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

沿岸部処分システム高度化開発

平成27年度~平成30年度 取りまとめ報告書

平成 31 年 3 月

国立研究開発法人産業技術総合研究所

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター 一般財団法人電力中央研究所

1. はじめに	
2. 本事業における設定課題と全体実施概要	
2.1 本事業における設定課題と実施体制	
2.2 本事業における研究開発の実施概要	5
3. 沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発	
3.1 地質環境の調査技術分野の課題設定	
3.2 沿岸部の自然現象に関する研究	11
3.2.1 はじめに	11
3.2.2 沿岸部における隆起・侵食に関する検討	11
3.2.3 沿岸部における断層運動に関する検討	
3.2.4 沿岸部における火成活動に関する検討	
3.3 沿岸部の地下水長期安定性に関する研究	69
3.3.1 はじめに	69
3.3.2 地下水長期安定性評価技術	
3.3.3 地下水環境関係の調査法	
3.4 沿岸部の地質環境の情報整備	100
3.4.1 背景と目的	100
3.4.2 沿岸部の地質環境情報の整理・管理システムの構築	101
3.4.3 沿岸部地下水に係わる文献の整理	
3.5 四者共研としての成果と課題	
3.5.1 沿岸部の自然現象に関する研究	
3.5.2 沿岸部の地下水長期安定性に関する研究	
3.5.3 沿岸部の地質環境の情報整備	
4. 沿岸部における工学技術の高度化開発	
4.1 工学技術分野の課題設定	
4.2 人工バリア材料等に関する劣化や変質に関する現象の把握(各種特性	等のデータ拡充)
4.2.1 オーバーパック	
4.2.2 緩衝材	
4.2.3 セメント系材料	
4.2.4 ニアフィールド複合現象評価手法の開発	195
4.3 塩水環境下ニアフィールド領域での処分システムの成立性に係る手法の)提示204
4.3.1 グラウト設計及び影響評価技術の開発	
4.3.2 ニアフィールド領域での処分システム構成材料の成立性と品質確保	:の方法の提示.219
4.3.3 処分システムの成立性に係る手法に基づく知見の体系化に向けた試	行232
5. 沿岸部における安全評価技術の高度化開発	
5.1 安全評価技術分野の課題設定	
5.2 評価の枠組みの整備	
5.3 核種移行モデル・パラメータ整備及び影響評価	
5.3.1 沿岸部の特徴を考慮した核種移行評価手法の整備	
5.3.2 沿岸部の特徴を考慮した核種移行モデル・パラメータ整備	

5.3.3 沿岸部の特徴を考慮したコロイド・有機物・微生物の影響評価	
6. 技術や知見の体系化に向けた分野間連携のあり方	
6.1 分野間連携に関する考え方	
6.2 各技術分野が期待する他分野との連携	
6.2.1 地質環境調査技術分野が期待する分野間連携	
6.2.2 工学技術分野が期待する分野間連携	
6.2.3 安全評価技術分野が期待する分野間連携	
7. おわりに	

図目次

义	3.2 - 1	沿岸部の隆起・沈降運動の様式の整理	. 12
义	3.2-2	松田・吉川(2001)と垣見ほか(2003)での構造区分の比較と陸域の隆起・	沈
	降様式	この海域への外挿の可能性	. 13
义	3.2 - 3	海水準変動と段丘の形成の模式図	. 14
义	3.2-4	沿岸部付近の模式的な地形・地質断面	15
义	3.2-5	湧別川並びにそれに続く海底谷沿いの地形・地質断面図	. 16
义	3.2-6	湧別川地域における陸域から沿岸海域への過去10万年間の隆起速度の外挿	. 17
义	3.2-7	北海道北部・天塩川並びにそれに続く海底谷沿いの地形・地質断面図	. 18
义	3.2-8	北海道北部・天塩川地域における陸域から沿岸海域への 過去 10 万年間の隆起	逮
	度のタ	▶挿	. 18
义	3.2-9	ーツ瀬川並びにそれに続く海底谷沿いの地形・地質断面図	. 19
义	3.2-10	ーツ瀬川地域における陸域から沿岸海域への過去10万年間の隆起速度の外植	挿
			. 20
义	3.2-11	事例研究調査位置図(宮崎平野とその沿岸海域)	. 22
义	3.2-12	平面近似モデルの概念図	. 23
义	3.2-13	平面近似モデル化の試行(平成 29 年度検討結果)	. 23
义	3.2-14	宮崎層群における走向・傾斜の分布	. 24
义	3.2-15	検討事例範囲のうち海域における海上音波探査記録の再解析による地質平面	义
			. 25
义	3.2-16	沿岸海域の沖積層下の地形・地質図(平成 29 年度検討結果)	. 25
义	3.2 - 17	複数の平面近似モデルによる不確実性の検討	. 27
図	3.2-18	各平面近似モデルから外挿された沿岸海域の隆起・沈降量	. 28
义	3.2-19	河川沿い地質断面図の例示	. 29
义	3.2-20	日本列島の大陸棚外縁と海底谷の分布図	. 31
义	3.2 - 21	日本列島の海底段丘の後面段丘崖基部の深度分布図	. 32
図	3.2-22	深度・面積分布と地形断面との関係	. 33
义	3.2-23	浅海底の数値地形解析に基づく海底段丘判読の例(三陸沿岸)	. 33
义	3.2-24	投影断面図上における海成段丘と浅海底地形の分布例(三陸沖)	. 34
义	3.2 - 25	投影断面図上における海成段丘と浅海底地形の分布例(房総沖)	. 35
図	3.2-26	投影断面図上における海成段丘と浅海底地形の分布例(津軽海峡)	. 35
义	3.2 - 27	一軸圧縮強度と地質係数との関係	. 37
図	3.2-28	圧密過程を組み入れたマップの取り扱い方	. 38
义	3.2-29	沿岸部での堆積による海食崖の後退の差	. 39
义	3.2-30	離水年代を 80 ka (MIS 5a) と仮定した時の ¹⁰ Be 濃度の深度プロファイル	. 52
図	3.2-31	沿岸部における断層の調査・評価の概略的なフロー	. 59
図	3.2-32	マグマや深部流体の存在を示唆する地球科学的情報	. 63
义	3.2-33	沿岸部での自然地震観測による地下構造の推定に関する模式図	. 63
义	3.2-34	(a) 堆積層を考慮しない場合、(b) 堆積層を考慮した場合における震源決定	Ĕの
_	概念図		. 65
図	3.2-35	サロベツ断層帯海域延長部を横切る断面(左図黒線)における(a)初期震渡	記の
	震央分	↑布及び(b)震源再決定後の震源の分布	65

义	3.2 - 36	各深度における P 波速度偏差の分布	66
义	3.2-37	各深度における S 波速度偏差の分布	66
义	3.3-1	沿岸部の地下水長期安定性評価の概念図	. 69
図	3.3-2	地下水年代測定法と各手法の評価時間スケール	. 70
义	3.3-3	沿岸部での地下水分布の概念図	. 73
义	3.3-4	地下水年代測定による流動性評価方法の概念図	. 74
义	3.3-5	ヘキサダイアグラム(赤線は 10 倍)	75
义	3.3-6	水素・酸素同位体比の関係	76
义	3.3-7	¹⁴ C 濃度と Cl ⁻ 濃度の関係及び地下水の区分結果	. 77
义	3.3-8	³⁶ Cl/Cl 濃度と Cl ⁻ 濃度の関係及び地下水の区分結果	. 78
义	3.3-9	⁴ He 濃度と Cl 濃度の関係	. 79
义	3.3-10	¹²⁹ I/ ¹²⁷ IとCl ⁻ 濃度の関係	. 79
义	3.3-11	地下水年代測定による流動性評価方法の適用結果	. 81
义	3.3-12	サロベツ原野の地質環境の概念モデル	. 82
义	3.3 - 13	本事業で収集した地下水の水質組成及び地下水年代の割合(円グラフの単位	
	は%)		. 83
図	3.3 - 14	DD-1 孔の間隙水圧の測定結果	. 84
义	3.3-15	DD-1 孔の地質及び穿孔及びダブルパッカーによって得られた地下水水質のシ	/
	ュティ	ィッフダイヤグラム	. 86
义	3.3-16	DD-1 孔と DD-4 孔から揚水された地下水の水質	. 87
义	3.3 - 17	水素・酸素同位体比の関係	. 87
义	3.3-18	Cl 濃度と ³⁶ Cl/Cl の深度方向分布	. 88
义	3.3-19	⁴ He 濃度と ³ He/ ⁴ He の深度方向分布	. 89
义	3.3-20	地上と原位置のモニタリング結果の一例	. 90
义	3.3 - 21	開発した原位置採水装置の概要	. 91
义	3.3-22	プッシュプル試験のイメージ	. 93
义	3.3-23	沿岸陸域・海域調査における海底地下水湧出探査の位置づけ	. 96
义	3.3-24	AUV による海底地下水湧出の設定航路の例(産業技術総合研究所ほか, 2016	;)
			. 97
図	3.4-1		101
凶	3.4-2	ES カテコリとダスクラロー(隆起・侵食の「予祭的 ES」及び「計画・手法	104
5.0	ES])		104
図	3.4-3	隆起・侵食における ES カテコリと新規ダスクの連携」	105
図	3.4-4	形態素解析・時糸列分析の流れ」	108
図	3.4-5	形態素解析システム処理フローナャート	111
凶	3.4-6	発行年別又歐致	112
図	3.4-7	属性キーリード別出現数	113
凶	3.4-8	地域関連人	113
凶	3.4-9	地形界2階層キーワード別出現数	114
凶	3.4-10	局頻度キーリード 年度別出現数	115
凶	3.4-11	地盤調査弟2階層キーリード別出現数	116
凶	3.4-12	地盤調査関連文献 発行年別出現数	116
义	3.4 - 13	高頻度キーワード 年度別出現数1	117

义	3.4-14	地盤調査第2階層キーワード別出現数	118
义	3.4-15	地盤調査関連文献 発行年別出現数	118
义	3.4-16	高頻度キーワード 年度別出現数	119
义	$3.4 \cdot 17$	災害第3階層キーワード別出現数	. 120
义	3.4-18	災害関連文献 発行年別出現数	. 120
义	3.4-19	高頻度キーワード 年度別出現数	. 121
义	3.4-20	災害関連文献 都道府県別出現数	. 122
义	3.4-21	地域別出現数	. 122
义	3.4-22	地下水第2階層キーワード別出現数	. 123
义	3.4-23	地下水関連文献 発行年別出現数	. 123
义	3.4-24	高頻度キーワード 年度別出現数	. 124
义	3.4-25	地下水関連文献 都道府県別出現数	. 125
义	3.4-26	地域別出現数	. 125
义	4.2-1	試験などに関する全体計画	. 137
义	4.2-2	樹脂埋めした試験片の写真	. 138
义	4.2-3	試験カラムの模式図	. 138
义	4.2-4	試験セルの模式図	. 139
义	4.2-5	人工海水中での分極測定結果	. 140
义	4.2-6	人工海水 10 倍希釈溶液中での分極測定結果	. 140
义	4.2-7	試験カラムの模式図	. 142
义	4.2-8	平均腐食速度の経時変化	. 143
义	4.2-9	平均腐食量の経時変化	. 143
义	4.2-10	水素抽出曲線の一例	. 143
义	4.2-11	SSRT 試験片の形状・寸法	. 144
义	4.2-12	緩衝材共存下での SSRT 試験用カラムの模式図	. 145
义	4.2-13	人工海水中における応力・歪み線図(左:人工海水単独、右:緩衝材共存)	. 146
义	4.2 - 14	最大応力比の電位依存性(左:溶液単独、右:緩衝材共存)	. 146
义	4.2 - 15	伸び比の電位依存性(左:溶液単独、右:緩衝材共存)	. 147
义	4.2-16	絞り比の電位依存性(左:溶液単独、右:緩衝材共存)	. 147
义	4.2 - 17	試験後試験片の SEM 観察結果例	. 148
义	4.2-18	従来材(上)と改良材(下)の溶接試験体の外観と断面マクロ観察	. 151
义	4.2 - 19	溶接試験体からの試験片採取位置	. 151
义	4.2-20	定電位分極試験用試験片	. 152
义	4.2-21	定電位保持試験装置外観写真	. 153
义	4.2-22	腐食形態と水質の関係	. 154
义	4.2-23	腐食電位と溶液組成の関係	. 154
义	4.2-24	溶液組成による溶接部の選択的な腐食の度合い (◦:従来材、●:改良材)	. 155
义	4.2-25	Grooving factor と水質の関係	. 156
义	4.2-26	Grooving factor α と溶液組成の関係	. 157
义	4.2-27	有効応力経路	. 161
义	4.2-28	応力-ひずみ関係	. 162
义	4.2-29	パラメータの設定フロー	. 162
义	4.2-30	膨潤指数と当量イオン濃度関係	. 163

図	4.2-31	飽和フロントの経時変化(一次元浸潤試験)	166
义	4.2-32	乾燥密度の経時変化(直列膨潤試験)	167
义	4.2-33	流速 0.01 ml/min での流出試験の状況(通水開始 960 min 後)	168
义	4.2-34	一次元浸潤速度及び透水係数取得試験の概要	169
义	4.2-35	一次元浸潤試験で得られた透水係数の経時変化	170
义	4.2-36	二次元土槽試験による浸潤・膨潤挙動に関する試験	171
义	4.2-37	直列膨潤量試験の膨潤圧と乾燥密度の経時変化	172
义	4.2-38	直列膨潤量試験結果による残留密度差	173
义	4.2-39	人工海水と 1/2 人工海水で作製したベントナイトスラリーの e-logp 関係	174
义	4.2-40	MgCl ₂ 水溶液を 100 mL/min 通水した時の供試体表面状況(ブロック)	175
义	4.2-41	MgCl2水溶液を 100 mL/min 通水した時の供試体表面状況	175
义	4.2-42	KCl 水溶液を通水して 24 時間後の供試体表面状況(ブロック)	175
义	4.2-43	人工海水を通水して 240 分後の供試体表面状況(ブロック)	176
义	4.2-44	緩衝材流出量と通水量の関係(ブロック供試体での試験、通水量 100	
	mL/n	nin)	177
义	4.2-45	陽イオン交換分配係数のイオン強度依存性	177
义	4.2-46	OPC(左図)及びHFSC(右図)硬化体粉砕物浸漬実験の液相のpH	182
义	4.2-47	OPC(左図)及び HFSC(右図)硬化体粉砕物浸漬実験の液相の pH	183
义	4.2-48	浸漬試験体の浸漬方法	186
义	4.2-49	セメント系材料の化学変質挙動に関する模式図(OPC 系材料)	188
义	4.2-50	セメント系材料の化学変質挙動に関する模式図(混合セメント系材料)	189
义	4.2-51	接液面からの距離と Ca、Cl の濃度及びビッカース硬度の関係の例	190
义	4.2-52	空隙率とビッカース硬度の関係	190
义	4.2-53	セメント硬化体中での物質移動と相平衡の概念図	191
义	4.2-54	Cl·の浸透解析結果の例(OPC コンクリート、人工海水浸漬)	192
义	4.2-55	鉄筋腐食限界になる深さと経過時間の関係の例(OPC コンクリート)	192
义	4.2-56	海水系地下水を想定した場合のニアフィールドの概念モデルの例	198
义	4.2-57	TRU 廃棄物処分における人工バリアシステムを対象とする化学-物質輸送解	析結
	果の依	列(支保における地下水の移流を考慮した場合の 10 万年後の鉱物の組成分布	`
			199
义	4.2-58	ニアフィールドの地質環境が沿岸域から陸域へ変遷する場合において緩衝権	才の
	安全桥	幾能が失われる状況に至る状態変遷のストーリーボードによる整理の例	201
义	4.2-59	処分後10万年後に沿岸域から陸域へ処分場の環境が変遷する場合の	202
义	4.3-1	工学技術の枠内で扱われる処分システムの成立性	204
义	4.3-2	地層処分事業を想定した許容湧水量の目安及びグラウト技術の検討例	206
义	4.3-3	3種類の溶液型グラウトの配合の考え方	207
义	4.3-4	ホモゲルの円筒供試体(左)及び一軸圧縮試験(中・右)の状況	207
义	4.3-5	ベーンせん断試験の状況(上:試験器、下左:供試体、下右:試験状況)	208
凶	4.3-6	海水適応グラウトの一軸圧縮強度の変化	210
义	4.3-7	海水硬化促進グラウトの一軸圧縮強度の変化	210
义	4.3-8	海水適応グラウトのシリカの溶出量の変化	211
义	4.3-9	海水硬化促進グラウトのシリカの溶出量の変化	211
义	4.3-10	注入時間に対する粘性及び浸透距離の関係	214

义	4.3-11	浸透性確認試験の結果の一例	215
义	4.3-12	処分システムの成立性に係わる手法の提示に向けた検討作業の全体像	219
义	4.3-13	想定されるニアフィールド領域の構成要素例	220
义	4.3-14	わが国の緩衝材設計に関する性能要件から設計仕様の連関イメージ	221
义	4.3-15	解析メッシュ図(左:全体図、右:キャップロック近傍拡大図)	223
义	4.3-16	塩分濃度分布(初期条件)	224
义	4.3-17	施設湧水量(m ³ /年)	224
义	4.3-18	処分坑道断面図	225
义	4.3-19	各スケールの水理地質構造モデル(鳥瞰図)	226
义	4.3-20	解析メッシュ図(掘削後及び定置・埋め戻し後、H30年度基本ケース)	228
义	4.3 - 21	掘削・埋め戻し(定置)に伴う処分坑道・処分孔の湧水量の経時変化	228
义	4.3-22	エキスパートジャッジの検討の流れ	232
义	4.3 - 23	設計要件に対する設計仕様の成立範囲	233
义	4.3-24	処分坑道周辺の解析メッシュ(掘削後及び定置・埋め戻し後、NF スケール	モ
	デル)		234
义	4.3 - 25	緩衝材流出試験結果(包括的技術報告書レビュー版(原子力機構,2018)).	235
义	4.3-26	各処分孔における緩衝材流出量と許容値との比較 まとめ	236
义	$5.1 \cdot 1$	「沿岸部における安全評価技術の高度化開発」での実施項目と「沿岸海底下	等に
	おける	地層処分技術的課題に関する研究会とりまとめ」での重点項目との関係	239
义	$5.2 \cdot 1$	沿岸部固有の特徴等を踏まえた核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの概略	的な
	枠組み	・(産業技術総合研究所ほか,2017)	242
义	5.2-2	性能評価の観点からの分野間の連携の手法・手順の概念	244
义	5.2 - 3	性能評価における入力-モデル-出力の関係のイメージ	245
义	$5.3 \cdot 1$	広域スケールの地形を考慮した鉛直二次元の地形モデル概念図	252
义	5.3-2	マトリクス部での拡散により塩分を留める効果が亀裂内の塩水と淡水の	252
义	5.3 - 3	処分場周辺の地下水流速と塩分濃度比の経時変化パターンの例	253
义	5.3-4	HydroGeoSphere を用いた亀裂とマトリクス部の二重空隙モデルの概念図	255
义	5.3 - 5	下流側境界における塩分濃度比と物質濃度比 C/Coの時間変化	255
义	6.1-1	調査・操業・閉鎖に至る段階的な事業展開における主要なステップ	282
义	6.1 - 2	国際機関が提案するセーフティケースの構造とコンテンツ体系	283
义	6.2 - 1	沿岸部における処分システムの成立性の例示における知見やデータの連係フ	п —
			286

表目次

表	2.1 - 1	沿岸部研究会で示された地質環境調査・評価技術に係る高度化の方向性	3
表	2.1-2	沿岸部研究会で示された工学的対策技術に係る高度化の方向性	4
表	2.1 - 3	沿岸部研究会で示された安全評価技術に係る高度化の方向性	5
表	3.2 - 1	海食崖の後退速度と P 波速度及び一軸圧縮強度の関係	39
表	3.2-2	海成堆積物の指標及び調査・分析手法	53
表	3.2-3	珪藻及び CNS 分析結果	54
表	3.3-1	水ガス比の比較	91
表	3.3-2	浜里 DD-1 孔、DD-4 孔で得られた pH、Eh の実測値と計算値の一覧	92
表	3.4-1	一元管理方式の主要項目の比較	102
表	3.4-2	ISIS と Geolis を連携させた場合の管理方策の有効性評価	102
表	3.4-3	ISIS と Geolis を連携させた場合の管理方策の有効性評価(その2)	103
表	3.4-4	研究結果の調査で実施した分類の定義	103
表	3.4-5	整理票の項目	104
表	3.4-6	ES カテゴリの整理票の例(隆起・侵食)	105
表	3.4-7	キーワード・トピック数	109
表	3.4-8	キーワード階層例	109
表	3.4-9	地盤調查手法 地域別出現数	128
表	3.4-10	地盤調査手法 地域別出現数(続き)	129
表	3.4-11	地盤調查手法 地形、地質、環境別出現数	130
表	3.4-12	地盤調査手法 エネルギー、災害、地下水、地質年代別出現数	131
表	4.2-1	分極曲線から Tafel 外挿法で推定した初期腐食速度(単位:mm/y)	141
表	4.2-2	応力腐食割れ試験条件	146
表	4.2-3	腐食試験の溶液条件(単位:mV _{SCE})	150
表	4.2-4	改良材の化学成分の分析結果(wt%)	152
表	4.2-5	人工海水の組成	161
表	4.2-6	設定された修正 Cam-clay モデルのパラメータ	163
表	4.2-7	沿岸部特有の条件を念頭にした場合に拡充すべき知見やデータ	165
表	4.2-8	浸潤速度測定試験結果のまとめ	170
表	4.2-9	塩水環境下におけるセメント系材料の機械的強度変化に関する検討の実施工	程
			184
表	4.2-10	浸漬試験体の条件	185
表	4.2-11	浸漬試験条件	186
表	4.2 - 12	ベントナイト系材料において想定される変質現象と安全機能への影響(産業	業技
	術総合	合研究所他, 2017)	197
表	4.2-13	セメント系材料において想定される変質現象と安全機能への影響(産業技行	術総
	合研究	宅所他, 2017)	197
表	4.3-1	海水適応グラウトに関する試験で得られた知見のまとめ	208
表	4.3-2	海水硬化促進グラウトの2種類の基本配合	209
表	4.3-3	海水硬化促進グラウトに関する試験で得られた知見のまとめ	209
表	4.3-4	長期力学的安定性確認試験で得られた知見のまとめ	210
表	4.3-5	長期化学的安定性確認試験で得られた知見のまとめ	212

表	4.3-6	平行平板装置を用いた浸透試験で得られた知見のまとめ	216
表	4.3-7	北欧の専門家による当研究成果のレビューの結果	216
表	4.3-8	解析ケース一覧	223
表	4.3-9	水理地質構造モデルの SDM モデルからの修正点	226
表	4.3-10	解析物性值	227
表	4.3-11	検討項目及び内容	229
表	4.3-12	各ケースの水理解析条件	235
表	5.2 - 1	性能評価において普遍的に重要性が高い情報の整理例	243

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物等の地層処分については、平成 27 年 5 月に閣議決定された「特定放射 性廃棄物の最終処分に関する基本方針」において、国は科学的に適性が高いと考えられる地域(好 ましい特性が確認できる可能性が相対的に高い地域)を提示することなどが示された。各地域の 科学的特性については、総合資源エネルギー調査会地層処分技術ワーキンググループ(以下、「地 層処分技術 WG」という。)において専門家による検討が進められ、平成 27 年 12 月に「科学的 有望地の要件・基準に関する地層処分技術 WG における中間整理」(以下、「中間整理」という。) が公表された(地層処分技術 WG, 2015)。中間整理において、「適性の低い地域(好ましくない 特性があると推定される地域)」を除いた上で、廃棄体の輸送時の安全性の観点から、港湾からの 距離が十分短い地域(島嶼部を含む沿岸部)が「より適性の高い地域(好ましい特性が確認でき る可能性が相対的に高く輸送面でも好ましい地域)」と整理された。加えて、沿岸部において期待 される一般的特性や事業を進める上での留意事項が示され、技術的信頼性をさらに向上すべく、 取り組むべき課題を抽出・整理すること、専門家を交えた具体的な検討を進めて行くことが重要 であることなどが示された。

これを受けて、別途設置された「沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会」 (以下、「沿岸部研究会」という。)において議論が進められ、平成28年8月に同研究会による 議論のとりまとめが行われた(沿岸部研究会,2016)。同とりまとめでは、海域を含めた沿岸部に おいて地層処分を実現するために必要な基本的な技術はおおむね整備されていることが示される とともに、"今後、技術の高度化に引き続き取り組むことで、さらに信頼性を高めることが重要で ある"と結論付け、併せて技術の高度化に向けて取り組むべき課題とその方向性が示された。

その後、平成 29 年 4 月に地層処分技術 WG の検討結果が取りまとめられ(地層処分技術 WG, 2017)、沿岸部に関連する事項について、沿岸部研究会の報告(とりまとめ)が妥当であると評価したうえで、以下の考えが示された(以下、原典からの抜粋)。

- ○地質環境の調査・評価技術、工学的対策技術、安全評価技術のいずれについても、今後デー タ等の拡充を行っていく必要はあるが、必要な基本的な技術は概ね整備されていると考えられる
- ○沿岸海底下の場合も含め、段階的な処分地選定調査、工学的対策及び安全評価を適切に行う ことによって、安全に地層処分を行うことは技術的な実現可能性があると考えられる
- ○今後技術の高度化に引き続き取り組むとともにデータ等の拡充に取り組むことで更に信頼性 を高めることが重要であると考えられる"

このような議論を経て、平成 29 年 7 月に「科学的特性マップ」が公表された(資源エネルギ 一庁, 2017)。

以上のような経緯のなかで、平成27年度より、産業技術総合研究所(以下、「産総研」という。)、 日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」という。)、原子力環境整備促進・資金管理センタ ー(以下、「原環センター」という。)、電力中央研究所(以下、「電中研」という。)の四機関が、 資源エネルギー庁から共同で本事業を受託し、初年度には(平成27年度)、沿岸部における処分 システムの構築を念頭に、初年度に沿岸部の特性などに関連したこれまでの地層処分研究開発成 果の再整理を行い、再検討が必要な課題などを抽出・整理するとともに、並行して進められた沿 岸部研究会にこれらの成果を提供して同研究会における議論を支援した(産総研ほか,2016)。平 成28年度からは、上記の沿岸部研究会や地層処分技術WGで示された課題や研究の方向性を踏 まえて、沿岸部における地層処分の観点から新たな研究開発計画を立案し、概要調査段階で必要 となる地質環境の調査・工学・安全評価に関する技術の高度化を目的とした研究開発に取り組む こととした。

本書は、沿岸部処分システム高度化開発として平成27年度から平成30年度までに取り組んだ四ヵ年に及ぶ研究開発成果を、次の構成で取りまとめたものである。

- 第1章 はじめに
- 第2章 本事業における設定課題と全体実施概要
- 第3章 沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発
- 第4章 沿岸部における工学技術の高度化開発
- 第5章 沿岸部における安全評価技術の高度化開発
- 第6章 技術や知見の体系化に向けた分野間連携のあり方
- 第7章 おわりに

上述した本事業の実施に至る背景と目的を踏まえ、2 章に本事業における設定課題と全体実施 概要を整理している。3 章から5 章には、各技術分野において得られた成果を四ヵ年に及ぶ研究 開発事業の全体取りまとめとして要約整理している。さらに6 章では、本事業で特徴的といえる 四つの関係研究機関による三つの主要技術分野の連携協力体制のもとで議論を進めた沿岸部を念 頭に置いた地層処分に関する技術や知見の体系化に向けた分野間連携のあり方について取りまと めている。なお、本書は四ヵ年の研究開発成果を要約的に取りまとめたものであるが、実施内容 や得られた成果の詳細については、事業成果報告書として別途事業年度ごとに整理しているので 参照されたい。

参考文献

沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会、とりまとめ、2016.

産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 27 年度地層処分技術調査等事業(沿岸部処分システム高度化開発)報告書, 2016.

資源エネルギー庁,科学的特性マップ,2017.

- 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 地層処分技術ワーキンググ ループ,科学的有望地の要件・基準に関する地層処分技術 WG における中間整理,2015.
- 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 地層処分技術ワーキンググ ループ, 地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果(地層処分 技術 WG とりまとめ), 2017.

2. 本事業における設定課題と全体実施概要

2.1 本事業における設定課題と実施体制

高レベル放射性廃棄物等の地層処分では、天然の岩盤(天然バリア)と人工的なバリア(人工 バリア)から構築される多重バリアシステムによって長期的な安全確保がなされる。この処分シ ステムの成立性や安全性に係る信頼性を一層高めていくためには、天然バリアと人工バリアの特 性把握と将来にわたる状態や機能の変化に係る調査評価技術の信頼性の向上が重要となる。

特に沿岸部における地層処分においては、内陸部と比べて、塩水の影響や海陸接合部などの沿 岸部固有の環境が想定されることから、地層処分技術の信頼性及び安全性の向上の観点から、沿 岸部固有の環境を考慮した地質環境の調査技術・工学技術・安全評価技術の高度化が必要である。 既に述べたように、沿岸部研究会における議論をとおして、これら三つの技術分野が信頼性向上 に向け取り組むべき課題とその方向性が、表 2.1-1~表 2.1-3 のように示されている(沿岸部研 究会, 2016)。

このような状況を踏まえ、本事業では、我が国における沿岸部固有の環境に留意し、概要調査 段階で必要となる地質環境の調査・工学・安全評価に関する研究開発に取り組むこととした(次 節に各技術分野における設定課題と研究開発の全体実施概要を示す)。加えて、分野横断的な課題 への取組並びに他分野への成果の反映とフィードバックといった分野間連携の促進に向けて、三 つの技術分野のそれぞれで専門性や豊富な研究実績を有する産総研、原子力機構、原環センター 並びに電中研の四機関が協力して、各機関がそれぞれに有している専門的な知識や経験等を効果 的に投入して取り組むこととした。このような実施体制を効果的に運用し、これらの知識や経験 を機関間及び分野間で相互補完的に利用かつ融合することによって、分野ごとの成果の信頼性や 汎用性の向上や沿岸部における地層処分システム全体としての成立性や性能の提示を可能とする だけでなく、事業全体として総合的に高いレベルの成果の創出を図ることとした。

重点項目	高度化の方向性
マグマ・深部流体等の有無	・海域を対象とした現地調査等により、物理探査手法の適用性を評価す
を確認するための調査・評	るとともに、調査事例を蓄積する。
価術の高度化	
隆起・侵食に係る調査・評	・「海成段丘などの有効な指標が発達しない沿岸部陸域」及び「研究事
価技術の高度化	例が少ない沿岸部海域」を対象とした隆起・侵食に係る調査・評価技
	術、及び海水準変動により海底が陸化した際の下刻場所や下刻量を
	予測するための以下の調査・評価技術の適用性を確認し、調査・評価
	事例を蓄積する。
	✔ 内挿・外挿による隆起・侵食の評価技術
	✓ 局所的な堆積物や侵食地形を指標とした隆起・沈降の調査・評価技
	術
	✓ 分布が局所的な段丘、被覆層がほとんど分布しない岩石段丘など
	を対象とした段丘の対比・編年技術
海陸接合部付近の活断層	・海陸接合部付近の海域における断層の分布や連続性等に係る調査事
分布を確認するための調	例を収集・分析することにより、海底地形計測、音波探査、ボーリン
査・評価技術の高度化	グ調査、年代測定等のそれぞれの調査技術の適用性を評価するとと
	もに、調査技術の適切な組み合わせ方を検討する。
沿岸部海域におけるボー	・沿岸部海域における孔口が海底にあるボーリング孔の掘削及びそれ
リング調査技術及び長期	を用いた調査や長期地下水モニタリングの事例の収集・分析により、
地下水モニタリング技術	調査技術の適用性を評価する。
の高度化	

表 2.1-1 沿岸部研究会で示された地質環境調査・評価技術に係る高度化の方向性

重点項目	高度化の方向性
オーバーパックの腐食速 度に係るデータの拡充	 ・溶接部を含め、沿岸部で想定される種々の地下水条件下(※1)で腐 食試験を行うことにより、溶接部を含む腐食データを拡充するととも に、既往の腐食寿命評価や腐食代設定の適用性を確認する。
緩衝材の各種特性に係る データの拡充	 ・沿岸部で想定される種々の地下水条件下(※1)で室内試験を行うことにより、周辺母岩への浸入・浸食及び流出現象、地下水浸潤挙動、膨潤圧、透水・せん断・圧密特性、変質挙動を把握するためのデータを拡充する。
セメント系材料の各種特 性に係るデータの拡充	 ・沿岸部で想定される種々の地下水条件下(※1)でバッチ式浸漬実験や通水実験を行うことにより、特性や変質挙動に係るデータを拡充するとともに、既往の長期的変質挙動評価モデルの適用性の確認や改良を行う。
グラウト材の各種特性に 係るデータの拡充	 ・沿岸部で想定される種々の地下水条件下(※1)に対する溶液型グラウトの設計・施工・長期影響に関するデータを室内試験により取得し、適用性を評価する。
グラウト注入施工方法及 びその長期的耐久性の検 討	 ・グラウト材の即効性や耐久性、ニアフィールドシステムへの影響を考慮したグラウト注入施工方法や注入後長期耐久性に係る検討を実施する。
ニアフィールド領域構成 材料(※2)に係る各種デ ータの拡充に伴う現象モ デルの高度化	 ・沿岸部で想定される種々の地下水条件下(※1)での緩衝材の力学挙動に係るデータを取得するとともに、取得したデータを活用して熱ー水ー応力ー化学(THMC)連成解析モデルの力学的現象に関するモデルの高度化を行う。 ・オーバーパック、緩衝材、セメント系材料の各個別要素に対する海水
	境境トでの長期挙動評価モテル開発・テータ取得等の成果を反映しつ つ、鉄ーベントナイトーセメント系材料の相互作用や複合現象を考慮 した評価手法を構築する。 ・室内試験等を通じてモデルの信頼性を確認する。
処分概念及びそれに必要な総合的評価手法の構築	 ・沿岸海底下の特性を考慮した地下施設の配置、人工バリアの仕様と構成の組み合わせによる種々の処分概念を検討し、その成立条件を確認する。 ✓ニアフィールド領域構成材料(※2)間の相互作用を考慮した室内試験により、人工バリア構成材料の各種特性や挙動に係るデータを拡充する。 ✓ サムレキデータに其べき、以下も考慮可能なニアフィールドシス
	 私兄した)ータに基づき、以下を考慮可能なニアフィールドシス テムの総合的評価手法を構築する。 個々のニアフィールド領域構成材料(※2)が塩水環境下で受 ける影響や、材料間の相互作用 建設から操業段階における塩水系地下水の湧水がニアフィー ルド領域構成材料(※2)に与える影響(特に、緩衝材の流出 挙動に与える影響)
地上・地下施設の総合的な設計の検討	 ・沿岸部の特徴を考慮した上で、制約条件を整理し、それを考慮した地上・地下施設の総合的な設計を行う。また、その結果を踏まえて陸域の場合との共通点や相違点を明確にするとともに、コストへの影響を整理する。 ✓ 島嶼の場合は既存インフラの利用可能性等の観点を考慮する。 ✓ 島嶼の場合は既存インフラの利用可能性等の観点を考慮する。 ✓ 治岸海底下の地下施設へアクセスするための坑道延長が長くなることを考慮し、火災等の異常時対応も含めた換気システム等に係る検討を行う。 ✓ 津波による地下施設の水没を防ぐために、地形条件を考慮した検討を行う
the state and states the factor	

表 2.1-2 沿岸部研究会で示された工学的対策技術に係る高度化の方向性

※1 海水より塩分濃度の高い地下水環境下や、海水より塩分濃度の低い地下水環境下、種々の溶存成分の地下 水環境下等。

※2 人工バリア構成材料、隙間充填材、埋め戻し材、プラグ材、グラウト材、支保材等。

重点項目	高度化の方向性
シナリオ構築手法の高度	・沿岸海底下における塩水環境下や塩淡境界の遷移域における水理場
化	及び化学場(地下水組成、有機物・微生物等)と、その変遷を考慮し
	たシナリオを検討する。
	・地質環境調査・評価技術及び工学的対策技術との連携による、沿岸海
	底下の地質環境特性及びその長期変遷、ニアフィールドの長期挙動に
	係る情報の充実と、シナリオ構築への反映方法を検討する。
核種移行評価モデルの高	・既存モデル化技術及び拡充するデータを用いた沿岸海底下を対象と
度化	する人工バリア/天然バリアの核種移行評価モデル及び生活圏評価
	モデルの、特に以下の観点に留意した適用性確認と改良・高度化、及
	び事例の拡充を行う。
	✔ 天然バリア中の核種移行モードの変遷(例えば、拡散から移流へ)
	✔ 化学場及び水理場の時間的・空間的変遷の考慮
	✔ 核種の流出域の変遷の考慮
種々の地質環境条件下及	・沿岸海底下等で想定される種々の地下水条件下(※)や、有機物・微
び地表環境条件下におけ	生物特性等が異なる地下水条件下での室内試験等によりデータを拡
る核種移行データの拡充	充する。
	・沿岸部で想定される種々の地表環境条件下での試料採取や室内試験
	等によりデータを拡充する。

表 2.1-3 沿岸部研究会で示された安全評価技術に係る高度化の方向性

※ 海水より塩分濃度の高い地下水環境下や、海水より塩分濃度の低い地下水環境下、種々の溶存成分の地下水 環境下等。

2.2 本事業における研究開発の実施概要

本事業における設定課題と課題に対する全体実施概要並びに平成27年度の課題抽出を踏まえて整備した研究計画に沿った平成28年度から平成30年度までの実施経緯について以下に要約 整理する(得られた主要な成果については3章以降に整理している)。

(1) 沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発

1) 沿岸部の自然現象に関する研究

沿岸部における地層処分システムを想定した場合に考慮すべき自然現象(隆起・侵食、断層活動、火成活動)及びこれらを対象とする調査・評価技術について、既存の知見の整理に基づいて 課題を抽出するとともに、それらの解決に必要な調査・評価技術の高度化等を進めた。

① 沿岸部における隆起・侵食に関する検討

海水準変動と地殻変動の両者の影響下にある隆起・侵食等、沿岸部の処分システムの理解に必要な自然現象に関わる研究とそれに必要な要素技術の開発を行う。沿岸部海域における隆起・侵 食の評価手法として、陸域の隆起・侵食の様式の海域への空間的外挿、海底堆積物の分布・層厚 等からの評価が考えられることから、沿岸部の情報の調査・解析等により、我が国の沿岸部の隆 起・侵食、地殻変動様式と評価手法について整理した。また、これらの評価のための要素技術と して、地形変化シミュレーション技術、海成段丘の発達が悪い地域の隆起・侵食量の評価手法、 被覆層を大きく欠く岩石侵食段丘などを対象とした段丘対比・編年手法の高度化に取り組んだ。

平成28年度は、既存の地体構造区分の精査に基づく陸域の隆起・侵食の様式の海域への外挿・ 内挿が可能と考えられる地域と課題がある地域の整理、比較的既存情報が豊富な地域で陸上河川 〜海底谷の地形地質断面図からの隆起・侵食量評価と陸域の隆起傾向の沿岸海域への外挿を試行 した。さらに、隆起・侵食量の評価手法に用いる基礎データとして、大陸棚を中心とした数値地 形解析・地形判読等による地形学的特徴を整理した。また、地形変化シミュレーション技術の高 度化、要素技術開発に適したフィールドを選定するための既存情報の整理等を行った。平成 29 年 度は、研究事例として、平成 28 年度に得た情報に加えて、地形・地質調査等によりデータを拡充 し、地形地質断面図からの隆起・侵食量評価、陸域で構築した隆起・侵食の様式の沿岸海域への 外挿の精度・信頼性の検討、精度向上をはかった。また、引き続き大陸棚を中心とした地形判読 等から沿岸部海域の地形学的特徴を整理した。さらに、平成 28 年度に整理した情報に基づいて 地形・地質調査を実施し、要素技術開発を進めた。平成 30 年度は、平成 29 年度に実施した地形・ 地質調査並びに要素技術開発を継続し、沿岸部における隆起・侵食評価手法、海域の隆起・侵食 評価指標、要素技術開発について、最終年度としての成果取りまとめと課題の整理を行う。

沿岸部における火成活動に関する検討

沿岸部におけるマグマや深部流体等の存否を把握するための手法として、地球物理学的手法の 適用性を検討しつつ、沿岸部における地下深部構造調査技術の高度化を進めた。

平成 29 年度までに、地下深部のマグマや深部流体等に関する既存の調査・研究事例を収集し、 沿岸部における適用性や課題等を整理した。また、ここで抽出された地球物理学的な調査手法に 関する課題について、その改善に向けた検討を実施した。平成 30 年度は、沿岸部特有の調査・観 測環境により想定され得る課題(地下深部構造推定結果の空間分解能や信頼性の低下等に対する 調査手法の高度化)に関する検討を行った。

2) 沿岸部の地下水長期安定性に関わる研究

① 沿岸部の地下水長期安定性評価技術の検討

高レベル放射性廃棄物処分の安全評価では地下水シナリオが重要であり、地下水の安定性や地 化学特性はこのシナリオにおいて重要な要素の一つである。このため、沿岸部の大深度ボーリン グにおいて、水質・地下水年代調査や地化学調査を実施し、地下水の性状について調査した。こ の調査結果に基づいて、地形、地質、水理、水文状態などと地下水の安定性や地化学特性との相 関を示すとともに、地下水の長期安定性を調査する方法の体系化を図った。

平成28年度及び平成29年度に、既存の大深度ボーリング孔などを活用し、地下水を採水し て水質・地下水年代調査や地下水のpH、ORP、温度などを計測した。これらを通じて、大深度 での採水技術、水質・地下水年代調査技術、地化学特性調査技術を確認した。この結果、これら の大深度の地下水は、流動性の観点からみて長期的に安定していることや、地下深部の地化学環 境が十分な遅延性能を有することを確認できた。また、平成29年度においては関東から四国に わたる日本列島南沿岸部の地下水を中心に採取し、深層地下水の塩分濃度や同位体組成と滞留時 間の関係を調査した。平成30年度は、これまでの結果を踏まえて、さらに深部地下水の採水調 査を行い、水質・地下水年代の調査、地化学特性データの充実を図った。また、これまでに得ら れた結果を整理し、地下水の流動性や地化学特性と地形・地質などとの相関を検討するととも に、化石海水や氷期に涵養した地下水の残留要因を検討した。さらに、これまでの調査結果を踏 まえて、沿岸部地下水の長期安定性の評価を試みた。

沿岸部における地質環境の調査・解析・評価技術の検討

既往の沿岸域研究により、これまでに沿岸海底下には長期的に安定した地下水が存在すること や、深部地下水が上向きに流動するためには塩淡境界や断層の存在が鍵になることが判明してい る。これを踏まえ、陸域から海域に至る調査結果を統合した地下水流動解析を実施し、地下水の 安定領域と非ダルシー流領域の存在の比較・検討を可能とし、列島内で安定化した地下水領域の "見える化"に寄与することを目指した。 平成28年度に実施した既往文献の調査等に基づくと、沿岸域の塩水領域の分布や安定性の程度は、広域地下水流動系のあり方と大きく関連していると考えられる。また氷期に形成された地下水流動域よりも深部には超長期的に安定した非ダルシー領域が存在する可能性も高く、この現象が列島各地で見られる現象であることも示唆された。この沿岸部深層に存在する超長期安定領域の評価のために、地下水流動の範囲を三次元的にとらえ、滞留時間の異なる地下水流動の範囲を評価できる手法が検討された。平成29年度には陸域・海域における地下水試料採取調査を本格的に開始し、選定された地域において、地下水流動モデルによる滞留時間の解析と現地で採取した深層地下水の年代測定値に大きな開きがあることが観測された。さらに、解析の高精度化を図り、全国規模の深層地下水観測結果(年代測定による長期滞留地下水の存在)が評価された。平成30年度は、沿岸部の深層地下水に関する観測と解析の範囲を広げつつ継続的に取り組み、列島各地の安定的な深層地下水の領域を三次元的に把握できるよう調査並びにデータの充実を図った。

3) 沿岸部の地質環境の情報整備

前述した(1)の1)及び2)の検討へのデータ提供を目的として、国内外の既存文献の調査を 行い、沿岸部の地質環境として、地質、地質構造、熱環境、水理場、力学場、化学場、隆起・沈 降などの項目について情報整備を行った。併せて、整備した情報及び検討した方法論などの一元 的管理の方策について検討を進めた。

平成 28 年度には、日本列島の地質や地下水を研究対象とし、海外で公表された論文を中心に 文献の整理を実施した。平成 29 年度には、国内外の既存文献の調査を完了し、情報を一元化して 管理できる方策を検討した。平成 30 年度は、データマイニング手法を用いて、地域ごとあるいは 地質や地形ごとの調査方法、地域の特性などを関連付けるキーワードの抽出を行い、当該事業に 対する課題の抽出を行った(文献分析研究)。さらに、収集・整理した沿岸部の地質環境情報に関 する課題を明確化するとともに、一元的に管理するシステムを構築し、当該事業で得られた情報 を入力・管理した。

(2) 沿岸部における工学技術の高度化開発

沿岸部における処分システムの構築を念頭に、ニアフィールドを構成する人工バリア(ガラス 固化体、オーバーパック、緩衝材)及び坑道等を含むニアフィールド構成材料(支保、隙間充填 材、埋め戻し材、プラグ、グラウト等)について、沿岸部特有の地質環境条件を考慮した長期的 な挙動の評価とともに、ニアフィールド領域での処分システムの成立性と品質確保について工学 技術を意識した手法の開発が必要となる。これを踏まえ、既往の知見やデータ等の活用や十分性 に留意しつつ、沿岸部特有の地質環境特性に関する関連情報の整理を行うとともに、沿岸部の地 質環境条件に特化した研究開発課題の整理を行い各種の検討を進めた。

平成28年度は、平成27年度に実施した沿岸部の特性等に関連したこれまでの地層処分研究 開発成果の再整理等を踏まえ、優先的に取り組むべき課題の抽出を行い、平成30年度迄の試験 計画や研究開発計画を具体化し、これらに着手した。平成29年度は、沿岸部の特性等に関連し たこれまでの地層処分研究開発成果の再整理等を踏まえ、平成28年度に具体化した平成30年 度迄の試験計画や研究開発計画に基づく人工バリア材料等に関する各種試験、調査や検討を継続 した。平成30年度は、上記の計画に基づき、下記の項目ごとに各種試験の継続実施並びに調査 や検討を進めるとともに、最終年度としての全体成果の取りまとめを行った。

1) 人工バリア材料等に関する劣化や変質に関する現象の把握

ニアフィールドを構成する各要素の長期的な機能・性能に及ぼす塩水の影響を把握し、沿岸部 を想定した核種移行評価における場の設定や、人工バリア及び地下施設設計へのフィードバック に資することを目的として、ニアフィールドを構成する材料(a.オーバーパック、b.緩衝材、c.セ メント系材料、d.左記以外のニアフィールド構成材料)に関する各種特性等のデータ拡充や変遷 挙動等の評価手法の高度化について、閉鎖後の長期挙動評価への反映、及び設計や施工等の工学 技術や操業期間中の安全確保への反映、の2つの視点を念頭に調査・検討を進めた。

- a.オーバーパック:オーバーパックの母材及び溶接部のそれぞれについて、沿岸部で想定され る地下水条件における腐食挙動に着目した各種試験を実施し、知見やデータの拡充を行った。
- b.緩衝材:緩衝材について、閉鎖後の長期挙動評価への反映及び設計や施工等の工学技術や操 業期間中の安全確保への反映の観点から、前者は塩水環境下におけるせん断特性に着目した 基本特性に関する試験を、後者は再冠水時の現象(膨潤挙動、流出挙動)に着目した試験を 実施し、知見やデータの拡充を行った。
- c.セメント系材料:幅広い地下水条件や固液比を変化させた条件による試験を実施し、セメント水和物の溶解沈殿挙動に関するデータの拡充を行うとともに、既存モデル解析との比較検討によるモデルの沿岸部での適用性の確認を進めた。また、設計や施工等の工学技術や操業期間中の安全確保への反映の観点から、バルク試験体を用いた力学特性の変化に関するデータを取得するとともに、溶脱変質に係る拡散挙動の変化に関するモデルの高度化を進めた。
- d.ニアフィールド複合現象評価手法の開発:オーバーパック、緩衝材、セメント系材料等の異 種材料間に跨る相互作用や複合現象のうち、沿岸部に特有の現象に着目し、核種移行経路の 場の状態を評価するための課題を既往の知見に基づき整理するとともに、核種移行経路の場 の状態を評価するための手法を構築した。

2) 塩水環境下ニアフィールド領域での処分システムの成立性に係る手法等の提示

① グラウト設計及び影響評価技術の開発

海水条件下での溶液型グラウト特性データ(長期安定性)の取得及びグラウト設計技術の適用 性・影響を評価する。得られた成果を踏まえて、過去の資源エネルギー庁委託事業「地下坑道施 工技術高度化開発」で作成したガイドライン及びグラウトデータベースの更新に係る検討を進め た。

② ニアフィールド領域での処分システム構成材料の成立性と品質確保の方法の提示

処分システムを構成するニアフィールド領域の地下構成材の各要素が、建設・操業から閉鎖ま での擾乱や変遷の影響、対策効果を見込んだうえで、閉鎖後長期の安全評価が期待する性能を達 成することを示すための手法の構築に向けて、手法や体系の検討を行うとともに、そこで利用可 能な水理解析ツールの適用性等の確認を進めた。これらの取組をとおして、ニアフィールド領域 での処分システムの成立性を示すための手法や体系の素案を提示するとともに品質確保の考え方 を整理した。

(3) 沿岸部における安全評価技術の高度化開発

沿岸域での処分を想定した場合に適用可能な坑道閉鎖後の安全評価技術の高度化開発として、 沿岸部固有の特徴等を、安全評価技術の主要要素である「(安全評価シナリオ、生活圏評価の評 価条件等の)評価の枠組み」、「評価モデル」、「評価パラメータ」、並びに「影響評価」の観点か ら分析を進めた。そのうえで、海外事例等も含めて既往の方法論や評価ツールを活用しつつ、 (1)及び(2)の技術分野で実施される地質環境調査結果や処分場設計に係る工学技術の進捗・成果等を考慮・反映しながら、沿岸部固有の特徴に対応した安全評価を行うために必要なデータ、技術並びに、それらの特徴が安全評価結果に及ぼす影響に関する知見等の技術基盤の整備を行った。具体的には、安全評価技術を人工バリアと天然バリアでの核種の移行挙動を評価する核種移行評価と、表層環境に至った核種の移行と被ばくを評価する生活圏評価に区別し、核種移行評価と生活圏評価を沿岸部固有の特徴に対応した評価としていくための評価の枠組みの整備を進めた。核種移行評価では特に地下水流動状況や地下水化学等の特徴を取り込んだ評価技術と評価事例の整備・高度化を、生活圏評価では特に処分場からの核種の表層環境への放出域や核種の移行経路及び被ばく経路・形態等の特徴を取り込んだ評価技術と評価事例の整備・高度化に取り組んだ。

平成29年度までに、安全評価において留意すべき沿岸部固有の特徴等を踏まえた核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの評価の枠組みの検討として、評価内容(評価シナリオ・解析ケース等)や、それら評価で必要となる情報や利用可能な情報に対応した評価方法(モデル化方法等)の分析・整備に取り組んだ。併せて、沿岸部固有の場の特徴を反映した核種移行評価に係るモデル・パラメータ整備に向けて、海進・海退の影響を受けた地下水流動状況や地下水化学等の変化の評価手法の調査と評価の試行、また、塩濃度等の地下水組成やその変化等の影響を評価するための基盤情報として必要となる、核種の収着に関するデータ、コロイドの安定性に関するデータ、有機物・微生物の存在量や組成等の特性データの取得等に取り組んだ。最終年度である平成30年度は以下を実施した。

1) 評価の枠組みの整備

平成 29 年度に実施した、安全評価において留意すべき沿岸部固有の特徴等を踏まえた核種移 行評価と生活圏評価のそれぞれの評価の枠組みの検討を継続するとともに、それぞれの評価の全 体的なイメージの具体化を進めた。具体的には、平成 29 年度に開始した、核種移行評価と生活圏 評価のそれぞれの評価内容(評価シナリオ・解析ケース等)とそれら評価で必要となる情報や利 用可能な情報に対応した評価方法(モデル化方法等)の分析・整備を継続・拡充した。また、そ れらに基づき、利用可能な情報に応じた核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの全体的なイメー ジについて、現段階で想定されるものを例示するとともに、引き続き取り組むべき技術的課題を 整理した。

2) 核種移行モデル・パラメータ整備及び影響評価

平成 29 年度に実施した、沿岸部固有の場の特徴を反映した核種移行評価に係るモデル・パラ メータの整備を継続するとともに、現段階での技術レベル、引き続き取り組むべき技術的課題を 整理した。具体的には、海進・海退の影響を受けた地下水流動状況や地下水化学等の変化の評価 手法については、評価の試行と最新情報の収集・整備等を継続・拡充するとともに、それに基づ き、利用可能な情報に応じた現象理解の高度化や核種移行評価への反映のイメージと方法及び課 題等について、現段階で想定されるものを例示した。核種の収着、コロイドの安定性とその影響、 有機物・微生物の存在量・組成等の特性とその影響などについては、塩濃度等の地下水組成やそ の変化等の影響を評価するための基盤情報としてのデータ取得と最新情報の収集・整備を継続す るとともに、それに基づき、利用可能な情報に応じた核種移行に係る現象理解やパラメータ設定 への反映のイメージと方法及び課題等について、現段階で想定されるものを例示した。

3. 沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発

3.1 地質環境の調査技術分野の課題設定

概要調査段階以降に必要となる地質環境の調査技術の高度化の観点では、第1章で述べたよう に、平成27年度より着手した本事業の初年度において、沿岸部における処分システムの構築を 念頭に、沿岸部の特性などに関連したこれまでの地層処分研究開発成果の再整理を行い、再検討 が必要な課題などを抽出・整理している(産総研,原子力機構,原環センター,電中研,2016)。こ のような整理結果は、並行して進められた沿岸部研究会に適宜提供され、平成28年8月の同研 究会のとりまとめでは、"海域を含めた沿岸部において地層処分を実現するために必要な基本的 な技術はおおむね整備されている"としつつも、"今後、技術の高度化に引き続き取り組むことで、 さらに信頼性を高めることが重要である"と結論付け、併せて技術の高度化に向けて取り組むべ き課題とその方向性が示された(沿岸部研究会,2016)。

このような沿岸部研究会における議論を踏まえ、本事業における地質環境の調査技術の高度化 に向けた取組では、①沿岸部における地質環境の長期安定性に関する調査技術、②沿岸部特有の 地質環境下における地下水の長期安定性に関する調査技術及び③これまでに蓄積されている沿岸 域の地質環境に関する情報整理とその活用という、三つの実施項目を設定し平成 28 年度からの 3ヵ年計画を具体化したうえで取組に着手してきた。

本章(第3章)では、概要調査段階以降に必要となる地質環境の調査技術の高度化の観点から、 上記の実施項目①、②及び③に含まれる個々の課題について、3ヵ年の実施内容や得られた成果 などについて述べる。

実施項目①(3.2 沿岸部における自然環境に関する検討)

3.2.2 沿岸部における隆起・侵食

- 3.2.3 沿岸部における断層運動
- 3.2.4 沿岸部における火成活動
- 実施項目②(3.3 沿岸部の地下水長期安定性に関する研究)
 - 3.3.2 地下水長期安定性評価技術
 - 3.3.3 地下水長期安定性評価技術
 - 3.3.4 地下水環境の調査・解析評価技術の検討

実施項目③(3.4 沿岸部の地質環境の情報整備)

- 3.4.2 沿岸部の地質環境情報の整理・管理システムの構築
- 3.4.3 沿岸部地下水に係わる文献の整理

参考文献

沿岸部研究会,沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会 とりまとめ,2016. 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 27 年度地層処分技術調査等事業(沿岸部処分システム高度化開発)報告書, 2016.

3.2 沿岸部の自然現象に関する研究

3.2.1 はじめに

沿岸部における地層処分システムを想定した場合に考慮すべき自然現象(隆起・侵食、断層活動及び火成活動)及びこれらを対象とする調査・評価技術について、既存の知見の整理に基づい て課題を抽出するとともに、それらの解決に必要な調査・評価技術の高度化等を進めた。

3.2.2 沿岸部における隆起・侵食に関する検討

(1) はじめに

海水準変動と地殻変動の両者の影響下にある隆起・侵食等、沿岸部の処分システムの理解に必要な自然現象に関わる研究とそれに必要な要素技術の開発を行った。沿岸部海域における隆起・ 侵食の評価手法として、陸域の隆起・侵食の様式の海域への空間的外挿、海底堆積物の分布・層 厚等からの評価が考えられることから、沿岸部の情報の調査・解析等により、我が国の沿岸部の 隆起・侵食、地殻変動様式と評価手法について整理した。また、これらの評価のための要素技術 として、地形変化シミュレーション技術、海成段丘の発達が悪い地域の隆起・侵食量の評価手法、 被覆層を大きく欠く岩石侵食段丘などを対象とした段丘対比・編年手法の高度化を検討した。

(2) 実施内容

1) 沿岸域における隆起・侵食の検討

① 地体構造区分に基づく陸域の地体構造区分の海域への内挿・外挿の妥当性の検討(平成 28 年度)

(a) 概要

新第三紀の日本海拡大以降から現在に至る地殻変動に着目したわが国の地体構造区分(松田・ 吉川,2001;垣見ほか,2003)の精査を行うことにより、マクロスケールにおける陸域の隆起・侵 食の様式の海域への内挿・外挿の実施可能性を考察した。

(b) 実施内容

地殻変動様式の時間的・空間的な内挿・外挿の前提は、斉一観である。すなわち、ある時間ス ケールの下で一連の地殻変動傾向で説明される空間的範囲を認定することである。具体的には、 沿岸陸域と沿岸海域の両者が共通の特徴を有し、連続的な変動傾向にあるならば、また、一つの 構造区と見なせるならば、陸域のデータを海域へ内挿・外挿する論拠となると考える。

外挿における時間スケールの設定は、評価すべき事象の時間スケールに見合ったものでなけれ ばならない。しかし、今回は海水準1サイクル約10万年間の素過程の理解という観点に立ち、こ こでは過去10万年あたりの平均的な隆起・沈降量の内挿・外挿を考える。同様に、空間スケール についても、評価すべき地域のスケールに見合った検討範囲を設定する必要があるが、明確な設 定の基準があるわけではない。このため、ここでは地層処分技術WG中間整理(資源エネルギー 庁, 2016)が取り扱う沿岸域に沿って、海岸線より海側20kmを目安とする。

以上のような視点に立って、ここではおおむね新第三紀中新世以降の地殻変動に着目した地体 構造区分の研究に着目し、検討対象を新第三紀中新世以降としたのは、過去1億年の日本列島の 地史の中で、最も大きいと言ってよい地史イベントと考えられている日本海拡大が中期中新世ま でに終了したと考えられているためである。主要な検討材料は、松田・吉川(2001)と垣見ほか (2003)の2点とした。ここでは、これらの研究の地体構造区分の論拠を精査し、その結果に基 づいてわが国の沿岸部の新第三紀中新世以降の地殻変動様式を整理し、沿岸陸域から沿岸海域へ の隆起・侵食傾向の内挿・外挿の可能性について概観した。なお、ここで言う内挿・外挿が可能 とは、論理的に可能という意味であり、それが検証されたという意味ではない。

(c) 結果及び考察

各地体の隆起・沈降の特徴を陸域から海域への外挿という観点から、オーソドックスではある が、沿岸部における隆起・沈降の様式について、Aタイプ/沿岸部に活断層・褶曲などがない地 域、Bタイプ/沿岸部に活断層がある地域、Cタイプ/沿岸部に活褶曲・曲隆などがある地域の 三つに区分した(図 3.2-1)。



図 3.2-1 沿岸部の隆起・沈降運動の様式の整理

このほか、地質構造が複雑などの理由で、隆起・沈降傾向の内挿・外挿が困難と考えられる地域があるが、割愛する。

Aタイプは、沿岸部に活構造が記載されていないかまたは少なく、地質構造の連続性が見込ま れる地域である。これらの地域(陸域)の多くは、傾動しながら隆起していると見なされる地域 である。活断層、活褶曲などがないことを、内挿・外挿を積極的に否定する材料がないという前 提を置くことができる論拠と見なせば、これらの地域は陸域の隆起・沈降の様式を空間的に内挿・ 外挿することが可能であると考えられる。

BタイプとCタイプは、部分的に外挿が可能な地域を含む可能性は否定しないが、積極的に外 挿が可能であるとするものでは無い。可能であるかどうか、その成否は、陸域から海域にかけて の地質構造の説明性にかかっている。

なお、言うまでもなく、上記以外に、第四紀火山が分布する地域、地質構造の連続性の把握が 難しい地域、陸域かつ/または海域に活断層などが多く分布する地域など、内挿・外挿が困難な地 域がある。

このように、地体構造区全域で単純に外挿することが可能な沿岸地域は限られると考えられる

(図 3.2-2)。



図 3.2-2 松田・吉川(2001)と垣見ほか(2003)での構造区分の比較と 陸域の隆起・沈降様式の海域への外挿の可能性

図 3.2-1 のうちの A、B または C タイプに相当すると考えられる地域を大まかに例示した。

(d) まとめ

新生代の地体構造区分研究事例を取り上げてこれを精査し、沿岸部での陸域から海域への隆起・ 沈降傾向の内挿・外挿の実現可能性について、全国を網羅するような文献資料を参考に検討した。 この結果、積極的に内挿・外挿が可能と見込まれる地域、断層・褶曲を考慮してその検討にあた るべき地域をそれぞれ整理した。これらの情報は、次項で展開する地域レベルでの沿岸部陸域か ら海域への隆起・沈降傾向の内挿・外挿の検討の基礎となる。

② 地形・地質縦断面を用いた隆起・侵食評価手法の机上事例研究(平成28年度)

(a) 概要

地形・地質情報が比較的得られる地域において、陸域主要河川沿い~海域海底谷沿い(以下、 河川沿い)の地形地質断面図を作成し、気候段丘モデルに基づく隆起・侵食評価、並びに沖積層 の最大層厚からの見積りにより、後期更新世の隆起量・侵食量の評価を試みた。これらの結果と 当該地域の地史的解釈を合わせて、陸域の隆起・沈降量の海域への外挿の妥当性の検討、後期更 新世以降の下刻量分布の解釈などを行った。

(b) 実施内容

(i) 事例研究地域の設定

幡谷ほか(2016)を参考に、沖積層の情報を含んだ研究事例がある主な河川河口の前面海域に

おいて、海上保安庁が刊行している沿岸の海の基本図(海底地形図、海底地質構造図)の調査を 行い、再解析が可能と見込まれる記録の品質がよい範囲を抽出した。次に、その中で、陸域の地 形・地質データ、特に、段丘の記載が豊富である、段丘の分布が見込まれるという条件を満たす 地域を事例研究地域とした。具体的には、北海道東部・湧別川地域、北海道北部・天塩川地域、 宮崎平野・一ツ瀬川地域の3ヵ所において、机上検討を行った。

(ii) 陸域の隆起・侵食量評価

まず、既往文献・資料並びに空中写真判読により、研究対象とした地域の主要河川沿いの段丘 の分布と対比・編年情報、地質・地質構造を整理した。前者は主として隆起量の評価、後者は隆 起運動様式の考察に用いる情報である。段丘対比・編年に際しては、必要に応じ、その根拠とな るテフラデータの新知見(新たな降下年代の知見など)に基づく読み替え、濱田・幡谷(2011) に従った段丘を構成する地質に見られる経験的指標の再検討を行い、対比・編年を見直した。陸 域の隆起量は、気候段丘モデルに基づき見積もり(貝塚編,1977 など)、ここでは、吉山・柳田 (1995)の海水準1サイクル間の隆起量の指標(FS、FS'、BB、BV の各値)を用いた(図 3.2-3)。 この隆起量の見積り方法では、周期的な気候変動に伴って、海水準が周期的かつ同程度の上昇・

下降を繰り返すことを前提とする。



図 3.2-3 海水準変動と段丘の形成の模式図

幡谷(2005)より引用。左側:海水準変動曲線は、Chappell(1994)のデータを使い、等速隆 起を仮定して作成。右側:海水準変動に対応した河川縦断形状と隆起量の指標となる河成段丘面 の比高値の定義。吉山・柳田(1995)に基づいて作成

具体的な見積もりの手順は以下の通りである。おおむね主要河川沿いに断面図を切る基線を設定し、そこに河川沿いの段丘面の高度分布を投影する。これは河床縦断段丘投影図、河床縦断図などと呼ばれることもあるが、ここではこれを地形地質断面図と呼ぶことにする。この図から、海水準が最も高かった二つの時期に形成された海成・河成段丘同士(現河床を含む)同士(FS値、FS)値)、あるいは、最も寒かった二つの時期に形成された河成段丘同士(TT値)、あるいは谷底(現河谷を含む)同士(BB値、BV値)の比高値を読み取る。なお、隆起量・隆起速度の見積りにあたっては段丘面上に堆積した被覆層の厚さを考慮する必要があるが、情報が乏しい地域では誤差要因と考えて無視することもある。今回は、隆起速度の地域間比較を目的としていないため、地域ごとの対応とする。沈降量は、基本的には当該地域に分布する堆積物の厚さを読み替える。ただし、堆積物自体が薄い場合には海水準変動の影響を考慮する必要があり、具体的な評価の論理

については個々に述べることとする。これら陸域の隆起・沈降運動の海域への外挿については、 以下のように行った。

まず、おおむね調査対象とした河川の陸域調査地域内の最上流部と海域調査地域内の海底谷の 出口すなわち付近を結ぶなど、河川と海底谷の大局的な流路の方向に沿って、直線断面の基線を 設定する。次に、おおむね河川沿いに得られている隆起速度を基線に直交方向に投影する。①の 検討結果と地域レベルでの地質構造などの情報を考慮して基線上での変化傾向(隆起・沈降様式 /モデル)を把握し、その傾向に基づいて内挿・外挿する。最終氷期の海水準低下により下刻さ れてできた谷を沖積層が埋積しており、沖積層の層厚を侵食量に読み替えることができる。

(iii) 海域の海底谷沿いの地形地質断面図の作成と下刻侵食量の評価

内陸部では隆起量以上に下刻侵食されることはないと考えられる。しかし、沿岸部では、海水 準の低下に伴って隆起量以上に下刻侵食が進む点に留意する必要がある。下刻侵食量の評価にあ たっては、沖積層の厚さに着目した。晩氷期及び後氷期の氷河性海面変動/海面上昇に伴って水 成堆積物すなわち沖積層が堆積し、それが作った堆積平野を沖積平野という。井関(1975)が述 べるように、世界の臨海沖積平野の基底をなす埋積谷は、最終氷期の低位海面を示す優れた地形 学的証拠であると考えられる(図 3.2-4)。埋没谷底面を覆う礫層は最終氷期最盛期における低位 海面に対応して形成された河成堆積層と考えられており、沖積層基底礫層(BG 層)と呼ばれて いる。下刻侵食量は、海水準低下と隆起運動の総和と考えられるが、これらを前提とすれば、海 成段丘(過去の海浜)に刻まれた谷底の深さ(現在は沖積層に埋積されている)がその履歴、す なわち、後期更新世以降の河川下刻量と見なすことができる(幡谷ほか,2016 など)。

具体的な作業としては、陸域で作成された河川沿いの地形・地質断面図における現海岸線付近の沖積層の分布、海岸線付近の既往ボーリングデータ(例えば、国土交通省,2008;国土交通省 ボーリングデータベース KuniJiban;以下、「KuniJiban」という)に基づき沖積層の基底深度を 読み取る。次に、音波探査データの再解析により、海底谷横断面において、海岸線付近で読み取 った沖積層の基底深度を追跡し、地形・地質断面図にまとめる。つまり、海底谷に見られる沖積 層最深部をもって、下刻侵食の深さの痕跡と見なす。幡谷ほか(2016)は、陸域において一つ前 の高海水準期である海洋酸素同位体ステージ(MIS)5eの海面高度(旧汀線高度)と沖積層最深 部を最大下刻量と見なしたが、海域についてどう評価するかについては本論の論点の一つである。



(c) 机上調査結果

(i) 北海道東部·湧別川地域

【先行研究】本地域は、北海道北東部のオホーツク海に面した地域で、南東から北西方向の直線的な海岸線を有する。小池・町田編(2001)などによれば、海岸線と並行に3段の海成段丘がほ

ぼ一定の標高で分布する。北見山地には、南西から北東に流下し、河成段丘を伴った河川がいく つか発達するが、湧別川はその一つである。この地域は、松田・吉川(2001)の北見帯、垣見ほ か(2003)の日高・根室帯北部にあたる。両研究とも、地殻変動が少ない地域と認識している。 先に述べた海成段丘の分布は、第四紀後期の一様な隆起運動を示すものである。また、小疇ほか 編(2003)は、北見山地の沖合は大陸棚が広く緩勾配(4/1000-5/1000)なので、最終氷期の最 大海面低下期にも河川による大きな下刻が生じなかったとした。

【机上検討結果】湧別川の河床勾配と沿岸海域の地形勾配がほぼ同じという特徴を持つ。陸域の 河成段丘の比高は小さく、海域の沖積層の厚さはほぼ一定である(図 2.17)。先行研究(Wako, 1961;柳田・水野,1982;小池・町田編,2001;小疇ほか編,2003;柳田,2003など)の段丘対 比・編年の情報を整理し作成した段丘分布図に基づき求めた湧別川中・上流の内陸部のTT値は、 最大でも23mと比較的小さく、下流に行くに従い徐々に減少する。海岸付近で海成段丘の旧汀 線高度から求められるFS値は0-7mであり、TT値の下流方向への減少傾向と整合する。沿岸 部海岸線付近の沖積層の厚さは、ボーリングデータ(KuniJiban、沿岸部海の基本図「紋別」)に よれば、概ね20m以下、厚くとも30mに満たないと推定される。海域については、現在の湧別 川のほぼ延長上に北東方向に流下していたと考えられ、沖合15km弱まで、埋積された海底谷上 の沖積層は約20mの厚さでほぼ一定である。ただし、この厚さの中には、一様に広く覆ってい る地層の厚さを含んでおり、沖積層の基盤岩を削り込んでいる深さ(近傍の大陸棚の水深との差) は、最大でもこの半分以下であり、ほとんどは5mに満たない(図 3.2-5)。



図 3.2-5 湧別川並びにそれに続く海底谷沿いの地形・地質断面図

ほぼ現河川・海底谷沿いに基線を設け、河床、段丘、沖積層基底、海底地形を投影した。上図 における TT 及び FS (MIS9) は吉山・柳田 (1995)の海水準1サイクル間の隆起量の指標、図 中における数値は隆起量の指標から計算された平均隆起速度。

【まとめ】湧別川地域については、全体として、過去10万年間の平均隆起速度は20m程度より 小さいが、わずかではあるが、下流方向あるいは北東方向に向かって減少している傾向が見られ る。地体構造区としては一様な隆起運動を考えることができることを論拠に、基線上で見かけ北 東下がりの一様な傾動を考えると、湧別川前面の沿岸海域、海岸線より 10 km 程度の範囲では、 隆起・沈降速度が極めて小さい地域という推定結果が導かれる(図 3.2-6)。河川による後期更新 世以降の最大下刻量も、幡谷ほか(2016)が示した上限値である隆起量+100 m を下回る。



図 3.2-6 湧別川地域における陸域から沿岸海域への過去 10 万年間の隆起速度の外挿 調査地域近傍で得られた過去 10 万年間の平均隆起速度を、基線に対して直交方向に投影。TT 換 算(○)は MIS6 と MIS2 との河成段丘から求めた平均隆起速度、FS (MIS9) 換算(□)は MIS9 の河成段丘から求めた平均隆起速度、FS 換算(■)は MIS5e 海成段丘から求めた平均隆起速度

(ii) 北海道北部·天塩川地域

【先行研究】検討対象地域は、天塩川の下流、天塩平野(サロベツ原野)・宗谷丘陵・天塩山地(北部)などからなる地域と、天塩川河口前面の沿岸海域である。松田・吉川(2001)によれば、天 塩-夕張衝突帯に位置している。垣見ほか(2003)の地体構造区分では、石狩天塩帯北部に属し、 衝突帯、隆起優勢の褶曲-逆断層地域といった記載がなされている。本地域には、問寒別断層帯、 幌延断層帯、サロベツ撓曲帯などの更新世の海成段丘群を変形させているおおむね南北方向の構 造が分布し、それぞれ隆起帯を成している(太田ほか,2007など)。一方、サロベツ撓曲帯(天塩 撓曲)は沈降域である(産総研,2006)。このように、本地域は、地殻変動が活発な地域と認識さ れる。沿岸海域は、遠浅な地形を呈し、海岸線より20km沖合でも、海底面は水深80m程度で ある。新里ほか(2007)の既存情報の整理によれば、この沿岸海域を含むサロベツ撓曲帯西方か ら沖合約20km程度に渡って新第三系~第四系の堆積盆が分布し、東側のサロベツ撓曲帯の活動 に伴う短縮が顕著と見なしている。つまり、今回調査対処とした沿岸海域の全体が現在も成長を 続けている沈降域にある。

【机上検討結果】先行研究の海成段丘のデータ(小池・町田編,2001;小疇ほか,2003;新里・安 江,2005;新里ほか,2007;太田ほか,2007)の整理結果に基づけば、後期更新世以降の平均隆起 速度は海岸線より約5-15 kmの範囲では、過去10万年程度の平均隆起速度は29-48 m/10⁵年 となり、内陸側から海岸側に向かって、大局的には微増傾向にあると見なせる(図 3.2-7)。一方、 産総研(2006)のボーリング調査によれば、天塩平野の天塩川左岸において MIS5eの海進期の 地層が標高 -17 m にあるとされており、過去10万年程度の平均沈降速度を14 m/10⁵年程度と 見積ることができる。海域では、天塩川の延長は、ほぼ真西に延び、沖積層基底礫層(BG 層)の 下限深度は、海底谷に沿って沖合20 km までに、約-86--110 m で、ほぼ一定の勾配で緩やか に減ずる。しかし、沖積層基底面に刻まれた谷の深さは最大でも10 m 程度である。



図 3.2-7 北海道北部・天塩川並びにそれに続く海底谷沿いの地形・地質断面図

ほぼ現河川・海底谷沿いに基線を設け、河床、段丘、沖積層基底、海底地形を投影した。上図 における FS は吉山・柳田(1995)の海水準1サイクル間の隆起量の指標、図中における数値は 隆起量の指標から計算された平均隆起速度。





調査地域近傍で得られた過去 10 万年間の平均隆起速度を、基線に対して直交方向に投影。FS 換算(□、■及び■)は MIS5e 海成段丘から求めた平均隆起速度

【まとめ】陸域の丘陵地と平野の間に活構造(撓曲)があり、丘陵地の隆起量データを平野部、 さらには沿岸部海域に外挿することは困難である(図 3.2-8)。現状では、陸域からの外挿ではな く、このような地質構造発達史の知見をもって、沈降域と評価するのが妥当と考える。地層の厚 さをおおよその沈降量と読み替えるならば、沈降速度は、産総研(2006)のボーリング調査結果 に基づいて得られた14 m/10⁵年程度かそれよりやや早いと推定する。沈降域であるため、河川に よる後期更新世以降の最大下刻量の推定には課題があるが(幡谷ほか,2016)、沖積層基底面の谷 の深さは10m 程度より小さく、非常に小さいと判断できる。

(iii) 宮崎平野・一ツ瀬川地域

【先行研究】本地域は、宮崎平野の北西部、一ツ瀬川の河口より約30kmの区間と、海岸線より約20kmの沿岸海域である。本地域は、松田・吉川(2001)では宮崎一沖縄島帯に、垣見ほか(2003)では九州・琉球弧外帯北部に区分されている。陸域の一ツ瀬川本流沿いには、活断層などの記載はない(活断層研究会,1991;中田・今泉編,2002)。海底谷沿いにも、音波探査記録の再解析を実施したが、活構造は認められなかった。これらのことから、一ツ瀬川とその海域延長の海底谷沿いは連続的な一連の隆起・沈降域と見なせる。

【机上検討結果】主に長岡(1986)及び長岡ほか(2010)の一ツ瀬川沿いの段丘記載に基づき地 形地質断面図を作成した。これから読み取れる FS 値、FS 値から見積もられる後期更新世以降の 平均隆起速度は 65 - 76 m/10⁵年となり、上流から下流に向けて微減している。河口付近の河川下 刻量が反映された沖積層の深度については、長岡(1986)の一ツ瀬川沿いの地形・地質断面図よ り読み取れる深さは 60 m であるが(幡谷ほか,2016)、国土交通省ボーリングデータベース KuniJiban に基づき精査し、GL - 35 m から - 40 m に修正した。音波探査データの再解析によれ ば、河口付近から海底谷沿いの沖積層基底深度は海岸線より約15 km 程度は滑らかに繋がり、段 差などは認められない。沖積層基底の海底谷沿いの勾配は海底面のそれよりも緩く、現海岸線か ら離れるに従い、両者の比高は小さくなる。約15 km よりも先では、沖積層基底の勾配、海底地 形勾配ともにやや急になり、収斂する。沖積層が薄化し尖滅する箇所として認識した大陸棚縁辺 部の水深は約120 m である。沖積層に刻まれた谷の深さは、最大でも15 m 程度である(図 3.2-9)。



図 3.2-9 ーツ瀬川並びにそれに続く海底谷沿いの地形・地質断面図

ほぼ現河川・海底谷沿いに基線を設け、河床、段丘、沖積層基底、海底地形を投影した。上図 における FS 及び FS'は吉山・柳田(1995)の海水準1サイクル間の隆起量の指標、図中におけ る数値は隆起量の指標から計算された平均隆起速度。

【まとめ】一ツ瀬川の上流から下流にかけて見られる隆起速度の明瞭な減少傾向は、単調な傾動 運動を反映したものと考えられ、傾動運動に参加している地塊の広がりは陸域から海域へと広が っていると考えられる。これを沿岸海域へ外挿してこの海域での過去 10 万年間の平均隆起速度 を見積ると河口付近から沖合約 16 km の大陸棚縁辺部に向けて 62 m/10⁵ 年から 50 m/10⁵ 年と減 ずると推定できる(図 3.2-10)。河川による後期更新世以降の最大下刻量も、幡谷ほか(2016) が示した上限値である隆起量+100m を下回る。



図 3.2-10 一ツ瀬川地域における陸域から沿岸海域への過去 10 万年間の隆起速度の外挿 調査地域近傍で得られた過去 10 万年間の平均隆起速度を、基線に対して直交方向に投影。FS 換 算(□及び■)は e MIS5 海成段丘から求めた平均隆起速度、FS'換算(△及び▲)は MIS5 河成 段丘と現河床の比高から求めた平均隆起速度

(d) 考察

(i) 隆起・沈降傾向の陸域から沿岸部海域への外挿

北海道湧別川地域、宮崎県一ツ瀬川地域のように、陸域である程度変動傾向が把握できて、か つ、活断層や波長が短い活褶曲が分布していなければ、陸域の変動傾向を海域に内挿・外挿する ことは論理的には可能である。一方、北海道幌延地域のように、沿岸部に活断層や波長が短い活 褶曲が分布する場合には、単純な内挿・外挿は難しく、より精度が高い地形・地質情報が必要か つ、地質構造発達史の検討の重要性が高まる。ただし、断面だけでの検討なので、課題も残る。 湧別川地域の後期更新世の隆起運動は、東方に分布する網走構造線の運動の影響を受けている可 能性がある。また、一ツ瀬川地域を含む宮崎平野では、北方への傾動運動が言及されており(長 岡ほか, 2010)、三次元的な検討の必要性を示していると考えられる。

(ii) 大陸棚外縁から見積る手法(仮説)との比較

大陸棚外縁が最終氷期最盛期(Last Glacial Maximum;以下、LGM という)の最も海水準が下がった時の海岸線と見做して変動の基準にすることが考えられる(図 2.1-5)。しかし、汎世界的な海水準の最大低下量、大陸棚縁辺部の深度、海水準最大低下の時期の三つのパラメータが必要であるが、それぞれの不確実性の影響(評価のリスク)が大きく、現状では外挿との比較は難しい。

(iii) 下刻侵食の評価

今回調査を行った三つの地域を概観すると、沿岸海域の沖積層・海底谷について、以下のこと が言えると考えられる。まず、一定の品質が確保されていることが前提となるが、沖積層に埋積 された海底谷を陸域から音波探査断面上で追跡することは、散乱層などがない限りは技術的に可 能である。沖積層であることの確認は、陸上のボーリング調査データ(地質層序・年代の検討を 含む)によるが、海域でもデータを取ることは可能であり、調査を実施することが望ましい。し かし、実際に実施するかどうかは別問題である。

沖積層の厚さは、海岸線付近より沖合に向かって、漸減するか、あるいは、あまり変わらない。 陸域の沖積層も含めて考えると、現海岸線付近の厚さが最大である可能性がある。これは、海岸 線を境に地形勾配が急になることに対応している。ただし、湧別川から続く海底谷上では、湧別 川の河床勾配が調査範囲ではほぼ一定で、河口前面海域の勾配もそれにほぼ等しく、海岸線より 10km 強の範囲では厚さにあまり変化が見られない。ただし、これを論証するためには、谷がい つ形成された地形面を掘り込んだかを知る必要がある。これは海底地形の成因論の問題である。

また、一定の厚さ以上の沖積層に広く覆われており、沖積層に埋積された谷は、つまり、沖積 層の基盤に刻まれた谷の深さは、沖積層の厚さより浅い。特に、天塩川地域、湧別川地域では、 周囲より 10 m より浅い。このことは、沿岸海域では、後期更新世以降には、現海岸線付近ほど の下刻が生じていなかったことを示しているのかもしれない。この論証もまた、海底地形の成因 と関連する。

ーツ瀬川地域との比較で言えば、天塩川地域前面海域は沈降域であり、湧別川地域前面海域は、 地形勾配が河川勾配とあまり変わらないという特徴を持つ。これらのことは、沈降域であること や、地形勾配が下刻侵食に影響していることを示唆している。前者について、幡谷ほか(2016) は、沈降域の沖積層の深さの説明で下刻の影響と沈降運動の影響の分離が課題と指摘している。

(e) まとめ

陸上河川〜海域谷沿いの地形・地質の連続性がある地域では、沿岸海域の外挿による隆起量の 見積りは妥当である可能性がある。しかし、沿岸陸域で平野/山地境界に活断層などがある場合 には、外挿に用いることができるデータは限られ、沿岸海域の隆起・沈降量の定量的評価には、 沿岸部の地形・地質の精査を要す。

大陸棚縁辺部が最終氷期最盛期(LGM)の河口であるとして隆起量を見積ることは、LGMの 最大の海水準低下量、最大低下した時期、LGMの河口部の位置などの不確実性の影響が大きい。

下刻量は、最高潮時の海岸線付近(現在の海岸線付近)が最大かもしれない。 今後の課題としては、以下の点が挙げられる。

- 今回は二次元断面での検討だが、広域的にデータを取得し、三次元的に分析することにより、隆起・沈降様式の理解を深め、沿岸海域の隆起・沈降評価の精度・信頼性向上が望める。
- 外挿とは独立した評価方法として期待される大陸棚の地形・地質情報を用いた隆起量評価
 については、不確実性の低減を図るか、これらの不確実性の影響を織り込む必要がある。
- 沿岸海域の下刻量の評価のためには、地形面(大陸棚)の成因とその時期の理解が必要である。

