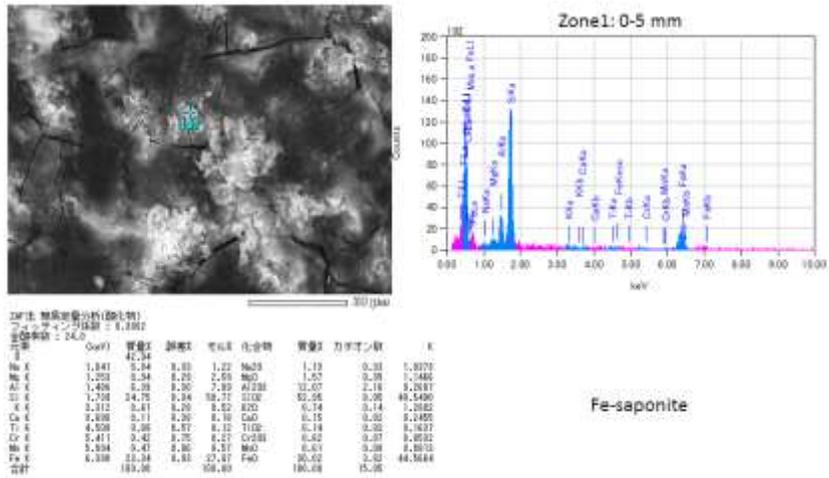
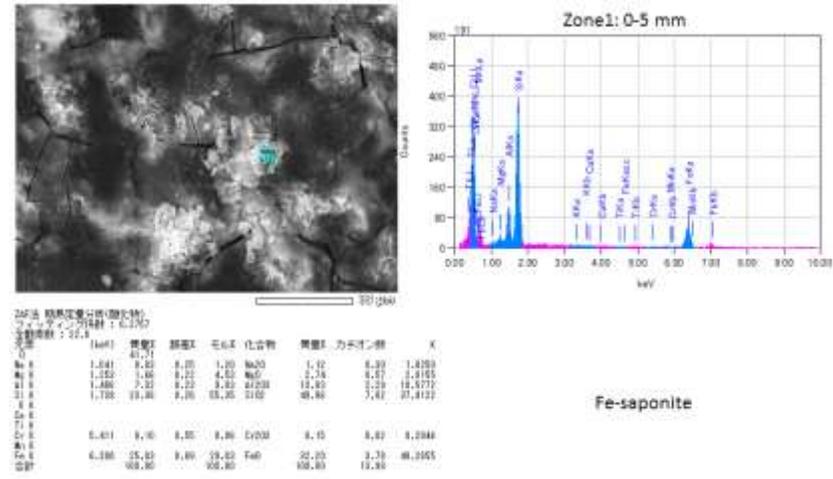
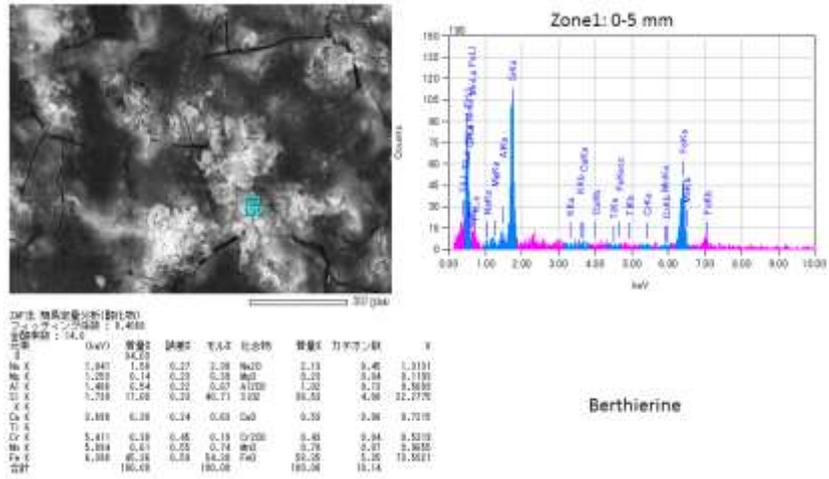
DAI 地球化学分析センター

分析番号: 14.8

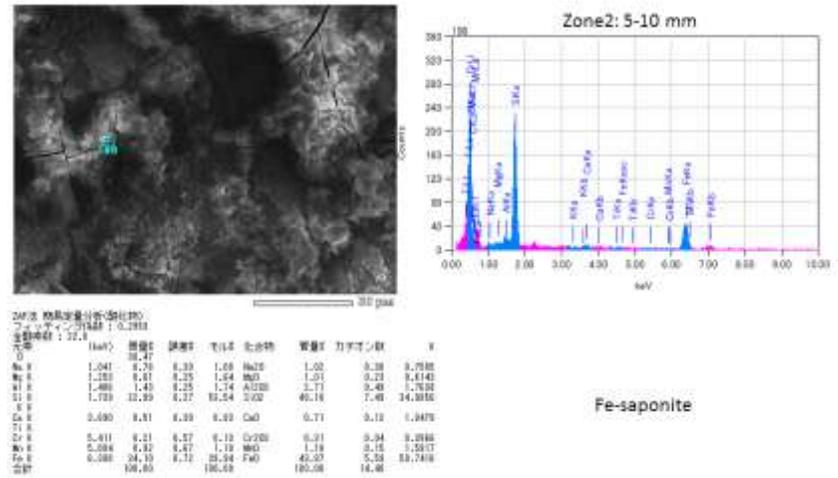
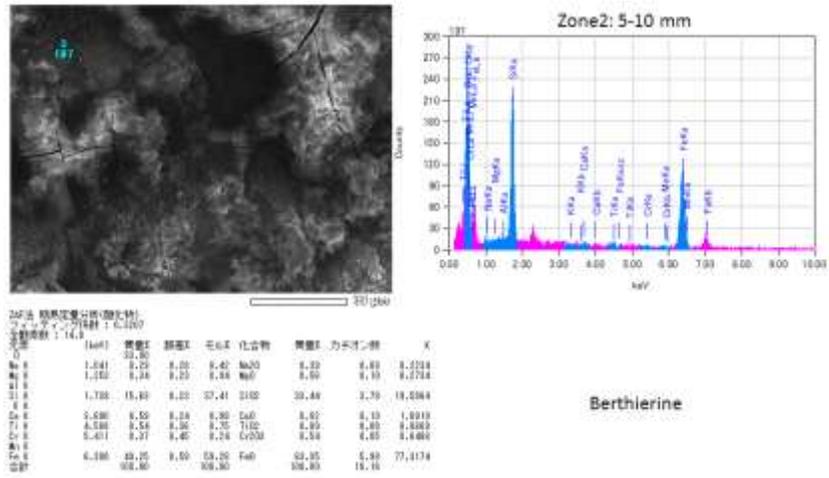
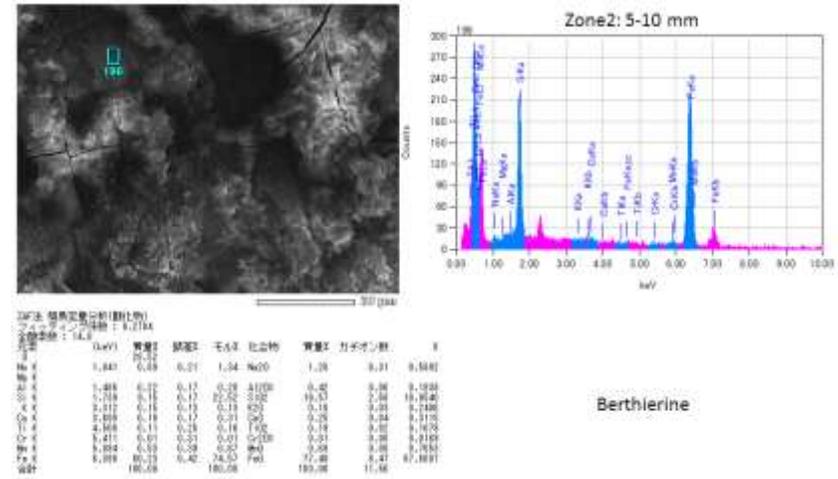
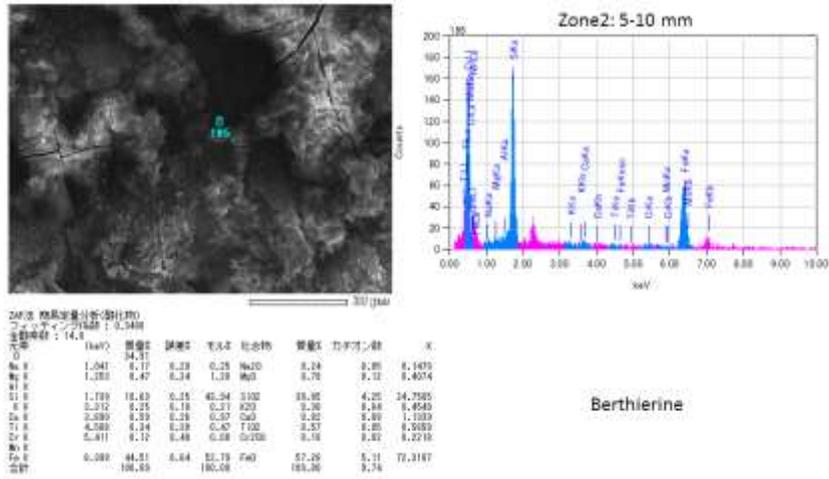
元素	(keV)	強度	標準	モリス	化合物	質量%	モリス	%
O	0.51	34.87						
Na	1.041	6.37	6.32	1.41	Na2O	1.26	0.27	0.0224
Al	1.485	1.41	6.18	1.75	Al2O3	0.36	0.36	1.0244
Si	1.739	17.17	6.18	42.44	SiO2	38.32	4.87	13.6471
S								
Ca	2.989	6.75	6.33	1.38	CaO	1.35	0.33	1.4015
Cl								
Fe								
Ni	0.884	6.33	6.46	0.88	NiO	8.43	0.88	0.0222
Mn	0.589	40.38	6.28	61.71	MnO	53.26	4.30	10.8239
Al	1.471	6.33	6.33	1.02	Al2O3	1.15	0.30	1.4586
合計		100.89	100.00	100.00		100.00	0.90	

Fe-chlorite

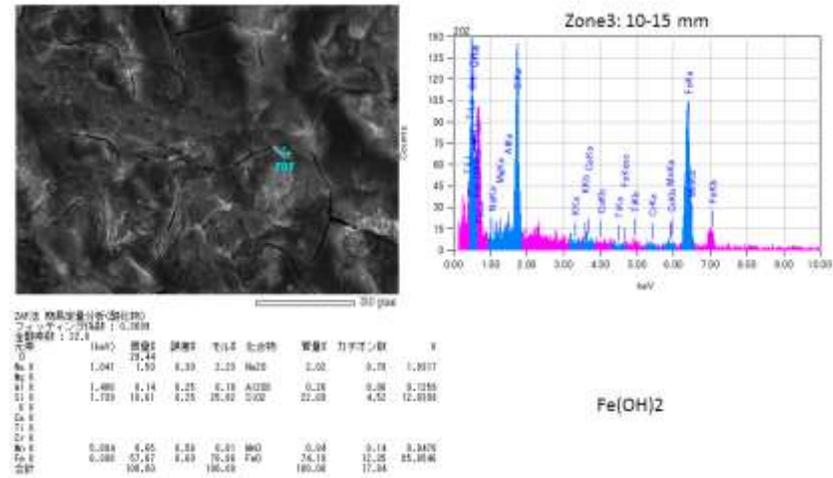
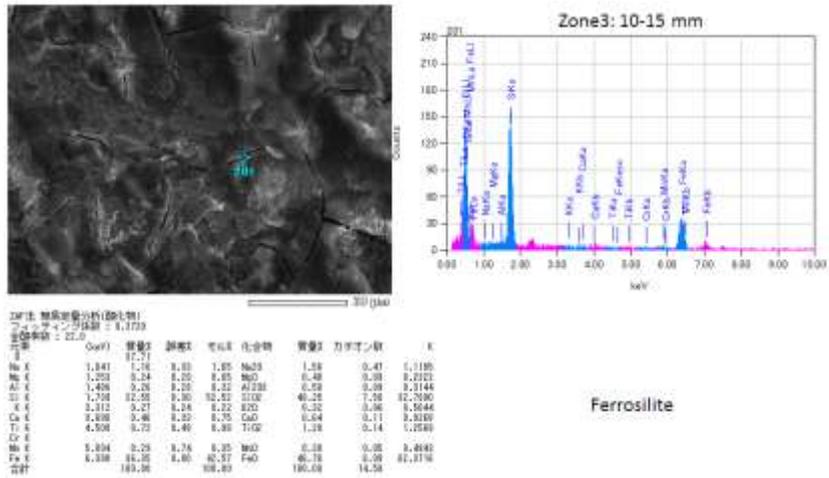
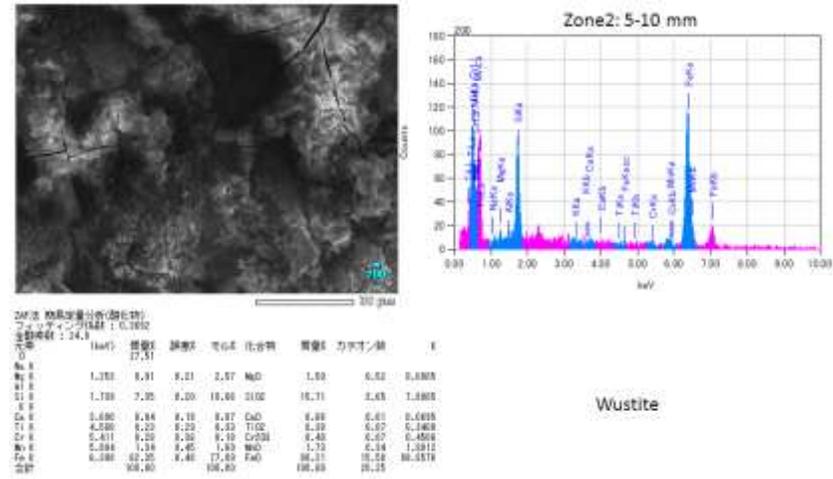
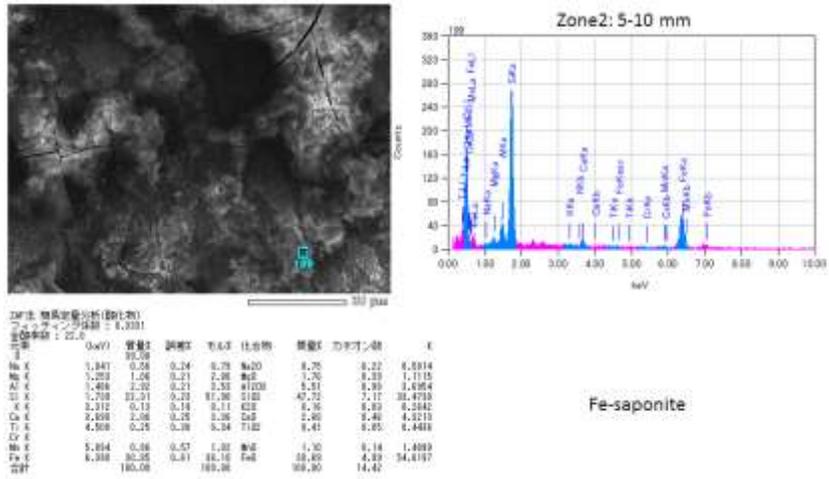
添付図 4-5-28 FW-MAG-5 (M5303)の FESEM 観察および EDS 分析 (5)



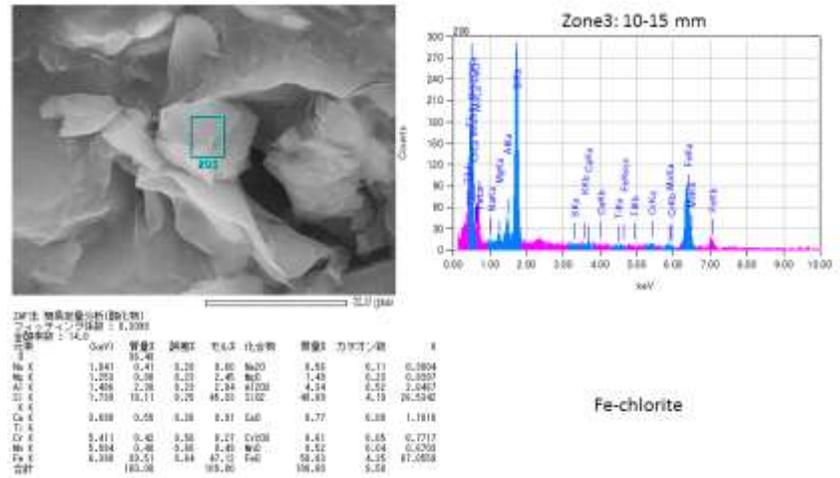
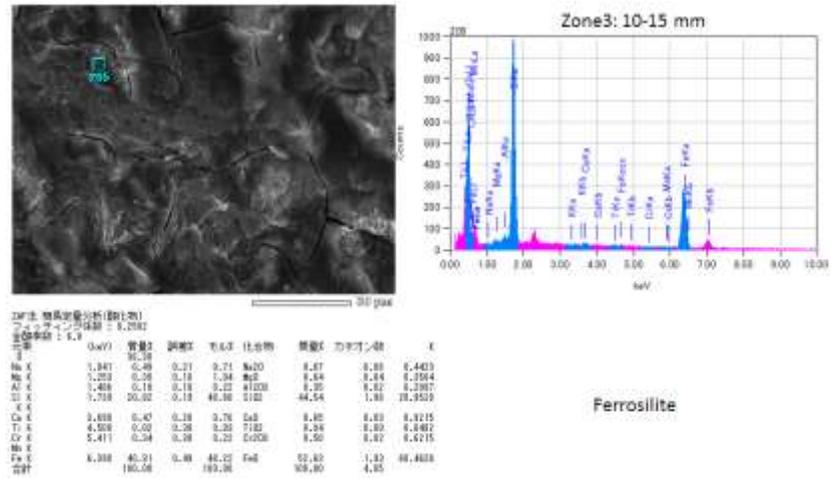
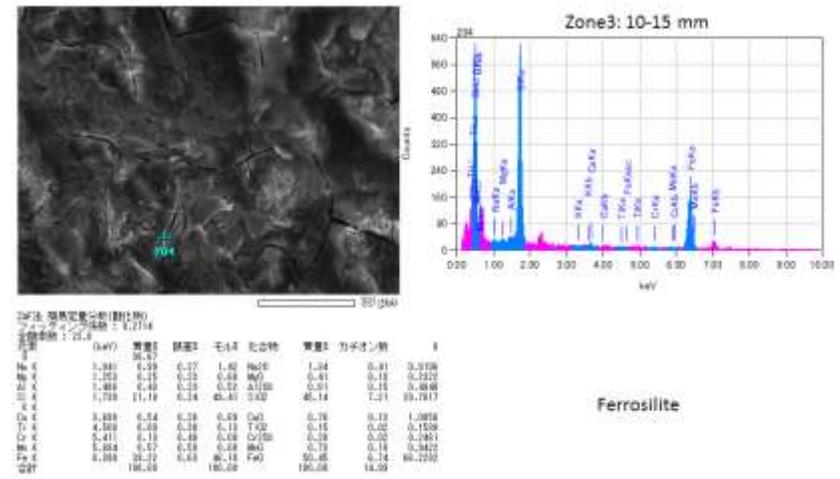
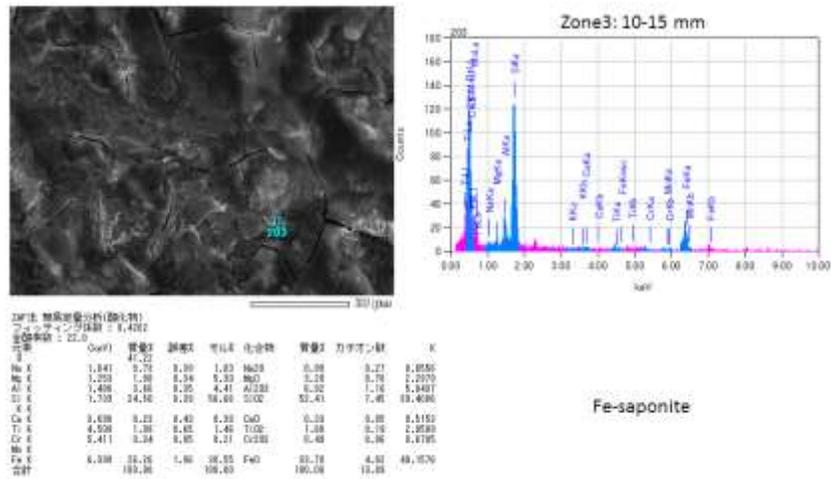
添付図 4-5-29 FW-MAG-10 (M5104)のFESEM 観察およびEDS 分析 (1)



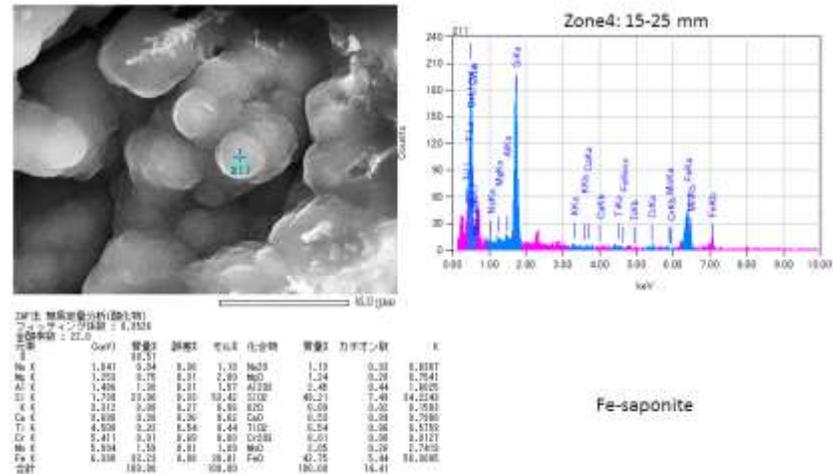
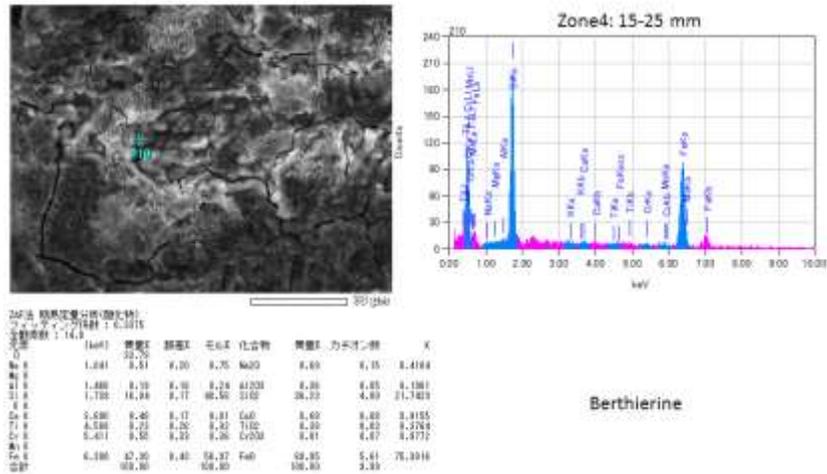
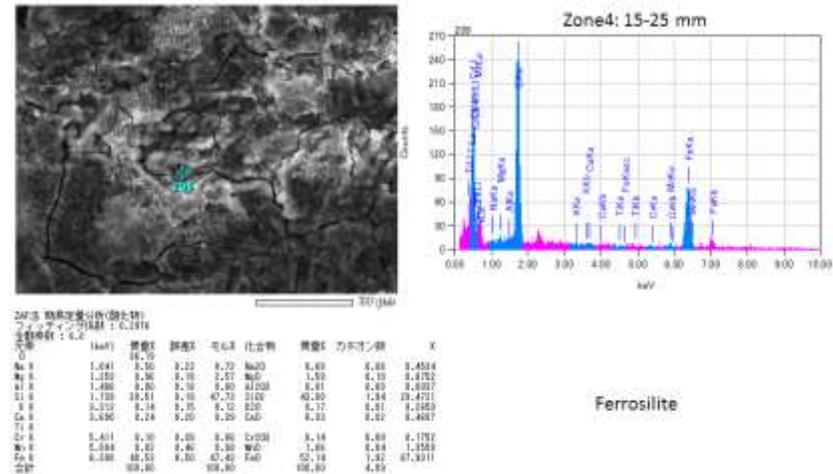
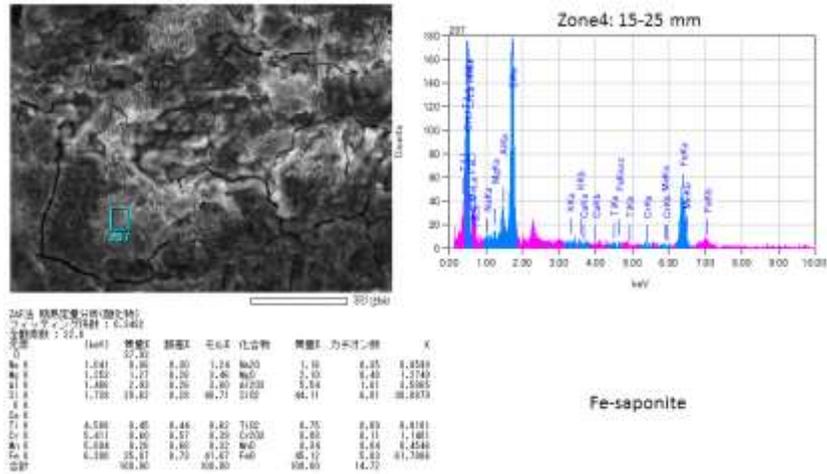
添付図 4-5-30 FW-MAG-10 (M5104)の FESEM 観察および EDS 分析 (2)



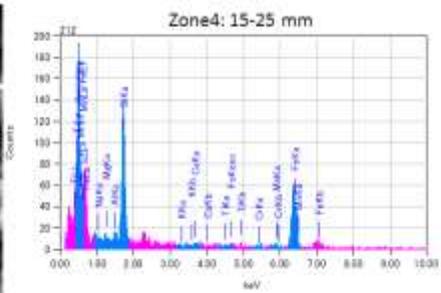
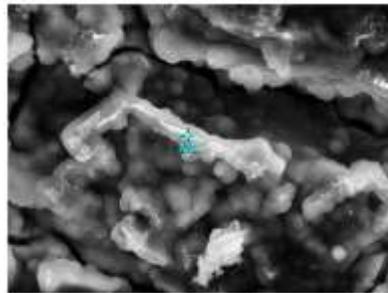
添付図 4-5-31 FW-MAG-10 (M5104)の FESEM 観察および EDS 分析 (3)



添付図 4-5-32 FW-MAG-10 (M5104)の FESEM 観察および EDS 分析 (4)



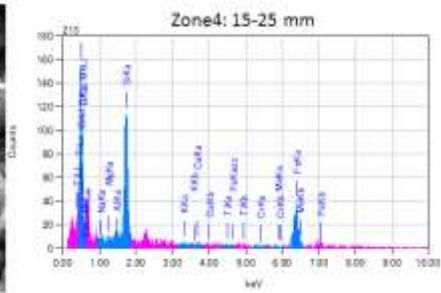
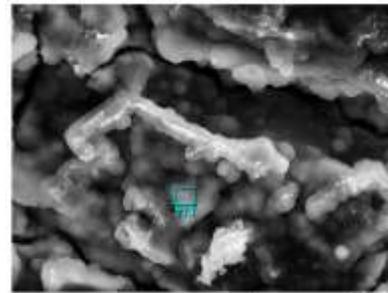
添付図 4-5-33 FW-MAG-10 (M5104)の FESEM 観察および EDS 分析 (5)



ZAF法 結果定量分析(原子%)
 プロットチャンネル: 1.0100
 分析領域: 14.2

元素	原子%	質量%	検出率	モル%	化合物	質量%	力率校正係数	K
Si	33.28							
Al	1.841	0.24	0.48	1.22	Al ₂ O ₃	1.13	0.25	8.785
Mg	1.203	0.38	0.34	2.78	MgO	1.82	0.27	8.014
Al	1.488	0.51	0.34	1.36	Al ₂ O ₃	1.53	0.29	6.334
Si	1.708	0.41	0.38	0.73	SiO ₂	10.96	0.69	19.903
K	3.312	0.03	0.27	0.33	K ₂ O	8.84	0.81	8.586
Ca	2.938	0.38	0.36	0.86	CaO	8.55	0.88	6.938
Ti	4.558	0.14	0.53	0.28	TiO ₂	8.24	0.82	6.283
Zr	5.411	0.21	0.37	0.28	ZrO ₂	8.46	0.94	8.553
Mn	5.354	1.14	0.32	1.41	MnO	1.53	0.14	1.324
Fe	8.388	46.88	0.88	85.82	FeO	68.82	0.82	74.781
合計	160.58			189.34		109.90	10.29	

Berthierine

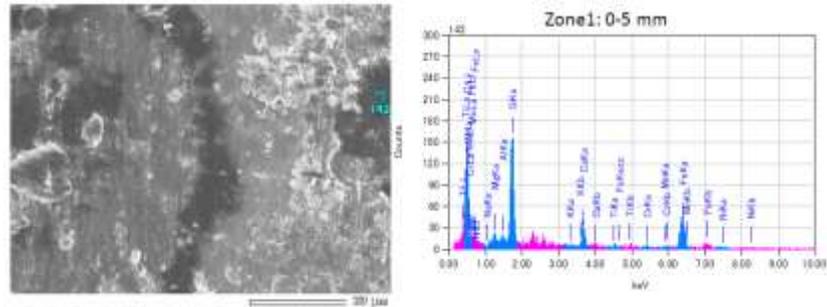


ZAF法 結果定量分析(原子%)
 プロットチャンネル: 1.0100
 分析領域: 14.2

元素	原子%	質量%	検出率	モル%	化合物	質量%	力率校正係数	K
Si	28.25							
Mg	1.841	0.24	0.48	1.22	Al ₂ O ₃	1.13	0.25	8.785
Mg	1.203	0.38	0.34	2.78	MgO	1.82	0.27	8.014
Al	1.488	0.51	0.34	1.36	Al ₂ O ₃	1.53	0.29	6.334
Si	1.708	0.41	0.49	0.91	SiO ₂	14.73	1.25	29.784
K	3.312	0.03	0.25	0.29	K ₂ O	8.47	0.83	8.385
Ca	2.938	0.38	0.46	0.85	CaO	8.72	0.83	1.4271
Ti								
Zr								
Mn	5.354	1.14	1.05	1.24	MnO	8.32	0.81	8.887
Fe	8.388	46.87	1.15	86.80	FeO	51.25	1.97	87.887
合計	160.58			189.30		109.83	4.84	

Ferrosilite

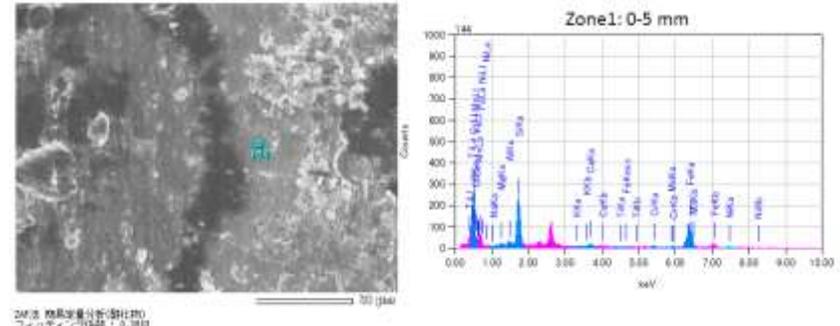
添付図 4-5-34 FW-MAG-10 (M5104)の FESEM 観察および EDS 分析 (6)



ZAF法 元素定量分析(原子比)
 プラズマクリーニング: 0.1019
 分析領域: 14.8

元素	(at%)	濃度%	検出率	原子比	化合物	質量%	分子量/原子量	Z
Na	1.381	2.54	0.24	6.71	NaCl	4.32	6.88	2.2894
Mg	1.488	6.46	0.24	6.57	MgO	6.39	6.11	6.2416
Si	1.739	17.83	0.25	40.22	SiO ₂	36.14	1.27	26.9856
K	0.212	6.14	0.23	9.22	K ₂ O	6.17	6.82	6.2114
Ca	0.286	6.52	0.17	11.60	CaO	6.49	1.69	10.4501
Ti	0.411	1.49	0.53	0.32	TiO ₂	1.18	6.18	3.2884
Cr	0.284	6.87	0.42	6.79	Cr ₂ O ₃	2.87	6.63	1.6799
Mn	0.289	10.60	0.47	10.59	MnO	41.22	1.76	54.6401
Ni	1.471	6.46	1.17	6.52	NiO	6.61	6.63	6.1914
合計		100.00		100.00		100.00	3.29	6.1914

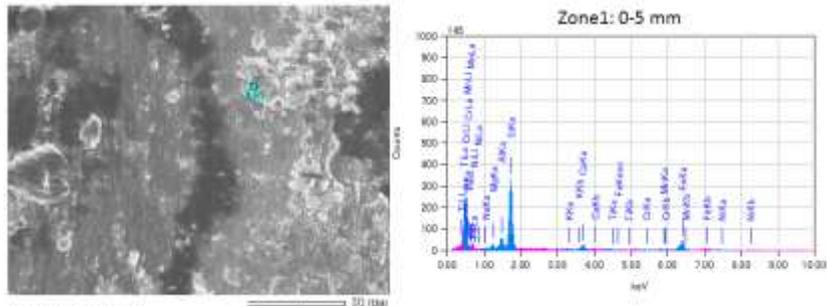
Fe-chlorite



ZAF法 元素定量分析(原子比)
 プラズマクリーニング: 0.1019
 分析領域: 14.8

元素	(at%)	濃度%	検出率	原子比	化合物	質量%	分子量/原子量	Z
Na	1.233	6.05	0.41	3.29	NaCl	1.42	6.24	6.6796
Mg	1.488	6.39	0.49	1.16	MgO	1.76	6.24	6.2388
Si	1.739	19.89	0.42	92.57	SiO ₂	29.92	3.43	17.1008
K	0.689	1.98	0.42	3.31	CaO	1.36	6.23	2.5181
Ti	0.411	3.87	0.88	1.32	Cr ₂ O ₃	2.86	6.27	3.4529
Cr	0.284	6.81	0.38	0.63	NaCl	3.85	6.86	6.7796
Mn	0.289	46.63	1.64	35.74	FeO	62.71	5.41	71.2064
Ni	1.471	3.12	1.94	3.66	NiO	2.48	6.25	6.1922
合計		100.00		100.00	100.00	100.00	18.33	6.1922

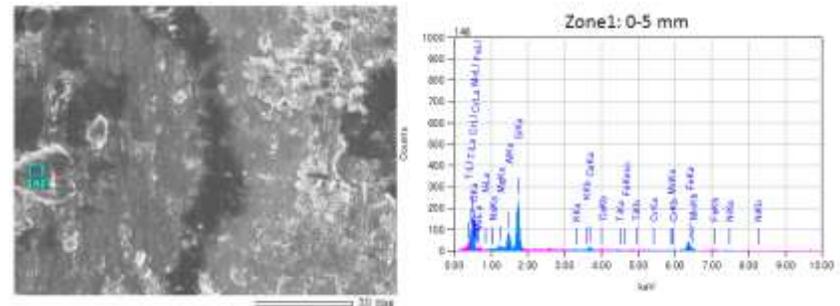
Fe-chlorite



ZAF法 元素定量分析(原子比)
 プラズマクリーニング: 0.1019
 分析領域: 12.8

元素	(at%)	濃度%	検出率	原子比	化合物	質量%	分子量/原子量	Z
Na	1.281	2.49	0.23	6.40	NaCl	3.46	6.79	2.8995
Mg	1.488	7.43	0.24	6.73	MgO	6.36	1.11	6.2416
Si	1.739	17.09	0.27	61.28	SiO ₂	37.84	2.86	46.2179
K	0.212	6.16	0.23	9.22	K ₂ O	6.20	6.83	6.4408
Ca	0.289	6.11	0.31	6.20	CaO	4.95	6.44	6.5947
Ti	0.411	6.81	0.47	0.02	TiO ₂	3.82	6.89	6.6246
Cr	0.284	6.89	0.71	0.79	NaCl	8.86	6.19	1.8578
Mn	0.289	16.45	0.78	12.24	FeO	38.31	3.81	38.4489
Ni	1.471	6.46	1.17	6.52	NiO	6.61	6.63	6.1914
合計		100.00		100.00	100.00	100.00	19.82	6.1914

Fe-saponite

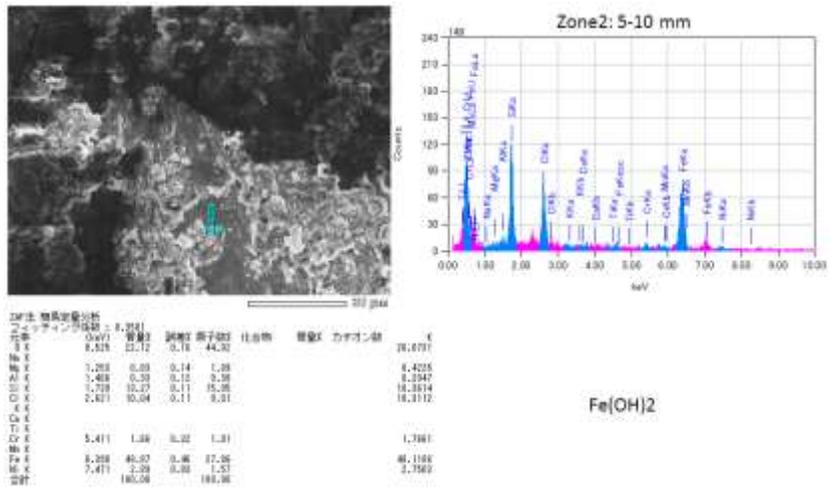
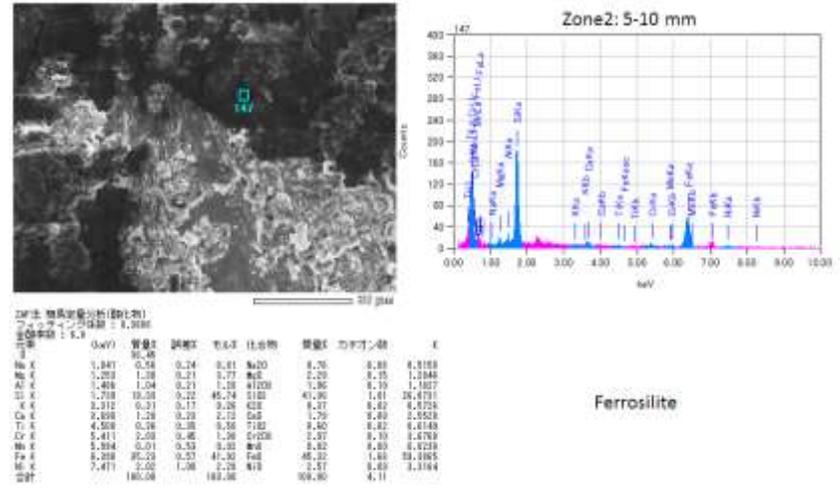
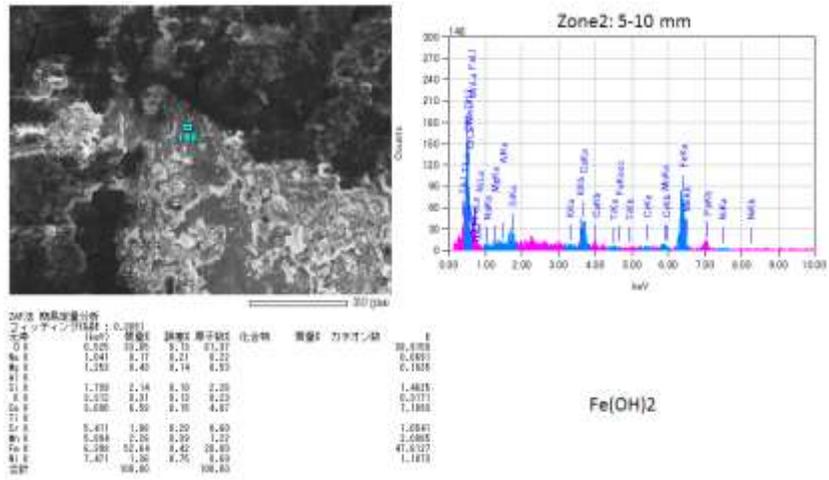


ZAF法 元素定量分析(原子比)
 プラズマクリーニング: 0.1019
 分析領域: 12.8

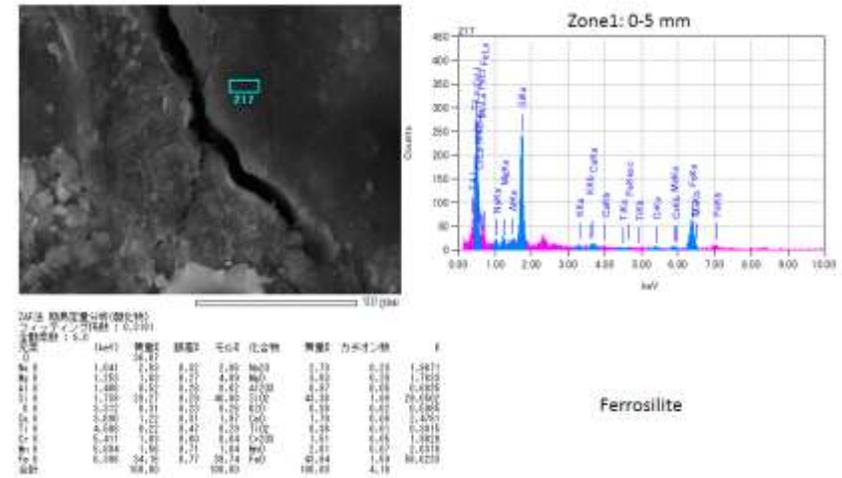
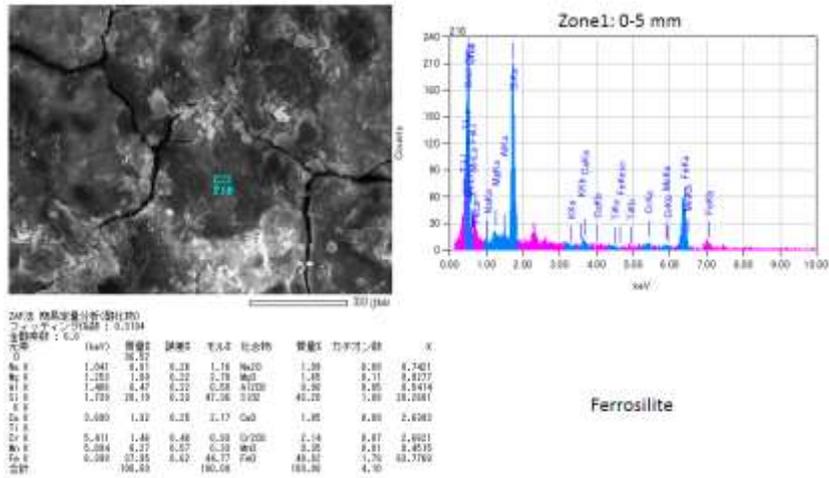
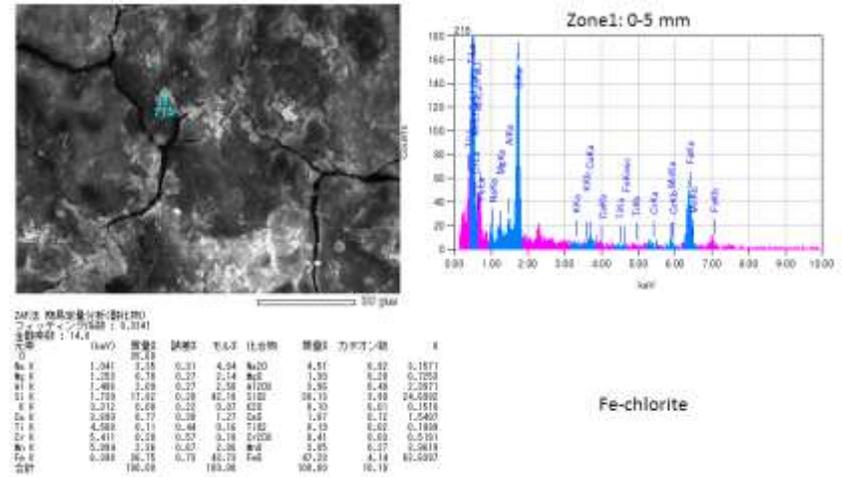
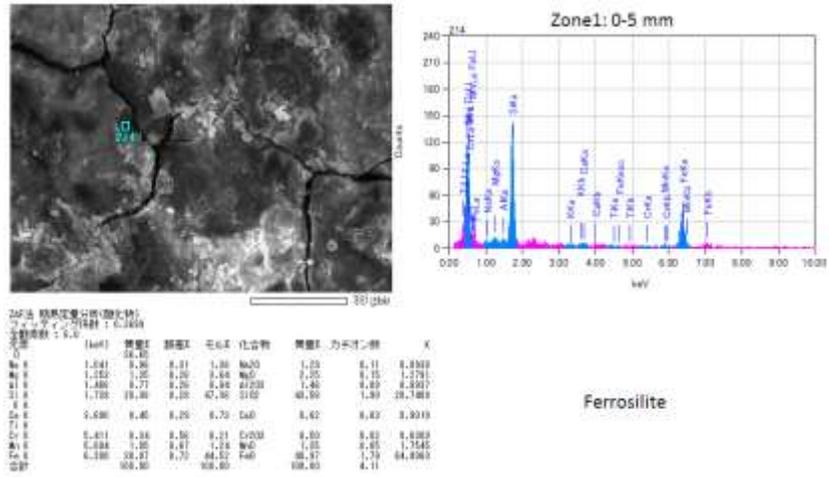
元素	(at%)	濃度%	検出率	原子比	化合物	質量%	分子量/原子量	Z
Na	1.041	6.32	0.28	0.41	Na ₂ O	6.44	6.12	0.2817
Mg	1.281	1.28	0.23	3.54	NaCl	2.35	6.46	1.8911
Mg	1.488	7.03	0.23	0.25	MgO	13.27	3.19	60.0008
Si	1.739	19.32	0.27	84.91	SiO ₂	40.60	7.69	31.2524
K	0.212	6.28	0.23	9.22	K ₂ O	6.32	6.86	6.5519
Ca	0.289	1.39	0.28	0.25	CaO	2.77	6.42	6.4931
Ti	0.411	6.07	0.44	0.44	TiO ₂	8.53	6.89	6.6102
Cr	0.284	6.44	0.46	0.53	NaCl	8.57	6.87	6.6117
Mn	0.289	12.64	0.71	17.40	FeO	28.84	3.49	42.4758
Ni	1.471	6.46	1.24	3.54	NiO	9.63	6.67	6.5147
合計		100.00		100.00	100.00	100.00	31.93	6.1914

Fe-saponite

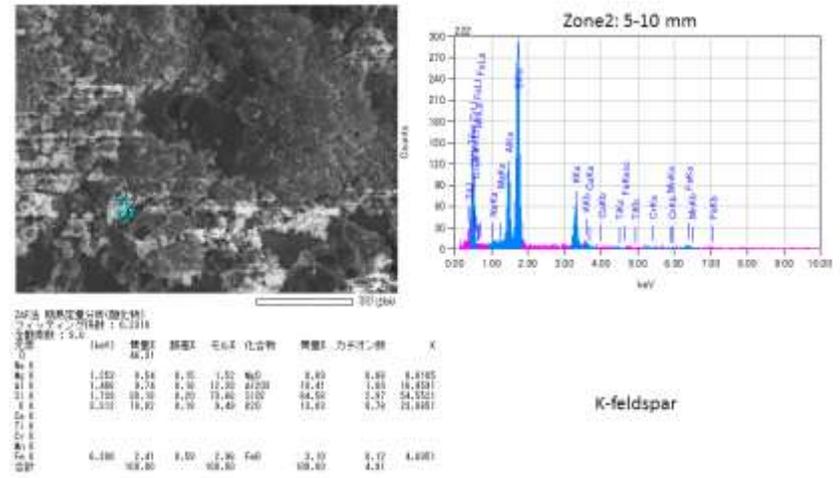
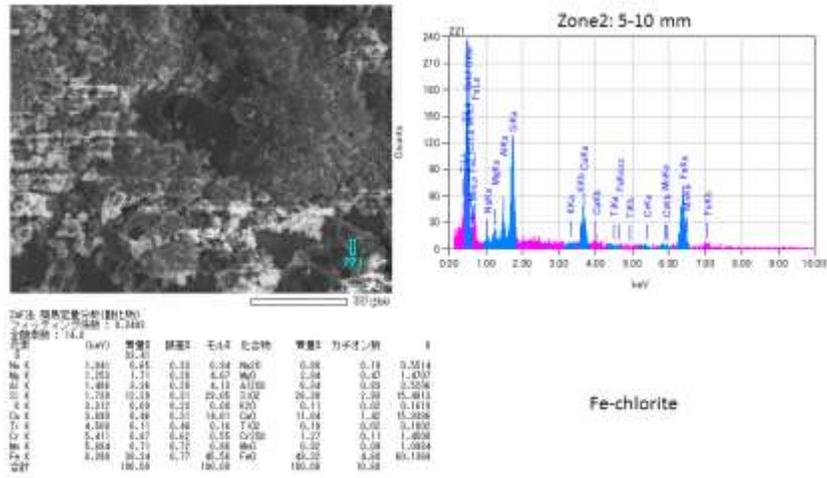
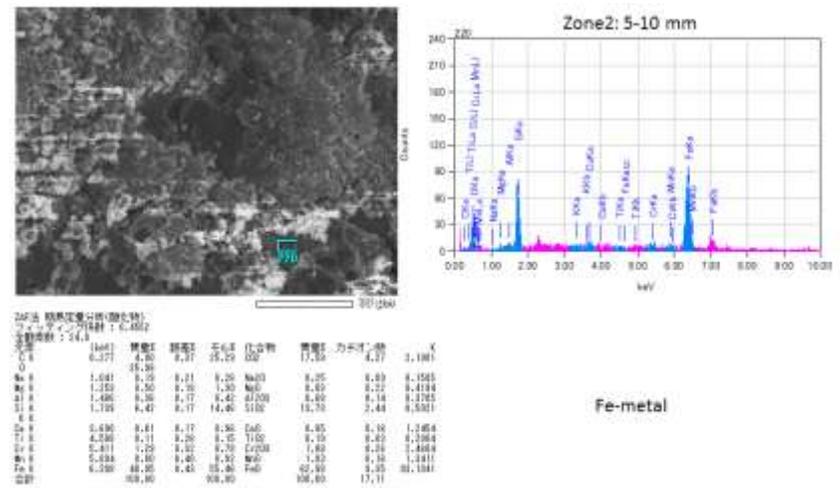
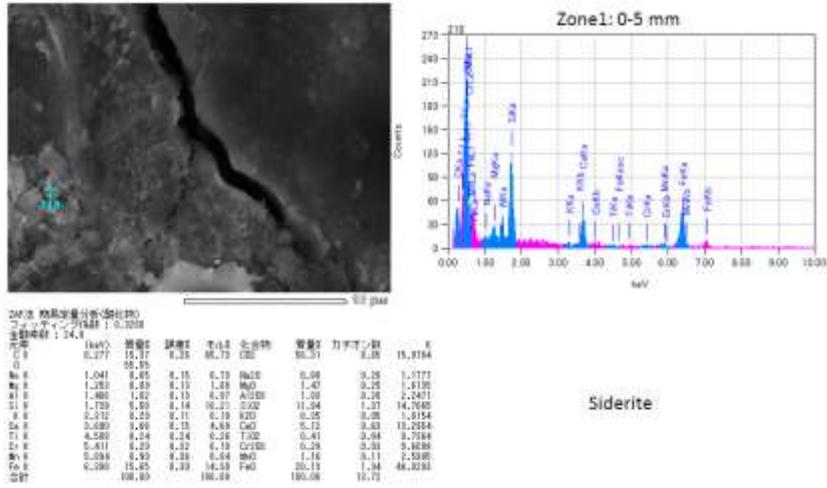
添付図 4-5-35 SW-EBW-5 (E5300)の FESEM 観察および EDS 分析 (1)



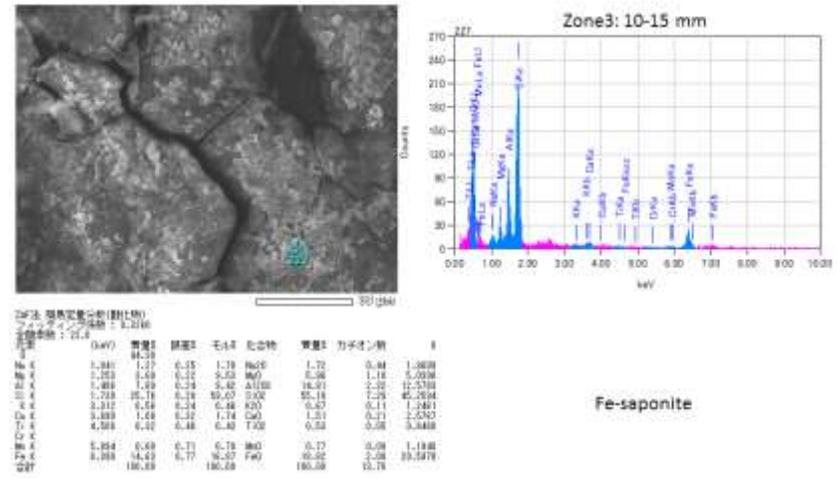
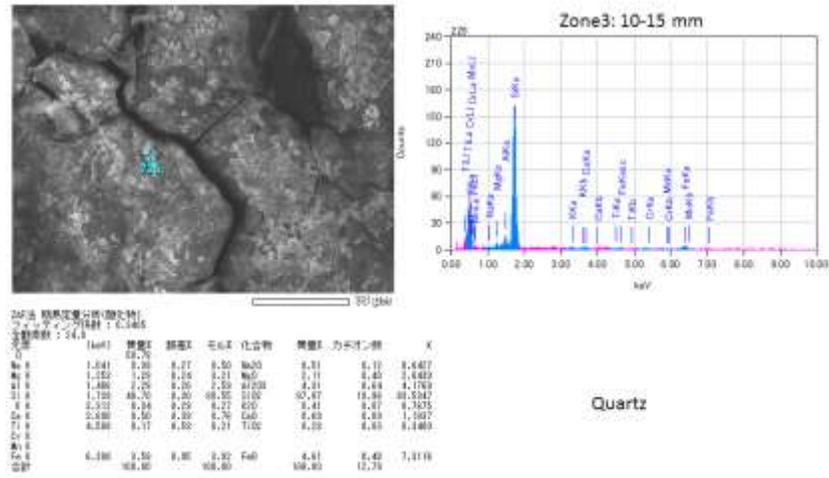
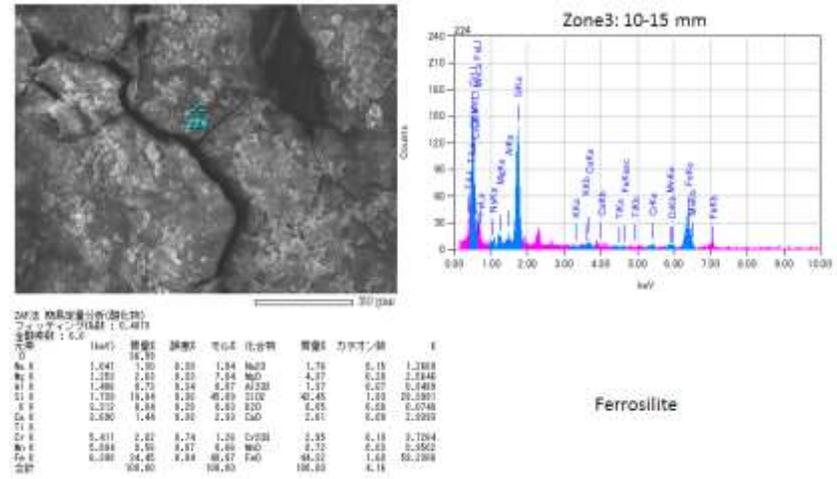
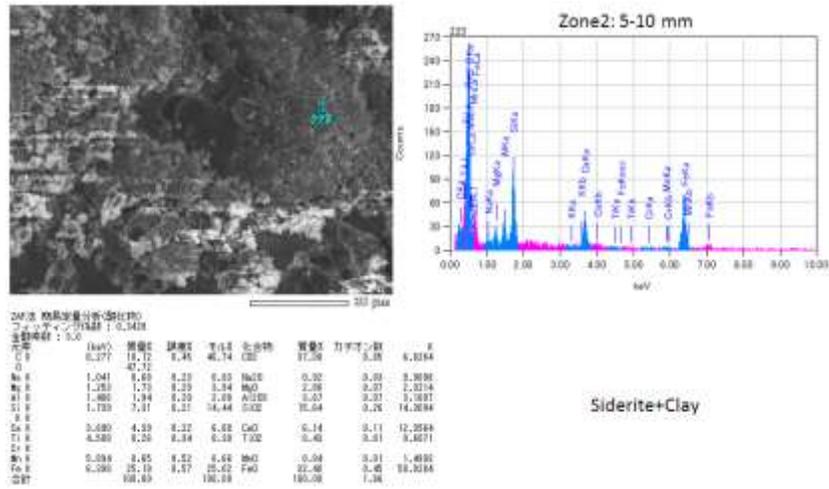
添付図 4-5-36 SW-EBW-5 (E5300)の FESEM 観察および EDS 分析 (2)



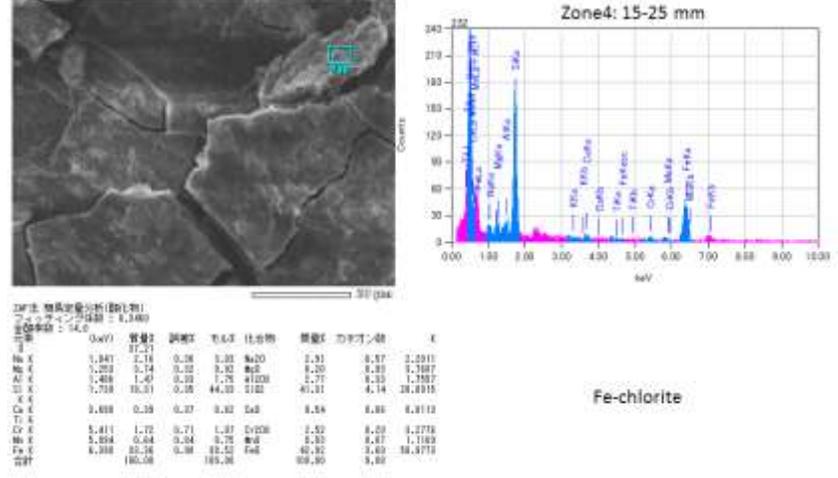
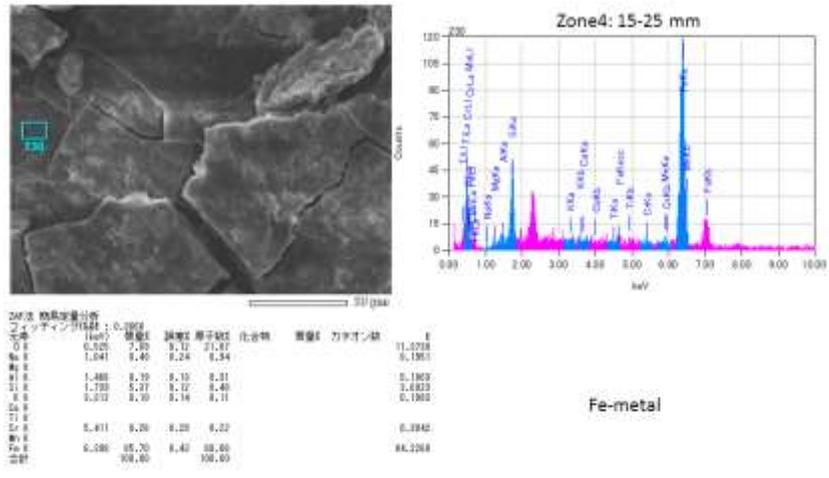
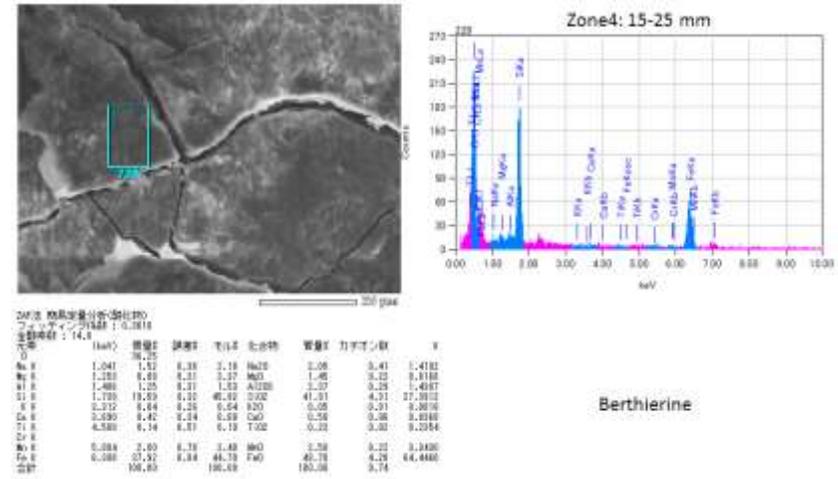
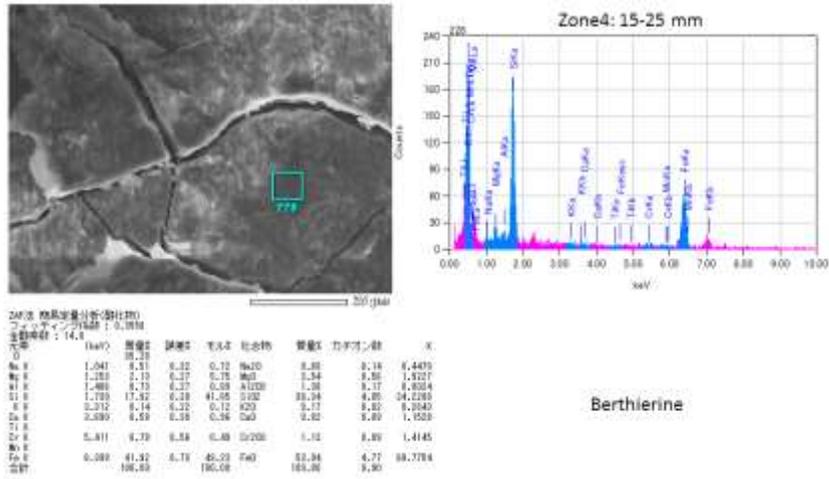
添付図 4-5-37 SW-EBW-10 (E5201)の FESEM 観察および EDS 分析 (1)



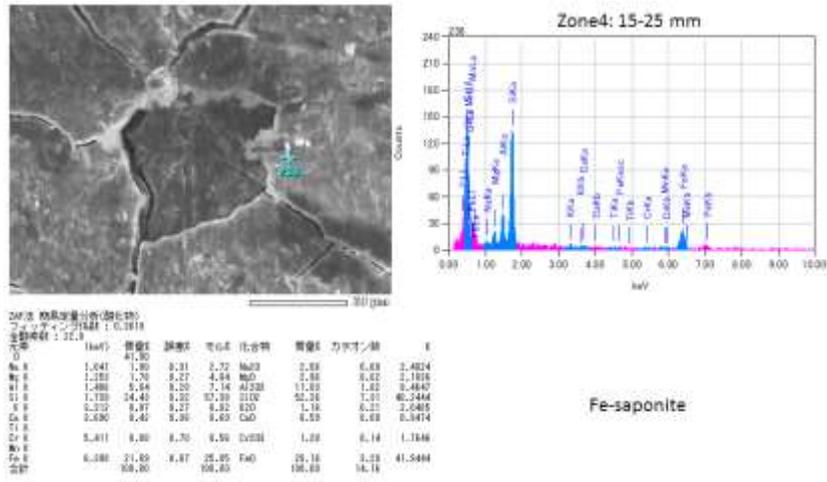
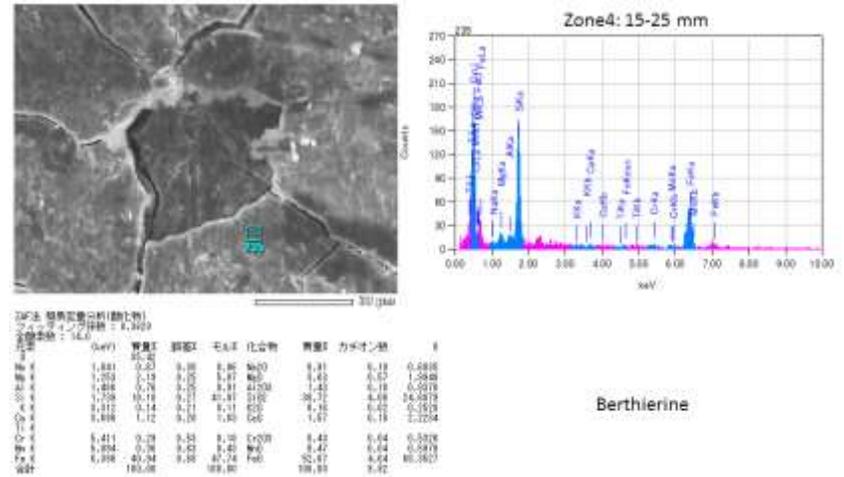
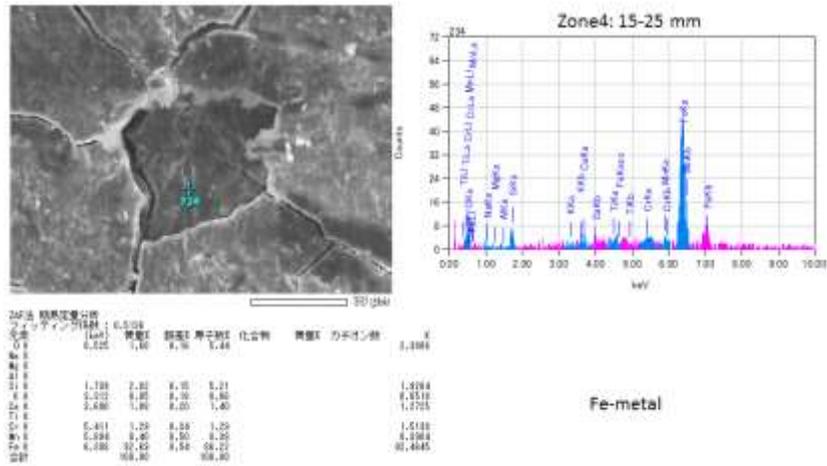
添付図 4-5-38 SW-EBW-10 (E5201)の FESEM 観察および EDS 分析 (2)



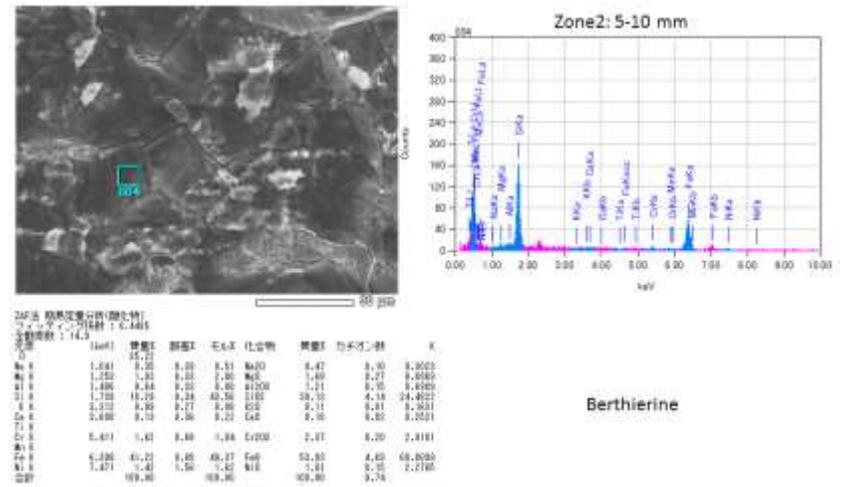
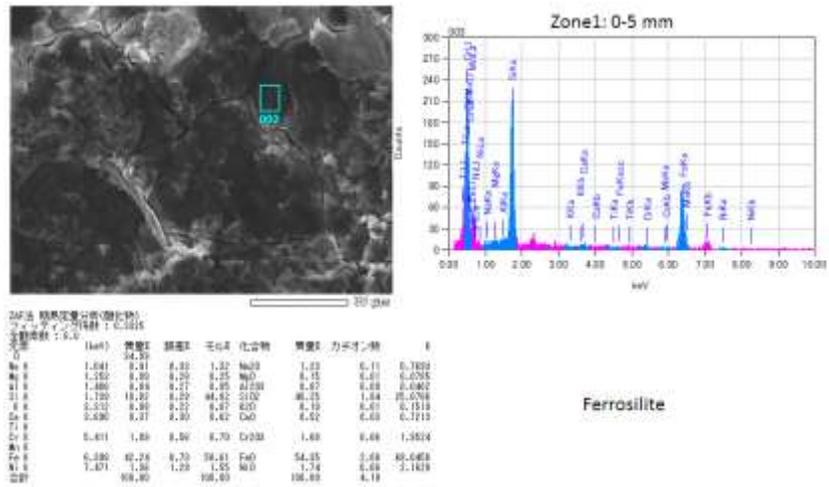
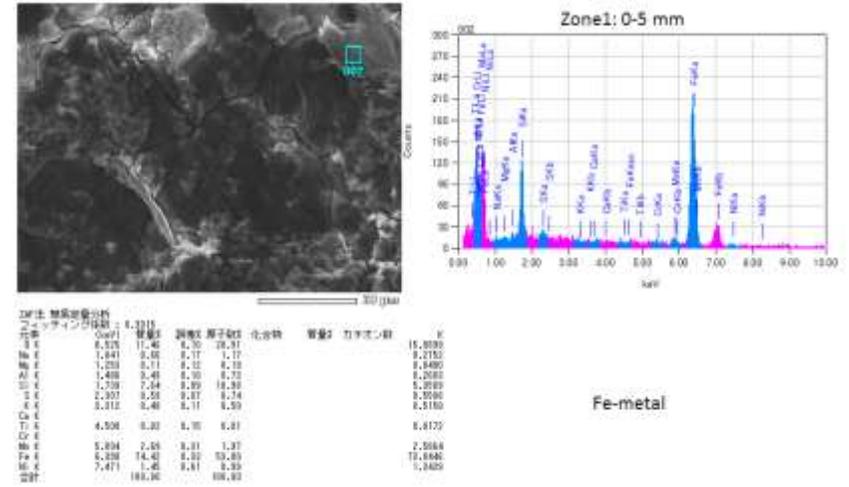
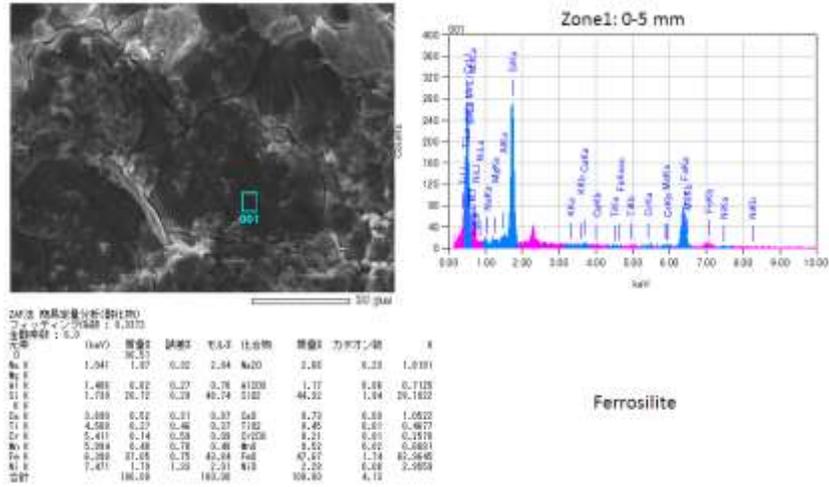
添付図 4-5-39 SW-EBW-10 (E5201)の FESEM 観察および EDS 分析 (3)



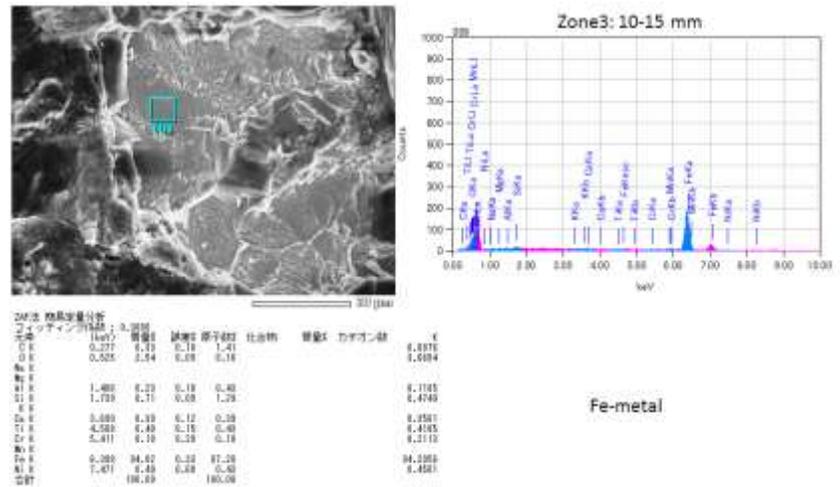
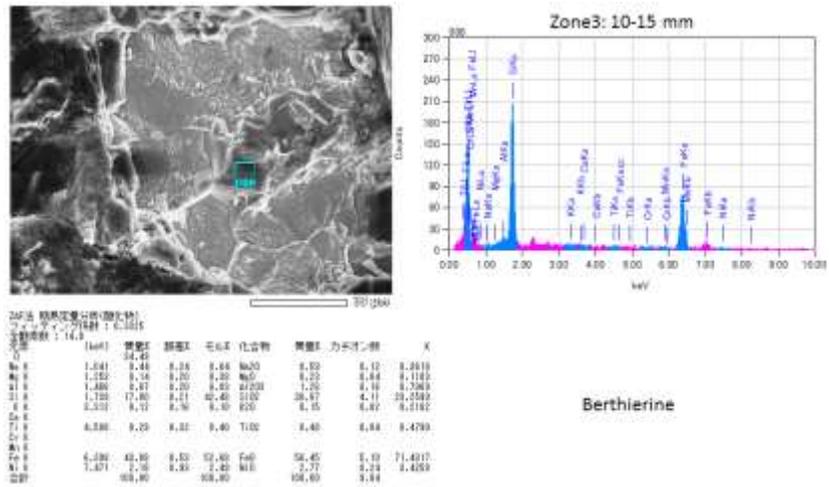
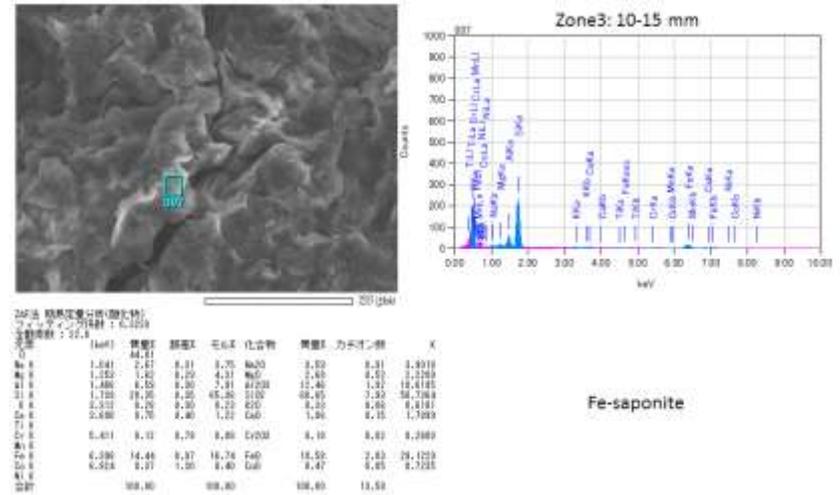
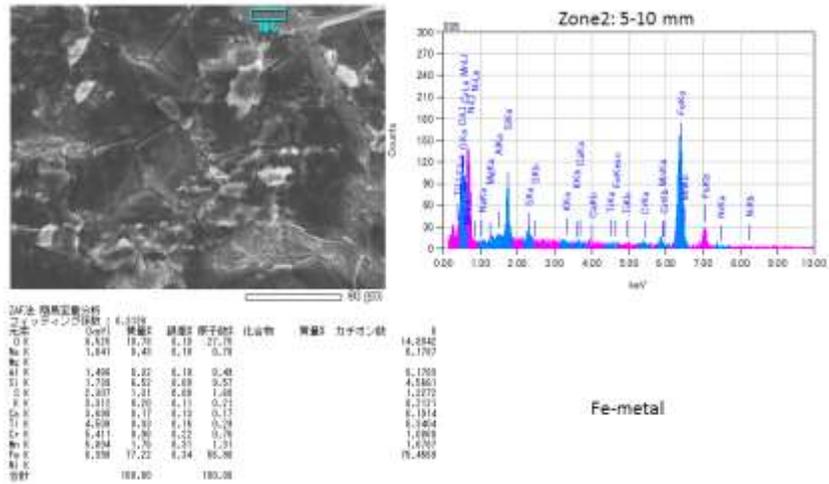
添付図 4-5-40 SW-EBW-10 (E5201)の FESEM 観察および EDS 分析 (4)



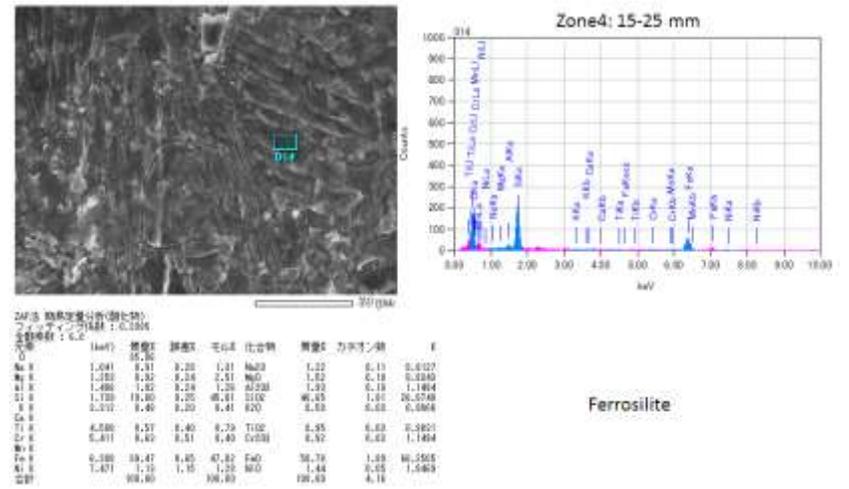
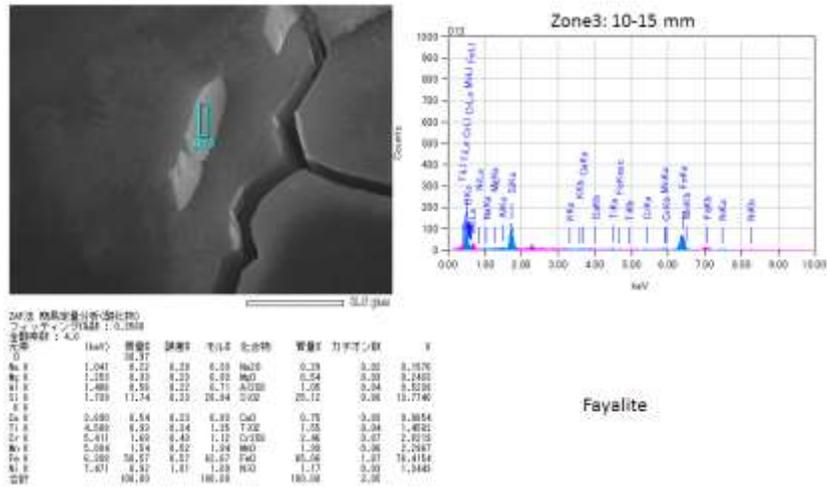
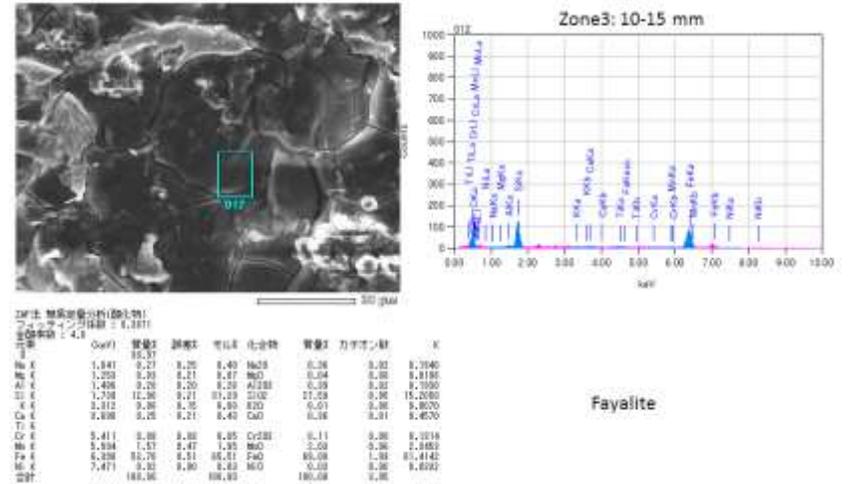
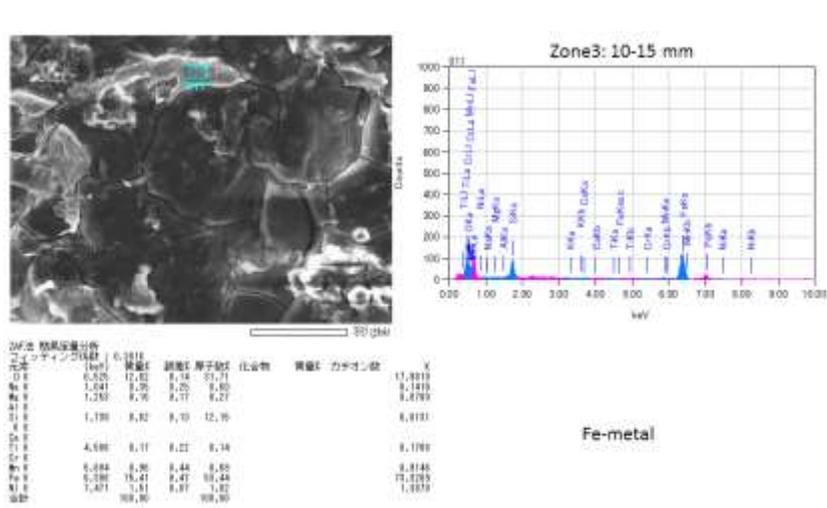
添付図 4-5-41 SW-EBW-10 (E5201)の FESEM 観察および EDS 分析 (5)



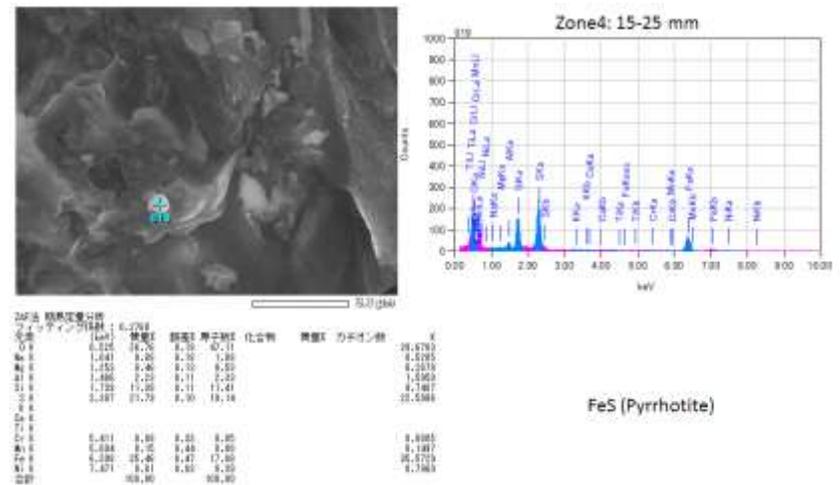
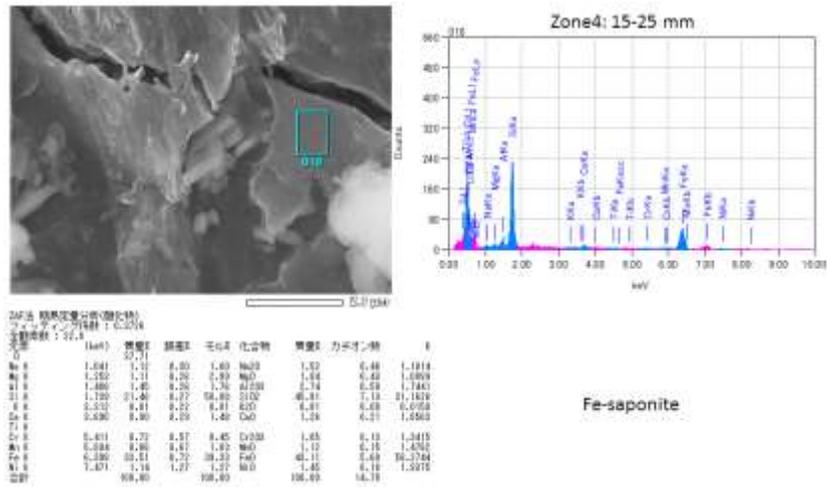
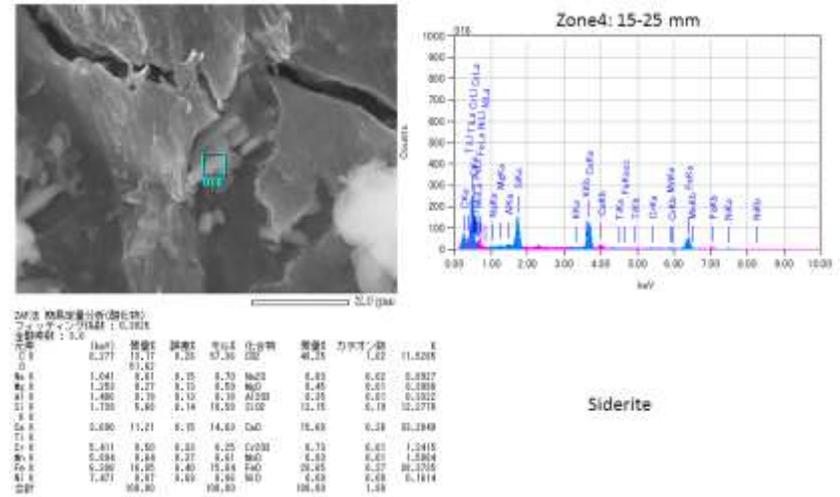
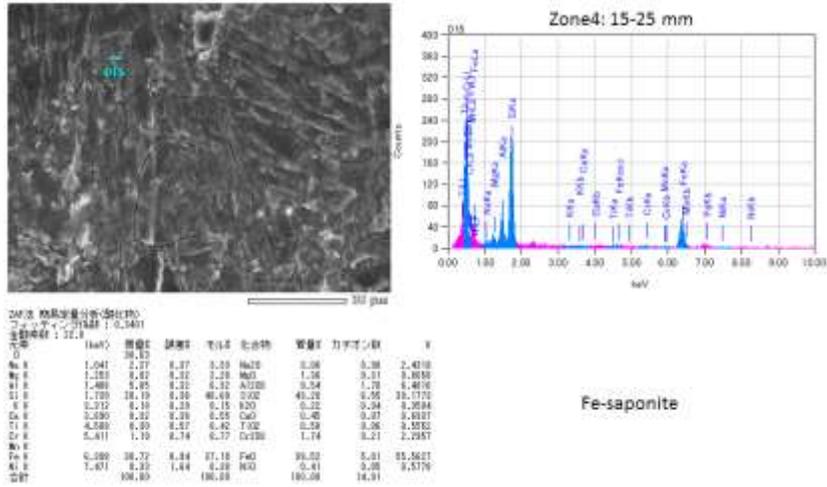
添付図 4-5-42 FW-EBW-5 (E5104)の FESEM 観察および EDS 分析 (1)



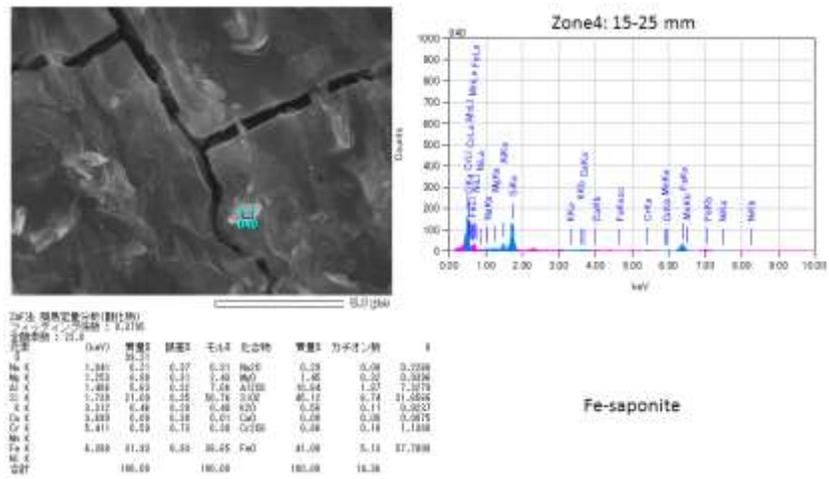
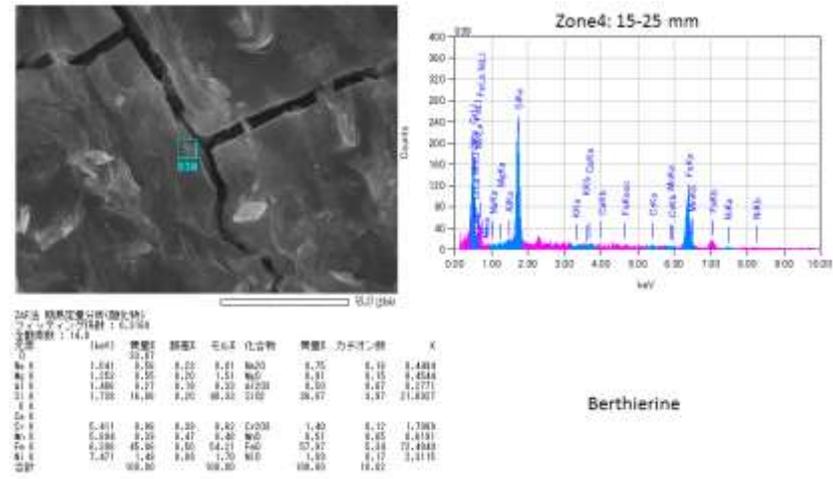
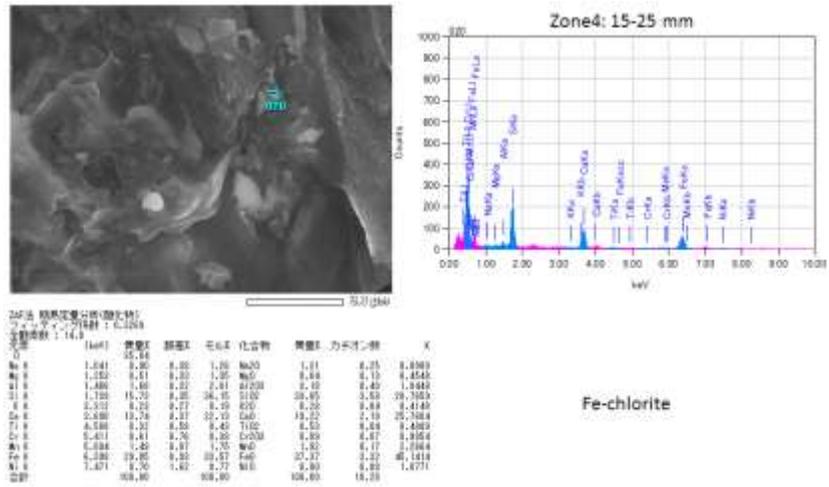
添付図 4-5-43 FW-EBW-5 (E5104)の FESEM 観察および EDS 分析 (2)



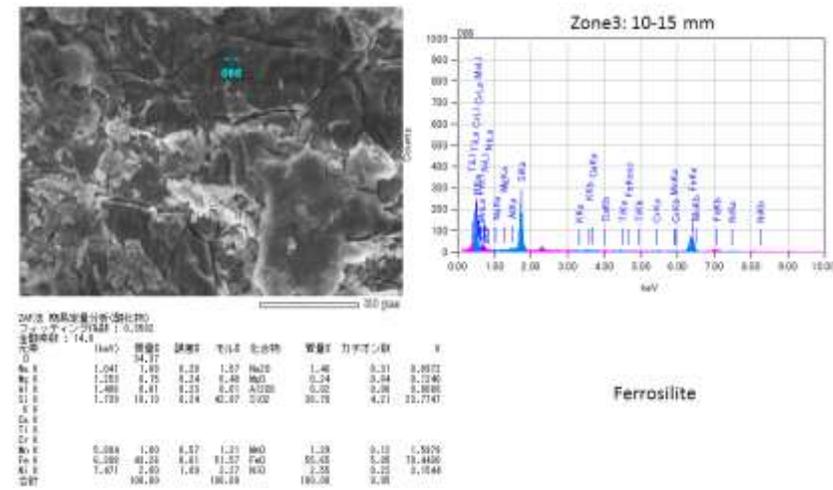
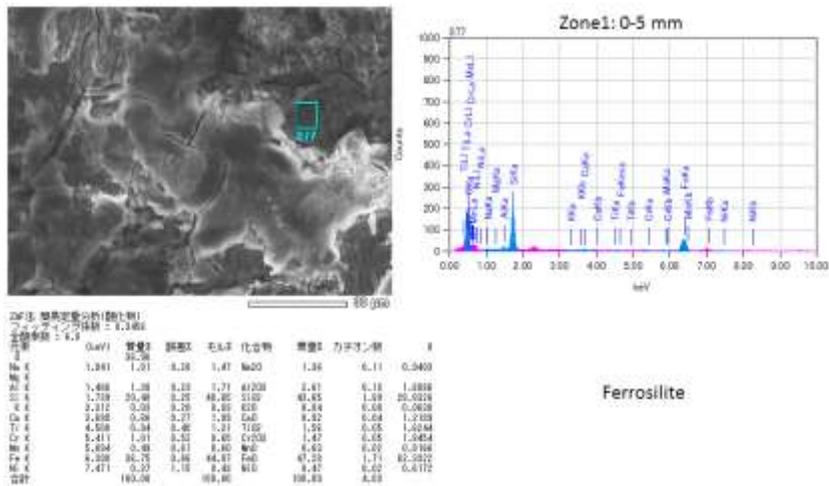
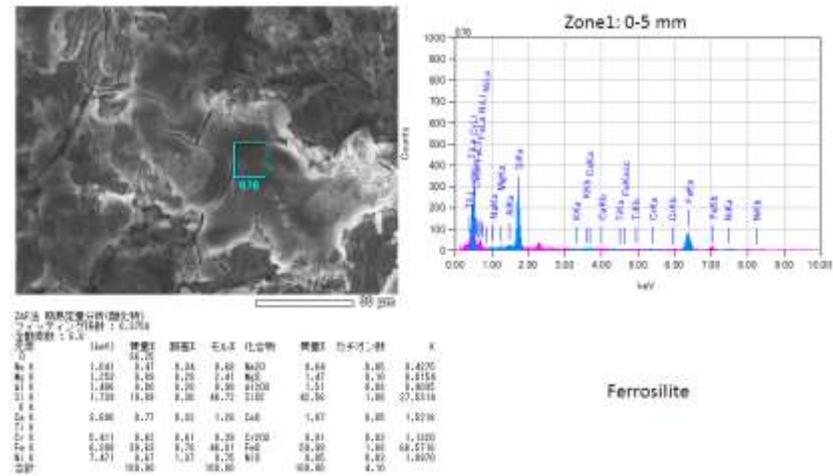
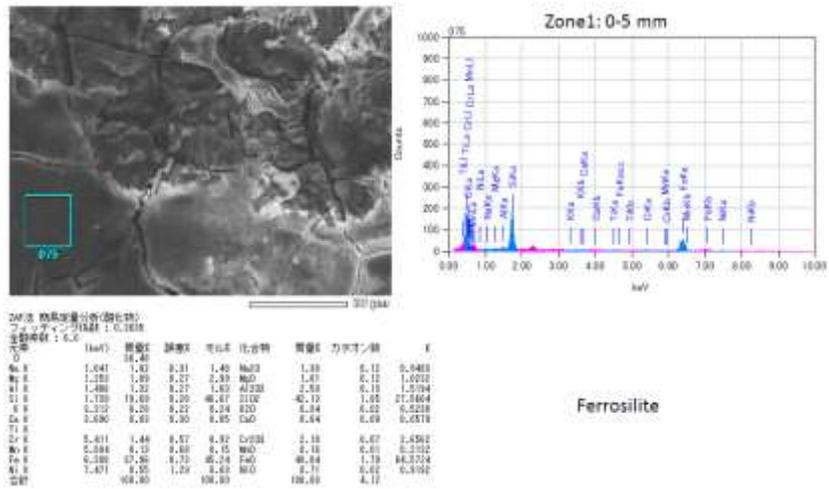
添付図 4-5-44 FW-EBW-5 (E5104)の FESEM 観察および EDS 分析 (3)



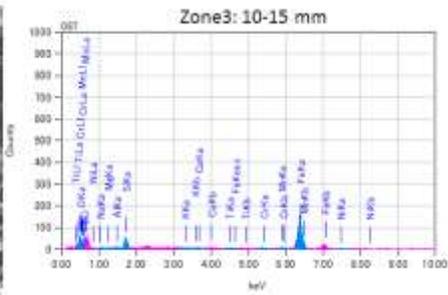
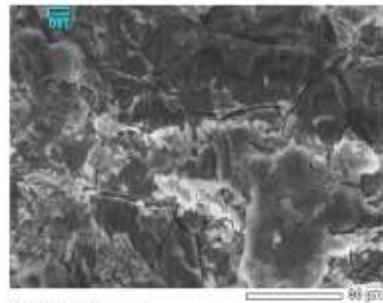
添付図 4-5-45 FW-EBW-5 (E5104)の FESEM 観察および EDS 分析 (4)



添付図 4-5-46 FW-EBW-5 (E5104)の FESEM 観察および EDS 分析 (5)



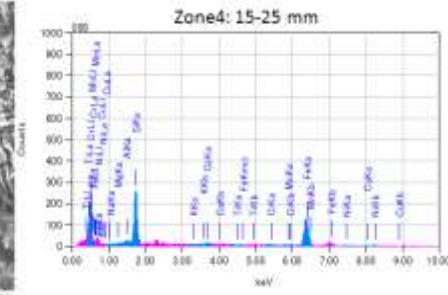
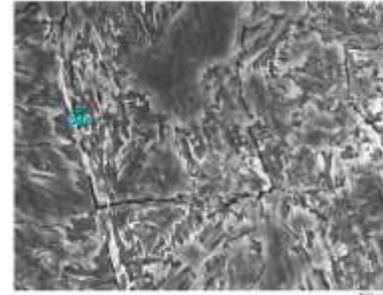
添付図 4-5-47 FW-EBW-10 (E5202)の FESEM 観察および EDS 分析 (1)



ZAF法 元素定量分析 (ZAF法)
 フェーザン法検出 : 0.1307
 分析時間 : 14.67

元素	濃度 (%)	重量%	原子%	化合物	質量%	力率 (%)	Z
O	53.23	5.51	6.12	H ₂ O	16.54		8
Fe	1.941	9.49	0.22	Fe	9.50		26
Al	1.466	9.82	0.12	Al ₂ O ₃	1.30		13
Si	1.758	9.81	0.11	SiO ₂	2.79		14
Ca	0.558	9.78	0.15	CaO	0.86		20
Ti	0.668	9.89	0.19	TiO ₂	1.26		22
Cr	0.411	9.87	0.28	Cr ₂ O ₃	0.88		24
Mn	0.694	9.89	0.38	Mn ₂ O ₃	1.71		25
Ni	0.358	12.56	0.41	Ni ₂ O ₃	0.70		28
Cu	1.471	1.11	0.18	Cu ₂ O	0.80		29
合計	100.00		100.00				

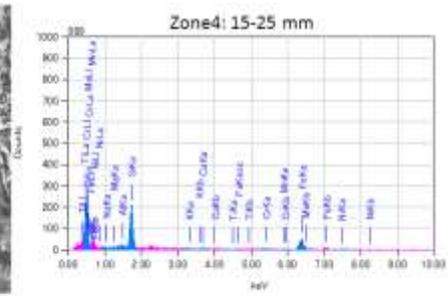
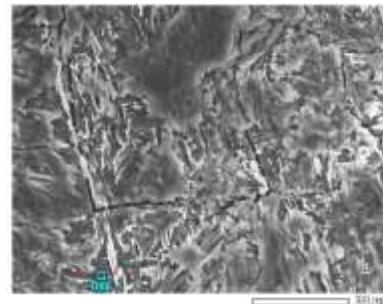
Fe-metal



ZAF法 元素定量分析 (ZAF法)
 フェーザン法検出 : 0.1319
 分析時間 : 14.67

元素	濃度 (%)	重量%	原子%	化合物	質量%	力率 (%)	Z
Fe	1.941	9.52	0.24	Fe ₂ O ₃	8.83	6.18	0.4849
Al	1.352	0.14	0.08	Al ₂ O ₃	0.22	6.64	0.1889
Si	1.466	3.38	0.26	SiO ₂	1.93	6.24	0.2689
Ca	1.758	15.33	0.21	Ca ₂ SiO ₄	20.79	7.68	31.2598
Cr	0.411	0.08	0.21	Cr ₂ O ₃	1.21	6.15	1.8108
Ti	0.668	0.08	0.46	TiO ₂	1.29	6.11	1.5429
Mn	0.694	46.38	0.52	Mn ₂ O ₃	48.21	6.67	76.0798
Ni	1.471	0.26	0.83	NiO	1.31	6.15	1.4611
Cu	0.868	0.18	1.27	Cu ₂ O	0.45	6.64	0.3240
合計	100.00		100.00		100.00	10.22	

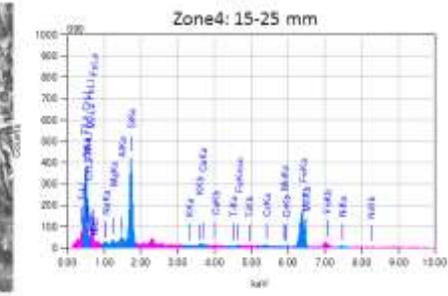
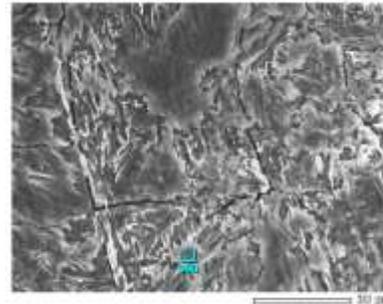
Ferrosilite



ZAF法 元素定量分析 (ZAF法)
 フェーザン法検出 : 0.1408
 分析時間 : 12.43

元素	濃度 (%)	重量%	原子%	化合物	質量%	力率 (%)	Z
O	27.76						
Fe	1.041	6.67	0.24	Fe ₂ O ₃	6.67	6.67	0.8589
Al	1.352	6.19	0.28	Al ₂ O ₃	6.65	6.29	0.4978
Si	1.466	1.41	0.17	SiO ₂	2.66	6.43	1.6778
Ca	1.758	17.80	0.28	Ca ₂ SiO ₄	47.89	7.79	31.8932
Cr	0.694	0.09	0.81	Cr ₂ O ₃	1.31	6.89	1.2587
Ti	0.668	0.10	0.59	TiO ₂	1.24	6.88	0.8603
Mn	0.694	6.18	0.70	Mn ₂ O ₃	8.17	6.82	8.2144
Fe	0.358	15.56	0.70	Fe ₂ O ₃	46.75	5.50	61.9918
Ni	1.471	1.11	1.11	NiO	1.62	6.19	1.3687
合計	100.00		100.00		100.00	14.43	

Fe-saponite

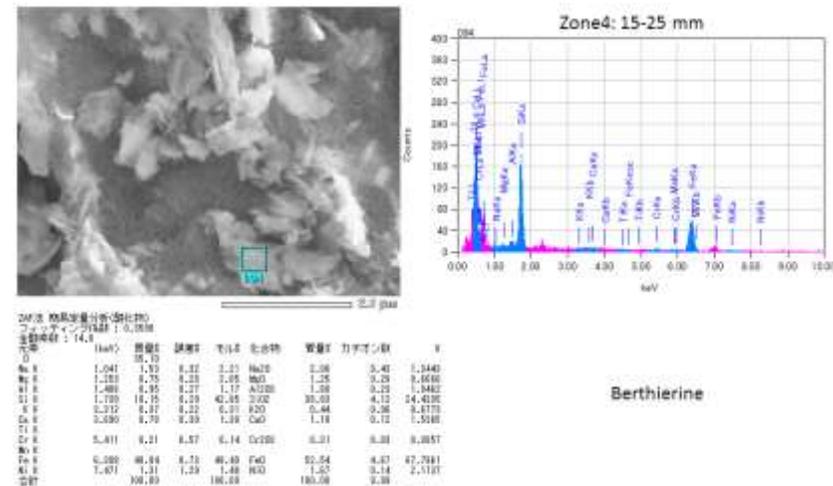
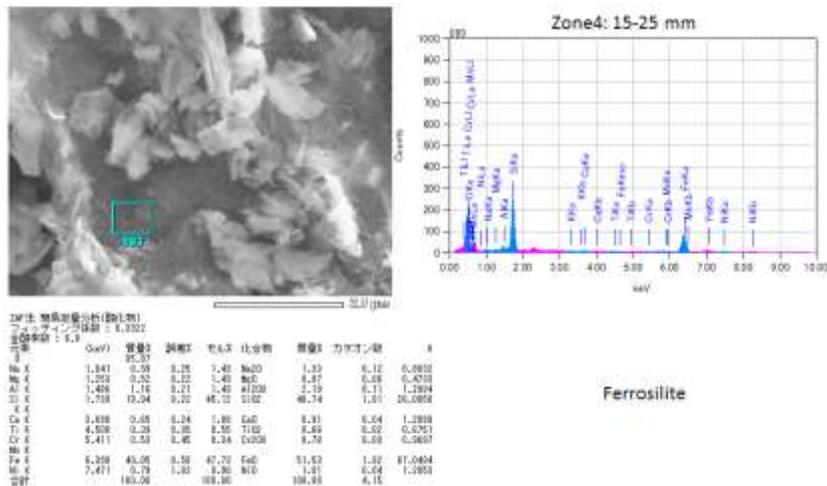
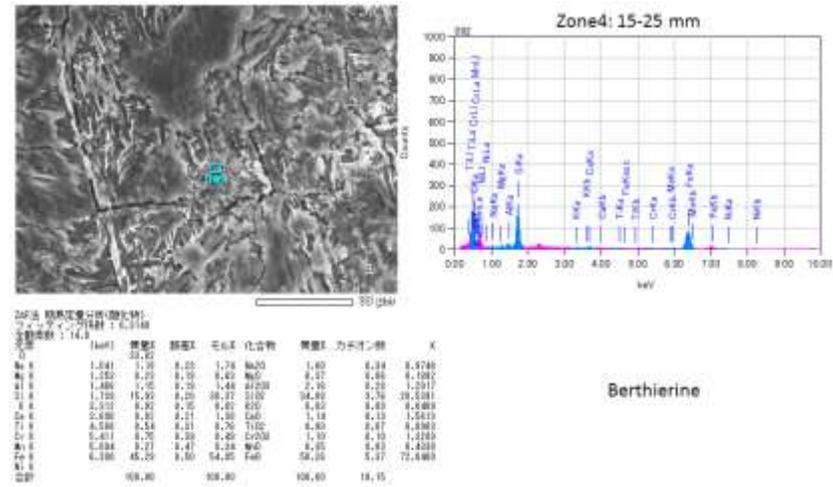
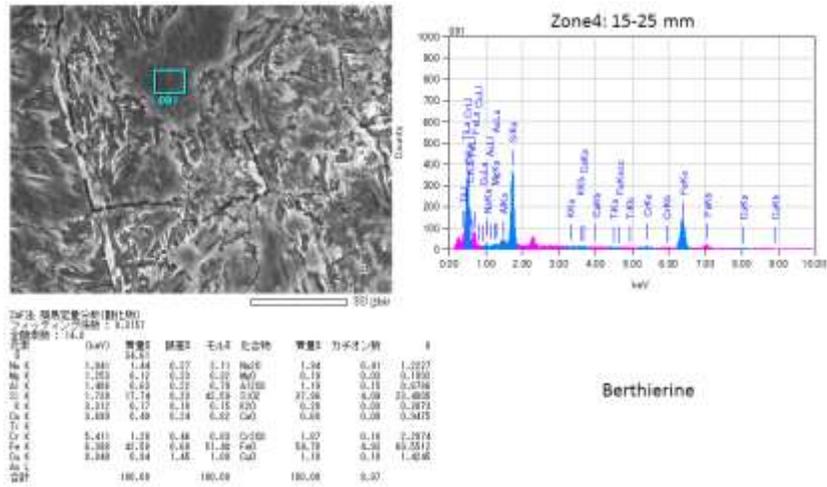


ZAF法 元素定量分析 (ZAF法)
 フェーザン法検出 : 0.1288
 分析時間 : 14.43

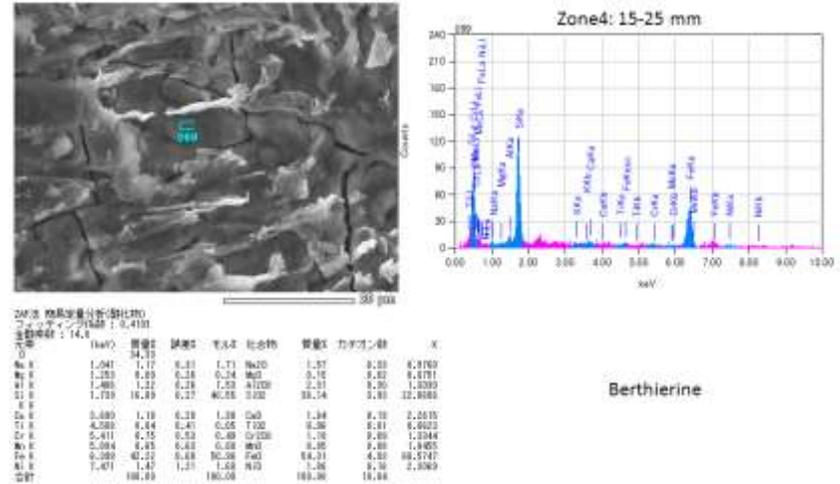
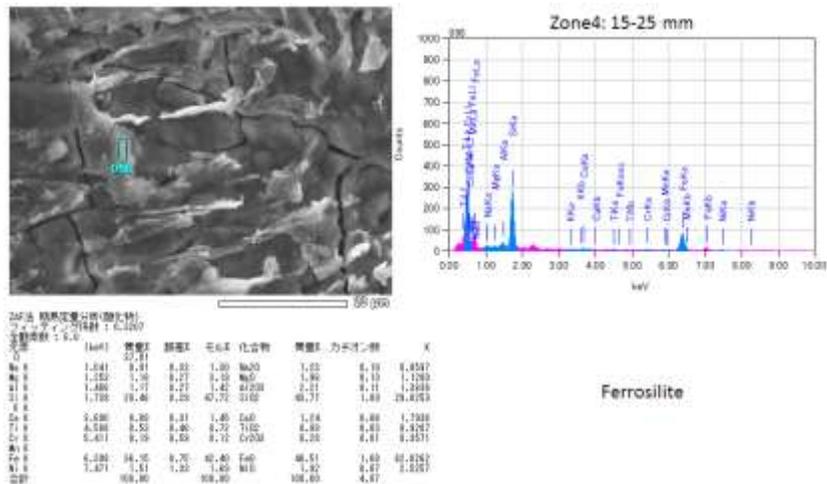
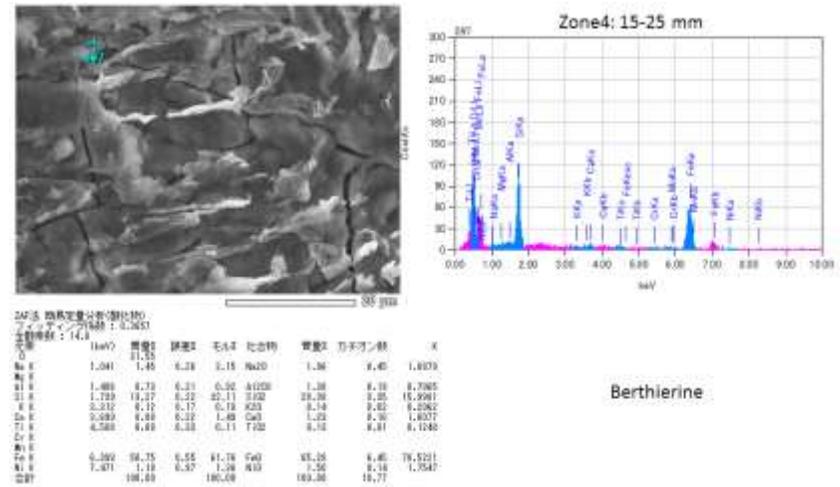
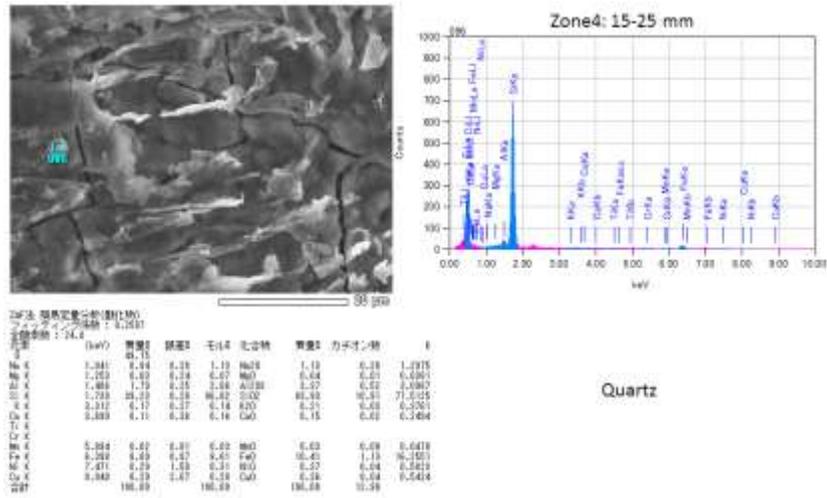
元素	濃度 (%)	重量%	原子%	化合物	質量%	力率 (%)	Z
O	34.05						
Fe	1.041	6.67	0.24	Fe ₂ O ₃	6.77	6.18	0.4857
Al	1.352	6.19	0.28	Al ₂ O ₃	1.70	6.18	0.5822
Si	1.466	1.29	0.18	SiO ₂	1.82	6.38	1.2962
Ca	1.758	16.01	0.28	Ca ₂ SiO ₄	44.89	6.80	21.0974
Cr	0.694	6.49	0.21	Cr ₂ O ₃	4.95	6.67	6.1808
Ti	0.668	1.09	0.46	TiO ₂	1.48	6.18	1.8882
Mn	0.358	46.37	0.51	Mn ₂ O ₃	54.85	6.14	70.5861
Ni	1.471	0.21	1.21	NiO	1.55	6.22	1.1462
合計	100.00		100.00		100.00	16.68	

Fe-chlorite

添付図 4-5-48 FW-EBW-10 (E5202)の FESEM 観察および EDS 分析 (2)



添付図 4-5-49 FW-EBW-10 (E5202)の FESEM 観察および EDS 分析 (3)



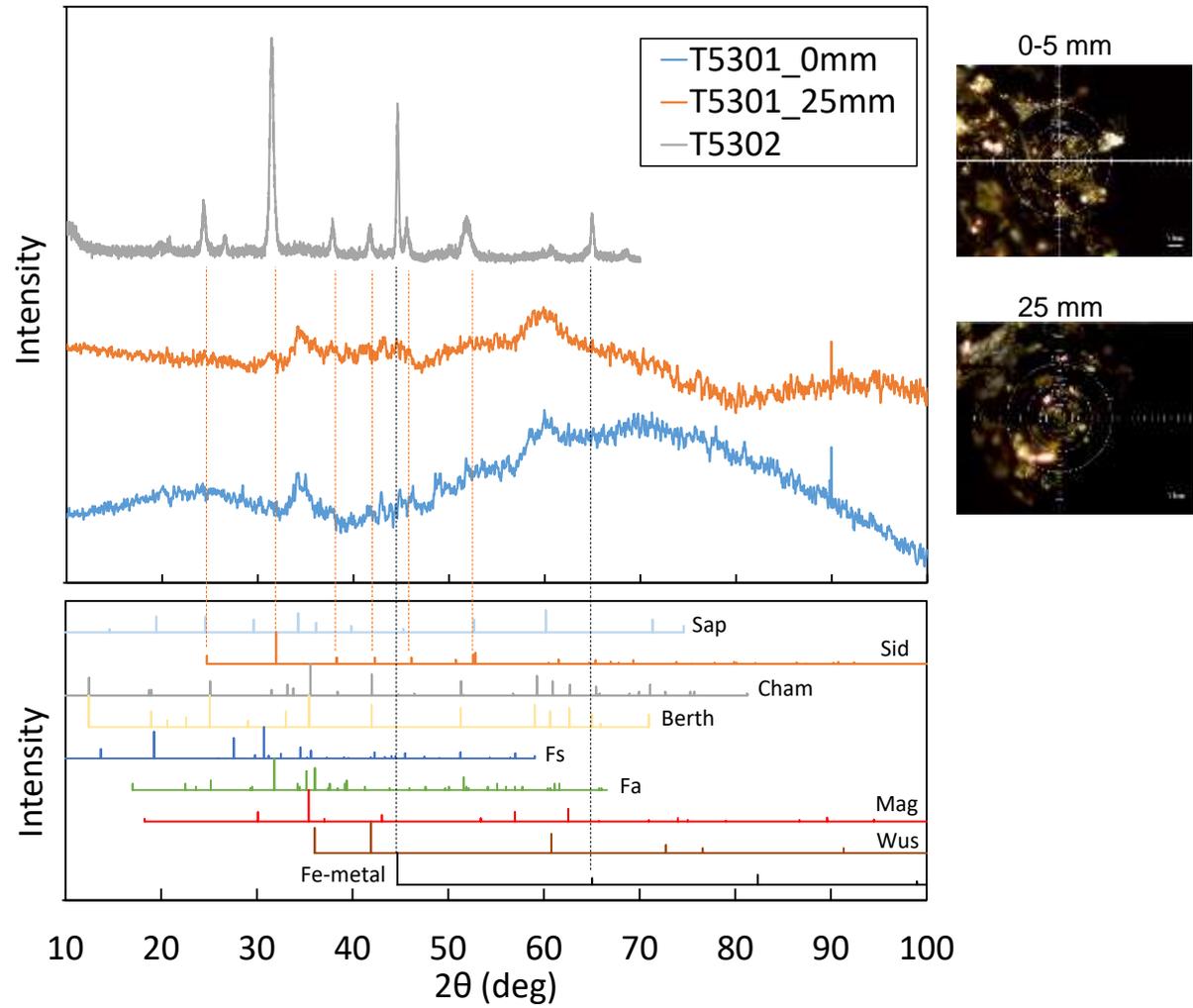
添付図 4-5-50 FW-EBW-10 (E5202)の FESEM 観察および EDS 分析 (4)

