

平成 29 年度

高レベル放射性廃棄物等の地層処分に
関する技術開発事業

直接処分等代替処分技術開発

報告書

平成 30 年 3 月

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

本報告書は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業として、国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構が実施した平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業「直接処分等代替処分技術開発」の事業報告書である。

目 次

目次.....	i
1. はじめに.....	1-1
1.1 背景と目的.....	1-1
1.2 本事業の全体計画.....	1-1
1.3 平成 29 年度の実施内容.....	1-10
2. 直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および閉じ込め性能評価手法の高度化.....	2-1
2.1 先進的な材料の開発.....	2-1
2.2 閉じ込め性能評価手法の高度化.....	2-59
2.2.1 人工バリア材料の閉じ込め性能の評価に関する研究.....	2-59
2.2.2 使用済燃料の閉じ込め性能に関する研究.....	2-137
2.2.3 多重バリアによる閉じ込め性能評価手法に関する研究.....	2-165
2.3 まとめ.....	2-181
3. 直接処分施設の設計検討.....	3-1
3.1 直接処分方策に関する調査・検討.....	3-1
3.2 人工バリアの設計.....	3-63
3.2.1 処分容器の設計.....	3-63
3.2.2 処分容器の設計における臨界安全に関する検討.....	3-75
3.2.3 緩衝材の設計.....	3-90
3.3 地下施設の概念設計.....	3-132
3.4 搬送・定置設備の概念設計.....	3-153
3.5 まとめ.....	3-158
4. 直接処分施設の設計支援システムの構築.....	4-1
5. その他の代替処分オプションについての調査・検討.....	5-1
6. おわりに.....	6-1
付録 1.....	付 1-1
付録 2.....	付 2-1
付録 3.....	付 3-1

目 次

図 2.1-1	800 °Cおよび 1,200 °Cにおける Ni-Nb-Ta 三元系合金の計算状態図	2-3
図 2.1-2	MD シミュレーションの熱処理プロセス	2-4
図 2.1-3	各合金の原子配置の MD シミュレーション結果	2-5
図 2.1-4	各合金の 2 体分布関数	2-5
図 2.1-5	Fe 基、Cu 基および Ni 基アモルファス合金の時間-温度-変態図の計算結果	2-8
図 2.1-6	三元系アモルファス合金に対する δ パラメータと γ パラメータの相関関係	2-10
図 2.1-7	Ni-Nb-Ta および Zr-Al-Ni _a 合金の δ パラメータと γ パラメータの合金組成依存性	2-11
図 2.1-8	急冷フレーム溶射に用いる急冷遷移制御溶射ガンの模式図	2-12
図 2.1-9	5 mm 厚の Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラス溶射材の外観	2-13
図 2.1-10	5 mm 厚の Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラス溶射材の断面	2-13
図 2.1-11	5 mm 厚の Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラス溶射材の表面の XRD 図形	2-14
図 2.1-12	5 mm 厚の溶射材断面に見られた結晶	2-14
図 2.1-13	Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスの溶射を行なった外径 14 mm の鋼管	2-15
図 2.1-14	Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスの溶射を行なった外径 14 mm の鋼管表面の XRD 図形	2-15
図 2.1-15	Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスの溶射を行なった外径 14 mm の鋼管断面	2-15
図 2.1-16	急冷型フレーム溶射により作製した Cu ₅₆ Ni ₄ Zr ₂₀ Ti ₂₀ 溶射被膜外観	2-16
図 2.1-17	急冷型フレーム溶射により作製した Cu ₅₆ Ni ₄ Zr ₂₀ Ti ₂₀ 溶射被膜断面	2-16
図 2.1-18	急冷型フレーム溶射により作製した Cu ₅₆ Ni ₄ Zr ₂₀ Ti ₂₀ 溶射被膜表面の XRD 図形	2-17
図 2.1-19	新型プラズマ溶射装置を用いて作製した Cu ₅₆ Ni ₄ Zr ₂₀ Ti ₂₀ 溶射被膜外観	2-18
図 2.1-20	新型プラズマ溶射装置を用いて作製した Cu ₅₆ Ni ₄ Zr ₂₀ Ti ₂₀ 溶射被膜断面	2-18
図 2.1-21	新型プラズマ溶射装置を用いて作製した Cu ₅₆ Ni ₄ Zr ₂₀ Ti ₂₀ 溶射被膜表面の XRD 図形	2-18
図 2.1-22	0.5 mm 厚から 2.0 mm 厚の Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスの溶射を行った表面の浸漬試験による表面形態変化	2-19
図 2.1-23	0.5 mm 厚から 2.0 mm 厚の Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスの溶射を行った表面の浸漬試験による表面形状変化	2-20
図 2.1-24	浸出試験概要	2-24
図 2.1-25	浸出試験後の Zr ₅₅ Cu ₃₀ Ni ₅ Al ₁₀ 粉末の SEM-EDS 分析結果	2-29
図 2.1-26	浸出試験後の Zr ₅₇ Cu _{15.4} Ni _{12.6} Al ₁₀ Nb ₅ の SEM-EDS 結果	2-30
図 2.1-27	浸出試験後の Ni ₆₅ Cr ₁₅ P ₁₆ B ₄ 粉末の SEM-EDS 分析結果	2-40
図 2.1-28	浸出試験後の Ni ₆₅ Cr ₁₅ P ₁₆ B ₄ 粉末の SEM-EDS 分析結果	2-41
図 2.1-29	浸出試験後の Ni ₆₅ Cr ₁₃ Nb ₂ P ₁₆ B ₄ 粉末の SEM-EDS 分析	2-42

図 2.1-30	浸出試験後の $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末の SEM-EDS 分析	2-43
図 2.1-31	浸出試験後の $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 粉末の SEM-EDS 分析結果	2-46
図 2.1-32	浸出試験後の SUS316L 粉末の EDS 分析結果	2-50
図 2.1-33	浸出試験後のハステロイ C276 粉末の EDS 分析結果	2-51
図 2.1-34	$\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 溶射試験片のアノード分極挙動に及ぼす NaCl 濃度の影響	2-55
図 2.1-35	$\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 溶射試験片のアノード分極試験後の試験片表面	2-56
図 2.1-36	$\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 溶射試験片のアノード分極挙動に及ぼす研磨の影響	2-56
図 2.1-37	$\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 溶射試験片 (溶射まま) の定電位試験結果	2-56
図 2.1-38	$\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 溶射試験片 (溶射まま) の定電位試験後試験片の外観	2-57
図 2.1-39	$\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 溶射試験片 (溶射まま) の再不動態化電位測定結果	2-58
図 2.2.1-1	D_2O 浸透試験の模式図	2-62
図 2.2.1-2	各温度 (353, 363, 373 K) の飽和 NaHCO_3 水溶液中に各時間 (1.2, 21.6, 259.2 ks) 浸漬させた試料の表面状態	2-63
図 2.2.1-3	飽和 NaHCO_3 水溶液中に 21.6 ks 浸漬させた試料に対する XRD 試験結果	2-64
図 2.2.1-4	各温度 (353, 363, 373 K) の飽和 NaHCO_3 水溶液中に種々の時間浸漬させた試料に対する XRD 試験によって得られた, $\text{Fe}(2\theta = 44.7^\circ)$ の強度に対する $\text{FeCO}_3(2\theta = 32.0^\circ)$ の強度比の経時変化	2-65
図 2.2.1-5	各温度 (353, 363 K) の飽和 NaHCO_3 水溶液中に各時間 (1.2, 21.6, 259.2 ks) 浸漬させた試料の断面観察結果	2-66
図 2.2.1-6	各温度 (353, 363 K) の飽和 NaHCO_3 水溶液中に種々の時間浸漬させた試料の断面観察によって得られた皮膜厚さの経時変化	2-67
図 2.2.1-7	各温度 (353, 363 K) の飽和 NaHCO_3 水溶液中に種々の時間浸漬させた試料の断面観察によって得られた皮膜厚さの経時変化 (横軸: 浸漬時間の平方根)	2-68
図 2.2.1-8	353 K の飽和 NaHCO_3 水溶液中に 21.6 ks 浸漬させた皮膜への D_2O 浸透試験後に TDS で得られた D_2O の脱離速度	2-69
図 2.2.1-9	皮膜を形成した試料に対する D_2O 浸透試験によって得られた D_2O 浸透量の経時変化	2-70
図 2.2.1-10	皮膜内の D_2O の拡散が定常状態の到達したときの推定 D_2O 濃度分布	2-72
図 2.2.1-11	皮膜を形成した試料に対する D_2O 浸透試験によって得られた D_2O 浸透量の経時変化	2-73
図 2.2.1-12	密閉型セルの模式図	2-75
図 2.2.1-13	開放型セルの模式図	2-75
図 2.2.1-14	密閉型セルによる炭素鋼の交流インピーダンス測定 (かぶり厚: 5 mm)	2-76
図 2.2.1-15	密閉型セルによる炭素鋼の交流インピーダンス測定 (かぶり厚: 3 mm)	2-77

図 2.2.1-16	密閉型セルによる炭素鋼の交流インピーダンス測定（かぶり厚：1 mm）	2-78
図 2.2.1-17	密閉型セルのベントナイトの状態変化	2-79
図 2.2.1-18	炭素鋼の腐食速度の経時変化（密閉型セル）	2-80
図 2.2.1-19	炭素鋼の腐食速度の経時変化（開放型セル）	2-81
図 2.2.1-20	250 日後の炭素鋼の腐食表面観察（開放型セル）	2-82
図 2.2.1-21	定常腐食速度のかぶり厚依存性（開放型セル）	2-83
図 2.2.1-22	密閉型セルと開放型セルの腐食速度の比較	2-84
図 2.2.1-23	酸素消費型腐食から水素発生型腐食への移行を説明する模式図	2-85
図 2.2.1-24	本研究で使用した膨潤ベントナイト埋没試験用セルと Cu 箔試料の模式図	2-86
図 2.2.1-25	真空グローブボックスを使用した実験装置の概略図およびグローブボックスの外観	2-87
図 2.2.1-26	試験後の Cu 箔試料写真	2-88
図 2.2.1-27	各種腐食条件下における Cu 箔厚さの経時変化	2-89
図 2.2.1-28	U 字ベント曲げ試験片の形状と、曲げ時の形態と試験片領域	2-92
図 2.2.1-29	U 字ベント曲げ試験片の組み立て手順	2-93
図 2.2.1-30	平板および U 字ベント曲げ試験片の純水膨潤ベントナイト中での浸漬試験後の試料外観写真	2-94
図 2.2.1-31	平板および U 字ベント曲げ試験片の純水膨潤ベントナイト中での浸漬試験後の試験片表面の SEM 写真	2-95
図 2.2.1-32	U 字ベント曲げ試験片の純水および 10 mM NH ₃ 膨潤ベントナイト中での浸漬試験後の試験表面の SEM 写真	2-96
図 2.2.1-33	U 字ベント曲げ試験片の純水および 10 mM NH ₃ 膨潤ベントナイト中での 240 日間の浸漬試験後の試験片表面の SEM 写真	2-97
図 2.2.1-34	平板試験片の純水および 10 mM の NH ₃ 膨潤ベントナイト中での浸漬試験後の試験片表面の SEM 写真	2-99
図 2.2.1-35	U 字ベント曲げ試験片を純水膨潤したベントナイト中で 240 時間浸漬した試料の腐食生成物の剥離箇所の SEM 写真	2-99
図 2.2.1-36	U 字ベント曲げ試験片を純水膨潤したベントナイト中で 240 時間浸漬した試料の表面付近断面の SEM 像ならびに元素マップ像	2-100
図 2.2.1-37	脱気および脱気なし環境で調製した純水膨潤ベントナイト中にて平板試験片に生成した皮膜の動電位分極還元曲線	2-101
図 2.2.1-38	脱気および脱気なし環境で調製した純水膨潤ベントナイト中にて平板試験片に生成した皮膜の動電位分極還元曲線より得られた皮膜厚さ	2-101
図 2.2.1-39	局部腐食が生じたときの皮膜構造の模式図	2-102
図 2.2.1-40	膨潤ベントナイト中での Cu の皮膜形態に及ぼす応力の作用の模式図	2-102
図 2.2.1-41	照射下での電気化学測定系の概略	2-104
図 2.2.1-42	等価回路の構成	2-105

図 2.2.1-43	等価回路の交流インピーダンスの測定結果	2-105
図 2.2.1-44	純チタン電極の交流インピーダンス測定結果	2-106
図 2.2.1-45	純銅電極の交流インピーダンス測定結果	2-106
図 2.2.1-46	図 2.6-5 の高周波数域 (灰色の部分) の拡大図	2-107
図 2.2.1-47	ニッケル基合金電極の交流インピーダンス測定結果	2-107
図 2.2.1-48	処分容器に及ぼす微生物腐食反応の概念図	2-111
図 2.2.1-49	地層処分システムの人工バリア性能における微生物影響の可能性に関する ディシジョンツリー	2-112
図 2.2.1-50	腐食試験に用いた PEEK 製およびチタン製カラム	2-113
図 2.2.1-51	浸漬終了後の代表的なベントナイト試料 (30 °C, 1.3 g cm ⁻³ , 6 ヶ月)	2-116
図 2.2.1-52	炭素鋼片の重量減損	2-116
図 2.2.1-53	浸漬試験 1 年後の炭素鋼片	2-117
図 2.2.1-54	浸漬終了 6 ヶ月後のベントナイト試料	2-117
図 2.2.1-55	異なる圧縮ベントナイト密度条件における炭素鋼腐食量	2-117
図 2.2.1-56	浸漬液中の化学成分の分析結果	2-119
図 2.2.1-57	気相部のガス成分の分析結果	2-119
図 2.2.1-58	浸漬液中の化学成分の分析結果	2-119
図 2.2.1-59	コロニーカウントによる培養法にて取得した圧縮ベントナイト中の生 菌数	2-121
図 2.2.1-60	圧縮ベントナイト中の微生物の全菌体密度	2-123
図 2.2.1-61	圧縮ベントナイト中の硫酸還元菌密度	2-123
図 2.2.1-62	圧縮ベントナイト中のメタン菌密度	2-123
図 2.2.1-63	異なる乾燥密度条件下における炭素鋼片の重量減損量	2-126
図 2.2.1-64	異なる乾燥密度条件下における各微生物増殖の経時変化	2-127
図 2.2.1-65	有効モンモリロナイト乾燥密度と膨潤圧の関係	2-127
図 2.2.1-66	低濃度側溶液へ透過したヨウ化物イオンおよび酪酸イオンのフラック スの時間変化 (乾燥密度 1.4 Mg m ⁻³ , NaCl 濃度 0.5 mol l ⁻¹)	2-130
図 2.2.1-67	低濃度側溶液へ透過した重水およびブタノールのフラックスの時間変 化 (乾燥密度 1.4 Mg m ⁻³ , NaCl 濃度 0.5 mol l ⁻¹)	2-131
図 2.2.1-68	銅試験片との接触面近傍領域 (300 μm×300 μm) の圧縮ベントナイ ト試料の Cu, S, O, Si, Al, Na, Cl マッピング分析結果	2-134
図 2.2.1-69	接触面近傍領域 (36 μm×36 μm) の Cu, S マッピング分析結果と点 分析による元素存在比の分析結果 (クニゲル V1)	2-135
図 2.2.1-70	接触面近傍領域 (40 μm×40 μm) の Cu, S マッピング分析結果と点 分析による元素存在比の分析結果 (クニピア F)	2-135
図 2.2.2-1	使用済燃料中の核種分布および核種放出の概念	2-138
図 2.2.2-2	PWR 使用済燃料における FGR 分布	2-142
図 2.2.2-3	17×17 型 STEP2 燃料における FGR と経験最高線出力の関係	2-142

図 2.2.2-4	FEMAXI コードの解析体系	2-143
図 2.2.2-5	FEMAXI コードにおける燃料ふるまい解析フロー	2-144
図 2.2.2-6	結晶粒および粒界における核分裂生成ガスの状態の模式図	2-145
図 2.2.2-7	FGR 計算フロー	2-145
図 2.2.2-8	計算ケース毎の計算値と実測値の比	2-149
図 2.2.2-9	RB [μ m] と FGR の関係 (PWR 結果の抜粋)	2-150
図 2.2.2-10	FBCOV [%] と FGR の関係 (PWR 結果の抜粋)	2-150
図 2.2.2-11	オプション設定変更前後の FGR 解析値と実測値の比較	2-152
図 2.2.2-12	PWR 使用済燃料の FGR 計算結果	2-155
図 2.2.2-13	BWR 使用済燃料の FGR 計算結果	2-155
図 2.2.2-14	PWR 使用済燃料における高出力運転後の FGR 計算結果	2-156
図 2.2.2-15	燃料溶解速度の全炭酸濃度依存性に関する文献情報	2-157
図 2.2.2-16	溶解速度測定試験に使用した試料の pH と酸化還元電位 (Eh) の関係	2-159
図 2.2.2-17	本研究で得られた溶存ウラン濃度の全炭酸濃度依存性	2-160
図 2.2.2-18	本研究で得られた二酸化ウラン溶解速度の全炭酸濃度依存性	2-161
図 2.2.3-1	縦置き方式と横置き方式における構成要素の位置関係	2-168
図 2.2.3-2	岩盤中の高透水性構造と坑道が交差することを想定した解析モデルの 概念	2-169
図 2.2.3-3	三次元物質移行解析で求められた物質移行挙動の例	2-170
図 2.2.3-4	三次元物質移行解析で求められた物質移行率の例	2-171
図 2.2.3-5	廃棄体、人工バリア、母岩の各領域における収着性物質の残留率	2-171
図 2.2.3-6	地下水流動解析の解析モデルの概念図	2-174
図 2.2.3-7	地下水流動解析結果の例 (結晶質岩)	2-176
図 2.2.3-8	地表までの移行時間の比較	2-177
図 2.2.3-9	各処分場位置からの流跡線の例	2-177
図 3.1-1	超音波探傷試験の実施手順	3-7
図 3.1-2	試験体	3-8
図 3.1-3	フェーズドアレイ法による超音波探傷の測定と走査方向	3-8
図 3.1-4	フェーズドアレイプローブおよびワイヤーエンコーダ	3-9
図 3.1-5	測定装置全容	3-10
図 3.1-6	フェーズドアレイ超音波探傷における測定画像の表示形式	3-12
図 3.1-7	フェーズドアレイ測定透過画像 (ケース 1)	3-13
図 3.1-8	特徴 (EDM スリット) 位置での画像 (ケース 1)	3-14
図 3.1-9	フェーズドアレイ測定透過画像 (ケース 2)	3-15
図 3.1-10	特徴 (EDM スリット) 位置での画像 (ケース 2)	3-16
図 3.1-11	フェーズドアレイ測定透過画像 (ケース 3)	3-17
図 3.1-12	特徴 (EDM スリット) 位置での画像 (ケース 3)	3-18

図 3.1-13	フェーズドアレイ測定透過画像（ケース 4）	3-19
図 3.1-14	特徴（EDM スリット）位置での画像（ケース 4）	3-20
図 3.1-15	フェーズドアレイ測定透過画像（ケース 5）	3-21
図 3.1-16	特徴（EDM スリット）位置での画像（ケース 5）	3-22
図 3.1-17	フェーズドアレイ測定透過画像（ケース 6）	3-23
図 3.1-18	特徴（EDM スリット）位置での画像（ケース 6）	3-24
図 3.1-19	フェーズドアレイ測定透過画像（ケース 7）	3-25
図 3.1-20	フェーズドアレイ測定透過画像（ケース 8）	3-26
図 3.1-21	切断後の試験サンプルの外観写真	3-29
図 3.1-22	各断面のマクロ観察結果	3-30
図 3.1-23	スリットの深さと高さの定義	3-30
図 3.1-24	シミュレーションにおける配置概略図	3-32
図 3.1-25	シミュレーションによるセクタ走査画像	3-32
図 3.1-26	超音波探傷測定とシミュレーション解析の画像の比較	3-36
図 3.1-27	複合処分容器への超音波探傷技術の適用性検討手順	3-38
図 3.1-28	SKB におけるリファレンス複合処分容器	3-39
図 3.1-29	銅容器の外寸	3-39
図 3.1-30	複合処分容器の蓋部付近の構造	3-39
図 3.1-31	蓋部と胴部との隙間、および溶接部に発生する可能性のある欠陥	3-41
図 3.1-32	平面上のスリットでの反射・回折の模式図	3-41
図 3.1-33	複合処分容器の超音波探傷シミュレーションの解析モデル	3-42
図 3.1-34	特徴を付与しない解析モデル（隙間によるエコーの影響の確認）	3-43
図 3.1-35	特徴を付与した解析モデル	3-43
図 3.1-36	STEP1 の超音波探傷解析モデルおよび解析条件	3-44
図 3.1-37	集束距離を変化させたときの解析結果	3-45
図 3.1-38	隙間における影響調査	3-46
図 3.1-39	STEP2 の解析モデル作成のための概略図	3-47
図 3.1-40	STEP2 の超音波探傷シミュレーションモデル	3-47
図 3.1-41	STEP2 の超音波探傷シミュレーション解析結果	3-48
図 3.1-42	隙間からのエコーを特徴とする方法	3-50
図 3.1-43	核セキュリティシステムの概念の検討例（地上施設）	3-52
図 3.1-44	核セキュリティシステムの概念の検討例（地下施設）	3-53
図 3.1-45	UAS を利用した脅威の例	3-57
図 3.1-46	核セキュリティ機器・システムの種類、配置の例	3-61
図 3.2.1-1	臨界計算モデル	3-67
図 3.2.1-2	直接処分体系での実効増倍率計算結果	3-68
図 3.2.1-3	遮へい解析計算モデル概念図	3-71
図 3.2.1-4	処分容器表面の吸収線量率分布	3-73

図 3.2.1-5	緩衝材中の吸収線量率分布 (0° 方向)	3-73
図 3.2.2-1	破損体系と鉄を反射体とした臨界実験データとの相関係数評価結果	3-77
図 3.2.2-2	SiO ₂ 反射体効果における国際ベンチマーク問題の計算体系	3-79
図 3.2.2-3	SiO ₂ およびコンクリート反射体の臨界実験を対象とした相関係数の評価結果	3-80
図 3.2.2-4	燃料粒子の規則的立方格子配列モデルとランダム配列モデル	3-82
図 3.2.2-5	燃料粒子再配置時の臨界性計算モデル概念図	3-82
図 3.2.2-6	中性子吸収材を考慮した使用済燃料 7 体体系の中性子増倍率	3-84
図 3.2.2-7	中性子吸収材を考慮した使用済燃料 12 体体系の中性子増倍率	3-84
図 3.2.2-8	わが国で仮に臨界事象が発生した場合を想定した破損体系	3-88
図 3.2.3-1	PEM 容器仕様	3-94
図 3.2.3-2	解析モデル(ケース i)	3-101
図 3.2.3-3	経過年数に対する腐食膨張量および等価剛性 (複合処分容器)	3-102
図 3.2.3-4	圧縮強度と静弾性係数の関係	3-103
図 3.2.3-5	変形図 (ケース i (標準)) (変形量の表示倍率: 1 倍)	3-104
図 3.2.3-6	緩衝材の最大有効主応力分布 (ケース i (標準)、5 万年後、単位: MPa)	3-105
図 3.2.3-7	岩盤の最大・最小主応力分布、破壊限接近度 (ケース i (標準)、6 万年後)	3-105
図 3.2.3-8	解析モデル図 (ケース ii)	3-107
図 3.2.3-9	経過年数に対する腐食膨張量および等価剛性 (炭素鋼処分容器)	3-108
図 3.2.3-10	変形図 (ケース ii)	3-109
図 3.2.3-11	緩衝材の最大有効主応力分布 (ケース ii、1 千年後、単位: MPa)	3-111
図 3.2.3-12	岩盤の最大・最小主応力分布、破壊限接近度 (ケース ii、1 万年後)	3-111
図 3.2.3-13	e-logP 曲線の再現 (乾燥密度 1.8 Mg m ⁻³ 、ケイ砂混合率 50 wt%)	3-113
図 3.2.3-14	有効応力経路の再現 (乾燥密度 1.8 Mg m ⁻³ 、ケイ砂混合率 50 wt%)	3-113
図 3.2.3-15	軸ひずみ-軸差応力関係の再現 (乾燥密度 1.8 Mg m ⁻³ 、ケイ砂混合率 50 wt%)	3-114
図 3.2.3-16	変形図 (ケース iii) (変形量の表示倍率: 1 倍)	3-114
図 3.2.3-17	緩衝材の最大有効主応力分布 [MPa] (ケース iii、1 千年後)	3-116
図 3.2.3-18	岩盤の最大・最小有効主応力分布、破壊限接近度分布	3-117
図 3.2.3-19	e-logP 曲線図	3-125
図 3.2.3-20	沈下量の経時変化	3-126
図 3.2.3-21	軸ひずみに対する軸差応力 (乾燥密度 1.8 Mg m ⁻³ 、ケイ砂混合率 50 wt%)	3-128
図 3.2.3-22	軸ひずみに対する間隙水圧増分 (乾燥密度 1.8 Mg m ⁻³ 、ケイ砂混合率 50 wt%)	3-129

図 3.2.3-23	軸ひずみに対する軸差応力（乾燥密度 1.8 Mg m ⁻³ 、ケイ砂混合率 30 wt%）	3-129
図 3.2.3-24	軸ひずみに対する間隙水圧増分（乾燥密度 1.8 Mg m ⁻³ 、ケイ砂混合率 30 wt%）	3-130
図 3.2.3-25	有効応力経路（乾燥密度 1.8 Mg m ⁻³ 、ケイ砂混合率 50 wt%）	3-131
図 3.2.3-26	有効応力経路（乾燥密度 1.8 Mg m ⁻³ 、ケイ砂混合率 30 wt%）	3-131
図 3.3-1	練混ぜ手順	3-146
図 3.3-2	材齢と圧縮強度の関係	3-148
図 3.3-3	材齢と引張強度の関係	3-148
図 3.3-4	圧縮強度と引張強度の関係	3-149
図 3.3-5	圧縮強度と静弾性係数の関係	3-150
図 3.3-6	ポアソン比の測定結果	3-150
図 3.3-7	単位容積質量の測定結果	3-151
図 3.4-1	主要坑道移動工程の初期画面および終了画面	3-155
図 3.4-2	処分坑道内進入工程の初期画面および終了画面	3-155
図 3.4-3	処分容器定置工程の初期画面および終了画面	3-155
図 3.4-4	上部緩衝材設置工程の初期画面および終了画面	3-155
図 3.4-5	画面構成	3-156
図 4-1	地層処分エンジニアリング統合支援システム (iSRE) の概念図	4-1
図 4-2	本研究の実施範囲	4-4
図 4-3	仮想環境のイメージ	4-5
図 4-4	モニタリングデータ更新の IF による連携	4-6
図 4-5	モニタリングデータ更新のインターフェース画面	4-7
図 4-6	積算 DB と外部積算システムとの関係の概念	4-8
図 4-7	積算機能の表示画面	4-9
図 4-8	モニタリング機能の表示画面	4-10
図 4-9	点検機能の表示画面	4-11
図 4-10	メンテナンス機能の表示画面	4-13
図 4-11	ユーザー、管理者、開発者の関係性と利用方法	4-14
図 4-12	文書管理機能を構成する各機能	4-15
図 4-13	イベントの構成例	4-17
図 4-14	イベント機能の表示画面	4-18
図 4-15	ファイル管理イメージの対比	4-19
図 4-16	三次元モデルからのアクセス機能画面	4-20
図 4-17	文献調査結果から推測された処分場候補地周辺の地質	4-24
図 4-18	概要調査結果から推測された処分場候補地周辺の地質	4-24

図 4-19	文献調査報告書の閲覧	4-26
図 4-20	地質・地形データの閲覧	4-26
図 4-21	各種議事録の登録	4-27
図 4-22	概要調査計画書の登録時のイベントの設定	4-27
図 4-23	概要調査計画書の閲覧	4-28
図 4-24	調査結果（地質データ）の登録	4-28
図 4-25	概要調査報告書の登録	4-29
図 4-26	自治体関係データの閲覧	4-30
図 4-27	各種協議資料の登録	4-30
図 4-28	3D 地質モデル（文献）の閲覧	4-32
図 4-29	図面（三次元モデル）の閲覧と文献調査時の処分場概念検討時のレイアウト図（三次元モデル）のビューワ表示のイメージ	4-32
図 4-30	解析の検討結果の登録	4-33
図 4-31	図面（三次元モデル）の登録と概要調査に基づく概念設計の結果（処分場レイアウト）のビューワ表示のイメージ	4-33
図 4-32	図面管理 DB における三次元モデル選択時のビューワ機能画面	4-34
図 4-33	文献調査段階（前段階）における設計情報に関するイベント検索の結果	4-34
図 4-34	イベント管理画面におけるイベント登録時の操作画面	4-35
図 4-35	設計条件（概要）の閲覧	4-36
図 4-36	安全評価解析結果の参照（e-PAR との連携）	4-36
図 4-37	安全評価報告書（概要）の登録	4-36
図 4-38	廃棄体（使用済燃料）定置状況のイメージ	4-37
図 4-39	定置後のモニタリング状況のイメージ	4-38
図 4-40	人工バリア設置計画書の登録	4-40
図 4-41	人工バリアモニタリング記録の閲覧および登録	4-41
図 4-42	処分孔モニタリング記録の閲覧	4-43
図 4-43	廃棄体定置計画書の登録	4-43
図 4-44	廃棄体定置記録の登録とその時の作業イメージ	4-44
図 4-45	図面管理 DB における三次元モデルによる定置状況確認時の処分坑道のビューワ機能画面	4-45
図 4-46	処分孔モニタリング記録の閲覧および登録	4-46
図 4-47	管理者によるユーザー種別に応じたユーザー情報登録時の画面	4-49
図 4-48	ユーザー種別ごとの権限設定状況（国民ユーザーの例）	4-50
図 4-49	ユーザー種別ごとの操作制限（国民ユーザーの例）	4-50
図 5-1	廃棄体パッケージの種類	5-25
図 5-2	本検討で想定した超深孔処分の概念図	5-32
図 5-3	熱対流などによる廃棄体定置領域およびシール材領域中の移行の概念図	5-34
図 5-4	地下水流れによる周辺母岩中の移行の概念図	5-34

図 5-5	熱対流などによる移行と地下水流れによる移行の組み合わせイメージ図	5-36
図 5-6	熱対流などによる累積移行率と地下水流れによる累積移行率の比較（対象核種：C-14）	5-39
付図 1-1	横置き方式の人工バリアおよび坑道の仕様	付 1-1
付図 1-2	縦置き方式の人工バリアおよび坑道の仕様	付 1-2
付図 1-3	三次元物質移行解析のモデル形状と領域区分（縦置き方式の場合の例）	付 1-3
付図 1-4	沿岸域の場の概念図	付 1-7
付図 1-5	岩盤中での核種の移行が開始する時期まで処分場が塩淡境界よりも海側にとどまるために必要な現汗線からの距離	付 1-8
付図 2-1	緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布（No. 1, 1,000年後）	付 2-2
付図 2-2	緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布（No. 2, 1,000年後）	付 2-2
付図 2-3	緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布（No. 3, 1,000年後）	付 2-2
付図 2-4	緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布（No. 4, 5万年後）	付 2-3
付図 2-5	緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布（No. 5, 5万年後）	付 2-3
付図 2-6	緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布（No. 6, 5万年後）	付 2-3
付図 2-7	緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布（No. 7, 1,000年後）	付 2-4
付図 2-8	緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布（No. 8, 1,000年後）	付 2-4
付図 2-9	緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布（No. 9, 1,000年後）	付 2-5
付図 2-10	緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布（No. 10, 1,000年後）	付 2-5
付図 2-11	緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布（No. 11, 1,000年後）	付 2-5
付図 2-12	岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度（No. 1, 1万年後）	付 2-6
付図 2-13	岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度（No. 2, 1万年後）	付 2-6
付図 2-14	岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度（No. 3, 1万年後）	付 2-6

付図 2-15	岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 4, 6 万年後)	付 2-7
付図 2-16	岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 5, 6 万年後)	付 2-7
付図 2-17	岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 6, 6 万年後)	付 2-8
付図 2-18	岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 7, 1 万年後)	付 2-8
付図 2-19	岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 8, 1,000 年後)	付 2-8
付図 2-20	岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 9, 7,000 年後)	付 2-9
付図 2-21	岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 10, 1 万年後)	付 2-9
付図 2-22	岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 11, 1 万年後)	付 2-9

表 目 次

表 1.1-1	本事業で利用・引用する主な過去の研究開発成果	1-1
表 2.1-1	500 K 等温熱処理条件(構造緩和)における MD シミュレーション結果から算出したアモルファス合金の物性	2-7
表 2.1-2	代表的な金属ガラスの VFT パラメータ (η_0 , B , T_0), ガラス遷移温度 (T_g) および D^* ならびに m 値	2-8
表 2.1-3	金属ガラス $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ 粉末の組成	2-22
表 2.1-4	金属ガラス $Zr_{57}Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}Nb_5$ 粉末の組成	2-22
表 2.1-5	金属ガラス $Ni_{65}Cr_{15}P_{16}B_4$ 粉末の組成	2-22
表 2.1-6	金属ガラス $Ni_{65}Cr_{13}Nb_2P_{16}B_4$ 粉末の組成	2-22
表 2.1-7	金属ガラス $Cu_{60}Zr_{30}Ti_{10}$ 粉末の組成	2-23
表 2.1-8	SUS316L 粉末の組成	2-23
表 2.1-9	ハステロイ C276 粉末の組成	2-23
表 2.1-10	$Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0 M)	2-26
表 2.1-11	$Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M)	2-27
表 2.1-12	$Zr_{57}Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}Nb_5$ 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M)	2-28
表 2.1-13	EDS 分析による $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ 粉末の元素比	2-29
表 2.1-14	EDS 分析による $Zr_{57}Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}Nb_5$ 粉末の元素比	2-30
表 2.1-15	$Ni_{65}Cr_{15}P_{16}B_4$ 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0 M)	2-32
表 2.1-16	$Ni_{65}Cr_{15}P_{16}B_4$ 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M)	2-33
表 2.1-17	$Ni_{65}Cr_{15}P_{16}B_4$ 粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、NaCl 濃度 0 M)	2-34
表 2.1-18	$Ni_{65}Cr_{15}P_{16}B_4$ 粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M)	2-35
表 2.1-19	$Ni_{65}Cr_{13}Nb_2P_{16}B_4$ 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0 M)	2-36
表 2.1-20	$Ni_{65}Cr_{13}Nb_2P_{16}B_4$ 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M)	2-37
表 2.1-21	$Ni_{65}Cr_{13}Nb_2P_{16}B_4$ 粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、NaCl 濃度 0 M)	2-38
表 2.1-22	$Ni_{65}Cr_{13}Nb_2P_{16}B_4$ 粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M)	2-39
表 2.1-23	EDS 分析による $Ni_{65}Cr_{15}P_{16}B_4$ 粉末の元素比	2-40
表 2.1-24	EDS 分析による $Ni_{65}Cr_{15}P_{16}B_4$ 粉末の元素比	2-41
表 2.1-25	EDS 分析による $Ni_{65}Cr_{13}Nb_2P_{16}B_4$ 粉末の元素比	2-42
表 2.1-26	EDS 分析による $Ni_{65}Cr_{13}Nb_2P_{16}B_4$ 粉末の元素比	2-43
表 2.1-27	$Cu_{60}Zr_{30}Ti_{10}$ 粉末の浸出試験結果	2-45
表 2.1-28	EDS 分析による $Cu_{60}Zr_{30}Ti_{10}$ 粉末の元素比	2-46
表 2.1-29	SUS316L 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気)	2-48
表 2.1-30	SUS316L 粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、試験開始から 2,472 時間後)	2-49
表 2.1-31	ハステロイ C276 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気)	2-49

表 2.1-32	ハステロイ C276 粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、試験開始から 2,472 時間後)	2-50
表 2.1-33	EDS 分析による SUS316L 粉末の元素比	2-51
表 2.1-34	EDS 分析による浸出試験後のハステロイ C276 粉末の元素比	2-52
表 2.2.1-1	各種条件における Cu 箔の腐食速度と試料表面生成物	2-90
表 2.2.1-2	試料として用いた無酸素銅の化学組成	2-92
表 2.2.1-3	U 字ベント曲げ試験片と板状試験片の 7, 30, 60 日間純水膨潤ベントナイト中で浸漬後の試験片表面の EDS 測定による原子分率	2-95
表 2.2.1-4	U 字ベント曲げ試験片の純水膨潤ベントナイト中で浸漬後の試験片表面の EDS 測定による原子分率	2-98
表 2.2.1-5	U 字ベント曲げ試験片の 10 mM NH ₃ 膨潤ベントナイト中で浸漬後の試験片表面の EDS 測定による原子分率	2-98
表 2.2.1-6	U 字ベント曲げ試験片を純水膨潤したベントナイト中で 240 時間浸漬した試料の腐食生成物の剥離箇所での測定による原子分率	2-100
表 2.2.1-7	測定に使用した UNS N10276 (C276) の化学組成	2-103
表 2.2.1-8	ガンマ線照射下での各種電極の腐食速度の推定結果	2-108
表 2.2.1-9	浸漬試験における試料リスト	2-115
表 2.2.1-10	ベントナイト試料中の DNA 濃度	2-122
表 2.2.1-11	ヨウ化物イオン、酢酸イオン、酪酸イオン実効拡散係数、形状因子の実測値	2-130
表 2.2.1-12	重水およびブタノールの実効拡散係数、形状因子の実測値	2-131
表 2.2.2-1	国内向け瞬時放出割合の設定値 (平成 28 年度の暫定値)	2-139
表 2.2.2-2	国内向け長期溶解速度の設定値 (平成 28 年度の暫定値)	2-139
表 2.2.2-3	FEMAXI のバージョン一覧	2-141
表 2.2.2-4	計算対象とした使用済燃料サンプルと FGR 実測値	2-146
表 2.2.2-5	変量させたオプション設定とパラメータ一覧	2-148
表 2.2.2-6	模擬する PWR 使用済燃料の特性	2-153
表 2.2.2-7	模擬する BWR 使用済燃料の特性	2-154
表 2.2.2-8	解析結果を踏まえた PWR 使用済燃料の FGR	2-162
表 2.2.2-9	瞬時放出割合一覧 (諸外国の設定を付記)	2-163
表 2.2.2-10	主な不確実性因子	2-163
表 2.2.3-1	ニアフィールドの構成要素のつながりに基づき抽出した主な移行経路	2-168
表 2.2.3-2	定置方式の選択による閉じ込め性能の違いに関する知見のまとめ	2-172
表 2.2.3-3	設計オプションとして想定した処分場の位置	2-174
表 2.2.3-4	地下水流動解析の解析パラメータ	2-175

表 2.2.3-5	処分場位置の選択による天然バリア中での非収着性核種 (C-14 など) の閉じ込め性能の知見のまとめ	2-178
表 2.2.3-6	設計オプションの選択による閉じ込め性能の違いの特徴のまとめ	2-180
表 3.1-1	探傷条件	3-9
表 3.1-2	超音波探傷の測定ケース一覧	3-11
表 3.1-3	読み取った特徴の位置と大きさ	3-27
表 3.1-4	特徴の相対位置	3-28
表 3.1-5	各切断面における特徴の位置と大きさ	3-30
表 3.1-6	シミュレーション解析設定値	3-31
表 3.1-7	シミュレーション解析から求めた 8 mm の特徴の位置と大きさ	3-32
表 3.1-8	特徴の大きさに関する誤差	3-34
表 3.1-9	相対位置に関する誤差	3-35
表 3.1-10	解析と実測の比較	3-36
表 3.1-11	検出可否、分離性に関する測定値と解析値の比較	3-37
表 3.1-12	銅容器の寸法	3-40
表 3.1-13	複合処分容器の超音波探傷シミュレーション解析の実施手順	3-43
表 3.1-14	摩擦攪拌接合内に特徴をつけ、表面部を補修する方法	3-49
表 3.1-15	主な核セキュリティシステム・機器の種類および設置機器の例 (1/3)	3-54
表 3.1-15	主な核セキュリティシステム・機器の種類および設置機器の例 (2/3)	3-55
表 3.1-15	主な核セキュリティシステム・機器の種類および設置機器の例 (3/3)	3-56
表 3.1-16	UAS 検知技術の比較 (1/2)	3-58
表 3.1-16	UAS 検知技術の比較 (2/2)	3-59
表 3.1-17	IAEA 核セキュリティシリーズ文書の要求事項に基づいて処分施設に適 用される基本的な核セキュリティシステム	3-60
表 3.1-18	施設設計の具体化に並行して国・施設の特徴などを考慮して付加すべき と考えられる核セキュリティ要件	3-62
表 3.2.1-1	使用済燃料の基本仕様	3-64
表 3.2.1-2	処分容器の基本仕様	3-65
表 3.2.1-3	燃料仕様	3-65
表 3.2.1-4	収納可能な最低燃焼度	3-69
表 3.2.1-5	遮へい解析条件	3-72
表 3.2.1-6	緩衝材中での吸収線量率	3-74
表 3.2.2-1	評価対象とした鉄反射体臨界実験シリーズの概要	3-77
表 3.2.2-2	評価対象とした SiO ₂ およびコンクリート反射体臨界実験シリーズの概 要	3-80
表 3.2.2-3	燃焼度クレジットで考慮した核種	3-81

表 3.2.2-4	使用済燃料 7 体収容容器の未臨界維持に必要な中性子吸収材の量	3-85
表 3.2.2-5	使用済燃料 12 体収容容器の未臨界維持に必要な中性子吸収材の量	3-85
表 3.2.2-6	軽水炉における実効遅発中性子割合	3-88
表 3.2.3-1	平成 29 年度の設計解析ケース	3-90
表 3.2.3-2	考慮したシナリオの特徴と力学的なモデル・手法（縦置き、ブロック方式の例）	3-94
表 3.2.3-3	各ケースで使用した物性値	3-97
表 3.2.3-4	処分容器（炭素鋼）の物性値	3-97
表 3.2.3-5	複合容器（銅外層）の物性値	3-97
表 3.2.3-6	支保工（高強度吹付けコンクリート）の物性値	3-98
表 3.2.3-7	軟岩系岩盤の物性値（処分深度 500 m）	3-98
表 3.2.3-8	緩衝材の物性値（乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} 、ケイ砂 30 wt%配合）	3-99
表 3.2.3-9	ケース ii 評価開始時点の緩衝材の物性値	3-99
表 3.2.3-10	緩衝材の物性値（乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂 50 wt%配合）	3-99
表 3.2.3-11	腐食した PEM 容器（炭素鋼）の物性値	3-100
表 3.2.3-12	間隙流体の物性値	3-100
表 3.2.3-13	ケース i の初期条件	3-102
表 3.2.3-14	緩衝材厚さの経時変化（ケース i（標準））	3-104
表 3.2.3-15	ケース ii の初期条件	3-108
表 3.2.3-16	緩衝材厚さの経時変化（ケース ii）	3-110
表 3.2.3-17	緩衝材の厚さ（ケース iii）	3-115
表 3.2.3-18	解析ケース（平成 26 年度～平成 29 年度）	3-119
表 3.2.3-19	緩衝材の応力緩衝性の評価結果	3-119
表 3.2.3-20	膨潤応力測定試験に使用する供試体の仕様	3-122
表 3.2.3-21	载荷条件の設定の考え方	3-123
表 3.2.3-22	供試体（No.1～No.3）における载荷条件	3-123
表 3.2.3-23	圧密指数および膨潤指数の測定結果	3-124
表 3.2.3-24	三軸圧縮試験の供試体の仕様	3-127
表 3.2.3-25	圧密非排水三軸圧縮試験の条件	3-127
表 3.2.3-26	圧密条件	3-127
表 3.2.3-27	圧密前後の供試体の状態	3-128
表 3.2.3-28	三軸圧縮試験結果	3-130
表 3.2.3-29	限界状態パラメータ M と内部摩擦角 ϕ'	3-131
表 3.3-1	組み合わせの特徴の評価結果	3-133
表 3.3-2	組み合わせに対する断面形状の設定例(1/2)	3-134
表 3.3-2	組み合わせに対する断面形状の設定例(2/2)	3-135
表 3.3-3	組み合わせに対応する掘削技術（掘削工法、掘削方式）の一覧表	3-137
表 3.3-4	掘削技術の評価項目	3-138

表 3.3-5	掘削工法と掘削方式の組み合わせの評価項目による評価結果	3-138
表 3.3-6	掘削技術の観点での組み合わせの評価結果	3-139
表 3.3-7	空洞の力学的安定性による組み合わせの評価結果	3-140
表 3.3-8	定置技術による組み合わせの評価結果	3-141
表 3.3-9	安全性・回収性・経済性による組み合わせの評価結果	3-142
表 3.3-10	使用材料の一覧	3-144
表 3.3-11	HFSC 結合材料構成比および水結合材比	3-145
表 3.3-12	供試体作製に関するその他の条件	3-145
表 3.3-13	物性試験用供試体作製に関する規格	3-145
表 3.3-14	試験配合およびフレッシュコンクリートの性状	3-146
表 3.3-15	試験項目および試験材齢	3-147
表 3.3-16	圧縮強度試験結果	3-147
表 3.3-17	割裂引張強度試験の結果	3-148
表 3.3-18	静弾性係数試験結果	3-149
表 3.3-19	ポアソン比の測定結果	3-150
表 3.3-20	単位容積質量の測定結果	3-151
表 3.4-1	動画のタイトルおよび説明文	3-157
表 4-1	インターフェースの設計および試作の項目と進捗	4-2
表 4-2	データベースの設計および試作の項目と進捗	4-2
表 4-3	iSRE の機能の概要	4-3
表 4-4	システムに採用したオープンソフトウェア	4-5
表 4-5	iSRE 開発用 PC 環境	4-6
表 4-6	積算 DB のテーブル	4-8
表 4-7	維持管理・補修履歴 DB (モニタリング) のテーブル	4-10
表 4-8	維持管理・補修履歴 DB (点検) のテーブル	4-11
表 4-9	維持管理・補修履歴 DB (メンテナンス) のテーブル	4-12
表 4-10	ユーザーマニュアルの概要	4-15
表 4-11	システム管理者マニュアルの概要	4-16
表 4-12	イベントとして考えられる候補例	4-17
表 4-13	適用ケース一覧表 (1/2)	4-21
表 4-13	適用ケース一覧表 (2/2)	4-22
表 4-14	試運用ケース 1 で取り扱う主要データ	4-25
表 4-15	概要調査計画の策定における動作確認項目	4-26
表 4-16	概要調査の実施における動作確認項目	4-28
表 4-17	精密調査地区の検討における動作確認項目	4-29
表 4-18	概要調査段階の情報に基づく処分施設の概念設計における動作確認項目	4-31
表 4-19	概要調査段階の情報に基づく安全評価における動作確認項目	4-35

表 4-20	試運用ケース 2 で取り扱う主要なデータ	4-39
表 4-21	人工バリアの設置における動作確認項目	4-40
表 4-22	処分孔・人工バリアモニタリングにおける動作確認項目	4-41
表 4-23	廃棄体設置計画の検討における動作確認項目	4-42
表 4-24	廃棄体の定置における動作確認項目	4-44
表 4-25	定置箇所周辺のモニタリングにおける動作確認項目	4-46
表 4-26	iSRE の実用化に向けた iSRE 機能の向上に関する課題と対策・考察	4-47
表 4-27	iSRE の実用化に向けたソフトウェア技術などに関する課題と対策・考察	4-48
表 4-28	国民への情報開示における動作確認項目	4-49
表 5-1	わが国への適用における課題に対し重点的に検討する項目の整理	5-3
表 5-2	サイト選定条件としての地質環境における重要事項の整理	5-7
表 5-3	石油・天然ガス分野での掘削装置の主な構成要素	5-8
表 5-4	ボトムホール・アセンブリーの主な構成要素	5-9
表 5-5	深部掘削技術の実現性における重要事項の整理	5-11
表 5-6	操業・閉鎖のための技術の実現性における重要事項の整理	5-15
表 5-7	廃棄体の仕様・種類の設定の実現性における重要事項の整理	5-18
表 5-8	超深孔処分の実現性における重要事項の整理	5-21
表 5-9	ガラス固化体と使用済燃料の形状および重量の比較	5-25
表 5-10	TRU 推定発生量	5-26
表 5-11	超深孔処分を想定したわが国における放射性廃棄物の特徴	5-27
表 5-12	超深孔処分の安全評価シナリオ(1/2)	5-30
表 5-12	超深孔処分の安全評価シナリオ(2/2)	5-31
表 5-13	母岩透水係数をパラメータとした解析ケース	5-34
付表 1-1	人工バリアの物質移行パラメータ	付 1-4
付表 1-2	岩盤の物質移行パラメータ	付 1-4
付表 1-3	水理地質構造モデルの設定根拠の概要	付 1-5
付表 2-1	解析ケース（平成 26 年度～平成 29 年度）	付 2-1
付表 3-1	空洞の力学的安定性評価結果一覧表（処分坑道、硬岩系地盤）	付 3-2
付表 3-2	空洞の力学的安定性評価結果一覧表（処分坑道、軟岩系地盤）	付 3-3

第 1 章

はじめに

1 章詳細目次

1. はじめに	1-1
1.1 背景と目的	1-1
1.2 本事業の全体計画	1-1
(1) 直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および 閉じ込め性能評価手法の高度化	1-2
1) 先進的な材料の開発	1-2
2) 閉じ込め性能評価手法の高度化	1-3
(2) 直接処分施設の設計検討	1-4
1) 直接処分方策に関する調査・検討	1-4
2) 人工バリアの設計	1-4
① 処分容器の設計	1-4
② 処分容器の設計における臨界安全に関する検討	1-5
③ 緩衝材の設計	1-6
3) 地下施設の概念設計	1-7
4) 搬送・定置設備の概念設計	1-7
(3) 直接処分施設の設計支援システムの構築	1-8
(4) その他の代替処分オプションについての調査・検討	1-9
(5) 情報収集および評価委員会の設置と運営	1-10
1.3 平成 29 年度の実施内容	1-10
(1) 直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および 閉じ込め性能評価手法の高度化	1-10
1) 先進的な材料の開発	1-10
2) 閉じ込め性能評価手法の高度化	1-10
(2) 直接処分施設の設計検討	1-11
1) 直接処分方策に関する調査・検討	1-11
2) 人工バリアの設計	1-11
① 処分容器の設計	1-11
② 処分容器の設計における臨界安全に関する検討	1-11
③ 緩衝材の設計	1-11
3) 地下施設の概念設計	1-11
4) 搬送・定置設備の概念設計	1-12
(3) 直接処分施設の設計支援システムの構築	1-12
(4) その他の代替処分オプションについての調査・検討	1-12
(5) 情報収集および評価委員会の設置と運営	1-12
参考文献	1-13

1. はじめに

1.1 背景と目的

東北地方太平洋沖地震やこれに起因する原子力事故を契機として、今後の日本のエネルギーシステムをより安全性とセキュリティ性の高いものとしていくことが国家的な重要課題である。長期的に安定なエネルギーシステムを構築していく上で、原子力の利用にあたっては、シビアアクシデント対策などより高い安全性と核セキュリティの確保を図るとともに、将来のエネルギー政策や世界のエネルギー情勢などに柔軟に対応可能な技術基盤を整備しておくことが不可欠となっている。従来より、わが国では資源の有効利用を目的として全量を再処理し、発生する高レベル放射性廃液をガラス固化体として最終処分することを基本方針として研究開発を実施してきている。しかしながら、原子力利用における柔軟性を確保しつつ今後のバックエンド対策を着実に進めていくために、これまでに蓄積されてきたガラス固化体の処分に関する技術的知見および諸外国における直接処分に関する技術的知見ならびにその他の考えられる代替処分オプションに関する調査・検討事例を利用し、わが国における使用済燃料の直接処分についての技術的な検討およびその他の代替処分オプションの技術的な検討を行っておくことが必要である。そのため、本事業では使用済燃料の直接処分についての技術的課題などの把握およびそれを実現するために必要な技術開発ならびにその他の代替処分オプションについての調査と有効性の検討をわが国の諸条件を踏まえて行うことを目的とする（日本原子力研究開発機構，2014；2015b；2016；2017）。

なお、本事業の実施においては、高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の地層処分、TRU廃棄物の地層処分、および使用済核燃料の直接処分に関する過去の研究開発成果を適宜活用・引用する（表 1.1-1 参照）。

表 1.1-1 本事業で利用・引用する主な過去の研究開発成果

過去の研究開発成果	略称
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－（核燃料サイクル開発機構，1999a；1999b；1999c；1999d）	H12 レポート
TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－（電気事業連合会，核燃料サイクル開発機構，2005）	第2次 TRU レポート
わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価－直接処分第1次取りまとめ－（日本原子力研究開発機構，2015a）	直接処分第1次取りまとめ

1.2 本事業の全体計画

本事業では、わが国の地質環境条件や使用済燃料の特性を踏まえ、直接処分などの代替処分技術についての調査、検討、技術開発を実施する。代替処分技術のうち、直接処分技術については、諸外国の事例調査を通じて最新の技術動向や技術的課題などを把握したうえで、わが国の諸条件を考慮した場合の処分場施設の設計・性能評価技術の調査、検討、技術開発

を実施する。超深孔処分など、現在検討段階にあるその他の代替処分オプションについては、諸外国の事例調査を行うことにより、それらの考え方、特徴、検討の背景、技術的課題などを明らかにし、わが国の諸条件を考慮した場合の有効な代替処分オプションについて検討する。これにより、わが国における使用済燃料の直接処分等代替処分オプションについての技術的基盤を提供することを目標とする。

上記に基づき、使用済燃料の直接処分に関する技術開発およびその他の代替処分オプションについての調査と有効性の検討を、わが国の諸条件を考慮して検討を行っておくことが重要と考えられる課題に注力しつつ進めるために、以下の事業項目を設定し技術開発を継続してきている。

- ・直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および閉じ込め性能評価手法の高度化
- ・直接処分施設の設計検討
- ・直接処分施設の設計支援システムの構築
- ・その他の代替処分オプションについての調査・検討
- ・情報収集および評価委員会の設置と運営

以下に、各事業項目についての全体的な計画、および平成 28 年度までの主な実施内容をまとめる。

(1) 直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および閉じ込め性能評価手法の高度化

本技術開発項目については、2 つの技術開発項目（「先進的な材料の開発」、「閉じ込め性能評価手法の高度化」）に分けて実施する。

1) 先進的な材料の開発

処分容器材料、緩衝材、埋め戻し材について、わが国の地下水水質などの地質環境条件を考慮しても長期の閉じ込め性を担保できるか否かを確認するとともに、より有効な新材料の開発・適用性についても検討を進める必要がある。また、廃棄体から発せられる高い放射線や発熱が処分システムの安全性に与える影響や、設計に対する制約条件を緩和するという観点から、処分容器や緩衝材、埋め戻し材として使用可能な新材料の有効性について検討・確認することが必要である。

そこで、本技術開発項目については、以下に示すような新材料に期待する性能に着目し、人工バリア材に関し、わが国および諸外国における研究開発動向の調査を行う。この結果を踏まえて、安全性、経済性、技術的実現性などに関する検討を基礎試験も含めて実施することにより、新材料の開発や新たな候補材料となりうる材料選定を行い、人工バリア材料としての適合性に関する知見の総合的な整備と次段階の研究計画の策定に資する。

- ・処分容器：耐食性向上等
- ・緩衝材、埋め戻し材：高吸着性、高熱伝導性等

平成 28 年度までに、処分容器材料への適用を考慮して平成 25 年度に提示された金属ガラスの候補材料を中心に、物理化学的な基本特性や耐食性などの知見の整備を進めるとともに、

従来の処分容器候補材料との耐食性の比較検討に着手した。また、溶射によるコーティングなどの施工技術に関する適用性を検討し、適用にあたっての課題を抽出した。緩衝材、埋め戻し材など他のバリア材料については、機能や性能向上に関し、収着性、熱伝導性に着目して既往の研究開発事例や国内外における検討状況と適用にあたっての課題を整理して取りまとめた。

2) 閉じ込め性能評価手法の高度化

人工バリア材料や燃料集合体などのニアフィールド構成要素の劣化およびそれに起因して生じる核種の放出・移行に関わる現象や、それらに及ぼす諸因子の影響などに対して、わが国の幅広い地質環境条件やその長期的変遷も考慮に入れた現象理解やメカニズム解明により不確実性を低減し、より現実的な閉じ込め性能評価手法を構築することによって、これまで保守的に見積もってきた閉じ込め性能をより適正に評価し、より高度なバリア機能を期待できる可能性がある。例えば、処分容器材料の腐食機構を解明、モデル化することにより、経時的な腐食速度の低下を考慮した腐食量評価に基づいて寿命を推定できる可能性がある。また、燃料集合体に対して溶解や劣化挙動の理解に基づき閉じ込め性能を適正に評価することによって、燃料中や金属中の放射性核種の放出速度などに関するモデル/パラメータについて、より現実的な安全評価上の設定が可能となることが期待できる。

そこで、人工バリア材料や燃料集合体などのニアフィールド構成要素の材料を対象に腐食、劣化や変質に関する現象、メカニズム、影響因子の作用などを解明するとともに、わが国の幅広い地質環境条件やその長期的変遷も考慮に入れた様々なシナリオに対応可能な多重バリアシステムや構成要素に対する、新たな長期挙動の評価手法の検討や従来の評価手法の高度化などに資するための知見の整備を行う。

平成28年度までに、人工バリアの閉じ込め性能評価手法に関する研究として、処分容器を構成する金属材料を対象に、使用済燃料の直接処分を想定した深部地下環境における腐食現象やその影響の理解のための試験、文献調査などを実施した。人工バリアの閉じ込め性能に及ぼす環境因子の影響のうち、微生物の影響について、直接処分を想定した長期的な閉じ込め機能への影響評価、影響緩和のための工学的対策などの観点からの知見を整備した。また、緩衝材によるC-14の移行遅延機能に着目し、有機化合物の形態で存在するC-14（酢酸イオンなど）の緩衝材中の実効拡散係数の整備を行った。使用済燃料集合体からの瞬時放出および長期溶解については、諸外国における評価モデルおよびパラメータについて不確実性を含めて調査し、それらの結果に基づいて国内向けのソースタームパラメータの値を暫定的に設定するとともに、不確実性を取り入れた値の幅を検討した。加えて、根拠データの整理などを通じて、それらの知見を国内の使用済燃料や地質環境条件に適用するために検討・検証すべき課題を見出した。多重バリアの閉じ込め性能の評価手法については、設計オプションの違いによる水理・物質移行への影響の定量的な比較・評価に向けて、広域的なスケールの観点からは、地質環境条件の多様性（大規模な断層、海水準変動などに起因する長期変遷など）と異なる処分場位置との組合せの影響、局所的なスケールの観点からは、地質環境条件の多様性（岩種、小規模断層、亀裂の不均質性など）と異なる定置方式との組合せの影響などを比較・評価する手法を例示した。さらには、設計研究の進展を考慮した上で、着目すべ

き性能評価上の課題を明らかにした。

(2) 直接処分施設の設計検討

本技術開発項目においては、使用済燃料の直接処分のための処分施設の設計検討を行う。設計検討の対象とする施設・設備は、使用済燃料に適用する人工バリアを構成する廃棄体および緩衝材など、それら人工バリアを搬送・定置するための設備、搬送・定置設備の外形や必要空間と整合するアクセス坑道や処分坑道からなる地下施設とする。

また、使用済燃料の処分施設の設計段階において考慮しておくことが必要になると考えられる様々な方策（操業中および閉鎖後管理段階の保障措置ならびに核セキュリティ対策、回収可能性の維持など）についても調査・検討を行う。

1) 直接処分方策に関する調査・検討

使用済燃料の処分施設の設計段階において考慮しておくことが必要になると考えられる様々な方策として、多様な使用済燃料集合体を考慮した操業中および閉鎖後管理段階の保障措置ならびに核セキュリティ対策、回収可能性、モニタリング、モラトリアムの考え方、処分までの貯蔵場所、貯蔵方法、貯蔵（冷却）期間の維持などが考えられ、これらに対する方策について事前に検討しておくことは現段階における重要な課題である。

これらの内、保障措置および核セキュリティについて、処分施設の設計検討段階での考え方や方策などについて、直接処分で行っているスウェーデン、フィンランドなど諸外国の事例を調査・分析し、得られた成果・情報を整理する。また、上記の調査検討の結果抽出された技術課題を踏まえて、保障措置・核セキュリティシステムの具体化検討および適用候補技術の適用性確認を実施する。

平成28年度までに、保障措置および核セキュリティについて、IAEAおよびスウェーデン、フィンランドにおける保障措置実施方策、核セキュリティ確保のための実施方策について検討を行った。加えて、国際会議などを通じてIAEAおよび諸外国の関係者から使用済燃料の直接処分に適用する保障措置および核セキュリティシステムの概念検討の現状についてヒアリングを行った。保障措置技術については、使用済燃料および設計情報の検認技術を整理し、廃棄体の固有性確認技術について適用可能性を検討した。核セキュリティ対策については、IAEAの核セキュリティ勧告文書および関連基準の要求事項を処分施設に適用する際の考え方、課題などを整理し、設計基礎脅威の設計手順を参考に考察した仮想脅威に基づいて物理的な核セキュリティ対策を検討した。これらの結果、処分施設の設計段階で考慮すべき保障措置・核セキュリティ上の要件や適用可能な技術が明らかになった。

2) 人工バリアの設計

① 処分容器の設計

使用済燃料集合体を収容する処分容器は人工バリア構成要素の一つであり、その設計においては、バリア機能を発揮するために設定された設計要件を満足させることが必要である。また、使用済燃料として代表的なものとしてはPWR燃料集合体とBWR燃料集合体があり、それらの燃焼度や濃縮度なども燃料集合体毎に異なるものが存在するため、処分容器にはこれ

ら多様な使用済燃料を包括して収容可能とすることが求められる。さらに、この多様性に加えて人工バリアの定置方式（横置きあるいは縦置き）に応じた臨界安全性、銅や炭素鋼などの処分容器材料や容器構造とそれらに応じた製作性（処分容器への使用済燃料集合体の封入技術や検査技術も含む）、さらには作業時の容器のハンドリング性や処分容器と容器に収容した燃料集合体の健全性などにも配慮し、これらの観点も踏まえて処分容器の設計を進める必要がある。このため、本技術開発項目では、上記を考慮の上、多様性のある使用済燃料に対応する処分容器の設計を行い、レファレンスとなる処分容器仕様を提示する。対象とする使用済燃料はPWR燃料集合体およびBWR燃料集合体とし、設計を通じて抽出した開発課題とその課題解決策についても併せて示すものとする。

平成28年度までに、炭素鋼処分容器およびそのオプションとなる銅と炭素鋼からなる複合容器を設計対象とし、また、PWRおよびBWRの代表的な使用済燃料集合体を処分対象として、横置きおよび縦置き定置方式に対応する処分容器の設計を実施した。また、燃料の多様性に着目し、臨界安全解析、放射線遮へい解析を実施し、使用済燃料集合体の収容体数、寸法、肉厚などの基本仕様の成立性を評価した。さらに製作性や作業時の閉じ込め性などの観点から処分容器に適用可能な封入・検査技術に関する基盤情報の整備、封入後の使用済燃料集合体や処分容器の構造健全性に関する評価などを実施し、基本仕様の成立性を確認した。また、これら設計を通じて処分容器の開発課題を抽出し、その課題解決策についてもあわせて提示した。

② 処分容器の設計における臨界安全に関する検討

使用済燃料の直接処分を行う際には、超長期の時間経過に伴う処分容器の劣化により形状などが変化する。その場合、燃料やその周辺の条件は想定以上には変わらないという、通常の臨界安全管理では担保されている要件を満たすことができなくなる可能性がある。ここでは、未臨界性を担保するための処分容器の設計を行うことを目的とし、以下の項目について検討を進める。

- ・臨界安全評価において、燃料の燃焼に伴う反応度低下を考慮する燃焼度クレジット(BUC)の導入が必要と判断される場合、BUCを考慮した処分容器の設計のための臨界安全評価モデルの構築の検討などを行う。
- ・臨界安全ベンチマーク実験データ ICSBEP の調査によって、処分容器設計時に利用する臨界計算コードの精度評価に使用する事が適切な実験データの抽出と代表性評価を行い、未臨界を判断するための中性子増倍率の基準値の設定に関する検討を行う。
- ・BUC 導入時に使用する燃焼計算コードの計算精度の確認と、その計算誤差が臨界安全評価に与える影響の評価を行う。この中では、照射履歴による影響や燃焼度分布による影響なども調査し、特に、BWR 燃料の燃焼計算において考慮が必要となるボイド率の影響を検討する。
- ・中性子増倍率を低減するために処分容器の一部に中性子毒物を適用する可能性およびその必要量について検討する。
- ・通常の臨界安全評価では、反射体として水を想定するが多いが、直接処分の場合、廃棄体周辺には緩衝材や岩盤が存在することから、ここでは、これらを構成する物質を

対象として、反射体効果の検証を行う。

- ・設計を超える事態の影響評価を行う必要性について検討を行う。

平成28年度までに、臨界安全ベンチマーク実験データICSBEPに内蔵される実験データを対象とした代表性評価や未臨界を判断するための中性子増倍率の基準値の設定に関する調査・検討を行った。燃焼度クレジット導入時に必要なパラメータの調査・検討については、PWR燃料およびBWR燃料の燃焼計算の誤差、燃焼計算時のパラメータの設定値の不確実性、燃焼度分布の考慮の有無による臨界安全評価への影響を検討した。中性子吸収材については、超長期にわたり燃料と共存することが期待できる可能性のある材料に対して、未臨界担保のためのPWR使用済燃料を対象とした最小必要量などの検討を行った。緩衝材や岩盤を構成する物質の中性子反射体効果については、SiO₂を反射体とした国際ベンチマーク問題を提起・実施し、臨界安全の観点で必要とされる計算コード・核データなどの計算システムの妥当性を確認するとともに、SiO₂反射体を対象とした臨界実験について解析を実施し、SiO₂反射体効果の妥当性の確認を行った。設計を超える事態の影響評価の必要性については、諸外国の臨界発生時の影響評価事例について文献調査を行い、保守的な臨界発生シナリオにおいても処分場性能に影響を及ぼす可能性は小さいことが示唆された。

③ 緩衝材の設計

緩衝材は、処分容器とともに人工バリアを構成する要素の一つであり、処分容器と同様に設計要件が設定されている。緩衝材においても、設計要件を満足し、使用済燃料の放射線量、形状、寸法、重量などの特徴に加えて、定置方式も考慮した上で設計することが必要となる。そこで、本技術開発項目では、使用済燃料を封入した処分容器を対象とした緩衝材の設計を行う。具体的には、ベントナイトとケイ砂の混合体を材料とした緩衝材を対象として、処分容器の沈下量を数値解析から求めることにより、緩衝材による処分容器の支持性能を確認する。また、処分容器の腐食による膨張を考慮した数値解析（腐食膨張解析）により、処分容器の全量が腐食した場合においても緩衝材の緩衝機能により処分容器および岩盤が破壊しないような適切な緩衝材厚さを確認する。緩衝材の設計にあたっては、各解析の入力データを整備する必要があることから、整備が必要となる緩衝材の力学的および水理学的な物性値などを取得する。

平成28年度までに、炭素鋼処分容器および銅外層と炭素鋼からなる複合容器を対象として、軟岩・硬岩の両岩盤条件および横置き・縦置きの両定置方式についてガラス固化体仕様の緩衝材（密度1.6 Mg m⁻³、ケイ砂混合率30 wt%、厚さ700 mm）による処分容器の支持性能を確認した。炭素鋼処分容器の場合の縦置き定置方式については、支持性能は確認されたものの、せん断応力が卓越する箇所が見受けられたため、異なる仕様の緩衝材による性能確認を行った。また、人工バリアをPEM方式とした場合について、硬岩系岩盤の条件下で、縦置き定置方式を対象として、ガラス固化体仕様の緩衝材による処分容器の支持性能の確認を行なった。緩衝材の設計に必要な緩衝材の力学的および水理学的な物性値を取得するために、緩衝材の乾燥密度およびケイ砂混合率を変えた条件下での圧密試験、三軸圧縮試験および透水試験を継続した。また、銅と炭素鋼からなる複合容器を想定した緩衝材の設計に必要な銅の腐食生成物の力学特性などを取得した。

3) 地下施設の概念設計

人工バリアのレイアウトに対応する地下施設の概念は、人工バリアを地下に構築するための定置方式や搬送・定置設備の仕様によって必要となる地下空間の大きさが異なることを考慮して設計する。

地下施設は使用目的の異なる坑道（アクセス坑道、連絡坑道、主要坑道、処分坑道など）からなる坑道群で構成され、多くの坑道交差部が存在することから、これらの坑道および坑道交差部の空洞安定性について解析し、適用実績の高い力学的安定性評価指標による評価を行い、概念設計に反映する。なお、施工方法との整合のとれた現実的な地下施設の概念設計を可能とするために、施工方法を実現する掘削手順や支保工打設の工程などを考慮する。さらに、地下施設の建設時においては突発的な湧水なども考えられることから、地下施設の建設に必要な対策工についても検討を行う。これらの設計検討においては、日本原子力研究開発機構が瑞浪および幌延において実施した地下施設（立坑、水平坑道など）の設計／施工についての実績も踏まえることにより、その信頼性を向上させる。

また、適切な支保工を選定することで掘削土量を抑えるなど、地下施設の空間設計の合理化を図るため、地下施設の設計に使用する支保工の配合選定のための基礎物性を取得する。

平成28年度までに、代表的な人工バリア仕様としてブロック方式およびPEM方式、定置方式として縦置き定置方式および横置き定置方式を対象とした空洞の力学的安定性の評価を実施した。また、操業時の荷重に対する坑道底盤の安定性を評価し、縦置き定置方式における底盤コンクリートの設計を実施した。施工方法については、岩盤、処分パネルの形状に対して、処分容器、緩衝材、搬送・定置設備などから決まる各坑道の内空断面寸法と坑道延長の関係および適用できる掘削工法を合わせて検討し、処分坑道擦り付け部の概念設計を実施した。湧水については、処分場の概念に応じて許容される湧水量が異なるため、湧水対策工を抽出・整理し、湧水対策工の概念設計を実施した。設計手順については、地下施設の設計の最適化に向けて、人工バリアの設計と搬送・定置設備の設計との連携を考慮した地下施設の設計フローを構築した。支保工については、地下施設の設計に使用する場所打ちコンクリートの配合選定のための基礎物性の取得を行った。

4) 搬送・定置設備の概念設計

搬送・定置設備の概念設計は、処分場の地質環境条件や処分場概念、また、これらを前提として設計された処分容器および緩衝材から成る人工バリア仕様を上位条件として実施される。この搬送・定置設備の概念設計においては、その成果として、設備の実現可能性を評価し、開発課題を明確にすることが求められる。このため、代表的な処分場概念や人工バリア仕様を条件として搬送・定置設備の概念設計を実施することが必要である。代表的な条件としては人工バリアの横置きおよび縦置き定置方式、ブロック方式およびPEM方式、炭素鋼処分容器および銅と炭素鋼からなる複合処分容器などを設定する。なお、概念設計の実施においては、使用済燃料を含む廃棄体がガラス固化体に比べて長尺化し、かつ、重量も増加することなどの直接処分における特徴に着目する。さらに、設備の異常・故障やメンテナンスなどの操業に関わる技術と安全性についても十分考慮する。

また、概念設計の最初の段階においては、処分場概念や人工バリアなどの様々な上位条件に対応可能な搬送・定置設備に関わる技術選択枝を技術オプションとして体系的に整理しておくことが有効である。この技術オプションは構成技術や機能の全容の把握、さらには上位条件が示された際に適用候補技術の絞込みや着目すべき技術課題の明確化を可能とするための設計ツールとして取りまとめ、概念設計に活用する。

平成 28 年度までに、代表的な人工バリア仕様として炭素鋼処分容器および銅と炭素鋼からなる複合容器、定置方式として横置き、堅置き定置方式および PEM 方式などを対象とし、処分坑道の搬送・定置設備の概念設計を行った。この概念設計では、それぞれの設備の構成や概略の寸法などの仕様を具体化したうえで、それぞれの実現可能性の評価を行い、課題を抽出した。これらの概念設計を進める前提として、搬送・定置設備への適用候補技術全般の調査と整理を行い、技術オプションとして体系的な取りまとめを行った。さらに、搬送・定置設備の設計を他施設と整合したものとしていくために、搬送・定置設備の設計と人工バリアや地下坑道などの他の処分施設の設計との連携を考慮すべき設計項目、および搬送・定置設備と核セキュリティ・保障措置を考慮した技術や処分システムとの連携を考慮すべき設計項目を明確にし、設計フローを構築した。これにより、ブロック・堅置き方式を対象に、他施設との整合に配慮した搬送・定置設備および地上施設の概念設計例を提示した。

(3) 直接処分施設の設計支援システムの構築

地層処分事業は、長期にわたる事業であり、数世代の技術者が関わる事業であることから、事業の知識情報を確実に管理し、次世代に継承することが重要となる。また、多様な使用済燃料を対象とした処分場の設計を効率的に行うためには、設計に関するデータや判断根拠の一元管理など、設計を支援する工学技術のための知識化ツールが必要となる。このため、本技術開発項目では処分場の工学技術に関する知識化ツールとして「設計支援システム」(地層処分エンジニアリング総合支援システム (iSRE)) の開発を行う。この設計支援システムは、長期にわたる事業期間における調査・建設・操業・閉鎖の各プロセスでの設計・施工・維持管理に関わる情報の管理・継承を支援し、設計や施工の透明性、追跡可能性を確保できるシステムとする。また、設計に用いるデータを共有し、一元的に管理することで、処分容器・緩衝材・搬送定置設備・地下施設・地上施設の統合的な設計を支援するとともに、事業期間における情報の増大、技術の進歩に応じて繰り返し行われる設計を支援するシステムとする。本システムの構築にあたっては、計画～設計～施工～維持管理までの建設事業全体について、IT 技術を用いて一括で管理する概念である CIM (Construction Information Modeling) の考え方を参考として、三次元 CAD モデルに属性情報を関連付けたデータモデルを用いて情報の管理を行う。また、データモデルを用いて CAE 技術を利用することにより、処分施設の設計、建設、維持管理計画および操業計画の策定などを可能とする。本システムを効率的に開発するために、使用済燃料の直接処分に対応した搬送・定置設備と地下施設の概念設計結果を事例として用い、本システム上でデータモデルを試作し、システム開発上の課題を抽出する。本システムの開発においては、設計や安全評価の前提となる地質環境調査評価技術に関する知識化ツールである「次世代型サイト特性調査情報統合システム (ISIS)」(原子力機構, 2013a) や知識工学的手法を用いた性能評価支援システム(たとえば、「電子性能評価レポート (e-PAR)」

(原子力機構, 2013b)) との連携を図る。これにより、処分施設の設計検討や安全評価、さらには処分施設を設置する地質環境などの見える化を図り、社会・国民に対しても地層処分を分かりやすく説明するための有効なツールになり得るよう開発を進める。

平成28年度までに、設計支援システムの要件や具備すべき機能を整理し、それらに基づき本システムの概念設計を行い、中核となるデータベースとインターフェースの機能の設定を行った。それに基づきデータベースとインターフェースの基本設計、詳細設計を行い、一部の機能について試作を進めた。具体的には、統合データベースと設計データベースについて詳細設計と試作を行い、積算データベースと維持管理補修履歴データベースについて基本設計を行った。また、解析データの参照にアクセスするためのインターフェースについて試作を行った。さらに、設計支援システムの試運用を、「地上からの調査」、「地下施設の設計・施工（立坑・水平坑道）」および「施工の中断、見直し、再施工」の行為とその行為に対応する情報のやり取りを想定し、試作したインターフェースとデータベースの機能の一部を用いて行った。これを通じて明らかになったインターフェース、データベースの機能や運用方法についての課題などに対する見直し・改良を行った。

(4) その他の代替処分オプションについての調査・検討

放射性廃棄物の最終処分方式としては、国際的共通認識としてもっとも有望な方法とされた地層処分の研究が進められてきている。総合資源エネルギー調査会の放射性廃棄物WGが示した「放射性廃棄物WG 中間とりまとめ（平成26年5月）」（放射性廃棄物WG, 2014）では、放射性廃棄物の最終処分方式として、現在各国が取り組んでいる地層処分のほかに、海洋投棄、海洋底下処分、沈み込み帯への処分（以上はロンドン条約により禁止）、氷床処分（南極条約により禁止）、超深孔処分、岩石溶解処分、井戸注入処分、宇宙処分について、国際的な評価が示された。また、地層処分の安全性に未だ不確実性があることから、その不確実性を今後の研究開発などにより低減することと並行して、今後の技術の進捗により潜在的な課題が克服されることで検討の対象となり得る方式については、その可能性を模索する、という国際的な認識を示している。

このような背景を踏まえ、本技術開発項目においては、直接処分以外の代替処分オプションについての調査・検討を行う。具体的には、超深孔処分など、現在検討段階にあるその他の代替処分オプションについて、諸外国の事例調査を行うことにより、それらの考え方、特徴、検討の背景、技術的課題などを明らかにし、わが国の諸条件を考慮した場合の有効な代替処分オプションについて検討する。

平成28年度までに、その他の代替処分オプション（長期貯蔵などを含む）について調査を開始し、それぞれの処分概念オプションが現在の取り扱いに至った経緯などについての技術情報を取りまとめた。更に、その他の代替処分オプションのひとつである超深孔処分に関して、わが国への超深孔処分の概念の適用を検討するための情報基盤の整備として、検討が進んでいる米国などでの検討の背景や根拠および超深孔の深部地質環境特性、超深孔の掘削技術、超深孔処分の安全評価についての国内外の文献調査と整理を行った。

(5) 情報収集および評価委員会の設置と運営

本事業の実施に当たり、国内外の関係機関や大学などとの間で必要に応じて情報交換などを実施し、関連技術などについての最新情報を入手するとともに、成果の普及などを積極的に行う。また、本事業に係る専門家・有識者などで構成される委員会を設置し、研究計画、実施方法、結果の評価などに関する審議・検討を行い、事業報告書を取りまとめる。

1.3 平成 29 年度の実施内容

以下では、1.2 節で示した全体的な計画と平成 28 年度までの実施内容・成果を踏まえて設定した、平成 29 年度の実施内容を示す。

(1) 直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および閉じ込め性能評価手法の高度化

1) 先進的な材料の開発

処分容器材料については、平成 25 年度に提示された金属ガラスの候補材料を中心に、平成 28 年度までの成果に基づき、引き続き耐食性を含めて基本特性に関するデータ取得など知見の整備を行うとともに、従来の処分容器候補材料との耐食性の違いについて検討を継続する。これらの結果に基づいて処分容器材料としての性能を評価する。また、溶射によるコーティングなどの施工技術に関する適用性の検討を継続し、処分容器としての施工性を評価する。以上をもとに、金属ガラスの処分容器材料としての適用性を総合的に評価して取りまとめるとともに、実用上の課題を抽出する。

2) 閉じ込め性能評価手法の高度化

人工バリアの閉じ込め性能評価手法の構築に資するため、平成 28 年度に引き続き金属材料の腐食現象の理解・メカニズム解明や、腐食による緩衝材特性への影響評価のための試験および文献調査を行い知見を拡充するとともに、平成 28 年度までに得られた知見を含めて処分容器による閉じ込め機能の高度化の可能性を提示する。また、微生物の活動に着目し、直接処分システムにおける多様な微生物の影響を考慮し、微生物の種類（硫酸還元菌、メタン生成菌、酢酸生成菌など）や共存するベントナイトの影響についてデータの拡充を行うとともに、人工バリアの閉じ込め性能に及ぼす影響を整理する。更に、緩衝材による C-14 などの移行遅延機能については、有機化合物の化学形態の違いに加えて分子量が異なる C-14 に対して実効拡散係数の実測値を整備し、化学形態や分子量が C-14 の拡散挙動に及ぼす影響について整理する。使用済燃料のソースターム評価では、放射性核種放出挙動の指標となる国内の使用済燃料における核分裂生成ガスの放出率の解析的調査などを通じて知見を拡充するとともに、平成 28 年度までに収集した関連情報を総括することで、ソースターム評価をより現実的にするために必要な項目を整理する。また、調査した燃料溶解速度について、わが国で想定される緩衝材間隙水への適用性を評価するため、 UO_2 の溶解速度の炭酸濃度依存性について実験的に調査する。多重バリアによる閉じ込め性能の評価手法については、様々な設計オプションと地質環境条件との組合せおよびスケールの違いなどに起因する影響の類似点・相違点の分析ならびにそれら影響の評価手法の体系的整備を行い、取りまとめる。

(2) 直接処分施設の設計検討

1) 直接処分方策に関する調査・検討

IAEA および諸外国の使用済燃料の直接処分施設に適用する保障措置および核セキュリティの検討状況について、国際会議などを通じての情報の入手を継続する。処分容器の固有性確認技術に関しては、シミュレーション解析または試験サンプルを用いて、識別符号の付与方法を含む超音波探傷技術による固有性確認方法の適用性を評価する。加えて、複合容器に対する超音波探傷測定に係るシミュレーション解析を行い、複合容器への超音波探傷技術の適用可能性を評価する。上記結果および平成 28 年度までの結果を踏まえて、わが国の特徴に応じた処分施設の設計に反映する保障措置技術、核セキュリティ技術を整理し、取りまとめる。

2) 人工バリアの設計

① 処分容器の設計

処分容器仕様に影響を及ぼす設計因子と条件の不確実性および多様性を考慮して、臨界安全および放射線遮へい性などに係る解析を実施し、平成 28 年度までに設計した基本仕様の成立性を評価する。平成 28 年度までの検討結果と合わせて、種々の設計因子や多様性に対して成立性が確認された処分容器の仕様を、設定手法、適用範囲および今後の合理化の可能性とともに整理し、設計事例として提示する。

② 処分容器の設計における臨界安全に関する検討

緩衝材や岩盤を構成する物質の反射体効果について、平成 28 年度に SiO_2 の反射体効果の検証で対象とした臨界実験と直接処分体系との類似性について評価を行い、 SiO_2 反射体効果の直接処分体系への適用性を確認する。また、設計を超える事態の影響評価の必要性について、米国などでエネルギー発生などの観点での臨界発生時の処分システムへの影響評価に適用された手法の、わが国への適用性などを検討する。中性子吸収材については、BWR 使用済燃料における現実的な吸収材の挿入添加量などについて検討を行う。さらに、これまでの検討結果を、処分容器の設計検討に適用できる臨界安全評価技術として取りまとめる。

③ 緩衝材の設計

緩衝材による複合処分容器の支持性能について、これまで未検討である豎置き定置方式の人工バリアを対象として確認する。また、人工バリアを PEM 方式とした場合については、平成 28 年度検討以外の岩盤条件や定置方式を対象として緩衝材による処分容器の支持性能を確認する。平成 28 年度までの検討結果と合わせて、種々の設計因子や多様性に対して成立性が確認された緩衝材の仕様を、設定手法、適用範囲および今後の合理化の可能性とともに整理し、設計事例として提示する。また、設計に必要な緩衝材の物性値の取得を継続し、緩衝材設計の基本データとして取りまとめる。

3) 地下施設の概念設計

人工バリアのレイアウトをオプションから合理的に選定するため方法論として、平成 28 年

度までの成果に加え力学的安定性、施工性、経済性などに対する指標を考慮した取りまとめを行う。さらに、場所打ちコンクリートを対象とした配合選定のための基礎物性の取得を継続し、平成 28 年度までの検討結果とあわせて、HFSC コンクリートの吹付けコンクリートおよび場所打ちコンクリートの配合選定のための情報を取りまとめる。

4) 搬送・定置設備の概念設計

搬送・定置設備への適用可能な技術、他施設との整合を考慮した搬送・定置設備などの設計フローおよびそれらに基づく設計事例に関する平成 28 年度までの検討結果を取りまとめる。

(3) 直接処分施設の設計支援システムの構築

地層処分エンジニアリング総合支援システム（iSRE）について、維持管理補修履歴データベースと積算データベースの詳細設計と試作、モニタリングデータの更新のためのインターフェースの試作を行う。また、設計支援システムの試運用として、地層処分事業の各段階で行われる行為を想定した機能検証を行う。これにより、プロトタイプとしての設計支援システムを提示するとともに、実際の地層処分事業への適用に向けて充実させるべき事項とその対策案を整理する。

(4) その他の代替処分オプションについての調査・検討

超深孔処分について、引き続き調査を実施して最新情報を整理するとともに、わが国における適用にあたっての成立性を見通し、適用に向けての技術的課題のほか、社会・経済を含む全般的な課題などを従来の地層処分との比較を含めて整理する。

(5) 情報収集および評価委員会の設置と運営

本事業の実施に当たり、国内外の関係機関や大学などとの間で必要に応じて情報交換などを実施し、関連技術などについての最新情報を入手するとともに、成果の普及などを積極的に行った。また、本事業に係る専門家・有識者などで構成される委員会を設置し、研究計画、実施方法、結果の評価などに関する審議・検討を行い、事業報告書を取りまとめた。さらに、平成 25 年度～平成 29 年度の成果を 5 か年の報告書として取りまとめた。

【参考文献】

- 放射性廃棄物 WG（総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会放射性廃棄物 WG）（2014）：放射性廃棄物 WG 中間とりまとめ 平成 26 年 5 月。
- 核燃料サイクル開発機構（1999a）：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—総論レポート、JNC TN1400 99-020。
- 核燃料サイクル開発機構（1999b）：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 1、核燃料サイクル開発機構 技術報告書。JNC TN1400 99-021。
- 核燃料サイクル開発機構（1999c）：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。核燃料サイクル開発機構 技術報告書。JNC TN1400 99-022。
- 核燃料サイクル開発機構（1999d）：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 3。核燃料サイクル開発機構 技術報告書。JNC TN1400 99-023。
- 原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2013a）：平成 24 年度地層処分技術調査等事業 地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発 6 カ年とりまとめ報告書、平成 25 年 3 月。
- 原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2013b）：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 先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発 6 カ年とりまとめ報告書、平成 25 年 3 月。
- 原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2014）：平成 25 年度地層処分技術調査等事業「使用済燃料直接処分技術開発」
- 原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2015a）：わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価 -直接処分第 1 次取りまとめ-、JAEA-Research-2015-016。
- 原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2015b）：平成 26 年度地層処分技術調査等事業「使用済燃料直接処分技術開発」報告書
- 原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2016）：平成 27 年度地層処分技術調査等事業「直接処分等代替処分技術開発」報告書
- 原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2017）：平成 28 年度地層処分技術調査等事業「直接処分等代替処分技術開発」報告書
- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構（2005）：TRU 廃棄物処分技術検討書—第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—、JNC TY1400 2005-013/FEPC TRU-TR2-2005-02。

第 2 章

直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる

先進的な材料の開発および閉じ込め性能評価手法の高度化

2 章詳細目次

2. 直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および閉じ込め性能評価手法の高度化	2-1
2.1 先進的な材料の開発	2-1
(1) 本項目の背景と目的	2-1
(2) 金属ガラスの物理化学的特性に関する検討	2-2
1) Ni 基データベース(TCNI8)を利用した熱力学計算および分子動力学シミュレーション	2-3
2) 時間 - 温度 - 変態図の計算とその結果に基づく平衡論の観点からの時間的安定性の調査	2-7
3) 原子寸法差、混合エンタルピーなどのガラス(アモルファス)形成能の評価因子	2-9
(3) 金属ガラスの溶射コーティングへの適用性	2-11
1) Ni 基金属ガラス溶射膜の厚膜化の検討	2-11
2) 異形状基材への Ni 基金属ガラスの溶射の検討	2-14
3) Cu 基金属ガラスの溶射	2-15
4) Ni 基金属ガラス溶射被膜の耐食性に関する予備的調査	2-19
(4) 金属ガラスアトマイズ粉末による耐食性評価試験	2-20
1) 実施概要	2-21
2) 金属ガラスのアトマイズ粉末を用いた浸出試験方法	2-21
① 金属ガラス試料および合金試料	2-21
② 浸出試験	2-23
3) 結果および考察	2-24
① Zr 基金属ガラス	2-24
② Ni 基金属ガラス	2-31
③ Cu 基金属ガラス	2-44
④ 従来の高耐食性金属材料	2-47
⑤ 元素浸出による劣化の推定	2-52
(5) Ni 基金属ガラス溶射膜の局部腐食試験	2-52
1) 試験の概要	2-52
2) 実験方法	2-53
① 試験片	2-53
② 試験溶液	2-53
③ 試験手順	2-53
3) 実験結果と考察	2-54
2.2 閉じ込め性能評価手法の高度化	2-59
2.2.1 人工バリア材料の閉じ込め性能の評価に関する研究	2-59

(1) 本項目の背景と目的	2-59
(2) 処分容器材料の腐食挙動	2-61
1) 炭素鋼腐食生成物形成試験と皮膜の性状評価	2-61
① 実験方法	2-61
② 実験結果と考察	2-63
2) 交流インピーダンス法による炭素鋼の腐食モニタリング	2-74
① 実験方法	2-74
② 実験結果と考察	2-76
3) レジストメトリー法によるベントナイト中における銅の腐食速度のモニタリング	2-85
① 実験方法	2-85
② 実験結果と考察	2-87
4) ベントナイト中における銅の応力腐食割れ挙動	2-91
① 実験方法	2-91
② 実験結果と考察	2-93
5) 代替処分容器候補材料 (Cu, Ti, Ni 基合金など) のガンマ線照射下での電気化学特性	2-102
① 実験方法	2-103
② 実験結果と考察	2-104
6) まとめ	2-108
① 炭素鋼腐食生成物形成試験と皮膜の性状評価	2-108
② 交流インピーダンス法による炭素鋼の腐食モニタリング	2-108
③ レジストメトリー法によるベントナイト中における銅の腐食速度のモニタリング	2-109
④ ベントナイト中における銅の応力腐食割れ挙動	2-109
⑤ 代替処分容器候補材料のガンマ線照射下での電気化学試験	2-109
(3) 人工バリア性能への微生物影響評価	2-111
1) 試験方法	2-113
2) 圧縮ベントナイトカラムを用いた炭素鋼片の腐食試験結果	2-115
3) ベントナイト内に含まれる微生物量と代謝反応の推定	2-121
4) 人工バリア内における微生物活性の抑制要因と微生物腐食メカニズム	2-124
(4) 緩衝材中の C-14 移行挙動試験	2-128
1) 試験手法	2-128
2) 解析手法	2-129
3) 試験結果	2-129
(5) 銅とベントナイトの相互作用に関する調査	2-133
1) 試験方法	2-133
2) 試験結果と考察	2-133

2.2.2 使用済燃料の閉じ込め性能に関する研究	2-137
(1) 本項目の背景と目的	2-137
(2) FEMAXI コードを用いた核分裂生成ガス放出割合の評価	2-140
1) 過年度までの FGR 検討の概要	2-141
2) FEMAXI-7 の概要	2-143
3) 計算条件などの検討	2-146
4) 代表的特性を持つ使用済燃料の FGR 計算	2-153
(3) 燃料溶解速度の炭酸濃度依存性評価	2-157
1) 実験方法	2-157
2) 実験結果	2-158
(4) ソースターム評価の総括	2-162
1) ソースタームパラメータの暫定値の設定	2-162
2) より現実的な評価を行うための課題の整理	2-163
2.2.3 多重バリアによる閉じ込め性能評価手法に関する研究	2-165
(1) 本項目の背景と目的	2-165
(2) 廃棄体の定置方式の選択による閉じ込め性能の違いの分析・整理	2-166
1) 定置方式の選択による移行経路の違いの分析・整理	2-167
2) 三次元物質移行解析による定量的な検討	2-168
3) 定置方式の選択による閉じ込め性能の違いに関する知見の整理	2-171
(3) 処分場の位置の選択による閉じ込め性能の違いの分析・整理	2-172
1) 広域的スケールを対象とする地下水流動解析の手法の概要	2-173
2) 処分場の位置の選択による閉じ込め性能の違いの分析	2-175
3) 処分場の位置の選択による閉じ込め性能の違いに関する一般的知見の整理	2-178
(4) 設計オプションの選択による閉じ込め性能の違いの統合的な分析・整理	2-178
2.3 まとめ	2-181
(1) 先進的な材料の開発 (2.1 節参照)	2-181
(2) 閉じ込め性能評価手法の高度化：人工バリア材料の閉じ込め性能の評価に関する研究 (2.2.1 項参照)	2-182
(3) 閉じ込め性能評価手法の高度化：使用済燃料の閉じ込め性能に関する研究 (2.2.2 項参照)	2-184
(4) 閉じ込め性能評価手法の高度化：多重バリアによる閉じ込め性能評価手法の構築 (2.2.3 項参照)	2-185
参考文献	2-186

2. 直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および閉じ込め性能評価手法の高度化

直接処分では、使用済燃料の多様性や不確実性、使用済燃料の処分に伴い生じる挙動や影響の複雑性などにより、ガラス固化体処分に比して核種の閉じ込め性能がより重要となる。このことを踏まえ、人工バリア材などについて、必要となる閉じ込め性能を確保することが可能かを確認することが重要である。

これらを踏まえ、本技術開発項目では、以下について検討する：

- ・直接処分を行う場合の処分容器材料、緩衝材、埋め戻し材に適用可能な先進的な材料の開発を通じて、閉じ込め性能の向上の可能性を検討する。
- ・人工バリアの閉じ込め性能評価における不確実性を低減させることを目的とし、使用済燃料の特性および人工バリア材料の腐食、劣化および変質などに係る知見の拡充を行うとともに、閉じ込め性能の評価手法について検討する。

上記に関する検討内容を、次節以降に「先進的な材料の開発（2.1節）」および「閉じ込め性能評価手法の高度化（2.2節）」として示す。最後に、本章のまとめを2.3節に示す。

2.1 先進的な材料の開発

(1) 本項目の背景と目的

使用済燃料のインベントリや廃棄物の形状・寸法および廃棄体から発せられる放射線や発熱がガラス固化体とは異なることに留意し、より有効な新材料の開発・適用性についても検討を進める必要がある。また、それらが、処分システムの安全性に与える影響や設計に対する制約条件を緩和するという観点から、処分容器や緩衝材などとして使用可能な新材料の有効性について検討・確認することが必要となる。

そこで、本研究では、処分場設計に資する技術オプションとして提示することを目的として、従来から提案されている候補材料（以下、「従来材料」という）だけでなく、より有効と考えられる新材料も視野に入れ、わが国における使用済燃料の直接処分に適用可能な人工バリア材料について幅広い検討を行うこととした。この検討にあたっては、新材料に期待する性能について、わが国および諸外国における調査結果を踏まえて、安全性、経済性、技術的実現性などに関する検討を基礎試験も含めて実施することにより、人工バリア材料としての適合性に関する知見の総合的な整備と次段階の研究計画の策定に資することとした。新材料に期待する性能の例としては、以下が挙げられる。

- ・処分容器：耐食性向上など
- ・緩衝材、埋め戻し材：高吸着性、高熱伝導性など

平成28年度までに、処分容器を対象に、既往の研究成果を調査することにより、先進的な新材料開発にあたっての留意事項・課題を整理した。この調査結果に基づき、処分容器新材料としてバルク金属ガラスを対象に開発候補材料を提示した。また、提示された候補材料を対象に、物理化学的な基本特性を整理し、既存の材料との比較を行うとともに、容器材料としての適用性、容器材料としての適用に必要な技術開発課題を検討した。また、緩衝材につ

いては、収着性向上と熱伝導性向上の観点から文献調査を実施し、性能を向上させる可能性のある材料を抽出するとともに、適用上の課題を整理した。

平成 29 年度は、平成 28 年度までの成果に基づき、金属ガラスについての検討を継続した。具体的には、検討対象とする合金の見直しや改良を行うとともに、引き続き耐食性を含めて基本特性に関するデータ取得など知見の整備を行った。また、溶射によるコーティングなどの施工技術に関する適用性の確認を行った。平成 29 年度の実施概要項目は以下のとおりである。

- ・金属ガラスの物理化学的特性に関する検討

候補となる新合金はいずれも非晶質であることから、その熱力学安定性などの物理化学的な基本特性を整理する。平成 29 年度は平成 28 年度までの検討結果などを参考に対象とする合金組成を選定し、それに対して引き続き状態図、自由エネルギー解析などの熱力学的な検討を行った。また、ガラス形成能を評価するパラメータについて、 γ パラメータなど新たな指標を含めて選定された合金に対する適用性を検討した。

- ・金属ガラスの溶射コーティングへの適用性

処分容器への施工を考慮して溶射コーティングの適用を検討した。平成 28 年度までの研究により良好なコーティングが可能であることが確認された Ni 基合金については、より厚い溶射膜形成を試みた。さらに、円筒形状の処分容器への溶射を想定し、曲面をもった基材への溶射技術の適用性を検討した。また、これまでの溶射試験で酸化や結晶化が見られた Cu 基、Zr 基合金のうち、Cu 基を対象により良好な溶射膜形成を可能とする技術の検討を行った。

- ・金属ガラスアトマイズ粉末による耐食性評価試験

平成 28 年度に引き続き薄帯や板材よりも比表面積の大きい粉末粒子を用いて、淡水系地下水および塩水系地下水を考慮した条件での合金の耐食性評価試験を行い、元素浸出量の経時変化などのデータの拡充を行った。比較のため、ステンレス鋼、ニッケル基合金などの従来の高耐食性金属試料を用いた試験も継続して実施し、浸出量などの評価を行った。

- ・Ni 基金属ガラス溶射膜の局部腐食試験

溶射コーティングの適用性およびアトマイズ粉末による耐食性評価試験を通じて処分容器材料として最も有望と考えられる Ni 基合金を対象として、高耐食性金属において問題となる局部腐食の挙動を検討した。

これらの実施内容について、以下の構成で後述の(2)～(5)で報告する。また、そのまとめを 2.3 節に示す。

- ・金属ガラスの物理化学的特性に関する検討（後述の(2)参照）
- ・金属ガラスの溶射コーティングへの適用性（後述の(3)参照）
- ・金属ガラスアトマイズ粉末による耐食性評価試験（後述の(4)参照）
- ・Ni 基金属ガラス溶射膜の局部腐食試験（後述の(5)参照）

(2) 金属ガラスの物理化学的特性に関する検討

これまでの溶射による施工性、耐食性の観点から処分容器材料として Ni 基合金が最も有望

であることが示されており、Ni 基合金に対する物理化学的特性の評価が必要である。よって、平成 28 年度に引き続き Ni 基合金に対して以下に示す 1)～3)の事項を検討した。

- 1) Ni 基データベース (TCNI8) を利用した熱力学計算および分子動力学シミュレーション
- 2) 時間 - 温度 - 変態図の計算とその結果に基づく平衡論の観点からの時間的安定性
- 3) 原子寸法差、混合エンタルピーなどのガラス (アモルファス) 形成能の評価因子

1) Ni 基データベース (TCNI8) を利用した熱力学計算および分子動力学シミュレーション

Ni 基合金として Ni-Nb-Ta 系に対する状態図計算を行った。その一例として、Ni-Nb-Ta 三元系合金の 800 °C および 1,200 °C における計算結果を図 2.1-1 に示す。いずれも、70 at.% 以上の高 Ni 濃度側を表示している。図 2.1-1 のいずれの状態図も、正三角形の形状の合金組成図の上部の Ni リッチ側に黒色で塗りつぶされた Ni 固溶体が存在するとともに、Ni 濃度が 75 at.% 近傍で、合金組成図の左辺から右辺に水平に伸びる $Ni_{75}(Nb, Ta)_{25}$ 相の存在が認められる。これらの図は実験状態図 (P. Villars, et al. 2011) で示されている $Ni_{75}(Nb, Ta)_{25}$ 相の領域と完全一致はしていないが、合金状態図の幾何学的特徴において合致する傾向が見られた。よって、Ni-Nb-Ta 系に対して Ni リッチ側を中心として、実験結果を比較的良好的に再現することが可能と考えられる。

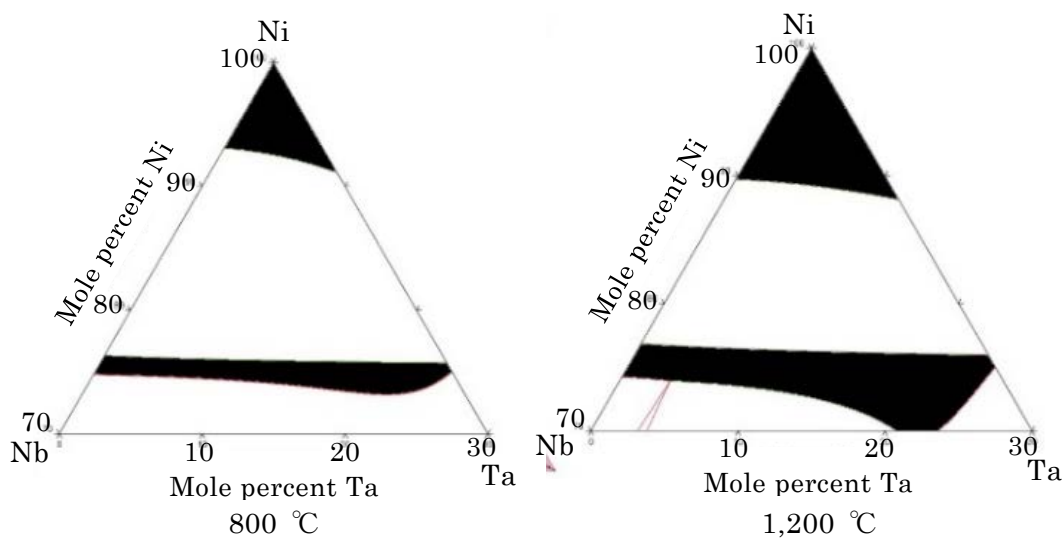


図 2.1-1 800 °C および 1,200 °C における Ni-Nb-Ta 三元系合金の計算状態図

次に、分子動力学 (MD) シミュレーションを行い、アモルファス合金の基礎物性を調査した。対象合金としては、ともに、臨界直径 2 mm のバルク金属ガラスの作製報告がある $Ni_{60}Nb_{30}Ta_{10}$ 合金 (M. Lee et al., 2003) および $Ni_{62}Nb_{38}$ 合金 (L. Xia et al., 2006) を参考として、(a) $Ni_{60}Nb_{30}Ta_{10}$ 合金、(b) $Ni_{60}Nb_{40}$ および (c) $Ni_{60}Ta_{40}$ アモルファス合金を選択した。合金用の MD ポテンシャルとして GEAM (Generalized Embedded Atom Method) が具備されている既存の市販ソフトウェアの「SCIGRESS」Version 2 (富士通) (Fujitsu, 2016) を利用した。なお、GEAM ポテンシャルは、Cu、Ag、Au、Ni、Pd、Pt、Al、Pb、Fe、Mo、Ta、W、Mg、Co、Ti、Zr の単体および合金に対して有効な MD ポテンシャルである。しかしながら、本シミュレーション対象元素として Nb が計算対象に組み入れられていないため、Ta と Ni の原子相関を参考として、

本シミュレーション用に Nb の GEAM パラメータを独自に設定した。なお、原子数 (N)、温度 (T) および圧力 (P) を一定に保つ NTP アンサンブルで MD シミュレーションを行った。

具体的な MD シミュレーションの手法を以下に示す。まず、初期構造として fcc 構造の $10 \times 10 \times 10$ のスーパーセルを作成し、合計 4,000 個の原子をスーパーセル上でランダムに配置した。その後、図 2.1-2 に示す 3 つの熱処理プロセスを施した。第一プロセスは、2,500 K、1.5 ps の高温保持であり、この高温熱処理により合金を液相状態とした。第二プロセスは急冷プロセスであり、2,500 K から 500 K まで 2 ps の時間間隔、すなわち、 10^{15} K s^{-1} の冷却速度で液相合金を急冷した。さらに、第三プロセスとして、急冷合金の構造緩和を目的として、500 K で 1.5 ps の間、低温保持を行った。なお、これ以降、図 2.1-2 で $t = 1.5 \text{ ps}$ の状態を液体合金、 $t = 3.5 \text{ ps}$ の状態を急冷合金または as-Q (Quench) 合金、構造緩和を経た $t = 5 \text{ ps}$ の状態をアモルファス合金と呼ぶことにする。

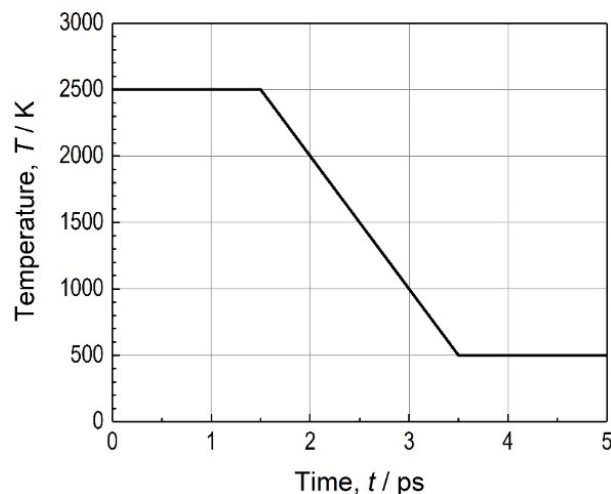


図 2.1-2 MD シミュレーションの熱処理プロセス

第三プロセス ($t = 5 \text{ ps}$) まで施したアモルファス合金、すなわち、(a) $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{30}\text{Ta}_{10}$ 、(b) $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{40}$ および (c) $\text{Ni}_{60}\text{Ta}_{40}$ アモルファス合金の原子配置を図 2.1-3 に示す。図 2.1-3 が示すように、緑色の直線で囲まれた立方体形状のスーパーセル内に、外形上、Ni、Nb および Ta 原子が無秩序充填されており、アモルファス構造が生成していると推測される。この原子の無秩序充填の度合いを定量的に評価するために、2 体分布関数 ($\rho(r)$) を計算した。例として、図 2.1-4(a) の $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{30}\text{Ta}_{10}$ 合金の結果を以下で説明する。図 2.1-4(a) は Ni、Nb および Ta の原子からなる 6 種類の原子対およびその総和である total の 2 体分布関数を距離の関数として示している。図 2.1-4(a) の Total のプロファイルに着目すると、約 0.25 nm の位置に第一ピークがあり、それよりも長距離側の約 0.47 nm、0.68 nm および 0.90 nm に第二、第三および第四ピークが認められる。これらの第一から第四ピークの縦軸強度は、長距離側程小さくなっており、遠方に行くにしたがって振幅が減衰して $\rho(r)$ の値が 1 に近づく傾向が理解できる。この傾向は、液体やガラス (アモルファス) 構造に特有の 2 体分布関数であり、このことから、本 MD シミュレーションの $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{30}\text{Ta}_{10}$ 合金がアモルファス合金として作成できたことを示唆している。個別の原子対の 2 体分布関数をみると、Ni-Ni ペアの 2 体分布関数のピーク

ク位置が 0.235 nm で最も近距離であり、続いて Ni-Nb および Ni-Ta の 2 体分布関数のピーク位置が 0.255 nm で 2 番目に近距離となっている。純金属の状態における Ni、Nb および Ta の原子寸法(半径) (Y. Waseda, 2004) は、それぞれ、 $r_{\text{Ni}} = 0.125$ nm, $r_{\text{Nb}} = 0.143$ nm, $r_{\text{Ta}} = 0.143$ nm で与えられている。これらの原子寸法の値は、上述の、Ni-Ni ペアの 2 体分布関数のピーク位置が 0.235 nm で最近接にあり、続いて Ni-Nb および Ni-Ta の 2 体分布関数のピーク位置が 0.255 nm で 2 番目の近接距離となっている傾向と整合する。

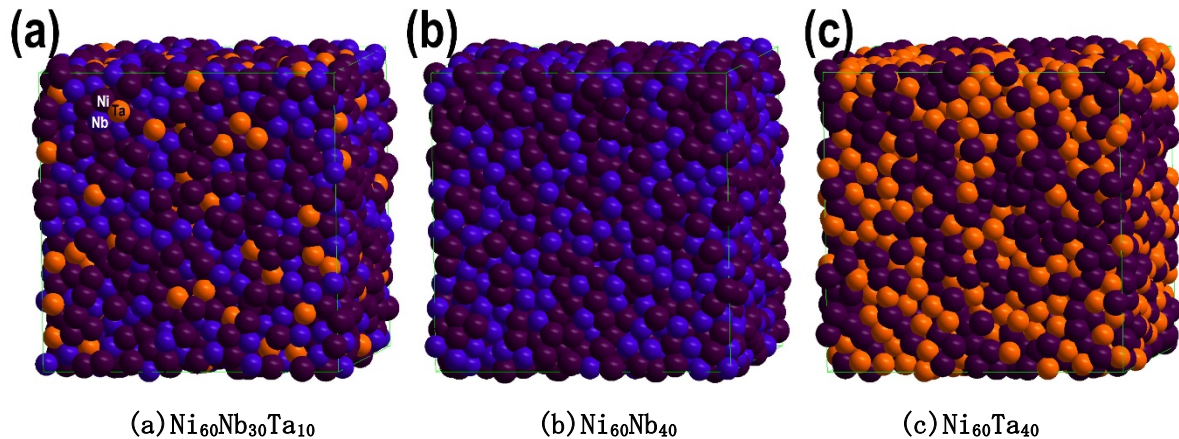


図 2.1-3 各合金の原子配置の MD シミュレーション結果

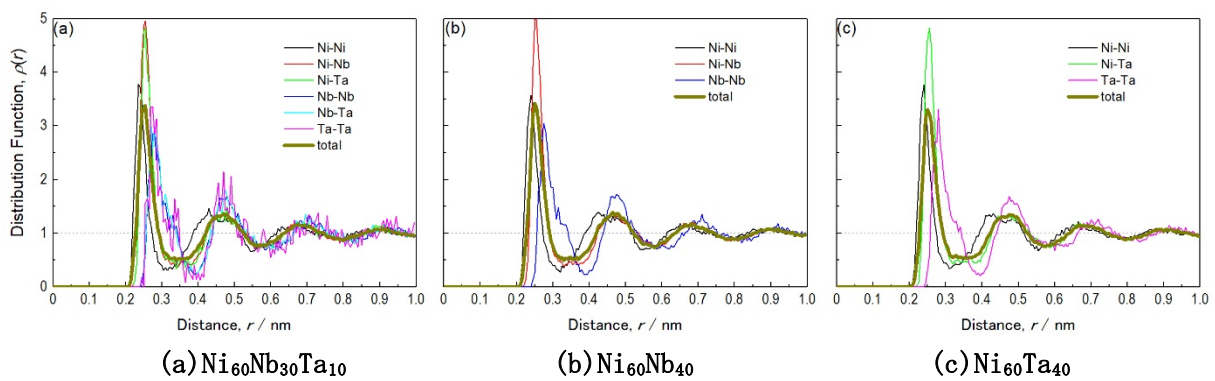


図 2.1-4 各合金の 2 体分布関数

次に、MD シミュレーションソフトウェア (SCIGRESS) に具備されている機能を利用して MD 結果で得られた 3 種類の合金の物性を計算した。なお、計算は、図 2.1-2 の第 3 プロセス、すなわち、 $T=500$ K で施したアモルファス相の構造緩和の時間内で行い、密度 (Density)、等温圧縮率 (Isothermal Compressivity)、ずり粘性 (Shear Viscosity) および構成元素の自己拡散係数 (Self Diffusion Constant) を以下の方法で算出した。

まず、密度 (Density, ρ) は系の全体の質量 (M_{system}) とシミュレーション中の系の体積の平均値 (V_{system}) から式 2.1-1 で求めた。

$$\rho = \frac{M_{\text{system}}}{\langle V_{\text{system}} \rangle} \dots\dots\dots \text{式 2.1-1}$$

次に、自己拡散係数 (D) は全分子で平均した各原子の重心の平均二乗変位 (MSD: Mean Square Displacement) から式 2.1-2 で計算した。

$$D = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{6} \frac{d(\langle MSD \rangle)}{dt} \dots\dots\dots \text{式 2.1-2}$$

一方、等温圧縮率は NPT アンサンブルのシミュレーション中で圧力と体積の振動から式 2.1-3 に基づき求めた。

$$K_r = - \frac{1}{\langle V \rangle} \frac{\partial V}{\partial P} \dots\dots\dots \text{式 2.1-3}$$

なお、 $\langle V \rangle$ はシミュレーション中の平均体積であり、右辺の偏微分項は $V(t)$ を圧力 $P(t)$ に対してプロットした際の曲線を線形近似したときの比例定数である。

最後に、ずり粘性 η は、Green-Kubo の公式から圧力テンソルの平衡振動を使って、式 2.1-4 に基づき計算を行った。

$$\eta = - \frac{V}{k_B T} \int_0^\infty \frac{\langle P_{xy}(t) P_{xy}(0) \rangle + \langle P_{yz}(t) P_{yz}(0) \rangle + \langle P_{zx}(t) P_{zx}(0) \rangle}{3} dt \dots\dots\dots \text{式 2.1-4}$$

ここで、 V は系の体積、 T は系の温度、 k_B はボルツマン定数、 P_{ab} は圧力テンソルの成分項である。

本研究で得られたアモルファス合金の物性の計算結果を表 2.1-1 に示す。表 2.1-1 から、 $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{30}\text{Ta}_{10}$ 、 $\text{Ni}_{60}\text{Ta}_{40}$ および $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{40}$ アモルファス合金の物性は、密度、等温圧縮率および構成元素の自己拡散係数については合金組成の変化に対して大きな変化は認められない。しかしながら、ずり粘性は、 $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{30}\text{Ta}_{10}$ アモルファス合金で特異的に高くなっていることが明らかになった。シミュレーションを実施した $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{30}\text{Ta}_{10}$ 、 $\text{Ni}_{60}\text{Ta}_{40}$ および $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{40}$ のアモルファス合金は、いずれも、Ni の濃度が 60 at.% であり、 $\text{Ni}_{60}\text{Ta}_{40}$ および $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{40}$ のアモルファス合金を起点として、それぞれ、Nb および Ta の合金置換で $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{30}\text{Ta}_{10}$ のアモルファス合金の合金組成となることから、 $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{30}\text{Ta}_{10}$ アモルファス合金のずり粘性は、 $\text{Ni}_{60}\text{Ta}_{40}$ および $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{40}$ アモルファス合金のずり粘性の加算平均が適用されることが予想された。しかしながら、 $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{30}\text{Ta}_{10}$ アモルファス合金のずり粘性は合金組成について特異性を示す結果が得られた。このことは、 $\text{Ni}_{60}\text{Nb}_{30}\text{Ta}_{10}$ アモルファス合金多元合金化の効果を反映していると考えられる。

表 2.1-1 500 K 等温熱処理条件(構造緩和)における MD シミュレーション結果から算出した
アモルファス合金の物性

Property	Symbol / Unit	Ni ₆₀ Nb ₃₀ Ta ₁₀	Ni ₆₀ Ta ₄₀	Ni ₆₀ Nb ₄₀
Density	$\rho / \text{g cm}^{-3}$	10.11	13.38	9.02
Isothermal Compressivity	GPa^{-1}	0.005231	0.005321	0.00542
Shear viscosity/	cP	1,657.36	33.64	8.14
Self diffusion constant of Ni	$D_{\text{Ni}} / 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$	0.4838	0.4652	0.5014
Self diffusion constant of Nb	$D_{\text{Nb}} / 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$	0.3989	—	0.3993
Self diffusion constant of Ta	$D_{\text{Ta}} / 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$	0.3586	0.3645	—

2) 時間 - 温度 - 変態図の計算とその結果に基づく平衡論の観点からの時間的安定性の調査

平成 27 年度に、いわゆる、時間-温度-変態(Time-Temperature-Transformation)図および連続冷却-変態(Continuous-Cooling Transformation)図の考え方に立脚して金属ガラスの安定性を評価した。そこで示されたように、加熱雰囲気中における金属ガラスの安定性を決定する重要な因子として、金属ガラスの粘性、特に、粘性の温度依存性が重要である。金属ガラスの粘性の温度依存性を表現する近似式としては、複数のモデル式が提唱されているが、その中で、式 2.1-5 の Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) 式が最も汎用的に用いられている。

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{B}{T - T_0}\right) \dots\dots\dots \text{式 2.1-5}$$

ここで、 T_0 は理想ガラス遷移温度であり、冷却速度もしくは昇温速度が無限小に遅い場合に検出されるガラス遷移温度である。一般的に、VFT 式はガラス遷移温度($T = T_g$)における粘性値、すなわち、 $\eta = 10^{12} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ を拘束条件として課して実験データのフィッティングがなされる。VFT 式は、実験結果をフィッティングする際に必要なパラメータが η_0 、 B および T_0 の 3 つのみであり、最も簡便であり汎用的に用いられている。ここで、VFT 式に関連するパラメータであるフラジリティ・インデックス (D^*) および m 値を式 2.1-6 および式 2.1-7 で定義する。

$$B = D^* T_0 \dots\dots\dots \text{式 2.1-6}$$

$$m = \frac{BT_g}{(T_g - T_0)^2 \ln 10} \dots\dots\dots \text{式 2.1-7}$$

金属ガラスの粘性データの文献調査を行った結果、Fe₆₇Mo₆Ni_{3.5}Cr_{3.5}P₁₂C_{5.5}B_{2.5} (B. Bochtler et al., 2016) および Ni₆₉Cr_{8.5}Nb₃P_{16.5}B₃ (O. Gross et al., 2017) 各合金に対するデータが報告されていることがわかった。これまで報告されている Fe 基および Cu 基のデータと併せて表 2.1-2 に示す。

表 2.1-2 代表的な金属ガラスの VFT パラメータ (η_0 , B , T_0), ガラス遷移温度 (T_g) および D^* ならびに m 値

No.	Alloy	$\eta_0 / 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$	B/K	T_0/K	T_g/K	D^*	m
1	Fe ₇₉ Si ₁₀ B ₁₁	1.9	4,505	701	818	6.43	117
2	Cu ₄₇ Ti ₃₄ Zr ₁₁ Ni ₈	4	(6,000)	500	(659)	12.00	68
3	Ni _{59.35} Nb _{34.45} Sn _{6.2}	180*	(7,370)	670	887	11.00	60
4	Fe ₆₇ Mo ₆ Ni _{3.5} Cr _{3.5} P ₁₂ C _{5.5} B _{2.5}	5,805	9,723.45	456.5	717	21.3	44.9
5	Ni ₆₉ Cr _{8.5} Nb ₃ P _{16.5} B ₃	85*	6,943.4	466	666	14.9	56.9

*注: $T=T_g$ で $\eta=10^{12} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ を満たすよう、オリジナル文献の値を補正している。

表 2.1-2 で与えられる粘性のデータを用いて算出した、時間-温度-変態図を図 2.1-5 に示す。図 2.1-5 が示すように、Fe₆₇Mo₆Ni_{3.5}Cr_{3.5}P₁₂C_{5.5}B_{2.5} および Ni₆₉Cr_{8.5}Nb₃P_{16.5}B₃ の合金の結晶 (Crystal) の C 型曲線は、相対的に時間軸の長時間側に位置しており、ガラス形成能が高いことを示唆している。特に、同じ Fe 基合金 (Fe₇₉Si₁₀B₁₁ および Fe₆₇Mo₆Ni_{3.5}Cr_{3.5}P₁₂C_{5.5}B_{2.5})、同じ Ni 基合金 (Ni_{59.35}Nb_{34.45}Sn_{6.2} および Ni₆₉Cr_{8.5}Nb₃P_{16.5}B₃) でも、表 2.1-2 に示した粘性挙動の相違により、図 2.1-5 の水平な右向きの矢印のように、C 型曲線が長時間側にシフトしている。このような C 型曲線の長時間側へのシフトは、図 2.1-5 で左上から垂れ下がっている二点鎖線の 5 本の冷却曲線を利用して考える場合、右側の冷却曲線程冷却速度が遅く、そのため、結晶の C 型曲線と接する際に長時間を要することからも理解できる。この図に基づく、Fe₆₇Mo₆Ni_{3.5}Cr_{3.5}P₁₂C_{5.5}B_{2.5} および Ni₆₉Cr_{8.5}Nb₃P_{16.5}B₃ の合金を含め、ガラス遷移温度 (T_g) 以下の温度域において 5 万年 ($\sim 10^{12.2} \text{ s}$) 程度は結晶化が生じないと推定される。

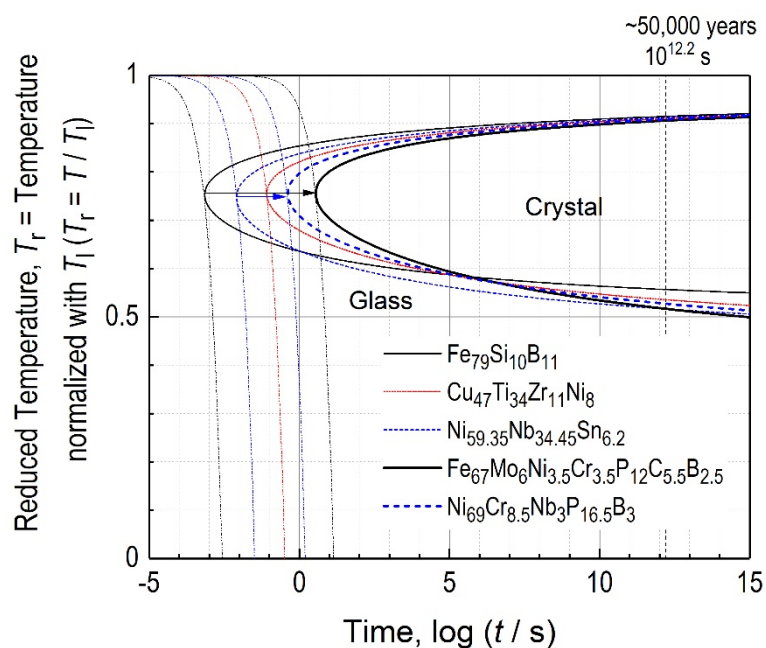


図 2.1-5 Fe 基、Cu 基および Ni 基アモルファス合金の時間-温度-変態図の計算結果

3) 原子寸法差、混合エンタルピーなどのガラス(アモルファス)形成能の評価因子

従来、混合エンタルピー (ΔH_{mix}) とともに、原子寸法差の効果として例えば δ パラメータ (Y. Zhang et al., 2008) を用いてアモルファス形成能の評価因子の計算がなされているが、最近、これらの補正を行う研究が展開されつつあり、これまでに Ω パラメータ (X. Yang and Y. Zhang, 2012; Y. Zhang et al., 2014) などに着目して評価を行った。平成 29 年度は、原子寸法差の効果を定量的に評価するパラメータとして γ パラメータ (Z. J. Wang et al., 2015) と δ パラメータの相関について、MD シミュレーションで研究対象とした $Ni_{60}Nb_{30}Ta_{10}$ 合金を対象として評価した。

まず、 γ パラメータは式 2.1-8 で定義される。

$$\gamma = \frac{\omega_s}{\omega_L} = \left(1 - \frac{\sqrt{(r_s + \bar{r})^2 - \bar{r}^2}}{(r_s + \bar{r})^2} \right) \bigg/ \left(1 - \frac{\sqrt{(r_L + \bar{r})^2 - \bar{r}^2}}{(r_L + \bar{r})^2} \right) \dots\dots\dots \text{式 2.1-8}$$

$$\bar{r} = \sum_{i=1}^N c_i r_i \dots\dots\dots \text{式 2.1-9}$$

ここで、式 2.1-8 で示される γ パラメータは構成元素の原子半径の最小値 (r_s) と最大値 (r_L) に関する項 (ω) の比、すなわち、 ω_s/ω_L で定義される。すなわち、 γ パラメータは構成元素の最小、最大および平均原子半径 (r_s , r_L および \bar{r}) の関数である。なお、 \bar{r} は式 2.1-9 で表されるように、合金組成 c_i に関する加算平均である。なお、 γ パラメータは原子半径が大きな原子 (r_L) および小さな原子 (r_s) が合金系の平均半径の原子 (\bar{r}) に接する際の角度として与えられている (Z. J. Wang et al., 2015)。

一方、 δ パラメータは式 2.1-10 で定義される。

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i \left(1 - \frac{r_i}{\bar{r}} \right)^2} \times 100 \dots\dots\dots \text{式 2.1-10}$$

式 2.1-8 で定義される γ パラメータと δ パラメータの相関を調査した平成 28 年度の報告に、 $Ni_{60}Nb_{30}Ta_{10}$ 合金のプロットを追加した結果を図 2.1-6 に示す。図 2.1-6 で、 $Ni_{60}Nb_{30}Ta_{10}$ 合金は、同じ γ パラメータの値 ($\gamma = 1.19$) の金属ガラスの中で、最大の δ の値を有していることが分かる。ここで、 γ パラメータが原子寸法の最大および最小値に着目していることを考慮すると、 $Ni_{60}Nb_{30}Ta_{10}$ 合金が、同じ γ パラメータの値 ($\gamma = 1.19$) の金属ガラスの中で、最大の δ の値を有していることは、 $Ni_{60}Nb_{30}Ta_{10}$ 合金の平均原子半径に対する原子寸法差の特徴が反映されている。 $Ni_{60}Nb_{30}Ta_{10}$ 合金の特徴としては、まず、Nb と Ta の原子寸法が同一であるため、疑似的な 2 元素とみなすことができる点を挙げることができる。このような特徴を持つ $Ni_{60}Nb_{30}Ta_{10}$ 合金の原子寸法差を δ で評価した場合、統計的に与えられているアモルファス合金の母集団に対して、最も効率的にアモルファス構造をとる原子寸法差が得られており、そのために、同じ γ パラメータの値 ($\gamma = 1.19$) の金属ガラスの中で、最大の δ の値が得られていると考えられる。

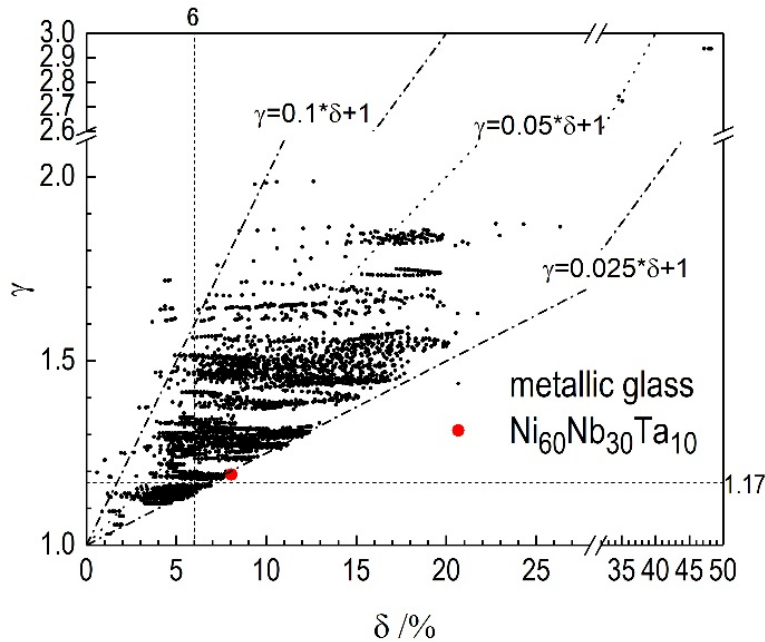


図 2.1-6 三元系アモルファス合金に対する δ パラメータと γ パラメータの相関関係

最後に、 δ パラメータと γ パラメータの合金組成依存性の解析を行った結果を図 2.1-7 に示す。図 2.1-7 は、Ni-Nb-Ta および Zr-Al-Ni 合金について、 δ パラメータと γ パラメータの値を等高線表示した図である。なお、原子半径については、 $r_{Zr}=0.162$ nm、 $r_{Al}=0.143$ nm、 $r_{Ni}=0.128$ nm、 $r_{Nb}=0.143$ nm、 $r_{Ta}=0.143$ nm を用いた (Y. Waseda, 2004)。この原子半径から、Zr-Al-Ni 合金では、構成元素の原子寸法が、相対的に、「大-中-小」型であるのに対して、Ni-Nb-Ta では、「小-中-中」型であると理解できる。図 2.1-7 に示した δ パラメータと γ パラメータの等高線図から、Ni-Nb-Ta では δ パラメータと γ パラメータが同様の合金依存性を示すことが分かる。一方、Zr-Al-Ni 合金では δ パラメータと γ パラメータは異なった合金組成依存性を示す。ここで、Ni-Nb-Ta 合金では、 $r_{Nb}=0.143$ nm、 $r_{Ta}=0.143$ nm であるために、等 Ni 濃度で Nb と Ta が置換した合金組成線上で δ パラメータと γ パラメータの値が等しくなる傾向が反映されている。この傾向は、図 2.1-7 (c) の Zr-Al-Ni 合金の γ パラメータでも認められ、等 Zr 濃度で Al と Ni が置換した合金組成線上で γ パラメータの値が等しくなっている。式 (2.1-8) で定義される γ パラメータでは、多元系合金においても、最大および最小の原子寸法差をもつ元素の原子半径の特徴が強調されている傾向が図 2.1-7 に示されていることが明示された。 γ パラメータによる解析では、いわゆる Hume-Rothery の固溶限との関係が示されている点で優れているが、多元系合金で構成される構成元素の原子寸法差に差異がない場合には、必ずしも δ パラメータの値の傾向と一致しないことが示唆される。図 2.1-7 のように、 δ パラメータの合金組成依存性を等高線表示した解析は、Takeuchi et al. (2013) が実施しており、その際には、 δ パラメータとボルツマン定数 (k_B) で規格化したミスマッチエントロピー (S_o) が同等の傾向を示すことが報告されている。したがって、合金の原子寸法差の効果を表すパラメータとして、 S_o/k_B 、 δ パラメータ、 γ パラメータを考えた場合、前者の 2 つ (S_o/k_B 、 δ パラメータ) と γ パラメータとは異なる性質をもつことが明らかになった。したがって、総合的に考えて、異なる性質を持つ δ パラメータと γ パラメータの複合評価が合金

の原子寸法差評価には有効と考えられる。

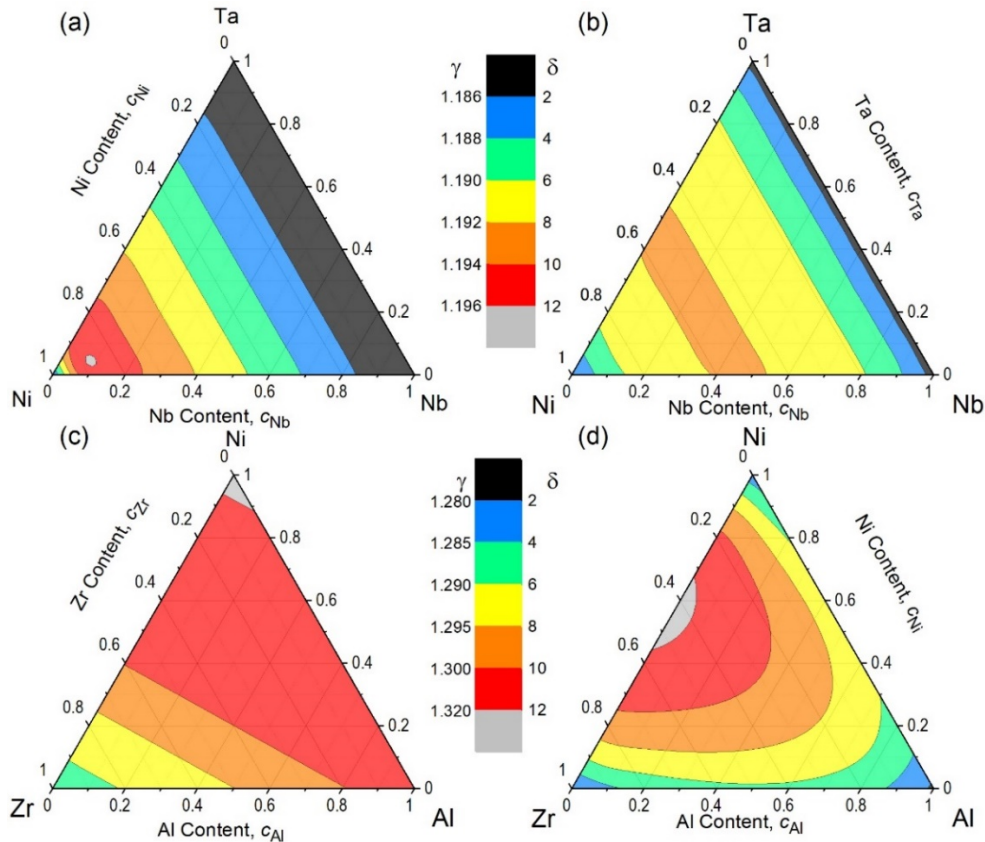


図 2.1-7 Ni-Nb-Ta および Zr-Al-Ni 合金の δ パラメータと γ パラメータの合金組成依存性 ((a)と(c)は γ パラメータ、(b)と(d)は δ パラメータ)

(3) 金属ガラスの溶射コーティングへの適用性

金属ガラスの溶射コーティングへの適用性の内容を、以下の 1)～4) の構成で報告する。

- 1) Ni 基金属ガラス溶射膜の厚膜化の検討
- 2) 異形状基材への Ni 基金属ガラスの溶射の検討
- 3) Cu 基金属ガラスの溶射
- 4) Ni 基金属ガラス溶射被膜の耐食性に関する予備的調査

1) Ni 基金属ガラス溶射膜の厚膜化の検討

金属ガラスの溶射には、いずれも可燃性物質と酸化剤から生成する火炎（フレーム）に原料粉末を投入し基材に投射するフレーム溶射法に分類される手法が報告されており、その中でも、高速フレーム溶射（HVOF）や図 2.1-8 に示す急冷遷移制御溶射ガンを用いた急冷フレーム溶射が報告されている。HVOF では金属ガラス粉末を完全に熔融せずに過冷却液体状態で基材に噴霧する方法であり、過冷却液体領域の広い金属ガラスでなければ溶射ができないという条件があるため、平成 26 年度からの溶射コーティングへの適用では、急冷フレーム溶射により検討を行なっている。

平成 26 年度では、処理容器へのコーティングをした場合の容器のハンドリングなども想定

して、Ni 基金属ガラスを厚膜化した際の問題点などを抽出することを目的に、多数回の溶射膜の積層を試みた。その検討の結果、2.0 mm 厚さまでの溶射膜の作製を検討し、さらに問題点の抽出を行った。その結果、2 mm 厚までは厚膜化しても、0.1 mm 程度の膜を単純に積層した状態であり、内部の気泡なども変化せず、かつ金属ガラスからなる厚膜が作製できることを確認した。しかし、断面観察を行ったところ、溶射ガン内部に付着した破片が溶射膜内に確認され、長時間連続しての溶射を行う場合の問題として明らかになった。平成 27 年度では、厚さ 1 mm 程度で一回程度、溶射ガン内部の清浄処理を行なうことで、多数回の溶射膜の積層を試み、破片の観察されない 2 mm 厚の溶射に成功した。さらに、平成 28 年度では、溶射ガン内部の清浄処理も含めて作業ルーチンを改良し、さらに厚い溶射膜(3 mm)が作製可能であることを明らかにした。そこで、平成 29 年度(本年度)は、容器のハンドリングなどを考慮してさらに厚膜の 5 mm 厚の溶射膜が作製可能であるか検討した。

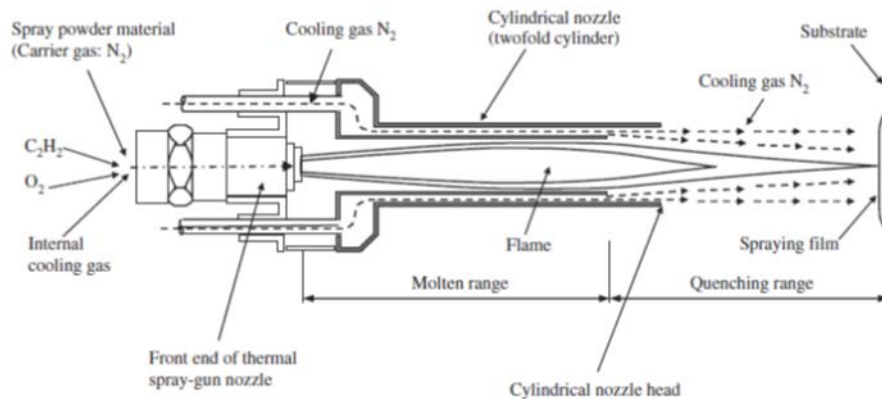


図 2.1-8 急冷フレイム溶射に用いる急冷遷移制御溶射ガンの模式図

図 2.1-9 に 5 mm 厚に $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 金属ガラスを溶射コーティングした溶射材の外観を示す。基材は 50 mm 角の SS400 の板材である。いずれの外観も、これまでの異なる厚みの溶射材と相違がない。図 2.1-10 に図 2.1-9 で示した溶射材のコーティング部分の断面の外観と顕微鏡像を示す。この断面像は、結晶の存在を明瞭にするために凹凸に高いコントラストが得られる微分干渉観察を行なっているため、気孔は強調され観察されている。平成 28 年度に報告した 3 mm 厚の Ni 基金属ガラス溶射材と同様に、5 mm 厚であっても割れなどがなく結晶による層状のコントラストも観察されていない。図 2.1-11 に溶射材の表面の XRD 図形を示す。XRD にも結晶析出に起因するシャープなピークが観察されず、ガラス相特有のブロードなピークのみが観察された。これらの結果、溶射作業途中で溶射ガン内部に生じる付着物を取り除き清掃するという作業上の留意により、薄膜を積層した状態を継続することが可能であり、5 mm 厚の溶射膜を作製できることが分かった。しかし、図 2.1-12 に示すように一部に未溶融粒子が付着したと考えられる 0.1 mm 径以下の結晶粒子が観察されており、その頻度は 25 mm×5 mm の観察視野に 15 個ある程度であった。この結晶粒子を下げるためには、ガン内部の付着物の除去などの作業上の留意事項についてもさらなる検討が必要であることが示唆された。

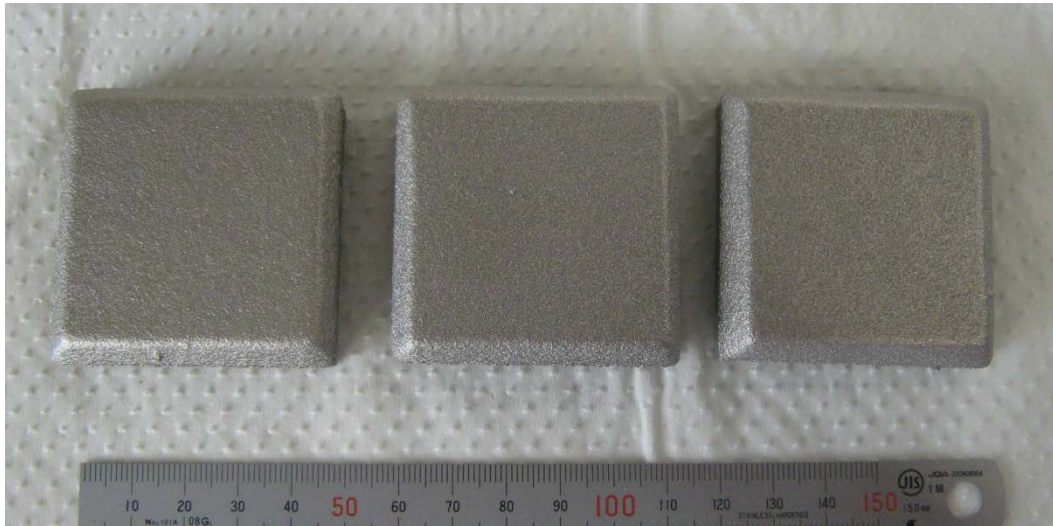


図 2.1-9 5 mm 厚の Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラス溶射材の外観（上：鳥瞰、下：今回作製した 3 個のサンプルの表面）

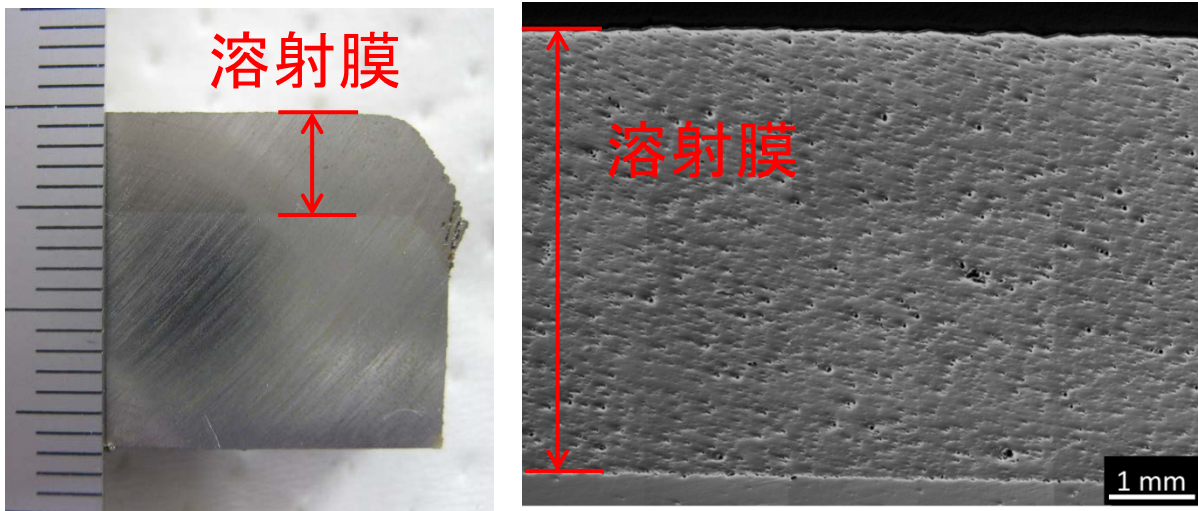


図 2.1-10 5 mm 厚の Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラス溶射材の断面（左：外観、右：微分干渉観察）

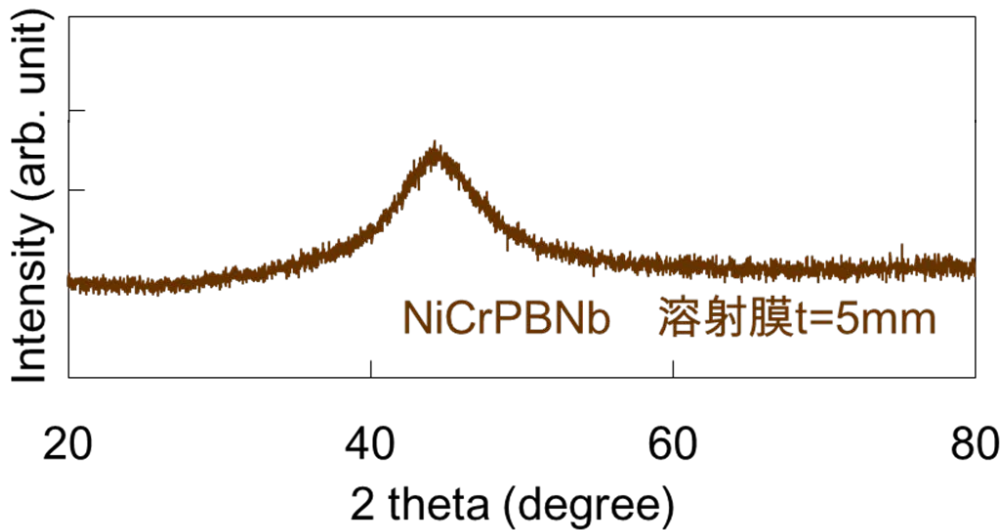


図 2.1-11 5 mm 厚の Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラス溶射材の表面の XRD 図形

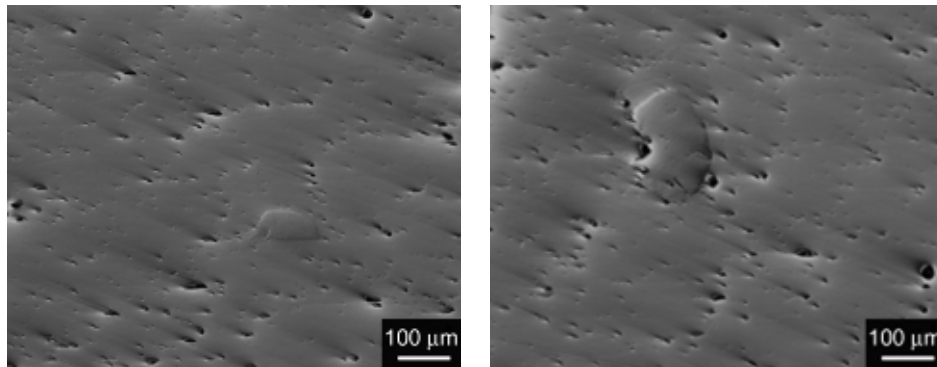


図 2.1-12 5 mm 厚の溶射材断面に見られた結晶

2) 異形状基材への Ni 基金属ガラスの溶射の検討

容器への溶射を考慮した場合、底部などの平面および側面などの大きな曲率の表面以外への溶射コーティングも必要になることが考えられる。そこで、平面以外の形状への溶射コーティングを試みている。これまで、JIS STPG370（圧力配管用炭素鋼鋼管継目無）、サイズは 8A-SCH80（外径 13.8 mm、肉厚 3.0 mm）の基材を用いて、パイプを回転させると同時に長手方向にガンを走査して溶射を実施したところ、溶射膜中に亀裂が観察され、鋼管の回転速度を含めた溶射ガンの走査速度を中心に溶射条件の検討が必要であることが判明した。そこで厚膜コーティングの知見からガン走査速度を上げて円筒材への溶射を試みた。図 2.1-13 に、上記基材へ Ni 基金属ガラスを 0.5 mm 厚で溶射コーティングした試料の外観を示す。図中の左右方向に走査しているため中心部分に厚みがある形状ではあるが、平面の溶射と同様に光沢を有し剥離なども観察されていない。図 2.1-14 に溶射膜表面の XRD 図形を示す。厚膜と同様に結晶相の析出は認められず表面についてはガラス相であることが確認された。しかし、図 2.1-15 の溶射膜断面に示すように、基材と溶射膜との界面に一層の結晶化を生じたような断面が観察されており、溶射の極初期に若干高熱であったことがうかがえる。これは、溶射初期に基材の予熱とフレームからの入熱および外部からの冷却の調整が不足であったことが

原因と考えられる。形状が複雑であれば、入熱方向や冷却方向が複雑になるため、溶射操作中のみでなく、極初期の溶射条件にも注意を払うことが必要である。

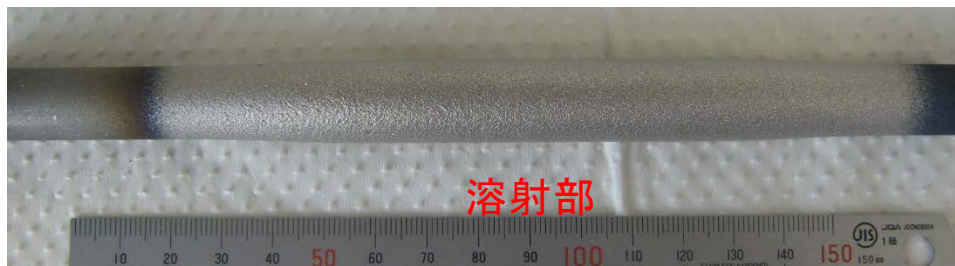


図 2.1-13 Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスの溶射を行なった外径 14 mm の鋼管

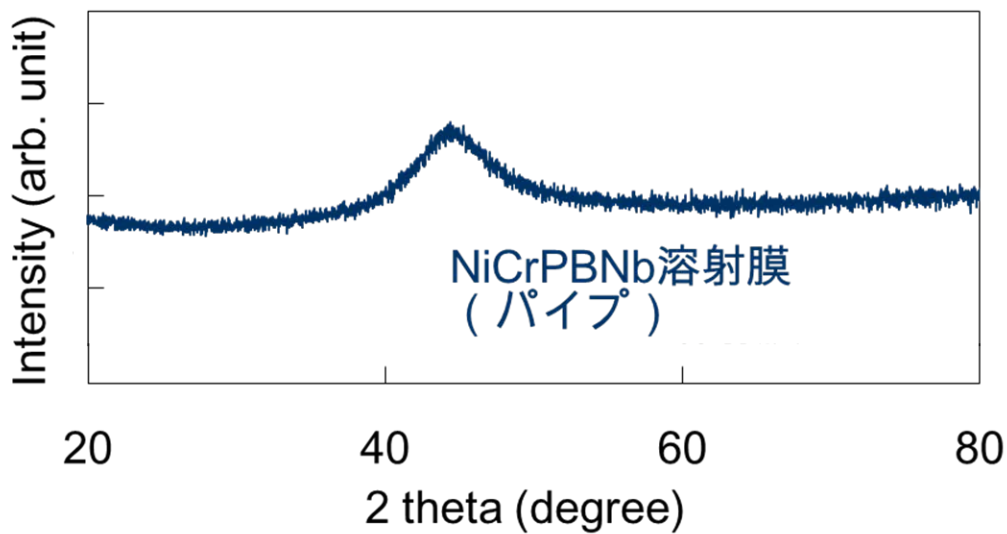


図 2.1-14 Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスの溶射を行なった外径 14 mm の鋼管表面の XRD 図形

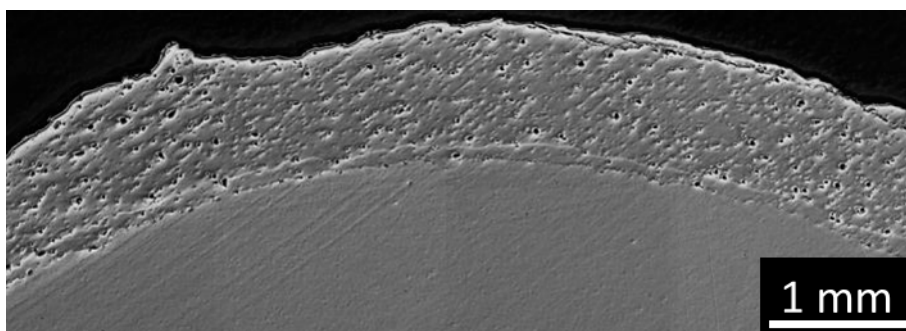


図 2.1-15 Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスの溶射を行なった外径 14 mm の鋼管断面

3) Cu 基金属ガラスの溶射

アルカリ水溶液環境下における耐食性が良好な Cu 基金属ガラスとして、Cu-Zr-Ti 系金属ガラスを選定しているが、Zr の酸化が生じやすいなどの原因のために、ガスフレーム溶射では良好な溶射膜の形成が困難な結果が得られている。しかし、以前溶射試験を行なった $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 合金は Cu 基金属ガラスの中ではガラス形成能が高いとは言えないため、新たに高

ガラス形成能の Cu 基金属ガラスを見出し、溶射膜の形成を試みた。溶射に用いた組成は $\text{Cu}_{56}\text{Ni}_4\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ であり、金型鑄造法により 4 mm φ のバルク金属ガラスが作製可能なガラス形成能を有している組成である。

図 2.1-16 に $\text{Cu}_{56}\text{Ni}_4\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ の溶射被膜の外観を示す。表面が茶色を呈しており、酸化していることがうかがえる。図 2.1-17 に溶射膜断面の微分干渉観察像を示す。溶射膜には図中に黒く見える部分で付着液滴の間に酸化膜が存在している、または液滴の状態で酸化してしまうために酸化膜の殻が割れずにそのまま溶射膜に付着していると思われる様子が確認された。また、図 2.1-18 の XRD 図形が示すように、溶射膜には結晶析出に伴う鋭いピークが存在し、ガラス形成能を増大させても合金の酸化を起因とする結晶化を抑えることができなかった。

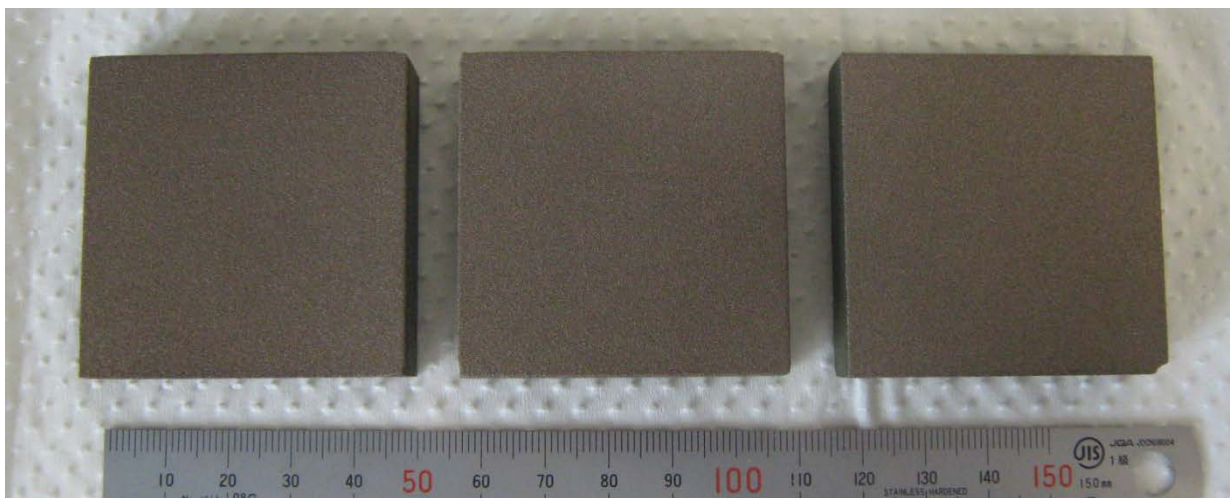


図 2.1-16 急冷型フレーム溶射により作製した $\text{Cu}_{56}\text{Ni}_4\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ 溶射被膜外観

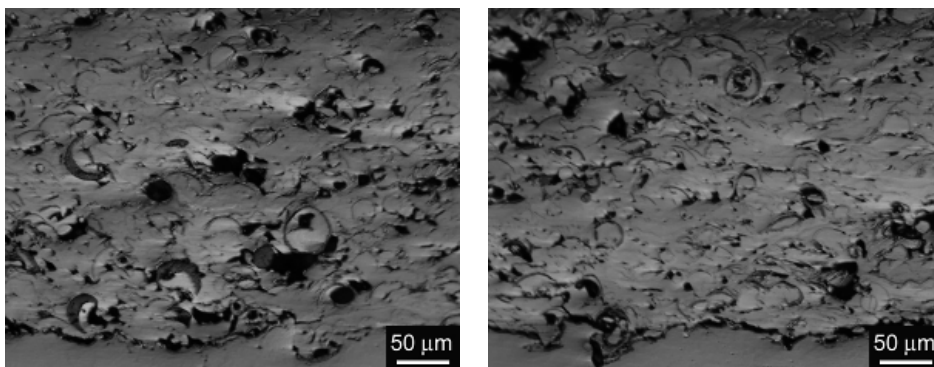


図 2.1-17 急冷型フレーム溶射により作製した $\text{Cu}_{56}\text{Ni}_4\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ 溶射被膜断面

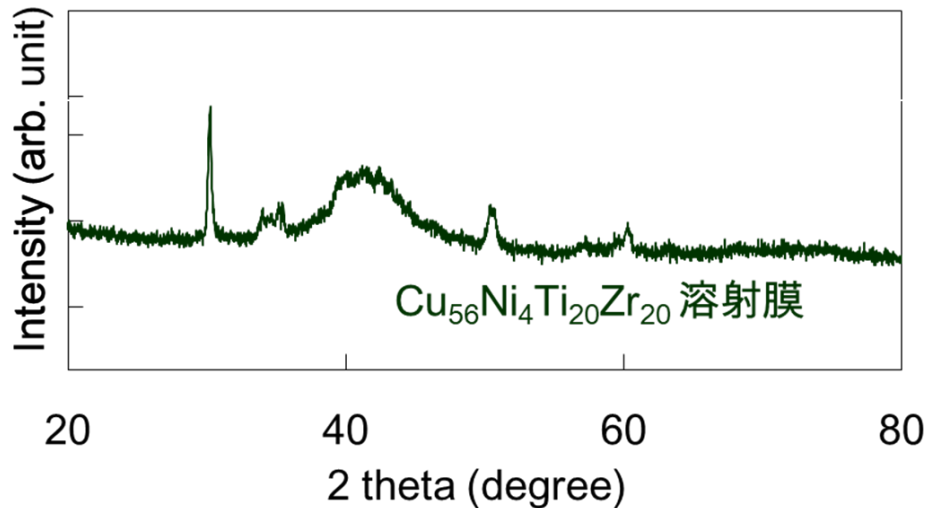


図 2.1-18 急冷型フレーム溶射により作製した $\text{Cu}_{56}\text{Ni}_4\text{Ti}_{20}\text{Zr}_{20}$ 溶射被膜表面の XRD 図形

そこで、Ti などの活性金属の溶射膜作製用に近年開発が進められている新型プラズマ溶射装置を用いて酸化を抑制し、さらに酸化の抑制により結晶相の生成を抑えられる可能性があるか試験を行なった。図 2.1-19 に、この新型プラズマ溶射法により作製した $\text{Cu}_{56}\text{Ni}_4\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ 組成の溶射膜外観を示す。この溶射膜は図 2.1-16 と同一組成で同一ロットの粉末から作製した溶射膜であり、溶射法が違うのみである。新型プラズマ溶射法により作製した溶射膜表面は、酸化による変色が認められず、溶射膜特有の金属光沢を有している。これは図 2.1-16 の急冷型フレーム溶射法を用いた場合と比較すると、全く異なる表面状態であり酸化が抑制されていることがわかる。また、表面には亀裂などが生じることもなく製膜できていることから、この新型溶射装置の開発が進行することにより十分に溶射膜を生成できる可能性があると考えられる。図 2.1-20 に、上記溶射被膜の断面を示す。粒子間の明確な酸化膜が観察されてないことから、酸化の抑制がされていると推察されるが、気孔が多く、また未熔融粒子も認められることから、溶射ガンの改造および溶射条件の検討が今後も必要である状況であることが分かる。しかし、図 2.1-21 の溶射膜表面の X 線回折図形には結晶化に伴う鋭いピークが存在せずガラス相特有のブロードなピークのみであることから、被膜はガラス相であり、酸化抑制により結晶化も防ぐことができることが分かった。Zr などの活性で酸化しやすい金属を含有する金属ガラスの溶射膜の生成には、このように酸化を抑える溶射技術の開発が必要であり、今後の開発が期待される。

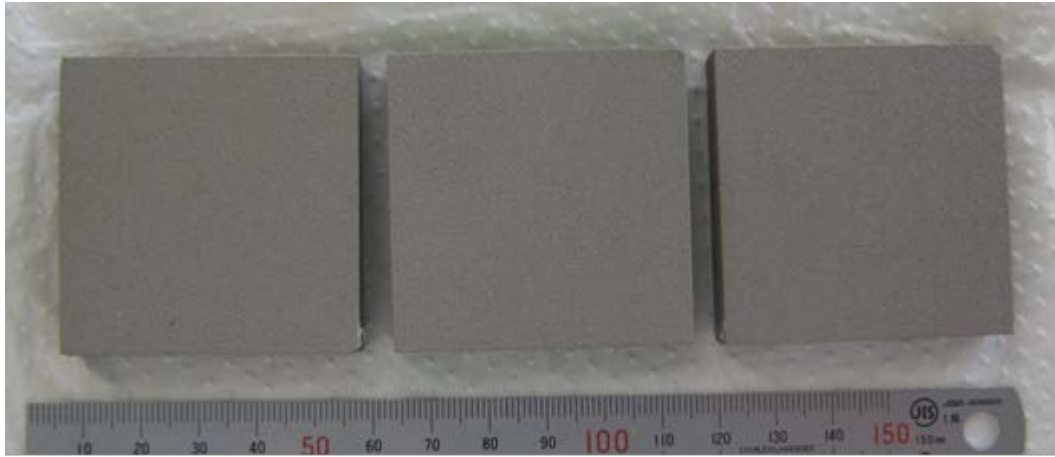


図 2.1-19 新型プラズマ溶射装置を用いて作製した $\text{Cu}_{56}\text{Ni}_4\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ 溶射被膜外観

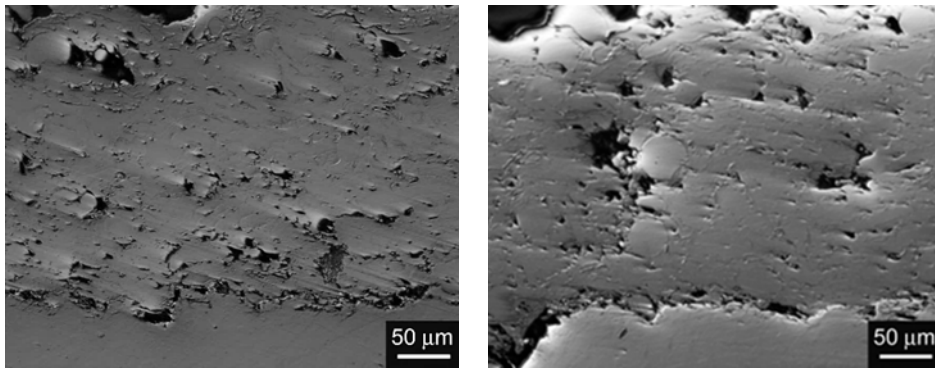


図 2.1-20 新型プラズマ溶射装置を用いて作製した $\text{Cu}_{56}\text{Ni}_4\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ 溶射被膜断面

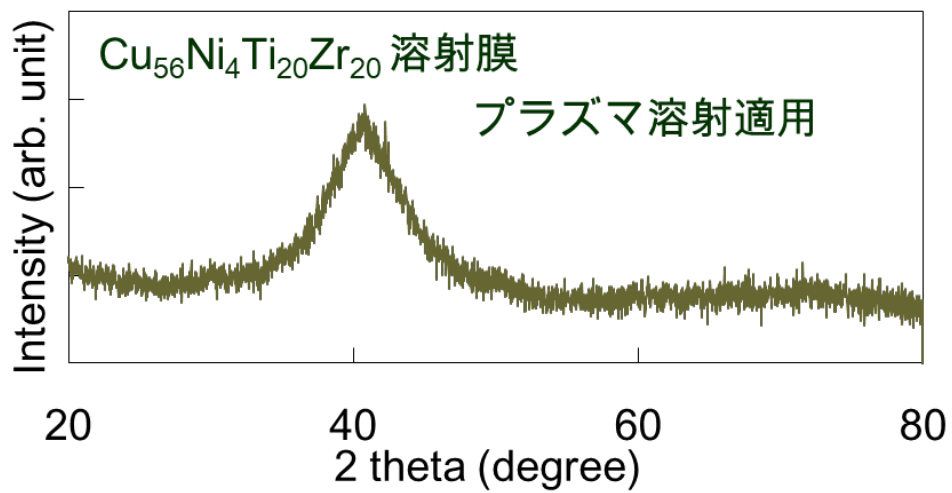


図 2.1-21 新型プラズマ溶射装置を用いて作製した $\text{Cu}_{56}\text{Ni}_4\text{Zr}_{20}\text{Ti}_{20}$ 溶射被膜表面の XRD 図形

4) Ni 基金属ガラス溶射被膜の耐食性に関する予備的調査

平成 27 年度に作製した Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラス溶射膜について、40 g L⁻¹ の NaCl を酢酸にて pH3 に調整した腐食液に浸漬し、耐食性を評価した。この液は、塩水噴霧試験で使われる CASS 液から塩化第二銅を抜いた組成の腐食液である。図 2.1-22 に 0.5 mm 厚から 2.0 mm 厚の Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスの溶射を行った表面の実体顕微鏡像を示す。中心の円形部分が浸漬液に触れている部分で、その周りは O リングによって支持されている。0.5 mm 厚に関しては浸漬試験後 6 ヶ月で腐食液が着色を呈しパッキンとの境界で亀裂が観察された。また、1 mm 厚についても 12 ヶ月で腐食液の着色が認められた。図 2.1-23 に各試料の浸漬部位の形状測定結果を示す。0.5 mm 厚については浸漬 6 ヶ月より凸に膨らみ、溶射の欠陥部から腐食液が侵食し基材を腐食していることがうかがえる。1.0 mm 厚については浸漬 12 ヶ月後に膨らみが生じ始めており、溶射膜の欠陥に起因するものと考えられる。耐腐食性の向上のためには溶射欠陥を極力抑制する溶射技術の向上とともに、厚膜の形成が重要と考えられる。

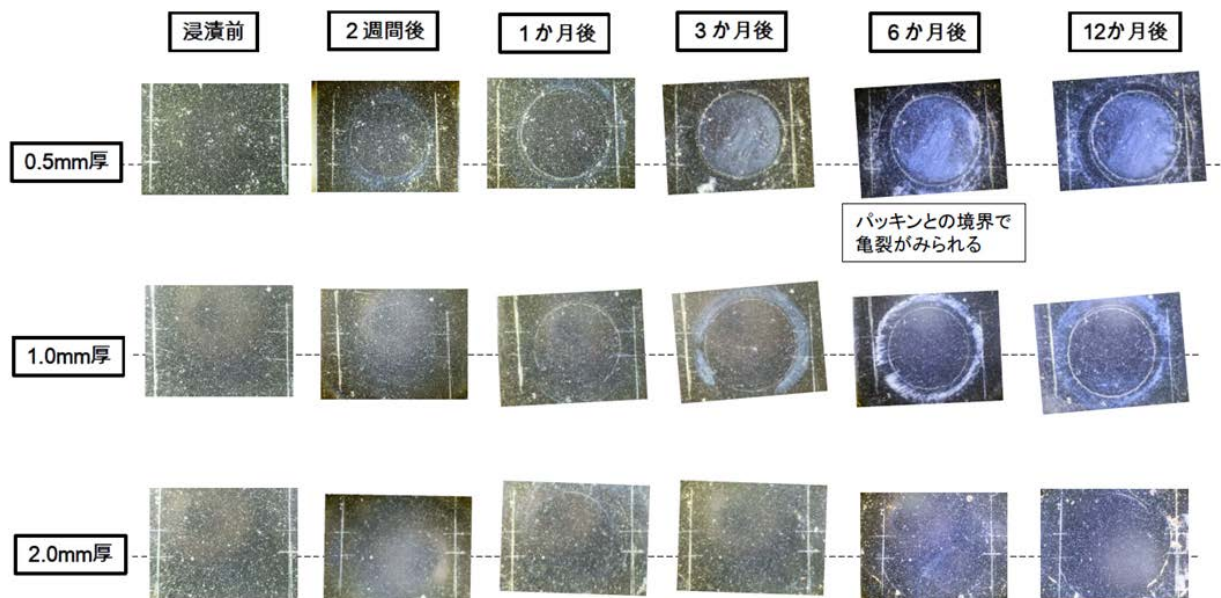


図 2.1-22 0.5 mm 厚から 2.0 mm 厚の Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスの溶射を行った表面の浸漬試験による表面形態変化

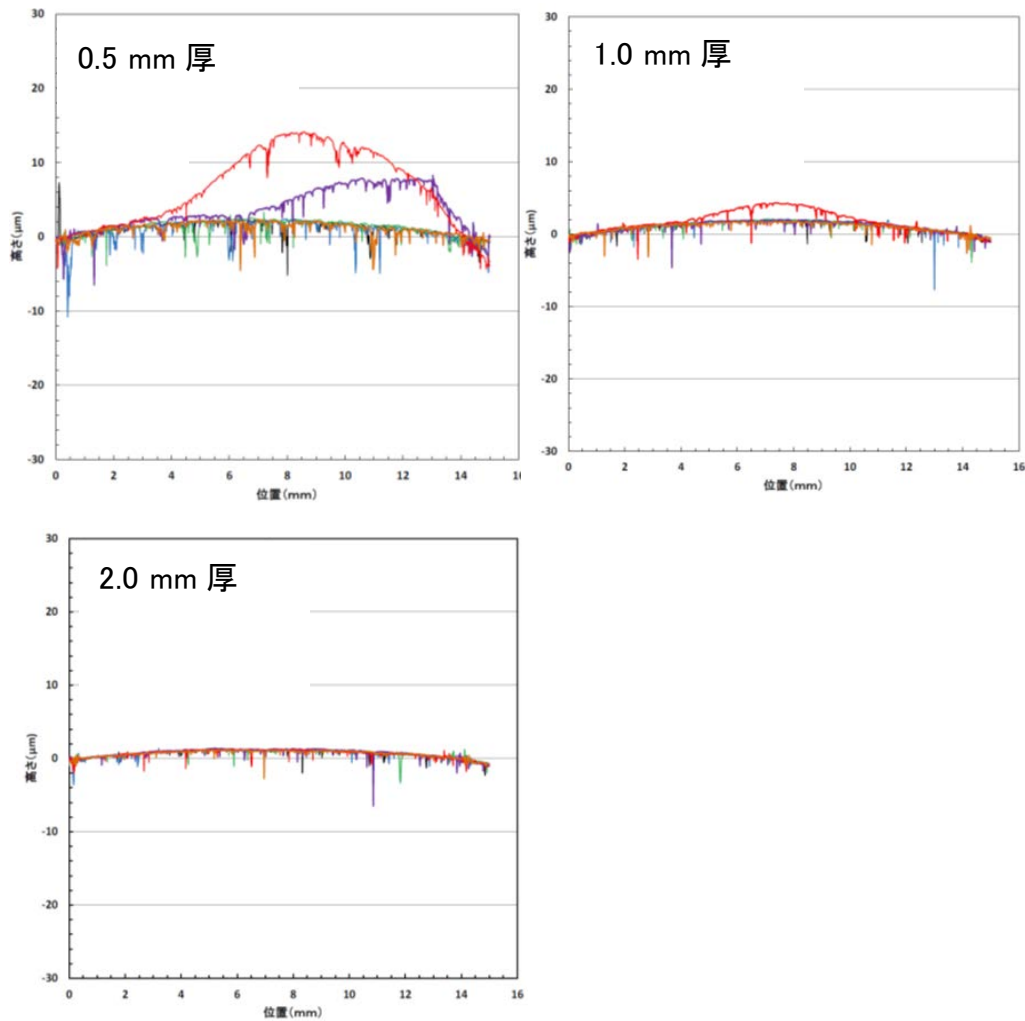


図 2.1-23 0.5 mm 厚から 2.0 mm 厚の Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスの溶射を行った表面の浸漬試験による表面形状変化（オレンジ：浸漬前、黒：2 週間後、青：1 ヶ月後、緑：3 ヶ月後、紫：6 ヶ月後、赤：12 ヶ月後）

(4) 金属ガラスアトマイズ粉末による耐食性評価試験

金属ガラスアトマイズ粉末による耐食性評価試験について、以下の 1)～3)の構成で報告する。

- 1) 実施概要
- 2) 金属ガラスのアトマイズ粉末を用いた浸出試験方法
 - ① 金属ガラス試料および合金試料
 - ② 浸出試験
- 3) 結果および考察
 - ① Zr 基金属ガラス
 - ② Ni 基金属ガラス
 - ③ Cu 基金属ガラス
 - ④ 従来の高耐食性金属材料
 - ⑤ 元素浸出による劣化の推定

1) 実施概要

金属ガラスの耐食性検討として、金属ガラスのアトマイズ粉末を用いた耐食試験を平成 26 年度より継続実施中である。非晶質構造である金属ガラスは、均質な不動態被膜を形成しやすいことにより高耐食性を示すことが期待される。この非晶質構造の形成および保持には、それに適した元素比率の状態にあることが必要であるため、本検討においては金属ガラス材料からの元素浸出に着目した浸出試験を行っている。試験条件は、処分環境を想定したセメント系材料使用による高アルカリ条件、埋め戻し期間の酸化雰囲気から深地下の還元雰囲気を考慮した酸化還元条件、淡水および塩水条件、地下の温度勾配を考慮した温度条件について設定した。

平成 28 年度までの浸出試験の結果、Zr 基金属ガラス材料である $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ と $Zr_{57}Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}Nb_5$ 、および Cu 基金属ガラス材料である $Cu_{60}Zr_{30}Ti_{10}$ についてはほぼ元素浸出が認められず、高い耐食性能を期待できる結果が得られている。また、Ni 基金属ガラス材料である $Ni_{65}Cr_{15}P_{16}B_4$ および $Ni_{65}Cr_{13}Nb_2P_{16}B_4$ については微量の Cr、P、B の浸出が確認されたものの、試験に使用した試料総量から考えれば極少量に留まっていることが確認された。これらの耐食試験においては、SEM (Scanning Electron Microscope) による外観観察および EDS (Energy Dispersion X-ray Spectrometer) による元素分布分析、元素比率分析を併せて実施しており、金属ガラス粉末試料の外観および元素比率に有意な変化は生じていないことを確認している。また、金属ガラスとの比較として、耐食性が高いとされる従来の合金材料である SUS316L およびハステロイ C276 についても同様の浸出試験を行っている。これらの従来合金からはある程度の Cr の浸出が確認されており、同じく Cr を含有する Ni 基金属ガラスと比較するとその浸出は大きいことが示された。

平成 29 年度は種々の金属ガラス粉末および従来合金を用いた耐食試験を継続実施し、浸漬期間が 1,000 日を超えるデータを取得した。

2) 金属ガラスのアトマイズ粉末を用いた浸出試験方法

① 金属ガラス試料および合金試料

本検討の浸出試験には、ガスアトマイズ法により作製された金属ガラスの粉末を使用した。ガスアトマイズ法は、合金溶湯に高速のガス(アルゴンや窒素、ヘリウムなどの不活性ガス)を吹き付けることで飛散および急冷凝固させて合金粉末を得る方法である(井上, 2009)。

表 2.1-3~表 2.1-9 は、各金属ガラス粉末および合金試料について含有する各元素の物質質量[mo1]を計算したものである。後述する浸出試験では 1 サンプルあたり 8 g の金属粉末を使用したため、表中では 8 g あたりの物質質量[mo1]を示した。後述の浸出試験結果においては、これら試料中の物質質量に対して浸出した元素の物質質量を浸出率として整理する。

表 2.1-3 金属ガラス $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ 粉末の組成 (元素比率より計算)

元素	原子量	モル比[%]	重量比[%]	8g中の重量[g]	8g中の物質質量[mol]
Zr	91.2	55	67.02	5.36	5.87×10^{-2}
Cu	63.5	30	25.45	2.04	3.21×10^{-2}
Ni	58.7	5	3.92	0.31	5.34×10^{-3}
Al	27.0	10	3.61	0.29	1.07×10^{-2}

表 2.1-4 金属ガラス $Zr_{57}Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}Nb_5$ 粉末の組成 (元素比率より計算)

元素	原子量	モル比[%]	重量比[%]	8g中の重量[g]	8g中の物質質量[mol]
Zr	91.2	57	67.95	5.44	5.96×10^{-2}
Cu	63.5	15.4	12.78	1.02	1.61×10^{-2}
Ni	58.7	12.6	9.67	0.77	1.32×10^{-2}
Al	27.0	10	3.53	0.28	1.05×10^{-2}
Nb	92.9	5	6.07	0.49	5.22×10^{-3}

表 2.1-5 金属ガラス $Ni_{65}Cr_{15}P_{16}B_4$ 粉末の組成 (元素比率より計算)

元素	原子量	モル比[%]	重量比[%]	8g中の重量[g]	8g中の物質質量[mol]
Ni	58.7	65	74.31	5.94	0.101
Cr	52.0	15	15.19	1.22	2.34×10^{-2}
P	31.0	16	9.66	0.77	2.49×10^{-2}
B	10.8	4	0.84	0.07	6.23×10^{-3}

表 2.1-6 金属ガラス $Ni_{65}Cr_{13}Nb_2P_{16}B_4$ 粉末の組成 (元素比率より計算)

元素	原子量	モル比[%]	重量比[%]	8g中の重量[g]	8g中の物質質量[mol]
Ni	58.7	65	73.14	5.85	9.97×10^{-2}
Cr	52.0	13	12.96	1.04	1.99×10^{-2}
Nb	92.9	2	3.56	0.28	3.07×10^{-3}
P	31.0	16	9.51	0.76	2.45×10^{-2}
B	10.8	4	0.83	0.07	6.13×10^{-3}

表 2.1-7 金属ガラス Cu₆₀Zr₃₀Ti₁₀ 粉末の組成(元素比率より計算)

元素	原子量	モル比[%]	重量比[%]	8g中の重量[g]	8g中の物質質量[mo]
Cu	63.5	60	54.23	4.34	6.83×10^{-2}
Zr	91.2	30	38.95	3.12	3.42×10^{-2}
Ti	47.9	10	6.82	0.55	1.14×10^{-2}

表 2.1-8 SUS316L 粉末の組成(元素比率より計算)

元素	原子量	モル比[%]	重量比[%]	8g中の重量[g]	8g中の物質質量[mo]
Fe	55.8	67.35	68.00	5.44	9.75×10^{-2}
Ni	58.7	13.55	13.00	1.04	1.77×10^{-2}
Cr	52.0	15.69	17.00	1.36	2.62×10^{-2}
Mo	96	3.41	2.00	0.16	1.67×10^{-3}

表 2.1-9 ハステロイ C276 粉末の組成(元素比率より計算)

元素	原子量	モル比[%]	重量比[%]	8g中の重量[g]	8g中の物質質量[mo]
Ni	58.7	52.41	60.00	4.80	8.18×10^{-2}
Cr	52.0	12.38	16.00	1.28	2.46×10^{-2}
Mo	96.0	22.86	16.00	1.28	1.33×10^{-2}
Fe	55.8	4.15	5.00	0.40	7.17×10^{-3}
W	183.8	8.20	3.00	0.24	1.31×10^{-3}

② 浸出試験

図 2.1-24 に試験概要を示す。液相 16 ml に対し、固相として金属粉末 8 g を加え、液固比を 2 mL g⁻¹ とした。液相は、淡水条件として 0.1 M NaOH 溶液を、塩水条件として 0.6 M NaCl in 0.1 M NaOH 溶液を使用しており、全ての試験において pH 13 とした。酸化還元条件設定としては、とくに雰囲気制御を行わず実験室の大気環境下で試薬調整、混合、容器密封を行った試料を酸化条件と定義した。一方、極低酸素条件となる処分環境条件を考慮して、浸漬溶液を窒素ガスで脱気するとともに窒素ガスを充填したグローブバック内で混合、容器密封を行い、酸化還元電位が -400 mV 以下になるように還元剤として Na₂S₂O₄ 溶液を適宜混合した試料を還元条件とした。容器にはシーリングキャップ付き PPCO (polypropylene copolymer) 製ナルゲン梨型沈澱管(容量 42 mL)を使用した。浸出試験中は、恒温振とう器(EYELA 社製 MMS-1)にて装置内温度を 25 °C および 60 °C に保ちつつ、100 strokes min⁻¹ で振とうした。所定時間振とう後、孔径 0.45 μm のメンブレンフィルター(ADVANTEC 社製)で固液を分離した。液相については ICP-AES(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry、Seiko Instrument 社製 SPS7800)を用いて各金属粉末の構成元素について濃度を測定した。固相については、超純水で洗浄およびシリカゲル入り真空デシケーター内で乾燥させた後、SEM-EDS による観察を行った。

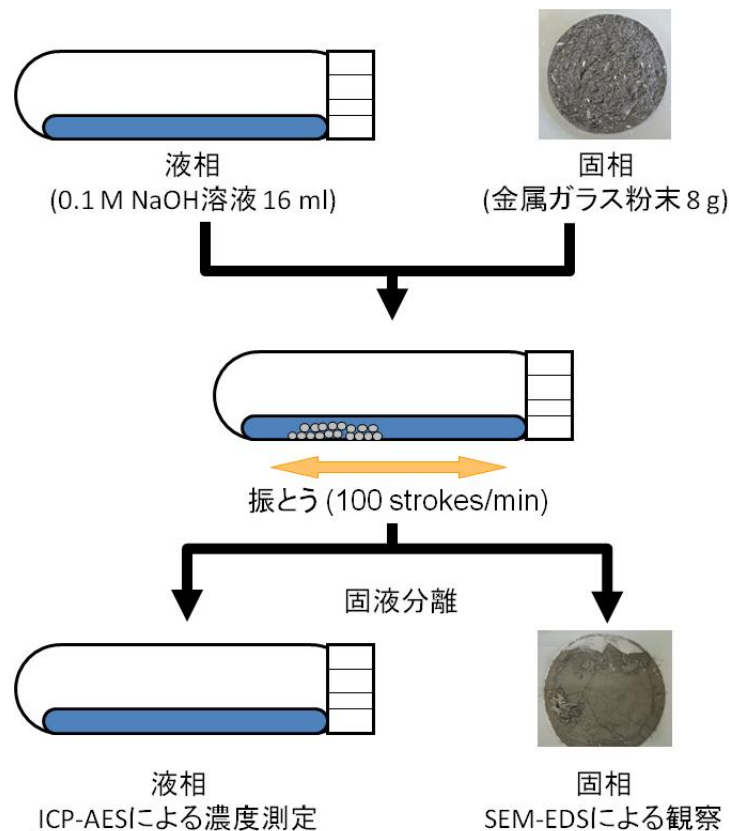


図 2.1-24 浸出試験概要

3) 結果および考察

本節では、Zr 基、Ni 基、Cu 基、従来合金に分類して浸出試験結果を整理するとともに元素浸出挙動について議論する。

① Zr 基金属ガラス

表 2.1-10 および表 2.1-11 は、 $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ 粉末を使用した浸出試験結果、そして表 2.1-12 は $Zr_{57}Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}Nb_5$ 粉末を使用した浸出試験結果である。浸出試験条件は、pH 13、酸化雰囲気、NaCl 濃度 0 M あるいは 0.6 M とした。表中の「ND」は液相中の元素を ICP-AES 測定で検出できなかった場合に付されており、使用装置の検出限界は元素によって若干異なるものの 1~10 ppb 程度である。表中では、液相分析より得た浸出元素濃度から、浸出した各原子の物質量を示すと同時に(各表の(a)および(b))、金属ガラス粉末試料 8 g に含有する各元素の物質量に対する、液相に浸出した元素の物質量の割合[%]を mol 浸出率として示した(各表の(a')および(b'))。

表 2.1-10 および表 2.1-11 からわかるように、 $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ からの Al の浸出は試験開始後に顕著であったものの、その後約 900 日にわたってほぼ増加することは無かった。表 2.1-12 に示した $Zr_{57}Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}Nb_5$ の浸出試験結果においても、 $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ よりも Al 浸出が多かったものの、試験期間にわたって有意な Al 浸出増加は見られず浸出率は 0.05 %以下に留まった。Al 以外の元素の浸出は Al に比べると極微量だった。図 2.1-25 および図 2.1-

26、表 2.1-13、表 2.1-14 に示す SEM-EDS による分析結果からも、浸出試験前後で概観に目立った変化は無く、局所的な元素量変化や元素比率の増減もほぼ見られなかった。これらのことは、平成 28 年度に示したように、一般的に高耐食性を示すとされる Zr や Cu、Ni が高アルカリ条件において速やかに不動態被膜を形成したためと考えられる(原子力機構, 2017)。Al は高アルカリ条件下ではアルミン酸塩 $[Al(OH)_4(H_2O)_2]^-$ を生成し溶解するが、Zr 基金属ガラスにおいては Zr などが速やかに安定な不動態被膜を形成するために、Al の浸出が抑制されたと考えられる。また、塩濃度依存性および温度依存性もほとんど見られないことから、Zr 基金属ガラスにおいて形成される不動態被膜は、ステンレス鋼などが腐食しやすい高塩濃度および高温条件においても長期にわたり安定に保たれる可能性がある。さらに、Al の浸出が極微量で抑えられたことに加え、他元素の浸出もほとんど無かったことから、本検討の試験条件において Zr 基金属ガラスはそのガラス形成能を失うことなくアモルファス状態を保っており、処分環境条件において高耐食性を期待できると考えられる。

表 2.1-10 Zr₅₅Cu₃₀Ni₅Al₁₀ 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0 M)

(a)

酸化雰囲気	25°C	NaCl 0 M		
時間[h]	Zr [mol]	Cu [mol]	Ni [mol]	Al [mol]
1414	ND	1.83×10^{-8}	1.66×10^{-8}	1.51×10^{-6}
3721	ND	ND	ND	7.04×10^{-7}
10609	ND	ND	ND	7.19×10^{-7}
21511	1.70×10^{-9}	ND	4.37×10^{-9}	8.18×10^{-7}

(a')

酸化雰囲気	25°C	NaCl 0 M	mol浸出率(%)	
時間[h]	Zr (%)	Cu (%)	Ni (%)	Al (%)
1414	ND	5.70×10^{-5}	3.11×10^{-4}	0.0141
3721	ND	ND	ND	6.59×10^{-3}
10609	ND	ND	ND	6.73×10^{-3}
21511	2.88×10^{-6}	ND	8.17×10^{-5}	7.65×10^{-3}

(b)

酸化雰囲気	60°C	NaCl 0 M		
時間[h]	Zr [mol]	Cu [mol]	Ni [mol]	Al [mol]
1414	ND	1.23×10^{-8}	2.64×10^{-8}	1.77×10^{-6}
3721	ND	ND	ND	6.29×10^{-7}
10609	ND	3.33×10^{-8}	1.02×10^{-8}	9.12×10^{-7}

(b')

酸化雰囲気	60°C	NaCl 0 M	mol浸出率(%)	
時間[h]	Zr (%)	Cu (%)	Ni (%)	Al (%)
1414	ND	3.85×10^{-5}	4.94×10^{-4}	0.0166
3721	ND	ND	ND	5.88×10^{-3}
10609	ND	1.04×10^{-4}	1.90×10^{-4}	8.54×10^{-3}

表 2.1-11 Zr₅₅Cu₃₀Ni₅Al₁₀ 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M)

(a)	酸化雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M		
	時間[h]	Zr [mol]	Cu [mol]	Ni [mol]	Al [mol]
	1414	ND	1.14×10^{-8}	2.80×10^{-8}	1.73×10^{-6}
	3721	ND	ND	ND	6.32×10^{-7}
	10609	ND	ND	ND	6.15×10^{-7}
	21511	1.36×10^{-9}	ND	8.32×10^{-9}	6.60×10^{-7}

(a')	酸化雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)	
	時間[h]	Zr (%)	Cu (%)	Ni (%)	Al (%)
	1414	ND	3.56×10^{-5}	5.24×10^{-4}	0.0162
	3721	ND	ND	ND	5.92×10^{-3}
	10609	ND	ND	ND	5.75×10^{-3}
	21511	2.31×10^{-6}	ND	1.56×10^{-4}	6.18×10^{-3}

(b)	酸化雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M		
	時間[h]	Zr [mol]	Cu [mol]	Ni [mol]	Al [mol]
	1414	ND	2.02×10^{-8}	2.21×10^{-8}	1.94×10^{-6}
	3721	ND	ND	ND	7.85×10^{-7}
	10609	ND	1.61×10^{-8}	1.69×10^{-9}	7.71×10^{-7}
	21511	ND	3.66×10^{-8}	8.82×10^{-9}	1.21×10^{-7}

(b')	酸化雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)	
	時間[h]	Zr (%)	Cu (%)	Ni (%)	Al (%)
	1414	ND	6.30×10^{-5}	4.14×10^{-4}	0.0181
	3721	ND	ND	ND	7.35×10^{-3}
	10609	ND	5.02×10^{-5}	3.17×10^{-5}	7.22×10^{-3}
	21511	ND	1.14×10^{-4}	1.65×10^{-4}	1.13×10^{-3}

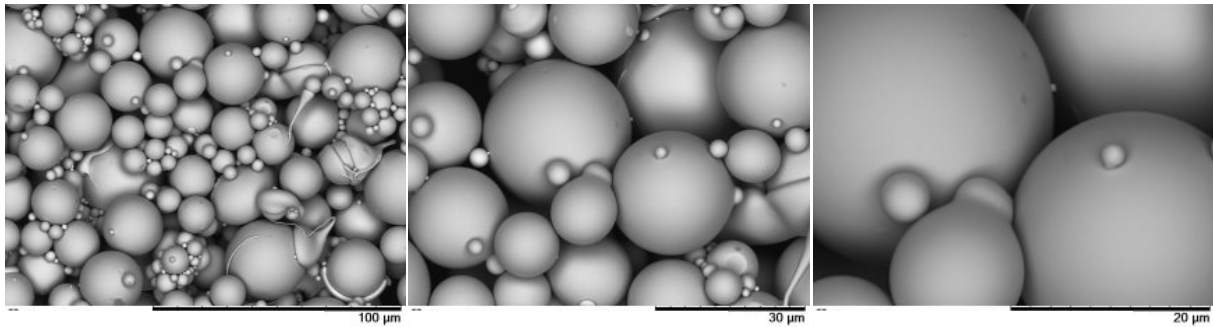
表 2.1-12 Zr₅₇Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al₁₀Nb₅ 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M)

(a) 酸化雰囲気		25°C		NaCl 0.6 M		
時間[h]	Zr [mol]	Cu [mol]	Ni [mol]	Al [mol]	Nb [mol]	
112	ND	ND	ND	1.04×10^{-6}	ND	
3282	ND	1.31×10^{-8}	ND	3.43×10^{-6}	ND	
7342	ND	ND	ND	1.38×10^{-6}	ND	
14230	ND	ND	ND	1.29×10^{-6}	ND	
25132	4.35×10^{-9}	ND	8.12×10^{-9}	1.34×10^{-6}	ND	

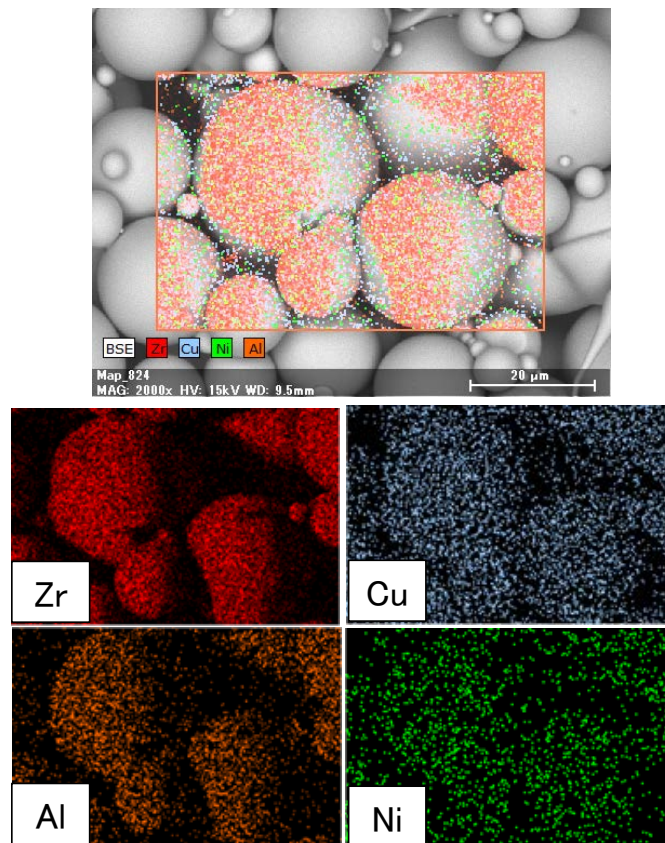
(a') 酸化雰囲気		25°C		NaCl 0.6 M			mol浸出率(%)
時間[h]	Zr (%)	Cu (%)	Ni (%)	Al (%)	Nb (%)		
112	ND	ND	ND	9.96×10^{-3}	ND		
3282	ND	8.12×10^{-5}	ND	0.0328	ND		
7342	ND	ND	ND	0.0132	ND		
14230	ND	ND	ND	0.0124	ND		
25132	7.29×10^{-6}	ND	6.16×10^{-5}	0.0129	ND		

(b) 酸化雰囲気		60°C		NaCl 0.6 M		
時間[h]	Zr [mol]	Cu [mol]	Ni [mol]	Al [mol]	Nb [mol]	
112	ND	ND	ND	1.26×10^{-6}	ND	
3282	ND	4.74×10^{-9}	ND	4.23×10^{-6}	ND	
7342	ND	ND	ND	1.78×10^{-6}	ND	
14230	ND	2.53×10^{-9}	7.68×10^{-9}	1.86×10^{-6}	5.66×10^{-8}	

(b') 酸化雰囲気		60°C		NaCl 0.6 M			mol浸出率(%)
時間[h]	Zr (%)	Cu (%)	Ni (%)	Al (%)	Nb (%)		
112	ND	ND	ND	0.0120	ND		
3282	ND	2.94×10^{-5}	ND	0.0404	ND		
7342	ND	ND	ND	0.0170	ND		
14230	ND	1.57×10^{-5}	5.83×10^{-5}	0.0178	1.08×10^{-3}		



(a) 浸出試験後の $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ 粉末の SEM 画像

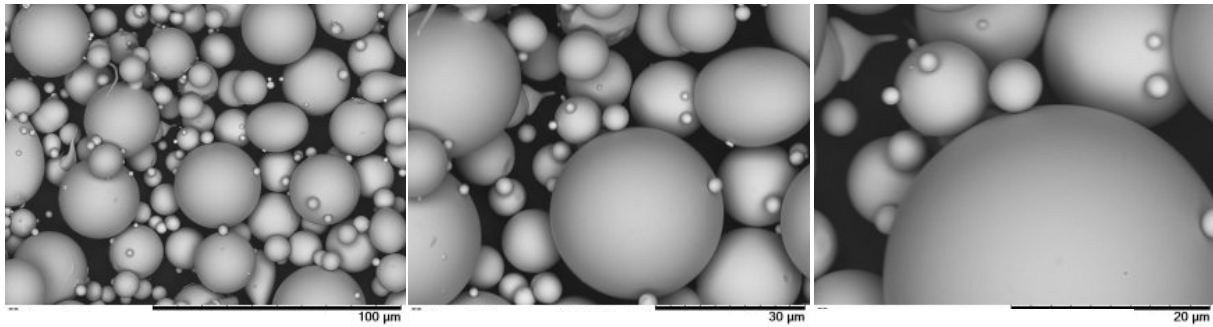


(b) EDS 分析による浸出試験後の $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ 粉末の元素分布