③ 宮崎平野における隆起・侵食に関わる事例研究(平成 29・30 年度)

(a) 概要

ここまでの机上検討を受け、外挿法による海域の隆起量評価が可能と考えられる宮崎県一ツ瀬 川地域を含む宮崎平野において、事例研究を実施した(図 3.2-11)。段丘の多段発達が良く、隆 起量が大きいため空間変化をとらえやすい、かつ、指標テフラが豊富に分布する、といった理由 で、北海道弓場津川地域を含むオホーツク海側よりも研究に有利と考えた。 陸域の隆起量データから構築した隆起モデルを海域に外挿することにより、沿岸海域の隆起量の評価を試みた。ここでのポイントは、これまでやってきた地形・地質断面図に基づく二次元での外挿に代わり、三次元の外挿に拡張したことである。



図 3.2-11 事例研究調査位置図(宮崎平野とその沿岸海域) 陸域及び海域の基図は、米国航空宇宙局(NASA)による地形データ(SRTM-3)及び日本水路 協会発行の海底地形データ(M7000シリーズ)からそれぞれ作成。黒点線:事例検討範囲、橙 色線:沿岸の海の基本図「延岡」、「美々津」及び「宮崎」、赤線:沿岸の海の基本図調査におけ る海上音波探査測線、青線:旧地質調査所による海上音波探査測線(GH83-1)

(b) 実施内容

宮崎平野中・北部のうち、この範囲の南に位置する一ツ瀬川周辺では、西北西-東南東の地形・ 地質断面図から、海側へ傾動しながら隆起していると考えられる(前項目 ②「地形・地質縦断面 を用いた隆起・侵食評価手法の机上事例研究」を参照)。一方、長岡ほか(2010)は、海成段丘の 分布から、北方への傾動運動を指摘している。これらのことは、宮崎平野の後期更新世の隆起運 動が、一様な傾動運動で特徴づけられることを示唆している。

そこで、本研究では、陸域の後期更新世の平均隆起速度分布から、一方向への傾動隆起モデル を構築し、これを沿岸海域に外挿することにより、海域の隆起速度を見積もった。このモデルは、 最も単純な隆起モデルの一つであり、隆起量の空間分布が一次式、すなわち、平面・平板で表現 されることから、ここではこれらを平面近似モデルと呼ぶ(図 3.2-12)。



図 3.2-12 平面近似モデルの概念図

具体的な外挿法の検討の手順は以下のとおりである。まず、先行研究の情報の分析に加え、野 外調査によりデータを拡充した。次に、陸域の隆起モデルを構築した。しかし、後述するように、 この過程で、データソースにより傾動方向が異なるモデルができることが分かった。このため、 モデルの絞り込み・検証の材料を、陸域の地質構造のみならず、海上音波探査記録の再解析によ り把握した海域の地形・地質分布、地質構造、並びに、測地データにも求めた。さらに、これら の検討の過程で出てきた不確実性の要素を整理し、要素ごとに隆起モデルを構築し、それらを比 較することで隆起量評価の不確実性について検討した。

一方、沿岸海域での下刻侵食量の見積もり・評価については、一ツ瀬川に加えて、複数の河川 についても調査し、評価を取りまとめた。

(c) 調査結果と考察

(i) 野外調査等によるデータの拡充と隆起モデル(平面近似モデル)の構築

宮崎平野の段丘の対比と編年については、長岡(1986)、長岡ほか(2010)などによる詳しい 研究がなされている。本研究では、これらを確認するとともに、段丘編年に関わる年代データが 乏しい北部に重点を置いて、データの拡充を図った。特に、市街地化著しい日向市内では、露頭 が極めて少なく、先行研究の知見の検証、新たな地質情報の獲得が難しかったため、ボーリング 掘削並びにピット掘削による地質調査を4箇所で実施した。しかしながら、基本的には、先行研 究が裏付けられる結果となった。

そこで、先行研究の段丘対比・編年を踏襲し、これに基づく隆起量分布からモデルを構築した。 ここで、MIS5e、MIS5cの段丘からの隆起量データを使った隆起モデルと、MIS5eの段丘からの 隆起量データを使ったモデルを構築し、傾動方向が大きく異なる 2 つの隆起モデルを得た(図 3.2-13)。



図 3.2-13 平面近似モデル化の試行(平成 29 年度検討結果)

(ii) 陸域の隆起モデルの検証・絞り込み

まず、新第三系の地質分布・地質構造の検討を行った。これは、後期更新世以降の傾動運動が 地質分布・地質構造にも反映されているのではないかという点に着目した検討である。陸域では、 鈴木(1987)の走向線図から、宮崎平野中・北部では現海岸線よりも東に振れた北北東走向・東 南東傾斜の同斜構造が読み取れる。一方、海域の検討では、産業技術総合研究所(旧地質調査所) より借用した宮崎平野沿岸部の海上音波探査記録(GH83-1 航海、地質調査所, 1998)の再解析を 実施した。宮崎層群の上位層の走向傾斜は、概ね北北東・南南西走向・西南西傾斜であった(図 3.2-14)。宮崎層群堆積後~後期更新統堆積前以降の運動を反映したものと考えられる。



図 3.2-14 宮崎層群における走向・傾斜の分布

次に、宮崎層群とその上位層の分布に着目した。海上音波探査記録の再解析によれば、海底面 では、南北からわずかに西に触れた直線的な境界を以て両層が分布している(図 3.2-15)。両者 の関係は不整合で、宮崎層群に対し、しばしばその上位層が西向きに高角で接している(アバッ ト)。また、海域の宮崎層群分布域には多数の谷が刻まれているのに対し、更新統分布域はなだら かな陸棚地形を呈す(図 3.2-16)。このような地質境界・地形境界は、宮崎層群の傾動と海水準 変動によって生まれた堆積域と侵食域の境界、つまり、上位層堆積期の海面最高潮時の汀線を示 していると解釈できる。これらは更新世における北北西方向の汀線の存在と東北東方向の傾動を 示唆する。



図 3.2-15 検討事例範囲のうち海域における海上音波探査記録の再解析による地質平面図 旧地質調査所・GH-83-1 航海(地質調査所, 1998)で取得された海上音波探査記録の再解析によ り作成



図 3.2-16 沿岸海域の沖積層下の地形・地質図(平成 29 年度検討結果)

一方、九州中・南部は、測地(GPS)により反時計回りの回転運動をしていることが知られている(地震調査委員会, 2013 など)。

以上を考え合わせると、宮崎層群堆積時に始まり、現在に至るまで、傾動方向が反時計回りに変化するという地殻変動の作業仮説を考えることができる。これに沿って考えるならば、一次データの不確実性は大きいかもしれないが、後期更新世以降の隆起運動を表すモデルとしては、モデル1(図 3.2-13)の方が妥当であると考えられる。

(iii) 隆起モデルの不確実性の検討

隆起・沈降モデルは、データセットに依存する。つまり、いうまでもなく、データセットの不 確実性はモデル化に影響する。その意味で、本研究で扱うのは、隆起量の見積もりに対して、地 形・地質データの不確実性が与える影響、つまりリスクである。ここでは、陸域隆起量の仮想的 なデータセットを用いて平面近似モデルを複数構築し、これまでに示したモデル1とモデル2も 含めて比較することにより、上記リスクを検討する。

まず、仮想的なものを含めた5つのデータセットから平面近似モデルを作成した(図 3.2-17)。

- (ア) 基本データセット/MIS5e、5c データを用いた場合(H29 実施、前述のモデル 2)
- (イ) 基本データセットのうち、MIS5e 段丘から見積もられたデータのみ用いた場合(H29 実施、前述のモデル 1)
- (ウ) 基本データセットの名貫川以北の段丘データを除いた場合
- (エ) 基本データセットの名貫川以北の段丘が1段ずつ古くなった場合
- (オ) 基本データセットの名貫川以南の MIS5e 面が1段ずつ古くなった場合

これらは、平成 29 年度のモデル 2 のデータセット(MIS5e、MIS5c データを用いた場合)を 基本データセットとし、時間的・空間的にデータがこれより少ない場合の想定 2 ケースと、仮に 段丘対比・編年に関わる異なる作業仮説があった場合の想定 2 ケースである。

以下、地史に基づく検証を是とし、(ア)が考えうる最も確からしいモデルであるとの前提で、 モデル化の結果とその考察を述べる。

(ア)と(イ)の比較から、データの品質がやや劣っても、MIS5cのデータがあった方が良い。

(ア)と(ウ)の比較から、データの分布により、傾動方向が変わり、隆起量の外挿結果が変わる(北部で過大評価、南部で過小評価)ことがわかる。

(ア)と(エ)の比較では、(ア)よりも(エ)の平面近似の相関が良い。モデル構築の土台で ある本年度の段丘対比・編年において、昨年度からの変更はないとしたが、引き続き検討する余 地があることを示しているのかもしれない。ただし、傾動方向の差は小さく、事例研究地域北半 分の沿岸海域では、両者で外挿結果の差も小さい。

(オ)はテフラデータから否定される仮想的なものであるが、相関も良くない。明らかに否定 されるようなデータセットを検討する意義はない例となろう。

次に、これらのモデルを沿岸海域に外挿し、隆起・沈降量を見積もった(図 3.2-18)。ア・イ・ ウがデータセットの量による比較、ア・エ・オが編年(モデル)の違いによる比較となる。この 結果は、データセットの影響が大きいのか、段丘対比・編年に関わる複数の作業仮説の影響が大 きいのかは、評価すべき範囲によることを示している。例えば、両測線の交点のCでは、段丘の 編年の違いによる影響(不確実性)よりもデータセットの影響が大きいが、より北方では必ずし もそうはなっていない。この事例研究が示すのは、このような解析を実施して、各モデルの課題


を明らかにし、解決に取り組むことが全体としての不確実性の低減につながることと考える。

図 3.2-17 複数の平面近似モデルによる不確実性の検討



図 3.2-18 各平面近似モデルから外挿された沿岸海域の隆起・沈降量 海岸線に平行な A 測線、同じく直交する B 測線において、各モデルの外挿から計算された結 果。

(iv) 沿岸海域の下刻侵食量

仮に、隆起も沈降も極めて少ない地域の陸域では、下位水準低下に伴う下刻侵食が最も大きい (深い)のは、現在の海岸線付近と考えて差し支えない(井関,1975など)。その下刻量は隆起量 と関連があり、現在の海岸線付近における後期更新世以降すなわち直近の海水準変動1サイクル の間の最大下刻量は、当該地域の後期更新世以降の隆起量に100mを加えたものより小さい(幡 谷ほか,2016)。

事例調査地域・宮崎平野及びその沿岸海域において、東方への傾動運動が生じているのであれ ば、海岸線から離れるほど後期更新世以降の隆起量は小さいと推定され、後期更新世以降の最大 下刻量も小さくなると考えられる。そして、海水準が最も低下した最終氷期極相期(およそ 2-3 万年前、Clark et al., 2009 など)の海岸線付近では、少なくとも、そこが隆起していないあるい は沈降していると評価されるならば、下刻量が 0 と推定されることになる。

本研究では、事例研究地域・宮崎平野の沿岸海域である大陸棚上において、現在の主要河川から繋がるとみられる沖積層下に埋積された河谷を追跡し、その地質断面図を作成した。沖積層の 厚さとして表現される下刻量は、海岸線付近で最大であった(図 3.2-19)。このことは、上記の 隆起量と組み合わせた評価と整合的である。

ただし、本研究は、あくまで沿岸海域において現海岸線付近の下刻量が最も深くなる一事例で

ある。一般化には事例蓄積が必要と考える。



図 3.2-19 河川沿い地質断面図の例示

(d) まとめ

陸域において後期更新世以降の隆起モデルを構築し、それを外挿して沿岸海域の後期更新世以降の隆起・沈降量を見積もる手法(以下、外挿法)の事例研究を宮崎平野において実施した。以下に主な結果をまとめる。

- ・ボーリング調査等を含む野外調査を実施し、データの拡充を図った。その結果、従来の知見を再確認し、段丘対比・編年について踏襲した。
- ・データセットにより、構築されるモデルの傾動方向が異なる結果を得た。これは海域の外 挿結果に大きく影響することになる。
- ・モデルの絞り込み・検証を行うため、地質・地質構造の検討を行った。この結果を踏まえ、 新第三紀以降、傾動方向が反時計回りになるような地史の作業仮説を提示し、これに整合 的な隆起モデル(東北東傾動)を採用した。このことは、隆起モデルを絞り込むに際し、 地史の検討が重要であることを示している。
- ・外挿法による隆起・沈降量の見積りの不確実性を、仮想的なものも含めた複数のデータセットから構築された平面近似モデルを比較することにより検討した。データセットの不確実性の影響、段丘対比・編年の不確実性の影響がある。どちらの影響が大きいかは評価すべき地理的範囲によると思われるが、ここに提示したような方法で検討することにより、不確実性の幅を具体的に把握することができると考えられる。
- ・沿岸部の河川による下刻侵食については、山側から海側に傾動する地域において、現海岸 線付近の下刻侵食が最も大きい可能性が示唆された。このことは、幡谷ほか(2016)が示 した「隆起量+100mより深く彫り込まれることはない」という作業仮説と整合的である。

④ 三ヵ年の成果取りまとめ

三ヵ年の研究を通して得た点を以下に纏める。

 ・現時点で、海域において、海域から得たデータから直接後期更新世以降の隆起運動を精度 よく求めることは難しい。このため、沿岸海域の隆起量評価にとって、陸域の隆起モデル を構築し、それを沿岸海域に外挿する方法(外挿法)は、現実的な選択である。

- ・我が国の沿岸部で外挿法が容易に適用できる地域は限られる。ここで、容易とは、単純な 一様傾動の隆起・沈降運動を想定できる地域のことを指す。言い換えれば、断層や褶曲を 伴う隆起モデルの外挿は今後の課題である。なお、第四紀火山の分布により外挿法を適用 し難い地域もあるが、これはサイトとして不適であるため検討に及ばない。
- ・単純な一様傾動モデルに基づく隆起量評価にも、不確実性がある。モデル構築に用いるデ ータセットにより、傾動方向が異なり、引いては隆起量の見積りに影響する。データセッ トの違いを生じる原因としては、取得するデータの分布範囲、段丘対比・編年に関わる複 数の異なる作業仮説の存在が考えられる。
- 複数の隆起モデルは、地史の検討により絞り込みうることを提案した。
- ・隆起量評価の不確実性を、感度解析によって評価することを提案した。

2) 海底地形の地形判読に基づく隆起・侵食評価手法の検討

1 背景と目的

海陸境界付近の隆起・侵食に関する調査・評価技術の高度化においては、現在の陸域だけでな く、氷期に広く陸化する大陸棚からも地殻変動や侵食の指標となる地形の分布やその特徴を読み 取ることが技術開発課題となる。この技術開発課題の解決には、大陸棚周辺の地形的特徴の俯瞰 的な把握が必要となる。しかし、日本列島周辺の大陸棚の地形的特徴を図示した主題図について は、大陸棚縁辺と陸棚谷(氷期に大陸棚を下刻した河谷)の分布を示した1/100万スケールの日 本第四紀地図(日本第四紀学会編,1987)を除くと一般にはほとんど利用できない。そこで、本 事業では、大陸棚周辺の地形的特徴を俯瞰するための基礎資料の作成を目的として、近年利用可 能になった海底地形デジタルデータ(M7000シリーズ)を用いて浅海底を対象とした地形判読や 数値地形解析を行った。さらに、作成した資料に基づき沿岸部における地殻変動の評価手法の検 討を行った。得られた成果については、各年度の報告書に記載されていることから、ここでは概 要のみ以下に記す。

2 結果

大陸棚周辺の地形的特徴を俯瞰するための基礎資料として、(1)大陸棚外縁と大陸棚の侵食現 象に係る地形の分布図、(2)海底段丘の後面段丘崖基部の分布を示す図を作成した。前者の図は、 わが国の大陸棚の広がりや大陸棚の開析度合いを把握する上で重要な意味を持つ。一方、後者の 図は、海底段丘とよばれる陸域に分布する海成段丘と形態が類似することから、海成段丘と同様 な過程(氷河性海水準変動と地殻変動の重合)により形成され、現在は水没している可能性をも つ地形の分布を示したものである。海底段丘の中には、海域における地殻変動を反映した深度分 布を示すものが存在している可能性があるため、それらを判読し、分布を図化することは、沿岸 部の地殻変動の評価において重要な意味を持つ。沿岸部の地殻変動の評価手法の検討については、 投影断面図上での MIS 5e 海成段丘と浅海底地形の高度分布の比較に基づき行った。

(a) 大陸棚外縁と大陸棚の侵食現象に係る地形の判読・図化

海底地形デジタルデータ(M7000シリーズ)から作成したアナグリフ画像の地形判読に基づき 大陸棚外縁と大陸棚の侵食現象に係る地形の分布図を作成した。大陸棚の広がりを規定する大陸 棚外縁については、八島ほか(1982)と吉川(1997)の定義にならい大洋底に向かって下る顕著 な遷急区間のうち、最も海側に連なるものとし、「地形的特徴に基づく大陸棚外縁」として図示し た。さらに大陸棚外縁を海底谷の谷頭部や海底地すべりの滑落崖頂部に一致するものとそうでな いものとに区分した。また、大陸棚外縁以浅に見られる連続性の良い遷急区間も図示した。

大陸棚の侵食現象に係る地形については、陸棚谷と海底谷に着目した。陸棚谷については、大 陸棚上の谷線を判読・図化した。海底谷については、大陸棚との関係に着目して、①大陸棚を開 析し海洋底までのびる海底谷、②大陸斜面上に発達するガリー、③大陸斜面上に発達する海底谷 の3タイプに区分した。図 3.2-20 に作成した図を示す。



図 3.2-20 日本列島の大陸棚外縁と海底谷の分布図

図 3.2-20 を俯瞰することにより、(1) 大陸棚の広がりと大陸棚外縁の深さの地域差、(2) 陸棚 谷は日本列島の大陸棚にほぼ普遍的に分布するが、その出口深度には地域差がみられること、(3) 大陸棚の広がりが海底谷の谷頭部や地すべり滑落崖の頂部が連なる開析前線によって決められて いる場があること、といった日本列島の大陸棚の地形的特徴に係る基礎情報を読み取ることが可 能となった。

(b) 海底段丘の判読・図化

海底地形デジタルデータ(M7000シリーズ)から作成したアナグリフ画像の地形判読に基づき、 日本列島における海底段丘の後面段丘崖基部を判読・図化した。アナグリフ画像判読における海 底段丘の判読基準は、陸上の段丘判読における基準(例えば、鈴木,2000)を参照し、「一方ない し四方を崖または急斜面で縁取られ、周囲より不連続的に高い平坦面ないしは緩斜面」とした。 そして海底段丘の後面段丘崖の基部を図化した。

に海底段丘の後面段丘崖基部の深度分布を表した図を示す。



図 3.2-21 日本列島の海底段丘の後面段丘崖基部の深度分布図 MIS 5e 海成段丘は、野村ほか(2017)のデータに基づく。

から、(1)海底段丘は、日本列島の大陸棚上にほぼ普遍的に認められ、陸域に分布する海成段 丘に比べて地形面の空間的な連続性が良いこと、(2)海底段丘の大半は、大陸棚外縁の平均水深 である約140m(岩淵・加藤,1988)以浅に分布するが、水深200m以深においても、全体とし ての数は少ないが海底段丘を確認することができること、といった海底段丘の分布に係る基礎情 報を読み取ることが可能となった。

さらに本事業では、海底段丘判読の信頼性向上を目的として、深度・面積分布図を用いた数値 地形解析に基づく海底段丘の判読手法について検討した。図 3.2-22 に示された深度・面積分布 と地形断面との関係に基づくと、深度・面積分布にみられるピークは、その深度に平坦面ないし は緩傾斜な斜面が存在することを表し、谷はその深度の面積が狭い、すなわち急斜面が存在する ことを表す。つまり、深度・面積分布におけるピークの立ち上がり深度は、海底段丘の後面段丘 崖基部に、またピークがみられなくなる上限深度が大陸棚外縁にそれぞれ相当するとみなせる。

数値地形解析に基づく判読結果と海底地形アナグリフ判読の結果とを比較すると、数値地形解 析から新たに海底段丘を判読することができた場と数値地形解析のみでは海底段丘を判読するこ とが困難であった場が存在した。大まかに言えば、前者に相当する場は、傾斜1°未満の斜面であ り、後者に相当する場は、(1)一本の測線で地形断面を代表させられる解析領域(矩形)を設定 できない、つまり複雑な地形形状をとる場や、(2)深度・面積変化が相対的に小さいため、深度 方向の面積変化のピークがはっきりしない、例えば、傾斜数°以上の斜面に複数段の海底段丘が分 布するような場であった。そのため、傾斜 1°未満の斜面が広がる浅海底地形における海底段丘判 読では、アナグリフ画像判読に数値地形解析を組み合わせた手法の適用が望ましいと考えられた。 そのような場の事例を図 3.2-23 に示す。



図 3.2-22 深度・面積分布と地形断面との関係



図 3.2-23 浅海底の数値地形解析に基づく海底段丘判読の例(三陸沿岸) 深度・面積分布図は、解析領域内の深度 0~250 m のものを示す。数値地形解析のみでは、 海底段丘面の後面段丘崖基部を水深 30 m に認めることができない。

(c) 沿岸部海域の地殻変動の評価手法

沿岸部海域の地殻変動の評価手法の検討では、海底段丘の発達の良い海域を対象に MIS 5e 海 成段丘と浅海底地形を投影断面図上に示し、両者の高度分布パターンの比較を行った。図 3.2・24 に三陸沖、図 3.2・25 に房総沖、図 3.2・26 に津軽海峡(北海道側)の事例をそれぞれ示す。ここ では、ひと続きの海底段丘面や大陸棚外縁が同時代に形成された地形であると仮定した時に、投 影断面図から読み取れた結果の要点を以下に記す。

- ・海成段丘の高度と海底段丘群や大陸棚外縁の深度変化の傾向が調和的にみえる区間がある(図 3.2-24~図 3.2-26)。特に注目すべきは、そのような区間では、海成段丘の高度変化の傾きに対 して大陸棚外縁とそれ以浅の海底段丘の深度変化の傾きが小さく、逆に大陸棚外縁以深では海 底段丘の傾きが同等か大きくなることである(図 3.2-24)。
- ・大陸棚外縁については、海岸線の一般方向にほぼ一定深度のものと、深度変化が大きくノコギリ状の深度分布を呈するものがある。後者は、開析前線が大陸棚外縁に及んでいる場合にみられる(図 3.2-25)。
- ・陸域の活断層ないしは推定活断層の海域延長部を境に海底段丘群の深度に変化がみられる(図 3.2-26)。

これらのことは、海底段丘の深度分布の中に地殻変動を反映したものが含まれていることを示していると考えられる。



図 3.2-24 投影断面図上における海成段丘と浅海底地形の分布例(三陸沖) MIS 5e の旧汀線分布は、野村ほか(2017)のデータに、 それ以外の分布は、本事業によるデータに基づいている。



図 3.2-25 投影断面図上における海成段丘と浅海底地形の分布例(房総沖) MIS 5e の旧汀線分布は、野村ほか(2017)のデータに、 それ以外の分布は、本事業によるデータに基づいている。



図 3.2-26 投影断面図上における海成段丘と浅海底地形の分布例(津軽海峡) MIS 5e の旧汀線分布は、野村ほか(2017)のデータに、 それ以外の分布は、本事業によるデータに基づいている。

③ まとめ

本事業では、陸域だけでなく氷期に陸化する大陸棚からも地殻変動量や侵食量を見積もる方法

を検討する上での基礎データ、すなわち、わが国の大陸棚に発達する海底地形の実態及び特徴を まとめたデータを作成することを目的として浅海底を対象とした地形判読や数値地形解析を実施 し、大陸棚周辺の地形的特徴を俯瞰するための基礎資料としての(1)大陸棚外縁と大陸棚の侵食 現象に係る地形の分布図、(2)海底段丘の後面段丘崖基部の分布図を作成した。そして MIS 5e の海成段丘の高度分布と判読した海底段丘や大陸棚外縁の深度分布との比較に基づき、海域の地 殻変動評価手法について検討した。

大陸棚外縁と大陸棚の侵食現象に係る地形の分布図からは、わが国の大陸棚外縁や陸棚谷の分 布の地域差を読み取ることが可能となった。また、大陸棚外縁が海底谷の谷頭部や地すべり滑落 崖の頂部が連なる開析前線に一致する場があることが明らかになった。一方、海底段丘の後面段 丘崖基部の分布図からは、海底段丘がわが国の海域に普遍的に分布する地形であること、またそ の段数や分布深度には地域差があることが明らかになった。これらの分布図に示された海底地形 の深度分布と、過去約 10 万年間の地殻変動をあらわす MIS 5e の海成段丘の高度分布とを比較 した結果、大陸棚外縁や海底段丘の深度分布の中には海域の地域的な地殻変動を反映したものが 含まれている可能性があることがわかった。このことから、海域における地殻変動様式の把握に おいて、大陸棚外縁や海底段丘の発達史の理解が重要であると結論づけられた。それゆえ、海底 段丘や大陸棚外縁の発達史の理解に向けて、それらの成因を音波探査記録などから把握すること、 また海外の研究事例(例えば、Chaytor et al., 2008; Castillo et al., 2018)のように海底段丘や 大陸棚外縁付近から絶対年代試料を採取し、その形成年代を明らかにすることが今後の課題とし て挙げられる。

3) 要素技術の検討(その1)地形変化シミュレーション技術の高度化

隆起・侵食は、地形に現れることから、地形変化の評価が重要である。地形変化の評価手法と しては、実存する堆積物や地形の記載・分析に基づく手法に加え、地形変化の数理モデルに基づ く数値シミュレーションを適用する手法が考えられる(野上,2010)。地形変化の数値シミュレー ションは、長期にわたる地形変化とその不確実性の幅を定量的に得ることができるという利点を 有している。近年では、数値計算技術の高度化を受け、海成段丘の発達への適用例(井上・田中, 2013)なども報告されている。本事業では、沿岸部を対象とした地形変化の数値シミュレーショ ン技術の高度化を目的として、谷川ほか(2016)による地形変化シミュレーション技術を参考と し、沿岸部に見られる現象である堆積物の圧密に伴う物性変化と海食の数値シミュレーション技 術について検討した。

検討に用いた地形変化シミュレーション・プログラム(以下、「JAEAsmtp2」という)は、侵 食土砂が運搬される距離を集水面積のべき関数として下流側ほど増加させる手法である。侵食量 は基本的に、地質の硬さを表す係数(地質係数)の逆数に傾斜(勾配)のタンジェントを乗じて 算出する。堆積量は、メッシュで算出された侵食量を運搬距離で指定する距離の下流側のメッシ ュに均等に堆積させ、さらに運搬距離を流下長の増大に伴って下流側で増大させる。これらに加 え、気候の変化や礫径なども係数としてプログラムに関与する。JAEAsmtp2の詳細については、 産業技術総合研究所ほか(2017)及び日本原子力研究開発機構(2018)を参照されたい。

① 圧密に伴う物性変化を考慮したシミュレーション技術

JAEAsmtp2 では、期間別に堆積厚が記録され、圧密に伴う物性変化は考慮されていない。沿 岸部海域での侵食深を地形変化シミュレーションによって検討する場合には、特に未固結堆積物 の物性変化を適切に与える必要がある。そこで、圧密による岩相の変化を既存の堆積物の物性デ ータから明らかにする方法を検討した。 日本各地の沿岸部の粘土質堆積物を対象として、圧密による物性変化、特に侵食に対する受食 性に関連する物性値を既存資料に基づいて整理した結果、更新世後期〜完新世の正規圧密状態下 において粘土質堆積物の一軸圧縮強度は、埋没深度とともに比例的に増大する傾向があり、正規 圧密状態ではおおよそ 30 万年程前までこの関係を適用できる可能性が認められた。一方、一軸 圧縮強度とP波速度の関係について、大久保・寺崎(1971)を参考に検討した結果、それらは対 数表示で比較的良い正の相関があることが認められた。P波速度と地質係数の関係については、 三箇・安江(2008)及び花谷ほか(2011)においてすでに検討されているため、一軸圧縮強度と 地質係数の関係を示すと、それらはほぼ比例関係にあることが分かった(図 3.2.27)。



図 3.2-27 一軸圧縮強度と地質係数との関係

花崗岩類、中新世堆積岩、鮮新世堆積岩の値は三箇・安江(2008)の推定値、更新世前期堆積岩 は花谷ほか(2011)の推定値による。

圧密変化を地形変化シミュレーションに適用するには、埋没深度に応じて適宜メッシュ単位に 地質係数を変更すれば良いと考えられる。これを表現する方法として、初期堆積物を埋没深度別 に最大5層としてマップを設定し、シミュレーション期間中の新たな堆積物は期間別にマップを 設定する方法を考えた。マップデータはメッシュ単位に堆積物の上面標高と地質係数の二つの情 報を持たせることになる。

谷川ほか(2016)では、初期堆積物として1層(地質係数=1)のモデルを用いており、期間 中の堆積物は期間別に複数のマップを記憶しているものの、堆積物ごとに異なる地質係数は記憶 させていない(図 3.2-28)。したがって、シミュレーションに用いる情報としては、基盤上面高 (絶対高度)とそれぞれの堆積物の上面高のみを用いている。圧密過程をシミュレーションに組 み入れる場合には、垂直方向の基盤や堆積物の境界については上面高のみを記憶させることとし、 それぞれの堆積物について地質係数を記入するマップ情報を与える方法が考えられる(図 3.2-28)。この方法を用いれば、堆積物の個々のメッシュについて埋没深度(最上面からの深度) を算出することにより、圧密後の地質係数を算出することができる。



図 3.2-28 圧密過程を組み入れたマップの取り扱い方 左:谷川ほか(2016)のマップ構成、右:本事業において検討したマップ構成

② 海食を表現できるシミュレーション技術

海食崖・海食台は海進時の岩石海岸に形成され、海水準以下の浅所に侵食により海食台を形成 するとともに、海食崖を後退させる。JAEAsmtp2 では海食機能が考慮されておらず、地形の変 化量としては最も大きい海食崖の後退を表現することはできていない。また、海水準上昇期の海 岸付近の平坦部では、川筋で標高がやや低いため海岸線はリアス式に屈曲の多い海岸線が形成さ れ、実際とは特徴が異なる海岸線が形成されてしまう。そのため、沿岸部における地形変化をよ り正確に表現するために、既存情報に基づき、海食崖の形成プロセスの把握、海食崖の後退速度 と一軸圧縮強度の関係の検討を行い、海食崖の後退速度を考慮した地形変化のアルゴリズムを検 討した。

海食崖の後退速度はおおまかに波のエネルギーと海岸の岩石強度で決定されると考えられている(Sunamura, 1983; 宇多, 1997)。岩石の一軸圧縮強度は岩石により30倍程度の差があり、また、海食崖の後退速度は地質により40倍程度の差がある(表 3.2-1)。海食崖の後退速度が岩石の一軸圧縮強度に反比例するとすれば、両者を乗じた値はおおむね一定の値となるはずである。 先述のように一軸圧縮強度と地質係数とは比例関係にあり(図 3.2-27)、一軸圧縮強度から地質係数に換算し、これと海食崖の後退速度を乗じた値は2倍程度の一定の範囲に収まる(表 3.2-1) ことから、海食崖の後退速度は岩石の一軸圧縮強度にほぼ依存すると言えることが分かった。よって一軸圧縮強度あるいは地質係数を決定すれば海食崖の後退速度が推定できることになる。

海食を考慮した地形変化シミュレーションを行い、海食崖の形成を検討したところ、シミュレ ーション直後には海食が生じるが、沿岸部での堆積により海食崖の侵食が困難になり海食崖の後 退は停止した(図 3.2-29)。一方、海食崖の基部付近に堆積させない場合は、シミュレーション 中に海食崖は後退し続ける結果となった(図 3.2-29)。この結果から、海食崖の後退が海食崖基 部での波蝕による土砂の再侵食(ないし、土砂の未堆積)が重要であると考えられる。地形変化 シミュレーションでは、沿岸部に堆積する砂浜海岸と、波蝕により海底侵食が生じる両者の地形 を扱う必要があり、また、地形場の変化に応じて状態が変化することを考慮する必要がある。こ のような海域での外力(波の入射方向、海流、波のエネルギー)のような複雑な現象を地形変化 シミュレーションに組み入れることは現状では困難と考えられる。このため、現時点での対応と しては、海岸地形の特徴から堆積比マップを作成し、形態模擬的に海食機能をシミュレーション に組み入れる方法が考えられる。

	後退速度(mm/yr)			P 波速度	一軸圧縮係数	地好反物	谷退 声度 > 地質区数	
	最小	最大	中央値	幅	Km/s	kN/m2	地員际奴	反应还反 个地员际数
変成岩	22	42	32	10	4.3	62, 750	2, 723	87, 121
深成岩	25	48	36	12	4.3	63, 095	2, 736	98, 501
火山岩	28	56	42	14	4. 1	54, 292	2, 387	100, 244
中古生代	49	96	72	24	3.4	33, 520	1, 540	111, 359
古第三紀	102	202	152	50	3. 1	25, 870	1, 216	189, 905
新第三紀	89	162	126	37	2. 3	12, 138	611	76, 809
第四紀	235	488	362	127	1.3	2, 495	145	52, 469

表 3.2-1 海食崖の後退速度と P 波速度及び一軸圧縮強度の関係

[※]第四紀のP波速度は井波(1983)を引用、第四紀以外は須田ほか(1991) の単元別集計値を使用



③ まとめ

沿岸部に見られる現象である堆積物の圧密に伴う物性変化と海食の数値シミュレーション技術 について JAEAsmtp2 を用いて検討した結果、圧密に伴う物性変化については、既存情報による 一軸圧縮強度や P 波速度との関係に基づき、シミュレーションで用いる地質係数として表現する ことが可能であることを明らかにした。圧密過程をシミュレーションに組み入れる方法として、 垂直方向の基盤や堆積物の境界については上面高のみを記憶させることとし、それぞれの堆積物 について地質係数を記入するマップ情報を与える方法を提示した。

海食の数値シミュレーション技術については、一軸圧縮強度あるいは地質係数から海食崖の後 退速度が推定できることを確認するとともに、海食崖の後退を考慮したシミュレーションの結果 から海食崖基部での波蝕による土砂の再侵食が重要であることが明らかになった。しかし、海流 や波のエネルギーなどの要素まで考慮して本手法による地形変化シミュレーションを行うことは 現状では困難である。本事業で構築した数値シミュレーション・プログラム(JAEAsmtp2 に、 堆積物の圧密に伴う物性変化と海食を考慮したプログラム)は、JAEAsmtp3 として取りまとめた。

4) 要素技術の検討(その2)経験的指標に基づく段丘対比・編年手法の高度化

研究に適した地域の検討(平成 28 年度)

(a) 実施概要

絞り込みは、2 段階で実施した。このうち、第一段階(一次スクリーニング)では、本項目で テーマとした経験的指標に基づく段丘対比・編年手法の高度化のみならず、海成段丘の発達が悪 い地域の隆起・侵食量の評価手法、並びに、被覆層を大きく欠く岩石侵食段丘などを対象とした 段丘対比・編年手法の高度化の検討地域の絞り込みと共に、全国規模でデータが揃った文献を用 い、同じデータに基づいて議論した。これは、詳細な地形の把握と実際の地質試料を用いた分析 などが必要であるため、野外調査が必須であり、このための研究対象を決めるにあたり、①隆起・ 侵食量の見積りには主に段丘を指標として使うため、調査地域周辺には少なくとも対比・編年が 可能な程度に段丘が分布していることが望ましい、②どのような段丘がどの程度分布し、どのよ うな調査をすれば、対比・編年が可能になるかを確認する必要がある、③段丘だけでなく、岩石 侵食段丘の前身である波食棚を調査することにより、隆起の指標、数値年代測定のための試料を 見つけることも重要、といった相互に関連した点について包括的に検討する必要があると考えた ためである。

(b) 手法

海成段丘の発達が悪い地域の隆起・侵食量の評価手法、並びに、被覆層を大きく欠く岩石侵食 段丘などを対象とした段丘対比・編年手法の高度化の研究地域候補の絞り込みは後節に譲ること とし、ここでは経験的指標に基づく段丘対比・編年手法の高度化の視点から、スクリーニングの 手順について述べる。

本実施項目では、比較的古い先行研究で用いられてきた経験的な指標を重視する。この指標は、 地質学的・地形学的な経験則として認識されている地層・岩石の風化や地形面の開析を活用する ものである。すなわち、段丘形成直後に新鮮であった段丘被覆層や段丘礫層が、風化により赤色 化、粘土化などの作用を受けていくことと、段丘形成直後に平坦であった段丘面が開析により平 坦さを失っていくことなどから、年代情報を抽出するものである。これらの性状の変化は、さま ざまな地域で広域的に共通して認められることから、類似した性状を持つ段丘同士が同時代に形 成された段丘として対比できるものとして考えるものである。段丘編年の強力なツールであるテ フラデータの誤った解釈を修正する際にも有効と期待される(濱田・幡谷,2011 など)。今回は経 験的な指標の中でも、段丘を構成する地質の風化に特に着目する。

第一次スクリーニングでは、本項目では、段丘の分布、地質分布の均一性を特に重視した。これに加えて、形成時期の検討に有効となるテフラの分布を参考となる条件として加えた。検討単位は、日本の地形 2~7(東京大学出版会)の地形中区分とする。海成段丘の分布については、同じ場所で形成時期が異なる複数の段丘で比較するために、新しい段丘から古い段丘まで、できるだけ段数があることが望まれる。このような情報を得るための既存資料として、「日本の海成段丘アトラス」(小池・町田編,2001)を用いた。河成段丘の分布については、日本全国の主な河成段丘の分布を示した既存資料として、濱田・幡谷(2011)を用いた。地質分布については、「日本の地形1総説」(米倉ほか編,2001)に示された日本の地質を用いた。

二次スクリーニングでは、一次スクリーニングで判断した内容について、個別の文献や資料を用いた確認を行った。具体的には、主に河成段丘の分布、河成段丘と海成段丘の近接、被覆層の

存在などについて、以下に示す考え方を用い、一次スクリーニングで絞り込んだ地域について、 調査対象としての適性を評価した。また、地質の分布については、産業総合研究所の20万分の1 シームレス地質図を用い、段丘礫層の礫を供給する後背地地質を調査した。なお、海成段丘の分 布とテフラについては、一次スクリーニングの結果を踏襲した。

まず、河成段丘の分布については、河成段丘は、経験的指標の検討対象である礫層が得やすい 対象であり、検討を行う上では、年代の異なる複数段の段丘が存在することが望ましい条件とな る。このため、河成段丘の分布の状況を調査候補地として適性が高い順に以下の三つに区分した。

- ▶河成段丘の発達が良い地域:河川に沿って多段の河成段丘が比較的広く分布する
- ▶河成段丘が分布する地域:河川に沿った分布を示さず、扇状地性など、比較的小規模な河 成段丘がある程度発達する
- ▶河成段丘の分布が乏しい地域:河成段丘が見られないか、あるいは、小河川に沿ってごく 新しい河成段丘が極めて小規模に分布する

次に河成段丘と海成段丘の近接関係については、沿岸域での隆起量評価を行う上では、河成段 丘が単に分布しているだけでなく、海成段丘との地形学的層位関係、すなわち空間的な交差関係 などの確認が対比・編年上、有用な情報となりうるため重要である。従って、河成段丘と海成段 丘が近接して分布していることが望ましい。このため、河成段丘と海成段丘の分布の近接の状況 を調査候補地として適性が高い順に以下の三つに区分した。

- ▶河川に沿って比較的広い多段の河成段丘の分布と河川の河口付近に海成段丘が分布する
- ▶多段の河成段丘が分布するが、その河成段丘が分布する河川の河口付近には海成段丘が分 布せず、海成段丘の分布域が当該河川から離れている、あるいは海成段丘の分布地域に近 接して河成段丘が分布するものの、小規模である
- ▶河成段丘かつまたは海成段丘の分布がごく局所的で、分布していても分布域がまったく重ならない

段丘被覆層についても、段丘礫層と同様、経験的指標の検討対象となる。段丘被覆層は、指標 テフラ起源の物質を含みながらも主に風成ローム層からなり、地域ごとに層厚、性状などに差が あるが、海成、河成を問わずに存在すると考えられる。しかし、風成ロームとは異なる堆積物が 被覆層を厚く覆っている場合、あるいは大量に挟まれる場合などには風化作用に影響を与えるこ とが考えられるため注意が必要である。このため、文献中にそのような記述がある地域について は適性が劣る地域として評価する。

さらに、経験的指標は、段丘礫層及び段丘被覆層の風化による変化を扱うものであるため、気 候条件により性状に差が生じる可能性がある。このため、調査候補地の適性の判断には用いない が、条件が同等な複数の調査候補地域から絞る場合に、気候条件の異なる地域を含めることを考 慮する。

(c) 調査結果と考察

(i) 一次スクリーニング

19 地域が調査・研究に適した地域として残った。その内訳は、北海道9地域(渡島半島、北見山地、日高山地、宗谷丘陵、天塩山地、増毛山地)、東北1地域(北上山地)、関東1地域(常陸台地)、中部5地域(佐渡島、能登半島、濃尾平野・三河高原、赤石山地、面白山地)、近畿・中

国・四国2地域(四国山地、紀伊山地)、九州1地域(南九州東部平野)である。このうち、三つ の項目すべての検討に適する条件を持つ地域は1地域、三つの項目すべての検討が可能な地域は 4地域、二つの項目の検討が可能な地域は14地域である。それ以外の81地域のうち、一つの項 目のみ検討可能な地域は23地域、一つの項目も検討可能な条件を持たないのは58地域である。

ここでの適性の判断は、海成段丘の段数、河成段丘の発達状況及び完新世段丘の有無によって おり、調査検討の効率性からみた便宜的なものである。実際には、各項目の検討の実施の適不適 は、段丘の性状、すなわち段丘基盤の地質や礫の岩種などの条件によって左右される。つまり、 一次スクリーニングで抽出した上位 19 地域は、一つの地域で複数の項目の検討ができるという 利点を持つが、一つの検討項目に限った場合には、これに漏れた 23 地域の方が適する可能性も ある。従って、最終的に調査地域を決定する際には、検討項目の適性により、上位 19 地域以外の 地域が選択される可能性も残す。

(ii) 二次スクリーニング

ここまで述べてきたように、研究を実施する上での適性の評価の基準として重要なのは、多段 の河成段丘の分布が広く、河成段丘の発達する河川の河口付近で海成段丘が近接して発達するこ とにある。そうした基準を基にして、経験的指標の検討のための調査地域候補として、検討でき る可能性が高い地域、検討できる可能性がある地域、検討できる可能性が低い地域の三段階の評 価を行った。具体的には、検討できる可能性が高い地域は、紀伊山地、北見山地、日高山脈、常 陸台地、十勝平野及び南九州東部平野の6地域、検討できる可能性がある地域は、渡島半島、四 国山地、佐渡島、北上山地、濃尾平野・三河平野、宗谷丘陵、天塩山地、赤石山地、両白山地と 周辺の9地域であり、検討できる可能性が低い地域は、能登半島、根釧平野、増毛山地及び日本 海南部島嶼(北海道)の4地域である。

(d) まとめ

岩石段丘表面の露出年代測定手法の適用性の検討、海成段丘の発達が悪い地域の隆起・侵食量 指標の検討の2項目と共に、経験的な風化指標を重視した総合的な段丘対比・編年手法の高度化 に適した研究地域について、既存情報に基づいた2段階のスクリーニングを行い、野外調査地域 を絞り込んだ。経験的な風化指標を重視した総合的な段丘対比・編年手法の高度化では、紀伊山 地、北見山地、日高山脈、常陸台地、十勝平野及び南九州東部平野の6地域を検討できる可能性 が高い地域とした。

ただし、既存の文献で得られる情報のみでは、検討の具体的な対象となる段丘礫層や段丘被覆 層の検討に適したものであるのか、確認できない。また、ある検討項目について適しているとし た地域に、既存情報では把握できなかった別の検討項目が可能な地形・地質が分布している可能 性もあり、場合によっては効率的に年代測定関係の要素技術開発が可能であることも考えられる。 年代測定関係の要素技術開発については、野外調査と試料採取が不可欠と考えられるため、早期 に実施に移すべきと考えられる。

② 宮崎平野における事例研究(平成 29・30 年度)

(a) 概要

研究に適した地域のスクリーニングの結果、検討に最も適していると判断された6地域のうち、 宮崎平野で事例研究を実施することとした。前項目1)③「宮崎平野における隆起・侵食に関わ る事例研究(平成29・30年度)」において宮崎平野を取り上げたが、本研究にとっても、長期間 にわたって形成された多段の段丘が分布し、段丘礫層の記載があり、被覆層中に多くの指標テフ ラが記載されているという点は、研究地域に適している。

前項目1)③「宮崎平野における隆起・侵食に関わる事例研究(平成29・30年度)」では、段 丘礫の風化の程度や被覆層の赤色化といった経験的指標の定性的な区分に対し、主に地形層序・ テフラ層序による段丘対比・編年の結果とは矛盾が無いことを確認した。ここでは、これを検証 材料として、宮崎平野に分布する年代の異なる複数の段丘から段丘礫・被覆層試料を採取し、間 隙率や色調など風化により変化する特徴について、定量的データを取得することにより、経験的 指標の適用性の確認と精度向上を図る。

(b) 実施内容

(i) 段丘礫の風化性状の調査・分析

段丘礫の風化性状の定量的評価を行うため、既往の研究によって報告されている段丘礫の風化 による間隙率と色調の変化(西山・松倉,2001;西山ほか,2001)及びそれらの原因となっている と考えられる鉱物の溶解・晶出、元素の移動、溶出、濃集を調査・分析した。

調査は、まず空中写真判読によって地形区分した段丘面に対し、野外における段丘構成層及び 被覆層の観察を行い、層序の確認を行った。調査を行った露頭のうち、露出状況の良好な露頭で は、連続的に被覆層試料を採取し、RIPL 法(古澤,2004)による火山灰分析を行って年代データ を得た。こうして得たデータをもとに段丘の対比・編年を行った。

風化性状の分析用の段丘礫試料の採取は、以上の露頭調査に平行して行った。礫試料の採取は、 被覆層との層序関係が確認できる露頭において、被覆層の基底から2mぐらいまでの深さを目途 とした範囲で採取した。また、礫試料は、概ね拳大のサイズのものを採取するようにした。採取 した礫試料は、室内に持ち帰り、以下の詳細観察、分析を行った。詳細観察、分析を行った試料 数は、砂岩もしくは溶結凝灰岩のみ存在する露頭では、一露頭につき5ないし6試料、砂岩と溶 結凝灰岩が混在する露頭では、比較のため、両岩種の礫を合わせ14試料とした。

室内に持ち帰ったすべての礫試料は、まず、水浸法により有効間隙率を測定し、そののち、岩 石カッターで二分割し、断面を研磨、研磨面に対し、観察を行って岩種の識別、風化被膜の有無 など風化性状を確認した。礫の切断面については、分光測色計を用い、礫の長軸沿いに 6mm で 測色を行うとともに、X線分析顕微鏡 (XGT)による元素マッピングを行い、Al、Si、Ca及び Fe の分布を調べた。そのうえで、一部の試料について、X線回析分析 (XRD)による鉱物組成分析、 水銀圧入式ポロシメータによる間隙率・間隙径測定を行った。XRD分析は、高位、中位、低位段 丘の礫試料の風化による砂岩の鉱物変化並びに中位段丘の砂岩礫、溶結凝灰岩礫の外殻部 (強風 化部)、芯部 (弱風化部)の鉱物組成差を調べるために行った。また、ポロシメータ測定は、高位、 中位、低位段丘の礫試料の風化による砂岩の間隙率・間隙径分布の変化、並びに中位段丘の砂岩 礫、溶結凝灰岩礫の外殻部 (強風化部)、芯部 (弱風化部)の間隙率・間隙径分布を調べるために 行った。

(ii) 段丘被覆層の風化性状の調査・分析

段丘被覆層の風化性状の定量的評価を行うため、既往の研究によって報告されている段丘被覆 層の赤色化(松井・加藤,1962;岡田,1973)及びそれの原因となっていると考えられる鉄鉱物の 形成・結晶成長を調査・分析した。

被覆層の赤色化の調査としては、露頭調査で、肉眼での観察に加え、分光測色計を用い、L*a*b* 表色系の測色値を鉛直方向に約 10 cm おきに計測した。また、鉄鉱物の形成・結晶成長の分析は、 遊離酸化鉄分析及び XRD 分析により行った。各段丘の露頭において、段丘構成層直上付近の風 成層として最も古く、風化している層準及び AT 降下層準付近と推定される層準において試料を 採取し、遊離酸化鉄分析を行って、遊離酸化鉄の活性度、結晶度を求めた。また、高位面並びに 中位面の各一露頭において採取した試料について XRD 分析を行い、試料に含まれる鉄酸化鉱物 を同定した。

(c) 調査結果

(i) 段丘礫の風化性状の調査・分析

宮崎平野南部地域(平成29年度実施)では、高位面から低位面まで形成年代の異なる段丘がよ く発達し、段丘構成礫は砂岩礫を主とする。このため、年代の異なる段丘から採取した砂岩礫の 性状比較により、風化による性状変化を明らかにした。

露頭観察の結果、Hf1 面の礫層は、かなりの量のクサリ礫が含み、赤色化も進んで著しく風化 するが、Hf2 面、Mm1 面とより新しい段丘では礫層の風化の程度が弱くなっている様子が明確 に識別できる。一方で、Mm1 面、Mf2 面、Mf4 面及び Lf2 面では、複数地点の露頭の比較で は、新しい段丘ほど風化が弱い傾向は認められるが、個別の露頭観察だけでは識別が難しい程度 に、その差は小さい。

測色結果、有効間隙率の測定結果では、そうした肉眼観察の結果と整合するデータを得た。

測色結果は、最も高位の Hf1 面では、a*値 10 以上、b*値 20~30、続く Hf2 面では a*値 10、 b*値 20 程度、中位段丘では、a*値 0~10、b*値 10~20 となり、低位の Lf2 面では a*値 0~ 10、b*値 10~20 の範囲で、高位段丘での赤褐色化が顕著で、新しい段丘ほどそれが弱くなって いることが確認できる。ただし、中位の Mm1 面、Mf2 面及び Mf4 面は形成年代が近いためか、 測色値は近い値を示す。

有効間隙率の値は、Lf2 面では 8.7%であるのが、Mm1 面では 17.0%、高位段丘では 20%を 超える。また、Hf1 面、Mm1 面及び Lf2 面の各段丘からの 1 試料のみであるが、ポロシメータ 測定の結果でも、高位の段丘ほど間隙率が高く、かつ間隙径が大きい。

宮崎平野北部地域(平成 30 年度実施)では、礫試料が得られる段丘が Mm1 面、Mf2 面の中位 面に限られ、かつ段丘礫の岩種は、南よりに分布する露頭のみ砂岩礫、泥岩礫、溶結凝灰岩が混 在するが、ほとんどの露頭では、溶結凝灰岩礫のみである。このため、露頭間及び同一露頭内で の砂岩と溶結凝灰岩の風化性状の違いを検討した。

露頭観察の結果、Mm1 面、Mf2 面の礫層は、宮崎平野南部地域の中位段丘と同等の風化程度 で、クサリ礫はほぼ含まず、高位段丘とは明確に区別でき、かつ低位段丘とは区別が可能な程度 に風化が進んでいることが確認された。

測色結果、有効間隙率の測定結果では、そうした肉眼観察の結果と整合するデータを得た。

測色値、有効間隙率、いずれも、Mm1 面と Mf2 面の段丘礫で明確に識別できるほどの差は見 られない。露頭間もしくは礫種間での差の方が大きく、同一の露頭内の同一岩種では比較的似た 値を示すが、有効間隙率は、色調に比べるとばらつきが大きい。また、溶結凝灰岩と砂岩が混在 する露頭での測定結果では、ばらつきの範囲はほぼ重なってはいるが、砂岩礫の方が a*値、b*値 及び有効間隙率において大きな値をとる試料があり、風化が進んでいるものが含まれる。

Mm1 面、Mf2 面の段丘礫は、風化している部分では、a*値 0~10、b*値 10~20 となり、宮 崎平野南部の中位段丘と同程度である。ただし、宮崎平野南部の段丘砂岩礫は、ほとんどの場合、 礫全体がほぼ均一に風化するが、宮崎平野北部の段丘礫では、同様の風化様式を示すものも存在 するが(砂岩礫が多い)、一部の砂岩礫とほとんどの泥岩、溶結凝灰岩では風化被膜を形成する風 化様式を示す。こうした風化被膜を形成している礫では、芯の部分は比較的新鮮であり、a*値は 0 前後の値となり、新鮮な部分ではマイナスの値となっている。また、そのような礫では、b*値 も 10 未満程度と低い。 有効間隙率は、最小で 3.9%、最大で 20.7%であり、ほとんどものが 7~18%の範囲に入る。これらの値は、宮崎平野南部の砂岩礫に比べ、若干低い傾向にある。

宮崎平野の南北を通じて、X線分析顕微鏡による元素マッピング、段丘礫のXRD 分析、ポロ シメータ測定では、上記の赤褐色化、間隙の増加の原因となる元素の移動、鉱物変化が確認された。

この分析により、風化した外縁部での Si、Al、Ca の溶脱、斜長石と白雲母の溶解、消失、間 隙率の増大、間隙径の拡大が確認された。溶結凝灰岩のように風化被膜を作るものでは、芯の部 分との差が顕著で、砂岩のようにほぼ均質なものでは差は小さいが、いずれも外側で風化が進ん でいる。また、風化によりギブサイトが晶出すること、更に、Hf1 面の礫には、わずかだが赤鉄 鉱と針鉄鉱の晶出が確認された。

(ii) 段丘被覆層の風化性状の調査・分析

宮崎平野における露頭における段丘被覆層の観察、分光測色計による測色により、中位段丘、 高位段丘で色調の段階的変化が肉眼観察で確認され、それと整合的なデータとして下位から上位 にかけて、段階的に a*値、b*値が低くなっていく傾向が得られた。

年代ごとの比較では、K-Tz 層準付近では、a*値は 10 程度、b*値は 20 程度の値を示し、肉眼 的には褐色ないし赤褐色を呈する。これより下位の a*値は 10 を超えて増加するが、b*値に関し ては、K-Tz 層準とあまり変わらず、もっぱら赤色化が進んで、肉眼観察結果でもいわゆる赤色 土と呼ばれるような強い赤色化を示す。一方、K-Tz 層準よりも上位の層準では、a*値、b*値と も減少傾向を示し、赤褐色化が弱く、褐色を呈す。宮崎平野北部で得た測色値では、露頭の周辺 の基盤地質の分布に規制されているような傾向が見られた。また、北海道幌延地域の MIS7 の段 丘(新里ほか, 2007)では、K-Tz 層準よりも古いはずの被覆層下位の赤褐色化する部分での測色 値は、a*値 10 弱、b*値 20 弱であり、宮崎地域の K-Tz 層準よりも赤褐色化の程度が弱い。 遊離酸化鉄分析結果は、上記の色調変化と整合するものとなっている。

基本的には、遊離酸化鉄の結晶化指数は、年代とともに増加する傾向があり、宮崎平野南部で は、AT に近い層準では褐色森林土(B)、K-Tz に近い層準では黄褐色土(YB)の領域に入り、赤 色土(R)の領域に入るものは、高位段丘に載る K-Tz よりも明らかに下位の層準のものである。 しかし、幌延地域では K-Tz よりも明らかに下位の層準の試料でも黄褐色土(YB)の領域に落ち、 宮崎平野とは傾向が異なる(図 3.2-30)。また、宮崎平野北部では、同一露頭でより下位の層準 ほど結晶化指数が大きくなる変化傾向は、宮崎平野南部と同様だが、南部と異なる特徴として、 基盤地質に溶結凝灰岩が分布する周辺の露頭のものは、より高い結晶度をもつ。こうした露頭で は、K-Tz に近い層準の試料でも、赤色土(R)の領域と同じ程度の結晶度を持つ。遊離酸化鉄分 析の結果は、古い段丘被覆層の酸化鉄鉱物の成長を示し、このことは XRD 分析で、高位段丘の 被覆層の下部から赤鉄鉱、針鉄鉱の存在としても確認された。また、段丘礫と同様、風化した被 覆層ではギブサイトの晶出が確認される。



図 3.2-30 段丘被覆層の遊離酸化鉄分析結果

グラフ上の領域区分は永塚(1973)による。B:褐色森林土、YB:黄褐色土、R:赤色土

(d) 考察

(i) 段丘礫の風化性状

段丘礫の有効間隙率、色調は、風化による礫の斜長石や有色鉱物と鉱物溶解に酸化鉄鉱物の結 晶成長によって生じており、基本的に風化期間が長くなることにより変化していく。したがって、 年代指標となると考えられる。宮崎平野に分布する段丘では、南部で砂岩礫、北部で溶結凝灰岩 礫が主たる段丘礫として含まれており、いずれも中位段丘に含まれる有効間隙率、赤褐色化は若 干の差はあるが、類似した性状といえる。少なくとも、露頭観察のレベルにおける指標としては、 同程度の年代観を示す指標として扱うことが可能であり、客観性があるといえる。

ただし、明瞭な風化被膜をもつ溶結凝灰岩と礫全体がほぼ均一に風化する砂岩は、風化様式が 異なっているため、風化の進行過程、すなわち、有効間隙率、赤褐色化が、同じような変化をし ていくかについては、不明である。

宮崎平野南部の砂岩の風化性状に基づけば、有効間隙率、色調のデータの礫の風化性状のみで も、高位、中位、低位の段丘を区別する指標として適用できると考えられる。ただし、中位面の 段丘同士では、それぞれの値は重なりが大きいため、これらのみの性状で段丘を区別することは 難しい。

宮崎平野北部では、Mm1 面と Mf2 面の段丘礫の有効間隙率、色調データを岩種別、露頭別に 比較し、Mm1 面と Mf2 面の年代差よりも礫種や露頭間の差の方が大きいことを確認した。また、 同じ砂岩同士あるいは溶結凝灰岩同士でも風化性状に露頭ごとに風化性状が異なっており、おそ らく、同一の岩種でも粒度などの岩石組織や構成鉱物の種類、含有量などにより、風化様式が変 わるものと感がられる。また、露頭ごと異なる風化環境条件も影響している可能性もある。

(ii) 段丘被覆層の風化性状

段丘被覆層の赤色化及び遊離酸化鉄結晶指数は、風化による酸化鉄鉱物の結晶成長によって生 じており、基本的に風化期間が長くなることにより変化していく。したがって、年代指標となる と考えられる。ただし、段丘被覆層の赤色化は、単純に時間の長さに比例する変化ではなく、温 暖期の繰り返しによる段階的変化と考えられる。このことは、MIS5 の温暖期を経ていない低位 段丘は、専ら褐色ロームのみ載せているのに対し、MIS5 の温暖期を経ている中位段丘は、部分 的に赤褐色ロームを載せている事実によっても理解できる。こうした段階的変化による赤色化、 段丘礫の風化性状と同様、高位、中位、低位の段丘の区別にうえで有用と考えられる。少なくと も宮崎平野程度の広がり地域では、測色データは共通性をもって年代観をおり、ほぼ統一的な指 標となると考えられる。

遊離酸化鉄分析は、宮崎平野南部では AT、K-Tz などのテフラの層準をもとに分析結果を比べ ると、堆積年代の近い試料同士で類似した値を取り、年代指標となるが、宮崎平野北部では、ほ ぼ同じ時代と考えられる試料が全く異なる値をとるため、年代指標として適用することが難しい。 この原因と考えられるのが、基盤地質の違いによる遊離鉄を供給量が関係していると考えられる。 したがって、遊離酸化鉄は、基盤地質が同一あるいは遊離鉄の供給量に差がない地質が分布する 地域であることが必要である。また、宮崎平野と幌延の試料の分析データの比較からは、寒冷地 での酸化鉄の結晶成長が低調であると推定される。このため、気候条件の大きく異なる地域間で 指標を流用することが難しいと考えられる。つまり、気候条件の異なる地域同士では、赤色化、 遊離酸化鉄のいずれも共通した指標を使うことは難しく、別々の指標を整備することが必要と考 えられる。

(iii) 段丘礫、被覆層の風化性状を用いた経験的指標の適用方法と留意点

段丘被覆層による有効間隙率、赤色化といった経験的指標に関して、宮崎平野では高位段丘、 中位段丘、低位段丘との区別ができることを確認した。一方で、中位段丘同士などでは、風化程 度に明瞭な差が見られず、これらを区別する指標とするのは難しい。段丘礫、段丘被覆層の風化 程度は、礫の種類や基盤地質などの条件により、Mm1 面、Mf2 面程度の時代差を超える程度に 違いが生じていると考えられる。逆にいえば、礫の種類や調査地における地質分布が均一な地域 では、より細かな年代差を区別できる指標となる可能性もある。ただ、経験的指標のうちの一つ の指標、例えば有効間隙率を単独で適用して細かな年代差を区別するのは、限界があると考えら れる。このため、表 3.2-2 に示されるような風化に関して、利用可能な情報を可能な限り用いる ことにより、段丘の区別を細かくできることが期待でき、対比の精度を上げることに寄与できる と考えられる。

宮崎平野での調査・分析の結果から、段丘礫、段丘被覆層の風化性状は、さまざまな要素が複 合して決まることが確認された。このことを念頭におくと、経験的指標の適用にあたっては、対 象調査地域でのそれらの風化性状に影響を与える要因を把握しておくことが、重要と考えられる。 特に宮崎地域のように調査対象地域が広域に及んだ場合には、地区間で条件が変わる場合が多く なると予想される。また、調査対象地域が宮崎平野よりも狭い範囲であっても、地質構造が複雑 で、かつ性質の異なる地質が隣接して分布する地域では適用に注意が必要になるであろう。

宮崎平野の溶結凝灰岩と砂岩の礫の風化では、少なくとも有効間隙率に関して同一露頭内では

極端な差が見られなかった。これが偶然であるのかあるいはほかの岩種も含めて同様であるのか については、現時点では不明である。しかし、既往の文献調査の結果によれば(濱田・幡谷,2011)、 いわゆるクサリ礫や赤色土といった指標がある程度の年代的共通性をもって分布することは確か であり、岩種間の溶解過程や赤色化の過程は、それほど大きく変わらない可能性がある。宮崎平 野北部における遊離酸化鉄分析結果が、永塚(1973)の分類領域を外れた結果となったのは、非 常に例外的な地域であった可能性もある。一方、風化による有効間隙率の増加が、岩石の溶解現 象を見ていることを考えると、石灰岩やチャートあるいは超苦鉄質岩など、極端に化学組成が異 なる岩石では、大きく異なる変化が生じる可能性が考えられる。これらについては、今後のデー タの蓄積が必要である。

風化様式に関しては、溶結凝灰岩では砂岩と異なり明瞭な風化被膜を持つことが確認された。 今回の調査では中位段丘のみを対象としていたため、詳細な検討はしなかったが、これは既往の 報告(栗山ほか,2006; Oguch,2001;濱田・幡谷,2009)にある安山岩や玄武岩と同様にその幅 が、年代指標として活用できる可能性が考えられる。また、一部の砂岩についても、同様のアプ ローチが有効である可能性がある。より年代幅の大きな段丘が分布する地域での調査事例の蓄積 が望まれる。

以上、全体を通じて、経験的指標の適用性の向上、高度化を目指すためには、段丘礫、段丘被 覆層の風化作用を左右する条件を、これまで以上に明らかにすることが必要と考えられる。上述 したように、それらは、礫の岩種、地質分布などに規制されると予想されるが、これまでそうい った点を考慮して、風化性状を調査・分析してきた事例はなく、今後データを蓄積していく必要 がある。そのうえで、条件ごとに風化性状の変化と年代との対応を確認することにより、指標の 精度、信頼性の向上が可能になると考えられる。また、適用上の制限や限界などについても明ら かになるであろう。こうした条件の調査については、実際の段丘礫、段丘被覆層を対象とした調 査・分析が重要であるが、それだけでは事例の収集にかなりの時間と労力が必要になると考えら れる。このため、風化性状を左右する条件の絞り込みについては、実験的なアプローチも有効で ある可能性もあり、こちらの点でもデータの蓄積が求められる。

表 3.2-2 段丘面区分と構成層砂岩礫と被覆層の関係

段斤面		段丘構成層砂線	皆礫の特徴	段丘被覆層の特徴			
1,7,11,11	間隙率	測色値	元素分布	構成鉱物	測色値	構成鉱物	遊離酸化鉄
Hf1	有効間隙率は、ほとんど が20%を超える。平均: 22.3% 水銀圧入法での間隙率: 32.6%	外緑部 : a*値 10 以上、b*値 20~30 芯部では外縁部よりも a*,b*値が 小さい	Al は芯部に比べ外縁部でや や乏しい。Fe は芯部に比べ外 縁部でやや富む。Si は一様に 分布、Ca は全体に少ない	斜長石と白雲母を欠き、 ギブサイトを含む。針鉄 鉱、赤鉄鉱を含む	露頭での被覆層下部、a*値 10 以上、15 を超す部分あり、b* 値 20 程度 ブロック試料、a*値 20 近く、b* 値 25 超	被覆層の下部でギブ サイトを多く含む。針 鉄鉱、赤鉄鉱を含み、 斑紋部では相対的に 赤色部で多い	被覆層下部は、結晶化 指数が 0.5 以上の高い 値を示し、赤色土の領 域に入る
Hf2	有効間隙率は、鉱物脈が 発達するものを除き 20%を超える。平均: 17.4%	外縁部 : a*値 10 程度、b*値 20 程度 芯部では外縁部よりもやや a*,b* 値が小さい。	Al は芯部に比べ外縁部でや や乏しいが、Hf1より不明瞭。 Si は芯部に比べ外縁部でや や乏しいものもある。Fe は芯 部に比べ外縁部でやや富む Ca は全体に少ないが、芯にや や高く含有するものがある	_	露頭での被覆層下部、a*値 15 程度、b*値 20 前後	_	被覆層下部は、結晶化 指数が 0.5 以上の高い 値を示し、赤色土の領 域に入る
Mm1	有効間隙率は 10 ないし 20 強。平均:17.0%。 水銀圧入法での間隙率: 18.3%	 a*、b*値とも外縁部と芯でほぼ一定、a*値5以下、b*値10~20。 b*値は、外縁部で若干高い値を示すものがある 	元素の分布に際だった方よりはないが、Siは外縁部でやや低くなっているものもある	斜長石と白雲母を残し ており、ギブサイトは 含まない。針鉄鉱は含 むが、赤鉄鉱はほとん ど認められない	 K-Tz 層準付近では、a*値 10 超、b*値 25 超だが、やや砂質 な下部では、a*値 10 超、b*値 30 程度。ブロック試料、K-Tz 層準 a*値 20 近く、b*値 25 超 	緑泥石とギブサイト を含む。針鉄鉱は含む が、赤鉄鉱はほとんど 認められない	被覆層下部は、結晶化 指数が 0.4 から 0.5 と 比較的高く、かつ活性 度が 0.35 未満で、黄褐 色土の領域に入る
Mf2	有効間隙率は、4.2~16.6 とやや幅がある。平均: 11.5%	均一な部分は a*値 0~10、b*値 10~20 程度。外縁部の赤褐色化が 進む部分は a*値 10 程度、b*値 20~30 程度	Al、Siに外縁部での際立った 低下は認められないが、外縁 部で赤褐色化が顕著な試料 では、該当箇所でFeが高い	_	Aso-4 が混じる層準付近は、 砂、シルトが混入し、a*値 10 未満。やや上位の軽石質テフラ の層準付近は a*値 10、b*値 20 弱。さらに上位の層準ではa*、 b*値さらに低い	Ι	被覆層上部は、結晶化 指数が低く、かつ活性 度が高く、褐色森林土 の領域に入る。被覆層 下部は不明
Mf3	_	_	_	_	露頭面では最上部を除くと a* 値 10 前後、b*値 15 前後。ブ ロック試料では、a*値 10 超、 b*値 25 前後	_	被覆層下部は、結晶化 指数が 0.5 以上の高い 値を示し、赤色土の領 域に入る
Mf4	有効間隙率は、5.6から 6.0。、平均:5.7%	不規則な岩石組織を反映する部 分以外は、比較的均一。a*値 0~10、b*値 10~20 程度。赤褐色 化が進む部分では a*値 10 程度、 b*値 20 程度。L*値は、やや低い 50 近くを取るものが多い	Al、Si に外縁部での際立った 低下は認められず、赤褐色化 が顕著な部位で Fe が高い	_	露頭では、下部で a*値 10 未 満、b*値 20 程度であるが、か なり砂が混じる。その上位の比 較的純粋なロームに近い層準 では、a*値 10 未満、b*値 20 未 満。	_	_
Lf2	有効間隙率は、5.3 から 12.3 の間でややばらつ く。平均:8.7%。 水銀圧入法での間隙率: 6.2%	不規則な岩石組織や外縁部に赤 褐色化部を持つ試料以外では、比 較的均一。 鉱物脈を伴った礫は、Mf4 面より a*値、b*値が低い。他の試料は、 a*値 0~10、b*値 10~20 強。L*値 は、風化した礫は 50~60。新鮮な 礫は 40 を下回る	Al、Siに外縁部での際立った 低下は認められず、赤褐色化 が顕著な部位で Fe が高い	斜長石と白雲母を残し ており、ギブサイトは含 まない。針鉄鉱、赤鉄鉱 は含まない	露頭の被覆層の露出は、非常に 限定的であるが、a*値が 10 程 度、b*値が一方は 20 未満、も う一方は 20 超.	_	被覆層上部は、結晶化 指数が低く、かつ活性 度が高く、褐色森林土 の領域に入る。被覆層 下部は不明

表内の段丘礫層、被覆層に関する記述は、測定、分析を行った段丘のものであり、ここに記していない段丘は、データがない。また、表中空欄の部分も、測定、分析未実施でデータがない

(e) まとめ

経験的指標に基づく段丘対比・編年手法の高度化を目指し、宮崎平野への事例研究を行った。 段丘礫の有効間隙率、赤色化、段丘被覆層の赤色化などの経験的指標は、高位、中位、低位とい った大まかな段丘の区分には十分有効である。より細かな区分は、段丘礫の有効間隙率について は、風化を左右する岩石の初生的な間隙率、間隙径分布、鉱物組成、鉱物量比、化学組成、段丘 分布地域の基盤岩石の鉱物量比、鉱物組成を個別に考慮したうえで、Al、Si、Ca などの溶出量を 評価することにより可能である。また、段丘被覆層の赤色化については、段丘分布地域の基盤岩 石の鉱物量比、鉱物組成を個別に考慮したうえで、酸化鉄鉱物の結晶成長を評価することにより 可能である。これらの組み合わせは、調査対象地域ごとに異なるため、その都度、これらを調査、 評価する必要があると考えられるが、実際にどの程度の幅があるのかについては、現時点では明 らかとは言えない。このため、異なる礫種、異なる地質分布の条件でどのような風化性状が生じ、 年代の異なる段丘でどのように変化していくのかの事例を蓄積していくことが必要と考えられる。

5) 要素技術の検討(その3)岩石侵食段丘や局所的な堆積物の年代などによる隆起・侵食評価 手法の検討

日本では海岸が隆起して形成された海成段丘は岩石侵食段丘が多い。岩石侵食段丘は被覆層を 大きく欠くことから、隆起量・侵食量の推定のためには、岩石侵食段丘の表面が露出した年代や 局所的に分布する堆積物の年代を用いた段丘の対比・編年が有効と考えられる(表 3.2-2)。また、 海成段丘の発達が悪い地域においても、何らかの指標からかつて海であったことが把握できれば、 その指標の分布高度と形成時期から隆起・侵食の評価が可能である。岩石の露出年代については、 ¹⁰Be や²⁶Al などの宇宙線生成核種(terrestrial in situ cosmogenic nuclide; TCN)を用いた年 代測定法(TCN 法)が適用可能であることから(松四ほか, 2007)、岩石侵食段丘の編年におけ る TCN 法の適用性を検討するため、事例研究として海成段丘で基盤岩試料を採取し、¹⁰Be と²⁶Al 濃度を測定して離水年代の推定を試みた。また、局所的に分布する堆積物については、海成堆積 物であることを判断する際に有効な調査・分析手法について整理するとともに、代表的な手法の 適用性確認のための事例研究を実施した。



図 3.2-31 岩石侵食段丘の対比・編年に有効な試料分布のイメージ

① 岩石侵食段丘の露出年代測定による隆起・侵食量の評価手法の検討

TCN 法は面上の岩石を測定すれば直ちに離水年代が求まるというような単純な手法ではなく、 どのような侵食プロセスを仮定するかによって年代値の解釈は大きく変化しうる。本事業ではま ず、TCN 法を用いた既往研究事例について整理し(産業技術総合研究所ほか, 2017)、それらか ら得られた知見に基づき、1) 完新世侵食段丘における水平方向の TCN 蓄積量の不均質の検討、 2) 堆積段丘における TCN 深度プロファイルの測定、3) 離水時期の異なる複数段の侵食段丘に おける TCN 法の適用について、試料採取及び測定結果の解釈における考え方の検討を行った(産 業技術総合研究所ほか, 2018)。これらは、TCN 法で離水年代を計算する上で適用するモデルの 妥当性検証のために重要な検討事項となる。

¹⁰Be や ²⁶Al は、岩石中に含まれる酸素やケイ素に宇宙線が照射される事によって生成・蓄積さ れる。一般に、測定には粒径 0.2 mm 以上かつ高純度の石英(ガラスビードにした試料を蛍光 X 線分析で測定した際に、Siと 0.1%以下の Al のみが検出され、他の元素は検出されないことが目 安)が20-30g以上必要である。したがって、TCN法の適用の可否については、岩石侵食段丘 の発達状況(地形学的条件)に加え、測定に適した石英粒子が効率よく抽出できる岩石かどうか の地質学的条件も考慮することが求められる。地層処分におけるサイト選定や安全評価において 本手法を適用するためには、既に汎用的な手法となっている放射性炭素年代測定法の適用範囲(約 5 万年前以降)よりも古い時期に離水した段丘への適用性確認が重要である。そのため本事業で は、1)陸域の堆積段丘の対比・編年から岩石侵食段丘の年代が推定され、TCN年代との比較・ 検証が可能である、2) 石英を普遍的に含む岩石から構成される段丘である、3) 約5万年前より も古い時期に離水した可能性の高い段丘であることを満たす地域において事例研究を実施した。 具体的には、3.2.2.(2).1)沿岸域における隆起・侵食の検討で事例対象地域とした宮崎地域沿 岸部の尾鈴山火山深成複合岩体(木村ほか, 1991)を基盤とする MIS 5c に対比される段丘(産業 技術総合研究所ほか,2018)、及び、西南日本の前弧域の沿岸部に広く分布する付加体(四万十帯) 砂岩を基盤とする段丘で、段丘対比・編年が良く分かっている高知県土佐湾北東岸地域 (Matsu'ura, 2015) を対象として TCN 法の検討を行った。

尾鈴山火山深成複合岩体の事例では、分析対象とした岩石は花崗閃緑斑岩で、石英は斑晶とし て 10%程度存在するものの、しばしば融食して入り組んだ形状を示すとともに、他の鉱物などか らなる包有物を多く含むため、Al 濃度<0.1%となる高純度の石英を十分に濃集させることが困 難であった。そのため、26Al については、濃度の測定はできたものの、想定より低い核種量とな り、そこから侵食・堆積シナリオとのフィッティングにより離水年代を計算することができなか った。一方¹⁰Beについては、minimum exposure age(段丘離水時から TCN の蓄積を開始して おり、また上載する堆積物の厚さは離水時から現在まで一定だと仮定した場合の年代)が約105-70 kaの比較的まとまりの良い値を示した。10Be濃度について、段丘面が形成・離水後、一定速 度で現在の層厚まで被覆層が堆積したと仮定して¹⁰Beの蓄積量を計算したところ、MIS5aに離 水したシナリオが最も測定値と一致した(図 3.2-30)。したがって、離水時期は地形判読に基づ く検討(MIS 5cに対比)よりもやや新しくなる。当該地域の地形・地質構造発達史の考察は今後 の課題だが、いずれにしろ、石英抽出処理の難しい酸性火山岩類を基盤とする岩石侵食段丘に対 しても、¹⁰Be 法により離水年代の推定ができた点は、沿岸部の隆起・侵食の評価手法の拡充への 貢献が期待できる大きな成果である。今後は、事例研究の蓄積に加え、侵食・堆積シナリオとの フィッティングの際に重要となる地下物質の密度のより正確な推定や、深度の異なる試料での ¹⁰Be 測定による離水年代の確度の向上が課題である。



図 3.2-30 離水年代を 80 ka (MIS 5a) と仮定した時の ¹⁰Be 濃度の深度プロファイル 3 つのグラフは、同じ段丘面での異なる 3 地点での結果。赤で示したマーカーが、深度プロファ イルを計算した地点のデータを示す。すなわち、赤で示したマーカーがプロファイル上に載 っていれば、その地点では実測値と理論値が整合的だということになる。一番左のグラフの 地点を除き、実測値と理論値が整合的な結果となっている。

② 局所的な堆積物の年代などによる隆起・侵食評価手法の検討

本事業ではまず、堆積学的指標、生物学的指標、化学的指標及び物理的指標(色彩や密度など) のそれぞれについて、隆起量・侵食量の推定の基礎情報となる堆積物の堆積環境(陸成・海成の 区別や深度)の推定の適用事例に関してレビューした(産業技術総合研究所ほか,2017;表 3.2·2)。 これらの指標の中から特に有効性が期待される手法として、陸成・汽水成及び海成の区別に加え、 堆積時の水深や流速などの堆積環境の推定が可能な化石種もある珪藻分析と、化石鑑定や堆積相 解析のようなエキスパートジャッジを伴わずに陸成・汽水成及び海成の区別が可能で、分析手法 も比較的容易な全有機炭素・全窒素・全硫黄分析(CNS分析)について、局所的に分布する堆積 物を対象とした適用性検討のための事例研究を実施した。

分類	指標		調查·分析手法	古水深の評価への適用
堆積学 的指標	* 海成堆積相		肉眼観察による堆積相解析から堆積環境を推定する。ボーリングコアでは情報が 限られるため、生物学的指標や化学的手法などを併用することが多い。	Δ
生物学的指標	海生大型化石		堆積物中の化石と現世の生物や過去に地層から産出した化石との比較から推定 する。軟体動物を指標とする研究事例が多い。	Δ
		渦鞭毛藻	海性~淡水性動植物プランクトン。堆積物中の化石と現世の種や過去に地層から産出した種との比較から推定する。	Δ
		珪藻	海性~淡水性植物プランクトン。堆積物中の化石と現世種や過去に地層から産 出した種との比較から推定する。	0
	海生	放散虫	海性動物プランクトン。堆積物に含まれる化石と現世の種や過去に地層から産出 した種との比較から推定する。示準化石として利用されることが多い。	×
	做 化 石	有孔虫	海性動物プランクトン。堆積物中の化石と現世の種や過去に地層から産出した種 との比較から推定する。	0
		貝形虫	海性~淡水性動物プランクトン。堆積物中の化石と現世の種や過去に地層から 産出した種との比較から推定する。	0
		石灰質 ナンノ	海性動物プランクトン。堆積物中の化石と現世の種や過去に地層から産出した種 との比較から推定する。示準化石として利用されることが多い。	×
	生痕 化石 生痕相		堆積物中の生痕化石と現世の生物活動や地層に認められる生痕化石との比較 から推定する。	0
化学的指標	硫黄 (TS)		元素分析による含有量から推定する。海成堆積物は硫黄を多く含み、0.3~0.5 wt%以上を示す。	Δ
	有機炭素/硫黄比 (C/S比)		元素分析による含有量の比から推定する。有機炭素/硫黄比は、酸化的な海成 堆積物が3前後、汽水から内湾の堆積物が1前後を示す。	×
	有機炭素/窒素比 (C/N比)		元素分析による含有量比から推定する。有機炭素/窒素比は有機物の起源の指標であり、動植物プランクトン起源の有機物が6-9前後、陸源高等植物が15より大	×
	炭素同位体比 (δ ¹³ C)		さい胆を示す。員重分析で求められる灰茶回位体比と有機灰茶/室茶比との奥係からは、有機物の起源をより細分することができる。	×
	ホウ素, ホウ素 同位体比(δ ¹¹ B)		元素分析による含有量、質量分析による同位体比から推定する。海成堆積物は 非海成堆積物よりもホウ素を多く含み、100 ppmを超える値を示すことがある。た だし、ホウ素の多い砕屑性イライトを含むと非海成堆積物でも大きな値を示す。	×
	粘土鉱物		X線回折分析による粘土鉱物組成から推定する。海成粘土は硫化物が多いため、風化に伴い粘土鉱物を分解する傾向にある。また、海水環境下では火山砕 屑物の化学的変質が進行し易く、スメクタイトが優勢となる。	×
	電気伝導度		懸濁液を作成して、その電気伝導度から推定する。懸濁液の電気伝導度は、海 成堆積物が1 mS/cm以上、汽水成堆積物が0.6~1 mS/cmを示す。ただし、作成 過程の各処理(ろ過、乾燥、振とう)の影響を受けることもある。	×
物理的 指標	5 色彩		 色彩色差計を用いて測定した堆積物の色彩から推定する。含水状態にある海成 単積物の色彩は化学成分の濃度・存在形態と相関があり、沖積粘性土における L*とa*の値と海成層との関係は0.63L*-36.7>0、-7.42a*+5.90>0が得られている。 	

表 3.2-2 海成堆積物の指標及び調査・分析手法

○:定量的評価が可能, △:定性的評価なら可能, ×:適用困難(陸成・汽水成・海成の区別にとどまる)

事例研究対象としたのは、沿岸部に位置し、広域的な地形・地質構造が比較的良く知られている北海道幌延地域(太田ほか,2007)に局所的に分布する堆積物である(産業技術総合研究所ほか,2018)。試料採取地点は、平坦面の分布と比高から MIS 5e の段丘堆積物と推定されているが、既往研究では、堆積年代・堆積環境に関する具体的な情報は得られていなかった。

珪藻分析の結果、すべての試料において豊富な珪藻殻が得られ(10⁵-10⁶ 個/g 以上)、うち約 半数は完形殻であった。それらは主に海水種からなり、わずかに淡水種・汽水種を伴う。ただし 海水種の大半は、鮮新世に絶滅した Denticulopsis (Neodenticula) kamtschatica (柳沢, 2010) と推定される Denticulopsis 属の固体であった(表 3.2-3)。当該地域の基盤岩である新第三紀堆 積岩からは Neodenticula kamtschatica の産出が知られており(木方ほか, 2006)、大量に含まれ る絶滅種は新第三紀堆積岩からの再堆積の可能性が高い。この基盤岩の再堆積由来と思われる絶滅種の大量の混入により、珪藻分析による堆積環境の詳細な検討が困難となる結果となった。

CNS 分析の結果は、すべての試料において全有機炭素濃度が 0.18%以下、全窒素濃度が 0.07% 以下、全硫黄濃度が 0.004%以下といずれも極めて低い値となった(表 3.2-3)。リズミカルな砂 泥互層を主体とする産状も踏まえると、当該地域は堆積速度の速い環境下にあったことが示唆さ れ、CNS 分析によっても陸成・汽水成・海成の厳密な区別が困難な結果となった。

以上より、局所的な堆積物のみでの検討では、各手法における固有の問題点が強調され、隆起・ 侵食評価が困難な場合があることが明確となった。処分事業におけるサイト選定の観点からは、 局所的な堆積物に拘らず、周辺の条件の良い地点においてボーリングなどを行うことで、より信 頼性の高いデータの取得を目指すことも重要であると考えられる。

		珪藻化	石分析(割	CNS 分析 (濃度:%)				
試料採取 位置	海水種 (絶滅種)	海水種 (その他)	汽水種	淡水種	その他 不明種	全炭素	全窒素	全硫黄
KS-F1	61.0	31.0	1.4	0.5	6.2	0.18	0.07	<0.002
KS-F2	73.4	20.3	0.0	2.9	3.4	0.18	0.07	<0.002
KS-F3	77.1	17.8	0.0	3.3	1.9	0.16	0.07	0.003
KS-F4	83.9	14.8	0.0	0.4	0.9	0.13	0.06	0.004
KS-F5	68.3	23.9	0.5	6.3	1.0	0.085	0.05	0.004
KS-F6	36.1	39.5	0.0	21.0	3.4	0.12	0.06	<0.002
KS-F7	56.0	9.7	0.0	33.3	0.9	0.14	0.06	0.002
KS-F8	24.8	40.3	3.4	29.1	2.4	0.09	0.05	0.004
試料採取位置の詳細は産業技術総合研究所ほか(2018)の 56 ページを参照。								

表 3.2-3 珪藻及び CNS 分析結果

謝辞

「1)沿岸域における隆起・侵食の検討」で用いた海上音波探査記録は、沿岸の海の基本図調査 データに関しては海上保安庁より、旧地質調査所(現産業技術総合研究所)・GH83・1 調査航海デ ータに関しては産業技術総合研究所 産業技術総合研究所地質調査総合センターより開示して頂 いた。ここに記して、関係者に深く謝意を表します。

参考文献

Castillo, C.M., Klemperer, S.L., Ingle Jr, J.C., Powell II, C.L., Legg, M.R. and Francis, R.D., Late Quaternary subsidence of Santa Catalina Island, California Continental Boredeland, demonstrated by seismic-reflection data and fossil assemblages from submerged marine terraces, Geological Society of America Bulletin, vol.131, pp.21-42, 2018.