添付資料 4-6

腐食生成物の分析結果

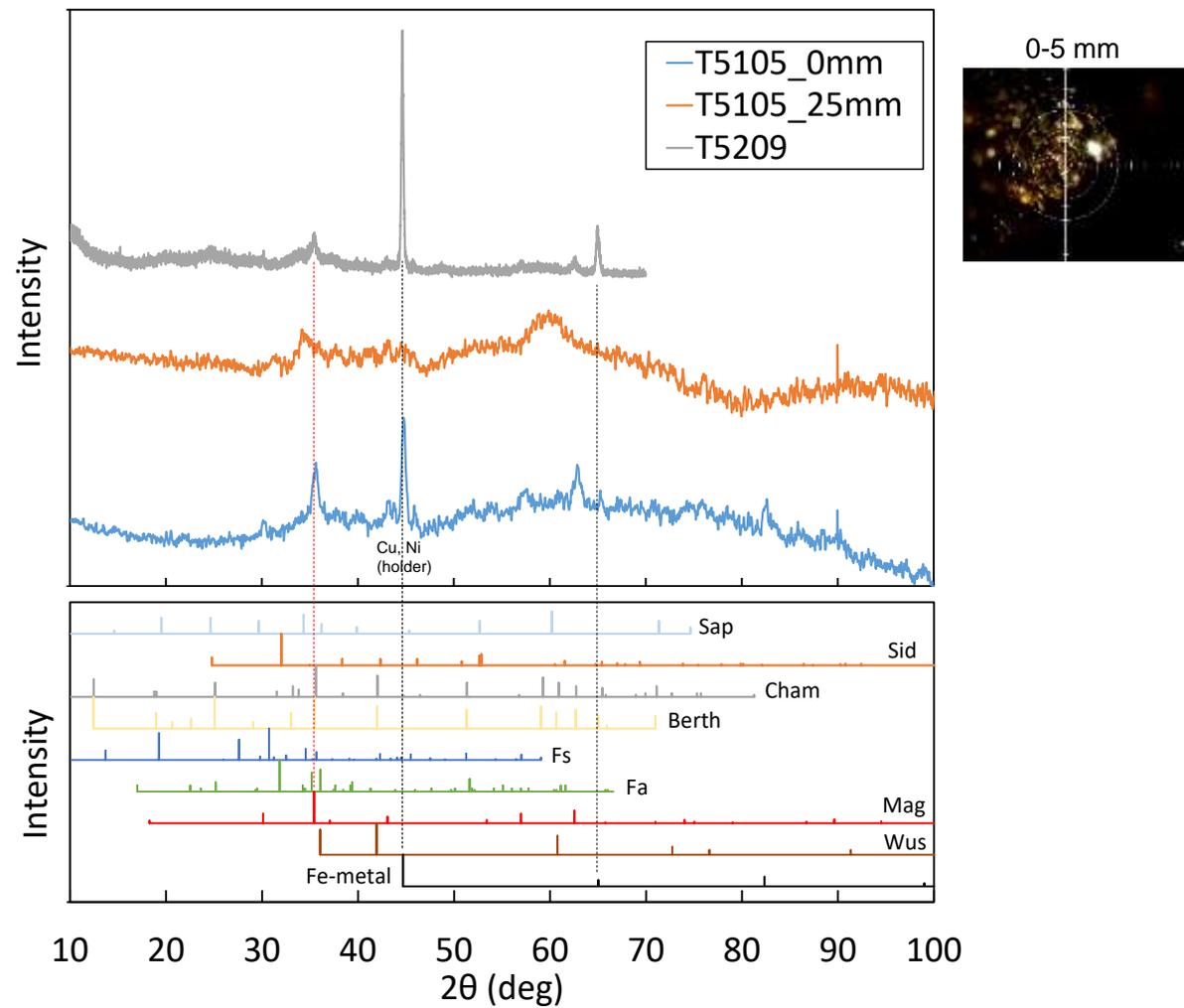
— μ -XRD 分析 —

4.9 緩衝材共存環境における炭素鋼

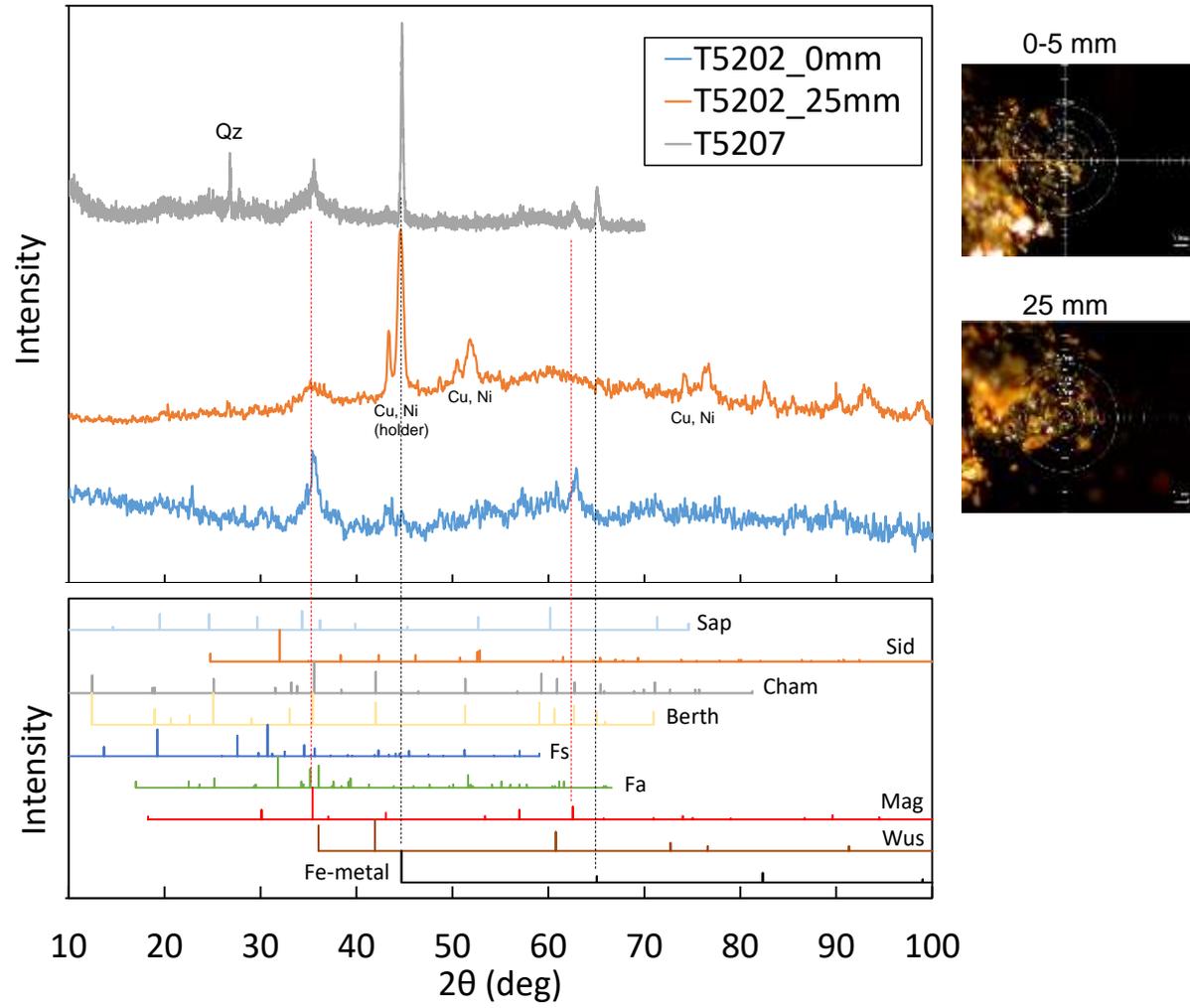


添付図 4-6-1 μ -XRD(T5301: SW-TIG-5)と同条件の XRD(T5302)の測定結果

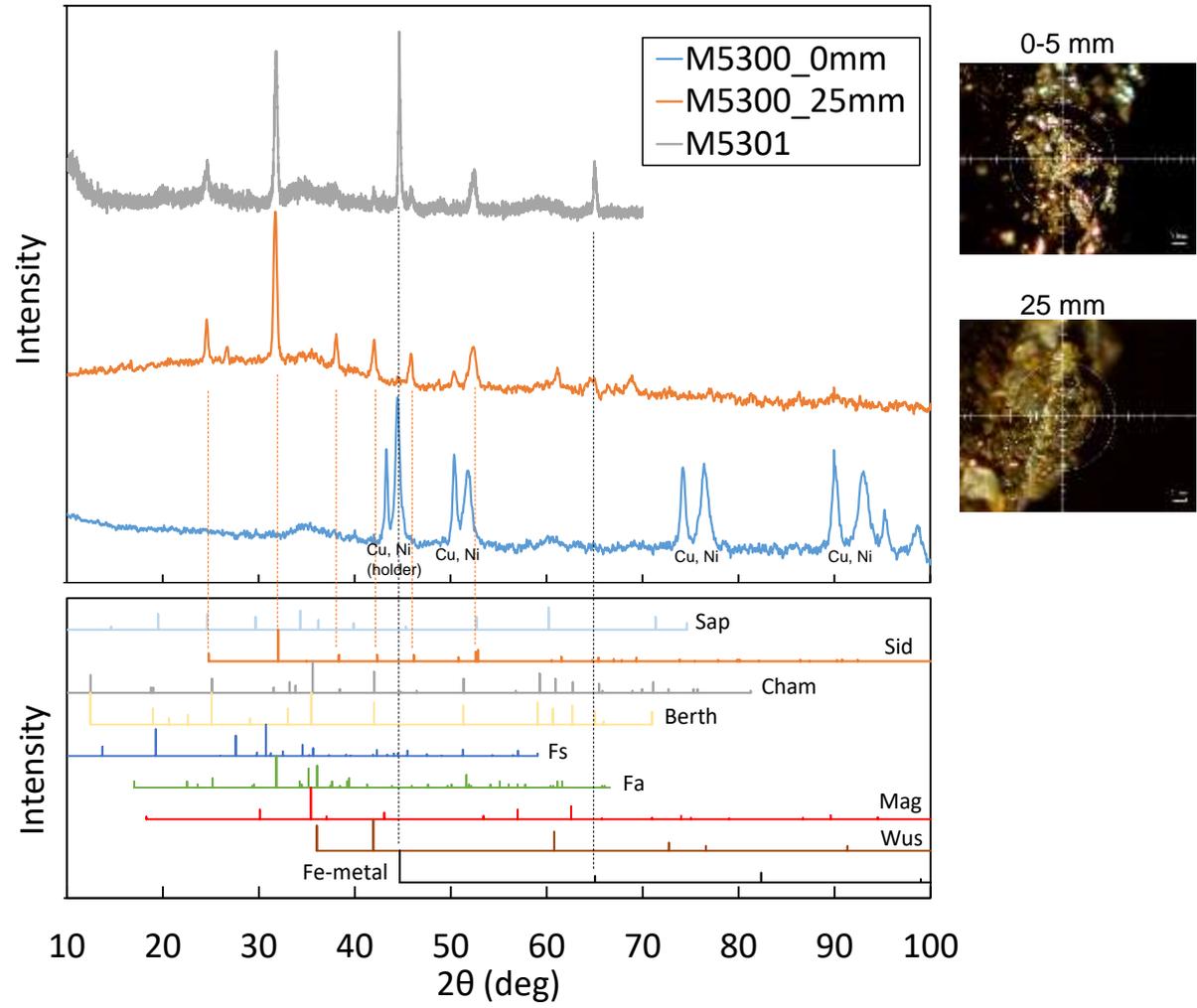
(0mm : 母材部、25mm : 溶接金属部)



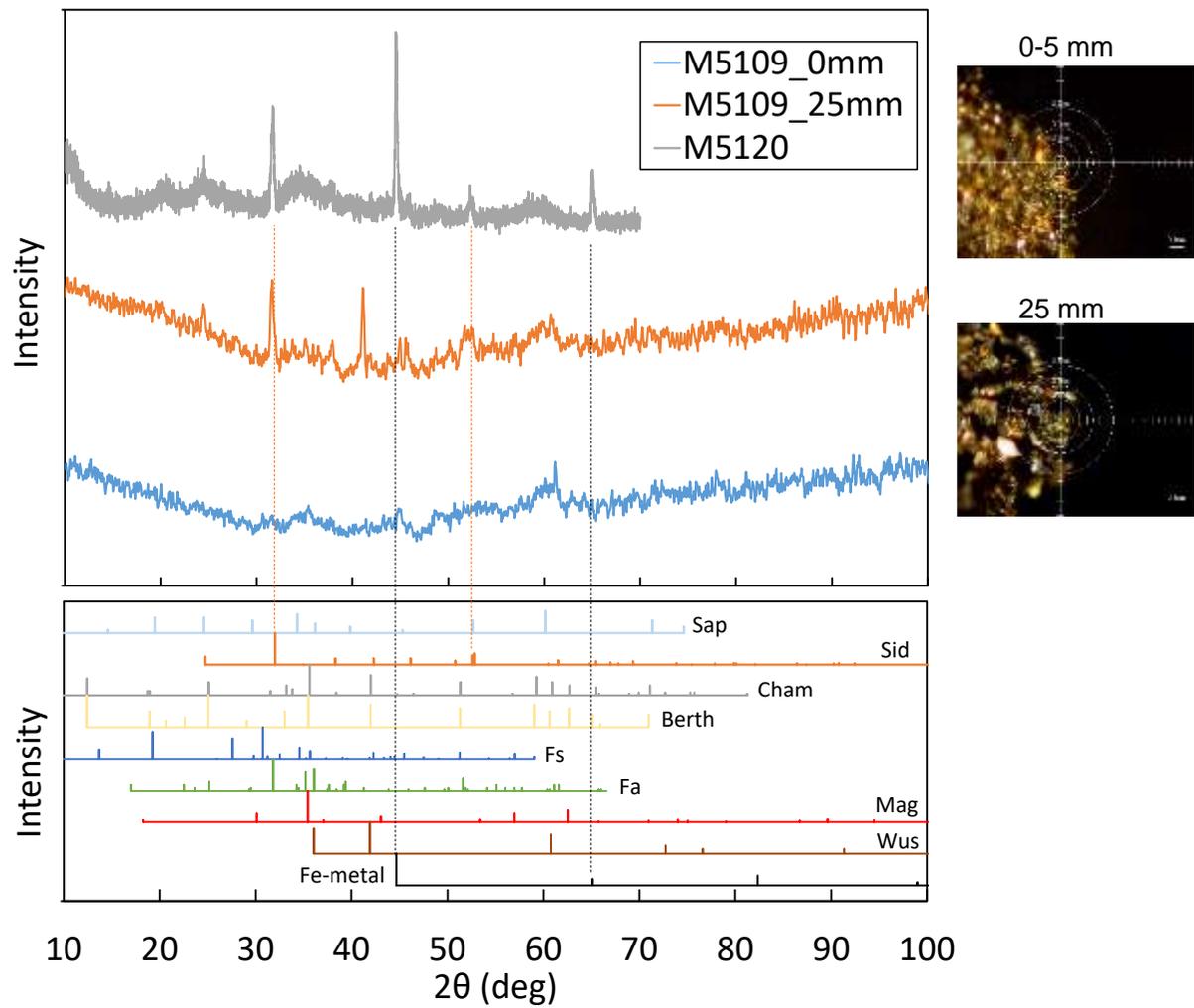
添付図 4-6-2 μ -XRD(T5105: FW-TIG-5)と同条件の XRD(T5209)の測定結果
(0mm: 母材部、25mm: 溶接金属部)



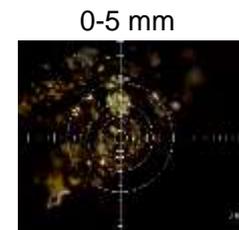
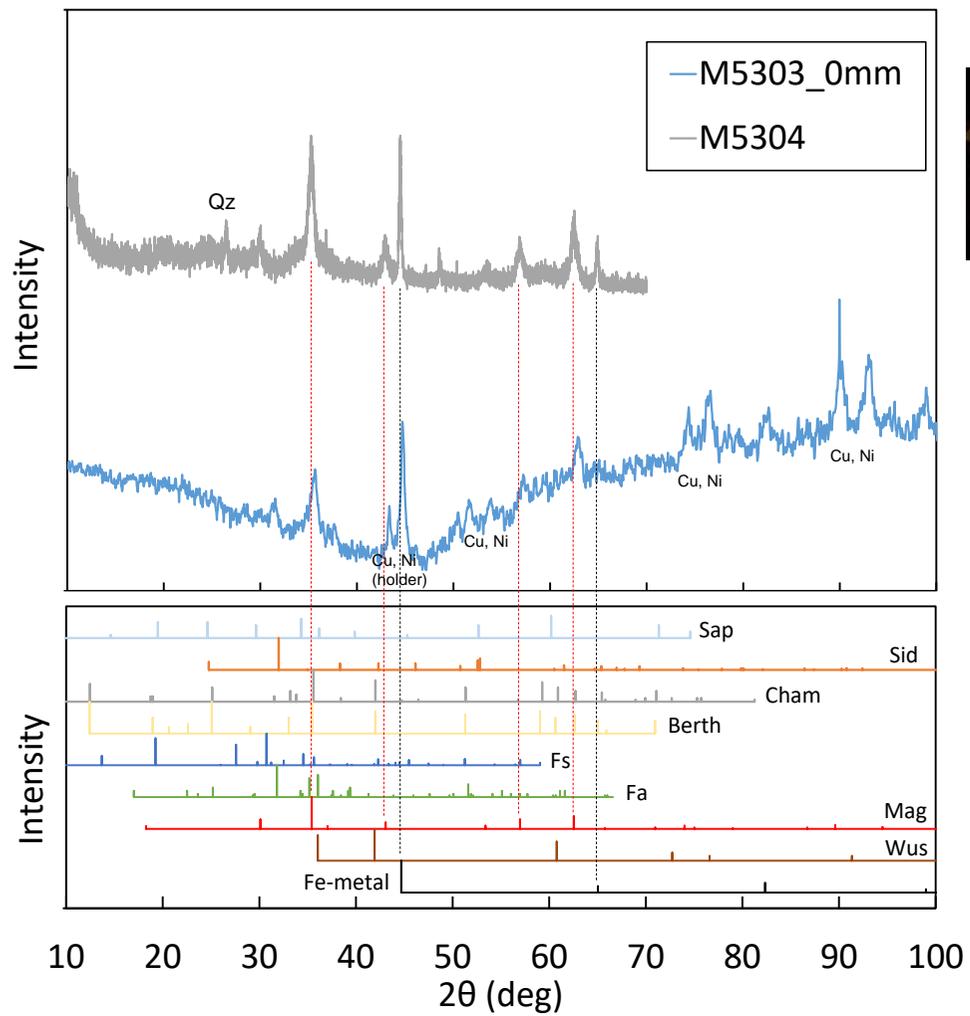
添付図 4-6-3 μ -XRD(T5202:FW-TIG-10)と同条件の XRD(T5207)の測定結果
(0mm:母材部、25mm:溶接金属部)



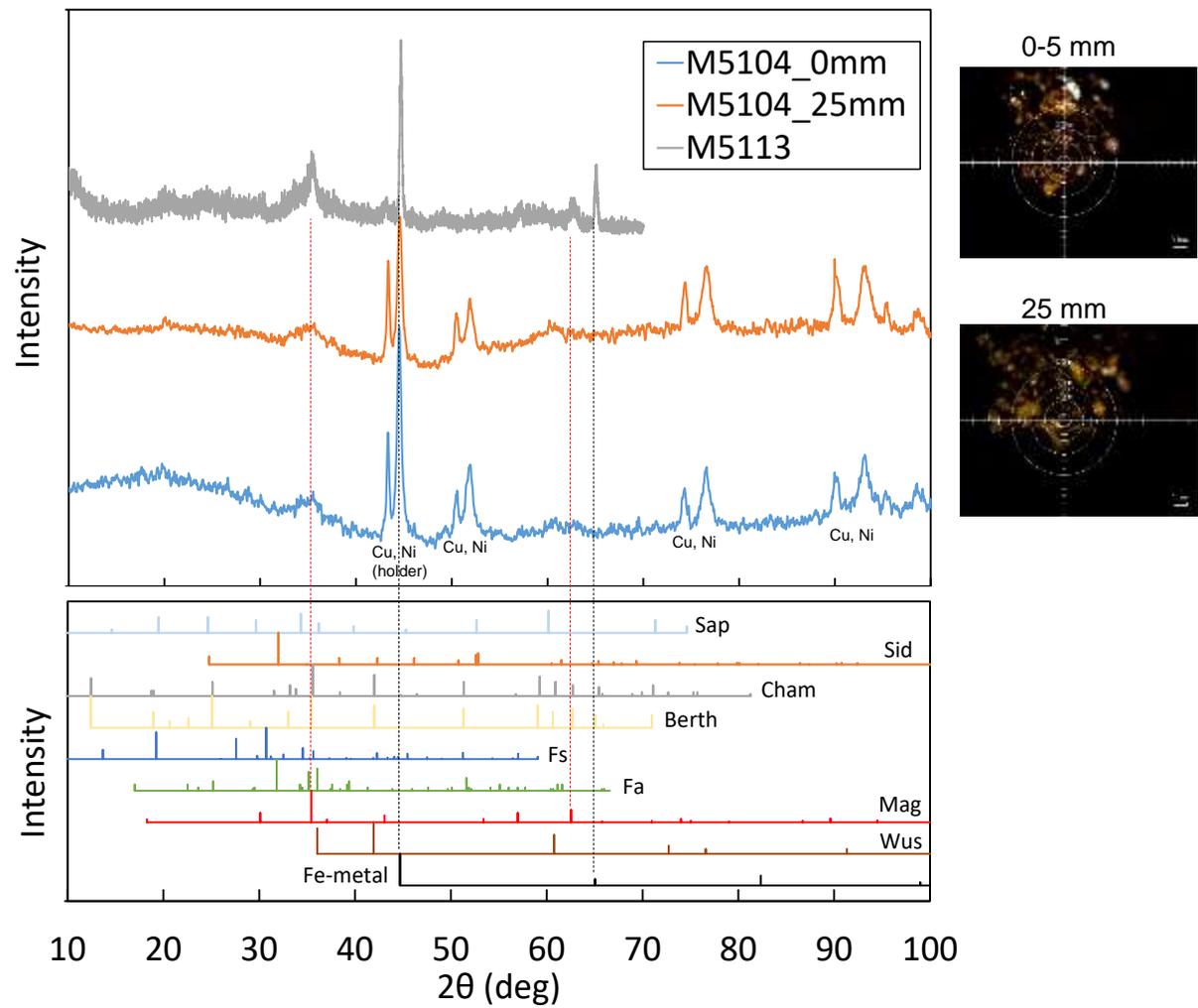
添付図 4-6-4 μ -XRD(M5300:SW-MAG-5)と同条件の XRD(M5301)の測定結果
(0mm:母材部、25mm:溶接金属部)



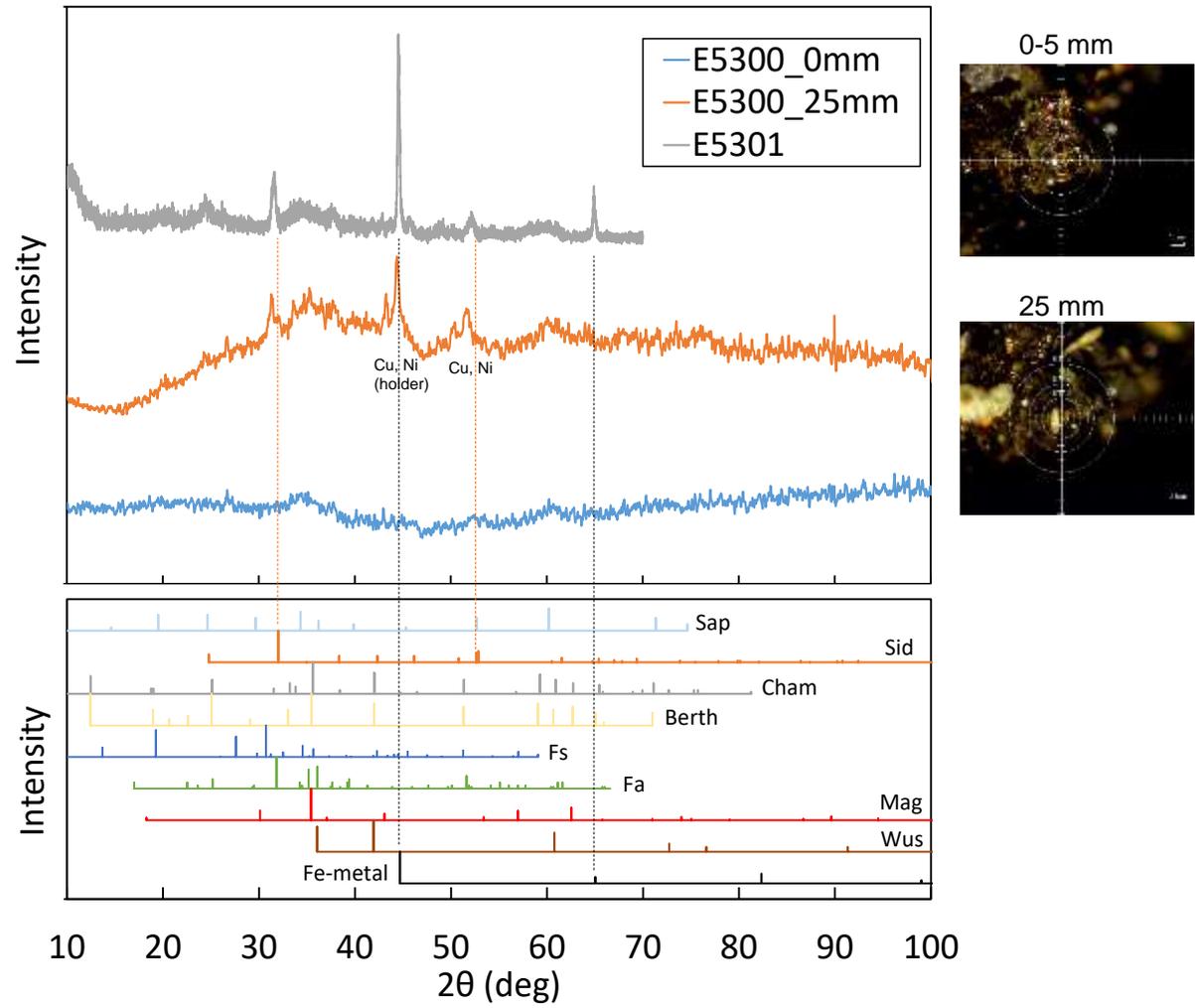
添付図 4-6-5 μ -XRD(M5109:SW-MAG-10)と同条件の XRD(M5120)の測定結果
(0mm:母材部、25mm:溶接金属部)



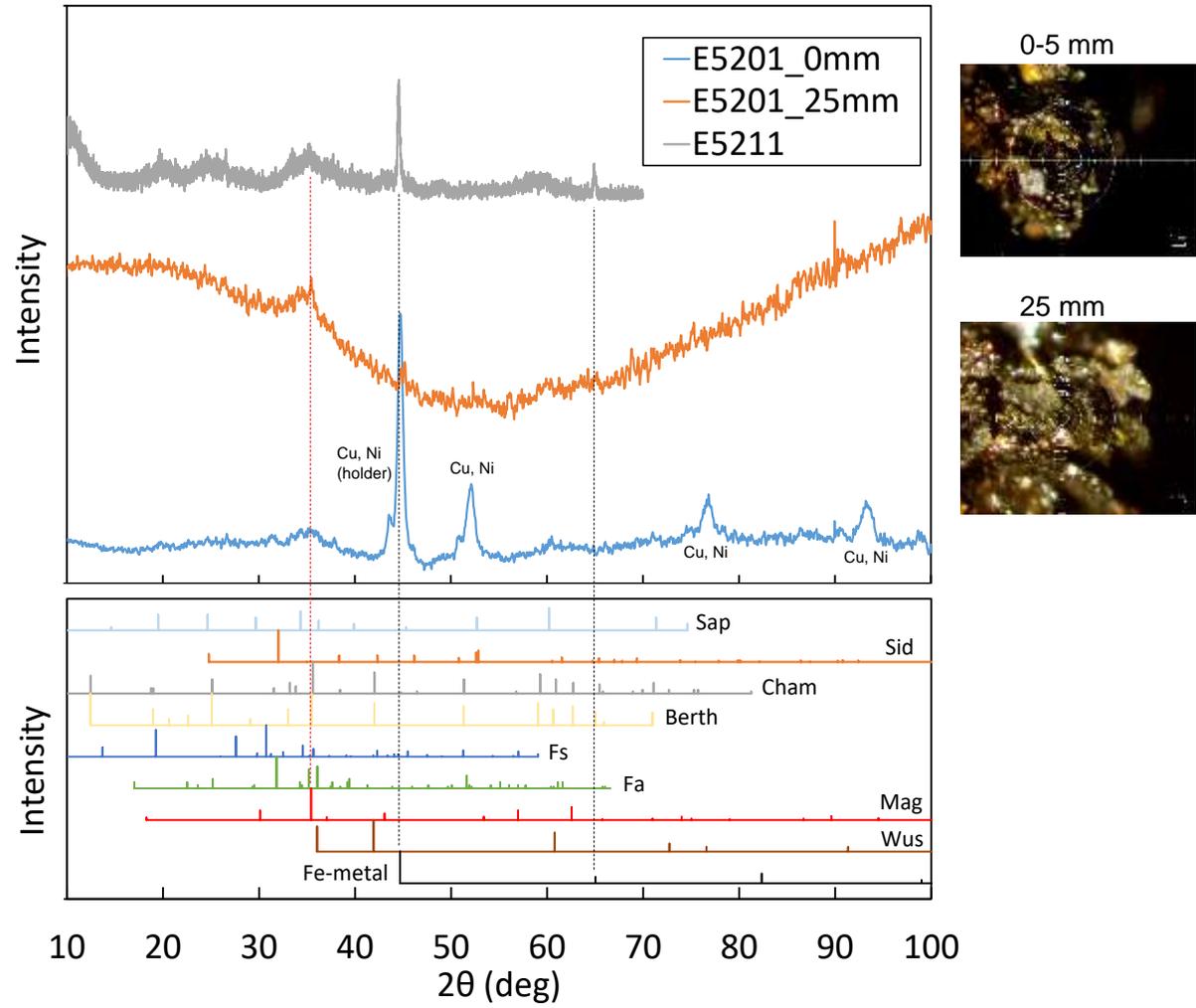
添付図 4-6-6 μ -XRD(M5303:FW-MAG-5)と同条件の XRD(M5304)の測定結果
(0mm:母材部)



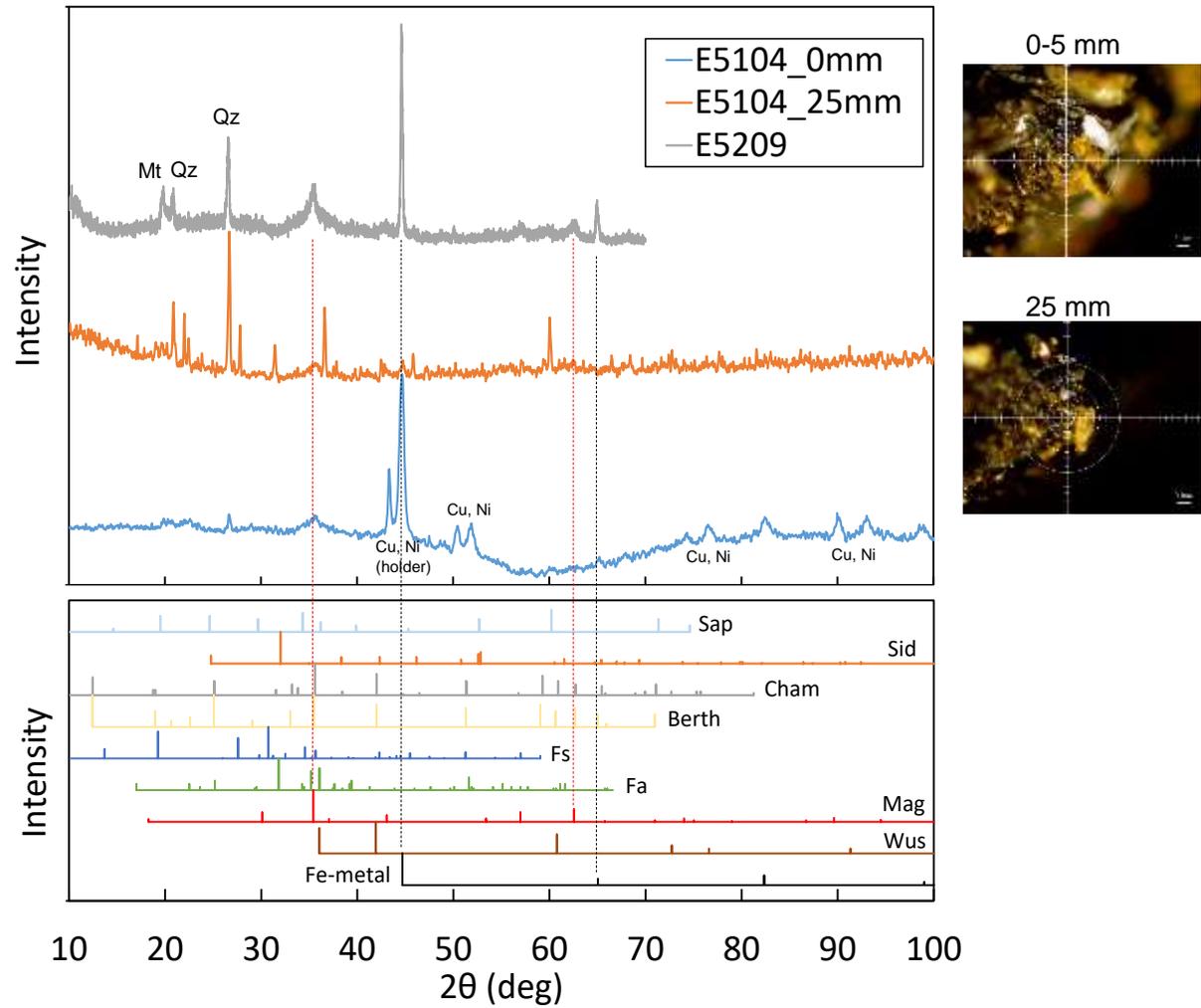
添付図 4-6-7 μ -XRD(M5104 : FW-MAG-10)と同条件の XRD(M5113)の測定結果
(0mm : 母材部、25mm : 溶接金属部)



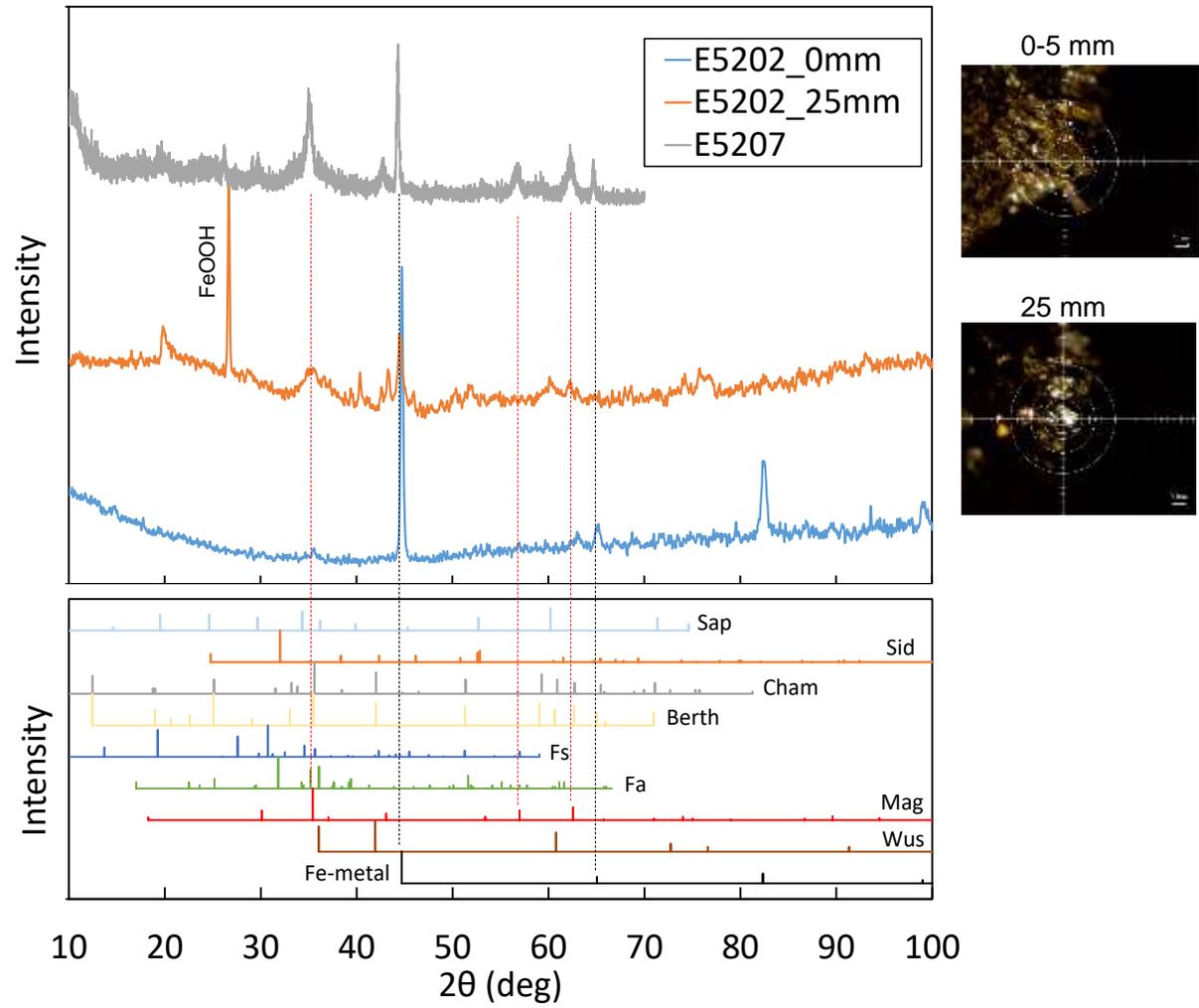
添付図 4-6-8 μ -XRD(E5300:SW-EBW-5)と同条件の XRD(E5301)の測定結果
(0mm:母材部、25mm:溶接金属部)



添付図 4-6-9 μ -XRD(E5201: SW-EBW-10)と同条件の XRD(E5211)の測定結果
(0mm: 母材部、25mm: 溶接金属部)



添付図 4-6-10 μ -XRD(E5104:FW-EBW-5)と同条件の XRD(E5209)の測定結果
(0mm:母材部、25mm:溶接金属部)



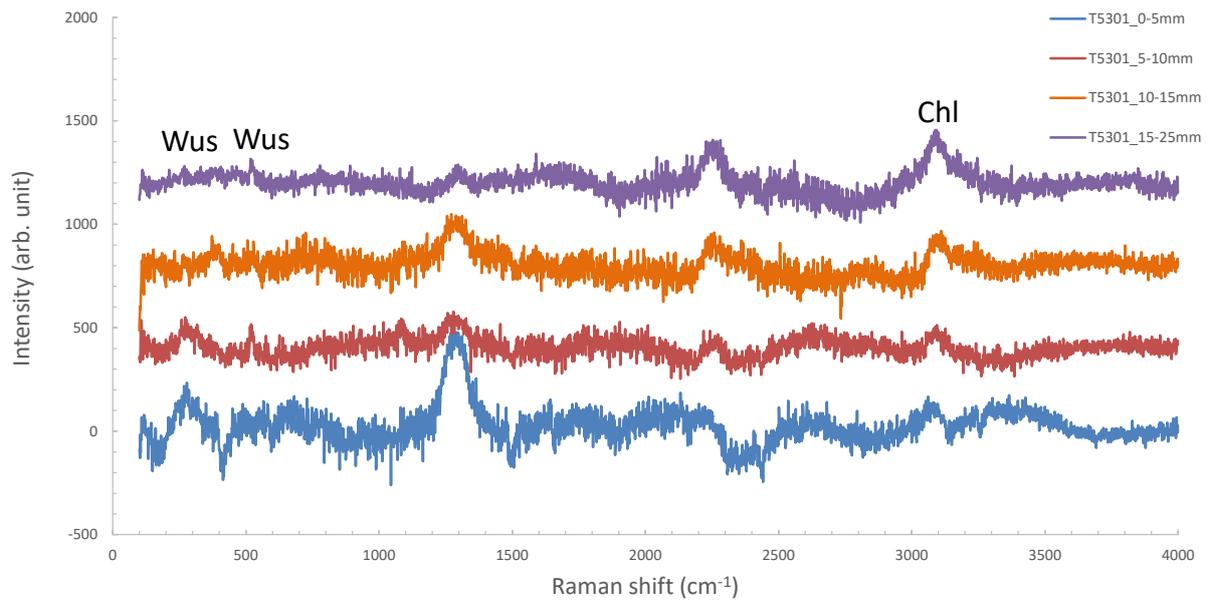
添付図 4-6-11 μ -XRD(E5202:FW-EBW-10)と同条件の XRD(E5207)の測定結果
(0mm:母材部、25mm:溶接金属部)

添付資料 4-7

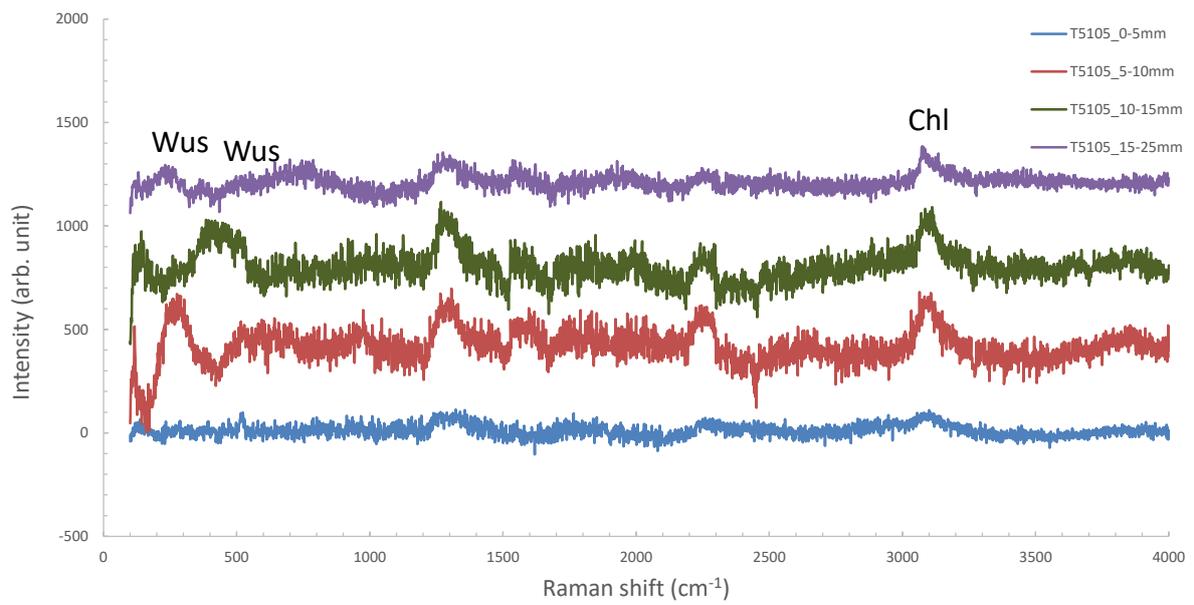
腐食生成物の分析結果

ーラマン分光分析ー

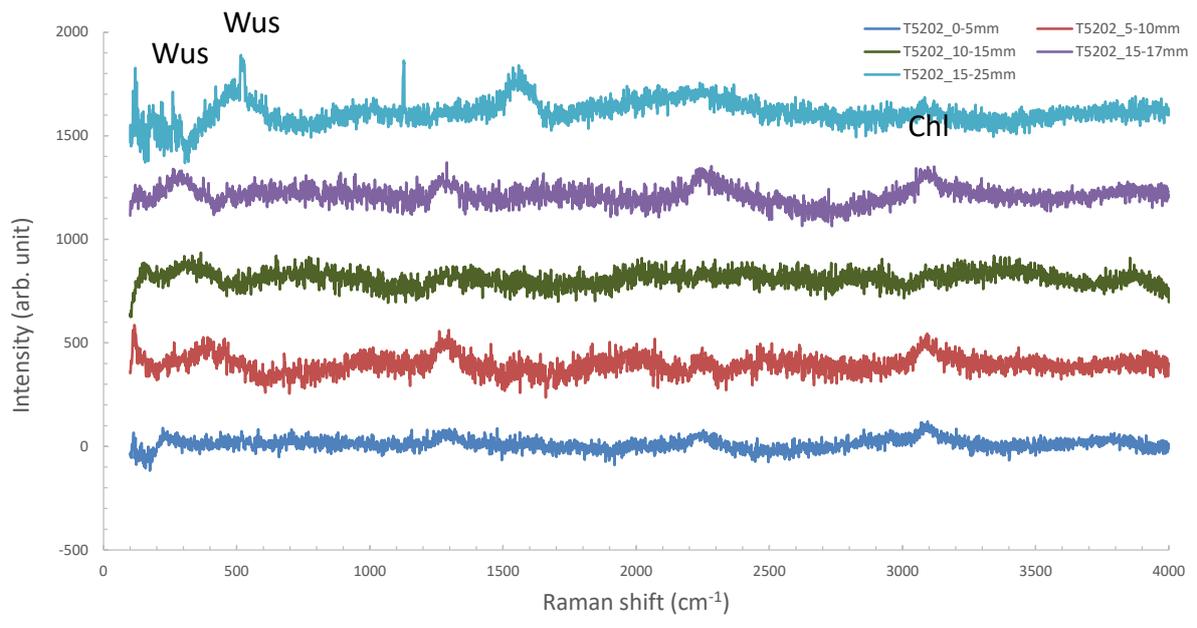
4.9 緩衝材共存環境における炭素鋼



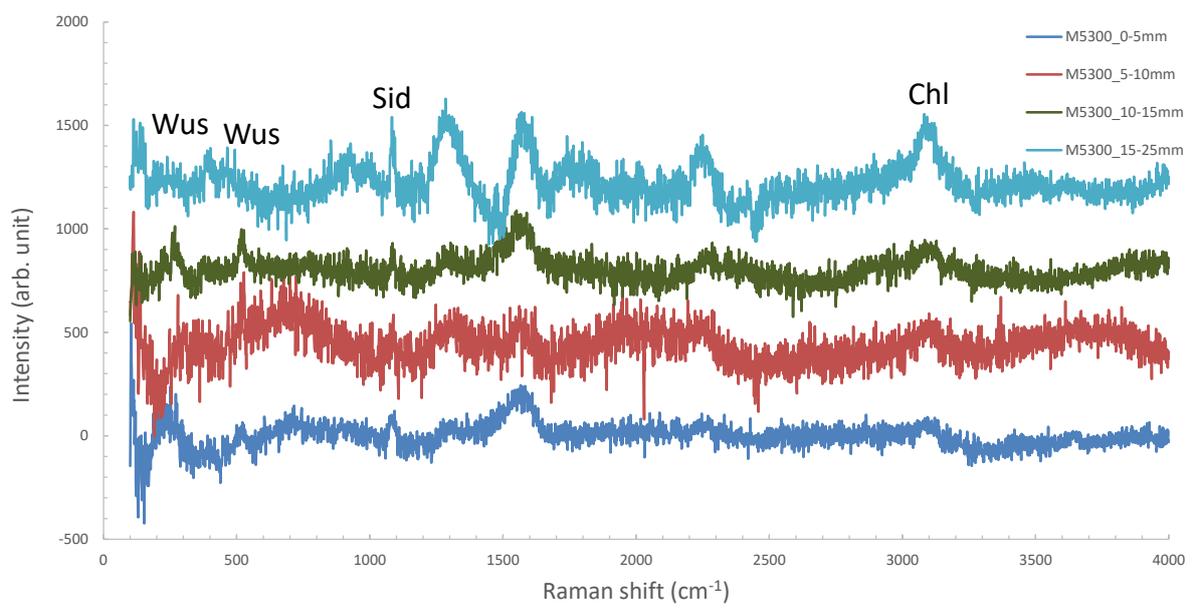
添付図 4-7-1 SW-TIG-5 (T5301)のラマン分光スペクトル



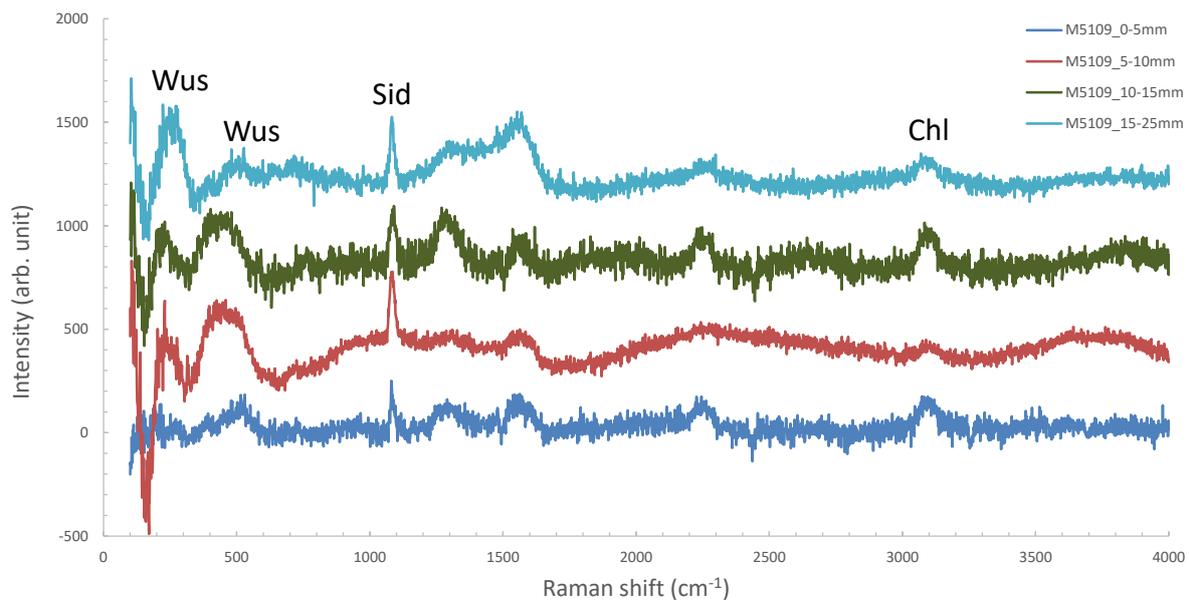
添付図 4-7-2 FW-TIG-5 (T5105)のラマン分光スペクトル



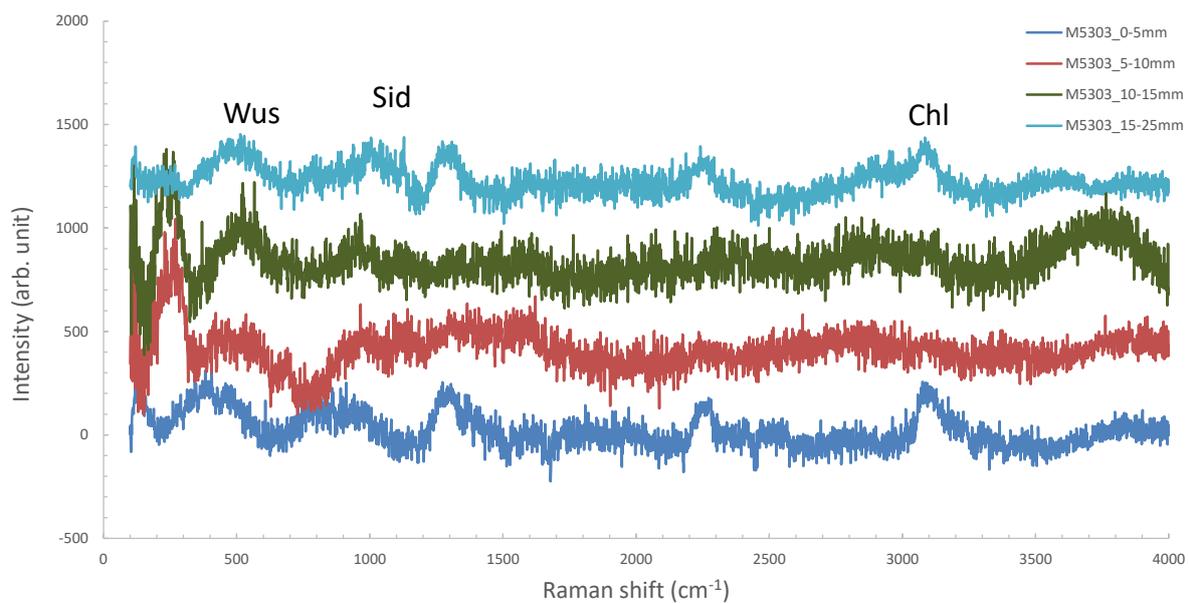
添付図 4-7-3 FW-TIG-10 (T5202)のラマン分光スペクトル



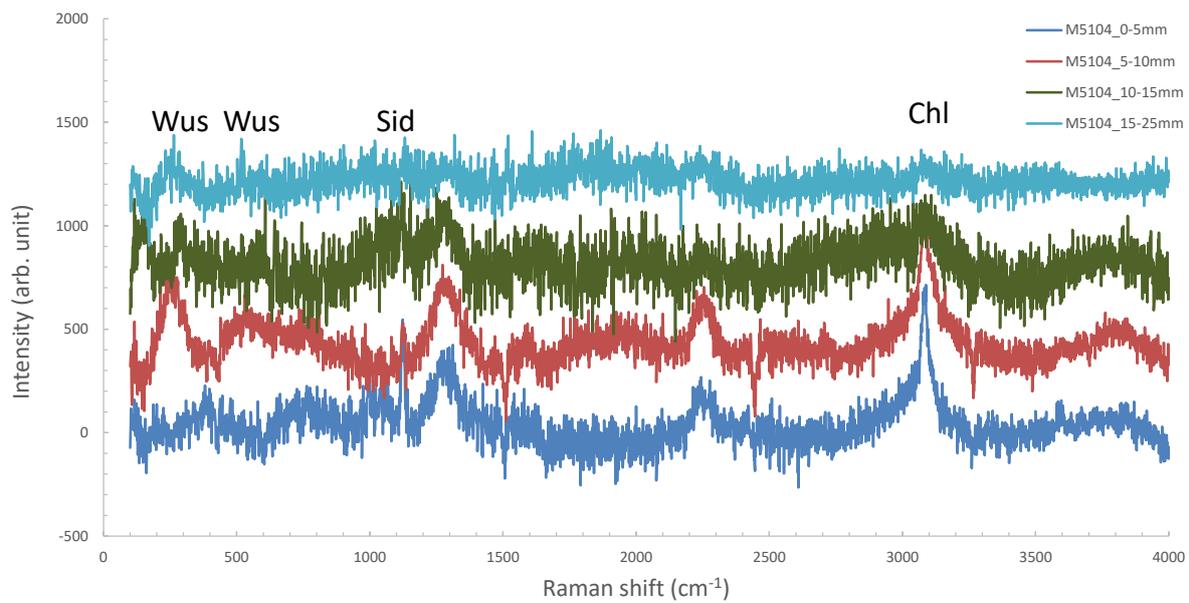
添付図 4-7-4 SW-MAG-5 (M5300)のラマン分光スペクトル



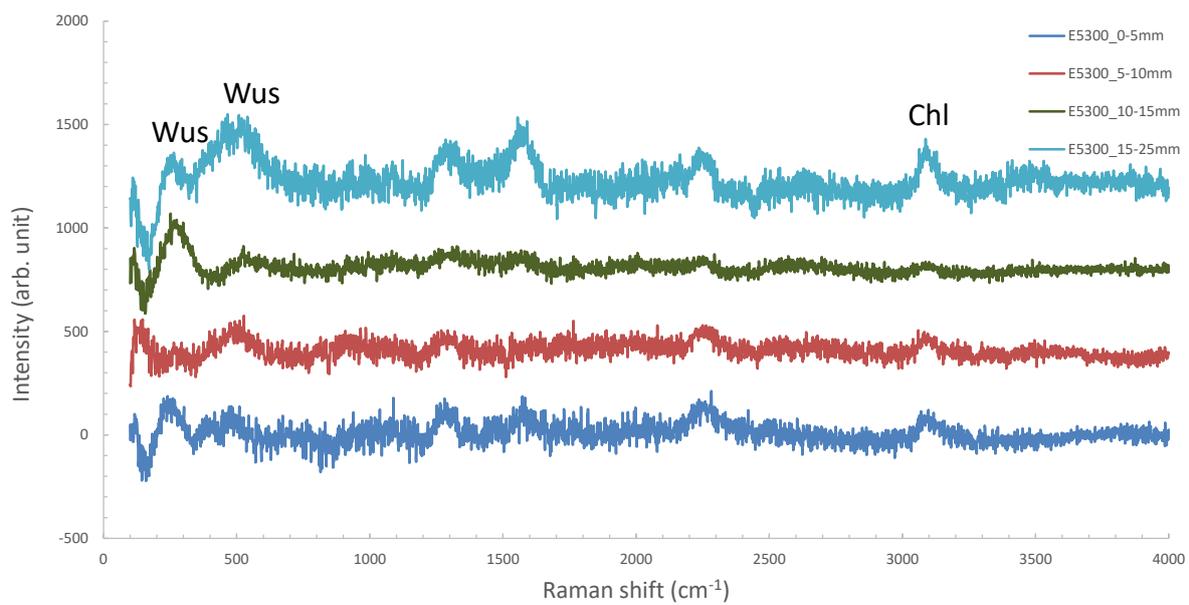
添付図 4-7-5 SW-MAG-10 (M5109)のラマン分光スペクトル



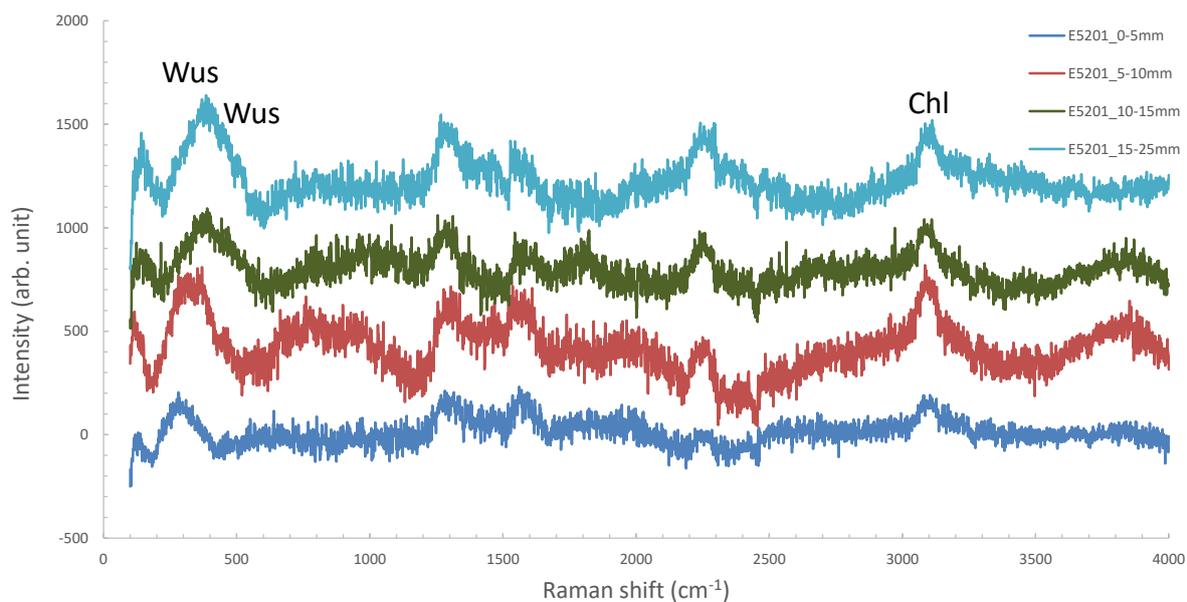
添付図 4-7-6 FW-MAG-5 (M5303)のラマン分光スペクトル



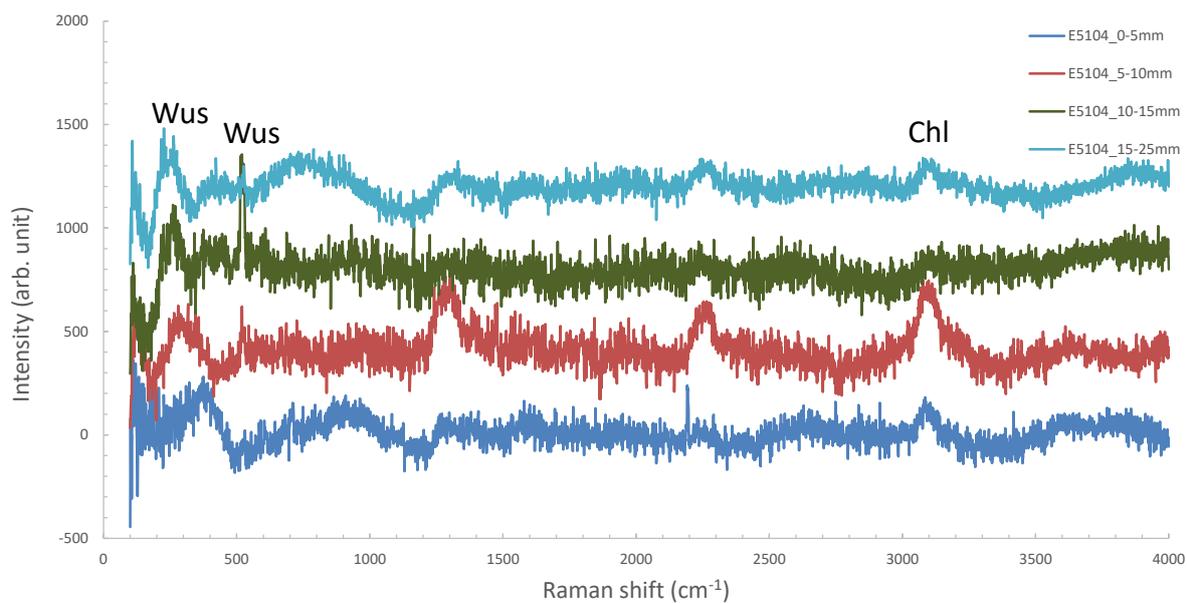
添付図 4-7-7 FW-MAG-10 (M5104)のラマン分光スペクトル



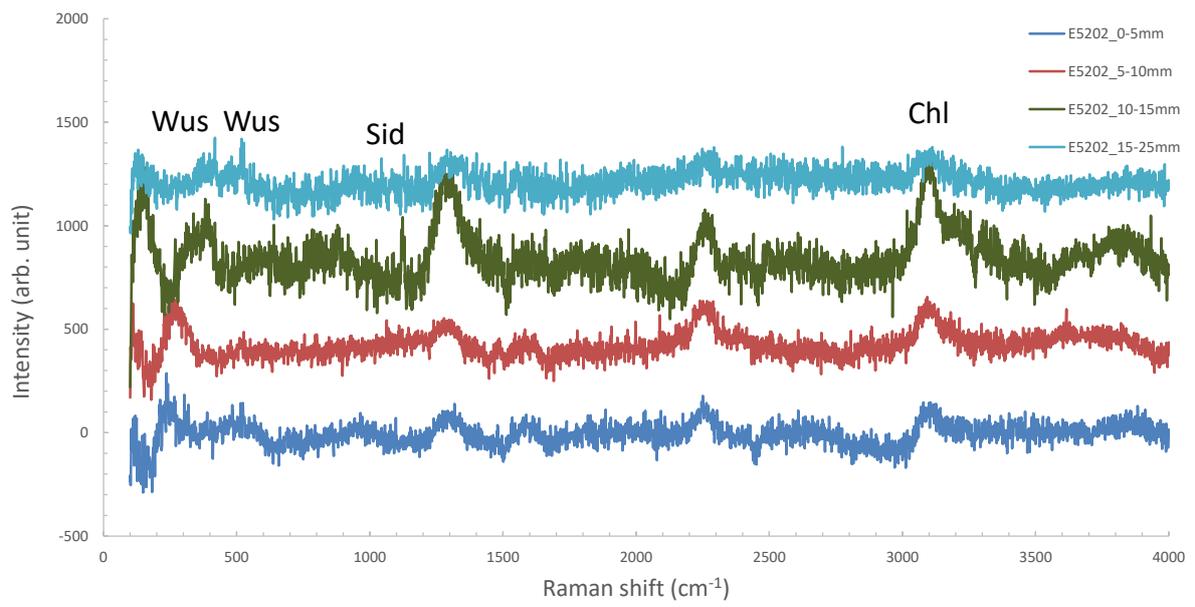
添付図 4-7-8 SW-EBW-5 (E5300)のラマン分光スペクトル



添付図 4-7-9 SW-EBW-10 (E5201)のラマン分光スペクトル



添付図 4-7-10 FW-EBW-5 (E5104)のラマン分光スペクトル



添付図 4-7-11 FW-EBW-10 (E5202)のラマン分光スペクトル

第5章 溶接部の残留応力改善手法の検討

5.1 背景および目的

平成 27 年度は、落とし蓋形状のオーバーパックを対象として、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て、溶接欠陥を応力状態の最も厳しくなるき裂とみなし、有限要素解析によりオーバーパックが破壊しない溶接深さおよび限界き裂寸法を求めた。

本検討では、局部腐食の発生を防止するために、平成 27 年度に実施した平蓋形状のオーバーパックの溶接残留応力解析結果に対して、外面誘導加熱応力改善法（External Induced Heating Stress Improvement; 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ことを目的とする。

平成 27 年度に有限要素解析により求めた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た。残留応力改善手法は EIHSI 法とし、汎用 FEM 解析コード Abaqus を用いて、EIHSI 法における施工パラメータの検討を行った。実施の手順としては、予備解析として EIHSI 法の加熱方法、冷却方法について設定し、その設定条件に基づき EIHSI の本解析を実施した。

5.2 残留応力低減のための予備解析の実施

5.2.1 平蓋オーバーパックの形状

平成 27 年度の溶接残留応力解析で対象とした平蓋オーバーパックの形状を図 5.2.1-1 に、溶接部残留応力解析結果を図 5.2.1-2 から図 5.2.1-4 に示す[1]。これらの残留応力分布を EIHSI 法施工前の初期状態として与えた。平蓋オーバーパックは、原環センターの平成 17 年度報告書[2]で示された形状・寸法を基本とした。溶接残留応力低減解析においては、オーバーパックに収納されているガラス固化体についても考慮して実施した。

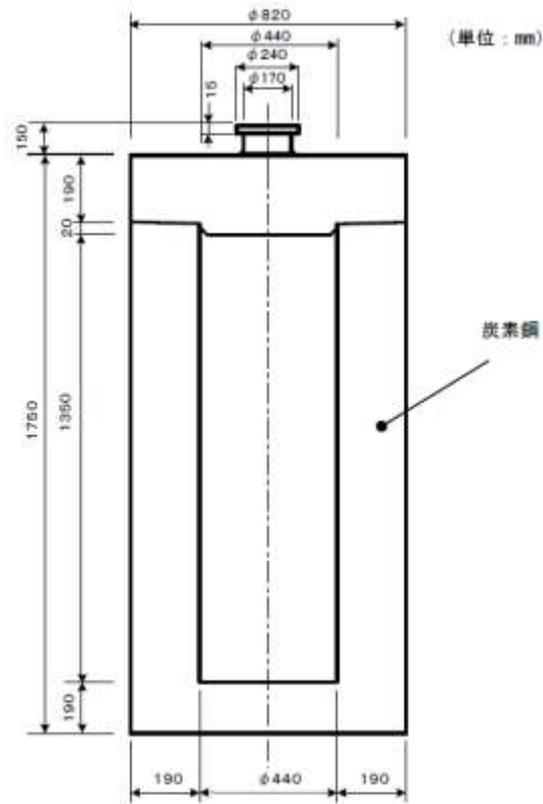
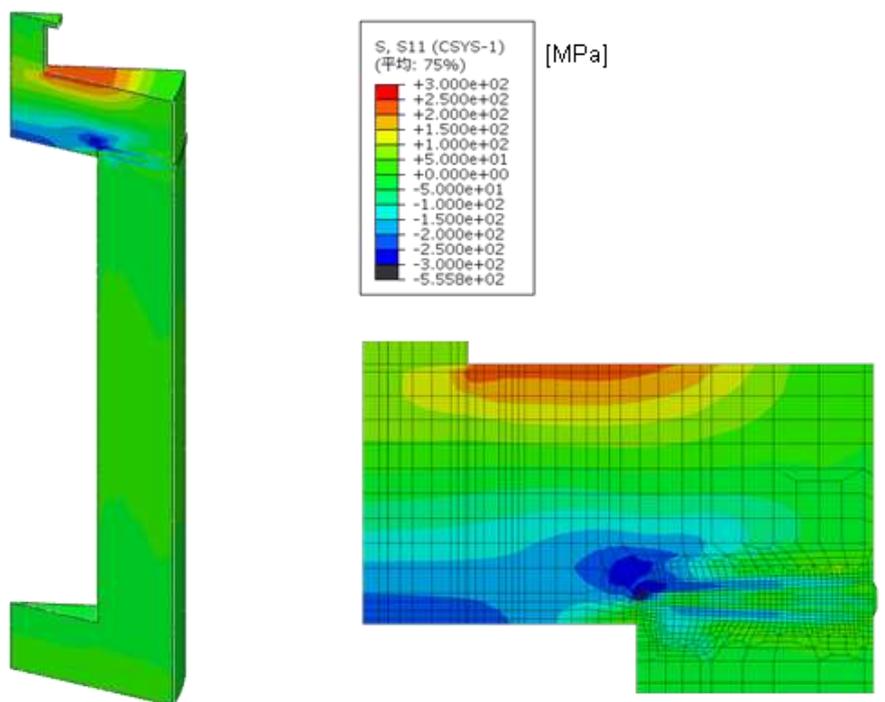


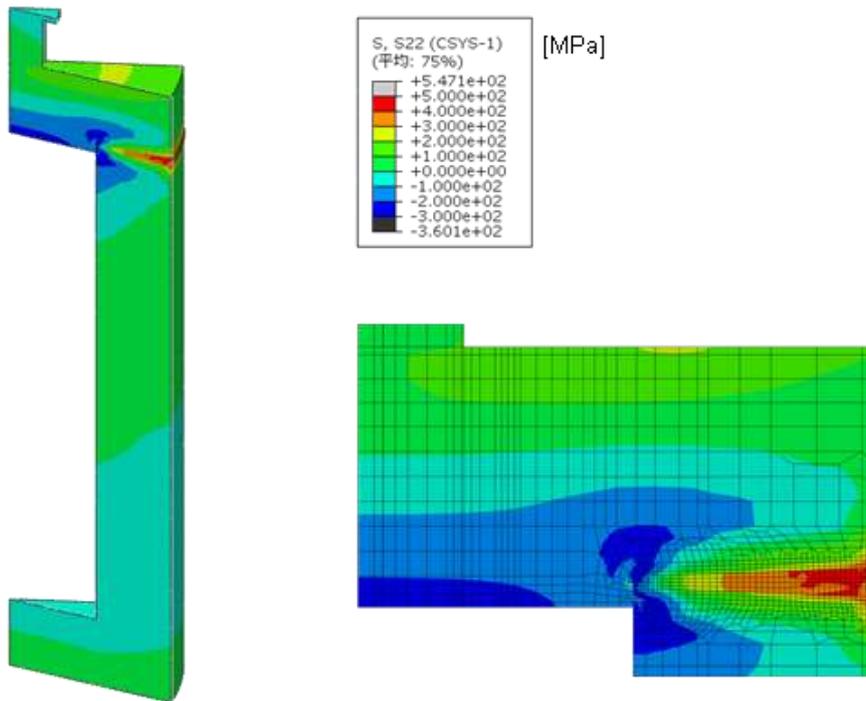
図 5.2.1-1 平蓋形状のオーバーパック
(平成 17 年度 遠隔操作技術高度化調査報告書(1/3))



(a) 全体図 (15 度断面)

(b) 溶接部近傍拡大図 (15 度断面)

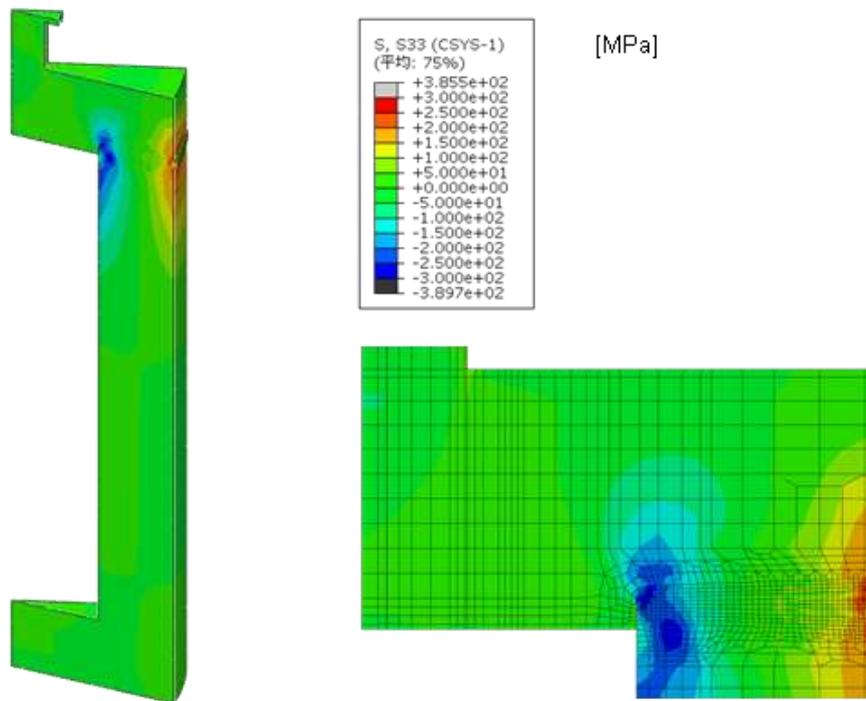
図 5.2.1-2 溶接残留応力解析結果 (半径方向応力分布図)



(a) 全体図 (15 度断面)

(b) 溶接部近傍拡大図 (15 度断面)

図 5.2.1-3 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 5.2.1-4 溶接残留応力解析結果 (軸方向応力分布図)

5.2.2 予備解析

(1) 解析手順

以下に、実施した解析手順を以下に示す。

- ① ガラス固化体の発熱を考慮したオーバーパットの初期温度解析
 - ・ ガラス固化体の発熱量 ($3.67 \text{ kJ/s}\cdot\text{m}^3$) 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ト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 ②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トの機械的特性値は、平成 19 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 5.2.2-1 から図 5.2.2-6 参照)

平蓋オーバーパットの EIHSI 法による残留応力低減解析の検討においては、平成 22 年度および平成 23 年度に実施した落とし蓋オーバーパットでの EIHSI 法の解析手順に準拠することとした[4][5]。EIHSI 加熱時および急冷時のパラメータとして、平成 23 年度に実施した落とし蓋オーバーパットの EIHSI 法の解析条件を以下に記す。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。

※平成 23 年度の設定条件（落とし蓋オーバーパットの EIHSI 法による残留応力低減解析条件）

- ① 蓋上面からの入熱量
 - ・ 0.50 W/mm^2
 - ・ 0.25 W/mm^2
 - ・ 0.10 W/mm^2
- ② 蓋上面の最高到達温度
 - ・ 600°C （一定）
- ③ EIHSI 急冷時（熱伝達率）のパラメータ（急冷方法）
 - ・ 噴霧（スプレー・ミスト）
 - ・ 噴流（ラミナー）
 - ・ 蓋上面のみ冷却
- ④ 急冷時間
 - ・ 10 分間（急冷後は自然空冷）

表 5.2.2-1 温度解析に用いた熱境界条件

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 ² ·K	-	-	-	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
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	526.85	9.40E-03
比熱	kJ/kg·K	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	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	765.00	0.975	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	800.00	0.9	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	900.00	0.653	-	-		
-	-	-	-	-	-	-	-	1400.00	0.653	-	-		
発熱量	kJ/s·m ³	-	3.67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
密度	kg/m ³	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	-	-	-	-

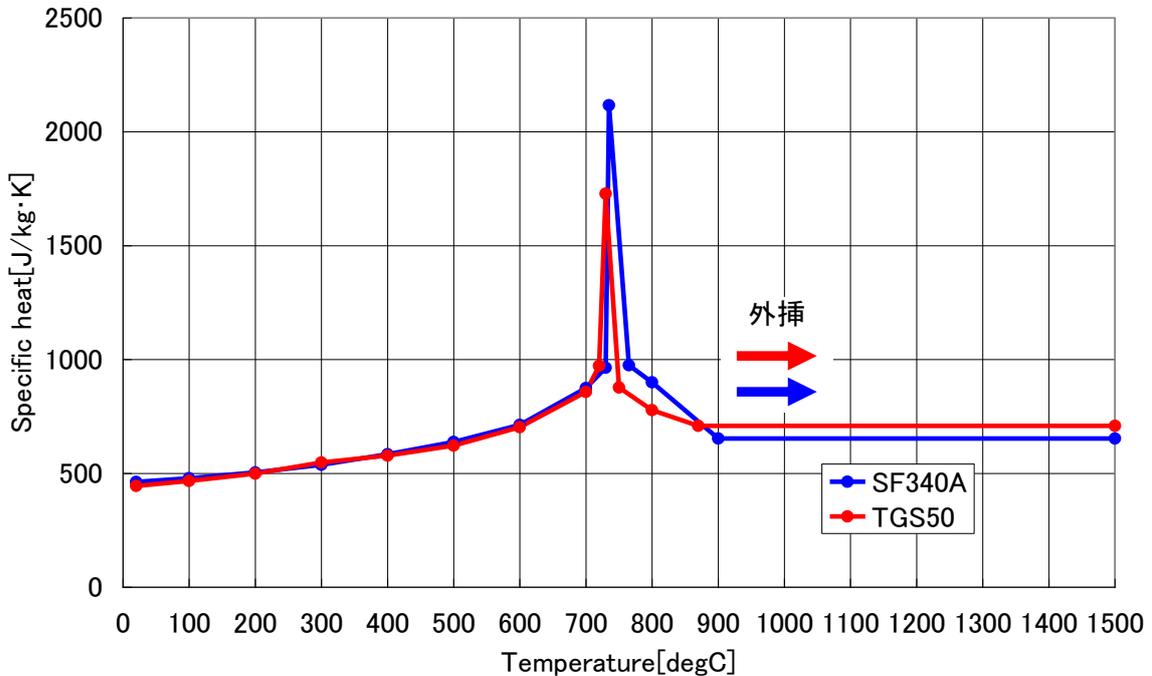


図 5.2.2-1 比熱

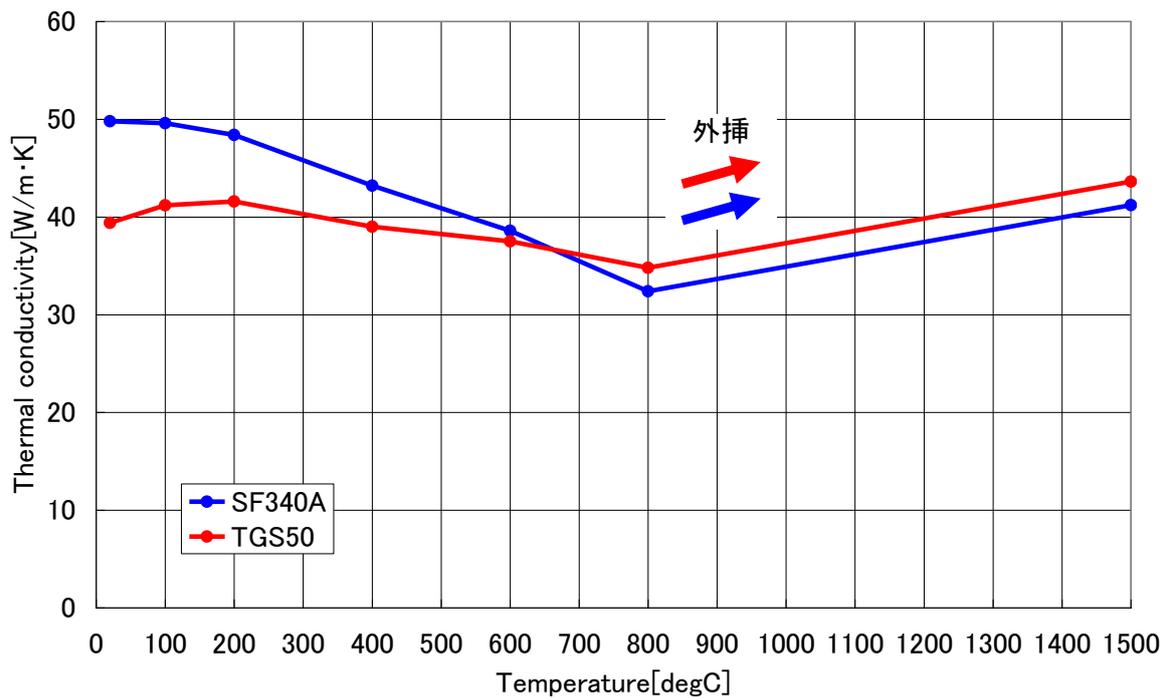


図 5.2.2-2 熱伝導率

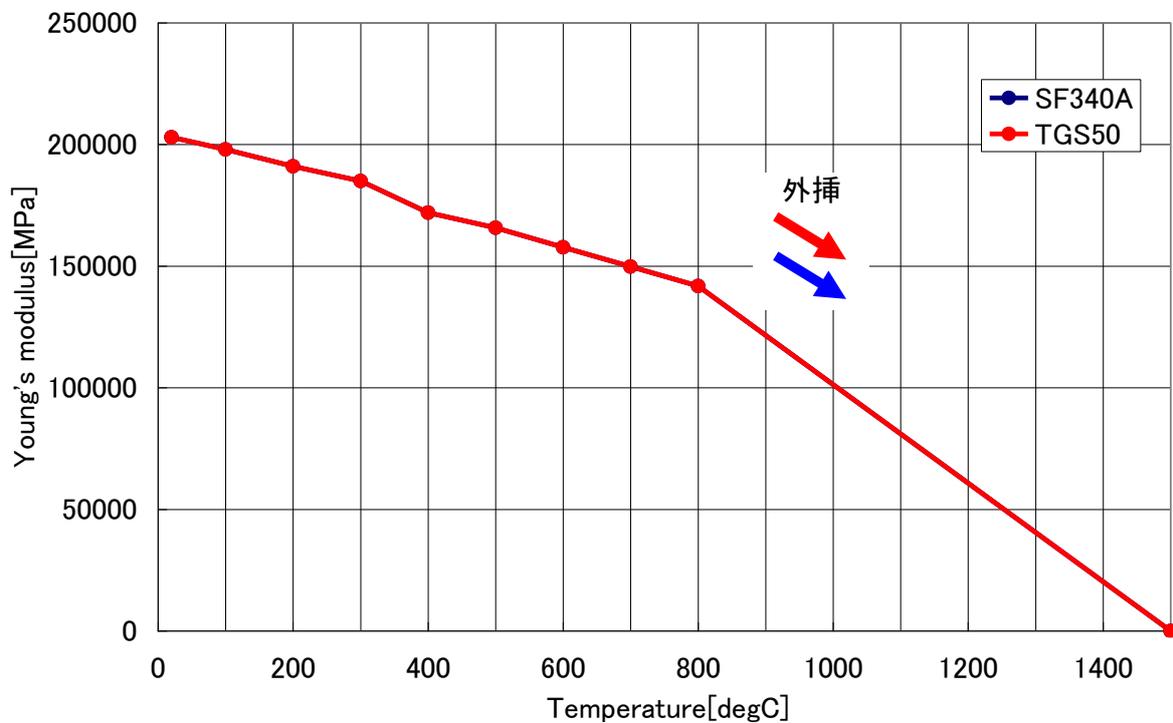


図 5.2.2-3 ヤング率

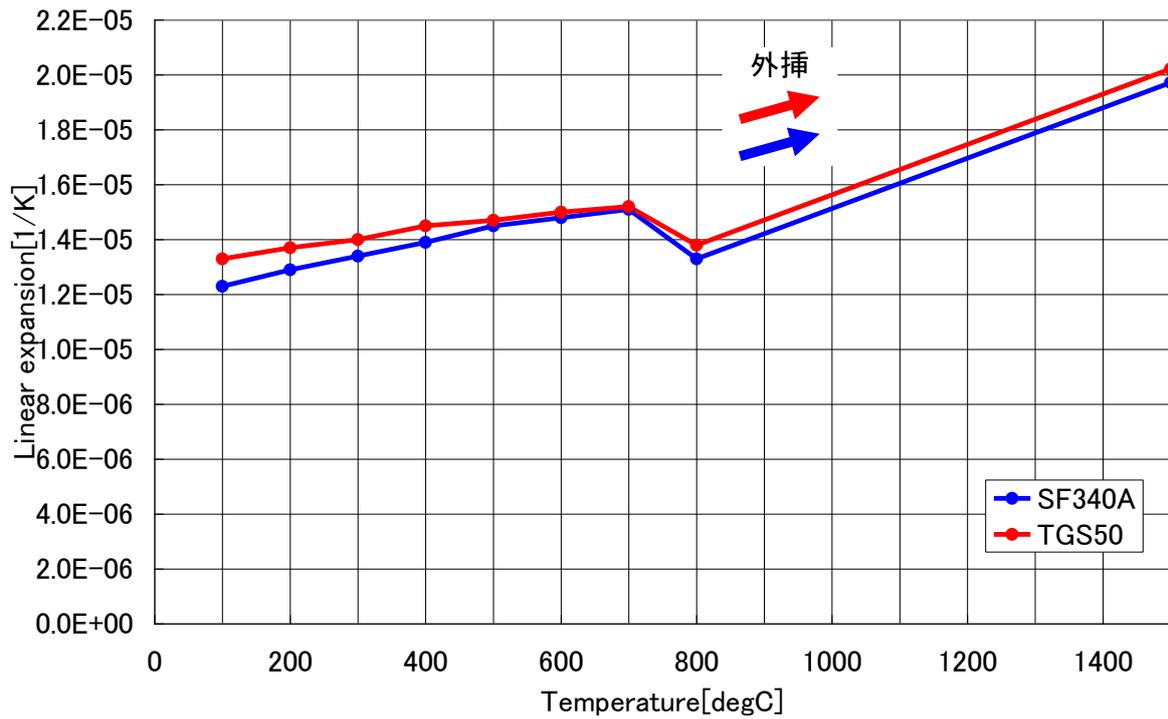


図 5.2.2-4 線膨張係数

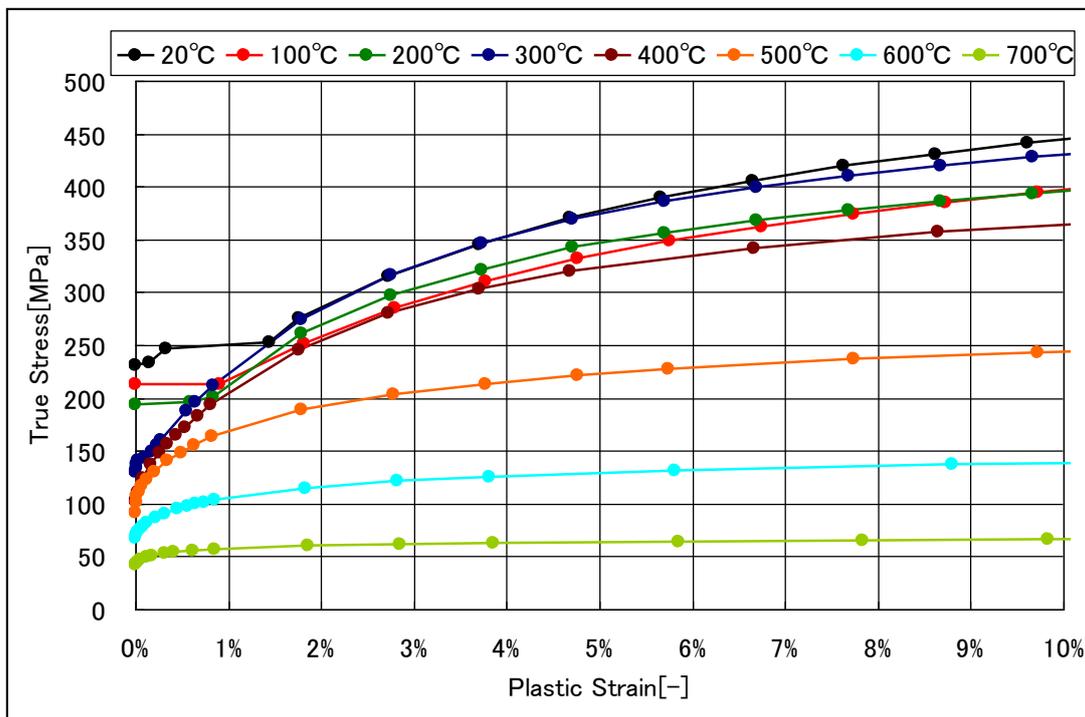


図 5.2.2-5 母材 (SF340A) の応力-塑性ひずみ線図

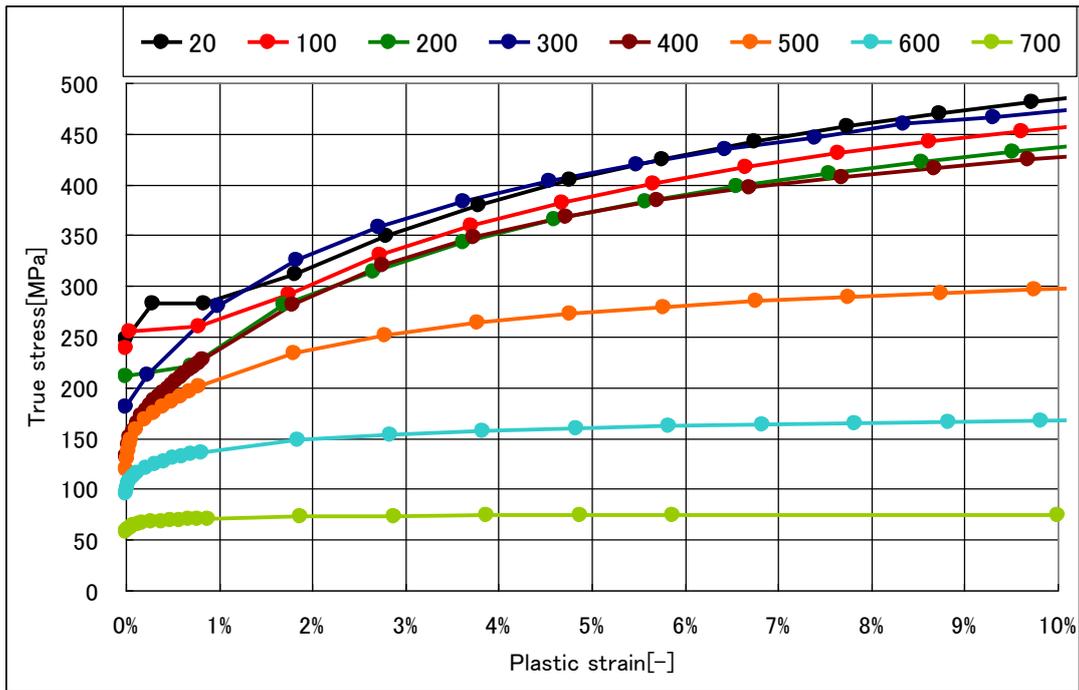


図 5.2.2-6 溶接金属 (TGS50) の応力-塑性ひずみ線図

(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種々検討するため、図 5.2.2-7 に示す平成 27 年度の溶接残留応力解析に用いた 3 次元モデルのうち、図 5.2.2-8 に示す周方向約 10° 部分を取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 5.2.2-2 に予備解析で実施した解析ケースの一覧を示す。また、加熱時のヒーター位置および冷却時の急冷領域の位置を図 5.2.2-9 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温度依存性を考慮した熱伝達率の値を図 5.2.2-10 に示す。

表 5.2.2-2 に示すように、予備解析ではヒーター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し、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。表中の加熱条件に記載のある PWHT 条件は、平成 27 年度に実施した平蓋溶接部の PWHT 解析における入熱条件を示しており、その詳細は表 5.2.2-3 に示す条件である。予備解析の結果を添付資料 5-1 に示す。トライアル 1 はオーバーパック周面の溶接部近傍のみ急冷したことと PWHT 条件以外の解析ケースにおいて各ヒーターの出力が同じであることを特徴とする解析ケース群である。トライアル 2 は急冷領域に蓋部を加えたことと PWHT 条件以外の解析ケースにおいて溶接部以外のヒーターの出力をトライアル 1 と比較して下げたことを特徴とする解析ケース群である。トライアル 3 はトライアル 2 をベースに冷却方法をスプレー冷却からラミナー冷却に変更した解析ケース群である。トライアル 4 はトライアル 2 をベースに溶接部表面を 600 度まで加熱後、保温時間を設けた解析ケース群である。

表 5.2.2-2 各解析ケースのヒーター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			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
	[W/mm ²]						
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 ²	0.250	0.250	0.250	-	スプレー冷却	自然空冷
	0.50W/mm ²	0.500	0.500	0.500	-	スプレー冷却	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 ²	0.025	0.250	0.010	-	スプレー冷却	スプレー冷却
	0.50W/mm ²	0.025	0.500	0.010	-	スプレー冷却	スプレー冷却
トライアル3	PWHT	PWHTと同様の条件		-	ラミナー冷却	ラミナー冷却	自然空冷
	0.25W/mm ²	0.025	0.250	0.010	-	ラミナー冷却	ラミナー冷却
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
	20分	0.025	0.250	0.010	20分	スプレー冷却	スプレー冷却
	30分	0.025	0.250	0.010	30分	スプレー冷却	スプレー冷却

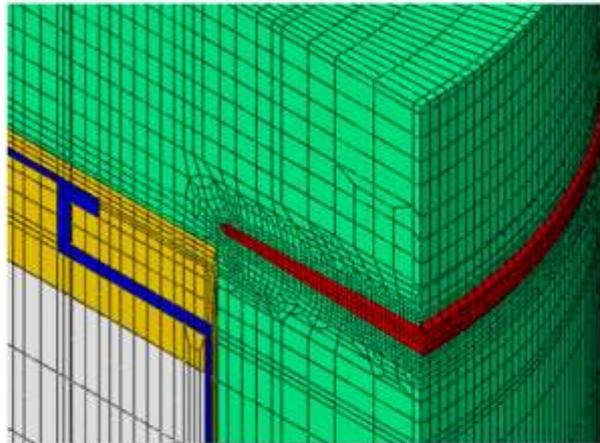
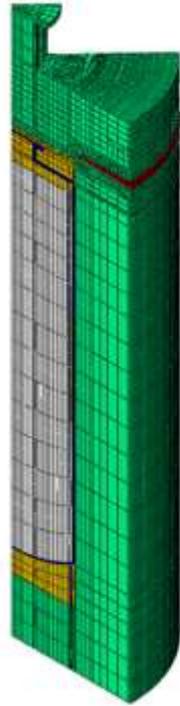
注 1 : Heater2 加熱面が 600°C前後を維持するように加熱

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 5.2.2-3 トライアル 1~3 の PWHT 条件の詳細加熱条件

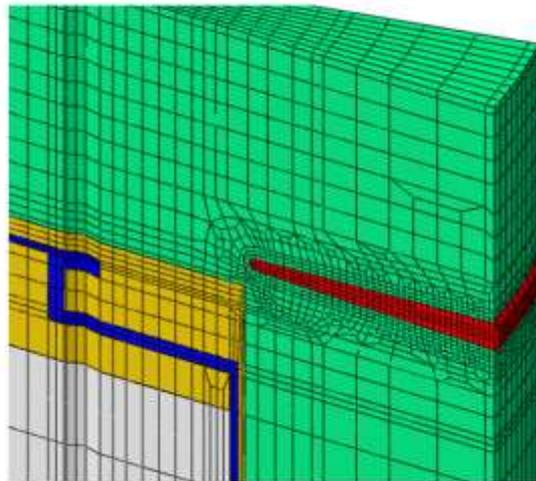
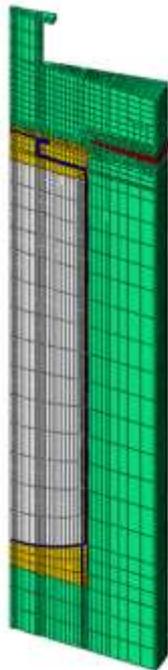
	Stepの時間 [s]		Heater1	Heater2	Heater3
			[W/mm ²]		
Step 1	14580	開始時	0.025	0.018	0.010
		終了時	0.025	0.033	0.020
Step 2	11454.5	開始時	0.025	0.034	0.020
		終了時	0.025	0.021	0.020



(a) モデル全体

(b) 溶接部近傍拡大図

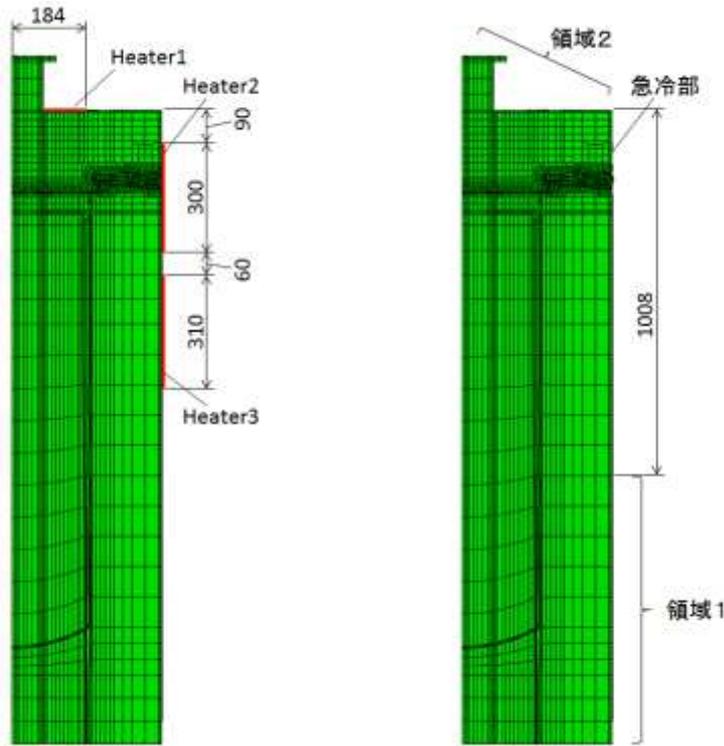
図 5.2.2-7 H27 年度の平蓋オーバーパック解析モデル (温度解析モデル)



(a) モデル全体

(b) 溶接部近傍拡大図

図 5.2.2-8 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)



(a) ヒーターの配置

(b) 冷却部の配置

図 5.2.2-9 ヒーター、断熱材および冷却領域の配置

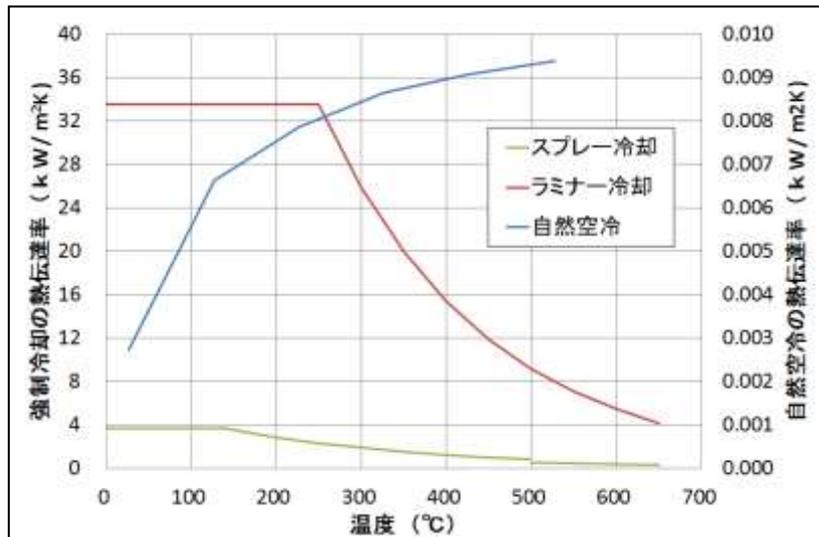


図 5.2.2-10 各冷却条件における熱伝達率の温度依存性

(3) 解析結果

各解析ケースの中で、ガラス固化体の温度が最も上昇したトライアル 1 の PWHT 条件におけるガラス固化体の温度履歴を図 5.2.2-11 に示す。図より、ガラスの最高到達温度は 400°C 以下であり、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。溶接金属内部における各方向の残留応力分布図を図 5.2.2-12 から図 5.2.2-15 に示す。

また、各解析ケースの温度解析で得られた急冷開始時、終了時の温度分布を添付図 5-1-1 から添付図 5-1-8 に、応力解析により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添付図 5-1-9 から添付図 5-1-20 に示す。

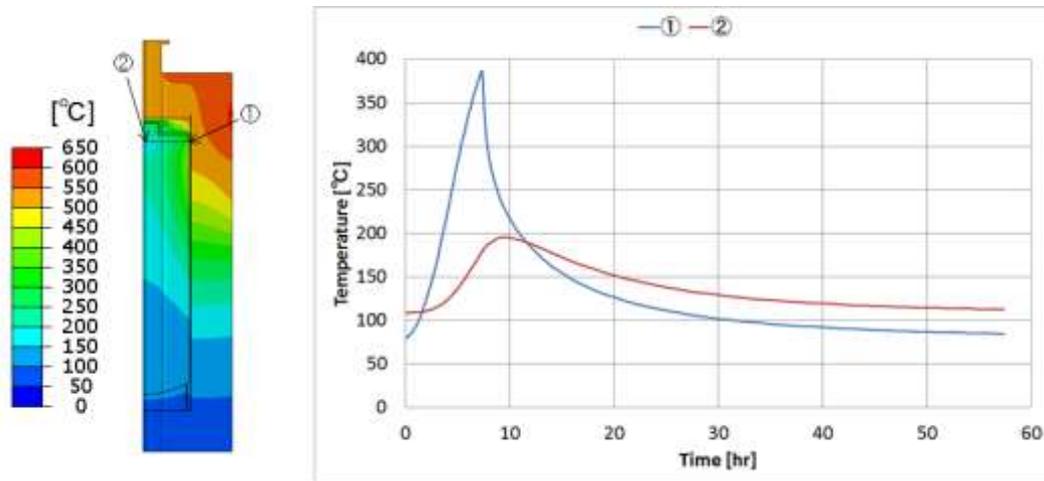


図 5.2.2-11 トライアル1 PWHT 条件におけるガラス固化体の温度履歴

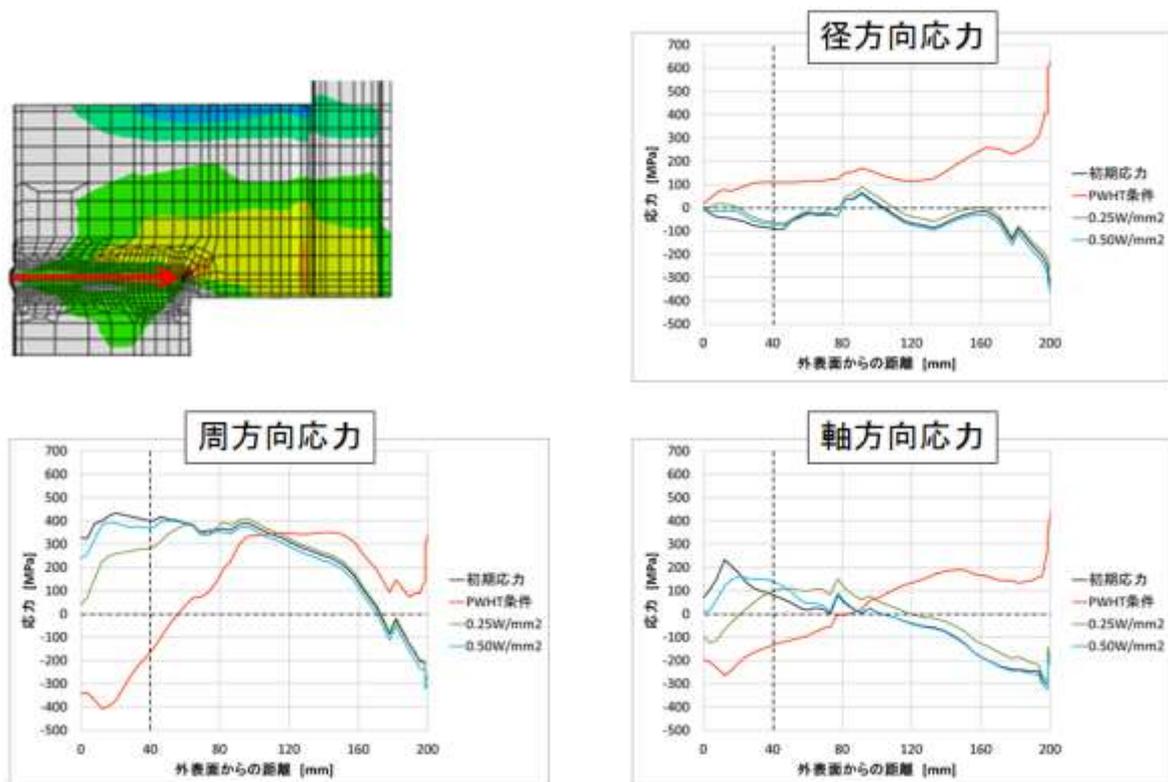


図 5.2.2-12 トライアル1 溶接金属内部における各方向残留応力

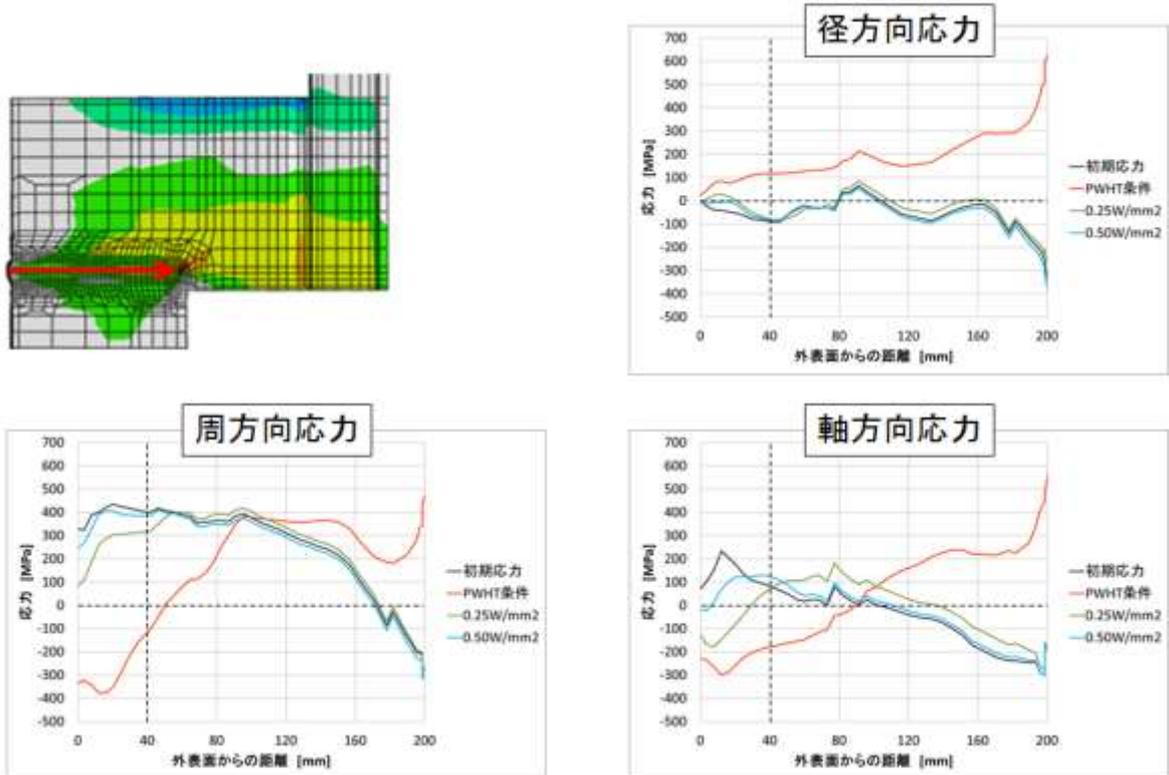


図 5.2.2-13 トライアル 2 溶接金属内部における各方向残留応力

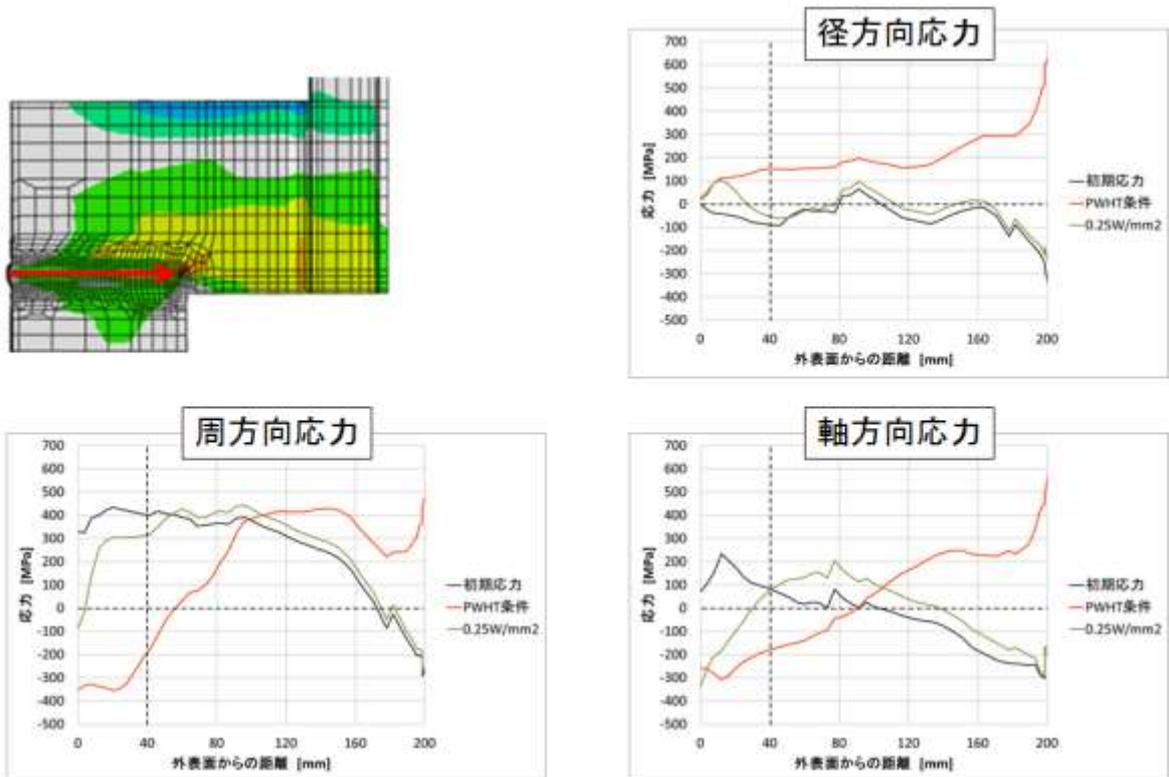


図 5.2.2-14 トライアル 3 溶接金属内部における各方向残留応力

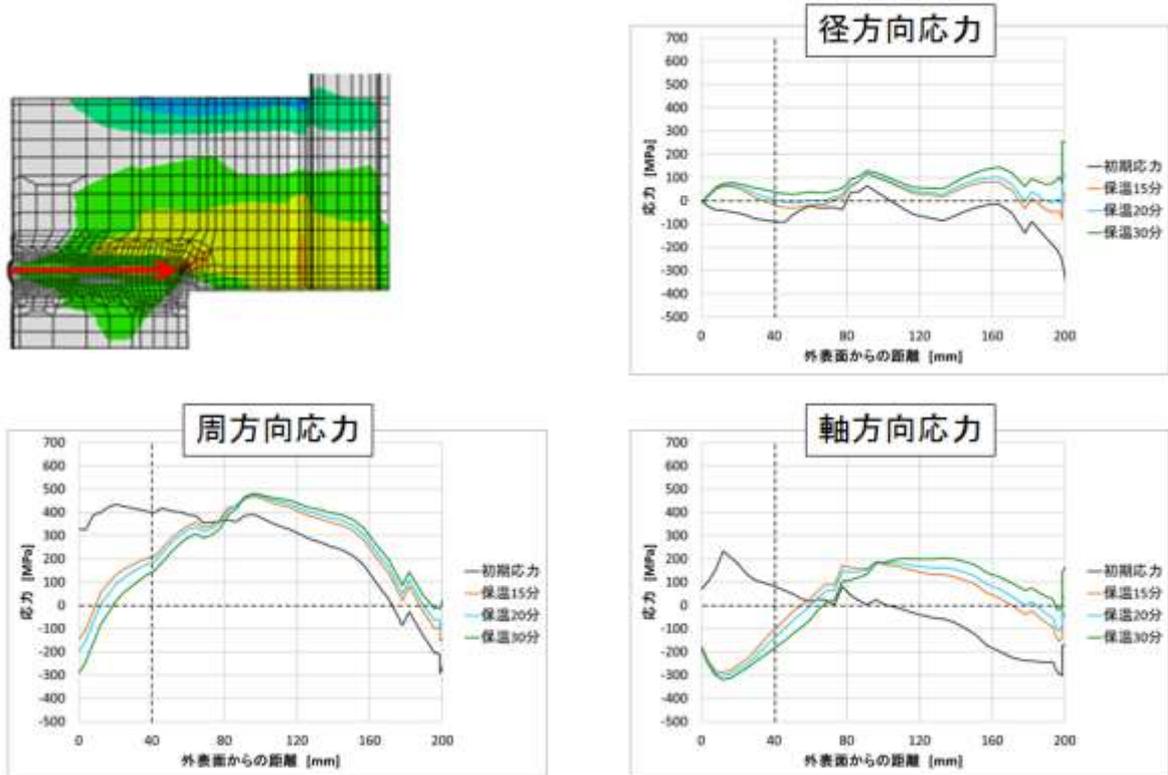


図 5.2.2-15 トライアル 4 溶接金属内部における各方向残留応力

(4) 溶接残留応力低減解析で実施する計算条件の選定

トライアル 1 から 4 の 4 解析ケース群 (全 11 ケース) の解析を実施した結果、以下のことが分かった。

- EIHSI で同じ加熱を行っても、外表面近傍の応力は、軸方向応力に比べて周方向応力は、圧縮応力になりにくい。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、平蓋オーバーパックでは特に軸方向応力が問題となると思われるため、EIHSI は有用と考えられる。
- トライアル 1、2、3 より、弱い入熱で加熱を行い。内部の温度がより高温になってから急冷することで外表面に圧縮応力が入りやすくなるが、PWHT 条件以外で外表面から 40mm 深さまで圧縮応力場となる条件は見いだせなかった。
- PWHT 条件で内面まで十分加熱 (外表面から 190mm 位置で約 530°C) した場合、軸方向応力、周方向応力のいずれも外表面から 40mm より深いところまで圧縮応力場となるが、内面側が大きな引張応力場となる。
- トライアル 4 より、PWHT よりも大きい入熱で加熱し、外表面が 600°C に到達した後 600°C に保持することで内部を緩やかに温め、その後急冷することで外表面へ圧縮応力場を導入しつつ、内部の引張応力へのシフトが抑制される結果が得られることがわかった。(保温 30 分のケースでは、保温により外表面から 100mm 深さ位置が 400°C 程度まで昇温)
- 急冷方式の差 (スプレー冷却とラミネー冷却) は、ほとんど見られなかった。

以上の結果を踏まえ、残留応力低減解析の本解析はトライアル 4 を基準とし、軸方向応力が外表面から 40mm 深さまで圧縮応力となり、かつ、トライアル 4 のケースの中で周方向が最も深い位置まで圧縮応力となった保温時間を 30 分のケースにて実施することとした。

5.3 溶接残留応力低減解析

予備解析で設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、平成 27 年度の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。

5.3.1 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。

5.3.2 解析モデル

解析モデルは、平成 27 年度の検討で使用した実規模の解析モデルとし、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 2.1 12 に平蓋オーバーパックの解析モデル（温度解析モデル）を、図 2.1 41 に平蓋オーバーパックの解析モデル（応力解析モデル）を示す。

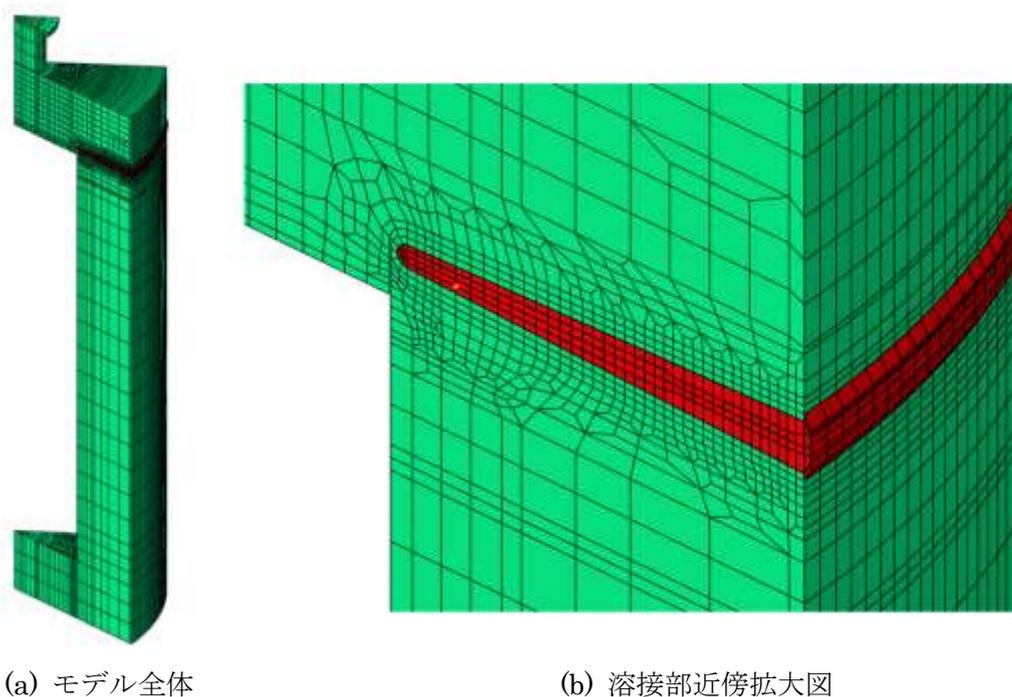


図 5.3.2-1 H27 年度の平蓋オーバーパック解析モデル（応力解析モデル）

5.3.3 解析結果

ガラス固化体の温度履歴を図 5.3.3-1 に示す。同図から、ガラス固化体の最高到達温度は 163°C 以下であり、制限温度である 500°C 以下に抑えられていることを確認できた。温度解析で得られ

た急冷開始時、および終了時の温度分布を図 5.3.3-2 に示す。応力解析で得た半径方向応力、周方向応力および軸方向応力の分布図を図 5.3.3-3 から図 5.3.3-5 に示す。また、溶接金属内部の残留応力分布を図 5.3.3-6 に示す。

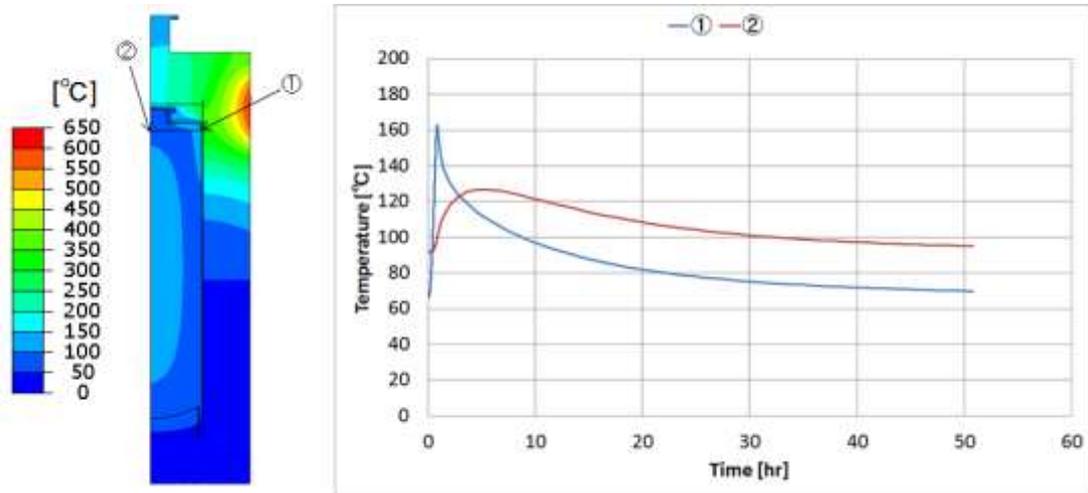


図 5.3.3-1 ガラス固化体の温度履歴

(① : ガラス上部表面のうちキャニスタ内部表面、②ガラス上部表面中央)

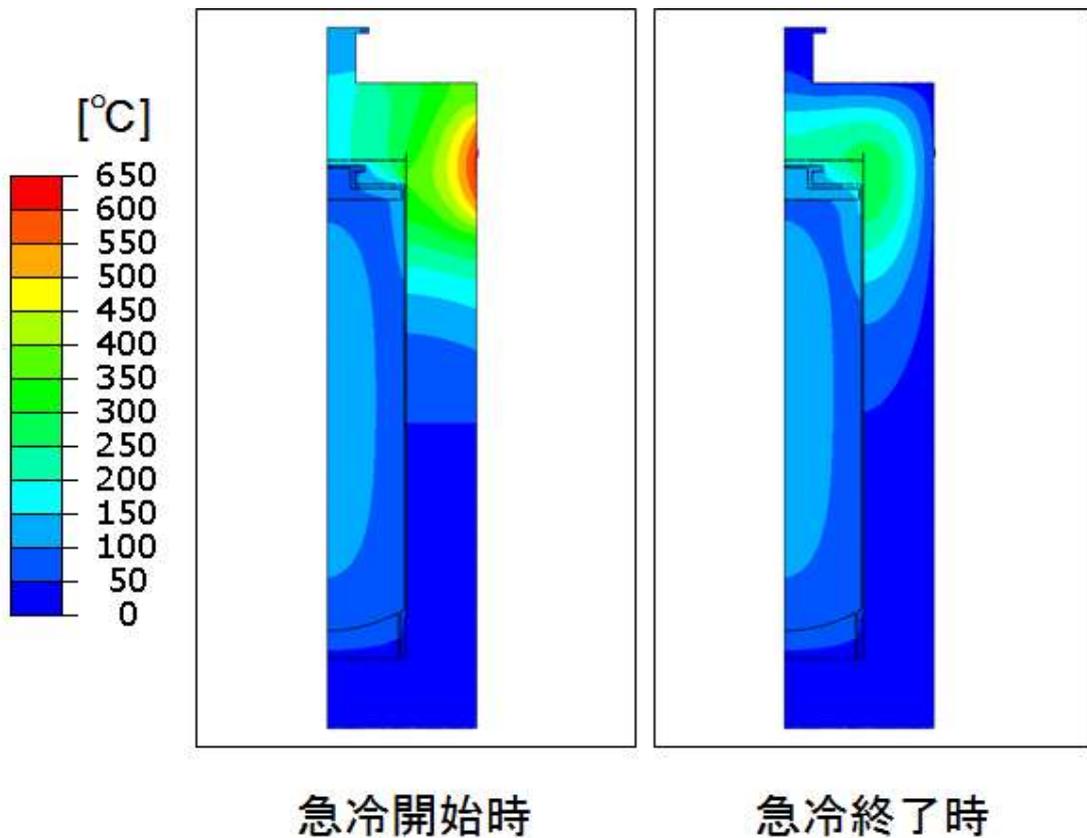


図 5.3.3-2 急冷開始時および急冷終了時の温度分布

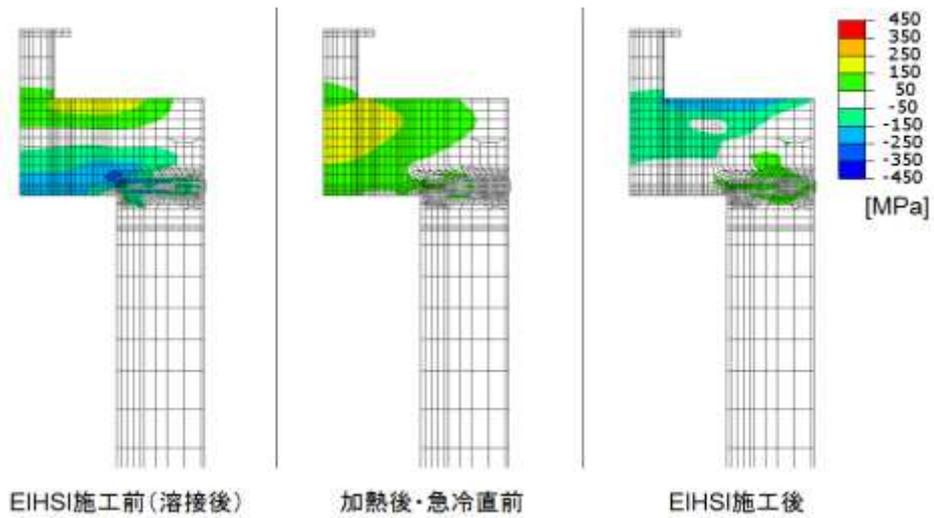


図 5.3.3-3 EIHSI 法施工による半径方向応力分布の変化

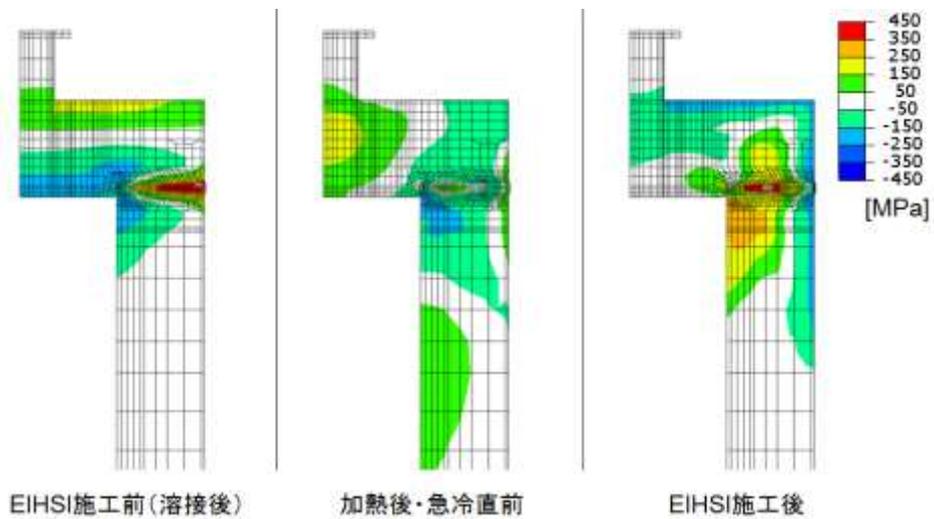


図 5.3.3-4 EIHSI 法施工による周方向応力分布の変化

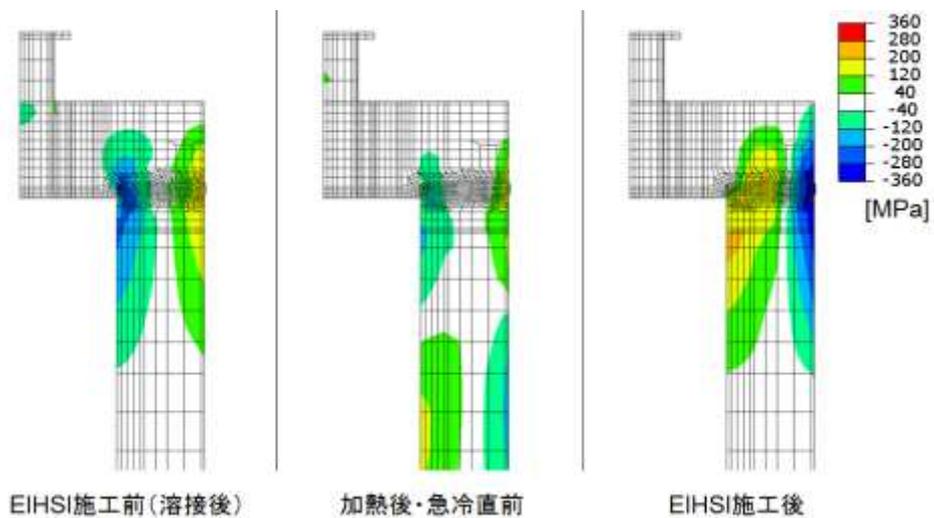


図 5.3.3-5 EIHSI 法施工による軸方向応力分布の変化

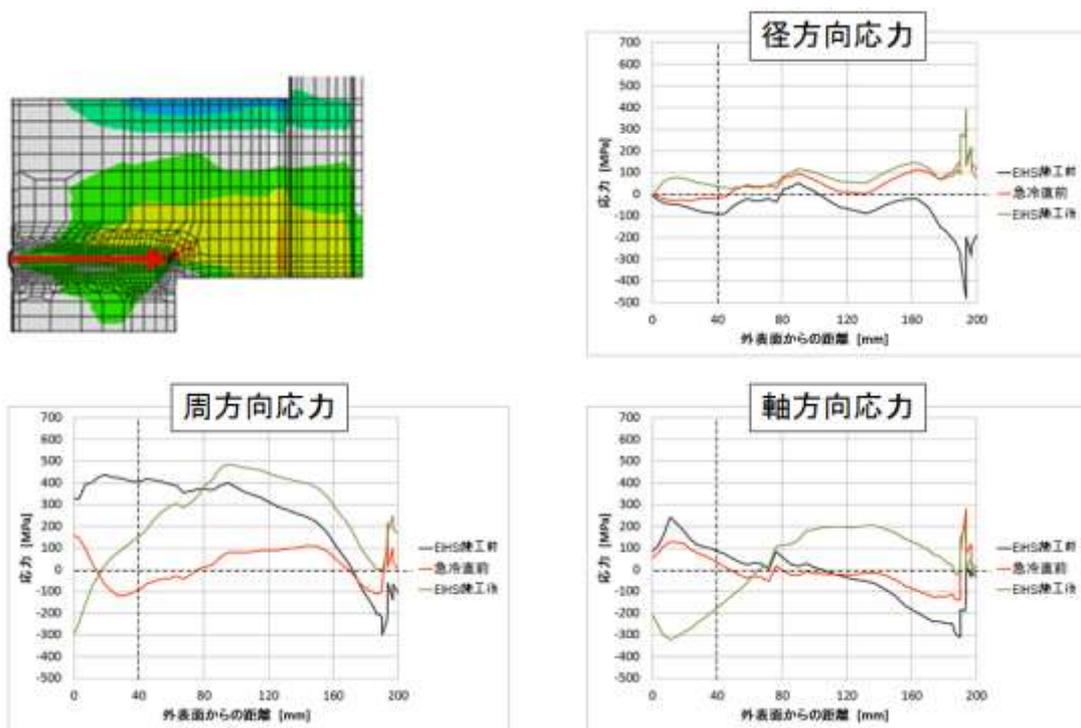


図 5.3.3-6 溶接金属内部における残留応力分布

5.4 まとめ

平成 27 年度の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 4、保温 30 分）にて EIHSI 法の解析を行ったところ、予備解析結果とほぼ同等の残留応力分布が得られた。以下にその概要を記す。

第1章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、平蓋オーバーパックでは特に軸方向応力が問題となると思われる。よって、外表面から 40 mm より深いところまで圧縮応力を確認できた点で EIHSI 法は有用と考えられる。

第2章今回選定した EIHSI 法パラメータでは、周方向応力は外表面から 20 mm 程度の深さまでしか圧縮応力とならなかった。

第3章径方向は引張応力となっているが、この方向の応力成分は溶接部外面の応力腐食割れにほとんど寄与しないと考えられるため、問題ないと考えられる。

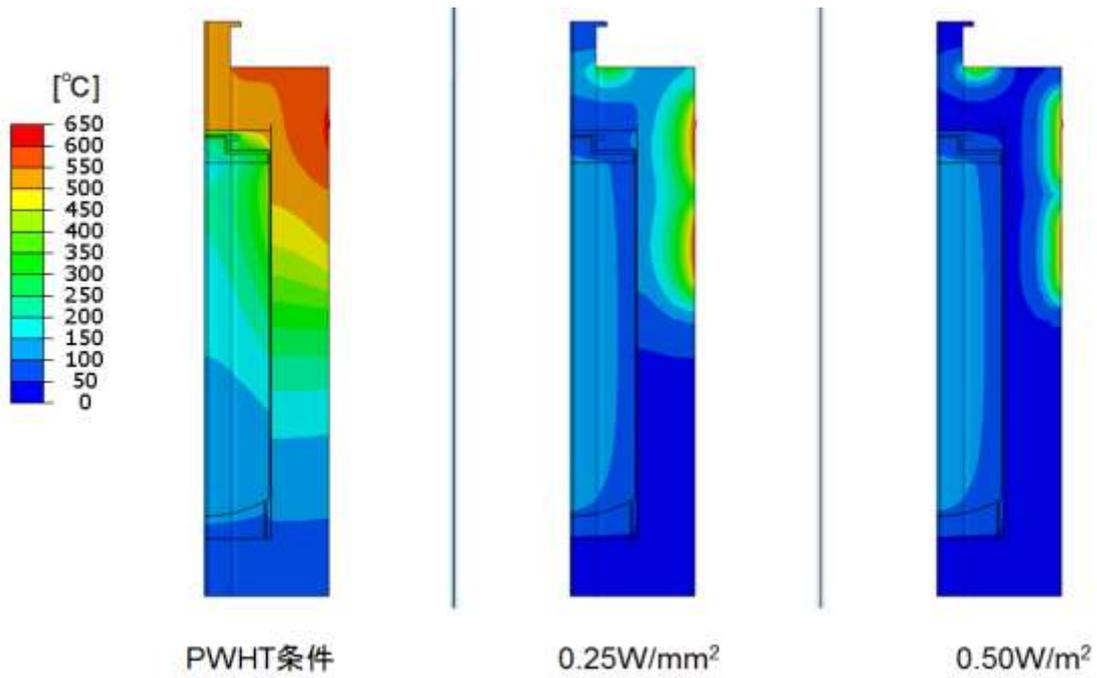
第5章 参考文献

- [1] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 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).
- [2] 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 (1/2) (2006).
- [3] 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費 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).
- [4] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 22 年度地層処分技術調査等委託費 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－ (1/2) (2011).
- [5] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 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 2 分冊)－人工バリア品質評価技術の開発－ (1/2) (2012).

