

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

平成 28 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

本報告書は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業として、国立研究開発法人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・資金管理センター及び一般財団法人電力中央研究所が実施した平成 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」の成果を取りまとめたものである。

正誤表

報告書名：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

No.	年度	頁	種類	場所	誤	正
1	27	App.3-16	表	第 4 章 Appendix 3 知見、課題、試験計画の一覧表 (App.3-16 の後)	2 ページ落丁	落丁した 2 ページを 下記ページ番号で 追加。 App.3-16 (1) App.3-16 (2)

目次

1. はじめに.....	1
1.1 本事業の背景と目的.....	1
1.2 本事業の概要.....	1
1.3 本報告書の構成.....	1
2. 沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する検討.....	2
2.1 研究会について.....	2
2.2 研究会の参加者.....	2
2.3 本年度の開催実績.....	3
3. 沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発.....	4
3.1 沿岸部の地質環境特性と調査技術に関する検討.....	4
3.1.1 はじめに.....	4
3.1.2 既存の知見などの調査.....	4
3.1.3 課題と対策案の整理.....	15
3.1.4 まとめ.....	17
参考文献.....	17
3.2 沿岸部の地下水調査技術に関する検討.....	21
3.2.1 はじめに.....	21
3.2.2 地下水年代測定技術に関する調査.....	22
3.2.3 海底地下水湧出探査に関する調査.....	49
3.2.4 まとめ.....	57
参考文献.....	57
3.3 沿岸部の研究に資する基盤情報の整備.....	62
3.3.1 はじめに.....	62
3.3.2 既存の知見などの調査.....	63
3.3.3 課題と対策案の整理.....	63
3.3.4 まとめ.....	64
参考文献.....	64
4. 沿岸部における工学技術の高度化開発.....	65
4.1 沿岸部における地層処分のための工学技術の検討及び関連情報の整理.....	65
4.1.1 はじめに.....	65
4.1.2 既存の知見などの調査.....	67
4.1.3 課題と対策案の整理.....	73
4.1.4 まとめ.....	87
参考文献.....	89
4.2 人工バリア材料等を対象とする劣化や変質に関する現象の把握.....	90
4.2.1 はじめに.....	90
4.2.2 既存の知見などの調査.....	91
4.2.3 課題と対策案の整理.....	100
4.2.4 まとめ.....	104
参考文献.....	105
4.3 グラウト設計及び影響評価技術の開発.....	107
4.3.1 はじめに.....	107

4.3.2	既存の知見などの調査.....	107
4.3.3	課題と対策案の整理.....	108
4.3.4	まとめ.....	110
	参考文献.....	110
4.4	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.....	112
4.4.1	はじめに.....	112
4.4.2	既存の知見などの調査.....	113
4.4.3	課題と対策案の整理.....	114
4.4.4	まとめ.....	116
	参考文献.....	117
5.	沿岸部における安全評価技術の高度化開発.....	118
5.1	はじめに.....	118
5.2	既存の知見などの調査.....	119
5.3	課題と対策案の整理.....	127
5.4	まとめ.....	132
	参考文献.....	132
6.	おわりに.....	139

Appendixes (4章関連)

Appendix 1 既存の成果整理表

Appendix 2 課題と対策案の整理表

Appendix 3 知見、課題、試験計画の一覧表

図目次

図 3.1-1	最近約 10 万年間の隆起速度の分布図における約 10 万年間の隆起量別の割合	7
図 3.1-2	塩淡水境界を形成する 3 つのパターン	10
図 3.1-3	日本列島と周辺海域の高度段彩図	13
図 3.1-4	沿岸部の地形表示の例	13
図 3.1-5	日本列島と周辺海域の傾斜区分図	14
図 3.1-6	日本列島の傾斜区分図	15
図 3.2-1	沿岸部の地下水調査技術に関する検討の調査項目	21
図 3.2-2	沿岸部での地下水年代調査地点	22
図 3.2-3	幌延沿岸域の地形図と地質平面図（右上）・断面図（右下）	24
図 3.2-4	幌延沿岸域での地下水年代調査結果	24
図 3.2-5	海水準変動を考慮した幌延沿岸部での地下水流動解析結果	25
図 3.2-6	幌延沿岸域における地下水分布の概念図	25
図 3.2-7	地下水試料の採取地点	26
図 3.2-8	酸素水素同位体比	27
図 3.2-9	太平洋炭鉱における地下水分布の概念図	28
図 3.2-10	六ヶ所サイトの地形・層序・地質断面図	29
図 3.2-11	六ヶ所サイトの水循環の概念モデル	30
図 3.2-12	B11 孔の Kr 濃度と酸素同位体比の深度分布	30
図 3.2-13	六ヶ所における地下水年代分布の概念図	31
図 3.2-14	横須賀の地形図と地質図	33
図 3.2-15	ボーリングにおける主な調査結果	33
図 3.2-16	ボーリング孔での実測値と解析値の比較	34
図 3.2-17	地下水流動解析結果を反映した地下水流動の概念図	34
図 3.2-18	地質構造	36
図 3.2-19	池島炭鉱における地下水水質分布の概念図	36
図 3.2-20	セラフィールドにおける地下水年代分布の概念図	38
図 3.2-21	Äspö HRL と周辺の高透水帯と水理調査に用いられたボーリング孔及びトンネル	40
図 3.2-22	エスポ周辺の主要な地下水分布と滞留時間	40
図 3.2-23	オルキルオトの地下水環境の変遷	42
図 3.2-24	地下水年代測定法と評価可能な時間スケール	46
図 3.2-25	沿岸域で想定される地下水の滞留時間分布	49
図 3.2-26	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	50
図 3.2-27	沿岸陸域・海域調査における海底地下水湧出探査のフロー	51
図 3.2-28	湧出地下水の探査方法と搭載プラットフォーム	52
図 3.2-29	AUV による海底地形（左）とサイドスキャンソナーの音響映像（右）	54
図 3.2-30	AUV による海底面近傍における温度と塩分の分布	55
図 3.2-31	RENUS100 への探査機器の設置例	56
図 3.2-32	AUV による海底地下水湧出の設定航路の例	56
図 3.3-1	ISIS の全体像	56
図 4.1-1	沿岸部で計画されている地層処分場のレイアウト	66

図 4.1-2	1977 年に示された KBS-1 処分概念 (右図) と処分場概念 (左図)	67
図 4.1-3	KBS-3 処分概念とフォルスマルクで想定される処分場レイアウト	68
図 4.1-4	スウェーデンのサイト選定フロー	68
図 4.1-5	フィンランドのサイト選定フロー	71
図 4.1-6	サイト確定調査のスケール.....	72
図 4.1-7	塩分濃度と膨潤圧の関係.....	78
図 4.1-8	SR97 におけるニアフィールドの流動経路のモデリング例.....	84
図 4.4-1	本検討の位置づけ	113
図 4.4-2	検討課題と成果提示に向けた検討の全体像	113

表目次

表 2.2-1	本研究会に参加した学識者 (研究会委員)	3
表 2.3-1	平成 27 年度の研究会開催実績と検討項目.....	3
表 3.1-1	海陸 DEM の作成に際して使用した海底地形デジタルデータの一覧.....	12
表 3.2-1	地下水年代測定事例のまとめ	44
表 3.2-2	自律型無人探査機 (AUV) の技術状況 (探査深度 600m 以浅)	53
表 3.2-3	RRMUS100 に搭載が可能な計測機器.....	55
表 4.1-1	総合立地調査に至るゼネラルな視点での調査の流れと実施内容.....	70
表 4.1-2	使用済燃料のための深地層処分場 (SR97) で扱われた三つの仮想的サイト	74
表 4.1-3	SR-97 の基本シナリオで考慮された沿岸部に特有となる事項.....	80
表 4.1-4	技術レポート (TR-00-12) で整理された適格性指標 (水文地質学)	81
表 4.1-5	技術レポート (TR-00-12) で整理された適格性指標 (化学 [地下水組成])	82
表 4.2-1	対象材料とその挙動に影響を及ぼす因子の整理	90
表 4.2-2	緩衝材間隙水中の化学種の濃度範囲と pH の範囲 (計算値)	92
表 4.2-3	緩衝材試験使用液種一覧.....	95
表 4.3-1	地層処分事業を想定した許容湧水量の目安およびグラウト技術の検討例.....	109

1. はじめに

1.1 本事業の背景と目的

本事業は、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）として、経済産業省資源エネルギー庁から、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（原環センター）、一般財団法人電力中央研究所の四機関が共同で受託したものである。

高レベル放射性廃棄物の地層処分について、平成 27 年 5 月 22 日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では、国が科学的有望地を提示し、処分地選定調査への協力を自治体に申し入れるよう改定され、平成 28 年 3 月現在、科学的有望地の具体的要件・基準については、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にて専門家による検討が進められている。その検討の中では、「適性の低い地域」を除いた上で、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）が「より適性の高い地域」として議論されるとともに、沿岸部における特性と留意事項が示され、今後の調査研究への取組についても、具体的な検討の場で議論すべきとの指摘が示された。また、並行して審議が進められている総合資源エネルギー調査会放射性廃棄物ワーキンググループにおいても、沿岸部にどのような一般的特性や課題があるのかを含め、丁寧な説明が必要との指摘がなされた。

地層処分技術については、個別の要素技術開発やそれらの体系的な取りまとめが着実に積み重ねられてきた一方で、「沿岸部」へのそれらの適用については、調査技術の特殊性や塩水に対応した技術開発及びそれらの体系化が十分とは言い難い。また、処分場建設・操業に対する沿岸環境影響の理解に乏しいこと、さらには、安全評価の信頼性向上の観点から、塩水と淡水が混在する環境が天然・人工バリア性能に及ぼす影響を考慮する必要があることなどの沿岸部固有の課題がある。

これらの状況を踏まえ、沿岸部の特性に関連する課題の解決に向けた取組を着実に進める必要があることから、沿岸部に関連するこれまでの地層処分研究開発成果に基づいて、沿岸部の特性を整理するとともに課題を抽出し、今後達成すべき目標の設定とともに沿岸部に関する今後の研究開発計画の立案に資するために各課題に対する今後の対策案を整理する。加えて、それに基づき、地層処分技術の信頼性及び安全性の更なる向上を目的に、沿岸部を対象とした技術開発とその体系化に向けた検討を行う。

1.2 本事業の概要

平成 27 年度は「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」の事務局の支援、及び沿岸部に関する情報の整理等として以下の(1)～(3)を実施した。

- (1) 沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発
- (2) 沿岸部における工学技術の高度化開発
- (3) 沿岸部における安全評価技術の高度化開発

1.3 本報告書の構成

本報告書は、6 章から構成されている。1 章（本章）に事業の背景と目的及び事業の概要を示す。2 章では研究会の事務局支援の実績を記述した。

3 章～5 章では、沿岸部における地層処分技術の信頼性及び安全性の更なる向上を図ることを目的として、概要調査段階以降に必要な技術の高度化について、それぞれ、沿岸部における地質環境の調査技術、工学技術、安全評価技術の高度化開発として実施した結果について示す。

2. 沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する検討

本章では、「沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する検討」に係る業務として実施した「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」（以下、「研究会」という。）の事務局支援の内容について整理する。

2.1 研究会について

既に述べたように、本研究会は、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、「技術WG」という。）における議論を受けて設置するものであり、その設置の背景と目的は以下のとおりである（第16回配布資料*）。

- 高レベル放射性廃棄物の最終処分に向け、国が提示する科学的有望地の検討では、技術WGにおいて、「適性の低い地域」を除いた上で、廃棄物輸送時の安全性確保の観点から、沿岸部（島嶼部や沿岸海底下を含む）が「より適性の高い地域」として議論されている。
- 技術WGでは、沿岸部における特性と留意事項が示され、今後の調査研究については別の場で具体的な検討を行うべきとの指摘があった。
- また、放射性廃棄物ワーキンググループにおいても、特に海域については、一般的な特性や留意事項について丁寧な説明が必要との指摘があった。
- 以上を踏まえ、本研究会では、特に沿岸部の海域に着目し、関連する研究成果などを整理する。また、技術的信頼性を更に向上させるべく取り組むべき課題を抽出・整理し、それらを効率的かつ着実に実施していくための今後の指針として、取りまとめる。

2.2 研究会の参加者

研究会の参加者は以下のとおりである。

研究会委員（学識者）

- ・（表 2.2-1 を参照）

関連研究機関等（五十音順）

- ・ 国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）
- ・ 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター（RWMC）
- ・ 原子力発電環境整備機構（NUMO）
- ・ 国立研究開発法人産業技術総合研究所（AIST）
- ・ 一般財団法人電力中央研究所（CRIEPI）
- ・ 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）
- ・ 国立研究開発法人放射線医学総合研究所（NIRS）

文部科学省（オブザーバー）

- ・ 研究開発局 原子力課

経済産業省

- ・ 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 放射性廃棄物対策課

※

http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/genshiryoku/chisou_shobun_wg/016_haifu.html

表 2.2-1 本研究会に参加した学識者（研究会委員）

（五十音順、敬称略）

委員氏名	勤務先 役職名
大江 俊昭	東海大学 工学部原子力工学科 教授
主査 大西 有三	関西大学 環境都市工学部 特任教授（京都大学名誉教授）
佐藤 治夫	岡山大学 大学院自然科学研究科 准教授
竹内 真司	日本大学 文理学部地球システム科学科 准教授
登坂 博行	東京大学 大学院工学系研究科 教授
山崎 晴雄	首都大学東京 大学院都市環境科学研究科 教授
吉田 英一	名古屋大学 博物館 教授

2.3 本年度の開催実績

平成 27 年度に 2 回の研究会を開催し、研究会の開催・運営に係る事務局支援を行った。上述した検討会設置の背景と目的を踏まえて開催された研究会の開催日時と検討項目は、表 2.3-1 のとおりである。研究会で提示された資料や議事要旨については、以下のアドレスのホームページで公開されているので参照されたい。

○開催実績および議事要旨

http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment.html

○第 1 回研究会配布資料

http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/001_haifu.html

○第 2 回研究会配布資料

http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/002_haifu.html

表 2.3-1 平成 27 年度の研究会開催実績と検討項目

○第 1 回（平成 28 年 1 月 26 日（火） 10:00～12:00）
● 研究会の設置及び今後の進め方について
● 沿岸部における地層処分についての関連情報の整理について
○第 2 回（平成 28 年 3 月 22 日（火） 10:00～12:00）
● 我が国の沿岸部の地下環境における特性について
● 沿岸部における地層処分についての技術的対応可能性について

3. 沿岸部における地質環境の調査技術の高度化開発

地質環境についての情報は、科学的有望地の選定及び処分地選定調査において重要な情報となる。科学的有望地の選定においては、回避すべき範囲の設定において、火山や活断層といった天然現象が抽出されている。本章では、沿岸部における地層処分を想定した場合に考慮すべき地質環境特性と調査技術について、既存情報の調査、課題の抽出・整理を行う。天然現象としては、「火山・火成活動」、「断層活動」、「隆起・侵食」及び「気候・海水準変動」の四つを検討の対象とした。地質環境特性としては、「熱環境」、「力学場」、「水理場」及び「化学場」の四つを検討した。さらに、沿岸部の地下水調査技術に関する検討として、地下水の年代測定技術と海底地下水湧水探査技術について既存情報を整理するとともに、これらに関する報告書や論文などの情報の整理についても検討した。

3.1 沿岸部の地質環境特性と調査技術に関する検討

3.1.1 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沿岸部固有の地質環境・天然現象、これを対象とする調査・評価技術について、体系的な地質・地下水調査に係る先行研究や各種データベースを基に主な知見と調査解析技術を整理し、課題と対策案を検討する。

3.1.2 既存の知見などの調査

(1) 自然現象

1) 火山・火成活動

① 主な知見

処分場の長期の安全性確保という観点では、まず火山の分布が重要であるが、沿岸部ということで分布の特徴が大きく異なることはない。火山の調査・評価の空白域はあるが、それを埋める調査・研究や技術開発が進められている。

地球上の火山の多くはプレートの生産境界である海嶺や消費境界である海溝付近に集中して分布している。日本列島及びその周辺海域は沈み込み帯に位置し、現時点で 456 の第四紀火山が確認されている（産業技術総合研究所, 2013）。これらの火山は、千島、北海道、東北本州を経て伊豆諸島からマリアナに至る東日本火山帯と山陰から九州を経て南西諸島に至る西日本火山帯に分布している（Sugimura, 1960）。第四紀火山の分布の特徴は、プレートの配置、沈み込む方向・角度、沈み込むプレートの年代あるいはその到達深度などと密接に関係している。東北地方では、火山活動は火山フロントの背弧域に限定して繰り返し生じており、火山が分布する領域と、分布しない領域が存在している。北海道に関しても、火山フロントが形成されている。一方、西南日本のうち山陰から九州地方北部に関しては、フロントが明確ではない。沿岸部における火山の分布の特徴を火山フロントとの関係で整理すると、フロントの前弧側の沿岸部では火山が存在しないが、背弧側にあたる沿岸域では火山が分布する場所もある。なお、沿岸域を含む日本周辺海域の火山について、海上保安庁による精力的な調査・観測が行われており、火山の分布や活動などの情報の蓄積が進められている（例えば、伊藤ほか, 2012；海上保安庁, 2014）。日本列島及びその周辺海域の火山の分布や特徴については、以下のデータベースなどによって取りまとめられている。

- ・日本の火山（第3版）（産業技術総合研究所, 2013）
- ・日本の火山データベース「第四紀火山」（産業技術総合研究所）

- ・第四紀火山岩体・貫入岩体データベース（産業技術総合研究所）
- ・海域火山データベース（海上保安庁海洋情報部）

② 主な調査・解析技術

一般に文献調査及び地形調査によって、活動位置・規模・様式や噴出時期等の活動履歴の評価に十分な情報が得られなかった場合、地質調査を行い火山噴出物の噴出中心位置、噴出物種類、活動時期、噴出物（堆積物）分布などの評価に必要な情報を収集する。特に海域での調査においては、ドレッジもしくはボーリング掘削などにより火山噴出物の試料採取・分析・年代測定などを行い、詳細な情報の収集・評価を実施する。地球物理学的調査では、地震波速度構造、重力異常、比抵抗構造、地震活動及び地殻変動に関する検討を実施し、マグマ溜まりの規模や位置、マグマの供給系に関係する地下構造などについて調査する。地球化学的調査では、探査機や潜水調査船などを用いて火山ガス（噴気）の化学組成分析、温度などの情報から、火山の活動を調査する。

2) 断層活動

① 主な知見

処分場の長期の安全性確保という観点では、まず断層の分布が重要であるが、沿岸部ということで分布の特徴が大きく異なることはない。断層の調査・評価の空白域はあるが、それを埋める調査・研究や技術開発が進められている。

活断層の分布やタイプの偏在性や地域性が生じる原因は、日本列島が全体として東西方向の圧縮を受けており、それを受ける日本列島の地殻の物性や地質構造の違いが、東北日本と西南日本で異なるためと考えられている（松田ほか, 1978；池田ほか, 1996）。断層のタイプは、主に東北日本では逆断層、西南日本では横ずれ断層、そして琉球弧付近では正断層が支配的である。

沿岸部海域の断層やその把握に必要な海底地形・地質に関する情報については、海上保安庁、産業技術総合研究所、国土地理院などの機関によって実施された反射法地震探査などによる海底地質調査や海底地形調査の成果をもとに取りまとめられている（例えば、海上保安庁, 2001；2002）。さらに、石油公団（現 石油天然ガス・金属鉱物資源機構）によって大陸棚石油・天然ガス基礎物理探査が実施されており、その成果を用いて日本列島周辺海域の第四紀地質構造図が編纂されている（徳山ほか, 2001）。

陸域の活断層とは異なり、海域の活断層は全国を統一的基準のもとに認定してカタログ化された資料がないことから、地震調査研究推進本部によって日本周辺海域の断層情報が整理されつつある（例えば、海洋研究開発機構, 2015）。また、陸域と海域の境界付近における断層の連続性を検討するには、沿岸部海域のデータが必要であるが、地震調査研究推進本部や海上保安庁などによって沿岸部海域の活断層情報が蓄積されつつある（例えば、産業技術総合研究所, 2015a）。

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、以下のデータベースなどによって取りまとめられている。

- ・新編日本の活断層（活断層研究会編, 1991）
- ・日本周辺海域の第四紀地質構造図（徳山ほか, 2001）
- ・活断層データベース（産業技術総合研究所）
- ・沿岸域海底活断層調査（海上保安庁海洋情報部）
- ・沿岸海域における活断層調査（例えば、産業技術総合研究所, 2015a）
- ・海域における断層情報総合評価プロジェクト（例えば、海洋研究開発機構, 2015）

② 主な調査・解析技術

活断層の活動は地形や地層の変位・変形として記録される。そのため、海底地形計測、音波探査、海底ボーリング調査、採泥調査、堆積物の年代測定などを行い、海底の変動地形や堆積物の変位・変形を調べることで、海域の断層の分布・活動度・活動履歴を把握することが可能である。海底地形計測や音波探査では、得られた高精度・高解像度の海底地形をもとに、断層の詳細な位置や長さに関する情報のほか、海底下に分布する地層の堆積状況を明らかにする。また、海底音波探査や反射法地震探査は、断層運動による地層の変位・変形を詳細に把握するために用いられる。海底ボーリングなどによる海底堆積物の採取やその年代測定では、音波探査によって捉えられた断層について、活動年代や平均変位速度を明らかにすることができる。

3) 隆起・侵食

① 主な知見

隆起・沈降運動と侵食・堆積作用は長期にわたり徐々に地層処分システムが有する物理的隔離機能に影響を与える天然現象である。特に、隆起と侵食は処分場を生活圏に接近させる。隆起は地表面の高度が増加する運動で、沈降運動は逆に高度を減ずる場合である。侵食作用は地表を削り減らすもので、逆に地表に物質（地層）が加わる作用を堆積という。一般に、侵食・堆積作用は隆起・沈降運動の影響を受ける。

沿岸部の侵食は、主に河川による下刻と波浪による海食があるが、処分場の地表接近シナリオを考えた場合には、下刻が重要と考えられる。下刻は、侵食基準面である海面に向かって進むことから、10 万年スケールの下刻の見積りには、隆起・沈降運動に加えて、海水準変動のうち、特に海面低下の影響を考慮する必要がある。

侵食の評価にあたって重要な隆起・沈降量は、わが国の沿岸部陸域では比較的よく把握されており、分布図として取りまとめられている。わが国の沿岸部陸域には、定向的な隆起を示す海成段丘群が広く分布しており（例えば、小池・町田編, 2001）、現在の海岸から陸側 10~20km 程度の範囲に分布することが多い（核燃料サイクル開発機構, 1999）のが特徴である。これらの海成段丘の旧汀線高度などのデータに基づき、沿岸部陸域の過去約 10 万年間の平均的隆起速度が全国的に把握されている（地質環境の長期安定性研究委員会編, 2011）。この資料によれば、沿岸部でもそれ以外でも隆起速度別の割合は同様の傾向であり、沿岸部陸域でも、0.3 mm/年 以下を示す地域が比較的多い（図 3.1-1）。なお、日本海側の活褶曲の背斜部や関東以西のプレート境界に面した太平洋沿岸で速い隆起速度が見られる。また、主要な平野部の多くは第四紀を通じて沈降しており、第四紀における平均沈降速度は 1mm/年 以下である（例えば、小池・町田編, 2001）。ただし、これらの平野の中には、海成段丘が分布し、第四紀の後期に隆起に転じたと考えられるところもある。以上の陸域における知見に対し、沿岸部海域については、隆起・沈降運動並びに侵食作用について調査・研究事例が非常に少ない。

第四紀後期の日本列島の大局的な隆起・沈降図に関わる先行研究を以下に記す。

日本列島全体を対象とした、大局的な隆起速度の分布の総括した図については、まず第四紀地殻変動研究グループ（1968）により「第四紀地殻変動図」が作成された。これは、新第三紀末～第四紀はじめに形成された、侵食小起伏面の高度、鮮新統・更新統境界層準の分布高度などから隆起・沈降量を推定した。90 年代以降は、沿岸部について、最終間氷期極相期（約 13 万年前）と言われる海洋酸素同位体ステージ（以下、「ステージ」という）5e に形成された海成段丘の旧汀線を指標とした隆起量の研究が主流をなしている。その他、ステージ 5e の海成層を指標とし

て隆起・沈降量を求める事例も多く見られる（例えば、下山ほか, 1999）。Ota et al., (1992) では、最終間氷期に形成された海成段丘の旧汀線高度分布が示されている。小池・町田編（2001）は、「日本の海成段丘アトラス」として日本列島の海岸・平野に分布する海成段丘と河成段丘のカタログを作成した。これにより各地でステージ 9、7、5e、5c、5a 及び 1 の海成段丘が記載された。内陸部の隆起・沈降量評価については、吉山・柳田（1995）により、河成段丘の比高を隆起量の指標とする方法が提案され、この指標を用いた事例研究が進められた（例えば、田中ほか, 1996；田力ほか, 2005；幡谷ほか, 2006）。これらを受け、藤原ほか（2004, 2005a）は、5 万分の 1 地形図のグリッド単位で、内陸部を含む日本全国の隆起速度図を試作した。地質環境の長期安定性研究委員会編（2011）による「地質学会リーフレット 4 日本列島と地質環境の長期安定性」に引き継がれ、データ密度がこれまで薄かった西日本を中心に新規データを補充し、またポイントデータのある範囲については 5 万分の 1 グリッド図への反映を行っている。

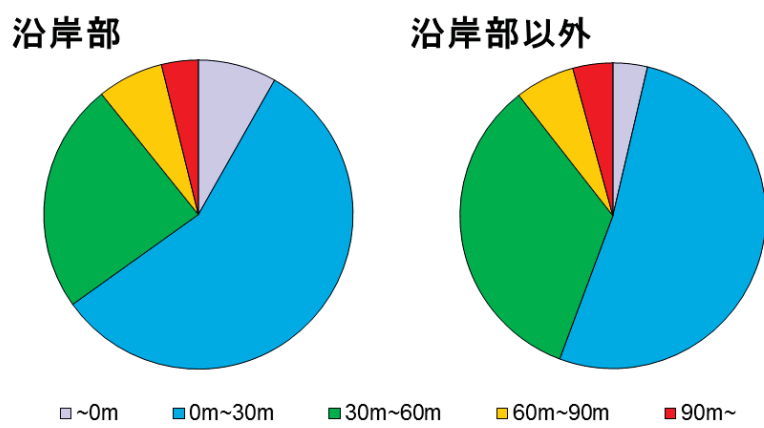


図 3.1-1 最近約 10 万年間の隆起速度の分布図（地質環境の長期安定性研究委員会編, 2011）における約 10 万年間の隆起量別の割合

およそ 20km 四方のエリアを 1 グリッドとして計数／海岸線を含むグリッドを沿岸部とした

② 主な調査・解析技術

沿岸部陸域の中期～後期更新世以降の隆起・沈降については、海成段丘の旧汀線高度、海成段丘堆積層の頂面、前浜堆積物、地層の堆積曲線、反射法断面、地形・地質の年代などの情報を、既存の技術を用いて得ることで、多くの地域で評価可能である。この他、産業技術総合研究所の 20 万分の 1 シームレス地質図など、地質図を解釈することにより、第四紀を通じてのより長期の隆起・沈降傾向を把握できる場合がある。これらのうち、最も有効なデータは海成段丘であるが、岩石侵食段丘が卓越する地域、海成段丘そのものが分布していない地域も少なくなく、そのような地域の段丘対比・編年手法の開発は課題となっている。

沿岸部陸域の侵食についても、埋没谷の深度（沖積層基底面）、海成段丘面の開析度、地形・地質の年代などの情報を、既存の技術を用いて得ることで、多くの地域で評価可能である。また、産業技術総合研究所（2015b）は、「次の氷期終了を超えた将来の侵食量評価では、沿岸部の地形はリセットされるものとみなす必要がある。従って、どの地点で下刻が進行するのかを予測することはできず、すべての地点で隆起量と氷期の最大海面低下量（約 130m）を合わせた河川下刻を想定する必要がある。」と述べている。なお、地層処分技術 WG（2014）でも同様な「隆起量と氷期の最大海面低下量」の考え方を採用して将来の下刻を考えており、最大海面低下量として 150m を想定している。一方、海成段丘面の開析度に基づく検討事例があり、離水後約 12.5 万年

間では、谷の平均深度は隆起量の 20~30 %という見解が述べられている（藤原ほか, 2005b）。さらに、現在の海岸線付近において、最大下刻量は、後期更新世以降の隆起量と沖積層基底礫層の下限の比高からの検討から、後期更新世以降の下刻の深さは、隆起量に 100 m を加えたもの以下であったという研究がある（幡谷ほか, 2016）。

一方、沿岸部海域の隆起・侵食の評価については、一つの方法として、陸域で構築された隆起・侵食モデルの海域への外挿が考えられるが、海岸線から離れるに従い不確実性が大きくなると考えられ、手法の信頼性向上は今後の課題である。

4) 気候・海水準変動

① 主な知見

海水準変動は汎世界的な現象である。100~60 万年前以降、約 10 万年の周期で現在の海水準から見てプラス数 m~マイナス百数十 m の範囲で変動してきた（例えば、Waelbroeck et al., 2002 ; Raymo and Nisancioglu, 2003）。現在は高潮期にあり、いずれ百数十 m の海水準低下が起こると考えられるが、海水準が現在より著しく上昇することは考えにくい。ステージ 2 からステージ 1 への海水準の上昇速度については、7,000 年間に 110 m 程度である（太田ほか, 2010）。また、例えば大阪湾では、約 1 万年前から 6,000 年前までの海水準の上昇において一番早かった時期が 8,000 年前から 7,000 年前までの 1,000 年間であり、そのときの海水準上昇速度が約 13 mm/年であった（貝塚ほか, 1995）。

海水準変動が沿岸部に与える影響としては、前述したように、現在の海水準からの海面低下に伴う下刻侵食の促進がある。また、百数十 m の海面低下が生じれば、一般に 20~30 km の幅を持つ大陸棚の多くが陸化すると考えられる。

② 主な調査・解析技術

周期的な気候・海水準変動を隆起・侵食等の検討の上での前提とすることとし、現状ではこれを課題として扱わない。

(2) 地質環境

1) 熱環境

① 主な知見

熱環境としては、熱伝導率、比熱及び線膨張係数といった熱物性と、地温勾配が対象である。前者は、主にボーリングコアを用いた岩石供試体を用いた室内試験により、後者はボーリング孔における温度検層によってデータが取得される。これらのデータは、第 2 次取りまとめの時点で文献調査が実施され、熱物性については岩種ごとに統計量が整理されている（佐藤ほか, 1999）。地温勾配については、日本地図にプロットされるとともに、それらに基づいてコンター図が示されている（矢野ほか, 1989）。これらに加えて、産業技術総合研究所において熱物性のデータベースが整備されている（産業技術総合研究所, 1989）。以上のデータについては、内陸部あるいは沿岸部といった区分で整理されたものではないものの、地温勾配については、海洋におけるデータがいくつか存在する。

近年では、海洋研究開発機構による東北地方太平洋沖地震調査掘削（Japan Trench Fast Drilling Project, 略称 JFAST）が実施され、水深約 6,890 m の海底から北米プレート前縁の付加体を掘削して厚さ約 820 m の断層上盤を貫通し、さらに海底下深度 850 m まで 3 本のボーリング孔が掘削され、温度検層による地温勾配のデータが取得されている（林ほか, 2014）。これによると、平均地温勾配として 26.29 °C/km の値が得られており、非火山地域のデータの範囲に含

まれる。

② 主な調査・解析技術

ボーリング調査によって得られる岩石試料を用いた室内試験、あるいは、ボーリング孔における検層によって、熱特性や地温勾配のデータを取得することが可能と言える。

2) 力学場

① 主な知見

力学場としては、有効空隙率や弾性波速度といった物理特性と、一軸圧縮強さや圧裂引張強さといった力学特性、並びに岩盤の初期応力が対象である。前者は、主にボーリングコアを用いた岩石供試体を用いた室内試験により、後者は水圧破砕法に代表されるボーリング孔における原位置初期応力法やコア法によってデータが取得される。これらのデータは、第2次取りまとめの時点で文献調査が実施され、物理特性と力学特性については岩種ごとに統計量が整理されている（佐藤ほか，1999）。岩盤の初期応力については、主応力と深度の関係が整理されている。これらに加えて、産業技術総合研究所において物理特性と力学特性のデータベースが整備されている（産業技術総合研究所，1989）。以上のデータについては、内陸部あるいは沿岸部といった区分で整理されたものではない。

熱環境の項で示したように、近年では、海洋研究開発機構による東北地方太平洋沖地震調査掘削が実施され、水深約 6,890m の海底から海底下深度 850m までボーリング孔が掘削され、ボアホールブレイクアウトによって評価した初期応力のデータが取得されている（Lin et al., 2013 ; 林ほか，2014）。これによると、水平面内主応力の大きさは土被りに対してやや小さく、第2次取りまとめの時点で収集した文献データの傾向から外れていない。

② 主な調査・解析技術

ボーリング調査によって得られる岩石試料を用いたコア法による測定、あるいは、ボーリング孔における原位置初期応力測定などによって、力学特性や初期応力のデータを取得することが可能と言える。

3) 水理場

① 主な知見

わが国の沿岸部の地形は、リアス式海岸などの一部地域を除いて、沿岸平野が開けていることが多い。地表面の形状は平坦であり、地下水の動水勾配もこれに沿って小さいことが多い。さらに、平野が大きくなればなるほど、後背山地との距離も大きく、深部地下水の動水勾配さえも小さくなると考えられる。さらに、わが国の海岸平野は 4~5 枚の難透水層をはさむことが多く、下位の地下水流ほど緩慢である可能性が高い。複数の帯水層が存在する場合、帯水層ごとに塩淡水境界が存在することが知られている（丸井・安原，1999）。また、海水準の変動に伴って（低水準のときに）張り出した淡水地下水を海水がトラップして海底下に淡水地下水が張り出している現象が見られる（Ueda et al., 2014）。これは、さらに下位の塩水が化石水として長期間安定して存在していることを示すものであることが特徴的である（産業技術総合研究所，2012）。この様に帯水層の地質構造と水理構造がずれていることも報告されている（丸井ほか，2006）。一方、深層にまで及ぶ地下水の区分けについては高村・丸井（2006）が詳しい。