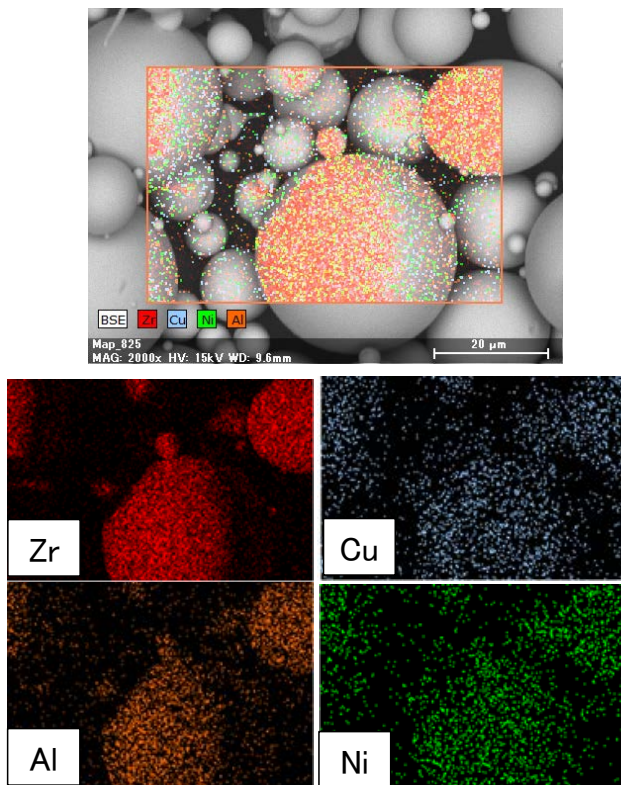
図 2.1-25 浸出試験後の $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ 粉末の SEM-EDS 分析結果(表 2.1-11 (b)の試料)

表 2.1-13 EDS 分析による $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ 粉末の元素比(「試験後」は表 2.1-11 (b)の試料)

$Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$	試験前		試験後	
	重量割合[%]	元素割合[%]	重量割合[%]	元素割合[%]
Zirconium	67.51	55.71	67.25	55.51
Copper	27.00	32.00	25.81	30.59
Nickel	2.03	2.61	3.61	4.63
Aluminium	3.46	9.67	3.32	9.27



(a) 浸出試験後の $Zr_{57}Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}Nb_5$ 粉末の SEM 画像 (表 2.1-12 (b) の試料)



(b) EDS 分析による浸出試験後の $Zr_{57}Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}Nb_5$ 粉末の元素分布

図 2.1-26 浸出試験後の $Zr_{57}Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}Nb_5$ の SEM-EDS 結果 (表 2.1-12 (b) の試料)

表 2.1-14 EDS 分析による $Zr_{57}Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}Nb_5$ 粉末の元素比 (表 2.1-12 (b) の試料)

$Zr_{57}Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al_{10}Nb_5$	試験前		試験後	
	重量割合[%]	元素割合[%]	重量割合[%]	元素割合[%]
Zirconium	75.19	63.09	76.27	63.59
Copper	10.84	13.05	11.12	13.13
Nickel	10.30	13.43	8.18	10.60
Aluminium	3.68	10.43	4.44	12.51

Nb は使用装置では測定対象外

② Ni 基金属ガラス

表 2.1-15～表 2.1-18 は $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{15}\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末を用いた浸出試験結果、表 2.1-19～表 2.1-22 は $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末を使用した浸出試験の結果である。Ni 基金属ガラスについては、酸化還元条件として酸化雰囲気と還元雰囲気の両方の条件による浸出試験を実施している。なお、表 2.1-15(b)や表 2.1-17(b)、表 2.1-19(b)、表 2.1-20(b)、表 2.1-21(b)のように他の表と比べてデータが少ないものは、Zr 基金属ガラスの場合と同様に使用容器に不具合が生じデータ取得できなかったことによる。

表 2.1-15～表 2.1-22 から分かるように、Ni および Nb はほとんど浸出が確認されなかったのに対し、Cr、P、B の有意な浸出が確認された。これらの浸出は、酸化還元雰囲気および NaCl 濃度、金属ガラスの組成には依存性が見られなかった。その一方で、温度依存性が確認されており、高温において Cr、P、B の浸出が顕著に増加した。しかし、平成 29 年度取得した 20,000 時間超のデータも併せて比較すると、例えば表 2.1-16(b)や表 2.1-18(b)の Cr、および表 2.1-17(a)や表 2.1-22(b)の P のように、一部の条件においては浸出が緩やかになる場合も確認された。そして、モル浸出率の最大値としては Cr で 0.03 %未満、P で 1 %程度に留まった。このように浸出が緩やかになる傾向は B にも見られており、Cr や P よりも早い段階で浸出が緩やかになるとともに、モル浸出率としては 0.3 %に留まっている。

前述の Zr 基金属ガラスにおいては、Al の浸出が Zr、Cu、Ni による不動態被膜形成によって抑制されることを指摘した。Ni 基金属ガラスにおいても、Ni が同様に不動態被膜を形成することにより他元素の浸出を抑制していることが考えられる。しかし、Ni 基金属ガラスにおいては、Zr 基金属ガラスと比べて不動態被膜形成に寄与する元素の割合などによって被膜の安定性が異なり、可溶性元素の浸出が進行した可能性がある。しかしながら、浸出が緩やかになる傾向も見られており、ある程度の元素浸出が終わった後は、可溶性元素の浸出も小さく抑えられることも期待される。また、後述する SUS316L やハステロイ C276 のような従来の耐食合金と比較すると、共通に含有する Cr の浸出の観点からは、Ni 基金属ガラスは有意に高い耐食性を示すと言える。

図 2.1-27～図 2.1-30 に浸出試験後の $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{15}\text{P}_{16}\text{B}_4$ および $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ の SEM 観察と EDS 分析結果を、表 2.1-23～表 2.1-26 に浸出試験前後の EDS 分析による元素比率を示す。図 2.1-27～図 2.1-30 に示す試験後の SEM 画像には粒子表面において斑点のような陰影が見られる。しかし、本検討に用いた装置ではさらに高倍率で細部を観察することは困難であり、EDS 分析からも局所的な元素の増加や減少、凝集なども確認できなかった。加えて、表 2.1-23～表 2.1-26 に示す試験前後の元素比率変化においても、Cr および P 浸出に予想されるような比率変化は見られなかった。溶液分析結果を考慮すれば、試験後の SEM 画像に見られた陰影は Cr や P、B の浸出によるものと考えられるが、上述のようにモル浸出率としてはいずれも非常に小さく、EDS 分析では有意な差が確認できなかった。

表 2. 1-15 Ni₆₅Cr₁₅P₁₆B₄粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0 M)

(a)	酸化雰囲気	25°C	NaCl 0 M		
	時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	P [mol]	B [mol]
	330	ND	1.51×10^{-7}	1.54×10^{-7}	2.38×10^{-6}
	1034	ND	2.54×10^{-7}	3.55×10^{-7}	2.59×10^{-6}
	9936	ND	8.99×10^{-7}	1.55×10^{-5}	5.86×10^{-6}
	26864	ND	1.71×10^{-6}	3.77×10^{-5}	9.73×10^{-6}

(a')	酸化雰囲気	25°C	NaCl 0 M	mol浸出率(%)	
	時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	P (%)	B (%)
	330	ND	6.48×10^{-4}	6.19×10^{-4}	0.0382
	1034	ND	1.09×10^{-3}	1.42×10^{-3}	0.0415
	9936	ND	3.85×10^{-3}	0.062	0.094
	26864	ND	7.31×10^{-3}	0.151	0.156

(b)	60°C	NaCl 0 M	酸化雰囲気		
	時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	P [mol]	B [mol]
	330	ND	9.75×10^{-7}	2.17×10^{-6}	2.49×10^{-6}
	1034	ND	1.95×10^{-6}	6.47×10^{-6}	5.56×10^{-6}

(b')	60°C	NaCl 0 M	酸化雰囲気	mol浸出率(%)	
	時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	P (%)	B (%)
	330	ND	4.17×10^{-3}	9.64×10^{-3}	0.0578
	1034	ND	8.33×10^{-3}	0.0345	0.105

表 2.1-16 Ni₆₅Cr₁₅P₁₆B₄ 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M)

(a) 酸化雰囲気		25°C	NaCl 0.6 M		
時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	P [mol]	B [mol]	
330	ND	2.05×10^{-7}	2.10×10^{-7}	2.22×10^{-6}	
1034	ND	3.74×10^{-7}	4.50×10^{-7}	2.40×10^{-6}	
9936	ND	1.17×10^{-6}	1.69×10^{-5}	5.67×10^{-6}	
26864	ND	2.02×10^{-6}	3.43×10^{-5}	8.71×10^{-6}	

(a') 酸化雰囲気		25°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)	
時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	P (%)	B (%)	
330	ND	8.79×10^{-4}	8.42×10^{-4}	0.0356	
1034	ND	1.60×10^{-3}	1.81×10^{-3}	0.0386	
9936	ND	5.01×10^{-3}	0.0677	0.0909	
26864	ND	8.65×10^{-3}	0.138	0.140	

(b) 酸化雰囲気		60°C	NaCl 0.6 M		
時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	P [mol]	B [mol]	
330	ND	1.07×10^{-6}	2.17×10^{-6}	2.49×10^{-6}	
1034	ND	2.66×10^{-6}	6.47×10^{-6}	5.56×10^{-6}	
9936	ND	5.56×10^{-6}	1.31×10^{-4}	1.34×10^{-5}	
26864	ND	6.66×10^{-6}	2.28×10^{-4}	1.88×10^{-5}	

(b') 酸化雰囲気		60°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)	
時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	P (%)	B (%)	
330	ND	4.57×10^{-3}	8.71×10^{-3}	0.0400	
1034	ND	0.0114	0.0259	0.0893	
9936	ND	0.0238	0.523	0.215	
26864	ND	0.0285	0.916	0.301	

表 2.1-17 Ni₆₅Cr₁₅P₁₆B₄粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、NaCl 濃度 0 M)

(a) 還元雰囲気	25°C	NaCl 0 M		
時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	P [mol]	B [mol]
1369	1.36×10^{-7}	3.39×10^{-7}	2.44×10^{-6}	4.13×10^{-6}
4705	ND	4.26×10^{-7}	5.44×10^{-6}	4.27×10^{-6}
10585	1.22×10^{-8}	8.16×10^{-7}	1.55×10^{-5}	5.66×10^{-6}
21488	ND	1.07×10^{-6}	2.20×10^{-5}	7.37×10^{-6}

(a') 還元雰囲気	25°C	NaCl 0 M	mol浸出率(%)	
時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	P (%)	B (%)
1369	1.34×10^{-4}	1.45×10^{-3}	9.81×10^{-3}	0.0663
4705	ND	1.82×10^{-3}	0.0218	0.0684
10585	1.20×10^{-5}	3.49×10^{-3}	0.0620	0.0908
21488	ND	4.58×10^{-3}	0.0884	0.118

(b) 還元雰囲気	60°C	NaCl 0 M		
時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	P [mol]	B [mol]
1369	1.43×10^{-7}	1.83×10^{-6}	3.02×10^{-5}	8.00×10^{-6}
4705	ND	3.43×10^{-6}	1.37×10^{-4}	9.90×10^{-6}
10585	1.35×10^{-8}	5.54×10^{-6}	3.01×10^{-4}	1.23×10^{-5}

(b') 還元雰囲気	60°C	NaCl 0 M	mol浸出率(%)	
時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	P (%)	B (%)
1369	1.41×10^{-4}	7.82×10^{-3}	0.121	0.128
4705	ND	0.0147	0.551	0.159
10585	1.33×10^{-5}	0.0237	1.21	0.197

表 2.1-18 Ni₆₅Cr₁₅P₁₆B₄ 粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M)

(a) 還元雰囲気		25°C	NaCl 0.6 M		
時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	P [mol]	B [mol]	
1392	1.49×10^{-7}	4.34×10^{-7}	3.10×10^{-6}	4.22×10^{-6}	
4728	ND	1.58×10^{-7}	2.34×10^{-6}	4.81×10^{-6}	
10608	9.67×10^{-9}	6.74×10^{-7}	8.84×10^{-6}	4.40×10^{-6}	
21488	ND	9.45×10^{-7}	1.59×10^{-5}	6.20×10^{-6}	

(a') 還元雰囲気		25°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)	
時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	P (%)	B (%)	
1392	1.47×10^{-4}	1.86×10^{-3}	0.0124	0.0676	
4728	ND	6.74×10^{-4}	9.38×10^{-3}	0.0772	
10608	9.55×10^{-6}	2.89×10^{-3}	0.0354	0.0706	
21488	ND	4.04×10^{-3}	0.0639	0.0995	

(b) 還元雰囲気		60°C	NaCl 0.6 M		
時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	P [mol]	B [mol]	
1392	1.36×10^{-7}	2.98×10^{-6}	3.57×10^{-5}	8.75×10^{-6}	
4728	ND	2.08×10^{-6}	8.81×10^{-5}	5.14×10^{-6}	
10608	9.35×10^{-9}	6.05×10^{-6}	1.46×10^{-4}	1.60×10^{-5}	
21488	ND	6.27×10^{-6}	2.13×10^{-4}	1.78×10^{-5}	

(b') 還元雰囲気		60°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)	
時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	P (%)	B (%)	
1392	1.34×10^{-4}	0.0128	0.143	0.140	
4728	ND	8.89×10^{-3}	0.353	0.0824	
10608	9.23×10^{-6}	0.0259	0.585	0.256	
21488	ND	0.0268	0.855	0.286	

表 2.1-19 Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄ 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0 M)

(a) 酸化雰囲気		25°C	NaCl 0 M			
時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	Nb [mol]	P [mol]	B [mol]	
333	ND	4.31×10^{-9}	ND	9.79×10^{-8}	3.11×10^{-6}	
811	ND	8.91×10^{-8}	1.35×10^{-8}	3.15×10^{-7}	3.57×10^{-6}	
8905	ND	5.23×10^{-7}	ND	1.04×10^{-6}	5.04×10^{-6}	
25831	ND	8.09×10^{-7}	1.04×10^{-7}	2.64×10^{-6}	6.32×10^{-6}	

(a') 酸化雰囲気		25°C	NaCl 0 M	mol浸出率(%)		
時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	P (%)	B (%)	
333	ND	2.16×10^{-5}	ND	3.99×10^{-4}	0.0506	
811	ND	4.47×10^{-4}	4.40×10^{-4}	1.29×10^{-3}	0.0582	
8905	ND	2.62×10^{-3}	ND	4.22×10^{-3}	0.0822	
25831	ND	4.06×10^{-3}	3.38×10^{-3}	0.0108	0.103	

(b) 酸化雰囲気		60°C	NaCl 0 M			
時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	Nb [mol]	P [mol]	B [mol]	
333	ND	3.25×10^{-7}	ND	2.69×10^{-7}	3.86×10^{-6}	
811	ND	7.98×10^{-7}	1.37×10^{-8}	8.71×10^{-7}	4.42×10^{-6}	
8905	ND	2.21×10^{-6}	ND	3.41×10^{-5}	4.90×10^{-6}	

(b') 酸化雰囲気		60°C	NaCl 0 M	mol浸出率(%)		
時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	P (%)	B (%)	
333	ND	1.63×10^{-3}	ND	1.10×10^{-3}	0.0628	
811	ND	4.00×10^{-3}	4.46×10^{-4}	3.55×10^{-3}	0.0721	
8905	ND	0.0111	ND	0.139	0.0799	

表 2.1-20 Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄ 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M)

(a) 酸化雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M			
時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	Nb [mol]	P [mol]	B [mol]
333	ND	1.21×10^{-7}	ND	1.81×10^{-7}	2.97×10^{-6}
811	ND	2.49×10^{-7}	1.36×10^{-8}	3.44×10^{-7}	3.25×10^{-6}
8905	ND	1.03×10^{-6}	ND	9.60×10^{-7}	4.65×10^{-6}
25831	ND	1.78×10^{-6}	1.05×10^{-7}	2.51×10^{-6}	5.95×10^{-6}

(a') 酸化雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)		
時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	P (%)	B (%)
333	ND	6.06×10^{-4}	ND	7.39×10^{-4}	0.0485
811	ND	1.25×10^{-3}	4.45×10^{-4}	1.40×10^{-3}	0.0530
8905	ND	5.18×10^{-3}	ND	3.91×10^{-3}	0.0759
25831	ND	8.93×10^{-3}	3.41×10^{-3}	0.0102	0.0969

(b) 酸化雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M			
時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	Nb [mol]	P [mol]	B [mol]
333	ND	2.46×10^{-7}	ND	4.86×10^{-7}	1.56×10^{-6}
811	ND	1.48×10^{-6}	1.39×10^{-8}	2.93×10^{-6}	4.69×10^{-6}
8905	ND	3.46×10^{-6}	ND	2.93×10^{-5}	5.33×10^{-6}

(b') 酸化雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)		
時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	P (%)	B (%)
333	ND	1.24×10^{-3}	ND	1.98×10^{-3}	0.0254
811	ND	7.40×10^{-3}	4.53×10^{-4}	0.0119	0.0765
8905	ND	0.0173	ND	0.120	0.0868

表 2.1-21 Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄ 粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、NaCl 濃度 0 M)

(a) 還元雰囲気	25°C	NaCl 0 M			
時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	Nb [mol]	P [mol]	B [mol]
1370	1.46×10^{-7}	2.46×10^{-7}	7.97×10^{-8}	1.40×10^{-6}	5.21×10^{-6}
4705	ND	2.95×10^{-7}	ND	1.60×10^{-6}	4.86×10^{-6}
10585	1.06×10^{-8}	6.87×10^{-7}	1.10×10^{-8}	1.57×10^{-6}	4.88×10^{-6}
21488	ND	7.19×10^{-7}	9.10×10^{-8}	3.27×10^{-6}	5.93×10^{-6}

(a') 還元雰囲気	25°C	NaCl 0 M	mol浸出率(%)		
時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	P (%)	B (%)
1370	1.47×10^{-4}	1.23×10^{-3}	2.60×10^{-3}	5.71×10^{-3}	0.0850
4705	ND	1.48×10^{-3}	ND	6.53×10^{-3}	0.0792
10585	1.07×10^{-5}	3.44×10^{-3}	3.58×10^{-4}	6.41×10^{-3}	0.0796
21488	ND	3.61×10^{-3}	2.97×10^{-3}	0.0133	0.0966

(b) 還元雰囲気	60°C	NaCl 0 M			
時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	Nb [mol]	P [mol]	B [mol]
1370	1.41×10^{-7}	9.16×10^{-7}	7.42×10^{-8}	1.74×10^{-5}	6.15×10^{-6}
4705	ND	1.56×10^{-6}	ND	7.13×10^{-5}	5.77×10^{-6}
10585	7.93×10^{-9}	2.91×10^{-6}	4.04×10^{-9}	2.19×10^{-4}	5.19×10^{-6}

(b') 還元雰囲気	60°C	NaCl 0 M	mol浸出率(%)		
時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	P (%)	B (%)
1370	1.42×10^{-4}	4.60×10^{-3}	2.42×10^{-3}	0.0709	0.100
4705	ND	7.81×10^{-3}	ND	0.291	0.0940
10585	7.95×10^{-6}	0.0146	1.32×10^{-4}	0.893	0.0847

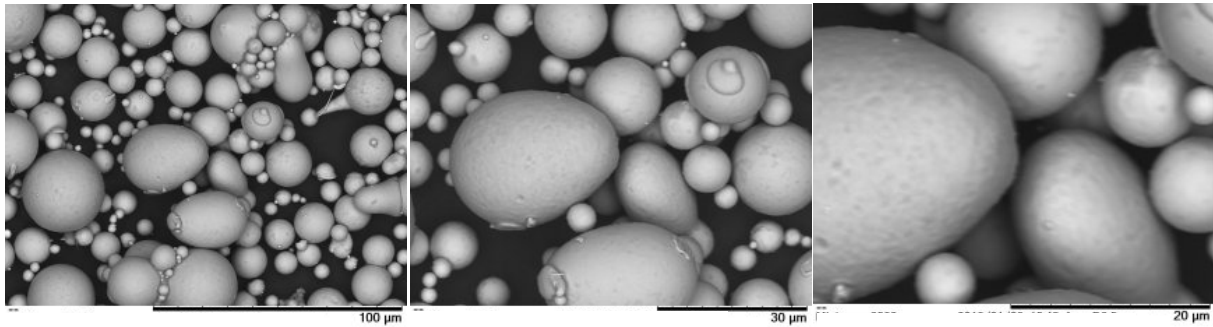
表 2. 1-22 Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄ 粉末の浸出試験結果 (還元雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M)

(a) 還元雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M			
時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	Nb [mol]	P [mol]	B [mol]
1370	1.38×10^{-7}	1.93×10^{-7}	8.55×10^{-8}	1.82×10^{-6}	5.50×10^{-6}
4705	ND	4.04×10^{-7}	ND	6.33×10^{-6}	4.08×10^{-6}
10608	4.61×10^{-9}	2.33×10^{-7}	3.24×10^{-9}	2.63×10^{-6}	4.60×10^{-6}
21488	ND	4.52×10^{-7}	9.17×10^{-9}	2.74×10^{-6}	5.22×10^{-6}

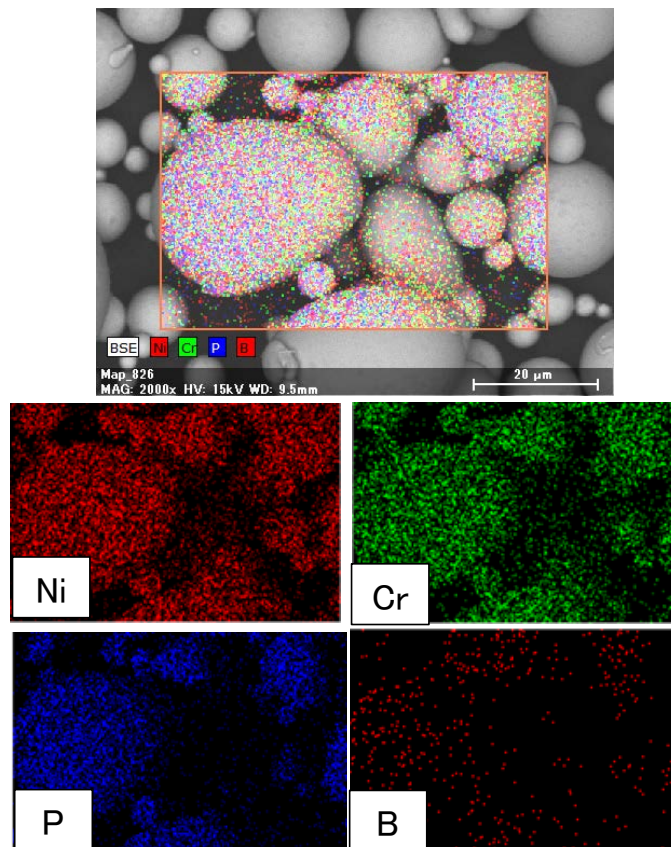
(a') 還元雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)		
時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	P (%)	B (%)
1370	1.38×10^{-4}	9.68×10^{-4}	2.79×10^{-3}	7.44×10^{-3}	0.0896
4705	ND	2.03×10^{-3}	ND	0.0258	0.0664
10608	4.62×10^{-6}	1.17×10^{-3}	1.06×10^{-4}	0.0107	0.0750
21488	ND	2.27×10^{-3}	2.99×10^{-3}	0.0112	0.0851

(b) 還元雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M			
時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	Nb [mol]	P [mol]	B [mol]
1370	1.28×10^{-7}	1.63×10^{-6}	7.34×10^{-8}	2.50×10^{-5}	6.40×10^{-6}
4705	ND	3.80×10^{-6}	ND	1.07×10^{-4}	1.37×10^{-5}
10608	6.00×10^{-9}	3.85×10^{-6}	ND	2.26×10^{-4}	5.01×10^{-6}
21488	ND	5.43×10^{-6}	2.32×10^{-8}	2.73×10^{-4}	5.99×10^{-6}

(b') 還元雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)		
時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	P (%)	B (%)
1370	1.29×10^{-4}	8.16×10^{-3}	2.39×10^{-3}	0.102	0.104
4705	ND	0.0190	ND	0.437	0.223
10608	6.02×10^{-6}	0.0193	ND	0.920	0.0817
21488	ND	0.0273	7.55×10^{-4}	1.110	0.0976



(a) 浸出試験後の $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{15}\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末の SEM 画像



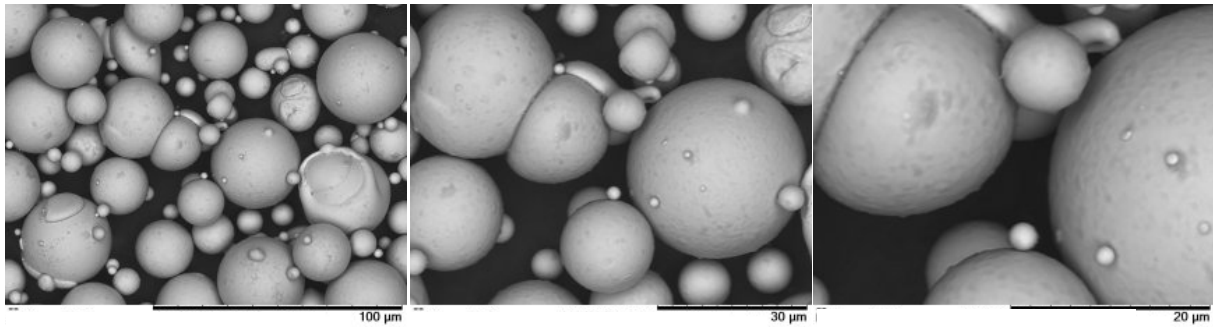
(b) EDS 分析による浸出試験後の $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{15}\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末の元素分布

図 2.1-27 浸出試験後の $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{15}\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末の SEM-EDS 分析結果(表 2.1-16(b))の試料)

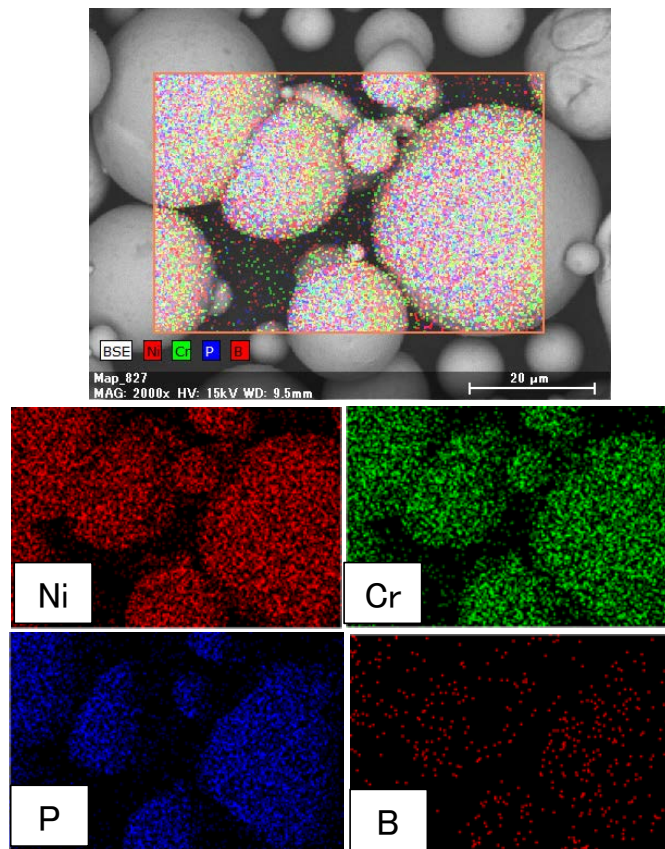
表 2.1-23 EDS 分析による $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{15}\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末の元素比(表 2.1-16(b))の試料)

$\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{15}\text{P}_{16}\text{B}_4$	試験前		試験後	
	重量割合[%]	元素割合[%]	重量割合[%]	元素割合[%]
Nickel	75.33	68.37	73.54	66.63
Chromium	15.52	15.89	17.38	17.78
Phosphorus	9.15	15.73	9.08	15.59

(BoronはEDS定量分析において誤差が大きいため除外した)



(a) 浸出試験後の $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{15}\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末の SEM 画像



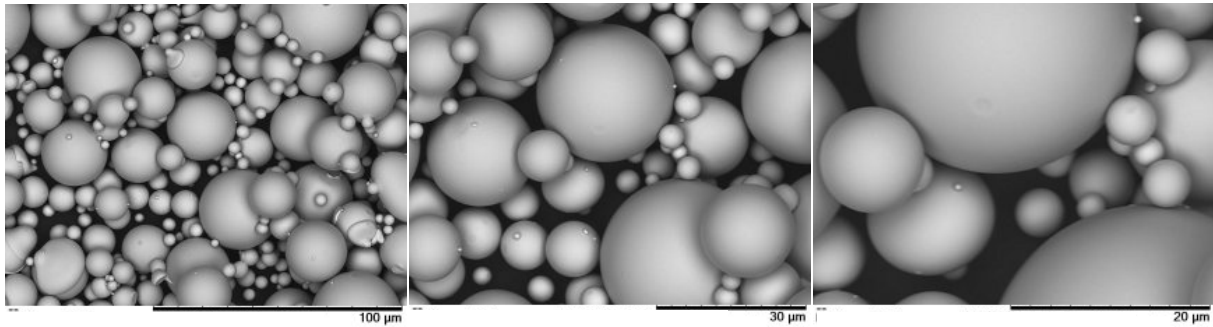
(b) EDS 分析による浸出試験後の $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{15}\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末の元素分布

図 2.1-28 浸出試験後の $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{15}\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末の SEM-EDS 分析結果(表 2.1-18(b))の試料)

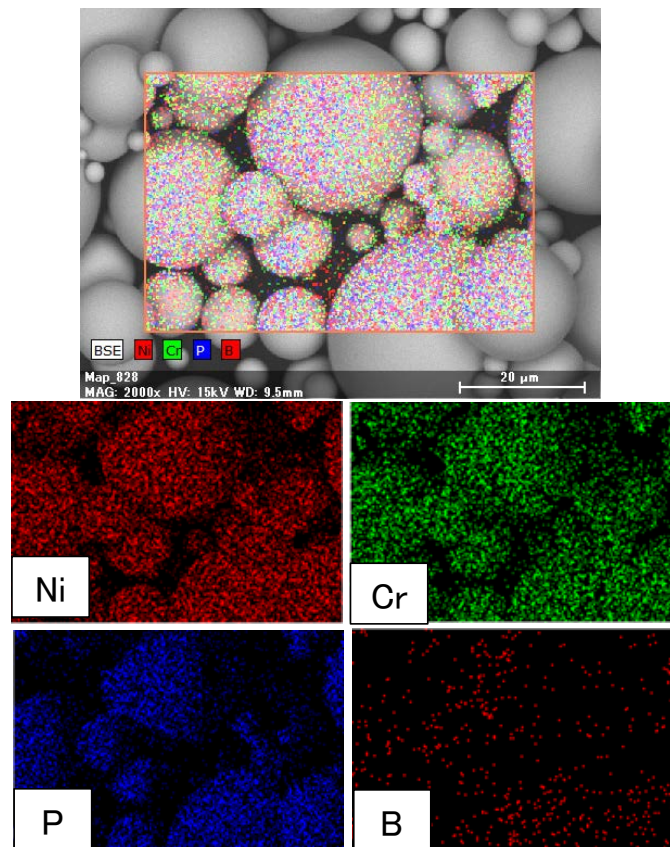
表 2.1-24 EDS 分析による $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{15}\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末の元素比(表 2.1-18(b))の試料)

$\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{15}\text{P}_{16}\text{B}_4$	試験前		試験後	
	重量割合[%]	元素割合[%]	重量割合[%]	元素割合[%]
Nickel	75.33	68.37	72.49	65.29
Chromium	15.52	15.89	17.74	18.03
Phosphorus	9.15	15.73	9.77	16.68

(BoronはEDS定量分析において誤差が大きいため除外した)



(a) 浸出試験後の $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末の SEM 画像



(b) EDS 分析による浸出試験後の $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末の元素分布

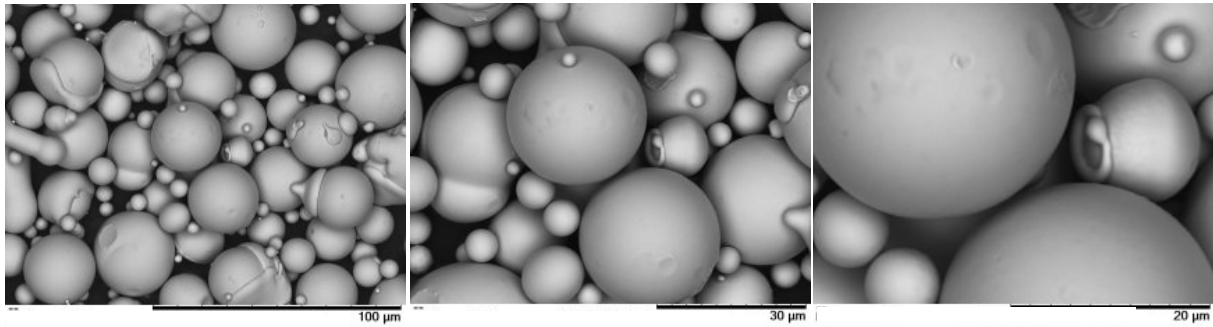
図 2.1-29 浸出試験後の $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末の SEM-EDS 分析 (表 2.1-20 (a)) の試料)

表 2.1-25 EDS 分析による $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末の元素比 (表 2.1-20 (a)) の試料)

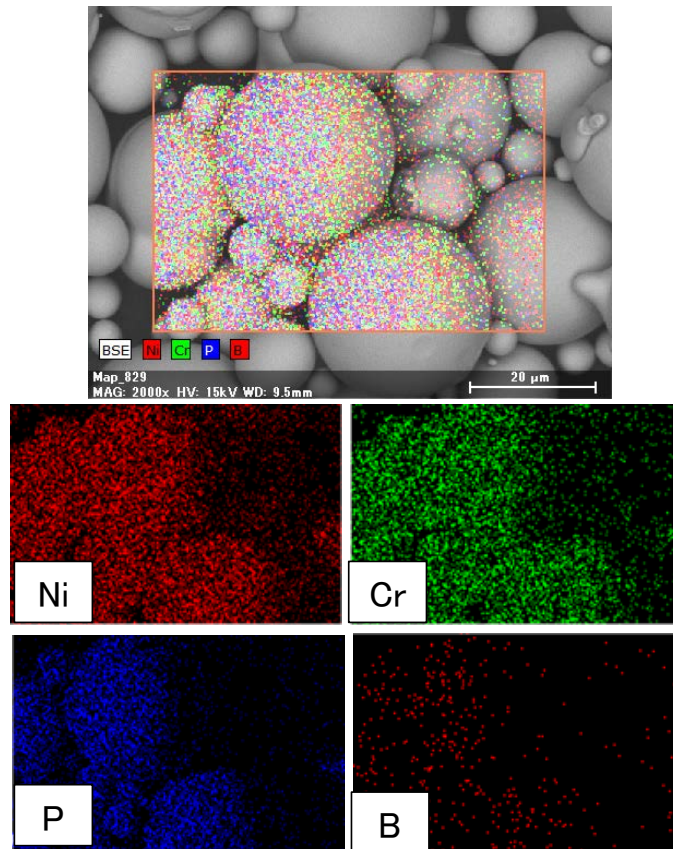
$\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$	試験前		試験後	
	重量割合[%]	元素割合[%]	重量割合[%]	元素割合[%]
Nickel	75.43	68.33	76.49	69.69
Chromium	15.15	15.49	14.74	15.16
Phosphorus	9.42	16.18	8.77	15.15

(BoronはEDS定量分析において誤差が大きいため除外した)

Nb は使用装置では測定対象外



(a) 浸出試験後の $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末の SEM 画像



(b) EDS 分析による浸出試験後の $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末の元素分布

図 2.1-30 浸出試験後の $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末の SEM-EDS 分析 (表 2.1-22 (b)) の試料)

表 2.1-26 EDS 分析による $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 粉末の元素比 (表 2.1-22 (b)) の試料)

$\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$	試験前		試験後	
	重量割合[%]	元素割合[%]	重量割合[%]	元素割合[%]
Nickel	75.43	68.33	76.85	69.57
Chromium	15.15	15.49	13.35	13.63
Phosphorus	9.42	16.18	9.80	16.80

(BoronはEDS定量分析において誤差が大きいため除外した)

Nb は使用装置では測定対象外

③ Cu 基金属ガラス

表 2.1-27 は、 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 粉末を使用した浸出試験の結果である。Cu 基金属ガラス粉末の浸出試験は、pH 13、酸化雰囲気かつ NaCl 濃度 0.6 M の条件のみ実施した。Cu、Zr、Ti のいずれにおいても時間経過に従って元素浸出が微増するとともに、高温条件において Cu および Zr の浸出がやや大きくなったが、モル浸出率としては極微量に留まった。同じく Cu および Zr を含む Zr 基金属ガラスと比較すると、Cu 基金属ガラスの方がこれらの元素浸出が若干多くなった。いずれもモル浸出率としては十分に小さくガラス形成能に影響を及ぼすものではないと考えられるが、本検討の試験条件においては Zr 基の方がより安定である可能性がある。図 2.1-31 および表 2.1-28 に示す SEM-EDS 分析結果からも、浸出試験前後で外観や元素分布、元素比率に大きな変化は見られなかった。本検討で得られた結果に見られる高耐食性は、Cu、Zr、Ti のいずれも不動態被膜形成を期待できる元素であることが大きく、これらを含む従来の金属材料も高い耐食性を示す。加えて、金属ガラスは(Cu 基以外の金属ガラスも同様に)非晶質構造であるために一様かつ速やかに不動態皮膜が形成されるとともに、結晶質に見られる孔食などの発生が抑制される効果が付与されることにより、これらの元素を含む従来の合金と比べても、耐食性がさらに高まると期待される。

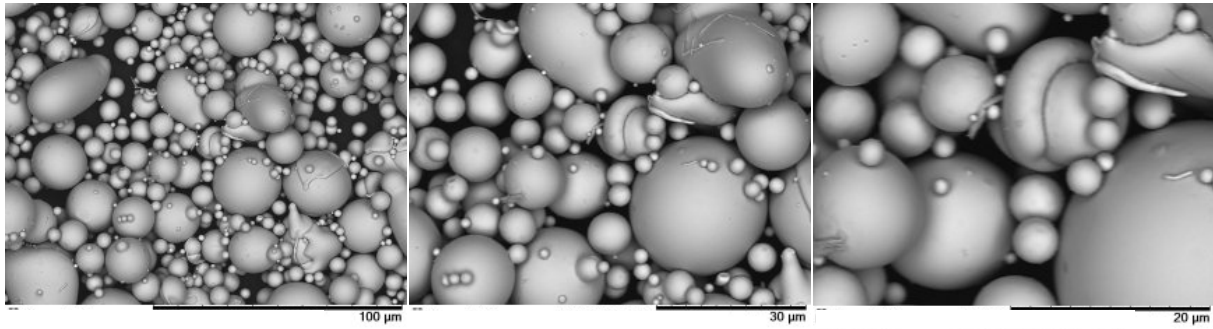
表 2.1-27 Cu₆₀Zr₃₀Ti₁₀粉末の浸出試験結果

(a) 酸化雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M	
時間[h]	Cu [mol]	Zr [mol]	Ti [mol]
112	1.06×10^{-7}	1.55×10^{-8}	ND
3282	1.67×10^{-7}	1.68×10^{-7}	2.21×10^{-7}
7342	7.76×10^{-9}	2.68×10^{-7}	2.91×10^{-7}
14227	2.88×10^{-8}	3.50×10^{-7}	3.54×10^{-7}
25132	3.67×10^{-8}	3.69×10^{-7}	4.02×10^{-7}

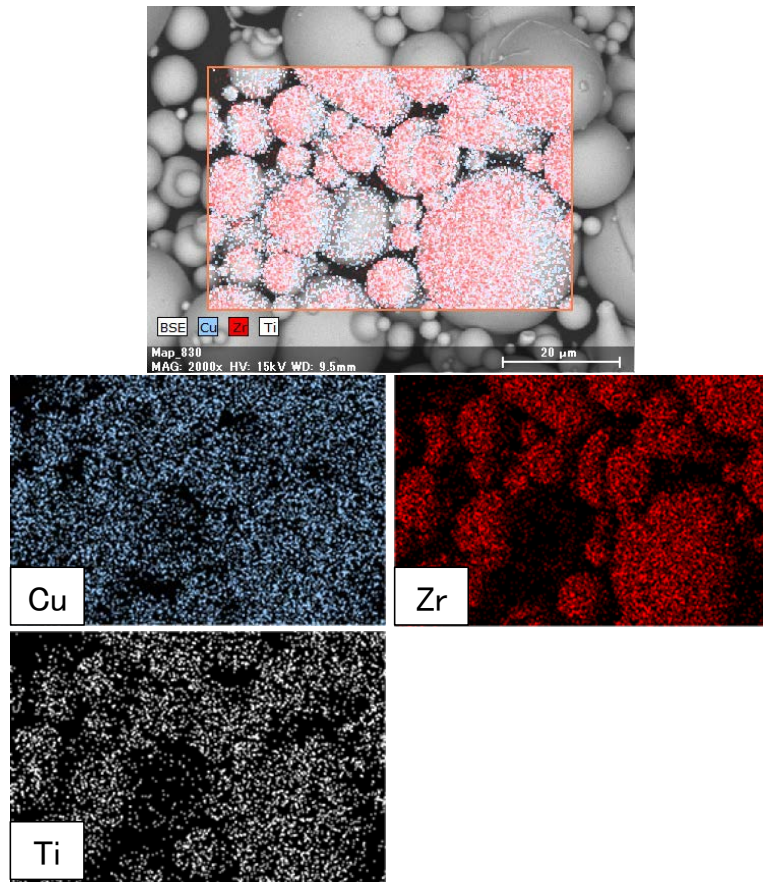
(a') 酸化雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)
時間[h]	Cu (%)	Zr (%)	Ti (%)
112	1.55×10^{-4}	4.54×10^{-5}	ND
3282	2.44×10^{-4}	4.93×10^{-4}	1.94×10^{-3}
7342	1.14×10^{-5}	7.83×10^{-4}	2.55×10^{-3}
14227	4.21×10^{-5}	1.02×10^{-3}	3.11×10^{-3}
25132	5.38×10^{-5}	1.08×10^{-3}	3.53×10^{-3}

(b) 酸化雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M	
時間[h]	Cu [mol]	Zr [mol]	Ti [mol]
112	4.61×10^{-8}	1.42×10^{-8}	ND
3282	1.24×10^{-7}	1.63×10^{-7}	2.12×10^{-7}
7342	2.61×10^{-8}	2.16×10^{-7}	2.34×10^{-7}
14227	4.65×10^{-8}	1.09×10^{-7}	1.05×10^{-7}
25132	1.26×10^{-6}	1.57×10^{-6}	2.06×10^{-7}

(b') 酸化雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)
時間[h]	Cu (%)	Zr (%)	Ti (%)
112	6.75×10^{-5}	4.16×10^{-5}	ND
3282	1.82×10^{-4}	4.76×10^{-4}	1.86×10^{-3}
7342	3.82×10^{-5}	6.33×10^{-4}	2.06×10^{-3}
14227	6.80×10^{-5}	3.19×10^{-4}	9.26×10^{-4}
25132	1.84×10^{-3}	4.60×10^{-3}	1.81×10^{-3}



(a) 浸出試験後の $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 粉末の SEM 画像



(b) EDS 分析による浸出試験後の $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 粉末の元素分布

図 2.1-31 浸出試験後の $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 粉末の SEM-EDS 分析結果(表 2.1-27(b)の試料)

表 2.1-28 EDS 分析による $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 粉末の元素比(表 2.1-27(b)の試料)

$\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$	試験前		試験後	
	重量割合[%]	元素割合[%]	重量割合[%]	元素割合[%]
Copper	55.71	60.93	52.65	58.12
Zirconium	36.55	27.84	39.52	30.39
Titanium	7.74	11.23	7.84	11.48

④ 従来の高耐食性金属材料

表 2.1-29 と表 2.1-30 に SUS316L 粉末を用いた浸出試験結果、および表 2.1-31 と表 2.1-32 にハステロイ C276 粉末を用いた浸出試験結果を示す。平成 28 年度までは pH 13、酸化雰囲気かつ NaCl 濃度 0.6 M の条件でのみ実施していたが、還元雰囲気条件を平成 29 年度追加実施した。

表 2.1-29～表 2.1-32 に示すように、SUS316L およびハステロイ C276 とともに、Cr および Mo の浸出が顕著であり、高温においてその浸出率は大きくなった。この金属と同様に Cr を含む金属ガラスである Ni 基金属ガラスの Cr 浸出率と比較すると、SUS316L およびハステロイ C276 のいずれも Ni 基金属ガラスよりも浸出率の増加が大きいことが分かる。とくに SUS316L においては、Cr の浸出は粒界腐食を引き起こすとされており(杉本, 2009)、耐食性を低下させる一因となり得る。還元雰囲気条件については、表 2.1-30 および表 2.1-32 に示した浸漬期間 2,472 時間の一点のみの取得に留まっており経時変化は得られていないが、いずれも表 2.1-29 および表 2.1-31 に示した酸化雰囲気条件の 315 時間～5,515 時間の間に入るような値となった。このことから、本検討の還元雰囲気条件においては、水素脆化のような何らかの腐食作用が短期間で顕著に進むことは無かったと推測される。

図 2.1-32 および図 2.1-33、表 2.1-33、表 2.1-34 は、浸出試験後の SUS316L およびハステロイ C276 の SEM 観察と EDS 分析結果である。EDS 分析による元素分布および元素比率からは、浸出試験前後で大きな差異は確認できない。なお、SUS316L の浸漬液は平成 28 年度にも示したように茶褐色に濁っていることから、SEM 観察に見られた付着物は水酸化鉄(III)沈殿によるものと考えられる。鉄系の従来合金は高アルカリ条件において不動態被膜を形成するために高い耐食性を示すとされているが、高 NaCl 条件においては塩化物イオンにより被膜が侵されて腐食が進展する(岩瀬ら, 2010)。その結果、本検討の浸出試験においても腐食が進展し、水酸化鉄(III)生成や Cr、Mo の浸出が観察されたと考えられる。なお、水酸化鉄(III)はコロイド、あるいは沈殿物となるため、孔径 0.45 μm フィルターを用いた濾過操作によって除去され、表 2.1-29 および表 2.1-30 に示すように溶液分析においては検出限界以下となった。ハステロイ C276 もまた Fe を 5 %含むが、SEM-EDS 分析や浸出試験時の液相などに大きな変化は確認されておらず、Ni による不動態被膜が耐食性を保っていると言える。

表 2. 1-29 SUS316L 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気)

(a) 酸化雰囲気 25°C NaCl 0.6 M

時間[h]	Fe	Ni	Cr	Mo
315	1.78×10^{-8}	ND	3.86×10^{-6}	2.80×10^{-7}
5515	ND	ND	3.27×10^{-5}	3.94×10^{-6}
16735	ND	ND	1.07×10^{-4}	1.21×10^{-5}

(a') 酸化雰囲気 25°C NaCl 0.6 M mol浸出率(%)

時間[h]	Fe	Ni	Cr	Mo
315	1.82×10^{-5}	ND	0.0148	0.0168
5515	ND	ND	0.125	0.236
16735	ND	ND	0.410	0.725

(b) 酸化雰囲気 60°C NaCl 0.6 M

時間[h]	Fe	Ni	Cr	Mo
315	6.10×10^{-9}	ND	8.21×10^{-6}	8.26×10^{-7}
5515	ND	ND	1.80×10^{-4}	2.09×10^{-5}
16735	ND	ND	5.15×10^{-4}	5.68×10^{-5}

(b') 酸化雰囲気 60°C NaCl 0.6 M mol浸出率(%)

時間[h]	Fe	Ni	Cr	Mo
315	6.26×10^{-6}	ND	0.0313	0.0496
5515	ND	ND	0.690	1.26
16735	ND	ND	1.97	3.41

表 2. 1-30 SUS316L 粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、試験開始から 2,472 時間後)

還元雰囲気 (単位: mol)			還元雰囲気 mol浸出率(%)		
元素	25°C, 塩水	60°C, 塩水	元素	25°C, 塩水	60°C, 塩水
Fe	ND	1.33×10^{-7}	Fe	ND	1.37×10^{-4}
Ni	ND	ND	Ni	ND	ND
Cr	7.04×10^{-6}	4.29×10^{-5}	Cr	0.0269	0.164
Mo	ND	4.63×10^{-6}	Mo	ND	0.278

表 2. 1-31 ハステロイ C276 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気)

(a) 酸化雰囲気 25°C NaCl 0.6 M

時間[h]	Ni	Cr	Mo	Fe	W
315	ND	1.83×10^{-7}	5.68×10^{-7}	ND	6.15×10^{-8}
5515	ND	9.23×10^{-7}	3.45×10^{-5}	ND	7.32×10^{-8}
16735	ND	2.25×10^{-6}	5.08×10^{-5}	ND	ND

(a') 酸化雰囲気 25°C NaCl 0.6 M mol浸出率(%)

時間[h]	Ni	Cr	Mo	Fe	W
315	ND	7.42×10^{-4}	4.26×10^{-3}	ND	4.71×10^{-3}
5515	ND	3.75×10^{-3}	0.0259	ND	5.61×10^{-3}
16735	ND	9.15×10^{-3}	0.0381	ND	ND

(b) 酸化雰囲気 60°C NaCl 0.6 M

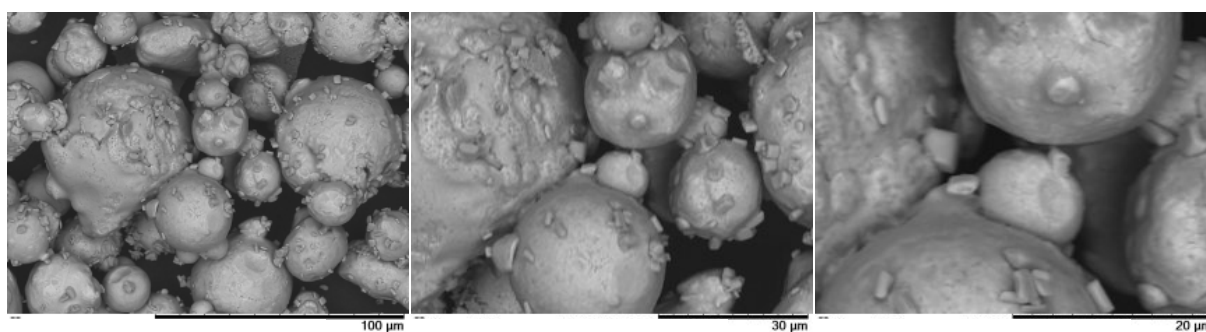
時間[h]	Ni	Cr	Mo	Fe	W
315	ND	1.01×10^{-6}	3.20×10^{-6}	ND	2.37×10^{-7}
5515	ND	3.86×10^{-6}	1.24×10^{-5}	ND	4.17×10^{-7}
16735	ND	6.25×10^{-6}	1.74×10^{-5}	ND	1.36×10^{-6}

(b') 酸化雰囲気 60°C NaCl 0.6 M mol浸出率(%)

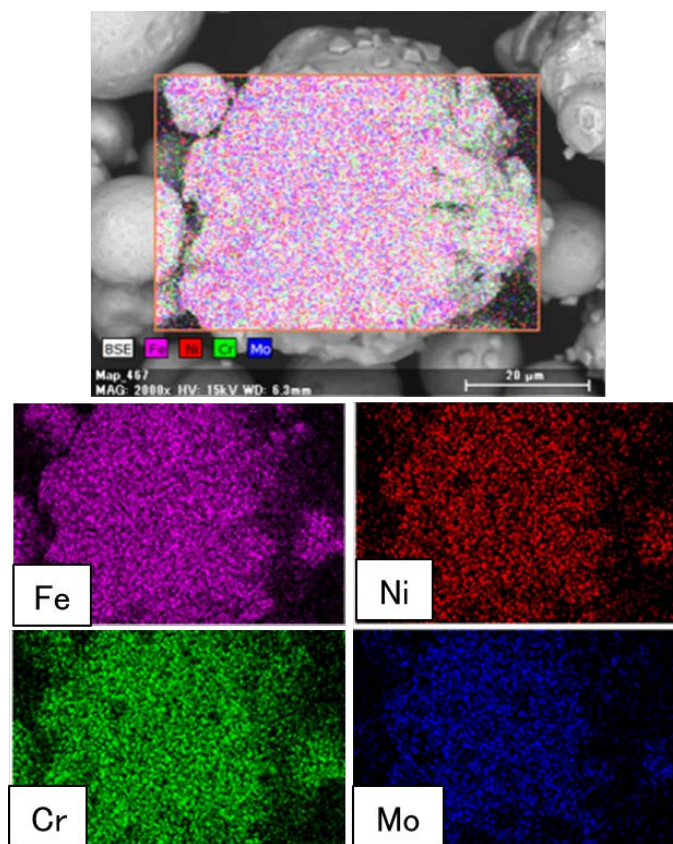
時間[h]	Ni	Cr	Mo	Fe	W
315	ND	4.08×10^{-3}	0.0240	ND	0.0182
5515	ND	0.0157	0.0930	ND	0.0319
16735	ND	0.0254	0.1310	ND	0.104

表 2.1-32 ハステロイ C276 粉末の浸出試験結果 (還元雰囲気、試験開始から 2,472 時間後)

還元雰囲気 (単位: mol)			還元雰囲気 mol浸出率(%)		
元素	25°C, 塩水	60°C, 塩水	元素	25°C, 塩水	60°C, 塩水
Ni	ND	ND	Ni	ND	ND
Cr	9.73×10^{-7}	1.38×10^{-6}	Cr	3.95×10^{-3}	5.59×10^{-3}
Mo	5.76×10^{-7}	3.80×10^{-6}	Mo	4.32×10^{-3}	0.0285
Fe	ND	ND	Fe	ND	ND
W	ND	1.86×10^{-8}	W	ND	1.43×10^{-3}



(a) 浸出試験後の SUS316L 粉末の SEM 画像 (表 2.1-29 (b) の試料)

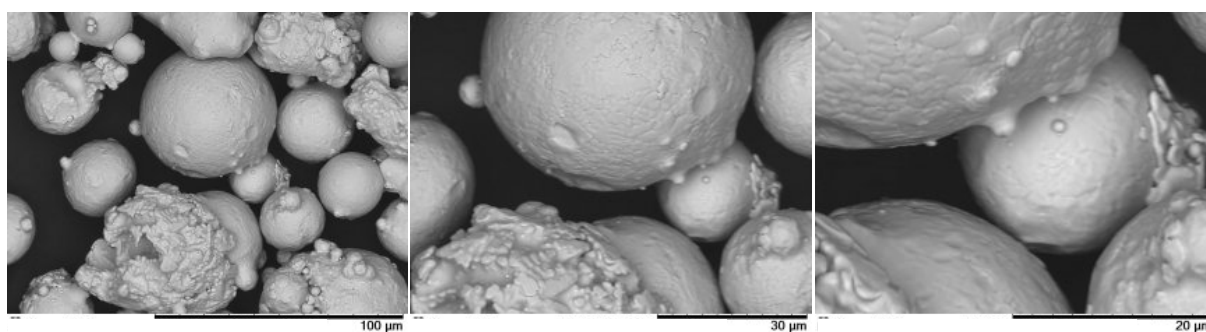


(b) EDS 分析による浸出試験後の SUS316L 粉末の元素分布

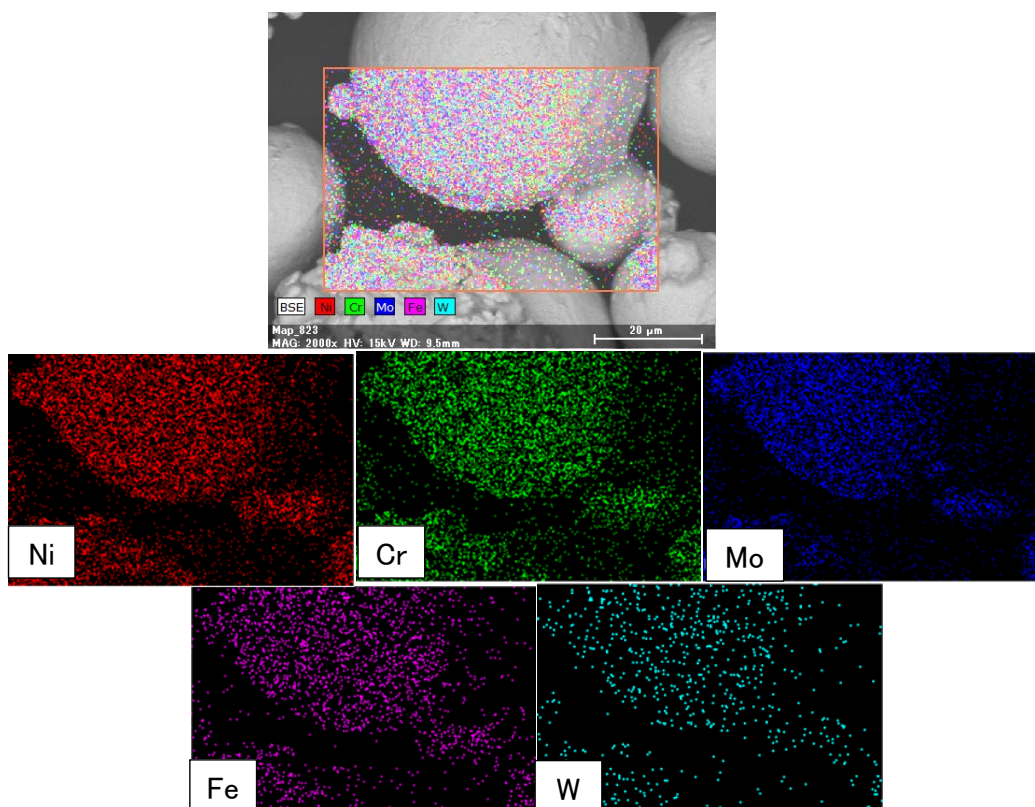
図 2.1-32 浸出試験後の SUS316L 粉末の EDS 分析結果 (表 2.1-29 (b) の試料)

表 2.1-33 EDS 分析による SUS316L 粉末の元素比(表 2.1-29 (b)の試料)

SUS316L	試験前		試験後	
	重量割合[%]	元素割合[%]	重量割合[%]	元素割合[%]
Iron	67.49	67.49	65.36	65.05
Chromium	18.88	20.28	19.59	20.94
Nickel	11.64	11.08	14.38	13.61
Molybdenum	1.98	1.15	0.68	0.39



(a) 浸出試験後の Hastelloy C276 粉末の SEM 画像



(b) EDS 分析による浸出試験後の Hastelloy C276 粉末の元素分布

図 2.1-33 浸出試験後の Hastelloy C276 粉末の EDS 分析結果(表 2.1-31 (b)の試料)

表 2. 1-34 EDS 分析による浸出試験後の Hastelloy C276 粉末の元素比(表 2. 1-31 (b) 試料)

Hastelloy C276	試験前		試験後	
	重量割合[%]	元素割合[%]	重量割合[%]	元素割合[%]
Nickel	60.32	63.12	57.47	59.95
Chromium	16.34	19.30	18.16	21.38
Molybdenum	15.72	10.06	17.54	11.19
Iron	6.49	7.14	6.83	7.49
Tungsten	1.13	0.38	0.00	0.00

⑤ 元素浸出による劣化の推定

金属ガラス材料においては元素の浸出によって元素比率が変化し、ガラス形成能が維持できなくなることが懸念される。そこで本検討では、Ni 基金属ガラスからの P 浸出を例とし、P が浸出した分の割合が金属ガラスとしての性能を失うものと仮定して、劣化割合(厚さ)の試算を試みた。浸出試験において P は Ni 基金属ガラスからモル浸出率で最大 1 % 浸出した場合について、金属ガラス粒子の表面から 1 % に相当する体積分が劣化し、そのときの半径の変化分が劣化厚さに相当すると見立てた。なお、劣化に伴う表面積変化はここでは無視した。SEM 観察から金属ガラス粒子はほぼ球状であり、球の体積 V をもとに計算すると劣化していない部分の半径 r と元の半径 r_0 の関係は

$$V = 0.99V_0, \quad \frac{4}{3}\pi r^3 = 0.99 \times \frac{4}{3}\pi r_0^3, \quad r^3 = 0.99r_0^3, \quad \therefore r = 0.997r_0 \dots\dots \text{式 2. 1-11}$$

となる。すなわち、劣化していない部分の半径は元の半径の 0.997 倍、劣化した厚さは元の半径の 0.3 % に相当する。本検討において Ni 基金属ガラス粒子は 38 μm 以下で分級しており、仮に半径 20 μm とすると劣化厚さは 6 nm と見積もられる。今回検討対象とした金属ガラスの中では、Ni 基金属ガラスからの P 浸出がモル浸出率としては最大であり、他の含有元素はいずれもこれよりも小さくなる。このような試算に基づくと、今回の試験期間内に生じた成分浸出による劣化厚さはもともとの粒子半径に比較してきわめて小さいと推定される。ただし、溶射などの施工方法や条件によって耐食性が変わってくる可能性があり、実際の施工に対応した評価が必要である。

(5) Ni 基金属ガラス溶射膜の局部腐食試験

Ni 基金属ガラス溶射膜の局部腐食試験について、以下の 1)~3) の構成で報告する。

1) 試験の概要

チタン、低合金チタンやニッケル基合金に代表される高耐食性金属は、金属表面に保護性の高い不動態皮膜を形成し、皮膜が健全なかぎり腐食速度は極めて小さいという特徴を有する。しかし、処分後初期の比較的酸化性の雰囲気では、塩化物イオンなど不動態破壊型の化学種の存在下において孔食やすきま腐食などの局部腐食が問題となり、これらの腐食が生じない環境で材料を適用することが基本的な考え方となっている(核燃料サイクル開発機構、

1999)。本検討において耐食性や施工性の観点から最も有望な処分容器材料として選定された Ni 基の金属ガラスについても、これまでの金属ガラス粉末を用いた耐食性評価試験より、従来の高耐食性金属と同様に不動態皮膜によって高い耐食性を維持すると考えられる。よって、局部腐食に対する耐食性を従来の高耐食性金属と比較することによって、処分容器材料としての性能を相対的に評価することとした。

孔食、すきま腐食には、温度、塩化物イオン濃度など環境条件に応じて臨界電位が存在し、その電位を超える条件でこれらの腐食が生じるといわれている（腐食防食協会，1993）。よって、その臨界電位を測定し、材料間での比較を行うことによって耐局部腐食性が評価可能である。孔食については、金属の電位を十分遅い速度でアノード分極し、電流値が急激に上昇するときの電位をもって臨界電位（孔食電位）と見なすことができるといわれている（腐食防食協会，1993）。一方、すきま腐食については、すきま付きの試験片を用いてアノード分極によってすきま腐食を発生・成長させたのち、電位を徐々に低下させ、すきま腐食の進展が停止して再不動態化するときの電位（すきま腐食再不動態化電位）を臨界電位として評価する手法が用いられている（腐食防食協会，1993）。

平成 28 年度はこれらの臨界電位の評価に向けた予備的な検討として、炭素鋼上に Ni 基合金の溶射膜を形成させた試料を用いてアノード分極測定を実施し、表面を研磨した場合には高濃度（3 M）の NaCl 水溶液中でも孔食に伴う電流の急激な増加は認められず、SUS316L 以上の耐孔食性を有する可能性が示された。しかし、一部の試験片では、皮膜に基材まで貫通した亀裂が観察され、基材（炭素鋼）の腐食も認められた。この亀裂は試験片両面の溶射の際に、一方の面への過剰な熱サイクルの影響やヒュームの付着などの影響によるものと推察された。そこで平成 29 年度はこのような影響を低減した溶射試料を用いて試験を行った。

2) 実験方法

① 試験片

金属ガラスには $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ を用い、溶射処理を行った試験片を用いた。溶射試料の約 10×10 mm の部分を切出し、一方の面にリード線を取り付けた後、エポキシ樹脂に埋め込んだ。溶射ままの表面の試料のほか、エメリー#800 にて研磨した試料も作製した。

② 試験溶液

試験溶液には 0.5 M、0.6 M、1.0 M および 3.0 M の NaCl 水溶液を用いた。試験温度は 90 °C とした。

③ 試験手順

試験片を試験溶液とともに電解セルに入れ、参照電極（飽和カロメル）対極を設置したのち、試験溶液を窒素ガスにて 3 時間以上脱気した。次に各電極をポテンシオスタットに接続し、試験片の自然電位を測定したのち、JIS G0577 に準じて自然電位から 20 mV min^{-1} の速度で動電位法によりアノード分極を行った。NaCl 濃度 1.0 M の試験についてはアノード分極曲線において皮膜破壊によると思われる電流値の急激な増加が認められた電位付近（ $-650 \sim 500 \text{ mV vs. SCE}$ ）で定電位試験も実施した。さらに、皮膜破壊が生じる電位条件（ -500 mV vs. SCE ）

で約 40 時間 (2,400min) 定電位保持して腐食を進展させたのちに 10mV/120min のステップで電位を降下させ、腐食進展が停止する電位を求めた。

3) 実験結果と考察

溶射ままの試験片を用いて各 NaCl 濃度条件で得られたアノード分極測定結果を図 2.1-34 に示す。また、試験後試験片の外観を図 2.1-35 に示す。なお、図 2.1-34 の電流密度は電流値を浸漬面の寸法から算出した面積で除したみかけの値である。溶射ままの試料の実際の表面積は表面の微細な凹凸によってより大きいと考えられる。図 2.1-34 より、自然電位からアノード分極すると 0.5 M では -0.1 V (vs. SCE) 付近から電位とともに電流値が増加の傾向を示したが、急激な立ち上がりではなく、試験後試験片の外観からも腐食による変色などは見られなかったことから明瞭な皮膜破壊は生じていないと推察される。0.6 M および 1.0 M では、約 -0.55 V (vs. SCE) 付近で、3.0 M では -0.6 V 付近で電流値が急激に上昇し、試験後試験片の外観においても黄～茶色の変色が認められ、NaCl 濃度が高いほど変色は顕著となった。このようなことから 0.6 M 以上では皮膜破壊が生じていたと推察される。また、このような変色は試験片表面全体にわたっており、孔食のような局所的な皮膜破壊ではなく、全面的な皮膜破壊の様相である。溶射ままの試験片表面は凹凸によって閉塞部が生じ、微細なすきま構造が全面的に形成されたことによってすきま腐食と類似のメカニズムによって皮膜破壊が全面的に生じた可能性がある。次に、1.0 M NaCl 水溶液中での試験片表面の研磨の有無によるアノード分極曲線の違いを図 2.1-36 に示す。研磨なしの試料については、同じ溶射試料の別の部位から切り出した試験片での測定結果の比較 (研磨なし-1、研磨なし-2) も行った。研磨なしの場合には試料によってやや異なる挙動が見られ、研磨なし-1 のほうが分極開始後から早い段階で電流値が大きくなり、-0.6 V (vs. SCE) 付近からより急激に値が増加した。一方、研磨した場合には電流値の急激な増加は観察されなかった。研磨なしの試料 (溶射まま) について電流値の急激な増加が認められた電位 (-0.55、-0.6 V vs. SCE) とその前後 0.05 V の条件にて 1.0 M NaCl 水溶液中で約 48 時間の定電位試験を行った。その結果を図 2.1-37 に示す。また、試験後試験片の外観を図 2.1-38 に示す。-0.65 V (vs. SCE) については電流値のばらつきが大きかったことから異なる二つの試験片で測定を行ったが、いずれも類似の挙動を示した。-0.6 V (vs. SCE) 以上では電流値の変動は小さく、試験開始後数 100～1,000 min 以降は電流値が概ね一定か緩やかな低下傾向を示した。試験終了時点での値は -0.6 V (vs. SCE) 以下では 10^{-7} ～ 10^{-6} A cm² 程度のオーダーであり、図 2.1-34 で電流値が増加する前の不動態域における電流値と概ね整合する。また、-0.6 V (vs. SCE) 以下では外観上も変色などは見られなかった。-0.5 V (vs. SCE) では電流値が著しく大きく、外観上も他の条件とは明らかに異なり変色した様相であったことから、皮膜破壊が生じていたと推察される。これら定電位試験結果は動電位法によるアノード分極試験結果と整合しており、溶射ままの表面の状態では -0.55～0.5 V (vs. SCE) の範囲に皮膜破壊生起の閾値が存在すると推察される。

次に、皮膜破壊が生じたと推定される -0.5 V で 2,400 min 定電位保持したのちに、120 分ごとに電位を 10 mV ステップで低下させた結果を図 2.1-39 に示す。約 -0.65 V vs. SCE 以下になると、皮膜破壊が生じていない状態での見かけの電流密度 (図 2.1-37 より 10^{-3} mA cm⁻² 以下) 相当まで電流値が低下し、かつ電流値の経時的な増加傾向も見られなくなった。よっ

て、 -0.65 V vs. SCE 以下では皮膜破壊による腐食進展が概ね停止して再不動態化したと考えられる。

比較的汎用的に使用されている高耐食性金属の類似の環境における局部腐食臨界電位として、例えばステンレス鋼 SUS316L では $80 \text{ }^\circ\text{C}$ の 1 M NaCl 水溶液中において孔食電位が 0.04 V vs. SCE と報告されている (磯本・松尾, 2012)。また、 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ の NaCl 水溶液中における純チタン、低合金チタン、Ni 基合金のすきま腐食再不動態化電位のデータがすきま腐食の生起臨界条件として深谷ほか (2007) によりまとめられており、それによると 1 M NaCl の条件では純チタン (ASTM Grade 1) では -0.5 V vs. SCE 程度、低合金チタン (ASTM Grade 12, Ti-0.8 %Mo-0.3 %Ni) では -0.3 V vs. SCE 程度、Ni 基合金 (Alloy22, Ni-21 %Cr-13 %Mo) では -0.1 V vs. SCE 程度と推定される。

今回の溶射試験片では、研磨した試料については SUS316L の孔食電位の報告事例 0.04 V vs. SCE より十分高い電位でも孔食発生が認められていないことから、溶射膜自体は SUS316L よりも耐孔食性に優れることが期待される。また、皮膜破壊がすきま腐食に類似のメカニズムで生じたと仮定してチタン材などのすきま腐食再不動態化電位と比較すると、本試験で得られた溶射ままの材料での再不動態化電位 -0.65 V vs. SCE 程度は、純チタンのすきま腐食再不動態化電位 (-0.5 V vs. SCE 程度) より低いものの、定電位法での皮膜破壊生起電位は $-0.55 \sim -0.5 \text{ V vs. SCE}$ と純チタンのすきま腐食再不動態化電位に近い値である。今回得られた溶射材の皮膜破壊電位や再不動態化電位が局部腐食の臨界電位と見なしうるかどうかは測定方法の最適化を含めて更に検討が必要であるが、純チタンに近い耐局部腐食性を期待できる可能性がある。

実際の処分容器としての適用においては、構造的なすきまの有無や表面の微細な凹凸などが皮膜の耐食性に大きく関わると考えられることから、実際の施工方法や表面仕上げ方法に対応した耐食性の評価が必要である。

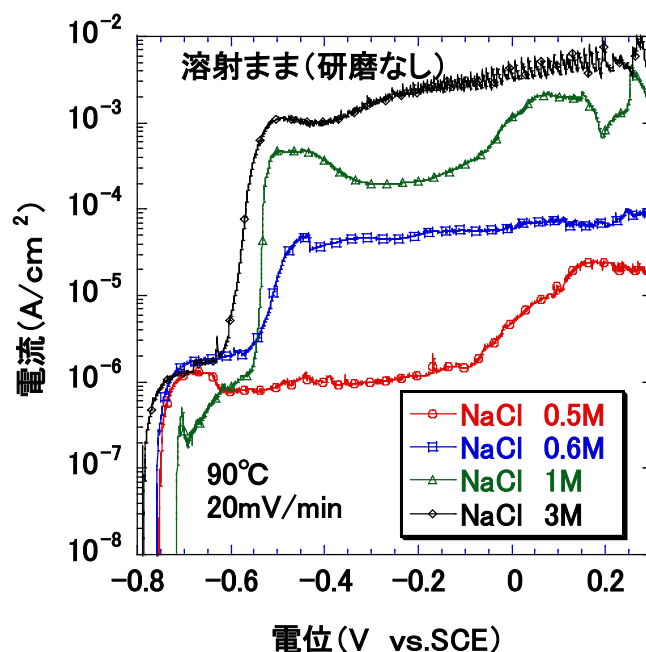


図 2.1-34 $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 溶射試験片のアノード分極挙動に及ぼす NaCl 濃度の影響

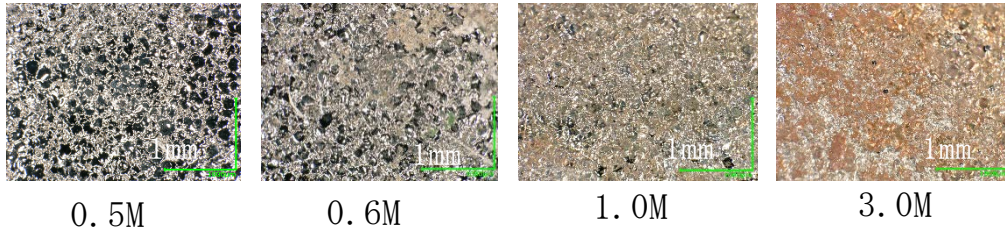


図 2.1-35 $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 溶射試験片のアノード分極試験後の試験片表面

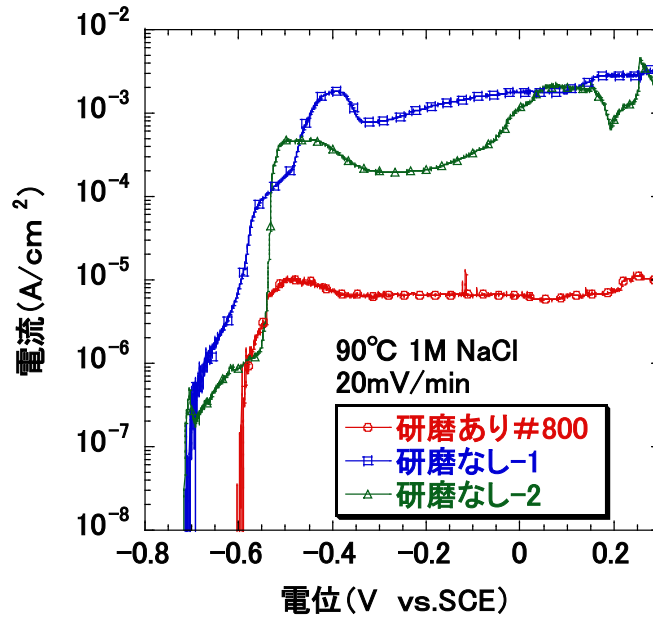


図 2.1-36 $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 溶射試験片のアノード分極挙動に及ぼす研磨の影響

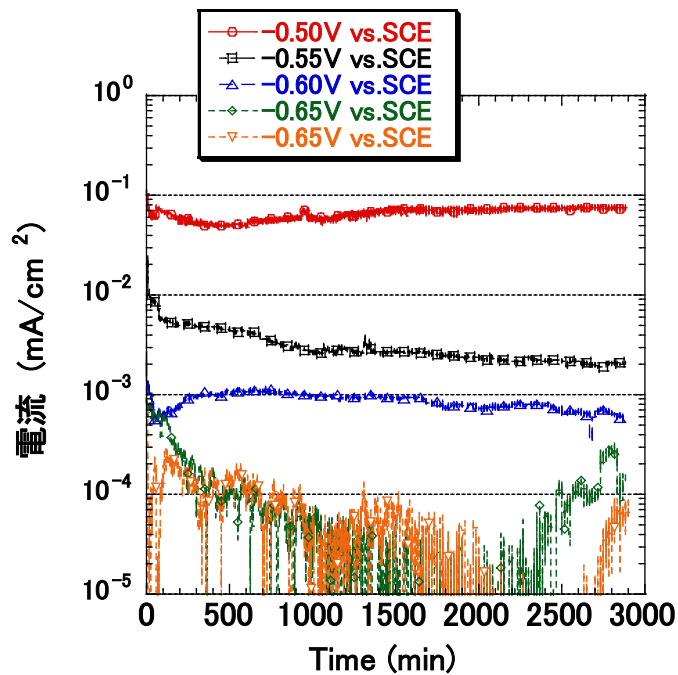


図 2.1-37 $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 溶射試験片 (溶射まま) の定電位試験結果

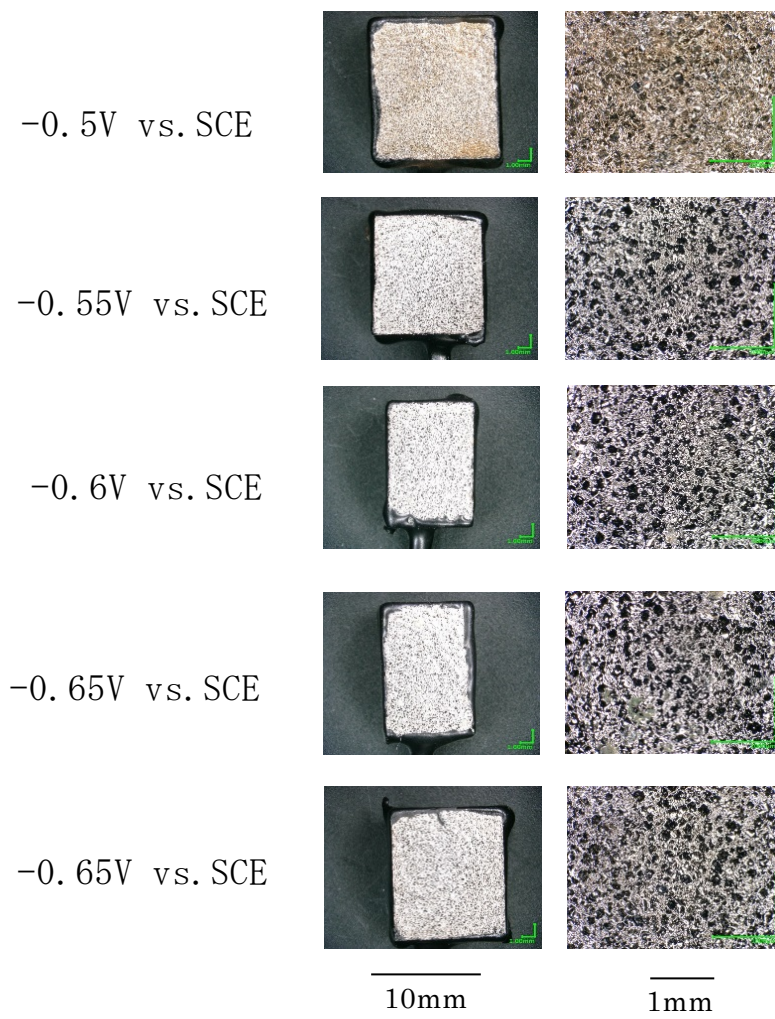


図 2.1-38 $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ 溶射試験片（溶射まま）の定電位試験後試験片の外観

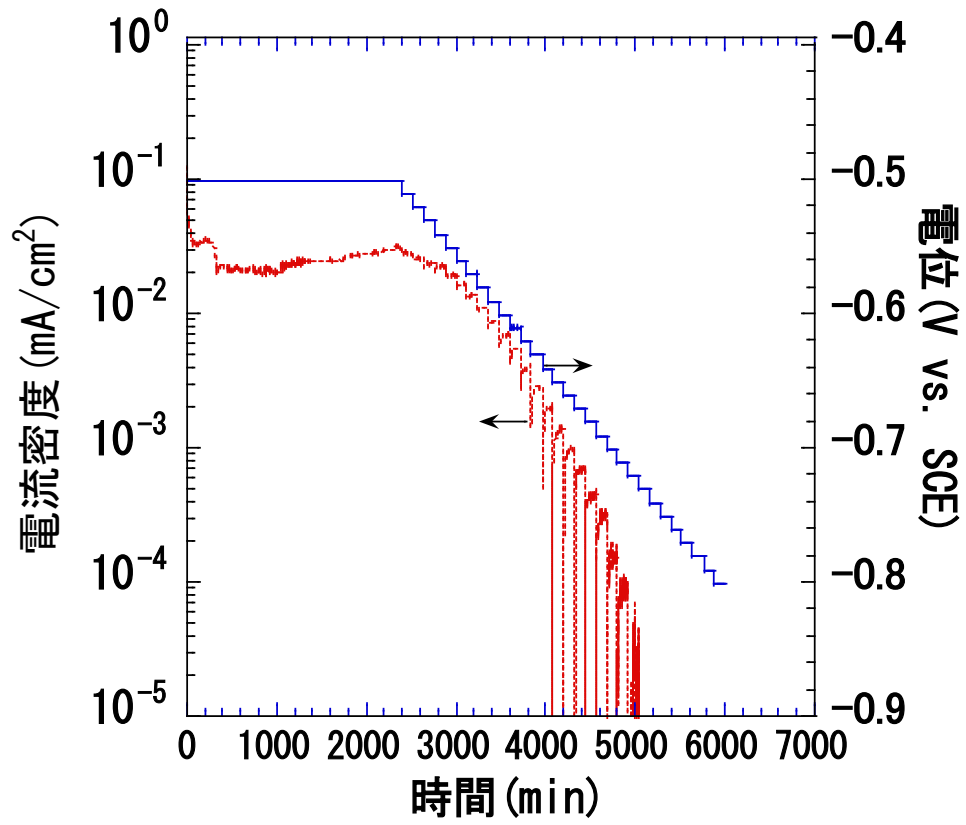


図 2.1-39 Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄ 溶射試験片（溶射まま）の再不動態化電位測定結果

2.2 閉じ込め性能評価手法の高度化

直接処分システムにおける放射性核種の閉じ込め性能を評価するための手法を高度化するには、人工バリア材料や燃料集合体などのニアフィールド構成要素の劣化およびそれに起因して生じる核種の放出・移行に関わる現象や、それらに及ぼす諸因子の影響などに関してわが国の幅広い地質環境条件やその長期的変遷も考慮に入れた現象理解やメカニズム解明により不確実性を低減し、これまで保守的に見積もってきた閉じ込め性能をより適正に評価することが必要である。この高度化を行うことで、例えば処分容器材料の腐食機構をモデル化により、経時的な腐食速度の低下を考慮した腐食量評価に基づいて過度な保守性を除いた寿命を推定できるなど、より高度なバリア機能を構築することが可能となる。また、燃料集合体の腐食挙動の理解に基づいて閉じ込め性能を適正に評価することで、燃料や金属からの放射性核種の放出速度などに関するモデルおよびパラメータをより現実的な値に設定することが可能となる。以上を踏まえ、人工バリア材料や燃料集合体などのニアフィールド構成要素の材料を対象に、腐食、劣化、変質に関する現象やメカニズム、それらへの影響因子の作用などを解明するとともに、多重バリアシステムやその構成要素に対して、わが国の幅広い地質環境条件やその長期的変遷も考慮に入れた様々なシナリオに対応可能な新たな長期挙動の評価手法の検討や従来の評価手法の高度化などに資するための知見の整備を行うこととした。

2.2.1 人工バリア材料の閉じ込め性能の評価に関する研究

(1) 本項目の背景と目的

2.2節で述べたように、人工バリア材料の劣化現象や、それらに及ぼす諸因子の影響などに関して現象理解やメカニズム解明により不確実性を低減し、これまで保守的に見積もってきた閉じ込め性能をより適正に評価することが必要である。

本項では、処分容器の閉じ込め性能と緩衝材による閉じ込め性能についての検討を行う。

まず、処分容器の閉じ込め性能については、それが主に耐食性によって決定されることが考えられることから、処分容器の閉じ込め性能評価手法を高度化することを目的として、炭素鋼、銅、チタンなどの従来の処分容器候補材料を対象として地下水による腐食現象とそのメカニズムを理解するための実験的検討を行った。また、処分容器の腐食挙動評価における不確実性のひとつとして考えられる微生物による影響に着目してベントナイト中における微生物の挙動や微生物共存下における腐食挙動に関する検討を行った。

緩衝材による閉じ込め性能については、安全評価における初期の支配核種である C-14 の閉じ込めに着目してベントナイト中における C-14 の移行挙動に関する検討を行った。また、処分容器として銅を用いた場合の銅腐食生成物が緩衝材の特性に与える影響を調査した。

平成 29 年度の実施項目と概要は以下のとおり。

- ・ 処分容器材料の腐食挙動

処分容器候補材料の腐食メカニズムの解明および腐食メカニズムに基づく処分容器の閉じ込め性能評価手法の構築、耐食性向上に資する知見を整備することを目的として、炭素鋼腐食生成物皮膜の性状評価と腐食モニタリング、ベントナイト中における銅の腐食速度のモニタリングと応力腐食割れ挙動、放射線による処分容器候補材料の腐食への影響に関する検討を実施した。

- ・人工バリア性能への微生物影響評価

処分環境を想定した条件下における微生物腐食活性を支配する要因および腐食メカニズムの解明を目的として、 1.3 g cm^{-3} の圧縮密度条件下において炭素鋼片を用いた腐食評価試験を実施し、微生物活性を抑制するベントナイト乾燥密度と腐食に関与する微生物代謝に関する検討を行った。

- ・緩衝材中の C-14 移行挙動試験

有機形態の C-14 の移行挙動の理解を目的として、圧縮ベントナイト中の酪酸イオンの実効拡散係数を取得し、既往の結果と併せて有機化合物の分子量の違いによる拡散挙動の違いについて検討を行った。

- ・銅とベントナイトの相互作用に関する調査

硫化水素イオン共存下で圧縮ベントナイトと銅試験片を約 1 年間接触させ、試験片との接触面付近のベントナイト中の鉱物の変質状況や圧縮ベントナイト中に移行した銅の存在形態について調査した。

上記に関する検討内容を「(2) 処分容器材料の腐食挙動」、「(3) 人工バリア性能への微生物影響評価」、「(4) 緩衝材中の C-14 移行挙動試験」および「(5) 銅とベントナイトの相互作用に関する調査」として示す。また、本項目のまとめを 2.3 節に示す。

(2) 処分容器材料の腐食挙動

平成 28 年度までに、低酸素濃度下における炭素鋼の腐食モデル、ベントナイト中における純銅の腐食速度と応力腐食割れ挙動、放射線環境におけるチタンの腐食挙動などに関する検討を実施した。その結果から、以下の取り組みの必要性が示された。

- 炭素鋼については、低酸素濃度下における腐食速度の低下現象をモデル化する上で腐食生成物皮膜の性状を把握するとともに、より高度なモデルを構築する上で腐食生成物形成などの界面の状態や腐食速度のモニタリングが必要。
- 純銅については、ベントナイト中における腐食速度に及ぼす環境因子の影響、応力腐食割れに及ぼす環境因子や応力因子の影響などについて更に現象理解を進めることが必要。
- チタンの腐食に及ぼす放射線の影響についても、腐食量の測定に加えて電気化学的特性など、より詳細な現象の理解が必要。
- 更に、放射線による影響については、チタン以外の材料についても知見が乏しく、より広範な材料に対して評価を行う必要。

以上のことから、平成 29 年度は、処分容器候補材料の腐食メカニズムの解明および腐食メカニズムに基づく評価手法の構築、耐食性向上に資する知見を整備することを目的として、以下に示す項目の検討を行った。

- 1) 炭素鋼腐食生成物形成試験と皮膜の性状評価
- 2) 交流インピーダンス法による炭素鋼の腐食モニタリング
- 3) レジストメトリー法によるベントナイト中における銅の腐食速度のモニタリング
- 4) ベントナイト中における銅の応力腐食割れ挙動
- 5) 代替処分容器候補材料 (Cu, Ti, Ni 基合金など) のガンマ線照射下での電気化学特性

以下にこれらの項目の検討内容と結果を示す。また、1) から 5) までのまとめを 6) に示す。

1) 炭素鋼腐食生成物形成試験と皮膜の性状評価

平成 27 年度までの検討 (原子力機構, 2016) において、地層処分で想定される低酸素濃度環境における炭素鋼の腐食進展挙動を予測するモデルの調査を行い、柴田ほか (2013) により提案された腐食生成物皮膜の成長・溶解と皮膜内の物質移行に基づくモデルによって概ね妥当な予測が可能であることが示された。一方、このモデルによる予測では、腐食生成物皮膜中の物質移行特性の評価が不可欠であり、実際に皮膜を形成させて腐食に寄与する化学種の移行特性を実測する必要がある。そこで実際の環境で生じる皮膜に近い皮膜の迅速な形成方法を検討するとともに、形成した皮膜中の物質移行特性評価を試みた。

① 実験方法

低酸素濃度下で代表的な炭素鋼の腐食生成物としてマグネタイト (Fe_3O_4) およびシデライト (FeCO_3) が挙げられる。平成 28 年度はマグネタイト皮膜の形成を試みており、平成 29 年度はシデライト皮膜の形成を試みた。また、低酸素濃度下では水の還元による腐食が支配的

となることから、皮膜中の水の移行特性評価に資するため重水を用いて拡散係数の測定を行った。

供試材には、厚さ 2 mm の純 Fe 板(ニラコ製：純度 99.5 mass%) を使用し、マイクロカッターによって 10 mm × 10 mm の板状試料に加工して試料とした。この試料の表面にエメリー紙(～#6/0)で乾式研磨を行い、エタノール中で超音波洗浄を 600 s 行った後に皮膜形成試験に供した。皮膜形成試験には、353, 363, 373 K における飽和 NaHCO₃ 水溶液の上澄み液を使用した。皮膜形成試験の手順を次に示す。

反応槽をマントルヒータに設置して所定温度に加熱した試験溶液中に試料を浸漬させ、種々の時間保持することによって試料に皮膜を形成させた。試験中の蒸発による試験溶液の濃縮を抑制するために反応槽にグラハム冷却器(EYELA 製、ACE-2000)を接続した。浸漬後の試料には純水での洗浄、圧縮空気吹付による洗浄水の除去を行った後にシリカゲル入り密閉容器内で保管した。

作製した皮膜の表面は CCD (Charge Coupled Device) マイクロスコップで観察した。断面は走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope: SEM) で観察した。また、皮膜の構成化学種の同定には XRD を用いた。

次に、D₂O 拡散係数の測定試験は次のように行った。PTFE (polytetrafluoroethylene) テープに直径 6 mm の穴を開け、皮膜形成試験が終了した試料の中央にテープの穴がくるように被覆し、接液面積を限定した。次に図 2.2.1-1 に示すように密閉可能な容器に設置したアクリル台の上に PTFE テープで被覆された試料を設置し、試料の被覆していない部分に D₂O (和光純薬工業製) を 0.05 mL 滴下した。アクリル台の下にも D₂O を設置し、密閉容器内における D₂O の相対湿度を 100 % にして、試料に接触させた D₂O の乾燥を防止した。この状態で容器を密閉し、室温 (約 298 K) で 3974.4 ks までの種々の時間試料を保持して、D₂O を皮膜に浸透させた。次に、皮膜中の D₂O 浸透量を昇温脱離ガス分析装置 (ULVAC 製 TDS-200-L STANDAM) を用いて測定した。D₂O 浸透試験後の試料の表面に吸着した D₂O または H₂O 成分を取り除くため、TDS 装置の高真空 (10⁻⁷～10⁻⁶ Pa) 測定室に室温で 54 ks 程度に保持した。その後、昇温速度 5.5 × 10⁻² K s⁻¹ にて室温から 973 K まで加熱し、各温度で試料から脱離する D₂O ($m/z = 20$, m : 式量、 z : 価数) または H₂O ($m/z = 18$) の脱離速度を 20 s 間隔で測定した。

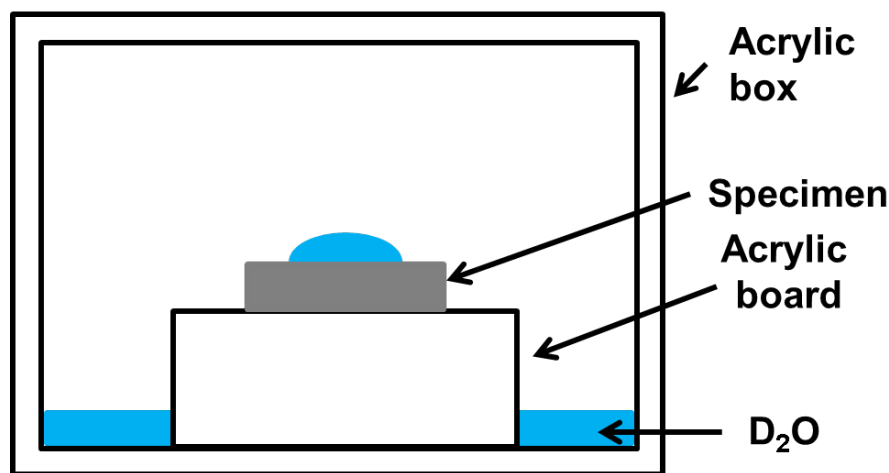


図 2.2.1-1 D₂O 浸透試験の模式図

② 実験結果と考察

各温度 (353, 363, 373 K) の飽和 NaHCO_3 水溶液中に各時間 (1.2, 21.6, 259.2 ks) 浸漬させた試料の表面状態を図 2.2.1-2 に示す。いずれの試料の表面も濃茶褐色に近い黒色に変色していた。また、温度が 353 および 363 K の場合、21.6 ks 浸漬した試料の表面の黒色化が顕著であり、259.2 ks 浸漬すると薄い黒色に変化した。一方、浸漬時間が 21.6 ks の場合、353 および 363 K では試料表面の黒色化が顕著であったが、373 K では試料表面の黒色化がほとんど認められなかった。

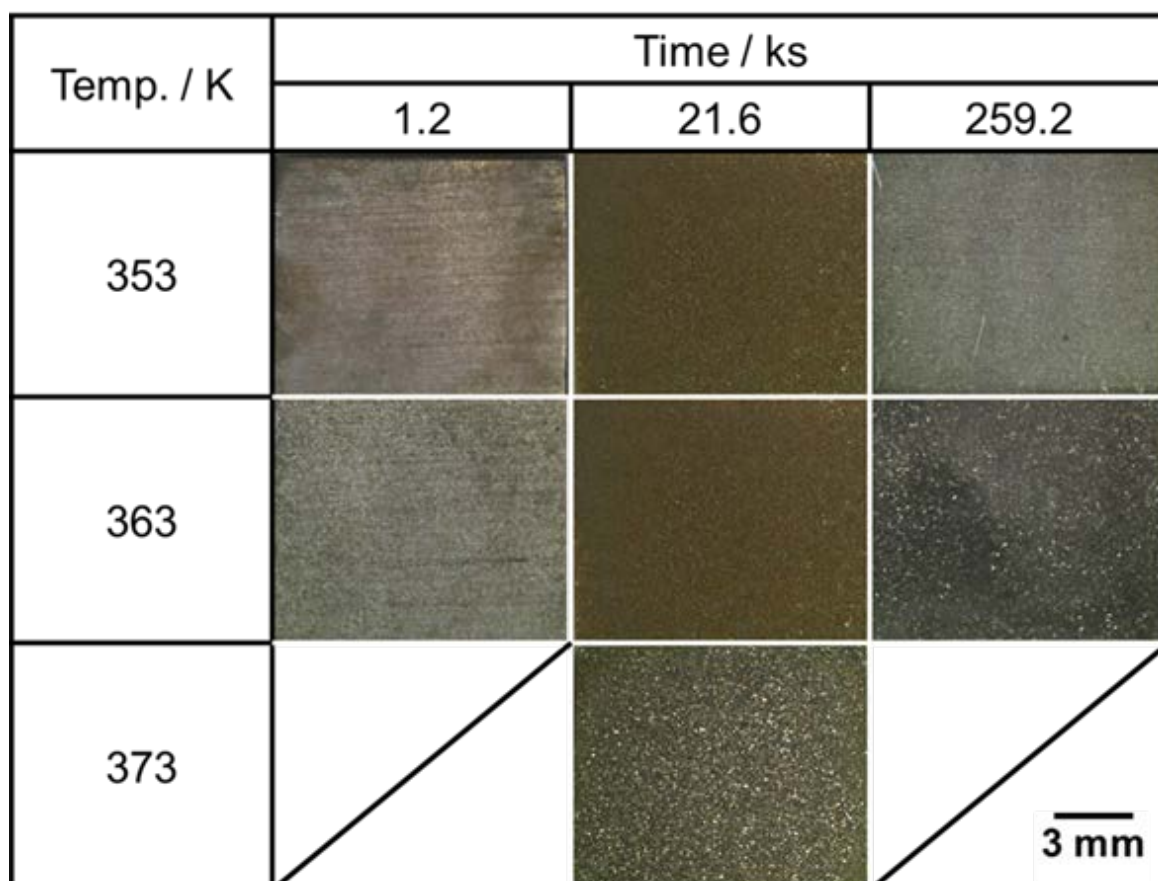
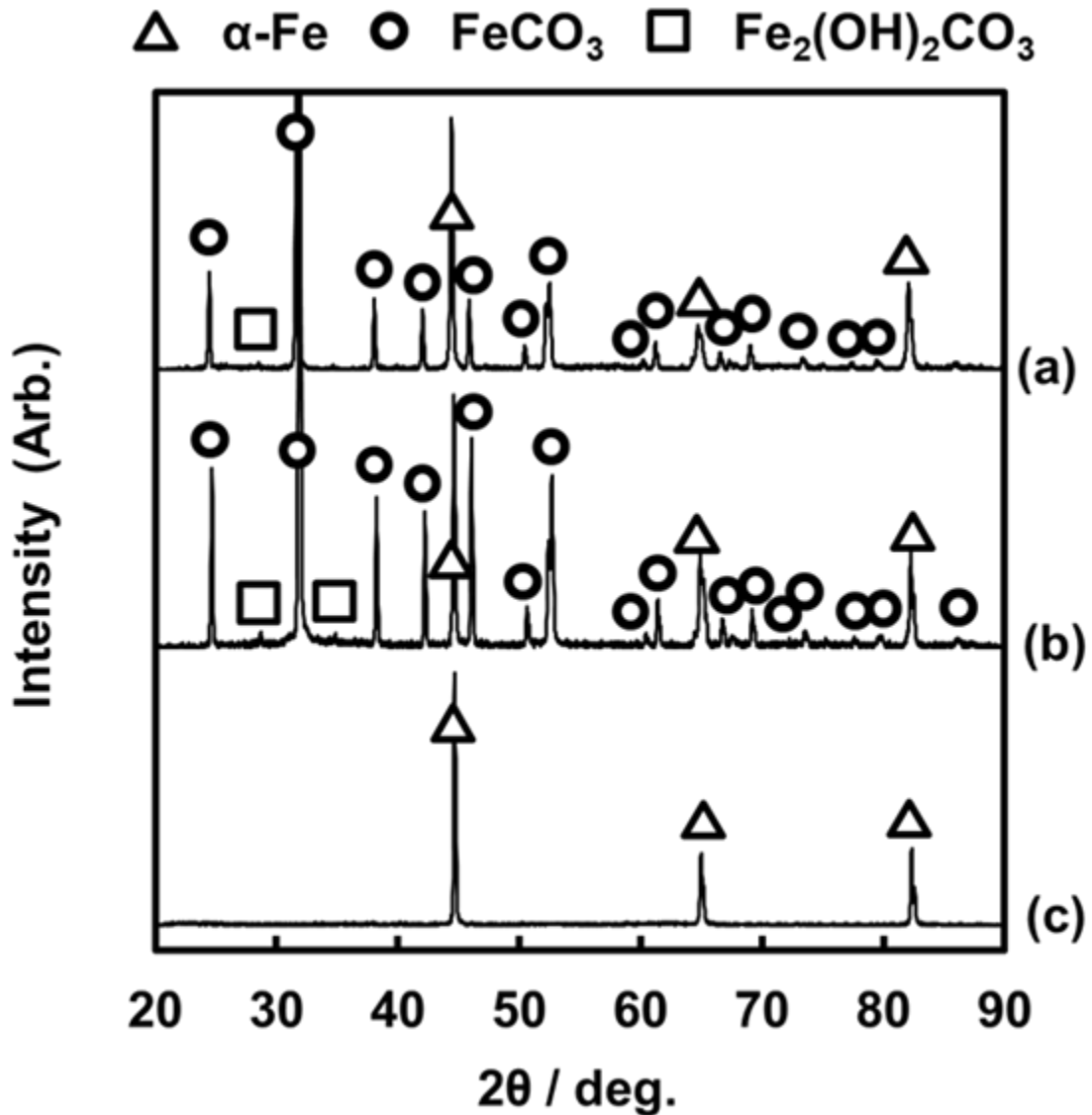


図 2.2.1-2 各温度 (353, 363, 373 K) の飽和 NaHCO_3 水溶液中に各時間 (1.2, 21.6, 259.2 ks) 浸漬させた試料の表面状態

各温度 (353, 363, 373 K) の飽和 NaHCO_3 水溶液中に 21.6 ks 浸漬させた試料に対する XRD 試験結果を図 2.2.1-3 に示す。353 K および 363 K の試験溶液に浸漬した試料では Fe と FeCO_3 に帰属するピークのみが見られた。一方、373 K の場合には Fe のピークのみが確認され、皮膜構成物質と考えられるいずれの物質にも帰属するピークも検出されなかった。



(a) 353K, (b) 363K, (c) 373 K

図 2.2.1-3 飽和 NaHCO_3 水溶液中に 21.6 ks 浸漬させた試料に対する XRD 試験結果

各温度 (353, 363, 373 K) の飽和 NaHCO_3 水溶液中に種々の時間浸漬させた試料に対する XRD 試験によって得られた、 Fe ($2\theta = 44.7^\circ$) の X 線強度に対する FeCO_3 ($2\theta = 32.0^\circ$) の X 線強度比の経時変化を図 2.2.1-4 に示す。353 および 363 K の場合には浸漬時間が約 1.0 ks になると FeCO_3 が生成し始め、約 21.6 ks で最大値を示し、259.2 ks 以上浸漬すると完全に消滅した。また、353 K よりも 363 K の方が厚い皮膜が形成された。一方、373 K の場合には 21.6 ks 浸漬しても Fe 以外の物質は検出されなかった。

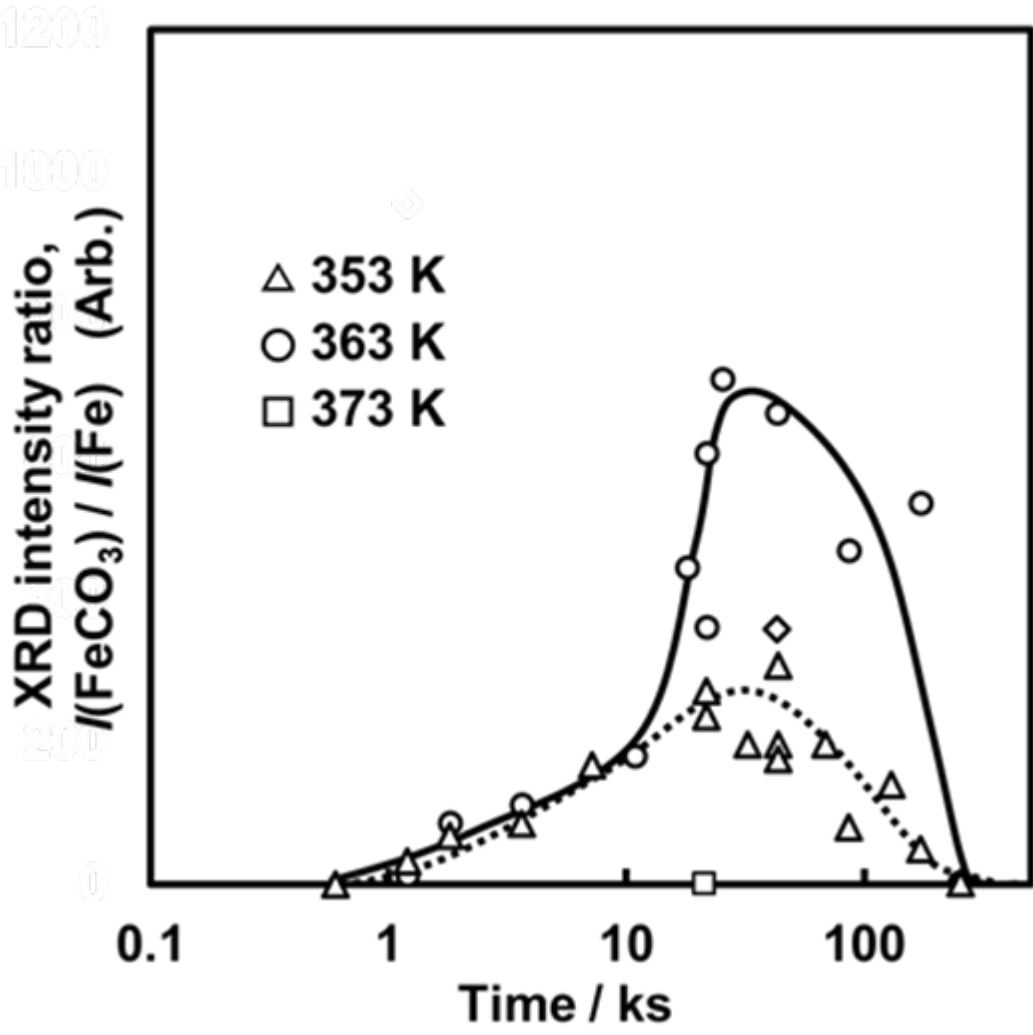


図 2.2.1-4 各温度(353, 363, 373 K)の飽和 NaHCO₃水溶液中に種々の時間浸漬させた試料に対する XRD 試験によって得られた, Fe($2\theta = 44.7^\circ$)の強度に対する FeCO₃($2\theta = 32.0^\circ$)の強度比の経時変化

各温度(353, 363 K)の飽和 NaHCO₃水溶液中に各時間(1.2, 21.6, 259.2 ks)浸漬させた試料の断面観察結果を図 2.2.1-5 に示す。いずれの温度の場合でも、1.2 ks 浸漬した試料にはわずかな皮膜が、21.6 ks 浸漬した試料には厚い皮膜が認められたが、259.2 ks 浸漬すると皮膜がほとんど認められなかった。この傾向は図 2.2.2-3 に示した XRD 試験結果と極めて類似しており、皮膜が FeCO₃ で構成されていることを示唆する。

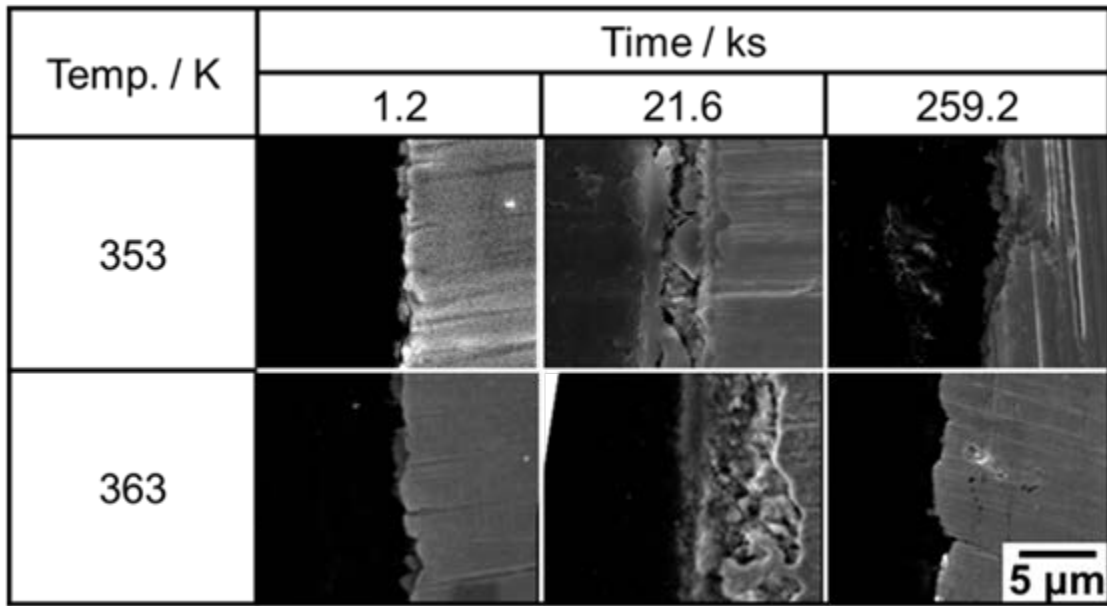


図 2. 2. 1-5 各温度 (353, 363 K) の飽和 NaHCO_3 水溶液中に各時間 (1. 2, 21. 6, 259. 2 ks) 浸漬させた試料の断面観察結果 (写真左 : 樹脂、中央 : 皮膜、右 : Fe)

各温度 (353, 363 K) の飽和 NaHCO_3 水溶液中に種々の時間浸漬させた試料の断面観察によって得られた皮膜厚さの経時変化を図 2. 2. 1-6 に示す。皮膜厚さは、SEM で撮影された任意の 3 か所の試料断面写真の任意の 5 か所から測定された平均値を示す。いずれの温度の場合にも浸漬時間が約 1. 0 ks になると FeCO_3 が生成し始め、約 21. 6 ks で最大値を示し、259. 2 ks 以上浸漬すると完全に消滅した。また、363 K で形成した皮膜は 353 K の場合に比べて厚いことがわかった。この挙動は図 2. 2. 1-3 に示した XRD 試験結果と極めて類似しており、皮膜が FeCO_3 で構成されていることを示唆する。

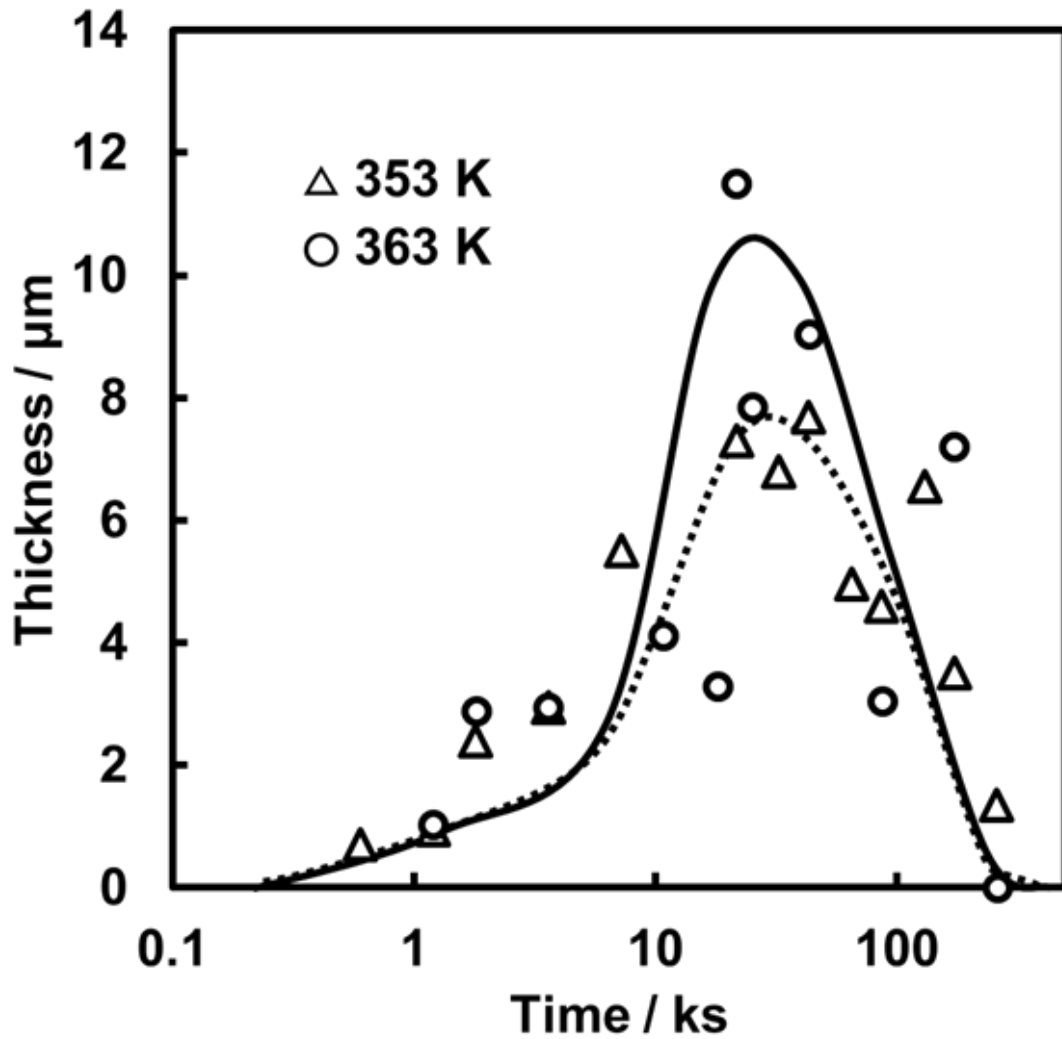


図 2.2.1-6 各温度(353, 363 K)の飽和 NaHCO_3 水溶液中に種々の時間浸漬させた試料の断面観察によって得られた皮膜厚さの経時変化

図 2.2.1-6 を浸漬時間の平方根で表した結果を図 2.2.1-7 に示す。試料を浸漬して約 $30 \text{ s}^{1/2}$ (約 1.0 ks) 後に皮膜が形成し始め、その後の皮膜厚さは、最大値を示す近傍まで、浸漬時間の平方根に対して直線的に増加することが確認された。このことから、皮膜は放物線則に従って、すなわち、拡散律速に基づいて成長していることがわかり、皮膜が亀裂などの大きな貫通欠陥を形成せずに成長したことが示唆された。

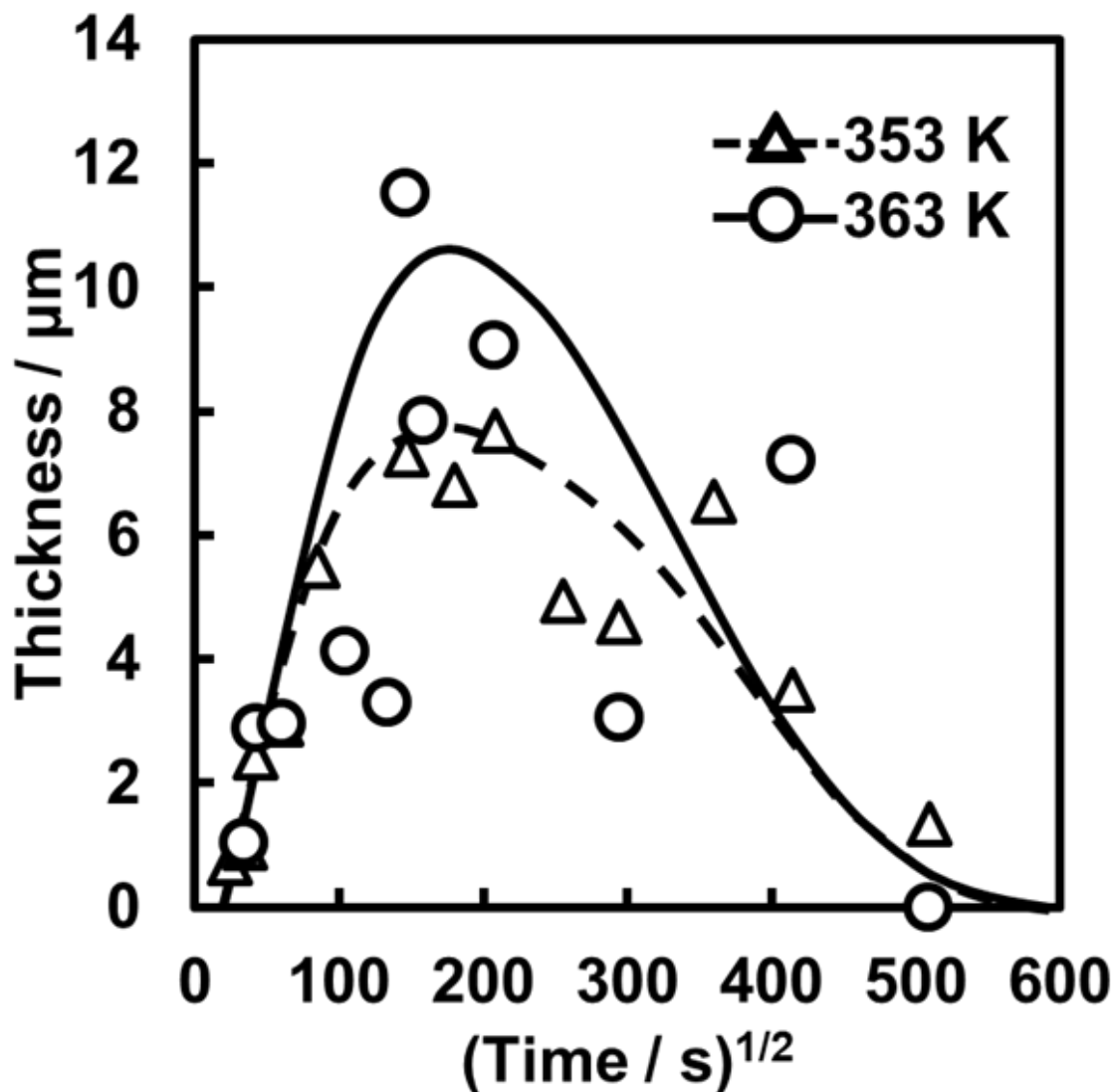


図 2.2.1-7 各温度(353, 363 K)の飽和 NaHCO_3 水溶液中に種々の時間浸漬させた試料の断面観察によって得られた皮膜厚さの経時変化(横軸：浸漬時間の平方根)

本皮膜形成試験では、今回対象としたすべての皮膜形成温度において、試験溶液から気泡の発生が大量に認められ、温度の上昇とともに気泡の発生速度が増加することを目視で確認した。試験溶液はすべて飽和溶液なので、373 K 以下で試験溶液は沸騰しない。発生した気泡を $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液に通気させると $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液が白濁した。このことから、本試験溶液を加熱すると HCO_3^- が分解されて CO_2 が発生しその濃度が減少することが示唆された。21.6 ks 以上の時間浸漬すると HCO_3^- 濃度が皮膜を安定に維持できる値よりも減少したために皮膜厚さが減少したと考えられる。

一方、本試験結果では、363 K 以下で皮膜が形成され、373 K では皮膜が認められなかった。熱力学的には FeCO_3 の安定域は Fe_3O_4 安定域の低温側にあり、373 K にすると FeCO_3 が生成しない実験結果を支持するものである。

今回作製した FeCO_3 皮膜は大きな貫通欠陥を伴わずに拡散律速で成長することが明らかに

なった。そこで、353 K および 363 K の試験溶液に 21.6 ks 浸漬を行って、比較的厚い皮膜を形成した試料に D_2O 浸透試験を行い、TDS 試験によって浸透した D_2O 量を測定した。一例として、353 K の飽和 $NaHCO_3$ 水溶液中に 21.6 ks 浸漬させて形成した皮膜に種々の時間 D_2O 浸透試験を行い、その後の TDS によって得られた加熱中に試料から脱離した D_2O の速度を図 2.2.1-8 に示す。この図より、450 K で小さな、560 K で大きな D_2O 脱離速度の最大値を示した。また、低温側の最大値は約 $0.4 \text{ ng mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で定常値を示したが、高温側の最大値は D_2O 浸透時間の経過とともに増加した。この挙動は 363 K の $NaHCO_3$ 飽和水溶液中に 21.6 ks 浸漬して形成した皮膜でも同様であった。

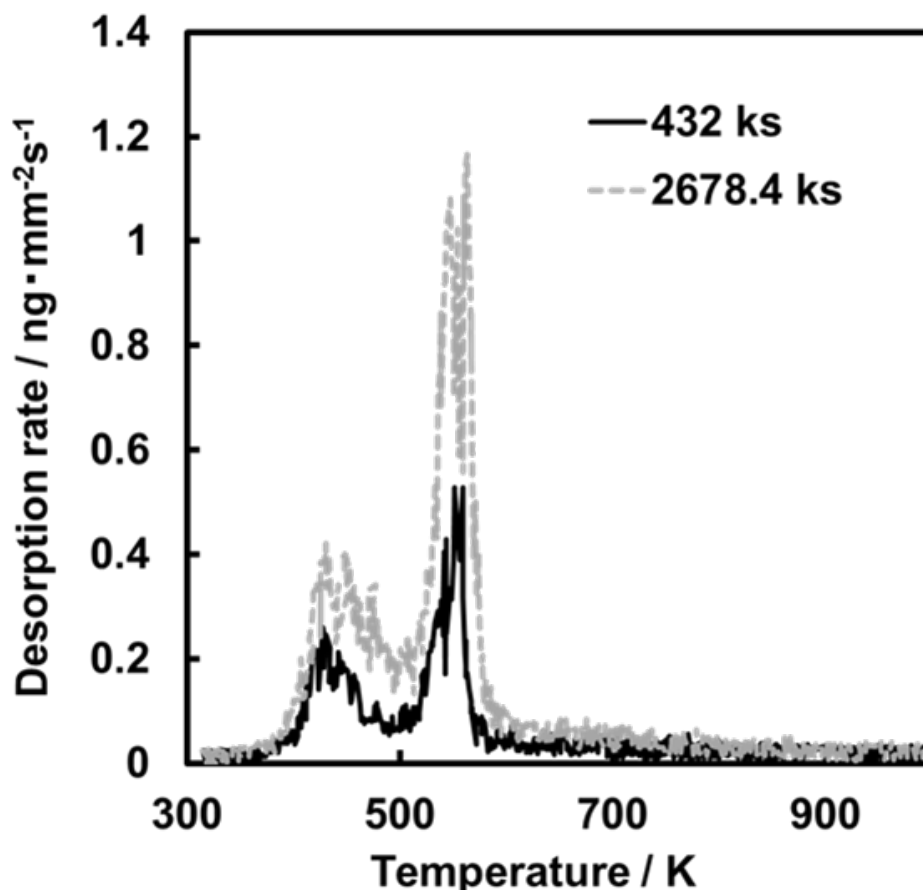


図 2.2.1-8 353 K の飽和 $NaHCO_3$ 水溶液中に 21.6 ks 浸漬させた皮膜への D_2O 浸透試験後に TDS で得られた D_2O の脱離速度

図 2.2.1-8 に示した曲線を TDS 時間で積分し、バックグラウンド値を補正することによって、皮膜に浸透した D_2O 量を算出することができる。この D_2O 浸透量と D_2O 浸透時間の関係を図 2.2.1-9 に示す。353 K で形成した皮膜では、 D_2O 浸透時間の経過とともに D_2O 浸透量が増加し、1000 ks 以上浸透させると浸透量が定常値を示す傾向が確認された。一方、363 K で形成した皮膜では、 D_2O 浸透時間の経過とともに D_2O 浸透量が増加するが、1.6 ks 以上浸透させただけで浸透量が定常値を示す傾向が確認された。

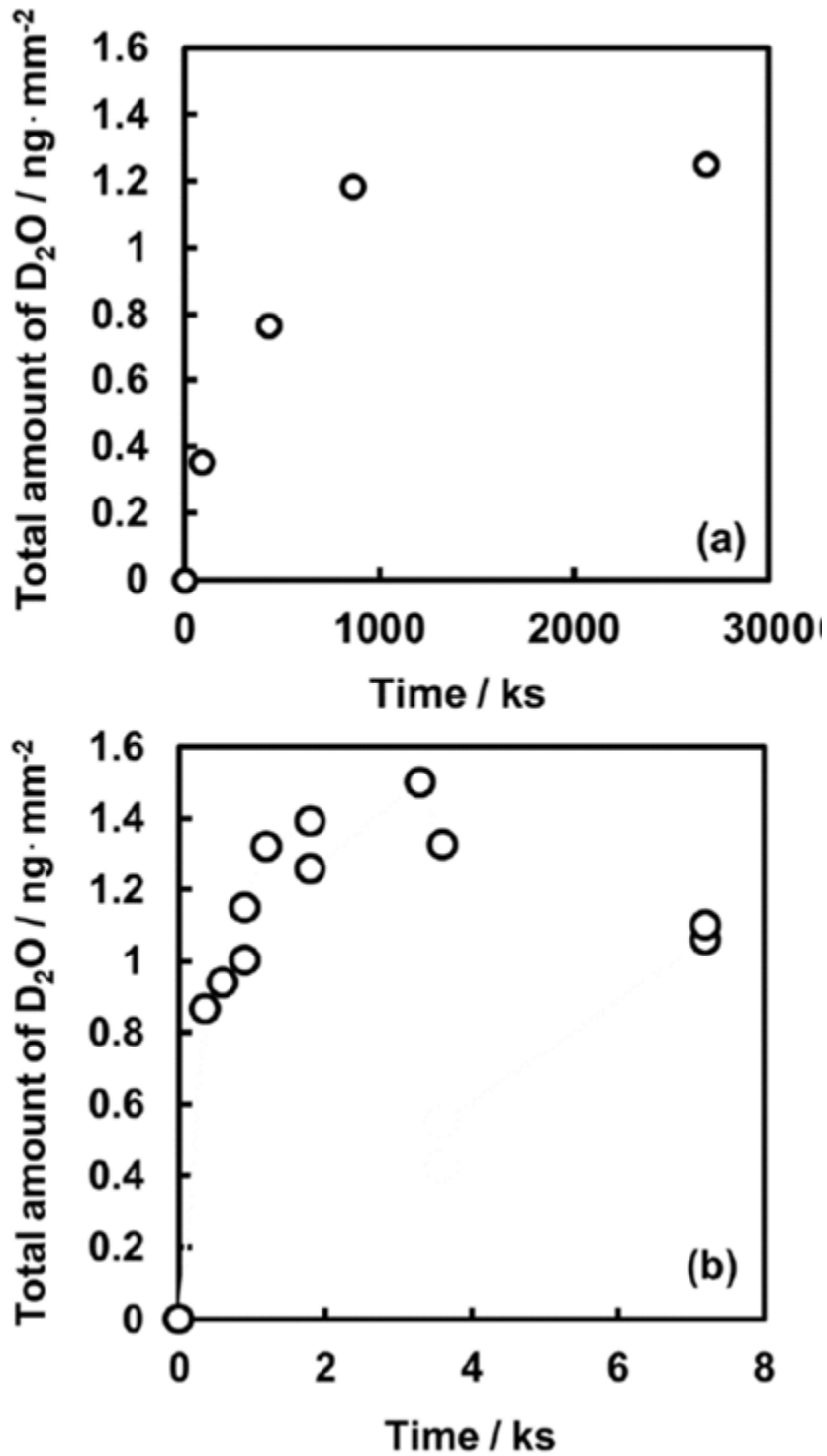


図 2.2.1-9 皮膜を形成した試料に対する D_2O 浸透試験によって得られた D_2O 浸透量の経時変化 ((a) 353 K、(b) 363 K)

試料に形成させた $FeCO_3$ 皮膜への D_2O の浸透挙動について定量的な検討を行った。春名ほか (2015) に準じて過渡状態における浸透を半無限厚さの皮膜に対する一次元の物質拡散現象であると仮定し、式 2.2.1-1 に示す Fick の第二法則に付随して式 2.2.1-2 に示す初期条件、

式 2.2.1-3 に示す境界条件を適用した。

$$\partial C / \partial t = D \partial^2 C / \partial x^2 \quad \dots\dots\dots \text{式 2.2.1-1}$$

ここで、 C を皮膜内の D_2O 濃度、 D を見かけの拡散係数、 t を浸透時間、 x を皮膜の D_2O 接触表面からの厚さ方向の位置とする。また、初期条件を、皮膜表面以外に D_2O が存在しないこと(式 2.2.1-2)、境界条件を、皮膜表面の D_2O 濃度は常に C_0 (一定値)であること(式 2.2.1-3)とした。

$$t = 0 \text{ のときに } C(x \geq 0) = 0 \quad \dots\dots\dots \text{式 2.2.1-2}$$

$$t > 0 \text{ のときに } C(x=0) = C_0 \quad \dots\dots\dots \text{式 2.2.1-3}$$

これらの条件を考慮して式 2.2.1-1 を変形すると、任意の時間 t における D_2O 浸透量 Q を式 2.2.1-4 で表現することができる。

$$Q = 2C_0 (Dt / \pi)^{1/2} = St^{1/2} \quad \dots\dots\dots \text{式 2.2.1-4}$$

$$S = 2C_0 (D / \pi)^{1/2} \quad \dots\dots\dots \text{式 2.2.1-5}$$

C_0 と D が t に依存しない値とすると、式 2.2.1-4 は Q が $t^{1/2}$ に比例することを示す。したがって、 D_2O 浸透量 Q を浸透時間 t の平方根に対して図示すると比例関係が得られることになる。この関係が成立し、 C_0 が既知の場合には、図から算出される直線の傾き S と C_0 から D を以下のように算出することができる。

$$D = (S / 2C_0)^2 \pi \quad \dots\dots\dots \text{式 2.2.1-6}$$

C_0 は以下の考え方に基づいて推定された。図 2.2.1-9 に示したように、皮膜への D_2O 浸透量は浸透時間とともに増加し、やがて定常値(Q_∞)を示した。 D_2O 浸透量が定常値を示した場合にも、拡散によって D_2O が Fe 表面に供給される速度で腐食が進行するので、皮膜内の D_2O 濃度分布は図 2.2.1-10 に示す直線状($C(x=0) = C_0$, $C(x=L)=0$, L : 皮膜厚さ)になることが想定される。このとき、測定された Q_∞ は斜線部の三角形の部分に相当するので、 C_0 は Q_∞ を 2 倍にして皮膜厚さで除することで算出することができる。

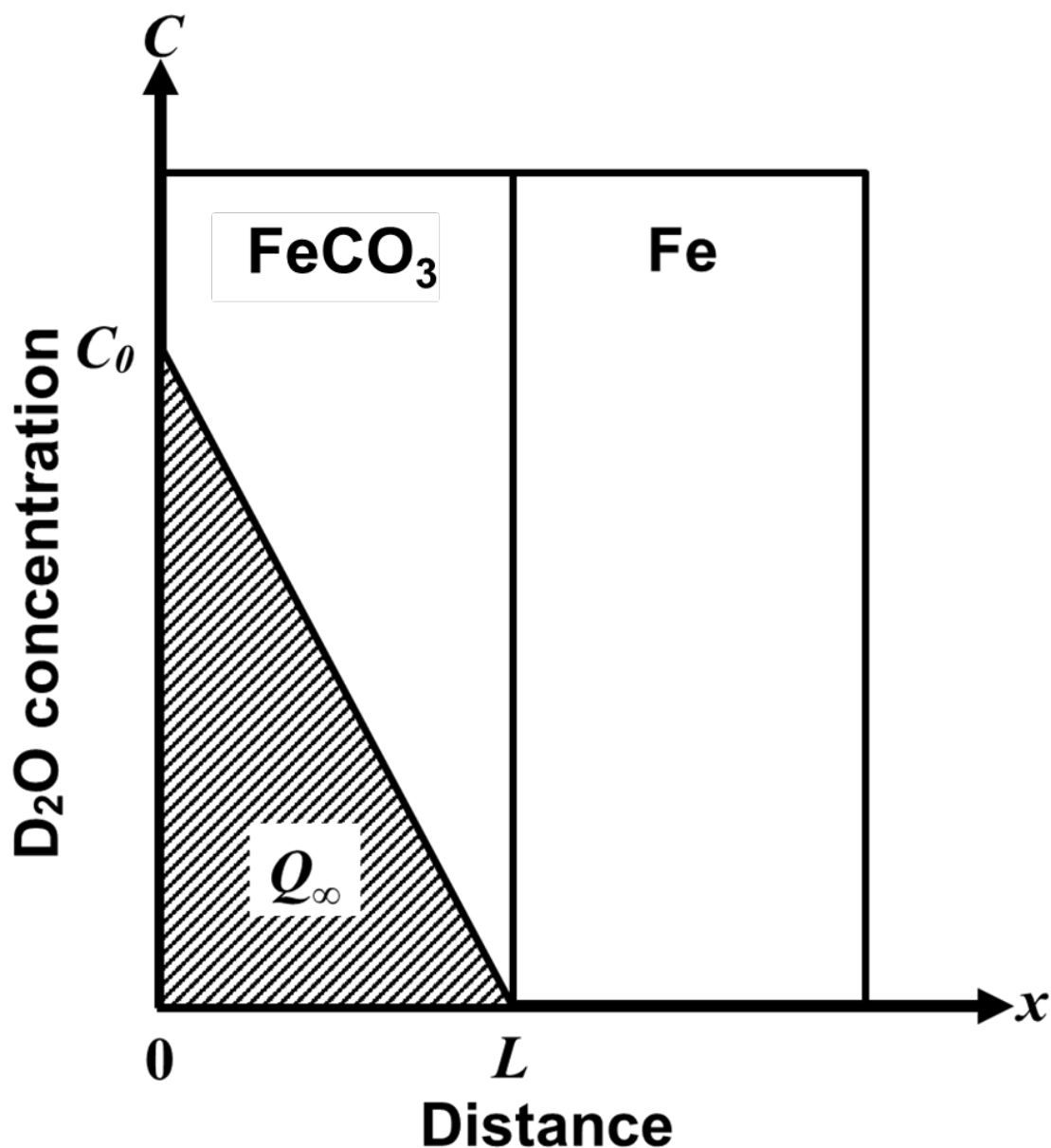


図 2.2.1-10 皮膚内の D_2O の拡散が定常状態の到達したときの推定 D_2O 濃度分布

そこで、 D_2O 浸透量の経時変化を示した図 2.2.1-9 の横軸を平方根で表示した結果を図 2.2.1-11 に示す。この図より、いずれの温度で形成した皮膚に対しても D_2O 浸透量は浸透時間の平方根に対して直線的に増加し、やがて定常値を示すことが示唆された。これらの図より、353 K の皮膚(平均皮膚厚さ $7.3 \mu\text{m}$) の場合には、浸透初期に認められた直線の傾き S が $1.20 \times 10^{-3} \text{ ng mm}^{-2} \text{ s}^{-1/2}$ 、浸透後期に認められた定常値 Q_∞ が 1.19 ng mm^{-2} と推定されるので、 C_0 は $3.26 \times 10^2 \text{ ng mm}^{-3}$ 、皮膚中の D_2O の拡散係数 D は $1.06 \times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ と算出される。一方、363 K の皮膚(平均皮膚厚さ $11.5 \mu\text{m}$) の場合には、 S が $3.47 \times 10^{-2} \text{ ng mm}^{-2} \text{ s}^{-1/2}$ 、 Q_∞ が 1.40 ng mm^{-2} と推定されるので、 C_0 は $2.43 \times 10^2 \text{ ng mm}^{-3}$ 、 D は $1.60 \times 10^{-10} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ と算出される。

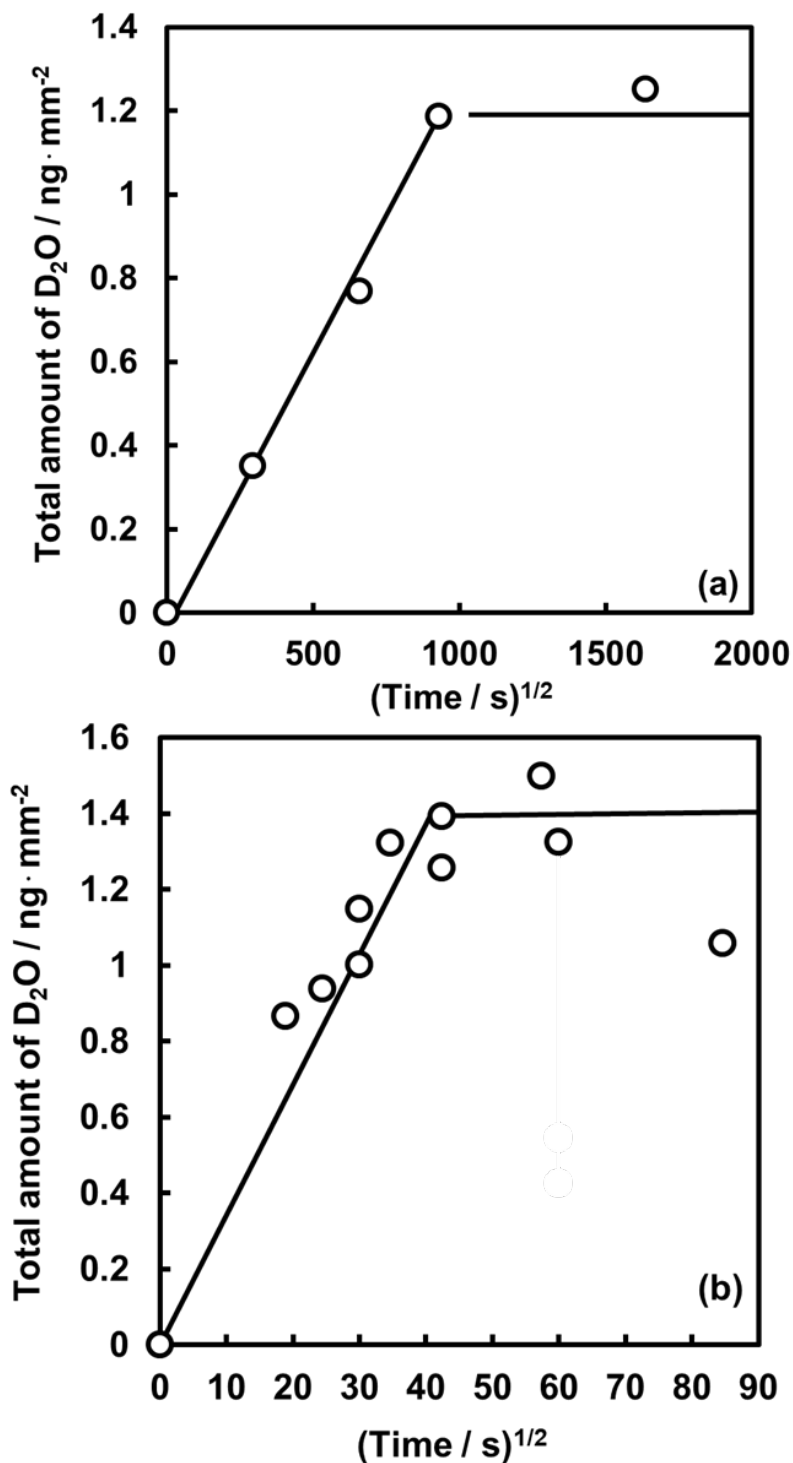


図 2.2.1-11 皮膜を形成した試料に対する D₂O 浸透試験によって得られた D₂O 浸透量の経時変化 ((a)353 K、(b)363 K)

これまでに推定された Fe 上に形成した皮膜に対する D₂O の拡散係数は、高温大気酸化中で形成した Fe₃O₄ 皮膜に対しては $9.5 \times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 、酸化剤含有 NaOH 水溶液中で形成した Fe₃O₄ 皮膜に対しては $5.1 \times 10^{-15} \sim 9.9 \times 10^{-15} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ であった。これらの値に対して本研究で推定された 353 K で形成した FeCO₃ 皮膜に対する D₂O の拡散係数 $1.06 \times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ は Fe₃O₄ 皮膜

に比較的近い値を示し、D₂O に対する拡散障壁となることが示されたが、363 K で形成した FeCO₃ 皮膜に対する値 $1.60 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ は Fe₃O₄ 皮膜より 2~4 桁大きな値を示した。FeCO₃ 皮膜は高温ほど厚い皮膜が形成されたが、ある温度以上ではこの皮膜が形成されなかったことから、363 K では皮膜形成反応速度が促進されて厚いが、皮膜がそれほど安定ではないので比較的緻密でない皮膜が形成され、一方 353 K では皮膜形成反応がそれほど促進されないが緻密な皮膜が形成されたと考えられる。

2) 交流インピーダンス法による炭素鋼の腐食モニタリング

交流インピーダンス法は、自然状態をほとんど乱すことなく緩衝材中における炭素鋼の腐食速度やベントナイト/炭素鋼界面状態をモニタリングすることが可能であり、腐食メカニズムの解明や腐食速度の経時変化を追跡する上で有力な手法と考えられる。交流インピーダンス法を用いて緩衝材を模擬した圧縮ベントナイト中での炭素鋼の腐食挙動を調査した例（西方，2014；谷口ほか，2014）では、酸素の消費または腐食生成物皮膜形成によると思われる腐食速度の時間的な低下などが確認されている。しかしベントナイトの厚さについては任意に設定されており、ベントナイトの厚さが測定結果に及ぼす影響などを実験的に検討した例はほとんど見当たらない。

そこで本検討では、ベントナイト厚さをパラメータとして交流インピーダンス測定を行い、腐食速度や界面状態とその経時的な挙動の違いを調査した。

① 実験方法

・試験片とプローブ電極

試験片は炭素鋼板（SM400B，10 mm×5 mm×3 mm）を用いた。この試験片にリード線を半田づけして電極とした。同一の電極 2 枚を 2 mm の間隔でエポキシ樹脂に平行に埋め込み、腐食モニタリング用のプローブ電極とした。

・試験環境

ベントナイト（70 wt%）と SiO₂（30 wt%）を混合したものを超純水と混合し、ベントナイト（SiO₂を含む）と水の混合比はベントナイト 10 g に対して蒸留水を 50 mL とした。以降では、ベントナイト、シリカおよび超純水を混合したものを単にベントナイトと呼ぶ。

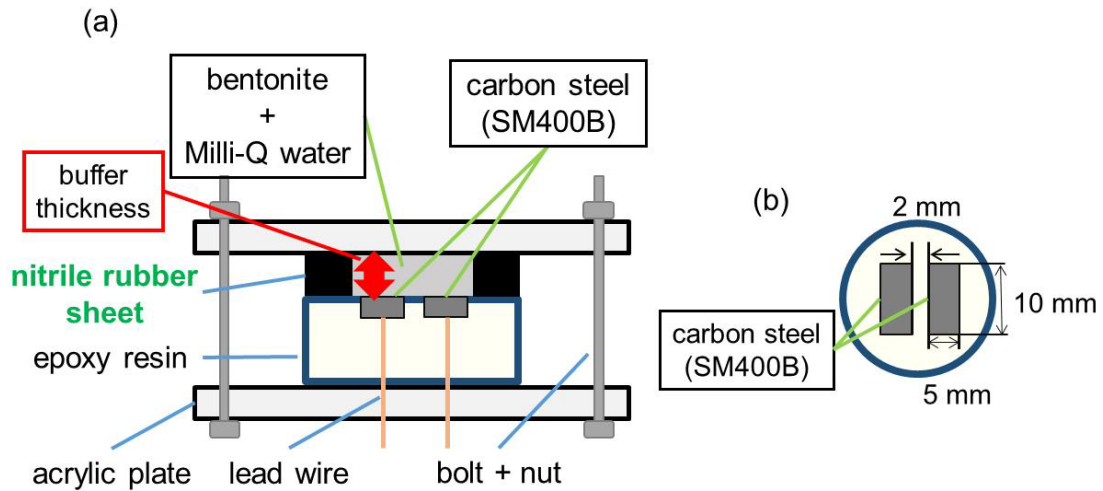
試験温度はすべて室温（25 °C）とした。

・実験セル

平成 28 年度から開始した試験では、図 2.2.1-12 に示すようにプローブ電極上に間隔 1~5 mm のすき間を形成するようにアクリル板を固定し、そのすき間にベントナイトを挿入した。すき間は、ニトリルゴム製ガasketをプローブ電極とアクリル板の間にスペーサとして挿入することにより形成した。このすきま部にベントナイトを挿入することにより密閉系でのセルとした。

平成 29 年度は、この試験を継続するとともに、上部を大気開放した試験セルを用いてベントナイトかぶり厚さを変えた試験も実施し、ベントナイト中の酸素の移行の影響についてより詳細な検討を行った。開放型セルの模式図を図 2.2.1-13 に示す。アクリル製のパイプ（20 mm φ）をプローブ電極上に固定し、ベントナイトをかぶり厚 60 mm になるようにアク

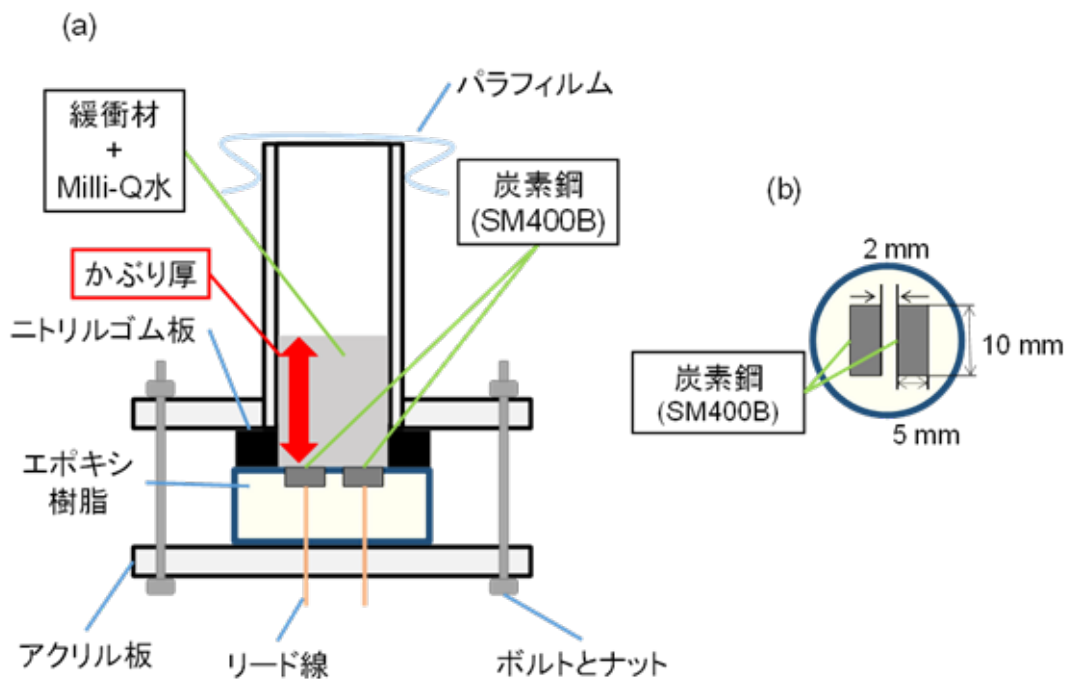
リル製パイプに挿入した。ベントナイトからの水分の蒸発を最小限にするためパイプの上部をパラフィルムにより覆った。酸素はパラフィルムを通してある程度入ると考えられる。このセルにより炭素鋼の酸素との腐食をモニタリングした。ベントナイトのかぶり厚は、20, 40, 60 mm とした。



(a) セルの全体図

(b) プローブ電極の拡大図

図 2. 2. 1-12 密閉型セルの模式図



(a) セルの全体図

(b) プローブ電極の拡大図

図 2. 2. 1-13 開放型セルの模式図

・腐食モニタリング

腐食モニタリングは電気化学インピーダンス計測により行った。インピーダンス測定条件は交流振幅 10 mV、周波数範囲は 10 kHz～1 mHz とした。モニタリングは腐食が定常状態に達したことを確認し終了した。モニタリング期間は約 230 日～1 年である。

② 実験結果と考察

密閉型セルによる炭素鋼の交流インピーダンスの測定結果を図 2.2.1-14（かぶり厚 5 mm）、図 2.2.1-15（かぶり厚 3 mm）、図 2.2.1-16（かぶり厚 1 mm）に示す。

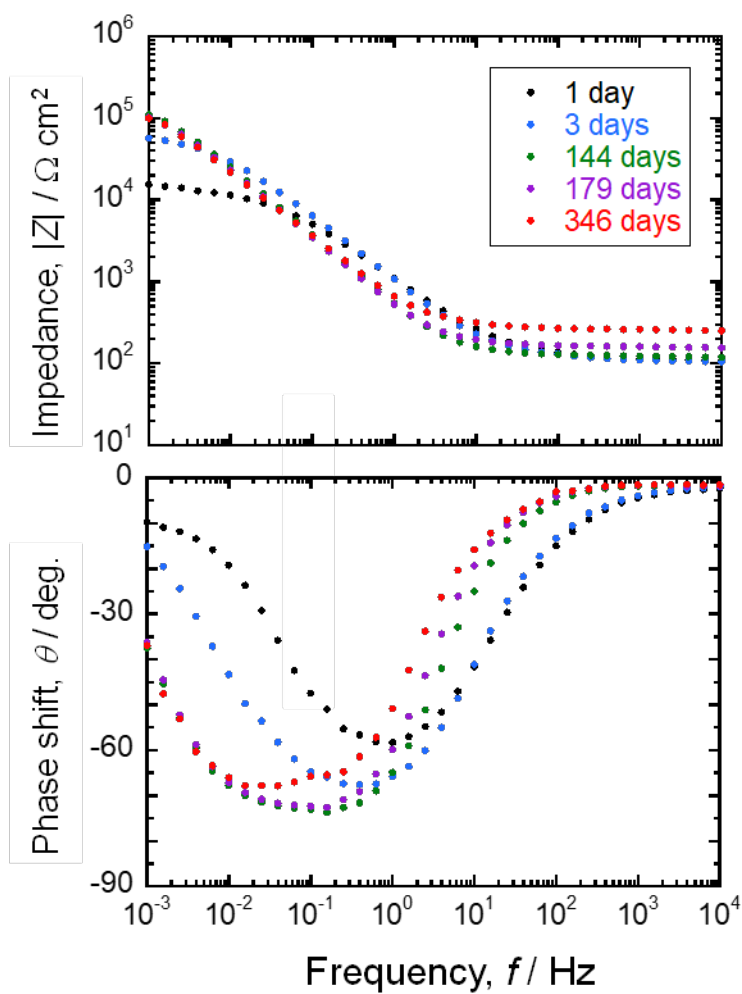


図 2.2.1-14 密閉型セルによる炭素鋼の交流インピーダンス測定（かぶり厚：5 mm）

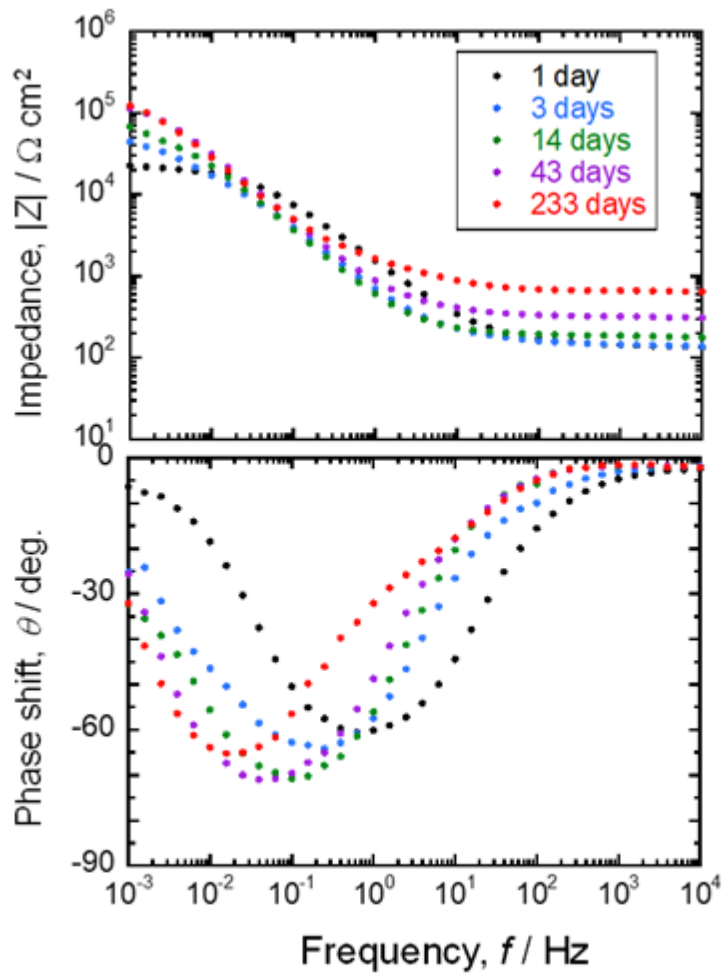


図 2.2.1-15 密閉型セルによる炭素鋼の交流インピーダンス測定 (かぶり厚 : 3 mm)

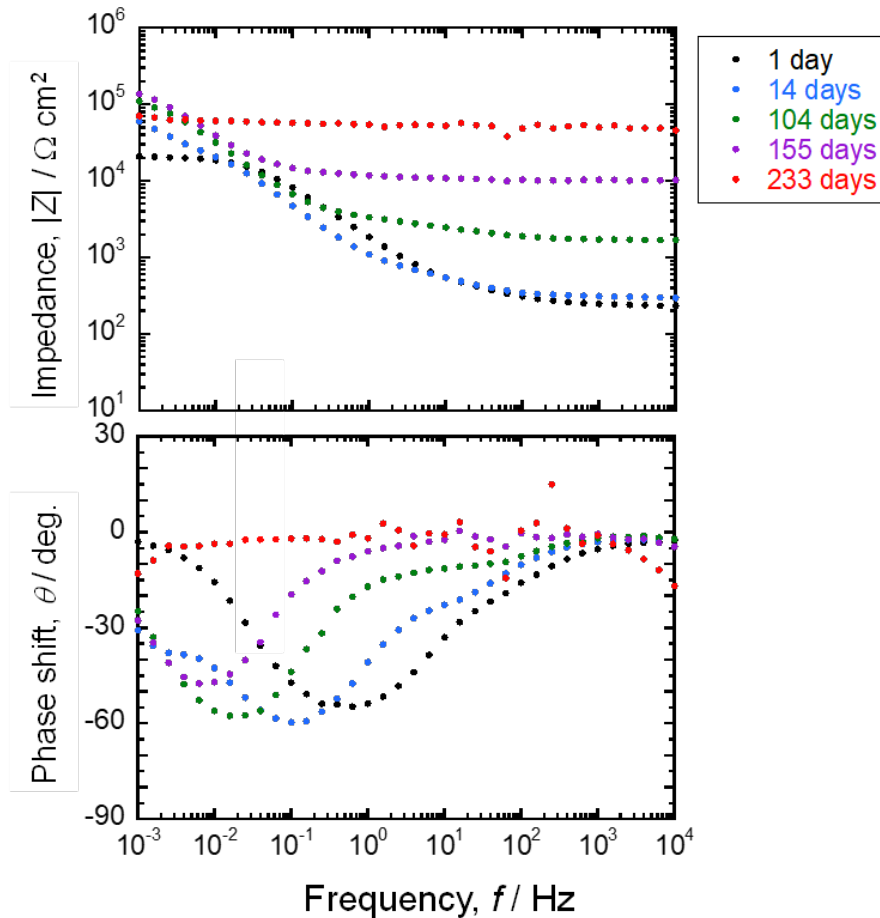


図 2.2.1-16 密閉型セルによる炭素鋼の交流インピーダンス測定 (かぶり厚 : 1 mm)

かぶり厚 5 mm では、高周波数の溶液抵抗 R_{so1} は約 $100 \Omega \text{ cm}^2$ で一定である。これは後述する 60 mm のかぶり厚とほぼ同じ値であることから、 R_{so1} は電極幅 (5 mm) 程度以上になれば、電流線分布の関係から、かぶり厚さ依存がほとんどなくなると考えられる。一方、位相差を見ると、100 Hz ~ 10 Hz の位相差は徐々に、またわずかに低周波数側に移行する。このわずかな低周波数側への移行は錆が徐々に増えていることを意味する。また、位相差のピークの低周波数側への移行は、電荷移動抵抗 R_{ct} が時間とともに大きくなっていることを意味する。このことは低周波数のインピーダンス (1 mHz) の増加からもわかる。密閉型セルでは酸素の消費により腐食速度が確実に減少している。

かぶり厚さ 3 mm では、高周波数のインピーダンスは初期には約 $100 \Omega \text{ cm}^2$ を少々超える程度であるが、その後時間とともに増加する。これはかぶり厚 5 mm のものと大きく異なる。また、100 Hz ~ 10 Hz の位相差の低周波数側への移行は、かぶり厚 5 mm と比べてより顕著である。これらの結果から、錆の増加がかぶり厚 5 mm のものより顕著であることが予想される。一方、低周波数のインピーダンスが時間とともに増加することから、かぶり厚 3 mm の場合にも酸素の消費により腐食速度が確実に減少している。

かぶり厚 1 mm では、高周波数のインピーダンスは初期には約 $200 \Omega \text{ cm}^2$ で溶液抵抗 R_{so1} に相当する値を示すが、その後時間とともに増加した。この増加はかぶり厚 3 mm のものより顕著である。約 100 日後の高周波数のインピーダンスは $2 \text{ k} \Omega \text{ cm}^2$ となり、初期の R_{so1} の 10 倍の

値となる。この増加の原因については後で述べる。位相差を見ると、100 Hz～10 Hz の位相差の低周波数側への大きな移行が、かぶり厚 3 mm と同様に観察された。また、高周波数のインピーダンスの増加に伴い、1 Hz 以上の周波数領域で不均一な電流分布により生じる伝送線回路タイプの挙動があらわれる。かぶり厚 1 mm でも当然酸素の消費により腐食速度が確実に減少している。

100 日以降の交流インピーダンスを見ると、かぶり厚 5 mm では、低周波数の挙動はあまり変化ないが、高周波数の溶液抵抗は少しずつ増加していることがわかる。かぶり厚 3 mm でも同様な変化を示した。一方、かぶり厚 1 mm のものは、233 日で溶液抵抗が低周波数のインピーダンスと同程度まで大きく増加した。密閉型セルの上からの写真を図 2.2.1-17 に示すが、3 mm, 1 mm のものはベントナイトに割れが入っており、これにより溶液抵抗が増加したものと思われる。

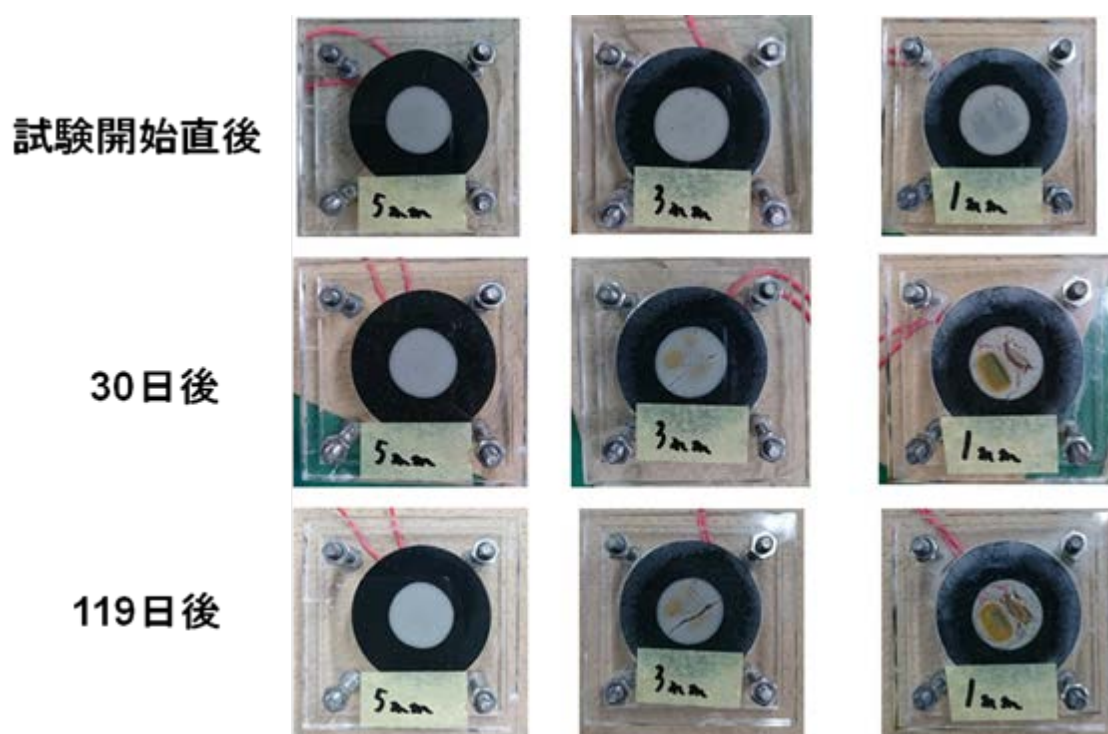


図 2.2.1-17 密閉型セルのベントナイトの状態変化

低周波数 1 mHz のインピーダンスの逆数を腐食速度の指標として時間に対してプロットしたものが図 2.2.1-18 である。腐食速度は初期 1 週間程度で急激に減少し、その後 50 日程度まで徐々に減少することがわかる。腐食速度の減少は、腐食反応により酸素が消費され、ベントナイト中に酸素の拡散層が成長したためと考えられる。ベントナイト中は、水溶液中と異なり自然対流が存在しないため、拡散層はベントナイトかぶり厚さまで成長し続けることになる。144 日目に密閉型セル全体を窒素雰囲気の中に入れてしたが、腐食速度は変化しなかったことから、セルガasket部などからの空気の侵入は無いと考えられる。腐食速度は 250 日（かぶり厚 5 mm は約 1 年）まで一定値を示した。また、その定常の腐食速度はかぶり厚さ

依存がなく、約 $1 \times 10^5 \text{ } \Omega \text{ cm}^2$ となり、Stern-Geary の式の比例定数を 20 mV とすると、腐食電流密度は $0.2 \text{ } \mu \text{ A cm}^{-2}$ となり、減肉速度として約 $2.3 \text{ } \mu \text{ m year}^{-1}$ となる。この速度は水の還元による腐食速度と思われる。

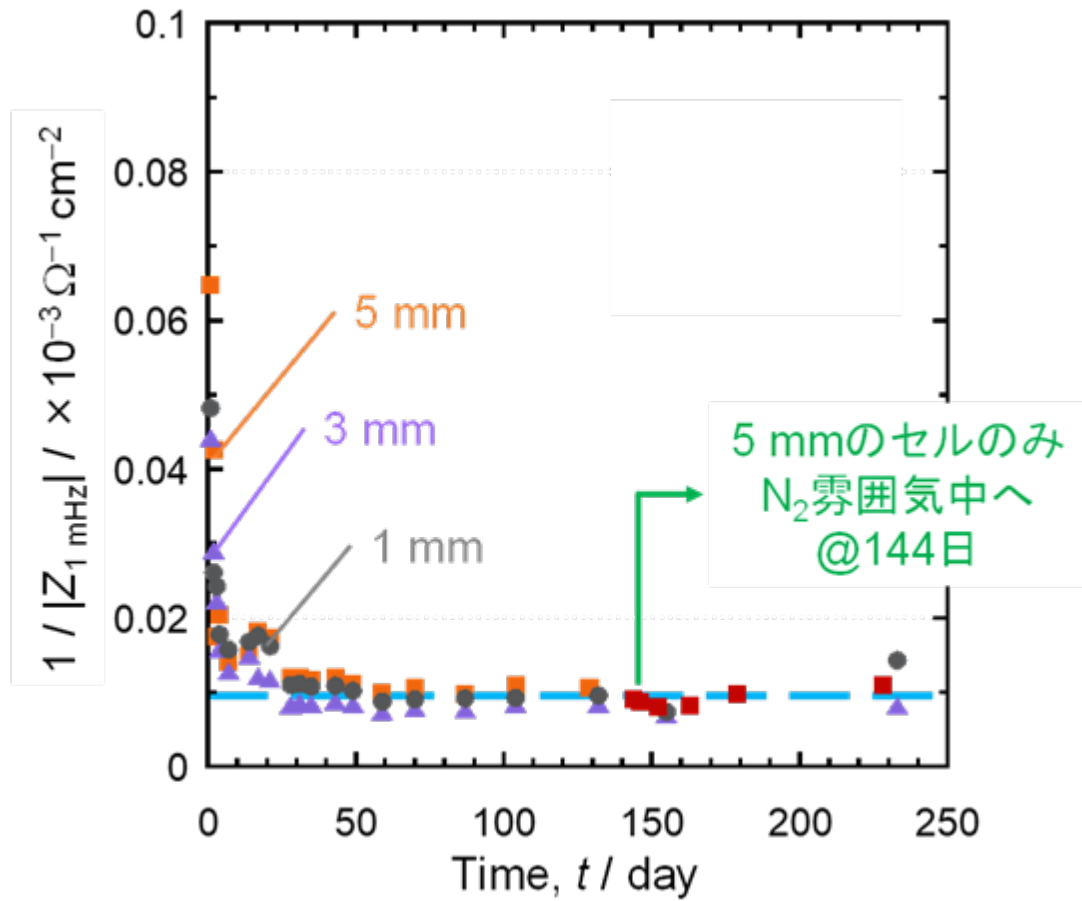


図 2.2.1-18 炭素鋼の腐食速度の経時変化（密閉型セル）

開放型セルによる低周波数 1 mHz のインピーダンスの逆数（腐食速度の指標）を図 2.2.1-19 に示す。かぶり厚は 20 mm, 40 mm, 60 mm である。腐食速度が減少するのは密閉型セルと同じであるが、その減少の速度は開放型のセルのほうが緩やかである。ここでかぶり厚 20 mm で、約 150 日以降に腐食速度が急激に増加するが、これはセルの劣化により外部から空気が侵入したためと考えられる。250 日で腐食試験を終了し、プローブ表面を観察した結果を図 2.2.1-20 に示す。取り出し直後は黒さびが観察されたが、その後 5 日空气中に放置すると赤錆に変化したことから、ベントナイト中では酸素が欠乏状態になっていることがわかる。20 mm のかぶり厚のみが一部にやや激しい腐食が発生していることから、150 日以降のデータは削除して、150 日における腐食速度を定常腐食速度とした。これらの定常腐食速度をかぶり厚の逆数に対してプロットしたのが図 2.2.1-21 である。ほぼかぶり厚の逆数に比例して腐食速度が増加することから、開放型セルでの炭素鋼の腐食はベントナイト中の酸素の拡散が律速していることがわかる。

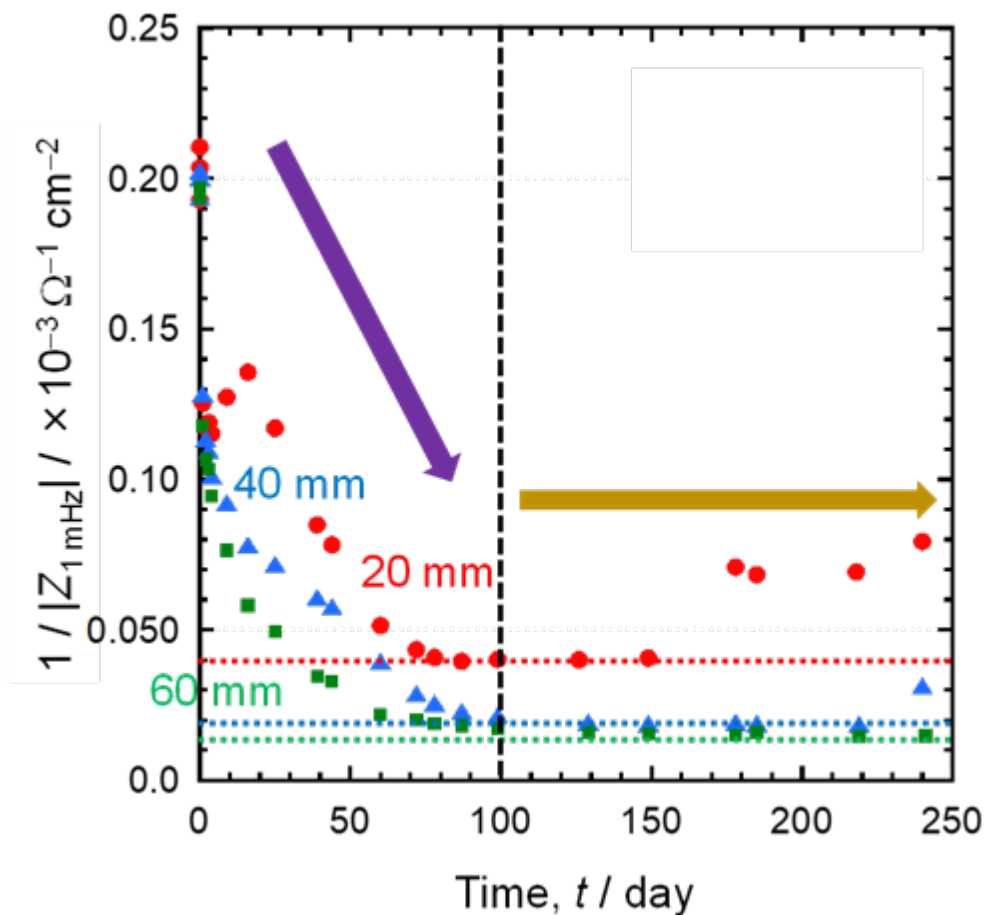


図 2.2.1-19 炭素鋼の腐食速度の経時変化（開放型セル）

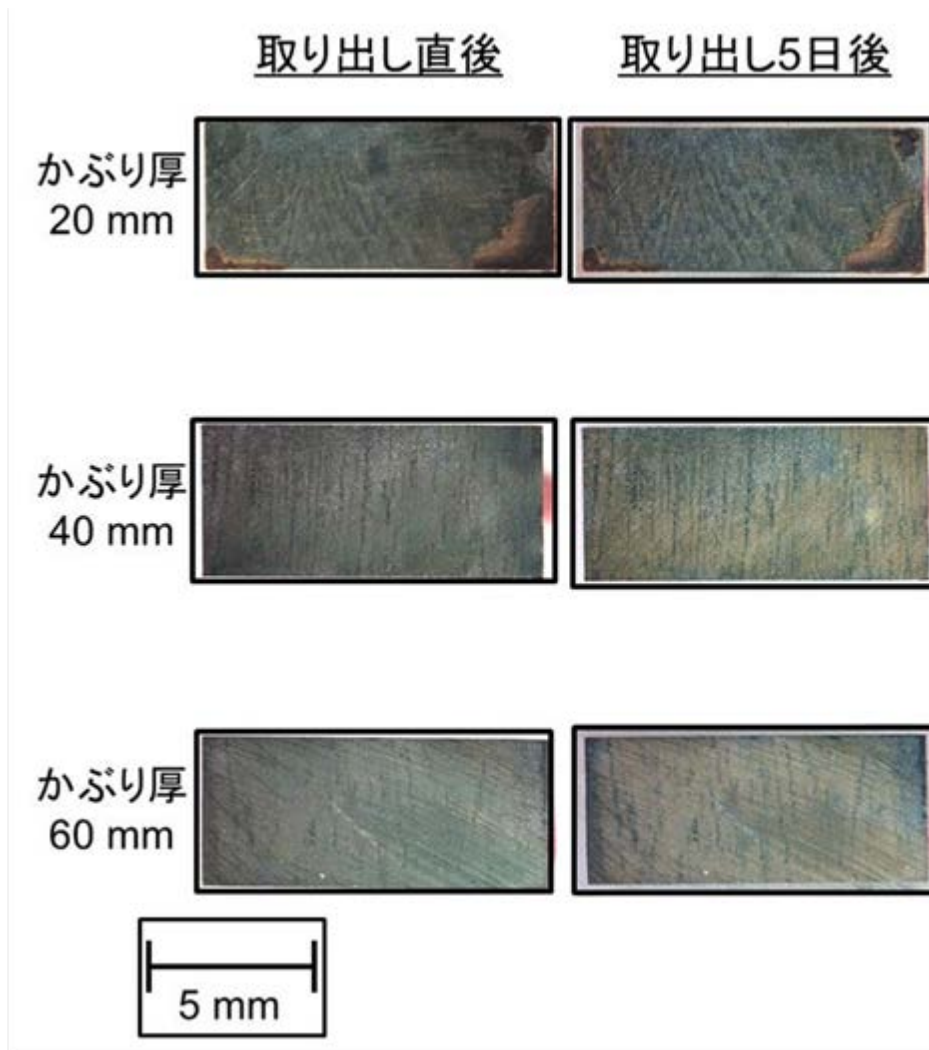


図 2. 2. 1-20 250 日後の炭素鋼の腐食表面観察（開放型セル）

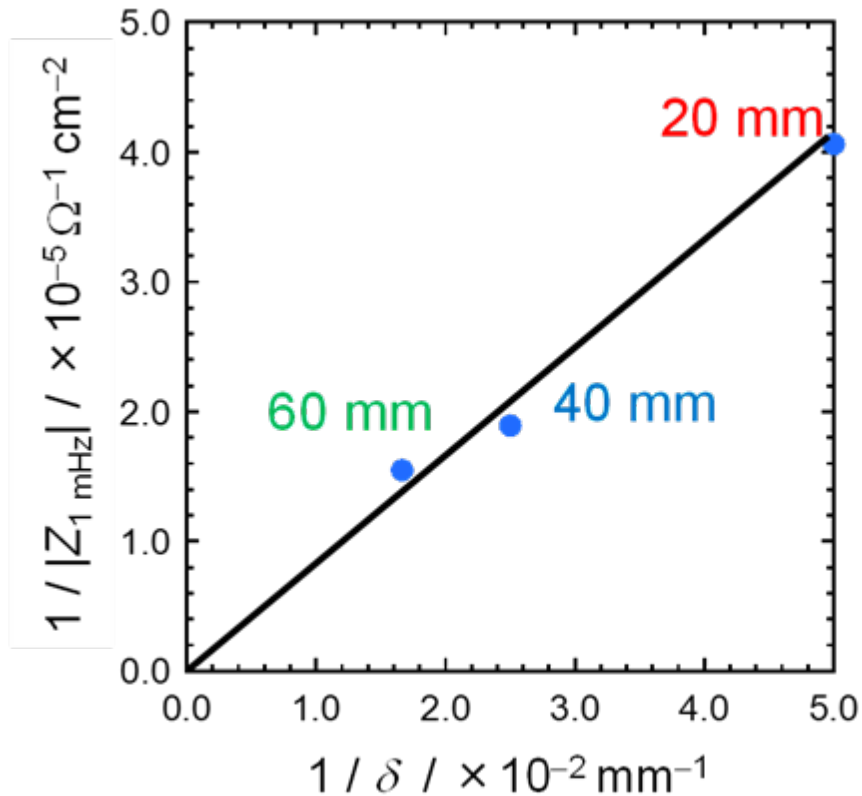


図 2.2.1-21 定常腐食速度のかぶり厚依存性（開放型セル）

密閉型セルと開放型セルで測定された腐食速度の経時変化の比較を図 2.2.1-22 に示す。定常状態（100 日以降）での腐食速度を比較すると開放型セルの値が大きい。ただし、40 mm、60 mm の速度は密閉型セルの腐食速度に近い値をとっている。開放型セルの定常状態での腐食反応における酸素の還元速度（酸素による腐食速度）と水の還元速度（水による腐食速度）のベントナイトかぶり厚依存性を模式的に表したのが図 2.2.1-23 である。かぶり厚が厚くなるにしたがって、酸素の拡散電流は減少する。一方、水の還元電流はかぶり厚さには依存しないはずである。これによりあるかぶり厚さで酸素の還元電流と水の還元電流が等しくなる。この厚さを、酸素の拡散係数 $D(\text{O}_2)=2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 、酸素濃度を $2 \times 10^{-7} \text{ mol cm}^{-3}$ と仮定し、水の還元速度（水による腐食速度）を図 2.2.1-22 の密閉型セルで得られた値 $0.2 \mu \text{ A cm}^{-2}$ を使って計算すると、約 80 mm となる。すなわち、80 mm 以上ベントナイトのかぶり厚があると、空気開放でも、酸素から水による腐食に 100 日程度で移行することになる。水溶液中とは異なり、ベントナイト中では自然対流が存在しないため、拡散層は半無限に成長するためかなり短い期間で水による腐食に移行すると考えられる。

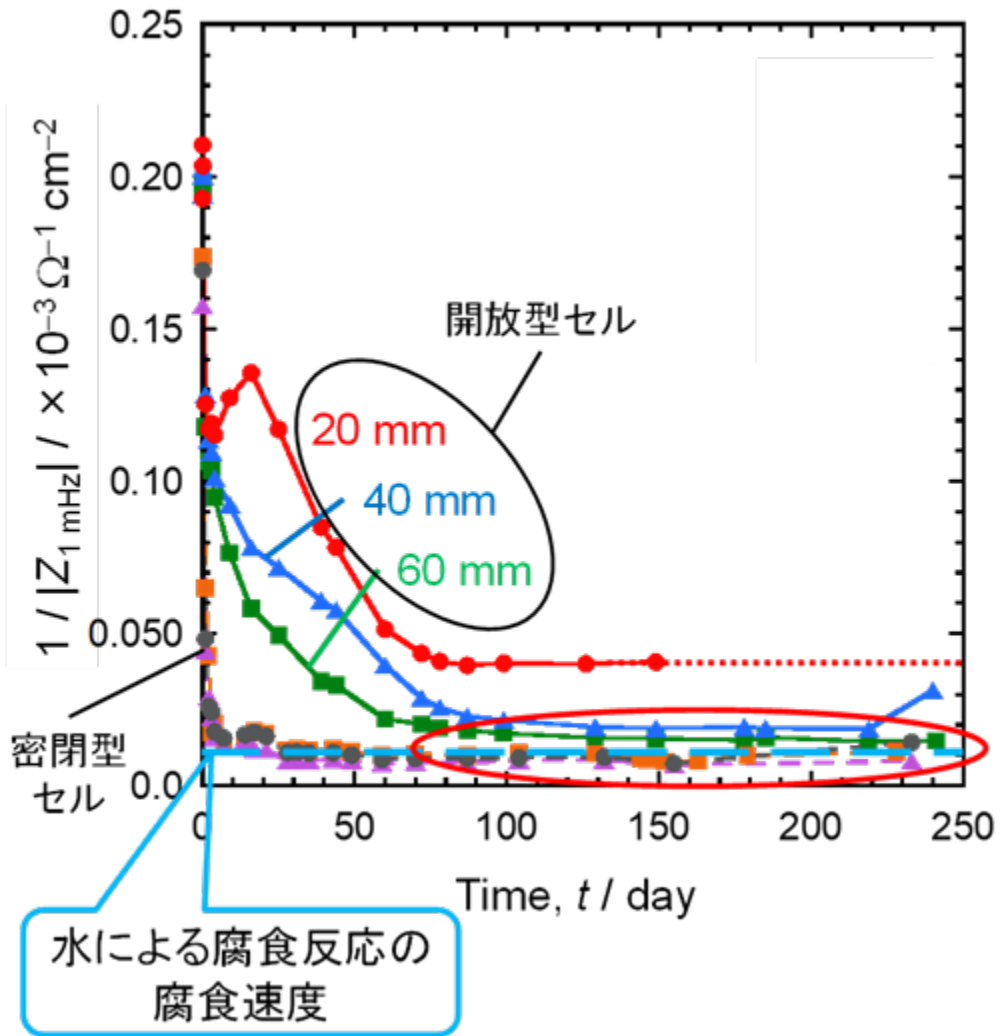


図 2. 2. 1-22 密閉型セルと開放型セルの腐食速度の比較

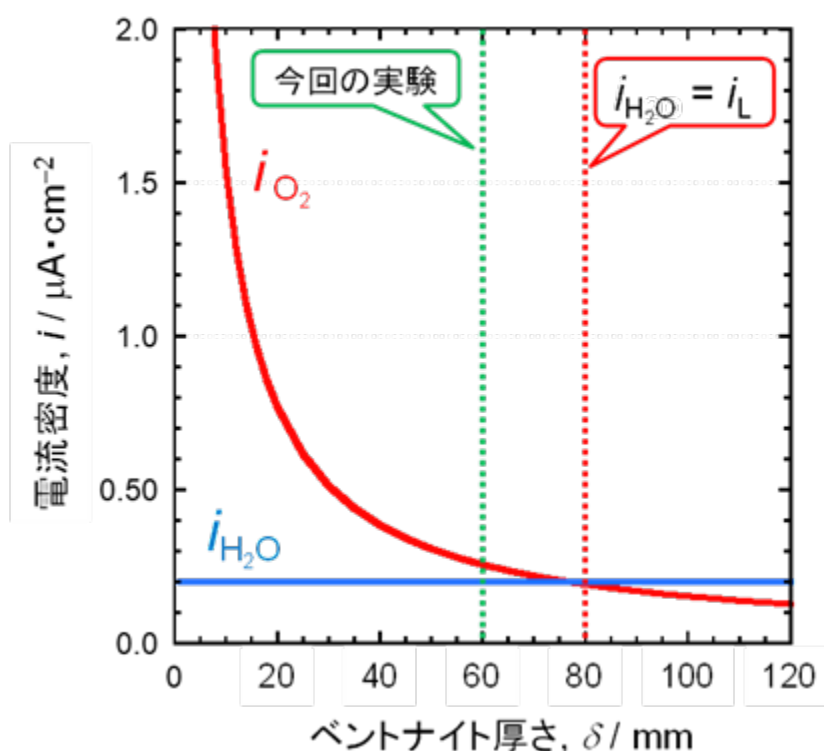


図 2.2.1-23 酸素消費型腐食から水素発生型腐食への移行を説明する模式図

3) レジストメトリー法によるベントナイト中における銅の腐食速度のモニタリング

2) で述べたとおり、交流インピーダンス法はベントナイト中における腐食モニタリング手法として有効と考えられ、平成 27 年度には純銅についても腐食モニタリングを試み適用性が確認された（原子力機構，2016）。純銅は、溶存酸素濃度の低い環境では一般的に熱力学的に安定であり、ほとんど腐食が進展せず、処分環境においても初期には酸素による腐食が進展しうるものの、長期的には極めて小さな腐食速度が期待できる可能性がある。そのため腐食速度の低下や腐食生成物成長などに伴い、交流インピーダンス法によるモニタリングでは腐食速度の定量的な把握が困難となる可能性もあり、環境条件や腐食特性に応じて種々のモニタリング手法を構築することが重要である。

そこで、平成 28 年度より、微小の腐食速度をモニタリングする手法としてレジストメトリー法を用いた測定を試みており（原子力機構，2017）、平成 29 年度は溶液条件の違いによる影響を確認した。

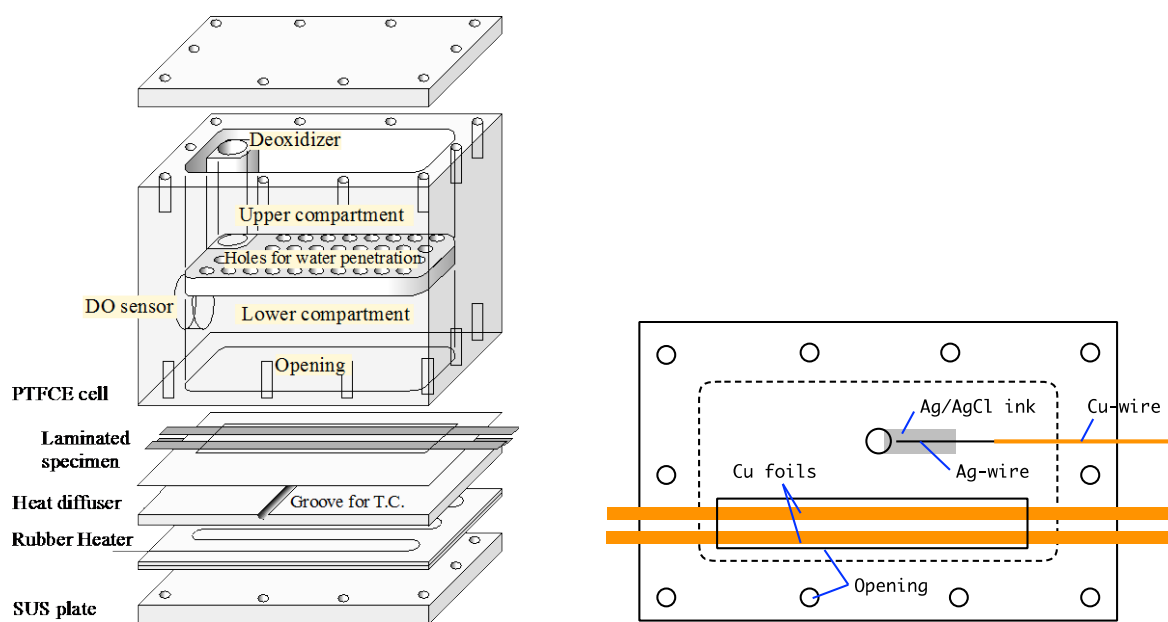
① 実験方法

銅試験片には Nilaco 製純度 99.99 % の銅箔（厚さ 5 μm）を用いた。試験溶液には純水（Milli-Q 水）および純銅の腐食に影響を及ぼすと考えられる化学種を含む環境として、 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 、 NaCl 、 NH_4Cl を用いた。

測定セルの模式図を図 2.2.1-24 に示す。セル本体はダイフロン製で、セル内部の下半分にはベントナイト粉末（クニゲル）を、上半分には試験溶液を入れ、セルの底面からラミネー

ト封止した厚さ 5 μm の Cu 箔 (Nilaco 社製、純度 99.99 %) と加熱用ヒーターを固定した。試験溶液は上室から下室のベントナイトに浸透させた。Cu 箔の幅は 2 mm、長さ 90 mm、腐食部の長さは 55 mm である。このセルを真空グローブボックス (アズワン社製 VG400 型、以下 GB) 中に設置した (図 2.2.1-25)。試験溶液中に含まれる溶存酸素を除去するため、セル内に乾燥ベントナイト粉末のみを入れた状態で GB に設置し、GB 内部の酸素を除去した後に脱気した水溶液をセル内に導入した。また、真空 GB と真空ポンプを使用してセル内の気体を強制的に排気してから N_2 ガスを導入することで、セル内の O_2 除去を行った。GB 内には水溶液タンクも配置し、GB 内の真空排気および N_2 置換により水溶液内の溶存酸素 (DO) も除去することとした。また、セルへの水溶液供給および水溶液タンクのパブリングのためにチューブポンプを設置した。腐食試験中は常に微量の N_2 を GB 内に流し、トラップを介して排気した。

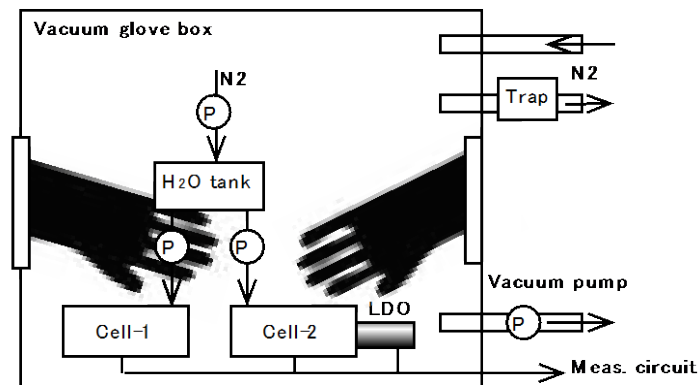
レジストメトリーによる Cu 箔減肉量のほか、Cu 箔間のカップリング電流 Ag/AgCl/Ag-wire による浸漬電位、GB 内および測定セルに組み込んだ蛍光式溶存酸素センサー (Hach 社製 HQ-40d 型 LDO センサー) による溶存酸素 (DO) 濃度の測定も行い、通常計測時におけるセル内の DO 値は、センサーの検出下限 0.01 mg L^{-1} 以下であることを確認した。



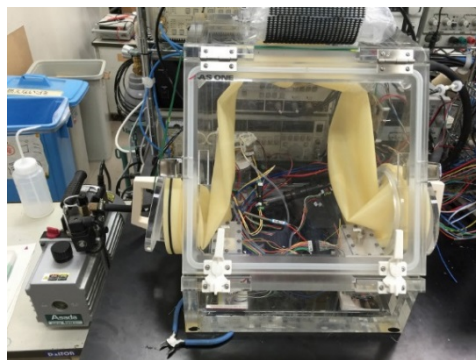
(a) 本研究で使用した膨潤ベントナイト埋没試験用セル

(b) Cu 箔試料

図 2.2.1-24 本研究で使用した膨潤ベントナイト埋没試験用セルと Cu 箔試料の模式図



(a) 実験装置の概略図



(b) グローブボックスの外観

図 2.2.1-25 真空グローブボックスを使用した実験装置の概略図およびグローブボックスの外観

② 実験結果と考察

図 2.2.1-26 に各種条件で試験後の Cu 箔試料写真を示す。(a)純水で膨潤させたベントナイトでは、試料表面が皮膜で覆われ下地金属が見えなくなっていた。(b)1 M NH_4Cl 水溶液で膨潤させたベントナイト環境では、試料表面にベントナイトが付着している部分、溶解により荒れた金属色を呈している部分、および緑色の物質で覆われている部分が見られた。(c)～(h)は水溶液環境である。(c)純水中では、試料表面はうっすらと黒色の皮膜で覆われていた。(d)1 M NH_4Cl 水溶液中では、試料表面は灰色に変わっていたが、これは後で示すようにラミネート試料中に埋め込んだ Ag/AgCl 参照電極由来の Ag が析出した可能性がある。(e)0.1 M NaCl 水溶液と(f)0.1 M NH_4Cl 水溶液中では試験後の試料表面は金属光沢を保っており、皮膜生成よりも溶解反応が進行していたことがわかる。(g)0.1 M Na_2SO_4 水溶液中では、試料表面はムラのある状態で黒色の皮膜で被覆されていた。(h)0.1 M NaHCO_3 水溶液中では、試料表面は皮膜で覆われていた。

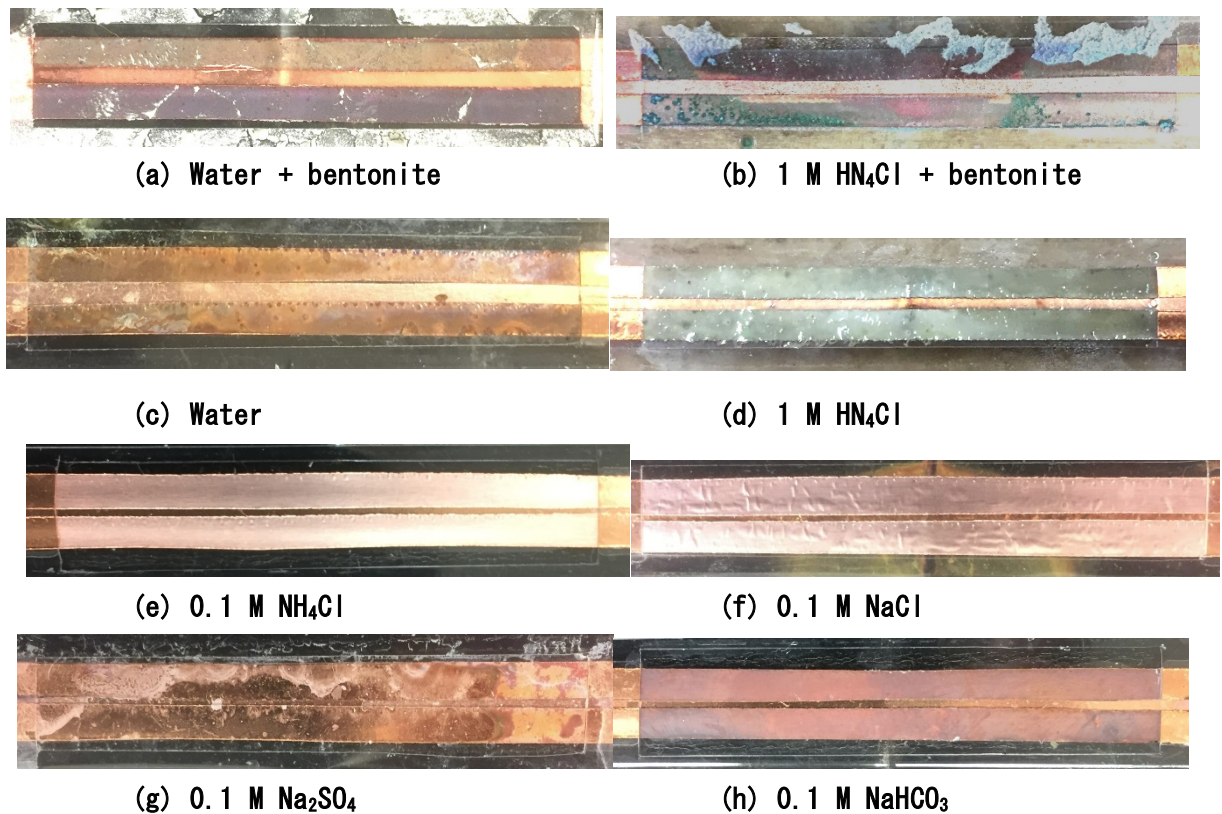


図 2.2.1-26 試験後の Cu 箔試料写真

図 2.2.1-27 に各条件でレジストメトリーにより測定された Cu 箔試料の腐食減肉の経時変化を示す。腐食速度は時間経過および測定条件により異なるが $0\sim 70 \mu\text{m y}^{-1}$ の範囲で、極端に大きな場合を除外するとおよそ $5 \mu\text{m y}^{-1}$ 以下の値となっている。これらの結果を表 2.2.1-1 にまとめた。一般的な傾向として初期の腐食速度は大きく、ある程度時間が経過すると腐食速度は低下するが、この傾向から外れる場合もある。腐食速度に影響を与える因子は (a) 溶存酸素濃度や (b) 表面皮膜が想定される。(b) に関しては、過年度の結果で $\text{D}_0=0.2 \text{ mg L}^{-1}$ 程度の時には腐食が進行することで表面皮膜が成長し、この皮膜が溶液イオン種に依存するためにその後の腐食速度に影響を与えることが確認できた。これに対して $\text{D}_0 < 0.01 \text{ mg L}^{-1}$ まで低下させた本実験環境では、腐食速度が小さいために、本試験期間 (1~3 ヶ月) では十分な厚さの皮膜が成長せず、イオン種による皮膜の耐食性の違いが顕在化していないと推定される。(a) に関しては、本実験系は D_0 センサの検出限界の $\text{D}_0 < 0.01 \text{ mg L}^{-1}$ まで低下させているが、グローブボックスへの N_2 ガスの流通状態により 0.01 mg L^{-1} 以下で D_0 値が変動しているようである。図 2.2.1-27(e) の $0.1 \text{ M NH}_4\text{Cl}$ と (h) の $0.1 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ は同時に配置して測定したものであるが、図 2.2.1-27(e) で $2000\sim 3000 \text{ ks}$ の間で一時的に腐食速度が大幅に (1 桁ほど) 増加している。このとき D_0 センサは検出限界値 0.01 mg L^{-1} 付近を示しており (通常は検出限界 0.01 mg L^{-1} 以下)、GB 内の D_0 値が通常よりも増加していたと思われる。同じ時間帯で、同時測定していた図 2.2.1-27(h) の方でも若干腐食速度が増加する傾向を見せており、 D_0 値の変動が腐食挙動に影響したと推定される。ただし図 2.2.1-27 (h) の方が D_0 変動の影響が小さかったのは、表面が皮膜で覆われていたため溶解がそれほど加速しなかったためと考え