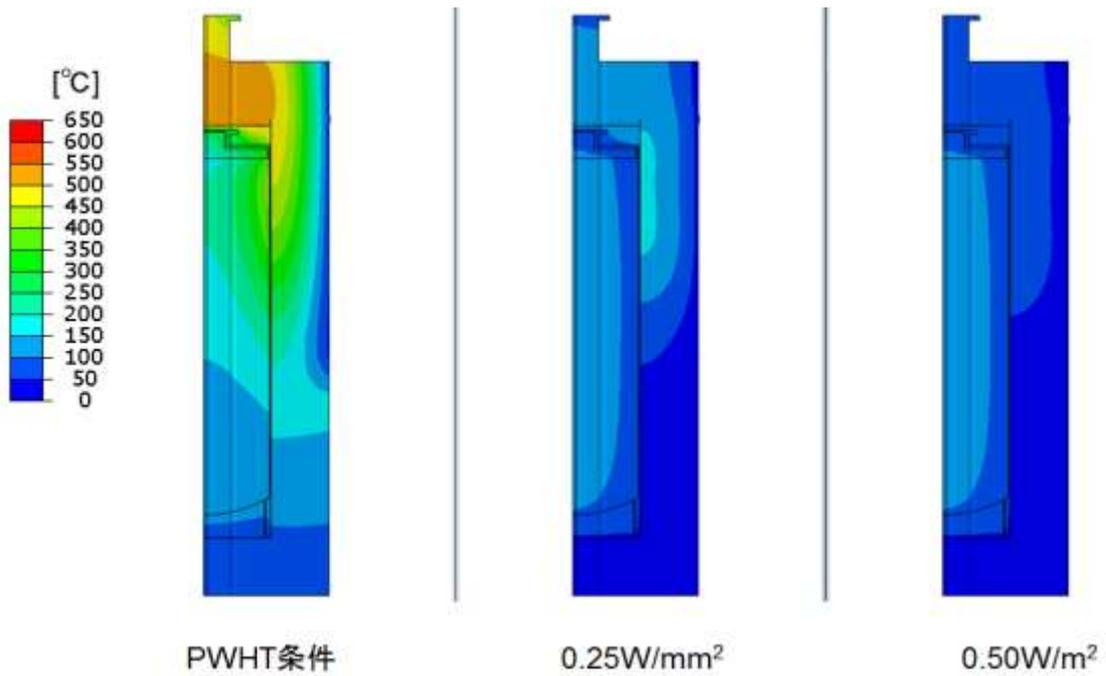
添付資料 5-1

予備解析結果

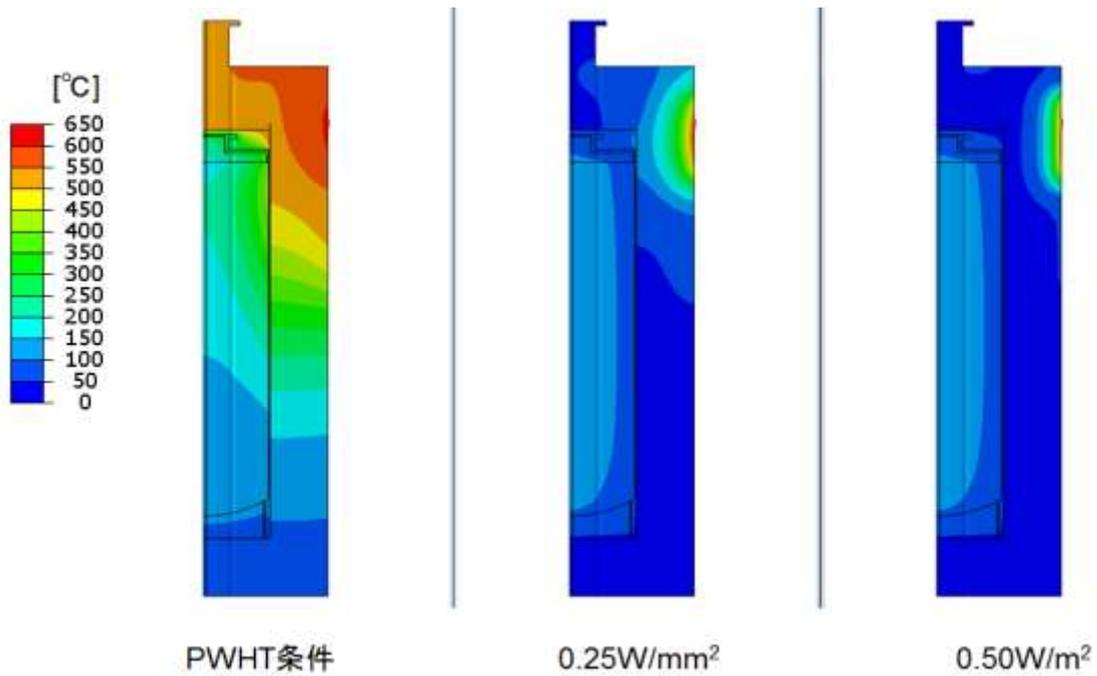
5.2.2 予備解析



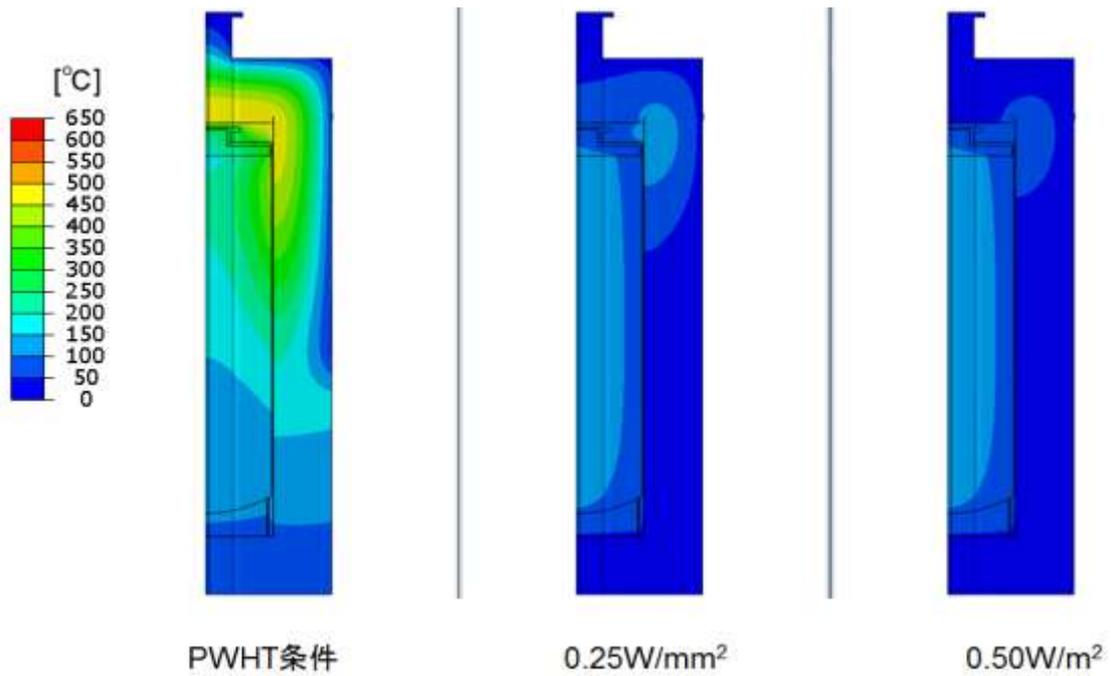
添付図 5-1-1 トライアル1 各解析ケースの急冷開始時温度分布



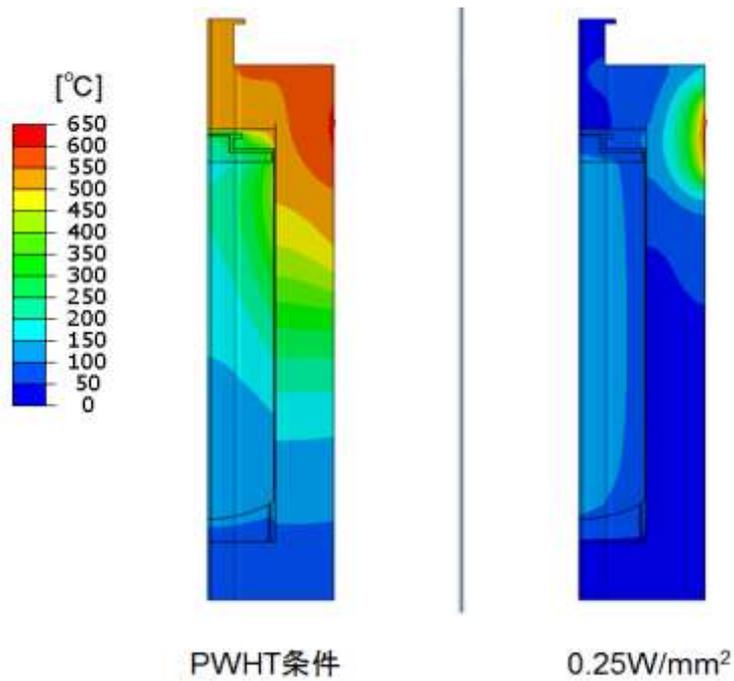
添付図 5-1-2 トライアル1 各解析ケースの急冷終了時温度分布



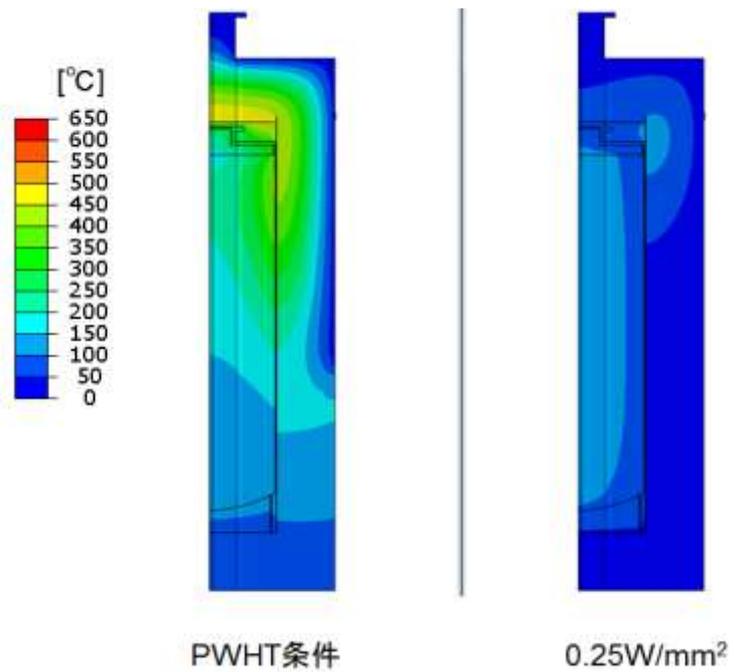
添付図 5-1-3 トライアル2 各解析ケースの急冷開始時温度分布



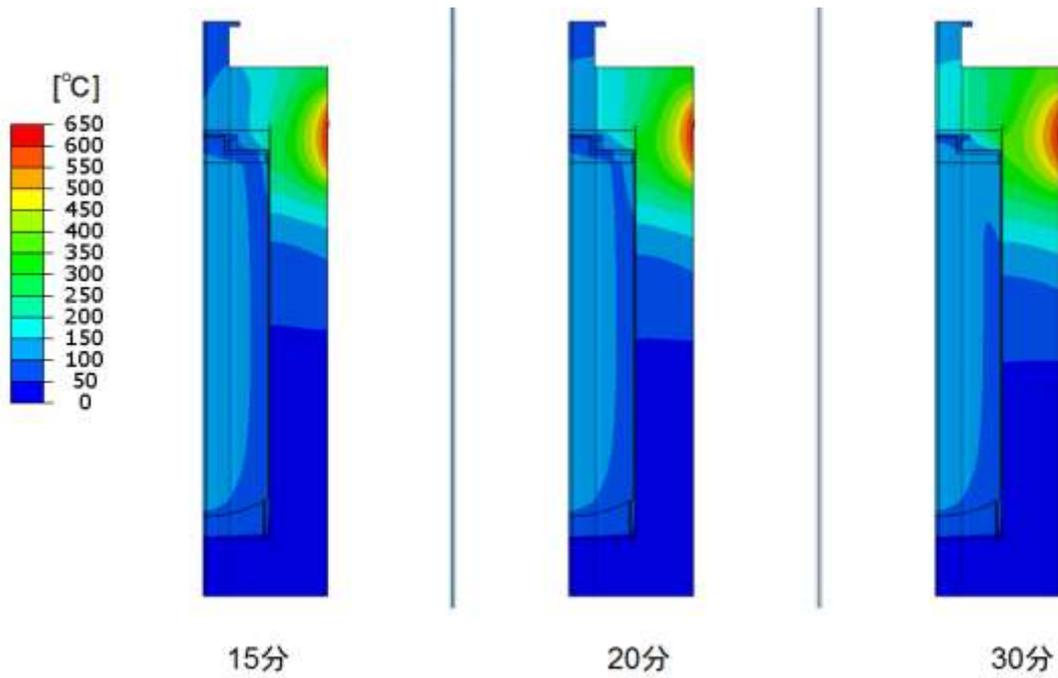
添付図 5-1-4 トライアル2 各解析ケースの急冷終了時温度分布



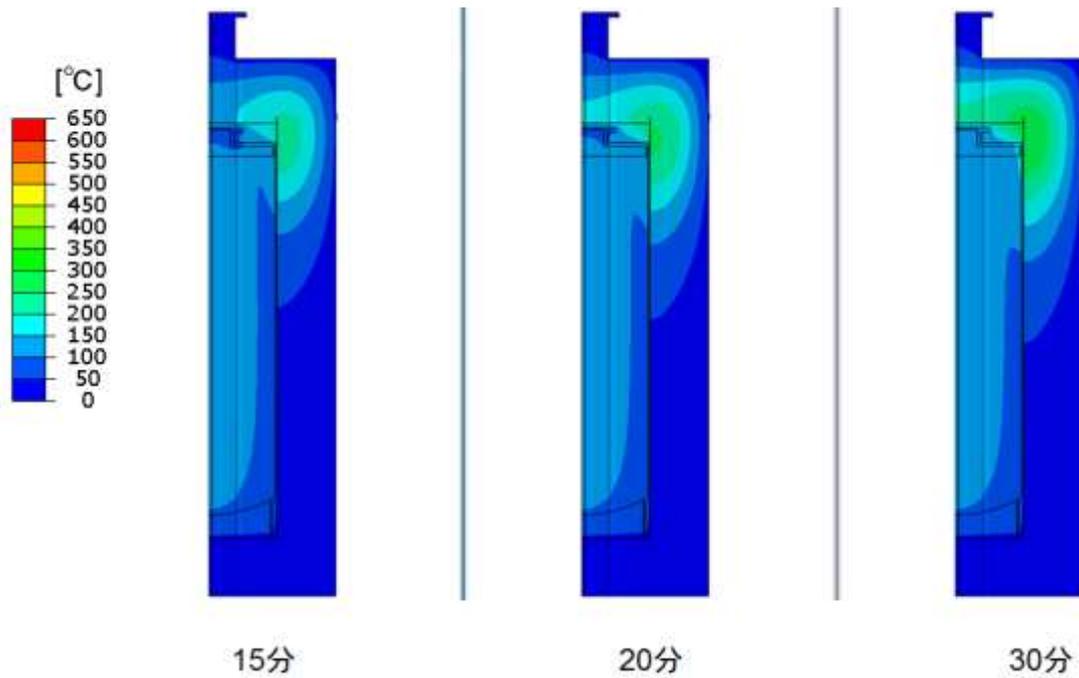
添付図 5-1-5 トライアル3 各解析ケースの急冷開始時温度分布



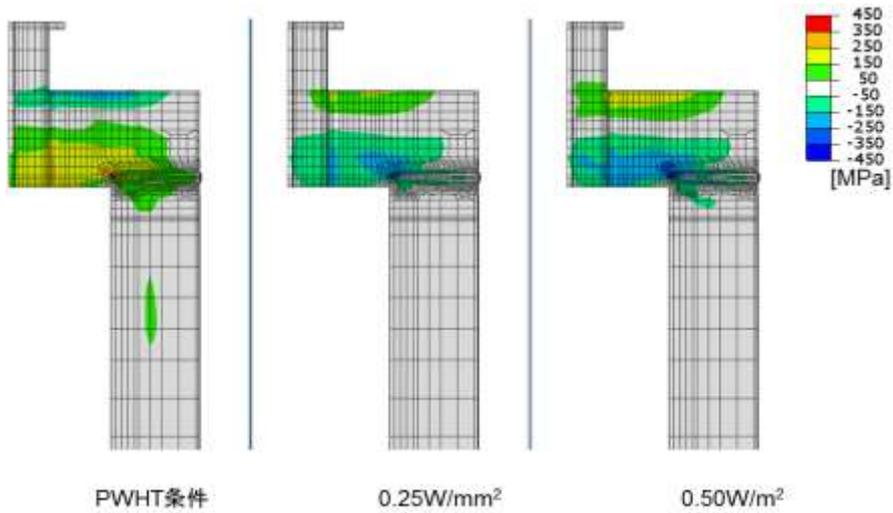
添付図 5-1-6 トライアル3 各解析ケースの急冷終了時温度分布



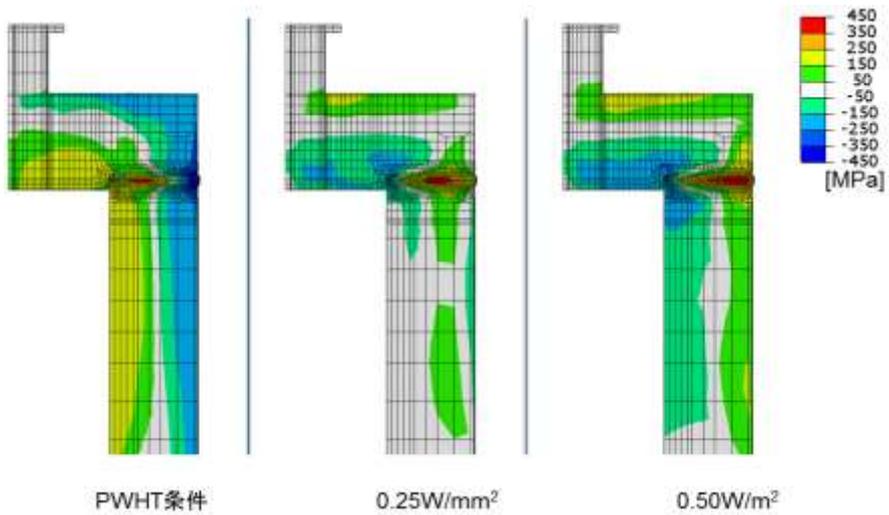
添付図 5-1-7 トライアル4 各解析ケースの急冷開始時温度分布



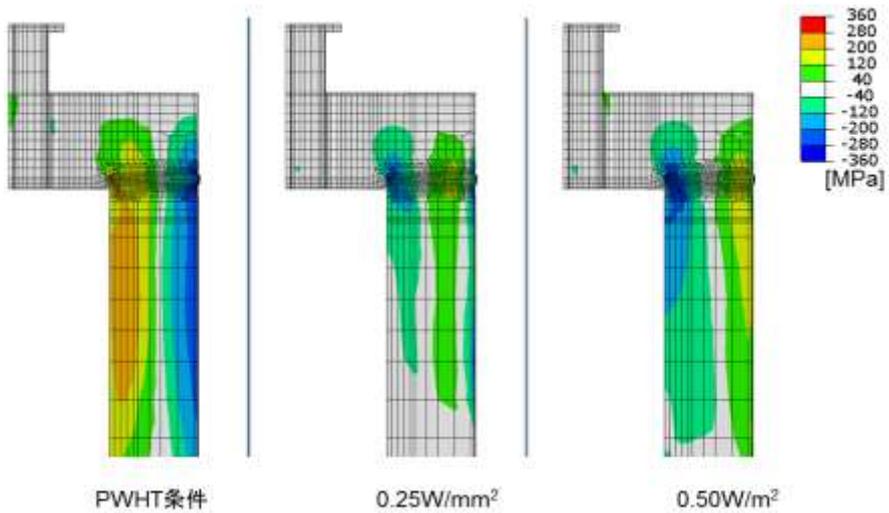
添付図 5-1-8 トライアル4 各解析ケースの急冷終了時温度分布



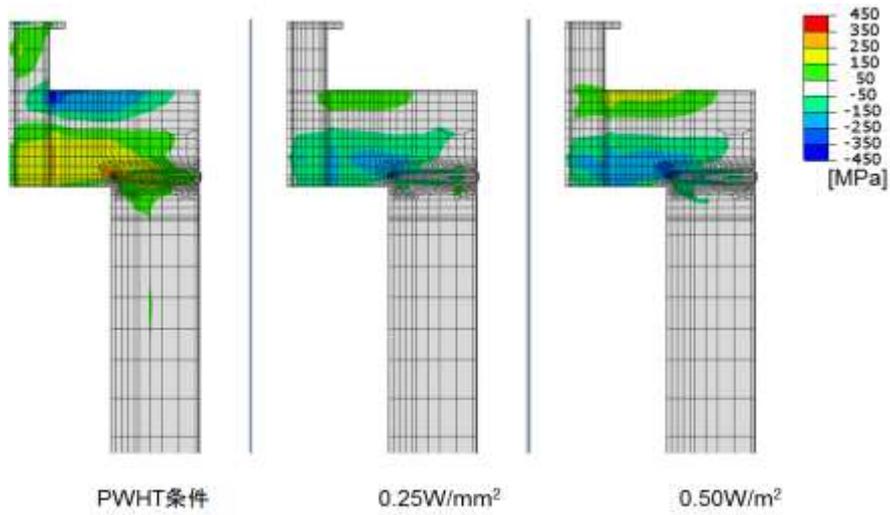
添付図 5-1-9 トライアル1 各解析ケースの半径方向応力分布



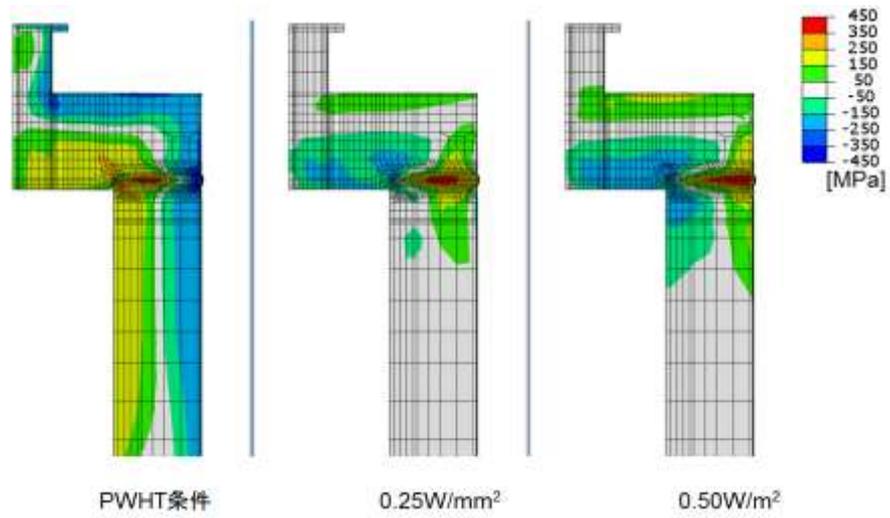
添付図 5-1-10 トライアル1 各解析ケースの周方向応力分布



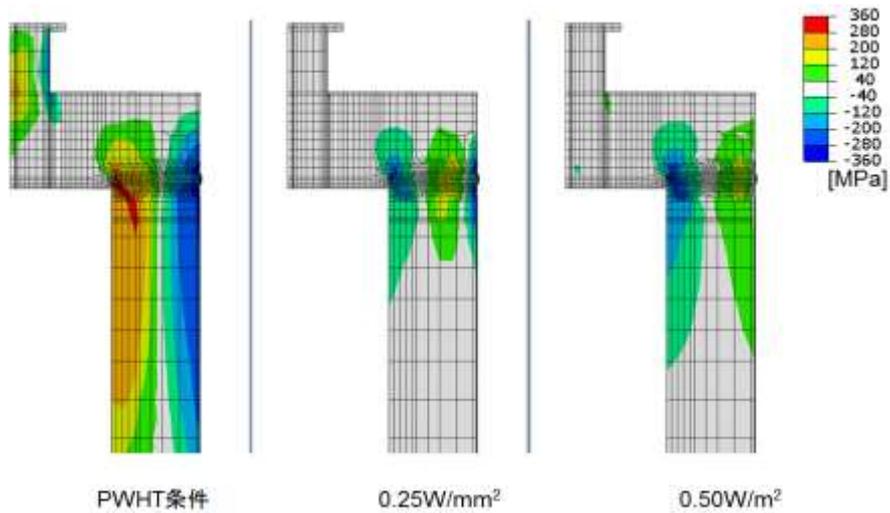
添付図 5-1-11 トライアル1 各解析ケースの軸方向応力分布



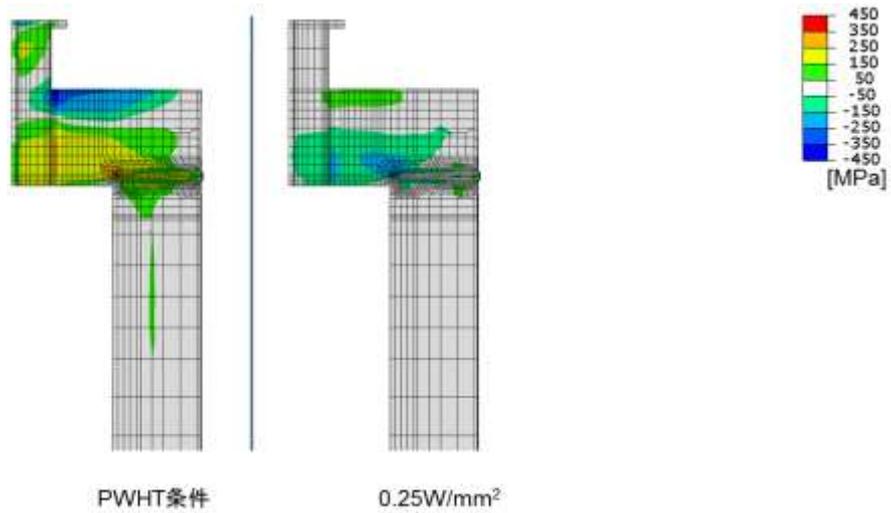
添付図 5-1-12 トライアル2 各解析ケースの半径方向応力分布



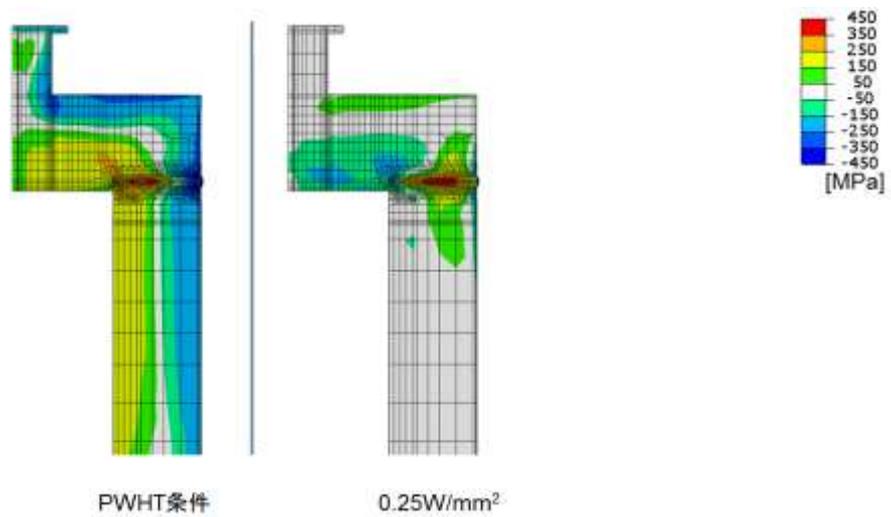
添付図 5-1-13 トライアル2 各解析ケースの周方向応力分布



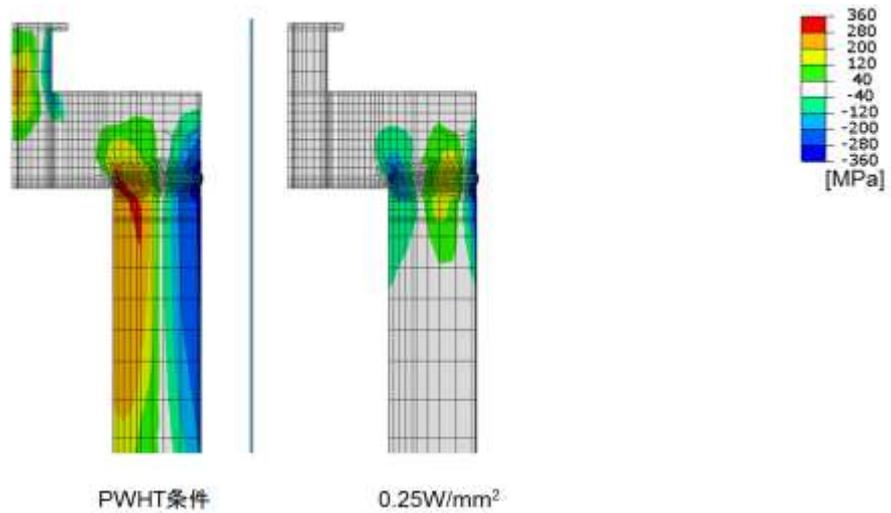
添付図 5-1-14 トライアル2 各解析ケースの軸方向応力分布



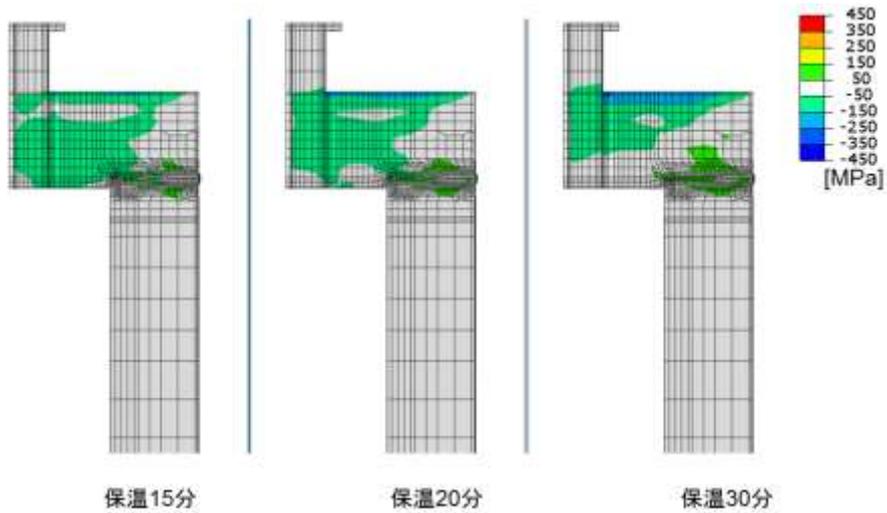
添付図 5-1-15 トライアル3 各解析ケースの半径方向応力分布



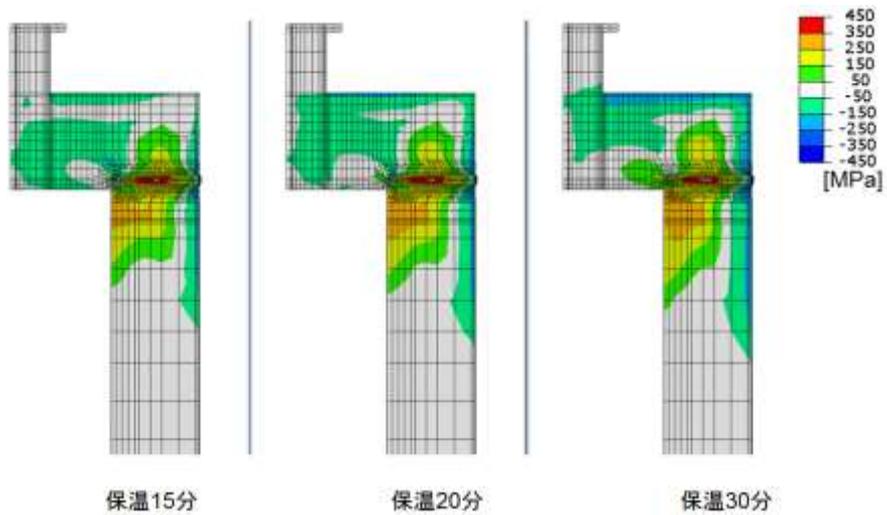
添付図 5-1-16 トライアル3 各解析ケースの周方向応力分布



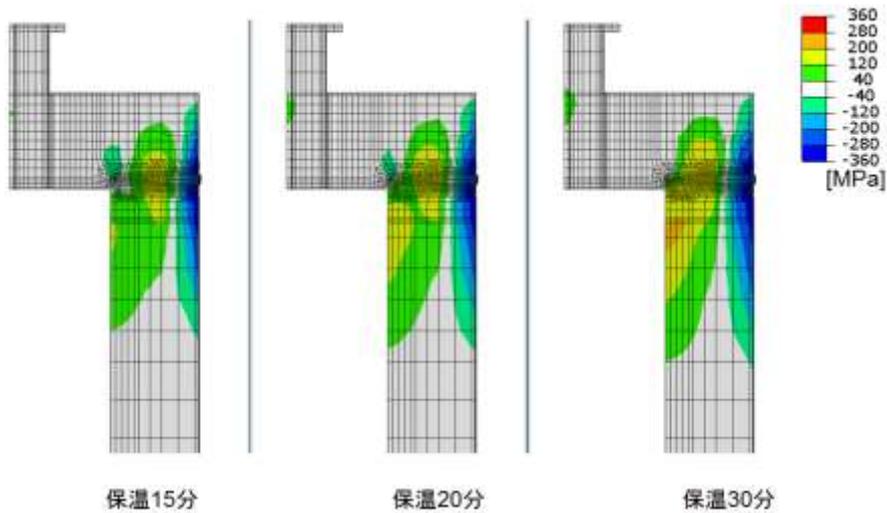
添付図 5-1-17 トライアル3 各解析ケースの軸方向応力分布



添付図 5-1-18 トライアル4 各解析ケースの半径方向応力分布



添付図 5-1-19 トライアル4 各解析ケースの周方向応力分布



添付図 5-1-20 トライアル4 各解析ケースの軸方向応力分布

第6章 オーバーパックの強度に関する検討

6.1 背景および目的

6.1.1 背景

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、限界の溶接欠陥寸法、および許容される残留応力の大きさを検討してきた。

これまでの検討では 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 の板厚に腐食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 の全板厚が接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 6.1.1-1 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。

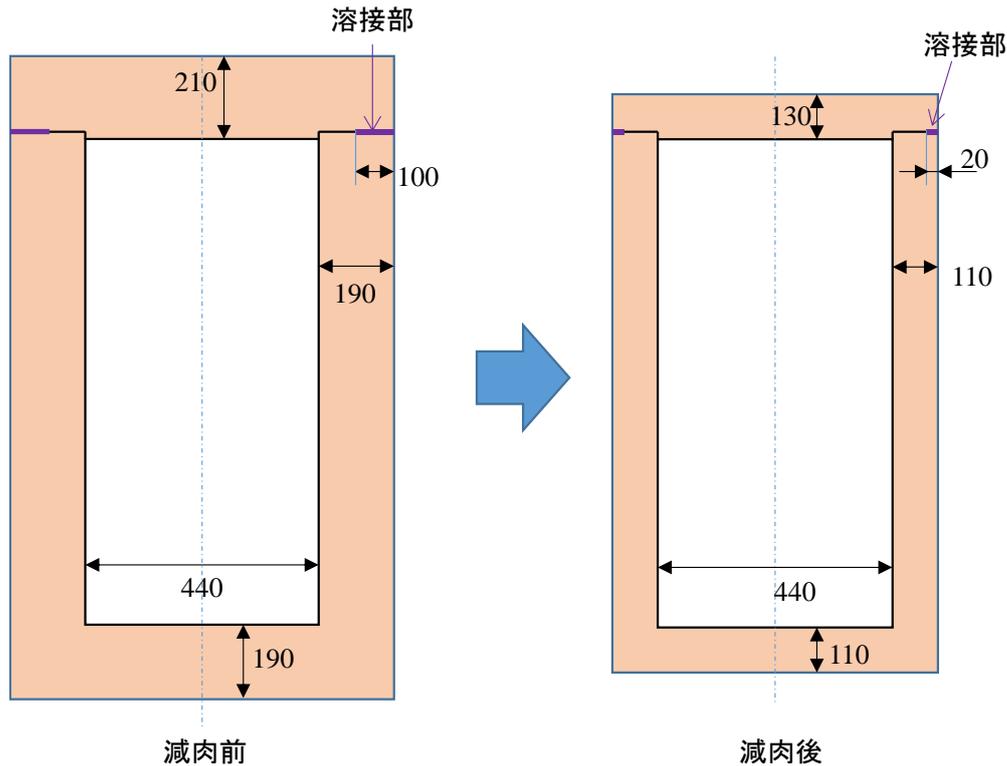


図 6.1.1-1 オーバーパックの減肉による形状の変化
(平蓋において外面から 80 mm の減肉を想定)

6.1.2 目的

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、塑性崩壊、弾塑性破壊および脆性破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る。併せて、溶接検査時に許容される溶接欠陥寸法の検討を行った。さらに、複数の溶接欠陥が接近した場合を想定した解析も実施し、溶接後の検査で複数の欠陥が発見された場合の取り扱い方法を提示した。

6.2 構造健全性確保の考え方

6.2.1 破壊形態および破壊モードの想定

構造健全性評価では、対象となる構造物の破壊形態（どの部位がどのように壊れるか）を想定し、それぞれの破壊形態に対して考えられる破壊モード（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、想定する全ての破壊形態に対して、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、破壊形態と破壊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壊モードとしては、図 6.2.1-1 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、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）も切欠きやき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。一般的な機器設計[2]では、疲労（ラチェット変形含む）も破壊モードとして考慮するが、オーバーパックに対しては疲労による破壊は考慮する必要はない[3]。

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
延性 ↓ 脆性	塑性崩壊	荷重(応力)	降伏強さ 引張強さ
照射損傷 ↑ ↓ き裂サイズ	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)
	脆性破壊	応力拡大係数 (K値)	破壊靱性値 (K_{IC})

図 6.2.1-1 破壊モードと強度評価方法[1]

6.2.2 破壊強度評価方法

構造健全性評価では、①欠陥を起点としない破壊、②溶接欠陥を起点とした破壊、および③未溶接部を起点とした破壊の3つの破壊形態全てを対象として破壊の有無を判断する必要がある。そして、全ての破壊形態に対して破壊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。これらの破壊形態には、塑性崩壊、弾塑性破壊、および脆性破壊の3つの破壊モードが含まれる。破壊の有無の判断（破壊評価）では、破壊を引き起こす力である破壊の駆動力と、破壊に対する材料強度を比較する。そして、材料強度が破壊の駆動力よりも大きい場合に、破壊が発生しないと判断される。それぞれの破壊モードに対応した破壊駆動力と材料強度を図 6.2.2-1 に示す。具体的には、以下のように破壊の有無を判断する。

塑性崩壊に対しては、弾完全塑性の応力・ひずみ曲線（図 6.2.2-1）を想定した有限要素解析により、破壊荷重（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。本業務では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 6.2.2-2 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、破壊時にき裂先端での塑性変形、延性き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]が適用されるが、本業務では、簡便のため、弾塑性破壊靱性値（ J_{Ic} ）とJ積分を比較することで破壊の有無を判断する。この方法により算出される破壊荷重は、2パラメータ評価法やJ-T評価法による破壊荷重よりも安全側となる。

未照射の構造材料（炭素鋼など）ではき裂先端から延性き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。

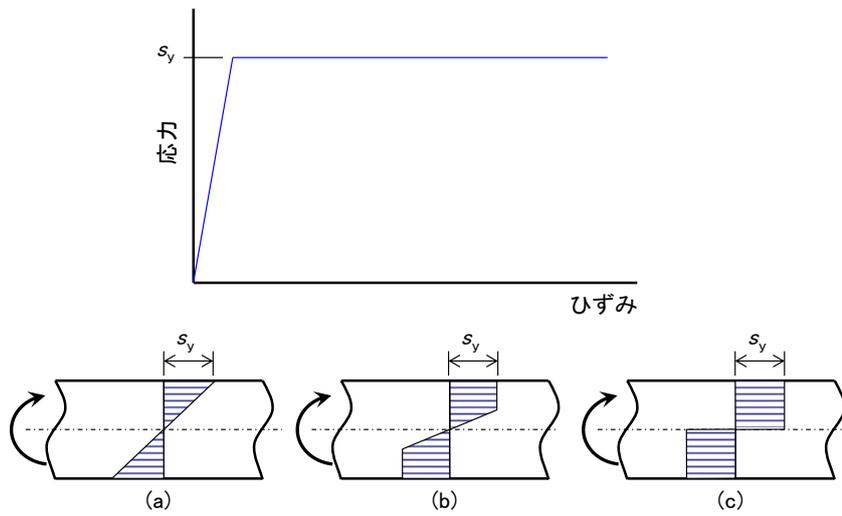


図 6.2.2-1 弾完全塑性応力・ひずみ曲線による塑性崩壊の考え方

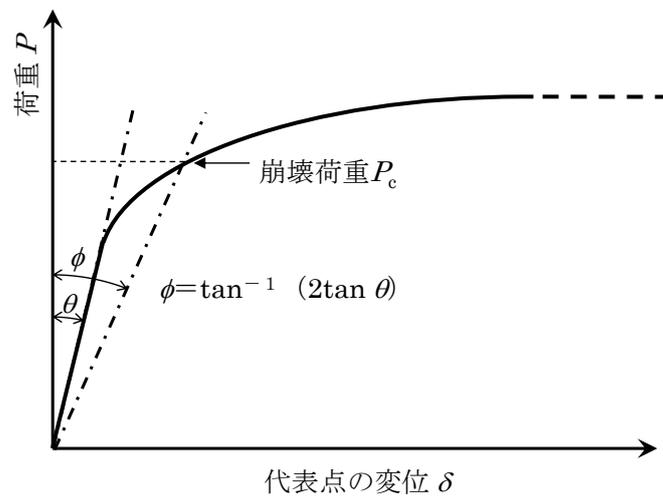


図 6.2.2-2 2倍勾配法

6.3 解析の基本条件

6.3.1 解析方法

破壊解析のためには、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と J 積分の算出が必要となる。解析には、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 6.3.1-1 に示した。

表 6.3.1-1 物性値

温度 (°C)	縦弾性係数 (GPa)	ポアソン比 (-)
90	199	0.3

6.3.2 解析モデル

解析の対象となるオーバーパック形状を図 6.3.2-1 に示す。オーバーパックの蓋形状は、落とし蓋および平蓋を対象とした。操業期間中の板厚は、190 mm とするが、埋設後の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。

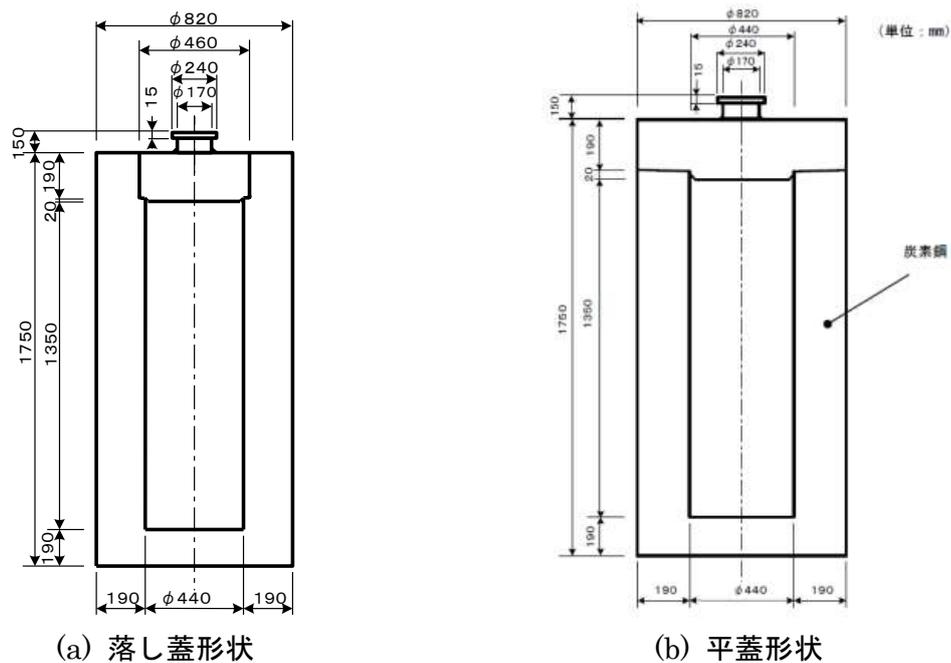


図 6.3.2-1 オーバーパック形状

6.3.3 想定した荷重

以下の荷重を想定した。

操業期間中

- ・吊り上げ荷重（自重）

埋設後

- ・外圧
- ・溶接残留応力

6.4 解析の実施

6.4.1 板厚と崩壊荷重の関係の整理

オーバーパックの塑性崩壊に対する強度を把握するために、胴体および蓋（底板）の板厚と崩壊荷重の関係を求める。6.2.1 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ためには、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、③未溶接部を起点とした破損の3つの破損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損に対する強度を調べる。

(1) 解析方法

オーバーパックの解析モデルを図 6.4.1-1 に示す。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 は埋設前の 190 mm から最小 50 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 6.4.1-2 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。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、6.4.1 では、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、6.2.2 (図 6.2.2-2) の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ため、荷重は外圧、変位は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 6.4.1-3 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、500 MPa を適用した。

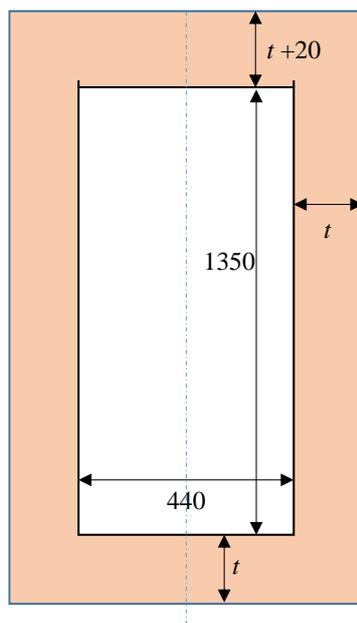


図 6.4.1-1 解析モデル (単位: mm、 $t = 60 \sim 190$ mm)

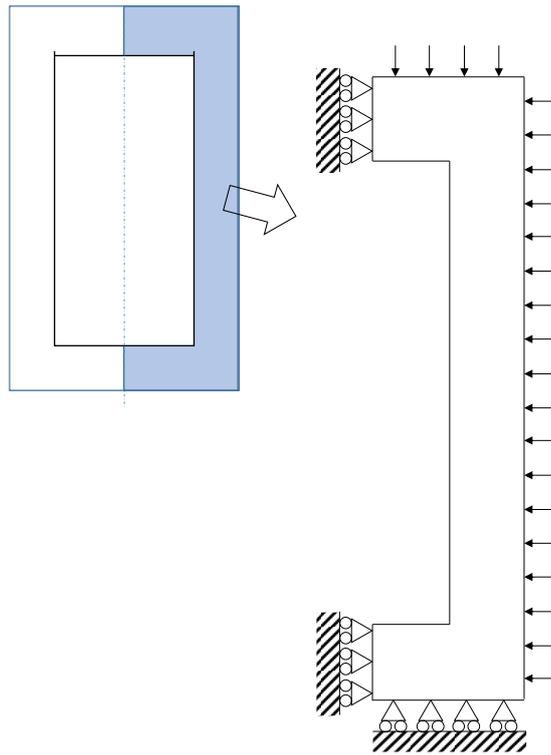


図 6.4.1-2 境界条件

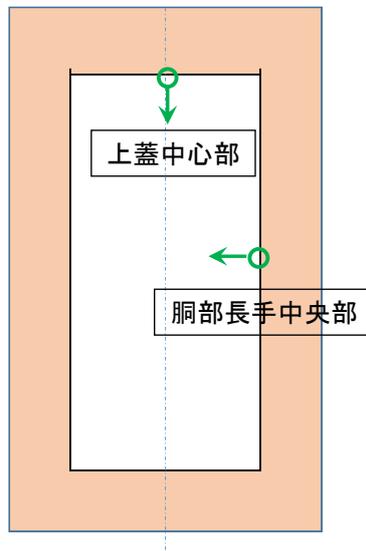


図 6.4.1-3 2倍勾配法を適用する際に用いる参照点と変位の方向

(2) メッシュサイズの影響

有限要素解析では、解析結果に対する有限要素メッシュ依存性が問題となる。解析の品質を確保するため、本解析を実施するに先立ち、メッシュ依存性を調べるための予備解析を実施した。図 6.4.1-4 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。粗メッシュではメッシュあたり 10 mm、詳細メッシュではその 4 分の 1 の 2.5 mm としている。図 6.4.1-4 は板厚 $t=190$ mm のメッシュを示しているが、板厚を変化させる場合は、メッシュサイズは変えずにメッシュ数を減らすことで、所定の板厚になるようにした。降伏強度は $S_y = 300$ MPa とした。

図 6.4.1-5 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 6.4.1-5 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 190 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 6.4.1-6 に示す。胴部長手中央部の変位が相対的に大きく、この点を参照点に崩壊荷重が決定された。

3 種のメッシュを用いた場合の板厚と崩壊荷重 P_L の関係を図 6.4.1-7 に示す。板厚が小さくなるほど、崩壊荷重が減少している。粗メッシュを用いた場合の崩壊荷重が、相対的に大きくなる傾向があるものの、その差は顕著でない。中間メッシュと詳細メッシュの結果がほぼ一致していることから、中間メッシュにおいて、メッシュ依存性は収束していると判断できる。以後の解析では、詳細メッシュを用いた。

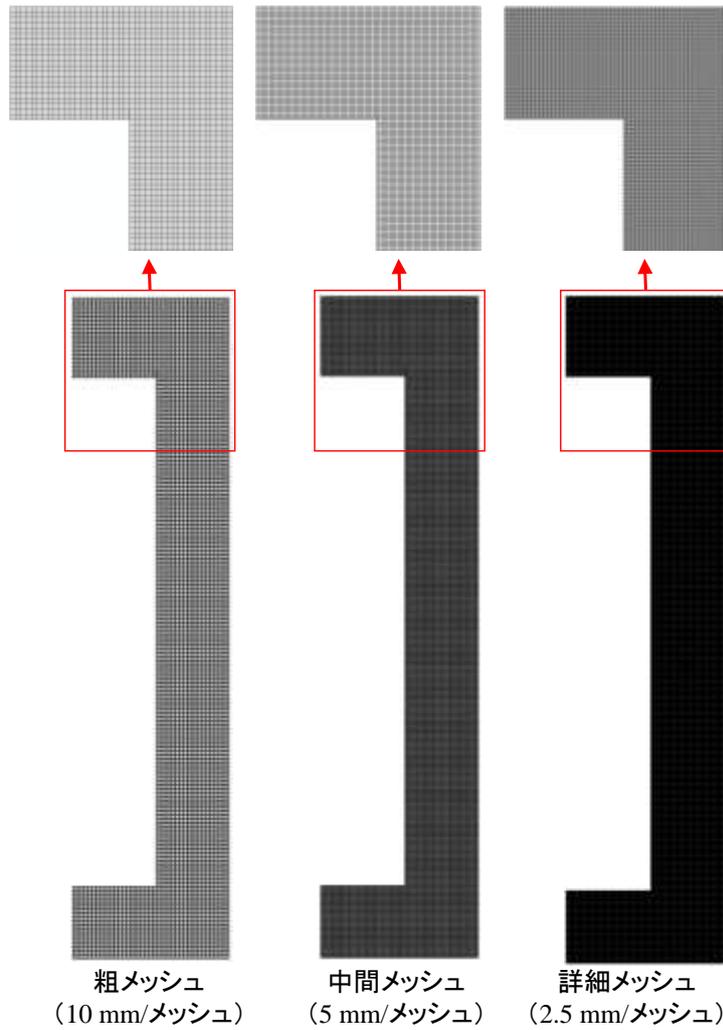


図 6.4.1-4 要素分割 ($t = 190$ mm)

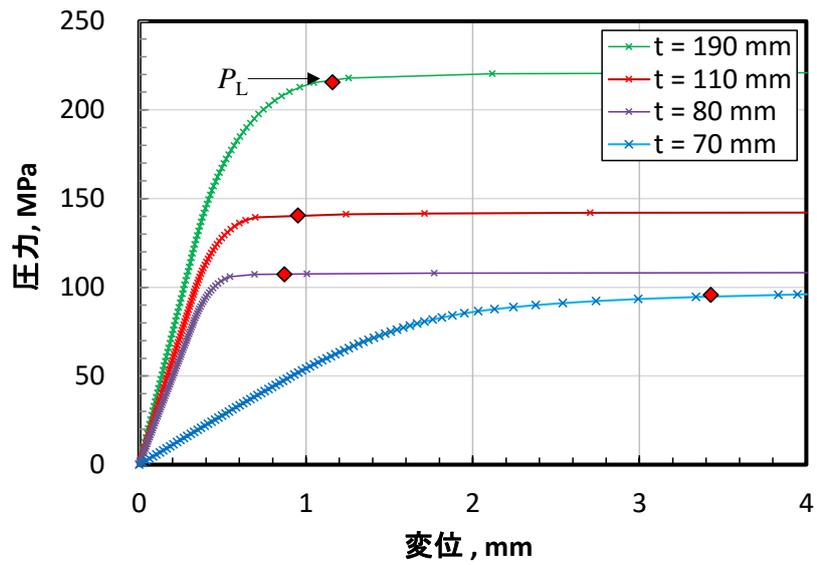


図 6.4.1-5 2倍勾配法の適用($S_y = 300$ MPa、詳細メッシュ使用)

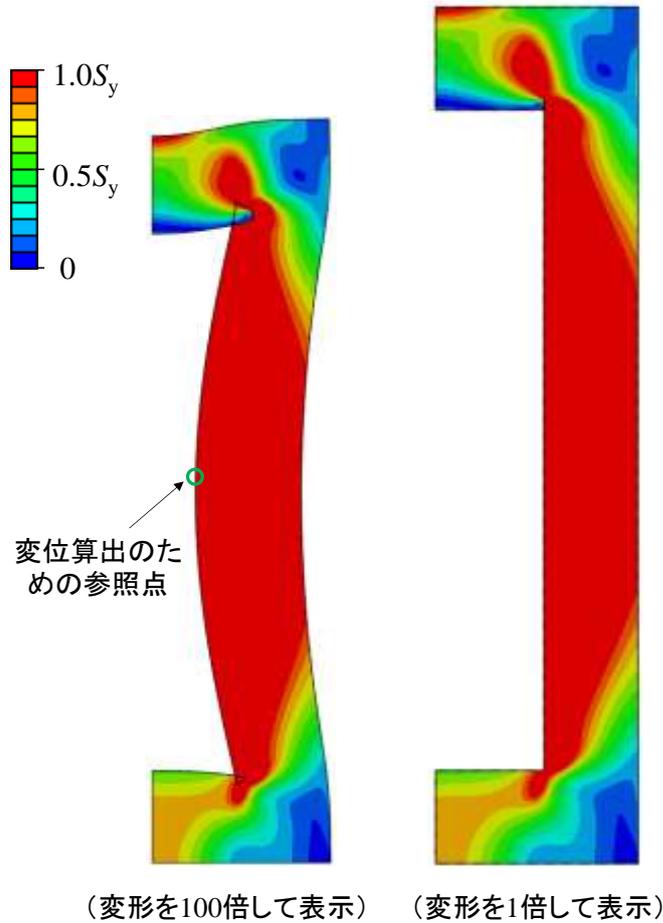


図 6.4.1-6 塑性崩壊時の形状と相当応力分布 ($t = 190 \text{ mm}$ 、 $S_y = 300 \text{ MPa}$)

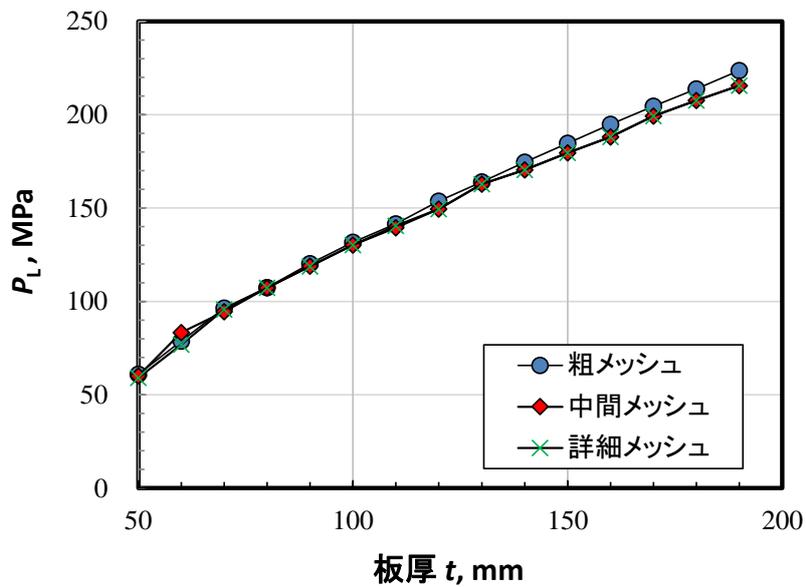


図 6.4.1-7 崩壊荷重に及ぼすメッシュサイズの影響 ($S_y = 300 \text{ MPa}$)

(3) 板厚に対する崩壊荷重

板厚と崩壊荷重の関係を図 6.4.1-8 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。降伏強度が最も小さい $S_y = 100 \text{ MPa}$ 、板厚 50 mm の場合の崩壊荷重が最も小さくなり、 19.7 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、 50 mm の板厚に対しても、崩壊荷重に対して 1.8 倍程度の強度があることがわかる。

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 80 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 70 mm 以下の場合の参照点は、上蓋中心となった。図 6.4.1-9 に崩壊と判断された時点のモデルの形状を示した。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 6.2.2-1 の(c)の状態) となり、塑性崩壊と判断される。板厚が小さくなると、上蓋の変形と応力が相対的に大きくなり、 $t = 60 \text{ mm}$ では胴部よりも上蓋が先に塑性ヒンジ状態となっている。

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 $(P_L R_m/t) / S_y$ で正規化した結果を図 6.4.1-10 に示す。ここで、 R_m はオーバーパックの平均半径 ($t = 190 \text{ mm}$ の場合は $R_m = 220 + 190 \times 0.5 \text{ mm}$ となる) を示す。円筒構造物に外圧 (内圧) P が作用する場合、外圧により発生する周方向応力 (Hoop 応力) は、薄く肉円筒に対して $P \times (R_m/t)$ で近似できることから、 $(P_L R_m/t)$ は断面の Hoop 応力に相当する。そして、Hoop 応力を S_y で除することで、崩壊荷重に及ぼす板厚および降伏荷重の影響を正規化することができる。図 6.4.1-10 では、 P_L/S_y の値が S_y に依存していないことから、崩壊荷重は降伏強度にほぼ比例していることがわかる。そして、参照点が胴部長手中央部である場合は、板厚の影響も R_m/t でほぼ正規化できている。参照点が上蓋中心部である場合は、 $(P_L R_m/t) / S_y$ が相対的に小さくなった。これは、崩壊荷重が胴部の Hoop 応力によってもたらされないためと考えられる。

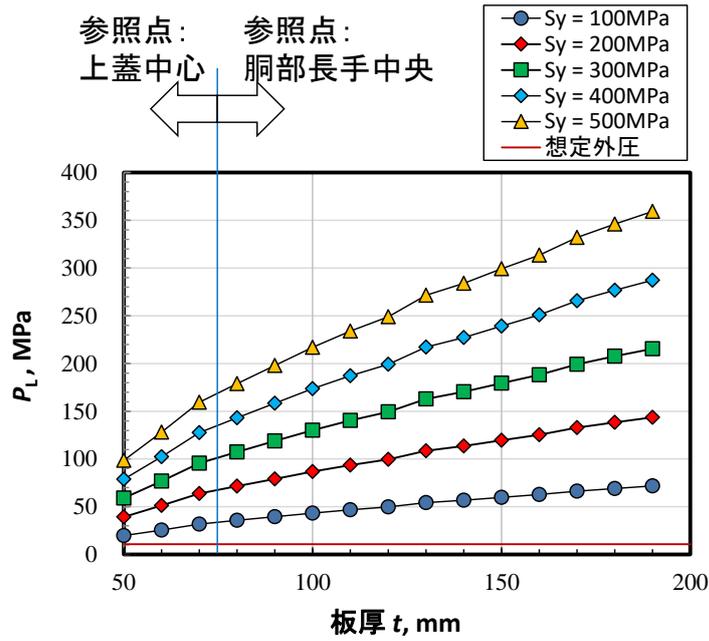


図 6.4.1-8 板厚に対する崩壊荷重の変化 (詳細メッシュ使用)

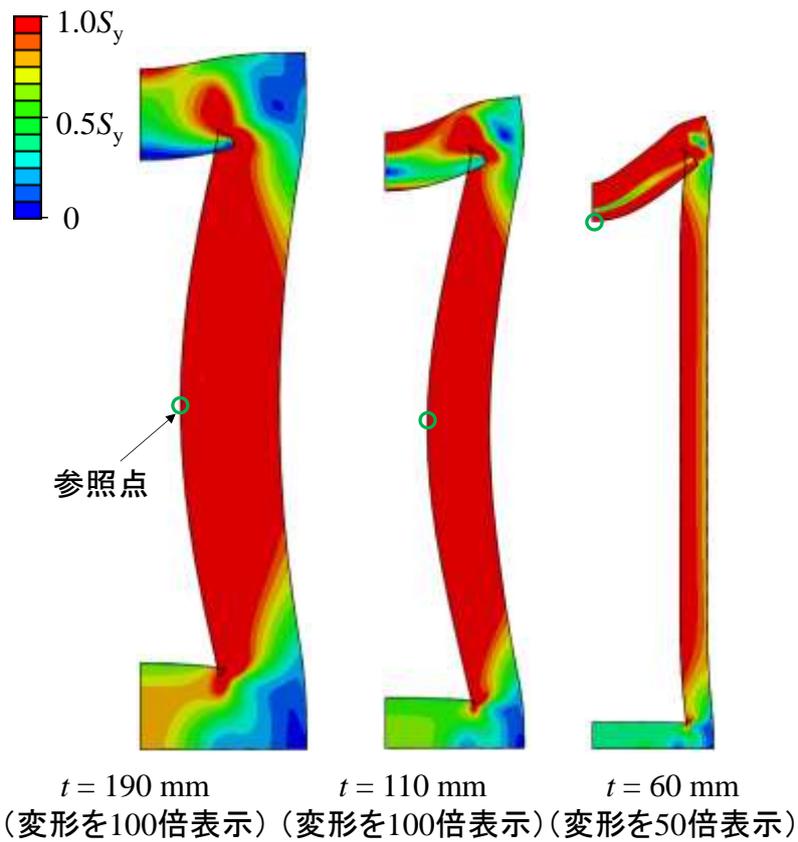


図 6.4.1-9 塑性崩壊時の形状と相当応力分布 ($S_y = 300$ MPa)

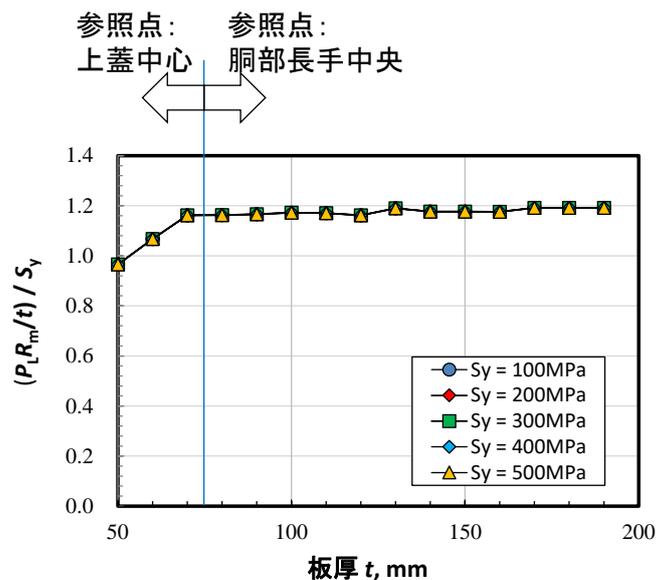


図 6.4.1-10 正規化極限荷重 (詳細メッシュ)

(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、下面にも外圧が負荷され、崩壊荷重に影響をおよぼすことが懸念される。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 6.4.1-11 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 6.4.1-12 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かった。

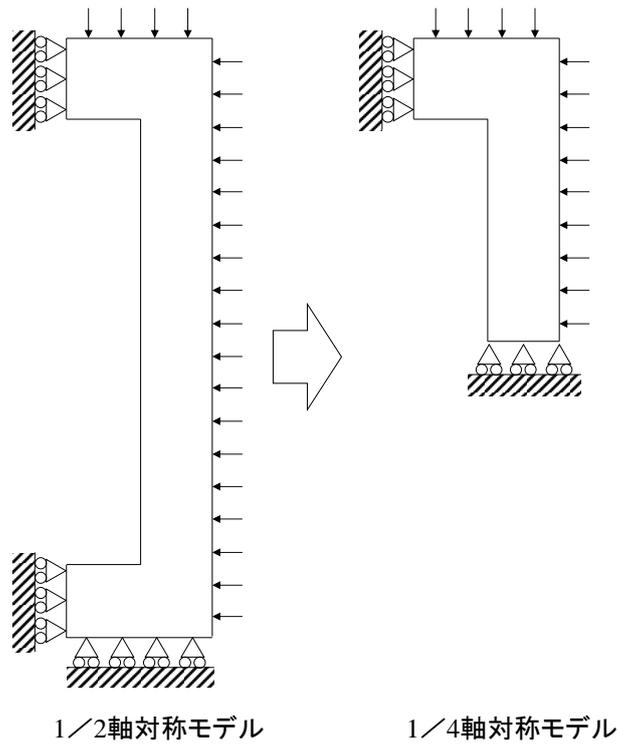


図 6.4.1-11 境界条件の変更

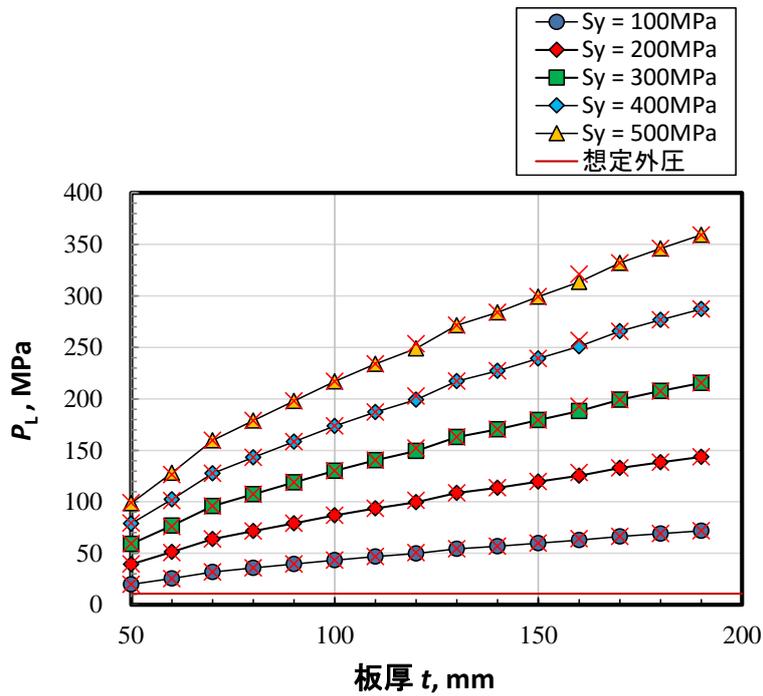


図 6.4.1-12 肉厚に対する極限荷重の変化
(境界条件の影響、“×”は 1/4 軸対称モデルを使用した結果)

(5) 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 MPa、板厚 50 mm の極端な場合でも、崩壊荷重は 19.7 MPa となり、実際に想定される 10.7 MPa よりも十分大きな値となった。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。板厚が 80 mm 以上の場合は、胴部長手中央部の変位が大きくなり、70 mm 以下の場合は上蓋中心部の変位が大きくなり、崩壊時の変形モードが板厚に依存する傾向が見られた。また、崩壊荷重は、降伏強度で正規化できることを確認した。

6.4.2 溶接深さをパラメータとした破損防止

6.2.1 項で述べたオーバーパックの破損形態（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、③未溶接部を起点とした破損）の内、③に対する強度を検討した。落し蓋と平蓋のそれぞれに対して未溶接部を最も応力状態の厳しくなるき裂とみなし、その部位を起点とした破損の有無を調べた。荷重は、操業期間中における吊り上げ荷重、および埋設後の外圧を想定した。未溶接部をき裂と見なした弾塑性破壊評価では、変形により残留応力が解放されるため、溶接残留応力の影響は無視できる。

6.2.2 項（図 6.2.1-1）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（操業期間中）、または脆性破壊（埋設後）、および塑性崩壊（操業期間中および埋設後）となる。未照射の炭素鋼を対象にした場合、き裂を起点とした破壊の破壊モードは脆性破壊ではなく、弾塑性破壊となる[5]。そして、照射により脆化（硬化）すると、破壊モードが弾塑性破壊から脆性破壊に変化する。

以上の状況を鑑み、構造健全性評価のために確認しておく必要のある荷重、破壊モードと構造健全性評価の方法の組み合わせ（解析パターン）は表 6.4.2-1 のようになる。埋設前の操業期間中は、「吊り上げ荷重による崩壊解析」と「吊り上げ荷重による弾塑性解析」を実施した。また、埋設後を想定した解析では、「外圧による崩壊解析」を実施した。4 項目の埋設後の外圧による脆性破壊は人工バリア品質／健全性評価手法の構築（オーバーパック）「溶接部の限界き裂寸法の解析的検討」（H26 年度[7]および H27 年度[8]）において実施済みである。また、埋設後の弾塑性破壊に対しては、安全側の脆性破壊評価の結果を参照することで構造健全性は確認できる。それぞれの解析パターンに対して、溶接深さを変化させながら破壊荷重を算出した。

表 6.4.2-1 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

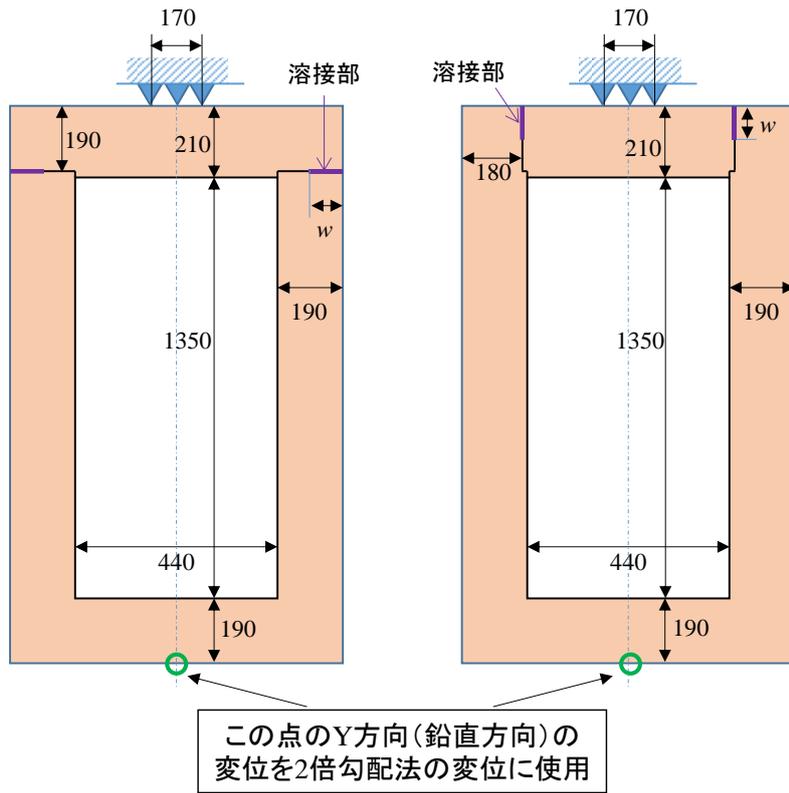
	荷重および破壊モード	想定される破壊形態	備考
操 業 期 間 中	吊り上げ荷重による塑性崩壊	溶接部（未溶接部リガメント部）の塑性崩壊	「吊り上げ荷重による崩壊解析」とよぶ
	吊り上げ荷重による弾塑性破壊	未溶接部先端からの弾塑性破壊	「吊り上げ荷重による弾塑性解析」とよぶ
埋 設 後	外圧による塑性崩壊	溶接部（未溶接部リガメント部）の塑性崩壊	「外圧による崩壊解析」とよぶ
	外圧による脆性破壊	未溶接部先端からの脆性破壊（弾塑性破壊含む）	照射硬化を考慮し、脆性破壊を想定 解析結果は、文献[7][8]の成果を参照

(1) 解析方法

吊り上げ荷重による崩壊解析、吊り上げ荷重による弾塑性解析の解析モデルを図 6.4.2-1 に示す。平蓋と落し蓋それぞれに対応したモデルを適用した。板厚は、操業期間中を対象としているので、減肉を想定しない 190 mm とした。境界条件としては、上端中央の直径 170 mm の範囲を固定し、自重を負荷することで、吊り上げ時に作用する荷重を模擬した。密度は、 $7.86 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とした。溶接深さは w で表し、 w を 10 ~ 180 mm の範囲で変化させながら解析を実施した。吊り上げ荷重による崩壊解析には 2 倍勾配法を適用した。下面中心部を参照点とし、この位置の鉛直方向変位と自重（解析では徐々に負荷した）の関係から崩壊荷重を算出した。降伏強度として、通常の数百 MPa 程度の降伏強度では自重では崩壊しなかった。そこで、降伏強度を 0.5 MPa を基本条件とした。吊り上げ荷重による弾塑性解析では、溶接部の先端（未溶接部との境界）をき裂先端と見なし、応力・ひずみ曲線を想定した弾塑性有限要素解析により J 積分値を算出した。

軸対称 1/2 モデルを用いて、落とし蓋および平蓋を対象に有限要素メッシュを作成した。解析の品質を確保するために、崩壊解析には、6.4.1 項で確認されたメッシュ（詳細メッシュ）と同様の要素分割を適用した。また、J 積分の解析に対しては、人工バリア品質／健全性評価手法の構築（オーバーパック）（平成 27 年度[7]、および平成 28 年度[8]）において、「溶接部の限界き裂寸法の解析的検討」で検証済みのメッシュ分割方法を適用した。

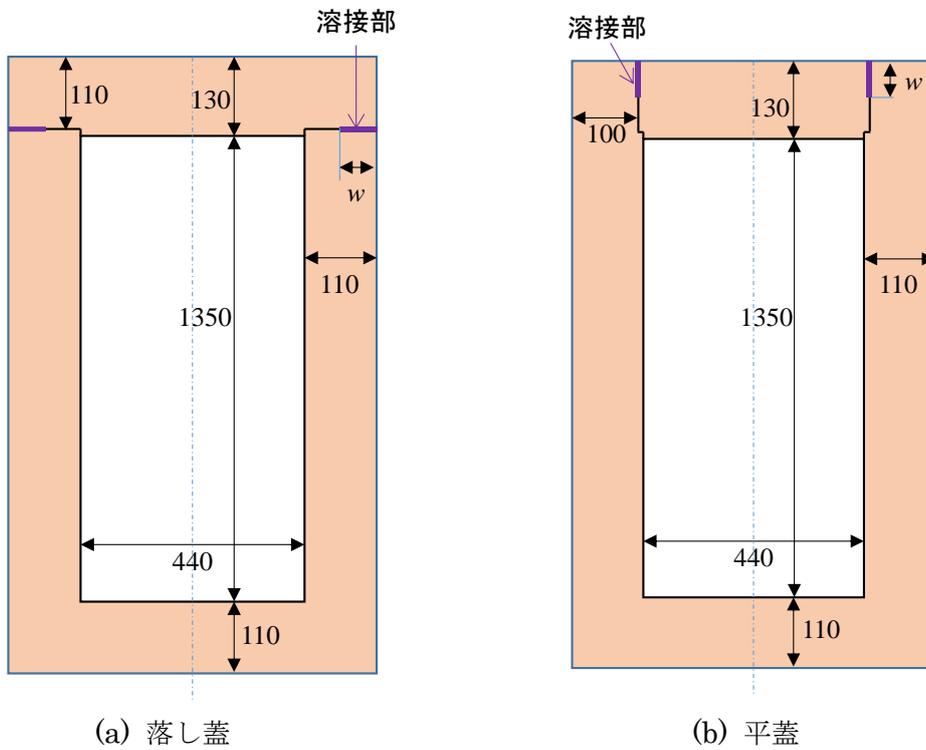
外圧による崩壊解析の解析モデルを図 6.4.2-2 に示す。平蓋と落し蓋それぞれに対応したモデルを適用した。板厚は、減肉を最大限に考慮した 110 mm とした。胴部側面および上蓋上面より一様な外圧を負荷し、崩壊荷重を 2 倍勾配法により算出した。変位の算出においては、上蓋中心部、および胴部長手中央部（図 6.4.1-3 参照）の変位を参照した。6.4.1 項で適用した軸対称 1/2 モデル（詳細メッシュ）と同様の要素分割と境界条件を適用した。降伏強度は 300 MPa とした。



(a) 落とし蓋

(b) 平蓋

図 6.4.2-1 「吊り上げ荷重による崩壊解析」および「吊り上げ荷重による弾塑性解析」の解析モデル (単位: mm)



(a) 落とし蓋

(b) 平蓋

図 6.4.2-2 「外圧による崩壊解析」の解析モデル (単位: mm)

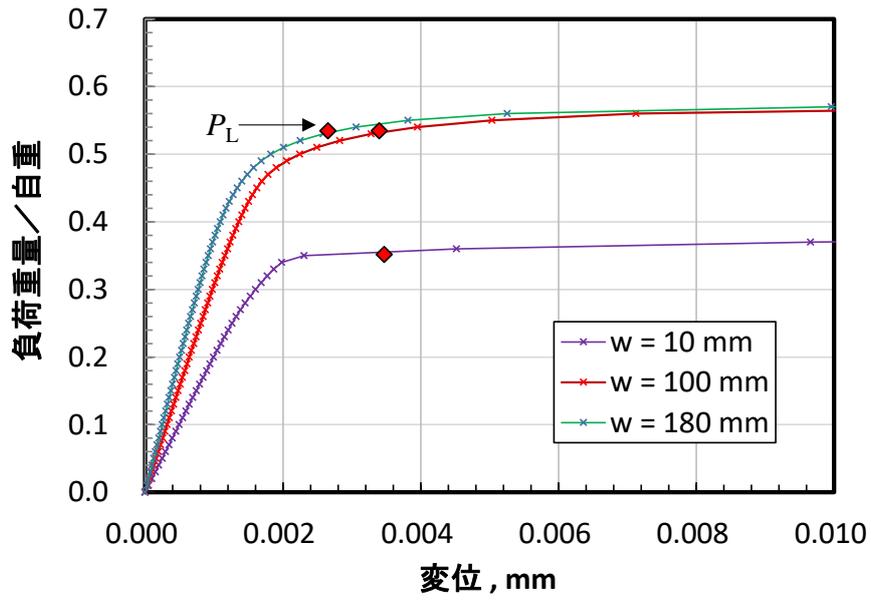
(2) 吊り上げ荷重による崩壊解析

自重を徐々に負荷した場合の参照点の変位を図 6.4.2-3 に示す。降伏強度は、溶接深さ w を 10 ～ 180 mm の条件で崩壊が発生するよう $S_y = 0.5 \text{ MPa}$ としている。 $S_y = 100 \text{ MPa}$ では自重に対して崩壊することはなかった。溶接深さが小さくなるほど、未溶接部の範囲が大きくなり、小さい負荷で崩壊するようになる。崩壊時の変形と相当応力分布を図 6.4.2-4 に示す。平蓋、落し蓋いずれの場合も、応力は上蓋中央部と、未溶接部の先端近傍に集中していることがわかる。溶接深さが大きい場合は上蓋中央部が、溶接深さが小さくなると（未溶接部分が大きくなると）未溶接部先端で崩壊が発生している。

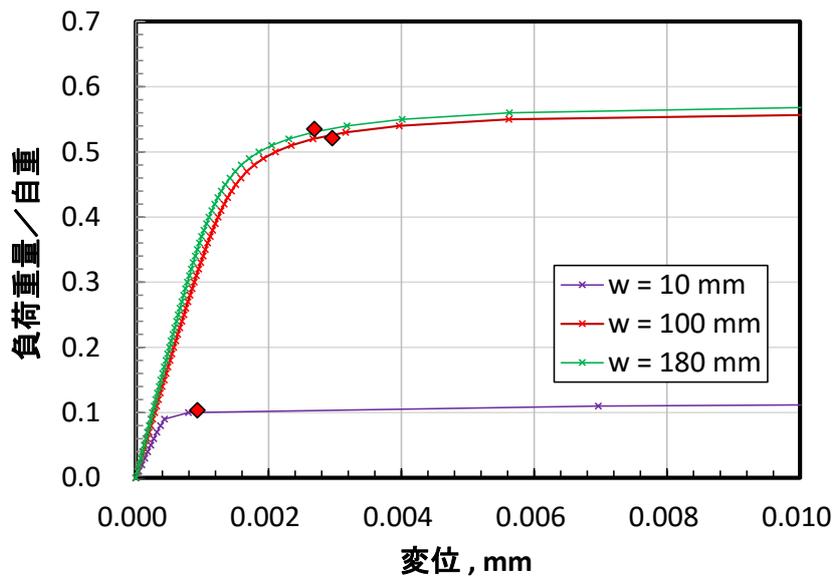
解析で仮定した $S_y = 0.5 \text{ MPa}$ は実際の降伏強度とは乖離している。そこで、崩壊が発生する限界の降伏強度を算出した。図 6.4.2-3 では $S_y = 0.5 \text{ MPa}$ としており、 P_L はいずれの場合も自重を下回っている。先の解析より、崩壊荷重は降伏強度に対して比例的に増加することから、自重により崩壊しない限界の降伏強度 $S_{y(\text{limit})}$ は次式で算出することができる。

$$S_{y(\text{limit})} = \frac{S_y (= 0.5 \text{ MPa})}{(P_L / \text{自重})} \quad \text{式 (6.4.2-1)}$$

図 6.4.2-5 に算出された $S_{y(\text{limit})}$ と w の関係を示す。溶接深さが大きい場合は、自重を支えるのに必要な S_y はおおよそ 1 MPa となる。 w が 60 mm より小さくなると $S_{y(\text{limit})}$ が増加するが、 $w = 10 \text{ mm}$ の場合でも、 $S_{y(\text{limit})}$ は 5 MPa より大きくなることはなかった。実際には、減肉代の 40 mm 分の溶接厚さは確保されることになる。一般的な炭素鋼の S_y は 200 MPa より大きいことを考えれば、吊り上げ荷重に対する崩壊強度は十分であると判断できる。例えば、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。



(a) 平蓋



(b) 落とし蓋

図 6.4.2-3 負荷（自重）と変位の関係($S_y = 0.5 \text{ MPa}$)

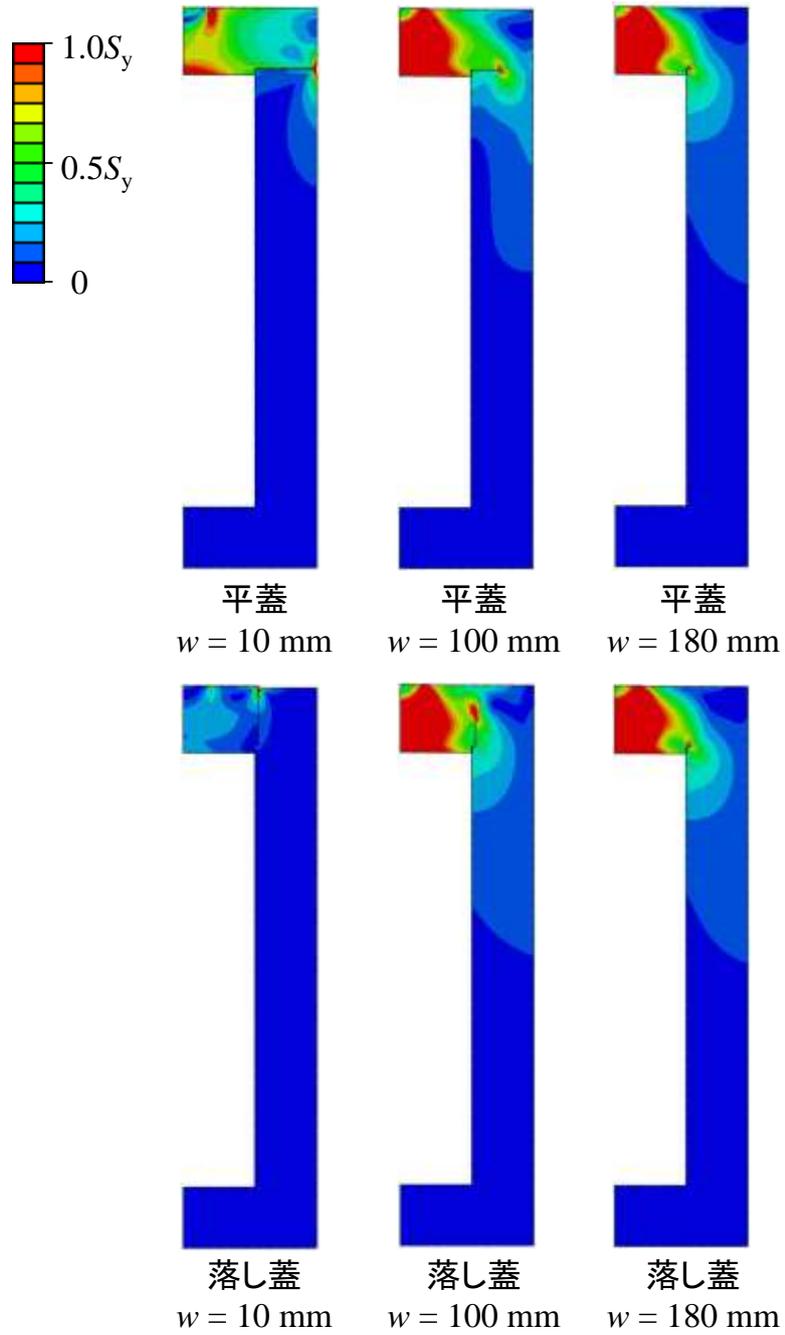


図 6.4.2-4 塑性崩壊時の形状と相当応力分布 (変形を 1,000 倍して表示、 $S_y = 0.5 \text{ MPa}$)

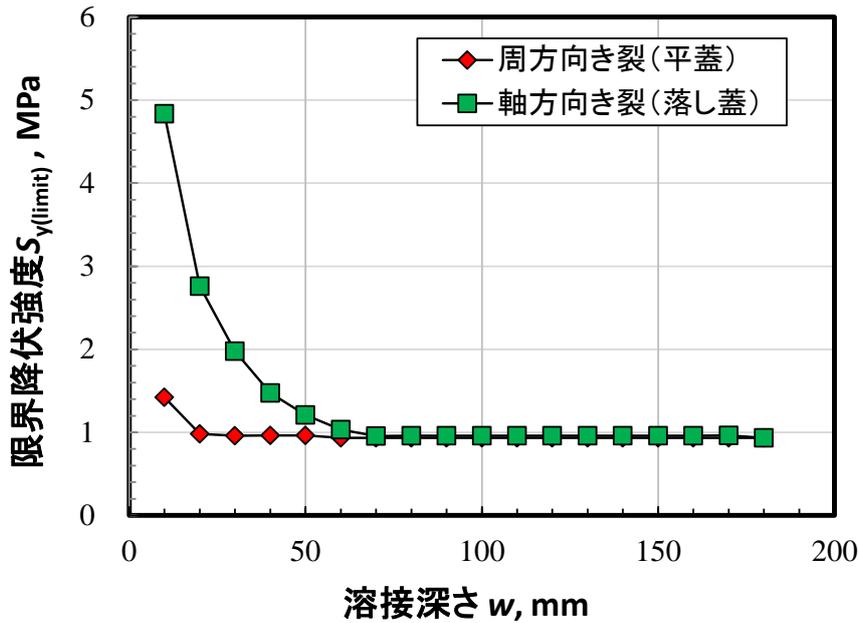


図 6.4.2-5 自重を支えるのに求められる限界の降伏強度

(3) 吊り上げ荷重による弾塑性解析

溶接深さが小さい場合、未溶接部をき裂とみなせば、その先端を起点とした破壊が生じる可能性がある。先に述べたように、破壊モードとして弾塑性破壊が想定され、その場合の駆動力は J 積分となる。そこで、自重を荷重した場合の、未溶接部先端の J 積分を弾塑性解析により算出した。

弾塑性解析には、応力・ひずみ曲線が必要となる。本業務では、代表的な炭素鋼である SM400 および SM490 を対象に解析を行った。これらの材料の応力・ひずみ曲線を図 6.4.2-6 に示す。これらの応力 σ とひずみ ε の関係は、次式の Ramberg-Osgood 則によって近似されている。

$$\frac{E\varepsilon}{\sigma_y} = \frac{\sigma}{\sigma_y} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^n \quad \text{式 (6.4.2-2)}$$

σ_y は材料の降伏強度を示す。 α と n は定数で、一様伸びの 80% 以下のデータを用いた回帰分析によって求めた。 σ_y および α と n は表 6.4.2-2 に示している。

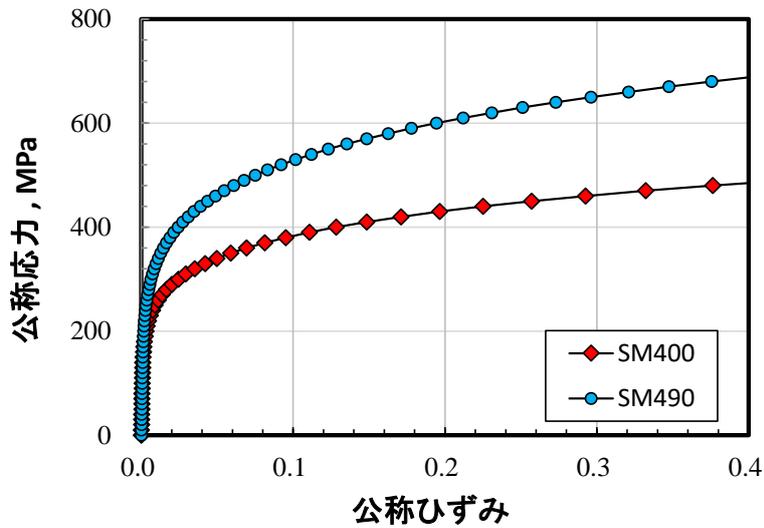
得られた J 積分を図 6.4.2-7 に示す。一般的に、J 積分はき裂が長くなるほど大きくなる。したがって、溶接深さ w が小さくなると、未溶接部 (き裂) が長くなり、J 積分が大きくなった。SM400 と SM490 でほとんど同じ J 積分が得られた。これは、自重により発生する塑性ひずみが小さかったことによる。つまり、解析結果は弾性解析と同等になったため、J 積分が応力・ひずみ曲線に依存しなかった。

破壊の駆動力である J 積分が材料の強度である破壊靱性値を下回れば破壊は発生しない。応力・ひずみ曲線を得た材料と同一ロット材から得た破壊靱性値を表 6.4.2-2 に示しているが、値として

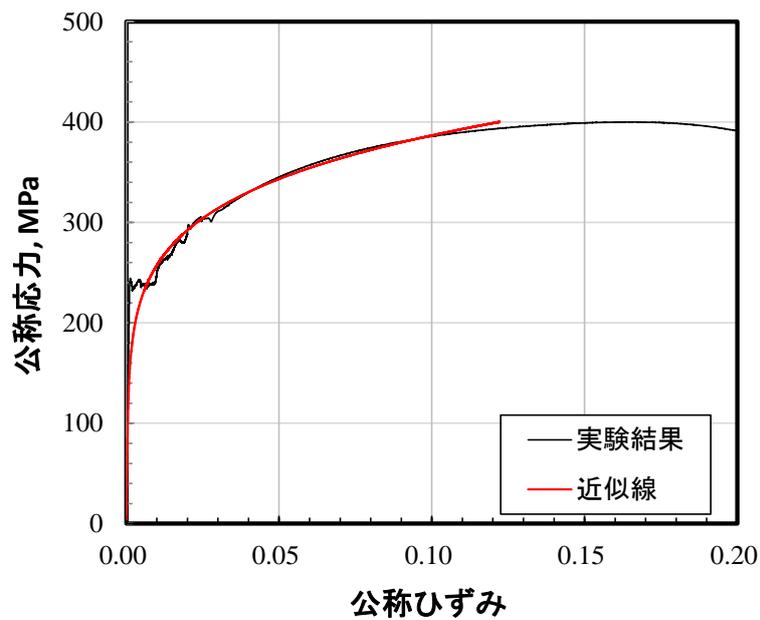
は駆動力である J 積分の 1,000 倍程度の大きさとなっており、弾塑性破壊に対する懸念はないと判断できる。

表 6.4.2-2 炭素鋼の応力・ひずみ曲線の定数および破壊靱性値

	σ_y	α	n	破壊靱性値 J_Q	文献
SM400	238 MPa	4.81	5.95	589 kN/m	
SM490	365 MPa	7.41	5.32	313 kN/m	[9]

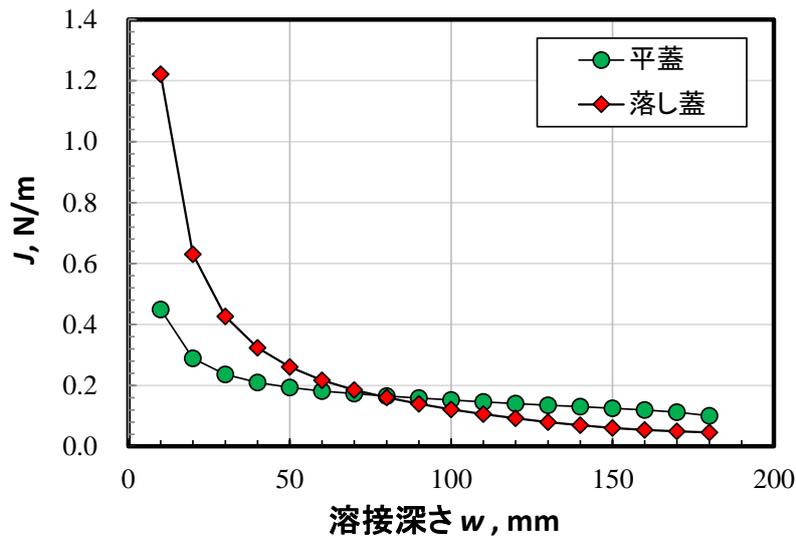


(a) SM400 と SM490 の比較

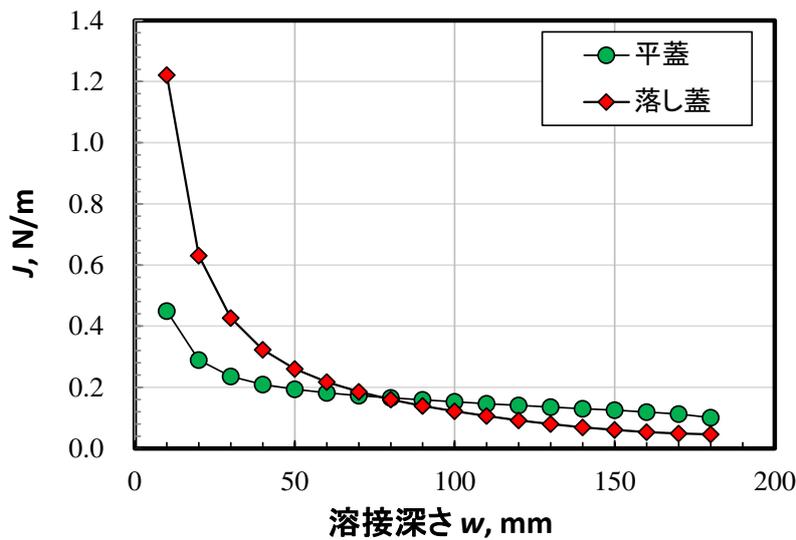


(b) SM400 の実験結果と Ramberg-Osgood 式による近似結果

図 6.4.2-6 解析に用いた応力・ひずみ曲線



(a) SM400



(b) SM490

図 6.4.2-7 J 積分値と溶接深さの関係

6.4.3 外圧による崩壊解析

埋設後の崩壊解析では、減肉後の 110 mm の板厚に対して、溶接深さ w を変化させた場合の崩壊荷重（外圧）を求めた。外圧に対して圧縮の荷重が負荷されることから、溶接深さに対して崩壊荷重が変化せず、溶接深さに関係なく崩壊荷重が同じになる可能性もある。構造健全性を評価する上では、崩壊荷重が変化しないことを確認することも重要となる。降伏強度は $S_y = 300 \text{ MPa}$ とした。

図 6.4.4-1 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 6.4.4-2 に示す。溶接深さ w が 100 mm

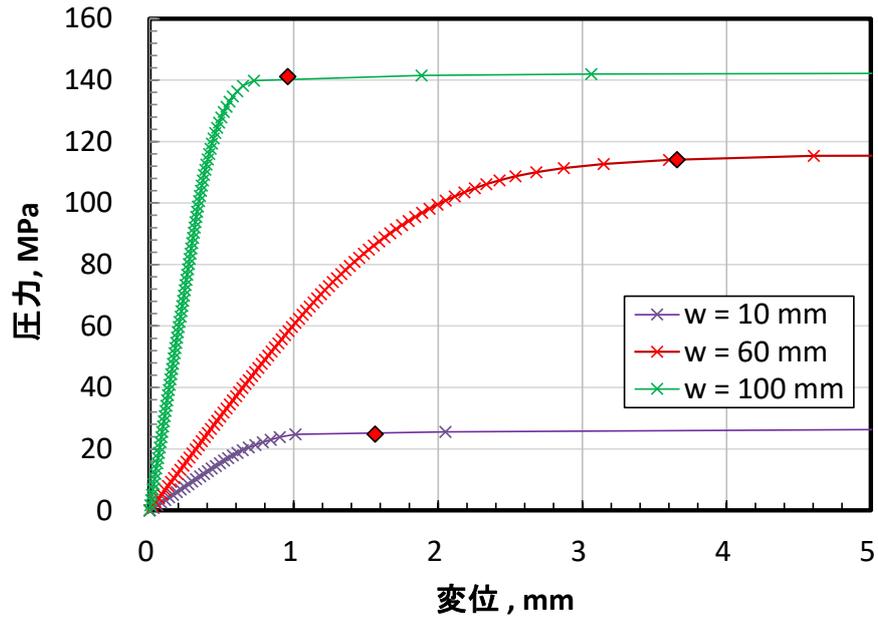
の場合は、胴部長手中央が参照点となり、 $w = 10$ および 60 mm の場合の参照点は上蓋中心となった。平蓋、落とし蓋いずれの場合も、溶接深さが小さくなると、未溶接部の先端近傍に応力が集中し、最終的に未溶接部先端が塑性崩壊した。図 6.4.4-3 は崩壊荷重と溶接深さの関係を示す。溶接深さが大きくなると、崩壊荷重が単調減少した。ただし、平蓋、落とし蓋いずれの場合も、想定される外圧 10.7 MPa には耐えることができる。

図 6.4.4-2 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 6.4.4-4 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 6.4.4-5 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 6.4.1 項で実施した $t = 110 \text{ mm}$ の解析結果とほぼ一致し、参照点も胴部長手中央となった。落とし蓋の場合も、溶接深さが 70 mm 以上の場合の崩壊荷重は平蓋のそれと一致した。しかし、溶接深さが 60 mm より小さくなると崩壊荷重が減少し、参照点も上蓋中心となった。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。図 6.4.4-6 に $w = 10$ の場合の崩壊時の形状と相当応力分布を示す。接触を考慮した場合でも、落とし蓋の場合は、上蓋部の下方向への変形が発生している。

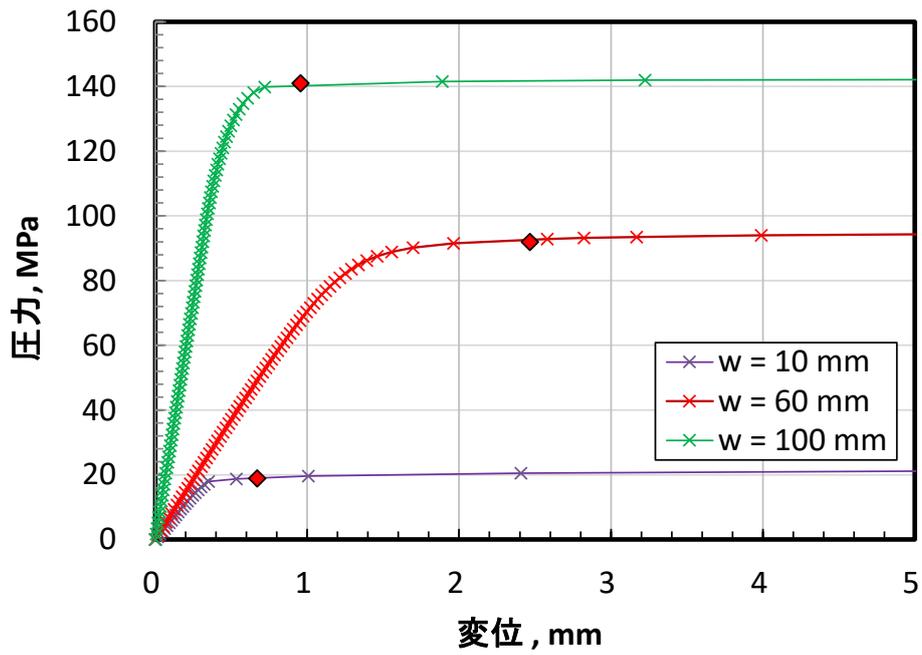
6.4.4 まとめ

本解析では、埋設前の操業期間中を想定した「吊り上げ荷重による崩壊解析」と「吊り上げ荷重による弾塑性解析」、および、埋設後を想定した「外圧による崩壊解析」を実施した。操業期間中の荷重として自重を想定したが、自重に対する材料強度（降伏強度および破壊靱性値）は十分大きく、溶接深さにかかわらず操業期間中の破壊は発生しないと判断された。

埋設後の外圧に対する強度では、平蓋形状に対しては、溶接深さを小さくしても崩壊荷重は低下することはないとの結果が得られた。一方、落とし蓋形状に対しては、溶接深さが小さくなると崩壊強度が低下する傾向が見られた。ただし、崩壊荷重は、想定外圧である 10.7 MPa を上回っており、溶接深さを極端に小さくした場合でも塑性崩壊が発生しないことが確認された。



(a) 平蓋



(b) 落とし蓋

図 6.4.4-1 圧力と変位の関係($S_y = 300$ MPa)