地質調査所,海洋地質図 49 豊後水道南方海底地質図(1:200,000)および説明書, 1998.

- Chappell, J., Upper Quaternary sea levels, coral terraces, oxygen isotopes and deep-sea temperatures, Journal of Geography, vol.103, pp.828-840, 1994.
- Clark, P. U., Dyke, A. S., Shakun, J. D., Carlson, A. E., Clark, J., Wohlfarth, B., Mitrovica, J. X., Hostetler, S. W. and McCabe, A. M., The Last Glacial Maximum, Science, vol.325,

pp.710-714, 2009.

古澤 明, RIPL 法により由布岳火山周辺のテフリックレスから見いだした火山活動, 地質学雑誌, vol.110, pp.19-37, 2004.

濱田崇臣, 幡谷竜太, 河成段丘を用いた内陸部隆起量評価手法の適用性の検討~経験的指標を重 視したアプローチ~(および別冊付録), 電力中央研究所報告(研究報告), N10050, 28p., 2011.

花谷育雄, 宗像雅広, 木村英雄, 三箇智二, 堆積岩分布地域における地形変化のモデル化に関す る研究~房総半島における検討, 原子力バックエンド研究, vol.18, pp.3-24, 2011.

幡谷竜太,柳田 誠, 鳥越祐司, 佐藤 賢, 後期更新世以降の現海岸線付近での下刻, 応用地質, vol.57, pp.15-26, 2016.

井波和夫, 房総半島上総層群泥岩の圧密について, 地質調査所月報, vol.34, pp.207-216, 1983.

井上 信,田中 靖,グリッド形地形発達シミュレーションモデルの現実地形への適用,地形, vol.34, pp.147-165, 2013.

岩淵義郎, 加藤 茂, 第四紀地図の作成過程からみた大陸棚, 第四紀研究, vol.26, pp.217-225, 1988.

井関弘太郎, 沖積層基底歴礫層について, 地学雑誌, vol.84, pp.247-264, 1975.

地震調査委員会,九州地域の活断層の長期評価(第一版/平成 25 年 2 月 1 日), 2013.

https://www.jishin.go.jp/main/chousa/13feb_chi_kyushu/k_honbun.pdf(2019年3月18日 最終閲覧)

貝塚爽平(編),日本の地形-特質と由来-,岩波新書,234p,1977.

垣見俊弘,松田時彦,相田 勇,衣笠善博,日本列島と周辺海域の地震地体構造区分,地震第2輯, vol.55, pp.389-406, 2003.

活断層研究会(編),新編日本の活断層 分布図と資料,東京大学出版会,437p,1991.

木方建造,大山隆弘,鈴木浩一,中田英二,田中姿郎,宮川公雄,石井英一,高橋一晴,濱克宏, 國丸貴紀,津久井郎太,福島龍郎,瀬谷正巳,青木和弘,幌延における堆積岩の特性研究,電 力中央研究所/日本原子力研究開発機構共同研究成果報告,50p,2006.

木村克己, 巖谷敏光, 三村弘二, 佐藤喜男, 佐藤岱生, 鈴木祐一郎, 坂巻幸雄, 尾鈴山地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 137p, 1991.

新里忠史, 安江健一, 幌延地域における地質環境の長期安定性に関する研究, 原子力バックエン ド研究, vol.11, pp.125-137, 2005.

小疇 尚, 野上道男, 小野有五, 平川一臣(編), 日本の地形2 北海道, 東京大学出版, 359p, 2003. 小池一之, 町田 洋(編), 日本の海成段丘アトラス, 東京大学出版会, 122p, 2001.

国土交通省,国土地盤情報検索サイト「KuniJiban」,2008. http://www.kunijiban.pwri.go.jp (2019年3月18日最終閲覧)

松田時彦,吉川真季,陸域のM≧5地震と活断層の分布関係-断層と地震の分布関係-その2,活 断層研究, vol.20, pp.1-22, 2001.

松井健,加藤芳朗,中国・四国地方およびその周辺における赤色土の産状と生成時期-西南日本 の赤色土の生成にかんする古土壌学的研究第2報,資源科学研究所彙報,vol.64, pp.31-48, 1965.

松四雄騎, 若狭 幸, 松崎浩之, 松倉公憲, 宇宙線生成核種 ¹⁰Be および ²⁶Al のプロセス地形学的 応用, 地形, vol.28, pp.87-107, 2007. 長岡信治,後期更新世における宮崎平野の地形発達,第四紀研究, vol.25, pp.139-163, 1986.

長岡信治,西山賢一,井上弦,過去 200 万年間における宮崎平野の地層形成と陸化プロセス,地 学雑誌, vol.119, pp.623-667, 2010.

永塚鎮男, 褐色森林土, 黄褐色森林土, 赤色土における遊離酸化鉄の存在形態について, ペドロ ジスト, vol.17, pp.70-83, 1973.

中田 高, 今泉俊文(編), 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, 60p, 2002

日本第四紀学会(編),日本第四紀地図,東京大学出版会,110p,1987.

日本原子力研究開発機構,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 地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書,206p,2018.

新里忠史, 舟木泰智, 安江健一, 北海道北部, 幌延地域における後期鮮新世以降の古地理と地質 構造発達史, 地質学雑誌(補遺), vol.113, pp.119-135, 2007.

西山賢一, 松倉公憲, 四万十帯砂岩の風化: 色彩および鉱物化学的性質の変化, 地形, Vol. 22, pp. 23-42, 2001.

西山賢一,水上陽成,小池克明,松倉公憲,風化による砂岩礫の間隙構造の時間変化,応用地質, vol.42, pp.2-14, 2001.

野上道男,未来の地形と地形学の未来,日本列島の地形学,東京大学出版会, pp.180-186, 2010.

野村勝弘,谷川晋一,雨宮浩樹,安江健一,日本列島の過去約十万年間の隆起量に関する情報整理,日本原子力研究開発機構,JAEA-Data/Code2016-015,49p,2017.

岡田篤正,四国中央北縁部における中央構造線の第四紀断層運動,地理学評論,vol.46,pp.295-322,1973.

大久保彪, 寺崎 晃, 岩石の物理的性質と弾性波速度, 土と基礎, vol.19, pp.31-37, 1971.

太田久仁雄,阿部寛信,山口雄大,國丸貴紀,石井英一,操上広志,戸村豪治,柴野一則,濱 克宏, 松井裕哉,新里忠史,高橋一晴,丹生屋純夫,大原英史,浅森浩一,森岡宏之,舟木泰智,茂田 直孝,福島龍朗,幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第一段階)研究成果 報告書 分冊「深地層の科学的研究」,日本原子力研究開発機構,JAEA-Research 2007-044, 434p, 2007.

三箇智二, 安江健一, 河床縦断形のシミュレーション, 地形, vol.29, pp.27-49, 2008.

産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成28年度地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発報告書,372p, 2017.

産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成29年度地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発報告書,390p, 2018.

産業技術総合研究所, サロベツ断層帯の活動性および活動履歴調査, 「基盤的調査観測対象断層 帯の追加・補完調査」成果報告書, vol.H17-1, 2006.

資源エネルギー庁,沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会とりまとめ,17p, 2016.

須田芳朗,村田泰章, 菊地恒夫,花岡尚之. 岩石物性値データベース (PROCK),地質調査所研究 資料集, no.155, 231p, 1991.

Sunamura, T., Processes of sea cliff and platform erosion, in Komar, P.D. (ed.) CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion, CRC press, Florida, pp.233-265, 1983.

鈴木隆介,建設技術者のための地形図読図入門 第3巻 段丘・丘陵・山地,古今書院,942p, 2000.

- 鈴木秀明, 宮崎層群の層位学的研究, 東北大學理學部地質學古生物學教室研究邦文報告, vol.90, pp.1-24, 1987
- 谷川晋一, 三箇智二, 安江健一, 河川の土砂運搬作用を考慮した河床縦断面形のシミュレーション, 地形, vol.37, pp.189-207, 2016.

宇多高明(編),日本の海岸侵食,山海堂,442p,1997.

Wako, T., River terraces and gentle slopes along the Shokotsu river, northeastern Hokkaido, The science reports of the Tohoku University, 7th series, Geography, vol.10, pp.39-49, 1961.

柳沢幸夫, 釧路海底谷側壁から採取された泥岩試料の珪藻化石, 地質調査研究報告, vol.61, pp.105-123, 2010.

八島邦夫, 今井健三, 西沢邦和, 100万分の1海底地形図「北海道」・「東北日本」と海底地形, 水路部研究報告, vol.17, pp.93-162, 1982.

柳田 誠, 水野秀明, 湧別川の河岸段丘(演旨), 地形, vol.3, pp.209-210, 1982.

柳田 誠, 北見山地中・南部の河川地形と緩斜面, 小疇 尚・野上道男・小野有五・平川一臣編「日本の地形 2 北海道」, 東京大学出版会, pp.80-80, 2003.

米倉伸之,貝塚爽平,野上道男,鎮西清高(編),日本の地形1総説,東京大学出版,351p,2001. 吉川虎雄(編),大陸棚その成り立ちを考える,古今書院,202p,1997.

吉山 昭,柳田 誠,河成地形面の比高分布から見た地殻変動,地学雑誌, vol.104, pp.809-826, 1995.

3.2.3 沿岸部における断層運動に関する検討

(1) はじめに

沿岸部における地質環境の調査技術のうち、断層運動については、海陸接合部における断層の 分布や活動性といった情報を得るため、陸域及び海域の双方における調査技術の適切な組み合わ せが重要となる。特にわが国は四方が海で囲まれており、海陸境界付近での断層運動に関する調 査・評価技術の整備に加え、わが国の沿岸部における断層の分布や特徴について十分な情報が整 理されていることが求められる。

日本列島及びその周辺海域の断層の分布や特徴については、既に網羅的に調査・整理された文 献などの情報が複数知られている(例えば、徳山ほか,2001;阿部・青柳,2006)。沿岸部の断層 を対象とした調査・解析技術についても、海底地形計測、音波探査、海底ボーリング調査といっ た調査目的に応じた複数の手法が整備されており、海域においても陸域と同様、活断層分布を確 認するための段階的な地質環境調査を実施することが可能である見通しが得られている(沿岸海 底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会,2016)。ただし、その段階的な調査の信頼 性の向上という観点から、わが国の沿岸部における地質構造や変動地形に係る最新の調査・研究 や、個別技術の適用条件・適用限界などの詳細についてさらに知見を整理し、調査技術の適切な 組み合わせ方を提示していく必要がある。

そこで本事業では、特にここ十数年の間に拡充された情報を中心に、海陸境界付近の断層など に関する調査・研究事例と調査技術に関する情報を収集・分析し、わが国における沿岸部の断層 運動に関わる特徴や、既存の調査技術の適用性について検討を行った。情報収集においては、大 学などによって実施された学術的研究や公的機関において調査された国土基盤情報に加え、国内 外の原子力施設の耐震安全評価に関連して実施された調査・評価、沿岸部における地下資源探査 や二酸化炭素地下貯留の実証試験などにおける事例も対象とした。

情報収集・分析結果については、丹羽ほか(2018)にて詳細に取りまとめを行っている。本報 告書では、その概要について要約する。

(2) 実施概要

1) わが国の沿岸部の断層分布・断層運動に関わる地形・地質学的特徴

本事業で収集した情報、及び海上保安庁や産業技術総合研究所などによる国土基盤情報の作成 のため日本全域にわたり実施された調査データなどを総合すると、断層の分布や特徴に関わる広 域的な海底地形・海底地質の概要については、日本列島周辺海域の情報がほぼ把握されていると 言えることが分かった。特に、陸域での地形・地質調査により、海域の延長線上に活断層が疑わ れる地域においては、地震調査研究推進本部などのプロジェクトにより、沿岸部の断層分布や活 動性に関する調査が既に実施されていることが確認できた。また、沿岸部の断層分布・断層運動 に関わる地形・地質学的特徴について、日本列島の基盤地質構造に基づき区分された地域ごとに 整理した結果、断層の分布や断層運動の特徴は同じ地域であれば陸域と沿岸部とで大きな違いは ないことも確認できた。

ただし細かく見ると、北海道のオホーツク海沿岸や東北の三陸沖、九州の日向灘沿岸部など、 沿岸部の陸域によく知られた活断層が分布しない地域を中心に、断層運動に着目した海域の目立 った調査事例が見られない地域も存在することに留意が必要である。

2) 沿岸部の断層分布・連続性・活動時期・活動性などの調査・評価手法の整理

沿岸部の断層分布・連続性・活動時期・活動性などを評価するための考え方や各種調査手法に ついて、本研究により収集した既存の調査・研究事例に基づき整理し、沿岸部の海域を対象とし た調査・評価の概略的なフローを取りまとめた(図 3.2-31)。さらに、このフローに沿って、海底地形調査、海底地質調査、海底堆積物調査のそれぞれについて、調査手法の適切な選択や個々の調査・評価に係る考え方・留意点について取りまとめた。

海底地形調査については、主要な調査手法の一つであるマルチビーム測深を例として、海底地 形に合わせた測線設定の基本的考え方について整理した。海底地質調査については、調査手法と して最も広く採用されている音波探査について、測線設定の考え方、三次元探査の優位性、海陸 境界部での探査手法、地層境界からの反射波を利用した断層の検知が難しい塊状岩体などを対象 とした解析手法といった点について取りまとめた。海底堆積物調査については、試料採取におけ る着眼点や、堆積物の記載・分析結果と音波探査結果との対比について重要な点について取りま とめた。

海陸境界では、調査船の進入が困難なことなどにより、調査技術に一部制約が生じるものの、 ケーブルの敷設による浅海部での観測と、陸域沿岸での地質調査・観測とを適切に組み合わせる ことにより、地層処分実施主体が精密調査までに回避するような規模の大きな断層を検出するこ とは十分可能であると考えられる。



図 3.2-31 沿岸部における断層の調査・評価の概略的なフロー 個々の調査手法は一例を示している。

3) 海底地形・地質に係る調査手法の適用性に関する検討

本事業では、海底地形調査、海底地質調査、海底堆積物調査のそれぞれについて、個別の調査 手法の適用条件・適用限界などの詳細についての知見の整理も実施した。

海底地形調査については、マルチビーム測深をはじめ、サイドスキャンソナーやサブボトムプ ロファイラー、航空レーザー測深といった技術について取りまとめを行い、機器の進歩に伴い測 定精度や利便性が向上している傾向を確認した。

海底地質調査については、最も広く行われている手法である音波探査を中心に取りまとめを行った。2000年代以前の音波探査は、1)ソノプローブやチャープソナーによる海底からの深度約 100 m 以浅の浅部地下構造探査、2)スパーカーを用いた複数測線を設定して行うやや広域的な 地質構造を把握するためのシングルチャンネル探査、3)ウォーターガンやエアガンによる深部 (海底からの深度約 100 m 以深)の地下構造を把握するためのシングルチャンネル探査が主体で あったが、2000 年代以降は、4)ブーマーによる海底からの深度約 200 m 以浅の地下構造を主な 対象としたマルチチャンネル音波探査及び 5)ウォーターガンやエアガンを用いたより深部の地 下構造まで把握するためのマルチチャンネル探査が主流となってきていることが整理できた。ま た、最近の傾向として、海底からの深度約数十 m までの極浅部の地下構造の詳細な探査にパラメ トリック方式音源のサブボトムプロファイラーなどの新しい機器が用いられるようになってきて いること(楮原ほか,2012 など)、複数のストリーマーケーブルを連結して一度にデータを取得 し、高精度で地質構造を解析する三次元音波探査が普及しつつあること(高野ほか,2006 など)、 受振器を連結させた海底ケーブルを常設型として設置して観測を継続することにより、地下地質 情報の精緻化を図る試みがなされていること(Xue et al., 2017 など)が特筆すべき点である。

海底堆積物調査については、柱状採泥、ドレッジ(表層採岩)、グラブサンプラといった海底表 層試料の採泥・採岩手法に加え、最も充実したデータの得られる海上ボーリングに関して、各手 法の特徴を整理した。これらは個別の技術としては整備されつつあるものの、日本の沿岸部で掘 削から試料採取まで行われ、学術的な検証が可能な形で公表されている実績は、資源エネルギー 庁による基礎試錐調査などを除くとあまり多くないのが現状である。

参考文献

阿部信太郎,青柳恭平,日本列島沿岸海域における海底活断層調査の現状と課題-海底活断層評価の信頼度向上に向けて-,電力中央研究所報告,N05047,26p,2006.

沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会,沿岸海底下等における地層処分の 技術的課題に関する研究会とりまとめ, 17p, 2016.

楮原京子,内田康人,村上文敏,仁科健二,大津 直,岡崎紀俊,函館平野西縁断層帯海域延長部 の地下構造と活動性,活断層・古地震研究報告,no.12, pp.1-43, 2012.

丹羽正和,野村勝弘,日浦祐樹,海陸境界付近の断層の分布・特徴、及びその調査・評価技術に関 する知見の整理, JAEA-Review 2018-010, 40p, 2018.

高野 修, 荒戸裕之, 中西健史, 松岡俊文, 佐伯龍男, 三次元反射法地震探査技術の進展がもたら す地質学, とくに堆積学分野へのインパクト, 物理探査, vol.59, pp.225-231, 2006.

- 徳山英一,本座栄一,木村政昭,倉本真一,芦寿一郎,岡村行信,荒戸裕之,伊藤康人,徐垣,日 野亮太,野原 壯,阿部寛信,坂井眞一,向山建二郎,「日本周辺海域中新世最末期以降の構造 発達史」付図 日本周辺海域の第四紀地質構造図,海洋調査技術,vol.13, pp.27-53, 2001.
- Xue, Z., Toshioka, T., Aoki, N., Kawabe, Y. and Tanase, D., Research and development of a permanent OBC system for time-lapse seismic survey and microseismic monitoring at the offshore CO₂ storage sites, Energy Procedia, vol.114, pp.3778-3785, 2017.

3.2.4 沿岸部における火成活動に関する検討

(1) 背景と目的

火山・火成活動が地層処分システムに及ぼす影響としては、マグマの貫入や噴出による処分施 設及び廃棄体の直接的な破損のほか、マグマや深部流体の熱などによる地下水温の上昇や熱水対 流の発生、熱水・火山ガスの混入による地下水の水質変化などが考えられる。また、深部流体は、 沈み込むスラブやマントル起源の流体が断裂系などを通じて地表付近に上昇するもので(産業技 術総合研究所, 2012a)、pH が低く炭酸化学種が高濃度に含まれるなどの特徴があり、温度が高い 場合には熱環境への影響もある。そのため、これらが流入する範囲では地質環境として好ましく ない熱環境や化学場が生成される可能性があり、概要調査などにおいてその影響を排除すること が望ましい(地層処分技術 WG, 2014)と指摘されている。

一方で、経済産業省総合資源エネルギー調査会地層処分技術ワーキンググループにおいては、 廃棄物の輸送時の安全性の観点から、沿岸部(島嶼部や海底下を含む)を「より適性の高い地域」 とするとの考え方が示された。また、地層処分の観点から沿岸部において期待される特性や留意 事項が示され、今後の調査研究などへの取組について、具体的な検討を進めて行くことが重要で あるとの指摘がなされた(地層処分技術 WG, 2015)。これらの指摘を受けて、経済産業省が設置 した「沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会」においては、地層処分の物 理的隔離機能に影響を与える可能性がある自然現象の一つとして火山・火成活動が示され、処分 事業における概要調査や精密調査の実施にあたってマグマ・深部流体などの有無を確認し、影響 範囲を評価するための調査・評価技術の高度化が今後の課題の一つとして挙げられている(沿岸 海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会, 2016)。

このため本事業では、沿岸部への適用のための技術の高度化及びその適用事例の提示を目標と して、既存の調査・研究事例を収集・分析することで、マグマや深部流体の発生・移動に関する 科学的知見のほか、その有無や分布を把握するための地球物理学的手法に関する沿岸部への適用 性及び適用にあたっての課題を整理した。さらに、これにより抽出された課題に対して、それを 改善するための手法とその妥当性について、適用事例を通じて検討した。

(2) マグマ・深部流体の発生・移動に関する科学的知見

日本列島のようなプレートの沈み込み帯におけるマグマやいわゆる深部流体は、海洋プレート が陸側のプレート下へ沈み込むことで地球内部に運ばれた水が、沈み込みに伴う温度・圧力の上 昇によって、海洋プレートからマントル・ウェッジへ放出されることに起因すると考えられてい る(例えば、Tatsumi, 1989; Iwamori, 1998)。

日本列島では、海洋プレートである太平洋プレートやフィリピン海プレートが、北米プレート (オホーツクプレート)とユーラシアプレートの下へ沈み込んでいる。沈み込んだプレート(以 下、スラブという)では、その温度と圧力の上昇に伴って、スラブを構成する含水鉱物が脱水反 応を起こすことが知られている(例えば、Iwamori, 1998)。また、特に火山フロントよりも海溝 側となる前弧域では、スラブ上面における堆積層からの間隙水の放出も生じるとも指摘されてい る(例えば、Hyndman and Peacock, 2003)。このように放出された水は、周囲との密度差によ り上昇してマントル・ウェッジへ移動し、マントル物質(カンラン岩)を蛇紋岩化させる。含水 鉱物の脱水反応が生じる深さは、スラブの生成年代に起因する温度構造などに依存するため、太 平洋スラブとフィリピン海スラブとで異なる。そのため、比較的古く低温の太平洋スラブでの脱 水深度は、若く高温であるフィリピン海スラブよりも深くなると考えられている。

スラブ起源の水が加わることによって蛇紋岩化したマントルは、東北日本の場合、スラブの沈 み込みに引きずられ、さらに深部で再度脱水分解する。ここで放出された水はマントル・ウェッ ジ内を上昇する過程で部分溶融を引き起こしてメルトを生成させ、火山フロント直下でモホ面(モホロビチッチ不連続面)まで達すると考えられている(例えば、Zhao et al., 1992; Nakajima et al., 2001; Hasegawa et al., 2007)。モホ面まで達したメルトは火山活動の原因となる。また、部分溶融を経ずに地表付近まで上昇するものは、深部流体の原因の一つと考えられており、前弧域に位置する紀伊半島に湧出する高温の温泉は、このような流体の上昇が関与しているとも指摘されている(例えば、西村, 2001)。

(3) 沿岸部におけるマグマ・深部流体の調査技術

1) 沿岸部に対する地球物理学的手法の適用性と課題

マグマ・深部流体などの有無や分布を確認するための地球物理学的手法について、主に陸域を 対象とした既存の調査・研究事例などに関する情報の収集及び分析により、沿岸部での調査に対 する現状の技術の適用性や課題を整理した結果を表 3.2・に示す。図 3.2・32 にはマグマや深部流 体の存在を示唆する地球科学的な情報を示すが、地下深部(地殻及び上部マントル)における流 体の有無や分布などに関するこれまでの調査・研究では、地震波トモグラフィや地磁気・地電流 法(Magnetotelluric 法。以下、「MT 法」という)といった自然由来の現象(地磁気・地電流、 自然地震)の観測に基づく手法が主要な方法として用いられていることが明らかになった。この うち MT 法に関しては浅海域における観測の困難性が指摘されているものの、それに対応する観 測技術の開発が既に進められている(産業技術総合研究所, 2013)。一方で、地震波トモグラフィ のほか、レシーバ関数解析やS 波反射面解析などの地震学的手法については、自然地震の観測デ ータを用いるため、高い精度で解析を行うためには定常地震観測網の端部または外側となる沿岸 部での震源決定精度の向上が重要となる(図 3.2-33)。

傳播	用られる	GONE	型類分類量·決定構成	マグマ・運動連体に対する情報	沿岸部への適用性と問題
地震波 トモグラフィ	P達・5波速度分布 (二次元、三次元)	慶源源さと同様度 (~数百km)	分解線:観測点間隔と同程度 (国内機種では20~30 km程度)	遺体分布域:地震波低速度, 高ポアソン比 高型領域:地震波低速度	・定常地震観測網の外側(沿岸部海域)では震源決定 構度が低下 ・そのため、陸域と同種度の信頼性を有する解析は困難
MT法 (地磁気・地電流 法)	比髮抗分布 (二次元,三次元)	観測周波数に依存 (~百数十km)	分解離:観測点間隔に依存するか、 深部ほど分解整低下 (地般深部で10-20km程度)	滚体分布堿:低比抵抗	・洗海域での観測では流浪によりノイズが混入するため、 装置の揺動を低減可能な観測機を用いることが重要
レシーパ 開設解析	Ps変換面漂さ (分布)	地設、上都マントル (~百数十km)	分解能:統刑点間隔と同程度	遺体分布域:境界重深さ	・沿岸部海域の多くは定常地震観測編の外側に位置するため、解析は回動
S波反射面 解析	反射蓋の位置・ 種料・方位角	地藏内	位置決定轉度(隆緩):發km	流体分布域:上面罩さ	・定常地最額原摘の外側(沿岸部海域)では震源決定 構成が低下 +そのため、種域と同程度の信頼性を有する新析は困難
低周波地震 震源決定	義源位置(分布)	地蔵内。 マントル最上部	位置決定構度(種種):数km	遠体分布矯の存在: 遠体分布矯の確認で発生する傾向	 ・定常地震観高編の外側(沿岸部海域)では最非決定 構度が低下
地酸熱流量 地漏勾配 測定	地表付近ての熱約 情報	地版内	分解載:観測点間癌と同程度	高温器種の存否	・種脯と同程度の測定が可能
地跟発生期 解析	地震発生層の 下面深さ分布	地設內	深さ決定機度(種城):数km	高温領域:周辺に比べて下面深度が違い領域	 記常地震観末期の外側(沿岸部海道)では震意決定 構度が低下 そのため、陸域と同程度の信頼性を有する解析は困難
地震波 トモグラフィ (人工の登録者)	P波運度分布 (二次元,三次元)	課さ10km程度	分解総:浅御(数km)は観測点開陽 と問程度。課部ほど分解値が低下	遠体分希睡: 助義波低速度 高温领域: 地震波低速度	・稜域と同程度の測定が可能だが、探査深度が深さ10 10程度までに限られる。

表 3.2-5 マグマや深部流体に関する地球物理学的手法の概要


図 3.2-32 マグマや深部流体の存在を示唆する地球科学的情報



図 3.2-33 沿岸部での自然地震観測による地下構造の推定に関する模式図

2) 地球物理学的手法の高度化

マグマ・深部流体などの分布を推定するための主要な手法の一つとして用いられる自然地震デ ータを用いた地震波トモグラフィは、地震の発生に伴って震源から地表の地震観測点に伝播する 地震波の観測データを多量に用い、多数の三次元ブロックまたは格子点によって表現された解析 対象領域内の地震波速度構造をインバージョンによって推定する手法である。この手法を使った これまでの研究では、そのほとんどが陸域に展開される定常地震観測網で記録された地震データ を用いるため、観測網の内側となる陸域を主な解析対象としている(例えば、Zhao et al., 1992; Nakajima et al., 2001)。一方、定常地震観測網の端部あるいは外側に位置する沿岸部への適用性 の観点でみた場合は、主に二つの課題が挙げられる。

一つ目の課題は、解析精度の向上(不確実性の低減)である。日本列島には、地震波速度が極 めて遅い堆積層などが場所によって大きく異なる厚さ(~数千 m)で分布しているが、従来の方 法ではこれらの詳細な分布が解析に考慮されていない。この場合、波線追跡と呼ばれる数値解析 によって計算される地殻内の地震波伝播経路(理論波線)や伝播に要した時間(理論走時)が実 際と大きくずれてしまう。そのため、このような領域を対象として震源決定を行った場合は、実 際とは大きくずれた位置に震源が推定されてしまう(図 3.2-34)。地震波トモグラフィを含め、 自然地震の観測に基づく手法(S 波反射面解析、低周波地震分布、地震発生層の深さ分布)では、 このように推定される震源パラメータ(発震時刻及び震源位置)が、それぞれの解析の入力情報 となる。例えば、このような領域に対して地震波トモグラフィを適用した場合は、結果として地 殻構造のイメージには偽像が生じてしまうことが想定される。二つ目の課題は、空間分解能の向 上である。通常よく用いられる地震波トモグラフィでは、地表における地震観測点の間隔に比べ て高い空間分解能で地殻構造を推定することができない。特に、定常的な地震観測点が展開され ていない海域においてはこの課題への対応も重要となるが、近年では地震波の後続波を利用する ことによって海域への適用が進められている(例えば、Wang and Zhao, 2005; Liu et al., 2013)。

このため、本事業では一つ目の課題の解決を目的として、沿岸部における震源決定及び地震波 トモグラフィに係る解析方法の改善について検討した。本検討では、地下深部にマグマの存在が 想定される利尻火山が位置し、かつ堆積層の層厚変化が著しい北海道北西部における陸域・海域 を含む領域を事例として、堆積層の層厚変化を考慮した震源決定法及び地震波トモグラフィを適 用し、本手法の妥当性を検討した。なお、これらの解析には、気象庁一元化検測値データに掲載 される地震データを用いた。

堆積層の層厚変化として深部地盤構造モデル(防災科学技術研究所編,2009)を考慮した震源 決定の解析結果の例として、サロベツ断層帯の海域延長部(阿部ほか,2013)の走向と直交する 断面における震源分布を図 3.2-35 に示す。サロベツ断層帯海域延長部(抜海沖活動セグメント) は、20°Eの傾斜を持つ全長約 49 kmの活断層とされ、平均変位速度は 1.0 m/千年と見積られ ている(産業技術総合研究所,2012b)。図 3.2-4 に示す震源再決定前後の震源分布によると、震 源再決定前の震源(以下、「初期震源」という)は比較的ばらついた分布をしている。これに対し て、震源再決定後においては、東に傾斜する震源の集中域が認められ、その地表延長部は活断層 トレースのやや東方に位置する。地表付近における活断層の傾斜は低角であると推定されている ことから、震源再決定によって推定された震源分布は、活断層の深部延長部における活動を示唆 している可能性が考えられる。

さらに、堆積層の層厚変化を考慮した波線追跡を適用した地震波トモグラフィの結果を、従来 の手法に基づく解析結果とともに図 3.2-36 及び図 3.2-37 に示す。従来の手法による解析結果 (図 3.2-36 (a) 及び図 3.2-37 (a))において、第四紀火山である利尻火山周辺の地震波速度は 平均的な速度から高速度の領域としてイメージされたが、今回の手法を用いた解析結果(図 3.2-36 (b) 及び図 3.2-37 (b))では、P 波速度、S 波速度ともに低速度の領域としてイメージさ れ、利尻火山周辺における二つの解析結果は大きく異なる傾向を示す。マグマなどの流体が存在 する場合は、P 波速度、S 波速度ともに低速度を示すことが知られているが(例えば、O'Connell and Budiansky, 1974; Zhao and Negishi, 1998)、利尻火山周辺の地殻においては流体の存在を 示唆する低周波微小地震の発生が認められていること(図 3.2-36 及び図 3.2-37)、既存の研究に よって利尻火山周辺下のマントル・ウェッジでは、流体の上昇を示唆する顕著な地震波低速度体 が見出されている(Liu et al., 2013; Asamori and Zhao, 2015; Niu et al., 2016)ことから、堆 積層の層厚分布を考慮した解析によって利尻火山下の上部地殻に認められた地震波低速度の領域 は、火山活動に関連した流体(マグマまたはその固化に伴って放出された水)の存在を示唆する と考えられる。また、従来の手法を適用した場合に認められた地震波高速度体は、解析領域にお ける堆積層の層厚変化が顕著であることに伴う偽像である可能性が考えられる。

以上の成果は、マグマや深部流体の有無や分布を把握するための解析に必要となる自然地震の 震源決定や地震波トモグラフィについて、その精度を向上させるためには、堆積層の分布を考慮 した解析が有効であることを示唆する。また本手法は、堆積層の層厚が急変し、かつ定常地震観 測網の端部に位置する沿岸部においては特に有効であると考えられる。



図 3.2-34 (a) 堆積層を考慮しない場合、(b) 堆積層を考慮した場合における震源決定の概念 図



図 3.2-35 サロベツ断層帯海域延長部を横切る断面(左図黒線)における(a)初期震源の震央 分布及び(b)震源再決定後の震源の分布



-3 -2 -1 0 1 2 3 P-wave velocity (%)

図 3.2-36 各深度における P 波速度偏差の分布

(a) 従来の手法による解析結果、(b) 堆積層の層厚分布を考慮した手法による解析結果。星印 及び赤三角は、それぞれ低周波地震及び第四紀火山を示す。



図 3.2-37 各深度におけるS波速度偏差の分布

(a) 従来の手法による解析結果、(b) 堆積層の層厚分布を考慮した手法による解析結果。星印 及び赤三角は、それぞれ低周波地震及び第四紀火山を示す。

(4) まとめ

本事業では、マグマや深部流体の有無や分布を把握するための地球物理学的手法について、沿 岸部への適用のための技術の高度化及びその適用事例の提示を目標として、既存の調査・研究事 例を収集・分析し、課題を整理した。さらに、これにより抽出された課題(定常地震観測網の端 部または外側となる沿岸部において地震学的手法を適用するために必要となる震源決定精度や地 下構造推定精度の向上)に対して、それを改善するための手法(堆積層の層厚変化を考慮した震 源決定法及び地震波トモグラフィ)を検討し、利尻火山の周辺領域における適用事例を示した。 この手法を用いることによって、従来の手法では検出できなかった火山活動に関連した流体を検 出することができたと考えられることから、沿岸部に対して自然地震の観測データに基づく手法 を適用する場合には、堆積層の層厚変化を考慮した震源決定法及び地震波トモグラフィなどが有 効であることが明らかになった。

しかしながら、これらの手法によって得られる個別の観測・解析結果には不確実性(観測や解 析に伴う誤差や分解能の制約)があることに注意すべきである。図 3.2-32 に示すように、マグマ や深部流体の存在を示唆する地球科学的な情報は複数存在する。一般に、複数の手法によって得 られた情報が整合的であることはその結果の信頼性が高いことを示す。そのため、表 3.2-に示す 他の地球物理学的手法の他、マグマや深部流体に関する地球化学的な指標の一つとして用いられ るヘリウム同位体比(³He/⁴He 比)といった地球化学的情報も取得して相補的に用いることで、 その有無や分布を総合的に検討することが沿岸部においては特に重要と考えられる。

謝辞

本報告では、防災科学技術研究所によって公開されている気象庁一元化地震データを使用しま した。気象庁一元化地震データは防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京 大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、気象庁、産業技術総合研究所、 国土地理院、青森県、東京都、静岡県及び神奈川県温泉地学研究所の地震観測データを使用して、 気象庁が文部科学省と協力して整理したものです。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 阿部信太郎, 内田康人, 荒井良祐, サロベツ断層帯海域延長部における活構造の分布・性状と活動 性について, 活断層・古地震研究報告, vol.13, pp.39-74, 2013.
- Asamori, K. and Zhao, D., Teleseismic shear wave tomography of the Japan subduction zone, Geophysical Journal International, vol.203, pp.1752-1772, 2015.
- 防災科学技術研究所(編), 強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討, 防災 科学技術研究所資料, no.337, 265p 2009.
- 沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会,沿岸海底下等における地層処分の 技術的課題に関する研究会 とりまとめ, 17p, 2016.
- Hasegawa, A., Nakajima, J., Kita, S., Okada, T., Matsuzawa, T. and Kirby, S., Anomalous deepening of a belt of intraslab earthquakes in the Pacific slab crust under Kanto, central Japan: Possible anomalous thermal shielding, dehydration reactions, and seismicity caused by shallower cold slab material, Geophysical Research Letters, vol.34, L09305, doi:10.1029/2007GL029616, 2007.
- Hyndman, R. D. and Peacock, S. M., Serpentinization of the forearc mantle, Earth and Planetary Science Letters, vol.212, pp.417-432, 2003.

- Iwamori, H., Transportation of H₂O and melting in subduction zones, Earth and Planetary Science Letters, vol.160, pp.65-80, 1998.
- Liu, X., Zhao, D. and Li, S., Seismic heterogeneity and anisotropy of the southern Kuril arc: insight into megathrust earthquakes, Geophysical Journal International, vol.194, pp.1069-1090, 2013.
- Nakajima, J., Matsuzawa, T., Hasegawa, A. and Zhao, D., Three-dimensional structure of Vp, Vs, and Vp/Vs beneath northeastern Japan: Implications for arc magmatism and fluids, Journal of Geophysical Research, vol.106, pp.21843-21857, 2001.

西村 進, 紀伊半島の温泉とその熱源, 温泉科学, vol.51, pp.98-107, 2001.

- Niu, X., Zhao, D., Li, J. and Ruan, A., P wave azimuthal and radial anisotropy of the Hokkaido subduction zone, Journal of Geophysical Research, vol.121, pp.2636-2660, 2016.
- O'Connell, R. J. and Budiansky, B., Seismic velocities in dry and saturated cracked solids, Journal of Geophysical Research, vol.79, pp.5412-5426, 1974.
- 産業技術総合研究所,概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—立地要件への適合性とその 根拠となる調査結果の妥当性—,産業技術総合研究所地質調査総合センター研究資料集, no.560, 112p, 2012a.
- 産業技術総合研究所,活断層データベース,2012b.

https://gbank.gsj.jp/activefault/ index_gmap.html(2018年1月18日最終閲覧).

- 産業技術総合研究所,沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発 平成 24 年度 成果報告書,521p, 2013.
- 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 地層処分技術ワーキンググ ループ,最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価—地質環境特性および地質環境の 長期安定性について—,61p,2014.
- 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 地層処分技術ワーキンググ ループ,科学的有望地の要件・基準に関する地層処分技術 WG における中間整理,68p,2015.
- Tatsumi, Y., Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction zones, Journal of Geophysical Research, vol.94, pp.4697-4707, 1989.
- Wang, Z. and Zhao, D., Seismic imaging of the entire arc of Tohoku and Hokkaido in Japan using P-wave, S-wave and sP depth-phase data, Physics of the Earth and Planetary Interiors, vol.152, pp.144-162, 2005.
- Zhao, D. and Negishi, H., The 1995 Kobe earthquake: seismic image of the source zone and its implications for the rupture nucleation, Journal of Geophysical Research, vol.103, pp.9967-9986, 1998.
- Zhao, D., Hasegawa, A. and Horiuchi, S., Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan, Journal of Geophysical Research, vol.97, pp.19909-19928, 1992.

3.3 沿岸部の地下水長期安定性に関する研究

3.3.1 はじめに

高レベル放射性廃棄物処分においては、処分した放射性核種が漏洩し、地下水によって輸送されることを想定した「地下水シナリオ」が安全評価において重要になる。核種は放射性物質のため、漏出までの時間が長いほど放射壊変によって放射毒性が低下することを考えると、処分場周辺の地下水流速が遅い方が安全評価上有利である。

海域が境界条件となり、動水勾配の小さい沿岸部では動水勾配が小さく、塩淡境界の下位にあ る海水域は流動性が低いため、長期にわたって安定なことが期待される。地下水年代測定や地下 水流動解析は、地下水の長期安定性に関する知見を得るための最も有効な方法と考えられる。こ れは、天然に存在する同位体や溶存ガスから地下水の地下水年代を導くものである。地下水流動 解析は、評価地点の地形、地質、水理、水文情報を総合し、地下水の流動性を評価するものであ る。これらの技術を適用し、適用性検討と課題抽出を行うことで、技術の高度化を行う。

また、地下水の化学組成や溶存イオン濃度も、核種の溶解度や地層への吸着特性へ影響を及ぼ すため重要である。しかしながら、処分で対象となるような深部の地下水の安定性や地化学環境 に関するデータはそれほど多くない。この理由から本事業では、図 3.3-1 に示すような既存の大 深度ボーリング孔などから地下水を採取し、地下水年代(平均滞留時間)・地化学環境測定を行う こととした。



図 3.3-1 沿岸部の地下水長期安定性評価の概念図

3.3.2 地下水長期安定性評価技術

(1) 地下水年代測定

地下水年代測定技術は天然に存在する放射性物質の壊変、壊変に伴う物質の蓄積、古気候など の環境的なイベントに着目し、地下水の地下水年代を評価する方法である。地下水年代解析の原 理及び用いられる放射性物質やトレーサーの種類については図 3.3-2 のようにまとめられる。

地下水年代は用いたトレーサーの初期値、平衡値、異なる起源の混合などの影響を受ける。そのため一つの物質や同位体のみから地下水年代を評価することは難しい。適切な地下水年代を求めるためには、同じ地下水に複数の方法を適用し、相互比較して求めることが好ましい(Hasegawa et al., 2016)。このため、本事業では可能な限り複数の方法を適用する。

高レベル放射性廃棄物処分においては、その安全性を示すために最終処分施設周辺の地下水流 動が緩慢であることを示すことが地質環境特性調査の重要課題の一つとなる。そのためには、岩 盤の透水性や動水勾配に加えて、地下水の年代測定などによってその滞留時間を把握する必要が ある。滞留時間の長い地下水を対象とした年代測定法として、長半減期核種であるヨウ素-129

(129I)を利用する 129I/127I 比年代測定法やヘリウム(4He)の蓄積から年代を推定する 4He 年代 測定法がある。これらの測定は、主に海外施設に頼っている状態であり、国内において測定例は 少ない。本事業では、これら地下水年度測定技術に関する情報収集及び整備を行った。また ⁸¹Kr の適用性評価も試みた。

寸性同位体	対象物質	時間スケール(年)	特記事項
	(半減期:年)	10 ⁻¹ 10 ⁰ 10 ¹ 10 ² 10 ³ 10 ⁴ 10 ⁵ 10 ⁶ 10 ⁷	1110 F X
	²²² Rn (0.01)	■ ~0 ₀₃ 氷期の 地下水	
	⁸⁵ Kr (10.72)		溶存量小
	³ H (12.43)		
	(³ H+ ³ He)	1~100	³ Heにより 評価年代が増加
	³⁹ Ar (269)	50~20 00	溶存量小
牧	₁₄ C (5730)	<u> </u>	
	有機 ¹⁴ C	<u> </u>	
	⁸¹ Kr (2.1x10 ⁵)	104~ 106	溶存量小
	³⁶ CI (3.0x10 ⁵)	$5x10^4 \sim 2x10^6$	
	¹²⁹ I (1.6x10 ⁷)	5x10 ⁶ ~ 5x10 ⁸	
к	CFCs, SF ₆		温暖化ガス
溶存ガ	希ガス温度計 (Ne, Kr, Xe)	1,000~100,000	涵養時の温度 →涵養時期
	⁴He	1,000~10 ⁷ ●	
立体	² H, ¹⁸ O	1,000~100,000	涵養時の温度 →涵養時期
安定同(³⁷ Cl		拡散場の指標
	⁸⁷ Sr		同位体交換に より年代評価

図 3.3-2 地下水年代測定法と各手法の評価時間スケール

1) 地下水の¹²⁹//¹²⁷ I 比年代測定法

地下水中の¹²⁹I/¹²⁷I 比の測定は、加速器質量分析装置 (AMS) で行われる。そのため、AMS 測 定を対象とした測定試料の調製法及び装置の設定等の情報収集を行った。AMS による測定では、 地下水からヨウ素を分離精製し、ヨウ化銀にする必要がある。これまで地下水からのヨウ素の抽 出法として有機溶剤を用いた溶媒抽出法とイオン交換樹脂を用いる方法 (Jabbar et al., 2011) が 報告されている。このうち、イオン交換樹脂を用いる方法では、人為起源の¹²⁹I の混入が報告さ れており (楠野ほか, 2017)、低い同位体比をもつと予想される地下水への適用は適当でないこと がわかっている。一方、溶媒抽出法は、そのような人為起源の¹²⁹I の混入は報告されていないが、 これまでの多くの研究で用いられている抽出溶媒の四塩化炭素及びクロロホルム (Togo et al., 2016 など) が、国内では平成 26 年に特定化学物質に指定され、今後はその使用が厳しく制限さ れることが想定される。そのため、測定試料調製法の整備の一環として、上記の抽出溶媒を使わ ない方法であるノルマルへキサンによる溶媒抽出 (賀佐ほか, 2007) を検討した。その結果、ノ ルマルへキサンは、四塩化炭素やクロロホルムと変わらないヨウ素抽出能力を持ち、人為起源の ¹²⁹I の混入もなく低い同位体比のヨウ素の抽出が可能であることが確認できた。

一方、129I/127I 比測定は、現在、先に述べたように海外施設に依存している。国内にも 129I/127I 比測定が可能な加速器質量分析施設はあるが少なく、また商業的に測定を行っているところはな い。さらに、ヨウ素は測定による相互汚染を引き起こしやすく、低い同位体比を持つ地下水の測 定では、これまで人為起源の 129I を測定していない施設で実施することが望ましいことがわかっ ている。日本原子力研究開発機構東濃地科学センターの AMS (JAEA-AMS-TONO) は、National Electronic Corporatio 製加速電圧最大 5 MV のもので、すでに国内で 129I 測定が可能な東京大学 加速器施設及び国立環境研究所の AMS と同型機である。これまで 129I 測定は行っておらず、人 為起源の 129I の汚染もなく、地下水の 129I 測定が十分可能であることが見込まれることから、129I 測定のための整備を行った。測定試料の調製法の検討及び装置の各機器の最適化を行い、標準試 料及び同位体比が既知の試料を用いて試験測定を行った結果、地下水中の 129I 測定が可能な 10⁻ 11 レベルから 10⁻¹⁴ レベルまでの 129I/127I 比が測定可能であることを確認した。

以上により、国内において地下水の¹²⁹I/¹²⁷I 比年代測定法が可能なノルマルヘキサンによるヨ ウ素抽出法を含む前処理法及び JAEA-AMS-TONO による¹²⁹I/¹²⁷I 比測定が整備できた。今後は さらに精度の高い測定を行うことができるよう、前処理手法及び測定方法の高精度化を行ってい くことが重要である。

2) 地下水の⁴He 年代測定法

ヘリウム (⁴He)の蓄積に基づく年代の推定については、ヘリウムの同位体比測定にマルチコレ クター型希ガス質量分析装置を適用し、高精度での同位体比測定に成功した。本装置は大気を希 釈して測定した場合、³He/⁴He の測定値は 10%程度の精度を得られることが確認されている(日 本原子力研究開発機構, 2017)。また、Ne の同位体についても ²⁰Ne / ²²Ne=10.0840±0.0044 と有 効数字が 5 桁の精度での測定が可能になった(日本原子力研究開発機構, 2016)。沿岸部で採取さ れた試料についても、同等の精度で測定が行えており、十分に ⁴He 年代測定法に活用できる。さ らに、これまでは生成量が微量であるため検出が困難であった宇宙線暴露によって生成した ²¹Ne の蓄積による年代測定法への活用が期待される。また、沿岸部の地下深部から採取される地下水 は、メタン濃度が高い発泡性の水も存在していることから、そのような地下水を採取する方法と して、金属容器を連結し、湧水を環流させて気泡の混入を防ぐ手法の適用性も確認した。

3) ⁸¹Kr 年代測定の開発

高レベル放射性廃棄物処分などで対象となる地下水の長期安定評価には、104-106年の滞留時間の地下水年代測定のツール開発が極めて重要である。⁸¹Kr(半減期:0.21Ma)は宇宙線由来の 核種であり、核実験、再処理あるいは岩石内での²³⁵Uや²³⁸Uの核反応により放出される割合が 少ない核種であること、不活性希ガスであるため地下水・岩石間の相互作用も低いことを考慮する と、104-106年の時間枠における地下水の絶対年代測定に有効であると考えられる。沿岸部の 300m以深の地下深部では塩分濃度が高くメタン濃度も高い地下水も存在しており、我が国の地 層処分のための地層・深層地下水特性(深部地下水のイオン濃度と共存ガス濃度が高い条件)に 適応した抽出システムの構築が必須である。ここでは、⁸⁵Kr分離技術(Ohta et al., 2009)を改 良して、1)地下深部のサイトで稼動可能な装置の構築及び小型・軽量化、2)大気中の⁸¹Krの汚 染防止手法・評価手法の開発、3)Krの分離効率手法の検討を行った。

開発した装置は、分離ユニット、排気ユニットで構成した。分離ユニットにはメンブレンフィ ルター、中空糸膜及び水トラップホルダーより構成され、排気ユニットは真空ポンプ、コンプレ ッサーと抽出ラインで構成される。分離ユニット、排気ユニット、ボンベ部は狭い坑道内で可搬 可能な小型軽量化したシステムを開発した。

Kr 分離装置により捕集したガス中の O₂ を指標とすることで、大気由来 ⁸¹Kr 汚染の有無を正確に評価したところ、膜分離法より分取したガス中の O₂ は、バックグランドレベルもしくは汚染レベルが低濃度(0.01%未満)であることが明らかになった。Kr 分離抽出システムによる木中空糸膜の接触時間が 100 s/m²以下で最も効率よく抽出できることがわかった。開発した分離シスムでは、淡水及び海水と同等の塩分濃度に相当する地下水でも溶存ガスを効率よく分離できることが明らかになった。次に、開発した分離システムを深部地下水に適用し、in-site(原位置)で He, Ne, Ar, Kr, Xe, ²²²Rn の分離効率を求めたところ、地下水中の Kr の分離効率は 90%程度であることを明らかにした。また、膜分離システムによる希ガスの抽出率は、拡散が支配的であることがわかった。

沿岸部の深部地下水を対象とした⁸¹Kr 分離システムを構築し、実証試験を行った。構築したシ ステムは、次の基準を満たす。

1) 大気由来の⁸¹Kr 汚染を最小限(0.01%以下)にできるシステムである。

2) 地下深部の地下水中の Kr は 90% 程度の高い分離効率を示す。

(2) 大深度ボーリングにおける地下水調査結果

本事業では、既存の大深度ボーリング孔や温泉井などから地下水を採取し、地下水年代測定を 実施する。地下水年代測定結果の妥当性を示すために、地下水流動概念モデルとの整合性を示す ことが重要であるが、地下水流動の概念モデルの構築ができる調査地点は限られる可能性が高い。 ただし、沿岸域では、地下水が海水準変動の影響を受けていると想定すると、大別して、現降水 (0~2万年)、現海水(0~2万年)、氷期の地下水(2万年以上)、化石海水(10万年以上)の4 種類に分類できる可能性がある。このプロセスを、図 3.3-3に示す。氷期に海水準が長期にわた って低下し、その後の間氷期では逆に海水準が上昇する。海岸部の地下水流動は、この海水準変 動に対応して変化するが、流れが緩慢な領域では、氷期降水や化石海水残留する現象が起こる。

図 3.3-3 に示すように、沿岸部の降水系地下水は、現降水と氷期降水の2種類が考えられる。 氷期降水は、約2万年よりも古い地下水であるため、¹⁴C濃度が低く、涵養温度も現在よりも低 くなるため、水素・酸素安定同位体比が軽く、希ガス濃度にも違いが表れるはずである。海水系 地下水の現海水と化石海水とでは、地下水年代が大きく異なるため、¹⁴C、³⁶Cl/Cl、¹²⁹I/¹²⁷I、⁴He など多くの指標で違いが表れるはずである。

このため、図 3.3-4 に示す手順で、4 種類の地下水への識別を試みた。地形、地質、水理、水 文などの地下水流動の概念モデル構築データが不足する地点については、このような区分で流動 性を検討する。

本事業では、沿岸部の 1000 m 級の大深度ボーリングや温泉井など 62 地点から地下水を採取 して、上記の4種類への地下水の識別を実施した。



図 3.3-3 沿岸部での地下水分布の概念図



図 3.3-4 地下水年代測定による流動性評価方法の概念図

1) 主要溶存イオン

主要溶存イオンについて、図 3.3-5 に示すようにヘキサダイアグラムによる図化を行った。図 には海水のイオンバランスも併せて示した。

この結果を淡水(Cl<1,900mg/l)、汽水(1,900~16,000 mg/l)、海水(16,000 mg/l)に分類した結果、淡水に分類されるものは35 試料(56%)、汽水に分類されるものが21 試料(34%)、海水に分類されるものは6 試料(10%)であった。沿岸部から採取しているものの、海水は比較的少なく、淡水や汽水が多い結果となっている。水質のタイプとしては、Na-Cl型が39 試料(63%)、Na-HCO3型が12 試料(19%)、Na-SO4型が4 試料(6%)、Ca-Cl型が5 試料(8%)、Ca-SO4型が2 試料(3%)であった。沿岸部から地下水を採取しているため、Na-Cl型に属するものが多い傾向にある。一般に、水質の進化は、Ca-HCO3型が陽イオン交換でNa-HCO3型となり、流動性が高い順に HCO3→SO4→Cl と支配的な陰イオンが変化していくことから、Ca-HCO3型→Na-HCO3→Na-Cl型で流動性が低下すると考えられる。このため、Na-Cl型が多いということは流動性が低いことを表していると考えられる。

また、微量成分に基づいて深部流体流入の判定を行った。風早ほか(2014)では西南日本について深部流体の調査を行ない、有馬型の深部流体の判定基準として、Li/Clの重量濃度比で0.001以上かつ Cl 濃度が200 mg/L 以上という分類をしている。今回は風早ほか(2014)の基準に従って深部流体の混合について判定をした結果、試料24,25,52,53,55,59 が有馬型の深部流体の判定基準値に適合した。ただし、ほとんどの地点において Li/Cl や B/Cl はいずれも海水より高い値を示すことから、熱水などの水岩石作用を受けた水が水素・酸素同位体比の大きなズレを生じない程度に混合しているか、Li や B を多く含む地質を通過してきた水であると考えられる。



図 3.3-5 ヘキサダイアグラム (赤線は 10 倍)

2) 水素·酸素同位体比

水素・酸素同位体比を図 3.3-6 に示す。図では Cl-濃度でプロットの色を変えている。汽水あ

るいは海水に属するものは天水線からずれて降水と海水(Seawater)の混合線付近にプロットされる。海水から離れたデータは、水岩石相互作用によって、水素・酸素同位体比が変化したものと考えられる。高温環境では、地下水と岩石の同位体交換によって酸素同位体比が重くなる場合があり、低温環境では粘土鉱物中の水との交換で、天水線の上側にシフトすることがある(加藤・ 梶原, 1986;長谷川ほか, 2013)。



図 3.3-6 水素・酸素同位体比の関係

3) トリチウム

トリチウムは、半減期が12.4 年であり、現在の降水は2~5 TU 程度であるため、地下水年代が50年未満もしくは新しい地下水あるいは海水の混合が有意な試料でのみ検出される。 今回の調査では、数地点で検出されており、これらは、塩分濃度が高ければ現海水、低ければ現降水であると判定することができる。

4) ¹⁴C

¹⁴C は半減期が 5730 年であり、¹⁴C 濃度が高いものは、新しい地下水、現降水もしくは現海水 の可能性が高い。¹⁴C 濃度の低いものは古いと考えられるが、海成炭酸塩や有機物の溶解、メタ ン生成 CO₂の溶解の影響を受けている可能性がある。これらについては、原位置の涵養条件や地 化学反応を考慮する必要があるが、今回の調査でこれらの調査をしていないため、判定が困難で ある。また、溶存炭酸量が少ない場合には、大気の混入により¹⁴C 濃度が高くなっている可能性 があり、これらについても注意が必要である。Nakata et al. (2016) によれば、水試料の採水時 には、大気混入によって 1mg 程度の C が加わる可能性があるため、TIC 濃度が低く、¹⁴C 濃度が 高いものは、大気や添加薬品に含まれる C の混入を疑う必要がある。

¹⁴C 濃度と Cl⁻濃度との関係を図 3.3-7 に示す。ここでは、参考のために溶存炭素量(TIC)も 併せて示した。現海水、現降水には ¹⁴C が有意に含まれるが、化石海水には ¹⁴C は含まれず、氷 期降水では 14C 濃度が低いことから、14C と Cl⁻濃度を用いて、地下水の区分が可能であると考 えられる。この分類により、現海水と化石海水は明確に判別が可能である。現降水と氷期降水は 10 pMC を基準に判定した。これは 100 pMC を初期値とすると放射壊変によって 10 pMC 以下 となるのが、約2万年以上になるためである。ただし、前述のように、海成炭酸塩やメタン生成 CO₂が溶解した場合、10 pMC を下回る可能性がある。このため、現降水と氷期降水の判別につ いては信頼性が低い。



図 3.3-7 ¹⁴C 濃度と CI⁻濃度の関係及び地下水の区分結果

5) ³⁶Cl

³⁶Cl/Cl と Cl 濃度の関係を図 3.3-8 に示す。ここでは、横軸に Cl⁻濃度、縦軸に ³⁶Cl/Cl として 整理した。また、前述の ¹⁴C と Cl⁻濃度の関係から推定した地下水区分でプロットを別けて表示 した。

³⁶Cl/Cl は、現海水では 0.7×10⁻¹⁵ である(Fifield et al., 2013)。³⁶Cl は、地層中で長期に滞留 すれば(数十万年以上)、原位置生成も有意となるため、化石海水は現海水に比べて ³⁶Cl/Cl が高 くなる。このため、Cl⁻濃度が高く、³⁶Cl/Cl が海水よりも有意に高いものは、化石海水であると 考えられる。

³⁶Cl/Cl は、降水での初期値は、緯度や海からの距離に依存する。これは、緯度によって宇宙線 のフラックスが異なり、Ar を核破砕して生成する ³⁶Cl の量が変化するためと、海からの距離に よって、海塩による希釈率が異なるためである(Phillips, 1999)。このため、降水系では初期値 が明確でない場合、³⁶Cl 年代の推定が難しいとされている。ここでは、現降水としてプロットし た ³⁶Cl/Cl と Cl⁻濃度に一定の関係があるように見える。図中の線は、宇宙線起源の ³⁶Cl のフラ ックスを 100 atm/m²s、降雨量を 1,800 mm/y を仮定した場合に、海塩による希釈を考慮した混 合線である。現降水中の ³⁶Cl は海塩によって希釈され、おおむね混合線に載ることがわかる。一 方で、氷期降水中の 36Cl は当初のフラックス量よりも増えており、単純に 36Cl のフラックスが 海塩で希釈されていない。このため、化石海水から 36Cl の供給を受けていると考えられる。この ように、現降水は現海水と混合しており、氷期降水は化石海水と混合している傾向が強いことが 明らかになった。これは、概念図で示したように現降水で洗われている滞留時間の短い領域には、 海水準変動の影響で流入した現海水の影響を受けている可能性が高く、氷期の地下水が残留して いるような滞留時間の長い領域では、その下に残留する化石海水と混合していることを示してい る可能性がある。

これらの結果から、¹⁴C と Cl の関係から推定された化石海水と現海水の評価結果は、³⁶Cl/Cl と Cl の関係で確認することができた。



図 3.3-8 ³⁶CI/CI 濃度と CI⁻濃度の関係及び地下水の区分結果

6) そのほかの地下水年代測定結果

4He 濃度と Cl 濃度の関係を図 3.3-9 に示す。図では、地下水の区分を考慮して表示するとと もに、4He の大気平衡濃度(=4.8×10⁻⁸ ccsrp/gw)を併せて示した。この結果、4He 濃度が高く、 蓄積が進んでいるとみなせる地下水については、氷期降水や化石海水が多い傾向にある。化石海 水に分類されたものでも、大気平衡に近いところに位置するものは、採水時に大気にふれた影響 でガスが抜ける、あるいは、大気と交換したと考えられるものが多い。溶存ガスは、大気と接触 すると、大気と交換し大気と平衡になってしまう可能性がある。

¹²⁹I/¹²⁷I と Cl 濃度の関係を図 3.3-10 に示す。¹²⁹I/¹²⁷I は半減期が約 1600 万年であり、初期値 は 150×10⁻¹⁴程度とされている。この条件で、¹²⁹I 年代を計算すると、ほとんどの化石海水の年代 が 5000 万年程度になる。降水系の地下水ではヨウ素濃度が低く、分析が困難であることから、 海水系の地下水を中心に分析を実施している。¹²⁹I/¹²⁷I による地下水年代測定については、起源 や動態について不明確な部分が多いため、今後事例を増やすとともに、他の方法と比較して検討

が必要である。







図 3.3-10 ¹²⁹/¹²⁷ と CI⁻濃度の関係

7) 地下水年代測定結果のまとめ

以上図 3.3・4 の評価手順に基づいて地下水を区分すると、現海水 11 試料(18%)、現降水 17 試料(27%)、氷期降水 18 試料(29%)、化石海水 16 試料(26%)となる。Cl 濃度と¹⁴C、Cl 濃度 と³⁶Cl のように組み合わせて評価することにより、視覚的にも適切に区分されていると考えられ る。現降水と氷期降水との識別は、¹⁴C 濃度に基づいており、8¹³C や溶存イオン量などによる補 正を実施していないため、信頼性が低いが、Cl と³⁶Cl との関係から、現降水は現海水と、氷期降 水は化石海水と混合している傾向があるため、適切に区分できているのではないかと考えられる。 現海水と化石海水の識別は、Cl 濃度と¹⁴C で識別したものが、Cl 濃度と³⁶Cl で確認できており、 一部例外はあるが、整合的に説明できている。ここでは、Cl 濃度が低くても 1,900 mg/l 以上で あれば化石海水としている。このような低い値を閾値としたのは、化石海水と氷期降水の混合を 考慮したことと、化石海水が水・岩石反応で希釈される場合を考慮したためである。

それ以外の年代測定法を適用したが、溶存ガスを用いた方法は、簡易的な採水では評価が難し いことが明らかになった。これは大深度から地下水を揚水することによって、溶存ガスが分離す る、あるいは、地上付近で大気と接触する影響でガス組成が変化するためと考えられる。後述す る原位置採水が実施できた浜里地点では、希ガス温度計と水素酸素同位体比が整合し、氷期降水 の識別をすることが可能であったが、原位置採水ができない場合には希ガス温度計も適用が難し いと考えられる。水素・酸素同位体比については、浅部地下水のデータがない場合には、現降水 と氷期降水の評価が難しいことから、浅部地下水の評価の重要性が明らかになった。また、4He や 36Cl では、原位置での生成速度が重要となることから、原位置の岩石コアのデータ、4He では ウラン・トリウム量、間隙率、密度、36Cl では、これに加えて、岩石中の主要鉱物や微量成分の データが必要となることから、これらのデータの取得が必要である。129I については、近年分析 は可能となっているが、適用例が少ないため、また年代測定として使うのは難しいと考えられる。 今回の調査でも、初期値として 150×10⁻¹⁴を採用した場合には、化石海水の 129I 年代はほぼ 5000 万年程度となる。

以上の結果から今回の評価フローを評価すると図 3.3-11 のようになる。

80



図 3.3-11 地下水年代測定による流動性評価方法の適用結果

(3) 概念モデル及びシステマティック区分

1) 我が国の地下水流動概念モデル

前節までの議論では、地下水を年代別に、現降水、現海水、氷期降水、化石海水の四つに分類 した。沿岸部の深層地下水をこのように分類分けすることにより、地下水流動の概念モデルの構 築につながっていく。その一例が、図 3.3-12 である。本事業では、太平洋炭鉱、六ケ所、横須賀 西岸、長崎の池島炭鉱、新潟平野、千葉県君津市、勇払平野、イギリスのセラフィールド、スウ ェーデンのエスポ、フィンランドのオルキルオト等について検討した。これらについてまとめる と我が国の流域スケールの地下水流動は、以下のような特徴がある。流動性の地下水が深層に到 達しやすい条件としては、

- ・背後に巨大な山体を有すること
- ・涵養域にて一旦涵養した地下水が、直ちに流出しないこと。涵養域に小河川がほとんど存在しないような条件がこれに含まれる
- ・難透水層に挟まれた透水性の地層が地表付近から深層まで連続していること
- また、流動性地下水が深層に到達しにくい条件としては、
- ・涵養域から流出域までフラットな地形を有していること
- ・ 涵養域に小河川が多数存在し、一旦涵養した地下水が直ちに地表に流出する構造になっている こと。
- ・浅層に難透水性の地層が存在し、それが広範囲に分布すること
- 前者は、君津市、駿河湾、勇払平野が該当し、後者は幌延、六ケ所、新潟平野などが該当する。
- 一方、氷期降水の到達深度は、単純に海水準の低下量(約120m程度)と比較できないようであ

る。例えば幌延のような地域では現降水と氷期降水の漸移帯が深度 20~70m であるが、氷期降水の到達深度は(深度 140~190m よりも)遥かに深い領域にまで及んでいる。この理由は定かではないが、これも氷期の広域地下水流動に寄与する地下水涵養量の違いが影響した可能性がある。



2) システマティック区分

本事業では、沿岸部の深部地下水の性状に関連すると考えられる水文地質学的な項目を挙げ、 それらの項目に応じて深部地下水試料を区分して検討する作業を行った。これをシステマティッ ク区分と呼称し、平成 28 年度から平成 30 年度にかけて検討を進めた。具体的には、国内の 90 地点を対象に、水質組成(淡水、汽水、塩水)や地下水年代(現降水、現海水、氷期降水、化石 海水)と、その地下水の賦存状況に関わると考えられる地形・地質の要素(地形勾配、表層地質、 地下地質など)との間の関係性について検討した。

図 3.3-13 は本事業で収集した地下水の水質組成区分と地下水年代区分を示したものである。 海水と同程度の塩化物イオン濃度を持つ塩水はおよそ1割程度であり、ほとんどの地下水に淡水 との混合が認められる。また地下水年代についてみると、氷期降水や化石海水などの古い地下水 が全体の6割程度であることが分かる。



図 3.3-13 本事業で収集した地下水の水質組成及び地下水年代の割合(円グラフの単位は%) (産業技術総合研究所ほか, 2019)

また、上記の地下水年代と地形・地質学的要素の間で多変量解析を行ったところ、本事業で得 られた地下水の年代形成に関わる要素として、最も関与が大きい要素として海底地形勾配、次に 井戸直下の地下地質と推定された。海底地形勾配と地下水年代の関係については、緩傾斜の場合 に地下水年代が古く、急傾斜の場合に地下水年代が新しいという結果が得られた。また地下地質 の種類別に地下水年代との関係性を見ると、新第三紀堆積岩類では年代が古い、第四紀堆積岩類 及び火山岩類では年代が新しい方にそれぞれ関与が大きいと評価された。つまり本事業で収集し た地下水から見える傾向として、海底地形勾配がより緩傾斜の地点では地下水年代が古く、また 地下地質が新第三紀堆積岩類の地点において地下水年代が古い、という傾向を示しているといえ る。

3.3.3 地下水環境関係の調査法

(1) 大深度ボーリングからの採水

1) 経緯

沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発(産総研,平成19~24年度)では、DD-1 孔の深度 214 m、306 m、476 m、613 m、715 m、943 m、1143 mの7 深度にてパーフォレーションによ る穿孔を行い、深度1143 m 以外でダブルパッカーを用いた揚水を実施した。一方、本事業でも上 記の深度で地下水の採取を実施した。ここでは本事業で DD-1 孔から得られた水質データとの比 較を行い、その差異について考察する。また、本事業では未実施だった深度1143 mからの地下水 採取をおこなった。この深度は地下水流動解析という視点に立てば、不透水境界の下位に位置す る領域であり、異常間隙水圧を示すことが分かっている(図 3.3-14)。以下ではこの地下水の水 質の特徴についても述べる。



図 3.3-14 DD-1 孔の間隙水圧の測定結果

2) 過去のデータとの比較

水質変化をシュティッフダイヤグラムとパイパートリリニアダイヤグラムで表示したものが図 3.3-15、図 3.3-16 である平成 24 年度のデータでは深度 214 m と 715 m については概略試験結 果を、深度 306 m、476 m、613 m、943 m では詳細試験結果を記してある。すなわち、各深度 にて最も信頼できる測定データを記してある。詳しくは産総研(2013)を参照されたい。

平成 24 年度時点の調査結果と比較して、深度 214 m、306 m、476 m、715 m にて揚水された 地下水は大きく電気伝導度が上昇している。深度 476m は NaCl 型を維持したまま大きく濃度が 上昇しているが、深度 214m と深度 306m は Na (HCO₃)型から NaCl 型に変化している。人為 的な影響がない状態で自然に水質タイプが変化することは一般には考えにくいため、この結果は 平成 24 年度から今年度までの間にパーフォレーションによる穿孔部から帯水層内に孔内水が混 入したためと考えざるを得ない。パイパートリリニアダイヤグラム(図 3.3-16)では平成 24 年 度採取の深度 214 m と深度 306 m の地下水が、本事業では深度 715m や 943m 側の水質に近づ いているようにも見え、両者の混合の影響であることを支持している。本事業では、深度 214 m では孔内装置のデッドボリューム(ダブルパッカー間の採水区間の容積 0.01 m³ + 配管内容積) の 37 倍にあたる 32 m³、深度 306 m では 35 m³を事前に揚水しているが、このような大量の揚 水をおこなっても、孔内水の影響を完全に除去できなかったことになる。最も電気伝導度の上昇 が大きかった深度 476 m は揚水流量が 0.1 L/min と低く、孔内装置のデッドボリュームが 0.82 m³に対して総揚水量は 0.54 m³であり、深度 214 m と 306 m と比較してトータルの揚水量が著 しく小さい。そのため孔内水の影響が顕著に残ってしまったと推定される。

パーフォレーションによる穿孔を用いた地下水試料の採取は、シングルスクリーンを有する井 戸を複数設けるよりも経済的だが、5年程度で水質に大きな変化を生じさせる可能性がある。地 層処分のような長期間の調査・観測を必要とする場合はシングルスクリーンの井戸を設けること が望ましい。

3) 深度 1143 m の地下水

深度 1143 m はいわゆる異常間隙水圧領域である (図 3.3-14)。この深度のボーリングコアの 浸透率は 10⁻¹⁶ m² であるが、このような領域では、ダルシー則では動水勾配とフラックスの間に 比例関係が成立しにくくなることが知られている (Liu and Birkholzer, 2012)。これが異常間隙 水圧を示すメカニズムになっていると推定される。

深度 1143 m の穿孔区間からの採水は、揚水による水位回復が緩慢であるため(産総研, 2013)、 原位置での封圧採水及び加圧採水を実施した(注:間隙水圧が高いからといって地下水が高速で 噴き出るようなことはない。地層の透水性が低いためである。)。水質は図 3.3-15、図 3.3-16 に 示す通りであり NaCl型を示す。この深度の地下水からは、上位(深度 943 m 以浅)では感じら れなかったガソリン臭が認められており、ベンゼン、トルエン、チオフェンなどの成分が認めら れた。本地域を含む天北地域は石油・ガスを産する有望地域として知られているが、本地域にて 有機物の熟成(堆積性有機物が地層の埋没・沈降に伴って、主に温度と時間の影響で石油に変化 する過程。地学団体研究会, 1996)が期待されるのは、新第三系から白亜系とされている(小椋・ 掃部, 1992)。深度 1143 m は勇知層(前期更新統~後期鮮新統)や当該深度の地温が約 42 ℃と 低いことを考えると、これらの炭化水素は下位の地層から移動し、この深度領域に蓄積した可能 性がある。しかし、この炭化水素の挙動については現状では良くわからない。本事業で得られた 結果は、いわゆる不透水境界とみなされる領域の理解に対して極めて重要な知見を示していると 思われるが、実態解明にはさらなる考察、調査が必要である。

4) 地下水年代測定結果

本地点では、水質の他に、水素・酸素同体、塩素同位体、希ガスなどの調査が実施されている。 本地点での水質は Cl 濃度の分布に代表されるように、深度 470m 以浅(沖積層から更別層)で は Cl 濃度が低い淡水域、それ以深では深度 800 mまで Cl 濃度が増加する混合域、深度 800 m 以深では Cl 濃度がほぼ一定の海水域である。水素・酸素同位体比の結果(図 3.3·17)でもほぼ 同様の傾向がみられるが、深度 800 m 以深では酸素同位体比が重くなり、内陸部の化石海水に近 づく傾向がみられる。また、更別層の深度 90~300 m は現降水に比べて水素・酸素同位体比が低 い傾向にある(Ikawa et al.,2013)。深度 90-100m と深度 210 m の涵養温度を希ガス濃度で求め た結果、涵養温度が 0.7℃程度になることから、氷期に涵養した降水と推定される。ただし、深度 306 m では、涵養温度は 8.1 ℃程度、¹⁴C も優位に検出される(約 15 pMC)ことから、温暖期 に涵養したと推定され、地下水年代が逆転している。



図 3.3-15 DD-1 孔の地質及び穿孔及びダブルパッカーによって得られた地下水水質のシュティ ッフダイヤグラム



図 3.3-17 水素・酸素同位体比の関係

Cl 濃度と ³⁶Cl/Cl は、図 3.3-18 に示すように、淡水域(深度 470 m 以浅)では大きいが、混合 域以深(深度 470 m 以深)では低い。淡水域で大きいのは、降水起源の ³⁶Cl の影響と考えられ る。海水域で低いのは、海水(³⁶Cl/Cl=0.7×10⁻¹⁵)を起源としているためと考えられる。ただし、 海水の ³⁶Cl/Cl よりは有意に高く、深度方向に増加傾向がある。これは原位置で生成した ³⁶Cl が 蓄積しているためと考えられる。勇知層は地質年代が若く(2.3~1.5 Ma: 岡・五十嵐, 1997; 安 江ほか, 2006)、間隙率に深度依存性があることから、圧密過程にあり、³⁶Cl/Cl は原位置平衡には 達していないが、³⁶Cl が原位置生成の影響を受けるほど古い(数十万年以上)と考えられる。



図 3.3-18 CI 濃度と³⁶CI/CI の深度方向分布

⁴He と ³He/⁴He は、図 3.3⁻19 に示すように、 ⁴He は深度ともに増加し、 ³He/⁴He は低下して いる。これは、 ⁴He は原位置の U⁻Th の壊変によって生成したものが蓄積し、 ³He/⁴He も ⁴He の 蓄積の影響で小さくなっていると考えられる。ただし、本地点は地下水がメタンガスを多く含み、 揚水での減圧やコアの大気圧への開放で、脱ガスしたためこれを保存性の Ne 量で溶解度補正を している。

原位置での He の生成速度は、岩石中の U・Th 濃度や間隙率に依存するが、おおむね 1×10⁻¹² 程度であり、原位置生成だけで ⁴He が蓄積していると仮定すると 100 万年程度の蓄積に相当す る。ただし、外部からのフラックスによる蓄積の影響や、前述のように現在圧密過程で、間隙率 も変化しているため、定量的な年代は推定できない。

これらの結果から、浅部の更別層内の地下水では一部例外はあるものの、氷期に涵養した降水、 深部の勇知層内の海水は堆積時に取り込まれた化石海水と推定される。



(2) 原位置での地化学調査

1) 目的

地下水水質や pH 等の物理化学パラメータは地下水化学場を把握するために必要な基本情報で ある。水質に関わるデータを採取・測定するにあたって、地上と地下での違いや掘削泥水の影響 評価など、これまでに様々な検討がなされている(古江ほか,2005;岩月ほか,2009;穂刈,2010; 富岡ほか,2013)。本研究では、幌延町浜里の DD-1 孔を主な対象とするにあたり、同地域に特徴 的な溶存ガスの影響を評価するための地下水試料の採取・測定に関する検討を実施した。

2) 地上測定と原位置測定の違い

地上測定では、pH や Eh の値が原位置に比べて高くなる場合のあることが知られている。この ため、地上及び原位置に測定プローブを設置してモニタリングを行った。pH の地上と地下での 差異は溶存ガス中の CO₂の脱ガスに起因すると言われている。そこで、図 3.3-20 に溶存ガスの 少ない 214 m 区間と溶存ガスの多い 715 m 区間の地上並びに原位置のモニタリング結果を示す。



図 3.3-20 地上と原位置のモニタリング結果の一例

溶存ガスの少ない 214 m 区間では、pH は地上と原位置でほぼ一致する結果が得られた。一方 で溶存ガスの多い 715 m 区間では乖離していた。Eh はいずれの区間も地上の値が原位置の値よ りも高い値を示した。EC は各区間とも地上と地下で変わらない値を示した。

3) 原位置でサンプルを得る方法の開発

溶存ガスは地上で水上置換によって得る方法がよく知られている。ただし、大深度孔において、 比較的浅い深度でのポンプ揚水では、ポンプ揚水中の孔内水位の低下により、原位置の圧力が低 下して、脱ガスを誘発する恐れがある。すなわち、地上で回収するガスの成分は地下と同じであ っても、ガス水比については異なる可能性が高い。そこで、地上での採取に加え、原位置での採 取を行った。原位置での採取に当たっては、可能な限りガス水比を正確に取れるような工夫を行 った。

① 原位置採水装置の検討

今回使用した原位置採水装置の概要を図 3.3-21 に示す。ステンレス製の筒の内部にピストンが 内蔵されており、地上からの操作により原位置でピストンを動かすことにより地下水を得る。孔 内の水圧が、採水区間の水頭と同じであれば、溶存ガスは脱ガスすることなく、地下水とともに 採取される。



② 水上置換法によるガス採取

水上置換法では、5L程度のプラスチック製ビーカーに水道水もしくは地下水を満たして、その 中で実施した。ガス採取ではガラス製バイアル瓶を、ガス水比測定ではメスシリンダーを用いて 水上置換を行い採取・測定を行った。

図 3.3-21 開発した原位置採水装置の概要

③ 結果の比較

地上並びに原位置でのガス水比の採取結果を表 3.3-1 に示す。原位置で取ったものに比べ、 地上ではガス水比が低い。後述する pH や ORP のモデリング計算に使用するガス水比は原位置 採取したものを使う必要がある。

区間	ガス水比 地上測定	揚水方式	ガス水比 原位置採水装置				
214m	0.040	ポンプ揚水	取得できず				
306m	0.006	ポンプ揚水	取得できず				
613m	0.288	ポンプ揚水	0.6	ガスバッグ方式	0.9	メスシリンダー方式	
715m	0.033	ポンプ揚水	1.3	ガスバッグ方式	-	-	
943m	0.015	ポンプ揚水	1.7	ガスバッグ方式	1.6	ガスバッグ方式	

表 3.3-1 水ガス比の比較

4) 原位置計測値を補完するための計算による pH、ORP の確認

地上で得られた値を基に、pH、ORPの原位置の値を推定する手法が提案されている(岩月ほか,2009;穂刈,2010)。必ずしも原位置の値が正確に得られない状況もあると考えられ、計算的な方法による値の推定や検証は有用であると考えられる。一方で、その適用例は限られており、さまざまなサイトでのその確からしさの確認が必要である。そこで、本研究では、これまでに本手法の適用がなされていない浜里での適用性の検討を行った。pHの算出にはPHREEQC

(Parkhurst and Appelo, 1999)を用いた。Ehは PHREEQC で計算したのちの各イオンの活量と pH を用いて、想定される半電池反応式と平衡電位から算出した。結果を表 3.3-2 に示す。

表 3.3-2 浜里 DD-1 孔、DD-4 孔で得られた pH、Eh の実測値と計算値の一覧

	2016、2017年度			2018年度			
	DD-1孔					DD-4孔	
测宁。↓ 計質。↓	476m	613m	715m	943m	943m	1143m	350m
则化hu、 引 者hu				(2017)	(2018)		
地上での測定値	7.69	7.55	7.85	7.08	7.70	8.46	7.94
原位置測定値	7.27	7.21	7.45	6.86	9.43	6.65	7.85
溶存ガスを考慮した計算値	7.56	7.47	7.46	6.75	7.11	7.58	-
原位置と計算値の差	0.3	0.3	0.0	0.1	2.3	0.9	-

	2016、2017年度			2018年度			
	DD-1孔					DD-4孔	
「「「」」」では、「」」(「」」)	476m	613m	715m	943m	943m	1143m	350m
EII(別疋旭C計昇旭、IIIV)				(2017)	(2018)		
地上での測定値	15	-17	-115	-94	27	184	100
原位置測定値	-48	-250	-341	-248	-271	-293	-217
$CO_2(g)/CH_4(g)$	-297	-291	-291	-245	-279	-317	-
SO_4/FeS_2	-	-228	-	-199	-222	-271	-231
Magnetite(am)/Siderite	-72	-74	-75	1	-56	-150	-152

pH はその一致の程度はさまざまであるが、原位置の値に近づいた。また、Eh は想定する酸化 還元対によっていくらか値が異なるが、関ほか (2004)、岩月ほか (2009)、Sasamoto ほか (2011) など、深地層において SO₄/pyrite や CO₂/CH₄の酸化還元対が支配的であるという報告があるが、 本研究においても、SO₄/pyrite や CO₂/CH₄の酸化還元対に基づいて算出した Eh が、原位置で測 定した値とほぼ同じ値を得られる結果であった。

5) まとめ

浜里の DD-1 孔の採水作業において地上と原位置でのモニタリングを行い、改めて原位置での 測定の必要性を指摘した。

本孔は地下水に溶存ガスが含まれることが特徴的であるが、その評価に当たっては、原位置でガス水比を取得する必要がある。本研究においてその方法を整備することができた。

また、地上で得られた値から原位置の pH、Eh を推定したところ、原位置の実測値と整合的な 値が得られた。

今後も、本研究のような検討を引き続き行い、他地域での適用性の確認や、精度向上に関わる 取り組みをすることが望まれる。

(3) プッシュプル試験

1) 背景

概要調査段階の安全評価では、超長期間の核種移行を評価するために超長期地下水流動解析が 実施される。これには、地下水年代分布が重要な役割を果たす。すなわち、得られた地下水の年 代からおよその地下水流動を逆算的に推定し、その結果を超長期地下水流動解析に活用するとい うことである。しかしながら、一般に沿岸部の深部地下水の年代に関する調査事例は少ない。そ こで、本事業ではこれまで、沿岸部の原位置地下水を採取し、地化学、放射性同位体比、安定同 位体比などを分析することにより、地下水年代決定までの手順を体系化してきた。しかし、より 信頼性のある結果を導くという意味では、同位体などによって得られた地下水年代及びそれより 推定される地下水流動を別の手法でも検証することが必要である。また、概要調査段階において は、地下情報を得るために大深度の掘削が行われるが、掘削は一般に高額であるため、1本のボ ーリング孔からできる限り多くの水文地質情報を求めることが望ましい。すなわち、1本のボー リング孔より原位置の地下水を採取すると同時に、地下水流動を調査することが期待される。