られる。

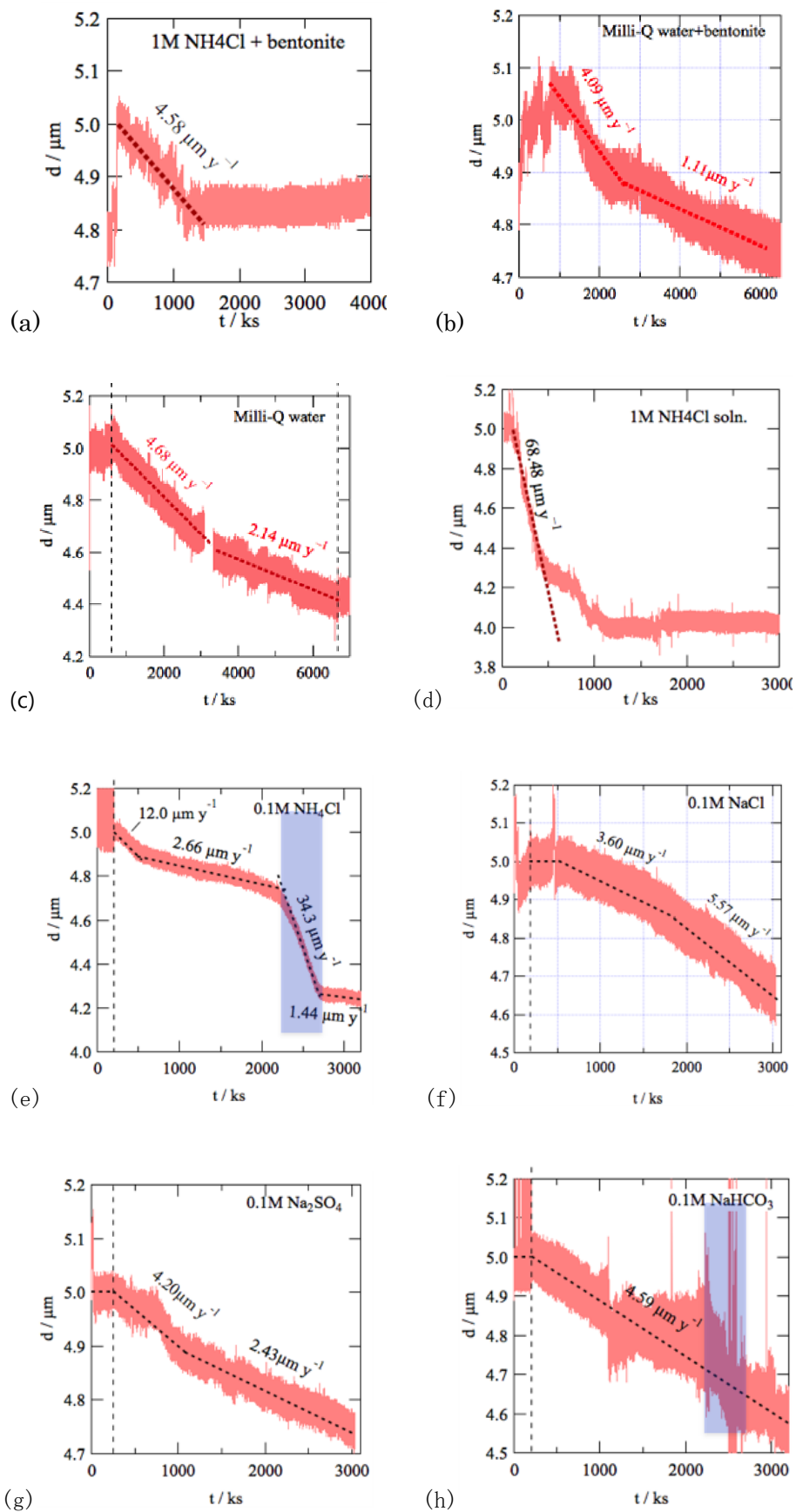


図 2. 2. 1-27 各種腐食条件下における Cu 箔厚さの経時変化

表 2. 2. 1-1 各種条件における Cu 箔の腐食速度と試料表面生成物

Condition	Rate / $\mu\text{m y}^{-1}$	$d_{\text{Loss}}(\text{Av}) / \mu\text{m y}^{-1}$	Products
(a) Water + Bentonite	4.1 \rightarrow 1.1	0.25 $\mu\text{m} / 83\text{day}$ \rightarrow 1.10	Cu ₂ O, CuO, CuS
(b) 1M NH ₄ Cl + Bentonite	4.6 \rightarrow neg	0.16 / 46 \rightarrow 1.27	Cu ₂ O, CuO, CuCl?
(c) Water	4.7 \rightarrow 2.1	0.6 / 83 \rightarrow 2.64	Cu ₂ O, CuO
(d) 1M NH ₄ Cl	68.5 \rightarrow neg	1.0 / 46 \rightarrow 7.93	(Cu ₂ O),CuO, CuCl?
(e) 0.1M NH ₄ Cl	1.44 \sim 34.3	0.38 / 37 \rightarrow 3.75	Cu ₂ O
(f) 0.1M NaCl	3.60 \rightarrow 5.57	0.36 / 35 \rightarrow 3.75	Cu ₂ O, CuCl?
(g) 0.1M Na ₂ SO ₄	4.20 \rightarrow 2.43	0.26 / 35 \rightarrow 2.71	Cu ₂ O
(h) 0.1M NaHCO ₃	4.59	0.425 / 37 \rightarrow 4.19	Cu ₂ O

4) ベントナイト中における銅の応力腐食割れ挙動

銅はアンモニアの存在する環境にて応力腐食割れを生じることが知られており (Suzuki, 1981; Pugh et al., 1966; Uhlig and Duquette, 1969)、生成した酸化物皮膜(変色皮膜)が応力の作用で脆性破壊して下地銅が露出されるとその部位での酸化物生成が優先されて酸化物が局部的に生成し、そのような割れと皮膜再生とが繰り返し進行する変色被膜破壊型応力腐食割れとして亀裂が進展する。平成 27 年度までに実施した、水を膨潤させたベントナイト中での、銅の応力腐食割れ感受性についての低ひずみ速度試験法(SSRT)による評価(原子力機構, 2016)では、銅に典型的な変色皮膜型応力腐食割れが生じ、ベントナイトを膨潤する水溶液中にアンモニアが含まれると亀裂の進展が加速される可能性も示唆された。しかし、これまでの SSRT による評価は、試験片を強制的に破断まで変形させる試験であり比較的厳しい荷重条件が付与されたものとなっている。一方、実際の処分容器でこのような荷重条件がもたらされることは考えにくい。

そこで、平成 28 年度より、静的な応力条件での試験を実施しており、平成 29 年度は一般的な定ひずみ試験である U 字ベント曲げ試験を実施した。さらに、表面に生成する酸化物の状況についても検討した。

以下では、まず実験方法を示し、その実験結果と考察を示す。

① 実験方法

試料は市販の厚さ 2 mm の純銅板(99.99 %)を用いた。この化学組成を表 2.2.1-2 に示す。これを、Ar 雰囲気中で 550 °C、60 min のひずみ除去焼鈍を行った後に、図 2.2.1-28 に示す形状の平板引張試験片を放電加工によって切り出した。さらに、SiC 紙 #1000 乾式研磨仕上げ、水洗の後応力腐食割れ試験に供した。一方、表面皮膜検討用として、同じ銅版より 10×10 mm² の試片を切り出し、SiC 紙 #1000 での乾式研磨仕上げ、水洗の後、浸漬用試料とした。

特級試薬と純水から調製した膨潤ベントナイトを試験環境とした。膨潤ベントナイトは以下のように混合して作成した。

ベントナイト(クニミネ工業製クニゲル V1)	140 g
純水	1,200 g

アンモニウムを含む場合は、あらかじめ 10 mM のアンモニア水を調製し、上記と同様に膨潤ベントナイトを調製した。

図 2.2.1-28 に示す試験片を切り出し、この試料を SiC 研磨と 0.3 μm アルミナペーストを用いての鏡面仕上げの後に、定ひずみ維持のためのボルトを締結し、50 °C に保持した膨潤ベントナイト中に埋設して保持した。U 字ベント曲げ試験片の組み立ての手順を図 2.2.1-29 に示す。

また、上記の各種応力腐食割れ試験と同様の環境に晒した平板試料の腐食生成物をラマン分光法にて分析した。

表 2.2.1-2 試料として用いた無酸素銅の化学組成 (Cu 以外の成分の単位 : ppm)

Cu (%)	Ag	Pb	Sn	Fe	Ni	Bi	As	Sb	Se	Te	Zn	P	Cd	O
≥99.99	9	≤1	≤1	3	≤1	0.2	≤1	≤1	≤5	≤5	≤5	≤5	≤5	≤2

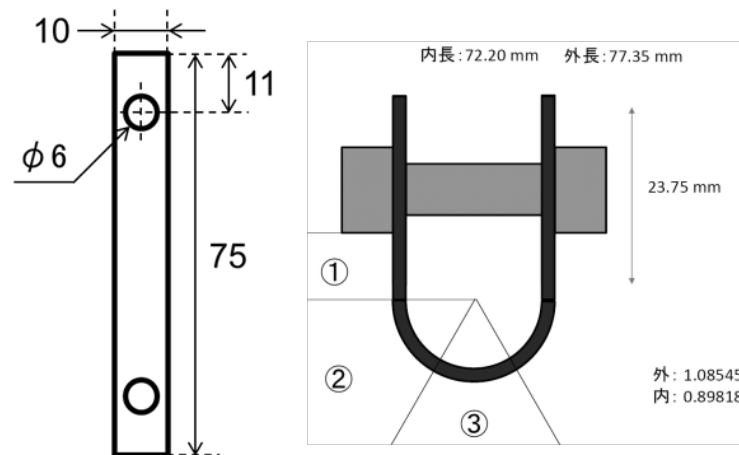


図 2.2.1-28 U字ベント曲げ試験片の形状と、曲げ時の形態と試験片領域

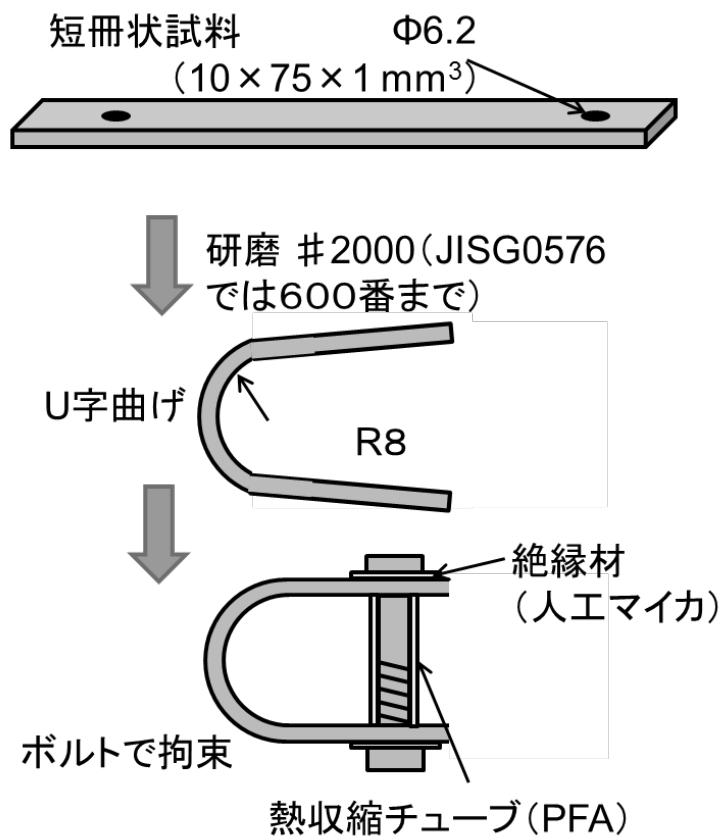


図 2. 2. 1-29 U字ベント曲げ試験片の組み立て手順

② 実験結果と考察

50 °Cの純水または 10 mM NH_3 水溶液で膨潤したベントナイト中で、U字ベント曲げ試験片と板状試験片の 7, 30, 60, 240 日間の浸漬試験後の試料外観写真を図 2. 2. 1-30 に示す。U字ベント曲げ試験片では 30 日以上浸漬で腐食生成物は容易に剥離し、特に超音波洗浄ではかなりの腐食生成物が脱落した。そこで、純水で慎重にすすぎ洗浄を行い以下の観察に供した。一方、板状試料では浸漬時間が長くなるに伴い、濃い色の不均一な腐食生成物を形成した。

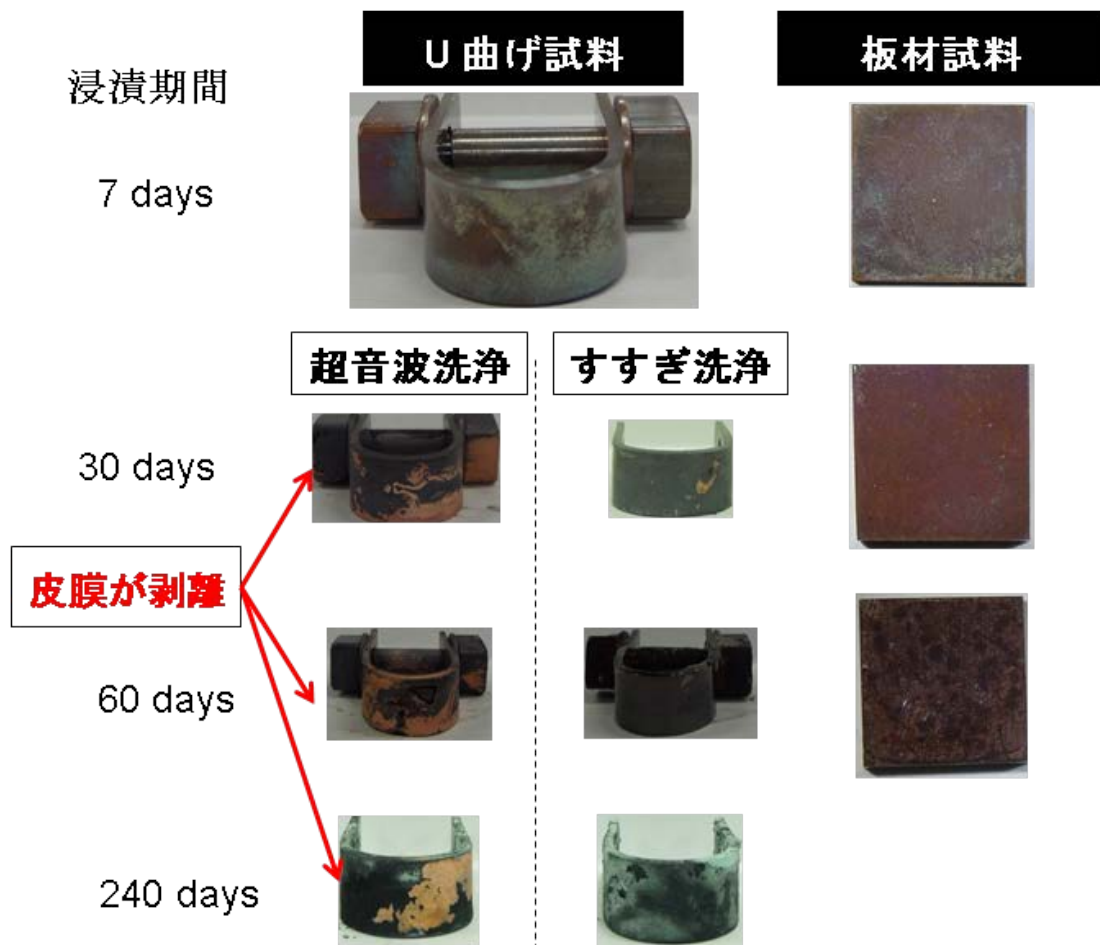


図 2. 2. 1-30 平板およびU字ベント曲げ試験片の純水膨潤ベントナイト中での浸漬試験後の試料外観写真

図 2. 2. 1-31 に U 字ベント曲げ試験片と板状試験片の 7, 30, 60 日間純水膨潤ベントナイト中での浸漬後の試験片表面の SEM 写真を示す。U 字ベント曲げ試験片では腐食生成物に割れがみられ、30 日浸漬試験片で明らかなように、最表面に存在し下地との密着が悪いと思われる板状の層と試料表面に直接生成している内部層とに大きく分けることができる。一方、板状試料に生成する腐食生成物は U 字ベント曲げ試験片の腐食生成物よりも薄く、層状構造は見られなかった。これらの試料の表面に対して EDS 測定を行った。O, S, Si, Cu の見かけの検出原子分率を表 2. 2. 1-3 に示す。EDS 測定では検出深さは数 μm に達するので、Cu については腐食生成物中と下地 Cu との和となっている。U 字ベント曲げ試験片では浸漬時間が長いほど S, O とも増大している。一方、板状試料では Cu 濃度が U 字ベント曲げ試験片と比べて高いが、これは板状試料では腐食生成物が薄いため、下地の Cu を多く検出していることとなる。時間の経過とともに、O が減少し、S は増大しており、S/O も増大している。すなわち時間の経過とともに硫化物の割合が増している。一方、Cu は漸減しているがその変化はわずかであり、皮膜厚さの変化は少ないと判断できる。

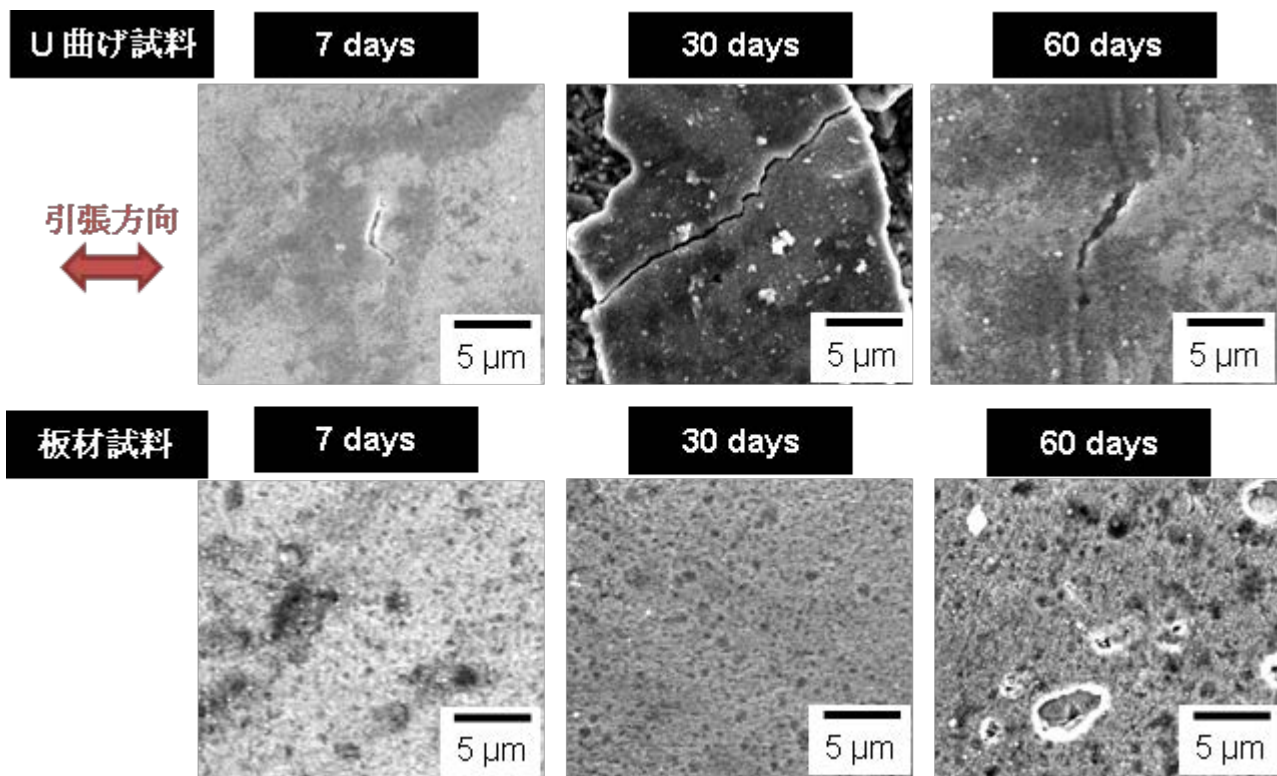


図 2. 2. 1-31 平板およびU字ベント曲げ試験片の純水膨潤ベントナイト中での浸漬試験後の試験片表面のSEM写真

表 2. 2. 1-3 U字ベント曲げ試験片と板状試験片の7, 30, 60日間純水膨潤ベントナイト中で浸漬後の試験片表面のEDS測定による原子分率

U 曲げ試験料					
(at%)					
days	O	Si	S	Cu	S/O
7	7.55	0.08	2.32	90.04	0.31
60	21.39	1.20	8.68	68.74	0.42

板材試験料					
days	O	Si	S	Cu	S/O
7	6.45	0.06	1.13	92.36	0.17
30	4.12	0.02	2.43	93.43	0.59
60	2.24	0.03	3.66	94.07	1.66

次に、U字ベント曲げ試験片でNH₃の有無の影響を検討する。図2.2.1-32に、浸漬期間60日までのNH₃無しと有りの場合の表面皮膜形状を示す。さらに、図2.2.1-33に240日浸漬後の結果を示す。図中①～③は図2.2.1-28で示した試料の部位を示す。なお、図2.2.1-32のno NH₃は図2.2.1-31に示した図と同じである。NH₃濃度10 mMの方ではNH₃無の試料で見られた硫化物層と類似の形態は少ない。さらに、60日浸漬ではNH₃有の試料のみで局部腐食の発生に伴う、マウンド状の腐食生成物がみられた。一方、240日浸漬後についてはNH₃の有無にかかわらず、試料前面にマウンド状の腐食生成物がみられる。

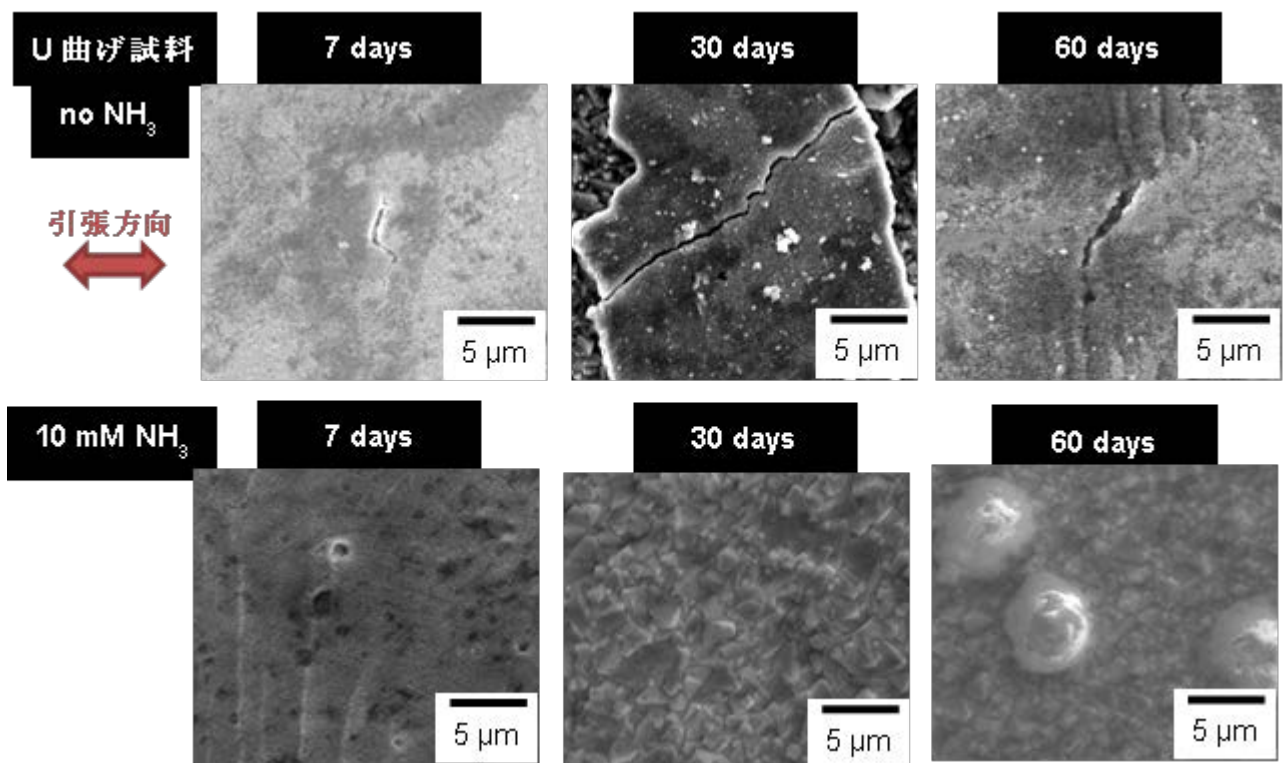


図2.2.1-32 U字ベント曲げ試験片の純水および10 mM NH₃膨潤ベントナイト中での浸漬試験後の試験表面のSEM写真

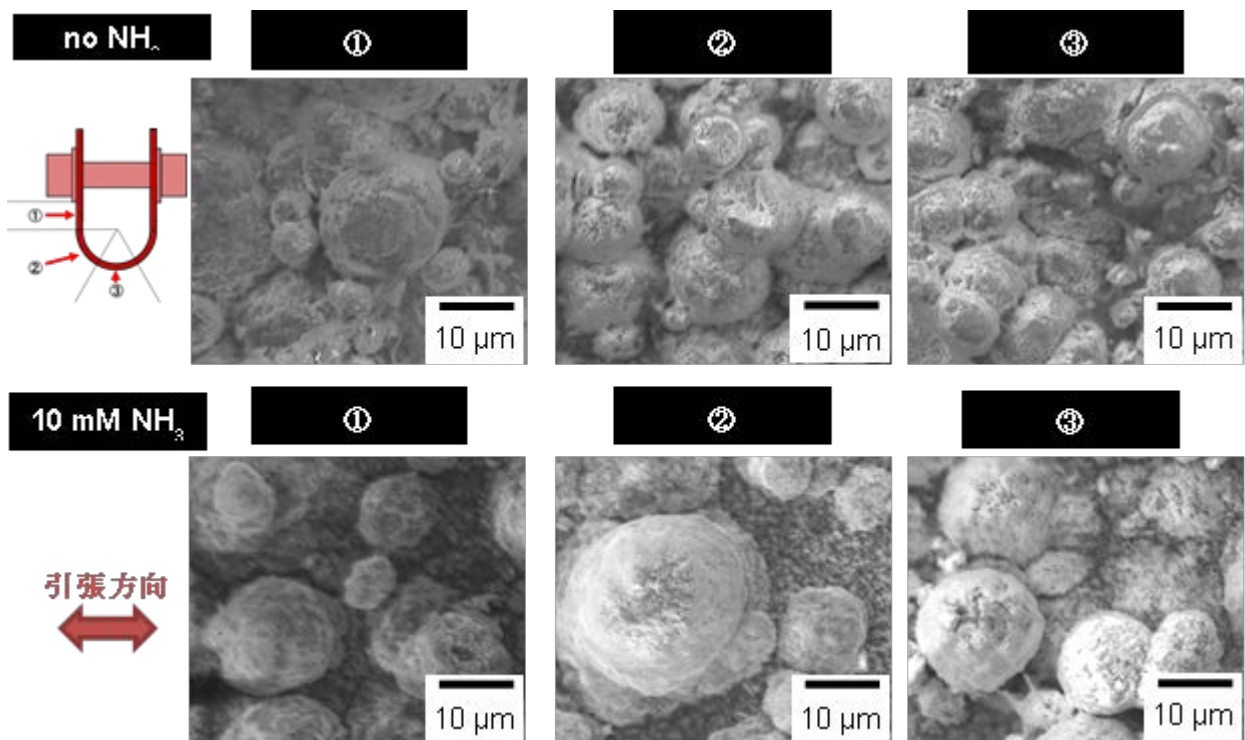


図 2.2.1-33 U字ベント曲げ試験片の純水および 10 mM NH₃ 膨潤ベントナイト中での 240 日間の浸漬試験後の試験片表面の SEM 写真

U字ベント曲げ試験片について NH₃ の無と有の膨潤ベントナイトに浸漬した試料表面の EDS 分析結果を表 2.2.1-4 と表 2.2.1-5 にそれぞれ示す。表中の①～③は図 2.2.1-28 で示した試料の部位を示す。Cu については、いずれの試料についても浸漬時間の経過にともなって大きく減少しているが、先に述べたように Cu には下地からの信号が含まれており、すなわち腐食生成物の厚さが時間とともに大きくなっていることを意味する。

表 2.2.1-4 U 字ベント曲げ試験片の純水膨潤ベントナイト中で浸漬後の試験片表面の EDS 測定による原子分率

no NH ₃		(at%)				
days	O	Si	S	Cu	S/O	
①	7	12.49	0.07	2.99	84.44	0.25
	60	29.62	1.64	1.96	66.77	0.07
	240	41.05	5.00	0.03	53.92	0.00
②	7	15.91	0.32	3.27	80.51	0.21
	60	23.32	1.07	10.09	65.53	0.44
	240	49.81	5.50	0.07	44.62	0.00
③	7	9.49	0.09	3.13	87.29	0.33
	60	21.39	1.20	8.68	68.74	0.42
	240	52.32	4.77	0.06	42.85	0.00

表 2.2.1-5 U 字ベント曲げ試験片の 10 mM NH₃ 膨潤ベントナイト中で浸漬後の試験片表面の EDS 測定による原子分率

10 mM NH ₃						
days	O	Si	S	Cu	S/O	
①	7	7.50	0.03	1.58	90.89	0.21
	30	29.58	1.24	1.01	68.17	0.03
	60	27.59	1.60	2.02	68.79	0.07
	240	46.71	2.39	0.07	50.83	0.00
②	7	9.63	0.07	2.29	88.01	0.24
	30	27.38	3.10	1.10	68.43	0.04
	60	33.17	1.86	2.73	62.24	0.08
	240	38.05	3.51	0.06	58.37	0.00
③	7	7.47	0.08	2.40	90.05	0.32
	30	23.26	0.99	0.82	74.93	0.04
	60	28.19	1.10	1.96	68.76	0.07
	240	46.39	3.86	0.15	49.60	0.00

焼鈍処理後に鏡面仕上げした平板試験片を 50 °C の純水または 10 mM の NH₃ 水溶液を膨潤したベントナイト中に 120 日まで浸漬した試料の表面 SEM 像を図 2.2.1-34 にまとめて示す。応力ないしは変形のない試料では NH₃ の有無での差は顕著でないが、120 日では局部腐食に伴うマウンド状腐食生成物がみられ、特に NH₃ の有では、試料のほぼ全面を覆っていることがわかる。

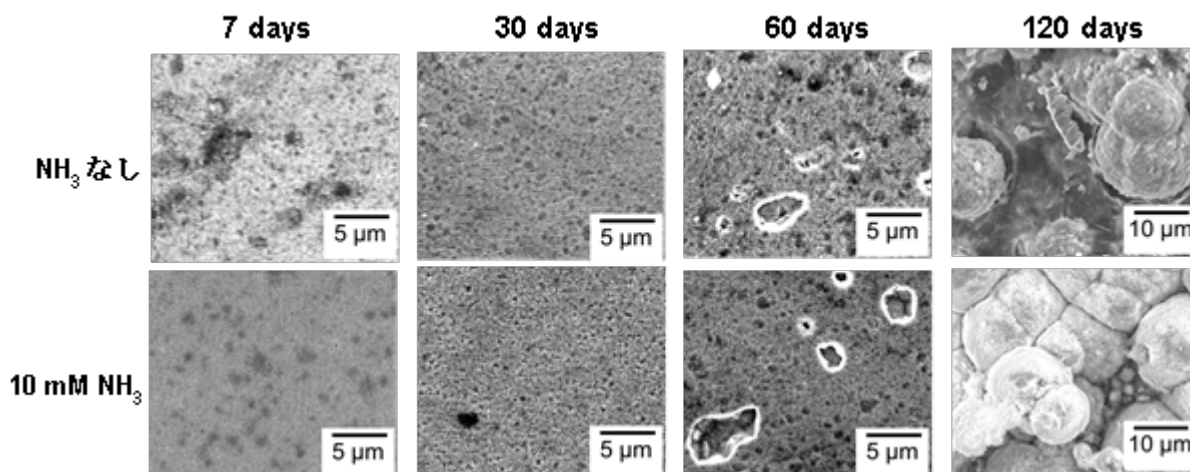


図 2. 2. 1-34 平板試験片の純水および 10 mM の NH₃ 膨潤ベントナイト中での浸漬試験後の試験表面の SEM 写真

U 字ベント曲げ試験片を純水膨潤したベントナイト中で 240 時間浸漬した試料の腐食生成物の剥離箇所を SEM および EDS 分析した。図 2. 2. 1-35 に分析箇所を示す。(1)は最表面に現れた局部腐食に伴うマウンド状腐食生成物、(2)はマウンド状腐食生成物の直下の層、(3)さらに下側の層、および(4)下地銅である。表 2. 2. 1-6 にこれらの部位での EDS 測定結果を示す。分析結果より、(1)～(4)は順に CuO ないしは Cu₂O, Cu₂S, Cu₂O, CuO と考えられる。

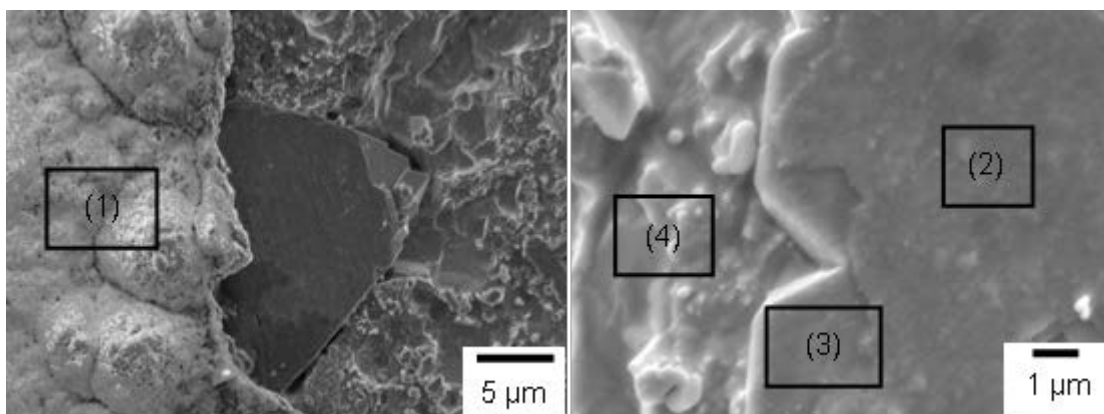


図 2. 2. 1-35 U 字ベント曲げ試験片を純水膨潤したベントナイト中で 240 時間浸漬した試料の腐食生成物の剥離箇所の SEM 写真 (図中の数字は EDS 分析箇所を示す)

表 2.2.1-6 U 字ベント曲げ試験片を純水膨潤したベントナイト中で 240 時間浸漬した試料の腐食生成物の剥離箇所の測定による原子分率

	(at%)				
	O	Si	S	Cu	S/O
(1)	49.66	2.06	0.07	48.22	0.00
(2)	5.20	0.07	9.07	85.65	1.79
(3)	25.48	0.00	0.02	74.51	0.00
(4)	4.03	0.37	0.05	95.56	0.01

次に同試料の表面付近断面の SEM 像ならびに元素マップ像を図 2.2.1-36 に示す。0 はマウンド状腐食生成物の方がその下の表面層、あるいはさらにその内部の不均一な腐食域と比べて濃度が高いため、マウンド状腐食生成物は Cu_2O 、他は Cu_2O と判断できる。また、S はマウンド状腐食生成物の直下に濃縮しており、さらに酸化物全体にも低濃度ながら分布していると考えられる。下地銅の内部へ進展する腐食域は局部腐食状であり、その部位にはマウンド状腐食生成物がみられる。また、内部に進展する Cu_2O に表面に垂直な割れがみられることより、変色皮膜型応力腐食割れを生じたと考えられる。ただし、今回の浸漬試験では局部腐食が極めて多数生じており、局在化が不十分であり SSRT で見られる典型的な割れは形成しなかったと思われる。

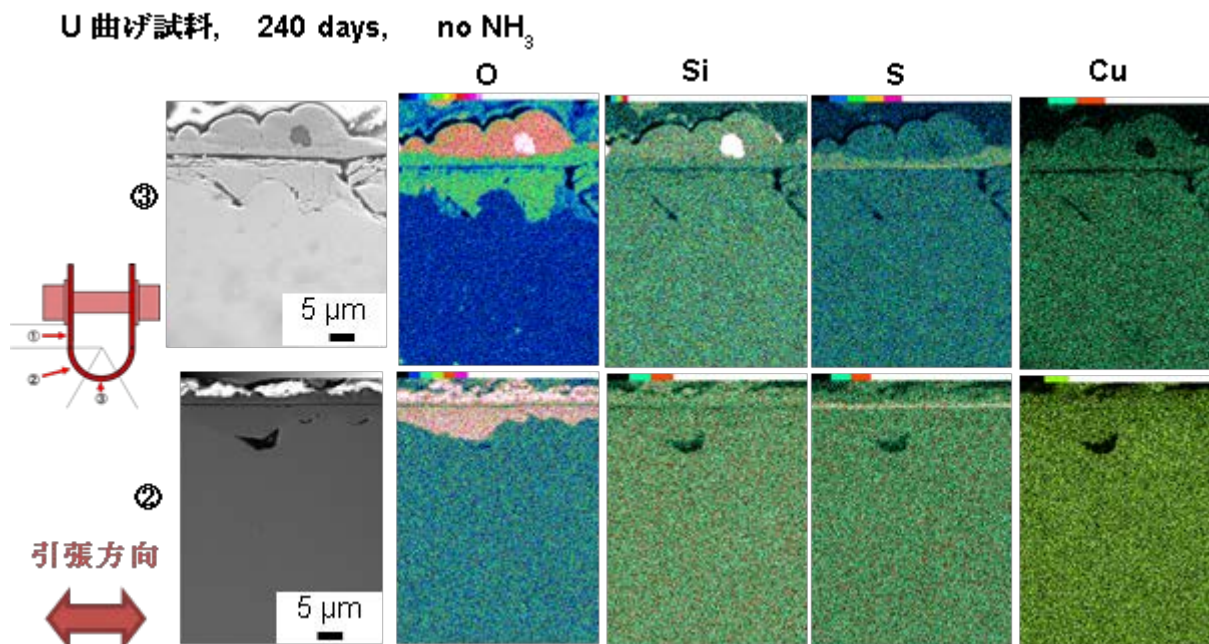


図 2.2.1-36 U 字ベント曲げ試験片を純水膨潤したベントナイト中で 240 時間浸漬した試料の表面付近断面の SEM 像ならびに元素マップ像

脱気環境で調製した純水膨潤ベントナイト平板試験片に生成した皮膜の厚さを動電位分極

還元法により分析した。比較として、同様の操作を脱気のない環境にて行った試料についても同様に分析した。図 2.2.1-37 に還元曲線の例を示す。酸化物と硫化物はそれぞれ-1000 mV, -500 mV で還元される。脱気がない場合には、浸漬時間の経過とともに酸化物の厚さは減少し、硫化物については増大することがわかる。一方、脱気した場合には、酸化物厚さは脱気なしの場合より著しく小さく、硫化物は殆ど生成しない。図 2.2.1-38 に浸漬時間と皮膜厚さとの関係を整理して示す。脱気した場合、酸化物厚さは初期の 300 h まではほとんど変化しないとともに、硫化物は生成しなかった。一方、550 h に達すると酸化物は殆ど消失するとともに、硫化物形成が開始している。

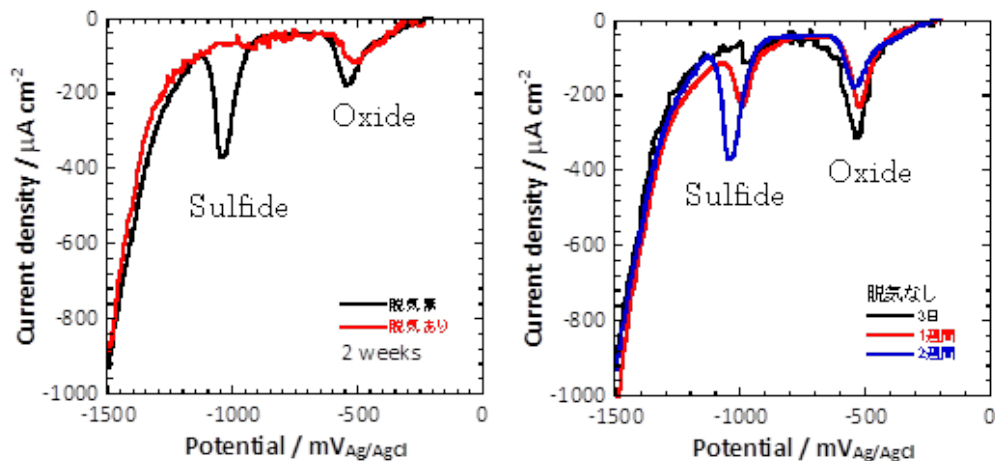


図 2.2.1-37 脱気および脱気なし環境で調製した純水膨潤ベントナイト中にて平板試験片に生成した皮膜の動電位分極還元曲線

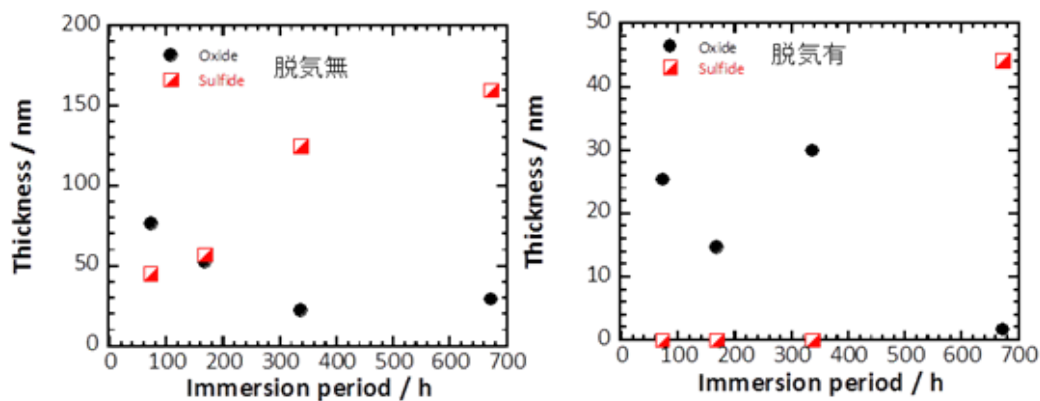
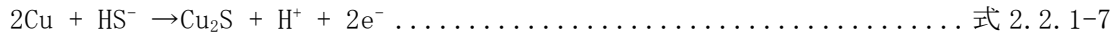


図 2.2.1-38 脱気および脱気なし環境で調製した純水膨潤ベントナイト中にて平板試験片に生成した皮膜の動電位分極還元曲線より得られた皮膜厚さ

ここで、地下埋設環境での銅の応力腐食割れ感受性と腐食生成物の性状との関係を検討した。ベントナイト中では硫化鉄(パイライト)などに起因して硫化物を含む可能性があり、例えば、式 2.2.1-7 に示す反応に基づき、硫化物を生成する。



これまでに明らかになったように、溶存酸素が存在する環境では初期は酸化物が生成し、次第に硫化物の生成に変化する。すなわち、溶存酸素濃度が高い段階では酸化物が優先的に生成するが、次第に酸化物生成速度が低下し硫化物の生成が主となる。このとき、酸化物より熱力学的に安定な硫化物への生成も生じる可能性がある。一方、応力があると局部腐食を生じ、剥離した腐食生成物は Cu_2O の層の上に Cu_2S 層が生じており、局部腐食が生じるとその部位ではマウンド上の CuO が最上面に生成している。以上の推定から得られた、皮膜の構造を図 2.2.1-39 に示す。ここでは、U 字ベント曲げ試験片での観察であるが、平板試料でも長時間の浸漬の後には同様のマウンド状腐食が生じることがあり、応力がなくても局部腐食を生じるとこのような CuO を主体としたマウンド状腐食生成物を生じる。以上より、長期にわたる腐食生成物の形成過程に及ぼす応力の作用について、図 2.2.1-40 にまとめて示す。

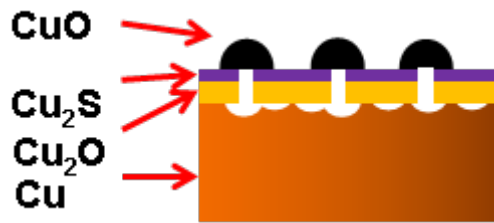


図 2.2.1-39 局部腐食が生じたときの皮膜構造の模式図

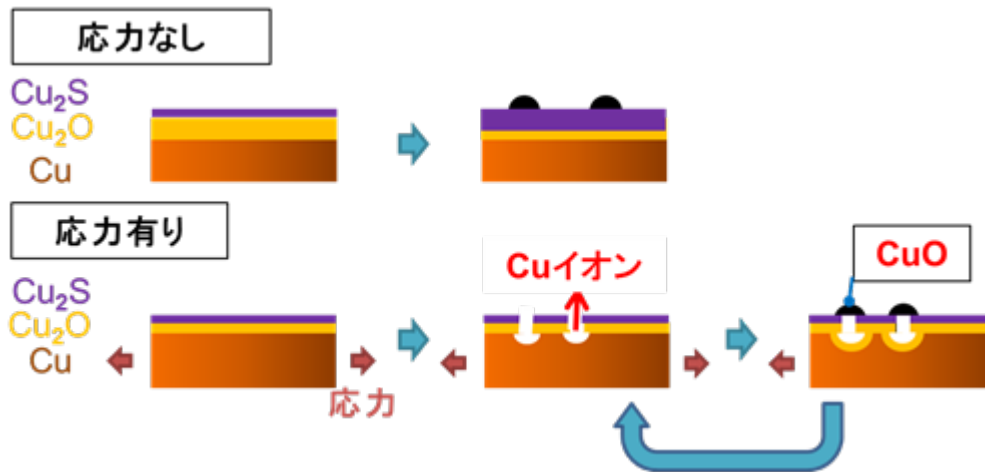


図 2.2.1-40 膨潤ベントナイト中での Cu の皮膜形態に及ぼす応力の作用の模式図

5) 代替処分容器候補材料 (Cu, Ti, Ni 基合金など) のガンマ線照射下での電気化学特性

処分後初期には使用済燃料からの放射線の線量率が比較的大きく、地下水の放射線分解などによって生じた化学種によって処分容器の腐食挙動が影響を受ける可能性がある。平成 27 年度は、代替処分容器候補材料であるチタンを対象として、pH の異なる微量 (50 mM) の塩化物

イオンを含む模擬地下水（炭酸水素塩／炭酸塩水溶液）中で、ガンマ線照射下での純チタン試料の浸漬試験を行い、試験後の溶液中の Ti の分析結果から純チタンの腐食速度を測定した（原子力機構，2016）。平成 28 年度より、チタンのほか、純銅、Ni 基合金を対象としてガンマ線照射下での電気化学試験を行っており、既に自然電位、アノード／カソード分極特性などを検討した（原子力機構，2017）。平成 29 年度はこれらの材料を用いて交流インピーダンス測定を行い、平成 28 年度の結果と合わせて腐食におよぼす放射線の影響の検討を行った。

① 実験方法

純チタンならびに純銅、UNS N10276(Hastelloy® C-276)の直径 1.0 mm の線材をコイル状に加工したもの（表面積：6～7 cm²）を試料電極（WE）に用いた（以下、各電極を、「Ti」ならびに「C」、「C276」と表記する。Ti ならびに Cu の純度はそれぞれ 99.5 %と 99.99 %以上である。また、C276 の成分を表 2.2.1-7 に示す。

表 2.2.1-7 測定に使用した UNS N10276 (C276) の化学組成

C	Si	Mn	P	S	Ni
0.007	0.055	0.34	0.002	<0.001	bal.
Cr	Mo	Co	Fe	W	V
15.21	15.3	0.95	4.71	3.68	<0.01

いずれの電極もエメリー紙での乾式研磨で 180 番まで仕上げした後、同じく 120 番で研磨し、エタノール中で超音波洗浄してから使用した。

試験溶液には以下 3 種類の水溶液を用いた。

- 50 mM NaCl + 1 M Na₂CO₃ (pH 8)
- 50 mM NaCl + 1 M NaHCO₃ (pH 12)
- 50 mM NaCl + 1 M Na₂CO₃ + 0.1M NaOH (pH 13)

図 2.2.1-41 に測定系の概略を示す。

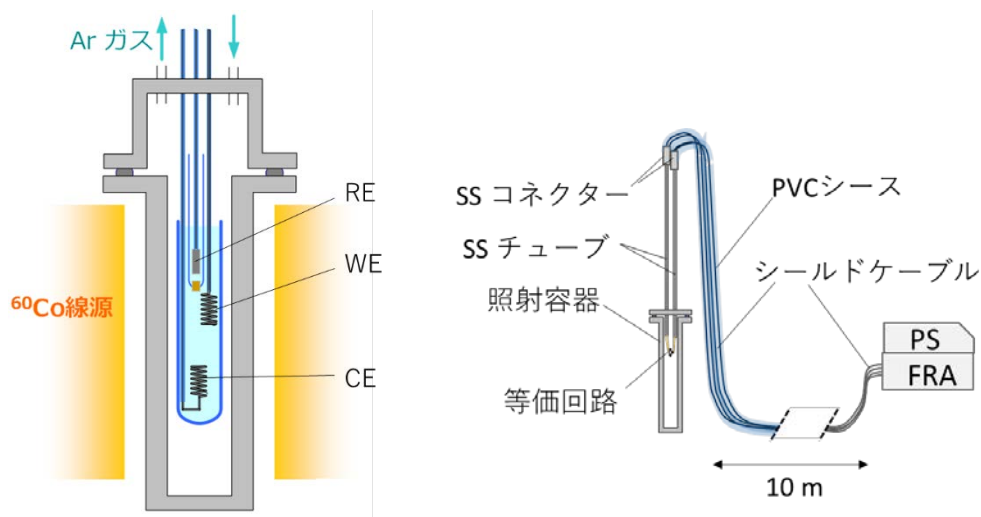


図 2.2.1-41 照射下での電気化学測定系の概略

作用電極 (WE) の試験液への浸漬の面積は 6 から 7 cm^2 であった。参照電極 (RE) には内部溶液は飽和 KCl 水溶液とする Ag/AgCl 電極を用いた。対極 (CE) は白金とした。試験セルには外形 30 mm, 長さ 200 mm のホウ珪酸ガラス製の試験管を用いた。試験溶液は Ar ガスを吹き込んで脱気した後に試験セルに入れた。試験セルをステンレス容器 (照射容器) に収めた後、速やかに、容器を水深 5 m のプール底の ^{60}Co 線源に容器を差し込みガンマ線照射の照射を開始した。本試験の期間中における照射容器内の吸収線量率は、 $6.4 \pm 0.8 \text{ kGy h}^{-1}$ であった。

交流インピーダンスの測定は、ガンマ線照射で、CE から外部電流を印加しない自然状態において、 20 ± 1 時間 WE を予備浸漬し、そのまま同じく照射下でおこなった。WE の電位をポテンショスタットで予備浸漬終了時の自然電位に制御した後、同電位に振幅 $\pm 10 \text{ mV}$ の正弦波を重畳させた。正弦波の周波数は $20 \text{ kHz} \sim 0.01 \text{ Hz}$ の範囲で変化させた。ポテンショスタットに接続した周波数応答解析器 (FRA) で WE の電位および WE-CE 間の電流に重畳している正弦波信号の振幅と位相差を解析し、各周波数での WE の界面インピーダンスを測定した。なお、予備浸漬ならびに分極測定的全測定期間を通して容器内に Ar ガスを流通した。

② 実験結果と考察

交流インピーダンスが所定の精度で測定できること確認するため、図 2.2.1-42 の等価回路を照射容器内で各電極を接続するクリップに繋ぎ、ポテンショスタットの設定電位は 0 V とし、回路に $20 \text{ kHz} \sim 0.005 \text{ Hz}$ の振幅 $\pm 10 \text{ mV}$ の正弦波を印加し、各周波数でのインピーダンスを測定した。その結果を図 2.2.1-43 に示す。ここで、照射容器を水深 5 m のプール底の線源に設置するため、ポテンショスタットから照射容器までのケーブル長さは 10 m としている。図 2.2.1-43 に示した結果から、このような長距離のケーブルを使用しているにも関わらず、適切に回路のインピーダンスが測定できることが確認された。

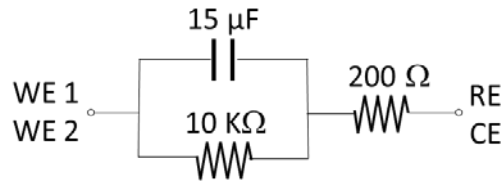


図 2.2.1-42 等価回路の構成

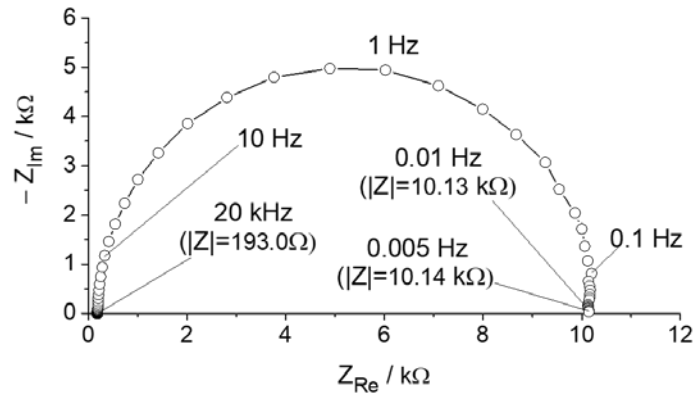


図 2.2.1-43 等価回路の交流インピーダンスの測定結果

次に、図 2.2.1-44 に、照射下ならびに非照射下における各溶液中での純チタンの交流インピーダンスの測定結果を示す。放射線の照射により界面のファラデーインピーダンスが低下している。また、照射および非照射のいずれの条件下でも、pH の増加とともにファラデーインピーダンスが減少した。さらに、図 2.2.1-45 に照射下ならびに非照射下における各溶液中での純銅の交流インピーダンスの測定結果を示す。放射線の照射により界面のファラデーインピーダンスが低下している。また、図 2.2.1-45 に示す高周波域を拡大したものを図 2.2.1-46 に示す。照射および非照射のいずれの条件下でも、pH の増加とともにファラデーインピーダンスは増加した。図 2.2.1-46 の照射下でのプロットは、pH9 はやや傾きが小さいものの、pH12 ならびに pH13 では 45 度の直線となっている。これより、ガンマ線照射下では有限拡散モデルでの物質輸送律速下で腐食反応が進行していると推察される。

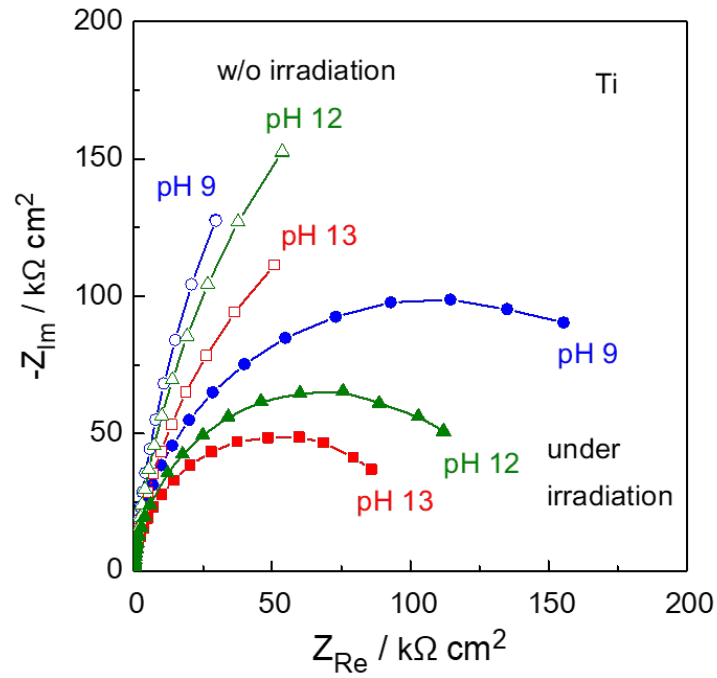


図 2. 2. 1-44 純チタン電極の交流インピーダンス測定結果

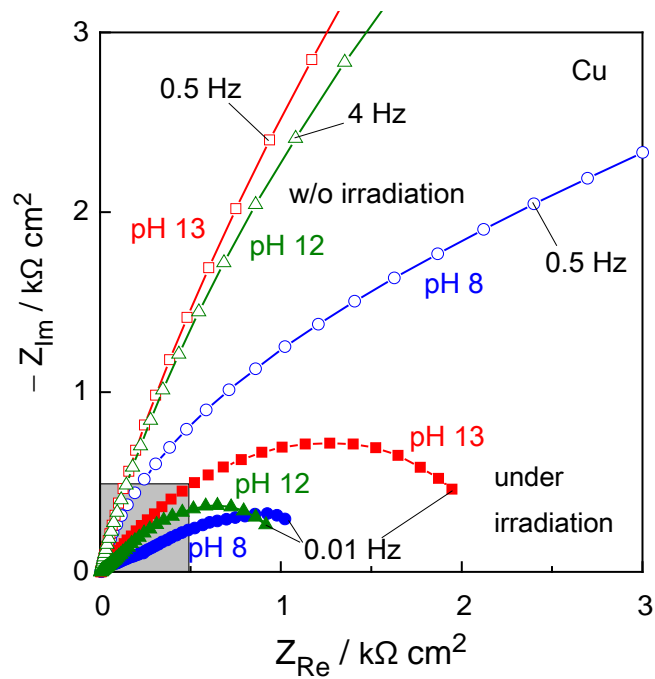


図 2. 2. 1-45 純銅電極の交流インピーダンス測定結果

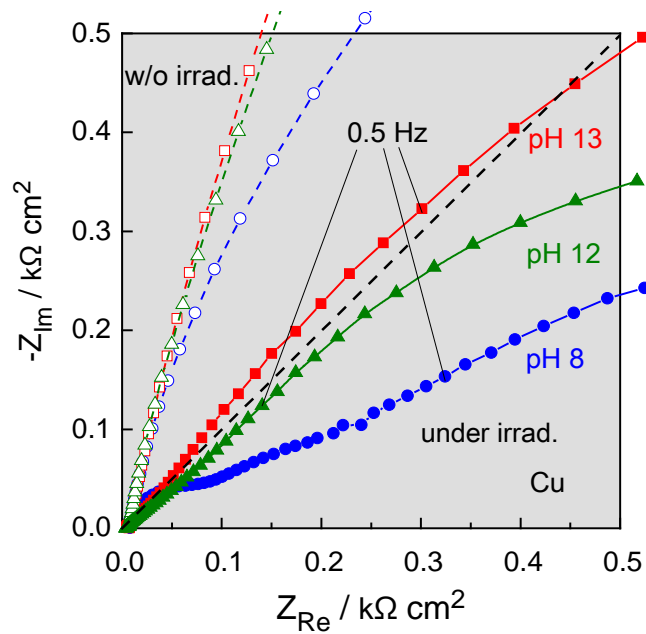


図 2.2.1-46 図 2.6-5 の高周波数域（灰色の部分）の拡大図

図 2.2.1-47 に 照射下ならびに非照射下における各溶液中でのニッケル基合金の交流インピーダンスの測定結果を示す。放射線の照射により界面のファラデーインピーダンスが低下している。照射および非照射のいずれの条件下でも、pH の増加とともにファラデーインピーダンスは増加した。

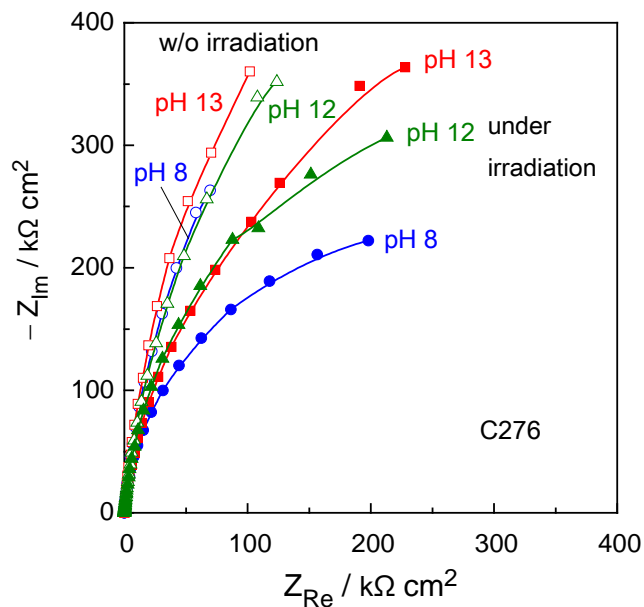


図 2.2.1-47 ニッケル基合金電極の交流インピーダンス測定結果

表 2.2.1-8 に交流インピーダンスの結果から推定したガンマ照射下での純チタンおよび純銅の腐食速度を示す。ニッケル基合金については、ファラデーインピーダンスが大きく、交流インピーダンスの結果からは有意な腐食速度の推定は行えなかった。

表 2.2.1-8 ガンマ線照射下での各種電極の腐食速度の推定結果

材料	pH	腐食電流 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	腐食速度 $\mu\text{m}/\text{y}$
Ti	8	0.089	0.77
	12	0.14	1.2
	13	0.19	1.7
Cu	8	19	220
	12	21	240
	13	10	120

6) まとめ

処分容器候補材料の腐食メカニズムの解明および腐食メカニズムに基づく評価手法の構築、耐食性向上に資する知見を整備することを目的として、以下に示す項目の検討を行った。

- 炭素鋼腐食生成物形成試験と皮膜の性状評価
- 交流インピーダンス法による炭素鋼の腐食モニタリング
- レジストメトリー法によるベントナイト中における銅の腐食速度のモニタリング
- ベントナイト中における銅の応力腐食割れ挙動
- 代替処分容器候補材料 (Cu, Ti, Ni 基合金など) のガンマ線照射下での電気化学特性

これらの項目の検討結果は以下のようにまとめられる。

① 炭素鋼腐食生成物形成試験と皮膜の性状評価

Fe 表面上に緻密な FeCO_3 皮膜を迅速に形成する水溶液条件を把握するとともに、 FeCO_3 皮膜に対する D_2O の拡散挙動を調査し、353 K および 363 K の NaHCO_3 飽和水溶液中に Fe を浸漬して形成した皮膜に XRD 試験を行うと、皮膜は FeCO_3 で構成されていることが確認された。 FeCO_3 皮膜に D_2O 浸透試験を行い、 D_2O の浸透時間と浸透量の関係を拡散に基づいて解析した結果、353 K で形成した FeCO_3 皮膜に対する D_2O の拡散係数は $1.06 \times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 、363 K で形成した FeCO_3 皮膜に対する D_2O の拡散係数は $1.60 \times 10^{-10} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ と推定され、低温で形成された皮膜の方が D_2O の拡散に対する障壁能力が高いことが示唆された。

② 交流インピーダンス法による炭素鋼の腐食モニタリング

ベントナイトのかぶり厚 1 mm, 3 mm, 5 mm の密閉型セルにより、炭素鋼の交流インピーダンスを測定を約 250 日間行った結果、いずれのかぶり厚でも、腐食速度は時間とともに減少し、約 50 日で定常状態に達した。その定常での腐食速度はかぶり厚に依存せず、約 $2 \mu\text{m year}^{-1}$ (約 $0.2 \mu\text{Acm}^{-2}$) となった。この腐食速度は水による炭素鋼の腐食速度に相当すると考えられる。

かぶり厚 20 mm, 40 mm, 60 mm の開放型セルにより、炭素鋼の交流インピーダンスを計測した結果、腐食速度は徐々に減少し、約 100 日で一定となった。この定常状態での腐食速度はかぶり厚の逆数にほぼ比例することから、開放型セルではベントナイト中の酸素の拡散が

腐食を律速している。ただし、60 mm のかぶり厚の定常状態での腐食速度は密閉型セルでのものとかなり近い値を示していることから、ある厚さ（酸素の拡散係数 $2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 、酸素濃度 $2 \times 10^{-7} \text{ mol cm}^{-3}$ と仮定すると約 80 mm）以上になると、開放型セルでも酸素消費型から水素発生型（水との腐食）に移行するものと思われる。

③ レジストメトリー法によるベントナイト中における銅の腐食速度のモニタリング

オーバーパック材料の地下埋設初期における膨潤ベントナイト埋設銅の腐食挙動を調査するため、真空グローブボックス中に Cu 箔試料を取り付け、DO 値 0.01 mg L^{-1} 以下の極低酸素濃度環境で膨潤ベントナイトならびに各種イオンを含む水溶液環境中での Cu 箔の腐食挙動を 1~3 ヶ月程度の期間調査した。その結果、Cu 薄膜の腐食速度は膨潤ベントナイト中では $1 \sim 1.3 \text{ } \mu\text{m y}^{-1}$ 、水溶液中では $2 \sim 8 \text{ } \mu\text{m y}^{-1}$ 程度となり、膨潤ベントナイト中の方が腐食速度が小さかった。試験後の試料表面には、ベントナイト中では Cu_2O と Cu_2S が、水溶液中では Cu_2O や塩化物などが生成した。

④ ベントナイト中における銅の応力腐食割れ挙動

湿潤ベントナイト中に平板試験片と U 字ベント曲げ試験片を埋設したところ、いずれの試料でも長時間の後には局部腐食が生成し、その部位では CuO を主体とするマウンド状腐食生成物を形成した。このとき、U 字ベント曲げ試験片の方が局部腐食の発生頻度は大きく、加工度が大きいとほぼ全面が局部腐食状になった。このとき、 NH_3 は局部腐食の進展を加速すると思われるが、発生頻度については不明確であった。なお、脱気環境では酸化物、硫化物ともに生成速度が低下するが、数か月後より硫化銅を主体とする皮膜を生成することが分かった。

U 字ベント曲げ試験のような大きな定ひずみが与えられると、局部腐食が多数発生するが、動的ひずみのときのような局部腐食の局在化が生じにくく、必ずしも変色皮膜型応力腐食割れを生じることはなかった。従って、Cu に加工ひずみあるいは残留応力が存在する際に、膨潤ベントナイト中の残留溶存酸素の作用により厚い皮膜を生成し、変色皮膜破壊型応力腐食割れを生じる可能性がある。

⑤ 代替処分容器候補材料のガンマ線照射下での電気化学試験

代替処分容器候補材料の耐食性への放射線の影響を調査するため、純チタンならびに純銅、Ni 基合金のガンマ線照射下および非照射下での交流インピーダンスを測定した。Ni 基合金には C276 (UNS N10276, Hastelloy® C-276) を用いた。

純チタンならびに純銅、Ni 基合金のいずれの電極でも、ガンマ線照射によりファラデーインピーダンスが低下する（腐食反応が加速される）ことが確認された。また、純チタンは、非照射下を含め、pH の増加とともにファラデーインピーダンスが減少した。純銅と Ni 基合金では、逆に pH に応じてファラデーインピーダンスは増加した。高周波数域でのインピーダンス特性から、ガンマ線照射下での純銅の腐食反応の律速段階はカソード反応の物質輸送と推定された。交流インピーダンスの測定結果から推定したガンマ照射下での純チタンおよび純銅の腐食速度は、それぞれ $0.8 \sim 2 \text{ } \mu\text{m y}^{-1}$ および $0.12 \sim 0.24 \text{ mm y}^{-1}$ となった。ニッケル基合

金については、ファラデーインピーダンスが大きく、交流インピーダンスの結果からは有意な腐食速度の推定はおこなえなかった。

(3) 人工バリア性能への微生物影響評価

人工バリアの閉じ込め性能に及ぼす影響事象の一つとして、微生物による処分容器の腐食が挙げられる（図 2.2.1-48、図 2.2.1-49 参照）（Kim et al., 2004; Little and Lee, 2007; King, 2009; 日本原子力機構, 2014）。国内においても、処分容器の微生物腐食影響について知見が集積されてきたが（核燃料サイクル開発機構, 1999; 2001; 和田ほか, 1998; 西村ほか, 1999）、それらの研究は、主に硫酸還元反応を主体とした評価に限定されている。しかしながら、近年の知見により、処分環境と同様の環境と想定される還元的環境下において、メタン生成菌（Daniels et al., 1987; Dinh et al., 2004; Mori et al., 2010; Uchiyama et al., 2010）、酢酸生成菌（Mand et al., 2014; Kato et al., 2015）、硝酸還元菌（Till et al., 1998; Xu, 2013; Iino et al., 2015）、それらを含む複合微生物（Mand et al., 2014）などの金属腐食への関与が指摘されている（図 2.2.1-48）。そのため、微生物反応が処分システムの安全機能に及ぼす影響の不確実性を低減させるためには、硫酸還元反応だけでなく人工バリア内に存在しうる様々な微生物種を対象とした微生物影響について検討する必要がある。

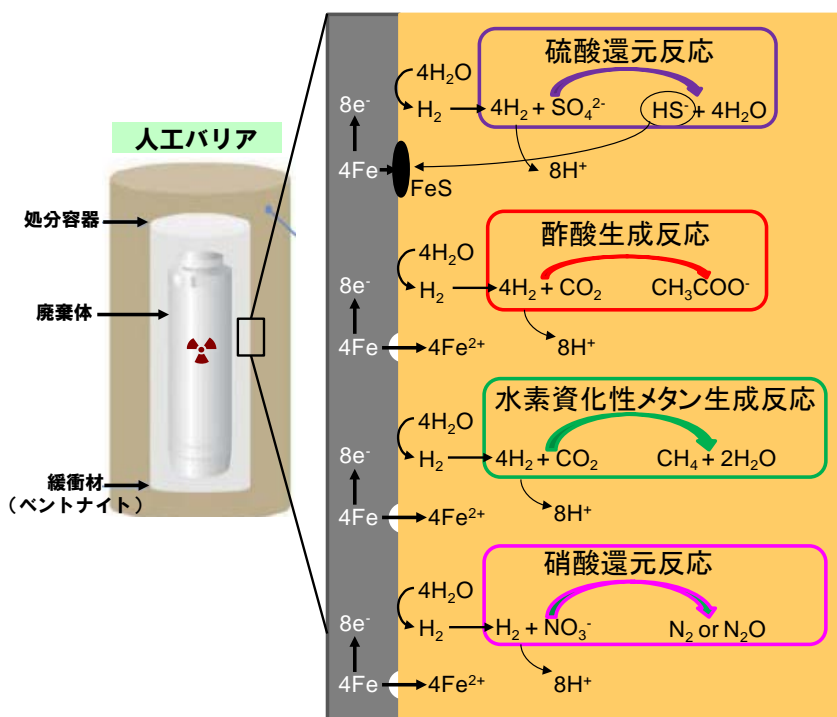


図 2.2.1-48 処分容器に及ぼす微生物腐食反応の概念図

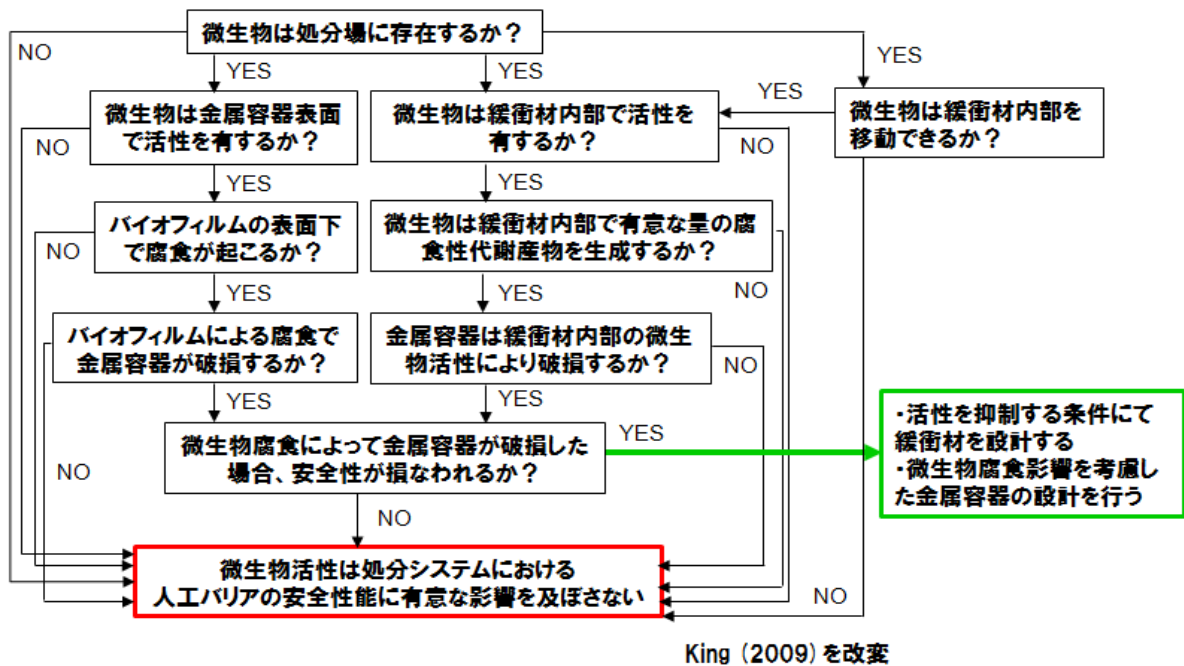


図 2.2.1-49 地層処分システムの人工作業性能における微生物影響の可能性に関するディシジョンツリー

(King, 2009 を改変)

平成 28 年度までに、人工バリア性能に及ぼす微生物影響を評価するために、一般的な嫌気的環境である湖沼堆積物などの試料を採取し、鉄腐食性菌の探索を行うとともに、炭素鋼試験片を用いた腐食試験を行った。その結果、環境中には硫酸還元菌以外にも鉄腐食能を有するメタン生成菌や酢酸生成菌などが普遍的に存在することを明らかにした(平野ほか, 2015)。また、ベントナイト中における微生物による鉄腐食活性に関する知見を拡充し、その微生物腐食活性を支配する要因とメカニズムを明らかにするために、ベントナイト中での鉄腐食性メタン生成菌および微生物群集を対象とした炭素鋼の腐食評価試験を実施するとともに、30 °C および 50 °C の各温度条件にて、それぞれ 1.0 および 1.6 g cm⁻³ の圧縮密度条件下において炭素鋼片を埋設した圧縮ベントナイトカラムを用いた腐食評価試験を実施した。1 年間に渡る腐食試験結果より、圧縮密度 1.0 g cm⁻³、培養温度 30 °C の条件では圧縮ベントナイト内の炭素鋼片の腐食が 6 ヶ月から 1 年の間で急速に進行した一方で、圧縮密度の高い条件(1.6 g cm⁻³) かつ温度の高い条件(50 °C) では腐食が抑制され、腐食反応は緩やかに進行することが明らかとなった。本試験から、圧縮密度の低い条件下においては腐食が進んでいる傾向が見られたことから、処分環境において圧縮密度が低下した場合には微生物による腐食影響を考慮することが必要となる可能性が示唆された。一方で、腐食が促進される要因とメカニズムについてのより詳細な評価の必要性が課題として挙げられた。

平成 29 年度は、処分環境を想定した条件下における微生物腐食活性を支配する要因およびメカニズムについての検討をさらに進めることを目的として、1.0 g cm⁻³ と 1.6 g cm⁻³ の中間である 1.3 g cm⁻³ の圧縮密度条件下において炭素鋼片を埋設した圧縮ベントナイトカラムを用いた腐食評価試験を 30 °C および 50 °C において実施するとともに、ベントナイト内部における微生物の現存量と生菌数、多様性に関するデータを取得し、クニゲル V1 およびケイ砂

の混合物 (7:3) を用いた場合に微生物活性を抑制する圧縮ベントナイト密度と腐食に関する微生物代謝反応について評価を行った。

1) 試験方法

平成 29 年度は、平成 28 年度から引き続き、人工バリア外に存在する微生物の圧縮ベントナイト内部への移行や、それらが金属材料に及ぼす影響評価のための腐食試験を実施した。腐食試験には、PEEK 製およびチタン製カラムを用い、圧縮ベントナイト密度 1.3 g cm^{-3} に調整された緩衝材 (ベントナイト (クニゲル V1、クニミネ工業) - ケイ砂 (5 号) の 7:3 混合体) 中に炭素鋼片を設置した。カラム部分に圧縮ベントナイトを充填後、パールコーンフィルタ (孔径 $100 \mu\text{m}$) を挟み上板、下板でねじ止めすることで密閉した (図 2.2.1-50)。それぞれのカラム内の酸素を真空引きと窒素置換を繰り返し行うことにより除去した後、嫌気チャンバー内であらかじめ培養した嫌気性金属腐食微生物群 VMC (VM-I medium enriched Community、菌体密度 $4.2 \times 10^9 \text{ copies-16S rRNA gene ml}^{-1}$) を植菌し、表 2.2.1-9 の試験条件に従い、無酸素条件下にて温度 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ もしくは $50 \text{ }^\circ\text{C}$ で浸漬培養試験を開始した。培養試験過程で生じた微生物代謝を明らかにするために、溶液中のガス濃度や化学成分分析を行った。 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 試験においては、培養期間 1 週間ごとにガラス密閉瓶上部に設置したシリコン栓部分からガスを採取し、ガスクロマトグラフィーによりガス組成の測定を行った。培養期間終了後に密閉瓶を開放し、浸漬培養液の成分分析 (HPLC、IC、鉄濃度) を行うと共に、カラムを開封し、緩衝材の水分活性を測定した後、緩衝材内の炭素鋼片を取り出し、重量減少測定を行った。

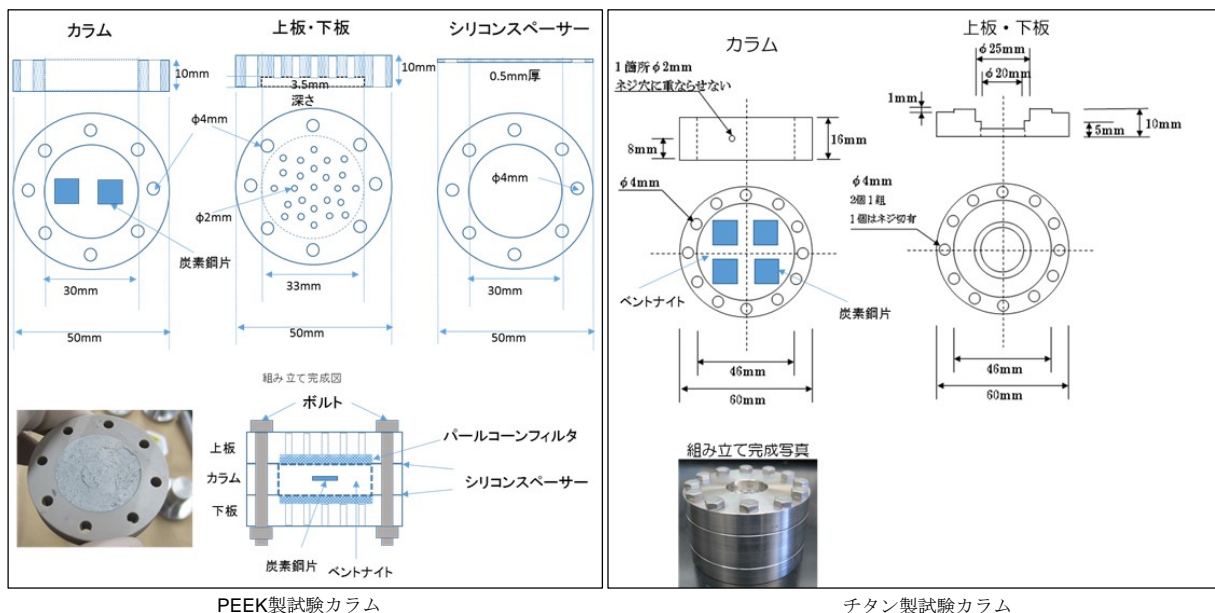


図 2.2.1-50 腐食試験に用いた PEEK 製およびチタン製カラム

解体した圧縮ベントナイトについて浸漬液と接触していた表面 2 mm 程度を削り、内部にあたる部分を採取した。採取したベントナイト 1 g を PBS 10 ml に懸濁し、懸濁液を DNA 抽出および培養試験に供した。DNA 抽出については、試験終了後に採取した浸漬液およびベントナイト (約 1.2 g) を用いた。平成 28 年度までの DNA 抽出法では、ベントナイト中の DNA 濃度

はほとんどの試料で検出下限値以下であったことから、ベントナイト試料からの DNA 抽出効率を改善するために抽出方法の検討を行い、平成 29 年度は DNA 抽出手法を既報の粘土質試料からの DNA 抽出手法 (Richard et al., 2014) を参考に次のように改良した。改善法の検討には、あらかじめ密度がわかっている大腸菌 *E. coli* JM109 株を培養した培養液 (10^8 cells mL⁻¹程度の菌体密度)を用いた。

1. ベントナイト試料に対して 0.33 ml g⁻¹の clay lysis solution (1 M phosphate pH7.2、4 M guanidine isothiocyanate、10 µl ml⁻¹ 2-mercaptoethanol) を添加し、ビーターで破碎処理(Thermo BI0101 FastPrep FP120、強度:6、時間:40 秒)
2. 破碎処理後のベントナイト試料に対して 4.67 ml g⁻¹ extraction buffer (100 mM Tris 7.0、1 M NaCl、100 mM NaH₂PO₄、20 mM EDTA、1 % SDS) を添加
3. 1.3 ml g⁻¹ detergent mix (5 % sarkosyl、5 % cetyltrimethyl ammonium bromide) + 5 M potassium acetate (0.67 ml g⁻¹、pH5.2) を添加し、氷上で 15 分間静置
4. 試料溶液と同量の Chloroform/isopropanol (49:1) と混合後、遠心分離(7,100 g for 20 min)
5. 上清に 0.67 volume の isopropanol を添加し、遠心分離(16,000 g × 20 min)を行い、得られた沈殿物を乾燥し、滅菌水 120 µl に溶解したものを抽出 DNA 試料とする。

ベントナイトを含む試料については、DNA がベントナイトに吸着することによって抽出効率が低下するため、ベントナイト 1 g あたり 40 mg あるいは 400 mg のスキムミルクを添加し、浸漬液同様に抽出を行った。抽出 DNA 溶液は蛍光光度計 (Qubit 1.0、測定キット: ds DNA HS assay kit、Thermo Fisher Scientific 社) により濃度を測定した。

浸漬液中に含まれる微生物数の推定を行うために、抽出 DNA 溶液中の 16S rRNA 遺伝子 (全微生物量)、硫酸還元菌、メタン菌を対象とし、Real-time PCR (LightCycler ST300, Roche Diagnostic 社) を用いて TaqMan probe 法により浸漬液 1 ml 中の各遺伝子コピー数の定量を行った。プライマー濃度は 0.5 µM、PCR 反応は初期変性 (95 °C 10 分)、PCR 反応 (95 °C 10 秒、50 °C 45 秒、72 °C 1 秒) を 40 サイクルの条件で行った。各遺伝子を検出するためのプライマーおよびプローブは次のものを使用した。

全微生物の定量: 16S rRNA 遺伝子

プライマー Uni340F (5' -CCTACGGGRBGCASCAG-3')、Uni806R (5' -GGACTACNNGGTATCTAAT-3')
プローブ Uni516F (5' -TGYCAGCMGCCGCGTAHACVNRS-3') (Takai and Horikoshi, 2000)

硫酸還元菌の定量: 硫酸還元酵素をコードする遺伝子 *dsrA*

qdsrA-F (5' -GAATTCGCTGCTACGACTC-3')、qdsrA-R (5' -TCCTTCCAGGTACCGATGAC-3') を用い (Benomar et al., 2015)

メタン菌の定量: メタン生成反応を担う酵素の遺伝子 *mcrA*

mlas (5' -GGTGGTGTMGDDTTCACMCARTA-3')、mcrA-rev (5' -CGTTCATBGCCTAGTTVGGRTAGT-3') (Steinberg and Regan, 2008)。

浸漬液にて膨潤させる前の圧縮ベントナイトを初期値 (コントロール) として用い、DNA 抽

出および各遺伝子量の定量をおこなった。

浸漬液およびベントナイトに含まれる微生物種を明らかにするために、次世代シーケンサー (Illumina, MiSeq) を用いて、16S rRNA 遺伝子 V4 領域を対象とした解析に基づく微生物群集組成解析を行った。得られた遺伝子配列は QIIME パイプライン (Caporaso et al., 2010) によりクラスタリングおよび相同性解析をおこなった。

培養法による生菌数計数については、ベントナイト懸濁液 100 μ l を R2A 寒天培地 (Wako) に塗布し、好気条件下で 1 週間もしくは嫌気チャンバー内で 1 ヶ月培養を行い、培養終了後に形成されたコロニー数を計測した。試験はベントナイト懸濁液を原液とし、10 倍、100 倍希釈の溶液を調製し、それぞれ 3 連で実施した。対照として、圧縮前のベントナイトを同様に培養に供し、形成されたコロニー数を初期値とした。

表 2.2.1-9 浸漬試験における試料リスト

温度と カラム材質	乾燥密度	培養日数および諸条件
30 $^{\circ}$ C PEEK 製カラム	1.3 g cm^{-3}	培養日数 (30 日, 90 日, 180 日, 365 日) 植菌、非植菌 (各条件 n=3)
50 $^{\circ}$ C チタン製カラム		培養日数 (30 日, 90 日, 180 日, 365 日) 植菌、非植菌 (各条件 n=3)

2) 圧縮ベントナイトカラムを用いた炭素鋼片の腐食試験結果

表 2.2.1-3 に示す各設定期間の培養終了後、試験体内部で生じたメタンや水素に関わる微生物反応を推察するために、温度条件 30 $^{\circ}$ C の試料については密閉容器上部からガスを採取後、容器を開封し、浸漬液からカラムを取り出した。カラム開封後の圧縮ベントナイトについて代表的なものの写真を図 2.2.1-51 に示す。30 $^{\circ}$ C の培養試験において、培養期間 6 ヶ月以降のベントナイトカラムでは VMC の添加の有無に関わらず、表面およびベントナイト内部において炭素鋼周辺を中心に黒色への変化が見られた。それぞれの試験で回収した圧縮ベントナイトを解体し、取り出した炭素鋼片を Clark 溶液で洗浄後、表面観察を行うとともに重量を測定した。試験後の炭素鋼片の重量と初期の炭素鋼片の重量の差分 (重量減損) を算出し、腐食量として取りまとめた。圧縮密度 1.3 g cm^{-3} において、植菌の有無に関係なく腐食が緩やかに進行し、6 ヶ月後には腐食量が 10~20 mg foil⁻¹ 程度となった (図 2.2.1-52)。圧縮密度 1.0 g cm^{-3} の条件下にて腐食試験期間 1 年後の VMC を添加した試料では、顕著に腐食が進行し (74.9 mg foil⁻¹)、炭素鋼表面には多数の腐食孔が存在し、腐食孔が 0.5 mm 厚の炭素鋼片を貫通している部分も観察されたが (図 2.2.1-53)、圧縮密度 1.3 g cm^{-3} の条件下における腐食量は圧縮密度 1.0 g cm^{-3} における腐食量よりも小さく、短期間で著しい腐食反応は生じなかった (図 2.2.1-53)。また炭素鋼片の表面観察結果からも、圧縮密度 1.3 g cm^{-3} では 1 年の短期間においては VMC に含まれる微生物による顕著な腐食促進は生じていないと考えられた。

50 °Cの試験条件下では、圧縮ベントナイトの表面および内部に黒い変色は観察されなかった（図 2. 2. 1-54）。また、炭素鋼片の重量減損の計測の結果、植菌の有無に関わらず緩やかに腐食が進行し、1年間での腐食量としては約 20 mg foil⁻¹であった（図 2. 2. 1-55）。平成 28 年度までに得られた結果として、1年間での腐食量が 1.0 g cm⁻³では 18 mg foil⁻¹、1.6 g cm⁻³では 15 mg foil⁻¹程度であり（図 2. 2. 1-55）、平成 29 年度に取得された 1.3 g cm⁻³の腐食量と同程度であるとともに、50 °Cの試験条件においては検討した密度範囲 1.0~1.6 g cm⁻³において微生物による腐食促進作用が抑制されることが推定された。炭素鋼表面の SEM 観察からも 30 °C試験と比較して、凹凸は少なく、顕著な腐食が進んでいないことが確認された。環境中から採取した VMC は培養温度 30 °Cで集積したものであるため、50 °Cの試験条件下では微生物活性が抑制された可能性も考えられるが、一般的に高温環境下では微生物活性が低下するため、温度条件により腐食への影響が抑制されたことが要因であると推定される。

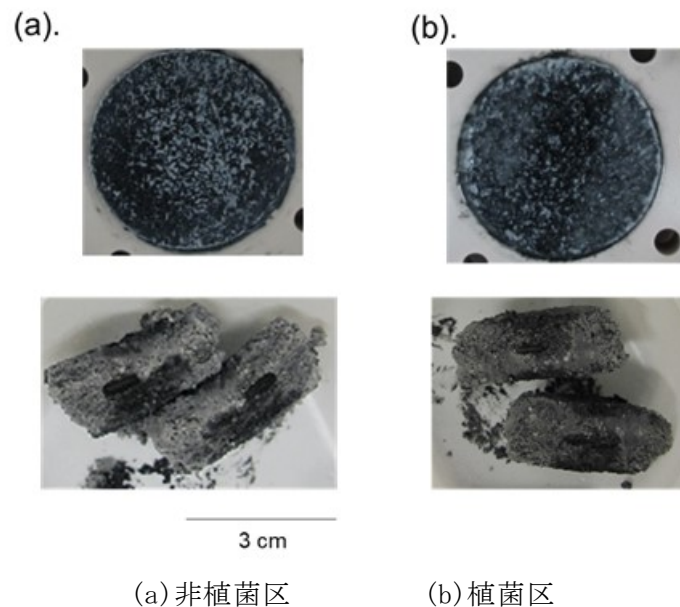


図 2. 2. 1-51 浸漬終了後の代表的なベントナイト試料(30 °C、1.3 g cm⁻³、6 ヶ月)

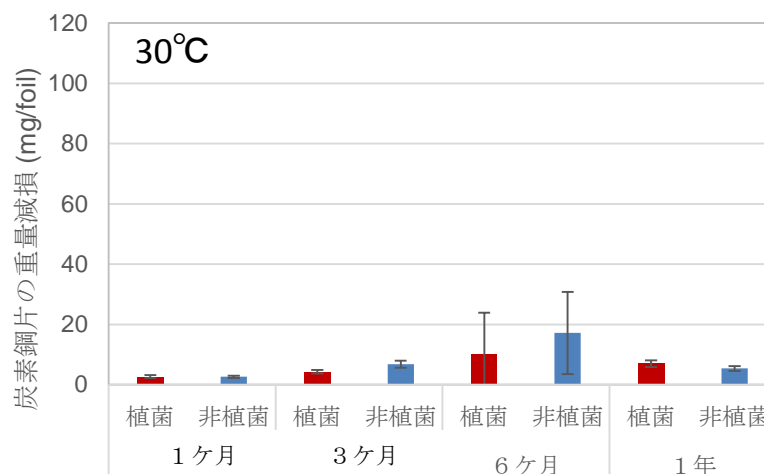


図 2. 2. 1-52 炭素鋼片の重量減損

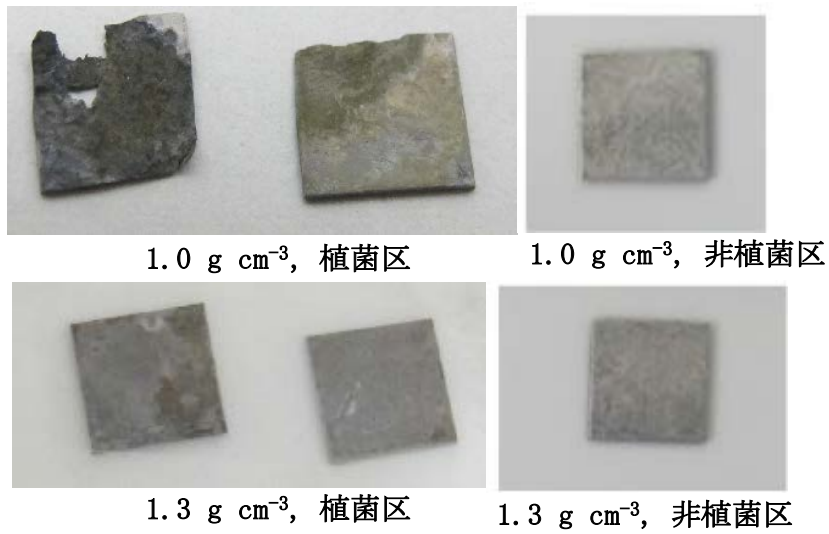


図 2. 2. 1-53 浸漬試験 1 年後の炭素鋼片

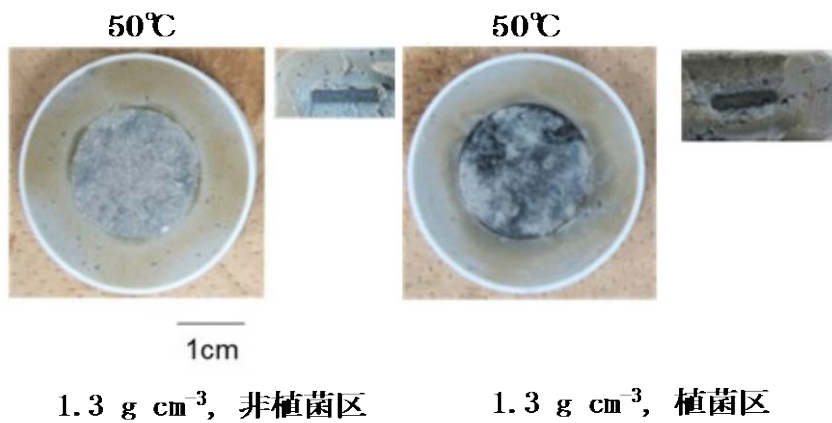


図 2. 2. 1-54 浸漬終了 6 ヶ月後のベントナイト試料

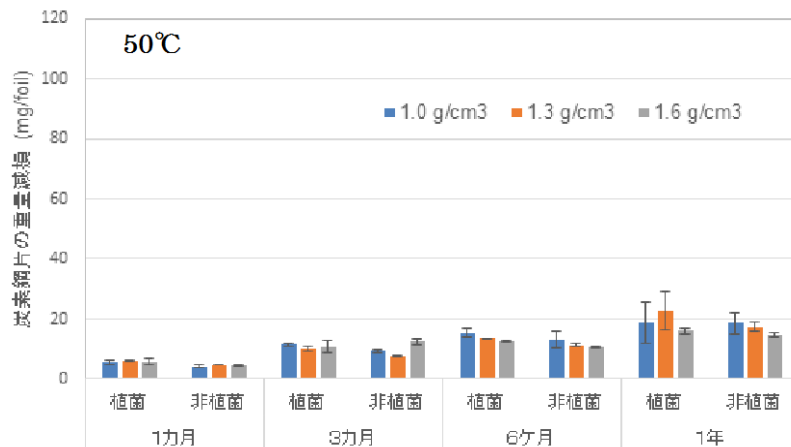


図 2. 2. 1-55 異なる圧縮ベントナイト密度条件における炭素鋼腐食量

炭素鋼腐食に関与する微生物反応を推定し、腐食に影響を及ぼす微生物反応とそのメカニズムの解明に反映させるため、浸漬液成分、気相部のガス組成を分析し、微生物の代謝生成物および消費物を評価した。その結果、30℃試験においては、浸漬液中の初期値 53.5 mM の乳酸が植菌区では 1 ヶ月後に完全に消費されるとともに、酢酸が検出され、生成された酢酸は 3 ヶ月以降に緩やかな減少が確認されたことから、乳酸の消費に伴い酢酸が生成される反応が活発に進行していることが示された (図 2.2.1-56)。一方、非植菌区においても浸漬液中の乳酸の減少が見られ、ベントナイトカラム表面に付着した微生物もしくはベントナイト内部に潜在する微生物により乳酸が分解されたことが推定された。しかし、その消費速度は植菌区と比較して遅く、植菌区では培養 1 ヶ月後には乳酸が検出されなかったのに対して、非植菌区では乳酸の残存が認められた。また、各試料における浸漬液中の硫酸イオン (初期値 3,000 ppm) は植菌区では、1 ヶ月から 3 ヶ月の間に大きく減少した後、ほぼ変化がなかった一方で、非植菌区では 3 ヶ月から 1 年の間に連続的に減少した (図 2.2.1-56)。硫酸イオンの減少とともに、気相部の硫化水素が増加したことから (図 2.2.1-57)、植菌区においてより活発に硫酸還元菌が増殖していることが推定された。培養開始時の気相部は窒素で充填されているが、気相部のガス測定の結果、試験期間 1 ヶ月までに植菌の有無に関わらず、乳酸の分解に伴った CO₂ の発生が検出され、植菌区においてはメタンガス、非植菌区では水素の発生が検出された (図 2.2.1-57)。植菌区においては CO₂ を消費し、メタンを生成するメタン菌の増殖が示唆された。これまでの解析から、腐食に関与する菌として硫酸還元菌やメタン生成菌が VMC に含まれていることが明らかとなっており (平野ら, 2015)、本研究で取得したデータからも、硫酸還元菌およびメタン菌が浸漬液中で増殖していることが推定された。平成 28 年度に得られた 1.0 g cm⁻³、1.6 g cm⁻³ の試験においても、培養期間 1 年後では乳酸が完全に分解され、硫酸イオンが 1,500 ppm 前後まで消費されるとともに硫化水素、メタンガスの発生が検出されており、浸漬するベントナイトカラムの密度に寄らず同様の微生物代謝が起きていることが確認された。

50℃の試験条件においては、30℃での試験と比較してベントナイト圧縮条件によらず浸漬液中での乳酸分解は遅く、植菌区・非植菌区ともに試験期間 1 年を経過しても残存していた (図 2.2.1-58)。硫酸イオンは試験期間 1 ヶ月から 1 年の間において全ての試料において大きな変化は見られなかった (図 2.2.1-58)。したがって、50℃の試験区においては、30℃と比べ、浸漬液中での硫酸還元反応を含む微生物の増殖・活性が抑制されていることが示唆されるとともに、この傾向は異なる密度のベントナイトカラムを用いた試験と同様の結果であったことから、浸漬液中で増殖する微生物群が比較的近似していることが示された。

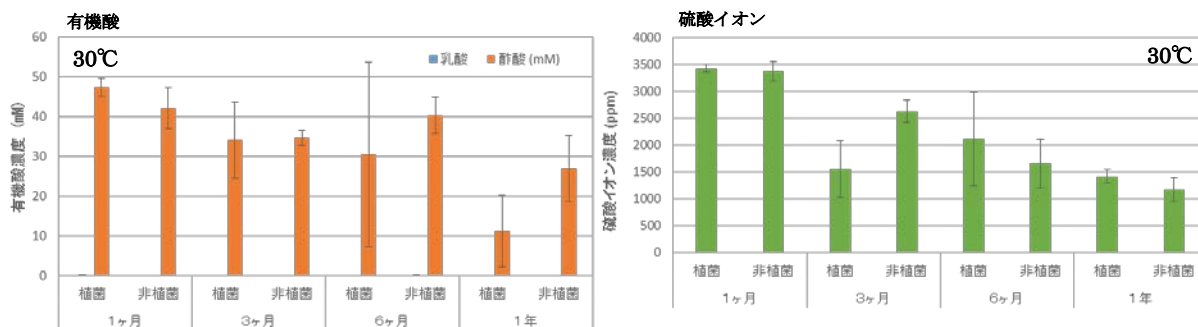


図 2. 2. 1-56 浸漬液中の化学成分の分析結果

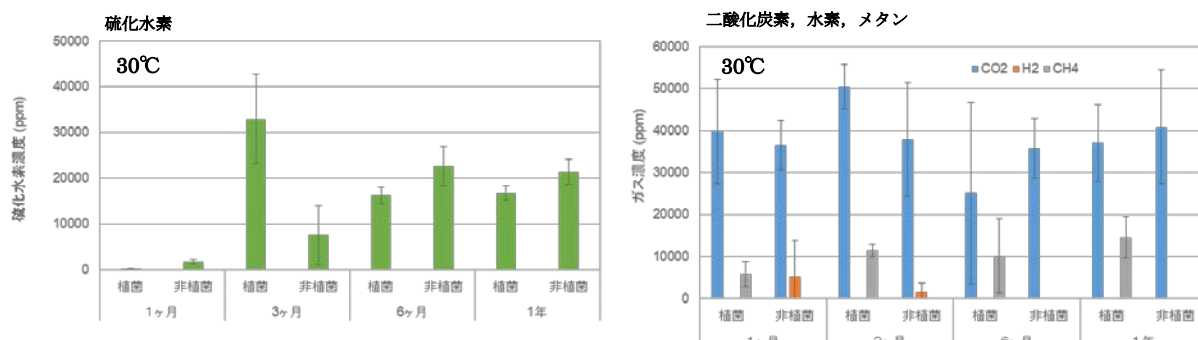


図 2. 2. 1-57 気相部のガス成分の分析結果

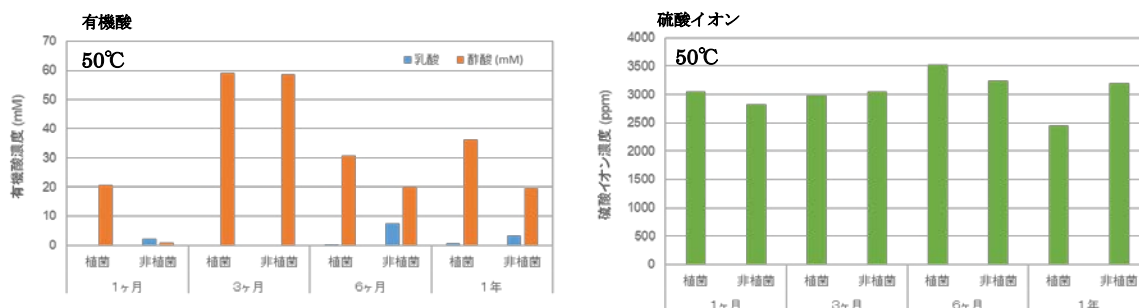


図 2. 2. 1-58 浸漬液中の化学成分の分析結果

圧縮ベントナイト中での微生物の増殖・生存を評価するために、反応試験後のベントナイトの一部を R2A 寒天培地に塗布し、好気・嫌気条件下で 1 ヶ月間培養した後、寒天培地上に形成されたコロニーの数 (CFU) を生菌数として評価した (図 2. 2. 1-59)。その結果、培養開始前のベントナイトに含まれる初期生菌数は好気・嫌気性菌ともに 3.3×10^1 colonies g^{-1} であったのに対して、30 °C 試験においては好気性菌の生菌数の変化は見られなかったが、嫌気性菌は $10^2 \sim 10^4$ colonies g^{-1} の高い生菌数が観察された。この嫌気性菌の高い生菌数は、膨潤後には外部から微生物の移行が困難になると推定されるベントナイト圧縮密度の高い条件 (1.6 g cm^{-3}) や非植菌区においても見られたことから、浸漬液から増殖菌体が侵入しただけではなく、ベントナイト内部にもともと存在した嫌気性菌が栄養成分の侵入により増加したことが反映されていると考えられる。R2A 培地を用いてコロニー形成が確認された嫌気性菌

については、その特性やベントナイト内における腐食反応への寄与は未解明であるが、温度 30 °C・圧縮密度 1.0 g cm⁻³の条件下にて嫌気性菌の生菌数が顕著に増加していることから、これらの菌は6ヵ月から1年間の間に著しく進行した腐食反応に関与している可能性がある。一方、50 °C試験では大きな生菌数の増加は認められず（最大で 10² colonies g⁻¹程度）、1年の試験後では生菌数が減少していることが示された。この結果は、上述の炭素鋼腐食量や代謝産物の試験結果から推測された微生物活性の低さと一致するものである。地下水を用いた Stroes-Gascoyne ら(2010)の類似試験では、圧縮密度に関わらず嫌気性微生物は検出されず、好気条件においても 1.6 g cm⁻³の圧縮密度条件ではほぼ増殖が観察されないという結果が示されている。また、国内における微生物影響の検討例の中で、西村ほか(1999)は、単離された硫酸還元菌や鉄酸化菌、あるいはベントナイト中にもともと存在している微生物を対象として、圧縮ベントナイト密度 0.6、1.8 g cm⁻³（ベントナイトのみ）および 1.6 g cm⁻³（ベントナイト 70 %+ケイ砂 30 %）、温度 30 °Cの条件下でベントナイト内部での硫酸還元菌増殖や炭素鋼腐食に関する試験をおこなっている。その結果、2週間の培養期間内ではいずれの条件下においても硫酸還元菌の密度は初期と同レベルか検出未満であり、また、3ヵ月間の腐食試験結果から、ベントナイト中の硫酸還元菌はいずれも検出未満であり、炭素鋼腐食も微生物添加の有無で大きな変化が見られなかったことから、微生物の腐食影響の可能性は低いと報告されている。一方で、本研究では温度条件により検出の違いはあるものの、1.6 g cm⁻³の圧縮密度条件においても培養法により生菌が検出された。これら既報と本研究での結果の差異が生じた要因として、培養期間の違いや珪砂の含有量の違い（すなわち緩衝材中のモンモリロナイト密度の含有量）による膨潤圧や水分活性の違いが挙げられる。前者については、既存の報告に関わる培養試験期間が3ヵ月であるのに対し、本事業で行った試験は1年間の培養期間を設けたことから、長期的な視点では圧縮ベントナイト中で微生物活性が維持されている可能性が指摘された。このような増殖活性は長期にわたって継続するのか、あるいはある程度の対数増殖期を経過すれば定常期・死滅期に入り、微生物活性が低下するのかについては、今後確認する必要がある。また、高密度の圧縮ベントナイト中ではベントナイトのフィルトレーション効果により外部から微生物が侵入できないと想定されている（核燃料サイクル開発機構, 1999）が、本研究では 1.6 g cm⁻³の圧縮密度条件においても植菌区および非植菌区の両条件下で微生物が検出されており、これらの微生物が緩衝材の膨潤過程で増殖したのか、あるいは膨潤過程で侵入した微生物が、緩衝材の微細な空隙を住みかとして増殖したのかについても今後評価が必要であると考えられる。これらの研究結果から、日本で検討されている緩衝材に対する圧縮ベントナイト中の微生物活性と膨潤圧、水分活性、住みかとしての空隙サイズの関係性については、今後データを拡充し、詳細な検討を行う必要がある。一方で、環境中で培養可能な種は1%未満であると考えられていることから、培養法に依存した微生物活性評価には限界がある。既存の知見との比較の観点から、培養法による圧縮ベントナイト中の微生物活性評価は重要であると考えられるが、培養法に依存しない DNA 解析などの分子生物学的手法を用いた評価も並行して行う必要がある。

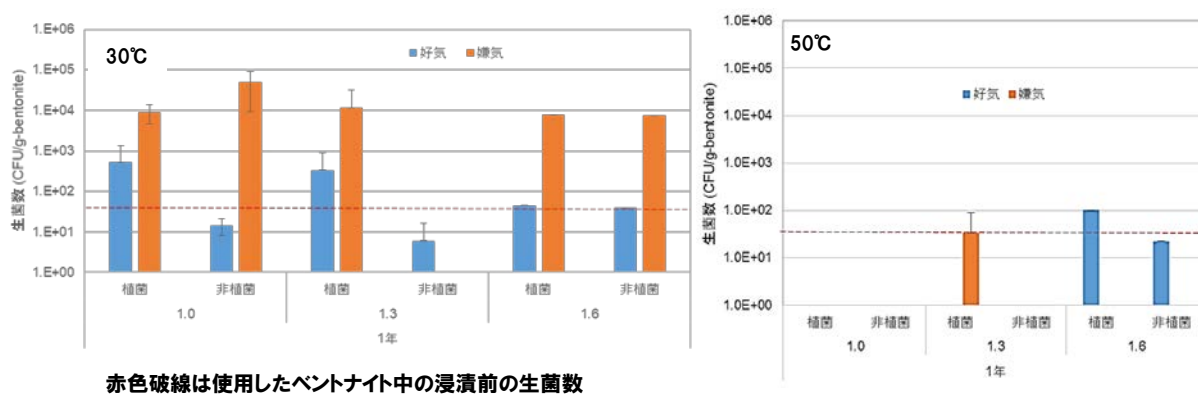


図 2.2.1-59 コロニーカウントによる培養法にて取得した圧縮ベントナイト中の生菌数

3) ベントナイト内に含まれる微生物量と代謝反応の推定

試験を実施した圧縮ベントナイト内での微生物量を推定するため、ベントナイト試料から DNA を抽出し、微生物量の推定を行った。平成 28 年度までに実施した DNA 量測定結果は、圧縮ベントナイトカラムの浸漬液からは $0.1 \sim 1.6 \mu\text{g mL}^{-1}$ 程度の DNA (細胞数では $10^9 \sim 10^{10} \text{ cells mL}^{-1}$ に相当) が抽出されている一方で、炭素鋼近傍のベントナイトより抽出された DNA は定量限界未満であった。そこで、平成 29 年度は粘土質であるベントナイトを考慮した上で DNA 抽出法の改善を試みた。改善法の検討には、大腸菌 *E. coli* JM109 株を培養した培養液 ($10^8 \text{ cells mL}^{-1}$ 程度の菌体密度) を用いた。その結果、ベントナイト中に既知密度の大腸菌が存在するにも関わらず、従来の Power soil DNA isolation kit を用いた場合には、ベントナイトから DNA は抽出できず、スキムミルクを添加した場合において DNA は回収されたが、検出下限に近い量であった。一方、改善法を適用した場合にはスキムミルクの添加の有無に関わらず、従来法の 10 倍を超える DNA の回収量が得られた (表 2.2.1-10)。さらに、スキムミルクを添加することにより DNA 回収量は増加し、その添加量増加 (40 mg g^{-1} から 400 mg g^{-1}) に応じて DNA 回収量は増加した。しかしながら、抽出時に 400 mg g^{-1} のスキムミルクを添加した試料の抽出 DNA は PCR 増幅が見られなかったことから、スキムミルク由来の成分が PCR における DNA 増幅反応を抑制している可能性が考えられた。よって、圧縮ベントナイトを用いた長期腐食評価試験で得られたベントナイト試料の DNA 抽出には 40 mg g^{-1} のスキムミルクを添加する改善法を適用することとした。本手法を平成 28 年度の試験で得られたベントナイト試料 (密度: 1.0 g cm^{-3} 、 1.6 g cm^{-3} 、温度 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $50 \text{ }^\circ\text{C}$) に適用したところ、平成 28 年度までのキットを使った抽出検討では測定限界未満の量しか回収できなかったのが、改良法を適用した場合には顕著に回収率が向上し、植菌区、非植菌区に関わらず DNA 解析に必要な DNA 量を確保することができた。

表 2. 2. 1-10 ベントナイト試料中の DNA 濃度

	DNA濃度 ($\mu\text{g/g-bentonite}$)	PCR
PowerSoil DNA isolation kit	×	×
PowerSoil Kit + スキムミルク (40 mg/g)	0.02	○
+スキムミルク (400 mg/g)	×	×
改良法	0.23	○
改良法+スキムミルク (40 mg/g)	0.39	○
+スキムミルク (400 mg/g)	0.65	×
改良法+ RNA (40 mg/g)	×	×
+ RNA (400 mg/g)	×	×

上述の手法で抽出した DNA 試料を用いて、ベントナイト試料および浸漬液中の全菌、硫酸還元菌、およびメタン菌の定量を行った。これまでに実施した異なる乾燥密度条件下での腐食試験を対象として、抽出 DNA 試料を解析した結果、多様な微生物種がベントナイト内外に存在した場合においても、乾燥密度が高くなるにつれて全菌体および硫酸還元菌の密度が明瞭に低下する傾向が示された (図 2. 2. 1-60、61、62)。特に乾燥密度 1.0 g cm^{-3} 、 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ の条件下では、試験開始から 6 ヶ月以降、菌体密度が著しく増加しており、1 年後の植菌区において硫酸還元菌の増殖も認められているが、乾燥密度増加とともに微生物増殖が抑制される傾向が確認された。 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ においても、高乾燥密度が微生物の増殖を抑制する傾向は認められ、同じ乾燥密度の試験条件下では、 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ と比較すると全菌密度、硫酸還元菌密度、メタン菌密度ともに増殖が抑えられていることが示された。 1.0 および 1.3 g cm^{-3} の圧縮密度条件のベントナイトカラム内では、VMC 非植菌の試験条件においても、硫酸還元菌の増殖が認められており、もともとベントナイトに存在していた微生物が増殖したことが推定された。 1.0 g cm^{-3} と比較すると、 1.3 g cm^{-3} の乾燥密度条件下の方がベントナイト内での微生物増殖が抑制される傾向が示されたが、 1.6 g cm^{-3} の条件下と比較すると微生物密度は高いことから、1 年を超える長期において硫酸還元菌が増殖した場合には腐食が急激に進行する可能性がある。メタン菌については、 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ と比較すると $50 \text{ }^\circ\text{C}$ の温度条件下の方が増殖が抑制されていることが示されたが、 1.6 g cm^{-3} においてもやや増加が認められた。これらの結果から、金属腐食の影響を低減させるためには、ベントナイトの膨潤時の周辺環境 (特に地下水中) の微生物密度が低いことに加えて、温度および乾燥密度が極めて重要な因子であることが明らかになった。

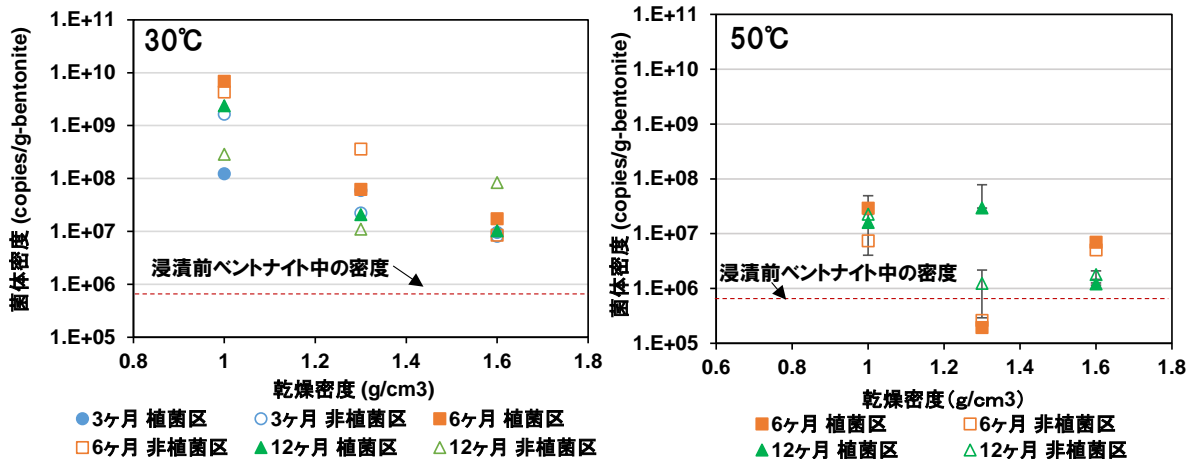


図 2.2.1-60 圧縮ベントナイト中の微生物の全菌体密度

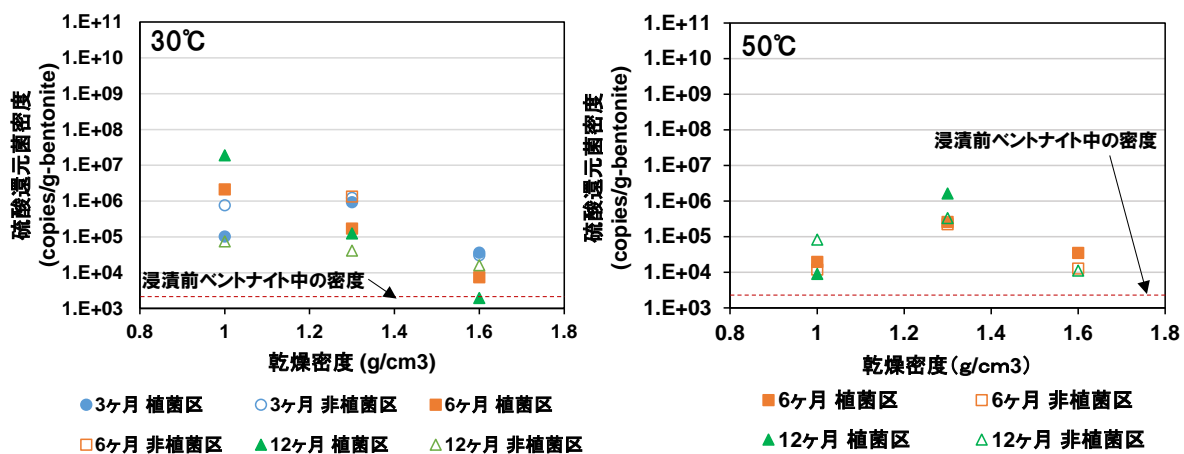
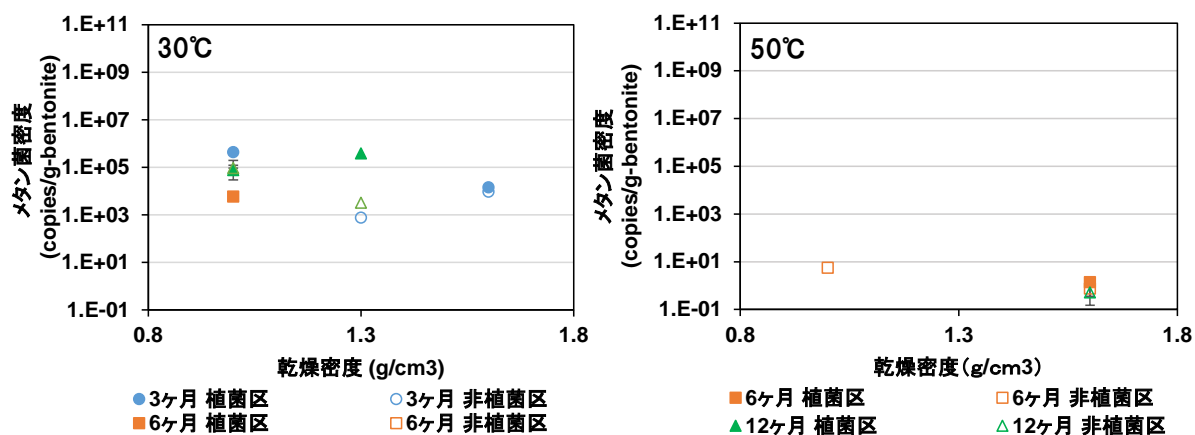


図 2.2.1-61 圧縮ベントナイト中の硫酸還元菌密度



腐食試験前のベントナイト中のメタン菌密度は検出下限値以下

図 2.2.1-62 圧縮ベントナイト中のメタン菌密度

4) 人工バリア内における微生物活性の抑制要因と微生物腐食メカニズム

本研究で実施した圧縮ベントナイトを用いた腐食試験の結果から、日本において想定されているベントナイト（クニゲル V1）およびケイ砂の混合物（7：3）を人工バリアの緩衝材とし、緩衝材の浸漬溶液に高濃度の微生物群集が存在する条件下で試験を実施した場合、1年間の試験期間においては、 1.3 g cm^{-3} 以上の圧縮ベントナイト密度条件下では腐食が進行していないことが示された（図 2.2.1-63）。しかしながら、 1.0 、 1.3 g cm^{-3} の条件においては、圧縮ベントナイト内部で全菌量および硫酸還元菌量の増加が認められており、またメタン菌については 1.6 g cm^{-3} の条件においても初期濃度と比較して増殖が確認された（図 2.2.1-64）。 1.0 g cm^{-3} の条件下にて実施した腐食試験結果から、 $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ の条件下で6ヵ月～1年間の間に著しい腐食進行が認められたことから、ベントナイト内部で微生物が増殖している場合には、ある段階において急激な腐食進行が起こる可能性がある。平成 27 年度～平成 29 年度の試験結果から、本研究において処分容器の腐食を促進した微生物反応としては、硫酸還元反応が主反応であり、メタン菌による腐食反応は、これらの菌が鉄（処分容器やベントナイト中の鉄）と接触する環境下で生じ易くなることが示された。一方で、近年嫌気環境下で腐食影響が懸念されている酢酸生成菌については、本研究で実施した試験系において酢酸生成は認められたが、その大部分は乳酸分解に起因するものと考えられ、鉄酸化に伴う水素を利用した酢酸生成がどの程度腐食に寄与したのかに関する詳細な知見は得られていないことから、今後評価手法の検討も含めて行う必要がある。また、本研究で実施した腐食試験の浸漬液中には、微生物増殖を促進するために高濃度の硫酸イオンを添加し、硫酸還元反応が生じやすい条件下で試験を実施しており、実際の地下環境における地下水条件とは異なることから、今後は、原位置の地下環境を模擬した条件で試験データを取得し、微生物が関与する腐食メカニズムを評価することが求められる。

既存の報告（例えば Stroes-Gascoyne et al., 2010）では、微生物活性を抑制する要因として、圧縮ベントナイト密度が挙げられているが、本研究結果においても温度と圧縮ベントナイト密度が微生物活性において重要であることが確認された。諸外国ではこれまでの室内・原位置試験の知見に基づき、緩衝材内部において微生物活性を抑制する条件として、水分活性 $a_w < 0.96$ 、膨潤圧 $> 2 \text{ MPa}$ に維持することが望ましいとしており、そのためには MX-80 Wyoming bentonite (100 %) を用いた場合において 1.6 g cm^{-3} 以上の乾燥密度を保持するか、あるいはベントナイト中の間隙水の塩分濃度を $\leq 50 \text{ g L}^{-1}$ あるいは $> 100 \text{ g L}^{-1}$ に保つことが重要であるとされている（例えば Stroes-Gascoyne et al., 2010）。膨潤圧が高くなればなるほど緩衝材中の水分活性が低下し、かつ空隙サイズも微小になることから、微生物の居住空間としては極めて過酷な環境となることが予想される。MX-80 Wyoming bentonite (100 %) を緩衝材として用いた場合、乾燥密度 1.6 g cm^{-3} での膨潤後の空隙サイズは間隙水の塩分濃度の増加に伴い大きくなるものの、 $0.005 \sim 0.1 \text{ } \mu\text{m}$ の範囲（平均値； $0.02 \text{ } \mu\text{m}$ ）で分布することが示されている（Stroes-Gascoyne et al., 2010）。一般的に、微生物（ここでは細菌と古細菌）の最小サイズは $0.2 \sim 0.3 \text{ } \mu\text{m}$ と考えられており、これは生命活動を維持するために必要な生体分子（細胞膜やタンパク質、リボソーム、ゲノム DNA など）を含むサイズという観点からも妥当な大きさである。しかしながら、微生物の中には、 $0.2 \text{ } \mu\text{m}$ 以上のサイズ径を有している場合であっても、その細胞のしなやかさによって 0.1 あるいは $0.2 \text{ } \mu$

m 孔径のフィルターを通過したり (Wang et al., 2008)、環境状態によってサイズを変えるものが存在する (Kuhn et al., 2014)。ただし、それらの微生物サイズや生態は特殊なケースであり、それを踏まえたとしても、緩衝材の空隙サイズが $0.1 \mu\text{m}$ より小さい場合には、微生物の増殖は制限されるものと考えられる。一方で、海外で検討されている MX-80 や日本におけるクニゲル V1、クニピア F などの様々な種類のベントナイトやベントナイトとケイ砂混合の緩衝材の特性を比較するために、緩衝材中のモンモリロナイト含有量を指標とした「有効モンモリロナイト乾燥密度」を用いて整理する試みがなされており (佐藤, 2009)、クニゲル V1 (70 %) とケイ砂 (30 %) の混合物を緩衝材とした場合には、有効モンモリロナイト乾燥密度は 1.0 g cm^{-3} 程度であり (ベントナイト中のモンモリロナイト含有率 0.59 の場合)、MX-80 (100 %) の場合に微生物活性が抑制される乾燥密度 1.6 g cm^{-3} は有効モンモリロナイト乾燥密度にして 1.4 g cm^{-3} であることから、日本で検討されているベントナイトおよびケイ砂の混合物を緩衝材として用いた場合には、MX-80 (100 %) の場合と比べると膨潤圧や水分活性条件が微生物抑制に十分でない可能性がある (図 2.2.1-65)。さらに、ケイ砂を混合することによりマクロ空隙が形成され、乾燥密度 1.97 g cm^{-3} で $10 \mu\text{m}$ 、 1.6 g cm^{-3} で $50 \mu\text{m}$ 程度の大きい空隙サイズが存在することが報告されている (Wang et al., 2013; Cui, 2017)。この程度の空隙は微生物増殖が可能なサイズであり、膨潤圧が飽和に達するまでの緩衝材の膨潤過程において緩衝材中に微生物が侵入した場合、あるいは膨潤過程でもともとベントナイト中に存在する微生物に水分が供給された場合には、これらの空隙を利用して微生物が増殖する可能性がある。膨潤圧や水分活性の観点からも日本で検討されている緩衝材を対象とした微生物活性のデータを拡充することが重要であると考えられる。一方で、地層処分場に廃棄体や緩衝材を設置した直後は、オーバーパックおよび緩衝材近傍の温度は約 $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、水分が飽和に達する約 10~100 年後も温度は $90\sim 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度となることが予測されており (鈴木ほか, 2012)、微生物増殖に適した環境ではないと予測されるが、緩衝材膨潤過程や膨潤後の温度が低下するフェーズにおける微生物活性の可能性を評価するためにも、様々な条件を想定したデータの拡充が必要であると考えられる。

本研究成果から、日本で検討されている緩衝材料を用いて、微生物群集存在下において炭素鋼腐食および圧縮ベントナイト内部における微生物増殖に関するデータを取得し、温度および乾燥密度が重要な因子であることを示した。また、腐食に関連する微生物代謝は硫酸還元反応が主要であるが、条件によってはメタン生成反応に伴う鉄腐食も生じることが示された。今後は、本研究で得られたデータの再現性を確認する必要があるとともに、より処分環境に近い様々な条件下 (1.6 g cm^{-3} 以上の高乾燥密度、 $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上の高温条件など) におけるデータを実際の地下環境における原位置試験も含めて拡充し、微生物影響を膨潤圧・水分活性・空隙サイズ・温度・栄養塩濃度などの様々な要因から評価していく必要がある。

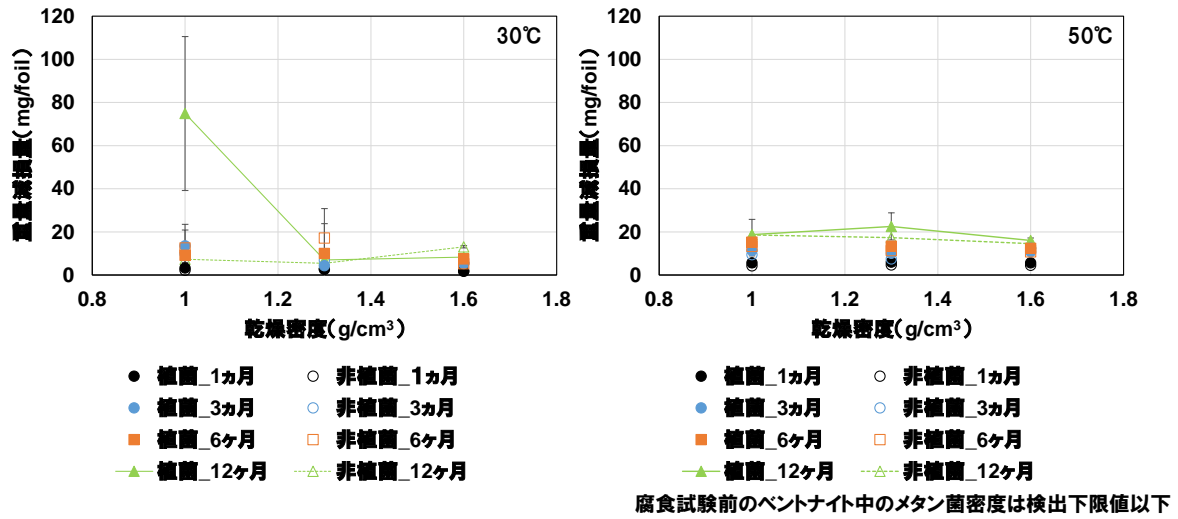


図 2. 2. 1-63 異なる乾燥密度条件下における炭素鋼片の重量減損量

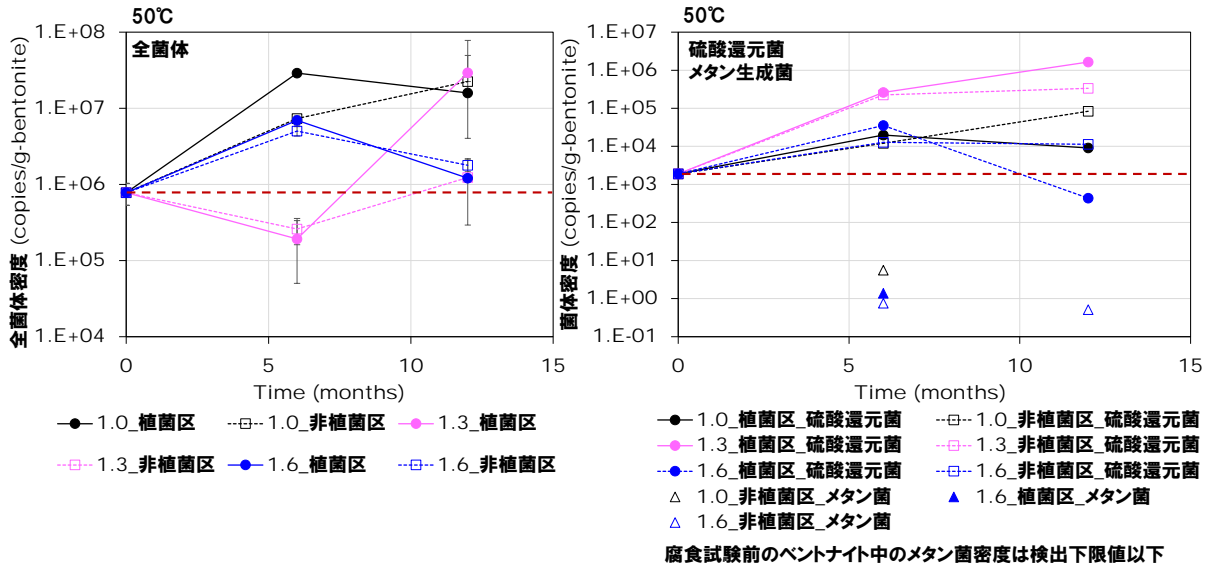


図 2.2.1-64 異なる乾燥密度条件下における各微生物増殖の経時変化

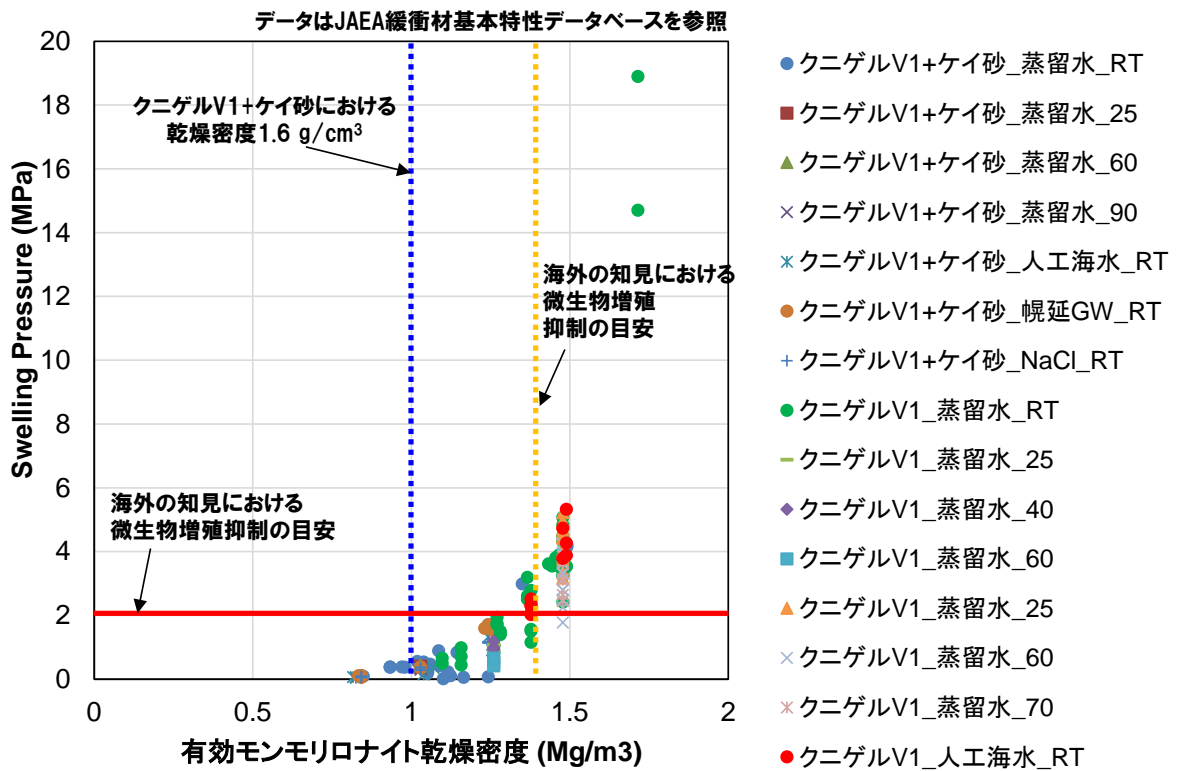


図 2.2.1-65 有効モンモリロナイト乾燥密度と膨潤圧の関係

(4) 緩衝材中の C-14 移行挙動試験

使用済燃料や放射化された金属材料中に含まれる C-14 は、人工バリアや岩盤への収着性が低いと予測されることから、使用済燃料の直接処分における安全評価上の被ばく線量に大きく寄与する重要な核種となることが考えられる。これまでの研究より、これらより放出される C-14 は、無機および有機の両形態が存在し、有機形態で存在する C-14 は、分子量の小さいアルデヒド類、カルボン酸、アルコール類などと報告されている (Kaneko et al., 2003)。そのため、有機、無機化合物に関する収着拡散データを拡充し、化学形態や分子量の違いによる C-14 の人工バリアや岩盤中での収着拡散挙動の変化について把握する必要がある。

本研究では、拡散係数がほとんど報告されていない分子量の小さい有機化合物について、圧縮ベントナイトに対する透過拡散試験を実施して実効拡散係数を取得する。平成 28 年度までに、乾燥密度 0.8 および 1.4 Mg m⁻³ の圧縮ベントナイトに対し、酢酸イオン (CH₃COO⁻) の実効拡散係数の実測値を取得した。また、どちらの乾燥密度においても、酢酸イオンの実効拡散係数は、ヨウ化物イオンの同条件での実効拡散係数を両イオンの自由水中の拡散係数の比によって補正することにより推測可能であることを示した。

平成 29 年度は、乾燥密度 1.4 Mg m⁻³ の圧縮ベントナイトに対して、同じカルボン酸であるものの、酢酸イオンとは分子量が異なる酪酸イオン (C₃H₇COO⁻) の実効拡散係数を取得し、分子量の違いによるカルボン酸の拡散挙動の違いについて検討を行った。また、カルボン酸とは化学形態の異なる有機化合物であるアルコールの一種であるブタノール (C₄H₉OH) の実効拡散係数を取得し、化学形態の違いによる拡散挙動の違いについて検討を行った。

以下、実施内容を、「1) 試験手法」、「2) 解析手法」、「3) 試験結果」の順で説明する。

1) 試験手法

拡散試験には、C-14 で標識された酪酸ナトリウムをトレーサーとして使用し、試験溶液は、0.5 mol l⁻¹ の NaCl 溶液とした。試験溶液の pH は、酪酸ナトリウムを用いた試験については、圧縮ベントナイト間隙水の pH として想定される pH8 付近とし、大気中の二酸化炭素の混入による pH 低下を抑えるため、窒素雰囲気グローブボックス内で実施した。pH8 付近においては、酪酸ナトリウムはほぼ酪酸イオンとナトリウムイオンに解離しており、得られる実効拡散係数は酪酸イオンのものとなる。ブタノールの試験については、pH の変化による化学形態の変化がほとんどないため大気下で実施し、pH 調整は行わなかった。試験には、精製モンモリロナイトであるクニピア F を使用し、乾燥密度は 1.4 Mg m⁻³ とした。試験は、同条件の 2 試料 (試料 1、試料 2) を作製して実施した。

試験は、循環型の透過拡散試験装置を用いて実施した (原子力機構, 2016)。酪酸イオンの拡散試験については、平成 28 年度までの酢酸イオンの試験と同様の手順で、クニピア F の充填、含水飽和を行い、酪酸イオンと拡散挙動を比較するため、同じ陰イオンの形態で拡散するヨウ化物イオン (I⁻) の拡散試験を最初に実施した (原子力機構, 2017)。その後、酢酸ナトリウムの代わりに C-14 で標識された酪酸ナトリウム溶液を使用して酪酸イオン (C₃H₇COO⁻) の拡散試験を実施した。試験では、試験装置に接続されている高濃度側容器中の溶液は定期的に採取、低濃度側容器中の溶液は別の容器と定期的に交換して C-14 の放射能濃度を測定し、C-14 の濃度変化より酪酸イオンの実効拡散係数を算出した。ブタノールの拡散試験につ

いても、酪酸イオンの試験と同様の手順で実施した。ただし、ブタノールは電氣的に中性であることから、ブタノールとの拡散挙動を比較するため、ヨウ化物イオン (I⁻) の代わりに電氣的に中性である重水を用いて拡散試験を実施するとともに、ブタノールの拡散係数を取得するため、C-14 で標識された酪酸ナトリウム溶液の代わりに C-14 で標識されたブタノール溶液を使用して試験を実施した。

2) 解析手法

実効拡散係数 D_e は、フィックの第一法則に基づいて、低濃度側溶液の濃度変化より算出した定常状態におけるトレーサーのフラックス J と高濃度側溶液中のトレーサー濃度 C_H より式 2.2.1-8 に従って算出した。(原子力機構, 2016)

$$D_e = -J \cdot \frac{L}{C_H} \dots \dots \dots \text{式 2.2.1-8}$$

ここで、 L はベントナイト厚さである。また、実効拡散係数は、トレーサーの自由水中の拡散係数 D_0 と式 2.2.1-9 の関係で表される。

$$D_e = FF \cdot D_0 \dots \dots \dots \text{式 2.2.1-9}$$

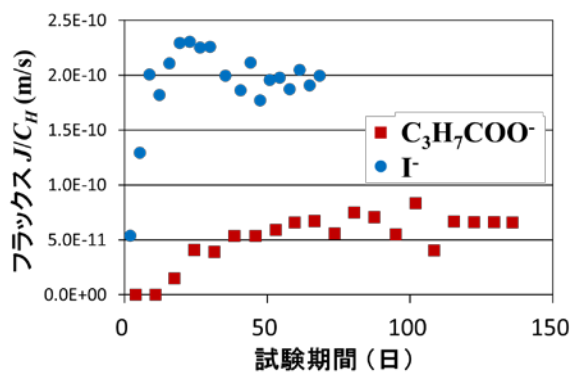
ここで、 FF は形状因子である。2 種類のトレーサー間において形状因子が一致する場合、自由水中の拡散係数の違いを元に、両トレーサー間の実効拡散係数の関係を式 2.2.1-8 の形で記述することが可能である。式 2.2.1-10 は、酢酸イオンとヨウ化物イオンを例とした関係式である。

$$D_e^{CH_3COO^-} = \frac{D_0^{CH_3COO^-}}{D_0^{I^-}} \cdot D_e^{I^-} \dots \dots \dots \text{式 2.2.1-10}$$

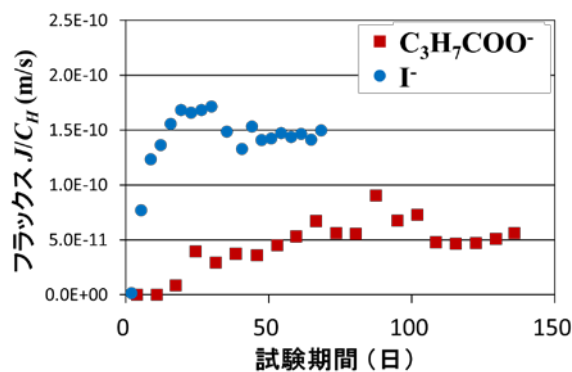
ここで、 $D_e^{CH_3COO^-}$ は圧縮ベントナイト中の酢酸イオンの実効拡散係数、 $D_e^{I^-}$ は圧縮ベントナイト中のヨウ化物イオンの実効拡散係数、 $D_0^{CH_3COO^-}$ は自由水中の酢酸イオンの拡散係数、 $D_0^{I^-}$ は自由水中のヨウ化物イオンの拡散係数である。

3) 試験結果

まず、低濃度側溶液へ透過したヨウ化物イオン、酪酸イオンのフラックスの時間変化を図 2.2.1-66 に示す。トレーサーのフラックスは、高濃度側溶液中のトレーサー濃度により規格化した値を示す。試験期間中に、高濃度側溶液中の各トレーサー濃度の低下は観察されなかった。図 2.2.1-66 より、ヨウ化物イオンのフラックスは概ね 20 日程度、酪酸イオンのフラックスは 60 日程度で一定の値となり、定常に達していることがわかる。定常状態におけるフラックスと高濃度側溶液中のトレーサー濃度より、式 2.2.1-8 に従って各トレーサーの実効拡散係数を算出し、算出した実効拡散係数より、式 2.2.1-9 に基づいて形状因子を算出した。それぞれの値を、平成 28 年度までに取得した酢酸イオンの値とともに、表 2.2.1-11 に示す。



(a) 試料 1



(b) 試料 2

図 2.2.1-66 低濃度側溶液へ透過したヨウ化物イオンおよび酪酸イオンのフラックスの時間変化（乾燥密度 1.4 Mg m^{-3} 、 NaCl 濃度 0.5 mol l^{-1} ）

表 2.2.1-11 ヨウ化物イオン、酢酸イオン、酪酸イオン実効拡散係数、形状因子の実測値

乾燥密度 (Mg m^{-3})	ヨウ化物イオン		酢酸イオン		酪酸イオン	
	D_e ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)	FF	D_e ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)	FF	D_e ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)	FF
0.8	8.5×10^{-11}	4.1×10^{-2}	5.1×10^{-11}	4.7×10^{-2}		
	8.8×10^{-11}	4.3×10^{-2}	4.9×10^{-11}	4.5×10^{-2}		
1.4	4.0×10^{-12}	2.0×10^{-3}	2.3×10^{-12}	2.1×10^{-3}		
	4.4×10^{-12}	2.1×10^{-3}	2.6×10^{-12}	2.4×10^{-3}		
	2.0×10^{-12}	1.0×10^{-3}			6.5×10^{-13}	7.4×10^{-4}
	1.5×10^{-12}	7.4×10^{-4}			6.0×10^{-13}	6.9×10^{-4}

次に、低濃度側溶液へ透過した重水、ブタノールのフラックスの時間変化を図 2.2.1-67 に示す。トレーサーのフラックスは、高濃度側溶液中のトレーサー濃度により規格化した値を示す。試験期間中に、高濃度側溶液中の各トレーサー濃度の低下は観察されなかった。図 2.2.1-67 より、重水のフラックスは概ね 20 日程度、ブタノールのフラックスは 30 日程度で一定の値となり、定常に達していることがわかる。酪酸イオンの試験と同様に、各トレーサーの実効拡散係数と形状因子を算出した。それぞれの値を表 2.2.1-12 に示す。

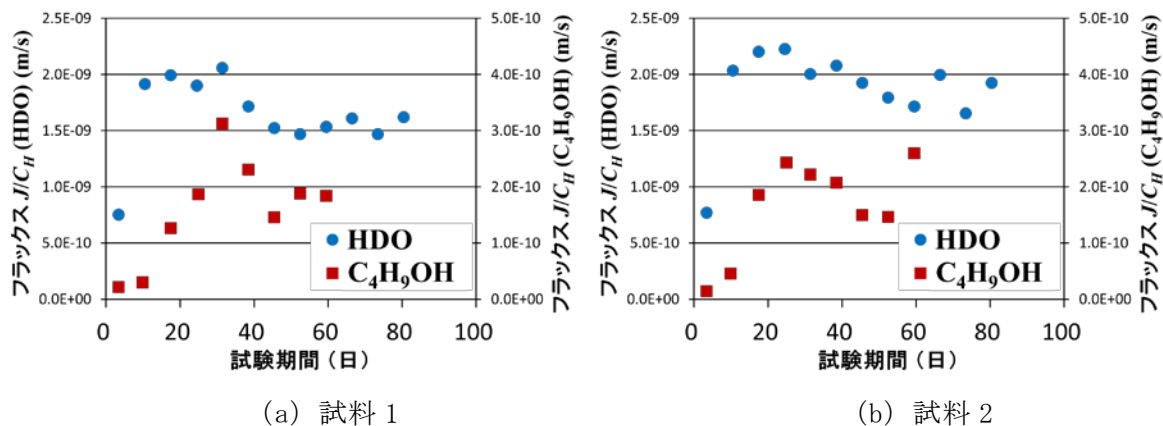


図 2.2.1-67 低濃度側溶液へ透過した重水およびブタノールのフラックスの時間変化 (乾燥密度 1.4 Mg m^{-3} 、NaCl 濃度 0.5 mol l^{-1})

表 2.2.1-12 重水およびブタノールの実効拡散係数、形状因子の実測値

乾燥密度 (Mg m^{-3})	重水		ブタノール	
	D_e ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)	FF	D_e ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)	FF
1.4	1.7×10^{-11}	7.7×10^{-3}	2.1×10^{-12}	3.7×10^{-3}
	2.0×10^{-11}	8.8×10^{-3}	2.0×10^{-12}	3.6×10^{-3}

表 2.2.1-11 に示すように、平成 28 年度までに実施した酢酸イオンの試験においては、乾燥密度 0.8 および 1.4 Mg m^{-3} の異なる 2 条件の圧縮ベントナイトにおいて、ヨウ化物イオンと酢酸イオンの形状因子がほぼ同一の値であることを示した。すなわち、酢酸イオンの実効拡散係数が、同条件で取得したヨウ化物イオンの実効拡散係数より式 2.2.1-10 により算出することが可能であり、また、同式の成立は、乾燥密度に依存しないことが示唆された。

平成 29 年度に取得した圧縮ベントナイト乾燥密度 1.4 Mg m^{-3} におけるヨウ化物イオンおよび酪酸イオンの形状因子を比較すると、これまでに取得した酢酸イオンの場合と同様に、両トレーサー間で近い値を示している。この結果は、酪酸イオンにおいても、式 2.2.1-10 が成立することを示しており、ヨウ化物イオンなどの他の陰イオンの実効拡散係数の報告値を利用し、酪酸イオンの実効拡散係数を設定できることを示している。また、酢酸イオンと酪酸イオンの両イオンにおいて式 2.2.1-10 が成立することは、概ね本試験で検討した範囲内では、カルボン酸の分子量に依存せず式 2.2.1-10 が成立することを示していると考えられる。

上記のカルボン酸を用いた試験に対し、アルコールであるブタノールの試験においては、表 2.2.1-12 に示すように、ブタノールの形状因子が重水に比べて $1/2$ 以下に低下することが確認された。このことは、ブタノールについては式 2.2.1-10 が成立していないことを示しており、重水などの電氣的に中性な他の化学種の実効拡散係数の報告値を利用し、ブタノールの実効拡散係数を正確に推定することが難しいことを示しているとともに、カルボン酸とアルコール間での圧縮ベントナイト中での拡散機構に違いがあることを示唆するものである。

平成 29 年度の試験結果より、カルボン酸については、分子量によらずヨウ化物イオンなど

の他の陰イオンの報告値を利用して実効拡散係数を設定できることが確認された。一方で、アルコールについては、重水などの電氣的に中性な他の化学種の報告値を利用し、実効拡散係数を正確に設定することが難しいことが示唆される結果が得られた。しかしながら、重水に比べてブタノールの形状因子が低いことから、重水などの実効拡散係数に基づいて式 2.2.1-10 により推定されるブタノールの実効拡散係数は過大評価となる。そのため、本試験結果の安全評価への適用を考えた場合には、アルコールに関しても、式 2.2.1-10 を用いて保守的に実効拡散係数を設定することが可能と考えられる。

(5) 銅とベントナイトの相互作用に関する調査

処分場環境においては、処分容器の周囲に圧縮ベントナイトが配置される。そのため、処分容器材料として銅の適用性を評価する上では、銅処分容器の腐食反応に伴うベントナイトの主要構成鉱物であるモンモリロナイトの変質や、圧縮ベントナイト中へ移行した銅腐食生成物の溶解などによる放射性核種の収着への影響について検討が必要である。銅は、酸素が存在しない環境ではほとんど腐食しないものの、硫化水素イオンなどが存在する場合には、銅が硫化銅などに変化し腐食することが報告されている（原子力機構、2007）。銅の腐食量が大きい場合、銅の腐食反応がモンモリロナイトの変質挙動やベントナイトへの核種の収着挙動に及ぼす影響が顕著になる可能性があるものの、これらの影響に関して、硫化物存在下での研究はほとんど報告されていない。

本調査では、硫化水素イオン共存下で圧縮ベントナイトと銅試験片を接触させ、試験片との接触面付近のベントナイト中に生成する鉱物を観察することにより、ベントナイト中のモンモリロナイトの変質について評価するとともに、圧縮ベントナイト間隙水中の Cu 濃度を決定する要因となるベントナイト中へ移行した銅腐食生成物の同定を行う。

平成 28 年度は、試験期間 1 ヶ月の試料について、銅との接触界面近傍の圧縮ベントナイトについて EPMA 観察を行い、ベントナイト中の鉱物の変質状況や圧縮ベントナイト中に移行した銅の存在形態について調査した。平成 29 年度は、試験期間約 1 年の試料について同様の分析を行い、モンモリロナイトの変質や銅の存在形態について調査するとともに、時間経過に伴う圧縮ベントナイト中への銅の移行挙動について調査を行った。

1) 試験方法

試験手法および試験条件は、平成 28 年度に実施した試験と同様に、標準的な海水の組成から微量元素を除いた人工海水に 0.01 mol l^{-1} となるように Na_2S を添加した溶液にテフロン製の試験カラムを浸漬し、圧縮ベントナイトと接触させた状態で銅試験片を腐食させた。銅試験片は無酸素銅 C1020P-1/2H を用いた。ベントナイト試料は、粗製ベントナイトであるクニゲル V1 と、ほぼモンモリロナイトにより構成される精製ベントナイトであるクニピア F を用い、ベントナイトの乾燥密度は 0.8 Mg m^{-3} とした。試験温度は $80 \text{ }^\circ\text{C}$ とした。試験期間は 1 年とし、試験期間経過後、圧縮ベントナイトを取り出して数 mm 角程度に切断、乾燥させた後、樹脂包埋した試料をマイクロームを用いて切断し、切断面の EPMA 観察を行った。

2) 試験結果と考察

図 2.2.1-68 に、銅試験片との接触面を含む圧縮ベントナイト試料（クニゲル V1）の EPMA 観察結果を示す。図 2.2.1-68 は、 $300 \text{ } \mu\text{m} \times 300 \text{ } \mu\text{m}$ の領域の反射電子像（BEI）と Cu, S, O, Si, Al, Na, Cl のマッピング分析結果を示しており、図の右側が銅試験片との接触面である。図 2.2.1-68 に示すように、銅試験片と圧縮ベントナイトの接触面付近に高濃度の Cu が分布しており、試験期間 1 年経過後も、試験片の腐食に伴って放出された Cu が概ね試験片との界面付近にとどまっていることがわかる。一方で、昨年度に実施した試験期間 1 ヶ月の試料では、銅試験片との接触面付近に高濃度の Cu の分布が確認されたのに加えて、濃度は高くないものの試験片との接触面から数百 μm 程度まで Cu が分布しているのが確認されてい

る。そのため、本年度の結果からは、試験期間の経過につれて圧縮ベントナイト中に数百 μm 程度まで分布していた低濃度のCuが逸散した可能性が示唆される。また、銅の存在形態に関しては、CuとSの濃度分布には正の相関が見られる一方で、CuおよびSとOの濃度分布には相関が見られないことから、Cuは硫酸塩ではなく硫化物として存在しており、CuとSの濃度が高い部分で硫化銅が生成していることが推測される。

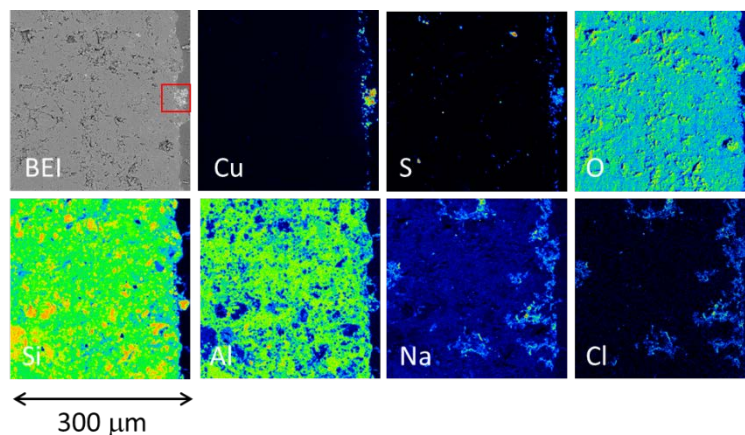


図 2.2.1-68 銅試験片との接触面近傍領域 ($300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$) の圧縮ベントナイト試料の Cu, S, O, Si, Al, Na, Cl マッピング分析結果

図 2.2.1-69 に、図 2.2.1-68 の反射電子像中に示す枠内 ($36\ \mu\text{m} \times 36\ \mu\text{m}$) について、Cu と S のマッピング分析結果と、図中に示す 4 カ所についての点分析による元素存在比の分析結果を示す。点分析の結果、銅試験片との接触面から離れた Spot3 と Spot4 に比べて、銅試験片に近接している Spot1 と Spot2 においては、S に対する Cu の原子数の比 (図中 Cu/S 比) が高くなる傾向が見られている。このことは、銅試験片との接触面近くでは Cu_2S の比率が高いのに対し、接触面から離れるに従って CuS の存在量が増加することを示しているものと考えられる。

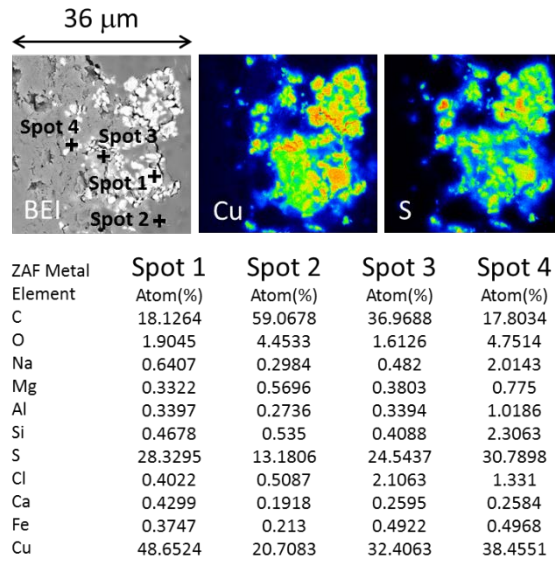


図 2.2.1-69 接触面近傍領域 (36 μm ×36 μm) の Cu, S マッピング分析結果と点分析による元素存在比の分析結果 (クニゲル V1)

図 2.2.1-70 に、圧縮ベントナイト試料としてクニピア F を用いて実施した試験試料について、銅試験片との接触面近傍の EPMA 観察結果を示す。図 2.2.1-70 は、40 μm ×40 μm の領域の反射電子像 (BEI) と Cu, S のマッピング分析結果であり、図の右側が銅試験片との接触面である。図 2.2.1-70 には、銅試験片との接触面付近に生成した硫化銅の周辺部の Spot1 および Spot2 について点分析を実施し、含まれる Mg, Al, Si, Fe の組成比を分析した結果を示す。また、クニピア F の構造式より算出した組成比を図中に合わせて示す。点分析の結果、両 Spot の元素組成比はクニピア F と概ね同じであった。図 2.2.1-70 に示す Spot 以外にも複数の位置において同様の点分析を実施したが、どの位置においてもクニピア F と同様の元素組成比を示した。このことから、本調査で用いた試料中には、組成変化を伴うような圧縮ベントナイト中のモンモリロナイトの大きな変質は確認されなかった。

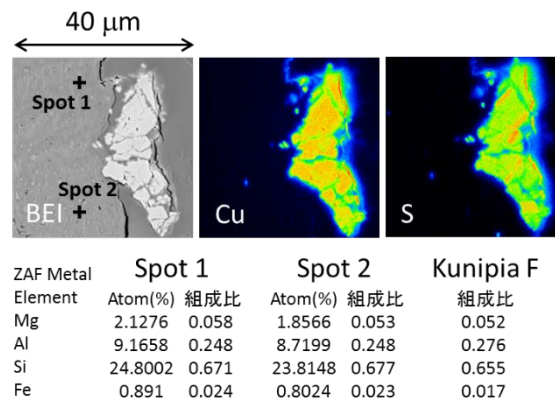


図 2.2.1-70 接触面近傍領域 (40 μm ×40 μm) の Cu, S マッピング分析結果と点分析による元素存在比の分析結果 (クニピア F)

本年度の調査結果より、試験片の腐食に伴って放出された Cu は概ね試験片との界面付近にとどまっており、圧縮ベントナイト内部へあまり移行しないこと、銅腐食生成物は硫化物の形態で存在し、試験片から離れるに従って Cu_2S から CuS の形態に変化している可能性が示唆されることが明らかになるとともに、組成変化を伴うような圧縮ベントナイト中のモンモリロナイトの大きな変質は確認されなかった。昨年度の調査を行った試験期間 1 か月の試料についても、本年度の調査結果とほぼ同じ結果が得られている。しかしながら、本事業により実施した調査においては、EPMA 観察による概略的かつ半定量的な分析に留まっていることから、今後、より詳細な分析を実施して、銅の腐食反応による圧縮ベントナイトへの影響を詳細かつ定量的に評価していくことが課題であると考えられる。

2.2.2 使用済燃料の閉じ込め性能に関する研究

(1) 本項目の背景と目的

直接処分システムの安全性を評価する上で、ガラス固化体の地層処分と大きく異なる特徴の一つとして、処分容器による閉じ込め機能が喪失した場合に放射性核種が使用済燃料から地下環境へ放出される際の挙動が挙げられる。具体的には、放出される放射性核種の種類、放出量、放出時期、放出速度、化学形態などである。なお、以下ではこれらを実評価することを総称して「ソースターム評価」と呼ぶ。

使用済燃料のソースターム評価は、直接処分の安全評価上の重要な項目であるが、わが国における直接処分を対象としたソースターム評価の事例としては、使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価第1次取りまとめ（原子力機構，2015a）（以下、「直接処分第1次取りまとめ」という）において安全評価を試行した際の設定が該当するが、そこではスイスで検討されたソースタームパラメータをそのまま採用したのみであり、各々のパラメータの設定値および設定根拠などについての詳細な検討は行われていない。

そこで、本項目では、直接処分を検討している諸外国におけるソースターム評価の考え方や、それらの根拠となっている文献情報（試験データ）を調査・整理するとともに、最近行われた、あるいは現在も進行中のソースタームに関する試験研究の成果なども参考として、わが国の直接処分に適したソースタームパラメータの設定を試みている（原子力機構，2015b；2016；2017）。

使用済燃料中の核種分布および核種放出の概念を図 2.2.2-1 に示す。燃焼・照射によって燃料中に生じる超ウラン元素、核分裂生成物などの多様な放射性核種の一部は、 UO_2 の結晶粒界に遍在化し、さらに、燃料ペレット内部に生じるガス気泡やひび割れなどの気相を介して、燃料と被覆管とのギャップ（隙間）にまで移行する。これらは、燃料と地下水が接触した場合に比較的速やかに放出される（瞬時放出）と考えられている。その他の核種は、燃料マトリクス中に分散して存在し、燃料マトリクスが地下水へ長期にわたってゆっくりと溶解することと調和して放出される（長期溶解）と考えられている。加えて、ジルカロイ被覆管の放射化で生成する核種（主に C-14）は、酸化膜中に存在する場合は比較的速やかに放出され（瞬時放出）、母材中に存在する場合は母材の腐食溶解にともなって比較的緩慢に放出される（長期溶解）と考えられている。

瞬時放出の程度を示すパラメータは、使用済燃料中の核種毎の総インベントリのうち瞬時放出されるインベントリの割合である瞬時放出率（IRF）が用いられる。また、長期溶解の程度を示すパラメータは、 UO_2 ペレットあるいはジルカロイ被覆管が溶解や腐食によって消失するまでの年数の逆数である溶解速度が用いられる。

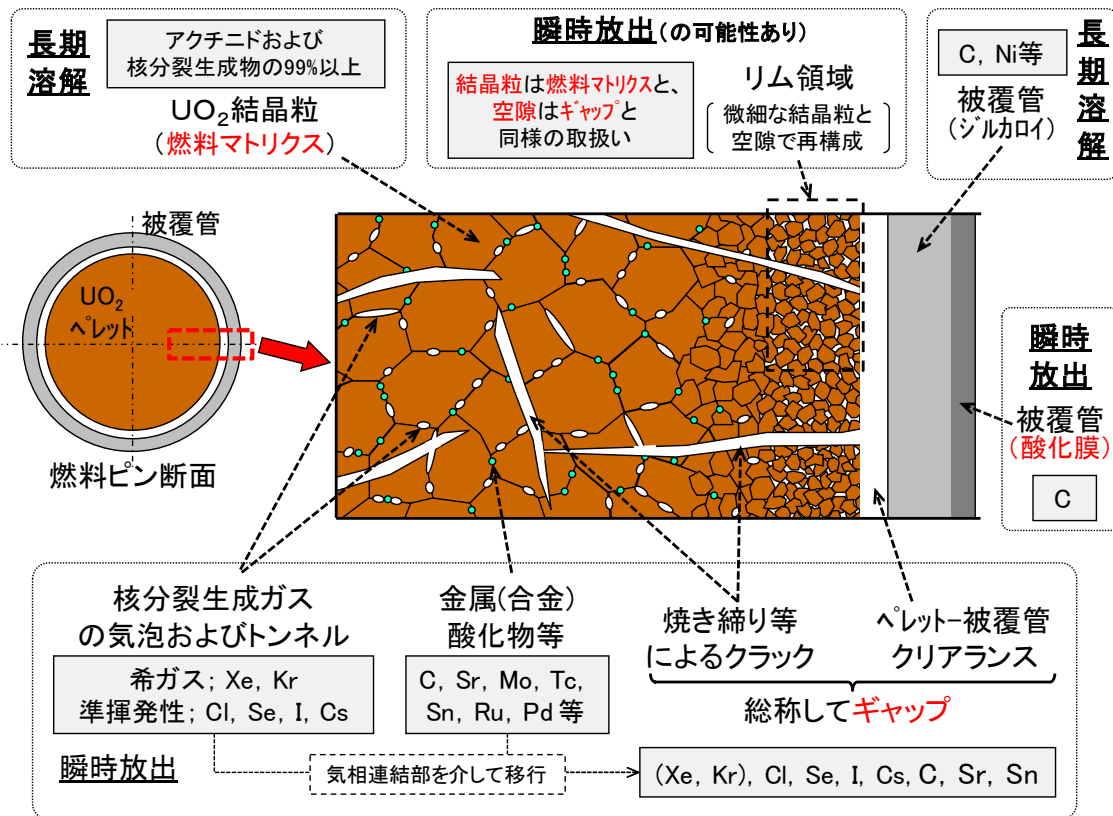


図 2.2.2-1 使用済燃料中の核種分布および核種放出の概念

平成 28 年度までに、諸外国における直接処分安全評価レポート、ソースターム評価に伴う不確実性を低減するための国内外の試験研究の成果および、国内使用済燃料の特性などを調査・整理した。また、ソースターム評価に伴う不確実性因子を考慮し、わが国向けの瞬時放出および長期溶解に関するパラメータの暫定値を設定した。(原子力機構, 2015a ; 2016 ; 2017)。

平成 28 年度に暫定値として設定した瞬時放出および長期溶解のパラメータを、それぞれ表 2.2.2-1 および表 2.2.2-2 に示す。表 2.2.2-1 中に記載している“FGR”とは、使用済燃料における核分裂生成ガス放出割合 (Fission Gas Release Rate) の略称である。以後の報告では、この略称を用いる。表中の I, Cs, Cl の欄に示すとおり、これら核種の瞬時放出パラメータを具体的に定めるためには、国内使用済燃料の特徴に応じた FGR を設定することが必要になる。このような FGR との相関性に基づいて瞬時放出割合を設定する手法は、諸外国の様々な照射後試験データに基づく考え方であり、直接処分方策を進めている国々での安全評価にも採用されている。本項目におけるわが国向けのパラメータ検討においても、国内使用済燃料の特徴や照射履歴の多様性に対応するためとして、この考え方を踏襲したものである。

表 2.2.2-1 国内向け瞬時放出割合の設定値（平成 28 年度の暫定値）

核 種		瞬時放出割合（IRF）[%]	
		推奨値	最大値
使用済燃料	¹²⁹ I	FGR 推奨値×1	FGR 最大値×1+3 *1
	¹³⁵ Cs ¹³⁷ Cs	FGR 推奨値×(1/√3)	FGR 最大値×(1/√3)+3 *1
	³⁶ Cl	FGR 推奨値×3	FGR 最大値×3+3 *1
	⁷⁹ Se	1.0	7.0 *2
	⁹⁰ Sr	1.0	4.0 *2
	⁹⁶ Tc	1.0	5.0 *2
	¹⁰⁷ Pd	1.0	5.0 *2
	¹²⁶ Sn	0.1	7.0 *2
	¹⁴ C	10	14 *2
構造材金属	¹⁴ C	20	40 *3

- *1：定置後の 1,000 年間で起こり得る、使用済燃料中の核種分布の経時変化などの不確実性を考慮し、3 %を加味（原子力機構，2017）
- *2：諸外国の安全評価におけるレファレンスケースの瞬時放出割合から最も高い設定値を選択し、さらに、*1と同様に 3 %を加味（原子力機構，2017）
- *3：主に、1 次冷却水系統から持ち込まれ、被覆管に付着する C-14 を想定し、最悪ケースとして推奨値の 2 倍を想定（原子力機構，2017）

表 2.2.2-2 国内向け長期溶解速度の設定値（平成 28 年度の暫定値）

部 位	長期溶解速度[y ⁻¹]
燃料マトリクス	1×10 ⁻⁷
構造材金属	10 ⁻⁴ （ジルカロイ、SUS、インコネルなど全金属）

平成 29 年度は、平成 28 年度に暫定値として設定したソースタームパラメータの一部を検証するため、瞬時放出割合の導出根拠とした国内使用済燃料の特性データの解析的検証、および、UO₂ の溶解速度の実験的検証を実施した。具体的な検討内容を以下に示す。

- ・FEMAXI コードを用いた核分裂生成ガス放出割合の評価

照射時の燃焼ふるまいをシミュレーションする解析コードである FEMAXI を活用し、瞬時放出割合の設定に必要な国内使用済燃料の FGR（表 2.2.2-1 中の I, Cs, Cl 参照）の解析計算を試みる。

- ・還元雰囲気における U 溶解速度の炭酸濃度依存性評価

わが国で想定される緩衝材間隙水中の無機炭素（全炭酸）濃度が諸外国より 10 倍程度高いことから、UO₂ の溶解速度に及ぼす全炭酸濃度の影響を実験的に調査し、平成 28 年度に暫定的に設定した燃料溶解速度（10⁻⁷ y⁻¹）（原子力機構，2017）の妥当性を検証する。

加えて、平成 29 年度の実施結果とこれまでに調査・検討した結果を総括し、わが国向けのソースタームパラメータの最新の設定を示すとともに、ソースターム評価を継続する場合の課題などを整理した。これらについて、以下の構成で後述の(2)～(4)にて報告し、そのまとめを 2.3 節に示す。

- ・ FEMAXI コードを用いた核分裂生成ガス放出割合の評価（後述の(2)参照）
- ・ 燃料溶解速度の炭酸濃度依存性評価（後述の(3)参照）
- ・ ソースターム評価の総括（後述の(4)参照）

(2) FEMAXI コードを用いた核分裂生成ガス放出割合の評価

一部核種の瞬時放出パラメータを具体的に定めるためには、国内使用済燃料の特徴に応じた FGR を設定することが必要になる（表 2.2.2-1 中の I, Cs, Cl 参照）。このため、平成 28 年度までに、国内で実施された照射後試験のデータを調査・整理し、その結果に基づいて FGR の推奨値（通常の商用運転を経た使用済燃料の FGR）および最大値（悲観的な照射条件を考慮した場合に取り得る最大の FGR）を検討した。また、国内照射後試験の件数が少ないため、軽水炉燃料の照射時ふるまいを解析するコードである FEMAXI コード（解析計算出力のひとつに FGR がある）に着目し、これを活用するための事前調査として、旧バージョンではあるものの、FEMAXI-Ⅲによる FGR 計算事例を調査し、FGR 計算への適用性を確認した。参考として、FEMAXI のバージョンの一覧を表 2.2.2-3 に示す。

今年度は、現行バージョンである FEMAXI-7 を用いて FGR の試算を行った。また、FGR の計算値と実測値を比較することなどを通して、過年度までに検討した下記 2 項目について検証を行った。なお、現行バージョンの FEMAXI-7 を用いた FGR 計算事例は現在公開されていない。

- ・ 商用炉における一般的な運転を経た使用済燃料の FGR を試算し、平成 28 年度までに収集した実測データや、それらを基に検討した国内使用済燃料の FGR との比較を実施。
- ・ 過年度に整理した FGR と経験最高線出力の相関性について、計算による再現性を確認。

FEMAXI-7 の活用については、FGR 計算モデルなどを調査・整理し、それらを基に適切な計算条件を検討した後、前述の 2 項目に係る FGR の計算を行った。

以降に、これまでの FGR 検討の概要を「1) 過年度までの FGR 検討の概要」として示す。次に、今年度用いる FEMAXI-7 の概要説明を「2) FEMAXI-7 の概要」として示したのち、FEMAXI-7 による実際の計算について、「3) 計算条件などの検討」、「4) 代表的特性を持つ使用済燃料の FGR 計算」として示す。

表 2.2.2-3 FEMAXI のバージョン一覧

コード名	履歴
FEMAXI-I	Haldon Project において市川が開発 (1974)。二次元弾塑性 PCMI 解析。
FEMAXI-II	木下 (電中研) がクリープモデルを追加 (1977)
FEMAXI-III	原研、大学、日立、東芝、NFD、電中研、CRC が大規模に共同開発 (1984)
FEMAXI-IV	中島らが改良し、NUPEC ((財) 原子力発電技術機構) で利用。その後鈴木が改良し Ver. 2 を開発し、NEA-DataBank へ公開 (1996)
FEMAXI-V	鈴木らが高燃焼度用に改良。NUPEC、NEA-DataBank へ公開 (2001)
FEMAXI-6	鈴木らが更なる改良、高度化を実施し、JNES ((独) 原子力安全基盤機構)、NEA-DataBank へ公開 (2003-2010)
FEMAXI-7	構造の改訂、機能追加

1) 過年度までの FGR 検討の概要

平成 28 年度までに検討した国内使用済燃料の FGR の導出手法を、PWR 燃料を例に説明する。使用済燃料から実測した FGR データは、高燃焼度化のための確証試験など (例えば、原子力発電技術機構, 2002) から収集した。FGR は運転時の出力で決まるペレット内の温度分布に応じた FP ガス原子の拡散移行や、燃焼度増加によるペレットの機械的変化によって影響を受ける。このことから、使用済燃料を、設計燃焼度が異なる以下の 3 つのタイプに大別し、タイプ毎に FGR を設定することとした。

- ・従来型 (15×15 型以前の全てを従来型とする。最大燃焼度は 39 GWd tU⁻¹)
- ・17×17 型 STEP1 (最大燃焼度 : 48 GWd tU⁻¹)
- ・17×17 型 STEP2 (最大燃焼度 : 55 GWd tU⁻¹)

収集した FGR と平均燃焼度の関係を図 2.2.2-2 に示す。この結果から、従来型および 17×17 型 STEP1 の FGR の推奨値は 1 %、17×17 型 STEP2 のそれを 2 %とした。

また、照射条件の多様性を考慮した場合に取り得る最大の FGR についても導出手法を検討した (現在公開されている実測データでは、照射履歴の多様性をカバーできていないと判断された)。照射履歴の多様性を最も悲観的に想定すると、原子炉運転における熱的制限値として設定されている線出力密度 (44 kW m⁻¹) での照射を経験するケースとなる。従来型および 17×17 型 STEP1 については、そのような高出力を経た燃料が今後発生する可能性は低いことから、最大値を推奨値と同じ 1 %と仮定した。一方、現行の 17×17 型 STEP2 については、今後も様々な照射履歴を経て発生し続けるため、44 kW m⁻¹出力での運転を経験する場合の FGR を評価することとした。そこで、FGR が平均線出力密度と直線関係にあるとする知見 (例えば、Kienzler, 2014) を参考とし、17×17 型 STEP2 による通常出力試験および出力急昇試験 (原子力発電技術機構, 2002) などのデータを図 2.2.2-3 に示すとおり整理した。図 2.2.2-3 より、燃焼度が 50~60 GWd tU⁻¹ の範囲において、FGR と経験最高線出力に線形の相関があると仮定され、その関係に出力 44 kW m⁻¹を外挿することで 17×17 型 STEP2 の FGR (約 17 %) を導出した。出力急昇試験の際の高出力照射時間は約 12 hr である。図 2.2.2-3 における整理では、最近までに一部データの追加を行い、これに基づいて FGR と経

験最高線出力の線形相関を見直したため、これに外挿して求める FGR の最大値を見直している。

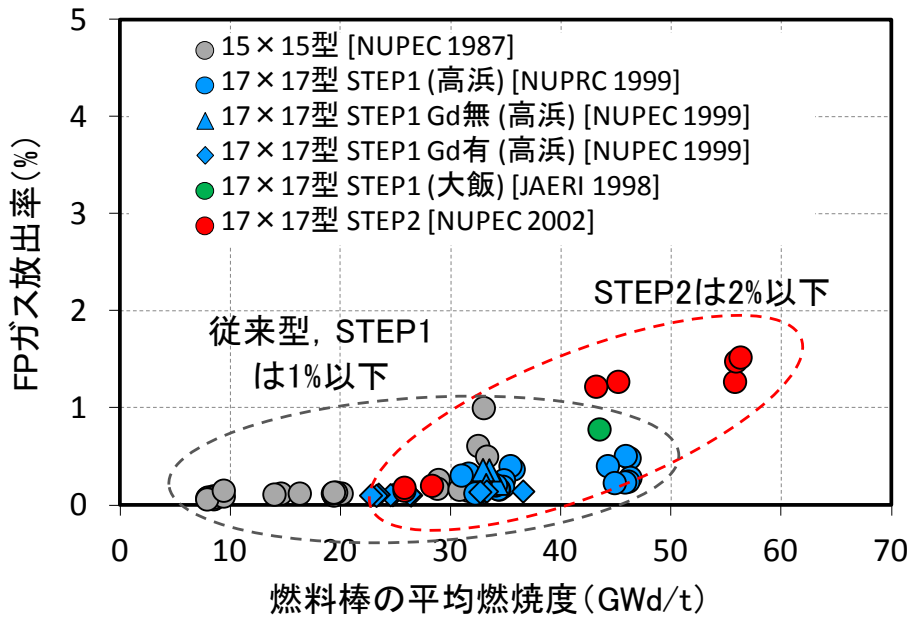


図 2.2.2-2 PWR 使用済燃料における FGR 分布

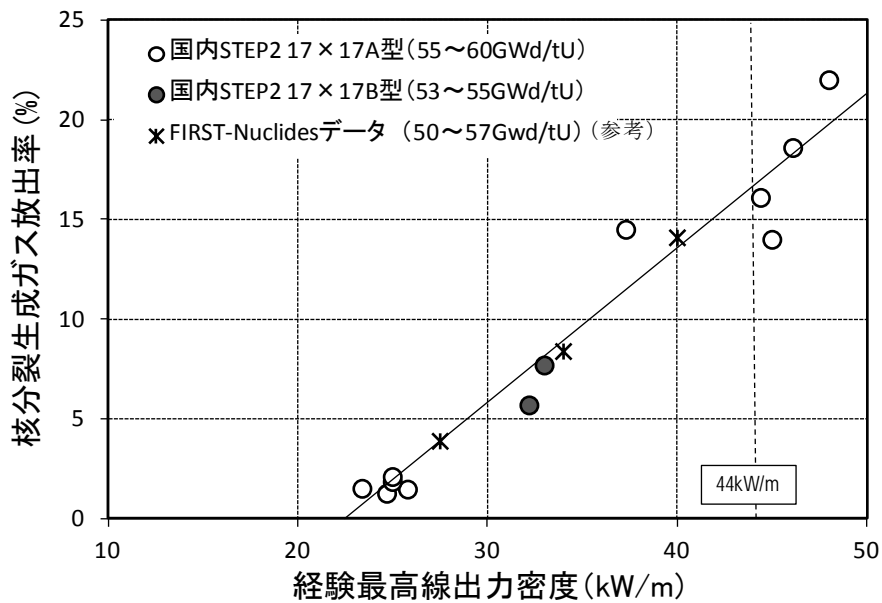


図 2.2.2-3 17×17 型 STEP2 燃料における FGR と経験最高線出力の関係

2) FEMAXI-7 の概要

ここでは、主に FGR の計算モデルを説明する。先ず、FEMAXI の全体概要を簡単に示した後、その中の機能のひとつである核分裂生成ガス放出挙動の解析モデルについて説明する。

FEMAXI-7 の解析体系を図 2.2.2-4、解析フローを図 2.2.2-5 に示す。FEMAXI-7 の解析体系は燃料棒 1 本を対象とした軸対象モデルである。解析フローは、主に熱的解析部と全長力学的解析部および局所 PCMI 解析部に分かれる。熱的解析部と全長力学的解析部は連成しており、1 つのタイムステップ内において反復繰り返し計算を実施し、温度と変形の収束値を求める。熱的解析部は、燃料棒の各セグメントにおいて温度分布やガス圧力を径方向一次元軸対称問題として取扱い、ペレットと被覆管のギャップ幅の変化、FP ガス放出モデル、軸方向ガス流動およびこれらのギャップ熱伝達へのフィードバックを考慮して解析する。軸方向出力分布を模擬するため、燃料棒発熱部の軸方向は最大 40 領域に分割可能である。全長力学的解析部は軸対称有限要素法 (FEM) を燃料棒全長の各セグメントに適用し、ペレットと被覆管の力学解析を実施する。ここでは、熱膨張、焼きしまり、スウェリングおよび、ペレットのリロケーションによる初期ひずみを計算し、ペレットの割れ、弾塑性およびクリープを考慮して剛性方程式を作成し、接触モードに対応する境界条件を仮定して剛性方程式を解き、応力やひずみを得る (鈴木ほか, 2014)。

なお、FEMAXI コードには燃料棒の燃焼解析は含まれていない。このため、燃焼度ステップ毎のペレット中の径方向の出力密度プロファイルは、別途、燃焼解析コードの「RODBURN」あるいは「PLUTON」を用いて解析し、その出力ファイルを入力ファイルとして用いるなどする必要はある。本検討では「RODBURN」を用いて燃焼解析を行うが、主眼は FEMAXI の活用であるため、燃焼解析に関する詳細な説明は割愛する。

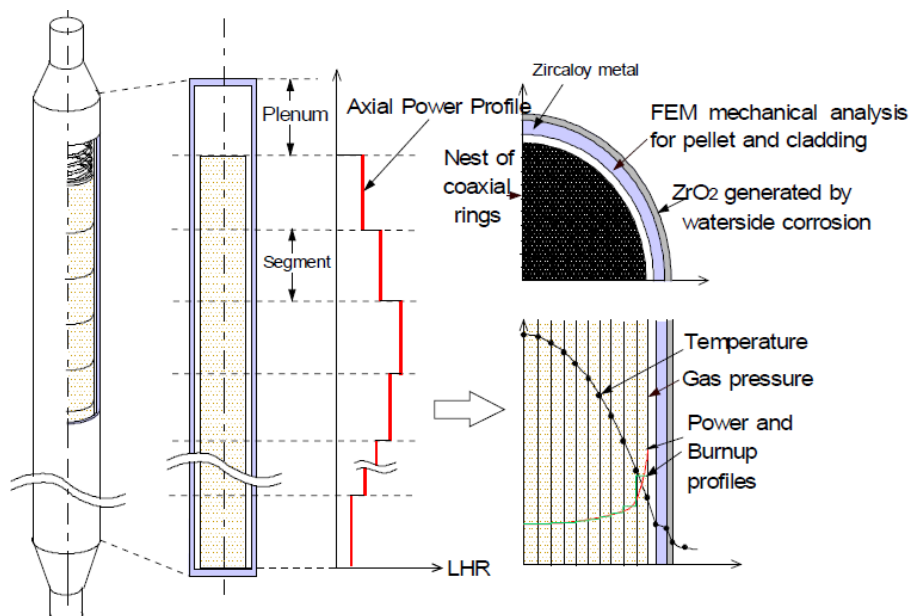


図 2.2.2-4 FEMAXI コードの解析体系

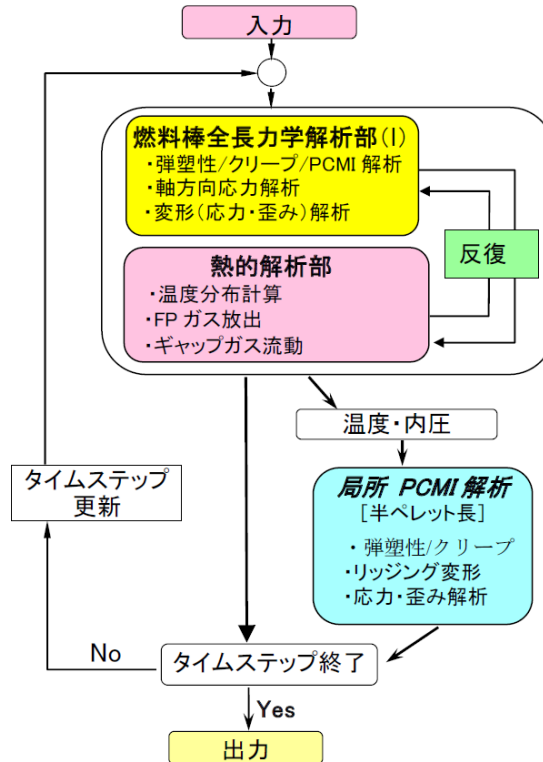


図 2.2.2-5 FEMAXI コードにおける燃料ふるまい解析フロー

本検討では、解析結果の一つである核分裂生成ガス放出挙動（総インベントリに対する放出割合。即ち FGR）に着目する。結晶粒および粒界中における核分裂生成ガスの状態の模式図を図 2.2.2-6 に示す。また、核分裂生成ガスの状態の模式図に基づく FGR 計算フローを図 2.2.2-7 に示す。UO₂ 粒内で生成された FP ガス原子は、ガス原子の粒内拡散および粒成長による粒界への掃き出しの 2 つの機構により粒界へ移動し、そこにガスバブルを形成・蓄積する。照射が進むにつれ、粒界でバブルの成長や高密度化が進むと、バブルは広範囲にわたって連結する。そして連結バブルの一点がクラックや自由空間に通じる通路に接触すると、バブル内のガスは燃料棒内の自由空間に放出されると仮定している。また、実際の結晶粒は不規則な形状をしており、粒界は隣接する結晶粒の間の薄膜状組織であるが、FEMAXI-7 ではこれらを球形形状に簡略化し、粒界の気泡が結晶粒を覆う理想化モデルを適用することで 1 個の結晶粒を計算対象としている（鈴木ほか，2014）。

これらの FP ガス放出挙動は、燃焼にともなう熱学的（温度分布、温度変化、熱膨張、ペレット熱伝導度変化など）・力学的（焼きしまり、スウェリング、密度変化、リロケーション、被覆管クリープなど）な現象が複雑に絡み合うことによる影響を受けることから（原子力安全研究協会，2013）、FEMAXI-7 においても様々な現象の相互作用を考慮しながら、核分裂生成ガス原子の生成、拡散、バブル形成、放出という過程をモデル化することで核分裂生成ガスの挙動解析を行っている（鈴木ほか，2014）。

各々の現象を再現するための解析モデルや物性値（あるいは物性値の導出式）は、様々な実情に対応するために数種類用意されていることが多く、このため、FEMAXI-7 による解析を行うためには、先に述べた「RODBURN」などによる解析結果（燃料内部の出力密度プロファイ

ル) を入力とするほかに、様々な計算オプションを設定する必要があり、オプション設定のための変数は約 90 種類ある。主要な変数の内容は、次項 3) において詳述する。

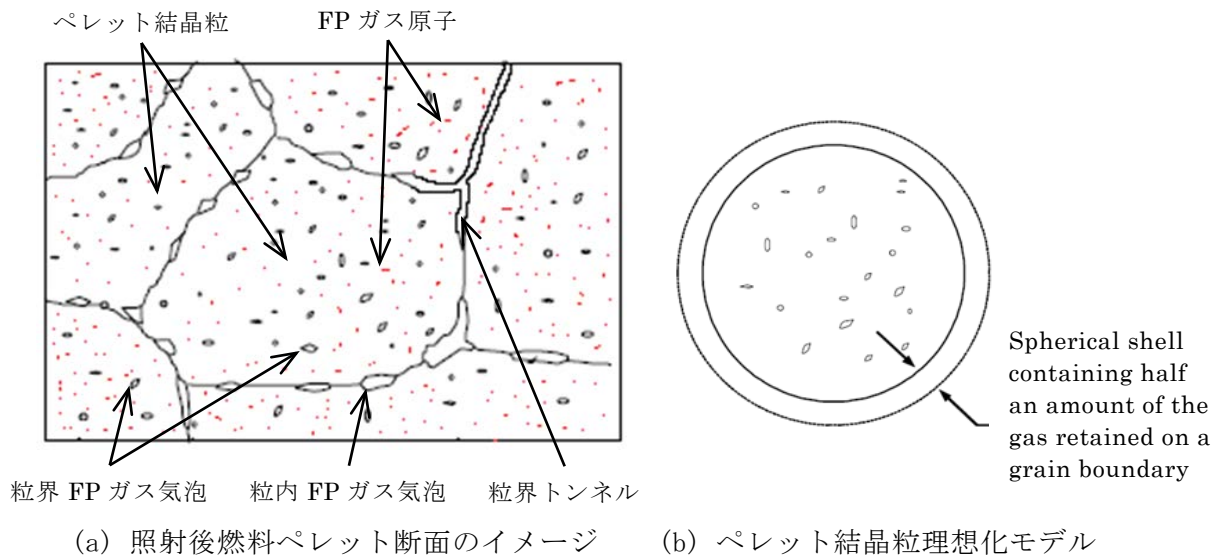


図 2.2.2-6 結晶粒および粒界における核分裂生成ガスの状態の模式図

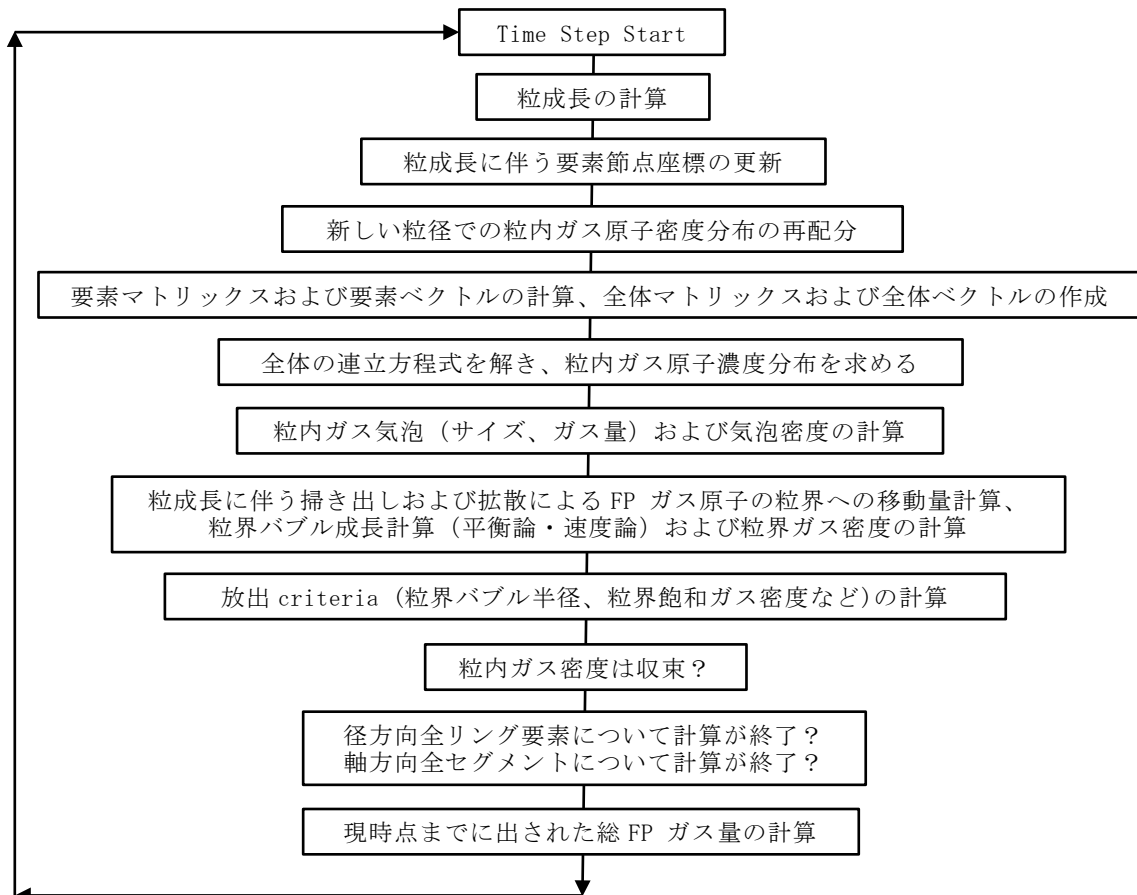


図 2.2.2-7 FGR 計算フロー

3) 計算条件などの検討

解析精度を高めるためには、2)で述べた様々なオプション設定を適切に行う必要がある。ここでは、様々なオプション設定のうちから、FPガスの移行挙動解析に対する感度が高いと考えられるオプション設定をパラメータとして既報の照射後試験を再現する計算を行い、FGR実測値の再現性が良好な解析条件を検討した。

計算対象とした使用済燃料サンプルとそのFGR実測値を表2.2.2-4に示す。これらサンプルは、旧(財)原子力発電技術機構および旧(独)原子力安全基盤機構が主体で実施された、高燃焼度燃料の確証試験などで用いられたものである(原子力発電技術機構, 2002a; 原子力安全基盤機構, 2007)。