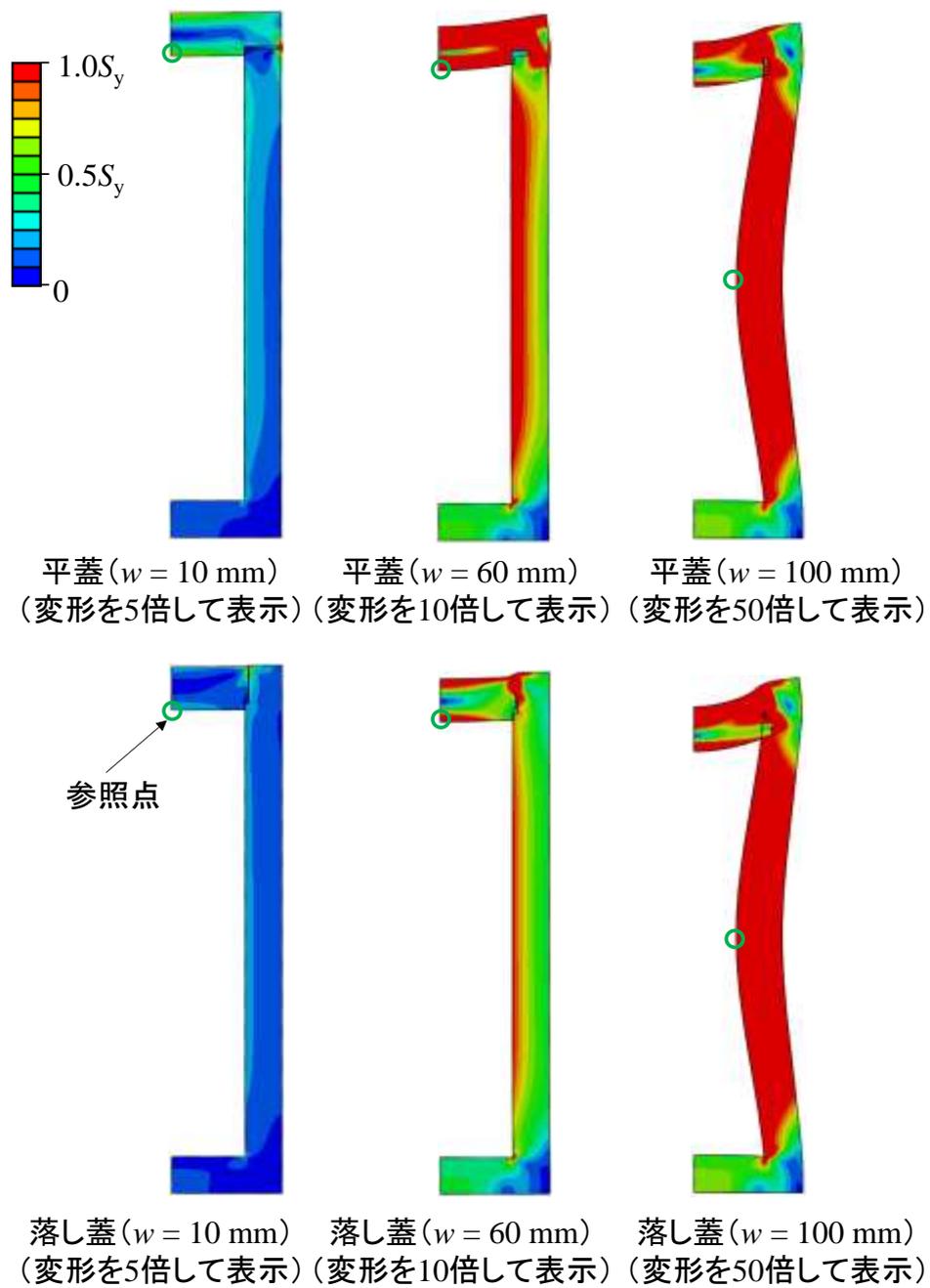


図 6.4.4-2 塑性崩壊時の形状と相当応力分布 ($S_y = 300 \text{ MPa}$)

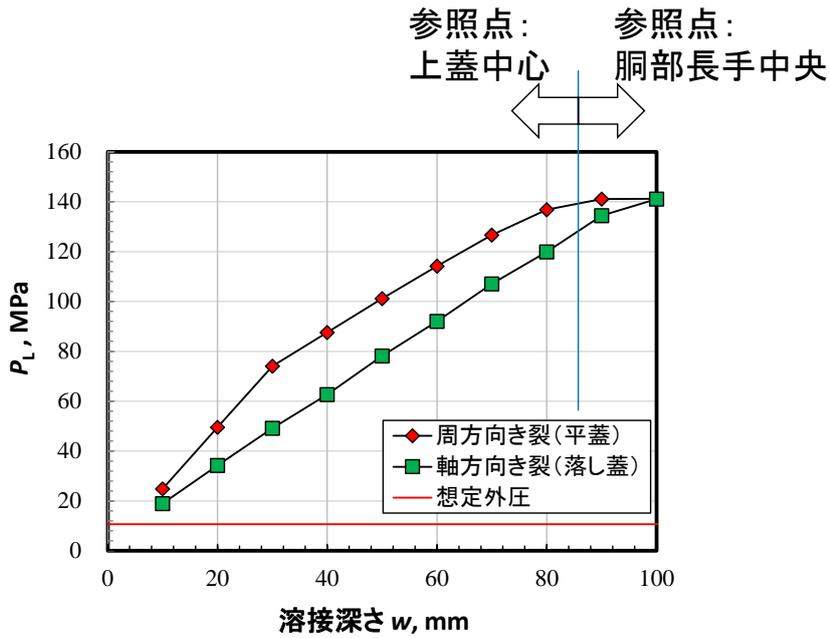
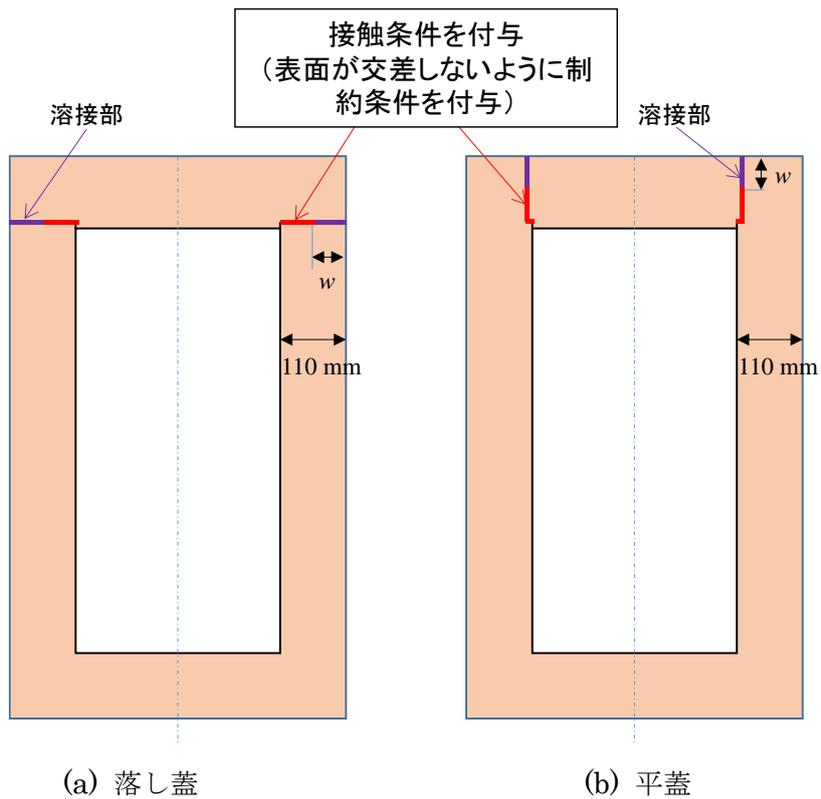


図 6.4.4-3 埋設後の外圧による塑性崩壊 ($S_y = 300 \text{ MPa}$)



(a) 落し蓋

(b) 平蓋

図 6.4.4-4 「外圧による崩壊解析」の解析モデル
(接触条件を付与したモデル)

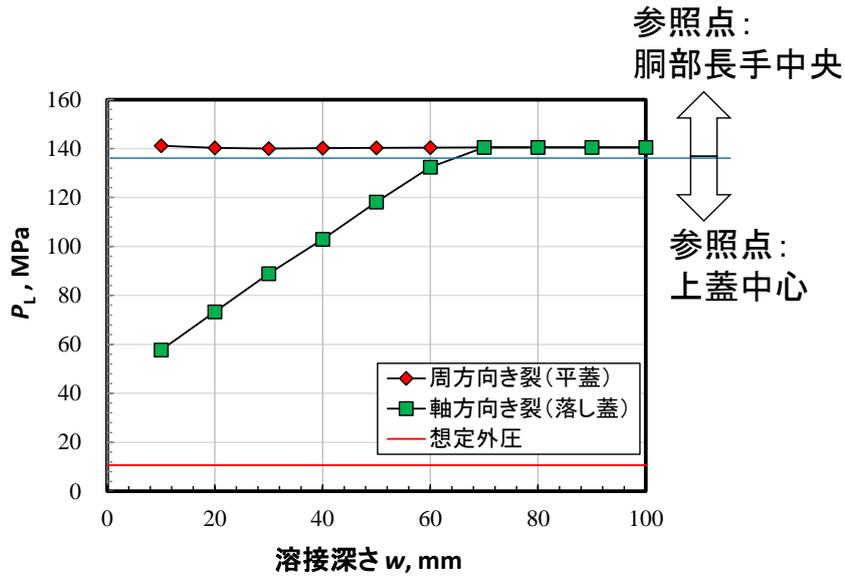


図 6.4.4-5 埋設後の外圧による塑性崩壊
(未溶接部の表面同士が交差しないように接触条件を考慮、 $S_y = 300$ MPa)

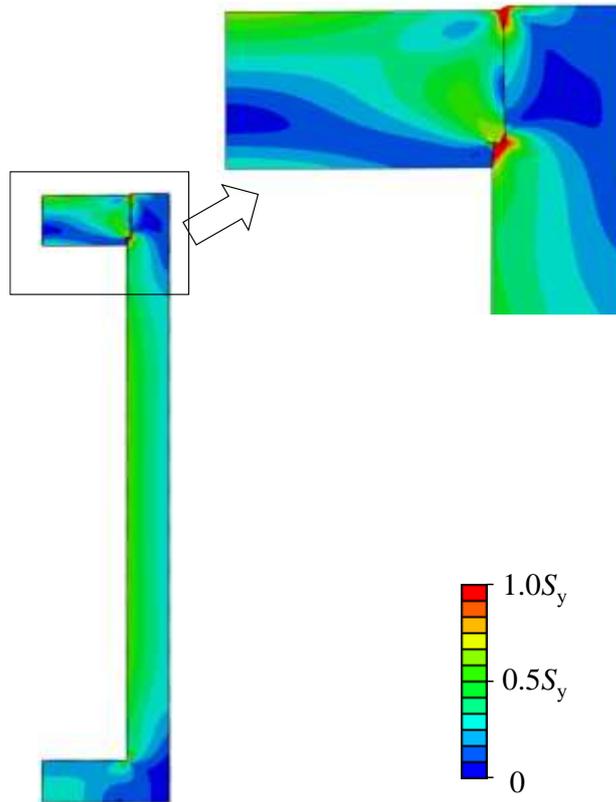


図 6.4.4-6 塑性崩壊時の形状と相当応力分布
(落とし蓋、 $w = 10$ mm、変形を 5 倍して表示、 $S_y = 300$ MPa)

6.4.5 溶接欠陥に対する構造強度

6.2.1 項で述べたオーバーパックの破損形態（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、③未溶接部を起点とした破損）の内、②の溶接欠陥を起点とした破損を発生させないための解析を行った。閉じ込め期間終了時点での破損では、照射を受けた炭素鋼が対象となるので、破損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損）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、限界の溶接欠陥寸法、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 6.4.5-1 の落とし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、半円形状のき裂を溶接部に沿って湾曲させた形状とし、落とし蓋上端からのき裂深さを a とした。溶接深さは、6.4.2 項と同様に、 w を用いて定義した。そして、図 6.4.5-2 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[7]）における「溶接部の限界き裂寸法の解析的検討」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、文献[10]を参照し、100 MPa の一様な残留応力分布を仮定した。解析では、残留応力はき裂面に面圧として負荷した。

き裂深さ a を最小 10 mm、最大 60 mm とし、溶接深さ w は表 6.4.5-1 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は、き裂深さ a が 30 mm 以下の場合は $w = a + 10$ mm、 a が 40 mm 以上の場合は $w = a + 20$ mm となり、全部で 42 ケースとなる。応力拡大係数はき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 6.4.5-1 溶接欠陥に対する構造強度の解析条件

(溶接深さ w とき裂深さ a の組み合わせ、○：解析実施、×：解析実施せず)

溶接深さ w き裂深さ 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	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○

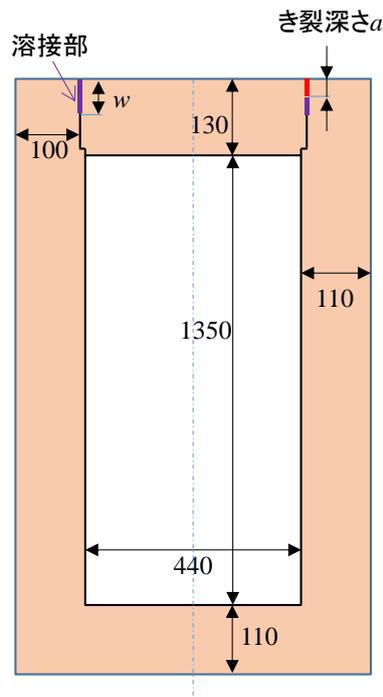


図 6.4.5-1 き裂深さと溶接深さの定義 (単位: mm)

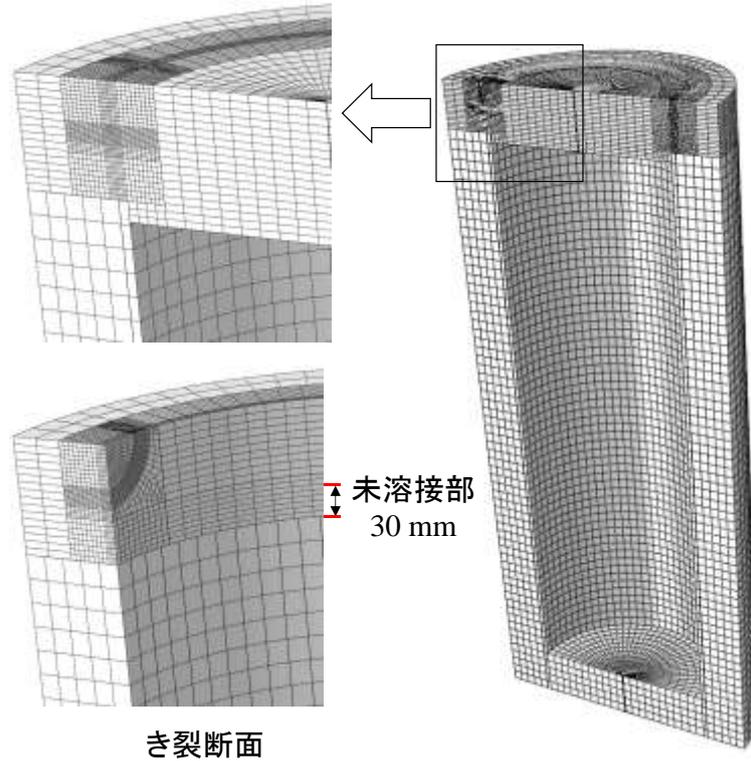


図 6.4.5-2 溶接欠陥に対する強度評価用のメッシュ分割 ($a = 50 \text{ mm}$ 、 $w = 80 \text{ mm}$)

(2) 解析結果

外圧を荷重した場合のモード I の応力拡大係数とき裂深さの関係を図 6.4.5-3 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 $0.3 \text{ MPa m}^{0.5}$ より大きくなることはなかった。とくに、円周方向の外圧に対しては全ての条件で応力拡大係数が負となった。つまり、円周方向の外圧に対してき裂は閉じるように変形した。溶接深さに対しては、単調な変化とはならなかった。一般的に、応力拡大係数はき裂サイズとともに大きくなる。円周方向に外圧を荷重した場合は、き裂深さ a が大きくなるほど応力拡大係数の絶対値は大きくなった。一方、軸方向の外圧に対しては、き裂深さと応力拡大係数の明確な関係は見えなかった。

残留応力を荷重した場合のモード I の応力拡大係数とき裂深さの関係を図 6.4.5-4 に示す。残留応力を荷重した場合の応力拡大係数は $10 \text{ MPa m}^{0.5}$ を超えており、外圧を荷重した場合より相対的に大きい値となった。また、き裂深さ a が大きくなるほど応力拡大係数が増加する傾向が明確に見られた。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 6.4.5-5 に示す。

$$f = \frac{K}{\sigma_R \sqrt{\pi a}} \quad \text{式 (6.4.5-1)}$$

K は応力拡大係数、 σ_R は残留応力を示し、 100 MPa を代入した。正規化残留応力は、き裂が深くなるほど大きくなる傾向を示した。そして、溶接深さが小さくなるにつれて、わずかであるが増

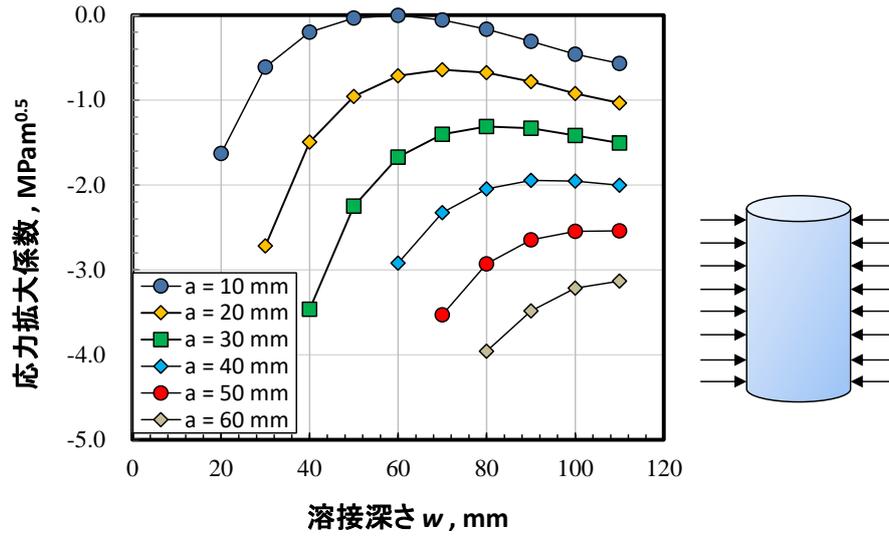
加する傾向を示した。

図 6.4.5-6 は、残留応力負荷時の相当応力分布を示す。残留応力はき裂面に面圧を負荷することで模擬しているため、応力はき裂部分でのみ大きくなっている。そして、残留応力によりき裂が開口する方向に変形している。この図では溶接深さ $w = 80 \text{ mm}$ (未溶接部 30 mm) となっているが、未溶接部先端に応力集中している様子は明確には確認できなかった。残留応力に対する溶接深さの影響は顕著ではないと考えられる。

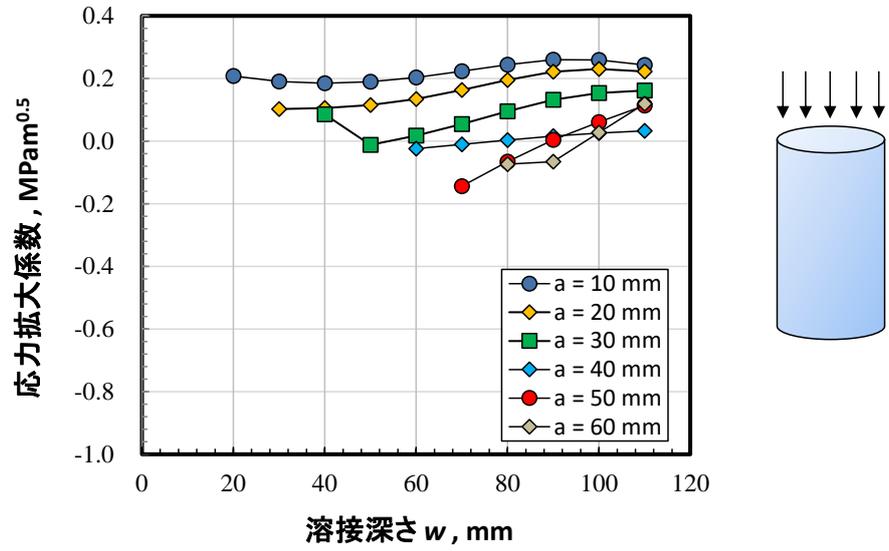
図 6.4.5-4 の結果は 100 MPa の残留応力が作用する場合の応力拡大係数であり、破壊評価では破壊靱性と図 6.4.5-4 の結果を比べることになる。一方、実際の破壊靱性は照射量によって変化する。また、残留応力も溶接施工方法や熱処理によって必ずしも 100 MPa とはならない可能性もある。応力拡大係数は残留応力に対して比例することから、図 6.4.5-4 の結果から、破壊靱性値が与えられた場合に許容される残留応力を算出することができる。図 6.4.5-7 は、破壊靱性値として K_{Ic} が与えられた時、それぞれのき裂深さで許容される残留応力の値を示す。外圧の影響は考慮していない。実線は $w = 0$ の場合の結果を示し、中実のプロットは、表 6.4.5-1 において、各き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き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、検査で発見すべきき裂サイズを推定することができる。

(3) まとめ

き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。求めた限界の溶接欠陥寸法に対して安全係数を考慮することで、溶接施工時の許容欠陥寸法を決定する基準とすることができる。外圧の破損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、検査で発見すべきき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 6.4.5-3 外圧を負荷した場合の応力拡大係数

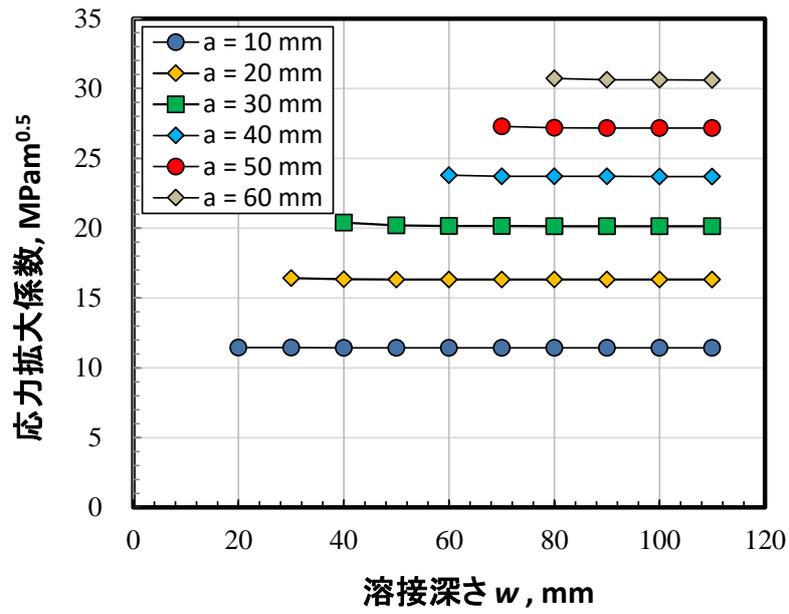


図 6.4.5-4 100 MPa の残留応力を負荷した場合の応力拡大係数

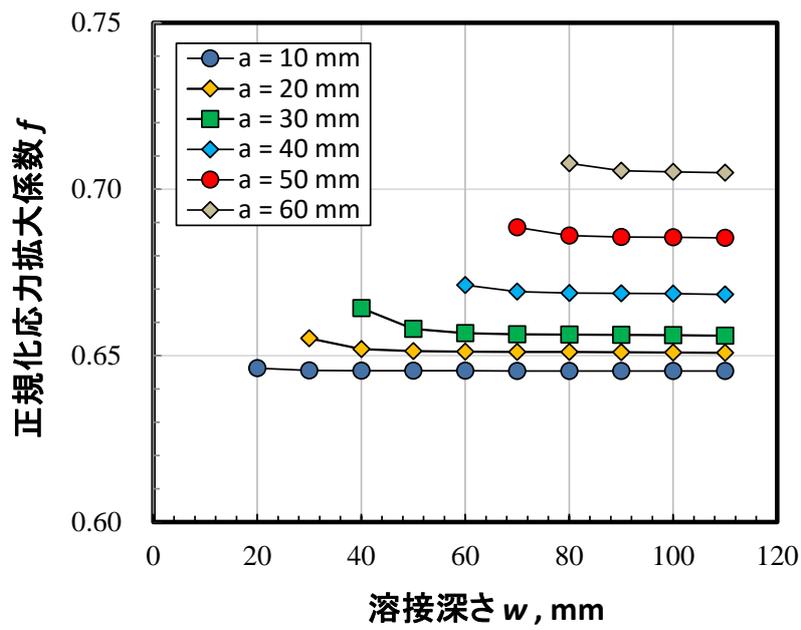


図 6.4.5-5 100 MPa の残留応力を負荷した場合の正規化応力拡大係数

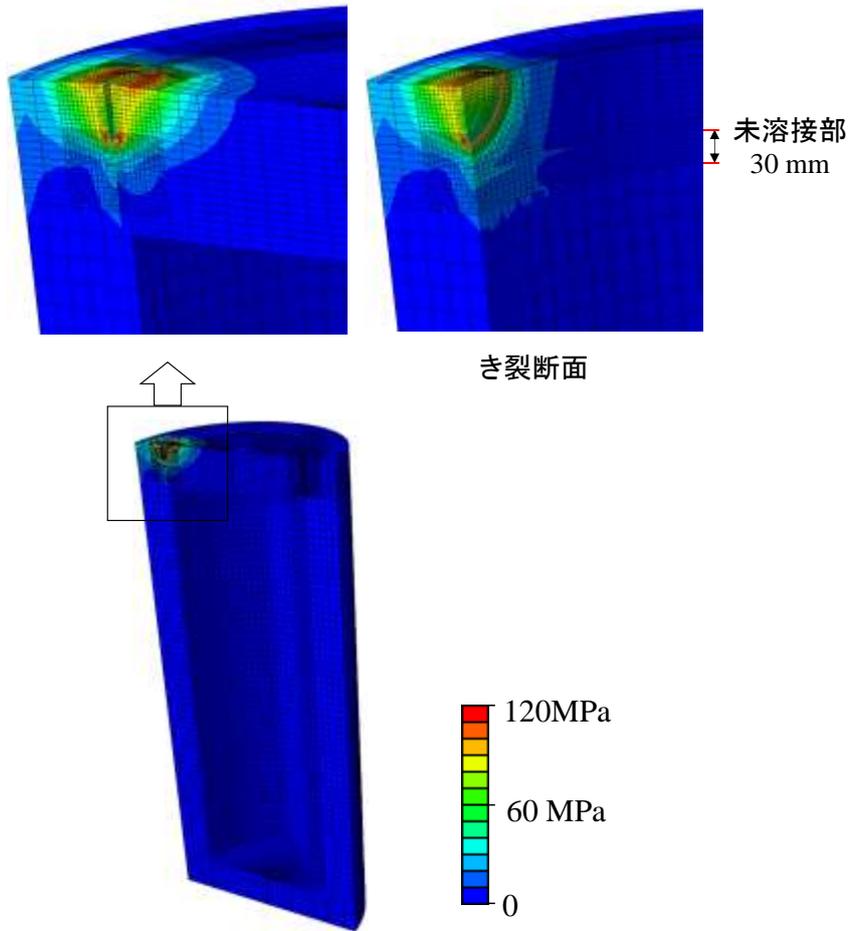


図 6.4.5-6 残留応力を負荷した場合の相当応力分布
($a = 50 \text{ mm}$, $w = 30 \text{ mm}$ 、変形は 100 倍して表示)

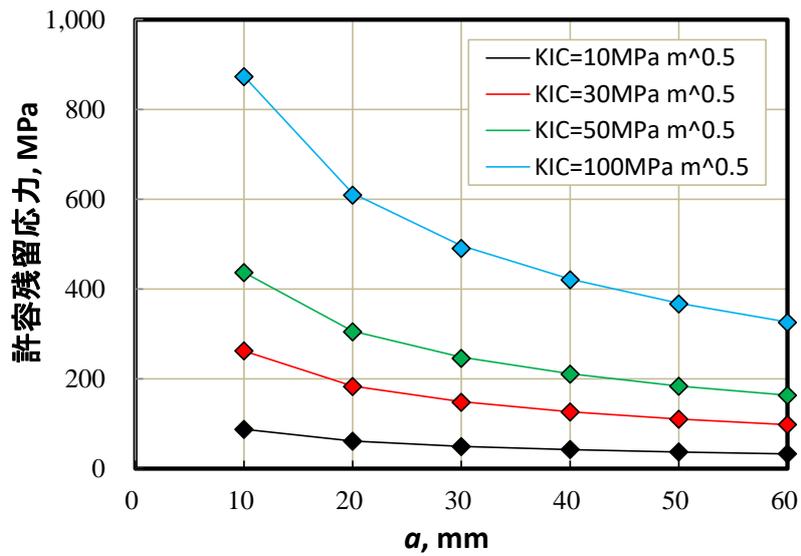


図 6.4.5-7 許容残留応力とき裂深さの関係

6.4.6 複数の溶接欠陥に対する強度の検討

溶接後の検査で欠陥が複数発生した場合の取り扱い方法を検討する。日本機械学会発電用原子力設備規格維持規格[5]などでは、2つの欠陥が接近して存在する場合は、2つの欠陥を合体した一つの欠陥と見なして構造健全性を評価する手順が規定されている。具体的には、2つの欠陥の間の距離 S が欠陥深さの2分の1よりも小さい場合は、2つの欠陥を合体した一つの欠陥として取り扱う[5] (図 6.4.6-1 参照)。本検討においても、この規格を参照しながら、オーバーパックの溶接部において複数の溶接欠陥が発見された場合の評価手順を検討する。

解析では、2つの欠陥を想定した場合の解析を行う。板厚は 110 mm として、同じ寸法の2つの欠陥を含む解析モデルを用いて、欠陥の間の距離と応力拡大係数の関係を調べる。そして、2つの欠陥を合体した欠陥として取り扱うべきしきい距離を決定する。その上で、複数欠陥に対する評価手順を提案する。

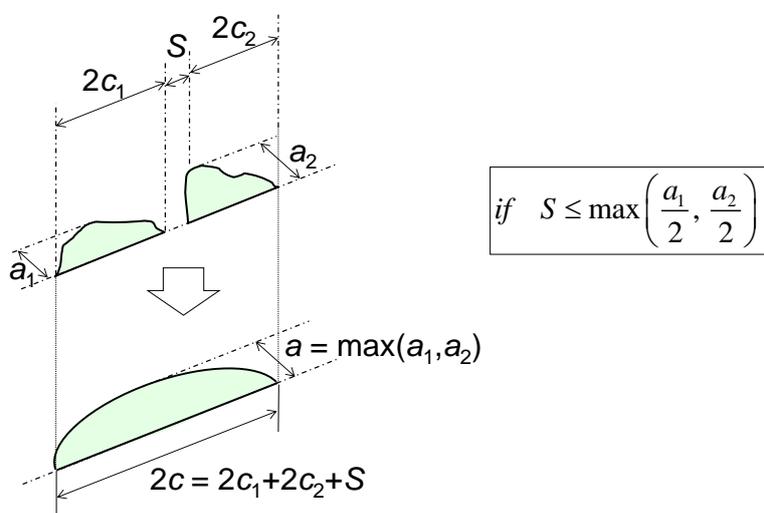


図 6.4.6-1 近接する2つの欠陥のモデル化方法

(1) 解析方法

溶接欠陥を含む図 6.4.6-2 のモデルを対象に解析を行う。6.4.5 項の解析と同様に、落とし蓋を対象とし、板厚は、減肉を最大限に想定して 110 mm とした。溶接欠陥は、半円形状のき裂を溶接部に沿って湾曲させた形状とし、落とし蓋上端からのき裂深さを a とした。溶接深さは、 w を用いて定義した。き裂間距離は S とした。そして、図 6.4.6-3 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。6.4.5 項で用いたメッシュと同等の分割方法を適用した。同じ大きさの2つのき裂を想定しているため、2つのき裂の中間を対称面に設定し、2分の1のモデルを作成した。荷重は、6.4.5 項と同様に、100 MPa の一様残留応力分布を仮定した。

き裂深さ a を 10 mm、30 mm および 50 mm とし、溶接深さは $w=110$ mm とした。溶接深さの影響を考察するため、 $a=50$ mm の場合のみ、 $w=70$ mm とした解析も実施した。き裂間距離 S は $0.5a$ から $2a$ までの範囲を $0.1a$ ずつ変化させた。応力拡大係数は、き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。

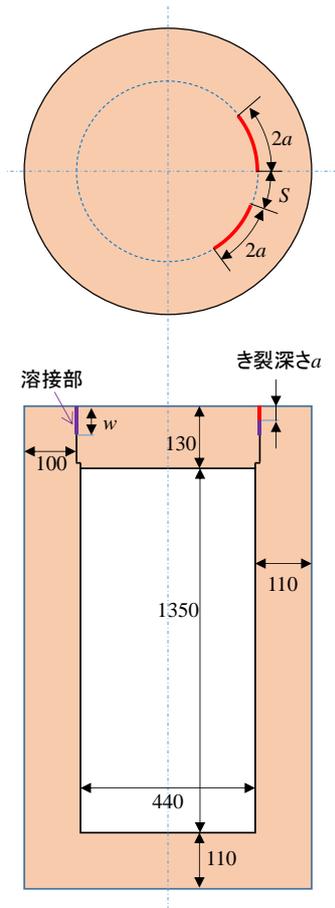


図 6.4.6-2 き裂深さと溶接深さの定義 (単位: mm)

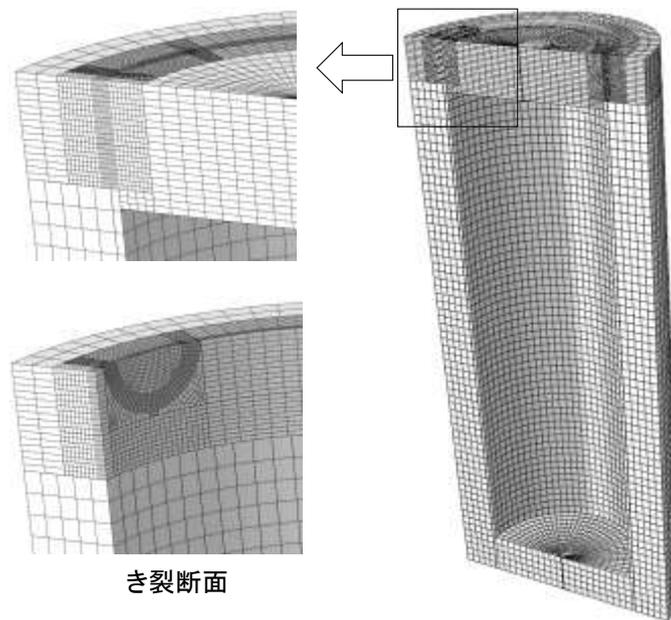


図 6.4.6-3 複数の溶接欠陥に対する強度評価用のメッシュ分割
($a = 50 \text{ mm}$ 、 $w = 110 \text{ mm}$ 、 $S = a$)

(2) 解析結果

き裂深さ 50 mm、溶接深さ 110 mm の場合のき裂前縁に沿った応力拡大係数の分布を図 6.4.6-4 に示す。き裂先端位置は θ で定義し、 $\theta = 180^\circ$ が隣接き裂に近い方の先端を示す。 $\theta = 180^\circ$ に近くなると応力拡大係数が大きくなっており、その程度はき裂間の距離 S が小さいほど顕著であった。図には 6.4.5 項で算出した $a = 50$ mm、 $w = 110$ mm の結果も示しているが、複数のき裂を有する場合の応力拡大係数が、き裂間の力学的相互作用によって大きくなっている。応力拡大係数はき裂間距離が大きくなると減少し、 S が $2a$ のときはき裂が単独で存在する場合（「単き裂」と表示）と同等の値となった。図 6.4.6-5 は、残留応力負荷時の相当応力分布を示す。残留応力によりき裂が開口し、き裂先端に応力が集中している様子がわかる。対称面側の先端の応力は相対的に大きくなった。

相互作用による応力拡大係数の増加を考察するため、解析で得られた応力拡大係数 K を、同じき裂深さと溶接深さの条件で算出された単き裂の応力拡大係数（6.4.5 項で算出） $K_{(単き裂)}$ で正規化した。図 6.4.6-6 に S/a と $K/K_{(単き裂)}$ の関係を示す。表面点と最深点の応力拡大係数を用いた。表面点の応力拡大係数は図 6.4.6-4 に示すように $\theta = 180^\circ$ で若干低下している。この影響を避けるために表面近傍で応力拡大係数が最大となる $\theta = 177.5^\circ$ における値を用いた。 $K/K_{(単き裂)}$ は S が小さくなるほど大きくなった。とくに、その傾向は表面点で顕著であった。この結果より、溶接欠陥が近接して存在する場合は、相互作用の影響を考慮する必要がある。また、溶接深さが 110 mm と 70 mm の場合の差はほとんど見られなかった。

維持規格の合体基準では、 S が $a/2$ よりも近くなると 2 つのき裂を合体させて評価している[5]。過去の検討[11]では、 $S = a/2$ が $K/K_{(単き裂)} = 1.07$ 相当であることが指摘されている。この考え方を考慮すると、図 6.4.6-6 の結果からは、 $S/a < 0.7$ の条件でき裂を合体させることで、維持規格相当の合体基準を満足できることがわかる。この基準は、溶接深さの影響は受けない。相互作用の応力拡大係数に及ぼす影響は、欠陥寸法が同じ場合に最大になることが示されていることから[12]、本解析の結果はき裂寸法の異なるケースに対しても適用することができる。

(3) まとめ

溶接後の検査で欠陥が複数発生した場合の取扱い方法として、近接する欠陥を合体させて評価する方法について検討した。き裂が近接すると応力拡大係数が増加し、その傾向は表面点で顕著であった。現状の維持規格の合体基準をベースに考えると、相互作用の影響を考慮すべき欠陥間の距離は $0.7a$ 相当であるとの考察結果を得た。

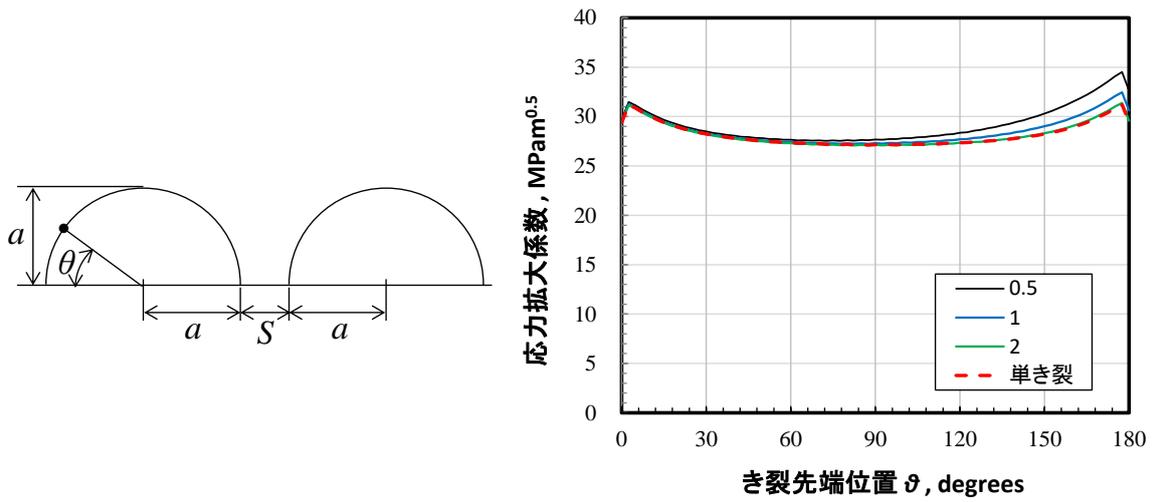


図 6.4.6-4 近接するき裂の応力拡大係数 ($a = 50 \text{ mm}$ 、 $w = 110 \text{ mm}$)

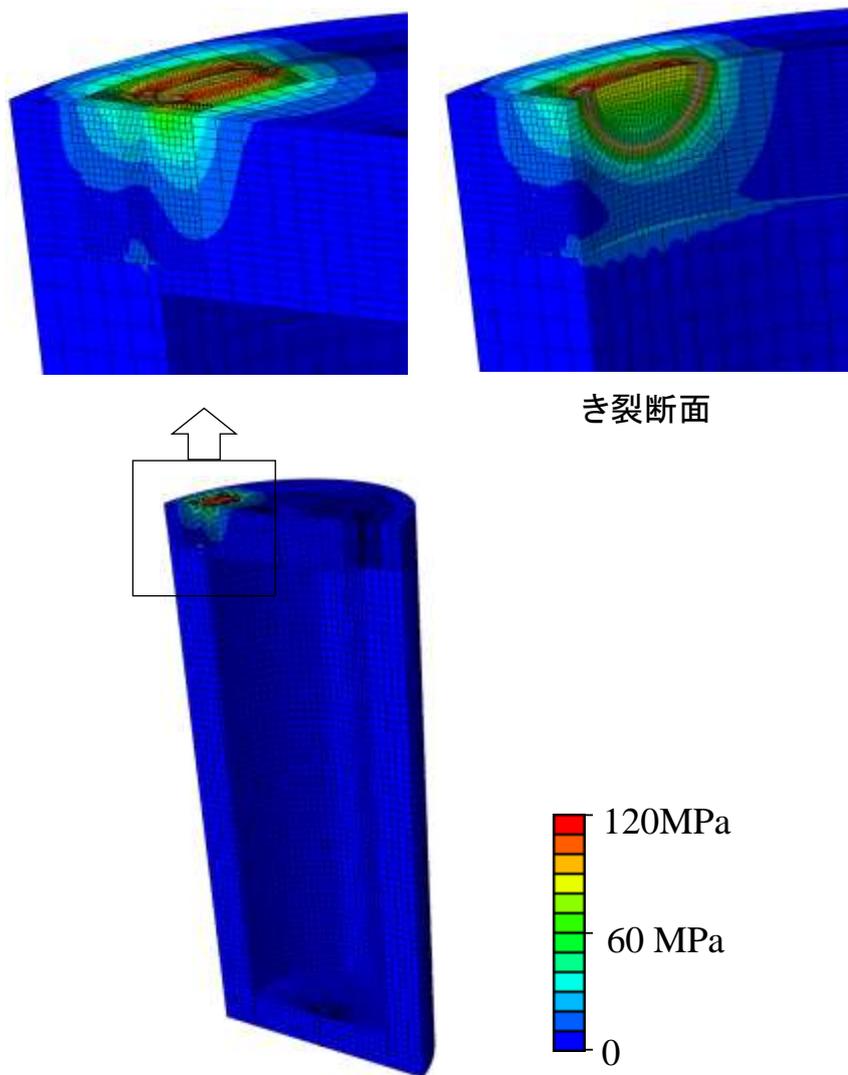
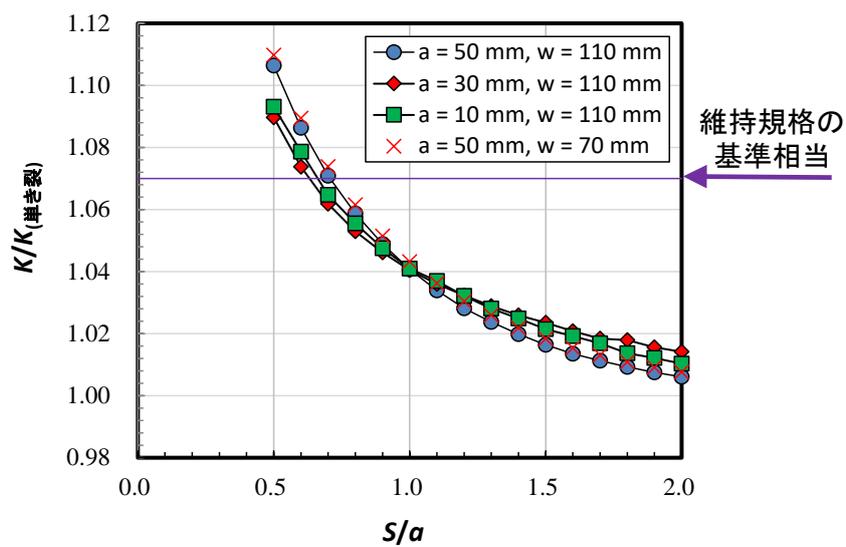
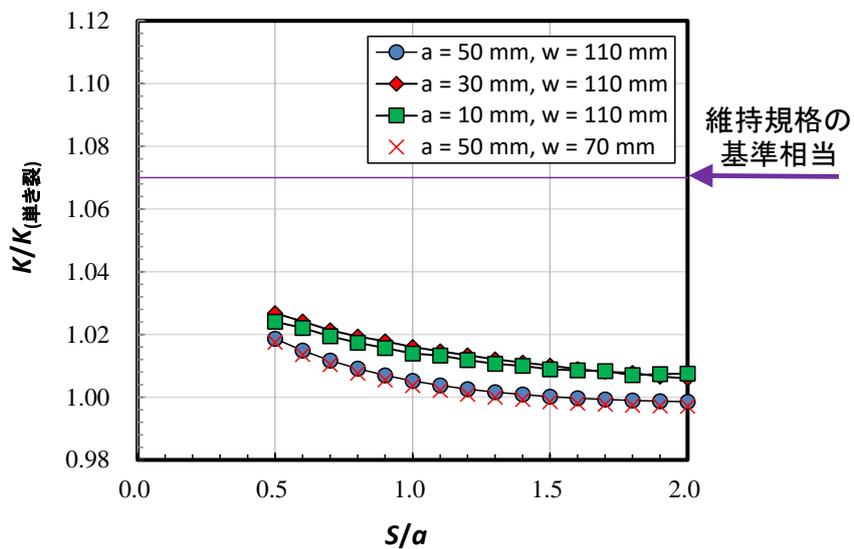


図 6.4.6-5 残留応力を負荷した場合の相当応力分布
($a = 50 \text{ mm}$ 、 $w = 110 \text{ mm}$ 、 $S = a$ 、変形は 100 倍して表示)



(a) 表面点



(b) 最深点

図 6.4.6-6 近接するき裂の応力拡大係数 (a = 50 mm)

6.5 まとめ

本章では、オーバーパックの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の算出、さらには複数の欠陥が近接した場合の取扱い方法について検討した。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した。結果は以下のように要約できる。

- 塑性崩壊が発生する外圧（崩壊荷重）と板厚の関係を調べ結果、降伏強度 100 MPa、板厚 50 mm の極端な場合でも、崩壊荷重は 19.7 MPa となり、実際に想定される 10.7 MPa よりも十分大きな値となった。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。
- 自重に対する材料強度（降伏強度および破壊靱性値）は十分大きく、溶接深さを小さくしても操業期間中の破壊は発生しないと判断された。
- 溶接欠陥を起点とした破壊では溶接残留応力が主な駆動力となり、外圧の影響はほとんど受けないことが示された。許容される残留応力値を算出したり、検査で発見すべきき裂サイズを推定したりするためのデータをまとめた。
- 近接した溶接欠陥は、合体させて取り扱うことが適当である。相互作用の影響を考慮すべき欠陥間の距離は $0.7a$ 相当であるとの考察結果を得た。

第6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, SMM0252 (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] 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] 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).
- [9] 釜谷昌幸：欠陥構造物の破壊強度に及ぼす塑性ひずみの影響、日本機械学会論文集 A 編, Vol. 76、pp.205-214 (2010).
- [10] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 21 年度 地層処分技術調査等委託費 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－(1/2) (2010).
- [11] M. Kamaya, A Criterion for Combination Rule in Flaw Assessment of Parallel Surface Cracks, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 133, No.061204 (2011).
- [12] M. Kamaya, Influence of the Interaction on Stress Intensity Factor of Semi-Elliptical Surface Cracks, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 130, No.011406 (2008).

第7章 炭素鋼の脆化量予測に関する検討

7.1 はじめに

放射線の照射損傷により材料が硬くなる脆化については原子炉圧力容器について良く調べられている。しかし、オーバーパックの照射環境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、オーバーパックのような照射条件での試験データはなく、照射試験データに基づいた脆化量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[2]を適用することは難しい。オーバーパックの脆化がその構造健全性に影響をおよぼすか否かを含めて、照射による損傷量を推定するためには、脆化因子となるマイクロ組織変化を解析により推定する方法が考えられる。また、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。そのため、照射材を模擬した冷間加工材を作製し、加工度により硬さを変化させた炭素鋼の硬さと破壊靱性値の関係を取得する。冷間加工により硬さを変化させた試験片に対して、超微小硬さ試験機とビッカース硬さ試験機による硬さ試験と破壊靱性試験および引張試験を実施し、硬さと破壊靱性の関係を定量的に把握する。

7.2 照射損傷量の予測モデルの構築

平成 26 年度に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[1]。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いため、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[2][3]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[5]（照射温度約 290 [°C]、中性子照射フラックス 1.0×10^{11} [n/cm²/s]）であり、オーバーパックにおける照射条件[5][6]（照射温度 90 [°C]、中性子照射フラックス 3.5×10^3 [n/cm²/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。一般的に、同一の中性子照射量の場合、低照射速度ほど銅析出物（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[7]。すなわち、軽水炉に比べてオーバーパックのように低照射速度の場合には、脆化が進行すると考えられる。

こうした課題を解決するには、JEAC4201-2007 で規定された脆化予測法の外挿性を今一度、脆化の機構論に立ち返って議論し、オーバーパック条件での脆化予測のあいまいさを定量評価する、もしくは、オーバーパックの条件に対しても十分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議論し、脆化種形成の予測に関する検討を行った[8]。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。このことから今年度は、反応速度論による照射脆化予測モデルの構築を行う。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合わせて予測できる。そして、放射線照射によるオーバーパックの最終的なマイクロ構造変化を予測する。

7.2.1 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、液滴は欠陥集合体に置き換えることが可能である。

図 7.2.1-1 に欠陥核生成エネルギーと集合体サイズの関係性を模式的に示す。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 ΔG 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の差で表される。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では、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。

本研究では、欠陥の流入と流出の 2 つのイベントをしっかりと分けて記述することで、平均的には起こらないはずの核生成を取り扱えるようにした。核生成のプロセスをしっかりと取り扱い、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。

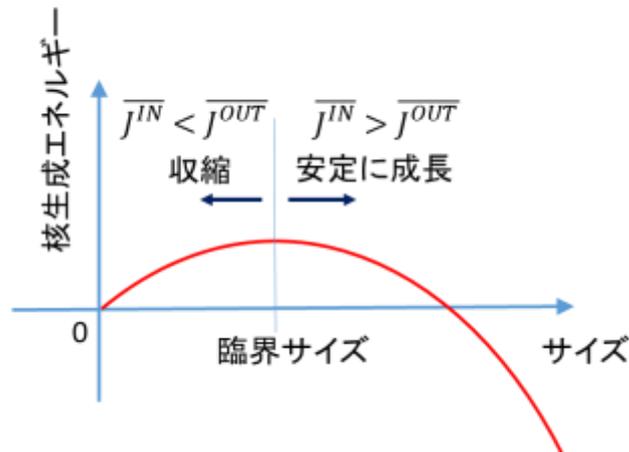


図 7.2.1-1 核生成エネルギーの集合体サイズ依存性

7.2.2 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 ($\sim 10^{-10}$ 秒) よりも長期の欠陥拡散過程 (10^{-6} 秒 \sim) 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、第一原理計算や分子動力学法などの原子スケールのシミュレーション結果や実験結果を用いることが多い。

本研究では、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。

- ① 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。
- ② 材料は不純物の銅を含有した実用銅を仮定し、SIA と空孔、銅原子のみが材料中を拡散する。
- ③ 欠陥の移動エネルギーは、実用銅の実験結果[9],[10]を用いる。また、銅の拡散は空孔拡散機構とする。
- ④ 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[11]を用いる。
- ⑤ 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。
- ⑥ 図 7.2.2-1 に示すように、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。V3Cu3 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。
- ⑦ 図 7.2.2-1 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。

- ⑧ 図 7.2.2-1 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、成長してグリッドを超えた集合体の数から求めた。
- ⑨ 点欠陥の消滅サイト（シンク）は転位線とし、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 7.2.2-1 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[12]により数値積分し、欠陥濃度の経時変化を解いた。本研究の反応速度論モデルに用いたパラメータは表 7.2.2-1 のとおりである。

表 7.2.2-1 反応速度論モデルにおけるパラメータ

格子定数	2.8665 Å [11]
格子間原子移動エネルギー	0.3 eV [9]
空孔移動エネルギー	1.0 eV [10]
銅原子の拡散の活性化エネルギー	1.0 eV
格子間原子形成エネルギー	4.88 eV [11]
空孔形成エネルギー	1.70 eV [11]
銅原子形成エネルギー（置換型）	0.319 eV [11]
転位バイアス	0.22 [13]
転位密度	10^{13} m^{-2}
損傷効率	0.1 [14]

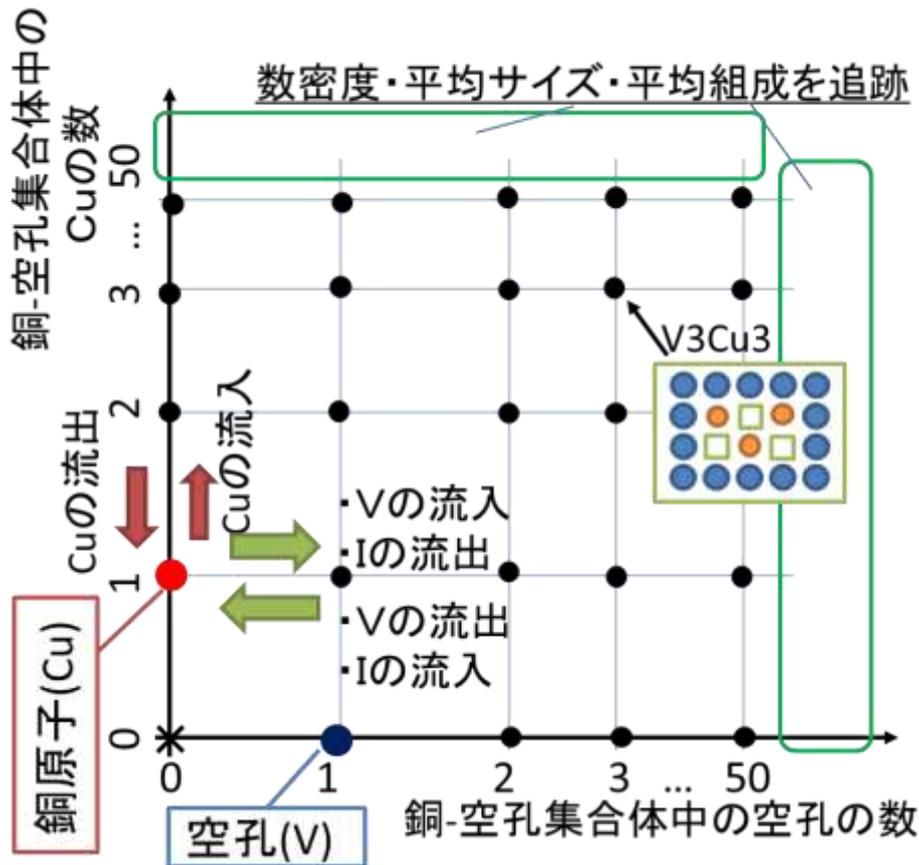


図 7.2.2-1 反応速度論モデルの概要

7.2.3 計算結果および考察

(1) 欠陥濃度の照射量依存性

図 7.2.3-1 に、各欠陥集合体の濃度（数密度）の時間変化を示す。照射条件は、材料試験炉に相当する 10^{-7} [dpa/s]、600 [K]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、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、I2 は格子間原子が 2 つ集まった集合体を意味する。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、欠陥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 7.2.3-1 中には 6 種類の集合体のみを記述しているが、実際の計算では格子間原子集合体はサイズ 50 まで、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 7.2.3-2 は、図 7.2.2-1 に示す銅-空孔集合体中の空孔数と銅原子数から構成されるグリッドを底面に示し、縦軸はそれらの集合体の濃度を表している。照射量が大きくなるにつれて、図 7.2.3-1 では示されていなかった大きいサイズの集合体も

形成していることが確認できる。

各サイズと組成の集合体の濃度から、すべての集合体の数密度、平均直径および平均組成を計算したものが図 7.2.3-3 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。なお、ここでは直径 1 [nm]以上の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。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、平均直径の増加度合いは小さく、数密度が大きく増加する。これは、前年度の結果から転位ループは銅-空孔集合体よりも熱的に安定であり、照射条件が変わっても臨界サイズは 2~3 であることから説明できる。臨界サイズが小さいということは、核生成が生じやすいことを意味する。したがって、生成した格子間原子は、すでに核生成している集合体を成長させる効果よりも新たに核生成する効果の方が大きいため、平均直径は変わらずに数密度が大きくなっている。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、早期に数密度および平均直径は増加して、定常濃度に達する。また、平均組成の結果から、銅原子をあまり含まないボイドが多く形成していることが分かる。これは、陽電子消滅法による実験において、材料試験炉では析出物よりボイドが形成されるという実験結果[15]と一致する。

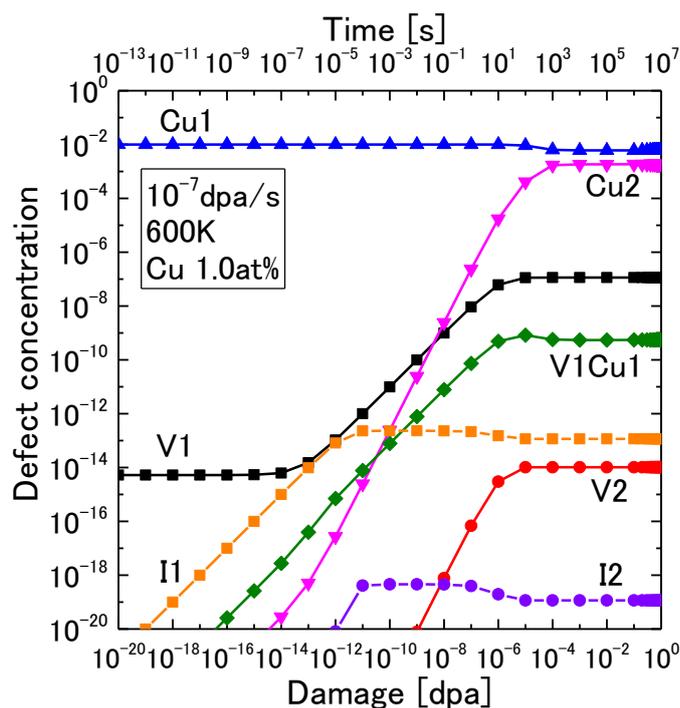


図 7.2.3-1 各欠陥濃度の照射量依存性

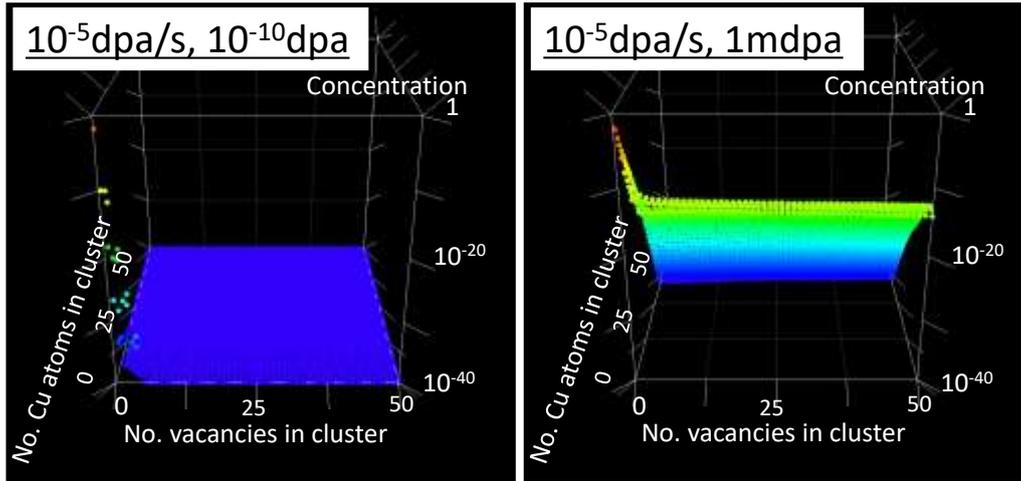


図 7.2.3-2 銅-空孔集合体の濃度変化

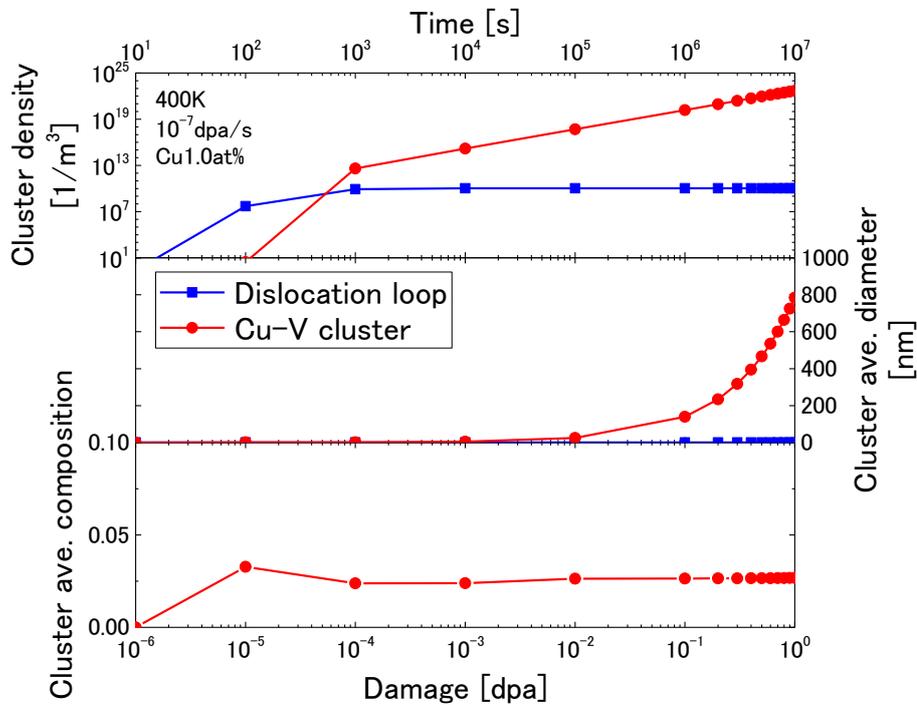


図 7.2.3-3 欠陥集合体の数密度、平均直径および平均組成の照射量依存性

(2) 欠陥集合体形成の損傷速度依存性

オーバパックの損傷速度と実際の商業炉や実験炉での損傷速度が大きく異なっていることから、照射による材料内マイクロ構造変化の損傷速度依存性に最も着目している。照射量 0.001 [dpa]、照射温度 600 [K]における損傷速度に対する銅空孔集合体の平均直径を図 7.2.3-4、数密度を図 7.2.3-5、平均組成を図 7.2.3-6 に示す。なお、組成については集合体中の銅原子の割合で定義した。ここから、損傷速度増加とともに平均直径は減少し、数密度は増加することが分かる。また、損傷速度が高いほど銅原子をあまり含まないボイドが多く形成することもわかる。低損傷速度で

は銅原子集合体が形成され、損傷速度が高くなるとボイドが形成されることは陽電子消滅の実験結果[15]とも一致する。

図 7.2.3-7 には照射量 0.001 [dpa]、照射温度 600 [K]における転位ループの平均直径を示す。損傷速度が変化しても平均直径は変化していない。図 7.2.3-8 には転位ループの数密度を示している。転位ループの数密度は損傷速度の 2 乗に比例して増加することが分かる。これらは前述したように、転位ループは熱的安定性が高く、照射条件によらず臨界サイズが 2~3 であるため、格子間原子は転位ループ成長への寄与よりも核生成への寄与の方が大きくなるためと考えられる。損傷速度の増加につれて、転位ループの数密度が増加する傾向については既存の実験結果[16]とも一致する。

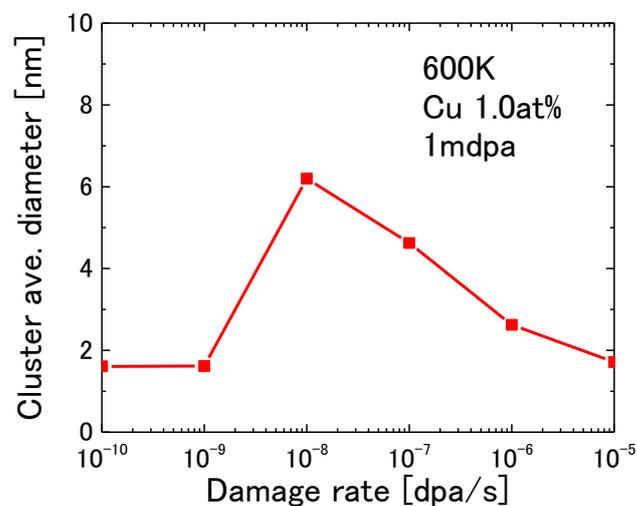


図 7.2.3-4 0.001dpa における銅-空孔集合体の平均直径の損傷速度依存性

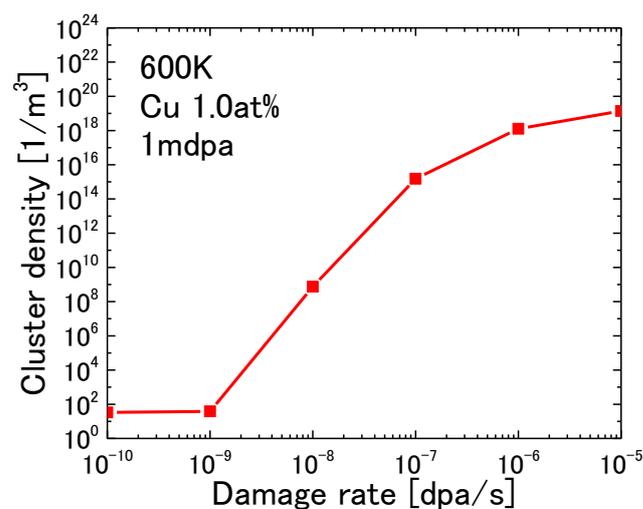


図 7.2.3-5 0.001dpa における銅-空孔集合体の数密度の損傷速度依存性

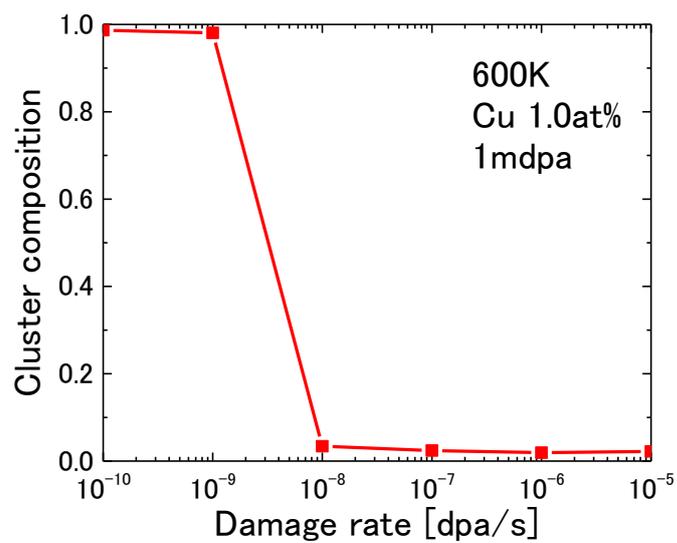


図 7.2.3-6 0.001dpa における銅-空孔集合体の平均組成の損傷速度依存性

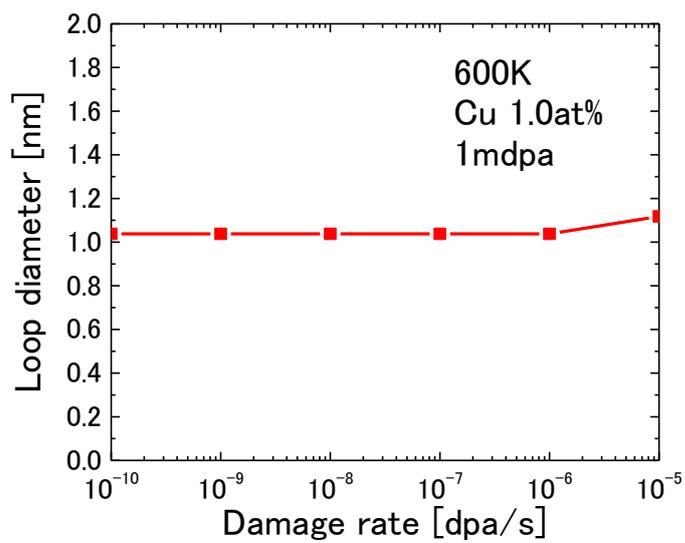


図 7.2.3-7 0.001dpa における転位ループの平均直径の損傷速度依存性

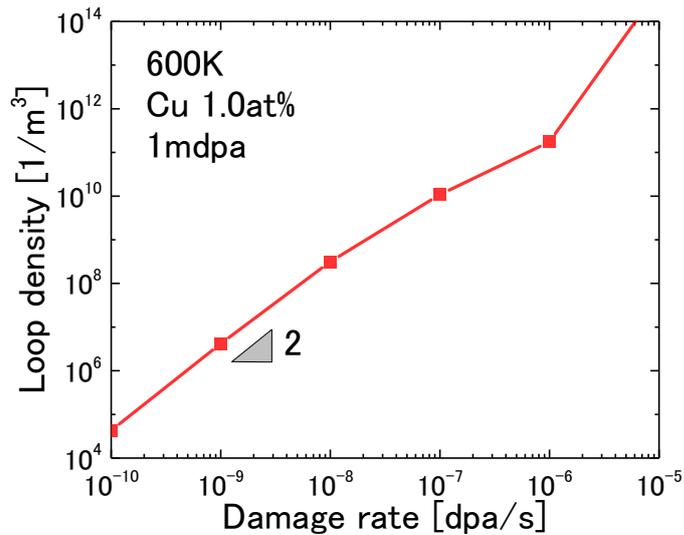


図 7.2.3-8 0.001 dpa における転位ループの数密度の損傷速度依存性

(3) オーバーパックの照射による脆化量の予測

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 [°C]）における脆化量を算出した。本節では臨界サイズ以上のサイズの欠陥集合体を転位ループおよび銅-空孔集合体として取り扱った。図 7.2.3-9 には転位ループおよび銅-空孔集合体の平均直径を示す。平均直径は時間の増加とともに上昇すること、転位ループに比べて銅-空孔集合体の方が直径は大きくなるのが分かる。図 7.2.3-10 には転位ループおよび銅-空孔集合体の数密度を示す。数密度についても、時間の増加とともに増大することが確認できる。また、格子間原子の拡散は早いため、転位ループが早期から形成される。照射後期になると、銅-空孔集合体の数密度も増加する。なお、オーバーパック処分後 1000 年の時点において、転位ループの平均直径と数密度は、 0.46 [nm] および 1.2×10^1 [1/m³]、銅-空孔集合体の平均直径と数密度は、 0.74 [nm] および 3.1×10^9 [1/m³] となった。

照射欠陥の形成による硬さの増加は、一般に Orowan モデル[17]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。

$$\Delta\sigma_{\text{Loop}} = \alpha_{\text{Loop}} \mu b \sqrt{N_{\text{Loop}} d_{\text{Loop}}} \quad \text{式 (7.2.3-1)}$$

$$\Delta\sigma_{(\text{Cu-V cluster})} = \alpha_{(\text{Cu-V cluster})} \mu b \sqrt{N_{(\text{Cu-V cluster})} d_{(\text{Cu-V cluster})}} \quad \text{式 (7.2.3-2)}$$

ここで、 $\Delta\sigma_{\text{Loop}}$ は転位ループ形成による降伏応力の変化量、 $\Delta\sigma_{(\text{Cu-V cluster})}$ は銅-空孔集合体の形成による降伏応力の変化量、 N_{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_{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。 α_{Loop} 、 $\alpha_{(\text{Cu-V cluster})}$ は転位ループと銅-空

孔集合体の硬化指数であり、ここではどちらも 0.3 とした。 μ 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。最終的な降伏応力の増加量は以下の式で求めることができる。

$$\Delta\sigma = \sqrt{(\Delta\sigma_{\text{LOOP}})^2 + (\Delta\sigma_{\text{Cu-V cluster}})^2} \quad \text{式 (7.2.3-3)}$$

照射量に対する降伏応力増加量を図 7.2.3-11 に示す。時間の増加とともに材料が硬化し、照射後期には銅-空孔集合体が形成されるため、降伏応力の増分はさらに増加することが確認できる。Orowan モデルを用いた場合には、オーバーパックにガラス固化体を挿入してから 1,000 年の時点での降伏応力増加量は 2.5×10^{-5} [MPa]、10 万年では 0.1 [MPa]となった。

今後は、照射試験片の分析結果を用いて、解析モデルの妥当性について検討し、必要に応じてモデルを改良していくとともに、転位密度や欠陥移動エネルギーなどの違いによって生じる脆化予測量のばらつきについて検討する。

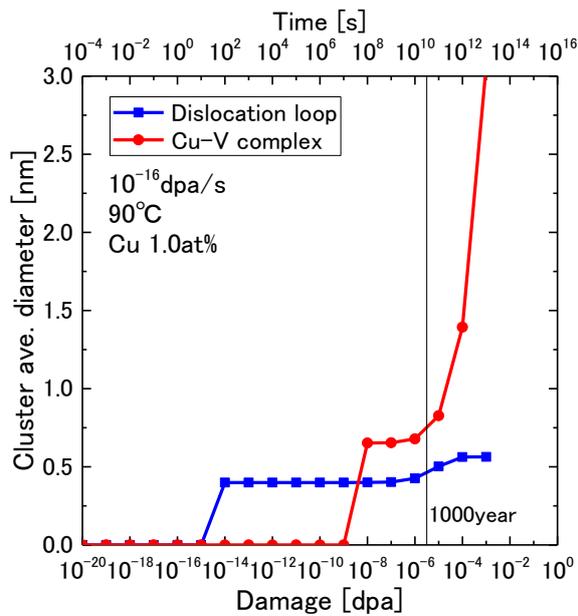


図 7.2.3-9 オーバーパックにおける欠陥集合体の平均直径の照射量依存性

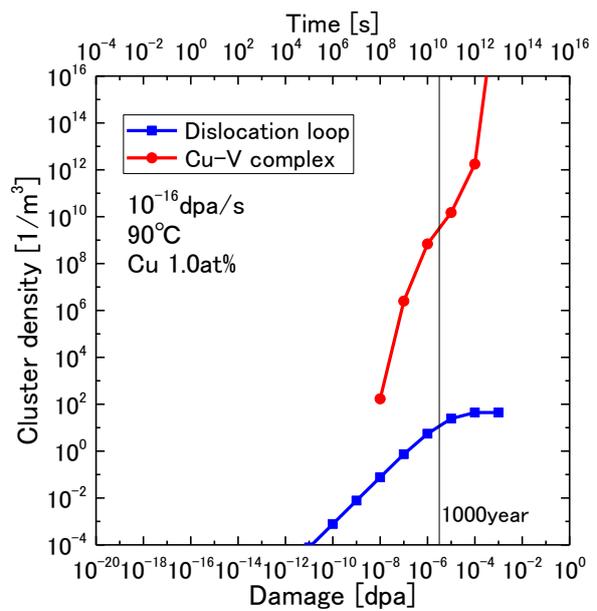


図 7.2.3-10 オーバーパックにおける欠陥集合体の数密度の照射量依存性

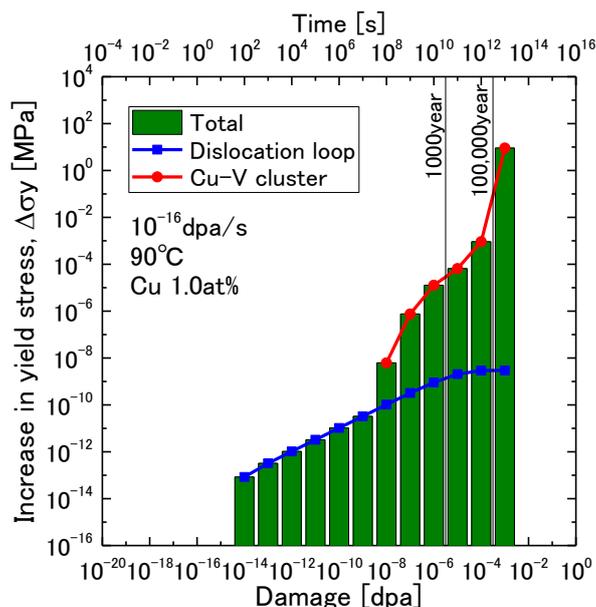


図 7.2.3-11 オーバーパック材の降伏応力増加量の照射量依存性

7.3 照射試験による脆化因子の把握

7.3.1 脆化因子におよぼす材料組成の影響

(1) 試験材

1) 炭素鋼 (0.5wt%Cu)

表 7.3.1-1 に示す目標組成の炭素鋼をボタン溶解により作製した。溶製後の外観を図 7.3.1-1 に示す。試験材を 1150°C で 1 時間の予熱の後、 $900\sim 1150^\circ\text{C}$ の温度範囲で熱間圧延を施して板材とした。圧延後の試験材 ($235\times 84\times 4.7$ mm) の外観を図 7.3.1-2 に示す。試料の一部を切り出した後、化学組成の分析に供した。表 3.1-1 に化学組成の分析結果を示す。試験材は目標組成とほぼ同じ組成を有することが確認された。組成分析とイオン照射に供した試験体の切り出し位置を図 7.3.1-2 中に示す。

2) FeMnSiCu 合金

表 7.3.1-2 に示す目標組成の合金をボタン溶解により作製した。溶製後の外観を図 7.3.1-3 に示す。試験材は炭素鋼と同様に 1150°C で 1 時間の予熱の後、 $900\sim 1150^\circ\text{C}$ の温度範囲で熱間圧延を施して板材とした。圧延後の試験材 ($203\times 85\times 4.8$ mm) の外観を図 7.3.1-4 に示す。試料の一部を切り出した後、化学組成の分析に供した。表 3.1-2 に化学組成の分析結果を示す。試験材は目標組成とほぼ同じ組成を有することが確認された。組成分析とイオン照射に供した試験体の切り出し位置を図 7.3.1-4 中に示す。

表 7.3.1-1 炭素鋼の化学組成 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
目標値	0.14	0.21	1.12	0.016	0.004	0.5	-
分析値	0.14	0.21	1.09	0.017	0.005	0.49	<0.01
	Cr	Mo	Al	V	V	Nb	Fe
目標値	-	-	-	-	-	-	bal.
分析値	<0.01	<0.01	<0.001	<0.001	<0.002	0.0013	bal.

表 7.3.1-2 FeMnSiCu 合金の化学組成 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
目標値	-	0.21	1.12	-	-	0.5	-
分析値	0.005	0.20	1.07	<0.001	<0.001	0.49	<0.01
	Cr	Mo	Al	V	V	Nb	Fe
目標値	-	-	-	-	-	-	bal.
分析値	<0.01	<0.01	<0.001	<0.001	<0.002	0.0016	bal.



図 7.3.1-1 溶製後の炭素鋼 (0.5wt%Cu)

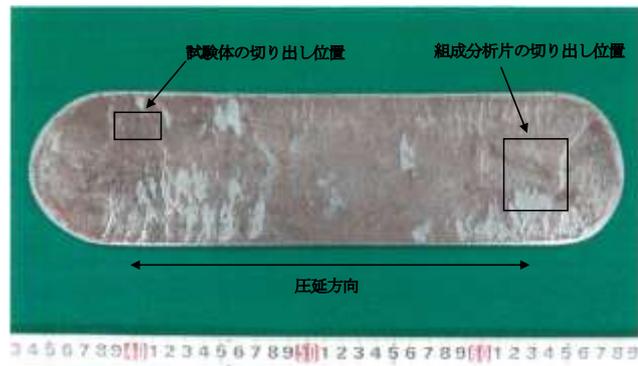


図 7.3.1-2 圧延後の炭素鋼 (0.5wt%Cu) の外観および組成分析片と試験体の切り出し位置



図 7.3.1-3 溶製後の FeMnSiCu 合金

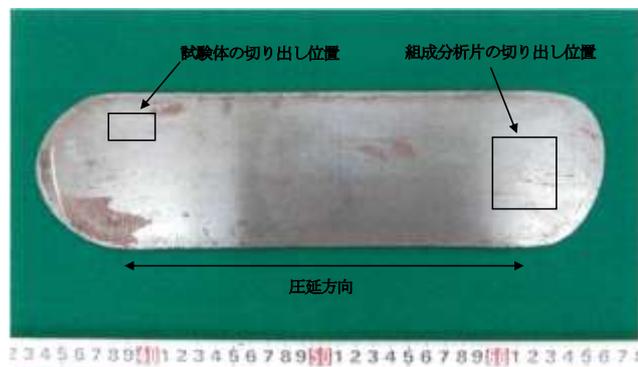


図 7.3.1-4 圧延後の FeMnSiCu 合金の外観および組成分析用試験片と試験体の切り出し位置

(2) 試験体の作製

炭素鋼の図 7.3.1-2 に示した位置より、 $10 \times 3 \times 1$ 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 4 個切り出した。試験体の表面と側面を 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（3%硝酸+97%エタノール）中に 1 秒間浸漬させて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。光学顕微鏡で観察した試験体表面の金相写真を図 7.3.1-5 (a) に示す。組織の大半はフェライト相であり、パーライト相（フェライトとセメンタイト）が一部混在していた。一般的な炭素鋼とほぼ同等の組織であることが確認された。

FeMnSiCu 合金の図 7.3.1-4 に示した位置より、 $10 \times 3 \times 1$ 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 4 個切り出した。炭素鋼と同様に、試験体の表面と側面を 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で鏡面研磨した。その後、ナイトール中に 1 秒間浸漬させて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。光学顕微鏡で観察した試験体表面の金相写真を図 7.3.1-5 (b) に示す。C の含有量がほとんどないため、炭素鋼と異なり、組織はフェライト単相である。図 7.3.1-6 に代表的な試験体の外観を示す。

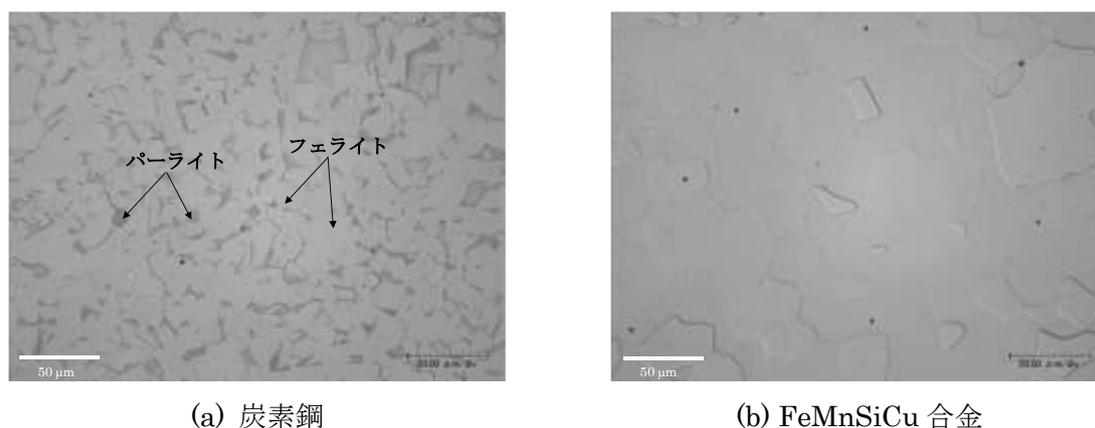


図 7.3.1-5 金相観察結果



図 7.3.1-6 試験体の外観

(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^{2+} イオンを照射した。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^[18]を用いて計算した損傷量の深さ分布を図 7.3.1-7 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、損傷量は深さ方向に沿って変化する特徴がある。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および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^{-4} dpa/s を目標値とした。また、照射量は 0.1 dpa と 1 dpa の 2 条件とした。表 7.3.1-3 に照射試験のマトリクスを示す。

図 7.3.1-8 に試験体を取り付けた照射ステージの外観を示す。各照射試験について 2 個ずつ試験体を照射した。照射中の試験体温度はサンプルホルダー裏側に設置されたヒーターで昇温し、試験体 1 個の側面にスポット溶接した熱電対により 90°C \pm 1°C の範囲で試験体温度を制御した。なお、熱電対の溶接により試験体端部が一部損傷するため、熱電対を溶接した試験体は予備として使用することとした。

試験体温度を所定の温度まで上げて一定になった後、イオンビームを照射した。イオンビームの電流値は試験体の取り付け位置に対応して 4 行 \times 5 列で配置された直径 2 mm のファラディカップで測定した。本試験体に対応するファラディカップの位置は、図 7.3.1-8 中に示した ch.8, 9, 13, 14 である。イオン電流値を一定とするため、一定間隔ごとに照射を短時間中断し、ファラディカップによる電流値の測定と調整を行った。なお、 1×10^{-4} dpa/s に対応するイオン電流値はファラディカップあたり 1.9 nA である。

表 7.3.1-4 に照射試験中の平均値として示した各試験体の照射実績を示す。照射試験中の照射速度は目標値の 1×10^{-4} dpa/s から最大 30%のずれが生じている場合があったが、平均値では 10%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に近い部位を供した。炭素鋼については 0.1 dpa 照射には試験体 2 の下部側 (ch14) を、1 dpa 照射には試験体 4 を供した。FeMnSiCu 合金については照射中の試験体 2 の固定が不十分であったことが照射終了後に判明し、温度が正確ではない可能性があることから、0.1 dpa 照射には予備の試験体 1 の上部側 (ch8) を、1 dpa 照射には試験体 4 を供した。

表 7.3.1-3 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
炭素鋼	90°C	1×10 ⁻⁴ dpa/s	0.1 dpa
			1 dpa
FeMnSiCu 合金	90°C	1×10 ⁻⁴ dpa/s	0.1 dpa
			1 dpa

表 7.3.1-4 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
炭素鋼	試験体 1	溶接	ch.8 ch.13	0.10 dpa (1.0×10 ⁻⁴ dpa/s) 0.10 dpa (1.0×10 ⁻⁴ dpa/s)	0.1 dpa (1×10 ⁻⁴ dpa/s)
	試験体 2	なし	ch.9 ch.14	0.11 dpa (1.1×10 ⁻⁴ dpa/s) 0.099 dpa (9.9×10 ⁻⁵ dpa/s)	0.1 dpa (1×10 ⁻⁴ dpa/s)
	試験体 3	溶接	ch.8 ch.13	1.0 dpa (1.0×10 ⁻⁴ dpa/s) 1.0 dpa (1.0×10 ⁻⁴ dpa/s)	1 dpa (1×10 ⁻⁴ dpa/s)
	試験体 4	なし	ch.9 ch.14	1.0 dpa (1.0×10 ⁻⁴ dpa/s) 1.0 dpa (1.0×10 ⁻⁴ dpa/s)	1 dpa (1×10 ⁻⁴ dpa/s)
FeMnSiCu 合金	試験体 1	溶接	ch.8 ch.13	0.096 dpa (9.6×10 ⁻⁵ dpa/s) 0.094 dpa (9.4×10 ⁻⁵ dpa/s)	0.1 dpa (1×10 ⁻⁴ dpa/s)
	試験体 2	なし	ch.9 ch.14	0.10 dpa (1.0×10 ⁻⁴ dpa/s) 0.10 dpa (1.0×10 ⁻⁴ dpa/s)	0.1 dpa (1×10 ⁻⁴ dpa/s)
	試験体 3	溶接	ch.8 ch.13	0.99 dpa (9.9×10 ⁻⁵ dpa/s) 1.0 dpa (1.0×10 ⁻⁴ dpa/s)	1 dpa (1×10 ⁻⁴ dpa/s)
	試験体 4	なし	ch.9 ch.14	1.0 dpa (1.0×10 ⁻⁴ dpa/s) 1.0 dpa (1.0×10 ⁻⁴ dpa/s)	1 dpa (1×10 ⁻⁴ dpa/s)

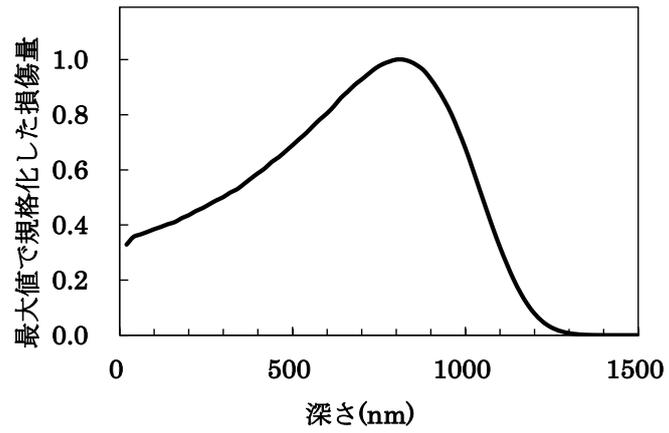


図 7.3.1-7 2.8MeV Fe²⁺イオンによる損傷量の深さ分布



図 7.3.1-8 試験体を取り付けた照射ステージの外観

(4) 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、硬さを測定した。圧子は、三角錐形状であるバーコビッチ型を用いた。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様ではなく、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[19]。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、炭素鋼についてはフェライト相について測定を行った。

2) 測定結果

炭素鋼についての硬さの測定結果を図 7.3.1-9 に示す。未照射材では 2.4 GPa に硬さの頻度分布のピークが存在しているが、照射量が増すにつれてピークは 3.6 GPa まで変化した。0.1 dpa までの照射で硬さが大きく増加したが、1 dpa の照射で更に硬化した。

硬さの平均値と硬さの増加量（未照射材の硬さとの差分）を図 7.3.1-10 に示す。なお、図中には平成 27 年度に炭素鋼（0.01%Cu）について測定した結果[8]を併せて示した。図中のエラーバーは測定値の最大と最小を示した。今年度使用した 0.5%Cu 材の方が硬い傾向にある。照射に伴う硬さの増加量については 0.01%Cu 材と同程度であった。

FeMnSiCu 合金についての硬さの測定結果を図 7.3.1-11 に示す。未照射材では 2.3 GPa に硬さの頻度分布のピークが存在しているが、照射量が増すにつれてピークは 3.6 GPa まで変化した。炭素鋼と同様に、0.1 dpa までの照射で硬さが大きく増加したが、1 dpa の照射で更に硬化した。

硬さの平均値と硬さの増加量を図 7.3.1-12 に示す。材料による違いを検討するため、炭素鋼（0.5%Cu）と平成 27 年度に FeCu 合金（0.5%Cu）について測定した結果[8]を合わせて示した。なお、図中のエラーバーは測定値の最大と最小を示した。炭素鋼（0.5%Cu）と FeMnSiCu 合金では硬さとその増加量に大きな違いは認められず、C や P、S の有無による違いは硬化に大きく影響しないことが分かった。FeCu 合金の硬さとその増加量は炭素鋼および FeMnSiCu 合金と比較して小さく、Mn や Si の添加は硬化量を大きくさせると考えられる。

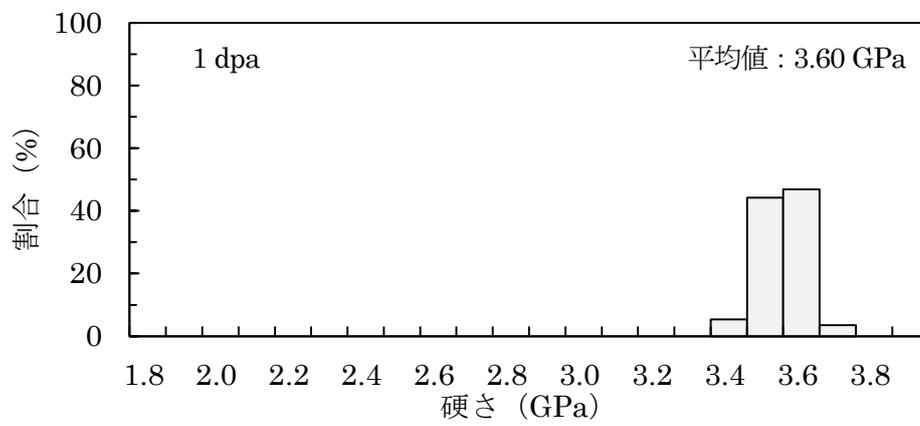
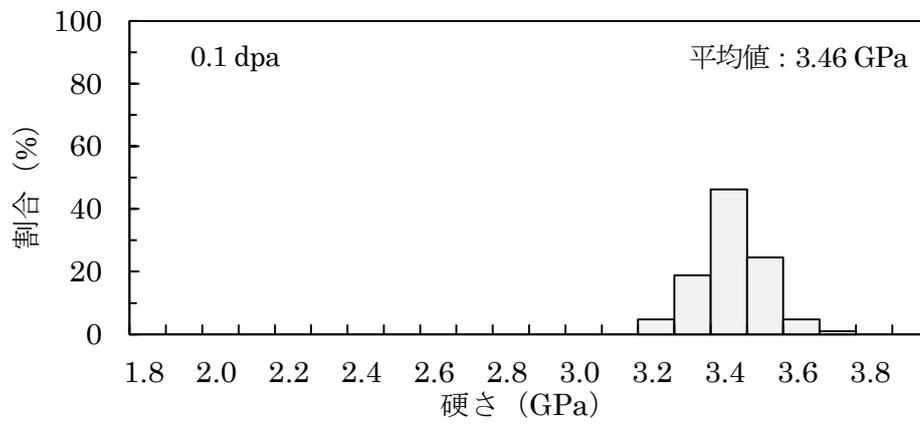
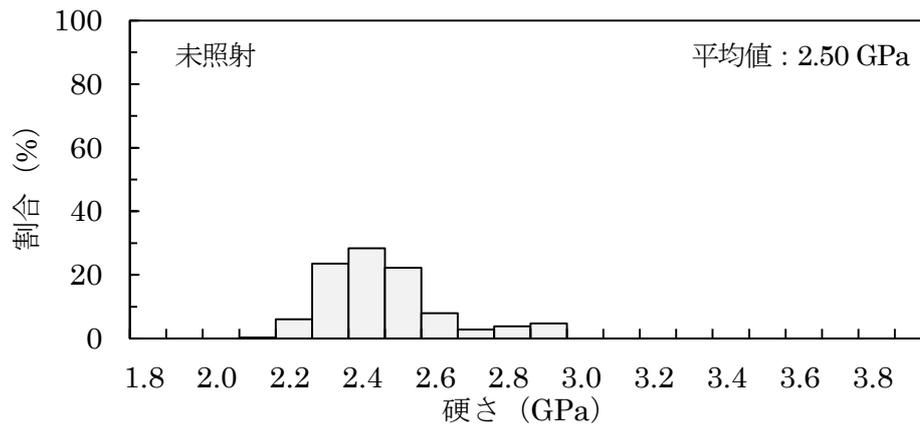


図 7.3.1-9 未照射およびイオン照射した炭素鋼のフェライト相の硬さの分布

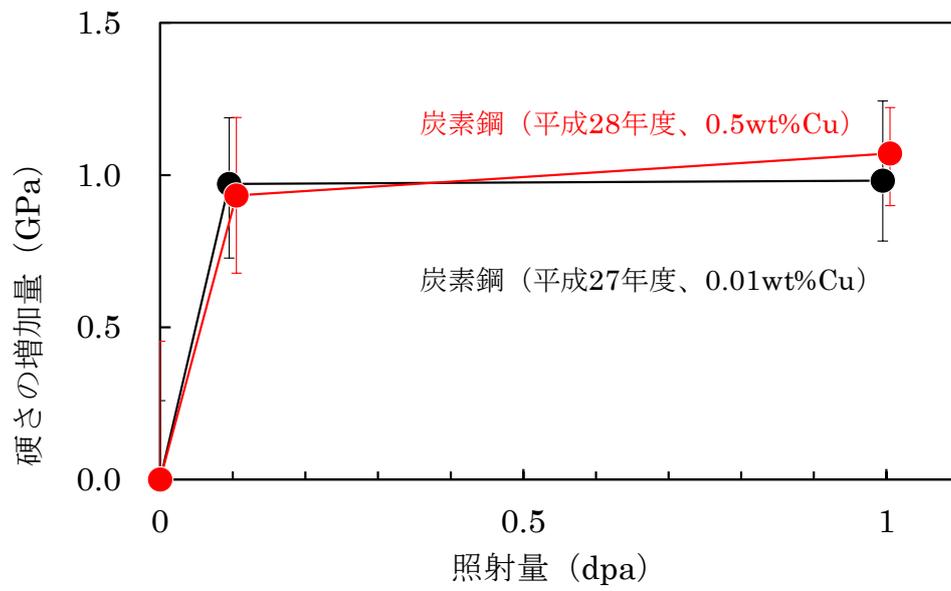
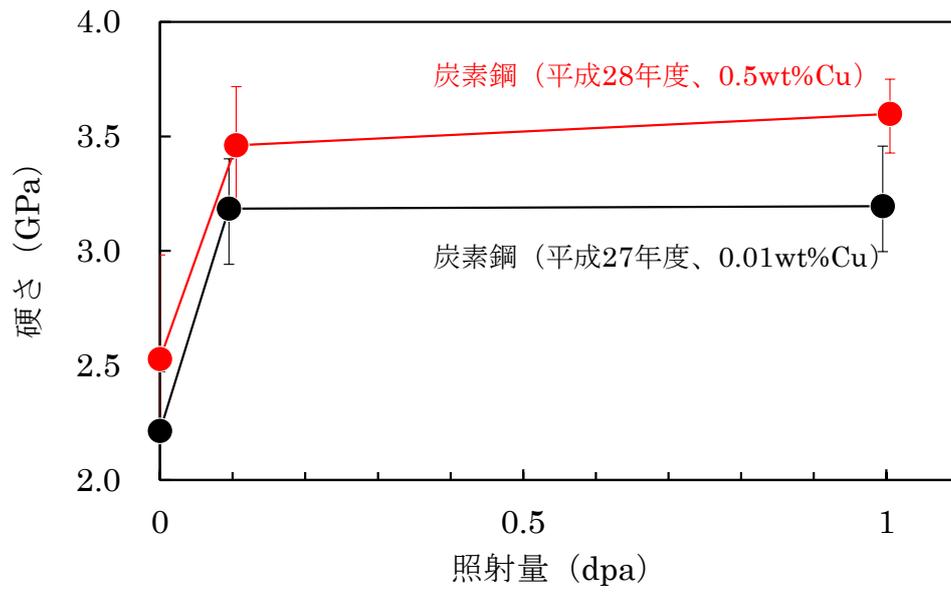


図 7.3.1-10 イオン照射に伴う炭素鋼の硬さの変化と Cu 含有量による違い

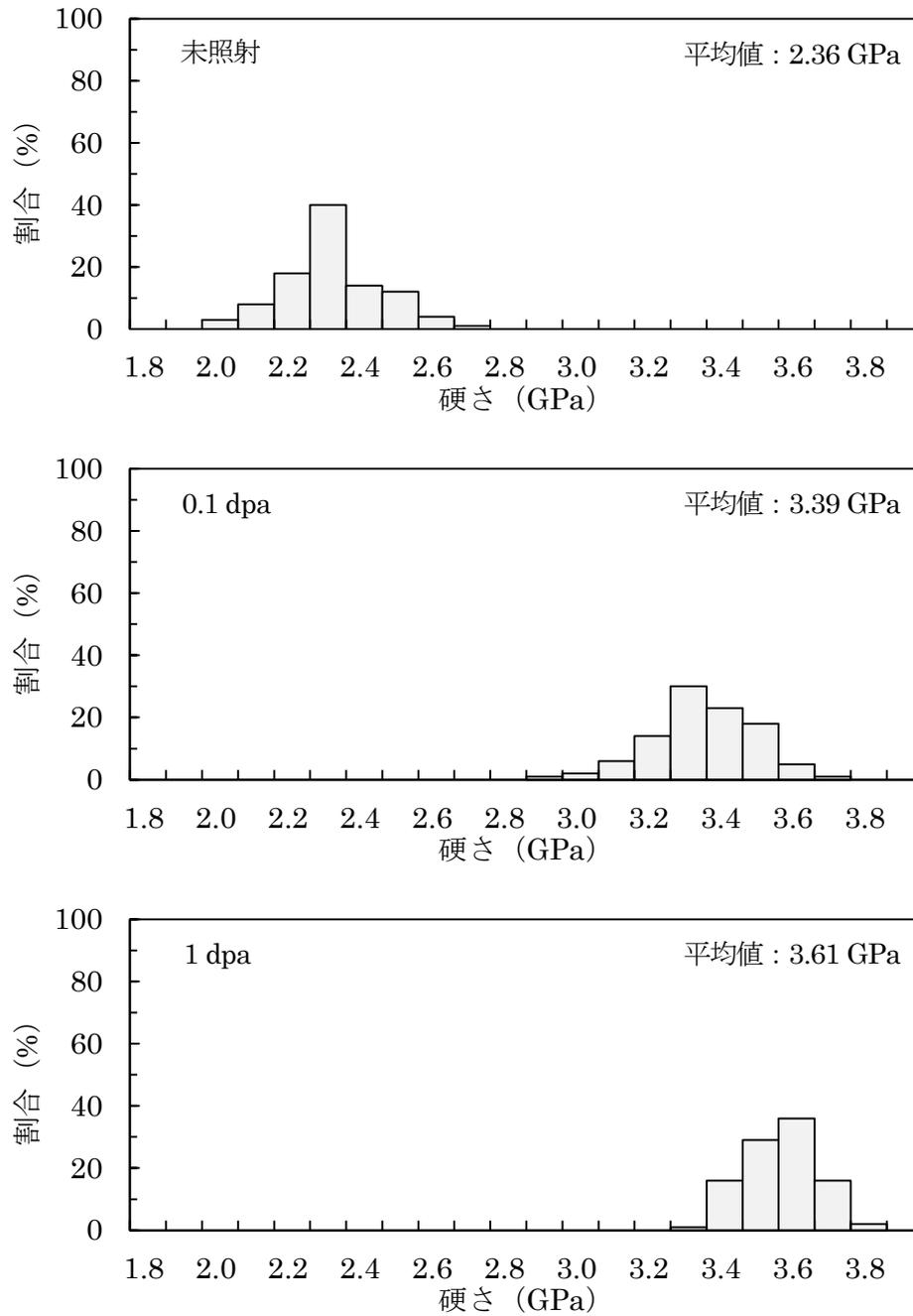


図 7.3.1-11 FeMnSiCu 合金の未照射材とイオン照射材の硬さの分布

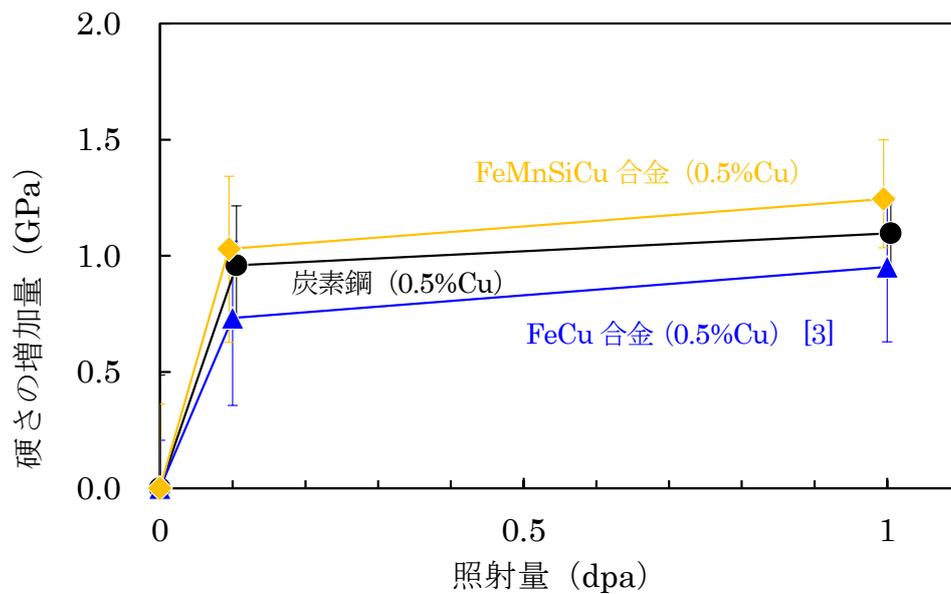
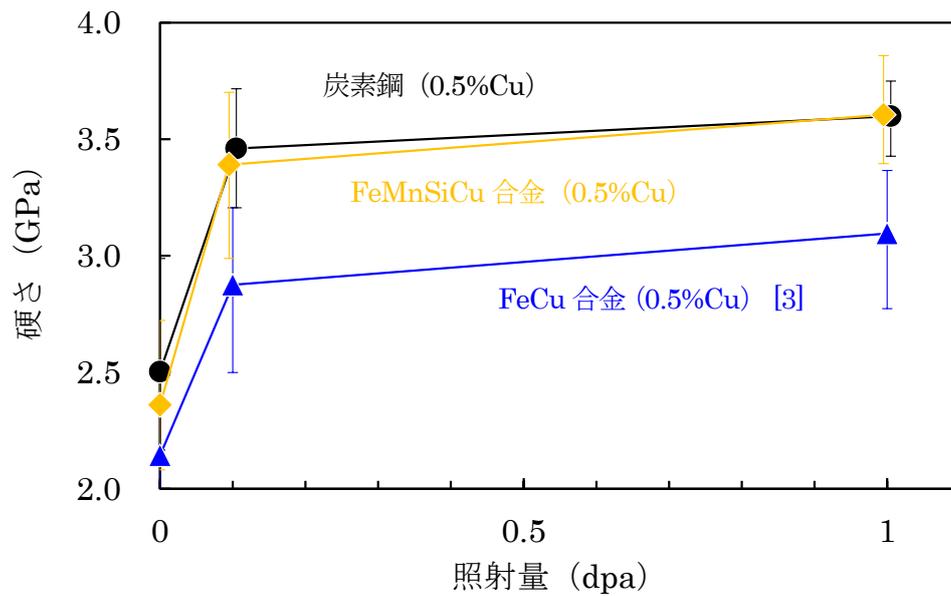


図 7.3.1-12 イオン照射に伴う FeMnSiCu 合金の硬さの変化

(5) 3次元アトムプローブ (APT) 分析

1) 分析試験片の作製

オーバーパックの炭素鋼はフェライト相とパーライト相からなる組織であり、本試験では APT 分析の対象はフェライト相とした。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。図 7.3.1-13 から図 7.3.1-16 には、イオン照射後の試験体の表面を EBSD で観察した結果を示す。装置は TSL 社製 OIM (Orientation Imaging Microscopy) を使用し、測定範囲は $500 \times 500 \mu\text{m}$ とし、測定間隔は

1 μm とした。なお、図中の色は試験体表面に垂直方向での結晶方位を示している。図中左上の【Γ】状の跡は集束イオンビーム（FIB）加工装置（日立ハイテクノロジーズ製 FB-2000A）で作製したマーキングである。炭素鋼のフェライト相と FeMnSiCu 合金から FIB 加工により微小試料を採取し、APT 分析試験片を作製した。図中には、微小試料の採取位置を示した。以下に、試験片の作製手順を詳述する。

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 のタングステン・デポジション（W デポ）機能を利用してマスクングした。炭素鋼と FeMnSiCu 合金の照射量 0.1 dpa と 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。

炭素鋼：CS-01dpa-uS1, CS-1dpa-uS1

FeMnSiCu 合金：FeMnSiCu-01dpa-uS1, FeMnSiCu-1dpa-uS1

FIB 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 7.3.1-17 に例を示したように、厚さ約 3 μm 、幅約 20 μm 、高さ約 10 μm 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。

b 微小試料の分割

図 7.3.1-18 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。

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。今回は 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。使用した装置は日立ハイテクノロジーズ製 NB5000 である。図 7.3.1-19 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、針は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。

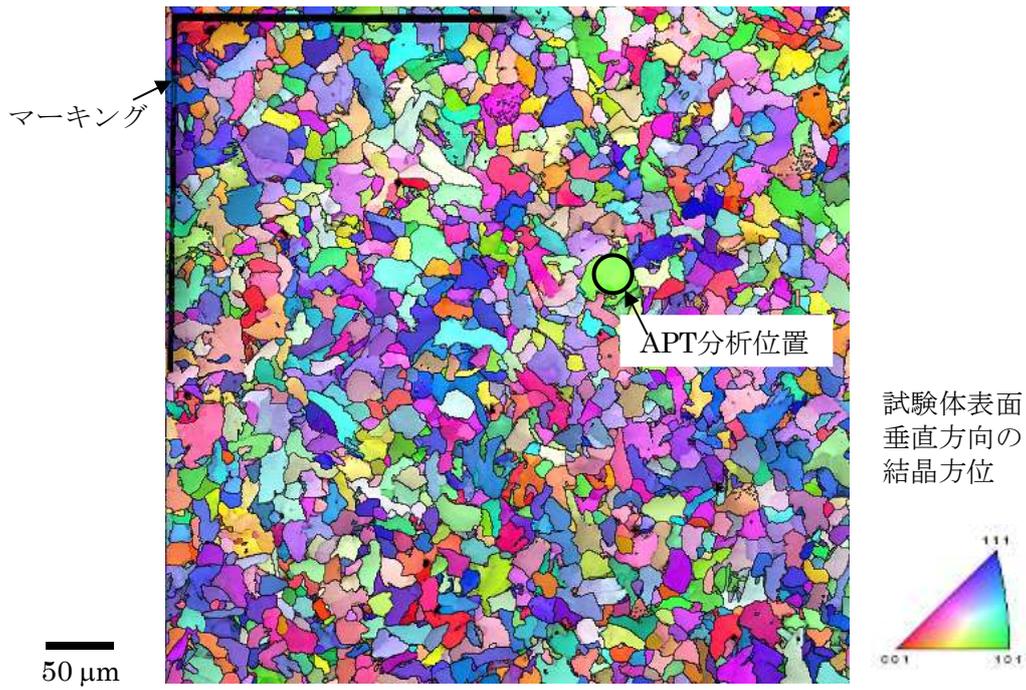


図 7.3.1-13 EBSD 測定結果 (炭素鋼、0.1 dpa)



図 7.3.1-14 EBSD 測定結果 (炭素鋼、1 dpa)

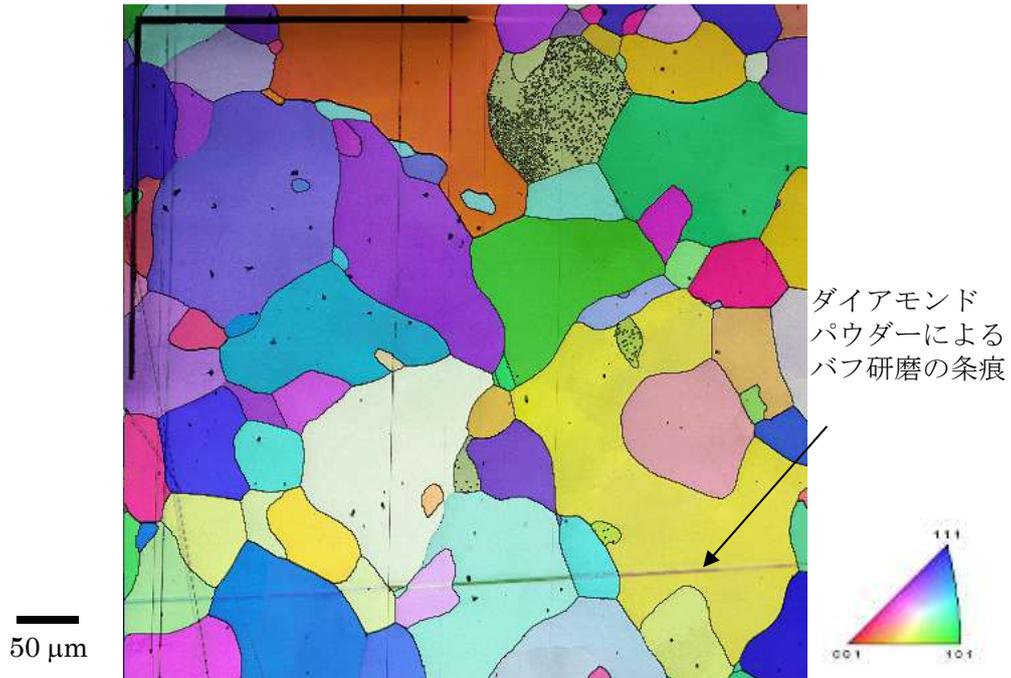


図 7.3.1-15 EBSD 測定結果 (FeMnSiCu 合金、0.1 dpa)

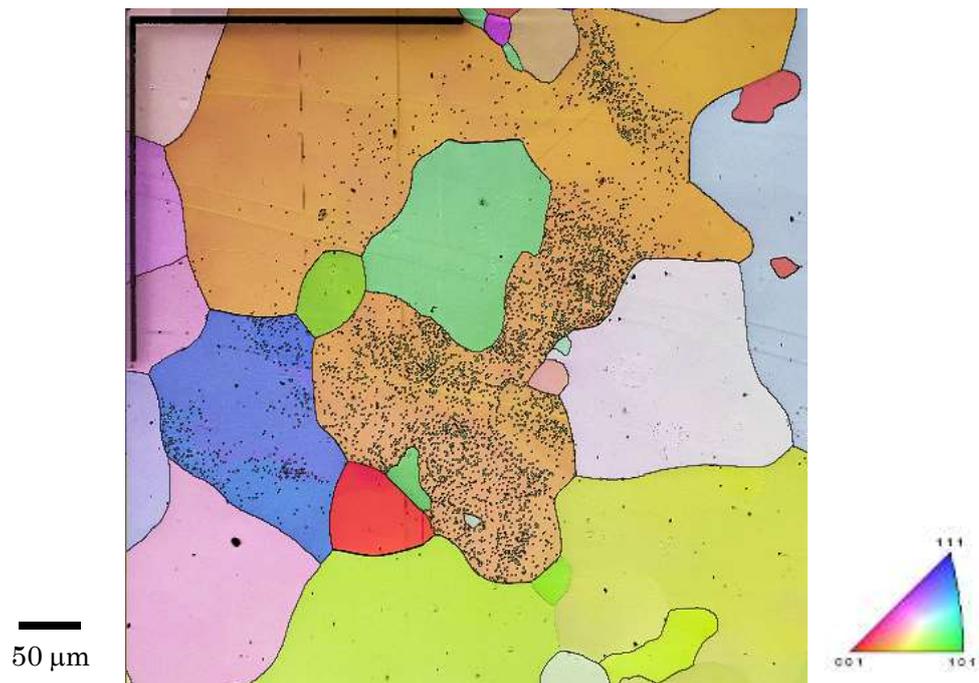
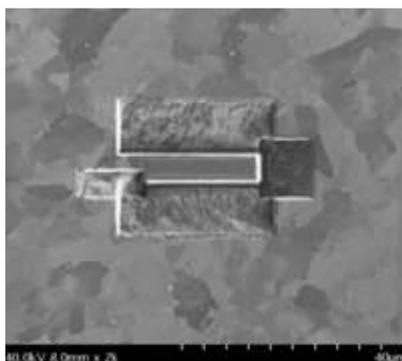
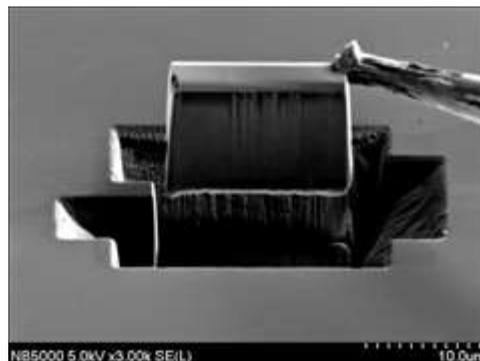


図 7.3.1-16 EBSD 測定結果 (FeMnSiCu 合金、1 dpa)



(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 7.3.1-17 FIB による微小試料の採取の例

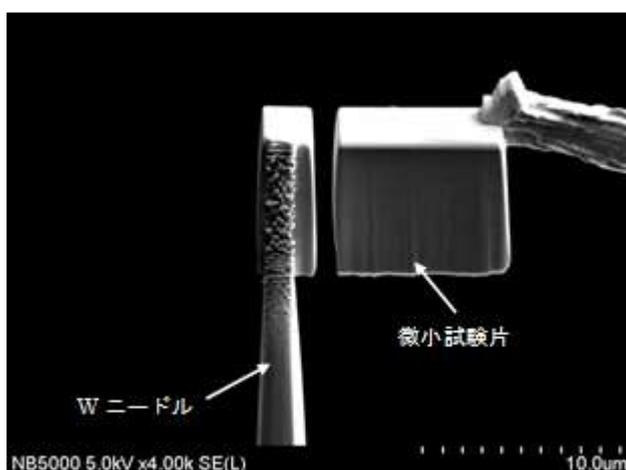
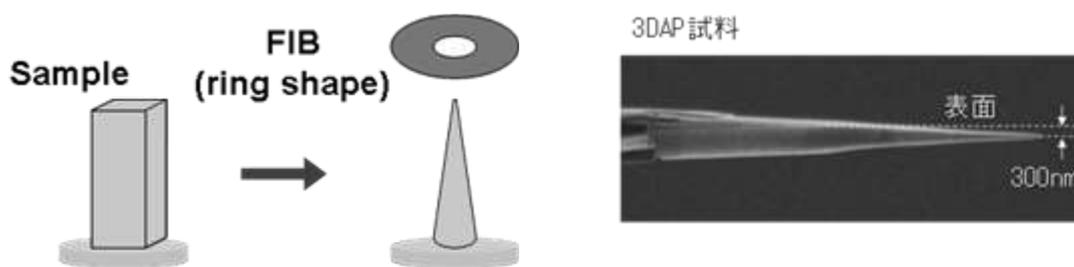


図 7.3.1-18 微小試料の分割の例



(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 7.3.1-19 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。今回に使用した炭素鋼と FeMnSiCu 合金は化学分析の結果、Ni 含有量 0.01% 未満と非常に低いため、質量数 58 は Fe として取り扱った。

3) 測定結果

炭素鋼について得られたアトムマップを図 7.3.1-20 から図 7.3.1-23 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。0.1 dpa 照射材では明確な原子の集積は認められなかった。1 dpa 照射材では Mn と Si、Cu が集積したクラスタの形成が認められた。

FeMnSiCu 合金について得られたアトムマップを図 7.3.1-24 から図 7.3.1-26 に示す。Fe、Mn、Si、Cu についてマップを示した。なお、参考のために未照射材について測定した結果も示した。炭素鋼と同様に、0.1 dpa 照射材では明確な原子の集積は認められなかったが、1 dpa 照射材では Mn と Si、Cu が集積したクラスタの形成が認められた。なお、未照射材についても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。

4) クラスタ解析

炭素鋼と FeMnSiCu 合金に Mn と Si、Cu 原子のクラスタが認められたため、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、原子炉圧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[8]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。炭素鋼と FeMnSiCu 合金について、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 0.7 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 10 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。

$$r_g = \sqrt{\frac{5}{3}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2\}}{n}} \quad \text{式 (7.3.1-1)}$$

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、アトムマップに溶質原子の集積が認められた炭素鋼の 1 dpa 照射材と FeMnSiCu 合金の 1 dpa 照射材について実施した。解析に用いた測定データは、CS-1dpa-uS2-AP1, FeMnSiCu-1dpa-uS1-AP2 である。

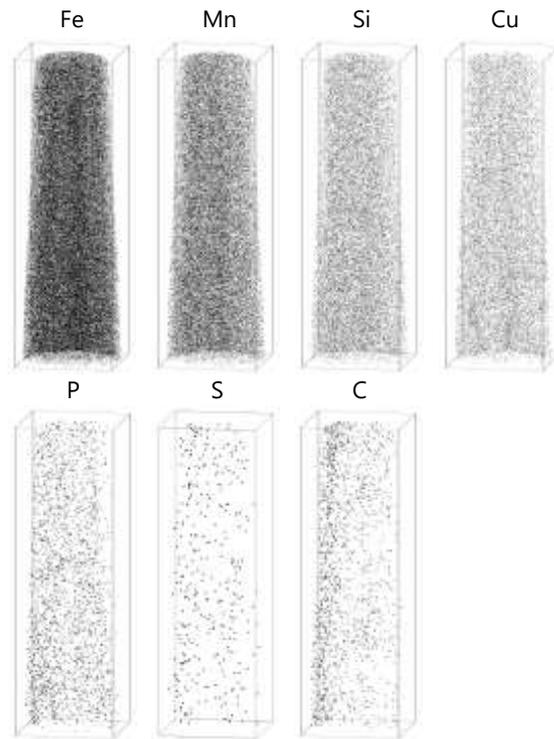
炭素鋼と FeMnSiCu 合金の MnSiCu マップとクラスタマップの比較を図 7.3.1-27 と図 7.3.1-28 にそれぞれ示す。炭素鋼と FeMnSiCu 合金で共に抽出されたクラスタは MnSiCu マップでの集積をよく反映している。