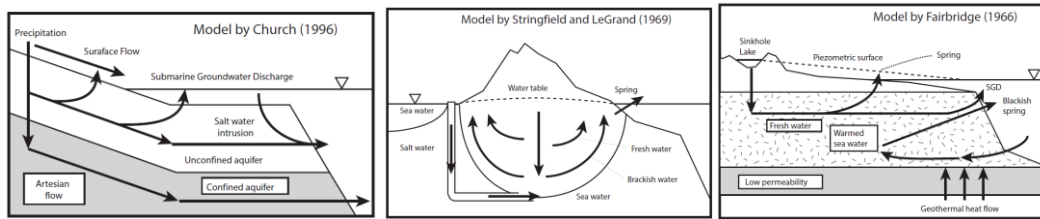


図 3.1-2 塩淡水境界を形成する3つのパターン

左から流動地下水型、密度流型、熱対流型である。それぞれのパターンにより淡水・塩水の動き方やその混合が変わるので、温度プロファイルをはじめとする地下水の水理構造に大きく影響する（丸井・安原, 1999）。

塩淡水境界の形成には三つの要因（地下水流動、密度流、熱対流）があり(図 3.1-2)、いずれの場合も深部にまで及んだ地下水が海底下に海底湧出地下水（SGD：Submarine Groundwater Discharge）として湧出してくることが知られている（丸井, 1997）。この海底湧出地下水を分析・解析することで、流動経路上の地質情報を得ることができ、地下水の流動深度を推定することも可能となる。さらに、海岸域の水理場を特徴づけるものとして断層の存在がある。例えば、海岸線に平行して海域に断層が走る場合、その断層が透水性であろうと遮水性であろうと、陸域から流下する地下水は上昇流となるため、断層の沖側にまで淡水が流動することはなく、よって安定した塩水地下水の領域が広がると考えられる。

内陸を対象としたデータは第2次取りまとめの時点で整理されているが、沿岸部のデータについては更なる拡充が必要である。後述するように、わが国の沿岸部に関する地質環境・地下水関連の文献は50万件以上存在することが判明した。これほどまでに莫大な文献量は、これまでに前例のないものとして文献解析の必要が生まれたため、現在整理中であり、先ず地域ごと、手法ごと、現象ごとなどの区分けに取り掛かっている。

② 主な調査・解析技術

ボーリング調査により、地下水圧や岩盤の透水係数のデータを取得することが可能である。しかし、既存の石油掘削や二酸化炭素の地中貯留研究などの超大深度ボーリングの場合、深部地下水の溶存物質が多く圧力も高いため、海水の混入を考慮する必要はないが、地層処分を対象とする深度においては、データ取得のため海水の混入を避けなければならない。また、電磁法や地震探査などの物理探査技術との融合により、海陸接合した地質構造や海水侵入の解釈が可能となり、長期的に安定した地下水領域の評価に糸口を見いだせると考えている。

調査プランを概観するにも、取得した年代測定データから3次元的な水理構造を見出すためにも地下水流動解析が重要であるが、その実例は限られている（例えば、産業技術総合研究所, 2012）。当然のことながら、密度流、熱連成解析などこれまでの技術の融合も必要（Fraser Harris et al., 2015）であると同時に、新規課題として、これまでの地下水・水理研究で見ない沿岸部の非ダルシー領域の解析が必須となる。

4) 化学場

① 主な知見

地下水の水質は起源となった水が地質と反応することによって形成され（Drever, 1988）、その起源には天水、海水（化石海水）、マグマ由来水などが想定される。陸水系の淡水はその滞留時間とともに、 CaHCO_3 系 \rightarrow NaHCO_3 系 \rightarrow NaCl 系へと変化するパターンにある（丸井,

2016)。海水系の地下水は、 Na^+ 、 Cl^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} に富む傾向にある（核燃料サイクル開発機構, 1999）。特に沿岸部では、塩淡境界の存在が重要な役割を果たしており、塩淡境界に規制される水理構造により、塩分濃度や温度勾配のプロファイル変化が重要な要素となる（産業技術総合研究所, 2012）。内陸を対象としたデータは第2次取りまとめの時点で整理されているが（全国対象データベースあり）、沿岸部のデータについては更なる拡充が必要である。現状では、千葉県蓮沼や幌延沿岸域を対象とした塩淡境界に関する調査事例がある（例えば、産業技術総合研究所, 2003）。

地層処分において対象とする範囲の地化学現象は、地下水の水質に関連した地球環境システムと生物システムで構成される範囲にあり、人間社会システムの及ばないものである（鹿園, 2010）。この領域においては、化学平衡論と物質移動論（反応・拡散・流動）を主な要素として考えなければならない。また、化学平衡論を議論・解析するためには温度・圧力環境を考慮せねばならず、先に述べてきた要素（熱環境・力学場・水理場）と相互に関連しあっていることも理解できる。

② 主な調査・解析技術

ボーリング調査により、海水の混入をなくした地下水を取得することが可能であるばかりでなく、ターゲット深度の地下水について、地質との結合力の違う地下水を分取することができる（pF値に応じた地下水試料の採取・分析；産業技術総合研究所, 2012）。しかし、地化学現象を理解するための多角的なデータ取得と解析・解釈のための調査事例は少なく、データの蓄積が必要と考えられる。

(3) 日本列島周辺の低海水準期の地形

1) 概要

先述のように、海水準が変化することで海岸線の位置が変化する。現在は高潮期にあり、いずれ百数十 m の海水準低下が起こると考えられ、その際には海岸線が後退し、現在の大陸棚が陸化すると考えられる。大陸棚の幅は日本周辺で一般に 20~30 km 前後であり、日本海南縁部と北海道北部周辺で広く、富山湾、相模湾、駿河湾で湾奥部は 1 km 以下と極端に狭い（米倉ほか編, 2001）。このように、低海水準期に陸化する地形の特徴を把握しておくことは重要である。

2) 沿岸部の地形

① 海陸数値標高モデルの作成

一般に利用することができる陸域と海域のデジタル地形データの種類と仕様、それらの数値標高モデル（Digital Elevation Model）（以下、「DEM」という）への変換方法については後藤（2012, 2013, 2014）に詳しく記載されている。本研究では、後藤（2012, 2013, 2014）を参照し、陸域と海域のDEMを統合したDEM（以下、「海陸DEM」という）を作成した。

海域 DEM には（財）日本水路協会が作成した海底地形デジタルデータ（M7000 シリーズ）を使用した。M7000 シリーズは、日本沿岸全域にわたって等深線をデジタル化したものである。等深線の間隔については、一般に浅海部で狭く、深海部はより粗い。例えば、M7012 の等深線の間隔は、130 m 以浅では 1 m だが、それ以深では 5 m 間隔となる（後藤, 2013）。等深線間の水平距離は、最も細かいところで 10~50 m である（後藤, 2013）。現時点で M7000 シリーズは、日本列島周辺海域の全域で系統的に海底地形情報が整備されたものの中では最も詳細なデータに位置づけられる（後藤, 2013）。

陸域 DEM には米国航空宇宙局（NASA）の Shuttle Radar Topographic Mission で作成された 3 秒メッシュ（約 90 m メッシュ）の DEM（SRTM-3）を用いた。この DEM は、

<http://srtm.csi.cgiar.org/>からフリーでダウンロードができる。

海陸 DEM の作成については、後藤（2013）に記された手法にならい、M7000 シリーズを海域 DEM に変換する処理を最初に行った。海域 DEM のメッシュサイズについては、陸域 DEM として使用する SRTM-3 のメッシュサイズにあわせて 90 m に設定した。そして作成された海域 DEM と陸域 DEM を合成し、海域 DEM の範囲で抽出することで日本列島とその沿岸部をカバーする海陸 DEM を作成した。これらの処理で使用したソフトウェアは ESRI 社の ArcGIS 10.2 である。使用した地形デジタルデータの一覧については、表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 海陸 DEM の作成に際して使用した海底地形デジタルデータの一覧

海底地形データ(M7000シリーズ)		SRTM-3 DEM
M7001	M7013	srtm_61_08
M7002	M7014	srtm_62_06
M7003	M7015	srtm_63_05
M7004	M7016	srtm_63_06
M7005	M7017	srtm_64_04
M7006	M7018	srtm_64_05
M7007	M7019	srtm_64_06
M7008	M7020	srtm_65_03
M7009	M7021	srtm_65_04
M7010	M7024	srtm_65_05
M7011	M7050	srtm_65_06
M7012		srtm_66_04

② 地形の特徴

海陸 DEM (90 m メッシュ) を用いて作成した高度段彩図を図 3.1-3 に示す。また、M7000 シリーズを 30 m メッシュで海域 DEM に変換したものをを用いた沿岸部の地形表示の例を図 3.1-4 に示す。

現在の海底地形で海水準が 140m 低下した際に陸化する部分は、薄い水色部分である。実際には、隆起・沈降量を考慮する必要があるが、この図からは大局的な地形の状況を知ることができる。大局的には、米倉ほか編（2001）でも言われている大陸棚の特徴と同様に、日本海南縁部と北海道北部周辺で広く、北海道渡島半島西岸、富山湾周辺、房総沖から紀伊半島周辺の本州南岸で狭いという特徴がある。既存のデータによって陸から海域までの地形を連続的に把握することが可能であり、大陸棚の幅の違いや海底谷の分布なども把握することが可能である。

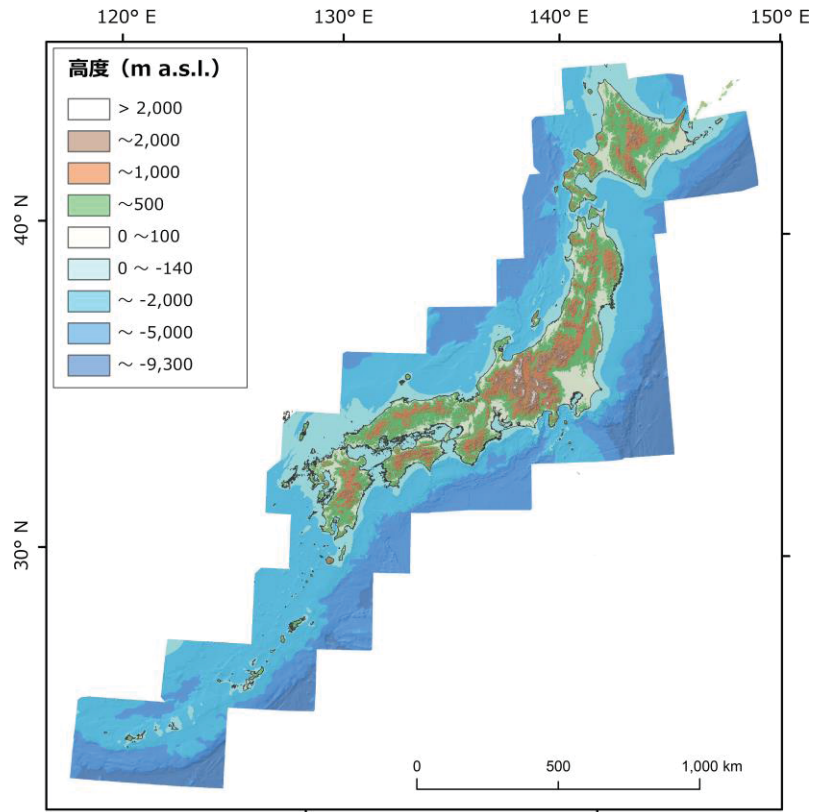


図 3.1-3 日本列島と周辺海域の高度段彩図

「海底地形デジタルデータ」M7000 シリーズと SRTM-3 データから作成した海陸 DEM (90 m メッシュ) を使用。

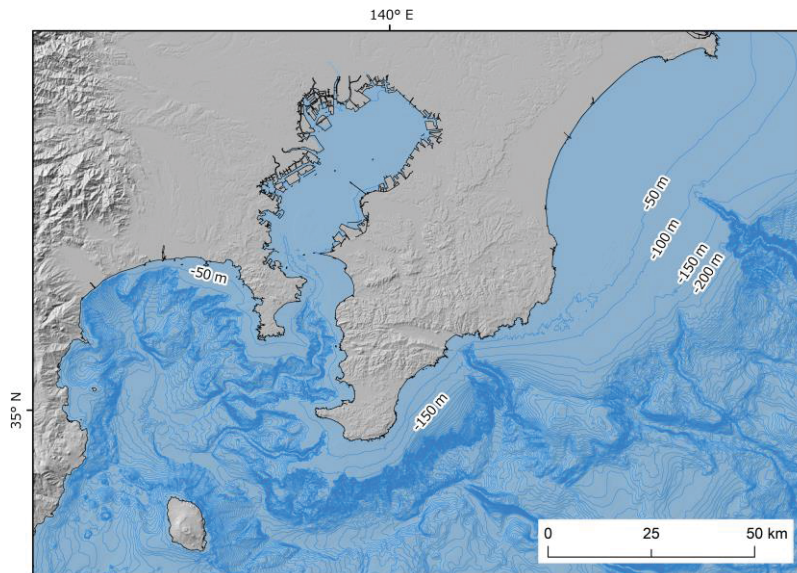


図 3.1-4 沿岸部の地形表示の例

海底地形の等深線は 50 m 間隔。海域の陰影図・等深線には、M7000 シリーズの M7001 を 30 m メッシュの DEM に変換したものを使用して作成。陸域の陰影図は SRTM-3 データ (約 90 m メッシュ) から作成。

海陸 DEM を用いて作成した傾斜区分図を図 3.1-5 に示す。図 3.1-5A は、海陸 DEM (90 m メッシュ) を用いて作成した 90 m メッシュの傾斜区分図である。これは、海陸 DEM の各セルと隣接する八つのセルにおける標高の最大の変化率を傾斜として示したものである。図 3.1-5B は、総務省統計局 (http://www.stat.go.jp/data/mesh/m_tuite.htm) に示された第 2 次地域区画と同等の大きさのメッシュ (緯度方向で 5 分、経度方向に 7 分 30 秒 : 約 10 km 四方) 内に含まれる 90 m メッシュの傾斜の中央値 (度) に基づく傾斜区分図である。大陸棚は一般的に平坦面であり、この図でも図 3.1-4 と同様に大陸棚の幅の違いを把握することが可能である。また、メッシュを使って示すことで、侵食の影響で凹凸が多い陸地となだらかな地形が多い海底を同じ基準で比較することが可能である。陸地では、緩斜面が広く分布しており、海底では、平坦面から極緩斜面が比較的広く分布している。海津編 (2012) によると、日本列島周辺の大陸棚の勾配は直線で近似すると平均 5~7‰ である。

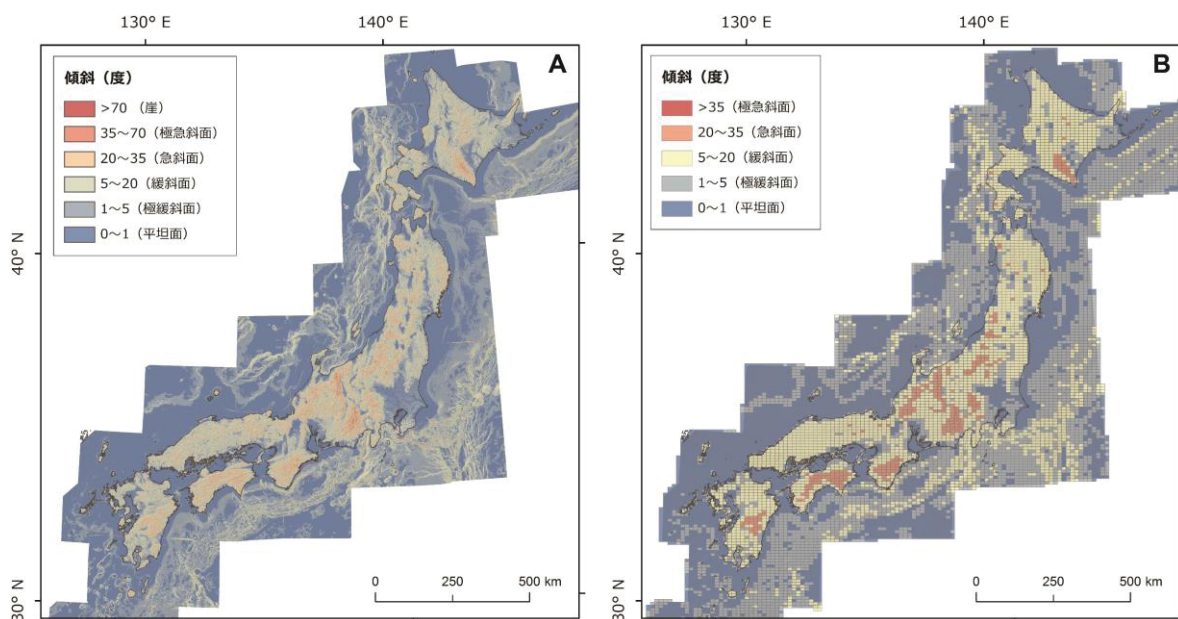


図 3.1-5 日本列島と周辺海域の傾斜区分図

A : 90 m メッシュの傾斜。B : 第 2 次地域区画と同等の大きさのメッシュ (約 10 km 四方) における傾斜 (中央値)。傾斜角による斜面の分類名称については、鈴木 (1997) に準拠した。

「海底地形デジタルデータ」M7000 シリーズと SRTM-3 データから作成した海陸 DEM (90 m メッシュ) を使用。

若松ほか (2005) 「日本の地形・地盤デジタルマップ」における傾斜データ (中央値) を用いて作成した傾斜区分図を図 3.1-6 に示す。この傾斜データは、国土地理院発行の数値地図 250 m メッシュ標高を用いて作成されている。この傾斜データでは、基準地域メッシュ (緯度方向で 30 秒、経度方向に 45 秒 : 約 1 km 四方) 内に含まれる 250 m メッシュの傾斜の中央値が正接で示される。図 3.1-6 では約 5 度を境に地形を二分して示した。

図 3.1-5 とは異なるデータを用いて作成されているが、図 3.1-5 と同様の傾斜の傾向を示しており、沿岸部にはなだらかな地形 (極緩斜面と平坦面) が多く分布している (図 3.1-6)。

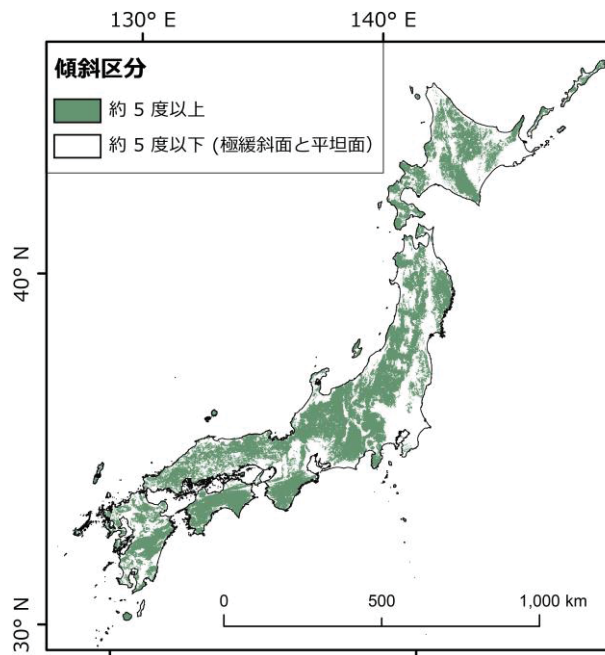


図 3.1-6 日本列島の傾斜区分図

若松ほか（2005）「日本の地形・地盤デジタルマップ」における傾斜データ（中央値）を用いて作成。傾斜角による斜面の分類名称（5 度以下は極緩斜面、1 度以下は平坦面）については、鈴木（1997）に準拠した。

3.1.3 課題と対策案の整理

(1) 自然現象

1) 課題と対策

① 火山・火成活動

火成活動や熱水活動を引き起こす潜在的な原因となり得る地下深部のマグマや深部流体などの有無に留意する必要がある。陸域では、非火山地帯であるにもかかわらず、地下深部にこれらの存在が見出された事例が報告されている（例えば、Umeda et al., 2006a, 2006b）。また、沿岸部を含む海域では、これらの活動に関連すると考えられる低周波地震活動が観測されている。この点については、海底電磁探査や地震波トモグラフィ法などの地球物理学的手法を適用することで把握可能と考えられる。そのため、今後は調査事例の蓄積及び調査・評価技術の高度化が課題である。

② 断層活動

陸域に分布する活断層の海域への延長や、海域の音波探査などにおいて明確に確認されている活断層の陸域への延長など、陸域と海域の連続性に留意する必要がある。また、沿岸部海域において地形や地層の上下変位量が小さい横ずれ活断層や、海陸線に沿って分布する活断層は検出が困難な場合があると考えられる。これらの場合、地下深部の構造、陸域と海域の連続性などに注目して既存の技術を適用することで、断層の有無や連続性の確認が可能と考えられる。近年では、沿岸海域における活断層調査（例えば、産業技術総合研究所, 2015a）や海域における断層情報総合評価プロジェクト（例えば、海洋研究開発機構, 2015）が行われており、今後も沿岸部における活断層の情報が蓄積されると考えられる。また、その際に用いられる手法は、既存情報の空

白域における活断層の有無の調査に有効と考えられる。

③ 隆起・侵食

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例が少ない沿岸部海域の隆起・侵食速度の調査・評価に留意が必要である。この場合、既存データを使った内挿・外挿から隆起・侵食速度の評価が可能と考えられる。内挿・外挿が困難な場合は、局所的な堆積物や侵食地形を指標とした手法を用いて、隆起・侵食速度の把握が可能と考えられる。今後は、これらの調査・評価技術の適用性確認及び事例の蓄積が課題である。

また、沿岸部の河川の下刻量は、隆起・沈降の量及び海水準変動による侵食基準面の変化と密接に関係するが、陸化した地塊が全て侵食されるわけではないことに留意が必要である。この場合は、隆起量、海面低下量及び海底地形勾配を用いるとともに河床縦断形状を考慮することで、10万年程度の評価は可能と考えられる。また、地形変化については数値計算による定量化が可能であることから、陸域から海域までを含めた地形変化のシミュレーション技術の開発・高度化が課題である。

④ 気候・海水準変動

現状では、これを課題としては扱わず、周期的な気候・海水準変動を隆起・侵食等の検討の上での前提とする。

(2) 地質環境

1) 課題と対策

① 熱・力学特性

前述のとおり、熱・力学特性については、ボーリング調査によって得られる岩石試料を用いた室内試験、あるいは、ボーリング孔における検層によって、データを取得することが可能と言える。ただし、調査事例が少ない沿岸部海域の調査・評価については、例えば、陸上におけるボーリング調査では想定しえないトラブルの発生の可能性も想定されることから、事前の準備を入念に行う等の留意が必要と考えられる。初期応力の評価にあたっては、海水面から海底までの水深分が被り圧として作用するのか、あるいは、間隙水圧として作用するのかを確認して評価する必要がある。

前述のとおり、沿岸海底下においては同深度の陸域と比較して土被りが大きい条件となる。このため、陸域における調査と比較して、浅い深度でボーリングによる応力解放が発生し、コアデイスキングやボアホールブレイクアウトが発生することが想定される。このように留意すべき事項はあるものの、ボーリング孔の掘削やこれに伴うコアの取得ができれば、既存の調査手法・機器の適用が可能の見通しが得られると考えられる。

② 地下水流動

陸域に比べて調査事例が少ないため、沿岸部海域の調査・評価には留意が必要であるが、既存の文献解析を実施することにより、海底下の水理環境の把握は可能と考える。さらには、これまで実施してきた単純な水理試験に加えて、Push-Pull試験 (Hebig, 2015) など高度な水理試験を導入する必要もあると考える。このためにも、密度流、熱連成解析などこれまでの技術の融合も必要 (山本ほか, 2006) であると同時に、新規課題として、地下水の年代測定結果と解析による地下水滞留時間のズレを解消するために、これまでの地下水・水理研究で類を見ない沿岸部の非ダルシー領域の地下水解析などが必須となる。

沿岸海底下においては同深度の陸域と比較して地下水の間隙水圧が高い条件となるが、海水の混入排除も含めて、既存の調査機器の適用が可能な見通しである。また、種々の地下水年代評価法により、地下水の滞留時間、拡散支配の緩慢な動きを把握することができるため、高度（広範囲かつ長期的）な解析も可能な状況にある。

さらに、3.2 で詳しく述べるように、地下水の滞留年代を直接評価することにより（地下水年代測定）、地下水の長期的な安定性を議論できると考えられ、その高度化が必要である。

③ 地下水の地球化学的特性

地表部においては日本列島全域（海域を含む）を対象としたマップが発行されている（産業技術総合研究所, 2010）が、深部環境については調査事例が少ないため、沿岸部海域の調査・評価に留意が必要となる。さらに地下水の滞留時間の推定や流動量など地球化学特性を決定する要素を地下水流動などの観点から解析する必要がある。さらには、化学平衡論と物質移動論を取り込んだ総合的な解釈や体系化が求められる。

沿岸海底下においては地下水の溶存成分やその濃度が異なるが、既存の調査機器の適用が可能な見通しであり、採水・分析技術は一定の基準をクリアーしている。精度の高い試料を圧力や時間を変化させながら採取することで、高度な解析にも対応できる。さらに、Push-Pull 試験などを併用することで、拡散・収着などの問題にも対応できる状況にある。

3.1.4 まとめ

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沿岸部の天然現象と地質環境を整理するために、天然現象については、火山・火成活動、断層活動、隆起・侵食（沈降・堆積）及び海水準変動を対象とし、地質環境については、熱環境、力学場、化学場及び水理場を対象として、沿岸部に関わる主な知見と調査・解析技術を整理した。また、沿岸部では海水準が低下することで、現在の海底下の一部が陸化すると考えられることから、低海水準期に陸化する地形の特徴を整理した。また、ここで整理した情報に基づいて、沿岸部における天然現象と地質環境に関する課題を整理するとともに対策案を検討した。

参考文献

- 地質環境の長期安定性研究委員会編, 地質リーフレット 4, 日本列島と地質環境の長期安定性, ISSN 2185-8543, 日本地質学会, 2011.
- 地層処分技術 WG, 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—, 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WG, 平成 27 年 12 月, 2014.
- 第四紀地殻変動研究グループ, 第四紀地殻変動図, 第四紀研究, vol.7, pp.182-187, 1968.
- Drever, J., The geochemistry of natural waters, V437, Prentice Hall, 1988.
- Fraser Harris, A.P., McDermott, C. I., Kolditz, O. and Haszeldine, R. S., Modelling groundwater flow changes due to thermal effects of radioactive waste disposal at a hypothetical repository site near Sellafield, UK, Environmental Earth Sciences, Springer, vol.74, no.2, pp.1589-1602, Springer, 2015.
- 藤原 治, 柳田 誠, 三箇智二, 日本列島の最近約 10 万年間の隆起速度の分布, 月刊地球, vol.26, pp.442-447, 2004.
- 藤原 治, 柳田 誠, 三箇智二, 守屋俊文, 地層処分からみた日本列島の隆起・侵食に関する研究, 原子力バックエンド研究, vol.11, pp.113-124, 2005a.

- 藤原 治, 柳田 誠, 三箇智二, 守屋俊文, 地層処分から見た侵食作用の重要性—海成段丘を対象とした侵食速度の推定を例に—, 原子力バックエンド研究, vol.11, pp.139-146, 2005b.
- 後藤秀昭, 数値標高モデルから作成した日本列島の地形アナグリフ—解説と地図—, 広島大学大学院文学研究科論集, vol.72, 特集号, 69p, 2012.
- 後藤秀昭, 等深線データから作成した日本列島周辺の海底地形アナグリフ—解説と地図—, 広島大学大学院文学研究科論集, vol.73, 特集号, vol.73, 74p, 2013.
- 後藤秀昭, 日本列島と周辺海域を統合した詳細地形アナグリフ—解説と地図—, 広島大学大学院文学研究科論集, vol.74, 特集号, 103p, 2014.
- 幡谷竜太, 柳田 誠, 山本真哉, 佐藤 賢, 古澤 明, 新潟県魚沼丘陵北部の河成段丘の層序, 応用地質, 47, 200pp.140-151, 2006.
- 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, 57, 1, 2016 (印刷中) .
- 林 為人, 斎藤実篤, モリジュームズ, 江口暢久, Sean TOCZKO, 東北地方太平洋沖地震調査掘削 (JFAST) の概要とこれまでの主な成果, 応用地質, vol.55, no.5, pp.241-250 2014.
- Hebig, Zeilfelder, S., K.H., Ito, N., Machida, I., Marui, A. and Scheytt., T. J., Study of the effects of the chaser in push-pull t racer tests by using temporal moment analysis, Geothermics, vol.54, pp.43-53, Elsevier, 2015.
- 池田安隆, 島崎邦彦, 山崎晴雄, 活断層とは何か, 東京大学出版会, 220p, 1996.
- 伊藤弘志, 堀内大嗣, 芝田 厚, 鈴木 晃, 小山薫, 日本周辺海域火山通覧 (第4版). 海洋情報部研究報告, vol.48, pp.41-73, 2012.
- 海上保安庁海洋情報部, 海域火山データベース ;
<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/GIJUTSUKOKUSAI/kaiikiDB/list-2.htm> (最終更新日, 2016年2月5日).
- 海上保安庁海洋情報部, 沿岸域海底活断層調査 ;
<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAIYO/FAULTS/main.html> (最終更新日, 2012年6月1日).
- 海上保安庁, 牛深 (海底地質構造図), 5万分の1沿岸の海基本図, 6348-3S, 2001.
- 海上保安庁, 宝島 (海底地形図), 5万分の1沿岸の海基本図, 6502-8, 2002.
- 海上保管庁, トカラ列島で発見された海底火山について, 火山噴火予知連絡会会報, no.115, 235-236, 2014.
- 海洋研究開発機構, 海域における断層情報総合評価プロジェクト 平成 26 年度成果報告書, 205p, 2015.
- 貝塚爽平, 成瀬 洋, 太田陽子, 小池一之, 日本の平野と海岸<新版 日本の自然 4>. 岩波書店, 248p, 1995.
- 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1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021, 1999.
- 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+付図, 1991.
- 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.
- Lin, W., Conin, M., Casey Moore, J., Chester, F.M., Nakamura, Y., Mori, J.J., Anderson, L., Brodsky, E.E., Eguchi, N., and Expedition 343 Scientists, Stress state in the largest displacement area of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Science, vol.339, no.6120, pp.687-690, 2013.

- 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, vol.27, no.2, pp.85-94, 1997.
- 丸井敦尚, 安原正也, 塩水-淡水境界に関わる地下水流動研究, 日本水文科学会誌, vol.29, no.1, pp.1-12, 1999.
- 丸井敦尚・樋口朋之・宮越昭暢、南関東の深部水理地質環境, 日本地下水学会 2006 春季学術大会、講演要旨集 18.p78-79,2006
- 丸井敦尚, 水循環基本計画ならびに地下水保全のためのデータ整備状況, 日本地下水学会誌, 2016 (印刷中) .
- 松田時彦, 中村一明, 杉村 新, 活断層とネオテクトニクス「変動する地球 I」第 3 章, 岩波講座地球科学 10, 岩波書店, pp.89-157, 1978.
- 太田陽子, 小池一之, 鎮西清高, 野上道男, 町田 洋, 松田時彦, 日本列島の地形学, 東京大学出版会, 204p, 2010.
- Ota, Y., Koike, K., Omura, A. and Miyauchi, T., Last interglacial shoreline map of Japan. Contribution for IGCP276, 1 sheet, 1992.
- Raymo, M. E. and Nisancioglu, K., The 41 kyr world: Milankovitch's other unsolved mystery, Paleoclimatology, 18, 1, 1011, pp.II-1~6. , 2003
- 産業技術総合研究所, 岩石物性値データベース (PROCK) , 1989.
<https://gbank.gsj.jp/prock/welcome.html> (2016 年 3 月 14 日最終閲覧) .
- 産業技術総合研究所, 第四紀火山岩体・貫入岩体データベース,
https://gbank.gsj.jp/quaternary/index_qvir.php (2016 年 2 月 29 日最終閲覧).
- 産業技術総合研究所, 日本の火山データベース「第四紀火山」, https://gbank.gsj.jp/volcano/Quat_Vol/index.html (2016 年 2 月 29 日最終閲覧).
- 産業技術総合研究所, 活断層データベース, <https://gbank.gsj.jp/activefault/> (2016 年 3 月 20 日最終閲覧).
- 産業技術総合研究所, 塩淡水境界面形状把握調査 報告書, 181p, 2003.
- 産業技術総合研究所, 海と陸の地球化学図, 207p, 2010.
- 産業技術総合研究所, 沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発 成果報告書, 521p, 2012.
- 産業技術総合研究所, 日本の火山 (第 3 版) , 2013.
- 産業技術総合研究所, 平成 26 年度沿岸海域における活断層調査 概要報告書, 14p, 2015a.
- 産業技術総合研究所, 我が国の地質環境について: 隆起・侵食、第 4 回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合, 資料 4-1, 2015b (<http://www.nsr.go.jp/data/000103988.pdf>, 2016 年 3 月 25 日最終閲覧).
- 佐藤稔紀, 石丸恒存, 杉原弘造, 清水和彦, 文献調査による我が国の岩石の物理学的特性に関するデータの収集(その 2), 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 99-011, 1999.
- 鹿園直建, 地球システム環境化学, 東京大学出版会, 266p, 2010.
- 下山正一, 木下裕子, 宮原百々, 田中ゆかり, 市原季彦, 竹村恵二, 旧汀線高度からみた九州の後期更新世地殻変動様式, 地質学雑誌, vol.105, p.311-331, 1999.
- Sugimura, A., Zonal arrangement of some geophysical and petrological features in Japan and its environs. J. Fac. Sci. Univ. Tokyo, Sec. II, XII, pp.133-153, 1960.
- 鈴木隆介, 建設技術者のための地形図読図入門, 第 1 巻 読図の基礎, 古今書院, 200p, 1997.
- 田力正好, 東北地方中部の TT 値・FS 値の分布から推定される過去 12 万年間の隆起沈降量. 日本の地形(3) 東北, 口絵, 2005.
- 高村弘毅, 丸井敦尚, 地下鹹水の定義と事例, 日本海水学会誌, 60, no.2, pp.2-6, 2006.