プッシュプル試験は、既知量のトレーサーを含む溶液を試験孔から帯水層に注水し、同じ試験 孔から地下水を揚水しながらトレーサーの濃度を計測するとともに、破過曲線を作成して、地下 水中の溶質の挙動や帯水層の物性を評価する試験であり、上述の目的を達成することができる調 査手法である(図 3.3・22)。また、プッシュプル試験から評価される地下水中の溶質の挙動や帯 水層の物性には、分散長、溶存成分の遅延特性などが挙げられ、その応用により分解生成反応、 有効間隙率、移流速度などの評価が可能となる(産業技術総合研究所,2013)。深部地下水の年代 は地下水の移流速度(自然流速)を反映しており、これを原位置試験であるプッシュプル試験の 結果と比較することにより、同位体によって得られた地下水年代分布及び推定される地下水流動 に関して議論をおこなうことができる。

沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発(産業技術総合研究所, 2013)では、北海道天塩郡 幌延町浜里試験地の DD-2 孔(100 m)を対象としたプッシュプル試験を実施しており、得られ る破過曲線が高い精度で再現性をもつことが確認されている。このような経緯から、沿岸部処分 システム高度化開発(産業技術総合研究所, 2018)においては、プッシュプル試験法の更なる高 度化を目指し、同様の観測井である DD-2 孔を用いた試験を実施することにより、沿岸部での地 下水の移流速度に関する検討をおこなった。さらに、それらの結果と同位体分析の結果に基づき 推定された地下水年代分布及び推定される地下水流動に関して比較・検討を行った。



図 3.3-22 プッシュプル試験のイメージ

ー般にプッシュプル試験では以下のような作業を行う。① 試験区間にトレーサー溶液を注入する(橙色で示されたパッカーの下が試験区間)。トレーサー溶液は井戸を中心として帯水層内を放射状に広がる。② 続いてチェイサーと呼ばれる溶液を注水する。チェイサーはしばしばトレーサーを含まない溶液が用いられ、トレーサー溶液を帯水層の奥に押し込む役割がある。ここまでが、注水すなわち"プッシュ"である。③ トレーサー濃度をモニタリングしながら揚水する。注水後直ちに揚水した場合、まずはチェイサーが揚水されるが、チェイサーが揚水しつくされると、④ のようにトレーサー溶液が揚水される。この揚水が"プル"に当たる。

2) 概要と実施項目

DD-2 孔は深度 100 m、スクリーン深度は深度 90.7~99.7 m、本帯水層の透水係数は 1.8~ 3.3×10⁵ m/s(Cooper-Jacob 法)であり(Cooper-Jacob, 1946)、2017 年の調査では 1.3×10⁵ m/s となった(産業技術総合研究所, 2018)。したがって 10⁵ m/s オーダーといえる。比貯留係数は 2017 年の調査より 7.2×10³ m⁻¹が得られた(産業技術総合研究所, 2018)。DD-2 孔から得られる 地下水は軽い 6D、6¹⁸O を示していることから、氷期降水に分類されており、地下水年代は 1.2~ 4.2 万年と推定されている(産業技術総合研究所, 2016)。平成 28 年度における報告書(産業技術 総合研究所, 2017)でも述べたが、DD-2 孔の地下水の涵養域はサロベツ背斜よりも海側であるこ とが比抵抗探査によって明らかにされている。広域スケールでみれば、地下水は涵養域を下沼周 辺とし、ピストン流的に海に向かって流動していると考えることができる。そのため涵養域周辺 の深度 80 m にて氷期降水のシグナルが得られたことは、涵養域においても氷期降水が(ピスト ン流的に押し出されずに)残留していること、つまり、ほとんど流動していないことを示唆する。 同位体によって得られる地下水年代分布から考えると、DD-2 孔の地下水は人間の時間感覚では ほとんど動いていないと考えられる。

仮に地下水がある程度の自然流速を有している場合、トレーサー溶液(及びチェイサー)の注 入後から揚水までの間に、一定の待機期間を設けると、トレーサー溶液は移動し破過曲線の重心 は変化すると予想される。この原理を用いて 2017 年の調査(産業技術総合研究所, 2018)ではト レーサー溶液及びチェイサーの注入後に異なる待機期間を設けた以下の試験を実施した。これに より、地下水流動という観点から、DD-2 孔における同位体より得られた地下水年代の検証を行 った。

【1】長期プッシュプル試験

約5年前に注入したトレーサー溶液及びチェイサーの回収を目的とした試験。平成24年 10月26日に 8D=0‰のトレーサー溶液 900L と 8D= -60‰のチェイサー120L を注入した (産業技術総合研究所,2013)。2017年の調査では、その回収を目的とし、揚水及び地下水 試料の採取、同位体分析をおこなった。

【2】 プッシュプル試験 (PP-1)

注入後、直ちに揚水を実施することでトレーサー及びチェイサーを回収する試験。平成24 年度に実施したプッシュプル試験と同じ仕様で実施した。平成24年度試験結果の再現性の 確認の意味がある。注水量はトレーサー溶液900L、チェイサー120L、注揚水流量は5L/min、 揚水時間は34時間とした。

【3】 プッシュプル試験 (PP-2)

注入後、約1ヶ月後に揚水を実施することでトレーサー溶液及びチェイサーを回収する試験である。トレーサー溶液とチェイサーの注入量、注揚水流量、揚水時間、地下水試料の採取間隔は PP-1 と同じである。

3) 結果と考察

まず、DD-2孔における帯水層内でのトレーサー溶液の挙動に関して、MODFLOW及び MT3DMS (GMS10.3.5, Aquaveo社) 等を用いて種々の予察的検討をおこなった。帯水層内をト レーサー溶液が均一に広がると仮定すると、トレーサー溶液は井戸の中心から約32 cm進むこと になる。これを初期値として、フィックの式を解いた結果(移流がなく分子拡散のみが物質輸送 に関わる条件で生じる濃度分布を推定した場合)、移流が極めて小さいならば、5年後においても DD-2孔の直下にてトレーサー溶液が検出されると予想された。一方で、移流が存在する場合は、 注水したトレーサー溶液とチェイサーが下流側に移動すると予想される。リング状に広がるトレ ーサーの中心が井戸から1m下流に流されたケース、すなわち、1m上流側で揚水をおこなったケ ースを想定したシミュレーションを行った結果、注水時のトレーサー濃度の10%が検出される結 果となった。一方で、同様の計算をトレーサーの中心から揚水井までの距離を変えておこなった ところ、1.5mほど離れると検出が難しくなることが示された。これらの結果をまとめると、仮に 地下水の自然流速(ダルシー流速)が1.0 m³/m²/y以上の場合は、トレーサーの検出が困難になる といえる。上述のように、この地域の地下水の涵養域が下沼周辺であり、ピストン流的に海に向 かって地下水が流動しているとすれば、下沼周辺から海岸までの距離はおよそ7,000 m程度であ り、ダルシー流速が約0.1 m/yであれば、下沼周辺からおよそ7000年で地下水は海岸へ到達する ことになる。これは、DD-2孔において地下水の年代が1.2~4.2万年と推定された結果(産業技術 総合研究所,2016)と矛盾する。

【1】長期プッシュプル試験の結果、平成24年度に注水したトレーサー(産業技術総合研究所, 2013)を本試験において検出することはできなかった。一方で、【2】プッシュプル試験(PP-1) の結果、トレーサー溶液とチェイサーをDD-2 孔に注入し、直後に揚水した 8D で算出された回 収率は89%であり、注水したトレーサーは適切に回収された。また、平成24年度に得られたプ ッシュプル試験の結果(破過曲線)とも非常に近い結果となった(産業技術総合研究所, 2013)。 このことは、2017年に実施した試験が適切に行われており、帯水層構造や井戸構造が変化してい ないことを示唆している。また、以上の再現性の高さは、先に述べた長期プッシュプル試験の結 果が信頼できることも意味する。

さらに、【2】 プッシュプル試験(PP-1)の結果と【3】 プッシュプル試験(PP-2)の結果を比較した場合、PP-1と比して PP-2 試験の方においてピークが早く出現し、ピーク濃度は低くなった。また、揚水量/注水量が1を超えたあたり(揚水量が1,000 L あたり)以降、PP-2 試験の濃度低下傾向は PP-1 試験に比べてなだらかとなった。破過曲線のテール部の低下傾向に差異がみられることは、PP-2 において注水から揚水までの1カ月間に、トレーサーの移動が生じたことを意味する。特にピークの出現時間に相違が見られることは、PP-2 試験の結果が、PP-1 試験と比して移流及び移流により生じる機械的分散の影響を受けた可能性を示唆している

以上のことから、DD-2 孔における地下水は、5 年間で注水時のトレーサーが検出できなくなる 程度に動いており、1 ヶ月間においてもプッシュプル試験で観測できる程度に地下水が動いてい ると解釈できる(上述の簡易的な計算より、約 1.0 m/y 以上の実流速と推測される)。これらの結 果は、DD-2 孔において地下水の年代が 1.2~4.2 万年と推定された結果(産業技術総合研究所, 2016)と矛盾する。つまり、年代トレーサーにより得られた地下水年代及びそれより推定される 地下水流動とプッシュプル試験の結果は一致しなかったということである。今回の調査では、そ の原因を確認することはできなかったたため、今後はその原因を解明していく必要がある。また、 プッシュプル試験を原位置で実施することにより、地下水中の溶質の挙動や帯水層の物性を求め ることができることを考えれば、これまで体系化してきた地下水年代決定までの手順とプッシュ プル試験により得られる地下水流動の解釈を併せて、概要調査の一つの手段として体系化してい くことも考えられるだろう。さらには、地層処分が 300 m 以深で実施されることを考慮すれば、 300 m 以深におけるプッシュプル試験の再現性も今後確認する必要がある。

(4) 海域調査の検討

1) 海底地下水湧出と沿岸部調査における位置づけ

沿岸においては海底から地下水が湧出する「海底地下水湧出」と呼ばれる現象が確認されてお り、国内においても 1990 年代から様々な報告がなされている(例えば Taniguchi and Fukuo, 1993;丸井,1997;徳永ほか,2001;張・佐竹,2002)。湧出する地下水は、陸域から流出する地 下水や再循環海水などが想定されるが、それらの水の起源を評価するためには、塩分や温度など の原位置測定に加えて湧出水の水質や同位体などの分析が有効である。また、海底からの地下水 の湧出に着目した定量的な評価も行うために、様々な手法が考案されている(谷口・岩川,2001; 萩原ほか,2003)。

沿岸部を想定した地層処分では、陸域から海域への地下水流動は放射性核種の移行経路となる 可能性があり、安全評価上で重要な要素になると考えられる(図 3.3-23)。その観点から、上記 の海底地下水湧出は物質の輸送経路となる可能性があり、無視できない現象といえる。そのため、 沿岸部環境下においては海底地下水湧出が存在する可能性を考慮に入れ、沿岸部の地下水流動調 査の一環として探査を行う必要があり、体系的な調査に位置づけられるべきである。

海底地下水湧出の存在については、沿岸で行われる地質構造調査や水理調査から得られた情報 に基づいて推測することができる。例えば陸域から連続する帯水層の分布や海域の断層の分布な どは、海底における地下水の湧出点となる可能性があることから、陸域の地質構造調査の結果か ら海底地下水湧出が存在する可能性がある領域を一定程度絞り込むことができると考えられる。 また、沿岸を対象とした水収支を計算することで、地下水が海域へ流出する可能性があるかなど を見積もることも可能である。その他にも、海域における面的な海底地形調査によって得られる 谷や崖などは、地下水が湧出しうる地形として役立つ情報の一つである。



図 3.3-23 沿岸陸域・海域調査における海底地下水湧出探査の位置づけ (平成 27 年度成果報告書)

2) AUV による海底湧出地下水の探査

海底地下水湧出を探査する上で、海底を寸刻みに採水して水質分析を行うことは現実的には難 しいため、探査はある程度の合理性をもって実施しなければならない。効率的な調査の実施が期 待できる手法の一つとして、AUV(自律型の無人潜水機)の適用が考えられる。その概要について平成 27 年度の成果報告書(産業技術総合研究所ほか, 2016)にとりまとめた。

AUV は ROV (遠隔操作式の探査機)と異なって操作用のケーブルがなく、あらかじめ設定した航行スケジュールに従って自律的に海底面を走査航行できる(図 3.3-24)。また設定に応じて一定間隔や一定水深、あるいは海底からの一定高度で探査できるため、湧出する地下水を検知できる探査機器を搭載すれば、効率的かつ均質な精度での面的な調査実施が期待される。このような精度を保ちつつ面的な探査が実施できれば、ダイバーや ROV による詳細な調査や採水を効率的に行うことができると考えられる。なお ROV を用いた採水手法については駿河湾において検討が進められており、海底面において淡水が7割程度混合した湧出水の採水に成功している(産業技術総合研究所ほか,2019)。AUV に搭載できる探査機器として、サイドスキャンソナーや CTD 計、溶存酸素計や pH 計などが挙げられ、それぞれ地下水の湧出に伴うシグナル(気泡の検出、塩分や酸素濃度の変化など)を面的に検知する上で有効な手法と考えられる。

また、海底地下水湧出の探査を視野に入れた AUV の適用で想定される課題についても、平成 27 年度報告書でとりまとめた。課題の1つとして、AUV の航行速度と搭載センサーの応答速度 の兼ね合いから、湧出に伴うシグナル(塩分の低下など)を検知できない可能性も考えられる。 また海中での AUV の位置同定の精度や、45 度以上の急崖部を対象とした探査実施の困難さなど も課題として挙げられる。このような想定される諸課題は、実際の現場における AUV の運用を 通じて検討していく必要があり、AUV の海底湧出地下水探査への適用が求められる。



図 3.3-24 AUV による海底地下水湧出の設定航路の例(産業技術総合研究所ほか, 2016)

参考文献

Cooper, H.H. and Jacob, C.E., A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, American Geophysical Union Transaction, 27, pp. 526-534, 1946.

張 勁, 佐竹洋, 富山湾における海底湧水, 海洋と生物, Vol.141, 2002, pp.294-301.

- 萩原崇史,張勁,小山裕樹,中村哲也,フラックスチャンバーによる海底湧水流量測定の試み, 2003 年度日本海洋学会秋季大会シンポジウム C「沿岸海底地下水湧水系と海洋環境への影響 評価」講演要旨集,2003,13.
- Fifield, L.K., Tims, S.G., Stone, J.O., Argento D.C. and De Cesare, M., Ultra-sensitive measurements of ³⁶Cl and ²³⁶U at the Australian National University, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 294, pp.126-131, 2013.

古江良治, 岩月輝希, 濱 克宏, 深層ボーリング孔を用いた地下水の地球化学調査の課題に対す

る試み,応用地質,46,pp.232-236,2005.

穂苅利之, 化学平衡論解析を用いた原位置地下水水質の推定, 清水建設研究報告, 87, pp.77-86, 2010.

- Ikawa R., Machida I., Koshigai M., Nishizaki S. and Marui, A.(2014): Coastal aquifer system in late Pleistocene to Holocene deposits at Horonobe in Hokkaido, Japan, Hydrogeology Journal, 22, 987–1002,2013
- 岩月輝希, 森川佳太, 細谷真一, 吉川英樹, 深部地下水の物理化学パラメータ (pH, 酸化還元電位) の測定とその留意点, 地下水学会誌, 51, pp. 205-214, 2009.
- 丸井敦尚,海底湧出地下水-新たな資源としての可能性-,日本水文科学会誌 第27巻,第2号, 85-94,1997
- 岡 孝雄・五十嵐八枝子、北海道・天塩平野北 部の上部新生界-特に勇知層・更別層の堆積層と 花 粉化石層序について-.川村信人・岡 孝雄・近藤 務編"加藤 誠教授退官記念論文集", 341-365, 1997.
- Parkhurst, D.L and Appelo, C.A.J., User's guide to PHREEQC (VERSION 2) A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, USGS, Water-Resources Investigations Report 99-4259, 1999.
- Sasamoto, H, Arthur, R. C. and Hama, K., Interpretation of undisturbed hydrochemical conditions in Neogene sediments of the Horonobe area, Hokkaido, Japan. *Applied Geochemistry*, 26, pp. 1464-1477, 2011.
- 産業技術総合研究所,沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発成果報告書,402p,2013.
- 産業技術総合研究所,海域地質環境調査確証技術開発成果報告書,3 箇年とりまとめ(総括報告書),153p,2016.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 27 年度沿岸部処分システム高度化開発報告書,139p,2016.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進,資金管理センター,電力 中央研究所,平成28年度沿岸部処分システム高度化開発報告書,368p,2017
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進,資金管理センター,電力 中央研究所,平成29年度沿岸部処分システム高度化開発報告書,393p,2018
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 30 年度沿岸部処分システム高度化開発報告書, 2019.
- 関 陽児, 中嶋輝允, 上岡 晃, 金井 豊, 間中光雄, 月村勝宏, 関東地方東部における大深度温泉の特徴-水質と地質の関係-, 54, pp. 1-24, 2004.
- Taniguchi, M. and Fukuo, Y., Continuous measurements of ground-water seeping using an automatic seeping meter, Groundwater 31, pp. 675-679, 1993.
- 谷口真人, 岩川浩照, 連続熱供給型湧出量計を用いた大阪湾における海底地下水湧出量の測定, 地下水学会誌, Vol.48, 2001, pp.271-277.
- Togo, Y. S., Takahashi, Y., Amano, Y., Matsuzaki, H., Suzuki, Y., Terada, Y., Muramatsu Y., Ito K. and Iwatsuki, T., Age and speciation of iodine in groundwater and mudstones of the Horonobe area, Hokkaido, Japan: Implications for the origin and migration of iodine during basin evolution, Geochimica et Cosmochimica Acta, 191, pp.165-186, 2016.
- 徳永朋祥, 浅井和見, 中田智浩, 谷口真人, 嶋田純, 三枝博光, 沿岸海底下での地下水採取技術の 開発とその適用-黒部川扇状地沖合での例-, 地下水学会誌, Vol.43, 2001, 279-287.
- 富岡祐一, 近藤浩文, 後藤和幸, 五嶋慶一郎, 吉村公孝, 村元茂則, ボーリング調査における地下
水水質に及ぼす掘削水、洗浄水およびセメントの影響,電力中央研究所研究報告, N12012, 2013.

安江健一・秋葉文雄・大平寛人・石井英一(2006) 北海 道北部, サロベツ背斜付近に分布する声 問層上部の 鮮新統上部珪藻化石帯とフィッション・トラック年 代. 地質学雑誌, 112, 284-293.

3.4 沿岸部の地質環境の情報整備

3.4.1 背景と目的

地層処分を対象とした候補サイトの選定や、選定後のサイトにおける自然現象や地質環境の把 握には既存の調査技術、データ、モデル及び解析結果が大きな役割を担う。このような情報は、 論文や各種資料などの文献に含まれているが、現状では論文検索のためのデータベースは複数存 在しており集約されているとは言い難い。その観点から、膨大な情報を有益かつ効率的に活用す るためには、わが国の地球科学に関する文献を一括に検索できるデータベースの構築が望まれる。 特に本事業に関わる沿岸部の地質環境調査や評価技術に着目して、これまでに実施されてきた深 部地下水環境に関わる研究を把握するために、わが国における対象地域での地質・地下水にかか わる文献情報データの集積を実施する。このデータベースは地域の科学的特性の提示や、文献調 査段階の基礎データに資するものとなる。Geolis を用いた 1945 年から 2015 年の国内文献整理 の総数は 50 万件を超えた(1945 年より前の論文は、情報や手法が古いことと、活字体が大きく 異なるので電子化は困難である)。今年度は、これまでに引き続き、GeoScienceWorld を用いて 情報の整理・分類・解析を継続した。

一方で、当事業の成果を格納するとともに、上記のような膨大な文献情報を検索できるシステ ムを構築する必要がある。これまで深地層の研究施設計画など国内外の地層処分を対象とした地 質環境調査、他の分野で実施された地質調査などに基づく調査技術に関する研究開発成果やそれ らを適用した経験・ノウハウなどを有効に利用できるように、知識工学的手法や IT を利用した 次世代型サイト特性調査情報統合システム(Information Synthesis and Interpretation System: 以下、「ISIS」という)が開発されている。このシステムは、平成 19 年度から平成 24 年度の経 済産業省委託事業(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)の一環として開 発された。本研究開発の初年度である平成27年度の検討では、ISISを基本として当事業の研究 開発の成果を取り込む方針とした。平成28年度は、原子力機構が構築したISIS、産総研が構築 した統合版地質文献データベース(GEOLIS)及び世界的な信頼度を持つ Global Science World についてシステムの概要を調査するとともに連携の方策などを検討し、沿岸部に関連した情報を 検索する方法や本研究で得られる情報を一元的に管理する方策を試行してその有効性を検討した。 平成 29 年度は、ISIS と GEOLIS を連携させて検索する機能を充実する方法を試行するととも に、本研究で得られた知見を ISIS に取り込むために分類・整理した。最終年度の平成 30 年度で は、前年度に引き続き、地質環境の研究成果から得られた知識の整理・集約を行うとともに、地 質環境情報の管理方策の試行を行った。さらに、これまでに集約してきた情報を格納し、DVD で 閲覧できるようにした。

3.4.2 沿岸部の地質環境情報の整理・管理システムの構築

(1) 沿岸部の地質環境情報に関する管理システムの構築

1) 基盤情報の整理

地質環境に係るデータ、モデル及び解析結果、これらを取りまとめて発行された報告書や論文、 表出されない知識や経験など、情報量は膨大なものとなっている。地質環境調査に関わる種々の 作業を支援することを目標とし、地層処分の候補サイトにおいて地質環境調査の作業を行う上で 有益と考えられる、深地層の研究施設計画など国内外の地層処分を対象とした地質環境調査、他 の分野で実施された地質調査などに基づく調査技術に関する研究開発成果やそれらを適用した経 験・ノウハウなどを有効に利用可能となるよう、知識工学的手法や IT を利用した、次世代型サイ ト特性調査情報統合システム (Information Synthesis and Interpretation System: 以下、「ISIS」 という)が、平成19年度から平成24年度の経済産業省委託事業、地層処分技術調査など事業(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)の一環として開発された(日本原子力 研究開発機構、2008;2009;2010;2011;2012;2013a;2013b)。 ISIS は、地質環境モデルの 作成や調査計画立案・実施を支援するエキスパートシステム、作成された地質環境モデルの可視 化ツール、エキスパートシステムを作成するツール、調査の工程管理及び地質環境電子文書シス テムとこれらを統合するマネジメントコクピットによって構成されている(図 3.4-1)。マネジメ ントコクピットは、これらの機能・ツールと関連する知識を統合するツールである。マネジメン トコクピットを通して、地質環境調査の様々な場面でマネージャーが行う意思決定を迅速かつ効 率的に支援できる。さらに、関係者間の知識の共有、知識の追跡性の確保が可能である。

平成 27 年度の検討により、ISIS を基本として当事業の研究開発の成果を取り込む方針とした。



図 3.4-1 ISIS の全体像

2) 管理方策の検討

平成28年度の検討として、原子力機構が構築したISIS、産総研が構築した統合版地質文献デ ータベース(Geolis)及び世界的な信頼度を持つGlobal Science World についてシステムの概要 を調査するとともに連携の方策などを検討し、沿岸部に関連した情報を検索する方法や本研究で 得られる情報を一元的に管理する方策を試行してその有効性を検討した。試行結果の総括を表 3.4-1 に示す。Geolis のデータを ISIS に取り込んで管理する方策が最も有効であることが明らか となった。また、ISIS を基本とした一元管理方式においては、Geolis のデータの利用形態によ り、有効な一元管理方式を選択する必要がある。このため、「特定の情報を閲覧・取得する場合」、 「検索結果の情報を閲覧・取得する場合」及び「ISIS の画面ですべての情報を提供する場合」の 3パターンの利用形態を想定し、各連携方式の優先順位を検討した。

	管理方式①	管理方式②	管理方式③	管理方式④	管理方式⑤
連携方式	リンク	リクエスト	リクエスト	リクエスト	データ取込
連携レベル	URL	アプリケーショ	アプリケーシ	アプリケーシ	データベース
		ン	зン	зン	
データ	小	中(検索条件に	中(検索条件	中(検索条件	大
送受信		よる)	による)	による)	
レスポンス	普通	少し遅い	少し遅い	少し遅い	速い
データの同期	同期	同期	同期	同期	非同期
更新の反映	即時	即時	即時	即時	運用の取決
データの管理	Geolis	Geolis	LOD サイト	LOD サイト	ISIS
データの特定	リンクにより該	検索条件が検索	検索パラメータ	いくつかの検索	ISIS の機能に
	当データが特定	キーワードしか	により検索条件	パターンが用意	より対応す
	される。	ない。	をいろいろと設	されている。	る。
			定できる。		

表 3.4-1 一元管理方式の主要項目の比較

管理方法①:画面表示インターフェイスから各種データベースなどへのリンクによる構成

管理方法②:HTMLのFORMタグを活用した連携方式

管理方法③:検索パラメータを活用した連携方式

管理方法④:LOD(Linked Open Data)公開サイトを活用した連携方式

管理方法⑤:データベースの取り込みによる一元管理

平成 29 年度の検討として、ISIS と Geolis を連携させて検索する機能を充実する方法を試行し 有効性を評価した。キーワードの関連性や検索の利便性などを評価として試行した結果の総括を 表 3.4-2 に示す。評価の結果、試行番号【4】の、既に ISIS に登録されている情報を用いて、簡 易形態素解析からキーワードを抽出し、データ連携を行う方式は有効性が大きいことが明らかと なった。また、検索結果の適合性を高めるために、試行番号【2】で試行したカテゴリ情報を用い て検索結果をさらに絞り込む機能を併せて活用することが有効であることが明らかとなった。

及 5.4-2 1515 C Geolis を建設させた場合の管理力束の有効性計画											
評価項目	試行番号	試行番号	試行番号	試行番号	試行番号						
	【1】	[2]	【3】	【4】	[5]						
キーワードの関連性	\bigtriangleup	0	0	0	0						
キーワードの保守性	0	0	\bigtriangleup	0	0						
検索の利便性	\bigtriangleup	0	0	0	\bigtriangleup						
検索の処理性能	0	\bigtriangleup	0	0	0						
検索結果の適合性	\bigtriangleup	0	\bigtriangleup	\bigtriangleup	0						
検索結果の再現性	\bigtriangleup	0	0	0	\bigtriangleup						
総合評価 (点)	9	12	13	14	12						

表 3.4-2 ISIS と Geolis を連携させた場合の管理方策の有効性評価

試行番号[1]:キーワードを用いた試行

試行番号[2]:キーワード及びカテゴリ情報を用いた試行

試行番号[3]:タグとしてキーワードの埋め込みを用いた試行

試行番号[4]:タグとして簡易形態素解析によるキーワードの抽出を用いた試行

試行番号[5]: Geolis データセット検索結果のフィルタリングの試行

平成 30 年度の検討として、ISIS コンテンツの一つである ES (エキスパートシステム)の情報

から形態素解析によってキーワードを抽出し、オープンソースの全文検索ツール(以下、Fess) を活用して、Web、ファイル及びデータベースを対象にキーワードと関連する情報など、さらに 正規表現によるキーワード抽出と Geolis 並びに国立国会図書館サーチ(以下、国会図書館デー タ)のデータを対象に文献情報などの収集・連携などの管理方策の試行を行った。平成 29 年度の 検討と同様に、ISIS と Geolis を連携させて検索する機能を充実する方法を試行し有効性を評価 した。キーワードの関連性や検索の利便性などを評価として試行した結果の総括を表 3.4-3 に示 す。試行パターン【4】の正規表現から文字列を抽出して情報を検索する方式が最も有効性が高い ことが明らかになった。

試行パターン 評価項目 試行パターン 試行パターン 試行パターン [1] [2] [3] [4] キーワードの関連性 \bigcirc 0 \triangle \bigcirc キーワードの保守性 \bigcirc 0 0 \triangle 検索の利便性 \bigcirc \bigcirc \triangle \triangle 検索の処理性能 Ο Ο \bigcirc \triangle 検索結果の適合性 \triangle \bigcirc \bigcirc \triangle 検索結果の再現性 \triangle \bigcirc \triangle \bigcirc 総合評価 (点) 8 171220

表 3.4-3 ISIS と Geolis を連携させた場合の管理方策の有効性評価(その 2)

試行番号[1]: 選定キーワードと対象本文の形態素解析との結果のマッチングからキーワードの 抽出をおこない、Fess データベースを対象に検索

試行番号[2]: 試行1で抽出したキーワードをカテゴリと関連付け、カテゴリの選択から関連キ ーワードと対象本文の形態素解析の結果とのマッチングをおこない、キーワード を抽出

試行番号[3]: ラベル選択による Fess データベースの検索範囲を指定して、キーワードを検索

試行番号[4]:対象範囲の本文中に記載される参考文献の著者と年度の文字列を表す正規表現か ら「著者+年度」をキーワードとして抽出し、さらに選択したキーワードを Geolis または国立国会図書館データベースを対象に検索

(2) 沿岸部の地質環境情報の整理

1) 研究結果の調査と内容の分類

本事業における地質環境に関する研究成果を ISIS に取り込むために、平成 29 年度には、平成 27 年度(産業技術総合研究所ほか,2016)及び平成 28 年度地層処分技術調査等事業 沿岸部処分 システム高度化開発報告書(産業技術総合研究所ほか,2017)、(以下、平成 27 年度報告書、平成 28 年度報告書)を対象に、研究結果から得られたノウハウの整理を行い、分野内及び分野間の作 業(タスク)の構築及び関連する専門分野固有の知識(領域知識)の整理を行った。報告書の記 載内容を表 3.4-4 に示す分類項目に従って整理した。分類・整理の結果、平成 27 年度報告書は 領域知識と事例に分類されたが、平成 28 年度報告書は検討方法などのタスクを分類、抽出する ことが可能となった。

分類	定義
領域知識	当該分野の専門的知識の解説、技術的知見、概要など
タスク	専門知識を利用して実施される作業や解析、評価など(主として作業題目や作業 目的として示すもの)
事例	対象が特定的または具体的に示されるもの
一般知識	当該分野以外または学術一般的な知識や参考文献など

表 3.4-4 研究結果の調査で実施した分類の定義

2) 研究結果から得られたタスク及び領域知識の整理

前述の分類結果を基に、ノウハウや領域知識の理解や利用のための整理とタスク間の基本構成 について、従来のエキスパートシステム(ES)の構成を参考にしながら、タスクの連携(タスク フロー)について検討・整理を行なった。平成29年度の検討では、平成28年度報告書の記載内 容を基にした分類結果から、下流タスクや知識情報が充実しているいくつかの主要タスクを対象 に領域知識を整理票形式でまとめた。整理票の項目を表3.4-5に示す。

項目	内容
\mathbf{ES}	検討課題のタイトル
主要タスク	ES を実施するためのタスクの最上流に位置するタスク
目的	タスクの目的
概要または背景	領域知識等から得られたタスクの概要または背景
留意点	ES またはタスクを実施する上で留意または考慮する点など
入力タスク	本タスクの上流に連なるタスク
選択枝	下流タスクへ移行する選択項目
出力タスク	本タスクの下流に連なるタスク
関連図	本タスクに関連する図など
報告書	参照する報告書の目次項目等

表 3.4-5 整理票の項目

平成 30 年度の検討では、比較的情報量が多い、平成 29 年度報告書の「2.1 沿岸部の自然現象 に関する研究」と「2.2 沿岸部の地下水長期安定性に関わる研究」を対象として、ES カテゴリを 整理するとともにタスクフローを作成した。例として、隆起・侵食の「予察的 ES」及び「計画・ 手法 ES」に関する ES カテゴリとタスクフローの関係を図示したものを図 3.4 2 に示す。また、 「隆起・侵食の評価」、「露出年代」、「隆起・侵食の指標」と大別して、ES 分類区分ごとに ES カ テゴリと新規タスクの連携を図 3.4 3 に示した。ES カテゴリの整理票の例を表 3.4 6 に示す。



図 3.4-2 ES カテゴリとタスクフロー(隆起・侵食の「予察的 ES」及び「計画・手法 ES」)



図 3.4-3 隆起・侵食における ES カテゴリと新規タスクの連携

表 3.4-6 ES カテゴリの整理票の例(隆	隆起・侵食)
-------------------------	--------

ESカテゴリ	調査候補地における露出年代測定手法の予察的検討
ES 分類区分	予察的 ES(1.11)
目的	・調査候補地における露出年代測定の評価と技術の概要説明
本文	海成段丘の発達が悪い地域の隆起・侵食量の評価手法、並びに、被覆層を大きく欠く岩石侵
	食段丘などを対象とした段丘対比・編年手法の高度化の検討には,詳細な地形の把握と実際の
	地質試料を用いた分析などが必要であるため、野外調査が必須である。例えば、隆起・侵食量
	の見積りには主に段丘を指標として使うため、調査地域周辺には少なくとも対比・編年が可能
	な程度に段丘が分布していることが望ましい。どのような段丘がどの程度分布し、どのような
	調査をすれば、対比・編年が可能になるかを確認する必要がある。また、段丘だけでなく、岩
	石侵食段丘の前身である波食棚を調査することにより、隆起の指標、数値年代測定のための試
	料を見つけることも重要である。そこで,既存情報を用いて,野外調査地域の絞り込みを行う。
	本土四島を取り囲む海岸線のうち,広い砂(礫)浜や干潟が発達する海岸は 1/5 ほどにすぎず,そ
	の他は海食崖が続く岩石海岸(太田ほか, 2010)である。そのため、日本では海岸が隆起して形成さ
	れた海成段丘は岩石侵食段丘が多い。岩石侵食段丘は被覆層を大きく欠くことから,岩石侵食段丘
	の表面が露出した年代を用いた段丘の対比・編年が有効と考えられる。岩石の露出年代について
	は,宇宙線生成核種を用いた年代測定法が適用可能であることから,岩石段丘表面の露出年代測
	定手法では,宇宙線生成核種を用いた岩石の露出年代に着目する。
留意点	・岩石段丘表面の露出年代測定手法の適用性の検討に必要な条件は、海成段丘の分布と岩石侵
	食段丘の分布である。
入力タスク	沿岸部における隆起・侵食に関する検討 ES
選択枝	・調査候補地が未定である
	・調査候補地における露出年代測定手法を検討する
	・海成段丘の発達が悪い地域の隆起・侵食量の指標を検討する
出力タスク	・年代測定に適した野外調査地域の検討



(3) まとめ

このように、当事業の地質環境に関する研究成果を ISIS に格納するために、「領域知識」、「タ スク」、「事例」及び「一般知識」に分類するとともに、タスクフローを整理するとともに、ES の カテゴリとタスクの関係を整理した。さらに「事例」や「一般知識」については整理票を作成し、 ISIS に取り込めるようにした。これら、沿岸部の地質環境情報の整理及び管理システムの構築の 検討の成果として、システムに整理した研究成果を格納し、DVD で閲覧可能とした。

3.4.3 沿岸部地下水に係わる文献の整理

(1) 背景と目的

日本列島に関する和文と英文の地球科学文献は 100 万部を超えて発表されており、このうち OCR に耐えると考えられる 80 万件超をこれまでにデータベース化した。これを使って、地域ご と、地質ごと、地形ごとにこれまでどのような調査研究がされてきたかを研究の対象や手法ごと にまとめ、今後地層処分研究に貢献できる統計解析を実施した。

本統計解析は、単なる研究動向の把握に留まらず、我が国を対象とした地球科学研究で蓄積さ れてきた知識を客観的かつ再現可能な手法を用いて再認識するものであり、どこの地域で、どの ような研究が行われてきたかの歴史的経緯を含めて明らかにすることで、将来の安全評価との関 連付けを視野に入れた地下水流動モデルの構築などの地球科学研究に関する各種論拠の獲得を支 援可能な基礎データを整備する。そこで、地域・地質・地形ごとに、どのような調査研究がされ てきたかを研究のターゲットや手法、年代ごとにまとめ、前述の目的に沿った統計諸量を出力す るシステムを開発した。

(2) 研究手法

約 80 万件の地球科学文献を対象に、全文献タイトルの形態素解析を実施し、統計処理の対象 とする属性キーワード及び関連するキーワードの出現数・年代等を整理した統計諸量を出力する システムを開発した。また、出力した統計諸量をもとに地球科学的見地に基づいた分析を行った。 全体的な流れを図 3.4-4 に示す。



図 3.4-4 形態素解析・時系列分析の流れ

(3) 計解析のための辞書及びトピックの作成

統計解析に用いる属性キーワード、関連キーワードを収録した辞書及び関連キーワードの組み 合わせで定義されるトピック:「地域属性と地域以外の属性の論理積として定義」を作成する。具 体的には、解析対象文献に含まれる地球科学分野の専門用語や新語などを抽出し登録する。特に、 当該文献が対象とする地域、地形、地質、地盤調査、環境、エネルギー、災害、地下水、地質年 代に関するキーワードについては、後述の統計解析結果の妥当性に影響を及ぼす場合があるため、 関連学会等で刊行されている用語辞典などの併用を踏まえ、過不足に十分留意して設定した。

辞書に登録した属性キーワードと各属性キーワードに関連するキーワード数、トピック数を表 3.47に示す。統計解析においては、属性キーワードごとに関連文献数(出現数)を計測する。こ こで各属性キーワードに関連するキーワードは定義や意味で階層を分けて整理した。下位の階層 となるほど詳細・具体的な物及び手法、固有名詞となる。例として、"地域"に関連するキーワー ドは上位階層から順に「地域」、「東日本 or 西日本」、「都道府県」、「市区町村」とした。各階層の 出現数は、下位階層での出現数を合計したものとした。キーワードの階層例を表 3.48に示

衣 5.4	+-/ +-/	
属性キーワード	関連キーワード数	トピック数
地域	2746	_
地形	296	296
地質	29	29
地盤調査	193	193
環境	69	69
エネルギー	29	29
災害	49	49
地下水	120	120
地質年代	86	86
合計	3617	871

表 3.4-7 キーワード・トピック数

表 3.4-8 キーワード階層例

第1階層 (属性キーワード)	第2階層	第3階層	第4階層	第5階層
地域	東日本	北海道	札幌	
地形	風成地形	砂丘		
地質	未固結堆積層	火山灰	火砕流堆積物	
地盤調査	地下水調查	透水試験	ルジオン試験	
環境	公害	地盤沈下	不等沈下	
エネルギー	再生可能エネルギー	地中熱	熱応答試験	
災害	自然災害	噴火	火砕流	
地下水	地下構造	帯水層	地層水	
地質年代	顕生代	新生代	第四紀	完新世

(4) 統計解析の結果

作成した辞書データを用いて地球科学文献電子化全データタイトルの形態素解析を実施した。 全文献データタイトルに含まれる属性キーワード及び関連するキーワードの出現数・年代等を整 理する。

1) 形態素解析

本事業で開発するシステムにおける形態素解析モジュールは、京都大学情報学研究科-日本電信電話株式会社コミュニケーション科学基礎研究所共同研究ユニットプロジェクトを通じて開発

されたオープンソース形態素解析モジュールである MeCab を採用した。MeCab は、他の解析モジュールと比べ高速に動作し、言語に依存せず辞書データの追加・編集が容易であることが特徴である。

2) プログラム概要

図 2.3-1 に示す形態素解析においては、地球科学文献電子化全データ、解析時に参照する辞書 データ、統計処理の対象とする属性キーワード及び関連するキーワードが必要となる。

これら入力データは Microsoft 社の Excel を始めとした表計算ソフトまたはテキストエディタ で容易に編集できる CSV 形式で取り扱う仕様とした。ただし、形態素解析に採用した MeCab の 仕様上、入力データの文字コードを UTF-8 で統一する必要があり、改善点の一つとして挙げられ る。

3) フローチャート

本業務で開発したシステムの処理フローを図 3.45 に示す。システムは大きく二つのプログラムに分類され、それぞれ不特定用語の抽出・統計処理用データの出力を行う。



図 3.4-5 形態素解析システム処理フローチャート

4) 時系列分析

前述した形態素解析の入力データである地球科学文献電子化全データは、文献ごとに発行年が 記録されている。これにより、属性キーワード及び関連するキーワードの出現数の計測と同時に 年度の計測ができる。後述の統計解析結果においては、属性キーワードごとに年度別の出現頻度 を整理した。

5) 統計解析結果の分析

統計解析結果を元に、地球科学的見地に基づいた統計諸量の分析を行う。具体的には、出現頻 度の高いまたは低いキーワード、トピックの学術的背景、要因に関する考察、時系列分析結果と 年代ごとの背景・ニーズとの関連付け等を分析した。

今回解析を実施した文献は 823,983 件あり、内 309,381 件が和名文献、514,602 件が英名文献 であった。全文献を発行年別に分類したグラフを図 3.46 に示す。



図 3.4-6 発行年別文献数

① 地域

全文献 823,983 件の内、地域に関するキーワードを含む文献は 163,763 件であった。 図 3.47 には、年代別に色分けされた属性キーワード別の出現数を示す。図 3.48 には、地域に 関するキーワードを含む文献を都道府県別に分類し発行年代別に色分けした分布図を示す。



図 3.4-7 属性キーワード別出現数



図 3.4-8 地域関連文献 都道府県別出現数

② 地形

地形に関するキーワードを含む文献は 244,848 件あった。文献数は 1945 年より増加していき 2005 年を境に少なくなる傾向がわかる。同傾向は、"地域"関連文献及び全文献における傾向と一 致する。最も出現数の多いキーワードは"地殻変動"であり 129,762 件あった。このうち、約 60% の 76,584 件は、地震に関連する文献である。"地震"の出現数の増加数を見ると、1993 年までは 50 件前後の数で増えていくのに対し、1993 年以降は数百件単位に増加しており、地震に対する 関心が深まっている事がわかる。1995 年には阪神淡路大震災が発生しており、要因の一つとして 考えられる。

また、海岸・海底地形関連文献を見ると、2011年に"海岸"の出現数が高くなっている。2011年 には東日本大震災が起きており、津波災害が問題となった事で関連文献が増えたものと思われる。 都道府県別に見ても最も出現数の高いキーワードは"地殻変動"である。地域で述べた新潟県、兵 庫県においては地殻変動の出現頻度が高く、震災の影響が考えられる。











(b) 海岸·海底地形関連文献



(c)河成地形関連文献図 3.4-10 高頻度キーワード 年度別出現数

③ 地質

全文献 823,983 件の内、地質に関するキーワードを含む文献は 20,179 件あった。 図 3.4 14 には、年代別に色分けされた第 3 階層キーワード別の出現数を示し、図 3.4 15 には、 発行年度別の出現数を示す。図 3.4 16_(a)、(b)、(c)には、第 3 階層キーワード高出現頻度順 に 3 種を発行年度別に分類し第 4 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。



図 3.4-11 地盤調査第2階層キーワード別出現数









(c) 堆積岩関連文献

図 3.4-13 高頻度キーワード 年度別出現数

④ 地盤調査

全文献 823,983 件の内、地盤調査に関するキーワードを含む文献は 16,797 件あった。 図 3.4-14 には、年代別に色分けされた第 2 階層キーワード別の出現数を示し、図 3.4-15 には、 発行年度別の出現数を示す。図 3.4-16_(a)、(b)、(c)には、第 2 階層キーワード高出現頻度順 に 3 種を発行年度別に分類し第 3 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。



図 3.4-14 地盤調査第2階層キーワード別出現数



図 3.4-15 地盤調查関連文献 発行年別出現数







(b) 物理探查·検層関連文献





⑤ 災害

全文献 823,983 件の内、災害に関するキーワードを含む文献は 30,758 件であった。 図 3.4-17 には、年代別に色分けされた第 3 階層キーワード別の出現数を示し、図 3.4-18 には、 発行年度別の出現数を示す。図 3.4-19_(a)、(b)、(c)には、第 3 階層キーワード高出現頻度順 に 3 種を発行年度別に分類し第 4 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 3.4-20 には、 災害∧地域属性キーワード(トピック)に該当した文献を都道府県別に分類し第 3 階層キーワー ド別に色分けした分布図を示す。図 3.4-21 には、図 3.4-17 において第 3 階層キーワードの出現 数の高い順に 4 種の度数を地図上に示した分布図を示す。









(b) 噴火関連文献



(c) 土砂災害関連文献図 3.4-19 高頻度キーワード 年度別出現数



図 3.4-20 災害関連文献 都道府県別出現数





地震災害



図 3.4-21 地域別出現数

⑥ 地下水

全文献 823,983 件の内、地下水に関するキーワードを含む文献は 13,798 件であった。 図 3.4-22 には、年代別に色分けされた第 2 階層キーワード別の出現数を示し、図 3.4-23 には、 発行年度別の出現数を示す。図 3.4-24_(a)、(b)、(c)には、第 2 階層キーワード高出現頻度順 に 3 種を発行年度別に分類し第 3 階層キーワード別に色分けした分布図を示す。図 3.4-25 には、 地下水 / 地域属性キーワード(トピック)に該当した文献を都道府県別に分類し第 2 階層キーワ ード別に色分けした分布図を示す。図 3.4-26 には、図 3.4-23 において第2階層キーワードの出 現数の高い順に4種の度数を地図上に示した分布図を示す。



図 3.4-22 地下水第2階層キーワード別出現数



図 3.4-23 地下水関連文献 発行年別出現数



(a) 水循環関連文献



(b) 地下構造関連文献



(c)帯水層定数関連文献図 3.4-24 高頻度キーワード 年度別出現数



図 3.4-25 地下水関連文献 都道府県別出現数









帯水層定数

地下水資源

図 3.4-26 地域別出現数

(5) 統計解析の考察

解析結果から各キーワードに対し推測される学術的背景、要因に関する考察、年代ごとの背景・ ニーズとの関連付けを以降に記載し、最後に総括として今後地層処分研究のセーフティーケース を議論するうえで貢献できる統計解析結果について述べる。

表 2.3-3 は、地盤調査 (地域キーワード(トピック)に該当した文献の出現数を示す。表 2.3-4 は、地盤調査 (地形、地質、環境キーワード(トピック)に該当した文献の出現数を示す。表 2.3-5 は、地盤調査 (エネルギー、災害、地下水、地質年代キーワード(トピック)に該当した文献

の出現数を示す。

1) 地域

日本全国の都道府県及び市町村名を含む文献(地域関連文献)は163,763件あった。地域関連 文献発行年別文献数を見ると、文献数は1945年より増加していき2005年を境に少なくなる傾 向となり、全文献における傾向と一致した。最も出現数が多いのは"北海道"であり、2000年代ま で徐々に出現数が上昇している。2010年代で出現数の増加幅が減少しているのは、全体の文献数 が減っている為と考えられる。また、"新潟県"は2000年代、"兵庫県"は1990年代で文献数が最 も増加している。これは、新潟県中越地震(2004年)、阪神淡路大震災(1995年)による災害後 調査・研究論文が増えた為と考えられる。

2) 地形

地形に関するキーワードを含む文献は 244,848 件あった。文献数は 1945 年より増加していき 2005 年を境に少なくなる傾向がわかる。同傾向は、"地域"関連文献及び全文献における傾向と一 致する。最も出現数の多いキーワードは"地殻変動"であり 129,762 件あった。このうち、約 60% の 76,584 件は、地震に関連する文献である。"地震"の出現数の増加数を見ると、1993 年までは 50 件前後の数で増えていくのに対し、1993 年以降は数百件単位に増加しており、地震に対する 関心が深まっている事がわかる。1995 年には阪神淡路大震災が発生しており、要因の一つとして 考えられる。

また、海岸・海底地形関連文献を見ると、2011年に"海岸"の出現数が高くなっている。2011年 には東日本大震災が起きており、津波災害が問題となった事で関連文献が増えたものと思われる。 都道府県別に見ても最も出現数の高いキーワードは"地殻変動"である。地域で述べた新潟県、兵 庫県においては地殻変動の出現頻度が高く、震災の影響が考えられる。

3) 地質

地質に関するキーワードを含む文献は 20,179 件あった。"地域"・"地形"と同様、文献数は 1945 年より増加していき 2005 年を境に少なくなる傾向となった。最も出現数の多いキーワードは"泥" であり 3,890 件あった。このうち、約 75%の 2,865 件は"粘土"に関連する文献、約 25%の 948 件 は"泥"に関する文献であり"シルト"に関する文献は 77 件とほとんど出現していない結果となっ た。"粘土"については、1947 年に計測され以降数十件の出現数を維持しており、古くから調査・ 研究されている項目と言える。"粘土"と同じ傾向は"火山岩"にも見られた。

地質に関するキーワードを含む文献に共通している傾向として、2011年に出現数が減少している事が挙げられる。2011年には東日本大震災が発生しており、震災に関わる文献が上昇した代わりに地質に関する文献が減少したものと思われる。

4) 地盤調査

地盤調査に関するキーワードを含む文献は16,797件あった。"地域"・"地形"と同様、文献数は 1945年より増加していき2005年を境に少なくなる傾向となった。最も出現数の多いキーワード は"物理探査・検層"であり7,543件あった。このうち、約50%の3,606件は"弾性波探査"に関連 する文献、約30%の2,203件は"速度検層"に関する文献であり、この二つが"物理探査・検層"の 80%を占めている。特に、"弾性波探査"をみると1980年代後半から出現数が倍近く増加してお り、以降も2010年まで出現数が増加し続けている。これは、1980年代に入りデジタル技術が発 展した事によるものと思われる。 "弾性波探査"においてはデジタル技術を利用した反射法の研究が活断層調査や土木地質調査の 分野でも行われるようになり、調査・研究論文が増加したものと考えられる(参考資料 9)

デジタル技術発展による影響は、地下水調査関連文献にもみられる。"地下水シミュレーション" は 1970年頃から文献が出始め、1995年前後を境に頻出する傾向が見られる。1970年から 1980 年代については、数値解析の一種である有限要素法が広まり始めたのが 1970年代であり、関連 する論文が計測されたものと思われる。また、1995年前後から出現数が上昇する点については、 パーソナルコンピューターの普及とともにシミュレーション技術が広まった為と考えられる。

5) 災害

災害に関するキーワードを含む文献は 33,051 件あった。年度別の文献数は"地域"・"地形"と同 傾向であった。最も出現数の多いキーワードは"地震災害"であり 12,796 件あった。地震災害関連 文献を見ると、2013 年前後で"津波"の出現数が高くなっており、東日本大震災(2011 年)の影響 が見られた。一方、津波による被害がなかった阪神淡路大震災(1995 年)の時期では出現数に変 わりは無く、地震を起こした活断層の文献が増えている傾向が見られた。

噴火関連文献を見ると、"噴火"に関連する文献は 1987 年頃より頻出しており、"マグマ"、"火 山灰"、"火砕流"といった関連キーワードも同年を境に出現数が上昇している。国内では噴火が多 発しており因果関係の特定には至らなかったが、1987 年前後の火山噴火には大島噴火(1986 年)、 三宅島噴火(1983 年)が挙げられる。"火砕流"については特に 1991 年より出現数が上昇してい るが、これは同年の雲仙岳噴火による火砕流が問題となった事が挙げられる。

6) 地下水

地下水に関するキーワードを含む文献は13,798 件あった。年度別の文献数は"地域"・"地形"と 同傾向であった。最も出現数の多いキーワードは"水循環"であり 8,884 件あった。"地下水"に関 連するキーワードに共通する傾向は、地下水調査関連文献にも見られ、地下水調査手法の発展と ともに地下水に関わる文献が増えている事が判る。また、都道府県別の出現数をみると"水循環" は全国的に等しく分布しており調査が盛んにおこなわれていることが判る。

さらに、地層処分研究としては、キーワードとして"原子力"を設定し出現数、年代を計測した。" 原子力"に関する文献は 1,694 件計測され、このうち約 20%の 310 件が"地層処分"に関する文献 であった。

ここまで解析結果に対し、国内で発生した年代ごとの背景、また技術の発展といった学術的背 景から各キーワードの出現数・年代について関連付けを行った結果として、実社会における要因 (科学の発展、災害等)の発生前後で関連するキーワードの頻出が見られ、システムが正しく動 作する事を確認した。今後は、精度向上の為、"地層処分"に関連するキーワードを細分化して追 加する事が重要である。具体的には、処分箇所に関わる地質や安全評価や解析に関わる要件、地 下水用語などが考えられる。これらキーワード・トピックを充実させる事で地層処分研究に貢献 できる統計解析ができると考える。

属性キーワード		物理探 査・検層	ボーリン グ	サンプ リング	サウン ディング	地下水 調査	載荷 試験	現場密 度試験	現場 計測	
		北海道	106	89	7	1	165	0	0	49
		青森県	3	5	0	1	4	0	0	0
		岩手県	33	14	1	0	9	0	0	12
		秋田県	8	14	0	4	3	0	0	2
		宮城県	41	12	0	1	8	0	0	5
	击	山形県	5	2	2	0	5	0	0	4
		福島県	12	4	3	0	8	0	0	4
		茨城県	15	14	1	1	11	0	0	7
	14	栃木県	11	2	0	0	4	0	0	4
		群馬県	6	9	1	1	2	0	0	1
		埼玉県	43	24	0	1	12	1	0	6
地		千葉県	13	10	0	0	5	1	0	7
域		東京都	36	33	4	1	23	0	0	17
		神奈川県	14	43	0	1	7	0	0	3
		山梨県	4	1	0	0	2	0	0	4
		長野県	24	19	5	0	25	0	0	11
		新潟県	57	32	3	3	17	0	0	18
	Ŧ	富山県	5	3	0	1	2	0	0	1
		石川県	6	3	0	0	7	0	0	2
		福井県	2	1	0	0	3	0	0	2
	/+~	静岡県	22	65	0	2	17	0	0	16
		愛知県	13	19	3	1	9	0	0	5
		岐阜県	24	14	1	3	8	0	0	23
		三重県	5	44	1	1	2	0	0	9

表 3.4-9 地盤調查手法 地域別出現数

属性キーワード		物理探 查•検層	ボーリン グ	サンプ リング	サウン ディング	地下水 調査	載荷 試験	現場密 度試験	現場 計測	
		滋賀県	4	10	0	2	6	0	0	1
		京都府	13	9	0	0	4	0	0	4
		大阪府	17	50	0	0	7	0	0	8
		兵庫県	51	21	0	0	13	0	0	26
		奈良県	4	0	0	0	1	0	0	0
		和歌山県	14	15	0	0	0	0	0	1
		鳥取県	42	0	3	1	12	0	0	6
		島根県	0	8	0	1	1	0	0	1
		岡山県	6	5	0	0	4	0	0	0
	西 日	広島県	0	5	0	0	6	0	0	5
+4		山口県	10	9	3	0	3	0	0	13
址		香川県	1	4	0	0	0	0	0	0
坝	本	愛媛県	3	9	0	0	3	0	0	6
		徳島県	5	1	0	0	2	0	0	1
		高知県	4	13	0	0	4	0	0	11
		福岡県	13	3	0	0	3	0	0	4
		佐賀県	0	0	0	0	5	0	0	1
		長崎県	6	70	2	1	13	0	0	1
		熊本県	4	9	0	0	6	0	0	4
		大分県	8	1	0	0	56	0	0	1
		宮崎県	1	0	1	0	2	0	0	1
		鹿児島県	20	14	1	2	6	0	0	5
		沖縄県	7	22	2	3	8	0	0	3

表 3.4-10 地盤調査手法 地域別出現数(続き)

属性キーワード			物理探 査・検 層	ボーリン グ	サンプ リング	サウン ディング	地下水 調査	載荷 試験	現場密 度試 験	現場 計測
地形		風成地形	3	3	0	0	3	0	0	9
		浸食地形	50	17	0	0	11	0	0	10
		海岸·海底 地形	790	236	44	15	188	9	0	190
		河成地形	223	120	8	2	167	1	0	59
		氷河地形	0	3	0	0	2	0	0	6
		斜面·平 面地形	421	131	1	1	104	0	0	24
		火山地形	22	16	0	1	3	0	0	3
		人工地形	148	55	2	3	49	6	0	60
		地殼変動	2110	421	64	19	344	10	0	498
		礫	0	0	1	0	1	0	0	5
		砂礫	2	2	3	0	0	2	0	0
	未固結	砂	14	5	9	1	18	3	0	21
		ローム	3	3	1	0	2	1	0	0
	堆頂眉	泥	22	12	8	0	3	8	0	17
Ηh		火山灰	0	14	2	0	1	0	0	2
近		泥炭	2	0	2	1	4	0	0	0
貝		堆積岩	4	2	3	0	13	3	0	24
		火成岩	17	2	3	0	5	0	0	4
	岩盤	火山砕屑 岩	0	1	0	0	0	0	0	0
		凝灰岩	0	0	0	0	1	0	0	1
		変成岩	7	0	0	0	1	0	0	3
		大気汚染	0	0	0	0	1	0	0	0
		水質汚濁	2	2	0	0	5	0	0	1
理		土壤汚染	5	1	1	0	1	0	0	1
· 保	公害	騒音	4	1	0	0	10	1	0	3
垷		振動	0	0	0	0	0	0	0	0
		悪臭	0	0	0	0	1	0	0	2
		地盤沈下	60	11	0	1	47	15	0	37

表 3.4-11 地盤調査手法 地形、地質、環境別出現数

	属性キーワー	-ド	物理探 査・検 層	ボーリ ング	サンプ リング	サウン ディング	地下 水調 査	載荷 試験	現場 密度 試験	現場 計測
再		太陽光	155	19	1	0	10	0	0	10
	再生司	水力	7	0	0	0	2	0	0	5
	円生り	風力	0	0	0	0	1	0	0	0
エネ	北エー	地熱	33	5	1	0	2	0	0	6
イルギ	124	地中熱	34	1	0	0	3	0	0	5
+		バイオマス	41	27	5	2	197	3	0	78
	化石	火力	352	21	2	1	47	1	0	52
	燃料	原子力	5	7	$\vec{x} - y$ $y - y$ $x - x - y$ $x - x - x - y$ $x - x - x - x - x - x - x - x - x - x -$	22				
		集中豪雨	292	50	2	3	26	2	0	43
	自然 災害	洪水	9	10	2	0	11	0	0	15
		土砂災害	10	2	1	0	8	0	0	9
災害		地震災害	0	0	0	0	0	0	0	0
		噴火	2	2	0	0	0	0	0	0
	人的 災害	原子力事 故	0	0	0	0	0	0	0	0
		水循環	2	3	0	0	8	0	0	1
		地下構造	0	0	0	0	0	0	0	0
+Jh	下-水	評価数値	32	217	4	2	48	1	0	44
민		地下水資 源	0	0	0	0	4	0	0	1
地		法律·条令	0	15	0	0	0	0	0	0
		顕生代	0	0	0	0	0	0	0	0
₩₽	在代	原生代	0	0	0	0	0	0	0	0
吧員		始生代	0	0	0	0	0	0	0	0
		冥王代	0	0	0	0	サウン ボ調 エレグ水調 査載荷 試験密度 密度 試験010000200010002000200030021973014710032003262001100080000000000080008000000048100481000	0		

表 3.4-12 地盤調査手法 エネルギー、災害、地下水、地質年代別出現数

(6) 今後の展望、課題

本業務では、地球科学文献の形態素解析・時系列分析を実施し、統計解析用のデータ出力及び 可視化を行うシステムを開発し、解析結果を分析した。解析結果の分析においては、国内で発生 した震災や施行された法律・条令といった年代ごとの背景、また技術の発展といった学術的背景 から各キーワードの出現頻度・年代について関連付けを行った。結果として、実社会における要 因(科学の発展、災害等)の発生前後で関連するキーワードの頻出が見られ、システムが正しく 動作する事を確認した。また、最終年度にはサムネイル(概要)の表示も可能にするプログラム を作成した。

今後は、キーワードごとの関連を検出する手法を改良し、地域ごとの調査の進展状況や地質環 境に対する理解度、解析結果をより判り易い形で可視化する事が必要であると考える。また、解 析結果の可視化においては、システムから出力されるデータのデータベース化、データベースを 利用した GIS システムの開発が考えられる。さらに、機械学習により効率的なキーワードの分類 を行っていくことが望まれる。

参考文献

日本原子力研究開発機構, 平成 19 年度 地層処分技術調査等委託費 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報告書, 243p, 2008.

日本原子力研究開発機構, 平成 20 年度 地層処分技術調査等委託費 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報告書, 241p, 2009.

- 日本原子力研究開発機構, 平成 21 年度 地層処分技術調査等委託費 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報告書, 189p, 2010.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 22 年度 地層処分技術調査等委託費 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報告書, 194p, 2011.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 23 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報告書 168p, 2012.
- 日本原子力研究開発機構,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,166p,2013b.

Geo Science World, http://geoscienceworld.org/(2017年3月8日最終閲覧).

産業技術総合研究所 地質調査総合センター, 統合版地質文献データベース(GEOLIS), https://gbank.gsj.jp/geolis/(2017年1月31日最終閲覧).

産業技術総合研究所 地質調査総合センター(LOD 公開サイト),

https://gbank.gsj.jp/ld/(アクセス:2017 年 1 月 31 日最終閲覧).

- 国立研究開発法人産業技術総合研究所,国立研究開発法人日本原子力研究開発機構,公益財団法 人原子力環境整備促進・資金管理センター,一般財団法人電力中央研究所,平成27年度 地層 処分技術調査事業 沿岸部処分システム高度化開発報告書,139p,2016.
- 国立研究開発法人産業技術総合研究所,国立研究開発法人日本原子力研究開発機構,公益財団法 人原子力環境整備促進・資金管理センター,一般財団法人電力中央研究所,平成28年度 地層 処分技術調査事業 沿岸部処分システム高度化開発報告書,372p,2017.
- 国立研究開発法人産業技術総合研究所,国立研究開発法人日本原子力研究開発機構,公益財団法 人原子力環境整備促進・資金管理センター,一般財団法人電力中央研究所,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 沿岸部処分システム高度化開発報告書, 393p, 2018.

3.5 四者共研としての成果と課題

3.5.1 沿岸部の自然現象に関する研究

(1) 機関間の連携

本実施項目は、大きく隆起・侵食、断層活動、火成活動の3つの研究テーマから成る。このう ち、沿岸部における断層活動及び火成活動の検討は原子力機構が単独で実施し、隆起・侵食の検 討について、原子力機構・電中研で協動した。

協働の主な内容は、主に、沿岸部における隆起・侵食に関する検討(担当:電中研)、要素技術の検討のうちの、経験的指標に基づく段丘対比・編年手法の高度化(担当:電中研)、並びに、岩石侵食段丘や局所的な堆積物の年代などによる隆起・侵食評価手法の検討(担当:原子力機構) を実施する研究フィールドの検討である。それぞれの研究項目に適した条件を上げ、共通項を整理し、議論の結果必要な条件を重ね合わせて、事例研究を実施する地域を検討した。その結果として、宮崎平野において、上記3点を含む事例研究を展開するに至った。ただし、岩石侵食段丘や局所的な堆積物の年代などによる隆起・侵食評価手法の検討については、良好な露頭での詳細検討という研究の性格から、宮崎平野以外にも、幌延地域や土佐湾北東岸地域での事例研究を実施している。

具体的な事例研究地域の決定以降は、基本的に、それぞれの機関がそれぞれの仕事を進めた。 その間、地質環境 WG での経過報告や互いの作業現場の見学などを実施した。互いに理解を深め、 互いの実施内容の関連性を模索した有益な議論もあったが、目に見える形での協働の成果(連名 での学会発表など)を創出するには至っていないのが現状である。

例えば、一連の隆起・侵食評価を行う中で、電中研が実施する地表踏査・ボーリング調査等にお いて、各種年代測定を原子力機構が分担するという青写真も描いたが、ここまでの年代測定の中 心は、現実には外注したテフラ分析であった。ただし、宇宙線生成核種を用いた岩石侵食段丘面 の離水時期の決定など、その実現により、将来的には野外調査の体系に組み込まれるであろうと 予想される研究(担当:原子力機構)にも取り組んでいる点は述べておく。また、電中研が実施 する陸域の隆起モデルの海域への外挿により評価した隆起量と、原子力機構が実施する海底地形 に基づき評価した地殻変動様式を比較するといったことも議論に上がったが、結果として事例研 究地域を重ねるに至らず、実現していない。

以上のように、適切な役割分担を行い、適度な独立性を以て事業を進めていくこと自体は必要不 可欠と考えるが、個々の成果の統合、言い換えれば、調査・評価の体系化は間違いなく今後の課 題である。今後、隆起・侵食の研究は、今後、別途実施している事業(地質環境長期安定性評価 技術高度化開発)に引き継がれる。まずは平成31年度までであるが、それぞれの機関が個別の研 究テーマに取組み、断層・火山の研究成果も含め、その成果統合において具体的な協働を模索し たい。

(2) 分野間の連携

工学技術や安全評価の分野に比べ、地質環境の分野、特に自然事象に関しては、科学的特性マップからの流れもあり、サイト選定への貢献という色彩が強いのが特徴である。言い換えると、 科学的特性マップで提示された諸特性について、沿岸海域で評価しうる手法の整備をまず命題と した。この結果、工学技術や安全評価との十分な連携には至っていない。

今後の課題としては、現在取り組んでいる様々な空間スケール・様々な時間スケールの手法開 発がある程度達成されることが前提となるが(これも課題)、研究評価委員会でも指摘があったよ うに、隆起・侵食と風化の関係など、自然事象とそれに関連した設計や安全評価に関わるパラメ ータと関連した事象との関連性を検討することが課題として挙げられよう。
3.5.2 沿岸部の地下水長期安定性に関する研究

本課題に関する研究では、産総研がこれまでに整理してきた全国的な井戸データを考慮して全国の沿岸での採水を実施することにより、複数の大深度井戸から採水を実施することができた。 また、電中研がこれまでの地下水年代測定技術の知見を生かして分析することにより、沿岸域に 氷期降水(2万年以上の淡水)や化石海水(10万年以上の海水)のような天然バリア性能が高い 地下水が半分以上存在することを示すことができた。

氷期降水や化石海水が残留している事実は、長期的な海水準変動を受けても、周辺環境が維持 されることを表しており、人工バリアの施設設計や安全評価のシナリオ設定において、シナリオ の変動を考えるうえでも有益であると考えられる。

ただし、ここで提示した長期にわたり安定な地下水環境が維持されるような地下水流動場の概 念については、工学分野(人工バリア等の機能変遷挙動評価)や安全評価へと引き継ぐことが時 間的に難しかった。このため、今後、これらの成果を他分野での検討に反映していく必要がある。

また、今回の調査では概略的な調査が主であったため、今後、詳細な調査を実施することにより、 氷期降水や化石海水の存在の妥当性を地史や水理特性などから確認していく必要がある。

3.5.3 沿岸部の地質環境の情報整備

(1) 沿岸部の地質環境情報に関する管理システムの構築

当事業の成果を格納するために、原子力機構が開発した次世代型サイト特性調査情報統合シス テム (Information Synthesis and Interpretation System (ISIS) と産総研のデータベース Geolis の連携を検討し、Geolis のデータを ISIS に取り込んだうえで膨大な文献から目的の文献を適正 かつ効率的に検索するための機能を充実させた。また、当事業の地質環境に関する研究成果を ISIS に格納するために、「領域知識」、「タスク」、「事例」及び「一般知識」に分類するとともに、 タスクフローを整理するとともに、ES のカテゴリとタスクの関係を整理した。さらに、「事例」 や「一般知識」については整理票を作成した。最終年度には、前年度までの隆起・侵食の研究成 果を例として ISIS に取り込んだが、地質環境の他の分野も含めて取り込むことが今後の課題と 考えられる。また、検索機能を充実させた ISIS は DVD で作動するようにしたが、ISIS の開発 から長年が経過しているため、最新のオペレーションツールで同様の機能を有するシステムの構 築も今後の課題と考えられる。

(2) 沿岸部の地質環境情報に関する管理システムの構築

本業務では、地球科学文献の形態素解析・時系列分析を実施し、統計解析用のデータ出力及び 可視化を行うシステムを開発し、解析結果を分析した。解析結果の分析においては、国内で発生 した震災や施行された法律・条令といった年代ごとの背景、また技術の発展といった学術的背景 から各キーワードの出現頻度・年代について関連付けを行った。結果として、実社会における要 因(科学の発展、災害等)の発生前後で関連するキーワードの頻出が見られ、システムが正しく 動作する事を確認した。また、最終年度にはサムネイル(概要)の表示も可能にするプログラム を作成した。

今後は、キーワードごとの関連を検出する手法を改良し、地域ごとの調査の進展状況や地質環 境に対する理解度、解析結果をより判り易い形で可視化する事が必要であると考える。また、解 析結果の可視化においては、システムから出力されるデータのデータベース化、データベースを 利用した GIS システムの開発が考えられる。さらに、機械学習により効率的なキーワードの分類 を行っていくことが望まれる。

4. 沿岸部における工学技術の高度化開発

4.1 工学技術分野の課題設定

概要調査段階以降に必要となる工学技術の高度化の観点では、既に述べたように、平成 27 年 度より着手した本事業の初年度において、沿岸部における処分システムの構築を念頭に、沿岸部 の特性などに関連したこれまでの地層処分研究開発成果の再整理を行い、再検討が必要な課題な どを抽出・整理している(産総研,原子力機構,原環センター,電中研,2016)。このような整理結 果は、並行して進められた沿岸部研究会に適宜提供され、平成 28 年 8 月の同研究会のとりまと めでは、"海域を含めた沿岸部において地層処分を実現するために必要な基本的な技術はおおむ ね整備されている"としつつも、"今後、技術の高度化に引き続き取り組むことで、さらに信頼性 を高めることが重要である"と結論付け、併せて技術の高度化に向けて取り組むべき課題とその 方向性が示された(2.2 節参照)。

このような沿岸部研究会における議論を踏まえ、本事業における工学技術の高度化に向けた取 組では、下記の実施項目①、②のように大項目として二つの実施項目を設定し、個別研究課題と して含まれるニアフィールドの構成要素(材料)や研究テーマに対して平成 28 年度からの三ヵ 年計画を具体化したうえで取組に着手した。

本章(第4章)では、概要調査段階以降に必要となる工学技術の高度化の観点から次の実施項 目①、②に含まれる個々の課題について、平成 30 年度までの三ヵ年の実施内容や得られた成果 などについて述べる。

実施項目①(4.2 人工バリア材料などに関する劣化や変質に関する現象の把握)

4.2.1 オーバーパック

- 4.2.2 緩衝材
- 4.2.3 セメント系材料
- 4.2.4 ニアフィールド複合現象評価手法の開発

実施項目②(4.3 塩水環境下ニアフィールド領域での処分システムの成立性に係る手法等の提示)

4.3.1 グラウト設計及び影響評価技術の開発

- 4.3.2 ニアフィールド領域での処分システム構成材料の成立性と品質確保の方法の提示
- 4.3.3 処分システムの成立性に係る手法に基づく知見の体系化に向けた試行

参考文献

沿岸部研究会,沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会 とりまとめ,2016. 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中

央研究所, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業(沿岸部処分システム高度化開発)報告書, 2016.