炭素鋼と FeMnSiCu 合金で抽出されたクラスタのサイズ分布を図 7.3.1-29 に示す。炭素鋼についてはクラスタ直径の分布のピーク位置は 1.5~2 nm にあり、クラスタの平均直径は 1.88 nm であった。また、数密度については $6.1 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ であった。平成 27 年度に試験した炭素鋼 (0.01%Cu) では 90°C, 1 dpa の照射で Mn 分布に揺らぎが認められたもののクラスタの形成は認められていない。Cu が多く含まれることで溶質クラスタの形成が促進されたと推測された。FeMnSiCu 合金についてはクラスタのサイズは炭素鋼 (0.5%Cu) と同程度であり、平均直径は 1.84 nm であった。また、数密度については $8.9 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ であった。平成 27 年度に試験した FeCu 合金 (0.5%Cu) では 1 dpa の照射で平均直径 1.64 nm の Cu クラスタが数密度 $4.0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ で形成しており [8]、今年度評価した炭素鋼と FeMnSiCu 合金の方がクラスタの直径が大きく、数密度も多かった。Cu 濃度が 0.5%と高い条件であれば、クラスタの核となる Mn や Si が加わることで溶質クラスタの形成が促進されると推察された。

炭素鋼 (0.5%Cu) と FeMnSiCu 合金で抽出されたクラスタの組成分布を図 7.3.1-30 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。炭素鋼については 50 個、FeMnSiCu 合金については 45 個のクラスタについて組成分布を示した。なお、組成は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。炭素鋼では大きいクラスタで Mn 含有量がわずかに多い傾向が認められたが、Si と Cu についてはクラスタのサイズと明確な関係は認められなかった。FeMnSiCu 合金については、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。また、炭素鋼と FeMnSiCu 合金ではクラスタの組成に大きな違いは認められなかった。クラスタの平均組成 (at%) は炭素鋼では Fe-21.9Mn-12.3Si-10.1Cu であり、FeMnSiCu 合金では Fe-21.5Mn-9.7Si-9.0Cu であった。表 7.3.1-5 にクラスタ解析結果をまとめる。

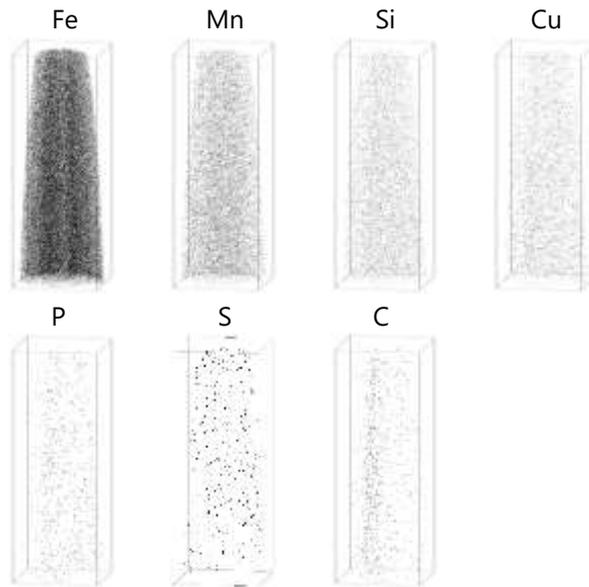
表 7.3.1-5 クラスタ解析結果のまとめ

材料	照射量 (dpa)	平均直径 (nm)	数密度 (m^{-3})	体積率	平均組成 (at%)
炭素鋼 (0.5%Cu)	1.0	1.88	6.1×10^{24}	0.170	Fe-21.9Mn-12.3Si-10.1Cu
FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu)	1.0	1.84	8.9×10^{24}	0.233	Fe-21.5Mn-9.7Si-9.0Cu



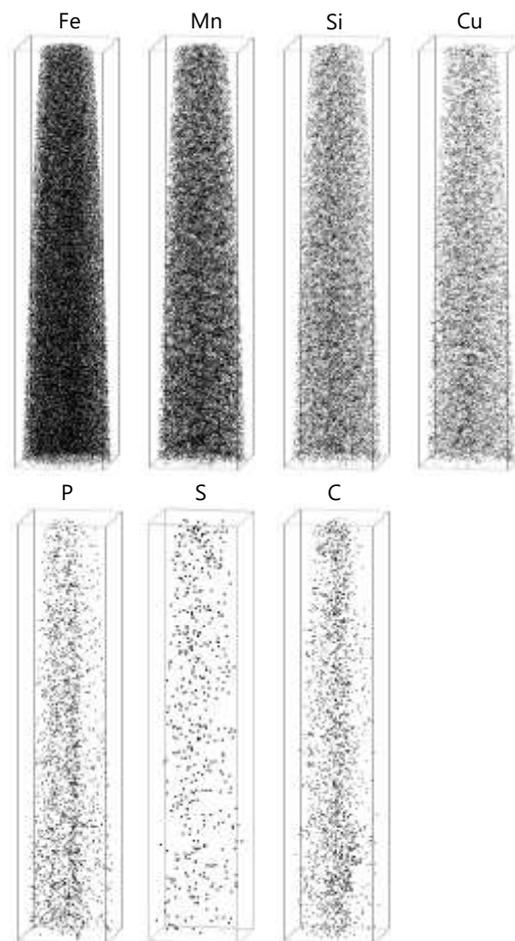
CS-01dpa-uS1-AP2 (44×42×136 nm)

図 7.3.1-20 炭素鋼試験片アトムマップ (炭素鋼(0.5%Cu)、90°C、0.1 dpa 照射材)



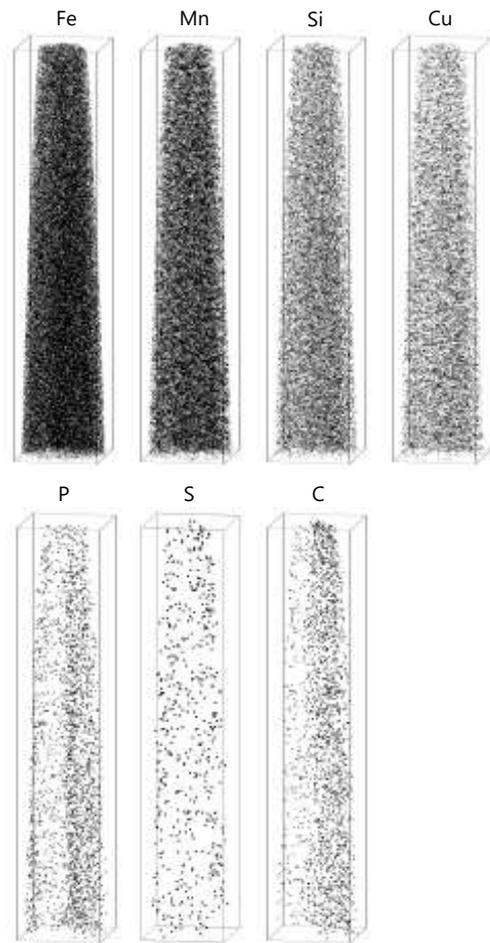
CS-01dpa-uS2-AP1 (34×34×94 nm)

図 7.3.1-21 炭素鋼試験片アトムマップ (炭素鋼(0.5%Cu)、90°C、0.1 dpa 照射材)



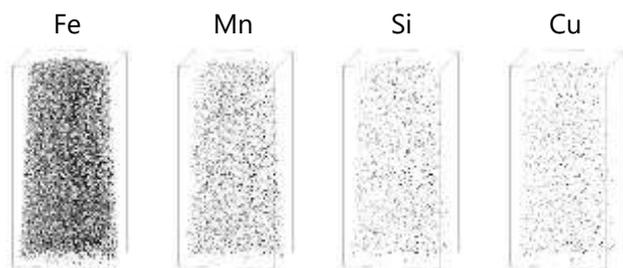
CS-1dpa-uS2-AP1 (43×42×202 nm)

図 7.3.1-22 炭素鋼試験片アトムマップ (炭素鋼(0.5%Cu)、90°C、1 dpa 照射材)

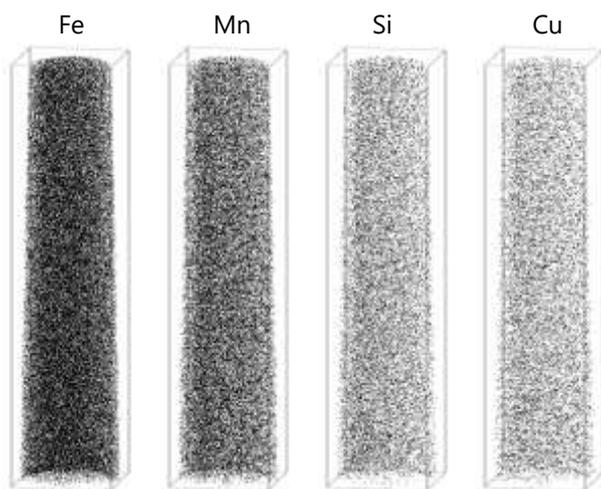


CS-1dpa-uS2-AP2 (43×42×213 nm)

図 7.3.1-23 炭素鋼試験片アトムマップ (炭素鋼(0.5%Cu)、90°C、1 dpa 照射材)

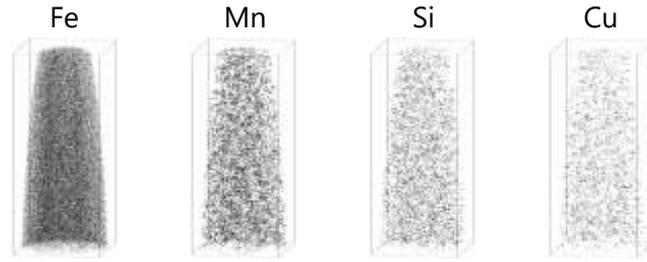


FeMnSiCu-01dpa-uS1-AP1 (38×37×77 nm)

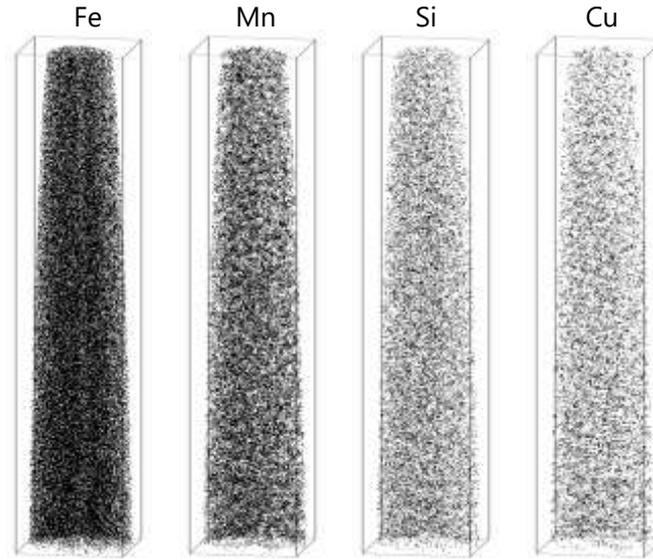


FeMnSiCu-01dpa-uS1-AP2 (41×40×172 nm)

図 7.3.1-24 FeMnSiCu 合金試験片アトムマップ (FeMnSiCu 合金、90°C、0.1 dpa 照射材)

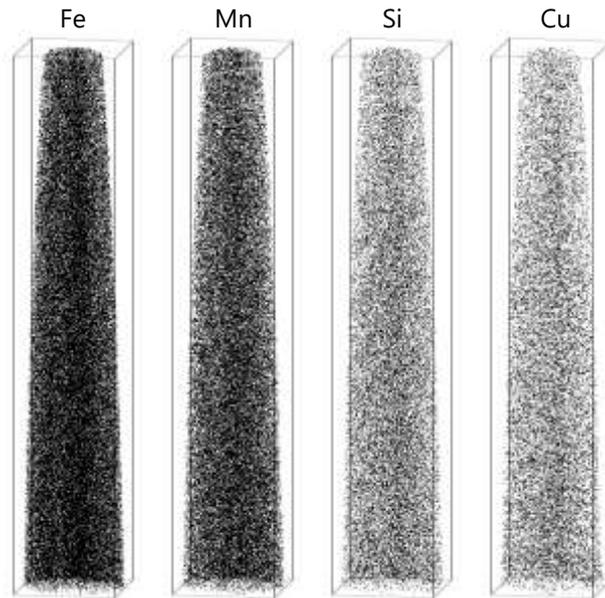


FeMnSiCu-1dpa-uS1-AP1 (32×31×72 nm)



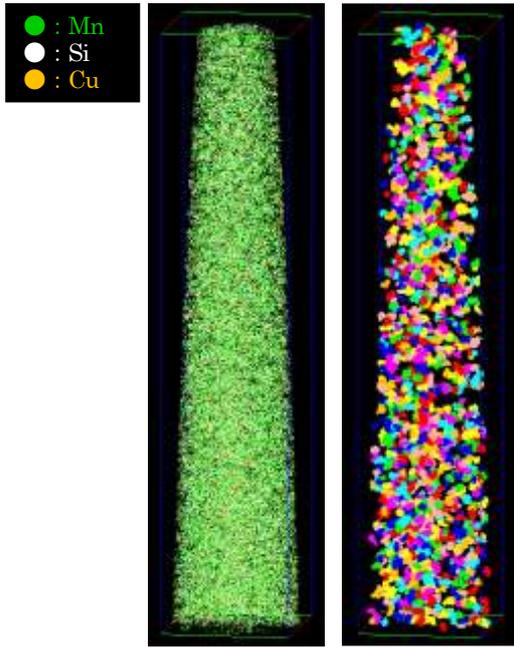
FeMnSiCu-1dpa-uS1-AP2 (39×40×189 nm)

図 7.3.1-25 FeMnSiCu 合金試験片アトムマップ (FeMnSiCu 合金、90°C、1 dpa 照射材)



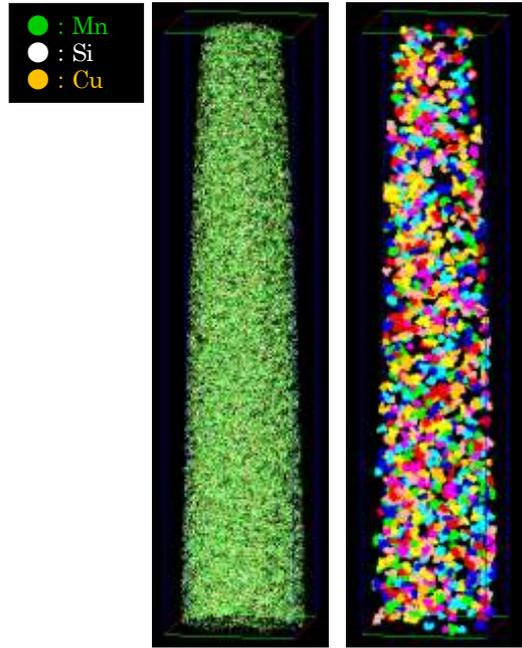
FeMnSiCu-0dpa-uS1-AP1 (41×41×218 nm)

図 7.3.1-26 FeMnSiCu 合金試験片アトムマップ (FeMnSiCu 合金、未照射材)



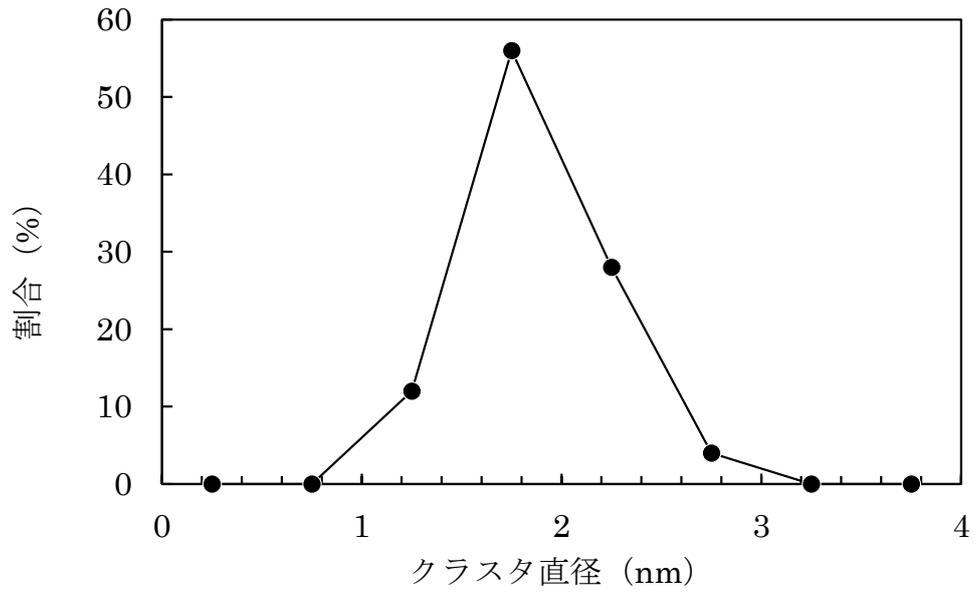
CS-1dpa-uS2-AP1
(90°C、1 dpa 照射材)

図 7.3.1-27 炭素鋼 (0.5%Cu) MnSiCu
マップ (左) とクラスタマップ (右) の比
較

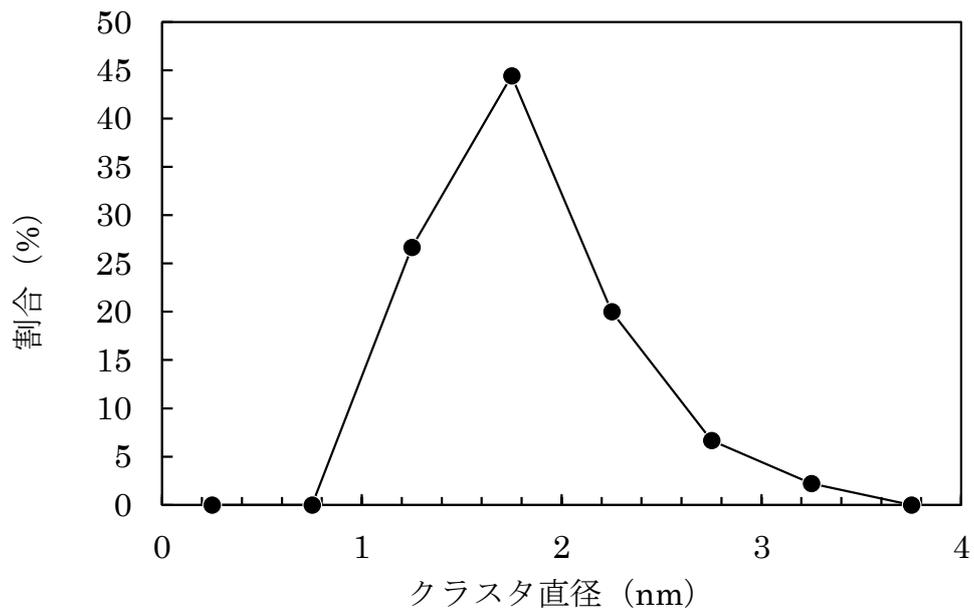


FeMnSiCu-1dpa-uS1-AP2
(90°C、1 dpa 照射材)

図 7.3.1-28 FeMnSiCu 合金の MnSiCu
マップ (左) とクラスタマップ (右) の比
較

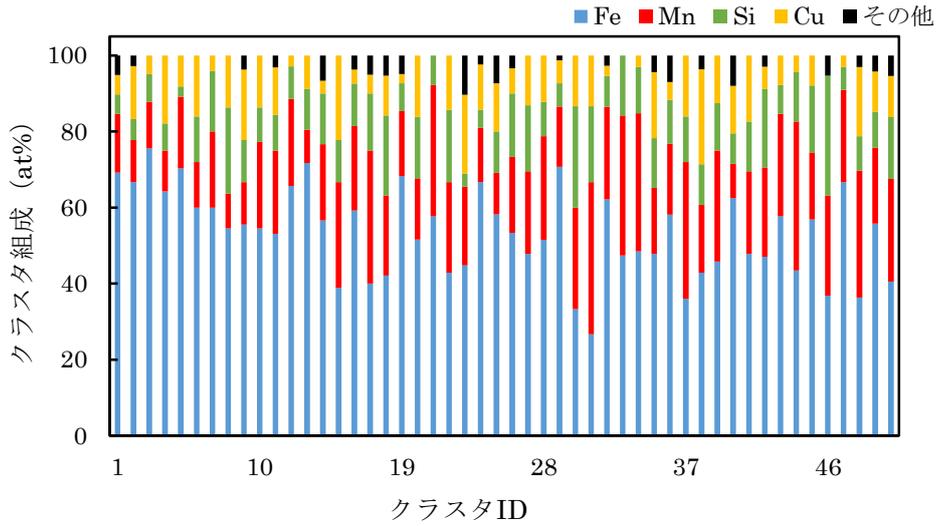


(a) 炭素鋼 (90°C、1 dpa 照射材)

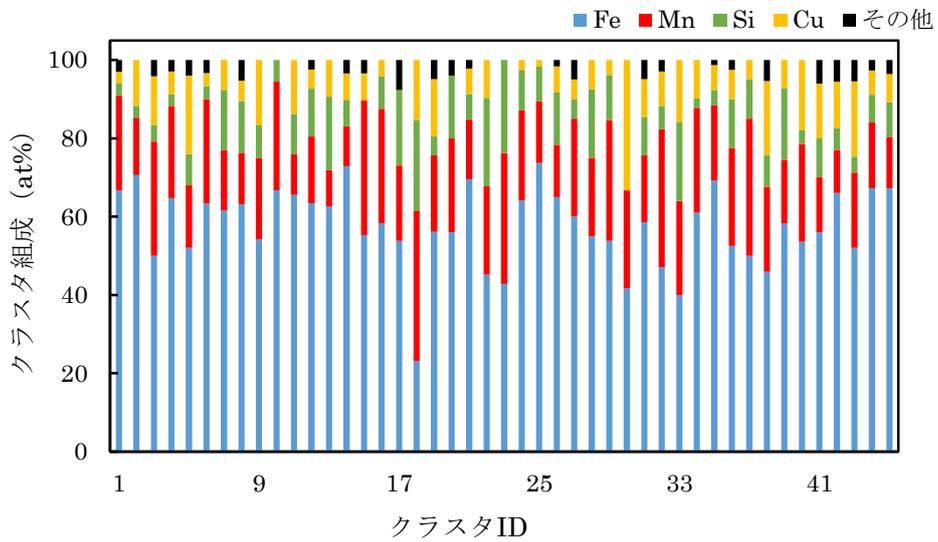


FeMnSiCu 合金 (90°C、1 dpa 照射材)

図 7.3.1-29 炭素鋼 (0.5%Cu) と FeMnSiCu 合金のクラスタのサイズ分布



(a) 炭素鋼 (90°C、1 dpa 照射材)



(b) FeMnSiCu 合金 (90°C、1 dpa 照射材)

図 7.3.1-30 炭素鋼 (0.5%Cu) と FeMnSiCu 合金のクラスタ組成の分布

(6) TEM 観察

1) 観察試験片の作製

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。炭素鋼と FeMnSiCu 合金試験体の表面の結晶方位と粒界位置を図 7.3.1-31 から図 7.3.1-32 に示す。

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結晶粒 2 個を含む $10 \times 4 \mu\text{m}$ 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。EBSD 測定の図中には TEM 観察試験片の採取位置を示した。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 $0.5 \sim 2 \text{ kV}$ の電圧条件で除去した。なお、TEM 観察試験片は試験体ごとに 1 個作製する予定であり、一部は現在作製中である。

2) 観察方法

平成 27 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^[20]により転位ループを観察した。表 7.3.1-6 は逆格子ベクトル g と転位ループのバーガースベクトル b の関係による転位ループのコントラストの変化をまとめたものである。表中の $|g \cdot b|$ の値は数字が大きいほど明るく、0 では観察されないことを示す。平成 27 年度に観察した 90°C で 0.1 dpa 照射した炭素鋼[8]を例として説明する。電子線入射方向 $B = [011]$ で g ベクトルを 3 通りに変えて同じ位置で撮影したマイクロ組織の明視野像と暗視野像を図 7.3.1-33 に示す。なお、図では 2 枚の TEM 写真を張り合わせており、写真の境が明暗の異なる筋として写っている。明視野像で黒いドット状に観察されるコントラストが転位ループであり、暗視野像では白いドット状のコントラストで観察される。図 7.3.1-34 には $g = [011]$ と $g = [200]$ の暗視野像の拡大図を示す。白色と黄色の丸枠で示した箇所が転位ループの例を示しており、白枠の転位ループはそれぞれの g ベクトルでしか観察されないが、黄色の枠の転位ループについては両方の g ベクトルで観察された。図 7.3.1-34 で観察された転位ループは、 $g = [200]$ で観察されるループに比べて $g = [011]$ で観察されるループの数が多く、両方の g ベクトルに共通して観察されるループがほぼないことから、主に $b = a\langle 100 \rangle$ の転位ループであったと考えられる。炭素鋼と組成が似ている A533B 鋼の実用材を 290°C でイオン照射した場合に $b = a\langle 100 \rangle$ の転位ループが形成したことが報告されており^[20]、炭素鋼についても $b = a\langle 100 \rangle$ の転位ループが主に形成したと推察された。

転位ループの平均直径と数密度の評価には、 $g = [011]$ で観察される転位ループの像を用いることとした。主に $b = a\langle 100 \rangle$ の転位ループが形成されていたことから、観察される転位ループは全て $b = a\langle 100 \rangle$ の転位ループであると仮定し、観察された転位ループの数を $3/2$ 倍して数密度を評価した。なお、試験片の薄膜部の膜厚は、試験片を傾斜させた際に試験片中の粒界によるコントラスト幅の変化から算出した。

3) 観察結果

転位ループの明視野像を図 7.3.1-35 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 7.3.1-7 にまとめた。また、図 7.3.1-36 に転位ループの平均直径と数密度の照射に伴う変化を示す。図中の値は 2 視野での平均値を用いた。図中には平成 27 年度に試験した炭素鋼 (0.01%Cu, 90°C 照射) と FeCu 合金の値[8]を比較のために示した。

炭素鋼については、0.5%Cu 材と 0.01%Cu 材とともに照射量の増加に伴って平均直径が増加する傾向が認められ、0.5%Cu 材の方が平均直径はより大きくなった。数密度については、0.01%Cu 材では照射量が増しても大きな違いは認められていないが、0.5%Cu 材では減少する傾向が認められた。FeMnSiCu 合金については、炭素鋼 (0.01%Cu 材) と同様であり、照射量が増すと平均直径が増加したが、数密度については大きな変化は認められなかった。FeCu 合金については照射量の変化に対して平均直径も数密度も大きく変化していない。Mn や Si が存在する炭素鋼と FeMnSiCu 合金では、照射量の増加に伴って転位ループが成長し、数密度が減少あるいはあまり変化しない傾向があることが分かった。

表 7.3.1-6 bcc 金属における転位ループのバーガースベクトル b と逆格子ベクトル g の組み合わせによる転位ループのコントラストの変化

g b	$[01\bar{1}]$	$[21\bar{1}]$	$[200]$	$[2\bar{1}1]$
$(a/2)[01\bar{1}]$	1	1	0	1
$(a/2)[011]$	0	0	0	0
$(a/2)[\bar{1}10]$	1/2	1/2	1	3/2
$(a/2)[110]$	1/2	3/2	1	1/2
$(a/2)[101]$	1/2	1/2	1	3/2
$(a/2)[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$	1	0	1	2
$(a/2)[\bar{1}11]$	0	1	1	1
$a[100]$	0	2	2	2
$a[010]$	1	1	0	1
$a[001]$	1	1	0	1

※値は $|g \cdot b|$ を示す。 $|g \cdot b|=0$ でコントラストなし。

表 7.3.1-7 転位ループの平均直径と数密度

材料	照射量 (dpa)	視野	平均直径 (nm)	数密度 (m^{-3})
炭素鋼	0.1	1	2.0	9×10^{22}
		2	1.9	1×10^{23}
		平均	2.0	1×10^{23}
	1.0	1	3.0	1×10^{22}
		2	2.7	6×10^{22}
		平均	2.8	3×10^{22}
FeMnSiCu 合金	0.1	1	2.5	7×10^{22}
		2	1.9	6×10^{22}
		平均	2.2	6×10^{22}
	1.0	1	2.8	5×10^{22}
		2	2.8	7×10^{22}
		平均	2.8	6×10^{22}

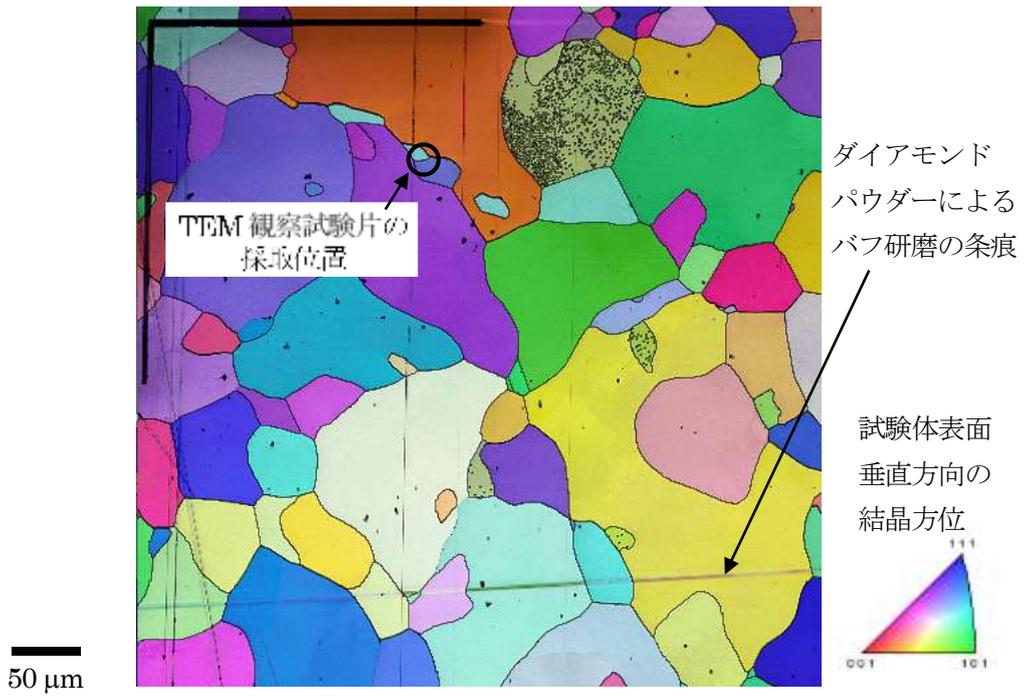


(a) 炭素鋼 (0.5%Cu)、90°C、0.1 dpa 照射材

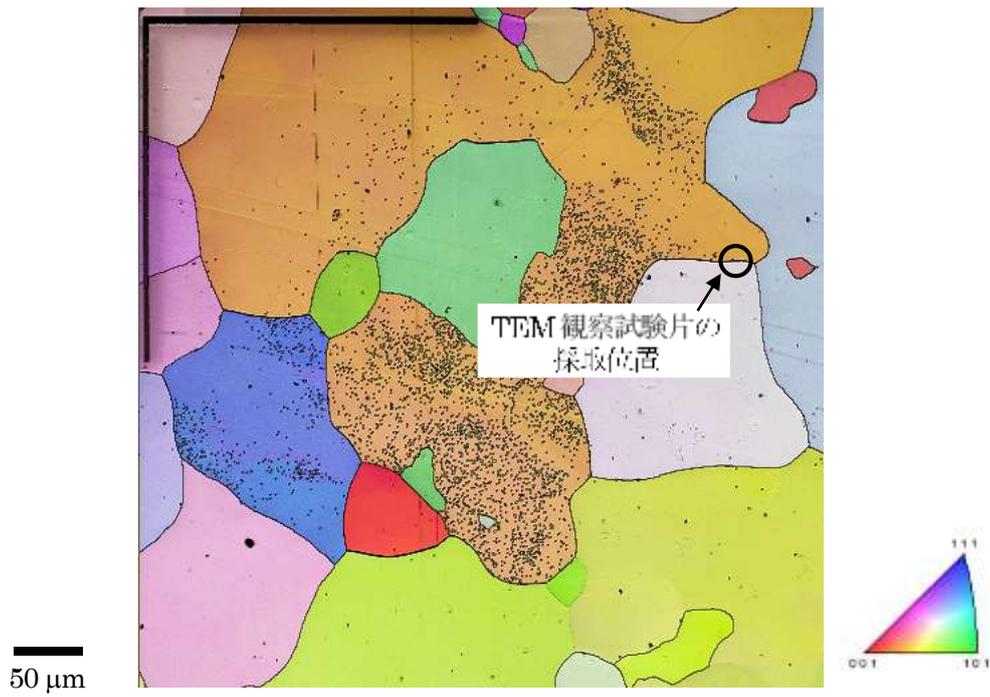


(b) 炭素鋼 (0.5%Cu)、90°C、1 dpa 照射材

図 7.3.1-31 EBSD 測定結果 (炭素鋼)



(a) FeMnSiCu 合金、90°C、0.1 dpa 照射材



(d) FeMnSiCu 合金、90°C、1 dpa 照射材

図 7.3.1-32 EBSD 測定結果 (FeMnSiCu 合金)

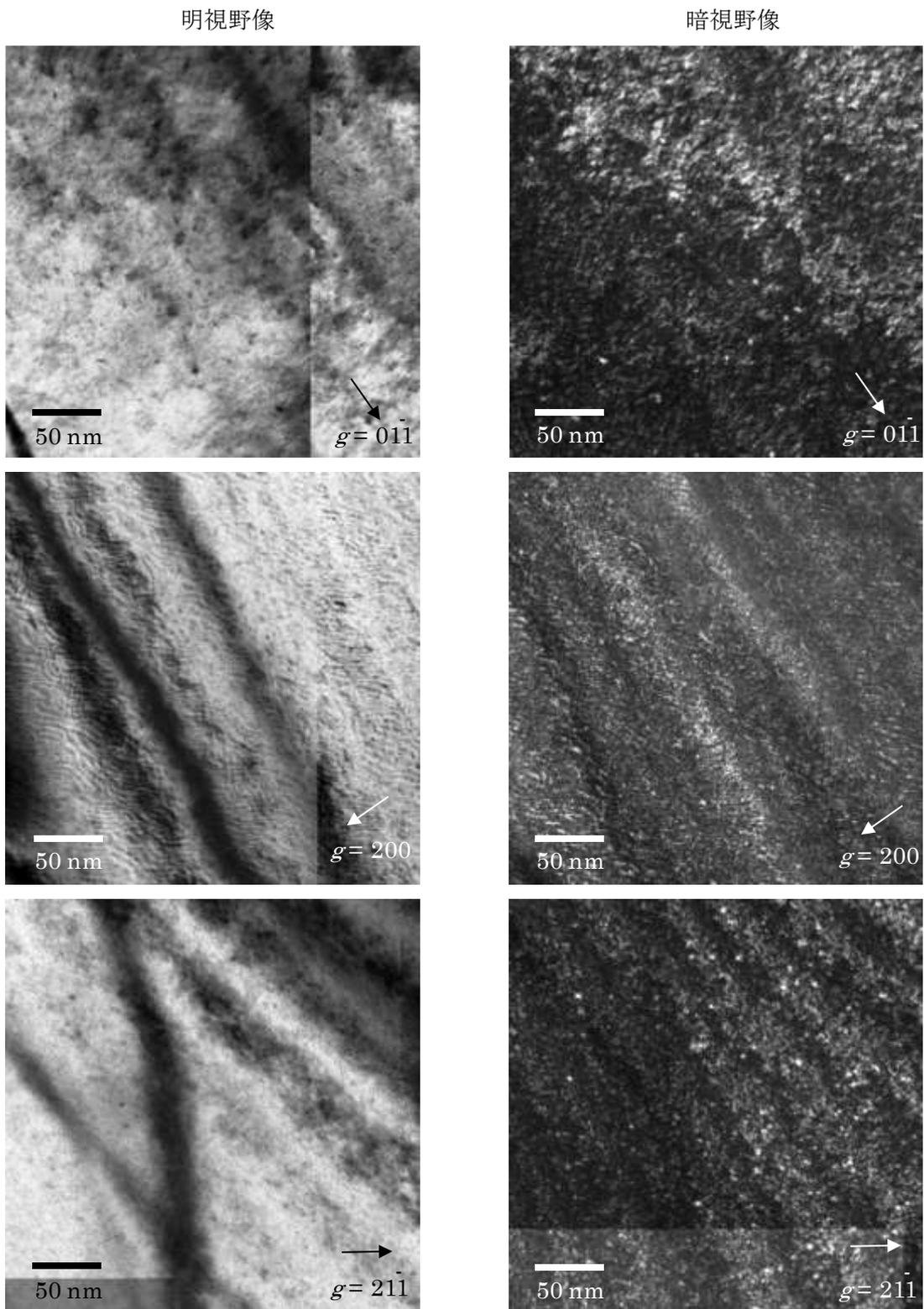
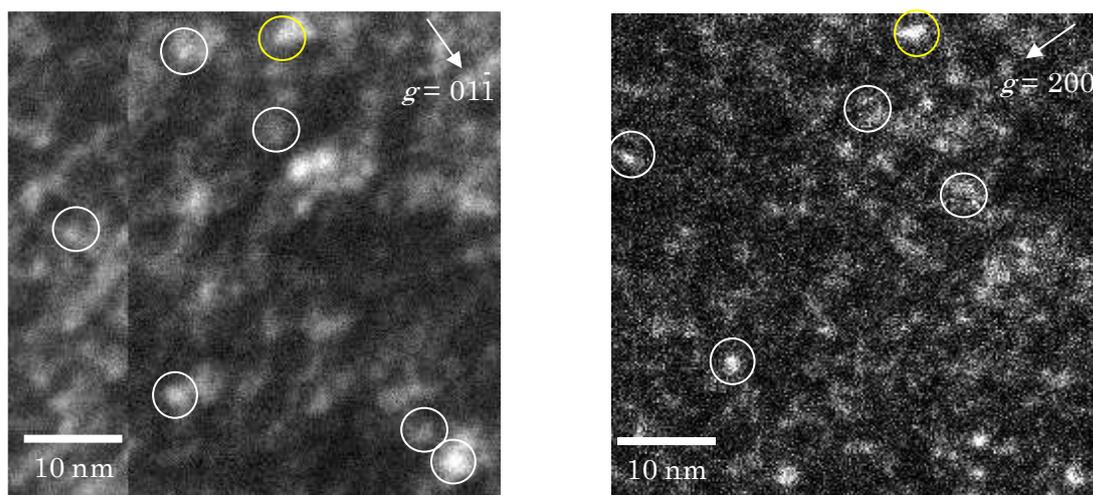


図 7.3.1-33 90°C で 0.1 dpa 照射した炭素鋼のマイクロ組織の明視野像と暗視野像[8]
 (電子線の入射方向は $B = [011]$)

電子線の入射方向 : $B = [011]$



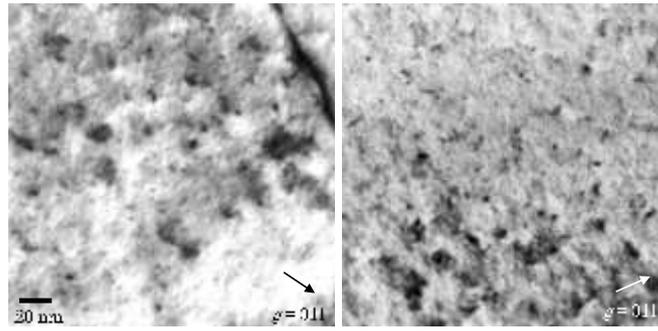
(a) $B=[011]$, $g = [01\bar{1}]$

(b) $B=[011]$, $g=[200]$

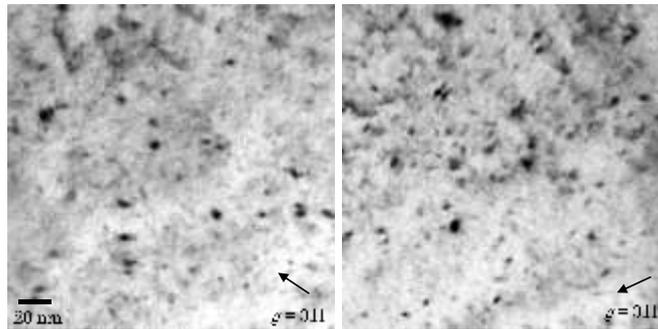
図 7.3.1-34 90°C で 0.1 dpa 照射した炭素鋼の暗視野像の拡大図[8]

視野 1

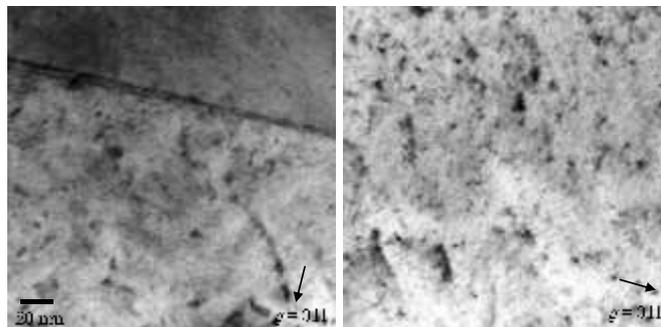
視野 2



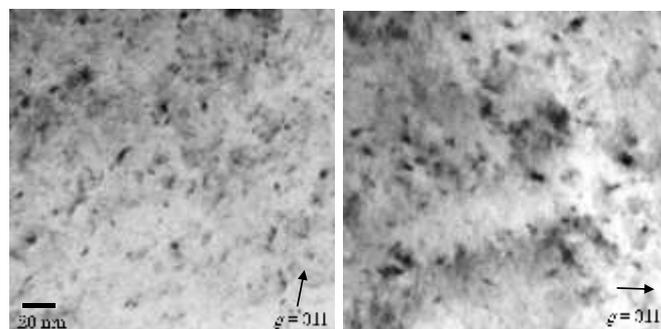
(a) 炭素鋼 (0.5%Cu)、90°C、0.1 dpa 照射材



(b) 炭素鋼 (0.5%Cu)、90°C、1 dpa 照射材



(c) FeMnSiCu 合金、90°C、0.1 dpa 照射材



(d) FeMnSiCu 合金、90°C、1 dpa 照射材

図 7.3.1-35 転位ループの明視野像 (B = [011])

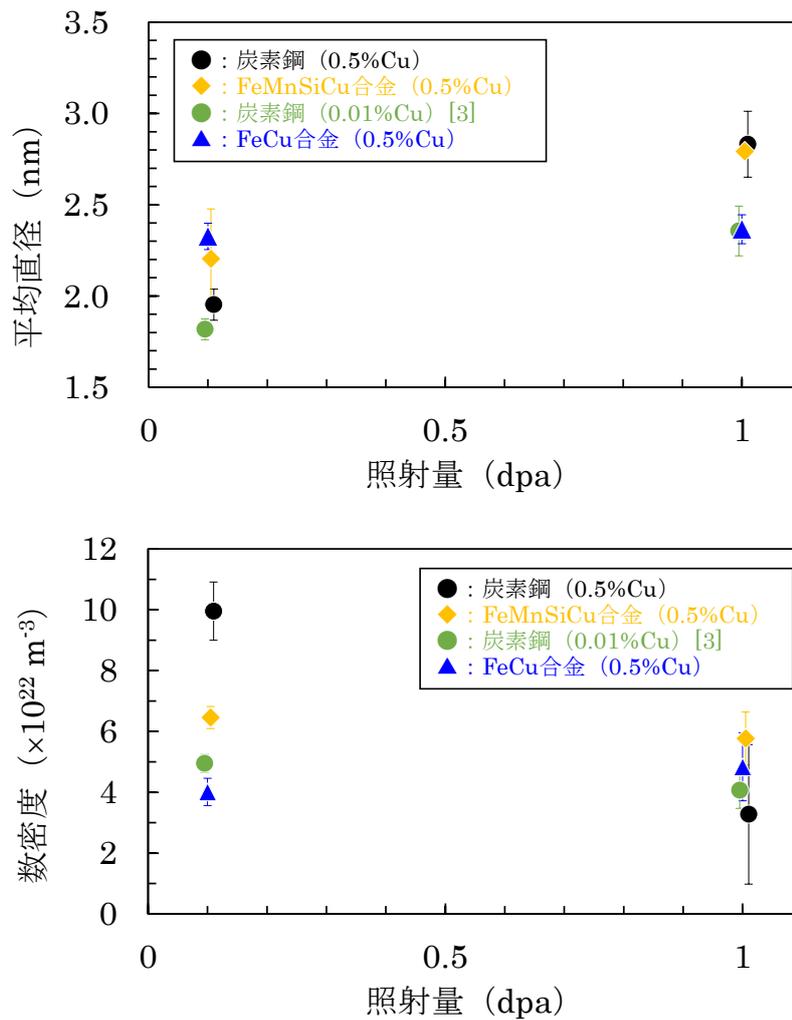


図 7.3.1-36 転位ループの平均直径と数密度の照射に伴う変化

(7) ミクロ組織と硬さの関係

イオン照射により炭素鋼 (0.5%Cu) と FeMnSiCu 合金は硬化し、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 7.3.1-8 に硬さの増加量とミクロ組織をまとめて示す。硬さの増加量は炭素鋼と比較して FeMnSiCu 合金でわずかに大きい。

転位ループの形成と硬化との関係を検討するため、転位ループの形成による硬化の指標である \sqrt{Nd} (N : 数密度、 d : 平均直径) を図 7.3.1-37 に示す。図中には炭素鋼 (0.01%Cu, 90°C 照射) と FeCu 合金の値[8]も比較のために示した。照射量の増加に伴う \sqrt{Nd} の変化は小さく、転位ループが硬化に及ぼす寄与は 0.1 dpa 照射と 1 dpa 照射では大きな違いはないことが示唆された。また、FeCu 合金に比べて FeMnSiCu 合金の \sqrt{Nd} は大きくなっており、Mn と Si の添加は転位ループの形成を促進することが示唆される。ただし、炭素鋼では必ずしも FeCu 合金よりも \sqrt{Nd} が大きくなるのはおらず、C や P、S 等の添加も転位ループの形成に影響することが推察された。

図 7.3.1-38 に硬さの増加量と転位ループの \sqrt{Nd} との関係を示す。また、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についても同様に整理し、図 7.3.1-39 に示す。図中には比較

のため、炭素鋼 (0.01%Cu) と FeCu 合金の値[8]も示した。照射量 0.1 dpa と 1 dpa では観察された転位ループの量があまり変わらず、硬さの変化もあまり大きくなかったことから、両者でよい相関関係は認められなかったが、硬さの増加量と転位ループの \sqrt{Nd} には一定の関係は認められ、転位ループが硬化を生じさせていることが分かった。また、FeCu 合金に比べて炭素鋼や FeMnSiCu 合金がより大きな硬さの増加量を示したことは、Mn や Si が転位ループの周りに集まり、転位ループの硬化係数を大きくしている可能性も考えられるが、詳細は今後の検討課題である。

溶質クラスタの $\sqrt{V_f}$ の増加に対しては全ての材料で硬さの増加量が大きくなる傾向が認められており、溶質クラスタの形成は硬化に寄与することが確認された。しかし、本研究で炭素鋼と FeMnSiCu 合金に認められた溶質クラスタの体積率は FeCu 合金に比べて大きい傾向が認められた。Mn と Si の添加により溶質クラスタの形成が促進されたと考えられるが、定量的な評価はさらに研究が必要である。

表 7.3.1-8 硬さの増加量とマイクロ組織

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
炭素鋼 (0.5%Cu)	0.1	0.96	2.0	1×10^{23}	-	-	-
	1.0	1.10	2.8	3×10^{22}	1.88	6.1×10^{24}	0.170
FeMnSiCu 合金 (0.5%Cu)	0.1	1.03	2.2	6×10^{22}	-	-	-
	1.0	1.25	2.8	6×10^{22}	1.84	8.9×10^{24}	0.233

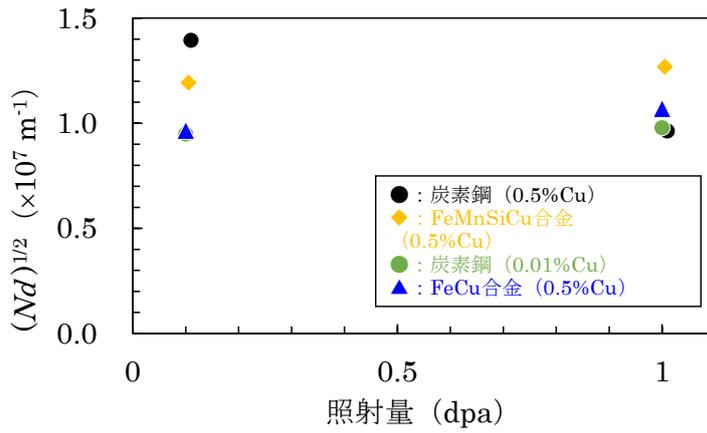


図 7.3.1-37 転位ループの \sqrt{Nd} の照射に伴う変化

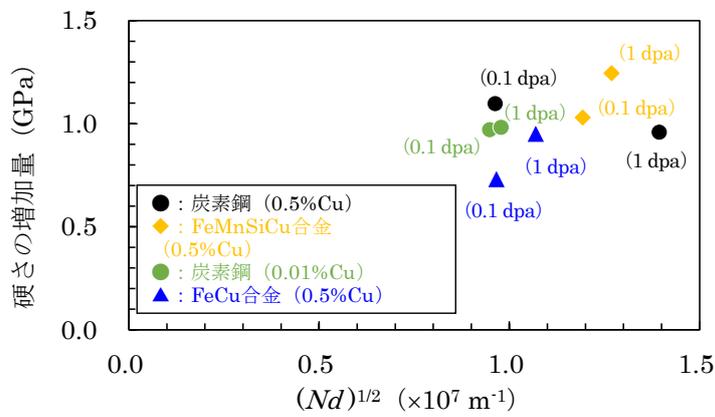


図 7.3.1-38 硬度の増加量と転位ループの \sqrt{Nd} との関係

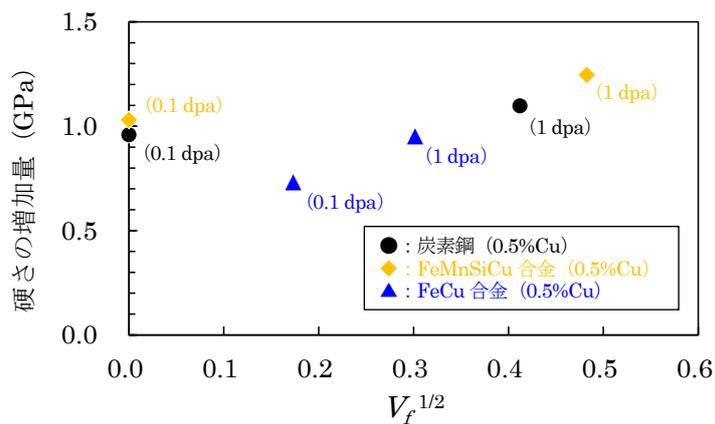


図 7.3.1-39 硬度の増加量と溶質クラスターの $\sqrt{V_f}$ との関係

7.3.2 脆化因子におよぼす照射速度の影響

(1) 試験片の作製

1) 試験材

炭素鋼 (0.5wt%Cu) および Cu 濃度 0.5wt% の FeCu 合金 (55×28×43t mm) を試験材として用いた。FeCu 合金は平成 27 年度の試験でも使用しており、真空溶解炉により鑄造した鑄塊を 1,100°C で鍛造した後、850°C で 2 時間保持から水冷する固溶化熱処理が施されている。表 7.3.2-1 に化学組成を示す。Cu 濃度が 0.48 wt% あり、他の不純物が極めて少ない材料である。

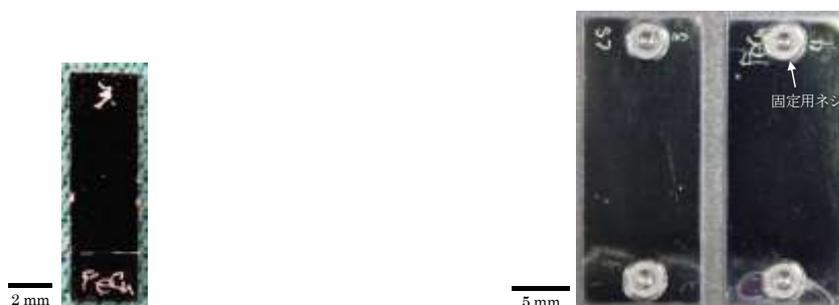
表 7.3.2-1 FeCu 合金の化学組成 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
0.001	<0.01	<0.01	<0.001	0.001	0.48	<0.01
Cr	Mo	Al	V	Nb	N	Fe
<0.01	<0.01	-	-	-	0.0019	bal.

2) 試験体の作製

炭素鋼の試験材からイオン照射用として 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。また、電子線照射用として 25×10×t1 mm の短冊状試験体を板厚方向に 2 個ずつ計 4 個切り出した。試験体の表面と側面を 1,200 番の SiC 研磨紙で湿式機械研磨した後、イオン照射用の試験体については 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 (溶液状の粒径 0.04 μm の研磨砥粒) で鏡面研磨し、照射用の表面とした。その後、ナイタール (3%硝酸+97%エタノール) 中に 1 秒間浸漬させて化学研磨により最表面の加工層を除去した。電子線照射用の試験体については、水中での照射試験になるために防食の観点から Zn メッキを施した後、最表面に耐食性のある Cr 化合物を形成するクロメート処理を施した。

FeCu 合金の試験材から、イオン照射用として 10×3×t1 mm の短冊状試験体を板幅方向に放電加工により 2 個切り出し、25×10×t1 mm の短冊状試験体を板幅方向に 4 個切り出した。表面研磨とメッキ処理については炭素鋼と同様に実施した。金属組織はフェライト単相である。図 7.3.2-1 に試験体の外観を示す。



(a) イオン照射試験用

(b) 電子線照射試験用 (メッキ処理後)

図 7.3.2-1 試験体の外観

(2) 電子線照射試験

1) 加速器

電子加速器を用いて、試験体に 5 MeV の電子線を照射した。電子線照射室の外観を図 7.3.2-2 に示す。電子線は、スキャンホーンと呼ばれる部分から照射トレイの幅約 1m に走査されながら鉛直下向きに照射される。

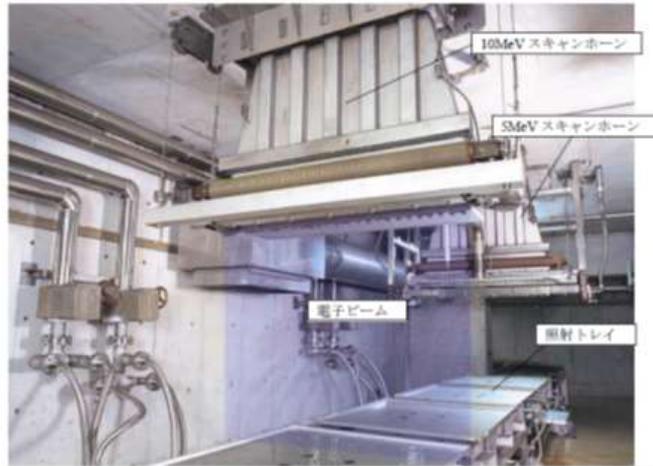


図 7.3.2-2 電子ビーム照射室の外観

2) 試験体の照射方法

図 7.3.2-3 に示すアルミニウム製の角管の中に試験体を固定し、冷却水を流しながら上方から電子ビームを照射する。この治具を図 7.3.2-4 に示すようにスキャンホーン (5 MeV 用) の直下に固定して照射を行った。



(a) アルミニウム製の角管



(b) 試験体固定治具

図 7.3.2-3 照射試験用治具

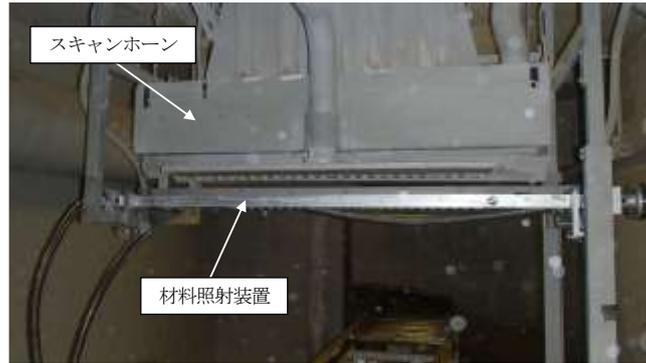


図 7.3.2-4 照射試験用治具のスキャンホーンへの取付け状況

3) 照射試験

電子線照射では試験体内部での発熱が極めて大きいため、試験体の温度は、電子ビームのエネルギーと強度や試験体板厚で決まる発熱量と、冷却水の温度と流量や接液面積で決まる冷却能力のバランスにより調整される。したがって、電子ビーム強度に比例する損傷速度と照射温度が独立には制御できず、目標とする温度で電子ビーム強度に制限があり、稼働時間との関係で到達可能な損傷量が決まることになる。そのため、予備試験により電子ビーム強度と照射温度の関係を調べた上で、照射試験を実施した。

照射試験は 172 時間実施し、長時間にわたるため 3 回に分けて実施した。照射中の熱電対の指示温度は $90^{\circ}\text{C}\pm 7^{\circ}\text{C}$ で維持できており、平均値で $92^{\circ}\text{C}\sim 95^{\circ}\text{C}$ であった。照射速度については、照射面積を長手方向均一長さで半値幅の範囲 ($94.4\times 2.08 = 196.35\text{ cm}^2$) とすると、1 mA の電子ビームに相当する電子数は $6.24\times 10^{15}\text{ e/s}$ であり、3 割程度の電子の漏れを考慮すると照射面積内の正味の平均電子密度は $2.23\times 10^{13}\text{ e/cm}^2/\text{mA/s}$ となる。 10^{-8} dpa/s は $10^{14}\text{ e/cm}^2/\text{s}$ に相当するため ($1\text{ dpa} = 10^{22}\text{ e/cm}^2$)、電流値 1 mA あたりの照射速度は $0.223\times 10^{-8}\text{ dpa/s/mA}$ となる。平均の照射速度は、3 回の照射試験を通じて平均の電流値が 6.4 mA であったことから、 $1.42\times 10^{-8}\text{ dpa/s}$ となる。また、試験体の中央でのビーム強度は、半値幅内の平均強度の 1.28 倍であるため、試験体中央の照射速度は $1.82\times 10^{-8}\text{ dpa/s}$ となる。照射中の電流値の変動幅は 3.1 mA から 11.3 mA であったため、照射速度の変動幅は $0.883\sim 3.22\times 10^{-8}\text{ dpa/s}$ であった。照射量については試験体中央で 0.01 dpa となった。硬さ試験と APT 分析および TEM 観察には試験体の中央部を供した。

(3) イオン照射試験

タンデム加速器を用いて、試験体表面に加速電圧 2.8 MeV で Fe^{2+} 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 $1\times 10^{-4}\text{ dpa/s}$ 、照射量を 0.01 dpa を目標値とした。

各照射試験について 2 個ずつ試験体を照射した。照射速度は目標値の $1\times 10^{-4}\text{ dpa/s}$ から最大 12% のずれが生じている場合があったが、平均値では 5% 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に近い部位を供した。

(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、硬さを測定した。測定方法の詳細はイオン照射試験における硬さ測定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、ナイトール（3%硝酸+97%エタノール）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

炭素鋼（0.5%Cu）について、電子線照射材とイオン照射材の硬さの測定結果を図 7.3.2-5 に示す。電子線照射材では 3.1 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、同一の照射量で電子線照射の方がイオン照射に比べて硬化量が大きくなった。

FeCu 合金について硬さの測定結果を図 7.3.2-6 に示す。電子線照射材では 2.9 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 2.6 GPa にピークがあり、炭素鋼と同様に、同一の照射量で電子線照射の方がイオン照射に比べて硬化量が大きくなった。

硬さの平均値と硬さの増加量（未照射材の硬さとの差分）を図 7.3.2-7 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。硬さは炭素鋼の方が大きいですが、硬さの増加量は炭素鋼と FeCu 合金で大きな違いは認められなかった。

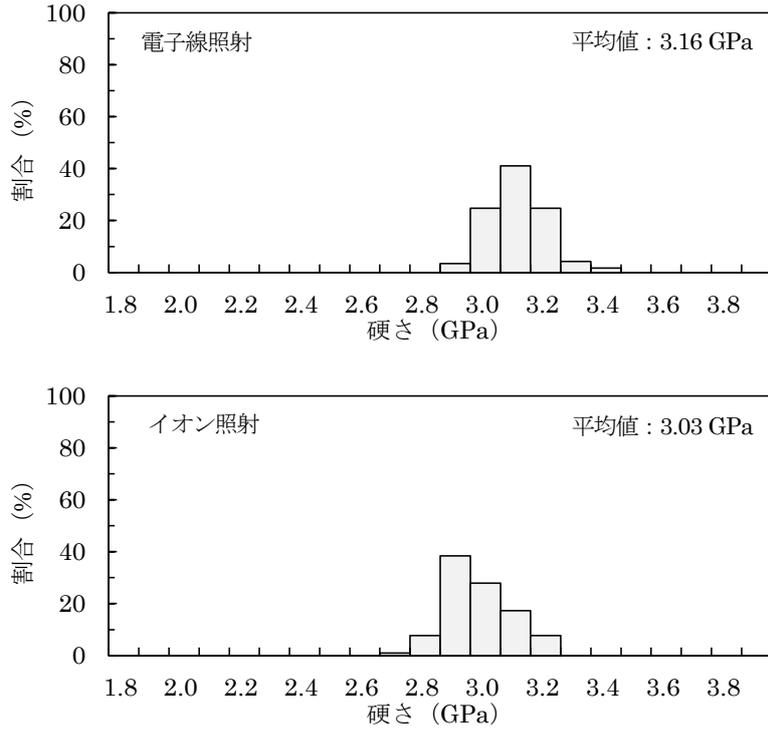


図 7.3.2-5 90°C で 0.01 dpa まで電子線照射、イオン照射した炭素鋼の硬さ分布

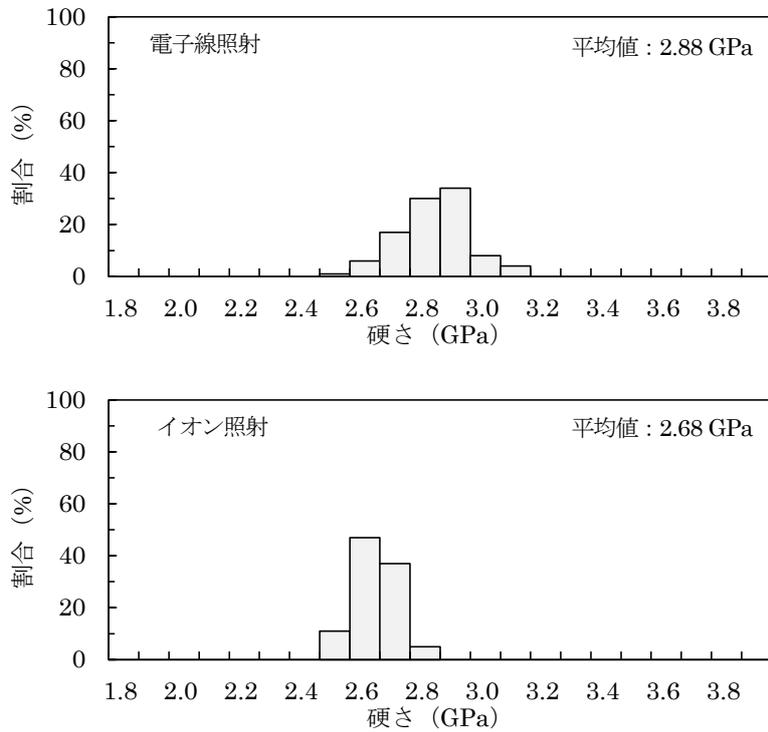


図 7.3.2-6 90°C で 0.01 dpa まで電子線照射、イオン照射した FeCu 合金の硬さ分布

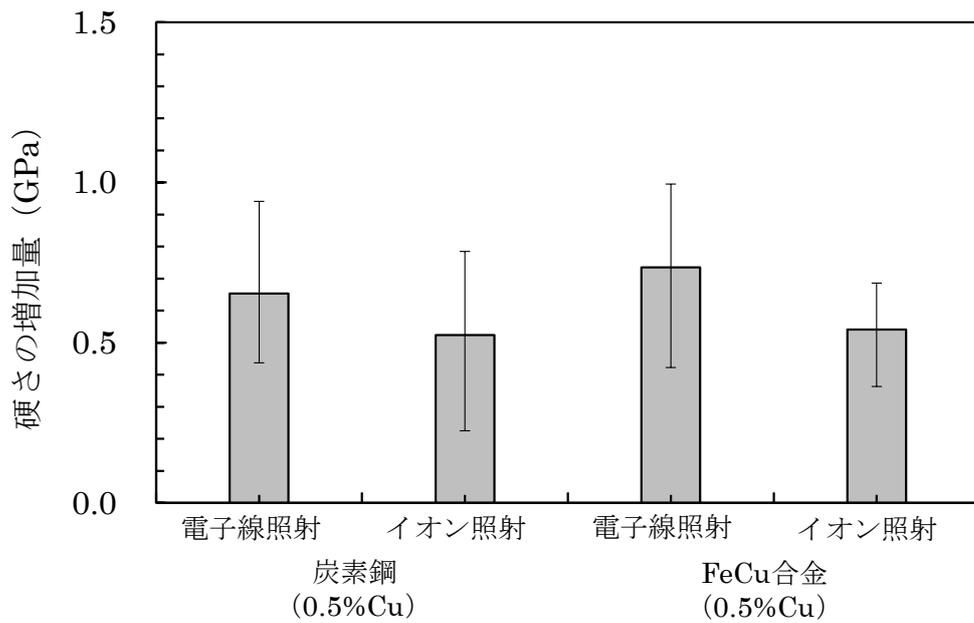
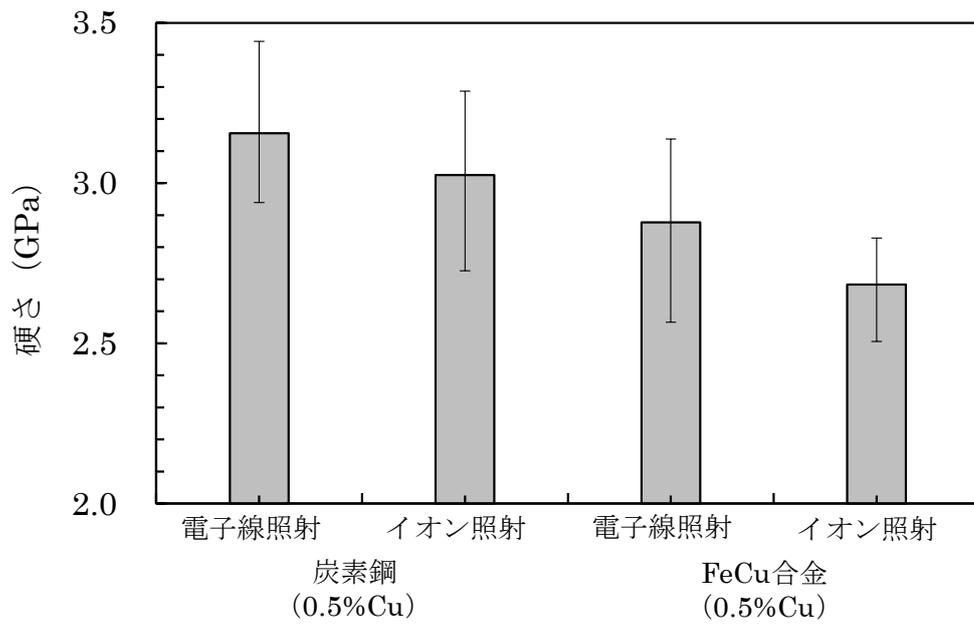


図 7.3.2-7 90°Cで0.01 dpaまでの電子線照射およびイオン照射に伴う硬度の変化

(5) 3次元アトムプローブ分析 (APT 分析)

1) 分析試験片の作製および測定方法

7.3.1 と同様の方法で分析試験片を作製し、測定を実施した。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。

炭素鋼 (E : 電子線照射, I : イオン試験) : CS-E-uS1, CS-I-uS1

FeCu 合金 (E : 電子線照射, I : イオン試験) : FeCu-E-uS1, FeCu-I-uS1

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。作製した APT 分析試験片の SEM 写真を図 4.6-2 に示す。

2) 測定結果

炭素鋼について得られたアトムマップを図 7.3.2-8 および図 7.3.2-9 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。電子線照射材については Mn と Si、Cu が集積したクラスタの形成が認められたが、イオン照射材については明確な集積は認められなかった。

FeCu 合金について得られたアトムマップを図 7.3.2-10 および図 7.3.2-11 に示す。Fe と Cu についてマップを示した。電子線照射材とイオン照射材でともに Cu が集積したクラスタの形成が認められた。

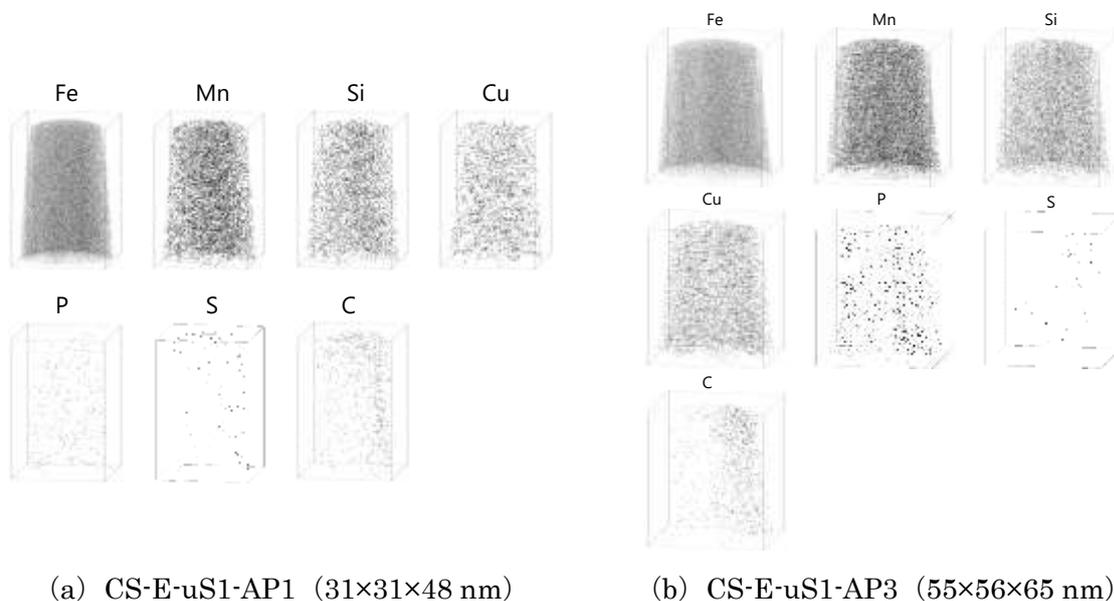
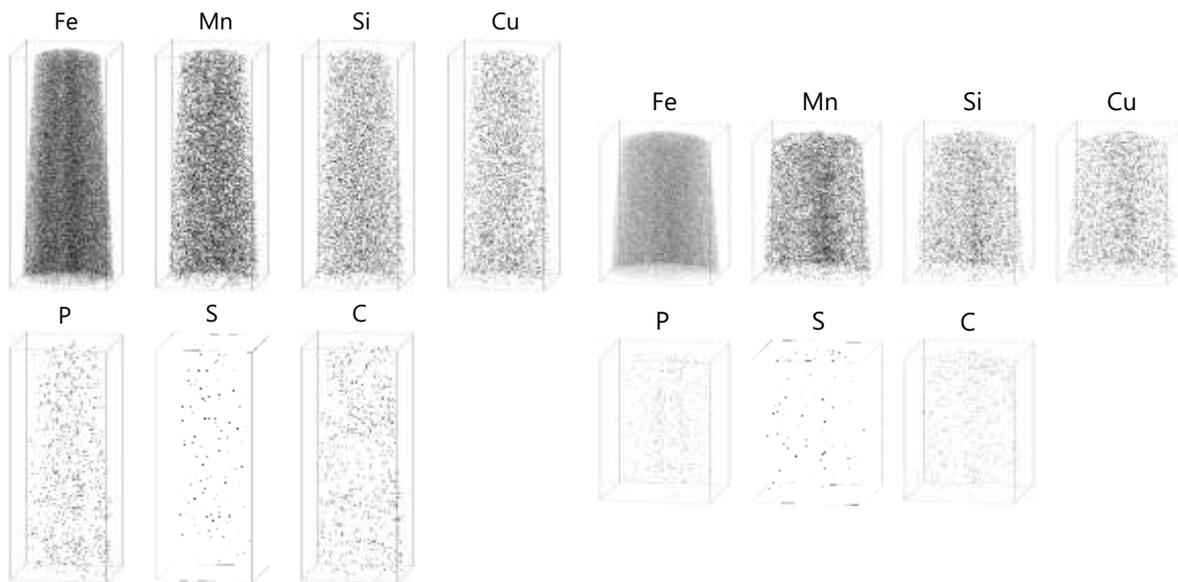


図 7.3.2-8 炭素鋼試験片のアトムマップ (電子線照射材)

(炭素鋼 (0.5%Cu)、90°C、0.01 dpa)

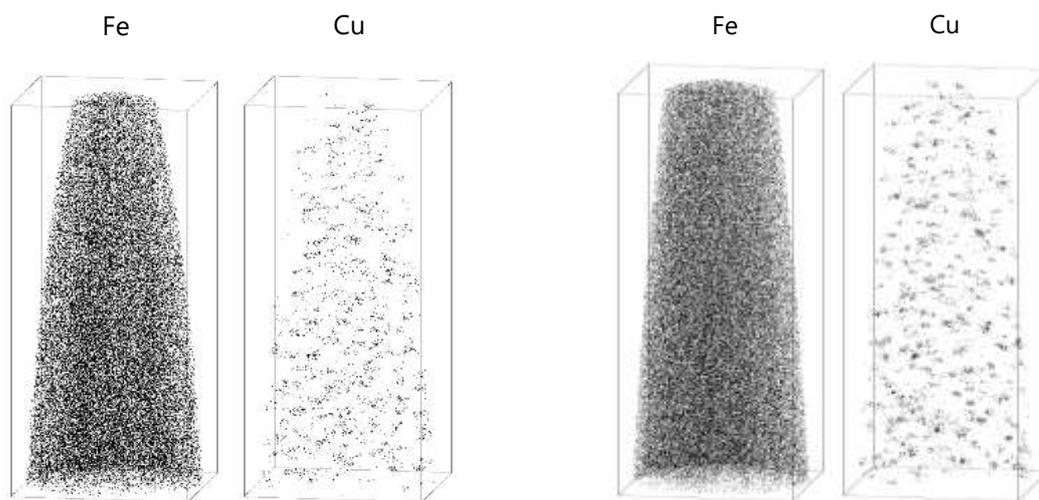


(a) CS-I-uS1-AP2 (32×33×79 nm)

(b) CS-I-uS1-AP3 (35×35×46 nm)

図 7.3.2-9 炭素鋼試験片のATOMマップ (イオン照射材)

(炭素鋼 (0.5%Cu)、90°C、0.01 dpa)

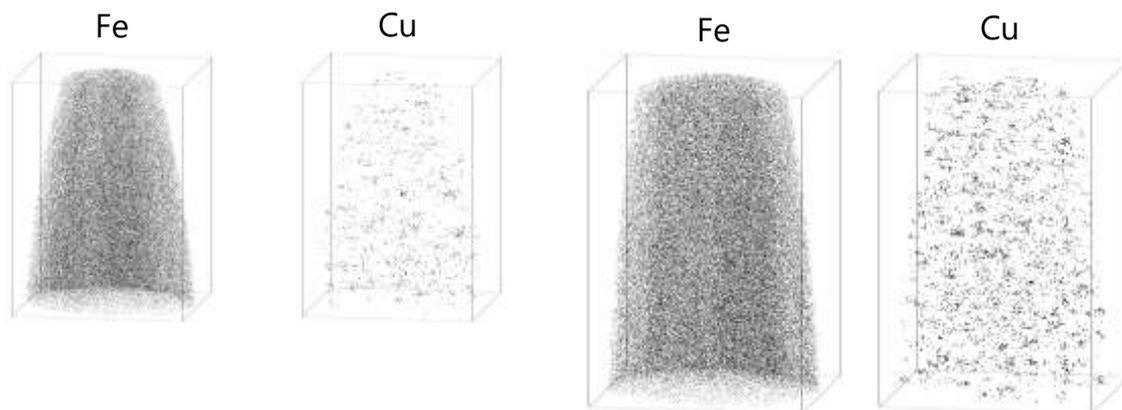


(a) FeCu-E-uS1-AP1 (34×35×78 nm)

(b) FeCu-E-uS1-AP3 (36×36×84 nm)

図 7.3.2-10 FeCu 合金試験片のATOMマップ (電子線照射材)

(FeCu 合金 (0.5%Cu)、90°C、0.01 dpa)



(a) FeCu-I-uS1-AP1 (27×27×37 nm) (b) FeCu-I-uS1-AP2 (34×34×51 nm)

図 7.3.2-11 FeCu 合金試験片のATOMマップ (イオン照射材)
(FeCu 合金 (0.5%Cu)、90°C、0.01 dpa)

(4) クラスタ解析

炭素鋼についてはコア原子を Mn、Si、Cu とし、コア原子連鎖距離と周辺原子抽出距離は 0.7 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、溶質クラスタとして扱うコア原子の最小数は 10 個とした。FeCu 合金については、コア原子を Cu とし、その他の条件については炭素鋼と同じとした。

クラスタ解析は、ATOMマップに明確な溶質原子クラスタの形成が認められた炭素鋼の電子線照射材と FeCu 合金の電子線照射材およびイオン照射材について実施した。解析に用いた測定データは、CS-E-uS1-AP1, FeCu-E-uS1-AP3, FeCu-I-uS1-AP2 である。

図 7.3.2-12 に炭素鋼 (電子線照射材) の MnSiCu マップとクラスタマップの比較を示すとともに、図 7.3.2-13 に FeCu 合金の Cu マップとクラスタマップの比較を示す。炭素鋼については抽出されたクラスタはやや粗な様相を呈しており、原子の集積が低いことが示唆される。FeCu 合金については、電子線照射材で明確なクラスタが確認されたが、イオン照射材ではクラスタはやや粗な様相を呈した。

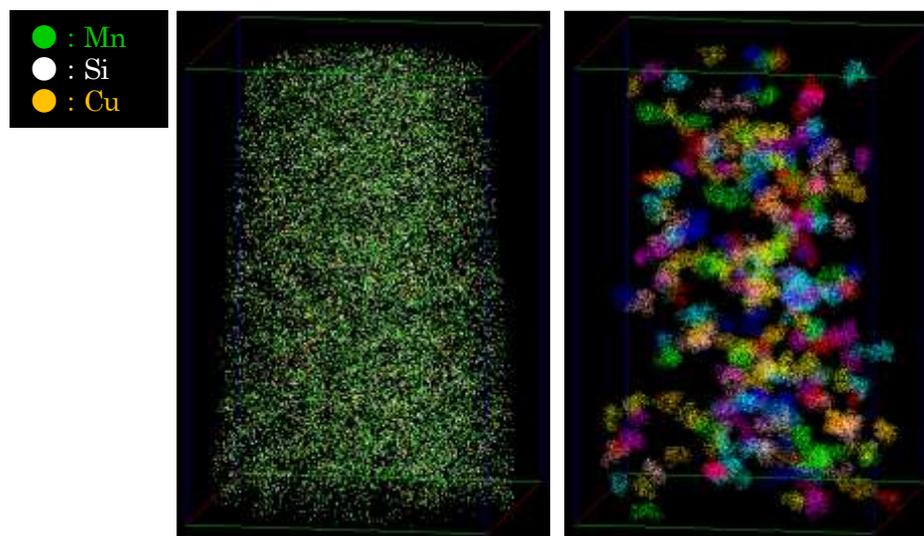
炭素鋼と FeCu 合金のクラスタのサイズ分布を図 7.3.2-14 に示す。炭素鋼の電子線照射材ではクラスタ直径の分布のピークは 1.5~2.0 nm にあり、平均値は 1.90 nm であった。FeCu 合金については、電子線照射材ではクラスタ直径の分布のピークは 1.5~2.0 nm にあり、平均値は 1.76 nm であったが、イオン照射材ではクラスタ直径の分布のピークは 1.0~1.5 nm にあり、平均値は 1.54 nm であった。また、数密度については、炭素鋼 (電子線照射材) では $8 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ であり、FeCu 合金では電子線照射材で $4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 、イオン照射材で $2 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ であった。電子線照射材ではイオン照射材と比較して溶質クラスタのサイズと数密度が増加しており、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。

炭素鋼と FeCu 合金のクラスタの組成分布をそれぞれ図 7.3.2-15 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。炭素鋼の電子線照射材については 112 個、FeCu 合金については電子線照射材では 146 個、イオン照射材では 39 個のクラスタについて組成分布を示した。炭素鋼では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。炭素鋼での平均組成

(at%) は Fe-21.0Mn-10.6Si-11.6Cu であり、Si や Cu を含まないクラスタも認められた。FeCu 合金については、電子線照射材とイオン照射材で組成分布に大きな違いは認められず、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。平均組成 (at%) は電子線照射材が Fe-31.7Cu で、イオン照射材では Fe-33.7Cu とほぼ同じであった。表 7.3.2-2 にクラスタ解析結果をまとめる。

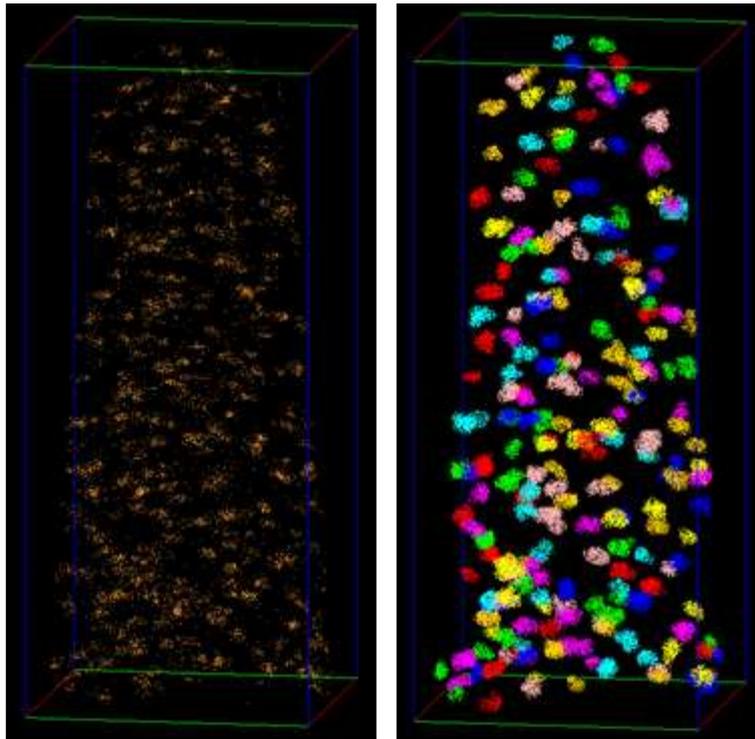
表 7.3.2-2 クラスタ解析結果のまとめ

材料	照射方法	照射条件			平均直径 (nm)	数密度 (m^{-3})	体積率	平均組成 (at%)
		温度 ($^{\circ}C$)	照射速度 (dpa/s)	照射量 (dpa)				
炭素鋼 (0.5%Cu)	電子線照射	90	1.82×10^{-8}	0.01	1.90	8.1×10^{24}	0.231	Fe-21.0Mn-10.6Si-11.6Cu
FeCu 合金	電子線照射	90	1.82×10^{-8}	0.01	1.76	3.8×10^{24}	0.087	Fe-31.7Cu
	イオン照射	90	9.8×10^{-5}	0.01	1.54	1.8×10^{24}	0.028	Fe-33.7Cu

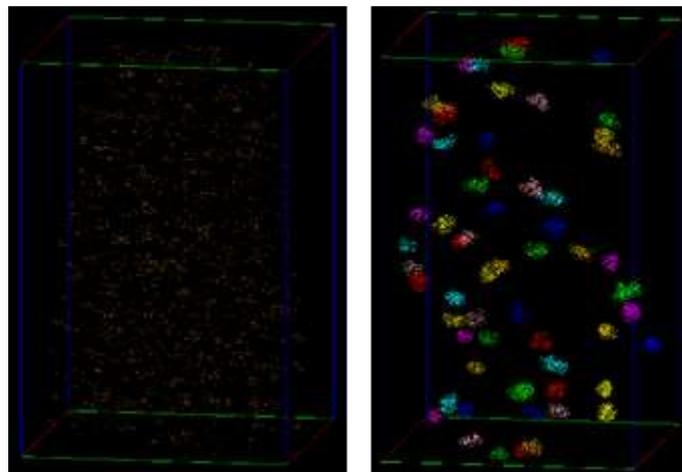


CS-E-uS1-AP1 (90 $^{\circ}C$ 、0.01 dpa、電子線照射材)

図 7.3.2-12 炭素鋼 (0.5%Cu) の MnSiCu マップ (左) とクラスタマップ (右)

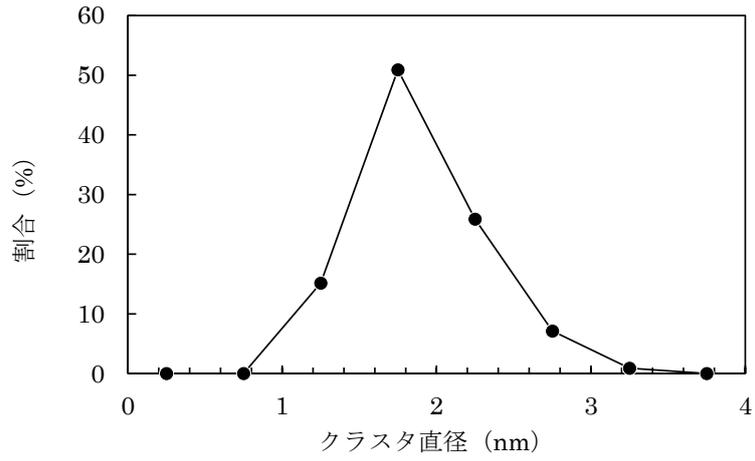


(a) FeCu-E-uS1-AP3 (90°C、0.01 dpa、電子線照射材)

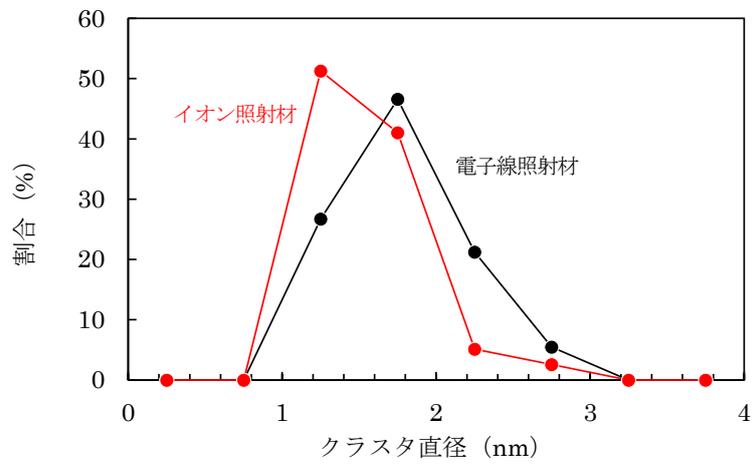


(b) FeCu-I-uS1-AP2 (90°C、0.01 dpa、イオン照射材)

図 7.3.2-13 FeCu 合金 (0.5%Cu) の Cu マップ (左) とクラスタマップ (右)

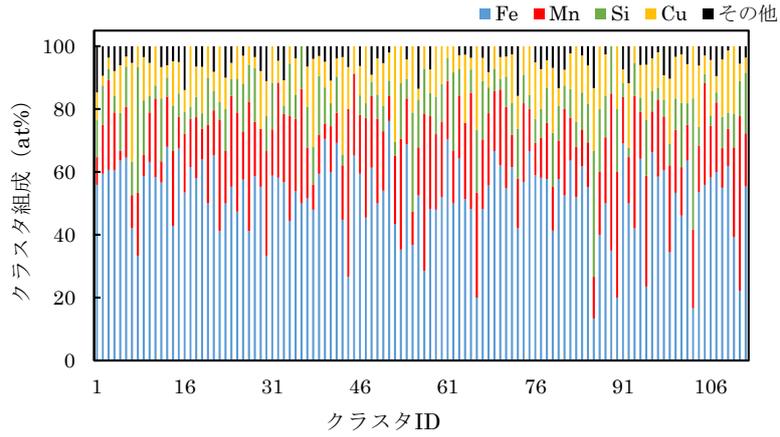


(a) 炭素鋼 (0.5%Cu) の電子線照射材

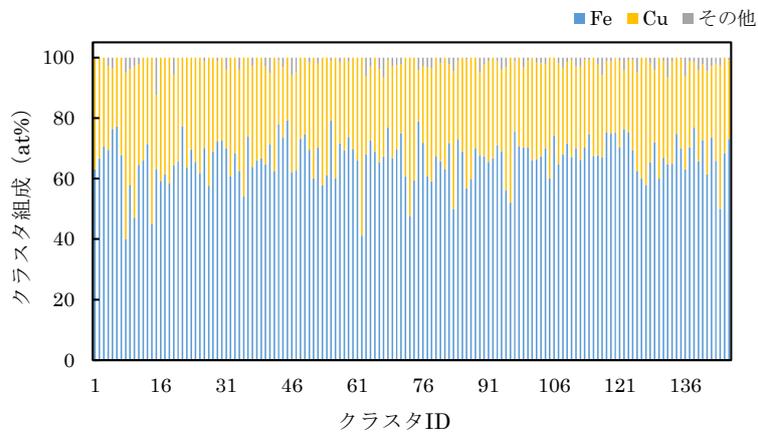


(b) FeCu 合金 (0.5%Cu) の電子線照射材とイオン照射材

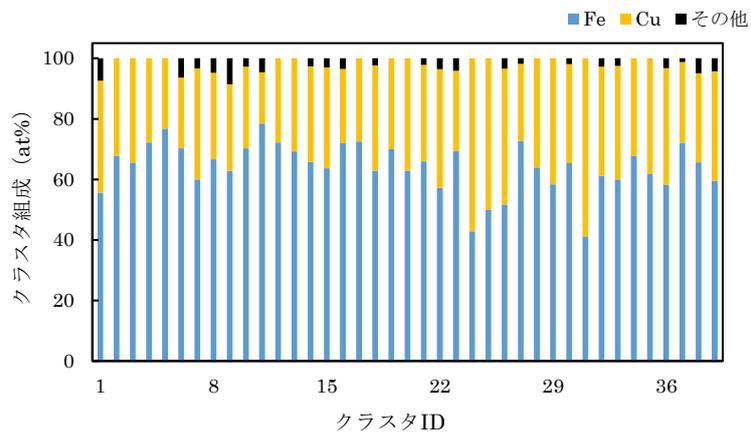
図 7.3.2-14 炭素鋼 (0.5%Cu) と FeCu 合金 (0.5%Cu) のクラスタのサイズ分布



(a) 炭素鋼 (0.5%Cu) の電子線照射材



(b) FeCu 合金 (0.5%Cu) の電子線照射材



(c) FeCu 合金 (0.5%Cu) のイオン照射材

図 7.3.2-15 炭素鋼 (0.5%Cu) と FeCu 合金 (0.5%Cu) のクラスタの組成分布

(6) TEM 観察

1) 観察用試験片の作製および観察方法

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。炭素鋼 (0.5%Cu) と FeCu 合金の試験体表面の結晶方位と粒界位置を図 7.3.2-16 に示す。

EBSD 測定結果を元に、試験体表面から FIB 加工により TEM 観察試験片を作製した。図 7.3.2-16 中に TEM 観察試験片の採取位置を示した。TEM 観察試験片の作製方法および観察方法は、イオン照射試験片と同様の方法である。

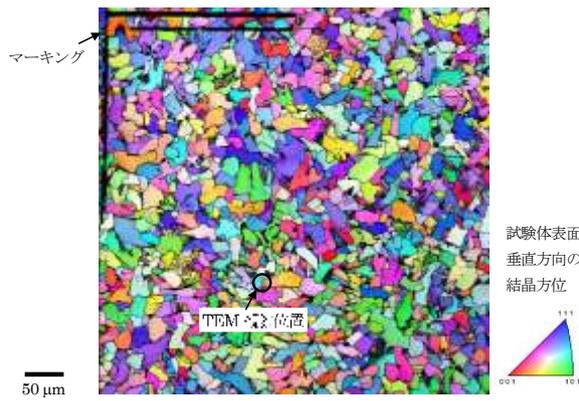
2) 観察結果

転位ループの明視野像を図 7.3.2-17 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 7.3.2-3 にまとめた。また、図 7.3.2-18 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。

炭素鋼については、電子線照射材の方がイオン照射材に比べて転位ループの平均直径が大きく、数密度も多かった。ただし、数密度の違いについては TEM 試料の膜厚等の測定誤差を考慮するところの程度の違いは有意ではない可能性がある。FeCu 合金については、平均直径は電子線照射材とイオン照射材で大きな違いは認められず、数密度はイオン照射材の方が高くなったが、炭素鋼と同様に有意な差ではない可能性がある。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 7.3.2-3 転位ループの平均直径と数密度

材料	照射方法	視野	平均直径 (nm)	数密度 (m^{-3})
炭素鋼 (0.5%Cu)	電子線照射	1	2.7	8×10^{22}
		2	2.1	1×10^{23}
		平均	2.4	9×10^{22}
	イオン照射	1	1.9	4×10^{22}
		2	1.6	3×10^{22}
		平均	1.7	4×10^{22}
FeCu 合金	電子線照射	1	2.3	1×10^{23}
		2	2.3	2×10^{23}
		平均	2.3	1×10^{23}
	イオン照射	1	2.3	2×10^{23}
		2	2.2	2×10^{23}
		平均	2.2	1×10^{23}



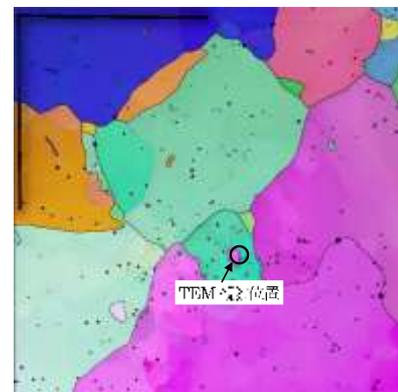
(a) 炭素鋼 (0.5%Cu)、90°C、0.01 dpa、
電子線照射材



(b) 炭素鋼 (0.5%Cu)、90°C、0.01
dpa、
イオン照射材



(c) FeCu 合金 (0.5%Cu)、90°C、0.01 dpa、
電子線照射材

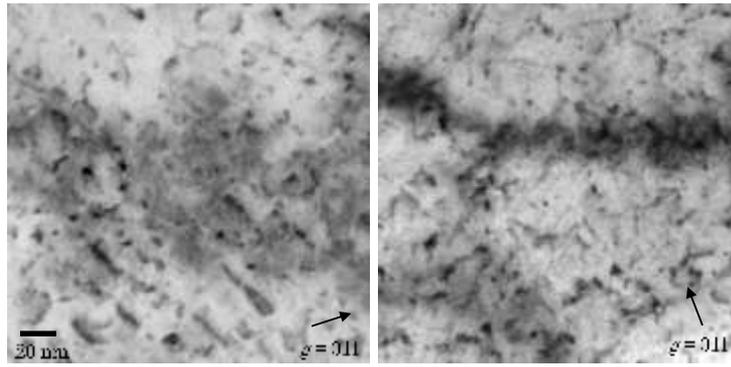


(d) FeCu 合金 (0.5%Cu)、90°C、0.01
dpa、
イオン照射材

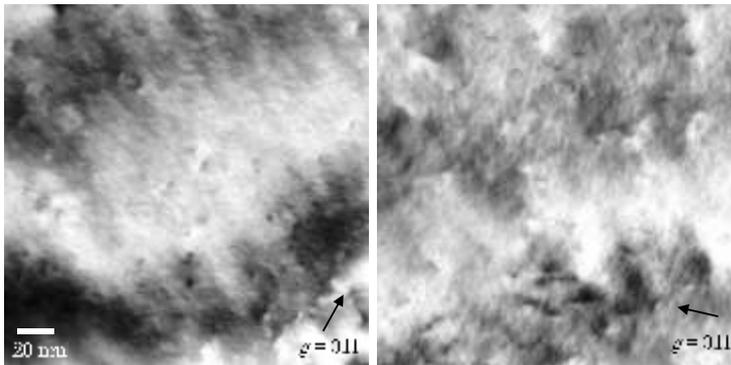
図 7.3.2-16 EBSD 測定結果

視野 1

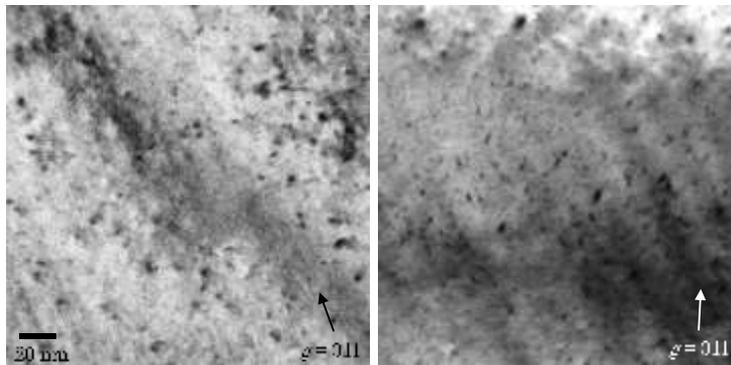
視野 2



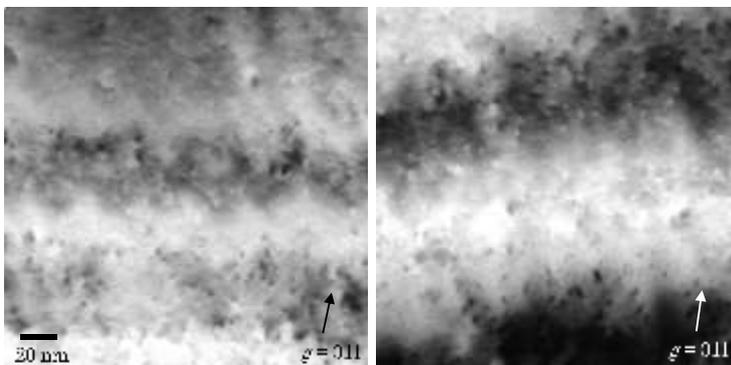
(a) 炭素鋼 (0.5%Cu)、90°C、0.01 dpa、電子線照射材



(b) 炭素鋼 (0.5%Cu)、90°C、0.01 dpa、イオン照射材



(c) FeCu 合金 (0.5%Cu)、90°C、0.01 dpa、電子線照射材



(d) FeCu 合金 (0.5%Cu)、90°C、0.01 dpa、イオン照射材

図 7.3.2-17 転位ループの明視野像 ($B = [011]$)

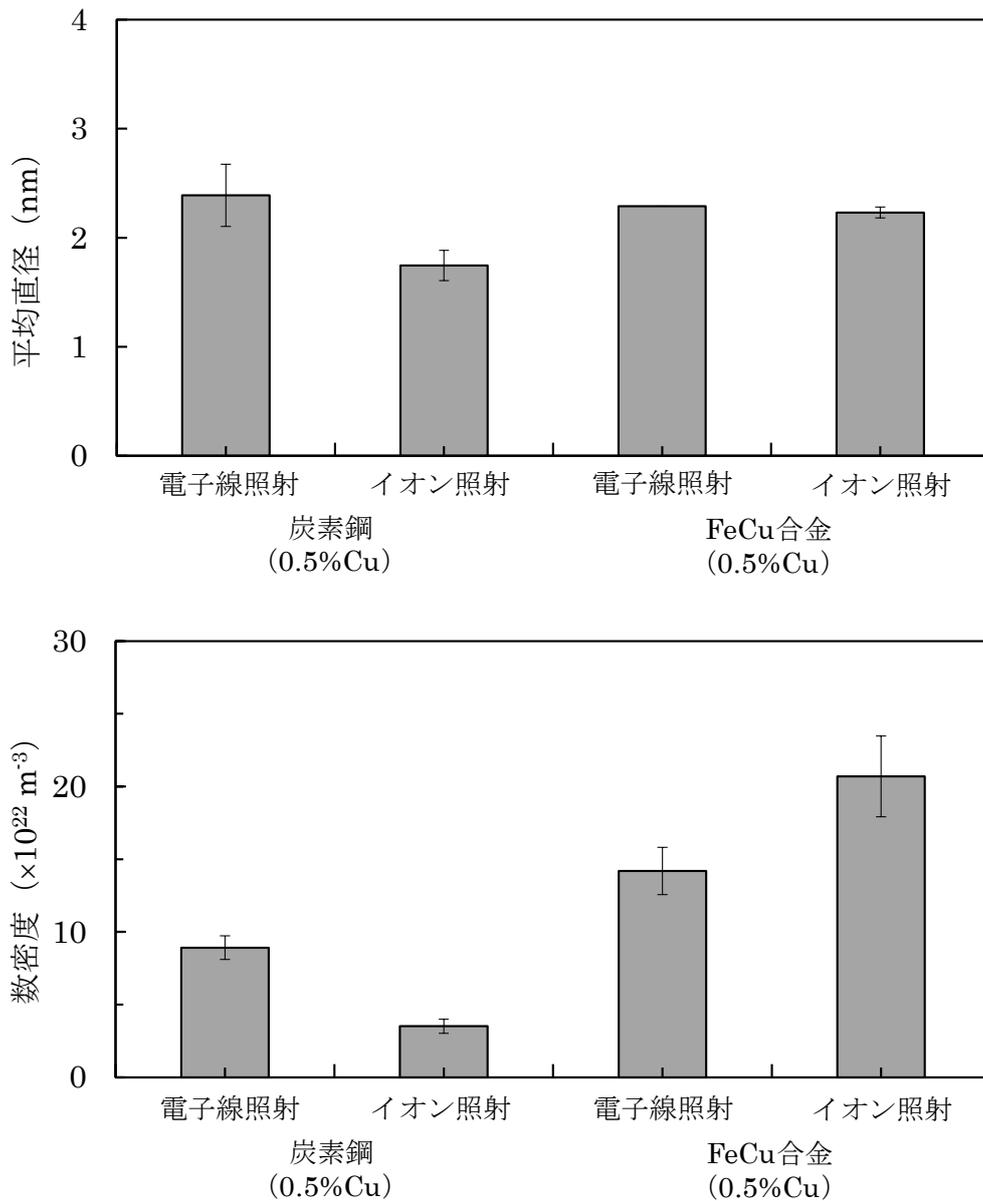


図 7.3.2-18 転位ループの平均直径と数密度

(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 0.01dpa まで照射損傷が導入された炭素鋼 (0.5%Cu) と FeCu 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ーの形成が認められた。表 7.3.2-4 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。また、炭素鋼と FeCu 合金では硬化量に大きな違いは認められなかった。

転位ループの形成による硬化の指標である \sqrt{Nd} (N : 数密度、 d : 平均直径) を図 7.3.2-19 に示す。 \sqrt{Nd} は転位ループの数密度の変化と同様に变化しており、数密度の評価における TEM 試料

の膜厚等の測定誤差を考慮すると、照射速度の違いによる影響は有意ではない可能性がある。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は大きな違いはないことが示唆された。

図 7.3.2-20 に硬さの増加量と転位ループの \sqrt{Nd} との関係を示す。また、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についても同様に整理し、図 7.3.2-21 に示す。FeCu 合金のイオン照射材のみ傾向から外れるが、転位ループの \sqrt{Nd} が大きいと硬さの増加量も大きい関係が認められる。また、溶質クラスタの $\sqrt{V_f}$ についても、 $\sqrt{V_f}$ が大きいほど硬さの増加量も大きい関係が認められており、転位ループと溶質クラスタの形成がそれぞれ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の形成が促進されたことによる部分が大きいと考えられる。

表 7.3.2-4 硬さの増加量とマイクロ組織

材料	照射方法	照射条件			硬さの増加量 (GPa)	転位ループ		溶質クラスタ		
		温度 (°C)	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
炭素鋼 (0.5%Cu)	電子線照射	90	1.82×10 ⁻⁸	0.01	0.65	2.4	8.9×10 ²²	1.90	8.1×10 ²⁴	0.231
	イオン照射	90	9.8×10 ⁻⁵	0.01	0.52	2.5	6.3×10 ²²	-	-	-
FeCu 合金 (0.5%Cu)	電子線照射	90	1.82×10 ⁻⁸	0.01	0.73	2.3	1.4×10 ²²	1.76	3.8×10 ²³	0.087
	イオン照射	90	9.8×10 ⁻⁵	0.01	0.54	2.5	3.2×10 ²²	1.54	1.8×10 ²³	0.028

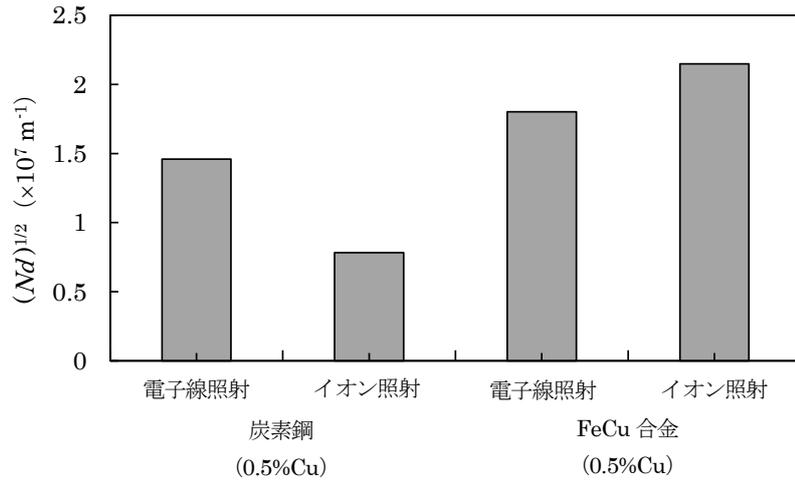


図 7.3.2-19 転位ループの \sqrt{Nd}

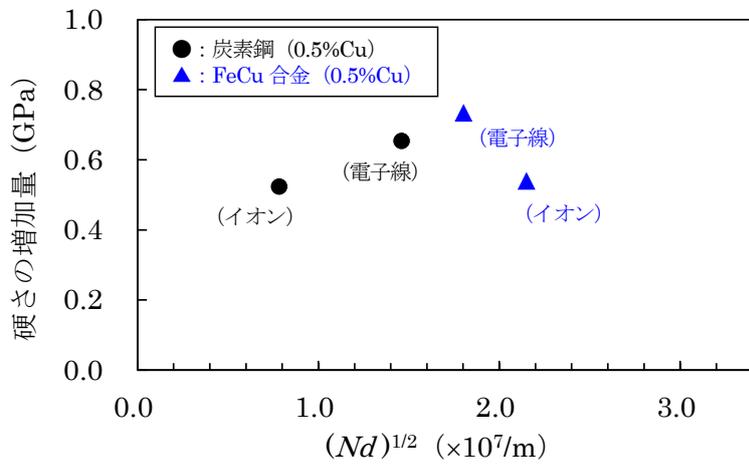


図 7.3.2-20 硬さの増加と転位ループの \sqrt{Nd} との関係

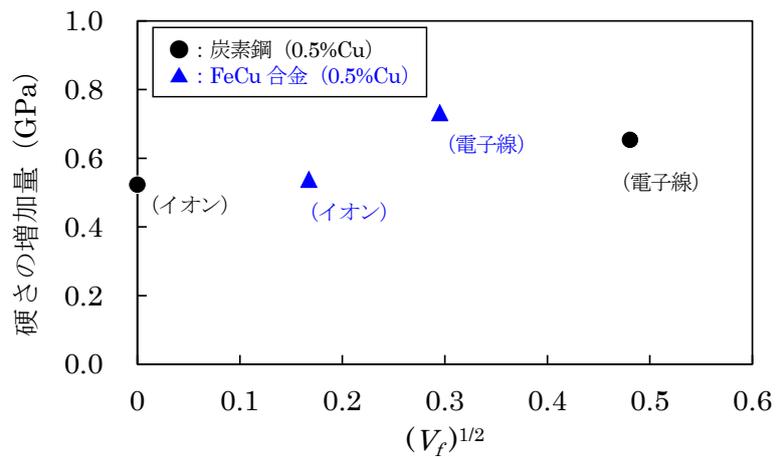


図 7.3.2-21 硬さの増加量と溶質クラスタの $\sqrt{V_f}$ との関係

7.4 炭素鋼の破壊靱性に関する検討

7.4.1 試験材

試験材は市販の SM400B の板材（厚さ 45 mm×幅 150 mm×長さ 500 mm）で、化学組成を表 7.4.1-1 に示す。この板材に対して冷間圧延加工を施した。4 枚の板材に対してそれぞれ 5%、10%、15%そして 20%の圧延率（素材の板厚からの板厚変化率で算出）とした。圧延後の材料を CW5、CW10、CW15 そして CW20 とする。冷間圧延の結果を表 7.4.1-2、圧延状況を図 7.4.1-1、圧延後の素材の外観を図 7.4.1-2 に示す。加工により板材は湾曲するが、これを平らにする圧延を実施すると、内部に圧縮の残留応力が発生し、破壊靱性試験時の疲労予き裂導入に支障を及ぼす可能性がある。そこで、湾曲したままの素材から引張試験片と破壊靱性試験片を採取した。試験片は、圧延材および未圧延材（CW0 とする）の、図 7.4.1-3 に示した位置で採取した。試験片は圧延方向（L 方向および LT 方向）と圧延直角方向（T 方向および TL 方向）の 2 種類を採取した。

表 7.4.1-1 素材（SM400）のミルシート値

引張試験			衝撃試験*	化学組成 (wt%)				
耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	衝撃値 (J)	C	Si	Mn	P	S
250	427	41	297	0.08	0.22	0.92	0.022	0.007

*衝撃試験片寸法：10×10 mm、試験温度：0°C

表 7.4.1-2 冷間圧延加工の結果

材料	目標圧延率 (%)	実績圧延率 (%)	最大圧延重 (ton)	パス 回数	圧延前厚さ (mm)	圧延後厚さ (mm)
CW0	5	5.04	160	16	44.43	42.19
CW5	10	9.96	190	24	44.36	39.94
CW10	15	14.90	262	31	44.50	37.87
CW20	20	20.02	271	40	44.51	35.60



図 7.4.1-1 圧延状況



図 7.4.1-2 圧延後の板材の外観

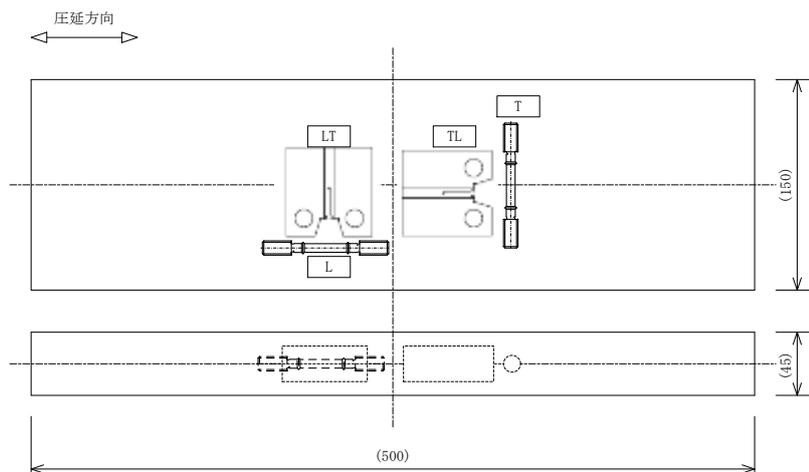


図 7.4.1-3 試験片採取位置

7.4.2 引張試験

(1) 試験方法

図 7.4.2-1 に示す試験片を用いて、JIS G0567(12)に従い、90°C の大気中で実施した。試験速度は、ひずみ 2%まで 0.3%/min のひずみ制御で、それ以降は 10%/min のストローク制御で実施した。各加工度（0%加工材含む）に対して L 方向と T 方向の 2 回実施した。

(2) 試験結果

引張試験の結果一覧を表 7.4.2-1 に、応力・ひずみ曲線を図 7.4.2-2 に示す。また、加工度と引張特性（0.2%耐力、引張強さ、伸び、絞り）の関係を図 7.4.2-3 から図 7.4.2-6 に示す。図中の記号は、加工度（CW#）と試験片方向（L または T）と用いて表示している。例えば、15%加工材の L 方向試験片の結果は CW15-L と表示している。

材料強度（0.2%耐力、引張強さ）は加工度とともに単調増加した。これは、加工硬化によるもので、加工により材料内部に蓄積した転位などの欠陥が変形を阻害する要因となり、変形強度が増加した。CW0 では、上降伏点以降に応力が低下し、応力の増加なしにひずみが増加する現象が見られるが、加工材ではこのような降伏現象は見られない。そこで、結果の整理においては降伏強度（上降伏強度）ではなく、0.2%耐力を用いた。加工度が 10%を超えると一様伸びが見られなくなり、降伏後すぐに引張強さに到達する。図 7.4.2-7 に 0.2%耐力と引張強さの比を示したが、加工度 10%でほぼ飽和している。

試験片は L 方向と T 方向に採取しているが、0.2%耐力において L 方向が T 方向よりも若干高い傾向を示したが、いずれの強度特性にも顕著な差は見られなかった。加工材を含めて、引張強度特性に対する異方性は顕著ではないようである。

表 7.4.2-1 引張試験の結果

試験片	加工度	下降伏点 (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	ヤング率 (GPa)
CW 0-L	0%	233	238	400	28.5	75	209
CW 0-T		232	236	399	28.5	74	209
CW 5-L	5%		381	434	17.5	73	210
CW 5-T				360	435	18.5	72
CW10-L	10%		472	505	14.0	71	209
CW10-T				441	479	13.5	74
CW15-L	15%		506	520	12.5	68	213
CW15-T				496	513	12.0	68
CW20-L	20%		534	544	11.5	67	211
CW20-T				518	544	11.5	66

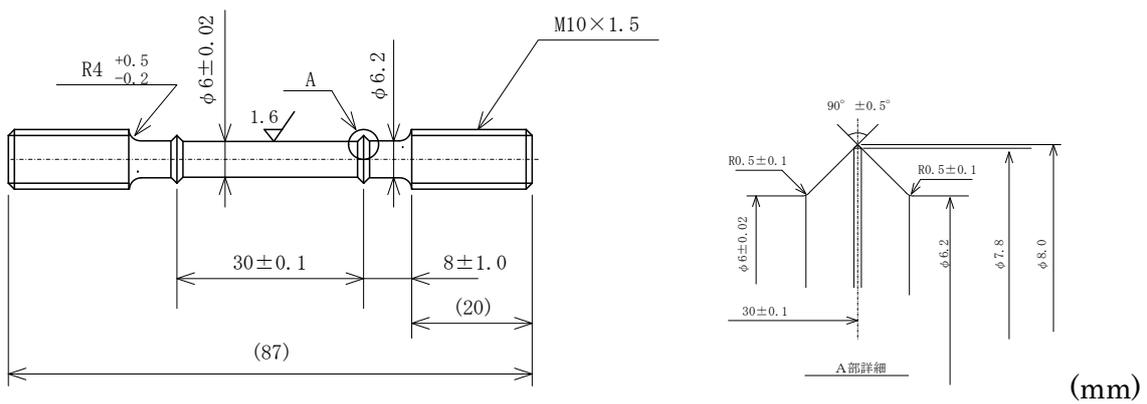


図 7.4.2-1 引張試験片

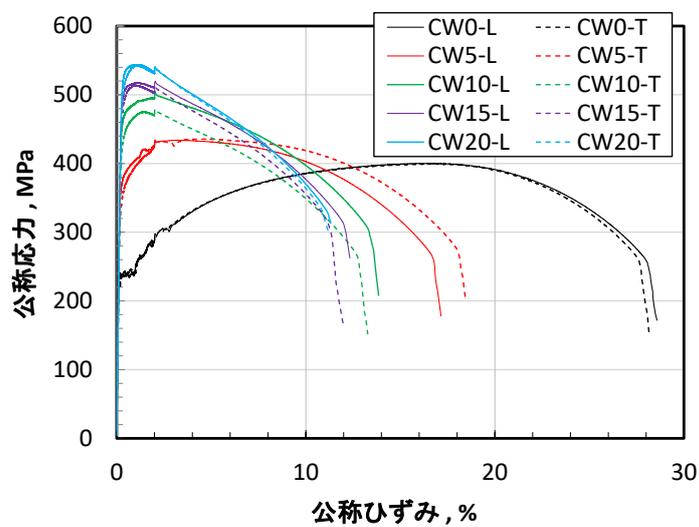


図 7.4.2-2 応力ひずみ曲線

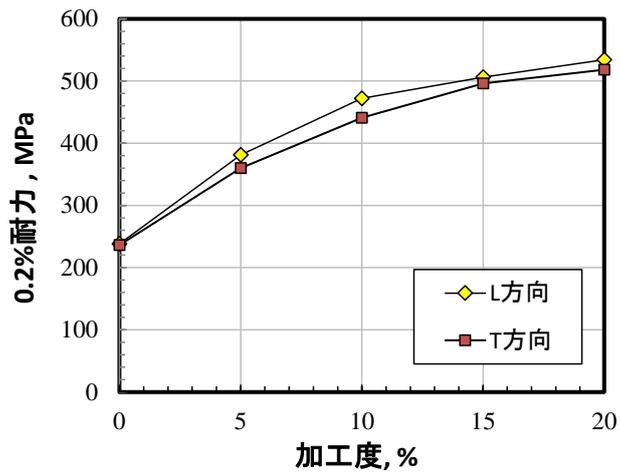


図 7.4.2-3 加工度と 0.2%耐力の関係

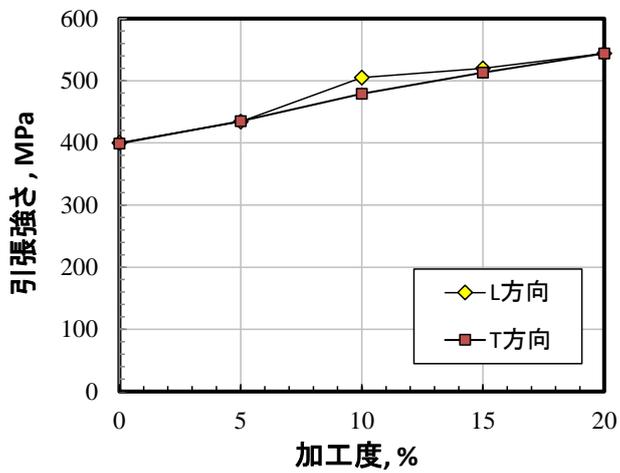


図 7.4.2-4 加工度と引張強さの関係

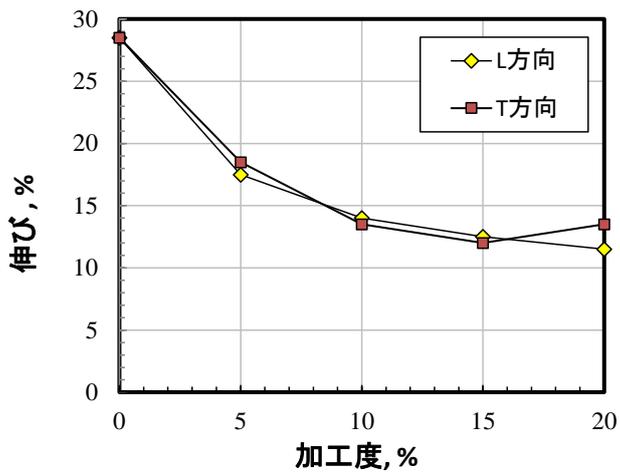


図 7.4.2-5 加工度と伸びの関係

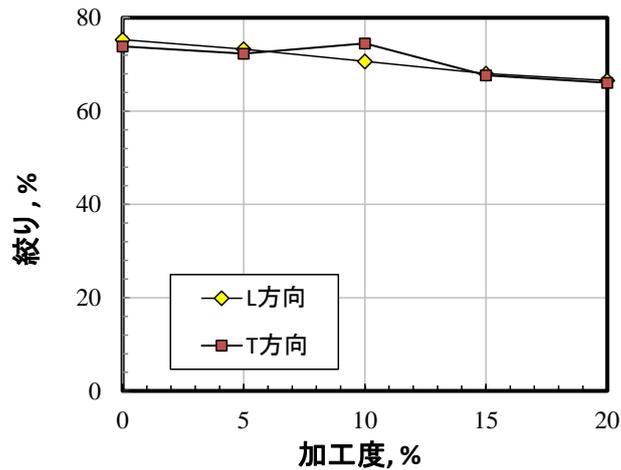


図 7.4.2-6 加工度と伸びの関係

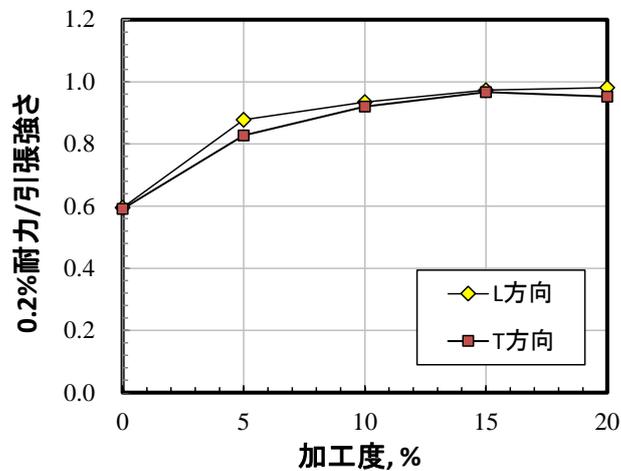


図 7.4.2-7 加工度と降伏比 (0.2%耐力/引張強さ) の関係

7.4.3 破壊靱性試験

(1) 試験方法

図 7.4.3-1 に示す試験片を用いて、ASTM E1820 に従い、90°C の大気中で実施した。各加工度 (0%加工材含む) に対して LT 方向と TL 方向の 2 回実施した。