- 田中和広, 遠田晋次, 上田圭一, 千木良雅弘, 我が国の地質環境の長期的変動特性評価 (その 2)
—隆起・沈降特性評価手法の提案と適用性検討—, 電力中央研究所報告, U96028, 25p, 1996.
- 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, 「日本周辺海域の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, no.1, 海洋調査技術協会, 2001.
- Ueda, T., Mitsuhashi, Y., Uchida, T., Marui, A. and Ohsawa, K., A new marine magnetotelluric measurement system in a shallow-water environment for hydrogeological study, *Journal of Applied Geophysics*, No.100, 23-31, Elsevier, 2014.
- Umeda, K., Ogawa, Y., Asamori, K. and Oikawa, T., Aqueous fluids derived from a subducting slab: Observed high ³He emanation and conductive anomaly in a non-volcanic region, Kii Peninsula southwest Japan, *J. Volcan. Geotherm. Res.*, Vol.149, pp.47-61, 2006a.
- Umeda, K., K. Asamori, T. Negi, and Ogawa, Y., Magnetotelluric imaging of crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline mountains in a nonvolcanic region, northeast Japan, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, vol.7, 2006b, Q08005, doi:10.1029/2006GC001247.
- 海津正倫編, 沖積低地の地形環境学, 古今書院, 179p, 2012.
- Waelbroeck, C., Labeyrie, L., Michel, E., Duplessy, J.C., McManus, J.F., Lambeck, K., Balbon, E., and Labracherie, M., Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records, *Quaternary Science Reviews* vol.21, pp.295-305, Elsevier, 2002.
- 若松加寿江, 久保純子, 松岡昌志, 長谷川浩一, 杉浦正美, 日本の地形・地盤デジタルマップ, 東京大学出版会, 2005.
- 山本 肇, 下茂道人, 藤原 靖, 国丸貴紀, Tianfu Xu, Marcus Laaksoharju, 幌延深地層研究所設置地区周辺の地下水水質形成シミュレーション, 第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 (土木学会), 200, pp.237-242, 2006.
- 矢野雄策, 須田芳朗, 玉生志郎, 日本の地熱調査における坑井データ, その 1, コア測定データ—物性, 地質層序, 年代, 化学組成—, 地質調査所, vol.271, 1989.
- 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, 東京大学出版会, 351p, 2001.
- 吉山 昭, 柳田 誠, 河成地形面の比高分布からみた地殻変動, 地学雑誌, vol.104, pp.809-826, 1995.

3.2 沿岸部の地下水調査技術に関する検討

3.2.1 はじめに

ここでは、沿岸部の地下水調査技術について、地層処分技術調査などでこれまで開発してきた図 3.2-1に示す地下水年代測定技術（電力中央研究所, 2013）や海底地下水湧出探査技術（電力中央研究所, 2008）について、既往の実施例をレビューし、その適用性を検討する。

地下水年代測定技術は、地下水の滞留性を評価する技術である。放射性廃棄物処分の安全評価では、処分した放射性物質が地下水によって輸送される「地下水シナリオ」が重要な評価シナリオとなる。処分した放射性物質は、放射壊変によって時間とともに毒性が低下する。このため、地下水の滞留性が高い地層に処分場を建設することが望ましい。地下水年代測定技術は、概要調査地区選定時にこのような滞留性の高い地層を識別する技術として研究開発を進めてきた。この技術の沿岸域での適用性を確認するため、沿岸部で実施された地下水年代測定結果について文献調査を行うとともに、沿岸部への適用する方法、適用の考え方についてまとめた。

海底地下水湧出探査技術は、地下水の海底からの湧出を明らかにするための技術である。処分候補地が沿岸部になった場合には、地下水の湧出点は海底下となることを考えられる。しかしながら、海域では陸域と同様な水文調査を実施することが困難である。このため、海底地下水湧出探査技術はAUV（Automatic Underwater Vehicle）やROV（Remotely Operated Vehicle）などを用いた探査によって、陸域と同様な水文調査を実施するために開発してきた技術である。地下水湧出探査技術については、原位置への適用を残して、研究開発を終了していたため、研究開発終了から現在までの海底地下水湧出探査技術の進展を調査するとともに、それらを踏まえた沿岸部への適用方法、適用の考え方についてまとめた。

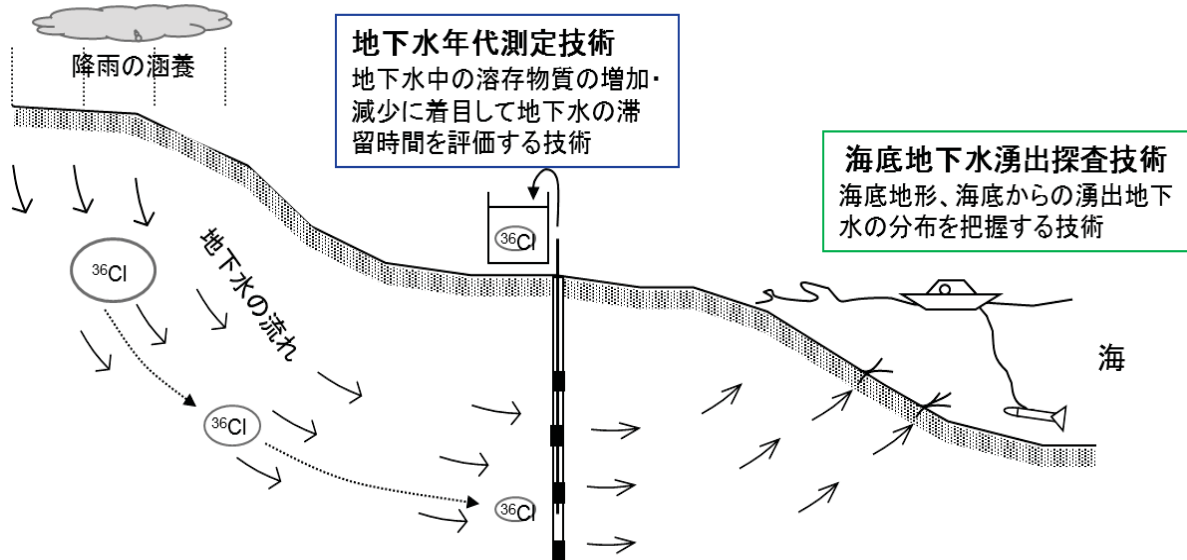


図 3.2-1 沿岸部の地下水調査技術に関する検討の調査項目

3.2.2 地下水年代測定技術に関する調査

(1) 沿岸部での地下水年代測定に関する調査

これまでに沿岸部で実施された地下水年代測定事例について文献調査によって取りまとめた。調査は図 3.2-2 に示すように、国内だけでなく、国外も対象に行った。国内は、幌延沿岸域、太平洋炭鉱、六ヶ所、横須賀西岸、池島炭鉱について調査した。国外では、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について調査した。

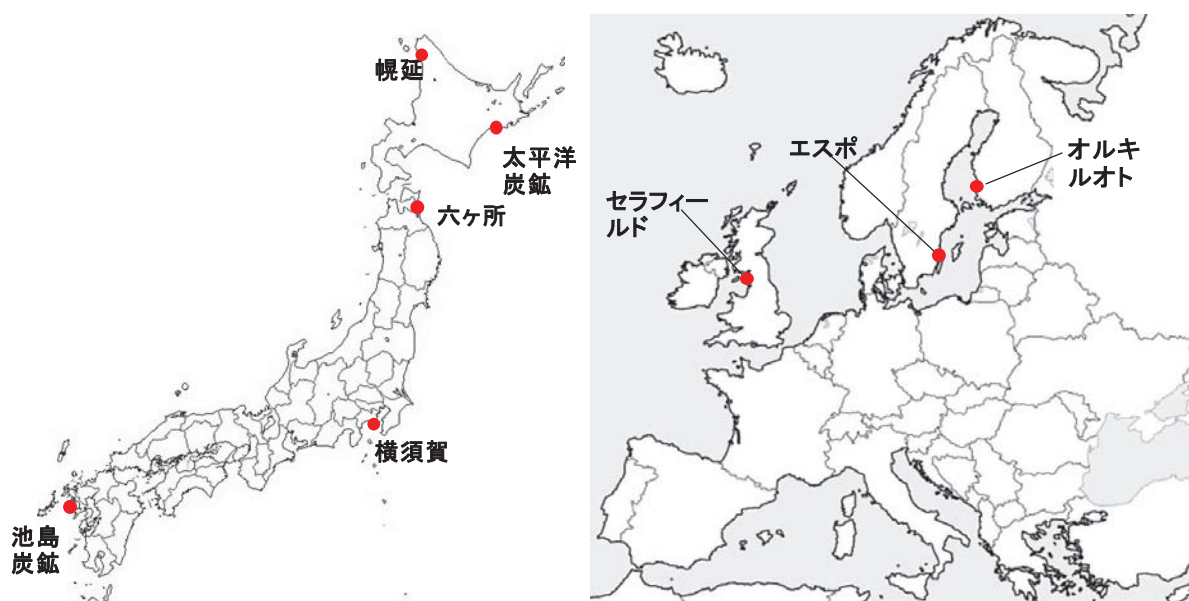


図 3.2-2 沿岸部での地下水年代調査地点

1) 幌延沿岸域

電力中央研究所では、産業技術総合研究所と共同で、北海道北部日本海沿岸部に位置する北海道幌延町浜里で掘削した沿岸域ボーリングにおいて地下水年代測定を実施している（産業技術総合研究所，2013；電力中央研究所，2013；Ikawa et al., 2014）。調査地点を図 3.2-3 に示す。調査地点は、汀線から数百メートル内陸に位置し、掘削地点の標高は約 5m である。西側には日本海、東側には天塩平野（サロベツ原野）が広がっている。海域は非常に遠浅で、内陸も低標高なため、地形勾配は非常に小さい。

調査地点の地質は、砂岩主体の鮮新統～更新統の勇知層、海水準変動に伴う礫層、砂層、シルト層から成る更新統の更別層が分布し、これを沖積層が覆う。掘削地点では、1,200m のボーリング掘削が行われ、470 m 以深に勇知層、90-470 m に更別層、90m 以浅に沖積層が確認されている。各地層の堆積年代は、勇知層が 2～1.3 Ma、更別層が 1.3～0.7 Ma とされ（太田ほか，2007）、沖積層が最終氷期最盛期（26～19ka; Clark et al., 2009）以降と考えられる。掘削地点付近の平野部の地質構造は、概ね北北西-南南東方向の向斜構造であり、その東側には丘陵地を成す幌延背斜が並走する。天塩川左岸では、平野と丘陵の境界部に天塩撓曲帯の分布が知られている。幌延背斜周辺には、中期～後期更新世の海成段丘が認められ、さらに勇知層、更別層が露出することから、幌延背斜付近は、現在隆起傾向にあると考えられる。一方、ボーリングを掘削した平野部については、周囲より新第三系・第四系が厚く堆積しており、長期にわたって沈降域にあると考えられる。産業技術総合研究所（2006）によれば、海洋酸素同位体ステージ 5e の地層の分布深度はおおよそ標高-17m 以深であり、地下水年代測定実施箇所付近は現在も沈降していると考え

られる。

地下水年代調査は、ボーリング孔から岩石コアと地下水を採取して実施している。この結果を図 3.2-4 に示す。地下水の Cl 濃度は、深度 470m 付近の更別層下限まで淡水を示す。その下位の勇知層内では、深度 470~800m が淡水と海水の混合、深度 800m 以深が海水であった。地下水の酸素同位体比は、深度 90~300m では現在の降水に比べて有意に低い傾向がある。これは、氷期に涵養したためと考えられる。深度 300m 以深は深度 800m までおおむね氷期の地下水と標準海水との混合線上に位置する。深度 800m 以深は明確に酸素同位体比の増加するシフトが見られる。これは、水・岩石相互作用により酸素同位体比が増加したためと考えられる。この酸素シフトは幌延内陸部の地層などで観測される現象と同じであると考えられる。

$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は、深度 470m まではおおむね 5×10^{-15} 程度であり、Cl 濃度も低いため、降水起源の Cl と推定される。深度 470m 以深では深度依存性があり、深部では 5×10^{-15} 程度となる。これは海水 (0.5×10^{-15}) に対して有意に大きい、原位置平衡値 $6.5 \pm 0.7 \times 10^{-15}$ に対しては小さい。これらに基づくと、 ^{36}Cl 年代は約 50 万年と推定される。ただし、この放射平衡値は現在の間隙率 (39%) に基づいて計算している。勇知層の堆積年代 2~1.3Ma で、 ^{36}Cl が平衡に達するのにかかる時間 (100 万年) に対してそれほど大きくなく、堆積当初はより間隙が大きかったことを考えると、平衡値はより小さかったと推定される。ちなみに、平衡値 5×10^{-15} に対応する間隙率は 46% である。間隙率は、勇知層浅部では 42% であるが、深度とともに 35% 程度まで低下しており、深部ほど圧密が進んでいると考えられる。このため、圧密による間隙率変化の影響で平衡値に達していないと考えられる。

^4He 濃度は、脱ガスの影響により濃度の低下が顕著なため、保存性の Ne 濃度から補正した。He の生成速度は、ウラン・トリウム放射壊変により He が生成すると仮定すると、更別層・勇知層ともに 2×10^{-12} ccSTP/gwy である。深度 350m までの He 濃度は大気平衡値 $\sim 1 \times 10^{-8}$ ccSTP/gw であり、数万年程度の蓄積に相当する。一方で、海水域の深度 800m 以深では、 1×10^{-6} ccSTP/gw であり、50 万年程度の蓄積に相当する。深度 300~800m は混合域であると考えられる。特に深部から採取した岩石コアについては、圧力解放による脱ガスの影響を受け、バラツキが大きく、低濃度となっている可能性がある。ちなみに、 ^4He 年代が堆積年代と同程度の 150 万年となるには、間隙率は 65% 程度である必要がある。勇知層内の海水が堆積時の海水であるとする、堆積年代の大部分は間隙率が大きい状態が維持される必要がある。

このように間隙率の変化により解釈が難しい部分はあるが、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は平衡値に近く、 ^4He も蓄積が進んでいるため、勇知層内の地下水は流動性が低いと推定される。

幌延沿岸域での水質・地下水年代分布を再現することを目的に地下水流動・物質移行解析も実施されており、この結果、浅部の更別層では氷期に涵養した地下水が残留すること、深部の勇知層では堆積時に閉じ込められた海水が残留することが、原位置で計測した透水係数 (勇知層は 1×10^{-7} m/s、更別層は 1×10^{-9} m/s 以下) で再現されている (図 3.2-5)。幌延沿岸域では、動水勾配が小さいため、氷期に涵養した地下水の影響が沿岸域に強く残る結果となった。また、勇知層の海水は、氷期の地下水の下に存在しており、現海水に置き換わる可能性が低いため、化石海水である可能性が高い。この調査結果に基づく地下水の分布を図 3.2-6 に示す。深部の地下水の安定性は、海水準変動に対する化石海水の残留性から議論できる可能性があると考えられる。

なお、測定箇所は、長期にわたって沈降が継続している向斜の中にあり、このことも地下水の流動性が低い一因かもしれない。

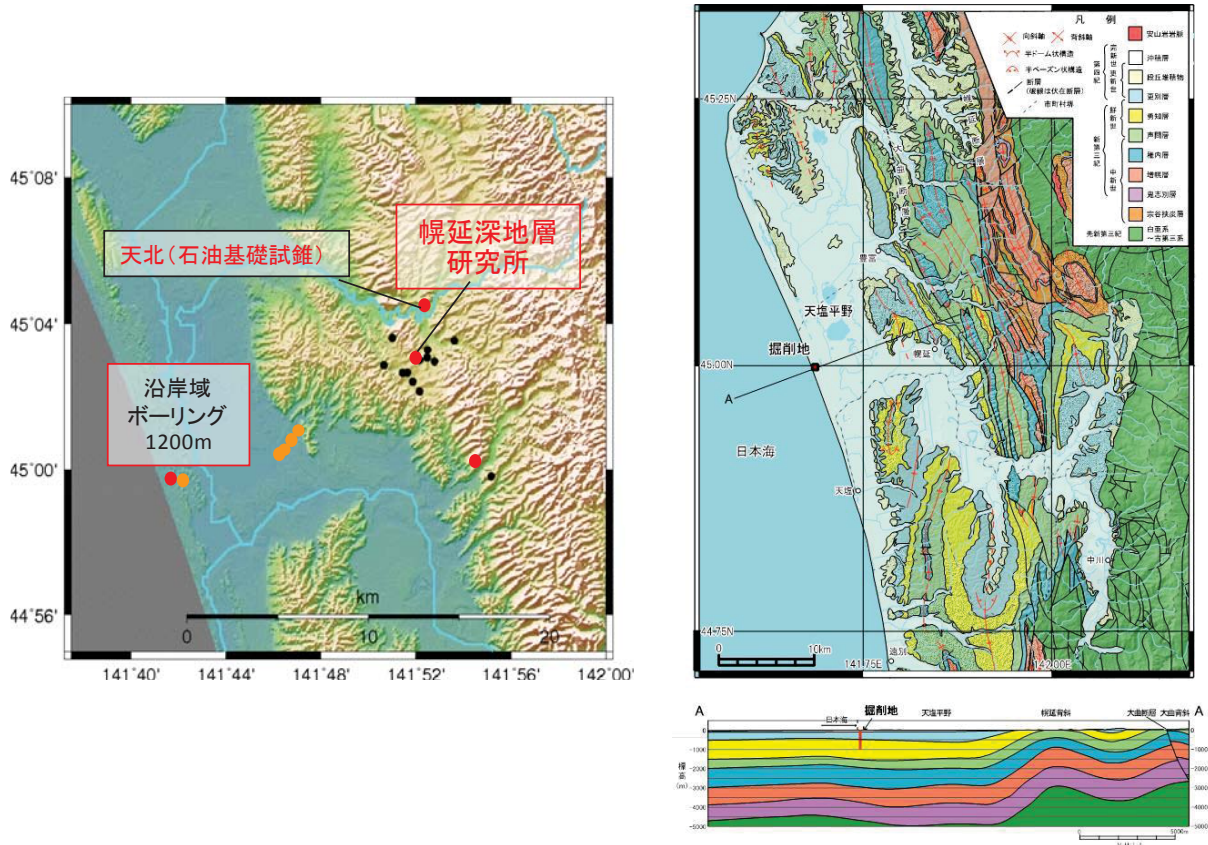


図 3.2-3 幌延沿岸域の地形図と地質平面図(右上)・断面図(右下)
 (地形図は国土院 50m メッシュ、地質図は産業技術総合研究所(2013)を参照)

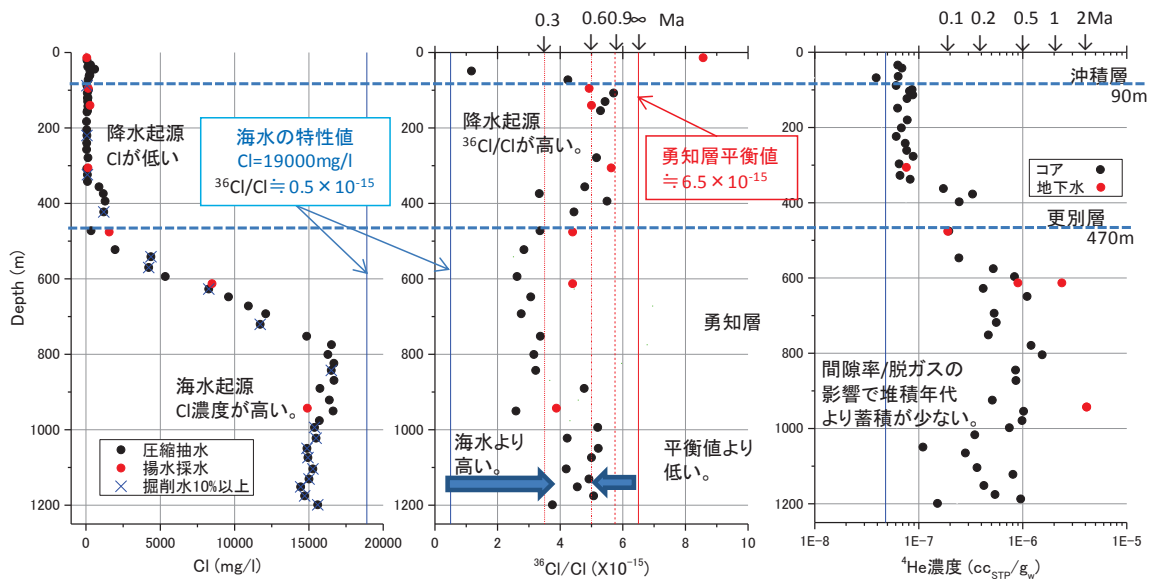


図 3.2-4 幌延沿岸域での地下水年代調査結果

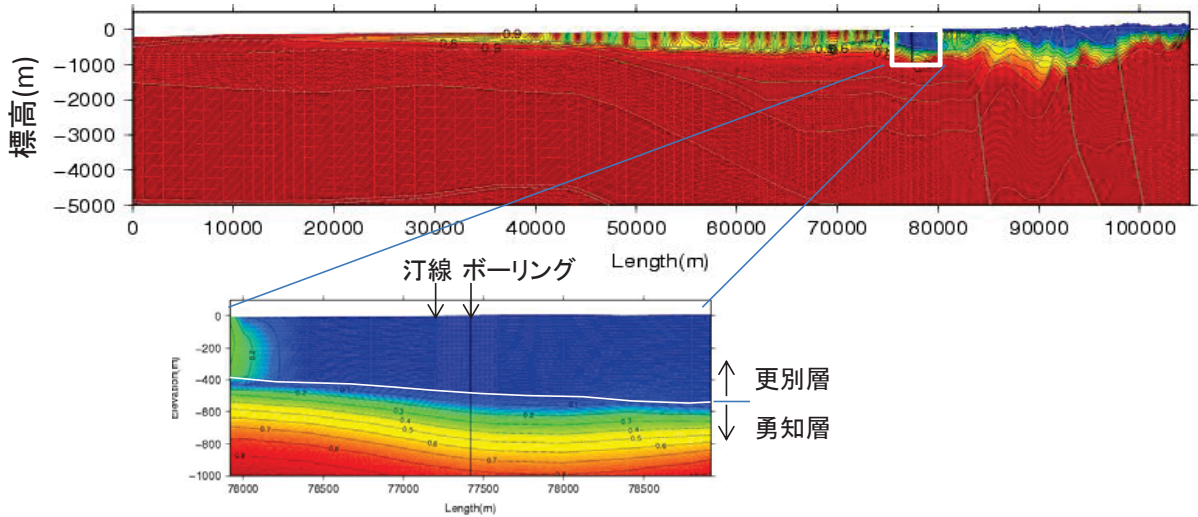


図 3.2-5 海水準変動を考慮した幌延沿岸部での地下水流動解析結果

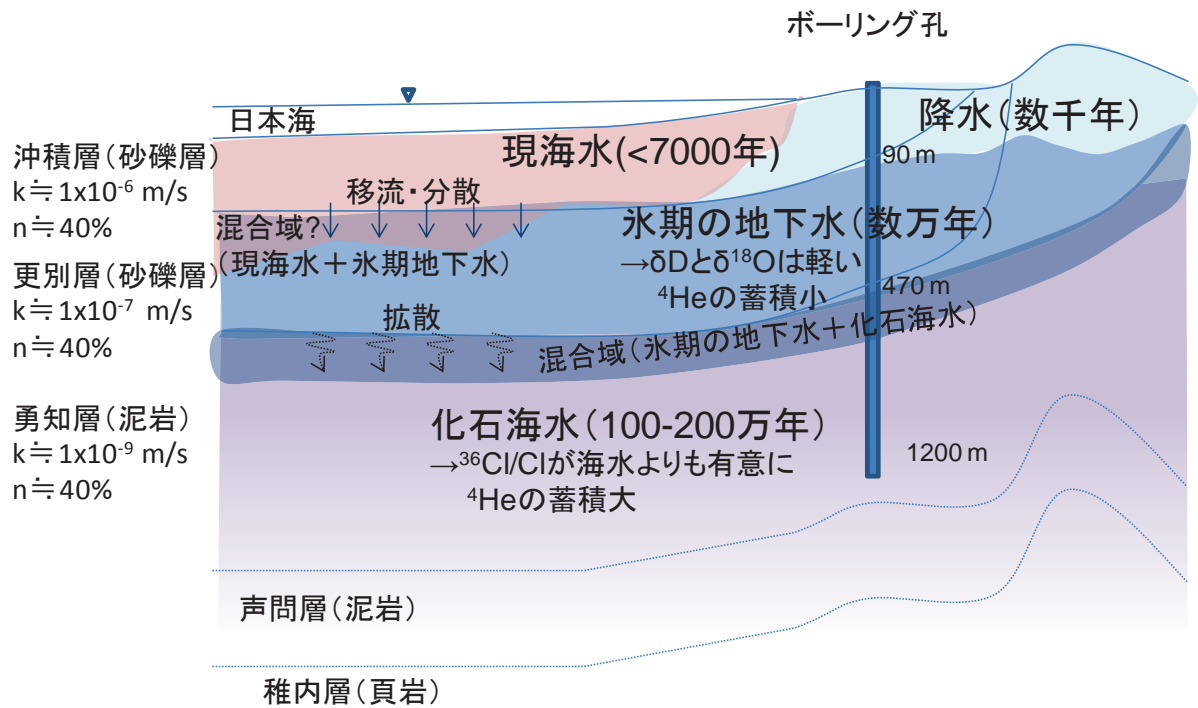


図 3.2-6 幌延沿岸域における地下水分布の概念図

2) 太平洋炭鉱

太平洋炭鉱（釧路炭鉱）は釧路市の東部の沿岸から海底下に掘削されている炭田であり、その範囲はおよそ 10km 四方に及ぶ。太平洋炭鉱(株)は平成 14 年 2 月から釧路コールマイン(株)に一部鉱区を譲渡して海岸から約 3km の海底下までの間で採炭中である（馬原ほか, 2003）。

長浜（1962）、日本地質学会（2010）などによれば、太平洋炭鉱周辺では、下位より、主に海成の砂岩・頁岩互層から成る上部白亜系根室層群、主に浅海～陸成の砂岩・泥岩互層・夾炭層からなる古第三系浦幌層群が分布し、これらを第四系更新統の主に海成の未固結の礫、砂、泥により構成される釧路層群、阿寒火砕流堆積物などが覆う。地表並びに海域表層には概ね浦幌層群以上が分布し、根室層群は深部において広く分布する。浦幌層群下部の春採狭炭層（層厚 90-130m）

で採炭が行われている。地層は南西ないし西南西に約 5°傾斜する同斜構造を示し、周囲を北北東-南南西～北東-南西走向の正断層で限られる。

地層全体の透水係数は不明だが、春採夾炭層の粗粒砂岩の透水係数は $10^{-11} \sim 10^{-13} \text{m/s}$ と小さく、主な帯水層とされる古第三紀層の基底礫岩の透水係数は $15 \sim 17 \text{darcy}$ (10^{-4}m/s オーダー)、白亜紀層中の含水層では $560 \sim 1,300 \text{darcy}$ ($10^{-3} \sim 10^{-2} \text{m/s}$ オーダー) の大きな値を示す (中田ほか, 2008)。

Cl⁻の深度分布 (図 3.2-7) によると、標高-200m 以浅は淡水領域であり、標高-450m までの深度に淡水層から塩水域に代わる漸移帯 (汽水域) が存在する。それ以深の水抜き孔から自噴した地下水の Cl⁻濃度はほぼ一定で坑内水より若干低く、現海水とは明らかに異なる。この水抜き孔自噴地下水は Cl⁻濃度が $12,500 \sim 13,700 \text{mg/L}$ (現海水の 70%程度) の Na-Ca-Cl タイプの地下水で、Ca²⁺濃度が高いため岩石との陽イオン交換反応が進んでいることを示している。

$\delta^{18}\text{O}$ - δD プロット (図 3.2-8) では、標高-450m 以浅の Cl⁻濃度の低い坑内水はほぼ天水線上に分布するのに対し、標高-450m 以深の Cl⁻濃度が高い坑内水は傾き 4.7 の線上にあり、幅広い値を示す。水抜き孔自噴地下水は δD が $-4.3 \sim -5.2\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ が $-21 \sim -28\text{‰}$ で狭い範囲に集中する。標高-450m 以浅の坑内水は降水の影響を強く受けた地下水と考えられる。

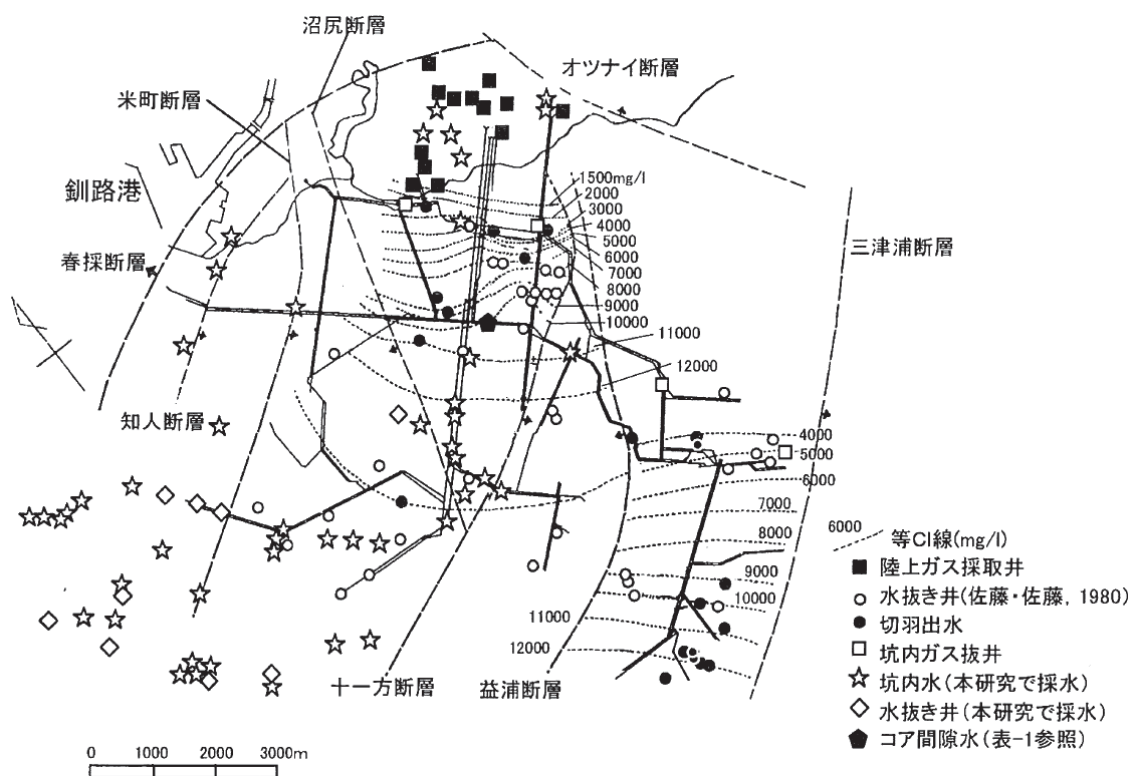


図 3.2-7 地下水試料の採取地点 (馬原・中田, 2003)

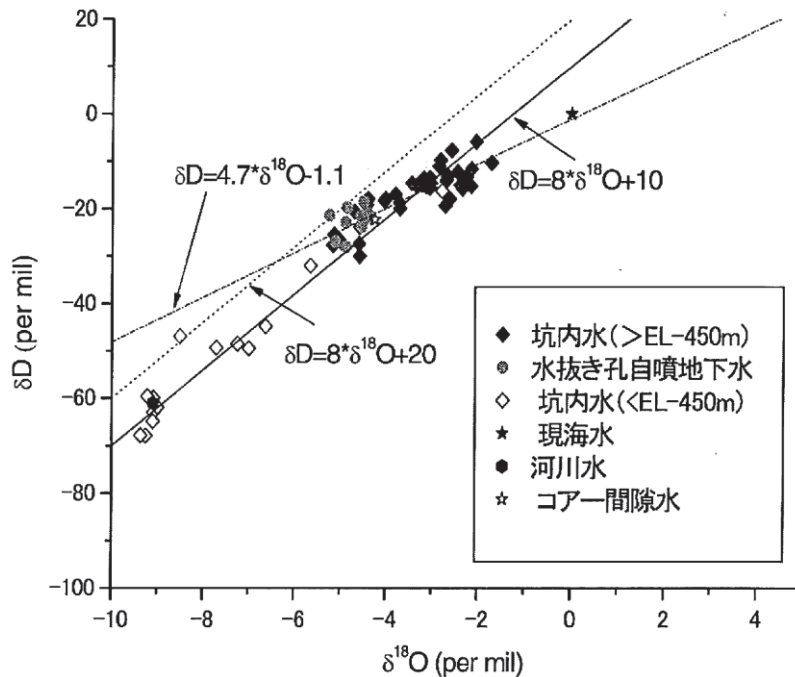


図 3.2-8 酸素水素同位体比（馬原ほか，2003）

炭鉱内のボーリングで得られた3個の泥質砂岩コアのウラン・トリウム含有量は、 2.0 ± 0.2 ppm、 6.2 ± 0.9 ppm を用いて ^{36}Cl の原位置生成量を計算し、これより Lehmann and Loosli (1991) の簡易式を用いて、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の放射平衡値として $9.5 \pm 0.73 \times 10^{-15}$ が得られている。地下水の $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の分析値は、水抜き孔自噴地下水が平均で $9.3 \pm 1.2 \times 10^{-15}$ 、それ以外の標高-450m 以深の坑内水は平均で $6.2 \pm 1.7 \times 10^{-15}$ であり、これらは分析誤差を考慮しても海水 (0.5×10^{-15}) に対して有意に放射化されており、どちらの水も $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}-\text{Cl}$ からみて現海水と浅層地下水との混合では形成されないと判断された。よって、水抜き孔自噴地下水は放射平衡に達した100 万年以上の古い地下水と結論づけられている。標高-450m 以深の坑内水は、放射平衡に達していないものの平衡値の半分以上を示すものもあり、30 万年 (^{36}Cl の半減期) よりも長い滞留時間と考えられる。