表 2.2.2-4 計算対象とした使用済燃料サンプルと FGR 実測値

照射炉	燃料タイプ	試料番号	燃料種類	燃焼度 [GWd t ⁻¹]	FGR実測値 [%]
高浜3号 (PWR)	17x17 長尺	F13	UO ₂	46.0	0.23
		G11	(U, Gd)O ₂	33.2	0.14
バンデロス2号 (PWR)	17x17 セグメント	WI-I13	UO ₂	25.7	0.09
		MMt-I05		55.8	1.27
福島第二 1号機 (BWR)	9x9A	2F1Z2-A6	UO ₂	59.0	8.00
		2F1Z3-A6		40.0	13.60
	9x9B	2F1Z2-C3		37.7	4.20
		2F1Z3-C3		56.6	5.60
	9x9A	2F1Z2-C2	(U, Gd)O ₂	45.2	0.30
		2F1Z3-C2		28.5	0.30
	9x9B	2F1Z2-C2		43.4	0.40
		2F1Z3-C2		27.5	0.20

また、FGR解析結果に影響を与える因子は、「燃料ペレットおよび被覆管内部の温度分布状態」および「FPガス放出挙動の考え方」であると考えられることから、それらに関する解析モデルを決定するための変数をパラメータとした。それぞれを「燃料および被覆管の熱分布・熱影響の解析モデル」および「FPガス放出挙動の解析モデル」とし、各解析モデルを詳細に規定するためのオプション項目を以下のように選定した。

- ・燃料および被覆管の熱分布・熱影響の解析モデル
 - ✓ 熱伝導率
 - ✓ ギャップコンダクタンス
 - ✓ ペレットスウェリング
 - ✓ ペレット焼きしまり
 - ✓ ペレットクラック
 - ✓ リロケーション
 - ✓ 被覆管クリープ
- ・FPガス放出挙動の解析モデル
 - ✓ FPガス放出モデルオプション

- ✓ 高燃焼度（リム）組織モデル
- ✓ 燃料粒成長オプション

実際に、これらオプション設定を規定するモデル選択や物性値入力のための変数は18種類であり、その設定値をパラメータとする試計算を行った。18種類の変数および設定パラメータの一覧を表2.2.2-5に示す。

FEMAXI への入力値である燃焼度毎の出力密度プロファイルを計算するための燃焼計算コードは、RODBURN-1 (Ver1.2(September 2005)) を用いたが、ここではFEMAXI の計算結果に着目するため、燃焼計算コードの詳述は割愛する。

各計算ケースの結果を、高浜3号機で照射されたG11 (表2.2.2-4参照、PWR使用済燃料) を例に、図2.2.2-8に示す。変数の設定を変えることで計算結果が大きく変わるもの、即ち感度が高い変数は、FPガス放出挙動の解析モデルに係る以下の6変数であった。燃料および被覆管の熱分布・熱影響の解析モデル全般については、オプション設定を変えても感度が低く、標準設定のままで良いと判断した。

・FPガス放出挙動の解析モデル

- ✓ IGASP (BA0~3) ; FPガス放出モデル (機構論モデル、速度論モデル) の選択
- ✓ HBS (A11, 12) ; リム組織生成モデルの考慮の有無
- ✓ IDCONST (B11~15) ; FPガス原子拡散係数の選択
- ✓ RF (B21~23) ; 粒界バブル限界半径[cm]
- ✓ RB (B31, 32) ; 境界層幅[μm]
- ✓ FBCOV (B41~46) ; レンズ状バブルが粒界を覆う割合[%]

注) CRPEC[被覆管クリープ式の選択]を変えることによる計算値の変化は、解析時の不具合が原因と考えられたため除外

このうち、IGASP, HBS, IDCONSTならびにRFについては、設定を変えることによる感度は高いが、標準設定のまま計算した結果が実測値に最も近いいため、設定を再検討する必要は無いと考えられた。一方、RBとFBCOVについては、標準設定による計算値は実測値と乖離するため、より適切な値を検討する必要があると判断した。

表 2.2.2-5 変量させたオプション設定とパラメーター一覧

設定対象モデル	変数名	パラメータ値、各値の意味
FP ガス放出 & リム組織	IGASP&HBS (BA0~3)	IGASP=[0], =0, =2, =2 HBS = [2], =0, =0, =2
		IGASP=0 : 機構論モデル+粒内バブルモデル IGASP=2 : 粒界バブル速度論モデル+粒内バブルモデル HBS =0 : 高燃焼度組織モデルを使用しない HBS =2 : JAERI リムモデル (実効燃焼度を用いる)
熱伝導率	IPTHCN (A11, 12)	UO ₂ :15, [:17], :91 Gd :15, [:15], :91
		ペレット熱伝導率の導出式を選択 (p324, 325*1)
FP ガス放出	IDCONT (B11~15)	[1], 2, 3, 4, 5, 6 FP ガス原子拡散係数の導出式を選択 (p370, 371*1)
	RF (B21~23)	5.0×10^{-6} , [$\times 10^{-5}$], $\times 10^{-4}$, $\times 10^{-3}$ 粒界バブル限界半径[cm]を指定 (p106*1)
	RB (B31, 32)	1.0×, [2.0×], 4.0×10^{-6} 境界層幅[cm]を指定 (p104*1)
	FBCOV (B41~46)	0.10, 0.15, 0.20, [0.25], 0.30, 0.35 レンズ状バブルが粒界を覆う割合 (p106*1)
ペレット スウェリング	IFSWEL (C11, 12)	0, [1], 4 ペレットスウェリングモデルを選択 (p140, 335*1)
	A1 (C21, 22)	0.02, 0.06, [0.0947] 燃焼度とスウェリング率の相関係数を成す定数 (IFSWEL=4 の場合に用いる) (p336*1)
粒成長	GRWF (D11, 12)	1.0, [1.5], 2.0 粒成長速度を GRWF 倍する係数 (p99*1)
ギャップ コンダクタンス	IGAPCN (E11, 12)	[0], 4, 5 ギャップコンダクタンス[W m ⁻² k ⁻¹]の導出式を選択 (p373*1)
	R1&R2 (E21, 22)	R1=0.1, =0.3, [=1.0] R2=0.1, =0.3, [=1.0] ペレット表面の粗さ(μm) & 被覆管表面粗さ(μm) (IGAPCN=0, 2 の場合に用いる) (p58, 375*1)
焼きしまり	DMAX (F11, 12)	20, [40], 80 焼きしまりによる最大体積収縮割合[%] 軸方向セグメント毎に指定 (p337-339*1)
クラックおよび リロケーション	FRELOC (G11~13)	0.1, 0.3, [0.5], 1.0 ペレット割れによる径方向リロケーション量を調節 (p209, 339*1)
	EPSRLZ (G21, 22)	1.0×, [3.0×], 5.0×10^{-3} 軸方向リロケーションひずみを調節 (p209, 339*1)
被覆管クリープ	CRPEQ (H11~13)	0, 1, 2, [3] 被覆管クリープひずみ速度の導出式を選択 (p354*1)
	CRFAC (H21, 22)	0.5, [1.0], 2.0 被覆管クリープひずみ速度に対する倍率 (p229, 357*1)

*1 : 鈴木ら (2014) におけるオプション内容詳細の記載頁

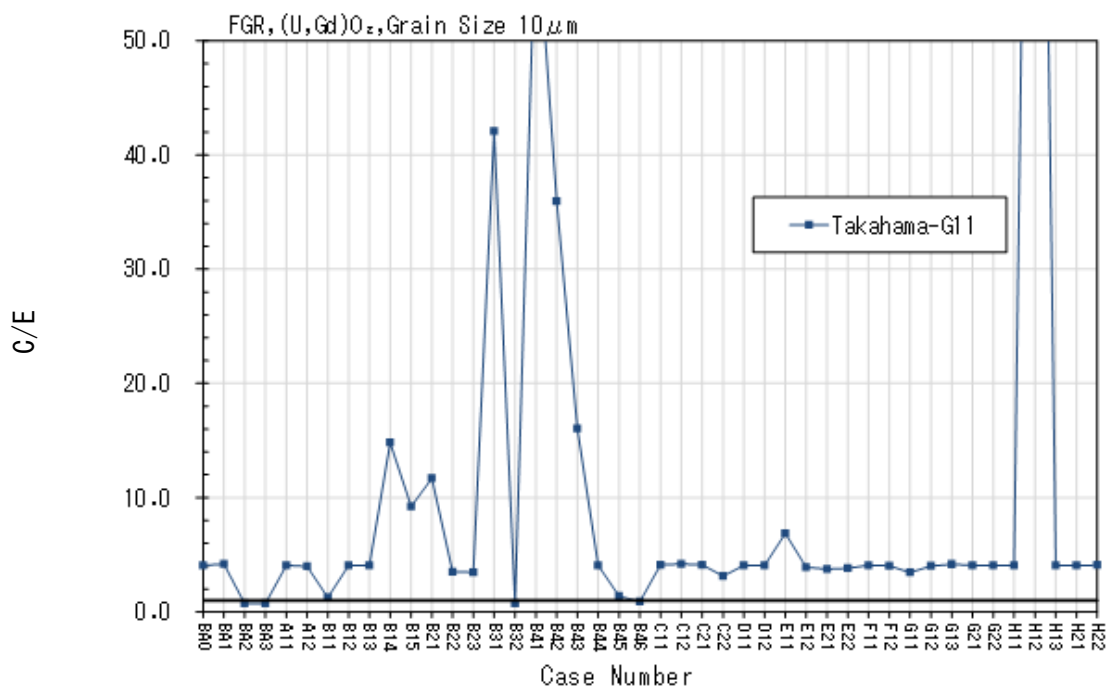


図 2.2.2-8 計算ケース毎の計算値と実測値の比

RB[境界 (粒界) 層厚さ: μm]と FPCOV[レンズ状バブルが粒界に占める割合: μm]は、オプション選択のためのフラグ値ではなく実際の物性値を直接入力する変数である。このことから、これらの設定値を、表 2.2.2-5 に示した変化幅より細かく変えて FGR 計算値の変化を確認した。RB および FPCOV の設定を変えたときの FGR 計算値の変化を、それぞれ図 2.2.2-9 および図 2.2.2-10 に示す。RB、FPCOV とも設定値を高くしていくに従って FP ガス放出割合が減少する傾向がみられ、計算上、試験値と合致する設定値を持ちうる事が分かる。RB については、境界層を厚く設定することで粒界ガスバブル中の FP ガス原子が結晶粒界中に再溶解する量が増えるため、ガスバブルが開気孔になったときに放出されるガス量が減るためと考えられた。FPCOV については、粒界バブルが粒界に占める割合が設定値以上にならなければ FP ガスの放出が起きにくいとする設定であり、これを高く設定することは固く高密度な材質を想定することとほぼ同義 (イメージ) であるため、FP ガスの放出が抑制されるものと考えられた。

ここで、設定変更が必要な変数が複数ある場合、いずれか一つの変数を変えることで解析精度が上がる事が経験的にわかっている。また、これらの設定を変えることに連動する機械的变化 (例えばペレット直径) は、RB を変えるほうが FPCOV を変える場合より若干小さく、その機械的变化が FGR 解析にフィードバックされる可能性が低いと考えられることから、RB だけを適切化することにした。

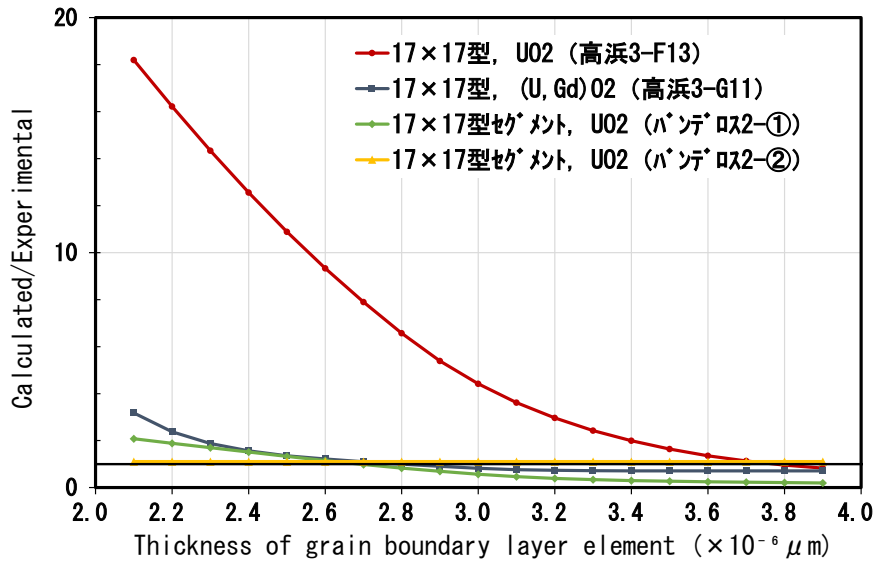


図 2.2.2-9 RB [μm] と FGR の関係 (PWR 結果の抜粋)

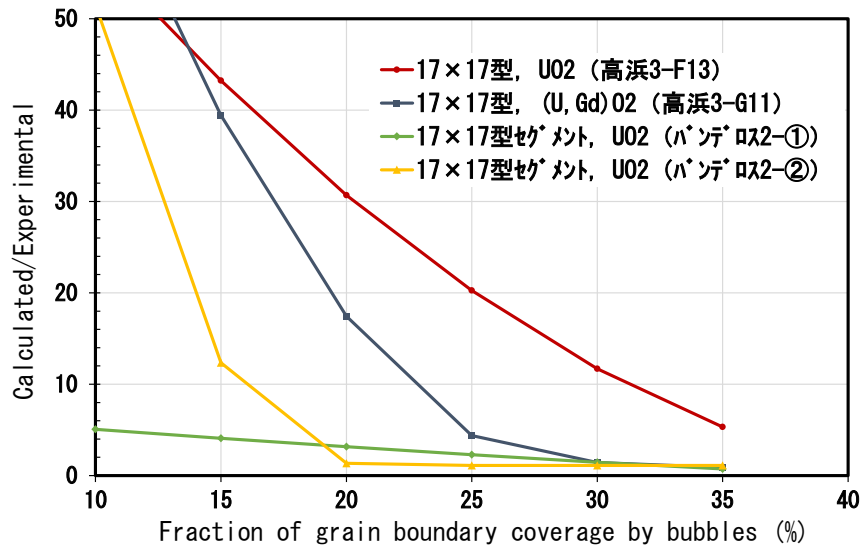


図 2.2.2-10 FBCOV [%] と FGR の関係 (PWR 結果の抜粋)

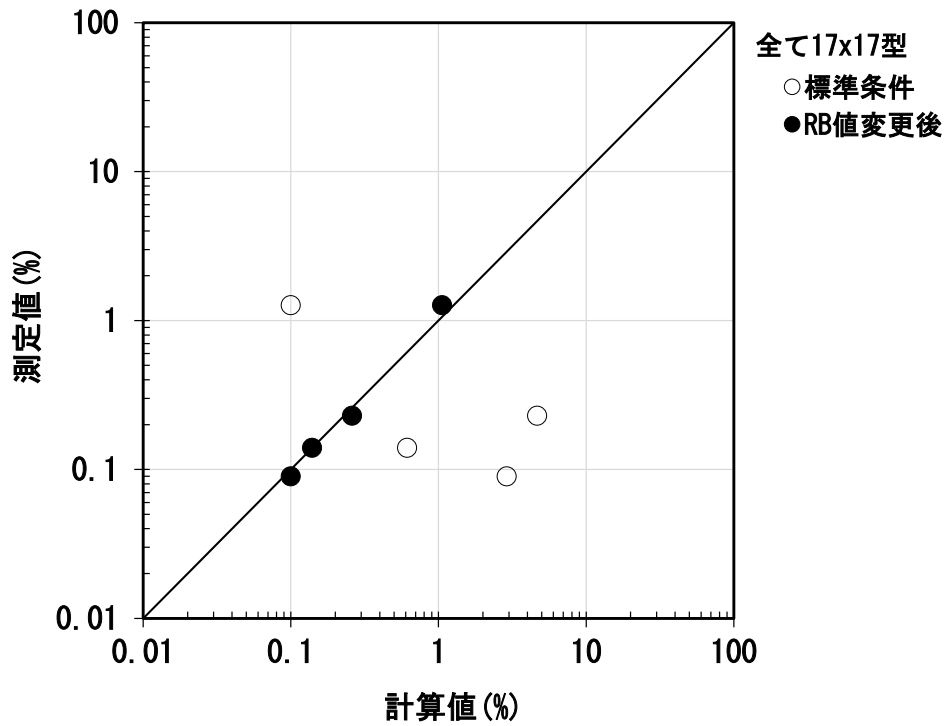
その結果、燃料の種類毎 (表 2.2.2-4 参照) に以下の RB 値を設定した。

- PWR-17x17 型-UO₂ 燃料 $3.7 \times 10^{-6} \mu\text{m}$
 - PWR-17x17 型-Gd 入り燃料 $2.8 \times 10^{-6} \mu\text{m}$
 - BWR-9x9A 型-UO₂ 燃料 $2.2 \times 10^{-6} \mu\text{m}$
 - BWR-9x9A 型-Gd 入り燃料 $3.5 \times 10^{-6} \mu\text{m}$
 - BWR-9x9B 型-UO₂ 燃料 $2.7 \times 10^{-6} \mu\text{m}$
 - BWR-9x9B 型-Gd 入り燃料 $2.9 \times 10^{-6} \mu\text{m}$
- [標準設定 ; $2.0 \times 10^{-6} \mu\text{m}$]

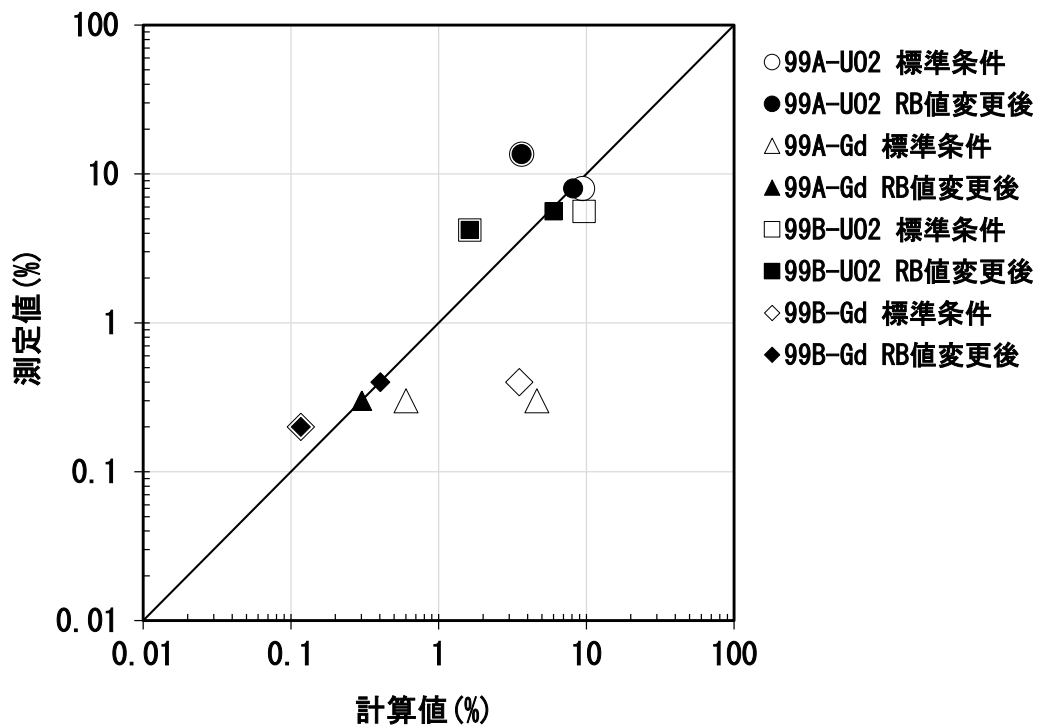
検討した RB の設定を用い、表 2.2.2-4 に示した実測試験の全ケースを模擬する FGR 計算を行った。計算値と実測値との関係を図 2.2.2-11 に示す。

PWR 使用済燃料については、標準条件による FGR 計算結果が実測値よりも大幅に高め、あるいは低めであったのに対し、RB 値変更後の計算結果は実測値の±15 %程に収まっており、再現性は高くなった（図 2.2.2-11(a)）。

BWR 使用済燃料についても、PWR の場合と同様に実測値の再現性は全体的に高まった。しかしながら、一部のサンプルについては計算値が実測値の 3～5 分の 1 程度になった。これは、過年度に調査した BWR 使用済燃料の照射後試験における FGR 測定値が、設計上の想定より突出して高かったことが要因であり、RB 値の変更による計算値の是正効果があるとしてもグラフ上の点綴位置はほぼ変わっていない（図 2.2.2-11(b)）。このような高い FGR が測定された原因は、燃料ペレットと燃料被覆管の隙間（ギャップ）が残留したことによる冷却水側への放熱不足により、ペレット内の温度が高く維持され FP ガス原子の粒界への拡散移行が促されたためと推測されているのみであり（原子力安全基盤機構，2007）、その検証を目的とする照射後試験などは、現在までに行われていないか公開されていない。このため、これらサンプルにおける FGR 実測値と計算値の乖離を特異ケースとみなす前提条件の下で、RB 値を適切化することによって計算精度を是正する方針を採用した。



(a) PWR ; 17×17 型



(b) BWR ; 9×9A および 9×9B 型

図 2.2.2-11 オプション設定変更前後の FGR 解析値と実測値の比較

4) 代表的特性を持つ使用済燃料の FGR 計算

計算対象とした使用済燃料燃料の特性を PWR 使用済燃料と BWR 使用済燃料について、それぞれ表 2.2.2-6 および表 2.2.2-7 に示す。

PWR 使用済燃料および BWR 使用済燃料ともに、原子炉への装荷体数が現段階で最も多いと思われる現行型燃料を想定した。現行装荷燃料には、サイクル初期の余剰反応度を抑えるための可燃性毒物 (Gd_2O_3) を添加した燃料も含めた。照射条件は、通常運転としてありうる 4 回の運転サイクルを経る (4 cycle) ケースと、5 回の運転サイクルを経る (5 cycle) ケースを想定した。1 回の運転サイクルは 13 ヶ月 (390 日) とし (原子力安全研究協会, 2013)、各ケースの総運転日数を経て 55 GWd tU^{-1} に到達するよう一定の線出力で運転することを想定した。即ち、同じ到達燃焼度の場合、運転サイクルが少なければ燃料棒の全寿命にわたる平均線出力は高くなり、運転サイクルが多ければ平均線出力は低くなる。なお、BWR は現在 45 GWd tU^{-1} で運転されており、先ずこれを模擬して計算した。また、高燃焼度等燃料確証試験として燃焼度 $55\sim 60 \text{ GWd tU}^{-1}$ における FGR が測定されているため、これらと対比するため 55 GWd tU^{-1} のケースについても計算を行った。また、通常運転を終えた燃料に対し、追加の照射として 44 kW m^{-1} の出力で 12 時間照射するケースも模擬し、「1) 過年度までの FGR 検討の概要」で前述した、照射履歴の多様性を考慮した場合の取り得る最も大きな FGR 値についても検討した。 44 kW m^{-1} は、現在の PWR 炉および BWR 炉の運転における熱的制限値、即ち、許されている最大の線出力密度である。

表 2.2.2-6 模擬する PWR 使用済燃料の特性

集合体	配列	17×17A			
	燃料ピッチ [mm]	12.6			
燃焼度		55		55	
ペレット	種類	$UO_2-Gd_2O_3$	UO_2	$UO_2-Gd_2O_3$	UO_2
	U235 濃縮度 [%]	3.2	4.8	3.2	4.8
	Gd_2O_3 重量比 [%]	10.0	—	10.0	—
線出力	4 cycle ^{*1}	157	174	左記の照射後、 高出力 (44 kW m^{-1}) 運転を 12 時間行う	
	5 cycle ^{*1}	125	139		
他の共通条件 ;					
ペレット外径 8.19 mm		ペレット高さ 10 mm		被覆管材質 ジェルコイ-4	
被覆管外径 9.5 mm		被覆管内径 8.36 mm		など	
冷却材入口温度 284 °C		冷却材出口温度 321 °C			

*1 : 原子炉の運転サイクルを示す。1 cycle は 13 ヶ月 (390 日) と想定
(原子力安全研究協会, 2013)

表 2.2.2-7 模擬する BWR 使用済燃料の特性

集合体	配列	9×9A		9×9B	
	燃料ピッチ [mm]	14.4		14.5	
燃焼度		45 (参考として 55)		45 (参考として 55)	
ペレット	種類	UO ₂ -Gd ₂ O ₃	UO ₂	UO ₂ -Gd ₂ O ₃	UO ₂
	U235 濃縮度 [%]	3.8		3.8	
	Gd ₂ O ₃ 重量比 [%]	5.0	—	6.0	—
	外径 [mm]	9.56		9.4	
被覆管	外径 [mm]	11.18		11	
	内径 [mm]	9.76		9.6	
線出力	4 cycle*1	184	194	176	168
	5 cycle*1	147	155	141	150
他の共通条件 ; ペレット高さ 10 mm 冷却材入口温度 216 °C 被覆管材質 ジルコイ-2 冷却材出口温度 287 °C など					

*1 : 原子炉の運転サイクルを示す。1 cycle は 13 ヶ月 (390 日) と想定

通常運転を模擬した計算結果を、PWR および BWR について、それぞれ図 2.2.2-12 および図 2.2.2-13 に示す。図 2.2.2-12 には、現行型ではない 17×17 型 STEP1 の実測データを含めているが、これは、同型燃料における UO₂ 燃料と Gd 添加燃料の FGR 実測値を比較する（後段に記載）ためである。

PWR 使用済燃料の UO₂ 燃料に対する FGR 計算結果は 0.2~0.4 % 以下であり、FGR 実測値の分布範囲内 (2 % 以下) に入っている。ただし、Gd 添加燃料に対する FGR 計算結果は 1.9~2.8 % となり、UO₂ 燃料よりも高くなった。これは、Gd₂O₃ の熱伝導度が UO₂ と比べて低く、計算上ペレット内の温度が下がりにくいため、粒内の FP ガスの拡散移行が促されることが一因だと考えられた。これらの結果、平成 28 年度に検討した 17×17 型 STEP2 燃料の FGR (2 %) を超える計算結果が一点発生した。しかしながら、現在の設定 (2 %) を数倍するような顕著な結果ではないことや、いまだ解析件数が少なく且つ Gd 添加燃料の解析条件に再検討の余地があると考えられることから、FGR の標準値 (2 %) を変更する必要は無いと判断した。

BWR 使用済燃料に対する FGR 計算結果は、燃焼度が 45 GWd tU⁻¹ の場合は 0.1~2.1 %、55 GWd tU⁻¹ の場合は 0.7~6.2 % となり、燃焼度 35~40 GWd tU⁻¹ の範囲の突出した FGR 実測値を除けば、燃焼度が高くなるのに伴って FGR が高まっていく傾向をもつ FGR 実測値の分布状態と概ね合致した。突出した FGR 実測値は、「3) 計算条件などの検討」で前述した、FGR が想定外に高いとされたデータに該当する。

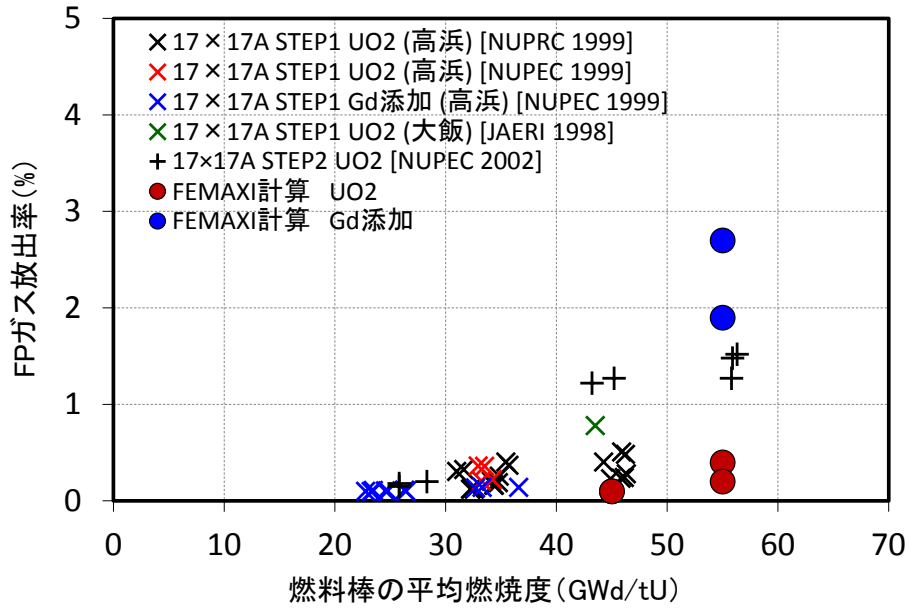


図 2.2.2-12 PWR 使用済燃料の FGR 計算結果

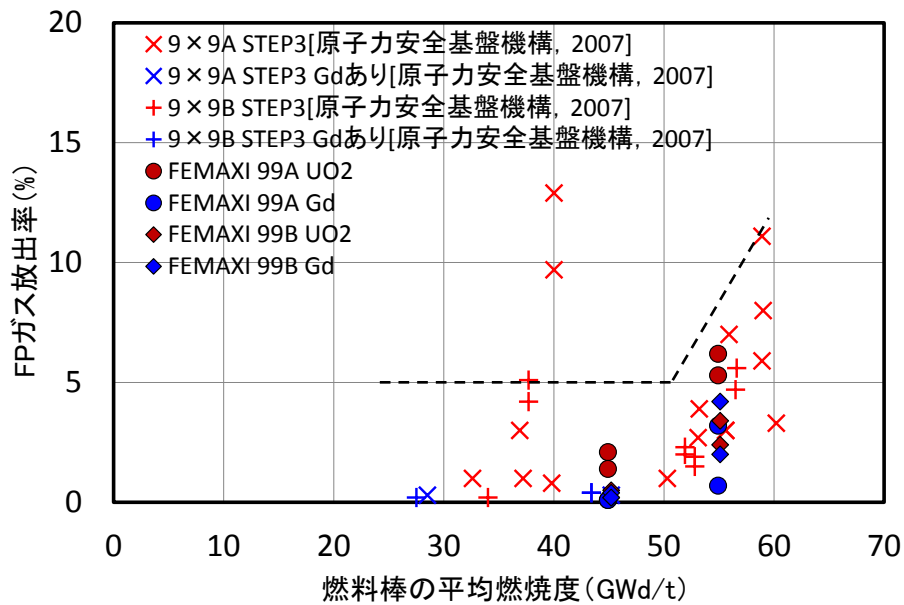


図 2.2.2-13 BWR 使用済燃料の FGR 計算結果

次に、PWR 使用済燃料について、通常運転後に 44 kW m^{-1} で 12 時間照射する場合の FGR 計算結果を図 2.2.2-14 に示す。「1) 国内向け FGR 検討の概要」で示したとおり、これまでに、FGR と経験最高線出力との線形相関から FGR の最大値を約 17 % と評価した。これに対し、 UO_2 燃料に対する FGR 計算結果は約 17 % になり、平成 28 年度の検討結果と合致した（図 2.2.2-13 中の実測データは全て UO_2 使用済燃料の測定値である）。ただし、Gd 添加燃料の FGR 計算値は UO_2 燃料の場合の約 2 倍となる 33~34 % と計算された。この違いの要因は、前述したような Gd_2O_3 の添加による熱伝導度の低下が一因と考えられた。

Gd 添加燃料の FGR 計算結果が突出して高い点については疑問が残る。図 2.2.2-12 で示した 17×17 型 STEP1 から測定された FGR は、 UO_2 燃料と Gd 添加燃料で同等である。また、この傾向は、燃焼度が $30 \sim 40 \text{ GWd tU}^{-1}$ の範囲で見られており、燃焼が進むとともに減少する Gd の添加影響が、より燃焼度が高い 55 GWd tU^{-1} 以上になって顕在化する可能性は低いと考えられるためである。

これらより、Gd 添加燃料の FGR 計算値に留意すべきものの、 UO_2 燃料に対する FGR 計算結果に限れば、これまでに検討した FGR 最大値を導出する考え方は概ね妥当であると判断された。ただし、Gd 添加燃料の FGR 計算結果の精度については、引き続き検討する必要がある。本項目では、計算条件の適切化をひとつの変数に絞って行ったが、今後は、より広範な条件の組み合わせを適切化することも必要であると考えられた。

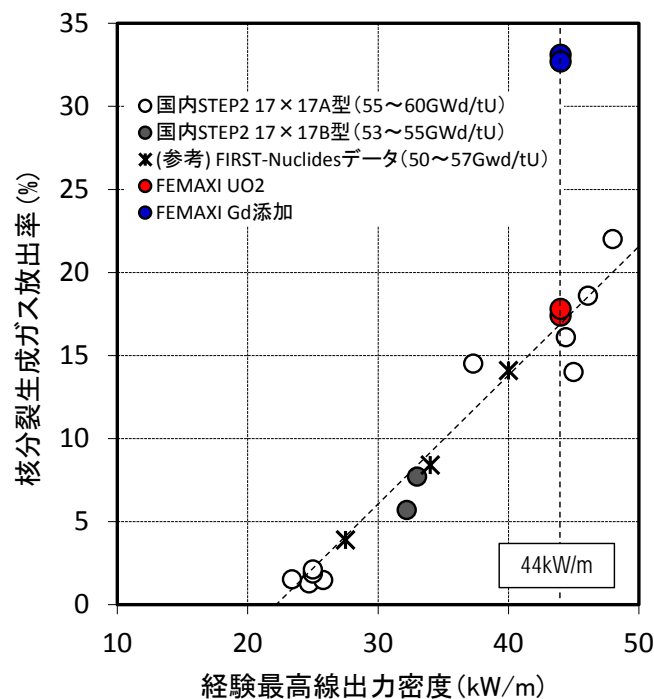


図 2.2.2-14 PWR 使用済燃料における高出力運転後の FGR 計算結果

(3) 燃料溶解速度の炭酸濃度依存性評価

わが国の緩衝材間隙水組成は、地層処分研究開発第2次取りまとめ（以下、H12レポート）（核燃料サイクル開発機構，1999）で用いたモデル計算（小田ほか，1999）によると、地下水の方解石（ CaCO_3 ）との平衡反応を想定しているために炭酸濃度が高くなる傾向にある。諸外国の地下水中の全炭酸濃度（中性～弱アルカリ性なので、実質的には炭酸水素イオン濃度）が $10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$ 程度であるのに対して、直接処分第1次取りまとめで設定した緩衝材間隙水中の全炭酸濃度は、それより約1桁高い $1.7 \times 10^{-2} \text{ mol dm}^{-3}$ である（原子力機構，2015a）。

使用済燃料もしくは二酸化ウラン（ UO_2 ）の溶解速度に及ぼす炭酸の影響については、いくつか既往の報告がある（原子力機構，2016；Kitamura and Akahori，2016）。図 2.2.2-15 に示すとおり、燃料溶解速度が全炭酸濃度の増加に伴い高くなっている傾向が見られるものの、実験雰囲気にも影響されており判然としない。地層処分環境に近いような還元条件での実測データを掲載している文献は2件（Cachoir et al.，2005；Evins et al.，2014（図 2.2.2-15 中の“REDUPP（2014）”））しかなく、しかも Evins et al（2014）は天然地下水を使用しているため、必ずしも炭酸影響が観察されているとは言いがたい。

このことから、わが国における直接処分性能評価のためのソースタームパラメータのひとつである燃料溶解速度について、 UO_2 を用いた実験研究を行うこととした。

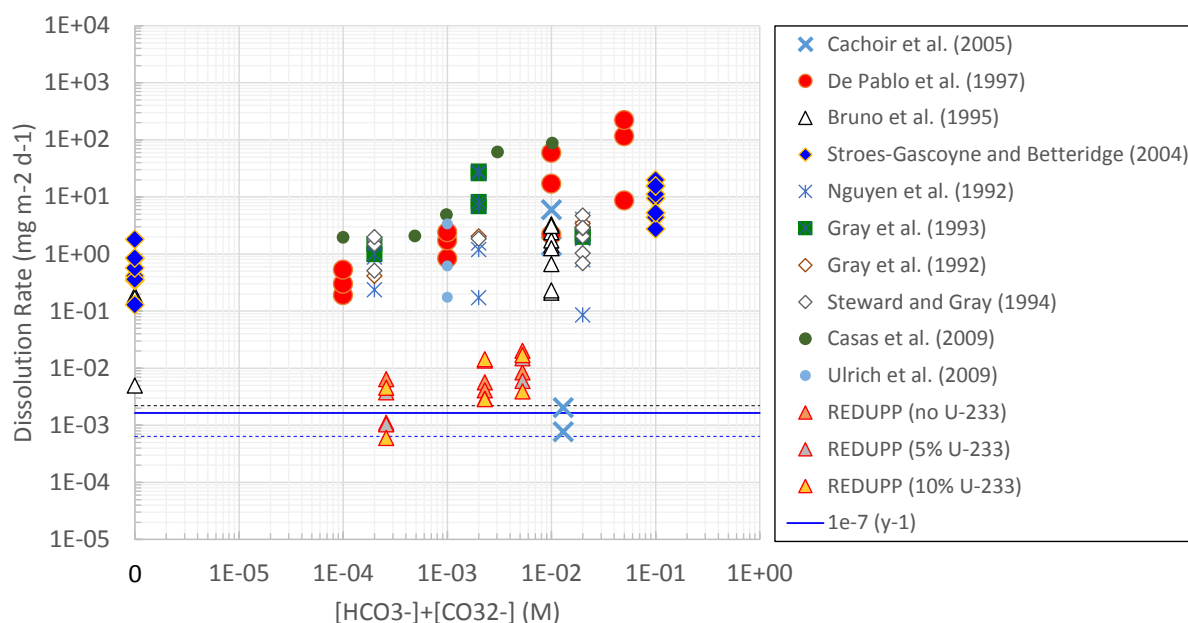


図 2.2.2-15 燃料溶解速度の全炭酸濃度依存性に関する文献情報

(原子力機構，2016)

1) 実験方法

溶解速度測定実験は、Ollila (2008) の手法を参考にバッチ法で行った。ポリプロピレン製容器に $0 \sim 0.05 \text{ M (mol dm}^{-3}\text{)}$ の炭酸水素ナトリウム (NaHCO_3)、 0.1 M の塩化ナトリウム (NaCl) および $2 \times 10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$ の pH 緩衝剤 EPPS (3-[4-(2-hydroxyethyl)-1-piperazinyl]propanesulfonic acid) の混合水溶液を入れ、pH を 8 に調整し、アルゴン雰囲気

気グローブボックス（酸素濃度 0.1 %以下）還元剤である鉄片もしくは塩化スズ(II) (SnCl₂) 水溶液を添加した。恒温振とう機（25 °C）で 4 日ほど振とうしたのちに pH を再度確認および調整し、UO₂ 粉末（比表面積 67 m⁻¹）を添加し、再び恒温振とう機（25 °C）で振とうした。所定の期間経過後に、試料中の pH および酸化還元電位 (E_h vs. SHE) をガラス電極で測定し、水溶液の一部を分取して孔径 0.45 μm および分画分子量 10⁴ (10 kDa) のフィルターで固液分離を行い、ろ液中の溶存ウラン濃度を誘導結合プラズマ質量分析 (ICP-MS) で定量した。振とう機は大気下に置かれているものを使用したものの、グローブボックス中で試料容器を脱酸素剤とともに密封したことから、ICP-MS 測定以外はアルゴン雰囲気を実施できたと考えられる。

2) 実験結果

所定の期間経過後に得られた各試料の pH と E_h の関係を図 2.2.2-16 に示す。鉄片を還元剤とした試料は 36.8 日経過後も比較的低い (≤-100 mV) E_h 値を保っているが、SnCl₂ を還元剤とした試料については 36.8 日経過後に E_h 値が上昇した。したがって、本試験に用いる還元剤としては鉄片の方が適切であることがわかった。

得られた溶存ウラン濃度の NaHCO₃ 濃度依存性を、試験期間および還元剤の種類ごとに図 2.2.2-17 に示す。いずれのプロットにおいても、溶存ウラン濃度は NaHCO₃ 濃度の増加とともに高くなる傾向が確認され、特に E_h が高くなった還元剤 SnCl₂ 試料の 36.8 日経過後の試料のうち全炭酸濃度が高い (0.01 M 以上) 試料で顕著であった (図 2.2.2-17(f))。この場合、ウランは完全に 6 価に酸化されたものと思われる。また、ほかの条件においても、全炭酸濃度の上昇に伴って溶存ウラン濃度も上昇した。この傾向は、既往の実測値および熱力学計算結果 (北村ほか, 2015) と整合する。なお、ウラン (IV) の酸化に伴って溶存ウラン濃度が上昇したと思われる試料以外については、溶存ウラン濃度の顕著な時間変化は見られなかった。

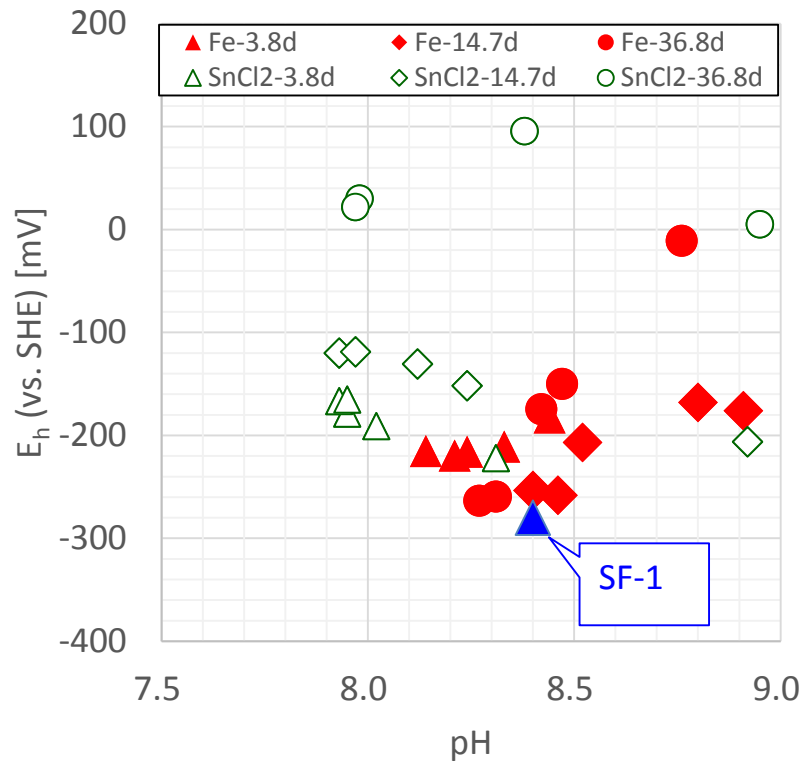
図 2.2.2-17 に示した実験結果から、次式を用いて UO₂ の溶解速度を算出した。

$$r = \frac{(C_t - C_0)A \times 10^3}{(S - (C_t - C_0)A S_A) \left(\frac{t}{86400} \right)} \dots \dots \dots \text{式 2.2.2-1}$$

ここで、*r* は溶解速度 (mg m⁻² d⁻¹)、*C_t* は時間 *t* (s) 経過後の溶存ウラン濃度 (M)、*C₀* は初期溶存ウラン濃度 (M; 本研究では 0 M)、*A* はウランの原子量 (= 238.0)、*S* は初期の固相の表面積の総和、*S_A* は固相の比表面積を表す。

(2.2.2-1)式を用いて得られた二酸化ウラン溶解速度の全炭酸濃度依存性を図 2.2.2-18 に示す。大半の試料で溶存ウラン濃度の顕著な時間変化が見られなかったことから、実験期間が長い条件の試料ほど溶解速度が低くなった。長期間の実験では系が平衡に到達する可能性もあることから、長期間の実験結果の取り扱いには注意が必要である。また、還元剤 SnCl₂ 試料については、上で述べたとおり還元状態の維持に疑問が生じたことから、鉄片を還元剤とした試料で得られた結果の方が信頼できると考えられる。このことを踏まえて図 2.2.2-17 における鉄片の結果を見ると、本研究で得られた値は直接処分第 1 次取りまとめの設定値に相当する値と比べ、概ね同程度かやや低い値をとっていることがわかる。また、図 2.2.2-15 に

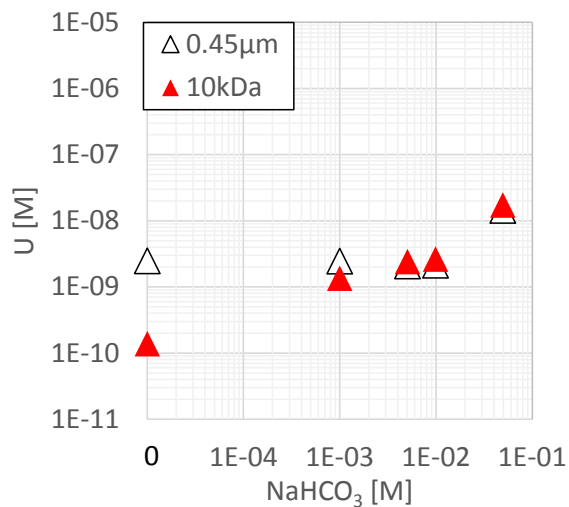
示した既往の文献値と比較すると、還元条件で得られた実測値である Cachoir et al. (2005) や“REDUPP (2014)” (Evins et al., 2014) と比較的よく整合していることがわかる。したがって、直接処分第1次取りまとめの設定値を見直す必要性はないと判断された。



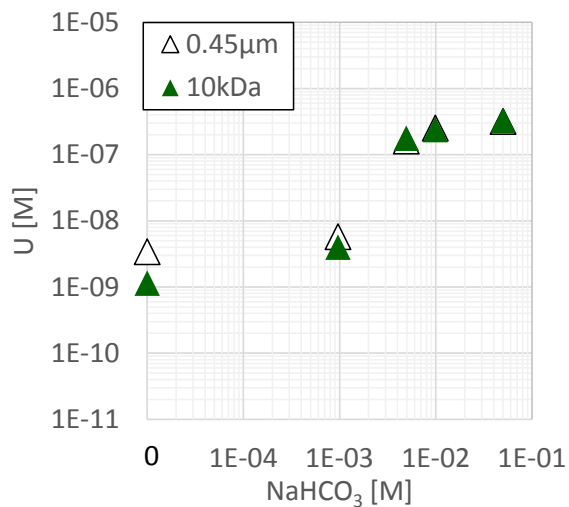
(SF-1 は直接処分第1次取りまとめの模擬緩衝材間隙水の値である)

図 2.2.2-16 溶解速度測定試験に使用した試料の pH と酸化還元電位 (E_h) の関係

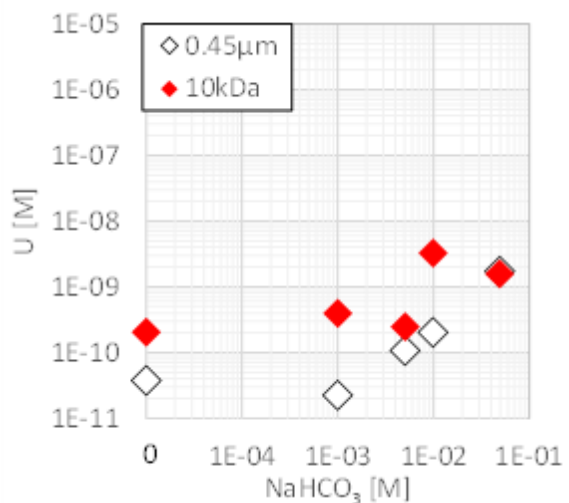
(a) 還元剤鉄片、3.8日後



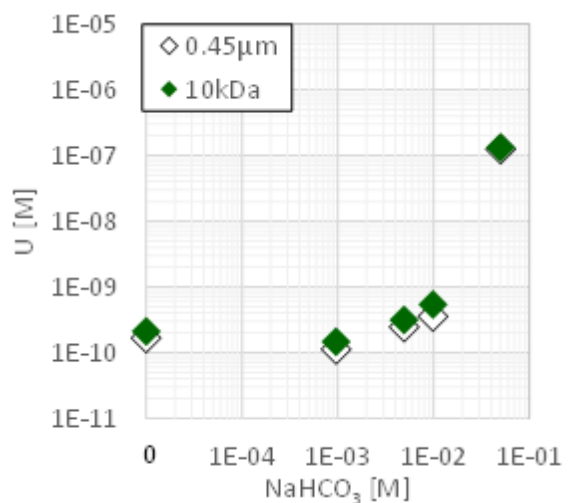
(b) 還元剤 SnCl₂、3.8日後



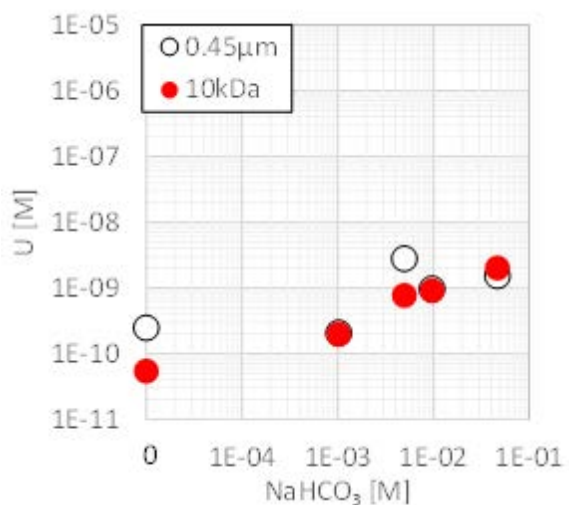
(c) 還元剤鉄片、14.7日後



(d) 還元剤 SnCl₂、14.7日後



(e) 還元剤鉄片、36.8日後



(f) 還元剤 SnCl₂、36.8日後

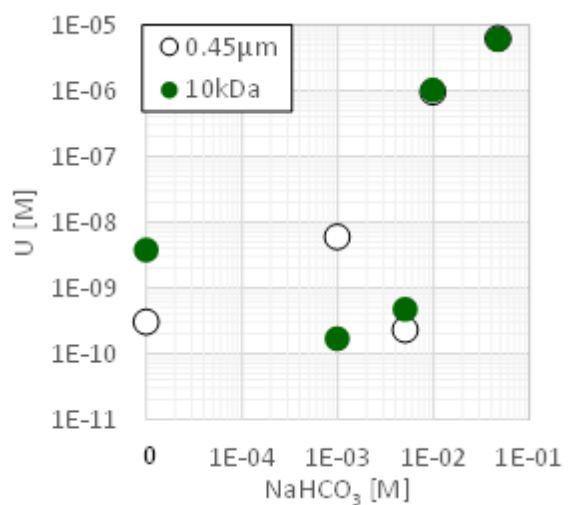
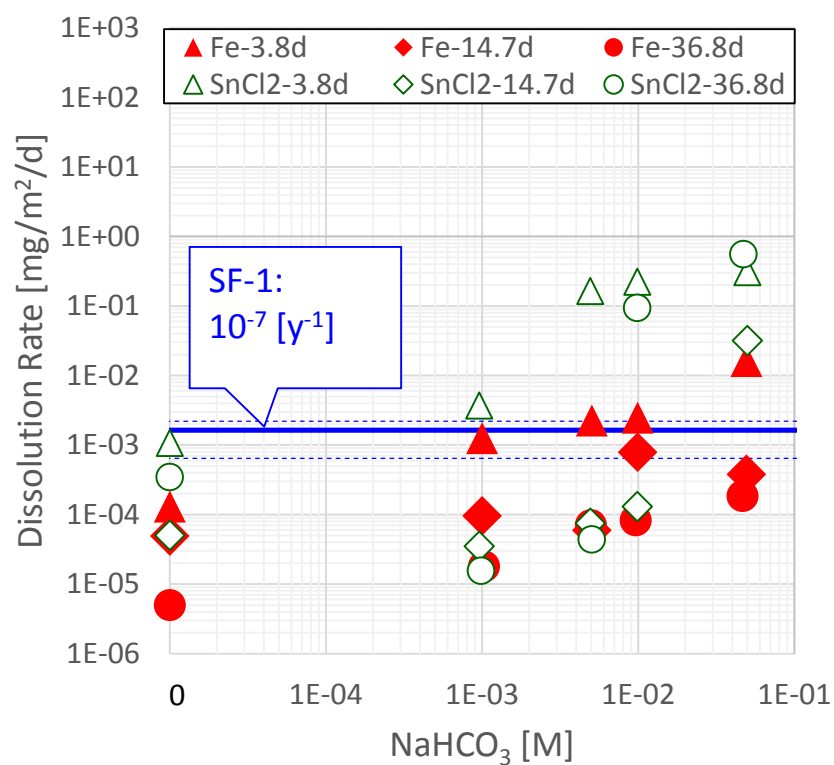


図 2.2.2-17 本研究で得られた溶存ウラン濃度の全炭酸濃度依存性



(SF-1: $10^{-7} [y^{-1}]$)は、直接処分第1次取りまとめの設定値に相当する値であり、破線はその不確実性の範囲を表す)

図 2.2.2-18 本研究で得られた二酸化ウラン溶解速度の全炭酸濃度依存性

(4) ソースターム評価の総括

1) ソースタームパラメータの暫定値の設定

瞬時放出割合を決めるための指標となる FGR の検討「(2) FEMAXI コードを用いた核分裂生成ガス放出割合の評価の検討」では、FEMAXI-7 を用いた FGR 解析結果から、平成 28 年度までに検討した燃料タイプ毎の FGR の推奨値と最大値が妥当であることが裏付けられた。従って、これらタイプ毎の FGR と集合体発生体数から荷重平均を求めることで、直接処分の対象である全ての PWR 使用済燃料を代表する FGR を導出し（式 2.2.2-2、式 2.2.2-3）、表 2.2.2-8 に示すとおり整理した。ただし、燃料タイプ毎の集合体発生体数を現段階で想定することはできないため、全タイプの発生体数が同数であると仮定する。

$$\text{推奨値} : F_{mean} = \frac{\sum_{k=1}^n (F_{(std)k} \times W_k)}{\sum_{k=1}^n W_k} \dots\dots\dots \text{式 2.2.2-2}$$

$$\text{最大値} : F_{max} = \frac{\sum_{k=1}^n (F_{(max)k} \times W_k)}{\sum_{k=1}^n W_k} \dots\dots\dots \text{式 2.2.2-3}$$

F_{mean} : 全 PWR に対する FGR、 W : 燃料タイプ別の発生数
 $F_{(std)}$: 燃料タイプ別の FGR 推奨値、 $F_{(max)}$: 燃料タイプ別の FGR 最大値

表 2.2.2-8 解析結果を踏まえた PWR 使用済燃料の FGR

燃料タイプ	FGR [%]		燃料集合体発生体数 [本]
	推奨値	最大値	
従来型	1	1	a *1
17×17 型 STEP1	1	1	a *1
17×17 型 STEP2	2	17	a *1
全 PWR の代表値	2.0 *2	7.0 *3	3a

- *1 : 全タイプの発生体数が同数であるとし、a[体]とおいた。
- *2 : 推奨値 : $F_{mean} = \{(1[\%] \times a[\text{体}]) + (1[\%] \times a[\text{体}]) + (2[\%] \times a[\text{体}])\} \div (a[\text{体}] \times 3)$
 $\approx 1.33 \approx 2 [\%]$ (小数点以下切上げ)
- *3 : 最大値 : $F_{max} = \{(1[\%] \times a[\text{体}]) + (1[\%] \times a[\text{体}]) + (17[\%] \times a[\text{体}])\} \div (a[\text{体}] \times 3)$
 $\approx 6.33 \approx 7 [\%]$ (小数点以下切上げ)

上記の FGR の値を、表 2.2.2-1 中の I, Cs, Cl について示した式に代入して瞬時放出割合を計算した。他の核種の設定値と合わせて表 2.2.2-9 に示す。なお、諸外国の安全評価で用いられている瞬時放出割合を参考として付記した。表 2.2.2-9 より、わが国向けのパラメータ設定値は、燃料タイプ毎の発生体数を仮定しているものの、諸外国の設定状況と概ね同様の傾向を示している。また、FGR の最大値は不確実性を考慮した核種移行解析に資することができると考えられる。ただし、現行型である 17×17 型 STEP2 の発生体数が増えるなど、FGR が高い燃料の処理量が多く想定される場合、I, Cs, Cl の瞬時放出割合は高くなる。

UO₂ の溶解速度については、「(3) 燃料溶解速度の炭酸濃度依存性評価」において、平成 28 年度に設定した溶解速度 ($1 \times 10^{-7} \text{ y}^{-1}$) がわが国特有の高い全炭酸濃度の条件下においても適用可能であると判断された。従って、長期溶解速度は表 2.2.2-2 で示した値から変更はない。

表2. 2. 2-9 瞬時放出割合一覧（諸外国の設定を付記）

		本項目で検討した 国内向けパラメータ (左値：推奨値, (右値)：最大値)	スイス		スウェーデン SR-Site (2011)	フィンランド TURVA-2012	
			Opalinus Clay (2002)	SGT-E2 (2014)			
想定炉型		PWR	PWR	PWR-UO ₂	PWR	PWR	
想定燃焼度		45 [GWd tHM ⁻¹]	48 [GWd tHM ⁻¹]	54~64 [GWd tHM ⁻¹]	60 [GWd tHM ⁻¹]	60 [GWd tHM ⁻¹]	
FGR設定 [%]		2.0 (7.0)	1	1.8	4.3	設定なし	
瞬時放出割合 (IRF [%])	使用済 燃料から	C	10.0 (14.0)	10	10	11	5.5
		Cl	6.0 (24.0)	10	5.4	13	8.2
		Se	1.0 (7.0)	4	0.2	0.65	0.4
		I	2.0 (10.0)	4	5.8	4.3	5.0
		Cs	1.2 (7.0)	4	5	4.3	5.0
		Sr	1.0 (4.0)	1	1	0.25	1.0
		Tc	1.0 (5.0)	2	1	0.2	1.0
		Pd	1.0 (5.0)	2	1	0.2	1.0
		Sn	0.1 (7.0)	4	0.1	0.03	0.001
	構造材 金属から	C	20 (40) (全量有機形態)	20 (有機+無機)	20 (有機+無機)	20 (化学形態未特定)	20 (化学形態未特定)

2) より現実的な評価を行うための課題の整理

今後、国内使用済燃料のソースターム評価の信頼性をより高めるためには、評価に付随する不確実性を適切に考慮する必要がある。そこで、平成28年度までの調査結果から瞬時放出および長期溶解の評価に係る主な不確実性因子を表2.2.2-10に示すとおり整理した。また、これまでの検討状況を踏まえ、これらを考慮する必要性および不確実性低減のための課題を整理した。

表2. 2. 2-10 主な不確実性因子

No.	不確実性因子	主な影響先
1	処分対象燃料の多様性（炉型, 設計仕様, 燃焼度など）	瞬時放出(長期溶解)
2	核分裂生成ガス放出率（FGR）の導出手法	瞬時放出
3	核種放出割合を実測する試験方法の妥当性	瞬時放出(長期溶解)
4	リム組織生成の寄与	瞬時放出
5	使用済燃料特性の経時変化（放射線影響を含む）	瞬時放出
6	構造材金属からのC-14の放出挙動、C-14の化学形態	瞬時放出(長期溶解)
7	燃料ペレットの比表面積	長期溶解
8	地質環境条件（炭酸濃度など）の多様性	長期溶解
9	地質環境条件の経時変化（放射線影響を含む）	長期溶解

No. 1およびNo. 2は相互の関連性が高い。今後、多様な使用済燃料がどのように類型化されるのかに応じて適切なFGR導出手法を選定する必要がある。また、本項目での検討は商用炉以外の研究炉、MOX燃料などといった比較的特異なケースをほぼ考慮していない。従って、国内使用済燃料の多様性に応じたFGRの検討は継続するべきであり、そのためには、照射後

試験の追加・継続が望まれるとともに、試験で補えない部分についてはFEMAXIなどのシミュレーションコードも活用していく必要がある。

No. 3は、諸外国の安全評価で参照されている根拠データに関する事項である（たとえば、Gray, 1999）。これらは、1990年台以前に実施された比較的古い実験データであり、用いられた燃料サンプルの代表性に関する記載が不明確な上、近年発生している使用済燃料に対する代表性についても懸念がある。現段階では、根拠データを参照しつつ保守側の判断を加味する方法が考えられるが、同様の試験の新しい知見については今後とも情報収集が必要であると考えられる。

No. 4については、照射後試験の結果からリム組織は瞬時放出へ寄与しないことが示唆されており（たとえば、Johnson et al., 2012）、現状では陽に考慮する必要性は低いと考えられる。しかしながら、さらなる高燃焼度化運転が現実化するような場合には、再考を要する因子であると思われる。

No. 5については、燃料自身から放射される α 線の影響下で燃料内部のFPガス原子の拡散挙動が経時的に変化することが懸念されており、このことで数千年後の瞬時放出割合が高まるという試算例がある（Ferry et al., 2004）。このような長期間の経時変化は短期間の試験などから判断できないため、現段階ではその可能性を考慮せざるを得ないと判断し、瞬時放出率の最大値を考える際に加味している（表2.2.2-1参照）。今後は、加味する幅をより現実的にしていくことが課題となる。

No. 6については、その放出量や化学形態に起因する収着挙動が処分場の線量を支配する因子になると考えられており、国内外での研究開発が現在も進められている。特に化学形態については、現状、放出されるC-14の全量が有機形態であると仮定しているが、これは最も悲観的な想定であり、今後も最新知見の調査を継続し、必要に応じて化学形態の想定を修正していく必要がある。

No. 7については、種々の試験において比表面積を考慮したうえで UO_2 溶解速度が評価され、現在の設定である $1 \times 10^{-7} \text{ y}^{-1}$ が主流になりつつある。しかし、European Commissionが行ったMICADOプロジェクト（Grambow et al., 2010）ではBET法で測定された比表面積に不確実性を考慮した幅を持たせることが提案されるなど、無視できない因子であると考えられることから、国内使用済燃料ペレットの比表面積を把握することは、今後の課題となる。

No. 8については、未照射の UO_2 を用いた小規模の基礎試験の結果から、 UO_2 溶解速度の全炭酸濃度依存性を確認した（「(3)燃料溶解速度の炭酸濃度依存性評価」参照）。しかしながら、ペレット大の UO_2 試料や照射後試料といった実践的な試料による、わが国で想定される緩衝材間隙水に対する浸出試験例はなく、諸外国が提唱する UO_2 溶解速度がわが国にも適用できるかの最終的な判断は行えていないため、それらのデータを得るための試験を今後とも継続する必要がある。

No. 9については、諸外国において酸素に富む地下水が処分場まで浸透する可能性が検討され、その上で処分場の還元性条件は保たれるとしている（たとえば、NWMO, 2012）。また、国内で直接処分を行うことを前提とした処分場原位置の地下環境を想定することは時期尚早であることから、現段階でこの影響を検討する必要性は低いと考えられる。

2.2.3 多重バリアによる閉じ込め性能評価手法に関する研究

(1) 本項目の背景と目的

サイトの条件が特定されていない段階では、わが国の地質環境条件として、地理、地形、地質学的に様々な可能性が考えられることから、処分施設の設計においては、対象とする多様な条件をカバーできるように、坑道のレイアウトや坑道の仕様、廃棄体の定置方式、処分容器の仕様などについての様々な代替案（以降、設計オプションと呼ぶ）を検討しておくことが重要である。また、対象とする条件が仮定される、あるいは具体化された場合に、その条件に適用可能な設計オプションを絞り込む際には、工学的実現性や経済性のみならず、安全性の観点も考慮して総合的に評価されることが重要である。

こうした観点から、平成 28 年度においては、廃棄体の定置方式（縦置き方式／横置き方式）などの坑道近傍のスケールにおける設計オプションと、処分場から地表に至る経路を含むより広域的なスケールでの処分場の位置に関する設計オプション（沿岸部／内陸部、深度の違いなど）を対象として、これら設計オプションの選択に依存して閉じ込め性能にどのような違いが生じるか（あるいは生じないか）を把握するための核種移行挙動に関する解析的検討を行った。

平成 29 年度においては、平成 28 年度までの検討結果を踏まえて、設計オプションの選択に依存して閉じ込め性能にどのような違いが生じるか（あるいは生じないか）についての検討を、核種の移行経路、速度、遅延挙動などを具体的な指標とした分析に重点をおいて継続するとともに、それらの検討結果から得られる知見について、本検討で想定した特定の条件下における知見としての整理だけでなく、より一般性の高い知見として整理することも試みた。

具体的な検討内容を以下に示す。

- 廃棄体の定置方式の選択による閉じ込め性能の違いの分析・整理

使用済燃料直接処分の安全評価においても、ガラス固化体の安全評価と同様に、人工バリア、および坑道からの調査が容易で特性を把握しやすい処分施設近傍の比較的狭い領域の岩盤から成るニアフィールドの性能に力点を置いて安全性を示す評価法

（ニアフィールドアプローチ）が有効であるとされる（原子力機構，2015）。この領域における設計オプションとしては、廃棄体の定置方式（縦置き方式／横置き方式など）や長寿命化（銅、チタンなど）などが考えられるが、このうち定置方式の選択による閉じ込め性能の違いについては、三次元的な移行経路の違いが核種移行挙動に与える影響を周辺岩盤の亀裂との交差状況なども考慮しつつ検討できる詳細な解析的検討が必要となる。そこで、平成 28 年度と同様に廃棄体の定置方式（縦置き方式／横置き方式）に着目し、この設計オプションの選択により、アクチニドなどのニアフィールドでの遅延効果が特に期待できる核種についての閉じ込め性能にどのような違いが生じるか（あるいは生じないか）を分析・整理した。

- 処分場の位置の選択による閉じ込め性能の違いの分析・整理

使用済燃料直接処分の安全評価では、燃料から瞬時放出する C-14 や I-129 など、バリア材料への収着による遅延効果が小さく、ニアフィールドの閉じ込めによって核種移行率を低減する効果が小さい可能性がある核種も含まれる。こうした核種のうち、

特に、比較的半減期が短い C-14 などの核種については、ニアフィールドから放出した核種が地表あるいは海底下に到達するまでの、より広範囲な領域での閉じ込め性能が重要となる可能性がある。このような領域では、地表までの卓越した核種移行経路となりうる断層などの高透水性構造と処分場との位置関係、地下水の上昇流が生じうる塩淡境界と処分場との位置関係、海水準変動や隆起・侵食などの長期的な環境変遷によるそれら位置関係の時間変遷などの閉じ込め性能への影響に着目した検討が必要となる。それらの影響の有無や程度は、処分場をどこに建設するかによって異なることから、平成 28 年度と同様に処分場の位置を設計オプションと捉え、処分場の位置の選択により、閉じ込め性能にどのような違いが生じるか（あるいは生じないか）を分析・整理した。

本項では、それぞれの着目点ごとの検討結果を「(2) 廃棄体の定置方式の選択による閉じ込め性能の違いの分析・整理」と「(3) 処分場の位置の選択による閉じ込め性能の違いの分析・整理」に示す。また、(2)と(3)の知見をより一般性の高い知見として整理することを目指した統合的な分析について「(4) 設計オプションの選択による閉じ込め性能の違いの統合的な分析・整理」に示す。なお、(4)では、設計オプション間で閉じ込め性能に差が生じる場合などでの、閉じ込め性能の差の緩和や更なる向上などのための方策案を検討した結果についても示す。本項のまとめを「2.3 まとめ」に示す。

(2) 廃棄体の定置方式の選択による閉じ込め性能の違いの分析・整理

処分坑道周辺は、廃棄体、緩衝材、坑道の支保、埋め戻し材、岩盤といった複数の要素によって成り立つ。縦置き方式と横置き方式では、それらの要素のつながり方が異なり、坑道周辺での地下水や核種などの移行経路はその影響を受けて変わり得る。特に、坑道周辺で水理学的に連続した移行経路となる可能性がある掘削影響領域（以降、EDZ と呼ぶ）と緩衝材とのつながり方については、縦置き方式と横置き方式では大きく異なり、定置方式の選択によって、EDZ が核種の支配的な移行経路となるかどうか左右される可能性がある。

こうした観点から、定置方式が異なることが移行挙動に及ぼす影響と、それによるニアフィールドの閉じ込め性能の違いを把握するための解析的検討を、人工バリア出口とニアフィールド母岩（坑道中心から下流側 100 m までの領域を想定）の出口におけるアクチニドの移行率（特に移行率の最大値の大きさとその出現時期など）およびニアフィールド内部におけるアクチニドの残留率などを指標として行った。このような解析的検討は、全体システム性能評価などで用いられる一次元モデルなどのシンプルな手法ではなく、三次元的な移行経路の違いが核種移行挙動に与える影響を、周辺岩盤の亀裂との交差状況なども考慮しつつ検討できる詳細な解析的検討が必要となる。また、周辺岩盤としては亀裂性岩盤を想定することで、閉じ込め性能の差の有無や程度を、閉じ込め性が比較的厳し目となる状況下で把握することとした。さらに、この検討から得られる知見を、設計オプションとして想定した廃棄体の定置方式を縦軸に、ニアフィールドにおける核種の移行挙動や閉じ込め性を左右する環境条件を表す因子などを横軸にとったマトリクス形式で整理した。

なお、緩衝材や岩盤への収着による遅延効果が有効となるアクチニドのような収着性核種の場合には、ニアフィールドにおける核種の閉じ込めが期待できる一方で、C-14 や I-129 の

ような非収着性核種については、ニアフィールドへの閉じ込めによって核種移行率を低減する効果が小さい可能性があることから、ここでは、主に、ニアフィールドにおける閉じ込めが有効であり、その検討の重要性がより高いと考えられる前者の収着性核種を対象として移行挙動や閉じ込め性の特徴の分析・整理を行った。

はじめに、横置き方式と縦置き方式での構成要素のつながり方の違いや閉じ込め性に影響し得る環境条件などに着目した移行経路の違いを分析した（後述の1）参照）。次に、三次元物質移行解析の解析方針などの整理とそれに基づく定量的な検討（後述の2）参照）、およびその結果を踏まえた定置方式の選択による閉じ込め性能の違いに関する知見の整理（後述の3）参照）を行った。

1) 定置方式の選択による移行経路の違いの分析・整理

前述のように、縦置き方式と横置き方式ではニアフィールドを構成する要素のつながり方が異なるため、地下水や核種などの移行経路はその影響を受けて変わり得る。そこで、まず、主な移行経路のパターンを、廃棄体を起点として岩盤に放出されるまでの構成要素のつながり方に基づき整理した。さらに、EDZ が卓越した移行経路となる可能性が定置方式によって異なるかどうかを考察した。

● 構成要素のつながり方による移行経路のパターンの整理

横置き方式と縦置き方式でそれぞれ以下の構成要素を考慮して、主な移行経路のパターンの整理を行った。また、ここで想定した横置き方式と縦置き方式での構成要素の位置関係の概念を図 2.2.3-1 に示す。

- ・横置き：廃棄体、緩衝材、EDZ、岩盤（統計的な亀裂）、断層などの大規模高透水性構造
- ・縦置き：廃棄体、緩衝材、埋め戻し材、EDZ、岩盤（統計的な亀裂）、断層などの大規模高透水性構造

なお、縦置き方式における EDZ については、処分坑道周りの EDZ と処分孔周りの EDZ の2種類が考えられるが、主要な移行経路に着目して分析・整理を行う観点から、処分坑道の周りの EDZ のみを考慮した。

構成要素のつながり方に基づき、核種が通過する順番を考慮することで表 2.2.3-1 に示す 10 の移行経路のパターンが抽出された。

● EDZ が卓越した移行経路となる条件の検討

上記に示した特定の経路での移行が他の経路に比べて顕在化する可能性が定置方式によって異なるかについては、定置方式そのものの違いだけではなく、EDZ および周辺岩盤の透水性の空間分布などにも左右されると考えられる。特に、EDZ については、坑道の軸方向に水理学的に連続した移行経路が形成される場合には、複数の廃棄体から放出した核種が EDZ において収斂される可能性があると考えられる。表 2.2.3-1 には、EDZ を通過する移行経路として 6 つのパターン（橙色部分）が挙げられた。さらに、断層などの大規模高透水性構造がそのような EDZ と連結している場合には、その内部を核種が選択的に移行する状況が想定される（横-3 および縦-5, 7）。このような、坑道軸方向に連続した高い透水性をもつ EDZ と、断層などの大規模高透水性構造が連結して主要な水みちになるような場合は、それ以外の場合と比較して、性能評価において厳しい条件を与える可能性が高い

と考えられる。これに対して、豎置きの場合では、このような坑道を通る経路と、坑道を通らずに処分孔の緩衝材から岩盤へ直接移行する経路（豎-1, 2）が同時に存在し得ることから、横置き方式との違いが顕在化する可能性がある。

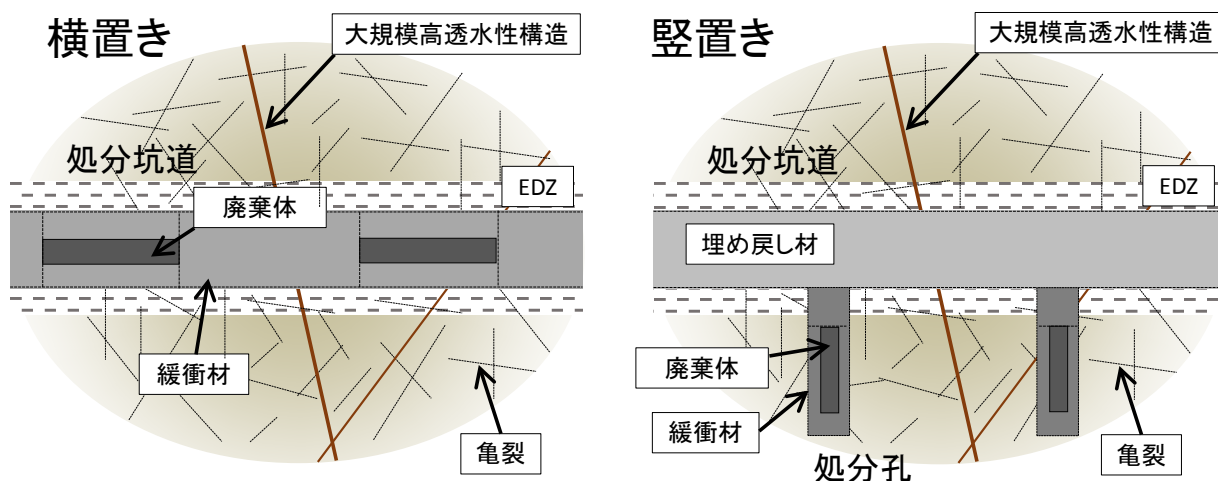


図 2.2.3-1 豎置き方式と横置き方式における構成要素の位置関係

表 2.2.3-1 ニアフィールドの構成要素のつながりに基づき抽出した主な移行経路

パターン No.	定置方式	要素-1	要素-2	要素-3	要素-4	要素-5
横-1	横置き	廃棄体	緩衝材	大規模高透水性構造	—	—
横-2		廃棄体	緩衝材	EDZ	亀裂	—
横-3		廃棄体	緩衝材	EDZ	大規模高透水性構造	—
豎-1	豎置き	廃棄体	緩衝材	亀裂	—	—
豎-2		廃棄体	緩衝材	大規模高透水性構造	—	—
豎-3		廃棄体	緩衝材	埋め戻し材	大規模高透水性構造	—
豎-4		廃棄体	緩衝材	埋め戻し材	EDZ	亀裂
豎-5		廃棄体	緩衝材	埋め戻し材	EDZ	大規模高透水性構造
豎-6		廃棄体	緩衝材	EDZ	亀裂	—
豎-7		廃棄体	緩衝材	EDZ	大規模高透水性構造	—

※豎-6 と豎-7 は、図 2.2.3-1 では埋め戻し材の下側の EDZ を通過することを想定。

2) 三次元物質移行解析による定量的な検討

• 三次元物質移行解析の方針と概要

1)の分析・整理の結果から抽出された、坑道軸方向に連続した高い透水性をもつ EDZ と、断層などの大規模高透水性構造が連結して主要な水みちになるような場合は、性能評価において厳しい条件となり、重要性が高いと考えられたことから、このような状況を想定して三次元物質移行解析を行うこととした。

解析モデルの概念を図 2.2.3-2 に示す。性能評価的にもっとも厳しい想定としては、上流側から EDZ に地下水が流れ込み、EDZ を坑道軸方向に移行した後に高透水性の構造を通

って母岩中を移行することが考えられる。あえてこのような状況を想定した解析を行うには、複数の高透水性構造が坑道周辺の EDZ と交差していることが必要となる。このような状況を詳細に表現しようとするとモデルが複雑になることから、評価上の想定として、図 2.2.3-2 に示すような 3 つ（坑道に対して上流側 2 つ、下流側 1 つ）の高透水性構造が 1 つの処分坑道と交差している単純化したモデルを構築して解析を行った。岩盤のそれ以外の領域については、統計的な亀裂ネットワークモデルを構築した。統計的亀裂ネットワークの亀裂統計データについては、直接処分第 1 次取りまとめの性能評価のリファレンスケースと同等とした。EDZ については一様に透水性の高い連続体で近似するモデルとした。

上記に示した考え方にに基づき、透水性が高く連続性も高い坑道沿いの EDZ と高透水性構造とが交差することを模擬した三次元物質移行解析を構築し、仮想的な収着性の物質を想定して解析を行った。

解析コードとしては Partridge（原環機構，2011）を使用した。これらの解析条件の詳細については、付録 1 に示す。

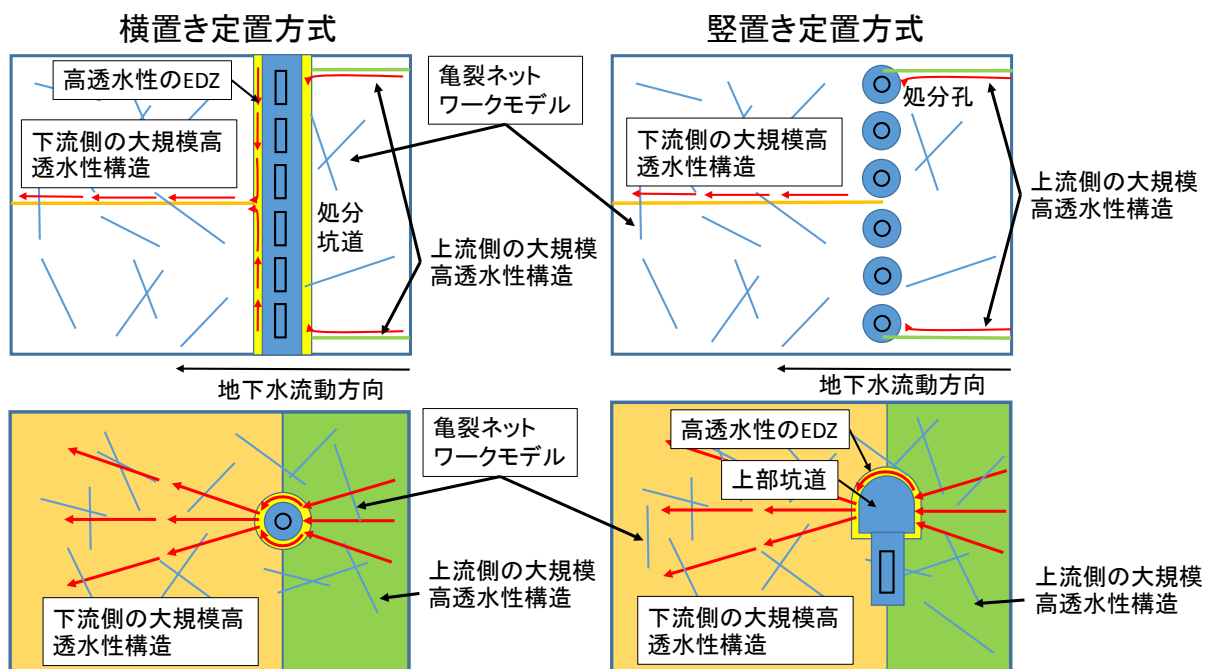


図 2.2.3-2 岩盤中の高透水性構造と坑道が交差することを想定した解析モデルの概念
（上：処分坑道を上から見た図、下：処分坑道を横から見た図）

- 定置方式の選択による閉じ込め性能の違いの分析

三次元物質移行解析で求められた物質移行挙動の例を図 2.2.3-3 に示す。横置き方式の場合は、上流側の大規模高透水性構造から流入する地下水が、EDZ を坑道軸方向に移行して下流側の大規模高透水性構造に至る経路を辿るために、本解析で設定した坑道内のほぼ全ての廃棄体から放出した物質が下流側の大規模高透水性構造に集中し、この亀裂を通じて母岩中を下流側に移行する挙動が認められた。これに対して、縦置き方式の場合は、下流側の大規模高透水性構造に沿って移行する物質もあるものの、処分孔の緩衝材から直接

岩盤中の亀裂に移行する物質も認められた。このことは、透水性が高く連続性も高い坑道沿いの EDZ と高透水性亀裂とが交差するとした本解析の限定された条件では、縦置き方式の場合では、表 2.2.3-1 で示した移行経路のパターンのうち、縦-1 の経路の寄与が比較的大きくなる可能性があることを示唆している。

三次元物質移行解析で求められた物質移行率の例を図 2.2.3-4 に示す。人工バリアからの移行率と天然バリアからの移行率のいずれにおいても定置方式による違いが認められ、縦置き方式の方が、横置き方式と比較して移行率を低く抑えられる結果となった（最大値で数分の一程度）。このことは、縦置き方式の場合では、個々の処分孔内の廃棄体から処分坑道まで一定の離隔が保たれることにより、透水性が高く連続性も高い坑道沿いの EDZ と大規模高透水性構造とが交差することの影響がある程度低減され、緩衝材から直接母岩に移行する物質の割合が相対的に増加することを示唆している。

廃棄体、人工バリアおよび天然バリア（ニアフィールド母岩）内での収着性物質の残留率の時間変化を図 2.2.3-5 に示す。大規模高透水性構造へ移行する物質の割合が、縦置き方式の方が横置き方式よりも小さいことを反映して、縦置き方式の方が横置き方式よりも物質がより長い期間にわたって人工バリアと天然バリアに留まる傾向が示されている。

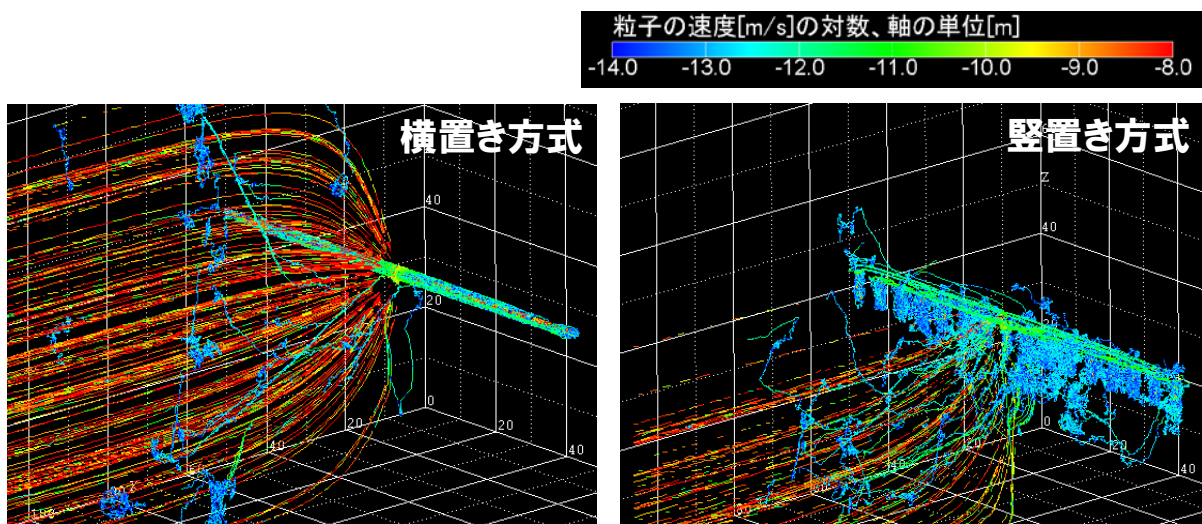


図 2.2.3-3 三次元物質移行解析で求められた物質移行挙動の例

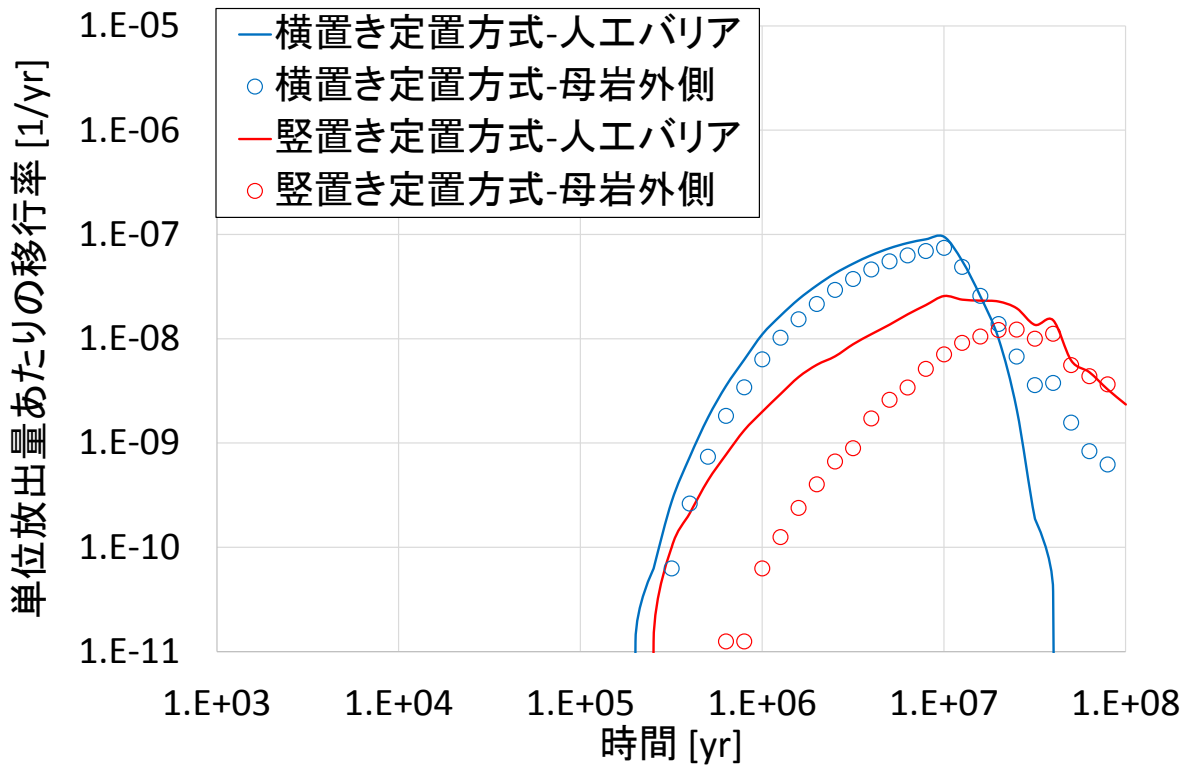


図 2.2.3-4 三次元物質移行解析で求められた物質移行率の例

(人工バリアからの移行率は、緩衝材と EDZ あるいは岩盤との境界面を単位時間あたりに通過する物質の数を、廃棄体から放出した物質の数で規格化したもの。天然バリアからの移行率は、坑道中心から 100 m 下流側の断面を単位時間あたりに通過する物質の数を、廃棄体から放出した物質の数で規格化したもの。)

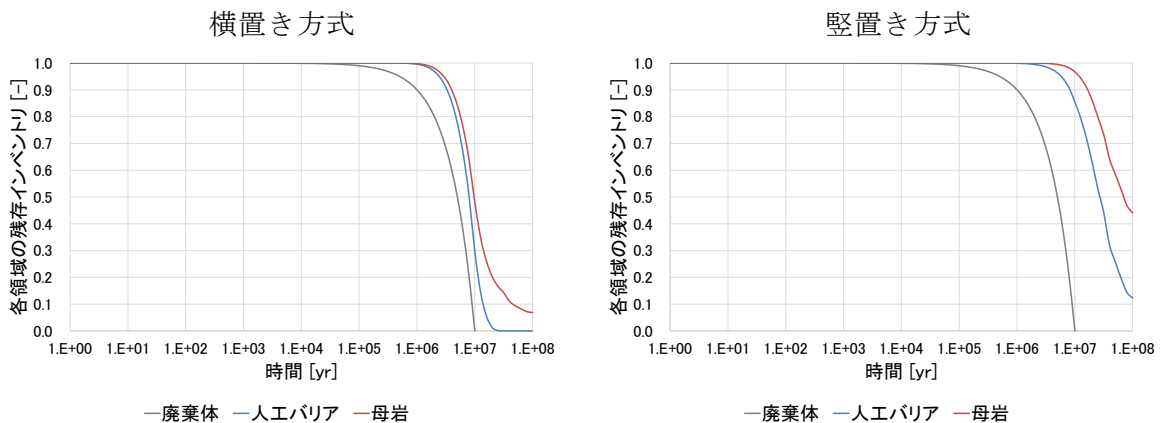


図 2.2.3-5 廃棄体、人工バリア、母岩の各領域における吸着性物質の残留率

3) 定置方式の選択による閉じ込め性能の違いに関する知見の整理

ここでは、定置方式の選択による閉じ込め性能の違いに関する 2) において実施した定量的評価や過年度の検討から得られた知見を、設計オプションとして想定した廃棄体の定置方式を縦軸に、ニアフィールドにおける移行挙動や閉じ込め性を左右する環境条件を表す因子な

どを横軸にとったマトリクス形式で整理した。ニアフィールドにおける移行挙動や閉じ込め性を左右する環境条件を表す因子としては、2)の定量的評価などから、大規模高透水性構造と処分坑道沿いの連続性の高いEDZとの交差の有無が特に重要になると考えられた。これらを踏まえてマトリクスの軸を設定し関連する知見の整理を試みた結果を表 2.2.3-2 に示す。

断層のような大規模な高透水性構造と処分坑道沿いの連続性の高いEDZが連結して主要な移行経路を形成するような、性能評価において厳しい条件を想定する場合には、そのような移行経路の物質移行への寄与が定置方式によって異なることで、ニアフィールドの閉じ込め性能が異なる可能性があると考えられる。他方、それ以外の場合では、横置き方式と縦置き方式の選択によるニアフィールドの閉じ込め性能の違いは顕在化しにくいと考えられる。

これらの知見は、今後対象とする地質環境条件が仮定される、あるいは具体化された場合に、その条件に適用可能な設計オプションを絞り込む際の、安全性の観点での一般的な留意事項として参考になると考えられる。

表 2.2.3-2 定置方式の選択による閉じ込め性能の違いに関する知見のまとめ

	大規模透水性構造と処分坑道沿いの連続性の高いEDZが交差した移行経路を形成する場合	左記以外の場合
横置き方式	複数の廃棄体から放出した物質が処分坑道沿いのEDZを介して大規模透水性構造に集約され、大規模透水性構造により下流へ移行することにより、ニアフィールドからの移行率が顕著に増大する可能性がある。	横置き方式と縦置き方式の選択によるニアフィールドの閉じ込め性能の違いは顕在化しにくいと考えられる。
縦置き方式	処分坑道沿いのEDZを経由せず処分孔の緩衝材から直接岩盤へ移行する割合がある程度見込める状況では、横置き方式よりも相対的に高い閉じ込め性能が期待できる可能性がある。	

(3) 処分場の位置の選択による閉じ込め性能の違いの分析・整理

(2)で示したように、緩衝材や岩盤への収着による遅延効果が有効となるアクチニドのような核種の場合には、ニアフィールドにおける核種の閉じ込めが期待できる一方で、インベントリの一部が瞬時放出として燃料などから放出される C-14 や I-129 などの核種では、バリア材料への収着などによる遅延効果が小さく、ニアフィールドの閉じ込めによって核種移行率を低減する効果が小さい可能性がある。ここでは、これらの核種のうち半減期が比較的短く、処分場の位置の選択およびそれに伴う地表までの移行時間の違いが核種移行率に与える影響が大きいと考えられる核種 (C-14 など) を想定して閉じ込め性能の違いの分析・整理を行った。

本検討で対象とする、ニアフィールドから放出した核種が地表あるいは海底下に到達するまでの広範囲な領域では、地表までの卓越した核種移行経路となりうる断層などの大規模高透水性構造と処分場との位置関係、地下水の上昇流が生じうる塩淡境界と処分場との位置関

係、海水準変動や隆起・侵食などの長期的な環境変遷によるそれらの時間変遷などの閉じ込め性能への影響に着目した検討が必要となる。それらの影響の有無や程度は、処分場をどこに建設するかによって異なる。

平成 28 年度までに実施した地下水流動解析では、内陸と沿岸などの位置によって、地表までの広域的なスケールにおける地下水流動の挙動が大きく異なることが示された（原子力機構，2017）。この結果を踏まえて、平成 29 年度においては、平成 28 年度と同様に内陸と沿岸部におけるいくつかの処分場の位置の選択を設計オプションとして考え、閉じ込め性能にどのような違いが生じるか（あるいは生じないか）について、地表までの広域的なスケールでの地下水流動解析に基づく移行経路や移行時間を指標とした分析を行った。さらに、処分場の位置の選択に応じた地表までの移行挙動を特徴づける因子を縦軸と横軸に配置したマトリクス形式で整理した。

これらの内容を、「1) 広域的スケールを対象とする地下水流動解析の手法の概要」、「2) 処分場の位置の選択による閉じ込め性能の違いの分析」、および「3) 処分場の位置の選択による閉じ込め性能の違いに関する一般的知見の整理」の構成で以下に示す。

1) 広域的スケールを対象とする地下水流動解析の手法の概要

設計オプションとして想定した処分場の位置を表 2.2.3-3 および図 2.2.3-6 に示す。内陸部と沿岸部では動水勾配が異なるために、地下水流速が異なること、および、塩淡境界近傍では地下水流動場がそれ以外の領域とは異なると考えられることから、内陸部と沿岸部のそれぞれについて、現汀線の近傍の場合と、現汀線から離れた場所の場合を想定した。

広域的なスケールを対象とする地下水流動解析については、過年度の検討と同様に、わが国において広く見られるような、陸域、大陸棚および大陸斜面から成る広域の二次元断面を仮定した。解析モデルの概念図を図 2.2.3-6 に、地下水流動解析の解析パラメータを表 2.2.3-4 にそれぞれ示す。このモデルでは、陸域、大陸棚および大陸斜面のそれぞれについて平均的な地形勾配を想定した。地表への短絡した移行経路となり得る断層などの高透水性構造についても、既往の文献（小坂ほか，2010、総務省統計局，2013）を参考に、平均的な間隔（9.4 km）で分布しているものと仮定した。断層の透水性については、断層面に平行な方向の透水性が高く、直交する方向については断層粘土などが存在し低透水性であると仮定した。断層の傾き方としては、内陸に向けて深くなるように傾く場合と、海側に向けて深くなるように傾く場合が考えられる。後者の場合では、内陸側から海側に向かって全水頭が低下することから、地下水が断層に沿って深部へ移行する可能性があるが、断層に沿って地下水が地表へ移行する方が性能評価において厳しい条件を与えることから、ここでは、図 2.2.3-6 に示されるように、内陸に向けて深くなるように傾く場合を想定した。地形勾配などに関する設定の根拠などの詳細については付録 1 に示す。

初期条件としては、大陸棚の陸側境界部に現在の汀線が位置することを想定し、その後、12 万年周期で 125 m の海水準変動が生ずることを仮定した（海退：10.8 万年、海進：1.2 万年）。また、隆起速度を 0.3 mm y^{-1} 、侵食速度を 0.1 mm y^{-1} として、沿岸域も徐々に陸化が進むような環境変遷の状態を想定した。岩盤としては、硬岩系岩盤である結晶質岩を想定し

た。なお、硬岩系岩盤である結晶質岩では、主に亀裂内部を地下水が移行することから、水理学的有効間隙率の設定の考え方（澤田ほか，2007）に基づき、有効間隙率を0.01%とした。

表 2.2.3-3 設計オプションとして想定した処分場の位置

	内陸／沿岸	現汀線からの距離	下流の断層との距離	深度
A	内陸	内陸側に 5 km 以上	約 5 km	1,000 m
B	内陸	内陸側に 2 km 以内	-	1,000 m
C	沿岸	海側に 2 km 以内	-	1,000 m
D	沿岸	海側に 5 km 以上	約 2 km	500 m

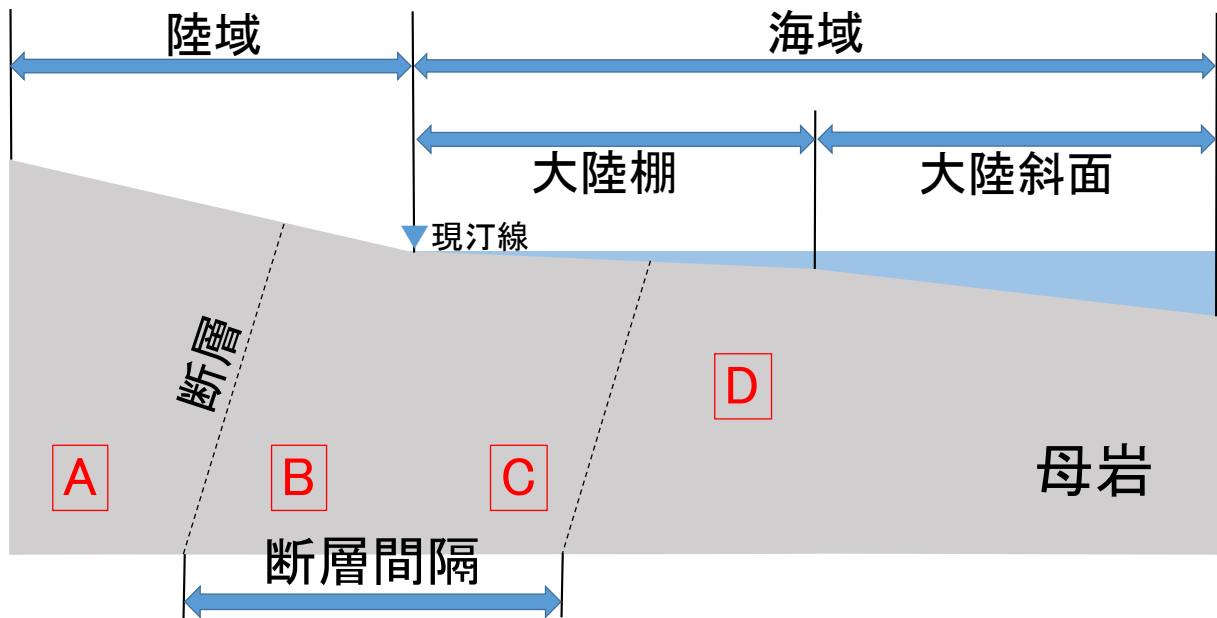


図 2.2.3-6 地下水流動解析の解析モデルの概念図

(原子力機構(2016)を改編)

図中の A~D は表 2.2.3-3 の設計オプションとして想定した処分場の位置に対応

表 2.2.3-4 地下水流動解析の解析パラメータ
(原子力機構, 2016)

設定項目		設定値	
地形勾配*1	陸域	緩傾斜:0.018 (角度1.0°)	
	大陸棚(海域-沿岸部)	平均勾配:0.5°, 幅:15.5 km, 高低差:140 m	
	大陸傾斜(海域-沖合部)	平均勾配:4.5°, 幅:15.5 km, 高低差:1220 m	
母岩 (結晶質岩)	透水係数	$\log_{10}K=-0.002Z-6.5229 \text{ m s}^{-1}$, 下限値: $3 \times 10^{-11} \text{ m s}^{-1}$ (Z: 深度[m])	
	比貯留係数	$1 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$	
	有効間隙率	0.01%	
	分子拡散係数	$1 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	
	分散長	縦:100 m, 横:10 m	
断層	物性	透水係数	面平行方向は母岩の100倍, 面直交方向は母岩の下限値
		その他	母岩と同じ値
	断層幅	70 m	
	断層間隔	9.4 km	
	傾斜角度	75°	

*1: 地形勾配などの設定根拠の詳細については付録 1 を参照のこと

2) 処分場の位置の選択による閉じ込め性能の違いの分析

地下水流動解析の結果の一例を図 2.2.3-7 に示す。また、この結果から、処分場位置 A, B, C, D それぞれの代表点からの地下水の移行経路を抽出して流跡線として表した。これらに基づく地表までの移行時間を比較した結果と流跡線を図 2.2.3-8 と図 2.2.3-9 にそれぞれ示す。

本解析の結果からは、内陸での処分場位置 A と B については、汀線から離れたところに位置する A の場合と汀線に近い B の場合では、地下水の移行時間は同程度だった。移行経路は、A の場合では、地下水は地形に沿って下流側へと向かい、断層などの高透水性構造に沿って地表へと上昇する経路、B では、塩淡境界に沿った比較的速い上昇流により地表へと移行する経路であった。

一方、沿岸での処分場位置 C と D については、地下水の移行時間が内陸の場合と比べて長くなり、特に、現汀線からの距離が遠い D の場合では、処分場位置 A の場合と比較して移行時間が 2 桁程度長い結果となった。移行経路は、C の場合では、地下水は陸側に向かってやや下方に移行した後、塩淡境界が処分場に近づくにつれて B の場合と同様に上昇流により地表に至る経路、D の場合では、地下水は一旦下方に移行した後高透水性の断層に沿った上昇流によって地表へと至る経路であった。

これらの結果は、沿岸側に処分場を建設する場合では、内陸側に建設する場合と比較して動水勾配が小さいため、地表までの移行時間を長く確保できる可能性があり、特に、処分場の位置が現汀線から離れた沖合の場合では、処分場のごく近傍に高透水性の断層が存在する場合（本検討での処分場位置 D が相当）でも、天然バリア中での閉じ込めが期待できることを示唆していると考えられる。また、塩淡境界との関係については、ガイベン-ヘルツベルグの法則による簡易的な計算（付録 1）によると、例えば処分場を現汀線から数 km 程度離すことができれば塩淡境界が処分場近傍に接近するタイミングは数万年以降となると予想され、半減期約 5,700 年の C-14 などは十分に崩壊すると考えられる。

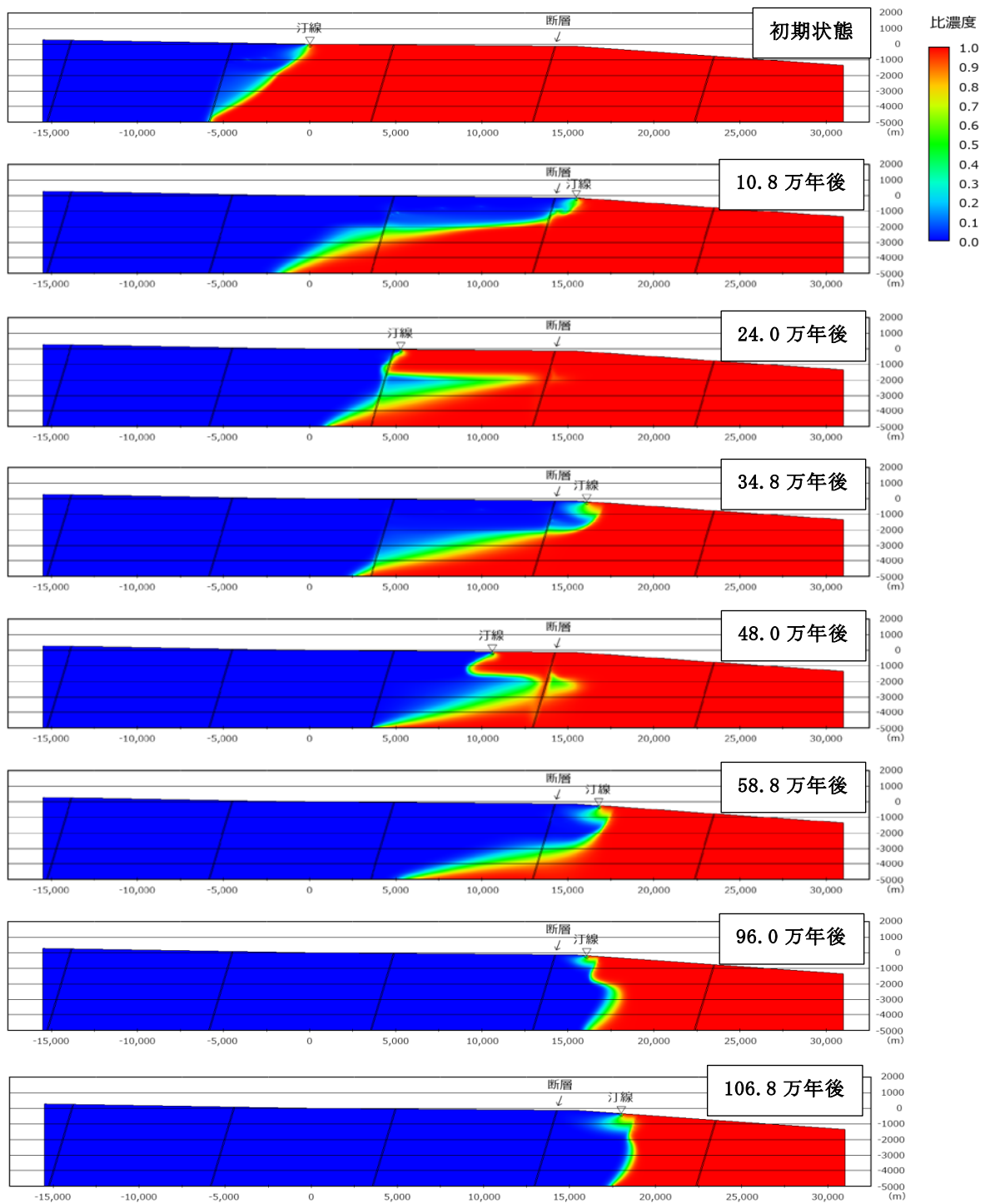


図 2.2.3-7 地下水流動解析結果の例 (結晶質岩)

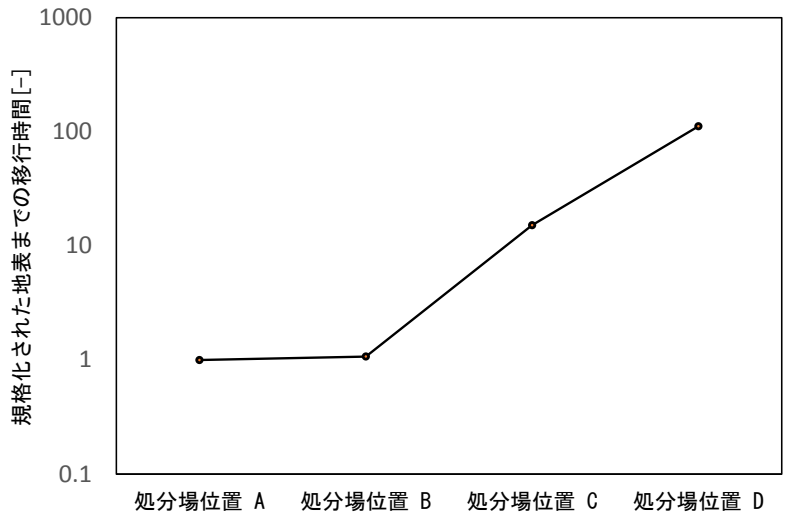


図 2.2.3-8 地表までの移行時間の比較

(処分場位置 A からの移行時間を 1 としたときの相対値を示す)

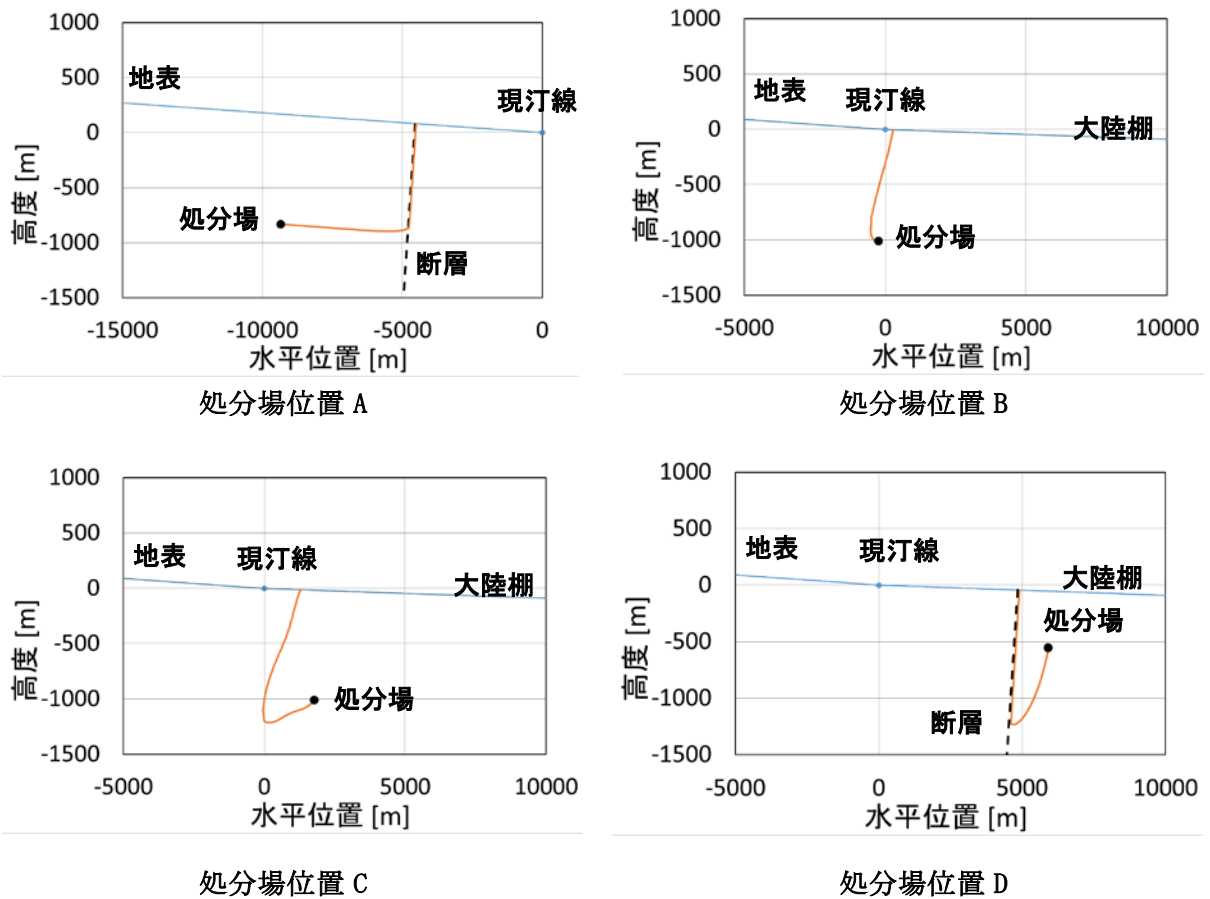


図 2.2.3-9 各処分場位置からの流跡線の例

(横軸の水平位置 0 m は、処分直後 (0 年) の現汀線の位置を意味する。
また、処分直後に処分場から地下水が移行し始めることを想定した。)

3) 処分場の位置の選択による閉じ込め性能の違いに関する一般的知見の整理

ここでは、処分場の位置の選択による閉じ込め性能の違いに関する 2)において実施した定量的評価や過年度の検討から得られた知見を、処分場の位置の選択に応じた地表までの移行挙動の特徴を特徴づける因子を縦軸と横軸に配置したマトリクス形式で整理した。本検討で着目した非収着性の物質（比較的半減期が短い C-14などを想定）についての処分場の位置の選択に応じた地表までの移行挙動の特徴を特徴づける因子としては、2)の定量的評価などから、内陸と沿岸の区分および汀線からの位置の違いに着目し、それぞれを縦軸および横軸とした。これらを踏まえてマトリクス形式での整理を試みた結果を表 2.2.3-5 に示す。

沿岸側では、内陸側と比較して小さい動水勾配により地表までの移行時間を長く確保できる可能性があり、特に、現汀線から離れた沖合の場合では、塩淡境界の時間変遷の影響を受けにくいことが想定されるとともに、処分場のごく近傍に高透水性の断層が存在するような場合でも天然バリアでの閉じ込めが期待できる可能性があると考えられる。

これらの知見は、今後対象とする地質環境条件が仮定される、あるいは具体化された場合に、その条件に適用可能な設計オプションを絞り込む際の、安全性の観点での一般的な留意事項として参考になると考えられる。

表 2.2.3-5 処分場位置の選択による天然バリア中での非収着性核種（C-14 など）の閉じ込め性能の知見のまとめ

	汀線からの距離	
	遠い	近い
内陸	核種の減衰に十分な移行時間が確保されるためには現実的範囲で透水係数ができるだけ低いことや、断層などの高透水性構造までの距離が大きいなどの条件が必要となる可能性がある。	塩淡境界に沿って上向きの比較的速い流れが生じやすいため、核種の減衰に十分な移行時間が確保されるために必要な条件は、左記と同様に厳しくなる傾向がある。
沿岸	内陸と比較すると、核種の減衰に十分な移行時間が確保され易い傾向にあると考えられる。 上記の傾向が基本であり、断層などの高透水性構造までの距離が近いなどの場合でも核種の減衰に十分な移行時間が確保できる可能性もある。	上記の傾向が基本であるが、内陸の場合と同様の、塩淡境界に沿った上向きの比較的速い流れの影響を受ける可能性には留意が必要。

(4) 設計オプションの選択による閉じ込め性能の違いの統合的な分析・整理

ここでは、設計オプションの選択による閉じ込め性能の違いに関する (2) と (3) および過年度での検討結果の統合的な分析・整理を試みた。得られた主な特徴を表 2.2.3-6 にまとめた。

まず、設計オプションの選択による閉じ込め性能の違いについては、(1)でも述べたように、使用済燃料直接処分の安全評価においてもニアフィールドアプローチが有効であるとされ（原子力機構、2015）、ニアフィールドアプローチでは人工バリアの閉じ込め特性や核種の収着性に影響を及ぼす地球化学的特性および水理学的特性の安定性が重要とされるが（増田、2016）、これらの条件とここまでの検討で対象とした設計オプション（定置方式、処分場の位置）、さらには着目する核種の特徴との組み合わせによって、ニアフィールドの閉じ込め性能

に差が生じる可能性、また、ニアフィールド以外での閉じ込め性能も重要となる可能性などを、これまでの検討の成果としていくつかの具体例とともに提示することができた。

また、ここまでの検討で対象とした設計オプションに対して以下の設計オプションを追加することで、ここまでの検討で対象とした設計オプションの閉じ込め性能をさらに向上させる可能性、あるいはここまでの検討で対象とした設計オプション間で生じた閉じ込め性能の差を緩和できる可能性なども期待できる。後者の「閉じ込め性能の差を緩和できる可能性」は、それにより選択可能な設計オプションが広がるという効果にもつながる可能性がある。

- 長寿命処分容器

天然バリア中においてC-14の移行時間を確保することが期待し難い状況にあり、かつ人工バリアからの核種移行率も比較的大きい場合には、C-14が顕著に減衰せずに生活圏に至る可能性がある。このような場合には、銅やチタン合金、あるいは2.1節で示した高耐食性材料を外殻として用いた複合型の処分容器（内部の構造材は炭素鋼製）を採用することで、C-14を容器内で減衰させるのに十分な閉じ込め期間（2～3万年以上）を確保するというオプションを検討することが有用と考えられる。

- 処分孔内の廃棄体の多段配置

ニアフィールドを横断するような大規模かつ高透水性の構造と連続した高透水性領域となる処分坑道との交差が避けられない状況では、(2)で示したように、堅置き方式がアクチニドなどの収着性核種の閉じ込め性能を確保するために有利となる場合もあり得ると考えられる。これは、(2)で分析したように、堅置き方式では、処分孔内の廃棄体から処分坑道まで一定の離隔が保たれることにより、透水性が高く連続性も高い坑道沿いのEDZを有する処分坑道に至る物質の量が少なくなり、処分孔の緩衝材から母岩に直接移行する物質の割合が相対的に増加するためと考えられる。このため、処分孔内の廃棄体から処分坑道まで距離を長くすることにより、このような効果がさらに顕在化する可能性があり、その方策として、処分孔内に多段に廃棄物を配置するというオプションを検討することが有用と考えられる。

表 2.2.3-6 設計オプションの選択による閉じ込め性能の違いの特徴のまとめ

	ニアフィールドの閉じ込め性能	広域的な領域の閉じ込め性能
収着性核種	<ul style="list-style-type: none"> ○ 縦置き方式と横置き方式での閉じ込め性能に違いが生じ得るのは、大規模な高透水性の構造（断層など）が処分坑道沿いの EDZ と連結して主要な移行経路を形成する場合などに限定されると考えられる。 ○ このような場合、縦置き方式で廃棄体を処分孔内に多段配置することで閉じ込め性能をさらに高めることができる可能性がある。 	—
非収着性核種 (短半減期核種 (C-14 など))	—	<ul style="list-style-type: none"> ○ 処分場の位置については、広域的な領域での長い移行時間（遅い移行速度）が確保できることが重要となる。これらを検討する際には、例えば、動水勾配が小さいこと、塩淡境界や断層などの高透水性構造との位置関係などが重要な留意点になると考えられる。 ○ 一方、処分容器の長寿命化が期待できれば、広域的な領域での移行時間（遅い移行速度）の確保の必要性が緩和され、処分場の位置の選択肢が広がる可能性がある。

2.3 まとめ

(1) 先進的な材料の開発 (2.1 節参照)

1) 金属ガラスの物理化学的特性に関する検討

Ni-Nb-Ta系を対象として状態図計算を行いNi基合金データベース(TCNI8)の検証を行った。その結果、本計算結果は、特にNiリッチ側を中心として、総合的に実験状態図を正しく再現することが可能であることが分かった。時間-温度-変態図の計算を新たに2合金($\text{Fe}_{67}\text{Mo}_6\text{Ni}_{3.5}\text{Cr}_{3.5}\text{P}_{12}\text{C}_{5.5}\text{B}_{2.5}$ および $\text{Ni}_{69}\text{Cr}_{8.5}\text{Nb}_3\text{P}_{16.5}\text{B}_3$ 合金)について実施し、ガラス遷移温度 $[T_g]$ 以下の温度域において5万年($\sim 10^{12.2}$ s)程度は結晶化が生じないと推定された。ガラス形成能の評価因子として、 δ パラメータ、 γ パラメータの適用性を評価した。その結果、総合的に考えて、異なる性質を持つ δ パラメータと γ パラメータの複合評価が合金の原子寸法差評価には有効と考えられる。

2) 金属ガラスの溶射コーティングへの適用性

厚さ5.0 mmまでの厚膜のNi-Cr-Nb-P-B金属ガラスの溶射コーティングを急冷フレーム溶射により実施し、良好な溶射膜の形成が可能であることがわかった。また、異形状として、外径約14 mm ϕ の鋼管への溶射を試み、概ね良好な溶射膜形成が可能であることを確認した。さらに、平成27年度に作製したNi-Cr-Nb-P-B金属ガラス溶射膜について、40 g L^{-1} のNaClを酢酸にてpH3に調整した腐食液に浸漬し、耐食性を評価した。1.0 mm以下の厚さでは膨らみが生じ始めており、溶射膜の欠陥に起因するものと考えられたが、2 mm厚では膨らみなどは見られなかったことから厚膜の形成による欠陥の影響の低減が重要と考えられた。

3) 金属ガラスアトマイズ粉末による耐食性評価試験

金属ガラス粉末(Zr基、Ni基、Cu基)を用いた元素浸出に関する腐食試験を継続した。また、平成27年度より開始した、耐食性が高いとされている従来の合金材料(SUS316LおよびハステロイC276)を用いた試験についても継続実施した。これまでの試験結果からは、いずれの金属ガラス材料もガラス形成能を損なうような元素浸出は生じておらず、各々の材料特性が安定に保たれていると考えられる。Ni基金属ガラスについてはある程度の元素浸出の進展が確認されたが、SUS316LとハステロイC276についてもいずれもCrが有意に浸出しており、Ni基金属ガラスと比べるとCrの浸出が比較的速いことがわかった。このことから、Ni基金属ガラスは、SUS316LやハステロイC276と比較して同等以上の高い耐食性を有していることが示唆された。また、試験後の各金属材料について行ったSEMによる外観観察およびEDSによる元素比率分析では、金属ガラスについては目立った変化は確認されなかった。

4) Ni基金属ガラス溶射膜の局部腐食試験

炭素鋼試験片に金属ガラス $\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{13}\text{Nb}_2\text{P}_{16}\text{B}_4$ を溶射した試料を用いて0.5~3 MのNaCl水溶液中で動電位アノード分極測定を行った。溶射したままの試料では塩化物イオン濃度が高いほど皮膜破壊の生じる電位は卑となり、腐食進展による変色も顕著となった。研磨した試料では3 Mの濃度でも皮膜破壊は生じなかった。溶射したままの状態では微細な凹凸によってすきま構造が形成され、容易に皮膜破壊に至った可能性がある。以上のことから

溶射膜の素材としての耐食性は汎用的なステンレス鋼に比較して良好と考えられるが、表面仕上げなど施工方法による影響を受ける可能性がある

(2) 閉じ込め性能評価手法の高度化：人工バリア材料の閉じ込め性能の評価に関する研究 (2.2.1 項参照)

1) 処分容器材料の腐食挙動

① 炭素鋼腐食生成物形成試験と皮膜の性状評価

FeCO₃皮膜に対する D₂O の拡散挙動を調査し、D₂O の浸透時間と浸透量の関係を拡散に基づいて解析した結果、353 K で形成した FeCO₃皮膜に対する D₂O の拡散係数は $1.06 \times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 、363 K で形成した FeCO₃皮膜に対する D₂O の拡散係数は $1.60 \times 10^{-10} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ と推定され、低温で形成された皮膜の方が D₂O の拡散に対する障壁能力が高いことが示唆された。

② 交流インピーダンス法による炭素鋼の腐食モニタリング

ベントナイトのかぶり厚 1 mm、3 mm、5 mm の密閉型セルにより、炭素鋼の EIS の測定を約 250 日間行った結果、定常での腐食速度はかぶり厚に依存せず、約 $2 \mu \text{ m y}^{-1}$ (約 $0.2 \mu \text{ A cm}^{-2}$) となった。この腐食速度は水による炭素鋼の腐食速度に相当すると考えられる。かぶり厚 20 mm、40 mm、60 mm の開放型セルにより、炭素鋼の EIS を計測した結果、腐食速度は徐々に減少し、約 100 日で一定となった。ある厚さ (約 80 mm) 以上になると、開放型セルでも酸素消費型から水素発生型 (水との腐食) に移行するものと思われる。

③ レジストメトリー法によるベントナイト中における銅の腐食速度のモニタリング

オーバーパック材料の地下埋設初期における膨潤ベントナイト埋設銅の腐食挙動を調査するため、極低酸素濃度環境で膨潤ベントナイトならびに各種イオンを含む水溶液環境中での Cu 箔の腐食挙動を 1~3 ヶ月程度の期間調査した。その結果、Cu 薄膜の腐食速度は膨潤ベントナイト中では $1 \sim 1.3 \mu \text{ m y}^{-1}$ 、水溶液中では $2 \sim 8 \mu \text{ m y}^{-1}$ 程度となり、膨潤ベントナイト中の方が腐食速度が小さかった。試験後の試料表面には、ベントナイト中では Cu₂O と Cu₂S が、水溶液中では Cu₂O や塩化物などが生成した。

④ ベントナイト中における銅の応力腐食割れ挙動

湿潤ベントナイト中に平板試験片と U 字ベント曲げ試験片を埋設したところ、いずれの試料でも長時間の後には局部腐食が生成し、その部位では Cu₀ を主体とするマウンド状腐食生成物が形成された。Cu に加工ひずみあるいは残留応力が存在する場合には、膨潤ベントナイト中の残留溶存酸素の作用により厚い皮膜を生成し、変色皮膜破壊型応力腐食割れを生じる可能性があることが示された。

⑤ 代替処分容器候補材料のガンマ線照射下での電気化学試験

純チタンならびに純銅、Ni 基合金のガンマ線照射下および非照射下での交流インピーダンス (電気化学インピーダンス, EIS) を測定した。いずれの材料の電極でも、ガンマ線照射によりファラデーインピーダンスが低下する (腐食反応が加速される) ことが確認された。

2) 人工バリア性能への微生物影響評価

処分環境を想定した条件下における微生物活性を支配する要因を明らかにし、圧縮ベントナイト内部における微生物代謝に伴う腐食量に関するデータを拡充するため、 1.3 g cm^{-3} の圧縮ベントナイト密度条件下において、腐食試験を実施し、これまでに実施した各乾燥密度条件 (1.0 g cm^{-3} 、 1.6 g cm^{-3}) における腐食試験結果を総合的に考察した。

その結果、1年間の試験期間においては、 1.3 g cm^{-3} 以上の乾燥密度条件下では腐食が進行していないことが示された。しかしながら、 1.0 、 1.3 g cm^{-3} の条件においては、圧縮ベントナイト内部で全菌量および硫酸還元菌量の増加が認められており、またメタン菌については 1.6 g cm^{-3} の条件においても初期濃度と比較して増殖が確認された。 1.0 g cm^{-3} の条件下にて実施した腐食試験結果から、 $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ の条件下で6か月～1年間の間に著しい腐食進行が認められたことから、ベントナイト内部で微生物が増殖している場合には、急激な腐食進行が起こる可能性がある。本研究結果においては、処分容器の腐食を促進する微生物反応としては、硫酸還元反応が主反応であり、メタン菌による腐食反応は、これらの菌が鉄(処分容器やベントナイト中の鉄)と接触する環境下で生じ易くなることを示した。また、微生物活性を抑制する要因として、温度、ベントナイト乾燥密度が大きく寄与していることが示され、この理由としては、これらの条件下では微生物の生息域が制限されることに加え、膨潤圧の上昇に伴い水分活性の低下や栄養塩の供給の低下が考えられた。一方で、諸外国のこれまでの知見を考慮すると、日本で検討されているベントナイトおよびケイ砂の混合物を緩衝材として用いた場合には、諸外国で提唱されている微生物増殖抑制に効果的な膨潤圧や水分活性条件が適用できない可能性があり、日本で検討されている緩衝材を対象とした微生物活性のデータをさらに拡充することが重要であると考えられる。

本研究成果から、日本で検討されている緩衝材材料を用いて、微生物群集存在下における炭素鋼腐食および圧縮ベントナイト内部における微生物増殖や代謝に関するデータを取得し、温度および乾燥密度が重要な因子であることを示した。また、腐食に関連する微生物代謝は硫酸還元反応が主要であるが、条件によってはメタン生成反応に伴う鉄腐食も生じることが示された。今後は、本研究で得られたデータの再現性を確認する必要があるとともに、様々な条件下(高乾燥密度、高温など)におけるデータを実際の地下環境における原位置試験なども含めて拡充し、微生物影響を膨潤圧・水分活性・空隙サイズ・温度・栄養塩濃度等の様々な要因から評価していく必要がある。

3) 緩衝材中の C-14 移行挙動試験

C-14の人工バリア中での拡散挙動の変化について把握するため、乾燥密度 1.4 Mg m^{-3} の圧縮ベントナイトに対して酪酸イオンおよびブタノールの実効拡散係数を取得し、有機化合物の分子量および化学形態の違いによる拡散挙動の違いについて検討を行った。その結果、取得した乾燥密度 1.4 Mg m^{-3} における酪酸イオンの形状因子は、酪酸イオンと同様に陰イオンであるヨウ化物イオンと概ね同じ値を示し、ヨウ化物イオンなどの他の陰イオンの実効拡散係数の既報値から酪酸イオンの実効拡散係数を推算できることが示唆された。同じカルボン酸で分子量の異なる酢酸イオンについても、平成28年度の検討においてヨウ化物イオンと形状因子が一致することが確認されており、カルボン酸については、分子量

によらず他の陰イオンの実効拡散係数の既報値から実効拡散係数を推算できることが示唆された。一方で、ブタノールについては、ブタノールと同様に電氣的に中性である重水に比べて形状因子が 1/2 以下に低下することが確認され、他の化学種の実効拡散係数の既報値から実効拡散係数を正確に設定することが難しいことが示唆される結果が得られた。

4) 銅とベントナイトの相互作用に関する調査

硫化水素イオン共存下で約 1 年間銅試験片に接触させた圧縮ベントナイト試料について、銅試験片との接触界面の EPMA 観察を行い、ベントナイト中の鉱物の変質状況や圧縮ベントナイト中に移行した銅の存在形態について調査した。その結果、試験片の腐食に伴って放出された Cu は概ね試験片との界面付近にとどまっていること、銅腐食生成物は硫化物の形態で存在し、試験片から離れるに従って Cu_2S から CuS の形態に変化している可能性が示唆された。また、組成変化を伴うような圧縮ベントナイト中のモンモリロナイトの大きな変質は確認されなかった。

(3) 閉じ込め性能評価手法の高度化：使用済燃料の閉じ込め性能に関する研究（2.2.2 項参照）

1) FEMAXI コードを用いた核分裂生成ガス放出割合の評価

PWR 使用済燃料について、現行型である 17×17 型の UO_2 燃料に対する FEMAXI コードを用いた FGR 計算を行い、その結果から、平成 28 年度に設定した FGR 推奨値（2 %）は妥当であると判断した。また、通常運転後に高出力運転を経験するケースについても FGR 計算を行い、平成 28 年度に検討した FGR の最大値（悲観値）の導出手法の妥当性を裏付ける結果を得た。これらの結果を踏まえて、FGR を指標として設定する一部核種の瞬時放出割合（IRF）についても、平成 28 年度に設定した値を変更する必要はないと判断した。

BWR 使用済燃料についても、現行型である $9 \times 9\text{A/B}$ 型の UO_2 燃料に対する FGR 計算は平成 28 年度に設定した FGR 推奨値（8 %）を概ね支持する結果であった。

しかしながら、Gd 添加燃料に対する FGR 計算では、PWR および BWR 使用済燃料のどちらにおいても、 UO_2 燃料の場合よりも高い FGR 値となった。国内の照射後試験の結果からは Gd 添加の有無による FGR の変化は無いことが示されており、この違いは、計算において、 UO_2 よりも熱電導度が低い Gd 酸化物の添加によりペレット内の温度分布が変化することが一因と考えられた。今後は、計算精度の向上に向けて、実験値と計算値の比較などを通しての計算条件の適切化等を図ることが重要となる。

2) 燃料溶解速度の炭酸濃度依存性評価

二酸化ウランの溶解速度に及ぼす炭酸影響について実験的に調査した。得られた溶存ウラン濃度は水溶液中の全炭酸濃度の増加とともに増加し、明確な炭酸濃度依存性が得られた。また、これらの実験結果から二酸化ウランの溶解速度を算出した。この結果は、平成 28 年度に設定した燃料溶解速度（ $1 \times 10^{-7} \text{ y}^{-1}$ ）が、わが国に特有な全炭酸濃度が高い条件下においても適用可能であることを支持するものであった。

(4) 閉じ込め性能評価手法の高度化：多重バリアによる閉じ込め性能評価手法の構築(2.2.3 項参照)

設計オプションの選択によってバリアの閉じ込め性能にどのような違いが生じるかについて分析・整理を行った。平成 29 年度は、定置方式の設計オプションと坑道周辺のニアフィールドにおける閉じ込め性能の関係に着目した検討、および処分場の位置の設計オプションと非収着性核種(比較的半減期が短い C-14 等を想定)の閉じ込め性能の関係に着目した検討を行った。

定置方式の設計オプション(横置き方式、縦置き方式)については、断層のような大規模な高透水性の構造と処分坑道沿いの連続性の高い EDZ が交差して主要な移行経路を形成するような、性能評価において厳しい条件での検討を行った。そのような条件では、横置き定置方式では、複数の廃棄体から放出した核種が EDZ を介して大規模高透水性構造に収斂して母岩中を移行することになるが、縦置き方式では、縦置き方式に特有の処分孔の緩衝材から岩盤に直接移行する割合が相対的に大きくなることにより、横置き方式よりも相対的に高い閉じ込め性能が示された。

処分場の場所の設計オプション(内陸部/沿岸部、深度の違いなど)については、沿岸側に処分場を建設する場合は、内陸側に建設する場合と比較して小さい動水勾配により地表までの移行時間を長く確保できる可能性があり、比較的近傍に塩淡水境界や高透水性の断層が存在する場合でも、天然バリアでの閉じ込めが期待できる可能性があることが示唆された。

上記検討結果については、本検討で想定した特定の条件下における知見として整理するだけでなく、より一般性の高い知見としていくための分析と整理を試みた。さらに、本検討で対象とした定置方式や処分場の位置などの設計オプションに対して、別の設計オプション(廃棄体の処分孔内多段配置、長寿命処分容器の適用)との組み合わせを考えることによる閉じ込め性能の向上の可能性等についても考察を試みた。

今後の課題としては、閉じ込め性能の違いが生じる条件や生じる違いの定量的な分析・整理を、多段配置や長寿命処分容器も含めたより広範な設計オプションの組み合わせを対象として拡充していくことが考えられる。

【参考文献】

- Benomar S, Ranava D, Cardenas ML, Trably E, Rafrafi Y, Ducret A, Hamelin J, Lojou E, Steyer JP, Giudici-Orticoni MT. (2015): Nutritional stress induces exchange of cell material and energetic coupling between bacterial species. *Nat Commun.*, 6: 6283.
- Bochtler, B., Gross, O., Gallino, I., and Busch, R. (2016): Thermo-physical characterization of the Fe₆₇Mo₆Ni_{3.5}Cr_{3.5}P₁₂C_{5.5}B_{2.5} bulk metallic glass forming alloy, *Acta Materialia*, Vol. 118, pp.129-139.
- Cachoir, C., Carbol, P., Cobos-Sabate, J., Glatz, J. P., Grambow, B., Lemmens, K., Martínez-Esparza, A., Menecart, T., Ronchi, C., Rondinella, V. V., Serrano-Purroy, D., Spahiu, K., Wegen D. and Wiss, T. (2005): Effect of Alpha Irradiation Field on Long-Term Corrosion Rates of Spent Fuel, Contract No. FIKW-CT-2001-00192 SFS, European Commission, Deliverable D9.
- Caporaso J, Kuczynski J, Stombaugh J. (2010): QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data. *Nat Methods.*, 7(5): p335-336.
- Cui, Yu-Jun (2017): On the hydro-mechanical behavior of MX80 bentonite-based materials. *Journal of Rock Mechanics and geotechnical Engineering.* 9, 565-574.
- Daniels, L., Belay, N., Rajagopal, B.S., and Weimer, P.J. (1987): Bacterial methanogenesis and growth from CO₂ with elemental iron as the sole source of electrons. *Science*, 237, 509-511.
- Dinh, H.T., Kuever, J., Mussmann, M. Hassel, A.W. Stratmann, M. and Widdel, F. (2004): Iron corrosion by novel anaerobic microorganisms. *Nature*, 427, 829-32.
- Evins, L. Z., Juhola, P. and Vähänen, M. (2014) : REDUPP Finel Report, SKB/Posiva Working Report 2014-12.
- Ferry C., Lovera P., Poinssot C. and Johnson L. (2004): Quantitative Assessment of the Instant Release Fraction (IRF) for Fission Gases and under Geological Disposal Conditions. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 807, 35-40.
- Fujitsu. (2016): FUJITSU Technical Computing Solution SCIGRESS, <<http://www.fujitsu.com/global/solutions/business-technology/tc/sol/scigress/>>.
- 深谷祐一, 明石正恒, 佐々木英二, 辻川茂男(2007): Ni-Cr-Mo合金の腐食すきま再動態化電位測定方法の最適化, *材料と環境*, vol. 56, No. 9, pp. 406-413.
- 腐食防食協会編(1993): 材料環境学入門, 丸善.
- 原子力機構 (日本原子力研究開発機構) (2007): 低酸素濃度環境における純銅の腐食挙動に及ぼす硫化物の影響と銅オーバーパック寿命の超長期化の可能性, *JAEA-Research* 2007-022.
- 原環機構(原子力発電環境整備機構) (2011): 地層処分事業のための安全評価技術の開発(II) -核種移行解析モデルの高度化-, *NUMO-TR-10-10*.
- 原子力機構 (日本原子力研究開発機構) (2014): 平成 25 年度地層処分技術調査等事業「使用

- 済燃料直接処分技術開発」.
- 原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2015a）：わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価 -直接処分第1次取りまとめ-, JAEA-Research-2015-016.
- 原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2015b）：平成26年度地層処分技術調査等事業「使用済燃料直接処分技術開発」報告書.
- 原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2016）：平成27年度地層処分技術調査等事業「直接処分等代替処分技術開発」報告書.
- 原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2017）：平成28年度地層処分技術調査等事業「直接処分等代替処分技術開発」報告書.
- 原子力安全研究協会（2013）：実務テキストシリーズ No. 3 軽水炉燃料のふるまい（改訂第5版）.
- 原子力安全基盤機構（2007）：平成18年度 高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証成果報告書（総合評価編），付録1および2を含む.
- 原子力発電技術機構（2002）：平成13年度 高燃焼度等燃料安全試験に関する報告書（PWR 高燃焼度燃料 総合評価編）.
- Grambow, B. (coordinator) et al. (2010): Final activity report: Project MICADO - Model uncertainty for the mechanism of dissolution of spent fuel in nuclear waste repository. Priority No. NUWASTE-2005/6-3.2.1.1-2, European Commission.
- Gray, W.J. (1999): Investigation of Iodine-129 and Cesium-137 in the Gaps and Grain Boundaries of LWR Spent Fuels, Mat. Res. Soc. Proc. 556, 487-494.
- Gross, O., Bochtler, B., Stolpe, M., Hechler, S., Hembree, W., Busch, R., and Gallino, I. (2017): The kinetic fragility of Pt-P- and Ni-P-based bulk glass-forming liquids and its thermodynamic and structural signature, Acta Materialia, Vol. 132, pp.118-127.
- haruna 春名匠, 山本達也, 宮入洋志, 柴田俊夫, 谷口直樹, 坂巻景子, 立川博一(2015): 大気中で Fe を高温酸化させた皮膜中への D2O の拡散浸透挙動, 材料と環境, Vol. 64, No. 5, pp. 201-205.
- 平野伸一, 長岡亨, 伊勢孝太郎, 天野由記, 松本伯夫(2015): 土壌微生物群集によって誘引される炭素鋼腐食とそのメカニズムの解析. 材料と環境, 64, 535-539.
- Iino, T., Ito, K., Wakai, S., Tsurumaru, H., Ohkuma, M. (2015): Iron corrosion induced by non-hydrogenotrophic nitrate-reducing *Prolixibacter* sp. MIC1-1. Appl. Environ. Microbiol., 81, 1839-1846.
- inoue 井上明久監修(2009): 新機能材料 金属ガラスの基礎と産業への応用, テクノシステム, pp. 41-48.
- isomoto 磯本良則, 松尾慎也(2012): SUS316L ステンレス鋼の孔食電位および孔食成長挙動に及ぼす金属イオンの影響, 材料と環境, Vol. 61, No. 5, pp. 213-218.
- iwase 岩瀬泰己, 岩瀬文夫(2010): コンクリートの基本と仕組み[第2版], 秀和システム, pp. 180.
- Johnson, L., Günther-Leopold, I., Kobler Waldis, J., Linder, H.P., Low, J., Cui, D.,

- Ekeroth, E., Spahiu, K. & Evins, L.Z. (2012): Rapid aqueous release of fission products from high burn-up LWR fuel: Experimental results and correlations with fission gas release. *J. Nucl. Mater.* 420(1-3), 54-62.
- 核燃料サイクル開発機構(1999): 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—総論レポート, JNC TN1400 99-020.
- 核燃料サイクル開発機構(1999): 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.
- 核燃料サイクル開発機構(1999): 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3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023.
- 核燃料サイクル開発機構(2001): ベントナイト中における硫酸塩還元菌の活性と硫化水素によるオーバーパック材料の腐食への影響. 核燃料サイクル開発機構 技術報告書. JNC-TN8400 2001-011.
- Kato, S., Yumoto, I., Kamagata, Y. (2015): Isolation of acetogenic bacteria that induce biocorrosion by utilizing metallic iron as the sole electron donor. *Appl. Environ. Microbiol.*, 81(1):67-73.
- Kienzler, B., Metz, V. and Valls, A. (2014): Fast/Instant Release of Safety Relevant Radionuclides from Spent Nuclear Fuel FIRST-Nuclides, EUROPEAN COMMISSION D-N° :5.13.
- Kim, J., Dong, H., Seabaugh, J., Newell, S.W., Eberl, D.D. (2004): Role of microbes in the smectite to illite reaction. *Science*, 303, 830.
- King, F. (2009): Microbially influenced corrosion of nuclear waste containers. *Corrosion*, 65, 223-251.
- Kitamura, A. and Akahori, K (2016): Effect of carbonate concentration on the dissolution rates of UO₂ and spent fuel - A review, In: *Advances in Materials Science for Environmental and Energy Technologies VI*, Ohji, T. et al. eds., Wiley, pp. 133-144.
- 北村暁, 近沢孝弘, 赤堀邦晃, 舘幸男 (2015): 諸外国における使用済燃料直接処分のソースターム評価 - (2) 使用済燃料および構造材の溶解速度評価, 日本原子力学会, 原子力バックエンド研究, Vol. 23 No. 1, pp. 55-72.
- 小坂 和夫, 千木良 雅弘, 吉田 鎮男, 金折 裕司(2010): 『日本の断層マップ』, 培風館.
- Kuhn, E., Ichimura, A.S., Peng, V., Fritsen, C.H., Trubl, G., Doran, P.T., Murray, A.E. (2014): Brine assemblages of ultrasmall microbial cells within the ice cover of Lake Vida, Antarctica. *Appl. Environ. Microbiol.* 80, 3687-3698.
- Lee, M., Bae, D., Kim, W., and Kim, D. (2003): Ni-based refractory bulk amorphous alloys with high thermal stability, *Materials Transactions*, Vol. 44, pp.2084-2087.
- Little, B.J., and Lee, J.S. (2007): *Microbiologically influenced corrosion*. Wiley

- series in Corrosion, R. Winston Revie, Series Editor, Wiley-Interscience.
- Mand, J., Park, S.H., Jack, R.T., Voordouw, G. (2014): The role of acetogens in microbial influenced corrosion of steel, *Frontiers in Microbiology*, 5, 268.
- Mori, K., Tsurumaru, H., and Harayama, S. (2010): Iron corrosion activity of anaerobic hydrogen-consuming microorganisms isolated from oil facilities. *J. Biosci. Bioeng.*, 110, 426-430.
- 西方篤 (2014): 電気化学インピーダンス法を用いたベントナイト中における炭素鋼の腐食モニタリング, *材料と環境 2014 講演集*, pp. 199-200.
- 西村務, 和田隆太郎, 西本英敏, 藤原和雄, 谷口直樹, 本田明 (1999): ベントナイト中における炭素鋼の腐食挙動に及ぼす微生物の影響. *核燃料サイクル開発機構 技術報告書 JNC TN8400 99-077*.
- NWMO (2012): Adaptive Phased Management Used Fuel Repository Conceptual Design and Postclosure Safety Assessment in Crystalline Rock Pre-Project Report, NWMO TR-2012-16.
- 小田治恵, 柴田雅博, 油井三和 (1999): 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*.
- Ollila, K. (2008): Dissolution of unirradiated UO₂ and UO₂ doped with ²³³U in low- and high-ionic-strength NaCl under anoxic and reducing conditions, *Posiva Working Report 2008-50*.
- Pugh, E. N., Montague, W. G. and Westwood, A. R. C. (1966): Stress-corrosion cracking of copper, *Corrosion Science*, Vol. 6, pp. 345-347.
- Richard A. Hurt, Jr, Michael S. Robeson, II, Migun Shakya, James G. Moberly, Tatiana A. Vishnivetskaya, Baohua Gu, Dwayne A. Elias. (2014): Improved Yield of High Molecular Weight DNA Coincides with Increased Microbial Diversity Access from Iron Oxide Cemented Sub-Surface Clay Environments, *PLoS One*. 9(7): 2014. e102826.
- 佐藤治夫 (2009): 高レベル放射性廃棄物地層処分における緩衝材の核種移行抑制機能. *Journal of MMIJ*, 125, 1-12.
- 澤田淳, 竹内真司, 三枝博光, 天野健治 (2007): (社) 第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p. 273-278, *土木学会 2007*.
- 柴田俊夫, 渡邊正敏, 谷口直樹, 清水亮彦 (2013): 酸素欠乏環境における炭素鋼腐食モデリング, *材料と環境*, Vol. 62, No. 2, 70-77.
- 総務省統計局 (2013): 1-6 都道府県別行政区画と面積, *日本の統計 2013*, 第 1 章 国土・気象, <<http://www.stat.go.jp/data/nihon/01.htm>>.
- Steinberg LM and Regan JM. (2008): Phylogenetic Comparison of the Methanogenic Communities from an Acidic, Oligotrophic Fen and an Anaerobic Digester Treating Municipal Wastewater Sludge, *Appl Environ Microbiol*. 74 (21): p 6663-6671
- Stroes-Gascoyne, S., Hamon, C.J., Maak, P., Russell, S. (2010): The effects of the physical properties of highly compacted smectitic clay (bentonite) on the culturability of indigenous microorganisms. *Applied Clay Science*, 47:p155-162.

- sugimoto 杉本克久(2009): 金属腐食工学(材料工学シリーズ), 内田老鶴圃.
- Suzuki, Y. (1981): Stress Corrosion Cracking of pure Copper in Dilute Ammonical Solutions, *Corrosion Science*, 21, pp.353-368.
- 鈴木英明, 中間茂雄, 藤田朝雄, 今井久, 九石正美(2012): 熱 - 水 - 応力 - 化学連成解析による緩衝材の地球化学環境の変遷に着目したニアフィールド長期挙動評価の一例. 原子力バックエンド研究, 19, 39-50.
- 鈴木元衛, 斎藤裕明, 宇田川豊, 天谷政樹(2014): 軽水炉燃料解析コード FEMAXI-7 のモデルと構造[改訂版], JAEA-DATA/Code 2013-014.
- Takai K, Horikoshi K. (2000): Rapid detection and quantification of members of the archaeal community by quantitative PCR using fluorogenic probes, *Appl Environ Microbiol*, 66(11): p5066-5072.
- Takeuchi, A., Amiya, K., Wada, T., Yubuta, K., Zhang, W., and Makino, A. (2013): Entropies in Alloy Design for High-Entropy and Bulk Glassy Alloys, *Entropy*, Vol. 15, pp. 3810-3821.
- 谷口直樹, 川崎学, 杉田裕, 柴田雅博, 本田明(2014): ベントナイト再冠水過程における炭素鋼の腐食モニタリング, 第 61 回材料と環境討論会講演集, B209.
- Till, B.A., Lenly, J. Weathers, Pedro J.J. Alvarez, J.J. (1998): Fe(0)-Supported Autotrophic Denitrification. *Environ. Sci. Technol.*, 32, 634-639.
- Uchiyama, T., Ito, K., Mori, K., Tsurumaru, H., Harayama, S. (2010): Iron-Corroding Methanogen Isolated from a Crude-Oil Storage Tank. *Appl. Environ. Microbiol.* March 15, 2010 76:6 1783-1788.
- Uhlig, H. H. and Duquette, D. J. (1969): "Alleged stress-corrosion cracking of pure Cu", *Corrosion Science*, 9, pp.557-560.
- Villars, P., Prince, A., and Okamoto, H. (2011): Handbook of Ternary Alloy Phase Diagrams (on CD-ROM) ASM International.
- 和田隆太郎, 西村務, 下郡一利, 泊里治夫, 舛形剛, 下田秀明, 藤原和雄, 西本英敏, 小田正彦(1998): 還元条件下におけるチタンオーバーパックの耐食性に関する研究 (II). 動力炉・核燃料開発事業団 研究委託内容報告書. PNC TJ 1058 98-001.
- Wang, YY., Hammes, F., Duggelin M., Egli, T. (2008): Influence of size, shape, and flexibility on bacterial passage through micropore membrane filters. *Environ. Sci. Technol.* 42, 6749-6754.
- Wang, Z.J., Huang, Y.H., Yang, Y., Wang, J.C., and Liu, C.T. (2015): Atomic-size effect and solid solubility of multicomponent alloys, *Scripta Materialia*, Vol. 94, pp.28-31.
- Wang. Q., Tang, AM, Cui YJ, Barnichon JD, Delage P, Ye WM. (2013): The effects of technological voids on the hydro-mechanical behavior of compacted bentonite-sand mixture. *Soils and Foundations*, 53(2), 232-245.
- Waseda, Y. (2004): Metal Databook, Maruzen Co. Ltd., pp. 1-604.
- Xia, L., Li, W.H., Fang, S.S., Wei, B.C., and Dong, Y.D. (2006): Binary Ni-Nb bulk

- metallic glasses, *Journal of Applied Physics*, Vol. 99, pp.026103/1-3.
- Xu, D., Li, Y., Song, F., Gu, T. (2013): Laboratory investigation of microbiologically influenced corrosion of C1018 carbon steel by nitrate reducing bacterium *Bacillus licheniformis*. *Corrosion Science*, 77, 385-90.
- Yang, X., and Zhang, Y. (2012): Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 132, pp.233-238.
- Zhang, Y., Lu, Z.P., Ma, S.G., Liaw, P.K., Tang, Z., Cheng, Y.Q., and Gao, M.C. (2014): Guidelines in predicting phase formation of high-entropy alloys, *Mrs Communications*, Vol. 4, pp.57-62.
- Zhang, Y., Zhou, Y.J., Lin, J.P., Chen, G.L., and Liaw, P.K. (2008): Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 10, pp.534-538.

第 3 章

直接処分施設的设计検討

3 章詳細目次

3. 直接処分施設の設計検討	3-1
3.1 直接処分方策に関する調査・検討	3-1
(1) 本項目の背景と目的	3-1
(2) 海外情報の調査	3-2
1) ASTOR における IAEA および諸外国による発表概要	3-2
① IAEA のアプローチ	3-2
② フィンランド	3-3
③ スウェーデン	3-3
④ カナダ	3-4
⑤ フランス	3-4
⑥ ASTOR 技術報告書のレビュー	3-5
2) スウェーデンにおける直接処分施設の検討事例調査	3-5
① 非破壊検認機器開発	3-5
② 保障措置対策	3-6
③ 核セキュリティ対策	3-6
(3) 保障措置技術開発	3-7
1) 試験体を用いた超音波測定試験	3-7
① フェーズドアレイ法による超音波探傷試験	3-8
a. 試験体系	3-8
b. 試験結果	3-11
c. 測定結果の分析	3-27
② 特徴の位置と大きさの実測	3-29
③ 超音波シミュレーション解析	3-31
a. 解析モデルに設定する特徴の選定	3-31
b. 解析モデルの設定	3-31
c. 超音波シミュレーション解析結果	3-32
④ 検証	3-32
a. 異なる方法で求めた特徴の位置・大きさに関する誤差	3-32
b. 検出可否、上下端の分離性、隣接する特徴の分離性に関する検証	3-36
⑤ 考察	3-37
2) 複合処分容器への超音波探傷技術の適用性検討	3-37
① 解析対象の調査	3-38
a. 複合処分容器の形状	3-38
b. 蓋部と胴部の接合部分の隙間	3-40
② シミュレーション解析条件設定	3-41

a. 解析モデルの設定	3-41
b. 解析手順	3-43
③ シミュレーション解析結果	3-44
a. シミュレーション解析結果 (STEP1)	3-44
b. シミュレーション解析結果 (STEP2)	3-46
④ 複合処分容器の検認に対する適用性の評価	3-48
⑤ 複合処分容器への特徴の付与方法の検討	3-49
a. 摩擦攪拌接合内に特徴をつけ、表面部を補修する方法	3-49
b. 隙間からのエコーを特徴とする方法	3-49
3) 考察	3-50
(4) 核セキュリティ対策に係る検討	3-51
1) 核セキュリティシステム概念	3-51
① INFCIRC/225/Rev. 5 による防護の考え方	3-51
② 地上に配置する核セキュリティシステム・機器	3-54
③ 上空からの侵入に対する核セキュリティシステム・機器	3-56
2) Security by Design (あらかじめセキュリティ要件を考慮して施設設計を行う 考え方) を考慮した核セキュリティシステム	3-59
3.2 人工バリアの設計	3-63
3.2.1 処分容器の設計	3-63
(1) 本項目の背景と目的	3-63
(2) 使用済燃料集合体および処分容器の基本仕様	3-64
(3) PWR 使用済燃料の多様性を考慮した臨界安全性評価	3-65
1) 解析手法	3-66
① 燃焼計算	3-66
② 臨界計算	3-66
2) 解析結果	3-67
(4) BWR 使用済燃料の多様性を考慮した遮へい解析による吸収線量率評価	3-69
1) 解析条件	3-70
① 解析コード	3-70
② 遮へい解析体系および遮へい解析条件	3-70
2) 解析結果	3-73
① 吸収線量率	3-73
② 放射線分解による処分容器の腐食への影響	3-74
3.2.2 処分容器の設計における臨界安全に関する検討	3-75
(1) 本項目の背景と目的	3-75
(2) 未臨界判定基準値の設定に関する検討	3-75
(3) 岩盤や緩衝材を構成する物質の反射体効果に関する検討	3-77
(4) 中性子吸収材に関する検討	3-80

1) 計算条件	3-81
2) 計算結果	3-82
(5) 臨界発生時における処分システムへの影響評価の必要性の検討	3-85
1) 臨界事象を想定した添加反応度および添加時間による検討	3-86
2) 臨界発生時における影響の取り扱いについて	3-88
3.2.3 緩衝材の設計	3-90
(1) 本項目の背景と目的	3-90
(2) 緩衝材の設計解析	3-91
1) 緩衝材の設計要件	3-92
2) 緩衝材の設計解析にあたってのシナリオ	3-92
3) 設計に用いる解析コードおよび力学モデル	3-95
4) 物性値	3-96
5) ケース i : 複合処分容器をブロック・縦置き方式で定置する場合の緩衝材の設計	3-100
① ケース i の解析モデル	3-100
② ケース i の解析条件	3-101
a. 初期条件および境界条件	3-101
b. 外力条件	3-102
③ ケース i の物性値	3-102
④ ケース i の解析結果	3-103
6) ケース ii : 人工バリアを PEM として軟岩環境に定置する場合の緩衝材の設計	3-106
① ケース ii の解析モデル	3-106
② ケース ii の解析条件	3-107
③ ケース ii の物性値	3-108
④ ケース ii の解析結果	3-109
7) ケース iii : 炭素鋼処分容器をブロック・縦置き方式で定置する場合の緩衝材の設計	3-112
① ケース iii の解析モデルおよび解析条件	3-112
② ケース iii の物性値	3-112
③ ケース iii の解析結果	3-114
8) 平成 26 年度から平成 29 年度の解析結果の整理	3-118
① レファレンス仕様の緩衝材の応力緩衝性	3-120
② 高乾燥密度、高ケイ砂混合率の緩衝材の応力緩衝性	3-120
③ 合理化の可能性	3-121
(3) 緩衝材の力学特性取得試験	3-122
1) 概要	3-122
2) 圧密試験	3-122
① 試験内容	3-122

② 試験結果	3-123
3) 三軸圧縮試験	3-126
① 試験内容	3-127
② 試験結果	3-127
3.3 地下施設の概念設計	3-132
(1) 本項目の背景と目的	3-132
(2) 地下施設の設計	3-133
1) 評価の対象とする坑道の断面形状の設定	3-134
2) 評価テーマの設定	3-135
3) 評価テーマごとの評価の検討	3-136
① 掘削技術	3-136
② 空洞の力学的安定性評価	3-139
③ その他の坑道の概念に係る評価テーマ	3-141
4) 総合的な評価による特徴の整理の考察	3-142
(3) 支保工施工合理化のための基本特性の取得	3-144
1) 供試体の作製条件	3-144
2) 物性試験用供試体の作製	3-145
3) 試験配合およびフレッシュコンクリートの性状	3-146
4) 物性試験項目および試験結果	3-147
5) 試験結果の考察	3-151
3.4 搬送・定置設備の概念設計	3-153
(1) 本項目の背景と目的	3-153
(2) 搬送・定置工程の三次元可視化の検討	3-154
1) CAD データの 3D-PDF データへの変換	3-154
2) 3D-PDF コンテンツの作成	3-154
3) 3D-PDF コンテンツの制御画面のカスタマイズ	3-156
4) 考察	3-157
3.5 まとめ	3-158
(1) 直接処分方策に関する調査・検討	3-158
(2) 人工バリアの設計	3-159
(3) 地下施設の概念設計	3-160
(4) 搬送・定置設備の概念設計	3-161
参考文献	3-162

3. 直接処分施設の設計検討

本項目においては、使用済燃料の直接処分のための処分施設の概念設計を行った。概念設計の対象とする施設・設備は、使用済燃料に適用する人工バリア(廃棄体および緩衝材など)、アクセス坑道や処分坑道からなる地下施設、人工バリアを搬送・定置するための設備とした。また、使用済燃料の処分施設の設計段階において考慮しておくことが必要になると考えられる様々な方策(操業中および閉鎖後管理段階の保障措置ならびに核セキュリティ対策など)についても調査・検討を行った。

上記に関する検討内容を、次節以降に「3.1 直接処分方策に関する調査・検討」、「3.2 人工バリアの設計」、「3.3 地下施設の概念設計」および「3.4 搬送・定置設備の概念設計」として示す。最後に、本章のまとめを3.5節に示す。

3.1 直接処分方策に関する調査・検討

(1) 本項目の背景と目的

保障措置および核セキュリティは使用済燃料の処分施設の設計段階において考慮しておくことが必要な対策のひとつであり、国際約束を満足させる設計および適用が要求される。そのため、まず、IAEAや諸外国における保障措置技術や核セキュリティ技術に係る検討の経緯や要件の整理状況、使用済燃料の処分施設の設計、建設、操業、閉鎖の各段階に応じた適用方法などを検討する必要がある。

平成28年度までに、海外における検討状況を把握するため、IAEAおよびスウェーデン、フィンランドにおける保障措置実施方策、核セキュリティ確保のための実施方策についての調査を行った。加えて、国際会議などを通じてIAEAおよび諸外国の関係者から使用済燃料の直接処分に適用する保障措置および核セキュリティシステムの概念検討の現状についてヒアリングを行った。保障措置技術については、使用済燃料および設計情報の検認技術を整理し、廃棄体の固有性確認技術について適用可能性を検討した。核セキュリティ対策については、IAEAの核セキュリティ勧告文書および関連基準の要求事項を処分施設に適用する際の考え方、課題などを整理し、設計基礎脅威の設計手順を参考に考察した仮想脅威に基づいて物理的な核セキュリティ対策を検討した。これらの結果、処分施設の設計段階で考慮すべき保障措置・核セキュリティ上の要件や適用可能な技術が明らかになった。

平成29年度は、国際会議などを通じてIAEAおよび諸外国の使用済燃料の直接処分施設に適用する保障措置および核セキュリティの検討状況についての調査を継続した。処分容器の固有性確認技術に関しては、試験サンプルおよびシミュレーション解析を用いて、識別符号の付与方法を含む超音波探傷技術による固有性確認方法の適用性を評価した。加えて、複合容器に対する超音波探傷測定に係るシミュレーション解析を行い、複合容器への超音波探傷技術の適用可能性を評価した。さらに、核セキュリティ技術については、平成28年度までの結果を踏まえて、わが国の特徴に応じて処分施設の設計に反映する核セキュリティ技術を整理し、取りまとめた。

上記検討結果について、それぞれ「(2) 海外情報の調査」、「(3) 保障措置技術開発」、「(4) 核セキュリティ対策に係る検討」に示す。

(2) 海外情報の調査

平成 29 年度は、2006 年から IAEA が毎年開催している地層処分への保障措置適用に関する専門家会合 (ASTOR : Application of Safeguards TO geological Repositories) に参加し、IAEA や諸外国 (フィンランド、スウェーデン、カナダ、フランスなど) による使用済燃料の直接処分施設に対する保障措置アプローチの検討状況や直接処分施設建設に向けた動向などに関する情報を収集した。加えて、直接処分施設の検討が進んでいるスウェーデンを訪問し、直接処分施設に適用する保障措置、核セキュリティ対策の検討状況を聴取した。その結果、先行国であるフィンランドにおいては処分施設に適用する保障措置の要件や技術の運用に向けた準備が進められている一方、フィンランド以外の諸外国では保障措置の要件や技術の開発を進めている状況であることがわかった。先行事例がないためフィンランドにおいても慎重に進められていると思われるが、今後処分施設の設計の具体化や建設が進められ、かつ諸外国における検討内容が明らかになるにしたがって、基準や検認技術の詳細設計が進むものと予想される。

平成 29 年度に実施した内容について、それぞれ「1) ASTOR における IAEA および諸外国による発表概要」、「2) スウェーデンにおける直接処分施設の検討事例調査」に示す。

1) ASTOR における IAEA および諸外国による発表概要

IAEA が主催する地層処分への保障措置適用に関する第 13 回専門家会合 (13th ASTOR) が、2017 年 4 月、茨城県水戸市および東海村で開催された。

第 13 回 ASTOR には 9 カ国 (ベルギー、カナダ、フィンランド、フランス、ドイツ、スウェーデン、スイス、アメリカ、日本) および 2 機関 (IAEA と EU) が参加し、各国の処分計画の状況、保障措置技術の開発状況、IAEA の保障措置アプローチ検討状況などが報告され、また 2016 年に作成した ASTOR 技術報告書のレビューが行われた。第 13 回 ASTOR で行われた主な発表の内容は以下のとおりである。

① IAEA のアプローチ

- フィンランド、スウェーデンにおける地層処分場に関する保障措置を検討する EPGR (Encapsulation Plants and Geological Repositories) project を立ち上げており、SGOC (Safeguards division of Operation C)、SGTS (Safeguards division of Technical Support)、SGCP (Safeguards division of Concepts and Planning) の各 Director の 3 名で構成される EPGR Project Board が直近では 2016 年 1 月に開催された。
- この EPGR Project Board において、フィンランドにおける地層処分開始時期が 2020 年から 2020 年代前半に延期されるとの情報を受け、保障措置アプローチの検討開始を 2018 年以降に繰り下げること、適用する保障措置技術を費用対効果の面で再検討することが決定された。
- 2016 年 2 月と 11 月に開催された EPGR Working Group (処分施設に関する活動を推進するために設立されたワーキンググループで、EC、IAEA、フィンランド、スウェーデンがメンバー) において、フィンランド、スウェーデンにおける進捗状況、EC/IAEA の共同作業、PGET (Passive Gamma Emission Tomography) などに関する情報交換が行われた。

- 詰替施設については、封じ込め／監視機器（C/S：Containment/Surveillance）の設置位置などの技術的な要求事項がまとめられたが、施設の設計情報が確定するまで詳細な検討は凍結されることになった。地下処分場については廃棄体へのアクセスルートが限られているため、検認活動や COK を維持するための対策を施さないブラックボックスアプローチを適用する方向で検討が進んでいる。
- 使用済燃料の検認への PGET の適用可能性に関する研究活動が数年間にわたって実施され、最近 1～2 年に実施されたフィールドテストでも良好な結果が得られている。2017 年 7 月に PWR/BWR/VVER440 の使用済燃料の検認への適用が IAEA によって承認される予定である（実際に承認されたのは 2017 年 12 月）。

② フィンランド

- 処分施設の許可は建設許可と運転許可の 2 段階になっており、建設許可は 2015 年 11 月 12 日に発行済であるが、運転許可は未取得である。建設工事は 2020 年代まで続く予定。
- 建設フェーズにおける保障措置として、安全上と保障措置上の観点での地下岩盤の検査、未申告活動がないことを証明するためのモニタリングプログラムの評価、設計情報の提出・検認、カメラ・ゲートモニターの設置や検認ステーションの確保といった保障措置要求事項の施設設計への組み込み（SBD：Safeguards by Design）が実施された。
- 設計情報質問票（DIQ：Design Information Questionnaire）が 2013 年 6 月に提出（その後 3 回改定）され、設計情報検認（DIV：Design Information Verification）が 2013 年 12 月、2014 年 11 月、2015 年 11 月に、未申告活動を検知するための補完アクセス（CA：Complementary Access）が 2016 年 4 月に実施された。
- 詰替施設については、使用済燃料の検認に関する研究開発、当該施設に適用する保障措置手法などを IAEA との間で取り決めた文書である施設附属書（FA：Facility Attachment）のドラフト版へのコメントへの対応、地下施設については設計情報検認を行うターゲット・方法、キャニスターの移動を監視するための信頼性のある C/S の開発、知識の連続性（COK：Continuity of Knowledge）が途切れた場合の回復方法などが今後対応／議論すべき保障措置上の課題として残っている。
- フィンランドとして処分施設に対する国内保障措置および核セキュリティ方策を策定するため、GOSSER（Geological Disposal Safeguards and Security）プロジェクトを 2015 年から開始した。

③ スウェーデン

- 国内処分プログラムの現状として、フォルスマルクの処分場およびオスカーシャムの詰替施設の建設・運用状況について紹介した。
- 許認可手続きの経緯として、2011 年 3 月に申請書を SSM（スウェーデン放射線安全機関）および土地・環境裁判所に提出したこと、2017 年末または 2018 年初めに SSM および土地・環境裁判所から意見書が提出されること、2018 年春にフォルスマルクが所在する自治体であるエストハンマル自治体において住民投票が実施される予定であることが紹介された。

- 今後の保障措置上の課題として、適用すべき検認技術、COK の維持方法、DIV の方法などが挙げられた。
- 処分施設の現状として、KBS-3 プログラムの概要を紹介。KBS-3 プログラムでは詰替施設と処分場の 2 つのプロジェクトに分け、使用済燃料の検認手法、キャニスターの設計、処分場の設計などの検討を実施している。
- 詰替施設である Clink は、基礎設計完了を 2019 年、詳細設計完了を 2021 年、建設開始を 2022 年としている。
- 処分場については、基礎設計が 2015 年に終了し、現在は 2020 年の建設開始を目指して詳細設計が行われている。
- 運用開始は、詰替施設および処分場ともに 2030 年を予定。また、Clink での使用を想定した使用済燃料の検認装置の開発も実施中である。

④ カナダ

- カナダにおける地層処分場サイト選定プロセスが 2010 年 5 月に開始された。現在 22 カ所のコミュニティが立地に係る興味を表明し、9 カ所が立地表明を検討中である。サイト決定期限は定められていない。
- 地層処分場デザインコンセプト、処分容器デザイン、処分施設に適用する保障措置要件を検討中である。
- 詰替施設については CANDU 炉と同等レベルの保障措置とすることを想定しており、地下処分場についてはフィンランド／スウェーデンの状況を注視している。しかし、多くの検討すべき課題が残っており、今後検討を継続する。

⑤ フランス

- 長半減期の中レベル廃棄物 (LL-ILW) および高レベル廃棄物 (HLW) を地層処分するための Cigeo プロジェクトを実施している。
- Cigeo プロジェクトは深地層処分施設に係るプロジェクトとして 2011 年に開始され、2015 年 11 月に予備設計が終了した。その後、2018 年 12 月まで詳細設計が実施される予定。その後、許可取得手続きを開始し、2021 年から地層処分施設の建設が開始される予定。
- 深地層処分施設である Cigeo 施設における処分対象は LL-ILW および HLW のみで、使用済燃料は処分対象外としている。
- LL-ILW はコンクリートキャスクで、HLW は金属キャスクで保管し、Cigeo 施設での開封は行わない。
- Cigeo 施設においては、一度定置された LL-ILW および HLW を移動するときは必ず検知されるようにすること、保障措置はブラックボックスアプローチとすることを計画している。(Cigeo 施設に搬入される LL-ILW および HLW の一部は Euratom の保障措置の対象となる。)

⑥ ASTOR 技術報告書のレビュー

第 13 回 ASTOR 会合では、平成 28 年度に骨子をまとめた ASTOR 技術報告書のレビューを行った。本技術報告書は、ASTOR 会合の成果として処分施設に適用可能性のある保障措置技術をまとめたものであり、2017 年 8 月に IAEA の技術文書「STR-384 Technologies Potentially Useful for Safeguarding Geological Repositories」(IAEA, 2017)として発行された。報告書において取りまとめられた保障措置技術は以下のとおりである。

- 3D レーザーキャナー
- ガンマ線トモグラフィ (GET : Gamma Emission Tomography)
- カロリメトリー
- パッシブガンマ
- パッシブ中性子アルベド反応度 (PNAR : Passive Neutron Albedo Reactivity)
- 中性子消滅時間差自己問いかけ法 (DDSI : Differential Die-Away Self-Interrogation)
- ORIGEN 解析による拡張データ評価によって補完したフォーク検出器
- 自発中性子共鳴濃度分析法 (SINRD : Self-Indication Neutron Resonance Densitometry)
- デジタルチェレンコフ光装置 (DCVD : Digital Cherenkov Viewing Device)
- ロードセル
- 封印
- 監視装置
- 非立会放射線モニター
- ホログラムタグ
- 超音波探傷による銅製処分容器の同定
- タングステンを利用した識別 ID
- 人工衛星画像
- 地震波検知 (パッシブ、アクティブ)
- 指向性レーダー
- 保障措置データの長期保存管理

2) スウェーデンにおける直接処分施設の検討事例調査

スウェーデン放射線安全機関 (SSM) を訪問し、直接処分施設に対する非破壊検認機器開発、保障措置対策、核セキュリティ対策の事例を聴取した。現在は保障措置対策も核セキュリティ対策も概念設計段階とのことで、具体的な対策の検討は今後 SBD (Safeguards By Design) コンセプト (保障措置上の要求事項を考慮に入れて施設や設備、工程などの設計を行う考え方) に従って徐々に進められるものと考えられる。

① 非破壊検認機器開発

- トモグラフィ、デジタルチェレンコフ光装置、測定精度などに関するプロジェクトをウプサラ大学に委託して実施しており、使用済燃料の部分欠損検認に利用する非破壊検認機器 (UGET : Unattended Gamma Emission Tomography、PGET : Passive Gamma Emission Tomography、デジタルチェレンコフ光装置) の Feasibility Test を進めている。

- PGET では、Cs-137、Kr-85、Co-60、Sb-125 の 4 核種を測定することにより部分欠損検認の精度向上に加え、燃焼度の測定などへの応用可能性を検討している。
- デジタルチェレンコフ光装置については、使用済燃料集合体の部分欠損検認への適用可能性の検討および測定精度の向上を図るため、シミュレーション解析を行っている。

② 保障措置対策

- 詰替施設は現在の中間貯蔵施設（CLAB）を統合するかたちで建設され、1 つの物質収支区域（MBA：Material Balance Area）が設定される。
- 詰替施設における処分容器の検認は、1 日当たり 1 基の頻度でリモートにより行う計画であり、IAEA、Euratom の認証を受けた施設者の装置を共同利用することでスペースの合理化を図る。
- 処分容器の同定確認方法としての超音波探傷測定の適用性について、蓋の底端部に入れたチャンファーや切欠き、または面取した面を測定する方法をイスプラ研究所と共同で検討している。
- 密封溶接された処分容器から使用済燃料を取り出すことは困難と考えられるので、詰替施設では密封溶接工程以降、および地層処分場では処分容器を輸送容器から取り出した以降についてはブラックボックスアプローチを適用することを考えている。
- 詰替施設内および輸送中の COK は 2 重 C/S をかけることにより維持するが、具体的に適用する C/S 機器は決まっていない。
- 輸送中は輸送容器に C/S 機器を取り付け、処分容器自体には何も取り付けない。
- 地層処分場に搬入された輸送容器は地下に設置する輸送容器取扱ステーションで開封し、空になった輸送容器は検認を受けてから搬出される。

③ 核セキュリティ対策

- 直接処分施設に対する核セキュリティについては、等級的手法を施設の状態（建設中、操業中、閉鎖後）に合わせて適用するという方向性だけが決まっている。
- 詰替施設への航空機落下やドローンの侵入など、上空からの脅威に対する対策が課題であることは認識しているが、まだ具体的な検討はされていない。
- 輸送に関する核セキュリティについては、全地球規模で船の位置を確認できる Web サイト（marinetraffic.com）に使用済燃料の輸送船の現在位置を示すことで核セキュリティを確保するという考え方であった。
- 地層処分場に関する核セキュリティについては、地下 500 m にあるということ自体が障壁であるとの考え方は持っているが、その他の核セキュリティ対策の検討は始まっていない。
- 地層処分場の地上エリアに設置する立入禁止区域の外（フェンスの外）から地層処分場への掘削活動は法律上制限できないが、掘削が行われても重機の搬入や掘削による振動などにより検知可能と考えている。
- 人工衛星の活用については、スウェーデンが核セキュリティ目的に利用可能な人工衛星を保有していないとのことから現在は考えていない。

(3) 保障措置技術開発

使用済燃料の直接処分施設では、処分容器に使用済燃料集合体を封入した後に使用済燃料を直接測定・検認することができないため、国際保障措置上の要件を満足するためには廃棄体の同定・識別や未開封確認を行うことが求められる。そのための検認技術として、平成 28 年度までに溶接部に自然発生する特徴（以下、自然特徴という）または人工的に付与する特徴（以下、人工特徴という）を利用した超音波探傷技術の適用可能性を、既存の超音波探傷試験結果の解析および超音波探傷シミュレーション解析により検討し、また、自然特徴と人工特徴が超音波探傷や廃棄体の性能に与える影響を整理した。加えて、経年経過後に発生すると考えられる処分容器の表面状態などの変化が超音波探傷の精度や再現性に与える影響をシミュレーション解析により評価した。（原子力機構，2016a；2017）

平成 29 年度は炭素鋼製の処分容器を模擬した試験体を用いた超音波探傷試験の実測値とシミュレーション解析結果との比較を行い、超音波探傷の適用可能性を検証した。あわせて、銅を外層、炭素鋼を内層とする複合処分容器を模擬した超音波シミュレーション解析を行い、超音波測定技術の複合処分容器の検認技術としての適用可能性を検証した。

1) 試験体を用いた超音波測定試験

平成 27 年度および平成 28 年度は超音波シミュレーション解析を用いて、炭素鋼製の処分容器への超音波探傷技術の適用可能性の検討を行った（原子力機構，2016a；2017）。

平成 29 年度は、処分施設において検認活動として実施されと考えられるフェーズドアレイ法による超音波探傷技術を用いた溶接内部に特徴を付与した試験体の測定、および試験体の測定条件をモデル化した超音波シミュレーション解析を行い、両者の結果を比較することで超音波探傷技術の適用可能性を確認した。また、同じ対象物に対して測定位置や測定方向が異なる超音波探傷測定を行い、測定の再現性について定量的に把握した。

試験体を用いた超音波探傷試験は図 3.1-1 に示す手順にて実施した。

超音波探傷試験の実施内容を「①フェーズドアレイ法による超音波探傷試験」、「②特徴の位置と大きさの実測」、「③超音波シミュレーション解析」に、試験結果の検証・考察を「④検証」、「⑤考察」に示す。

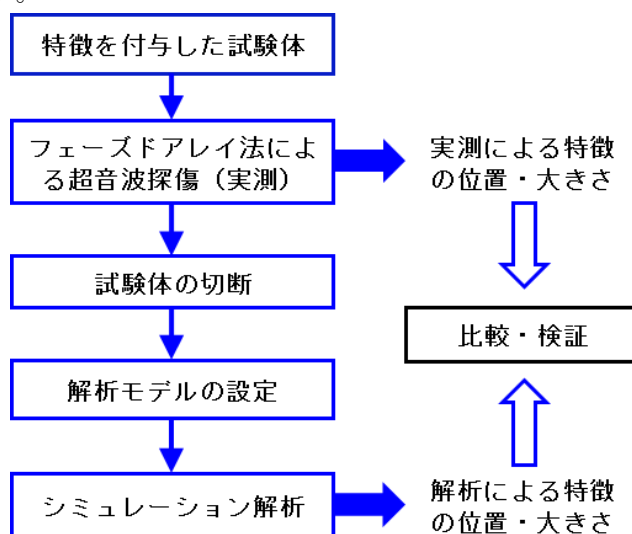
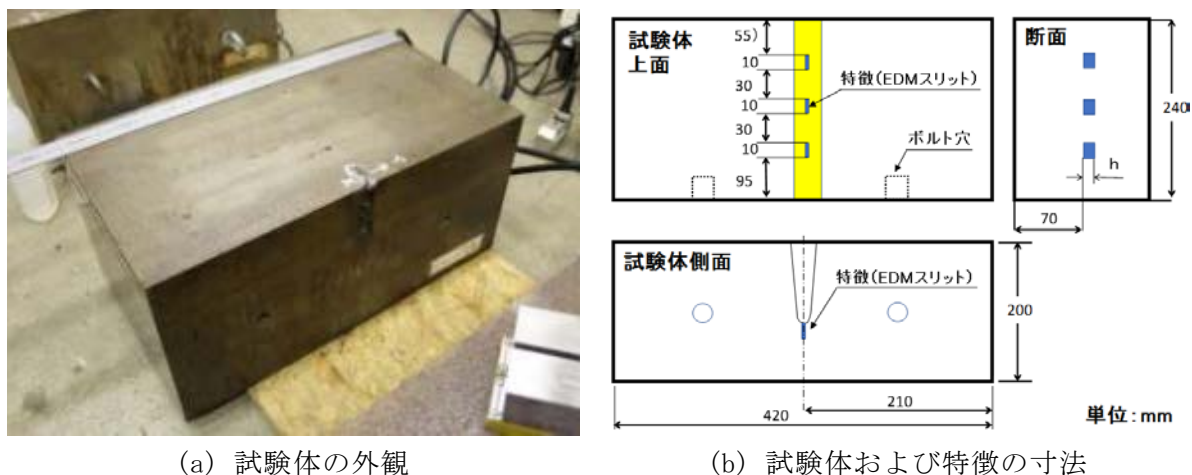


図 3.1-1 超音波探傷試験の実施手順

① フェーズドアレイ法による超音波探傷試験

a. 試験体系

図 3.1-2 に示すように、試験に用いた試験体は長さ 420 mm、幅 240 mm、厚さ 200 mm の炭素鋼部材で、中央部に TIG 溶接が施されている。溶接部には表面から深さ 70 mm の位置に放電加工 (EDM: Electrical Discharge Machining) による特徴 (EDM スリット) が 3 個設けられている。特徴の大きさ (図 3.1-2(b) 中の h) は 2 mm、5 mm、8 mm である。



(a) 試験体の外観

(b) 試験体および特徴の寸法

図 3.1-2 試験体

超音波探傷の測定は図 3.1-3 に示すように、フェーズドアレイのプローブ (探触子) を走査方向に移動しながら発信・受信を行い、内部の特徴 (傷など) を非破壊で三次元的に把握する方法で実施した。探傷条件を表 3.1-1 に、測定装置の外観を図 3.1-4、図 3.1-5 に示す。プローブは 2 MHz の超音波振動の発信、受信が可能で、プローブの位置は走査方向の移動量としてワイヤーエンコーダで記録される。また、測定結果はパソコンのモニター上にリアルタイムで表示される。

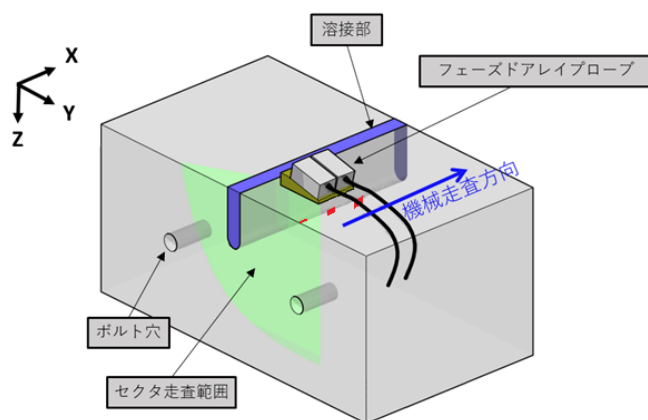


図 3.1-3 フェーズドアレイ法による超音波探傷の測定と走査方向

表 3.1-1 探傷条件

装置	項目	条件
フェーズドアレイ プローブ	周波数	2 MHz
	素子ピッチ	2 mm
	素子数	32 ch
クサビ	角度	6.2 度
	厚さ (最大値)	15.1 mm
	構成材 (ポリエーテルイミド) 中の音速	2450 m s ⁻¹
	種類	送受信機分割型
探傷器	波の種類	縦波
	構成材 (鋼) 中の音速	5930 m s ⁻¹
	屈折角	0~75 度
	電圧	250 V

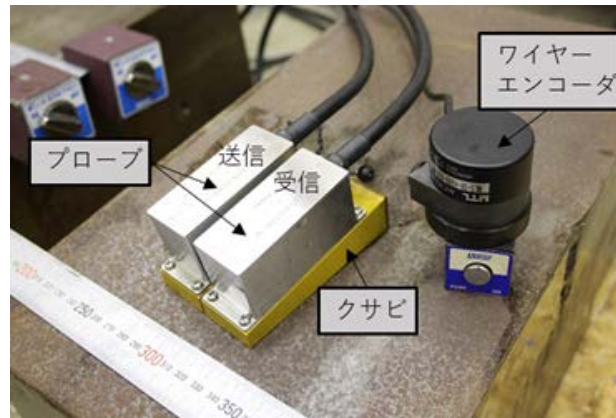


図 3.1-4 フェーズドアレイプローブおよびワイヤーエンコーダ

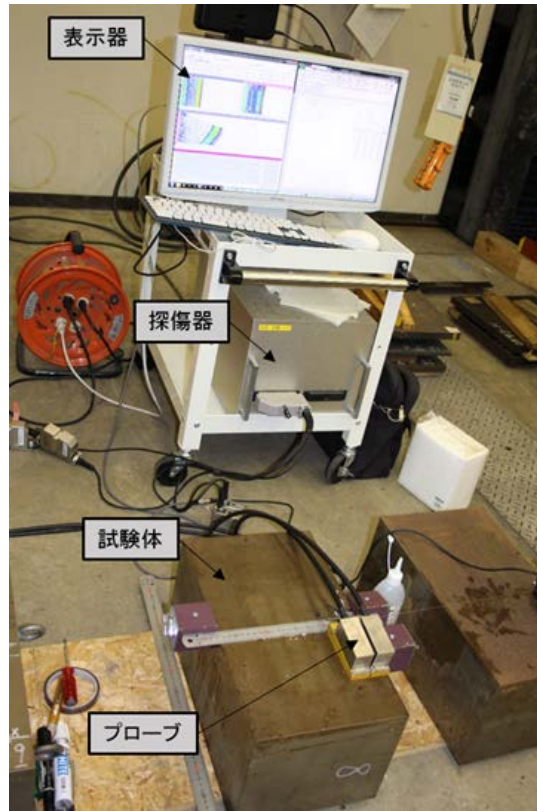


図 3.1-5 測定装置全容

試験は全部で 8 ケースを想定して実施した。表 3.1-2 に試験体を用いた測定ケースの一覧を示す。ケース 1 は試験体上面において、探触子（プローブ）の中心位置を溶接部中心から 80 mm 離し、溶接部に沿って平行に測定を行い、これを基本ケースとした。ケース 2 およびケース 3 は基本ケースから探触子を ± 10 mm 移動させて、同様の計測を行ったものである。一方、溶接部を挟んで基本ケースとは反対の位置に探触子を 80 mm 離し、溶接部に沿って平行に測定を行ったものをケース 4 とする。さらにケース 4 から探触子を ± 10 mm 移動させたものをケース 5、ケース 6 とした。また、試験体側面において、探触子を溶接部から 80 mm 離して測定したものをケース 7、ケース 8 とした。なお、ケース 7、ケース 8 は位置の異なる 3 つの特徴を一度に測定するものである。

ケース 1 は超音波シミュレーション解析結果との比較、ケース 1～ケース 6 は測定の再現性を検討するために利用する。また、ケース 7、8 は複数個の特徴を付与した際に、各々の特徴が独立して確認できることを検討するために利用する。

表 3.1-2 超音波探傷の測定ケース一覧

ケース番号	測定条件	探触子の位置と走査方向
1 (基本ケース)	試験体上面で、探触子を溶接部から 80 mm 離して測定	
2	ケース 1 から探触子を+10 mm 移動させて測定	
3	ケース 1 から探触子を-10 mm 移動させて測定	
4	溶接部を挟んでケース 1 と対称となる位置に探触子を置いて測定	
5	ケース 4 から探触子を+10 mm 移動させて測定	
6	ケース 4 から探触子を-10 mm 移動させて測定	
7	試験体側面で、探触子を溶接部から 80 mm 離して測定	
8	溶接部を挟んでケース 7 と対称となる位置に探触子を置いて測定	

b. 試験結果

超音波探傷では、探触子から発振した超音波が被試験体中の欠陥で反射・回折し、探触子に戻ってくるまでの時間とエコー（反射波および回折波）の強度を測定し、そのデータを画像化して表示する。図 3.1-6 に表示形式を示すが、走査範囲を表示するものを B スコープ（走査範囲スライス面）、縦断面を D スコープ（縦断面スライス面）および平面を表示するものを C スコープ（平面スライス面）として、測定結果が整理される。

ケース 1～ケース 8 におけるフェーズドアレイによる測定透過画像と特徴（EDM スリット）位置での画像を図 3.1-7～図 3.1-20 に示す。画像は受信強度を整理したもので、表示される情報は測定された受信波振幅の大小関係を、任意に設定した振幅値（一種の閾値）に対する比率で表現したものである。比率が高いと暖色系、比率が低いと寒色系で描かれる。

図 3.1-7、図 3.1-9、図 3.1-11、図 3.1-13、図 3.1-15、図 3.1-17、図 3.1-19 および図 3.1-20 に示すフェーズドアレイによる測定透過画像は、媒質中の異常（特徴）を見分けやすくするために、B スコープ、C スコープ、D スコープごとに所定の範囲（各スコープ図の右上に表示されている範囲。例えば、図 3.1-7 の B スコープの画像では Bscope-X=31.0～208.0 となっているが、この場合は X 方向の座標 31.0 mm～208.0 mm の範囲）を測定した結果を整理した

ものである。

また、図 3.1-8、図 3.1-10、図 3.1-12、図 3.1-14、図 3.1-16、図 3.1-18 に示す特徴（EDM スリット）の位置での画像は、ケース 1 からケース 6 の B スコープ探傷範囲において、2 mm、5 mm、8 mm の特徴からの受信波の強度が最大となった位置における画像を整理したもので、抽出位置は図中の右上に表示した（例えば図 3.1-8 では、ケース 1 の B スコープ探傷範囲において、2 mm、5 mm、8 mm の特徴からの受信波の強度が最大となった $X=99.0$ mm、 $X=141.0$ mm、 $X=179.0$ mm の位置における画像を示している）。

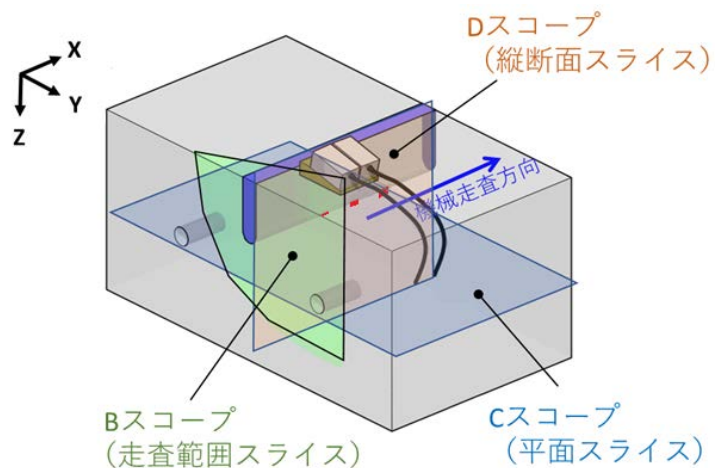
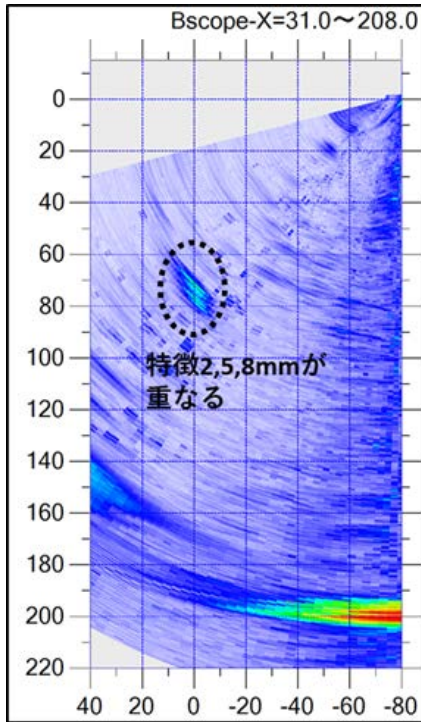
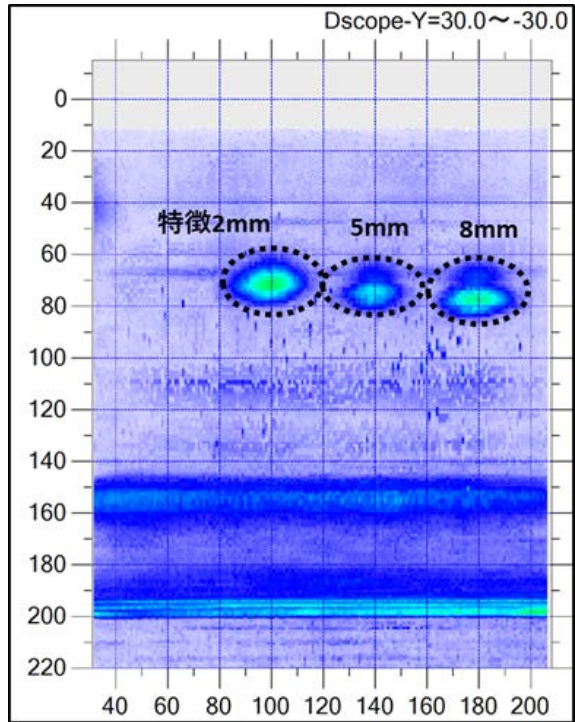


図 3.1-6 フェーズドアレイ超音波探傷における測定画像の表示形式



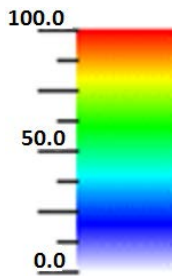
B スコープ

(範囲 X=31.0~208.0)

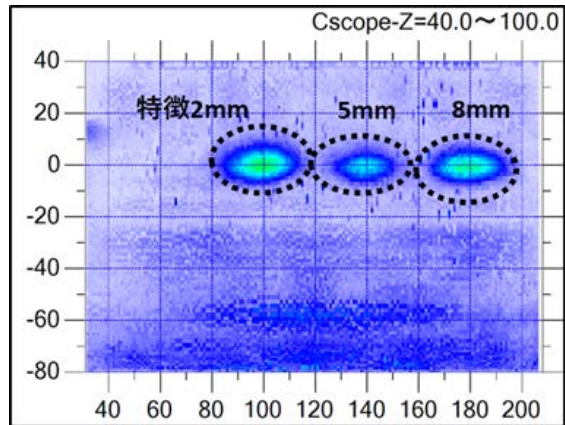


D スコープ

(範囲 Y=30.0~-30.0)

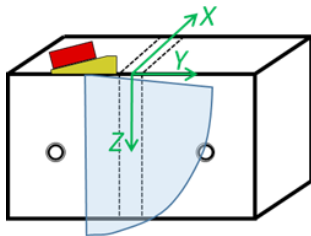


凡例 受信強度比



C スコープ

(範囲 Z=40.0~100.0)



測定概要

ケース番号 : ケース 1 (基本ケース)

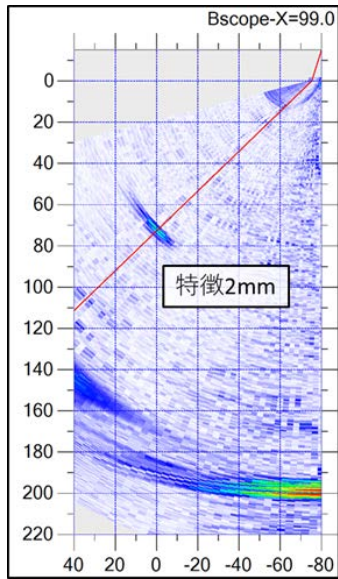
探傷面 : 試験体上面

送信波 : 縦波 2 MHz

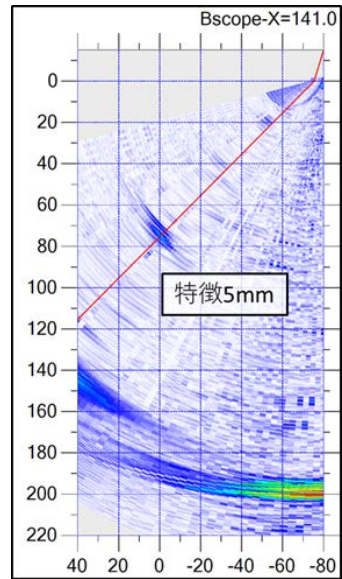
集束距離 : 130 mm

ゲイン : 18 dB

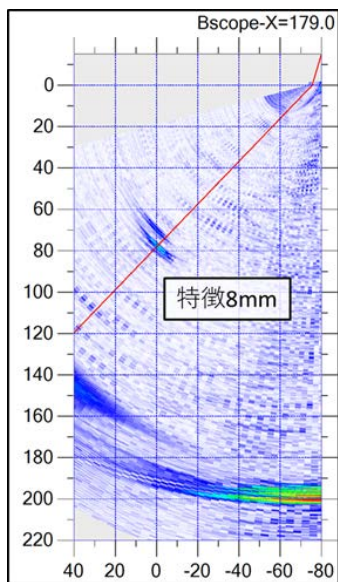
図 3.1-7 フェーズドアレイ測定透過画像 (ケース 1)