(2) 試験結果

破壊靱性試験の結果一覧を表 5.4-1 に示す。また、試験後の破面を図 7.4.3-2 に示す。記号は、加工度 (CW#) と試験片方向 (LT または TL) と用いて表示している。例えば、15%加工材の LT 方向試験片の結果は CW15-LT と表示している。

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、破壊靱性値は J_{IC} ではなく J_Q と表示している。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せずに、破壊靱性値が得られなかった。

$J-R$ 曲線を図 7.4.3-3 に示す。加工度が大きくなると破壊抵抗 (J) が減少していることが確認

できる。LT 方向に対して、TL 方向の破壊抵抗が小さい傾向にある。これは、圧延方向に平行にき裂進展する TL 方向の方が、圧延方向を横切る LT 方向よりも破壊しやすいことに対応している。得られた J - R 曲線は次式で近似した。

$$J = C_1(\Delta a)^{C_2} \quad (7.4.3-1)$$

図 7.4.3-3 (c)に近似線と試験点の対応を示すが、式 (7.4.3-1) で J - R 曲線が良好に近似できていることがわかる。定数 C_1 と C_2 の値は表 7.4.3-1 に示している。単位は J が [kN/m]、 Δa が [mm] となる。

加工度と破壊靱性値 (J_Q) の関係を図 7.4.3-4 に示す。破壊靱性値は加工度に対して単調減少した。また、LT 方向と TL 方向の差は顕著でなかった。

表 7.4.3-1 破壊靱性試験の結果

試験片	最大試験力 (kN)	J_Q (kN/m)	$K^{(*1)}$ (MPam ^{0.5})	C_1 (kN/m)	C_2	備考
CW0-LT	48.1	$\geq 799^{(*2)}$	428	—	—	
CW0-TL	45.6	589	368	544.4	0.6551	
CW5-LT	53.0	393	301	493.8	0.5961	
CW5-TL	49.0	455	325	500.2	0.3695	
CW10-LT	59.3	359	287	497.5	0.575	
CW10-TL	61.7	338	281	440.2	0.4675	
CW15-LT	61.6	219	226	350.5	0.5322	
CW15-TL	61.4	186	208	272.6	0.398	
CW20-LT	66.2	171	199	300.2	0.5495	
CW20-TL	65.0	174	201	284.3	0.4879	

(*1) J_Q より換算した値

(*2) 延性き裂が発生しなかった

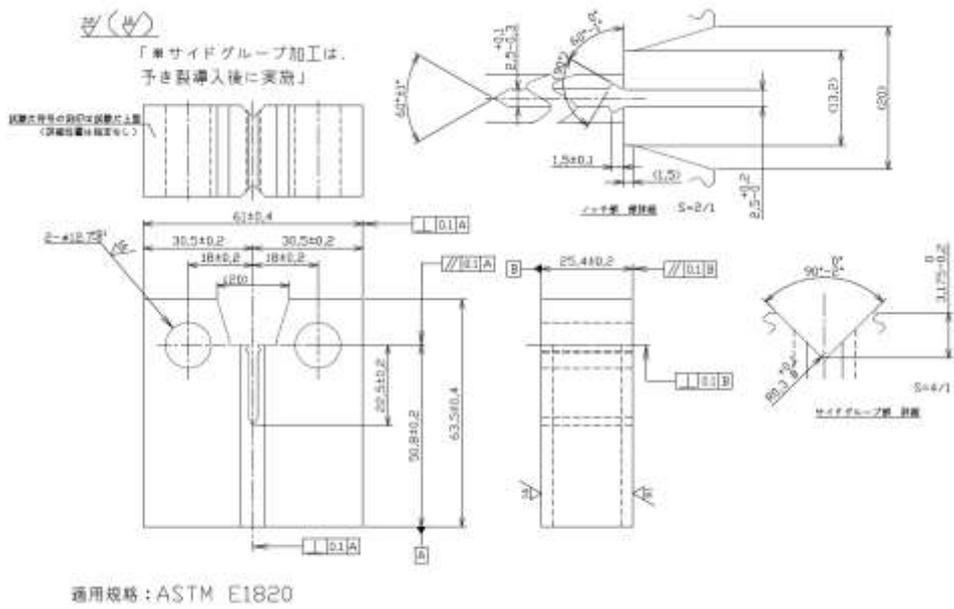


図 7.4.3-1 破壊靱性試験片

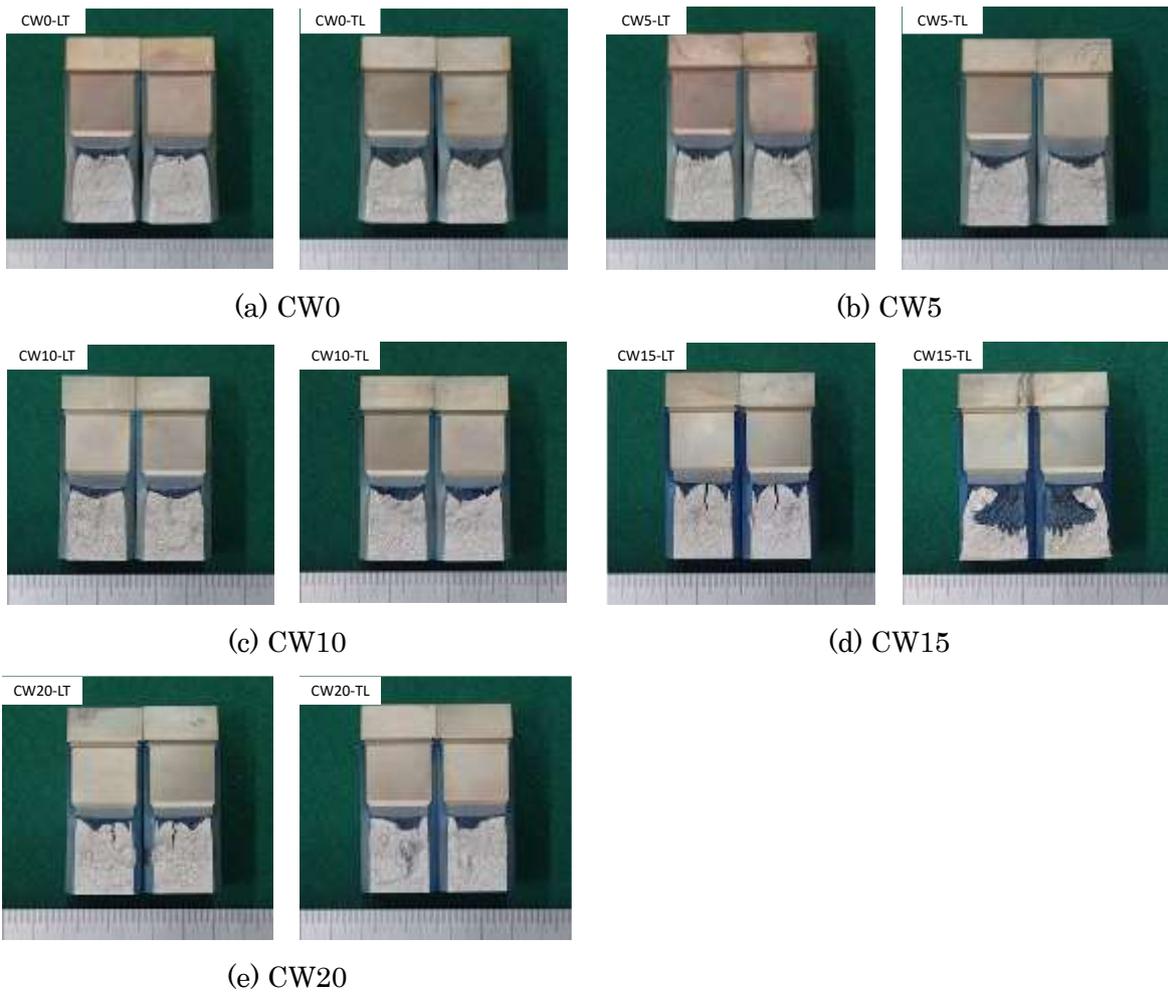
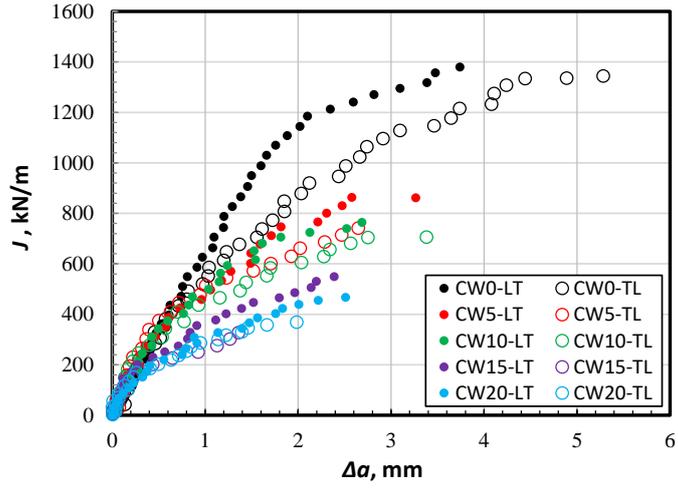
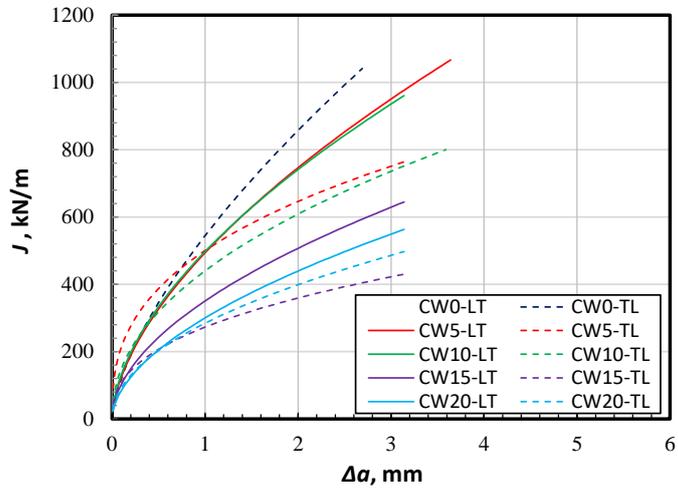


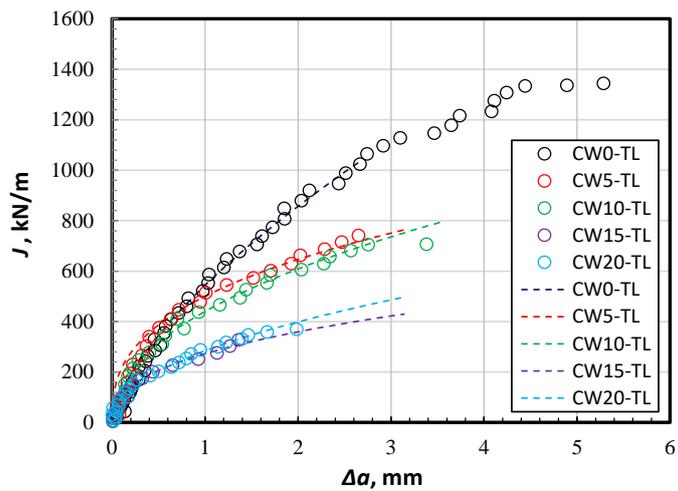
図 7.4.3-2 破壊靱性試験後の破面



(a) 試験データ



(b) 近似線



(c) 試験データと近似線の対応 (見やすくするため TL 方向のみ表示)

図 7.4.3-3 J-R 曲線

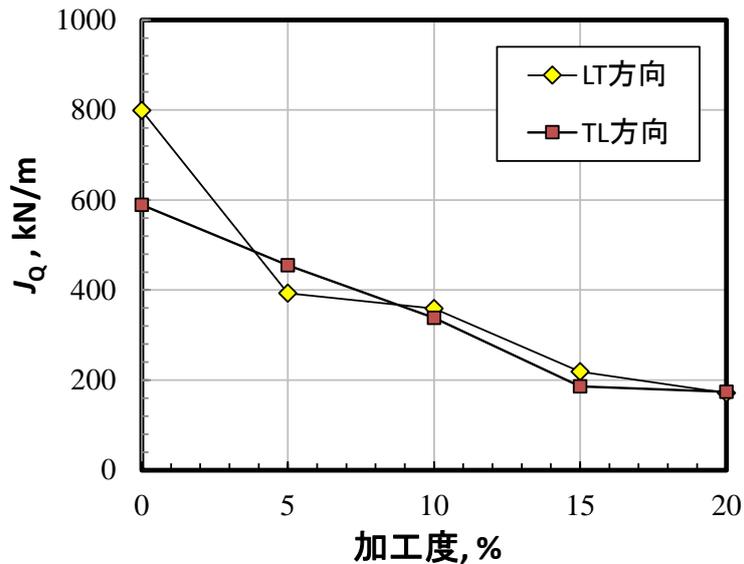


図 7.4.3-4 加工度と破壊靱性値 (J_Q) の関係

7.4.4 硬さ試験

(1) 試験方法

試験材の硬さをビッカース硬さ試験と超微小硬さ試験により測定した。試験材より L 方向と T 方向が圧子の荷重方向となるように硬さ試験用の試料を放電加工により 2 個ずつ切り出した。それぞれの試料を L 材と T 材とする。試料表面を 1200 番の SiC 研磨紙で湿式機械研磨した後、ビッカース硬さ試験用の試料については粒径 3 μm のダイヤモンドパウダーで鏡面研磨した。超微小硬さ試験用の試料についてはダイヤモンドパウダーとコロイダルシリカで鏡面研磨仕上げをした後、ナイトール中に 1 秒間浸漬させて化学研磨により最表面の加工層を除去した。

ビッカース硬さ試験の条件は、荷重 1 kgf、保持時間 15 秒間とし、5 点以上測定した。装置はミットヨ製微小硬さ試験機 HM-221 を用いた。超微小硬さ試験については照射試験で実施した試験条件と同じである。

(2) 試験結果

図 7.4.4-1 にビッカース硬さ試験の結果を示す。図中のエラーバーは測定値の最大と最小を示した。硬さは冷間加工度の上昇に伴って増加した。L 材と T 材では硬さに大きな違いは認められなかった。

図 7.4.4-2 に超微小硬さ試験の結果を示す。図中のエラーバーは測定値の最大と最小を示した。ビッカース硬さと同様に、冷間加工度の上昇に伴って硬さが増加した。ビッカース硬さと比較してエラーバーの範囲が広い特徴が認められた。超微小硬さについても、L 材と T 材で大きな違いは認められなかった。

図 7.4.4-3 にビッカース硬さと超微小硬さの関係を示す。L 材と T 材で硬さに大きな違いが認められなかったため、L 材と T 材の結果を合わせて用いた。図中の赤線は最小二乗法による線形近似で求めた線である。ビッカース硬さ H_v と超微小硬さ H_m は良く対応しており、 H_v と H_m の関係式は $H_v = 165.1 \times H_m - 307$ となった。

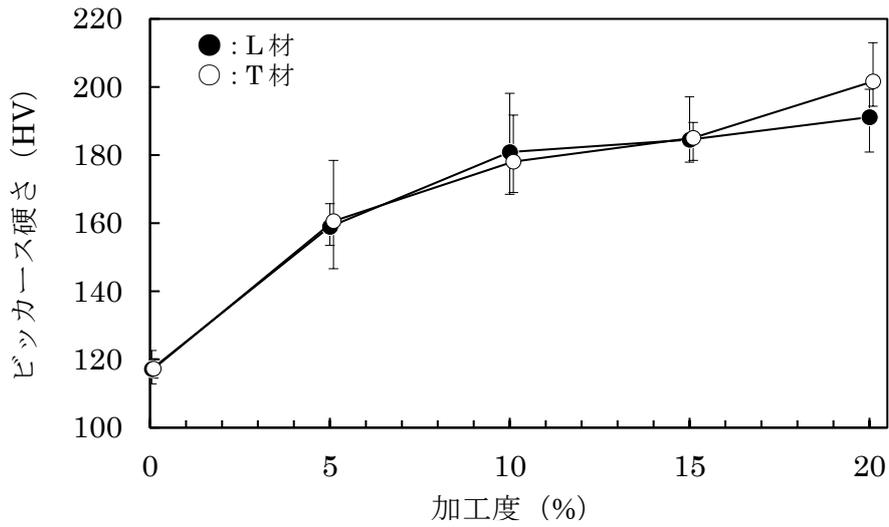


図 7.4.4-1 加工度とビッカース硬さの関係

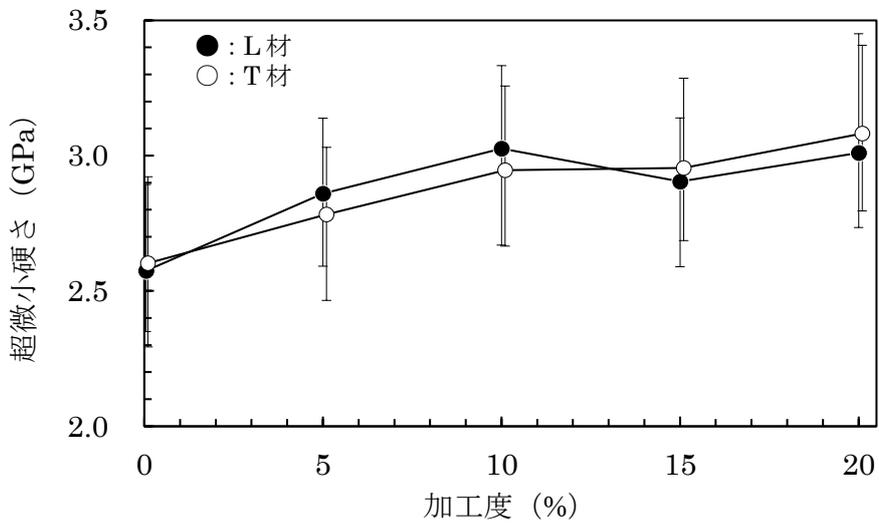


図 7.4.4-2 加工度と超微小硬さの関係

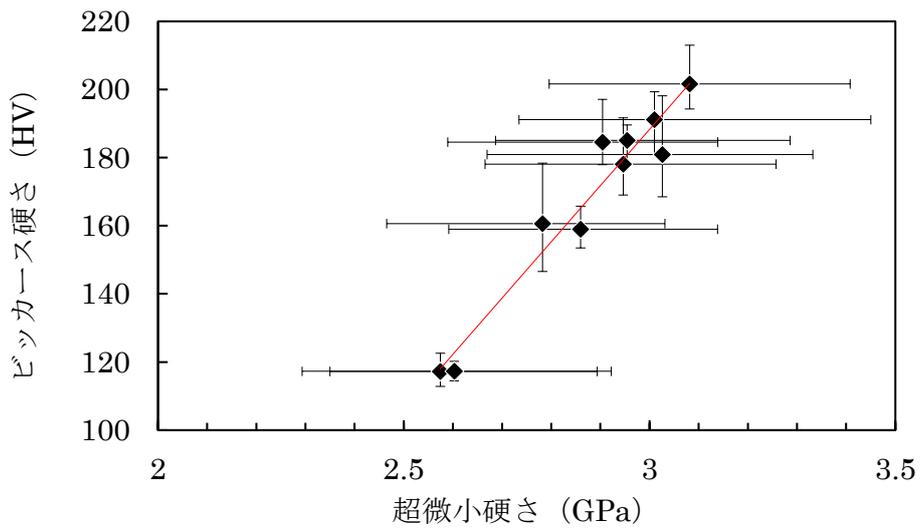
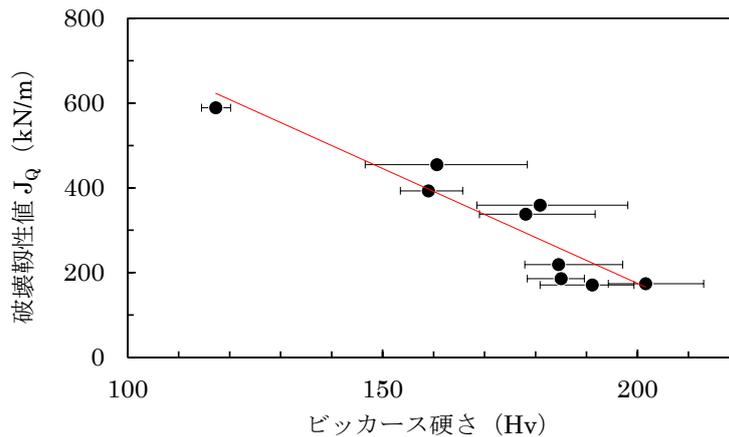


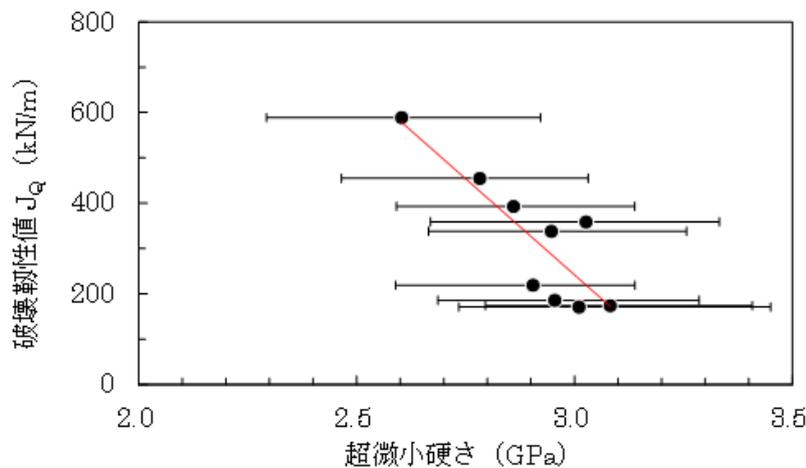
図 7.4.4-3 ビッカース硬さと超微小硬さの関係

(3) 硬さと破壊靱性の関係

ビッカース硬さ試験および超微小硬さ試験と破壊靱性値の関係を図 7.4.4-4 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、双方のデータを合わせて用いた。なお、図中の赤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、破壊靱性値の減少が認められた。ビッカース硬さと破壊靱性値には比較的良い対応が認められたものの超微小硬さについてはビッカース硬さほど良く対応しない結果となった。



(a) ビッカース硬さと破壊靱性の関係



(b) 超微小硬さと破壊靱性の関係

図 7.4.4-4 ビッカース硬さおよび超微小硬さと破壊靱性の関係

7.5 板厚の影響

7.5.1 目的

埋設後のオーバーパックが健全であることを示すために、ガラス固化体インベントリの変動幅を考慮して、現在のリファレンスケースとは異なる燃焼度の UO_2 使用済燃料から発生するガラス固化体を対象として、燃焼計算、ガラス固化体インベントリ設定、線量計算を実施し、オーバー

パックに照射される線量率、累積線量、はじき出し数を求める。

7.5.2 計算コードおよび計算条件

(1) 燃焼計算コード

使用済燃料中の核種の生成、崩壊計算、再処理における諸量計算に ORIGEN2.2UPJ 実効断面積ライブラリとして ORLIBJ40、崩壊ライブラリとして ENSDF を使用した。

(2) はじき出し損傷計算コード

日本原子力研究開発機構（原子力機構）で開発された、PHITS2.82 を使用した。PHITS は Particle and Heavy Ion Transport code System の略称であり、あらゆる物質中での様々な放射線挙動を核反応モデルや核データなどを用いて模擬するモンテカルロ計算コードである。原子力分野で培った数多くの基盤技術を集結し、その技術を原子力のみならず放射線に関連する多様な研究分野に応用することを目的に、原子力機構が中心となって開発を進めている。放射線施設の設計、医学物理計算、放射線防護研究、宇宙線・地球惑星科学など、工学、医学、理学の様々な分野で国内外 2000 名以上の研究者・技術者に利用されている。

(3) 燃焼計算条件および再処理条件

ガラス固化体インベントリの変動幅を考慮して、 UO_2 燃料の濃縮度を 6.2wt%、燃焼度を 70GWd/t、使用済燃料の冷却期間を 4 年とした。その他の燃焼計算条件および再処理条件は、第 2 次取りまとめと同じとした[21]。

ORIGEN 用実効断面積ライブラリは、PWR47J40（PWR 用 17*17 燃料ピン、ウラン濃縮度 4.7wt%）を使用した。本実効断面積は、典型的 PWR 燃料集合体モデルに基づいて作成されており、今回想定した高燃焼度燃料とは初期ウラン濃縮度が異なる。ただし、違いはとくに超ウラン元素の諸量計算結果に表れると考えられ、オーバーパックにおけるはじき出し損傷に対しては若干の過剰評価となることが予想される。本研究の目的に照らし合わせればより保守評価となり、安全側での評価結果になると考えられる。

70GWd/t で 4 年冷却の UO_2 使用済燃料の発熱量から、ガラス固化体製造時の発熱量制限値を 2.3kW/本とすると、1MTU あたりのガラス固化体発生本数は 1.91 本となった。

(4) 計算モデル

はじき出し損傷計算で使用した計算モデルを図 7.5.2-1 に示す。中心のガラス固化体（密度：2.70 g/cc、半径：20.9 cm）、キャニスタ（厚さ：0.6 cm、材質：SUS304L）、オーバーパック（厚さ：19.0 cm、材質：計算モデル上は鉄）の 3 領域から構成される。今回の解析パラメータによる影響を詳細に解析するため、オーバーパックの厚さを 1 cm ごとに更に領域を区切った。線源はガラス固化体領域からの均質線源を想定し、図 7.5.2-1 の赤や青のドットで示すようにガラス固化体内から均質に発生していることを確認した。計算の簡略化のため、垂直方向に無限の高さを持つ円筒モデルを採用した。現実のキャニスタは高さ 1,350cm、半径 21.5cm と縦長形状であり、今回の形状簡略化によっても水平方向放射線束成分の計算には十分な模擬性が期待できる。計算

に用いた線源粒子数は、光子計算では 10^9 個、中性子計算では 10^7 個を使用し、オーバーパック表面における放射線束の統計精度が 1σ レベルで 1%以下に収まるようにした。

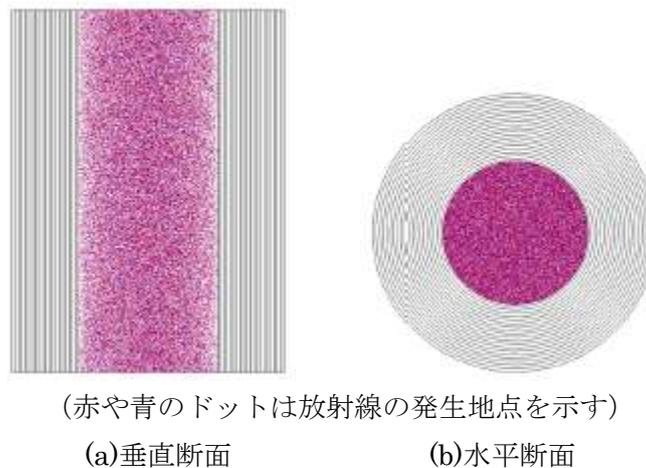


図 7.5.2-1 ガラス固化体およびオーバーパック解析モデルと線源分布

7.5.3 計算結果

(1) 中性子源強度とスペクトル

ORIGEN2.2UPJ による燃焼・諸量計算結果より、ガラス固化体内部で発生する中性子源強度とエネルギースペクトルを導出した。図 7.5.3-1 にガラス固化体中の中性子源強度の時間推移を示す。中性子源の時間減少は大きく分けて、0-100 年、100 年-200 年、200 年-10000 年で傾向の変化が確認できる。これは、ガラス固化体内での主要な中性子源が、冷却期間 100 年程度は、 Cm-244 (半減期 18.11 年)の自発核分裂及びガラス内酸素との(α, n)反応に依存し、200 年から 1 万年間は Cm-246 (半減期 4760 年)のそれらに依存し、100 年-200 年はその移行期であるためである。

図 7.5.3-2 に、中性子源エネルギースペクトルのガラス固化体冷却期間依存性を示す。縦軸の中性子線強度を対数表示したものを(a)に、線形表示したものを(b)に示す。結果として、中性子線源スペクトルに、ガラス固化体の冷却期間の依存性はほとんど見られなかった。これは、ガラス固化体内での主要な中性子源が、冷却期間 100 年程度は、 Cm-244 (半減期 : 18.11 年) の自発核分裂及びガラス内酸素との(α, n)反応に依存し、その後 1 万年間は Cm-246 (半減期 4,760 年) のそれらに依存し、反応比がほとんど変わらないためである。そこで、冷却初期 (0 年間) の中性子線源スペクトルを用いて、粒子輸送計算を行うこととした。

以上より、ガラス固化体中の中性子源は、冷却初期から 10000 年にかけて強度は約二千分の一に減少するが、そのエネルギースペクトルの変化は小さいことが明らかとなった。

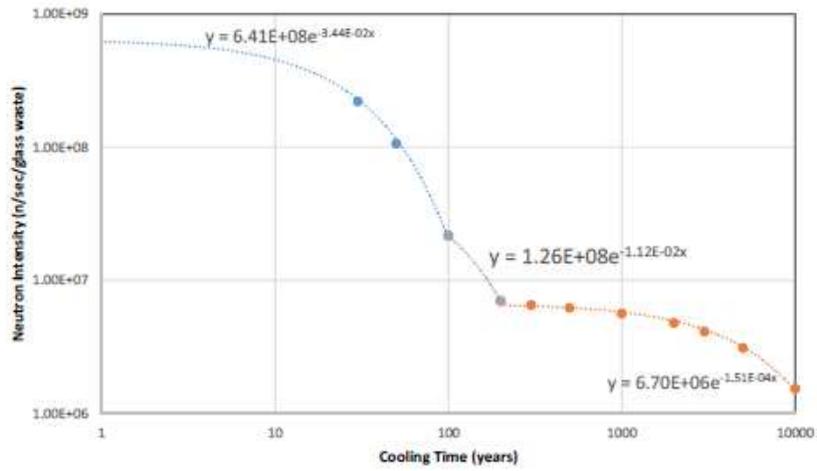
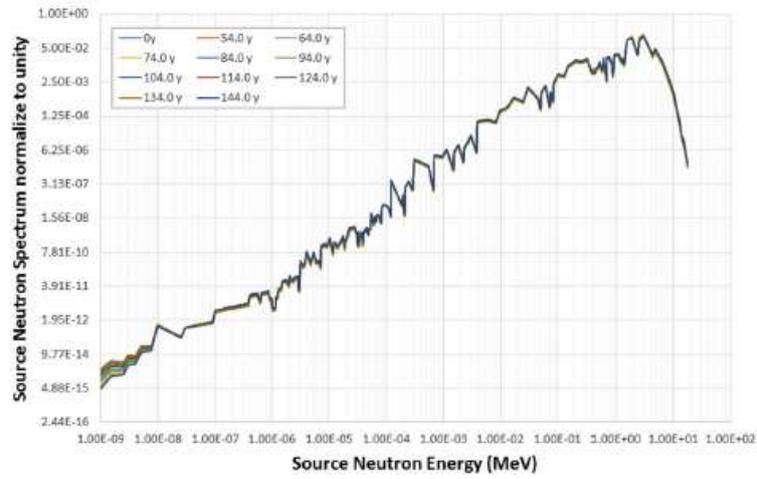
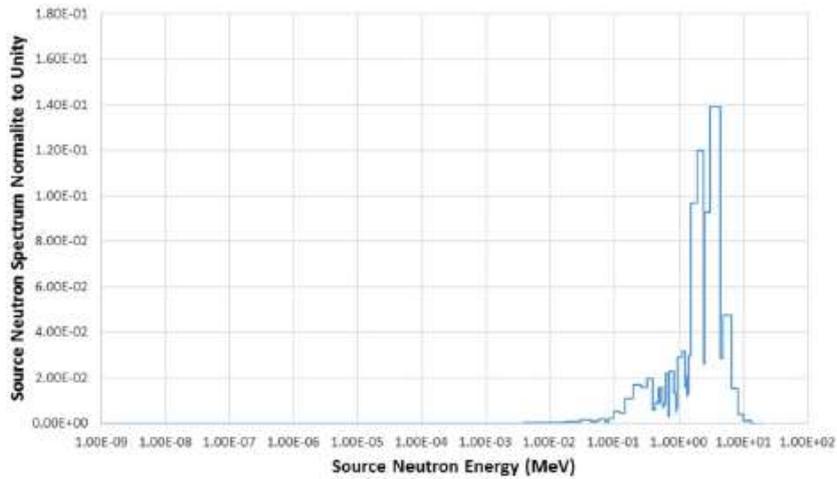


図 7.5.3-1 ガラス固化体中の中性子源強度の時間推移



(a)対数スケール



(b)線形スケール

図 7.5.3-2 中性子線源スペクトル (ガラス固化体冷却期間依存)

(2) 光子源強度とスペクトル

ORIGEN2.2UPJ による燃焼計算結果より、ガラス固化体内部で発生する光子源強度とエネルギースペクトルを導出した。図 7.5.3-3 にガラス固化体中のガンマ線源強度の時間推移を示す。光子源としては核分裂生成物、放射化生成物、重金属と多岐に渡り、冷却期間に大きな依存性を確認した。1 万年後には光子源強度は約 1/8000 まで減衰している。

図 7.5.3-4 に、光子源エネルギースペクトルのガラス固化体冷却期間依存性の評価結果を示す。光子源としては核分裂生成物、放射化生成物、重金属と多岐に渡り、そのエネルギースペクトルは冷却期間に大きな依存性を確認した。表 7.5.3-1 に高速光子源割合 (>0.1 MeV) を示す。この結果から、以下の光子スペクトルを 3 グループに分割した。各グループの代表的光子源エネルギースペクトルを用いて、粒子輸送計算及びはじき出し損傷計算を行う。

グループ 1 : 0-300 年間冷却 (高速光子源割合 >0.9)

グループ 2 : 300-1000 年間冷却 (0.9>高速光子源割合 >0.5)

グループ 3 : 1000-10000 年間冷却 (高速光子源割合 ~0.5)

表 7.5.3-1 高速ガンマ線割合 (ガラス固化体冷却期間依存)

冷却期間 (年)	0	30	50	100	200	300
高速ガンマ線割合 (>0.1MeV)	9.34E-01	9.13E-01	9.15E-01	9.15E-01	9.14E-01	9.08E-01
冷却期間 (年)	500	1,000	2,000	3,000	5,000	10,000
高速ガンマ線割合 (>0.1MeV)	6.69E-01	5.30E-01	5.29E-01	5.29E-01	5.28E-01	5.27E-01

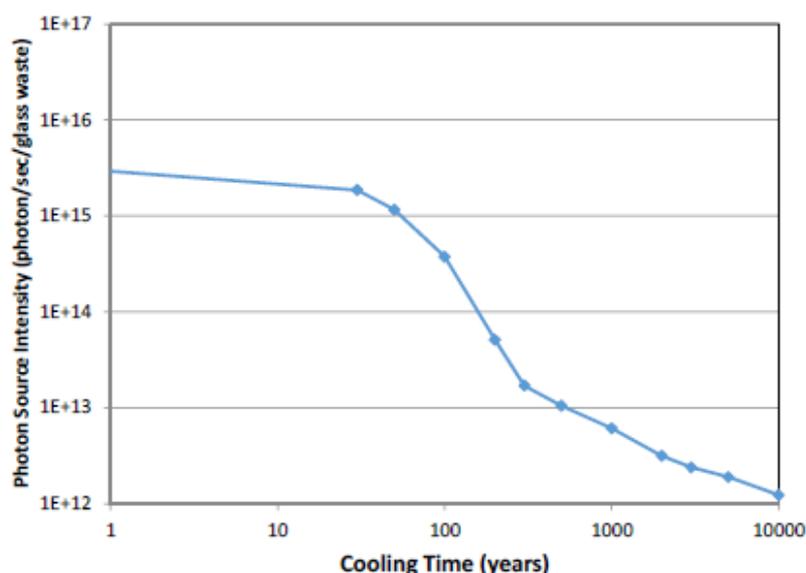


図 7.5.3-3 ガラス固化体中の光子源強度の時間推移

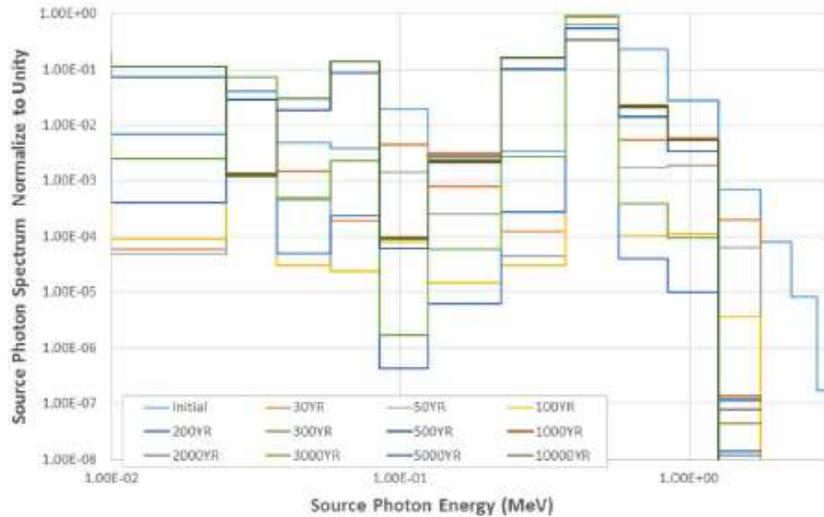


図 7.5.3-4 ガンマ線源スペクトル (ガラス固化体冷却期間依存)

7.5.4 オーバーパック内の照射計算とはじき出し計算

(1) オーバーパック内の照射計算

1) 中性子線

PHITS を用いた粒子輸送計算を行うにあたり、中性子源エネルギースペクトルとして前節の結果を受けて冷却期間 0 年のデータを用いた。図 7.5.4-1 及び表 7.5.4-1 に中性子束のオーバーパック内強度分布の評価結果を示す。(a)に冷却期間 0 年の評価結果を、(b)に冷却期間 1 万年の評価結果を示す。ガラス固化体中心における中性子線束と比べ、オーバーパック内側表面は約三分の一であり、それ以降はオーバーパック内での減弱が -0.239 cm^{-1} を係数とした指数関数的単調減少が確認できた。また、冷却期間 0 年の場合、オーバーパック表面の中性子線束は $1.27 \times 10^4 \text{ n/sec/cm}^2$ であるが、1 万年後には約二千分の一まで減少していることを確認した。

図 7.5.4-2 にオーバーパック内の中性子エネルギースペクトルの位置依存を示す。図より、自発核分裂及び (α, n) 反応により生成されたそれぞれ約 2MeV、約 3MeV をピークとした中性子線源エネルギースペクトルは、オーバーパック内での位置での違いがほとんど見られなかった。この結果より、中性子によるオーバーパックはじき出し損傷は、単純に全中性子線量に一次比例することが示唆された。

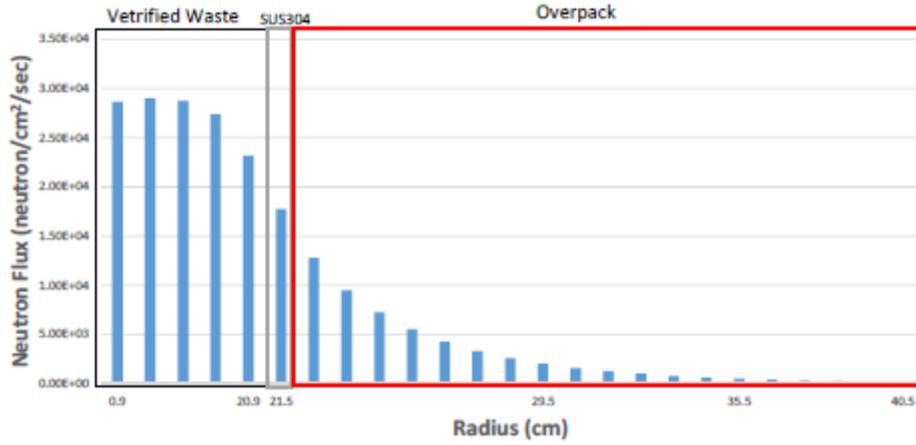
図 7.5.4-3 及び表 7.5.4-2 にオーバーパック内の中性子フルエンス(1 万年累積)の位置依存を示す。オレンジはガラス固化体冷却 30 年後にオーバーパックに装荷したケースの結果であり、青は 50 年後にオーバーパックに装荷したケースの結果である。結果より、オーバーパック装荷時刻の違いにより、約 8%の違いが確認できた。またオーバーパック内での減弱が $-0.239 (1/\text{cm})$ を係数とした指数関数的単調減少が確認できた。つまりオーバーパック厚みが 1cm 増加すれば、中性子フルエンスは 23.9%ずつ減少する、厚さ影響を定量的に明らかにした。

表 7.5.4-1 中性子束のオーバーパック内強度分布
(ガラス固化体製造後 0 年および 1 万年)

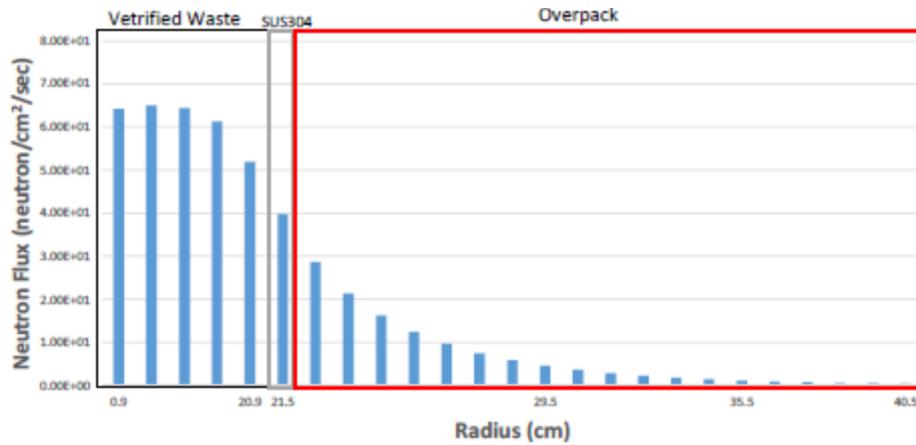
ガラス固化体中心からの 距離, cm	Neutron Flux, n/sec/cm ²	
	ガラス固化体製造後 0 年	ガラス固化体製造後 1 万年
21.5	1.77E+04	3.98E+01
22.5	1.28E+04	2.86E+01
23.5	9.52E+03	2.13E+01
24.5	7.24E+03	1.62E+01
25.5	5.56E+03	1.25E+01
26.5	4.30E+03	9.64E+00
27.5	3.35E+03	7.51E+00
28.5	2.62E+03	5.87E+00
29.5	2.06E+03	4.61E+00
30.5	1.62E+03	3.63E+00
31.5	1.28E+03	2.88E+00
32.5	1.02E+03	2.28E+00
33.5	8.04E+02	1.80E+00
34.5	6.42E+02	1.44E+00
35.5	5.10E+02	1.14E+00
36.5	4.05E+02	9.08E-01
37.5	3.24E+02	7.26E-01
38.5	2.59E+02	5.81E-01
39.5	2.08E+02	4.66E-01
40.5	1.64E+02	3.68E-01

表 7.5.4-2 オーバーパック内の中性子フルエンス(1 万年累積)の位置依存

ガラス固化体中心からの 距離, cm	Neutron Fluence, n/cm ²	
	30-10000 年間の累積値	50-10000 年間の累積値
22.5	4.74E+13	4.35E+13
23.5	3.53E+13	3.24E+13
24.5	2.69E+13	2.47E+13
25.5	2.06E+13	1.89E+13
26.5	1.60E+13	1.47E+13
27.5	1.24E+13	1.14E+13
28.5	9.72E+12	8.93E+12
29.5	7.64E+12	7.02E+12
30.5	6.01E+12	5.53E+12
31.5	4.76E+12	4.37E+12
32.5	3.78E+12	3.47E+12
33.5	2.98E+12	2.74E+12
34.5	2.38E+12	2.19E+12
35.5	1.89E+12	1.74E+12
36.5	1.50E+12	1.38E+12
37.5	1.20E+12	1.10E+12
38.5	9.61E+11	8.83E+11
39.5	7.72E+11	7.09E+11
40.5	6.10E+11	5.60E+11



(a)ガラス固化体製造後 0 年



(b)ガラス固化体製造後 1 万年

図 7.5.4-1 中性子束のオーバーパック内強度分布

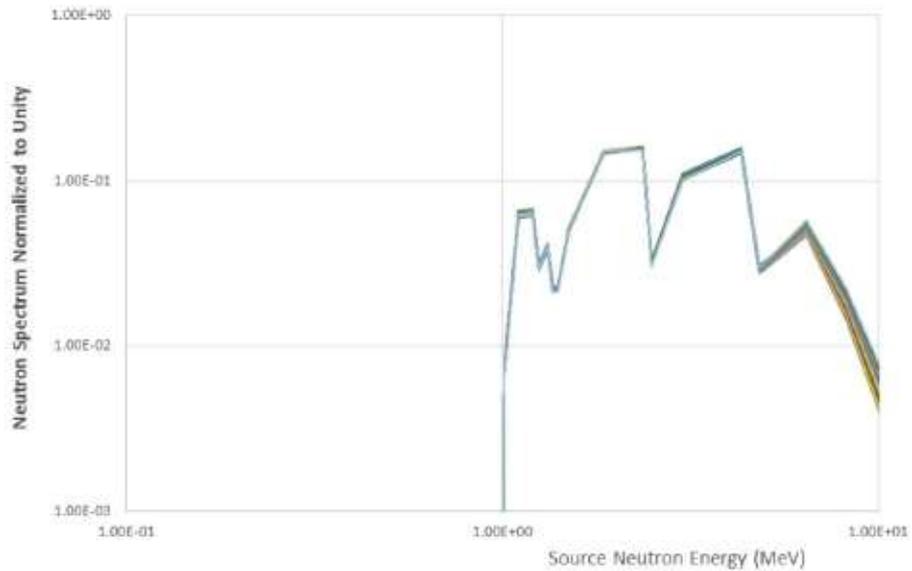


図 7.5.4-2 オーバーパック内の中性子エネルギースペクトルの位置依存

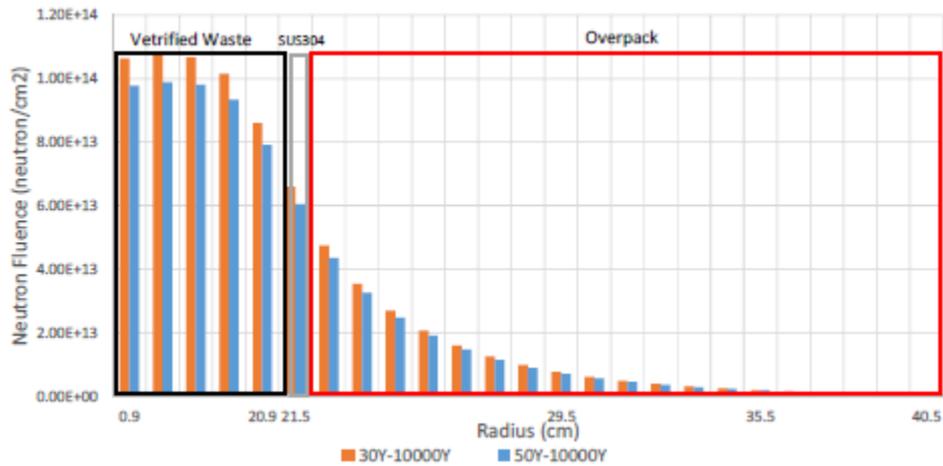


図 7.5.4-3 オーバーパック内の中性子フルエンス(1 万年累積)の位置依存

2) ガンマ線

PHITS を用いた粒子輸送計算を行うにあたり、光子源エネルギースペクトルとして下記の 3 グループの解析を行った。

グループ 1: 0-300 年間冷却 (高速光子源割合 >0.9)

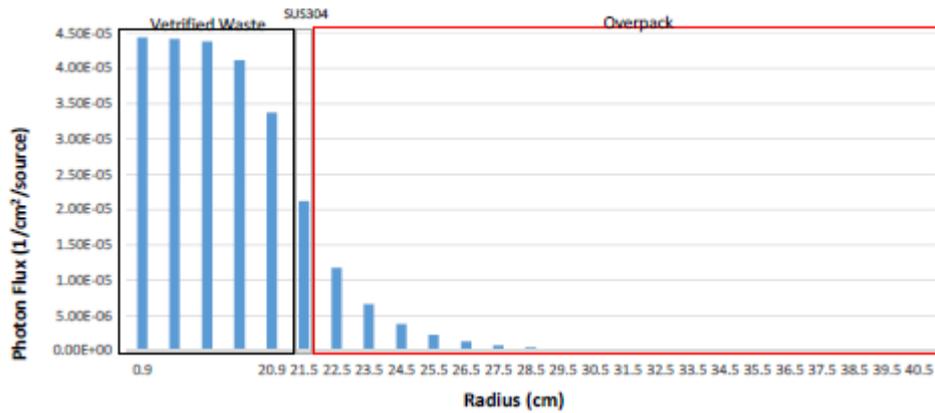
グループ 2: 300-1000 年間冷却 (0.9>高速光子源割合 >0.5)

グループ 3: 1000-10000 年間冷却 (高速光子源割合 ~0.5)

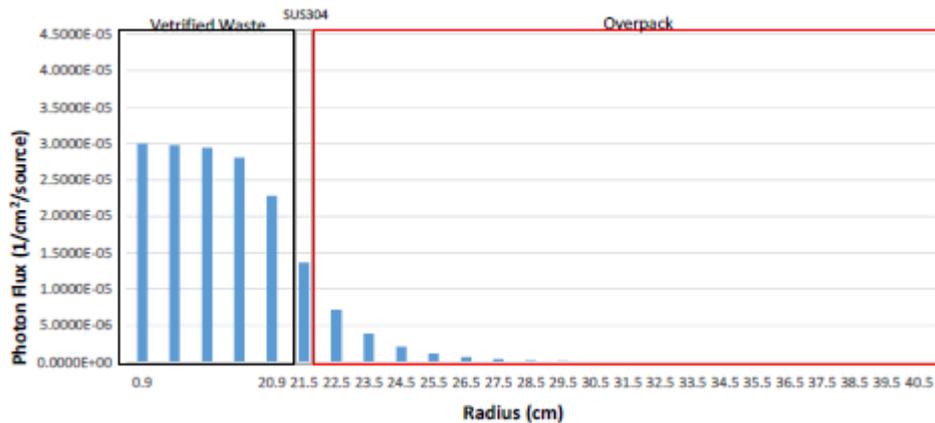
図 7.5.4-4 及び表 7.5.4-3 に光子束のオーバーパック内強度分布の評価結果を示す。(a)は冷却期間 0 の場合、(b)は冷却期間 500 年の場合、(c)は冷却期間 1000 年の場合の光子束を、光子源当りで規格化したものである。(a)の場合について詳しくみると、ガラス固化体中心におけるガンマ線束と比べ、オーバーパック内側表面は約四分の一であり、それ以降はオーバーパック内での減弱が -0.528 (1/cm)を係数とした指数関数的単調減少が確認できた。冷却期間がより長いグループ 2、3 の光子エネルギーを用いた(b)、(c)は線源光子がより低エネルギーにシフトするため、オーバーパック内の線源弱係数はさらに大きくなりより遮蔽されやすくなることを確認した。

表 7.5.4-3 光子束のオーバーパック内強度分布（ガンマ線源当りで規格化）

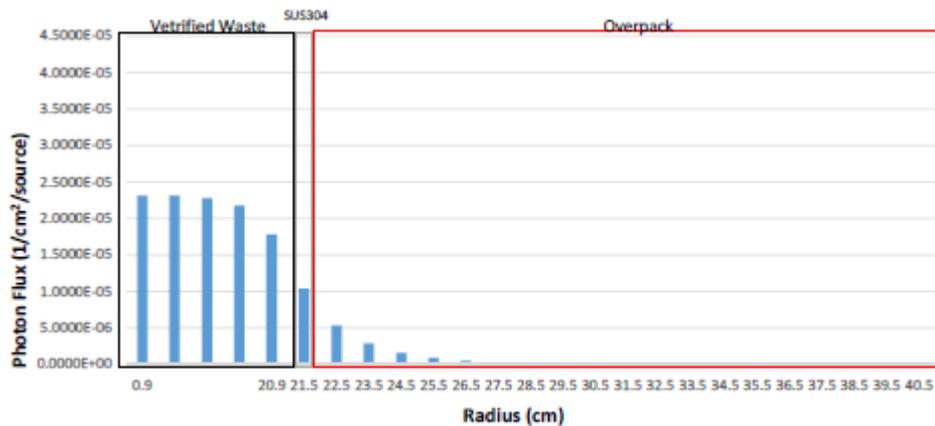
ガラス固化体中心からの 距離, cm	Neutron Flux, n/sec/cm ²		
	ガラス固化体製	ガラス固化体製造	ガラス固化体製造
	造後 0 年	後 500 年	後 1000 年
22.5	1.17E-05	7.14E-06	5.34E-06
23.5	6.57E-06	3.85E-06	2.87E-06
24.5	3.80E-06	2.11E-06	1.56E-06
25.5	2.23E-06	1.16E-06	8.55E-07
26.5	1.29E-06	6.45E-07	4.78E-07
27.5	7.58E-07	3.58E-07	2.62E-07
28.5	4.44E-07	2.00E-07	1.48E-07
29.5	2.69E-07	1.11E-07	8.22E-08
30.5	1.61E-07	6.18E-08	4.62E-08
31.5	9.43E-08	3.50E-08	2.61E-08
32.5	5.33E-08	1.97E-08	1.53E-08
33.5	3.16E-08	1.11E-08	8.81E-09
34.5	1.93E-08	6.04E-09	5.02E-09
35.5	1.22E-08	3.28E-09	3.12E-09
36.5	7.52E-09	1.96E-09	1.75E-09
37.5	4.64E-09	1.16E-09	1.08E-09
38.5	2.56E-09	7.77E-10	6.56E-10
39.5	1.64E-09	5.68E-10	4.83E-10
40.5	6.30E-10	3.22E-10	1.92E-10



(a) ガラス固化体製造後 0 年の光子エネルギースペクトルを用いた場合



(a) ガラス固化体製造後 500 年の光子エネルギースペクトルを用いた場合



(a) ガラス固化体製造後 1,000 年の光子エネルギースペクトルを用いた場合

図 7.5.4-4 光子束のオーバーパック内強度分布 (つづきガンマ線源当りで規格化)

7.5.5 オーバーパックにおけるはじき出し損傷計算

PHITS2.82 を使用し、オーバーパックにおけるはじき出し損傷計算を行った。計算に用いた線源粒子数は、光子計算では 10^9 個、中性子計算では 10^7 個を使用し、オーバーパック表面における放射線束の統計精度が 1σ レベルで 1%以下に収まるようにした。

(1) 中性子線

図 3.2.1 及び表 3.2.1 にオーバーパック内のはじき出し損傷として、中性子照射による Displacement Per Atom (DPA) 評価結果を示す。横軸はオーバーパック内での位置(中心からの距離)であり、縦軸は1万年間の累積中性子フルエンスによる DPA を示す。青はガラス固化体 50 年冷却後にオーバーパック内に装荷したケースの結果であり、オレンジは 30 年冷却後にオーバーパック内に装荷したケースの結果である。30 年冷却後にオーバーパック内に装荷したケースでは、最も大きな損傷を受けるオーバーパック内側表面において、 $6.07 \times 10^{-8} \text{dpa}$ であり、オーバーパック内での減弱が $-0.239 (1/\text{cm})$ を係数とした指数関数的単調減少が確認できた。つまり、オーバーパックの厚みが 1cm 増加するごとに、dpa は 23.9% ずつ減少した。

表 7.5.5-1 中性子によるはじき出し損傷評価結果

ガラス固化体中心からの 距離, cm	DPA by neutron	
	累積照射期間	累積照射期間
	30 年-10000 年	50 年-10000 年
22.5	6.067E-08	5.575E-08
23.5	4.443E-08	4.083E-08
24.5	3.341E-08	3.070E-08
25.5	2.544E-08	2.338E-08
26.5	1.970E-08	1.810E-08
27.5	1.530E-08	1.406E-08
28.5	1.199E-08	1.101E-08
29.5	9.381E-09	8.620E-09
30.5	7.421E-09	6.819E-09
31.5	5.816E-09	5.344E-09
32.5	4.627E-09	4.252E-09
33.5	3.668E-09	3.371E-09
34.5	2.919E-09	2.682E-09
35.5	2.306E-09	2.119E-09
36.5	1.852E-09	1.702E-09
37.5	1.470E-09	1.351E-09
38.5	1.164E-09	1.070E-09
39.5	9.150E-10	8.408E-10
40.5	7.025E-10	6.455E-10

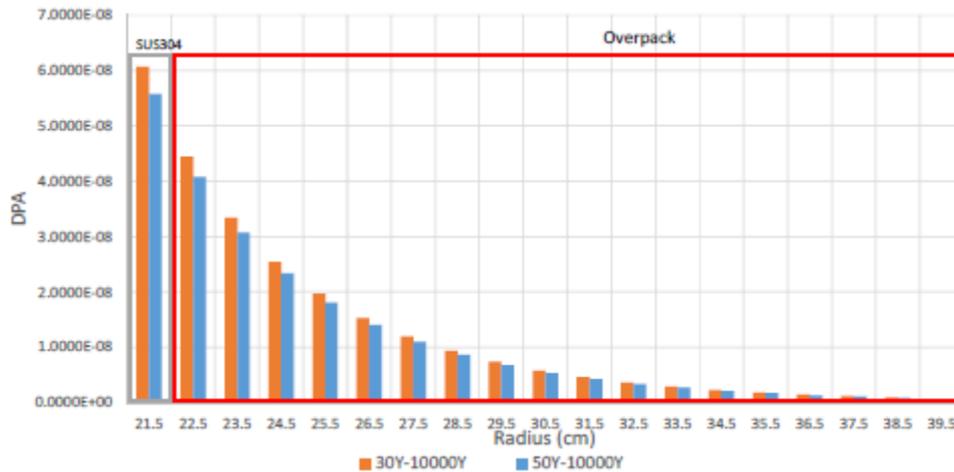


図 7.5.5-1 中性子によるはじき出し損傷評価結果

(2) ガンマ線

ガンマ線によるはじき出し損傷については、次年度に検討を行う。

7.6 まとめ

反応速度論によりオーバーパックの照射脆化を予測できるモデルを構築し、銅-空孔集合体および転位ループの形成を取り扱った反応速度論モデルを構築した。とくに、欠陥集合体からの欠陥の流出プロセスについて、エネルギー論をもとに組み入れて、欠陥集合体の核生成プロセスを詳細に表現できることに重点を置いてモデルを構築した。構築した反応速度論モデルにより、損傷速度の増加にしたがい、銅-空孔集合体の直径は減少し、数密度が大きくなることが分かった。さらに損傷速度が高くなるほど、銅を多く含まないボイドが形成されることもわかった。転位ループについては、損傷速度増加につれて、直径は変化せず、数密度は大きくなった。

今後は、照射試験の結果を用いてモデルの妥当性を検討する。その結果を反映してモデルを改良するとともに、転位密度や欠陥移動エネルギーの違いによって生じる脆化予測量のばらつきを検討し、評価のあいまいさを定量化する。また、照射による破壊靱性値変化を評価するために、降伏応力増加量と破壊靱性値や延性脆性遷移温度の関係についても検討する。

また、炭素鋼の脆化因子に及ぼす材料組成の影響と照射温度の影響を明らかにするため、以下の試験を実施した。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 合金と合わせて照射試験用の試験体を作製した。硬さ試験とマイクロ組織分析に供するため、試験体に電子線照射および Fe イオン照射を実施した。超微小硬さ試験による硬化量の測定と ATP および TEM によるマイクロ組織分析を実施した。

Mn と Si の添加は溶質クラスターの形成を促進し、硬化量を増加させることが分かった。また、照射速度の減少についても溶質クラスターの形成を促進し、硬化量を増加させることが分かった。硬化挙動とマイクロ組織変化との関係については、評価されたマイクロ組織の定量性や硬化要因が複合する場合の挙動等を慎重に検討する必要がある。

炭素鋼の破壊靱性に関する検討では、炭素鋼 (SM400) に対して冷間圧延にて最大 20%の加工を付与することで、照射脆化による硬化を模擬した。そして、90°C の大気中で引張試験および破

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。

さらに、 UO_2 の 70GWd/t の使用済燃料を対象としてガラス固化体から放出される中性子線によるはじき出し損傷量を求めた。ガラス固化体を 30 年貯蔵後にオーバーパック内に装荷したケースでは、最も大きな損傷を受けるオーバーパック内側表面において、 $6.07 \times 10^8 \text{dpa}$ であり、オーバーパック内での減弱が -0.239 (1/cm) を係数とした指数関数的単調減少が確認できた。

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 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（第1分冊）（2015）.
- [2] 日本電気協会原子力規格委員会：原子炉構造材の監視試験方法、JEAC 4201-2007（2007）.
- [3] 日本電気協会原子力規格委員会：原子炉構造材の監視試験方法、JEAC 4201-2007[2013年追補版]（2013）
- [4] 曾根田直樹、土肥謙次、野本明義、西田憲二、石野葉：軽水炉压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）.
- [5] 曾根田直樹、中島健一、西田憲二、土肥謙次：原子炉压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）.
- [6] 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).
- [7] 例えば、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).
- [8] 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－人工バリア品質／健全性評価手法の構築（第1分冊）（2016）.
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] P.T. Heald, “The preferential trapping of interstitials at dislocations”, *Philosophical Magazine*, Vol.31-3, pp. 551-558, (1975).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] T. Muroga, H. Watanabe and N. Yoshida, “Correlation of fast neutron, fusion neutron and electron irradiations based on the dislocation loop density”, *Journal of Nuclear Materials*, Vol.174 (2-3), pp.282-288, (1990).
- [17] Gary S. Was, “Fundamentals of Radiation Materials Science”, Springer, p.601, (2007).
- [18] J.F. Ziegler, J.P. Biersak, SRIM 2006 (2006).
- [19] 「微小試験片材料評価技術の進歩」 研究専門委員会[編]：微小試験片材料評価技術の進歩、日本原子力学会 (1992).
- [20] K. Fujii, K. Fukuya, “Characterization of defect clusters in ion-irradiated A533B steel,” *J. Nucl. Mat.* 336, pp.323-330 (2005).
- [21] 核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物ガラス固化体のインベントリ評価、JNC TN8400 99-085 (1999).

第8章 溶接部の非破壊検査技術の信頼性向上

8.1 背景および目的

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ボイドなどの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る可能性がある。したがって、オーバーパックが健全であることを判断するためには、超音波探傷法による欠陥寸法の測定精度を確認することが必要である。本業務では、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し、測定精度を向上することを目的とする。

8.2 実施内容の概要

平成 27 年度に超音波探傷試験データの処理方法として全波形収録開口合成法（Full Matrix Capture - SAFT: Synthetic Aperture Focusing Technique - TFM :Total Focusing Method : 以下、FMC-TFM とする）を適用することにより、欠陥の寸法や位置の測定精度の向上が図れる可能性が確認された。平成 28 年度は、溶接欠陥を付与した溶接試験体を作製し、FMC-TFM による基礎的な探傷試験データの取得および超音波シミュレーションを実施し、FMC-TFM による測定精度の向上について検証する。

8.3 超音波探傷試験用の溶接試験体の製作

複数の自然欠陥（自然欠陥には、意図して自然欠陥に似た欠陥を付与することも含める）を付与した溶接試験体を 2 体（試験体 A と試験体 B）製作した。溶接試験体の母材は炭素鋼とした。

8.3.1 溶接試験体の概要

欠陥の深さにより寸法および位置の測定精度が変化するため、欠陥深さを表面から約 50 mm および約 30 mm として、放電加工（EDM）によりスリットを付与した溶接試験体を製作する。溶接方法は MAG 溶接（シールドガス：Ar-20%CO₂）とした。

EDM スリットの寸法は、深さ 2 mm または 5 mm、長さ 10 mm、間隙 0.3 mm の矩形とし、開先底部に付与する。ただし、溶接による溶込みで深さが小さくなることを考慮して、溶接前に付与する EDM スリットの深さは、溶接後に想定される欠陥深さに 2 mm 足した寸法とする。図 8.3.1-1 に溶接試験体 A のイメージ図を示す。

図 8.3.1-2 に EDM スリットの配置図を示す。EDM スリットの深さは、ボルト穴に近い側を 5 mm に、遠い側を 2 mm にする。なお、積層して開先深さが約 30 mm になった時点で溶接金属上に図 8.3.1-2 と同じ寸法・個数の EDM スリットを付与した後、最終層まで積層する。

図 8.3.1-3 に溶接試験体 B のイメージ図を示す。表面から深さ約 50 mm まで開先加工を施し、EDM スリットを付与して分解能を評価する。EDM スリットの寸法は、深さ 5 mm、長さ 10 mm、間隔 0.3 mm の矩形として、図 8.3.1-4 に示す配置で付与する。そして、積層して開先深さが約 40 mm のときに図 8.3.1-5 に示す配置で深さ 5~8 mm、長さ 10 mm、間隔 0.3 mm の EDM スリットを再び付与して最終層まで積層する。

初期の開先深さは、溶接試験体 A が 55 mm、溶接試験体 B が 50 mm であった（開先底部に EDM スリット付与）。これに積層を行い、溶接試験体 A は開先深さが約 25 mm で、溶接試験体 B は開先深さが約 35 mm で溶接を中断し、再加工により各々開先深さを 30 mm、40 mm にした後、開先底部に EDM スリットを付与した。そして、表層に余盛ができる程度まで積層した。

超音波探傷試験において余盛の上に探触子を配置することは困難であることから、余盛がある場合、探傷条件に制約が生じる。そのため、余盛を除去して表面を平坦にした。図 8.3.1-6 に余盛除去後の溶接試験体 A と溶接試験体 B の外観写真を示す。ここに示す余盛除去後の試験体を超音波探傷に供した。

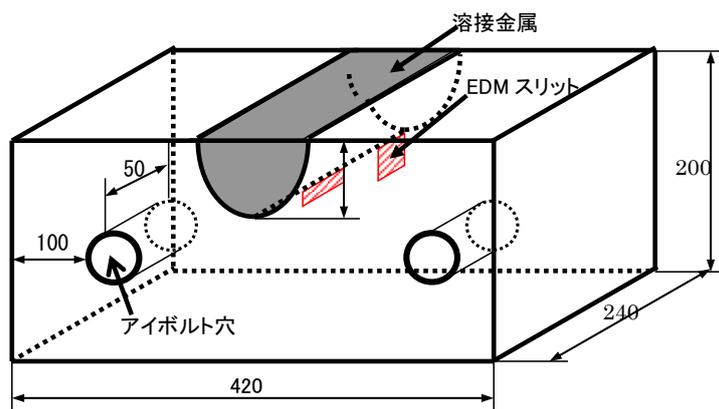


図 8.3.1-1 溶接試験体 A のイメージ図

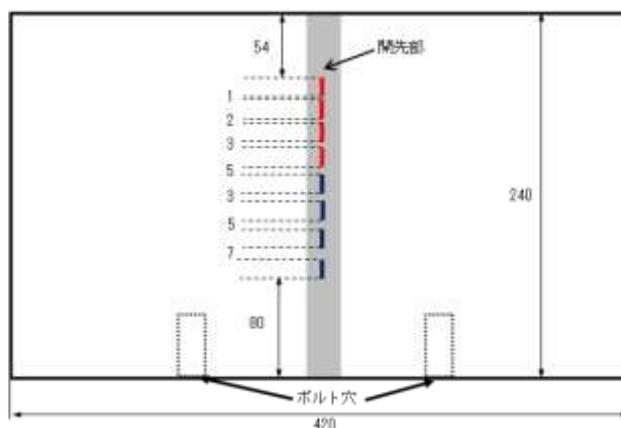


図 8.3.1-2 試験体の EDM スリット付与位置（赤：深さ 2 mm、青：深さ 5 mm）

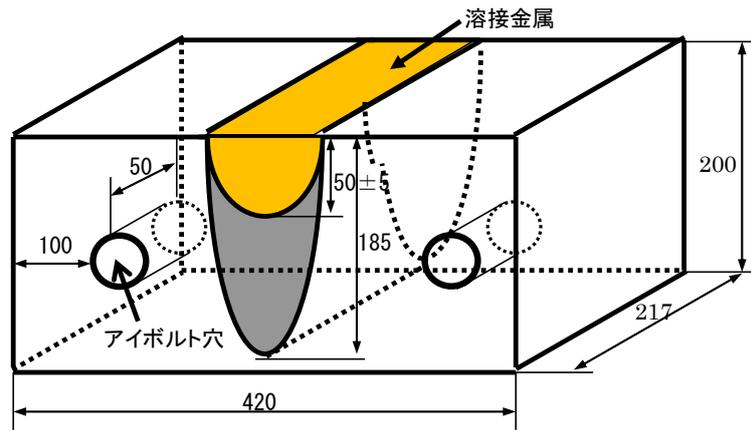


図 8.3.1-3 溶接試験体 B のイメージ図

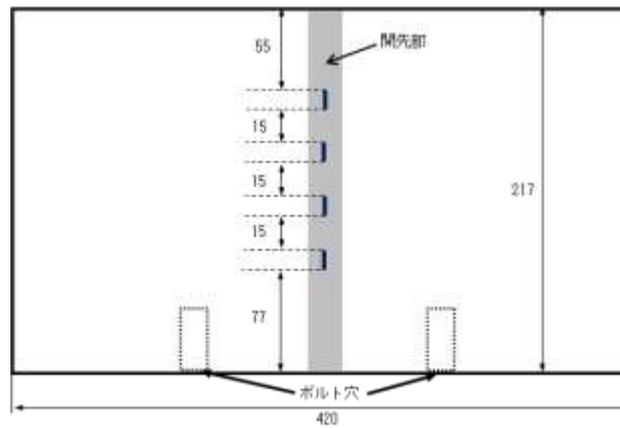


図 8.3.1-4 開先深さ 50 mm の EDM スリット付与位置

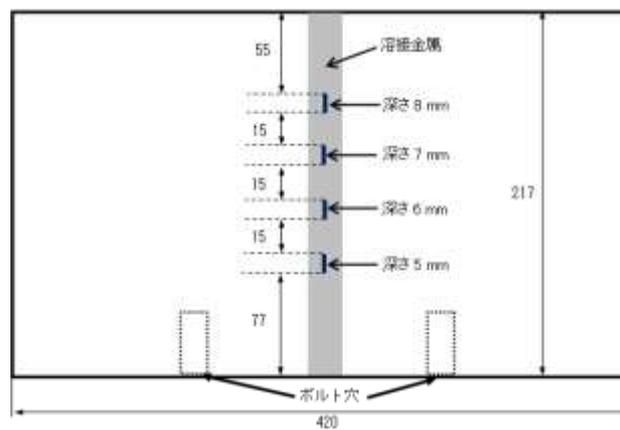


図 8.3.1-5 開先深さ 40 mm の EDM スリット付与位置

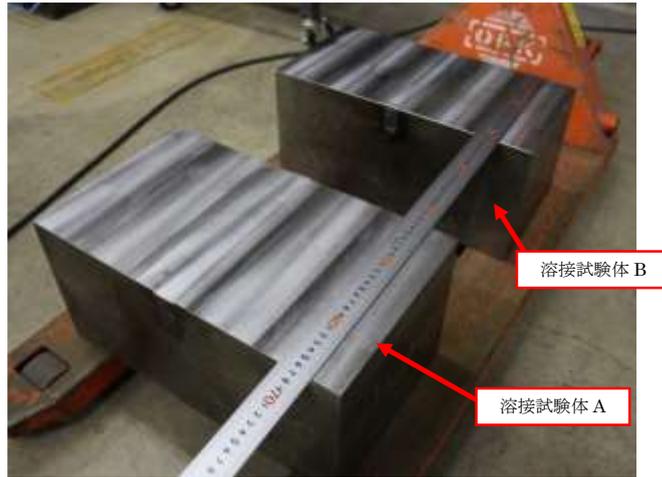


図 8.3.1-6 余盛研削後の溶接試験体 A と溶接試験体 B の外観写真

8.4 欠陥寸法および位置の測定精度向上に関する検討

8.4.1 目的

平成 27 年度までの検討により、FMC-TFM により欠陥の位置や寸法について測定精度向上が図れる可能性が確認された。また、平成 27 年度に策定された研究開発計画案において、平成 28 年度には測定精度向上に関する検討についての探傷試験の実施ならびに欠陥部の切断等による誤差の評価が示されている。平成 28 年度の本測定では、作業時の条件を考慮した FMC-TFM による基礎的な探傷試験を実施し、FMC-TFM による測定精度向上について検証する。

8.4.2 実施計画

製作する溶接試験体に対して、全波形収録開口合成法（以下、FMC-TFM）を用いて自然欠陥を可視化し、その寸法および位置を測定する。また、フェーズドアレイ法を用いた測定も実施して、FMC-TFM の測定結果と比較し、FMC-TFM による欠陥寸法および位置の測定精度向上の効果を確認する。また、FMC-TFM による測定精度および空間分解能の向上策についても検討する。

平成 27 年度までの検討により、FMC-TFM により欠陥の位置や寸法について測定精度向上が図れる可能性が確認されたが、一方で、実施された検討は主に溶接線方向と直交する断面における精度向上に関する検討であり、溶接線方向も考慮した測定精度向上についての検討は行われていない。作業時の測定においては、溶接線直交断面と同時に溶接線方向においても測定精度や分解能を確保する必要がある。溶接線方向も含む 3 次元空間において FMC-TFM による測定精度向上の効果をj得るためには、マトリックス配置のアレイプローブを採用することが一つの手段になる。平成 28 年度の測定では、マトリックスアレイプローブを使用した FMC-TFM による測定結果と、リニアアレイプローブを使用したフェーズドアレイ法による測定結果を比較し、欠陥位置や寸法の測定精度について検討するとともに、空間分解能についても検討する。FMC-TFM における測定精度および空間分解能の向上のための測定条件の検討については後述する超音波シミュレーション解析により実施し、FMC-TFM における測定条件に反映する。超音波シミュレーション解析結果を反映した FMC-TFM の測定条件ならびに、比較のために実施するフェーズドアレイ法の測定条件を以下に示す。

8.4.3 試験条件

平成 28 年度の FMC-TFM 測定では操業時を想定するため、高温試験体の測定で実績のある市販装置を使用する。ただし、本測定は基礎的な検討であるため、プローブやクサビについては高温環境対応の特殊な機器を使用せず、一般的な材質の市販のプローブ等を使用することとし、FMC-TFM における送受信条件の計算や送受信の実行を担う主要部分のみについて、高温試験体の測定で実績のある装置を使用する。FMC-TFM に使用する探傷機およびマトリックスアレイプローブを図 8.4.3-1 に示す。また、フェーズドアレイ法に使用する探傷機およびリニアアレイプローブを図 8.4.3-2 に示す。

FMC-TFM およびフェーズドアレイ法による測定は 3 つの面から送受信を行うものとし、それぞれ試験体 A の表面から、試験体 A の裏面から、試験体 B の表面からとする。試験体 A では EDM による欠陥および溶接欠陥について、表面からの測定では 100 mm 程度までの比較的浅い範囲を測定対象とし、裏面からの測定では 100 mm 程度から 200 mm までの比較的深い範囲を測定対象とする。試験体 B の表面からの測定においては、比較的浅い範囲の EDM による欠陥および比較的深い範囲の溶接欠陥を測定対象とする。

FMC-TFM における主な探傷条件を表 8.4.3-1 に示す。探傷条件は、後述するシミュレーション解析結果を反映して選定した。今回使用する装置における測定範囲の制限のため、FMC-TFM の測定では図 8.4.3-3 (a)から(c)に赤枠で示すように試験体深さ方向に 3 分割して画像化する。各測定範囲を浅い方から順に、測定範囲 N、M、F とする。試験体 A の表面からの測定では深さ 100 mm 程度までを対象とするため、測定範囲 N および M を使用し、試験体 A の裏面からの測定では 100 mm 程度より深い範囲を対象とするため測定範囲 M および F を使用する。試験体 B については測定範囲 N、M、F の 3 種類を使用する。

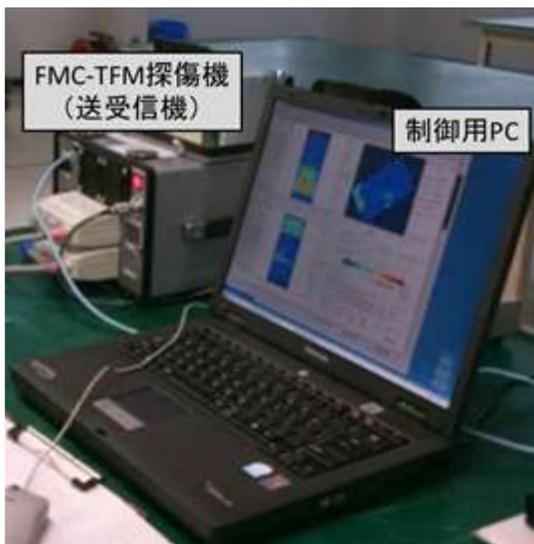
フェーズドアレイ法における主な探傷条件を表 8.4.3-2 に示す。フェーズドアレイ法では 100 mm 程度までの比較的浅い範囲については素子ピッチ 0.5 mm の 32ch リニアアレイプローブを使用し、100 mm 程度より深い範囲については 2.0 mm ピッチの 32ch リニアアレイプローブを使用する。平成 26 年度の検討により、100 mm 程度より深い測定範囲の分解能向上に開口寸法約 64 mm (素子ピッチ 2 mm×32 素子により約 64 mm) のプローブが有効であることが示されているため、同様の測定条件を採用する。

表 8.4.3-1 FMC-TFM 探傷条件

検査方法	直接接触法	
周波数	2 MHz	
素子数	256ch (16×16 マトリックスプローブ)	
素子ピッチ	3.0 mm	
開口寸法	約 48×48 mm	
サンプリング周波数	20 MHz	
接触媒質	ソニコート	
クサビ	2,360 m/s	
	入射角：16.9 度	
	底面：平面 クサビ内距離：46.5 mm	
検査対象音速	5,900 m/s	
屈折角	46.62 度	
画像化範囲	Xa	66.0 mm
	Ya	90.0 mm
	Za	113.3 mm
画像化中心距離	56/156/250 mm	
探傷ピッチ	溶接線方向 30 mm	

表 8.4.3-2 フェーズドアレイ法探傷条件

測定対象範囲	表面近傍から深さ	深さ 100 mm 程度から
	100 mm 程度まで	裏面 (200 mm) まで
検査方法	直接接触法	
周波数	3 MHz	
素子数	32ch (リニアアレイプローブ)	
素子ピッチ	0.5 mm	2.0 mm
開口寸法	素子配列方向：約 16 mm	素子配列方向：約 64 mm
	素子配列直交方向：20 mm	素子配列直交方向：20 mm
サンプリング周波数	50 MHz	
接触媒質	ソニコート	
クサビ	2,330 m/s	2,450 m/s
	入射角：16.5 度	入射角：6.2 度
	素子中心高さ：38.4 mm	素子中心高さ：15.1 mm
検査対象音速	5,900 m/s	
探傷ピッチ	溶接線方向 1 mm	



(a)探傷機および制御用 PC

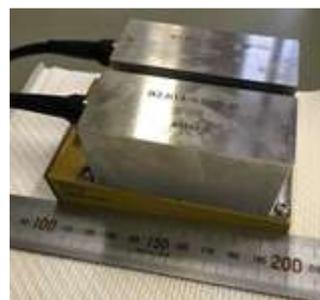


(b)プローブおよびクサビ

図 8.4.3-1 FMC-TFM に使用する探傷装置



(a)探傷機および制御用 PC



(b)2mm ピッチ 32ch リニアアレイプローブ



(c)0.5mm ピッチ 32ch リニアアレイプローブ

図 8.4.3-2 フェーズドアレイ法に使用する装置

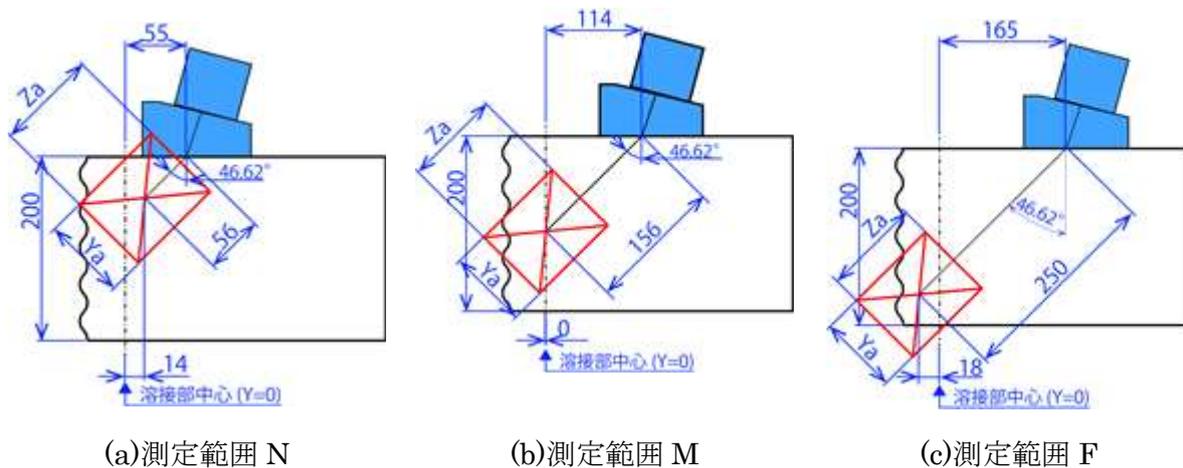


図 8.4.3-3 FMC-TFM 画像化範囲

8.4.4 探傷試験結果

FMC-TFM およびフェーズドアレイ法による測定結果の表示方法を図 8.4.4-1 に示す。また、XYZ 軸の原点および向きを定義を図 8.4.4-2 に示す。溶接試験体に付与された EDM による欠陥および溶接欠陥に対して、識別のために付与した番号を図 8.4.4-3 に示す。測定結果において各欠陥により現れる指示に対しては、探触子設置面の記号と欠陥の番号を組み合わせた指示番号を付与して整理した。探触子設置面の記号は試験体 A 表面を IAU、試験体 A 裏面を IAL、試験体 B 表面を IBU とし、欠陥の番号と組み合わせ、例えば IAU-E1、IBU-W1 などと表す。FMC-TFM およびフェーズドアレイ法による探傷試験の結果を添付資料 8-1 に示す。

FMC-TFM およびフェーズドアレイ法による各測定結果における欠陥の指示について、上端および下端、始端、終端、高さ（上端と下端の差）、長さ（始端と終端の差）を整理した結果を、FMC-TFM による測定結果は表 8.4.4-1 から表 8.4.4-3 に示し、フェーズドアレイ法による測定結果は表 8.4.4-4 から表 8.4.4-6 に示す。FMC-TFM における指示の読み取りでは、溶接部内の無欠陥部から 10mm 角程度の領域を切り出して、その領域の最大値をノイズレベルとし、各画像化データに対してノイズレベルを閾値とした二値化を行って指示の上端および下端、始端、終端を読み取った。二値化画像の例を図 8.4.4-4 に示す。フェーズドアレイ法における指示の読み取りでは、上端および下端はエコーが最大値になる座標を読み取り、始端および終端ではエコー最大値から 6dB 以内の値を持つ範囲を読み取った。

表 8.4.4-1 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						Z
IAU-E1	上端	87.8	-1.23	27.6	10.3	80.3	92.3	12.0	
	下端	86.3	-3.29	37.9					
IAU-E2	上端	89.3	-0.4	51.5	10.7	78.8	93.8	15.0	
	下端	86.3	-4.93	62.2					
IAU-E3	上端	95.3	2.89	28.8	12.8	95.3	-	-	終端：E5 と識別不可
	下端	102.8	-2.46	41.6					
IAU-E4	上端	101.3	-0.4	51.5	11.1	95.3	107.3	12.0	
	下端	101.3	-5.76	62.6					
IAU-E5	上端	119.3	-2.46	27.6	12.0	-	122.3	-	終端：E3 と識別不可
	下端	117.8	-2.87	39.5					
IAU-E6	上端	119.3	-3.7	54.0	8.7	111.8	122.3	10.5	
	下端	117.8	-4.11	62.6					
IAU-E7	上端	134.3	-2.46	28.4	13.6	-	137.3	-	
	下端	131.3	-2.87	42.0					
IAU-E8	上端	131.3	-2.05	51.9	11.1	-	135.8	-	
	下端	131.3	-4.93	63.0					
IAU-E9	上端	147.8	0.01	29.6	6.6	143.3	150.8	7.5	
	下端	147.8	-3.29	36.2					
IAU-E10	上端	144.8	-0.4	53.5	6.6	138.8	150.8	12.0	終端：X165 から測定
	下端	144.8	-5.35	60.1					
IAU-E11	上端	161.3	0.01	30.0	7.8	153.8	-	-	終端：E13 と識別不可
	下端	161.3	2.07	37.9					
IAU-E12	上端	155.3	-3.7	50.2	9.5	-	-	-	終端：E14 と識別不可
	下端	159.8	-4.55	59.7					
IAU-E13	上端	167.3	0.42	30.4	5.0	-	174.8	-	始端：E11 と識別不可
	下端	168.8	-3.29	35.4					
IAU-E14	上端	173.3	1.66	51.9	7.8	-	-	-	始端・終端：E12、E16 と識別不可
	下端	170.3	-4.52	59.7					
IAU-E15	上端	183.8	0.83	29.2	7.0	180.8	186.8	6.0	
	下端	182.3	-3.29	36.2					
IAU-E16	上端	180.8	3.72	51.5	9.1	-	191.3	-	始端：E14 と識別不可
	下端	186.8	-4.93	60.6					
IAU-W1	上端	24.8	3.31	51.1	6.2	21.8	27.8	6.0	
	下端	24.8	-3.7	57.3					
IAU-W2	上端	39.8	5.78	44.5	2.1	39.8	39.8	1.0	
	下端	39.8	4.96	46.5					
IAU-W3	上端	53.3	4.13	29.6	1.7	53.3	53.3	1.0	
	下端	53.3	2.07	31.3					
IAU-W4	上端	62.3	5.37	45.7	2.1	60.8	63.8	3.0	
	下端	62.3	4.13	47.8					

—:検出不可もしくは算出不可

表 8.4.4-2 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	-0.13	36.4	-7.4	80.25	87.75	7.5	
	下端	83.3	-8.37	28.9					
IAL-E2	上端	83.3	-3.02	60.3	-7.0	81.75	87.75	6.0	
	下端	83.3	-7.14	53.3					
IAL-E3	上端	101.3	-1.37	38.8	-5.4	96.75	105.8	9.0	
	下端	101.3	-7.14	33.5					
IAL-E4	上端	99.8	-0.13	60.7	-8.3	96.75	104.3	7.5	
	下端	101.3	-7.96	52.5					
IAL-E5	上端	117.8	0.69	37.6	-9.1	113.3	122.3	9.0	
	下端	116.3	-8.37	28.5					
IAL-E6	上端	117.8	-3.02	60.7	-8.7	113.3	-	-	終端：E8 と識別不可
	下端	119.3	-8.37	52.1					
IAL-E7	上端	131.3	-1.78	38.4	-4.5	126.8	132.8	6.0	
	下端	131.3	-6.31	33.9					
IAL-E8	上端	125.3	-0.54	61.5	-10.3	-	132.8	-	始端：E6 と識別不可
	下端	128.3	-9.61	51.2					
IAL-E9	上端	-	-	-	-	-	-	-	検出不可
	下端	-	-	-					
IAL-E10	上端	143.3	0.69	61.1	-8.7	-	-	-	始端・終端識別不可
	下端	141.8	-7.14	52.5					
IAL-E11	上端	-	-	-	-	-	-	-	検出不可
	下端	-	-	-					
IAL-E12	上端	156.8	0.28	59.9	-7.8	153.8	164.3	10.5	終端：E14 と識別不可
	下端	155.3	-6.72	52.1					
IAL-E13	上端	-	-	-	-	-	-	-	検出不可
	下端	-	-	-					
IAL-E14	上端	167.3	4.4	64.4	-14.5	-	-	-	始端・終端：E12、E16 と識別不可
	下端	168.8	-8.78	50.0					
IAL-E15	上端	-	-	-	-	-	-	-	検出不可
	下端	-	-	-					
IAL-E16	上端	183.8	-0.13	61.5	-9.5	-	186.8	-	始端：E14 と識別不可
	下端	179.3	-6.72	52.1					
IAL-W1	上端	-	-	-	-	-	-	-	検出不可
	下端	-	-	-					
IAL-W2	上端	-	-	-	-	-	-	-	検出不可
	下端	-	-	-					
IAL-W3	上端	-	-	-	-	-	-	-	検出不可
	下端	-	-	-					
IAL-W4	上端	-	-	-	-	-	-	-	検出不可
	下端	-	-	-					

－:検出不可もしくは算出不可

表 8.4.4-3 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						Z
IBU-E1	上端	84.8	1.25	42.8	-	78.8	89.3	10.5	下端：E2 と識別不可
	下端	△	△	△					
IBU-E2	上端	△	△	△	-	75.8	90.8	15.0	上端：E1 と識別不可
	下端	84.8	-3.29	60.6					
IBU-E3	上端	108.8	1.66	35.0	-	101.3	113.3	12.0	下端：E4 と識別不可
	下端	△	△	△					
IBU-E4	上端	△	△	△	-	101.3	113.3	12.0	上端：E3 と識別不可
	下端	110.3	-3.70	60.6					
IBU-E5	上端	129.8	2.89	34.2	-	125.3	138.8	13.5	下端：E6 と識別不可
	下端	△	△	△					
IBU-E6	上端	△	△	△	-	125.3	138.8	13.5	上端：E5 と識別不可
	下端	132.8	0.42	61.4					
IBU-E7	上端	158.3	1.66	36.6	-	152.3	164.3	12.0	下端：E8 と識別不可
	下端	△	△	△					
IBU-E8	上端	△	△	△	-	152.3	165.8	13.5	上端：E7 と識別不可
	下端	162.8	-2.87	60.1					
IBU-W1	上端	90.8	3.31	67.6	2.1	90.8	92.3	1.5	
	下端	90.8	1.66	69.6					
IBU-W2	上端	-	-	0	-	-	-	-	検出不可
	下端	-	-	0					
IBU-W3	上端	-	-	0	-	-	-	-	検出不可
	下端	-	-	0					
IBU-W4	上端	123.8	4.53	107.4	12.8	119.3	125.3	6.0	
	下端	122.3	-8.65	120.2					
IBU-W5	上端	-	-	0	-	-	-	-	検出不可
	下端	-	-	0					
IBU-W6	上端	-	-	0	-	-	-	-	検出不可
	下端	-	-	0					
IBU-W7	上端	-	-	0	-	-	-	-	検出不可
	下端	-	-	0					
IBU-W8	上端	164.3	7.01	113.6	9.1	159.8	168.8	9.0	
	下端	164.3	-2.47	122.7					
IBU-W9	上端	-	-	0	-	-	-	-	検出不可
	下端	-	-	0					

△: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

表 8.4.4-4 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、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
IAU-E1	上端	86	-1.4	33.3	3.9	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	88	-0.9	56.3	3.5	-	-	-	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	102	0.3	34.5	2.8	-	-	-	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	102	-0.7	56.4	3.2	-	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	118	-1.1	34.9	3.1	-	-	-	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	120	1.0	56.2	3.9	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	130	-0.6	35.2	1.9	-	-	-	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	129	-2.1	57.1	4.0	-	-	-	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	147	-0.2	34.1	-	-	-	-	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	146	0.3	55.4	2.0	-	-	-	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	160	-0.2	34.1	-	-	-	-	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	156	-0.4	54.6	1.8	-	-	-	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	168	-0.9	35.0	-	-	-	-	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	169	-0.9	56.2	1.2	-	-	-	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	181	-0.9	35.0	-	-	-	-	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	181	-0.6	56.5	0.9	-	-	-	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	25	-0.4	56.8	-	20	31	11	下端:検出不可
	下端	-	-	-					
IAU-W2	上端	38	6.7	47.6	-	-	-	-	下端:検出不可
	下端	-	-	-					
IAU-W3	上端	57	-1.8	34.3	-	53	61	8	下端:検出不可
	下端	-	-	-					
IAU-W4	上端	63	6.1	48.9	-	58	66	8	下端:検出不可
	下端	-	-	-					

一:検出不可もしくは算出不可

表 8.4.4-5 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、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	85	0.3	33.6	5.5	-	-	-	
	下端	85	2.9	28.1					
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	4.5	-	-	-	※1
	下端	117	-1.9	30.3					
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	-	-	-	-	-	-	-	測定範囲外
	下端	-	-	-					
IAL-W2	上端	40	3.1	42.6	-	33	49	16	下端：検出不可
	下端	-	-	-					
IAL-W3	上端	-	-	-	-	-	-	-	検出不可
	下端	-	-	-					
IAL-W4	上端	61	5.8	44.3	-	55	68	13	下端：検出不可
	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

-:検出不可もしくは算出不可

表 8.4.4-6 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、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					
IBU-E1	上端	81	-0.2	46.8	2.7	73	90	17	※1
	下端	80	0.7	49.6					
IBU-E2	上端	81	2.8	51.7	4.3	72	89	17	※1
	下端	77	2.9	56.0					
IBU-E3	上端	108	0.3	43.7	4.9	101	114	13	※1
	下端	106	-0.3	48.6					
IBU-E4	上端	107	0.3	53.3	3.7	99	114	15	※1
	下端	108	-0.2	57.0					
IBU-E5	上端	129	-1.7	42.0	8.2	124	138	14	※1
	下端	131	-0.7	50.2					
IBU-E6	上端	133	0.3	53.3	2.8	127	139	12	※1
	下端	133	0.9	56.0					
IBU-E7	上端	156	-1.1	42.5	7.9	149	163	14	※1
	下端	156	-0.5	50.3					
IBU-E8	上端	156	0.5	53.4	2.5	150	163	13	※1
	下端	156	0.8	55.9					
IBU-W1	上端	-	-	-	-	-	-	-	※1 検出不可
	下端	-	-	-					
IBU-W2	上端	76	10.5	119.4	-	68	82	14	※2 下端：検出不可
	下端	-	-	-					
IBU-W3	上端	103	-2.7	185.4	-	87	120	33	※2 下端：検出不可
	下端	-	-	-					
IBU-W4	上端	122	3.6	145.2	-	-	-	-	※2 下端：検出不可 始末端：エコー微少のため測定不可
	下端	-	-	-					
IBU-W5	上端	116	5.4	112.3	-	-	-	-	※2 下端：検出不可 始末端：エコー微少のため測定不可
	下端	-	-	-					
IBU-W6	上端	136	-4.4	111.0	-	-	-	-	※2 下端：検出不可 始末端：エコー微少のため測定不可
	下端	-	-	-					
IBU-W7	上端	144	-1.7	170.2	-	-	-	-	※2 下端：検出不可 始末端：エコー微少のため測定不可
	下端	-	-	-					
IBU-W8	上端	163	3.3	122.8	-	154	172	18	※2 下端：検出不可
	下端	-	-	-					
IBU-W9	上端	162	2.3	155.9	-	155	169	14	※2 下端：検出不可
	下端	-	-	-					

※1:0.5mm ピッチリニアアレイプローブによる測定

※2:2.0mm 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

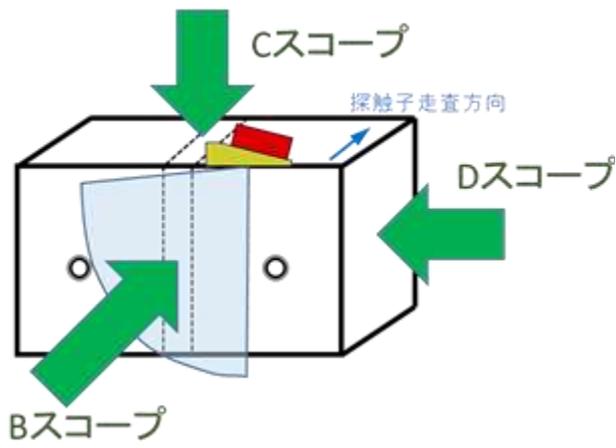


図 8.4.4-1 測定結果の表示方法

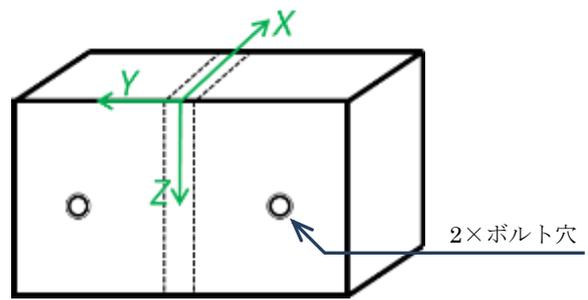
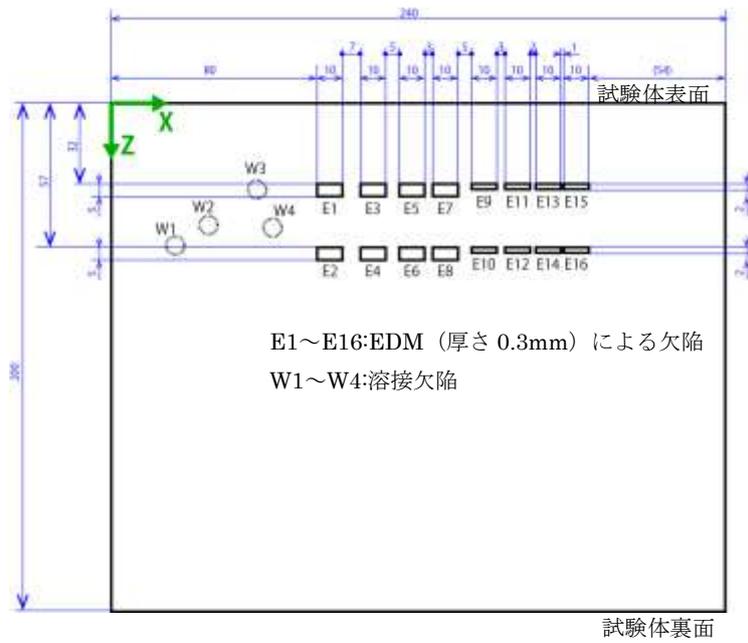
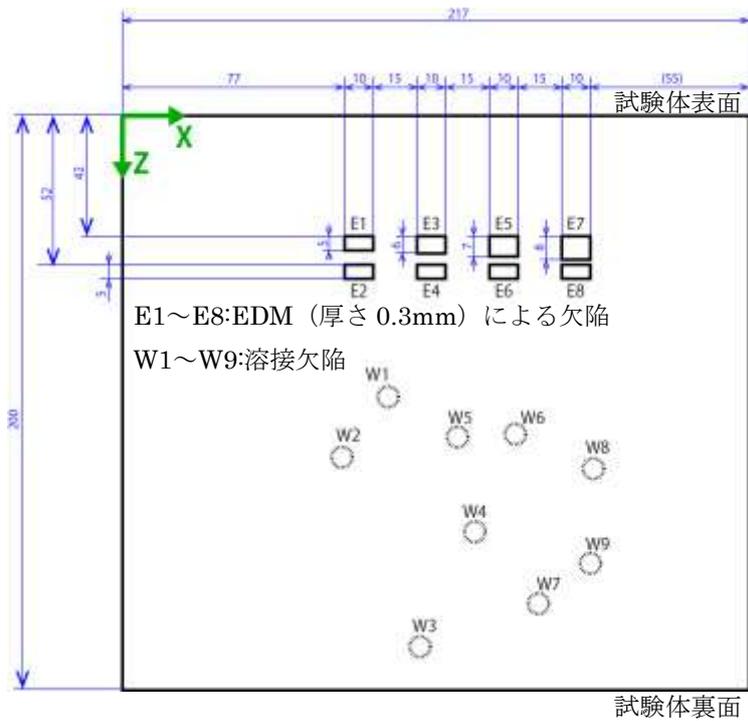


図 8.4.4-2 座標の定義

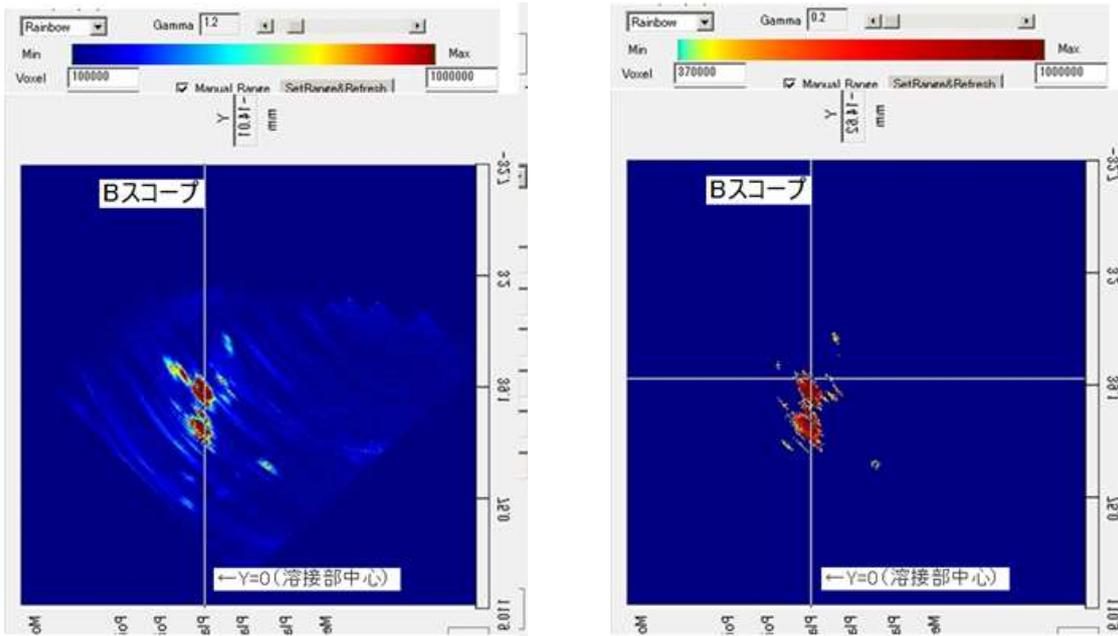


(a)試験体 A



(b)試験体 B

図 8.4.4-3 欠陥番号



(a) 二値化前の画像

(b) 二値化後の画像

図 8.4.4-4 FMC-TFM における指示範囲読み取りのための二値化画像の例

8.4.5 測定結果の評価

製作した試験体では EDM により付与した欠陥の上に溶接を行っており、後述する断面マクロ調査結果に示すように、溶接による溶込みや欠陥が生じる EDM 付与欠陥上部（試験体表面側）は形状が複雑になっている。このため測定精度の評価では、計画値通りの形状が得られていると考えられる EDM 付与欠陥下部（試験体裏面側）を使用して、深さ方向の測定精度を評価する。また、溶接線方向の測定精度については、EDM 付与欠陥における溶接線方向の始端および終端を基準として評価する。

深さ方向の測定精度を評価するため、EDM 付与欠陥下部（試験体裏面側の縁）に該当する測定値と断面観察による座標の誤差をまとめた結果を表 8.4.5-1 および表 8.4.5-2 に示す。FMC-TFM とフェーズドアレイ法を比較すると、深い範囲（探触子設置面から遠い範囲）においては FMC-TFM の誤差平均値が小さくなっている。一方で、浅い範囲ではフェーズドアレイ法の方が誤差の平均値および標準偏差において良好な値を示している。これは、本測定にて使用したプローブが FMC-TFM では 16×16 素子、3mm ピッチ（開口寸法約 48mm）であるのに対して、フェーズドアレイ法では 32 素子、0.5mm ピッチ（開口寸法約 16mm）であるため、特に浅い範囲では、FMC-TFM で画像化する際の 1 画素に寄与する素子数が相対的に少なくなり、情報量が低下したためと推測される。平成 27 年度に実施された 64 素子、1mm ピッチ（開口寸法約 64mm）等のリニアアレイプローブによる FMC-TFM の測定結果では測定精度の向上が確認されていることを勘案すれば、素子数や周波数、開口寸法を最適化することで FMC-TFM の測定精度は改善すると考える。また、浅い範囲と深い範囲で誤差平均値を比較すると、フェーズドアレイ法では比較的大きく変化しているのに対し、FMC-TFM では変化が小さくなっており、FMC-TFM では広い範囲で安定した測定結果が得られる可能性があることが示されている。

溶接線方向の測定精度を評価するため、断面観察において溶接線方向の測定を実施した試験体 A の欠陥番号 E1 から E8 について、始端および終端の測定誤差をまとめた結果を表 8.4.5-3 から表 8.4.5-6 に示す。また、本測定におけるフェーズドアレイ法では試験体 A の溶接線方向近接欠陥の始端および終端を識別できていない場合が多いため、試験体 B の計画値に対する測定誤差について集計した結果についても表 8.4.5-7 および表 8.4.5-8 に示す。

表 8.4.5-7 および表 8.4.5-8 より、溶接線方向の測定精度については 100mm 程度以内の浅い範囲であっても、FMC-TFM の方が良い精度を示す傾向にあると言える。これは、マトリクスアレイプローブを使用することで、溶接線方向にも超音波を仮想的に集束させるように信号処理を行っている効果と考えられる。また、表 8.4.5-3 と表 8.4.5-5 より、深さ方向の測定精度と同様に FMC-TFM の溶接線方向の測定精度も、浅い範囲と深い範囲で大きな変化がないことが確認できる。

以上により、深さ方向および溶接線方向において、FMC-TFM により測定精度が向上する効果が見込めることが確認された。一方で、マトリクスアレイプローブを使用することで画像化の 1 画素あたりの情報量が低下する可能性も確認されており、使用するプローブや信号処理方法の設計についてさらに最適化するための検討が必要と考える。

表 8.4.5-1 深さ 100mm 程度以内の深さ方向欠陥位置測定精度の比較

指示番号	断面観察による座標	FMC-TFM		フェーズドアレイ法	
		測定値	誤差	測定値	誤差
IAU-E1	35.9	37.9	2.0	37.1	1.2
IAU-E2	-	62.2	-	59.8	-
IAU-E3	37.2	41.6	4.4	37.2	0.0
IAU-E4	61.0	62.6	1.6	59.6	-1.4
IAU-E5	37.5	39.5	2.0	38.0	0.5
IAU-E6	60.1	62.6	2.5	60.1	0.0
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
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			3.3		0.4
誤差の最大値			4.7		3.0
誤差の最小値			1.6		-1.4
誤差の標本標準偏差			1.0		1.1

単位:[mm]

－:検出不可もしくは算出不可

表 8.4.5-2 深さ 100mm 程度より深い範囲の深さ方向欠陥位置測定精度の比較

指示番号	断面観察による座標	FMC-TFM		フェーズドアレイ法	
		測定値	誤差	測定値	誤差
IAL-E1	35.9	36.4	0.5	33.6	-2.4
IAL-E2	-	60.3	-	55.2	-
IAL-E3	37.2	38.8	1.6	34.8	-2.4
IAL-E4	61	60.7	-0.3	49.6	-11.4
IAL-E5	37.5	37.6	0.1	34.8	-2.7
IAL-E6	60.1	60.7	0.6	56.0	-4.1
IAL-E7	37.3	38.4	1.1	35.0	-2.3
IAL-E8	60.1	61.5	1.4	55.8	-4.4
IAL-E9	32.9	-	-	30.8	-2.1
IAL-E10	57.1	61.1	4.0	55.0	-2.1
IAL-E11	-	-	-	30.8	-
IAL-E12	-	59.9	-	54.8	-
IAL-E13	-	-	-	30.8	-
IAL-E14	-	64.4	-	54.7	-
IAL-E15	-	-	-	30.8	-
IAL-E16	56.9	61.5	4.6	55.7	-1.3
誤差の平均			1.5		-3.5
誤差の最大値			4.6		-1.3
誤差の最小値			-0.3		-11.4
誤差の標本標準偏差			1.7		2.9

単位:[mm]

—:検出不可もしくは算出不可

表 8.4.5-3 深さ 100mm 程度以内の溶接線方向測定精度 (FMC-TFM)

指示番号	断面観察による座標			測定値			誤差		
	始端	終端	長さ	始端	終端	長さ	始端	終端	長さ
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	-	-	-2.1	-	-
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	-	-	-	-
誤差の平均							-1.4	1.3	1.5
誤差の最大値							-0.3	3.7	2.1
誤差の最小値							-2.1	0.3	0.8
誤差の標本標準偏差							0.9	1.5	0.9

単位:[mm]

—:検出不可もしくは算出不可

表 8.4.5-4 深さ 100mm 以内の溶接線方向測定精度 (フェーズドアレイ法)

指示番号	断面観察による座標			測定値			誤差		
	始端	終端	長さ	始端	終端	長さ	始端	終端	長さ
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	-	-	-	-	-	-	-	-
誤差の平均							0.9	1.0	-
誤差の最大値							0.9	1.0	0.0
誤差の最小値							0.9	1.0	0.0
誤差の標本標準偏差							-	-	-

単位:[mm]

—:検出不可もしくは算出不可

表 8.4.5-5 深さ 100mm より深い範囲の溶接線方向測定精度 (FMC-TFM)

指示番号	断面観察による座標			測定値			誤差		
	始端	終端	長さ	始端	終端	長さ	始端	終端	長さ
IAL-E1	-	90.2	-	80.3	87.8	7.5	-	-2.5	-
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	-2.8	-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	1.3	-	-
IAL-E8	125.4	-	-	-	132.8	-	-	-	-
誤差の平均							0.5	-1.7	-1.3
誤差の最大値							1.3	0.3	-0.8
誤差の最小値							-0.5	-2.8	-2.4
誤差の標本標準偏差							0.9	1.2	0.9

単位:[mm]

—:検出不可もしくは算出不可

表 8.4.5-6 深さ 100mm より深い範囲の溶接線方向測定精度 (フェーズドアレイ法)

指示番号	断面観察による座標			測定値			誤差		
	始端	終端	長さ	始端	終端	長さ	始端	終端	長さ
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	-	-	-	-	-	-	-	-
誤差の平均							-	-	-
誤差の最大値							-	-	-
誤差の最小値							-	-	-
誤差の標本標準偏差							-	-	-

単位:[mm]

—:検出不可もしくは算出不可

表 8.4.5-7 計画値に対する深さ 100mm 以内の溶接線方向測定精度 (FMC-TFM)

指示番号	計画値			測定値			誤差		
	始端	終端	長さ	始端	終端	長さ	始端	終端	長さ
IBU-E1	77.0	87.0	10.0	78.8	89.3	10.5	1.8	2.3	0.5
IBU-E2	77.0	87.0	10.0	75.8	90.8	15.0	-1.3	3.8	5.0
IBU-E3	102.0	112.0	10.0	101.3	113.3	12.0	-0.8	1.3	2.0
IBU-E4	102.0	112.0	10.0	101.3	113.3	12.0	-0.8	1.3	2.0
IBU-E5	127.0	137.0	10.0	125.3	138.8	13.5	-1.8	1.8	3.5
IBU-E6	127.0	137.0	10.0	125.3	138.8	13.5	-1.8	1.8	3.5
IBU-E7	152.0	162.0	10.0	152.3	164.3	12.0	0.3	2.3	2.0
IBU-E8	152.0	162.0	10.0	152.3	165.8	13.5	0.3	3.8	3.5
誤差の平均							-0.5	2.3	2.8
誤差の最大値							1.8	3.8	5.0
誤差の最小値							-1.8	1.3	0.5
誤差の標本標準偏差							1.2	1.0	1.4

単位:[mm]

—:検出不可もしくは算出不可

表 8.4.5-8 計画値に対する深さ 100mm 以内の溶接線方向測定精度 (フェーズドアレイ法)

指示番号	計画値			測定値			誤差		
	始端	終端	長さ	始端	終端	長さ	始端	終端	長さ
IBU-E1	77.0	87.0	10.0	73	90	17	-4.0	3.0	7.0
IBU-E2	77.0	87.0	10.0	72	89	17	-5.0	2.0	7.0
IBU-E3	102.0	112.0	10.0	101	114	13	-1.0	2.0	3.0
IBU-E4	102.0	112.0	10.0	99	114	15	-3.0	2.0	5.0
IBU-E5	127.0	137.0	10.0	124	138	14	-3.0	1.0	4.0
IBU-E6	127.0	137.0	10.0	127	139	12	0.0	2.0	2.0
IBU-E7	152.0	162.0	10.0	149	163	14	-3.0	1.0	4.0
IBU-E8	152.0	162.0	10.0	150	163	13	-2.0	1.0	3.0
誤差の平均							-2.6	1.8	4.4
誤差の最大値							0.0	3.0	7.0
誤差の最小値							-5.0	1.0	2.0
誤差の標本標準偏差							1.6	0.7	1.8

単位:[mm]

—:検出不可もしくは算出不可

8.5 複数欠陥の検出および測定精度に関する検討

8.5.1 目的

平成 27 年度の調査では、リニアアレイプローブを使用した FMC-TFM により測定精度が向上する可能性があることが、シミュレーション解析および測定により示された。平成 28 年度は溶接線方向の分解能向上についても考慮するため、マトリックスアレイプローブを使用して測定を実施し、測定精度向上の効果を確認するとともに、近接欠陥の分解能についても検討する。また、マトリックスアレイプローブを使用する際の測定条件の検討のため、シミュレーション解析を実施する。

8.5.2 実施計画

測定精度向上策と空間分解能向上策を考慮した条件で FMC-TFM 法による超音波シミュレーション解析を実施し、複数欠陥を個々の欠陥に分離することができる測定条件を把握する。シミュレーション解析により把握した測定条件に基づき、マトリックスアレイプローブによる FMC-TFM の測定を実施し、試験体深さ方向に近接する欠陥の分解能ならびに溶接線方向に近接する欠陥の分解能について評価する。

8.5.3 シミュレーション解析の解析モデル及び解析条件

シミュレーション解析では、マトリックスアレイプローブを用いる FMC-TFM による測定を考慮して、欠陥高さ測定精度及び分解能に関する解析と、溶接線方向すなわち欠陥長さ測定精度及び分解能に関する解析を行う。シミュレーション解析では、素子数 (16×16)、素子ピッチ (3mm) を考慮して超音波の送受信をモデル化し、欠陥高さ測定精度及び分解能の把握のための Y-Z 断面の解析と、欠陥長さ測定精度及び分解能の把握のための X-Z 断面の解析を行う。各断面の模式図を図 8.5.3-1 に示す。欠陥高さ測定精度及び分解能の把握のために行う Y-Z 断面の解析においては図 8.5.3-2 に示すように深さ 20mm から 180mm の間に 20mm 刻みの等間隔で反射源を配置し、それぞれの反射源からの指示の振幅の大小や、指示同士が分離するかどうか、反射源に起因する指示以外のノイズの発生状況等を把握する。配置する反射源の種類は、体積を持つ溶接欠陥を模擬した横穴と割れ状の欠陥を模擬したスリットの各形状とする。超音波の振動の種類、屈折角 (θ) 及び超音波の入射位置 (Y) は表 8.5.3-1 に示す。

欠陥長さ測定精度及び分解能の把握のために行う解析では、本来は三次元モデルの斜角法で行う必要があるものの、計算メモリーや計算時間の関係で、模擬的に図 8.5.3-1 に示す X-Z 面での二次元解析とする。この解析では、図 8.5.3-3 および図 8.5.3-4 に示す解析モデルで欠陥の間隔を 3mm、5mm、10mm 及び 15mm と変えて各指示同士が分離するかどうかの確認と、図 8.5.3-5 に示す解析モデルで短い単独の欠陥からの指示の広がり方を把握する。反射源はスリット形状とし、深さ 180mm と深さ 40mm の 2 箇所に対して解析する。マトリックスアレイプローブによる欠陥長さ測定精度及び分解能の把握の比較のため、通常のアレイプローブを機械的に走査した条件でもシミュレーション解析を行う。

シミュレーション解析で使用する音速と密度を表 8.5.3-2 に示す。

表 8.5.3-1 超音波の種類、屈折角及び入射位置

超音波の種類	屈折角 (θ)	入射位置 (Y)	対象深さ
縦波	45°	50 mm	表面～100mm 程度
		100 mm	表面～裏面
		150 mm	100mm 程度～表面
縦波	30°	60 mm	表面～裏面
横波	70°	90 mm	表面～100mm 程度

表 8.5.3-2 音速および密度

材質	縦波音速(m/s)	横波音速(m/s)	密度($\times 10^3 \text{kg/m}^3$)
鋼	5,900	3,200	7.9
ポリスチレン (くさびの材質)	2,330	1,150	1.034