希ガスの分析結果では、 ^4He 濃度は $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ ccSTP/gw と大気平衡量 (5×10^{-8} ccSTP/gw) より著しく高く、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比も 1×10^{-8} と原位置生成の値に近い。ため、原位置生成の He が有意に蓄積していると考えられ、古い地下水と考えられる。 ^{36}Cl と ^4He は、いずれも地下水が他の水の影響を受けず地層中に長期停滞していることを支持するものである。これらの結果に基づいて作成した太平洋炭鉱での地下水分布の概念図を図 3.2-9 に示す。

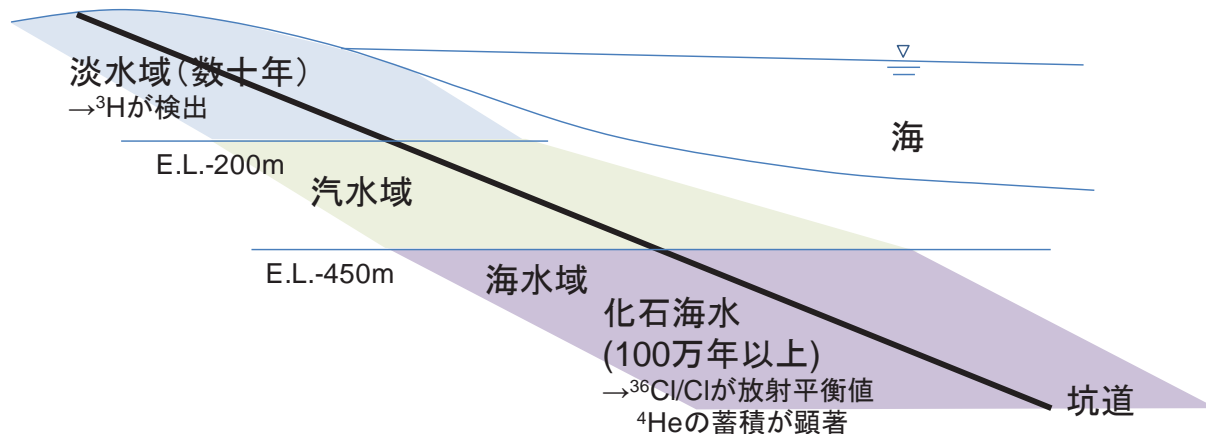


図 3.2-9 太平洋炭鉱における地下水分布の概念図

3) 六ヶ所

調査箇所の青森県六ヶ所村は、下北半島脊梁山地南端の太平洋側に位置し、東に太平洋を臨み、北側を老部川、南側を二又川と汽水湖の尾駁沼で囲まれた標高 30～60m の台地からなる（図 3.2-10、日本原燃、2006）。台地は主に中～後期更新世に形成された、北西から南東に向かって緩く傾斜海成段丘群からなり、敷地中央に沢が存在する。下北半島の地質は、下位より、ジュラ紀の付加体である尻屋層群（対馬・滝沢、1977）、新第三系の堆積岩類および火山砕屑岩類（泊層、猿ヶ森層、蒲野沢層、鷹架層、砂子又層）、第四系の段丘堆積物、砂丘堆積物、沖積層などである（猪原ほか、2008）。地下水年代測定実施箇所付近では、概ね深度 300m までの範囲では、鷹架層の中部層（主に砂岩、凝灰岩）と下部層（主に泥岩）が緩く傾斜して分布し、これを第四紀層が覆う（富岡ほか、2010）。測定実施箇所の近傍には面が密着した断層が見られるが、それらは地層の堆積後の未固結時の変形で形成されたと推定されている（日本原燃、2006）。また、坑壁観察などの結果、岩盤に連続する割れ目は少なく岩石は塊状であるとされている（大山ほか、2007）。

海成段丘群の分布から明らかのように、調査箇所は中期更新世より継続して隆起傾向にある。調査箇所の隆起量は、海成段丘の旧汀線高度から、後期更新世に 40m 程度と見積もられる。活断層としては、北東側に西傾斜の逆断層である出戸西方断層／六ヶ所撓曲帯が走っているが、その南方延長（調査箇所の東方）については、異なる見解がある（日本原燃、2006；渡辺ほか、2008）。最も近くに分布する第四紀火山は北西に 40km 以上離れた恐山火山であり、第四紀には火山活動、熱水活動の影響は認められない。地熱勾配は 40℃前後である（地質環境の長期安定性研究委員会編、2011）。

鷹架層の透水係数は、中部層では概ね $10^{-6} \sim 10^{-8}$ m/s、下部層では $10^{-8} \sim 10^{-9}$ m/s、中部層の中の軽石凝灰岩の透水係数は $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-11}$ m/s とされている（日本原燃、2006）。第四紀層の透水係数は平均 4×10^{-2} m/s である。

地下水流動は、台地上で涵養した地下水が、領域内の沼や海へ流出する。地下水面は主に第四紀層中にあり、北西から南西に向かう勾配となっている。

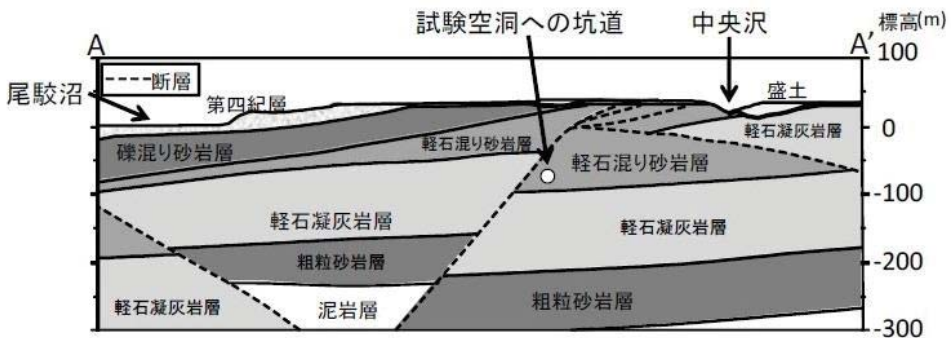
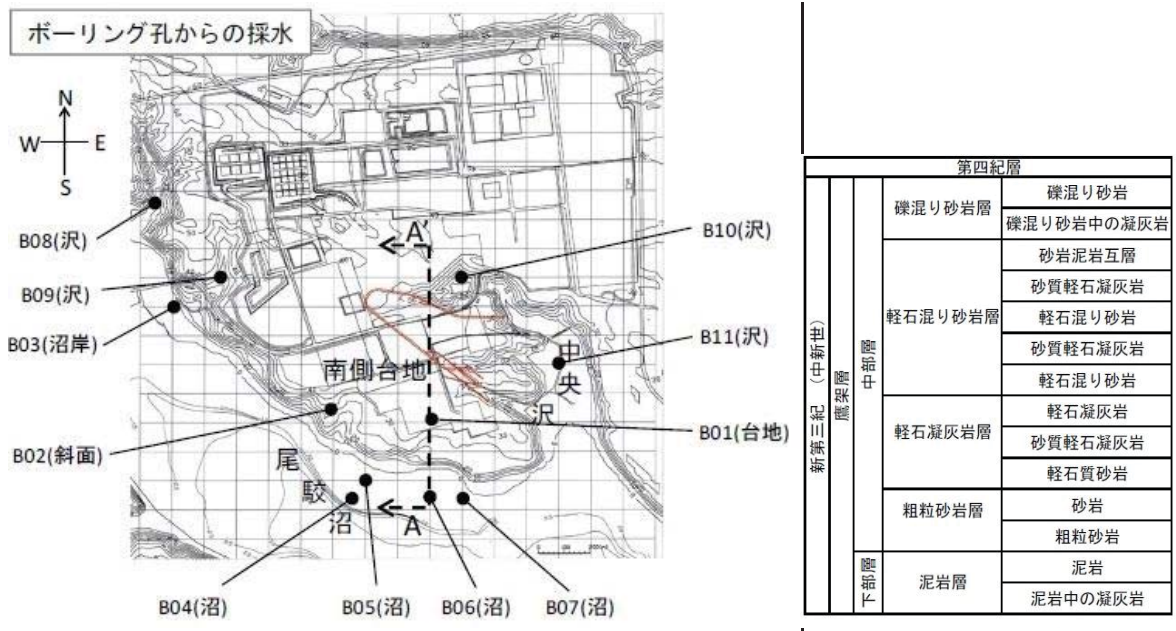


図 3.2-10 六ヶ所サイトの地形・層序・地質断面図 (富岡ほか, 2010)

地下水年代測定結果は、馬原ほか (1996) に図 3.2-11 に示すようにまとめられており、標高 -40 m より浅部ではトリチウムが検出され、50 年以内の新しい降水が混合したこと、標高-100m 以深では、 ^4He 濃度が 10^{-7}ccSTP/gw を超える大きな値となることから、古い地下水であるとしている。また、酸素・水素同位体比は、浅層地下水 (標高-40 m 以浅) はほぼ天水線上にあり、現在の降水が起源と考えられる。深層地下水 (標高-40m 以深) では浅層地下水や表流水よりも $\delta^{18}\text{O}$ が小さいものが多く、これらは氷期に涵養した地下水と考えられる。さらに深部には流動性の低い、塩分濃度の高い地下水が分布しているとしている。

富岡ほか (2010) では、標高-100m 以深では深度の増大につれて ^{14}C 濃度の低下とともに $\delta^{13}\text{C}$ の増大及び Ca と Mg の増大と Na の減少が見られることから、地下水の流動にともない Na-(Ca,Mg) のイオン交換による海成炭酸塩 (主に貝化石) の溶解が生じ、 ^{14}C を含まない炭素が地下水に加わり C が希釈されていると考えられるため、 ^{14}C 年代を補正している。この結果、 ^{14}C 年代は最大 33,000 年であったものが、24,000 年と補正されている。

中田・長谷川 (2011) では、希ガスのうち溶解度の温度依存性が大きい Kr を用いて涵養温度の推定を行っている。図 3.2-12 に示すように、深度約 200m のボーリング孔 (B11 号孔) でのプロファイルでは、Kr 濃度は深度 120m 付近で極大に、 $\delta^{18}\text{O}$ は 100~120m 付近で極小になることから、この地点が最終氷期最盛期 (26~19ka) に相当する推定している。

これらの結果に基づいて作成した六ヶ所での地下水分布の概念図を図 3.2-13 に示す。

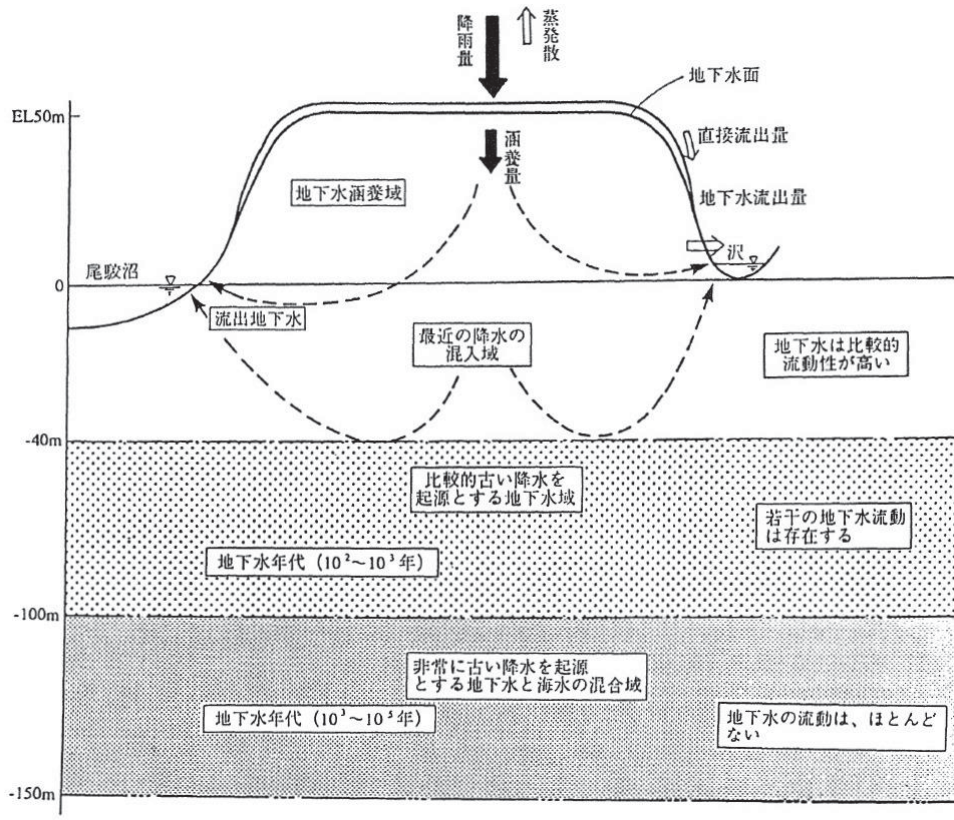


図 3.2-11 六ヶ所サイトの水循環の概念モデル (馬原ほか, 1996)

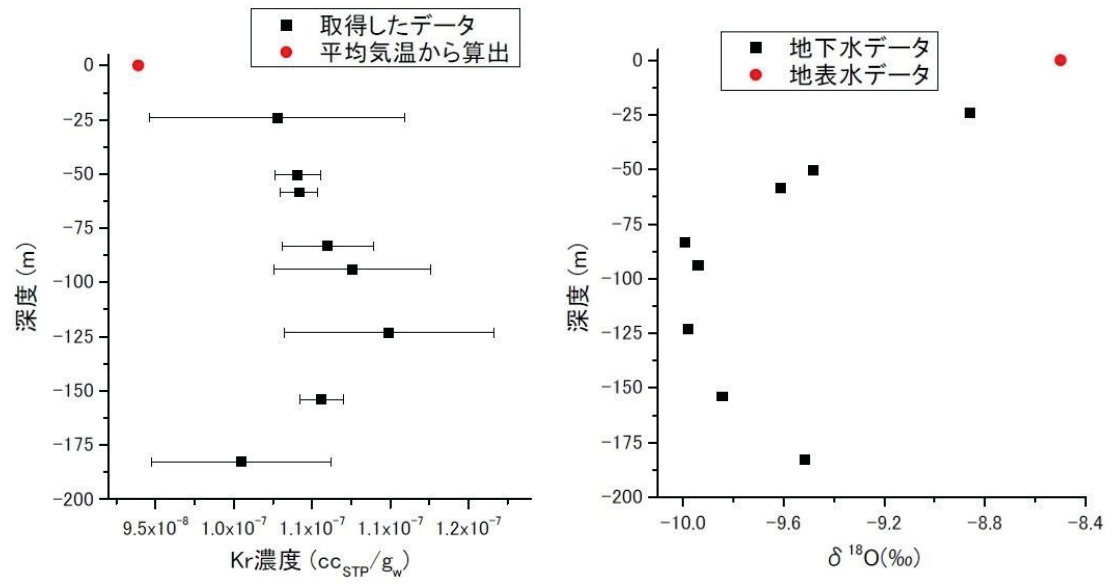


図 3.2-12 B11 孔の Kr 濃度と酸素同位体比の深度分布 (中田・長谷川, 2011)

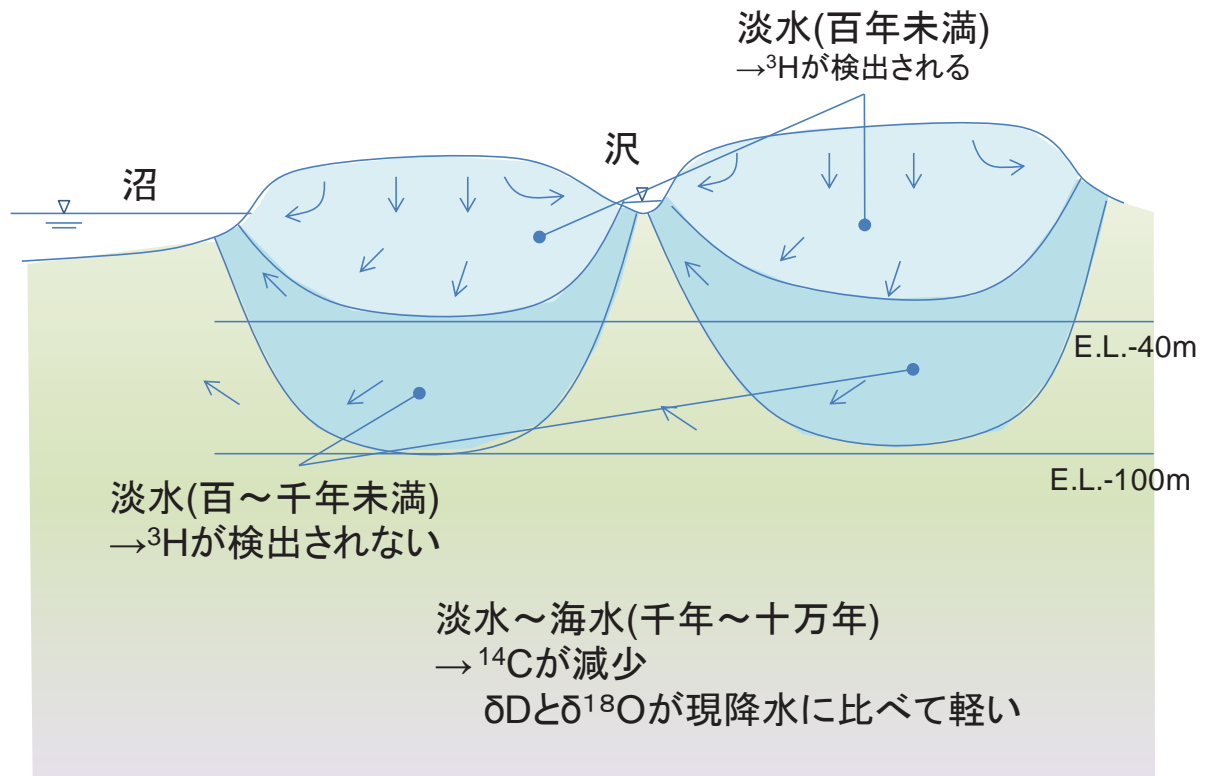


図 3.2-13 六ヶ所における地下水年代分布の概念図

4) 横須賀西岸

三浦半島西部の小田和湾に面する電力中央研究所横須賀地区において、ボーリング調査が実施されており、主要な調査結果は、近藤ほか（2011, 2012）にまとめられている。三浦半島の地形と地質図を図 3.2-14 に示す。調査箇所は、大楠山（241.8m）を最高点とし、武山へと続く丘陵が分水嶺の南側に位置する。この付近の地形は、西北西-東南東走向の活断層により、小地塊に別れた地形となっており、調査箇所は武山断層の南側に位置する。この丘陵は、葉山層群の隆起によって形成された地形で、葉山隆起帯と呼ばれている（小池, 1957；三梨, 1968）。この丘陵から南側の海域に向けて地下水が流れると想定される。

三浦半島には、西北西-東南東走向の活断層があり、地質分布もこの影響を強く受けている。三浦半島には、下位から葉山層群、三浦層群、上総層群、相模層群、沖積層が分布する。調査地点周辺での主要な地層は、新第三系の葉山層群と三浦層群であり、後者が前者を不整合で覆う。

葉山層群は、中新世前期から中新世中期（16.5～12Ma）の海成の泥岩、凝灰岩、凝灰質砂岩を主体とした付加コンプレックスである（江藤ほか, 1998；高橋, 2008 など）。主として硬質シルト岩や凝灰質砂岩とシルト岩の互層からなり、ボーリングコアでは、主に、複数種の泥の不規則な混合で、亀裂が密に発達するが、岩盤中では密着している。その最上部の年代は、産出化石により前期中新世後期とされ、ボーリングコアでは石灰質ナノ化石の CN3～5 帯を示した（近藤ほか, 2014）。

三浦層群は、中新世後期から鮮新世前期（7～4Ma）の海成の砂岩泥岩互層、凝灰質砂岩を主体とし、当地域周辺では三崎層と初音層に区分される。三崎層はシルト岩と玄武岩質凝灰岩および凝灰質砂岩の互層よりなり、凝灰岩のほとんどはスコリア質で、地層は側方への連続性がよい。石灰質ナノ化石帯の CN6～CN10c 帯に相当し（蟹江ほか, 1991）、上部中新統～鮮新統最下部

である。その堆積場は中部漸深海帯下部ないし深海帯とされている（秋元ほか, 1991）。一方、初声層は斜交層埋が発達する粗粒な再堆積火砕岩ないし凝灰質粗粒砂岩からなる浅海相である。ボーリングでは、初声層はごく浅部にのみ分布し、三崎層とは整合的に漸移する。なお、武山断層よりも北の葉山隆起帯以北に分布する逗子層は、同時異相である三崎層・初声層とは異なり、深海相を呈し、火山碎屑物の含有率が少ない。初声層に載る後期鮮新世～前期更新世の上総層群林層は、分布が限定的で、まとまった規模の堆積の場にはならなかったことを示す。

研究地域を含む武山断層と南下浦断層に挟まれる地域では、中部更新統の宮田層が堆積しており、両断層を境として隣接する南北の地域に対して相対的に沈降傾向の堆積の場になっていたと考えられる。宮田層堆積後は、海水準変動の影響を受けつつ、段丘が形成されており、隆起傾向にある。

三浦半島に分布する5本の活断層（北から衣笠、北武、武山、南下浦、引橋）は、右横ずれ地形が顕著である（太田, 2000）。また、段丘はほとんどが武山断層よりも南に分布し、海成段丘の引橋面（MIS5e）、小原台面（MIS5c）、三崎面（MIS5a）とされる。武山断層よりも北の葉山隆起帯に段丘面が分布しないのは、隆起量が大きく、侵食を強く受けたためとされている（鈴木, 2000）。

隆起・沈降運動は、葉山層群堆積時から現在に至るまで、日本の他の地域に比べ、激しいと考えられる。葉山層群は、海溝付近での堆積の後、沈み込みに伴って付加体となったと考えられる。その後、少なくとも横須賀サイト以北については、一旦陸化し、侵食をうけた後、再度沈降に転じて、三浦層群および安房層群を堆積させた。三浦層群は、堆積盆を埋積しながら徐々に浅海化し、更新世にはほぼ堆積盆が消滅したが、葉山隆起帯以北の安房層群では浅海化しつつも更新世まで堆積盆が残り、上総層群を堆積させた。また、火成活動については、初声層堆積終了以降、横須賀サイト周辺での影響は認められない。横須賀サイトでは、深度500mまでのボーリング調査実際されており、それによれば地表から深度約210mまでが三浦層群、深度約210m以深には葉山層群が分布している（近藤ほか, 2014）。主な調査結果を図3.2-15に示す（長谷川ほか, 2010）。各層の透水係数は、三浦層群で概ね 1×10^{-7} m/s、葉山層群で 1×10^{-9} m/sである。全水頭は、三浦層群では地表よりも数m低くほぼ一定であるが、葉山層群では深度方向に増加傾向にある。これが、流出域に位置するためか、塩分の密度による影響かは明確でない。

Cl濃度は、深度100mまでは低く、徐々に増加し、深度300m以深では概ね海水程度となる。Cl濃度の地層への依存性は明確ではない。 ^{14}C は三浦層群では40-60pMCであり、8000年以下と推定される。一方で、葉山層群では10pMCと有意に低下しており流動性が低いと考えられる。 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は、三浦層群内では現海水程度（ $0 \sim 2 \times 10^{-15}$ ）であるが、葉山層群内では有意に大きく一定であり（ $5 \sim 7 \times 10^{-15}$ ）、原位置での平衡値に達していると推定された。このため、葉山層群の ^{36}Cl 年代は、100万年以上と推定された。 ^4He 濃度は、深度100mまでは低く大気平衡程度（ 4.8×10^{-8} ccSTP/gw）と低濃度であるが、深度とともに増加し、葉山層群ではバラツキがあるものの高濃度（ 2×10^{-5} ccSTP/gw程度）となる。葉山層群での ^4He 年代は、岩石からの ^4He 生成速度に基づく700万年と推定された。このため、地下水の流動性は三浦層群では高いが、葉山層群では低いと考えられた（長谷川ほか, 2010）。なお、この地下水年代は、三浦層群最下部の堆積年代に相当する。

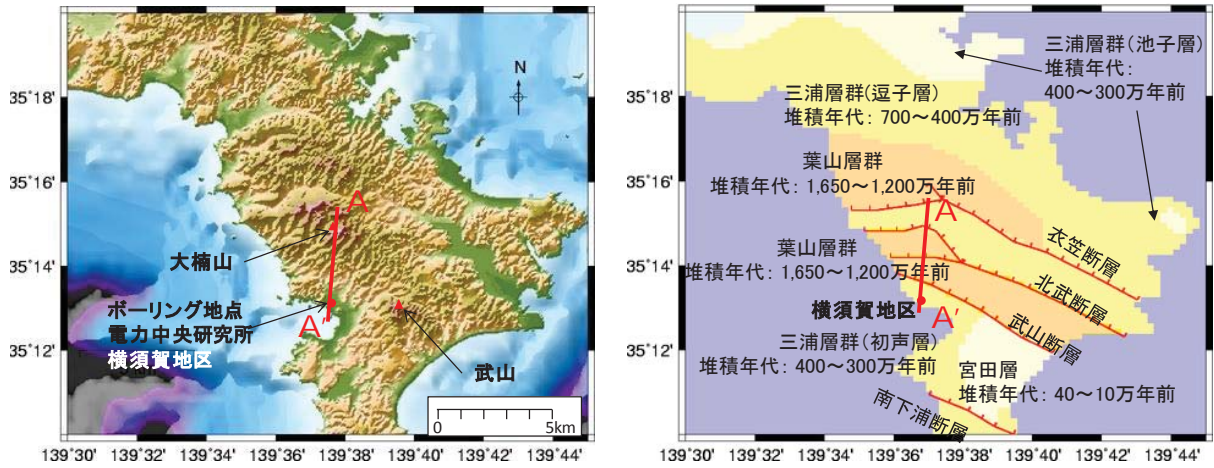


図 3.2-14 横須賀の地形図と地質図

地形図は国土地理院（1997）、海底地形は海上保安庁（2000）、海上保安庁（2007）
地質区分は地質調査所（2003）、地質年代は江藤ほか（1998）を参照。

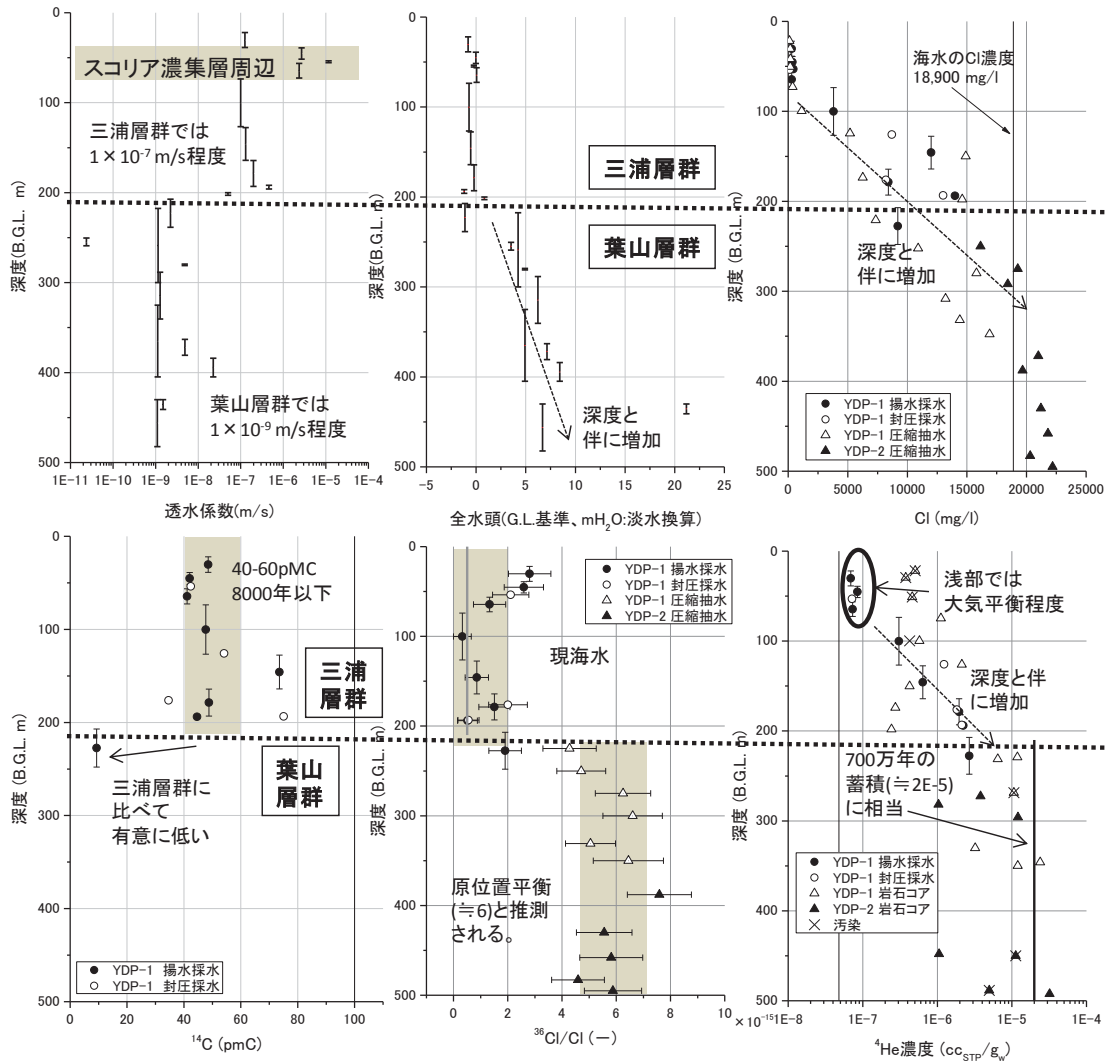


図 3.2-15 ボーリングにおける主な調査結果（長谷川ほか，2010）

長谷川ほか（2011）は、これらの調査結果に基づいた地下水流動解析・物質移行解析を実施して、全水頭、塩分濃度、 ^4He 濃度の再現を試みている。図 3.2-16 に示すように、海水準変動を考慮した解析を実施することで、海進時の海水浸入により三浦層群への塩分濃度の残留すること、葉山層群への化石海水の残留と、葉山層群から三浦層群への化石海水の供給で高い ^4He 濃度が再現できることを示している。また、これらの解析結果から、断層は地下水流動に大きな影響を与えていないと推定している。これらの解析結果を反映した地下水流動の概念図を図 3.2-17 のように示している。このように、水質・地下水年代などを含めて地下水流動解析を実施することが、特に調査数量が限定される概要調査において重要であると考えられた。また、海水準変動など過去履歴を考慮して現状を再現することは、将来環境の予測にも役に立つとしている。