4.2 人工バリア材料等に関する劣化や変質に関する現象の把握(各種特性等のデータ拡充) 4.2.1 オーバーパック

(1) 背景と目的

地層処分環境における炭素鋼オーバーパックで考慮すべき腐食現象として、不働態化、酸素に よる腐食(全面腐食、孔食、すきま腐食)、水の還元による全面腐食、応力腐食割れ、水素脆化割 れが挙げられている(核燃料サイクル開発機構,1999)。オーバーパックの候補材料である炭素鋼 については、これまでに種々の地下環境における水質を想定した試験が実施され、地層処分環境 での腐食に係る知見の拡充が進められている。例えば、オーバーパックの溶接封入部の腐食挙動 については、オーバーパックの封入技術の整備の一環として、溶接試験体に対する腐食試験が実 施され、溶接部は母材と同等の耐食性を有していることが確認されている(原環センター,2013)。

一方、これまでに実施された多くの腐食試験は、人工海水や人工淡水が模擬地下水として使用 されている。本事業では、平成27年度に現状の知見を整理した上で、沿岸部を対象とした場合に 検討すべき課題と対策案を以下のように整理した(産総研ほか,2016)。

○沿岸部の地下水組成が炭素鋼の腐食挙動に及ぼす影響

海水と陸水が混ざる沿岸部にオーバーパックを埋設したことを想定。既往の研究で使用した 人工海水や人工淡水と、濃度や溶液の化学種の組成がと異なる環境での炭素鋼の腐食挙動を評 価するための知見を拡充する。

○沿岸部における溶接部の耐食性評価

沿岸部における炭素鋼オーバーパック溶接封入部の品質改善手法の適用性を検討する。

これらのデータ取得に向けた試験などに関する全体計画を図 4.2-1 に示す。平成 28 年度は、 炭素鋼の母材を対象として人工海水を 1~1,000 倍に希釈した試験溶液を用いて浸漬期間 30 日間 までの腐食試験を行い、腐食速度や拡散性水素濃度を求めた(産総研ほか, 2017)。また、市販の 溶接材料を用いた腐食試験片を作製し、電気化学試験の条件設定のための予備試験を行うととも に、溶接部の選択的な腐食を改善するために Ni を添加した改良溶接材料を作製した(産総研ほ か, 2017)。平成 29 年度は、炭素鋼の母材を対象として人工海水を用いた緩衝材共存系での浸漬 試験を実施して、腐食速度及び拡散性水素濃度を求めた。また、平成 28 年度に作製した溶接試験 片を用いた電気化学試験を実施するとともに、改良溶接材料を用いた腐食試験片を作製した(産 総研ほか, 2018)。平成 30 年度は炭素鋼母材を対象とした腐食試験を引き続き実施するとともに、 改良溶接材料による溶接部の品質改善効果を評価した。また、これらの試験結果を取りまとめた。

母材	H28	H29	H30	備考
腐食試験(人工海水)				従来の試験方法を適用
腐食試験(模擬地下水)				既往データとの比較
塩濃度の影響評価				長期的な影響の可能性、など
溶接部	H28	H29	H30	備考
材料手配・溶接試験体の製作	従来材	改良材		鍛造材利用 TIG溶接
腐食試験(電気化学試験)	条件設定	従来材	改良材	例えば、定電位分極法
地下水組成の影響評価	評価方法	検討 従来材	改良材	不均一性、VS. 溶液、材料

図 4.2-1 試験などに関する全体計画

(2) 炭素鋼の腐食挙動

1) 電気化学挙動

炭素鋼オーバーパックの腐食形態は不働態化の有無によって異なることから、緩衝材共存下での炭素鋼の不働態化挙動を評価する必要があり、従来、炭酸塩環境等の不働態化しやすい条件での検討(核燃料サイクル開発機構,1999)が行われてきた。一方、沿岸部で想定される塩水環境での不働態化の臨界pH等のデータが十分とは言えない。そのため、本研究では沿岸部での地下水として海水起源の地下水及びこれと降水起源の地下水が混合した地下水を想定した水溶液を用いてアノード/カソード分極測定を行い、緩衝材中における炭素鋼の不働態化挙動を調査するとともに、分極曲線から浸漬初期における腐食速度を求めた。

試験方法

試験片として溶接構造用圧延鋼材(JISG3106)SM400B(C:0.13,Si:0.20,Mn:1.04,P:0.017,S:0.006 mass%)を用い10 mm×10 mm×2 mmの大きさに加工してリード線を半田付けし、エポキシ樹脂で樹脂埋めした(図 4.2-2)。樹脂埋め後の試験片の試験に供する表面を800番まで湿式研磨した後、バフ研磨(Al₂O₃、粒径0.05 m)で仕上げた。図 4.2-3に示すように、チタン製カラム(外径60 mm、高さ34 mm)に、作製した試験片と緩衝材を模擬したベントナイトとケイ砂の混合体を、油圧プレス装置を用いて充填した。ケイ砂の混合率、乾燥密度は既往の緩衝材仕様(核燃料サイクル開発機構,1999)に準じてそれぞれ30 mass%、1.6 Mg/m³とした。



図 4.2-2 樹脂埋めした試験片の写真



図 4.2-3 試験カラムの模式図

窒素雰囲気のグローブボックス内で、緩衝材と試験片を入れたカラムを、窒素ガスを吹き込ん で脱気した試験溶液に減圧状態で約24時間浸漬させた。次に図4.2・4に示すように試験セルを 組み立て、80℃に加熱後、自然電位にて10mVの振幅、高周波数(1kHz以上)で交流インピー ダンスを測定し液抵抗を推定した。次に-1.2~0V(vs. Ag/AgCl)の範囲で分極測定を行った。 分極測定の走査速度は20mV/minとした。得られた分極曲線は液抵抗補正を行った。試験溶液 には、人工海水(ASTM D1141-98準拠)及び人工海水を蒸留水で10倍に希釈した溶液を用い た。試験溶液のpHはNaOHを使用して8.5、10、12の3種類に調整した。比較のため、全ての 試験ケースについて緩衝材が共存しない条件として溶液単独での試験も行った。溶液単独の人工 海水10倍pH12の条件のみカソード処理(-1.2V vs.Ag/AgCl, 5 min)を行ってから分極測定を 実施した。



図 4.2-4 試験セルの模式図

② 試験結果と考察

人工海水中及び人工海水 10 倍希釈溶液中で測定した分極曲線をそれぞれ図 4.2-5 及び図 4.2-6 に示す。いずれも pH10 までは緩衝材の有無に関わらず不働態化の兆候は見られなかった が、溶液単独系では pH12 で不働態化の兆候と局部腐食発生によると思われる電流密度の立ち上 がりが見られた。一方、緩衝材共存系では不働態化の兆候と考えられる電流密度の低下や局部腐 食発生は確認されず、電流密度の挙動は他の pH 条件とほぼ同様であった。

ベントナイトは pH 緩衝作用によりアルカリ性溶液の浸潤に対して間隙水の pH を低下させる 効果を有すると報告されており(Wieland et.al, 1994)、このベントナイトの pH 緩衝作用が高 pH 条件であっても不働態化が起こらず電流密度の違いも小さなものとなる要因であると考えら れる。実際に一部の条件で pH 試験紙を用いて間隙水の pH を測定した結果、人工海水 10 倍希釈 溶液の場合 pH10 の溶液を浸潤させた際のベントナイト間隙水の pH は約 7.5 であった。また、 緩衝材共存系では溶存ケイ酸塩と鉄イオンの反応や、物質移動が制限されている炭素鋼/緩衝材界 面での鉄イオンの加水分解により炭素鋼試験片 - 緩衝材界面の pH が低下し不働態化が抑制され ている可能性もあるため、今後の検討が必要である。

図 4.2-5、図 4.2-6 に示す分極曲線から Tafel 外挿法を用いて推定した自然電位での腐食速度

を表 4.2-1 に示す。緩衝材の無い溶液単独系では人工海水を希釈することによって腐食速度が 1/20~1/200 程度小さくなるが、緩衝材共存系では溶液を希釈しても腐食速度の変化は小さいこ とがわかった。

以上の結果から、緩衝材共存系では、塩水環境において高 pH 条件でも不働態化しにくいこと、 また、浸漬初期の腐食速度は塩濃度による影響が小さなものである可能性が確認された。



図 4.2-5 人工海水中での分極測定結果



Potential (V vs.Ag/AgCl KCl_{sat.})

図 4.2-6 人工海水 10 倍希釈溶液中での分極測定結果

pH	8.5		1	0	12		
緩衝材	有	無	有	無	有	無	
人工海水	0.29	0.43	0.15	0.44	0.16	018	
10 倍希釈溶液	0.14	0.026	0.16	0.0022	0.22	0.0031	

表 4.2-1 分極曲線から Tafel 外挿法で推定した初期腐食速度(単位:mm/y)

2) 低酸素濃度下での腐食と水素吸収挙動

オーバーパック周辺の溶存酸素が腐食反応や緩衝材中の鉱物等との反応によって消費された後 は地下深部本来の低酸素濃度環境がもたらされ、水の還元反応をカソード反応とした全面腐食が 進展すると想定される。また、発生した水素の一部が金属中に吸収され、その吸収量によっては 水素脆化による破損が生じる可能性がある。よって、沿岸部を想定した地下水条件での低酸素濃 度下における腐食速度と水素吸収挙動を把握することを目的として浸漬試験を実施した。

① 試験方法

炭素鋼試験片には溶接構造用圧延鋼材(JIS G 3106 SM400B)を用いた。組成は1)の試験と 同様である。材料を寸法 30×30×2 mm の大きさに切り出し、表面はエメリー#800 の湿式研磨 にて仕上げた。

試験溶液には人工海水(ASTM D1141-98 準拠)及び、これを 10、100、1,000 倍希釈した溶液を 用いた。試験温度は既往の例(谷口ほか, 2010b; Kobayashi et al., 2011)に準じて 80℃、試験 期間は 365 日間とした。1 条件あたりの試験数(n 数)は n=3 とした。

図 4.2-7 に示すように、チタン製のカラム内に炭素鋼試験片と緩衝材(30wt%ケイ砂混合ベントナイト)を入れ、緩衝材が所定の密度(1.6 Mg/m³)になるように圧縮成形した。試験溶液を窒素雰囲気のグローブボックス中(気相部酸素濃度1ppm以下)で24時間以上ボックス内のガスを試験溶液に通気することにより溶存酸素を除去した。

その溶液と試験片をテフロン製の容器に入れ、これを 80℃に設定した恒温槽内に静置した。 浸漬期間経過後に試験片を取り出し、腐食生成物を除去した後に重量を測定し、試験前後の試験 片重量の差から平均腐食量を算出した。腐食生成物分析用の試験片については取り出し後直ちに X線回折測定用の雰囲気制御セルに入れ、セル内を窒素ガスで置換した後に分析を行った。水素 吸収量については、昇温脱離法により水素抽出曲線を求め、拡散性水素の放出が完了する温度 (約 250℃)以下までの放出水素量として求めた。測定条件を以下に示す。

- ·水素分析:API-MS法
- ・温度範囲:室温~600℃
- ・昇温速度:12℃/min
- ・雰囲気(キャリアガス): Ar



図 4.2-7 試験カラムの模式図

② 試験結果と考察

重量法により得られた平均腐食速度の希釈倍数依存性を図 4.2-8 に、平均腐食量の経時変化 を図 4.2-9 に示す。図 4.2-9 には平均腐食量(Y)を時間(t)に対してべき乗則(Y=At^B A.B: 係数)でフィッティングして得られた近似式も示した。図 4.2-8 より、人工海水(希釈な し)の腐食速度が比較的大きく、希釈倍率が10~1,000ではほぼ同様の値を示した。また、今 回得られた緩衝材中での腐食速度はいずれも溶液単独系よりも大きい。これは既往の結果(谷口 ほか、2010a)と整合する。溶液単独系では平成28年度の結果(産総研ほか、2017)が示すよう に、30日までの試験でも試験片全面に均一な皮膜が形成されており、その保護作用によって腐 食が抑制されたものと考えられる。一方、緩衝材中では平成29年度に報告したとおり90日後 の試験においても素地が一部観察されており、今回得られた365日の試験においても解体時に 皮膜が剥離するなど密着性が小さいため保護性も比較的小さかった可能性がある。既往の長期試 験(谷口ほか, 2010b)においてもベントナイト中で炭素鋼の腐食進展が大きく抑制されるのは 浸漬1年以降とされており、今回取り出した試験の期間は密着性や保護性の高い皮膜が形成さ れる途上段階であった可能性がある。平均腐食速度に及ぼす塩濃度の影響については、人工海水 が最も大きく、10倍以上の希釈では希釈倍数による影響は見られなかった。図 4.2-9 中に示し たべき乗則での近似結果においても皮膜の保護性に関連した値であるB値(値が小さいほど保 護性は大きい)は人工海水でやや大きく、希釈した場合にはほぼ同様の値を示した。したがっ て、現時点までのデータに基づくと緩衝材共存下では10倍以上の希釈によって腐食速度は希釈 しない場合よりもやや小さくなり、希釈倍数が大きくなっても腐食速度への影響は小さいと考え られる。希釈による皮膜の形成挙動と腐食抑制への影響とそのメカニズムについては、今後より 長期データの取得と表面に形成される皮膜組成や性状の変化等を踏まえてより詳細に検討する必 要がある。

③ 水素吸収量

水素抽出曲線の一例を図 4.2-10 に示す。この曲線より約 250℃までに放出された水素量を拡 散性水素とみなし水素濃度を求めた。30、90、365 日間浸漬した試験片の拡散性水素濃度は人 工海水系において得られているデータ(Kobayashi et al., 2011)と同程度であり、脆化が問題 となる濃度(ppm オーダー以上)(Okada, 1977)よりも十分小さいことがわかった。



3) 応力腐食割れ感受性

前述の 1)の結果が示すように、人工海水及び希釈した人工海水では不動態化しにくいことから、活性態・不動態遷移領域における応力腐食割れも生じにくいと考えられる。また、2)の結果が示すように、低酸素濃度下における腐食に伴う水素吸収量は十分小さく、水素脆化による破損が生じることは考えにくい。しかしながら、水素発生領域では水素吸収に伴ってある程度の脆化や機械的特性の変化が生じ、割れ感受性を示す可能性がある。よって沿岸部を想定した地下水条件での水素発生領域における割れ感受性を把握することを目的として、比較的厳しい応力条件で迅速に割れ感受性を評価することが可能な方法として広く用いられている低歪速度法(SSRT: Slow Strain Rate Technique)による応力腐食割れ試験を実施した。

① 試験方法

炭素鋼試験片には溶接構造用圧延鋼材(JISG 3106)SM400Bを用いた(C:014, Si:0.21, Mn:1.11, P:0.016, S:0.004 mass%)。材料を図 4.2-11の形状・寸法に切り出し、表面はエメリ ー#800の湿式研磨にて仕上げた。試験は溶液単独系のほか、図 4.2-12に示すようにゲージ部 に緩衝材の充填されたカラムを取り付けることにより緩衝材共存系でも実施した。緩衝材はチタ ン製のカラム内に炭素鋼試験片と緩衝材(30wt%ケイ砂混合ベントナイト)を入れ、緩衝材が 所定の密度(1.6 Mg/m³)になるように圧縮成形した。

試験溶液には人工海水(ASTM D1141-98 準拠)及び、これを 100 倍希釈した溶液を用いた。なお、比較のため不活性環境での試験として、シリコーンオイル中での試験も実施した。 温度は 1)及び 2)の試験と同様に 80℃とした。

試験片を試験溶液に浸漬させたのち、所定の電位条件で SSRT:試験を行った。電位は自然電位 Ecorr 及び自然電位より約 100~ 200mV 卑な電位を目安に設定した。試験条件を表 4.2・2 に示 す。歪速度は既往の炭酸塩環境での試験(Mitsui et. al, 2008)と同様に 8.3×10⁻⁷/s とした。



図 4.2-11 SSRT 試験片の形状・寸法



図 4.2-12 緩衝材共存下での SSRT 試験用カラムの模式図

2 試験結果と考察

応力・歪み線図の一例を図 4.2-13 に示す。この図より最大応力と破断歪みを求め、シコーンオイル中での値との比として算出した。その結果を図 4.2-14 と図 4.2-15 に示す。また、試験片の破面の面積から絞り(R.A.)を以下の式により求め、シリコーンオイル中での絞り値(R.A.oi)との比として算出した。その結果を図 4.2-16 に示す。

R.A. = $1 \cdot S_1 / S_0$

S1: 試験後の破面の面積

So: 試験前の平行部断面積

これらの値のうち、破断歪みや絞りは材料の延性に関連した指標であり、これらの値が小さい ほど脆性的な材料特性を示し、脆化の程度や脆化による割れ感受性を簡易的に評価可能と考えら れる。例えば漆原ほか(2002)は、水素脆化による鉄鋼材料の遅れ破壊感受性を非腐食性環境 での破断伸びとの比を用いて迅速的に評価している。図 4.2-14 より、最大応力はいずれの条件 でもシリコーンオイル中での値からほとんど低下していないが、破断歪みは図 4.2-15 に示すよ うに低下しており、溶液単独系では人工海水のほうが 100 倍希釈人工海水よりも大きく低下す る傾向があった。一方、緩衝材共存系では人工海水、100 倍希釈人工海水ともに 0.8 程度まで低 下したが、希釈倍数による違いはほとんど見られなかった。絞りについては、溶液単独系では人 工海水のほうが絞り比は低下していた。緩衝材共存系でも全体的に人工海水での値のほうが小さ いが、電位によって大きくばらついており、溶液単独系に比較して違いは明瞭ではなかった。

次に、試験後の試験片の SEM 観察結果の代表例を図 4.2-17 に示す。破面には水素脆性による破面で特徴的な擬へき開破面が認められており、側面には亀裂が観察された。したがって、図 4.2-15 や図 4.2-16 に見られた破断歪みと絞り比の低下は水素脆化を反映したものと考えられる。

試験溶液	緩衝材	電位(mV vs. SCE)
シリコーンオイル	無し	-
人工海水	無し	自然電位, -800, -900, -1000
	有り	自然電位, -800, -900, -1000
100 倍希釈人工海水	無し	自然電位, -600, -700, -800, -900
	有り	自然電位, -700, -800, -900, -1000

表 4.2-2 応力腐食割れ試験条件







図 4.2-14 最大応力比の電位依存性(左:溶液単独、右:緩衝材共存)





図 4.2-17 試験後試験片の SEM 観察結果例 (人工海水 緩衝材共存系 -800mV vs SCE)

4) まとめと今後の課題

人工海水及び希釈した人工海水を用いて炭素鋼の腐食試験を実施し結果、以下のことが確認された。

- 溶液単独系では不動態化するような高 pH 条件でも緩衝材共存系では、不働態化しにくい。よって、沿岸部を想定した処分においても従来の評価と同様に全面腐食が炭素鋼オーバーパックの主要な腐食形態であると考えられる。今後はより幅広い地下水組成を想定したデータの拡充と、緩衝材共存下での不動態化抑制のメカニズムや不動態化挙動評価の妥当性、信頼性の向上が課題として挙げられる。
- ・緩衝材共存下では、低酸素濃度下での腐食速度は塩濃度による影響が緩和され、既往の腐食量 評価が沿岸部を想定した条件にも適用可能である見通しが得られた。また、緩衝材中の水素吸 収量についても希釈倍数による影響は見られず、水素脆化が問題となる濃度よりも十分小さい ことが確認された。ただし、水素発生電位では低歪み速度法による試験において水素脆化によ る割れ感受性を示した。人工海水の希釈によって割れ感受性は低下する傾向が認められたが、 緩衝材共存系では溶液単独系に比較して違いは明瞭ではなかった。
- ・今後は長期試験等のデータ拡充と、塩濃度による皮膜の形成挙動や腐食抑制・水素吸収への影響とそのメカニズム等に関する詳細な検討が課題として挙げられる。

(3) 溶接部の腐食挙動

オーバーパックの候補材料である炭素鋼については、これまでに種々の地下環境における水質 を想定した試験が実施され、地層処分環境での腐食に係る知見の拡充が進められている。例えば、 オーバーパックの溶接封入部の腐食挙動についても、オーバーパックの封入技術の整備の一環と して、溶接試験体に対する同様の腐食試験が実施され、溶接部は母材と同等の耐食性を有してい ることが確認されている(原環センター,2013)。一方、酸化性雰囲気における人工海水中での浸 漬試験では、TIG (Tungusten Inert Gas)溶接や MAG (Metal Active Gas)溶接といったアー ク溶接部において、溶接金属部の選択的な腐食の発生が確認されたが、Ni を添加した溶接材料を 使用することで選択的な腐食の発生を抑制する効果が確認された(原環センター,2010)。

沿岸部における炭素鋼の腐食挙動に影響を及ぼす地下水中の化学成分を整理し、腐食を加速さ せる化学成分として、塩化物イオン(Cl)、腐食に対して保護的に作用(不働態化)する化学成分 として、重炭酸イオン(HCO₃-)を抽出した(産総研ほか,2016)。これら2種の溶液組成が炭素 鋼溶接部の腐食の均一性に与える影響、及び溶接部の品質改善手法である Ni 添加の溶接材料の 適用範囲について調査した。

1) 試験方法

① 溶液条件の設定

沿岸部における炭素鋼の腐食挙動に影響を及ぼす地下水中の化学成分を調査した結果、腐食を 加速させる化学成分として、塩化物イオン(Cl)及び硫酸イオン(SO4²)が挙げられた。また、 腐食に対して保護的に作用(不働態化)する化学成分として、重炭酸イオン(HCO3)が挙げら れた。わが国で想定される代表的な地下水と緩衝材の化学平衡計算の結果から、緩衝材の化学的 緩衝作用により、SO4²は地下水の2桁程度低下することが報告されている(油井・笹本,1999; 小田ほか,1999)。そのため、沿岸部の地下水成分として考慮すべき重要な化学成分として Cl 及 び HCO3 を抽出し試験マトリクスを設定した。試験溶液の濃度範囲は、わが国で想定される地下 水組成の幅を網羅した範囲で設定した。また、HCO3 濃度の上限は、炭素鋼の不働態化領域を見 極めるために、想定される地下水条件よりも広い範囲を設定した。 表 4.2-3 に溶液組成の組合わせを示す。試験溶液は蒸留水に NaCl と NaHCO₃ を加えること で調整した。

溶液	アノード分極試験(脱気)				定電	電位			
番号.	NaCl	NaHCO ₃	HCl	Na_2CO_3	pH	NaCl	NaHCO ₃	[Cl ⁻]/[HCO ₃ ⁻]	mVsce
1	6×10^{-4}	1.6×10^{-4}	9.8×10^{-6}		7.6	6×10^{-4}	2×10^{-4}	3	-150
2	6×10^{-4}	2.4×10^{-3}		4.6×10^{-5}	8.9	6×10^{-4}	2.5×10^{-3}	2×10^{-1}	-150
3	6×10^{-4}	2.0×10^{-2}		4.2×10^{-3}	9.5	6×10^{-4}	2.5×10^{-2}	2×10^{-2}	-150
4	2.8×10^{-2}	1.6×10^{-4}	1.0×10^{-5}		6.9	2.8×10^{-2}	2×10^{-4}	2×10^{2}	-560
5	2.8×10^{-2}	2.4×10^{-3}		2.4×10^{-5}	8.7	2.8×10^{-2}	2.5×10^{-3}	1.1×10^{1}	-560
6	2.8×10^{-2}	2.0×10^{-2}		2.0×10^{-2}	9.4	2.8×10^{-2}	2.5×10^{-2}	1.1	-400
7	5.4×10^{-1}	1.6×10^{-4}	8.4×10 ⁻⁶	1.6×10^{-4}	7.0	5.4×10^{-1}	2×10^{-4}	3×10^{3}	-630
8	5.4×10^{-1}	2.4×10^{-3}		2.4×10^{-3}	8.4	5.4×10^{-1}	2.5×10^{-3}	2.2×10^{2}	-630
9	5.4×10^{-1}	1.9×10^{-2}		1.9×10^{-2}	9.0	5.4×10^{-1}	2.5×10^{-2}	2.2×10^{1}	-485

表 4.2-3 腐食試験の溶液条件(単位:mV_{SCE})

溶接試験体の作成

炭素鋼の母材は、既往研究(原環センター,2013)との整合性を考慮して、炭素鋼鍛鋼材SF340A、 溶接方法はTIGを選択した。溶接条件は予備試験で設定し、改良材と従来材で統一した。炭素鋼 アーク溶接部で発生した選択的な腐食に対するNiを添加した改良溶接材料を用いた溶接試験体 を作製した「以下(改良材)という」(産総研ほか,2018)。改善効果評価の比較対象として、市販 の溶接材料(YGW17)を用いた溶接試験体を作製した「以下(従来材)という」(産総研ほか,2017)。 作製した溶接試験体に対して放射線透過試験(RT)を実施し、溶接欠陥が存在しない領域から図 4.2-19 のように腐食試験片を切り出し、試験片表面に欠陥が存在しないことを目視で確認した。 試験片の化学成分の分析結果を表 4.2-4 に示す。



図 4.2-18 従来材(上)と改良材(下)の溶接試験体の外観と断面マクロ観察



図 4.2-19 溶接試験体からの試験片採取位置

	部位	с	Si	Mn	Ρ	S	Cu	Ni	Cr	Мо	V
	規格値	<0.60	0.15~	0.30~	< 0.030	< 0.025					
母材	JIS G 3201	≡0.00	0.05	1.20	≣0.000	≣0.000					
	実績	0.10	0.18	0.42	0.011	0.017	0.13	0.09	0.12	0.02	<0.01
従来材	溶接材料	0.07	0.23	1.12	0.013	0.015	0.32		_		_
	溶接金属	0.083	0.21	0.89	0.011	0.018	0.19	0.04	0.05	<0.01	<0.01
改良材	溶接材料	0.082	0.23	1.08	0.004	0.0025	0.24	0.31	<0.010	<0.010	<0.002
	溶接金属	0.08	0.22	0.93	0.008	0.007	0.20	0.24	0.04	<0.01	<0.01

表 4.2-4 改良材の化学成分の分析結果(wt%)

同電位分極試験では、母材と溶接部にそれぞれ 5×40 mm、定電位分極試験では、溶接部を中心 に 40×40mm を残してシリコン樹脂等でマスキングした。



③ 保持電位の設定

定電位分極の電位を自然電位より貴な -630 mVscEに固定したが、電位保持中に表面被膜の生成で自然電位が貴にシフトし、-630 mVscEではアノード側の過電圧が維持できない状態となる溶液があった。そこで各溶液で同電位分極を行い、溶液ごとに保持電位を設定した。N2で脱気した溶液を 80 °C に昇温し、走査速度 5 mV/min で 0 mVscE までアノード分極を行った。カソード分極は母材試験片を使用し、NaCl 濃度を固定し、NaHCO3 を変えた溶液 No.1, 2, 3 で同様に取得した。得られた分極曲線から、母材と溶接部の電流密度に差が生じる条件を保持電位として設定した。表 4.2-3 に各溶液で設定した保持電位を合わせて示す。

④ 定電位分極による溶接部の選択的な腐食の再現

定電位保持試験装置の構成を図 4.2-21 に示す。試験は恒温槽中にて温度保持したガラス容器 に腐食試験片を設置し、試験中に試験液の気相部に空気を吹き込んで実施した。溶液温度を 80℃ に加温して試験片を浸漬し、80 分後の電位を浸漬前の電位として記録した。その後、 ③の結果 から設定した電位に設定し、100 時間の定電位分極を行なった。100 時間経過後に分極を停止し し、10 分後及び 30 分後に電位を計測して平均した値を試験後の浸漬電位とした。また、試験後 に脱スケール処理を実施し、試験片の減肉形状を三次元形状測定器で計測した。



図 4.2-21 定電位保持試験装置外観写真

2) 試験結果と考察

溶液種の影響

各溶液に対して設定した保持電位にて、80℃に加温した溶液中での100 Hr の定電位分極を実施した。

(a) 腐食形態

改良材について、試験後の試験片表面の外観観察の結果、9 種類の溶液で実施した今回の試験 における腐食形態は下記の3つの領域に分類することができる。図4.2-22 に腐食形態と溶液組 成の関係を示す。

領域A:母材と溶接部に全面腐食が発生する溶液条件

設定した試験溶液範囲において、HCO3 濃度が低く、CI 濃度が高いような条件である。母材、溶接部ともに全面腐食が生じた。

領域B:母材と溶接部で局部的な減肉が発生する溶液条件

HCO3·濃度が高い、または Cl·濃度が低い試験溶液範囲においては、母材と溶接部の全面に わたって、局部的な減肉が発生した。

領域C:腐食が極端に生じない溶液条件

HCOs:濃度が高く、かつ Cl-濃度が低い条件となる溶液 3 では、同電位分極曲線から設定 した電位条件であるにも関わらず、顕著な減肉が確認されなかった。定電位保持の間に試験 片表面が不働態化したと考えられる。

(b) 腐食電位

溶液中の Cl-濃度が高い、または HCO₃-濃度が低いほど、腐食電位が低下する傾向がみられた。 図 4.2-23 定電位分極前の腐食電位が-600 mVscEよりも高くなる環境では試験片は不働態化する 傾向を示し、分極後に局部的な減肉が発生した。



図 4.2-22 腐食形態と水質の関係



図 4.2-23 腐食電位と溶液組成の関係

② 改良溶接材料の品質改善効果の評価

Ni を添加した改良溶接材料による溶接部の品質改善効果を評価した。定電位分極後の試験片の 腐食生成物を除去した後、レーザー式三次元計測装置にて試験片表面の形状計測を実施した。計 測ピッチは 250 μm とし、マスキングにより存置した初期表面部分を基準点として試験前後の 減肉深さを取得した。計測で取得した試験後の減肉形状の三次元形状測定結果から、溶接部の選 択腐食の程度を Grooving Factor α (=溶接部の最大深さ/全体の平均深さ)を算出し、従来材と 比較した。

(a) 各溶液、試験片における Grooving factor

図 4.2-24 に各溶液における従来材と改良材の Grooving factor αを示す。容器 3 は腐食量がご く僅かで、αが算出出来なかった。また、溶液 7 と溶液 8 については、本年度新たに設定した保 持電位が平成 29 昨年度と同一のため参考としてΔで記載した。



図 4.2-24 溶液組成による溶接部の選択的な腐食の度合い(○:従来材、●:改良材)

算出した Grooving factor α について、[Cl⁻]と[HCO₃⁻] (腐食促進イオン Cl⁻の存在比率) でプロ ットしたものを図 4.2-25 に示す。改良材の Grooving factor を α_1 、従来材の Grooving factor を α_0 とする。[Cl⁻]/[HCO₃⁻]が 10 以上の全面腐食発生領域において、市販溶接材の α_0 は[Cl⁻]/[HCO₃⁻] の増加に伴い溶接部の腐食深さが深くなり \Box_0 が増大する傾向を示した。改良溶接材の α_1 は約 1 を示しており、[Cl⁻]/[HCO₃⁻]とともに Grooving Factor の低減幅も大きくなっている。



図 4.2-25 Grooving factor と水質の関係

(b) 改良材の品質改善効果

改良材の溶接部の選択腐食の改善効果の評価を、従来材との比較により行った。従来材、改良 材それぞれの試験片から求めた Grooving factor を用いて、以下の式により求めた。

改善効果 = α_0 / α_1

改善効果について、[Cl-]と[HCO3-]の比率で纏めたものを図 4.2-26 に示す。[Cl-]/[HCO₃:]が 10 以上の全面腐食発生領域において、 α_0/α_I が1より大きくなる傾向が認められた。この領域では 図 4.2-25 に示すように[Cl-]/[HCO₃:]が大きくなるに従い従来材の α_0 は増大するが、改良材の α_I は1以下で推移するためである。これは、炭素鋼の腐食に対し加速する効果を有する Cl-が有意に 作用する領域では、溶接部の選択的な腐食に対する Ni 添加の改良材の品質改善の効果が顕著に なることを意味する。



図 4.2-26 Grooving factor α と溶液組成の関係

3) まとめ

沿岸海底下の環境における炭素鋼の腐食挙動に影響を与える重要な化学種として Cl と HCO₃· を 抽 出 し た 。 そ れ ぞ れ の 濃 度 を パ ラ メ ー タ – と し て [Cl-]=6.0x10⁻⁴~5.4x10⁻¹mol/L 、 [HCO₃·]=2.0x10⁻⁴~2.5x10⁻²mol/L の範囲で 9 つの溶液を設定し、化学種の濃度比率が溶接部の腐 食挙動に与える影響を調査した。また、溶接部の選択的な腐食に対する改善手法の適用範囲を確 認するため、従来溶接材料、Ni 添加の改良溶接材で製作した溶接試験体を使用した。

・溶液組成の影響

溶液ごとに設置した保持電位にて 100 hr の定電位分極を実施し、溶液組成に対する溶接部の腐食形態を調査した。[Cl·]/[HCO₃·]≧10 では、母材・溶接部ともに全面腐食、[Cl·]/[HCO₃·]≧10 では、母材・溶接部ともに全面腐食、[Cl·]/[HCO₃·]≧0.2 では母材・ 溶接部ともに局部的な減肉が発生し、HCO₃·濃度が高く Cl·濃度が低い[Cl·]/[HCO₃·]<0.02(溶液3)の環境では、設定した保持電位では減肉が認められなかった。

・溶接部の選択的な腐食の程度

溶接部の選択的な腐食の程度を評価する指標として、Grooving factor α を用いた。各溶液条件での定電位分極試験後の三次元形状計測結果から求めた深さプロファイルより (を算出した。 母材の腐食深さを基準とした場合、 $\alpha \leq 1$ で溶接部の耐食性が母材と同等以上と評価される。従来材の α_0 は溶液組成に因るが 0.8~1.4 となった。一方、改良材の α_I は溶液組成に因るが 0.6~1.1 となった。

・改良材の改善効果

改良材の α_I と従来材の α_0 を比較し、改良材の改善効果を評価した。減肉が認められなかった溶液 3 を除き、 α_I が α_0 を下回る傾向が確認されたことから、本試験で設定した溶液の範囲においても Ni 添加による選択腐食の改善手法は有効であると言える。

参考文献

- 原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 22 年度処分システム工学要素技術高度化開発 報告書(第2分冊)人工バリア品質評価技術の開発(オーバーパック),2010.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 24 年度処分システム工学要素技術高度化開発 平 成 19 年度~平成 24 年度の取りまとめ報告書, 2013.
- 核燃料サイクル開発機構:わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性,地層 処分研究開発第2次取りまとめ,分冊2, JNC TN1400 99-022, 1999.
- Kobayashi, M., Yokoyama, Y., Takahashi, R., Asano, H., Taniguchi, N. and Naito, M., Long term integrity of overpack closure weld for HLW geological disposal Part 2- corrosion properties under anaerobic conditions, Corrosion Engineering, Science and Technology, vol.46, 2, pp.212-216, 2011.
- Mitsui, H., Takahashi, R., Asano, H., Taniguchi, N. and Yui, M.: Susceptibility to Stress Corrosion Cracking for Low-Carbon Steel Welds in Carbonate-Bicarbonate Solution, Corrosion, Vol. 64, No.12, pp.939-948, 2008.
- Okada, H.: Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Cracking of Structural Steels, Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys; Unieux-Firminy; France; 12-16 June 1973. pp. 124-134, 1977.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成28年度地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書,2018.
- 谷口直樹,山口真,内藤守正,人工海水中における炭素鋼の腐食挙動に及ぼすy線照射の影響,第 57回材料と環境討論会講演集,pp.107-110,2010a.
- 谷口直樹,川崎学,内藤守正:低酸素濃度下での模擬地下水の飽和した圧縮ベントナイト中にお ける炭素鋼の腐食挙動,材料と環境 Vol.59, pp.418-429, 2010b.
- Wieland, E., Wanner, H., Albinsson, Y., Wersin, P. and Karland, O. : A Surface Chemical Model of the Bentonite-Water Interface and its Implications for Modelling the Near Field Chemistry in a Repository for Spent Fuel, SKB Technical Report 94-26, 1994.

4.2.2 緩衝材

(1) 背景と目的

これまでに緩衝材の性能や特性に関する多くの検討がなされ、知見やデータの蓄積が進められ ている。しかし、緩衝材の膨潤や透水性などの特性把握に係る多くの研究や試験では、できるだ けシンプルな系での検討を行うため、緩衝材を飽和させるための液相には蒸留水を用いており、 実際の処分場における原位置での地下水化学環境を念頭に置いた試験例は少ない。また、イオン が影響する試験としては、イオン強度の影響を見るために NaCl のみを溶存成分と使われている 例が多く、その他にはセメントから溶脱するイオンとしてカルシウム、カリウムが取り上げられ、 CaCl₂, KCl 溶液を用いた試験が行われてきた。それらの先行研究から、蒸留水とイオン強度を持 つ溶液とでは、ベントナイトの膨潤挙動に差異はあるものの、緩衝材の性能を発揮できなくなる ほどの影響が生じることはないという知見が得られている(核燃料サイクル開発機構,1999)。一 方で、イオンを含む溶液での試験データは十分とは言えず、また、沿岸部で想定される海水系の 地下水を対象とした試験も少ない。沿岸部での処分場を考える場合、緩衝材の健全性(性能発揮) に関する不確実性の低減に向けて、海水組成を念頭に置いた溶存イオンの影響に関するデータの 拡充が必要である。

本業務では、これまでに実施された試験で得られた知見やデータを踏まえ、沿岸部の地下で想 定される地下水の化学成分に着目した試験を行い、緩衝材の健全性に関する知見やデータの拡充 を行った。

(2) 塩水環境下における緩衝材のせん断特性

1) 圧密非排水三軸試験

沿岸部を対象とした際の緩衝材の基本特性に関する既存の研究として、幌延深地層研究センタ ーで採水された 0.18M(海水の約 1/3)の塩化物イオンを含む実地下水(以下、幌延地下水)や 人工海水を用いた透水試験、熱物性試験、膨潤圧試験、標準圧密試験、圧密非排水三軸試験、一 軸圧縮試験、侵入試験、浸食試験が実施されている(菊池・棚井,2005;松本・棚井,2004;松本・ 棚井,2005;松本・藤田,2011)。せん断特性に関しては、海水系地下水を用いた圧密非排水三軸 試験が実施されている(菊池・棚井、2005)ものの、試験溶液とせん断特性との明確な相関関係 を明らかにするのに必要な試験データは十分には取得されていない。そのため、圧密非排水三軸 試験データを拡充し、塩水環境下における緩衝材のせん断特性を明らかにする必要がある。また、 沿岸部を対象とした緩衝材の力学挙動を解析する際に使用する弾塑性構成モデルとして Camclay モデル(Roscoe et al., 1963)や修正 Cam-clay モデル(Roscoe et al., 1968)などが候補と して考えられるが、塩水環境下での圧密非排水三軸試験データを拡充することで、塩水環境下で のこれらのモデルのパラメータを設定することが可能となる。本検討では、人工海水及び NaCl 溶液(イオン強度:0.2mol/l、0.8mol/l)を用いた圧密非排水三軸試験を実施し、塩水環境下にお ける緩衝材のせん断特性に関する試験データを拡充した。さらに、得られた圧密非排水三軸圧縮 試験のデータ及び、菊池・棚井(2005)が実施した標準圧密試験データを対象とした再現解析に より、修正 Cam-clay モデルを用いた場合の塩水環境におけるベントナイト緩衝材のパラメータ の設定を行った。

表 4.2-5 に実施した試験条件をまとめる。供試体は、クニゲルV1、3 号ケイ砂、5 号ケイ砂を 質量比 7:1.5:1.5 で混合した材料とし、初期乾燥密度は 1.6 Mg/m³とした。

学校这次	有効拘束圧	試験数	供試体	実施年度
武映俗攸	[MPa]	[回]	NO.	
人工海水	1	1	NO.1	H29
人工海水	2	2	NO.2,3	H29, H30
人工海水	3	2	NO.4,5	H29, H30
NaCl (0.2 eq/L)	3	1	NO.6	H30
NaCl (0.8 eq/L)	3	1	NO.7	H30

表 4.2-5 人工海水の組成

2) 圧密非排水三軸試験結果

図 4.2-27 に本研究において新たに取得した人工海水のせん断中の有効応力経路を示す。図中 には、既往の研究で得られている蒸留水の結果(高治・鈴木, 1999)と幌延地下水の結果(高治 ほか, 2004)も示している。人工海水を用いた場合の有効応力経路は、軸差応力の増加に伴い、 平均有効応力が減少していき、限界応力状態に至っているのがわかる。限界応力比は、塩水環境 においても、蒸留水を用いた場合の値である 0.63 を用いれば評価できることがわかる。また、せ ん断中の有効応力経路は試験溶液条件によって明確な違いは見られない。図 4.2-28 に軸差応力 と軸ひずみ関係を示す。軸差応力と軸ひずみ関係においても、試験溶液条件によって明確な違い は見られないことがわかる。









(c) 初期拘束圧 3MPa 図 4.2-28 応力-ひずみ関係

3) 弾塑性パラメータの設定

前述の圧密非排水三軸圧縮試験及び標準圧密試験(菊池・棚井、2005)の再現解析により、塩 水環境における緩衝材の弾塑性パラメータを設定した。本検討では、設定すべきパラメータの数 が少なく、既往の緩衝材の力学解析において適用実績 (例えば、日本原子力研究開発機構,2015) のある修正 Cam-clay モデルを用いた。設定するパラメータは圧縮指数、膨潤指数、限界応力比、 ポアソン比である。図 4.2-29 にパラメータの設定フローを示す。蒸留水条件におけるパラメー タを決定した後、塩水条件でのパラメータを決定した。蒸留水条件におけるパラメータ設定にお いては、まず標準圧密試験結果から正規圧密線の設定を行った後、圧密非排水三軸圧縮試験の結 果から限界応力比を設定した。本検討では限界応力比は0.63とした。続いて、圧密非排水三軸圧 縮試験の正規圧密状態での有効応力経路の再現解析により膨潤指数を決定した。ポアソン比につ いては、圧密非排水三軸圧縮試験の軸差応力と軸ひずみの再現解析により決定した。最後に、標 準圧密試験の再現解析を行うことにより、パラメータ設定の妥当性確認及びパラメータの微調整 を実施した。蒸留水条件でのパラメータ設定が完了した後、塩水条件におけるパラメータを設定 した。塩水条件におけるパラメータの設定においては、前述の三軸圧縮試験の結果及び標準圧密 試験(菊池・棚井、2005)の結果から、圧縮指数と限界応力比は塩水環境ではほとんど変化しな いと考えられるため、蒸留水のパラメータのうち、膨潤指数のみを変化させることとした。塩水 条件における膨潤指数は、標準圧密試験及び圧密非排水三軸圧縮試験の再現解析により決定した。



図 4.2-29 パラメータの設定フロー

図 4.2-29 のフローによって設定されたパラメータを表 4.2-6 に示す。

	蒸留水	NaCl 溶液	幌延地下水	人工海水	NaCl 溶液		
当量イオン濃度 c (eq/L)	0	0.2	0.21	0.64	0.8		
膨潤指数 κ	0.09	0.07	0.07	0.065	0.05		
圧縮指数 λ	0.125						
限界応力比 M	0.63						
ポアソン比 v	0.1						
圧密降伏応力 p_0 (MPa)	$p_0 = \exp((0.62 - e_0 - \kappa \ln p'_i)/(\lambda - \kappa))$						
	p'i:初期平均有効応力(=膨潤圧)						

表 4.2-6 設定された修正 Cam-clay モデルのパラメータ

最後に、各ケースで設定した膨潤指数を当量イオン濃度で整理した結果を図 4.2-30 に示す。 当量イオン濃度の増加に伴い、膨潤指数は低下しているのがわかる。様々な濃度条件におけるベ ントナイト緩衝材のパラメータ設定を可能とするために、膨潤指数 ĸ と当量イオン濃度 c の関係 式を設定した。関係式の設定においては、c=0 において ĸ=0.09 となること、常に к>0 となるこ とを考慮して以下のように設定した。

 $\kappa = 0.09\xi_{\kappa}$

(式 4.2.2-1)

 $\xi_{\kappa} = \left\{ a_{\kappa} + \frac{(1-a_{\kappa})}{(1+b_{\kappa}c)} \right\} \qquad (\pm 4.2.2-2)$

ここで、 $\zeta_{\mathbf{x}}$:塩水環境における膨潤指数の低下を表現する関数、 $a_{\mathbf{x}}$ 、 $b_{\mathbf{x}}$:フィッティングパラメータである。 $a_{\mathbf{x}}$ は濃度が上昇した時の \mathbf{x} の下限値を決定するパラメータであり、 $b_{\mathbf{x}}$ は曲線の形状を決めるパラメータとなる。本検討では、最小二乗法により、

 $a_{\kappa} = 0.4759$ (式 4.2.2-3)

 $b_{\kappa} = 3.3315$

(式 4.2.2-4)

と設定した。図 4.2-30 に設定した関数を示す。



図 4.2-30 膨潤指数と当量イオン濃度関係

4) まとめ

本検討では、人工海水及び NaCl 溶液(当量イオン濃度 *c*=0.2、0.8eq/L)を用いた圧密非排水 三軸圧縮試験を実施した。その結果、限界応力比は塩水環境においても蒸留水と同じ値を用いて 評価できること、せん断中の有効応力経路は試験溶液条件による明確な違いは見られないことが 明らかとなった。さらに、得られた圧密非排水三軸圧縮試験の結果及び、菊池・棚井(2005) が実施した標準圧密試験の結果に対する再現解析により、修正 Cam-clay モデルを用いた場合の 塩水環境におけるベントナイト緩衝材のパラメータの設定を行った。さらに、膨潤指数を当量イ オン濃度の関数で整理することで、様々な濃度条件におけるパラメータ設定が可能となった。今 後は、より塩濃度の高い条件や低乾燥密度・高乾燥密度条件での試験データや、弾塑性パラメー タのイオン種依存性を検討するための試験データを拡充していくことで、実際のサイトの地質環 境条件等をより適切に反映した処分施設の力学的な状態変遷の評価が可能となってくると考えら れる。

(3) 塩水環境下における操業から再冠水に至る緩衝材の短期的挙動

1) 沿岸部で想定される塩水系地下水を考慮した場合の緩衝材の挙動

① 着目すべき現象の整理

既往の研究(核燃料サイクル開発機構,1999)において、塩水は、ある程度高い密度の緩衝材の膨潤性能や透水性に対して大きな影響を与えないと報告されている。しかし、塩水系地下水環境における検討例は多くなく、かつ再冠水後の密度は均一であることを前提として長期の挙動予測や安全評価が行われている。

これに対して緩衝材の製造・施工過程と定置後の再冠水過程における浸潤・膨潤の結果として、 緩衝材内部に密度分布(密度差)が発生する可能性が指摘されており、再冠水時の挙動に着目し た地下水浸潤後の緩衝材の状態予測のモデル開発に向けた試験や検討が進められている(原環セ ンター, 2015)。

本業務においては、既往の蒸留水を主とした研究成果を活用することを前提とし、緩衝材が塩 水系地下水によって再冠水していく過程での、膨潤や浸潤の挙動を既往の成果との比較をするこ とによって、塩水の影響を検討することを方針とし、多様な地下水組成にも適用できる解析手法 の構築のための検証データとして、反映することを目的として、海水系地下水を対象とした再冠 水過程に関する試験や検討を進め知見やデータの拡充を行う。

これまで行われた研究では、蒸留水を使った再冠水挙動を把握する為の試験を比較対象として、 NaCl を単成分とする水溶液を使用した試験が主に行なわれ、浸潤挙動(速度)や緩衝材の残留 密度差並びに緩衝材流出現象に関して、イオン強度の違いによる影響が確認されている(原環セ ンター,2015)。また、緩衝材の化学的な変遷挙動に関して、再冠水プロセスにおいて考慮すべき ものとしてイオン交換反応に着目して、セメントからの溶脱成分である Ca によるイオン交換に ついての検討が進められている(原環センター,2015;2018)。以上を踏まえて本業務で取り組む べき課題を抽出し、その評価対象と優先順位を表 4.2-7 のように整理した(産総研ほか,2016)。

この整理を基に、再冠水過程における海水中に含まれる成分とその濃度、イオン強度、さらに はイオン種が及ぼす影響に関する知見やデータの拡充に向けて、平成 27 年度から着手した本業 務では、以下の再冠水挙動についてのデータ拡充に取り組むこととした。

・緩衝材の膨潤挙動(浸潤速度、二次元の浸潤挙動、残留密度分布)

・緩衝材の流出挙動

					-	-		
影響事	亚伍哥伊	影郷田乙	既往の研究における	沿岸部での性能評価に向けた データの追加・拡充の必要性***				
象	評価対象 影響因子 残留密度 分布 施工品質 (密度分 布) 応力履歴 二次元浸潤 試験 膨潤圧・ 透水係数 陽イオン交 換・可逆性 浸潤速度 地下水組成 緩衝材 小相模試驗	対する影響度など	NaCl*	CaCl_{2}^{st}	海水系	イオン 種		
	残留密度 分布 上 一 一 一 一 一	施工品質 (密度分 布)	液種によって残留 密 度差が大きくなる。	既*	Ca 型 要検討	0	Δ	
		応力履歴	密度差が発生するが、 履歴の差は 小さい	既*	Ca 型 要検討	Δ	_	
膨潤 性能		二次元浸潤 試験	液種によって 残留密 度差が大きくなる	既*	—	0	Δ	
11記 膨潤圧・ 透水係数	陽イオン交 換・可逆性	 膨潤圧に差が生じる が透水係数への影響 は小さい 	Δ	既*	Δ	Δ		
	・浸潤速度	地下水組成	液種により飽和度分 布の幅が 異なる 液種により浸潤速度 が 異なる	· 既*	0	0	_	
流出 挙動	緩衝材 流出量	小規模試験	液種により流出量、水 みちの形状が 異なる	既*	既*	0	0	
		人工注水 効果	イオン強度が高いと 効果が 低い 。	既*	既*	幌延地 下水	_	

表 4.2-7 沿岸部特有の条件を念頭にした場合に拡充すべき知見やデータ

*:イオン強度 0.5

***既:既往のデータあり。○:本フェーズで実施したもの。 △:本フェーズの結果を踏まえて今後実施することが望ましい項目

② 得られた成果の概要

(a) 膨潤挙動に及ぼす塩水系地下水の影響

再冠水過程における緩衝材の膨潤挙動を知るためには、不飽和な緩衝材が飽和に至る過程を考 慮した浸潤過程と膨潤性能(膨潤圧、膨潤率等)の把握が必要である。浸潤が進むことにより、 膨潤性能が発現し、飽和するに至って緩衝材の持つ膨潤性能が得られるためである。そのため、 膨潤挙動に関しては、定置後の緩衝材の浸潤挙動に関する試験と、施工時の密度分布が膨潤によ り均質化する挙動についてのモデル試験を行った。それぞれについて、人工海水、1/2 濃度の人工 海水(1/2人工海水と呼ぶ)、あるいはセメントからの溶脱による Ca 濃度が高くなった場合を想 定した、CaCl2 水溶液を対象とした試験を行い、イオン種の影響とイオン強度に関するデータ取 得を行った。浸潤挙動に関しては、一次元と見なせる試験系によって、緩衝材への浸潤速度を測 定し、二次元系の試験では、ペレット状のベントナイトとブロック成形したベントナイトの両方 が同時に浸潤する過程での膨潤圧、密度変化を測定した。どちらの試験も塩水環境を考慮した、 再冠水過程、及び再冠水後の緩衝材の密度分布を予測するための解析の検証データとして用いる ことができると考える。

● 一次元浸潤試験

一次元浸潤試験においては、人工海水と Ca 溶液(CaCl₂水溶液、イオン強度 0.5M)を用いて 浸潤速度を測定した。図 4.2-31 に各液種による飽和フロント(飽和度 95%まで浸潤した位置) の経時変化を示す。この試験により、以下のようなことが明らかとなった。

・浸潤速度は給水される液体に含まれる陽イオンの種類によって変化する。

飽和フロントの移動速度は、人工海水>Ca 溶液>Na 溶液>蒸留水の順に大きかった。

- ・塩水系地下水を対象として考える場合は、イオン種によって浸潤速度が異なることを考慮しなければならない。
- ・その影響の程度については、イオンの価数の影響がある可能性もあるが、さらなる地検の拡

充が必要である。

・200kPa で加圧した人工海水のケースでは、加圧による速度が著しかったため、埋戻し後の 地下水位の回復に伴う水圧の上昇による浸潤速度への影響も大きいと考えられる。



図 4.2-31 飽和フロントの経時変化(一次元浸潤試験)

● 二次元浸潤試験

二次元浸潤試験では、土槽を用いて隙間にペレットを入れた場合の施工を模擬し、人工海水を 浸潤させた試験を行った(4.2.2(3)2)①(b)参照)。以下のようなことがわかった。

- ・浸潤の速度は一次元と同様に人工海水の方が Na 水溶液(0.5M)の結果(原環センター, 2015) よりも早かった。
- ・膨潤圧は人工海水の方が低かった。この要因は人工海水中に含まれる Na 以外の陽イオンの 影響によると予想される。
- ・膨潤圧が低いことにより、土槽内の膨潤圧の均質化の進行が遅かったと考えられる。
- 密度の均質化試験

密度の均質化については、人工海水と人工海水の半分のイオン強度とした人工海水(1/2人工 海水と称す)によって、低密度(1.2Mg/m³)と高密度(2.0Mg/m³)のベントナイト供試体の膨潤 圧の押し合いによる密度の均質化についての試験を行った。以下のような結果が得られた。

- ・人工海水の場合は蒸留水よりも密度差が残り、NaCl水溶液よりは密度差が少なくなった。 (図 4.2-32 参照)。
- ・濃度が高い人工海水の方が残留する密度差は大きかった。
 - ⇒密度の均質化挙動はイオン強度に依存すると考えられる。
- ・NaCl水溶液よりも均質化が進んだことに関しては、陽イオン種(価数等)が影響している可能性がある。



図 4.2-32 乾燥密度の経時変化(直列膨潤試験)

以上のような膨潤挙動に係る試験の結果から、イオン強度が高く、多種のイオンが含まれるような地下水環境では、浸潤速度が速くなるため、再冠水終了までの時間が短くなることが予想される。また、膨潤性能(膨潤圧、膨潤率)が低くなることから、塩水環境では密度の均質化が進まず、密度分布が残りやすいことが分かった。そのため、塩水濃度の高い地下水環境では、緩衝材の密度はイオン強度の影響を加味して、要求される性能を満たすための設計値である密度を達成し、できるだけ均一に施工することが重要である。それによって、塩水環境でも緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響を低減できると考えられる。

また、再冠水過程と再冠水後の緩衝材の状態を予測するためには、本検討で得られた試験デー タを検証データとして、塩水の影響を加味した解析方法を構築することが可能になると考える。

(b) 緩衝材流出に及ぼす塩水系地下水の影響

緩衝材流出量に対する影響

緩衝材の流出に関しては、影響する液種の影響の検討として、既往の研究において、蒸留水、 Na 溶液、Ca 溶液による試験が行われた(原環センター,2015)。また、その後、幌延深地層研究 センターの地下坑道での原位置試験も行われ、幌延の地下水を対象とした試験も追加された(原 環センター,2018)。本業務においては、人工海水による流出を検討するとともに、海水の Na, Ca 以外の主要陽イオンである Mg と K を対象として、単成分の溶液を用いた試験を行った。溶液 は、塩化物塩を使用して作成し、イオン強度を 0.5M とした。得られた結果を以下に示す。

・Mg溶液、K溶液を通水した場合、セルとベントナイト供試体の隙間がシールされないこと が観察された(図 4.2-33の外観写真参照)。

・特に、K 溶液の膨潤は少なく、膨潤性能に対する K⁺イオンの影響が大きいことが窺えた。

・Mg 溶液、K 溶液の通水によっても表面から剥がれ落ちたものが運ばれることによる流出は 見られたが、水みちが発生して流速が早くなる箇所がないため、表面は削られず、流出量は少 なかった。

・人工海水の場合は、Na 溶液での試験の場合に近い結果となり、水みちの発生も見られた。

・海水成分中の Na、Cl イオン濃度が高いため、Na 溶液と同様の結果が得られたと考えられる。



a) MgCl₂水溶液 b) KC 1 水溶液 c) 人工海水 図 4.2-33 流速 0.01 ml/min での流出試験の状況(通水開始 960 min 後)

● 流出に係る膨潤性能の低下への影響

膨潤性能の低下は、イオン交換反応により、モンモリロナイトの層間陽イオンが交換したため と考えられる。緩衝材に対しての塩水系地下水の作用を考える場合、多様な組成の地下水を考慮 する必要がある。その際、イオン交換選択性が影響することが予想された。圧縮した供試体を陽 イオンの違う塩化物の水溶液に浸漬し、表面部分の層間陽イオンを調べ、結果を従来の地球化学 計算(PhreeqC)での計算と比較した結果(原環センター,2018)では、実際の測定値と計算値が 乖離していることが分かっている。このことは、地球化学計算に用いられているイオン交換選択 係数(電事連,2005)が、イオン濃度が高い領域、あるいは圧縮されたベントナイトに適応でき ない可能性を示唆するものである。そのため、イオン強度によるイオン交換の分配係数への影響 についての試験を行った。

その結果、ある程度までのイオン強度では、依存性があることがわかった。今回得られたイオン種による膨潤性能の低下、及びイオン交換に対するイオン強度等に係る知見は、塩水系の多様な地下水について適用するために、今後さらに拡充しておくべきだと考える。

2) 塩水系地下水を対象とした個別試験

上記で示した成果の概要について、個別試験の内容を以下に示す。詳細な試験条件については、 平成 29 年度報告書を参照されたい(産総研ほか, 2018)。

① 浸潤挙動に関する試験

緩衝材に地下水が浸潤することが引き金となって、膨潤に伴う力学変化やイオン交換による化 学変質などの事象が発生する。このため、地下水が緩衝材に浸潤する速度を把握することは、再 冠水過程において緩衝材に変遷事象の発生する時期や、相互作用のシナリオを推定する上で重要 な情報である。そのため、地下水の浸潤挙動に対する沿岸部を想定した液種の影響を把握するこ とを目的に試験を行った。

(a) 一次元浸潤速度及び透水係数取得試験

一次元と見なせる条件での試験として、供試体高さ 300 mm、直径 50 mm の試験装置(図 4.2-34 a))を用いて浸潤試験を行った。(試験装置、条件については、既報(産総研ほか, 2018)を参照。)

試験開始後初期にはどのケースでもフローポンプによる流量制御により、0.0001 cc/min で給水し、88 日間流量制御で給水した後に圧力制御に移行した。通水圧は供試体と給水孔の水位差7kPaとした。圧力制御に変更した時点で通水圧の増加により、流量が増加し、それに連動して浸潤フロントの移動速度も増加し、液種による浸潤面の移動速度に差が生じた。

図 4.2-34 b) には、本業務で行った液種の違いによる飽和フロントの経時変化の差異を示す。 人工海水と Ca 溶液のケースでは、Ca 溶液の方がフロントの移動速度が遅かった。人工海水のケ ース(低圧)では 280 日程度で飽和フロントが供試体の上面まで達した。これに対し、Ca 水溶 液の場合は 418 日を要した。このことにより、飽和フロントの移動速度が給水される液体に含ま れる陽イオンの種類によって変化することが明らかとなった。人工海水の高圧と低圧のケースを 比較すると、200 kPa に通水圧を増加させたことにより、フロントの移動速度が著しく増加した。



図 4.2-34 一次元浸潤速度及び透水係数取得試験の概要

比抵抗値から求めた飽和度(産総研ほか,2018)が1%増加した場所(Sr>=40)を浸潤フロント、飽和度が95%に到達した場所(Sr>=95)を飽和フロントとして定義した場合、既往の研究においては(式4-2)や(式4-3)のような近似式で浸潤距離と時間の関係を示している。

$D_p = aT^{\nu}$	(式 4-1)
$D_s = cT^d$	(式 4-2)

ただし、Dp、Ds (mm) は、それぞれ浸潤フロントと飽和フロントの底面からの距離乾燥密度、T(日) は経過時間、a、b、c、d は液種の違いによる補正係数である。

浸潤フロントと飽和フロントの経時変化(産総研ほか,2019)に対して、フィッティングによ り得られた飽和度と比抵抗の関係の係数 a, b, c, dを既往の結果と併せて表 4.2-8 に示す。係数 b,d は蒸留水の浸潤フロントを除き、0.5 であり、時間の平方根に比例する毛細管現象によって進 んでいると考えることができる。蒸留水の浸潤フロントの進展は毛細管現象として得られている 速度よりも遅く、モンモリロナイトの層間が浸潤に伴って広がること等の現象が関わっているこ とが予想された。

					浸潤フロント		飽和フロント	
実施	ベントナイト	液種	イオン 強度	通水圧	係数	係数	係数	係数
			四皮		а	b	С	d
既往の研究		蒸留水	0	60kPa	60	0.35	4.5	0.5
0京環センタ 一, 2016)	Na 型ベントナ	NaCl	0.5 程度	7kPa	14	0.5	10.5	0.5
	イト (ケイ砂	$CaCl_2$	0.5 程度	7kPa	7	0.5	16	0.5
本研究	30wt%含有)	人工海水	0.5 程度	7kPa	7	0.5	20	0.5
		人工海水 (高水圧)	0.5 程度	200kPa	6	0.5	17	0.5

表 4.2-8 浸潤速度測定試験結果のまとめ

※圧力制御開始時点を起点として、フィッティング

排水が確認された後、透水係数の計測を行った。排水が得られないケース(CaCl₂水溶液)については、給水量から算出した飽和フロントを用いて動水勾配を規定して透水係数を得た。透水係数の経時変化を図 4.2-35 に示す。人工海水の低圧のケースは、8.00×10⁻¹¹~1.16×10⁻¹⁰m/s 程度であり、高水圧のケースでは、5.00×10⁻¹¹ m/s 程度であった。緩衝材データベース(JAEA)によると同じ供試体(寸法は異なる)の透水係数は 1.39×10⁻¹¹ m/s であり、データベースと概ね整合した結果が得られた。CaCl₂水溶液の場合、算出された透水係数は 3.00×10⁻¹⁰~6.00×10⁻¹⁰ m/sであり、他のケースに比べて大きかった。浸潤に関しては、毛管現象と考えられるため、Ca型化によって層間(内間隙)が狭まり、粒子の間隙(外間隙)の径が大きくなったことなどが影響して浸潤が遅くなったものと解釈できる。



図 4.2-35 一次元浸潤試験で得られた透水係数の経時変化

(b) 二次元土槽試験による浸潤・膨潤挙動に関する試験

二次元土槽試験は施工に起因して生じる、定置後の緩衝材に存在する設計時からの誤差(密度 分布、隙間、初期間隙など)が膨潤挙動に及ぼす影響を評価することを目的としている。具体的 には、土槽内にペレット状のベントナイトとブロック成形したベントナイトを併用し、底面から 給水することによって緩衝材が均一化する過程を調査している。既往の研究(原環センター, 2014;2015)において、緩衝材の施工法に起因する隙間や間隙分布によって給水方向が異なる ため、均一化の状況も緩衝材の施工法ごとに異なることが明らかとなった。

本業務では、ブロック - ペレット充填併用ケースを対象にして、人工海水を浸潤させることに より、膨潤による緩衝材の均一化に及ぼす影響を把握する試験を実施した。

図 4.2-36 に、試験装置とて供試体と液種を変えた試験の終了時の膨潤圧分布の比較を示す。
ペレットとブロックを併用したケースにおいて液種の違いに着目すると、蒸留水を浸潤させた場 合には、膨潤性が高いため、密度の高いブロック部が膨潤してペレット充填部を圧縮して変形し た。そのため、ブロック部の密度が低くなって膨潤圧が低くなり、ペレット充填部は圧縮され密 度が高まったため、膨潤圧が高くなったことがわかる。一方、人工海水のケースは、膨潤性能が 低下するため、ブロック部の初期応力が解消されず、初期の膨潤圧分布の凹凸が残留したままで あり、ペレット充填部の膨潤圧も増加しない結果となったものと考えられる。NaCl 水溶液につ いても、人工海水のケースと同様の傾向がみられた。ただし、各ケースで土槽の上蓋を設置した 際に発生した初期応力が異なること、試験時間が異なることに注意が必要であり、初期応力の違 いの影響が最終的な膨潤圧分布に残った可能性も考えられる。

今回の結果は、一次元浸潤試験による浸潤速度に対する液種の影響とも整合した。さらに、二 次元での密度差のあるベントナイトを用いたことにより、浸潤による応力のやり取り、変形も見 ることができた。今後、二次元での力学挙動の解析の際の検証データとして用いることは、解析 手法を構築にとって有効なものとなると考える。



a) 二次元土槽試験のイメージ(ブロック定置+ペレット充填ケース)



2 密度均質化試験

緩衝材の様々な要求性能を管理するための代替パラメータは緩衝材全体の平均乾燥密度である。 これは緩衝材が膨潤後に均質化すること前提としている。実際には施工に起因して乾燥密度の分 布に局所的な差が生じる可能性があり、緩衝材が吸水膨潤して施工に伴う密度分布を解消しなけ れば所定の要求性能が満足されない領域が残る可能性がある。そのため、施工品質を保証するた めには、緩衝材施工時に許容される密度分布の範囲を長期性能の観点から示す必要があると考え られる。緩衝材の膨潤挙動は、間隙水のイオン強度の影響を受けるため、海水系の地下水が賦存 する環境では、どの程度密度分布が解消されるかを把握することが必要である。本業務では、人 工海水と 1/2 人工海水を用いて、多種のイオンが共存する状態で飽和させた時の密度の均質化挙 動を把握することを目的として試験を行った。

(a) 直列膨潤量試験

直列膨潤量試験は、既往の研究において開発された試験装置を用いて行った(原環センター, 2015;産総研ほか,2018)。図 4.2-37 に試験装置と直列膨潤量試験中の膨潤圧と計測された膨潤 量を各供試体の乾燥密度に算出し直した乾燥密度の経時変化を示す。

高乾燥密度(2.0Mg/m³)の供試体と低乾燥密度(1.2 Mg/m³)の供試体をセットした2つの セルをピストンとロードセルを介して直列で接続して膨潤量試験を実施した。(試験手順等につ いては、(産総研ほか, 2018)参照。)

膨潤圧の測定結果から、人工海水の膨潤圧の方が 1/2 人工海水に比べ小さく、イオン強度が高いほど、膨潤圧が低下していることが示された。乾燥密度の変化は、濃度の高い人工海水の方が残留した密度差が大きかった。イオン強度が高いことにより、膨潤性能が低くなったためと考えられ、イオン強度が大きいほど、残留密度差が大きくなることが明らかとなった。



図 4.2-37 直列膨潤量試験の膨潤圧と乾燥密度の経時変化

Kozeny-Carman 則を用いて算出した透水係数と乾燥密度の関係のラインを図 4.2-35 に示し た一次元浸潤試験で得られた透水係数にフィッティング(原環センター, 2018) させたものを図 4.2-38 に示す。図には、試験開始時の乾燥密度と膨潤後の乾燥密度を併せて示した。緩衝材が 満足すべき止水性能を、透水係数を指標として決める場合には、残留密度差を把握することによ って透水係数と乾燥密度の関係から透水係数のバラつきの範囲を示すことができる。この残留密 度差は、イオン強度が大きく、二価のイオン種が含まれる地下水環境下では大きくなることが本 検討によって明らかとなった。残留密度差が大きくなることから、施工時に許容される緩衝材の 密度分布を小さくする必要があるため、施工の管理は塩水環境の方が厳しくなる。施工の管理値 を決定するためには、再冠水後の緩衝材内の密度分布を予測する力学解析手法が必要となるが、 解析手法の構築のための検証データとして、本試験は適用できると考えられる。実際の塩水環境 下での施工には、巻き出し厚を小さくすることや所定の乾燥密度を満足する範囲で施工時の含水 比を最適含水比よりも高めに設定するなど、より品質(密度)を高くする施工が要求される。



図 4.2-38 直列膨潤量試験結果による残留密度差

(b) スラリー圧密試験

既往の研究(原環センター, 2015)では、緩衝材は、力が釣合う乾燥密度となるまで膨潤する という力学的な考え方に基づいて、緩衝材の e-logP 関係を取得し、e-logP 関係を用いて残留密 度差を解釈できることを示している。

ここでは、人工海水と 1/2 人工海水を用いて緩衝材のスラリーを作製し、圧密試験を実施した。この試験から e-logP 関係を取得し、液種によらず、e-logP 関係から残留密度差が説明可能であるかを検討した。試験は既往の研究と同一の方法で行った(原環センター, 2015)。

図 4.2-39 に人工海水と 1/2 人工海水での試験で得られたベントナイトスラリーの e-logp 関係 を示す。図には、既往の研究(原環センター, 2015)で得られた、蒸留水での e-logp 関係も併 せて示している。蒸留水を使用したスラリーの場合に比べ、人工海水を使用した場合でかつ圧密 応力が低い場合(0.32 MPa 未満)は間隙液のイオン強度に依存性が見られることから、イオン 強度が大きいほど膨潤性能が低いことが明らかである。さらに、応力が 0.32MPa 以上、間隙比 が 1.2 以下になるとイオン強度の影響が小さくなる傾向がみられる。これは、高密度になると間 隙体積の割合が小さくなり、応力の変化に対しての外的な要因(イオン強度など)の影響がでに くくなったためと考えられる。

これらの結果から、イオン強度が大きい地下水環境であっても、実際の処分場における緩衝材 を仕様通りの乾燥密度に施工できれば、イオン強度が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響は小さいと 考えられる。

173



図 4.2-39 人工海水と 1/2 人工海水で作製したベントナイトスラリーの e-logp 関係

実験室規模の緩衝材流出に関する試験

ベントナイト系人工バリア(緩衝材)の性能が再冠水期間中に十分に発揮されることを説明す るためには、施工された際の所定の量の緩衝材が所定の場所に留まっていることが重要である。 緩衝材の量が損なわれる現象に関する検討として、既往の研究(原環センター,2015)では、ブ ロック定置工法とペレット充填工法を取り挙げ、地下の湧水を想定して、水みちの生成、流出の 現象について室内試験によって検討した。その結果、湧水環境においては緩衝材の流出現象が発 生する可能性があることが確認されている。そのため、塩水環境の多様な地下水組成に対しても 緩衝材の流出の程度を把握する必要があると考え、塩水組成に係る陽イオンの流出に対する影響 に関してのデータ拡充、及び人工海水による影響の検討を目的として試験を行った。

既往の研究では、蒸留水での試験とともに、イオン強度の大きい地下水を想定した NaCl 水溶 液での試験、及びセメント溶脱による Ca の影響を考えた CaCl₂水溶液での試験が実施された。 これらの溶存成分を持つ水溶液での試験では、水みちの発生を伴った流出現象は同様に起こるも のの、緩衝材の流出速度、量に変化があることが分かっている。そこで、本検討では、海水の主 成分となっている陽イオンを単一の組成として持つ水溶液と多種のイオンが混在している人工海 水を用いた試験を行った。

(a) Mg 及び K 溶液による流出試験

図 4.2・40 には、ブロック供試体の代表的な結果として MgCl₂ 水溶液を 100mL/min の流量で 流した場合のブロック供試体の表面状態を示す。写真から、供試体の表面が鱗状の薄片になって いることがわかる。この状態は、流量が少ない場合にも共通してみられ、試験開始直後から起こ った。時間経過に伴って薄片のまま供試体とセルの間の隙間に沈殿していく様子が見られた。給 水開始から一日後でも、沈殿による隙間の充填や供試体自体の膨潤もほとんどなく、隙間がシー ルされるような状況は観察されなかった。供試体の解体からも、供試体表面がほとんど膨潤して いないことが確認され、水みちも見らなかった。

膨潤性能の低下は、MgCl₂水溶液が供試体表面に接した際に、供試体表面が陽イオン交換反応 によって Mg型化したために起こったと考えられる。また、Mg²⁺イオンと陽イオン交換反応によ って放出された Na⁺イオンが供試体内部に浸潤したために、供試体内部は薄片状にはならなかっ たものと考えられる。



図 4.2-40 MgCl₂水溶液を 100 mL/min 通水した時の供試体表面状況 (ブロック)

図 4.2-41 には、ブロック+ペレット充填の供試体に 100 mL/min の流量で流した場合の表面 状態を示す。写真から、通水開始 60 分後にはペレット部に水みちが発生していることが分かる。 また、ブロック部表面はほとんど膨潤しなかったが、ペレット部は膨潤していた。前述のような 鱗状の薄片は、ペレットとブロックの併用ケースでは観察されなかった。また、通水圧はブロッ クのみの時に比べて大きくなった。



図 4.2-41 MgCl₂水溶液を 100 mL/min 通水した時の供試体表面状況 (ブロック+ペレット)

KCl水溶液を通水した時の供試体の表面状態を図 4.2-42示す。通水量1ml/min、10ml/min、100mL/minのそれぞれについて、通水開始後1440分後(24時間後)の表面状態を示した。供試体 表面はどのケースでもほとんど膨潤しておらず、供試体とセルとの間の隙間はほとんどシールさ れていなかった。送水圧もどのケースでも低い値で推移した。また、1、10ml/minの供試体は、 大きな塊状にひび割れが見られた。緩衝材の膨潤の程度を比較すると、K+イオンが膨潤性能の低 下に及ぼす影響は、他の陽イオンよりも大きい可能性があると考えられる。



図 4.2-42 KCI 水溶液を通水して 24 時間後の供試体表面状況(ブロック)

ブロックとペレットを併用したケースでは、ペレットは膨潤し、破過とシールを繰り返していることが送水圧の経時変化から分かる。ペレットの膨潤は Mg 溶液の場合にも確認されており、ペレットを隙間に充填することによって、膨潤に影響するイオンがあっても地下水浸潤初期には

ペレットがある程度膨潤してシールする効果が得られると考えられる。

(b) 人工海水による流出試験

人工海水をブロックの供試体に通水した試験では、通水開始してすぐに送水圧が急増し、数百 kPa 程度まで達した後、破過して急激に通水圧が低下するという小規模な破過挙動を繰り返し た(産総研ほか, 2018)。図 4.2-43 には、人工海水をブロックに通水して 240 分後の供試体表面 の状況を示す。100 mL/min のケースでは、給水開始から 10 分後には供試体表面に比較的大きな 水みちが形成され、最後までその水みちが残った。表面状態は、既往の研究の NaCl 水溶液を通 水した時(原環センター, 2015)に近い結果であった。供試体の解体の結果、供試体表面は膨潤 し、セルと供試体の間の隙間がシールされていた。

人工海水を通水した場合には、主要な陽イオンがNa+イオンであるため、イオン交換反応の寄 与が少なく、膨潤性能に及ぼす影響が限定的であったと考えられる。



図 4.2-43 人工海水を通水して 240 分後の供試体表面状況 (ブロック)

(c) 地下水中の陽イオンが緩衝材流出に及ぼす影響

図 4.2-44 に K 溶液と Mg 溶液、及び人工海水を 100 mL/min の流量でブロック供試体に通水 した時の流出量と通水量の関係を示す。図には、蒸留水を用いた流出試験の結果も併せて示した。 図から、全てのケースで、蒸留水のケースよりも流出量は小さかったことがわかる。これに対し、 ペレット併用ケースは概ね同じ流出量となっていた(産総研ほか,2018)。ペレット併用ケースで は、ペレットの膨潤により水みちの断面積が小さくなり、水みちでの断面積当たりの流速が大き くなることにより、緩衝材の流出量が大きくなるが、ブロックのケースでは、膨潤性能の低下に より水の断面積当たりの流速が小さく、また、緩衝材が水に懸濁して運ばれる現象も起こらなか ったため、緩衝材の流出挙動が抑制されたものと考えられる。

以上のように、単体の陽イオンの影響として、緩衝材の流出量が減少する一方で、膨潤性能や 止水性能は低下していた。よって、緩衝材の流出に対してはマイナスの影響を与えないと考えら れる。しかし、緩衝材が隙間をシールする膨潤機能が損なわれる方向での影響があることが懸念 される。



図 4.2-44 緩衝材流出量と通水量の関係(ブロック供試体での試験、通水量 100 mL/min)

膨潤性能が通水液によって変化したのは、供試体表面のベントナイトがイオン交換により変化 したためと考えられる。本検討によって、陽イオン種によって、膨潤に対しての影響に差が見ら れたため、多種のイオンが含まれる場合にはイオン交換の選択性が重要だと考えられる。そのた め、イオン交換選択性に対する、イオン強度の影響を検討した。

図 4.2-45 にイオン強度に対する Na⁺イオンと各イオンの分配係数を示す。イオン強度の低い 場合は濃度に依存する傾向が見られ、イオン強度 0.20 M 付近からは、強度が変化しても分配係 数は変化しないという結果が得られた。今回の試験は、一旦 NH4⁺イオンで置換してから測定し たことによって、分配係数が既存の測定値より小さくなっているため、試験方法を検討する必要 があるが、イオン強度が高い系でのイオン交換反応の選択性はイオン強度が低い状態での選択性 と違いがあることがわかった。



図 4.2-45 陽イオン交換分配係数のイオン強度依存性

³⁾ 塩水系地下水による再冠水挙動への影響に関する考察と課題 塩水環境下での緩衝材の挙動は、①緩衝材(ベントナイト)の膨潤性能に対する塩水の影響と、

短期的に見た時に化学影響として対象とすべき、<u>②イオン交換反応の影響</u>として考えることがで きる。本業務では、不足していると考えられる再冠水時の力学的挙動について、データの拡充を 行った。

①緩衝材(ベントナイト)の膨潤性能に対する塩水の影響

本業務では、人工海水及び 1/2 人工海水、CaCl2 水溶液を用いた試験によって、浸潤、膨潤 に対する影響を確認した。その結果、これらの水溶液が緩衝材に浸潤した場合、浸潤速度の増 加、膨潤圧の低下、残留密度差の増加等の影響が見られ、膨潤性能が低下することが確認され た。しかし、予め緩衝材の密度を高めておく、密度分布の範囲を決めて製作・施工する等の対 応によって、緩衝材の性能を確保することが可能性であることもデータによって裏付けられた。 これは、これまでの塩水系での緩衝材の評価を支持するものである。ただし、緩衝材の施工の 裕度(品質の幅)を精度よく、合理的に示すためにはさらなるデータの拡充が必要であると考 える。

②イオン交換反応の影響

イオン交換は地化学解析では瞬時反応として扱われており、化学的な変化は、浸潤の進展と同 じタイミングで進行すると考えることができる。そのため、再冠水期間では最も考慮すべき化学 変化である。本業務でも、緩衝材流出に関する試験から、陽イオンの種類により影響の仕方が異 なることが明らかとなった。この影響は、イオン交換反応によるものと考えられた。多様なイオ ンが多様な濃度で含まれることが予想される塩水環境下において適切な評価を行うためには、そ れぞれのイオンの影響の把握とともに、イオン交換の選択性が重要である。イオン交換は、Na、 Ca、K、Mg が共存する場合には選択性をもって交換する。そのため、地下水組成とイオン交換 選択性によって、ベントナイトの層間陽イオンが変化し、それによってベントナイトの特性(透 水性、膨潤性)が変化する。これを地化学計算ではイオン交換選択係数として考慮され、ベント ナイトの変化が予測される。既往の研究において、供試体に各陽イオンを含む水溶液を接触させ たものについての層間陽イオンの分布の分析結果と、地化学計算によるイオン交換選択係数を考 慮した計算結果を比較した結果、乖離があることが示されている(原環センター,2018)。この乖 離の原因を探るために本業務ではイオン強度の影響について検討した。その結果、イオン交換の 選択性は、イオン強度に依存して変化するという知見が得られた。イオン交換選択係数がイオン 強度をある程度持つ溶液との挙動を表現できていない可能性がある。また、この他にもベントナ イトを分散させて測定したイオン交換選択性と圧縮されたベントナイトでのイオン交換反応にも 挙動に違いがある可能性もある。そのため、多様な地下水に適応できる緩衝材の特性を評価でき るツールの整備に向けて、さらにデータを取得することが必要であると考える。

参考文献

電気事業連合会 核燃料サイクル開発機構, TRU 廃棄物処分技術検討書 一第2次TRU 廃棄物処 分研究開発とりまとめー, 2005.

原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成25年度地層処分技術調査等事業(高レベル放射性 廃棄物処分関連処分システム工学確証技術開発)人工バリア品質/健全性評価手法の構築(その2) -緩衝材,2014.

- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 26 年度地層処分技術調査等事業 (高レベル放射性 廃棄物処分関連 処分システム工学確証技術開発)人工バリア品質/健全性評価手法の構築(そ の2) -緩衝材, 2015.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業(高レベル放射性 廃棄物処分関連処分システム工学確証技術開発)人工バリア品質/健全性評価手法の構築(その2) -緩衝材, 2016.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 29 年度地層処分技術調査等事業(高レベル放射性 廃棄物処分関連処分システム工学確証技術開発)人工バリア品質/健全性評価手法の構築(その2) -緩衝材, 2018.
- 核燃料サイクル開発機構,わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性--地層 処分研究開発第2次とりまとめー 分冊2 地層処分の工学技術,JNC-TN1400-99-022,1999
- 菊池広人,棚井憲治,幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験 JNC TN8430 2004-005, 2005.
- 松本一浩,藤田朝雄,緩衝材の流出/侵入特性,(Ⅲ) JAEA-Research 2011-014, 2011.
- 松本一浩, 棚井憲治, 緩衝材の流出/侵入特性, JNC TN8400 2003-035, 2004.
- 松本一浩, 棚井憲治, 緩衝材の流出/侵入特性, (Ⅱ) JNC TN8400 2004-026, 2005.
- Roscoe, K.H., Schofield, A.N. and Thurairajah, A.: Yielding of clays in states wetter than critical. Geotechnique, Vol.13 (3), pp.250-255, 1963.
- Roscoe, K.H. and Burland, J.B.: On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay. Engineering Plasticity, ed. J. Heyman and F.A. Leckie, Cambridge University Press: Cambridge, pp.535-609, 1968.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成27年度地層処分調査等事業沿岸部処分システム高度化開発報告書,2016.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 29 年度地層処分調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, Appendex X,2018.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 30 年度地層処分調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書,2019.
- 高治一彦, 鈴木英明, 緩衝材の静的力学特性, JNC-TN8400 99-041, 1999
- 高治一彦, 重野喜政, 下河内隆文、幌延の地下水環境下におけるベントナイト混合材料の力学特性 に関する研究(II), JNC-TN5400 2004-002, 2004

4.2.3 セメント系材料

(1) 背景と目的

セメント系材料は、高レベル放射性廃棄物処分では処分坑道の支保工、アクセス坑道並びに斜 坑などの支保工及びインバートなどの構造材として、また、TRU 廃棄物の地層処分ではそれらに 加えて、処分坑道のインバート、構造駆体、並びに容器内外の充填材としての使用が考えられて いる。

また、セメント系材料は、地下水との反応により変質することが知られており、主な変質とし ては水和鉱物の溶脱、膨張性の二次鉱物の生成及び溶脱成分による他のバリア材料の二次的な変 質が想定される。それらの影響として、物質移行特性の変化、ひび割れの発生、並びに機械的強 度の低下が考えられる。そのため、短期的には処分場操業中における空洞安定性への影響、長期 的には処分場閉鎖後における人工バリア機能への影響が生じる可能性がある。

セメント系材料の海水系地下水環境での変質及び劣化現象については、海洋構造物や海岸付近 の鉄筋コンクリート構造物の寿命評価などの観点での Cl の浸透に関する産業界での検討例など、 既に知見の蓄積がある。また、地層処分施設の建設及び操業期間中の健全性、並びに人工バリア の長期的な安定性の観点から、化学的な変質についてはこれまでにも国の基盤研究などで検討が 進められている。これらの検討から、降水系地下水と比較して Mg²⁺, Cl, SO4²の影響によるセメ ント鉱物の変質や析出物の生成を考慮する必要があること、混合セメントの方が普通ポルトラン ドセメントより変質が少ない傾向にあることなどが確認された(原環センター, 2006; 2007; 2009)。しかしながら、それらは沿岸部での現実的な地下水組成を想定したものではなく、多く は人工海水など溶存成分濃度が海水相当の模擬地下水を用いた検討である。

以上を踏まえ本事業では、沿岸部で想定される地下環境、特に地下水の各成分の現実的な濃度 などを念頭に、長期安全性評価や施設設計などへの適切な対応に向けた検討を進め、以下の実施 項目と目標設定を行いこれらに取り組む。

○塩水環境下におけるセメント系材料の変質評価:これまでに充填材の長期挙動評価のために 開発されたセメント水和物の溶解沈殿モデルの沿岸部での適用性の確認と信頼性の向上を 目指す。

○塩水環境下におけるセメント系材料の機械的強度の変化に関する検討:設計や工学技術における安全確保の観点から、短期的(操業期間中)な機械的強度の変化を把握することを目指す。

(2) 塩水環境下におけるセメント系材料の変質評価

上述したセメント系材料の変質については、主に普通ポルトランドセメント(以下、「OPC」という。)を中心に評価・検討が実施されてきた。一方、実際の地層処分施設ではセメント系材料の高アルカリ性間隙水による緩衝材・周辺岩盤への影響を低減する目的で、低アルカリ性セメントが用いられることも想定される。そのような低アルカリ性セメントの候補の一つとして、OPCに対してフライアッシュ(以下、「FA」という。)とシリカフューム(以下、「SF」という。)を混合することで間隙水や接触液の pH を低下させたフライアッシュ高含有シリカフュームセメント(以下、「HFSC」という。)が開発された(入矢・三原, 2003)。

処分環境におけるセメント系材料の長期的な変質評価を可能とするために必要となる化学モデルとして、化学平衡計算をベースとした水和物溶解沈澱モデル(以下、「モデル」という。)が OPC 及び HFSC を対象として開発されている(日本原子力研究開発機構, 2015; 2016; 2017)。この モデルの開発では、セメント水和物との反応として、イオン交換水と米国材料協会規格 ASTM D1141 相当(以後、「ASTM 相当」)の人工海水の2種類を対象にしていることから、米国材料協

会規格 ASTM D1141 相当(以後、「ASTM 相当」)の人工海水を希釈した溶液及び海水の主要成分である NaCl に着目した溶液に対する OPC と HFSC の浸漬実験を実施し、浸漬実験で得られた結果とモデル計算値との比較を行いモデルの適用性を評価した。

1) 人工海水希釈水に対する溶解沈殿モデルの適用性の評価

ASTM 相当の人工海水(八洲薬品株式会社製の金属腐食試験用アクアマリンを利用(略号:SW)) を2倍(略号:050SW)及び5倍(略号:020SW)に希釈した溶液(比較として人工海水、イオ ン交換水(略号:IEW)も準備)にセメントペースト硬化体粉砕物(OPC及びHFSC)を所定の 液固比で、アルゴン雰囲気で浸漬させ、25℃の温度で試料を保管した(産業技術総合研究所ほか, 2017)。その後、孔径 0.45µmのメンブランフィルターを通過させたろ液に対して、pH及び主要 元素濃度の測定を行った(産業技術総合研究所ほか,2018)。セメント水和物の溶解沈殿モデルに ついては、平成 29年度の処分システム評価確証技術開発(日本原子力研究開発機構,2018)にて 開発したものを適用して、計算を行った。

図 4.2-46 に人工海水及びその希釈水を用いた OPC 及び HFSC 硬化体粉砕物浸漬実験の液相の pH 及び主要元素の分析結果とモデル計算値との比較を示す。左図の OPC については、Si 濃度以外については、概ねモデル計算値は、分析結果を再現することができた。Si 濃度については、 IEW については、モデル計算値は、分析結果を再現しているが、人工海水になると、モデル計算値は、液固比 70 から 600 程度において、Si 濃度が高くなった。右図の HFSC については、モデル計算値は 概ね分析結果を再現できることが分かった。

2) NaCl 溶液に対する溶解沈殿モデルの適用性の評価

ASTM 相当の人工海水と同等のイオン強度になるよう調整した NaCl 濃度 0.644mol/L の溶液 (NC1)、NC1を2倍に希釈したように調整した溶液(NC2)、及び NC1を5倍に希釈したよう に調整した溶液にセメントペースト硬化体粉砕物(OPC 及び HFSC)を所定の液固比で、アルゴ ン雰囲気で浸漬させ、25 ℃の温度で試料を保管した(産業技術総合研究所ほか,2018)。その後、 孔径 0.45 µm のメンブランフィルターを通過させたろ液に対して、pH 及び主要元素濃度の測定 を行った(産業技術総合研究所ほか,2019)。

図 4.2-47 に NaCl 溶液を用いた用いた OPC 及び HFSC 硬化体粉砕物浸漬実験の液相の pH 及び主要元素の分析結果とモデル計算値との比較を示す。左図の OPC については、概ねモデル計算値は、分析結果を再現することが確認できた。右図の HFSC については、人工海水の場合と同様にモデル計算の pH は、分析値より高い値を示した。また、Al 濃度については、モデル計算値と分析値には一桁以上の乖離が見られた。HFSC は、フライアッシュを多量に含むことからケイ酸カルシウムアルミネート水和物 (C-A-S-H) が OPC に比較して多量に存在する可能性がある。Al の濃度は、C-A-S-H のような Al を含む水和物の考慮が必要となる可能性がある。また、C-A-S-H、C-S-H と同様にアルカリ金属イオン (Na 及び K) を収着する可能性があり、今後のモデル開発に反映する必要がある。









3) まとめ

本研究において、OPC 及び HFSC 硬化体について、人工海水とその希釈水、NaCl 溶液を対象 に水和物の溶解・沈澱に係るデータの拡充を行うことができた。また、既存のセメント水和物溶 解・沈澱モデル(日本原子力機構研究開発機構, 2018)は、一部の元素濃度については、モデル の見直しが必要であるものの、人工海水とその希釈水、NaCl 溶液を用いた試験結果を再現する ことができた。特に HFSC については、IEW(イオン交換水)を用いた試験について、pH がう まく再現できていない。また、Si や Al 濃度についても、現状のモデルではうまく再現できてい ない部分もあり、まだ、モデルでは考慮されてカルシウムケイ酸塩アルミネート水和物の熱力学 データの整備も必要である。さらに、様々な地下水環境(他の種類の塩の影響や温度の影響)に おいても、評価可能なようにセメント水和物溶解・沈澱モデルを開発していく必要がある。

(3) 塩水環境下におけるセメント系材料の機械的特性変化に関する検討

1) 目的及び実施内容

平成 27 年度の検討では、既往の知見や技術などの調査を踏まえ、沿岸部で想定される地下環 境、特に地下水の各成分の濃度などを踏まえた施設設計などへの適切な対応に向けて、以下の課 題を抽出した(産総研ほか, 2016)。

- ① 海水系及び降水系の化学モデルの適用範囲の確認
- ② バルク試験体を用いた力学特性の変化に関するデータの取得
- ③ ひび割れの閉塞挙動の確認
- ④ 塩水浸透に係わるモデルの検討

本検討では、課題の緊急性を勘案し、設計や工学技術における安全確保の観点からの処分場の 空洞安定性評価における根拠の整備の一環として、沿岸部での処分場操業期間におけるセメント 系材料の変質に伴う短期的な機械的強度の変化を把握することを目的に、②及び④に注力する。

なお、本検討においては、沿岸部の処分場環境における地下水中の成分濃度は、陸域からの降水系地下水の混合により海水より低いことが予想される事、地下水条件と各事象の関係について は人工海水での知見はあるが人工海水より濃度が低い系の溶液での試験データが少ない事、など を考慮して検討を行うこととした。

2) 3 ヵ年の全体計画

本検討に関する平成 28 年度~30 年度の 3 ヵ年の実施計画を表 4.2-9 に示す。各実施項目の具体的な内容について、後述の 3) 及び 4) に整理する。

実施項目	平成28年度	平成29年度	平成30年度
バルク試験体を用いた機械的強度の変化に 関するデータ取得			
人工海水への長期浸漬(10年程度)バルク 試験体での変質状態の確認			
沿岸海底下条件での機械的強度の変化 の確認(浸漬試験)			
塩水浸透に係わるモデルの検討			
産業界の塩化物イオン拡散モデルの調査		-	
沿岸海底下環境での塩化物浸透モデルへ の高度化			

表 4.2-9 塩水環境下におけるセメント系材料の機械的強度変化に関する検討の実施工程

3) バルク試験体を用いた力学特性の変化に関するデータの取得

これまでに、各種セメント系材料の水和物粉末及びブロック状の硬化体(以下、「バルク試験体」 という。)について、降水系地下水及び海水系地下水を模擬した浸漬試験を実施した。その結果、 水和物粉末ではセメント系材料全体が一様に変質するのに対し、バルク試験体では Ca が表層か ら溶出するのに加え、人工海水に浸漬した混合セメントのバルク試験体では明確な変質が認めら れない事を確認した(原環センター,2007;2010;2011)。このことは、各種セメント系材料の水 和物粉末試料の試験結果に基づいた溶解平衡モデルを用いた化学解析の結果が、海水系地下水環 境下での変質の影響範囲を過大に評価している可能性があることを示唆している。そのため、現 実的な変質過程での機械的強度の把握には、バルク試験体を用いて試験を実施する必要がある。

そこで本試験では、沿岸部で想定される条件でのセメント系材料のバルク試験体の変質状態と 機械的強度変化との関係を把握するため、塩水によるセメント系材料の変質が処分場操業期間中 の機械的強度に及ぼす影響を検討した。平成 28 年度は、人工海水に 10 年程度浸漬したバルク試 験体(セメントペースト、以下、「長期浸漬バルク試験体」という。)の変質状態の確認により、 機械強度への影響の推定及び操業期間の空洞安定性へのセメント変質の影響を検討し、以下の知 見を得た(産総研ほか, 2017)。

- 海水系地下水の影響によるセメント中のCaなどの溶出により操業期間中にセメント系材 料の機械的強度が低下する可能性がある。
- セメント系材料の変質と機械的強度との関係の検討を進めるためには、バルク状のセメン ト系材料からの成分溶出と短期的な機械的強度低下の関係の定量的な把握が必要である。

平成 29 年度~30 年度は、沿岸海底下の条件での機械的強度変化の確認のための浸漬試験試料 について、化学的な変質状況の確認のための分析(浸漬液の pH 分析、試料断面の元素組成分析

(EPMA)、鉱物相の同定(XRD)、鉱物の形態観察及び組成分布(SEM-EDS))と微小領域の硬度の測定(ビッカース硬度測定)を実施した。浸漬試験の試験体(以下、浸漬試験体)の条件を表 4.2-10に、浸漬試験条件を表 4.2-11に示す。また、浸漬試験体の浸漬方法を図 4.2-48に示す。なお、浸漬期間4ヶ月の結果は平成29年度報告書(産総研ほか,2018)、浸漬期間14ヶ月の結果は平成30年度報告書(産総研ほか,2019)に詳細を記す。

試料名	セメント種類	水結合材比	養生条件
0PC-45	普通ポルトランドセメント	45%	50℃ (水中) 91 日間 (練り混ぜは 30℃)
0PC-60	普通ポルトランドセメント	60%	
FAC30	普通ポルトランドセメント/フライアッシュ=7/3	60%	
BFSC70	普通ポルトランドセメント/高炉スラグ=3/7	60%	

表 4.2-10 浸漬試験体の条件

項目	内容
浸漬液相	希釈人工海水:1倍(人工海水)、1/10倍(1/10濃度人工海水)、
	1/100 倍(1/100 濃度人工海水)
	なお、浸漬液は、八洲薬品社、金属腐食試験用アクアマリンを製品添
	付の手順書に基づき作製し、この溶液を人工海水とした。
浸漬液量	500m1/1 試料あたり(単位面積流量 160m1/月/cm ²)、月1回液交換
試験期間	常時スターラ攪拌条件で4ヶ月及び14ヶ月間
雰囲気	浸漬試験中は密封し外気を遮断

表 4.2-11 浸漬試験条件



図 4.2-48 浸漬試験体の浸漬方法

浸漬試験体の分析結果から考察される浸漬試験体の化学的な変質挙動を、模式的に図 4.2-49及 び図 4.2-50 に示す。概略を以下に記す。

▶ 外部沈殿物(接液面の浸漬液側の沈殿生成物)