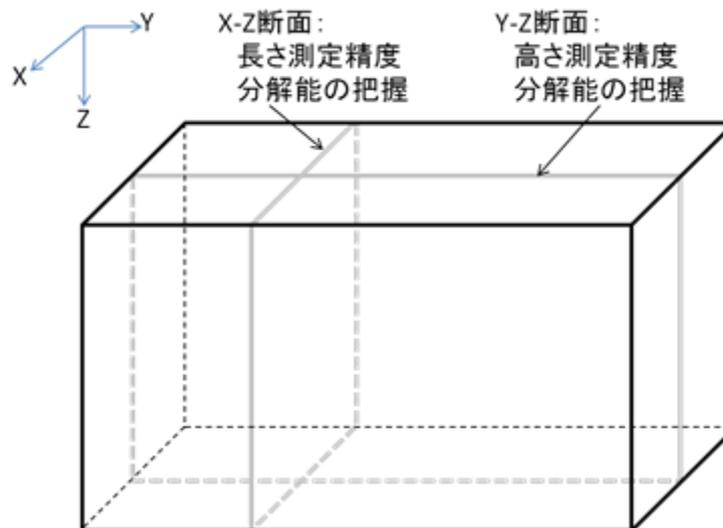
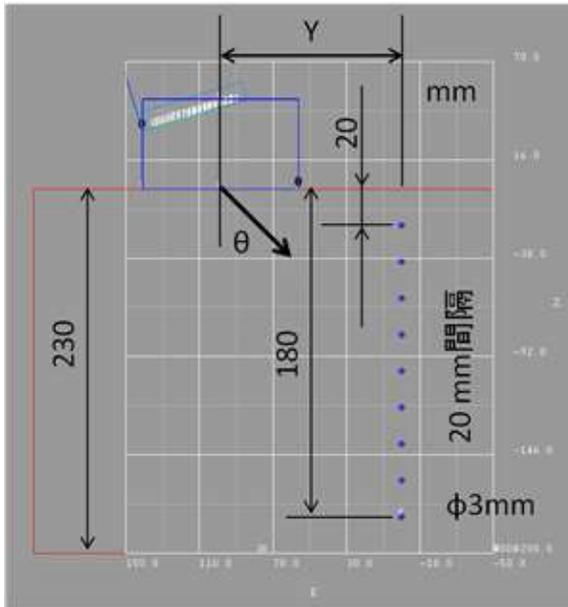
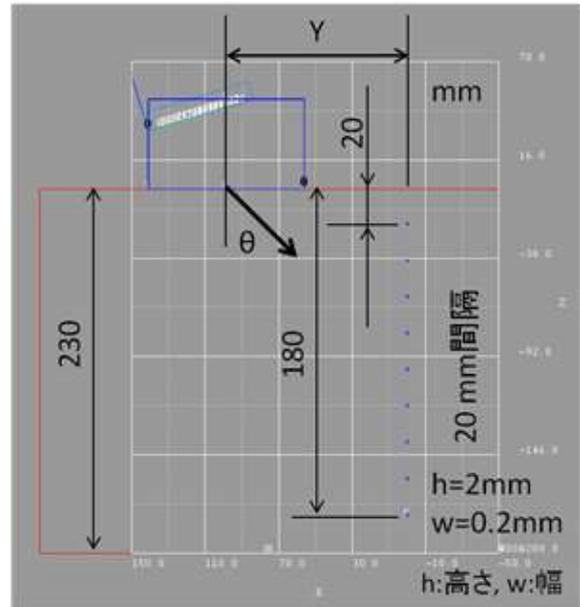


図 8.5.3-1 シミュレーション解析における解析モデルの断面

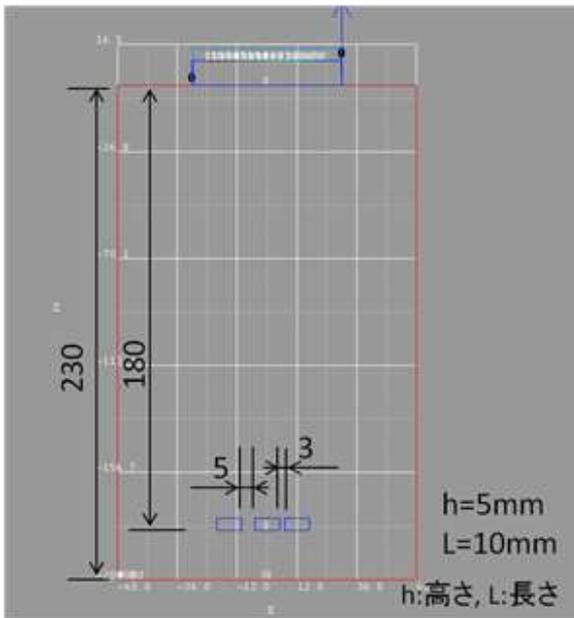


(a) 横穴を配置したモデル

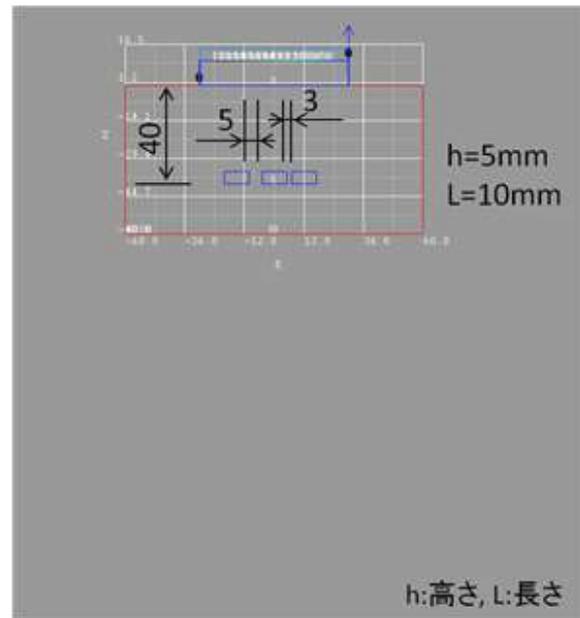


(b) スリットを配置したモデル

図 8.5.3-2 欠陥高さ測定精度及び分解能の把握のための解析モデル

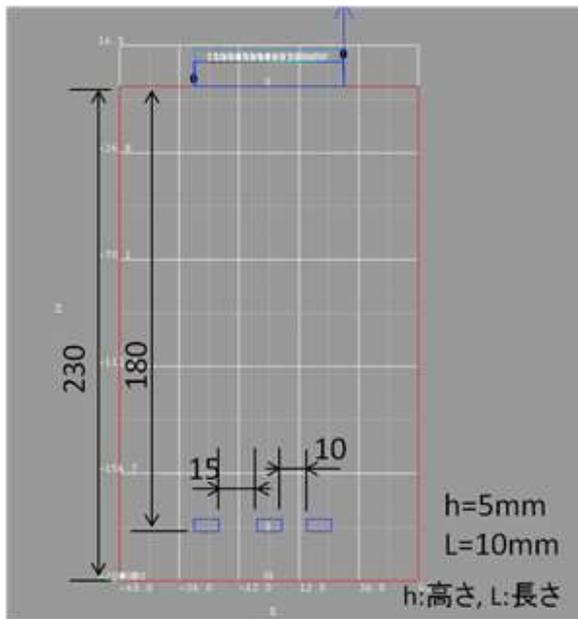


(a) 間隔 3mm 及び 5mm、深さ 180mm

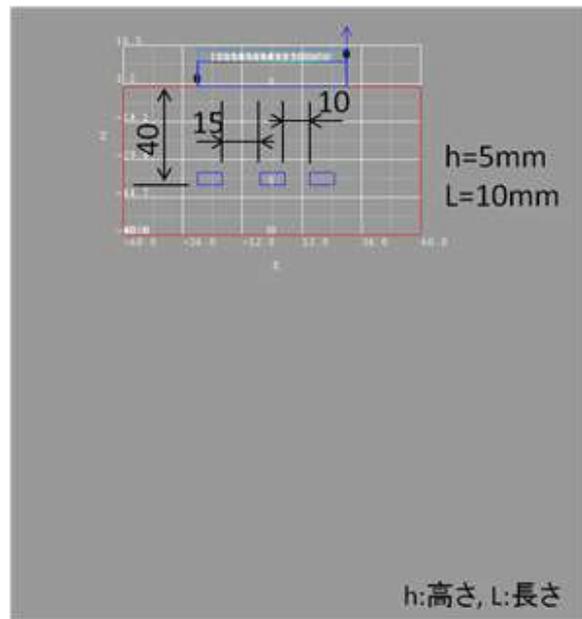


(b) 間隔 3mm 及び 5mm、深さ 40mm

図 8.5.3-3 欠陥長さ測定精度及び分解能の把握のための解析モデル(1)

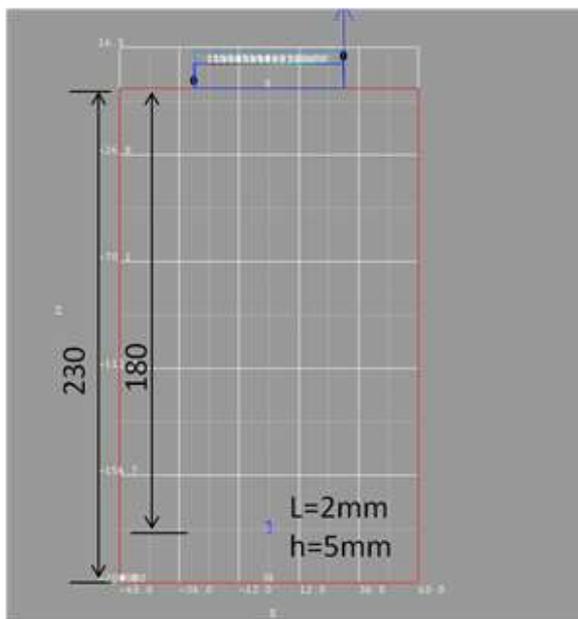


(a) 間隔 10mm 及び 15mm、深さ 180mm

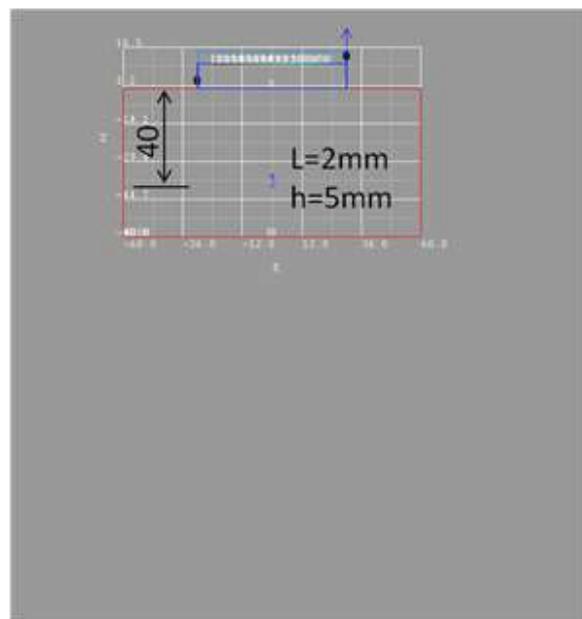


(b) 間隔 10mm 及び 15mm、深さ 40mm

図 8.5.3-4 欠陥長さ測定精度及び分解能の把握のための解析モデル(2)



(a) 長さ 2mm 単独欠陥、深さ 180mm



(b) 長さ 2mm 単独欠陥、深さ 40mm

図 8.5.3-5 欠陥長さ測定精度及び分解能の把握のための解析モデル(3)

8.5.4 シミュレーション解析結果及び評価

欠陥高さの測定精度および分解能を把握するため Y-Z 面で解析した結果を図 8.5.4-1 から図 8.5.4-10 に示す。図 8.5.4-1 から図 8.5.4-5 は体積を持つ溶接欠陥を想定した横穴でのシミュレーション解析結果、図 8.5.4-6 から図 8.5.4-10 は割れ状の欠陥を想定したスリットでのシミュレーション解析結果である。各々、表面から裏面までの全体像と表面から深さ約 110mm まで及び深さ約 80mm から裏面までの範囲の拡大図を示す。シミュレーション解析で設定した解析モデル

の反射源の位置も解析結果に示しているが、表示用のソフトウェアの問題（ゼロ点調整ができない）のため若干のずれが生じている。シミュレーション解析で設定した解析モデルの位置との比較は評価の対象としないものとする。

図 8.5.4-1 から図 8.5.4-3 に示す横穴に対する屈折角 45° の条件では、一部感度不足で検出が困難な条件はあるものの、識別可能な全ての指示が各々分離していることが確認された。また、 $Y=50\text{mm}$ 及び $Y=100\text{mm}$ あるいは $Y=50\text{mm}$ 及び $Y=150\text{mm}$ の 2 箇所測定することで、表面から裏面までの約 200mm の深さを有効範囲にできる可能性が確認された。図 8.5.4-4 に示す屈折角 30° の条件では、 $Y=60\text{mm}$ の一箇所測定で全ての指示が識別でき、かつ全て分離しており、一箇所測定で表面から裏面までの約 200mm の深さを有効範囲にできる可能性が確認された。図 8.5.4-5 に示す屈折角 70° （横波）では、深さ 100mm 程度までの各指示が識別かつ分離できるものの、反射源とは無関係の虚像も確認された。同様に、スリットに対しても横穴の結果と類似しているが、横穴に比べて反射波の振幅が低く、測定時のノイズレベルによっては検出が難しい場合があると考えられる。

これらの解析結果を表 8.5.4-1 に整理した。最適な探傷の条件は、屈折角 30° で入射位置が $Y=60\text{mm}$ 付近と言えるが、使用する装置では画像化の領域が図 8.4.3-3 に示す四角形の領域に限られており、板厚方向の領域を最大にとることができる屈折角 45° で装置の性能が最適化されている。したがって、試験による確認は、縦波 45° 斜角法で入射位置を 3 カ所で測定することとした。

一方、欠陥長さ測定精度及び分解能把握のため X-Z 面で解析した結果では、図 8.5.4-11 から図 8.5.4-18 に示す様に、マトリックスアレイプローブによる FMC-TFM の分解能改善が確認され、それに伴い欠陥長さ測定精度向上が期待される結果が得られた。図 8.5.4-11 及び図 8.5.4-12 は、深さ 180mm の間隔 3mm 及び 5mm の欠陥に対してマトリックスアレイプローブによる FMC-TFM と通常のリニアアレイで走査した解析結果である。間隔 3mm は両者ともに分離不可であったが、マトリックスアレイプローブによる FMC-TFM では間隔 5mm 内に振幅の低下が確認され、分離の可能性が高いと考えられる。欠陥の深さが浅い（深さ 40mm ）図 8.5.4-13 及び図 8.5.4-14 では、マトリックスアレイプローブによる FMC-TFM の間隔 3mm で指示の振幅低下が確認され、間隔 5mm で指示が消失し明確に分離できると考えられるものの、リニアアレイでは分離は難しいと言える。間隔が 15mm （おおよそ振動子幅程度）になるとリニアアレイでも指示の振幅低下が確認され、分離の可能性があると考えられる。また、図 8.5.4-15 から図 8.5.4-18 に示す短い単独欠陥に対して、リニアアレイでは実際よりも指示長さを過大評価する可能性を示唆する解析結果であったが、マトリックスアレイプローブによる FMC-TFM では、実際の長さを指示長さとして測定できる可能性が確認できたため、測定精度及び分解能向上に有効な手法と考えられる。これらのシミュレーション解析結果のまとめを表 8.5.4-2 に示す。前述あるいは後述する試験により、精度及び分解能を確認した。

表 8.5.4-1 欠陥高さ測定精度、分解能把握のためのシミュレーション解析の評価結果

反射源の種類	シミュレーション解析条件			評価結果
	超音波の種類	屈折角	入射位置	
横穴	縦波	45°	50 mm	表面から裏面（深さ 180mm）にわたり検出の可能性
			100 mm	表面から 20mm 深さまでを除き、裏面（深さ 180mm）にわたり検出の可能性
			150 mm	表面から 40mm 深さまでを除き、裏面（深さ 180mm）にわたり検出の可能性
	横波	70°	90 mm	表面から 60mm 程度深さまでの範囲
	縦波	30°	60 mm	表面から裏面（深さ 180mm）にわたり検出の可能性
スリット	縦波	45°	50 mm	表面から 120mm 程度深さまでの範囲
			100 mm	表面から裏面（深さ 180mm）にわたり検出の可能性
			150 mm	表面から 20mm 深さまでを除き、裏面（深さ 180mm）にわたり検出の可能性
	横波	70°	90 mm	表面から 60mm 程度深さまでの範囲
	縦波	30°	60 mm	表面から裏面（深さ 180mm）にわたり検出の可能性

表 8.5.4-2 欠陥長さ測定精度、分解能把握のためのシミュレーション解析の評価結果

手法	深さ	間隔	解析結果	評価
マトリックスアレイ FMC-TFM	180 mm	3 mm	振幅変化なし	分離不可
		5 mm	振幅低下	分離可能性あり
		10 mm	指示消失	分離
		15 mm	指示消失	分離
リニアアレイ		3 mm	振幅変化なし	分離不可
		5 mm	振幅変化なし	分離不可
		10 mm	振幅変化なし	分離不可
		15 mm	振幅低下	分離可能性あり
マトリックスアレイ FMC-TFM	40 mm	3 mm	振幅低下	分離可能性あり
		5 mm	指示消失	分離
		10 mm	指示消失	分離
		15 mm	指示消失	分離
リニアアレイ		3 mm	振幅変化なし	分離不可
		5 mm	振幅変化なし	分離不可
		10 mm	振幅変化なし	分離不可
		15 mm	振幅低下	分離可能性あり

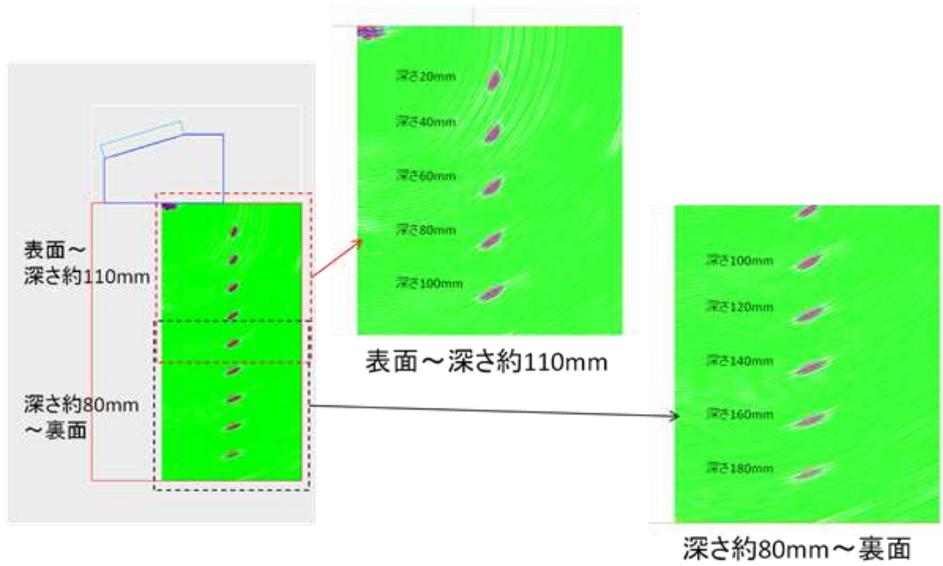


図 8.5.4-1 横穴に対するシミュレーション解析結果（縦波斜角 45° 、 $Y=50\text{mm}$ ）

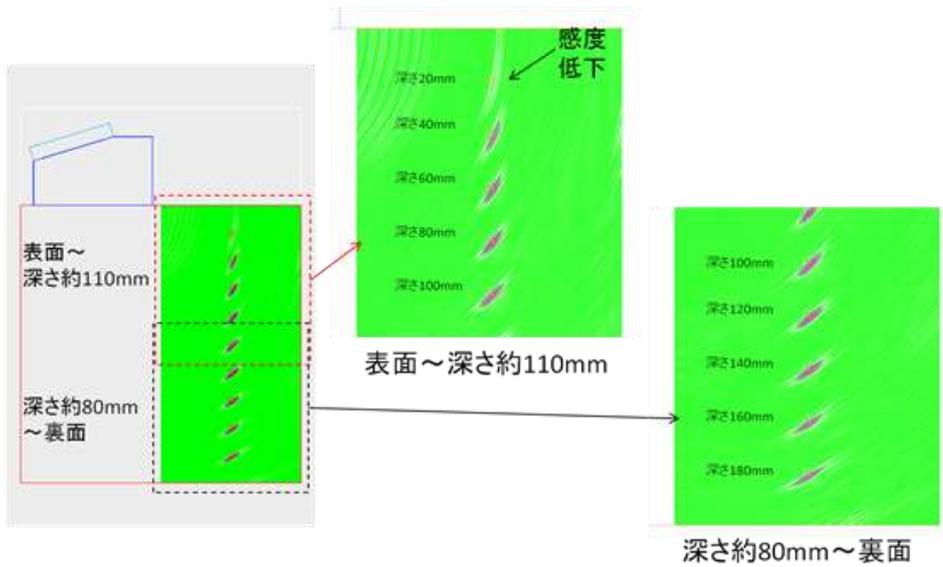


図 8.5.4-2 横穴に対するシミュレーション解析結果（縦波斜角 45° 、 $Y=100\text{mm}$ ）

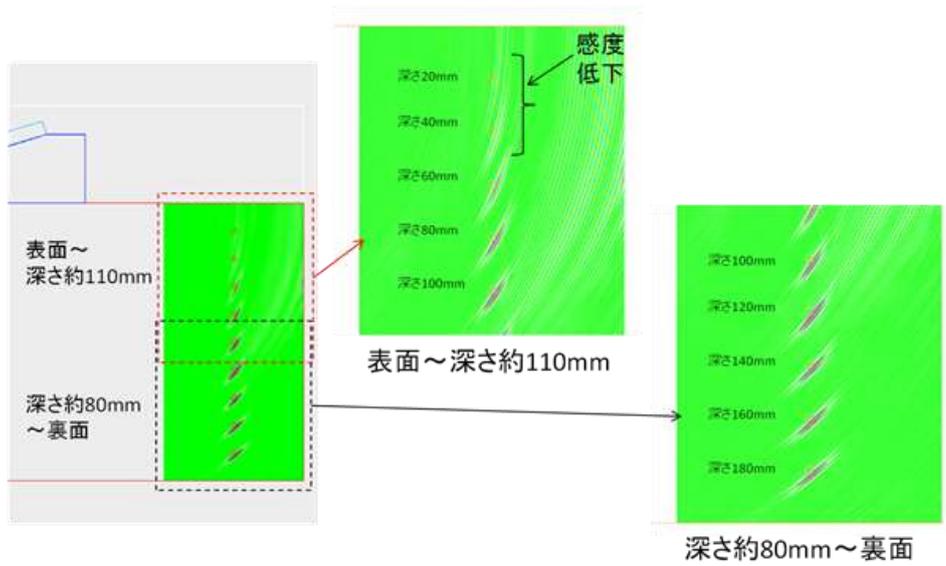


図 8.5.4-3 横穴に対するシミュレーション解析結果（縦波斜角 45° 、 $Y=150\text{mm}$ ）

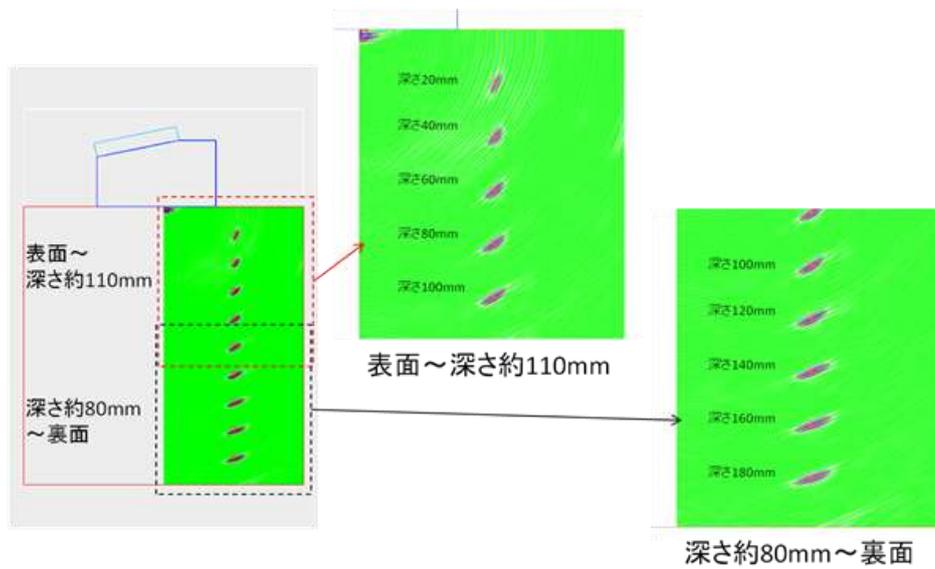


図 8.5.4-4 横穴に対するシミュレーション解析結果（縦波斜角 30° 、 $Y=60\text{mm}$ ）

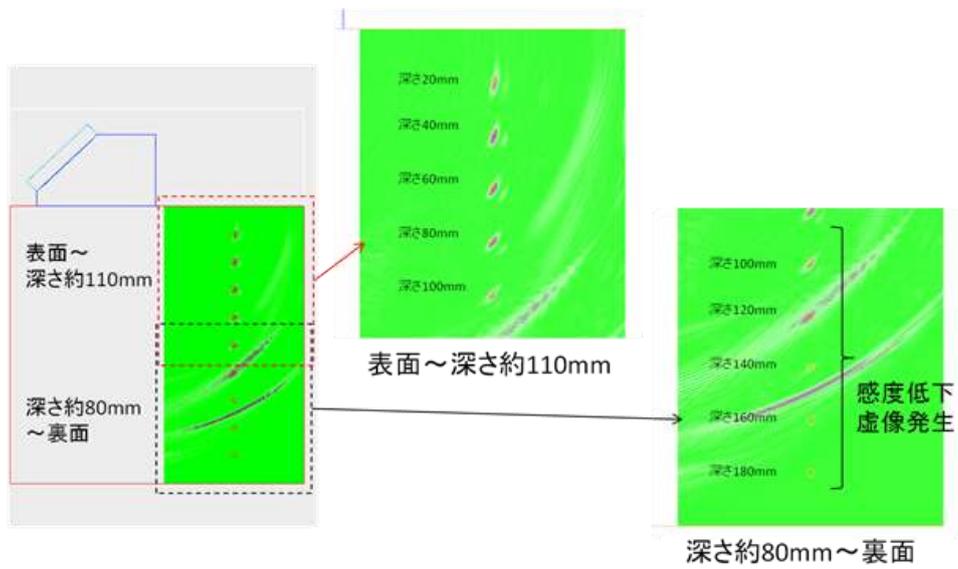


図 8.5.4-5 横穴に対するシミュレーション解析結果（横波斜角 70° 、 $Y=90\text{mm}$ ）

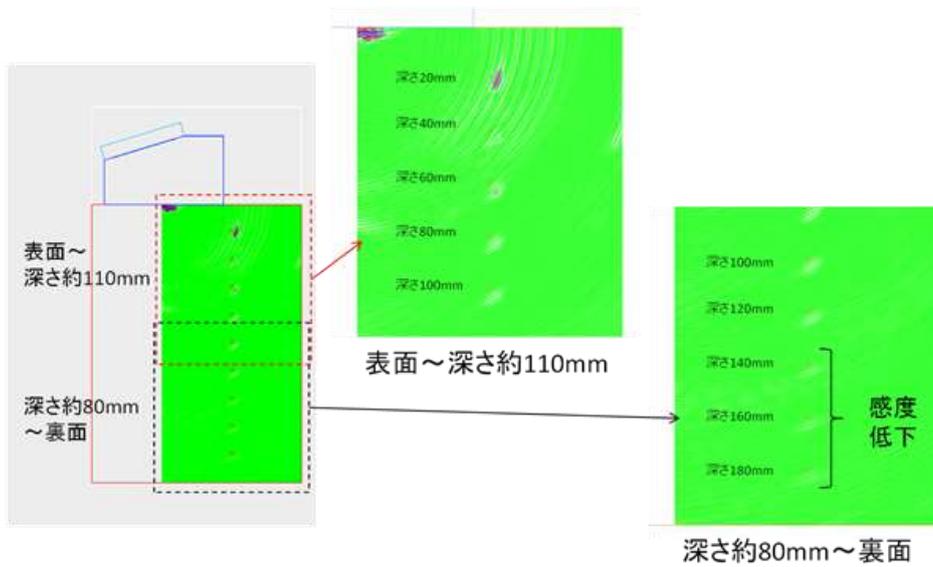


図 8.5.4-6 スリットに対するシミュレーション解析結果（縦波斜角 45° 、 $Y=50\text{mm}$ ）

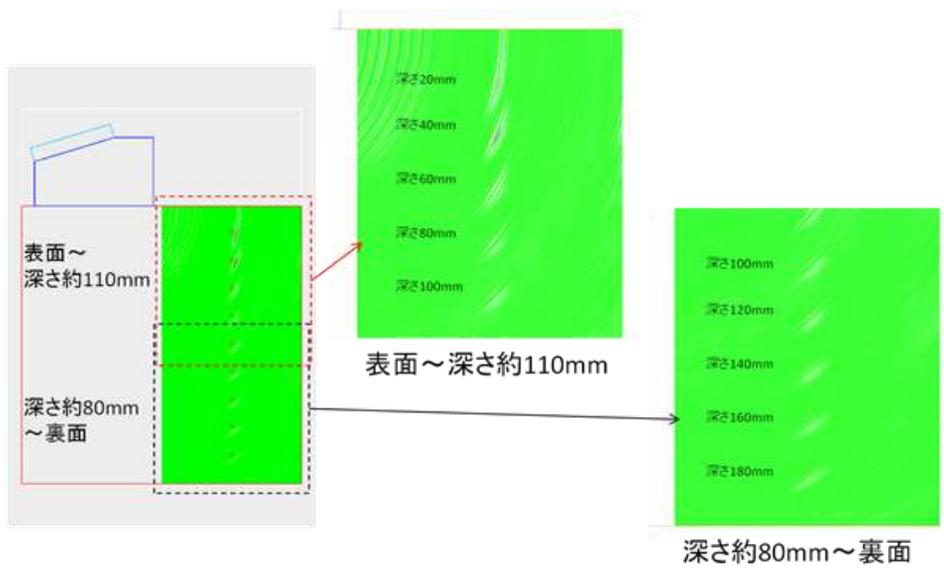


図 8.5.4-7 スリットに対するシミュレーション解析結果（縦波斜角 45° 、 $Y=100\text{mm}$ ）

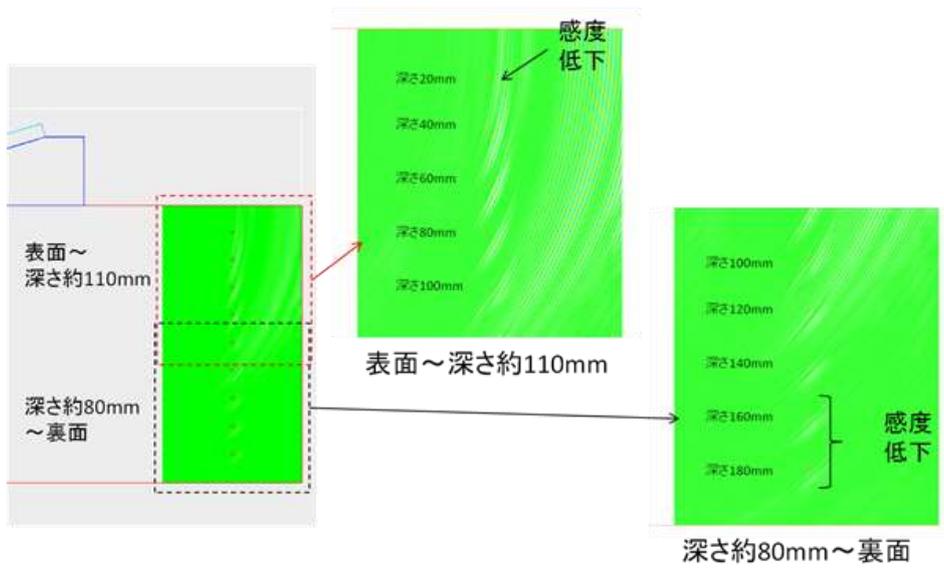


図 8.5.4-8 スリットに対するシミュレーション解析結果（縦波斜角 45° 、 $Y=150\text{mm}$ ）

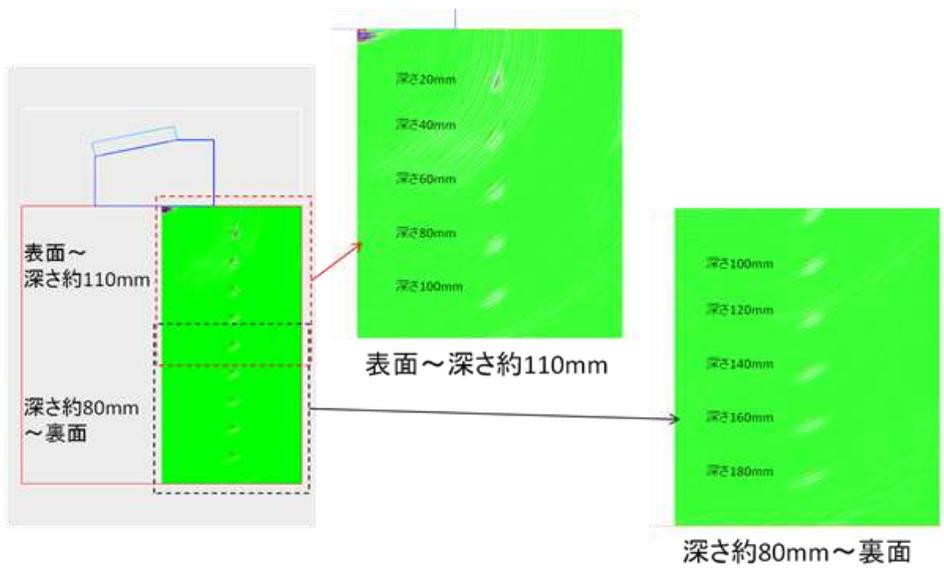


図 8.5.4-9 スリットに対するシミュレーション解析結果（縦波斜角 30° 、 $Y=60\text{mm}$ ）

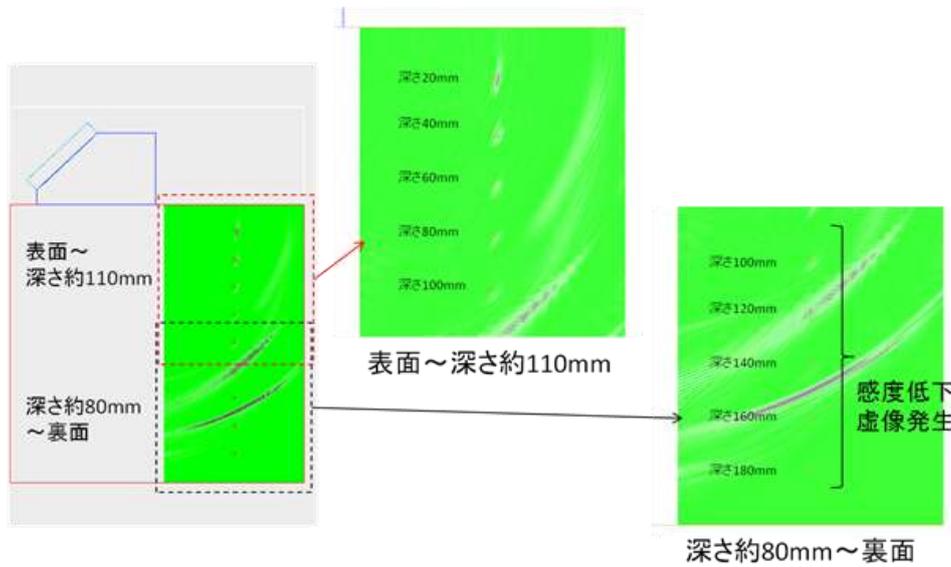
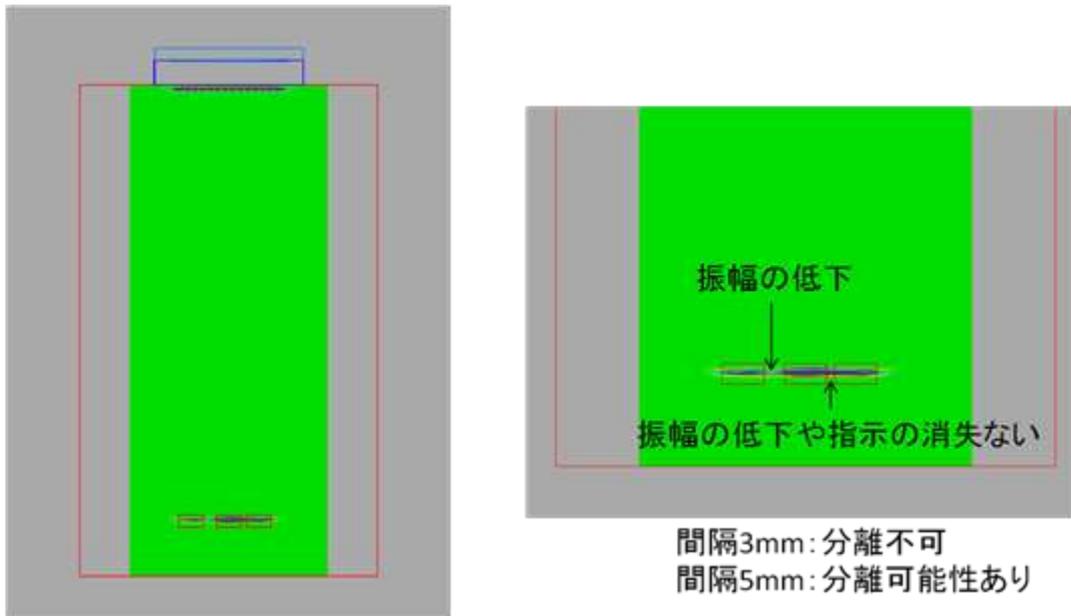
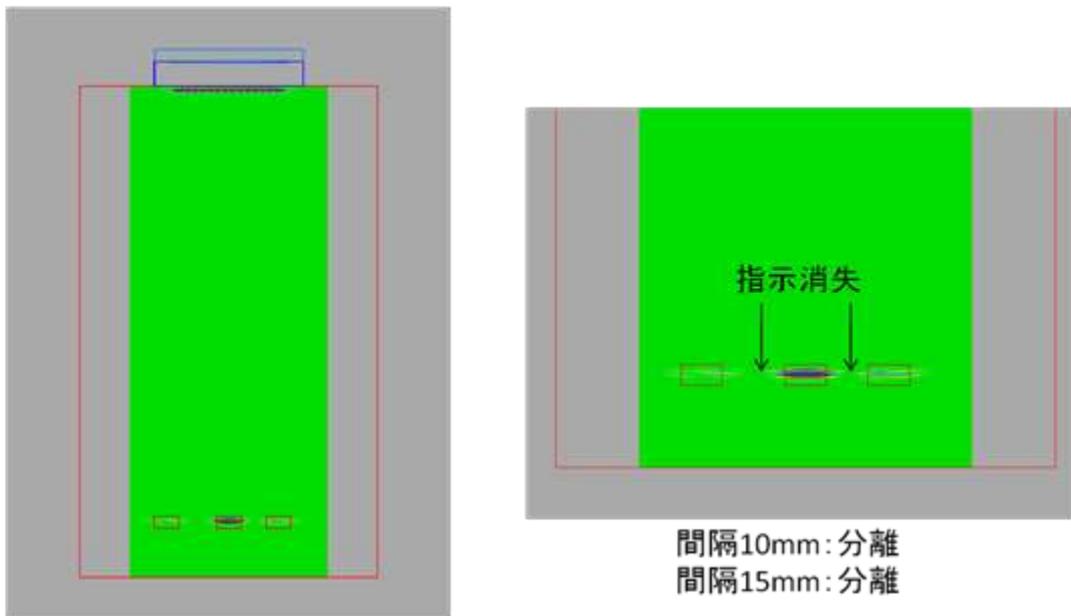


図 8.5.4-10 スリットに対するシミュレーション解析結果（横波斜角 70° 、 $Y=90\text{mm}$ ）

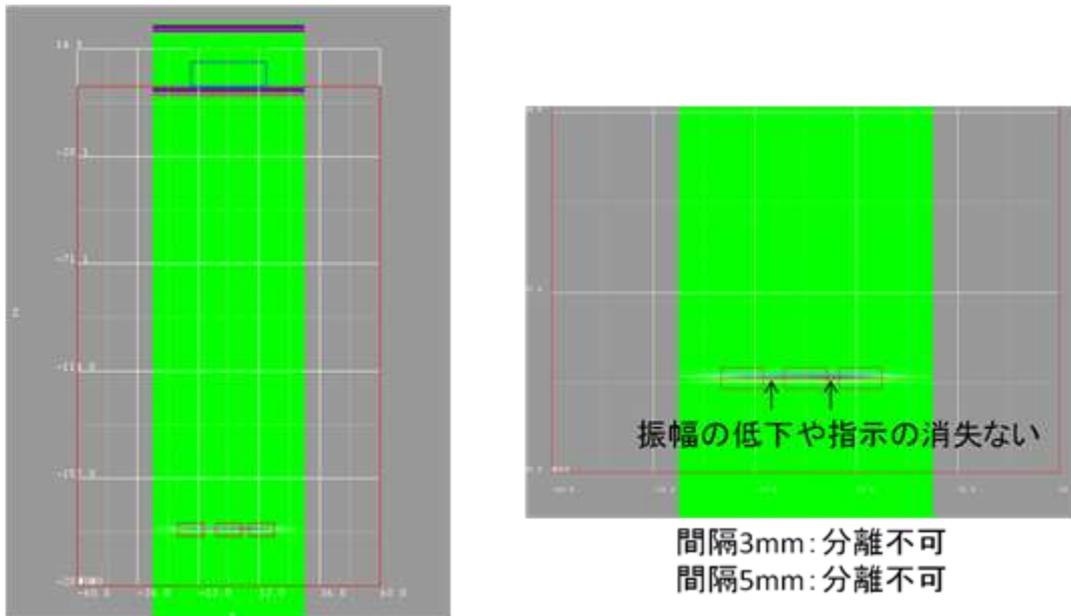


(a) 間隔 3mm 及び 5mm

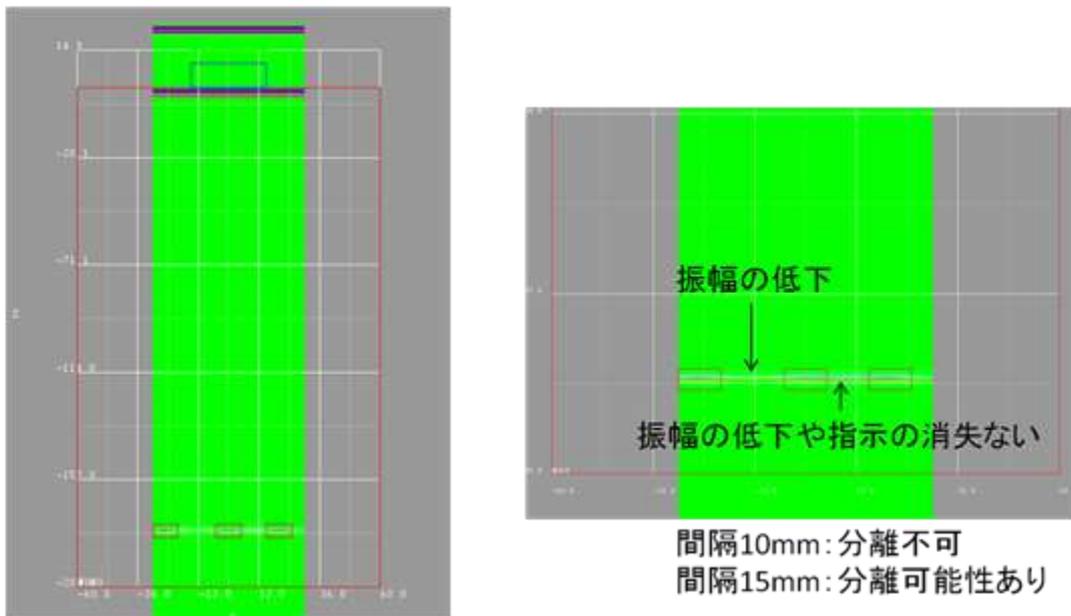


(b) 間隔 10mm 及び 15mm

図 8.5.4-11 深さ 180mm、マトリックスアレイ FMC-TFM での隣接欠陥に対するシミュレーション解析結果

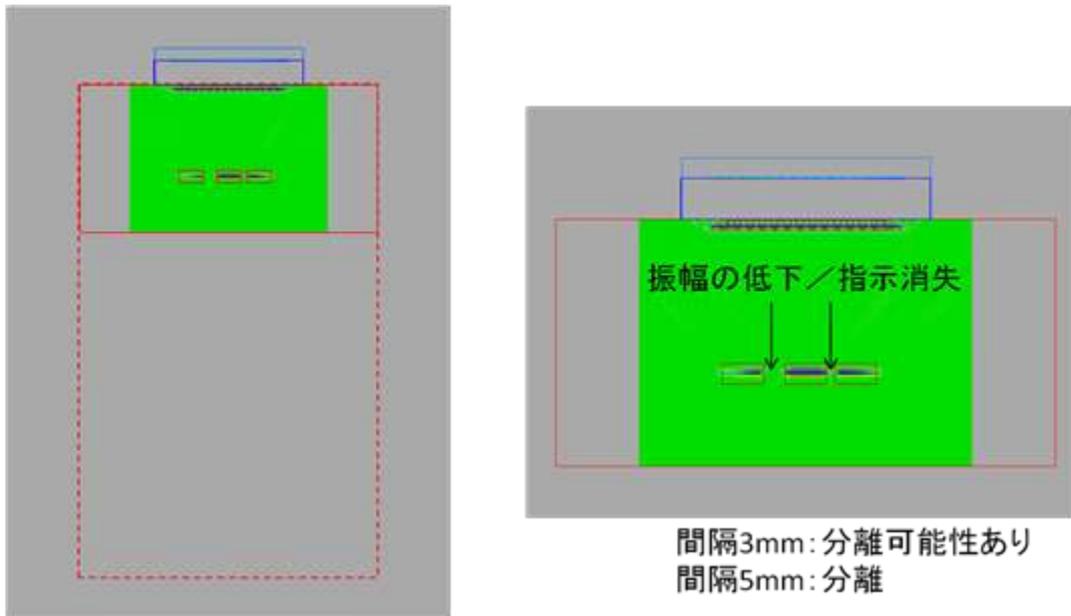


(a) 間隔 3mm 及び 5mm

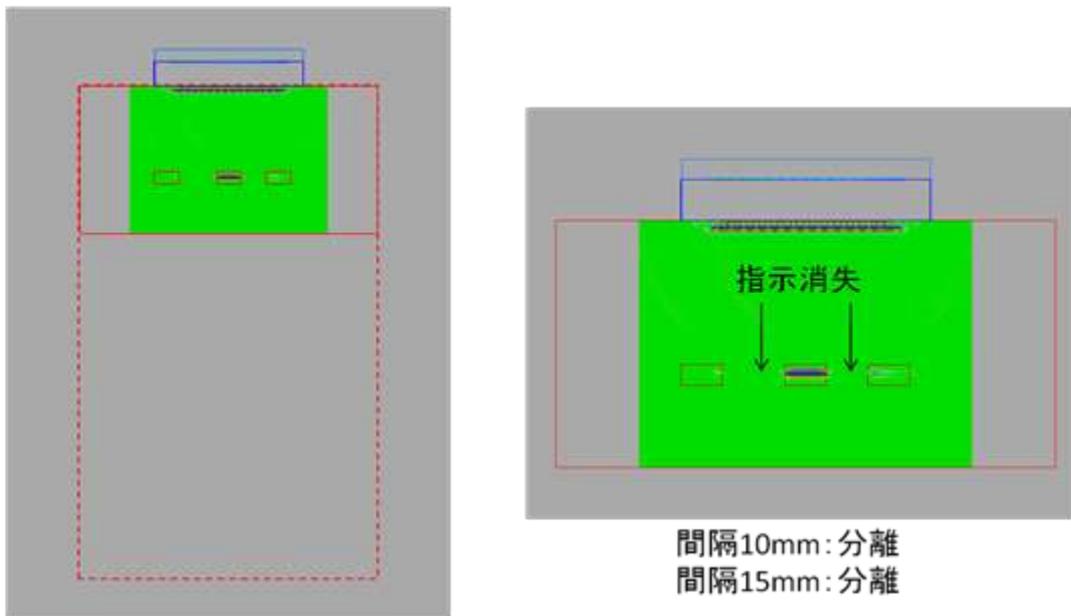


(b) 間隔 10mm 及び 15mm

図 8.5.4-12 深さ 180mm、リニアアレイでの隣接欠陥に対するシミュレーション解析結果

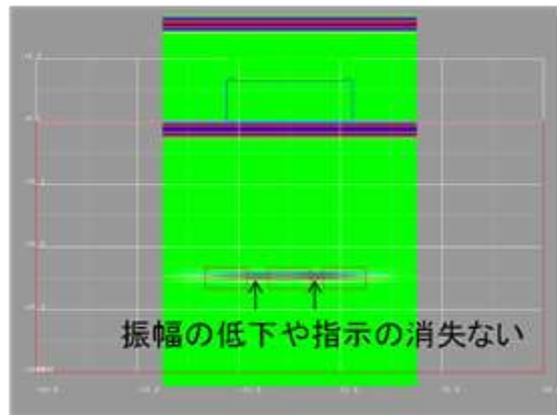
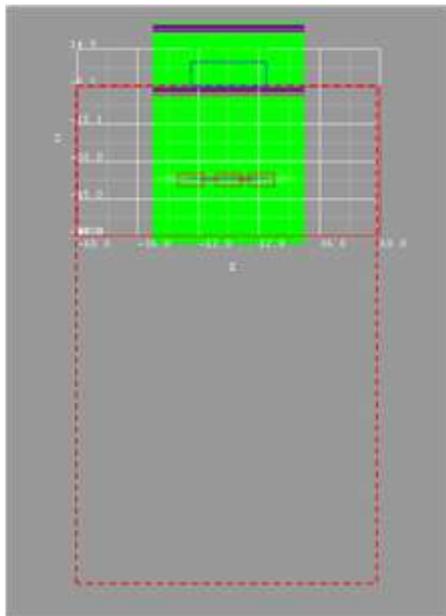


(a) 間隔 3mm 及び 5mm



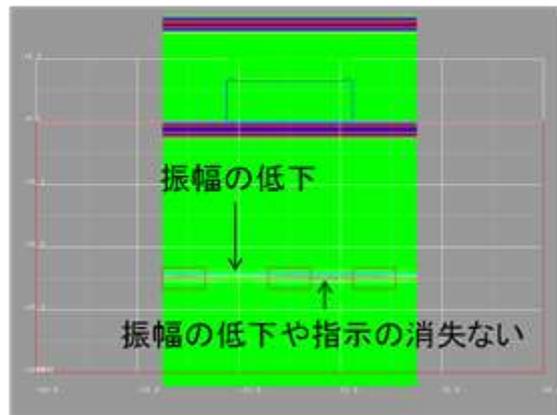
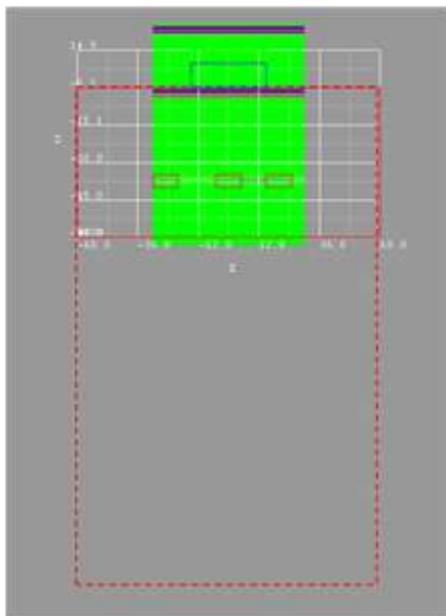
(b) 間隔 10mm 及び 15mm

図 8.5.4-13 深さ 40mm、マトリックスアレイ FMC-TFM での隣接欠陥に対するシミュレーション解析結果



間隔3mm:分離不可
間隔5mm:分離不可

(a) 間隔 3mm 及び 5mm



間隔10mm:分離不可
間隔15mm:分離可能性あり

(b) 間隔 10mm 及び 15mm

図 8.5.4-14 深さ 40mm、リニアアレイでの単独欠陥に対するシミュレーション解析結果

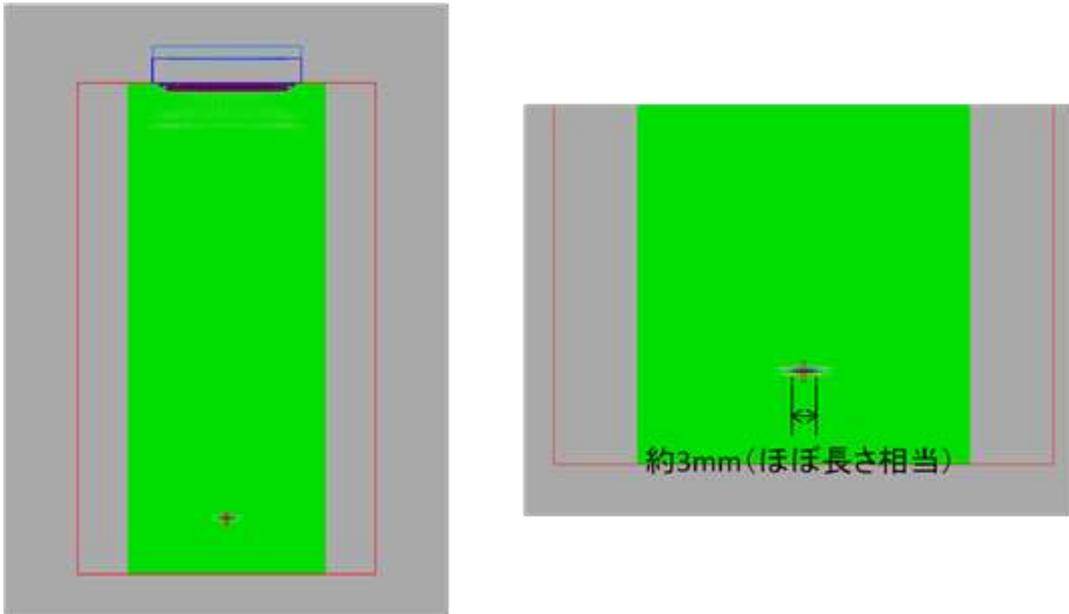


図 8.5.4-15 深さ 180mm、マトリックスアレイ FMC-TFM での単独欠陥に対するシミュレーション解析結果

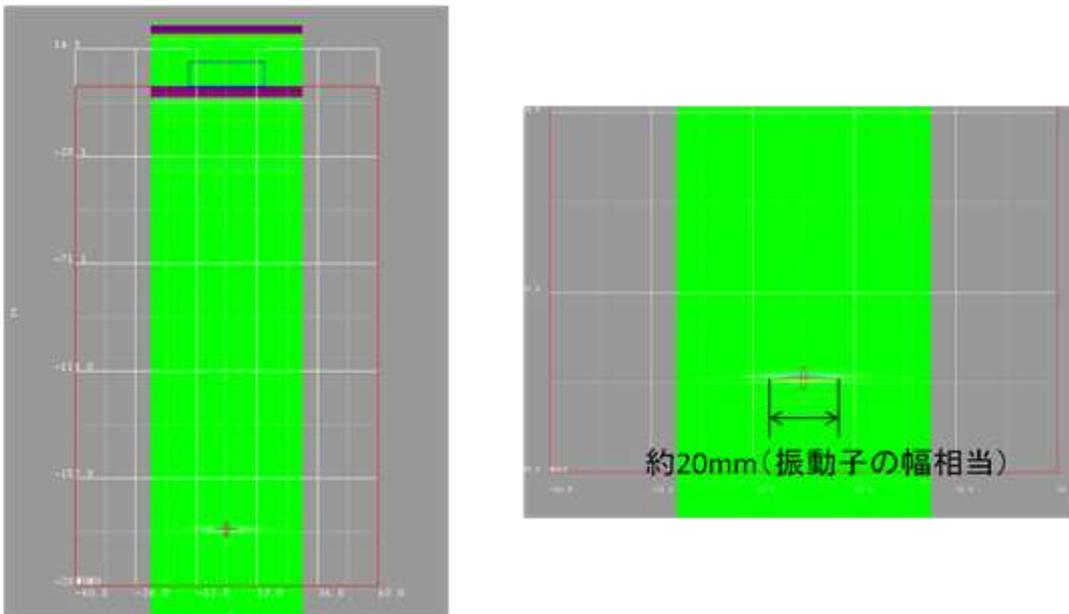


図 8.5.4-16 深さ 180mm、リニアアレイでの単独欠陥に対するシミュレーション解析結果

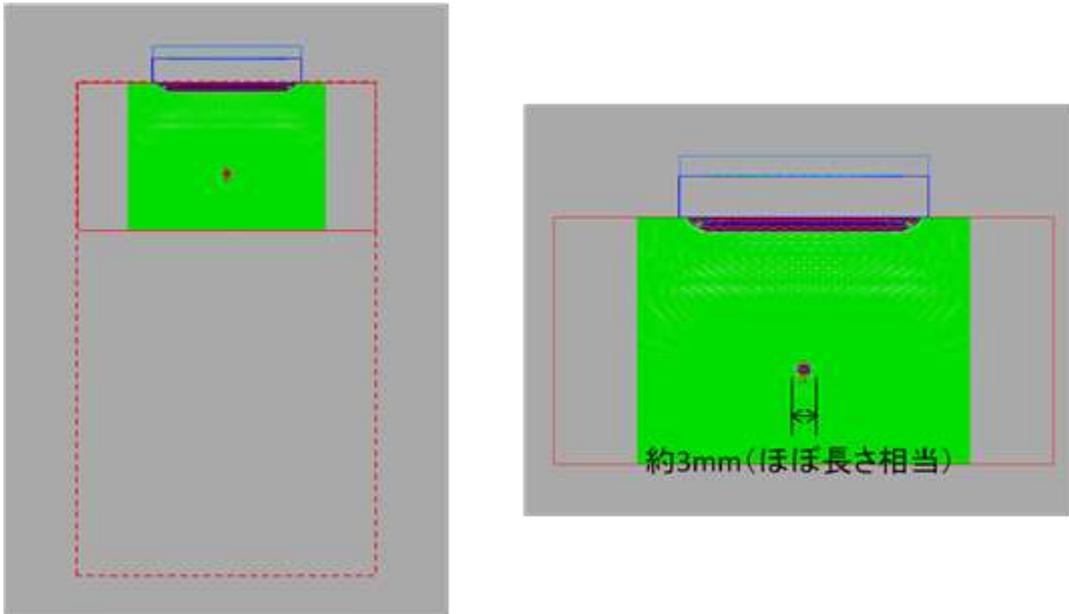


図 8.5.4-17 深さ 40mm、マトリックスアレイ FMC-TFM での単独欠陥に対するシミュレーション解析結果

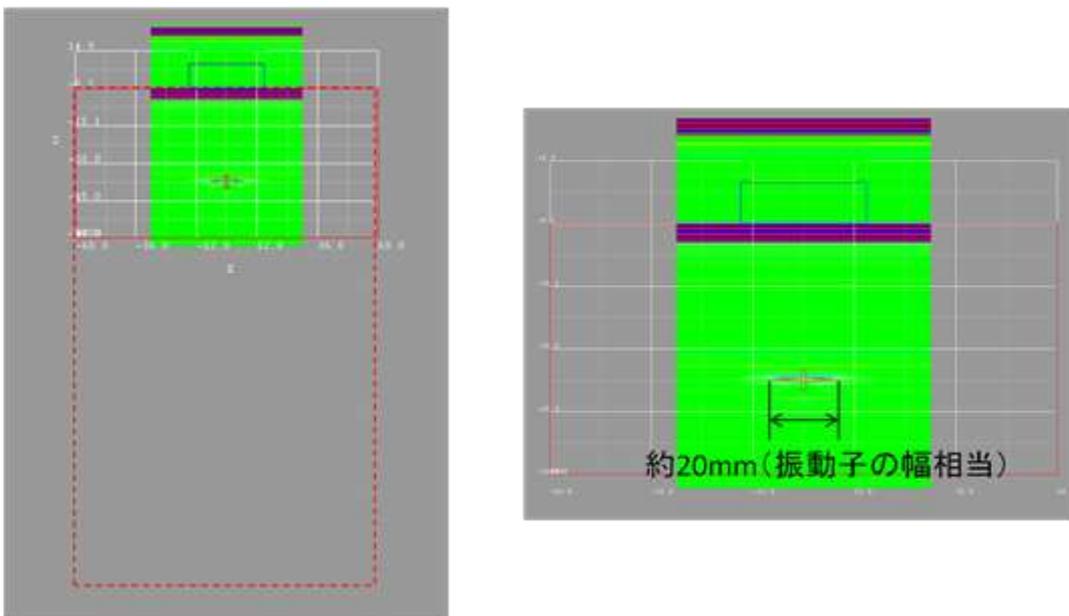


図 8.5.4-18 深さ 40mm、リニアアレイでの単独欠陥に対するシミュレーション解析結果

8.6 溶接欠陥寸法の測定および断面マクロ調査

8.6.1 目的

超音波探傷試験を実施した試験体 A および試験体 B を切断して、切断面の溶接欠陥の寸法および位置を実測する。

8.6.2 溶接試験体の切断条件

図 8.6.2-1に超音波探傷試験後の溶接試験体の切断位置を示す。溶接部を幅30 mmで切断して平

板形状にした後、さらに切断および研削により超音波探傷試験の欠陥指示位置近傍を観察した。図 8.6.2-2に欠陥位置を求めるための座標を示す。座標の原点は、溶接試験体でアイボルト穴側の溶接金属中央の最終層部で、 x (溶接線方向)、 y (溶接線直交方向)、 z (板厚方向) を定義する。図 8.6.2-3に欠陥座標の求め方を示す。例えば yz 面で図示された欠陥が観察された場合、欠陥高さが一番高い部分 (z_0 : z が最も小さい) と一番低い部分 (z_1 : z が最も大きい)、および各々における x (x_0 , x_1) と y (y_0 , y_1) を求める。

欠陥寸法および位置の実測値と FMC-TFM 法による欠陥の寸法、位置の測定結果を表または図に整理し、FMC-TFM 法の測定精度を明らかにする。溶接試験体の切断断面数は、1 試験体当たり 10 断面以上とする。

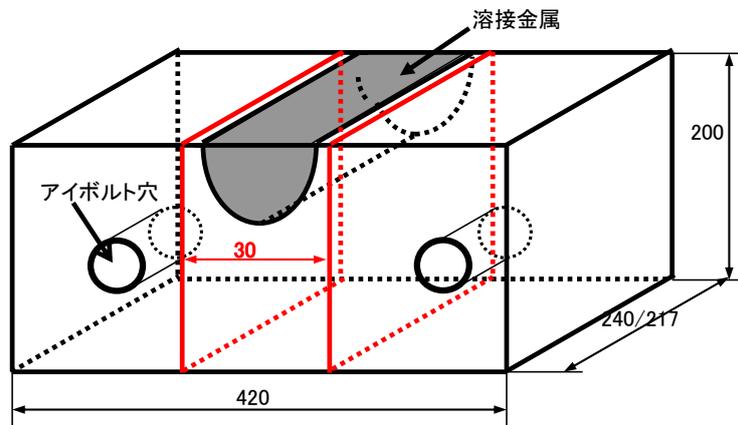


図 8.6.2-1 溶接試験体の切断位置

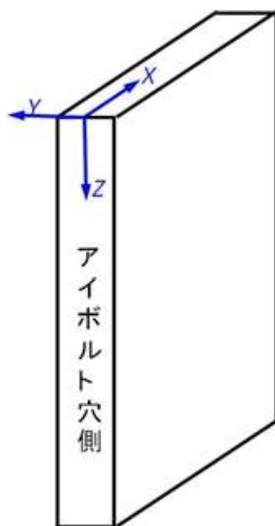


図 8.6.2-2 座標の定義

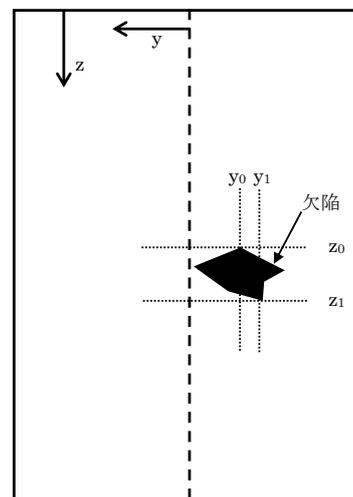


図 8.6.2-3 欠陥座標の定義 (yz 面)

8.6.3 溶接欠陥の断面マクロ写真

溶接欠陥の断面マクロ写真は、添付資料 8-1 に示す。

8.6.4 溶接欠陥寸法の実測値

表 8.6.4-1 および表 8.6.4-2 に欠陥座標の実測値を示す。溶接試験体 A、B ともに 15 欠陥の座標を求めた。各溶接試験体を切断して試験片（番号：BA○、BB○等）を複数個作製し、観察面を平面研削盤で研削して断面観察を行った。なお、BB8 と BB14 は欠陥指示位置であったが、欠陥は観察されなかった。

表 8.6.4-1 実測した溶接欠陥の座標（試験体 A）

試験体	試験片 番号	断面 観察番号	欠陥 番号	観察面	x ₀	x ₁	y ₀	y ₁	z ₀	z ₁
A	BA2	XA-1	W1	yz	26.2		-0.2	-0.2	54.9	55.7
	BA4	XA-2	-	yz	58.0		-6.3	-6.3	4.7	4.9
	BA7	XA-3	E1	yz	87.8		-0.5	-0.5	33.4	35.9
				xz (x 方向端部)		90.2				
		XA-4	E7	yz	130.5		-0.5	-0.5	34.0	37.3
				xz (x 方向端部)	125.4					
		XA-5	E5	xz	117.8	117.8	-0.5		32.0	37.2
				xz (x 方向長さ)	112.2	122.0				
	XA-6	E3	xz	105.6	105.6	-0.5		32.3	37.5	
			xz (x 方向長さ)	97.3	107.1					
	BA8	XA-7	E2	yz	88.1		-0.8	-0.8	54.7	59.7
				xz (x 方向端部)		90.1				
		XA-8	E8	yz	130.6		-0.8	-0.8	57.0	60.1
				xz (x 方向端部)	125.4					
		XA-9	E6	xz	121.1	121.1	-0.8		57.0	61.0
				xz (x 方向長さ)	112.1	121.8				
	XA-10	E4	xz	101.5	101.5	-0.8		55.0	60.1	
			xz (x 方向長さ)	97.1	107.0					
	BA9	XA-11	E9	yz	148.5		-0.9	-0.9	32.2	32.9
	BA10	XA-12	-	yz	146.7		1.6	1.6	47.2	47.7
XA-13		-	yz	146.7		4.1	4.1	54.5	54.7	
XA-14		E10	yz	146.7		-1.1	-1.1	56.2	57.1	
XA-15		E16	yz	182.1		-1.1	-1.1	56.0	56.9	

表 8.6.4-2 実測した溶接欠陥の座標 (試験体 B)

試験体	試験片 番号	断面 観察番号	欠陥 番号	観察面	X ₀	X ₁	Y ₀	Y ₁	Z ₀	Z ₁
B	BB1	XB-1	E1	yz	81.6		0.4	0.4	42.6	46.6
		XB-2	E2	yz	81.6		0.4	0.4	52.2	57.0
	BB2	XB-3	-	yz	90.1		6.8	6.8	40.8	41.0
		XB-4	W1	yz	90.1		3.4	3.4	68.9	69.1
	BB3	XB-5	E3	yz	109.8		0.4	0.4	42.2	47.2
		XB-6	E4	yz	109.8		0.4	0.4	53.9	56.8
	BB4	XB-7	E5	yz	134.9		0.5	0.5	44.6	48.5
		XB-8	E6	yz	134.9		0.5	0.5	53.8	56.8
	BB5	XB-9	E7	yz	155.4		0.9	0.3	39.0	49.9
		XB-10	E8	yz	155.4		0.3	0.3	52.9	56.2
	BB8	欠陥なし	-	yz	-		-	-	-	-
	BB10	XB-11	-	yz	139.3		7.4	7.4	108.9	109.1
	BB11	XB-12	W8	yz	163.9		4.5	4.5	118.4	119.3
	BB13	XB-13	-	yz	107.0		0.0	0.0	187.5	193.0
		XB-14	-	yz	107.0		-7.3	-7.3	159.9	160.3
	BB14	欠陥なし	-	yz	-		-	-	-	-
BB16	XB-15	W4	yz	121.5		3.9	3.9	151.9	152.1	

8.7 まとめ

超音波探傷試験の結果から、フェーズドアレイ法に比べて FMC-TFM では、深さ方向および溶接線方向において欠陥寸法の測定精度が向上する効果が見込めることが確認された。一方で、FMC-TFM では、マトリックスアレイプローブを使用することで画像化の 1 画素あたりの情報量が低下する可能性も確認されており、使用するプローブや信号処理方法についてさらに最適化するための検討が必要となる。

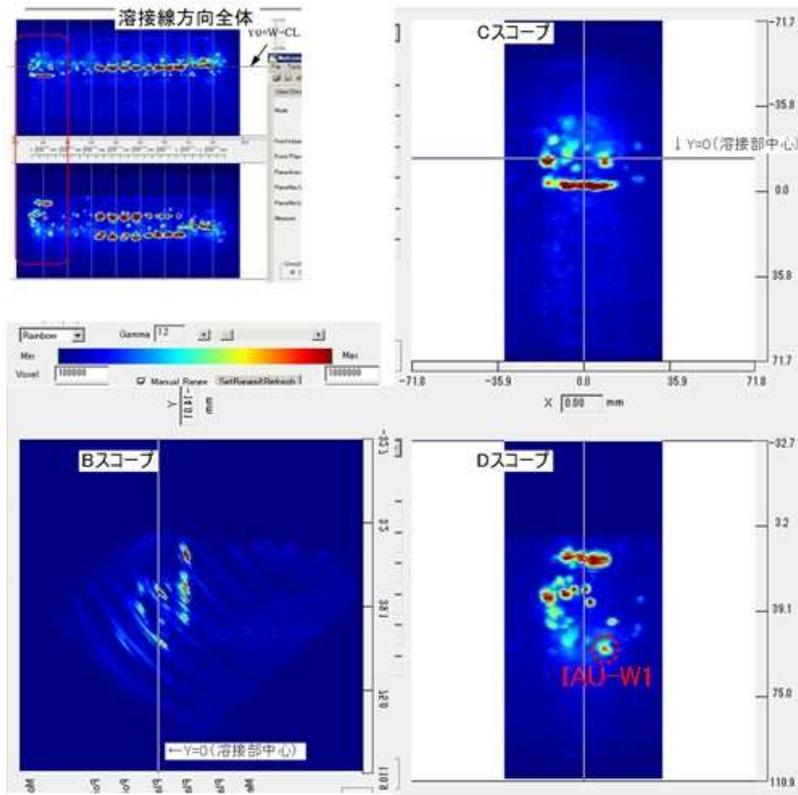
超音波シミュレーションの結果では、欠陥深さ 180mm で欠陥間隔 3mm の場合、フェーズドアレイ法および FMC-TFM ともに欠陥を分離して認識することは難しかった。マトリックスアレイプローブによる FMC-TFM では欠陥間隔 5mm 内に振幅の低下が確認され、複数欠陥を分離できる可能性が高いと考えられた。欠陥の深さが 40mm で欠陥間隔 3mm の場合には、FMC-TFM で指示の振幅低下が確認され、欠陥間隔 5mm で指示が消失し明確に分離できると考えられるものの、フェーズドアレイ法では分離して認識することは難しかった。欠陥間隔が 15mm になるとフェーズドアレイ法でも指示の振幅低下が確認され、複数欠陥を分離して認識できると考えられた。また、短い単独欠陥に対して、フェーズドアレイ法では実際よりも指示長さを過大評価する可能性を示唆する解析結果になったが、FMC-TFM では、実際の長さを指示長さとして測定できる可能性が確認できたため、FMC-TFM はフェーズドアレイ法に比べて溶接欠陥の寸法測定精度および分解能向上に有効な手法になると考えられる。

添付資料 8-1

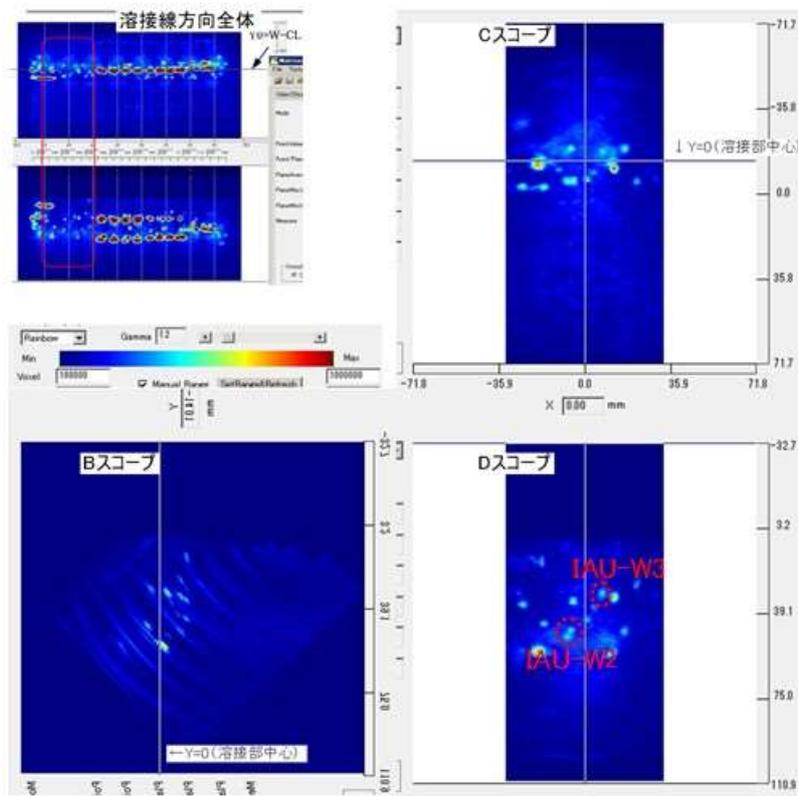
超音波探傷試験結果および断面マクロ写真

8.4.2 探傷試験結果

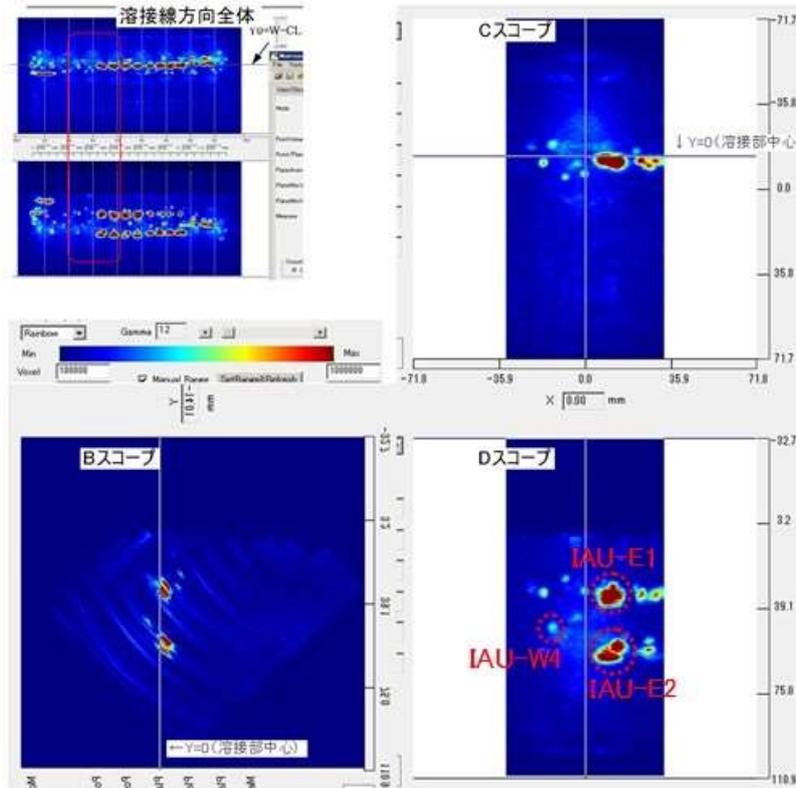
8.6.3 溶接欠陥の断面マクロ写真



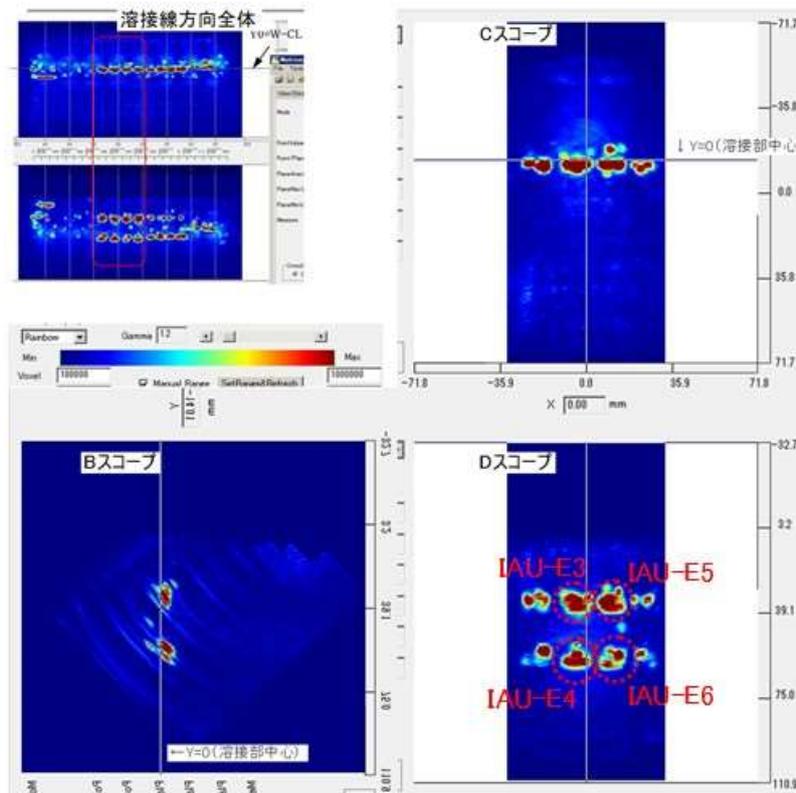
添付図 8-1-1 試験体 A 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=15mm、測定範囲 N)



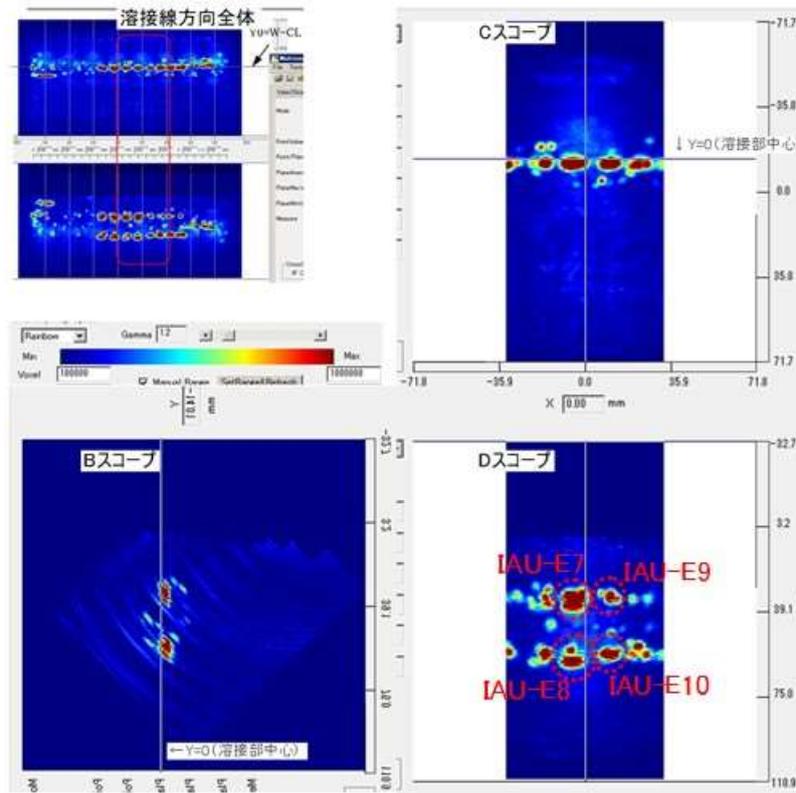
添付図 8-1-2 試験体 A 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=45mm、測定範囲 N)



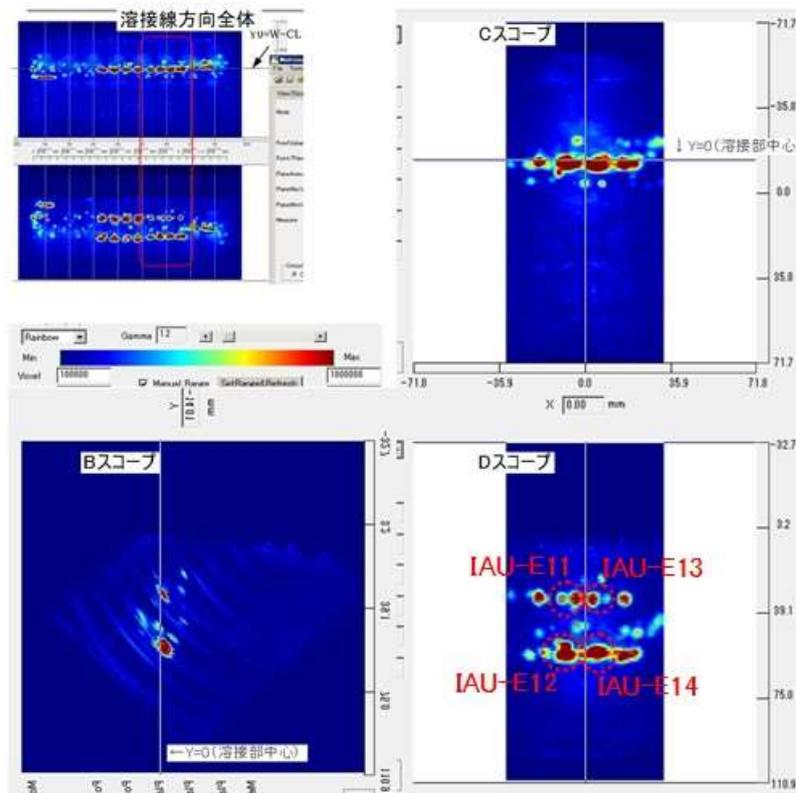
添付図 8-1-3 試験体 A 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=75mm、測定範囲 N)



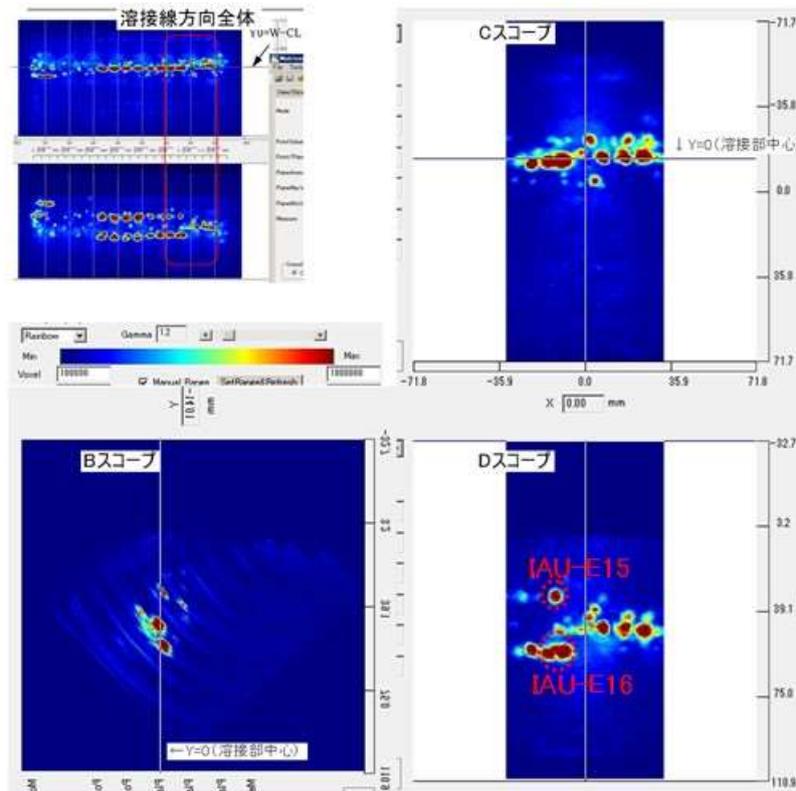
添付図 8-1-4 試験体 A 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=105mm、測定範囲 N)



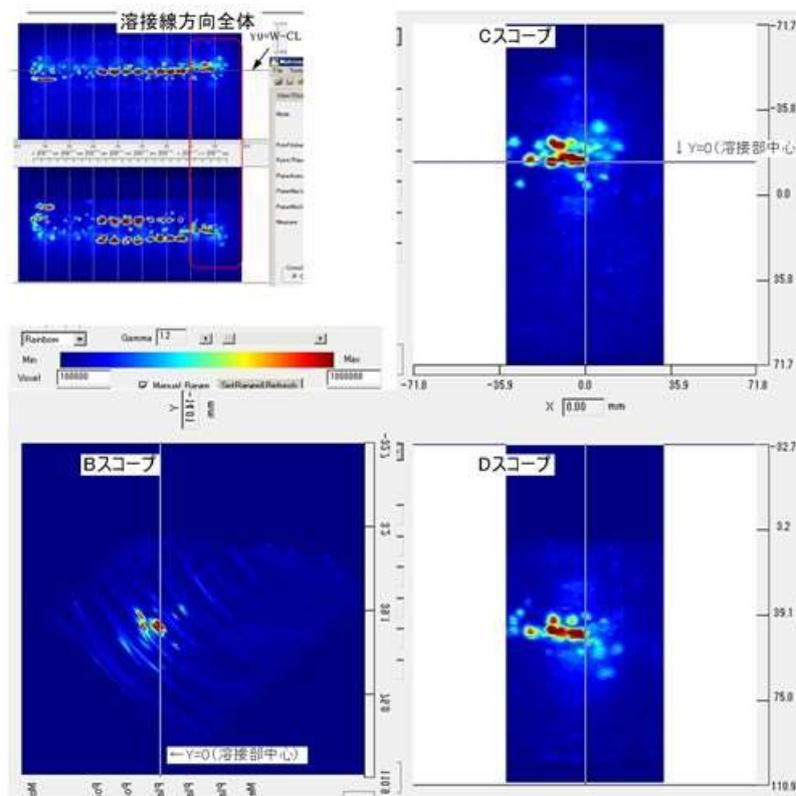
添付図 8-1-5 試験体 A 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=135mm、測定範囲 N)



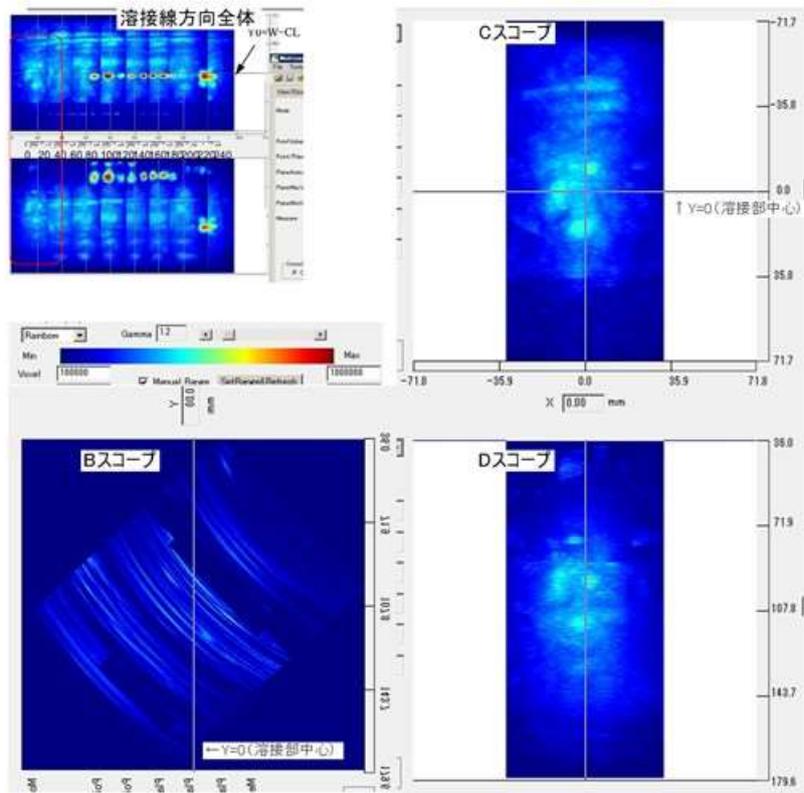
添付図 8-1-6 試験体 A 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=165mm、測定範囲 N)



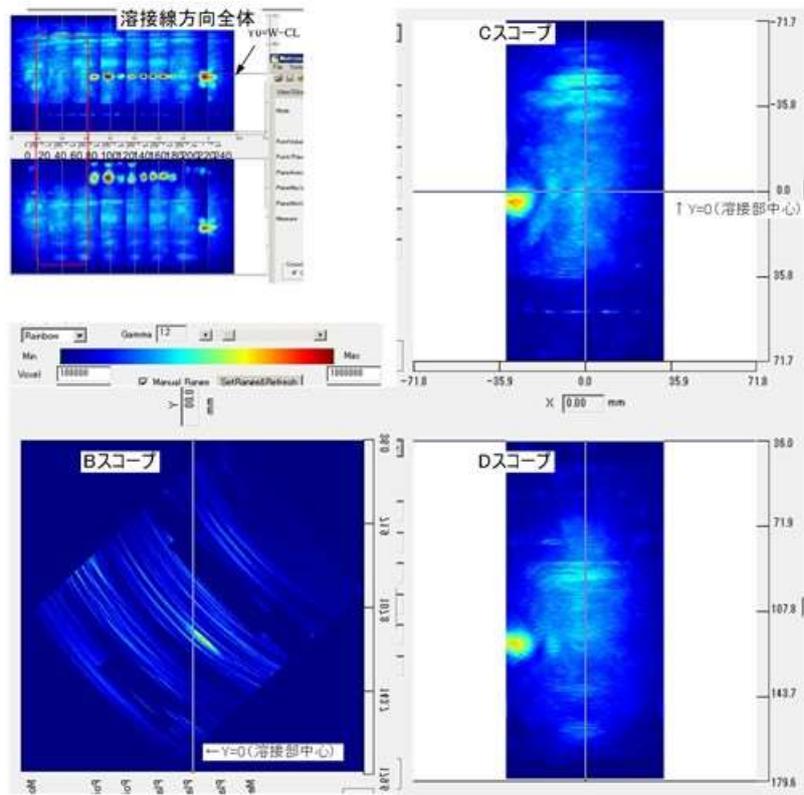
添付図 8-1-7 試験体 A 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=195mm、測定範囲 N)



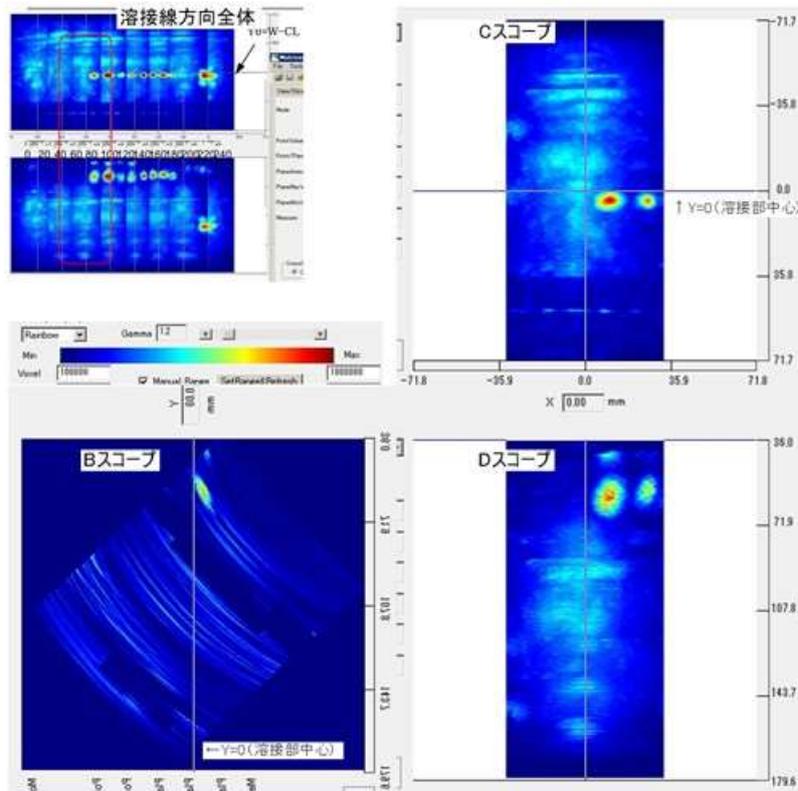
添付図 8-1-8 試験体 A 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=225mm、測定範囲 N)



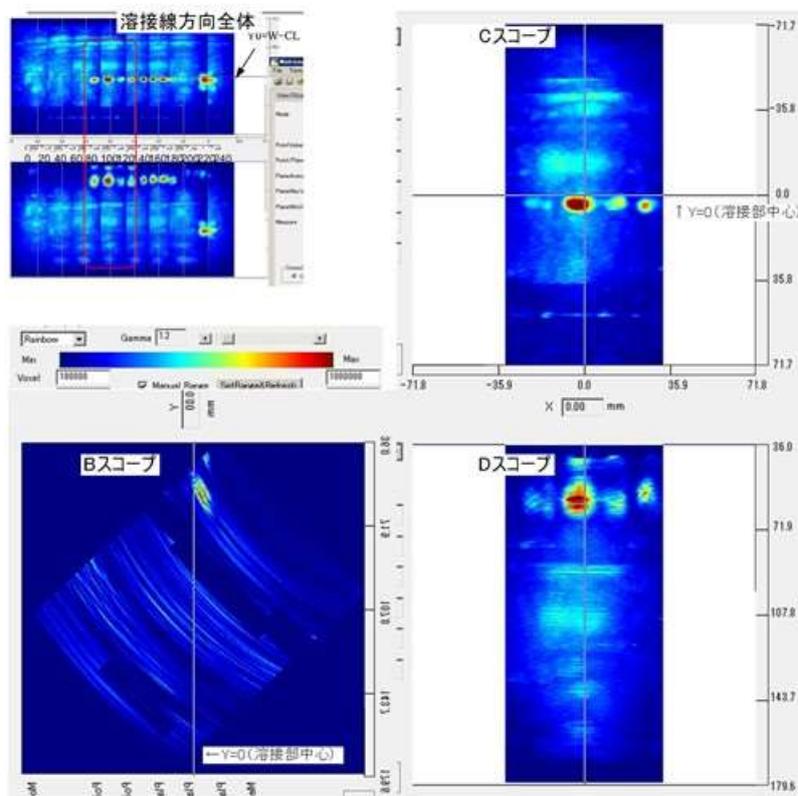
添付図 8-1-9 試験体 A 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=15mm、測定範囲 M)



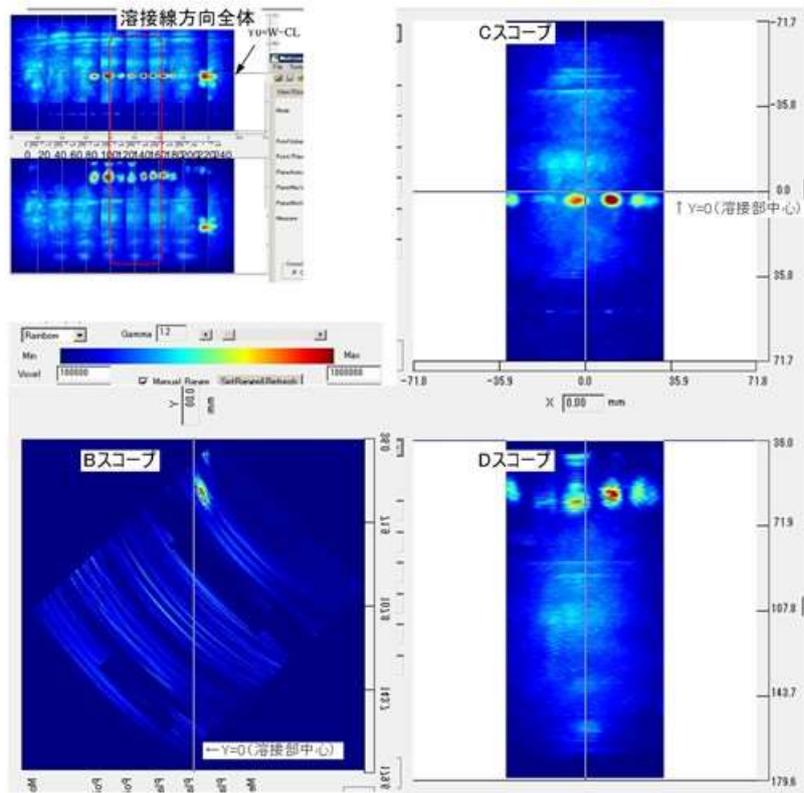
添付図 8-1-10 試験体 A 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=45mm、測定範囲 M)



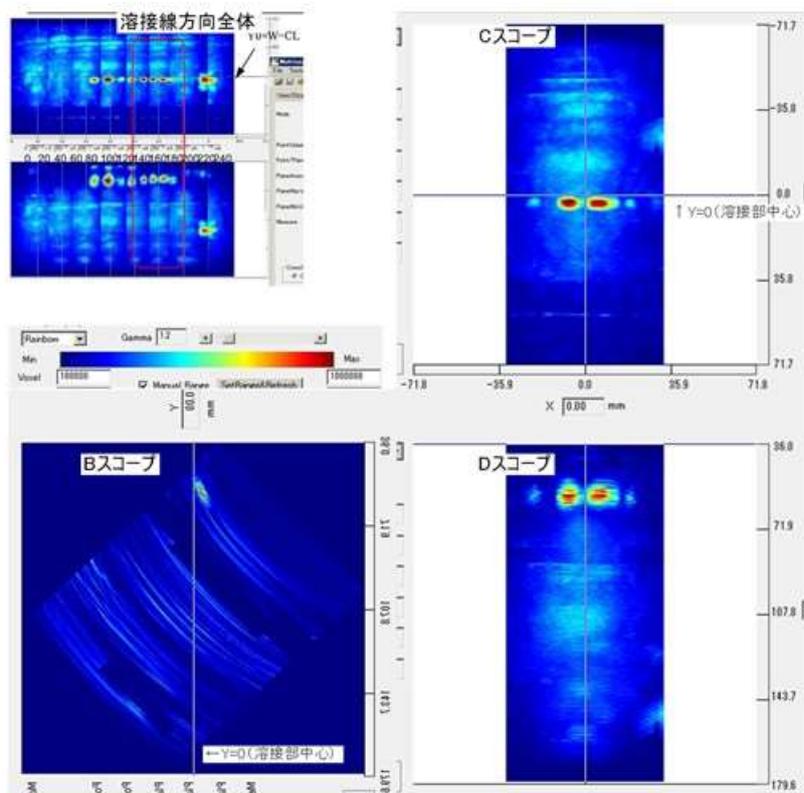
添付図 8-1-11 試験体 A 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=75mm、測定範囲 M)



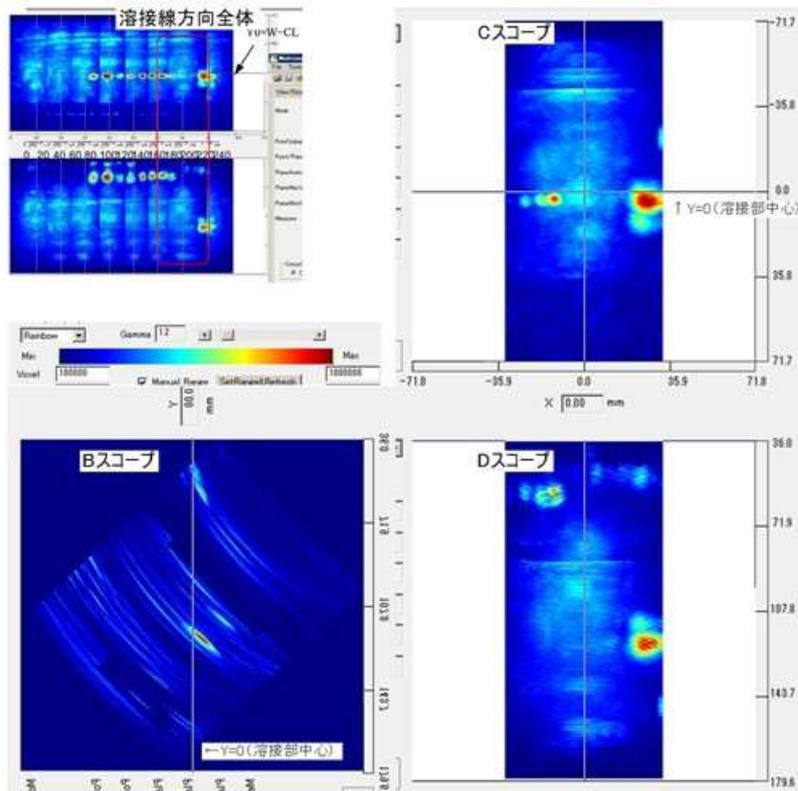
添付図 8-1-12 試験体 A 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=105mm、測定範囲 M)



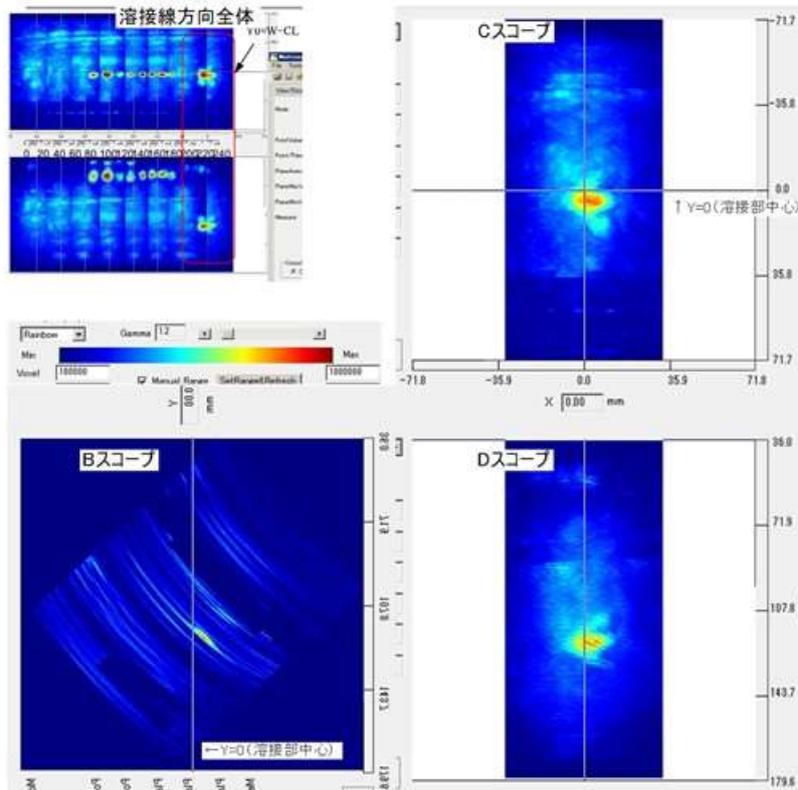
添付図 8-1-13 試験体 A 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=135mm、測定範囲 M)



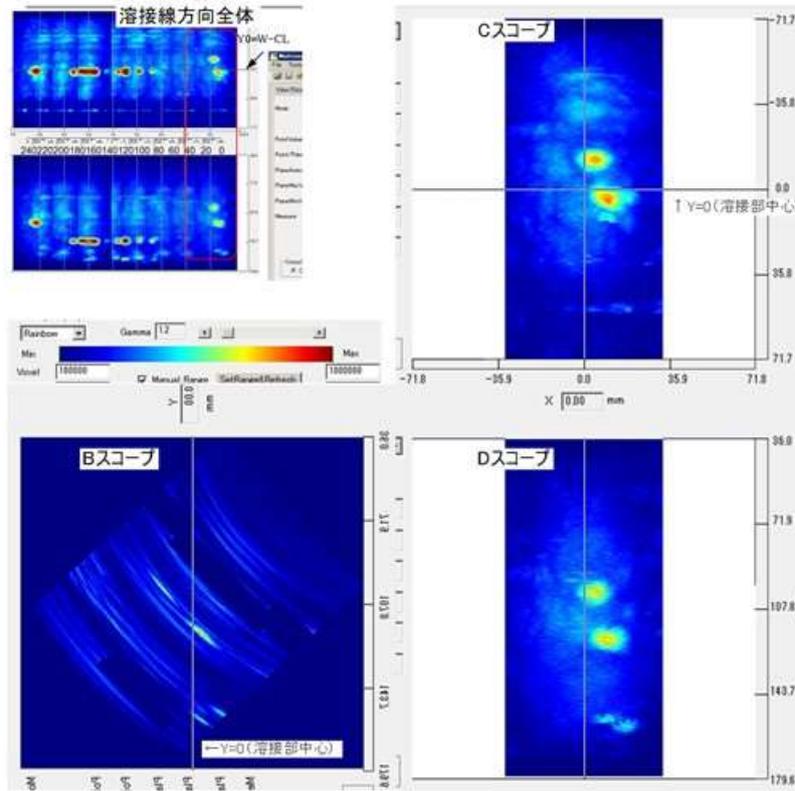
添付図 8-1-14 試験体 A 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=165mm、測定範囲 M)



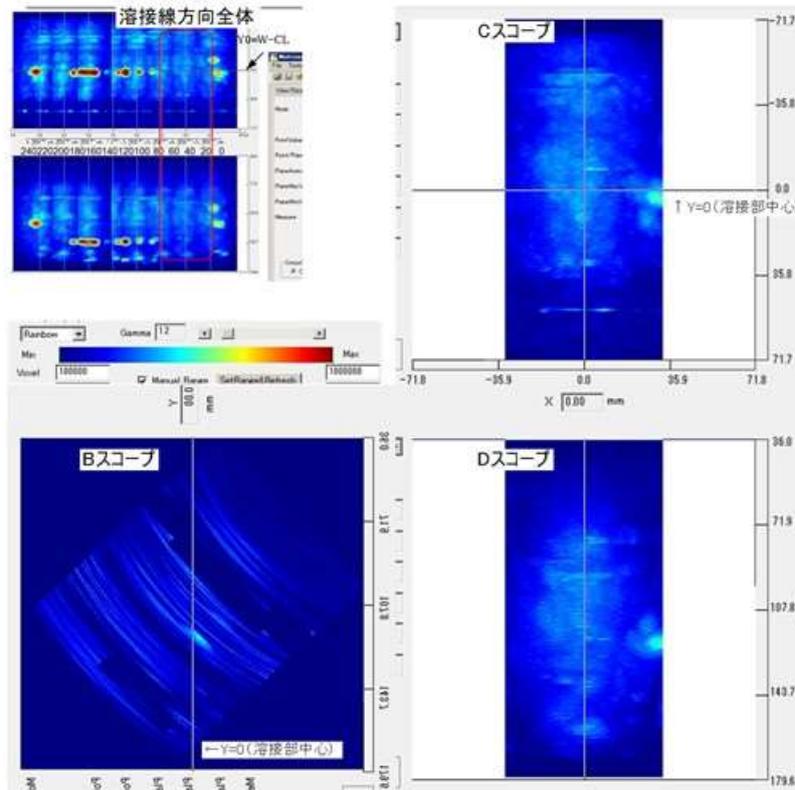
添付図 8-1-15 試験体 A 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=195mm、測定範囲 M)



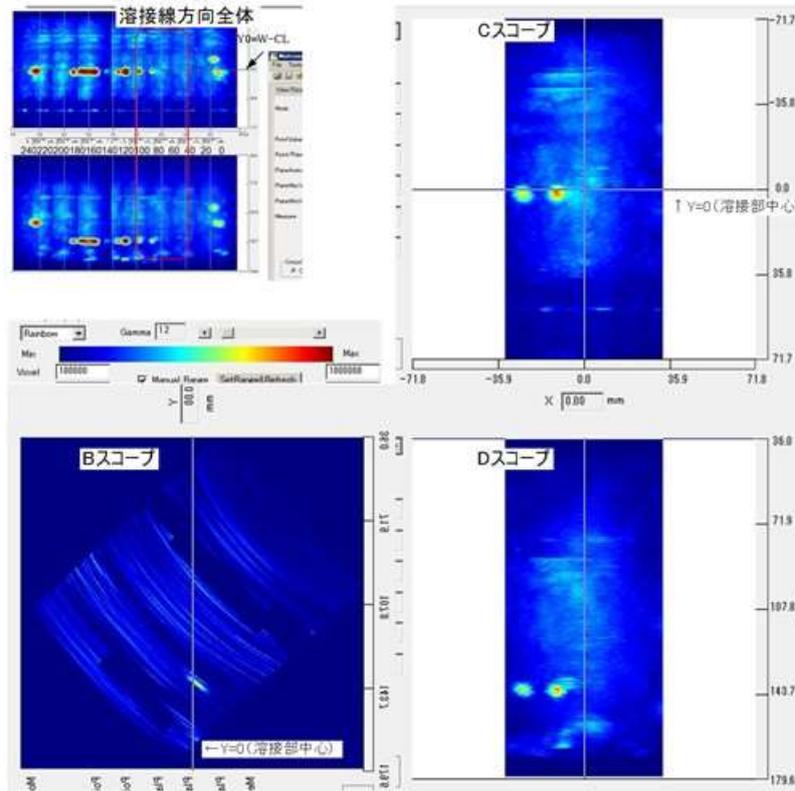
添付図 8-1-16 試験体 A 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=225mm、測定範囲 M)



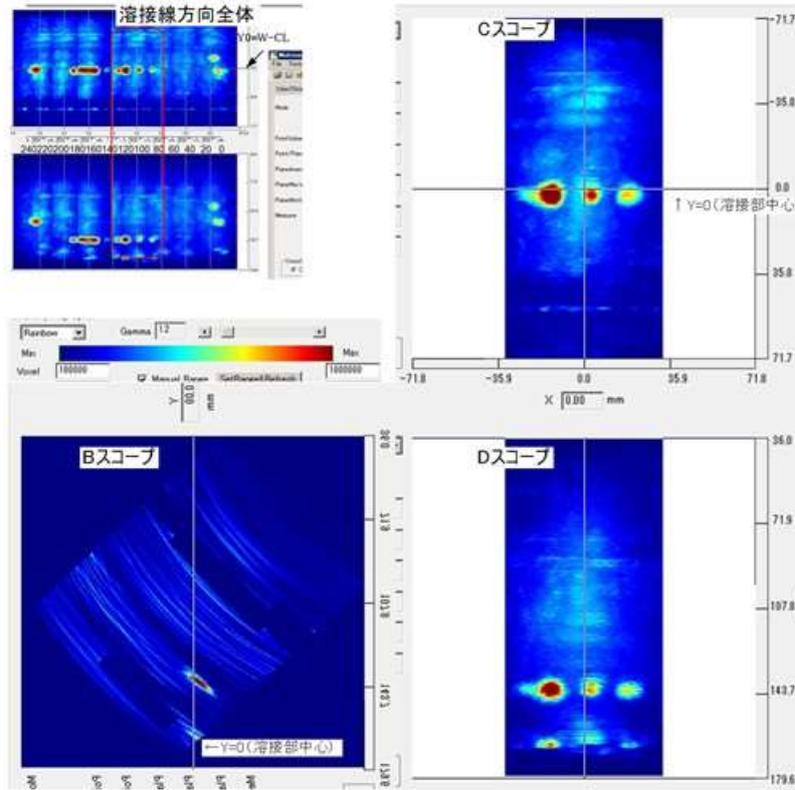
添付図 8-1-17 試験体 A 裏面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=15mm、測定範囲 M)



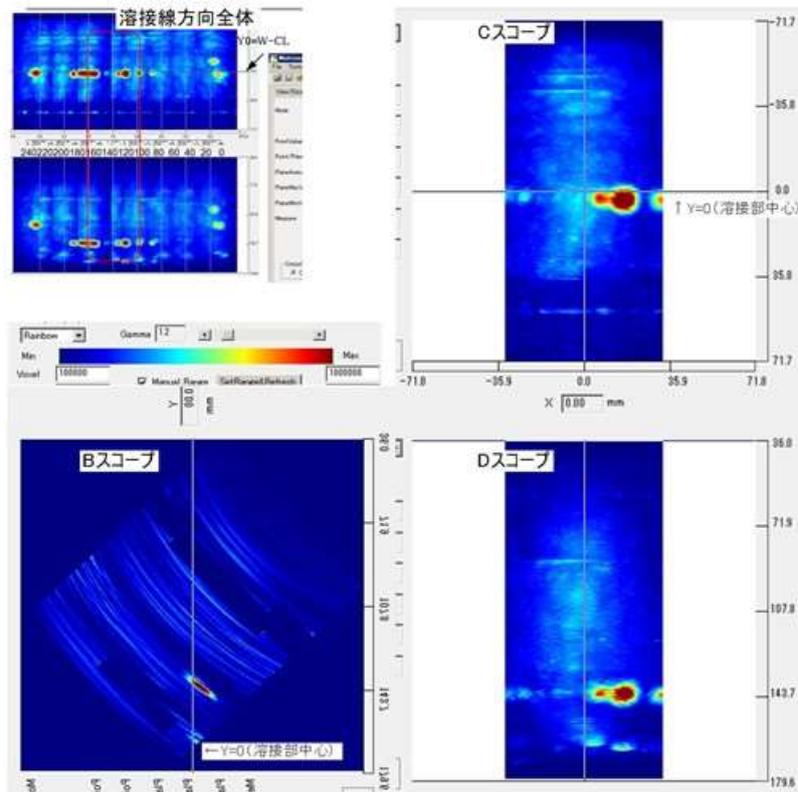
添付図 8-1-18 試験体 A 裏面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=45mm、測定範囲 M)



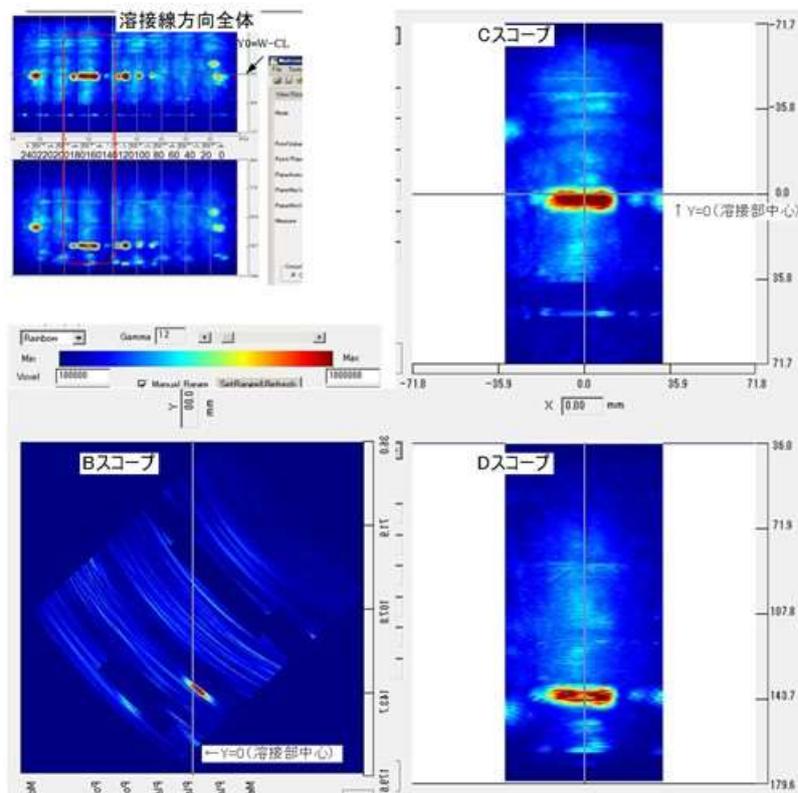
添付図 8-1-19 試験体 A 裏面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=75mm、測定範囲 M)



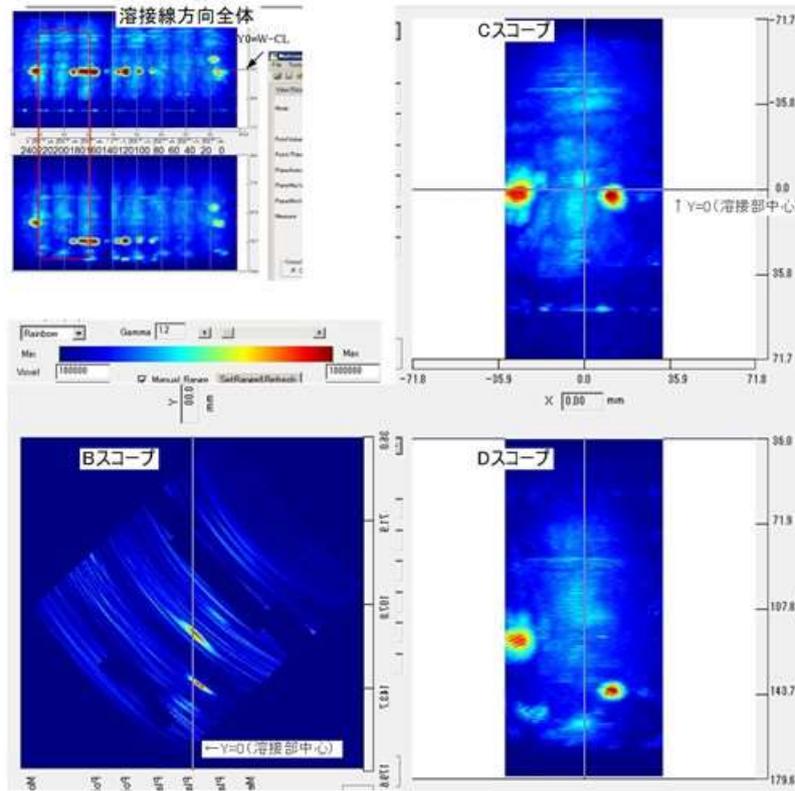
添付図 8-1-20 試験体 A 裏面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=105mm、測定範囲 M)



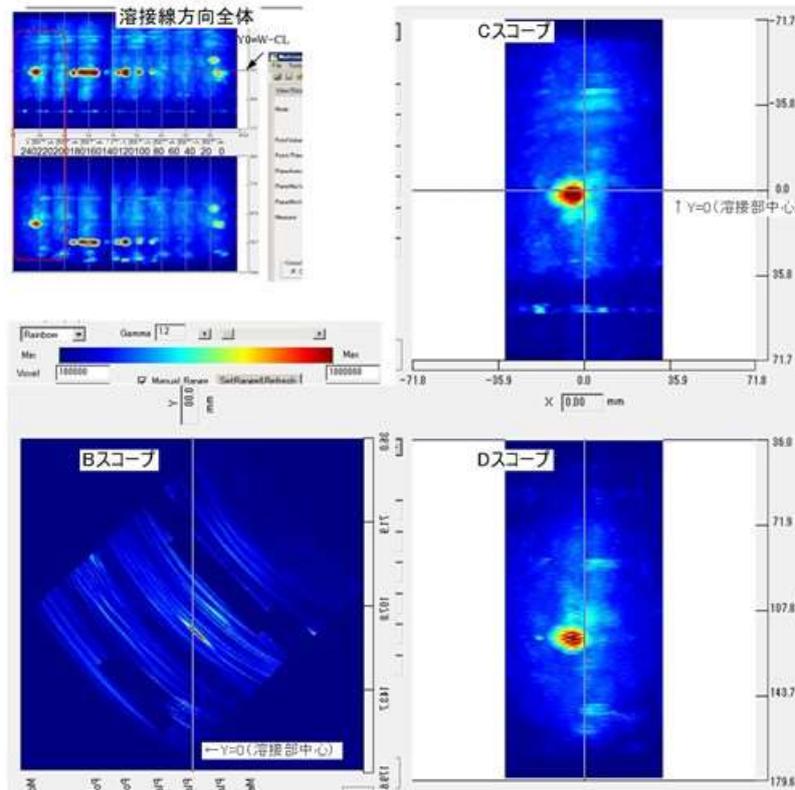
添付図 8-1-21 試験体 A 裏面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=135mm、測定範囲 M)