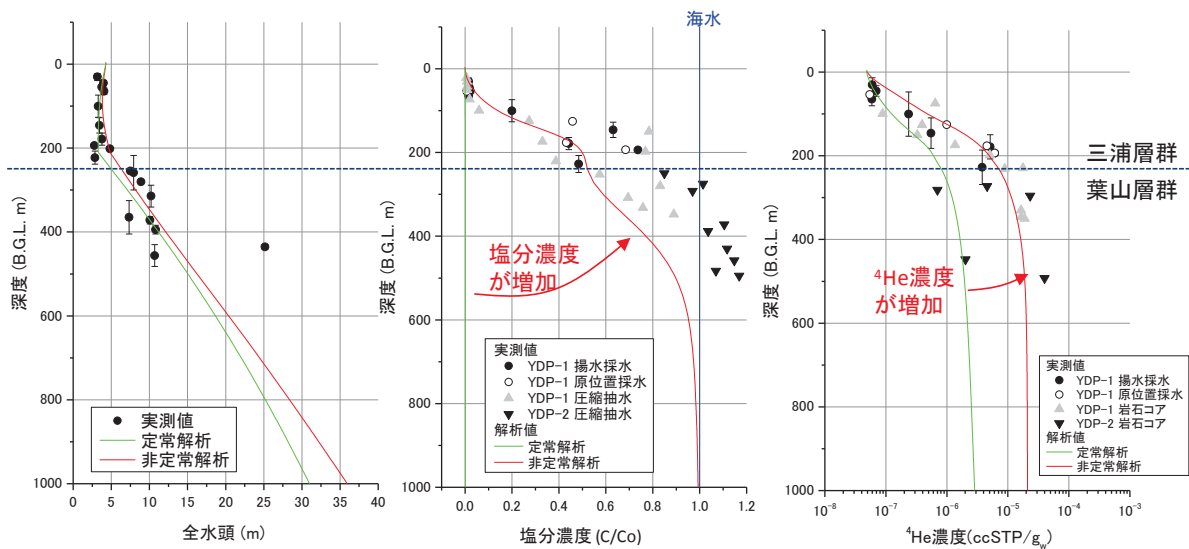


図 3.2-16 ボーリング孔での実測値と解析値の比較

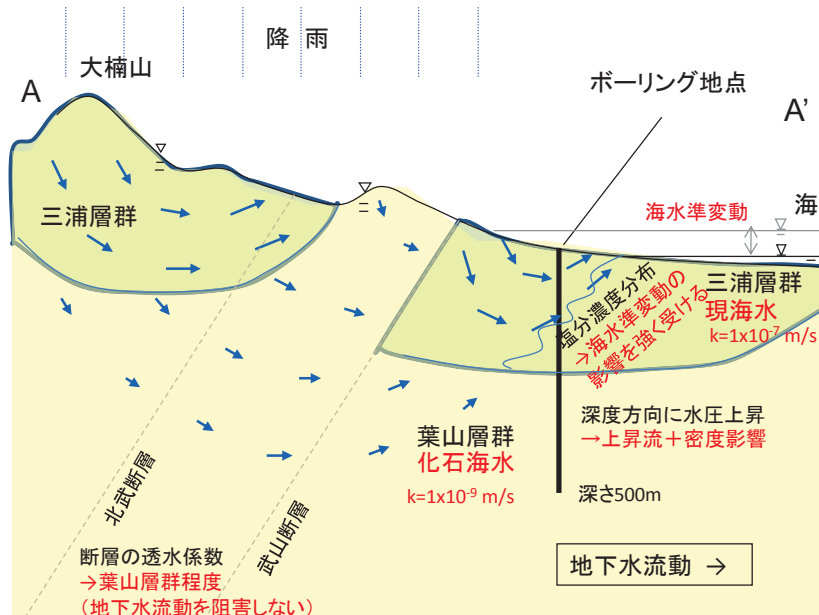


図 3.2-17 地下水流動解析結果を反映した地下水流動の概念図

5) 池島炭鉱

池島は長崎県の西彼杵半島の西方約 7km に位置する東西 1.5km、南北 1km の島である。島の北西部には標高 114m の山があり、比較的起伏に富む地形となっている。池島炭鉱は 1952 年の開削以来採掘区域を広げてきたが、2001 年の閉山にともない、第一斜坑を除きほとんどの坑道が水没している。現在は石炭採掘技術研修の場として利用され、新たな坑道の掘削も行われている。地下水に関する調査は主に第一斜向の深さ 300m 付近を対象に行われている（小野ほか、2004a；2004b）。

池島炭鉱の属する崎戸・松島炭田付近の地質は、基盤の長崎変成岩類および大瀬戸花崗閃緑岩とこれらを覆う古第三系からなる。炭田を成す古第三系は、淡水-汽水成層と浅海成層からなり、層厚は累計で 1,000m 以上に及び、西彼杵半島北西沿岸地域から西方の海域海底下に広く分布する（千々和、2010）。北部九州の古第三系は、多くの正断層に切られているが、地層の傾斜は緩く、その分布高度も低く、丘陵地や沿岸低地（一部は海底面下）を構成している。また、松浦半島では、古第三系を覆って分布する中後期中新世の火山岩には、古第三系を切っている断層が及んでいない。このような特徴から、北部九州では断層運動を伴う堆積盆を形成して古第三系が堆積したのち、現在までの 2,000 万年以上もの間、堆積盆の形成や断層運動を引き起こすような激しい変形が生じなかったことを示唆する。一方、池島および東側、対岸の西彼杵半島を含め、北部九州の海岸は出入りに富み、島嶼が多く、海成段丘が見られない。北部九州では、地形の骨格が第三紀に形成され、第四紀の海面変化による地形変化はそれを修飾しているに過ぎないとされ（長岡、2001）、第三紀以降の変動・変形は小さいと考えられる。最終間氷期の汀線付近の堆積物が沖合の海面下 7-8m 付近に見出されているので（下山ほか、1999）、少なくとも過去約 12.5 万年間に北部九州沿岸は沈降傾向にあると考えられる。

池島地表部のほぼ全域は、中新世の玄武岩に覆われ、堆積岩は島の北部でわずかに見られるのみである（小野ほか、2004b）。古第三系と玄武岩との境界はほぼ海水準面付近であり、その間に厚さ数 m の砂礫層を挟んでいる（松島炭鉱株式会社池島鉱業所鉱務課、1963）。島の中央部には落差 80m の池島断層が、北部沿岸には落差 60m の前曾根断層が存在する。断層は共に南落ちの正断層である。地下水年代評価の対象とした炭田の第一斜坑付近の深度約 300m 以浅に分布する池島炭鉱の古第三系は、下位から松島層群の崎戸層、西彼杵層群の板浦層、蛸浦層、徳万層と重なる（図 3.2-18）。

透水係数については、末永・中田（2008）は、間隙水圧測定・透水試験及び室内透水試験により、蛸浦層の砂岩の透水係数は、割れ目の発達に影響されるものの $10^{-6} \sim 10^{-10} \text{m/s}$ オーダーの範囲にあるとしている。中田ほか（2008）は、閉山後の再冠水速度に基づいて透水係数を計算し、立坑周囲の不飽和岩盤の冠水を考慮するかどうかによって変わるものの、 $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{m/s}$ の透水係数になるとしている。間隙率は、松島夾炭層で 12~15% という測定結果がある（末永・中田、2008）。

小野ほか（2004b）は、地下水の酸素・水素同位体比を調査し、坑口に近い湧水は天水線に最も近く、その他の地下水は坑道に近い湧水と海水（SMOW）との混合線上にあるため、当地区の地下水は熱水や水-岩石反応の影響を受けず、降水と海水との混合によって説明されるとしている。また、降水の影響は、標高-10m 程度までが強く、標高-40m 付近までが混合域としている。さらに、電気伝導度と ^{18}O の関係から、降水には現在の降水と氷期の降水の二つの起源があることを示している。これらの結果から、浅部では現在の降水と海水が混合しているが、深部では氷期に涵養した地下水と海水が混合しているとしている（図 3.2-19）。

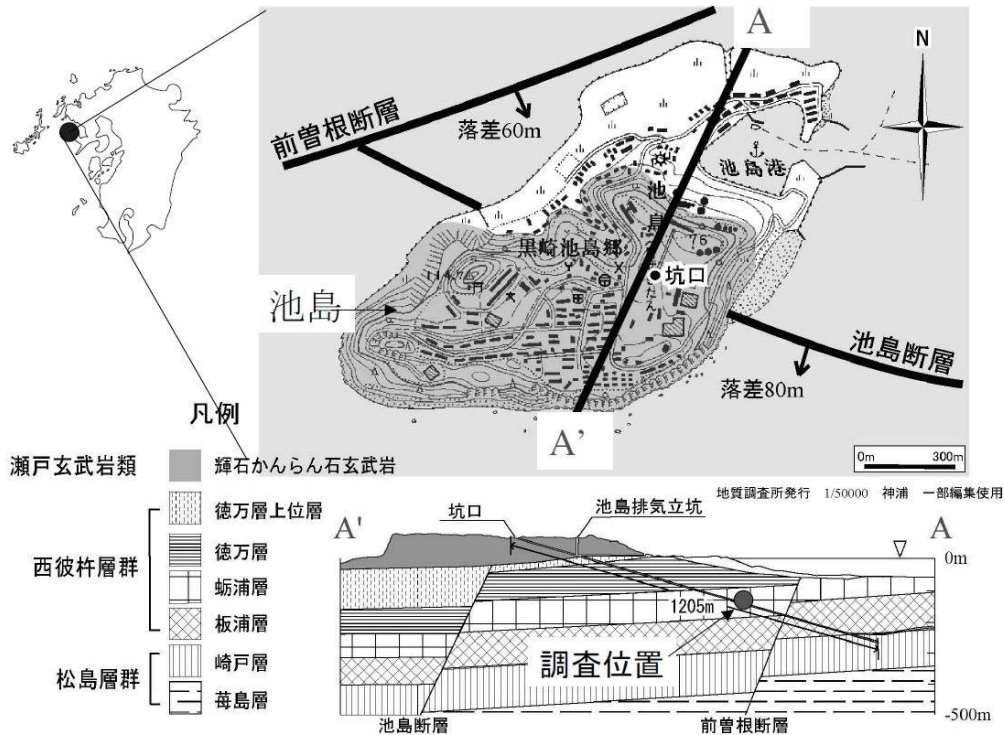


図 3.2-18 地質構造 (末永・中田, 2008)

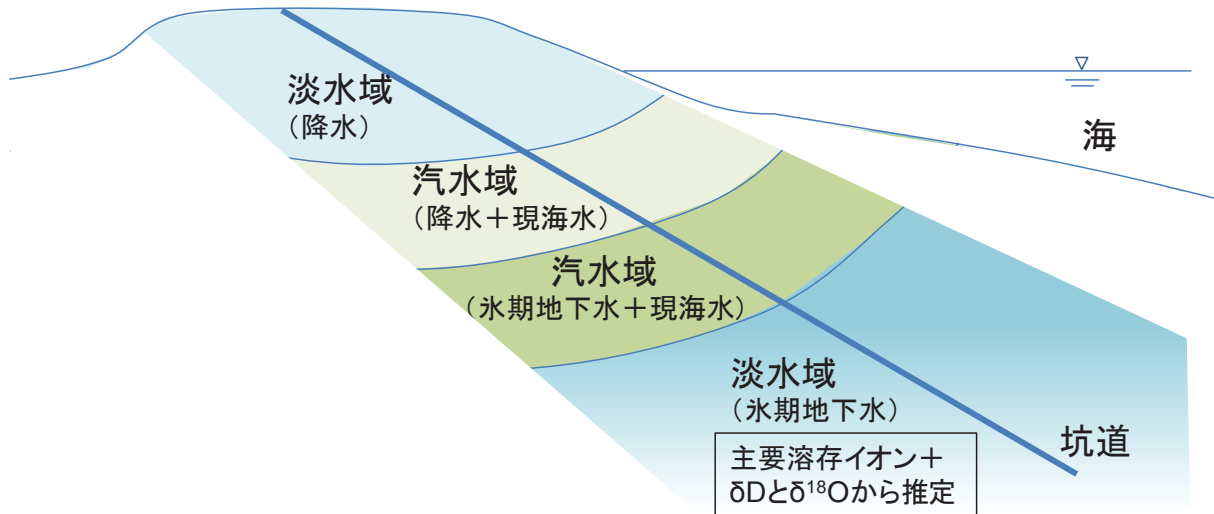


図 3.2-19 池島炭鉱における地下水水質分布の概念図

6) セラフィールド

イングランド北西部の沿岸の平野に位置するサイトで、1997 年まで処分場候補地 (Potential Repository Zone) として、その周辺の約 8×6.5km のエリアで調査が行われた (Nirex, 1997a ; 1997b)。

セラフィールドサイトは、海岸平野は標高 20~90m であるが、東部に山を抱え、最高点はセラフィールドの東北東約 15km の位置で標高 850m である。最終氷期に氷河(スカンジナビア氷床)の発達した地域であり、現在も隆起傾向にあると考えられる。地質学的には、西方に発達する東アイリッシュ盆地と東側の Lake District の台地との間の構造的漸移帯にあたり、オルドビス紀

の Borrowdale 火山岩 (BVG) を基盤として、その上に石炭紀～三畳紀の砂岩・泥岩を主とする堆積岩が分布する。西方の堆積盆中央部に向かって西に緩く傾斜する構造を示し、エリア西部で堆積岩は厚さ約 1500m となる。東部の台地では基盤の BVG が露出する。基盤の BVG の堆積構造は明らかでないが、石炭系以上の地層は、南西のアイリッシュ海岸方向に向かって 20~30 度程度で傾斜している。これらの地層は、それぞれの落差が 200m 未満の複数の正断層によって切られている。そのうち地下水流動評価を行った地区の中央部付近を通過する断層については、“Fault Zone”と示されており、数十 m 規模の破碎ゾーンを持つと見られるが、他の断層についてはそのような記載はなく、いずれも破碎規模は小さいとみられる。それらは、石炭紀以降の堆積盆の形成・拡大に関連して生じた断層と推定され、地層の年代、層厚分布、変位量からみて、ジュラ紀以降の活動はほとんどないと推定される。また、Bath et al. (2006) によれば、サイト中央部を軸とする開いた褶曲構造と見ることができ、その両翼には多数の正断層が認められる。正断層はサイト中央部で最も多い。

水理・地球化学・岩石・鉱物に関するデータが 19 本のボーリング (最大深度 1950m) の 163 区間から取得された。ボーリングは、主として地下水流動に平行な方向と直交する方向とに配置されている。

堆積層の主体をなす Sherwood Sandstone 層群の浸透率は概ね $6.5 \times 10^{-6} \sim 6.5 \times 10^{-10} \text{m/s}$ の範囲にあり、基盤の BVG は堆積岩類よりも低い $2.3 \times 10^{-6} \sim 7.3 \times 10^{-13} \text{m/s}$ の透水係数である。間隙率は、堆積岩では 3~20% (石炭系では 1%)、BVG では約 1% である。第四紀層は浸透率・間隙率ともに大きい。

当サイト周辺の地下水は、1) 海岸平野の領域 (地下水は淡水・汽水で、地形に従って流動)、2) サイト西部の深部の高塩分水 (ブライン) の領域 (アイリッシュ海側の岩塩が溶解した高塩分地下水)、3) サイト東部の基盤岩・丘陵領域 (地下水は地形と深部塩水の両方の影響を受けている) の 3 つに区分されている。海岸から約 12km で Lake District の標高約 500m の台地となり、この地形勾配が地下水流動の主な駆動力となっている。

地下水年代測定は、 ^3H 、 ^{14}C 、 ^4He 、 ^{36}Cl が実施されている。 ^4He 濃度は非常に高く、これから推定された Brine の ^4He 年代は数百万年という極めて古い年代を示す。ただし、 ^4He 濃度と Cl 濃度の間には相関が見られず、塩水の希釈という単純な二成分混合では説明できないため、 ^4He による年代推定には難しさがある。

Bath et al. (2006) はセラフィールドの地下水環境の形成プロセスを次のように推定している。

- ・淡水 (エリア中央部の深度 350m 付近が典型) は完新世に涵養した水である。
- ・淡水-汽水 (深度 700m 付近に局所的に分布) は酸素水素同位体組成が寒冷環境を示し、おそらく更新世後期のものである。
- ・基盤岩中の塩水は天水起源で 1 万~200 万年前の水である。この塩分の供給源は、第三紀の侵食を受ける前に、堆積盆側の高塩水を起源として上位の堆積岩から移動してきたものと考えられる。
- ・海側深部の高塩分水 (ブライン) は 200 万年以上前のおそらく第三紀に涵養した天水が、海側にある岩塩を溶解して形成された。
- ・これらの水の間を漸移帯は、エリア中央部の淡水-汽水と塩水との間は厚さ 20-30m しかないシャープなものだが、ブラインと基盤岩中の塩水との間の漸移帯の幅は 500m あり、この漸移帯での溶存物質の混合は ^{36}Cl データからみて最近 150 万年以内に始まったようである。

セラフィールドにおける地下水調査結果をまとめると図 3.2-20 のようになる。

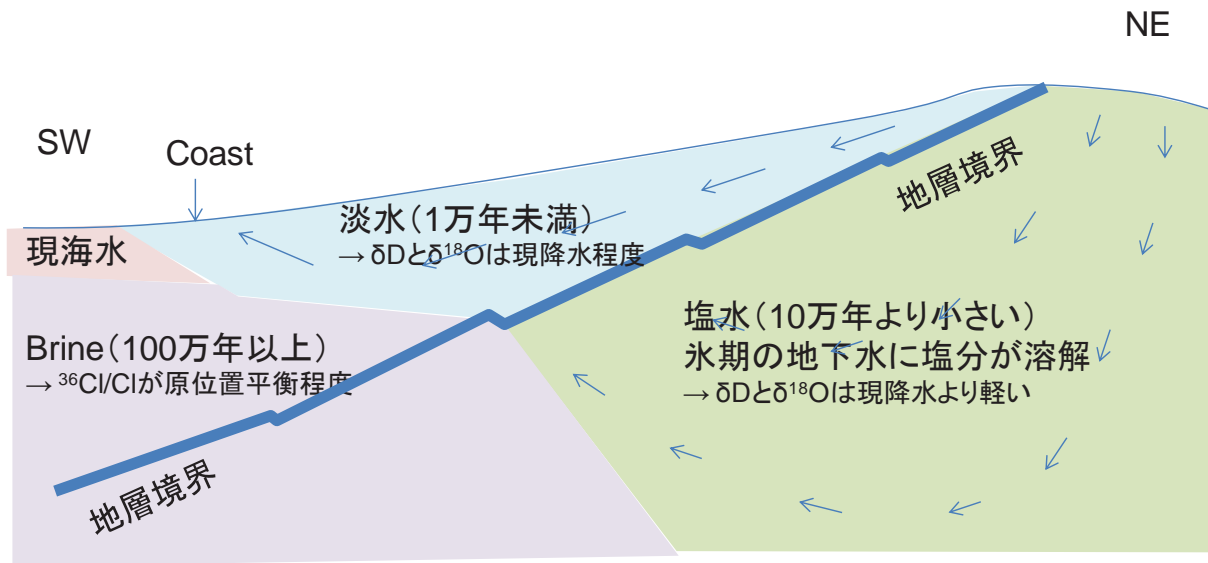


図 3.2-20 セラフィールドにおける地下水年代分布の概念図

地化学指標に基づいた地下水流動評価のうち塩分濃度分布 (Bath et al., 2006) は、一見、地層の分布に規制された分布しており、BVG の上に載る Sherwood Sandstone 層群 (SSG) には完新世にもたらされたとする淡水が浸透し、基盤の BVG には淡水が浸透しないかのように見える。実際、BVG は SSG に比べ浸透率が低い、もし、水質分布が浸透率によって規制されていて、それが完新世にもたらされたとすれば、現海岸であるサイト西方で深部まで (300m 超) 淡水が存在することや、逆にサイト東端で BVG 内に汽水が広く分布する事実が理解し難い。これらの水質分布が、SSG、BVG 内の細かな地質構造に規制されている可能性はあるが、ここで示された地質図、地質断面図のデータでは検証不能である。実際、SSG に属する地層・岩石としては、砂岩、泥岩、頁岩、角礫岩、蒸発岩さらには断層があり、それらは約 1 億年をかけて断続的に堆積・形成されたものである、水理地質的に均質な地質体と見なすことができるのかについては、より詳細なデータの検討を要すると考えられる。日本の地質・地質構造とは異なり、単純・均質な地質分布・構造を示す可能性もある。

当サイトに関しては、隆起・沈降、断層活動、火山・熱水活動等の顕著な活動は認められず、水理地質的条件の変化として考慮する必要はないと考えられる。地下水流動に影響を与える条件としては、海水準の変動・氷河の消長が挙げられる。その影響評価については、Bath et al. (2006) で評価対象とした範囲に限定せず、より広域の地下水流動評価が必要と考えられる。Bath et al. (2006) によれば、高角正断層が多く密集するサイト中央部において、Brine-Saline 境界が大きく落ち込み、最深部は標高-1500m を超える深度に達する。塩分濃度が最も濃い Brine はサイト中央部から南西側の深部にある。氷河による水頭と連続性が良い高角の割れ目が水質分布に影響している可能性が考えられる。

7) エスポ

エスポでの調査結果は Rhén et al. (1997) によってまとめられている。エスポはストックホルムの南約 350km に位置するバルト海沿岸の島である。図 3.2-21 に示すように、一片が約 1km の三角形を呈し、本土側対岸のラクスマールと近接している。地形はなだらかで、島の最高点は標高 14m である。岩盤が地表付近まで分布し、年間を通して流れがあるような河川はない。地下研究所 (HRL) は南のシンペバープ半島からエスポ島南部に至る坑道よりなり、坑道はエスポ島

でらせん状に2回りして深度460mまで下る。

エスポ島の岩盤は1.8~1.7億年前のSamaland-Varmland貫入岩体に属する花崗岩を主とし、岩石タイプとして、エスポドレライト、スモランド花崗岩、緑色岩、細粒花崗岩(後の貫入岩・岩脈)の四つが見られる。地質構造(断層・破碎帯)のパターンには、N-S及びE-W方向の直交する系統と、NEとNW方向の系統の二つがあり、いずれも高角を呈する。これまでに17の破碎帯が確認されている。地表付近は氷礫・砂やピートが分布する部分もあるが、土壌は薄い。この地域を含むスカンジナビア半島は、氷河性アイソスタシーによる隆起運動が特徴的であり、町田ほか編(2003)がその先行研究を紹介している。これらによれば、スカンジナビア半島を覆ったスカンジナビア氷床は、約8,000年前にはほぼ消失し、アイソスタシーにより、隆起(回復)運動が現在も続いている。エスポ付近の7,500年前以降の隆起量は300m程度である。氷床後退期には、液状化跡や低断層崖が多数認められ、大地震も発生したという。

ボーリング孔での水理試験(全層でのフローメーター検層、岩盤部での最小区間3mの透水試験、割れ目部分での透水試験、エアリフト、揚水試験、孔間干渉試験)によって水理特性データが取得された。割れ目帯の部分は高い透水性と連続性を示す透水ゾーン(Hydraulic Conductor Domain)であり、これらのゾーンは地下水環境に大きく影響している。その透水量係数は多くが 10^{-8} ~ 10^{-4} m²/sオーダーで、NE-1は 2×10^{-4} m²/s(透水係数が 10^{-5} m/s)以上と高く、重要な水みちとなっている。岩盤のマトリクス部分(Hydraulic Rock Mass Domain)の透水係数は20mスケールで 1×10^{-8} m/s程度である。

エスポの地下水は塩分濃度によって、①淡水(Non saline)、②汽水(Brackish)、③塩水(Saline)、④高塩水(Brine)の四つに分けられている。地下水タイプは主に起源に基づき、Brine、バルト海水、氷期の地下水、降水の四つに分けられる。Brineは深度350m以深に分布する。

地下水年代測定については、³H、¹⁴C、³⁶Cl、⁴Heが実施されている。ただし、³Hについては掘削水の混入の影響で信頼性が低いとされている。¹⁴Cは深度が数百メートルでも検出されている。ただし、Bath(2005)によれば、¹⁴C濃度が数十pMC以下(1万年以上の¹⁴C年代)では $\delta^{18}\text{O}$ も低下の傾向が見られており、氷期に涵養した地下水が残っていることを示している。³⁶Cl/Clは、エスポの深部の塩水(KAS03:深度860m)やラクスマールの深部のブライン(1,420m深度)では約 40×10^{-15} と放射平衡程度であり、³⁶Cl年代は150万年以上であると推定されるが、KAS03の226mと314mの淡水-汽水では、³⁶Cl/Clは $20 \sim 24 \times 10^{-15}$ であり、古い海水と新しい海水が混合したような形態を示している。⁴He濃度には深度依存性があり、 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ ccSTP/gwの非常に高い濃度が得られている。これに基づいて、複数の方法で⁴He年代を求めている(馬原・長谷川, 2003)。⁴He年代測定では、原位置生成とフラックスの寄与を推定する必要があり、原位置生成は岩石のウラン・トリウム濃度などから計算できるが、フラックスの寄与は地点及び流況に依存する。ここではフラックスをグローバルフラックス程度、拡散係数と濃度勾配から算出、³⁶Cl年代と⁴He濃度の関係から推定の3種類の方法で求め、千年~数百万年程度の地下水年代が得られている。

Laaksoharju(1999)によれば、図3.2-22に示すようにエスポの水質は、第四紀のサイクリックな氷河活動の影響を受けていると考えられおり、最終氷期(約13,000年以上前)には、氷床が1,000m程度まで形成され、深さ数百メートルまで淡水が浸透したと考えられている。ちなみに、エスポの東側に位置するラクスマールでは氷期の淡水の流入の影響で1,000m程度まで淡水化が進んでいる。その後、バルト海は淡水化や海水化を繰り返し、約8,000年~2,000年前までは、バルト海水よりも2倍程度塩分濃度が高かった。このため、密度差による海水の浸入があったと考えられる。エスポが陸化したのは約4,000年前からであり、この影響でエスポ浅部の淡水化が進んだと考えられる。

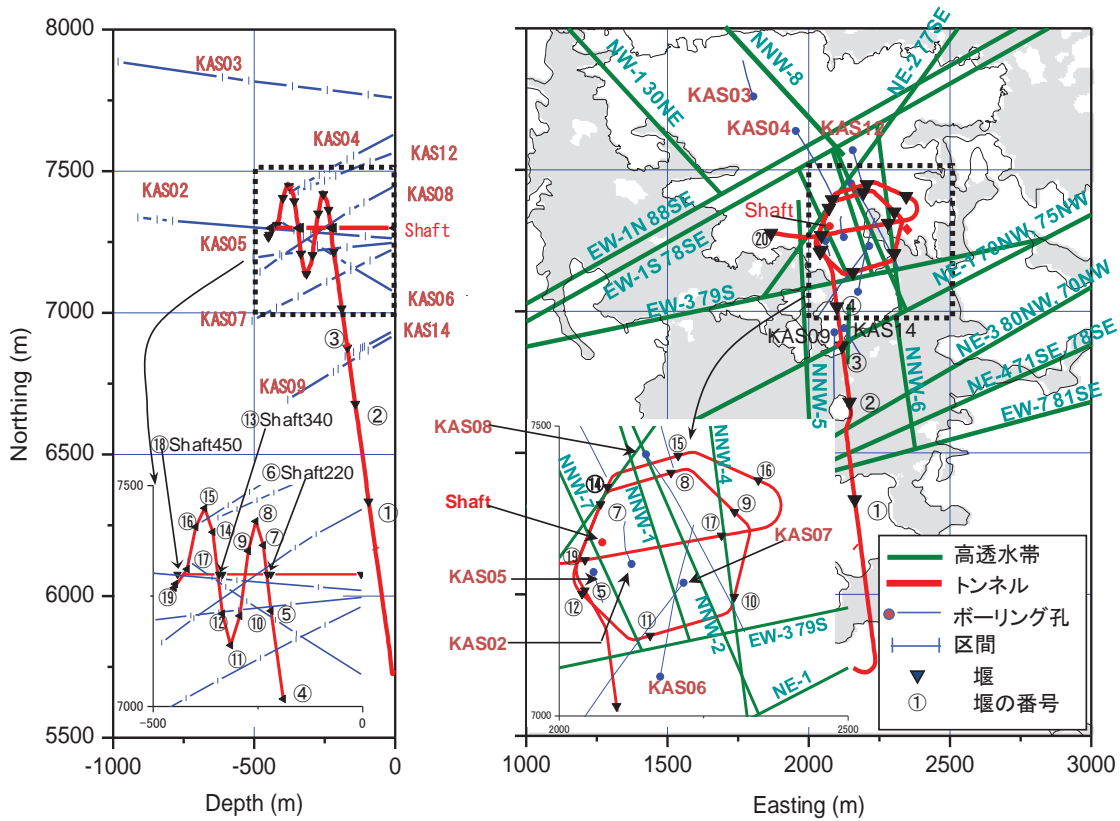


図 3.2-21 Äspö HRL と周辺の高透水帯と水理調査に用いられたボーリング孔及びトンネル (長谷川ほか, 2004)

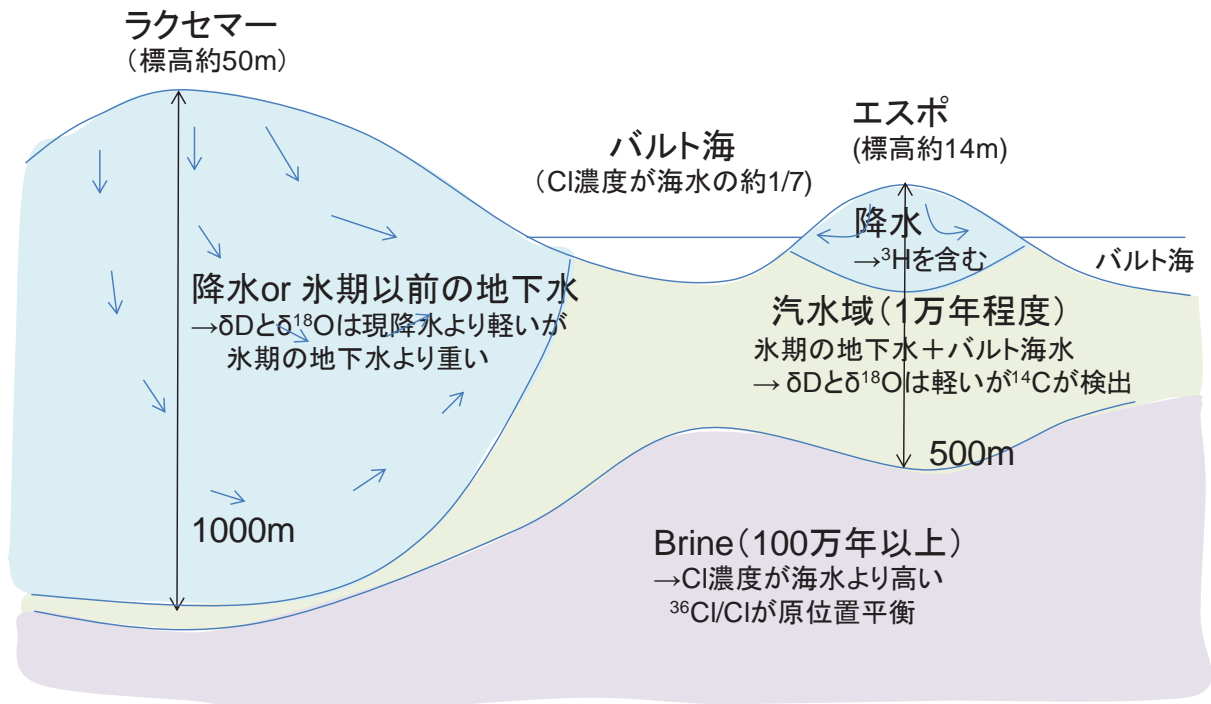


図 3.2-22 エスポ周辺の主要な地下水分布と滞留時間

8) オルキルト

オルキルトは、フィンランド南西部のバルト海に面した 10 km² 程度の島である。オルキルト島は、使用済み燃料の最終処分場の予定地であり、オンカロと呼ばれる地下調査施設が建設され、最終処分に係わる調査や技術開発と実証が進められている。オルキルト島は最終氷期後のアイソスタシーによって 2,500~3,000 年前に陸化し、現在も概ね 6 mm/年で隆起を続けている。島の最大標高は 18 m であり、比較的平坦な地形である (Posiva, 2012)。表層は厚さ 2~5 m の氷礫土や泥炭からなり、岩盤が露出しているところが多い。岩盤は先カンブリア系の片麻岩を主とする結晶質岩からなる。岩盤中には構造運動で形成された断層・割れ目帯が多数分布し、割れ目帯はほぼ鉛直方向のものから水平に近い緩傾斜のものまでである (Posiva, 2012)。

岩盤の水理特性は、主要な水みちとなる水理ゾーンと透水性の低い健岩部と分けて扱われている。割れ目帯のうち透水量係数が 10⁻⁷ m²/s より大きな測定値が得られたものを水理ゾーンとしている。水理ゾーンは透水量係数は大きなもので 10⁻⁵ m²/s である。健岩部の透水係数は、表層の 100~200m は透水性が高く、深くなるほど透水性が低くなる傾向が見られ、全体で 10⁻¹⁰~10⁻⁷ m/s 程度となっている (Andersson et al., 2007)。

地下水水質は、浅部は淡水であるが深度と共に Cl 濃度が高くなり、深部では海水よりも高い Cl 濃度となる。バルト海周辺は、ヴェルム氷期には氷床に広く覆われていた。概ね 2 万年前を境にして急速に温暖化が進行して氷床は融解し、ヨルディア海と呼ばれる塩分濃度の低い浅海となった。その後、バルト海は 8,000~3,000 年前頃にはリトリナ海と呼ばれる高塩分濃度 (現在のバルト海の約 2 倍) の海となり、その後、現在のバルト海水程度まで次第に低下したと考えられている (Posiva, 2012)。オルキルト島の現在の地下水の水質分布にその履歴が反映されている。

地下水年代測定には、トリチウム (³H)、溶存無機炭素の炭素同位体 ($\delta^{13}\text{C}$, ¹⁴C)、塩素同位体 (³⁶Cl)、溶存ヘリウム (⁴He) が使用されている。年代評価結果は以下のようにまとめられる (Pitkänen et al., 1999 ; Pitkänen and Partamies, 2007 ; Gascoyne, 2001)。

³H 濃度から、概ね 150 m 以浅の HCO₃ に富む淡水~汽水は、高いトリチウム濃度であることから 50 年以内の若い地下水と推定された。¹⁴C 濃度から、HCO₃ に富む淡水~汽水の多くは 35~70 pMC を示しているが、方解石の溶解による ¹⁴C の欠乏した炭素の付加を受けているとみられ、本来はより ¹⁴C 濃度の高い若い水と考えられる。深度 200~300 m に分布する SO₄ を含んだ汽水は ¹⁴C 濃度が 20~30 pMC であり、8,000~4,000 年の年代にあたることから、リトリナ海の海水が起源であると考えられる。Cl に富む汽水や塩水では ¹⁴C 濃度が低いことから古い年代に見えるが、方解石の溶解による ¹⁴C の希釈が考えられる水質タイプのため、年代の推定は難しい。⁴He 濃度は、深度とともに濃度が増大する結果が得られたが、深部ほど滞留時間が長いという定性的評価にとどまっている。³⁶Cl/Cl は、表層 200 m 付近までの地下水は高い ³⁶Cl/Cl 値を示すことから地表水の直接の影響や混入が考えられる。一方、500m 以深の Cl に富む汽水及び塩水の ³⁶Cl/Cl は、本サイトの岩石の化学組成を用いて計算した放射平衡値と同程度の値であることから、放射平衡に達しているものと考えられ、地下水年代は 150 万年以上と推定された。また、中間深度 (130~310 m) の SO₄ に富む汽水の ³⁶Cl/Cl は約 4×10⁻¹⁵ の低い値を示し、表層・深部のいずれの地下水とも明らかに異なるため、7,500~2,500 年前のリトリナ海の水が起源であると考えられる。