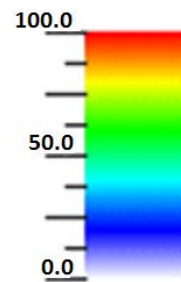
特徴 (EDM スリット) 2 mm 位置
(X=99.0 の B スコープ)



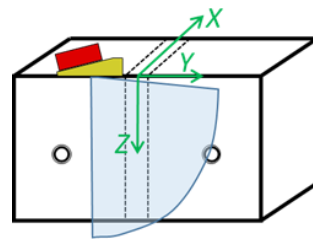
特徴 (EDM スリット) 5 mm 位置
(X=141.0 の B スコープ)



特徴 (EDM スリット) 8 mm 位置
(X=179.0 の B スコープ)



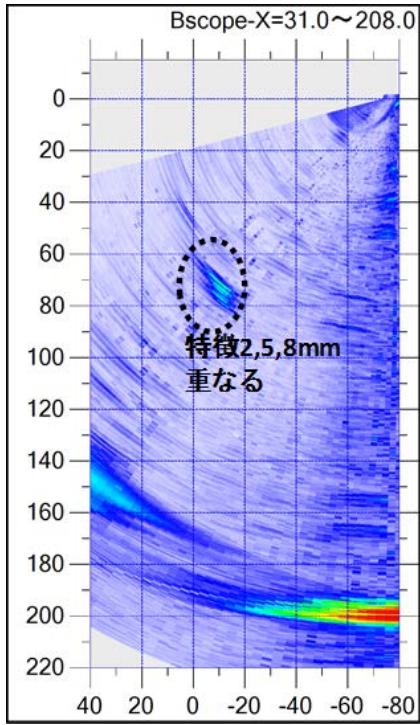
凡例 受信強度比



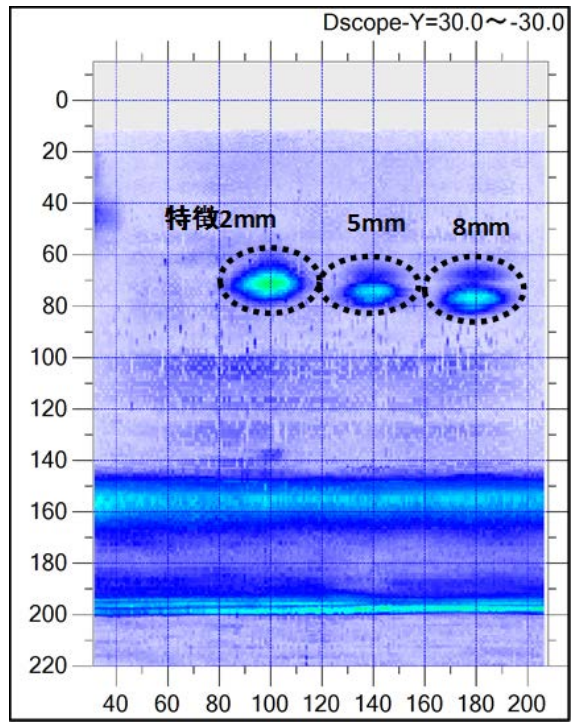
測定概要

- ケース番号 : ケース 1 (基本ケース)
- 探傷面 : 試験体上面
- 送信波 : 縦波 2 MHz
- 集束距離 : 130 mm
- ゲイン : 18 dB

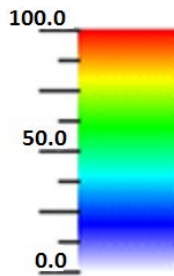
図 3.1-8 特徴 (EDM スリット) 位置での画像 (ケース 1)



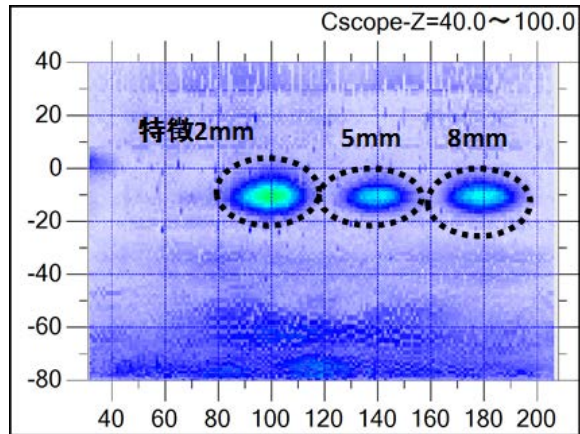
B スコープ
(範囲 X=31.0~208.0)



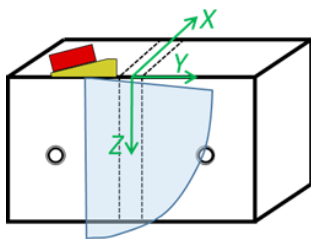
D スコープ
(範囲 Y=30.0~-30.0)



凡例 受信強度比



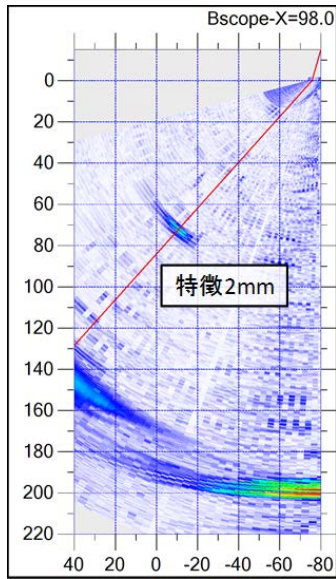
C スコープ
(範囲 Z=40.0~100.0)



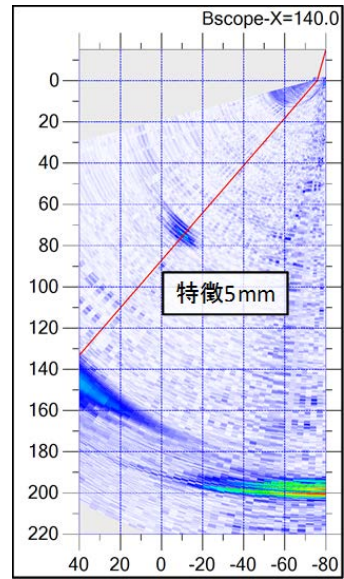
測定概要

ケース番号 : ケース 2
 探傷面 : 試験体上面
 送信波 : 縦波 2 MHz
 集束距離 : 130 mm
 ゲイン : 18 dB

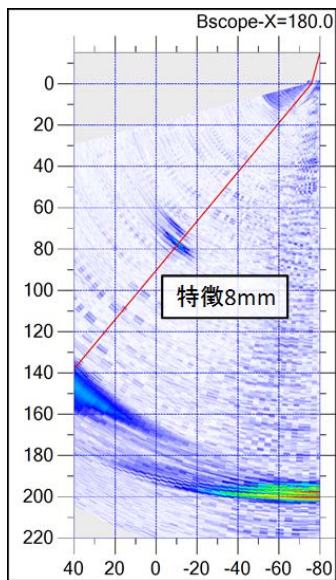
図 3.1-9 フェーズドアレイ測定透過画像 (ケース 2)



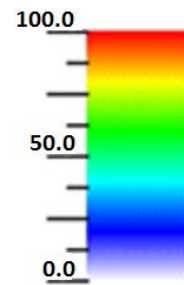
特徴 (EDM スリット) 2 mm 位置
(X=98.0 の B スコープ)



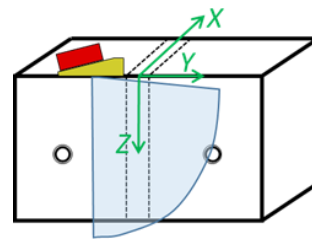
特徴 (EDM スリット) 5 mm 位置
(X=140.0 の B スコープ)



特徴 (EDM スリット) 8 mm 位置
(X=180.0 の B スコープ)



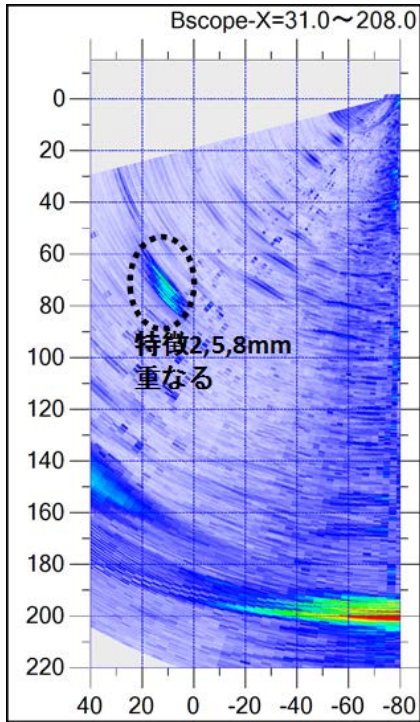
凡例 受信強度比



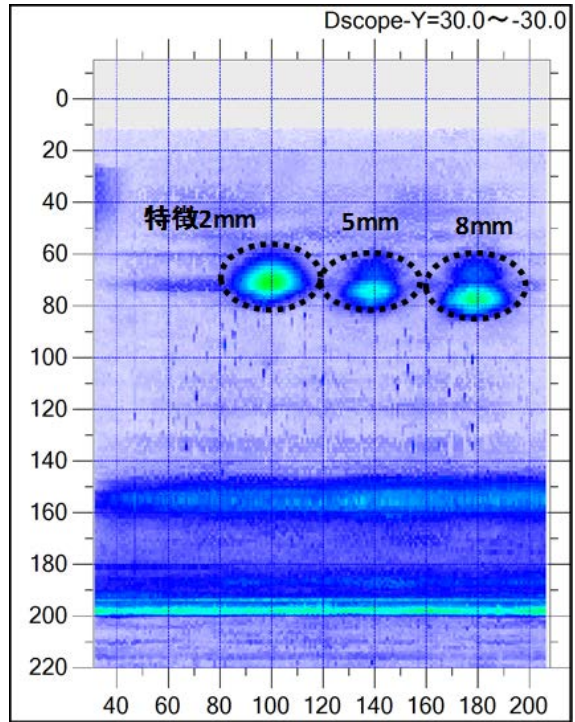
測定概要

- ケース番号 : ケース 2
- 探傷面 : 試験体上面
- 送信波 : 縦波 2 MHz
- 集束距離 : 130 mm
- ゲイン : 18 dB

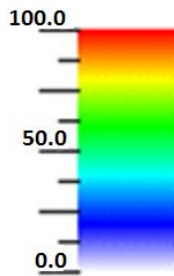
図 3.1-10 特徴 (EDM スリット) 位置での画像 (ケース 2)



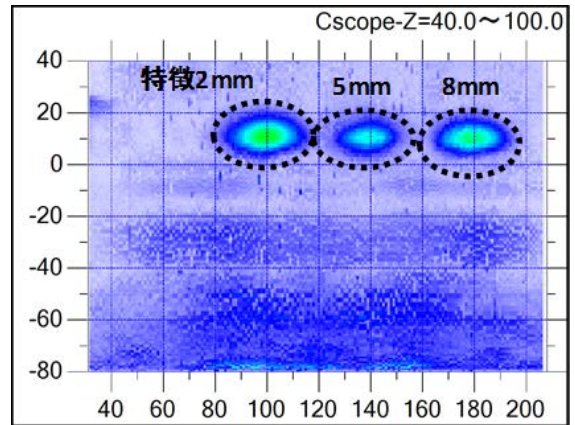
B スコープ
(範囲 X=31.0~208.0)



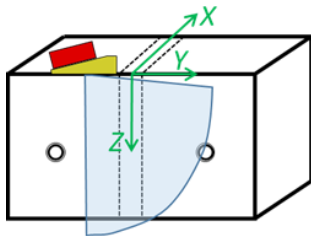
D スコープ
(範囲 Y=30.0~-30.0)



凡例 受信強度比



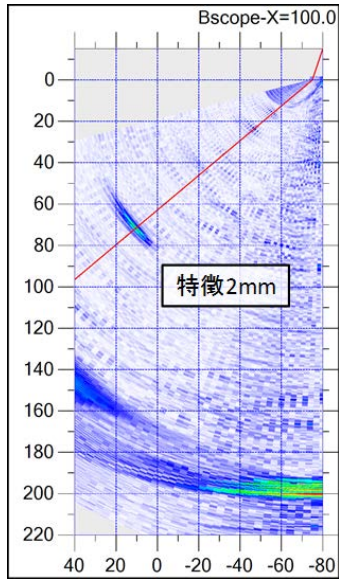
C スコープ
(範囲 Z=40.0~100.0)



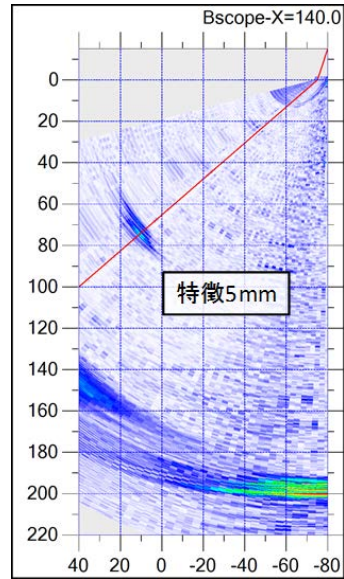
測定概要

ケース番号 : ケース 3
 探傷面 : 試験体上面
 送信波 : 縦波 2 MHz
 集束距離 : 130 mm
 ゲイン : 18 dB

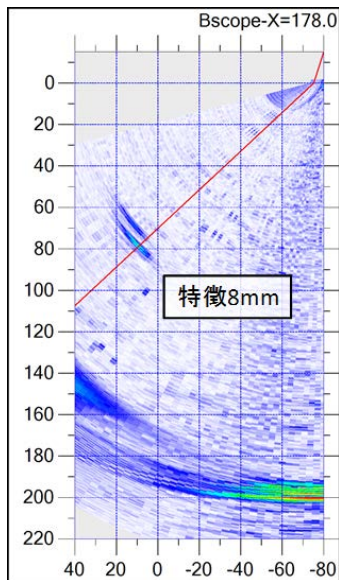
図 3.1-11 フェーズドアレイ測定透過画像 (ケース 3)



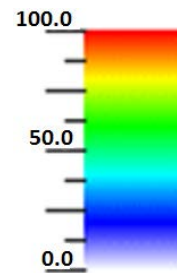
特徴 (EDM スリット) 2 mm 位置
(X=100.0 の B スコープ)



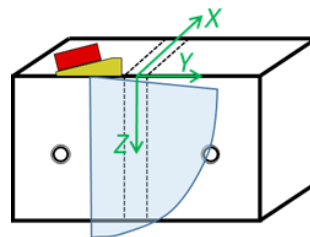
特徴 (EDM スリット) 5 mm 位置
(X=140.0 の B スコープ)



特徴 (EDM スリット) 8 mm 位置
(X=178.0 の B スコープ)



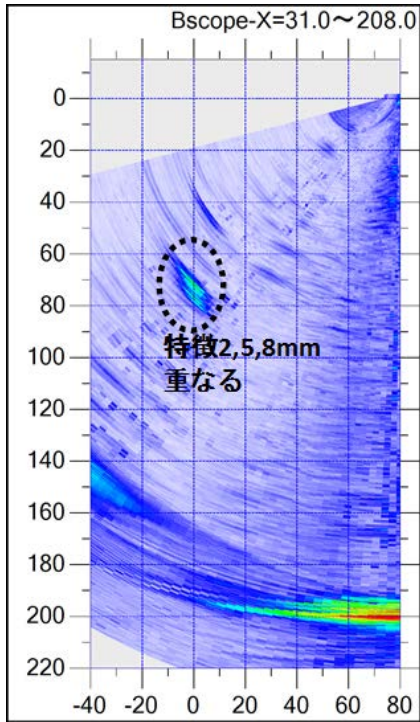
凡例 受信強度比



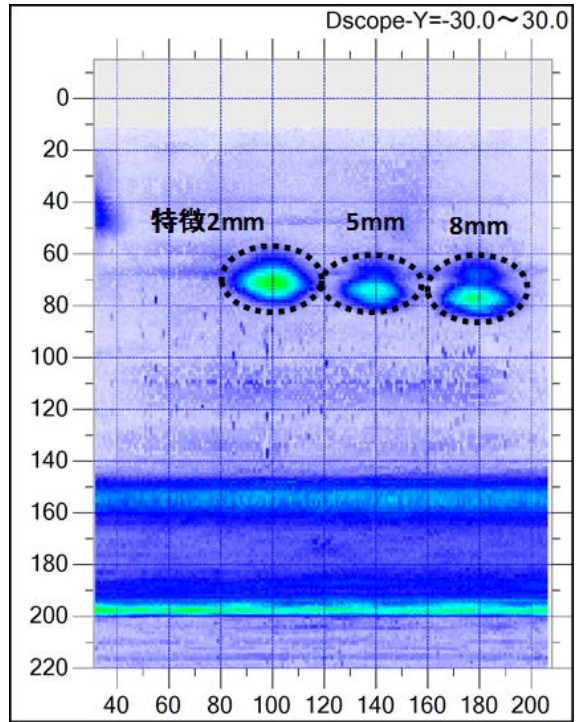
測定概要

- ケース番号 : ケース 3
- 探傷面 : 試験体上面
- 送信波 : 縦波 2 MHz
- 集束距離 : 130 mm
- ゲイン : 18 dB

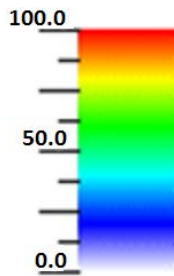
図 3.1-12 特徴 (EDM スリット) 位置での画像 (ケース 3)



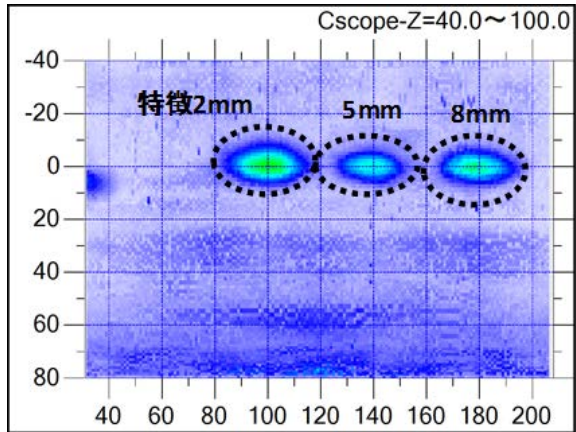
B スコープ
(範囲 X=31.0~208.0)



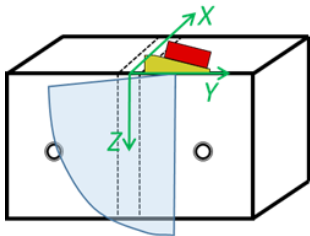
D スコープ
(範囲 Y=30.0~-30.0)



凡例 受信強度比



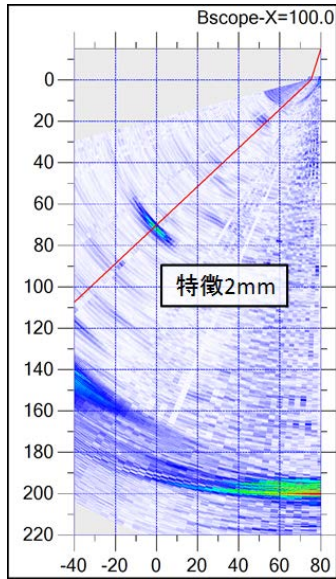
C スコープ
(範囲 Z=40.0~100.0)



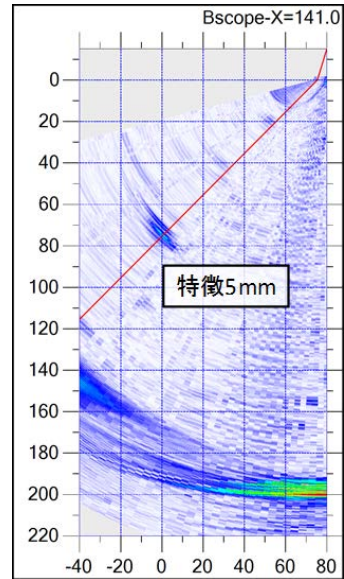
測定概要

ケース番号 : ケース 4
 探傷面 : 試験体上面
 送信波 : 縦波 2 MHz
 集束距離 : 130 mm
 ゲイン : 18 dB

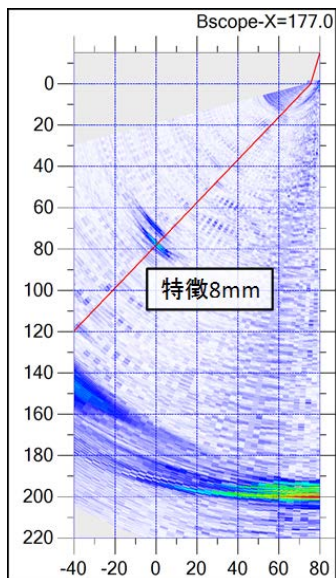
図 3.1-13 フェーズドアレイ測定透過画像 (ケース 4)



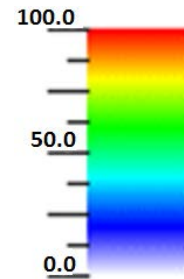
特徴 (EDM スリット) 2 mm 位置
(X=100.0 の B スコープ)



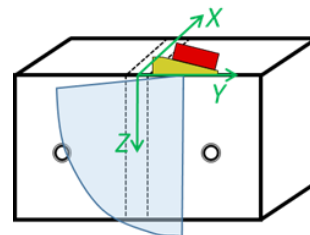
特徴 (EDM スリット) 5 mm 位置
(X=141.0 の B スコープ)



特徴 (EDM スリット) 8 mm 位置
(X=177.0 の B スコープ)



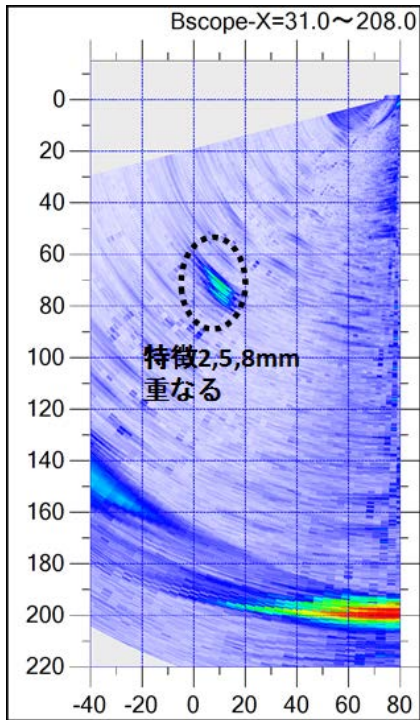
凡例 受信強度比



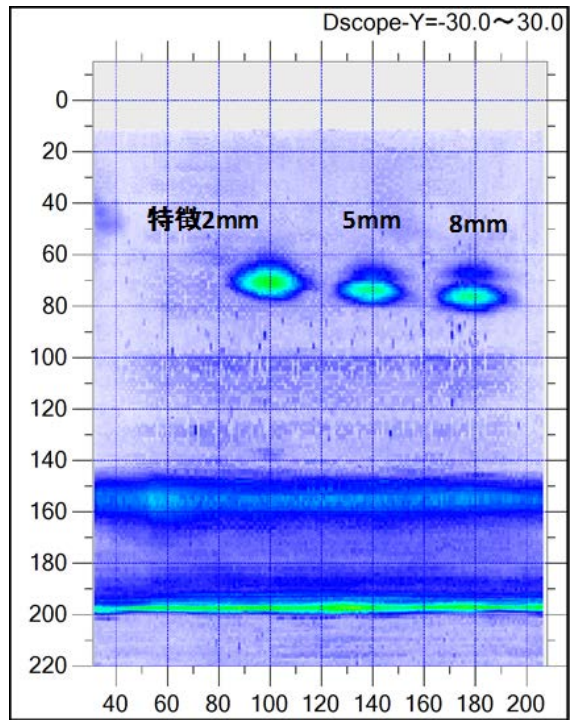
測定概要

- ケース番号 : ケース 4
- 探傷面 : 試験体上面
- 送信波 : 縦波 2 MHz
- 集束距離 : 130 mm
- ゲイン : 18 dB

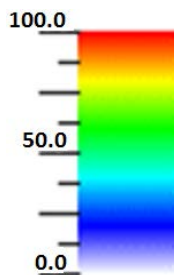
図 3.1-14 特徴 (EDM スリット) 位置での画像 (ケース 4)



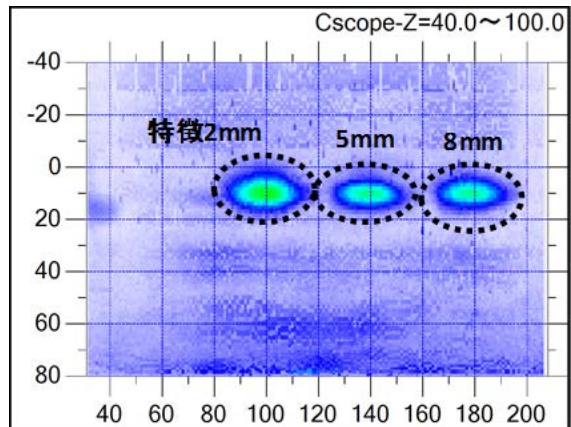
B スコープ
(範囲 X=31.0~208.0)



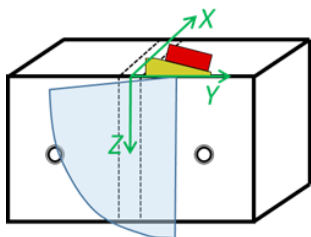
D スコープ
(範囲 Y=30.0~-30.0)



凡例 受信強度比



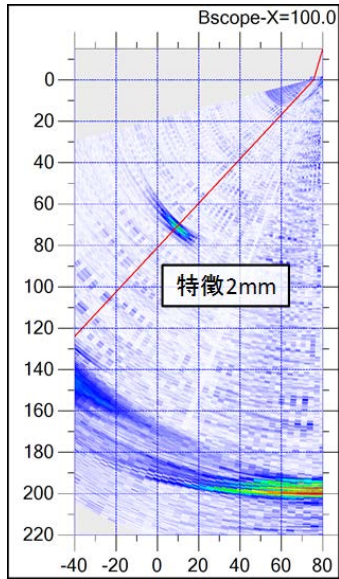
C スコープ
(範囲 Z=40.0~100.0)



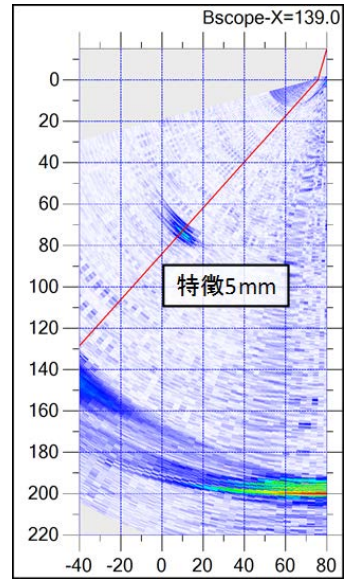
測定概要

ケース番号 : ケース 5
 探傷面 : 試験体上面
 送信波 : 縦波 2 MHz
 集束距離 : 130 mm
 ゲイン : 18 dB

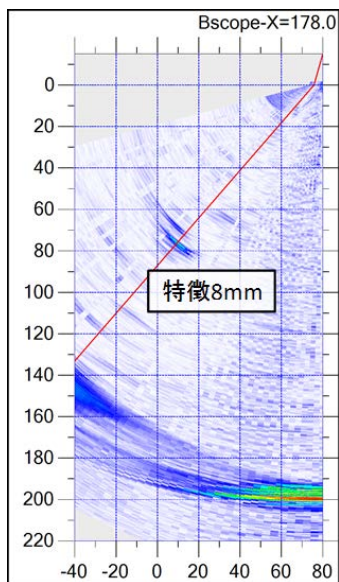
図 3.1-15 フェーズドアレイ測定透過画像 (ケース 5)



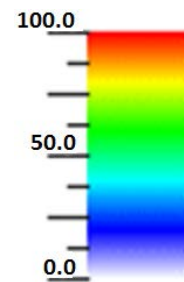
特徴 (EDM スリット) 2 mm 位置
(X=100.0 の B スコープ)



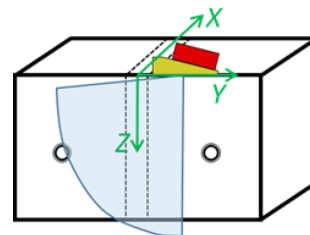
特徴 (EDM スリット) 5 mm 位置
(X=139.0 の B スコープ)



特徴 (EDM スリット) 8 mm 位置
(X=178.0 の B スコープ)



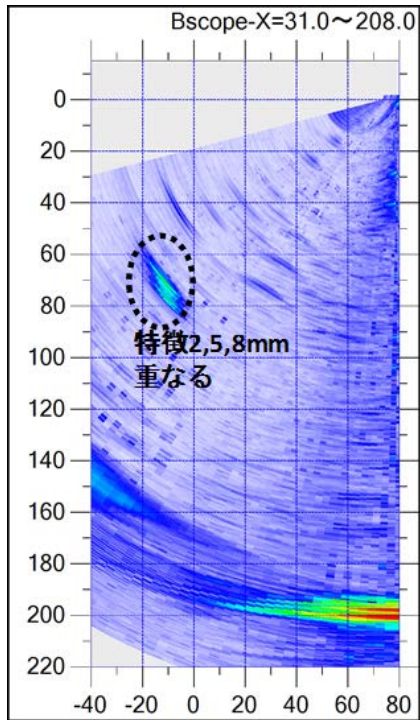
凡例 受信強度比



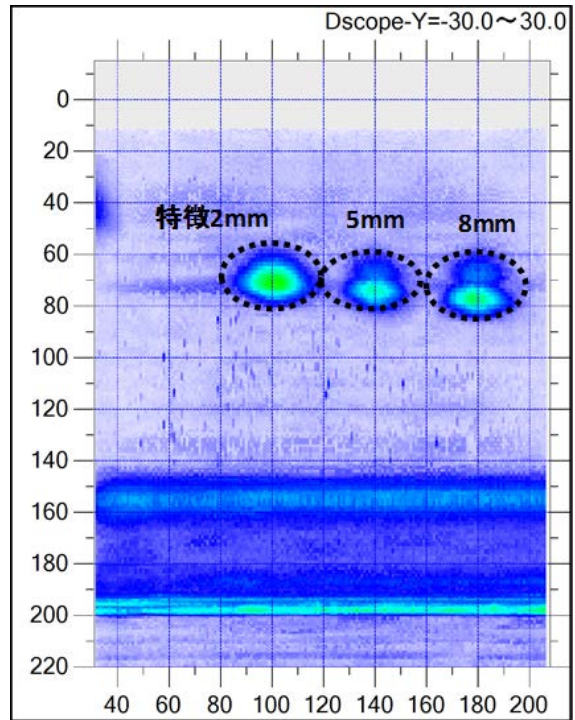
測定概要

- ケース番号 : ケース 5
- 探傷面 : 試験体上面
- 送信波 : 縦波 2 MHz
- 集束距離 : 130 mm
- ゲイン : 18 dB

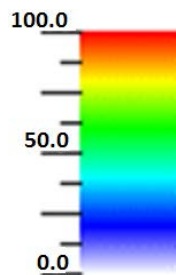
図 3.1-16 特徴 (EDM スリット) 位置での画像 (ケース 5)



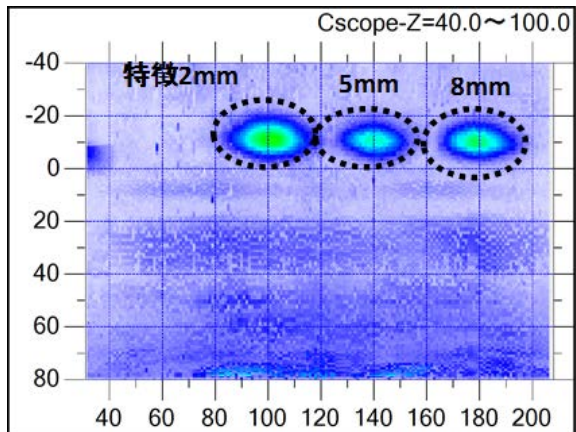
B スコープ
(範囲 X=31.0~208.0)



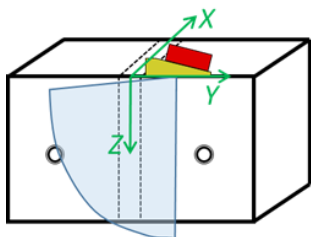
D スコープ
(範囲 Y=30.0~-30.0)



凡例 受信強度比



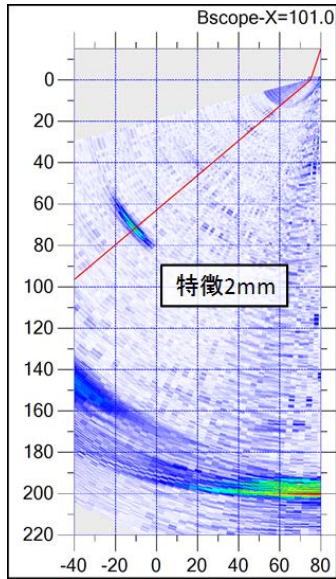
C スコープ
(範囲 Z=40.0~100.0)



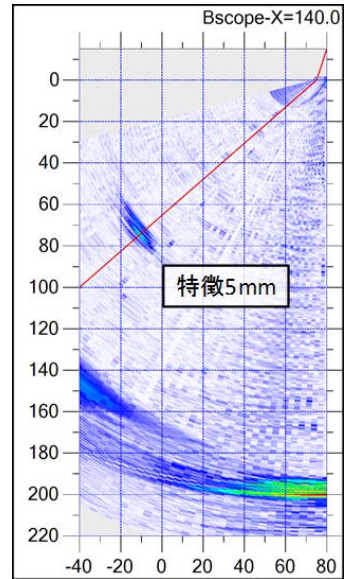
測定概要

ケース番号 : ケース 6
 探傷面 : 試験体上面
 送信波 : 縦波 2 MHz
 集束距離 : 130 mm
 ゲイン : 18 dB

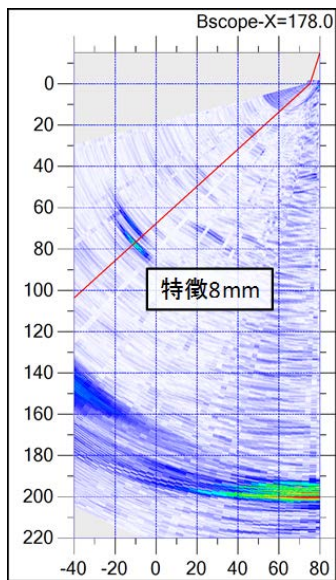
図 3.1-17 フェーズドアレイ測定透過画像 (ケース 6)



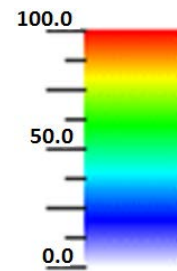
特徴 (EDM スリット) 2 mm 位置
(X=101.0 の B スコープ)



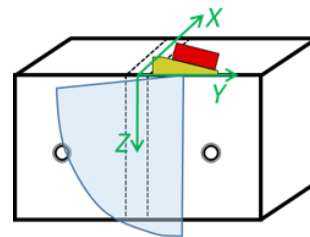
特徴 (EDM スリット) 5 mm 位置
(X=140.0 の B スコープ)



特徴 (EDM スリット) 8 mm 位置
(X=178.0 の B スコープ)



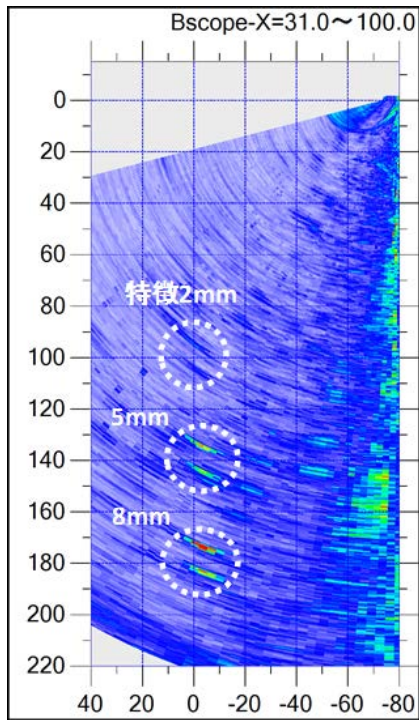
凡例 受信強度比



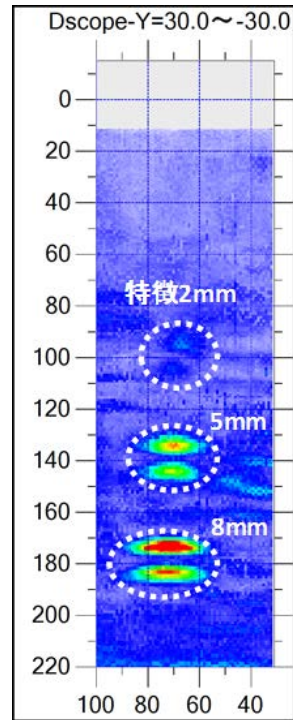
測定概要

- ケース番号 : ケース 6
- 探傷面 : 試験体上面
- 送信波 : 縦波 2 MHz
- 集束距離 : 130 mm
- ゲイン : 18 dB

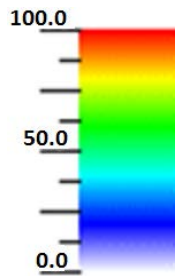
図 3.1-18 特徴 (EDM スリット) 位置での画像 (ケース 6)



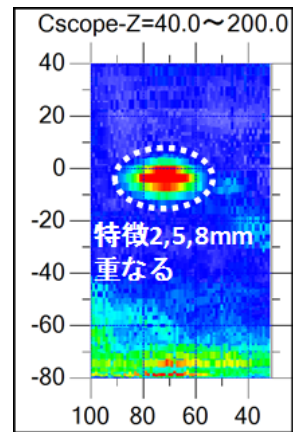
B スコープ
(範囲 X=31.0~100.0)



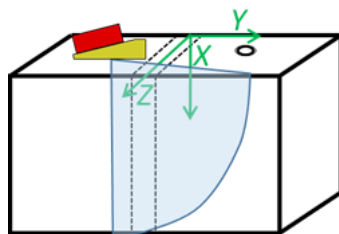
D スコープ
(範囲 Y=30.0~-30.0)



凡例 受信強度比



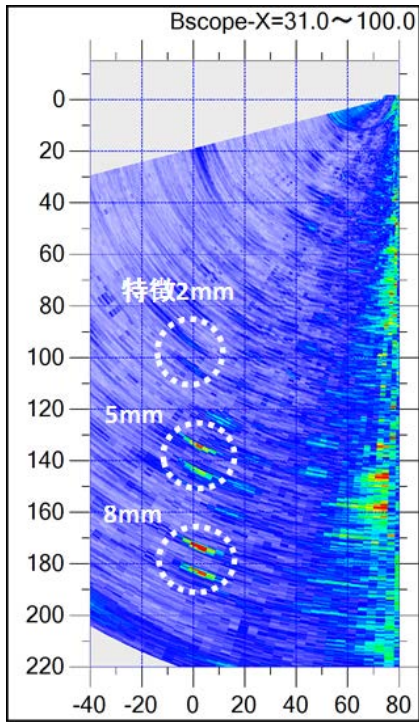
C スコープ
(範囲 Z=40.0~200.0)



測定概要

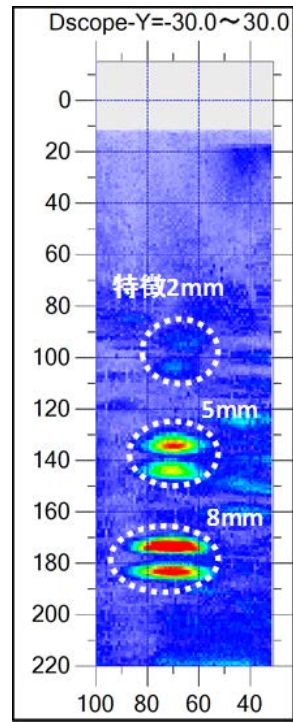
ケース番号 : ケース 7
 探傷面 : 試験体側面
 送信波 : 縦波 2 MHz
 集束距離 : 230 mm
 ゲイン : 24 dB

図 3.1-19 フェーズドアレイ測定透過画像 (ケース 7)



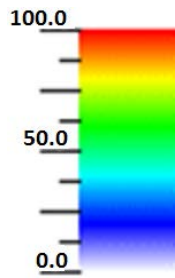
B スコープ

(範囲 X=31.0~100.0)

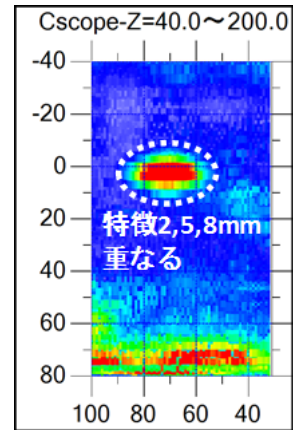


D スコープ

(範囲 Y=30.0~-30.0)

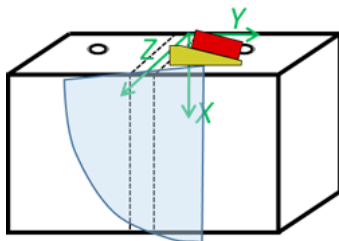


凡例 受信強度比



C スコープ

(範囲 Z=40.0~200.0)



測定概要

ケース番号 : ケース 8
 探傷面 : 試験体側面
 送信波 : 縦波 2 MHz
 集束距離 : 230 mm
 ゲイン : 24 dB

図 3.1-20 フェーズドアレイ測定透過画像 (ケース 8)

図 3.1-7～図 3.1-20 から特徴の位置と大きさについてまとめた結果(ケース 1～ケース 6)を表 3.1-3 に示す。

表 3.1-3 読み取った特徴の位置と大きさ

ケース	対象とする特徴	上端 (深さ Z 座標)	下端 (深さ Z 座標)	上下端の 分離性 *1	特徴の 大きさ *2
ケース 1	2 mm	68.7 mm	72.1 mm	×	3.4 mm
	5 mm	71.8 mm	74.8 mm	○	3.0 mm
	8 mm	70.3 mm	77.6 mm	○	7.3 mm
ケース 2	2 mm	69.7 mm	71.8 mm	×	2.1 mm
	5 mm	71.6 mm	74.7 mm	○	3.1 mm
	8 mm	68.2 mm	77.4 mm	○	9.2 mm
ケース 3	2 mm	69.4 mm	71.6 mm	×	2.2 mm
	5 mm	69.8 mm	74.4 mm	○	4.6 mm
	8 mm	69.1 mm	78.6 mm	○	9.5 mm
ケース 4	2 mm	70.1 mm	70.8 mm	×	0.7 mm
	5 mm	70.5 mm	74.9 mm	○	4.4 mm
	8 mm	68.3 mm	77.6 mm	○	9.3 mm
ケース 5	2 mm	68.6 mm	70.7 mm	×	2.1 mm
	5 mm	71.4 mm	73.4 mm	○	2.0 mm
	8 mm	68.1 mm	76.1 mm	○	8.0 mm
ケース 6	2 mm	69.5 mm	71.7 mm	×	2.2 mm
	5 mm	68.3 mm	74.4 mm	○	6.1 mm
	8 mm	67.7 mm	77.1 mm	○	9.4 mm

*1 2 mm の特徴については、特徴の上下端の分離可否の判断が評価者により分かれた（後述の c 項参照）。評価者により判断が異なる結果を検認データとして採用する可能性は低いと考えられることから、本検討において 2 mm の特徴については分離不可と評価した。

*2 2 mm の特徴の大きさについては、上下端の分離を可と判断した評価者の結果を示した。

c. 測定結果の分析

ケース 1～ケース 8 の測定にて得られた結果から次のとおり評価した。

図 3.1-8、図 3.1-10、図 3.1-12、図 3.1-14、図 3.1-16、図 3.1-18（ケース 1～ケース 6 における特徴（EDM スリット）位置での画像）に示すとおり、全てのケースにおいて深さ約 70 mm の位置に 2 mm、5 mm、8 mm の特徴があることが検出できていることから、特徴の検出性について確認することができた。

一方、特徴の上下端の位置は、ある程度の幅をもって観測されているエコーにおいて、受信強度が最大となっている位置を特定することで求めている。5 mm や 8 mm の特徴では上下

端それぞれのエコーが個別に確認できるため、上下端の位置を個別に求めることができるが、2 mm の特徴では上下端のエコーが近いために評価者によっては上下端を個別に求めることができないと判断する場合があった。このため、2 mm の特徴については、検認データとして採用できないと考えられることから、上下端の分離性は不可とした。

次に、探触子と各特徴（2 mm、5 mm、8 mm）が同一軸上にあった場合の特徴の検出性をケース 7 およびケース 8 の結果（図 3.1-19、図 3.1-20）に基づいて確認した。探触子と複数の特徴が同一軸上にあっても、特徴同士が 30 mm の間隔で付与されていれば個々の特徴を独立して検出できることが確認できた。

続いて、特徴間の相対位置の関係について整理した。特徴 8 mm を基準として、特徴 2 mm、特徴 5 mm との相対位置の関係を表 3.1-4 に示す。なお、特徴の上端は溶接時の溶込みにより変動している可能性があるため、ここでは下端を基準にすることとした。

表 3.1-4 特徴の相対位置

項目	特徴	相対位置 (特徴 8 mm の下端を基準)	仕様値との差の大きさ
仕様値	2 mm	-6 mm	—
	5 mm	-3 mm	—
	8 mm	(基準)	—
ケース 1	2 mm	-5.5 mm	0.5 mm
	5 mm	-2.8 mm	0.2 mm
	8 mm	(基準)	—
ケース 2	2 mm	-5.6 mm	0.4 mm
	5 mm	-2.7 mm	0.3 mm
	8 mm	(基準)	—
ケース 3	2 mm	-7.0 mm	1.0 mm
	5 mm	-4.2 mm	1.2 mm
	8 mm	(基準)	—
ケース 4	2 mm	-6.8 mm	0.8 mm
	5 mm	-2.7 mm	0.3 mm
	8 mm	(基準)	—
ケース 5	2 mm	-5.4 mm	0.6 mm
	5 mm	-2.7 mm	0.3 mm
	8 mm	(基準)	—
ケース 6	2 mm	-5.4 mm	0.6 mm
	5 mm	-2.7 mm	0.3 mm
	8 mm	(基準)	—

特徴 8 mm の下端を基準とすると、3 つの特徴の仕様上の相対位置は、特徴 2 mm で-6 mm、特徴 5 mm で-3 mm となる。この仕様上の相対位置と超音波探傷で得られた測定値から算出した相対位置を比較すると、差の最大値は特徴 2 mm では 1.0 mm (ケース 3)、特徴 5 mm では 1.2 mm (ケース 3) となった。

一方、平成 28 年度に実施した測定の再現性についてのシミュレーション解析(原子力機構, 2017)において示したとおり、2 MHz の超音波で測定した場合は最大 1 波長分(約 3 mm)の測定誤差が生じる可能性がある。このことから、測定にて得られた結果は測定誤差の範囲内で一致していると考えられることができる。

② 特徴の位置と大きさの実測

試験体中の特徴(EDM スリット)の位置と大きさを把握するため、試験体を溶接部を中心に幅 30 mm で切断した。切断後の試験体の外観写真を図 3.1-21 に示す。さらに、この切断した試験体を赤線にて示した特徴(EDM スリット)の中央部の断面に沿って切断し、切断面を観察した。なお、図中の①、②、③の切断面にそれぞれ 2 mm、5 mm、8 mm の特徴(EDM スリット)が付与されている。

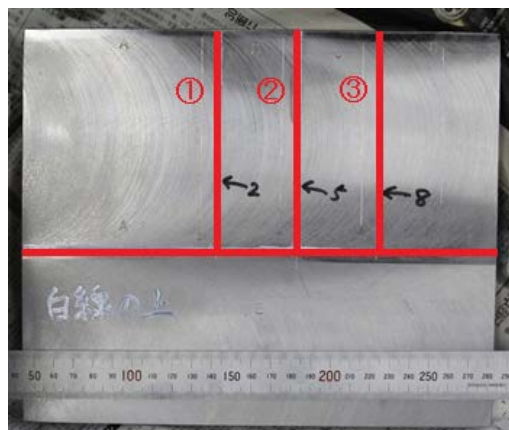


図 3.1-21 切断後の試験サンプルの外観写真

図 3.1-21 における切断面①～③のマクロ写真を図 3.1-22 に示す。溶接部の初層直下に特徴(EDM スリット)が存在しており、溶接部においては特徴以外の有意な欠陥は見られなかった。

ここで、特徴の位置と大きさを図 3.1-23 に示す定義(試験体表面から特徴の下端までの距離を「位置」、特徴の上端から下端までの距離を「大きさ」)に基づいて実測した。各断面における特徴の位置と大きさを実測した結果を表 3.1-5 に示す。

なお、後述する③の超音波シミュレーション解析でも同じ定義に従って特徴の位置と大きさを求めている。

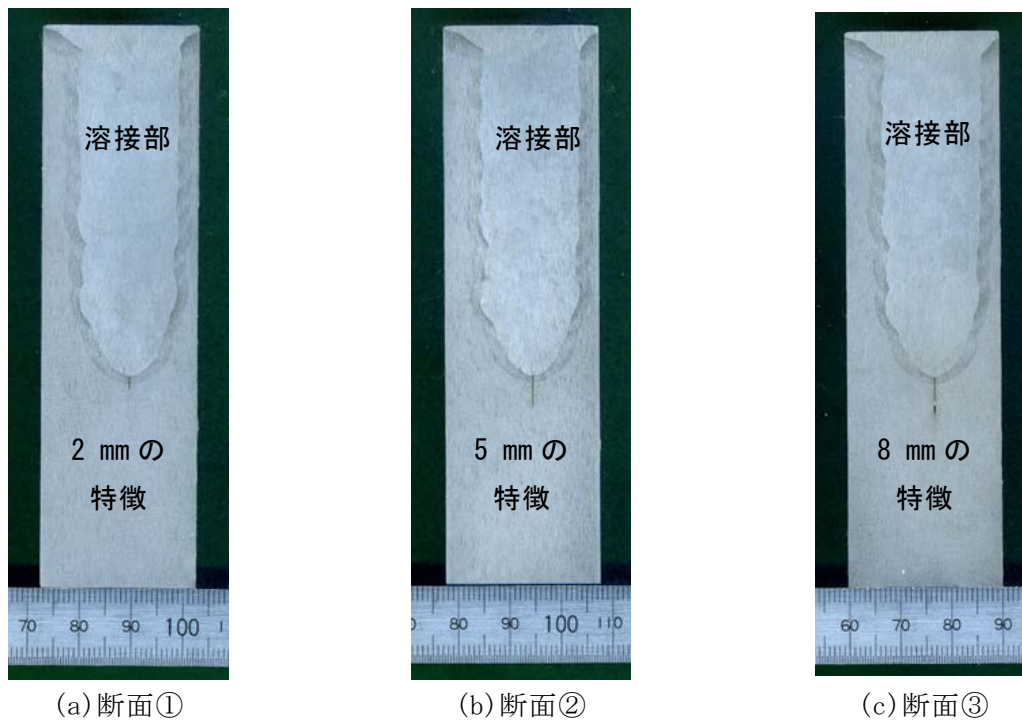


図 3.1-22 各断面のマクロ観察結果

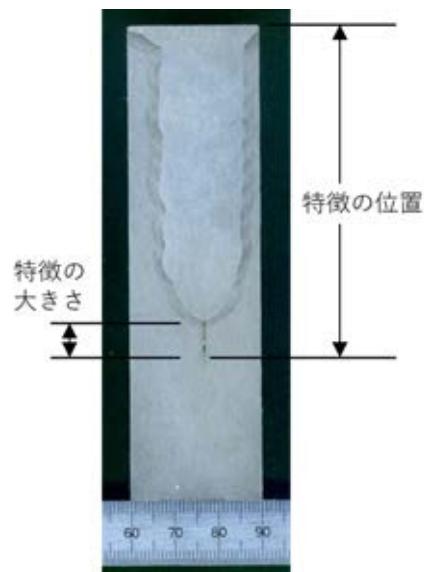


図 3.1-23 スリットの深さと高さの定義

表 3.1-5 各切断面における特徴の位置と大きさ

切断面	仕様値 [mm]	特徴の位置 [mm]	特徴の大きさ [mm]
①	2	70.8	2.3
②	5	73.9	5.6
③	8	75.8	7.3

③ 超音波シミュレーション解析

a. 解析モデルに設定する特徴の選定

解析モデルは、平成 27 年度に実施した超音波シミュレーション解析（原子力機構，2016a）と前述した試験体の実測を基に設定した。

前述のとおり、実測した試験体には大きさ 2 mm、5 mm、8 mm の特徴が付与されており、それらに対する測定結果が表 3.1-5 のように得られている。一方、平成 27 年度の超音波シミュレーション解析（原子力機構，2016a）では、付与した特徴の検出可否や上下端の分離性を確認するために大きさ 2 mm と 5 mm の特徴を対象として検討しているが、大きさ 8 mm についての解析結果はない。そのため、本検討では 8 mm の特徴に対する超音波シミュレーション解析を実施することにより、これまでの成果とあわせて、特徴の大きさ 2 mm～8 mm での比較を行うこととした。

b. 解析モデルの設定

表 3.1-6 にシミュレーション解析の設定値を示し、図 3.1-24 に解析モデルにおける特徴およびプローブ（クサビおよび送受信素子で構成される）の配置の概略を示す。特徴の位置と大きさは表 3.1-5 に示す 8 mm の特徴の値に基づいて設定し、プローブ位置は測定において基本ケースとしたケース 1 の条件と合わせて、溶接部中心から 80 mm の位置とした。

超音波シミュレーション解析には ComWAVE8（伊藤忠テクノソリューション社製）の陽解法による三次元 FEM コード（動的問題の数値解析を Δt 刻みの時間ステップ毎に三次元の有限要素法により行う解析コード）を利用し、解析要素は 0.05 mm×0.05 mm×0.05 mm のボクセル要素（立体要素）、要素数は約 800 万で、解析の時間刻みは 6.78 nsec とした。

表 3.1-6 シミュレーション解析設定値

フェーズドアレイ プローブ	周波数	2 MHz
	素子ピッチ	2 mm
	素子数	32 ch
クサビ	角度	6.2 度
	厚さ（最大値）	15.1 mm
	クサビ中の音速	2450 m s ⁻¹
送信条件	波の種類	縦波
	音速設定値	5930 m s ⁻¹
	屈折角	0～75 度（0.5 度ピッチ）

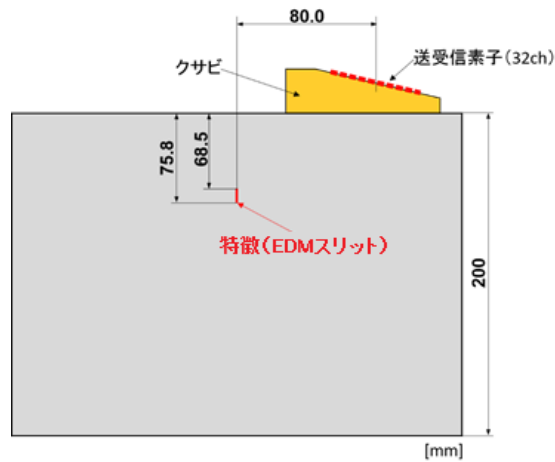


図 3.1-24 シミュレーションにおける配置概略図

c. 超音波シミュレーション解析結果

シミュレーション解析結果を図 3.1-25 に示す。この結果から、8 mm の特徴に対して、特徴の検出、上下端の分離は可能であることがわかった。

また、図 3.1-23 に示す定義に従って、シミュレーション解析で得られた結果から特徴の位置と大きさを求めた。算出した特徴の位置と大きさを表 3.1-7 に示す。

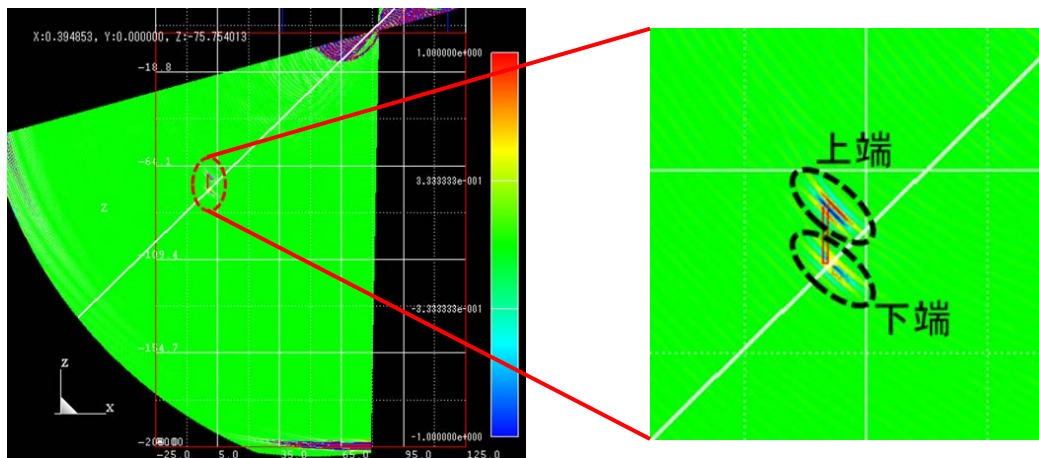


図 3.1-25 シミュレーションによるセクタ走査画像

表 3.1-7 シミュレーション解析から求めた 8 mm の特徴の位置と大きさ

上端までの距離	特徴の位置 (下端までの距離)	特徴の大きさ (上端から下端までの距離)
69.2 mm	75.8 mm	6.6 mm

④ 検証

a. 異なる方法で求めた特徴の位置・大きさに関する誤差

①項において示した超音波探傷測定により得られた特徴の位置・大きさ (表 3.1-3)、②項

において示した試験体を切断して得られた特徴の位置・大きさ（表 3.1-5）、および③項において示したシミュレーション解析により得られた特徴の位置・大きさ（表 3.1-7）を比較した。なお、これ以降、試験体の超音波探傷測定により得られた値を「測定値」、試験体を切断して得られた値を「実測値」、およびシミュレーション解析により得られた値を「解析値」と呼ぶ。

最初に、測定値と実測値を比較し、誤差平均および標準偏差を求めた。

特徴の大きさに関する測定値と実測値との誤差平均および標準偏差は、表 3.1-8 に示すとおり、1.3 mm（誤差平均）、および 1.0 mm（標準偏差）であった。

次に、特徴の位置についての誤差平均および標準偏差は、8 mmの特徴を基準点として 2 mm、5 mmの特徴の位置を整理した相対位置（表 3.1-4）と、試験体を切断して得られた特徴の実寸法を 8 mmの特徴を基準点にして整理した相対位置とを比較し表 3.1-9 にまとめた。特徴の相対位置に関する誤差平均は 1.0 mm、標準偏差は 0.7 mmであった。

なお、誤差平均および標準偏差は式 3.1-1 を用いて算出した。

$$M_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \sigma_A = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - M_R)^2} \quad n: \text{測定点数} \quad x: \text{測定値} \quad \dots\dots\dots \text{式 3.1-1}$$

ここで M_R : 誤差平均、 σ_A : 標本標準偏差

表 3.1-8 および表 3.1-9 にて示した結果から特徴の大きさと相対位置の誤差の平均値を比較すると、特徴の大きさでは誤差が 1.3 mm、相対位置では 1.0 mm となっている。特徴の大きさは特徴の上端と下端の位置の差から算出しており、また上端の相対位置の誤差は下端の相対位置の誤差と同等と考えられることから、特徴の大きさの誤差は上端と下端の測定誤差の 2 乗和平方根（1.4 mm）と同等となっている。

表 3.1-8 特徴の大きさに関する誤差

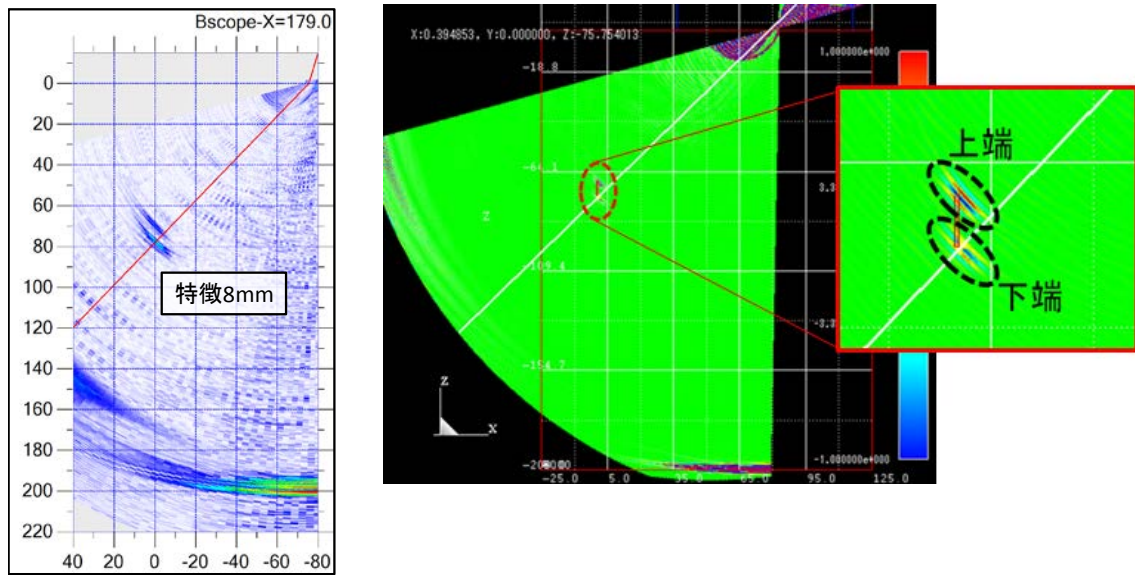
	特徴の大きさ (仕様値)	特徴の大きさ [mm]	実測値との誤差 [mm]
実測値	2 mm	2.3	
	5 mm	5.6	
	8 mm	7.3	
測定値 (ケース 1)	2 mm	3.4	1.1
	5 mm	3.0	2.6
	8 mm	7.3	0
測定値 (ケース 2)	2 mm	2.1	0.2
	5 mm	3.1	2.5
	8 mm	9.2	1.9
測定値 (ケース 3)	2 mm	2.2	0.1
	5 mm	4.6	1.0
	8 mm	9.5	2.2
測定値 (ケース 4)	2 mm	0.7	1.6
	5 mm	4.4	1.2
	8 mm	9.3	2.0
測定値 (ケース 5)	2 mm	2.1	0.2
	5 mm	2.0	3.6
	8 mm	8.0	0.7
測定値 (ケース 6)	2 mm	2.2	0.1
	5 mm	6.1	0.5
	8 mm	9.4	2.1
誤差の平均値 M_R			1.3
標本標準偏差 σ_A			1.0

表 3.1-9 相対位置に関する誤差

	特徴の大きさ (仕様値)	特徴の位置 [mm]	実測値との誤差 [mm]
実測値	2 mm	-5.0	
	5 mm	-1.9	
	8 mm	(基準)	
測定値 (ケース 1)	2 mm	-5.5	0.5
	5 mm	-2.8	0.9
	8 mm	(基準)	-
測定値 (ケース 2)	2 mm	-5.6	0.6
	5 mm	-2.7	0.8
	8 mm	(基準)	-
測定値 (ケース 3)	2 mm	-7.0	2.0
	5 mm	-4.2	2.3
	8 mm	(基準)	-
測定値 (ケース 4)	2 mm	-6.8	1.8
	5 mm	-2.7	0.8
	8 mm	(基準)	-
測定値 (ケース 5)	2 mm	-5.4	0.4
	5 mm	-2.7	0.8
	8 mm	(基準)	-
測定値 (ケース 6)	2 mm	-5.4	0.4
	5 mm	-2.7	0.8
	8 mm	(基準)	-
誤差の平均値 M_R			1.0
標本標準偏差 σ_A			0.7

続いて、測定値と解析値を比較した。ここでは、超音波シミュレーション解析はケース 1 の条件で 8 mm の特徴のみを対象として実施したため、比較する測定値もケース 1 での測定結果を対象とした。

超音波探傷測定により得られた超音波探傷画像と超音波シミュレーション解析により得られた超音波探傷画像の比較を図 3.1-26 に示す。画像上では同じようなエコーが観測されているが、測定値と解析値では、特徴の位置において 1.8 mm、特徴の大きさにおいて 0.7 mm の差が生じている。



(a) 超音波探傷測定画像 (b) シミュレーション解析による画像

図 3.1-26 超音波探傷測定とシミュレーション解析の画像の比較

8 mm の特徴に関する、測定値、実測値、解析値を表 3.1-10 に整理した。特徴の位置については、実測値を基に解析モデルを設定しているので実測値と解析値との差は無いが、測定値と解析値とは 1.8mm の差がある。一方、特徴の大きさでは、実測値と測定値は良く一致しているが、解析値とは 0.7 mm の差があることがわかる。

しかし、平成 28 年度に実施した測定の再現性についてのシミュレーション解析（原子力機構，2017）にて示したように、2 MHz 超音波による測定では 1 波長分（約 3 mm）の誤差が生じる可能性がある。これを考慮すると、実測値、測定値、解析値間の誤差は 3 mm 以内となっており、妥当な結果が得られているものと考えることができる。

表 3.1-10 解析と実測の比較

	特徴の位置 [mm]	特徴の大きさ [mm]
実測値	75.8	7.3
測定値（ケース 1）	77.6	7.3
解析値	75.8	6.6

b. 検出可否、上下端の分離性、隣接する特徴の分離性に関する検証

検出可否と分離性（上下端、特徴間）について、超音波探傷測定とシミュレーション解析結果を比較した結果を表 3.1-11 に示す。なお、特徴の検出可否、上下端の分離性を対象とした 2 mm、5 mm の解析結果と、隣接する特徴の分離性の解析結果については、平成 27 年度の成果（原子力機構，2016a）を利用した。

2 mm、5 mm と 8 mm のいずれの特徴でも、測定、解析ともに特徴を検出することができている。また、特徴の上下端の分離性では、2 mm の特徴は測定、解析ともにエコーが重なってし

まい、分離することは困難であった。隣接する特徴の分離性では、特徴の間隔を 30 mm に設定して付与しているが、測定、解析ともに分離して確認できている。

以上のことから、特徴の検出、特徴の上下端の分離、隣接する特徴の分離において、超音波探傷測定とシミュレーション解析で同じ結果が得られることが確認できた。

表 3.1-11 検出可否、分離性に関する測定値と解析値の比較

仕様値	特徴の検出可否		特徴の上下端の分離性		隣接する特徴の分離性	
	測定	解析	測定	解析	測定	解析 *1
2 mm	○	○ *1	×	×	分離可 *2	分離可 *2
5 mm	○	○ *1	○	○ *1		
8 mm	○	○	○	○		

*1：平成 27 年度のシミュレーション解析結果（原子力機構，2016a）

*2：特徴間の距離を 30 mm に設定した場合

⑤ 考察

試験体に対して実施した超音波探傷測定で得られた結果と超音波シミュレーション解析によって得られた結果の比較により、超音波探傷で得られる特徴の位置や大きさなどの特徴の情報は、数値解析によって、誤差はあるものの、評価する上で許容できる精度で把握することができることがわかった。このことは、処分容器の固有性確認方法の適用性を判断するうえで、必ずしも試験体を作製して超音波探傷による測定を行わなくても、超音波シミュレーション解析の数値解析で検討することが可能であることを示唆した。

また、特徴の最適な位置や大きさ、配列といった超音波探傷測定で得られる情報をシミュレーション解析により確認することができることから、処分容器を設計する段階で様々な付与方法を検討するためにシミュレーション解析を利用することも可能と考えられる。

一方で、特徴は処分容器の ID として使用するため、処分容器ごとに固有でなければならない。処分容器の数が多くなった場合、ID としての固有性を確保するため、特徴間の距離の短縮や形状の変化を実施する必要性が生じる可能性があり、その影響についても検討する必要があるものとする。

2) 複合処分容器への超音波探傷技術の適用性検討

銅を外層、炭素鋼を内層とする複合処分容器の検認技術についての検討として、超音波探傷技術の適用可能性を検証した。

ここでは SKB（スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社）で検討されている銅-炭素鋼複合処分容器の形状を参考に、複合処分容器の銅部（蓋）および溶接によって発生する特徴（あるいは人工的に付与した特徴）をモデル化してシミュレーション解析を行い、平成 27 年度に炭素鋼処分容器に対する適用可能性を検討（原子力機構，2016a）した探傷性、識別性などの視点を用いて、検認技術としての適用可能性を評価した。

複合処分容器の検認技術としての超音波探傷技術の適用可能性の検討は、図 3.1-27 に示す

手順にて実施した。まず、SKBの公開文献（SKB，2006；2010）より、複合処分容器の形状や材質、蓋部と胴部の接合方法など複合処分容器の概要について調査を行い、超音波探傷技術を用いた複合処分容器の対象となる部位の解析モデルの設定を行った。設定した解析モデルに基づいて超音波シミュレーション解析を実施し、特徴の認識性を確認した。また、超音波シミュレーション解析結果、ならびに平成27年度および平成28年度に炭素鋼の処分容器を対象に検討した固有性、同定識別性、計測性（原子力機構，2016a；2017）について検討することで、複合処分容器に関する超音波探傷の適用性を評価した。

また、複合処分容器の溶接部に特徴を付与することが可能と考えられる方法についても検討を行った。

複合処分容器への超音波探傷技術の適用性検討に関するシミュレーション解析の内容を「①解析対象の調査」、「②シミュレーション解析条件設定」、「③シミュレーション解析結果」、および「④複合処分容器の検認に対する適用性の評価」に示す。また、複合処分容器への特徴の付与方法の検討内容を「⑤複合処分容器への特徴の付与方法の検討」に示す。

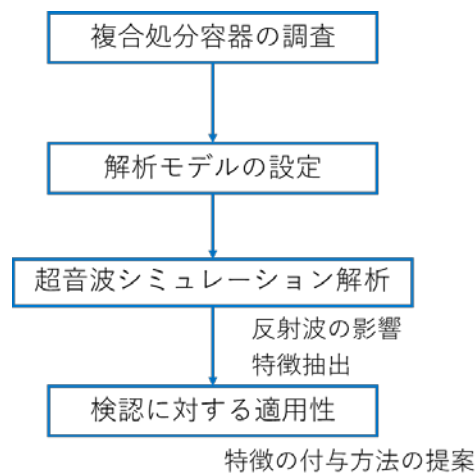


図 3.1-27 複合処分容器への超音波探傷技術の適用性検討手順

① 解析対象の調査

a. 複合処分容器の形状

複合処分容器は炭素鋼容器に使用済燃料を収納、それを銅容器に収容し、蓋を溶接などにより接合したもので、銅容器部は長さ 4.835 m、直径 1.05 m の円筒形状で、胴部の銅材の厚みは 49 mm である。複合処分容器の検認方法は、超音波探傷技術を用いて銅容器の溶接部に付与する特徴を測定し、それを用いて検認を行うものである。

SKB では、複合処分容器の銅材として純銅（リン脱酸銅）を用いて検討を進めている（SKB，2010）。また、本事業でも、純銅を対象として処分容器の検討（2.2.1 項など）が実施されているため、本検討でも純銅を対象として超音波シミュレーション解析を実施した。

SKB で検討されている複合処分容器の形状を図 3.1-28 に、銅容器部および、銅容器の蓋部と胴体の接合部付近の形状を図 3.1-29、図 3.1-30 に、それらの寸法を表 3.1-12 に示す。

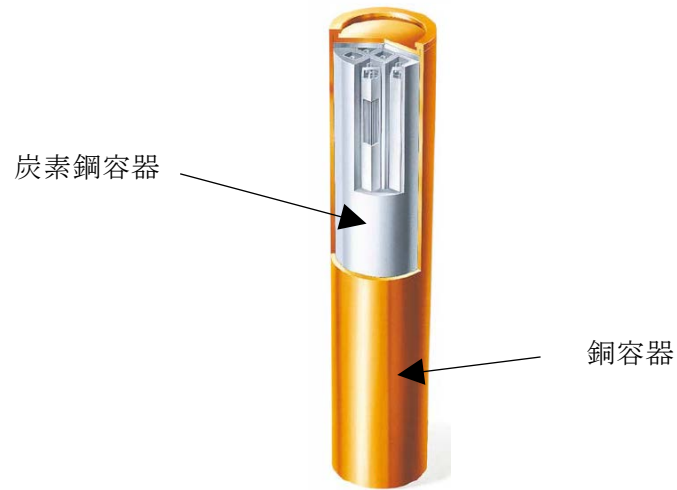


図 3.1-28 SKB におけるリファレンス複合処分容器
(SKB, 2010 に加筆)

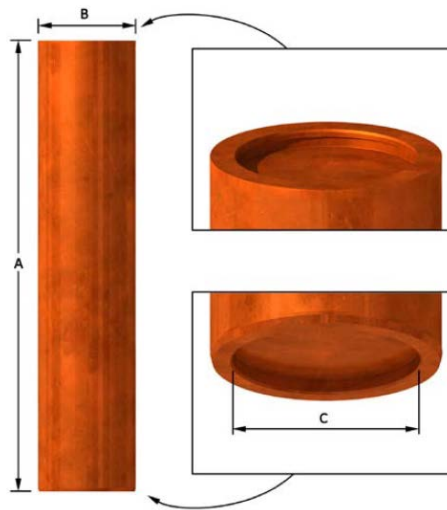


図 3.1-29 銅容器の外寸
(SKB, 2010)

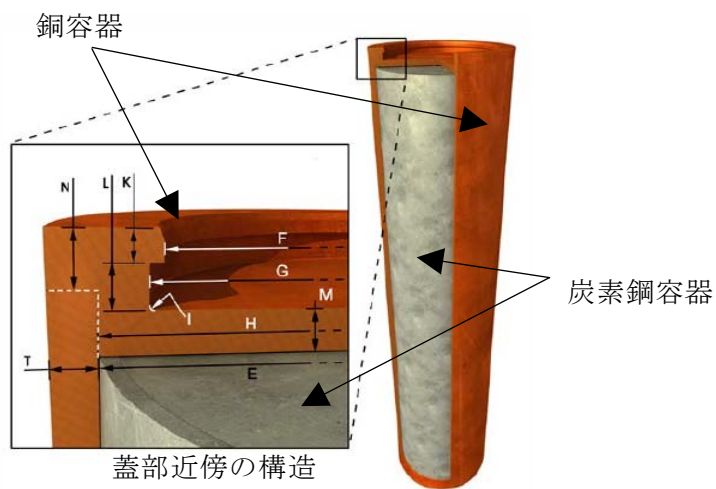


図 3.1-30 複合処分容器の蓋部付近の構造
(SKB, 2010 に加筆)

表 3. 1-12 銅容器の寸法

(SKB, 2010 を一部修正)

Figure no and dimension designation	Designation	Nominal value mm	Tolerance mm
Copper shell			
A	Total length	4,835	+3.25/-2.75
T	Wall thickness	49	+0.3/-0.3
B	Outer diameter	1,050	+1.2/-1.2
C	Inner diameter	850	+0.8/-0.8
E	Inner diameter	952	+0.5/-0.5
F	Inner diameter	821	+0/-0.5
G	Inner diameter	850	+0.8/-0.8
H	Diameter, lid	953	d8
H	Diameter, pipe	953	H8
I	Corner radius	10	-
K	Dimension	35	+0.5/-0.5
L	Dimension	50	+0.2/-0.2
M	Thickness	50	+0.6/-0.6
N	FSW position top	60	-
P	Dimension	75	+0.3/-0.3
	Thickness bottom	50	+1/-1
	FSW position bottom	50	-
Calculated	Inner free length	4,575	+0.6/-0.1
Calculated	Axial gap between lids	2	+1.1/-0.3
Calculated	Radial gap between shell and insert	1.5	+0.25/-0.5

b. 蓋部と胴部の接合部分の隙間

SKB で検討されている複合処分容器では、図 3. 1-31 に示すように、接合部付近に蓋部と胴部との隙間が存在している。媒質中を伝播する超音波は、図 3. 1-31 に示したような隙間がある場合、図 3. 1-32 に示すように境界面あるいは端部で反射または回折するため、特徴の検出が難しくなる可能性がある。特に回折波は隙間の大きさ（幅）が大きいかほど大きくなる。

銅容器の胴体と蓋の境界面の隙間の大きさは、胴体の内径と蓋の外径の公差（表 3. 1-12 の Tolerance）により決定される。胴体の内径の公差は H8 と規定されているので JIS 規格 B 0401-2（日本工業標準調査会，2016）（穴の嵌めあい公差）より $0 \sim +140 \mu\text{m}$ となり、蓋の外径の公差は d8 と規定されているので JIS 規格 B 0401-2（日本工業標準調査会，2016）（蓋の嵌めあい公差）より $-320 \sim -460 \mu\text{m}$ となる。このため、隙間の大きさは、それぞれの最大値を採用し、 $140 \mu\text{m} + 460 \mu\text{m} = 600 \mu\text{m}$ （0.6 mm）とした。

なお、銅-炭素鋼複合処分容器を採用している SKB では、胴体と蓋の接合方法として電子ビーム溶接 (EBW: Electron Beam Welding) もしくは摩擦攪拌接合 (FSW: Friction Stir Welding) を用いることが検討されているが、本検討では摩擦攪拌接合 (FSW) を用いた複合処分容器を対象とした。

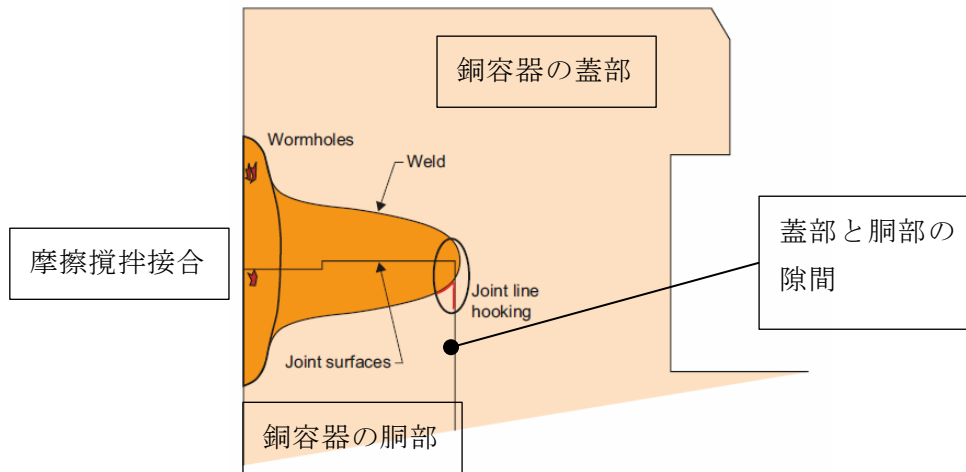


図 3.1-31 蓋部と胴部との隙間、および溶接部に発生する可能性のある欠陥
(SKB, 2010 に加筆)

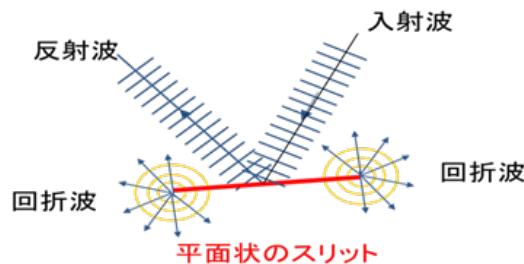


図 3.1-32 平面上のスリットでの反射・回折の模式図

② シミュレーション解析条件設定

a. 解析モデルの設定

超音波シミュレーション解析に用いる解析モデルは、図 3.1-30 に示した処分容器の形状を簡略化して設定した。図 3.1-33 に設定した解析モデルを示す。

超音波シミュレーション解析の対象とする超音波測定はフェーズドアレイ法による超音波探傷で、超音波探傷の探触子（プローブ）と溶接部の関係を平成 27 年度（原子力機構, 2016a）および平成 28 年度（原子力機構, 2017）と同じように溶接部に対して斜め方向から探傷を行う設定とするため、探触子は図 3.1-33 に示すように、プローブを胴部に据えて実施するものとした。

蓋部と胴部の隙間については、容器表面から 49 mm の位置に 0.6 mm の幅で存在しているものとした。このとき、図 3.1-31 に示すように、溶接材の溶け込みにより隙間の一部が埋まってしまう可能性があるが、解析においてはより厳しい条件（隙間が残る）を採用することとし、隙間へ溶接材の溶け込みはないものとして解析モデルを設定した。

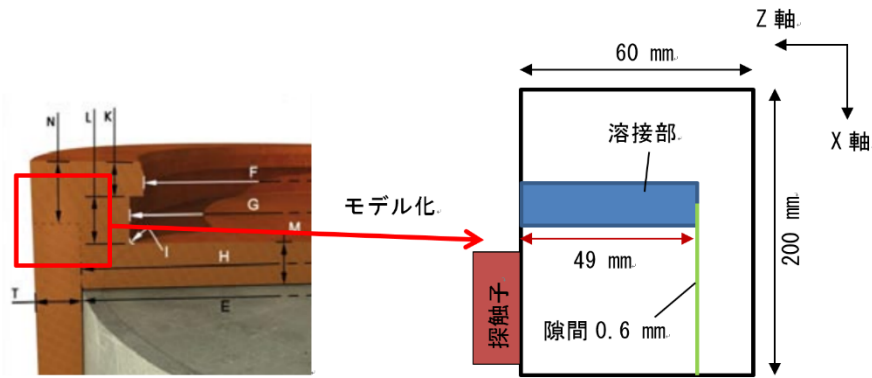


図 3.1-33 複合処分容器の超音波探傷シミュレーションの解析モデル
(SKB, 2010 に加筆)

複合処分容器の胴部は純銅で設定し、純銅中の音速や減衰は 20 mm、30 mm、40 mm の純銅直方体ブロックを用いて実測した数値を使用することとした。なお、平成 29 年度は、複合処分容器への超音波探傷技術の適用可否の確認を目的としているため、常温下での測定値を採用し、温度変化や製作時の結晶粒の大きさなどによる音速や減衰係数の変動は考慮しない。

純銅ブロックを用いて純銅中の音速および減衰を測定した結果、音速は縦波で $4,700 \text{ m s}^{-1}$ 、横波で $2,270 \text{ m s}^{-1}$ であった。また、減衰係数は縦波 1 MHz、2 MHz、5 MHz および横波 2 MHz で測定を行い、波長が 2 mm 以上となる 1 MHz および 2 MHz の縦波では約 -40 dB m^{-1} 、波長が 1 mm 未満となる 5 MHz の縦波および 2 MHz の横波では -100 dB m^{-1} であった。

一方、鋼の減衰係数は 1 MHz 縦波で -30 dB m^{-1} 、1 MHz 横波で -120 dB m^{-1} であることから、2 MHz を想定した場合、さらに減衰は小さくなる。厚さ 50 mm の探傷範囲における鋼と銅の減衰の差は縦波で 1 dB 以下、横波で 2 dB 以下であり、減衰の程度がほとんど同じであることから、純銅の超音波探傷シミュレーションにおいては、鋼のシミュレーションと同様に減衰を設定しないこととした。

また、結晶粒が粗大である場合、結晶粒に起因する反射波や回折波が生じる可能性があることから、結晶粒の大きさについても確認した。純銅試験体の組織観察を行ったところ、結晶粒寸法は $100 \mu\text{m}$ 未満であった。これは銅中を伝播する超音波の波長（例えば、周波数 2 MHz では波長 2.35 mm）と比較して十分小さく、結晶粒に起因すると考えられる反射波や回折波は十分に小さいと考えられる。よって鋼と同様に結晶粒の影響は考慮せず、純銅母材部は均質等方体モデルを用いることとした。また、銅容器の接合は摩擦攪拌接合（FSW）の適用が試みられており、一般に FSW は母材より結晶粒寸法が小さくなる傾向がある。よって、溶接部においても超音波における結晶粒の影響は小さいと考えられるため、本検討においては、結晶粒の影響は無いこととし検討した。

付与する特徴については、平成 27 年度および平成 28 年度での検討と同様に放電加工（EDM）によるスリットとし、特徴の大きさは平成 27 年度の炭素鋼の超音波シミュレーション解析にて検討した 2 mm および 5 mm を採用した（原子力機構, 2016a ; 2017）。また、2 mm および 5 mm の特徴間の離間距離は、平成 27 年度の検討結果から、炭素鋼においては隣接する 2 つの特徴を分離して確認できる条件が 20 mm 以上であった（原子力機構, 2016a）ことを参考に、銅材において確実に分離できる距離とするため、裕度を持たせて 30 mm とした。

解析に用いる超音波の周波数に関しては、平成 27 年度および平成 28 年度において炭素鋼の超音波シミュレーション解析に用いた周波数と同様 2 MHz とした（原子力機構，2016a；2017）。

また、使用した解析ソフトは、ComWAVE8（伊藤忠テクノソリューション社製）の陽解法による三次元 FEM コードとし、解析領域は X 方向 100 mm×Z 方向 100 mm×厚さ方向 0.05 mm、解析要素の大きさは 50 μm×50 μm×50 μm、要素数約 800 万のボクセル要素で、解析の時刻みは 6.78 nsec とした。

b. 解析手順

シミュレーション解析手順を表 3.1-13 に示す。

最初に、特徴を付与しない解析モデル（図 3.1-34）を用いて胴体と蓋の境界面からのエコーの影響範囲を調べ（STEP1）、特徴の検出が可能な深さ位置を設定する。次に、特徴を付与した解析モデル（図 3.1-35）を用いて特徴の寸法と間隔を設定した解析を実施する（STEP2）。

表 3.1-13 複合処分容器の超音波探傷シミュレーション解析の実施手順

手順番号	実施内容
STEP1	図 3.1-34 のモデルにて、隙間によるエコー（反射波および回折波）の影響を確認する。この結果から、付与する特徴の深さ位置を決定する。
STEP2	図 3.1-35 のモデルにて、特徴が認識できるかどうかの確認を行う。

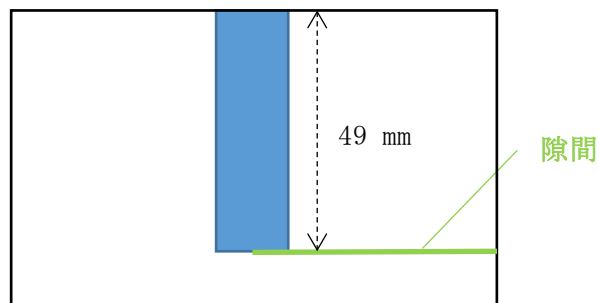


図 3.1-34 特徴を付与しない解析モデル（隙間によるエコーの影響の確認）

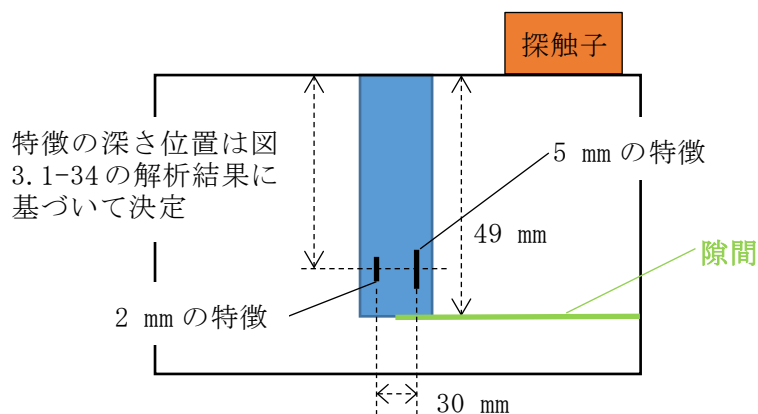


図 3.1-35 特徴を付与した解析モデル

③ シミュレーション解析結果

a. シミュレーション解析結果 (STEP1)

図 3.1-36 に作成した解析モデルおよび解析条件の概要を示す。図に示す放射状の線 (青色) の先端 (図中の左下方向) は、集束距離が 70 mm の場合の焦点位置を表す。集束距離が変わると、回折波の強度や広がりも変化することが予想される。隙間の影響を定量的に調査するため、集束距離を 50、60、70、80、90 mm に変えて反射波および回折波の強度や広がり方の違いを評価した。

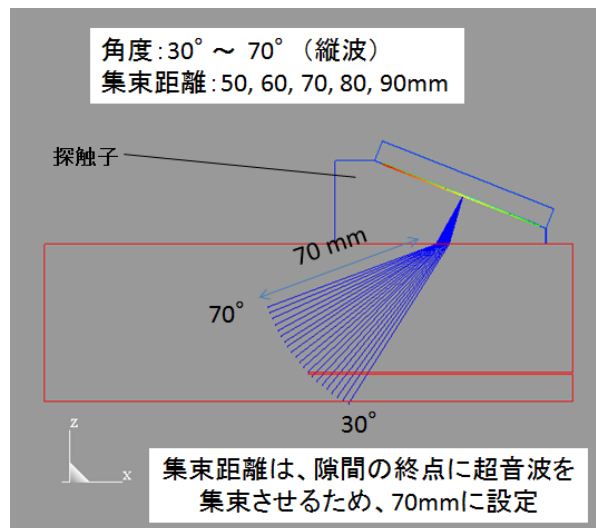
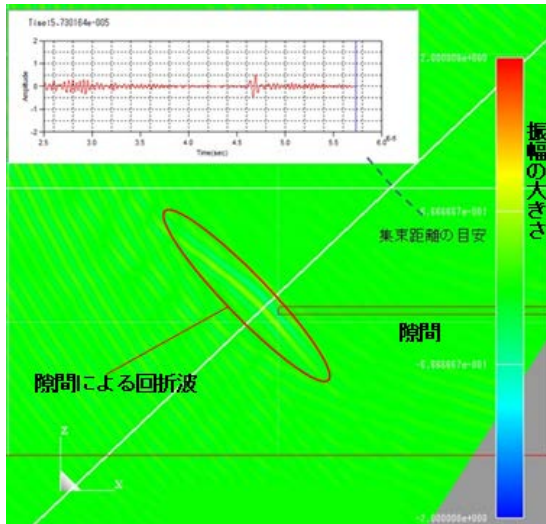


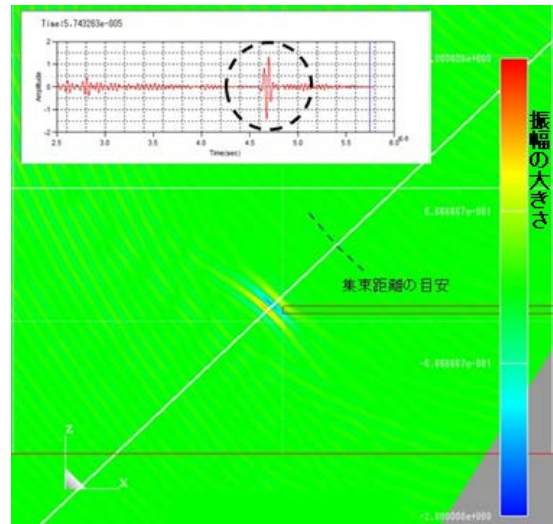
図 3.1-36 STEP1 の超音波探傷解析モデルおよび解析条件
(集束距離 70 mm の場合の焦点位置)

図 3.1-37 に集束距離を変化させたときの解析結果を比較して示す。凡例は測定されたエコーの振幅の大きさを示し、振幅が大きいと赤く、小さいと青くなる。図 3.1-37 に示すとおり、エコーが隙間先端部で発生し、その大きさは集束距離が超音波入射位置から隙間先端までの距離に相当する 70 mm で最大になっている。このことから、超音波探傷においては隙間先端からの影響を考慮する必要があることがわかる。

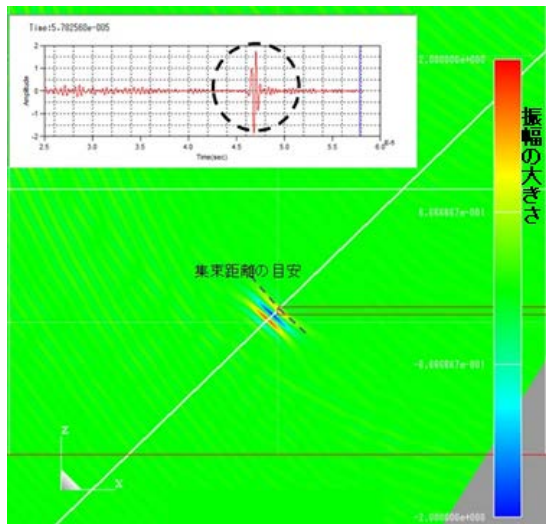
次に、隙間先端の付近にスリット状の特徴を付与した場合の特徴の検出性を確認するため、集束距離を 70 mm とした場合の解析結果に基づいて、5 mm の特徴を隙間先端から 2.5 mm、5 mm、10 mm の距離に付与し、超音波シミュレーション解析を行った。解析の結果を図 3.1-38 に示す。図には隙間先端からのエコーの影響範囲を示すため、直径 5 mm と 10 mm の円を補助線として示した。図 3.1-38 に示すとおり、隙間先端から特徴までの距離が 5 mm の場合でも影響が発生し、10 mm で影響がないことがわかった。そのため、STEP2 では隙間から特徴までの距離を 10 mm 以上としてシミュレーション解析を実施することとした。



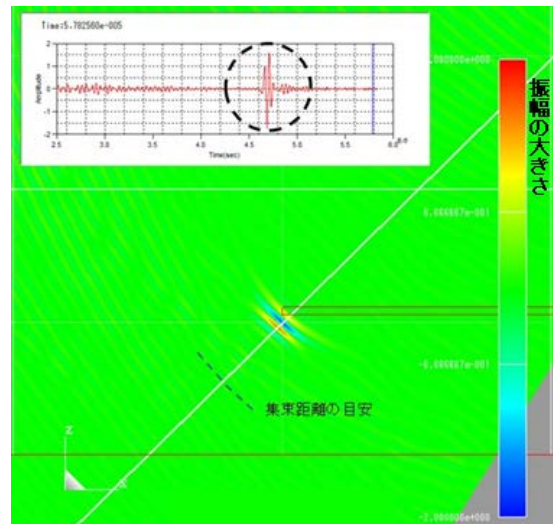
(a) 集束距離 : 50 mm



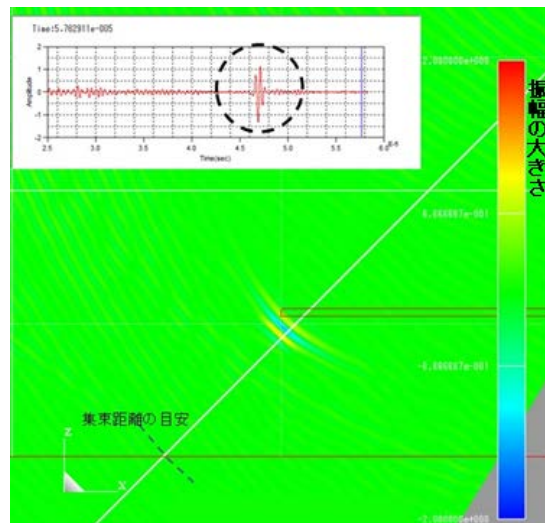
(b) 集束距離 : 60 mm



(c) 集束距離 : 70 mm

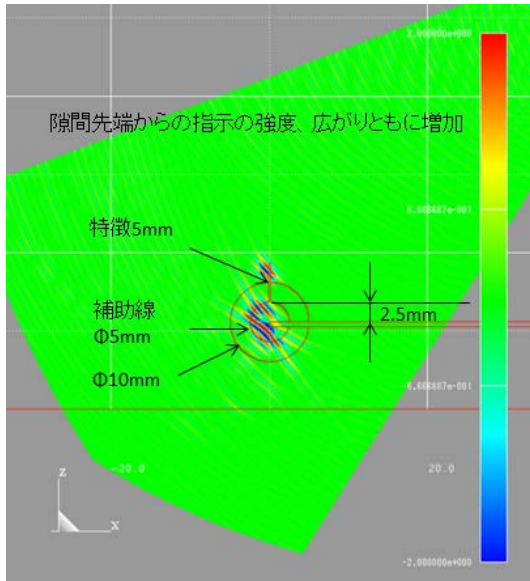


(d) 集束距離 : 80 mm

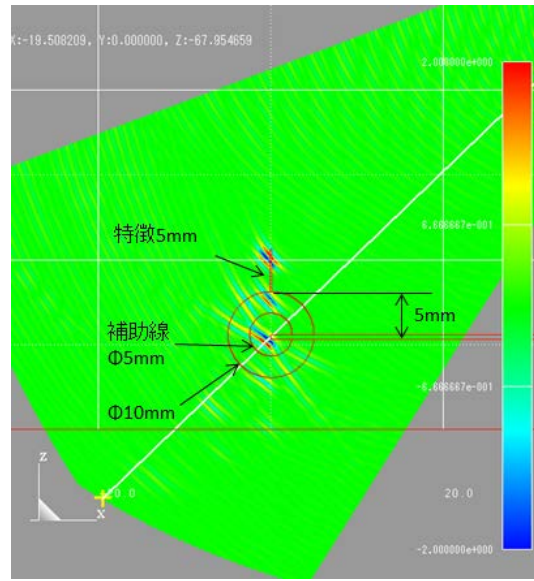


(e) 集束距離 : 90 mm

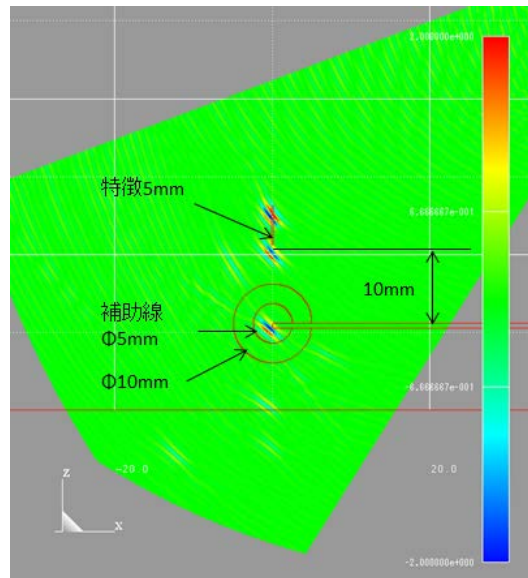
図 3.1-37 集束距離を変化させたときの解析結果



(a) 隙間先端から特徴までの距離：2.5 mm



(b) 隙間先端から特徴までの距離：5 mm



(c) 隙間先端から特徴までの距離：10 mm

図 3.1-38 隙間における影響調査

b. シミュレーション解析結果 (STEP2)

STEP1 の検討結果を踏まえ、STEP2 における解析モデルの概略図を図 3.1-39 に示す。付与する特徴は大きさ 2 mm と 5 mm の 2 つ、付与する位置は隙間がある 49 mm の深さ位置から上方に 2 mm の特徴では 11.5 mm、5 mm の特徴では 10 mm とし、特徴の中心が同じ深さ位置になるようにした。また、2 mm の特徴と 5 mm の特徴の離間距離は隙間先端から周方向に 15 mm ずつ距離を取って 30 mm とした。

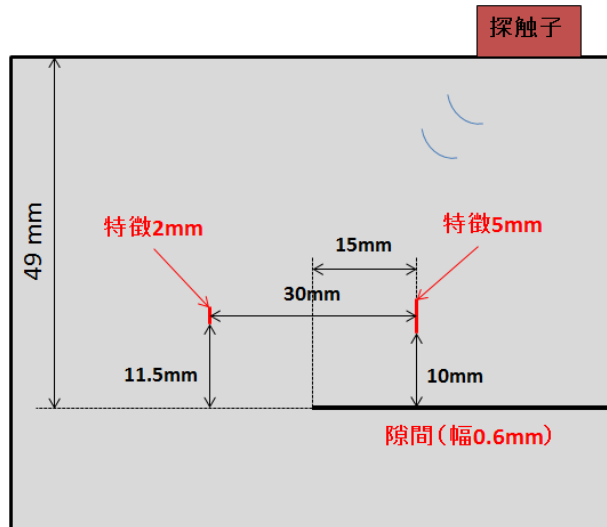


図 3.1-39 STEP2 の解析モデル作成のための概略図

図 3.1-40 にシミュレーション解析モデルを示す。また、図 3.1-41 に大きさ 5 mm の特徴近傍に集束距離 (50 mm) を設定した場合の解析結果、ならびに、隙間先端部および大きさ 2 mm の特徴近傍に集束距離 (70 mm) を設定した場合の解析結果を示す。いずれの集束距離においても、特徴の識別が可能であった。しかし、集束距離によって指示の広がりや強度が異なることから、実際の検認においては、集束距離の設定・記録を確実にを行う必要がある。

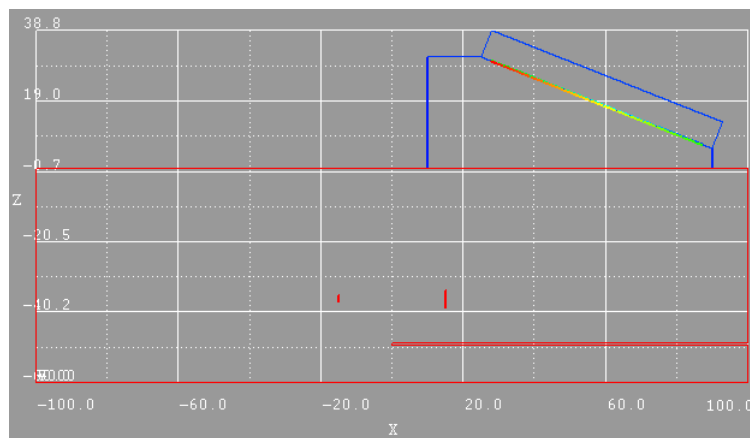


図 3.1-40 STEP2 の超音波探傷シミュレーションモデル

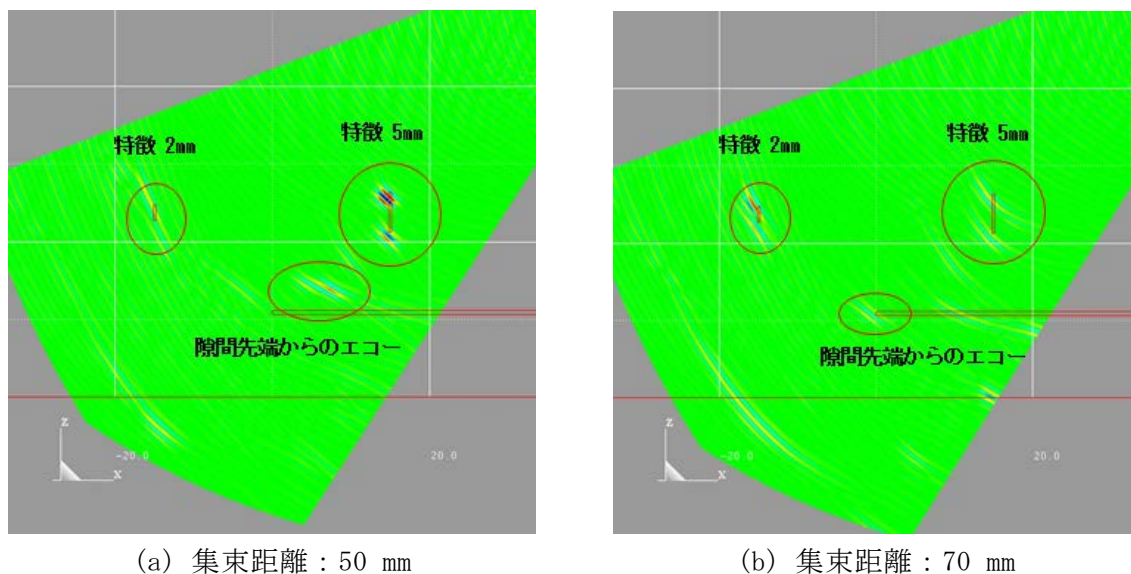


図 3.1-41 STEP2 の超音波探傷シミュレーション解析結果

④ 複合処分容器の検認に対する適用性の評価

平成 27 年度および平成 28 年度での評価により、炭素鋼の溶接部に付与する特徴を対象として超音波探傷で得た情報を再現性のある方法で画像化できれば、指紋認証などで実用化されている画像処理技術を応用して同定・識別できる可能性が高いことが示されている原子力機構，2016a；2017）。

特徴の画像化のための情報として特徴の位置や大きさが挙げられ、複合処分容器についてもこれらの情報を技術的に取得可能かどうかについて、以下に示す探知性、識別性を視点として評価した。

• 探知性

探知性（測定性）は、特徴の検出性、測定の再現性、計測精度を対象として評価した。超音波シミュレーション解析結果より、大きさ 2 mm の特徴を検出できたこと、離間距離 30 mm の 2 つの特徴を分離確認できたことから、炭素鋼処分容器の場合と同様に複合処分容器においても検出性はあると考えられる。

一方、測定の再現性や計測精度については、本検討では解析的な評価は行っていないが、炭素鋼と銅では弾性波速度や減衰などの超音波に対する物理特性が似ていることから、超音波探傷に関する測定の再現性や計測精度は炭素鋼と同様に確保できるものと考えられる。また、銅容器の摩擦攪拌接合によって自然に生じる特徴を超音波探傷技術で測定されており（SKB，2006）、超音波探傷技術による複合処分容器の特徴の探知性（測定性）はあると考えられる。

• 識別性

識別性は、特徴の位置や大きさを対象として評価する。超音波シミュレーション解析結果から、位置や大きさを取得できることが示唆され、複合処分容器においても、炭素鋼処分容器と同様に識別性のある情報を取得可能であると考えられる。

以上の検討より、複合処分容器の検認に対する超音波探傷技術の適用は、炭素鋼容器と同

様に可能性があると考えられる。

⑤ 複合処分容器への特徴の付与方法の検討

ここでは摩擦攪拌接合を用いた複合処分容器を対象に特徴の付与方法を検討した。

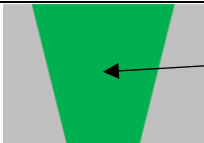
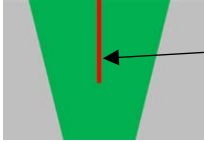
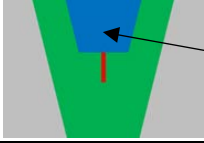
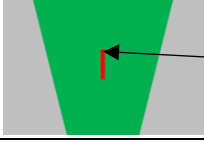
SKB では摩擦攪拌接合や電子ビーム溶接を施した銅の試験片を用いた超音波探傷測定や放射線透過測定によって、溶接行為に起因して自然に発生する特徴（自然欠陥）の計測試験を行っており（SKB, 2006）、また、POSIVA では銅容器の摩擦攪拌接合ではブローホールや接合部のフッキングなどの自然欠陥が発生することを報告している。

一方、自然欠陥のみによる検認を行う場合は検認可能な特徴の発生に不確実性があるため、平成 27 年度および平成 28 年度において人工的に特徴を付与方法について検討を行っており（原子力機構, 2016a ; 2017）、平成 29 年度においても、複合処分容器に人工的に特徴を付与方法について検討を行った。しかし、銅の摩擦攪拌接合において、接合部に特徴を付与するための検討がなされた例がないことから、適用可能性があると考えられる方法を挙げた。

a. 摩擦攪拌接合内に特徴をつけ、表面部を補修する方法

摩擦攪拌接合を行った後に放電加工などによるスリットを設け、さらに、スリットの一部分が残るように、小さな摩擦攪拌接合を行うことにより、接合内部に特徴を付与方法である。表 3.1-14 に概要を示す。

表 3.1-14 摩擦攪拌接合内に特徴をつけ、表面部を補修する方法

	作業手順	作業概要
①	大型の溶接プローブを用いて蓋と胴体を溶接	 大型プローブで溶接
②	放電加工などにより人工特徴（EDM スリット）を付与	 EDM スリットを付与
③	小型の溶接プローブを用いて人工特徴を埋め込む	 小型プローブで再溶接
④	人工特徴完成	 人工特徴完成

b. 隙間からのエコーを特徴とする方法

複合処分容器の蓋部に特徴的な隙間を利用する方法である。図 3.1-42 に概要を示すが、①項で示したように複合容器の蓋と胴体の嵌合部には隙間が存在し、超音波探傷を実施した場

合には、隙間からもエコーが発生する。この隙間の任意の位置に任意の数の銅片を挟み込むことで複数個のスリットを作り出すことが可能と考えられる。

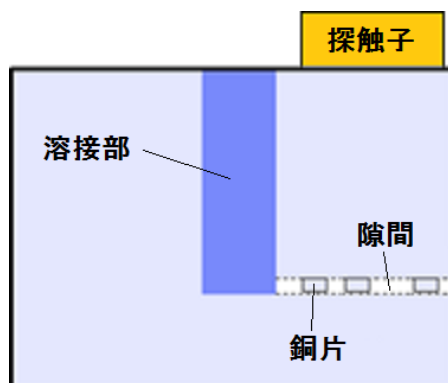


図 3. 1-42 隙間からのエコーを特徴とする方法

3) 考察

本節では、試験体を利用した超音波探傷技術による測定結果と超音波シミュレーション解析結果との比較評価を行うことで、これまでに検討してきた超音波シミュレーション解析の妥当性を確認した。また、超音波探傷技術の複合処分容器への検認技術としての適用可能性を超音波シミュレーション解析により確認した。

試験体を用いた超音波探傷試験では、試験体に対してフェーズドアレイ法による測定と試験体の実測値を基にしたモデルを用いた超音波シミュレーション解析を行った。また、探触子の走査線位置をずらした測定を行い、再現性についても検討した。以下に、得られた結果を示す。

- 大きさ 8 mm の特徴を対象とし、実測とシミュレーション解析にて得られた特徴の位置と大きさについて比較した結果、シミュレーション解析にて得られる数値は、特徴の位置、大きさともに測定の誤差範囲内にあり、シミュレーション解析は超音波探傷の測定を模擬できることが確認できた。
- 大きさ 2 mm、5 mm、8 mm の特徴を対象として、測定結果とシミュレーション解析結果（平成 27 年度（原子力機構，2016a）および平成 28 年度（原子力機構，2017）の結果を含む）とを比較した結果、特徴の検出、上下端の分離性、隣接する特徴の分離性は一致した結果が得られた。
- 測定における探触子の位置ずれによる測定誤差は、特徴の大きさに対しては、誤差平均 1.3 mm、標本標準偏差 1.0 mm であり、相対位置の誤差平均は 1.0 mm、標本標準偏差は 0.7 mm であった。

以上の成果から、超音波シミュレーション解析は、フェーズドアレイ法による超音波探傷の測定を模擬できており、平成 27 年度および 28 年度に実施した超音波シミュレーション解析（原子力機構，2016a；2017）を含め、検認手段として超音波探傷技術を適用することの可能性をシミュレーション解析により検討することは妥当であると考えられる。

また、複合処分容器への超音波探傷技術の適用性の検討においては、複合処分容器を対象とした超音波シミュレーション解析を行い、その結果と平成 27 年度および平成 28 年度に実施した炭素鋼の処分容器を対象に検討した結果（原子力機構，2016a；2017）とを比較検討をすることで、複合処分容器に対する超音波探傷の適用性を評価した。その結果、特徴間の離間距離が 30 mm ある 2 mm、5 mm の特徴の位置と大きさを検出できることを確認することができた。平成 27 年度（原子力機構，2016a）および平成 28 年度（原子力機構，2017）に行った炭素鋼処分容器と同様に、適用性可能性があることが確認できた。

一方、銅の溶接部に特徴を付与する方法が確立されておらず、課題が残されている。

以上のことから、特徴の付与方法に関する課題はあるものの、フェーズドアレイ法による超音波探傷技術は複合処分容器の検認技術として適用可能性があると考える。

(4) 核セキュリティ対策に係る検討

平成 28 年度までに、IAEA が発行している核セキュリティシリーズ文書の要求事項の確認、および仮想施設に対する仮想脅威の評価を実施し、直接処分施設の操業中のみならず閉鎖後にも適用可能な核セキュリティ体制や核セキュリティ機器を整理した（原子力機構，2014；2015a；2016a；2017）。

平成 29 年度は、平成 28 年度までに整理した核セキュリティ要素を統合し、わが国の特徴も考慮した核セキュリティシステムの種類や配置を検討した。

平成 29 年度に実施した内容について、それぞれ「1) 核セキュリティシステム概念」、「2) Security by Design を考慮した核セキュリティシステム」に示す。

1) 核セキュリティシステム概念

平成 28 年度までに検討した、IAEA が発行している核セキュリティシリーズ文書の要求事項、および仮想施設に対して想定した仮想脅威に基づいて検討した核セキュリティシステムを整理した（原子力機構，2014；2015a；2016a；2017）。また、平成 28 年度までは考慮していなかった上空からの侵入に対する核セキュリティシステムを検討した。

① INFCIRC/225/Rev. 5 による防護の考え方

わが国の核セキュリティ対策は、核物質および原子力施設に関する核セキュリティ勧告（INFCIRC/225/Rev. 5）（IAEA，2011）および実施指針を前提として構築されている。INFCIRC/225/Rev. 5（IAEA，2011）および実施指針には、悪意のある行為の未然防止、検知、遅延、および悪意のある行為が発生した場合の処置、影響緩和のための考え方や要件が示されている。

平成 27 年度および平成 28 年度に、これら考え方や要件を踏まえ、地上の詰替施設および地下の処分場に要求される核セキュリティシステムの概念の例を検討した。検討した結果を図 3. 1-43 および図 3. 1-44 に示す。なお、図中において[]内に示した数字は INFCIRC/225/Rev. 5（IAEA，2011）での要件の項目番号を示すものである。（原子力機構，2016a；2017）

センサー付きフェンス



侵入検知センサーや監視カメラ



車両検査設備



虹彩認証装置

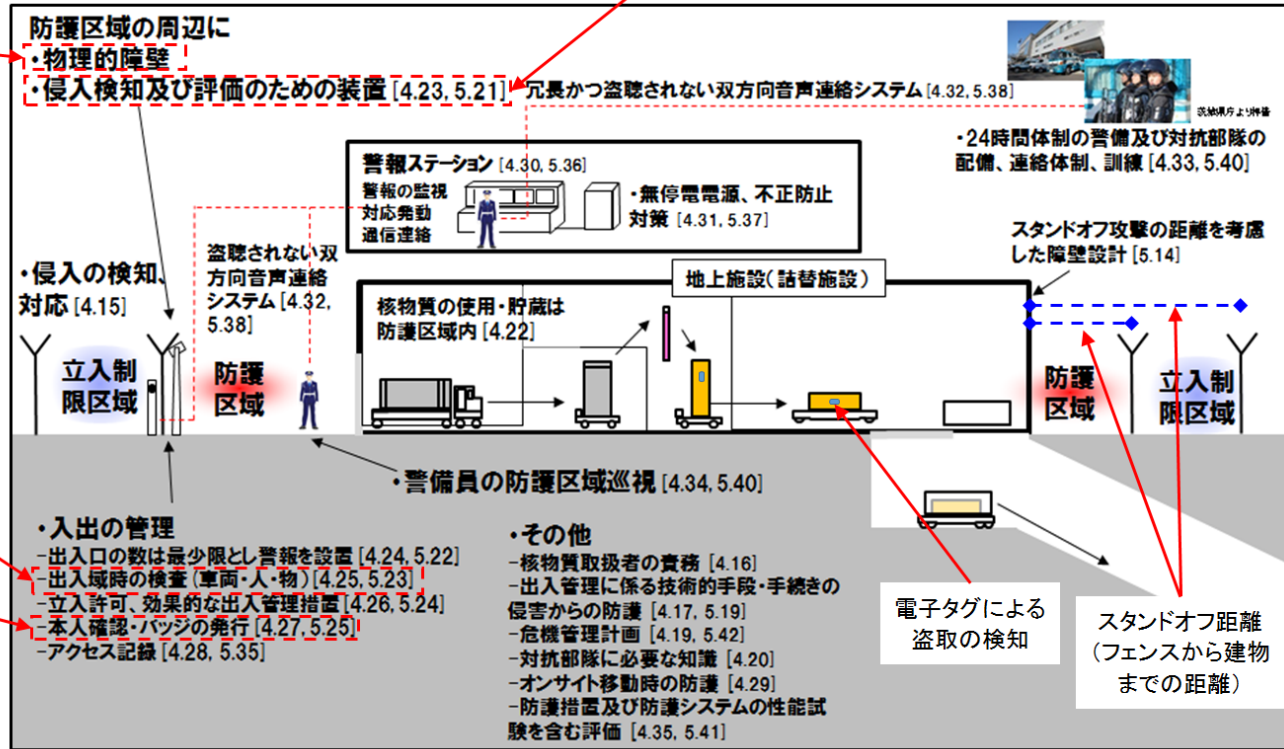
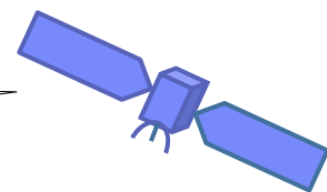


図 3.1-43 核セキュリティシステムの概念の検討例 (地上施設)

(原子力機構, 2015a ; 2015b ; USNRC, 2011a ; 2014 ; USDOD, 2005 ; IAEA, 2011)

人工衛星により未申告の掘削活動を検知



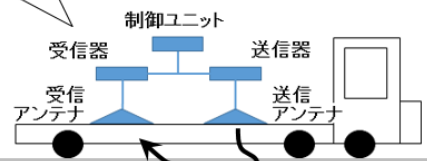
・岩盤を防護区域の物理的障壁として考える。
・カメラ監視(侵入検知)、地震波・レーダー(掘削活動)による侵入検知・評価
[4.23, 5.21]

地中貫通レーダーにより掘削空洞を検知

地上施設

防護区域

立入制限区域



カメラ等により侵入を検知

地震波測定やレーダー測定により掘削による侵入活動を検知

防護区域
(核物質の使用・貯蔵)
[4.22]



図 3.1-44 核セキュリティシステムの概念の検討例 (地下施設)
(原子力機構, 2015a に加筆 ; IAEA, 2011)

② 地上に配置する核セキュリティシステム・機器

平成 28 年度に、評価した仮想脅威に基づいて最も強固な核セキュリティシステム・機器が要求されるテロリストによる脅威を想定し、仮想施設に設置すべき主な物理的核セキュリティシステム・機器を整理した（原子力機構，2017）。

平成 28 年度に整理した仮想の使用済燃料直接処分施設に設置する核セキュリティシステム・機器を表 3.1-15 に示す。

表 3.1-15 主な核セキュリティシステム・機器の種類および設置機器の例 (1/3)

(USNRC, 2011a ; 2014 ; USDOD, 2010 ; 2013a ; 2013b ; 原子力機構, 2015b)



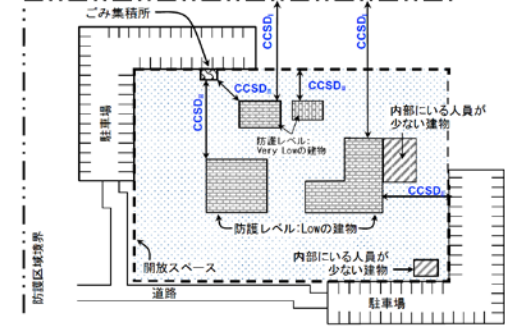
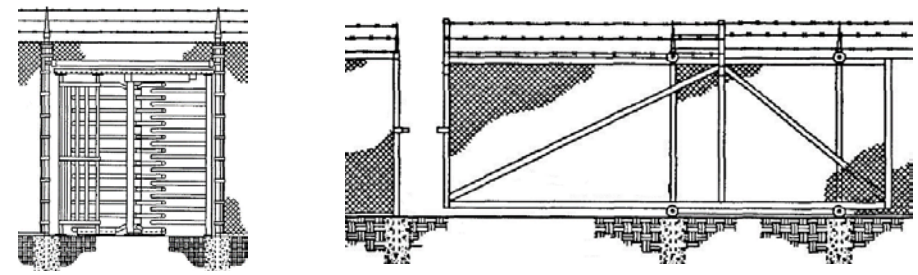
種類	設置機器の例	
フェンス		
車両バリア		
スタンドオフ距離		<p>CCSD_I: 爆発物重量クラス 1 に対するスタンドオフ距離</p> <p>CCSD_{II}: 爆発物重量クラス 2 に対するスタンドオフ距離</p>
ゲート (左: 人員用ゲート、右: 車両用ゲート)		

表 3.1-15 主な核セキュリティシステム・機器の種類および設置機器の例 (2/3)


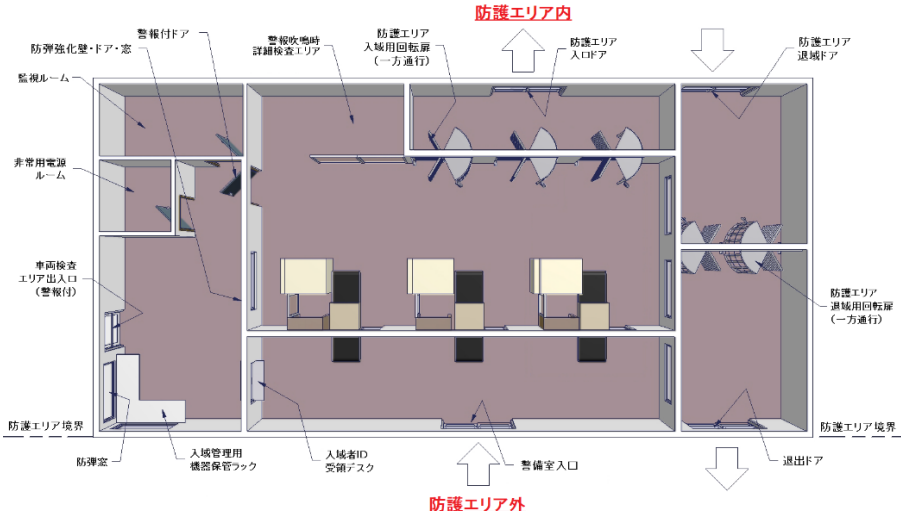

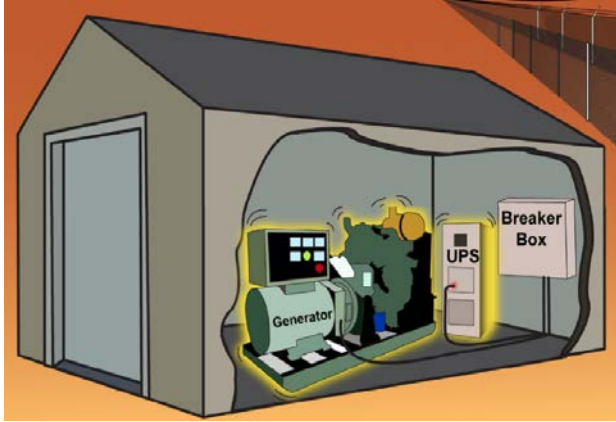
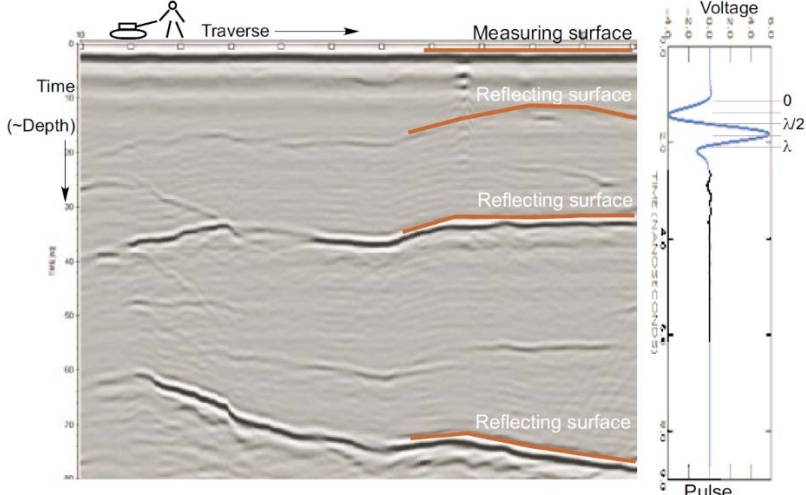
種類	設置機器の例
アクセスコントロール (虹彩認証装置)	
警備施設 (人の入退域にかかる警備施設)	
侵入検知機器	

表 3.1-15 主な核セキュリティシステム・機器の種類および設置機器の例 (3/3)

種類	設置機器の例
非常用電源	
地中レーダー測定機器 (測定イメージ、測定される反射パルス)	

③ 上空からの侵入に対する核セキュリティシステム・機器

前述の②項で検討した核セキュリティシステムは、地上からの脅威者の接近や妨害破壊行為に対応することは可能であるが、ドローンなどの小型の無人航空機 (UAS: Unmanned Aerial System) による攻撃および大型航空機の故意の落下といった上空からの接近や妨害破壊行為に対しても十分にカバーできるシステムとは言えず、別途対策を施す必要があるものと考えられる。

UAS を利用した脅威の例とそのうち処分施設に関連がある脅威を図 3.1-45 に挙げる。これら UAS を使った脅威に対しては、法整備や飛行禁止区域の設定、さらにはジオフェンシング技術 (特定のエリアに仮想のフェンス (ジオフェンス) を設ける技術。UAS については進入禁止エリアの情報をチップに埋め込み、GPS 情報と比較させることで侵入できないようにする技術が検討されている) の活用といった国や UAS メーカーによる対策を講じることによって、処分施設への接近を防止する社会的な仕組みを作ることが第 1 次の対策として重要である。その上で、施設としては UAS の検知と無力化のための対策を講じる必要がある。

UAS を検知するためのシステムに利用されている主な技術の概要、長所/短所を表 3.1-16 に示す。ビデオカメラや赤外線センサーのような前述の①項で検討した技術も利用可能であ

るが、どの技術も一長一短があり、単独のシステムであらゆる種類の UAS を検知することは困難である。このため、複数の技術を組み合わせたシステムを構築することが重要であるが、施設の立地場所、総合的な検知能力、コストなどの条件を踏まえて技術の組み合わせやシステム化を検討することが求められる。

さらに、UAS が検知された場合には、UAS による脅威を無力化させることが必要となる。無力化技術には電子的方法と物理的方法の 2 種類があり、電子的方法としては、電波妨害 (Jamming) による制御不能化、電磁パルスによる破壊、物理的方法としては、銃やレーザーによる破壊、対抗 UAS や猛禽類による捕獲、さらには UAS との通信信号の解析による UAS 操作者の逮捕など、様々な方法が世界各国で検討されている。

しかし、いずれの無効化技術も研究開発段階であること、UAS は比較的小さい上に高速で飛行しているため、UAS に照準を合わせること自体が困難であること、検知してから無効化対策を実行に移すまでに生じるタイムロスの中に UAS が攻撃を実行したり、攻撃範囲外に離脱したりする可能性があること、さらに電子的方法については処分施設周辺の住居やインフラ設備に設置されている電子機器にも被害を与えかねないといった課題があり、日本を含めいずれの国においても有効な無効化技術の確立には至っていない。

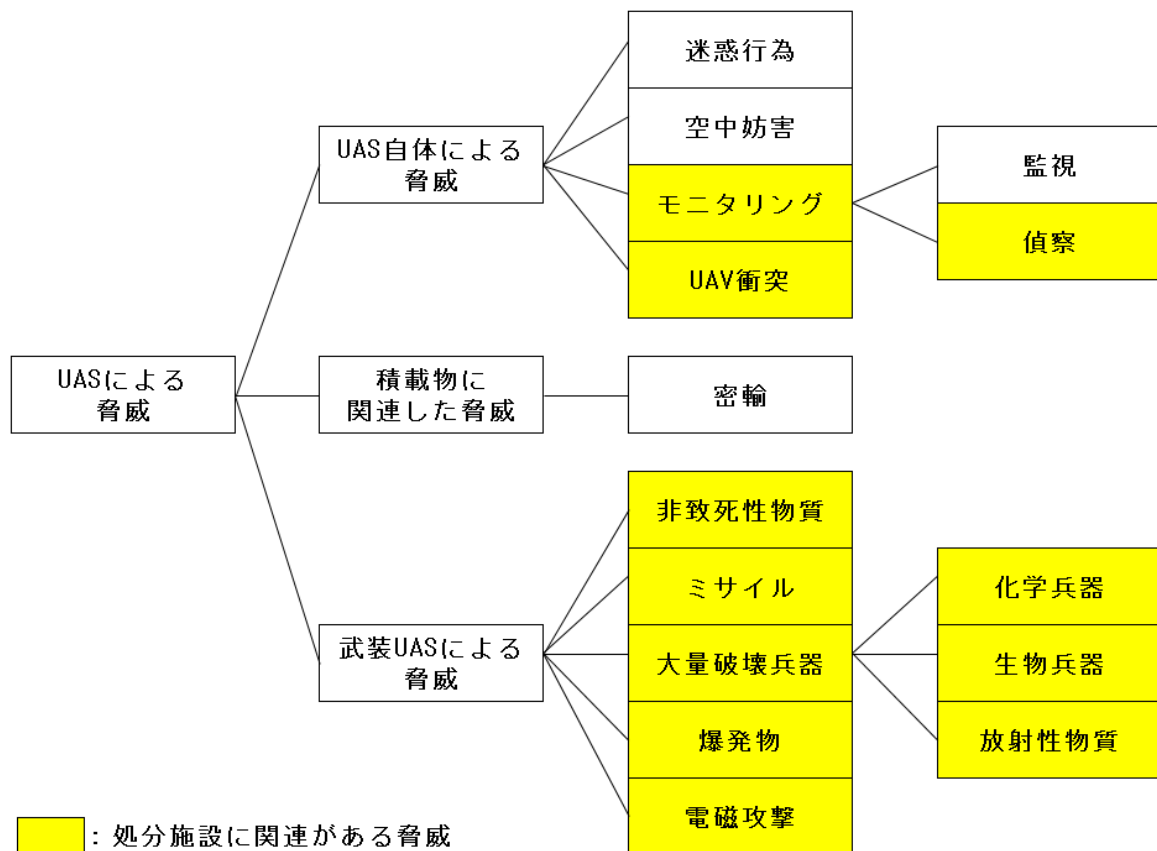


図 3.1-45 UAS を利用した脅威の例

(Embry-Riddle Aeronautical University Scholarly Commons, 2015)

表 3.1-16 UAS 検知技術の比較(1/2)

(Embry-Riddle Aeronautical University Scholarly Commons, 2015 ; Gabriel C. Birch, et. al., 2015)

検知技術	原理	長所	短所
ビデオカメラ	可視光を利用して検知する	<ul style="list-style-type: none"> 対象物の同定が可能 商用化されている製品が多い 比較的安価 	<ul style="list-style-type: none"> 検出可能距離が短い 周辺環境条件（明度、視界、周囲とのコントラストなど）によりに視認性が変化する 夜間の観測は困難
赤外線カメラ	UAS から放射される赤外線を観測する	<ul style="list-style-type: none"> 夜間の観測が可能 利用する赤外線波長によっては環境ノイズの影響を低減可能 商用化されている製品が多い 	<ul style="list-style-type: none"> 検出可能距離が短い 熱特性が小さい UAS の観測は困難 周辺環境条件（野生生物、気温、天候など）によりに検知性が変化する
音響センサー	UAS が発する音（エンジン、プロペラ）を検知する	<ul style="list-style-type: none"> 比較的安価 プロペラ音の固有周波数解析により UAS の特定可能 商用化されている製品が多い 	<ul style="list-style-type: none"> 検出可能距離が短い 周辺環境のノイズに影響される グライダータイプの UAS は検知できない
通信無線検知	UAS を操作するための無線電波、または UAS が収集したデータの送信電波を検知する	<ul style="list-style-type: none"> 無線の周波数や変調方式から無線電波の特定が可能 無線電波の特定により操作電波の遮断、奪取、もしくはジャミングが可能 三角測量法を適用することにより、操作者の位置特定が可能 	<ul style="list-style-type: none"> GPS を使った自動飛行の UAS は検知できない 検出可能距離が短い 周辺の電波環境によっては環境ノイズに隠れてしまう
レーダー装置	発射したレーダー信号が UAS に反射し、返ってきた信号を受信する	<ul style="list-style-type: none"> km オーダーでの検知が可能 UAS の追跡が可能 受信信号を解析することにより検知した UAS の同定が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 反射断面積が小さい UAS の検知は困難 環境雑音や野生生物からの反射信号との区分が難しい レーダーが遮へいされると、その後方は検出できない 装置の近接領域では実質的に検知できない

表 3.1-16 UAS 検知技術の比較(2/2)

検知技術	原理	長所	短所
LIDAR	発射した光パルス信号が UAS に反射し、返ってきた信号を受信する	<ul style="list-style-type: none"> • UAS までの距離を測定することが可能 • 夜間や悪天候での監視が可能 • 観測信号とノイズ成分との分離性 (S/N 比) が高い 	<ul style="list-style-type: none"> • 高価 • 送信波が人の目に入ると危険
人による監視	警備員による巡視	<ul style="list-style-type: none"> • 対象物の同定が可能 • 発見時の即時対応が可能 	<ul style="list-style-type: none"> • 検知する確率が低い • 費用対効果が低い (人件費) • 担当者のスキルにより検知能力が変動

大型航空機の落下に関しては、わが国では以下のような要件が規制基準で規定されており、偶発的な航空機落下は施設の安全設計において対策すべき要件、意図的な航空機落下は核セキュリティ対策として対策すべき案件と考えられている。(更田, 2015)

- 偶発的な航空機落下に対しては、事故時に大きな影響をもたらす可能性のある施設について、「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率に対する評価基準」を適用
- 意図的な航空機落下については、事故時に大きな影響をもたらす可能性のある施設について、可搬式設備などによる対応並びに特定重大事故対処施設の設置を要求

上記規制基準は、実用発電用原子炉施設の外、プルトニウムを取り扱う加工施設に対しても要求されており、「加工施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈の制定について (平成 25 年 11 月 27 日制定、平成 28 年 11 月 30 日改正)」(原子力規制委員会, 2016)によると、「可搬型重大事故等対処設備の保管場所は、故意による大型航空機の衝突も考慮することとし、例えば加工施設の恒設の建物から 100 m 以上離隔をとり、加工施設と同時に影響を受けないこと又は故意による大型航空機の衝突に対して頑健性を有することとする。」となっている。このことから、詰替施設についても「加工施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」を満足する対応が要求されるものと考えられるが、具体的な対策については詰替施設の設計に依存するため、現時点で対策を検討することは困難である。

2) Security by Design (あらかじめセキュリティ要件を考慮して施設設計を行う考え方) を考慮した核セキュリティシステム

1) 項にて検討したように、処分施設に適用する核セキュリティシステムは施設設計に依存するため、現時点で具体的な核セキュリティシステムを示すことは困難である。このため、表 3.1-17 に示す INFCIRC/225/Rev. 5 (IAEA, 2011) の要求事項に基づいて仮想の処分施設に適用する物理的な核セキュリティ機器・システムの種類、配置の例を検討し、配置例を図 3.1-

46 に示した。さらに、核セキュリティシステムは、施設設計が具体化していくことと並行して、国や施設の特徴、施設の操業状態、および想定される脅威などを反映して、Security by Design の考え方に基づいて具体化していく必要がある。国・施設の特徴などを考慮して施設設計の具体化に伴って付加すべきと考えられる核セキュリティ要件を表 3.1-18 に示す。

表 3.1-17 IAEA 核セキュリティシリーズ文書の要求事項に基づいて処分施設に適用される基本的な核セキュリティシステム

(原子力機構, 2015 ; IAEA, 2007 ; 2011)

<p>IAEA 核セキュリティシリーズ文書の要求事項</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 処分施設に適用する防護区分は等級的手法の考え方にに基づき区分Ⅱとする。 • 立入制限区域およびその内部に防護区域を設定し、核物質は防護区域内で使用または貯蔵する。 • 防護区域の周囲は、無許可立入を検知できるように物理的障壁（フェンスなど）、侵入検知および評価のための装置（監視カメラ、赤外線センサー、振動センサーなど）を装備する。 • 防護区域に入域および出域する車両、人および荷物は警備施設において検査を受ける。 • 常時要員が詰めている警備施設を設置し、警報のモニタリングおよび評価、対応の発動、ならびに警備員、対抗部隊および施設管理者との通信連絡に備える。 • 核セキュリティシステムおよび警備施設は、無停電電源を備え、不正な通信傍受、不正操作および不正改造に対する防止対策を施す。 • 警備施設と対抗部隊との間に、専用で冗長性があり、盗聴防止でき、多様な双方向の音声通信システムを備える。 • 核セキュリティシステムおよび警備施設は 24 時間、365 日稼働させる。 • 核セキュリティシステムにより収集された情報、および核セキュリティの設計や体制に関する情報は改ざん防止機能およびアクセス管理機能を有するシステムに保存する。 • 設計基礎脅威に基づいて、施設や核セキュリティシステムの頑健性を高める。
--------------------------------	--

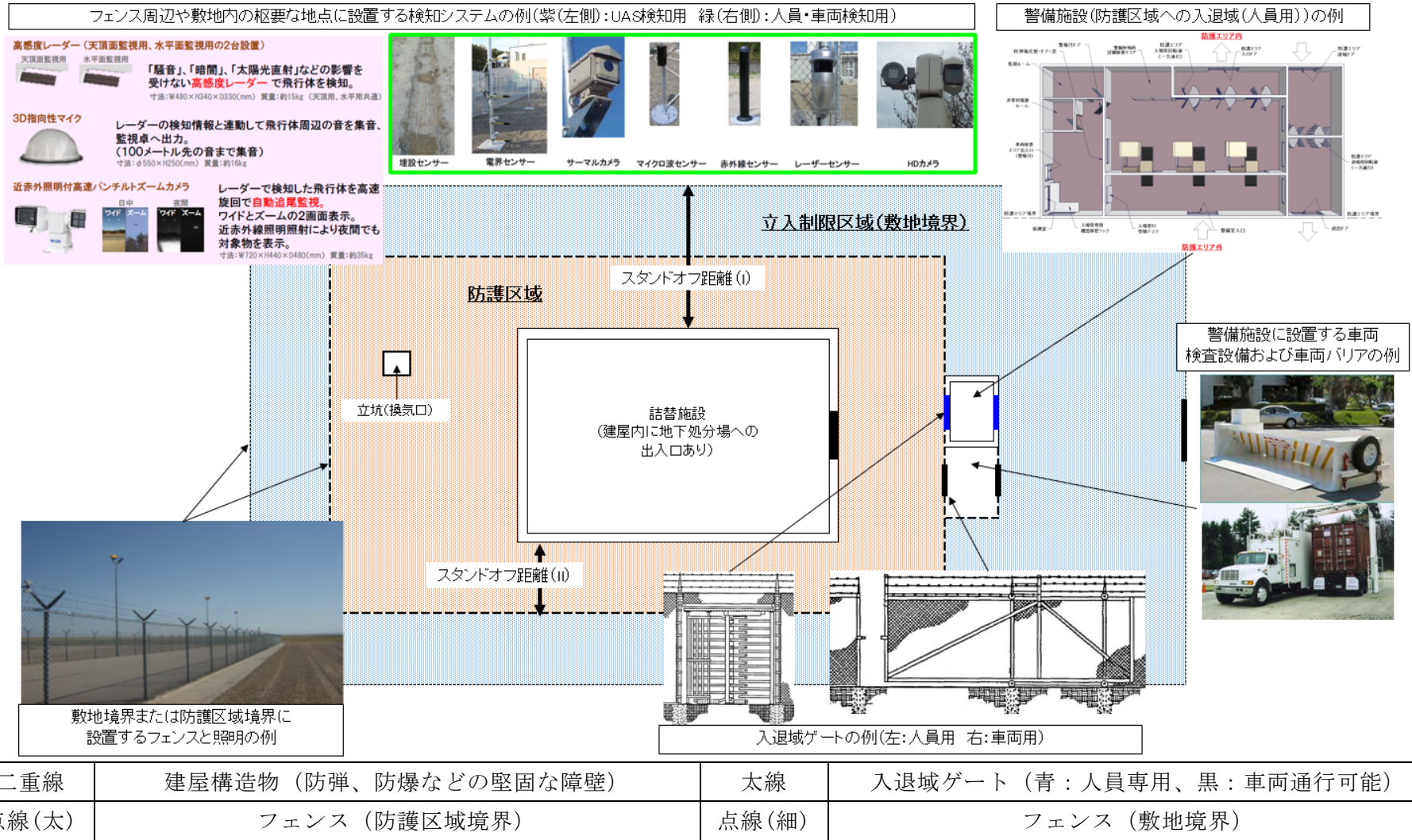


図 3.1-46 核セキュリティ機器・システムの種類、配置の例

(原子力機構, 2015b ; USNRC, 2011a ; USNRC, 2011b ; USDoD, 2005 ; USDoD, 2010 ; USDoD, 2013b)

表 3.1-18 施設設計の具体化に並行して国・施設の特徴などを考慮して付加すべきと考えられる核セキュリティ要件

<p>国・施設の特徴、処分施設の操業状態、および想定される脅威に基づき考慮すべき事項</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 直接処分施設閉鎖後は地下処分場に対する核セキュリティ対策が必要となると考えるが、先行国であるスウェーデンを含め具体的な検討は始まっていない。このため、操業中を基本ケースとして核セキュリティシステムを設計し、閉鎖後の核セキュリティ対策は操業中に検討する。 • わが国における社会的要請を考慮すると、詰替施設と地下処分場を別々のサイトに立地することは考えにくい。このため、詰替施設と地下処分場は同一の敷地にあるものとして核セキュリティシステムを設計する。 • 処分する使用済燃料が多いため、広大な敷地が必要となり立入制限区域も広大になることが想定される。無許可立入の検知・防止に死角が発生しないように核セキュリティ機器の種類、数、配置を検討する。 • 処分する使用済燃料が多いため、地下処分場も大きくなると予想される。図 3.1-44 のように地下処分場が地上部分の立入制限区域外まで広がった場合は、敷地外からの地下処分場への掘削活動を監視する体制を構築する。 • 使用済燃料を容易に盗取し持ち出すことはその重量および高放射線の影響で困難なので、サボタージュを重点とした設計基礎脅威の評価を行い、その評価結果に基づいて核セキュリティシステムを構築する。 • 詰替施設などの地上に建設される建物・施設のうち核セキュリティ上重要な建物・施設は、重火器や UAS の爆発物、航空機の落下などによる攻撃に十分耐えられる堅牢性を有するよう設計する。 • 日本では警備員の武装は認められないため、対抗部隊は国の治安組織となる。事象発生から治安組織の到着までタイムラグを考慮した核セキュリティシステムを構築する • バイオメトリクス認証や AI などの最新技術を積極的に利用して効率的・効果的な核セキュリティシステムを構築する。
--	--

3.2 人工バリアの設計

使用済燃料はガラス固化体と比較すると放射線量、発熱量、燃料組成、材質、廃棄体の仕様（形状、寸法、重量）などが異なるため、人工バリア（処分容器および緩衝材）についても使用済燃料集合体の仕様や条件に適した設計を行う必要がある。また、処分容器の設計における臨界安全性の検討を行う際に必要となる未臨界性の判定基準や、未臨界維持のために利用される中性子吸収材などの検討も必要である。これらの検討の実施について以下の構成で報告する

3.2.1 処分容器の設計

3.2.2 処分容器の設計における臨界安全に関する検討

3.2.3 緩衝材の設計

3.2.1 処分容器の設計

(1) 本項目の背景と目的

使用済燃料はガラス固化体と比較すると放射線量、発熱量、燃料組成、材質、形状、寸法、重量などが異なるため、処分容器についても使用済燃料集合体の仕様や条件に適した設計を行う必要がある。また、廃棄体の定置方式（横置き定置方式、縦置き定置方式）、処分容器（炭素鋼容器、腐食代に銅を用いた複合処分容器）の材料や構造とそれらに応じた製作性、作業時の容器のハンドリング性や処分容器と容器に収容した使用済燃料集合体の健全性なども考慮し、処分容器の設計を進める必要がある。

平成 27 年度までに、PWR および BWR の使用済燃料のレファレンス仕様に対して上記の観点に沿った設計を進め、処分容器の基本仕様を示すとともに、処分容器の製作時も含む作業時や処分後の使用済燃料集合体や処分容器の健全性評価を実施した（原子力機構，2015a；2016a）。平成 28 年度には、これらの成果を基に、使用済燃料の濃縮度や燃焼度などの多様性に着目し、臨界安全解析、放射線遮へい解析を実施し、平成 27 年度までに提示された基本仕様の処分容器の成立性を評価した。また、製作や作業に起因する不確かさや制約条件などが処分容器の仕様や健全性に及ぼす影響の検討として、廃棄体への入熱を考慮した伝熱解析による廃棄体温度の評価、および、複合容器の銅外層のクリープ挙動を考慮した構造解析による処分容器の健全性評価を実施した。

平成 29 年度は、平成 28 年度に引き続き、使用済燃料の濃縮度や燃焼度などの多様性に着目して臨界安全解析および放射線遮へい解析を実施し、平成 27 年度までに提示された基本仕様の処分容器の成立性を確認した。具体的には、臨界安全解析については、臨界安全性評価においてより保守的な評価になると考えられる、燃焼度クレジットの考慮において核分裂生成物による中性子の吸収を考慮しない条件での解析を行い、処分後の未臨界性を維持するために必要な最低燃焼度を導出した。放射線遮へい解析については、BWR 使用済燃料を対象として、遮へい性の評価において保守的な条件となる高燃焼度の使用済燃料に対して解析を行い、過年度の遮へい解析（原子力機構，2016a）においてレファレンス燃料仕様を対象として十分性が確認された遮へい厚さの設定（100 mm）により、使用済燃料からの放射線が引き起こす水の放射線分解によって生成される酸化性化学種が、処分容器の腐食に影響を及ぼさないことを確認した。

本項目の実施について以下の構成で示す。本項目のまとめについては 3.5 に示す。

- (2) 使用済燃料集合体および処分容器の基本仕様
- (3) PWR 使用済燃料の多様性を考慮した臨界安全性評価
- (4) BWR 使用済燃料の多様性を考慮した遮へい解析による吸収線量率評価

なお、5 か年取りまとめ報告書において、上記の検討結果と平成 28 年度までの検討結果とを合わせて、種々の設計因子や多様性に対して成立性が確認された処分容器の仕様を、設定手法、適用範囲および今後の合理化の可能性とともに整理し、設計事例として提示した。

(2) 使用済燃料集合体および処分容器の基本仕様

使用済燃料集合体や処分容器の基本仕様は、過年度の成果(原子力機構, 2014; 2015a; 2016a)を基に設定した。本検討で想定した使用済燃料および処分容器の基本仕様をそれぞれ表 3.2.1-1 および表 3.2.1-2 に示す。これらの基本仕様に基づき、以降の(3)および(4)の検討を実施した。

表 3.2.1-1 使用済燃料の基本仕様

仕様	PWR	BWR	備考
濃縮度	3.4~4.8 % (4.5 %)	4.0 %	PWR: 既往の文献(原子力機構, 2015c)におけるレファレンス燃料仕様(カッコ内)、および高燃焼度化を想定した仕様
燃焼度	39~55 GWD MTU ⁻¹ (45 GWD MTU ⁻¹)	45~55 GWD MTU ⁻¹	
燃料配列	17×17	9×9	
ペレット密度	理論密度の 95 %	理論密度の 97 %	
燃料有効長	3,600 mm	3,710 mm	BWR: 使用済燃料のレファレンス仕様(原子力機構, 2015a)を基本とし、設置許可上の集合体最高燃焼度までを考慮
ペレット直径	8.2 mm	9.6 mm	
燃料棒の本数	264 本	72 本	

表 3.2.1-2 処分容器の基本仕様

仕様		PWR	BWR	備考
収容体数設定範囲		4~1 体	12~4 体	
処分容器仕様	燃料集合体収容スペース	断面 ; 230 mm×230 mm	断面 ; 160 mm×160 mm	処分容器の径は収容体数設定範囲における寸法範囲を示す。
		長さ ; 4,500 mm		
	燃料集合体離間距離	50 mm		
	腐食代厚さ	40 mm		
	材質 (構造材)	炭素鋼		
	材質 (腐食代)	炭素鋼または銅		
処分容器外形寸法		径 ; 1,001~605 mm	径 ; 1,152~803 mm	
		長さ ; 4,780 mm		

(3) PWR 使用済燃料の多様性を考慮した臨界安全性評価

平成 27 年度までは、レファレンスの PWR 使用済燃料（濃縮度 4.5 %、燃焼度 45 GWd t⁻¹）および BWR 使用済燃料（濃縮度 4.0 %、燃焼度 45 GWd t⁻¹）を対象として、処分容器および使用済燃料の構造材などが腐食などにより破損して燃料が中央に集まって大きな燃料領域を形成することにより中性子が系外に漏れる確率が減少する保守的な体系を想定して臨界安全解析を行った。平成 28 年度においては、PWR 使用済燃料を対象として、濃縮度および燃焼度の多様性を考慮した評価を行った。具体的には、わが国では、PWR の UO₂ 燃料として、従来型（濃縮度 約 3.4 wt%/最高燃焼度 39 GWd t⁻¹）、高燃焼度化ステップ 1 燃料（濃縮度 約 4.1 wt%/最高燃焼度 48 GWd t⁻¹）、高燃焼度化ステップ 2 燃料（濃縮度 約 4.8 wt%/最高燃焼度 55 GWd t⁻¹）の 3 タイプが使用されていることから、これら 3 タイプの UO₂ 使用済燃料を、表 3.2.1-2 の処分容器に収納して処分する場合を想定して臨界解析を行い、処分後の未臨界性を維持するために必要な最低燃焼度をそれぞれ導出した。臨界解析における燃焼度クレジットの対象核種としては核分裂生成物およびアクチニドを考慮した。

平成 29 年度は、臨界安全上の保守性を考慮して、燃焼度クレジットの対象核種として核分裂生成物を考慮せずにアクチニドのみを考慮する条件で解析を行った。ここで、最低燃焼度が低いほど、より広範囲な燃焼度の使用済燃料に対して処分後の未臨界性が維持できることになる。

評価対象とする PWR の使用済燃料および処分容器の条件を表 3.2.1-3 に示す。炉から取り出した直後の燃料を想定し、冷却に伴う実効増倍率の低下については考慮しなかった。処分容器や使用済燃料集合体の金属材料の腐食の進展による形状の変化についても考慮しなかった。

表 3.2.1-3 燃料仕様

初期濃縮度 [wt%]	3.4	4.1	4.8
燃焼度 [GWd t ⁻¹]	20, 35	30, 40, 45	40, 55
炉取り出し後の冷却期間 [年]		0	

以降においては、以下の構成で報告する。

- 1) 解析手法
 - ① 燃焼計算
 - ② 臨界計算
- 2) 解析結果

1) 解析手法

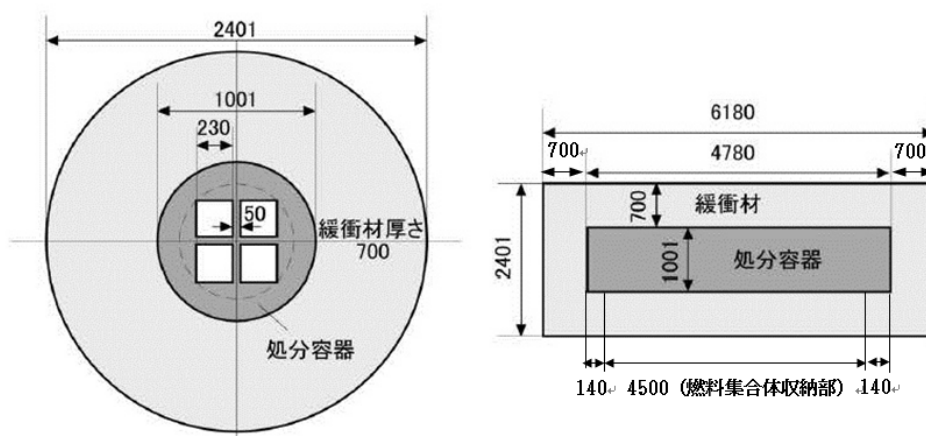
① 燃焼計算

燃焼計算には SWAT3.1 コード（須山ほか，2009）を使用し、表 3.2.1-3 に示した初期濃縮度について、単一燃料セル体系による計算を行った。その他の計算条件については、既往の検討（山本ほか，2015）と同様とし、中性子スペクトルの計算には MVP-2.0 コードおよび JENDL-4.0 に基づく断面積ライブラリを使用した。

② 臨界計算

臨界計算には MVP-2.0 コードおよび JENDL-4.0 に基づく断面積ライブラリを使用した。臨界計算モデルを図 3.2.1-1 に示す。使用済燃料集合体の収容体数としては、レファレンス仕様の PWR 使用済燃料集合体の処分容器を横置き定置とした場合の最大収容体数 4 体（原子力機構，2014）を設定した。処分容器内の使用済燃料集合体収納スペースには水が満たされているものとし、使用済燃料集合体の上部および下部の構造材については無視した。境界条件は完全反射とした。使用済燃料集合体の幾何形状および燃料セル、計装管およびガイド管などの幾何形状については既往の文献（山本ほか，2015）と同様とした。

未臨界を判定する基準値については、基準値の設定に関する過年度の成果（原子力機構，2015a；2016a）および既往の検討の成果（山本ほか，2015）に基づき、0.95 と 0.98 の 2 種類に不確実性を考慮した値を設定した。具体的には、核種組成の予測精度、燃焼履歴、燃焼度分布の 3 つに由来する実効増倍率の不確実性をそれぞれ考慮し、アクチノイドを考慮した場合の実効増倍率への影響を Δk で 0.04 とし（山本ほか，2015）、これら 2 つの値からそれぞれ 0.04 を差し引いた値である 0.91 および 0.94 を未臨界判定基準値とした。なお、平成 28 年度に実施した、燃焼度クレジット対象核種として核分裂生成物も考慮した評価においては、実効増倍率への影響を Δk で 0.05 とし（山本ほか，2015）、0.95 と 0.98 からそれぞれ 0.05 を差し引いた値である 0.90 および 0.93 を未臨界判定基準値としている（原子力機構，2017）。



単位：mm

図 3.2.1-1 臨界計算モデル

2) 解析結果

臨界計算の結果を図 3.2.1-2 に示す。さらに、未臨界判定基準値を 0.94 あるいは 0.91 とした場合に収納可能な最低燃焼度を線形内挿により求めた結果を表 3.2.1-4 に示す。

これらの図表においては、本年度の結果を「FP 考慮せず」として示した。また、昨年度の、燃焼度クレジットの対象核種としてアクチニドおよび核分裂生成物の両方を考慮する条件で計算した結果（原子力機構，2017）についても「FP 考慮」として併せて示した。

燃焼度クレジット対象核種として FP を考慮する場合、最低燃焼度は設計仕様上の最高燃焼度を大きく下回る。一方、燃焼度クレジット対象核種として FP を考慮しない厳しい評価を行うと、FP を考慮する場合の結果と比較して、最低燃焼度が平均 10 GWd t⁻¹ 程度増加する結果となったことから、燃焼度クレジット対象核種の種類や未臨界を判定する基準値は最低燃焼度への影響が大きいことを確認した。今後、わが国で実際に発生している使用済燃料の燃焼度分布のデータと本検討で評価された最低燃焼度との比較が重要である。

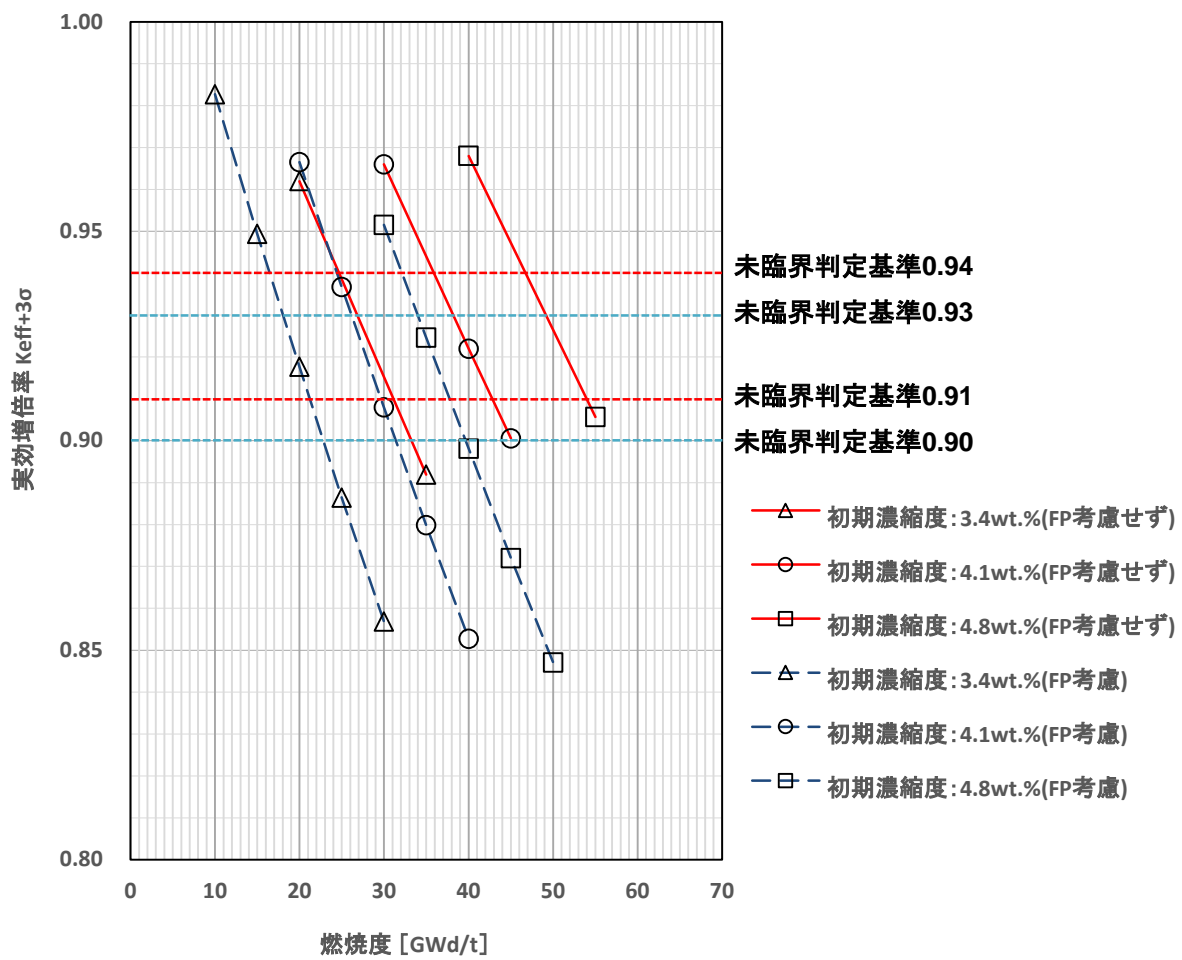


図 3.2.1-2 直接処分体系での実効増倍率計算結果

表 3.2.1-4 収納可能な最低燃焼度

燃料	燃料の 最高燃焼度 [GWd t ⁻¹] (設計仕様)	FP 考慮 (H28 年度実施)		FP 考慮せず (本年度実施)	
		未臨界を 判定する 基準値	最低 燃焼度 [GWd t ⁻¹]	未臨界を 判定する 基準値	最低 燃焼度 [GWd t ⁻¹]
PWR17x17 型 従来型燃料 (濃縮度 3.4 wt%)	39	0.93	18.1	0.94	24.7
		0.90	22.9	0.91	31.2
PWR17x17 型 STEP-I (濃縮度 4.1 wt%)	48	0.93	26.2	0.94	35.9
		0.90	31.5	0.91	42.8
PWR17x17 型 STEP-II (濃縮度 4.8 wt%)	55	0.93	34.0	0.94	46.8
		0.90	39.7	0.91	54.0

(4) BWR 使用済燃料の多様性を考慮した遮へい解析による吸収線量率評価

処分容器の厚さによっては、使用済燃料からの放射線が引き起こす水の放射線分解によって生成される酸化性化学種が処分容器の腐食に影響を及ぼす可能性がある。

平成 27 年度までは、直接処分第 1 次取りまとめに示されたレファレンスの使用済燃料を対象とする遮へい解析を行った。平成 28 年度においては、軽水炉から発生する使用済燃料の濃縮度および燃焼度の多様性を考慮した評価を行った。具体的には、PWR 使用済燃料を対象として、線源強度が大きく放射線遮へいの点でより厳しい結果となることが予想される高燃焼度の使用済燃料集合体を対象とした遮へい解析を行い、処分容器表面およびその外部の緩衝材中における吸収線量率を算出し、放射線分解によって発生する酸化性化学種の処分容器表面への供給速度を推定するとともに、それをカソード電流密度に換算することで、H12 レポートで設定されたカソード電流密度の基準値を下回るか確認した。

平成 29 年度は、高燃焼度の使用済燃料集合体を対象とした検討を、BWR 使用済燃料を対象として実施した。

以降において以下の構成で報告する。

1) 解析条件

- ①解析コード
- ②遮へい解析体系および遮へい解析条件

2) 解析結果

- ①吸収線量率
- ②放射線分解による処分容器の腐食への影響

1) 解析条件

① 解析コード

遮へい解析には、三次元連続エネルギーモンテカルロ法に基づくコード MCNP5 を用い、核データライブラリは ENDF/B-VI を使用した。

- ・ 解析コード ; MCNP5 Ver. 1.60
- ・ データライブラリ
 - γ線 : mcplib84 (ENDF/B-VI)
 - 中性子 : endf66 (ENDF/B-VI)

② 遮へい解析体系および遮へい解析条件

図 3.2.1-3 に遮へい解析の解析体系を示す。また、遮へい解析条件を表 3.2.1-5 に示す。なお、吸収線量率の容器周方向での評価点は、最も線量率が高くなる点を予備解析にもとづき設定した。

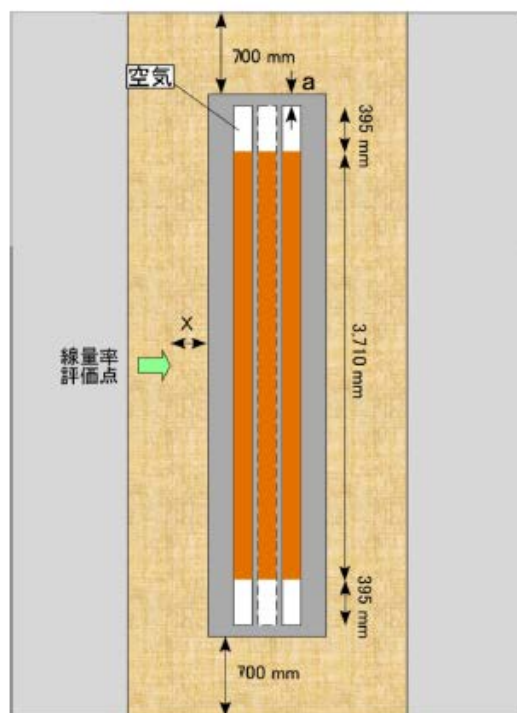
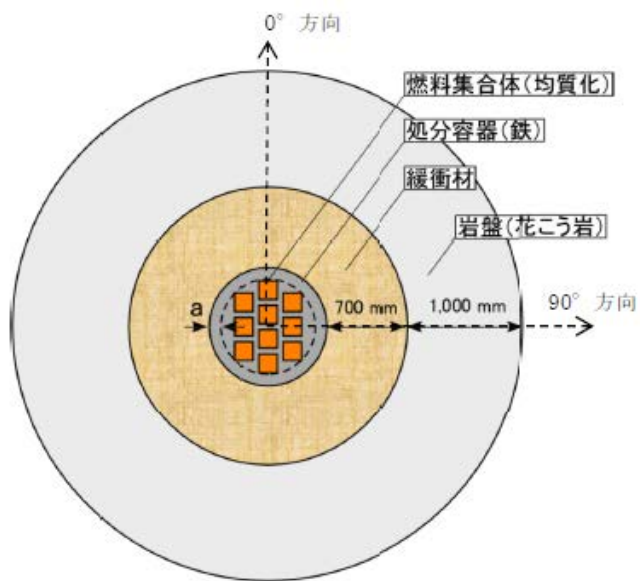


図 3.2.1-3 遮へい解析計算モデル概念図

当解析モデルにおいて、使用済燃料集合体領域の被覆管や構造材については、線源としては考慮するが、遮へいに影響する構成物質としては保守的に無視し、使用済燃料集合体領域内はすべて UO_2 のみで構成し、 UO_2 の密度は使用済燃料集合体領域内で一様であることを仮定して均質化したモデルとした。

表 3.2.1-5 遮へい解析条件

項目	条件	備考
線源強度	ORIGEN2.2による解析 原子力機構(2016a)の条件から燃焼度および濃縮度を下記「燃料集合体」に示された値に変更して算出	
燃料集合体	BWR使用済燃料の基本仕様(表3.2.1-1参照)を基本とし、燃焼度および濃縮度については以下を設定した。 ・燃焼度: 55 GWd t ⁻¹ ・濃縮度: 4.0 wt%	燃焼度: 設置許可上の集合体最高燃焼度 濃縮度: レファレンス仕様(原子力機構, 2015a)
対象とする放射線	中性子線、γ線を対象とする。(α、n)反応、自発性核分裂による中性子線および核分裂生成物の崩壊によるγ線、中性子線と人工バリア材との相互作用で発生する二次γ線を考慮する。	
処分容器材質	炭素鋼(SFVC1)	吸収線量率が最も高くなる燃料集合体数、断面形状(原子力機構, 2016a)
燃料集合体数	10体	
処分容器形状・寸法	図3.2.1-3に記載の寸法と断面。 ・燃料有効長; 3,710 mm ・燃料集合体離間距離; 50 mm (64 mm; 10体収容の中央部のみ) ・処分容器の遮へい厚さ; 100 mm ・燃料集合体収容スペース断面; 160 mm×160 mm	
燃料取出し後の冷却期間	50年	直接処分第1次取りまとめ
経過年数評価	受入時点を評価	
中性子スペクトル	Pu-239の核分裂スペクトル	
解析体系	・容器の断面ならびに長さ方向を考慮した三次元体系とする。遮へい解析体系は図3.2.1-3に示す。 ・処分容器は健全な状態を想定する。 ・腐食しりとなる容器の肉厚は無視し、遮へい厚には含めない。 ・処分容器の周囲は緩衝材ならびに岩盤とする。 ・処分容器の遮へい厚(図3.2.1-3中のa)は、100 mmとする。 ・吸収線量率の評価は容器表面で最も吸収線量率が高くなる容器周方向につき実施する。 ・容器の径方向の評価位置は処分容器ならびに緩衝材中として5点設定(図3.2.1-3中のX=0, 0.20, 0.40, 0.60, 0.70 m)する。	遮へい厚さ: 平成27年度の遮へい解析によりレファレンス燃料仕様を対象として十分性が確認された遮へい厚さ。 評価点: 予備解析にもとづき設定する。
中性子線強度	実効増倍率 Keff による増加を考慮し、ORIGEN 解析結果を 1/(1-keff) 倍した線源強度とする。Keff は処分容器が健全時の臨界解析により算出した値とする。	
吸収線量換算係数	γ線; Hubbell and Seltzer (2011) 中性子; ICRU REPORT 63 (Malmer, 2001)	
隣接処分容器からの放射線寄与	考慮しない。	
ピーキングファクター	1~3/24 ノード: 1.0 4~21/24 ノード: 1.3 22~24/24 ノード: 1.0	
緩衝材仕様	水で飽和した状態に設定	

2) 解析結果

処分容器表面における吸収線量率および緩衝材中での吸収線量率の解析結果、ならびに放射線分解による処分容器の腐食への影響評価を以下に示す。

① 吸収線量率

処分容器表面の吸収線量率を容器周方向の角度ごとに評価した結果を図 3.2.1-4 に示す。燃料に近接し、かつ遮へい厚も小さくなっている 0° 方向で最も吸収線量率が高くなっており、平成 27 年度の BWR のレファレンス燃料仕様を対象とした検討（原子力機構，2016a）と同様の傾向となっていることを確認した。

0° 方向についての、緩衝材中の吸収線量率の解析結果を図 3.2.1-5 および表 3.2.1-6 に示す。

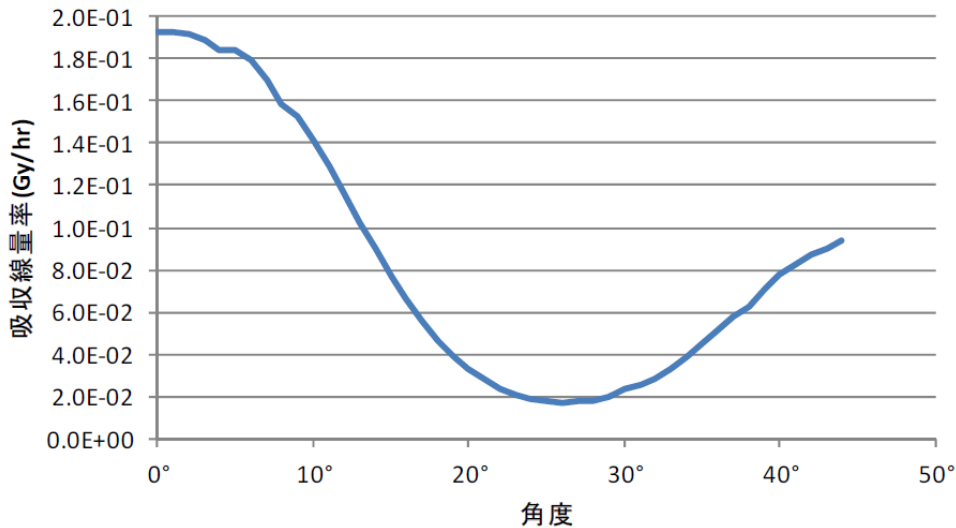


図 3.2.1-4 処分容器表面の吸収線量率分布

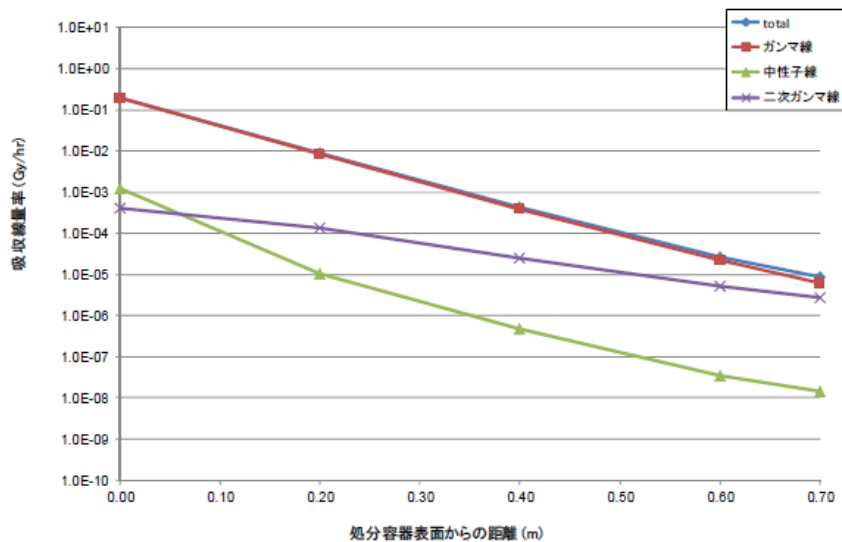


図 3.2.1-5 緩衝材中の吸収線量率分布 (0° 方向)

表 3.2.1-6 緩衝材中での吸収線量率

処分容器 表面からの 距離 x[m]	γ線		中性子		二次γ線		吸収 線量率 合計
	評価値 [Gy hr ⁻¹]	標準 偏差	評価値 [Gy hr ⁻¹]	標準 偏差	評価値 [Gy hr ⁻¹]	標準 偏差	評価値 [Gy hr ⁻¹]
0	1.914E-01	0.7 %	1.268E-03	1.5 %	4.196E-04	0.3 %	1.931E-01
0.20	8.689E-03	0.6 %	1.016E-05	1.2 %	1.343E-04	0.3 %	8.834E-03
0.40	3.964E-04	0.7 %	4.707E-07	0.8 %	2.505E-05	0.7 %	4.219E-04
0.60	2.185E-05	1.9 %	3.540E-08	0.9 %	5.332E-06	0.9 %	2.722E-05
0.70	6.200E-06	2.0 %	1.421E-08	0.8 %	2.811E-06	1.1 %	9.025E-06

② 放射線分解による処分容器の腐食への影響

H12 レポートの評価に準じ、上記の緩衝材中の吸収線量率の評価にもとづき、放射線分解によって発生する酸化性化学種の処分容器表面への供給速度を推定して、それをカソード電流密度に換算した。

放射線分解によって発生した酸化性化学種は、緩衝材に収着せず、すべて処分容器表面に供給され腐食に寄与すると仮定すれば、処分容器表面に供給されるカソード電流密度 I_{cath} [A m⁻²]は、以下のように表される。

$$I_{cath} = -nF \frac{pG' E p}{100Av \lambda} \dots\dots\dots \text{式 3.2.1-1}$$

ここで、n: 酸化性化学種の価数 (=2)、F: ファラデー定数 (=9.65×10⁴ C mol⁻¹)、G' : 100 eV のエネルギー吸収によって生成する酸化性化学種の分子数 2.13、E: 吸収線量率 [eV m⁻³ s⁻¹]、p: 緩衝材の間隙率 0.4、Av: アボガドロ数 6.02×10²³、λ: 緩衝材の吸収係数[m⁻¹]である。

図 3.2.1-5 より E と λ を求めるとそれぞれ 3.35×10¹⁷、14.36 となり、カソード電流密度 I_{cath} は式 3.2.1-1 により 2.64×10⁻⁵ A m⁻²と求められる。これは H12 レポートで設定された基準値である 1×10⁻⁴ A m⁻²を十分下回っており、100 mm の遮へい厚さによって高燃焼度の BWR 使用済燃料に対しても対応可能であることが確認された。なお、このカソード電流密度を腐食速度に換算すると 3.07×10⁻² μm y⁻¹となる。

3.2.2 処分容器の設計における臨界安全に関する検討

(1) 本項目の背景と目的

直接処分第1次取りまとめおよび本事業における処分容器の設計検討では、処分場閉鎖後において、処分容器内部での未臨界性を維持するための燃料集合体の収容体数を評価している（原子力機構，2015a；2015b；2016；2017）。このような臨界安全評価では、核燃料施設などに適用される通常の臨界安全管理とは異なり、直接処分のバリアシステムの仕様（材料、形状など）や、その時間的変遷に関する情報に基づき、モデルを構築して評価を行うことが必要である。ここでは、3.2.1項で示したような、処分容器内部における臨界安全性の評価の不確実性の低減と処分後の未臨界性の確実な維持に向けて、以下の項目について検討を行った。

- ・直接処分のバリアシステムを対象とする場合の、未臨界状態を判定するための基準値の設定に関する検討
- ・直接処分のバリアシステムに特有の物質である、ベントナイト緩衝材や周辺岩盤を反射体としてモデル化する場合の反射体効果に関する検討
- ・中性子増倍率を低減するための中性子吸収材の適用に関する検討

さらに、処分場閉鎖後の臨界の発生が処分システムに及ぼし得る影響の大小の判断などについても、諸外国の事例を参考としつつ予察的な検討を実施し、上記の成果も含めて、処分容器の設計検討に適用できる臨界安全評価技術として5か年報告書に取りまとめた。

(2) 未臨界判定基準値の設定に関する検討

未臨界判定基準値を設定するには、臨界計算コードおよび断面積ライブラリによる計算の精度評価を行うことが必要である。これは、臨界実験の再現解析を行い、実験値と計算値との比較を行うことで実施される。このような精度評価の結果は、対象とする解析体系などによって変わりうるが、使用済燃料直接処分の人工バリアシステムを対象とする体系で臨界実験を行った事例は存在しない。したがって、評価対象である処分体系と、燃料の種類や減速条件、反射条件などが同等あるいは近いもので、計算誤差が同じ傾向として現れる体系で行われた臨界実験のデータを用いて、精度評価を行うことが必要である。このように、対象とする体系との類似性を把握するための評価を類似性評価と呼ぶ。

過年度の検討において、PWR燃料およびBWR燃料における処分体系に対する類似性評価を行ったところ、MOX燃料系の臨界実験を対象とすると、処分直後の幾何形状が維持されている状態（以降、「健全状態」と呼ぶ）では類似性があり、推定臨界下限増倍率の評価に使用できる臨界実験データの存在が確認された（原子力機構，2016；2017）。しかしながら、鉄の腐食の進展・強度低下による崩落に伴って燃料が中央領域に集まり、周囲が鉄で覆われている体系（以降、「破損状態」と呼ぶ）に対しては、全ての臨界実験データが低い類似性を示し、推定臨界下限増倍率を導出する際に必要となる臨界実験データを抽出することができなかった。この原因として、対象とした臨界実験では反射体が鉄ではないことが原因である可能性が考えられた（原子力機構，2016；2017）。

このため、本年度では鉄を反射体とした臨界実験データを抽出し、その処分容器体系との類似性を検討した。表3.2.2-1に評価対象とした鉄反射体臨界実験シリーズの概要を示す。

対象とした臨界実験 54 ケースのうち、53 ケースは臨界安全ベンチマーク実験データベース ICSBEP (OECD/NEA, 2013) より、Iron および Carbon steel、Stainless Steel を反射体としている臨界実験データのうち LEU 系 (低濃縮ウラン燃料系) および MIX 系 (MOX 燃料系) から選択した。それ以外の STACY 更新炉については、実施済みの臨界実験ではなく、原子力機構の試験炉 STACY にて計画段階の更新炉であり、伊沢ら (Izawa et al., 2014) の報告や原子力規制委員会の情報 (原子力規制委員会, 2017) より構造材模擬体として鉄を使用した炉心体系の仕様を模擬したものである。類似性評価の手法については、平成 28 年度 (原子力機構, 2017) と同様とし、SCALE コード (ORNL, 2011) の TSUNAMI-IP モジュールによる相関係数 c_k の評価を行った。

図 3.2.2-1 に鉄反射体の臨界実験データを対象とした相関係数の評価結果を示す。PWR 燃料および BWR 燃料の保守的な破損体系と鉄を反射体とした臨界実験データとの類似性は、ICSBEP の臨界実験データではその殆どが 0.2 を下回る相関係数となり、高くとも LEU-COMP-THERM-043 や LEU-COMP-THERM-088 において 0.6 程度の結果となった。これに対し、STACY 更新炉では 0.9 以上の非常に高い類似性を示していることがわかる。また、対象とした保守的な破損体系において、TSUNAMI-IP モジュールにより算出される核種の中性子増倍率に対する感度係数による評価では Fe-56 の感度が大きいことから、この体系では鉄反射体の寄与が大きいことが確認できた。これらの類似性評価の結果から、直接処分で使用する処分容器の破損状態を想定した臨界安全性評価を行う場合に必要な臨界実験データを現時点で公開されている実験データベースより抽出するのは難しいことがわかった。しかし、将来的に STACY 更新炉にて鉄を構造材模擬体とした実験が実施された場合、破損状態の処分体系に対しても推定臨界下限増倍率を評価することができる可能性が示唆された。

表 3.2.2-1 評価対象とした鉄反射体臨界実験シリーズの概要

臨界実験シリーズ	反射体	ケース数
LEU-COMP-THERM-010	Carbon Steel	11
LEU-COMP-THERM-013	Carbon Steel	7
LEU-COMP-THERM-017	Carbon Steel	13
LEU-COMP-THERM-036	Stainless Steel (Fe, Cr, Ni)	2
LEU-COMP-THERM-040	Stainless Steel (Fe, Cr, Ni)	2
LEU-COMP-THERM-042	Carbon Steel	7
LEU-COMP-THERM-043	Stainless Steel (Fe, Cr, Ni)	1
LEU-COMP-THERM-066	Carbon Steel	2
LEU-COMP-THERM-068	Carbon Steel	2
LEU-COMP-THERM-088	Carbon Steel	1
MIX-MET-INTER-003	Iron	1
MIX-COMP-FAST-005	Stainless Steel (Fe, Cr, Ni)	1
MIX-COMP-FAST-006	Carbon Steel	1
STACY 更新炉	Iron	1

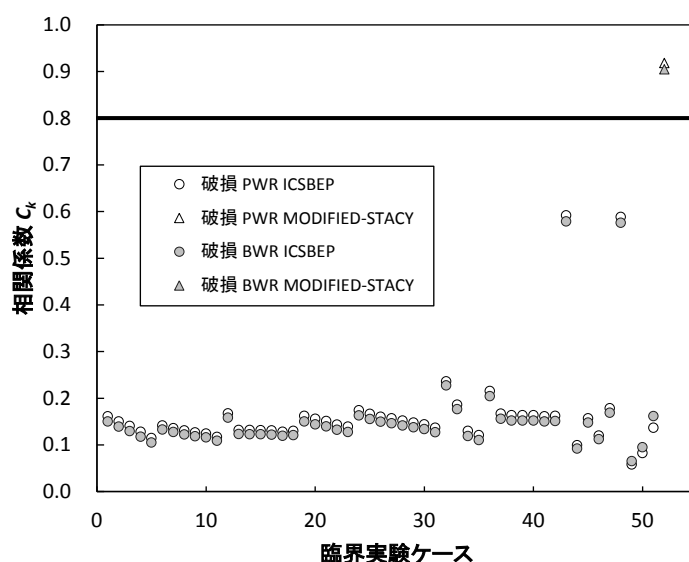


図 3.2.2-1 破損体系と鉄を反射体とした臨界実験データとの相関係数評価結果

(3) 岩盤や緩衝材を構成する物質の反射体効果に関する検討

使用済燃料の直接処分を対象とした臨界安全評価においては、処分容器を覆う緩衝材や天然バリアとなる岩盤に含まれる物質による中性子反射体効果が重要となる可能性が指摘されている（奥野ほか，2006；須山，2009）。しかし、岩盤や緩衝材を構成する物質の反射体効果について詳細に調査された例は少ない。このため、使用済燃料の直接処分における臨界安全評価ではこれら物質の反射体効果に対する計算システムや核データの精度について検証し、臨界安全評価モデルへの適用について検討する必要がある。

平成 26 年度においては、岩盤や緩衝材の主成分である二酸化ケイ素 (SiO_2) に着目し、核燃料施設など通常の臨界安全評価で仮定されている水反射体との比較を行った(原子力機構, 2015)。この結果、反射体厚さが十分に厚い場合では水反射体よりも SiO_2 反射体が中性子増倍率を大きく評価することが確認された。この結果を受け、平成 27 年度では、経済協力開発機構 原子力機関(OECD/NEA)原子力科学委員会(NSC)臨界安全性ワーキングパーティー(WPNCS)使用済燃料臨界性専門家会合(EGUNF)において、 SiO_2 反射体効果について異なる計算コードおよび核データでの計算値を比較する国際ベンチマーク問題を提案し、国際ベンチマーク計算を行った。国際ベンチマークは、8 か国 10 機関の参加を得て、様々な計算コードおよび核データライブラリによってベンチマーク計算が行われ、全参加機関でよく一致する結果が得ることができ、直接処分の臨界安全評価における SiO_2 反射体効果を検討する計算方法および計算システムの妥当性を確認することができた(原子力機構, 2016)。さらに、平成 28 年度においては、 SiO_2 反射体効果における計算精度の確認を行った(原子力機構, 2017)。この臨界解析における実効増倍率と臨界実験の測定値との比較は、良く一致した結果となり、 SiO_2 を反射体として使用した臨界実験に対する体系的な再現性は高いことがわかった。また、中性子スペクトルや反応率の比較においてもよく一致する結果が得られたことから、総合的にみて SiO_2 反射体効果の計算精度を確認することができた。

この確認された計算精度を元に、直接処分における臨界安全評価モデルとして適用するには、未臨界であると判定する指標値である推定臨界下限増倍率を設定するために、対象体系と類似した臨界実験データを抽出することが必要となる。このことから、本年度では 3.2.2(2)項でも検討を行った類似性評価を用いて、 SiO_2 反射体効果を考慮した体系と類似する臨界実験データの抽出を実施した。

類似性評価は、3.2.2(2)項と同様に SCALE コード(ORNL, 2011)の TSUNAMI-IP モジュールを使用し、相関係数 c_k にて評価を行った。緩衝材および岩盤に大量に含まれる SiO_2 の反射体効果を最大限に考慮するため、処分容器が完全に消失した状態、すなわち燃料集合体の周りが SiO_2 反射体で覆われたことを想定した体系とした。これは、 SiO_2 反射体効果における国際ベンチマーク問題と同一である。反射体の厚さについては、国際ベンチマークにおいて最も中性子増倍率が高い結果が得られた 120 cm とした。図 3.2.2-2 に SiO_2 反射体効果における国際ベンチマーク問題の計算体系を示す。

対象とする臨界実験データは、 SiO_2 または構成材料に SiO_2 が多く含まれるコンクリートを反射体とした臨界実験データを抽出し、その類似性について検討を行った。表 3.2.2-2 に評価対象とした SiO_2 およびコンクリート反射体の臨界実験の概要を示す。対象とした臨界実験 52 シリーズのうち、51 ケースは臨界安全ベンチマーク実験データベース ICSBEP(OECD/NEA, 2013)より、Silicon Dioxide および Concrete、Borated Concrete を反射体としている臨界実験データのうち LEU 系(低濃縮ウラン燃料系)および MIX 系(MOX 燃料系)から主に選択した。それ以外の STACY 更新炉は、3.2.2(2)項でも述べたように実施済みの臨界実験ではなく、原子力機構の試験炉 STACY にて計画段階の更新炉である。この STACY 更新炉では伊沢ら(Izawa et al., 2014)が鉄やコンクリートを構造材模擬体と考慮していることを報告している。このことから、3.2.2(2)項で設定した STACY 更新炉体系の構造模擬体を鉄からコンクリートに変更し、STACY 更新炉を模擬した体系を対象とした。

図 3. 2. 2-3 に SiO₂ およびコンクリート反射体の臨界実験を対象とした相関係数の評価結果を示す。精度評価に適切であると判断される指標である相関係数が 0.8 以上を示した臨界実験データは、湿潤 SiO₂ 反射体で 32 ケース、乾燥 SiO₂ 反射体で 38 ケースとなった。ICSBEP から抽出した臨界実験シリーズの中でも LEU-COMP-THERM-037 は、11 ケース全てにおいて 0.9 以上の非常に高い類似性を示していることがわかる。さらには STACY 更新炉においても 0.9 以上の相関係数を示す結果となった。この SiO₂ 反射体効果における国際ベンチマーク体系においては、SiO₂ 反射体を使用しているプルトニウムや高濃縮ウラン系の臨界実験データとの相関係数はかなり低い結果となっていることから、これらデータについては、反射体となる SiO₂ ではなく、燃料または減速材の寄与が大きいことが推測される。このことから、本検討では SiO₂ 由来の反射体を使用した臨界実験に絞って類似性評価を実施したが、他の低濃縮ウラン系または MOX 系の臨界実験データを選択することにより、高い類似性を示すデータをより抽出することができる可能性がある。また、STACY 更新炉体系との相関係数が高いことから、将来的に STACY 更新炉にてコンクリートを構造材模擬体とした実験が実施された場合、対象となる臨界実験としてデータ拡充できる可能性も高いと考えられる。

以上から、本検討では SiO₂ 反射体効果を考慮した体系において、30 以上のケースで高い類似性を示す結果を得ることができたことから推定臨界下限増倍率の評価が可能となり、直接処分における SiO₂ 反射体効果については臨界安全評価モデルへ適用可能であることを示した。

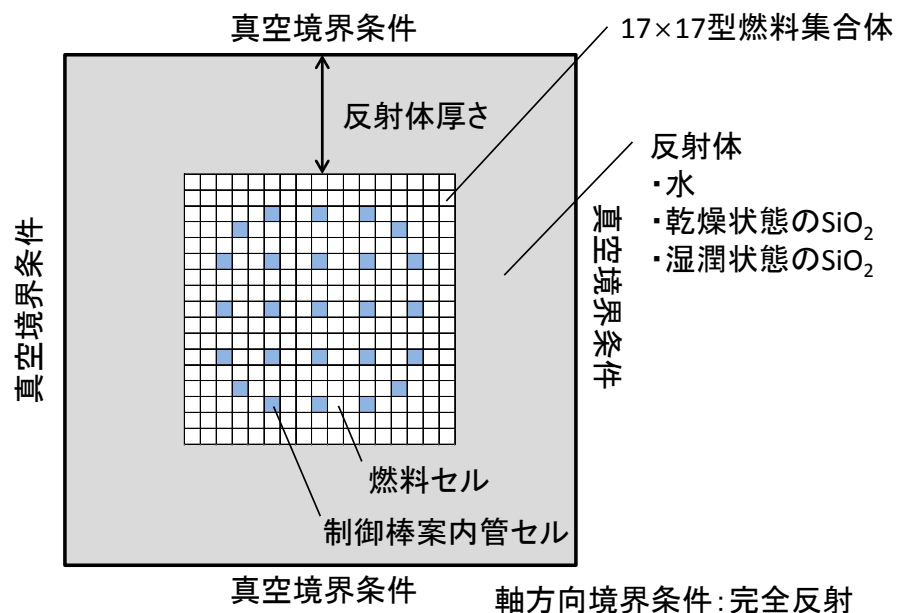


図 3. 2. 2-2 SiO₂ 反射体効果における国際ベンチマーク問題の計算体系

表 3.2.2-2 評価対象とした SiO₂およびコンクリート反射体臨界実験シリーズの概要

臨界実験シリーズ	反射体	ケース数
PU-MET-INTER-001-001	Silicon Dioxide	1
HEU-MET-INTER-005-005	Silicon Dioxide	1
HEU-COMP-MIXED-004-001	Silicon Dioxide	1
SUB-HEU-MET-FAST-001-001	Silicon Dioxide	1
LEU-SOL-THERM-008	Concrete	4
LEU-SOL-THERM-009	Borated Concrete	3
LEU-SOL-THERM-018	Concrete	6
LEU-SOL-THERM-022	Borated Concrete	4
LEU-SOL-THERM-037	Concrete	11
LEU-SOL-THERM-045	Concrete	9
LEU-SOL-THERM-066	Concrete	2
LEU-SOL-THERM-068	Concrete	5
MIX-SOL-THERM-004	Concrete	3
STACY 更新炉	Concrete	1

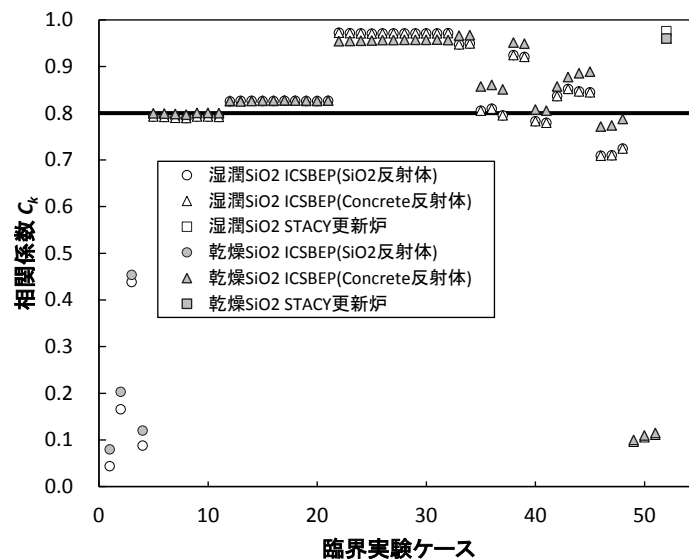


図 3.2.2-3 SiO₂およびコンクリート反射体の臨界実験を対象とした相関係数の評価結果

(4) 中性子吸収材に関する検討

使用済燃料の直接処分を対象とした臨界安全評価の信頼性向上のためには、燃焼度クレジットの適用に伴う不確かさや未臨界を判定する基準値などについての検討に加え、長期変遷などによる処分容器の破損、すなわち破損体系により未臨界性が担保できない可能性も想定する必要がある。そのため、PWR 燃料では、燃料集合体にある 25 本の案内管に中性子吸収材を挿入し未臨界を担保する検討が行われており、保守的な処分容器破損を考慮した体系においても未臨界を担保できる中性子吸収材を挿入するスペースは十分に確保でき、燃料集合体

に挿入可能な中性子吸収材の必要量について提示している(原子力機構, 2017)。本検討では、BWR 燃料についても燃料集合体へ挿入可能な中性子吸収材を想定し、未臨界を担保できる最低必要量について検討を実施した。