浸漬試験体の接液面の浸漬液側に、OPC では Ca 沈殿(Calcite (CaCO₃)と推定)と Mg 沈殿(Brucite (Mg (OH) 2と推定)が生成した。混合セメントでは、浸漬試験体の接 液面の浸漬液側に Ca 沈殿(Calcite (CaCO₃)と推定)が生成した。Ca 沈殿の生成量は塩 水濃度と線形の関係が認められたが、Mg 沈殿の生成量は 1/10 濃度人工海水に浸漬した試 験体が最も多く、塩水濃度と線形の関係は認められなかった。人工海水では液中の CO₃²⁻ 濃度が高く Ca 沈殿が多く生成したのに対し、1/10 濃度人工海水では液中の CO₃²⁻濃度が 低い分 Ca 沈殿量が少ないため、セメント中のアルカリ分と液中の Mg²⁺の反応や後述の M-S-H と推定される溶脱部の Mg 化合物の生成の抑制が限定的であったと考えられる。

これら接液面の浸漬液側に生成した沈殿の経時変化については、1/10 濃度人工海水に浸 漬した試験体の観察からは、増加傾向が認められなかった。これは、接液面の浸漬液側に 生成した沈殿により、浸漬試験体内部からのイオンの供給が制限されたためと考えられる。

▶ Ca 溶脱領域

浸漬試験体の接液面より内側に認められた Ca 溶脱領域(Portlandite (Ca (OH)₂)溶 脱領域、以下、溶脱部)の深さは、OPC の方が混合セメントより深く、本試験の浸漬期間 14ヶ月の結果においては、OPC が最大 5mm 程度、混合セメントが 1mm 程度であった。 Ca (OH)₂量と C-S-H の Ca/Si モル比の違いが影響していると考えられた。溶脱部の深 さは塩水濃度との線形の関係は認められなかったが、OPC では塩水濃度が高い方が深く、 混合セメントでは塩水濃度が低い方が深い傾向であった。

溶脱部の経時的な変化は、OPC 系材料、混合セメント系材料ともに、接液面の浸漬液側 に沈殿が生成した試験体では小さく、接液面の浸漬液側の沈殿が少ない試料では時間経過 とともに内部に進行する傾向が認められた。

これらの挙動には、Ca (OH) 2量と C-S-H の Ca/Si モル比による Ca 成分の溶脱しや すさと、接液面の浸漬液側の沈殿による Ca 溶脱抑制効果の両方が影響していると考えら れる。OPC では接液面の浸漬液側の沈殿生成前に塩水による Ca 溶脱が進行したため塩水 濃度の高い方が溶脱部は深く、混合セメントでは浸漬液側の沈殿生成による Ca 溶脱抑制 効果の影響が大きいために塩水濃度の低い方が溶脱部は深かったと推定される。

➤ Cl·浸透領域

浸漬試験体の接液面より内側に認められた Cl-浸透領域(以下、Cl 浸透部)の深さは、 OPC の方が混合セメントより深く、本試験の浸漬期間 14 ヶ月の結果においては、OPC が最深部の 30mm に到達していた一方、混合セメント系材料が 15~20 mm 程度であっ た。この要因は材料固有の空隙構造等の違いが影響していると考えられた。Cl-浸透量は、 OPC では塩水濃度との関係が不明瞭であった一方、混合セメントでは 1/10 濃度人工海水 に浸漬した試験体が最も大きく、塩水濃度と線形の関係は認められなかった。なお、OPC、 混合セメントともに Cl 浸透部は溶脱部よりも深部に達していた。

Cl·濃度は経時的には大きな変化は認められず、接液面の浸漬液側の沈殿により Cl·浸透 が抑制されている可能性がある。一方で、Cl 浸透部の深さは、接液面の浸漬液側に沈殿が 生成して Cl·浸透が抑制されている可能性がある試料も含め全試験体で経時的に深くなっ ており、内部拡散によるものと考えられる。

▶ 鉱物変化

浸漬試験体内部の鉱物に関して、混合セメントでは溶脱部において Mg 化合物(M-S-H と推定)の沈殿が認められた。この Mg 化合物沈殿の領域は、Ca 沈殿量が比較的少ないと Ca 溶脱及び Mg 浸透が抑制されないため経時的に拡大したと考えられた。

それ以外の鉱物の変化は、セメント種類及び塩水濃度に依らず同様の傾向を示した。また、経時的に浸漬期間4ヶ月で認められなかった鉱物が生成したり、生成した鉱物が消失したりする変化は認められなかった。

なお、普通ポルトランドセメント(以下、OPC)では、人工海水浸漬試料では試料の接液面に 外観変化(ドーム状の膨張)の発生した浸漬試験体と発生していない浸漬試験体を確認した。ま た、1/10人工海水浸漬試料ではOPCの全ての浸漬試験体の接液面に外観変化を確認した。この ドーム状の膨張の主要成分はCa、Mgであり、外観変化が無かった浸漬試験体の固液境界面の液 相側に生成した沈殿物と同様と考えられる。既往のコンクリートの海水暴露試験(福手ほか,1992) ではこの様なドーム状の膨張は報告されておらず、本試験で用いたセメントペースト硬化体は、 体積当たりのCa溶脱量がモルタルやコンクリートと比較して多かったため、接液面全体に膜状 の析出物が生成し、その影響でひび割れや膨張が発生した可能性が考えられる。EPMAからは外 観変化の有無に関係なく、溶脱する成分及び沈殿する成分は同じである事を確認した。



黒字、黒線:含有鉱物 ▼:接液面 Ettringite:3CaO・Al₂O₃・3CaSO₄・32H₂O $\label{eq:Friedel's salt: 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O} \mathsf{Friedel's salt: 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O}$ ※外部沈殿物の拡張に伴うドーム状の膨張の形成及び接液面の破損は考慮しない ※外部沈殿物の幅は、拡大して表示。

図 4.2-49 セメント系材料の化学変質挙動に関する模式図(OPC 系材料)



図 4.2-50 セメント系材料の化学変質挙動に関する模式図(混合セメント系材料)

浸漬試験体のビッカース硬度の測定結果の例を図 4.2-51 及び図 4.2-52 に示す。ビッカース硬度の測定から新たに分かった点は以下の通りである。

- ・ 塩水濃度及びセメント種類によらず、Ca溶脱が進行している領域(溶脱部)でのビッカー ス硬度の低下が認められた。
- OPCでは硬度の低下は溶脱部での空隙増加によると考えられる。一方、混合セメントでは M-S-Hと推定されるMg化合物生成により空隙増加が認められなかったにもかかわらず硬 度低下が認められ、C-S-Hの変質が硬度変化に影響していると考えられる。
- ・ 深層部の硬度は浸漬試験の開始前と同等であり、Clの浸透の有無、含有量の多少及び浸漬 後のアルミネート相の鉱物変化とビッカース硬度に関連は認められなかった。
- ・ 硬度低下の程度からセメント系材料の圧縮強度の変化を推定した。既往の検討(横関ら,

2002)から、モルタルの硬度値低下率と圧縮強度(N/mm²)低下率はほぼ1:1の関係と 推定される。これを参考にすると、塩水に浸漬したセメント系材料の溶脱部の圧縮強度は、 健全時の1/3~1/2程度まで低下する可能性が示唆された。



※ 空隙率は SEM 反射電子像の二値化画像から算出

図 4.2-52 空隙率とビッカース硬度の関係 (浸漬期間 14 ヶ月)

- 以上の結果をまとめると共に、塩水によるセメント変質が機械強度へ及ぼす影響を推定する。
 - 塩水によるセメント変質領域では、セメント系材料の機械的強度が低下する可能性がある。なお、この傾向は降水系地下水でも同様である。
 - OPCの硬度低下はCa溶脱に伴う空隙の増加が支配的要因であると考えられる。一方、混 合セメントの硬度低下はC-S-Hの変質の影響を受けている可能性がある。
 - 既往の検討を基に塩水浸漬による圧縮強度の低下を推定した結果、塩水に浸漬したセメント系材料の溶脱部の圧縮強度は、健全時の1/3~1/2程度まで低下する可能性が示唆された。

4) 塩水浸透に係わるモデルの検討

沿岸海底下では、処分場操業期間中に塩化物イオン(以下、Cl)のセメント系材料への浸透に よる内部の鋼材の腐食、それに伴うひび割れの発生、さらには、それらによる機械強度の低下が 懸念される。海水中のCl:の浸透によるセメント系材料中の鋼材腐食は、コンクリート構造物の耐 久性を評価する上で重要であることから、土木建築分野ではCl:の移動現象のみを扱った浸透予 測式及び数値解析モデルが検討されている。一方で、海水影響を受ける環境では、前項3)で確 認したように、セメント成分の溶脱以外に二次鉱物が生成する。このような環境でのセメント変 質を考慮したCl:の浸透解析においては、Cl:と海水中に含まれる他のイオンとの相互作用など多 くの水和物の相平衡を考慮することが有効である。 本検討では、平成 28 年度に産業界で検討されている Cl の浸透モデルを調査し、沿岸海底下の 地層処分の条件における評価への適用性を検討して、必要な課題を抽出した(産総研ほか, 2017)。 その結果を踏まえ、沿岸海底下での鋼材などの腐食によるセメント系材料のひび割れ発生に伴う 機械的強度の変化の評価にあたり、化学変質を考慮した Cl の浸透予測解析を用い、沿岸海底下の 地下水の浸透によりセメント系材料中の Cl 濃度が鋼材腐食発生の濃度に達する期間の評価を試 みた(産総研ほか, 2018; 2019)。

平成 30 年度にはケーススタディとして、処分場の操業期間を確実に網羅するため一般に事業 期間とされる 100 年間の期間を対象に、本解析によりコンクリート中への Cl 浸透解析を実施し た(産総研ほか, 2019)。ここでは、コンクリート 4 種類(OPC コンクリート、FAC コンクリー ト、BFSC コンクリート、吹付コンクリート(OPC ベース))、塩水 3 種類(人工海水、1/10 濃度 人工海水、1/100 濃度人工海水)についての Cl の浸透解析を実施した。解析には、Cl の浸透モデ ルの調査で見出された、物質移行(拡散モデル)と化学反応(相平衡モデル)を連成させた相平 衡物質移行解析コード(細川ほか, 2007; Hosokawa et al., 2011)を適用した Cl の浸透解析(以 下、本解析、図 4.2-53)を用いた。なお、本解析においては、固液界面の外側の沈殿生成による Cl 浸透の抑制効果を考慮できないため、Cl 浸透量が塩水濃度と線形の関係となると共に、試験よ り Cl 浸透が進行するとの計算結果となる可能性があったが、本検討においてはこの点を保守的 と判断した。



図 4.2-53 セメント硬化体中での物質移動と相平衡の概念図

本解析の結果の一例として、人工海水と接触した OPC コンクリートの Cl-浸透解析の結果を図 4.2-54 に、同ケースにおいて経過時間と鉄筋腐食限界(保守的にコンクリートの全 Cl-濃度 1.2kg/m³(土木学会,1999)、間隙水の[Cl⁻]/[OH⁻]=0.1(石田ほか,2007))になる深さの関係を図 4.2-55 に示す(解析条件及び結果の詳細は、平成 30 年度報告書(産総研ほか,2019)参照)。 結果の概略は以下の通りである。

· Cl·浸透領域

本解析におけるコンクリートへの Cl-浸透結果は、コンクリート配合や用いたセメン ト種類によっても Cl-浸透領域の深さが変化した。また、塩水濃度が高い程 Cl-浸透領域 が深くなっていた。塩水濃度と Cl-浸透領域の深さの関係は 3)の試験結果とは異なって おり、塩水濃度が高いケースにおいては Cl-浸透を実際よりも過大に評価している可能 性がある。

· 鉄筋腐食限界

経過時間と鉄筋腐食限界になる深さの関係から、鉄筋の腐食限界に達するまでの期間 を予測した。平成 30 年度の検討からは、鉄筋腐食限界に達するまでの期間はセメント 種類や配合の影響を受けている事が確認され、吹付コンクリート(OPC ベース)、OPC コンクリート、BFSC コンクリート、FAC コンクリートの順に期間が短い傾向であった。 Ca 溶脱領域

本解析の結果における 100 年後の Ca 溶脱部の深さは、人工海水浸漬のケースで Cl-浸透部の 1/10 以下であった。1/10 濃度人工海水及び 1/100 濃度人工海水のケースでは コンクリート配合や用いたセメント種類によって異なり、深くまで Cl-が浸透した OPC コンクリート及び吹付コンクリート (OPC ベース) で 1/8~1/6、Cl-浸透部が浅い混合 セメントコンクリートで 1/4 程度であった。

· 鉱物変化

解析結果において、主要な鉱物の変化は 3)の試験と一致しており、塩水の影響によ る鉱物変遷を再現できていると考えられる。一方、二次鉱物の生成場所が試験結果と異 なる事、及び、前述の通り Cl-浸透挙動が試験と異なり塩水濃度と線形の関係にある事 等、さらなる検討が必要な点も残されている。







図 4.2-55 鉄筋腐食限界になる深さと経過時間の関係の例(OPC コンクリート)

5) 塩水環境下におけるセメント系材料の機械的特性変化に関する検討のまとめ

塩水環境下におけるセメント系材料の機械的強度変化に関する検討においては、平成 27 年度 の検討により抽出された課題①から④のうち、②バルク試験体を用いた機械的強度の変化に関す るデータの取得、及び、④塩水浸透に係わるモデルの検討に取り組んだ。バルク試験体を用いた 機械的強度の変化に関するデータの取得については、セメント系材料の化学的な変質が機械的強 度に及ぼす影響を把握するため、濃度の異なる人工海水へ浸漬したバルク試験体の分析を実施し た。その結果、OPC の方は混合セメントより化学的変質の程度が大きい事、化学変質の程度と塩 水濃度との間に明確な線形関係を認められない事、Ca が溶出した部分で硬度が低下する事が確 認された。硬度低下には、OPC の場合は Ca 溶脱による空隙の増加、混合セメントの場合は C-S-H の変質が影響していると考えられた。硬度の低下の程度から、既往の検討を基に圧縮強度の低 下を推定した結果、セメント系材料の溶脱部の圧縮強度は、健全時の 1/3~1/2 程度まで低下する 可能性が示唆された。

塩水浸透に係わるモデルの検討においては、産業界で検討されている Clの浸透モデルの調査 に基づき、物質移行(拡散モデル)と化学反応(相平衡モデル)を連成させた相平衡物質移行解 析コードを適用する事とした。そして、鉄筋腐食によるセメント系材料のひび割れに起因する機 械的強度低下に関連して、本解析により Clの浸透のケーススタディを行い、それぞれのケースに ついて経過時間と鉄筋腐食限界になる深さの関係を求めた。今回実施したケーススタディでは、 塩水の影響による主要な鉱物変遷を再現できた。一方、二次鉱物の生成場所が試験結果と異なる 事、Cl浸透挙動が試験と異なり塩水濃度と線形の関係にある事等、試験結果と異なる点も認めら れる事から、Cl浸透を実際よりも過大に評価している可能性がある。

今後の課題としては、本検討で確認された C-S-H の変質等 Mg 系二次鉱物生成の機械的強度への影響評価、本検討で用いた Cl 浸透解析手法において沈殿物を評価するための検討、及び、現実の処分場の支保工を想定した試験と検討(岩盤と支保工の接触部分での地下水流動がセメント系材料の化学的変質へ及ぼす影響の評価、モルタルやコンクリート等の支保工に使用する材料での検討)等が挙げられる。また、処分場の成立性の評価における有益なデータを整備するために、地質調査から取得可能な処分場周辺の地下水条件(化学組成や流動挙動等)を反映したデータを取得する事、水理解析の精度を向上させるにあたり塩水による変質に伴うセメント系材料の透水性の変化に関する知見を拡充する事が必要であると考えられる。

参考文献

- 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会, コンクリート標準示方書 耐久性照査型施工編, 1999.
- 福手勤, 濱田 秀則, 山本 邦夫, 海洋環境に 20 年間曝露されたコンクリートの耐久性に関する研 究, 土木学会論文集 No.442, V-16, pp. 43-52., 1992.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 17 年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処 分技術調査-人工バリア長期性能確証試験-報告書, 2006.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター,平成18年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処 分技術調査-人工バリア長期性能確証試験-報告書,2007.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物 処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書(第1分冊)-人工バリアの長期挙動 の評価-,2009.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 21 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物 処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書(第1分冊)-人工バリアの長期挙動 の評価-, 2010.

- 原子力環境整備促進・資金管理センター,平成 22 年度地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物 処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書(第1分冊)-人工バリアの長期挙動 の評価-,2011.
- 細川佳史,山田一夫, Bjorn JOHANNESSON, Lars-OlofNILSSON, 熱力学的相平衡を考慮した Multi-species 物質移動モデルの構築, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp. 957-962, 2007.
- Hosokawa, Y., Yamada, K., Johannesson, B., Nilsson, L.-O., Development of a multi-species mass transport model for concrete with account to thermodynamic phase equilibriums, Materials and Structures, vol.44, pp.1577–1592, 2011.
- 石田健太,武若耕司,山口明伸,前田 聡,鉄筋腐食発生限界塩化物イオン量の定量評価に関す る実験的検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.29, No.1, pp.1065-1070, 2007.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成27年度地層処分調査等事業沿岸部処分システム高度化開発報告書,2016.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成28年度地層処分調査等事業沿岸部処分システム高度化開発報告書,2017.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,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 沿岸部処 分システム高度化開発 報告書,2018.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 30 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 沿岸部処 分システム高度化開発 報告書,2019.
- 横関 康弘, 渡邉 賢三, 安田 和弘, 坂田 昇, 炭酸化養生によるコンクリートの高耐久化, コンク リート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.555-560, 2002.

4.2.4 ニアフィールド複合現象評価手法の開発

(1) 背景と目的

高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)及びTRU廃棄物の地層処分システムの性能評価では、 ニアフィールドの長期挙動に影響を及ぼす可能性のある複数の現象と、これらの相関関係の理解 に基づき、ニアフィールドの状態変遷を評価するとともに、こうした評価から得られる知見や情 報を、核種移行の場の設定に反映させて核種移行挙動を評価することが重要である(例えば、日 本原子力研究開発機構,2015)。このようなニアフィールドの複合現象を評価するシステムを構築 する上で、材料表面や異種材料の境界面における選択的な材料の変質促進あるいは二次鉱物によ る間隙の閉塞に伴う物質移行・変質の抑制などの局所的な領域における振る舞いが施設全体の長 期的変遷に影響を及ぼす可能性を考慮することが重要であると指摘されており(日本原子力研究 開発機構,2013)、沿岸域に処分場を建設することを想定する場合においても、緩衝材やセメント 系材料等の人工バリア材料と海水系の地下水との化学反応による材料の変質・劣化等による影響 及びこれら材料間の相互作用による影響を考慮することが必要であると考えられる。

また、沿岸域に処分場を建設する場合には、海水準変動等の環境変遷による、長期的な時間ス ケールでの地下水組成の変遷を考慮することが特に重要であると考えられるが、このような影響 については、ニアフィールドの複合現象を評価するシステムに関する既往の検討(例えば、日本 原子力研究開発機構, 2012; 2013; 2014; 2015; 2016; 2017; 2018)では考慮されていない。

以上の観点から、沿岸域処分を想定した複合現象の評価手法の構築に向けて、はじめに、沿岸 域処分における人工バリア材料の変質挙動の特徴を把握するために、セメント系材料とベントナ イト系材料に対する海水系の地下水環境での変質挙動に関する既往の知見を調査すると共に、こ の結果に基づき、これら異種材料間の相互作用や化学・水理・力学に跨るマルチフィジックスの 連成現象をニアフィールドの概念モデルとして整理した。また、降水系地下水環境を想定する場 合との材料の変質挙動の違いや、海水準変動等の環境変遷によって地下水組成が長期的に変遷し ていく場合の影響等の傾向を把握することを目的として、沿岸部に処分施設を建設する場合を想 定して、ニアフィールド環境条件の変遷を考慮した化学・物質輸送解析を行った。

次に、上記の検討の結果を踏まえて、沿岸域処分に特有の環境変遷や材料の変質・相互作用等 を考慮した複合現象の評価手法を構築することを目的として、ガラス固化体と TRU 廃棄物を対 象とする地層処分システムにおいて共通的に使用される緩衝材に着目し、沿岸域処分を想定した 化学・水理等の連成解析の手法を具体化すると共に、これに基づく試解析を行った。さらに、これ らの結果から、沿岸域処分において特徴的な現象が、ニアフィールドにおける核種移行の場の状 態に影響を及ぼす可能性の有無について整理した。本項ではこれらの検討の成果を示す。

(2) 沿岸部処分を想定したニアフィールド複合現象の特徴の整理

沿岸域処分を想定したニアフィールド複合現象の評価を行うために必要な情報として、沿岸域 処分を想定する場合のニアフィールドの状態変遷において特徴的な現象等に関する知見の調査を 行うと共に、降水系地下水環境を想定する場合との材料の変質挙動の違い等を把握するための予 備解析を実施した。

1) 沿岸域処分を想定したニアフィールド複合現象の概念モデルの構築

ニアフィールドでの核種の移行挙動を規定する場の状態については、人工バリア材料と地下水 との化学反応による変質・劣化とそれに伴う水理・物質移行特性の変化のみならず、材料の変形 等の力学的な現象を含む、化学・水理・力学に跨るマルチフィジックスの連成現象で定まると考え られる。さらに、緩衝材、セメント系材料、鉄等の異種材料間の相互作用による影響も考慮する ことが必要である。こうした観点から、ここでは、沿岸域に処分場を建設する場合を想定してニ アフィールドの複合現象を評価する上で、化学-水理-力学に跨るマルチフィジックスの連成及び 材料間の相互作用等に着目しつつ、考慮すべき現象を概念モデルとして整理することを試みた。

はじめに、地層処分システムの緩衝材として想定されるベントナイト系材料と、支保、TRU廃 棄物の廃棄体パッケージの充填材、坑道の埋め戻し材等への使用が想定されるモルタル及びコン クリート等のセメント系材料を対象として、海水系の地下水で想定される化学成分などと反応し てこれら材料が変質する現象に関する知見を調査し、これらの変質現象がバリア材料としての安 全機能に及ぼす影響と共に整理した。これらの整理結果を表 4.2-12 と表 4.2-13 に示す。

次に、これらの調査の結果等を踏まえて、海水系地下水環境下における概念モデルを整理した。 結果を図 4.2-56 に示す。図 4.2-56 に示されるように、材料間の相互作用や化学・物質輸送・力学 に跨る連成の全体構造については、海水系地下水の場合と降水系地下水の場合で大きな違いは無 いが、海進・海退に起因する、沿岸域処分に特有の地下水環境の変遷を考慮することにより、連 成現象等の帰結として生じるバリア材料の安全機能の変化の程度等が異なる可能性があると考え られる。このような可能性に関する詳細な検討の結果については次項(3) にて後述する。

現象	海水中の原因物質等	想定される安全機能への影響等
スメクタイトのパリゴルスカイトへの変質	マグネシウム、シリカ	緩衝材の膨潤性の低下等。
スメクタイトの緑泥石又は緑泥石に類似した鉱物へ の変質	マグネシウム	緩衝材の膨潤性の低下等。
スメクタイトのサポナイトへの変質	マグネシウム	緩衝材の膨潤性の低下等の安全機能への影響は限定的となる可能性がある
スメクタイトのイライトへの変質	カリウム	緩衝材の膨潤性の低下。ただし、100℃以下となるように処分施設を設計することにより、イライト化を回避できる可能性がある。
層間陽イオン型の Mg 型への変化	マグネシウム	緩衝材の膨潤性の低下。
層間陽イオン型の K 型への変化	カリウム	緩衝材の膨潤性の低下。
層間陽イオン型の NH4型への変化	アンモニウム	緩衝材の膨潤性の低下。
密度が比較的低い領域における膨潤圧の低下	海水中の塩分	緩衝材の膨潤性の低下。有機物の透過が促進される可能性もある。

表 4.2-12 ベントナイト系材料において想定される変質現象と安全機能への影響(産業技術総合研究所他, 2017)

表 4.2-13 セメント系材料において想定される変質現象と安全機能への影響(産業技術総合研究所他, 2017)

現象	海水中の原因物質等	想定される安全機能への影響等
ブルーサイト及び M-S-H ゲルの生成による間隙水の pH 低下と、それによるポルトランダイト及び C-S-H ゲルの	マガネシウム	ポルトランダイトや C-S-H ゲル溶解に伴うコンクリートの強度低下・ひび割れが またらす、透水性の増加、直載した移行経路の形成
溶解	* 7 * 7 9 4	C-S-H ゲル溶解に伴う核種の収着性低下。
緩衝材あるいは母岩との界面でのブルーサイト生成	マグネシウム	界面における地下水及び物質の移行抑制。
エトリンガイトや二水石膏等の膨張性鉱物の生成と、それ によるひび割れの発生・劣化の促進	硫酸塩	セメント組織の脆弱化に伴うコンクリートの強度低下・ひび割れがもたらす、透 水性の増加。卓越した移行経路の形成。
ソーマサイトの生成	硫酸塩 炭酸塩	セメント組織の脆弱化に伴うコンクリートの強度低下・ひび割れがもたらす、透水性の増加。卓越した移行経路の形成。 C-S-H ゲル溶解に伴う核種の収着性低下。
フリーデル氏塩生成に伴う pH 上昇	塩化物	アルカリ骨材反応によるひび割れの発生、透水性の増加及び卓越した移行経路の 形成 緩衝材への高 pH 間隙水の移行によるモンモリロナイトの溶解度上昇、緩衝材の 劣化。
コンクリート内部における 3CaO・CaCl ₂ ・15H ₂ O 等の析 出とそれによる結晶圧の発生・コンクリートの破壊	塩化物	透水性の増加による、卓越した移行経路の形成。
カルサイト等の沈殿と、それに伴うポルトランダイト及び C-S-Hの溶解	炭酸塩	ポルトランダイトや C-S-H ゲル溶解に伴うコンクリートの強度低下・ひび割れが もたらす、透水性の増加、卓越した移行経路の形成。 C-S-H ゲル溶解に伴う核種の収着性低下。 カルサイト沈殿、セメント内部の緻密化による物質移行の抑制。
コンクリート中の鉄の表面の不動態被膜の破壊・腐食の進 展	塩化物	金属材料の腐食膨張等による引張応力が加わることでひび割れが発生。透水性の 増加による、卓越した移行経路の形成。



図 4.2-56 海水系地下水を想定した場合のニアフィールドの概念モデルの例 (海水系地下水特有の現象等を赤字で示す)(産業技術総合研究所ほか, 2018)

2) 人工バリア材料の材料間相互作用を考慮した化学-物質輸送解析

降水系地下水環境を想定する場合との材料の変質挙動の違いや、海水準変動等の環境変遷によって地下水組成が長期的に変遷していく場合の変質挙動の傾向を把握することを目的として、沿岸部に処分施設を建設する場合を想定して、ニアフィールド環境条件の変遷を考慮した化学・物質輸送解析を行った。解析体系としては単純な一次元体系を想定し、人工バリア外側の掘削影響領域やコンクリート支保において地下水の流れが生じている状況を想定した。

TRU 廃棄物処分施設の人工バリアシステムを対象として、セメント系材料とベントナイト系 材料の相互作用に着目した化学・物質輸送解析の結果の例を図 4.2-57 に示す。セメント系材料や、 セメント系材料との境界近傍のベントナイト系材料の変質の程度や、生成された二次鉱物の種類 などが、海水系地下水と降水系地下水との場合では若干違いが見られたものの、10万年後におい ても、緩衝材中ではモンモリロナイトが十分残存していることが確認された。また、海水準変動 等の環境変遷により、処分後の長期的な時間スケールにおいて、人工バリア外側を流れる地下水 が、海水系地下水から降水系地下水に切り替わる状況を想定して境界条件を設定し、解析を行っ た場合でも、材料間の境界で生成される二次鉱物によって間隙が閉塞されて物質輸送が抑制され ること等により、緩衝材の間隙水組成に大きな変化は見られず、上記の解析と同様に、緩衝材に おいて、長期間経過した後でもモンモリロナイトが十分残存していることが確認できた。このよ うな傾向は、ガラス固化体の人工バリアシステムを対象として、オーバーパックの鉄、ベントナ イト系材料及びセメント系材料の相互作用に着目した解析においても同様であった。



図 4.2-57 TRU 廃棄物処分における人工バリアシステムを対象とする化学-物質輸送解析結果の 例(支保における地下水の移流を考慮した場合の 10 万年後の鉱物の組成分布、 左:全体図、右:緩衝材と支保境界の拡大図) (産業技術総合研究所ほか, 2017)

(3) 核種移行経路の場の状態を評価するための連成解析手法の構築

ガラス固化体と TRU 廃棄物を対象とする地層処分システムにおいて共通的に使用される人工 バリア材料として緩衝材に着目し、沿岸域処分を想定する場合における緩衝材の長期状態変遷を 反映した核種移行解析の実施に向けて、化学・水理等の連成解析の手法を具体化した。

1) 核種移行経路の場の状態を評価するための連成解析の課題の抽出

前項で整理された概念モデルで示されるように、海水系地下水環境においても降水系地下水環 境と同様に、緩衝材とコンクリート支保やオーバーパックの境界領域で二次鉱物が沈殿して間隙 が充填されることにより、緩衝材のそれ以上の変質は抑制され、同時に、核種移行も顕著に抑制 されると考えられる。このことから、処分システムの既往の性能評価においては、人工バリア材 料の変質は、核種の閉じ込め機能に対してはむしろ好ましい効果を有するものと考えられている (例えば、電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構,2005)。しかしながら、(2) で示したよ うに、海進・海退に起因する、沿岸域処分に特有の地下水環境の変遷を考慮すると、このような 境界領域における緩衝材の変質と核種移行の抑制効果が担保されない可能性があると考えられ る。この場合の核種移行への影響要因として以下が考えられる。

- ✓ 処分場の環境が沿岸域から陸域に変遷して動水勾配が上昇し、コンクリート支保と岩盤あるいは緩衝材とコンクリート支保等の異種材料間の境界近傍で比較的速い地下水流れが生じると、地下水との反応により溶解したバリア材料の成分が外部へ輸送される速度が、二次鉱物が再沈殿する速度を上回る可能性が考えられる。この場合、これらの境界において物質輸送を抑制する保護的な変質層が生成(再生)されにくくなり、材料の溶脱あるいは変質が促進していく現象が生じる可能性が考えられる。
- ✓ 閉鎖後長期の時間スケールにおいてニアフィールド岩盤の地下水が海水系地下水から降水系 地下水に切り替わることにより、海水系地下水環境下において緩衝材・コンクリート支保間 に形成された境界層が、降水系地下水が浸入することで熱力学的に不安定な状態となり溶解 する可能性が考えられる。この場合、上記の流速の増加との組み合わせにより、緩衝材の変 質が進行していく可能性が考えられる(例えば、炭酸イオンやマグネシウムイオン濃度が低 下することで、緩衝材・支保間に沈殿していたカルサイトやドロマイトが再溶解する可能性 等が考えられる)。
- ✓ 緩衝材の外側境界近傍においてコンクリート支保との反応によりモンモリロナイトの含有量

が減少しても、内部からの膨潤圧が発揮されると密度の再分配が起こり、拡散場が維持され る可能性があると考えられる。しかしながら、海水系地下水環境下では、降水系地下水環境 よりも、特に、密度が低い領域で膨潤力が比較的低い値を示すことが知られており(産業総 合技術研究所ほか, 2017)、これにより、コンクリート支保境界近傍においてモンモリロナ イト含有量の低下を緩和する密度の再分配が妨げられる可能性がある。また、降水系地下水 環境下に比べて、海水系地下水環境下では緩衝材の透水性が低い値を示すことから(例え ば、産業総合技術研究所他, 2017)、これらの組合せによって緩衝材の変質が進行していく 可能性が考えられる。

このような沿岸域処分に特有の地下水環境の変遷によって、コンクリート支保との相互作用が 促進され、緩衝材の安全機能が失われる状態の変化をストーリーボードとして整理した。この整 理の例を図 4.2-58 に示す。なお、海進・海退に伴って生じる、沿岸域処分に特有の地下水環境の 変化としては複数のパターンが想定されるものの、このストーリーボードによる状態変遷の整理 においては、処分場の環境が沿岸域から陸域に変遷する単純なパターンを想定した。

緩衝材における、このような状態変遷のパターンに着目しつつ、緩衝材の変質等の状態変化に よる核種の移行特性に対する影響に関する既往の知見(例えば、伊藤・三原,2005等)を参考 に、拡散係数、透水係数及び収着分配係数等を支配する影響因子として、緩衝材のモンモリロナ イト含有率と間隙率に着目し、これらの影響因子の変化を定量的に評価するための化学-水理等 の連成解析を行うものとして、このためのモデル等に求められる要件を以下に示すように整理し た。

- ✓ 海水系地下水環境と降水系地下水環境における人工バリア材料の化学的変質挙動の違いを化 学・物質輸送解析モデルで表現できること。
- ✓ ニアフィールド岩盤を流れる地下水の組成や動水勾配が処分後の長期的時間スケールの中の ある時点で切り替わることを化学・物質輸送解析及び水理解析の境界条件に反映できること。
- ✓ 海水系地下水環境下と降水系地下水環境下での緩衝材の膨潤性及び透水性の違いを力学解析 モデルで表現できること。



図 4.2-58 ニアフィールドの地質環境が沿岸域から陸域へ変遷する場合において緩衝材の安全 機能が失われる状況に至る状態変遷のストーリーボードによる整理の例

2) 緩衝材の長期変遷に着目した連成解析

前項(2)で示したような、海進・海退に起因する、沿岸域処分に特有の地下水環境の変遷を考慮する場合に、コンクリート支保との境界領域における緩衝材の変質と核種移行の抑制効果が担保されない可能性の有無に着目して化学・水理の連成解析を行った。解析においては、前項(2)のストーリーボードで示したような、坑道に交差する岩盤中の亀裂から地下水が浸入してコンクリート支保でセメント成分が溶出することによって、支保で選択的な地下水の流れが生じる状況と、これによって高アルカリ水が供給され、緩衝材が変質する状況とを想定し、このような挙動を化学・物質輸送解析と水理解析の連成解析で表現するものとした。

解析結果の一例として、処分場閉鎖後の長期的な時間スケールにおいて、沿岸域処分に特有の 地下水環境の変化として想定される複数のパターンのうち、沿岸域から陸域に変遷する単純なパ ターンを想定した解析による鉱物組成分布を図 4.2-59 に示す。コンクリート支保においては、 降水系地下水に切り替わることで、CSH の Ca/Si 比の低下や、ポルトランダイト、エトリンガイ ト等の溶解による組成変化が認められた。しかしながら、緩衝材においては、モンモリロナイト の減少はコンクリート支保との境界近傍に限定され、処分場周辺の地下水組成や流速の変化によ る影響はほとんど認められなかった。間隙率についても大きな変化は認められなかった。なお、 これらの結果から、緩衝材において顕著な変質が認められなかったことから、前項(2)で示した、 緩衝材とコンクリート支保との境界における密度再配分に関する力学的な作用については本解析 では考慮しなかった。

上記の結果は、前項(2)で整理された、沿岸域処分に特徴的な環境変遷等によって核種移行に 顕著な影響を与える可能性が小さいことを示唆している。今後は、より広範囲な地質環境条件や、 海水準変動及び隆起・侵食による地下水環境の変化に関する複数のパターン間での人工バリア材 料の変質挙動への影響の違いにも着目して評価を行い、このような沿岸域に特徴的な環境変遷に よる核種移行への影響について知見を整備していくことが重要である。



図 4.2-59 処分後 10 万年後に沿岸域から陸域へ処分場の環境が変遷する場合の 鉱物組成分布(上:処分後 10 万年後、下:陸域への変遷から 6 万年後)

(4) まとめ

人工バリアシステムで使用されるセメント系材料及びベントナイト系材料について、海水系の 地下水環境での変質挙動に関する既往の知見を調査すると共に、この結果に基づき、これら異種 材料間の相互作用や化学・水理・力学に跨るマルチフィジックスの連成現象をニアフィールドの 概念モデルとして整理した。また、降水系地下水環境を想定する場合との材料の変質挙動の違い や、海水準変動等の環境変遷によって地下水組成が長期的に変遷していく場合の影響等の傾向を 把握することを目的として、沿岸部に処分施設を建設する場合を想定して、ニアフィールド環境 条件の変遷を考慮した化学・物質輸送解析を行った。さらに、上記の結果を参考として、沿岸域処 分において、コンクリート支保等の異種材料との相互作用等によって、緩衝材の止水性が失われ る可能性に着目して、化学・水理の連成解析モデルを構築して試解析を行った。その結果、緩衝材 においてはモンモリロナイトの減少はコンクリート支保との境界近傍に限定され、処分場周辺の 地下水組成や流速の変化による影響はほとんど認められなかった。このことは、試解析で想定し た状態変遷のパターンでは、核種移行経路の場の状態に著しい影響を与える可能性は小さいこと を示唆していると考えられる。

今後は、海水準変動や隆起・浸食による地下水環境の変化に関する複数のパターン間での人工 バリア材料の変質挙動への影響の違い(例えば、人工バリア材料の変質挙動の空間的な不均質性 の違い等)にも着目した評価手法の構築及びその評価結果を核種移行評価へ反映する手法を構築 することにより、これに基づくケーススタディを通じて環境変遷による核種移行への影響に関す る情報を拡充できることが期待される。

参考文献

- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, TRU 廃棄物処分技術検討書-第2次 TRU 廃棄物処 分研究開発とりまとめ-, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005.
- 伊藤弘之,三原守弘,ベントナイト系材料の飽和透水係数の変遷評価式,JNC TN8400 2005-029, 2005.
- 日本原子力研究開発機構,平成23年度地層処分技術調査等事業TRU 廃棄物処分技術セメント材 料影響評価技術高度化開発報告書,2012.
- 日本原子力研究開発機構,平成24年度地層処分技術調査等事業TRU 廃棄物処分技術セメント材 料影響評価技術高度化開発報告書,2013.
- 日本原子力研究開発機構,平成 25 年度地層処分技術調査等事業セメント材料影響評価技術高度 化開発報告書,2014.
- 日本原子力研究開発機構,平成 26 年度地層処分技術調査等事業セメント材料影響評価技術高度 化開発報告書,2015.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 27 年度地層処分技術調査等事業処分システム評価確証技術開発 報告書, 2016.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 28 年度地層処分技術調査等事業処分システム評価確証技術開発 報告書, 2017.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 29 年度地層処分技術調査等事業処分システム評価確証技術開発 報告書, 2018.
- 産業技術総合研究所他, 平成 28 年度地層処分技術調査等事業沿岸部処分システム高度化開発報 告書, 2017.
- 産業技術総合研究所他, 平成 29 年度地層処分技術調査等事業沿岸部処分システム高度化開発報 告書, 2018.

4.3 塩水環境下ニアフィールド領域での処分システムの成立性に係る手法の提示

設計・施工をとおして構築される地層処分システムの成立性を考える際には、閉鎖後長期の安 全性を満足させることに加え、工学技術の観点から以下の取組をもって処分システムの成立性を 示していく必要がある(図 4.3-1)。

- 閉鎖後長期の安全評価が前提とする処分システムの初期性能達成の見通しを得る (設計照査技術) ⇒製造/施工品質の幅や施工後の擾乱影響(湧水や坑内換気など)の見 積り
- 2) 操業段階における製造/施工の品質保証や性能確認ができることの見通しを得る (品質保証を含む性能確認技術) ⇒それらを可能とする具体的なプログラム案が準備され ている

そのためには、上記の取組に必要となる技術の整備や知見やデータの体系の具体化を進め、概 要調査段階のセーフティケース開発や精密調査計画の立案を支援する設計照査や品質保証/性能 確認プログラムの構築に資する技術基盤を整備していくことが望まれる。



図 4.3-1 工学技術の枠内で扱われる処分システムの成立性

本章の冒頭(4.1節)に示した沿岸部研究会による課題整理を踏まえ、本事業では上記1)の課題に取り組んできた。その際、操業段階と閉鎖後長期の処分システムの安全確保のそれぞれが対象とする時間スケールの違いを考慮しつつ、対象期間における湧水環境(水理場)に着目して、処分システムの初期性能達成の見通しを得るための定量化手法の整備を進めた。

平成 27 年度に実施した北欧(沿岸部での立地を進めているスウェーデン及びフィンランド) の先行的な取組事例に関する調査結果から、特に、閉鎖段階までにおける廃棄体定置後の緩衝材 の挙動に着目し、緩衝材の機能発揮に影響を及ぼす要因(湧水による緩衝材流出挙動)に留意す る必要性が示されている(産総研ほか,2016)。湧水が及ぼす影響の観点から、緩衝材と地下水の 相互作用である吸水・膨潤、並びに再冠水過程における流出挙動が人工バリアシステムの成立に 深く関わっており、ニアフィールド領域におけるこの影響を定量化して適切な対策を施すことが ガラス固化体を内包するオーバーパック周囲の環境条件を維持することにつながる。これを踏ま え、本課題への取組では、わが国の沿岸部で特徴的となる地下の水理環境(湧水環境/湧水対策) や処分システムの構成材料に対する化学的影響(塩水系地下水)などの状況を念頭に置いて、重 要な要素や影響因子を特定して、成立性を提示するための手法の整備に向けた検討を進めてきた。

なお、グラウトは、建設~閉鎖段階における地下水理環境の擾乱影響の緩和対策(湧水対策) として、本課題における個別のテーマの一つと位置付け、本節の中で展開している。本節では、 次の構成で個々の課題に関する全体計画並びにこれまでの実施内容や得られた成果について整理 する。

- ・グラウト設計及び影響評価技術の開発(4.3.1 項)
- ・ニアフィールド領域での処分システム構成材料の成立性と品質確保の方法の提示 (4.3.2 項)

4.3.1 グラウト設計及び影響評価技術の開発

(1) はじめに

坑道掘削時の湧水抑制対策にはグラウト注入が有効であるが、地層処分のための地下坑道は高 水圧及び低透水性の地質環境にあり、グラウトによる天然バリア・人工バリアへの影響が懸念さ れる。このことから、既存のグラウト技術を高度化する必要がある。グラウトに関する研究開発 がこれまで多く行われてきている。例えば、平成 19 年度から 24 年度まで、資源エネルギー庁の 委託事業「地下坑道施工技術高度化開発」が行われた(原子力機構,2013a:2013b)。 グラウトの 材料としては、古くは普通ポルトランドセメントが用いられてきたが、目的や用途に応じて、超 微粒子や低アルカリ性のセメントが開発・適用されてきた。ただし、セメント系材料は、海水条 件下では特に大きな問題になることは指摘されていない。処分事業の進んでいる北欧では、将来 の地層処分場に非常に厳しい許容湧水量が求められている。SKB では、例えば処分坑道において 1.7L /分/100 m (Svensk Kärnbränslehantering AB, 2007)、POSIVA では 1.8L /分/100 m (Hollmén, et al., 2013) とされている。処分坑道や処分孔周辺において湧水量を大幅に少なく するために、浸透性が高くて耐久性の高い活性シリカコロイドを用いた溶液型のグラウトの研究 が行われ、沿岸域のスウェーデンのエスポ HRL やフィンランドの ONKALO において実証試験 及び実適用が開始されている(Funehag, 2011; Hatakka, et al., 2013)。ただし、海水条件下で の硬化のメカニズムは不明であり、施工方法も未確立である。溶液型グラウトの周辺岩盤への影 響については未知の部分が多い。わが国では、瑞浪の深度 500m という高圧下において超微粒子 セメントに加えて溶液型グラウトを用いたグラウトの試験施工に成功しているが、ポストグラウ チング後の湧水量が約 70 L/分/100 m である(辻ほか, 2016)。また、沿岸域の倉敷では塩水環境 の地下水において溶液型グラウトによる施工(征矢ほか,2013)が実施されているが、具体的な 施工方法は未確立である。このような背景を踏まえて、海水条件下における溶液型グラウトの設 計・施工方法を確立することを目的として、本研究開発では以下の課題を設定し、グラウトに関 する研究を進めた(桝永ほか,2017; 辻ほか,2017; Tsuji, et al., 2017; 2019)。

- ・既存の知見及び課題の整理
- ・グラウト特性データの拡充・長期挙動の現象理解・モデル化・数値解析
- ・グラウト設計技術の更新・適用性確認
- ・グラウトの影響評価技術の更新・適用性確認

(2) 既存知見の整理・課題の設定

グラウトは、坑道掘削時の湧水対策として重要な技術である。土木分野ではダムや道路・鉄道 トンネルにおいて実績が豊富であり、地層処分の分野においても研究開発が行われている。本節 では、既存のグラウト技術を整理した後に、沿岸部を対象とした場合の課題について抽出し、今 後の研究計画を策定した。 海底下構造物におけるグラウト技術の情報調査として、青函トンネル、国家石油ガス備蓄基地 プロジェクト及び北欧の事例について文献調査を実施した。また、グラウト技術に関する既存の 研究成果として、幌延及び瑞浪の深地層研究所における研究例と資源エネルギー庁委託事業「地 下坑道施工技術高度化開発」(日本原子力研究開発機構 HP, 2013a; 2013b)を抽出した。これら の結果より、

・セメント系の材料の長期耐久性について青函トンネルの事例で実証されている

溶液型グラウトについては設計や施工方法が未確立である

と言える。地層処分事業を想定した場合、アクセス坑道や連絡坑道で実施されることが想定され る。セメント系材料を用いたグラウトについては、海水条件下でも支障なく施工でき、かつ、長 期耐久性も確保できると考えられる。一方、処分坑道や処分孔まわりで用いられると想定される 溶液型グラウトについては、海水条件下の挙動や周辺への影響も含めて未知の部分があり、グラ ウトの設計や施工方法についての研究開発の要素が残されていると考える。2013年に資源エネ ルギー庁委託事業において整理したグラウト技術を図 4.3-2に示す。

本事業においては、処分坑道並びに処分孔まわりで使用が想定される溶液型グラウトについて、 海水条件下での挙動や特性について明らかにすることを課題として設定した。



図 4.3-2 地層処分事業を想定した許容湧水量の目安及びグラウト技術の検討例

(3) 海水条件下で適用可能な溶液型グラウトの配合の検討

以下の3つの配合(図 4.3-3)について検討した(中島ほか, 2018; Tsuji, et al., 2017; 2019)

- ・「従来型グラウト」:淡水環境で無機塩系の硬化促進剤(KCl や NaCl)のみを用いてゲルタ イムの調整を行う従来の溶液型グラウトの配合。瑞浪超深地層研究所で適用 された配合。ただし、海水条件下では白濁現象が生じ適用が困難。
- ・「海水適応グラウト」:海水環境下で白濁現象を生じさせないように硬化促進剤に pH 調整剤 を併用してゲルタイムを調整する配合。
- ・「海水硬化促進グラウト」:練混ぜ水で用いる海水の硬化促進機能を有効に活用し、硬化促進 剤を用いないで pH 調整剤とシリカの量でゲルタイムを調整する配合。使用
材料の種類を減らすことができ、現場での施工性の向上が期待される。

【従来型グラウト】 海水条件下では適用不可(海水条件下での白濁懸念)

HI シリカ	硬化 促進剤	練混ぜ水 (資水)
--------	-----------	--------------

【海水適応グラウト】 海水条件下で適用可

Hiシリカ	出る	硬化 促進剤	練混ぜ水 (人工海水)
【海水硬化促進グラウト】	海水条件下で 適用 す	ប	
Hī シリカ	田間総副	練温t (人工))	f水 mok)

※Hi シリカ: 強化土エンジニヤリング社製のコロイダルシリカ

「従来型グラント」と「海水適応グラウト」については、平成28年度にそれらの配合の成立性 を検討した。具体的には、練混ぜ水を人工海水、50%人工海水及び精製水の三つの条件に対して、 硬化促進剤、pH 調整剤及びゲルタイムをパラメータとして、強度試験(一軸圧縮試験、三軸圧縮 試験、ベーンせん断試験)や白濁試験、粒径や粘性の測定などを実施した(中島ほか,2017; Tsuji, et al., 2019)。一軸圧縮試験の状況を図 4.3-4 に、ベーンせん断試験の状況を図 4.3-5 に示す。



図 4.3-4 ホモゲルの円筒供試体(左)及び一軸圧縮試験(中・右)の状況

図 4.3-3 3種類の溶液型グラウトの配合の考え方



図 4.3-5 ベーンせん断試験の状況(上:試験器、下左:供試体、下右:試験状況)

上記のとおり、海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得のため、練り混ぜ水が異なる溶 液型グラウトに対して、ゲルタイムを 60 分及び 120 分に調整するための配合(基本配合)を設 定し、基本配合のグラウト及びゲル化したホモゲルに対して、基本物性の取得、並びに施工性に 関連する特性を取得した。表 4.3-1 に試験結果をまとめる。

表 4.3-1 海水適応グラウトに関する試験で得られた知見のまとめ

	まとめ
	 練混ぜ水として人工海水、精製水及びその中間の性質を示すものとして人工海水と精製水を1:1 で混合した3種類を選定した。
 基本物性の把握 2)施工性・ 止水性(ゲ ル化特性)の把握 	 3 種類の練混ぜ水を用いて、硬化促進剤及び pH 調整剤の添加量を変えてゲルタイムを 測定し、同じゲルタイムを実現するためには練混ぜ水の種類に応じて添加剤量を変える 必要があることが分かった。
	●3 種類の練混ぜ水ごとにゲルタイムが 60 分及び 120 分となる添加剤量(硬化促進剤、 pH 調整剤)を設定し、計6種類の基本配合を設定した。
	 基本配合のホモゲルを作製し、短期的な力学強度を把握する目的で、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験及びベーンせん断試験を実施した結果、最大28日までの材齢において、力学強度が時間とともに増加する傾向は、練混ぜ水の種類に依存しないことが判明した。
	 すなわち、pH 調整剤を用いる本手法に拠れば練混ぜ水として塩水を用いることは、基本 物性に影響を与えることはなく、有意な問題点が見つからなかった。
	 白濁試験では、3種類の練混ぜ水によるグラウトを海水環境の地下水に接触させ、急激 にゲル化(白濁)しない配合を把握し、前節の基本配合の設定へフィードバックした。
	 粒径の経時変化測定試験では、ゲルタイム 60 分の3 種類の練混ぜ水の基本配合に対して、動的光散乱方式により確認した。この結果、時間に応じて粒径の変化する傾向が練 混ぜ水の違いに影響されないことが分かった
	 粘性の経時変化測定試験では、40分(ゲルタイムの2/3)程度までは非常に小さいニュートン流体挙動を示しており、粘性の増加傾向に練混ぜ水の違いは確認できなかった。
	 温度が変わることによる影響を、ゲルタイムとホモゲルの短期的な力学強度に着目して 確認した。ホモゲルの最大7日材齢の力学強度については、低温側は基本温度に対して
	若干小さい一軸圧縮強度を示し、高温側は2倍程度大きい一軸圧縮強度を示した。練混 ぜ水が変わることによる温度に依存する強度特性への影響は確認できなかった。

平成 29 年度には、「海水硬化促進グラウト」について、平成 28 年度と同様の試験を実施した

結果、一部の条件では白濁現象が生じたものの、基本配合を設定することが可能であることを確認した。表 4.3-2 に基本配合を、表 4.3-3 に試験結果をまとめる。

Hiシリカ pH 調整剤 硬化促進剤 配合名. 練混ぜ水 ゲルタイム pН (ml/L)(g/L)(ml/L)Si-45 80分 4507.750 人工海水 0.5Si-60 72 分 600 8.13

表 4.3-2 海水硬化促進グラウトの2種類の基本配合

表 4.3-3 海水硬化促進グラウトに関する試験で得られた知見のまとめ

	まとめ
1) 基本物性 の把握	 海水条件下での施工の合理化の観点で練混ぜ水として海水を用いて、pH 調整剤のみでゲルタイムをコントロールする海水硬化促進グラウトについて、ゲルタイム 60 分となる配合が、グラウト原液である Hi シリカの混合量を調整することで可能であることを明らかにし、Hi シリカ濃度が異なる2種類の基本配合を設定した。 基本配合のホモゲルを作製し、一軸圧縮試験を実施した結果、力学強度が時間とともに増加する傾向を確認したとともに、一軸圧縮強度は Hi シリカの混合量に依存することがわかった。
2) 施工性・ 止水性(ゲ ル化特性) の把握	 • 白濁試験では、硬化促進剤を用いた海水硬化促進グラウトを海水環境の地下水に接触させ、急激にゲル化(白濁)しない配合を把握した結果、pH 調整剤を 0.5 ml/L 添加することで白濁しないことが明らかになり、基本配合の設定へフィードバックした。 • 粘性の経時変化測定試験では、40分(ゲルタイムの 1/2)程度までは非常に小さいニュートン流体挙動を示していたが、硬化促進剤と pH 調整剤でゲルタイムの調整を行った基本配合よりも早い段階で粘性が増加する傾向となった。

(4) 海水条件下での溶液型グラウト特性データの取得

1) 長期力学的安定性確認試験

材齢の経過とともに溶液型グラウトの強度が増加することを確認するとともに、練混ぜ水の違いによる強度発現の違いを、一軸圧縮試験を行い確認した。試験は、標準温度 20℃で養生した供 試体及び 55℃で促進養生した供試体について行った。試験対象は 6 種類の基本配合である。試験 期間は最大 2 年間を予定し、促進養生では加賀(2000)の研究によると促進倍率 30 倍とされて いることから、最大 60 年後の時間が想定できる。養生は、20℃標準養生、55℃促進養生ともに、 気中で 6 日間 20℃標準養生を行い、そののちに養生水に浸した。養生水は練混ぜ水と同じとし、 養生水の温度は 20℃、55℃とした。海水適応グラウトについては、平成 28 年度から養生を開始 し、平成 30 年度において 720 日時点の試験データを取得した。海水硬化促進グラウトについて は、平成 29 年度から養生を開始し、平成 30 年度において 470 日時点の試験データを取得した。 図 4.3-6 に海水適応グラウトの試験結果を、図 4.3-7 に海水硬化促進グラウトの試験結果を示 す。図には人工海水の例を示す。また、表 4.3 4 に知見のまとめを示す。



図 4.3-6 海水適応グラウトの一軸圧縮強度の変化



図 4.3-7 海水硬化促進グラウトの一軸圧縮強度の変化

	表 4.3-4	朝力学的安定性確認試験で得られた知見のまとめ
--	---------	------------------------

	まとめ
海水適応 グラウト	 20℃標準養生の試験の結果、すべての配合のホモゲルにおいて、250 日までは一軸圧縮 強度は養生時間に応じて増加し、練混ぜ水の違いによらず、ほぼ同等の強度を示した。 練混ぜ水に人工海水を用いた場合であっても強度が小さくなる問題点などは認められな かった。 養生時間が 250 日を超えると、練混ぜ水の違いで強度が異なる結果となった。練混ぜ水 に人工海水を用いたケースでは 250 日をピークに強度の低下が始まり、720 日時点では 100 kPa 以下を示し、その後も継続的に強度が低下する可能性がある。練混ぜ水に 50% 人工海水を用いたケースでは、最も高い強度を示したのは 630 日時点であり、720 日で はそれよりも強度が低い結果を示しており、人工海水が練混ぜ水の場合より遅れて 630 日時点から強度低下が始まっていることが予想される。
海水硬化 促進 グラウト	 ●20℃標準養生の試験の結果、海水硬化促進グラウト(Si-45、Si-60)の一軸圧縮強度は、 海水適応グラウト(S-60)に比べて低いことがわかる。これは、海水硬化促進グラウト のシリカ含有率が低いことが原因と考えられる。 ●一軸圧縮強度の時間変化については、海水硬化促進グラウトは、海水適応グラウトと異 なる傾向を示した。すなわち、海水適応グラウトは250日をピークに強度が低下し始め たが、海水硬化促進グラウトの2種類のホモゲルの強度は480日時点で増加中である。

2) 長期力学的安定性確認試験

地下水にさらされたときのホモゲルの化学的耐久性を把握するために、硬化したホモゲルを養 生水に浸漬し、ホモゲルからのシリカ成分などの溶出を養生水の化学分析を行うことで確認した。 基本配合 6 種類に対して、養生温度を 20℃標準養生と 55℃促進養生の 12 ケースに対して試験 を実施した。養生水は練混ぜ水と同じとし、3Lの養生水を満たしたビーカー中に、100 ml のホ モゲルを硬化させたビーカーを練混ぜ1日後から浸漬した。なお、ホモゲルが養生水と接触して いる表面積は、20 cm²である。養生水の化学分析は、一軸圧縮試験と同様に、材齢7日後、14日 後と、それぞれ 250 ml を採取して行った。分析項目は、ホモゲルの劣化に直接結びつくと考え られるシリカの溶出を中心に、補足的にコロイダルシリカに含まれるナトリウム及び硬化促進材 の成分であるカリウムを加えた5項目とした。シリカについては、溶出形態の判断のために、全 シリカ、溶存及びコロイド状シリカ、イオン状シリカの3種類を対象とした。

図 4.3-8 に海水適応グラウトの試験結果を、図 4.3-9 に海水硬化促進グラウトの試験結果を示 す。図にはシリカ(イオン状シリカ)の例を示す。また、表 4.3-5 に知見のまとめを示す。



図 4.3-8 海水適応グラウトのシリカの溶出量の変化



図 4.3-9 海水硬化促進グラウトのシリカの溶出量の変化

	まとめ
海水適応 グラウト	 シリカについては、20℃養生した場合、練混ぜ水が精製水と50%人工海水のホモゲルでは、浸漬時点からほぼ直線的にシリカ濃度が増加し、200日程度で100ml/1程度に収束している。これに対し、練混ぜ水が人工海水のホモゲルでは、他の2つより浸漬初期における濃度の増加が顕著であり、100日程度で100ml/1の濃度に収束している。 ナトリウムイオン濃度は、精製水で練り混ぜたホモゲルを浸漬した場合には、試験期間中でほとんど変化しなかった。一方、50%人工海水及び人工海水で練り混ぜたホモゲルの場合は、浸漬初期には変化しないが、その後濃度が増加し、ふたたび下がり始める傾向があった。
	 カリウムイオン濃度は、初期に増加し、その後一定値に収束する挙動を示し、それはナトリウムイオンの場合よりも明確に確認できる。収束濃度はホモゲルの違いによりそれぞれ異なっているが、初期からの濃度増分で評価すると、練混ぜ水(養生水)が異なっても同じ挙動を示していると推測できる。
海水硬化 促進 グラウト	 シリカについては、濃度の収束値は 20℃養生の場合で 90~100 mg/l、55℃養生の場合で 150~170 mg/l と、海水適応グラウトとほぼ同等であった。20℃標準養生、55℃促進養生にかかわらず、シリカ濃度が収束するのに要する時間、収束する濃度ともに、海水硬化促進グラウトと、海水適応グラウトのうち人工海水で練り混ぜたホモゲルはほぼ同等の結果を示していると言える。すなわち、練り混ぜ水が同じであれば、Hi シリカの混合割合が異なっても、シリカ分の溶出挙動は同じであると言える。 ナトリウムイオンについては、養生水には人工海水を用いており、その初期濃度は10,000 mg/l であり、その後の経過時間に伴うイオン濃度の上昇は認められない。 カリウムイオンについては、初期濃度は 400 mg/l であった。カリウムイオン濃度については、養生温度によらず、海水硬化促進グラウトのすべてのホモゲルで濃度の上昇は認められない。 カリウムイオンについては、初期濃度は 400 mg/l であった。クリウムイオン濃度については、養生温度によらず、海水硬化促進グラウトのすべてのホモゲルで濃度の上昇は認められない。海水硬化促進グラウトは硬化促進剤を用いておらず、硬化促進剤の主成分は KCl(塩化カリウム)であり、このためカリウムイオン濃度が上昇しなかったと考えられる。すなわち、Hi シリカ濃度 80%の平成 28 年度から実施している 6 種類の基本配合の海水適応グラウトでは、カリウムイオンの溶出はすべて硬化促進剤の成分であったといえる。

表 4.3-5 長期化学的安定性確認試験で得られた知見のまとめ

(5) 長期挙動の現象理解に関する検討

塩水条件下を想定した海水適応グラウトの基礎物性や長期安定性に関する力学的・化学的な物 性の得られたデータを、世界中で唯一実施された倉敷 LPG の同等の試験における公開データと 整理して比較した。比較した項目は、基本配合、基本物性、長期力学的安定性、長期化学的安定 性である。これらの比較検討をもとに、塩水条件下における(海水適応グラウトの)溶液型グラ ウトの長期止水性能を推定した結果、以下の結論が得られた。

- ・基本物性:本試験で用いた海水適応グラウトと倉敷 LPG でのグラウトの基本物性は両者とも に同等であることが推定された。
- ・長期力学的安定性(静水時):長期的な力学的強度は、現時点までの分析では本試験が倉敷 LPG より同等以上の強度が出ているものといえる。したがって、両者の長期力学的安定性の特性は ほぼ同等、または海水適応グラウトの方が高い可能性があると推定された。
- ・長期化学的安定性(静水時):海水条件下での海水適応グラウトは、1回目の水替え時期の半年 程度までは倉敷LPGと同様のシリカ濃度上昇を示すため同等の化学的安定性があり、それ以 降の長期については、淡水条件下に比べてシリカ濃度の飽和量が低いことや、水替え後も倉敷 LPGの傾向に比べて上昇の速度が遅い傾向にあることが推察できた。したがって、海水適応 グラウトは海水条件下で倉敷LPGと同等以上の長期化学的安定性があることが推察された。
- ・長期止水性能の推定:海水適応グラウトは倉敷 LPG と同等以上に動水勾配環境下での長期物 性である「長期止水性能」を示すことが推定できた。

・溶液型グラウトのゲル化特性、ゲルのメカニズム、長期にわたる劣化のメカニズムについて検討を実施した。その結果、海水環境下で海水適応グラウトを用いることは、ゲル化特性・耐久性などについて、通常の淡水時での適用と比較して劣るものではないことが推察された。

(6) モデル化・数値解析への適用性検討

スウェーデンで研究されているグラウト浸透モデルに対して、海水条件下の場合はどのような 補正や改善を実施するのが適切か検討し、モデル化・数値解析へ展開する場合に留意すべき点や 課題などを挙げた。その際、グラウトの浸透モデルに詳しい北欧の専門家などから技術的アドバ イスやレビューを受けた。

1) スウェーデンで研究されているグラウト浸透モデルについて

スウェーデンでは、CTH(シャルマーシュ工科大学)が浸透理論と岩盤亀裂評価に基づく合理 的なプレグラウチング(掘削前のグラウチング)を実施するためのグラウトの調査から設計の一 連のグラウト設計フローを提唱している(Fransson, 2008)。このグラウト設計フローは、最初に 施工後(坑道掘削後)に許容する湧水量を設定し、長尺のプレボーリング孔などによる掘削する 坑道の岩盤亀裂評価のための予備調査を行う。次に、調査結果から掘削範囲における岩盤亀裂の 透水量係数(の和)を算出し、想定される亀裂開口幅(の分布)をもとに施工後の湧水量を予測 する。その湧水量が最初に設定した許容湧水量を満たすよう「グラウト浸透モデル」を用いて適 切な材料選定からグラウト浸透距離に基づく孔配置を設計するというものである。この手法は、 SKBによるエスポ硬岩研究所の大深度(TASSトンネル)での液型グラウトを用いた岩盤止水プ ロジェクト(Funehag, 2011)やPOSIVAによるオンカロ特性調査施設の大深度(デモ2トンネ ル)でのグラウチングのプロジェクト(Hollmén, 2013)で採用されてきた。

溶液型グラウトのグラウト浸透理論のベースとなる理論式(Funehag, 2007)は、CTHの Funehag 博士が提唱している下式である。ここで、*Imax, 2-D*はグラウトが二次元状に(=グラウト孔と交差する亀裂から円盤状に)広がるときの最大の浸透距離、bは水理学的亀裂開口幅、 *p*はグラウト注入差圧(注入圧と湧水圧の差)、*ta*は gel induction time(ゲル・インダクション タイム)、*po*は溶液型グラウトの配合時の初期粘性である。

$$I_{max,2-D} = 0.45 \cdot b \sqrt{\frac{\Delta p t_G}{6\mu_0}}$$
(4.3-1)

特筆すべきは、ゲル化特性のある溶液型グラウトの浸透理論に特有のゲル・インダクションタ イム(*ta*)である。ゲル・インダクションタイムとは、粘性が配合時の2倍になる時間と定義さ れており、経験上ゲルタイムの約1/3の時間とされている。図4.3-10に、注入時間に応じて「ゲ ル化を考慮しない場合の浸透距離」と、「ゲル化を考慮した場合の浸透距離」の双方の曲線を示す が、Funehag はグラウト浸透距離が*ta*以降はゲル化の進展により距離の増大がほとんど見込め ないため*ta*時点でのグラウト浸透距離を最大の浸透距離*Imax*2-Dに近似できること、また、その *Imax*2-Dがゲル化を考慮しない場合の理論式から類誌できることを理論的かつ実験的のアプロー チから発見したことで、粘性が変化する流体でありながら上記のような簡易な浸透理論の近似式 を開発した(Funehag, 2012)。



図 4.3-10 注入時間に対する粘性及び浸透距離の関係 (出典: Fransson, 2008 に加筆)

2) 海水適用時のグラウト浸透理論

海水条件下でのグラウト浸透モデルを適用するにあたり着目すべきことは、海水環境下においてもグラウトが海水と混ざり合うことによってゲルタイムが早くなっていることである。したがって、ゲル・インダクションタイム tg を補正するパラメータを設定して補正関数 φ を追加することにより、下式のように「海水適用時のグラウト浸透理論」を仮定することができる(辻ほか, 2018)。

 $I_{max,2-D} = 0.45 \cdot b \sqrt{\frac{\Delta p t_G \varphi}{6\mu_0}} \tag{4.3-2}$

例えば、フィンランドの研究事例では、通常の淡水条件下での $t_G = 60$ 分×1/3=20 分なのに対し、 海水条件下では $t_G = 60$ 分×1/3×【補正関数 φ 】=10 分となる。この実験の条件下では、 $\varphi = 0.5$ と 定数にするのが妥当である。しかし、実際の岩盤内の亀裂ネットワークにグラウトの浸透する場 合は、地下水との混ざり具合なども複雑になる可能性があり、その他多くの条件に依存する可能 性もあるため、0.5 として良いかまたは定数とできるかどうかについても今後さらなる検討が必 要であるといえる。したがって、補正関数を考慮したグラウト浸透理論を開発して適用すること により、従来型の溶液型グラウトの浸透距離をモデル化することができ、今後の浸透距離の数値 解析へ反映ができるものと考えられる。

3) 専門家へのレビュー

開発している淡水~海水環境下で白濁しない「海水適応グラウト」と「海水硬化促進グラウト」の概要を CTH の Funehag 准教授に示し、本グラウトを北欧の浸透モデル(注入理論)に 適用時の補正量や改善についてのレビュー並びに適用にあたって留意点などのアドバイスを受け るために下記のヒアリングを実施した。

- ・海水適応グラウト、海水硬化促進グラウトの適用性などについて。
- ・補正関数を用いて理論上浸透距離を減らす(補正する)必要とその定量性について
- (フィンランドでの実験から(安全側に)補正量を算出することが妥当か)
- ・地下水に対して白濁しない海水対応の配合なら、補正は不要とみなせるか
- ・実験的に浸透挙動を求める必要性、実施の際の留意点などについて

・その他、海水条件下で溶液型グラウトに関する留意点などについて

- ヒアリングの結果、Funehag 准教授から、以下のアドバイスを得た。
- ・海水適応グラウトについては適用性があるものの、促進グラウトについてはシリカ濃度が低い ために十分な強度と耐久性が確保できない可能性があり、適用時には事前の原位置試験で確認 するなど留意するように必要がある。
- ・補正関数による理論上浸透距離を減らす(補正する)手法については妥当と考えられるが、データ量が少ないことや動水勾配や注入圧に留意して検討を進める必要があり、Water Injectionのような手法は時間がかかり合理的ではないため採用すべきではなく、このような設計的なアプローチによるべき。
- ・今回開発した海水適応グラウト、海水硬化促進グラウトについては、現状では日本の溶液型グラウトでは合理的な対策であり、グラウトの先端で地下水と反応しないことから補正についても特に考慮しなくて良い可能性がある。ただし、このグラウトにおいても、実際に並行平板などで浸透実験を行うことが望ましい。

4) 平行平板装置を用いた浸透試験によるモデルの検証

グラウト技術のモデル化・数値解析への適用性検討に資するため、また、昨年度提示した新し いグラウト浸透理論の適用性を検証するため、グラウト浸透性確認試験を実施した。試験は、1 m 四方程度の人工亀裂を模擬したアクリル製等の材料の平行平板の装置を用いて溶液型グラウトを 注入させる室内試験を実施し、亀裂内での溶液型グラウトの浸透特性(浸透距離、時間等)を把 握した。材料は、本研究の対象材料であるパーマロック Hi (強化土エンジニヤリング社製)を主 材料とし、従来型グラウトと海水適応グラウトを対象とした。また、比較として、北欧で多く用 いられている Master Rock® MeycoMP320 (BASF SE 社製)の浸透性確認試験も数ケース実施 した。亀裂内の模擬地下水としては、精製水、50%海水+50%精製水、人工海水、オンカロ模擬 水を用いた。試験結果の一例を図 4.3-11 に、表 4.3-6 に平行平板装置を用いた浸透試験で得ら れた知見のまとめ示す。



図 4.3-11 浸透性確認試験の結果の一例

表 4.3-6 平行平板装置を用いた浸透試験で得られた知見のまとめ

まとめ

- ・従来型グラウトの浸透距離は、カルシウムイオンが多いオンカロの地下水(化石水)では大幅 に低減されるが、海水適応グラウト及び北欧グラウトについてはそれほど低減されないことが 分かった。また、50%濃度の人工海水やオンカロ模擬水では低減されないことが分かった。
- ●海水適応グラウトのみに着目すると、日本の人工海水に浸透させたときは、精製水のそれと全く同じ結果になっていることである。すなわち、海水適応グラウトはφ=1となることが示唆される。オンカロ水をターゲットとして pH 調整した配合を用いて浸透試験を実施していれば、同様にφ=1になることが期待できる。
- ●北欧のグラウトの浸透距離が通常の日本のものに比べて浸透距離の低減が見られないのは、グラウトの粘性が影響していると考えられる。日本のグラウトは2mPasに対し、北欧のそれは5mPasのため、グラウトの先端が混ざりにくいことが、北欧グラウトが浸透しやすい理由の一つではないかと推測できる。

(7) グラウトワークショップ及びグラウトガイドラインの更新

これまでの取り組みについて、SKBや POSIVA、大学など、北欧の専門家を含めたワークショ ップを開催しレビューを受けた(平成31年1月)。主なコメントなどを表 4.3-7 に示す。これら のコメントから、本研究においては、3年間を区切りとして長期耐久性の試験を始めとした各種 検討を行ってきたが、一定の成果として関係する専門家から賛同が得られ、グラウト設計技術の 適用性評価が認められたといえる。また、今後は更なる長期的な耐久性の確認と、更なる浸透性 能の確認のために浸透理論の充足や大型の試験装置による浸透性確認試験を実施し、将来の実適 用に向けて原位置置の注入試験を計画することが重要であることが分かった。

表 4.3	8-7 北区	欧の専門家(こよる	当研究成果の	のレ	ビュー	の結果
-------	--------	--------	-----	--------	----	-----	-----

まとめ	
 基本物性については異存なし。配合の開発については、白濁しない日本のグラウトは有効だ 海水硬化促進グラウトについては水質の変動影響が大きく、適用範囲が限定される。 	が、
●本研究は、塩水環境下の課題と解決手法を提言し、各国の相互の問題意識の共有につながり 新鮮で非常に良い研究である。ただし、浸透特性など今後の課題が残されている。グラワ 先端の流出を考慮して浸透理論の信頼性の向上を図るためにも、岩盤亀裂を模擬した平行 板装置や大型浸透性確認試験装置による検証・把握が必要である。)、 クト テ平
●この研究で塩水環境下での溶液型グラウトの適用に課題があることが良く分かった。	
 ●当プロジェクトは、3年目となるが、3カ年の結論としては、これで完了した(技術が完成た)とせず、さらなる検討が必要とすべきである。 	戈し
●本研究は実験室レベルでの研究である。今後は実際の岩盤(原位置)での検証が必要であり 岩盤と地下水が非常に重要な要素となる。注入材−注入技術−地下水環境(岩盤・地下z 水質)を考慮した一連のグラウト手法の開発が必要である。)、 Kの
●既往レビューの通り、ノルウェーの業者が溶液型グラウトを適用して香港で水密性を有する 底トンネルを建設している。ISRM グラウト委員会の担当者へのヒアリングが有効といえ 今後、ノルウェーでは長距離大深度の海底トンネルを含む国家プロジェクトが控えており 本技術をそうした海底トンネルの現場に展開することも良いアイディアとである。	5海 る。)、

平成 28 年度から開始した、海水条件下における溶液型グラウトの配合の検討や特性データの 取得、モデル化・数値解析への適用性の検討の成果について、グラウトデータベースやグラウト 技術ガイドライン (資源エネルギー庁委託事業「地下坑道施工技術高度化開発」)に更新の是非に ついて検討した。グラウトデータベースについては、海水適応グラウトと海水硬化促進グラウト の配合及びこれらを用いた長期力学的安定性試験(一軸圧縮試験)のデータを追加するとともに、 グラウトデータベースが作成された平成 24 年度以降の溶液型グラウトの施工事例を紹介した文 献を収納できるため、データベース更新に必要な素材を準備した。グラウト技術ガイドラインに ついては、地下坑道施工技術高度化開発におけるスイスグリムゼルでの原位置試験を実施した成 果も併せてガイドラインの成果となっている。本事業の3か年の研究成果は室内試験レベルでの 成果であり、原位置試験での実証が今後の課題として残されている。このことを踏まえると、グ ラウト技術ガイドラインの更新も今後の課題にするべきである。

(8) まとめ

本事業においては、処分坑道並びに処分孔まわりで使用が想定される溶液型グラウトについて、 海水条件下での挙動や特性について明らかにすることを課題として設定し、グラウト材料の基本 配合を設定するとともに、その基本特性を室内試験にて把握するとともに、長期(最大2年)に わたる力学的及び化学的な安定性に関するデータを取得した。これにより、海水条件下で溶液型 グラウトを使用できる見通しを得た。また、グラウト施工にあたって重要となる設計項目のうち、 浸透距離に関する理論式について検討した。これらの研究を進めるにあたっては、北欧の専門家 のレビューを適宜得て反映してきた。これらの成果を踏まえて、グラウトデータベースを更新す る情報を整理した。また、海水硬化促進グラウトの配合と浸透理論については特許を申請した。 今後の課題としては、原位置での実際の施工を通じて技術を確証するとともに、より長期にお ける安全評価上の取り扱いの可否を検討するために、以下が想定される。

・海水条件下における坑道掘削にともなう実施工による適用性の評価

・溶液型グラウトの岩盤や地下水への超長期の影響評価

参考文献

- Fransson, A., Grouting design based on characterization of the fractured rock Presentation and demonstration of a methodology, SKB, R-018-127, 2008.
- Funehag, J. and Emmelin, A., Injekteringen av TASS-tunneln -Design, genomförande och resultatfrån förinjekteringen-, SKB R-10-39, 2011.
- Funehag, J., Grouting of Fractured Rock with Silica Sol. Grouting Design Based on Penetration Length, Doctor thesis, Department of geology, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2007.

Funehag, J., Guide to grouting with silica sol – for sealing in hard rock, Befo Report 118, 2012.

- Funehag, J., Injekteringen av TASS-tunneln Design, genomförande och resultat frånförinjekteringen, SKB, R-10-39, 2011.
- Hatakka, L., Tirinen, J., Salminen, N., Nuijten, G., Lehmusj, ati R. and Aro, S., Grouting of shaft intersecting deep underground hydro-geological zones HZ20A & HZ20B in ONKALO underground research facility, Olkiluoto, 7th Nordic Grouting Symposium, Proceedings pp.147-152, 2013.
- Hollmén, K., Sievänen, U., Funehag, J., Granberg, N., Lyytinen, T. and Syrjinen, P., Colloidal Silica–Grouting in Demonstration Tunnel 2 in ONKALO, POSIVA, Working Report 2012-84, 2013.

加賀宗彦:水ガラス系注入材の安定性と注入固結砂の長期強度の予測,土木学会論文集, No.652/

III-51, pp.195-205, 2000.

- 桝永幸介, 佐藤稔紀, 沖原光信, 辻 正邦, 中島 均, 齋藤 亮, 海水条件下での溶液型グラウト特 性データの取得(その1) −研究の概要−", 土木学会平成 29 年度全国大会第 72 回年次学術 講演会講演概要集(DVD-ROM), 2017.
- 中島 均, 齋藤 亮, 辻 正邦, 沖原光信, 佐藤稔紀, 桝永幸介, 海水条件下での溶液型グラウト特 性データの取得(その4) -海水対応グラウトの基本特性-, 土木学会年次学術講演会, 2018.
- 中島 均, 沖原光信, 辻 正邦, 齋藤 亮, 佐藤稔紀, 桝永幸介, 海水条件下での溶液型グラウト特 性データの取得(その3) –基本物性試験結果–", 土木学会平成 29 年度全国大会第 72 回年 次学術講演会講演概要集(DVD-ROM), 2017.
- 日本原子力研究開発機構,平成24年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関 連,地下坑道施工技術高度化開発6カ年報告書,2013a.
- 日本原子力研究開発機構,平成24年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関 連,地下坑道施工技術高度化開発 グラウト技術のガイドライン(平成24年度版),2013b.
- 征矢雅宏, 竹内伸光, 大西 勝, 金戸辰彦, 倉敷 LPG 貯槽建設工事における溶液型グラウトによる止水対策(その1) 溶液型グラウトのマイクロフラクチャへの注入計画と実績-, 土木学 会第 68 回年次学術講演会, 2013.
- Svensk Kärnbränslehantering AB, Final repository facility Underground design premises/D2, SKB Rapport, R-07-33, 2007.
- 辻 正邦,小林伸司,佐藤稔紀,見掛信一郎,瑞浪超深地層研究所における大深度のポストグラウ チング技術-新技術を導入した設計,施工実績,湧水抑制効果の評価について-,第44回岩 盤力学に関するシンポジウム講演論文集,pp.359-364,2016.
- 辻 正邦, 沖原光信, 中島 均, 齋藤 亮, 佐藤稔紀, 青柳和平, 海水条件下での溶液型グラウト特 性データの取得(その2) – 海外の地層処分のためのグラウト技術に関する最新動向-", 土木 学会平成 29 年度全国大会第 72 回年次学術講演会講演概要集(DVD-ROM), 2017.
- 辻 正邦, 沖原光信, 中島 均, 齋藤 亮, 佐藤稔紀, 桝永幸介, 海水条件下での溶液型グラウト特 性データの取得(その 5) –海水条件下でのモデル化・数値解析への適用性検討–, 土木学会 年次学術講演会, 2018.
- Tsuji, M., Okihara, M., Nakashima, H., Sato, T. and Aoyagi, K., Latest rock grouting technologies under sea water in Nordic countries and Japan, Proceedings of 6th East Asia Forum on Radwaste Management Conference (EAFORM 2017) (Internet), 2017.
- Tsuji, M., Nakashima, H., Saito, A., Okihara, M. and Sato, T., Study on characterization of colloidal silica grout for rock excavation under saline groundwater, Proceedings of the WM2019 Conference, March 3 – 7, 2019, Phoenix, Arizona, USA, 2019.