地下水流動解析では、隆起・海水準変動を考慮した過去 8,000 年間の非定常解析を行っている (Andersson et al., 2007)。塩分濃度の変化を解析した結果、水理ゾーンを通して表層のやや高濃度の水が下方に侵入したことで、浅部が現在再び淡水化したことが表現されている。氷床の影響を評価するため、融解した氷床の底部から最大厚さ 2,000 m の荷重に応じた圧力で氷河融解水の涵養が続く条件で解析すると、1,000 年間で深度 400 m 付近まで浸透する結果となっている。

実際の深部塩水への氷河融解水の侵入深度は 400 m 付近までで、陸化した後の現在の天水の到達深度は 100~150 m 程度となっている。これは、地下水流動解析結果 (Pastina and Heiä, 2006) とも調和的である。

オルキオ島の地下水の区分と地下水環境の変遷は図 3.2-23 のようにまとめられる。最終氷期の末 (11,000 年前頃) には、深部に高濃度の塩水及びその希釈された塩水があり、その上に氷河融解水 (おそらく古い融解水に最終氷期後の融解水が加わったもの) が分布していた。その後温暖期となって淡水の時期を経て、リトリア期には海水が浸透して氷河融解水起源の地下水と混合し (SO₄ タイプの汽水)、その後バルト海の水や陸化後の地表からの淡水が浸透・混合し、現在の地下水が形成された。

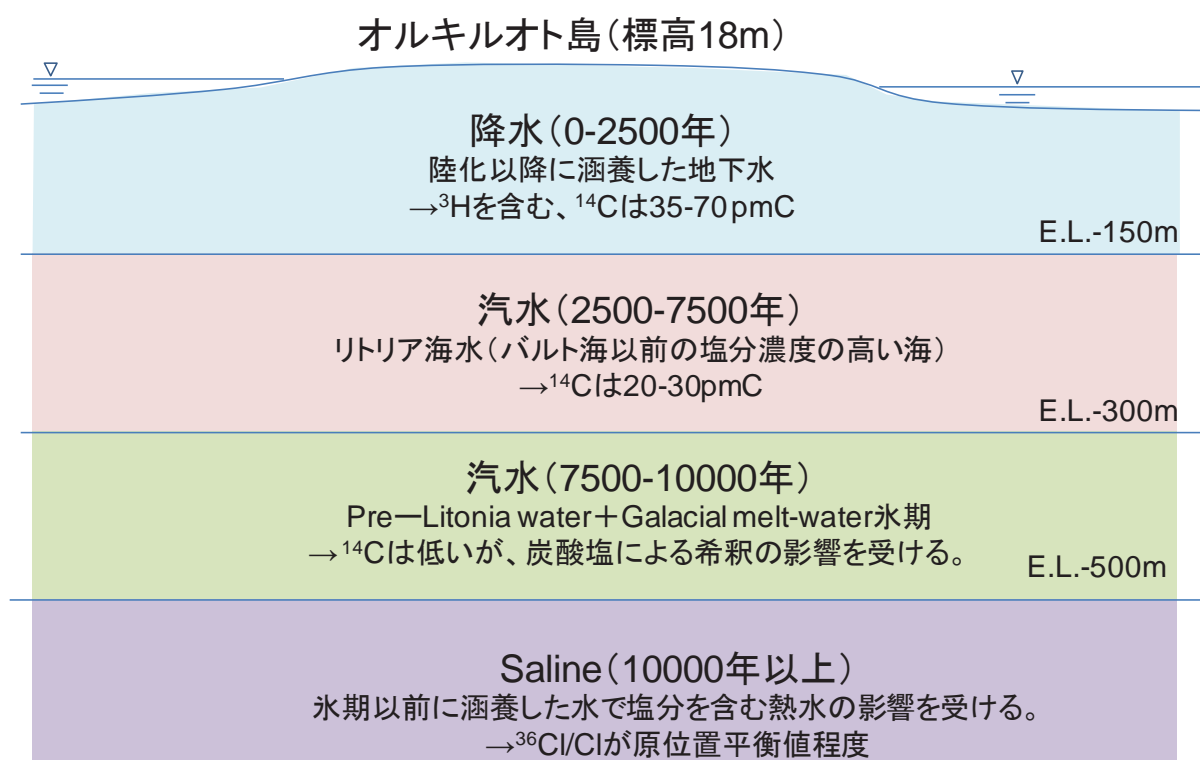


図 3.2-23 オルキオ島の地下水環境の変遷 (Posiva, 2012)

9) 調査事例のまとめ

沿岸域での地下水年代測定結果の調査事例をまとめると表 3.2-1 のようになる。特徴的なのは、主に氷期に涵養した地下水の残留と化石海水の残留が議論されていることである。

氷期の地下水の残存は、国内事例では、幌延、六ヶ所、池島炭鉱、国外事例では、エスポとセラフィールドで議論されている。国内では、海水準変動にともなって陸化するため淡水が沿岸部の海底に残るという例が多く、国外事例では氷期の永久凍土の形成にともない、氷河の融解水が地下に浸透する事例が多い。また、このような海域での淡水の残留は、Post et al., (2013) も示しているように世界のいたる所で報告されている。氷期の地下水の残留は主に水素・酸素同位体比が現在の降水よりも軽いことから説明されており、希ガス温度計を用いて説明した例 (六ヶ所、セラフィールド) や ¹⁴C 年代測定を用いて説明した例 (六ヶ所、エスポ) は限定されている。氷期の地下水の残留は定性的ではあるが、1 万年以上前の地下水が残留していることを示すことから、天然バリア性能の評価においては重要であると考えられる。このため、複数の地下水年代

測定結果から整合的に氷期の地下水が残留していることを示すことが、地下水流動が遅いことを示す上で重要であると考えられる。

化石海水はほぼ全ての事例で議論されている。化石海水の同定は、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ が放射平衡に達していることで説明される場合が多く、あわせて、 ^4He 濃度が高いことで補足するが多い。化石海水の残留は、百万年オーダーでほとんど動いていないことを示しており、天然バリア性能が非常に高いことを示す上で非常に重要であると考えられる。このため、 ^{36}Cl や ^4He など複数の指標を組み合わせてより定量的に化石海水の残留を説明する必要がある。

調査事例から、地下水は流れているというよりも、氷期に涵養した淡水が残留している、あるいは、化石海水のように海水が長期にわたり滞留しているという事例が多く、地質環境の変遷や境界条件の変遷を考慮した評価が必要であることがわかる。

表 3.2-1 地下水年代測定事例のまとめ

サイト	地質	地質構造、水理水文特性	地下水年代測定手法	年代測定の結果、解釈
幌延沿岸域	堆積岩(鮮新統～更新統の泥岩、砂岩)	丘陵・台地で涵養された地下水の流出域	溶存イオン, 酸素水素同位体, ^4He , ^{36}Cl	<ul style="list-style-type: none"> ・^4He 年代では 200 万年、^{36}Cl 年代では 50 万年程度の年代 ・沖積層には比較的新しい地下水、更別層には氷期の地下水、勇知層には堆積時に取り込まれた海水と氷期の地下水が混合している
六ヶ所	堆積岩(新第三紀の砂岩、泥岩)	台地で涵養した水が周囲の河川や湖沼に流出する流動場	溶存イオン, 酸素水素同位体, トリチウム, $^3\text{H}/^3\text{He}$, ^{14}C , ^4He , 希ガス(Kr)	<ul style="list-style-type: none"> ・深度 100m 以浅は最近数十年の水 (トリチウム, $^3\text{H}/^3\text{He}$) ・100-150m は寒冷期の水 (^{18}O)、^{14}C で 2.4 万年 ・Kr の示す温度から 120m 付近が 1.8 万年前の寒冷期 ・50-150m の汽水・塩水は古いもので 7～30 万年(^4He)
横須賀	堆積岩(新第三紀の砂岩、泥岩)	主要な地層は新第三紀の葉山層群と三浦層群であり、海成の堆積岩 山地部から海域に向けて地下水が流動していると想定	溶存イオン, Br/Cl 比, 酸素水素同位体, ^4He , $^3\text{He}/^4\text{He}$, Ne, ^{14}C , ^{36}Cl , $\delta^{37}\text{Cl}$	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水年代は三浦層群で 8,000 年以下、葉山層群で 700 万年程度 ・三浦層群の地下水は主に降水と現海水の混合、葉山層群の地下水は降水と現海水と化石海水の混合で形成
太平洋炭鉱(釧路炭鉱)	堆積岩(上部白亜紀の砂岩・頁岩、古第三紀の砂岩・泥岩、新第三紀の砂岩)	沿岸から海底下に掘削されている炭田 範囲はおおよそ 10km 四方	溶存イオン, 酸素水素同位体比, ^{36}Cl , 希ガス (^4He 濃度, $^3\text{He}/^4\text{He}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$)	<ul style="list-style-type: none"> ・200 万年以前の海水と当時の天水を起源とする淡水との混合で形成された汽水がその後長期間隔離された
池島炭鉱	堆積岩(古第三紀の砂岩)	東西 1.5km、南北 1km の島水没していない第一斜坑の深さ 300m 付近が対象	溶存イオン, 酸素水素同位体比	深度に応じて下記の A～D の 4 つの地下水質タイプ、 A：降水起源、B：降水と海水の混合地下水、C：海水起源、D：化石海水
エスポ	結晶質岩(花崗岩)	約 4,000 年前に陸化した沿岸の島、17 系統の透水割れ目帯がある。	溶存イオン, 酸素水素同位体, トリチウム, ^{14}C , ^4He , ^{36}Cl 二次方解石(^{18}O)	<ul style="list-style-type: none"> ・比較的浅部には氷河起源水 (^{18}O, ^{14}C) ・坑道周辺の様々な起源の水の年代は数千年～数百万年 (^4He) ・深度 860m の塩水の年代は 150 年以上 (^{36}Cl)
オルキルト	結晶質岩(片麻岩)	約 2,400 年前に陸化した沿岸の島、20 系統以上の割れ目帯があり、緩傾斜の割れ目帯は地下水流動に大きく影響している。	溶存イオン, 酸素水素同位体, トリチウム, ^{14}C , ^4He , ^{36}Cl , 二次方解石(^{18}O , U-Th)	<ul style="list-style-type: none"> ・表層 100m の HCO_3 型の水は若い水 (トリチウム, ^{36}Cl) ・その下の SO_4 型の水は 7,000～2,000 年前のリトリナ期の水 (^{18}O, ^{14}C, ^{36}Cl) ・深部割れ目の方解石は 12～29 万年 (U-Th)
セラフィーロ	堆積岩(主に中生代の砂岩、泥岩) 結晶質岩(古生代の火山岩:BVG)	西の海域に向かい堆積層が厚く分布、東端は標高 800m 以上の台地で、地形勾配が流動の駆動力。	溶存イオン, 酸素水素同位体, トリチウム, ^{14}C , ^4He , ^{36}Cl , 希ガス(Ne, Ar, Kr, Xe), 二次方解石(^{18}O)	<ul style="list-style-type: none"> ・平野の淡水・汽水の下にある塩水は寒冷期の水 (^{18}O) ・ブラインの年代は数百万年 (^4He) ・ブラインと BVG 中塩水では 150 年以上 (^{36}Cl) ・方解石の ^{18}O は氷河水の 1,000m の浸透を示す

(2) 沿岸部での調査への地下水年代測定法技術の適用

沿岸部での地下水年代測定の適用結果から、氷期に涵養した地下水と化石海水の残留が最も良く評価されており、地下水の流動性や地質や地下水環境の変遷を評価する上でも、これらを実評価することが重要であると考えられた。

氷期の地下水の残留については水素・酸素同位体比で、化石海水の残留については ^{36}Cl で説明されているが、この他の方法でも説明することで評価結果の信頼性を担保する必要がある。また、氷期の地下水は現在の降水、化石海水は現在の海水との識別が特に重要となるため、これらを識別する方法とそれに付随する調査内容についてここでは説明する。

1) 氷期に涵養した地下水の識別

地下水年代測定法と評価可能な地下水年代を図 3.2-24 に示す。この図から氷期の地下水（数万年程度）と同じ時間スケールを持つトレーサーには、無機 ^{14}C 年代測定法、有機 ^{14}C 年代測定法、希ガス温度計、 ^4He 年代測定などであることがわかる。このため、 δD と $\delta^{18}\text{O}$ とともに、これらの方法を組み合わせて評価することが信頼性の向上を図る上で重要である。

無機 ^{14}C 年代は、地下水に含まれる炭酸を採取し、加速器質量分析器で分析し、含まれるモダンカーボンの量から半減期に基づいて年代を推定する方法である。これまで、炭酸を SrCO_3 もしくは BaCO_3 として捕集して分析する沈殿法が一般的であったが、沈殿法では大気中の CO_2 や薬品による汚染が発生する可能性があるため、ガス化法での実施が好ましい(Nakata et al., in press)。また、無機 ^{14}C 年代測定は、地層中において炭酸塩鉱物の溶解、涵養時の状態（オープン及びクローズ状態）、有機物の溶解など様々な地化学反応を受けて希釈される可能性があるため、これらを実評価できるように、地層内の炭酸塩鉱物や有機物の分析や、涵養状態を推定するために、浅層地層での土壌 CO_2 の調査や ^{14}C や重炭酸の初期濃度、溶存有機物など調査しておく必要がある(Clark and Fritz, 1997)。また、セラフィールドの事例では、掘削水にポリマー泥水を利用したことで、掘削水由来の ^{14}C によって地下水の ^{14}C が汚染され、無機及び有機の ^{14}C 年代測定法を適切に求めることが困難であった。このような掘削時の泥水についても配慮が必要である。

有機 ^{14}C 年代は、地下水に含まれる溶存有機物を採取し、加速器質量分析器で分析し、無機 ^{14}C と同様に年代を推定する方法である。無機 ^{14}C と異なり、地化学反応は受けにくいものの、異なる起源の無機物の混入が問題になる。このため、形態によって起源を区別して評価する必要がある。特に、地盤内に含まれる有機物の混入で地下水の年代が得られない場合がある。また、 ^{14}C の地下水中の有機物の含有量によっては非常に大量の地下水から有機物を収集する必要が生じる。掘削時に有機物を混入すると地下水中の有機物が汚染されるため、ポリマー泥水を使った場合には分析が困難になる可能性が高い。また、掘削水のトレーサーとして、蛍光染料などを入れた場合も、蛍光染料は有機物のため汚染される可能性が高い(Nakata et al., 2013)。

希ガス温度計は、温度によって溶解度が数～数十%変化するXe、Krなどを対象に溶存量を実評価する。空気の混入が濃度に大きな影響を与えるため、これらにあわせて、He、Ne、Arなどの計測を行う。特に正確な濃度分析が必要となるため、脱ガスを可能な限り抑制して地下水を採取する必要がある。また、涵養温度と地史とを結びつけるには、古気候を地質調査などから復元したり、アイスコアの δD や $\delta^{18}\text{O}$ と比較したりする必要がある。

He年代測定は、地層内に含まれるウラン・トリウムの変換にともなうHeの生成に基づいて、蓄積量から年代を実評価する方法である。 ^4He の蓄積速度は、地層内に含まれるウラン・トリウム量、岩石の密度、間隙率に依存するため、これらの調査もあわせて必要である。また、Heは地層内で発生するだけでなく、外部からの流入があることが知られている。外部からの流入を実評価するには、より深部の地層内での濃度分布を把握して流入量の実評価や $^3\text{He}/^4\text{He}$ に基づく起源の実評価

が必要である。地層から生成する $^3\text{He}/^4\text{He}$ の評価には、地層中の中性子フラックスとリチウム量の評価が必要である。

最後に、氷期に涵養した地下水の識別では、最近涵養した現降水かを識別することが重要になるため、浅部の地下水についても、水素・酸素同位体比、有機・無機 ^{14}C 年代、希ガス温度計を調査し、新しい地下水と氷期に涵養した地下水とを識別できるようにしておく必要がある。

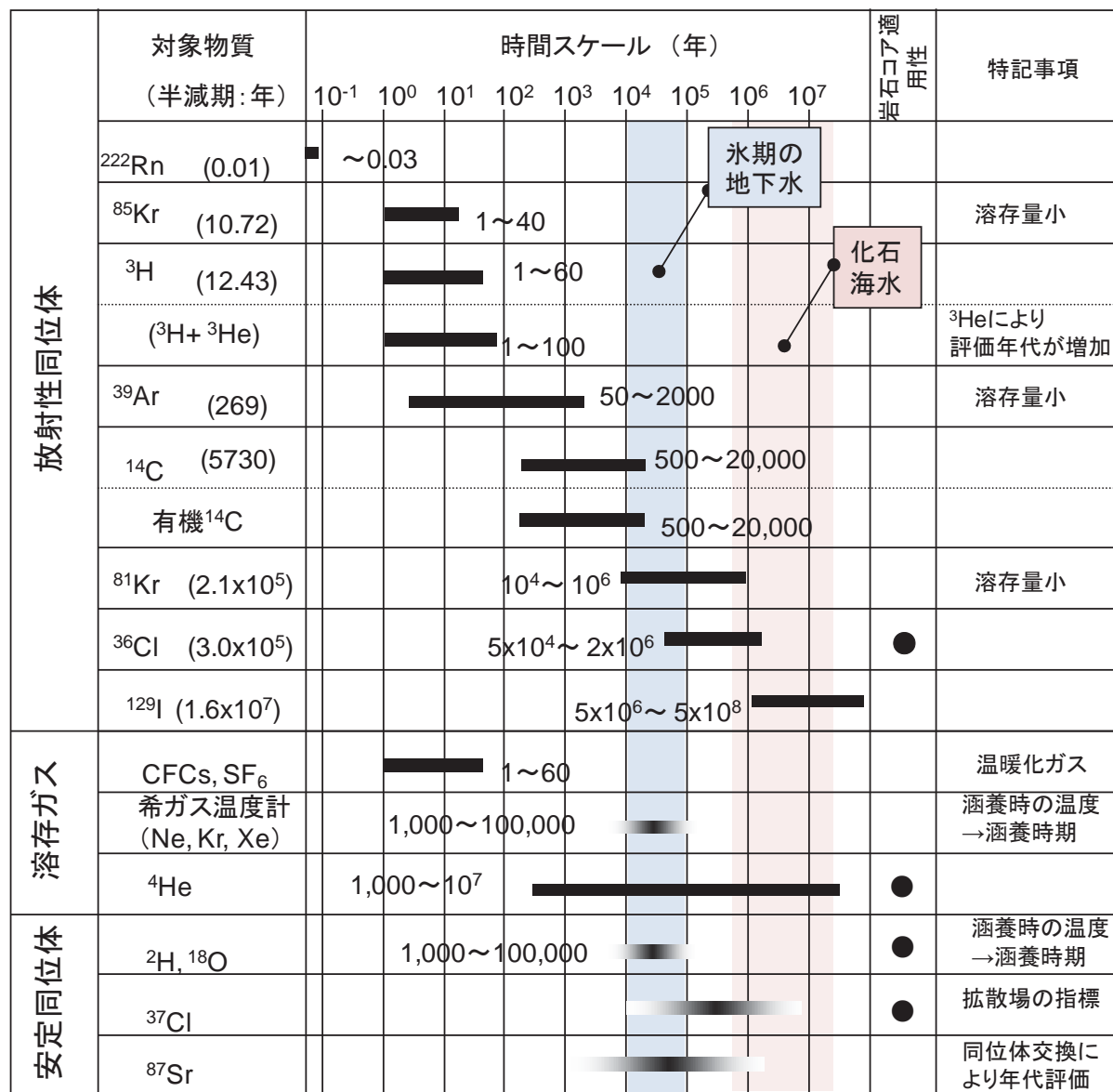


図 3.2-24 地下水年代測定法と評価可能な時間スケール

2) 化石海水の同定

化石海水の同定については、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ が放射平衡値に達しているかどうかに基づいて評価が実施されている。 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ では、半減期の 3 倍程度までの評価が可能であるとすると最大で 100 万年程度までの評価が可能である。100 万年程度経過した場合、平衡値と実測値との差は 10%程度であり、測定精度が 10%程度のため、この程度が限界である。 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ の放射平衡値は、岩石の物性や含有物質に基づいて自発核分裂や $\alpha\text{-n}$ 反応による中性子生成速度を求め、これに基づいて、 ^{36}Cl

の生成を計算する必要があるが、計算過程で様々な仮定が入る。このため、複数の地点で計算値と計測値を比較し、整合性を検討しておく必要がある。

化石海水の妥当性を確認する方法としては、同じ時間スケールを評価できる方法として、 ^{81}Kr 、 ^{129}I 、 ^4He があげられる。 ^4He が最も良く用いられるが、前述のように ^4He 年代測定は He の起源や外部からのフラックスが十分に評価できず半定量的な評価となっている場合が多い。このため、前述のようにフラックスを評価するために深度プロファイルの評価や $^3\text{He}/^4\text{He}$ による起源の評価が必要である。このため、馬原・長谷川 (2003) が実施しているように、フラックスを同定するために深度プロファイルや拡散係数の把握、その他の指標との相関性の確認が必要になる。深度プロファイルの評価には評価深度よりもより深部の調査が必要になるため、対象地点よりも十分に深い深度の調査が必要となる。調査地点が深くなると、コア採取時に圧力解放による脱ガスの影響を受けやすくなるのでサンプリング方法についても工夫が必要である。

^{81}Kr は半減期が 210,000 年の放射性物質である。 ^{81}Kr については、Lehman et al., (2003) がオーストラリア大鑽井盆地で適用した際には従来非常に大量の地下水(約 10m^3)から Kr を抽出する必要があった。化石海水が残留しているような地層から、大量の地下水を採取することは困難なため、適用は困難であった。近年、Chen et al., (1999) により ATTA 法 (Atom trap trace analysis: 特定の同位体の原子をレーザートラップで捕獲してカウントする方法) が開発され、その後、少ない量での分析を目指して開発が行われている (Lu and Mueller, 2010)。より少ない地下水量で分析が可能となれば、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ を補足する情報となりうる。

^{129}I は半減期が約 15,700,000 年と非常に長く、非常に長い年代の推定に有効であると考えられる。ただし、数百万年オーダーの化石海水の場合、初期値からの減少量が 10%程度にとどまり、初期値への依存性が高くなるため、初期値の推定が重要になる。ただし、初期値は、海水では $^{129}\text{I}/\text{I}=1.5\times 10^{-12}$ といわれているが、環境や起源に依存するため評価が難しく、現状では年代を過大に評価するケースが多いようである (Mahara et al., 2013)。

化石海水の識別では、沿岸域では化石海水を含むような地層では、移流でなく拡散が支配的であると考えられる。沿岸域では、長期にわたり海退するため、化石海水を残留するような地層の上に淡水がのるような状況が発生する可能性が高い。このような場合、透水性の高い地層では、氷期の地下水によって入れ替わるが、低透水の地層では浅部の塩水が拡散によって輸送されると考えられる。海水と降水では、 Cl 濃度や δD や $\delta^{18}\text{O}$ が有意に異なるため、このプロファイルの変化から、拡散の影響や拡散が始まってからの時間など、環境変化の情報も得ることが可能となる。このような環境の変化にともなう拡散の発生と、その分布から拡散時間を推定する取り組みは、主に粘土質な岩盤を対象として Mazurek et al., (2011) によってまとめられている。日本周辺の沿岸域では、海水準変動による環境の変動が明確なため、このような時間変動と拡散によるプロファイルの変化から、拡散が支配的であることや拡散時間を評価することができる可能性がある。

最後に、化石海水が残留するような地層では、地下水を採取することが困難である。このため、コア間隙水を用いて地下水を採取するには、圧縮抽水法 (木方ほか, 1999 ; 中田ほか, 2006)、リーチング、交換法 (馬原ほか, 2002 ; 中田ほか, 2007 ; 2008) を用いるとともに、これらの高度化が必要である。

3) 地下水年代測定の適用方法と課題

文献調査結果に基づいて想定した沿岸部での典型的な地下水年代の分布を図 3.2-25 に示す。沿岸部では、陸域の地下水が流れている領域、海域の現海水が流入している領域、氷期の地下水が残留している領域、化石海水が残留している領域に区分されると考えられる。地下水が流れて

いる領域は概ね 0～数万年程度、海底下で現海水が浸入しているのは 0～数千年であると考えられる。これは、海水準変動の周期的変動で海退の期間が 10 万年程度であるのに対して、海進期間は 2 万年以下と短く、沿岸付近では数千年程度しか海水化しないと考えられるためである。氷期の地下水は、海退の間に地下水が浸入する領域で数万年オーダーになると考えられる。滞留時間の短い氷期の地下水は、現海水に入れ替わると考えられる。化石海水は堆積時など、地層中に地下水が地層中に獲得されてから、ほとんど流れない領域である。

処分対象とする領域は化石海水部分が最も良いと考えられる。これは、化石海水部分は地下水流動が遅く、過去何回かの海水準変動を受けても淡水化しなかった領域であり、環境が変わっても地下水が動かなかつた実績があることになる。氷期の地下水の領域は、数万年の滞留時間があるものの、海退時には地下水が流れる領域となる。ただし、海進によって地下水が入れ替わっておらず、現在海退期であることから、塩水化する可能性は低い。淡水環境が維持されるため、人工バリア性能や核種の移行抑制は海水環境よりも良いと考えられる。現海水が存在する領域は、数千年程度の滞留時間となる上に、海水環境のため条件が悪いと考えられる。

地下水年代調査では、天然バリア性能の高い、氷期の地下水と化石海水を識別するための調査をする必要がある。このため、地形や地質などから、現在だけでなく海退時の地下水流動を想定し、処分施設の上流と下流、浅部、深部の地下水状態を把握するように調査を実施する必要がある。理想的には、化石海水だけでなく、氷期の地下水や現海水の分布状態も把握できるように調査を実施することが望ましい。また、現在の降水と氷期の地下水、現海水と化石海水との識別ができる様に、浅層ボーリングや海上ボーリングなどを実施する必要がある。

サンプリングは、ボーリング孔による採水だけでなくコアによる調査を実施する必要がある。これは特に化石海水の領域では地下水流動が遅く採水が困難であること、化石海水と淡水、化石海水と氷期の地下水の境界には、濃度プロファイルが作成されている場合があり、この分布が把握できれば、拡散による輸送が支配的であることや拡散時間、すなわち淡水化した時間などが把握できるためである。

評価では、海水準変動によって現海水や氷期の地下水が形成されるため、これらを再現できるように、海水準変動を考慮した地下水流動・物質移行解析によって、塩分濃度や滞留時間を再現する必要があると考えられる。過去の履歴を考慮した地下水流動モデルの妥当性を示すことによって、将来予測の妥当性も示すことができると考えられる。

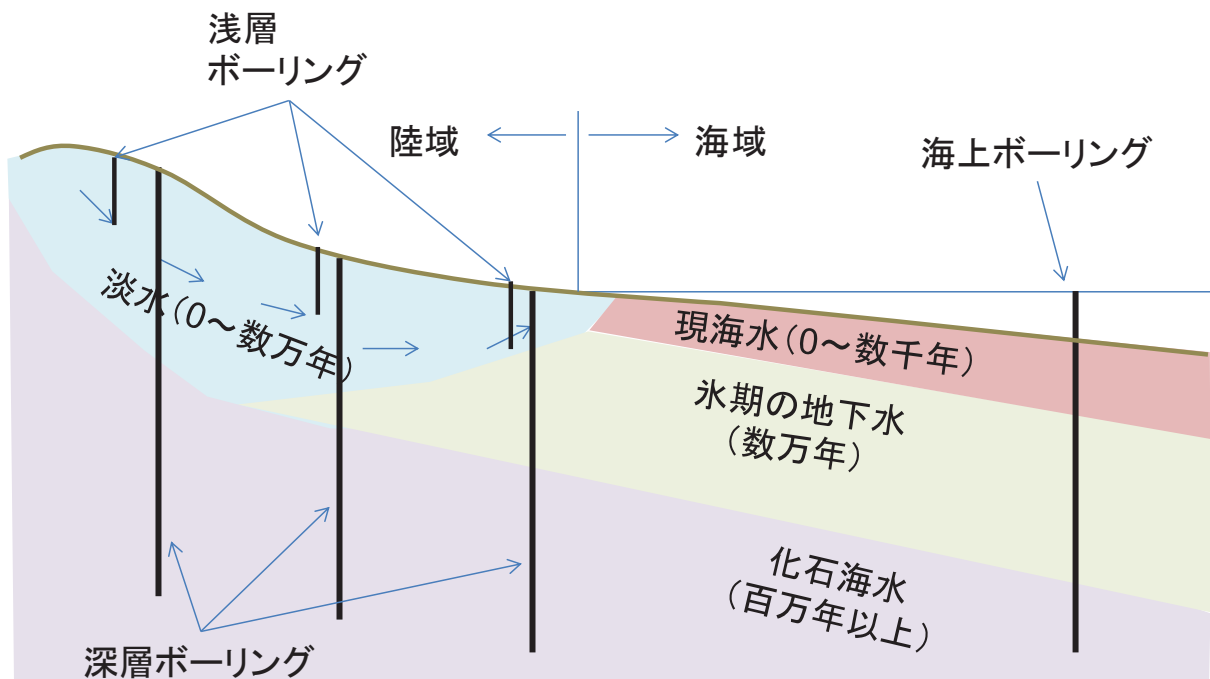


図 3.2-25 沿岸域で想定される地下水の滞留時間分布

また、化石海水の存在、地下水年代を地質学的に検証することで、地下水の安定性に関わる議論ができる可能性がある。沿岸部の事例ではないが、中田ほか（2016）は、幌延町の内陸部において、中新統中新統～鮮新統堆積岩類中の地下水の年代測定を実施した。この研究では、中新統堆積岩類の中で、地層の堆積年代と調和的な ^4He 年代ならびに堆積年代よりも新しい年代を得ており、これを隆起・沈降や断層運動などの変遷を経ても、当該地層堆積時に層中に保持された地下水の一部があまり移動していない可能性を示すと解釈した。その一方で、酸素同位体比は、稚内層で一部の地下水が拡散等により降水起源の地下水の影響を受けた可能性を示すとした。一般に、地層が地下水を獲得する時期は、地層の堆積時の他、陸化し侵食された後に水面下に没するなど、地史的なイベントの時であると考えられる。したがって、地下水年代測定結果と地史イベントを結びつけることができれば、地下水年代測定技術の有力な検証材料となると期待され、地質学的検証が課題の一つとしてあげられる。検証のためには、検証する測定法がカバーする年代範囲に即した地層内での測定が必要となる。地層処分で数百万年オーダーの滞留の可否が求められるとすれば、中新統～鮮新統堆積岩類の分布域を研究対象とすることが望ましい。また、氷期に堆積した地層中の氷期に取り込まれた地下水の検討をするのであれば、今回取り上げた地域の中では幌延沿岸部のような長期にわたって堆積が続いている地域での検討が地質年代の観点からは一番わかりやすいと思われる。

3.2.3 海底地下水湧出探査に関する調査

(1) 海底地下水湧出現象と探査方法の整理

1) 海底地下水湧出の既往探査概要

沿岸域の海底から地下水が湧出する現象は、数多く報告されている。我が国における沿岸での地下水を起源とした海底湧水の検討は、1990年代から2000年代に多くの探査が精力的に行なわれた（Taniguchi and Fukuo, 1993；Marui, 1997；徳永ほか, 2001；張・佐竹, 2002 など）。海底から湧出する水が淡水であれ塩水であれ、水の起源の評価が必要なため、塩分や温度などの原位置での計測のほか、採水し水質や同位体など水の起源につながる分析も行なわれている。海底

湧水が陸域から海域へ流動する地下水である際には、海底湧水の定量的評価が必要となる。このため、湧出量の原位置計測も行われている。2000年以降に適用された計測方法は、連続型熱供給式湧出測定法（谷口・岩川, 2001）、SGD フラックスチャンバー法（萩原ほか, 2003）などがある。ただし、湧出が広範囲に分布する場合は、すべてを評価することは困難なため、側点の代表性や、陸域の水収支の整合性を確認しつつ、現実的な湧出量評価を行う必要がある。

2) 沿岸調査における海底地下水湧出探査の位置付け

沿岸における地層処分において、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して、さらには安全評価の上で重要なものとなる（図 3.2-26）。海底地下水湧出探査は、沿岸の地下水流動調査の一環として行われるべき調査であり、体系的な調査に位置付けられるべきである。電力中央研究所（2008）が行った海底地下水湧出探査技術高度化調査では、この観点から沿岸の調査における海底地下水湧出探査の概念を示している（図 3.2-27）。海底地下水湧出がどのような沿岸でも存在するとは限らないため、まず湧出の可能性を検討することが必要とされる。具体的には、沿岸で必ず行われる地質構造調査や水理調査から得た情報から海底地下水湧出の可能性を検討することが可能である。例えば、陸域から連続する帯水層の海域で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ため、地質構造調査から可能性のある領域を絞り込むことができる。サイドスキャンソナーによる海底地形調査では、地下水の湧出によって生じたすり鉢状の窪地のほか、湧出地下水からの遊離ガス（遊離ガスは音波をよく反射する）の分布や湧出水による温度変化（音波の伝播速度が変化し揺らぎとして見える）箇所が検知される可能性がある。