1) 計算条件

本検討では、BWR燃料集合体7体および12体収容の処分容器を想定し、U-235濃縮度4.0wt%、燃焼度45GWd t⁻¹の炉取出し後15,000年の時点での燃料組成を使用して評価した。適用する燃焼度クレジットについては、PWR燃料の検討(原子力機構, 2017)を同様に、燃焼度クレジット導入ガイド原案(日本原子力研究所, 2001)を参考にしてNp-237とその崩壊による生成を考慮しU-233を含めた核種を設定した。表3.2.2-3に燃焼度クレジットで考慮した核種を示す。中性子吸収材となる粒子の組成については、濃縮度0.2wt%のdep. UO₂にGd₂O₃(酸化ガドリニウム)を加えたものとした。

計算コードはMVP-2.0、核データライブラリはJENDL-4.0を使用し、計算モデルには確率論的幾何形状(STG)モデルを適用した。このSTGモデルについては、減速や吸収が大きい軽水などの媒質について計算精度が低下する可能性がある(Koide et al., 2014)ため、予め図3.2.2-4に示す燃料粒子の規則的立方格子配置セルにおいて規則的配置セルとSTGモデルのランダム配置セルを作成して中性子増倍率を算出し、その差をSTGモデルの補正係数として与えた。

計算体系については、処分容器破損時に燃料粒子と水減速材が最も臨界になりやすい「燃料」と「燃料+水」の体積割合「燃料/(燃料+水)」である最適減速条件で再配置する仮想的な状態を想定した。最適減速条件としては、アクチノイド+核分裂生成物の燃焼度クレジットを適用した場合における7体収容の場合0.24、12体収容の場合0.26と設定した。この最適減速条件にて、燃料粒子および水減速材、中性子吸収材粒子がランダムに配置された領域を鉄反射体で覆うことで中性子の漏れが最小化した球形体系とした。計算体系の概念図を図3.2.2-5に示す。なお、燃料粒子および毒物粒子の半径については0.41cmとし、これらを覆う鉄反射体は、反射体効果が十分に飽和する厚さ70cmと設定した。

表 3.2.2-3 燃焼度クレジットで考慮した核種

燃焼度クレジット	核種
アクチノイド (11 Actinides)	U-233、U-234、U-235、U-238、Pu-238、Pu-239、Pu-240、 Pu-241、Pu-242、Am-241、Np-237
核分裂生成物 (12FP)	Mo-95、Tc-99、Rh-103、Cs-133、Sm-147、Sm-149、 Sm-150、Sm-152、Nd-143、Nd-145、Eu-153、Gd-155

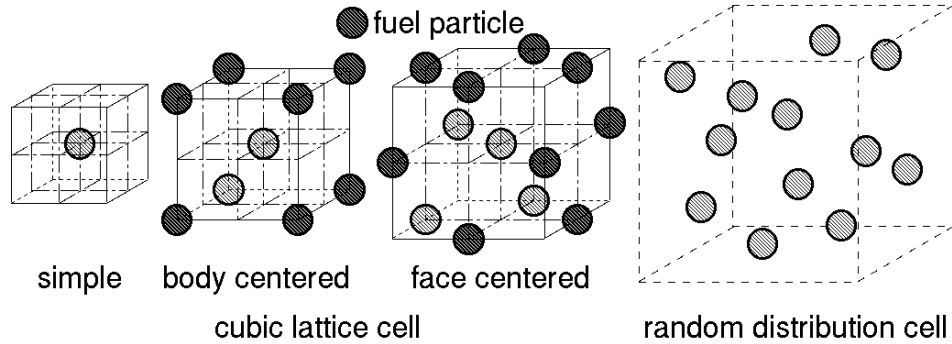


図 3. 2. 2-4 燃料粒子の規則的立方格子配列モデルとランダム配列モデル

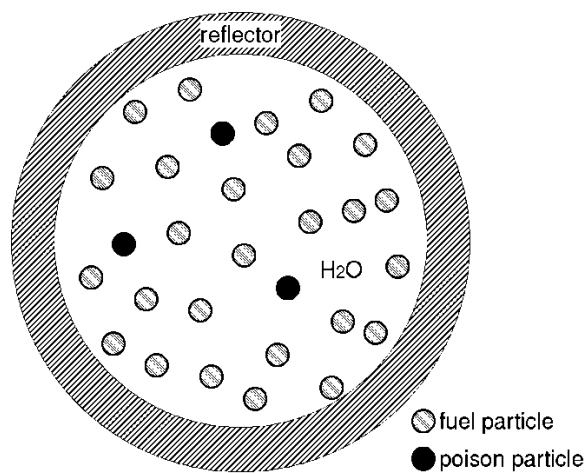


図 3. 2. 2-5 燃料粒子再配置時の臨界性計算モデル概念図

2) 計算結果

Gd₂O₃ 含有中性子吸収材粒子について、計算結果に STG モデルの補正係数を加えた中性子増倍率+3 σ が 0.95 および 0.98 以下となる燃料粒子数/中性子吸収材粒子数比 (f/p=中性子吸収材割合) を求め、中性子吸収材の必要量を検討した。

中性子吸収材を考慮した場合の BWR 使用済燃料 7 体および 12 体の解析結果を図 3. 2. 2-6 および図 3. 2. 2-7 に示す。また、未臨界維持に必要な中性子吸収材の量を表 3. 2. 2-4 および表 3. 2. 2-5 に示す。図 3. 2. 2-6 に示す BWR 使用済燃料 7 体を収容するケースでは、中性子吸収材を含まない体系での中性子増倍率が 0.98 以下であったため、中性子増倍率 0.95 以下の場合に必要な Gd₂O₃ 量についてのみ検討した。たとえば Gd₂O₃ 濃度を 5.0 wt% とした場合、f/p が 254 で中性子増倍率が 0.95 以下となった。この中性子吸収材割合は、BWR 燃料集合体 1 体中の燃料棒 74 本に対し、5.0 wt% の Gd₂O₃ を含む「棒状中性子吸収材」(寸法は燃料棒と同一と想定) が 0.29 本分に相当し、この割合以下で燃料棒と棒状中性子吸収材を共存させることができれば、中性子増倍率 0.95 以下の未臨界を担保できることを意味している。BWR 使用済燃料 7 体のケースでは図 3. 2. 2-6 の通り、Gd₂O₃ 濃度 0.05 wt% の棒状中性子吸収材であって

も 1.64 本挿入することで未臨界を担保できる結果となった。また、いずれの Gd_2O_3 濃度による結果においても、ウォーターチャンネルへの棒状中性子吸収材の挿入可能最大本数 9 本内で収まる結果となった。さらなる検討として、この挿入可能最大本数 9 本の棒状中性子吸収材全てをウォーターチャンネルに挿入する場合 ($f/p=8.0$) には、表 3.2.2-4 の通り、 Gd_2O_3 濃度 0.017 wt% 以上であれば中性子増倍率 0.95 以下の未臨界が担保できる結果となった。

図 3.2.2-7 に示す BWR 使用済燃料 12 体を収容するケースでは、中性子吸収材を含まない体系での中性子増倍率が 0.98 以上であったため、中性子増倍率 0.95 および 0.98 以下の場合に必要な Gd_2O_3 量について検討した。 Gd_2O_3 濃度を 5.0 wt% とした場合、 f/p が 89 となり棒状中性子吸収材棒が 0.83 本であれば中性子増倍率は 0.95 以下の、 f/p が 1,200 となり 0.06 本であれば 0.98 以下の未臨界を担保できる結果となった。また、BWR 使用済燃料 12 体のケースにおいても図 3.2.2-7 のとおり、ウォーターチャンネルへの棒状中性子吸収材の挿入可能最大本数 9 本内で収まる結果となった。さらに挿入可能最大本数 9 本の棒状中性子吸収材全てをウォーターチャンネルに挿入する場合、表 3.2.2-5 のとおり Gd_2O_3 濃度 0.028 wt% 以上であれば中性子増倍率 0.95 以下の、0.013 wt% 以上であれば中性子増倍率 0.98 以下の未臨界が担保できる結果となった。

このことから、ひとつの目安として挿入可能な棒状中性子吸収材を燃料集合体あたり 9 本とすると、BWR 使用済燃料 7 体収容においては Gd_2O_3 濃度が 0.017 wt% 程度以上であれば、12 体収容においては Gd_2O_3 濃度が 0.028 wt% 程度以上であれば中性子増倍率 0.95 以下の未臨界を十分に担保できるものと考えられる。

以上より、BWR 燃料を対象とした直接処分において、処分容器破損などによって臨界となる可能性を想定した場合においても、技術的に妥当な中性子吸収材を事前に燃料集合体に挿入しておくことで未臨界を担保できる可能性を示すことができた。しかし、本検討では処分容器への 7 体および 12 体の収容を想定した評価であり、処分容器設計が整い次第、その条件に従い再評価をすることが重要である。また、本検討では中性子吸収材として dep. $UO_2 + Gd_2O_3$ を設定したが、溶解などにより地球科学的に燃料とともに移行・拡散する物性については確認しておく必要がある。

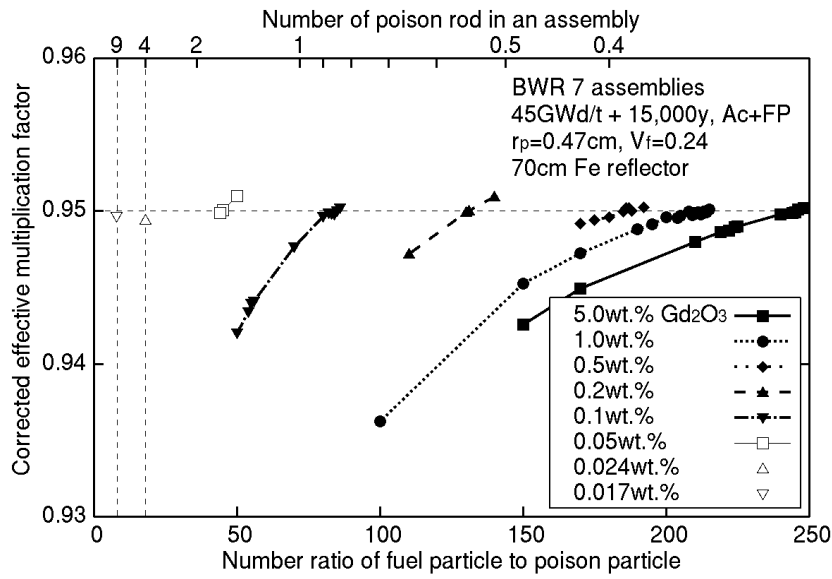


図 3. 2. 2-6 中性子吸収材を考慮した使用済燃料 7 体体系の中性子増倍率

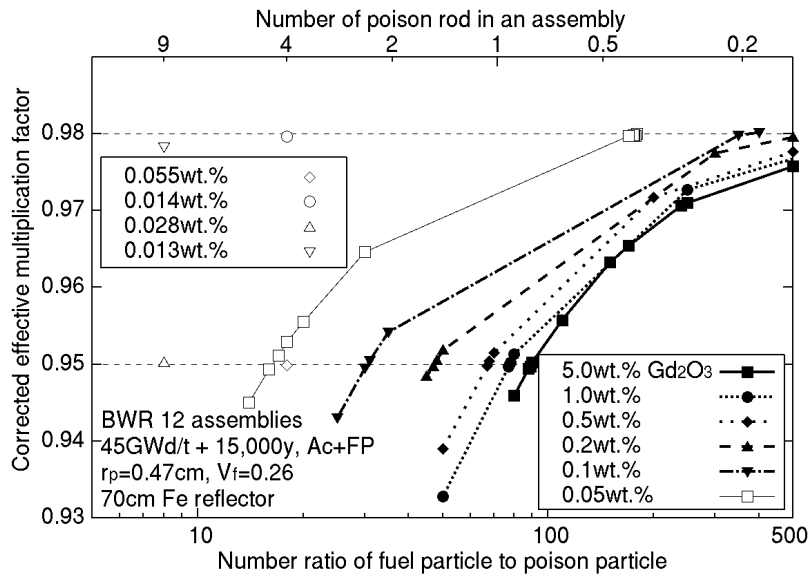


図 3. 2. 2-7 中性子吸収材を考慮した使用済燃料 12 体体系の中性子増倍率

表 3.2.2-4 使用済燃料 7 体収容容器の未臨界維持に必要な中性子吸収材の量（推定臨界下限増倍率を 0.95 とする場合）

Gd ₂ O ₃ 濃度 [wt.%]	未臨界維持に必要な毒物棒の本数（集合体 1 体あたり）
5.0	0.29
1.0	0.34
0.5	0.39
0.2	0.55
0.1	0.85
0.05	1.64

表 3.2.2-5 使用済燃料 12 体収容容器の未臨界維持に必要な中性子吸収材の量（左：推定臨界下限増倍率を 0.95 とする場合、右：同 0.98 とする場合）

Gd ₂ O ₃ 濃度 [wt.%]	未臨界維持に必要な毒物棒の本数（集合体 1 体あたり）	
	0.95	0.98
5.0	0.81	0.06
1.0	0.94	0.07
0.5	1.07	0.08
0.2	1.53	0.12
0.1	2.40	0.21
0.05	5.14	0.40

(5) 臨界発生時における処分システムへの影響評価の必要性の検討

使用済燃料の直接処分を対象とした臨界安全評価においては、処分場操業中および処分場閉鎖後にわたって臨界に至らないように処分容器や処分施設の設計を行う必要がある。処分場閉鎖後の臨界安全評価においては、超長期における燃料集合体、処分容器などの人工バリアの変遷挙動や天災による偶発事象の発生などの不確実性が存在することから、米国や英国のようにこれらの複合的な因子による臨界事象の影響を評価する手法を採り入れている国もある (Hicks et al., 2015)。また、このような偶発的な臨界事象を想定した直接処分時の臨界発生時における影響評価としては米国の事例 (CRWMS, 1997) が挙げられる。この米国の事例では、過渡解析コード RELAP5/MOD3 コード (INEL, 1995) を使用した事象の進展を評価しており、臨界事象は処分場全体には影響を与えない局所的な事象に限定されており、隣接する処分容器への影響もなく、処分システム性能に影響を及ぼすものではないとの判断が報告されている。この結果は、本事業で検討している直接処分システムにおいて仮に臨界が発生したとしても、処分システム全体に大きな影響を及ぼす可能性は小さいことを示唆しているが、処分システムや処分環境条件などが異なり、さらには臨界となった時に発生するエネルギーは、添加反応度の大きさやその反応度添加時間に依存することから、このような米国の評価結果をそのまま適用できるかの判断は難しい (原子力機構, 2017)。そこで本検討では、わが国の処分システムを対象に仮に臨界事象が発生した場合での添加反応度および反応度添加時間について評価し、米国の評価事例と比較することでわが国処分システム全体に影響を

及ぼす可能性について検討を実施した。

1) 臨界事象を想定した添加反応度および添加時間による検討

添加反応度については、米国の影響評価事例 (CRWMS, 1997) の考え方を参考にした。添加反応度を求める際に必要となる反応度 $\Delta\rho$ は以下の式 3.2.2-1 より求められる。

$$\Delta\rho = \frac{1}{k_{eff-Base}} - \frac{1}{k_{eff-Change}} \dots\dots\dots \text{式 3.2.2-1}$$

このとき、 $k_{eff-Base}$ は臨界点の中性子増倍率を、 $k_{eff-Change}$ は処分容器の破損を考慮した場合の最大の中性子増倍率を指す。添加反応度 $\Delta\rho(\$)$ はこの反応度 $\Delta\rho$ と実効遅発中性子割合 β_{eff} との関係より式 3.2.2-2 で表される。

$$\Delta\rho(\$) = \frac{\Delta\rho}{\beta_{eff}} = \left(\frac{1}{0.95} - \frac{1}{1.0186} \right) \times \frac{1}{0.005} = 14.18\$ \dots\dots\dots \text{式 3.2.2-2}$$

ここで、米国の事例では臨界点の中性子増倍率 $k_{eff-Base}$ を 0.95 とし、処分容器の破損を考慮した場合の最大の中性子増倍率 $k_{eff-Change}$ を 1.0186 と設定している。そして、実効遅発中性子割合 β_{eff} を 0.005 とし、添加反応度 $\Delta\rho(\$)$ を 14.18 \$ と評価している。

臨界事象として添加反応度を評価する場合、臨界点および臨界事象で最大となる中性子増倍率、実効遅発中性子割合の設定が必要となる。まずはこれらの設定について、米国の影響評価事例の値が適用可能であるか、また不可の場合に考える設定値について検討を行った。臨界点については、米国の影響評価事例では NRC の規制で設定されている 5% のマージン (NRC, 2017) に応じて 0.95 と設定されていると考えられる。本検討で適用する臨界点は、臨界安全評価において計算により体系が未臨界であると判定される中性子増倍率の基準値である推定臨界下限増倍率として、わが国の核燃料貯蔵施設などで使用されている 0.95、または過年度 (原子力機構, 2016 ; 2017) に検討している 0.98 と設定した。

実効遅発中性子割合については、Three Mile Island 発電所 1 号機における制御棒飛出し事故に関するパラメータサーベイの検討例 (Diamond et al., 2002) があり、この中ではサイクル末期における実効遅発中性子割合として、 $\beta_{eff} = 0.00521$ が設定されている。また、軽水炉におけるウラン炉心、ウラン/MOX 混合炉心およびフル MOX 炉心の実効遅発中性子割合の評価例 (Yamate et al., 1995; Demaziere, 2002) をまとめたものを表 3.2.2-6 に示す。米国の影響評価事例の対象としている燃料は、初期濃縮度 4.9 wt%、燃焼度 34 GWd t⁻¹ の燃焼燃料である。この燃料が配置される体系は、概ねウラン炉心のサイクル末期～ウラン/MOX 混合炉心の実効遅発中性子割合に相当すると考えられる。以上より米国で設定されている 0.005 という値は軽水炉のサイクル末期の値と同程度であることが確認できる。実効遅発中性子割合を決定する支配的な因子は燃料の組成であり、使用済燃料の組成は米国の事例とわが国の事例とで大きく異なることはないため、本検討における実効遅発中性子割合として 0.005 を設定することは適切であると判断しこの値を設定した。

処分容器の破損を考慮した場合の最大となる中性子増倍率については、仮に臨界事象が発生した場合を想定した破損体系 (図 3.2.2-8) での中性子増倍率とした。図 3.2.2-8 の体系

は、地下水の流入により処分容器内部から腐食が進行し、処分容器内部が腐食生成物に変遷し、地震発生による振動によって内部が崩落することにより燃料集合体が積み重なり底部に集積した状態を想定している。燃料はBWR使用済燃料の炉取り出し後11,000年とし、処分容器は燃料集合体10体収容とした。腐食生成物は、米国の影響評価事例ではヘマタイト(Fe_2O_3)を想定しているが、直接処分における処分環境を想定した場合、酸化還元電位の高い条件で生成するヘマタイトは適用が難しいと考えられることから、H12レポートにおいて代表的な腐食生成物として挙げられているマグネタイト(Fe_3O_4)とした。なお、処分容器内径上部については、健全な処分容器と燃料集合体との間の空隙が、内径に対して20%の割合であるため、崩落前に地下水で冠水していたことを想定し設定している。臨界計算コードはMVP-2.0(Nagaya et al., 2005)を使用し、断面積ライブラリにはJENDL-4.0に基づくMVP用のライブラリ(奥村ほか, 2011)を使用した。

臨界事象が発生した場合を想定した破損体系において臨界計算を行った結果、中性子増倍率は1.0024と評価され、この値を処分容器の破損を考慮した場合における最大の中性子増倍率として設定した。これらの設定値を用いて、式3.2.2-1にて臨界発生時の添加反応度の評価を実施した。その結果、臨界点に0.95を使用した場合は11.02\$, 0.98を使用した場合は4.57\$と評価された。米国の影響評価事例では14.18\$と評価されていることから、本検討での添加反応度は米国に比べ低いことがわかる。

反応度添加時間については、米国の影響評価事例では粒子サイズが0.010mmおよび0.063mmの場合、理想的な終端速度を仮定した計算により酸化鉄粒子が処分容器の底部まで落下する(ここでは1m落下する場合を計算)のに、それぞれ約40分および約1分かかるとの計算結果より、金属が酸化して生じるクラッドの典型的な粒子サイズは0.0001~0.010mmであることを考慮して30秒と3,600秒を設定している。腐食生成物の平均的な粒子サイズについては、米国と大きく異なることはないと考えられることから、反応度添加時間は30秒と3,600秒とする。

この反応度添加時間は米国の影響評価事例と同値を設定することから、臨界となった時に発生するエネルギーは添加反応度に依存することになる。よって、本検討の添加反応度は米国の影響評価事例より低いことから、処分システム性能の影響を及ぼす可能性は小さいものと考えられる。

表 3.2.2-6 軽水炉における実効遅発中性子割合

炉型	PWR			BWR		
燃料種類	ウラン 炉心	ウラン /MOX 混合 炉心	フル MOX 炉心	ウラン炉心	ウラン /MOX 混合 炉心	フル MOX 炉心
実効遅発 中性子割 合	0.005(EOC) ～ 0.006(BOC)	0.0045(EOC) ～ 0.005(BOC)	0.004	0.0055(EOC) ～ 0.006(BOC)	0.005(EOC) ～ 0.0055(BOC)	0.004

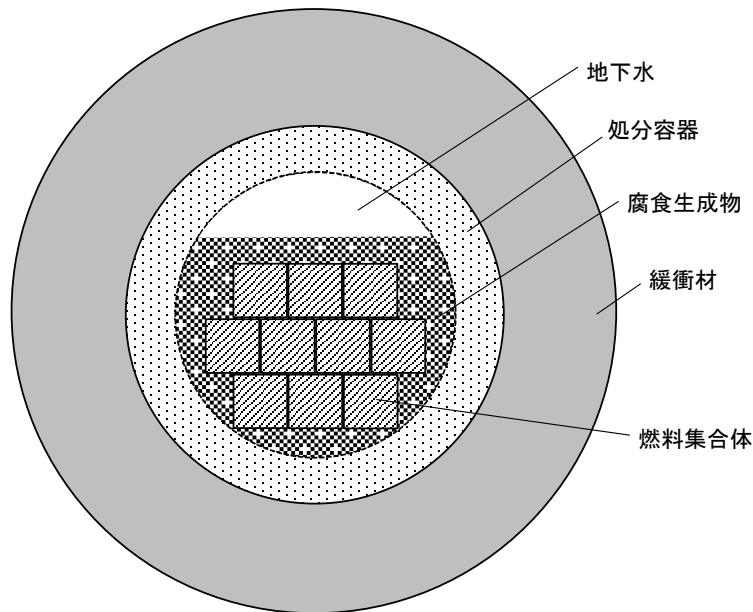


図 3.2.2-8 わが国で仮に臨界事象が発生した場合を想定した破損体系

2) 臨界発生時における影響の取り扱いについて

米国の臨界発生時における影響評価事例においては、処分システムへの影響は及ぼさないと判断されている。米国とは処分システムや処分環境条件などに違いがあり、さらに臨界となった時に発生するエネルギーは、評価モデルによって決まる添加反応度の大きさやその添加時間に依存する。この発生するエネルギーについて、臨界発生時に考えられる値を用いて評価を行ったところ、米国の添加反応度よりも低い評価となった。反応度添加時間は腐食生成物の平均的な粒径に依存していることから、米国との差はなく、添加反応度の差異が大きく影響することとなる。

米国の事例では、添加反応度 14.18 \$ を考慮して過渡解析を実施した結果、反応度添加時間が 30 秒のとき、臨界発生により最大で圧力は 2.5×10^5 Pa (=0.25 MPa)、温度は 500 K (=227 °C) となるが、この臨界事象はボイド率上昇のため即収束することが報告されている (CRWMS, 1997)。本評価における添加反応度は米国の事例に比べ低いことから、この米国の事例において臨界発生時に最大となる圧力および温度について、本事業で検討している人

工バリア設計の観点から処分システム全体への影響について検討を実施した。

圧力による影響については、過年度に処分容器における構造解析が実施されており（原子力機構, 2015; 2016）、板厚は許容応力 122 MPa を満たすことができることが報告されている。この値と比較して、臨界発生時における圧力ははるかに低い値であることから、圧力による処分容器への影響は殆どないものと考えられる。緩衝材については処分容器の外部であるため、圧力の影響を受けることはないといえる。温度による影響については、燃料は燃料熔融温度未満であることから熱影響はないと考えられる。処分容器として設定している炭素鋼は、オーバーパックに要求される機能や溶接性の観点から試験対象材料としている炭素鋼鍛鋼品 SF340A (NUMO, 2011) における使用限界温度は 450 °C (経済産業省, 2017) とされており、臨界時に発生する温度上昇より耐熱性はかなり高いことから熱影響はないものといえる。緩衝材として設定しているベントナイトは、100 °C 以上でのイライト化 (NUMO, 2011) などの熱影響が懸念されているが、ナチュラルアナログにおいてベントナイト鉱床が 160 °C から 100 °C まで 200 万年かかり冷却された状態でもイライト化しなかった事例 (Kamei et al., 1992) があるように、イライト化の進行は非常に遅いことが報告されている (核燃料サイクル開発機構, 2005)。このことから、臨界事象による温度の上昇は瞬間的なものであり、緩衝材のイライト化の影響はないものといえる。これらの検討結果より、臨界発生時における影響因子の与える影響は、過大評価を考慮した上でも十分に耐性があることを示し、人工バリアの安全機能を失うことはないものと考えられる。

以上より、直接処分システムの設計が整い次第、想定される臨界発生時のエネルギーが設計以上の事態となるかについて議論をする余地はあるが、直接処分システムにおいて仮に臨界が発生しても、処分システム全体に大きな影響を及ぼす可能性は小さいことを示唆した。

3.2.3 緩衝材の設計

(1) 本項目の背景と目的

直接処分における廃棄物は使用済燃料集合体であり、ガラス固化体と比較すると、廃棄体の形状、寸法、重量などが相違する。このため、廃棄体の特徴を考慮して、緩衝材の設計要件を抽出し、これらの設計要件を満足するように適切に設計を行い、緩衝材の仕様を設定する必要がある。

平成 28 年度までに、直接処分第 1 次取りまとめで設定したレファレンス仕様の緩衝材（乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 30 wt%）（以降、「レファレンス仕様の緩衝材」）を対象として、それが、人工バリアの施工方式（ブロック方式、PEM(Prefabricated Engineered barrier system Module)方式)、処分容器（炭素鋼容器、腐食代に銅を用いた複合処分容器）、廃棄体の定置方式（横置き定置方式、縦置き定置方式）、岩種（軟岩、硬岩）の組合せにもとづき設定した条件においても、緩衝材の応力緩衝性の設計要件（緩衝材の緩衝機能により処分容器および岩盤が破壊しない）を満足するかを確認するための設計解析を行ってきた。また、処分容器の支持性能の向上が期待できる高乾燥密度の緩衝材（乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 30 wt%）の適用性を検討した。

平成 29 年度は、複合処分容器を条件とした場合を対象として、処分容器の支持性能に着目しつつ、緩衝材の応力緩衝性の観点からレファレンス仕様の緩衝材の適用性の検討を進めるとともに、人工バリアを PEM 方式とした場合についても同様の観点からレファレンス仕様の緩衝材の適用性検討を進めた。また、平成 28 年度に引き続き、乾燥密度に加えケイ砂混合率も高めに設定した緩衝材の適用性検討として、乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 50 wt%の緩衝材の適用性検討を実施した。平成 29 年度の設計解析ケースを表 3.2.3-1 に示す。

表 3.2.3-1 平成 29 年度の設計解析ケース

	ケース i	ケース ii	ケース iii
緩衝材 (乾燥密度 [Mg m^{-3}], ケイ砂混合率 [wt%])	1.6, 30		1.8, 50
人工バリアの施工方式	ブロック	PEM	ブロック
処分容器	複合処分容器	炭素鋼処分容器	
岩盤	軟岩		
廃棄体の定置方式	縦置き		

ケース i については、レファレンス仕様の緩衝材の適用性検討として、ブロック方式、複合処分容器、軟岩の条件を設定し、過年度までに未検討である縦置きを条件に設定したものである。ケース ii については、レファレンス仕様の緩衝材の適用性検討として、PEM 方式を条件とした場合について、平成 28 年度と同様に、炭素鋼処分容器、縦置きの条件を設定し、過年度までに未検討である軟岩を条件としたものである。ケース iii は、乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 50 wt%の緩衝材を対象とした設計検討を、平成 28 年度に実施の、乾燥密度 1.8

Mg m⁻³、ケイ砂混合率 30 wt%の緩衝材を対象とした設計検討と同様の条件で実施するものである。

これらケース i～ケース iii の検討について「(2) 緩衝材の設計解析」に示す。また、平成 26 年度から平成 29 年度までの解析にもとづく緩衝材の応力緩衝性の設計要件確認の取りまとめとして、主要な解析ケースを対象として、処分容器の容器寿命の時点での緩衝材の最大主応力分布および最小主応力分布、ならびに、処分容器の腐食膨張が最大となる時点での岩盤の最大主応力分布および最小主応力分にに基づく破壊限接近度を整理した。これについても(2)に示す。ケース iii の解析に必要な、乾燥密度 1.8 Mg m⁻³、ケイ砂混合率 50 wt%の緩衝材の力学特性など（水理学的特性含む）を、標準圧密試験および三軸圧縮試験により取得した。これを「(3) 緩衝材の力学特性取得試験」に示す。本項目のまとめについては 3.5 節に示す。

なお、5 か年取りまとめ報告書において、平成 26 年度から平成 29 年度までの設計解析の成果をもとに、処分容器や岩盤などの条件の多様な組合せパターンのもとで実施したレファレンス仕様および高乾燥密度／高ケイ砂混合率の仕様の緩衝材の適用性検討について、緩衝材仕様の設定手法、適用範囲および今後の合理化の可能性とともに整理し、設計事例として提示した。

(2) 緩衝材の設計解析

ケース i においては、レファレンス仕様の緩衝材の適用性検討として、人工バリアの施工方式としてブロック方式、処分容器として複合処分容器、定置方式として縦置き、岩盤条件として軟岩を設定した解析を行った。また、支保工の力学特性に関するパラメータであるヤング率が緩衝材の設計に与える影響の把握を目的として、幌延深地層研究センターで取得されたデータをもとに設定した支保工のヤング率を用いた解析も実施した。

ケース ii においては、ケース i と同様にレファレンス仕様の緩衝材の適用性検討として、人工バリアを PEM とした場合について、処分容器として炭素鋼処分容器、定置方式として縦置き、岩盤条件として軟岩を設定した解析を行った。

ケース iii においては、処分容器の支持性能の向上が期待できる緩衝材の適用性検討として、平成 28 年度よりもケイ砂混合率を高く設定した緩衝材仕様（乾燥密度 1.8 Mg m⁻³、ケイ砂混合率 50 wt%）を対象として、人工バリアの施工方式としてブロック方式、処分容器として炭素鋼処分容器、定置方式として縦置き、岩盤条件として軟岩を設定した解析を行った。なお、本ケースの解析で用いる緩衝材の力学特性のパラメータについては、緩衝材の構成モデルが本項目の中で実施した標準圧密試験および三軸圧縮試験の結果を同時に再現するように設定した。

以降においては、緩衝材の設計要件、緩衝材の設計解析にあたってのシナリオ、使用した解析コードおよび解析モデル、本項目の解析で使用した物性値について 1) から 4) で述べた後、ケース i～ケース iii の設計解析の実施を 5)～7) に示す。次に、平成 26 年度から平成 29 年度までの解析結果にもとづく緩衝材の応力緩衝性の確認について 8) に示す。

1) 緩衝材の設計要件

緩衝材の設計要件は直接処分第1次取りまとめで示されており、本項目では、人工バリアの機能維持に対する影響を抑制（処分容器の変形緩和など）するための機能を果たす応力緩衝性の要件と、処分容器の力学的に安定な支持の機能を果たす強度特性の要件に着目して検討を行った。これら2つの設計要件の内容を以下に示す。

応力緩衝性：廃棄体埋設後、処分容器の閉じ込め機能が維持される期間、処分容器の腐食膨張と岩盤のクリープ変形による力学的影響を緩和すること。また、処分容器の腐食膨張による岩盤に対する力学的影響を緩和すること。

強度特性：処分容器および緩衝材の機能が要求される期間、人工バリアの寸法・形状を維持し、その機能に有害な影響を与えないこと。

なお、緩衝材の応力緩衝性について、処分容器に対する応力緩衝性の評価方法は次のとおりとした。処分容器は、処分容器に作用する外圧荷重 25 MPa のもとで構造健全性が維持されるように設計されることを基本としていることから、緩衝材から処分容器に作用する荷重が 25 MPa 以下であれば処分容器の構造健全性が維持される（破壊しない）。そこで、緩衝材から処分容器に作用する荷重の算定が必要となるが、緩衝材から処分容器に作用する荷重は、緩衝材全体における最大主応力の最大値以下となることから、本項目では、緩衝材から処分容器に作用する荷重を直接求めることに代えて、緩衝材の最大主応力の最大値を求め、処分容器の構造健全性維持の基準値である 25 MPa と比較することで処分容器が破壊に至るかを確認した。ここで、緩衝材中の水圧が位置によって大きく変わらないことから、緩衝材の最大有効主応力の最大値に処分深度の水圧を考慮する簡便な方法により、緩衝材の最大主応力の最大値を求めた。

岩盤に対する応力緩衝性については、後述の 3) で示す岩盤の破壊基準により、岩盤の破壊の発生の有無を確認することにより評価した。

強度特性については、処分容器の腐食膨張や岩盤クリープによる圧密にともない変化する緩衝材の厚さを評価することにより、人工バリアの形状や寸法が維持されるかを確認した。

2) 緩衝材の設計解析にあたってのシナリオ

緩衝材の設計にあたってのシナリオについては、ブロック方式の場合と PEM 方式の場合のそれぞれについて以下のとおりとした。

人工バリアの施工方式をブロック方式とした場合については、人工バリアは直接処分第1次取りまとめのレファレンス仕様を参考として PWR 使用済燃料集合体 2 体を封入した処分容器（炭素鋼処分容器または複合処分容器）の周囲を緩衝材が覆うものとし、岩盤のクリープ、廃棄体の沈下、処分容器の腐食膨張を考慮した。縦置きの場合を例として、表 3.2.3-1 に各シナリオの特徴と、それを表現するための力学的モデル・手法を示した。岩盤のクリープに対しては、長期的な 3 次クリープを考慮するため、岩盤にコンプライアンス可変型モデル（大久保ほか，1987；大久保・金，1993）を適用した。また、廃棄体の沈下に対しては、緩衝材に、塑性理論に基づく粘性土の代表的な構成則である修正 Cam-Clay モデル（Schofield and Wroth, 1968；Roscoe and Burland, 1968）を適用した。さらには、岩盤のクリープや処分容器の腐食膨張に起因した緩衝材への荷重の増加による緩衝材の圧密変形についても修正

Cam-Clay モデルを適用した。処分容器の腐食膨張については、処分容器の材料となる金属の線膨張係数で表現することとし、処分容器は弾性体としてモデル化した。また、支保工についても弾性体としてモデル化した。解析の実施においては、岩盤の掘削から廃棄体の定置の流れを考慮して、まず処分孔掘削時の岩盤の応力状態を求め、この岩盤の応力状態を人工バリアの設置時点に適用した上で、表 3.2.3-2 に示したシナリオに基づく力学モデル・手法による長期の評価を行った。

人工バリアを PEM とした場合のシナリオについては、原子力機構（2015a）で示した PEM 容器仕様（図 3.2.3-1）を対象として平成 28 年度に検討を行った。本シナリオにおいては、人工バリアの定置後における緩衝材の自己シール性の確保の観点から PEM 容器には遮水機能が期待されないと考えられるため、人工バリアの定置後再冠水により PEM 容器は短期間に完全腐食し、その後処分容器が腐食を開始すると仮定した。そこで、人工バリアを PEM とした場合の評価開始時点は、PEM 容器が完全に腐食した時点とし、それ以降に考慮すべきシナリオおよび力学的モデル・手法はブロック方式の場合（表 3.2.3-2）と同様とした。腐食した PEM 容器は弾性体としてモデル化した。解析の実施においては、ブロック方式の場合と同様に、岩盤の掘削から PEM の定置の流れを考慮して、処分孔掘削後の岩盤の応力状態を掘削解析により求め、これを、上記の評価開始時点に適用し、PEM の定置時点から PEM 容器の完全腐食に至る過程における岩盤の応力状態の変化は十分小さいものと仮定した。本来であれば、処分孔掘削後の岩盤の応力状態については PEM の定置時点に設定し、そこから PEM 容器の完全腐食に至る過程を含めた解析が必要であると考えられるが、前述のような仮定を設定することで、PEM 容器内部への地下水の浸入、それに伴う PEM 容器の腐食膨張および緩衝材の不飽和から飽和への遷移を同時に表現するための複雑なモデル化を回避して、ブロック方式と同様のモデル化による簡易的な評価を行うことで、本項目の目的である、PEM 方式の条件下でのレファレンス仕様の緩衝材の適用性の見通しの検討を可能とした。

なお、本設計検討においては、緩衝材の温度は 100 °C 以下となるように人工バリアを設計することを基本としていることから、緩衝材の力学特性への温度影響は限定的であると考え、緩衝材の力学特性の温度変化は考慮しなかった。PEM 容器の内圧上昇や温度変化による変形などの温度影響については、本検討では簡易的な評価のため考慮しなかったが、このような温度影響を踏まえた設計検討については今後の課題と考えられる。

表 3.2.3-2 考慮したシナリオの特徴と力学的なモデル・手法（竖置き、ブロック方式の例）

シナリオ	シナリオの特徴	力学的なモデル・手法
岩盤のクリープ		長期的な 3 次クリープを考慮するため、岩盤にコンプライアンス可変型モデルを適用する。
廃棄体の沈下		人工バリアを設置した時点で、廃棄体の自重により沈下し始める。 緩衝材に、塑性理論に基づく粘性土の代表的な構成則である修正 Cam-Clay モデルを適用する。
処分容器の腐食膨張		処分容器が酸素や硫化物などにより腐食され、腐食膨張変形を起こす。 処分容器は弾性体モデルとする。（腐食膨張は処分容器の材料となる金属の線膨張係数で表現する。）

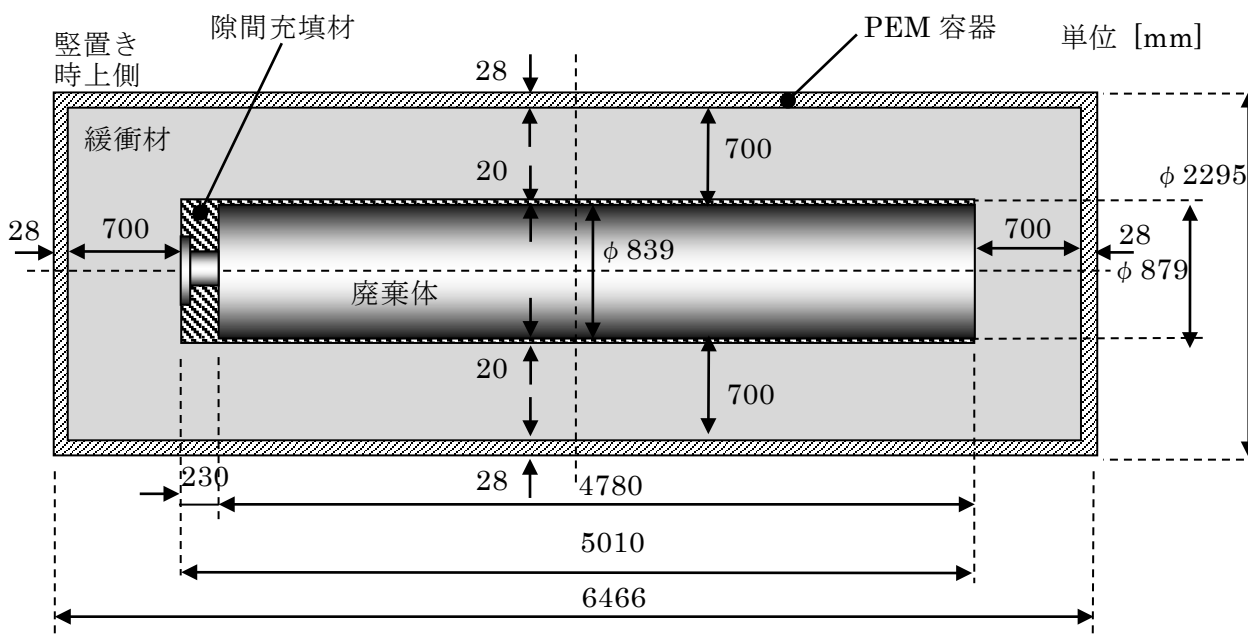


図 3.2.3-1 PEM 容器仕様
(原子力機構, 2015a)

3) 設計に用いる解析コードおよび力学モデル

解析には汎用有限要素法解析コード ABAQUS6.14(米 Dassault Systems 社)を用い、人工バリアおよび天然バリアを含めて浸透と応力を考慮した連成解析を行った。

ABAQUS は米国の Rhode Island の HSK 社により開発され、自動車、航空宇宙、工業製品などの産業で広く用いられている。ABAQUS のプロダクトは、ABAQUS/Standard、ABAQUS/Explicit、ABAQUS/CFD の3つからなり、本解析では陰解法を用いて有限要素解析を行う ABAQUS/Standard を用いている。

ABAQUS における有限要素法の定式化は仮想仕事の原理に基づく。仮想仕事の原理は、物体が平衡状態にあれば、そこに加えられる微小な仮想変位 δu または仮想速度 $\delta \dot{u}$ によって、物体ならびに外力の各々がなす仕事、または一種の仕事率が等置されることを示しており、次式で表わすことができる。

$$\int_{V_0} \Pi_{ij} \left\{ \frac{\partial(\delta u_j)}{\partial X_i} \right\} dV_0 = \int_{S_0} \bar{t}_{0j} \delta u_j dS_0 + \int_{V_0} \bar{b}_j \delta u_j dV_0 \dots \dots \dots \text{式3.2.3-1}$$

ここで、 Π は公称応力テンソル [Pa]、 δu は仮想変位 [m]、 \bar{t} は表面力 [Pa] および \bar{b} は物体力 [N m⁻³] を示す。

ABAQUS は広範囲の応力解析の問題を解析することができるが、本検討では静的応答問題のうち、非線形静的解析を実施している。なお、非線形性は、大変形効果、材料非線形性、接触や摩擦などの境界非線形性によって生じる可能性があるが、本解析では大変形効果は考慮していない。非線形つり合い方程式の解法には Newton 法を用いており、各変数の増分に対してつり合い状態を得るために繰り返し計算が行われる。

ABAQUS では、解析で対象とする事象に応じて構成則のオプションが選択できるようになっており、粘性土の塑性変形に対しては修正 Cam-Clay モデル (Schofield and Wroth, 1968 ; Roscoe and Burland, 1968) が標準で利用可能である。また、浸透流についても、ダルシー則に基づいたモデルが標準で利用可能である。一方、岩盤の非線形な粘弾性挙動を表現するためのコンプライアンス可変型モデルは、ABAQUS の構成則のオプションにはないことから、大久保らが提案した、非線形粘弾性挙動および強度破壊点以降の挙動を数値解析的に表現可能なモデル (大久保ほか, 1987; 大久保・金, 1993) をユーザー定義サブルーチンとして ABAQUS 中に組み込んだ。ABAQUS では、選択した構成則に応じて自動で強連成を行い、解析を行う。

コンプライアンス可変型モデルにおいては、岩盤の破壊基準として Janach (1977) の破壊条件式 (式 3.2.3-2) を適用している。そこで、岩盤の破壊の発生の有無を確認するにあたっては、式 3.2.3-2 にもとづく破壊限接近度 ($(\sigma_1 - \sigma_3) / \Delta \sigma_0$) を評価した。破壊限接近度が 1 以上であれば破壊と見做される。

$$\Delta \sigma_0 = \sigma_c (1 + \sigma_3 / \sigma_t)^{0.5} - \sigma_3 \dots \dots \dots \text{式3.2.3-2}$$

ここで、 σ_c は一軸圧縮強度 [Pa]、 σ_t は一軸引張強度 [Pa]、 σ_1 および σ_3 はそれぞれ最大主応力および最小主応力 [Pa] である。なお、本項目においては、H12 レポートの設定にもとづき、軟岩の一軸圧縮強度および一軸引張強度をそれぞれ 15 MPa および 2.1 MPa、硬岩の一軸

圧縮強度および一軸引張強度をそれぞれ115 MPaおよび8.0 MPaとした。

4) 物性値

本項目の検討で使用した物性値を表 3.2.3-4～表 3.2.3-12 にまとめた。また、ケース i～iii、これら物性値の表、各ケースに含まれる地下構造物の対応を表 3.2.3-3 に示す。

処分容器の物性値について、ケース i では銅外層と炭素鋼による複合容器を対象としており、炭素鋼の物性値を表 3.2.3-4 に、また、銅外層の物性値を表 3.2.3-5 に示す。ケース ii およびケース iii は炭素鋼処分容器が対象である。坑道の力学的安定性の確保のために設置される支保工の物性値については、過年度の設計検討と同様に吹付けコンクリートの物性値を設定した(表 3.2.3-6)。軟岩系岩盤の物性値は過年度の設計検討と同じである(表 3.2.3-7)。

緩衝材の物性値については、ケース i では直接処分第 1 次取りまとめのレファレンス仕様(乾燥密度 1.6 Mg M^{-3} 、ケイ砂混合率 30 wt%) を対象とした(表 3.2.3-8)。ケース ii では、前述のとおり、評価開始時点は PEM 容器が完全に腐食した時点となるため、レファレンス仕様(乾燥密度 1.6 Mg M^{-3} 、ケイ砂混合率 30 wt%) の緩衝材が PEM 容器の腐食膨張によって圧密した状態を対象とした。物性値はレファレンス仕様を対象とした試験結果に基づき設定した(表 3.2.3-9)。ケース iii では、レファレンス仕様よりも高乾燥密度かつ高ケイ砂混合率の緩衝材(乾燥密度 1.8 Mg M^{-3} 、ケイ砂混合率 50 wt%) を対象とし、力学特性のパラメータについては標準圧密試験および三軸圧縮試験の結果を同時に再現するように設定した(表 3.2.3-10)。試験結果の再現計算については後述の 7) で詳細を示す。

ケース ii で考慮する、完全腐食後の PEM 容器の物性値について、その機械的性質(ヤング率、ポアソン比)については処分容器(炭素鋼)の腐食生成物の設定と同じとし(表 3.2.3-4)、それ以外(密度、間隙比、透水性)については文献にもとづき設定した。PEM 容器の物性値を表 3.2.3-11 に示す。

なお、本検討では淡水環境を対象として設計検討を行ったが、別事業(経済産業省委託事業「平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分技術に関する調査等事業(沿岸部処分システム高度化開発)」など)において海水を対象とした緩衝材の力学特性を取得中(平成 30 年度終了予定)であることから、海水環境における緩衝材の力学特性の取得結果をもとに、緩衝材の設計を別途実施することの必要性を検討することは今後の課題になると考える。

表 3.2.3-3 各ケースで使用した物性値

構造物	ケース i	ケース ii	ケース iii
処分容器	炭素鋼：表 3.2.3-4 銅外層：表 3.2.3-5	炭素鋼：表 3.2.3-4	炭素鋼：表 3.2.3-4
支保工	表 3.2.3-6		
岩盤	表 3.2.3-7		
緩衝材	表 3.2.3-8	表 3.2.3-9	表 3.2.3-10
PEM 容器	—	表 3.2.3-11	—
間隙流体	表 3.2.3-12		

表 3.2.3-4 処分容器（炭素鋼）の物性値

項目	記号	単位	値	備考	
炭素鋼	密度	ρ	Mg m^{-3}	7.85	高治ほか(1999)より
	ヤング率	E	GPa	210	高治ほか(1999)より
	ポアソン比	ν	—	0.30	高治ほか(1999)より
	腐食生成物 ヤング率	E_c	GPa	105	本間ほか(2002)より 健全部に対して 50 %程度小さくなる
	腐食速度		mm y^{-1}	0.04	高治ほか(1999)より
	腐食膨張率		倍	3	須田ほか(1992)を参考

表 3.2.3-5 複合容器（銅外層）の物性値

項目	記号	単位	値	備考	
銅	密度	ρ	Mg m^{-3}	8.9	JIS C1020 無酸素銅より (理科年表平成 25 年より)
	ヤング率	E	GPa	117	JIS C1020 無酸素銅より (理科年表平成 25 年より)
	ポアソン比	ν	-	0.343	銅より (理科年表平成 25 年より)
	腐食生成物 ヤング率	E_c	GPa	80	原子力機構 (2016a) 実測値にもとづき保守的に 設定
	腐食速度		mm y^{-1}	0.0008	高治ほか(1999)に準拠して、腐食代 40 mm が腐 食寿命 50,000 年で腐食されるとする。
	腐食膨張率		倍	7	原子力機構 (2016a) 実測値にもとづき保守的に 設定

表 3.2.3-6 支保工(高強度吹付けコンクリート)の物性値

項目	記号	単位	値	備考
設計基準強度		MPa	36.0	支保工は弾性体と仮定するため解析では不使用
ヤング率	E	MPa	6,000	
ポアソン比	ν	-	0.20	
密度	ρ	Mg m ⁻³	2.35	電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構(2005)より インバート(無筋コンクリート)
透水係数	K	m s ⁻¹	1.80×10 ⁻¹⁰	入矢ほか(2004)より HFSC424
間隙比	e	-	0.163	入矢ほか(2006)より HFSC424の総細孔率(間隙率)14%より算出

表 3.2.3-7 軟岩系岩盤の物性値(処分深度 500 m)

項目	記号	単位	値	備考	
物理的特性	飽和密度	ρ	Mg m ⁻³	2.20	H12 レポート SR-C より
	真密度	ρ_R	Mg m ⁻³	2.7	H12 レポート SR-C より
	有効間隙率	n_e	%	30	H12 レポート SR-C より
力学特性	一軸圧縮強さ	qu	MPa	15	H12 レポート SR-C より
	ヤング率	E	MPa	3,500	H12 レポート SR-C より
	ポアソン比	ν	-	0.30	H12 レポート SR-C より
	粘着力	c	MPa	3.0	H12 レポート SR-C より
	内部摩擦角	ϕ	deg	28	H12 レポート SR-C より
	引張強度	σ_t	MPa	2.1	H12 レポート SR-C より
	側圧係数	K_0	-	1.07	H12 レポート SR-C 164/h+0.74 (h: 深度[m]) より
	初期鉛直応力	σ_v	MPa	11	H12 レポート SR-C $\rho h/100$ ($\approx \rho gh/1000$) より
水理特性	初期水平応力	σ_h	MPa	11.8	H12 レポート SR-C $K_0 \cdot \sigma_v$ より
	透水係数	k	m s ⁻¹	1×10 ⁻⁸	H12 レポート 健岩部: 10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻⁸ m s ⁻¹ より
クリープ特性	大久保モデル	n_0	-	20	高治ほか(1999)より
	3次クリープ	m	-	5	高治ほか(1999)より
	パラメータ	t_0	s	120	大久保ほか(1987)より

表 3.2.3-8 緩衝材の物性値 (乾燥密度 1.6 Mg m⁻³、ケイ砂 30 wt%配合)

項目	記号	単位	値	備考	
乾燥密度 1.6 Mg m ⁻³ (ケイ砂 30 wt%配合)	乾燥密度	ρ_d	Mg m ⁻³	1.600	
	間隙比	e	—	0.676	高治・鈴木(1999)より クニゲル V1 の $\rho_s=2.7$ Mg m ⁻³ 、 ケイ砂の $\rho_s=2.64$ Mg m ⁻³ とし、 混合体の $\rho_s=2.68$ Mg m ⁻³ から 間隙比を算出
	圧縮指数	λ	—	0.117	西村ほか(2006)より
	膨潤指数	κ	—	0.069	西村ほか(2006)より 再載荷時の値
	ポアソン比	ν	—	0.4	高治ほか(1999)より
	限界状態応力比	M	—	0.630	高治・鈴木(1999)より
	内部摩擦角	ϕ	deg	16.6	高治・鈴木(1999)より
	先行圧密降伏応力	P_0^*	MPa	0.800	H12 レポートより
	透水係数	K	m s ⁻¹	4.5×10^{-13}	松本ほか(1997)より
	膨潤圧 (初期応力)	P_{sw}	MPa	0.5	鈴木・藤田(1999)より

表 3.2.3-9 ケース ii 評価開始時点の緩衝材の物性値

項目	記号	単位	値	備考	
乾燥密度 1.6 Mg m ⁻³ (ケイ砂 30 wt%配合) ^{※1}	乾燥密度	ρ_d	Mg m ⁻³	1.84	処分孔に定置した時点から評 価開始時点までの圧密変形 (体 積減少) を基に設定
	間隙比	e	—	0.454	
	圧縮指数	λ	—	0.117	
	膨潤指数	κ	—	0.069	処分孔に定置した時点と同じ 値 (表3.2.3-8参照)
	ポアソン比	ν	—	0.4	
	限界状態応力比	M	—	0.630	
	内部摩擦角	ϕ	deg	16.6	
	先行圧密降伏応力	P_0^*	MPa	0.800	
	透水係数	K	m s ⁻¹	4.5×10^{-13}	
	評価開始時点の応 力	P_{sw}	MPa	4.5	

※1 PEM 容器を処分孔に定置した時点の緩衝材の仕様

表 3.2.3-10 緩衝材の物性値 (乾燥密度 1.8 Mg m⁻³、ケイ砂 50 wt%配合)

項目	記号	単位	値	備考	
乾燥密度 1.8 Mg m ⁻³ (ケイ砂 50 wt%配合)	乾燥密度	ρ_d	Mg m ⁻³	1.800	
	間隙比	e	—	0.502	本項目 (3) 標準圧密試験
	圧縮指数	λ	—	0.092	標準圧密試験および三軸圧縮試 験の結果 (本項目 (3)) を同時に 再現するように設定
	膨潤指数	κ	—	0.063	
	ポアソン比	ν	—	0.1	
	先行圧密降伏応力	P_0^*	MPa	3.4	
	限界状態応力比	M	—	0.47	本項目 (3) 三軸圧縮試験
	内部摩擦角	ϕ	deg	12.7	
	透水係数	K	m s ⁻¹	6.0×10^{-13}	松本ほか(1997)より
	膨潤圧 (初期応力)	P_{sw}	MPa	0.843	本項目 (3) 標準圧密試験

表 3.2.3-11 腐食した PEM 容器（炭素鋼）の物性値

項目	記号	単位	値	備考
炭素鋼の腐食生成物	ヤング率	E	GPa	105
	ポアソン比	ν	-	0.30
	密度	ρ	Mg m ⁻³	3.77
	間隙比		-	0.38
	透水係数		m s ⁻¹	8.1×10 ⁻⁹
				処分容器（炭素鋼）の腐食生成物の設定より（表 3.2.3-4）。 マグネタイト密度 5.2 g cm ⁻³ と下記の間隙比から算出 高谷ら（2013）にもとづき算出 エネルギー総研（2002）より

表 3.2.3-12 間隙流体の物性値

項目	記号	単位	値	備考
水の密度	ρ_w	Mg m ⁻³	1.0	高治ほか(1999)より

5) ケース i：複合処分容器をブロック・縦置き方式で定置する場合の緩衝材の設計

レファレンス仕様の緩衝材（乾燥密度 1.6 Mg m⁻³、ケイ砂混合率 30 wt%）を対象とした設計要件確認を目的として、平成 28 年度においては、ブロック・横置き方式で軟岩環境に定置する場合を対象として設計解析を行った。

本ケースでは同様の条件下で、定置方式を縦置きとした場合の解析を行った。ここでは、この解析を標準ケースという。また、支保工コンクリートのヤング率が緩衝材の設計に与える影響評価を目的として、幌延深地層研究センターで取得されたデータを参考に、過年度までに使用してきた支保工コンクリートのヤング率よりも高い値を設定した解析を実施し、緩衝材の応力緩衝性や処分容器の支持性能への影響を評価した。ここではこの解析を補足ケースという。

以降において以下の構成で報告する。

- ① ケース i の解析モデル
- ② ケース i の解析条件
 - a. 初期条件および境界条件
 - b. 外力条件
- ③ ケース i の物性値
- ④ ケース i の解析結果

① ケース i の解析モデル

解析モデルを図 3.2.3-2 に示す。解析対象は、処分容器（複合容器）、緩衝材、支保工、および岩盤とした。人工バリアを縦置き定置した場合は、処分容器を中心として緩衝材、支保工および岩盤が同心円状に位置することとなるため、軸対象問題として取り扱うことができる。人工バリアの仕様は、直接処分第 1 次取りまとめのレファレンス仕様を参考として、PWR 使用済燃料集合体 2 体を封入した処分容器の周囲を厚さ 0.7 m の緩衝材が覆い、縦置き方式で定置されるものとした。また、岩盤部分は、直接処分第 1 次取りまとめの緩衝材の設計に関する解析モデルを参考として、外側境界に掘削などの影響がおよばないように処分孔の直径の 5 倍程度までの範囲として、処分孔から約 12 m の範囲までをモデル化した。また、

深さ方向についても、緩衝材の下端から約 12 m の範囲までをモデル化した。

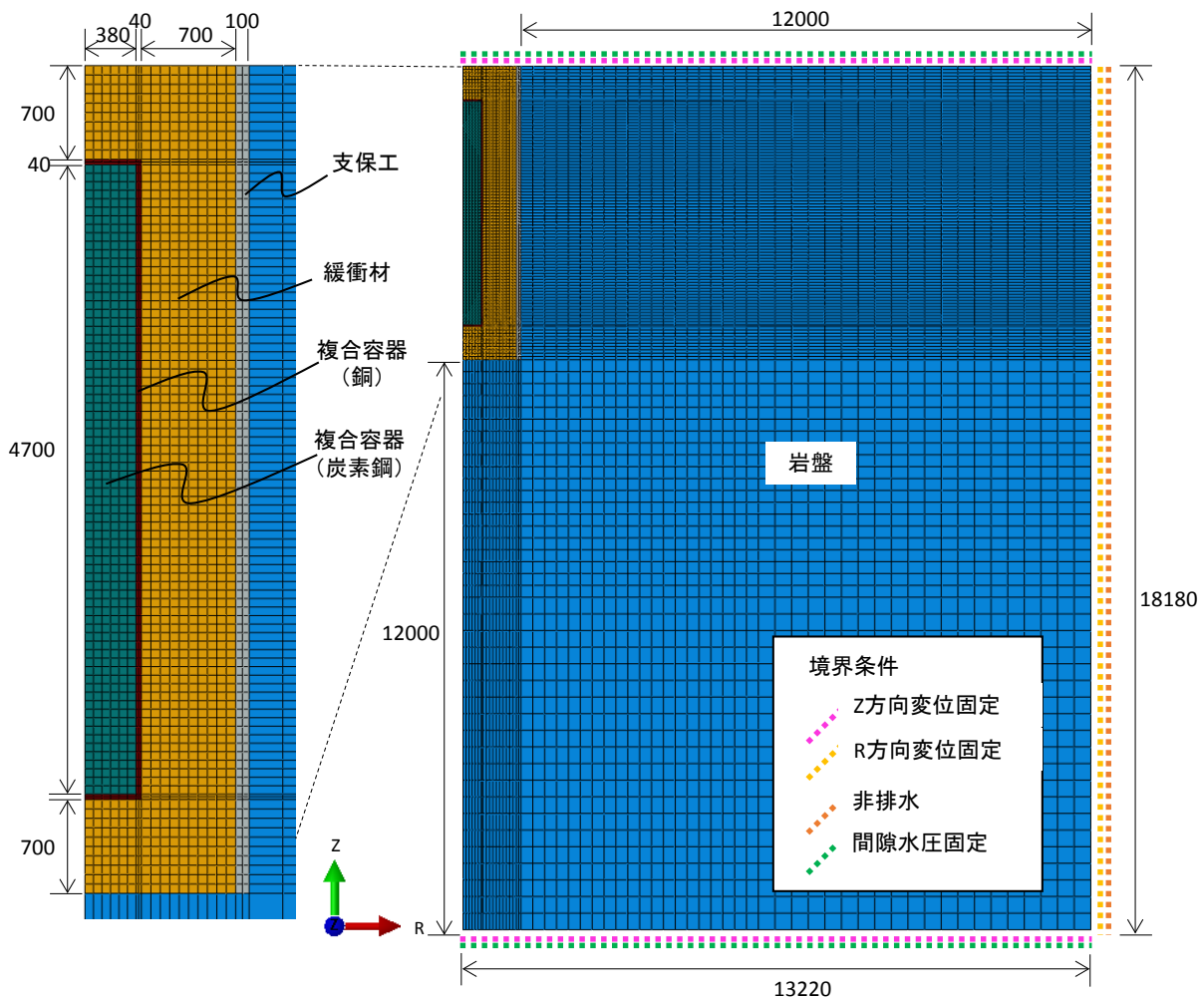


図 3.2.3-2 解析モデル(ケース i) (単位 : mm)

② ケース i の解析条件

a. 初期条件および境界条件

初期条件は、平成 28 年度の炭素鋼処分容器を対象にブロック・縦置き方式の場合を対象とした設計検討と同じ設定である。緩衝材の初期応力には、飽和を仮定して、膨潤圧 0.5 MPa を設定した。岩盤については、岩盤の掘削から廃棄体の定置の流れを考慮して、深度に応じた初期地圧および間隙水圧を解析モデルの要素ごとに設定した上で、処分孔の掘削解析により掘削後の岩盤の応力状態を求め、それを岩盤の初期応力に設定した。モデル上下面の初期地圧と間隙水圧を表 3.2.3-13 に示す。

表 3.2.3-13 ケース i の初期条件

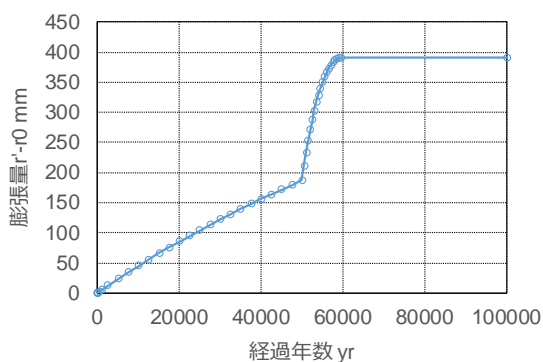
軟岩系 岩盤	モデル 上面	深度[GL -m]	500.00
		初期地圧[MPa]	9.3452
		間隙水圧[MPa]	4.9033
	モデル 下面	深度[GL -m]	518.18
		初期地圧[MPa]	9.6850
		間隙水圧[MPa]	5.0816

境界条件として、モデルの上下面に対して鉛直方向への変位固定条件、モデルの側面に対して径方向への変位固定条件を設定した（図 3.2.3-2）。間隙水圧については、モデル上面および下面に間隙水圧固定の条件を設定し、側面は、処分孔が平行して掘削されている処分場の一部分を切り出してモデル化していることから、空間の対称性を考慮し非排水条件とした。なお、境界条件は初期条件が設定された後に有効となり、例えば、初期応力場が設定された後に変位固定条件が有効となる。

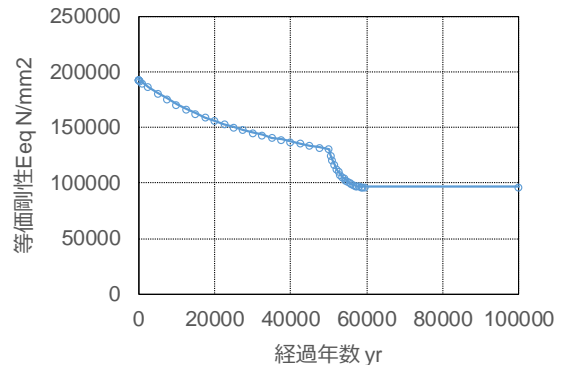
b. 外力条件

外力条件として、処分容器の腐食膨張による緩衝材への荷重を設定した。本設計解析では、処分容器の腐食代の銅部分およびその内部の炭素鋼部分に加え、使用済燃料部分も含めて腐食膨張するものと仮定し、予め計算した膨張量に応じた等価な体積ひずみおよび等価剛性を、銅、炭素鋼、使用済燃料の区別なく全断面に均一に与えた。計算方法は平成 28 年度（原子力機構，2017）と同様とした。

経過年数に対する腐食膨張量および処分容器の等価剛性を図 3.2.3-3 に示す。なお、処分容器の長手方向の腐食膨張量については、径方向の腐食膨張量に等しくなるように設定した。



(a) 腐食膨張量



(b) 等価剛性

図 3.2.3-3 経過年数に対する腐食膨張量および等価剛性（複合処分容器）

③ ケース i の物性値

処分容器（複合容器）、緩衝材、支保工、および岩盤の物性値は、平成 28 年度の横置き定置を対象とした設計検討と同じとした（表 3.2.3-4、表 3.2.3-5、表 3.2.3-6、表 3.2.3-7、

表 3.2.3-8)。なお、支保工のヤング率が緩衝材の応力緩衝性の評価に与える影響を検討するために過年度に設定していた 6,000 MPa に対して、幌延深地層研究センターで取得されたデータ (図 3.2.3-4) を参考に、本検討で設定した設計基準強度 (36 MPa) に対する代表的な値として、30,000 MPa を設定した。

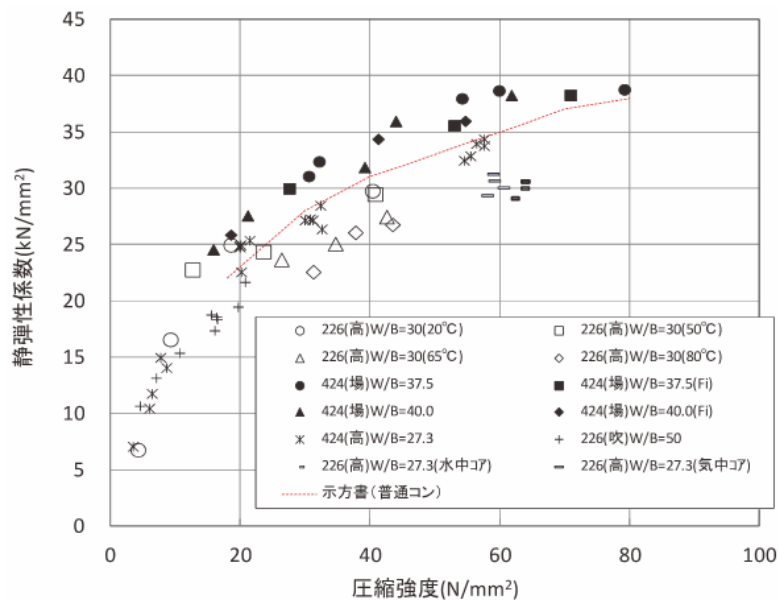


図 3.2.3-4 圧縮強度と静弾性係数の関係
(原子力機構, 2016b)

④ ケース i の解析結果

標準ケースの場合の変位図を、処分容器の定置後、1 千年経過時点、5 万年経過時点について図 3.2.3-5 に示す。また、処分容器下部および処分容器胴部中央で評価した緩衝材厚さを表 3.2.3-14 に示す。これらの図表から、処分容器の腐食膨張にともない緩衝材は圧密変形し、5 万年経過時点で緩衝材の厚さは約 27 % 減少したものの、人工バリアの形状、寸法は概ね維持されることが確認された。

緩衝材の応力緩衝性については、処分容器に対しては緩衝材の最大有効主応力をもとに評価した。複合処分容器の銅外層厚さは 5 万年の容器寿命を目安として設定されていることから、銅外層全てが腐食する 5 万年経過後の最大有効主応力を評価した (図 3.2.3-6)。また、岩盤に対する応力緩衝性については、複合処分容器の全量が腐食する 6 万年経過後の岩盤の最大有効主応力および最小有効主応力にもとづく破壊限接近度 (「3) 設計に用いる解析コードおよび力学モデル」参照) により評価した (図 3.2.3-7)。

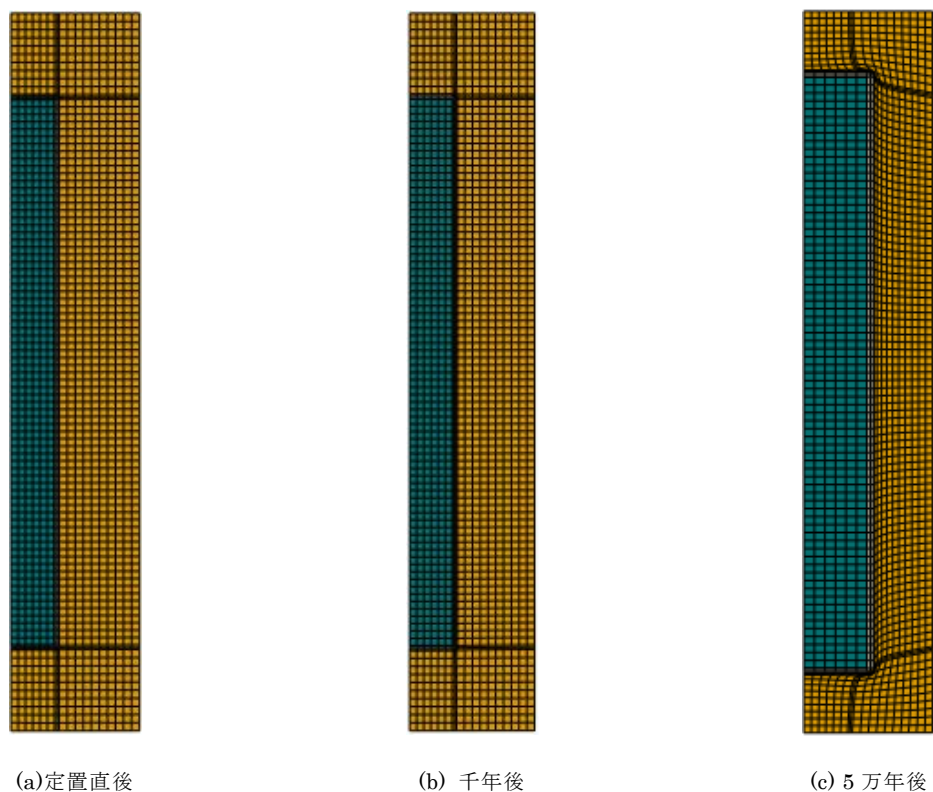


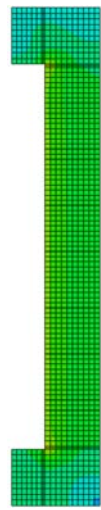
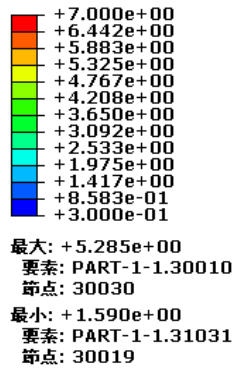
図 3.2.3-5 変形図（ケース i（標準））（変形量の表示倍率：1 倍）

表 3.2.3-14 緩衝材厚さの経時変化（ケース i（標準））

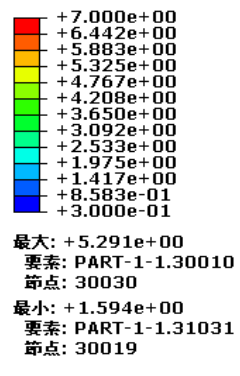
定置方式	計測位置	定置直後	1 千年後	5 万年後
縦置き	処分容器 胴部中央	700 mm	695 mm (-0.7 %)	514 mm (-26.6 %)
	処分容器 下部		694 mm (-0.9 %)	510 mm (-27.1 %)

緩衝材の応力緩衝性については、支保工コンクリートのヤング率に 6,000 MPa を用いた場合の緩衝材の最大有効主応力の最大値、および、支保工コンクリートのヤング率に 30,000 MPa を設定した場合の緩衝材の最大有効主応力の最大値について、水圧を考慮した場合の全応力はいずれの場合も 10 MPa 程度であり、処分容器の設計における外圧荷重 25 MPa を十分に下回っており、処分容器は機械的に破壊しないことが確認された。

また、岩盤の応力緩衝性については、支保工コンクリートのヤング率に 6,000 MPa を用いた解析（標準ケース）の場合の破壊限接近度の最大値は 0.31 であり、一方、支保工コンクリートのヤング率に 30,000 MPa を設定した場合（補足ケース）は 0.51 と評価され、破壊限接近度が高まる傾向が見られたものの、いずれの場合も破壊状態となる 1.0 を十分下回る結果となったことから支保工コンクリートのヤング率が応力緩衝性の評価に与える影響は大きくないと推察された。



(a) 標準

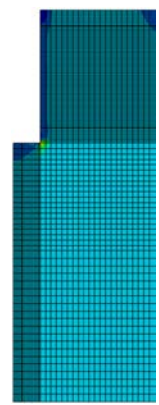
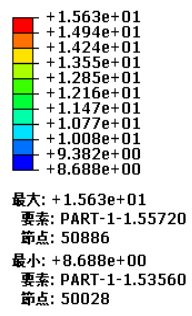


(b) 補足

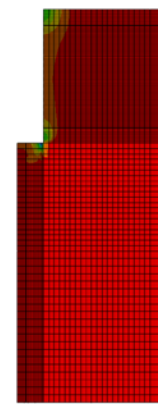
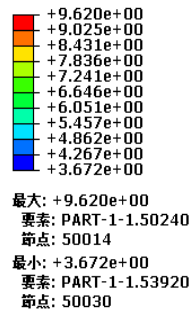
支保工のヤング率 6,000 MPa の場合

支保工のヤング率 30,000 MPa の場合

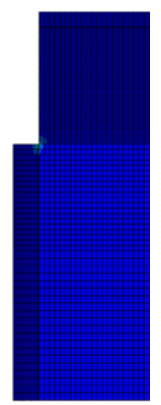
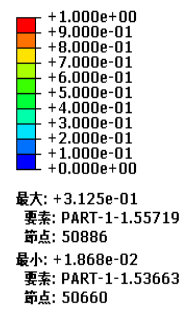
図 3.2.3-6 緩衝材の最大有効主応力分布 (ケース i (標準)、5 万年後、単位: MPa)



(a) 最大有効主応力 [MPa]

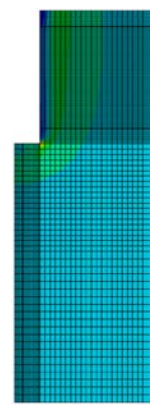
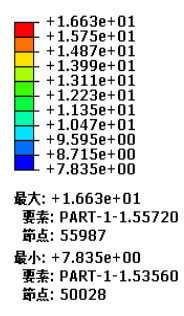


(b) 最小有効主応力 [MPa]

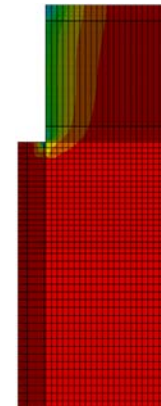
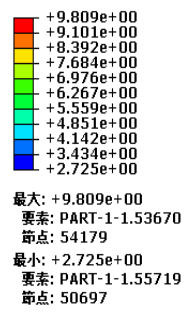


(c) 破壊限接近度 [-]

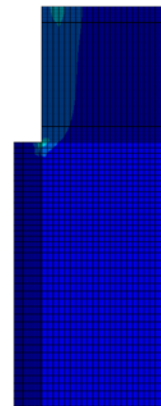
(標準) 支保工のヤング率=6,000 MPa の場合



(d) 最大有効主応力 [MPa]



(e) 最小有効主応力 [MPa]



(f) 破壊限接近度 [-]

(補足) 支保工のヤング率=30,000 MPa の場合

図 3.2.3-7 岩盤の最大・最小主応力分布、破壊限接近度 (ケース i (標準)、6 万年後)

6) ケース ii : 人工バリアを PEM として軟岩環境に定置する場合の緩衝材の設計

平成 28 年度において検討した、人工バリアを PEM とした場合に対応する解析モデルを用いて、これまで未検討である軟岩系岩盤に PEM を定置した場合を対象に設計解析を行った。

本項目で検討対象とした人工バリアは、直接処分第 1 次取りまとめのレファレンス仕様を参考として、PWR 使用済燃料集合体 2 体を封入した処分容器の周囲を緩衝材が覆い、さらにその周囲を PEM 容器が覆ったものであり、定置方式は豎置きとした。

以降において以下の構成で報告する。

- ① ケース ii の解析モデル
- ② ケース ii の解析条件
- ③ ケース ii の物性値
- ④ ケース ii の解析結果

① ケース ii の解析モデル

平成 28 年度の検討をもとに設定した、PEM 容器を軟岩中に豎置き定置した場合に対応する解析モデルを図 3.2.3-8 に示す。

解析対象は、処分容器、緩衝材、PEM 容器および岩盤に加え、軟岩条件下で考慮が必要となる支保工を対象とした。評価開始時点は PEM 容器が完全に腐食した時点とした。PEM 容器を豎置き定置した場合は、処分容器を中心として緩衝材、PEM 容器、支保工および岩盤が同心円状に位置することとなるため、軸対称問題として取り扱うことができる。

人工バリアの定置後、腐食膨張により PEM 容器の内外面が共に変位すると考えられるが、本解析では、PEM 容器の外表面位置は腐食前の位置に固定し、腐食膨張による PEM 容器の体積増加分と等価となるよう PEM 容器内面のみを 58 mm 変位させ、腐食膨張後（評価開始時点）の PEM 容器の厚さを 86 mm とした。緩衝材の厚さについて、処分孔に定置した時点では厚さ 0.7 m であるが、PEM 容器内面の変位量に相当する圧密変形が緩衝材に生ずるものとし、評価開始時点の厚さを 0.642 m とした。支保工は処分孔の側面に設置されるものとし、厚さを 100 mm とした。岩盤部分は、直接処分第 1 次取りまとめの緩衝材の設計に関する解析モデルを参考として、外側境界に掘削などの影響が及ばないと考えられる処分孔の直径の 5 倍程度までの範囲として、処分孔から約 12 m の範囲までをモデル化した。また、深さ方向についても、緩衝材の下端から約 12 m の範囲までをモデル化した。

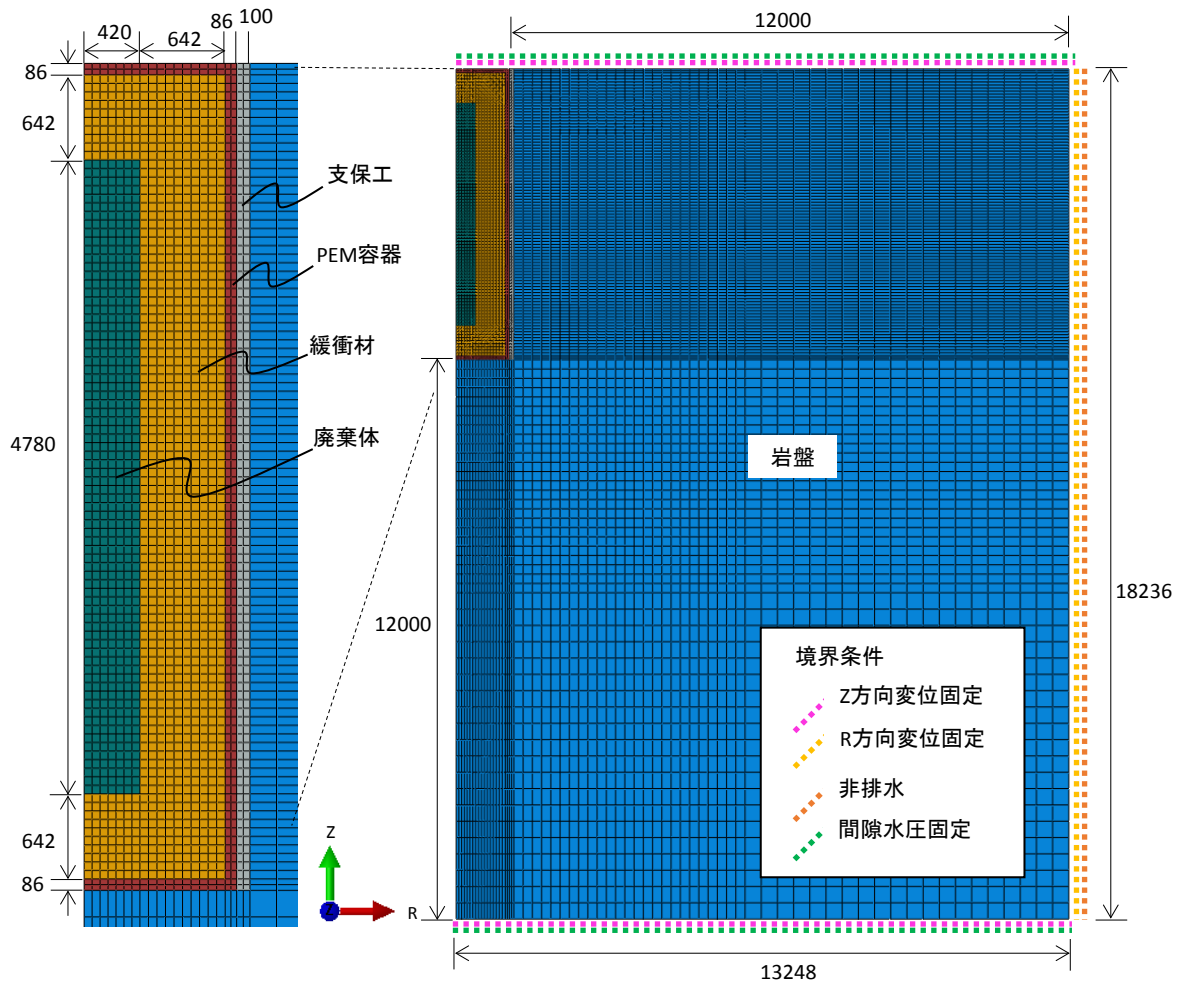


図 3.2.3-8 解析モデル図(ケース ii) (単位 : mm)

② ケース ii の解析条件

モデルの上下面および側面の節点には図 3.2.3-8 中に示した変位固定の境界条件を設定した。また、間隙水圧については、モデル上面および下面に間隙水圧固定の境界条件を設定し、側面は処分孔が平行して掘削されている処分場の一部分を切り出してモデル化していることから、空間の対称性を考慮し非排水条件とした。なお、境界条件は初期条件が設定された後に有効となり、例えば、初期応力場が設定された後に変位固定条件が有効となる。

岩盤については、岩盤の掘削から PEM の定置の流れを考慮して、深度に応じた初期地圧および間隙水圧を解析モデルの要素ごとに設定した上で、処分孔の掘削解析により掘削後の岩盤の応力状態を求め、それを解析の評価開始時点の岩盤の応力として設定した。モデル上下面の初期地圧と間隙水圧を表 3.2.3-15 に示す。なお、設定方法は、ケース i に示した方法(前述の 5)参照)と同様である。

解析の評価開始時点における緩衝材の応力については、レファレンス仕様の緩衝材の載荷応力-間隙比関係にもとづき、評価開始時点の間隙比に相当する応力を設定した(表 3.2.3-9)。

表 3.2.3-15 ケース ii の初期条件

軟岩系 岩盤	モデル 上面	深度[GL -m]	500.00
		初期地圧[MPa]	9.3452
		間隙水圧[MPa]	4.9033
	モデル 下面	深度[GL -m]	518.24
		初期地圧[MPa]	9.6860
		間隙水圧[MPa]	5.0822

外力条件については、処分容器の腐食膨張による緩衝材への荷重を設定した。本設計解析では、処分容器の炭素鋼部分に加え、使用済燃料部分も含めて腐食膨張するものと仮定し、予め計算した膨張量に応じた等価な体積ひずみおよび等価剛性を、炭素鋼、使用済燃料の区別なく全断面に均一に与えた。計算方法は平成 28 年度（原子力機構，2017）と同様であり、本解析の評価開始時点後の経過年数に対する処分容器半径の増加量（腐食膨張量）および処分容器の等価ヤング率を図 3.2.3-9 に示す。なお、処分容器の長手方向の腐食膨張量については、径方向の腐食膨張量に等しくなるように設定した。

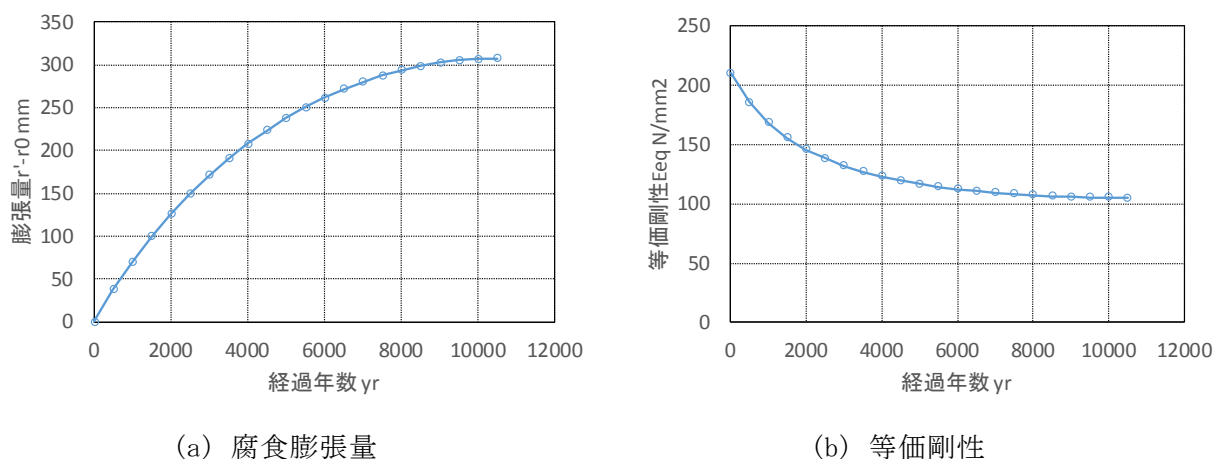


図 3.2.3-9 経過年数に対する腐食膨張量および等価剛性（炭素鋼処分容器）

③ ケース ii の物性値

炭素鋼処分容器については、評価開始時点では健全な状態であるものとし、表 3.2.3-4 に示す物性値を用いた。支保工の物性値については表 3.2.3-6 の値を用いた。

緩衝材については、評価開始時点においてはレファレンス仕様の緩衝材が PEM 容器の腐食膨張によって圧密した状態とし、レファレンス仕様にもとづき物性値を設定した（表 3.2.3-9）。乾燥密度および間隙比については、処分孔に定置した時点の乾燥密度および評価開始時点の緩衝材の体積を基に、PEM 容器の腐食膨張による体積増分が全て緩衝材の体積減少に寄与するものと仮定して設定した。圧縮指数、膨潤指数、ポアソン比、限界状態応力比、内部摩擦角、先行圧密降伏応力については、緩衝材の圧密にともなって変化するものではないため、処分孔に定置した時点の値と同じとした。評価開始時点で緩衝材に作用する応力に

については、レファレンス仕様の物性値にもとづき設定した正規圧密線を設定し、評価開始時点の間隙比 (0.454) に相当する載荷応力を 4.5 MPa に設定した (原子力機構, 2017)。

評価開始時点における PEM 容器は完全に腐食した状態と仮定するため、PEM 容器の機械的性質 (ヤング率、ポアソン比) は処分容器 (炭素鋼) の腐食生成物の設定 (表 3.2.3-4) と同じとし、それ以外 (密度、間隙比、透水性) は文献にもとづき設定した。物性値を表 3.2.3-11 に示す。間隙比については、高谷ら (2013) に示された鉄 (Fe) とマグネタイト (Fe_3O_4) の体積比から求められる体積膨張率および一般環境で生成するマグネタイトの腐食膨張率にもとづき、これらの膨張率の差を間隙と仮定して算出した (表 3.2.3-11)。密度は、マグネタイト密度と間隙比から算出した (表 3.2.3-11)。腐食した PEM 容器 (炭素鋼) の透水係数については、多孔質体を仮定し、エネルギー総研 (2002) において取得されたマグネタイト加圧成型試料 (成形圧力 10 MPa) の透水係数を使用した (表 3.2.3-11)。

④ ケース ii の解析結果

評価開始時点後の変位図を図 3.2.3-10 に示す。なお、出力時点としては、直接処分第 1 次取りまとめにおいて、処分容器の容器寿命とされている 1,000 年経過時点での結果を示した。評価開始時点後の緩衝材厚さについては、処分容器下部および処分容器胴部中央の位置において評価したものを表 3.2.3-16 に示す。

これらの図表から、処分容器の腐食膨張にともない緩衝材は圧密変形し、緩衝材の厚さは、処分孔への定置から 1,000 年経過までに、初期厚さから約 18 % 減少したものの、人工バリアの寸法、形状は概ね維持されることが確認された。

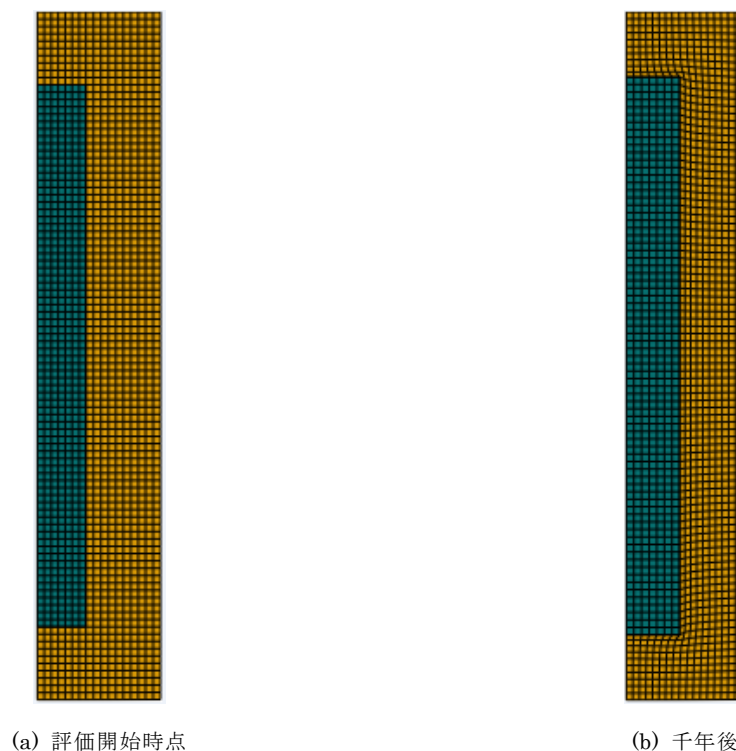


図 3.2.3-10 変形図 (ケース ii)

表 3.2.3-16 緩衝材厚さの経時変化 (ケース ii)

計測位置	定置直後	評価開始時点	千年後(※)
処分容器 胴部中央	700 mm	642 mm (-8.3 %)	572 mm (-18.3 %)
処分容器 下部			574 mm (-18.0 %)

※評価開始時点からの経過時間

緩衝材の応力緩衝性について、処分容器に対する応力緩衝性を、緩衝材の最大有効主応力をもとに評価した。処分容器の腐食代厚さは容器寿命をもとに設定されており、容器寿命の期間、処分容器が機械的に破壊しないように緩衝材が応力緩衝機能を発揮することが必要であることから、処分容器の腐食代が完全に腐食すると想定した1千年後の最大有効主応力を評価した(図 3.2.3-11)。また、岩盤に対する応力緩衝性については、処分容器の全量が腐食する1万年経過後の岩盤の最大有効主応力および最小有効主応力にもとづく破壊限接近度(「3)設計に用いる解析コードおよび力学モデル」参照)により評価した(図 3.2.3-12)。

緩衝材の最大有効主応力の最大値に水圧を考慮した全応力は18 MPa程度であり、この値は処分容器の設計における外圧荷重25 MPaを十分に下回っていることから、処分容器は機械的に破壊しないことが確認された。また、岩盤の破壊限接近度の最大値は0.44であり、破壊が発生する1.0を十分に下回っており岩盤の破壊は発生しないことが確認された。

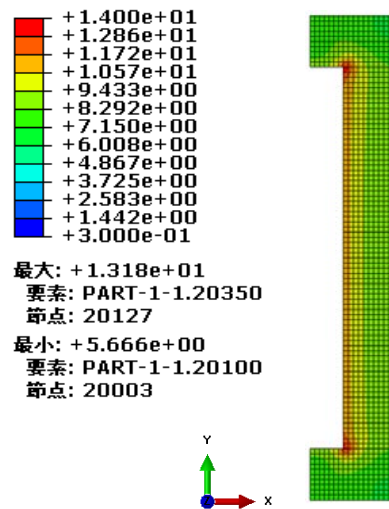
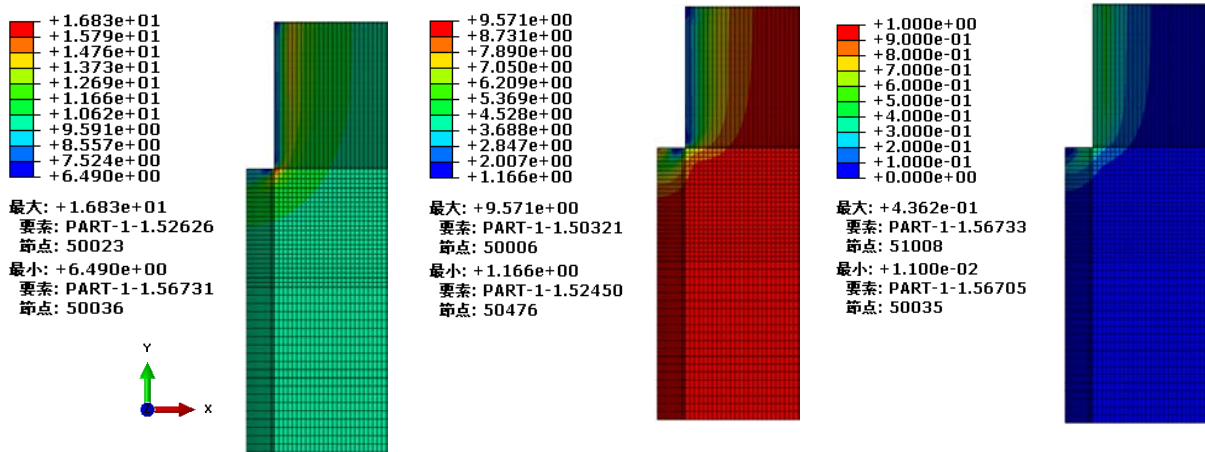


図 3.2.3-11 緩衝材の最大有効主応力分布 (ケース ii、1 千年後、単位 : MPa)



(a) 最大有効主応力分布 (b) 最小有効主応力分布 (c) 破壊限接近度

図 3.2.3-12 岩盤の最大・最小主応力分布、破壊限接近度 (ケース ii、1 万年後)

7) ケース iii : 炭素鋼処分容器をブロック・竖置き方式で定置する場合の緩衝材の設計

平成 27 年度においては、炭素鋼処分容器を竖置き方式で定置した場合について、レファレンス仕様の緩衝材が設計要件を満足するか確認するための設計解析を行い、局所的に緩衝材が限界状態に近い状態になることが確認された。そこで平成 28 年度においては、処分容器の支持性能の向上の検討を目的として、レファレンス仕様より高い乾燥密度の緩衝材（乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 30 wt%）が設計要件を満足するかの確認を行った。平成 29 年度も平成 28 年度に引き続き、処分容器の支持性能の向上の検討を目的として、乾燥密度およびケイ砂混合率がともにレファレンス仕様より高い緩衝材（乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 50 wt%）を対象として設計解析を行った。

以降において以下の構成で報告する。

- ① ケース iii の解析モデルおよび解析条件
- ② ケース iii の物性値
- ③ ケース iii の解析結果

① ケース iii の解析モデルおよび解析条件

解析対象は、炭素鋼処分容器、緩衝材、支保工、および岩盤である。解析モデルの寸法、初期条件、境界条件についてはケース i の場合と基本的に同じであり、ケース i との違いは、緩衝材以外では、処分容器の腐食代が本ケースでは炭素鋼となること、および、処分容器のメッシュ分割が若干異なるのみであることから、これらの諸条件の詳細な説明は割愛する。

外力条件については、使用済燃料部分も含めて腐食膨張するものと仮定し、予め計算した膨張量に応じた等価な体積ひずみおよび等価剛性を炭素鋼、使用済燃料の区別なく全断面に均一に与えた。計算方法は平成 28 年度の炭素鋼処分容器を対象とした場合（原子力機構，2017）と同様とした。

経過年数に対する処分容器半径の増加量（腐食膨張量）および処分容器の等価ヤング率はケース ii の図 3.2.3-9 と同じである。

② ケース iii の物性値

炭素鋼処分容器、支保工、軟岩系岩盤の物性値は、過年度の検討で用いたものと同じである（表 3.2.3-5、表 3.2.3-6、表 3.2.3-7）。緩衝材の力学特性（圧縮指数、膨潤指数、ポアソン比、限界状態応力比、先行圧密降伏応力）については、標準圧密試験の間隙比-載荷応力関係（ e - $\log P$ 曲線図）、三軸圧縮試験の有効応力経路図および軸ひずみ-軸差応力関係の 3 つの試験結果（後述の(3)参照）を同時に再現するように設定した。

設定された緩衝材の力学特性を用いてこれらの試験の再現計算を行った結果を図 3.2.3-13～図 3.2.3-15 に示す。また、緩衝材の物性値を表 3.2.3-10 に示す。

ここで、有効応力経路図および軸ひずみ-軸差応力関係における再現計算が試験と乖離する箇所が見られるが、せん断よりも圧密が主たる事象となる本設計解析に大きな影響を与えるものではないと考えられる。

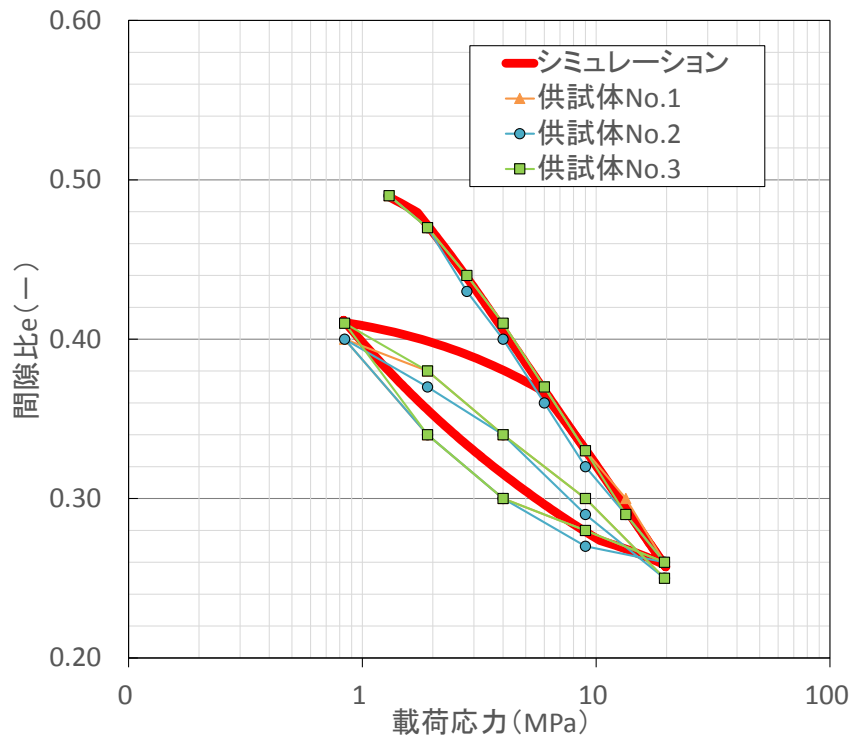


図 3.2.3-13 e-logP 曲線の再現 (乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 50 wt%)

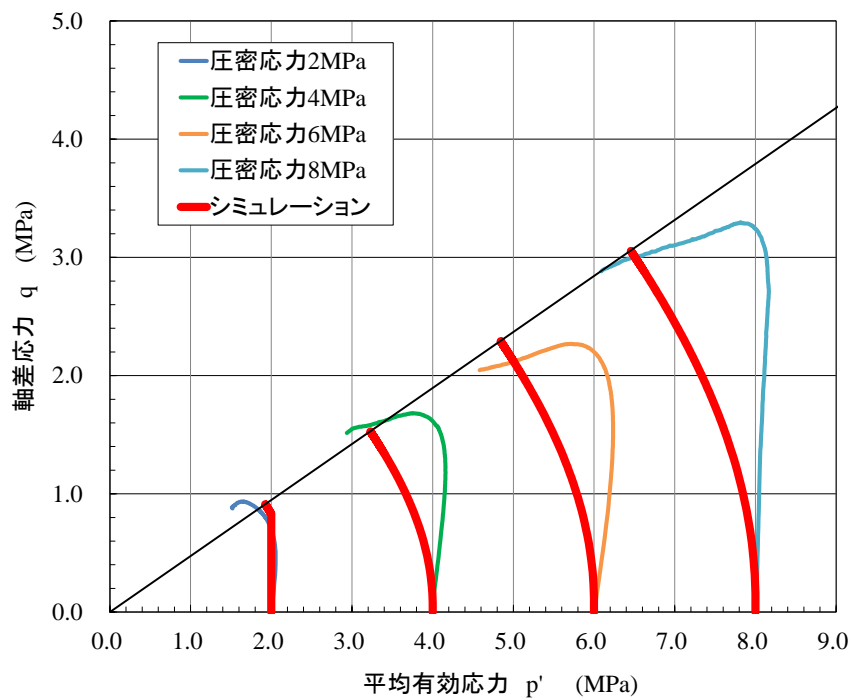


図 3.2.3-14 有効応力経路の再現 (乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 50 wt%)

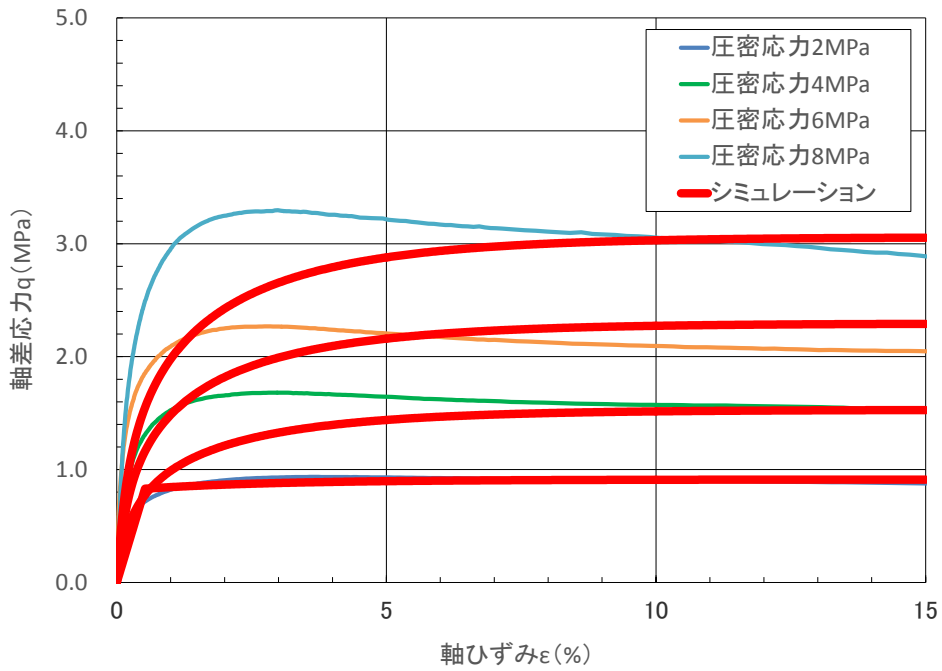


図 3.2.3-15 軸ひずみ－軸差応力関係の再現（乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 50 wt%）

③ ケース iii の解析結果

処分容器の定置後、3 千年経過時点、7 千年経過時点の変位図を図 3.2.3-16 に示す。また、処分容器下部および処分容器胴部中央で計測した緩衝材厚さを表 3.2.3-17 に示す。

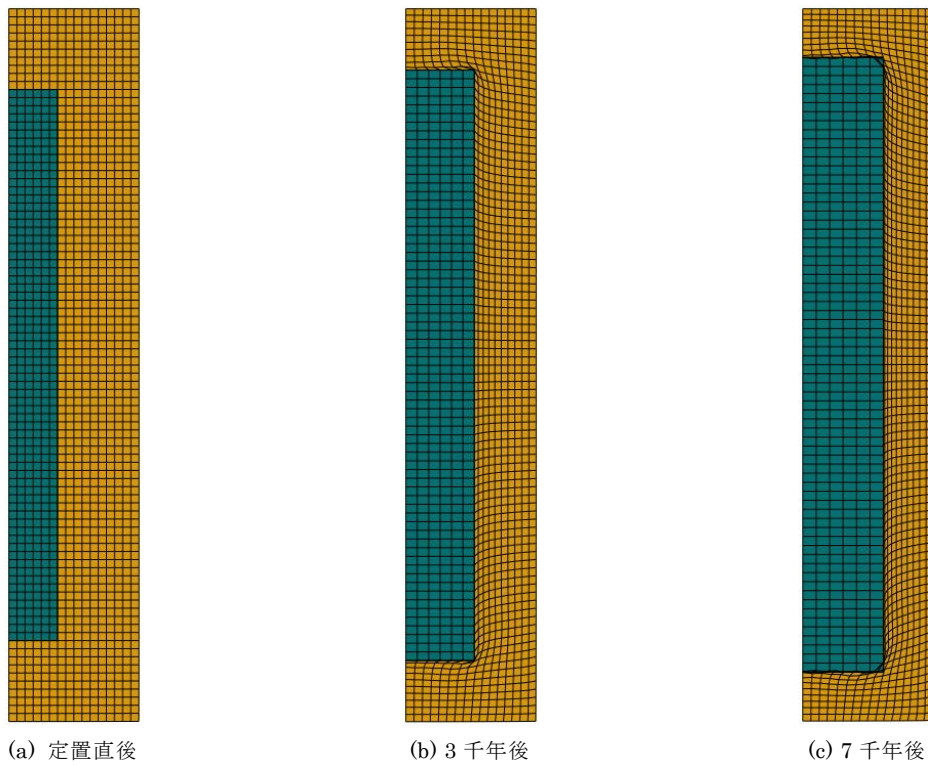


図 3.2.3-16 変形図（ケース iii）（変形量の表示倍率：1 倍）

表 3.2.3-17 には、レファレンス仕様（乾燥密度 1.6 Mg m⁻³、ケイ砂混合率 30 wt%）の緩衝材の場合の結果、および乾燥密度 1.8 Mg m⁻³、ケイ砂混合率 30 wt%の場合の結果を併せて示した。なお、レファレンス仕様（乾燥密度 1.6 Mg m⁻³、ケイ砂混合率 30 wt%）の緩衝材の場合の結果については、平成 27 年度（原子力機構，2016a）において、処分容器の腐食膨張による処分容器の長手方向の変位量が径方向の変位量と等しくなるように、適切に処分容器の長手方向の線膨張係数が設定されていなかったことから、長手方向の線膨張係数を適切に設定して再計算した結果を表 3.2.3-17 において示した。

緩衝材厚さの変化（図 3.2.3-16，表 3.2.3-17）にもとづき、緩衝材仕様を乾燥密度 1.8 Mg m⁻³、ケイ砂混合率 50 wt%とした場合において、人工バリアの寸法、形状は概ね維持されることが確認された。この仕様における緩衝材厚さの変化と、乾燥密度 1.8 Mg m⁻³、ケイ砂混合率 30 wt%の仕様の場合とを比較すると、前者のほうが、より厚く維持される傾向があることから、ケイ砂混合率を上げることにより処分容器の支持性能が改善される結果となったものの、レファレンス仕様（乾燥密度 1.6 Mg m⁻³、ケイ砂混合率 30 wt%）の場合との比較からは、処分容器の支持性能の改善はそれほど大きくないことが分かった。

表 3.2.3-17 緩衝材の厚さ（ケース iii）

緩衝材仕様	計測位置	定置直後	3 千年後	7 千年後
乾燥密度 1.8 Mg m ⁻³ ケイ砂混合率 50 wt%	処分容器 胴部中央	700 mm	532 mm (-24.0 %)	428 mm (-38.8 %)
	処分容器 底面下部		530 mm (-24.3 %)	425 mm (-39.3 %)
乾燥密度 1.8 Mg m ⁻³ ケイ砂混合率 30 wt% ※1	処分容器 胴部中央		530 mm (-24.3 %)	422 mm (-39.7 %)
	処分容器 底面下部		529 mm (-24.4 %)	422 mm (-39.7 %)
乾燥密度 1.6 Mg m ⁻³ ケイ砂混合率 30 wt% ※2	処分容器 胴部中央		530 mm (-24.3 %)	421 mm (-39.9 %)
	処分容器 底面下部		525 mm (-25.0 %)	418 mm (-40.3 %)

※1 平成 28 年度実施（原子力機構，2017）

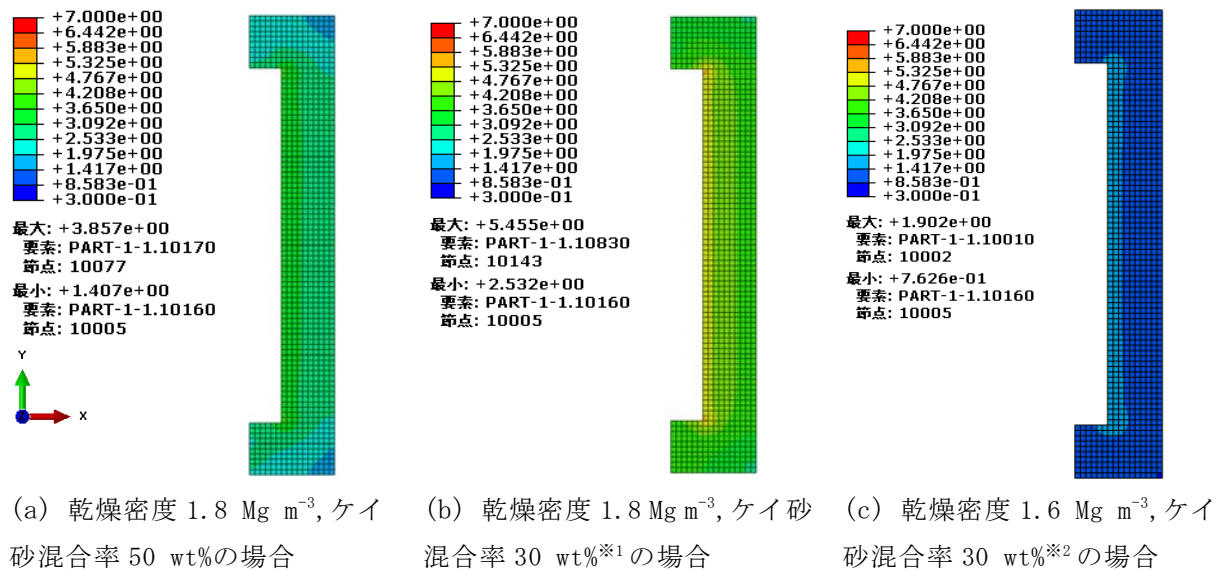
※2 平成 28 年度（原子力機構，2016a）の条件で、軸方向の線膨張係数を修正して再計算した結果

処分容器に対する応力緩衝性を、緩衝材の最大有効主応力をもとに評価した。処分容器の腐食代厚さは容器寿命をもとに設定されており、容器寿命の期間、処分容器が機械的に破壊しないように緩衝材が応力緩衝機能を発揮することが必要であることから、炭素鋼処分容器の腐食代が完全に腐食すると想定した 1 千年後での最大有効主応力を評価した（図 3.2.3-17）。また、岩盤に対する応力緩衝性については、炭素鋼処分容器の全量が腐食すると想定した 1 万年後の岩盤の最大有効主応力および最小有効主応力にもとづく破壊限接近度（「3）設計に用いる解析コードおよび力学モデル」参照）により評価した（図 3.2.3-18）。

緩衝材の最大有効主応力の最大値（3.9 MPa）に水圧を考慮した全応力は、処分容器の設計における外圧荷重 25 MPa を十分に下回っており、レファレンス仕様（乾燥密度 1.6 Mg m⁻³、

ケイ砂 30 wt%配合) の場合より若干の追加的な荷重が処分容器に作用するものの、処分容器は機械的に破壊しないことが分かった。また、乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 30 wt%の緩衝材の場合との比較から、乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} の場合、ケイ砂混合率を 30 wt%から 50 wt%に上昇させることにより、処分容器に作用する圧力を若干緩和できることが確認された。

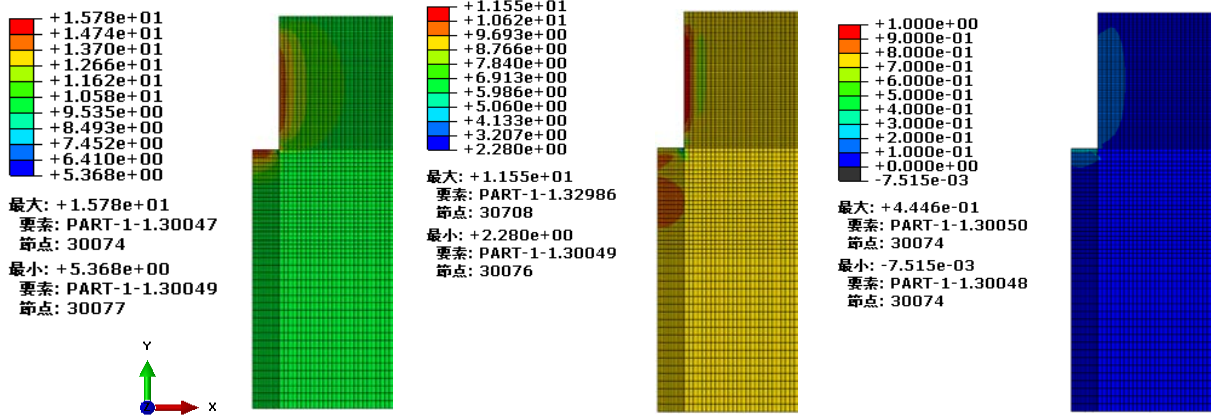
また、岩盤の破壊限接近度について、1 万年後の最大値は 0.44 であった。この値は破壊が発生する 1.0 を下回っており岩盤の破壊は発生しないことが確認されたものの、レファレンス仕様 (乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} 、ケイ砂 30 wt%配合) の場合よりは高くなることが確認された。ただし、乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 30 wt%の緩衝材の場合の岩盤の破壊限接近度は、7 千年後において 0.54 であったことから、完全腐食に達する 1 万年後には更に破壊状態に近づくと推察され、ケイ砂混合率を大きくすることにより、岩盤に対する応力緩衝機能が向上することが確認された。



※1 平成 28 年度の実施対象

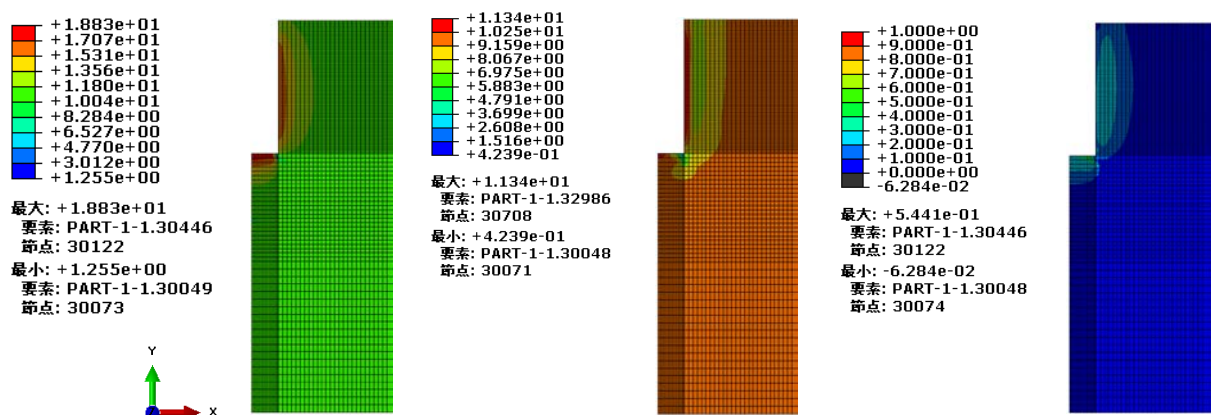
※2 平成 27 年度の実施 (原子力機構 (2016a)) では軸方向の線膨張係数が径方向の 1/2 として設定された解析であったため、上記では再計算に基づく結果を示した。

図 3.2.3-17 緩衝材の最大有効主応力分布 [MPa] (ケース iii, 1 千年後)



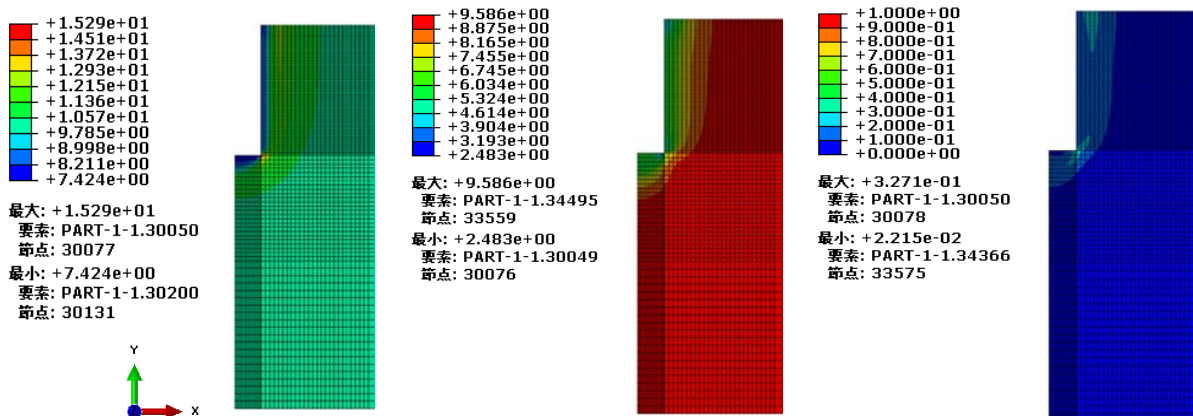
(a) 最大有効主応力 (b) 最小有効主応力 (c) 破壊限接近度

乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} , ケイ砂混合率 50 wt% の場合、1 万年後



(d) 最大有効主応力 [MPa] (e) 最小有効主応力 [MPa] (f) 破壊限接近度 [-]

乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} , ケイ砂混合率 30 wt%^{※1} の場合、7 千年後



(g) 最大有効主応力 [MPa] (h) 最小有効主応力 [MPa] (i) 破壊限接近度 [-]

乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} , ケイ砂混合率 30 wt%^{※2} の場合、1 万年後

※1 平成 28 年度実施

※2 平成 27 年度実施の解析 (原子力機構, 2016a) ではレファレンス仕様 (乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} 、ケイ砂 30 wt% 配合) の緩衝材を検討したが、軸方向の線膨張係数が径方向の 1/2 として設定された解析であったため、上記では再計算した緩衝材厚さを示した。

図 3.2.3-18 岩盤の最大・最小有効主応力分布、破壊限接近度分布

8) 平成 26 年度から平成 29 年度の解析結果の整理

平成 26 年度から平成 29 年度までに実施した解析（表 3.2.3-18）に基づき、緩衝材の応力緩衝性を、処分容器および岩盤の破壊に対する影響緩和の観点から整理した。

処分容器の腐食代厚さは容器寿命をもとに設定されており、容器寿命の期間、処分容器が機械的に破壊しないように緩衝材が応力緩衝機能を発揮することが必要であることから、解析結果をもとに、処分容器の腐食代がすべて腐食する時点（炭素鋼容器の場合は 1,000 年、複合容器の場合は 5 万年を想定）における緩衝材の最大主応力を評価した。緩衝材の最大有効主応力の最大値、および、これにもとづく最大主応力の最大値を表 3.2.3-19 に示す。

また、岩盤に対する処分容器の腐食膨張の作用が最大となるのは、使用済燃料を含む処分容器の全量が腐食膨張した時点であると考えられることから、処分容器の全量が腐食する時点での岩盤の最大有効主応力および最小有効主応力にもとづく破壊限接近度（「3)設計に用いる解析コードおよび力学モデル」参照）を評価した。岩盤の破壊限接近度の最大値を表 3.2.3-19 に示す。

なお、表 3.2.3-18 の注釈に示すとおり、No4. および No.5 については、平成 26 年度において、銅の腐食膨張パラメータとして文献にもとづく暫定値を使用した解析を実施し、平成 28 年度において、試験により取得した実測値にもとづく設定値を使用した解析をやり直しており、表 3.2.3-19 においては平成 28 年度の結果のみを示した。

個々の解析ケースの、緩衝材の最大有効主応力分布図および岩盤の最大有効主応力、最小有効主応力、破壊限接近度分布図については付録 2 に示す。

表 3.2.3-18 解析ケース（平成 26 年度～平成 29 年度）

No.	緩衝材 ^{※1}	人工バリア 施工方式	処分容器	廃棄体 定置方式	岩盤	実施年度
1	1.6 30	ブロック 方式	炭素鋼 処分容器	横置き	軟岩	平成 26 年度
2				縦置き	軟岩	平成 27 年度
3				縦置き	硬岩	
4			複合処 分容器	横置き	軟岩	平成 26 年度 ^{※2}
5				横置き	硬岩	平成 28 年度 ^{※2}
6				縦置き	軟岩	平成 29 年度
7		PEM 方式	炭素鋼 処分容器	縦置き	軟岩	平成 29 年度
8				縦置き	硬岩	平成 28 年度
9	1.8	ブロック 方式	炭素鋼 処分容器	縦置き	軟岩	平成 28 年度
10	30			縦置き	硬岩	
11	1.8 50	ブロック 方式	炭素鋼 処分容器	縦置き	軟岩	平成 29 年度

※1 上段:乾燥密度[Mg m⁻³]、下段:ケイ砂混合率[wt%]

※2 平成 26 年度は、銅の腐食膨張パラメータについて平成 26 年度では文献に基づく暫定値を使用。平成 28 年度は、実測値にもとづき設定した値を使用。

表 3.2.3-19 緩衝材の応力緩衝性の評価結果

No.	緩衝材		経過年数	岩盤	
	最大 有効主応力 の最大値[MPa]	最大主応力 (全応力) の最大値[MPa]		破壊限 接近度 の最大値 [-]	経過年数
1	1.9	6.8	1 千年	0.24	1 万年
2	1.9 ^(※1)	6.8 ^(※1)		0.33 ^(※1)	
3	1.9 ^(※1)	11.7 ^(※1)		0.46 ^(※1)	
4	5.1	10.0	5 万年	0.11	6 万年
5	4.6	14.4		0.18	
6	5.3	10.2		0.31	
7	13.2	18.1	1 千年	0.44	1 万年
8	13.4	23.2		0.60	1 千年
9	5.5	10.4	1 千年	0.54	7 千年
10	5.8	15.6		0.12	1 万年
11	3.9	8.8		1 千年	0.44

※1 平成 27 年度（原子力機構，2016a）の条件で、軸方向の線膨張係数を修正して再計算した結果（前述の 7）③参照）。

上記の結果をもとに、レファレンス仕様の緩衝材の応力緩衝性、および、高乾燥密度、高ケイ砂混合率の緩衝材の適用性について、それぞれ以下①および②にとりまとめた。さらに③として、合理化の可能性についてまとめた。

① レファレンス仕様の緩衝材の応力緩衝性

緩衝材の最大主応力の最大値について、ブロック方式、炭素鋼処分容器の場合、および、ブロック方式、複合処分容器の場合ともに、処分容器の設計で使用された外圧荷重 25 MPa より十分小さいことから処分容器は機械的に破壊しないと評価された。ただし、PEM 方式、炭素鋼処分容器の場合は 25 MPa に近い値となったことから、ブロック方式の場合よりも緩衝材の応力が高くなる傾向が確認された。

一方、岩盤の破壊限接近度の最大値について、ブロック方式、炭素鋼処分容器の場合は 0.46、ブロック方式、複合処分容器の場合は 0.31 と評価され、いずれの場合も 1 より小さいことから岩盤の破壊には至らないことが確認された。PEM 方式、炭素鋼処分容器の場合は、処分容器の腐食代が全て腐食膨張すると想定した時点（1 千年経過後）において既に 0.60 と高く評価され、処分容器が全て腐食した場合には岩盤が破壊に至る可能性もあると推察された。

以上から、人工バリアを PEM とした場合には、ブロック方式の場合よりも、処分容器および岩盤に対する緩衝材の応力緩衝機能が低下する傾向が確認されたが、これは、処分容器の腐食膨張および岩盤クリープに加え、PEM 容器の腐食膨張も緩衝材の圧密の進展に寄与するためと考えられる。

しかしながら、本検討で設定した PEM の場合の解析モデルにおいては、PEM 容器を構成する炭素鋼板には全く隙間が無いことを仮定しており、先行事例として、例えば SKB（2012）で検討されている、穴があいた金属容器（perforated metal shell）により緩衝材を覆う人工バリア概念を参考にすれば、PEM 容器の腐食膨張量は、本項目の検討における想定よりも少なくなると考えられる。したがって、PEM の場合のさらなる設計検討については、PEM 容器の適用や仕様の見通しがより明確になった段階で実施することが合理的と考えている。

なお、本項目の PEM の場合の検討は縦置き条件とした。縦置きの場合は横置きの場合よりも処分容器の底面に作用する圧力は高くなることから、PEM を横置きとした場合は、縦置きの場合よりも処分容器および岩盤に作用する圧力は緩和されると考えられるものの、ブロック方式における縦置きと横置きの結果の比較（表 3.2.3-19 の No.1 と No.2、No6 と No.4 と No.6）を参考として、縦置き、横置きの違いの影響は大きくないと推察される。

② 高乾燥密度、高ケイ砂混合率の緩衝材の応力緩衝性

緩衝材の最大主応力の最大値について、緩衝材仕様として乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 30 wt%、岩盤条件として軟岩、硬岩の両方の場合ともに、レファレンス仕様の場合よりも 4 MPa 程度高くなることが示されたものの、処分容器の設計で使用された外圧荷重 25 MPa より小さいことから処分容器は機械的に破壊しないと評価された。岩盤の破壊限接近度の最大値については、硬岩条件の場合に 0.12 と比較的強く評価されたものの、軟岩条件の 7 千年経過後の値が 0.54 と評価され、この値はレファレンス仕様の場合に評価された 1 万年後の最大値よりも大きいことから、岩盤に対する応力緩衝機能が低下する可能性がある。

また、緩衝材仕様として乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 50 wt%、軟岩条件とした場合について、緩衝材の最大主応力の最大値は 8.8 MPa と評価され、これはレファレンス仕様の場合より若干大きいものの、処分容器の設計で使用された外圧荷重 25 MPa より十分小さいことから処分容器は機械的に破壊しない。岩盤についても、破壊限接近度が 0.44 と評価されたことから破壊に至らないことが分かった。

③ 合理化の可能性

緩衝材の設計の合理化の可能性として、緩衝材を用いてレファレンス仕様の緩衝材、人工バリアの施工方式としてブロック方式を条件とした場合（表 3.2.3-19 の No.1～No.6）においては、処分容器に対する応力緩衝性および岩盤に対する応力緩衝性ともに、破壊に対する裕度が十分見込まれることから、緩衝材の厚さを、より薄く設定することなどにより合理化が実現できる可能性がある。

(3) 緩衝材の力学特性取得試験

1) 概要

力学モデルにおける緩衝材の設計では、関口ー太田モデル (Sekiguchi and Ohta, 1977) や修正 Cam-Clay モデル (Schofield and Wroth, 1968) などの一般的な粘性土質材料の挙動評価に用いられる構成モデルにより、処分容器の自重沈下や腐食膨張などの長期力学挙動評価を行う。本項目では、前項の緩衝材の設計に必要な力学の解析パラメータである膨潤指数 (C_s)、圧縮指数 (C_c) の取得を目的とした圧密試験「2)参照」、および、限界状態パラメータ (M)、内部摩擦角 (ϕ) などの取得を目的とした三軸圧縮試験「3)参照」を実施する。平成 28 年度から 29 年度にかけては、平成 29 年度に実施の緩衝材の設計解析 (前述の(2)のケース iii 参照) に用いるために、ケイ砂混合率を 50 wt%、乾燥密度を 1.8 Mg m^{-3} とした力学特性取得試験を実施した。

2) 圧密試験

緩衝材の設計に使用する解析パラメータの取得を目的として、ケイ砂混合率を 50 wt%、乾燥密度を 1.8 Mg m^{-3} の緩衝材を対象とし、力学特性である膨潤指数 (C_s) および圧縮指数 (C_c) など取得のための圧密試験を実施した。以下に試験内容および試験結果を示す。

① 試験内容

試験内容については、地盤工学会基準 JGS 0411-2009 および高治・鈴木 (1999) に準拠し設定した。

・ 供試体の仕様

試験供試体は、Na 型ベントナイトのクニゲル V1® (クニミネ工業 (製)) とケイ砂 (3 号および 5 号ケイ砂を乾燥重量で等量混合) を以下に示す割合で混合したものを、静的加圧法を用いて所定の乾燥密度になるように圧縮成型し、試験溶液 (蒸留水) で飽和した供試体を同一条件で 3 試料を同時に作製した。供試体の飽和は、膨潤応力測定試験 (平成 28 年度実施) により行った。供試体の仕様の一覧を表 3.2.3-20 に示す。

表 3.2.3-20 膨潤応力測定試験に使用する供試体の仕様

ベントナイト系材料	Na 型クニゲル V1®
混合材料	3 号ケイ砂、5 号ケイ砂 (1 : 1 混合)
ケイ砂混合率 [wt%]	50
乾燥密度 [Mg m^{-3}]	1.8
含水比 [%]	自然含水比 (7~8 %)
供試体寸法 [mm]	直径 60 × 高さ 20
試験温度 [$^{\circ}\text{C}$]	室温 (22 ± 1)
試験溶液	蒸留水

・ 載荷条件

試験過程は計 16 段階とし、各段階の載荷応力は対数軸上で載荷応力の間隔が等しくなるように設定した。各載荷過程における圧密の終了は 3 t 法を用いて判断した。載荷条件の設定の考え方を表 3.2.3-21 に示す。

また、供試体 (No. 1~No. 3) における載荷条件を設定した。初期値は、3 供試体の膨潤応力測定結果にばらつきが小さかったことから、それぞれの測定値の平均値を使用した。設定した載荷条件を表 3.2.3-22 に示す。

表 3.2.3-21 載荷条件の設定の考え方

過程	備考
載荷過程	膨潤応力が一定とみなせる状態になった時点 (飽和) を初期値として、荷重を上限 19.6 MPa まで 8 段階に分けて載荷する。
除荷過程	載荷過程終了後、初期値相当まで荷重を 4 段階に分けて除荷する。
再載荷過程	除荷過程終了後、再び荷重を上限 19.6 MPa まで 4 段階に分けて載荷する。

表3.2.3-22 供試体 (No. 1~No. 3) における載荷条件

【載荷過程】									
載荷段階	初期値	1 段階	2 段階	3 段階	4 段階	5 段階	6 段階	7 段階	8 段階
載荷応力 [MPa]	0.84	1.3	1.9	2.8	4.0	6.0	9.0	13.4	19.6
【除荷過程】									
載荷段階	—	1 段階	2 段階	3 段階	4 段階	/			
載荷応力 [MPa]	—	9.0	4.0	1.9	0.84				
【再載荷過程】									
載荷段階	—	1 段階	2 段階	3 段階	4 段階	/			
載荷応力 [MPa]	—	1.9	4.0	9.0	19.6				

② 試験結果

載荷過程、除荷過程、再載荷過程の各段階における試験時間および各段階試験終了時の供試体の高さを測定した。試験終了後は試料の炉乾燥質量を測定し、下式を用いて各段階の間隙比を算出した。

$$e = \frac{H}{H_s} - 1 \quad H_s = \frac{m_s}{\rho_s A} \dots\dots\dots \text{式 3.2.3-3}$$

ここに、

- e : 間隙比、H : 各段階終了時の供試体の高さ [cm]
- H_s : 供試体の実質高さ [cm]、m_s : 供試体の炉乾燥質量 [g]
- A : 供試体の断面積 [cm²] (=28.27 cm²)
- ρ_s : 混合材料の密度 [g cm⁻³] (=2.6344 g cm⁻³)

圧密の終了までの時間（载荷時間）は約3日～21日間で、平成27年度に実施した、ケイ砂混合率30 wt%の場合における期間とほぼ同程度であった。測定結果を表3. 2. 3-23に示す。また、緩衝材の水理的物性値の透水係数を取得するうえでの基礎データとなる、载荷にともなう緩衝材の沈下量の経時変化を、図3. 2. 3-20に示す。

表3. 2. 3-23 圧密指数および膨潤指数の測定結果

圧密過程	载荷段階	試験時間 t [h]	No. 1			No. 2			No. 3		
			供試体高さ H [cm]	炉乾燥質量 m _s [g]	間隙比 e [-]	供試体高さ H [cm]	炉乾燥質量 m _s [g]	間隙比 e [-]	供試体高さ H [cm]	炉乾燥質量 m _s [g]	間隙比 e [-]
载荷過程	1	72	1.989	101.25	0.49	1.988	101.14	0.49	1.992	101.23	0.49
	2	120	1.961		0.47	1.957		0.47	1.964		0.47
	3	144	1.917		0.44	1.910		0.43	1.919		0.44
	4	144	1.872		0.41	1.864		0.40	1.874		0.41
	5	168	1.822		0.37	1.813		0.36	1.823		0.37
	6	168	1.772		0.33	1.763		0.32	1.772		0.33
	7	168	1.726		0.30	1.716		0.29	1.726		0.29
	8	240	1.684		0.26	1.673		0.26	1.684		0.26
除荷過程	1	120	1.701	101.25	0.28	1.691	101.14	0.27	1.701	101.23	0.28
	2	216	1.736		0.30	1.727		0.30	1.736		0.30
	3	312	1.791		0.34	1.783		0.34	1.792		0.34
	4	504	1.870		0.40	1.865		0.40	1.875		0.41
再载荷過程	1	168	1.836	101.25	0.38	1.829	101.14	0.37	1.838	101.23	0.38
	2	192	1.788		0.34	1.779		0.34	1.789		0.34
	4	120	1.729		0.30	1.719		0.29	1.730		0.30
	4	120	1.671		0.25	1.660		0.25	1.671		0.25

表 3. 2. 3-23 に示した各载荷段階における载荷応力と間隙比から、 e - $\log P$ 関係（間隙比－载荷応力関係）を得た。これを図 3. 2. 3-19 に示す。

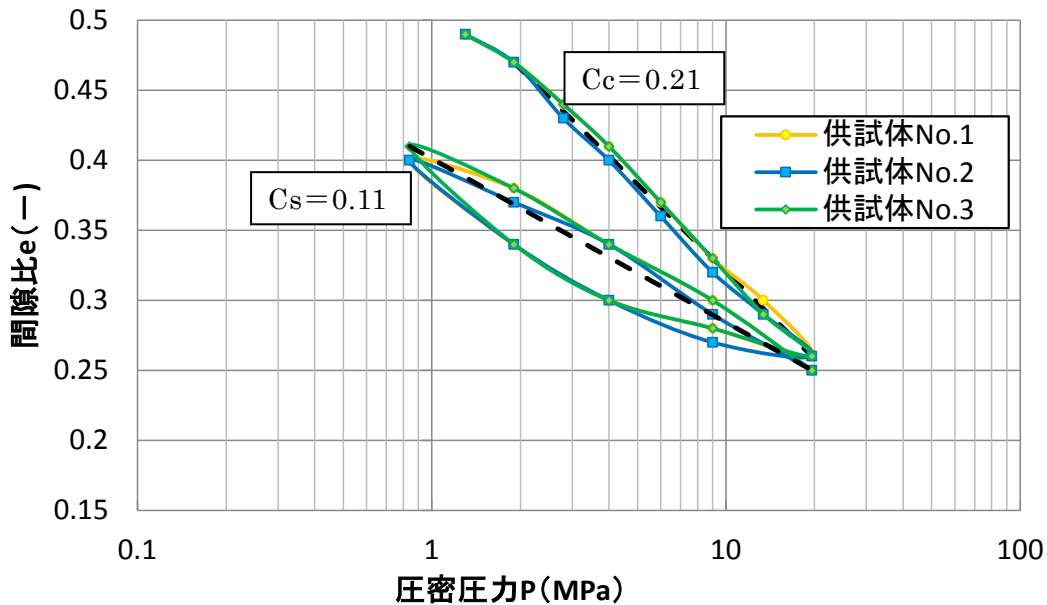


図 3.2.3-19 e-logP 曲線図

No. 1～No. 3 の各供試体に対して、圧縮指数 C_c および膨潤指数 C_s の取得を目的として、2 つの直線をそれぞれ e-logP 曲線図の荷重時および再荷重時の曲線部にフィッティング（図 3.2.3-19 中の点線）し、それをもとに、次式を用いて圧縮指数 C_c および膨潤指数 C_s を算出した。その結果、3 供試体すべてについて、圧縮指数として $C_c=0.21$ 、膨潤指数として $C_s=0.11$ が得られた。

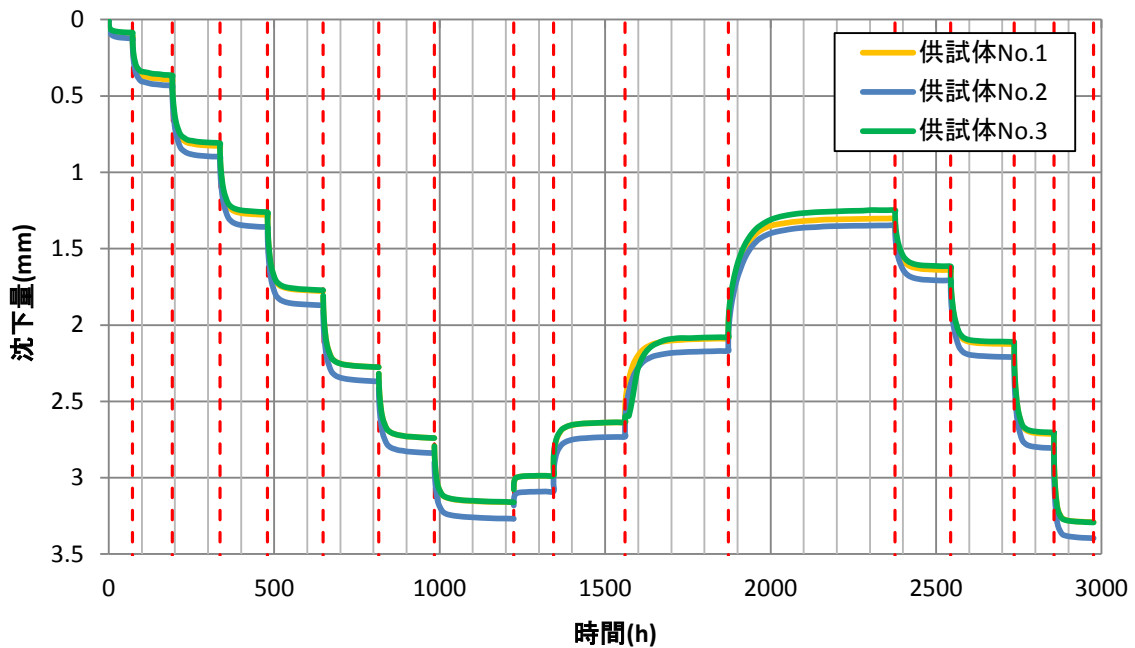
$$C_c = \frac{e_a - e_b}{\log_{10} \left(\frac{P_b}{P_a} \right)} \quad C_s = \frac{e_a - e_b}{\log_{10} \left(\frac{P_b}{P_a} \right)} \dots\dots\dots \text{式3.2.3-4}$$

ここに、

C_c : 圧縮指数、 C_s : 膨潤指数

e_a : 直線部 a 点の間隙比、 e_b : 直線部 b 点の間隙比

P_a : 直線部 a 点の荷重応力 [MPa]、 P_b : 直線部 b 点の荷重応力 [MPa]



赤点線は荷重段階の区切り位置を示す。

図 3.2.3-20 沈下量の経時変化

3) 三軸圧縮試験

乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 50 wt%の緩衝材を対象として、緩衝材の設計解析が必要となる、限界状態パラメータ M 、内部摩擦角 ϕ' を取得した。

平成 27 年度に実施した乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 30 wt%の供試体による三軸圧縮試験では、試験結果として限界状態パラメータ $M=0.38$ が得られたが、乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 30 wt%の供試体で得られている $M=0.63$ (高治・鈴木, 1999) の 6 割程度であり、乾燥密度が高いにも関わらず、せん断破壊しやすい傾向が示された。これは、粒子構造の配向度による影響として、粘性土を大きな荷重で一次的に圧縮すると粒子構造が一定方向に揃い配向度が高い状態となると考えられ、乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} の供試体の作成にあたり乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} の供試体作成時よりも大きな荷重で締め固めを行っているため、その荷重によりベントナイト粒子の構造が一定方向に揃い配向度が高まっている可能性を指摘した。一般に、粘性土は配向度が高いと強度や変形特性にも異方性が現れることから、乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} と 1.8 Mg m^{-3} の供試体では強度や変形特性に違いが出る材料となっていた可能性がある。

以上の経緯を考慮し、本試験における圧密応力は、平成 27 年度の試験における設定値 (2.0 MPa から 0.5 MPa 毎に 4.5 MPa までの 6 条件) より高い設定値とし、2.0 MPa から 2 MPa 毎に 8.0 MPa までの 4 条件とした。同様に、乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 30 wt%の供試体についても、データの比較を可能とするため、平成 27 年度に実施した試験結果を補填する形で、6.0 MPa および 8.0 MPa の 2 条件について追加試験を実施した。以下に試験内容および試験結果を示す。

① 試験内容

・ 供試体の仕様

三軸圧縮試験の供試体の仕様を表 3.2.3-24 に示す。試験には Na 型ベントナイトのクニゲル VI[®] とケイ砂 (3 号および 5 号ケイ砂を乾燥重量で等量混合) を所定の割合で混合し、静的加圧法を用いて所定の乾燥密度になるように圧縮成型した。圧縮成型後、体積拘束条件で蒸留水を給水し飽和供試体を作成した。供試体の寸法は直径 $\phi=50$ mm、高さ $h=100$ mm とした。

表 3.2.3-24 三軸圧縮試験の供試体の仕様

ベントナイト系材料	Na 型クニゲル VI [®]	
混合材料	3 号ケイ砂, 5 号ケイ砂 (1 : 1 混合)	
乾燥密度 [Mg m^{-3}]	1.8	
ケイ砂混合率 [wt%]	50	30
含水状態	蒸留水を 3 ヶ月以上加圧給水したもの	
寸法 [mm]	直径 50 × 高さ 100	

・ 試験条件

地盤工学会基準 JGS 0523-2009 の試験手順に準拠して表 3.2.3-25、表 3.2.3-26 の条件で圧密非排水三軸圧縮試験を行った。三軸圧縮試験時の背圧は、供試体の仕様に対する膨潤圧相当の 0.6 MPa とした。また、圧密応力は 2.0 MPa から 2 MPa 毎に 8.0 MPa までの 4 条件とした。圧密の終了は 3 t 法を用いて判断した。三軸圧縮試験の載荷速度は 0.01 mm min^{-1} (ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_a = 0.01 \text{ \% min}^{-1}$) で軸ひずみ $\epsilon_a = 15 \text{ \%}$ に達するまで載荷した。

表 3.2.3-25 圧密非排水三軸圧縮試験の条件

ケイ砂混合率 [wt%]	50	30
試験温度 [$^{\circ}\text{C}$]	20 ± 1	
背圧 [MPa]	0.6 (膨潤圧相当)	1.3 (膨潤圧相当)
圧密条件	表 3.2.3-26 参照	
せん断方法	軸変位速度制御 (軸変位速度 = 0.01 mm min^{-1}) 軸ひずみ $\epsilon_a = 15 \text{ \%}$ に達するまで載荷	

表 3.2.3-26 圧密条件

ケイ砂混合率 [wt%]	50				30	
試験番号	1	2	3	4	5	6
圧密応力 [MPa]	2.0	4.0	6.0	8.0	6.0	8.0

② 試験結果

表 3.2.3-27 に三軸圧縮試験に用いた供試体の圧密前 (初期状態) と圧密後の状態 (体積、

乾燥密度など)を示す。また、図 3.2.3-21～図 3.2.3-24 に三軸圧縮試験時の軸ひずみに対する軸差応力と間隙水圧増分を示し、表 3.2.3-28 に三軸圧縮試験結果を示した。これらの図より、軸差応力はいずれの場合も载荷に伴い増加し、ピークを越えた後は徐々に減少した。一方、間隙水圧は増加傾向であり、軸差応力が減少に転じた後も増加傾向を維持した。

表 3.2.3-27 圧密前後の供試体の状態

ケイ砂混合率[wt%]		50				30	
試験番号		1	2	3	4	5	6
圧密応力 σ'_c [MPa]		2.0	4.0	6.0	8.0	6.0	8.0
圧密前 (初期 状態)	体積 (cm ³)	198.40	197.98	198.22	197.79	198.44	199.29
	乾燥密度 (g cm ⁻³)	1.764	1.771	1.768	1.769	1.764	1.762
	含水比 (%)	19.9	19.5	19.6	19.7	20.0	19.7
	間隙比	0.523	0.517	0.520	0.519	0.533	0.535
圧密後	体積 V_c [cm ³]	181.11	172.10	165.60	160.24	181.86	179.68
	体積変化 ΔV_c [cm ³]	17.30	25.88	32.62	37.55	16.58	19.61
	体積ひずみ ε_{vc} [%]	8.72	13.07	16.45	18.98	8.36	9.84
	高さ H_c [cm]	9.815	9.731	9.505	9.405	9.706	9.584
	乾燥密度 ρ_d [Mg m ⁻³]	1.932	2.037	2.116	2.184	1.925	1.954
	間隙比 e_c	0.391	0.319	0.270	0.230	0.405	0.384

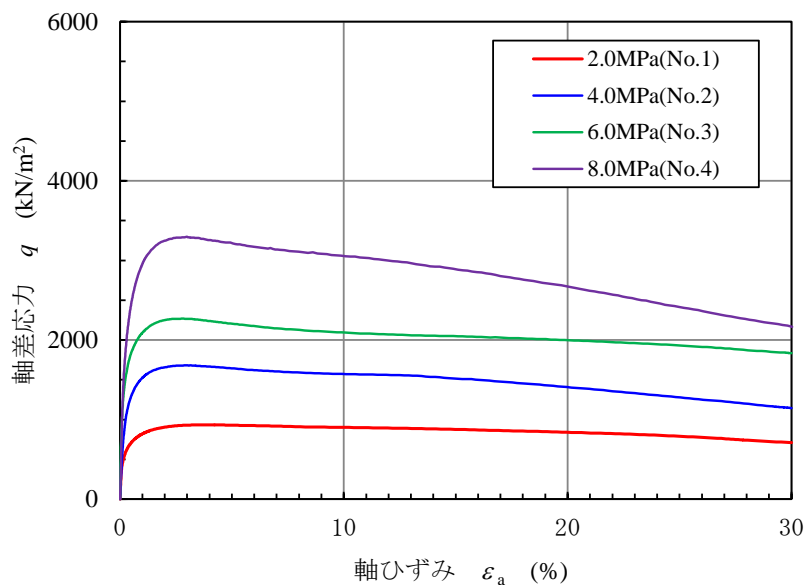


図 3.2.3-21 軸ひずみに対する軸差応力 (乾燥密度 1.8 Mg m⁻³、ケイ砂混合率 50 wt%)

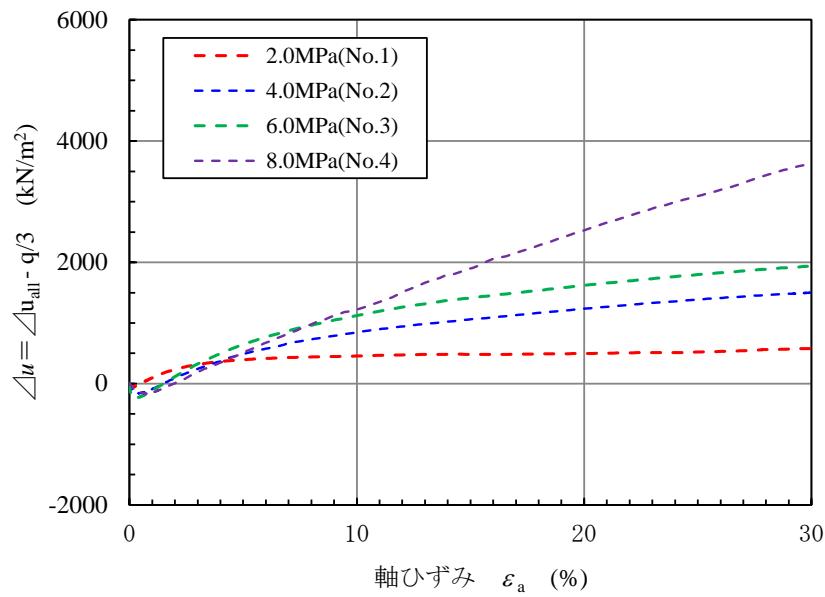


図 3.2.3-22 軸ひずみに対する間隙水圧増分 (乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 50 wt%)

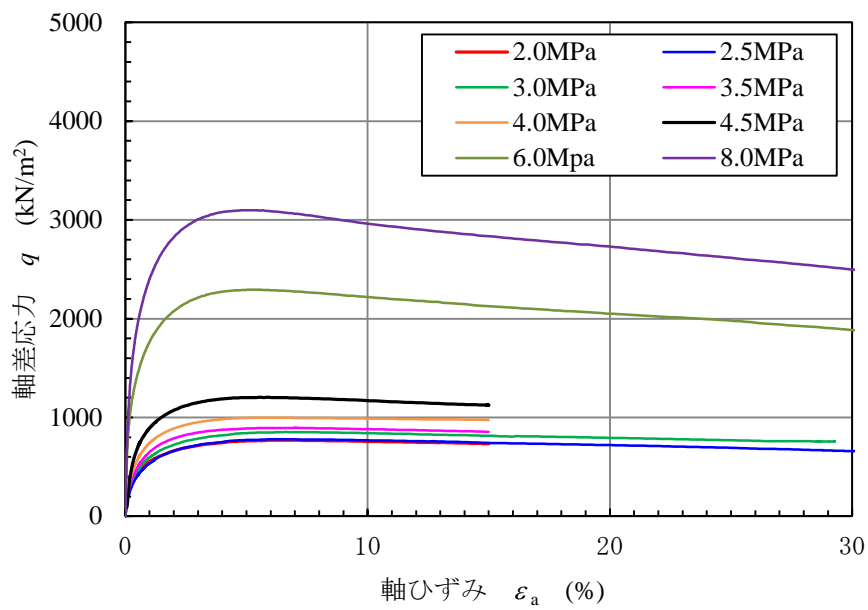


図 3.2.3-23 軸ひずみに対する軸差応力 (乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 30 wt%)

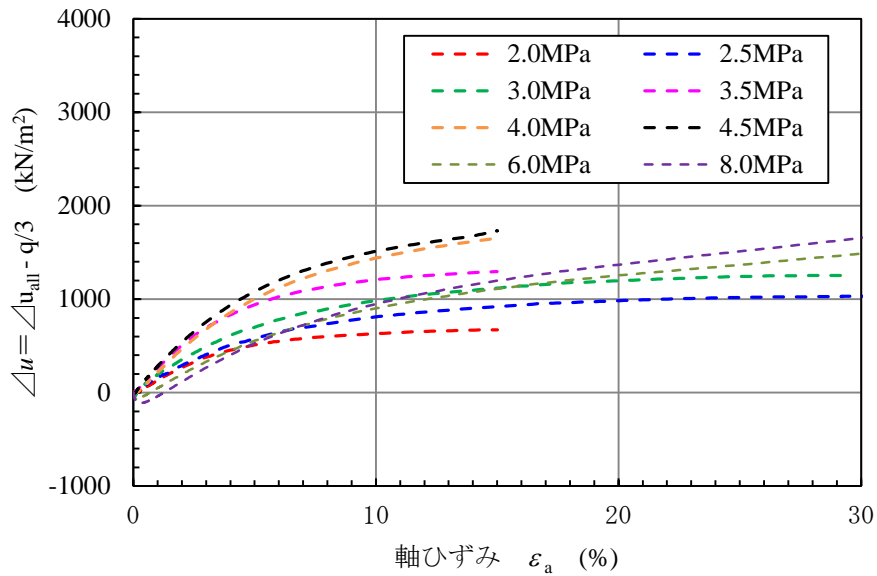


図 3.2.3-24 軸ひずみに対する間隙水圧増分 (乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 30 wt%)

表 3.2.3-28 三軸圧縮試験結果

ケイ砂混合率 [wt%]	50				30	
試験番号	1	2	3	4	1	2
圧密応力 [MPa]	2.0	4.0	6.0	8.0	6.0	8.0
B 値	0.96	0.98	0.97	0.97	0.96	0.97
破壊時の軸差応力 [MPa]	0.94	1.68	2.27	3.30	2.29	3.10
破壊ひずみ [%]	3.7	3.0	2.8	3.0	5.5	4.9
破壊時の間隙水圧 [MPa]	1.264	1.401	1.640	1.885	2.661	2.849

図 3.2.3-25、図 3.2.3-26 に有効応力経路図を示す。有効応力経路は図中右側に凸型を示し、一般的には正規圧密時に見られる応力経路を示した。それぞれの有効応力経路図において、限界状態における応力状態を基に限界状態線を設定した。これらの限界状態線に基づく限界状態パラメータ M および内部摩擦角 ϕ' を表 3.2.3-29 に示す。

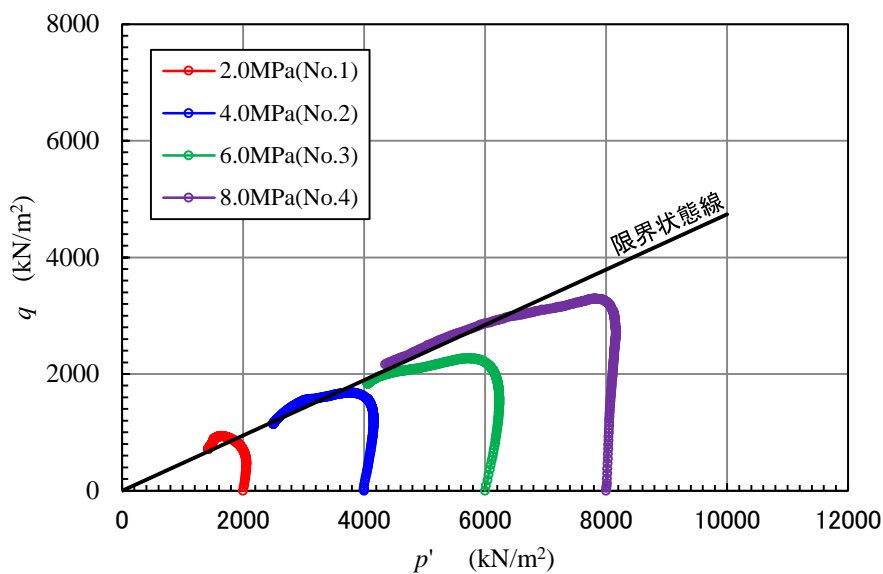


図 3.2.3-25 有効応力経路 (乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 50 wt%)

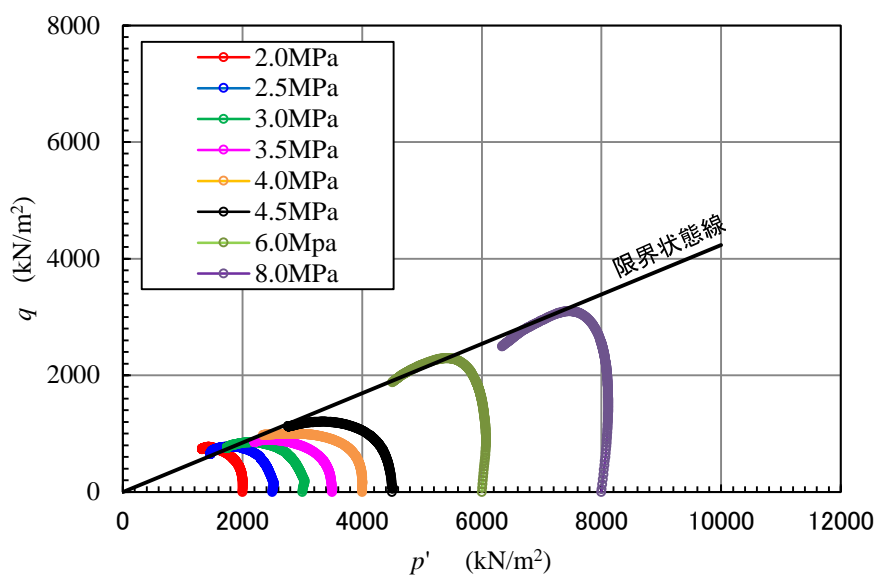


図 3.2.3-26 有効応力経路 (乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 30 wt%)

表 3.2.3-29 限界状態パラメータ M と内部摩擦角 ϕ'

ケイ砂混合率 [wt%]	50	30
限界状態パラメータ M	0.47	0.42
内部摩擦角 ϕ' [deg]	12.7	11.4

3.3 地下施設の概念設計

(1) 本項目の背景と目的

使用済燃料直接処分における地下施設の概念設計では、設計を行う上で特に問題となる廃棄体の重量および寸法がガラス固化体処分よりも大きくなることを踏まえ、代表的な地質環境特性および使用済燃料特性を前提とした予備的な設計により、ガラス固化体処分における技術と同様の考え方において地下施設の概念が成立することを確認する。なお、予備的な設計においては、最新の知見を考慮した現時点で実現可能な技術を考慮する。

平成 28 年度までに、わが国の多様な地質環境特性（岩盤の力学特性、初期地圧、水理・地質特性など）から設定した代表的な地盤条件に対して、人工バリアのレイアウトとして、人工バリアの施工方式（ブロック方式／PEM (Prefabricated Engineered Barrier System Module) 方式)、廃棄体の定置方式（横置き定置方式／縦置き定置方式）を組み合わせ、これらを前提条件とした坑道の設計より、ガラス固化体処分における技術と同様の考え方において地下施設の概念が成立することを示した。また、坑道を設計する上で考慮すべき最新の知見の調査として、空洞の力学的安定性評価のための評価指標、人工バリアの仕様や定置方式に対応した実現可能な坑道の建設技術、坑道に発生する湧水の対策技術、人工バリアの設計および搬送・定置設備の設計との連携を考慮した坑道の設計フローについて示した。また、地下施設の空間設計の合理化の検討に資する情報の整備として、支保工の候補技術であるコンクリートについて、岩盤や緩衝材への影響を考慮した低アルカリ性材料を使用した HFSC (Highly Fly-ash contained Silicafume Cement) コンクリートの配合選定のための基礎物性の取得を、吹付けコンクリートおよび場所打ちコンクリートを対象として行った。

平成 29 年度は、以下の項目に着目した検討を実施する。

- ・ 平成 28 年度までは、地盤条件と、地下施設である坑道の概念を設計する際に前提条件として特に重要な要素となる人工バリアの多様な組み合わせを検討ケースとして、空洞の力学的安定性や設計の前提となる掘削技術の調査など、それぞれの項目について坑道の概念が成立することを示してきた。これらの成果をもとに、地下施設の設計において考慮すべき項目について横並びで比較することによる総合的な評価を実施し、多様な組み合わせにより構成される地下施設の設計の特徴について取りまとめた整理を行う。（(2)参照）
 - ・ 場所打ちコンクリートを対象とした HFSC コンクリートの基本特性の取得を行う。平成 29 年度は、平成 27 年度に実施した HFSC424、平成 28 年度に実施した HFSC226 に続き、HFSC325 の配合について試験を実施する。試験結果を通し、これまでに実施してきた場所打ちコンクリートについて、用途や岩盤条件などに応じた適切な配合の選定や支保工の合理的な設計に対する適用性について取りまとめ考察する。（(3)参照）
- 以下に、「(2) 地下施設の設計」、「(3) 支保工施工合理化のための基本特性の取得」について示す。また、まとめについては 3.5 節に示す。

(2) 地下施設の設計

使用済燃料の地層処分では、安全性の確保が最優先事項であり、そのためには人工バリアの性能が確保されることが重要である。地下施設である坑道の設計では、安全性の確保が可能な人工バリアの施工方式(ブロック/PEM)と廃棄体の定置方式(横置き/縦置き)の組み合わせに対して必要な空間が設定され、空洞が力学的に安定するための構造を検討する手順が基本となるが、上記の人工バリアの設計を検討する際には、坑道の設計の観点からその組み合わせがどのような特徴を有し、どのような点に留意すべきであるかについても考慮される必要があると考えられる。こうしたことから、組み合わせの特徴についてはあらかじめ整理し示しておくことが重要であると考えられる。

本項目では、これまでの成果をもとに、坑道の設計の前提となる地盤条件と人工バリアの組み合わせ(以下、「組み合わせ」という)ごとの特徴を整理するため、坑道の設計において考慮すべき項目(これを「評価テーマ」と定義する)を、組み合わせごとに横並びで優劣をつけて比較することにより総合的に評価した。これは、表 3.3-1 に示される組み合わせの特徴の整理結果において、評価テーマごとに縦方向に評価結果を埋めていくプロセスとなる。このように整理された結果を組み合わせごとに、つまり表 3.3-1 を横方向に見たとき、組み合わせの特徴として捉えることができることを目的とした。

表 3.3-1 組み合わせの特徴の整理結果

組み合わせ			断面形状	評価テーマ					
地盤条件	人工バリア	廃棄体		掘削技術	力学的安定性	定置技術	安全性	回収性	経済性
硬岩系	ブロック方式	横置き	円形	○	◎	○	△	△	◎
		縦置き	馬蹄形	△	○	○	○	○	△
	PEM方式	横置き	円形	○	◎	○	△	△	◎
		横置き	馬蹄形	△	◎	○	△	△	○
		縦置き	馬蹄形	△	○	○	○	○	△
	軟岩系	ブロック方式	横置き	円形	○	○	○	△	△
縦置き			多心円形	○	△	○	○	○	△
PEM方式		横置き	円形	○	○	○	△	△	◎
		横置き	多心円形	○	○	○	△	△	○
		縦置き	多心円形	○	△	○	○	○	△

凡例「◎」: 特に適用性が高い、「○」: 適用性が高い、「△」: 適用性がある、「×」: 適用性がない

以降、表 3.3-1 に示した断面形状および評価テーマの設定について「1) 評価の対象とする坑道の断面形状の設定」および「2) 評価テーマの設定」において述べ、組み合わせの特徴の整理に至るプロセスを「3) 評価テーマごとの評価の検討」において述べる。

1) 評価の対象とする坑道の断面形状の設定

評価の対象とする坑道の種類を、地下施設を構成する坑道群（アクセス坑道／連絡・主要坑道／処分坑道／処分孔）より選定し、設定する。坑道群からの坑道の種類の選定に先立ち、組み合わせにより求まる坑道の種類の断面形状について、過年度における成果を整理した。

整理の結果、アクセス坑道、連絡・主要坑道、処分孔については、組み合わせに依存せずに断面形状が設定できるのに対し、処分坑道は組み合わせごとにそれぞれ異なる断面形状を選定できることから、処分坑道を評価の対象とした。組み合わせに対する断面形状の設定例を表 3.3-2 に示す。

表 3.3-2 組み合わせに対する断面形状の設定例 (1/2)

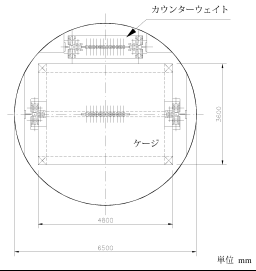
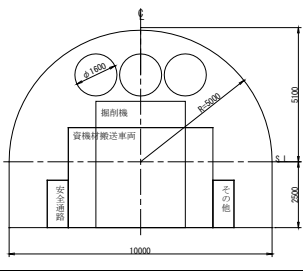
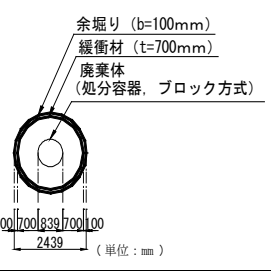
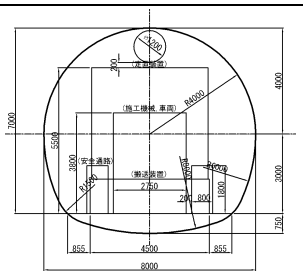
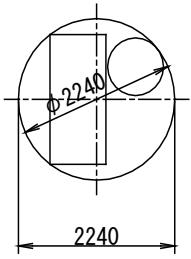
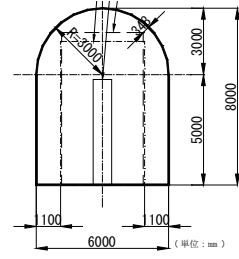
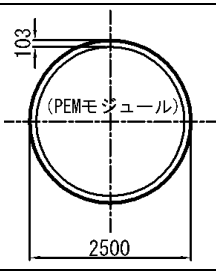
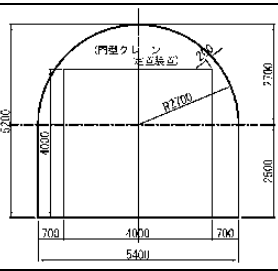
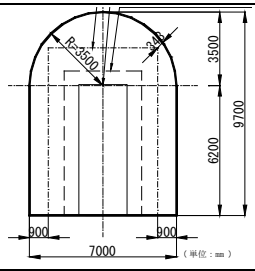
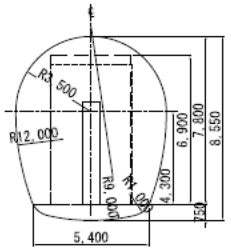
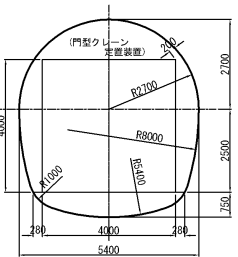
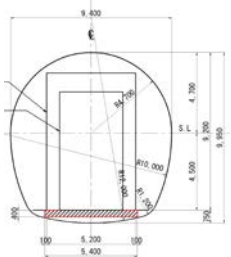
種類	アクセス坑道	連絡・主要坑道	処分孔
施工方式	ブロック方式／PEM方式		
定置方式	横置き定置方式／縦置き定置方式		
断面形状 (硬岩系)	円形 	馬蹄形 	円形 
	同上	多心円形 	同上
断面形状 (軟岩系)	円形	同上	円形
	同上	同上	同上

表 3.3-2 組み合わせに対する断面形状の設定例 (2/2)

種類	処分坑道		
地盤条件	硬岩系地盤		
定置方式	横置き定置方式		縦置き定置方式
断面形状 (ブロック方式)	円形		馬蹄形
			
定置方式	横置き定置方式		縦置き定置方式
断面形状 (PEM方式)	円形	馬蹄形	馬蹄形
			
地盤条件	軟岩系地盤		
定置方式	横置き定置方式		縦置き定置方式
断面形状 (ブロック方式)	円形		多心円形
	同上		
定置方式	横置き定置方式		縦置き定置方式
断面形状 (PEM方式)	円形	多心円形	多心円形
	同上		

2) 評価テーマの設定

表 3.3-1 に示した組み合わせの特徴の整理において、組み合わせに対し評価を行うための「評価テーマ」を設定する。評価テーマは、坑道の設計そのものである「掘削技術」

と「空洞の力学的安定性」の2テーマと、その他の坑道の概念との関わりの大きい4テーマを設定した。以下に、設定した評価テーマと、評価における観点を示す。

- ▶ 「掘削技術」：掘削計画の基本となる「掘削工法」と「掘削方式」の組み合わせにおける、施工性・安全性・周辺岩盤への影響の観点
- ▶ 「空洞の力学的安定性」：空洞の力学的安定性評価における、局所安全率・最大せん断ひずみの観点
- ▶ その他の坑道の設計に関係するテーマ
 - ✓ 「定置技術」：廃棄体定置時の観点
 - ✓ 「安全性」：作業時の災害などに対するリスクの観点
 - ✓ 「回収性」：埋戻し後の回収作業の観点
 - ✓ 「経済性」：経済性の比重の大きい掘削・埋戻しにおける土量の観点

3) 評価テーマごとの評価の検討

組み合わせの特徴の整理に至る過程として、評価テーマごとの組み合わせの評価方法を検討する。評価テーマごとの評価は、「評価対象」となる組み合わせを評価することを念頭に、評価テーマの有する特性を整理し、ここから抽出された「評価項目」と、表 3.3-1 の凡例に示した「評価結果の示し方」により行う。評価テーマごとの評価では、評価項目の特性や重要度などを勘案するものとする。

① 掘削技術

坑道の掘削計画では、安全で経済的となる掘削工法・掘削方式を選定することを基本としている。本項目では、この「掘削工法」と「掘削方式」の組み合わせを「掘削技術」と定義し、これに基づき組み合わせの評価を行う。過年度における概念設計では、掘削工法については「NATM(New Austrian Tunneling Method)」と「TBM(Tunnel boring machine)」、掘削方式については「発破掘削方式」と「機械掘削方式」を設定し、これらの組み合わせを条件として検討・整理してきた。発破掘削方式を採用する場合の掘削工法としては NATM、機械掘削方式の場合は自由断面掘削機を使用した NATM、または全断面掘削機を使用した TBM が一般的に採用される。全断面掘削機を使用した場合、掘削断面は円形になる。本検討においても、これらの組み合わせを評価項目として採用する。これらの組み合わせは、地盤条件と表 3.3-2 (2/2) において示した断面形状によって設定される。以下に、地盤条件および断面形状の掘削技術との関係について述べる。

• 地盤条件と掘削技術の関係

地盤条件の一軸圧縮強度は、過年度および直接処分第 1 次取りまとめにおける設定から、硬岩は 115 MPa、軟岩は 15 MPa である。地盤の強度から掘削工法・掘削方式を設定する際の考え方は、NATM における自由断面掘削機では、施工実績としては一軸圧縮強度で 80~100 MPa の岩質への施工例があるが、通常は一軸圧縮強度で 50 MPa 程度までの、主に軟岩や土砂地山に使用されるのが一般的であり、それを超える場合は発破掘削方式となる。一方、同じ機械掘削方式における全断面掘削機を使用し

た TBM では、施工実績としては 200 MPa を超える施工例があるが、一般的には一軸圧縮強度が 50～100 MPa 程度の良い地山において効率的な掘削が可能である。（土木学会，2006）

- 断面形状と掘削技術の関係

坑道の断面をどのような形状にするかは、建設・操業・閉鎖の各段階における作業などに必要な空間が確保され、かつ合理性の面から満足するものを選定することから、横置き定置方式では、NATM を採用する場合は馬蹄形もしくは多心円形、TBM を採用する場合は円形断面とし、縦置き定置方式では、搬送定置装置の大型化などにより馬蹄形もしくは多心円形とした。円形断面では、地盤条件に関わらず TBM を採用するため機械掘削方式となる。馬蹄形または多心円形断面で採用する NATM は、硬岩については発破掘削、軟岩については機械掘削を選定する。組み合わせに対応する掘削技術（掘削工法、掘削方式）の一覧を表 3.3-3 に示す。

表 3.3-3 組み合わせに対応する掘削技術（掘削工法、掘削方式）の一覧表

組み合わせ			断面形状	掘削工法	掘削方式
地盤条件	施工方式	定置方式			
硬岩系 (115 MPa)	ブロック方式	横置き	円形	TBM	機械掘削
		縦置き	馬蹄形	NATM	発破掘削
	PEM 方式	横置き	円形	TBM	機械掘削
			馬蹄形	NATM	発破掘削
		縦置き	馬蹄形	NATM	発破掘削
			多心円形	NATM	発破掘削
軟岩系 (15 MPa)	ブロック方式	横置き	円形	TBM	機械掘削
		縦置き	多心円形	NATM	機械掘削
	PEM 方式	横置き	円形	TBM	機械掘削
			多心円形	NATM	機械掘削
		縦置き	多心円形	NATM	機械掘削
			多心円形	NATM	機械掘削

- 掘削技術の評価項目の設定

掘削技術、すなわち掘削工法と掘削方式の観点での特徴を評価するため、施工の効率やトラブルへの適応性として「施工性」、作業の安全性の高さとして「作業の安全性」、また天然バリアとしての岩盤への悪影響の有無として「周辺岩盤への影響」について評価項目として設定した。評価項目ごとの評価のポイント、および評価結果の示し方を表 3.3-4 に示す。

表 3.3-4 掘削技術の評価項目

評価項目	評価結果の示し方
<ul style="list-style-type: none"> 施工性：施工の効率、トラブルへの適応性など 安全性：作業の安全性の確保 周辺岩盤への影響：天然バリア性能の確保 	◎：特に適用性が高い ○：適用性が高い △：適用性はある ×：適用性がない

- 掘削工法と掘削方式の各組み合わせの特徴の評価項目に基づく検討

表 3.3-3 に示した掘削工法と掘削方式の各組み合わせについて、評価項目に基づき特徴を整理し、評価した結果を表 3.3-5 に示す。それぞれ一長一短であることから大きな差はないが、本検討では、NATM と発破掘削方式の組み合わせにおいて相対的に評価が低くなる結果が得られた。

表 3.3-5 掘削工法と掘削方式の組み合わせの評価項目による評価結果

掘削工法 掘削方式	施工性	安全性	周辺岩盤への影響
NATM 発破掘削	<ul style="list-style-type: none"> 再施工やトラブルへの対応には比較的柔軟に対応可能 経済的な掘削が可能だが、余掘りが多くなる 	<ul style="list-style-type: none"> 切羽が露出するため、TBM に対しては相対的に安全性が低くなる 実績は十分 	亀裂などの発生・伸展が懸念
	○	△	△
NATM 機械掘削 (自由断面掘削機)	<ul style="list-style-type: none"> 再施工やトラブルへの対応には比較的柔軟に対応可能 余掘りは少ないが、掘削機械の性能の問題から、地盤条件による制約は発破掘削より多い 	同上	亀裂などへの影響は小さい
	○	△	○
TBM 機械掘削 (全断面掘削機)	<ul style="list-style-type: none"> 地盤条件により高速施工が可能 切羽の崩落や大量湧水などのトラブルを想定した機械の仕様の検討が必要 	切羽が露出しないため安全性は高い	同上
	○	○	○

- 掘削技術による組み合わせの評価

表 3.3-3 に示した掘削工法と掘削方式の組み合わせに対し、表 3.3-5 に示した評価項目に基づく評価結果を当てはめることにより、掘削技術の観点での組み合わせの評価として表 3.3-6 の評価項目の欄のようにまとめられる。

以上の検討によりまとめられた評価項目による評価結果を、掘削技術の評価として

まとめるにあたっては、以下の考え方により判定した。「施工性」と「安全性」については、想定的に評価の分かれるものもあるが、基本的には技術的に対応できる可能性があるのに対し、「周辺岩盤への影響」については、天然バリアの性能に有意な影響を生じる可能性があることから、評価を大きく左右する評価であると判断し、周辺岩盤への影響による評価結果を掘削技術の評価として採用した。

表 3.3-6 掘削技術の観点での組み合わせの評価結果

組み合わせ			断面形状	評価項目			掘削技術
地盤条件	施工方式	定置方式		施工性	安全性	周辺岩盤への影響	
硬岩系	ブロック方式	横置き	円形	○	○	○	○
		縦置き	馬蹄形	○	△	△	△
	PEM方式	横置き	円形	○	○	○	○
			馬蹄形	○	△	△	△
		縦置き	馬蹄形	○	△	△	△
			馬蹄形	○	△	△	△
軟岩系	ブロック方式	横置き	円形	○	○	○	○
		縦置き	多心円形	○	△	○	○
	PEM方式	横置き	円形	○	○	○	○
			多心円形	○	△	○	○
		縦置き	多心円形	○	○	○	○
			多心円形	○	○	○	○

② 空洞の力学的安定性評価

空洞の力学的安定性の観点からの組み合わせの評価を行う。評価にあたっては、過年度において実施した組み合わせに対応する坑道の力学的安定性の評価結果（付録 3 参照）を適用する。

• 空洞の力学的安定性の評価項目の設定

過年度における空洞の力学的安定性の評価としては、掘削時に生じる空洞周辺岩盤の破壊領域・塑性領域に対し、完全弾塑性モデルを用いた数値解析によって求められた「局所安全率」と「最大せん断ひずみ」を評価の基準に採用していた。以上より、空洞の力学的安定性では以上の二つを評価項目として設定する。以下に、評価項目として評価する上でのポイントを示す。

➤ 局所安全率

近接する空洞間の安定性評価の観点から、岩盤の応力的な解析により塑性領域（Mohr-Coulomb 降伏基準）を確認する際に基準となる指標。局所安全率が 1.5 以下となる最大範囲により評価する。

➤ 最大せん断ひずみ

岩盤に発生する変形量から算定された空洞周辺岩盤の破壊領域の発生を確認する際に基準となる指標。岩盤に発生する最大せん断ひずみが、統計データである限

界せん断ひずみの中央値以上となる最大範囲により評価する。

- 空洞の力学的安定性による組み合わせの評価

空洞の力学的安定性の観点から、局所安全率および最大せん断ひずみを評価項目として組み合わせの評価を行った。組み合わせの評価結果を表 3.3-7 に示す。

表 3.3-7 空洞の力学的安定性による組み合わせの評価結果

組み合わせ			断面形状	評価項目				力学的安定性
地盤条件	施工方式	定置方式		局所安全率		最大せん断ひずみ		
硬岩系	ブロック方式	横置き	円形	0.2 m	○	0.0 m	◎	◎
		縦置き	馬蹄形	1.3 m	○	0.4 m	○	○
	PEM 方式	横置き	円形	0.2 m	○	0.0 m	◎	◎
			馬蹄形	0.8 m	○	0.0 m	◎	◎
		縦置き	馬蹄形	1.6 m	○	0.7 m	○	○
軟岩系	ブロック方式	横置き	円形	0.6 m	○	0.3 m	○	○
		縦置き	多心円形	2.6 m	△	0.9 m	△	△
	PEM 方式	横置き	円形	0.6 m	○	0.0 m	◎	◎
			多心円形	1.8 m	△	0.0 m	◎	○
		縦置き	多心円形	3.5 m	△	1.1 m	△	△

局所安全率による評価では、「○」もしくは「△」の二段階で定量的に評価し、最大せん断ひずみによる評価では、0.0 m 以下となるものは「◎」、それ以外については定量的に「○」もしくは「△」の二段階で評価した。

局所安全率については、値が 1.5 以下となる範囲が発生しているが、塑性領域の拡大によって懸念される、過大な内空変位、あるいは、それに伴う地山の一体性の喪失、力学的な不連続面の影響などを考慮しなければならないような値にはなっていない。また、坑道のような空洞では、基本的に力学的な安定を保つ機構が常に働き、本質的に力の釣り合いがとれなくなるという意味での不安定状態になることはないと考えられることから、値を定量的に二段階に分け評価した。

最大せん断ひずみが限界せん断ひずみの中央値以上となる範囲の発生は、統計的に坑道が不安定になることが懸念されることから、発生の有無（0.0 m か、それ以上であるか）で評価は大きく異なる。よって 0.0 m 以下となるものについては特に適用性が高い評価とし、0.0 m 以上となるものについては、支保の増強などの対策により適用可能であることを考慮し、値を定量的に二段階に分け評価した。

以上の二つの評価をまとめるにあたっては、先に示したように最大せん断ひずみによる評価に重要度を置き、これによる評価を基本とする。ただし、「◎」と「△」のような評価が離れた場合は、平均的に「○」の評価とした。

③ その他の坑道の概念に関する評価テーマ

坑道の設計に直接的に関係する「掘削技術」、「坑道の力学的安定性評価」に対し、直接的ではないが坑道の設計に関係性のある項目として評価テーマに取り込み、評価を行う。なお、これらの評価テーマは地盤条件による影響が小さいことから、これを考慮しない。以下に、各評価テーマの評価項目、および評価結果を示す。

• 定置技術

廃棄体の定置に関する坑道の概念への影響の観点から、評価項目を設定する。また、定置技術による評価結果を表 3.3-8 に示す。

- 搬送作業の効率性（人工バリアの施工方式に関する観点）
- 設備寸法の違い（廃棄体の定置方式に関する観点）

表 3.3-8 定置技術による組み合わせの評価結果

地盤条件	施工方式	定置方式	定置技術	
硬岩系 ・ 軟岩系	ブロック方式	横置き	<ul style="list-style-type: none"> ・ 定置装置の寸法が縦置きより小さくなるため、坑道断面を小さくできる ・ PEM方式より定置装置が小さくなる ・ 定置により坑道が塞がれ、定置後、装置を後退させる必要がある ・ 坑内での緩衝材の組立てが発生 	○
		縦置き	<ul style="list-style-type: none"> ・ 底盤下の処分孔に定置するため坑道が塞がれない ・ PEM方式より定置装置が小さくなる ・ 吊り作業などが生じるため、横置きと比較し、装置が大きくなる ・ 坑道内での緩衝材の組立てが発生 	○
	PEM方式	横置き	<ul style="list-style-type: none"> ・ 定置装置の寸法が縦置きより小さくなるため、坑道断面を小さくできる ・ 坑内での緩衝材の組み立てが不要 ・ 定置により坑道が塞がれ、定置後、装置を後退させる必要がある ・ ブロック方式と比較し、装置が大きくなる 	○
		縦置き	<ul style="list-style-type: none"> ・ 底盤下の処分孔に定置するため坑道が塞がれない ・ 坑内での緩衝材の組み立てが不要 ・ 吊り作業などが生じるため、横置きと比較し、装置が大きくなる ・ ブロック方式と比較し、装置が大きくなる 	○

• 安全性・回収性・経済性

安全性・回収性・経済性に関する評価項目を設定し、それらの評価結果を表 3.3-9 に示す。

- 安全性
 - ✓ リスクへの対応性：作業時の安全性について、災害発生時のリスクや発生時の対応へのリスクの観点
- 回収性
 - ✓ 作業の効率性：埋め戻し後の使用済燃料を回収する際の効率の観点
- 経済性
 - ✓ 掘削・埋め戻し土量：経済性を考える上で比重の大きい掘削・埋戻しに伴う土

量を定量的に比較。土量の算定は、最も土量が少なくなるブロック方式・横置き定置方式（円形断面）を基準（=1.0）とし、これとの比で表す。

表 3.3-9 安全性・回収性・経済性による組み合わせの評価結果

地盤条件	施工方式	定置方式	安全性		回収性		経済性	
硬岩系 ・ 軟岩系	ブロック方式	横置き	定置を開始すると坑道が塞がれ、災害発生時のアクセスが片側からに限定される	△	手前から順番に回収することに限定	△	円形：1.0	◎
		縦置き	・処分坑道両端の主要坑道からアクセスが可能 ・処分孔が底盤の開口になっているため落下の危険性	○	任意の廃棄体を回収可能	○	馬蹄形・多心円形：3.0	△
	PEM方式	横置き	定置を開始すると坑道が塞がれ、災害発生時のアクセスが片側からに限定される	△	・早期であれば鋼殻ごと回収できる可能性 ・手前から順番に回収	△	円形：1.2	◎
		縦置き	・処分坑道両端の主要坑道からアクセスが可能 ・処分孔が底盤の開口になっているため落下の危険性	○	・早期であれば鋼殻ごと回収できる可能性 ・任意の廃棄体を回収可能	○	馬蹄形・多心円形：1.9	○
							馬蹄形・多心円形：4.0	△

4) 総合的な評価による特徴の整理の考察

評価テーマごとに総合的に評価した結果から、多様な組み合わせとしての坑道の概念の特徴について整理した。総合的な評価では、組み合わせを構成する地盤条件、人工バリアの施工方式および廃棄体の定置方式の、掘削技術などの評価テーマに対する影響が示された。これらの影響に関して分析した結果を以下に示す。

- 地盤条件は掘削技術と空洞の力学的安定性の評価への影響が見られた。掘削技術では、発破掘削を採用する硬岩系地盤における馬蹄形断面（ブロック・縦置き、PEM・横置き/縦置き）において、岩盤の亀裂などへの影響の課題が大きい。空洞の力学的安定性評価では、地盤の強度が評価に直接影響することから軟岩系地盤の方が不利となる。
- 人工バリアの施工方式は定置技術への影響が見られ、緩衝材を坑道内で組み立てる必要があるブロック方式の作業時の不確実性と寸法・重量の大きいPEMを取り扱う際のハンドリングが課題となる。
- 廃棄体の定置方式は、基本的には、横置きは安定性と経済性の高い円形、縦置きは建設や定置作業の制約から馬蹄形/多心円形を採用するとしていることから、断面形状への影響が見られた。断面形状は掘削技術の設定の前提となるため評価結果に大きな影響がある。
- 廃棄体の定置方式の違いにより、定置後の動線が確保されるか、遮断されるかの違いが生じ、安全性や回収性に影響する。
- 硬岩系のブロック方式とPEM方式の横置き定置方式同士を比較すると、評価が同じ

である（一致している）。このように、同一の地盤条件および廃棄体の定置方式においては、人工バリアの施工方式の違いによる評価の差は特に見られない。

総合的な評価による特徴の整理では、「選択した組み合わせはどの項目において有利であるか」、「どの評価テーマにおいて留意すべき点があるか」、といった組み合わせごと特徴を多様な観点から整理し示すことができた。整理の結果、組み合わせごとに特徴はそれぞれ一長一短であり、特に有利な組み合わせや問題のある組み合わせは見られず、限られた評価テーマからではあるが、坑道の設計の観点において、人工バリアの設計に特に有意に作用する可能性のある項目は見られなかった。また、評価テーマや評価項目の設定の検討プロセスは、評価テーマを構成する坑道の設計において考慮すべき多様な項目を整理し、人工バリアの組み合わせ（レイアウト）をオプションから選定する際の合理的な手法の一例が示すことができたという点で、今後同様の検討を行う際に活用できる可能性がある。

(3) 支保工施工合理化のための基本特性の取得

場所打ちコンクリートとしての用途を想定した HFSC コンクリートの基本特性を取得した。平成 27 年度は、HFSC424 について試験を行い、レファレンスケースにおける設計基準強度を満たす結果が得られた。平成 28 年度は、低アルカリ性に重点を置きセメント量が最も少ない HFSC226 について試験を行い、セメント量が少ないことから強度面において他の配合に劣るものの、より低アルカリ性の求められる用途や使用範囲において適用の可能性が考察された。平成 29 年度は、これらの中間的な配合である HFSC325 について試験を行い、強度と低アルカリ性の関係の観点から、適用性について考察する。

1) 供試体の作製条件

供試体作製にあたり、使用する材料の一覧を表 3.3-10 に示す。

表 3.3-10 使用材料の一覧

材料名	品名または準拠基準など
普通ポルトランドセメント (OPC)	JIS R 5210
練混ぜ水	JIS A 5308附属書C
骨材	JIS A 5308附属書A、ただしJIS A 1145またはJIS A 1146で区分Aであること
フライアッシュ (FA)	JIS A 6201 II種
シリカフューム (SF)	940-U (Elkem社製) (JIS A 6207相当)
高性能AE減水剤	レオビルド SP8SV (BASF 社製) (JIS A 6204)
その他混和剤*	2012制定コンクリート標準示方書[施工編] (土木学会, 2012b)

*空気量調整剤、消泡剤など。使用する場合のみ

本試験は、表 3.3-11 に示すように HFSC 結合材料構成比であるポルトランドセメント：シリカフューム：フライアッシュの重量比を 3：2：5 (以下、HFSC325)、結合材料の重量 [kg] に対する水の重量 [kg] 割合 (以下、水結合材比 W/B) を 40 % の一定とし、セメントの種類を普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントとした 2 配合の HFSC コンクリートを製造した。また、HFSC コンクリートの供試体作製に関するその他の条件を表 3.3-12 のように設定した。

表 3.3-11 HFSC 結合材料構成比および水結合材比

配合要因	指定内容	水準数
HFSC 結合材料構成比*	HFSC325	1 水準
水結合材比[W/B]**	40 %	1 水準
ポルトランドセメントの種類	普通 (OPC)、早強 (HPC)	2 水準
* HFSC 結合材料構成比：ポルトランドセメント (OPC または HPC)：シリカフューム (SF)：フライアッシュ (FA) の重量比を示す。		
** W/B：B は OPC (HPC)、SF、FA の総量で W/B は、結合材量に対する水量の質量比である。		

表 3.3-12 供試体作製に関するその他の条件
(土木学会, 2012b)

項目	仕様書による規定	配合条件
粗骨材最大寸法	20 mm	20 mm
単位結合材量	最小 360 kg m ⁻³ 程度	360 kg m ⁻³
単位水量	上限 175 kg m ⁻³ 程度	144 kg m ⁻³
スランプ	18±2.5 cm	18±2.5 cm
空気量	4.0～7.0 %	4.0～7.0 %

2) 物性試験用供試体の作製

図 3.3-1 に示す練混ぜ手順および表 3.3-13 に示す規格に従い、配合設計を実施した。本練り後、後述するフレッシュコンクリートの性状を確認し、物性試験用供試体を作製した。物性試験用供試体は直径 10 cm、高さ 20 cm の円柱形とし、突き棒を用いて作製した。本配合はセメント量が少なく、強度発現が遅いことを考慮して、成型から 2 日後に脱型し、試験の当日まで 20 °C の水中で養生した。

表 3.3-13 物性試験用供試体作製に関する規格

項目	準拠規格
練混ぜ	JIS A 1138 「試験室におけるコンクリートの作り方」
スランプ	JIS A 1101 「コンクリートのスランプ試験方法」
空気量	JIS A 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」
コンクリート温度	JIS A 1156 「フレッシュコンクリートの温度測定」
物性試験用供試体*	JIS A 1132 「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」
* 試し練りでは物性試験用供試体は作製しない	

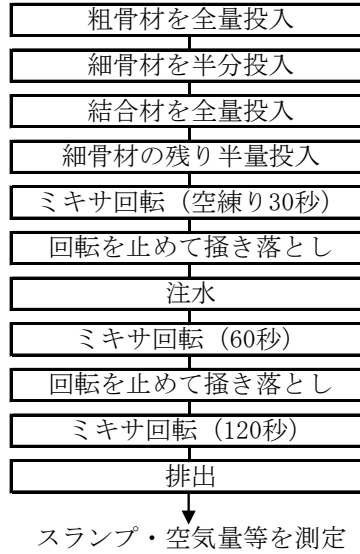


図 3.3-1 練混ぜ手順

3) 試験配合およびフレッシュコンクリートの性状

試験配合およびフレッシュコンクリートの性状を表 3.3-14 に示す。物性試験用供試体は単位水量を 144 kg m^{-3} 、細骨材率を 44.0 %として配合設計し、スランプおよび空気量は所定の範囲を満足するように高性能 AE 減水剤および AE 剤の添加量により調整した。

表 3.3-14 試験配合およびフレッシュコンクリートの性状

配合											フレッシュコンクリートの性状		
セメント	W/B [%]	s/a [%]	単位量 [kg m^{-3}]						化学混和剤		SL [cm]	空気量 [%]	温度 [$^{\circ}\text{C}$]
			W	結合材 (B)			S	G	SP B×%	AE 剤 B×%			
				C	SF	FA							
普通	40	44	144	72	72	216	759	987	1.80	0.007	16.5	5.6	22.5
早強	40	44	144	72	72	216	759	987	1.90	0.006	19.0	5.1	22.5

W/B: 水結合材比 s/a: 細骨材率 W: 水 C: セメント SF: シリカフューム FA: フライアッシュ B: C+SF+FA
 S: 細骨材 (静岡県掛川市産山砂、絶乾密度 2.54 g cm^{-3} 、表乾密度 2.58 g cm^{-3})
 G: 粗骨材 (茨城県桜川市産碎石、絶乾密度 2.63 g cm^{-3} 、表乾密度 2.64 g cm^{-3})
 SP: 高性能 AE 減水剤 SL: スランプ

4) 物性試験項目および試験結果

試験項目および試験材齢を表 3.3-15 に示す。圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度、単位容積質量は 4 材齢において測定し、ポアソン比のみ 3 材齢において測定した。引き続き、試験項目の測定結果を示す。

表 3.3-15 試験項目および試験材齢

試験項目	試験材齢				準拠基準など
	3 日	7 日	28 日	91 日	
圧縮強度試験	○	○	○	○	JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じ、所定の材齢において測定した。
静弾性係数試験	○	○	○	○	JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じ、圧縮強度と同時に測定した。
ポアソン比の測定	—	○	○	○	圧縮強度および静弾性係数の測定時に、ひずみゲージによりポアソンひずみ(横ひずみ)を計測し、JHS-307「コンクリートの静弾性係数試験方法」により算出した。
割裂引張強度試験	○	○	○	○	JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準じ、所定の材齢において測定した。
単位容積質量の測定	○	○	○	○	圧縮強度試験に用いる供試体の寸法(直径、高さ)および質量を測定し、硬化後コンクリートの所定材齢における単位容積質量を算出した。

- 圧縮強度試験結果

材齢と圧縮強度の関係を図 3.3-2 に示す。圧縮強度は、セメントの種類にかかわらず、材齢の経過に伴い増大する傾向を示し、早強ポルトランドセメント(以下、早強セメント)の方が普通ポルトランドセメント(以下、普通セメント)より大きい結果を得た。また、早強セメントは 91 日においても普通セメントと同程度の強度増加率を示した。

圧縮強度については、場所打ちコンクリートのレファレンスとなる設計基準強度 ($\sigma_{28} = 18 \sim 24 \text{ N mm}^{-2}$) (核燃料サイクル開発機構, 2005) を超える結果を得た。圧縮強度試験結果の一覧を表 3.3-16 に示す。