4.3.2 ニアフィールド領域での処分システム構成材料の成立性と品質確保の方法の提示 (1) 実施概要

本節(4.2節)の冒頭で述べた本課題に関する背景と目的を踏まえ、また、現在のジェネリック な段階に留意して、平成28年度から開始した三ヵ年にわたる取組では、限定的な条件ではある ものの(地質環境モデルや適用する処分システムの構成などを仮設定したうえで)、処分システム の成立性を示すための手法の検討を進め、必要となる知見やデータなどの体系(構造)を図4.3-12 に示す検討フローに沿って具体化することとした。



図 4.3-12 処分システムの成立性に係わる手法の提示に向けた検討作業の全体像

具体的な検討では、人工バリアの一つである緩衝材の再冠水に至るまでの挙動とニアフィール ド(以下「NF」と称す。)領域における坑内湧水環境と緩衝材の流出挙動を結び付け、閉鎖後長 期にわたる所定の性能を満足させる処分システムを、閉鎖前の操業段階でいかに構築するかに焦 点を当てて検討を進めた。そのような期間を対象とした検討では、着目する NF 領域における水 理の状態を知ることが不可欠となる。こうした地下水流動の把握を目的とした水理環境の把握に 係る検討では、対象領域のスケール(広域から狭域へのスケールダウン)を意識した水理解析体 系を整備することが必要となる。なお、緩衝材の挙動の与条件となる水理環境(湧水条件)は、 緩衝材以外の NF 構成要素の影響も受けることとなる。

以上を踏まえ、本課題に関する三ヵ年の全体計画では、特に次の二つの実施項目を設定して取 り組むこととした。

1) 処分システム成立性の提示に係わる手法及び体系の整備

2) 水理解析体系の整備

これらの実施項目は上図において、1)は「成立性の手法検討」、2)は「解析的アプローチ(水 理解析)」にそれぞれ対応する。図内の「現象論的アプローチ(構成材料に対する化学的影響)」 については、既出の4.1節に示した取組との連携を念頭に置く。最後に、得られる手法や体系に、 特定の条件(一般的に想定される沿岸部の環境条件や仮設定する処分システムの構成など)を例 題として適用する。このような検討プロセスを経て、沿岸部を念頭においたわが国における処分 システムに関する成立性を、特定の構成要素(緩衝材)に着目して例示するとともに、個別材料 に関する基本情報・要求性能、操業手順の柔軟性を提示することが可能と考える。

なお、検討をより具体的に進めるために、ここでは検討の前提条件として以下を設定して進めることとした。

•地質環境:新第三紀堆積岩

・処分概念:堅置き定置方式※

※処分システムの成立性に係わる手法を検討するという本取組の目的、並びに建設及び操業 期間中における湧水環境を適切に評価する必要性から、ここでは、緩衝材などの人工バリ アのみならず、他の構成材料(隙間充填材、埋め戻し材、支保、グラウト、プラグなど) を含む NF の構成要素を考慮する(図 4.3-13)。



図 4.3-13 想定されるニアフィールド領域の構成要素例

(2) 処分システムの成立性に係る体系の整備

1) わが国の処分システムの成立性の評価に適用可能な評価体系の整備

沿岸部におけるわが国の処分システムに対して、初期性能達成を定量的に示すための手法の素 案(ひな形)とすべく、平成29年度までの本事業における調査としてフィンランド(POSIVA) 及びスウェーデン(SKB)の先行的な取組事例を調査した。両国は、地質環境条件の類似性や実 施経緯に基づく処分概念の類似性など、多くの共通事項があることから両国間での共同研究を数 多く実施しており、共通する情報も多い。よって本検討では、上記両国のうち、より体系的なま とめ方がなされていたフィンランド(POSIVA)を調査対象とした。

平成 29 年度までの調査結果から、POSIVA によるセーフティケース開発は、以下の①~③に示 す反復的なプロセスによって開発され、体系化されていることが窺える。この POSIVA が提示し た体系(及び評価プロセス)を参考とし、わが国における処分システムの成立性を示すための手 法に関して、次の三つのステップを参考としつつ検討を進めた。結果を以降に示す。 ①設計基準(要件、基準、仕様等)の明確化
 ②初期状態の想定及び設計基準への適合性確認
 ③性能評価(バリアや地下構成要素の状態や機能の変遷挙動の評価)

2) 適用した3ステップの評価体系

設計基準の明確化

処分システムの性能評価を行うためには、その設計基準(要件、基準、仕様など)を明確にす る必要がある。そのため、POSIVAの手法を参考として、人工バリアの設計仕様に落とし込むま での手法を検討した。我が国における設計基準として、個別構成要素に対する設計仕様に展開す るうえでの上位の要件(設計要件など)が原子力発電環境整備機構の公開資料などから設定する ことができる(原子力発電環境整備機構, 2018)。これを POSIVAの手法に当てはめる形で整理 を行った。一例として、わが国の緩衝材の設計要件(■)、設計要件(■)、設計仕様(■)まで の各項目の連関を POSIVA の手法に適応させて整理した結果を図 4.3-14 に示す。



図 4.3-14 わが国の緩衝材設計に関する性能要件から設計仕様の連関イメージ

初期状態の想定及び設計基準への適合性確認

後述する性能評価では、地層処分システムの構成要素の施工後の初期状態に対して施設最終閉 鎖迄(再冠水に至る迄の期間)の状態や機能の変遷を評価する。その前段として、製造・施工時 の初期状態の要件への適合性を確認する必要がある。

この初期状態に関する要件への適合性確認では、以下に示す五つのステップにより、上記①で 構成要素の各々に対して設定した設計仕様が、初期状態に適合するかが確認される。

- 1. 基本設計値(Reference Design)の設定
- 2. 基本設計値の設計仕様への適合性確認
- 3. 製作・施工方法の設定
- 4. 基本設計値と製作・施工方法を踏まえた初期状態の設定

5. 初期状態の設計仕様への適合性確認

前記①で設定した地層処分システムの各構成要素の設計仕様に基づいて、上記ステップの1.及び2.において各構成要素の基本設計値を設定した上で、その基本設計値が、ステップ3.で設定した製作・施工方法を適用した場合に、どの程度の幅で品質が変動するかを想定し(ステップ4.で品質の幅を考慮した初期状態として設定)、この製作・施工品質を考慮した初期状態が最終的に要件管理システムの5段階目の設計仕様に適合していることをステップ5.で確認するという手順となる。

想定した初期状態が、設計仕様に適合しない場合には、ステップ3.において設定した製作・施 工方法を見直すこととなる。もしくは、地層処分システムの各構成要素の性能要件を満足する範 囲内で、設計仕様を見直すこととなる。

ジェネリックな段階にあるわが国では、地質環境や処分概念(及び地下構成要素)は特定され ておらず、性能要件(性能目標)等は例示的に示されている段階であり、それを満たすための製 作・施工方法も特定されていないことから、設計基準への適合性確認が行える段階ではない。そ のため、本検討では、上述したステップ5.の適合性確認は行わず、包括的技術報告書レビュー版 (原子力機構,2018)等に例示される設計仕様を、次に示す「性能評価」の出発点(初期状態)と している。

③ 性能評価

性能評価では、②で設定した地層処分システムの各構成要素の初期状態を出発点として、施工 後の安全評価期間(POSIVAの事例では100万年まで)における状態や機能の変遷挙動を評価し、 ①で設定した設計基準を満足することを確認する。性能評価は、将来の状況が合理的に見込まれ る変遷の道筋(設計基準シナリオ)に対して定量的に実施され、上述した性能要件(性能目標) の達成を確認するとともに、発生確率の低い事象や許容可能な不確実性を特定し、FEPや安全評 価シナリオの整備に資する情報を提供する。

POSIVA の事例では、性能評価は三つの期間(~100年、~1万年、~100万年)に分けて実施されており、本検討では、最初の期間(施工後~再冠水に至る期間)に着目して、その評価の方法論ならびに知見やデータの体系化手法の検討を進めた。その際に重要となるのは、地層処分システムの個々の構成要素に潜在的に影響を及ぼし得る様々な変遷プロセスを、どのように抜けなく網羅的に抽出するかである。例えば緩衝材や埋め戻材については、次のような項目に留意が必要であることが POSIVA の事例から窺える。

- ▶ 熱伝達
- ▶ 水の浸入及び膨潤
- ▶ パイピング・エロージョン
- ▶ 化学的エロージョン
- ▶ 間隙水の放射線分解
- ▶ モンモリロナイトの変質
- ▶ 随伴鉱物の変化
- ▶ 凍結及び解凍

(3) 水理解析体系の構築

処分システムの建設・操業過程の擾乱影響を見積るには、建設や操業段階における広域からニ アフィールド(以下 NF と称す)領域までの水理環境を把握することが必要となる。ここではそ のための水理解析体系の整備・構築を行った。

整備に向けた具体的な作業プロセスとして、最初に沿岸部に特有な環境が地下水理環境に与える影響を把握し(後述の1))、併せて、水理解析のためのモデル作成の入力となる処分坑道の構成の整理を行い(後述の2))、沿岸部の地下環境を対象とした水理解析において考慮すべき因子や処分坑道周辺の構成要素を具体化した。次に、上記の結果を踏まえて水理地質構造モデルの構築を行い、建設・操業過程を通した施設形状の時間変化にともなう擾乱の影響を見積るために、処分施設の湧水量の変化の把握を行なった。

このような一連の水理解析に用いた解析コードは、有限要素法に基づく飽和・不飽和浸透流及 び移流分散解析コード Dtransu-2D EL 及び Dtransu-3D EL である。本取組では非定常の飽和・ 不飽和浸透流解析によって検討を行った。

1) 沿岸部特有環境が水理環境に与える影響の把握

沿岸部研究会において、沿岸部に特有な環境において地下水理環境に影響を与える因子は、小 さな動水勾配(初期流速)、塩淡境界、海水の静水圧が挙げられている。これらの各因子が地下の 水理環境に与える影響について、処分施設の設置位置を変更することによりその影響の大小を変 化させ、処分施設の湧水量の変化からその影響に関して考察を行った。具体的には処分施設の建 設から閉鎖までにおける、塩密度を考慮した非定常の移流分散解析を実施し、各因子が処分施設 の湧水量に与える影響について評価を行った。解析ケース一覧を表 4.3・8 に、解析メッシュを図 4.3・15、表 4.3・9 に、洗い出し解析によって求めた初期の地下水の塩分濃度に関する空間分布を 図 4.3・16 に示す。透水係数は新第三紀堆積岩類の泥岩についての統計値に基づいて設定し、母 岩を 2.3E-8 (m/s) とした(原子力機構, 2016)。またキャップロックの透水係数として、その値 の 1/100 を設定した。その他の詳細な解析条件については過年度の年度成果報告書(産総研ほか, 2017)を参照されたい。

影響因子					
地下施設の地理的な位置		陸域(U)		海域(S)	
	汀線からの水平距離	15km	2.5km	2.5km	$15 \mathrm{km}$
	施設付近の初期 地下水流速の大小	大	小	極	小
	施設位置における	掘削に住	半い低下	—	定
	モデル上面水圧	(一定浸	透境界)	(海深相当	当の圧力)
密度流;	キャップロック‡		ケー	ス名	
あり	なし	U-2-1	U-1-1	S-1-1	S-2-1
なし	なし	U-2-2	U-1-2	S-1-2	S-2-2
あり	あり	U-2-3	U-1-3	S-1-3	S-2-3

表 4.3-8 解析ケース一覧



図 4.3-15 解析メッシュ図(左:全体図、右:キャップロック近傍拡大図)



図 4.3-16 塩分濃度分布(初期条件)

表 4.3-8 に示す各ケースの解析結果より、施設位置と1、10、100 年後の施設湧水量の関係を 取りまとめたものを図 4.3-17 に示す。限定的な条件の下での検討ではあるが、このような解析 結果から、次のような考察結果が得られた。

- 沿岸部に特有の因子として、1)低動水勾配、2)塩淡境界の存在ならびに3)浅部(処分場の上部)に存在する可能性のある海水に伴う静水圧に着目して、パラメータを変えた感度解析結果の比較検討を行った。この結果、前者の二つについては顕著な影響の差は見られない。
- 一方、海域に地下施設を設置したケースでは、陸域に設置したケースよりも坑道への湧水量 が大きくなり、また海底面の深度が深いほど(沖合に行くほど)、海底面の水圧が高くなる ため湧水量が大きくなる傾向となった。海域に処分場を設置したケースでは、塩淡境界や動 水勾配による影響は小さいことから、それらの影響と比較すると海水の静水圧の影響は相対 的に大きなものとなる。
- 塩淡境界などの塩密度の違いに伴う密度流の考慮の有無による坑道への湧水量の差異は掘削 直後にのみ大きく現れるが、時間の経過とともに小さくなっていく傾向となった。



図 4.3-17 施設湧水量(m³/年)

このような解析結果を踏まえて、以降の解析においては沿岸部特有の因子として影響が大きい と判断した"海水の静水圧"を考慮することとした。具体的には、処分施設の設置位置を海域 15 km に設定し、その位置に相当する深度の静水圧(EL.-635 m)を後述する 3)における広域 スケールモデルの境界条件として設定した。

2) 処分坑道の構成の整理

わが国における処分坑道の構成要素及びその設計仕様については、沿岸部で一般的に想定され る特有の環境(湧水環境、地球化学的環境)を仮定し、原子力機構の公開資料(原子力機構,2014; 2016)や土木工事設計要領(国土交通省九州整備局,2016)などの一般土木の知見を基に検討し た。

原子力機構の公開資料では、堅置きブロック方式の坑道には作業従事者の安全確保や、坑道壁 面剥落防止の目的から吹付コンクリートが設定されている。また、坑道の空洞安定性に関する解 析結果やトンネル標準示方書(土木学会,2005)に示されている標準的な支保パターンなどを参 考に、ロックボルト、鋼製支保工、床板コンクリートに関する設計仕様が示されている。一方、 原子力機構の公開資料に示されていない他の坑道の構成要素については、土木工事設計要領(国 土交通省九州整備局,2016)を基に設計仕様の検討を行った。同要領では、吹付コンクリート、 ロックボルト、鋼アーチ支保工、路盤コンクリート(床板コンクリート)に加えて、坑道の止水 及び、力学構造を確保するためのグラウト、金網、防・排水工、覆工コンクリートなどの構成要 素が示されている。

以上の検討結果を基に、本検討に必要となる水理解析モデルの構築の前提となる処分システム の坑道断面を図 4.3-18 のように設定した。



図 4.3-18 処分坑道断面図

3) 水理地質構造モデルの構築

本取組では処分施設の建設・操業に伴う擾乱を表現することを目的として、広域から NF までの幅広いスケールの水理地質構造モデルを構築した。本取組における前提条件とした新第三紀堆 積岩類について、原子力発電環境整備機構がジェネリックな段階を考慮した地質環境モデル(Site Description Model、以下「SDM」と称す。)を整備している(原子力機構, 2016; 2018)。そこ で、本取組における水理地質構造モデルの構築では、原子力機構が整備したモデルをベースとし て、三つのスケール(広域スケール、処分場スケール、NF スケール)に関する三次元モデルの整 備を行った。解析ではこれらのスケールの異なるモデルをネスティング(入れ子構造)すること によって、広域から NF までの幅広いスケールに対応可能な水理解析体系を構築した。また、前 述した 1)の検討結果を踏まえて広域スケールモデルの境界条件を、 2)の検討結果より処分坑道 の構成をそれぞれ組み合わせて設定した。本検討で用いた各スケールの水理地質構造モデルを図 4.3-19 に、そのモデルが原子力機構の SDM から変更した点を表 4.3-9 に、物性値の設定を表 4.3-10 に示す。その他の境界条件に関する考え方や設定値については過年度の年度成果報告書(産 総研ほか, 2018) を参照されたい。



図 4.3-19 各スケールの水理地質構造モデル(鳥瞰図)

衣 4.3-9 爪理児貝慎恒七ナルの SDM セナルからの	表 4.3-9	テモデルの SDM モデルからの修正	点
-------------------------------	---------	--------------------	---

解析モデル	水理地質構造	解析メッシュ
広域スケール	特になし	処分施設位置のメッシュを一部修正
処分場スケール	特になし	処分施設位置のメッシュを一部修正
NFスケール	NUMOが作成した100リアライ ゼーションの内、処分孔への 湧水量が比較的多いものをモ デルのベースとした	処分坑道周辺の構成要素及び解析領 域を変更し、解析メッシュを再度作 成した。

材料区分	透水係数 (m/s)	比貯留係数 (1/m H₂O)	間隙率	備考
	基質部: 3.00E-10	3.16E-6	0.25	室内試験の結果より設定
	対数平均: 3.11E-09			割れ目を考慮した対数平均値
支保エ (吹付けコンクリート)	5.02E-11	1.38E-6	0.19	
EDZ	岩盤の100倍	8.44E-6	0.25	
	低透水: 1.00E-08	5.00E-4	0.33	
(上) 「「「」」」 「」」 「」 「」 「」 「」 」 「」 」 」 」 」 」	高透水: 1.00E-05	1.00E-4	0.11	
隙間(処分孔、緩衝材間)	1.00E-05	1.00E-4	0.20	
床版コンクリート	5.02E-11	1.38E-6	0.19	

表 4.3-10 解析物性值

4) 建設・操業過程における地下水流動場の把握

建設・操業プロセスの進展に伴う地下施設構造の時間変化に伴う地下水流動場への影響を把握 することを目的として、処分施設の建設・操業過程(原子力機構, 2017)に伴う地下施設構造の 時間変化を 3)において作成した水理地質構造モデルを用いて具体化し、掘削から定置、埋め戻し に至る地下水流動場の変遷を、非定常の飽和・不飽和浸透流解析によって把握することを試みた (処分坑道及び処分孔の掘削から埋め戻しまでの湧水量及び再冠水過程の把握を行なった)。

ー連の解析に関する検討項目並びに得られた成果と課題を表 4.3-11 に示す。本書では、表 4.3-11 の検討項目から 2) において設定した基本ケースの建設・操業過程の処分坑道の湧水量の 変化を検討結果の一例として示す。解析に用いた掘削後及び定置・埋め戻し後の処分坑道周辺の 解析メッシュの拡大図を図 4.3-20 に示す。建設・操業の工程(坑道やパネルの展開手順)やその 他の詳細な解析条件は過年度の年度成果報告書(産総研ほか、2018)を参照されたい。坑道の掘 削から閉鎖に至るまでの処分坑道及び処分孔の湧水量の経時変化に関する解析結果を図 4.3-21 に示す。このような解析結果より次のような傾向が窺える。

- 処分坑道に地下水はほとんど湧出していない。これは低い透水係数を設定した支保工及び インバートと高い透水係数を設定した EDZ の存在によって、処分坑道周辺の地下水が EDZ の領域を介してほぼ全てが処分孔に向かって湧出している為と考えられる。
- 処分孔の湧水量は坑道掘削直後に比較的大きな湧水量を示すが、比較的早期(約2ヶ月程度(図 4.3-21 の①、②の破線))に湧水量の大きな変動は落ち着く傾向となり、その後はほぼ定常状態となる。
- 「坑道掘削後、近傍の領域(●領域 A、処分場スケールモデル)が埋め戻されることによって坑道周囲の水頭圧が回復し、埋め戻されていない隣接する処分坑道及び処分孔の湧水量は再び増加する傾向となる。
- 注)本検討では、支保工やインバートの透水係数をコンクリート相当に小さく設定している。 上記の解析結果の分析では、そのような設定条件にも留意が必要となる。





掘進方向





表 4.3-11 検討項目及び内容

検討項目	目的	内容	対象とした 水理地質構造モデル	成果と課題	実施年度
操業手順が処分坑道の 湧水状況に与える影響の把握	処分施設の形状変化が 着目する処分坑道の湧 水状況に与える影響の 把握	対象期間:建設〜操業 建設・操業過程を詳細に具体化し、掘削から定 置、埋戻しに至る過程を考慮した地下水流動解析 を行った。	広域スケールモデル ~NFスケールモデル	・主要坑道および処分坑道の湧水量は掘削開始か ら10年後にほぼ同一の値となり、掘削過程による 影響は長期的には小さいと言える。 ・処分施設の端(母岩)に近いほど坑道湧水量は 多くなる傾向となった。したがって、掘削段階の 坑道湧水量を安全側に評価するには、パネル内に おける坑道位置を考慮する必要がある。 ・処分坑道掘削直後は処分坑道の湧水量は比較的 大きな湧水量を示すが、掘削・埋戻し等を要因と する大きな変動は比較的早期(約2ヶ月程度)に 落ち着く傾向となる。 ・支保に十分な(コンクリート相当)遮水性を持 たせた場合、処分孔の湧水量は処分坑道よりかな り多い結果となった(H29年度の基本ケースで約5 倍)。	H28年度 H29年度
エンジニアリング的な手法の 効果に関する検討	工学的な対策(グラウ ト、支保等)が湧水量 に与える影響の把握	対象期間:処分坑道の掘削〜埋め戻し前 工学的な対策が坑道の湧水量に与える影響の把 握を行った。特に坑道周辺の構成要素に着目し、 その違いによる処分坑道及び処分孔の湧水量およ び不飽和領域の形成について評価した。	NFスケールモデル	・グラウトの有無によって処分坑道の湧水量に大きな違いは表れなかったが、処分孔の湧水量はグラウトを施工した場合の方が少なくなる傾向となった。 ・坑道周りにEDZが存在していると不飽和領域が形成されやすくなる傾向となった。	H29年度

(4) 成果と課題

以上のように、処分システムの成立性を示すための手法の検討を進め、必要となる知見やデー タなどの体系(構造)の具体化を行った。これらの検討成果に関するまとめと認識された課題に ついて以下に整理する。

○処分システムの成立性に係る体系の整備

- 処分システムの成立性を示すための手法や評価体系について、限定的な条件のもとではあるが、諸外国の先行的な取り組み事例等を参照しつつ、わが国に適応可能な手法を構築し、その適用性に関する見通しを得るとともに、留意点や今後の課題を取りまとめた。
- わが国では地層処分システムの各構成要素に関する設計仕様の設定が例示されているが、 ジェネリックな段階であるため(地質環境条件などが具体化されていない)、施工後の初期 状態に対する適合性確認等は実施されていない。本事業では、限定的な条件のもとではあ るが、そのような評価の考え方などを整理した。今後のサイト選定の進展に伴う地質環境 や処分概念の具体化に柔軟に対応できるように、成立性に係る評価体系等の拡張などを進 めておく必要がある。
- 諸外国の取り組み例では、このような成立性に係る評価体系等を「性能評価」と位置付け、 設計と FEP 整備を含む安全評価をインターフェイスする役割を担っている。今後、わが 国への適用を行う際には、地層処分システムの構成要素に潜在的に影響を及ぼし得る様々 な変遷プロセスを、どのように網羅的に抽出するかが重要である。

○水理解析体系の整備

- 沿岸部研究会で挙げられている沿岸部に特有の因子である、動水勾配、塩淡境界、並びに 海水の静水圧について感度解析による比較検討を行った。その結果、海水の静水圧の影響 が相対的に大きなものとなる傾向が得られた。このことから沿岸部に処分施設を建設する 際には、処分施設の建設位置によって異なる海水の静水圧に関して留意する必要性がある。
- 広域から NF までの幅広いスケールにおいて処分施設の建設・操業(地下空間の存在)に
 伴う水理場の擾乱を表現できる水理解析体系が構築できた(原子力発電環境整備機構が整備した新第三紀堆積岩類に関する SDM をベースに構築)。
- 建設から閉鎖までの操業手順を考慮した非定常の地下水流動解析により、処分坑道及び処分孔の湧水量の変化の傾向を把握した。
 - 処分坑道及び処分孔の湧水量は、掘削直後は比較的大きな湧水量を示すが、比較的早期に(約2ヶ月程度)経過した時点大きな変動は落ち着く傾向となる。
 - 隣接坑道の埋め戻し後は水圧が回復し、処分坑道及び処分孔の湧水量は再び増加する 傾向となった。

参考文献

原子力発電環境整備機構,処分場を構成する各部位に適用するセメント種類の選定に向けた検討 —各部位の要求特性の抽出と状態変遷の推定に基づく重要度の検討—NUMO-TR-13-07,2014. 原子力発電環境整備機構,外部専門家ワークショップ資料「わが国における安全な地層処分の実

現性-サイト選定で規定される多様な地質環境を対象としたセーフティケース-」,2016 原子力発電環境整備機構,包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の実現—適切なサ

イトの選定に向けたセーフティケースの構築—(レビュー版),2018. 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所, 平成 28 年度地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 2017.

産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,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 沿岸部 処分システム高度化開発 報告書,2018.

4.3.3 処分システムの成立性に係る手法に基づく知見の体系化に向けた試行

前節までの検討を経て整備・構築したで標記の成立性に係る手法等の適用性に関する検討では、 4.3.2(1)で述べたように、解析的アプローチ(これまでに構築した水理解析体系を用いた水理 解析)と、現象論的アプローチ(人工バリアの各構成材料に関する劣化や変質に関する知見)に 基づく技術的な判断(エキスパートジャッジ)を組み合わせて実施した。このような試行的な取 組に基づく検討をとおして、整備した成立性を示す手法の適用性について考察するとともに課題 等を整理した。評価の対象としては、建設・操業過程における地下水(坑内への湧水)の影響が 懸念される緩衝材とし、併せて同期間の水理場の変遷に影響するセメント系材料(支保工)の溶 脱についても、評価の対象として検討を進めた。

再冠水に至る迄の期間を対象とした成立性の評価に係る検討の流れを図 4.3-22 に示す。



図 4.3-22 エキスパートジャッジの検討の流れ

(1) エキスパートジャッジの検討の流れ

上図に示した成立性の評価に係る検討の流れの中で、緑の枠線で示した部分がエキスパートジ

ャッジとして評価・分析・判断を行う部分である。

ここでのエキスパートジャッジとは、緩衝材の流出量に着目し、解析的アプローチ(これまで に構築した水理解析体系を用いた水理解析)で得られる緩衝材領域を通過する処分孔内湧水量と、 現象論的アプローチ(人工バリアの各構成材料に関する劣化や変質に関する試験等に基づく知見 やデータ)に基づく総通水量(総処分孔内湧水量)と総緩衝材流出量の関係に基づき、再冠水後 の緩衝材の状態を把握し、長期安全性の観点で必要とされる緩衝材密度の十分性をエキスパート ジャッジするものである。また、セメント系材料で構成される支保工の機能変化は、ここで対象 とする評価期間におけるニアフィールドの水理場の評価に影響を与える可能性があることから、 評価の対象には、緩衝材の流出に加えて支保工の劣化(透水性の変化)も対象とした。

(2) 緩衝材流出現象

緩衝材は、定置後から再冠水に至るまでの期間において最も状態が変化する。同期間における 緩衝材への地下水の浸潤プロセスの進展に伴い、緩衝材としての期待される特性が発揮できる状 態へと移行する。一方で、同期間中に処分孔に流れ込む湧水により、緩衝材の流出の可能性も懸 念されている。

そこで本検討では、処分システムの成立性の指標として、緩衝材流出現象(長期に期待される 性能を発揮するために必要となる緩衝材の密度)に着目して評価を行った。

1) 緩衝材の成立性に関する考え方

堅置きブロック方式の緩衝材の設計要件に基づく設計仕様(成立範囲)は図 4.3-23 のように 示されている(原子力機構,2018)。同図から、塩水条件下においては、緩衝材が維持すべき膨潤 後の有効粘土密度は「自己シール性を満足する為の下限値」が最も厳しい条件となり、緩衝材の 厚さを 700mm とした場合、膨潤後に要求される有効粘土密度は約 1.25 Mg/m³(乾燥密度 1.0 Mg/m³相当)となる。本検討ではこの値を許容値と設定して成立性を評価するものとし、具体的 には緩衝材の浸潤後(膨潤後)の有効粘土密度を、定置から埋め戻しまでの間の緩衝材流出量の 評価値を差し引いて算出することとした。



図 4.3-23 設計要件に対する設計仕様の成立範囲 (ケイ砂を 30%混合したクニゲル V1 を緩衝材の材料として設定)

2) 緩衝材流出量の許容値の設定

これまでの研究において、緩衝材流出量と設計要件から求められている自己シール性を満足す る有効粘土密度の関係の算出方法は次の2つの手法が提示されている。

許容量①:扇状に範囲を限定して流出量を設定する方法(原子力発電環境整備機構, 2018) 許容量②:緩衝材全体に対して流出量を設定する方法(原環センター, 2015)

許容量①は緩衝材の流出によって水みちができる範囲を扇形と仮定し、その領域での緩衝材の 損出と自己シール性について評価する手法である。容量②は緩衝材の流出を全体としての損出と みなし、緩衝材全体として損出と自己シール性を判断する手法である。両手法による緩衝材流出 許容値の設定方法の詳細及びその考察に関しては平成 30 年度報告書(産総研ほか,2019)を参照 されたい。それぞれの手法を用いて処分孔1本当りの緩衝材流出量の許容値を計算すると、許容 量①が 0.629Mg、許容量②が 0.654Mg となる。本検討では保守的となる許容量②を採用して評 価することとした。

3) 水理解析

① 解析モデル及び解析物性値

緩衝材流出量の算出にはこれまでに整備した水理解析体系を用いて評価を行った。本取組では 非定常の飽和・不飽和浸透流解析によって検討を行った。基本ケースの NF スケールモデル及び 処分坑道周辺の解析メッシュを図 4.3-24 に示す。



図 4.3-24 処分坑道周辺の解析メッシュ(掘削後及び定置・埋め戻し後、NF スケールモデル)

2 解析ケース

本検討では定置から埋め戻しまでの期間の処分孔の湧水量から総流量を算出し、その結果から 緩衝材流出量を見積もった。実際の処分場環境やNF構成要素の仕様にも依存するが、埋め戻し 後においても処分孔(緩衝材定置領域)から上部の埋め戻し領域への地下水の流れがある可能性 があり、それに伴い緩衝材の流出が続く可能性があることに留意が必要である。

検証する水理解析ケースを表 4.3-12 に示す。ケース a) は処分坑道が開放した状態を維持した 状態を想定しており、処分孔からの湧水量が最も多くなるケースであり、緩衝材の流出の観点で 保守的なケースとなる。ケース b-1)、ケース b-2) では(緩衝材定置+処分坑道埋め戻し)、緩衝 材と処分孔周辺の母岩との間の隙間流量の計算をしており、処分坑道の埋め戻し材の透水係数の 差異による影響の確認も実施している。また、これらのケース以外にもグラウト、吹付けコンク リート、EDZ、亀裂、処分孔の隙間幅(処分孔壁と緩衝材間)等に関する影響の検討にも取り組 んだ。これらの検討結果は本年度の事業成果報告書に整理しているので参照されたい。

ケース名	緩衝材の定置	埋め戻し材		
ケース a)	なし	なし		
ケース b-1)	あり	高透水(砂相当)		
ケース b-2)	あり	低透水(粘性土相当)		

表 4.3-12 各ケースの水理解析条件

3 緩衝材流出量の評価方法

緩衝材の流出量は、水理解析結果から得られる緩衝材と処分孔壁間を通過する流量を、緩衝材 流出試験から得られた通水量と流出量の関係式に当てはめることにより評価した。

具体的には、水理解析から得られた処分孔壁面と緩衝材の隙間を通過する流量を、室内試験の 結果から得られた通水量と緩衝材流出量の関係式のうち、ブロック定置方式を模擬した供試体に 0.5M NaClを通水液とした試験結果から得られた式(m_s=9.0×Mw^{0.85})に当てはめることによ り算出した。図 4.3-25 に緩衝材流出試験から得られた通水量と流出量の関係式を示す。



図 4.3-25 緩衝材流出試験結果(包括的技術報告書レビュー版(原子力機構, 2018))

④ 解析結果

NF スケールモデルの中央処分坑道における各ケースの処分孔ごとの湧水量から算出した緩衝 材流出量を図 4.3-26 に示す。同図には併せて、①、②の手法によって設定した許容流出量を破線 で示している。ケース a)の処分坑道を埋め戻さない条件で緩衝材流出量を算出した場合におい ては、いくつかの処分孔において許容流出量を上回る結果となるが、ケース b-1)及びケース b-2)のように処分坑道を埋め戻した設定であれば、たとえ埋め戻し材が高透水性であっても、許容 値①、②のいずれの許容流出量も下回る結果が得られた。ケース a) では処分坑道 3 が埋め戻さ れていないため処分孔内に水理的な抵抗がなく、処分孔から湧水量が多くなる結果となったと考 えられる。また、流出量の許容量と比較した場合、許容値②で 7 つの処分孔が超過する結果とな った。一方、処分孔への緩衝材定置かつ埋め戻した状態であるケース b-1)、ケース b-2) につい ては流出量が大幅に低下し、全ての処分孔で許容値を下回る結果となった。このことから、今回 の試行的な取組における条件においては、処分坑道を埋め戻した場合には、緩衝材の設計要件を 満足し、処分システムの成立性を満たすという評価結果となる。





図 4.3-26 各処分孔における緩衝材流出量と許容値との比較 まとめ

(3) まとめ

塩水環境下ニアフィールド領域での処分システムの成立性に係る手法の提示として、建設・操 業過程に伴う擾乱による、人工バリア等の各構成要素の機能変遷を考慮した上で、処分システム の成立性について検討を行った。既に述べたように、評価手法については先行的な取組を行って いる北欧の取り組み事例(フィンランドの評価体系)を参考とし、わが国の地質環境や有望とさ れる処分概念の特徴等を考慮して評価体系や知見等の体系を構築した。

次に構築した評価体系に従った手法の適応性を検討する為、緩衝材流出現象に着目して、本手 法の適用を試みた。その結果、限定的な条件ではあるものの、構築した処分システムの成立性を 示す手法がわが国に適応できる見通しを示すことができた。ここでの取り組みをとおして得られ た成果と今後の課題を以下に示す。

処分システムの評価体系及び手法

- 限定的な条件ではあるが、処分システムの成立性を示すための評価体系について、わが国 に適応できる見通しを示した。
- 今回構築した評価体系を異なる地質環境や候補処分概念、定置方式に対応した形に拡張することによって、今後のサイト選定の進展に伴い具体化される地質環境や処分概念に柔軟な対応が可能になるとともに、より確からしい評価や新たな課題を抽出することが可能となる。

水理解析体系の構築

● 本取組において、幅広いスケールにおいて処分施設の建設による擾乱を表現可能な水理解

析体系を構築した。

- 一連の取組では斜坑や立坑がモデル化されていない点について留意が必要である。
- 本取組では浸透流解析による評価を行ったが、現実的には沿岸海底下の地下水環境は塩水の影響を受けると考えられる。このことから、より詳細な水圧分布や塩密度が影響する現象(緩衝材流出現象、セメント溶脱等)を考慮する必要性がある場合には、密度流解析の導入やその適用性の確認などを進める必要がある。

緩衝材流出現象

- 本取組では地下水流動解析及び室内試験の結果を用いて緩衝材流出現象の評価を試みた。
 このような取組により緩衝材流出量がより確からしい評価につながると考える。
- 水理解析において隙間の充填プロセスや緩衝材流出による質量の移動を考慮することにより、精度の高い評価が可能になると考えられる。

参考文献

原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 26 年度地層処分技術調査等事業 (高レベル放射性 廃棄物処分関連 処分システム工学確証技術開発)人工バリア品質/健全性評価手法の構築(そ の2) -緩衝材, 2015.

原子力発電環境整備機構,包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築— (レビュー版),2018.

5.1 安全評価技術分野の課題設定

(1) 背景と目的

「沿岸部における安全評価技術の高度化開発」では、わが国における沿岸部固有の環境を踏ま えた安全評価に関する技術開発の取り組みとして、沿岸部の特徴に対応した安全評価を行うため に必要なデータ、技術及びそれらの特徴が安全評価結果に及ぼす影響に関する知見などの現段階 での技術基盤の整備を行うことを目的とする。なお、この技術基盤の整備は、海外事例なども含 めて既存の方法論や評価ツールを活用しつつ、また、沿岸部における地質環境の調査技術の高度 化開発(3章参照)や沿岸部における工学技術の高度化開発(4章参照)の進捗・成果などを適宜 考慮・反映しながら、行った(産業技術総合研究所ほか, 2016; 2017; 2018; 2019)。

(2) 実施内容

「沿岸部における安全評価技術の高度化開発」では、以下の二つの項目を設定し実施した。

実施項目①:「評価の枠組みの整備」(5.2節参照)
 核種移行評価と生活圏評価を沿岸部固有の特徴に対応した評価としていくための概略的
 な枠組み、評価シナリオ・解析ケースの設定やその具体的な評価方法、評価で用いる情報の

整備の考え方・手順等についての検討を行った。

・ 実施項目②:「核種移行モデル・パラメータ整備及び影響評価」(5.3節参照)

核種の移行挙動の評価を沿岸部固有の特徴に対応した評価としていくための技術基盤と して、海進・海退の影響を受けた地下水流動状況や地下水化学等の変化の評価手法の調査と 評価の試行、核種の収着に関するデータ、コロイドの安定性に関するデータ、有機物・微生 物の存在量や組成等の特性データの取得等を行った。なお、5.3 節の内容は多岐にわたるた め、さらに以下の下位項目に分割した:

- ・沿岸部の特徴を考慮した核種移行評価手法の整備(5.3.1節参照)
- ・沿岸部の特徴を考慮した核種移行モデル・パラメータ整備(5.3.2節参照)
- ・沿岸部の特徴を考慮したコロイド・有機物・微生物の影響評価(5.3.3節参照)

なお、「沿岸部における安全評価技術の高度化開発」での実施項目①及び②は、「沿岸海底下等 における地層処分技術的課題に関する研究会とりまとめ(資源エネルギー庁,2016)において「安 全評価技術に係わる高度化の方向性」として挙げられている重点項目と図 5.1-1のように対応付 けられ、それら重点項目に対して主にデータ拡充や要素技術の整備に重点をおいた検討・整備を 行うこととしている。

以降の 5.2 節と 5.3 節では、実施項目①及び②のそれぞれの内容を以下の構成で示す:

- (1) 背景と目的
- (2) 実施内容
- (3) 今後の課題
- (4) 参考文献



図 5.1-1 「沿岸部における安全評価技術の高度化開発」での実施項目と「沿岸海底下等におけ る地層処分技術的課題に関する研究会とりまとめ」での重点項目との関係

参考文献

産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 2016.

- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 591p,2017.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,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 沿岸部処 分システム高度化開発 報告書,393p,2018.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 30 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 沿岸部処 分システム高度化開発 報告書,2019【公開準備中】.
- 資源エネルギー庁,沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会とりまとめ, 2016;

http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/pdf/report01_01.pdf (2019年1月21日最終閲覧)

5.2 評価の枠組みの整備

(1) 背景と目的

本項では、沿岸部における安全評価技術の高度化開発において、安全評価において留意すべき 沿岸部固有の特徴等を踏まえた評価の枠組みと評価の内容の具体化を進めることを目的とする。

安全評価においては、地層処分された放射性廃棄物が人間環境に及ぼす影響を評価する観点から、概要調査・精密調査や、処分場建設・操業を通じて得られた情報に基づき想定される処分直後の処分システムの状態を基本に、長期間のうちにその状態を変化させる可能性のある一連の現象を想定し、これらを組み合わせて処分システムの長期挙動を描くシナリオを設定する必要がある。また、これらシナリオに基づいた定量的な解析を行うための解析ケース及び評価方法(モデル化方法、使用ツール、パラメータ設定方法等)を設定していく必要がある。

このような、安全評価の全体像の中で、評価シナリオや解析ケースの設定は、評価の枠組みと なるものであり、それに基づくモデル・パラメータの設定は、評価の内容を具体化するものとな る。

まず、安全評価において留意すべき沿岸部固有の特徴等を踏まえた核種移行評価と生活圏評価 のそれぞれの概略的な枠組みについての検討を行った。また、沿岸部固有の特徴等を具体的に考 慮していくための核種移行での評価シナリオ・解析ケースの設定とそれらの評価方法(モデル化 方法、使用ツール、パラメータ設定方法等)、及び生活圏評価での移行経路・被ばく経路等の設定 とそれらの具体的な評価方法(モデル化方法、使用ツール、パラメータ設定方法等)について、 既存情報に基づく分析・整備を実施した。

次に、核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの評価内容(評価シナリオ・解析ケース等)とそ れら評価で必要となる情報や利用可能な情報に対応した評価方法(モデル化方法等)の分析・整 備を実施した。また、それらに基づき、利用可能な情報に応じた核種移行評価と生活圏評価のそ れぞれの全体的なイメージについて、現段階で想定されるものを例示するとともに、引き続き取 り組むべき技術的課題を整理した。

なお、生活圏評価にかかわる検討は、平成28年度までは独立した項目として「生活圏評価モデル・パラメータ整備及び影響評価」として実施していたが、平成29年度以降においては上記の観点に重点をおきつつ本項目で実施した。

(2) 実施内容

安全評価では、地質環境の調査などに基づき構築される地質環境モデルなどから、核種移行評価や生活圏評価に直接的に利用できる情報(移行経路、地下水組成、それらの時空間的な変遷など)が得られることを期待している。しかしながら、実際には、地質環境モデルなどから得られる情報が、核種移行評価や生活圏評価に直接的に利用できる情報とはなっておらず、それらをつなぐための別の複雑な作業が必要になる場合が多い。例えば、地質環境モデルの解像度と核種移行解析モデルの解像度の違いの調整(内外挿、補完、保守的な単純化など)、地質環境モデルのアウトプット(水頭分布)から核種移行解析モデルのインプット(流速や移行経路)への変換などが考えられる。このことは、沿岸部の特徴の一つである塩水と淡水の混在を考慮した地下水環境の時間変遷など、地下水移行シナリオにおいてより複雑でダイナミックな変遷を考慮することが重要となる場合には特に大きな課題となる。例えば、核種移行評価と生活圏評価のそれぞれで以下のような課題が考えられる。

·核種移行評価

塩水と淡水の混在を考慮した地下水環境の時間変遷を核種移行評価に反映するための作業手順

に複数の選択肢が存在することから、その選択肢によっては評価結果が異なる可能性がある。選 択肢としては、地下水流動解析により得られる広域の移行経路情報(流速や移行距離)に関する 時間変遷(内陸の場合よりも複雑)を、極力忠実に天然バリア中核種移行解析のパラメータ設定 に反映させる方法(例えば、時間変遷をそのまま入力すること、ステップ的な値の変化で近似さ せること)や、ある代表的な状態に対応するパラメータを評価期間全体に適用させる方法(例え ば、初期状態の維持を想定した設定、現実的な設定、保守的な設定)などが考えられる。さらに は、広域の移行経路情報を反映した100mスケールの解析(地下水流動解析や物質移行解析)を 実施し、それらの解析結果を天然バリア中の核種移行解析のパラメータ設定やモデルの選択に反 映することも考えられる。

これらのことから、沿岸部についての核種移行評価においては、地下水環境の時間変遷を核種 移行評価に反映するための選択肢を手法として整理しておくことが必要である。

生活圈評価

GBI (Geosphere Biosphere Interface:地質環境と生活圏のインターフェイス)や核種 移行・ 被ばく経路の設定においては、時間的変遷を考慮する場合に想定される場の変化(地形変化や土 地利用形態の変化など)の設定が大きな課題となる。特に、地形変化や土地利用形態の変化の時 間的変遷を概念的に捉える際には、主要な核種移行・被ばく経路との関係に着目する必要があり、 それらを地質環境モデルなどから抽出するための方法論が必要となる。さらに、沿岸部における 評価においては、塩淡境界の移動に伴う地下水移行経路の変化による GBI の変遷や地形変化によ る水域の陸化など、内陸の場合よりも複雑でダイナミックな変遷を考慮することが必要となる。 この場合、ダイナミックな変遷を考慮するために、内陸を主な対象に整備してきたモデルよりも 高度なモデル化技術が求められる可能性がある。また、評価結果に大きな影響を与える前提条件 である、評価対象領域の範囲や地形・気候、土地利用形態などの地表環境の初期状態とその時間 的変遷の設定についても、内陸を主な対象にする場合よりも丁寧な設定が求められる可能性があ る。

以上を踏まえ、地質環境の特徴についての調査結果、地質環境モデルの設定、地下水流動解析 結果などを、移行経路情報や地下水組成の分布・時間変化などの設定、核種移行評価モデルで用 いるパラメータの設定及び GBI や地表環境での核種移行・被ばく経路の設定などへとつなげて いくための基本的な道筋の整理を試みた(図 5.2-1)。この整理では、ダイナミックな環境変遷に ついての理解や評価をなるべく直接的かつ簡便に核種移行評価及び生活圏評価の主な要素に関係 付けることを目指して、沿岸部における環境変遷の構成要素及びそれらに影響を及ぼすプロセス 群も含めて整理している。この整理結果は、沿岸部の地下水移行シナリオの構築、及びそれに基 づく核種移行評価及び生活圏評価のモデル・パラメータの設定を行うための基本的な枠組みにな るとともに、5.3 節で後述する個別現象研究の実施において留意すべきや研究の対象としている 個別現象と他の現象との関係の把握にも資することができる。



図 5.2-1 沿岸部固有の特徴等を踏まえた核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの概略的な枠組 み(産業技術総合研究所ほか, 2017)

なお、ドイツのゴアレーベンでは、沿岸部での地下水環境の長期的な変遷をより現実的に考慮 した収着メカニズムを反映した収着モデルに基づき、地下水条件の変化に対応した収着パラメー タを評価し(Smart-Kd アプローチ)、地下水環境の長期変遷とそれに伴う収着パラメータの変化 を連動させて、より現実的な核種移行評価を行う試みがなされている(Noseck et al., 2014)。こ のほか、環境条件の不均質性や変遷を考慮した核種移行評価の事例として、フォルスマルクを対 象とした SKB による核種移行解析 (Trinchero et al., 2016)や米国ハンフォードサイトにおける ウランの移行解析 (Mills et al., 2009)では、イオン交換反応や表面錯体反応モデルによる収着 モデル計算と核種移行解析とを組み合わせて、環境条件変遷による収着分配挙動を直接的に取り 扱う手法も検討されている。これらは、地質環境の特徴や変遷を、性能評価上のモデルに適切に 取り込もうとする試みの一例と言える。また、これらの例は、地質環境条件についての情報と性 能評価で用いる情報の連携の重要性を示している例とも言える。

次に、評価シナリオ・解析ケースの設定及び設定した評価シナリオ・解析ケースの評価方法に ついての既存情報に基づく分析・整備を進めた。その最初のステップとして、地下水移行シナリ オの評価に対する基本的な枠組みを示す図 5.2-1 に沿って、評価シナリオ・解析ケースを具体化 に設定していく際に留意すべき事項等の洗い出し目的とした検討に着手した。具体的には、特に 「評価の目的・内容」と「評価に必要となる情報」との関係に着目した分析・整備を、主に既存 情報に基づき実施した。

ここで、「評価に必要となる情報」は、情報の種類だけではなく、その質や量などを含めた複数 の視点で分析し整理することが必要になると考えられる。これは、評価の内容や複雑さは、評価
を行う時点や評価の対象・目的等の組み合わせに応じて異なるが、このような違いが生じること には、利用できる情報の種類に大きく関わることは当然であるが、それだけではなく、調査や事 業の段階によって利用できる情報の質や量が大きく異なってくることにも依存すると考えられる ためである。

まず、情報の種類については、性能評価において普遍的に重要性が高い主な情報とそれに関連 する属性等を、これまでの性能評価で得られた知見等に基づき挙げていくことはそれほど困難で はない。例えば、性能評価において普遍的に重要性が高い情報を、情報の種類に着目し、かつ、 熱 T·水理 H·力学 M·化学 C の観点で整理すると、表 5.2·1 のような情報が挙げられる。ここで、 情報の種類としては、地下水の流速、地下水の移行経路、地下水の流出域、地下水組成、岩種等 を挙げている。このような整理により、それら情報が性能評価のどの部分との関係で重要となる かも比較的簡単に示すことができる。

THMC	情報	左記の情報が重要となる性能評価の項目	
水理 H	地下水の流速	移行時間	
	地下水の移行経路	移行距離、移行時間	
	地下水の流出域	生活圏への流入場所	
化学 C	地下水組成*	移行特性**	
	岩種	移行特性	
熱T	温度	移行特性	
力学 M	物理特性	間隙構造・特性	
	応力情報	掘削影響領域の水理特性の変化等	

表 5.2-1 性能評価において普遍的に重要性が高い情報の整理例 (産業技術総合研究所ほか, 2018)

*: pH, Eh, 主要イオン濃度(炭酸イオン等)、その他(有機物、微生物の種類・量等) **: (元素ごとの)分配係数、溶解度、拡散係数

さらに、沿岸部固有の特徴を具体的に性能評価に取り込むための「枠組み」の整備の一環とし て整理した「性能評価において普遍的に重要性が高い情報のリスト」(表 5.2・1)の拡充に向けて、 「性能評価で必要となる情報」の詳細化を分野間での連携とも関係付けつつ行うことに着目し、 そのための性能評価の観点からの分野間の連携の手法・手順の例示を試みた(後述の①)。また、 その手法・手順を地質環境調査と性能評価の両分野の専門家が参加する形で試行してみることで、 「性能評価で必要となる情報」の分野間の連携に留意した詳細化に係る議論等を効果的に行うた めに有用となる可能性のある留意点や課題も洗い出された(後述の②)。なお、ここでの検討はあ くまで性能評価の観点に重点をおいたものであり、異なる分野間での全体としての連携を実効的 に実施していくためには、このような検討例も参考にしつつ、性能評価以外の分野の観点を適切 に取り込んだ全体的な手法や手順を改めて整理する必要があると考えられる。

1) 性能評価の観点からの分野間の連携の手法・手順の検討

性能評価の観点からの分野間の連携の手法・手順として、「性能評価で必要となる情報」を中心 とした分野間での連携の手法・手順の案を検討した。図 5.2-2 に、その手法・手順の概念を示す とともに、各 STEP での具体的な方法を示す。



図 5.2-2 性能評価の観点からの分野間の連携の手法・手順の概念

●STEP0:「性能評価で必要となる情報」を中心とした分野間での連携の手法・手順に関する基本的な考え方の提示

本 STEP では、検討の準備として、「性能評価で必要となる情報」を中心とした分野間での連携の手法・手順に関する基本的な考え方を提示する。例えば、以下のような、検討の目的やその際の留意事項、検討の効果的な実施に役立ちそうな着目点・情報・知見等を抽出する。

- ・ 「性能評価で必要となる情報」の以下の観点での詳細化を目指す
 - 「性能評価において普遍的に重要性が高い情報のリスト」(表 5.2-1 参照)の拡充
 - 異なる分野間での連携の検討を通じた「性能評価で必要となる情報」の詳細化の手法・
 手順を特に以下に着目しつつ例示
 - ◆ 性能評価と地質環境調査の連携を例とする
 - ◆ 性能評価側でのインプットとなる情報と 地質環境調査側でのアウトプットとなる情報の対応の明確化・共有に留意する
 - ◆ 性能評価側のニーズ(性能評価において利用可能となることを期待する情報の種類や詳細度等)や地質環境調査側での制約(性能評価が期待する種類・詳細度での情報の取得や提供の難易度等)の明確化・共有に留意する
 - ◆ 上記を効果的かつわかりやすく行うこと、またそのプロセスをトレースできることにも留意する
 - 「性能評価で必要となる情報」を以下の観点で評価・整理すること、その特徴を明確にして いくことも有効
 - 性能評価上の重要性(安全性を論じるための性能評価での考慮事項としての重要性、 評価結果に対する感度としての重要性等)
 - 不均質・不確実性の種類やその程度
 - データ取得の難易度等の違い(情報の種類や求める詳細度に応じた違い、想定する場所による違い、調査段階による違い等)
- 地質環境調査と性能評価との分野間での連携に係る以下の既往の検討成果において整理できていることを分析・把握し本検討に活用すること、あるいは十分には整理・対応できていないことを踏まえて本検討で取り組むべき課題を分析・把握することなども有効
 - 評価ツリー(柴田ほか, 2014)
 - 統合化データフロー(日本原子力研究開発機構, 2011)

●STEP1:連携対象の具体化及び絞り込み

本 STEP では、連携を通じて詳細化していく「性能評価で必要となる情報」の属性や性能評価 上の位置づけ等を、例えば以下のような切り口から分析し整理していく。

- 熱(T)・水理(H)・力学(M)・化学(C)を起点として、連携の議論の具体化に資するために、連携の対象として着目すべき「情報」を段階的に詳細化(具体化)していく
- ・ そのうえで、性能評価の「どの観点」から「どの情報」の「どのレベル」に着目するかを具 体化(絞り込み)していく

本STEPについては、地質環境調査と性能評価の両分野の専門家が参加する形で試行を行った。 その内容は後述の「②連携対象の具体化の試行」において示す。

●STEP2:性能評価における入力ーモデルー出力の関係の整理

STEP1 での「連携対象の具体化及び絞り込み」と並行して、「性能評価で必要となる情報」が 性能評価において具体的にどのように使われうるか、それがどのような成果に結びつくか等を見 通せるように、「どのような入力のときに」、「どのようなモデルを通じて」、「どのような出力が得 られるか」、「その実現のためには何が必要か」などを、例えば以下のような切り口から整理して いく。

- ・ どのレベルの入力(例:図 5.2-3 の a~f)とモデルの組み合わせでどのような出力(例:図 5.2-3 の A~F;性能評価の結果としての核種移行率や線量)になるか
- ・ 各入力レベルを整えるためにどのような調査技術やリソースが必要か、また、それを実現す るための条件は何か(STEP1のどのレベルの情報で、どのレベルの入力が整えられるか)
- 各出力は、性能評価の成果としてどのような違いがあるか(評価結果として得られる情報・ 知見の種類や詳細度の違い、評価できる内容の現実性の違い、異なる場所の差別化が可能な 描写力の違い等)



図 5.2-3 性能評価における入力-モデル-出力の関係のイメージ

●STEP3:調査にかかる労力・コストと性能評価の結果の最適化

本ステップでは、STEP1 と STEP2 の検討・整理の結果を対比・分析し、必要に応じて複数の 「性能評価で必要となる情報」についての相対的な優先度等の検討を行う。ただし、このような 検討は性能評価上の必要性や重要性だけに着目して行ってしまうと実現できない絵に描いた餅に なってしまう可能性が高い。そのため、より実効性のあるものとしていくために、各入力レベル を整えるために必要な調査技術やリソースと、各出力の成果としての価値や詳細度の違いを対比 させるなどして、最適な入力と出力のセットはどれかを探り出す、あるいは最適とは言えないま でも同様な意義をもつ入力と出力のセットが複数存在し得るのであればそれらを洗い出し、実効 的な選択肢として明示していくことも重要となる。このような検討が進むことで、分野間におい てどのような連携をどの段階でどこまで目指すことが実現可能でかつ効果的かを俯瞰することに 資する情報・知見が蓄積されていくことが期待される。

2) 連携対象となる情報の具体化の試行

「1)性能評価の観点からの分野間の連携の手法・手順の検討」の「STEP1:連携対象の具体化 及び絞り込み」で述べた『連携を通じて詳細化していく「性能評価で必要となる情報」の属性や 性能評価上の位置づけ等についての検討』を、地質環境調査と性能評価の両分野の専門家が参加 する形で試行をしてみた。

なお、この試行においては、やりながら見えてくることもあると考え、①で述べた以下の二つの 切り口も議論のきっかけとして活用しつつも、必ずしもそれらだけにはこだわらず、両分野の専 門家がそれぞれの発言を受けて感じたこと・思ったことを発言するという発想の連鎖を重視し、 自由に議論を広げてみることとした。

熱(T)・水理(H)・力学(M)・化学(C)を起点として、連携の議論の具体化に資するために、連携の対象として着目すべき「情報」を段階的に詳細化(具体化)していく
 そのうえで、性能評価の「どの観点」から「どの情報」の「どのレベル」に着目するかを具体化(絞り込み)していく

また、「STEP0:「性能評価で必要となる情報」を中心とした分野間での連携の手法・手順に関 する基本的な考え方の提示」で例示した、連携に関する議論を通じて期待される「検討の目的や その際の留意事項、検討の効果的な実施に役立ちそうな着目点・情報・知見等の提示」について も、本試行のスコープとして、「両分野の専門家の議論において関係する意見やアイディアを出す こと」を含めることとした。

ただし、このような検討は初めての試みであり、検討の進め方等も試行錯誤であったことから、 本試行ではまず、両分野の専門家がそれぞれの考えを発言し、その発言を受けて考えたことを返 すと言う双方向の議論を重ねつつ抽出していく作業までが中心となった。その結果、本試行では、 STEP1の目的である「性能評価で必要となる情報」の属性や性能評価上の位置づけ等を具体的に 整理すること、及び、STEP0で挙げた「検討の目的やその際の留意事項、検討の効果的な実施に 役立ちそうな着目点・情報・知見等」を提示すること、までは至らなかった。しかしながら、両 分野の専門家による議論を通じて、今後このような連携に係る議論を本格的かつ効果的に進めて いくためのポイントや留意点に関係し得る以下に挙げたような意見等を抽出することができたと 考える。これらは例えば、両分野の専門家が事前に共有しておくべき事項、あるいは協力して検 討していくべき事項等の具体化へとつながっていくことが期待される。

- ・地質環境調査と性能評価との分野間での連携に係る既往の検討成果(評価ツリー(柴田ほか, 2015)、統合化データフロー(日本原子力研究開発機構, 2011))の分析
 - 分類・整理できていること:地質環境調査の項目と性能評価の項目やモデルとの関係づけ
 - +分には整理・対応できていないこと:上記の項目・モデルのレベルでの関係をより具体的
 に理解するための情報レベルでの関係づけ
 - ⇒ 地質環境調査と性能評価との連携について本検討で今後主に取り組むべき課題は、既往

の検討で分類・整理されている地質環境調査の項目と性能評価の項目やモデルとの関係を ベースに、その関係の内容をより具体的にしていくための情報レベルでの関係づけである ことを確認

- ・地質環境調査の進み方と性能評価での地質環境の情報の利用ニーズとの関係
 - ・ 地質環境調査は、基本的に「広い領域」から「狭い領域」へと段階的に進む
 - ・地質環境調査から得られる情報の性能評価での利用のニーズとしては、大きく「対象領域の境界条件の設定への反映」と「対象領域内の場の特性と水理・物質移行の特性・現象の設定への反映」に分類できると考えられる
 - ここで、性能評価での境界条件の設定では、そこで対象とする核種移行解析の領域よりも 広い領域での情報が必要となる
 - ⇒ 性能評価での境界条件として設定する情報の種類や詳細度、さらには境界条件の設定の 違いが性能評価結果に与える影響の大きさ等を確認すること、地質環境調査の早い段階で 性能評価の境界条件の設定に必要な情報は得られるか、得られない場合にはどのような対 応が必要/可能かなどを含めた、「情報の取得と利用について、内容だけでなくタイミン グも含めたマッチング」に着目した検討が重要になる可能性
- ・地質環境が実際に有する特徴に対する地質環境調査から得られる情報の充足性や性能評価での 表現の対応性
 - ・地質環境が実際に有する特徴(特に、地下水化学、地下水流動の内容や不均質性等、及びそれらの時間変遷)に対して、地質環境調査から得られる情報に基づいて設定あるいは地質環境モデルとして表現される地質環境の特徴(例えば、地下水組成の分布、移行経路、移行時間等)の量的な充足性(例えば、種類の充足性、空間的な充足性、時間的な充足性等)及び質的な充足性(信頼性/不確実性、解像度、現実性等)はどの程度か?
 - ・地質環境が実際に有する特徴に対して、地質環境調査から得られる情報に基づいて性能評価上で設定あるいはモデルを用いて評価される地質環境の特徴(例えば、地下水組成の分布、移行経路、移行時間等)についての量的な充足性(例えば、種類の充足性、空間的な充足性、時間的な充足性等)及び質的な充足性(信頼性/不確実性、解像度、現実性等)はどの程度か?
 - ・地質環境調査から得られる情報に基づいた地質環境モデル等として表現される、また、性能評価上で設定・評価される地質環境の特徴については、その質・量ともに、地質環境が実際に有する特徴を表現できるレベルまで充足性を上げることが理想的ではあるが、取得可能な情報量やその更新頻度・程度には限界がある。量・質の充足性をどこまで高めることを目指すことが可能か?
 - ⇒ 地質環境調査と性能評価との連携を、理想論ではなく、実際に目指すべきかつ目指すことが可能なものとしていくためには、上記のような量・質の充足性についての問題を、以下のことも考慮しつつ検討し整理していくことが重要になる可能性
 - 地質環境調査や性能評価の充足性は、調査の段階の進展に伴いどのように進展していくこ とが期待されるか?充足性の進展の限界はどこにあると考えられるか?
 - その充足性の進展や限界は、対象とする地質環境により大きく異なるか?その場合、特に どのような特徴を持つ地質環境の場合に、地質環境調査や性能評価のどの部分が大きく異 なる可能性があるか?
 - その進展や限界は、地質環境調査に基づく地質環境モデルの構築、性能評価における核種

移行評価結果(線量評価結果等)にどのような影響を与えるか?地質環境調査や性能評価の目的を満たすことが可能か?

- 実現できる充足性の範囲において「地質環境調査や性能評価の目的」が達成されるならば 問題はないが、達成されない場合には、地質環境調査や性能評価の信頼性が不十分となる。 そのような比較で着目すべき「地質環境調査の目的」や「性能評価の目的」は、対象とする 事業の段階によりどのように変化するか、さらには対象とする地質環境に応じても異なる か(時間的な変化が単純な地域と複雑な地域など)、それら目標の進展や違いは、地質環境 調査や性能評価の充足性の進展と整合するか?整合しない場合やその他の問題がある場合 にはどのような対応が必要になるか?

(3) まとめ及び今後の課題

安全評価において留意すべき沿岸部固有の特徴等を踏まえた核種移行評価と生活圏評価の評価 内容と評価方法の分析・整備の一環として、まず、沿岸部の地下水移行シナリオの構築及びそれ に基づく核種移行評価及び生活圏評価のモデル・パラメータの設定を行うための基本的な枠組み の整理を試みた。具体的には、地質環境の特徴についての調査結果、地質環境モデルの設定、地 下水流動解析結果などを、移行経路情報や地下水組成の分布・時間変化などの設定、核種移行評 価モデルで用いるパラメータの設定、及び GBI や地表環境での核種移行・被ばく経路の設定な どへとつなげていくための基本的な道筋を整理した。また、この整理に基づき、評価シナリオ・ 解析ケース設定で必要となる項目や「性能評価において普遍的に重要性が高い情報のリスト」を 提示するとともに、それらの調査・データ取得側の視点も含めた再整理・拡充を試みた。具体的 には、「性能評価で必要となる情報」の詳細化を分野間での連携とも関係付けつつ行うことに着目 し、そのための性能評価の観点からの分野間の連携の手法・手順の例示を試みた。さらに、その 手法・手順を地質環境調査と性能評価の両分野の専門家が参加する形で試行してみることで、「性 能評価で必要となる情報」の分野間の連携に留意した詳細化に係る議論等を効果的に行うために 有用となる可能性のある留意点や課題を洗い出した(「6.技術や知見の体系化に向けた分野間連 携の在り方」にも反映)。これらは例えば、分野間の連携で不可欠となる、複数分野の専門家が事 前に共有しておくべき事項、あるいは協力して検討しておくべき事項等の具体化へとつなげるこ と、さらにそれらを蓄積していくことで、その先にある分野間の連携の実現につながっていくこ とが期待される。

参考文献

- Mills, R. T., Sripathi, V., Mahinthakumar, G. K., Hammond, G. E., Lichtner, P. C. and Smith, B. F., Experiences and Challenges Scaling PFLOTRAN, a PETSc-based Code for Subsurface Reactive Flow Simulations, Towards the Petascale on Cray XT Systems, 2009, https://www.climatemodeling.org/~rmills/pubs/mills-PFLOTRAN_CUG2009.pdf.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 22 年度地層処分技術調査等委託費 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 報告書, 2011.
- Noseck, U., Britz, S., Flügge, J., Mönig, J., Brendler, V. and Stockmann, M., New methodology for realistic integration of sorption processes safety assessments, Waste Management 2014 Conference, 2014.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書,

2017.

- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 29 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 2018.
- 柴田 雅博, 澤田 淳, 舘 幸男, 牧野 仁史, 若杉 圭一郎, 三ツ井 誠一郎, 北村 暁, 吉川 英樹, 小田 治恵, 石寺 孝充, 陶山 忠宏, 畑中 耕一郎, 仙波 毅, 瀬尾 俊弘, 亀井 玄人, 黒澤 進, 後藤 淳一, 澁谷 早苗, 後藤 考裕, 窪田 茂, 稲垣 学, 守屋 俊文, 鈴木 覚, 石田 圭輔, 西尾 光, 牧内 秋恵, 藤原 啓司, 概要調査段階における設計・性能評価手法の高度化 3, NUMO-JAEA 共同研究報告書(2013 年度)(共同研究), JAEA-Research 2014-030, 2015.
- Trinchero, O., Painter, S., Ebrahimi, H., Koskinen L., Molinero, J. and Selroos, J. O., Modelling radionuclide transport in fractured media with a dynamic update of Kd values, Computers&Geosciences, vol. 86, pp. 55-63, 2016.

5.3 核種移行モデル・パラメータ整備及び影響評価

5.3.1 沿岸部の特徴を考慮した核種移行評価手法の整備

(1) 背景と目的

沿岸部には、降水起源の淡水系地下水と海水などを起源とする海水系地下水が分布する。沿岸 部の地下水環境(地下水流動、地下水の化学組成など)は、陸域の動水勾配を起動力とする淡水 系地下水の流動と、塩水(海水)と淡水の密度差を起動力とする地下水の流動、移流分散による 塩分の移動などの複数の現象に依存して変化する。また、断層や地質構造によって透水特性が不 均質に分布する場合には、地下水環境はその影響を受ける。長期的には、約12万年周期で変動す ると考えられる海進・海退や、隆起・侵食などの地形変化の影響を受けて地下水環境が変化する。 そのため、沿岸部を対象とした核種移行評価においては、海水準変動や隆起・侵食などの地形変 化による地下水環境の変化を適切に評価する手法とともに、そのように地下水環境が変化する環 境下での核種移行の挙動を評価する手法などの技術の整備を進めていく必要がある。

沿岸部を対象とした地下水環境の評価については、これまでにボーリング孔などを用いた実際 の地質環境調査と数値解析を組み合わせた評価手法が示されている(例えば、今井ほか,2009; 産業技術総合研究所, 2012;電力中央研究所, 2013)。また、沿岸部を対象とした核種移行評価手 法も整備が進められている(原子力発電環境整備機構, 2011a; 2011b)。いずれのケースも、地下 水環境の評価には Dtransu-3D・EL (菱谷ほか, 1999) や SEAWAT (Guo and Langevi, 2002) などの数値解析コードを用い、地層を多孔質媒体で表現した数値モデルが適用されている。一方 で、フォルスマルク(スウェーデン)やオルキルオト(フィンランド)などの結晶質岩を対象と した外国の処分場候補地においては、亀裂中の地下水流動に伴う塩分の移動と亀裂に接する岩石 マトリクス部での拡散による塩分の移動を連成させた数値モデルを用いた地下水環境評価が行わ れている(SKB, 2011; Posiva, 2013)。これらの数値モデルは、結晶質岩に代表される亀裂性媒 体を対象とした核種移行評価で用いられる亀裂中の移流分散とマトリクス部での拡散収着を考慮 した核種移行モデルと概念的に同様のモデルである。このような亀裂とマトリクス部による二重 空隙モデルを用いた溶質の移行挙動の評価結果は、多孔質媒体を仮定した単一空隙モデルの場合 に比べて、より複雑かつ緩慢である可能性がある。例えば、亀裂中の溶質の移動は移流分散によ る移動でその速度は相対的に速いものの、マトリクス部は拡散による移動で溶質の速度が相対的 に遅く、かつ間隙率が大きいために溶質を保持する容量が大きくなる。そのため、マトリクス部 における塩分の保持により、海進・海退による汀線の移動が地下水中の塩分濃度分布の変動に与 える影響が小さくなり、核種移行評価に用いられる地下水環境条件の変動が抑制されると考えら れる。以上の観点から、沿岸部における亀裂性媒体を対象に、海水準変動や隆起・侵食による地 下水環境変化を評価する際に、亀裂中の地下水流動とそれに伴う塩分の移流分散による移動に加 えて、亀裂に接する岩石マトリクス部が拡散により塩分を留める効果を考慮した地下水環境評価 手法を整備することを目的に、①数十キロメートルの広域スケール、②坑道周辺のブロックスケ ール(200m×200m×200m 程度の領域)の二つの異なるスケールを対象に技術開発を進めた。

(2) 実施内容

1) 広域スケールの沿岸部を対象とした地下水環境変化の評価手法の整備

広域スケールは海進・海退や隆起・侵食などの地形変化に起因した海水準変動が地下水環境に 与える影響を評価するために必要な領域で、地下水の涵養域である山地から海洋底下に至る幅広 いスケールが検討の対象となる。そのため、平成28年度には、広域スケールを対象とした計算に も適用できるように、亀裂ネットワークモデルを等価な多孔質媒体に変換し、かつマトリクス部 での塩分の拡散挙動を解析解により評価する近似的な手法(Hoch and Jackson, 2004)を用いた

数値解析手法を整備するとともに、特定のサイトを対象としない段階における評価であることと 解析の簡略化のために、鉛直二次元断面の地形モデル(図 5.3-1)を対象とした検討を行った。そ の結果、塩水中の塩分がマトリクス部を拡散により移動する効果を考慮した場合は、それを考慮 しない場合に比べてマトリクス部の拡散と相対的に大きな間隙率により塩分を留める効果が大き く、海水準変動が地下水環境の変化に与える影響が小さくなることが示された(産業技術総合研 究所ほか,2017)。平成29年度には、マトリクス部の塩分を留める効果が地下水環境の変化に及 ぼす影響が顕在化する条件を抽出するための検討を行った。その結果、図 5.3-2 に例示するよう に、母岩の透水係数が高い場合にはマトリクス拡散の考慮の有無が地下水環境評価結果に影響を 及ぼすことはないが、透水係数が 1.7×10⁻⁸ m/s 以下のケースではマトリクス拡散の考慮が地下水 環境評価結果に影響を及ぼすことがわかった。この結果から、沿岸部において極端に大きな地下 水流速が発現するような高い透水係数や動水勾配の場合を除いて、多くの場合には亀裂部におけ る移流分散だけではなくマトリクス部での拡散による塩分の移動を考慮した評価手法を適切に用 いる必要があることが示された(産業技術総合研究所ほか,2018)。平成30年度は、平成29年度 までに整備してきた広域スケールを対象とした評価手法を活用して、核種移行評価に必要な情報 である処分場周辺の地下水流速や塩分濃度比(海水の塩分濃度に対する比)の経時変化について の情報の抽出、抽出された情報に基づく地下水環境の変化のパターンの分類、それら地下水環境 変化のパターンを後述の処分場周辺のブロックスケールを対象とした核種移行評価へ反映する方 法、などについて検討した。処分場周辺の地下水流速や塩分濃度比の経時変化の抽出は、現汀線 の地下 1,000m の評価点 1、評価点 1 の沖合 5km (評価点 2)、評価点 1 の沖合 10km (評価点 3) の三つの評価点を対象とした(図 5.3-1)。処分場周辺の地下水環境変化に大きく影響を及ぼすと 考えられる亀裂部の透水性やマトリクス拡散特性、陸域の地形勾配等についてのパラメータ値を 変更した感度解析ケースを設定し、それぞれの評価点の地下水環境(塩分濃度比、地下水流速) の経時間変化を抽出し、その変化パターンの類型化を試みた。その結果、図 5.3-3 に例示する四 つに分類することができた。その概要を以下に記す。

- パターン1)海水準変動の影響が大きく、初期の海退により一様に塩水から淡水に変化する。
- ・ パターン2)海水準変動の影響が大きく、海退・海進の影響により塩水→淡水化→塩水化の サイクルが複数回繰り返される。
- パターン3)海水準変動の影響が小さく、隆起・侵食の影響により塩水が次第に淡水化する。
- パターン4)海水準変動の影響、隆起・侵食の影響がともに小さく、一定の塩水環境が保たれる。

これらの情報は、後述する処分場周辺のブロックスケールを対象とした核種移行解析に必要な地 下水環境の変化に伴って変化するブロックスケールの境界条件を設定するための情報として活用 する。



図 5.3-1 広域スケールの地形を考慮した鉛直二次元の地形モデル概念図 (色の違いは塩分濃度比の初期条件の例を示す)



図 5.3-2 マトリクス部での拡散により塩分を留める効果が亀裂内の塩水と淡水の 置換挙動に及ぼす影響が検討の例 (10.8 万年後の最大海退時における淡水と塩水の濃度分布の比較) (産業技術総合研究所ほか, 2018)



図 5.3-3 処分場周辺の地下水流速と塩分濃度比の経時変化パターンの例

2) 坑道周辺のブロックスケールを対象とした三次元亀裂ネットワークモデルを用いた地下水 環境変化の評価手法の整備

ブロックスケールについては、亀裂部の移流分散とマトリクス部での拡散による塩分の移動を 直接的に解くことが可能な手法として、三次元の亀裂のネットワーク構造を基に亀裂部とマトリ クス部のそれぞれを面要素と体積要素の有限要素に離散化した二重空隙モデルを用いる手法につ いて検討した。平成28年度には、亀裂部とマトリクス部の二重空隙モデルを扱うことが可能な 地下水流動・物質移動解析コード HydroGeoSphere (Aquanty, 2015)の適用を試みた。 200m×200m×200m の立方体領域に亀裂ネットワークモデルを作成して、亀裂部とマトリクス部 をそれぞれ面要素と体積要素で離散化した有限要素に変換した数値モデルを作成することで(図 5.3-4 参照)、亀裂部の移流分散とマトリクス部での拡散を考慮した塩分等の物質移動の解析が可 能であることを示した(産業技術総合研究所ほか, 2017)。平成 29 年度には、H28 年度に構築し た数値モデルを用いて、海進・海退による地下水環境(地下水流速や流向、地下水中の塩分濃度) の変化を解析するとともに、そのような地下水環境の変化が核種移行挙動に及ぼす影響として、 Cs のように塩分濃度に依存して分配係数が変化する場合について検討した。ブロックスケール の亀裂ネットワークモデルの初期条件として塩水で満たし、一定方向に一定の動水勾配で淡水を 浸透させるとともに、モデル中央部にソース部を設けて一定濃度条件で Cs を配置して実施した 地下水流動・核種移行解析により、モデル下流側における塩分濃度比と Cs 濃度比の時間変化を 求めた(図 5.3-5 参照)。核種移行解析は、Cs の分配係数 Kd はマトリクス部の塩分濃度比に応 じて塩水条件の 0.005 m³/kg から淡水条件の 0.05 m³/kg に変化する設定とした。その結果と対比 させるために、Kd が 0 m³/kg で一定、塩水条件の 0.005 m³/kg で一定、淡水条件の 0.05 m³/kg で一定の場合の結果も図 5.3-5 に示した。その結果、地下水環境として塩分濃度比の変化に起因 して核種の分配係数の変化が生じたとしても分配係数の変化がブロックスケールを核種が移行す

ることに要する時間よりも短い時間での変化であったため、淡水条件の Kd を設定したケースと 同じ結果となることが示された。すなわち、地下水環境の変化が核種移動挙動に及ぼす影響が顕 在化しない場合があることを示した(産業技術総合研究所ほか,2018)。これは、核種移行評価手 法の簡単化(例えば、塩水と淡水が時間変化する複雑な環境下でも、移行特性については一様な 淡水条件での設定が可能など)の根拠情報として利用できる可能性があり、本手法はそのような 核種移行評価上の設定根拠を抽出するツールとしても活用することができると考えられる。平成 30年度は、広域スケールを対象とした地下水環境評価の結果から類型化した処分場周辺の地下水 環境変遷のパターンを活用して、ブロックスケールの初期条件や境界条件の時間変化を設定し、 類型化した地下水環境変化パターンごとに、ブロックスケールを対象とした地下水環境変化の解 析と地下水環境の変化が核種移行挙動に与える影響について検討を行った。対象核種は Cs-135 とし、平成 29 年度の検討と同様に塩水濃度に依存して分配係数 Kd が変化することを仮定した。 解析条件を表 5.3-1 に、境界条件概念図を図 5.3-6 に示す。図 5.3-6 に赤線で示した処分坑道周辺 の掘削影響領域(EDZ)に、「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地 層処分研究開発第2次取りまとめ-」(以下、「第2次取りまとめ」という。)(核燃料サイクル開 発機構, 1999)のリファレンスケースで示された人工バリアからの核種移行率の経時変化を入力 した。核種移行解析結果の例を図 5.3-7 と図 5.3-8 に示す。これらの解析ケースは、広域を対象と した地下水流動解析で提示した、処分場周辺の地下水流速と塩分濃度比の経時変化のパターン(図 5.3-3 参照)の4つのパターンのうち、パターン2とパターン3に対応する。これらの図には、 図 5.3·3 の地下水実流速と塩分濃度比の経時変化を(a) に再掲し、その結果に基づき設定した外 側境界条件の経時変化を(b)に、核種移行解析の結果として下流(海域)側境界からの核種移行 率の経時変化等を(c)にそれぞれ示した。パターン2(図 5.3-7)は高い透水性を有しており、 海水準変動の影響が大きい。また、現汀線下より沖合の位置を対象としており、海退・海進の影 響により塩水→淡水化→塩水化のサイクルが複数回繰り返され、4 つのパターンの中で地下水環 境の変化が最も複雑である。このような複雑な地下水環境の変化パターンでも、これらの地下水 環境変化を考慮した境界条件を適切に設定することで、地下水流動の方向、流速、塩水濃度など の地下水環境の変化の繰り返しを考慮した母岩中の複雑な核種移行挙動を解析することができた。 その結果、下流(海域)側境界への核種移行率の経時間変化は、地下水環境の変化に対応して複 雑な形状を示していることがわかる。また、塩水濃度の変化による Kd の変化の影響を受け、核 種移行率の経時変化は塩水の Kd のケースと淡水の Kd のケースの間に分布している。パターン 2 は高い透水性を有しているため、母岩中の核種移行遅延効果が小さい。また、地下水流動の方 向が変わる度に核種移行率がスパイク的に変化する様子も示されている。パターン3(図 5.3-8) は透水性が低いため、海水準変動が地下水環境に与える影響が小さいものの、隆起・侵食の影響 により塩水環境から次第に淡水環境に変化する。そのため、地下水環境の変化は緩やかかつ単調 となる。解析の結果から、下流(海域)側境界への核種移行率の経時間変化は、塩水の Kd のケ ースから次第に淡水の Kd のケースの移行率に漸移している様子がわかる。パターン2に比べて 透水性が低いため母岩中の核種移行遅延効果が大きく、下流(海域)側境界の核種移行率の最大 値は人工バリアからの核種移行率の最大値に比べて3桁以上低下していることがわかる。

以上の結果から、地下水環境変化のパターンごとに母岩中の核種移行挙動が異なることが分かった。例えば、海水準変動の影響を受けて地下水環境が繰り返し変化するのは母岩の透水性が相対的に高い場合であり、母岩の透水性が高い場合には核種の移行遅延が小さくなることと組み合わされることで、地下水流速や塩水濃度の変化が母岩中の核種移行挙動に与える影響が大きくなる傾向のあることがわかった。一方、母岩の透水性が小さい場合には、海水準変動が地下水環境に与える影響は小さく、かつ核種の移行遅延が大きいことから、地下水流速や塩水濃度の変化が

254

母岩中の核種移行挙動に与える影響が母岩の透水性が高い場合に比べて小さくなる傾向あること がわかった。



図 5.3-4 HydroGeoSphere を用いた 亀裂 とマトリクス部の二重空隙 モデルの 概念図 (産業技術総合研究所 ほか, 2017)



図 5.3-5 下流側境界における塩分濃度比と物質濃度比 C/C₀の時間変化 (産業技術総合研究所ほか, 2017)

			設定条件・値	備考
マトリクス音	邹 透水係数	攵	1×10^{-12} m/s	低透水の条件を設定
マトリクス部 実効拡散係数			$2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	
マトリクス部 有効間隙率			2%	
マトリクス部 分配係数 Kd			塩水条件下:0.005 m³/kg	塩分濃度比 s (-) に応
			淡水条件下: 0.05 m³/kg	じて次式により Kd
				が変化すると仮定
				Kd=-0.045s+0.05
地下水流	初期条件	濃度条件	亀裂とマトリクス部が全て	
動解析の			上流側と同じ濃度条件	
境界条件	境界条件	動水勾配	経時的に変化	広域を対象とした地
		塩分濃度	経時的に変化	下水流動解析の結果
				を反映
核種移行解析の処		処分坑道を模	濃度条件:経時的に変化	
境界条件		擬した線要素		広域を対象とした地
				下水流動解析の結果
				を反映
		下流側	濃度条件:流出した地下水中	
			の核種濃度	

表 5.3-1 HydroGeoSphere を用いた地下水流動・核種移行解析の解析条件



図 5.3-6 ブロックスケールを対象とした核種移行解析の境界条件概念図



図 5.3-7 ブロックスケールを対象とした核種移行解析結果の例(パターン2の場合)



図 5.3-8 ブロックスケールを対象とした核種移行解析結果の例(パターン3の場合)

(3) まとめ及び今後の課題

沿岸部における地下水環境(地下水流動、地下水の化学組成など)を評価する手法の整備の一 環として、亀裂中の地下水流動とそれに伴う塩分の移流分散による移動に加えて、亀裂に接する 岩石マトリクス部が拡散により塩分を留める効果を考慮した地下水環境評価手法の整備を、①数 +キロメートルの広域スケール、②坑道周辺のブロックスケール(200 m×200 m×200 m 程度の 領域)の二つの異なるスケールを対象に進めた。その結果、沿岸部における亀裂性媒体を対象に、 海水準変動や隆起・侵食が処分場周辺の地下水環境の変化に与える影響を定量的に評価する手法 を整備するとともに、その評価結果から処分場周辺の塩分濃度や地下水流速などの地下水環境の 経時変化に関する情報を抽出した。さらに、抽出した情報を、処分場周辺におけるブロックスケ ールを対象とした亀裂ネットワークモデルの境界条件の設定等に活用することで、処分場周辺の 地下水環境の変化についての評価結果をブロックスケールでの核種移行の評価に反映することを 可能とする解析手法を整備した。

広域スケールを対象とした検討では、鉛直二次元の地形モデルを対象に、これまでに整備して きた広域スケールを対象とした評価手法を活用して、核種移行評価に必要な情報の一つである処 分場周辺の地下水流速や塩分濃度などの地下水環境の経時変化などの情報に基づき地下水環境の 変化を4種類のパターンに分類した。そして、この地下水環境の変化のパターンは母岩の透水性 によって特徴づけられることを示した。本検討で整備した地下水環境変化を評価する手法と、処 分場周辺の地下水環境変化に大きく影響を及ぼすと考えられる亀裂部の透水性やマトリクス拡散 特性についてのパラメータ値を変更した感度解析により得られた知見は、文献調査段階など調査 の初期の段階などの地質環境データが限られた場合での地下水環境の変化の推定に資することが できると考えられる。また、この広域スケールを対象とした地下水環境変化に関する情報を、処 分場周辺のブロックスケールを対象とした地下水環境の変化を考慮した核種移行評価の境界条件 として活用した。

ブロックスケールを対象とした検討では、処分坑道周辺の 200 m×200 m×200 mの領域を対象 に、三次元の亀裂のネットワーク構造を基に亀裂部とマトリクス部のそれぞれを有限要素に離散 化した二重空隙モデルを用いて直接的にモデル化し、海進・海退や隆起・侵食による地下水環境 (地下水流速や流向、地下水中の塩分濃度)の変化を評価するとともに、そのような地下水環境 の変化のもとでの核種移行挙動を評価する手法を構築した。この手法では、広域スケールを対象 としたモデルを用いた地下水環境変化の評価の結果から得られる、地下水流速や塩分濃度の経時 変化等の情報をブロックスケールの境界条件に適用することで、地下水環境の変化が母岩中の核 種移行挙動に与える影響を考慮した解析を可能にした。この手法を用いて、広域スケールを対象 とした検討で得られた4つの地下水環境の変化のパターンを事例に核種移行解析を行った結果、 地下水環境変化のパターンごとに母岩中の核種移行挙動が大きく異なることが分かった。特に、 母岩の透水性の高低が地下水環境の変化の大小の主な要因となり、例えば、高透水性の場合には、 地下水環境の変化が大きくなることと核種移行の遅延効果が小さくなることとの組み合わせによ り、核種移行挙動が複雑となる可能性のあることが示された。

本検討で整備した評価手法により、沿岸部の地下水環境の変化を、花崗岩などの亀裂性媒体の 特徴を適切に考慮して評価するとともに、その地下水環境の変化を考慮した処分坑道周辺の三次 元のブロックスケールを対象とした核種移行挙動を評価することが可能となった。サイトを特定 しない段階における本検討では、広域スケールの地下水環境変化の評価に鉛直二次元断面を対象 とした。しかし、広域スケールの評価に用いた Connectflow コードは、具体的なサイトを対象と した三次元モデルを用いた評価についても豊富な実績を有しており(例えば、SKB, 2011; Posiva, 2013)、本手法を具体的なサイトのデータを用いた三次元モデルへ拡張することに大きな課題は ないと考えられる。今後は、本検討で整備した一連の評価手法の具体的なサイトデータを用いた 評価への適用を積み重ねることにより、その適用上の課題の抽出と、それら課題の解決に向けた 評価手法の高度化が期待される。

参考文献

Aquanty, HydroGeoSphere Verification Manual Release1.0, Aquanty Inc., Canada, 86p., 2015. 電力中央研究所, 岩盤中地下水移行評価技術高度化開発 ・地下水年代測定技術調査・, 402p., 2013. 原子力発電環境整備機構, 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, 179p., 2011a.

- 原子力発電環境整備機構,地層処分事業の安全確保(2010年度版)ー確かな技術による安全な地 層処分の実現のために-,NUMO-TR-11-01,770p.,2011b.
- Guo. W., Langevin, C. , User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations 6-A7, 77p., 2002.
- 菱谷智幸, 西垣 誠, 橋本 学, 物質移動を伴う密度依存地下水流の 3 次元数値解析手法に関する 研究, 土木学会論文集, No.638/Ⅲ-49, pp. 59~69, 1999.
- Hoch, R. and Jackson, P., Rock-matrix diffusion in transport of salinity. Implementation in ConnectFlow, SKB R-04-78, Svensk Kärnbränslehantering AB, 69p., 2004.
- 今井 久,山下 亮,塩崎 功,浦野和彦,笠 博義,丸山能生,新里忠史,前川恵輔,地下水流動に 対する地質環境の長期的変遷の影響に関する研究,JAEA-Research 2009-001, 116p., 2009.

- 核燃料サイクル開発機構,わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層 処分研究開発第2次取りまとめ-分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 379p., 1999.
- Posiva, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto Models and Data for the Repository System 2012, Posiva 2013-01, Posiva Oy. 474p., 2013.
- 産業技術総合研究所,沿岸域塩淡境界·断層評価技術高度化開発,平成24 年度成果報告書,521p.,2012.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 591p., 2017.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 29 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 393p., 2018.

SKB, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project, SKB TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB, 893p, 2011.