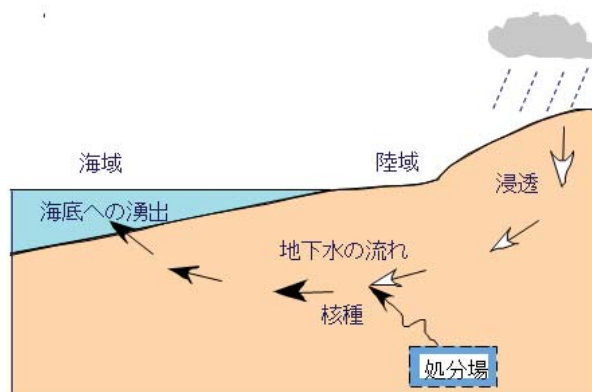


図 3.2-26 沿岸陸域・海域調査における海底地下水湧出探査の位置づけ

また、沿岸の水理調査（水収支調査）から、海域への地下水としての流出が想定される場合もある。以上のように沿岸で行われる一般的な地質調査や水理調査は、海底地下水湧出の可能性と湧出領域の程度絞込みに役立つと考える。

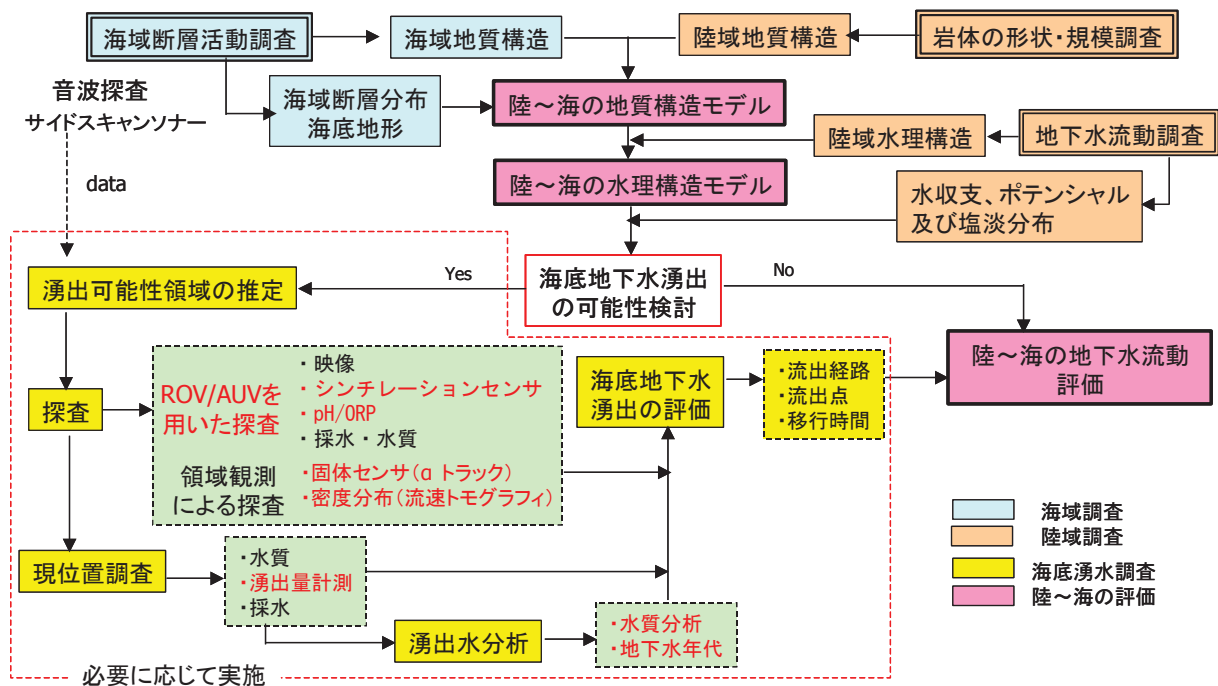


図 3.2-27 沿岸陸域・海域調査における海底地下水湧出探査のフロー

3) 海底地下水湧出探査の手順

海底地下水湧出の可能性がある場合、そのための調査を展開する。この調査は広域を対象とする調査（広域海底地下水湧出探査）と絞り込まれた領域での調査（狭域海底地下水湧出探査）の2段階で行うことが合理的である。以下に広域海底地下水湧出探査と狭域海底地下水湧出探査について述べる。

(a) 広域海底地下水湧出探査

観測船からサイドスキャンソナー、サブボトムプロファイラーを曳航し、広域的に探査する。現在では、無索水中ロボット AUV (Automatic Underwater Vehicle) にこれらの機器を搭載して、より簡単に海底地形や地質構造を広範囲に調査することも可能である。

(b) 狭域海底地下水湧出探査

上記(a)よって海底地下水湧出の可能性が高い領域を絞り込んだ後、その箇所での精査を実施する。海底地下水湧出の可能性を示唆された領域にダイバーや ROV (Remotely Operated Vehicle) を投入し、視覚と各種計測機器によって海底湧出水の有無を確認する。この調査では、定点での計測や採水が必要であり AUV などの移動体では難しい。

4) 海底地下水湧出探査のための計測機器

海底地下水湧出探査ならびに湧出水の性状調査においては、海水中に湧出する地下水を捉える必要がある。換言すれば水中で水の湧出を捉える必要があり、陸上の目視で行う湧水調査に比較して格段に難しい。このため、海底地下水湧出探査においては、海水と地下水との水質の違いを利用する(図 3.2-28)。一般的には湧出地下水は海水と比較し塩分が低く、溶存酸素濃度も低い。また、ラドンが溶存する。海水と比較し温度や pH が異なる場合もある。これらの水質の相違点を明らかにする方法として、原位置計測が可能な機器を以下に示す。

(a)塩分と温度

CT計：Conductivity と Temperature を計測。Conductivity から塩分を換算する。

密度トモグラフィ：塩分または温度が海水と異なる場合、音の伝搬速度が変化し、この変化の領域をマッピングすることで、地下水の湧出域をマッピングする。

(b)溶存酸素濃度

ORP計：地下水の酸素濃度は海水に比較して低いと考えられることから酸化還元電位も低いことが期待できるため ORP 計が検知に適用できる可能性がある。

(c)ラドン

シンチレーションセンサ：固体プラスチックシンチレーターなどを用いて原位置の計測が可能である。

(d)採水と室内分析

採水器：湧出水の水質や年代測定をラボで実施するために湧出水のサンプリングを実施する。サンプリングツールはダイバーや ROV で運搬し、使用する。

なお、(a)では海底に湧出する地下水が化石海水であることを想定していないが、化石海水と海水との区別は(b)~(d)の情報で判断する。

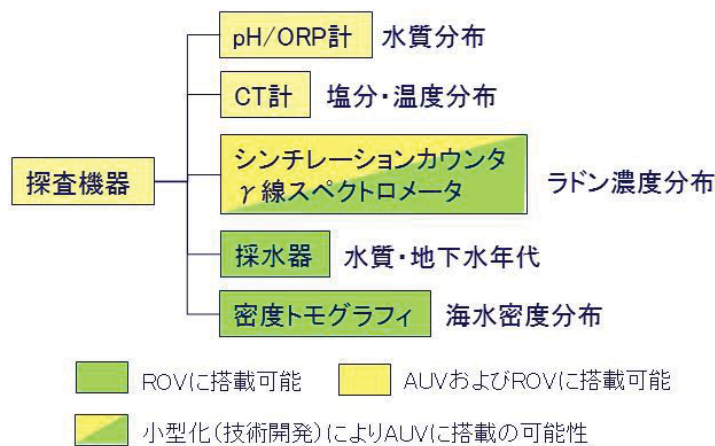


図 3.2-28 湧出地下水の探査方法と搭載プラットフォーム
(※ここでは REMUS100 クラスの AUV への搭載を想定している)

(2) AUV による探査手法と探査機器

1) 探査プラットフォームとしての AUV

海底地下水湧出探査において海底を寸刻みに採水調査することは現実的には困難であり、陸域の調査と同様に、ある程度の合理性を持って探査することが必要である。その方法のひとつは前述した海域や陸域の地質構造調査や水理調査の結果に基づいた調査地域の絞り込みである。さらには、絞り込んだ領域を均質な調査精度で行い、採水等が必要な領域にさらに絞ることで、より合理的で系統的な探査方法となりうる。その具体的な方法として、AUV による海底の二次元的な調査を提案したい。AUV はケーブルがなく、ひとたび航行スケジュールをインプットすると自律的に海底面を一定間隔で走査航行することが可能である。この AUV に湧出地下水を検知可能な機器を搭載すれば、合理的で均質な精度の調査が可能である。この方法で海底地下水湧出の可能性のある箇所を絞り込むことができれば、ダイバーや ROV による詳細な調査や採水も無駄なく行うことができる。AUV については、近年様々なものが開発されている。探査深度が深くなるほど大型となり、多数のセンサーを搭載することが可能である。我が国の例では海洋研究開

発機機構が探査深度 3,000m～3,500m 級の大型 AUV を開発している。これらの機器は空中重量も 900kg～8,000kg まであり、調査海域までクレーンのある船舶で輸送することが必要である。より簡便な取り扱いが可能な AUV として、600m よりも浅い深度の調査に用いられる AUV を表 3.2-2 に示す。このうち汎用型として普及し商業的にも成功しているの REMUS100 である。REMUS100 はウッズホール海洋研究所で開発された小型・軽量・長距離潜航型の AUV で、これまでに世界中 100 台以上が実用機として稼働しており、海域の環境モニタリング、水中捜索、機雷掃海などで適用され最も実績がある。また、REMUS600、アクアエクスプローラ 2、トライドックは REMUS100 が搭載できないカメラやサブボトムプロファイラーを取り付けての運用が可能であり、海底地下水湧出探査に必要とする計測機器の取り付けにおいて裕度が高いと考えられる。

表 3.2-2 自律型無人探査機 (AUV) の技術状況 (探査深度 600m 以浅)

機体名称 メーカー	REMUS10	REMUS600	アクアエクス プローラ 2	トライドック	淡深
所有者	電力中央研究所 防衛省	防衛省	KDDI	東大生産研	琵琶湖研他
大きさ	1.6m×φ0.19m	3.25m×φ0.34m	3.0m×1.3m ×0.9m	1.85m×0.58m ×0.53m	2m×0.75m× 0.75m
空中重量	37kg	240kg	260kg	170kg	180kg
探査深度	100m	600m	500m	100m	150m
稼働時間	20 時間	70 時間	24 時間	2.5 時間	12 時間
搭載観測 機器	<ul style="list-style-type: none"> ・CTD 計 ・サイドスキャンソナー ・蛍光濁度計 ・溶存酸素計 ・ADCP 	<ul style="list-style-type: none"> ・CTD 計 ・サイドスキャンソナー ・サブボトムプロファイラー 	<ul style="list-style-type: none"> ・3 軸直交型磁気センサー ・水中テレビカメラ ・ストロボ高度ソナー ・前方障害物探査ソナー ・ドップラーソナー ・バラストリリーサー ・部位リリーサー ・ラジオビーコン 	<ul style="list-style-type: none"> ・ドップラーソナー ・ジャイロ ・カメラ ・レーザー測距装置 ・深度計 	<ul style="list-style-type: none"> ・ビデオカメラ ・CTD 計など ・水中顕微鏡

「堀田 (2013) (海洋分野における国家基幹技術検討委員会 資料) から抜粋・加筆」

2) AUV 搭載の探査機器

(a) ナビゲーション

AUV には基本的な仕様としてはじめから搭載されている機器と後から艤装として搭載可能な機器がある。このうち基本仕様として最も重要なのはナビゲーションのための機器である。例えば、REMUS100 では ADCP/DVL (Acoustic Doppler Current Profiler/ Doppler Velocity Log) と、D-GPS (Differential Global Positioning System) のポジショニングによる推測航法と LBL (Long Base Line) 航法を組み合わせたハイブリッド航法を採用している。D-GPS によるポジショニングは、一定区間の潜航航行と浮上を繰り返し、浮上時に位置確認と修正をする。測位精度測位精度は 1m 以下である。ポジショニングの誤差の大部分は自然の流速によって生じており、AUV の巡航速度に比較して流速が小さい場合は、大きな誤差が生じない。LBL 航法はトランス

ポンダ(音波発信源)を予め GPS などによって位置を既知とした 2~4 箇所の海底に固定するか、浮きと錘によって固定し、AUV 自身から音信の応答をトランスポンダーから得て相対距離を測定し、自己の位置を決定する。この際、個々トランスポンダーと AUV の距離を十分とったほうが、AUV の位置精度が高くなる。LBL の誤差は伝搬時間の測定誤差、音速誤差、音波の屈折、トランスポンダー/AUV の位置誤差などの積算であり、海象条件によっても異なる。

(b) サイドスキャンソナー

汎用の AUV にはサイドスキャンソナーが標準として搭載されているものが多く、その目的は海底地形を把握するためのものである。サイドスキャンソナーの計測では、一般的に船舶からケーブルでトランスジューサーが取り付けられたプラットフォームを曳航して行う。原理はプラットフォームから超音波を送信し、海底で散乱された音波の後方散乱強度を画像化するものである。サイドスキャンソナーの音波の周波数は 5kHz~500kHz 程度であり、周波数が高くなるほど減衰が著しく到達距離が短くなるが、分解能は高くなる。AUV のサイドスキャンソナーは、海底に近接し、その高度と姿勢も保持して観測するため、波風などの海象の影響を受けることなく、曳航式に比較して高分解能の音響映像がえられることが特徴である。図 3.2-29 に示した例は、REMUS100 を用いて、鹿児島湾の若尊(わかみこ)カルデラ内の溶岩ドームの海底地形とそのサイドスキャンソナーによる映像である。サイドスキャンの映像にはドーム斜面の小石の分布やドームから生じた気泡が映像として捉えられている。海中における気泡はサイドスキャンソナーの音波を良く反射するため、海底から地下水が湧出する際に、遊離したガスを捉えることが期待できる。

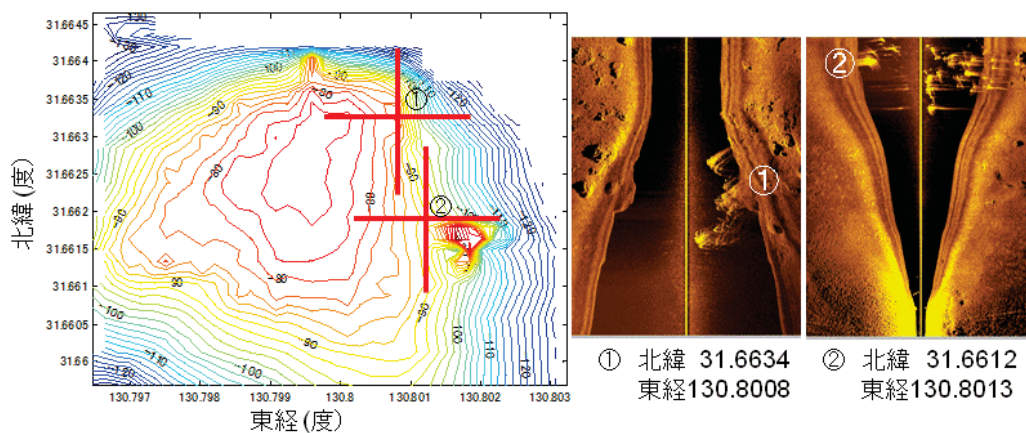


図 3.2-29 AUV による海底地形(左)とサイドスキャンソナーの音響映像(右)
海底地形の①、②箇所で音響映像が撮影された。海中に立ち上がる弧状の映像は気泡である。

(c) CT 計

CT 計は海域環境などを観測する AUV には計測機器として搭載されていることが多い。一般的には CT とともに深度 (Depth) も同時に計測するため CTD 計として搭載されている。AUV に搭載して走査 (スキャン) した場合は、海底面における塩分の分布データの取得が可能で、海水と海底地下水との塩分や温度の違いから地下水の湧出個所が捉えられる可能性がある。図 3.2-30 に示した例は、AUV を海底地形に沿って航行させ、搭載された CTD 計によって温度と塩分を観測したものである (Maeda et al., 2015)。上げ潮時と満潮時の温度と塩分の違い、また地形による違いが詳細に捉えられている。

(d)その他の AUV へ搭載可能な計測機器

AUV に搭載可能で海底地下水湧出探査に適用の可能性がある計測機器についてここでは示す。例示に当たっては RRMUS100 への搭載事例があるもの、もしくはサイズや重量から搭載可能なものを示す。括弧内は製造会社である。

- ① 溶存酸素計： OXGEN Optode (AANDERAA)
- ② クロロフィル-a および濁度計測：ECO Pucks (WET Labs)
- ③ pH/ORP 計：ガラス電極製 pH/ORP 計 (AMT)

クロロフィル-a および濁度による海底湧出地下水の探査事例はないが、地下水に含まれるミネラルによる植物プランクトンの増加や、湧水による底泥の巻き上げで濁度が上昇する可能性を考慮してのことである。RRMUS100 への搭載方法は OXGEN Optode と ECO Pucks は AUV 内部に設置し、電源は AUV のバッテリーを利用することが可能である。pH/ORP 計は電極が海水の経過する箇所に置く必要があるため、ノーズコーンに設置する。このため計測用のバッテリーもノーズコーン内に設置する必要がある (図 3.2-31, 表 3.2-3)。

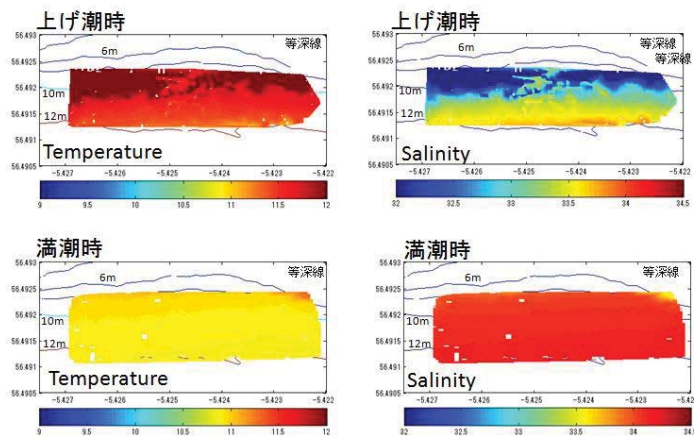


図 3.2-30 AUV による海底面近傍における温度と塩分の分布

表 3.2-3 RRMUS100 に搭載が可能な計測機器

計測項目	測定範囲		感度		取り付け箇所
クロロフィル 濁度計 (ECO Pucks)	470nm (照射光)		ウラニン換算濃度による		AUV 内部
	0.1NTU～ 250NTU	0.07～175 度	0.01NTU	0.05 度	
溶存酸素 (OXGEN OPTODE)	0～500μM	0～120%	<8μM	<5%	AUV 内部
Ph	0～14 pH		0.1 pH		ノーズコーン
ORP	±2000mV		±1mV		ノーズコーン

NTU : Nephelometric turbidity units. 1 NUT=0.7 度と仮定



図 3.2-31 RENU100 への探査機器の設置例

(3) 海底地下水湧出探査への AUV の適用と課題

海底の探査において AUV にはケーブルなどの拘束するものがなく海中を自由に航行できる特徴を有する。このため、適切な地下水の湧出を探査可能なセンサーを搭載すれば海域を面的に探査可能な航路や海底地形の起伏に合わせた航路とすることで、調査領域内で均質な探査が期待できる (図 3.2-32)。この AUV での探査により、地下水湧出の可能性のある領域が抽出することができた場合、原位置でのさらなる水質の計測や採水を行う必要があり、ダイバーもしくは ROV による作業が必要である。

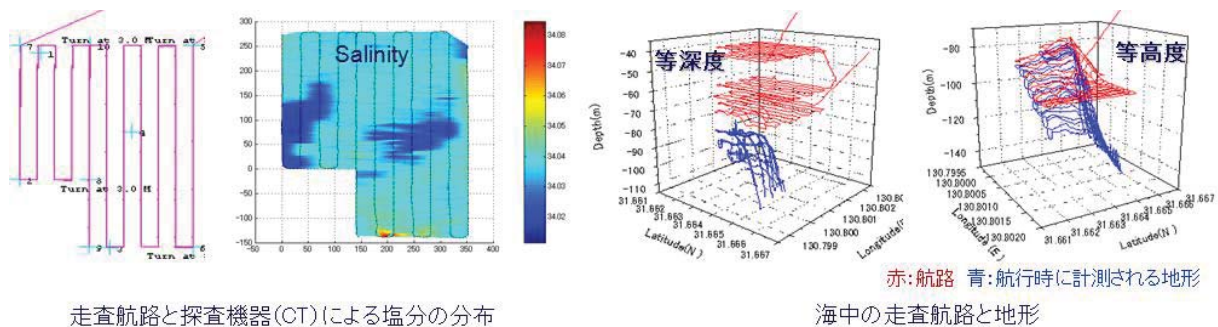


図 3.2-32 AUV による海底地下水湧出の設定航路の例

また、AUV の適用にあたっては、以下の点が課題として考えられる。

(a) 搭載計測機器の応答速度

AUV に搭載した計測機器の応答速度には一定の限界があり、AUV の航行速度が速すぎる場合や海水による希釈効果が大い際は地下水の湧出箇所を経過しても応答しない可能性がある。

(b) AUV の位置同定

AUV は D-GPS ならびに LBL の推測航法で正確な位置同定が可能である。しかしながら、D-GPS による位置同定は AUV が浮上した際のみ有効であり、海中での航行の際に早い海流があった場合は位置精度が低下する。また、LBL の場合も、海底から立ち上げたロープにトランスポンダーを固定しても海流が早い場合は流れによる動揺で、数 m の位置のずれが生じる。

(c) 海底地形の影響

海底の起伏が 45 度以上ある急崖の場合は AUV でも、一定の深度を保持して近接することが困難で、均質な調査が難しい。

これらは実際に AUV による海底地下水湧出の適用がなされたことがないため、机上で憂慮された課題である。実際の AUV の運用でこの課題の本質を見極めることが必要であり、AUV による海底地下水湧出探査への適用が求められる。

3.2.4 まとめ

地下水年代測定に関する調査では、沿岸域で実施された調査結果を取り纏めた。この結果、氷期に涵養した地下水や化石海水の存在を議論されていることが多かった。氷期の地下水は、主にヨーロッパの沿岸域で見つかっており、主に水素・酸素同位体で評価され、無機 ^{14}C 年代測定で補足されていることが多い。一方で、化石海水は国内の沿岸域で見つかっており、主に $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ で評価されることが多く、 He の定性的な結果で補足されることが多い。今後の調査でも、氷期の地下水の残留や化石海水の残留を説明することが、地下水の安定性を示す上で重要であると考えられるため、複数の結果からこれらを説明することが重要であると考えられる。氷期の地下水については、水素・酸素同位体比と無機 ^{14}C 年代だけでなく、有機 ^{14}C 年代測定、希ガス温度計など、化石海水については、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ と ^4He だけでなく、 $^{129}\text{I}/\text{I}$ や ^{81}Kr の適用を含めて、開発を行っていく必要がある。化石海水の場合には、地下水の採取が困難なため、コア試料を含めた採取方法を適用し、採水結果を補完していくことが重要である。また、海水準変動など環境の変化を考慮した地下水流動・物質移行解析を行い、塩分濃度や滞留時間の分布を説明することが、将来の変化を予測する上でも重要であると考えられた。さらに、化石海水が地層中に閉じ込められた時期、すなわち、地史的な説明をすることで、地下水年代測定の信頼性向上が図れると期待される。

海底の探査においては AUV が海中を自由に航行できることから、適切な地下水湧出を探査可能な機器を搭載すれば、海底面を均質な精度で探査することが可能である。一方で、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箇所を経過しても応答しない可能性がある。このような課題は AUV 実際の運用を通して検討して行くことが必要であり、AUV による海底地下水湧出探査へ適用が求められる。

参考文献

- 秋元和實, 内田英一, 尾田太良, 三浦半島南端の中一後期中新世三崎層産底生有孔虫群集による古環境復元, 月刊地球, Vol.13, pp.24-30, 1991.
- Andersson, J., Ahokas, H., Hudson, J., Koskinen, L., Luukkonen, A., Löfman, J., Keto, V., Pitkänen, P., Mattila, J., Ikonen, A. T. K. and Ylä-Mella, M., Olkiluoto site description 2006. POSIVA 2007-03, 2007.
- Bath, A., Geochemical investigations of groundwater stability, *SKI Report 2006:12*, 2005.
- Bath, A., Richards, H., Metcalfe, R., McCartney, R., Degnan, P. and Littleboy, A., Geochemical indicators of deep groundwater movements at Sellafield, UK, *Journal of Geochemical Exploration*, 90, pp.24-44, 2006.
- Chen, C. Y., Li, Y. M., Bailey, K., O'Connor, T. P., Young, L. and Lu, Z. -T., Ultrasensitive isotope analysis with a magneto-optical trap, *Science*, 286, pp.1139-1141, 1999.
- 千々和一豊, 崎戸・松島炭田, 日本地方地質誌 8 九州・沖縄地方, 日本地質学会編, 朝倉書店, pp.81-82, 2010.
- 地質調査所, 100 万分の 1 日本地質図 第 3 版, CD-ROM 版, 2003.
- 地質環境の長期安定性研究委員会編, 地質リーフレット 4, 日本列島と地質環境の長期安定性, ISSN 2185-8543, 日本地質学会, 2011.
- 張 勁, 佐竹洋, 富山湾における海底湧水, *海洋と生物*, Vol.141, pp.294-301, 2002.
- Clark, P. U., Dyke, A. S., Shakun, J. D., Carlson, A. E., Clark, J., Mitrovica, J. X., Hostetler, S. W. and McCabe, A. M., The Last Glacial Maximum. *Science*, 325, pp.710-714, 2009.
- Clark, I. and Fritz, P., *Environmental Isotopes in Hydrogeology*, CRC Press LLC, 327p, 1997.

- 電力中央研究所, 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:岩盤中物質移行評価技術高度化開発—海底地下水湧出探査技術高度化調査—) 報告書, 2008.
- 電力中央研究所, 平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 (地層処分共通研究:岩盤中物質移行評価技術高度化開発—地下水年代測定技術調査—) 報告書, 2013.
- 江藤哲人, 矢先清貫, 卜部厚志, 磯部一洋, 横須賀地区の地質,地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 1998.
- Gascoyne, M., ³⁶Cl in Olkiluoto groundwaters: Evidence for intrusion of Litorina seawater. Posiva Working Report 2001-20, 2001.
- 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を試み, 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.
- 長谷川琢磨, 中田弘太郎, 近藤浩文, 五嶋慶一郎, 富岡祐一, 後藤和幸, 柏谷公希, 地下水年代測定による現海水と化石海水の同定 —三浦半島西部沿岸ボーリングへの地下水年代測定法の適用—, 電力中央研究所, N10008, 22p, 2010.
- 長谷川琢磨, 中田弘太郎, 近藤浩文, 五嶋慶一郎, 富岡祐一, 後藤和幸, 柏谷公希, 水質・地下水年代を利用した地下水流動評価法の高度化 —三浦半島西部沿岸を対象とした地下水流動・物質移行解析—, 電力中央研究所, N10017, 23p, 2011.
- 長谷川琢磨, 田中靖治, 馬原保典, 五十嵐敏文, Aspo Hard Rock Laboratory 建設にともなう地下水流動変化に着目した解析モデルの検証, 土木学会論文集, N.o.757/III-66, pp.189-202, 2004.
- 服部仁, 井上英二, 松井和典, 5 万分の 1 地質図幅「神浦」及び説明書 (地域地質研究報告), 地質調査所, 126 p, 1999.
- 堀田平, 海洋立国日本とその鍵となる 国家基幹技術:海洋研究開発機構 海洋分野における国家基幹技術検討委員会 (第三回) 説明資料 資料 2, 2013.
- Ikawa, R., Machida, I., Koshigai, M., Nishizaki, S. and Marui, A., Coastal aquifer system in late Pleistocene to Holocene deposits at Horonobe in Hokkaido, Japan, *Hydrogeology Journal*, Vol. 22, pp.987–1002, 2014.
- 猪原芳樹, 大山隆弘, 鳥越祐司, 帯磁率による下北半島東部の鷹架層の地質構造に関する検討, 応用地質, Vol.49, No.3, pp.139-149, 2008.
- 海上保安庁, 海底地形図「浦賀水道」, 海上保安庁, No.6363-1, 2000.
- 海上保安庁, 海底地形図「相模湾」(復刻版), 海上保安庁, No.6363-5, 2007.
- 蟹江康光, 岡田尚武, 笹原由紀, 田中浩紀, 三浦・房総半島新第三紀三浦層群の石灰質ナノ化石年代および対比, 地質学雑誌, 97, pp.157-169, 1991.
- 木方建造, 大山隆弘, 馬原保典, 圧密型岩石抽水装置の製作と深部堆積岩への適用, 応用地質, Vol.40, No.5, pp.260-269, 1999.
- 小池清, 南関東の地質構造発達史, 地球科学, Vol.34, pp.1-16, 1957.
- 国土地理院, 数値地図 50m メッシュ (標高) 日本-I, CD-ROM 版, 1997.
- 国土地理院, 数値地図 50m メッシュ (標高) 日本-II, CD-ROM 版, 1997.
- 近藤浩文, 木方建造, 五嶋慶一郎, 長谷川琢磨, 浜田崇臣, 大山隆弘, 鈴木浩一, 後藤和幸, 末永弘, 中田弘太郎, 田中姿郎, 長岡亨, 窪田健二, 土宏之, 三和公, 村元茂則, 河野一輝, 伊藤久敏, 高レベル放射性廃棄物等の処分地選定のための概要調査技術に係わる実証研究 (その 2) —沿岸域堆積軟岩地点における地質環境モデルの構築と地表物理探査手法の検証—, 電力中央研究所報告, N11038, 30p, 2011.