表 3.3-16 圧縮強度試験結果

HFSC の配合	セメントの種類	圧縮強度 [N mm^{-2}]			
		3 日	7 日	28 日	91 日
HFSC325	OPC	6.42	15.8	33.2	49.5
	HPC	9.50	16.1	35.5	52.5

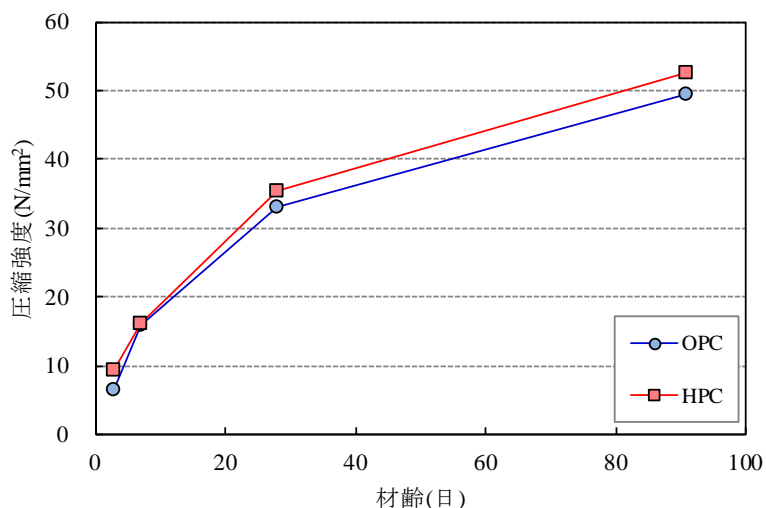


図 3.3-2 材齢と圧縮強度の関係

- 割裂引張強度試験結果

材齢と引張強度の関係を図 3.3-3 に示す。引張強度は、圧縮強度と同様に材齢の経過に伴い増大する傾向を示し、早強セメントの方が普通セメントよりやや大きな強度を示した。割裂引張強度試験結果の一覧を表 3.3-17 に示す。

表 3.3-17 割裂引張強度試験の結果

HFSC の配合	セメントの種類	引張強度 [N mm ⁻²]			
		3 日	7 日	28 日	91 日
HFSC325	OPC	0.69	1.30	2.77	3.00
	HPC	0.94	1.36	2.71	3.50

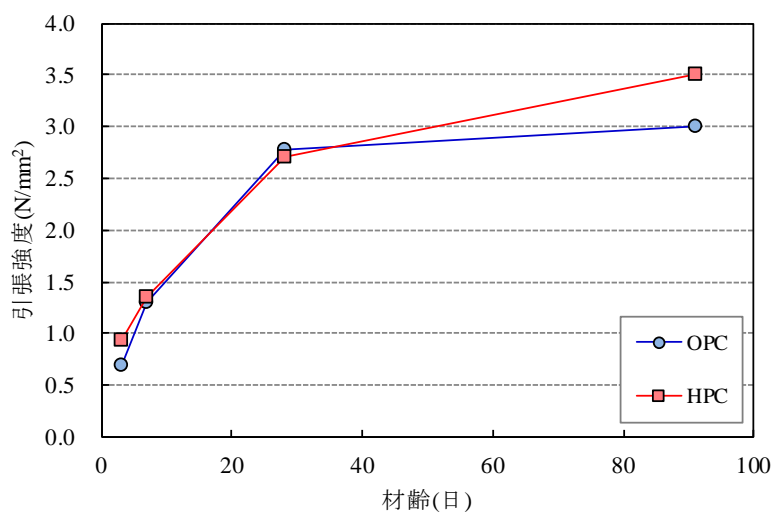


図 3.3-3 材齢と引張強度の関係

圧縮強度と引張強度の関係を図 3.3-4 に示す。圧縮強度と引張強度の関係式（土木学会，2012a）も図中に記載した。圧縮強度と引張強度の関係は、試験結果を用いて算出した回帰式に高い相関係数が得られ、土木学会式に概ね近似する結果が得られた。したがって、HFSC コンクリートにおいても土木学会式を用いて圧縮強度から引張強度を推定できる可能性がある。

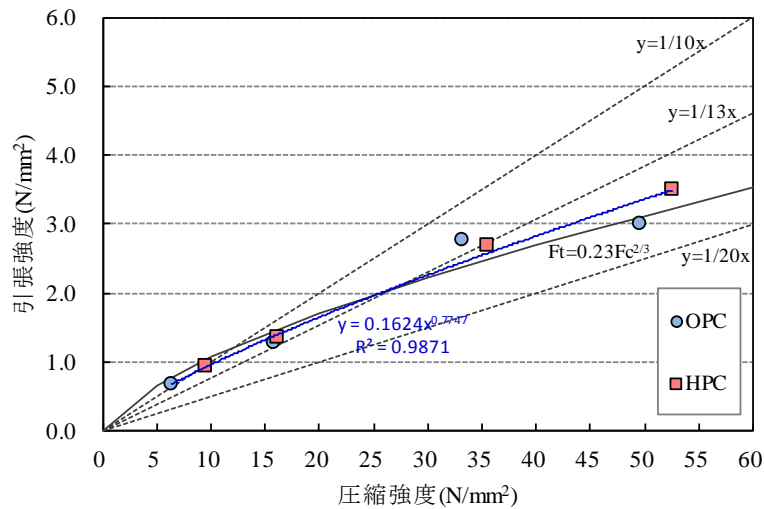


図 3.3-4 圧縮強度と引張強度の関係

- 静弾性係数試験結果

圧縮強度と静弾性係数との関係、および圧縮強度と静弾性係数の関係式（土木学会，2012a；建築学会，2015）を図 3.3-5 に示す。圧縮強度と静弾性係数の試験結果を用いて算出した回帰式は、建築学会式に近似する結果となり高い相関係数を示したが、土木学会式とは差が生じる結果となった。HFSC コンクリートの構成材料であるフライアッシュやシリカフェームは静弾性係数に影響を及ぼす要因とされているが、本結果からはその影響は確認されず、建築学会式（建築学会，2015）に定められている係数の実用性が高いことを示唆する結果が得られた。静弾性係数試験結果の一覧を表 3.3-18 に示す。

表 3.3-18 静弾性係数試験結果

HFSC の配合	セメントの種類	静弾性係数 [kN mm ⁻²]			
		3 日	7 日	28 日	91 日
HFSC325	OPC	15.8	22.1	26.1	29.2
	HPC	17.7	19.8	26.2	28.8

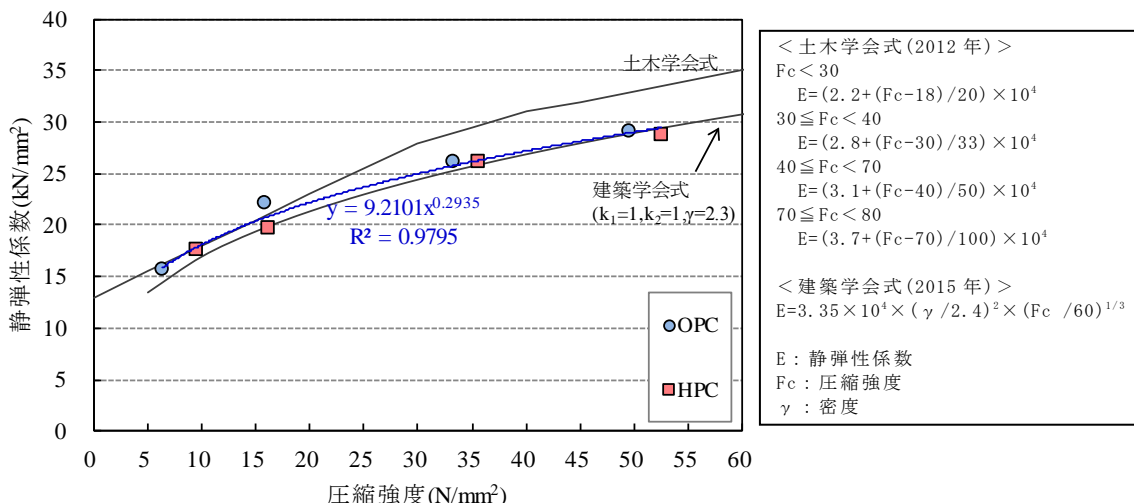


図 3.3-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

• ポアソン比の測定結果

ポアソン比の測定結果を図 3.3-6 に示す。ポアソン比は、0.17～0.18 の範囲となった。普通コンクリートのポアソン比は、一般に 0.18～0.20 (日本コンクリート工学会, 1996)、もしくは、一律 0.20 でよいと定義されている (土木学会, 2012a)。したがって、本試験における HFSC コンクリートのポアソン比は、一般的なコンクリートと同程度と考えられる結果が得られた。ポアソン比の測定結果の一覧を表 3.3-19 に示す。

表 3.3-19 ポアソン比の測定結果

HFSC の配合	セメントの種類	ポアソン比		
		7日	28日	91日
HFSC325	OPC	0.19	0.17	0.20
	HPC	0.18	0.19	0.18

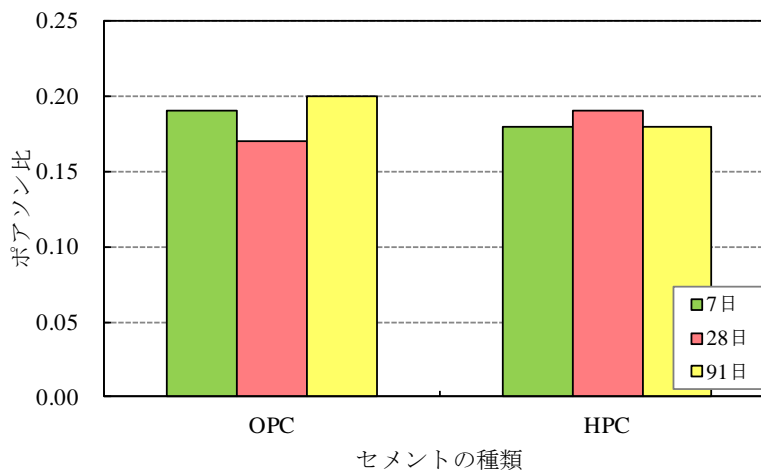


図 3.3-6 ポアソン比の測定結果

- 単位容積質量の測定結果

単位容積質量の測定結果を図 3.3-7 に示す。普通セメントを用いたコンクリートでは単位容積質量が 2.2~2.4 kg L⁻¹とされている(日本コンクリート工学協会, 1996)のに対し、セメント量を抑えて、軽量であるフライアッシュを多く含む配合である HFSC325 コンクリートの単位容積質量は、2.22~2.27 kg L⁻¹の範囲となり、単位容積質量はやや小さくなる傾向が示され、概ね想定どおりであった。単位容積質量についても、他の物性値と同様、一般的なコンクリートの範囲内と考えられる結果であった。単位容積質量の測定結果の一覧を表 3.3-20 に示す。

表 3.3-20 単位容積質量の測定結果

HFSC の配合	セメントの種類	単位容積質量 [kg L ⁻¹]					練混ぜ時の空気量 [%]
		3 日	7 日	28 日	91 日	理論値	
HFSC325	OPC	2.25	2.26	2.25	2.26	2.25	5.6
	HPC	2.27	2.27	2.27	2.27	2.25	5.1

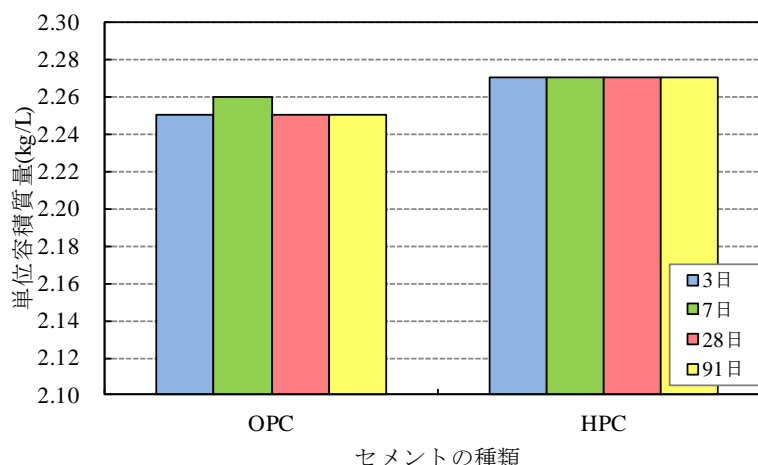


図 3.3-7 単位容積質量の測定結果

5) 試験結果の考察

場所打ちコンクリートを対象とした低アルカリ性コンクリート (HFSC325) の基本特性を取得した。圧縮強度については、場所打ちコンクリートのレファレンスとなる設計基準強度 ($\sigma_f = 18 \sim 24 \text{ N mm}^{-2}$) (原子力機構, 2017) を満たす結果が得られ、これまでに取得した HFSC424、HFSC226 と比較すると、セメント量から想定されるとおり両者の中間的な強度結果が得られた。これより、支保工の合理的な設計という面では、強度が確保できる HFSC424 が有利な配合であると言える。OPC と HPC の比較については、強度特性を比較すると顕著な差異は見られなかった。HFSC の配合の特徴はセメント量が少ないことから、セメントの種類による影響は小さい可能性がある。また、圧縮強度とその他の諸特性 (引張強度、静弾性係数) との関係において、コンクリート標準示方書に示されて

いる傾向と同様の傾向が確認できたことから、HFSC の基本的な性質はコンクリートの一般的に知られているものに近いと考えられる。

過年度から実施してきた試験を通して取りまとめた考察を以下に述べる。長期的な強度 (σ 28~91) の増加率の観点から HFSC325 と HFSC424 を比較すると、フライアッシュの含有量の多い HFSC325 の方が約 10 %前後高い結果が得られた。フライアッシュによるポゾラン反応の影響によると考えられ、HFSC の特徴的な性質である可能性が考えられる。セメント量の最も少ない HFSC226 の 28 日強度については、レファレンスとした設計基準強度に対して基準を下回る結果となり、支保工としての強度に対する実用性はやや低い結果となった。以上より、 σ 91 を超える試験の実施によるデータの取得や、低アルカリ性においては優れるが強度の観点からはやや実用性が低い配合の活用方法が課題であると考えられる。これについては、短期的には荷重が作用しないため早期の強度を必要としない場合やコンクリート以外の用途 (注入グラウトなど) について適用の可能性がある。これより、対象とする用途や部材を想定した物性取得について引き続き進めていくことが必要であると考えられる。

3.4 搬送・定置設備の概念設計

(1) 本項目の背景と目的

搬送・定置設備の概念設計は、処分場の地質環境条件や処分場概念、また、これらを前提として設計された処分容器および緩衝材から成る人工バリア仕様を上位条件として実施される。この搬送・定置設備の概念設計においては、その成果として、それぞれの設備の実現可能性を評価し、開発課題を明確にすることが求められる。このため、代表的な処分場概念や人工バリア仕様を条件として設備の概念設計を実施することが必要である。

平成 28 年度までに、代表的な廃棄体の定置方式（横置き定置方式、縦置き定置方式）および人工バリアの施工方式（ブロック方式、PEM 方式）の組合せを対象として搬送・定置設備の概念設計を行った。この概念設計では、それぞれの設備の構成や概略の寸法などの仕様を具体化した上で、それぞれの実現可能性の評価を行い、課題を抽出した。これらの概念設計を進める基盤として、搬送・定置設備への適用候補となる技術全般の調査と整理を行い、技術オプションとして体系的な取りまとめを行った。

搬送・定置設備に適用候補となる技術オプションは多種多様であり、例えば、対象物（廃棄体、緩衝材）を装置内の特定位置に保持する機能（把持機能）としては、押し込み方式や片持ち吊り下げなどがある（原子力機構，2015a）。このような技術オプションの特徴整理や絞込みでは、対象物を搬送・定置する具体的な動作も重要となり、搬送・定置設備に適用される技術オプションによって異なる。そのため、搬送・定置設備を使用した搬送・定置の動作を手順を追って分かりやすく示すことが必要であり、それには動画による可視化が効果的である。

そのため、平成 29 年度は、過年度までの設計の成果をもとに、搬送・定置の工程を対象とした動画による三次元可視化の検討を行った。可視化の対象は、ブロック・横置き定置方式に対応する、片持ち吊り下げ方式を適用した廃棄体搬送・定置装置を用いた廃棄体の搬送・定置工程とした。地下坑道や搬送・定置装置などの三次元モデルについては、過年度の成果を活用した。また、三次元可視化の技術としては、3D-PDF 技術を利用した。

3D-PDF は、PDF に 3D データを埋め込んだものである。3D-PDF 技術の既存の活用事例としては、地質構造の三次元表示や、機械部品の組み立て、建設施工手順の説明マニュアル等への適用がインターネット上で公開されている。3D-PDF を用いることで、動画により搬送・定置の作業状況などを分かりやすく示すことができる。また、CAD データの扱いに特化したソフトウェアやネットワークを介したシステムへの接続を行うことなく、無料の PDF 閲覧ソフトを用いて動画の再生を行うことができる。なお、予め搬送・定置の一連の作業を動画として編集することは必要となるものの、一度編集しておけば、視点を 360 度任意に変えることができ、再生、停止、繰り返し再生などの操作も簡便である。

本項目の実施について、「(2)搬送・定置工程の三次元可視化の検討」として以下に示す。また、本項目のまとめについては 3.5 節に示す。

なお、5 か年取りまとめ報告書において、本項目の成果および平成 28 年度までに実施した搬送・定置設備への適用可能な技術、他施設との整合を考慮した搬送・定置設備等の設計フローおよびそれらに基づく設計事例に関する成果を取りまとめた。

(2) 搬送・定置工程の三次元可視化の検討

本項目においては、ブロック・横置き定置方式に対応する搬送・定置設備による搬送・定置工程を対象として、所定の搬送・定置工程に沿って搬送・定置設備の動きを動画として再生可能な 3D-PDF のコンテンツ（以降、「3D-PDF コンテンツ」）の試作を行った。

3D-PDF コンテンツの基とした CAD データについては、過年度（原子力機構，2015a）に作成した CAD データを活用した。3D-PDF コンテンツの作成は以下の 1) から 3) の手順で実施した。また、4) に本検討の考察を示した。

- 1) CADデータの3D-PDFデータへの変換
- 2) 3D-PDFコンテンツの作成
- 3) 3D-PDFコンテンツの制御画面のカスタマイズ
- 4) 考察

1) CADデータの3D-PDFデータへの変換

まず、平成 26 年度の本事業の中の「処分施設の設計支援システムの構築」において試作された、搬送・定置設備、処分容器、地下坑道（主要坑道、処分坑道）、上部および下部の緩衝材の 3D-CAD データを、3D-PDF データに変換した。この 3D-CAD データは、三次元モデルに材料や管理情報などの属性データを関連付けた「データモデル」と、地下施設や地層などの各「データモデル」とを統合した「統合モデル」の試作の成果である。

CAD データの 3D-PDF データへの変換では、CAD データを作成した汎用 CAD ソフトウェア（Autodesk 社製）を利用して、動画に不要なデータの削除、物体の移動を設定し易くするためのグループ化および構造化を実施し、CAD ソフトウェアに組み込みの 3D-PDF 出力機能を利用して 3D-PDF データ（PDF 形式）に変換して出力した。

2) 3D-PDFコンテンツの作成

1) において作成した 3D-PDF データをもとにして、3D-PDF コンテンツ作成用ソフトウェアを用いて、搬送・定置設備や視点の移動を設定することにより動画を作成した。なお、本作業では、Tech Soft 3D 社製の 3D-PDF 取り扱い機能を活用したソフトウェアを使用した。

動画の作成にあたっては、搬送・定置の工程に沿った部分的な再生も可能とするため、以下①～④の工程に分割した。各工程の 3D-PDF コンテンツの開始画面および終了画面を図 3.4-1～図 3.4-4 に示す。

- ① 搬送・定置設備が主要坑道内を移動する（図 3.4-1）。
- ② 搬送設備から定置装置が降り、処分坑道内に進入する（図 3.4-2）。
- ③ 処分坑道内に設定された下部緩衝材上に処分容器を定置する。定置後、定置装置は処分坑道を後退する（図 3.4-3）。
- ④ 処分容器の上に上部緩衝材が設置される様子を、上部緩衝材の透明度を変化させる等により表現する（図 3.4-4）。

各工程の動画においては、搬送・定置の動作が分かり易く表示されるように視点の移動を設定した。例えば、上記②に対応する図 3.4-2 の処分坑道内進入工程についての動画の初期画面では、地下坑道、搬送・定置設備が分かるような視点を設定し、処分坑道内への定置装

置の進入にともない、処分坑道内の廃棄体の定置位置が表示されるように視点の移動を設定した。



(a) 初期画面

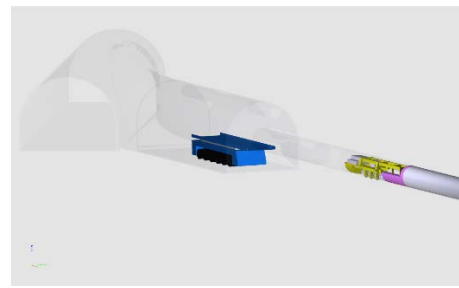


(b) 終了画面

図 3.4-1 主要坑道移動工程の初期画面および終了画面



(a) 初期画面

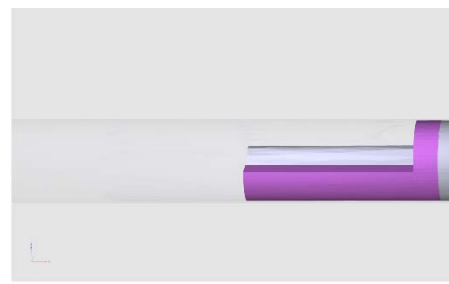


(b) 終了画面

図 3.4-2 処分坑道内進入工程の初期画面および終了画面



(a) 初期画面

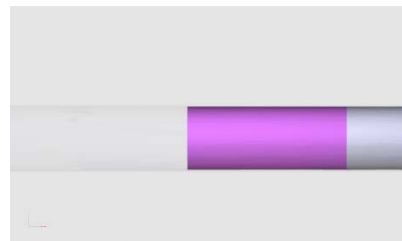


(b) 終了画面

図 3.4-3 処分容器定置工程の初期画面および終了画面



(a) 初期画面



(b) 終了画面

図 3.4-4 上部緩衝材設置工程の初期画面および終了画面

3) 3D-PDFコンテンツの制御画面のカスタマイズ

3D-PDF コンテンツについて、搬送・定置の工程毎の部分再生、および搬送・定置の全工程の一括再生等の制御を実現するために必要なカスタマイズを行った。ここでは先ず、前述の 3D-PDF コンテンツ作成用ソフトウェアを使用して、動画および動画の説明文の表示領域の設定や、動画の再生を制御するためのボタンなどの設置を行ったものを PDF 形式で出力した。なお、今回使用した 3D-PDF コンテンツ作成用ソフトウェアが未対応である、ボタン操作による動画再生などのアクションの設定や、上部緩衝材の透明度の変化などについては、この PDF 形式のファイルを Adobe 社製 PDF 編集ソフトに読み込んで設定を行った。

このカスタマイズを行った 3D-PDF コンテンツが格納された PDF ファイルを、Adobe 社製の無料の PDF 閲覧ソフトを起動して読み込むと図 3.4-5 の画面が表示される。

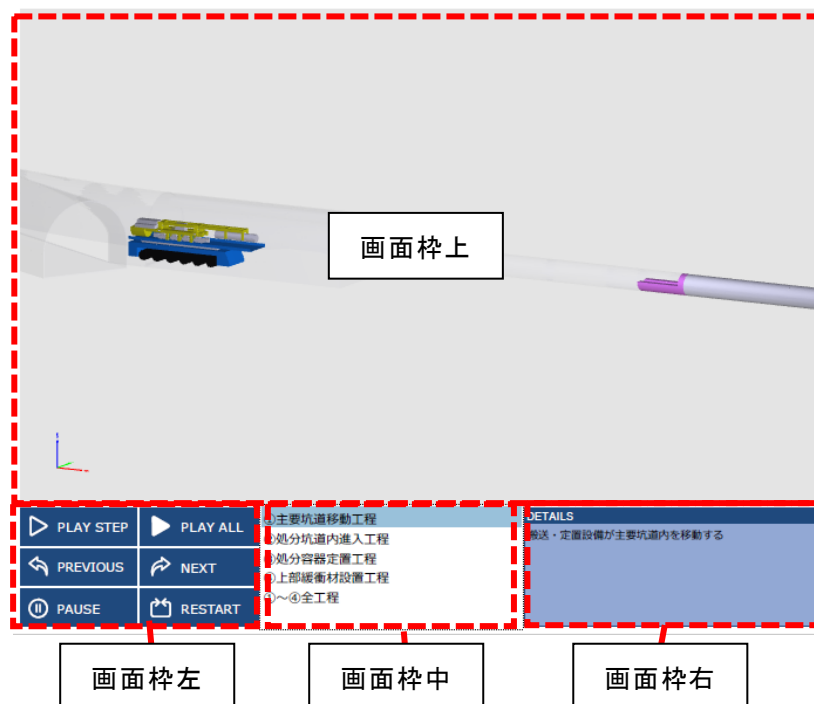


図 3.4-5 画面構成

画面は、4つの画面枠に分割されている（図 3.4-5）。画面枠上は、動画が表示される領域である。画面枠中には動画のタイトル一覧が表示される。また、画面枠右には、画面枠中で選択された動画の概略が分かる説明文が表示されるように設定した。

動画のタイトルおよび説明文を表 3.4-1 に示す。

表 3.4-1 動画のタイトルおよび説明文

タイトル	説明文
①主要坑道移動工程	搬送・定置設備が主要坑道を移動する
②処分坑道内進入工程	搬送設備から定置装置が降り、処分坑道内に進入する
③処分容器定置工程	処分坑道内に設置された下部緩衝材上に処分容器を定置する。定置後、定置装置は処分坑道を後退する
④上部緩衝材設置工程	緩衝材上に設置された処分容器の上に上部緩衝材が設置される
①～④全工程	①～④全工程の再生

画面枠左には、動画の再生、停止、再開を制御するためのボタンが配置されており、これらのボタンを押したときの動作は以下のとおりである。

PLAY STEP: 画面枠中で選択されたタイトルの動画のみを再生する

PLAY ALL: 動画の全タイトルを再生する

PREVIOUS: 画面枠中で選択されたタイトルの上のタイトルの動画を再生する

NEXT: 画面枠中で選択されたタイトルの下のタイトルの動画を再生する

PAUSE: 動画の再生を一時停止する

RESTART: 動画の再生を再開する

4) 考察

本検討では、搬送・定置設備に適用される技術オプションによって異なる、搬送・定置設備を使用した搬送・定置の動作に関して手順を追って分かり易く示すことを目的として、廃棄体の搬送・定置工程を対象として、3D-PDF 技術を利用して、三次元動画として可視化する試みを行った。試行の結果、汎用 CAD ソフトウェアで作成された CAD データを利用して CAD データから 3D-PDF への変換が問題なく出来ること、変換データを三次元動画として可視化出来ることが確認できた。

3D-PDF による三次元動画においては、動画の再生中に一時停止して、視点を 360 度任意に変えることができ、再生、停止、繰り返し再生等の操作も簡便であること、また、動画の再生と同時に、動画に関する説明文を表示させることで、工程をより分かり易く示すことが出来ることを確認できた。今後、設計検討などで作成された CAD データを三次元動画化して搬送・定置工程における作業などを可視化することで見えてくる、搬送・定置設備に適用候補となる技術オプションの特徴整理などに活用することが期待できる。

また、3D-PDF を閲覧する上では、CAD ソフトウェアやネットワークを介した専用システムを利用することなく、通常の PDF ドキュメントの閲覧に用いられる無料の PDF 閲覧ソフトウェアが利用できること、および既往の研究論文などが一般に PDF 形式で公開されている現状を踏まえると、3D-PDF 技術による設計検討の取りまとめは、設計などに関する研究成果の蓄積や公開に適用性があると考えられる。

3.5 まとめ

(1) 直接処分方策に関する調査・検討

・海外情報の調査

IAEA や諸外国における状況については、使用済燃料の地層処分に係る保障措置適用を技術的に支援する IAEA の専門家会合 (ASTOR) に参加し、各国の地層処分の状況および保障措置に関する技術的トピックについての情報収集を継続した。IAEA からは、詰替施設の封じ込め/監視装置 (C/S) 機器の技術的な要求事項はまとめられたが、詳細については施設設計が確定するまで検討を凍結すること、地下施設はブラックボックスアプローチを適用することで検討が進んでいること、PGET が PWR/BWR/VVER440 の使用済燃料の検認への適用について承認されたことが示された。また、これまでの ASTOR の活動成果のまとめとして、処分施設に適用可能な技術をまとめた技術文書が 2017 年 8 月に IAEA から発行された。

さらに、先行国であるスウェーデンの放射線安全機関を訪問し保障措置対策および核セキュリティ対策の検討状況について聞き取り調査を実施した。現状では、概念設計段階であるが、施設設計の進捗と並行して、適用する保障措置および核セキュリティの方策、ならびに検認装置、封じ込め/監視装置、核セキュリティ機器の種類や配置などに関する具体的検討が進むことが確認できた。

今後とも、ASTOR を初めとした国際会議への参加などを通じて、IAEA および諸外国の使用済燃料の直接処分に適用する保障措置および核セキュリティの検討状況に関する最新の情報を入手し、わが国における検討に適宜反映できるようにしていくことが有用であると考えられる。

・保障措置技術開発

超音波計測を用いた廃棄体の同定・識別および未開封確認技術の適用性を確認するため、これまで実施してきたシミュレーションによる適用性確認結果を検証する観点で、溶接部に人工的に付与した特徴を有する炭素鋼の試験体を用いて超音波計測を実施し、適用可能性を検討した。その結果、シミュレーションによる評価結果のとおり、炭素鋼の溶接の特徴に対して超音波計測技術が適用できる可能性が確認できた。

また、銅製の容器部分を溶接する複合容器に対して、炭素鋼と同様に超音波計測を用いた同定・識別技術の適用性をシミュレーションにより確認し、特徴を付与する位置や大きさに配慮すれば炭素鋼と同様に本技術が適用できることが確認できた。しかしながら、摩擦攪拌溶接法を用いる場合には、特徴の付与方法を検討する必要がある。炭素鋼または複合のいずれの容器を使用するとしても、将来的には処分容器の具体的な設計や溶接方法が決定した時点で試験サンプルを用いた試験を実施し、シミュレーション解析結果の検証を行うことが必要と考える。

・核セキュリティ対策に係る検討

核セキュリティ技術については、これまでに IAEA が発行している核セキュリティシリーズ文書の要求事項の確認、および仮想施設に対する仮想脅威の評価をもとに、処分施設に適用可能な核セキュリティ体制や核セキュリティ機器を整理してきた。これに、上空からの侵入などの脅威に対する核セキュリティ対策を加え、わが国の特徴も考慮した核セキュリティシステムの種類や配置を例示した。

本検討では一般的な要件を基にシステムを検討したが、実施の施設設計が決まった段階で設計脅威を評価しシステム検討を行う必要がある。わが国はもちろんのこと先行国でも長期的な対応が必要となる処分施設に対する核セキュリティ要件は未だ検討が始まった段階であるため、継続的に最新の情報を入手することでわが国における検討に反映できるようにしていくことが必要である。また、核セキュリティ対策は、実際の処分施設初期設計段階から盛り込み、その後の状況に応じて適宜改良していくことが重要である。

(2) 人工バリアの設計

・ 処分容器の設計

平成 28 年度に引き続き、使用済燃料の濃縮度や燃焼度などの多様性に着目して臨界安全解析および放射線遮へい解析を実施し、平成 27 年度までに提示された基本仕様の処分容器の成立性を確認した。

臨界安全解析については、PWR の使用済燃料を対象として、臨界安全上の保守性を考慮して燃焼度クレジットの考慮において核分裂生成物による中性子の吸収を考慮しない条件での解析を行い、処分後の未臨界性を維持するために必要な最低燃焼度を導出した。その結果と、平成 28 年度に実施した、燃焼度クレジットの考慮において核分裂生成物による中性子の吸収を考慮する条件での結果との比較から、燃焼度クレジット対象核種の種類や未臨界を判定する基準値は最低燃焼度への影響が大きいことを確認した。また、今後、わが国で実際に発生している使用済燃料の燃焼度分布のデータと本検討で評価された最低燃焼度との比較が重要である。

放射線遮へい解析については、BWR 使用済燃料を対象として、遮へいの観点から保守的な条件となる高燃焼度の使用済燃料に対して解析を行い、100 mm の遮へい厚さの設定により、使用済燃料集合体からの放射線が引き起こす水の放射線分解によって生成される酸化性化学種は処分容器の腐食に影響を及ぼさないことを確認した。

・ 処分容器の設計における臨界安全に関する検討

上記の「処分容器の設計」で示した、処分容器内部における臨界安全性評価の不確実性の低減と未臨界性の確実な維持に向けて、以下の項目について検討を行った。

処分容器破損状態に対する推定臨界下限増倍率の評価の向上に向けて、破損状態の処分体系に対して類似性の高い臨界実験データを抽出するための類似性評価を実施した。その結果、現在公開されている臨界実験データでは類似性の高いデータは見いだされなかったが、将来的に STACY 更新炉にて鉄を構造材模擬体とした実験が実施された場合には、破損状態の処分体系に対する推定臨界下限増倍率の評価に適用できる可能性があることが示唆された。

岩盤や緩衝材を構成する物質である SiO_2 の反射体効果に関する検討では、類似性評価を用いて、 SiO_2 反射体効果を考慮した直接処分体系と類似する臨界実験データの抽出を実施した。その結果、コンクリート反射体を使用した臨界実験データにおいて 30 以上のケースで高い類似性を示すことがわかった。このことから、直接処分体系において SiO_2 反射体効果を考慮した推定臨界下限増倍率の評価が可能であると考えられた。

中性子吸収材の検討では、BWR 燃料を対象とした燃料集合体へ挿入可能な中性子吸収材

について、保守的な処分容器の破損を考慮した体系でも未臨界を担保できうる最低必要量の検討を、燃料集合体 7 体および 12 体収容の処分容器を対象に実施した。その結果、事前に中性子吸収材を挿入しておくことで、処分容器の破損を考慮しても未臨界を十分に担保できる可能性を示した。

臨界発生時における処分システムへの影響評価の必要性の検討では、米国の評価事例と比較し、わが国で想定する直接処分システムにおいて仮に臨界が発生すると仮定しても、処分システム全体に大きな影響を及ぼす可能性は小さいことが示唆された。

・緩衝材の設計

ガラス固化体仕様の緩衝材（乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 30 wt%）について、銅外層と炭素鋼からなる複合処分容器を軟岩系の岩盤環境下に豎置き定置する条件、および、PEM 方式、炭素鋼処分容器、軟岩、豎置き定置方式の組合せの条件において設計解析を実施し、それにもとづく緩衝材厚さの変化から、処分後においても、処分容器を支持する人工バリアの形状、寸法は概ね維持されることが確認された。また、処分後において緩衝材が応力緩衝機能を発揮して、応力緩衝性の要件（所要の期間、処分容器および岩盤が破壊しない）を満足することを確認した。

高乾燥密度、高ケイ砂混合率の緩衝材（乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 50 wt%）の適用性について、炭素鋼処分容器を軟岩系の岩盤環境下に豎置き定置する条件において設計解析を行い、それにもとづく緩衝材厚さの変化から、処分後においても、処分容器を支持する人工バリアの形状、寸法は概ね維持されることが確認された。また、緩衝材が応力緩衝性の要件を満足することを確認した。

平成 26 年度から平成 29 年度までの解析をもとに、ガラス固化体仕様の緩衝材の適用性、および、高乾燥密度、高ケイ砂混合率の緩衝材の適用性を整理した。その結果、ガラス固化体仕様の緩衝材は、ブロック方式を対象として、応力緩衝性の要件が満足されることを確認した。一方、PEM 方式の場合には、岩盤が破壊に近い状態となり得ることが推定された。ここで、本検討では PEM 容器に全く隙間のない保守的な仮定に基づき PEM 容器の腐食膨張量を設定して解析を行ったことから、今後、PEM 容器の適用や仕様の見通しがより明確になった段階でより詳しい設計検討を実施し確認することが合理的と考えられる。

緩衝材の圧密試験および三軸圧縮試験を、乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 50 wt% の供試体について実施し、緩衝材の力学特性などを取得した。平成 27 年度の成果である、ケイ砂混合率を 30 wt%、乾燥密度を 1.8 Mg m^{-3} の緩衝材の圧密試験結果と比較すると、強度特性である圧縮指数についてはほとんど差が見られなかったが、ケイ砂混合率を 20 wt% 増加させたことによる有効粘土密度の低下により膨潤指数は 2 割程度下がり、膨潤性能の低下が確認された。三軸圧縮試験により得られた限界状態パラメータの値は、乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 30 wt% の供試体から得られた値と近い値が得られた。

(3) 地下施設の概念設計

・地下施設の設計

過年度における成果をもとに、坑道の設計の前提となる地盤条件と人工バリア条件の組み合わせごとに、坑道の設計において重要となる項目についての違いや優劣などの評価を

行うことで、各組み合わせの特徴の整理と組み合わせ間での比較ができるようにした。坑道の設計において重要となる項目としては、掘削技術や空洞の力学的安定性評価に加え、坑道の設計に関わりのある定置技術などの項目を設定した。また、人工バリア条件としては、人工バリアの定置方式（ブロック方式・PEM方式）および廃棄体の定置方式（横置き定置方式・縦置き定置方式）に着目した。その結果、限られた項目についての評価に基づく知見ではあるが、地下施設の設計の観点からは、地盤条件と人工バリア条件の組み合わせに関して、特に有利な組み合わせや大きな問題のある組み合わせは見られなかった。

今後は、評価の妥当性の向上のための評価項目の拡充あるいは評価の効率化のための評価項目の合理化などの検討、さらには、組み合わせ間の違いや優劣をより明確にしていくための評価項目への重要度の設定や評価結果の重みづけについても検討し、評価結果をなるべく定量的に示すことができるようにすることが望ましいと考えられる。

・支保工施工合理化のための基本特性の取得

場所打ちコンクリートを対象とした低アルカリ性コンクリート HFSC325（セメント：シリカフェーム：フライアッシュ＝3：2：5）の基本特性を取得した。圧縮強度については、レファレンスケースにおける設計基準強度を満たす結果が得られ、これまでに取得した HFSC424、HFSC226 と比較すると、セメント量の多少から当初想定したとおり両者の中間的な強度結果が得られた。また、2種類のセメント（OPC と HPC）の強度特性を比較すると顕著な差異は見られなかった。HFSC の配合の特徴はセメント量が少ないことであることから、セメントの種類による影響は小さい可能性がある。

HFSC325 は、設計基準強度としては HFSC424 に劣り、支保工の合理的な設計における適用性はやや低い面があるが、長期的な強度増進が期待できる可能性があり、早期に荷重が作用しない部材などについては適用の可能性もある。また、HFSC424 と比較してセメント量が少ないことから、岩盤に有意に影響する可能性のあるアルカリ性の低減については優れており、上記のように用途を選ぶことにより有効に活用できる可能性がある。

フライアッシュやシリカフェームを多量に含む HFSC のようなコンクリートの性状については既往のデータが少ないことから、性状や基本特性といったデータ取得は引き続き必要であると考えられる。

(4) 搬送・定置設備の概念設計

本検討では、適用される搬送・定置設備の技術オプションによって異なる搬送・定置の動作を分かり易く示すことを目的として、廃棄体の搬送・定置工程を三次元動画として可視化する試みを行った。具体的には、3D-PDF 技術を利用して、CAD データから 3D-PDF に変換することで、三次元動画として可視化した。その結果、搬送・定置工程を、三次元動画およびその動画とともに表示される説明文により分かり易く示すことができることを確認した。

この 3D-PDF 技術を利用した三次元可視化は、技術オプションの特徴の把握や違いの比較などに活用することが期待できる。また、3D-PDF の閲覧には無料の PDF 閲覧ソフトウェアが利用できることから、設計検討の成果などの三次元情報の蓄積や公開にも有効となることが期待される。

【参考文献】

- C. Demaziere (2002) : "Reactor Physics Calculations on MOX Fuel in Boiling Water Reactors (BWRs)", Proc. 7th Information Exchange Meeting on Partitioning and Transmutation.
- CRWMS M&O (1997): Criticality Consequence Analysis Involving Intact PWR SNF in a Degraded 21 PWR Assembly Waste Package, BBA000000-01717-0200-00057 REV00.
- D. J. Diamond, B. P. Bromley, and A. L. Aronson (2002): "Studies of the Rod Ejection Accident in a PWR", Brookhaven Technical Report W-6382 1/22/02.
- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構(2005): TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013/FEPC TRU-TR2-2005-02.
- Department of Defense (2005): Unified Facilities Criteria (UFC) , Security engineering: entry control facilities/access control points, UFC 4-022-01.
- Department of Defense(2010): Unified Facilities Criteria (UFC) , Selection and application of vehicle barriers, UFC 4-022-02 (Change 1) .
- Department of Defense(2013a): Unified Facilities Criteria (UFC) , DoD minimum antiterrorism standards for buildings, UFC 4-010-01 (Change 1) .
- Department of Defense(2013b): Unified Facilities Criteria (UFC) , SECURITY FENCES AND GATES, UFC 4-022-03.
- 土木学会(2006): 2006年制定トンネル標準示方書 山岳工法・同解説, 2006年7月.
- 土木学会(2012a): 2012年制定コンクリート標準示方書設計編, 2012年3月.
- 土木学会(2012b): 2012年制定コンクリート標準示方書施工編, 2012年3月.
- Embry-Riddle Aeronautical University Scholarly Commons(2015): Examining Unmanned Aerial System Threats & Defenses: A Conceptual Analysis.
- エネルギー総研(エネルギー総合工学研究所)(2002):平成13年地層処分場の高圧環境における性能評価手法に関する技術開発.
- Gabriel C. Birch, John C. Griffin, Matthew K. Erdman(Sandia National Laboratories)(2015): UAS Detection, Classification, and Neutralization: Market Survey 2015, SAND2015-6365.
- 原環機構(原子力発電環境整備機構)(2011): 地層処分事業の安全確保(2010年度版), NUMO-TR-11-01.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2014):平成25年度地層処分技術調査等事業使用済燃料直接処分技術開発報告書.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2015a):平成26年度地層処分技術調査等事業使用済燃料直接処分技術開発報告書,平成27年3月.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2015b):日本原子力研究開発機構核不拡散・核セキュリティ総合支援センター(ISCN)における活動について、原子力科学技術委

- 員会 核不拡散・核セキュリティ作業部会（第4回）。
- 原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2015c）：わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価－直接処分第1次取りまとめ－，JAEA-Research 2015-016.
- 原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2016a）：平成27年度地層処分技術調査等事業 直接処分等代替処分技術開発報告書，平成27年3月。
- 原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2016b）：低アルカリ性セメント（HFSC）を使用したコンクリートの基本特性，JAEA-Data/Code 2016-011.
- 原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2017）：平成28年度地層処分技術調査等事業 使用済燃料直接処分技術開発報告書，平成29年3月。
- 原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2017）：平成28年度地層処分技術調査等事業 「直接処分等代替処分技術開発」報告書。
- 原子力規制委員会（2016）：加工施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈の制定について
- 原子力規制委員会（2017）：STACYの炉心の安全確認事項について，
<<https://www.nsr.go.jp/data/000156521.pdf>>，（2017年4月24日閲覧）。
- Hicks, T., Baldwin, T. and Winsley, R. (2015) : Analysis of The Likelihood of Post-Closure Criticality in a Geological Disposal Facility, International Conference on Nuclear Criticality Safety, ICNC2015, Charlotte, NC, USA, Sep. 13-17 2015.
- 本間信之，谷口直樹，川崎学，川上進（2002）：オーバーパック腐食生成物の弾性係数の測定，JNC TN8400 2002-010.
- Hubbell, J. H. and Seltzer, S. M. (2011) : Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z =1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest, NISTIR 5632 (Data last updated 2011).
- IAEA (2007) : IAEA Nuclear Security Series No. 4, Engineering safety aspects of the protection of nuclear power plants against sabotage.
- IAEA (2011) : IAEA Nuclear Security Series No. 13, Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (INFCIRC/225/Revision 5) .
- IAEA (2017) : Technologies Potentially Useful for Safeguarding Geological Repositories, STR-384.
- Idaho National Engineering Laboratory (1995) : RELAP5/MOD3 Code Manual, NUREG/CR-5535, INEL-95/0174.
- 入矢桂史郎，栗原雄二，藤島敦（2004）：ポゾランを高含有した低アルカリ性吹付けコンクリートの性状，土木学会第59回年次学術講演会（平成16年9月），CS1-029, pp. 57-58.

- 入矢桂史郎, 中山雅, 小西一寛, 三原守弘(2006): ポズラン高含有低アルカリ性吹付けコンクリートの施工性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 173-178.
- Izawa, K., Tonoike, K., Sono, H., Miyoshi, Y. (2014): CRITICAL EXPERIMENTS FOR FUEL DEBRIS USING MODIFIED STACY, PHYSOR 2014 proceedings, JAEA-CONF-2014-003.
- Janach, W. (1977): Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 104. p. 209-215.
- K. Yamate, S. Abeta, K. Suzuki, and S. Doi (1995): "MOX Fuel Design and Development Consideration", International Atomic Energy Agency, Technical Committee Meeting on Recycling of Plutonium in Water Reactor Fuel, Newby Bridge, Windermere, U. K..
- 核燃料サイクル開発機構(2005): 緩衝材の鉱物学的長期変遷シナリオ, JNC TN8400 2005-020.
- Kamei, G., Yusa, Y. and Sasaki, N. (1992): "Natural analogue study on the long-term durability of bentonite Time, temperature condition and water chemistry on illitization at the Murakami deposit, Japan", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Scientific Basis for Nuclear Waste Management XV, Vol. 257, pp. 505-512.
- 経済産業省(2017): 別表第1 鉄鋼材料の各温度における許容引張応力, <http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2005/files/171214-3.pdf>, (2017年12月25日閲覧).
- 建築学会(2015): 建築工事標準仕様書・同解説, 2015年7月.
- Koide, T., Endo, T., Yamamoto, A. et al. (2014): Impact of Nearest Neighbor Distribution of Fuel Particle on Neutronics Characteristics in Statistical Geometry Model, "Proc. Int. Conf. on Physics of Reactors (PHYSOR 2014), Kyoto, Japan, Sep. 28-Oct. 3, 2014.
- 更田豊志(原子力規制委員会)(2015): 地震・津波・航空機衝突対策に関する規制基準、日本原子力学会「2015年秋の大会」静岡大学静岡キャンパス 原子力安全部会企画セッション.
- Malmer, C. J. (2001): ICRU Report 63. Nuclear Data for Neutron and Proton Radiotherapy and for Radiation Protection, Medical Physics, Volume 28, Issue 5, pp. 861.
- 松本一浩, 藤田朝雄, 石川博久, 菅野毅, 鈴木英明, 石黒勝彦(1997): 緩衝材の飽和透水特性, PNC-TN8410 97-296.
- Nagaya, Y., Okumura, K., Mori, T., Nakagawa, M. (2005): MVP/GMVP II: General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods, JAERI 1348.
- 日本原子力研究所(2001): 燃焼度クレジット導入ガイド原案, JAERI-Tech 2001-055.
- 日本コンクリート工学協会(1996): コンクリート便覧(第二版), 1996年7月.
- 日本工業標準調査会(2016): 製品の幾何特性仕様(GPS)ー長さに関わるサイズ公差のISOコード方式ー第2部: 穴及び軸の許容差並びに基本サイズ公差クラスの表(JIS

B 0401-2) .

- 西村繭果, 棚井憲治, 高治一彦, 平井卓, 白武寿和(2006): 緩衝材長期力学挙動評価モデルのパラメータ設定に関する検討, JAEA Research 2006-036.
- NRC (2017): PART 60-DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES IN GEOLOGIC REPOSITORIES ,
<<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part060/full-text.html>>, (2017年12月22日閲覧).
- Oak Ridge National Laboratory (2011): Scale: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design, ORNL/TM-2005/39, Version 6.1.
- OECD/NEA Nuclear Science Committee (2013): International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA-1486/12.
- 奥村啓介, 長屋康展(2011): JENDL-4.0に基づく連続エネルギーモンテカルロコードMVP用の中性子断面積ライブラリーの作成と ICSBEP ハンドブックの臨界性ベンチマーク解析への適用, JAEA-Data/Code 2011-010.
- 奥野浩, 佐藤庄平, 川崎弘光(2006): 二酸化珪素または水を減速材とした臨界及び未臨界アクチニド濃度の計算, 2006年原子力学会秋の大会.
- 大久保誠介, 金豊年(1993): 非線形粘弾性モデルによる円形坑道周辺岩盤の挙動のシミュレーション, 資源と素材, Vol.109, pp.209-214.
- 大久保誠介, 西松裕一, 緒方義弘(1987): 非線形粘弾性モデルによる坑道変形のシミュレーション, 日本鉱業会, Vol.103, pp.293-296.
- Roscoe, K. H. and Burland, J. B. (1968): On the Generalized Stress-Strain behavior of 'Wet' clay, Engineering Plasticity, Cambridge University Press, pp.535-609.
- Schofield and Wroth. (1968): Critical state soilmechanics, McGraw-Hill, London.
- Schofield and Wroth. (1968): Critical state soilmechanics, McGraw-Hill, London.
- Sekiguchi and Ohta. (1977): Induced anisotropy and time dependency in clay, Proc. 9th ICSMFE, special.
- SKB (2012): KBS-3H Complementary studies, 2008-2010, SKB TR-12-01, 58p.
- SKB (2006): Reliability of nondestructive testing (NDT) of the copper canister seal weld, R-06-08.
- SKB (2010): Design analysis report for the canister, TR-10-28.
- 須田久美子, Sudhir, M., 本橋賢一(1992): 腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.751-756.
- 須山賢也(2009): 臨界安全からみた核データに対する要求, 核データニュース, No.92.
- 須山賢也, 望月弘樹, 高田友幸, 龍福進, 奥野浩, 村崎穰, 大久保清志(2009): 連続エネルギーモンテカルロコード MVP および MCNP を使用する統合化燃焼計算コードシステム-SWAT3.1, JAEA-Data/Code 2009-002.
- 鈴木英明, 藤田朝雄(1999): 緩衝材の膨潤特性, JNC TN8400-99-038.

- 高治一彦, 杉野弘幸, 奥津一夫, 三浦一彦, 田部井和人, 納多勝, 高橋真一, 杉江茂彦 (1999): ニアフィールドの長期構造安定性評価, JNC TN8400 99-043.
- 高治一彦, 鈴木英明 (1999): 緩衝材の静的力学特性, JNC TN8400 99-041.
- 高治一彦, 鈴木英明 (1999): 緩衝材の静的力学特性, JNC TN8400 99-041.
- 高谷哲, 中村士郎, 山本貴士, 宮川豊章 (2013): コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 69, No. 2, pp.154-165.
- USNRC (2011a): Intrusion Detection Systems and Subsystems, NUREG-1959
- USNRC (2011b): Access Control Systems, NUREG-1964
- USNRC (2014): Physical Security Best Practices for the Protection of Risk-Significant Radioactive Material, NUREG-2166.
- 山本健士, 秋江拓志, 須山賢也, 細山田龍二 (2015): 使用済燃料直接処分の臨界安全評価—燃焼度クレジット評価のためのデータの整備— (受託研究), JAEA-Technology 2015-019.

第 4 章

直接処分施設の設計支援システムの構築

4 章詳細目次

4. 直接処分施設の設計支援システムの構築	4-1
(1) 背景と目的	4-1
(2) iSRE の開発状況	4-3
1) iSRE の機能の概要	4-3
2) iSRE 開発の進捗	4-4
3) iSRE の開発環境	4-5
(3) iSRE の設計および試作	4-6
1) 「モニタリングデータ更新」のインターフェースの試作	4-6
2) データベースの詳細設計および試作	4-7
① 「積算 DB」の詳細設計および試作	4-7
② 「維持管理・補修履歴データベース」の詳細設計および試作	4-9
3) iSRE の利用マニュアルの整備	4-13
① システム利用者の関係性と利用方法の整理	4-13
② 整備した利用マニュアルの概要	4-14
(4) 過年度に抽出された課題への対応	4-16
1) イベント機能	4-16
2) 三次元モデルからのアクセス機能の検討	4-19
(5) 試運用による機能の確認と改善点の抽出	4-20
1) 適用ケースの整理	4-20
2) 試運用のケース選定および試行	4-23
① 試運用ケース 1 における試行	4-23
a. 試運用ケース 1 のシナリオの設定	4-23
b. 試運用ケース 1 の実施	4-25
② 試運用ケース 2 における試行	4-37
a. 試運用ケース 2 のシナリオの設定	4-37
b. 試運用ケース 2 の実施	4-38
3) 試運用を通して確認できた機能と課題	4-46
① iSRE の実用化に向けた iSRE 機能の向上に関する課題と対策・考察	4-47
② iSRE の実用化に向けたソフトウェア技術などに関する課題と対策・考察	4-48
③ 第三者の理解促進に向けた考察	4-48
(6) まとめと今後の課題	4-51
参考文献	4-52

4. 直接処分施設の設計支援システムの構築

(1) 背景と目的

使用済燃料の直接処分の工学技術に関する情報を管理する知識化ツールの整備を目的として、「地層処分エンジニアリング総合支援システム (integrated System for Repository Engineering、以下「iSRE」という)」の開発を行う。

iSRE のシステムは、百年程度の長期にわたる処分事業の情報を管理・継承するとともに、蓄積・統合された情報を用いて合理的な設計・施工管理に資することを旨とするものであり、その開発においては以下の実現を目標とする。

- ・ 処分場の工学技術に関する知識化ツールとして、知識情報の管理・継承を行う。
- ・ 調査・建設・操業・閉鎖の各プロセスでの設計・施工・維持管理に関わる情報の管理を支援する。
- ・ 設計に用いるデータを共有し、一元的に管理することで、処分容器、緩衝材、搬送・定置設備、地下施設および地上施設の整合的な設計を支援する。
- ・ 事業期間における情報の増大、技術の進歩に応じて繰り返し行われる設計を支援する。
- ・ 建設時・操業時・閉鎖時における建設機械や搬送・定置設備などの動作をシミュレーションし、安全な現場作業計画の立案を支援する。
- ・ ステークホルダーの理解促進を支援する。

以上の開発目標を具現化するための iSRE の概念は、外部システムとの連携を可能とするインターフェース機能、情報の格納場所となるデータベース機能により構成する。「処分場の設計」と iSRE との情報のやり取りについては、将来的には現在開発中の IFC フォーマットにより接続されることを想定した開発を行う。iSRE の概念図を図 4-1 に示す。

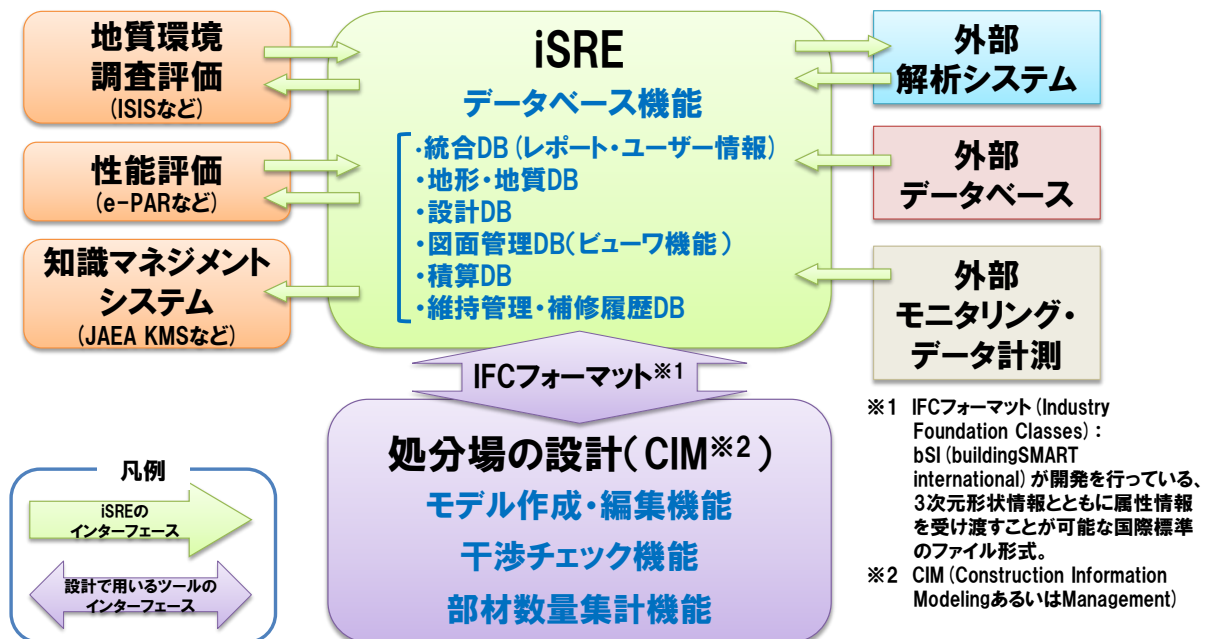


図 4-1 地層処分エンジニアリング総合支援システム (iSRE) の概念図

平成 29 年度は、平成 28 年度までの開発に引き続きインターフェースの開発としてモニタリングデータ更新のためのインターフェースの試作、データベースの開発として積算データベースと維持管理・補修履歴データベースの詳細設計と試作を行う。また、試作した機能を確認し、今後の改善項目と開発課題を抽出するため、設計支援システムの試運用として、地層処分事業の各段階で行われる行為を想定した試行を行う。平成 29 年度に設計・試作を行うインターフェースとデータベースを表 4-1、表 4-2 に示す。

(2)以降において、以下の構成で平成 29 年度の実施内容などについて示す。

- ・ iSRE の開発状況 ((2)参照)
- ・ iSRE の設計および試作 ((3)参照)
- ・ 過年度に抽出された課題への対応 ((4)参照)
- ・ 試運用による機能の確認と改善点の抽出 ((5)参照)
- ・ まとめと今後の課題および対策 ((6)参照)

なお、以降の文中における、「IF」はインターフェース、「DB」はデータベースを指すものとする。

表 4-1 インターフェースの設計および試作の項目と進捗

インターフェース	基本設計	詳細設計	試作
設計および施工時のデータの作成・更新や参照	—	—	—
ISIS や e-PAR など既存のデータベースにアクセス	—	—	—
モニタリングデータ更新	—	—	—
解析データの参照	—	—	—

— : 平成 28 年度までに検討、 — : 平成 29 年度検討

表 4-2 データベースの設計および試作の項目と進捗

データベース	基本設計	詳細設計	試作
ユーザ管理情報や設計根拠のレポートなどを格納する『統合 DB』	—	—	—
地形データおよび地質環境モデルを格納する『地形・地質 DB』	—	—	—
設計にあたり実施した解析のデータを格納する『設計 DB』	—	—	—
データモデル・統合モデルなどを格納する『図面管理 DB』	—	—	—
部材数量を元にコスト算出した結果を格納する『積算 DB』	—	—	—
維持管理段階における情報を格納する『維持管理・補修履歴 DB』	—	—	—

— : 平成 28 年度までに検討、 — : 平成 29 年度検討

(2) iSRE の開発状況

iSRE の開発にあたり、まず iSRE を構成する機能の概要を示し、続いて、過年度の機能開発の進捗の確認も含めて、平成 29 年度に実施する開発内容と開発を実施する環境について示す。

1) iSRE の機能の概要

iSRE において実施できる項目を具現化するための機能の概要を表 4-3 に示す。

表 4-3 iSRE の機能の概要

機能	概要	
文書管理		各種のドキュメントを管理する機能群。
	レポート	事業申請などの正式な申請書類、各種調査や研究開発の取りまとめレポート類、ならびにその他の種別を指定しない文書を管理する機能。
	設計のストーリーボード	処分場の設計条件を導くための、人工バリアや処分場の長期的な状態の変化をベースとして、設計にて考慮すべき状態を整理した設計のストーリーボードを管理する機能。
	設計条件	設計作業を行うにあたっての、前提となる条件を管理する機能。
	設計根拠	設計成果資料などを管理する機能。
	性能評価	核種移行解析の解析・評価ケースと統合モデルを関連付けて管理する機能。解析・評価ケースは電子性能評価レポート(e-PAR)の情報を参照する機能。
議事録	各種会議体の議事録を管理する機能。	
設定	ユーザー管理	iSRE システムを利用する際の基礎となる各種マスターデータの設定や、ユーザー情報の設定（ユーザのログイン情報、権限情報など）を管理する機能。
モデル管理		構造物、設備、処分容器の設計および建設を効率的に行うことを支援する機能群。
	図面データ	構造物、設備、人工バリア、処分容器の設計/建設図面データを管理する機能。
	解析データ	空洞安定解析、浸透流解析などの解析ソフトウェアで行ったシミュレーションのデータを管理する機能。
	積算	積算単価および積算結果を管理する機能。
外部 DB	緩衝材 DB、グラウト DB などの外部システムの情報へのアクセス窓口を提供する機能。	
地形・地質		地形・地質に関する各種情報を管理する機能群。
	地質環境モデル	次世代型サイト特性調査情報統合システム (ISIS) のドキュメント管理情報の参照および取得をする機能。
地形・地質	処分場建設地の地形・地質・岩盤の調査結果を管理する機能。	
モニタリング	モニタリングデータ	「建設・操業時の作業安全性の確認」および、「処分場の閉鎖時の安全評価」を行うために、各種のモニタリングデータを管理する機能。
維持管理		建設後の施設維持管理に関する情報を管理する機能群。
	点検	地上施設、地下施設、坑道などの、定期、緊急の点検記録を管理する機能。
メンテナンス	日常的な施設のメンテナンスに関する記録を管理する機能。	
イベント	イベント管理	事業の各段階のイベント（審査・確認など）に関連するモデルやドキュメントを決定情報として管理する機能。iSRE 全機能を横断した情報をイベント毎に管理する。

2) iSRE 開発の進捗

iSRE の機能の全体構成を図 4-2 に示す。開発の進捗として、平成 28 年度までに試作まで終了した機能について黒色枠で示し、平成 29 年度に開発を実施した機能を赤色枠で示した。

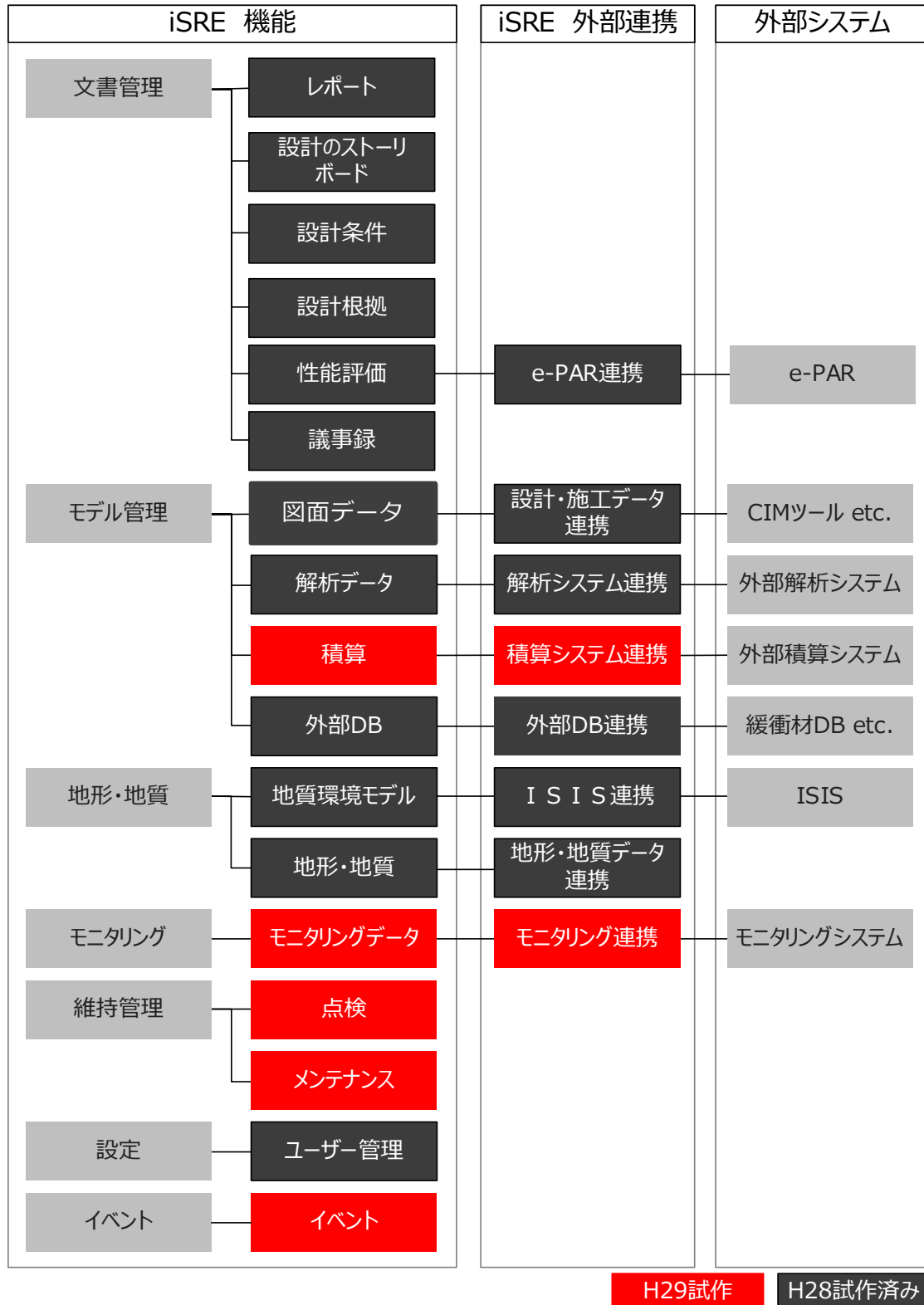


図 4-2 本研究の実施範囲

3) iSRE の開発環境

iSRE の特徴の一つは、事業主体、設計に携わる技術者、施工業者、ステークホルダーなどが、一元化されたデータに基づき、処分場の建設・操業・閉鎖の際の状況を共有しつつ、各段階の設計を支援できるシステムであるといえる。

また、数世代の長期にわたる事業においては、特定の OS やソフトウェアに対して依存せず、常に最新のシステム環境であることが望まれる。こうした観点から、特定のソフトウェアに対する依存度が低いと考えられるオープンソフトウェアによりシステムを構築する。システムを構築する上で採用したオープンソフトウェアを表 4-4 に示す。

表 4-4 システムに採用したオープンソフトウェア

項目	ソフトウェア
Web サーバ	Apache 2.4
データベース	PostgreSQL 9.4.5
開発言語	PHP 5.6
三次元モデルビューア	Autodesk View and Date API

iSRE を運用する際の環境構築イメージを図 4-3 に示す。iSRE 開発は、開発用 PC 内に仮想エミュウェア社製「VMware Player」を用いて仮想環境を構築し、ユーザーPC と仮想環境内のデータサーバのネットワーク経由での利用を模擬し開発を進めた（表 4-5）。仮想環境内には、iSRE との情報のやり取りを行うこととなる「次世代型サイト特性調査情報統合システム（以下、ISIS）」（原子力機構，2013a）、「電子性能評価レポート（以下、e-PAR）」（原子力機構，2013b）、「緩衝材基本特性データベース（以下、緩衝材基本特性 DB）」（原子力機構，2006）を構築した。ネットワーク経由での iSRE の利用方法としてはクラウドシステムの活用なども候補として想定している。

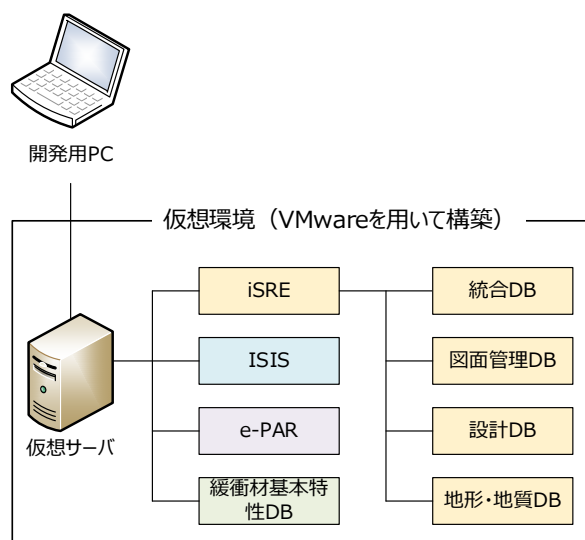


図 4-3 仮想環境のイメージ

表 4-5 iSRE 開発用 PC 環境

PC 構成内容	製 品
PC 本体	VAIO 社製 VAI0 Pro13 (SVP132A16N) ・ CPU : Core i7 ・ メモリー : 8 GB
OS	Microsoft 社製 Windiws10 Professional (64 bit)
仮想環境	ヴィエムウェア社製 VMware Player

(3) iSRE の設計および試作

1) 「モニタリングデータ更新」のインターフェースの試作

iSRE を用いたファイルの受渡しを効率的かつ効果的に行うためのインターフェース機能（表 4-1 参照）を開発する。平成 29 年度は、平成 28 年度までに詳細設計まで完了している「モニタリングデータ更新」のためのインターフェースの試作を実施した。

「モニタリングデータ更新」のインターフェース機能は、建設・作業時の作業安全性の確認や、事業期間を通じて繰り返し行なわれる安全評価のために行われるモニタリングより得られるデータファイルを外部のモニタリングシステムから抽出し、「維持管理・補修履歴データベース」に計測値、観測項目、期間、位置などの属性情報を付与し格納する機能である（図 4-4）。ファイルの格納は、任意に設定した階層に登録可能とした。

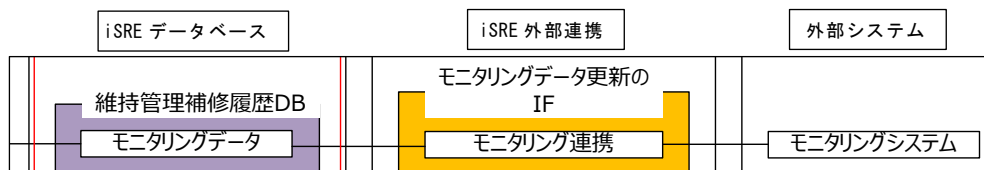


図 4-4 モニタリングデータ更新の IF による連携

試作では、仮想のネットワーク経由で外部に格納したモニタリングファイルにアクセスし、該当するファイルの取り込みが可能な機能を実装した。実装した機能について以下に示す。また、実装した機能の操作画面について、図 4-5 に示す。

- ファイル取り込み機能
 - ✓ 「ファイルを追加」から外部モニタリングシステムにアクセスし、観測項目（内空変位、漏水、放射線量）、観測期間および平成 29 年度に開発したイベントを選択し（図中①）、取り込みが完了し画面に表示されたファイル（図中②）を、「ファイルを追加」（図中③）から DB へ登録が可能
 - ✓ フォルダの追加により任意の階層設定において管理が可能（図中④）
- 取り込んだファイルの検索機能
 - ✓ 観測項目（内空変位、漏水、放射線量）を選択および観測期間の設定を行い（図中⑤）、指定した内容に関連するファイルをキーワードからの検索（図中⑥）
 - ✓ 検索結果は画面に一覧表示され（図中②）、ファイルの選択が可能



図 4-5 モニタリングデータ更新のインターフェース画面

2) データベースの詳細設計および試作

設計支援システムは、処分場の工学技術に関する知識化ツールとして、システム内部のデータベース群により設計・施工・維持管理・モニタリングなどの情報を管理する。平成 29 年度は、平成 28 年度までに実施した「積算 DB」「維持管理・補修履歴 DB」の基本設計にもとづいて、それらデータベースの詳細設計および試作を実施した。

① 「積算 DB」の詳細設計および試作

積算 DB は、建設工事発注時に作成される積算単価および積算結果データを設計・施工情報と共に格納し、管理する機能である。管理する積算に関するデータのファイルは、積算における数量および費用の算出データを管理する外部の積算システムからインターフェースを経由して取り込み、積算 DB に格納し管理可能とする。積算 DB と外部積算システムとの連携を図 4-6 (赤枠) に示す。

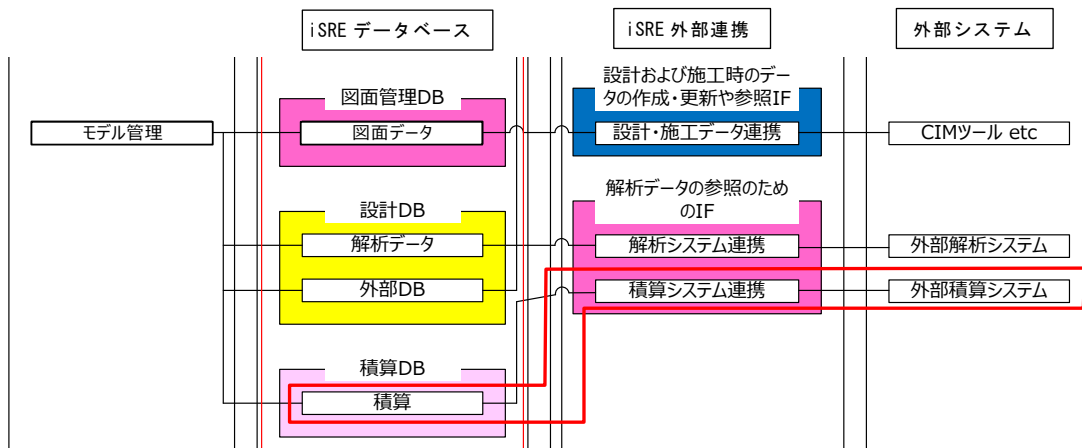


図 4-6 積算 DB と外部積算システムとの関係の概念

詳細設計においては、以下に示した項目について検討する。また、データベースの定義および属性の設定を表 4-6 に示す。

- ▶ 積算データは、任意形式のファイルとして管理する。
- ▶ 積算ファイルは、任意のフォルダによる階層構造で管理する。
- ▶ 積算ファイルは、積算項目、種類、概要などの情報を持つ。
- ▶ フォルダ、ファイルには自由入力形式の備考を登録可能とする。
- ▶ キーワード検索では、ファイル名、フォルダ名の他、概要の文字列を対象とすることができる。
- ▶ 積算ファイルをダウンロード、追加、削除する。

表 4-6 積算 DB のテーブル

テーブル名	tb_sekisan_t		備考	積算テーブル					
説明	列名	説明	データ型	NN	PK	UK	FK	初期値等	備考
定義	did	モニタリングデータID	integer	○	○	○			
	type	フォルダorファイル	integer	○					1:ファイル、2:フォルダ
	folder	フォルダ	text						
	file_nm	ファイル名	text						
	outline	概要	text						
	sekisan_item_id	積算項目データID	integer						
	type_id	種類データID	integer						
	uid	ユーザID	integer	○					
	pid	親ID	integer	○					
	entry_date	更新日	timestamp(6)	○					

試作により実装した機能を以下に示す。また、実装した機能の操作画面について、図 4-7 に示す。

- ▶ 検索機能
 - ✓ 項目選択（資材単価、材料単価、機器単価、総事業費、発注別、エリア別）において該当する項目を選択し（図中①）、キーワードによりファイルを検索
- ▶ 登録機能
 - ✓ DB 登録時には、フォルダの追加（図中②）から任意に階層を設定し管理が可能



図 4-7 積算機能の表示画面

② 「維持管理・補修履歴データベース」の詳細設計および試作

「維持管理・補修履歴データベース」は、「モニタリング」、「点検」、「メンテナンス」の機能で構成されている。各機能について詳細設計および試作を実施した。

• モニタリング機能

モニタリング機能は、「建設・作業時の作業安全性の確認」および、「処分場の閉鎖時の安全評価」における各種のモニタリングから得られるデータファイルを管理する機能である。モニタリング機能について、以下に示した項目について検討した。また、データベースの定義および属性の設定を表 4-7 に示す。

- モニタリングデータは、任意形式のファイルとして管理する。
- モニタリングファイルは、任意のフォルダによる階層構造で管理する。
- モニタリングファイルは、属性として観測項目、観測期間などの情報を持つ。
- モニタリングファイルをダウンロード、追加、削除する。

表 4-7 維持管理・補修履歴 DB（モニタリング）のテーブル

テーブル名	tb_monitoring_t		モニタリングテーブル						
説明	モニタリング		備考						
	列名	説明	データ型	NN	PK	UK	FK	初期値等	備考
定義	monitoring_id	モニタリングデータID	integer	○	○	○			
	type	フォルダorファイル	integer	○					1:ファイル、2:フォルダ
	folder	フォルダ	text						
	file_nm	ファイル名	text						
	outline	概要	text						
	observ_item_id	観測項目データID	integer						
	period_from	期間From	date						
	period_to	期間To	date						
	uid	ユーザID	integer	○					
	pid	親ID	integer	○					
	entry_date	更新日	timestamp(6)	○					

試作により実装した機能を以下に示す。また、実装した機能の操作画面について、図 4-8 に示す。

- 検索機能
 - ✓ 項目選択（内空変位、漏水、放射線量）において該当する項目を選択し、キーワードによりファイルを検索（図中①）
- 登録機能
 - ✓ DB 登録時には、フォルダの追加（図中②）から任意に階層を設定し管理が可能



図 4-8 モニタリング機能の表示画面

- 点検機能

点検機能は、地上施設、地下施設、坑道などについての定期・緊急の点検記録データを管理する機能である。点検機能について、以下に示した項目について検討した。また、データベースの定義および属性の設定を表 4-8 に示す。

 - 点検記録データは、任意形式のファイルとして管理する。
 - 点検記録ファイルは、任意のフォルダによる階層構造で管理する。

- 点検記録ファイルは、属性として施設種別、日付、名称、健全性、概要などの情報を持つ。
- 点検記録ファイルをアップロード、ダウンロード、追加、削除する。

表 4-8 維持管理・補修履歴 DB (点検) のテーブル

テーブル名	tb_check_t		点検テーブル						
説明	点検		備考						
	列名	説明	データ型	NN	PK	UK	FK	初期値等	備考
定義	check_id	点検データID	integer	○	○	○			
	type	フォルダorファイル	integer	○					1:ファイル、2:フォルダ
	folder	フォルダ	text						
	file_nm	ファイル名	text						
	outline	概要	text						
	check_item_id	点検項目ID	integer						
	check_nm	点検名称	text						
	soundness_id	健全性ID	integer						
	entry_date	更新日	timestamp(6)		○				
	uid	ユーザID	integer		○				
pid	親ID	integer		○					

試作により実装した機能を以下に示す。また、実装した機能の操作画面について、図 4-9 に示す。

- 検索機能
 - ✓ 項目選択（地上施設、坑道、地上施設設備、坑道附帯設備、モニタリング装置、機材、搬送定置装置）において該当する項目を選択し、キーワードによりファイルを検索（図中①）
- 登録機能
 - ✓ DB 登録時には、フォルダの追加（図中②）から任意に階層を設定し管理が可能

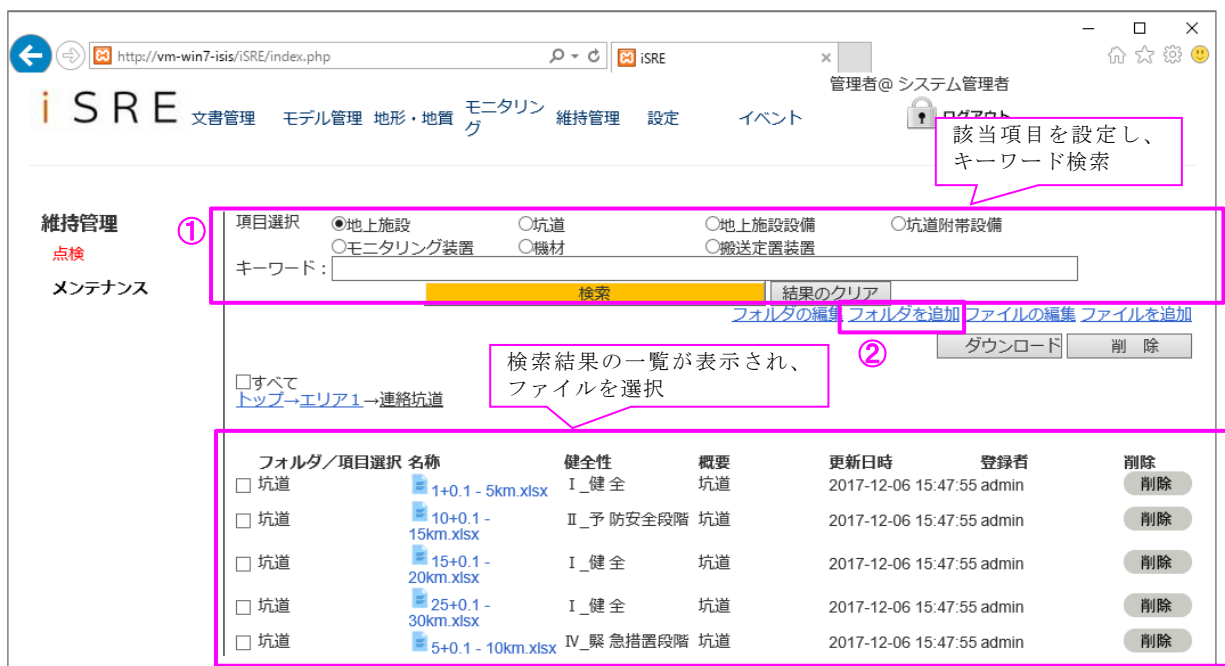


図 4-9 点検機能の表示画面

- メンテナンス

メンテナンス機能は、日常的な施設のメンテナンスに関する記録を管理する機能である。メンテナンス機能について、以下に示した項目について検討した。また、データベースの定義および属性の設定を表 4-9 に示す。

- ▶ メンテナンス記録データは、任意形式のファイルとして管理する。
- ▶ メンテナンス記録ファイルは、任意のフォルダによる階層構造で管理する。
- ▶ メンテナンス記録ファイルは、属性として施設項目の情報を持つ。
- ▶ メンテナンス日、変状種類、概要は、属性情報とせず別に登録し、参照可能とする。
- ▶ キーワード検索では、ファイル名、フォルダ名の他、概要の文字列を対象とすることができる。
- ▶ メンテナンス記録ファイルをダウンロード、追加、削除する。

表 4-9 維持管理・補修履歴 DB (メンテナンス) のテーブル

テーブル名	tb_maintenance_t		メンテナンステーブル						
説明	メンテナンス		備考						
	列名	説明	データ型	NN	PK	UK	FK	初期値等	備考
定義	maintenance did	メンテナンスデータID	integer	○	○	○			
	type	フォルダorファイル	integer	○					1:ファイル、2:フォルダ
	folder	フォルダ	text						
	file_nm	ファイル名	text						
	outline	概要	text						
	check_item_id	点検項目ID	integer						
	maintenance_nm	点検名称	text						
	state_type_id	変状種別ID	integer						
	entry_date	更新日	timestamp(6)		○				
	uid	ユーザID	integer		○				
	pid	親ID	integer		○				

試作により実装した機能を以下に示す。また、実装した機能の操作画面について、図 4-10 に示す。

- ▶ 検索機能
 - ✓ 項目選択（地上施設、坑道、地上施設設備、坑道附帯設備、モニタリング装置、機材、搬送定置装置）において該当する項目を選択し、キーワードによりファイルを検索（図中①）
- ▶ 登録機能
 - ✓ DB 登録時には、フォルダの追加（図中②）から任意に階層を設定し管理が可能



図 4-10 メンテナンス機能の表示画面

3) iSRE の利用マニュアルの整備

平成 29 年度における iSRE の設計および試作により、開発計画における 4 項目のインターフェース機能と 6 項目のデータベース機能、さらに過年度において抽出された課題への対応において開発したイベント機能（(4)参照）の開発が終了し、iSRE の初期モデルとしてプロトタイプを構築したことから、利用マニュアルを整備した。利用マニュアルは、以下の利用者および用途を想定した。

- 「ユーザー」：システムを使用する際に使用方法を参照するためのマニュアル
- 「管理者」：システムの運用や管理を行う上で参照するためのマニュアル

そこで、利用マニュアルとして盛り込むべき項目を検討するため、上記の利用者に加え「開発者」の立場も考慮した関係性の整理を行う。

以下に、システム利用者の関係性と利用方法の整理（①参照）、さらに利用方法に対して整備した利用マニュアルの概要（②参照）について述べる。

① システム利用者の関係性と利用方法の整理

iSRE のシステムには、「ユーザー」、「管理者」、「開発者」がそれぞれ立場に応じて関与する。これら三者の立場を以下のように定義した。

- ・ ユーザー：システムの使用者として、情報を抽出・登録・閲覧に関わる者
- ・ 管理者：システムの運営・管理者（基本的には事業主体）として、情報の管理および知識化に関わる者
- ・ 開発者：管理者の要請を受けてシステム開発を行う者

図 4-11 に示した三者の関係より、データを利用するユーザーによるシステム使用時、およびコンテンツやシステムを管理する管理者による管理方法の確認時において利用マニュアル

が必要となることが示された。これより、利用マニュアルは、ユーザー向けの「ユーザーマニュアル」および、管理者向けの「システム管理者マニュアル」を対象に整備を行った。

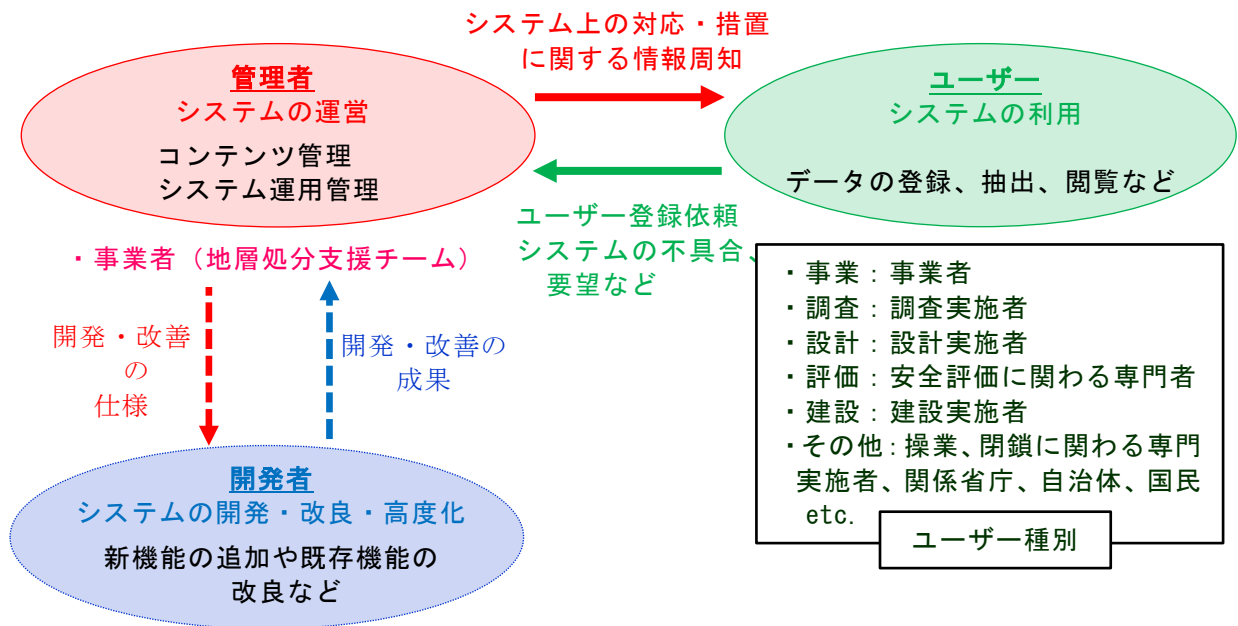


図 4-11 ユーザー、管理者、開発者の関係性と利用方法

② 整備した利用マニュアルの概要

整備した利用マニュアルは、画面遷移を随所に盛り込んだ視覚的にわかりやすい構成とした。また、それぞれの項目において示した説明内容の具体的な使用例として、試運用（(5)参照）を事例とした「試運用ケースによるシステム動作例」を巻末に示した。以下に、ユーザーマニュアルおよびシステム管理者マニュアルについて、整備した記載事項の概要について示す。

- ユーザーマニュアルの概要

ユーザーマニュアルでは、システムの動作条件、システム概要の説明のあと、各機能（文書管理、モデル管理、地形・地質、モニタリング、維持管理、設定、イベント）について画面遷移とともに画面上の操作方法について示した。また、各機能の画面操作方法の解説のあと、試運用を事例とした各機能の利用方法を示した。目次ごとのユーザーマニュアルの内容について、表 4-10 に示す。

表 4-10 ユーザーマニュアルの概要

目次	内容
1. はじめに	動作条件（ハードウェア、ソフトウェア）、システムの概要（iSRE 機能、画面構成など）、利用上の留意点（ファイル名に関するルールなど）、などを記載する。
2. 文書管理 3. モデル管理 4. 地形・地質 5. モニタリング 6. 維持管理 7. イベント	2～4 項において、iSRE 機能を構成する下位機能ごとに画面遷移、フォルダの作成方法、ファイルの追加方法、データのダウンロードの方法などを記載する。文書管理の画面遷移を例に、各機能を構成する下位機能について図 4-12 に示す。
8. 試運用ケースによるシステム動作例	試運用ケース（概要調査）を事例とした、iSRE の各機能使用時の具体的な動作例



図 4-12 文書管理機能を構成する各機能

- システム管理者マニュアルの概要

システム管理者マニュアルでは、コンテンツの管理およびシステムの運用管理に関する内容に加え、管理者は三次元モデルを取り扱う地層処分支援チームの役割を包含することを考慮する。マニュアルでは、ログインユーザーの設定、図面データ（三次元モデル、二次元データ）の管理、イベントの管理などの管理者権限で行う作業について示す

とともに、システムのインストール方法、地層処分支援チームの役割と実施内容について示した。目次ごとのシステム管理者マニュアルの内容について、表 4-11 に示す。

表 4-11 システム管理者マニュアルの概要

目次	内容
1. はじめに	地層処分チームの役割、動作条件(ハードウェア、ソフトウェア)、システムの概要 (iSRE 機能、画面構成など)、インストールの方法、利用上の留意点 (ファイル名に関するルールなど)、など
2. 設定	画面遷移、ユーザーの登録に関する設定、ユーザーが操作可能な機能に関する権限の設定
3. モデル管理	画面遷移、図面の追加・検索方法、三次元モデル関連データの登録・参照方法、図面のダウンロード・削除方法
4. イベント	画面遷移、イベントの設定方法
5. データベースマスタの更新	データベース上でマスタ情報として定義されているマスタ定義に新たな項目の追加、項目名の変更方法
6. 試運用ケースによるシステム動作例	試運用ケース (一般ユーザーのシステムの使用) を事例とした、iSRE の各機能使用時の具体的な動作例

(4) 過年度に抽出された課題への対応

iSRE では、iSRE の機能ごとに分類されたデータベースにおいてファイルが管理されており、各データベースにおいて検索が実施できることを確認している。しかし、iSRE のシステムの実用性向上に向けて過年度に抽出された課題として、ある作業を行う際に必要なファイルを iSRE の機能で分類されたデータベースからキーワード検索だけで行った場合、キーワードは適合するが不要のないファイルが大量に検索されることや、必要なファイルが漏れてしまうなどの検索に関する問題が挙げられた。膨大な数の中から必要なファイルを検索する際の効率性や漏れの発生への対応は、特に知識化ツールにおいて重要な検索に関する機能の高度化に向けた取り組みであることから、データベースを横断的に検索する機能として「イベント機能」、および三次元モデルから関連情報を取得する機能として「三次元モデルからのアクセス機能」について対応を検討した。

1) イベント機能

登録した「イベント」に基づきデータベースを横断的に検索する機能として「イベント機能」について検討を行った。ここでイベントとは、事業の進展に伴い発生する出来事を指す用語と定義する。検索の方法は、イベントに関係するファイルを一括で検索し抽出することにより検索したいファイルを絞り込み、抽出されたファイルに対して、登録されているデータベースの情報を参考にキーワード検索により取得したいファイルを抽出できる機能として設計および試作を行った。

設定したイベントが階層構造となる場合は、上位のイベントを「親イベント」、下位となるイベントを「子イベント」として設定可能とした。ファイルは親イベントや子イベントをまたがる可能性があることから、一つのファイルに対し複数のイベントを登録できるようにし

た。階層構造となる場合のイベントの構成例を図 4-13 に示す。また、イベントとして考えられる候補の例について、図 4-13 のイベントの構成例を踏まえ、表 4-12 に示す。

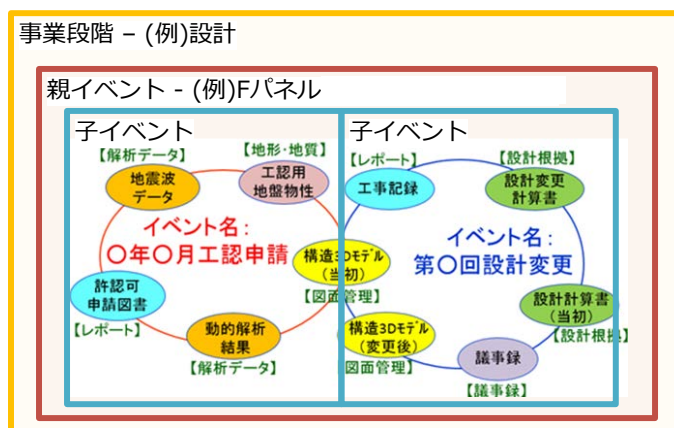


図 4-13 イベントの構成例

表 4-12 イベントとして考えられる候補例

事業段階カテゴリ	親イベント	子イベント
概要調査地区選定	Aエリア地上施設設計	設計条件、設計結果
	Aエリア地下施設設計	設計条件、設計結果
	Aエリア安全評価	入力データ、評価結果
	Bエリア地上施設設計	設計条件、設計結果
	Bエリア地下施設設計	設計条件、設計結果
	Bエリア安全評価	入力データ、評価結果
	Cエリア地上施設設計	設計条件、設計結果
	Cエリア地下施設設計	設計条件、設計結果
精密調査地区選定	Aエリア地上施設設計	設計条件、設計結果
	Aエリア地下施設設計	設計条件、設計結果
	Aエリア安全評価	入力データ、評価結果
	Cエリア地上施設設計	設計条件、設計結果
	Cエリア地下施設設計	設計条件、設計結果
処分地選定	Cエリア地上施設設計	設計条件、設計結果
	Cエリア地下施設設計	設計条件、設計結果
	Cエリア安全評価	入力データ、評価結果
事業許可申請	地上施設設計	設計条件、設計結果
	地下施設設計	設計条件、設計結果
	安全評価	入力データ、評価結果
安全審査	第1回規制委員会会合	提出資料、バックデータ
	第2回規制委員会会合	提出資料、バックデータ
	第X回規制委員会会合	提出資料、バックデータ
設工認	地上施設設計	設計条件、設計結果
	地下施設設計	設計条件、設計結果
	安全評価	入力データ、評価結果
施設確認	Aパネル施設確認	設計図面、確認結果
	Bパネル施設確認	設計図面、確認結果
	Cパネル施設確認	設計図面、確認結果
定期安全レビュー	第1回安全レビュー	審査資料、記事録
	第2回安全レビュー	審査資料、記事録
	第3回安全レビュー	審査資料、記事録
廃止措置申請	地下施設設計	設計条件、設計結果
	安全評価	入力データ、評価結果

「イベント機能」は、関連するデータにイベントを属性情報として付与し、データをイベントで紐付けることにより、DBの横断的な検索を可能とする「イベント検索」の機能と、発生するイベントをユーザーインターフェースで管理する「イベント管理」の機能を合わせたものとして設計する。

イベント機能の画面の試作では、以下に示す項目によりイベントの追加（登録）、検索を実施できるようにした。試作したイベント機能の表示画面および操作の説明を図 4-14 に示す。

- ▶ 任意の名称のイベントを追加可能（図中①）
- ▶ イベントのステータスを未対応/処理中/処理済/完了の4段階で管理（図中②）
- ▶ イベントの階層（種類）として「親イベント」「子イベント」を設定可能（図中③）
- ▶ 親イベントには、イベントの発生に適用可能と想定される事業段階の分類（調査/設計/建設/維持管理）の設定が可能（図中④）
- ▶ イベント名による検索（図中⑤）で、イベントに関連付けられたファイルの一覧を表示（図中⑥）
- ▶ イベント検索で抽出されたファイルには、登録先のデータベースの情報を表示（図中⑦）

The screenshot shows the iSRE event management interface. At the top, there are navigation tabs: 文書管理, モデル管理, 地形・地質, モニタリング, 維持管理, and 設定. The user is logged in as '管理者@システム管理者' with a 'ログアウト' button. A status legend on the right lists: 未対応, 処理中, 処理済, 完了. The main form includes fields for 'イベント名' (circled 5), '事業段階' (circled 4), and '対象期間'. There are '検索' and '結果のクリア' buttons. Below the form, there are buttons for '親イベント追加' and '子イベント追加' (circled 1). A table lists events with columns for 'イベント名', '種別' (circled 3), '事業段階', '対象期間', and '状態'. The first event is 'Fパネル実施設計業務委託 第1回設計変更' with status '処理中'. A text box (circled 2) explains that parent events can be set with a business stage. Below the table, a detailed view of the selected event shows its 'ファイル' list (circled 6) and a list of associated files with their '更新日時' and '種別' (circled 7). A text box explains that files registered in iSRE are linked to the event.

図 4-14 イベント機能の表示画面

2) 三次元モデルからのアクセス機能の検討

図面管理 DB では、三次元モデルや二次元の図面データを管理する。三次元モデルには、処分場を構成する各パーツ（地層、坑道、支保工、搬送定置装置など）であるデータモデルと、それらを計画の配置で組み合わせた統合モデルがある。図面管理 DB におけるビュー機能では、これらの三次元モデルを視覚的に確認することが可能であり、ビュー機能に映し出された統合モデルは、ビュー機能における表示・非表示の切り替えにより、確認したいデータモデルの組み合わせのみを表示することが可能である。

そこで、三次元モデルを利用したデータベースの横断的な検索機能の拡充として「三次元モデルからのアクセス機能」について検討した。ビュー機能では、表示したいデータモデルのみを表示させることができることから、表示させたデータモデルに紐付けた異なる DB に格納された関連ファイルへのアクセスを可能とするこの機能は、基本となる機能ごとに整備されたデータベースに対し、三次元モデルごとのファイル管理機能の付加を意味する。従来の DB 管理（iSRE 機能ごとの管理）と拡充するモデルごとの管理の対比を、図 4-15 に示す。

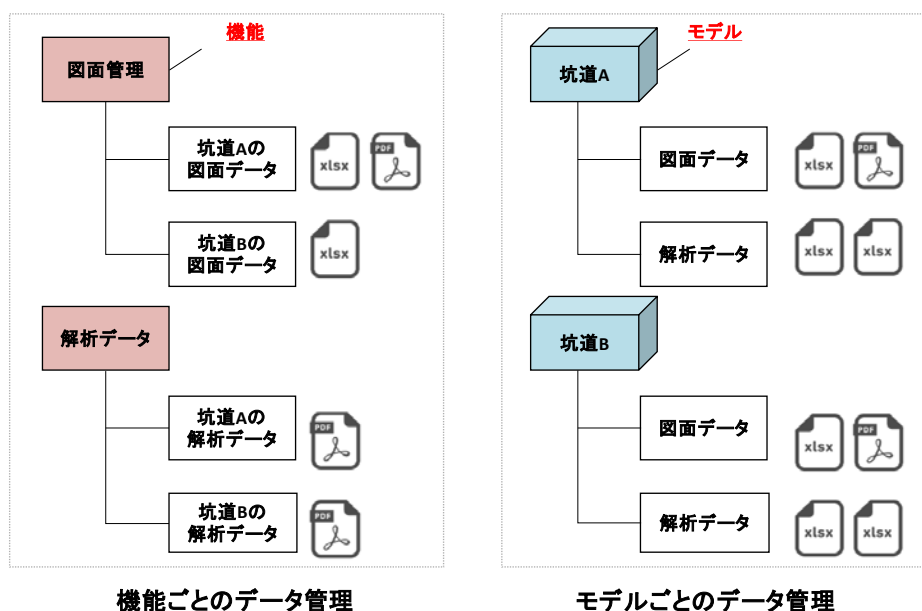


図 4-15 ファイル管理イメージの対比

平成 29 年度の開発では実装には至らなかったが、機能の試験的な操作が可能で、仮データを使用したビューのイメージの試作を実施し、関連するファイルへのアクセスによる登録・検索機能の確認を行うことができた。具体的な機能について以下に、また、試作画面を図 4-16 に示す。

- 統合モデルを選択し（図中①）、表示したいデータモデルを選択（図中②）
- 表示されたデータモデルに紐付いた関連ファイルが格納されたデータベースが、三次元ビューの右側に階層表示（図中③）
- 表示されたデータベースから、関連するファイルへのアクセスが可能



図 4-16 三次元モデルからのアクセス機能画面

(5) 試運用による機能の確認と改善点の抽出

過年度において試作した機能、平成 29 年度に試作した機能、および、これまでに挙げられた課題への対応により追加した機能のそれぞれおよびそれらにより iSRE の知識化ツールとして必要な機能が整備されているかの確認、ならびに今後の課題の抽出を、試運用を通して行う。機能の確認におけるデータ閲覧時のデータベース選択や登録時の格納場所の選択は、「表 4-3 iSRE 機能の概要」を参照することとする。

試運用では、プロトタイプに平成 29 年度に試作した機能を追加し、なるべく実運用に近いシナリオを設定し、これに沿った確認を行うこととした。そのため、試運用の実施に先立ち、地層処分において iSRE の利用される場面を可能な限り幅広く想定し、想定した場面の適用ケースを整理し、ここから試運用の対象とするケースを選定する。次に、そのケースでの状況や作業内容などの具体化するシナリオの設定を行い、シナリオに基づく試運用を行う。

以下に、本項目の構成を示す。

- 1) 適用ケースの整理
- 2) 試運用のケース選定および試行
- 3) 試運用をとおして確認できた機能と課題

1) 適用ケースの整理

シナリオに基づいた試運用を実施するため、地層処分において iSRE の利用される場面を可能な限り幅広く想定し、試運用の対象とするケースとして選定するための適用ケースを整理する。適用ケースは、システムの多様な利用形態をなるべく多く抽出することを念頭に行う。適用ケースは、事業段階ごとの利用形態を大分類において示し、中・小分類において、より具体的な適用ケースとして整理する。整理した適用ケースを表 4-13 に示す。

表 4-13 適用ケース一覧表 (1/2)

No	利用形態		適用ケース		
	事業段階	大分類	中分類	小分類	
1	調査	文献調査 (概要調査地区選定)	文献調査	文献調査計画の策定	
2				文献調査の実施とまとめ、概要調査地区の選定	
3			文献調査以外の検討	文献調査段階の情報に基づく処分概念の検討	
4				文献調査段階の情報に基づく安全評価	
5		概要調査 (精密調査地区選定)	概要調査	概要調査計画の策定	
6				概要調査の実施とまとめ、精密調査地区の選定	
7			概要調査以外の検討	概要調査段階の情報に基づく処分施設の概念設計	
8				概要調査段階の情報に基づく安全評価	
9		精密調査 (処分施設建設地選定)	精密調査	精密調査計画の策定	
10				精密調査の実施とまとめ、処分場建設地の選定	
11			精密調査以外の検討	処分施設の基本設計	
12				安全評価の実施	
13		事業許可取得の段階 (規制対応)	炉規法に基づく事業許可申請	施設の設計、安全評価の実施、申請書などの作成	
14			炉規法関連の審査・許可		
15			炉規法以外の許認可申請対応（環境影響評価書の作成 など）		
16			炉規法以外の審査・許認可（環境影響評価書 など）		
17	建設	建設および建設時の検討	敷地の造成		
18			地上施設の建設		
19			地下施設の建設		
20			地下施設設備の設置と運用（換気、排水など）	事前の計画に基づく設備の設置	
21				想定外の状況に対する計画変更	
22				変更計画に基づく設備の更新	
23			止水プラグの設置	計画	
24				施工、記録の保存	
25			想定外地質における地下施設の計画変更	事前の計画に基づく地下施設の建設	
26				想定外地質に対する計画変更	
27				変更計画に基づく地下施設の建設	
28			埋設施設確認（地下施設）		
29			掘削時の情報に基づく地質情報の更新		
30			施工記録の作成		

表 4-13 適用ケース一覧表 (2/2)

No	利用形態		適用ケース		
	事業段階	大分類	中分類	小分類	
31	操業	廃棄体の定置	処分孔の設置、人工バリアの設置（定置前）		
32			廃棄体の定置	廃棄体の確認、地下施設への搬入	
33			人工バリアの設置（定置後）、処分孔の埋戻し		
34			埋設施設確認（廃棄体の定置完了）		
35			情報公開		
36		基本シナリオ以外の事象への対応	閉鎖していない坑道の変状への対応		
37			想定外の人工バリア挙動の発生		
38			想定外廃棄体の発覚と回収	該当廃棄体の特定	
39				廃棄体回収計画の策定	
40				廃棄体回収	
41				施設の修復	
42	建設・操業	維持管理、補修など	施設の維持・点検・補修		
43			各種モニタリング		
44		規制対応	使用前検査	資料作成	
45				審査・許認可	
46			保安検査	資料作成	
47				審査・許認可	
48			セーフティケースの更新（定期安全レビューへの対応）	安全評価の前提条件の確認	
49				安全評価の実施、レポート作成	
50				規制官庁による審査結果の承認	
51			閉鎖	規制対応	閉鎖措置計画の許認可対応
52		審査・許認可			
53	処分場閉鎖に向けた対応	連絡坑道、アクセス坑道の埋め戻し			
54		各種モニタリング			
55		施設の維持・点検・補修			
56	閉鎖後管理	各種モニタリング			
57	事業廃止	規制対応	廃止措置計画の許認可対応	資料作成	
58				審査・許認可	
59		環境保全と記録保存	地下施設とボーリング孔の全て埋戻し		
60			地上施設の撤去		
61			事業記録の集約・保存		
62	事業段階に関係無し／区分が困難なもの	核物質防護対応 規制対応	使用済燃料直接処分における使用済燃料の管理	受入、廃棄体の確認	
63				定置、埋設	
64				再取り出し	
65				履歴の確認	
66		情報公開および閲覧	事業管理者による閲覧情報の整理		
67			国民、関係官庁などへの閲覧		
68			処分場の最新状況の表示		
69		システムの更新・改良	iSRE の更新・改良		
70			周辺システムの更新・改良		

2) 試運用のケース選定および試行

試運用ケースの選定は、主要なインターフェースおよびデータベースの動作が確認でき、さらに、現在の初期モデルとしてのプロトタイプの実用化に向けた多様な試行により、なるべく多くの改善点を抽出する観点から、利用形態の特徴が異なる二つの試運用ケースを設定することとした。以上の観点から、下記の2ケースを対象のケースとして選定した。

- ✓ 試運用ケース1：頻度は多くないが比較的大掛かりとなる調査・設計・評価のシナリオ
- ✓ 試運用ケース2：操業期間において日常的に発生するデータ管理のシナリオ

また、試運用ケースごとに構成されるシナリオは、なるべく実運用に近い利用形態について、比較的状况がイメージしやすいことを考慮することとする。以下に、設定した試運用ケースごとにシナリオを設定し、設定したシナリオに沿った試行によりプロトタイプの試運用を行う。

① 試運用ケース1における試行

試運用ケース1では、事業の比較的早い段階であり、実地調査と比較して不確定な要素が大きい文献調査段階から、概要調査段階に進める際の情報の大幅な増加に着目し、文献調査における不明確な点の抽出や、精密調査地区の選定に向けた設計や安全評価を通じた課題の整理など多くの情報の分析が必要になる、比較的大掛かりな調査・設計・評価のプロセスである概要調査段階を選定した。以降、概要調査段階を基本としたシナリオを設定し、シナリオに沿った試運用を実施する。

a. 試運用ケース1のシナリオの設定

試運用ケース1のシナリオは以下の5段階のプロセスにより構成する。

- プロセス1

文献調査結果より、当該地域は長期的に安定した均質な堆積岩が広く分布すると想定されており、それを基に地層処分場の概念が例示されていた（図4-17）。文献調査が終了し概要調査段階が始まるにあたり、概要調査計画の検討を実施する。概要調査の基本計画の策定にあたっては、それまでに実施された文献調査の報告書や、概要調査地区に選定された地域の地形・地質、地下水データなどを参考として概要調査計画書を作成する。

- プロセス2

概要調査計画書に基づき概要調査を実施し、調査結果を報告（提出）する。文献調査段階の情報を更新し、概要調査報告書の作成を行う。概要調査におけるより詳しい調査では、地下施設設置対象層の層厚が部分的に薄いことが確認されており、概要調査報告書に反映される。概要調査結果から推測された処分場候補地周辺の地質を図4-18に示す。

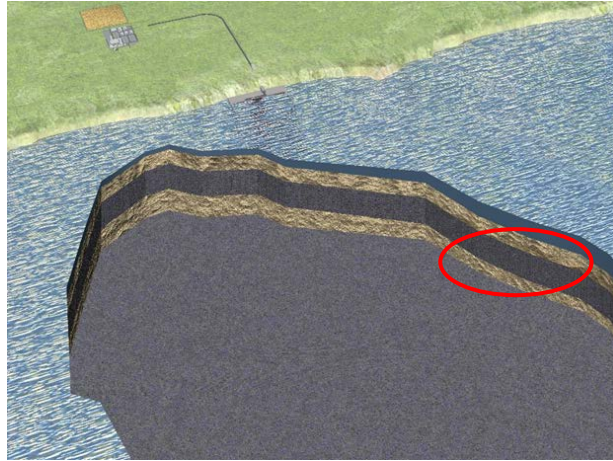


図 4-17 文献調査結果から推測された処分場候補地周辺の地質



概要調査により対象
母岩の層厚が部分的
に薄いことが判明

図 4-18 概要調査結果から推測された処分場候補地周辺の地質

- プロセス 3

概要調査報告書に基づき、精密調査地区を検討する。精密調査地区の検討にあたっては、iSRE 上の概要調査報告書や自治体の基本データなどを参考とし、最終的に精密調査地区選定報告書を作成する。
- プロセス 4

概要調査の結果、地質・地形データなど、様々な情報が追加・更新される。それらのデータに基づき処分場概念（処分場レイアウト、敷地面積、人工バリア仕様など）を設計し、精密調査地区選定の検討材料とする。概念設計では、iSRE 上のデータなどを参考にしつつ、3D 地質モデルの作成や空洞安定解析、熱解析、浸透流解析などを実施する。
- プロセス 5

各種概念設計の結果に基づき検討、合理化された処分場概念に対し、処分場の長期安全性を確認する。安全評価は、iSRE 上のデータやこれまでの検討結果などを参考とし長期安全性評価を実施する。

b. 試運用ケース 1 の実施

試運用ケース 1 において想定するプロセスと取り扱われる代表的な情報を表 4-14 に示す。

表 4-14 試運用ケース 1 で取り扱う主要データ

No.	プロセス	システム利用	
		閲覧	登録
1	概要調査計画の策定	文献調査報告書 地形・地質／地下水データ	検討・協議資料／議事録 概要調査計画書
2	概要調査の実施	概要調査計画書 自治体関係データ 調査結果	調査結果 検討・協議資料／議事録 概要調査結果報告書 精密調査地区選定報告書
3	精密調査地区の検討		
4	概要調査に基づく処分施設の概念設計	文献／概要調査報告書 地質モデル／設計条件書 設計計算書／図面	各種解析結果 検討・協議資料／議事録 概念設計計算書／図面
5	概要調査に基づく安全評価の実施	図面／設計条件書 安全評価計算書	検討・協議資料／議事録 安全評価報告書
取り扱った ファイル数		39 ファイル	46 ファイル

- プロセス 1 : 「概要調査計画の策定」

- ユーザー（事業者など）

概要調査計画書の作成のため、「文献調査報告書」（図 4-19）、「地質・地形データ」（図 4-20）、「地下水データ」、「自治体関係データ」の閲覧、計画書作成の過程で作成される「各種検討資料」、「各種協議資料」、「各種議事録」（図 4-21）の登録、成果物である「概要調査計画書」（図 4-22：イベントの設定）の登録を試行した。

- 管理者（事業者など）

データの閲覧・登録に伴う不具合などについて対応し、対応報告書の登録を試行した。（全プロセスにおいて発生する行為であるため、以降は省略）

以下に、概要調査計画策定のプロセスにおけるデータの閲覧および登録時の保存/閲覧先（機能）と動作確認したインターフェースおよびデータベースを表 4-15 に示す。

表 4-15 概要調査計画の策定における動作確認項目

シナリオ	利用者	作業内容 (確認機能)	資料名	保存/閲覧先 (作業DB/IF)	インターフェース				データベース									
					1	2	3	4	1	2	3	4	5	6				
概要調査 計画の策定	ユーザー (事業者)	資料閲覧	文献調査報告書	文書管理 レポート														
			地質・地形データ	地形・地質 地形・地質データ														
			地下水データ	地形・地質 地形・地質データ														
			自治体関係データ	文書管理 レポート														
			検討資料	文書管理 レポート	-	-	○	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-	
		資料登録	協議資料	文書管理 レポート														
			議事録	文書管理 議事録														
			概要調査計画書	文書管理 レポート														
			資料登録	文書管理 レポート														
			対応報告書	文書管理 レポート	-	-	○	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-	
	管理者 (事業者)	資料登録	対応報告書	文書管理 レポート	-	-	○	-	○	○	-	-	-	-	-			

凡例
 【インターフェース】
 1: 設計および施工時のデータの作成・更新や参照のIF
 2: 解析データの参照のためのIF
 3: ISISやe-PARなど既存のデータベースのIF
 4: モニタリングデータ更新のIF
 【データベース】
 1: 統合DB
 2: 地形・地質DB
 3: 設計DB
 4: 図面管理DB
 5: 積算DB
 6: 維持管理・補修履歴DB
 星取表:
 ○: 有効な機能確認ができる
 ◎: 部分的な機能確認ができる
 -: 機能確認は不十分である
 システム取扱者:
 *: 関係有
 -: 関係無し



図 4-19 文献調査報告書の閲覧



図 4-20 地質・地形データの閲覧



図 4-21 各種議事録の登録

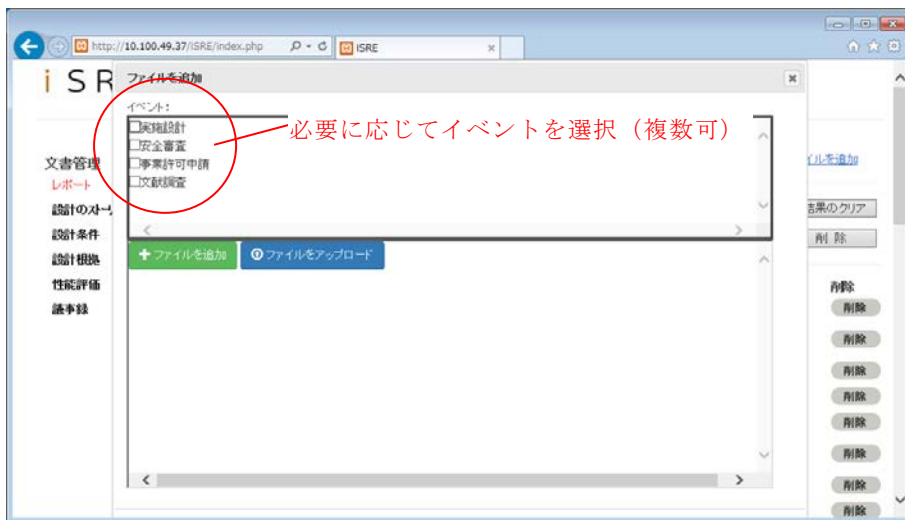


図 4-22 概要調査計画書の登録時のイベントの設定

- プロセス 2: 「概要調査の実施」
 - ユーザー（業務を受託した会社など）

概要調査実施のため、「概要調査計画書」（図 4-23）、「概要調査実施計画書」の閲覧および登録、成果物である「調査結果」（図 4-24）の登録を試行した。
 - ユーザー（事業者など）

概要調査報告書作成のため、「調査結果」の閲覧、「概要調査報告書」（図 4-25）の登録を試行した。

以下に、概要調査実施のプロセスにおけるデータの閲覧および登録時の保存/閲覧先（機能）と動作確認したインターフェースおよびデータベースを表 4-16 に示す。また、閲覧における操作画面として、「概要調査計画書」の閲覧を図 4-23 に示す。登録における操作画面として、「調査結果」の登録を図 4-24、概要調査報告書の登録を図 4-25 に示す。

表 4-16 概要調査の実施における動作確認項目

シナリオ	利用者	作業内容 (確認機能)	資料名	保存/閲覧先 (作業DB/IF)		インターフェース				データベース						
						1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	
概要調査の実施	概要調査 実施計画の 検討/計画書の作成	ユーザー (調査)	資料閲覧	概要調査計画書	文書管理	レポート	-	-	◎	-	○	○	-	-	-	-
		資料登録	概要調査実施計画書	文書管理	レポート	-	-	◎	-	○	○	-	-	-	-	-
	概要調査 実施	ユーザー (調査)	資料閲覧	概要調査実施計画書	文書管理	レポート	-	-	◎	-	○	○	-	-	-	-
		資料登録	調査結果	地形・地質	地形・地質データ	-	-	◎	-	○	○	-	-	-	-	-
	概要調査報告書 の作成	ユーザー (事業者)	資料閲覧	調査結果	地形・地質	地形・地質データ	-	-	◎	-	○	○	-	-	-	-
資料登録	概要調査報告書	文書管理	レポート	-	-	◎	-	○	○	-	-	-	-	-	-	
データ登録・閲覧時 の不具合等対応	管理者 (事業者)	資料登録	対応報告書	文書管理	レポート	-	-	◎	-	○	○	-	-	-	-	

凡例

【インターフェース】

1: 設計および施工時のデータの作成・更新や参照のIF
 2: 解析データの参照のためのIF
 3: ISISやe-PARなど既存のデータベースのIF
 4: モニタリングデータ更新のIF

【データベース】

1: 統合DB
 2: 地形・地質DB
 3: 設計DB
 4: 図面管理DB
 5: 積算DB
 6: 維持管理・補修履歴DB

星取表:

◎: 有効な機能確認ができる
 ○: 部分的な機能確認ができる
 -: 機能確認は不十分である
 *: システム取扱者:
 *: 関係有
 -: 関係無し

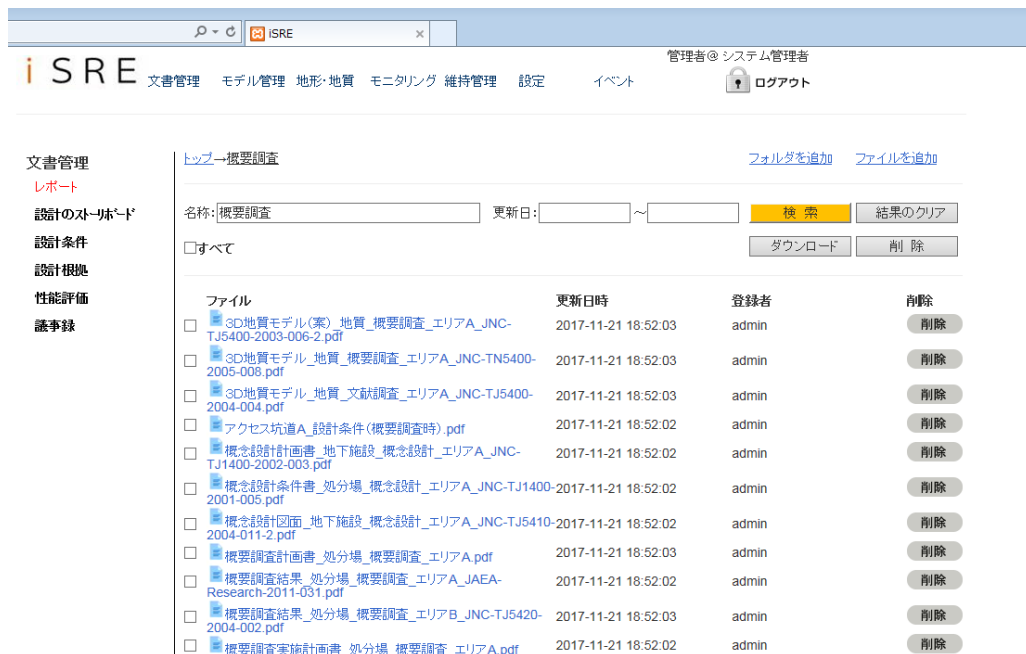


図 4-23 概要調査計画書の閲覧



図 4-24 調査結果（地質データ）の登録

ファイル名	登録日時	登録者	操作
3D地質モデル(案)_地質_概要調査_エリアA_JNC-TJ5400-2003-006-2.pdf	2017-11-21 18:52:03	admin	削除
3D地質モデル_地質_概要調査_エリアA_JNC-TN5400-2005-008.pdf	2017-11-21 18:52:03	admin	削除
3D地質モデル_地質_文献調査_エリアA_JNC-TJ5400-2004-004.pdf	2017-11-21 18:52:03	admin	削除
アクセス坑道A_設計条件(概要調査時).pdf	2017-11-21 18:52:02	admin	削除
概念設計計画書_地下施設_概念設計_エリアA_JNC-TJ1400-2002-003.pdf	2017-11-21 18:52:02	admin	削除
概念設計条件書_処分場_概念設計_エリアA_JNC-TJ1400-2001-005.pdf	2017-11-21 18:52:02	admin	削除
概念設計図面_地下施設_概念設計_エリアA_JNC-TJ5410-2004-011-2.pdf	2017-11-21 18:52:02	admin	削除
概要調査計画書_処分場_概要調査_エリアA.pdf	2017-11-21 18:52:03	admin	削除
概要調査結果_処分場_概要調査_エリアA_JAEA-Research-2011-031.pdf	2017-11-21 18:52:02	admin	削除
概要調査結果_処分場_概要調査_エリアB_JNC-TJ5420-2004-002.pdf	2017-11-21 18:52:03	admin	削除
概要調査実施計画書_処分場_概要調査_エリアA.pdf	2017-11-21 18:52:02	admin	削除
概要調査報告書_処分場_概要調査_エリアA.pdf	2017-11-21 18:52:02	admin	削除
概要踏査計画書_処分場_概要調査_エリアB_JNC-TN5510-2003-001.pdf	2017-11-21 18:52:03	admin	削除

図 4-25 概要調査報告書の登録

• プロセス 3 : 「精密調査地区の検討」

➤ ユーザー（事業者など）

精密調査地区検討のため、「概要調査報告書」、「自治体関係データ」（図 4-26）の閲覧を試行した。検討の過程で作成される「各種検討資料」、「各種協議資料」（図 4-27）、「各種議事録」の登録、成果物である「精密調査地区選定報告書」の登録を試行した。

以下に、精密調査地区の検討のプロセスにおけるデータの閲覧および登録時の保存/閲覧先（機能）と動作確認したインターフェースおよびデータベースを表 4-17 に示す。また、閲覧における操作画面として、「自治体関係データ」の閲覧を図 4-26 に示す。登録における操作画面として、「精密調査地区検討報告書議事録」の登録を図 4-27 に示す。

表 4-17 精密調査地区の検討における動作確認項目

シナリオ	利用者	作業内容 (確認機能)	資料名	保存/閲覧先 (作業DB/IF)	インターフェース				データベース						
					1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	
精密調査地区の検討	ユーザー (事業者)	資料閲覧	概要調査報告書	文書管理	レポート					1					
			自治体関係データ	文書管理	レポート										
			検討資料	文書管理	レポート	-	-	○	-	○	-	-	-	-	-
		資料登録	協議資料	文書管理	レポート										
			議事録	文書管理	議事録										
			精密調査地区選定報告書	文書管理	レポート										
データ登録・閲覧時の不具合等対応	管理者 (事業者)	資料登録	対応報告書	文書管理	レポート	-	-	○	-	○	○	-	-	-	

凡例

【インターフェース】
 1: 設計および施工時のデータの作成・更新や参照のIF
 2: 解析データの参照のためのIF
 3: ISISやe-PARなど既存のデータベースのIF
 4: モニタリングデータ更新のIF

【データベース】
 1: 統合DB
 2: 地形・地質DB
 3: 設計DB
 4: 図面管理DB
 5: 積算DB
 6: 維持管理・補修履歴DB

星取表:
 ◎: 有効な機能確認ができる
 ○: 部分的な機能確認ができる
 -: 機能確認は不十分である

システム取扱者:
 *: 関係有
 -: 関係無し



図 4-26 自治体関係データの閲覧



図 4-27 各種協議資料の登録

- プロセス 4 : 「概要調査段階の情報に基づく処分施設の概念設計」
 - ユーザー（業務を受託した会社など）

調査会社や解析を実施する会社などが業務遂行のため、「文献調査報告書」、「3D 地質モデル」、「概要調査報告書」、「3D 地質モデル」（図 4-28）、「設計計算書」、「図面」（図 4-29）、「設計条件書」の閲覧、成果物である「各種検討結果」の登録を試行した。
 - ユーザー（事業者など）

地形・地質データの更新のため、「3D 地質モデル」の閲覧および登録、検討の過程で作成される「各種検討資料」、「各種協議資料」、「各種議事録」の登録を試行した。設計作業が終了し精密調査地区選定検討のため、「各種検討結果」（図 4-30）の閲覧、検討の過程で作成される「各種検討資料」、「各種協議資料」、「各種議事録」の登録、最終成果である「設計計算書」、「図面」（図 4-31）の登録を試行する。

以下に、概要調査段階の情報に基づく処分施設の概念設計のプロセスにおけるデータの閲覧および登録時の保存/閲覧先（機能）と動作確認したインターフェースおよびデータベースを表 4-18 に示す。図面管理 DB における三次元モデル選択時のビューワ機能画

面を図 4-32、イベントの登録（文献調査、事業許可申請、安全審査、実施設計、安全評価）における操作画面を図 4-33、文献調査段階（概要調査の前段階）における設計情報（設計条件、図面、計算書）を対象として実施したイベント検索の結果を図 4-34 に示す。

表 4-18 概要調査段階の情報に基づく処分施設の概念設計における動作確認項目

シナリオ	利用者	作業内容 (確認機能)	資料名	保存/閲覧先 (作業DB/IF)	インターフェース				データベース										
					1	2	3	4	1	2	3	4	5	6					
3D地質モデルの検討	ユーザー (調査)	資料閲覧	文献調査報告書	文書管理	レポート														
			3D地質モデル(文献)	地形・地質	地質環境モデル	◎	○	○	-	○	◎	-	○	-	-	-	-	-	
3D地質モデルの作成	ユーザー (事業者)	資料登録	概要調査報告書	文書管理	レポート														
			3D地質モデル(概要)案	地形・地質	地質環境モデル														
3D地質モデルの作成	ユーザー (事業者)	資料登録	資料閲覧	3D地質モデル(概要)案	地形・地質	地質環境モデル													
			検討資料	文書管理	レポート														
			協議資料	文書管理	レポート	◎	○	○	-	○	◎	-	○	-	-	-	-	-	-
			議事録	文書管理	議事録														
空洞安定解析の実施	ユーザー (建設)	資料閲覧	設計計算書(文献)	文書管理	レポート														
			図面(文献)	モデル管理	図面管理														
			3D地質モデル(概要)	地形・地質	地質環境モデル	◎	◎	○	-	-	○	◎	◎	-	-	-	-	-	-
			設計条件書(概要)	文書管理	設計条件														
空洞安定解析の実施	ユーザー (建設)	資料登録	検討結果(空洞安定解析)	モデル管理	解析データ														
			設計計算書(文献)	文書管理	レポート														
熱解析の実施	ユーザー (建設)	資料閲覧	図面(文献)	モデル管理	図面管理														
			3D地質モデル(概要)	地形・地質	地質環境モデル	◎	◎	○	-	-	○	◎	◎	-	-	-	-	-	
			設計条件書(概要)	文書管理	設計条件														
			検討結果(熱解析)	モデル管理	解析データ														
長期力学解析の実施	ユーザー (建設)	資料閲覧	設計計算書(文献)	文書管理	レポート														
			図面(文献)	モデル管理	図面管理														
			3D地質モデル(概要)	地形・地質	地質環境モデル	◎	◎	○	-	-	○	◎	◎	-	-	-	-	-	
			設計条件書(概要)	文書管理	設計条件														
長期力学解析の実施	ユーザー (建設)	資料登録	検討結果(長期力学解析)	モデル管理	解析データ														
			設計計算書(文献)	文書管理	レポート														
浸透流解析の実施	ユーザー (建設)	資料閲覧	図面(文献)	モデル管理	図面管理														
			3D地質モデル(概要)	地形・地質	地質環境モデル	◎	◎	○	-	-	○	◎	◎	-	-	-	-	-	
			設計条件書(概要)	文書管理	設計条件														
			検討結果(浸透流解析)	モデル管理	解析データ														
換気解析の実施	ユーザー (建設)	資料閲覧	設計計算書(文献)	文書管理	レポート														
			図面(文献)	モデル管理	図面管理														
			3D地質モデル(概要)	地形・地質	地質環境モデル	◎	◎	○	-	-	○	◎	◎	-	-	-	-	-	
			設計条件書(概要)	文書管理	設計条件														
換気解析の実施	ユーザー (建設)	資料登録	検討結果(換気解析)	モデル管理	解析データ														
			設計計算書(文献)	文書管理	レポート														
レイアウト合理化 方策の検討	ユーザー (建設)	資料閲覧	図面(文献)	モデル管理	図面管理														
			3D地質モデル(概要)	地形・地質	地質環境モデル	◎	◎	○	-	-	◎	◎	○	-	-	-	-		
			設計条件書(概要)	文書管理	設計条件														
			検討結果(レイアウト合理化)	モデル管理	解析データ														
概念設計の検討 /計算書の作成	ユーザー (事業者)	資料閲覧	空洞安定解析結果	モデル管理	解析データ														
			熱解析結果	モデル管理	解析データ														
			長期力学解析結果	モデル管理	解析データ														
			浸透流解析結果	モデル管理	解析データ														
			換気解析結果	モデル管理	解析データ														
			レイアウト合理化検討結果	モデル管理	解析データ	◎	◎	◎	-	◎	◎	◎	◎	◎	-	-	-	-	
		資料登録	検討資料	文書管理	レポート														
			協議資料	文書管理	レポート														
			議事録	文書管理	議事録														
			設計計算書(概要)	文書管理	レポート														
			図面(概要)	モデル管理	図面管理														
データ登録・閲覧時の不具合等対応	管理者 (事業者)	資料登録	対応報告書	文書管理	レポート	◎	◎	◎	-	◎	◎	◎	◎	◎	-	-			

凡例
【インターフェース】
1: 設計および施工時のデータの作成・更新や参照のIF
2: 解析データの参照のためのIF
3: ISISやe-PARなど既存のデータベースのIF
4: モニタリングデータ更新のIF

【データベース】
1: 統合DB
2: 地形・地質DB
3: 設計DB
4: 図面管理DB
5: 積算DB
6: 維持管理・補修履歴DB

星取表:
◎: 有効な機能確認ができる
○: 部分的な機能確認ができる
-: 機能確認は不十分である
システム取扱者:
*: 関係有
-: 関係無し



図 4-28 3D 地質モデル（文献）の閲覧

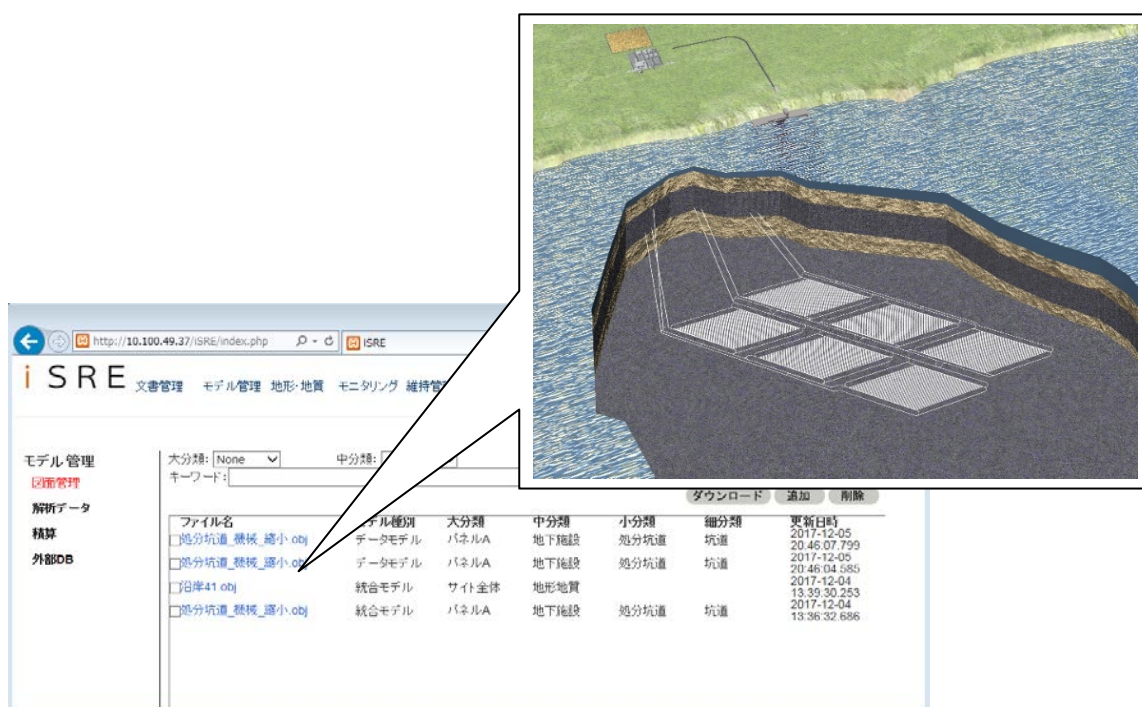


図 4-29 図面（三次元モデル）の閲覧と文献調査時の処分場概念検討時のレイアウト図（三次元モデル）のビューワ表示のイメージ



図 4-30 解析の検討結果の登録

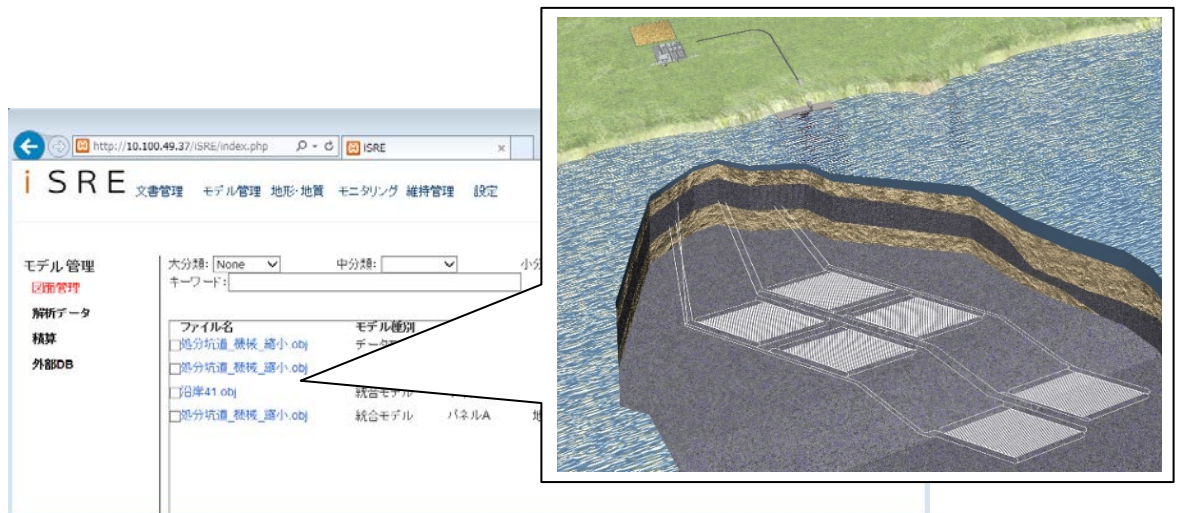


図 4-31 図面（三次元モデル）の登録と概要調査に基づく概念設計の結果（処分場レイアウト）のビュー表示のイメージ

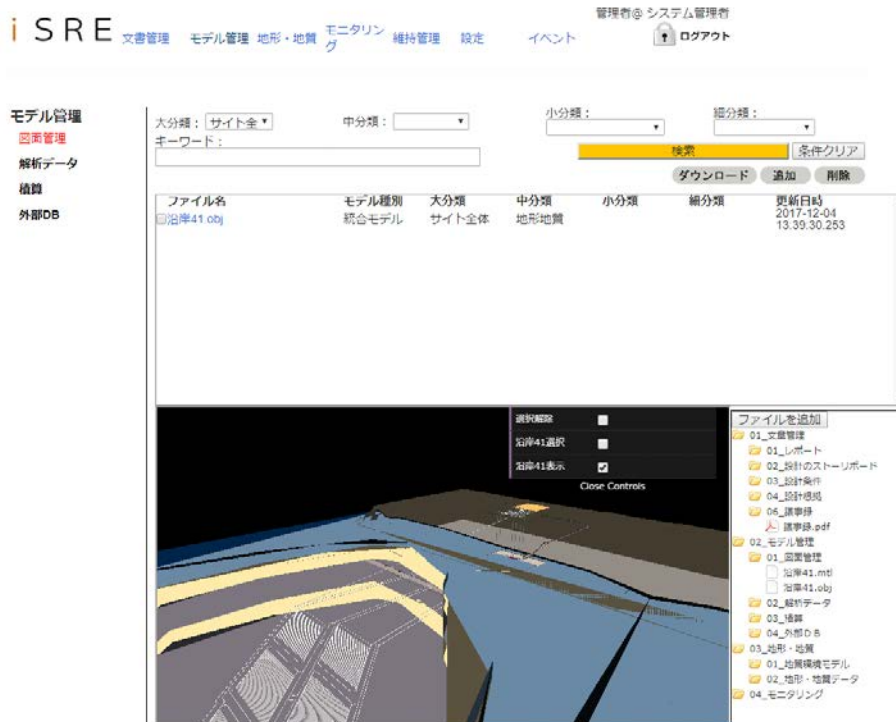


図 4-32 図面管理 DB における三次元モデル選択時のビューワ機能画面

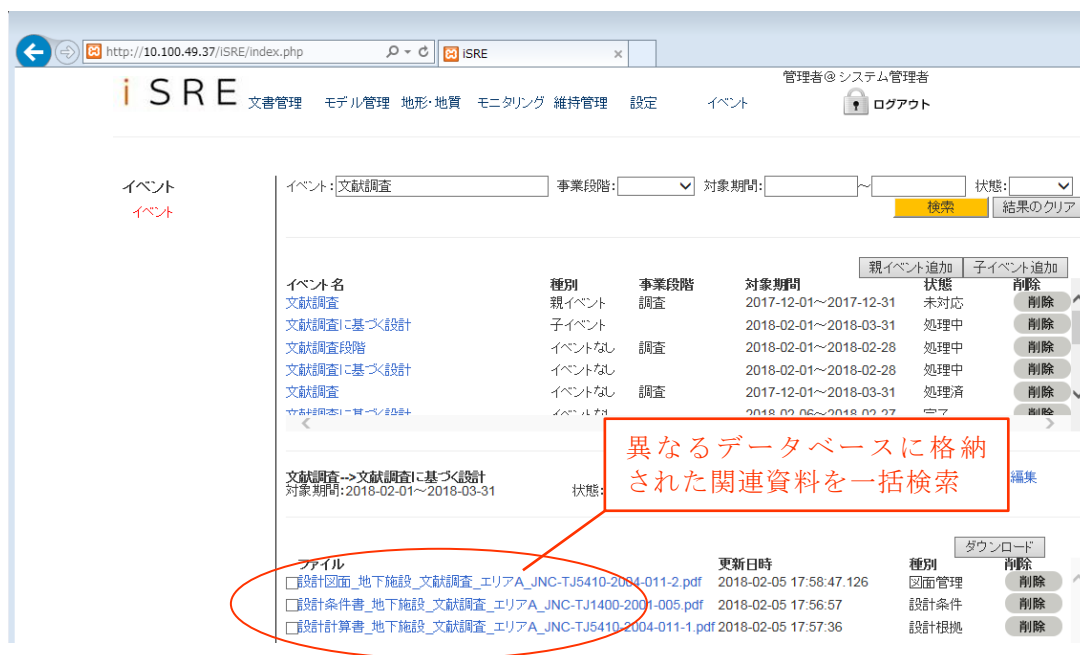


図 4-33 文献調査段階（前段階）における設計情報に関するイベント検索の結果



図 4-34 イベント管理画面におけるイベント登録時の操作画面

- プロセス 5 : 「概要調査段階の情報に基づく安全評価の実施」
 - ユーザー（業務を委託した実施会社など）

長期安全性確認として安全評価を行うため、「図面」、「安全評価計算書」、「設計条件書」（図 4-35）の閲覧、成果物である「安全評価解析結果」の登録を試行した。
 - ユーザー（事業者など）

長期安全性評価結果を確認するため、「安全評価解析結果」（図 4-36）の閲覧、確認過程において作成された「各種検討資料」、「各種協議資料」、「各種議事録」の登録、成果物である「安全評価報告書」（図 4-37）の登録を試行した。

以下に、概要調査段階の情報に基づく安全評価のプロセスにおけるデータの閲覧および登録時の保存/閲覧先（機能）と動作確認したインターフェースおよびデータベースを表 4-19 に示す。

表 4-19 概要調査段階の情報に基づく安全評価における動作確認項目

シナリオ	利用者	作業内容 (確認機能)	資料名	保存/閲覧先 (作業DB/IF)	インターフェース				データベース									
					1	2	3	4	1	2	3	4	5	6				
概要調査段階の情報に基づく安全評価の実施	安全評価解析の実施	ユーザー (コンサル)	資料閲覧	図面(概要)	モデル管理	図面管理												
				安全評価計算書(文書)	文書管理	レポート												
				設計条件書(概要)	文書管理	設計条件	○			-								
		資料登録	安全評価解析結果	文書管理	性能評価													
	安全評価結果の確認/報告書の作成	ユーザー (事業者)	資料閲覧	安全評価解析結果	文書管理	性能評価												
				検討資料	文書管理	レポート												
				協議資料	文書管理	レポート												
				議事録	文書管理	議事録												
		資料登録	安全評価報告書(概要)	文書管理	レポート													
データ登録・閲覧時の不具合等対応	管理者 (事業者)	資料登録	対応報告書	文書管理	レポート	○	○	○	-	○	○	○	○	-	-			

凡例
【インターフェース】
 1: 設計および施工時のデータの作成・更新や参照のIF
 2: 解析データの参照のためのIF
 3: ISISやe-PARなど既存のデータベースのIF
 4: モニタリングデータ更新のIF
【データベース】
 1: 統合DB
 2: 地形・地質DB
 3: 設計DB
 4: 図面管理DB
 5: 積算DB
 6: 維持管理・補修履歴DB
星取表:
 ○: 有効な機能確認ができる
 ◯: 部分的な機能確認ができる
 -: 機能確認は不十分である
システム取扱者:
 *: 関係有
 -: 関係無し



図 4-35 設計条件（概要）の閲覧



図 4-36 安全評価解析結果の参照 (e-PAR との連携)

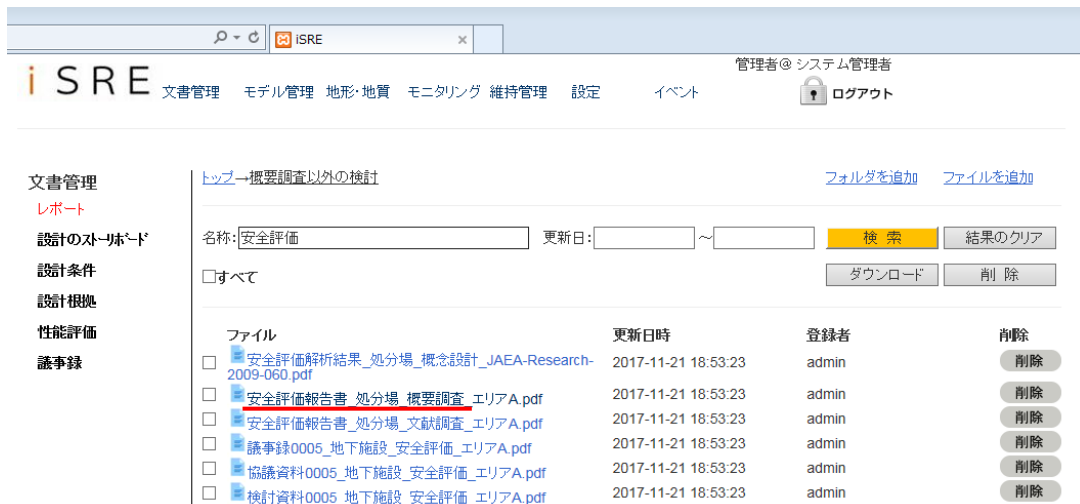


図 4-37 安全評価報告書（概要）の登録

② 試運用ケース 2 における試行

試運用ケース 2 では、試運用ケース 1 で対象としたような比較的大掛かりな作業への対応とは対照的に、操業期間において日常的なルーチン管理により発生するデータ管理のプロセスである人工バリアの設置や廃棄体の定置に伴うモニタリングデータ管理と、日常的なルーチン管理で発生する膨大な量のデータを長期間にわたり管理することが求められる操業開始後の廃棄体管理を選定した。以降、モニタリング管理と廃棄体管理を基本としたシナリオを設定し、シナリオに沿った試運用を実施する。

a. 試運用ケース 2 のシナリオの設定

試運用ケース 2 のシナリオは以下の 5 段階のプロセスにより構成する。

- プロセス 1

操業段階において、人工バリア、廃棄体の搬入から人工バリア設置、廃棄体定置など、一連の工程を実施（図 4-38）において、人工バリア設置計画書を作成する。iSRE では多様な廃棄体を対象とするが、ここでは廃棄体定置方式として処分孔縦置き定置方式を想定する。定置にあたっては、処分孔の健全性が確認されるとともに、人工バリア、廃棄体のトレーサブルな管理により、定置後の坑道環境（地盤変形、空間線量など）に問題がないことをモニタリングにより確認する（図 4-39）。これら一連の作業が、膨大な数の廃棄体一つ一つで行われており、iSRE によってそれらのデータを確実に保管される。

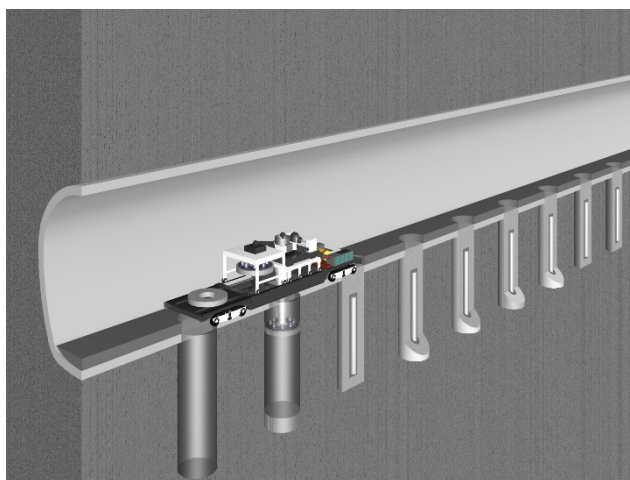


図 4-38 廃棄体（使用済燃料）定置状況のイメージ

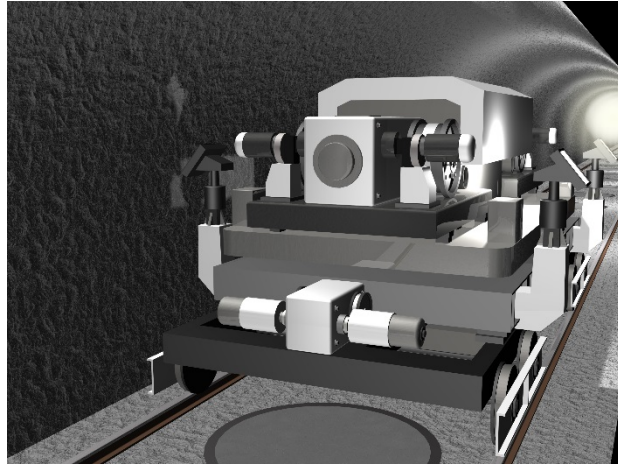


図 4-39 定置後のモニタリング状況のイメージ

- プロセス 2

人工バリア設置計画書に基づき、所定の位置に人工バリア（緩衝材）の設置を実施する。事前の長期挙動予測などに基づき設置可否は検討されており、ここでは設置される人工バリアの搬入記録を確認（閲覧）し、設置記録を登録する。人工バリア設置後、人工バリアの設置状況（地山とのギャップ、設置高さなど）および処分孔の変状（処分孔径、鉛直、水平変位など）をモニタリングする。これらモニタリング記録は、廃棄体の定置、廃棄体定置後の長期安全性評価などの際、参考とする。

- プロセス 3

人工バリア設置後、人工バリアの設置状況（地山とのギャップ、設置高さなど）および処分孔の変状（処分孔径、鉛直、水平変位など）をモニタリングする。これらモニタリング記録は、廃棄体の定置、廃棄体定置後の長期安全性評価などの際に参考とされる。

- プロセス 4

廃棄体の定置にあたり、処分孔および人工バリアにおいて特に問題となる変形などの発生の確認から、廃棄体定置後の長期安全性を確認しておく。従って、廃棄体設置計画の検討にあたっては、処分孔、人工バリアのモニタリング記録や人工バリア長期挙動予測、廃棄体製作記録などを閲覧する。一連の安全評価で問題のない処分孔に対し、廃棄体の定置計画を検討、登録する。

- プロセス 5

廃棄体の定置にあたっては、定置する廃棄体の番号と処分孔の番号がリンクされ、廃棄体の製作から搬入、定置にわたる一連の流れが記録される。また、事前に作成された廃棄体定置計画書に基づき、所定の廃棄体が定置されていることを確認する。

b. 試運用ケース 2 の実施

試運用ケース 2 において想定するプロセスと取り扱われる代表的な情報を表 4-20 に示す。

表 4-20 試運用ケース 2 で取り扱う主要なデータ

No.	プロセス	システム利用	
		閲覧	登録
1	人工バリアの設置	処分孔モニタリング記録 人工バリア製作記録 人工バリア長期挙動予測	人工バリア設置計画書 処分孔／人工バリアモニタリング記録 検討・協議資料／議事録 人工バリア搬入／設置記録
3	廃棄体定置計画の検討	処分孔／人工バリアモニタリング記録 人工バリア／廃棄体製作記録 安全評価報告書	検討・協議資料／議事録 廃棄体定置計画書 設置許可申請書／許可書 廃棄体搬入／定置記録
4	廃棄体の定置		
5	定置箇所周辺のモニタリング	処分孔／人工バリア／廃棄体モニタリング記録 人工バリア製作記録	人工バリア設置記録 人工バリアモニタリング記録 空間線量などモニタリング記録
6	国民への情報開示	各種データ、資料	対応報告書
取り扱うファイル数		38 ファイル	47 ファイル

- プロセス 1: 「人工バリア（緩衝材）の設置」

- ユーザー（事業者など）

人工バリア設置計画書の作成および設置可否の検討をするため、「処分孔モニタリング記録」、「人工バリア製作記録」、「人工バリア長期挙動予測結果」の閲覧、検討過程において作成される「各種検討資料」、「各種協議資料」、「各種議事録」の登録、成果物である「人工バリア設置計画書」（図 4-40）の登録を試行した。

- ユーザー（業務を受託した会社など）

人工バリアの設置可否のためのモニタリングの記録および報告書作成のため、「処分孔モニタリング記録」、「人工バリア製作記録」、「人工バリア設置計画書」の閲覧、「人工バリアモニタリング記録」、「人工バリア長期挙動予測結果」の登録を試行した。人工バリアの搬入においては「人工バリア製作記録」の閲覧、「人工バリア搬入記録」の登録を試行した。

以下に、人工バリアの設置のプロセスにおけるデータの閲覧および登録時の保存/閲覧先（機能）と動作確認したインターフェースおよびデータベースを表 4-21 に示す。

表 4-21 人工バリアの設置における動作確認項目

シナリオ	利用者	作業内容 (確認機能)	資料名	保存/閲覧先 (作業DB/IF)	インターフェース				データベース							
					1	2	3	4	1	2	3	4	5	6		
人工バリア設置計画の 検討/計画書の作成	ユーザー (事業者)	資料閲覧	処分孔モニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ											
			人工バリア製作記録	維持管理	点検											
		資料登録	検討資料	文書管理	レポート	○	○	○	○	◎	○	-	○	-	◎	
			協議資料	文書管理	レポート											
			議事録	文書管理	議事録											
人工バリア設置計画書	文書管理	レポート														
処分孔モニタリング の実施	ユーザー (調査)	資料閲覧	処分孔モニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ	-	-	-	◎	-	◎	-	-	-	◎	
		資料登録	人工バリアモニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ											
人工バリア長期挙動 の予測	ユーザー (コンサル)	資料閲覧	処分孔モニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ											
		資料登録	人工バリア製作記録	文書管理	レポート	◎	◎	○	◎	○	◎	-	-	◎		
人工バリア設置可否 の検討/評価	ユーザー (事業者)	資料閲覧	人工バリア長期挙動予測報告書	文書管理	レポート											
		資料登録	人工バリア長期挙動予測報告書	文書管理	レポート	◎	○	○	-	◎	-	○	-	-	-	
人工バリアの搬入	ユーザー (メーカー)	資料閲覧	人工バリア製作記録	維持管理	点検	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		資料登録	人工バリア搬入記録	維持管理	点検											
人工バリアの設置	ユーザー (メーカー)	資料閲覧	処分孔モニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ											
		資料登録	人工バリア設置計画書	文書管理	レポート	○	-	-	○	-	-	-	○	○	◎	
		資料登録	人工バリア搬入記録	維持管理	点検											
データ登録・閲覧時 の不具合等対応	管理者 (事業者)	資料登録	対応報告書	文書管理	レポート	◎	◎	○	◎	◎	◎	○	○	◎		

凡例

【インターフェース】

- 1: 設計および施工時のデータの作成・更新や参照のIF
- 2: 解析データの参照のためのIF
- 3: ISISやe-PARなど既存のデータベースのIF
- 4: モニタリングデータ更新のIF

【データベース】

- 1: 統合DB
- 2: 地形・地質DB
- 3: 設計DB
- 4: 図面管理DB
- 5: 積算DB
- 6: 維持管理・補修履歴DB

星取表:

- ◎: 有効な機能確認ができる
- : 部分的な機能確認ができる
- : 機能確認は不十分である

システム取扱者:

- *: 関係有
- : 関係無し



図 4-40 人工バリア設置計画書の登録

- プロセス 2: 「処分孔・人工バリアモニタリングの実施」
 - ユーザー (業務を受託した会社など)
 - 人工バリア設置時のモニタリングを実施し記録を残すため、「処分孔モニタリング記録」、「人工バリアモニタリング記録」(図 4-41) の閲覧および登録を試行した。

以下に、処分孔・人工バリアモニタリングの実施のプロセスにおけるデータの閲覧および登録時の保存/閲覧先（機能）と動作確認したインターフェースおよびデータベースを表 4-22 に示す。また、閲覧における操作画面として、「人工バリアモニタリング記録」の閲覧を図 4-41 に示す。

表 4-22 処分孔・人工バリアモニタリングにおける動作確認項目

シナリオ	利用者	作業内容 (確認機能)	資料名	保存/閲覧先 (作業DB/IF)	インターフェース				データベース							
					1	2	3	4	1	2	3	4	5	6		
処分孔/人工バリア モニタリングの実施	ユーザー (調査)	資料閲覧	処分孔モニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ											
			人工バリアモニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ	-	-	-	◎	-	◎	-	-	-	◎	
		資料登録	処分孔モニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ											
			人工バリアモニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ											
データ登録・閲覧時 の不具合等対応	管理者 (事業者)	資料登録	対応報告書	文書管理	レポート	◎	◎	○	◎	◎	◎	◎	○	○	◎	

凡例

【インターフェース】
 1: 設計および施工時のデータの作成・更新や参照のIF
 2: 解析データの参照のためのIF
 3: ISISやe-PARなど既存のデータベースのIF
 4: モニタリングデータ更新のIF

【データベース】
 1: 統合DB
 2: 地形・地質DB
 3: 設計DB
 4: 図面管理DB
 5: 積算DB
 6: 維持管理・補修履歴DB

星取表:
 ◎: 有効な機能確認ができる
 ○: 部分的な機能確認ができる
 -: 機能確認は不十分である

システム取扱者:
 *: 関係有
 -: 関係無し

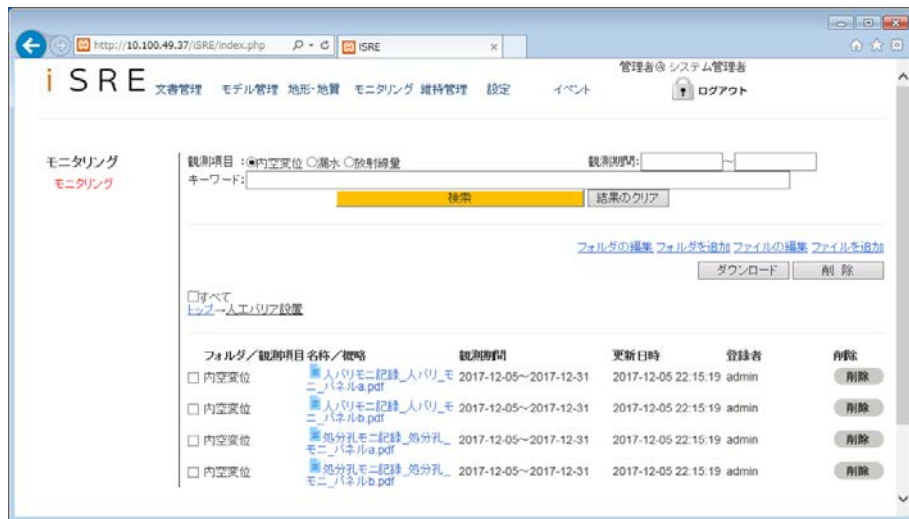


図 4-41 人工バリアモニタリング記録の閲覧および登録

• プロセス 3: 「廃棄体設置計画の検討」

➤ ユーザー（事業者）

廃棄体の設置許可書類を作成するため、「各種モニタリング記録」（図 4-42）、「各種長期挙動予測結果」、「各種製作記録」、「安全評価報告書」の閲覧、書類作成の過程で作成される「各種検討資料」、「各種協議資料」、「各種議事録」の登録、成果物である「廃棄体定置計画書」（図 4-43）、「設置許可申請書」の登録を試行した。また、許可後における設置の可否の判断のため、「廃棄体長期挙動予測報告書」の閲覧、判断の過程で作成される「各種検討資料」、「各種協議資料」、「各種議事録」の登録の確認を試行した。

➤ ユーザー（関係省庁）

提出された許可申請の確認のため、「設置許可申請書」、「各種検討記録」、「各種調査記録」の閲覧、成果物である「設置許可書」の登録を試行した。

➤ ユーザー（業務を受託した会社など）

設置許可に至るモニタリングと長期挙動予測の検討のため、「各種モニタリング記録」、「各種製作記録」の閲覧、「各種モニタリング記録」、「廃棄体長期挙動予測報告書」の登録を試行した。

以下に、廃棄体設置計画の検討のプロセスにおけるデータの閲覧および登録時の保存/閲覧先（機能）と動作確認したインターフェースおよびデータベースを表 4-23 に示す。

表 4-23 廃棄体設置計画の検討における動作確認項目

シナリオ	利用者	作業内容 (確認機能)	資料名	保存/閲覧先 (作業DB/IF)	インターフェース				データベース									
					1	2	3	4	1	2	3	4	5	6				
廃棄体設置計画の検討 /計画書の作成	ユーザー (事業者)	資料閲覧	処分孔モニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ													
			人工バリアモニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ													
			人工バリア長期挙動予測報告書	文書管理	レポート													
		資料登録	廃棄体製作記録	維持管理	点検													
			検討資料	文書管理	レポート	-	○	-	○	◎	-	-	◎	-	○			
			協議資料	文書管理	レポート													
			議事録	文書管理	議事録													
設置許可申請 (施設確認)	ユーザー (事業者)	資料閲覧	廃棄体製作記録	維持管理	点検													
			人工バリア製作記録	維持管理	点検													
			人工バリア長期挙動予測報告書	文書管理	レポート	-	○	-	-	◎	-	-	○	-	-			
			廃棄体長期挙動予測報告書	文書管理	レポート													
		安全評価報告書	文書管理	レポート														
資料登録	設置許可申請書	文書管理	レポート															
設置許可 (施設確認)	ユーザー (関係省 庁)	資料閲覧	設置許可申請書	文書管理	レポート													
		資料登録	各種検討記録/調査記録	文書管理	レポート	-	-	-	-	○	-	-	○	-	-			
処分孔/人工バリア モニタリングの実施	ユーザー (調査)	資料閲覧	処分孔モニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ													
			人工バリアモニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ	-	-	-	◎	-	-	-	-	-	◎			
		資料登録	処分孔モニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ													
			人工バリアモニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ													
廃棄体長期挙動 の予測	ユーザー (コンサル)	資料閲覧	処分孔モニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ													
			人工バリアモニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ													
			人工バリア製作記録	維持管理	点検	◎	◎	-	○	○	-	-	○	-	○			
		資料登録	廃棄体製作記録	維持管理	点検													
			廃棄体長期挙動予測報告書	文書管理	レポート													
廃棄体設置可否 の検討/評価	ユーザー (事業者)	資料閲覧	廃棄体長期挙動予測報告書	文書管理	レポート													
		資料登録	検討資料	文書管理	レポート	-	○	-	-	◎	-	-	-	-	-			
			協議資料	文書管理	レポート													
			議事録	文書管理	議事録													
データ登録・閲覧時 の不具合等対応	管理者 (事業者)	資料登録	対応報告書	文書管理	レポート	◎	◎	-	◎	◎	-	-	◎	○	◎			

凡例

【インターフェース】

- 1: 設計および施工時のデータの作成・更新や参照のIF
- 2: 解析データの参照のためのIF
- 3: ISISやe-PARなど既存のデータベースのIF
- 4: モニタリングデータ更新のIF

【データベース】

- 1: 統合DB
- 2: 地形・地質DB
- 3: 設計DB
- 4: 図面管理DB
- 5: 積算DB
- 6: 維持管理・補修履歴DB

星取表:

- ◎: 有効な機能確認ができる
- : 部分的な機能確認ができる
- : 機能確認は不十分である

システム取扱者:

- *: 関係有
- : 関係無し



図 4-42 処分孔モニタリング記録の閲覧



図 4-43 廃棄体定置計画書の登録

- プロセス 4: 「廃棄体の定置」

- ユーザー（業務を受託した会社など）

設置可否の判断がなされ、廃棄体の搬入および定置のため、「廃棄体製作記録」、「各種モニタリング記録」、「廃棄体搬入記録」、「廃棄体定置計画書」、の閲覧、「廃棄体搬入記録」、「廃棄体定置記録」（図 4-44）の登録を試行した。また、定置後のモニタリングを行うため、「各種モニタリング記録」の閲覧および登録を試行した。

以下に、廃棄体の定置のプロセスにおけるデータの閲覧および登録時の保存/閲覧先（機能）と動作確認したインターフェースおよびデータベースを表 4-24 に示す。また、三次元データによる定置状況確認の際の画面ビューを図 4-45 に示す。

表 4-24 廃棄体の定置における動作確認項目

シナリオ	利用者	作業内容 (確認機能)	資料名	保存/閲覧先 (作業DB/IF)	インターフェース				データベース							
					1	2	3	4	1	2	3	4	5	6		
廃棄体の搬入	ユーザー (メーカー)	資料閲覧	廃棄体製作記録	維持管理	点検											
		資料登録	廃棄体搬入記録	維持管理	点検	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
廃棄体の定置	ユーザー (メーカー)	資料閲覧	処分孔モニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ											
			人工バリアモニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ											
		資料登録	廃棄体搬入記録	維持管理	点検	◎	-	-	○	-	-	-	○	○	○	
		資料登録	廃棄体定置計画書	文書管理	レポート											
定置箇所周辺のモニタリング	ユーザー (調査)	資料閲覧	処分孔モニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ											
			人工バリアモニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ											
		資料登録	処分孔モニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ	-	-	-	◎	-	-	-	-	-	◎	
			人工バリアモニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ											
			廃棄体モニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ											
空間線量モニタリング記録	モニタリング	モニタリングデータ														
データ登録・閲覧時の不具合等対応	管理者 (事業者)	資料登録	対応報告書	文書管理	レポート	◎	◎	-	◎	◎	-	◎	◎	○	◎	

凡例

【インターフェース】
 1: 設計および施工時のデータの作成・更新や参照のIF
 2: 解析データの参照のためのIF
 3: ISISやe-PARなど既存のデータベースのIF
 4: モニタリングデータ更新のIF

【データベース】
 1: 統合DB
 2: 地形・地質DB
 3: 設計DB
 4: 図面管理DB
 5: 積算DB
 6: 維持管理・補修履歴DB

星取表:
 ◎: 有効な機能確認ができる
 ○: 部分的な機能確認ができる
 -: 機能確認は不十分である
 *: システム取扱者
 -: 関係無し

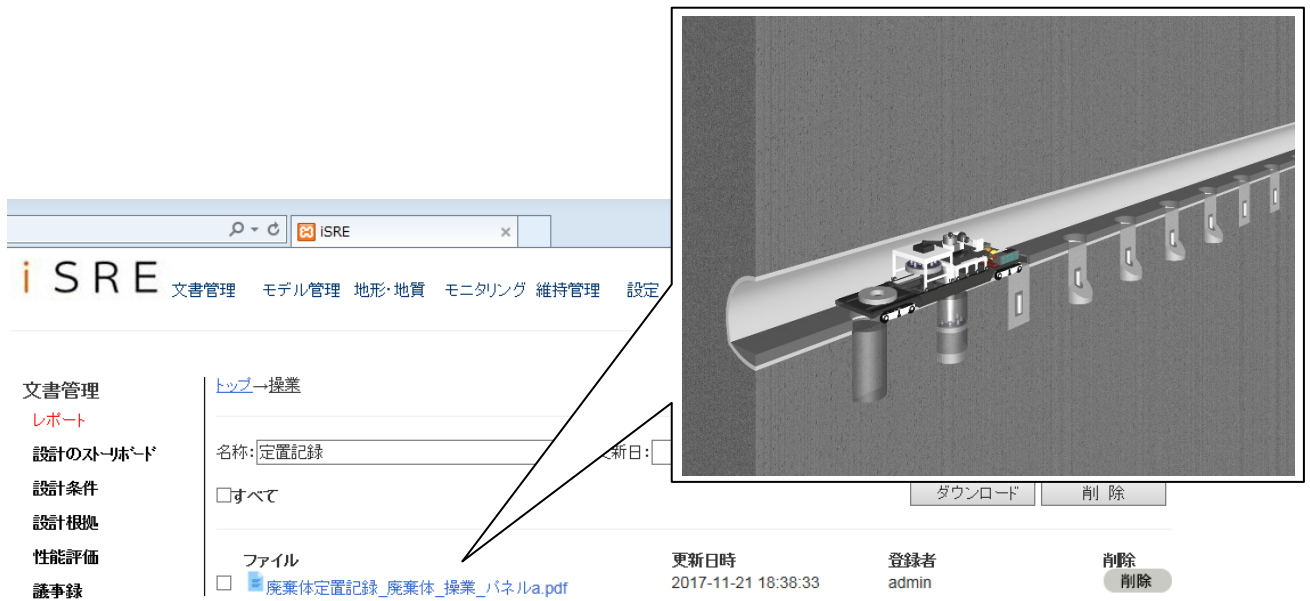


図 4-44 廃棄体定置記録の登録とその時の作業イメージ

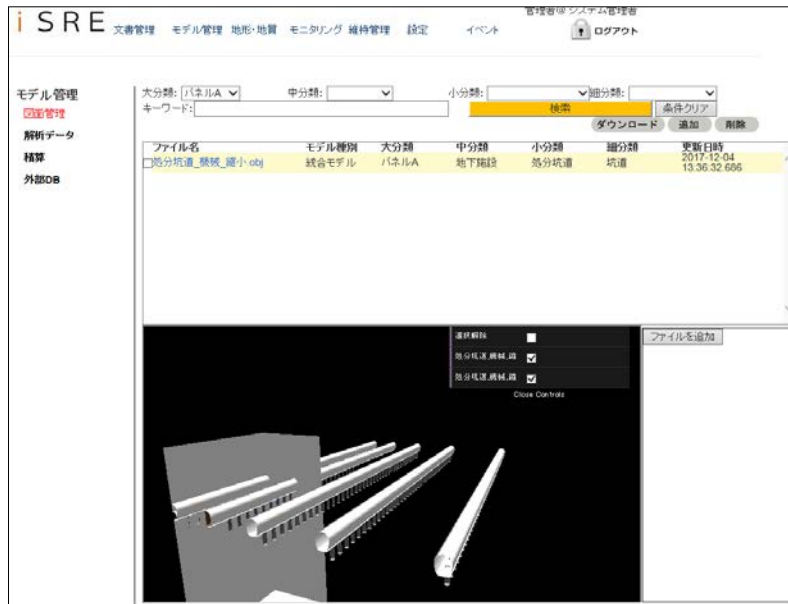


図 4-45 図面管理 DB における三次元モデルによる定置状況確認時の処分坑道のビューワ機能画面

- プロセス 5 : 「定置箇所周辺のモニタリング」

- ユーザー（業務を受託した会社など）

人工バリアを搬入および定置するため、「廃棄体制作記録」、「各種モニタリング記録」、「廃棄体搬入記録」、「廃棄体定置計画書」の閲覧、「廃棄体搬入記録」、「廃棄体定置記録」の登録を試行した。また、定置後のモニタリングを行うため、「各種モニタリング記録」（図 4-46）の閲覧および登録を試行した。

以下に、定置箇所周辺のモニタリングのプロセスにおけるデータの閲覧および登録時の保存/閲覧先（機能）と動作確認したインターフェースおよびデータベースを表 4-25 に示す。また、「処分孔モニタリング記録」の閲覧および登録における操作画面を図 4-46 に示す。

表 4-25 定置箇所周辺のモニタリングにおける動作確認項目

シナリオ	利用者	作業内容 (確認機能)	資料名	保存/閲覧先 (作業DB/IF)	インターフェース				データベース						
					1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	
人工バリアの搬入	ユーザー (メーカー)	資料閲覧	人工バリア製作記録	維持管理 点検	○	○	-	◎	○	-	-	-	-	○	
		資料登録	人工バリア搬入記録	維持管理 点検											
人工バリアの設置	ユーザー (メーカー)	資料閲覧	処分孔モニタリング記録	モニタリング モニタリングデータ											
			人工バリアモニタリング記録	モニタリング モニタリングデータ											
			廃棄体モニタリング記録	モニタリング モニタリングデータ	◎	◎	-	◎	○	-	○	○	○	○	
		資料登録	人工バリア搬入記録	維持管理 点検											
		資料登録	人工バリア設置記録	維持管理 点検											
定置箇所周辺のモニタリング	ユーザー (コンサル)	資料閲覧	人工バリア設置記録	維持管理 点検											
			人工バリアモニタリング記録	モニタリング モニタリングデータ	○	○	-	◎	◎	-	◎	◎	-	◎	
		資料登録	人工バリアモニタリング記録	モニタリング モニタリングデータ											
			空間線量モニタリング記録	モニタリング モニタリングデータ											
データ登録・閲覧時の不具合等対応	管理者 (事業者)	資料登録	対応報告書	文書管理 レポート	◎	◎	-	◎	◎	-	◎	◎	○	◎	

凡例

【インターフェース】

- 1: 設計および施工時のデータの作成・更新や参照のIF
- 2: 解析データの参照のためのIF
- 3: ISISやe-PARなど既存のデータベースのIF
- 4: モニタリングデータ更新のIF

【データベース】

- 1: 統合DB
- 2: 地形・地質DB
- 3: 設計DB
- 4: 図面管理DB
- 5: 積算DB
- 6: 維持管理・補修履歴DB

星取表:

- ◎: 有効な機能確認ができる
 - : 部分的な機能確認ができる
 - : 機能確認は不十分である
- システム取扱者:
- *: 関係有
 - : 関係無し



図 4-46 処分孔モニタリング記録の閲覧および登録

3) 試運用を通して確認できた機能と課題

開発した iSRE の機能の確認、および機能確認を通した今後の課題抽出を行うことを目的として、プロトタイプを使用した試運用を行った。平成 29 年度における試運用は、多様な場面設定においても機能が整備されていることが確認でき、また、なるべく多くの改善点や課題の抽出を念頭に、特徴の異なる二つのケースを設定し、これに即したシナリオに沿って実施した。以上を踏まえた試運用による確認を通し、平成 29 年度において設定したシナリオにおいて想定される iSRE の利用方法を示すことができ、以下の点が整備されていることが確認できた。

- 地層処分事業において発生することが想定されるデータの格納場所が DB において整備されていること

- ▶ 多量に登録されたファイルから、必要なファイルの検索が可能であること
- ▶ 地層処分事業において想定される外部システムとの連携に、開発した IF 機能が対応していること

平成 29 年度に整備した機能である「イベント機能」についても、イベントの設定、イベントによる一括検索の機能の動作を確認した。試運用では、イベントとして設定した「文献調査」に紐付けられたすべてのファイルを一括で検索でき、着目したイベントに対し漏れの無い検索が可能であることが確認できた。以上、設計支援システムの初期モデルとして開発したプロトタイプを試運用を通じた試行により、本システムの基本概念や試作した機能などが、事業で想定される情報のやり取りに対応するための基礎となりうるということが確認された。

今後、iSRE の実用化の観点、および第三者に向けた地層処分に対する理解促進の観点から、以下の項目について考察する。

- ・ iSRE の実用化に向けた iSRE 機能の向上に関する課題と対策・考察 (①参照)
- ・ iSRE の実用化に向けたソフトウェア技術などに関する課題と対策・考察 (②参照)
- ・ 第三者の地層処分に対する理解促進に向けた考察

① iSRE の実用化に向けた iSRE 機能の向上に関する課題と対策・考察

試運用を通して iSRE 機能の向上に関して課題として抽出された項目について、対策と考察を表 4-26 に示す。

表 4-26 iSRE の実用化に向けた iSRE 機能の向上に関する課題と対策・考察

課題	内容	対策・考察など
インターフェース機能とデータベース機能の質的向上および実用化に向けた課題	イベントの設定は現時点では登録時に限られるが、あとからファイルごと、あるいは複数ファイルをまとめて、編集・再設定できるようにすべき。	一括操作機能を検討する。ただし、操作ミスによるデータ損失を防ぐため、操作可能な権限について留意する。
	将来データが大量・多様化することを考えると、イベントの階層の深さは自由に設定できる柔軟性をもたせるべき。	多重階層構造のデータベース設計を検討する。ただし、多重階層構造化されたデータベースは拡張性が乏しく、機能改良の妨げとなることに留意する。
	アクセス権限の設定は、必要に応じてドキュメントごとなど詳細に設定できることが望ましい。	データごとにアクセス権を管理し、閲覧権限を制御する機能を検討する。
	各 DB における属性項目は、随時修正可能にした方がよい。	マスター（属性項目の設定）を管理する機能を検討する。ただし、変更時に過去データとの齟齬が生じる可能性があるため、データの付け替え機能なども合わせて検討する。
	必要な情報を適宜、正確に抽出できる機能（どれが最新か、実施する解析に使うべきデータはどれかなど）の具備	<ul style="list-style-type: none"> ・ 時間と空間の 2 軸でデータを管理していく。時間履歴管理とのリンク方法は要検討 ・ 最新データかどうかを判断するためのフラグを付ける

② iSRE の実用化に向けたソフトウェア技術などに関する課題と対策・考察

試運用を通してソフトウェア技術などに関して課題として抽出された項目について、対策と考察を表 4-27 に示す。

表 4-27 iSRE の実用化に向けたソフトウェア技術などに関する課題と対策・考察

課題	内容・観点	対策・考察
オープンソース化	多様な人が開発に参画することによって、ソフトウェアの質の向上を図ること	開発者を集めるインセンティブや合意形成の仕組みについて検討が必要
	長期的間に開発者が変わった場合でも、安定的なシステム運用を担保すること	プログラム説明書などのドキュメントの整備、コーディングルールの検討、開発・運用の効率・継続性を勘案した技術（ミドルウェアやプログラム言語など）の選定などが重要
OS の変更などに対する対応	IT 環境の変化に対応したシステムであること	iSRE に登録できるデータ形式を制限する（長期間でデータ形式が変わった場合に、データ形式の変換作業が必要となるが、変換可能性を確保するためにはデータ形式を制限することが望ましい）
		システムの整備、運用の責任者を定め、事業条件や IT 環境に応じてシステムを継続的に改善していくための体制・仕組みを整備
	事業の進展に伴い、計画時に想定していない工程、作業が発生し、過去の分類、構成が大きく変更される可能性がある	システム構成、ファイル管理機能の効率化（フォルダ構成、ファイルの保存先・ファイル名の一括変更など）が有効
AI の導入	知識化ツールへの適用を検討することも考えられる	AI の技術の現状や見通しを踏まえての検索機能の高度化や画像解析による施設劣化状況の監視などへの適用性の可否の検討が必要
システムの公開	システムの第三者への公開を念頭に置いた場合、ユーザーごとの作業に最適なインターフェースが求められる	不要な機能、表示は混乱を招く恐れがあるため、ユーザーごとに必要最小限の機能のみを表示させる
	事業の進展に伴い、異なる権限を付与すべきユーザーが追加されることも考えられる	ユーザー権限のコントロールを考慮した管理機能と運用方針を定める
セキュリティ	機密性の高い情報を扱うシステムであり、実用化にあたっては IT インフラを含めたセキュリティ検討が必要	システムの運用方法を決定した上で、ハードウェア、ネットワークの基本設計を行ない、設計内容を踏まえて iSRE の機能や対象ユーザーの見直しを行う。

③ 第三者の理解促進に向けた考察

地層処分事業は多くの国民が関心を持つ事業であり、事業中の様々な情報を求める声は多いと考えられる。そのような声に対し、iSRE では、平成 29 年度において、想定したユーザー種別に応じたアクセス権を付与する機能を実装し、ユーザー種別に応じて登録、閲覧の可否を設定することが可能であることを確認した。本試行では、管理者である「事業者(管理者)」、関連ユーザーである「事業者(ユーザー)」、「実施者(調査会社、建設会社、メーカーなど)」

一般ユーザーである「国民」を想定し、それぞれに適切な権限を付与して閲覧、登録作業を試行した。

試行では、例えば権限は閲覧のみである「国民」がデータの削除ボタンを押してもデータは消去されないことなどを確認した。

以下に、国民への情報開示のプロセスにおけるデータの登録時の保存/閲覧先（機能）と動作確認したインターフェースおよびデータベースを表 4-28 に示す。また、登録における操作画面として、「ユーザー種別」の登録を図 4-47、国民などの一般ユーザーを対象とした例において「ユーザー種別ごとの権限設定状況」の設定を図 4-48、図 4-48 の権限設定に対する画面操作の制限の例を図 4-49 に示す。

表 4-28 国民への情報開示における動作確認項目

シナリオ	利用者	作業内容 (確認機能)	資料名	保存/閲覧先 (作業DB/IF)		インターフェース				データベース					
						1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
国民への情報開示	国民	資料閲覧	各種データ、資料	文書管理	レポート	-	-	-	-	◎	-	-	-	-	-
データ登録・閲覧時の不具合等対応	管理者 (事業者)	資料登録	対応報告書	文書管理	レポート	-	-	-	-	◎	-	-	-	-	-

凡例

【インターフェース】

- 1: 設計および施工時のデータの作成・更新や参照のIF
- 2: 解析データの参照のためのIF
- 3: ISISやe-PARなど既存のデータベースのIF
- 4: モニタリングデータ更新のIF

【データベース】

- 1: 統合DB
- 2: 地形・地質DB
- 3: 設計DB
- 4: 図面管理DB
- 5: 積算DB
- 6: 維持管理・補修履歴DB

星取表:

- ◎: 有効な機能確認ができる
- : 部分的な機能確認ができる
- : 機能確認は不十分である
- *: 関係有
- : 関係無し



図 4-47 管理者によるユーザー種別に応じたユーザー情報登録時の画面

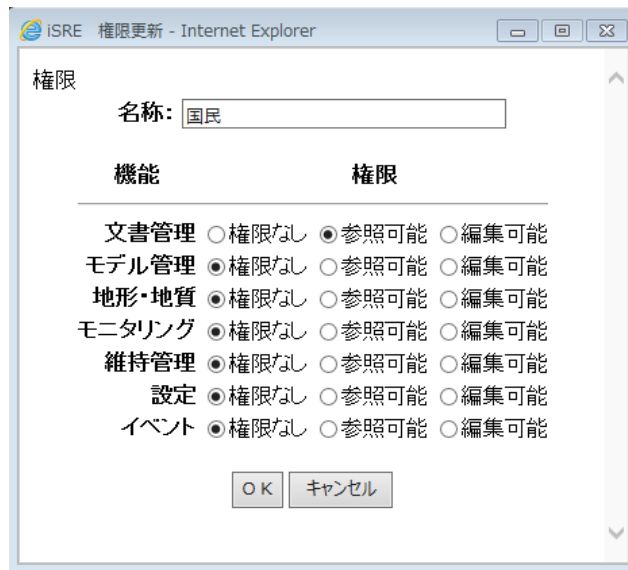


図 4-48 ユーザー種別ごとの権限設定状況（国民ユーザーの例）



図 4-49 ユーザー種別ごとの操作制限（国民ユーザーの例）

(6) まとめと今後の課題

平成 29 年度の開発では、開発当初に計画されたすべてのインターフェースおよびデータベース機能の設計・試作が完了し、初期モデルとしてのプロトタイプが完成した。これに伴い、システムの利用マニュアルを整備した。利用マニュアルは、システムを使用するユーザー向けのユーザーマニュアルと管理者向けのシステム管理者マニュアルについて整備し、それぞれの立場で必要な情報を示すことができた。過年度における開発において課題としていたデータベースを横断的に検索する機能については、イベント機能の実装と三次元モデルからのアクセス機能の試行により、検索性能の向上が確認できた。これらを踏まえ、試作した機能の確認および課題抽出を目的として、地層処分事業の各段階で行われる行為を想定した試運用を実施した。試運用の結果、本システムの基本概念や試作した機能等が、事業で実際に想定される情報のやり取りに対応するための基礎となり得ることを確認した。また、実用化に向けての課題として、iSRE の機能向上に関する課題とソフトウェア技術の進展に関する課題を抽出し、対策・考察を示すことができた。最後に、地層処分事業を進める上で特に重要な観点である第三者への理解促進の観点からの検討を行い、iSRE の今後の活用の可能性を示すことができた。

今後、さらに具体的な試運用による機能の適用性の確認を通して、拡充すべき機能、すでにある機能の高度化、機能間において連携を強化すべき項目の検討などを、設計の知識化ツールと第三者への情報開示ツールの両方の観点に留意しつつ進めることが必要と考えられる。

【参考文献】

原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2006）：緩衝材基本特性データベースの開発，平成18年9月 <<https://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/>>（2018年3月閲覧）

原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2013a）：平成24年度地層処分技術調査等事業 地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発 6カ年とりまとめ報告書，平成25年3月．

原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2013b）：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 先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発 6カ年とりまとめ報告書，平成25年3月．

第 5 章

その他の代替処分オプションについての調査・検討

5 章詳細目次

5. その他の代替処分オプションについての調査・検討	5-1
(1) 背景と目的	5-1
(2) わが国への適用における課題に対し重点的に検討する項目の整理	5-2
(3) 超深孔処分における地質環境・工学技術などに関する調査・情報整理	5-4
1) 諸外国における最新情報	5-4
① サイト選定条件としての地質環境	5-5
② 工学技術と超深孔処分の実現性	5-8
a. 深部掘削技術	5-8
b. 操業・閉鎖のための技術	5-12
c. 廃棄体の仕様・種類の設定	5-16
d. 超深孔処分の実現性	5-19
2) わが国における最新情報	5-22
① 地質環境の安定性と深部特性の評価	5-22
② 掘削・操業・閉鎖技術の実現性	5-23
③ 廃棄体の仕様・種類の整理	5-24
(4) 超深孔処分による安全確保の見通しに関する情報整理と解析	5-28
1) 米国の事例の調査	5-28
2) わが国の特徴を考慮した場合の超深孔処分の予察的な解析の試行	5-32
① 超深孔処分の場および主な移行プロセスの想定	5-32
② 超深孔処分の想定における移行経路のバリエーション	5-33
③ 解析上の取り扱いの設定	5-34
④ 評価パラメータおよび解析ケースの設定	5-36
⑤ 解析結果および考察	5-37
(5) 超深孔処分に関する最新情報などの調査結果に基づく分析	5-40
(6) まとめ	5-41
参考文献	5-43

5. その他の代替処分オプションについての調査・検討

(1) 背景と目的

高レベル放射性廃棄物の最終処分方式としては、国際的共通認識として地層処分が最も有望な方法とされており、わが国においても、最新の科学的知見を踏まえて地層処分に関する研究開発が進められてきている。一方、総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会放射性廃棄物WG（以下、「放射性廃棄物WG」という）による「放射性廃棄物WG中間とりまとめ（平成26年5月）」（放射性廃棄物WG，2014）（以下、「WG中間とりまとめ」という）では、高レベル放射性廃棄物の最終処分方式として、現在各国が取り組んでいる地層処分のほかに、代替処分概念として、海洋投棄、海洋底下処分、沈み込み帯への処分（以上はロンドン条約により禁止）、氷床処分（南極条約により禁止）、超深孔処分、岩石熔融処分、井戸注入処分、宇宙処分などについての国際的な評価が示されている。また、地層処分の安全性の不確実性を今後の研究開発などにより低減することと並行して、今後の技術の進捗により潜在的課題が克服され、検討の対象となりうる代替処分概念については、その可能性を模索する、という国際的な考え方が示されている。

このような背景を踏まえ、平成27年度よりわが国の高レベル放射性廃棄物の処分方法について、将来世代の幅広い選択肢を確保するために、代替処分概念などに関する調査研究を行うこととした。本調査では、WG中間とりまとめに示されている代替処分概念、および最終処分以外の方式（たとえば、使用済燃料の中長期的な貯蔵、暫定保管、核種分離・変換）を検討対象として情報を整理するとともに、超深孔処分など、現在検討段階にある代替処分概念については、諸外国の事例調査を行うことにより、それらの考え方、特徴、検討の背景、技術的課題などを明らかにし、わが国の諸条件を考慮した場合の有効な代替処分概念について検討することとした。

平成28年度までに、全体の調査研究計画の策定、その他の代替処分オプション（長期貯蔵などを含む）についての調査、および現在検討段階にある代替処分概念として超深孔処分に着目した情報の整理や課題の検討に着手した。具体的には、超深孔処分相当の深度での地質環境の特徴の調査および情報整理、超深孔掘削などの関連技術の開発動向や実績に関する調査および情報整理、および超深孔処分による安全確保の見通しに関する情報整理と予察的な検討を行った。

平成29年度は、まず、平成28年度までに整理した情報に対して、諸外国およびわが国における地質環境や工学技術に関する最新情報や補完的な情報の調査・整理を行う。なお、これらの情報の調査・整理の実施にあたっては、それを効果的に行うために重点的に検討すべきと考えられる項目の洗い出しを試みた。その洗い出しでは、諸外国での検討で着目されていること、また、わが国への超深孔処分の適用性の検討に反映していくうえで留意が必要になりそうなこと、などに着目することとした。また、超深孔処分の安全性に係る検討について米国の事例に関する最新情報の調査を継続するとともに、米国の事例で着目する熱対流による移行に対して、わが国の地質環境で想定される母岩中の地下水流動による移行との比較に着目した予察的な核種移行解析を行った。これら検討を踏まえて、超深孔処分をわが国に適用する場合に想定される諸外国との共通点や相違点、それらに基づく今後検討が必要な課題などの整理を進めた。

(2)以降において、以下の構成で平成 29 年度の実施内容などについて示す。

- ・ わが国への適用における課題に対し重点的に検討する項目の整理 ((2)参照)
- ・ 超深孔処分における地質環境・工学技術などに関する調査・情報整理 ((3)参照)
- ・ 超深孔処分による安全確保の見通しに関する情報整理と解析 ((4)参照)
- ・ 超深孔処分に関する最新情報などの調査結果に基づく分析 ((5)参照)
- ・ まとめ ((6)参照)

(2) わが国への適用における課題に対し重点的に検討する項目の整理

平成 28 年度までに整理した情報に対して、諸外国およびわが国における地質環境および工学技術に関する最新情報や補完的な情報の調査・整理の実施にあたり、情報の調査・整理を効果的に進めるには、諸外国での検討で着目されていること、また、わが国への超深孔処分の適用性の検討に反映していく上で留意が必要になりそうなこと、などの着目すべきポイントを設定することが有用と考えられる。

そこで、過年度における調査の経緯などに基づき、超深孔処分のわが国への適用性の検討で重要となりそうなポイントと関係する情報の抽出を試みた。平成 29 年度は、以上の観点から重点的に検討する項目を整理し、これらに基づき過年度の調査結果の整理を行いつつ、その整理でのより詳しく知りたい部分や足りない部分をなるべく狙って最新情報の調査を進めることとした。重点的に検討する項目の分類は、過年度からの検討を踏まえて以下の三つとした。

- 超深孔処分の適用が可能な条件の観点：「サイト選定条件としての地質条件」
- 適合する条件下での技術の実現性：「工学技術および超深孔処分の実現性」
- 実現可能な技術における処分場としての安全性：「処分システムの安全性評価」

以下に、諸外国の情報のわが国への適用における課題に対し、洗い出した重点的に検討する項目について整理した一覧表を表 5-1 に示す。

表 5-1 わが国への適用における課題に対し重点的に検討する項目の整理

課題の分類	課題検討のポイント	検討に関する情報
サイト選定条件としての地質環境	<ul style="list-style-type: none"> 超深孔処分におけるサイト選定条件の要件とはどのようなものか、わが国において超深孔処分に適した地質や岩盤環境が存在するか 	<ul style="list-style-type: none"> 諸外国の超深孔処分での地下深部における地質環境の基本要件（力学的特性・岩盤などの地質特性）およびその考え方の背景 わが国での超深部（地表面下 5,000 m 程度）での地質環境特性と実現性や課題
工学技術と超深孔処分の実現性 <ul style="list-style-type: none"> 深部掘削技術 操業・閉鎖のための技術 廃棄体の仕様・種類の設定 超深孔処分の実現性 	<ul style="list-style-type: none"> 今現在検討されている超深度の坑井の掘削にあたり、現時点での技術レベルおよびどのような検討が今後必要となってくるか 操業・閉鎖については、どの程度技術的検討が進んでいるのか 超深孔処分の対象となる廃棄物が存在するか 対象となる廃棄物が存在する場合に、どのような廃棄体をどのようなパッケージで対象とするのか 処分の実施にあたり、地域住民や社会の合意および事業の成立性を踏まえた実現可能性の評価のためにどのような検討が必要か 廃棄体定置後の回収可能性が必要か、また技術的な見通しはあるか 	<ul style="list-style-type: none"> 超深孔の掘削技術に関する技術的要件などに関する背景や根拠 超深孔処分を進めるにあたり、今後必要となる技術開発エリア わが国での技術開発および適用実績 操業期間中の廃棄体の取扱や管理方法、定置や閉鎖に関する規制・制度設計 超深孔の孔内構造や材料 使用済燃料などの対象廃棄物候補の検討 わが国での超深孔処分の対象となり得る廃棄物候補の廃棄体の形態（構造や材料） 諸外国でのフィールドテストの現状 超深孔処分にかかる回収可能性の検討 米国サンディア国立研究所などの国際会議や最新の研究などの情報
処分システムの安全性評価 <ul style="list-style-type: none"> 安全確保の考え方 FEP、安全評価のシナリオ 	<ul style="list-style-type: none"> 米国での安全評価事例では、どのような現象やプロセスに着目されているのか 我が国の地質環境を対象とする場合、どのような条件を考慮する必要があるのか 	<ul style="list-style-type: none"> 超深孔処分の実現性を示すうえで必要となる安全評価の手法について（特に米国における安全確保の考え方、FEP、安全評価のシナリオについて情報整理と安全評価上の課題の抽出）

(3) 超深孔処分における地質環境・工学技術などに関する調査・情報整理

超深孔処分は、使用済燃料などの処分方法として諸外国において検討が行われている。特に米国では包括的評価が行われるなどして (Murphy and Diodato, 2010)、フィールド試験の実施に向けて積極的に検討が進められてきた。米国を中心にこれら諸外国で検討されている地質環境や工学技術に関する最新情報について、前項で洗い出した重点的に検討すべきと考えられる項目に着目した情報の収集および整理を行う。

以下に実施内容を示す。

- ・ 諸外国における最新情報 (「1」参照)
- ・ わが国における最新情報 (「2」参照)