5.3.2 沿岸部の特徴を考慮した核種移行モデル・パラメータ整備

(1) 背景と目的

人工バリアである緩衝材(ベントナイト)や天然バリアである岩石中での核種の溶解度、収 着、拡散は、核種の移行遅延を支配する重要な現象である。これら核種移行現象は、間隙水水質 やそこでの核種の溶存化学種等の様々な条件によって大きく変化する。そのため、安全評価の対 象となる地質環境や地球化学条件、それらの変動も考慮して、核種移行現象を表現するための核 種移行パラメータを、その不確実性とあわせて設定する必要がある。沿岸部の特徴を考慮した核 種移行パラメータを設定するうえでは、沿岸部における地下水組成の特徴とその長期的な変遷に よる影響を適切に考慮することが重要となる。具体的には、地下水組成として海水等を起源とす る海水系地下水を考慮する必要性に加え、長期の時間スケールにおいては、海進・海退や隆起・ 侵食などの地形変化の影響を受けて地下水組成が変化することを考慮する必要がある。

本調査では、国内外の安全評価において検討されてきたパラメータ設定手法及びモデル整備の 現状を調査し、溶解度や収着についての沿岸部の特徴を考慮したパラメータ設定の方法論や課題 を検討するとともに、不足している収着モデル基礎データを取得することを目的とする。

(2) 実施内容

1) 沿岸部での溶解度評価のための活量補正モデルの調査・整備

核種移行パラメータとして重要な溶解度については、わが国のみならず欧米各国においても、 対象となる核種の溶解や錯生成に関する熱力学データを収集・整備することで熱力学データベー ス(TDB)を構築し、溶解度を制限する固相を適切に設定した上で熱力学計算により評価してい る (例えば、核燃料サイクル開発機構, 1999; Berner, 2014; Grivé et al., 2010, Wersin et al., 2014)。 したがって、信頼性の高い溶解度評価を行うためには、信頼性の高い TDB の構築が必要である。 わが国における海水系のモデル地下水 (saline-reducing-high-pH; SRHP) 及びそれに対応する ベントナイト間隙水のイオン強度は0.7程度(本報告では特に断らない限りイオン強度に体積モ ル濃度基準の値を用いる)と想定されている(核燃料サイクル開発機構,1999)。海水系地下水の ようにイオン強度が高い系での溶解度評価では、活量係数が理想状態(1)とは大きく異なること から、最新の TDB では高イオン強度に適用可能な活量補正モデルを導入している。その一つが、 |経済協力開発機構原子力機関 (OECD/NEA) が整備を進めている SIT 法 (Grenthe et al., 2013) であり、原子力機構が整備している"JAEA-TDB"(Kitamura et al., 2014) でも採用されてい る。わが国における地層処分の対象となり得る環境でのイオン強度は最大でも2以下であると考 えられる(例えば、尾山ほか, 2011)ことから、活量補正モデルとして SIT 法を採用している。 SIT 法の適用範囲は、3.5 mol/kg (≒ 3 mol/dm³) 以下と言われている (Grenthe and Puigdomenech, 1997).

SIT 法では、活量係数を以下の式で表す。

$$\log_{10}\gamma_{j} = -z_{j}^{2}D + \sum_{k}\varepsilon(j,k,I_{m})m_{k}$$

$$D = \frac{A\sqrt{I_{m}}}{1+Ba_{j}\sqrt{I_{m}}}$$

$$(1)$$

ここで、Dは Debye-Hückel 項、 $e(j,k,I_m)$ はイオン強度 I_m におけるイオン jの対電解質イオン kに対する特異イオン相互作用係数である。また、 $A \ge Ba_j$ は 298.15 K、1 気圧においてそれ ぞれ 0.509、1.5 という値になることが知られている(Grenthe et al., 2013)。このうち、特異イオン相互作用係数は塩(電解質)の種類ごとに実験的手法でのみ導出されるものである。

熱力学データを導出するための実験研究は、錯生成の影響を排除するためイオン強度の調整に 過塩素酸ナトリウムが用いられることが多いことから、特異イオン相互作用係数についても、陰 イオン種ではナトリウムイオンに対するもの(ϵ (A^{rr}, Na^{+}))、陽イオン種では過塩素酸イオンに 対するもの(ϵ (M^{n+}, ClO_4))が多く報告されている。ここで、沿岸部の地下環境で想定される海 水系地下水の主要な塩(電解質)は塩化ナトリウムであると予想されるので、 ϵ (A^{rr}, Na^{+})は既 存の多くの報告がそのまま利用できる一方で、陽イオン種の塩化物イオンに対する特異イオン相 互作用係数(ϵ (M^{n+}, Cl))の整備は不十分である。このことから、既存の報告が多い ϵ (M^{n+}, ClO_4) から ϵ (M^{n+}, Cl)を推定する方法について検討した。

本調査では、 ε (Mⁿ⁺,ClO₄) と ε (Mⁿ⁺,Cl[·]) の相関について、OECD/NEAのTDBのうち特異 イオン相互作用係数の情報が最も充実している鉄(第1分冊)(Lemire et al., 2013) やJAEA-TDB (Kitamura et al., 2014)の選定値を対象として調べることとした。この際、特異イオン相 互作用係数が ε (Mⁿ⁺,ClO₄[·]) = 0の場合は ε (Mⁿ⁺,Cl[·]) も0になると仮定した。

得られた結果を相関式とともに図 5.3-9 に示す。大半の陽イオン種に対するプロットが相関式 上にあり、概ね直線関係となっていることがわかる。相関式の傾きが 0.46 ± 0.04 と 1 より小さ いことから、 ϵ (Mⁿ⁺,Cl⁻) が ϵ (Mⁿ⁺,ClO₄) よりも小さい、すなわち塩化物系の特異イオン相互 作用係数は過塩素酸系より小さいことがわかる。したがって、塩化物系の特異イオン相互作用係 数として過塩素酸系の特異イオン相互作用係数を用いることで、保守的に高イオン強度の影響を 評価することができると考えられる。



図 5.3-9 過塩素酸系及び塩化物系における特異イオン相互作用係数の相関関係

なお、溶解度を制限する固相については、想定する pH や酸化還元電位が、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, 1999)で設定した淡水系及び海水系地下水(ベン トナイト間隙水)の条件から大きく変動しない限り、それら地下水条件に対する地層処分研究開 発第2次取りまとめでの溶解度を制限する固相の設定から大きく変わることはないと考えられる。

2) 沿岸部での収着パラメータ設定のための収着データ取得と収着モデルの適用性評価

沿岸部の特徴を考慮した収着・拡散パラメータを評価するうえでは、沿岸部の地下水組成の特 徴として塩濃度(イオン強度)の影響と、その長期的な変遷による影響とを適切に考慮する必要 がある。降水系地下水と海水系地下水の双方を対象とした安全評価は従来から検討されており、 そのために採用されてきたアプローチは、降水系地下水と海水系地下水の条件での収着・拡散デ ータを取得・整備し、それぞれの条件に対するパラメータを設定する方法である。パラメータ設 定を検討するにあたって、緩衝材ベントナイトの収着パラメータの設定を最初のターゲットとし て、主要な核種を対象とした既存の収着データの充足度、塩濃度影響の傾向性などを調査・分析 するとともに、収着モデルの適用性を検討することとした。

まず、国内外の安全評価において検討されてきた収着パラメータ設定手法及びモデル整備の現 状を調査した結果、これまでに最新のデータを集約したデータベースとメカニズム理解に基づく 定量評価モデル及び対象とする環境条件に応じてパラメータとその不確実性を設定するための手 法(例えば、柴田ほか,2015;日本原子力研究開発機構,2015)が整備されてきており、沿岸部 の条件が与えられれば、これらの手法によりパラメータを設定することが基本的には可能との見 通しを得た。あわせて、評価の信頼性を向上させるうえでの課題として、沿岸部の特徴を考慮し て信頼性の高いパラメータ設定を可能とするための海水系地下水の高塩濃度条件やその条件の変 動、セメント支保の使用に伴う間隙水の高 pH 条件への変遷など、沿岸部の地下水・間隙水環境 やその長期的な変遷をより現実的に考慮した評価を行うための多様な間隙水条件での収着・拡散 データ及びモデルの整備・拡充、収着・拡散パラメータ評価の方法論の高度化が抽出された。こ れを踏まえ、本調査では、地下水・間隙水の高塩濃度及び高 pH 条件における核種の収着データ の取得と収着モデルの適用性の評価を進めた。

まず、収着データ取得についての成果を示す。沿岸部での処分を想定される海水系地下水によ る高イオン強度及びセメント影響による高 pH 環境においては、海水系地下水成分である Ca 等 と陽イオンの核種との収着競合などを考慮することが必要になると考えられる。そのためには、 比較的低 pH の条件では、モンモリロナイトのベーサルサイトでの陽イオン交換による Ca の収 着が、一方で高 pH 条件ではエッジサイトへの表面錯体反応による Ca の収着が重要となる。し かしながら、これまで高イオン強度における Ca の収着データを取得した例はない。そこで、 Ca のモンモリロナイトのベーサルサイト及びエッジサイトに対する収着データを実験的に取得 した。

収着試験の結果、ベーサルサイトに対するイオン交換反応による収着は、高イオン強度(0.5 M NaClO₄)において選択係数が上昇することが確認された。この要因として、高イオン強度では粘 土粒子が凝集(タクトイド形成)することで収着サイトの構造が変化し、親和性が変化している 可能性(McBride, 1980; Tournassat et al., 2009; 2011)が推察された。

一方、エッジサイトにおける収着競合を評価するため、高イオン強度・高 pH における Ca の 収着データを取得した。その結果、pH 8 程度以上の条件において、Ca の収着はエッジサイトへ の収着が支配的になることが確認されるとともに、Ca と Sr の競合試験から、高イオン強度・高 pH 条件下で Sr の収着は共存する Ca の増加とともに減少し、両者はエッジサイトに対する収着 において競合することが確認された(図 5.3·10 (a))。また、Sr と比較して収着における表面錯 体形成反応の寄与がより大きいと考えられる遷移金属元素として Ni を対象とし、同様に Ca と の収着競合試験を行った。その結果、Ni の収着は共存する Ca の濃度に影響を受けないことが確 認された(図 5.3·10 (b))。これまで Ca 及び Ni のそれぞれを用いた収着試験から、両者は異な るエッジサイトに収着する可能性が報告されていたが(Baeyens and Bradbury, 1995)、競合試 験を行うことによりその挙動を実験的に示すことができた。



次に、収着モデルの適用性についての検討結果を示す。緩衝材ベントナイトの主構成鉱物であ るモンモリロナイトの収着モデルとして、一種類のベーサルサイトにおけるイオン交換反応と一 種類のエッジサイトにおける表面錯体反応を考慮した静電補正を行わないモデル(日本原子力研 究開発機構、2016)の適用性評価を行った。既往のデータの調査とそれらに対するモデルの適用 性評価の結果、1価の陽イオン(Cs)についてはモデルにより実測値を良好に再現することがで きた。一方、2価(Ca, Sr, Ni)及び3価(Eu, Am)の陽イオンでは、イオン交換反応による収 着においてモデルと実測値との乖離が生じることが課題として確認された。このイオン交換反応 におけるモデルと実測値との乖離の要因を調査するため、Ni を例として複数の収着データに対 して地球化学計算コード PHREEQC を用いたフィッティング解析によりイオン交換選択係数を 導出し、イオン強度との関係を調べた。その結果、いくつかの収着データでは低イオン強度にお いて見かけ上選択係数が低下していることが確認された。これは、低イオン強度では不純物とし て存在する共存イオンの影響が顕在化し、収着競合を起こすことで収着量が低下しているためで あると考えられた(図 5.3-11)。一方、高イオン強度では選択係数の上昇が見られ、先述のとお りタクトイド形成によるものと考えられた。既往の収着データからイオン交換選択係数を導出す る場合、これらの現象を考慮する必要があることが確認されたが、その定量的な取扱いについて は今後さらに検討が必要な課題である。

2) で実測データを取得した Ca 及び Sr の表面錯体反応による収着は、エッジサイトを一種類 とするモデル(日本原子力研究開発機構, 2016)では結果を十分に再現できないことが確認され た。そのため、エッジサイトを反応性の強弱及びプロトン化・脱プロトン化定数により三種類に 分けたモデル(Bradbury and Baeyens, 2005)を用いることで、結果を良好に再現できることを 確認した。このモデルを用いることで、Sr のエッジサイトに対する収着量が共存 Ca 濃度の増加 に伴って低下する収着競合の傾向を再現することができた(図 5.3-12)。また、このモデルを用 いることで、Ni が Ca とは異なる種類のエッジサイトに収着することを表現でき、Ni のエッジ サイトに対する収着量が共存 Ca 濃度の影響を受けないことを再現することができた。



(a)補正なし (b) 共存イオンとの競合を考慮 図 5.3-11 Na 型モンモリロナイトに対する Ni の収着データのイオン強度依存性のモデル

による再現



図 5.3-12 Na 型モンモリロナイトに対する Sr の収着における共存 Ca の影響の収着モデルに よる再現

(3) まとめ及び今後の課題

沿岸部での処分を想定する場合に想定される、海水系地下水による高イオン強度環境及びセメ ント影響による高 pH 環境を対象に、高イオン強度での溶解度評価に対応するために活量係数モ デルを活用する手法の構築する、及び収着データ取得と収着モデルの適用性評価を行った。収着 データ取得については、高イオン強度でのモンモリロナイトへの Ca の収着データに加え、Ca が 共存する条件での Sr 及び Ni の収着データを取得し、これらの元素間の収着競合の有無を確認し た。また、収着モデルの適用性評価については、一種類のベーサルサイトでのイオン交換反応と 三種類のエッジサイトでの表面錯体反応を考慮したモデルを用いることで、例えば、共存 Ca 濃 度の増加に伴い、Sr のエッジサイトに対する収着量が低下すること、また、Ni のエッジサイト に対する収着量は影響を受けないことを、高イオン強度・高 pH の条件でも再現することができ、 沿岸部で想定される環境でもこのようなモデルにより収着挙動を評価できる可能性が示された。 今後は、高イオン強度環境での収着パラメータの設定手法の高度化に向けては、例えば、比較 的 pH が低い条件でのベーサルサイトでのイオン交換反応について、高イオン強度環境でのタク トイド形成の影響の可能性を含めて、現象理解や定量的な影響評価手法について検討していく必 要がある。また、遷移金属元素と同様に表面錯体反応が重要な収着機構となるアクチニド元素と Ca との競合についても、理解の深化やモデル適用性の確認に向けた実測値データの拡充などが 望まれる。さらに、沿岸域で想定される地下水・間隙水の長期的変遷やその不確実性のモデルで の評価と核種移行パラメータ設定への反映方法についても検討していく必要がある。

参考文献

- Baeyens, B., Bradbury, M. H., A quantitative mechanistic description of Ni, Zn and Ca sorption on Na-montmorillonite Part II: Sorption measurements, Bericht Nr. 95-11, 1995.
- Berner, U., Solubility of radionuclides in a bentonite environment for provisional safety analyses for SGT-E2, Nagra Technical Report NTB 14-06, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 2014.
- Bradbury, M. H., Baeyens, B., A quantitative mechanistic description of Ni, Zn and Ca sorption on Na-montmorillonite Part III: Modelling, Bericht Nr. 95-12, 1995.
- Bradbury, M. H., Baeyens, B., Modelling the sorption of Mn(II), Co(II), Ni(II), Zn(II), Cd(II), Eu(III), Am(III), Sn(IV), Th(IV), Np(V) and U(VI) on montmorillonite: Linear free energy relationships and estimates of surface binding constants for some selected heavy metals and actinides, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 69(4), pp. 875–892, 2005.
- Grenthe, I., Mompean, F., Spahiu, K., Wanner, H., TDB-2: Guidelines for the extrapolation to zero ionic strength, OECD/NEA, 2013.
- Grenthe, I., Puigdomenech, I., Modelling in aquatic chemistry, OECD Publications, 724 p, 1997.
- Grivé, M., Domènech, C., Montoya, V., Garcia, D., Duro, L., Determination and assessment of the concentration limits to be used in SR-Can Supplement to TR-06-32, SKB R-10-50, Svensk Kärnbränslehantering AB., 2010.
- 核燃料サイクル開発機構,わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層 処分研究開発第2次取りまとめ-分冊3地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-23, 1999.
- Kitamura, A., Doi, R., Yoshida, Y., Update of JAEA-TDB: Update of thermodynamic data for palladium and tin, refinement of thermodynamic data for protactinium, and preparation of PHREEQC database for use of the Brønsted-Guggenheim-Scatchard model, JAEA-Data/Code, 2014
- Lemire, R., Berner, U., Musikas, C., Palmer, D. A., Taylor, P., Tochiyama, O., Chemical thermodynamics of iron ,Part 1, Volume 13a, NEA No.6355, 2013.
- McBride, M. B., Interpretation of the variability of selectivity coefficients for exchange between ions of unequal charge on smectites, Clays and Clay Minerals, Vol. 28(4), pp. 255-261, 1980.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書 2015.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発 報告書 2016.
- 尾山洋一, 高橋正明, 塚本 斉, 風早康平, 安原正也, 高橋 浩, 森川徳敏, 大和田道子, 芝原暁彦,

稲村明彦,日本列島の非火山地域における深層地下水水質と地質との関係について,原子力 バックエンド研究, vol. 18, 1, pp.25-34, 2011.

- 柴田雅博,澤田 淳, 舘 幸男,牧野仁史, 若杉圭一郎, 三ツ井誠一郎, 北村 暁, 吉川英樹, 小田治 恵, 石寺孝充, 陶山忠宏, 畑中耕一, 仙波 毅, 瀬尾俊弘, 亀井玄人, 黒澤 進, 後藤淳一, 澁 谷早苗, 後藤考裕, 窪田 茂, 稲垣 学, 守屋俊文, 鈴木 覚, 石田圭輔, 西尾 光, 牧内秋恵, 藤原啓司, 概要調査段階における設計・性能評価手法の高度化3; NUMO-JAEA 共同研究報 告書(2013 年度) (共同研究), 日本原子力研究開発機構技術資料, JAEA-Research 2014-030, 2015.
- Tournassat, C., Gailhanou, H., Crouzet, C., Braibant, G., Gautier, A., Gaucher, E. C., Cation exchange selectivity coefficient values on smectite and mixed-layer illite/smectite minerals, Soil Science Society of America Journal, Vol. 73(3), pp. 928–942, 2009.
- Tournassat, C., Bizi, M., Braibant, G., Crouzet, C., Influence of montmorillonite tactoid size on Ca-Na cation exchange reactions, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 364, pp. 443–454, 2011.
- Wersin, P., Kiczka, M., Rosch, R., Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto – Radionuclide solubility limits and migration parameters for the canister and the buffer, POSIVA 2012-39, 2014.

5.3.3 沿岸部の特徴を考慮したコロイド・有機物・微生物の影響評価

(1) 背景と目的

沿岸部の地下環境では、陸域の地下環境と比べて高い塩分濃度や有機物濃度などの地球化学条件に加えて、海水準変動、隆起・侵食などの地形変化にともなう地球化学条件の長期変遷により、 コロイド、有機物、微生物の特性(濃度、組成、サイズ、構造)や核種との相互作用性(収脱反応、錯生成反応、酸化還元反応)が変化する可能性がある。そのため、沿岸部におけるコロイド、 有機物、微生物の影響評価に当たっては、これらの変化を考慮しつつ、沿岸部に固有の現象について理解を深めるとともに、核種との相互作用に関わる知見の整理や拡充が必要である。

本調査では、沿岸部におけるコロイド、有機物、微生物の影響評価に向けて、これらの地球化 学条件の特徴等を考慮しつつ、従来の淡水系地下水を想定した影響評価体系や手法(核燃料サイ クル開発機構,1999)などの有効性について検討することを目的とする。

(2) 実施内容

1) コロイド

核種移行に及ぼすコロイド影響評価については、これまでに高いコロイド濃度やコロイドに対 する核種の高い分配係数といった保守的なパラメータを採用した評価が行われている(核燃料サ イクル開発機構,1999)。地下水中の塩濃度が上昇すると、コロイドが凝集して沈殿し濃度が低下 するとともに、核種のコロイドへの分配係数が低下することから、性能評価上は保守的になると 考えられる。その一方で、塩濃度の高い天然の地下水中に存在するコロイドについては、その種 類が同定されておらず、評価の対象とすべきコロイド種を限定することができていない。そのた め、塩濃度が高い領域でのコロイドの影響評価の精度を向上させる上では、コロイドが安定に存 在しうる(コロイドが凝集して沈殿しない)地下水条件や影響評価の対象とすべきコロイド種を 明確化していく必要がある。

天然の地下水中に含まれるコロイドに加えて、人工バリアを構成する圧縮ベントナイトからは ベントナイトコロイドが生成する可能性がある(例えば、松本ほか,2008)。ベントナイトコロイ ドの生成は、核種を収着することによりその移行挙動に影響を及ぼすとともに、浸食により圧縮 ベントナイトの密度を低下させる可能性がある。圧縮ベントナイトの浸食は、ベントナイトコロ イドの安定性が低下する塩濃度の高い地下水に対しては起こらないことが確認されており(松本 ほか,2005)、ベントナイトコロイドの安定性がベントナイトの浸食挙動に大きく関係すると考え られる。そのため、沿岸部で想定されるような地下水中の塩濃度の変化が起こる環境を対象とし てベントナイトの浸食挙動を評価するためには、ベントナイトコロイドが安定に存在する塩濃度 領域を明確にすることが必要である。

本調査では、天然の地下水中に存在すると考えられる粘土鉱物コロイドなどの無機コロイドと、 わが国の地層処分において使用が想定されているベントナイトであるクニゲル V1 を対象とした ベントナイトコロイドについて、コロイド安定性の塩濃度依存性について実験的に評価した。な お、本事業では、ベントナイトコロイドとして、ベントナイトの主成分であるモンモリロナイト により構成されるモンモリロナイトコロイドを調査対象とし、溶液中に分散したモンモリロナイ ト粒子をモンモリロナイトコロイドとした。

まず、ベントナイトコロイドを対象とした試験では、クニゲル V1 と同じ鉱床より採掘された ベントナイトより作製され、その主要構成鉱物であるモンモリロナイト含有量がほぼ 100%であ るクニピア F を用い、NaCl 溶液及び希釈した人工海水中でのモンモリロナイトコロイドの安定 性について評価を行った。試験は、クニピア F をイオン交換水中に分散させ、しばらく静置した 後、NaCl 溶液または人工海水を添加して所定の NaCl 濃度または人工海水濃度に調整し、一定 時間ごとに粒径測定システム(大塚電子株式会社製、ELSZ-1000ZSEA)を用いてモンモリロナ イトコロイドの粒径を測定することにより、その凝集挙動を観察した。試験に使用した NaCl 溶 液の pH は 9 程度、人工海水の pH は 8 程度とした。また、NaCl 溶液を用いた試験においては、 遠心分離機(日立製作所製、CT6D)により 6000rpm で 120 分間遠心分離を行い、上澄み液より 採取したより浮遊しやすいモンモリロナイトコロイドについても凝集挙動を観察した。試験に使 用したクニピア F は、含有するカルサイトが溶解して溶液中に Ca イオンが放出され、モンモリ ロナイトコロイドの凝集挙動へ影響を及ぼす可能性があることから、カルサイトをあらかじめ除 去したもの(pH を 5 に調整した酢酸ナトリウム溶液によりカルサイトをあらかじめ溶解させて 除去)を用いた。カルサイトを除去したクニピア F は、試験前に NaCl 溶液により Na 型に調製 した。

試験溶液として NaCl 溶液を使用した試験の結果を図 5.3-13 に示す。図 5.3-13 は、モンモリ ロナイトコロイドの散乱強度分布より算出される平均粒径の時間変化を示しており、経過時間 0 分での平均粒径は NaCl 溶液添加前のモンモリロナイトコロイドの平均粒径、経過時間 0 分以外 の平均粒径は NaCl 溶液添加後のモンモリロナイトコロイドの平均粒径である。また、図 5.3-13 (a) は、遠心分離未実施のモンモリロナイトコロイドの試験結果、図 5.3-13 (b) は、遠心分離 後の上澄み液での試験結果として上部 1/4 から採取したモンモリロナイトコロイドに対する試験 結果を示している。





本試験の結果、遠心分離を行っていないモンモリロナイトコロイドにおいては、NaCl 濃度が 0.02 mol/l までは、試験期間中で粒径がほぼ一定であるのに対し、0.03 mol/l においては試験後 1時間程度で粒径が大きくなる傾向が見られ、0.05 mol/l においてはより顕著に粒径が大きくな る傾向が見られた。この結果から、クニピア F から生成するモンモリロナイトコロイドは、おお むね NaCl 濃度 0.02 mol/l 程度まで安定であり、それ以上の NaCl 濃度では凝集して沈殿すると 考えられる。一方、遠心分離後のモンモリロナイトコロイドは NaCl 0.04 mol/l 程度まで平均粒 径の変化が見られず、凝集せずに安定である傾向が見られた。このことから、一部の浮遊しやす いモンモリロナイトコロイドは、NaCl 濃度 0.04 mol/l 程度まで安定に存在しうることがわかっ た。ただし、遠心分離によるモンモリロナイト回収量より、NaCl 濃度 0.04 mol/l 程度まで安定 なコロイドは全体の 10%程度と算出され、浮遊しやすいモンモリロナイトコロイドの全体に対す る含有量は限られていることから、ベントナイトコロイドの生成挙動を評価する上での浮遊しや すいモンモリロナイトコロイドの影響は小さいと考えられる。

また、試験溶液として人工海水を使用した試験の結果を図 5.3-14 に示す。本試験の結果、溶液

中の人工海水濃度が 0.5%及び 0.7%の条件においては、溶液中に分散させたモンモリロナイトコ ロイドの平均粒径は試験期間中でほぼ一定であるのに対し、人工海水濃度が 1%の条件において は、試験開始後に粒径が大きくなることが確認され、モンモリロナイトコロイドは、おおむね人 工海水の濃度が 1%以上になると凝集して沈殿すると考えられた。一方で、図 5.3-13 (a) に示す ように、NaCl 溶液を用いた試験では、NaCl 濃度がおおむね 0.03 mol/l からコロイドが凝集する 傾向が観察されている。これらの結果をイオン強度より比較すると、濃度 1%の人工海水のイオ ン強度が 7.2×10⁻³程度であるのに対し、濃度 0.03 mol/L の NaCl 溶液のイオン強度は 0.03 であ ることから、実際の地下水環境に近い溶液組成を持つ人工海水を希釈した溶液中の方がより低い イオン強度でモンモリロナイトコロイドが凝集することがわかる。このことから、NaCl 溶液を 用いた試験結果を性能評価へ適用することを考えた場合、モンモリロナイトコロイドが安定に存 在しうる地下水条件として、NaCl 溶液を用いた試験により示されたイオン強度を指標として用 いることは、保守的な評価につながるものと考えられる。



図 5.3-14 希釈した人工海水中に分散させたモンモリロナイト粒子の平均粒径の時間変化

次に、粘土鉱物コロイドを対象とした試験では、粘土鉱物試料としてイライト(Rochestsr, NY, USA 産)と黒雲母(Nellore, Andhra Pradesh, India 産)を用いて試験を実施した。粘土鉱物試 料は、乳鉢を用いて孔径 45□m以下に粉砕し、Na 型に置換したものを用いた。粘土鉱物コロイ ドの粒径測定は、モンモリロナイトコロイドと同様の手順で実施し、粘土鉱物コロイド試料に NaCl 溶液を添加して粘土鉱物コロイド試料中の NaCl 濃度を 0.005 mol/L から 0.05 mol/L に調 整し、その凝集挙動を観察した。粘土鉱物コロイド試料及び添加した NaCl 溶液の pH は 9 付近 に調整した。

試験結果を図 5.3-15 に示す。試験の結果、イライト及び黒雲母より作製した粘土鉱物コロイドの平均粒径は 20-80 □m の値が得られた。測定結果のばらつきは大きいものの、NaCl 濃度が 0.05 mol/L の試料においても、その平均粒径は、NaCl 濃度の低い他の試料と同様に 20-80 □m の範囲内でのばらつきであり、NaCl 濃度の増加に伴う粒径の増加傾向は見られなかった。地下水中の粘土鉱物コロイドと本試験での粘土鉱物コロイドでは粒径が異なることに留意が必要であるものの、本試験の結果は、これらの粘土鉱物コロイドは、地下水中の塩濃度が増加しても凝集して沈殿することはなく、コロイドが安定して存在する可能性を示唆していると考えられる。



(a) イライトより調整したコロイド
 (b) 黒雲母より調整したコロイド
 図 5.3-15 NaCl 溶液中に分散させた粘土鉱物コロイドの平均粒径の時間変化

2) 有機物

陸域及び沿岸部の全ての深部地下環境には、核種と安定な錯体を生成する天然有機物が存在す る。これらの有機物と核種との錯体は、核種の見かけの溶解度を上昇させ、また、母岩への核種 の収着やマトリクス拡散を抑制することにより、処分システムにおける核種移行遅延効果を低下 させる可能性がある。一方、このような有機物による影響の程度は、地下水水質や有機物の特性 等の条件に依存するため、地下深部における有機物の存在が必ずしも影響の顕在化に繋がるとは 限らない。本調査では、沿岸部の海水系地下水に溶存する有機物の濃度・組成、錯生成等の特性 について、陸域の有機物のものとの比較から、沿岸部の深部地下水に溶存する有機物に固有の核 種移行への影響を抽出・評価した。

まず、沿岸部での有機物の濃度や組成について検討した。沿岸部の深部地下水に溶存する有機物は、沿岸部の地層を形成する堆積岩からの溶出によって地下水へ供給されるため、その濃度(10~390 mgC dm⁻³) (Thurman, 1985; Nagao et al., 1999; 2009; 笹本ほか, 2015) は、海水中での濃度(0.35~12.7 mgC dm⁻³) (Dafner et al., 2002) や陸域の花崗岩に存在する地下水中での 濃度(1.6~7.7 mgC dm⁻³) (Pettersson et al., 1994) と比べて一般に高い。日本国内の堆積岩に存在する地下水について見てみると、幌延の地下研究施設の深部地下水(化石海水)中の溶存有機物濃度は~25 mgC dm⁻³ (笹本ほか, 2015; 産業技術総合研究所ほか, 2017)、千葉県茂原地域の高塩濃度地下水では56 mgC dm⁻³ との報告があり(Nagao et al., 1999, 2009)、国内の花崗岩に存在する地下水の値(例えば、岐阜県瑞浪地域の花崗岩の地下水中の値、0.1~3.1 mgC dm⁻³) (岩月ほか, 1998; 長尾・岩月,2007; 長尾ほか, 2009) と比べて 8~560 倍程度高い。

一方、環境水に溶存する有機物の全てが金属イオンと錯生成する訳ではなく、その主成分の一 つである腐植物質が、その錯生成において重要な役割を果たすと考えられている(Bryan et al., 2012)。しかし、日本国内の高塩濃度地下水については、これまでに腐植物質濃度のデータが存 在していなかったため、地下水における腐植物質の錯生成への寄与の大きさは明らかにされてい なかった。本調査では、疎水性樹脂(DAX-8)を固相抽出剤として用いる腐植物質定量法(Tsuda et al., 2012; Kida et al., 2016)を、幌延の地下研究施設の深部地下水(化石海水)や新潟県の二 つの観測井戸の地下水に適用し、それらに溶存する腐植物質の濃度を定量評価し、有機物に占め る腐植物質の割合を評価した。その結果、幌延の地下研究施設の各深度の地下水に溶存する有機 炭素の 59~64%が腐植物質で構成されていること、日本国内の湖沼水中の溶存有機物を構成する 腐植物質の存在割合(37.3~77.1%)(Tsuda et al., 2016)の範囲と一致することを見出した(図 5.3-16)。このことから、沿岸部の海水系の深部地下水に溶存する腐植物質は、深度や地域間の相 異に関わらず、湖沼水等の地表水に溶存するものと同様に、核種との錯生成において主要な配位 子となる可能性があることを確認した(産業技術総合研究所ほか,2018)。



図 5.3-16 全溶存有機物濃度と腐植物質濃度との関係

次に、沿岸部の深部地下水に溶存する腐植物質の構造特性について検討した。腐植物質の構造 特性は、金属イオンとの錯生成反応やその移行性を理解するうえで不可欠な知見である。一般に、 陸域地表に存在する腐植物質は、植物の構成成分であるリグニンに由来し、その構造成分である フェニルプロパノイドを比較的多く含み、高い芳香族性を示す(Stevenson, 1994)のに対し、沿 岸部の深部地下水中の腐植物質は、海洋堆積物中の有機物(海洋プランクトンの死骸など)に由 来するため、その構成成分である脂質を比較的多く含み、高い脂肪族性を示すと考えられている (Harvey et al., 1983; Claret et al., 2005)。また、リグニンの分子量は数万 g mol⁻¹以上である のに対し、脂質の分子量は数百gmol⁻¹程度であり、これら前駆体の違いによって地表水と沿岸部 の深部地下水での腐植物質の分子量は大きく異なる。そのため、沿岸部の深部地下水中の腐植物 質は、地表水のものと比較して、芳香族性が低く(脂肪族性が高く)、分子量が低い構造特性を持 つと考えられている。しかし、日本国内の沿岸部の深部地下水に溶存する腐植物質の構造特性に 関わる知見は、幌延の地下研究施設の限られた深度の地下水に溶存するものに限られており、そ の構造特性の多様性についての理解は得られていなかった。そこで本調査では、異なる深度や異 なる地域の深部地下水を採水し、それらに溶存する腐植物質の構造特性を、紫外可視スペクトロ メトリーやサイズ排除クロマトグラフィーを用いて評価し、河川水に溶存する腐植物質の構造特 性と比較した(図 5.3-17)。その結果、幌延の河川水中の腐植物質は、比較的分子サイズが大き く、芳香族性に富む構造特性を有し、幌延や新潟の深部地下水中の腐植物質は、比較的分子サイ ズが小さく、脂肪族性に富む構造特性を有していることを確認した(産業技術総合研究所ほか, 2019)。このことは、日本国内での深部地下水の多様な腐植物質においても、上述したような地 表水と沿岸部の深部地下水とに溶存する腐植物質の構造特性の相異に関する一般的な理解が成立 する可能性があることを示唆している。



(a) 紫外可視吸収スペクトル

(b) サイズ排除クロマトグラム



沿岸部の高塩濃度地下水に溶存する腐植物質の錯生成能については、幌延の地下研究施設の深 部地下水から分離・精製した溶存腐植物質を対象に、Cu²⁺ (Saito et al., 2015) や Eu³⁺ (Terashima et al., 2012; Saito et al., 2017) に対する錯生成能が調査されており、それらは土壌や湖水中の腐 植物質よりも錯生成定数が小さいことが見出されている。この違いは、隣接し合う酸性官能基を 比較的多く含む陸域の地表水中の腐植物質では、核種と多座配位により安定な錯体を生成するの に対し、沿岸部の深部地下水中の腐植物質は、酸性官能基間が離れた構造特性を有し、比較的不 安定な単座配位で核種と錯生成するためであると推察されている(産業技術総合研究所ほか, 2018)。しかし、地下水に溶存する有機物は、地表からの涵養や褐炭等の埋没有機物(地表の有機 物起源)の溶出により、地表で生成した有機物と混合する場合もあり、必ずしも錯生成能が低く なるとは限らない。また、沿岸部の深部地下水に溶存する腐植物質の硫黄の割合(1.9~2.5%) は、湖沼水や淡水組成の地下水に溶存する腐植物質の値(0.0~0.8%)と比べて高い傾向を示す ことが見出されており(Saito et al., 2015)、それらは腐植物質の構造中でチオール基(R-SH) (Stevenson, 1994) やチオ酢酸基 (R-OSH) (Saito et al., 2015) 等として存在し、B 族元素 (Pb など)等の「軟らかい酸」に分類される金属イオンと比較的強い結合を形成する可能性がある。 しかし、その影響の程度については、これまでに知見が得られていなかったことから、本調査で は、蛍光消光法を適用して、沿岸部の深部地下水から抽出した腐植物質に対する Ni 及び Pb に対 する条件付き錯生成定数を評価した(産業技術総合研究所ほか,2019)。その結果、NiとPbに対 する腐植物質の錯生成能は、河川水と深部地下水とでは大きく異なるのに対し、深部地下水間で はほぼ同じであることを確認した(図 5.3-18)。しかし、Ni と Pb に対する $\log K$ 値を比較する と、深部地下水中の腐植物質では、地域の違いに関わらず、Ni に対する log K 値が Pb に対する 値よりも小さくなるが、河川水中の腐植物質では、Ni に対する logK値が Pb に対する値よりも 大きくなり、沿岸部の深部地下水に溶存する腐植物質と河川水に溶存する腐植物質とでは、錯生 成サイトの特性が異なる可能性があることを確認した(図 5.3-18)。一般に、Niは「硬い酸」に 分類され、水酸化物イオン等の「硬い塩基」と強い結合を形成し、Pb は「軟らかい酸」に分類さ れ、硫黄等の「軟らかい塩基」と強い結合を形成する(Pearson, 1963)。また、沿岸部の深部地 下水に溶存する腐植物質は、地表水に溶存する腐植物質と比べて、硫黄の含有量が高く(Saito et al, 2015)、隣接し合うカルボキシル基間の距離が長い可能性がある(Terashima et al., 2012)。 このため、深部地下水の腐植物質では Ni や Pb がカルボキシル基と単座配位により比較的緩く結 合し、一方、河川水の腐植物質では多座配位により強く結合するために、深部地下水よりも河川 水の腐植物質で高い錯生成能が観察されるものと考えられる。また、硫黄を多く含む深部地下水 中の腐植物質では、チオール基サイト等への Pb 結合の寄与が、河川水の腐植物質の場合よりも 大きくなり、Pb に対する log K値が Ni に対する値よりも高くなった可能性がある。しかし、Pb は、腐植物質間を架橋して、安定な錯体を形成する可能性もあることから (Orsetti et al., 2013)、 深部地下水の腐植物質の Pb に対する log K値が Ni に対する値よりも大きくなった原因について は、Pb に対する腐植物質の錯生成反応機構の詳細理解を通して明らかにしていく必要がある。



図 5.3-18 沿岸部の深部地下水及び河川水から抽出した腐植物質に対する Ni 及び Pb の条件付き錯生成定数。

さらに、沿岸部の高塩濃度地下水における核種移行に対する有機物影響評価では、濃度や錯生 成能とともに、その移行性を考慮する必要がある。特に、緩衝材(圧縮ベントナイト)での有機 物の透過性は、塩濃度が高く有機物のサイズが小さいほど高くなることが知られている(Iijima et al., 2009: 2013)。また、幌延の地下研究施設の高塩濃度地下水に溶存する腐植物質の分子サ イズ(0.30~0.55 nm)は、地表環境(土壌、河川、湖)に存在する腐植物質のもの(0.84~2.49 nm)と比べて小さいことが報告されている(Saito et al., 2015)。そこで、本調査では、圧縮べ ントナイトに対する透過が既に確認されている Aldrich 社製フミン酸 (AHA) の低分子量分画 (< 3 kDa)を指標として用いることで、幌延の地下研究施設及び新潟県の観測井戸から採取した深 部地下水に溶存する有機物の圧縮ベントナイトに対する透過可能性を調査した(産業技術総合研 究所ほか, 2018)。具体的には、サイズ排除クロマトグラフィーを用いて、AHAの透過分画と沿 岸部地下水に溶存する有機物とのサイズ分布データを取得し、得られたサイズ分布を比較するこ とで、圧縮ベントナイトに対して透過可能なサイズ分画 (AHA 透過分画よりも遅くに溶出する分 画)の存在を評価した。その結果、沿岸部の深部地下水に溶存する有機物の大部分が、AHA 透過 分画(<3kDa)よりも遅い保持時間に溶出することを見出し(図 5.3-19)、イオン強度 0.1 以上 の高塩濃度条件において圧縮ベントナイト(乾燥密度、1.2 Mg m⁻³)を透過可能なサイズである と評価された。しかし、実際の海水では、Ca や Mg の多価金属イオンが含まれており、これらが 有機物の透過拡散に影響する可能性がある。今後、海水組成を考慮した圧縮ベントナイトに対す る有機物の透過拡散に関わる知見を拡充することにより、海水条件における有機物の透過性につ いて評価する必要がある。



図 5.3-19 サイズ排除クロマトグラフィーによる沿岸部地下水に溶存する 有機物の圧縮ベントナイト透過サイズの評価

以上より、本調査では、幌延や新潟の沿岸部の深部地下水に溶存する腐植物質の濃度、構造特 性、錯生成能について新たにデータを取得し、深部地下水中の溶存腐植物質の多様性を考慮した 特性データを整備した。また、得られた深部地下水に溶存する腐植物質の特性データと河川水に 溶存する腐植物質のデータとの比較・評価から、深部地下水中の腐植物質の特性「濃度が高く、 比較的低分子量の脂肪族性に富む分子構造を有し、比較的低い錯生成能を有する」ことを確認し た。また、サイズ排除クロマトグラフィーによるサイズ分布の評価から、沿岸部の深部地下水に 溶存する有機物は、圧縮ベントナイト(乾燥密度、1.2 Mg m⁻³)を透過可能なサイズであると評 価された。

3) 微生物

地下環境には、沿岸部及び陸域の地下において普遍的に微生物が存在することが数多くの研究 から明らかにされている(Inagaki et al., 2006; 2015; Parkes et al., 2005; Pedersen et al., 2014)。地層処分システムにおいて、微生物は主に処分場閉鎖後の酸化還元状態回復促進、人工 バリア内の金属容器の腐食、放射性核種の移行などに影響を及ぼす可能性があると考えられてい る。これらの事象に対する微生物影響評価を行う際には、その存在量や核種との相互作用に関連 する微生物代謝に関する知見が必要になるが、その特性は岩盤の空隙や栄養塩濃度等に依存する ところが大きいと考えられている(Pedersen et al., 2014; Inagaki et al., 2015)。様々な沿岸部 環境を対象とした調査報告から、現存量に関する知見は集積されつつあり、深度1,000 m程度ま では全菌数として地下水中では約10³~10⁶ cells/ml、岩石中(堆積物中)では約10²~10⁶ cells/g dry weightの微生物が地下水に存在することが明らかにされている(図5.3-20、表5.3-2)

(Hallbeck and Pedersen, 2012; Pedersen et al., 2008; 2014; SKB, 2010; Shimizu et al., 2006; 天野ほか, 2012; Ise et al., 2017; Takeuchi et al., 2009; Takeuchi et al., 2011; Inagaki et al., 2015)。なお、全菌数とは、生きている菌や死菌すべての数を示したものであり、その数からは代謝活性を有する菌や死菌・不活性の菌を識別することはできないが、生菌や活性を有する

菌のみに存在するアデノシン三リン酸(Adenosine triphosphate; ATP, 生体内でエネルギーの 放出・貯蔵、物質の合成・代謝において重要な物質)と全菌数は相関関係があることから、全菌 数として示されている存在量は、生菌あるいは代謝活性を有する菌数の指標となることが報告さ れている(Eydal and Pedersen, 2007; Pedersen et al., 2014)。したがって、環境中に存在する 全微生物の存在量及び代謝活性に関する知見を集積することが、核種移行への影響評価を行う上 で必要である。一方で、微生物代謝については、各環境で優占する微生物種が異なり、沿岸部地 下において優占種として検出されている微生物群は、未だかつて培養に成功しておらず代謝が未 知の微生物群に属する種が多く存在することから、代謝の不明なものが多く、知見の蓄積は十分 とは言い難い。

そこで本調査では、既存のデータを活用して水質等の地球化学条件と微生物群集組成の関係性 について評価を行うとともに、沿岸部地下において優占種として存在する未知微生物の代謝につ いて、培養法に依存しない推定手法に関する知見を整理し、これらの微生物代謝が核種移行に影 響を及ぼす可能性について考察した。



図 5.3-20 沿岸部及び陸域の地下における微生物現存量の深度分布

調査サイト	岩盤 タイプ	対象試料	細胞数 (cells/ml in groundwater, cells/g dry weight in core)	地下水のタイプ	微生物の多様性	参考文献
Olkiluoto, ONKALO	花崗岩	地下水	10 ³ -10 ⁶	methane-rich saline Na-Ca-Cl	Gamma-proteobacteria, Methanosarcinales, Methanomicrobiales, ANME, Delta- proteobacteria	Pedersen et al., 2014
Forsmark and Laxemar	花崗岩	地下水	10 ³ -10 ⁶	methane-rich saline Na-Ca-Cl	Gamma-proteobacteria, Methanosarcinales, Methanomicrobiales, ANME, Delta- proteobacteria	SKB 2010
幌延	堆積岩	地下水	10 ³ -10 ⁶	methane-rich saline Na-Cl- HCO3 ⁻	Chloroflexi, Firmicutes, Bacteroidetes, Beta- proteobacteria, Delta- proteobacteriam, Methanomicrobiales, JS1, ANME	Shimizu et al., 2006 Amano et al., 2012 Ise et al., 2017
関東平野沖積層	堆積岩	コア	10 ⁶	methane-rich freshwater	Chloroflexi, MCG, JS1, ANME-I, MBG-C	Takeuchi et al., 2009 Takeuchi et al., 2011
下北半島東方沖	堆積岩	コア	10 ² -10 ⁶	methane-rich coal-bearing sediment	Actinobacteriam Proteobacteria, Firmicutes, Bacteroidetes, Acidobacteria	Inagaki et al., 2015

表 5.3-2 沿岸部の調査サイトにおける微生物現存量と多様性の報告例

水質条件と微生物代謝の関係性について、主成分分析及び正準対応分析を用いて、幌延、下北 半島、スウェーデン、米国ユタ州等の様々な地下環境条件下における微生物群集の類似性を比較 し、各サイト間の群集の差の要因となる水質条件の抽出を試みたところ、群集の類似性とメタン、 有機物、硫酸イオン、水素、塩化物イオン、鉄などの濃度が密接に関係することが示されたこと から、これらの成分が微生物代謝に寄与していることが示唆された。今後、このような統計学的 評価で参照可能なデータを様々な環境条件下において拡充することで、群集間の類似性と水質条 件との関係性をより明確に示すことができ、地球化学条件に基づいてある程度微生物群集組成を 推定することが可能になると考えられる。一方で、データベースの拡充は、取り扱うデータの量 が膨大であることや、知見ごとにデータの質や取得されたデータの項目等が異なることから、整 備には時間と手間を要する。なお、微生物の生息環境と微生物群集組成・代謝の関係性に関する 情報については、地層処分の分野だけでなく、環境問題や健康問題など様々な分野で必要とされ 始めてきており、例えば、国立遺伝学研究所は、微生物群集組成の大規模データから様々な環境 と微生物のつながりを可視化するウェブツール「LEA」を開発し、平成30年度に公開している (http://leamicrobe.jp;Higashi et al., 2018)。このような公開ツールやデータベースを活用した 評価についても、地層処分の分野での有効性について今後検討していく必要があると考える。

沿岸部の地下で優占種として検出されているのは、メタン生成菌や、硫酸還元菌が属する Deltaproteobacteria、発酵菌や硫酸還元菌が属するFirmicutesなどであり、これらは、メタン、 硫酸イオン、水素、有機物の多い環境に特徴的な代謝機能を有する微生物種であると考えられる。 沿岸部ではこれらの種の他、優占種として未知微生物群(未だかつて培養に成功していないため に代謝機能の未解明な微生物群)が検出されている報告例が多い。沿岸部地下において優占種と して検出される未知微生物としては、Chloroflexi, ANME(嫌気的メタン酸化古細菌)、JS1、 MBG-D (Marine Benthic Group)、MCG (Miscellaneous Crenarchaeotal Group) (Ise et al., 2017; Hernsdorf et al., 2017; Hoshino et al., 2017; Nobu et al., 2016; Takeuchi et al., 2009; Takeuchi et al., 2011)等が挙げられる。これらの微生物群は、そのほとんどが培養に成功してお らず、従来の培養法に基づく代謝機能の推定が困難な種である。そこで、培養法に依存しない代 謝機能の推定手法として、環境DNAを対象とした分子生態学的手法(すなわちゲノム解析手法) を活用した未知微生物群の代謝機能推定に関する知見に基づき、前述の未知の微生物種の代謝機 能と核種との相互作用の可能性について整理した(表5.3-3)。ゲノム解析では、生物の持つ全遺 伝情報を総合的に解析することで、得られた配列情報から遺伝子の同定と機能の推定を行うこと により、その生物の代謝機能を推定することができる。この手法は培養法に依存せず遺伝子情報 から代謝機能を推定できることから、培養に成功していない未知微生物に対しても有効な手法と なることが期待される。幌延深地層研究センター地下施設から採取された地下水中で検出された、 嫌気的メタン酸化菌として知られるANME-2dやChloroflexiに属する種は、ゲノム解析から鉄還 元反応を行うための遺伝子を有することが報告されており(Hernsdorf et al., 2017)、これらの 種は核種の酸化還元反応に関与する可能性がある。一方で、ANME-2dの中でも瑞浪超深地層研 究所地下施設から採取された地下水から検出された種については、金属還元反応を行うための遺 伝子を有していないことが報告されている(Ino et al., 2018)。また、その他の微生物種である JS1、MBG-D、MCGについては、有機物の発酵や分解反応によってエネルギーを獲得すること が推定されているが、呼吸反応を行う遺伝子を有していないことから(Hernsdorf et al., 2017; Lloyd et al., 2013; Nobu et al., 2016)、核種との相互作用の可能性は低いと考えられる。このよ うに、ゲノム解析手法の適用により、未知微生物の代謝の推定を含む微生物の代謝機能を推定す ることが可能であることが示された。今後、核種移行への微生物影響を評価するためには、微生 物現存量に関するデータに加えて、培養法・分子生物学的手法・環境因子を考慮した統計解析手 法等、本調査で示したような複数の手法を組み合わせた微生物群集組成と代謝情報の関連性につ いて参照可能なデータの拡充が必要である。

微生物種	調査サイト	対象試料	地下水のタイプ	ゲノム解析手法に基づき推定された代謝機能	核種との相互作用 の可能性*	参考文献
ANME-2d	日本 幌延	堆積岩地下水	methane-rich saline Na-Cl- HCO3 ⁻	嫌気的メタン酸化,鉄還 元,炭素固定,窒素固 定反応	©	Hernsdorf et al., 2017
ANME-2d	日本 瑞浪	花崗岩地下水	fresh water, Na- Ca-Cl	嫌気的メタン酸化,水素酸化	_	Ino et al., 2017
JS1	デンマーク Aarhus bay	堆積物	methane-rich sediment	嫌気性従属栄養性、呼吸活性を持たない、プロ ピオン酸などの有機酸 の発酵によりエネル ギーを獲得	-	Nobu et al., 2016
JS1	日本 幌延	堆積岩地下水	methane-rich saline Na-Cl- HCO3 ⁻	嫌気性従属栄養性, 呼 吸活性を持たない, 発 酵, 高分子有機物分解	-	Hernsdorf et al., 2017
Chloroflexi	日本 幌延	堆積岩地下水	methane-rich saline Na-Cl- HCO3 ⁻	鉄還元, 高分子有機物 分解, 発酵	0	Hernsdorf et al., 2017
MBG-D	デンマーク Aarhus bay	堆積物	methane-rich sediment	嫌気性従属栄養性, た んぱく質の再無機化	Δ	Lloyd et al., 2013
MCG	デンマーク Aarhus bay	堆積物	methane-rich sediment	嫌気性従属栄養性,た んぱく質の再無機化	Δ	Lloyd et al., 2013
*微生物細胞表面への収着反応は考慮しない. ©:可能性が大いにある.〇:可能性がある.△:不明:可能性は低い						

表 5.3-3	ゲノム解析手法を活用した未知微生物群の代謝機能と
	核種との相互作用に関する推察

(3) まとめ及び今後の課題

コロイドについては、圧縮ベントナイトより生成するベントナイトコロイド及び天然の地下水 中に存在すると考えられる粘土鉱物コロイドに対して、コロイド安定性の塩濃度依存性について 実験的に評価し、コロイドが安定に存在する塩濃度を示した。ただし、天然の地下水中に存在す ると考えられる無機コロイドについては、より実環境に近い粒径の小さい粘土鉱物コロイドに対 する塩濃度依存性の評価を行うとともに、粘土鉱物コロイド以外の無機コロイドに対しても評価 を行っていくことが必要と考えられる。

有機物については、日本国内の深部地下水に溶存する腐植物質について、濃度、構造特性、錯 生成能のデータを取得し、それらデータと河川水に溶存する腐植物質でのデータとを比較し、核 種移行への影響を評価した。しかし、本調査で得られたデータは限定的であり、核種移行への影 響について、部分的・定性的な評価を行うには有用であるものの、網羅的・定量的な評価を行う ためには、さらに多様な沿岸部地下環境でのデータの取得とそれに基づく核種移行への影響の評 価が求められる。

微生物については、地球化学条件と微生物群集分布及び微生物代謝との関連性や、微生物代謝 が核種移行に及ぼす影響について、統計学的手法やゲノム解析手法を用いた評価が有効である可 能性を示すことができた。今後は、核種移行への微生物影響を評価するために、微生物現存量に 関するデータに加えて、培養法・分子生物学的手法・環境因子を考慮した統計解析手法等、複数 の手法を組み合わせた微生物群集組成と代謝情報の関連性について参照可能なデータを拡充する 必要がある。また、より信頼性の高い統計学的評価に向けて、「LEA」などの微生物と環境因子と の関係性を可視化するツールの活用などが有効になる可能性があると考えられる。

参考文献

- 天野由記,山本陽一,南條 功,村上裕晃,横田秀晴,山崎雅則,國丸貴紀,大山隆弘,岩月輝希, 幌延深地層研究計画における地下水、河川水および降水の水質データ(2001~2010年度), JAEA-Data/Code 2011-023, 2012.
- Bryan, N.D., Abrahamsen, L., Evans, N., Warwick, P., Buckau, G., Weng, L. and van Riemsdijik, W.H., The effects of humic subsatnes on the treansportation of radionuclides: Recent improvements in the prediction of behabiour and the understanding of mechanisms, Applied Geochemistry, Vol.27, pp.378-389, 2012.
- Claret F., Schafer, T., Rabung, T., Wolf, M., Bauer, A., Buckau, G., Differences in properties and Cm(III) complexation behavior of isolated humic and fulvic acid derived from Opalinus clay and Callovo-Oxfordian argillite, Appl. Geochem., 20, pp.1158, 2005.
- Dafner, E.V. and Wangersky, P.J., A brief overview of modern directions in marine DOC studies. Part III – Recent progress in marine DOC studies. J. Environ. Monit., 4, pp. 55-69, 2002.
- Eydal, H.Sc. and Pedersen, K., Use of an ATP assay to determine viable microbial biomass in Fennoscandian Shield groundwater from depths of 3-1000 m, Journal of Microbiological Methods, 70, pp.363-373, 2007.
- Hallbeck, L., and Pedersen, K. Culture-dependent comparison of microbial diversity in deep granitic groundwater from two sites considered for a Swedish final repository of spent nuclear fuel. FEMS Microbiology Ecology, 81, pp.66-77, 2012.
- Harvey, G.R., Boran, D.A., Chesal L.A., Tokar, J.M., The structure of marine fulvic and humic acids, Marine Chemistry 12, pp.119-132, 1983.
- Hernsdorf A.W., Amano Y., Miyakawa K., Ise K., Suzuki Y., Anantharaman K., Probst A., Burstein D., Thomas B.C., Banfield J.F. Potential for microbial H2 and metal transformations associated with novel bacteria and archaea in deep terrestrial subsurface sediments. The ISME Journal 11, pp.1915-1929, 2017.
- Higashi K., Suzuki, S., Kurosawa, S., Mori, H., Kurokawa, K., Latent environment allocation of microbial community data. PLoS Comput Biol 14(6), e1006143, 2018.
- Hoshino, T., Toki, T., Ijiri, A., Morono, Y., Machiyama, H., Ashi, J., Okamura, K., Inagaki, F. Atribacteria from the subseafloor sedimentary biosphere disperse to the hydrosphere through submarine mud volcanoes. Frontiers in Microbiology, 8, 1135, 2017.
- Iijima, K., Kurosawa, S., Tobita, M., Kibe, S., Ouchi, Y., Diffusion behavior of humic acid in compacted bentonite: effect of ionic strength, dry density and molecular weight of humic acid. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 1124, pp.263-270, 2009.
- Iijima, K., Kurosawa, S., Kibe, S., Tobita, M., Ouchi, Y., Modeling of diffusion behavior of humic acid and Nd in the presence of humic acid in compacted bentonite, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 65, pp.66-71, 2013.
- Inagaki, F., Nunoura, T., Nakagawa, S., Teske, A., Lever, M., Lauer, A., Suzuki, M., Takai, K., Delwiche, M., Colwell, F.S., Nealson, K.H., Horikoshi, K., D'Hondt, S., Jørgensen, B.B., Biogeographical distribution and diversity of microbes in methane hydrate-bearing deep marine sediments, on the Pacific Ocean Margin. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 103, pp.2815-2820, 2006.
- Inagaki, F., Hinrichs, K.-U., Kubo, Y., Bowles, M.W., Heuer, V.B., Hong, W.-L., Hoshino, T., Ijiri, A., Imachi, H., Ito, M., Kaneko, M., Lever, M.A., Lin, Y.-S., Methé, B.A., Morita, S., Morono, Y., Tanikawa, W., Bihan, M., Bowden, S.A., Elvert, M., Glombitza, C., Gross, D., Harrington, G.J., Hori, T., Li, K., Limmer, D., Liu, C.-H., Murayama, M., Ohkouchi, N., Ono, S., Park, Y.-S., Phillips, S.C., Prieto-Mollar, X., Purkey, M., Riedinger, N., Sanada, Y., Sauvage, J., Snyder, G., Susilawati, R., Takano, Y., Tasumi, E., Terada, T., Tomaru, H., Trembath-Reichert, E., Wang, D.T. and Yamada, Y., Exploring deep microbial life in coalbearing sediment down to ~2.5 km below the ocean floor. Science, Vol. 349, pp.420-424, 2015.
- Ino K., Hernsdorf A.W., Konno U., Kouduka M., Yanagawa K., Kato S., Sunamura M., Hirota A., Togo YS., Ito K., Fukuda A., Iwatsuki T., Mizuno T., Komatsu D.D., Tsunogai U., Ishimura T., Amano Y., Thomas B.C., Banfield J.F., Suzuki Y. Ecological and genomic profiling of anaerobic methane-oxidizing archaea in a deep granitic environment. The ISME Journal, 12, pp.31-47, 2018.
- Ise, K., Sasaki, Y., Amano, Y., Iwatsuki, T., Nanjo, I., Asano, T. and Yoshikawa, H., The succession of bacterial community structure in groundwater from a -250-m gallery in the Horonobe Underground Research Laboratory. Geomicrobiology Journal, 34, 489-499, 2017.
- 岩月輝希,豊嶋賢治,吉田英一,深地層を対象とした地下水の地球化学調査の現状,原子力バックエンド研究 Vol.4(2), pp.73-81, 1998.
- 核燃料サイクル開発機構,わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層 処分研究開発第2次取りまとめ-分冊3地層処分システムの安全評価,JNC TN1400 99-23, 1999.

- Kida, M., Ohtuka, T., Kato, T., Suzuki, T. and Fujitake, N., Evaluation of salinity effect on quantitative analysis of aquatic humic substances using nonionic DAX-8 resin, Chemosphere Vol.146, pp.129-132, 2016.
- Lloyd, K.G., Schreiber L., Petersen D.G., Kjeldsen K.U., Lever M.A., Steen A.D., Stepanauskas R., Richter M., Kleindienst S., Lenk S., Schramm A., Jørgensen B.B. Predominant archaea in marine sediments degrade detrital proteins. Nature, 496, pp.215-218. 2013.
- 松本一浩, 棚井憲治, 緩衝材の流出/侵入特性(II)-幌延地下水(HDB-6 号孔)を用いた緩衝材の侵入特性評価-, JNC TN8400 2004-026, 2005.
- 松本一浩, 飯島和毅, 棚井憲治, 緩衝材の浸食現象評価-ベントナイトコロイドの生成挙動-, JAEA-Research 2008-097, 2008.
- 長尾誠也, 岩月輝希, 三次元蛍光分光光度法による深部地下水溶存腐植物質の簡易特性分析,分析 化学 Vol.56(3), pp.143-150, 2007.
- 長尾誠也, 岩月輝希, 濱 克宏, 岐阜県東濃地域の地下水から分離精製した溶存腐植物質の特性, 原子力バックエンド研究 Vol.15(2), pp.77-86, 2009.
- Nagao, S., Tanaka, T., Nakaguchi, Y., Suzuki, Y., Hiraki, K., Ogawa, H., Complexation of Pu and Am with fulvic acid under saline condition, JAERI-Conf. 99-004, pp. 674 680, 1999.
- Nagao, S., Sakamoto, Y., Rao, R.R., Fujitake, N., Effects of groundwater humic substances on sorption of Np(V) on sandy materials, Humic Substances Research, 5/6, pp.9-17, 2009.
- Nobu, M.K., Dodsworth, J.A., Murugapiran, S.K., Rinke, C., Gies, E.A., Webster, G., Schwientek, P., Kille, P., Parkes, R.J., Sass, H., Jørgensen, B.B., Weightman, A.,J., Liu, W., Hallam, S., Tsiamis, G., Woyke, T., Hedlund, B.P. Phylogeny and physiology of candidate phylum 'Atribacteria' (OP9/JS1) inferred from cultivation-independent genomics. The ISME Journal, 10, pp.273-286, 2016.
- Orsetti, S., Marco-Brown, J.L., Andrade, E.M. and Molina, F.V., Pb(II) binding to humic substances: An equilibrium and spectoroscopic study, Environmetal Science and Technology, 47, pp.8325-8333, 2013.
- Parkes, R.J., Webster, G., Cragg, B.A., Weightman, A.J., Newberry, C.J., Ferdelman, T.G., Kallmeyer, J., Jorgensen, B.B., Aiello, I.W., Fry, J.C., Deep sub-seafloor prokaryotes stimulated at interfaces over geological time. Nature, 436, pp.390-394. 2005.
- Pearson, R.G., Hard and Soft Acids and Bases, J. Am. Chem. Soc., 85, pp.3533-3539, 1963.
- Pedersen, K., Arlinger, J., Eriksson, S., Hallbeck, A., Hallbeck, L., and Johansson, J. Numbers, biomass and cultivable diversity of microbial populations relate to depth and boreholespecific conditions in groundwater from depths of 4-450 m in Olkiluoto, Finland. The ISME Journal, 2, pp.760-775, 2008.
- Pedersen, K., Bomberg, M., and Itävaara, M., Summary report microbiology of Olkiluoto and ONKALO groundwater, POSIVA 2012-42, 2014.
- Pettersson, C., Ephraim, J. and Allard, B., On the composition and properties of humic substances isolated from deep groundwater and surface waters, Org. Geochem. 21, pp.443-451, 1994.
- Saito, T., Terashima, M., Aoyagi, N., Nagao, S., Fujitake, N. and Ohnuki, T., Physicochemical and ion-binding properties of highly aliphatic humic substances extracted from deep sedimentary groundwater, Environ. Sci.: Processes Impacts 17, pp.1386-1395, 2015.

- Saito, T., Aoyagi, N. and Terashima, M., Europium binding to humic substances extracted from deep underground sedimentary groundwater studied by time-resolved laser fluorescence spectroscopy, J. Nucl. Sci.Technol.54, pp.444-451, 2017.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 591p,2017.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 29 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 2018.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 30 年度 地層処分技術調査等事業 沿岸部処分システム高度化開発 報告書, 2019【公開準備中】.
- 笹本 広,山本信幸,宮川和也,水野 崇,幌延深地層研究計画で得られた地下水の水質データ
 (2011年度~2013年度),日本原子力研究開発機構 技術報告書,JAEA-Data/Code 2014-033, 2015.
- Shimizu, S., Akiyama, M., Ishijima, Y., Hama, K., Kunimaru, T. and Naganuma, T., Molecular characterization of microbial communities in fault-bordered aquifers in the Miocene formation of northernmost Japan. Geobiology, Vol. 4, pp. 203-213, 2006.
- SKB, Geosphere process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-48, 2010.
- Stevenson, F.J., Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions, New York: John Wiley & Sons, 1994.
- Takeuchi, M., Komai, T., Hanada, S., Tamaki, H., Tanabe, S., Miyachi, Y., Uchiyama, M., Nakazawa, T., Kimura, K., and Kamagata, Y., Bacterial and archaeal 16S rRNA genes in Holocene marine sediments from the Kanto Plain. Geomicrobiology Journal, Vol. 26, pp. 104-118, 2009.
- Takeuchi, M., Hoshioka, H., Seo, Y., Tanabe, S., Tamaki, H., Kamagata, Y., Takahashi, HA., Igari, S., Mayumi, D., and Sakata, S., A distinct freshwater-adapted subgroup of ANME-1 dominates active archaeal communities in terrestrial subsurfaces in Japan. Environmental Microbiology, Vol. 13, pp. 3206-3218, 2011.
- Terashima, M., Nagao., S., Iwatsuki, T., Fujitake, N., Seida, Y., Iijima, K. and Yoshikawa, H., Europium-binding abilities of dissolved humic substances isolated from deep groundwater in Horonobe area, Hokkaido, Japan, J. Nucl. Sci. Technol., 49, pp.804-815, 2012.
- Thurman, E.M., Organic geochemistry of natural waters, Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers, a member of the Academic publishers group, DORDRECHT / BOSTON / LANCASTER, 1985.
- Tsuda, K., Takata, A., Shirai, H., Kozaki, K. and Fujitake, N., A method for quantitative analysis of aquatic humic substaces in clear water based on carbon concentration, Analytical Science Vol.28, pp.1017-1020, 2012.
- Tsuda, K., Kida, M., Aso, S., Kato, T., Fujitake, N., Maruo, M., Hayakawa, K. and Hirota, M., Determination of aquatic humic substances in Japanese lakes and wetlands by the carbon concentration-based resin isolation technique, Limnology, pp.1-6, 2016.

6. 技術や知見の体系化に向けた分野間連携のあり方

第1章および第2章で述べたように、本事業では"沿岸部処分システム"をキーワードとして、 地質環境調査技術、工学技術並びに安全評価技術の主要な三つの技術分野について、それぞれの 分野で専門性や豊富な研究実績を有する産総研、原子力機構、原環センター並びに電中研の四機 関が協力して調査研究を進めてきた。そのような実施体制を構築した背景には、各機関の専門的 知見を活用して沿岸部研究会で示された多岐にわたる研究課題に着実に取り組むことに加え、概 要調査段階以降における候補サイトを対象としたセーフティケースの整備に必須となる分野間の 連携方策を、本事業においてより現実的かつ具体的に検討を進める狙いがある。

本章では、本事業における個々の課題への取組と並行して四機関で検討を進めた分野間連携の あり方について、これまでの検討結果を整理する。

6.1 分野間連携に関する考え方

国際原子力機関(IAEA)や経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA)などの国際機関 における検討をとおして、処分場の段階的な開発プロセスの概念が具体化されるとともに、事業 の節目で整備されるセーフティケースの構造などが提案されている(図 6.1-1、図 6.1-2)。

このような段階的な処分場開発プロセスは、事業進捗に伴い精緻化されるサイト情報にも相応 して、それぞれの技術分野や個々の取組の間での情報のインターフェイスやフィードバックなど による相互に連携した反復的なプロセスをとおして最適化される。



段階的な事業展開プロセスにおける主要な意思決定のステップ

図 6.1-1 調査・操業・閉鎖に至る段階的な事業展開における主要なステップ



注) 左図は IAEA の特定安全指針 No.SSG-23 (IAEA, 2012) 及び OECD/NEA 文書#3679 (OECD/NEA, 2004) より。右表 は、これらの国際機関発行文書で示されるコンテンツ内容を OECD/NEA が示す枠組み(大項目)をベースに整理したもの

図 6.1-2 国際機関が提案するセーフティケースの構造とコンテンツ体系

図 6.1-2 に示すように、セーフティケースの構造における主要な三つの技術分野間での情報の 流れは概念的に示されているものの、今後の事業展開を円滑に進めるためには、分野間でインタ ーフェイスされる情報やデータを具体化し、事業段階の違いに応じた情報等の精度や詳細さの違 いや想定される制約や課題への認識を相互に共有し、それらへの対応のあり方などについて予め 検討を進めておくことが望まれる。

特に沿岸部を念頭に置いた場合、セーフティケース開発の出発点となる地質環境情報について、 既存の文献情報の十分性や候補サイトに対する調査技術の適用性など、内陸部の場合と異なる部 分があり得ることが想定される。事業の節目におけるセーフティケース開発そのものは事業主体 の役割であるが、本事業を実施する基盤研究関係四機関が、テストフィールド等を活用した現実 的な情報やデータを元に上記のような検討をジェネリックな観点から先行させることで、概要調 査段階以降の実施主体の円滑な取組に貢献できる。

参考文献

IAEA, Specific Safety Guide, No. SSG-14 "Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste", 2011

IAEA, Specific Safety Guide, No.SSG-23 "The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste", 2012

OECD/NEA, Post-closure Safety Case for Geological Repositories (NEA#3679), 2004.

6.2 各技術分野が期待する他分野との連携

上述した分野間連携の考え方を踏まえ、本事業の実施四機関で分野間連携のあり方に関する議 論を進めた。以下、これまでの議論で具体化された事項などについて、各分野の立場から整理す る(他の分野に期待する連携方策といった観点で整理)。なお、候補サイトが特定された概要調査 段階以降の取組への反映を意図した分野間連携に係る検討は、現時点で必ずしも十分ではなく、 連携方策の具体化までには至らずに他分野に期待する事項の抽出で議論が途絶えているものや課 題の共有で終えているものもある。これらについては、上述した分野間連携の議論を推し進める 意図を踏まえ、引き続き議論を深めていく必要がある。

6.2.1 地質環境調査技術分野が期待する分野間連携

第3章(3.5節)で述べたように、本事業における地質環境の調・査技術分野の取組では、3.1 節において沿岸部の自然現象の調査・評価技術の高度化、3.2節において沿岸部の地下水長期安 定性に関する調査・評価技術の高度化、さらには3.3節では沿岸部の地質環境の情報整備を進め てきた。

3.1節の分野ではJAEAと電中研、3.2節の分野では電中研と産総研、3.3節では産総研とJAEA が機関間の連携を図り、それぞれの成果を統合化することで新たな成果を生み出すことができ、 さらには両者間で研究要素が重複しないような工夫をすることにより効率的な研究を実施するこ とができた。

分野間連携の観点からは、地質環境に関する情報が分野間で共有/引き渡される情報の流れの 最上流に位置すると認識していることから、精緻で正確な情報を提供することが重要であると考 えがちである。本事業での分野間連携での議論を振り返ると、他の分野からの要望を踏まえて地 質環境調査技術分野としての対応が必要であると現状では認識している。

- ・工学分野が必要としているのは、地下水流動のみならず地下水水質に関する情報であり、これらを共有する必要がある。基盤研究としての位置付けや実際の事業への影響の可能性を踏まえると、特定の地域に特化したような研究開発は適切ではない。このようなことにも留意すると、ジェネリックな段階における研究開発として、わが国の沿岸部に関する一般的な地下水分布に関するパターン化や類型化に向けた取り組みが望まれる。
- ・安全評価の観点からは、いくつかの水理地質構造モデルのパターンに基づいた物質以降経路、
 流出店などの情報が必要となる。
- 以上のような要望に対して
- ・現在日本の沿岸部の地下水水質の情報を収集しており将来的には収集した膨大な情報から必要な情報を抽出することを含めた対応を可能としたい。
- ・沿岸部の深部地下水を水質組成、地下水年代と地形地質の要素との関連性を検討し、システ マティック区分を実施しており、沿岸部一般的な深部地下水のパターン化を可能にしている。
 このような相互関係に関する情報共有は、いまだ十分とは言えない。それぞれの実務担当者が 今後お互いに情報共有する場を設けたうえで、議論することが肝要である。

6.2.2 工学技術分野が期待する分野間連携

第4章で述べたように、本事業における工学技術分野の取組では、個々の構成要素に関する特 性データ等の拡充に係る取組に加え、処分システムの成立性に係る手法等の提示に係る検討を進 めてきた。

前者では、わが国の沿岸部で想定される地下環境、特に塩水系の地下水化学環境を念頭に置き、 オーバーパック、緩衝材、セメント並びにグラウトなど、人工バリア材料等のニアフィールドを 構成する各要素に関する劣化や変質に関する挙動把握に資する試験や複合現象評価手法の構築に 取り組んだ(4.2節参照)。特に試験を伴う取組では、二つの機関(及び各種試験に取り組む個々 の課題に関するメンバー)が連携して、模擬地下水として標準海水(ASTM D1141-98 準拠人工 海水など)及びその希釈水等を用いるなど、試験環境や試験条件の整合性の確保が図られた。ま た、濃度条件についても、地質環境調査技術分野が有する知見を活用し、わが国の沿岸部で想定 される地下水組成の幅や長期的な変遷の見通しをより現実的に捉えた試験条件等を設定すること ができ、従来の降水系を主体とした知見やデータに加え、沿岸部の処分場というものをより現実 的に捉えた知見やデータを拡充することができた。しかしながら、得られた知見やデータは、わ が国の沿岸部で想定される多様な地質環境や処分場構成要素の材料バリエーション等に対して十 分とは言えず、また、例えば緩衝材の機能や状態の変化に影響を与える特定の化学種の存在も示 唆されている(4.2.2項参照)。これまでの地質環境調査技術における調査研究から(特に沿岸部 の地下水長期安定性に関する研究)、わが国の沿岸部の地下水は、起源の異なる降水や海水起源の 地下水がその流動環境や鉱物との反応環境などの違いにも影響され、その組成にバリエーション の幅を持つことが把握されている。今後、わが国の沿岸部で一般的に想定される地下水について、 個々の組成成分が取り得る幅に関する情報が更に拡充されれば、処分場構成要素の状態や機能の 変化に係る知見等の拡充において、念頭におくべき地下水組成をより現実的に捉えることができ る。今後の概要調査段階以降における処分場設計の柔軟性や信頼性の向上に向けて、このような 分野間連携を更に加速させ知見やデータを拡充していくことが望まれる。

後者では、塩水環境下におけるニアフィールド領域での処分システムの成立性を示すための手 法等の検討に取り組み、建設・操業から閉鎖後の再冠水に至る迄の限定的な期間、沿岸部の地質 環境や処分概念に関する限定的な仮定など、検討の前提に制約はあるものの、より現実的な環境 を仮定して手法の整備を行うとともに、工学技術分野内における個別課題の知見やデータの連携・ 体系化に向けた試行的な取組を進めた(4.3.2、4.3.3 項参照)。そのような検討を通して、評価手 法や知見やデータの体系化案を具体化するとともに、必要となる水理解析体系の構築及び水理場 の評価における沿岸部の特性等を把握することができた。これらは、同期間を対象とした処分シ ステムの性能評価に係る取組であるが、この期間のシステムの状態や機能の変化を確からしく示 す(予測する)ことによって、その後のシステムの長期的な状態変化の評価へと連携がなされる。 また、このような処分システムの性能に係る一連の評価を試行することで、知見やデータの連携 (及び評価の流れ)に関する全体の流れが図 6.2・1 のように具体化される。同図内に灰色で示し た部分は工学技術分野からみた今後の分野間連携に向けて期待する取組の例である。本事業では、 条件や適用範囲を限定したうえで成立性を示すための方法や知見等の体系化案を構築したが、今 後はこれらの拡張を行うとともに、分野間で連携すべきデータ等のインターフェイス設計等を進 めていく必要がある。

以上のように、本事業における工学技術分野に関する取組や四つの機関による検討を経て、工 学技術の立場から今後必要となる分野間連携に係る取組を把握することができた。ただし、現時 点では必要な分野間連携課題を認識・共有したに過ぎず、今後、更なる議論を深めていく必要が ある。例えば、地質環境調査技術の成果(実際のサイト調査で得られる情報)を工学設計に受け 渡す際のインターフェイス設計や必要となるデータの精度・範囲などは現時点では具体化には至 っていない。また、安全評価分野が担う FEP データベース整備やシナリオ開発への工学技術分 野からの技術支援として、安全評価期間を見据えた性能評価の方法論やあり方など、分野間連携 に係る多くの議論すべき課題が残されている。今後、これらの議論や検討を加速させ、サイト選 定プロセスの進展に応じて、適時に、かつ効率的・効果的に評価が行えるように準備を進めてお

くことが望まれる。



図 6.2-1 沿岸部における処分システムの成立性の例示における知見やデータの連係フロー

6.2.3 安全評価技術分野が期待する分野間連携

5 章で述べたように、本事業における安全評価技術分野の取組では、沿岸部の特徴を考慮した 核種移行に係る核種移行モデル・パラメータ整備及び影響評価(5.3 節参照)についての取組に加 え、性能評価の枠組みの整備(5.2 節参照)において、性能評価の観点からの分野間の連携の手 法・手順の検討に着手してきた。

その中では、「性能評価において普遍的に重要性が高い情報」の整理とともに、そのような「性 能評価で必要となる情報」の詳細化を分野間での連携とも関係付けつつ行うことに着目し、その ための性能評価の観点からの分野間の連携の手法・手順の例示を試みた。



図 6.2-2 性能評価の観点からの分野間の連携の手法・手順の概念(図 5.2-1 の再掲)

また、その手法・手順を地質環境調査と性能評価の両分野の専門家が参加する形で試行してみ ることで、「性能評価で必要となる情報」の分野間の連携に留意した詳細化に係る議論等を効果的 に行うために有用となる可能性のある留意点や課題も洗い出された。例えば、以下のようなこと が挙げられた:

- ・ 地質環境調査と性能評価との連携について本検討で今後主に取り組むべき課題は、既往の検 討(評価ツリー(柴田ほか,2015)、統合化データフロー(日本原子力研究開発機構,2011)) で分類・整理されている地質環境調査の項目と性能評価の項目やモデルとの関係をベースに、 その関係の内容をより具体的にしていくための情報レベルでの関係づけ
- ・ 性能評価での境界条件として設定する情報の種類や詳細度、さらには境界条件の設定の違い が性能評価結果に与える影響の大きさ等を確認すること、地質環境調査の早い段階で性能評 価の境界条件の設定に必要な情報は得られるか、得られない場合にはどのような対応が必要 /可能かなどを含めた、「情報の取得と利用について、内容だけでなくタイミングも含めたマ ッチング」に着目した検討が重要になる可能性
- ・ 地質環境調査と性能評価との連携を、理想論ではなく、実際に目指すべきかつ目指すことが 可能なものとしていくためには、以下のことに考慮した検討・整理が重要になる可能性
 - ▶ 地質環境調査や性能評価の充足性の調査の段階の進展に伴いう進展、その進展の限界
 - ▶ 充足性の進展や限界の対象とする地質環境による違いの有無・程度
 - その進展や限界が、地質環境調査に基づく地質環境モデルの構築、性能評価における核 種移行評価結果(線量評価結果等)に及ぼす影響
 - 地質環境調査や性能評価の目的の、対象とする事業の段階による変化、対象とする地質 環境に応じた違い、それら目標の進展や違いの地質環境調査や性能評価の充足性の進展 と整合 等

なお、上記のような検討と洗い出された留意点や課題はあくまで性能評価の観点に重点をおい た試行での例であり、異なる分野間での全体としての連携を実効的に実施していくためには、こ のような検討例も参考にしつつ、性能評価以外の分野の観点を適切に取り込んだ全体的な手法や 手順を改めて整理する必要があると考えられる。

参考文献

- 柴田 雅博, 澤田 淳, 舘 幸男, 牧野 仁史, 若杉 圭一郎, 三ツ井 誠一郎, 北村 暁, 吉川 英樹, 小田 治恵, 石寺 孝充, 陶山 忠宏, 畑中 耕一郎, 仙波 毅, 瀬尾 俊弘, 亀井 玄人, 黒澤 進, 後藤 淳一, 澁谷 早苗, 後藤 考裕, 窪田 茂, 稲垣 学, 守屋 俊文, 鈴木 覚, 石田 圭輔, 西尾 光, 牧内 秋恵, 藤原 啓司, 概要調査段階における設計・性能評価手法の高度化 3, NUMO-JAEA 共同研究報告書(2013 年度)(共同研究), JAEA-Research 2014-030, 2015.
- 日本原子力研究開発機構, 平成 22 年度地 層処分技術調査等委託費 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 報告書, 2011.

7. おわりに

資源エネルギー庁からの委託事業として、平成 27 年度より着手した本事業では、沿岸部にお ける地層処分の観点から、概要調査段階で必要となる地質環境の調査・工学設計・安全評価に関 する技術の高度化を目的とした研究開発に取り組んできた。

平成 30 年度までの四ヵ年に及ぶ本事業の実施にあたっては、産総研、原子力機構、原環センタ ー並びに電中研の四機関がそれぞれに有する専門的な知識や経験を踏まえて、効率的・効果的に 成果をあげることができた。その間、本事業のもとに設置した、外部の専門家や有識者などで構 成される委員会において、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、適 時に有益な意見や助言を頂いた。委員会の設置・運営にご協力を頂いた外部の専門家や有識者の 皆様には、ここであらためて感謝の意を表したい。

沿岸部における地層処分の観点から設定した個々の課題に関して得られた成果は本書の3章から5章に示したとおりである。6章で述べたように、ここでは本書の結言として、今回の主要な 三つの技術分野に係る課題を関係する四つの研究機関が共同で取り組んだ結果について、特筆すべき主要な成果を以下に要約する。

- ○四機関の専門知識、経験等を分野間に相互補完的に利用し、かつ融合することによって、分野ごとの成果の信頼性や汎用性の向上を図ることができた。とりわけ、地質環境調査技術分野から始まるデータの提供フローと工学技術や安全評価技術からのデータの要求という双方向の情報提供・情報共有が必要となる分野間の連携体制が築けたことは意義深い。
- ○当該研究課題への取組をとおして四機関の連携並びに分野間の連携を強固にするとともに、 わが国における沿岸部固有の環境を前提として、概要調査段階で必要となる地質環境の調 査・工学設計・安全評価に関する分野横断的な課題に対してシステマティックな研究開発に 取り組むことができた。上記の双方向の情報提供・情報共有(他分野への成果の反映やフィ ードバック)を促進させることで、研究開発の適正化にも寄与することができる。
- ○加えて、地層処分事業が包含する総合的かつ分野横断的な研究課題への対処をとおして、各 機関における専門性を有するスペシャリストが目指すべきジェネラリスト像が共有される とともに、そのための人材育成に係る取組の必要性と継続的な協働が確認された。

以上のように、本事業は資源エネルギー庁の委託事業(基盤研究開発事業)として、ジェネリ ックな観点から日本列島の成因を考慮しつつ列島全体を概観できるように地質環境や地下水環境 に関する調査の地域や手法を構成し、工学技術や安全評価技術との連携に係る分野横断的な課題 へと展開して他分野への成果の反映やフィードバックを図りつつ研究開発に取り組んだ。その結 果(成果)として、分野間並びに機関間での相互理解や相互補完が促進され、研究開発事業とし ての効率的・効果的な実施が可能となり、成果の完成度を高めることにも寄与できた。

今後は、地層処分システム全体としての成立性(長期的な状態や性能の変化の見通しの提示) 並びに安全性の提示など、事業全体としての総合的に高いレベルでの成果の創出に向けて、引き 続き四機関が協働で取り組み、サイト選定プロセスの進展に応じて実施主体が適時にかつ効率的・ 効果的に技術的対応ができるように、基盤研究として先行的な研究開発に取り組んで行くことが 望まれる。地層処分事業が包含する総合的かつ分野横断的な研究課題に主要な四つの関係機関が 引き続き協働で取り組むことで、人材育成や国民への分かりやすい情報提供にも貢献していくこ とが期待される。