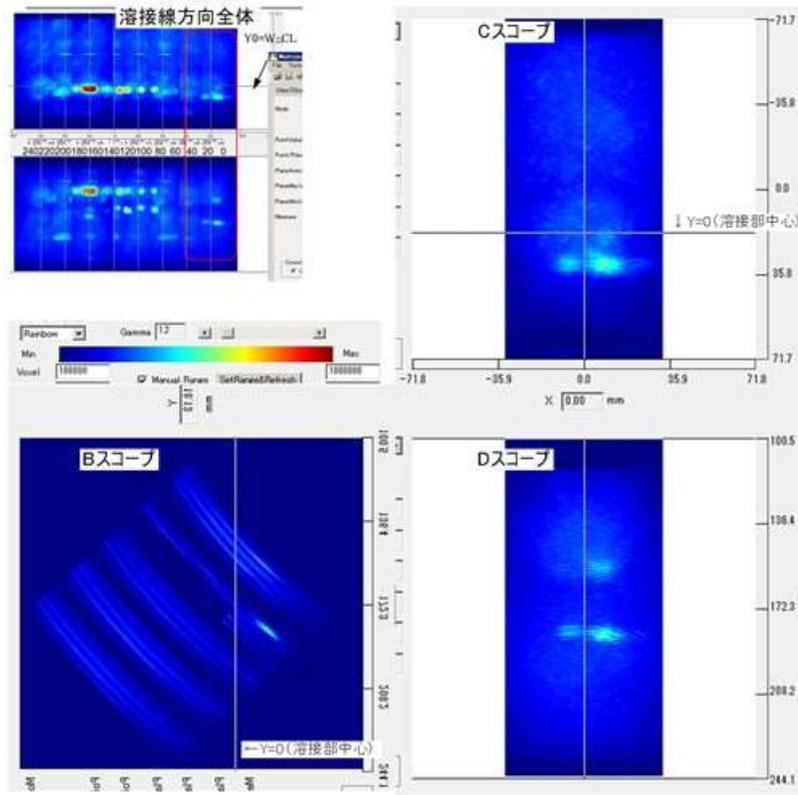
添付図 8-1-22 試験体 A 裏面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=165mm、測定範囲 M)



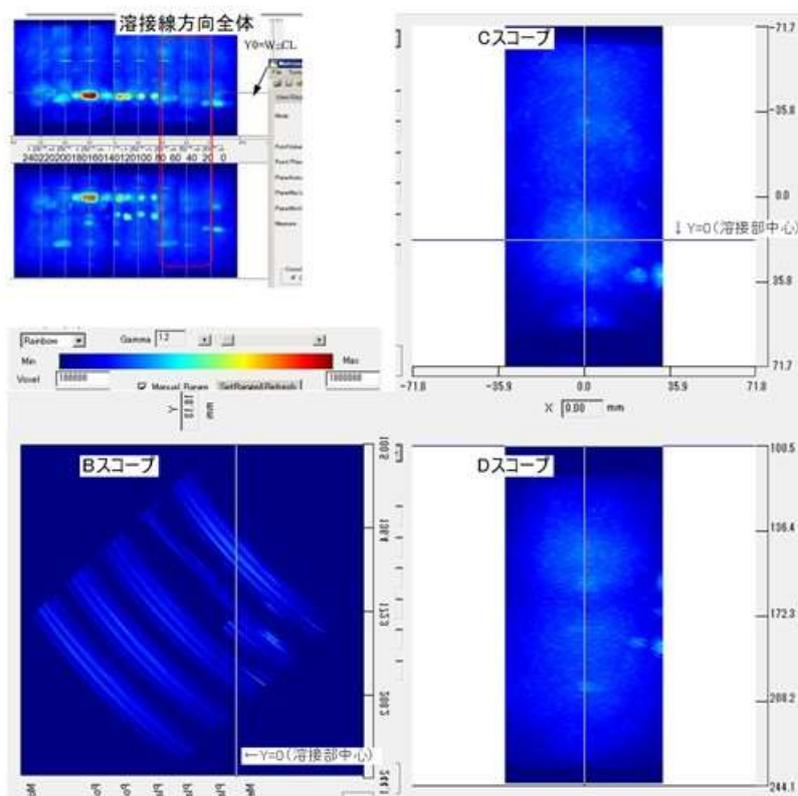
添付図 8-1-23 試験体 A 裏面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=195mm、測定範囲 M)



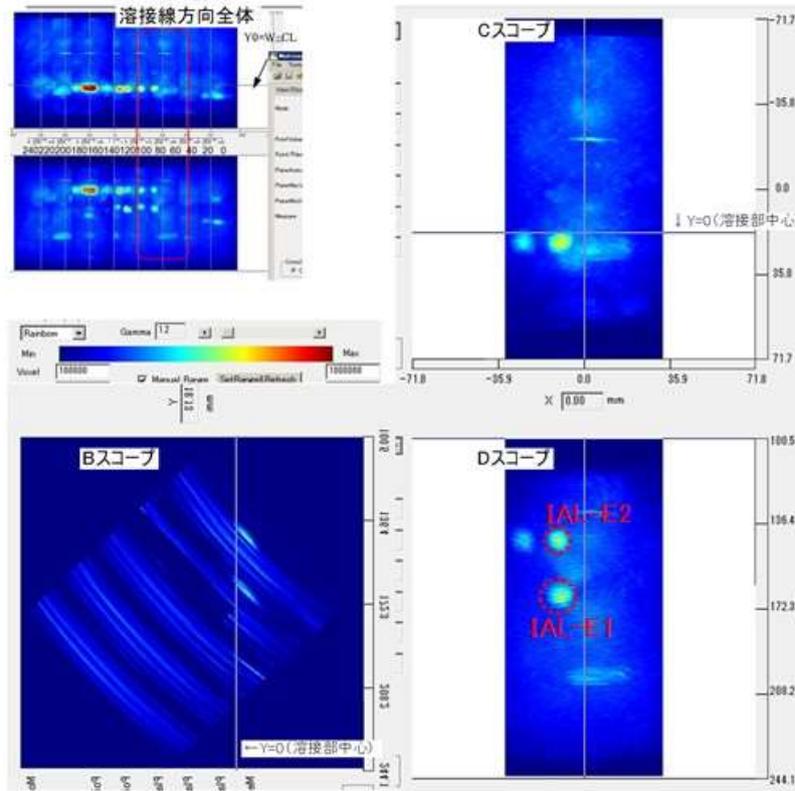
添付図 8-1-24 試験体 A 裏面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=225mm、測定範囲 M)



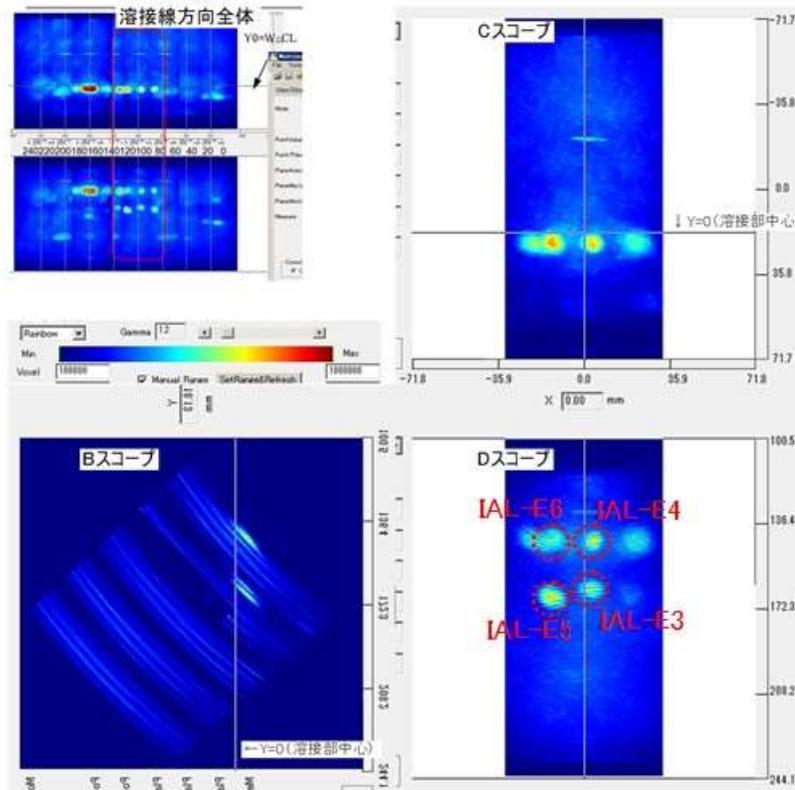
添付図 8-1-25 試験体 A 裏面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=15mm、測定範囲 F)



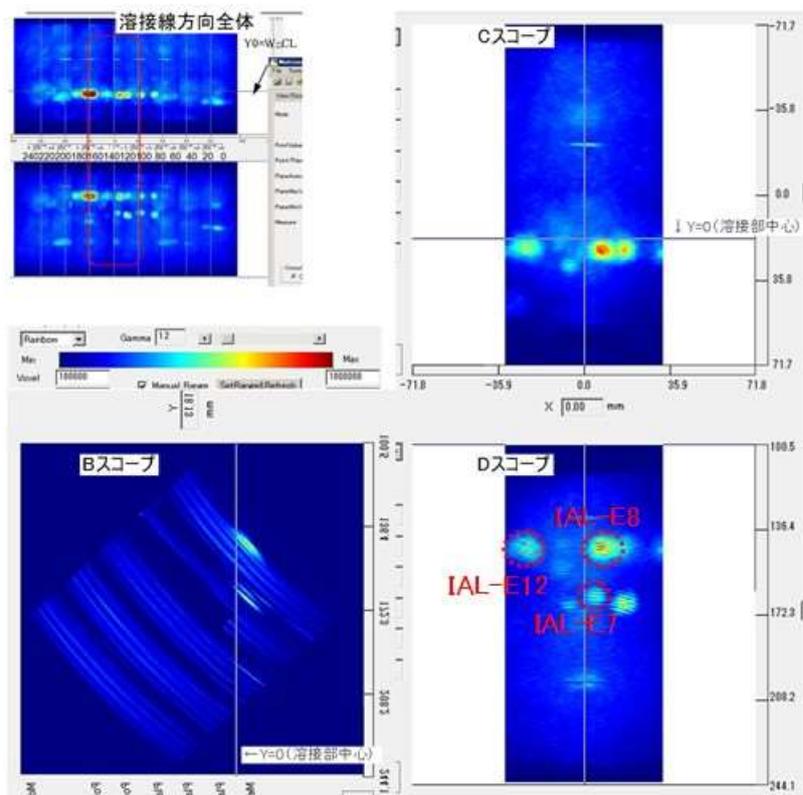
添付図 8-1-26 試験体 A 裏面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=45mm、測定範囲 F)



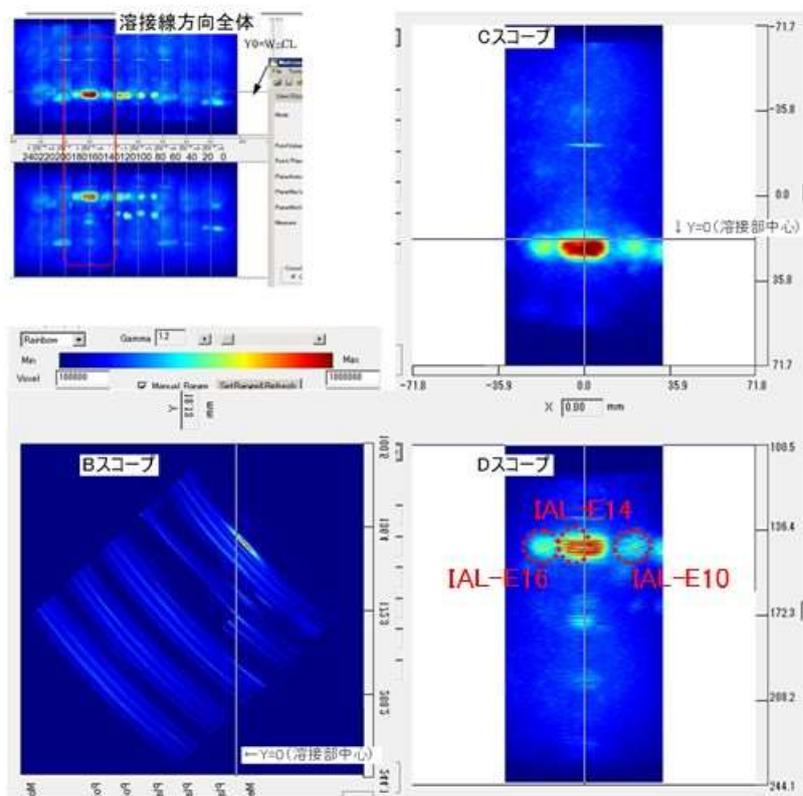
添付図 8-1-27 試験体 A 裏面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=75mm、測定範囲 F)



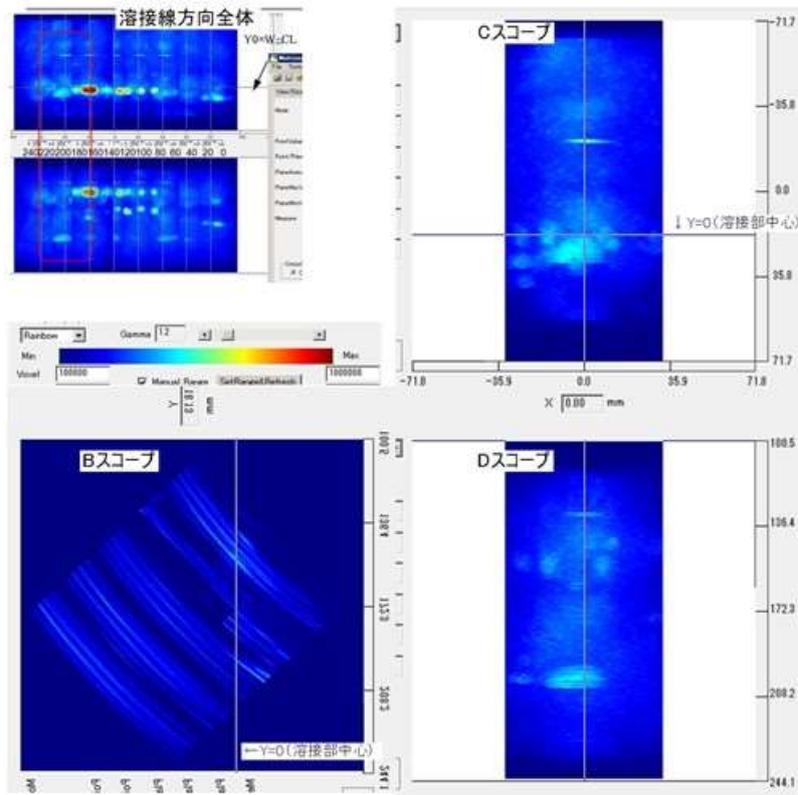
添付図 8-1-28 試験体 A 裏面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=105mm、測定範囲 F)



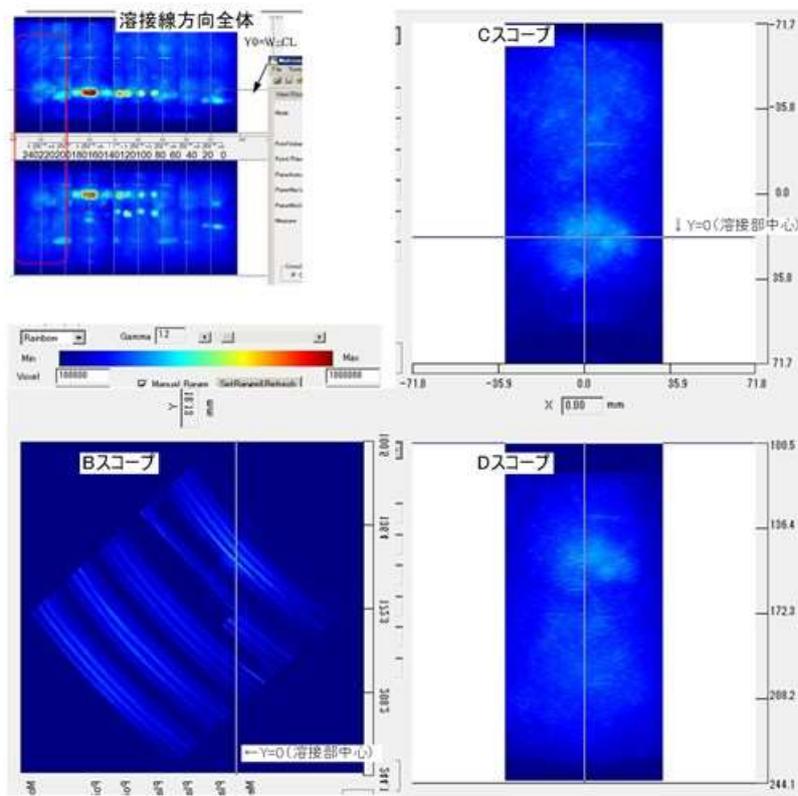
添付図 8-1-29 試験体 A 裏面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=135mm、測定範囲 F)



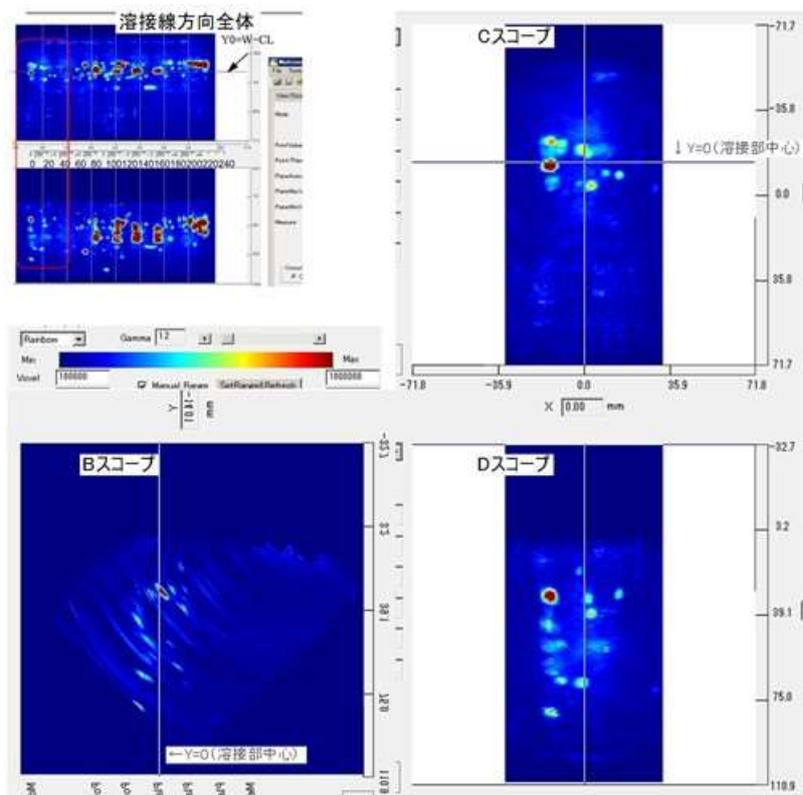
添付図 8-1-30 試験体 A 裏面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=165mm、測定範囲 F)



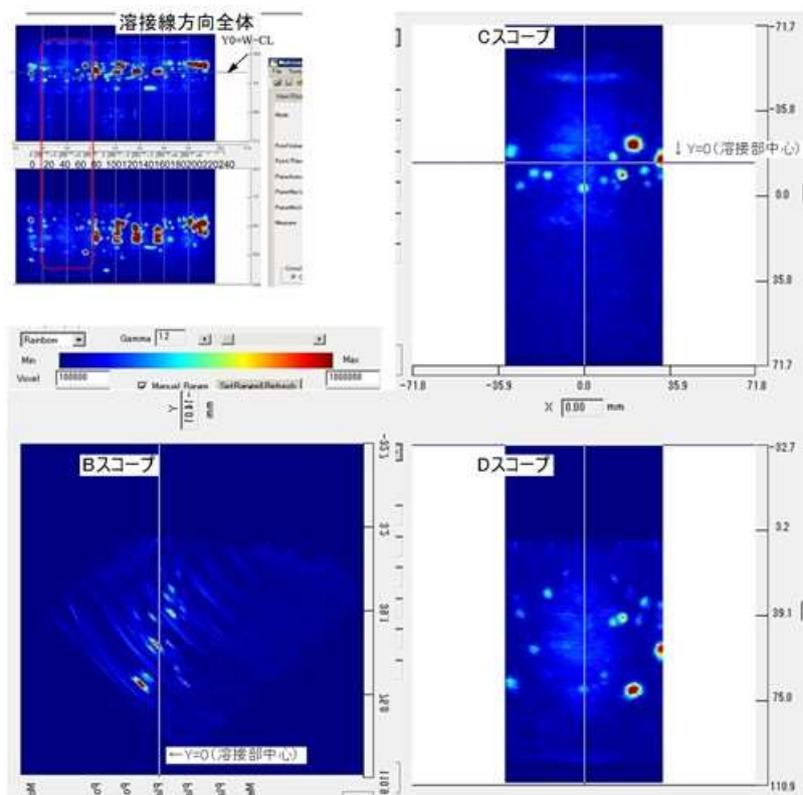
添付図 8-1-31 試験体 A 裏面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=195mm、測定範囲 F)



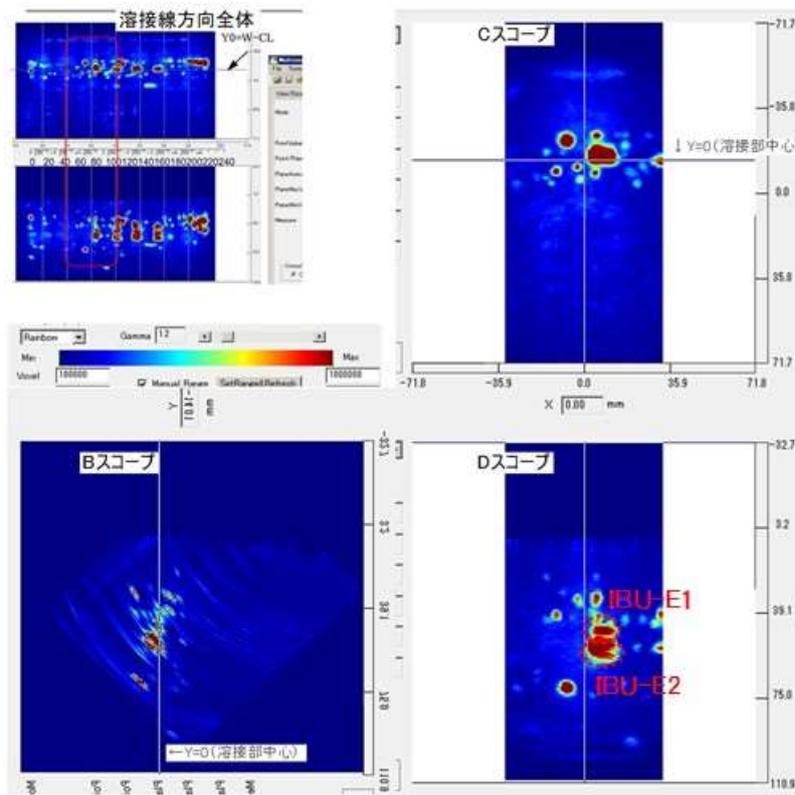
添付図 8-1-32 試験体 A 裏面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=225mm、測定範囲 F)



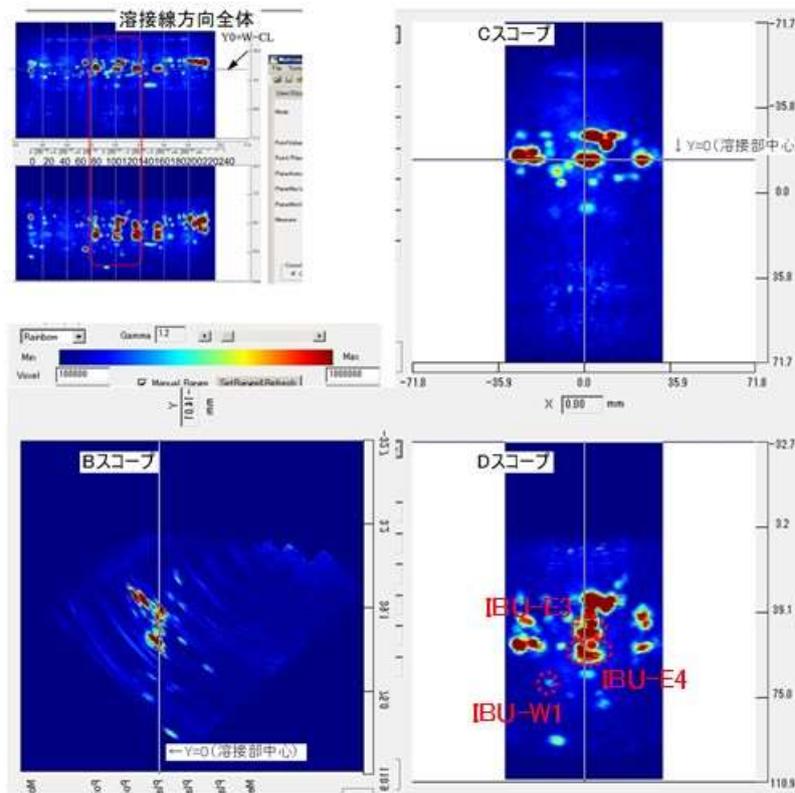
添付図 8-1-33 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=15mm、測定範囲 N)



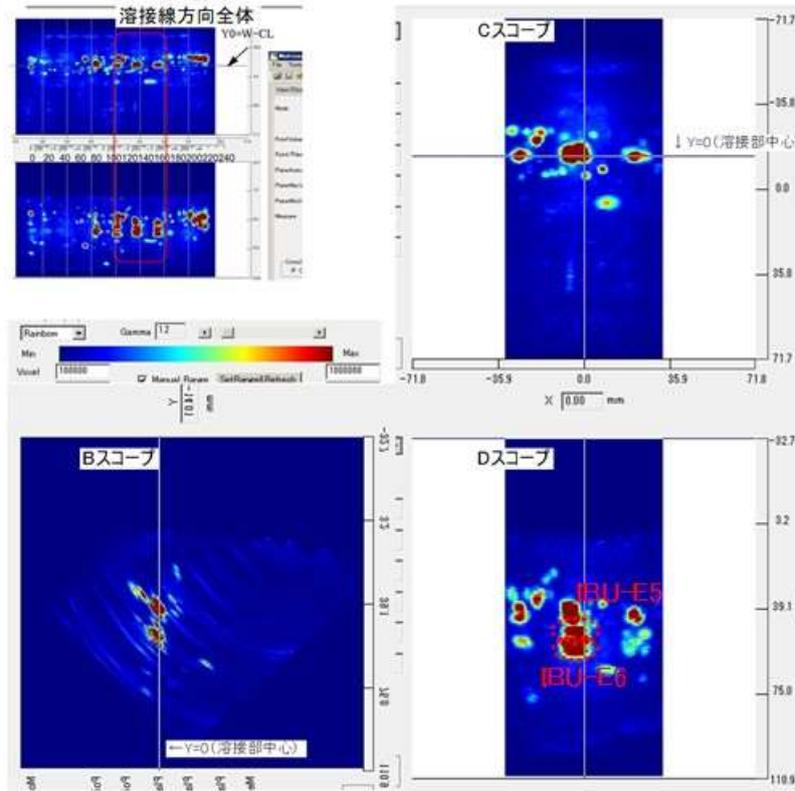
添付図 8-1-34 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=45mm、測定範囲 N)



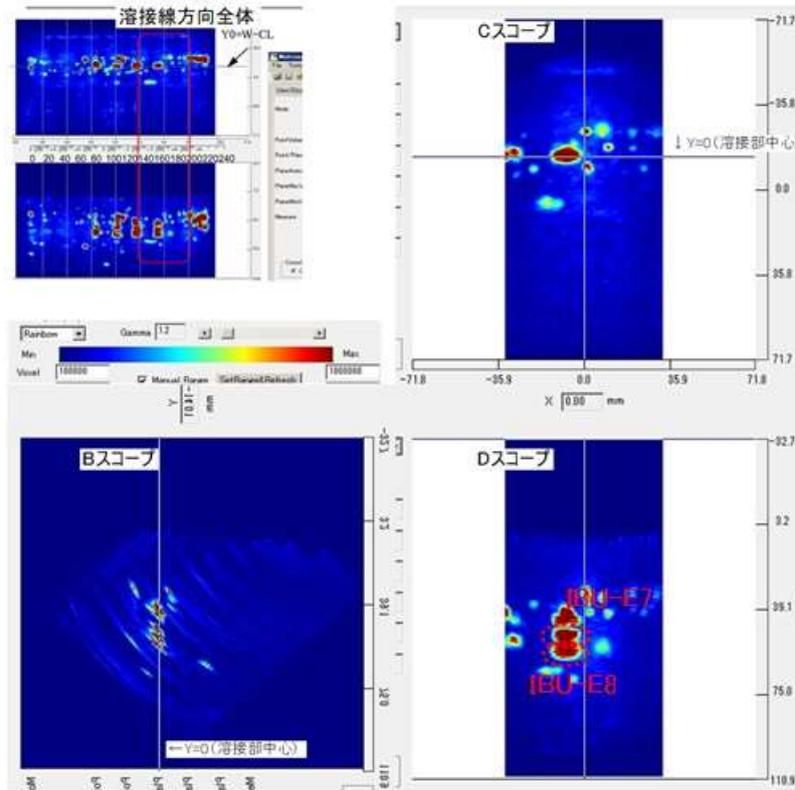
添付図 8-1-35 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=75mm、測定範囲 N)



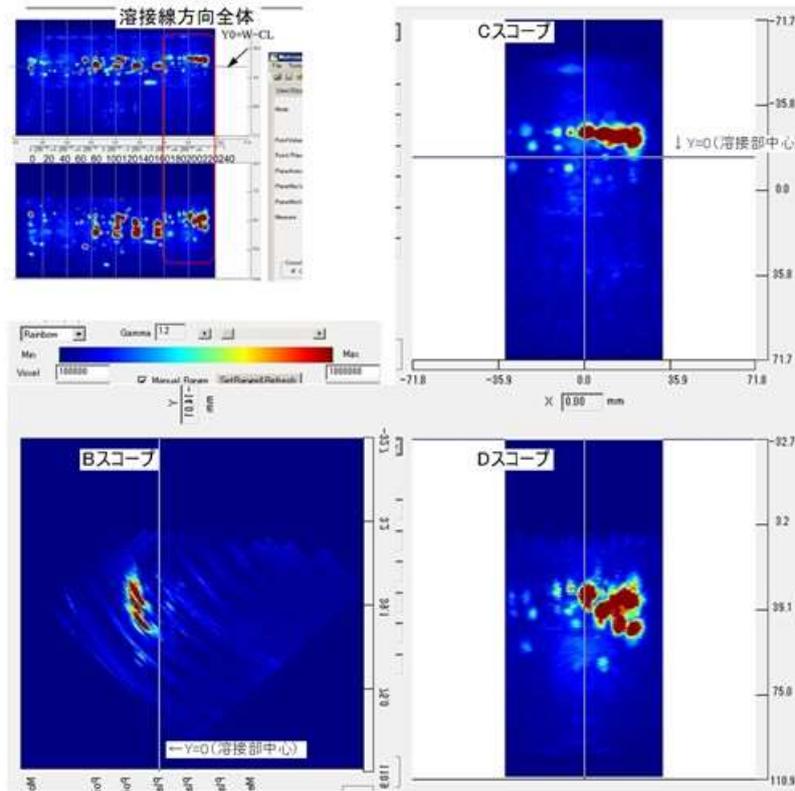
添付図 8-1-36 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=105mm、測定範囲 N)



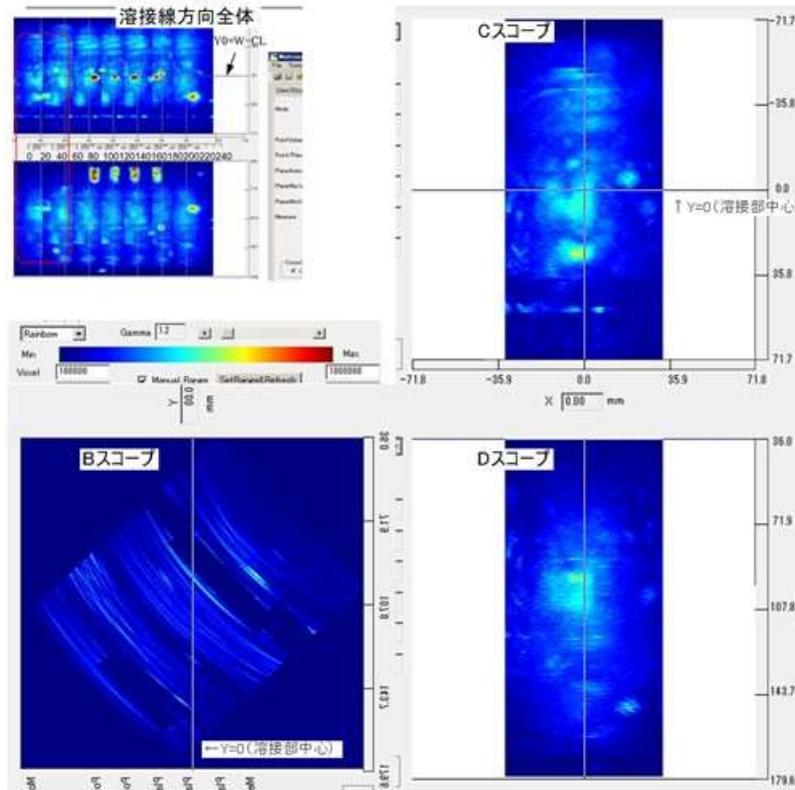
添付図 8-1-37 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=135mm、測定範囲 N)



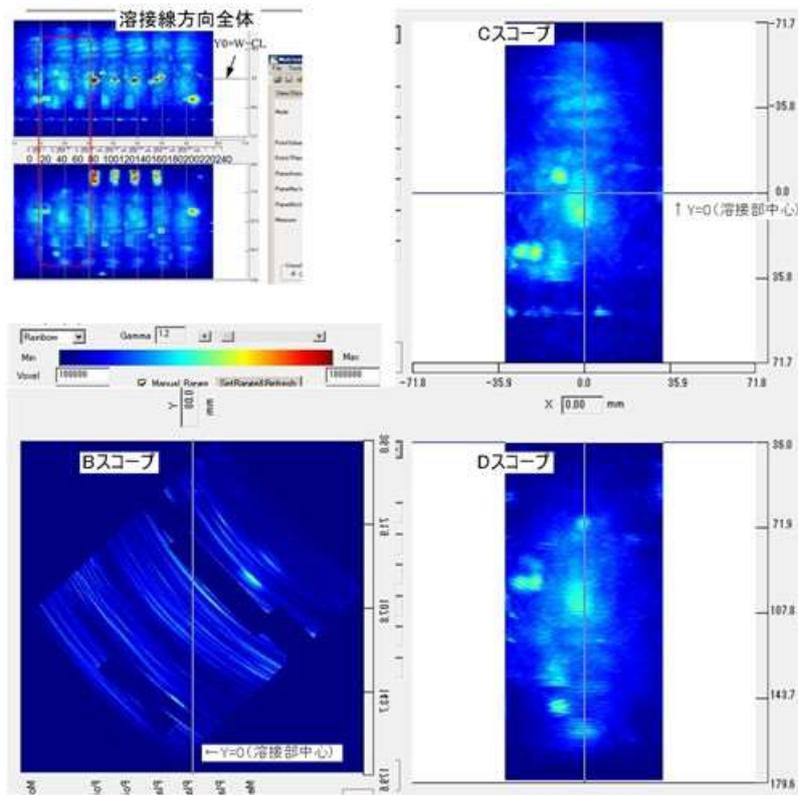
添付図 8-1-38 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=165mm、測定範囲 N)



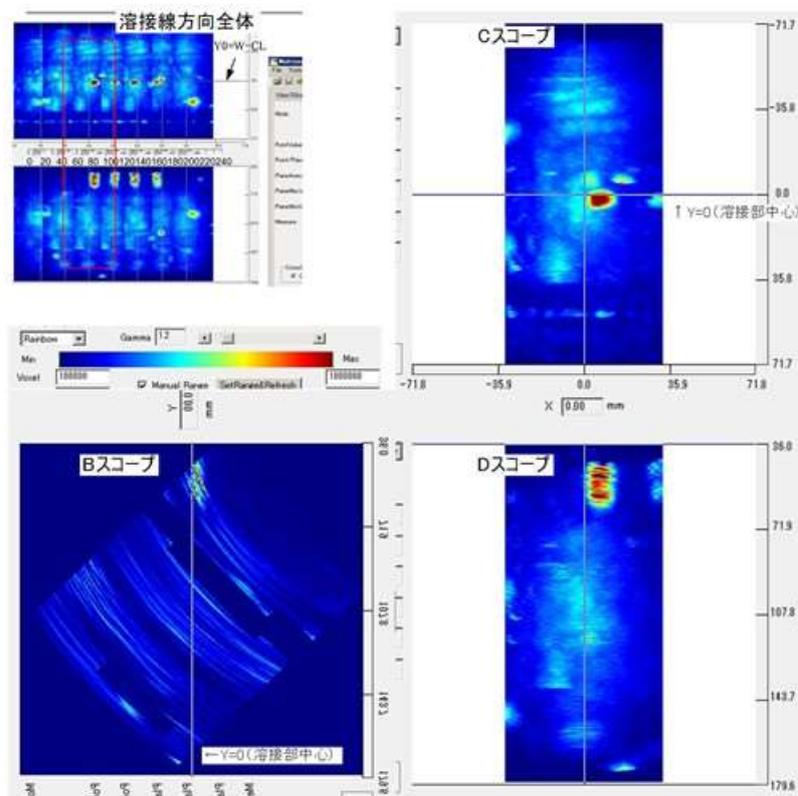
添付図 8-1-39 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=195mm、測定範囲 N)



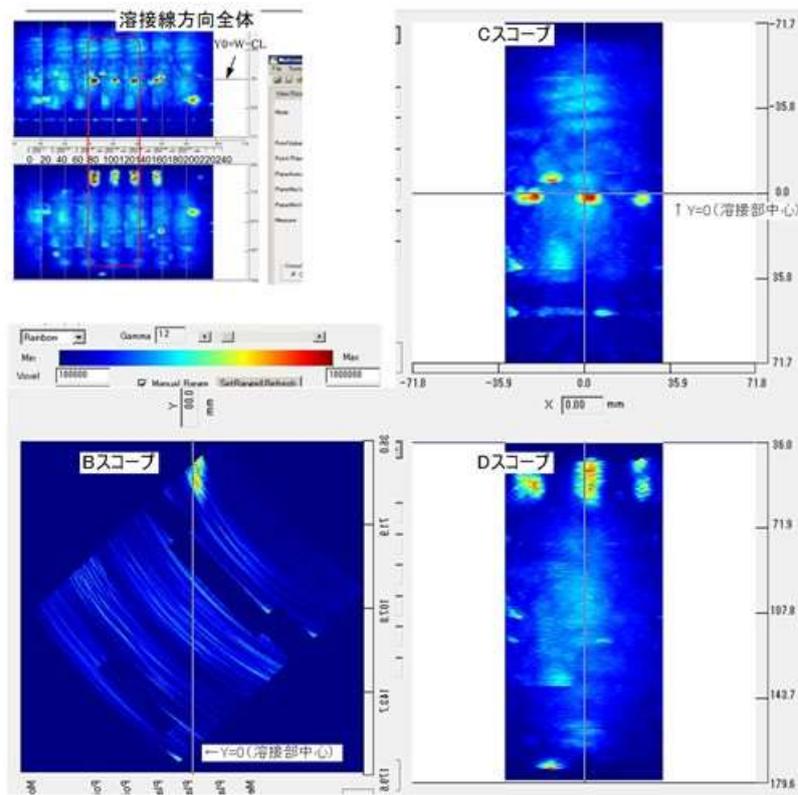
添付図 8-1-40 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=15mm、測定範囲 M)



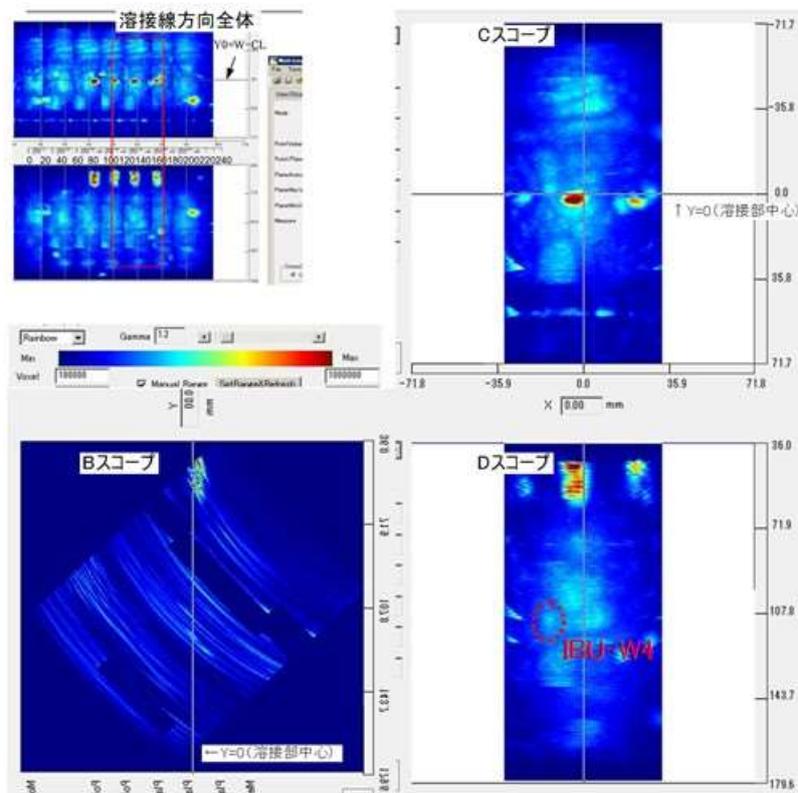
添付図 8-1-41 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=45mm、測定範囲 M)



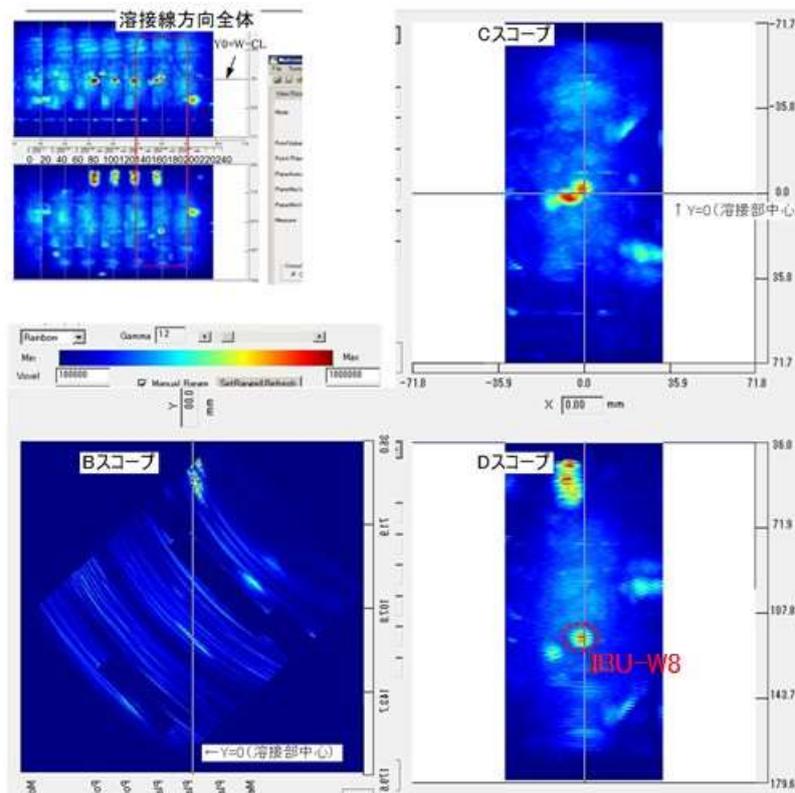
添付図 8-1-42 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=75mm、測定範囲 M)



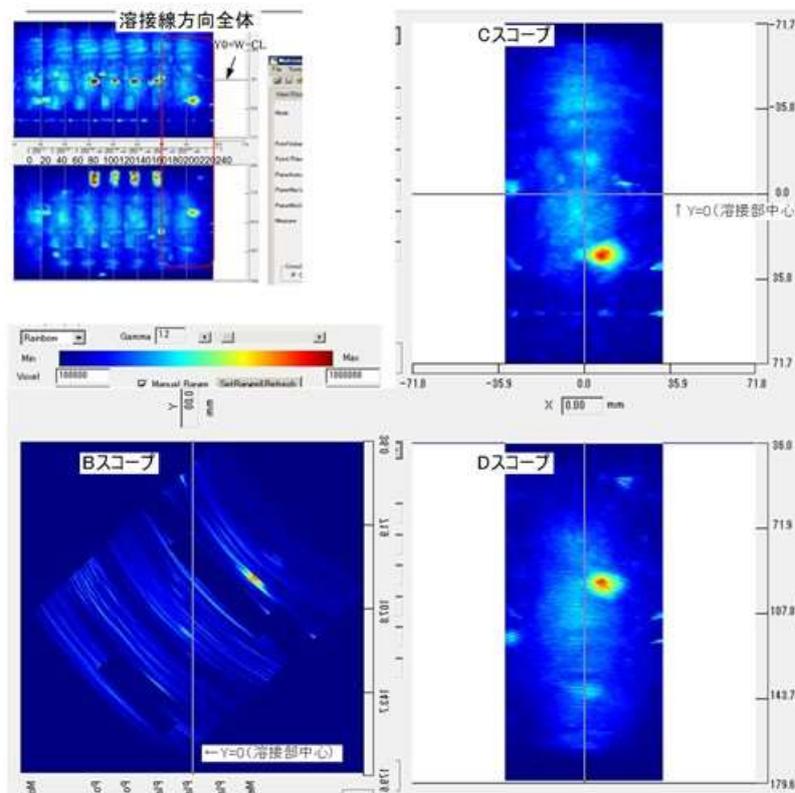
添付図 8-1-43 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=105mm、測定範囲 M)



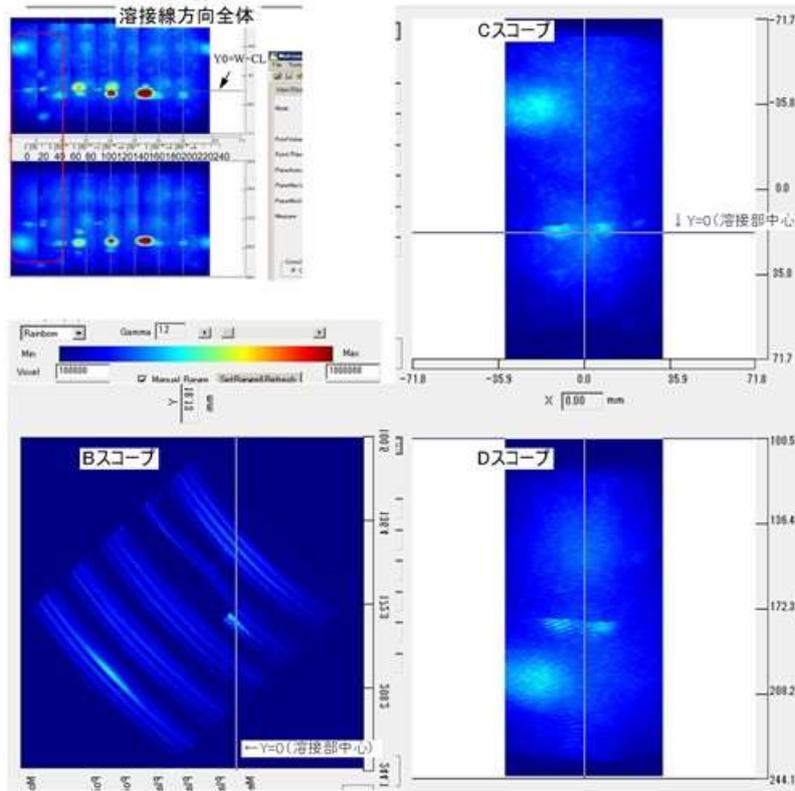
添付図 8-1-44 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=135mm、測定範囲 M)



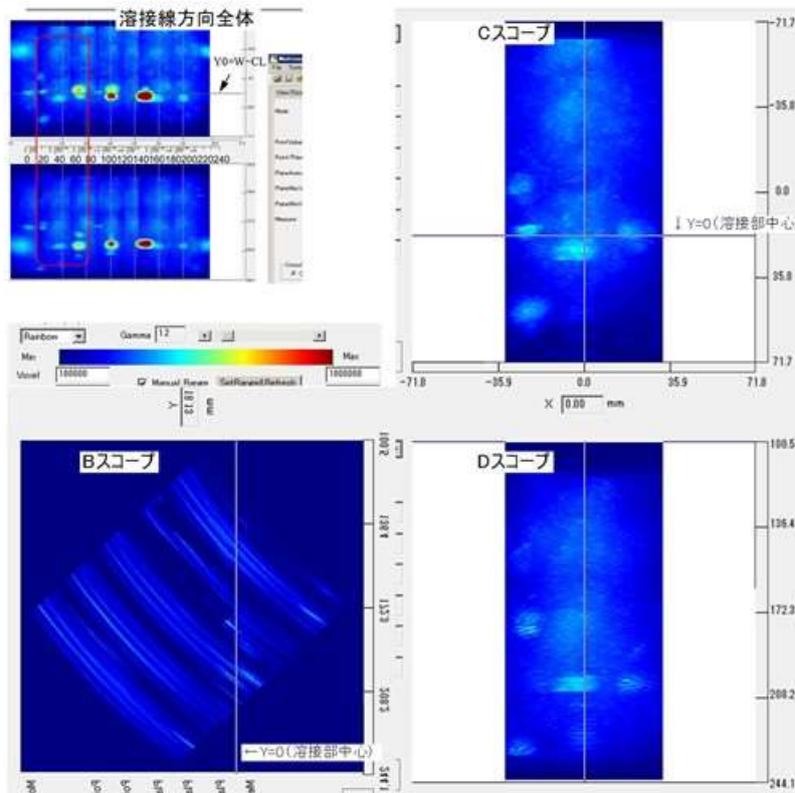
添付図 8-1-45 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=165mm、測定範囲 M)



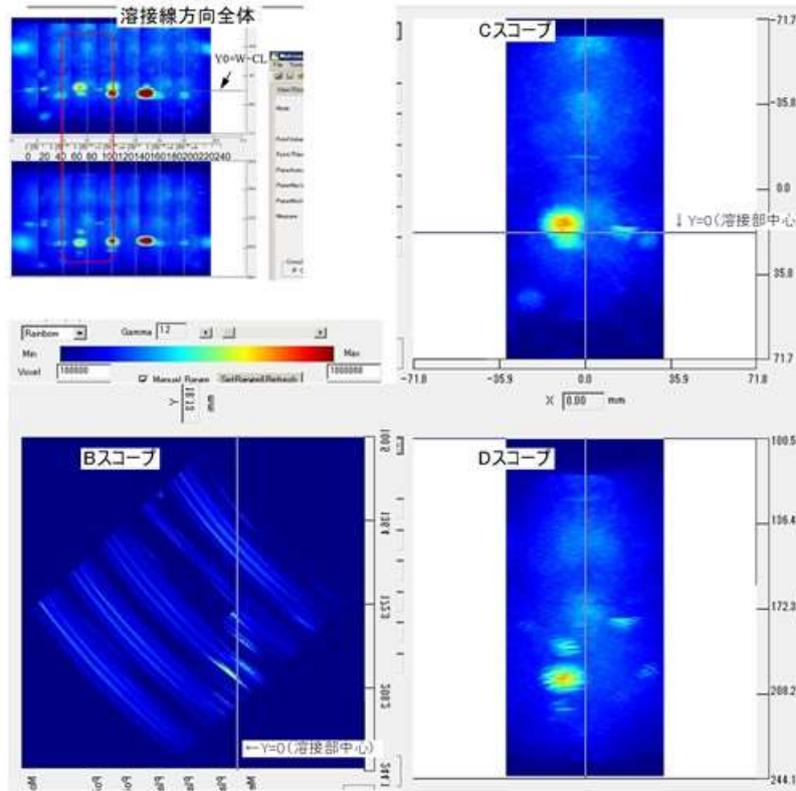
添付図 8-1-46 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=195mm、測定範囲 M)



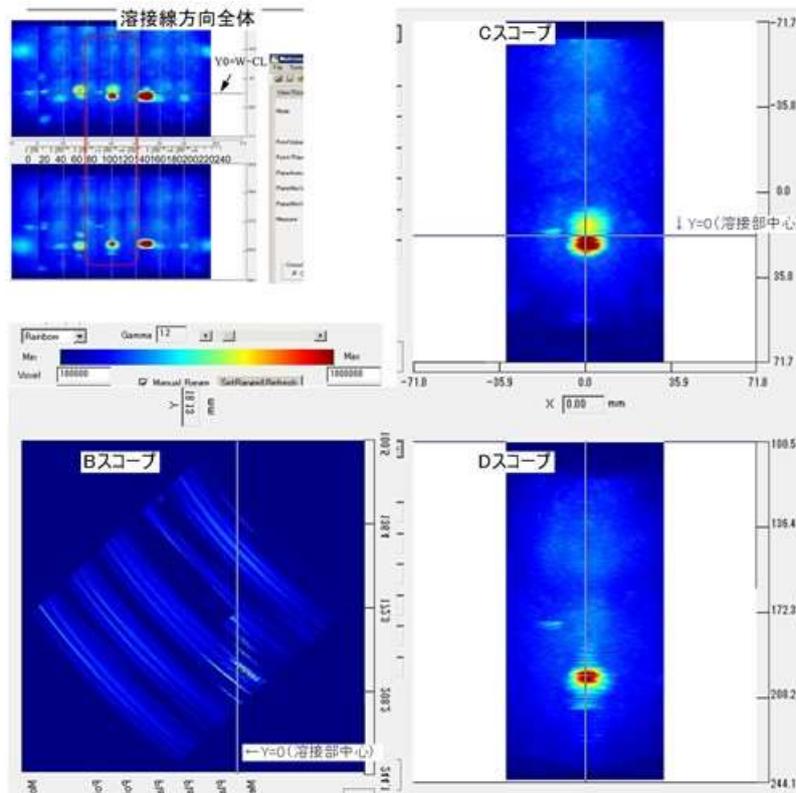
添付図 8-1-47 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=15mm、測定範囲 F)



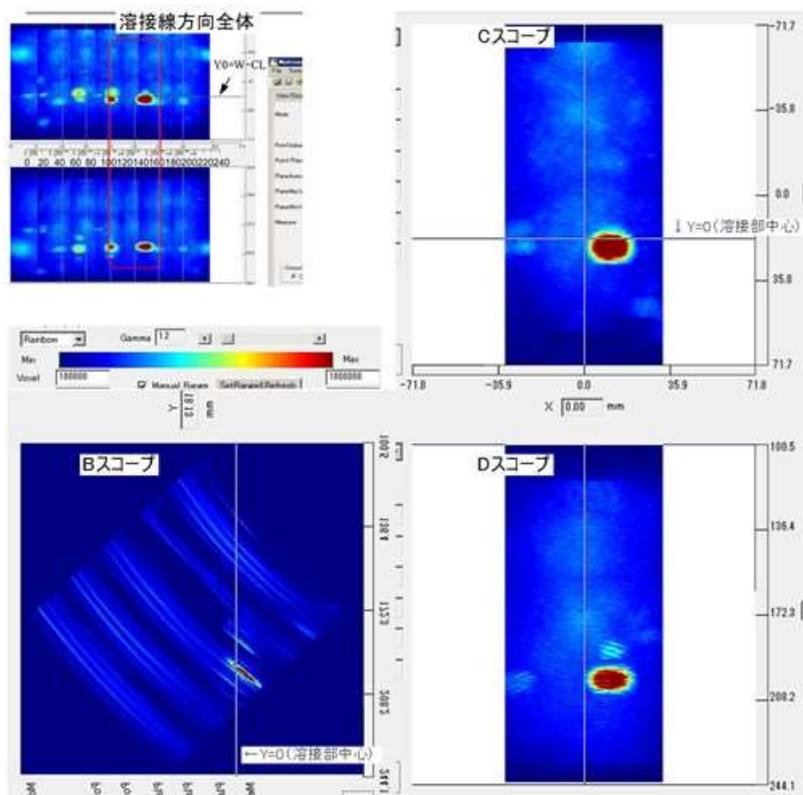
添付図 8-1-48 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=45mm、測定範囲 F)



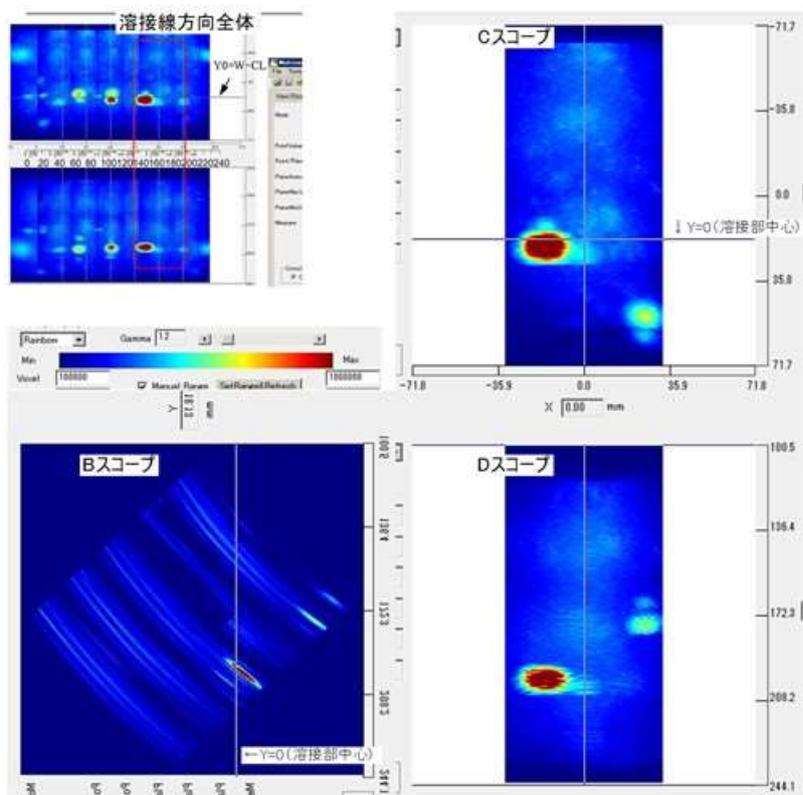
添付図 8-1-49 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=75mm、測定範囲 F)



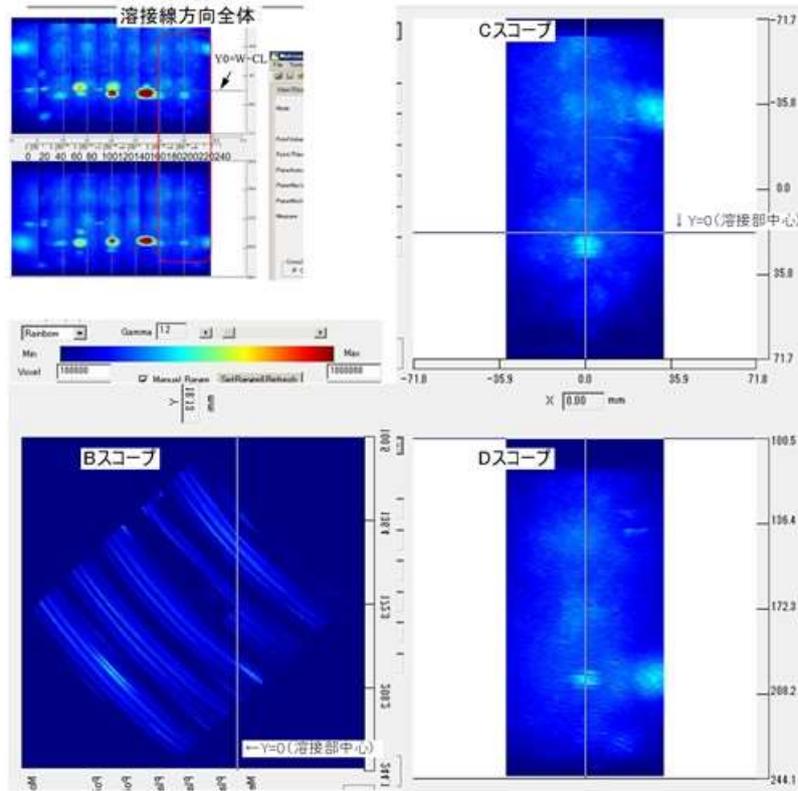
添付図 8-1-50 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=105mm、測定範囲 F)



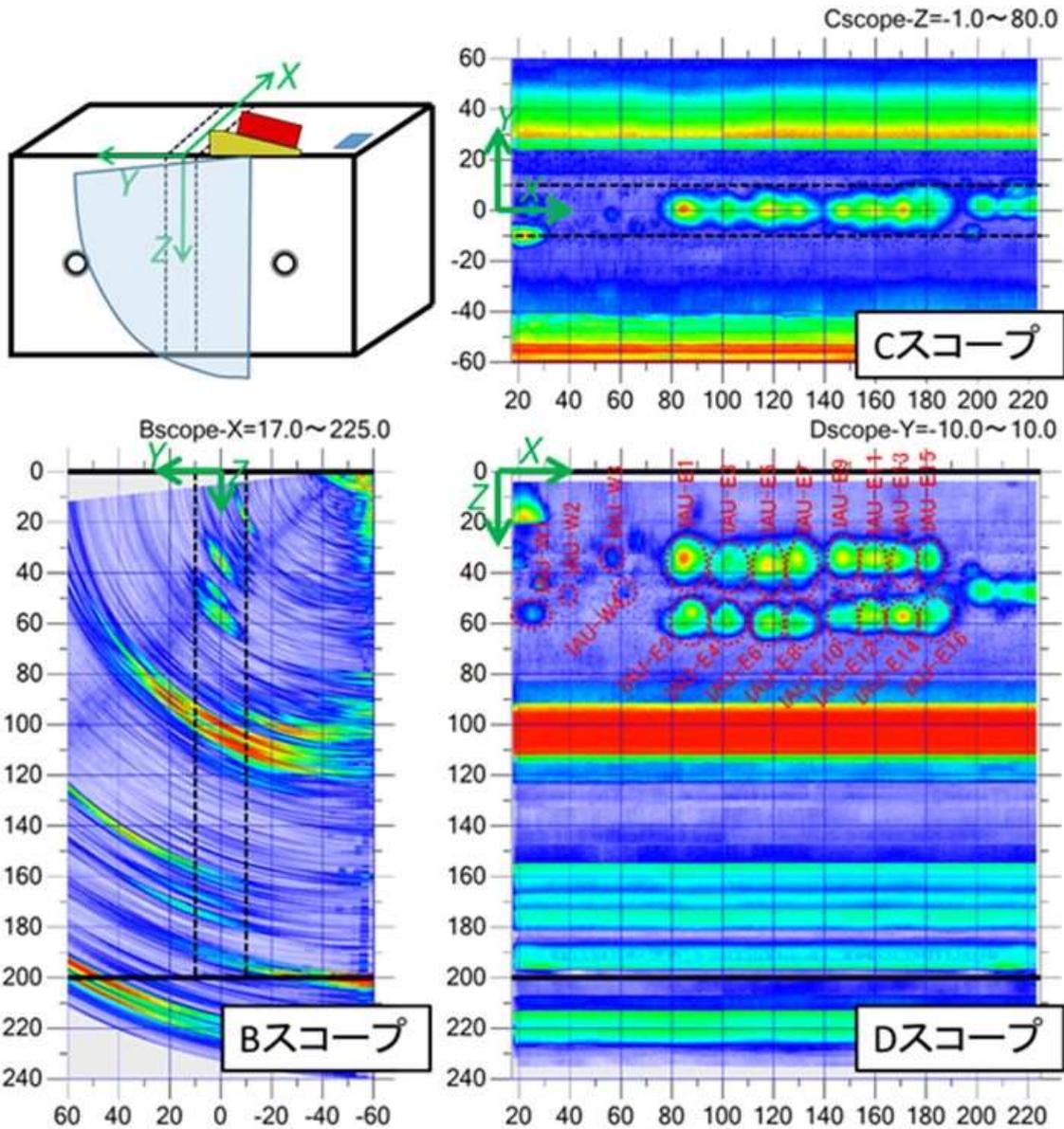
添付図 8-1-51 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=135mm、測定範囲 F)



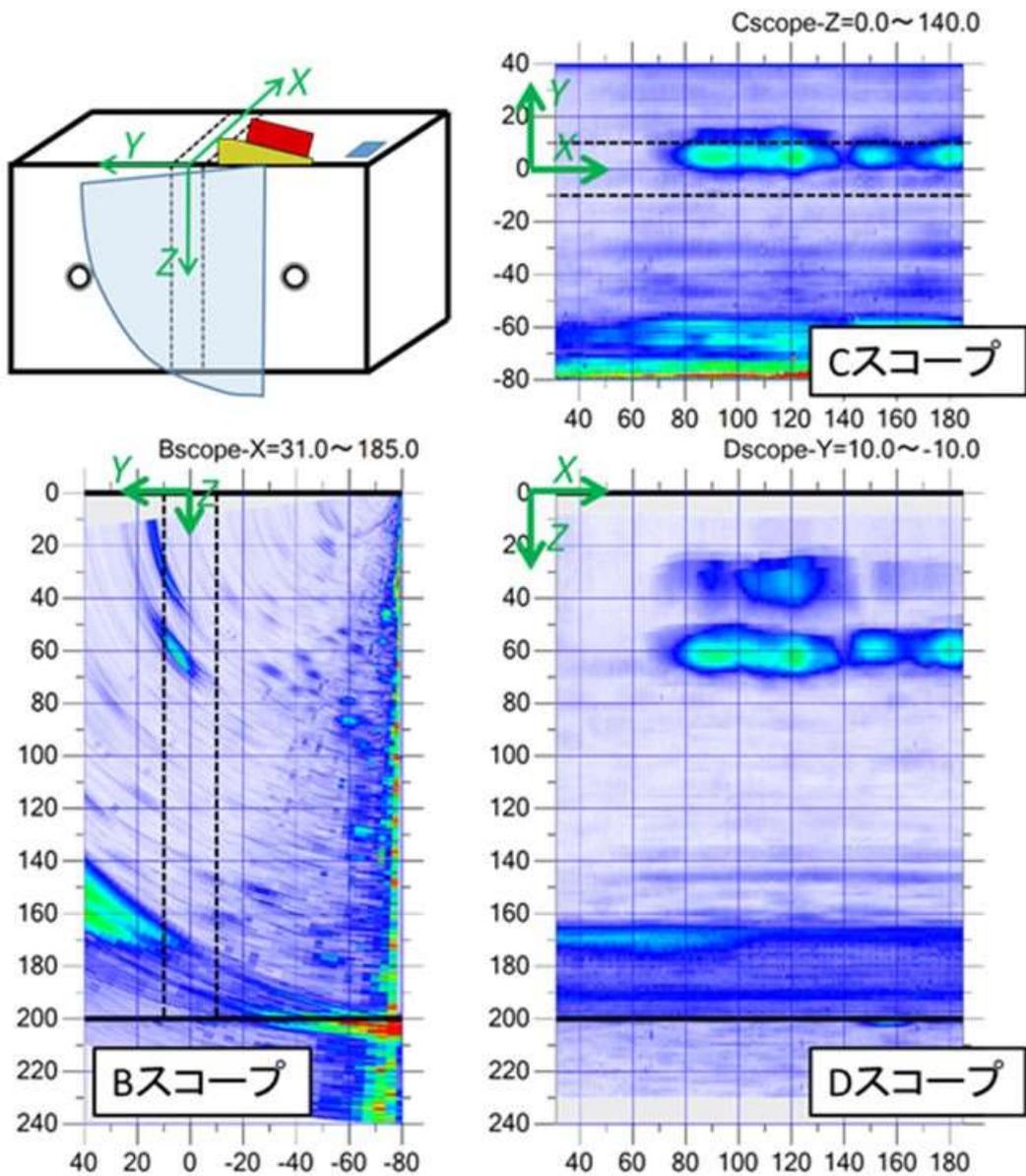
添付図 8-1-52 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=165mm、測定範囲 F)



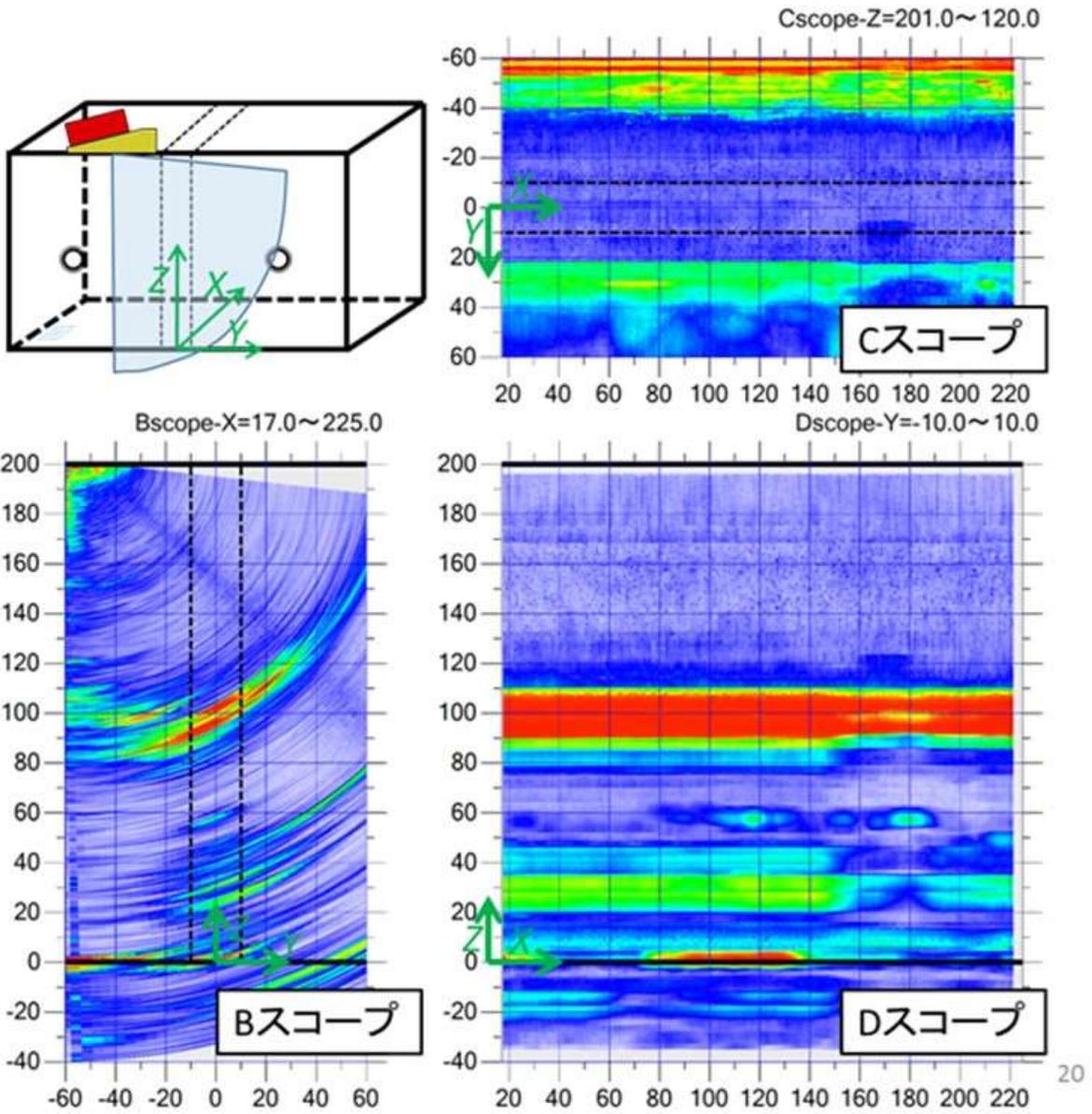
添付図 8-1-53 試験体 B 表面からの FMC-TFM (プローブ位置 X=195mm、測定範囲 F)



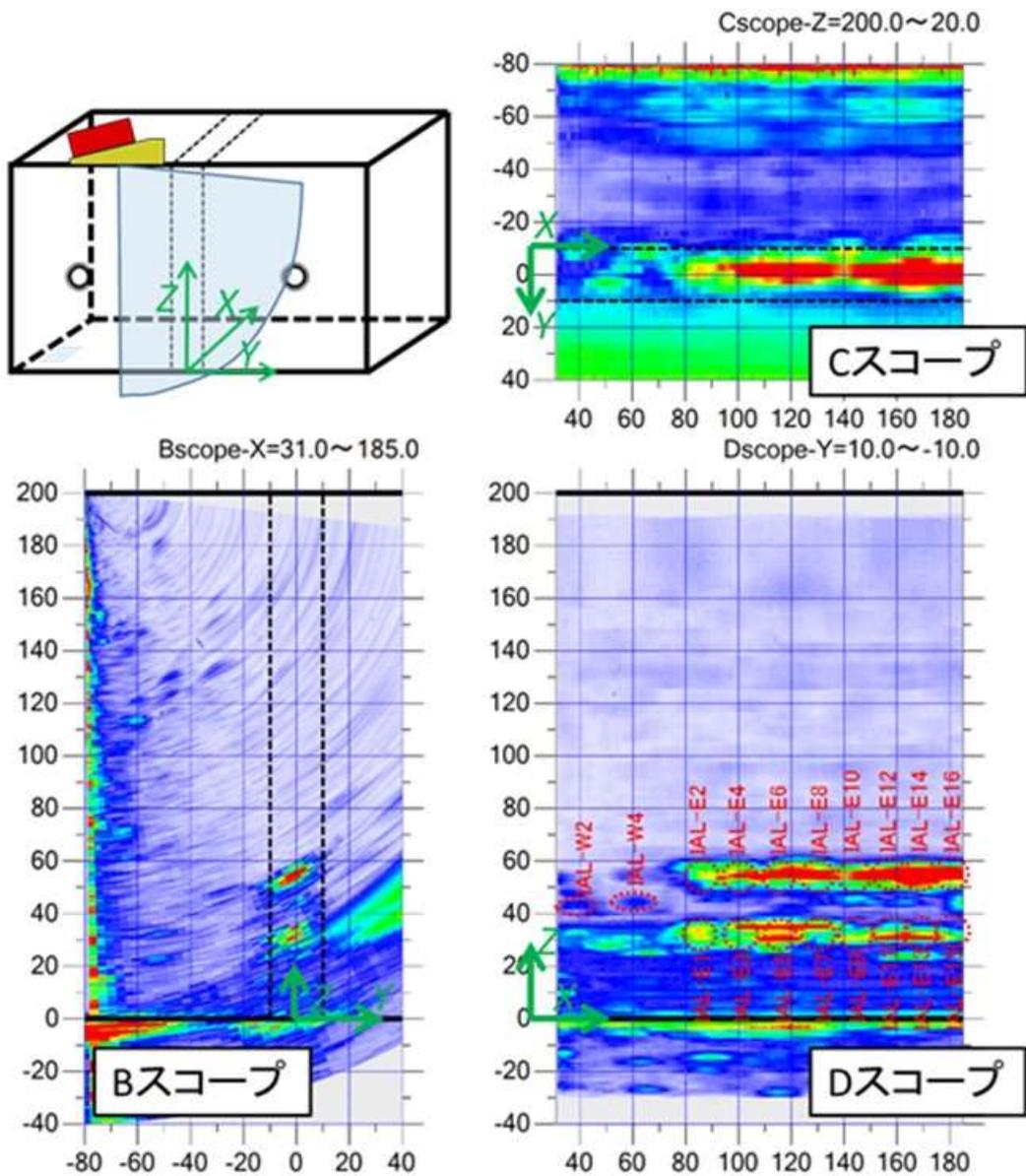
添付図 8-1-54 試験体 A 表面からのフェーズドアレイ法 (0.5mm ピッチプローブ)



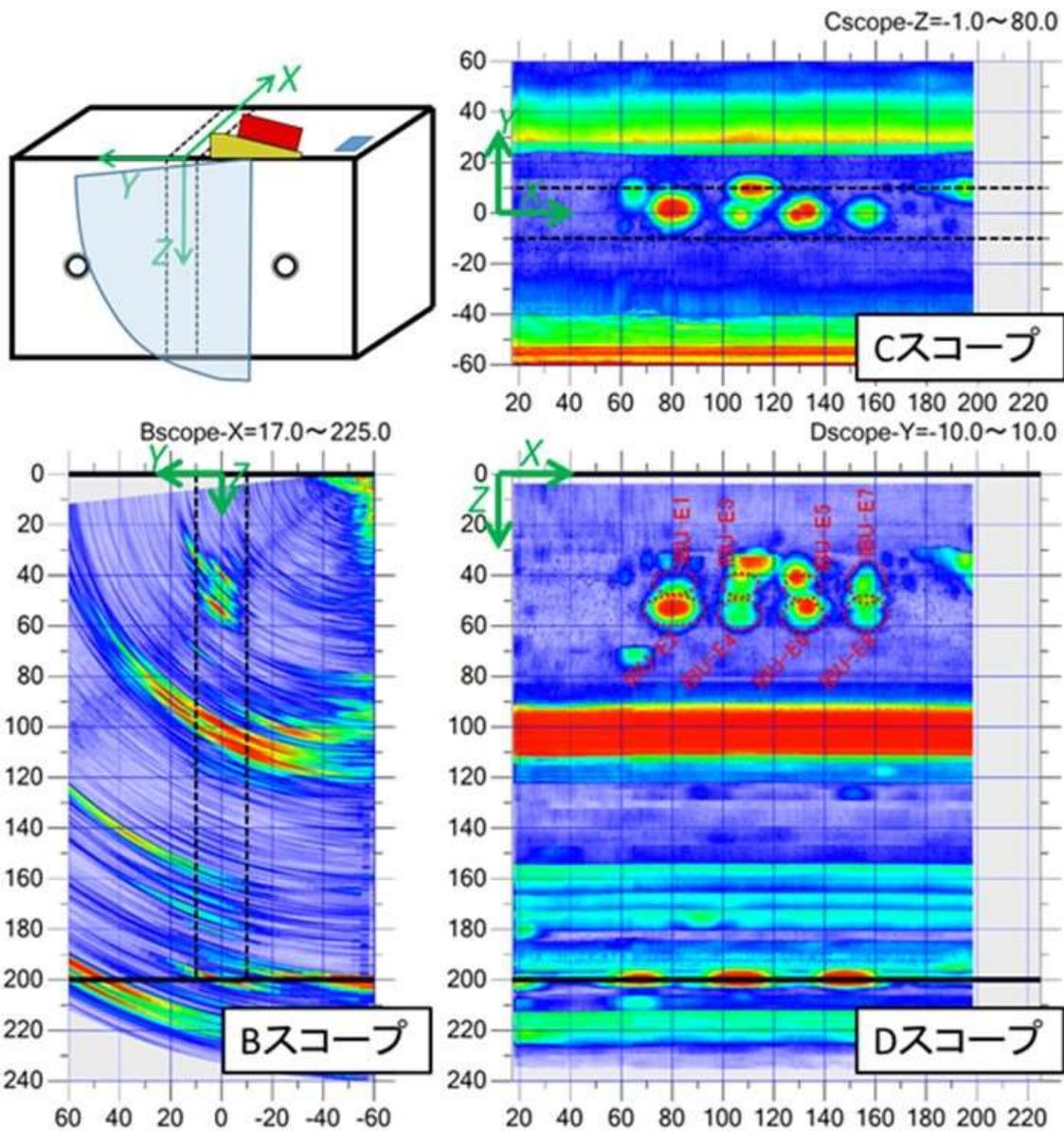
添付図 8-1-55 試験体 A 表面からのフェーズドアレイ法 (2mm ピッチプローブ)



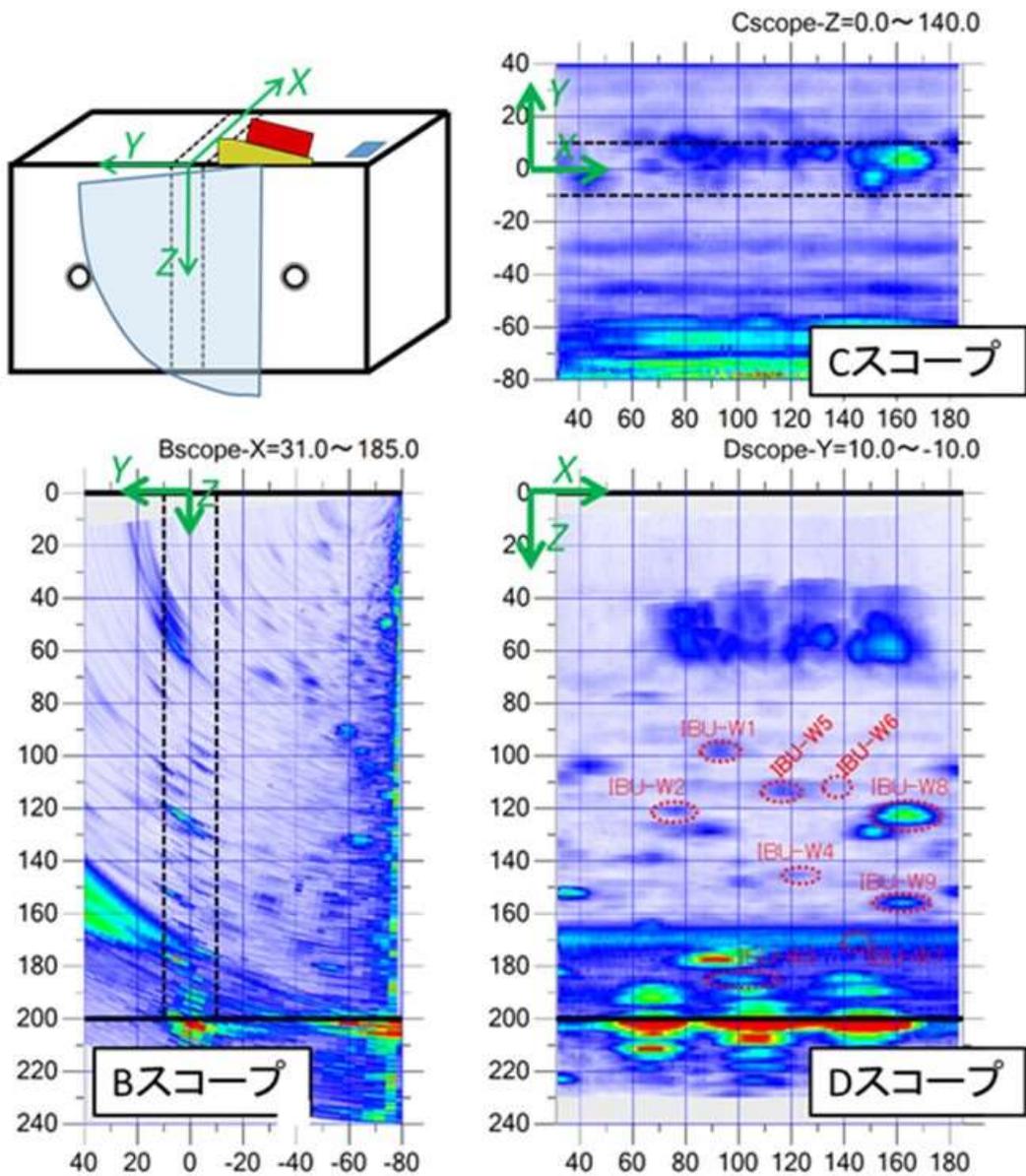
添付図 8-1-56 試験体 A 裏面からのフェーズドアレイ法 (0.5mm ピッチプローブ)



添付図 8-1-57 試験体 A 裏面からのフェーズドアレイ法 (2mm ピッチプローブ)



添付図 8-1-58 試験体 B 表面からのフェーズドアレイ法 (0.5mm ピッチプローブ)



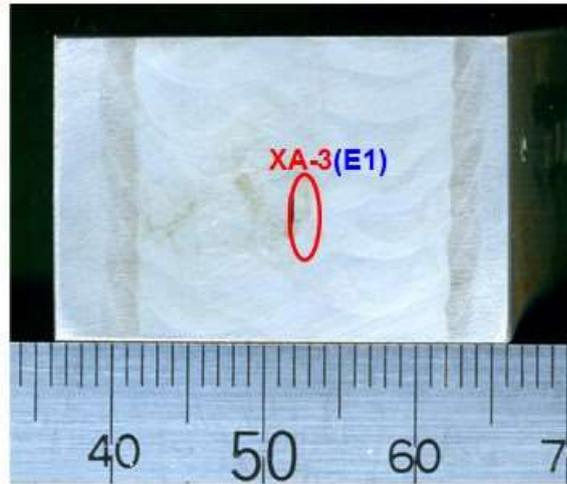
添付図 8-1-59 試験体 B 表面からのフェーズドアレイ法 (2mm ピッチプローブ)



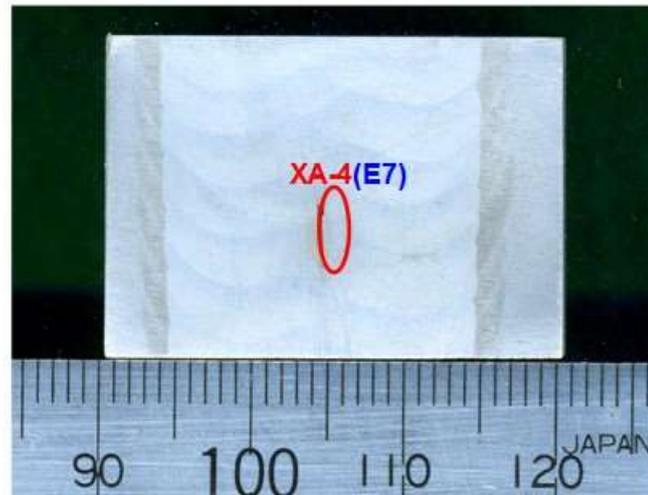
添付図 8-1-60 断面観察番号 A-1 の断面マクロ写真



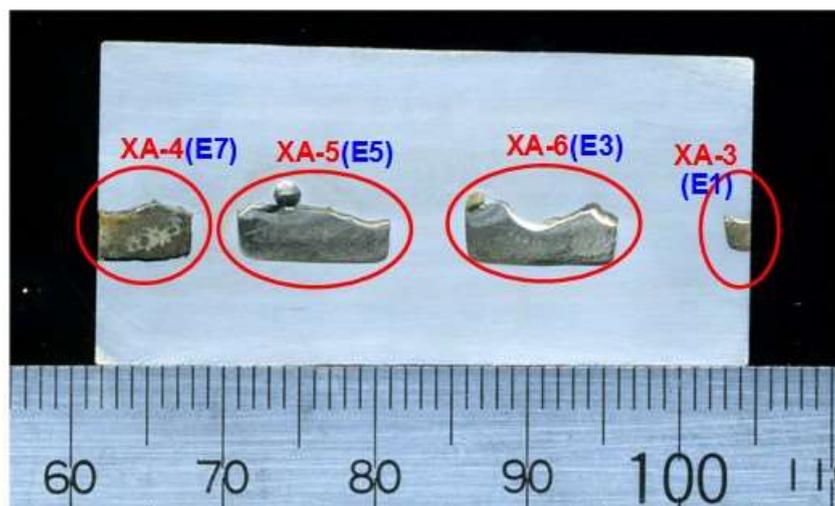
添付図 8-1-61 断面観察番号 A-2 の断面マクロ写真



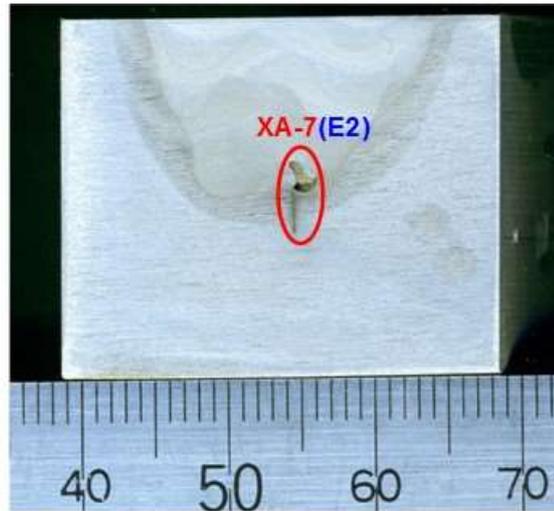
添付図 8-1-62 断面観察番号 A-3 の断面マクロ写真



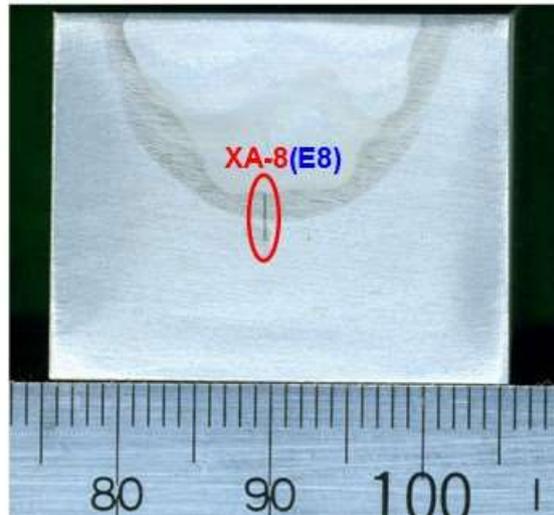
添付図 8-1-63 断面観察番号 A-4 の断面マクロ写真



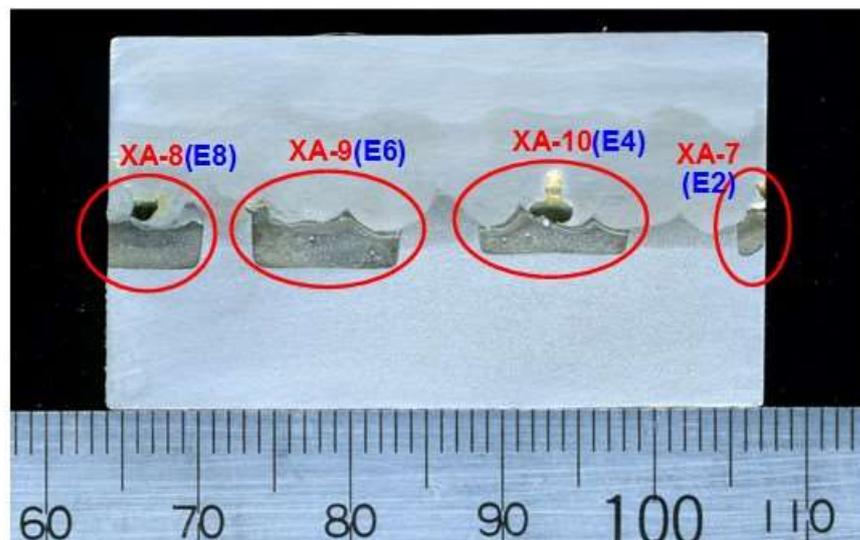
添付図 8-1-64 断面観察番号 A-5、A-6 の断面マクロ写真



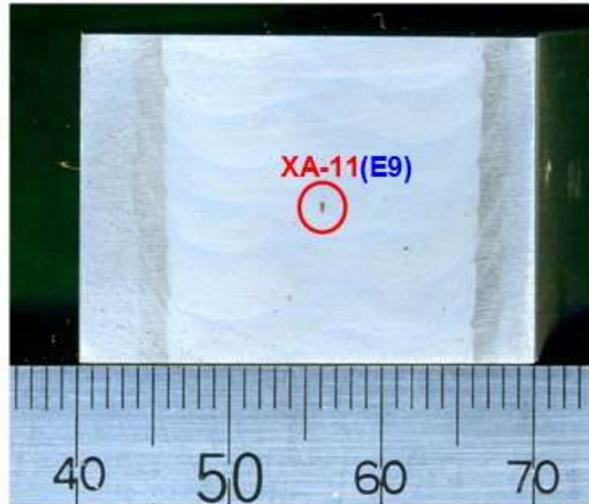
添付図 8-1-65 断面観察番号 A-7 の断面マクロ写真



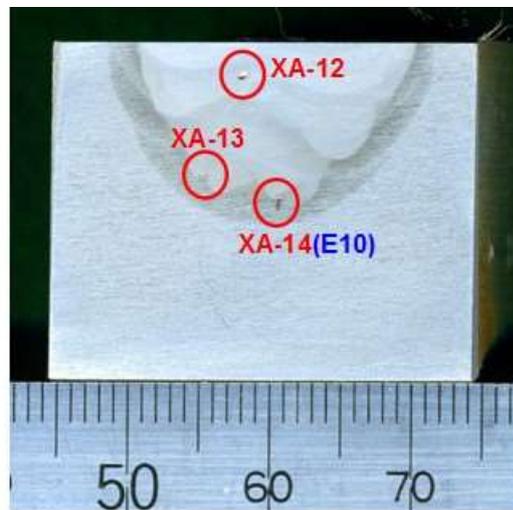
添付図 8-1-66 断面観察番号 A-8 の断面マクロ写真



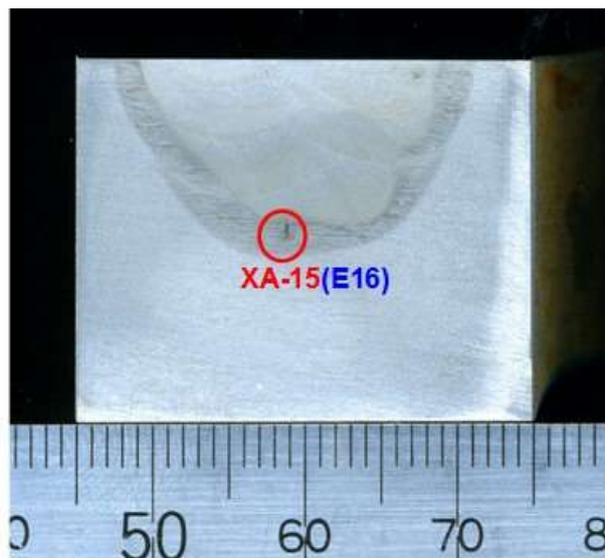
添付図 8-1-67 断面観察番号 A-9、A-10 の断面マクロ写真



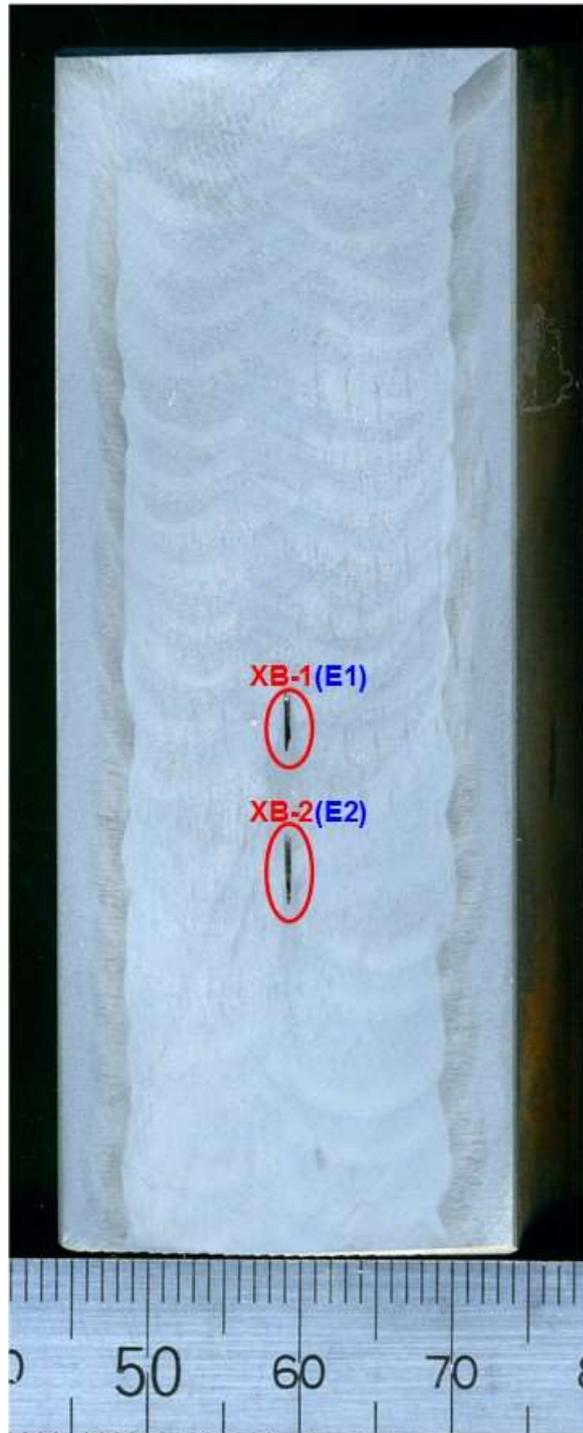
添付図 8-1-68 断面観察番号 A-11 の断面マクロ写真



添付図 8-1-69 断面観察番号 A-12、A-13、A-14 の断面マクロ写真



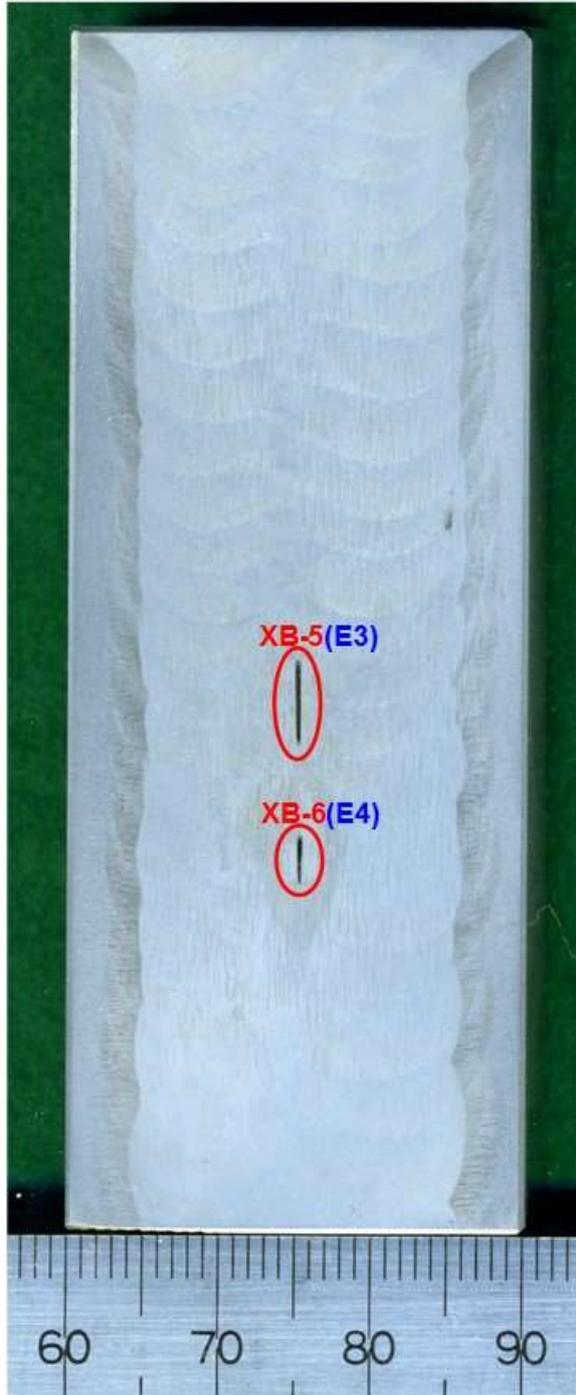
添付図 8-1-70 断面観察番号 A-15 の断面マクロ写真



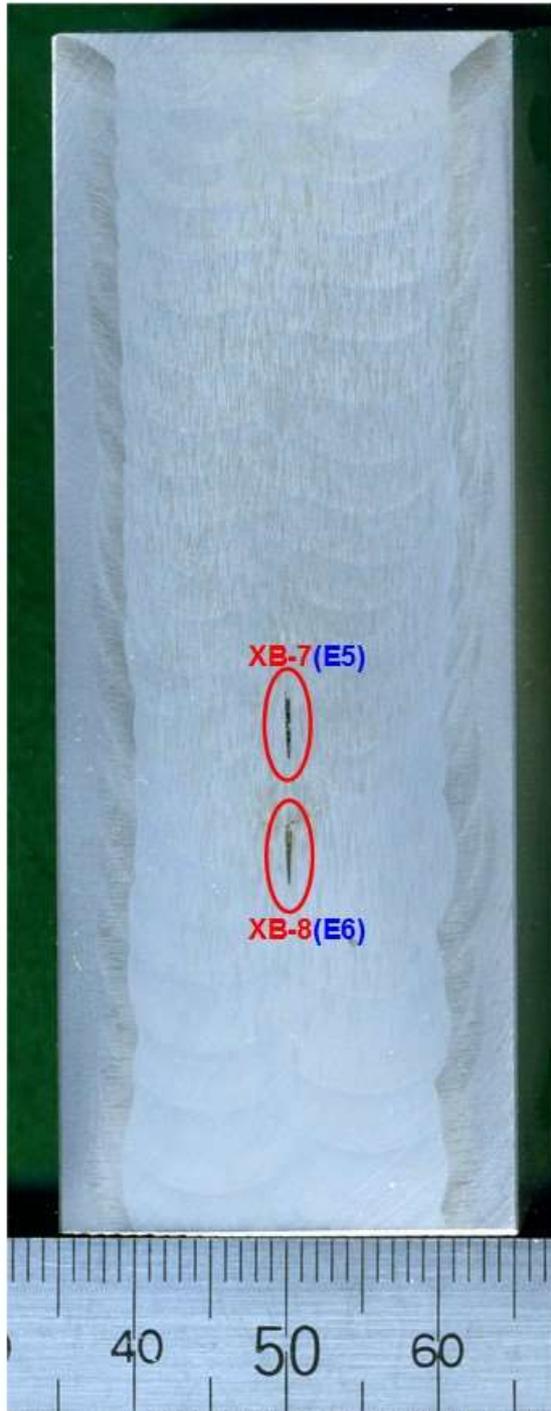
添付図 8-1-71 断面観察番号 B-1、B-2 の断面マクロ写真



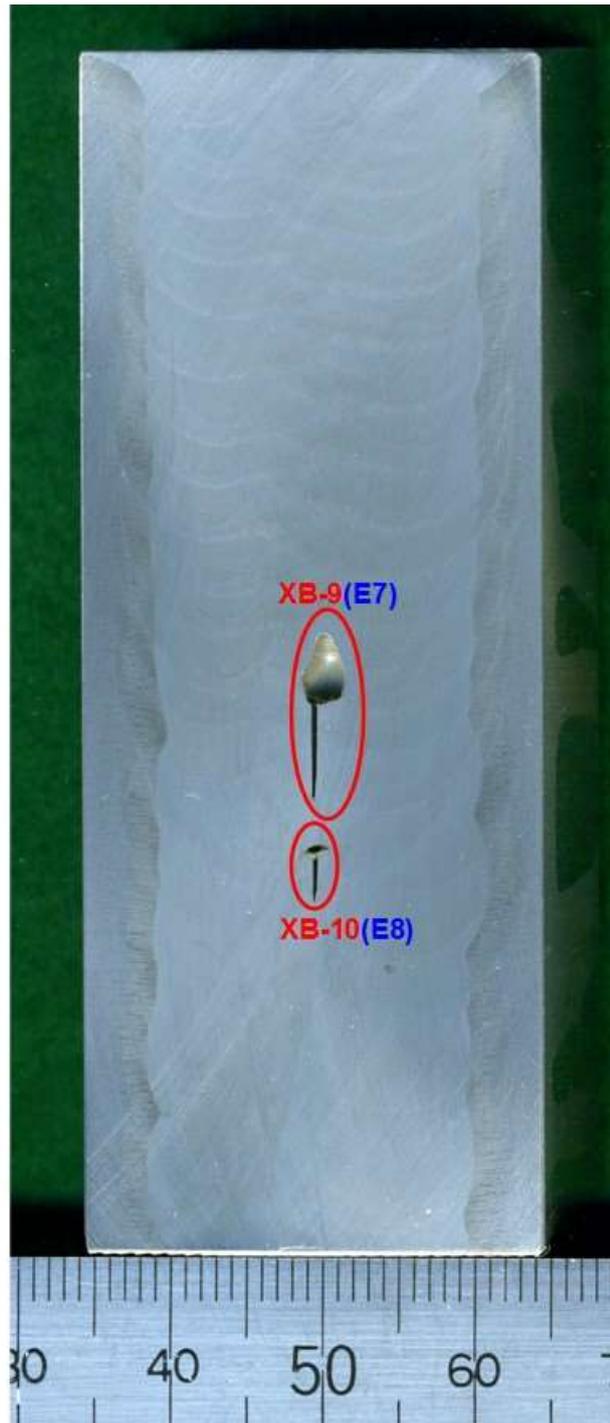
添付図 8-1-72 断面観察番号 B-3、B-4 の断面マクロ写真



添付図 8-1-73 断面観察番号 B-5、B-6 の断面マクロ写真



添付図 8-1-74 断面観察番号 B-7、B-8 の断面マクロ写真



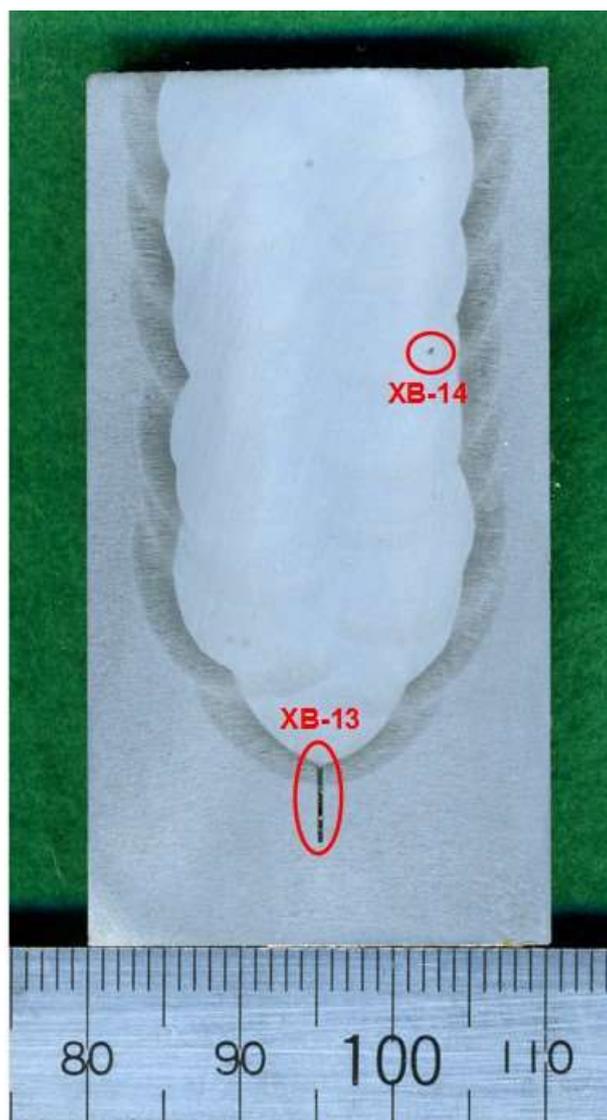
添付図 8-1-75 断面観察番号 B-9、B-10 の断面マクロ写真



添付図 8-1-76 断面観察番号 B-11 の断面マクロ写真



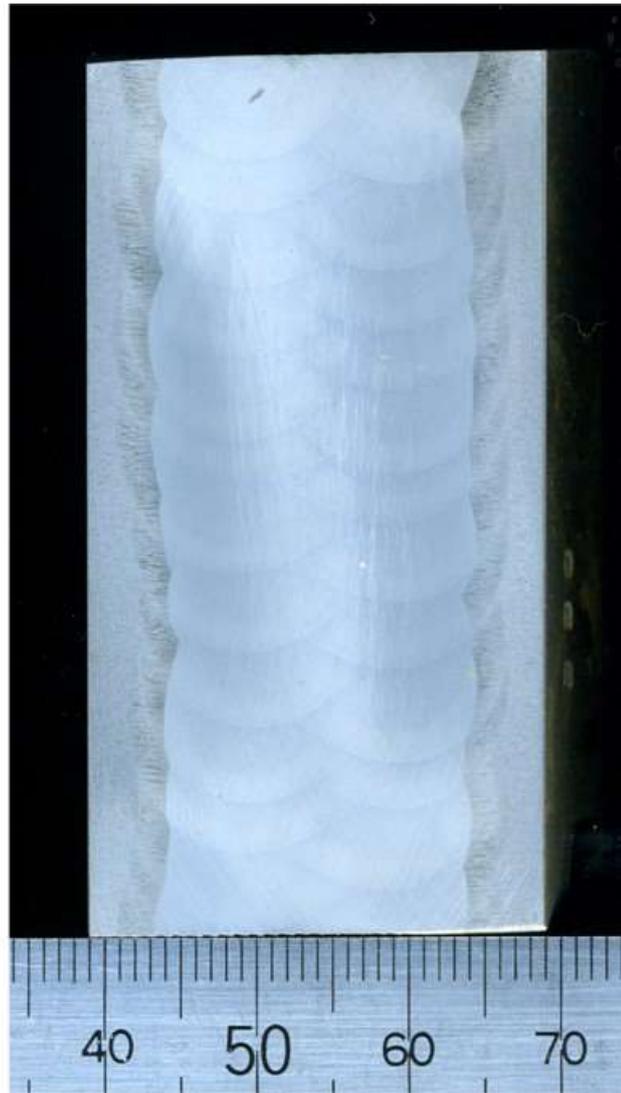
添付図 8-1-77 断面観察番号 B-12 の断面マクロ写真



添付図 8-1-78 断面観察番号 B-13、B-14 の断面マクロ写真



添付図 8-1-79 断面観察番号 B-15 の断面マクロ写真



添付図 8-1-80 欠陥指示位置の断面マクロ写真（無欠陥）



添付図 8-1-81 欠陥指示位置の断面マクロ写真（無欠陥）

第9章 まとめ

9.1 オーバーパック健全性評価手法の構築

構造物が健全であることを判断するためには、破損形態（どの部位がどのように破損するか）と破損モード（局部腐食、延性破壊、脆性破壊などの壊れ方）を適切に想定することが重要であり、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。そのため、オーバーパックに想定される破損形態および破損モードを整理した。そして、全ての破損モードを防止するための健全性評価フローを構築した。

9.2 現象理解の腐食試験

平成 25 年度に立案した計画に基づき、工学規模試験（幌延 URL、地上工学規模試験）および小規模要素試験（不均質試験、経時変化試験）の実施、腐食計測技術の適用性検討について継続して実施した。不均質試験装置の解体を通して、来年度解体予定の工学規模試験装置のうち、幌延 URL 試験装置の解体及び分析方法を検討した。

幌延 URL での試験では、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℃の状態での腐食速度の計測を継続して実施し、3 電極センサーの電流・電圧測定データによる腐食速度の再評価を行った。再評価後の腐食速度は数十 μm /年程度となった。地上工学規模試験装置でも、ガラス固化体からの発熱を想定して、ヒーターによる模擬オーバーパックの加熱を開始した。幌延 URL 同様、3 電極センサーの再評価を行い、再評価後では初期に数百 μm /年となる他は、数十 μm /年程度またはそれより低い値となった。

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、不均質試験装置の解体を実施した。3 次元計測による腐食量は、母材、溶接部、緩衝材に隙間を施した不均質部で大きな差異は認められず、7~11 μm 程度であり、全面腐食が進行していると考えられた。この値は、試験期間約 1 年における腐食量としては、H12 レポートで示された腐食量と整合的である。不均質試験装置の解体時に、来年度の幌延 URL 試験装置の解体に反映するため、① 工学規模試験装置解体手順の作成、② 緩衝材ブロックのサンプリング位置及びサンプリング方法の確認、③ 模擬オーバーパックの脱錆・養生方法の確認、④ 模擬オーバーパック脱錆、計測に伴う移送時の影響確認し、結果を基に、幌延 URL 試験装置の分析項目の洗出し、解体方法及び解体スケジュールの検討、解体治具の設計を実施し、ハンドリングフローを制作し、それらを元に解体計画を提示した。

9.3 メカニズム解明の腐食試験

還元性雰囲気における炭素鋼溶接部の腐食挙動に及ぼす影響を明らかにするために、5 年間および 10 年間の長期浸漬試験の分析評価を実施した。試験片の重量減少から試験期間平均での腐食速度を算出すると、人工海水の 5 年で 3.48~4.91 $\mu\text{m}/\text{y}$ 、人工海水の 10 年で 2.32~3.29 $\mu\text{m}/\text{y}$ 、人工淡水の 5 年で 2.53~2.88 $\mu\text{m}/\text{y}$ および人工淡水の 10 年で 1.40~1.81 $\mu\text{m}/\text{y}$ であった。第 2 次取りまとめにおける炭素鋼の腐食速度 10 $\mu\text{m}/\text{y}$ を十分に下回っており、今回の試験条件の範

囲では、溶接部が炭素鋼オーバーパックスの耐食性を著しく低下させる要因とはならなかった。試験片表面の XRD 分析では、主にシデライト (FeCO_3) やマグネタイト (Fe_3O_4) と推定されるピークが確認された。また、溶接部を含む炭素鋼の水素脆化の可能性を評価するために、拡散性水素吸収量を測定し、今回の拡散性水素濃度のデータを含めても濃度は 0.1ppm を下回っており、この値は臨界水素濃度と比較して十分に小さく、溶接部の水素脆化の生起の可能性は低いと考えられた。

9.4 溶接部の残留応力改善手法の検討

平成 27 年度に実施した溶接残留応力解析で求めた平蓋形状の残留応力分布を初期条件として、予備解析で選定した熱処理条件で外面誘導加熱応力改善法 (EIHSI 法) の解析を実施した。解析の結果では、平蓋形状のオーバーパックスでは、外表面から 40mm より深いところまでの軸方向の引張残留応力を圧縮応力に改善できることを確認した。ただし、今回選定した EIHSI 法の熱処理条件では、周方向応力については外表面から 20mm 程度の深さまでしか圧縮応力に改善できなかった。今後は、全層溶接ではなく部分溶接を対象として EIHSI 法による残留応力の改善のための熱処理条件を確認する。

9.5 オーバーパックスの強度に関する検討

オーバーパックスの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損を評価するための破壊駆動力の算出、さらには複数の欠陥が近接した場合の取扱い方法について有限要素解析により検討した。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した。結果は以下のように要約できる。

塑性崩壊が発生する外圧 (崩壊荷重) と板厚の関係を調べ結果、降伏強度 100MPa 、板厚 50mm の極端な場合でも、崩壊荷重は 19.7MPa となり、実際に想定される 10.7MPa よりも十分大きな値となった。つまり、オーバーパックスは外圧に対して十分な強度を有していると判断できた。

自重に対する材料強度 (降伏強度および破壊靱性値) は十分大きく、溶接深さを小さくしても操業期間中の吊り上げ時の破損は発生しないと判断された。

溶接欠陥を起点とした破損では溶接残留応力が主な駆動力となり、外圧の影響は相対的に小さいことが示された。許容される残留応力値の算出や検査で発見すべきき裂サイズの推定のためのデータを整理した。

近接した溶接欠陥は、合体させて取り扱うことが適当である。相互作用の影響を考慮すべき欠陥間の距離は $0.7a$ 相当であるとの考察結果を得た。

9.6 炭素鋼の脆化量予測に関する検討

反応速度論によりオーバーパックスの照射脆化を予測するモデルを構築し、銅-空孔集合体および転位ループの形成を取り扱った反応速度論モデルを構築した。とくに、欠陥集合体からの欠陥の流出プロセスについて、エネルギー論をもとに組み入れて、欠陥集合体の核生成プロセスを詳細に表現できることに重点を置いてモデルを構築した。構築した反応速度論モデルにより、損傷速

度の増加にしたがい、銅-空孔集合体の直径は減少し、数密度が大きくなることが分かった。さらに損傷速度が高くなるほど、銅を多く含まないボイドが形成されることもわかった。転位ループについては、損傷速度増加につれて、直径は変化せず、数密度は大きくなった。

炭素鋼の脆化因子に及ぼす材料組成の影響と照射温度の影響を明らかにするため、Cu 濃度が 0.5wt%の炭素鋼、FeMnSiCu 合金、FeCu 合金の照射試験用の試験体を作製し、3次元アトムプローブおよび透過型電子顕微鏡による分析を実施した。また、超微小硬さ試験による硬化量の測定と ATP および TEM によるマイクロ組織分析を実施した。分析の結果、Mn と Si の添加は溶質クラスタの形成を促進し、硬化量を増加させることがわかった。照射速度の減少についても溶質クラスタの形成を促進し、硬化量を増加させることがわかった。

炭素鋼の破壊靱性に関する検討では、炭素鋼 (SM400) に対して冷間圧延にて最大 20%の加工を付与することで、照射脆化による硬化を模擬した。そして、90°C の大気中で引張試験および破壊靱性試験を実施し、硬さと破壊靱性値の低下量の関係を整理した。

さらに、 UO_2 の 70GWd/t の使用済燃料を対象としてガラス固化体から放出される中性子線によるはじき出し損傷量を求めた。ガラス固化体を 30 年貯蔵後にオーバーパック内に装荷したケースでは、最も大きな損傷を受けるオーバーパック内側表面において、 $6.07 \times 10^{-8} \text{dpa}$ であり、オーバーパック内での減弱が 0.239 (1/cm) を係数とした指数関数的単調減少が確認できた。

9.7 溶接部の非破壊検査技術の信頼性向上

超音波探傷試験の結果から、フェーズドアレイ法に比べて FMC-TFM では、深さ方向および溶接線方向において欠陥寸法の測定精度が向上する効果が見込めることが確認された。一方で、FMC-TFM では、マトリックスアレイプローブを使用することで画像化の 1 画素あたりの情報量が低下する可能性も確認されており、使用するプローブや信号処理方法についてさらに最適化するための検討が必要となる。

超音波シミュレーションの結果では、欠陥深さ 180mm で欠陥間隔 3mm の場合、フェーズドアレイ法および FMC-TFM ともに欠陥を分離して認識することは難しかった。マトリックスアレイプローブによる FMC-TFM では欠陥間隔 5mm 内に振幅の低下が確認され、複数欠陥を分離できる可能性が高いと考えられた。欠陥の深さが 40mm で欠陥間隔 3mm の場合には、FMC-TFM で指示の振幅低下が確認され、欠陥間隔 5mm で指示が消失し明確に分離できると考えられるものの、フェーズドアレイ法では分離して認識することは難しかった。欠陥間隔が 15mm になるとフェーズドアレイ法でも指示の振幅低下が確認され、複数欠陥を分離して認識できると考えられた。また、短い単独欠陥に対して、フェーズドアレイ法では実際よりも指示長さを過大評価する可能性を示唆する解析結果になったが、FMC-TFM では、実際の長さを指示長さとして測定できる可能性が確認できたため、FMC-TFM はフェーズドアレイ法に比べて溶接欠陥の寸法測定精度および分解能向上に有効な手法になると考えられる。