1) 諸外国における最新情報

わが国への適用を考慮しようとした時に重点的に検討すべき項目に対し、諸外国 (米国、スウェーデン、スイス、イギリス、ドイツ、カナダ、韓国など) における超深孔処分に対する地質環境の基本要件、サイト選定条件の考え方、掘削技術などの工学技術に関する技術的要件などに関する背景や根拠についての最新情報を収集し、整理を行った。近年、特に米国においては、米国エネルギー省 (DOE) のもとで超深孔処分についての調査や、2017 年に政府の方針により中止が発表されたものの (DOE, 2017)、フィールドテスト (ノースダコタ州・ラグビー) に向けての具体的な計画の検討などが進められて来た。諸外国の対応に対しても影響の大きい米国のフィールドテストの具体性を示す情報として、計画されていた実証・検証項目 (SNL, 2016a) について、調査した結果を以下にまとめる。

- ・ 結晶質岩において、十分な直径と 5,000 m の深度を持つ処分孔の掘削技術などの実証
- ・ 廃棄物の安定性と封じ込め機能について、フィールドテストサイトでの熱環境、水理場、化学場、力学場での各条件を特徴づけるための地下深部における科学的検証
- ・ 特定の温度、圧力、塩分濃度、および地球化学的な条件下における試験用廃棄体パッケージおよびシール材の評価
- ・ 試験用廃棄体パッケージの定置方法、地表面での取扱い方法、試験用廃棄体パッケージの定置と回収のための工学的技術の開発と検証
- ・ シールのデザインとシール材の充填方法の開発とテスト
- ・ 閉鎖前および閉鎖後の安全性の実証

本項目では、超深孔処分において重点的に検討する項目に挙げられた観点から、過年度において整理された米国における情報を中心にまとめ、平成 29 年度の調査において新たに得られた情報について示す。これらの情報から、「(5) 超深孔処分に関する最新情報などの調査結果に基づく分析」において、わが国への適用において今後検討が必要な課題などを整理するための諸外国の状況の共通項や、留意すべき重要な点の抽出を行う。

以下に実施内容を示す。

- ・ サイト選定条件としての地質環境 (①参照)

- ・ 工学技術と超深孔処分の実現性（②参照）

①サイト選定条件としての地質環境

地層処分においては、サイト選定と設計の方向性として、堅牢性と深部性からの防御性を重視すべきであり、人工バリアと天然バリアの両方によってこれらが実現されると考えられる（SNL, 2016a）。一方、超深孔処分概念においては、人工バリアの機能はあまり期待されておらず、超深度の地質環境に埋設することによる隔離を想定している。超深孔処分を実施する母岩として、米国では結晶質岩を基本要件としている。理由として、超深孔処分概念は動的な地質条件が無い（主に地下水流動が無いこと、また、例えば氷河期や他の気候変動の影響、または一般的な地表や地表付近の関連するプロセスが無いこと）との想定に基づいており、結晶質岩はその条件を満たすとされていることが挙げられる。

米国などで検討が進む超深孔のプロファイルは、超深孔処分の処分領域（廃棄体の定置領域）と閉塞領域（シールの設置領域）を結晶質岩中に設定することを前提としており、処分領域の長さを 2 km、閉塞領域の長さを 1 km としている。対象の岩種を結晶質岩、処分深度を 5 km 程度とした根拠としては、地下水の動きが遅い傾向があること、100 万年以上にわたって廃棄物を生活圏から十分に隔離するという目的に適している（Brady et al., 2009）ことが挙げられている。結晶質岩における 5 km 程度での環境としては以下の様な環境の特徴が想定されている。

- 低透水性 ($10^{-16} \sim 10^{-20} \text{ m}^{-2}$)
- 低間隙率 (< 1 %)
- 高濃度の塩水の成層の存在により対流を抑制する環境

米国で検討が進められている地質環境のその他の基本要件としては、結晶質基盤岩の上限面分布深度、結晶質岩の地質・地質構造、基盤岩構造の複雑さ、水平応力、地熱流速・地温勾配、隆起、第四紀断層と火山活動、地下資源などが挙げられる。

閉鎖後の長期安全性の観点からは、活断層や火山活動などの地質環境の長期安定性に係る地質現象のほか、地下深部から地表に至る移行経路となる不連続構造の存在とその水理地質学的特性、地下深部から地表に至る核種移行の駆動力の 1 つと考えられる熱流束や温度勾配が着目されている。また、人為事象の観点からは、地下資源に着目した要件が設定されている。（(4)において詳説）

その他の例として、スウェーデンにおいては、地理的位置（高緯度）に特化した要件として、将来の氷河期における変化が設定されているが、スイスや IAEA における地質環境の基本要件については、米国における地質環境の基本要件と大きな差異は見られない。

平成 29 年度に得られた情報として、東アジアの例では、韓国の超深孔処分における地質環境に関する報告書（Kang, 2014）の中で、超深孔処分を代替処分方式として検討している。報告書の中では、朝鮮半島の地質について、ユーラシアプレートの太平洋西部モバイルベルトに位置していること、半島の露出面積の半分以上は、先カンブリア変成岩と古生代～中生代深成岩から成り立っており、地殻変動を伴う地下には、古生代と中生代の堆積岩と火山岩から成ることなどを朝鮮半島の地質区分の地図から説明している。超深孔処分の適地の条件としては人口密集地を避けることや、過去の地震活動を参照すること

などが記載されているが、それ以上に踏み込んだ具体的な要件については言及されていない。結論として、通常の地層処分と比較した場合の潜在的な安全性の優位性を考慮すると、超深孔処分は、韓国の使用済燃料や HLW の最終処分のために、地域社会にとってより受け入れられる可能性がある代替物となりえるが、技術的課題を特定するとともに、深井掘削の可能性に関する包括的な市民の意見をを得るために、さらなる検討が必要であるとされている。

以上より、超深孔処分のサイト選定に適した地質環境の基本的要件は、他の諸外国においても概ね米国と同様の要件が検討されていると言える。スウェーデンの例に挙げたように氷河期の変化を考慮するなど、各国の特定の地質的条件を追加項目として検討しているケースや、韓国のように具体的な検討がそこまで進んでいないケースもみられ、各国における超深孔処分についての検討の段階にはばらつきがある。また、深度による特性などの違いは有るものの、通常の地層処分で検討されている地質環境の要件とほぼ同じ項目が検討対象となっている。

サイト選定条件としての地質環境について、米国および諸外国において重要とされている点と、それらの共通項や留意すべき事項を表 5-2 に示す。

表 5-2 サイト選定条件としての地質環境における重要事項の整理

米国	海外での状況 その他の諸外国	共通項や留意すべき重要な点
<p>●米国において Freeze et al. (2015) が提案するサイト選定条件を集約すると、超深孔処分の対象となり得るサイト条件は、以下のようによまとめられる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 処分領域および閉塞領域の対象母岩は、均質な結晶質岩（花崗岩）であること ・ 結晶質岩の上限面分布深度が 2 km 未満であること ・ 地熱流速が 75 mW m⁻² 未満であること ・ 地下深部の応力状態に異方性が認められないこと ・ 深部の地下水循環を避けるため、地形の傾斜は 1° 以上の地点まで、約 100 km 以上離れていること ・ 処分領域の基盤岩と地表面の間に帯水層が存在しないこと ・ 形成年代が古く、高塩分濃度で還元性の地下水が地下深部に分布すること ・ 結晶質岩中に規模が大きい鉛直のせん断帯や高透水性を示す構造などが存在しないこと ・ 岩体中に第四紀に形成された著しい変質が生じていないこと ・ 対象岩体中に歴史地震の記録がないこと ・ 第四紀の断層から 10 km 以上離れていること ・ 第四紀の火山活動から 10 km 以上離れていること ・ 経済的に利用可能な天然資源が分布しないこと ・ 石油備蓄基地や市街地から離れていること 	<p>●IAEA が示すサイト選定要件（ただし、ボーリング孔の深度は数百 m（地層処分相当）を対象）では以下のような点が評価対象として示されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 地下水への汚染の可能性 ・ 洪水、侵食、地すべりまたは風化などの気候・気象と関連する地表面現象が、処分システムの隔離機能に及ぼす影響 ・ 断層活動、地震活動または火山活動が、処分場の隔離機能を喪失させる可能性とその程度 ・ 処分場の隔離機能を脅かす可能性のある予測可能な人間活動の程度、 ・ 周辺の地化学環境が人工バリアの寿命を損なう可能性とその程度 ・ 地質が物理的・化学的安定性に寄与する程度 ・ 地質、水理地質および地化学特性が、サイトからアクセス可能な環境への放射性核種の移行抑制に寄与する程度 ・ 廃棄体や掘削重機をサイトへ運搬するための交通網、必要に応じて、水や電気などのインフラ設備 <p>●他の国々でも、概ね米国と同様の要件が検討されている。スウェーデンなどでは、各国で共通に挙げられている要件に加えて、以下の様な要件を追加で検討している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 将来の氷河期における変化を設定 ・ 十分に大きな不透水性 ・ 地下水分布 ・ 地化学的現象 ・ 主要な割れ目、断層などの存在 ・ 処分場における微生物の影響 	<p>●諸外国においても米国と概ね同様の共通項として、以下の地質環境の要件が挙げられている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 断層やせん断域などの複雑な地質構造を避けること ・ 処分層となる深部までの間に帯水層が無いこと ・ 地表から深部（5,000 m 程度）までの水平応力の差および水平応力の異方性が小さいこと ・ 将来の経済的な開発が見込まれる天然資源が存在しないこと <p>●米国において、超深孔処分を実施する母岩に結晶質岩が示されて来た理由としては、超深孔処分概念は動的な地質条件が無い（主に地下水流動が無いことや、例えば氷河期や他の気候変動の影響、または一般的な地表や地表付近の関連するプロセスが無いこと）との想定に基づいており、結晶質岩はその条件を満たすとされている点が挙げられる。</p>

② 工学技術と超深孔処分の実現性

超深孔処分は、検討対象が深度 5 km に及ぶ地下深部に大口径のボーリング孔を設置する処分概念であることから、ボーリング孔の掘削技術、操業（輸送、地上保管、廃棄体取扱・定置）・閉鎖のための技術など、各工程において検討が必要となる。想定される地質条件に対して、工学技術の実現性の観点から、以下の技術について整理する。

- ・ 深部掘削技術（a. 参照）
- ・ 操業・閉鎖のための技術（b. 参照）
- ・ 廃棄体の仕様・種類の設定（c. 参照）
- ・ 超深孔処分の実現性（d. 参照）

a. 深部掘削技術

超深孔処分の掘削については、石油・天然ガス分野など長年にわたり開発されてきた掘削に関する最新技術の限界から大幅にかけ離れたものではなく、現在までに培われてきた掘削技術や施策の延長線上にあるものと考えられている。結晶質岩における世界各地の掘削深度 5,000 m を超える坑井の掘削深度と掘削孔径については、最も深い坑井は旧ソビエト連邦 Kola の 12.2 km（口径 8・1/2”：約 216 mm）であり、SNL（2016b）によれば最も大きな掘削孔径はニューメキシコ州で掘削された地熱井の 9・7/8”（約 250 mm）（掘削深度 4.4 km）である。また、超深孔処分のレファレンスデザインとして処分深度（裸孔区間）3,000～5,000 m、孔底での孔径 17”（0.43 m）を示しているが、深度 3,000～5,000 m の領域を孔径 17”（0.43 m）で掘削した実績は無いとしている（Arnold et al., 2011）。

Beswick(2009)では、直径 500～600 mm の掘削孔を結晶質岩で深度 5,000 m まで掘削することは、今後の掘削機器とプロセスの開発によって達成可能であると結論付けている。

超深孔の掘削において主に使用されることが想定される、石油・天然ガス分野での掘削装置（総称してリグと呼称する）について、その主な構成要素とその役割を表 5-3 に示す。

表 5-3 石油・天然ガス分野での掘削装置の主な構成要素
(JOGMEC 石油・ガス用語辞典)

名称	役割
エンジンとトランスミッション	動力の発生とその伝達機構（動力源としてディーゼル、またはガス・エンジン）
巻き揚げ装置	ドリルストリング、ケーシング、チュービングなどの重量物の吊上げ、吊下げ機構
ロータリー装置	穴を掘るためにビットを回転させる機構
掘削泥循環装置	掘り屑（くず）を取り除くなど、坑内を安全に保つための循環（ポンプ）機構

超深孔の掘削においては、大きな動力が必要になることから、動力源とその伝達機構と

なるエンジンとトランスミッションなどの各種構成要素については、大型化が必要になる。巻き揚げ装置などについても大型化が必要となってくるが、Beswick(2008)によれば、石油掘削用のリグの最大吊り上げ能力は900トン程度であり、最終孔径500mmで深度4kmから5kmの掘削にも適用可能な範囲であると考えられている。また、石油技術協会(1998)によれば、リグによる吊り下げ荷重の実績として世界最大の掘削リグはドイツにおいて地球科学の調査を目的として超深孔掘削のために設計されたUTB-1が挙げられる。UTB-1は吊荷重が816トン、12,000mまでの掘削が可能となっている。また、穴を掘るためにビットを回転させる機構をロータリー装置と呼ぶが、石油・ガス分野では100年以上の長期にわたってロータリー工法による掘削が一般的に行われており、超深孔処分においても実績のあるロータリー工法が採用されると考えられる。

掘削には、リグ以外にも、ボトムホール・アセンブリー(BHA; bottomhole assembly)と呼ばれる孔内へ挿入するためのドリルパイプやドリルビットなどの装置・機器が必要となる。ボトムホール・アセンブリーを構成する主要な機器を表5-4に示す。

表5-4 ボトムホール・アセンブリーの主な構成要素
(JOGMEC 石油・ガス用語辞典)

名称	役割
ドリルビット	坑底部で岩石を破壊するための坑内機
ドリルパイプ	ロータリー掘りではビットを回したり、掘削泥水を循環させるためのパイプ
スタビライザー	ボトムホール・アセンブリーを坑井中心部に保持し、ビット回転の軸を固定して坑井掘進の方向を安定させる役割の装置
ドリルカラー	ビットに荷重を加えるために掘り管とビットの間に挟んで使用される特別に肉の厚いパイプ
ダウンホール・モーター (必要に応じて)	循環する泥水の流力を動力として、ドリルストリングを回転させずにビットだけを回転させるための装置
方向性制御機器 (必要に応じて)	掘削方向の制御を行うことを可能にする装置 代表的なものに、ロータリー・ステアラブル・システム(RSS)が挙げられる。
MWD計測機器 (必要に応じて)	掘削中にビット直下に配置した各種センサーで方位、傾斜、ビットの向き、荷重、トルク、温度、圧力などの坑底データを計測するとともに、これらの計測データをリアルタイムに地上へ伝送する機器
LWD検層機器 (必要に応じて)	掘削と同時に孔内の地層の検層を行う物理検層機器

超深孔処分においては、垂直で滑らかな品質の高い坑井を掘削することが定置作業などでの作業時の安全性や作業効率に大きく影響する。滑らかで、蛇行の少ない坑井を掘削するためには、ダウンホール・モーターや、方向制御技術であるロータリー・ステアラブル・システム（RSS）を使用することが主流となっている。油田探査業務で世界大手のシュルンベルジェ社の RSS では、ツールの外周を覆うように三方向に配置されたパットが坑井の中でのドリルパイプの位置を常に制御し、ロータリー工法でのドリルパイプの回転に合わせて掘削方向の最適な制御を行うことが可能である。ドイツの KTB（ドイツ大陸深部掘削計画、1987-1995）で、前述の UTB-1 リグを使用して掘削された KTB-HB 孔（掘削深度 9.1 km）はダウンホール・モーターと数種類の RSS を使用して掘削され、深度約 6 km 地点まで良好な直進性があった事例が SNL(2016b) において紹介されている。

これまで諸外国における大深度坑井の掘削技術について述べたが、超深孔処分として現在検討されているプロファイルについては、主に石油ガス分野での採掘技術を引き続き開発していくことでの対応が可能と考えられる。SNL(2016a)においても、超深孔の坑井掘削および建設は、現在利用できる技術を用いて可能なことは指摘されており、特定の要件などが組み込まれるようにすること（例えば、廃棄体パッケージが詰まる可能性を減らすことを目的とした、坑井の最大偏差および坑井の孔曲がり率の制限など）、合理的なコストで結晶地下深度 5,000 m まで掘削できる技術を利用することなどを掘削における条件として挙げている。

関連する処分概念としては、専有面積に関する利点をもつ関連処分概念として、超深孔をマトリックス形態で特定のエリアに掘削する概念（Vertical Deep Borehole）（原子力発電環境整備機構、2004）や、ドイツの Mine Borehole Matrix（原子力機構、2015）などの関連処分概念がある。

平成 29 年度に得られた関連する最新の技術として、従来の掘削工法に代わる新しい方法として、プラズマトーチを採用した掘削方法が Gamechanger Technologies 社から紹介された。動作原理としては、岩を破壊するための熱エネルギーをプラズマ媒体として伝達し掘削を行う技術が挙げられる。この技術は、2016 年 6 月 13 日～15 日にイギリス・シェフィールドで開催された超深孔処分に関する国際会議における技術セッションで紹介されたものである。会議の主催は、イギリスのシェフィールド大学の物質科学・工学科（Department of Materials Science and Engineering）であり、目的は、超深孔処分概念の、技術的、科学的、規制、および社会的側面や、放射性廃棄物用の超深孔処分の現状と適用性に関して議論の場を提供することであった。

深部掘削技術について、米国および諸外国において重要とされている点と、それらの共通項や留意すべき事項を表 5-5 に示す。

表 5-5 深部掘削技術の実現性における重要事項の整理

諸外国の状況		
米国	その他	共通項や留意すべき重要な点
<ul style="list-style-type: none"> ● 米国においては、超深孔処分の掘削について、石油・天然ガス分野などで長年にわたり開発されてきた最新の掘削技能の限界から大幅にかけ離れたものではなく、現在までに培われてきた掘削技術や施策の延長線上にあるものと考えられている。 ● SNL(2016a)において、超深孔の坑井掘削および建設は、現在利用できる技術を用いて可能なことが指摘されている。その上で、技術を選定する場合には、掘削孔の品質が高くなるような技術（定置の効率や、廃棄体パッケージが回収可能になる確率を上げる）であったり、合理的なコストで地下深度 5,000m まで掘削できる技術であることなど、特定の要件を満たす技術が組み込まれるようにすべきであるとの指針が示されている。 ● 米国におけるフィールドテスト（2017 年に DOE の公式サイト上で中止がアナウンス）においては、主な目的の一つとして、費用効果の高い廃棄物処分方法として、結晶質岩において、十分な直径を有する 5,000 m の深度を持つ処分孔の掘削技術などの実証が挙げられていた。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 2007 年にスイスで掘削された深部地熱井は、深度 5 km、最終孔径 251 mm で、ライン地溝帯の結晶質基盤岩中を 2.4 km 掘削した実績などがあり、専門家の意見としては、孔径 50～70 cm の掘削は技術的には実現可能とされている。 ● Beswick(2009)によると、直径 500～600 mm の掘削孔を結晶質岩で深度 5,000 m まで掘削することは、今後の掘削機器とプロセスの開発によって達成可能であると結論付けている。 ● 2016 年 6 月にイギリスのシェフィールドで開催された超深孔処分に関する国際会議では掘削技術など現在開発中の新しい技術などが紹介された。イギリスの Game changer Technologies 社からは従来の掘削工法にかわる新しい掘削方法として、プラズマを利用した技術を開発しているとの発表があった。ただし、現時点では基礎研究の段階であり開発、実証を経ての実用化に漕ぎつくまでにはまだしばらく時間がかかると考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 今までの石油や天然ガス、地熱、地球科学的分野など様々な分野における掘削の実績などから、米国をはじめ諸外国においては 5,000m 程度の超深孔の掘削については、可能であろうと結論づけられている。 ● 直径や深度とともに、ボーリング孔掘削の難しさは指数関数的に増加し、コストが大幅に増加することから、装置の大型化、コストや効率の最適化など、超深孔処分のための技術研究開発や実証は引き続き必要となる。 ● 結晶質岩において、十分な直径を有する 5,000 m の深度を持つ処分孔の掘削技術などの実証を目指した米国における DOE 下でのフィールドテストは中止となった。

b. 操業・閉鎖のための技術

操業（輸送、地上保管、廃棄体取扱・定置）から閉鎖までのプロセスを通じて、地層処分と超深孔処分が大きく異なる点は、地層処分の場合は人や重機が処分施設に直接入り作業や品質確認を行うことが可能であるのに対して、超深孔処分では、人や重機の立入りが不可能で、常に遠隔での作業とならざるを得ないことである。つまり、地層処分においては、地下構造に人や工作機械が入り、廃棄体の設置および品質管理を行うことが可能であるが、超深孔処分においては、深度数キロの地下深部への掘削や、孔内へワイヤーなどを下ろして定置作業や品質管理を実施する必要がある。そのため、作業性の確保や想定外の事態への対応、品質管理の方法など、対応策を事前に十分に検討・準備することが必要となる。

Brady et al. (2009)では坑内構造として、深さ 5 km の坑井をまず設定し、下部 2 km に 200 から 400 体の廃棄体を定置する概念が示されている。定置においては、ワイヤーなどを用いて廃棄体のキャニスタをひとつずつ定置する方法や 10 から 20 のキャニスタをストリングとして一つなぎにして定置する方法などが提案されている。

超深孔の掘削後は、ケーシングとライナーが孔内に挿入されるが、ケーシング（掘削後に地層が露出している坑井壁を保護するための管）とライナー（ケーシングと同じ機能、地表から吊り下げるのではなく孔内の深部から吊り下げられる）の役割としては以下が挙げられている。

- ・ 廃棄体パッケージ定置のために表面から連続的で明確で滑らかな経路を提供する
- ・ 岩またはセメントの破片が孔内に落ちないようにする
- ・ パッケージの吊り下ろしや、取り出しの際の地下深部での圧力の制御
- ・ 廃棄体定置ゾーンに積み重ねられたパッケージを一行に並べる
- ・ 廃棄体定置ゾーンのセメントプラグとブリッジプラグの設置を容易にする
- ・ 廃棄体パッケージが誤って落とした場合の最終落下速度の制限
- ・ 事故の際の廃棄体パッケージの回収を容易にする（例えば、砕石からの保護、引っかかったパッケージの回収時にケーシングを引っ張ることにより取り出しやすくなることなど）

廃棄体の定置ゾーンに使用される材料については、SNL(2016a)に説明がある。掘削後の孔内へは、スチール製のライナーが設置され、定置時の孔壁への廃棄体パッケージの引っかかりや孔内の崩落を防ぐ。廃棄体の定置後、廃棄体の定置ゾーンにおいては、廃棄体とライナーの間隙に、緩衝材や埋戻し材の役割を果たすものとして液体（塩水）が想定されている。定置については、40 個程度の廃棄体パッケージが設置された後、最上部の廃棄体パッケージの上部にブリッジプラグが設置され、ケーシングとチュービングとの間の間隙を閉塞する遮断装置であるスクイズパッカーがブリッジプラグの 10 m 上部に設置される。セメントプラグについては、チューブを用いて、パッカーを通して圧入され、パッカーとブリッジプラグの 10 m の空間を充填する。また、ライナーに穿孔を開け、ライナーと孔壁の間の空間にもセメントを注入して孔壁とライナーの間の空間もシールする。セメントプラグの主な役割としては、上部の廃棄体パッケージの重量で下部の廃棄体が

押しつぶされることを防ぐためであるが、その他にも補助的に孔内を短い区間ごとに分割するという役割も果たす。

操業においては、坑井の掘削以外にも、地上施設の建設、廃棄体の輸送、地上での作業、地上での廃棄体の定置準備、坑井内への定置、シール作業など様々な工程について検討する必要がある。特に地上での廃棄体の定置準備と廃棄体の地下深部への定置については、安全面やリスクについて十分に検討する必要がある。操業にかかる地上施設での作業としては、廃棄体の受け入れ、輸送、準備、孔口設置などの作業が必要となる。それらの作業の設備としては、廃棄体の輸送用キャスクを吊り上げるクレーン、筒状の移動用キャスク、輸送用キャスクから移動用キャスクへの移動用シールド、移動用キャスクから孔口まで移動させるためのクレーン、孔口に置いて孔内に廃棄体を下ろすための回転台などが挙げられる。SNL(2016a)では、地上での廃棄体の取扱の前提としては、廃棄体は孔内に下ろせる状態で輸送キャスクに入れて超深孔処分サイトまで輸送されることが想定されており、クレーンを用いて、輸送キャスクから移動用シールドに移動させる方法が検討されている。

廃棄体の定置方法については、Arnold et al. (2013) で、重力によるもの、ワイヤーライン、ドリルパイプ、コイルドチュービングの 4 つの概念が基本的な定置のメカニズムとして検討されていたが、SNL(2016a)ではワイヤーラインを使用して、廃棄体パッケージを定置ゾーンまで吊り下げ、定置位置に順番に積み上げていくことを想定している。定置時に掘削泥水への汚染を防ぐために、廃棄体パッケージは定置の間は汚染物質を外部に漏らさないようなデザインとなる。また、各廃棄体パッケージの底部には落下時の衝撃を緩和する装置が取り付けられ、パッケージの上部には取付け・取外しが可能な機構がデザインされる。また、地上部の吊り下げ装置には、特別にデザインされたワイヤー（ワイヤーライン）が設置され、それにより 26,000 ポンド（約 12,000 kg）までの荷重を安全に吊り下げることが可能となる。ワイヤーラインには検層ツールと孔内モニタリング機器が含まれ、廃棄物パッケージはワイヤーラインにより定置ゾーンまで降ろされ、定置位置において取外し機構が作動して廃棄体パッケージを孔内の定置位置に設置する。設置後、ワイヤーは地表まで巻きとられる。移動用シールドは洗浄・検査して、次の廃棄体パッケージ定置に向けて準備される。

定置時に想定される事故として、容器や繫留ワイヤーの落下などがある。セーフティケースでは、容器が万一坑内に落下した場合にも終端速度が容器の破壊をもたらさないように深孔内の流体密度の設定が考慮される必要がある。ワイヤーラインを用いた定置において、想定される事故・事象については、SNL(2016a)で言及されており、以下のようものが挙げられている。

- ・ 廃棄体パッケージを地表からの落下
- ・ 廃棄体パッケージの降下時に孔内に落下
- ・ 廃棄体パッケージが孔壁内に詰まる
- ・ ワイヤーライン機器を回収（巻取り）時に廃棄体パッケージ上に落とす

上記に挙げた定置にかかる具体的な事故の要因および対策については、イベントツリー解析などの検討を行い対応策について検討している。結果として、108 個の廃棄体パッ

ケージを事故無く安全に定置できる確率を 99.41 %と算出している。

孔内の下部ゾーンに既定の廃棄体を定置した後は閉鎖のプロセスに移る。SNL(2016a)の検討においては、全長 5 km の内、上部 3 km までをシール材で覆う構造が示唆されている。孔内下部 2 km の廃棄体定置ゾーンに廃棄体パッケージの定置が完了した後は、上部の坑内にシール材とプラグを充填・設置して廃棄体パッケージ周辺を埋め戻し、廃棄体パッケージ上部の坑内をシール材などで埋め戻す閉鎖作業を行う。それにより廃棄体ゾーンへの水の侵入や、廃棄体ゾーンからの汚染物質の移動を防止することができる。検討されているプロファイルでは、シールのゾーンの周囲は結晶岩が想定されており、シール材の材料として、ベントナイトやセメントプラグ、バラスト（砂、碎石岩）などが想定されている。さらにシール材の上部のエリアは結晶岩上部の堆積岩が想定されており、セメントプラグや碎石岩バラストなどで充填することが想定されている。米国において検討されているシール材とプラグの設置位置などについては、SNL(2016a)の中に示されている。

その他にも、Gibb(2012)では、新しいキャニスタ設計や代替支持マトリックスを含む高燃焼度の廃棄物処理のための新たな閉鎖概念を提案している。新たな概念は、燃焼度の高い SF に適しており、超深孔においては掘削孔や SF コンテナの直径が小さく廃棄体周辺部が高温になることから、充填した特殊な高密度支持マトリックス（HDSM、細かな鉛合金ショットで構成）などが融解し、コンテナと母岩の間に残っている空隙を満たし最終的に凝固する。また、廃棄体パッケージを積み重ねることで課せられる負荷応力による破損の可能性も低減されるとしている。ただ、定置と同様に閉鎖の工程においても、遠隔での作業となるために、閉鎖工程でのシール材の敷設など、孔内深部での作業については、モニターデバイスや検層機器などがあるものの、非常に長距離となる掘削孔のシールの品質を保証したり、欠陥箇所を迅速に修繕対応することは難しいのが現状である。近年、掘削孔のシールについて従来の石油・ガス分野なども含めて、多くの研究が行われているものの、実規模での実証はされていない。

以上の調査より、今後の課題として、定置の不具合などが発生する可能性や発生した場合の対策案の検討が技術面、制度面からも必要となってくると考えられる。

操業・閉鎖のための技術について、米国および諸外国において重要とされている点と、それらの共通項や留意すべき事項を表 5-6 に示す。

表 5-6 操業・閉鎖のための技術の実現性における重要事項の整理

諸外国の状況		
米国	その他	共通項や留意すべき重要な点
<ul style="list-style-type: none"> ● 廃棄体の定置については、SNL(2013)では、重力によるもの、ワイヤーライン、ドリルパイプ、コイルドチュービングの4つを基本的な定置のメカニズムとして検討していた。SNL(2016)ではワイヤーラインを使用する形での具体的な検討がなされている。ワイヤーラインを用いた手順としては、廃棄体パッケージを定置ゾーンまで吊り下げて行き、定置位置に順番に積み上げていく方法が想定されている。 ● 定置においては数百個に上る廃棄体をどの様に効率的に定置するかといった作業効率の面も重要ではあるが、どのように孔内への廃棄体パッケージの詰まりリスクを削減するかといった点や、詰まった場合にどのように対処できるのかという点については、高品質な坑井の掘削や廃棄体パッケージの形状や仕様、制度なども合わせて、幅広い角度から検討が必要となる。 ● 地上での作業は、米国で検討されていたフィールドテストに向けて具体的な作業工程や手順が固まりつつあった。一方で、どのように閉鎖時の孔内の品質を保つかという点など、シールのデザイン、シール材の充填方法や、品質管理の方法についてもフィールドテストでの実証が予定されていた。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 米国と同様に、廃棄体の定置方法に主な焦点を当ててイギリスのシェフィールド大学などで調査・研究が進められている。 ● Gibb(2012)では、新しいキャニスタ設計や代替支持マトリックスを含む高燃焼度の廃棄物を処理するために、超深孔処分に関しての新たな閉鎖概念を提案している。新たな概念は、燃焼度の高いSFに適しており、超深孔においては掘削孔やSFコンテナの直径が小さく廃棄体周辺部が高温になることから、充填した特殊な高密度支持マトリックス(HDSM、細かな鉛合金ショットで構成)などが融解し、コンテナと母岩の間に残っている空隙を満たし最終的に凝固する。また、廃棄体パッケージを積み重ねた負荷応力による破損の可能性も低減されるとしている。 ● スウェーデンにおいては、どのような方法で数キロの深度のボーリング孔内の正しい位置にキャニスタおよび緩衝材を定置できるのか、また、定置後に予想されるこれらの特性がどのようなものであるかということに関しては、現在のところ実用的な知識はないと指摘されている(SKB, 2011)。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 掘削とは異なり、操業については超深孔での参照できる実績などはなく、廃棄体パッケージの定置方法などについては、具体的な検討が進むが、実証・確立された方法はまだない。 ● 超深孔処分においては、掘削孔(上部)で廃棄体が詰まった場合や、掘削孔を部分的に破壊するような突発的事象など、操業時、特に定置に関して回収不可能となるリスクが常にある。正常な運用条件下であれば、上部廃棄体の定置を後戻りさせるための一定の技術的対策を講じることは可能であるが、例えば、地震による掘削孔破損、突発的なライナーの損傷などの場合には、廃棄体は回収不可能となり、その坑井は使用できなくなる可能性が高い。廃棄体が詰まる可能性の検討と並行して、詰まった場合にどうするかといった対処方法も含めて検討していくことが必要となる。 ● 閉鎖についても、操業と同様に遠隔での作業となるためにシール材の設置などの地下深部での作業は難易度が高くなる。モニターデバイスや検層機器などがあるものの、非常に長距離となる掘削孔のシールの品質を保証したり、欠陥箇所を迅速に修繕対応することは現状では難しい。実規模での実証はされていないため、今後も開発・実証が必要となる。

c. 廃棄体の仕様・種類の設定

- 廃棄体の仕様

処分の対象となる廃棄体の仕様の検討は、孔径や幾何学的条件に大きく依存する。廃棄体の定置は一般的には小さいほど容易になるため、廃棄体のサイズは小さいほど望ましい。そのため、廃棄物パッケージはオーバーパックよりも単純な金属パッケージのデザインが考えられている。ただ、使用済燃料と HLW は他の廃棄体よりも大きな直径が必要になると想定されている。例えば、米国エネルギー省の情報では、超深孔処分用の孔は 43 cm (17 インチ) を一般的な直径としている (NWTRB, 2016)。

Brady et al. (2009) では、廃棄体容器については、石油掘削に一般に使用されるケーシング管 (高さ 5 m、内径 318 mm、外径 340 mm の仕様) を用いて、商業用使用済燃料の集合体である PWR (高さ 4059 mm、幅 214 mm (対角幅 302 mm)、重量 666 kg) や BWR (高さ 4,476 mm、幅 139 mm (対角幅 198 mm)、重量 297 kg) を格納する形なども検討されており、廃棄体容器については、定置時の衝撃や孔内に詰まった時の回収作業に耐えうる性能が担保されれば十分であるとしていた。また、容器内にできる空隙は安定した状態が保持される様にベントナイトパウダーで充填される。また、SNL (2016a) では、廃棄体パッケージを耐腐食性の外殻で覆い、廃棄用のオーバーパックに挿入する可能性も示唆しており、参照設計として内部にステンレススチール製の Cs カプセル、ステンレススチールまたはニッケル合金の Hastelloy 製 Sr カプセルを収納できる炭素鋼製のケーシングを提示している。一般に、廃棄体キャニスタ自体には廃棄体の隔離機能などは想定されていない。他の諸外国の廃棄体のサイズを見てみると、韓国は直径 0.4 m (Lee, 2016) のものが、イギリスにおいては Pu の廃棄体について、直径は 0.3 m より小さくする概念などが示唆されている (Kickmaier et al., 2016)。

操業中でも、特に定置における効率や安全性は、容器の頑強性と深孔のデザインと定置場所に達するまでの運用方法の組み合わせで決まると考えられており、効率かつ安定した定置のために定置作業の際に坑内壁にひっかからないよう外面や端部が滑らかであるような廃棄体パッケージやパッケージの端部をねじ用に加工したねじ接合の接続部なども検討されている。

- 廃棄体の種類

超深孔処分の対象廃棄物としては、比較的少量であること、サイズが小さいこと、比較的高放射能レベルであることの 3 つの条件を満足するような廃棄体が適していると考えられている。サイズの条件として、現状の掘削技術を想定する場合、現状検討されている孔径に収まるサイズ (43 cm 以下を目安) の廃棄体が望ましい。最も有望と考えられるのは、特殊な廃棄物の形態 (例えば、プルトニウム、使用済燃料の線源)、または、小規模な原子力発電事業を行い、廃棄体の物量もあまり多くない国であると思われる。ただ、イギリスのシェフィールド大学では SF および HLW 向けの超深孔処分を提案しており、米国においては、軍事廃棄物 (Cs/Sr カプセル) が対象廃棄物として選定されてきた経緯がある。米国において Cs/Sr カプセルが対象とされた

背景として、当初ユッカマウンテンの地層処分が商用と軍事用の HLW および使用済燃料の両方に対応する処分方法として想定されていたが、オバマ政権の方針として、ユッカマウンテン計画を中止し、代替案を検討する方針となった。その後、米国エネルギー省（DOE）に軍事廃棄物専用の処分場の計画を進めるよう認可が与えられ、その後、地層処分以外の新たな処分方法として検討されていた超深孔処分において、DOE の所有するハンフォードの軍事廃棄物（Cs/Sr カプセル）が対象廃棄物として適しているとされたという経緯がある。米国のハンフォードの放射性廃棄物の容器を含む軍事廃棄物が超深孔処分に適しているとされる根拠として、ハンフォードのチューブは直径 7 cm に満たず (Tollefson, 2014)、容器の詰め替えの手間なく坑井に格納することが可能という点があり、この特長を用いて全ての容器を一つの軸上に並べて定置することが可能となる。

以上の調査より、超深孔処分の概念は、少量の廃棄物を短期間の工事期間で効果的に隔離するのにコストや事業面で有利な方法と考えられるが、日本や米国など多量に廃棄物がある国においては超深孔処分が採用されたとしても、一部のみの廃棄物について処分可能なだけで、その他の放射性廃棄物については、坑道掘削型処分場が依然として必要となると考えられる。

廃棄体の仕様・種類の設定について、米国および諸外国において重要とされている点と、それらの共通項や留意すべき事項を表 5-7 に示す。

表 5-7 廃棄体の仕様・種類の設定の実現性における重要事項の整理

諸外国の状況		
米国	その他	共通項や留意すべき重要な点
<ul style="list-style-type: none"> ● 対象となる仕様の要件としては、超深孔の坑井の口径に入る直径であることが第一の条件となる。米国エネルギー省では、超深孔処分用の孔の直径は一般的には 43 cm(17 インチ) (NWTRB, 2016) であり、34 cm のケーシングなどがパッケージの容器として検討されている。 ● 紆余曲折を経て、ハンフォードの軍事廃棄物 (Cs/Sr カプセル) が超深孔処分での廃棄物の対象となっている。 ● 廃棄体のパッケージについては、定置などの操業時の保護機能を目的として仕様が想定されており、人工バリアとしての機能は期待されていないとしている。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 米国と同じく、直径が主な要件となり、サイズを満たす様々な種類の廃棄体が提案されている。韓国は直径 0.4 m (Lee, 2016) の使用済燃料が検討されている。イギリスにおいては、イギリスのシェフィールド大学では SF および HLW が廃棄体の対象として提案されており、その他に Pu の廃棄体を 0.3 m 以下の直径にしたものなどが廃棄体候補として提案・検討されている。 ● 廃棄体の種類としては、スウェーデンや韓国では使用済燃料、イギリスやオーストラリアでは、HLW のガラス固化体などが検討されており、オーストラリアにおいては SYNROC (核廃棄用のチタン酸塩の安定な鉱物相から成る合成岩石) の固化体も提案されている。 ● 超深孔処分の場合には、緩衝材にもキャニスタにもバリアとしての機能を期待できない。岩盤が、長期的に安定保存することが可能な唯一のバリアとなる (SKB, 2011)。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 超深孔処分の対象廃棄物としては、 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 比較的少量であること ➢ サイズが小さいこと ➢ 比較的高放射能レベルであること の以上 3 点を満足するようなものが適していると考えられる。放射能レベルの観点から、最も有望な廃棄物の形態としては、特殊廃棄物の形態であるプルトニウム、使用済燃料の線源が考えられ、物量の面からは、小規模な原子力発電事業を行い、廃棄体の物量もあまり多くない国に適した概念と思われる。 ● サイズの具体的な条件として、現状の掘削技術を想定する場合、米国において示される孔径 (17 インチ; 43 cm) に収まるサイズが諸外国においても目安のサイズとして想定されているようである。 ● 廃棄体パッケージについては、定置などの操業時の保護機能を目的として仕様が想定されており、人工バリアとしての機能はあまり期待されていない。 ● 以上の点より、超深孔処分の概念は、少量の廃棄物を短期間の工事期間で効果的に隔離するのにコストや事業面で有利な方法と考えられるが、日本や米国など多量に廃棄物がある国においては超深孔処分が採用されたとしても、一部のみの廃棄物について処分可能なだけで、その他の放射性廃棄物については、坑道掘削型処分場が依然として必要となると考えられる。

d. 超深孔処分の実現性

- 回収可能性

超深孔処分における回収可能性を検討する場合には、定置などの作業プロセスにおいての予期せぬ事象により回収不可能に至る可能性や、閉鎖後に回収が決まった場合の回収可能性など、あらゆる不測の事態を想定して対応することが必要である。

設計をシンプルにし、定置時の予期せぬ事象に対して前もって対策を施すことにより、廃棄体が詰まる可能性はほぼゼロに維持される (Arnold et al., 2011) との指摘もあるが、万一掘削孔内の定置プロセスにおいて廃棄体が詰まった場合についての検討も必要となる。米国で検討された手法として、廃棄体が詰まった場合は、キャニスタや接続部の強度に基づき、掘削リグから相当な力で引っ張り出すような回収作業が試行され、詰りが解消されなかった場合は、キャニスタの列の上にブリッジプラグとセメントプラグを設置して定置を継続するとしているが、キャニスタが処分領域に至らず、回収されなかった場合にはボーリング孔はグラウト・シールされ、放棄するといった様な考え方も提案されている。前述のように、SNL(2016a)では、操業時に想定される事故として、廃棄体パッケージの地表からの落下や孔壁内に詰まる事故などを想定したイベントツリー解析などを実施しており、結論として108個の廃棄体パッケージを事故無く安全に定置できる確率を99.41%と算出している。

一旦定置した後の廃棄体の回収については難易度がさらに高くなると予想され、さらに閉鎖プロセスを経てボーリング孔がシールされた後は、廃棄体は完全には回収できない可能性が極めて高くなる。もし、永久的および不可逆的な処分が意図されていない場合には、超深孔処分は最善の策とはならない可能性が指摘されている (Brady et al., 2009)。従って、回収可能要件がある国では、回収可能性は超深孔処分を検討する上で大きな課題となっている。回収可能性を要件としているスウェーデンなどの諸外国では、超深孔処分での回収がほぼ不可能であることから、積極的な検討は進められていない。一方、米国においては現行の規制では廃棄体の回収可能性が要求されているが、超深孔処分については政策として、超深孔処分を実施する場合はその要件を除外することが想定されている (Brady et al., 2009)。廃棄体が詰まる可能性を最小限にするための検討と並行して、閉鎖後を想定して廃棄体上部の埋め戻し材を取り出しての回収の試行や、孔内浅部で詰まった場合に処分孔とは別の掘削孔を付近に掘削して別の坑井から取り出すなどの対応策を様々な角度から検討していくことは重要な点であると言える。

- 経済的試算

Beswick(2009)によると、直径600mmの1本の超深孔の掘削、廃棄物定置、および完成は、早くても3年と試算し、費用については、最初の掘削孔の建設には3,500万~4,000万GBP(約50~60億円)の費用を見積もっている。

また、SNL(2012)によると、ボーリング孔一本当たり48億円という試算がされている。キャニスタの調達および装荷の費用は、1本の掘削孔につきおよそ760万ドル(約8億円)になると推定されており、1本の掘削孔を満たすにはおよそ5,000万ドル(約

53 億円) の費用がかかると試算されている。

経済面については、地層処分型の施設よりも安価になる可能性もあるが、フィールドテストでの各工程の手順の開発・実証、定置にかかる不確実リスクの対処方策など、今後検討・具体化すべき箇所も多く、現時点では経済的な費用を試算した文献は少ない。

廃棄体の種類においても述べたように、超深孔処分概念の主な制約の 1 つとして、超深孔一本当たり収容できる廃棄体の規模には限界があり、多くの国においては、HLW/SF の掘削孔処分に加えて、深地層処分場の建設と資金調達が必要になる。掘削孔技術を十分に確固としたレベルへと引き上げるための未知のコストとそうした掘削孔のサイト選定に要する労力などを勘案したときの事業性については、別途検討する必要がある。また、回収可能性を放棄した場合は、米国におけるフィールドテストサイトの適地サイトの選定が難航したことからも、サイト確保が新たな課題となることが予想される。

超深孔処分の実現性について、米国および諸外国において重要とされている点と、それらの共通項や留意すべき事項を表 5-8 に示す。

表 5-8 超深孔処分の実現性における重要事項の整理

諸外国の状況		
米国	その他	共通項や留意すべき重要な点
<ul style="list-style-type: none"> ● 設計をシンプルにし、定置時の予期せぬ事象に対し前もって対策を施策することにより、廃棄体が詰まる可能性はほぼゼロに維持される (Arnold et al., 2011) との指摘もある。また、SNL (2016a) では、操業時に想定される事故として、廃棄体パッケージの地表からの落下、孔壁内に詰まる事故などを想定した、イベントツリー解析などを実施しており、結論として 108 個の廃棄体パッケージを事故無く安全に定置できる確率を 99.41 % と算出している。 ● 米国においては現行の規制では廃棄体の回収可能性が要求されているが、超深孔処分では政策として、超深孔処分を実施する場合はその要件を除外する (Brady et al., 2009) ことが想定されている。 ● コストについては、様々な試算がなされている。SNL (2012) によると、ボーリング孔一本当たり 48 億円という試算がされている。キャニスタの調達および装荷の費用は、1 本の掘削孔につきおよそ 760 万ドルになると推定されており、1 本の掘削孔を満たすにはおよそ 5,000 万ドルの費用がかかると試算されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 回収可能性を要件としているスウェーデンや、ドイツ、フランス、スイスなどの廃棄物の回収が必要となる法的枠組みを持つ諸外国では、超深孔処分を実施した場合には、回収できない可能性が極めて高いことから、積極的な検討は進められていない。 ● Beswick (2009) によると、直径 600 mm の 1 本の超深孔の掘削、廃棄物定置、および完成は、早くて 3 年を要し、費用については、最初の掘削孔の建設には 3,500 万～4,000 万 GBP の費用がかかると試算している。また、処分孔の掘削については技術が確立することで 2 本目以降の掘削コストが大幅に減少することが想定されることから、超深孔処分はおそらく、(従来の地層処分よりも) 安価であると試算している。 	<ul style="list-style-type: none"> ● ボーリング孔がシールされた後は、廃棄体は完全には回収できない可能性が高くなる。もし、永久的および不可逆的な処分が意図されていないのであれば、超深孔システムは最善の策ではない可能性がある (Brady et al., 2009) との指摘がある。 ● SNL (2016a) では、操業 (定置) に関して、108 個の廃棄体パッケージを事故無く安全に定置できる確率を 99.41 % と試算しているが、一度閉鎖まで進めた廃棄体については、処分からごく短い期間が経過した後であっても、廃棄物を回収することができないと認識されており、回収可能性を要件としているスウェーデンや、ドイツ、フランス、スイスなどの廃棄物の回収が必要となる法的枠組みを持つ諸外国では、積極的な検討は進められていない。 ● 経済面については、地層処分型の施設よりも安価になる可能性もあるが、回収できない可能性が高くなることから適地サイトの選定などが新たな課題となることが予想される。米国におけるフィールドテストのサイト確保のプロセスからは、従来の処分概念よりも超深孔処分の受け入れコミュニティを見つけることが難航することなども推測される。

2) わが国における最新情報

わが国への適用性の観点から重点的に検討すべき項目を考慮し、わが国における地表面下 1,000～5,000 m 程度の地質環境特性（熱、水理、応力、化学、微生物影響など）および工学技術開発の観点から得られた情報を整理する。これまでの調査内容を補完し、最新の知見について文献調査を通して調べたが、超深孔処分に関する新しい情報については、特に得られなかった。また、最新の会議情報として、2017年5月29日～6月1日には、使用済燃料について NUMO-NTI のワークショップについて調査した。ここでは、日本、韓国、中国、台湾、米国の放射性廃棄物処分の専門家が参加し、核燃料サイクルの課題のバックエンドに直面している環太平洋諸国の国々を集めて、関連情報を議論し共有するためのワークショップとなっており、その中で米国の SNL からの専門家が超深孔処分について発表して意見交換や議論が行われたが、新しい情報については、特に得られなかった。

以上を踏まえ、本項目では、これまでの調査結果も含めて、わが国における情報の調査結果について、以下の項目により整理・検討を行った。

- ① 地質環境の安定性と深部特性の評価
- ② 掘削・操業・閉鎖技術の実現性
- ③ 廃棄体の仕様・種類の整理

① 地質環境の安定性と深部特性の評価

わが国での超深部（地表面下 5,000 m 程度まで）までを含めたサイト選定条件としての地質環境特性は以下の様にまとめられる。

- ▶ わが国の地下深部の地質環境を把握するため、公開資料から温度特性、物理特性、力学特性、水理特性および水質特性を収集した。その結果、密度、有効間隙率および浸透率は深度相関が認められた。これらは、深度が増加するにしたがって孔隙が小さくなることに起因しているものと思われる。一方、力学特性は明瞭な深度相関は認められなかった。
- ▶ 温度は基礎試錐の資料で比較的明瞭に深度の増加に応じて温度が高くなるものの、地熱地域ではばらつきが大きいことが示された。
- ▶ 地下水の水質はイオン濃度が高く、地下水の水質は NaCl 型が最も多いことが判明した。水質型あるいはイオン濃度が深度に応じて変化するような傾向は認められなかった。
- ▶ わが国では、米国とは形成年代が異なるものの花崗岩が広く分布すると考えられ、花崗岩を対象母岩とすることは可能であると考えられる。また、わが国には、深度数～5 km に達する堆積岩が分布しており、これらも超深孔処分の対象母岩となり得る可能性がある。
- ▶ 諸外国で超深孔処分に対して検討されているサイト選定条件は、超深孔処分の対象母岩を結晶質岩または花崗岩とすることを前提として検討しているため、サイト選定において対象母岩の岩種が限定されている要件やサイト選定条件は、通常の地層処分に比べ不利な点であると考えられる。また、水平応力の観点からは、

ある程度の異方性を有する地域においても対処可能な通常の地層処分に比べ、異方性が認められないことがサイト選定条件となる超深孔処分は不利であると考えられる。

- ▶ わが国に適用可能なサイト選定条件を考える場合、諸外国のサイト選定要件を参考に、わが国が変動帯に位置することを考慮し、火山や活断層などのわが国の地質環境を考慮した設定が必要である。また、地形勾配に係わる要件（傾斜 1° 以上の地点から100 kmの離隔）は、わが国では困難であるため、諸外国における要件の設定主旨を踏まえた、独自の閾値を検討することが必要である。
- ▶ わが国は世界第三位の地熱資源国で、地温勾配の高い箇所が存在するが、地熱地域を除けば一般的な地温勾配であると思われる。したがって、地熱流速が 75 mW m^{-2} 未満の地域は十分に存在すると思われる。

米国をはじめとする諸外国において検討されている地質環境の基本要件は、結晶質基盤岩の上限面分布深度、結晶質岩の地質・地質構造、基盤岩構造の複雑さ、水平応力、地熱流速・地温勾配、隆起、第四紀断層と火山活動、地下資源などである。これらの地質環境の基本要件は、処分施設（深度数 km に及ぶボーリング孔）の掘削・操業時における安全性や容易性、閉鎖後の安全性に係る要件であり、わが国においても結晶質岩（花崗岩）を対象として超深孔処分を検討する上で参考になると考えられる。また、水平応力については、通常の地層処分では、処分坑道の規模や配置を最適化することにより、処分坑道の安定性に影響を及ぼさない程度の水平応力の異方性に対しては対応が可能であると考えられることから、水平応力の観点からは、通常の地層処分に比べ、超深孔処分は不利であると考えられる。

② 掘削・操業・閉鎖技術の実現性

わが国における掘削技術などの工学技術に関しては、石油・ガスでの実績はあまりなく、掘進長1,000 m以上の坑井は、温泉分野が最も実績が多く、次いで地熱分野（地熱開発促進調査）および石油・天然分野（基礎試錐）となっている。深部掘削の適用実績については、国内で掘削された掘進長1,000 mを超える坑井として、石油・天然ガス資源開発のみならず、地熱・温泉資源開発、水資源開発、土木関係および地震観測などの分野など幅広い分野での掘削孔データを調査したところ、これまでに日本で最も深い掘削孔は、新潟県における基礎試錐「新竹野町」で、帝国石油がNational 1320-UEのリグを用いて1992年から1993年にかけて掘削したものであり、深度は6,310 m、最終孔径の最大値は215.9 mmである。

わが国でも1996年～2000年頃に、科学的研究を目的として約10 kmの超深孔の掘削計画（JUDGE計画）が計画されていた。JUDGE計画とは、Japanese Ultradeep Drilling and Geoscientific Experimentsの略であり、陸上から海洋プレートの沈み込み帯を貫く超深部掘削を行い、深度約10 km～、温度 $\sim 400^{\circ}\text{C}$ の条件で、坑井掘削、岩石・水・ガス試料の採取、坑井を利用した各種観測を行うと共に、陸上から海洋プレートの沈み込み帯について地球科学上の見地から様々な仮説の検証を行う計画であり、有害廃棄物の地層処分についてもプロジェクトの目的の一つとして挙げられていた。

斎藤ほか(2001)によると、超深度科学調査井の掘削を困難にする要因として、大型掘削装置とドリルパイプの設計製作、地層の崩壊対策、高温度地層対策、坑跡管理、高圧ガスや火山性ガス対策、科学者の要求、および社会的な問題(資金、コンセンサス、組織の構築)が挙げられている。大型掘削装置とドリルパイプの設計製作については、ドイツのKTB井やその後の大深度掘削技術で対応可能な分野と思われることから対応可能と推測しており、高温度地層対策、坑跡管理の面からの課題を検討した結果、地層温度が10 kmで400 °Cでも深度7 kmの坑井は従来工法と最新の技術で実現できる可能性が大きいと結論付けている。

実際に JUDGE 計画での例にもあるように、高温対策は超深孔の掘削においても課題になると考えられる。掘削にかかる機器の耐熱性については、東洋エンジニアリング(1997)において、世界最高の地温である500 °Cが観測された葛根田の地熱井で使用された機器の耐熱温度として、ダウンホール・モーターの175 °C、O-リングの190 °C、計測デバイスの175 °C、分散剤の300 °Cなどを挙げており、一般に掘削機器については175 °C程度が最高耐熱温度と考えられる。また、国内においては、地熱分野で実績が多く、高温対応という点では既に国内での実績が十分であると考えられる。JUDGE 計画では10 km程度の深度や地熱帯の高温での対応が必要になるが、超深孔処分を検討されている深度は5 km程度であり、地温も200 °C程度と考えられることから、最新の技術により対応してることが可能と考えられる。

超深孔処分にかかる操業・閉鎖のための技術については、わが国で検討した事例は見当たらず、超深孔処分を進めて行く場合には、米国での検討や諸外国の事例を参照しつつ、わが国のサイトに即した検討や実証が必要となる。

③ 廃棄体の仕様・種類の整理

超深孔処分の対象廃棄物としては、以下の3点を満足するものが適していると考えられる。

- 物量の観点：比較的少量であること
- 廃棄体のサイズの観点：サイズが小さいこと
- 放射エネルギーの観点：比較的高放射能レベルであること

以下に、わが国において廃棄体の仕様が報告されている廃棄物について、高レベル廃棄物とTRU廃棄物を対象に超深孔処分への適性を検討した。

• 高レベル廃棄物（ガラス固化体、および使用済燃料）

➤ 物量の観点

ガラス固化体、および使用済燃料いずれも非常に大きいため、全量を超深孔処分することは困難になる可能性がある。

➤ 廃棄体のサイズの観点

オーバーパック無しの状態でのガラス固化体の場合の直径は43 cm、使用済燃料の場合、PWRは21 cm、BWRは14 cmと、使用済燃料のサイズは小さいためパッケージのサイズを十分小さく出来れば超深孔処分に適する可能性がある。以下に、

ガラス固化体と使用済燃料の形状および重量の比較を表5-9に示す(原子力機構, 2015b)。

表 5-9 ガラス固化体と使用済燃料の形状および重量の比較 (原子力機構, 2015b)

	ガラス固化体	使用済燃料
形状	ステンレス製キャニスタ入りガラス(円柱状) ¹⁾ JNFL:高さ1.34m × 直径 0.43m TVF:高さ1.04m × 直径 0.43m	燃料集合体(角柱状) ³⁾ PWR:高さ約4.2m × 幅 約0.21m × 奥行き 約0.21m BWR:高さ約4.5m × 幅 約0.14m × 奥行き 約0.14m
重量	ステンレス製キャニスタ入りガラス ²⁾ JNFL:約500kg (キャニスタ重量約100kgを含む) TVF:約400kg (キャニスタ重量約100kgを含む)	燃料集合体 1体あたり ⁴⁾ PWR:約670 kg 程度 BWR:約250 kg 程度

1) 高レベル事業推進準備会 (1997)、2) 石原ほか (1999)、3) 電気事業連合会 (2013)、4) 原燃輸送株式会社ウェブページ (<http://www.nft.co.jp/qa/qa3.html> (参照: 2014年10月21日))

➤ 放射エネルギーの観点: 適している。

• TRU 廃棄物

TRU 廃棄物は、再処理施設や MOX 燃料加工施設の操業や施設の解体に伴って発生するため、その種類や性状が多様多岐にわたっていることが特徴である。超深孔処分への適用性について想定されている廃棄体パッケージの種類を図 5-1 に示す(電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005)。

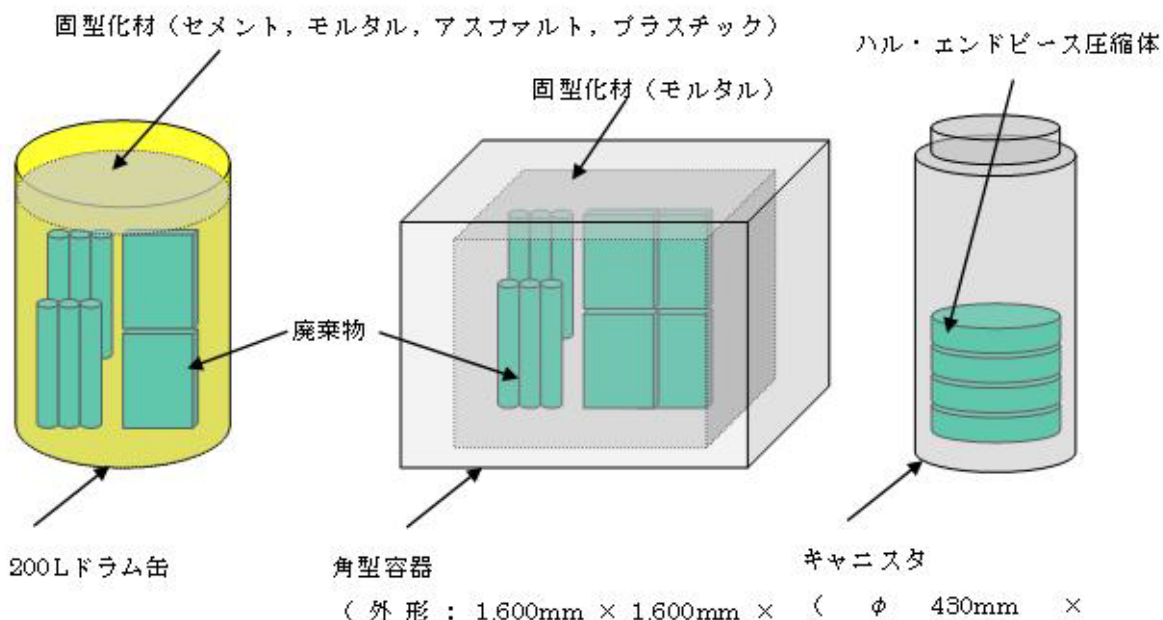


図 5-1 廃棄体パッケージの種類 (電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005)

➤ 物量の観点

物量については、ガラス固化体および使用済燃料と比べて少ないものの、全量を超深孔処分することは困難になる可能性がある。TRU 推定発生量を表 5-10 に示す。

表 5-10 TRU 推定発生量（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）

廃棄体容器種類	廃棄体		発生量(m ³)
キャニスタ	民間再処理操業	ハル・エンドピース	5,573
	JNC 再処理操業	ハル・エンドピース	
	返還 COGEMA	固型物収納体	
角型容器	民間再処理操業	CB, BP, 特殊機器廃品・容器	24,158
	民間再処理・MOX 解体	不燃性廃棄物, 二次廃棄物の一部	
1500L コンテナ	返還 BNGS	雑固体, マグノックス雑固体	9,000
500L ドラム缶	返還 BNGS	遠心分離ケーキスラリーなど	2,520
200L ドラム缶	その他廃棄体		99,023
計			140,274

➤ 廃棄体のサイズの観点

キャニスタおよび 200 L ドラム缶（直径約 60 cm）については、諸外国で想定されている廃棄体のサイズよりもやや大きいが、超深孔処分に適した設計により適用の可能性がある。

➤ 放射エネルギーや安全評価の観点

TRU 処分における支配核種であり、被ばく線量の低減措置の難しい I-129 の線量を大きく低減できる可能性がある。また、短半減期の Sr-90 や Cs-137 に関する懸念が低減される可能性がある。なお、硝酸塩影響の観点では、超深孔処分に適用した場合他の廃棄体への影響の検討が不要になる点は、メリットとなる可能性がある。

以上より、いずれの廃棄体も物量が多く、数百本の超深孔が必要となるため、すべてを超深孔処分で処分することは難しいと考えられる。また、現状で想定されているわが国の高レベル廃棄物、TRU 廃棄物のパッケージはいずれもやや寸法が大きく、超深孔処分に適したパッケージの設計、あるいは廃棄物の細分化が新たに必要と考えられるが、細分化は作業に伴う被ばくとコストを伴うものであり、副次的な廃棄物も生じるものであることを考慮する必要がある。

以下に、超深孔処분을想定したわが国における放射性廃棄物の特徴について表 5-11 に示す。

表 5-11 超深孔処分を想定したわが国における放射性廃棄物の特徴

廃棄物の種類		物量	放射能 量	廃棄体サイズ	特徴
高レベル	ガラス 固化体	非常に 多い	高	<ul style="list-style-type: none"> ガラス固化体： 直径 430 mm オーバーパッ ク：直径 820 mm 	<ul style="list-style-type: none"> 現在存在するガラス固 化体で適しているもの は無い 将来生成されるガラス 固化体が十分に小さく なれば可能性は大きく なる
	PWR	非常に 多い	高	<ul style="list-style-type: none"> 2 体収容よりも 1 体収容におい て適用の可能性 が高い 燃料集合体幅： 210 mm 	超深孔処分に適したパッ ケージの設計、あるいは廃 棄物の細分化が新たに必 要と考えられが、細分化は 作業に伴う被ばくとコス トを伴うものであり、副次 的な廃棄物も生じ得るも のであることを考慮する 必要がある。
	BWR	非常に 多い	高	燃料集合体幅： 120 mm	
TRU	I-129 を 含む 廃 棄体	少ない	中	直径約 600 mm (200L ドラム缶)	TRU 処分における支配核種 であり、被ばく線量の低減 措置の難しい I-129 の線 量を大きく低減できる可 能性がある
	Sr-90・ Cs-137 を含む 廃棄体	中程度 に多い	低	直 径 約 600 ～ 1,600 mm (200L ド ラム缶、キャニス タ、角型容器など)	短半減期の Sr-90 や Cs- 137 に関する懸念が低減さ れる可能性がある
	硝酸塩 を多く 含む 廃 棄体	中程度 に多い	中	直径約 600 mm (200L ドラム缶)	TRU 処分において他の廃棄 体への硝酸塩影響を考慮 する必要が無くなる可能 性がある

(4) 超深孔処分による安全確保の見通しに関する情報整理と解析

本項目では、まず米国での予察的な超深孔処分の安全評価事例の調査を平成 28 年度までに引き続き実施した。また、それら調査結果を参考に、米国で主な移行経路やプロセスと考えられているものが、わが国を想定した評価においても同様に重要になるか、あるいは別のプロセスに着目する必要があるかなどの見通しを得ることを目的とした予察的な解析を行った。これらについて、以下に「1) 米国の事例の調査」および「2) わが国の特徴を考慮した場合の超深孔処分の予察的な解析の試行」として示す。

1) 米国の事例の調査

ここでは、米国（サンディア国立研究所）の論文として、平成 28 年度までは Brady et al. (2009) を、平成 29 年度は Freeze et al. (2016) を対象とし、以下の項目について調査した。

- ・ 安全性確保の考え方
- ・ 安全評価のシナリオ
- ・ その他

・ 安全性確保の考え方

米国の超深孔処分では母岩として堆積層の下に存在する結晶質基盤岩を対象としており、米国の事例では、以下のような特性により放射性核種の生活圏からの長期の隔離を見込むことができるとしている。この点については基本的な考え方であり、平成 28 年度の調査からの更新はなかった。

- 移行経路が長いこと
- 流体の移動が遅いこと
- 上方向の圧力がないこと
- 核種放出や移行を制限する化学環境があること
- 力学的安定性があること

花崗岩のような結晶質岩は以下の理由からボーリング孔設置に適する。

- 大規模に比較的均質であること
- 低い透水性および間隙率
- 高い機械的強度（ボーリング孔の変形を防ぐ）
- 荷重が高いことによる移行経路となりうる亀裂の閉鎖

・ 安全評価のシナリオ

Freeze et al. (2016) で示されているシナリオは、Freeze et al. (2013) で実施された FEP のスクリーニングに基づくものである。シナリオは大きく分けて、擾乱なしのシナリオ (Undisturbed Scenarios)、人工バリアの機能喪失シナリオ (Defective Engineered Barrier Scenarios)、擾乱シナリオ (Disturbed Scenarios) の 3 つに分類されており、さらにそれぞれの中でいくつかのシナリオが設定されている。各シナリオ区分およびそれらのシナリオで想定される現象を表 5-12 に示す。なお、平成 28 年度の調

査では、核種移行経路に着目したシナリオが3つ示されていたが、これらは全て擾乱なしのシナリオに該当する。

Freeze et al. (2016) では、人工バリアの機能喪失シナリオおよび擾乱ありのシナリオの具体的評価は実施されていない。現段階での予察的な評価では超深孔処分のフィジビリティに焦点を当てていることから、人工バリアの機能喪失シナリオは人工バリアの特性／要素の機能低下あるいは劣化の拡大が基本変動シナリオに含まれること、擾乱シナリオはサイト固有の条件や規制の考え方(regulatory consideration)に強く依存することから、擾乱なしのシナリオ以外は将来に実施することとしている。また、シナリオ区分にはないものの、廃棄体定置領域上部において発生する可能性のある廃棄体容器のスタックによる閉鎖後の影響についても将来考慮することとしている。

表 5-12 超深孔処分の安全評価シナリオ(1/2)

シナリオ区分		想定される現象
擾乱なしのシナリオ (Undisturbed Scenarios)	掘削孔中の移行	<p>掘削孔に沿った流体（液体または気体）の流れによって、核種は浅部の帯水層（または地表）まで輸送され、生活圏へと到達する。このシナリオが成立するためには、掘削孔（シール材とプラグ）が高い透水性を持つことと水理的ポテンシャルが上方向に保持されている必要がある。また、廃棄体パッケージは早期に劣化することを想定する。</p> <p>掘削孔の透水性について、廃棄体定置領域の鉛直方向の透水性は比較的高いと考えられるものの、シール材領域の鉛直方向の透水性は非常に低く保たれ、この部分では拡散支配の移行になると考えられる。上方向の水理的な勾配（すなわち移流）は次の要因により生じ得ると考えられる。</p> <p>(a)周囲の水理的な条件、(b)廃棄体の熱による流体の加圧、(c)廃棄体定置領域内の熱流体による浮力、(d)廃棄体定置領域からの水とガスの放出による熱—化学反応</p> <p>熱パルスの継続時間は規制期間(regulatory period)に比べて小さく、その間は上部のシール材が最も健全な時期である。</p>
	掘削孔周辺のDRZ(Disturbed Rock Zone)中の移行	<p>掘削孔の周辺部の円環における上方向の流体（液体または気体）の流れが核種を浅部の帯水層（または地表）へと輸送し生活圏へと到達させる。このシナリオが生じるにはDRZの透水性が十分に高く鉛直方向に繋がっており、かつ上方向の水理的な勾配が保持されている必要がある。DRZ内の鉛直方向の透水性は周辺の健全な岩盤やシール材より高いと考えられる。DRZ内の鉛直方向の水理的な勾配は次の要因により生じ得る。(a)周囲の水理的な条件、(b)廃棄体定置領域またはDRZ内の水の廃棄体の熱による加圧、(c)廃棄体定置領域またはDRZ内の熱流体による浮力、(d)廃棄体定置領域またはDRZ内の水又はガスの放出による熱—化学反応</p>
	掘削孔から離れた周辺母岩中の移行	<p>結晶質岩および堆積岩中の流体（液体または気体）の流れが核種を浅部の帯水層へと輸送し生活圏へと至る。このシナリオは結晶質岩および上部の堆積岩中の亀裂部または断層の透水性が高く、水理的な勾配が鉛直方向に保たれている場合に生じる。結晶質岩および層状の堆積層の鉛直方向の透水性が低い場合、帯水層へ大量の水が流れるには亀裂や断層が交差した部分が存在する必要がある。</p>

表 5-12 超深孔処分の安全評価シナリオ(2/2)

シナリオ区分		想定される現象
人工バリアの 機能喪失シナリオ (Defective Engineered Barrier Scenarios)	廃棄体パッケージ の欠陥	人工バリアの特性/要素の機能低下あるいは劣化の拡大は基本変動シナリオに含まれる。従って、陽的に人工バリアの欠陥シナリオを考慮する必要性は除外される。これらのシナリオは擾乱なしのシナリオと同様、3つの移行経路を持っているが、人工バリアの機能低下による影響は擾乱なしのシナリオより大きい。例えば、シール材が機能を喪失した場合、熱パルスが生じる期間において掘削孔と DRZ にそった鉛直方向の移流を増大させる。これは健全な母岩と掘削孔の間の横方向の繋がりが増加した場合と同様である。
	廃棄体定置領域に おける緩衝材/埋め 戻し材の欠陥	
	シール材の欠陥	
擾乱シナリオ (Disturbed Scenarios)	人間侵入	これらの擾乱シナリオは外部事象により引き起こされる。これらの内いくつかはサイト選定により除外出来ると考えられる。例えば、地震あるいは火山活動が活発な地域を避けることで、これらのシナリオの発生確率を規制基準以下に低減させることが出来る。
	地震活動	
	火山・火成活動	
	気候変動/氷河作用	

・ その他

Brady et al. (2009)においては使用済燃料を想定した検討を実施していたが、Freeze et al. (2016)においては廃棄体のサイズや物量の関係から Cs/Sr カプセルを主要な対象として検討している。

また、Freeze et al. (2016)においては、Brady et al. (2009)に対して、より詳細な核種移行評価が試みられており、PFLOTRAN(Hammond et al., 2011; 2014; Lichtner and Hammond, 2012)を用いて、①非等温の多相流動、②反応輸送、③地質力学に関わる非線形の偏微分方程式を連成させた核種移行評価が行われている。なお、この評価では、周辺母岩を含めた垂直方向（深度 3,466 m～6,000 m）および水平方向（半径 1,000 m）を二次元モデル化しているが、核種移行の駆動力としては鉛直方向の熱対流の影響が大きく、評価上は Brady et al. (2009)と同様に鉛直方向の移行を主に見ている。

2) わが国の特徴を考慮した場合の超深孔処分の予察的な解析の試行

① 超深孔処分の場および主な移行プロセスの想定

本検討での超深孔処分の場の想定を図 5-2 に示す。また、そこでの主な移行プロセスの想定は以下のとおりである。

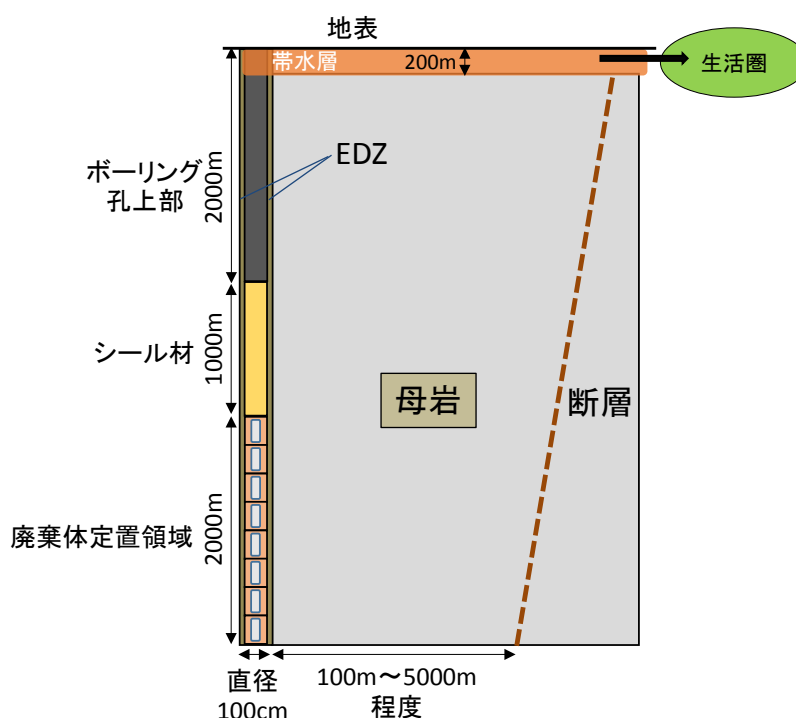


図 5-2 本検討で想定した超深孔処分の概念図

➤ 廃棄体定置領域

- ✓ 深度 5,000 m～3,000 m の幅 2,000 m の領域に廃棄体が均等に分布している。
- ✓ 廃棄体からの発熱および地温勾配から、本領域内で温度勾配が発生し熱対流が生じる。ここで、廃棄体の発熱に由来する熱対流の継続時間は数百年である。

- ✓ 米国の事例を参考に、廃棄体定置領域はベントナイトで充填されると仮定し、本領域内では熱対流と濃度勾配による拡散で核種が本領域内を上方向へ移行する。収着性の核種は、その移行過程でベントナイトへの収着により遅延する。
 - ✓ ベントナイトで充填されている廃棄体定置領域は低透水性のバリアを形成し、透水性が低い。
- シール材領域
- ✓ 深度 3,000 m～2,000 m の 1,000 m の領域をシール材領域とする。
 - ✓ 廃棄体定置領域からの熱および地温勾配から、本領域内で温度勾配が発生し熱対流が生じる。ここで、廃棄体の発熱に由来する熱対流の継続時間は数百年である。
 - ✓ 米国の事例を参考に、シール材領域はベントナイトで充填されると仮定し、本領域内では熱対流と濃度勾配による拡散で核種が本領域内を上方向へ移行する。収着性の核種は、その移行過程でベントナイトへの収着により遅延する。
 - ✓ ベントナイトで充填されているシール材領域は低透水性のバリアを形成し、透水性が低い。
- ボーリング孔上部領域
- ✓ 深度 2,000 m～地表までの長さ 2,000 m の領域をボーリング孔上部領域とする。
 - ✓ 本検討では、この領域は移行経路として考えない（シール材領域の上部に到達した核種は瞬時に生活圏へと到達すると仮定）。
- 母岩領域
- ✓ 深度 5,000 m から地表までの領域に母岩が均等に分布している。
 - ✓ 上記の各領域から移行してきた核種は、動水勾配に起因した地下水の流れによる移流・分散で移行する。
 - ✓ 母岩中を移行した核種は、下流側にある大規模な破砕帯を含む断層に到達し、断層中を移流・分散で移行し、生活圏に到達すると仮定する。

② 超深孔処分の想定における移行経路のバリエーション

①に示した超深孔処分の場合および主な移行プロセスの想定から、移行経路のバリエーションとしては主に以下の2種類が考えられる。

- ・熱対流と拡散によって廃棄体定置領域およびシール材領域中を移行（図 5-3 参照）
- ・地下水の流れによって母岩中を移行（図 5-4 参照）

米国の事例では、母岩での地下水の流れが十分に少ないとして、前者の熱対流などによる移行に着目した評価を行っている。一方、わが国の地質環境条件では、地下水の流れが想定されることから、後者の地下水流れによる移行も考慮しておく必要があると考えられる。

そのため、本検討では、熱対流などによる移行と地下水流れによる移行が、母岩中の地下水の流れの程度の違いに応じてどのようなバランスになるか、あるいはどちらかが卓越するのかなどについての知見を得ることを目的とした予察的な解析を行った。この解析では、熱対流などによる鉛直方向の移行（図 5-3 参照）と地下水流れによる水平方向の

移行（図 5-4 参照）を同時に解析し、各移行経路での累積移行率（評価点での移行率の累積値）を比較することとした。なお、熱対流などによる移行のモデル化は米国の事例（Brady et al., 2009）を参考とし、地下水流れによる移行のモデル化は直接処分第 1 次取りまとめを参考とした。

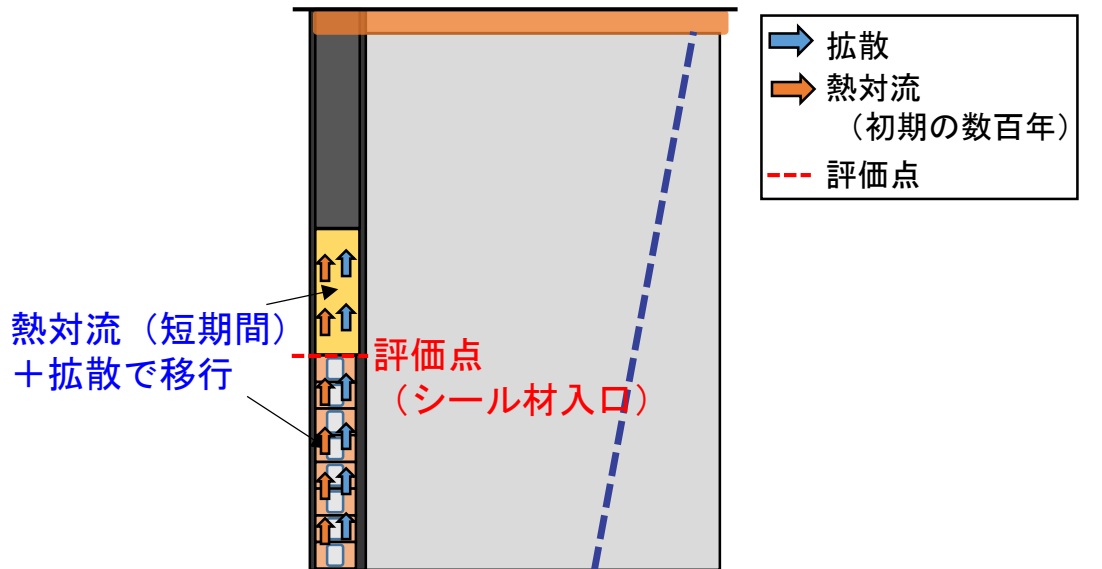


図 5-3 熱対流などによる廃棄体定置領域およびシール材領域中の移行の概念図

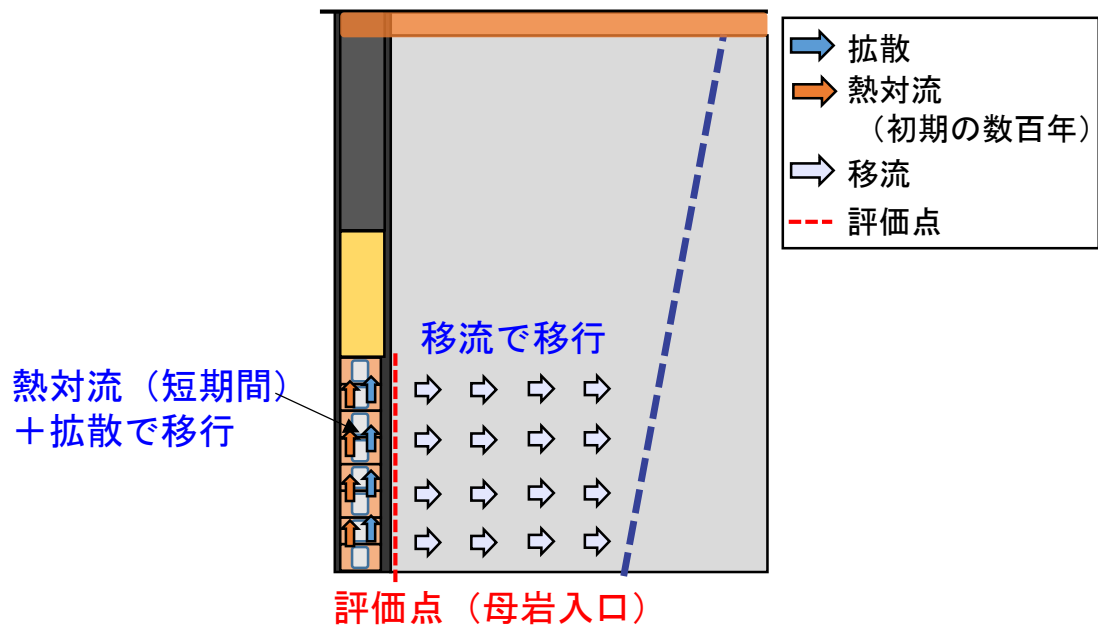


図 5-4 地下水流れによる周辺母岩中の移行の概念図

③ 解析上の取り扱いの設定

②に示した移行経路のバリエーション（熱対流などによる移行、地下水流れによる移行）について、①に示した場および主な移行プロセスの想定以外の解析上の取扱いを以下に示す。

- ・ 共通事項
 - 廃棄体パッケージ内の核種は、定置完了後すぐに全量が放出されると仮定する。すなわち、廃棄体パッケージの容器寿命、核種溶出率は考えない。
- ・ 熱対流などによる廃棄体定置領域およびシール材領域中の移行の取扱い
 - 廃棄体定置領域中での熱対流および濃度勾配による拡散による上方向の移行について、熱対流の継続時間は、米国の事例での熱対流解析 (Clayton et al., 2011) を参考に 300 年と仮定した。
 - シール材領域中での熱対流の継続時間は、廃棄体定置領域中と同様に、米国の事例での熱対流解析 (Clayton et al., 2011) を参考に 400 年と仮定した。
 - 各移行経路での累積移行率を比較するための出力として、熱対流などによる移行については、シール材領域入口 (図 5-3 中の「評価点」参照) での核種フラックスから累積移行率を評価する。
 - シール材領域の側面から周辺母岩への移行は考慮しない。
- ・ 地下水流れによる母岩中の移行の取扱い
 - 廃棄体定置領域内の核種は、ボーリング時に生じた擾乱母岩 (以下、EDZ とする) を通過する地下水と瞬時に混合し、その全量が母岩に流入すると仮定する (EDZ では、核種の沈殿・収着は考慮しない)。
 - EDZ を通過した核種は、周辺母岩に、後述の④で設定する動水勾配と透水係数により規定される移流で移行する。なお、米国の事例での熱対流解析 (Clayton et al., 2011) によれば、廃棄体からの発熱による温度上昇は処分孔周辺に留まることから、EDZ および母岩中の熱対流による移流は無視する。
 - 各移行経路での累積移行率を比較するための出力として、地下水流れによる移行については、母岩入口 (図 5-4 中の「評価点」参照) での核種フラックスから累積移行率を評価する。
- ・ 熱対流などによる移行と地下水流れによる移行の組み合わせに関する取扱い
 - このシナリオでは、幅 2,000 m の廃棄体定置領域について、その領域内での熱対流 (300 年) および拡散による上向きの移行と側面からの EDZ さらには母岩への移行とを同時に考える必要がある。そのために、図 5-5 に示すようなイメージで熱対流などによる移行と地下水流れによる移行を組み合わせた二次元的な評価を行った。ここで、廃棄体定置領域内は熱対流などによる上方向の移行を評価するために 48 分割し、一方、EDZ と母岩については廃棄体定置領域内と同等の分割は不要と考え近似的に 4 分割した。

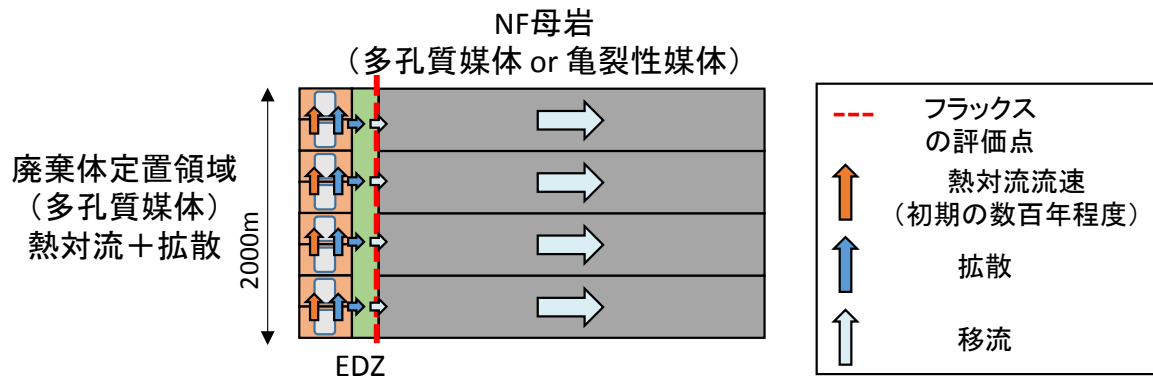


図 5-5 熱対流などによる移行と地下水流れによる移行の組み合わせイメージ図

④ 評価パラメータおよび解析ケースの設定

①に示した場および主な移行プロセスの想定および③に示した解析上の取扱いに加えて、以下の評価パラメータの設定および解析ケースの設定を行うことで、②で目的として示したように、熱対流などによる移行と地下水流れによる移行が、母岩中の地下水の流れの程度の違いに応じてどのようなバランスになるか、あるいはどちらかが卓越するのかなどについての知見を得ることを目的とした予察的な解析を行った。

主な評価パラメータは以下の通り。

- 超深孔処分の想定に対応する熱対流の継続時間や流量・流速については、わが国での検討の実績がないことから、米国の事例による熱対流解析 (Clayton et al., 2011) の結果を引用した。
- 本検討で処分対象として想定する廃棄体としては、廃棄体定置領域の孔径が狭いことを考慮して、廃棄体パッケージ本当たり燃料集合体一体を収容するものと仮定した。また、米国の事例では一本のボーリング孔に対して 400 本の廃棄体パッケージを定置することを想定していることから、本検討でも同様に一本のボーリング孔に対して 400 本の廃棄体パッケージを定置することを仮定した。これは直接処分第 1 次取りまとめにおける廃棄体 (燃料集合体 2 体収容) 200 本に相当する (直接処分第 1 次取りまとめでの廃棄体 (燃料集合体 2 体収容) 36,477 本に対して約 200 分の 1)。
- インベントリについては、直接処分第 1 次取りまとめでは処分後 1,000 年で廃棄体から核種が放出されるとしているため、炉取り出し 1,050 年 (貯蔵 50 年 + 処分後 1,000 年) 時点での値を設定しているが、本検討では定置完了後すぐに全量が放出されると仮定しているため、直接処分第 1 次取りまとめと同様の使用済燃料 (PWR、濃縮度 4.5 %、燃焼度 45,000 MWD MTU⁻¹) の仕様に対し、炉取り出し 50 年後のインベントリを初期値として設定した。
- 廃棄体定置領域 (ベントナイトでの充填を想定)、シール材領域 (ベントナイトでの充填を想定)、母岩での核種の移行に関するパラメータ (拡散係数、分配係数、溶解度など) については、直接処分第 1 次取りまとめなどから設定した。
- 評価対象核種は、直接処分第 1 次取りまとめにおいて支配的核種であり、収着に

よる遅延効果が小さく、比較的半減期が短い C-14 とした。

解析ケースについては、前述の目的に応じて、母岩中の地下水の流れの程度の違いを母岩透水係数の違いで表現することとし、表 5-13 に示す 6 ケースを設定した。なお、本検討では、熱対流などによる移行と地下水流れによる移行を、評価点としてシール材領域入口（図 5-3 参照）と母岩入口（図 5-4 参照）を設定して、それぞれでの核種フラックスから累積移行率を算出し比較する。さらに、熱対流などによる移行と地下水流れによる移行のバランスの変化を条件の異なるケースで比較しやすくするために、累積移行率については、本検討で考慮した廃棄体（燃料集合体 2 体収容）200 本分のインベントリの初期値を 1 とした場合の規格化量として示すこととした。

表 5-13 母岩透水係数をパラメータとした解析ケース

解析ケース	母岩透水係数 [m s ⁻¹]	設定理由	
レファレンス	1.0×10 ⁻¹⁰	直接処分第 1 次取りまとめの設定値	
case1	1.0×10 ⁻⁹	レファレンスに対して地下水流れが大きい設定	
case2	1.0×10 ⁻⁸		
case3	1.0×10 ⁻¹¹	レファレンスに対して地下水流れが小さい設定	わが国の母岩透水係数の調査結果（平成 28 年度 表 5-12）における下限値
case4	1.0×10 ⁻¹²		ペクレ数の計算から、母岩への拡散および移流がほぼ同等になる（少し移流が卓越する）条件
case5	1.0×10 ⁻¹³		米国事例（Freeze et al., 2016）での母岩透水係数の設定値

⑤ 解析結果および考察

図 5-6 に、レファレンスおよび case1～5 における、以下のそれぞれの移行による C-14 の累積移行率の結果を示す。

- ・熱対流などによる廃棄体定置領域からシール材領域への移行（図 5-3 の評価点）
- ・地下水流れによる廃棄体定置領域から母岩への移行（図 5-4 の評価点）

まず、レファレンスでは、熱対流などによる累積移行率は、初期インベントリを 1 とした規格化量で 2 割弱、地下水流れによる累積移行率は約 8 割強となり、合計すると初期インベントリのほぼ全てが、最終的には廃棄体定置領域からシール材領域か母岩へと移行する結果となった。ここで、熱対流などによる累積移行率の増加傾向は、地下水流

れによる累積移行率に比べて遅く、かつ、廃棄体定置領域での熱対流継続期間の300年以降はほぼ増加しない。一方、地下水流れによる累積移行率は、300年以降も増加するが、1,000年時点までに初期インベントリのうちシール材領域に移行した分以外の8割強が移行することで、頭打ちとなる。

次に、レファレンスと母岩透水係数を変えたケースの結果を比較する。レファレンスに比べて地下水の流れが大きい case1、case2 では、地下水流れによる累積移行率が大きくなっており、初期インベントリのほぼ全てが地下水流れにより廃棄体定置領域から母岩へと移行している。他方、レファレンスに比べて地下水の流れが遅い case3、case4、case5 では、透水係数が小さくなるとともに地下水流れによる累積移行率が下がること、およびこれらのケースでは熱対流などによる累積移行率はレファレンスに比べて増加するものの約2割が上限となることが特徴となっている。ここで、地下水流れによる累積移行率が下がることについては、その立ち上がりが遅くなること、および C-14 の崩壊減衰が顕在化する 10,000 年程度で累積移行率が頭打ちになるということも特徴である。また、熱対流などによる累積移行率について、その上限が約2割になっていることについては、以下のように解釈できる。

- ・ 本解析においては米国の事例の熱対流解析結果を参考に、廃棄体定置領域の熱対流流速を $5 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ y}^{-1}$ 、処分孔断面積を約 1 m^2 、間隙率を 0.034 として設定しており、これらから間隙流速は約 1.47 m y^{-1} と計算される。
- ・ 廃棄体定置領域における熱対流継続期間を 300 年と設定していることから、その期間に核種は約 440 m 移動することになる（可溶性・非吸着性の場合）。
- ・ そのため、廃棄体定置領域の上部約 440 m の領域に存在する廃棄体からの核種がシール材領域に到達することになり、これは廃棄体定置領域全体の 2,000 m に対して 2 割程度となる。

これらの結果、レファレンスに比べて地下水の流れが遅い case3、case4、case5 では、熱対流などによる累積移行率と地下水流れによる累積移行率の合計は、初期インベントリの一部に限定されることになる。

以上の検討結果より、地下水の流れが想定されるわが国の地質環境条件では、米国の事例において主な移行経路となっている熱対流などによる移行だけを考慮することは適切ではなく、地下水流れによる移行を考慮する必要性が示唆された。また、地下水流れによる移行が地下水流れの大小に大きく依存すること、一方、熱対流などによる移行には上限が存在すると考えられることから、今後、それぞれの移行について想定し得る条件を検討しながら、それらの組み合わせについての解析的検討を充実させることで、両者の移行がどのようなバランスになるか、あるいはどちらかが卓越するのかなどについての知見を蓄積していくことが必要になると考えられる。そのためには、熱対流解析による熱対流の速度や継続期間、および核種移行解析による移行挙動や遅延効果についての感度解析を、各領域（廃棄体定置領域、シール材領域、母岩など）の構成要素、およびその特性についてのバリエーションを考慮しつつ実施することが必要になると考えられる。

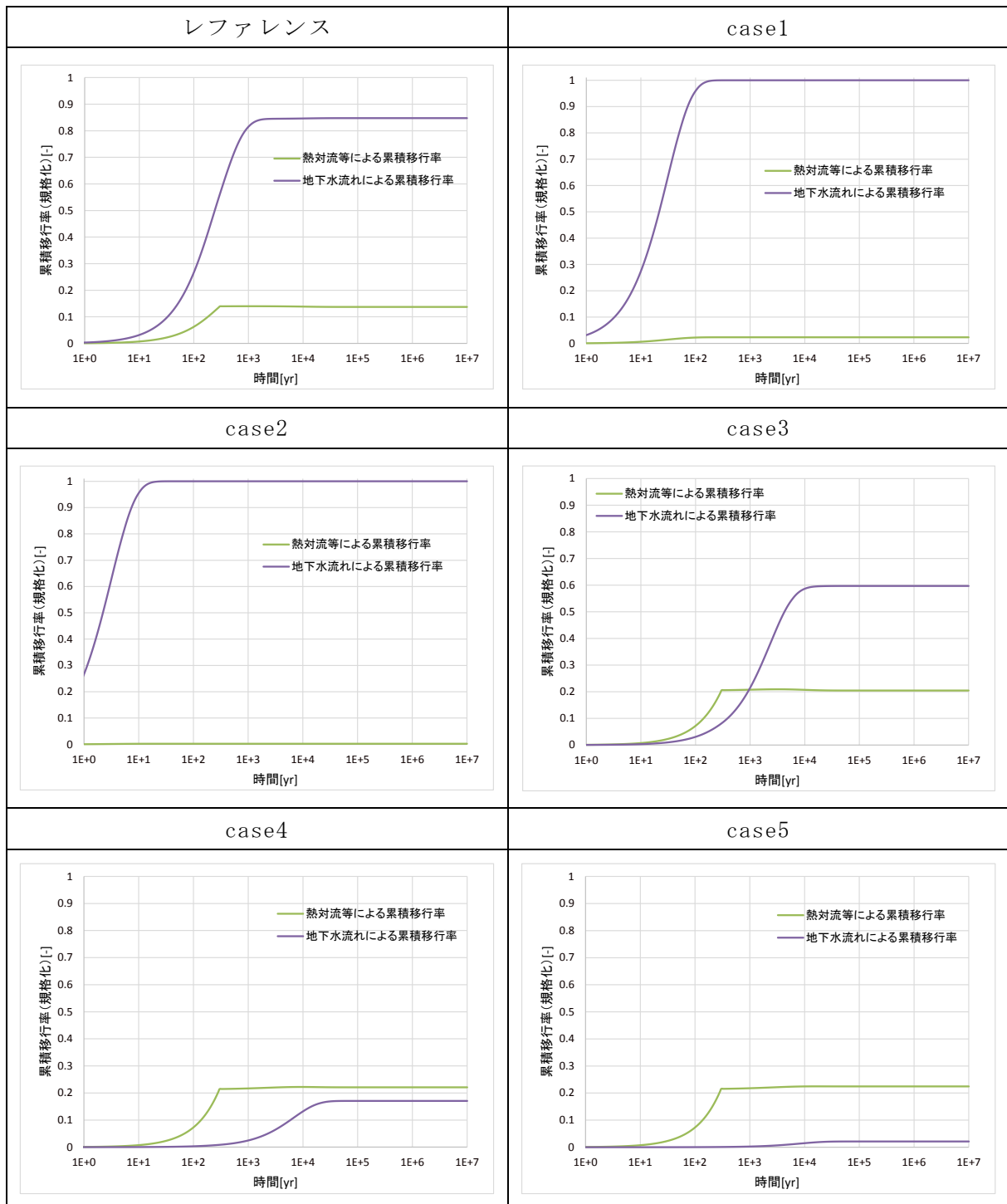


図 5-6 熱対流などによる累積移行率と地下水流れによる累積移行率の比較 (対象核種：C-14)

(5) 超深孔処分に関する最新情報などの調査結果に基づく分析

超深孔処分について、諸外国の事例から抽出された各国に共通に示唆される点や留意点の整理、および国内外での関連情報の整理を踏まえて、超深孔処分をわが国へ適用する際に留意すべきと考えられる課題を以下に示す。

- 地質環境の観点からの課題
 - 諸外国は対象母岩を均質な結晶質岩に特定しているが、分布している結晶質岩は先カンブリア紀（古生代以前）のものである
 - ✓ わが国に分布している結晶質岩は中生代以降のものであることから、地質年代の相違による結晶質岩の地質の違いに留意が必要
 - 米国では、深部の地下水流動の観点から要件として地形勾配に制限を設定している
 - ✓ わが国の地形は起伏が多く、米国と同様の地形的制限には適応できないことに留意が必要
 - 諸外国は深部までの水平応力の差および異方性が小さいことを要件として設定している
 - ✓ わが国はプレートの収束境界に位置しており、プレート運動が水平応力などの応力場に影響する条件であることから、こうした地質条件下での処分時の影響について留意が必要
 - 上記の3課題はいずれも、通常深度の地層処分では考慮する必要のない留意点であり、サイト選定において選定地を限定させる要因となり、通常深度の地層処分を選択するよりも不利な点となる可能性がある
- 工学技術の観点からの課題
 - 諸外国では石油、天然ガス、地熱、地球科学的分野など様々な分野における掘削の実績があり、これを背景に5,000 m程度の掘削は可能として設定
 - ✓ わが国では、石油産業などにおける掘削技術が欧米諸国と比較して発展していないため、検討・実施のための技術者や専門家が不足している点に留意が必要
 - 諸外国では、不確実な要因で発生する廃棄体の詰まりのリスク、詰まった場合どうするかといった点について、今後調査・整理が必要な重要な点としている
 - ✓ わが国においても、操業時の技術におけるリスクとしては同程度であり、今後調査・整理が必要である
 - 諸外国ではコストや事業面から事業期間の短縮および効果的な隔離において有利とみており、少量であり、サイズが小さく、比較的高い放射能レベルである廃棄物を対象として設定。米国では特に、小さく、物量も少ないCs/Srカプセルを有力な候補としている。
 - ✓ わが国においても、事業期間の短縮および効果的な離隔などが通常深度の地層処分より有利な点になる可能性があると考えられるものの、処分の対象となる廃棄物の候補、廃棄体の構造や材料に関して検討されておらず、今後調査・整理が必要である。
 - 米国では、閉鎖まで進めた廃棄物や孔内に詰まった廃棄体については回収することができないと認識しているが、回収可能性を要件としている各国では代替処分概念

としてのみ検討している。

- ✓ わが国では可逆性・回収可能性の考え方が必要とされており、この考え方が堅持されることを想定すると、回収技術や孔曲がりや低減する技術の確立に向けた検討が必要
- 安全性の評価の観点からの課題
 - わが国の特徴を想定した安全性の評価では、熱対流による廃棄体定置領域やシール材領域中の移行に加え、母岩中の移行も含め適切に考慮することが重要になる。
 - 熱対流に関する課題
 - ✓ 廃棄体の発熱量、廃棄体定置領域、シール材領域の構成要素やそれらの物性値などの熱対流解析の条件のより具体的な設定
 - ✓ 熱対流速度の時間変化の核種移行モデル上の取扱い
 - ✓ 上記を反映した熱対流解析（構成要素や物性値などのバリエーションを考慮した感度解析を含む）
 - 核種移行に関する課題
 - ✓ 廃棄体定置領域、シール材領域、および母岩の構成要素やそこでの移行特性などのより具体的な設定
 - ✓ 上記を反映した核種移行解析（含む、構成要素や移行特性のバリエーションを考慮した感度解析）

(6) まとめ

諸外国において検討されている地質環境の基本要件は、処分施設（深度数 km に及ぶボーリング孔）の掘削・操業時における安全性や容易性、閉鎖後の安全性に係る要件であり、わが国においても結晶質岩（花崗岩）を対象として超深孔処分を検討する上で参考になると考えられる。ただし、わが国における地質環境を考慮した見直しが必要であり、対象岩種を含めたサイト選定要件、わが国独自の地形勾配に係る要件、水平応力状況、地震や火山活動による超深孔処分概念への影響の 4 点に関しては、わが国での独自の検討が必要であると考えられる。

工学技術の面からは、諸外国と同様に、石油掘削などの技術を応用し、サイト選定などと並行して、わが国のサイトに適した技術への最適化は今後必要となってくると考えられる。また、操業・閉鎖に関しては、特に廃棄体の定置に係り、廃棄体が孔内に詰まった場合など、回収可能性の取り扱いが重要になってくると考えられる。回収可能性が極めて小さくなる点について、現時点での不確実リスクを見極めると共に、その上で代替処分概念として検討を進めていく場合には、制度設計や安全規制の基本的な考え方など、実施体制を見直し、再構築していくことが必要となる。

超深孔処分の安全性の評価については、米国の事例で主な移行経路とされている熱対流による廃棄体定置領域やシール材領域中の移行だけでなく、母岩中での地下水の流れによる移行も考慮した解析を試行し、それらの移行のバランスなどが地下水流れの違いに応じて大きく変わり得ることを確認した。今後は、熱対流解析による熱対流の速度や継続期間、および核種移行解析による移行挙動や遅延効果を、各領域（廃棄体定置領域、シ

ール材領域、母岩など)の構成要素およびその特性についてのバリエーションを考慮することで感度解析的に検討していくことの必要性が示された。

【参考文献】

- Arnold, B.W., Brady, P., Altman, S., Vaughn, P., Nielson, D., Lee, J., Gibb, F., Mariner, P., Travis, K., Halsey, W., Beswick, J. and Tillman J. (2013): Deep Borehole Disposal Research (2013): Demonstration Site Selection Guidelines, Borehole Seals Design, and RD&D Needs, SAND2013-9490-P, 221p.
- Arnold, B.W., et al. (2011): Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. Sandia National Laboratories, SANDIA REPORT SAND2011-6749, 66p.
- Beswick, J. (2008): Status of Technology for Deep Borehole Disposal, EPS International, Contract No NP 01185, 91p.
- Beswick, J. (2009): Deep bore hole disposal of radioactive waste. Presentation to the 11th RWIN(Radioactive Waste Immobilization Network) meeting, Sheffield, April.
- Brady, P. V., Arnold, B. W. Freeze, G. A., Swift, P. N., Bauer, S. J. Kanney, J. L., Rechar, R. P. and Stein, J.S. (2009): Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. Sandia National Laboratory, Albuquerque, USA. Report No: SAND2009-4401. 75 pps.
- Clayton, D., G. Freeze, T. Hadgu, E. Hardin, J. Lee, J. Prouty, R. Rogers, W.M. Nutt, J. Birkholzer, H.H. Liu, L. Zheng, and S. Chu (2011): Generic Disposal System Modeling - Fiscal Year 2011 Progress Report. FCRD-USED-2011-000184, SAND 2011-5828P. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- 電気事業連合会(2013): 原子力・エネルギー図面集 2013.
- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構(2005): TRU 廃棄物処分技術検討書-第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-, JNC TY1400 2005-013/FEPC TRU-TR2-2005-02.
- DOE (Depart of Enegy) (2017): Studying the Feasibility of Deep Boreholes, <<https://energy.gov/under-secretary-science-and-energy/articles/studying-feasibility-deep-boreholes>>.
- Freeze G.A., Stein E.R., Price L., MacKinnon R. and Tillman J. (2016): Deep Borehole Disposal Safety Analysis, FCRD-UFD-2016-000075, SAND2016-10949R, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Freeze, G., M. Voegele, P. Vaughn, J. Prouty, W.M. Nutt, E. Hardin, and S.D. Sevougian. (2013): Generic Deep Geologic Disposal Safety Case. FCRD-UFD-2012-000146 Rev. 1, SAND2013-0974P. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- 原子力発電環境整備機構 (NUMO) (2004): Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments, 2004.
- 原子力機構 (日本原子力研究開発機構) (2015a): 平成 26 年度地層処分技術調査等事業使用済燃料直接処分技術開発報告書、平成 27 年 3 月。

- 原子力機構（日本原子力研究開発機構）（2015b）：わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価-直接処分第1次取りまとめ-, JAEA 技術報告書, JAEA-Research2015-016.
- Gibb, F.G., Travis, K.P., Hesketh, K.W. (2012): Deep bore hole disposal of higher burn-up spent nuclear fuels. Mineralogical Magazine (Pre-Publication).
- Hammond, G.E., P.C. Lichtner and R.T. Mills (2014): Evaluating the Performance of Parallel Subsurface Simulators: An Illustrative Example with PFLOTRAN, Water Resources Research, 50, doi:10.1002/2012WR013483.
- Hammond, G.E., P.C. Lichtner, C. Lu, and R.T. Mills (2011): “PFLOTRAN: Reactive Flow and Transport Code for Use on Laptops to Leadership-Class Supercomputers”, in F. Zhang, G.T. Yeh, and J. Parker (ed.) Groundwater Reactive Transport Models. Bentham Science Publishers.
- 放射性廃棄物 WG（総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会放射性廃棄物 WG）（2014）：放射性廃棄物 WG 中間とりまとめ 平成 26 年 5 月.
- 石原義尚, 牧野仁史, 大井貴夫, 石黒勝彦, 宮原要, 梅木博之, 赤坂秀成, 藤原啓司(1999)：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, 21p.
- Kang J. (2014): Potential for Deep Borehole Disposal of Nuclear Wastes in ROK, <<https://nautilus.org/napsnet/napsnet-special-reports/update-potential-for-deep-borehole-disposal-of-nuclear-wastes-in-rok/>>.
- Kickmaier W., Hardie S. and McKinley I. (2016): Literature survey on the deep borehole disposal concept. Report number MCM TR 15-01.
- 高レベル事業推進準備会(1997)：高レベル放射性廃棄物ポケットブック.
- Lee J-Y. (2016): Research Status on Deep Borehole Disposal of High-level Radioactive Waste in Korea. Presentation at the International Meeting on Deep Borehole Disposal, June 13-15, Sheffield, UK.
- Lichtner, P.C. and G.E. Hammond (2012): Quick Reference Guide: PFLOTRAN 2.0 (LA-CC-09-047) Multiphase-Multicomponent-Multiscale Massively Parallel Reactive Transport Code. DRAFT LAUR-06-7048. December 8, 2012. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.
- Murphy, W. M. and Diodato, D. M., (2010): Some observations on deep borehole disposal of spent nuclear fuel and high level nuclear waste. Workshop on research needs for borehole disposal.
- NWTRB (2016): Technical Evaluation of the U.S. Department of Energy Deep Borehole Disposal Research and Development Program. A report to the U.S. Congress and the Secretary of Energy, January.
- 齋藤清次, 畠山信夫(2001)：JUDGE 井(10km, 400℃)掘削の困難性と実現に向けての基本戦略の提案.
- 石油技術協会(1998)：深掘技術分科会 1984 年から 1998 年の研究成果, <<https://www.japt.org/html/iinkai/drilling/seikabutu/fukaboriin/fukabori>>.

html>.

SNL Sandia National Laboratories (2012): Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste: Final Report, Sandia National Laboratory.

SNL Sandia National Laboratories (2016a): Deep Borehole Disposal Safety Analysis <<http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2016/1610949r.pdf>>.

SNL Sandia National Laboratories (2016b): Deep Borehole Field Test Laboratory and Borehole Testing Strategy, FCRD-UFD-2016-000072, SAND2016-9235 R.

Tollefson, J. (2014): US seeks waste-research revival, Nature 6 Mar, DOI: 0.1038/507015a.

東洋エンジニアリング(1997): 深層ボーリング技術調査(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書), PNC TJ1277 97-003.

第 6 章

おわりに

6 章詳細目次

6. おわりに	6-1
6.1 直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および閉じ込め性能評価手法の高度化	6-1
(1) 先進的な材料の開発	6-1
(2) 閉じ込め性能評価手法の高度化	6-1
6.2 直接処分施設の設計検討	6-2
(1) 直接処分方策に関する調査・検討	6-2
(2) 人工バリアの設計	6-2
1) 処分容器の設計	6-2
2) 処分容器の設計における臨界安全に関する検討	6-2
3) 緩衝材の設計	6-2
(3) 地下施設の概念設計	6-3
(4) 搬送・定置設備の概念設計	6-3
6.3 直接処分施設の設計支援システムの構築	6-3
6.4 その他の代替処分オプションについての調査・検討	6-3
6.5 情報収集および評価委員会の設置と運営	6-3

6. おわりに

本事業は、わが国における地層処分の代替処分オプションの技術的基盤を提供するとともに処分方法についての幅広い選択肢を確保することを目標として、平成 29 年度までの 5 年間で実施されてきた。平成 25 年度～平成 26 年度の 2 か年においては、使用済燃料の直接処分に関する技術開発を先行して実施したが、平成 27 年度からはこれに加えて、その他の代替処分オプションに関する調査と有効性の検討も視野に入れた技術開発となっている。

本事業では以下の事業項目を設定し、使用済燃料の直接処分に関する技術開発およびその他の代替処分オプションについての調査を実施した。

- ・直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および閉じ込め性能評価手法の高度化
- ・直接処分施設の設計検討
- ・直接処分施設の設計支援システムの構築
- ・その他の代替処分オプションについての調査・検討
- ・情報収集および評価委員会の設置と運営

以下に平成 29 年度に実施した上記事業項目の成果を総括する。

6.1 直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および閉じ込め性能評価手法の高度化

(1) 先進的な材料の開発

処分容器材料への適用を考慮して平成 25 年度に提示された金属ガラスの候補材料を中心に、耐食性を含めて基本特性に関するデータ取得など知見の整備を行うとともに、従来の処分容器候補材料との耐食性の違いについて検討を継続した。これらの結果に基づいて処分容器材料としての性能を評価した。また、溶射によるコーティングなどの施工技術に関する適用性の検討を継続し、処分容器としての施工性を評価した。以上をもとに、金属ガラスの処分容器材料としての適用性を総合的に評価して取りまとめるとともに、実用上の課題を抽出した。

(2) 閉じ込め性能評価手法の高度化

人工バリアの閉じ込め性能評価手法に関する研究として、金属材料の腐食現象の理解・メカニズム解明や、腐食による緩衝材特性への影響評価のための試験および文献調査を行い知見を拡充するとともに、平成28年度までに得られた知見を含めて処分容器による閉じ込め機能の高度化の可能性を提示した。また、微生物の活動に着目し、直接処分システムにおける多様な微生物の影響を考慮し、微生物の種類（硫酸還元菌、メタン生成菌、酢酸生成菌など）やベントナイトの共存による影響についてデータの拡充を行うとともに、人工バリアの閉じ込め性能に及ぼす影響を整理した。更に、緩衝材によるC-14などの移行遅延機能については、有機化合物形態の違いに加えて分子量が異なるC-14に対して実効拡散係数の実測値を整備し、化学形態や分子量がC-14の拡散挙動に及ぼす影響について整理した。使用済燃料のソースターム評価では、放射性核種放出挙動の指標となる国内の使用済燃料における核分裂生成ガスの放出率の解析的調査などを通じて知見を拡充するとともに、平成28年度までに収

集した関連情報を総括することで、ソースターム評価をより現実的にするために必要な項目を整理した。また、調査した燃料溶解速度について、わが国で想定される緩衝材間隙水への適用性を評価するため、UO₂の溶解速度の炭酸濃度依存性について実験的に調査した。多重バリアによる閉じ込め性能の評価手法については、様々な設計オプションと地質環境条件との組合せおよびスケールの違いなどに起因する影響の類似点・相違点に関する知見やその評価手法などの体系的整備を行った。

6.2 直接処分施設の設計検討

(1) 直接処分方策に関する調査・検討

使用済燃料の直接処分施設に適用する保障措置および核セキュリティのIAEAおよび諸外国の検討状況について、国際会議などを通じての情報の入手を継続した。処分容器の固有性確認技術に関しては、識別符号の付与方法を含む超音波探傷技術による固有性確認方法の適用性を、シミュレーション解析または試験サンプルを用いて評価した。加えて、複合容器に対する超音波探傷測定に係るシミュレーション解析を行い、複合容器への超音波探傷技術の適用可能性を評価した。上記結果および平成28年度までの結果を踏まえて、わが国の特徴に応じた処分施設の設計に反映する保障措置技術、核セキュリティ技術を整理し、取りまとめた。

(2) 人工バリアの設計

1) 処分容器の設計

処分容器仕様に影響を及ぼす設計因子と条件の不確実性および多様性を考慮して臨界安全、放射線遮へい性などに係る解析を実施し、平成28年度までに設計した基本仕様の成立性を評価した。平成28年度までの検討結果と合わせて、種々の設計因子や多様性に対して成立性が確認された処分容器の仕様を、設定手法、適用範囲および今後の合理化の可能性とともに整理し、設計事例として提示した。

2) 処分容器の設計における臨界安全に関する検討

緩衝材や岩盤を構成する物質の反射体効果について、平成28年度にSiO₂の反射体効果の検証で対象とした臨界実験と直接処分体系との類似性について評価を行い、SiO₂反射体効果の直接処分体系への適用性を確認した。中性子吸収材については、BWR使用済燃料における現実的な吸収材の挿入添加量などについて検討を行った。さらに、これまでの検討結果を、処分容器の設計検討に適用できる臨界安全評価技術として取りまとめた。

3) 緩衝材の設計

緩衝材による複合処分容器の支持性能について、これまで未検討であった堅置き定置方式の人工バリアを対象として確認した。また、人工バリアをPEM方式とした場合については、平成28年度の検討とは異なる岩盤条件や定置方式を対象として緩衝材による処分容器の支持性能を確認した。平成28年度までの検討結果と合わせて、種々の設計因子や多様性に対して成立性が確認された緩衝材の仕様を、設定手法、適用範囲および今後の合理化の可能性と

ともに整理し、設計事例として提示した。また、設計に必要となる緩衝材の物性値の取得を継続し、緩衝材設計の基本データとして取りまとめた。

(3) 地下施設の概念設計

人工バリアのレイアウトをオプションから合理的に選定するため方法論として、平成 28 年度までの成果に加え力学的安定性、施工性、経済性などに対する指標を考慮した取りまとめを行った。さらに、場所打ちコンクリートを対象とした配合選定のための基礎物性の取得を継続し、平成 28 年度までの検討結果とあわせて、HFSC コンクリートの吹付けコンクリートおよび場所打ちコンクリートの配合選定のための情報を取りまとめた。

(4) 搬送・定置設備の概念設計

搬送・定置の動作を分かり易く示すことを目的として、3D-PDF 技術を利用した搬送・定置工程の三次元動画としての可視化を試行した。また、搬送・定置設備への適用可能な技術、他施設との整合を考慮した搬送・定置設備などの設計フローおよびそれらに基づく設計事例に関する平成 28 年度までの検討結果を取りまとめた。

6.3 直接処分施設の設計支援システムの構築

地層処分エンジニアリング総合支援システム（iSRE）について、維持管理補修履歴データベースと積算データベースの詳細設計と試作、モニタリングデータの更新のためのインターフェースの試作を行った。また、設計支援システムの試運用として、地層処分事業の各段階で行われる行為を想定した機能検証を行った。これにより、システムのプロトタイプを提示するとともに、実用化に向けて充実させるべき事項やその対策案を整理した。

6.4 その他の代替処分オプションについての調査・検討

超深孔処分について、引き続き調査を実施して最新情報を整理するとともに、わが国における適用性の検討に向けての技術的課題について、社会・経済を含む全般的な課題との関連性や従来の地層処分との比較なども含めて、検討・整理した。

6.5 情報収集および評価委員会の設置と運営

本事業の実施に当たり、国内外の関係機関や大学などとの間で必要に応じて情報交換などを実施し、関連技術などについての最新情報を入手するとともに、成果の普及などを積極的に行った。また、本事業に係る専門家・有識者などで構成される委員会を設置し、研究計画、実施方法、結果の評価などに関する審議・検討を行い、事業報告書として本報告書を取りまとめた。さらに、平成25年度～平成29年度の成果を別途5か年の報告書として取りまとめた。

付録 1

設計オプションの選択による閉じ込め性能の
違いの分析・整理における解析の補足情報
(本編 2.2.3 項に付す)

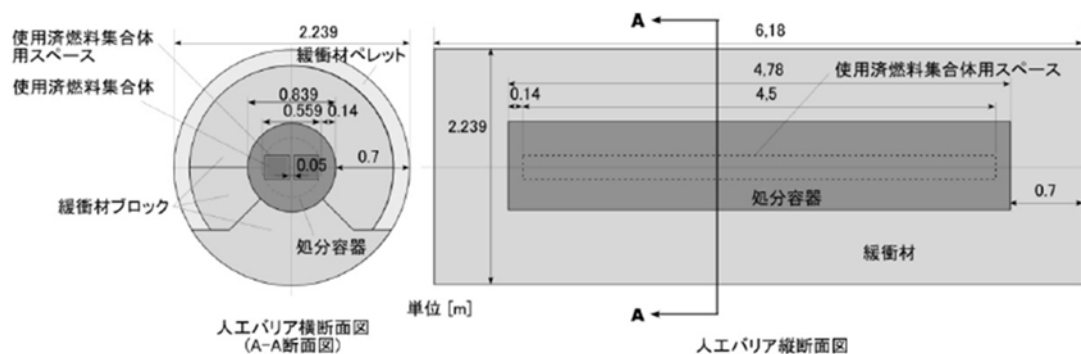
本付録では、2.2.3 項で示された、廃棄体の定置方式の選択によるニアフィールドの閉じ込め性能の違いの分析・整理の一環として実施された三次元物質移行解析(2.2.3 項(2))と、処分場の位置の選択による広域的なスケールでの閉じ込め性能の分析・整理の一環として実施された地下水流動解析(2.2.3 項(3))を補足する情報を示す。

1. 三次元物質移行解析の解析条件

1.1 想定された人工バリアの仕様

横置き方式

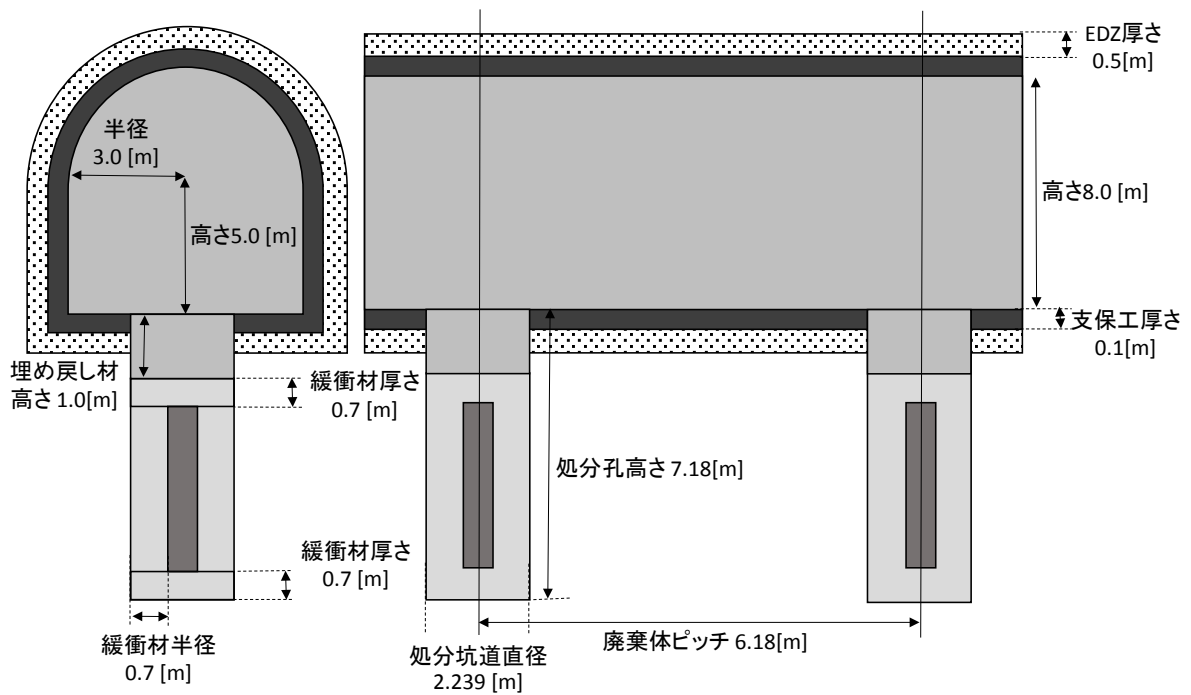
直接処分第1次取りまとめにおけるレファレンス人工バリアの仕様に準拠してモデルを作成した。付図 1-1 に直接処分第1次取りまとめにおけるレファレンス人工バリアの仕様を示す。人工バリアは、使用済燃料集合体2体を封入した処分容器(封入したものが廃棄体となる)の周囲を厚さ0.7 mの緩衝材が覆うものとなる。同一の処分坑道内での廃棄体ピッチは最小値6.18 mであることから、隣接する処分容器間の距離は6.18 mとした。坑道の直径は2.239 mである。緩衝材はブロックとペレットから構成されているが、解析モデル上は同一の物性として扱う。廃棄体は、処分容器と燃料集合体で構成されるが、解析モデル上は廃棄体を均一なものとして扱った。また、処分坑道周辺のEDZの厚さを0.5 mとした。



付図 1-1 横置き方式の人工バリアおよび坑道の仕様(直接処分第1次取りまとめより)

縦置き方式

過年度の成果を踏まえ、付図 1-2 に示す仕様に基づいてモデルを作成した。廃棄体ピッチ、処分孔中の廃棄体サイズや緩衝材厚みは横置き坑道と同一である。また、廃棄体離間距離は横置きの廃棄体ピッチと同じになるよう、6.18 m とし、横置き同様、評価対象領域には 16 体の廃棄体を配置している。処分孔上部埋め戻し材の厚さは H12 レポートと同一とした。上部坑道には厚み 0.1 m の支保工が存在するが、今回の解析では支保については考慮せず、EDZ の厚さを 0.6 m とした。

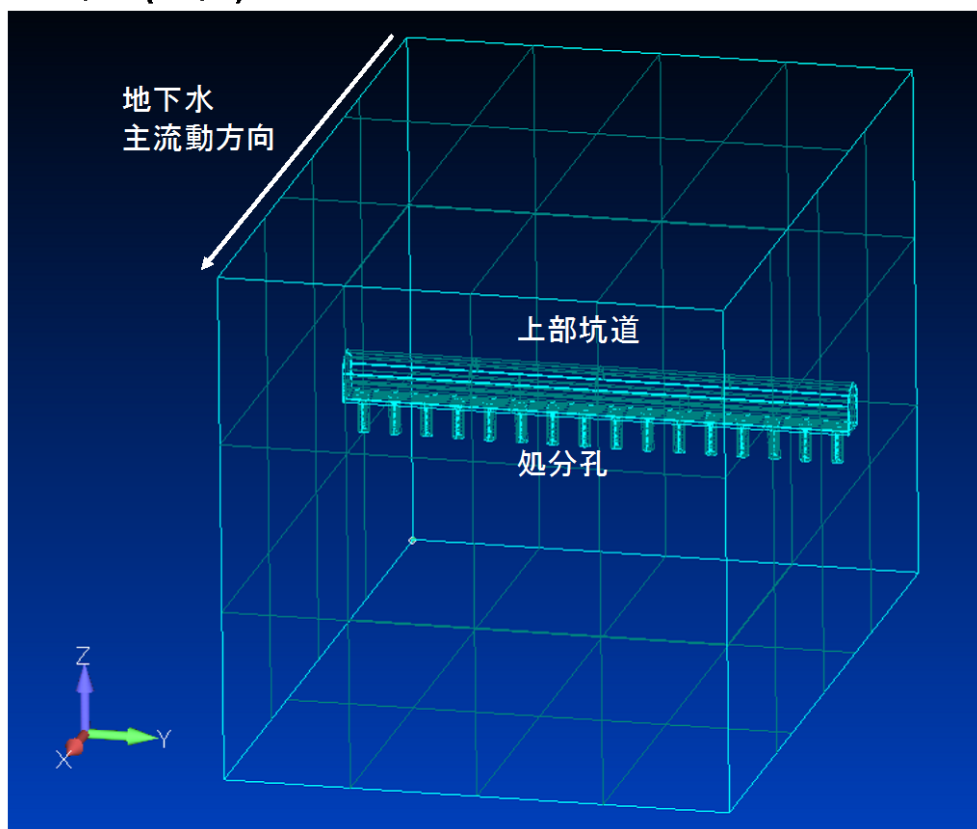


付図 1-2 縦置き方式の人工バリアおよび坑道の仕様

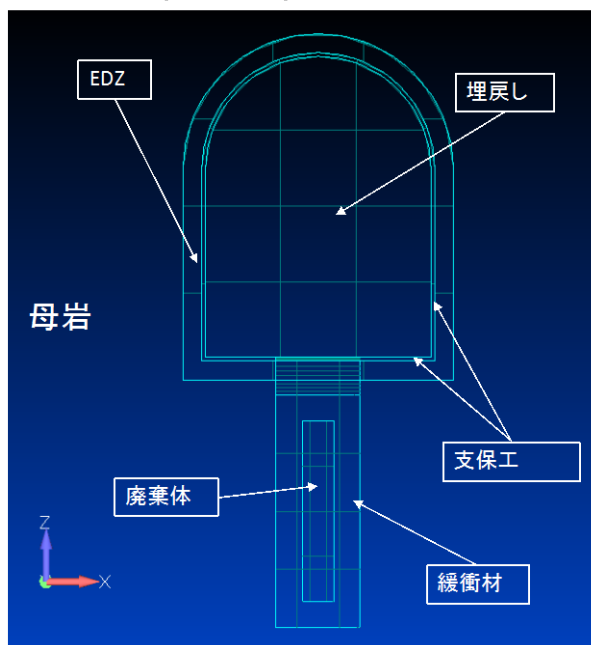
1.2 解析モデル

解析体系は、地下水の主流動方向 150 m (x 軸) × 坑道の延長方向 98.88 m (y 軸) × 鉛直方向 100 m (z 軸) とした。廃棄体は 16 体配置した。坑道の中心軸は、(x, z)=(50, 50) とした。付図 1-3 に縦置き方式の場合の三次元モデルの形状と領域区分を示す。初期状態として、図中の廃棄体の領域に仮想的な収着性の物質を表す粒子を配置して解析を行った。

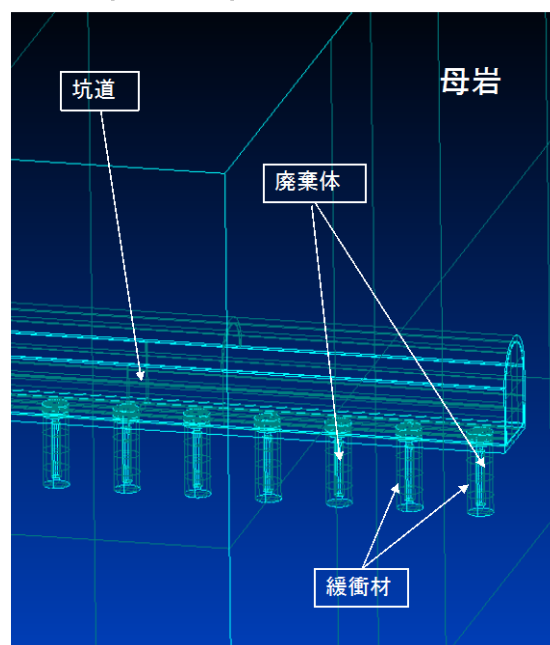
鳥瞰図(全体)



YZ面投影図(坑道近傍)



鳥瞰図(坑道近傍)



付図 1-3 三次元物質移行解析のモデル形状と領域区分 (縦置き方式の場合の例)

1.3 解析条件

水理学的境界条件として、巨視的な動水勾配は直接処分第1次取りまとめのレファレンスケースと同様に処分坑道と直交する方向に0.01とした。解析モデルの上流端面と下流端面に固定水頭境界条件を課して側面は不透水とした。また、使用済燃料の燃料マトリクス中の溶解速度を直接処分第1次取りまとめのレファレンスケースと同様に 10^{-7} y^{-1} とし、これに従い、廃棄体から可溶性の物質が放出することとした。

人工バリアの物質移行パラメータと岩盤の物質移行パラメータを、付表1-1と付表1-2にそれぞれ示す。

付表 1-1 人工バリアの物質移行パラメータ

	緩衝材*1	埋め戻し材*2
透水係数 [m s^{-1}]	1e-12	1e-11
実効拡散係数 [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$]	2.2e-11	2.2e-11
分配係数 [$\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$]	5.7	5.7
間隙率 [-]	0.4	0.4
真密度 [kg m^{-3}]	2,667	2,667

*1 直接処分第1次取りまとめを参考に設定

*2 ベントナイト系材料を想定した値として直接処分第1次取りまとめを参考に設定。

付表 1-2 岩盤の物質移行パラメータ

分類	名称	設定値
亀裂構造パラメータ (統計的亀裂)	一次元亀裂密度 [本 m^{-1}]	0.3
	透水量係数の分布	対数正規分布
	透水量係数 [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$] 分布の対数平均	-9.99
	透水量係数分布の対数標準偏差 [-]	1.07
	亀裂の半径分布	べき乗分布
	べき指数 [-]	3.0
	モデル化する亀裂の最小半径 [m]	7.0
	モデル化する亀裂の最大半径 [m]	300.0
	亀裂の方向性 分布 (走向、傾斜、パラメータ) 比率	Fisher 分布 (0, 90, 10) 0.5 (90, 90, 10) 0.5
	母岩マトリクス中の透水係数 [m s^{-1}]	不透水
大規模高透水性構造 のパラメータ	EDZ の透水係数 [m s^{-1}]	1e-05
	上流側の高透水性構造の透水量係数 [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$]	1e-07
物質移行特性※	下流側の高透水性構造の透水量係数 [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$]	1e-06
	実効拡散係数 [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$]	2.1e-12
	分配係数 [$\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$]	0.1
	間隙率 [-]	0.02
	真密度 [kg m^{-3}]	2,694

※代表的なアクチニドとして、直接処分第1次取りまとめのウランの設定値を参考とした。

また、EDZにおける物質移行特性については、母岩における値と同一とした。

2. 広域的スケールを対象とする地下水流動解析の水理地質構造モデルの設定根拠

2.2.3 (3)で実施した地下水流動解析において設定した地形勾配と断層の角度等に関する設定の根拠を付表 1-3 に示す。

付表 1-3 水理地質構造モデルの設定根拠の概要

陸域	<p>陸域地形の傾斜は、大陸棚の 2 倍である 1.0° (勾配 0.018) とした。この値は若松ほか(2005)の低地および台地の傾斜勾配の 50 パーセントイル(0.017)に相当し、沿岸域の緩やかな地形の例としては蓋然性の高いものであると考えられる。</p>
大陸棚	<p>日本第四紀学会編(1987)を基に海岸線から大陸棚外縁までの距離(大陸棚の幅)、及び大陸棚外縁の水深を計測するとともに、平均勾配を算出した。また大陸棚の幅と大陸棚外縁の水深及び平均勾配を統計的に整理し、その中央値(大陸棚の幅 15.5 km、大陸棚外縁の水深 140 m、平均勾配 0.51°)を用いることとし、丸めて 0.5° とした。</p>
大陸斜面	<p>大陸斜面は、大陸と大洋の境界部にある水深約 200 m から 2,000~3,000 m までの海底の急斜面である(町田, 1981)。新版地学事典編集委員会編(1996)によると、大陸斜面の傾斜は 3° ~ 6° の急勾配を示す。そこで、沖合部の平均勾配はこの範囲の中央値である 4.5° とした。</p> <p>また、約 100 万年後の海退時に海側の幅が陸側よりも著しく狭くなることを防ぐため、大陸斜面についても陸域や大陸棚と同じ 15.5 km の幅を取ることとした。</p>
断層	<p>断層の間隔及び傾斜については「日本の断層マップ」(小坂ほか編, 2010)を参照し設定した。10 km 以上の断層の累積総延長 40,226.6 km であり、また我が国の総面積が 377,960 km² であること(総務省統計局, 2013)から、長さ 10 km 以上の断層の分布頻度は、1 km あたり約 0.11 条(約 9.4 km 間隔)となる。</p> <p>また、長さ 10 km 以上かつ傾斜角度が示されている断層は、傾斜 60° 以上の高角度傾斜が約 79 % と卓越しており、傾斜角は高角度を設定することとした。</p> <p>以上の知見を踏まえて、断層の頻度と傾斜角度は、次のように設定した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・断層の頻度：10 km あたり 1.1 条(約 9.4 km 間隔) ・断層の傾斜角：75° (高角度傾斜の中央値)

3. ガイベン・ヘルツベルグの法則に基づく沿岸の処分場位置の設定

2.2.3項の(3)で示した、処分場の位置の選択による閉じ込め性能の違いに関する分析・整理の結果から、塩淡水境界に伴う上昇流の影響を受けにくい沖合に処分場を建設する場合には、半減期が比較的短い核種であれば（例えば、C-14 など）、十分な減衰が見込める程度に地表までの移行時間を長く確保することが期待できる可能性が示唆された。ここでは、ガイベン・ヘルツベルグの法則(Freeze et al., 1979)に基づき塩淡水境界の移動距離の簡易的な推定を行った。対象とする沿岸域の場の概念図を付図 1-4 に示す。

ガイベン・ヘルツベルグの法則は付式 1-1 で表現される。

$$\frac{d}{h} = \frac{\rho_0}{\rho - \rho_0} \dots\dots\dots \text{付式 1-1}$$

ここで、 d は評価点（処分場）の深度[m]、 h は評価点直上の地下水位[m]（ここでは標高と同じと仮定する）、 ρ_0 は淡水の密度[g cm⁻³]、 ρ は塩水の密度[g cm⁻³]である。

また、付図 1-4 の想定では、海退距離 L は下記の付式 1-2 で示される。

$$L = \frac{\Delta H t}{T \gamma} \dots\dots\dots \text{付式 1-2}$$

ここで、 ΔH は最大海退時の海水準低下量[m]、 t は海退開始後の経過時間[年]、 γ は海底地形の勾配[-]、 T は海退期間[年]である。

ガイベン・ヘルツベルグの法則に基づき、塩淡水境界の深度が処分場深度 d [m]に等しくなるような汀線からの距離 x [m]を求める。ここで、下の付式 1-3 が成り立つことは自明であるため、付式 1-3 に付式 1-1 および付式 1-2 を代入することで簡易な一般式（付式 1-4）を得ることができる。

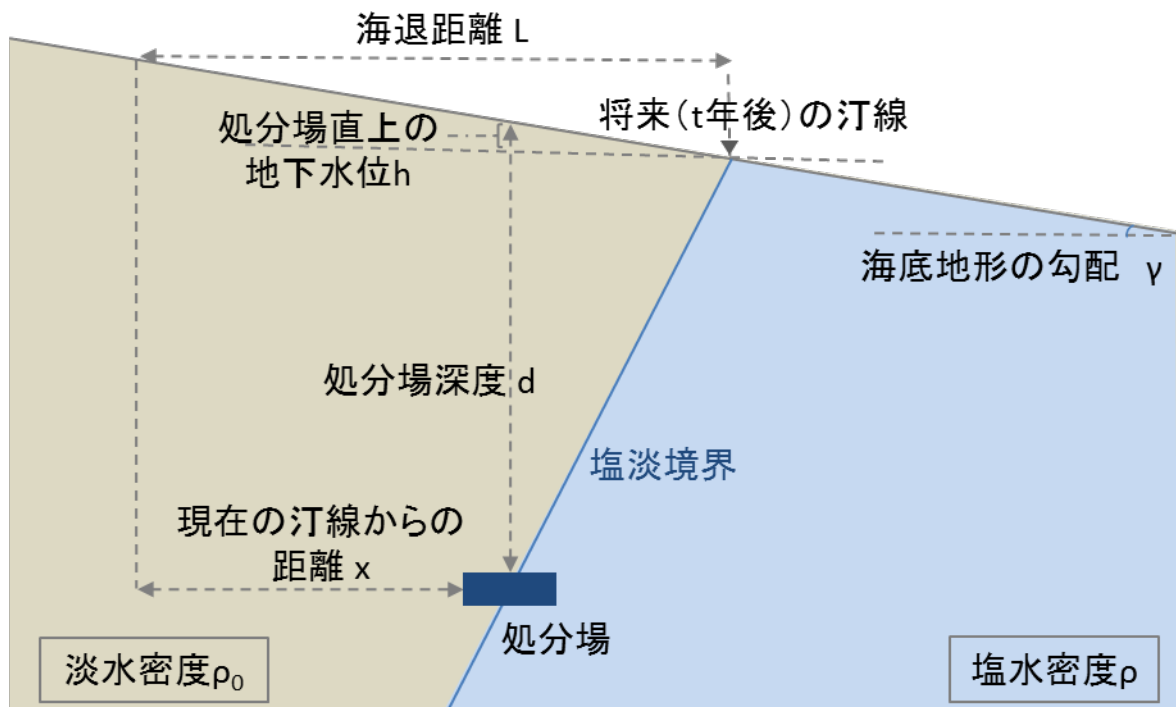
$$h = \gamma(L - x) \dots\dots\dots \text{付式 1-3}$$

$$x = \left(\frac{\Delta H t}{T} - \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} d \right) \gamma \dots\dots\dots \text{付式 1-4}$$

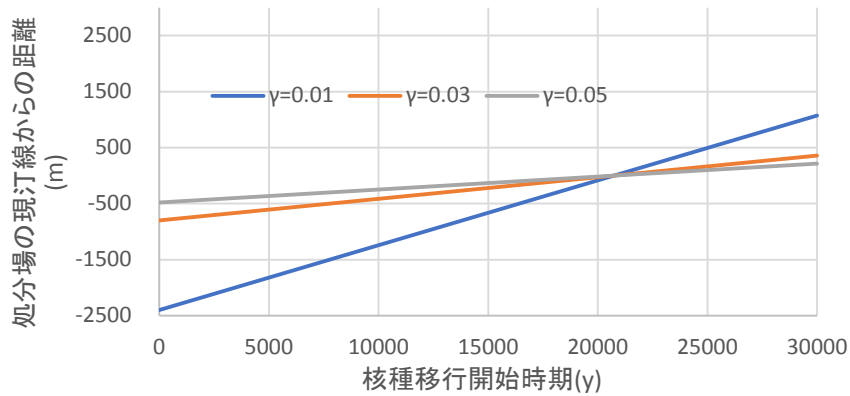
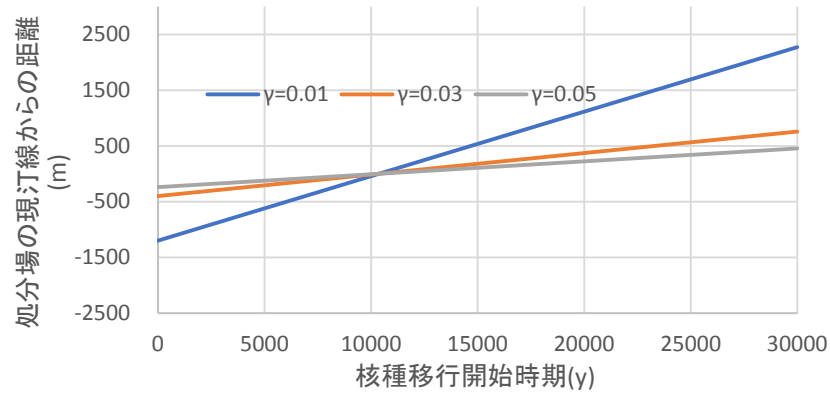
付式 1-4 に基づき、処分場深度 500 m あるいは 1,000 m、海底の地形勾配 0.01, 0.03, 0.05 の場合について、岩盤中での核種の移行が開始する時期 t まで処分場が塩淡水境界よりも海側にとどまるために必要な現汀線からの距離を算出した。結果を付図 1-5 に示す。 $\rho_0=1.000 \text{ g cm}^{-3}$ 、 $\rho=1.024 \text{ g cm}^{-3}$ 、 $\Delta H=125 \text{ m}$ 、 $T=10.8 \text{ 万年}$ とした。 $t=30,000 \text{ 年}$ 程度では、現汀線から 3 km 程度離れた位置に処分場があると、塩淡水境界に沿った上昇流の影響を受けにくいことが分かった。

ただし、上記の簡易的な計算では、岩盤の不均質性あるいは涵養による影響などを考慮していないため、結果はあくまで目安であり、個々のサイトについては密度流解析などによっ

て確認することが必要である。



付図 1-4 沿岸域の場の概念図



付図 1-5 岩盤中での核種の移行が開始する時期まで処分場が塩淡水境界よりも海側にとどまるために必要な現汀線からの距離

上：処分場深度 500 m、下：処分場深度 1,000 m

縦軸の負値は深部の塩淡水境界が陸側に入り込んでいることを示す。

参考文献

- 若松加寿江, 松岡昌志, 杉浦正美 (2005): 日本の地形・地盤デジタルマップ, 東京大学出版会.
 日本第四紀学会編 (1987): 『日本第四紀地図』, 東京大学出版会.
 町田貞, 井口正男, 貝塚爽平, 佐藤正, 榎根勇, 小野有五編 (1981): 『地形学辞典』, 二宮書店.
 新版地学事典編集委員会 編 (1996): 新版 地学辞典, 平凡社.
 小阪和夫, 金折裕司, 千木良雅弘, 吉田鎮男共編 (2010): 日本の断層マップ, 培風館.
 総務省統計局: 1-6 都道府県別行政区画と面積, 日本の統計 2013, 第 1 章 国土・気象, <http://www.stat.go.jp/data/nihon/01.htm> (最終閲覧日: 2014 年 11 月 10 日).
 Freeze, R. A. and Cherry, J. A. (1979): Groundwater, Prentice Hall, Englewood Cliff, p. 604.

付録 2

緩衝材の設計解析結果
(平成 26 年度～平成 29 年度)
(本編 3. 2. 3 項に付す)

1. 緩衝材の設計解析結果

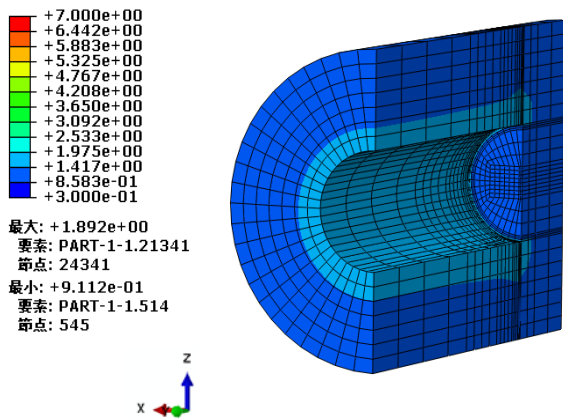
平成 26 年度から平成 29 年度までに実施した主要な解析の一覧を付表 2-1 に示す。これらの解析に基づく緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布を付図 2-1～付図 2-11 に、岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度分布を付図 2-12～付図 2-22 に示す。なお、岩盤の破壊限接近度は、最大有効主応力分布および最小有効主応力分布をもとに、本文中の式 3.2.3-2 に示される破壊条件式を用いて計算されたものである。

付表 2-1 解析ケース（平成 26 年度～平成 29 年度）

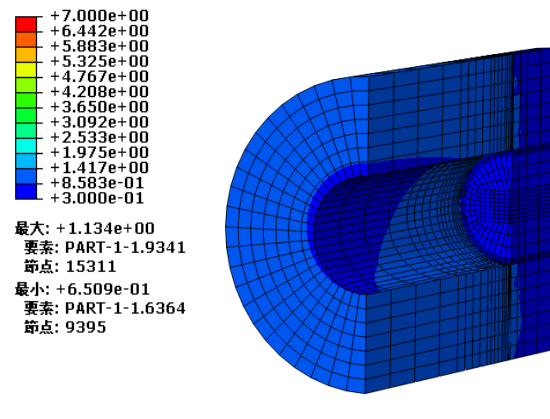
No.	緩衝材 ^{※1}	人工バリア方式	処分容器	定置方式	岩盤	実施年度
1	1.6 30	ブロック方式	炭素鋼 処分容器	横置き	軟岩	平成 26 年度
2				縦置き	軟岩	平成 27 年度
3				縦置き	硬岩	
4			複合処 分容器	横置き	軟岩	平成 26 年度 ^{※2}
5				横置き	硬岩	平成 28 年度 ^{※2}
6				縦置き	軟岩	平成 29 年度
7		PEM 方式	炭素鋼 処分容器	縦置き	軟岩	平成 29 年度
8				縦置き	硬岩	平成 28 年度
9	1.8	ブロック 方式	炭素鋼 処分容器	縦置き	軟岩	平成 28 年度
10	30			縦置き	硬岩	
11	1.8 50	ブロック 方式	炭素鋼 処分容器	縦置き	軟岩	平成 29 年度

※1 上段:乾燥密度[Mg m⁻³]、下段:ケイ砂混合率[wt%]

※2 銅の腐食膨張パラメータについて平成 26 年度では文献に基づく暫定値を使用。平成 28 年度は、実測値にもとづき設定した値を使用。以降に示す付図は平成 28 年度の結果。

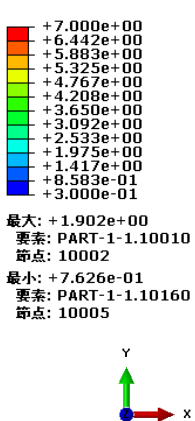


(a) 最大有効主応力分布 [MPa]

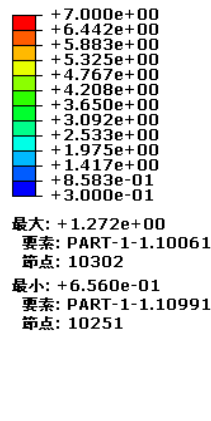


(b) 最小有効主応力分布 [MPa]

付図 2-1 緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布 (No. 1, 1,000 年後)

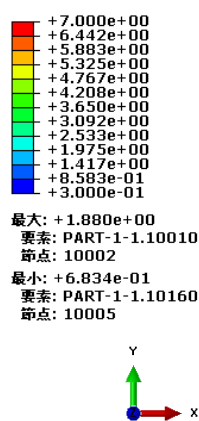


(a) 最大有効主応力分布 [MPa]

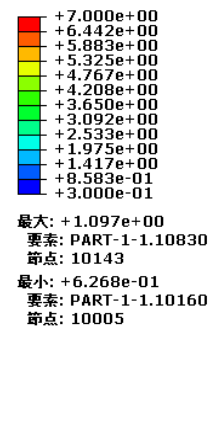


(b) 最小有効主応力分布 [MPa]

付図 2-2 緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布 (No. 2, 1,000 年後)

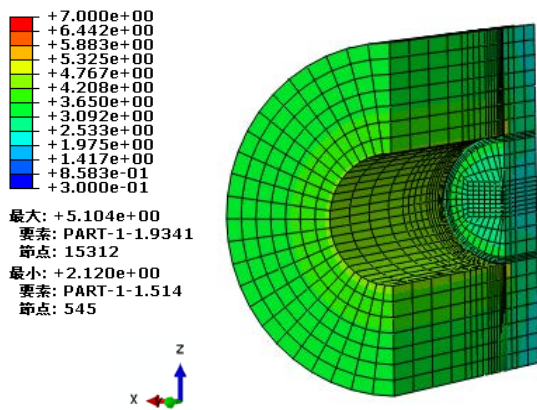


(a) 最大有効主応力分布 [MPa]

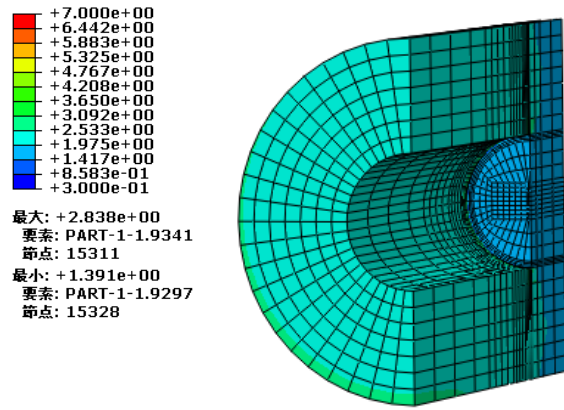


(b) 最小有効主応力分布 [MPa]

付図 2-3 緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布 (No. 3, 1,000 年後)

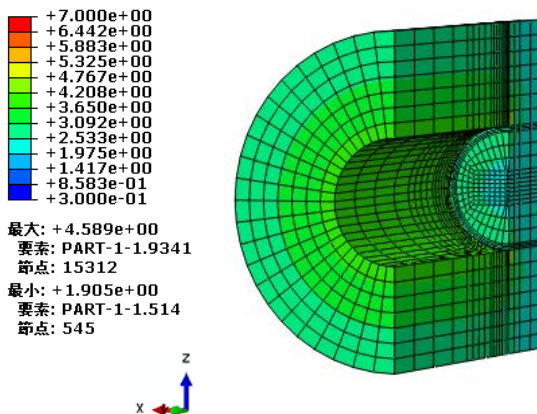


(a) 最大有効主応力分布 [MPa]

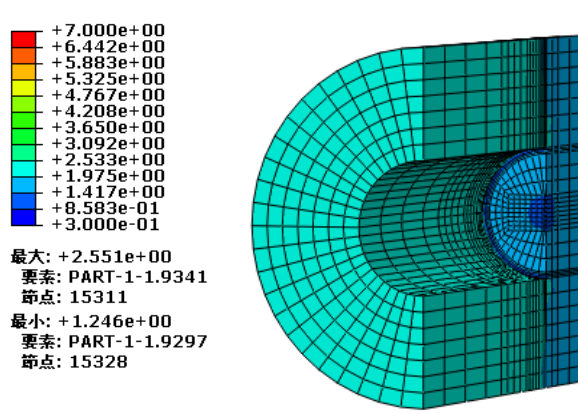


(b) 最小有効主応力分布 [MPa]

付図 2-4 緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布 (No. 4, 5 万年後)

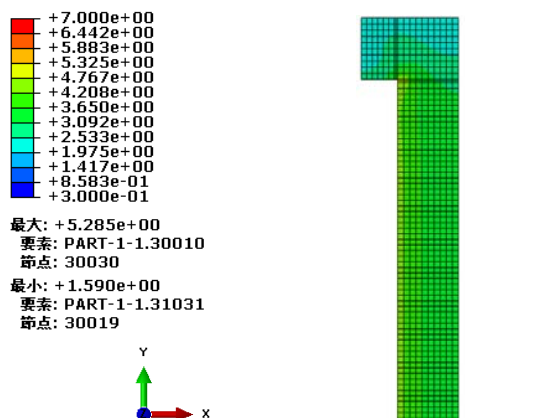


(a) 最大有効主応力分布 [MPa]

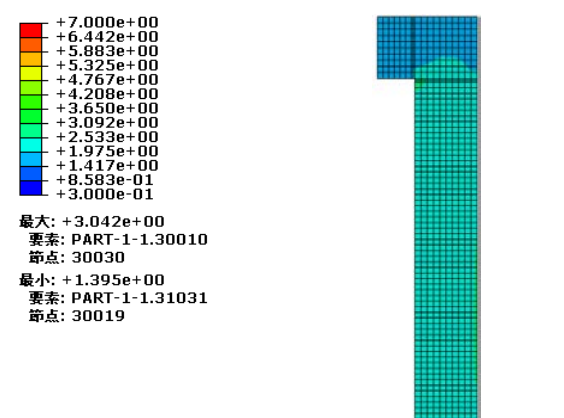


(b) 最小有効主応力分布 [MPa]

付図 2-5 緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布 (No. 5, 5 万年後)



(a) 最大有効主応力分布 [MPa]

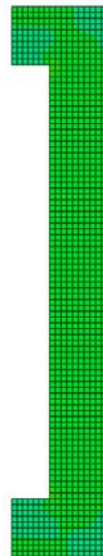
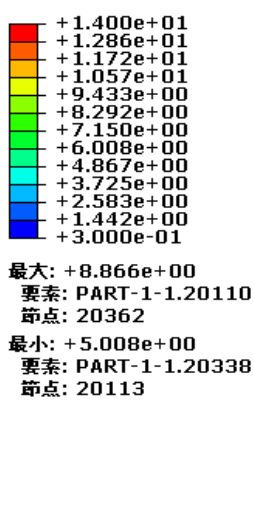


(b) 最小有効主応力分布 [MPa]

付図 2-6 緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布 (No. 6, 5 万年後)

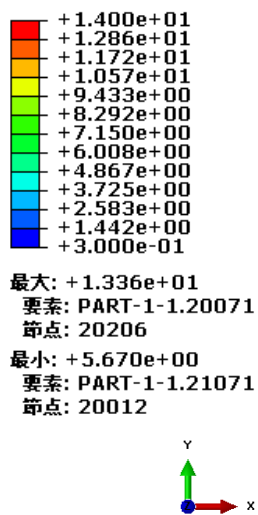


(a) 最大有効主応力分布 [MPa]

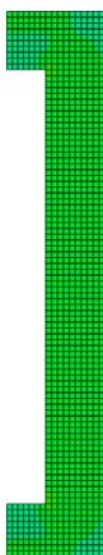
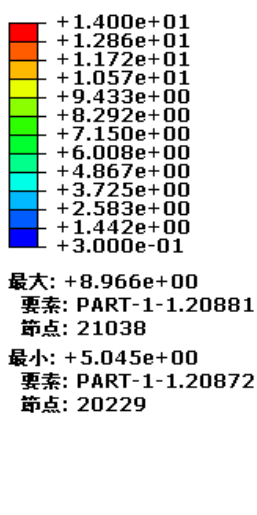


(b) 最小有効主応力分布 [MPa]

付図 2-7 緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布 (No. 7, 1,000 年後)

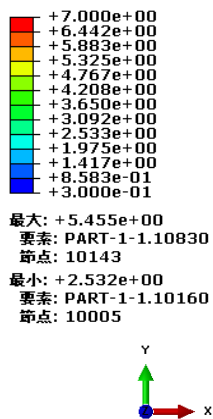


(a) 最大有効主応力分布 [MPa]

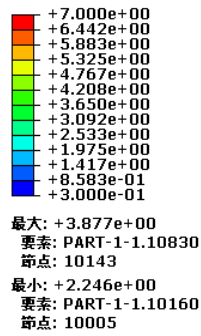


(b) 最小有効主応力分布 [MPa]

付図 2-8 緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布 (No. 8, 1,000 年後)

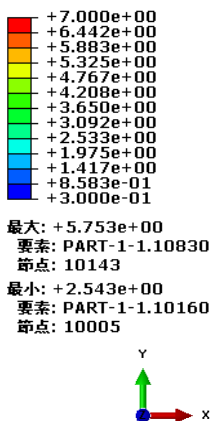


(a) 最大有効主応力分布 [MPa]

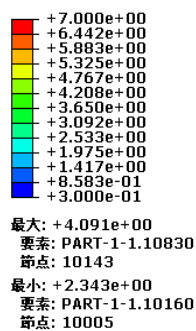


(b) 最小有効主応力分布 [MPa]

付図 2-9 緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布 (No. 9, 1,000 年後)

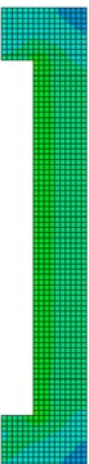
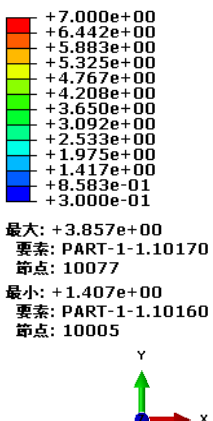


(a) 最大有効主応力分布 [MPa]

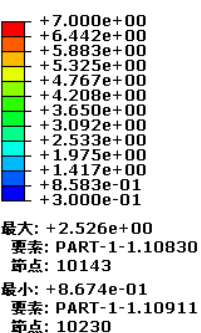


(b) 最小有効主応力分布 [MPa]

付図 2-10 緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布 (No. 10, 1,000 年後)

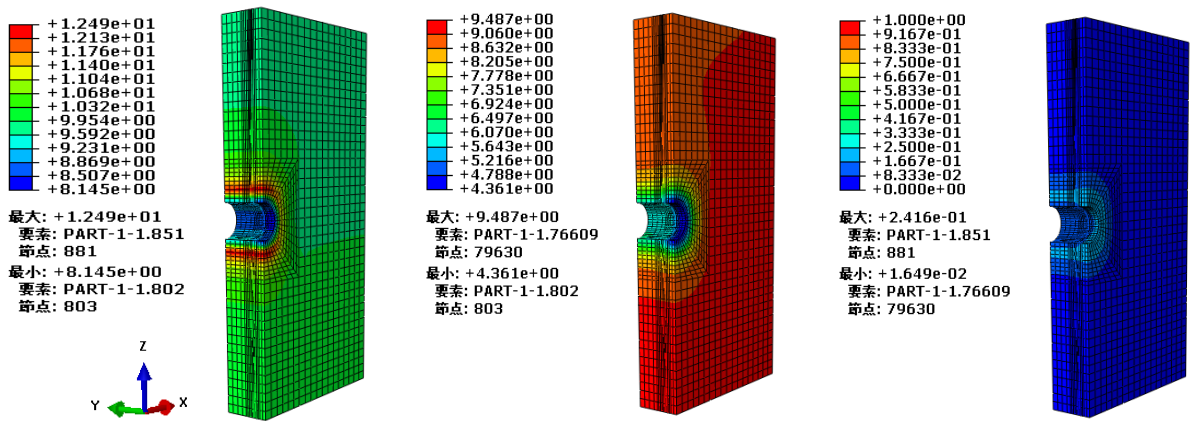


(a) 最大有効主応力分布 [MPa]



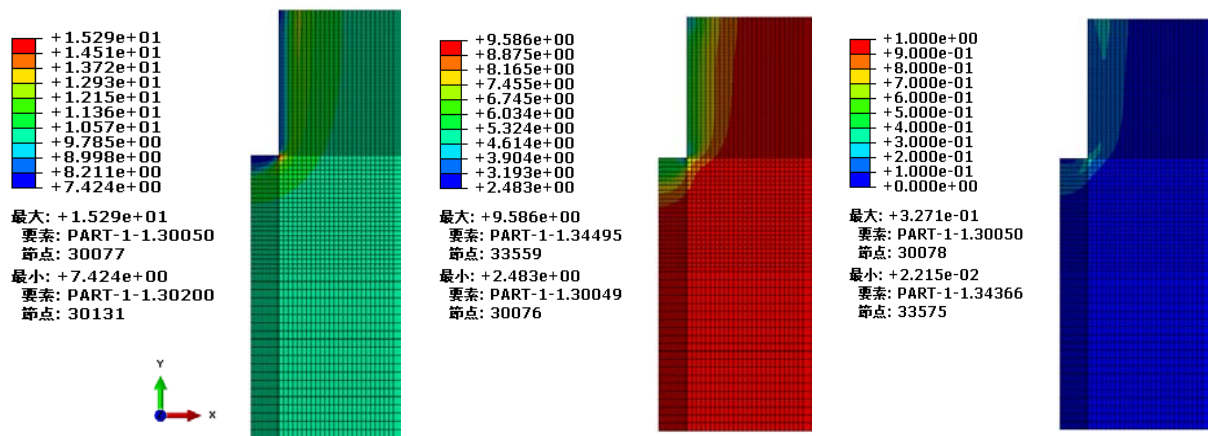
(b) 最小有効主応力分布 [MPa]

付図 2-11 緩衝材の最大有効主応力分布および最小有効主応力分布 (No. 11, 1,000 年後)



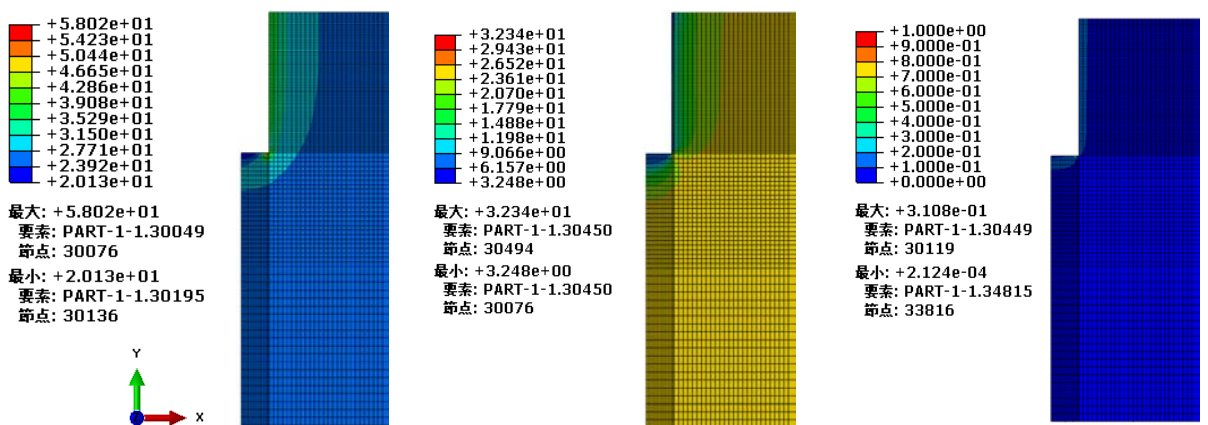
(a) 最大有効主応力分布 [MPa] (b) 最小有効主応力分布 [MPa] (c) 破壊限接近度 [-]

付図 2-12 岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 1, 1 万年後)



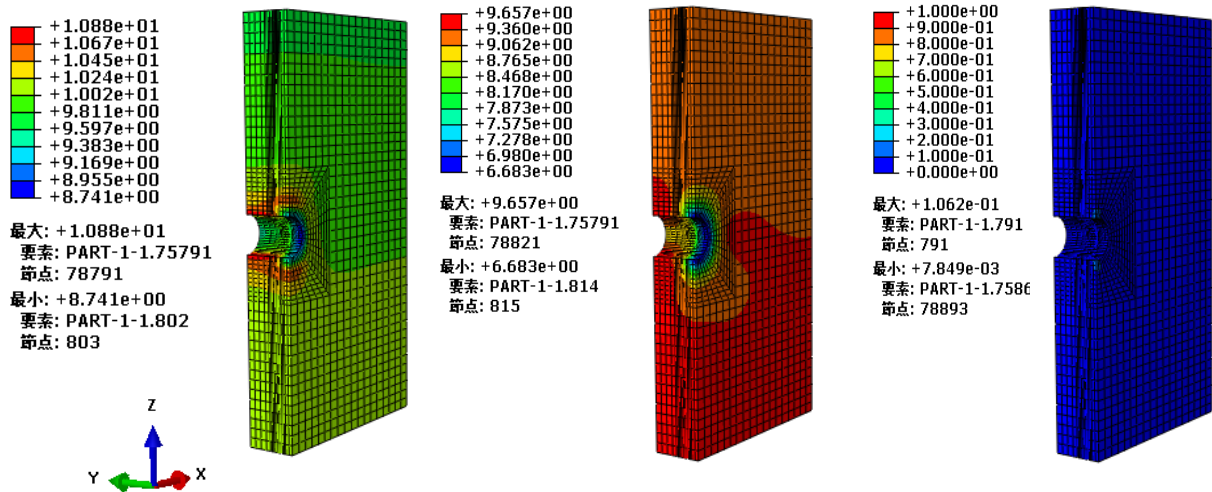
(a) 最大有効主応力分布 [MPa] (b) 最小有効主応力分布 [MPa] (c) 破壊限接近度 [-]

付図 2-13 岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 2, 1 万年後)



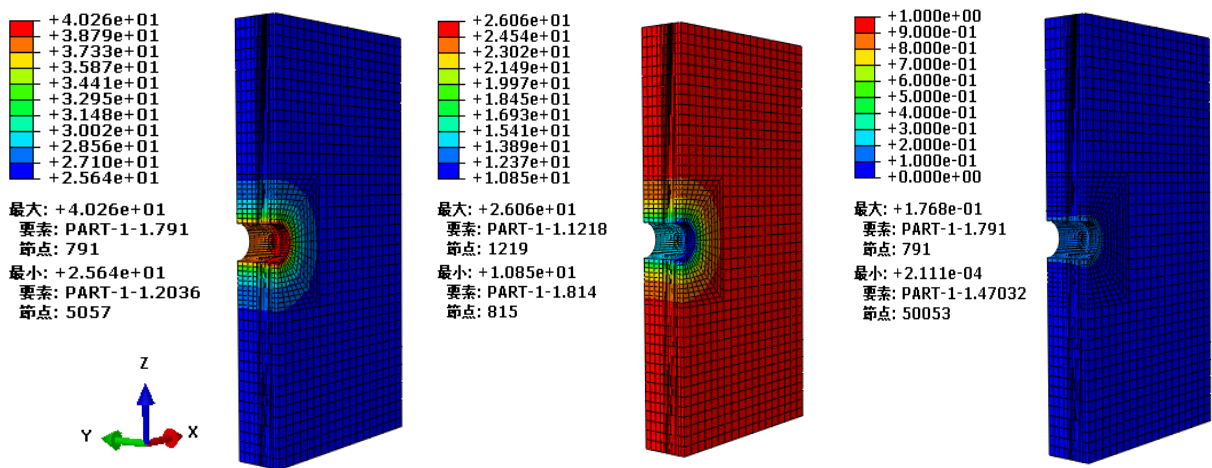
(a) 最大有効主応力分布 [MPa] (b) 最小有効主応力分布 [MPa] (c) 破壊限接近度 [-]

付図 2-14 岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 3, 1 万年後)



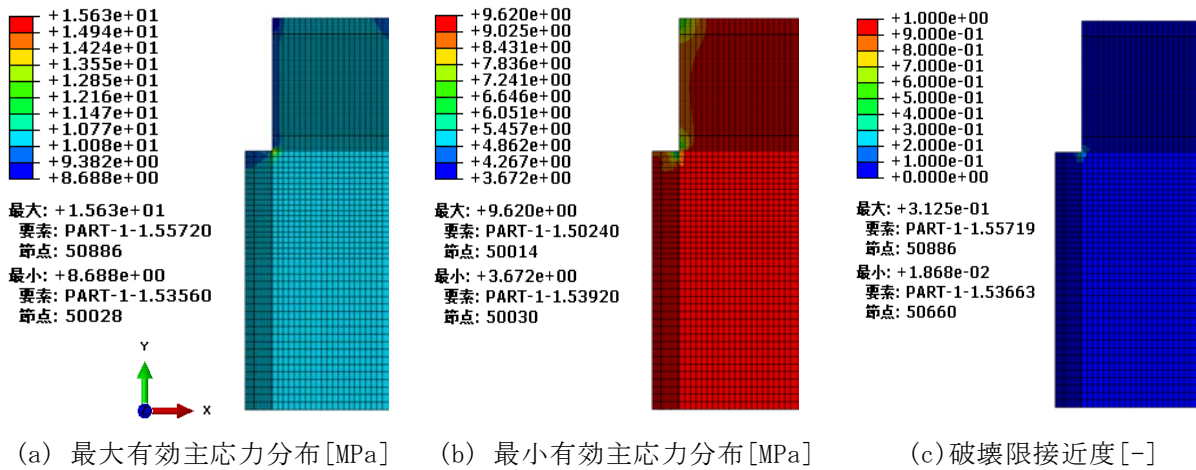
(a) 最大有効主応力分布 [MPa] (b) 最小有効主応力分布 [MPa] (c) 破壊限接近度 [-]

付図 2-15 岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 4, 6 万年後)

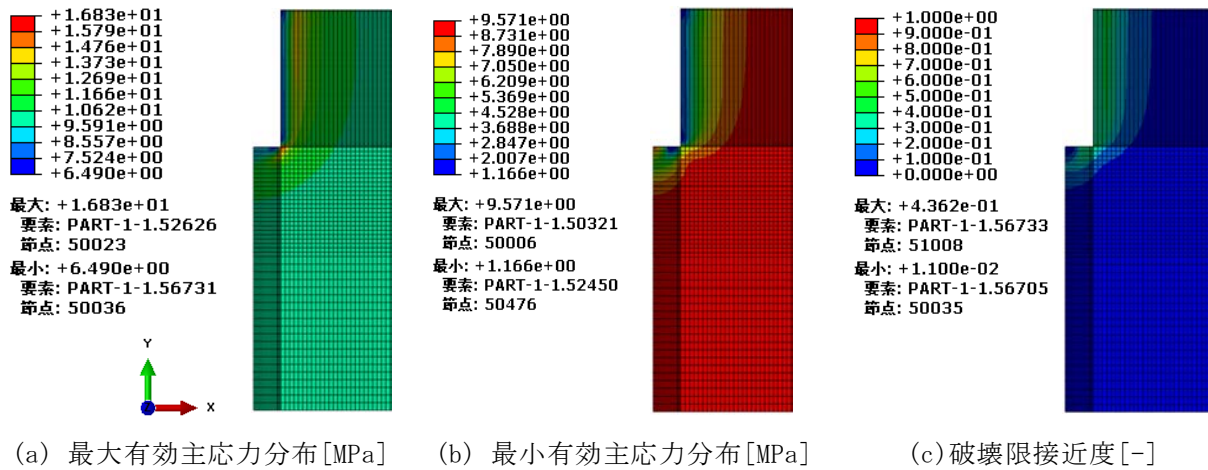


(a) 最大有効主応力分布 [MPa] (b) 最小有効主応力分布 [MPa] (c) 破壊限接近度 [-]

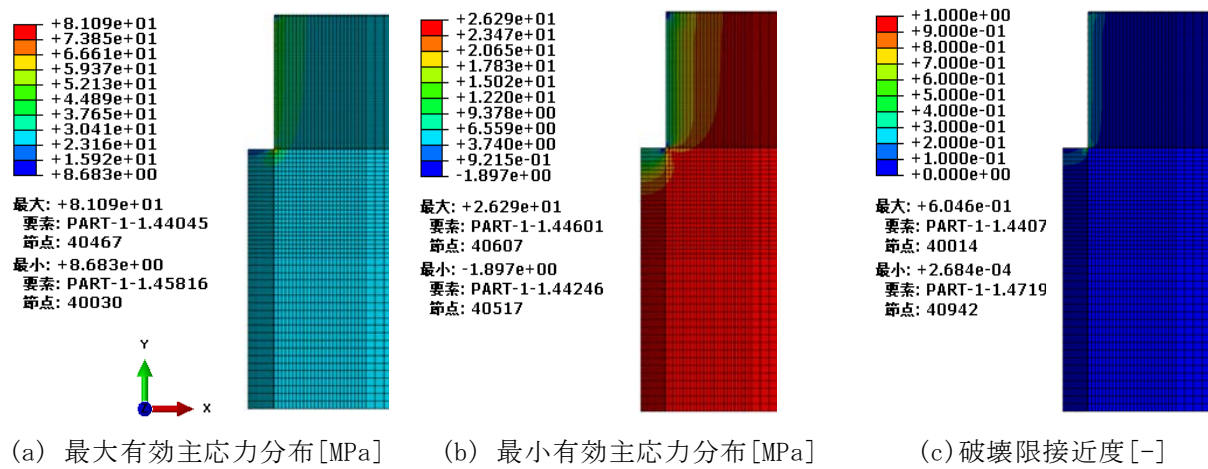
付図 2-16 岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 5, 6 万年後)



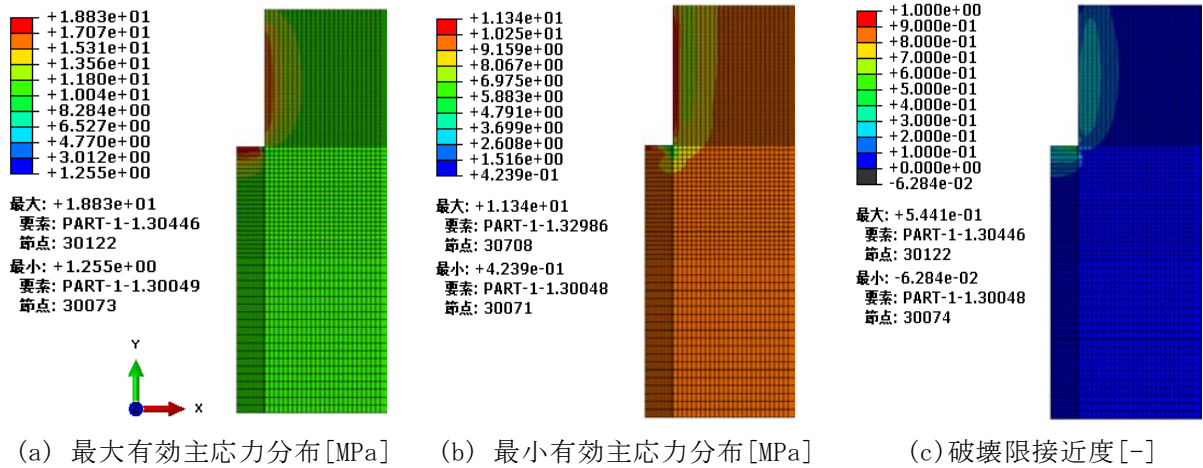
付図 2-17 岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 6, 6 万年後)



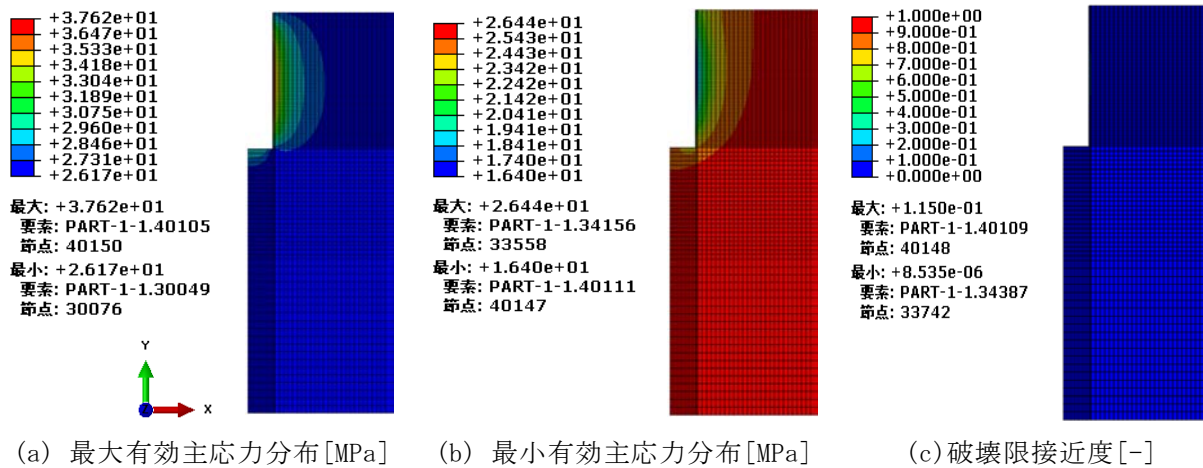
付図 2-18 岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 7, 1 万年後)



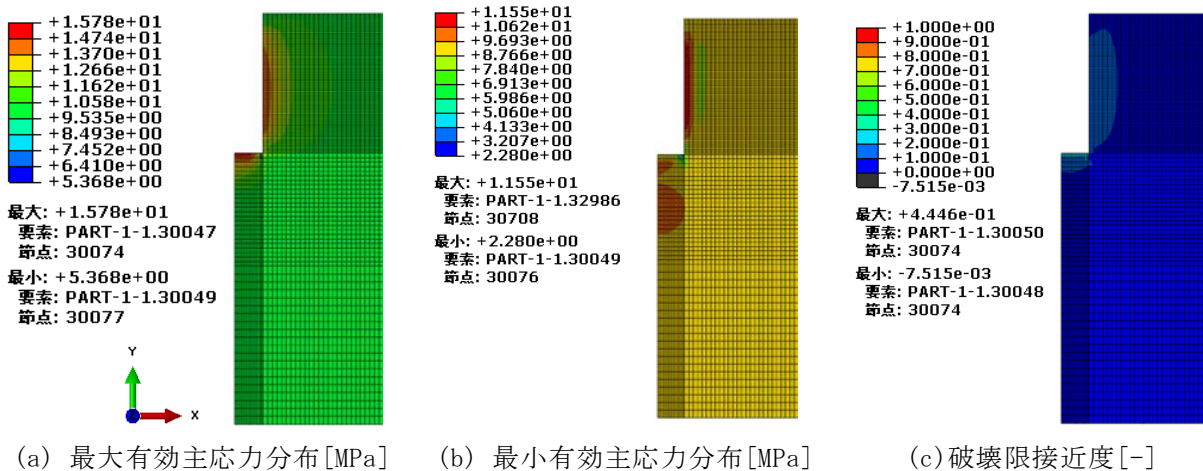
付図 2-19 岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 8, 1,000 年後)



付図 2-20 岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 9, 7,000 年後)



付図 2-21 岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 10, 1 万年後)



付図 2-22 岩盤の最大有効主応力分布、最小有効主応力分布、破壊限接近度 (No. 11, 1 万年後)

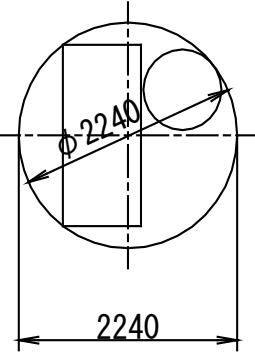
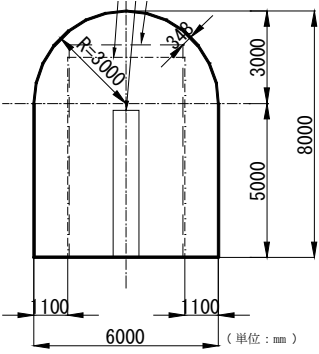
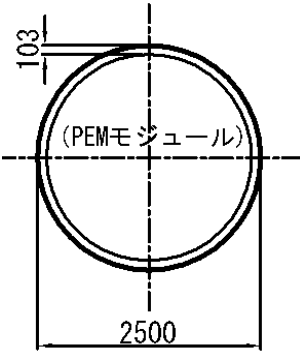
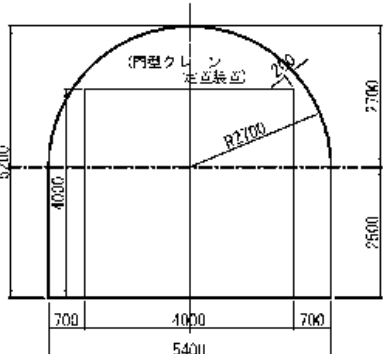
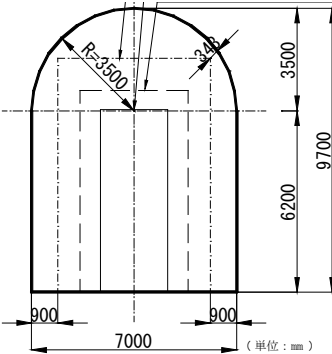
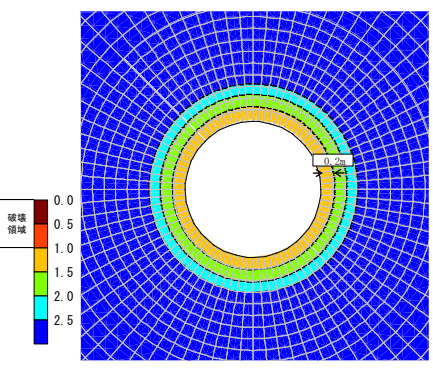
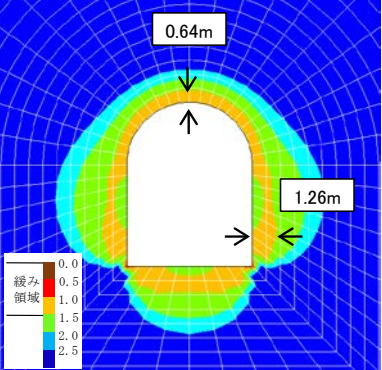
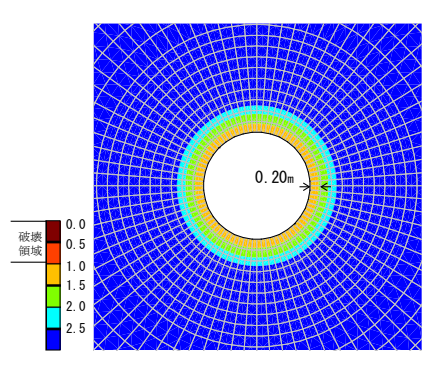
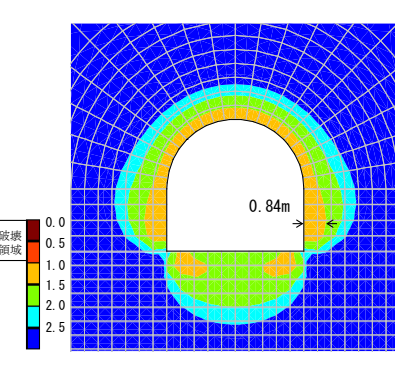
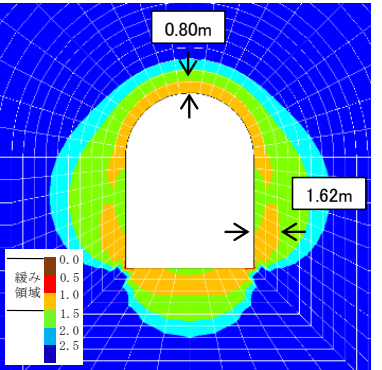
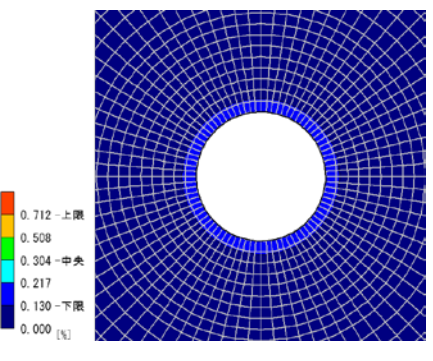
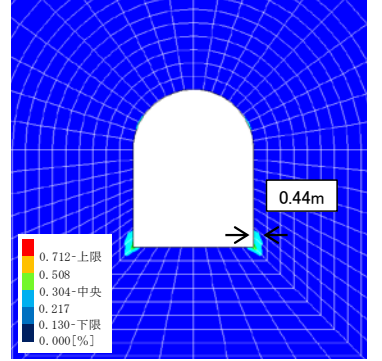
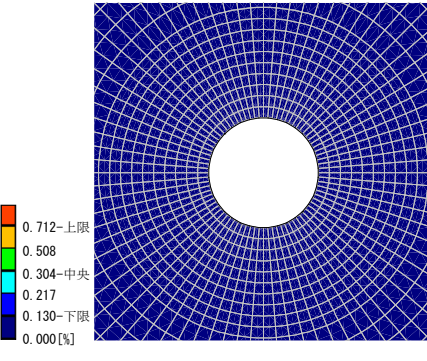
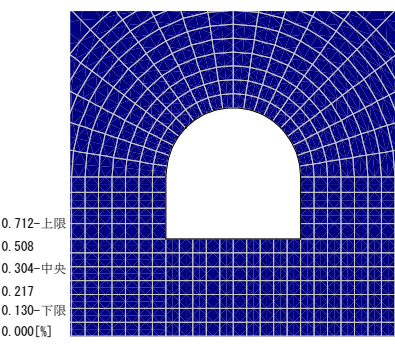
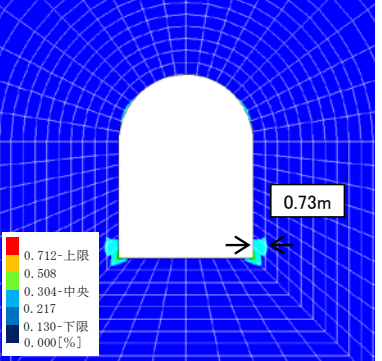
付録 3

空洞の力学的安定性評価結果の補足情報
(本編 3.3 項に付す)

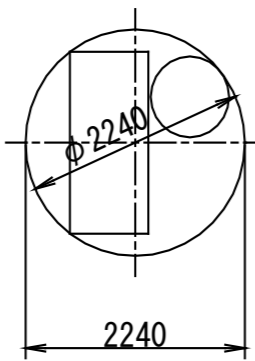
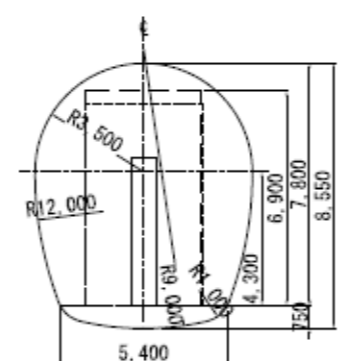
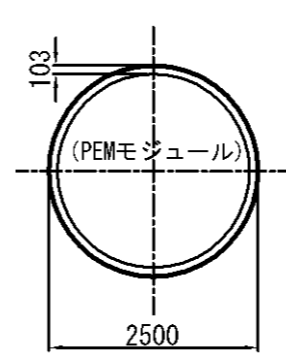
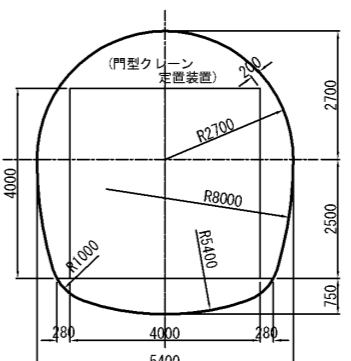
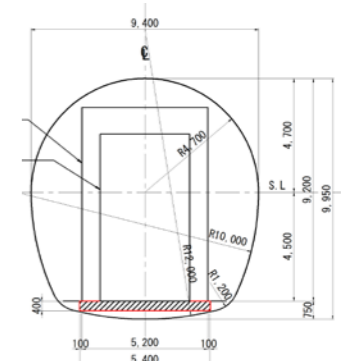
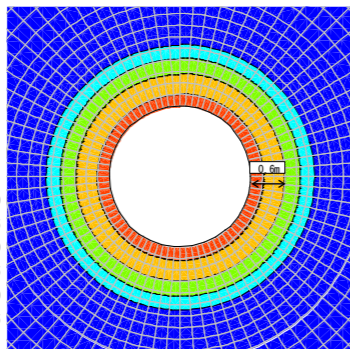
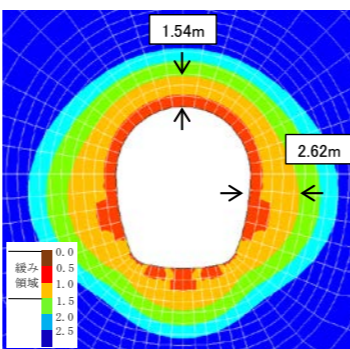
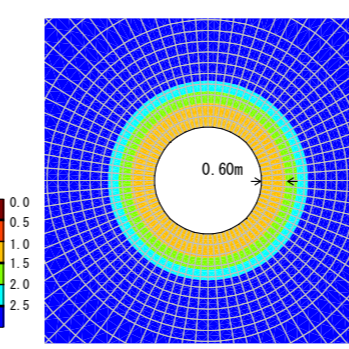
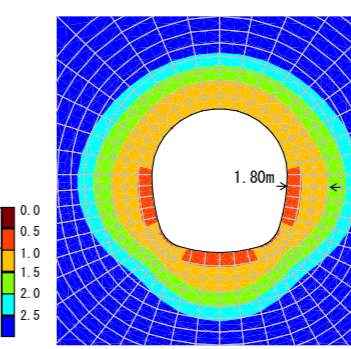
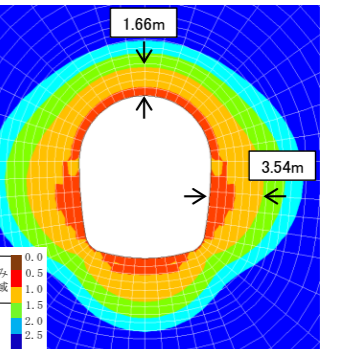
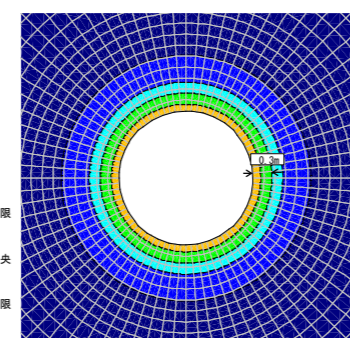
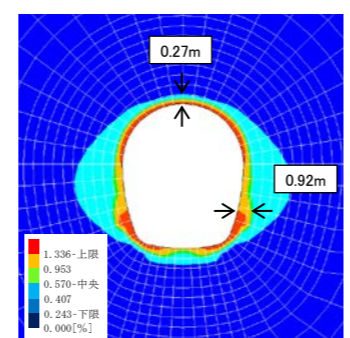
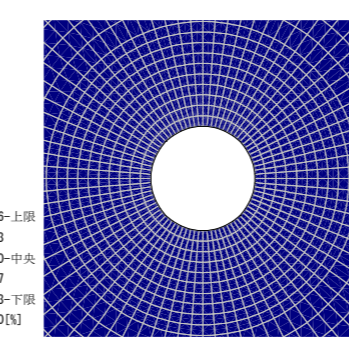
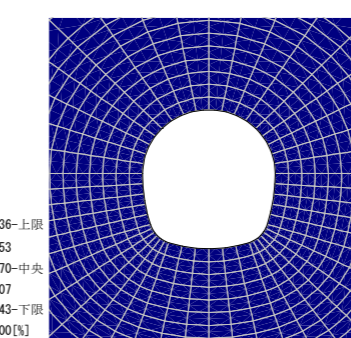
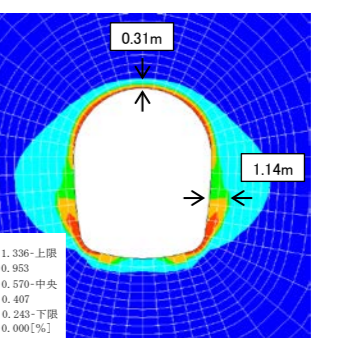
1. 空洞の力学的安定性評価結果

平成 25 年度から平成 27 年度までに、処分坑道を対象とした力学的安定性評価として実施した二次元の数値解析により得られた結果の一覧について、硬岩系地盤について付表 3-1、軟岩形地盤について付表 3-2 に示す。結果一覧には、局所安全率および最大せん断ひずみの分布に加え、その状態における地盤内の最大主応力、坑道の変形量（内空変位量および天端沈下量）について記載した。また、解析の条件となる支保工の仕様（支保工厚さ）と、支保工に発生する軸力および曲げモーメントの最大値について記載した。

付表 3-1 空洞の力学的安定性評価結果一覧表（処分坑道、硬岩系地盤）

坑道の種類	処分坑道				
	ブロック方式		PEM方式		
人工バリアの施工方式	ブロック方式		PEM方式		
廃棄体の定置方式	横置き定置方式	縦置き定置方式	横置き定置方式	横置き定置方式	縦置き定置方式
坑道の形状	円形	馬蹄形	円形	馬蹄形	馬蹄形
概念図					
局所安全率（1.5以下の範囲）	0.2 m	1.3 m	0.2 m	0.8 m	1.6 m
局所安全率分布図					
最大せん断ひずみ（限界せん断ひずみの中央値(γc)以上の範囲）	0 m (γc : 0.304%)	0.4 m (γc : 0.304%)	0.0 m (γc : 0.304%)	0.0 m (γc : 0.304%)	0.7 m (γc : 0.304%)
最大せん断ひずみ分布図					
最大主応力	51.0 MPa	140 MPa	51.3 MPa	61.7 MPa	156 MPa
内空変位量	2.0 mm	3.2 mm	0.8 mm	2.1 mm	3.8 mm
天端沈下量	1.2 mm	1.0 mm	0.4 mm	1.0 mm	1.3 mm
支保工厚さ	100 mm	100 mm	50 mm	100 mm	100 mm
軸力の最大値（奥行 1m 当り）	93.5 kN	420 kN	92.0 kN	335 kN	400 kN
曲げモーメントの最大値（〃）	0.0 kNm	0.7 kNm	0.0 kNm	1.0 kNm	0.5 kNm

付表 3-2 空洞の力学的安定性評価結果一覧表（処分坑道、軟岩系地盤）

坑道の種類	処分坑道				
人工バリアの施工方式	ブロック方式		PEM方式		
廃棄体の定置方式	横置き定置方式	縦置き定置方式	横置き定置方式	横置き定置方式	縦置き定置方式
坑道の形状	円形	多心円形	円形	多心円形	多心円形
概念図					
局所安全率（1.5以下の範囲）	0.6 m	2.6 m	0.6 m	1.8 m	3.5 m
局所安全率分布図					
最大せん断ひずみ（限界せん断ひずみの中央値(γc)以上の範囲）	0.3 m (γc : 0.570%)	0.9 m (γc : 0.570%)	0.0 m (γc : 0.570%)	0.0 m (γc : 0.570%)	1.1 m (γc : 0.570%)
最大せん断ひずみ分布図					
最大主応力	18.5 MPa	23.2 MPa	13.8 MPa	20.8 MPa	23.9 MPa
内空変位量	4.6 mm	17.8 mm	5.4 mm	18.7 mm	20.0 mm
天端沈下量	2.5 mm	8.7 mm	2.7 mm	5.9 mm	9.5 mm
支保工厚さ	300 mm	300 mm	100 mm	300 mm	500 mm
軸力の最大値（奥行 1m 当り）	1,162 kN	4,410 kN	1,174 kN	3,605 kN	6,329 kN
曲げモーメントの最大値（〃）	0.0 kNm	119 kNm	0.0 kNm	68 kNm	387 kNm