- 近藤浩文, 鈴木浩一, 長谷川琢磨, 五嶋慶一郎, 吉村公孝, 村元茂則, 高レベル放射性廃棄物等の処分地選定のための概要調査技術に係わる実証研究—地質環境条件に応じた掘削・孔内調査・試験手法の適用性と課題—, 電力中央研究所報告, N15, 117p, 2012.
- 近藤浩文, 鈴木浩一, 長谷川琢磨, 濱田崇臣, 吉村公孝, 地層処分地選定のための地質環境調査技術の実証研究 調査段階に応じた地質環境モデルの構築と調査手法の適用性検討, 地質学雑誌, Vol.120, pp.447-471, 2014.
- Laaksoharju, M., Tullborg, E.-L., Wikberg, P., Wallind, B. and Smellie, J., Hydrogeochemical conditions and evolution at the Aspo HRL, Sweden, Applied Geochemistry, 14, pp.835-859, 1999.
- Lehmann, B. E., Loosli, H. H., Isotopes Formed by Underground Production, In: Pearson, F.J.(Eds), Applied Isotope Hydrogeology- A Case Study in Northern Switzerland, Studies in Environmental Science, Elsevier, 439 p r, 1991.
- Lehmann, B. E., Love, A., Purtschert, R., Collon, P., Loosli, H. H., Kutschera, W., Beyerle, U., Aeschbach-Hertig, W., Kipfer, R., Frapet, S. K., Herczeg, A., Moran, J., Tolstikhin, I. N. and Gröning, M., A comparison of groundwater dating with ^{81}Kr , ^{36}Cl and ^4He in four wells of the Great Artesian Basin, Australia, Earth and Planet. Sci. Lett., 211, pp.237-250, 2003.
- Lu, Z. T. and Mueller, P., Atom trap trace analysis of rare noble gas isotopes, Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics (BERMAN, P., ARIMONDO, E., LIN, C., Eds), Elsevier, 2010.
- Maeda, Y., Shitashima, K. and Sakamoto, A., Mapping observation using AUV and Numerical study of leaked CO_2 diffusion in sub-seabed CO_2 release experiments. International Journal of Greenhouse Gas Control, 38, pp.143-152, 2015.
- 町田 洋, 大場忠道, 小野 昭, 山崎晴雄, 河村善也, 百原 新 編, 第四紀学, 朝倉書店, 336p, 2003.
- 馬原保典, 岩石コアを用いた地下水年代測定の試み (その 1) , 電力中央研究所報告報告, U01035, 12p, 2002.
- 馬原保典, 長谷川琢磨, スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル廃棄物処分のための国際共同研究 (その 7) —溶存 He 濃度と放射性塩素同位体比($^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$) を組み合わせた地下水年代測定法の新たな提案—, 電力中央研究所報告, U02040, 20p, 2003.
- 馬原保典, 河西基, 垣内弘幸, 五十嵐敏文, 佐伯明義, 地球化学的手法を用いた地下水流動調査法の提案—六ヶ所サイトにおける地下水流動特性の把握—, 電力中央研究所報告, U95044, 58p, 1996.
- 馬原保典, 中田英二, 化石海水の同定手法の提案—太平洋炭鉱における地下水水質・同位体分布と ^{36}Cl 測定による地下水年代評価—, 電力中央研究所報告, U03019, 15p, 2003.
- Mahara, Y., Ohta, T., Tokunaga, T., Matsuzaki, H., Nagao, K., Nakata, E., Miyamoto, Y., and Kubota, T., Pore-water mobility: Distribution of d^{37}Cl , $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$, $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ and dissolved ^4He concentration in the core drilled in the Mobarra gas field, Japan, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 294, pp.597-601, 2013.
- Marui, A., Submarine groundwater discharge possibility of opening up new resources. J. Japan. Ass. Hydrol. Sc.27, pp.85-94, 1997.
- 松島炭鉱株式会社池島鉱業所鉱務課, 池島鉱業所の坑内水について. 九州炭礦技術連盟会誌, 16(1), 24-30, 1963.
- Mazurek, M., Alt-Epping, P., Bath, A., Gimmi, T., Niklaus Waber, H. and Buschaert, S.,

- Cannière, P.D., Mieke De Craen, M., Andreas Gautschi, A., Savoye, S., Vinsot, A., Wemaere, I. and Wouters, L., Natural tracer profiles across argillaceous formations, *Applied Geochemistry*, 26, pp.1035-1064, 2011.
- 三梨 昂, 三浦・房総半島の地質構造と堆積構造 I 層序概説, 日本地質学会第 75 年年会地質見学案内書, pp.4-13, 1968.
- 長浜春夫, 5 万分の 1 地質図幅「釧路」および同説明書, 北海道開発庁, 53p, 1962.
- 長岡信治, 九州における第四紀の氷河性海面変化と気候変化の影響, 日本の地形〈7〉九州・南西諸島, pp.298-301, 2001.
- 中田英二, 末永弘, 大山隆弘, 野村時定, 市原義久, 閉鎖後の堆積岩海底下坑道での再冠水速度に関する調査, 電力中央研究所報告, N07042, 22p, 2008.
- 中田弘太郎, 長谷川琢磨, 涵養温度を指標として用いる地下水年代評価法の提案, 電力中央研究所報告, N10036, 14p, 2011.
- 中田弘太郎, 長谷川琢磨, 東原知広, 地下水年代測定評価技術の開発 (その 1) - 地下水年代測定のためのコア間隙水中希ガス抽出技術の確立と適用 -. 電力中央研究所報告, N05065, 20p, 2006.
- 中田弘太郎, 長谷川琢磨, 大山隆弘, 地下水年代測定評価技術の開発 (その 5) - 岩石間隙水における同位体比評価のための同位体交換法の開発 -, 電力中央研究所報告, N06034, 18p, 2007.
- 中田弘太郎, 大山隆弘, 東原知広, 長谷川琢磨, 橋川貴史, 地下水年代測定評価技術の開発 (その 6) - 低透水性岩盤における地下水抽出法の提案 -, 電力中央研究所報告, N07012, 16p, 2008.
- 中田弘太郎, 長谷川琢磨, 大山隆弘, 幡谷竜太, 笹本広, 石井英一, 宮川和也, 幌延地域における地下水年代と地質年代・地史の比較検討, 日本原子力学会 2016 年春の年会, 1E13, 2016.
- Nakata, K., Kodama, H., Hasegawa, T., Hama, K., Iwatsuki, T., and Miyajima, T., Groundwater dating using radiocarbon in fulvic acid in groundwater containing fluorescein, *Journal of Hydrology*, Vol.489, pp.189-200, 2013.
- Nakata, K., Hasegawa, T., Iwatsuki, T. and Kato, T., Comparizon of ^{14}C collected by precipitation and gas-strip methods for dating groundwater, *Radiocarbon*, in press.
- 日本地質学会編, 日本地方地質誌「北海道」, 朝倉書店, 631p, 2010.
- 日本原燃, 低レベル放射性廃棄物の次期埋設に関する本格調査結果について, 33p, 2006.
- Nirex, Nirex 97: An Assessment of the Post-closure Performance of a Deep Waste Repository at Sellafield, Volume 1: Hydrogeological Model Development - Conceptual Basis and Data. Nirex Science Report S/97/012, 1997a.
- Nirex, Nirex 97: An Assessment of the Post-closure Performance of a Deep Waste Repository at Sellafield Volume 2: Hydrogeological Model Development - Effective Parameters and Calibration. Nirex Science Report S/97/012, 1997b.
- 小野雅弘, 塩手康之, 田中和広, 飯島幸夫, 中田英二, 離島海底下の地下水特性, 日本地質学会学術大会講演要旨 113, pp.264-264, 2004a.
- 小野雅弘, 田中和広, 嶋田純, 大山隆弘, 飯島幸夫, 長崎県池島炭鉱における地下水の同位体特性, 日本応用地質学会平成 16 年度研究発表会講演論文集, pp.125-128, 2004b.
- 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 繰上広志, 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, 幌延地層研究所計画における地上からの調査研究段階 (第 1 段階) 研究成果報告書一分冊「深地層の科学研究」-, JAEA-Research, 2007-044, 2007.
- 太田陽子, 三浦半島 - 断層地塊と海成段丘, 日本の地形〈4〉関東・伊豆小笠原, 東京大学出版

- 会,pp.142-149,2000.
- 大山隆弘, 猪原芳樹, 長岡亨, 地下岩盤の地化学環境調査・評価技術の開発, 六ヶ所サイト試験空洞周辺岩盤の酸化還元状態と将来予測, 電力中央研究所報告, N07001,22p, 2007.
- Pastina, B. and Hellä, P., Expected evolution of a spent nuclear fuel repository at Olkiluoto (revised). POSIVA 2006-05, 2006.
- Pitkänen, P., Luukkonen, A., Ruotsalainen, P., Forsman, H.-L. and Vuorinen U., Geochemical modelling of groundwater evolution and residence time at the Olkiluoto site. POSIVA 98-10, 1999.
- Pitkänen, P. and Partamies, S., Origin and implications of dissolved gases in groundwater at Olkiluoto. POSIVA 2007-04, 2007.
- Posiva Oy, Olkiluoto site description 2011. POSIVA 2011-02, 2012.
- Post, V.E.A, Groen, J. Kooi, H., Person, M., Ge,S. and Edmunds, W.M., Offshore fresh groundwater reserves as a global phenomenon, Nature, Vol.504, pp.71-77, doi:10.1038/nature12858, 5 December 2013.
- Rhén, I., Backbom, G.(ed), Gustafson, G., Stanfords, R., and Wikberg, P., Äspö Hard Rock Laboratory. Geoscientific evaluation 1997/2. Results from pre-investigations and detailed site investigations. Summary report. SKB TR-97-03, 1997.
- 産業技術総合研究所, 沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発,平成 24 年度成果報告書,2013.
- 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,「基盤的調査観測対象断層帯の追加・補完調査」成果報告書, No.H17-1, 2006 (http://jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/tsuika_hokan/h17_sarobetsu.pdf, 平成 28 年 3 月 14 日最終閲覧)
- 下山正一, 木下裕子, 宮原百々, 田中ゆかり, 市原季彦, 竹村恵二, 旧汀線高度からみた九州の後期更新世地殻変動様式,地質学雑誌,Vol.105, pp.311-331, 1999.
- 末永弘, 中田英二, 沿岸海底下堆積岩における空洞掘削ともなう地下水理への影響, 電力中央研究所報告,N07043, 18p,2008.
- 鈴木毅彦, 関東における丘陵の形成, 日本の地形〈4〉関東・伊豆小笠原,東京大学出版会, pp.308-313, 2000.
- 高橋雅紀,三浦半島,関東地方(日本地方地質誌3), 日本地質学会編, 朝倉書店, pp.187-193, 2008.
- Taniguchi, M. and Fukuo, Y., Conitnuos 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, pp.271-277, 2001.
- 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, 279-287, 2001.
- 富岡祐一, 長谷川琢磨, 大山隆弘, 地化学環境を考慮した ^{14}C 年代補正法の検討—六ヶ所サイトにおける水質形成機構の解明と地下水年代評価—, 電力中央研究所報告, N10005, 25p, 2010.
- 対馬坤六, 滝沢文教, 5 万分の 1 地質図幅「尻屋崎」及び説明書(地域地質研究報告), 地質調査所, 36p, 1977.
- 渡辺満久, 中田 高, 鈴木康弘, 下北半島南部における海成段丘の擁曲変形と逆断層運動, 活断層研究, 29, pp. 15-23, 2008.

3.3 沿岸部の研究に資する基盤情報の整備

3.3.1 はじめに

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 3.3-1)。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。

本システムに、今後実施される沿岸部における情報を追加する際に必要な検討を実施した。

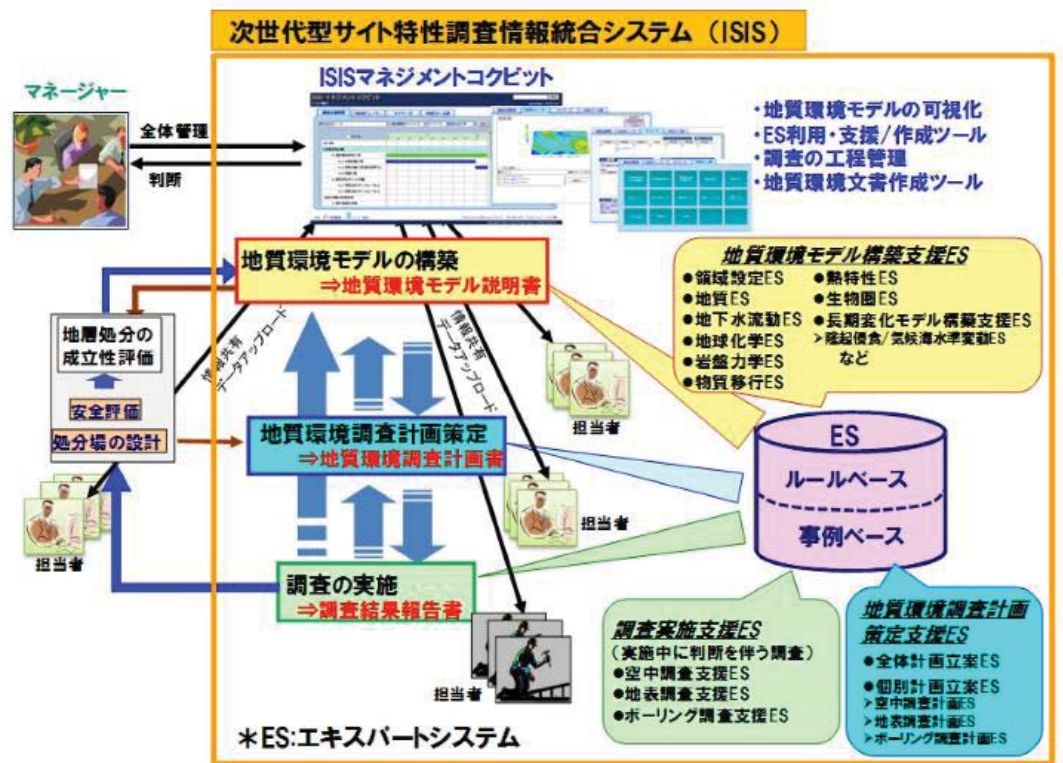


図 3.3-1 ISIS の全体像

3.3.2 既存の知見などの調査

日本原子力研究開発機構及び産業技術総合研究所などの国の関連研究機関では、深地層の研究施設における研究を含む基盤研究の成果や既存情報を活用しつつ、以下などの沿岸部に関連する研究開発を実施してきた。

- ・塩淡水境界形状把握調査（平成 14～18 年度, AIST）
- ・沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発（平成 19～24 年度, AIST）
- ・海域地質環境調査技術高度化開発・確証技術開発（平成 23～27 年度, AIST）
- ・地質環境総合評価技術高度化開発（平成 19～24 年度, JAEA）の一部

上記は、この他に、研究機関独自の研究開発も多く存在する。

また、沿岸部に関わらず、統合版地質文献データベース（通称ジオリス、<https://gbank.gsj.jp/geolis/>）に掲載されている 1945 年～2015 年の地球科学（自然現象や地質環境）に関する論文・資料を収集した。関連する学協会（学会誌）は、日本地質学会、日本応用地質学会、日本温泉科学会、日本海洋学会、日本火山学会、日本活断層学会、日本鉱物科学会、日本古生物学会、資源地質学会、資源・素材学会、日本地震学会、日本水文科学会、水文・水資源学会、石油技術協会、日本堆積学会、日本第四紀学会、地学団体研究会、日本地下水学会、日本地球化学会、日本地形学連合、日本地熱学会、日本地理学会、東京地学協会、物理探査学会、日本陸水学会、陸水物理研究会、日本リモートセンシング学会などである。

データベースから収集した文献は、筆者、文献タイトル、発行年等で列ごとに整理し、フィルターをかける。その結果を以下のように整理している。

- ・文献番号
- ・著者名（日本語、英語）
- ・発行年
- ・論文題名（日本語、英語）
- ・資料名（日本語、英語）
- ・巻、号、頁
- ・発行所（日本語、英語）
- ・インデックス
- ・位置情報

文献整理の総数は 50 万件を超えた（現在のところ重複のチェックが完全でないため、総数は概算）。また、2000～2008 年の論文数が、いずれも毎年 1 万件を大きく超えており、他の年度と比べ大きいことが判明した。

3.3.3 課題と対策案の整理

上述した全ての情報を取り扱うのは現実的ではなく、地層処分事業に特化した取捨選択が必要と考えられる。まずは、位置情報の整理が課題となる。単一的な手法で位置を同定できないことから、内容を解析する方法を構築する予定である。さらに今後、海外誌（海外誌に掲載されたわが国に関する論文）の調査が残されているが、これも含め、現在公表されている文献で科学的有望地の選定や文献調査段階の議論が十分にできると考える。

また、今後、本事業並びに上記の既存情報の整理方法について検討を進めるとともに、ISIS への取り込みについても検討を進める。幌延町の沿岸域において実施された事業について、概要が取りまとめられている（笹本, 2014）。これをベースに、瑞浪及び幌延の深地層の研究施設で得られた成果と対比され、幌延沿岸部特有の事項が抽出されている（日本原子力研究開発機構, 2013b）。

これらについては、判断支援エキスパートシステム（基本計画立案，予察モデル構築など）に反映されている。

今後、本事業や関連事業において取得される新たに得られるデータや情報、特に過去の沿岸域を対象としたプロジェクトにおいてデータ取得や検討が多いとは言えない「沿岸海底下」を対象とした場合の特有の事項等を整理して、ISISに取り込むことをあげることができる。このようなデータの収集状況や調査・検討の状況を踏まえて、ISISに取り込むことを随時実施していく。

3.3.4 まとめ

これまでに蓄えられたわが国の自然現象や地質環境に関わる文献やデータベースは全国斑なくしかも多数（国内学会だけで50万件以上）整備されている。今後、本事業においては、沿岸部に関する既存情報を概括するとともに、それらの既存情報や新たにデータや情報について、ISISへの取り込みについて検討を進める。

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報告書，219p, 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.
- 笹本 広（編），沿岸域プロジェクトー関係機関における議論の内容と得られた成果の概要ー，JAEA-Review 2014-015, 35p, 2014.

4. 沿岸部における工学技術の高度化開発

概要調査段階以降で必須となる工学技術に関する高度化開発では、沿岸部における処分システムの構築を念頭に、既存の知見やデータ等を踏まえて、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関するエンジニアリングを意識した手法の開発が必要となる。

平成 27 年度の事業では、

①沿岸部における地層処分のための工学技術の検討及び関連情報の整理
を行い課題抽出の視点を整理しつつ、次の三つの観点、

②人工バリア材料等を対象とする劣化や変質に関する現象の把握

③グラウト設計及び影響評価技術の開発

④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

について、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を行い、再検討が必要な課題や新規の課題を抽出し、今後達成すべき目標の設定とともに沿岸部に関する今後の研究開発計画を立案している。

上記の①～④に係る本年度の調査や検討等の結果について、4.1 節以降に、得られた成果を整理する。

4.1 沿岸部における地層処分のための工学技術の検討及び関連情報の整理

4.1.1 はじめに

沿岸部における地層処分に際して留意すべき課題の検討に資する調査として、沿岸部に特有となる“課題抽出の視点”を整理する。具体的には、沿岸部での地層処分場の立地を進めている海外事例を対象として、わが国の概要調査段階以降に必須となる技術等に関して先行的に行われた検討、特に技術的観点からの検討や対策等に着目して調査する。これにより、沿岸部に特有となる技術課題の明確化に向けた整理を行う。

現時点において、沿岸部での地層処分場の立地計画が具体化しているものとして、スウェーデン及びフィンランドの計画がある。いずれも使用済燃料を直接処分する計画であり、沿岸部での処分場立地が想定されている（図 4.1-1 参照）。

スウェーデン

- ・処分場立地地域：エストハンマル自治体フォルスマルク
- ・岩種／処分場予定深度：結晶質岩／深度約 500m
- ・事業進展状況：実施主体である SKB 社が 2011 年 3 月に処分場の立地・建設の許可を申請。現在、安全審査が進められており、安全審査に係る放射線安全機関（SSM）から政府への意見書の提出は 2017 年内の見込みであるが、SSM は現時点で、フォルスマルクは放射線安全の観点から適切なサイトであると評価しており、SKB 社の使用済燃料の処分方法についても肯定的な見方をしている。

フィンランド

- ・処分場立地地域：エウラヨキ自治体オルキルオト

- ・岩種／処分場予定深度：結晶質岩／深度約 400～450m
- ・事業進展状況：実施主体である Posiva 社が 2012 年 12 月に処分場の建設許可を申請。安全規制機関である放射線・原子力安全センター（STUK）は、2015 年 2 月に申請に対して肯定的な意見書を政府に提出し、2015 年 11 月に政府が建設許可を発給している。

スウェーデンで計画されている処分場レイアウト

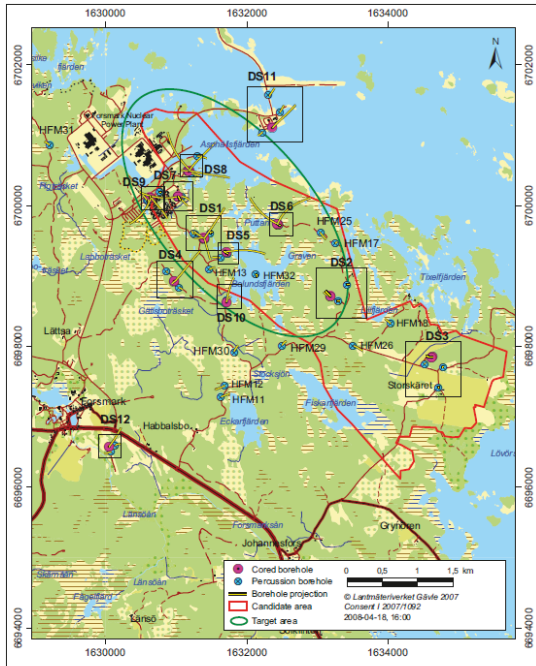


Figure 4.5. The Forsmark candidate area with the target area in the north-western part (ringed in green) and the location of the drill sites (Figure 11-1 in the Site description Forsmark).

図出典：(SKB, 2011) より

フィンランドで計画されている処分場レイアウト

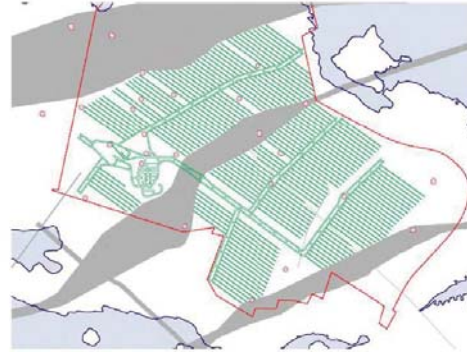


Figure 3-6. The current reference layout (green). Grey areas are not suitable for deposition tunnels based on Rock Suitability Classification (RSC). Red ovals denote respect distances to drillholes. Red line surrounding the repository shows the area reserved for the repository in urban planning.

図出典：(Posiva, 2012a) より

図 4.1-1 沿岸部で計画されている地層処分場のレイアウト

本節（4.1 節）では、これらの両国において、沿岸部に特有となる技術的事項に関して、どの様に課題が認識され、どの様な対応が検討されてきたかといった観点から、関連する知見等が含まれる技術資料などについて、特にわが国の概要調査に相当する段階での検討の経緯等を中心に整理を行った。

以下、4.1.2 項では、両国の地層処分事業に関するこれまでの段階的な進め方を概観し、沿岸部に関する既存の知見を含む技術資料について概説する。それらの資料に示される具体的な知見等については、4.1.3 項において課題と対策案として整理している。このような関連する技術資料の抽出や内容の整理においては、以下の理由から、主に両国のサイト選定プロセスの初期段階において取りまとめられたものに注目している。

- ・わが国の概要調査段階以降を念頭に置いた本事業の目的から、沿岸部に着目して取り組むべき重要課題の抽出では、より包括的な視点で沿岸部に特有な事項等を捉える必要がある（沿岸部の地層処分について一般的に想定される事項等を幅広く把握する必要がある）。
- ・両国は、既に地層処分サイトの特定を経た事業許可段階にあり、当初に想定された課題等の一部は既にサイト・スペシフィックな地質環境条件の詳細な調査等により解決・解釈され、最新の技術資料では課題の存在そのものが見えなくなっている可能性が否定できない。

なお、上述したように、現時点において両国の地層処分事業は、わが国の事業許可申請段階にある（フィンランドは既に処分場の建設許可が発給されている）。このことは、沿岸部での地層

処分場の立地に関して、当初にいくつかの技術的な課題等が念頭に置かれたものの、安全規制当局の審査に耐えうる適切な対処がなされてきたといえることができる。

4.1.2 既存の知見などの調査

上述したように、本項では、(1)スウェーデン、(2)フィンランドの順で、各国の地層処分段階的な進め方について整理したうえで、そのような事業展開における位置付けなどを含めて、沿岸部に関する既存の知見を含む技術資料を整理する。

(1) スウェーデンの地層処分事業の進め方と沿岸部に関連する既存の知見を含む資料

1) 地層処分事業の進め方

スウェーデンでは、1977年の原子力条件法の規定により、新設の原子力発電プラントの運転条件として、運転に伴い発生する使用済燃料の安全な処分方法と場所の存在を事業者が提示すべきことを要求した。これを受けて、当時のSKBF社は、1977年に使用済燃料の再処理に伴うガラス固化体を念頭に置いたKBS-1と称される処分概念を開発した(図4.1-2参照)(SKBF, 1977)。翌1978年には、使用済燃料の直接処分を念頭に置いたKBS-2が開発され(SKBF, 1978)、KBS-2を改良したKBS-3が1983年に開発されている(SKBF, 1983)。KBS-3処分概念は、現在の立地・建設の許可申請における基礎となっている(図4.1-3参照)。

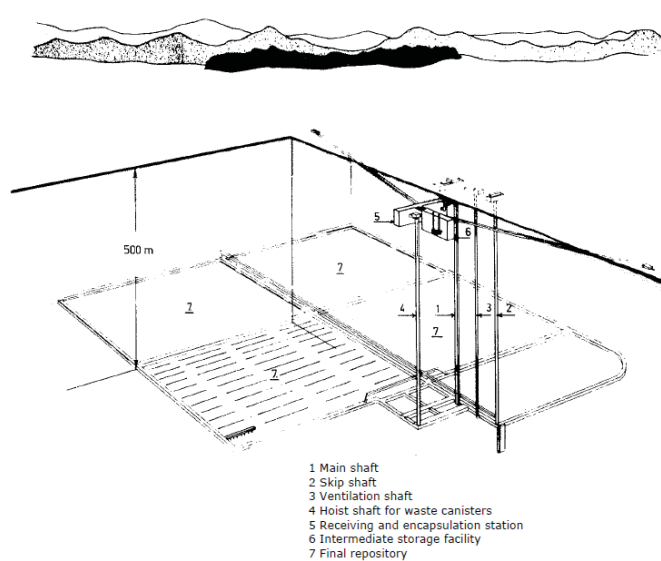


Figure 3-2. Perspective drawing of final repository with plant for intermediate storage and encapsulation. The final repository consists of a system of parallel storage tunnels situated 500 m below the surface.

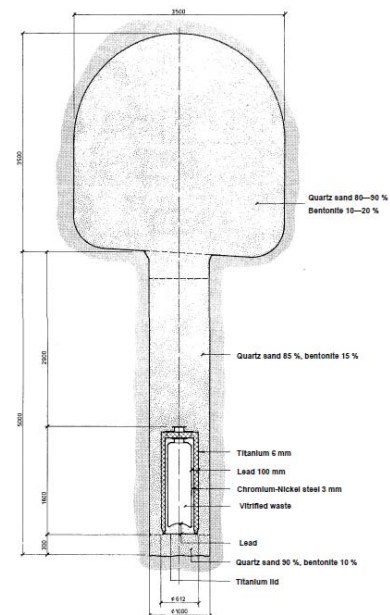


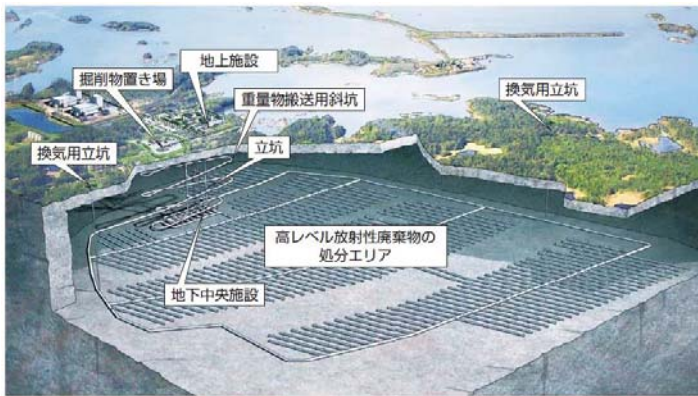
Figure 3-3. The sealed final repository. Tunnels and storage holes are completely filled with a buffer material consisting of quartz sand and bentonite.

図出典：(SKBF, 1977) より

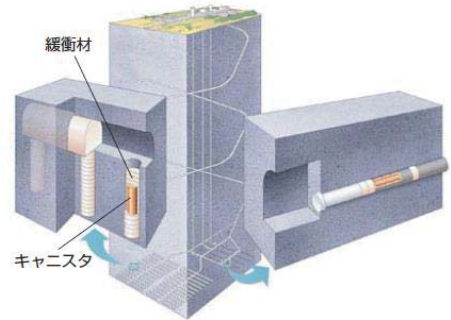
図 4.1-2 1977 年に示された KBS-1 処分概念 (右図) と処分場概念 (左図)

¹ 現在の SKB 社の前身 (SKBF は Swedish Nuclear Fuel Supplies Inc. のスウェーデン語の頭文字からつけられた略称)

フォルスマルクで想定される処分場レイアウト



KBS-3 処分概念



KBS-3V(左)及び KBS-3H (右) の概念

図出典：(経済産業省, 2015) より

図 4.1-3 KBS-3 処分概念とフォルスマルクで想定される処分場レイアウト

スウェーデンでは、当初の KBS-1 処分概念の開発段階から、高レベル放射性廃棄物の処分方法として、国内の大半を占める母岩環境（結晶質岩）を念頭に置いた深度約 500m の地層処分が想定されており、母岩環境における“地下水”を介した放射性物質の移行特性（そのような水理特性に影響を与える断層や破碎帯等の影響）が、処分概念開発における主たる考慮すべき事項として認識されていた（SKBF, 1977）。また、原子力条件法の要求に基づく、上記の KBS 処分概念の開発経緯においては、将来の処分場立地サイトを特定するものではないが、特定地域の地質環境に関する情報が活用された。そのような開発過程において、沿岸部に関係するものとして、例えば、高塩分濃度を示す地下水の存在が、国内の既存のサンプリングデータや特別に実施した大深度ボアホールによる地下水化学等の調査から把握されていたが、この段階では“沿岸部での立地”を特別に意図した記述は見られない（SKBF, 1977；1978；1983）。

以上のような 1970 年代からの処分概念開発の経緯の中で、現在のフォルスマルクの選定に至るスウェーデンのサイト選定活動は、1992 年に SKB 社が取りまとめた研究開発計画 (RD&D92) において提案されたサイト選定プロセス案の提示以降となる²。提案されたプロセスは、次の 3 つの調査から成る段階的な調査プロセスで構成されている（SKB, 1994；1995）。プロセス全体の流れとこれまでの経緯を図 4.1-4 に示す。

①総合立地調査

- ・特定の自治体を対象とせずに行う立地研究
- ・調査結果は、下記②③の調査の際の「背景情報」と位置付け

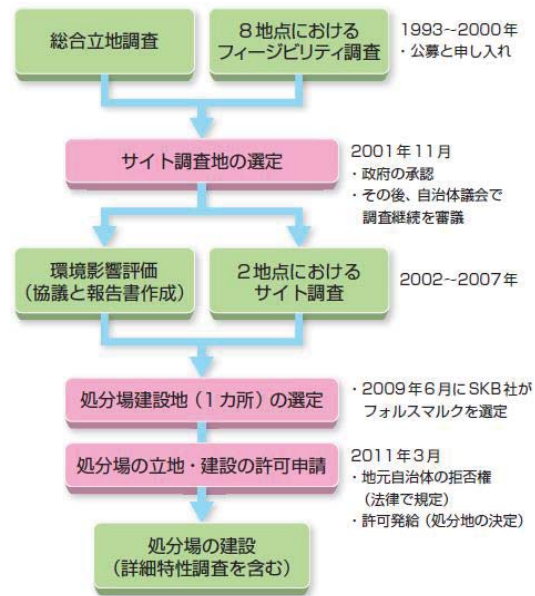


図 4.1-4 スウェーデンのサイト選定フロー

² RD&D92 は、その後の SKB 社による補足を経た 1995 年に政府に承認された。

②フィージビリティ調査

- ・既存文献を元に、調査対象自治体の領域内に、地質、社会、輸送を考慮して「サイト調査」の対象となる場所が存在するかを検討
- ・法的には自治体の許諾は不要であるが、SKB社は自治体議会の了承を得てから実施（プログラムの公表後にSKB社が公募。応募した二つの自治体での住民投票による反対の後に、1995年から特定の自治体に調査を申し入れ。）
- ・調査結果は、「サイト調査」を行う場所の選定のための比較・スクリーニング情報

③サイト調査

- ・最終目標は、法律に基づく処分場の立地・建設の許可申請に向けた情報を取得すること
- ・ボーリング調査（1,000m級）、安全評価、施設設計、環境影響評価ならびに必要な協議を実施

上記三つの調査は、シーケンシャルに行われたのではなく、①総合立地調査と②フィージビリティ調査が並行して実施されたことに留意が必要である。全国レベルの情報等を用いて実施された①の総合立地調査は、特定の地域を絞り込むことを目的としたものではなく、以下の目的のために実施されたものである（SKB, 1994）。

- ・1970年代以降のゼネラルな視点での調査研究の延長
- ・上記②③の特定の候補サイトを対象とした段階的な調査によるサイト選定を、地域的および全国的な視点から支持するための“背景情報”として整備

1970年代以降の調査研究の流れを受けて実施された①総合立地調査に至る調査の流れと実施内容は、1998年の研究開発実証プログラム98（RD&D98）において表4.1-1のように整理されている（SKB, 1998a）。

表 4.1-1 総合立地調査に至るゼネラルな視点での調査の流れと実施内容

調査の名称	調査の実施内容	
調査サイトに関する予備調査 (1975～1985年)	深層試錐および岩盤特性の測定を伴うどちらかという包括的なサイト調査。対象となったのは、スウェーデン国内の約 10ヶ所のサイトである。この調査により、良好な地質学的可能性を備えたサイトが、国内の様々な場所に見出されることが明らかになった。技術報告書の形で、広範な文書化が実施されている。また、本調査の結果は、サイト調査の対象となる区域を選定するために用いられた背景資料および比較資料に組み込まれている。	
地球科学的な背景資料 (1977～1995年)	中心となる地球科学的なテーマに関する調査が実施された。その分野として、テクトニクス、構造地質学、地震、地下水化学、氷河期、岩盤応力などが挙げられた。約 40 の技術報告書がサイト選定の背景資料に組み込まれている。	
総合立地調査 95	全国規模の総合立地調査	立地に関する要素および立地の見込みが全国規模で、系統的に検討された。スコーネ、カレドニーデス、エーランド、ゴトランドの大部分が除外された。スウェーデンの様々な地方における立地可能性を判断する上で重要な社会的要素だけでなく、安全性(地質学)、技術、土地および環境に関する様々な要素が、全国規模で調査されている。この調査の結果は、SKB がフィージビリティ調査における影響の評価の際に、基本資料として組み込まれた。更に、サイト調査対象地域の選定の背景資料にも組み込まれている。
	県域別総合立地調査	立地の見込みに関する分析が、ゴトランドを除くすべての県を対象に実施された。地球科学的な条件に焦点が絞られている。それ以降の調査を行う上で比較的すぐれた特性を備えている可能性のある地域が特定された。
	北部と南部 / 沿岸と内陸	スウェーデンの北部と南部に、さらには沿岸部と内陸部に立地した場合の全体的な特性の違いが明らかにされた。
	既存原子力自治体の総合立地調査	既に原子力活動が実施されている地方自治体の立地条件が検討された。SKB がオスカーシャム、ニーシェーピン、エストハンマルならびにヴァールベリーにおけるフィージビリティ調査の実施を希望する根拠が示された(チェヴリングは除外されている)。その結果はサイト調査対象地域の選択の背景資料に組み込まれている。

2) 沿岸部に関連する既存の知見を含む資料

上表のとおり、全国レベルでの総合立地調査は4種の調査で構成されており、その一つとして沿岸部と内陸部に立地した場合の一般的な特性の違いを分析している。分析結果は1998年にSKB レポート³として取りまとめられ (SKB, 1998b)、得られた知見等は、例えば以下に示す技術レポートなど、その後のSKB社の技術的な取組のベースとして参照活用され、2011年の立地・建設許可申請におけるSR-Siteプロジェクトにおける安全機能指標として継承されている (SKB, 2011)。

- ・1998年：研究開発実証プログラム 98 (RD&D98) (SKB, 1998a)

³ SKB レポート「SKBR-98-16 “北部 vs 南部 / 沿岸部 vs 内陸部 スウェーデンの地域間の地層処分場の立地条件の一般的な相違”」として、スウェーデン国内における地層処分場立地の適格性の点から、北部と南部及び沿岸部と内陸部について、一般的な観点(ゼネラルな観点)から比較・分析の結果を取りまとめている (SKB, 1998b)。

- ・1999年：使用済燃料の地層処分場 SR 97－閉鎖後安全性 (SR97) (SKB, 1999)
- ・2000年：KBS-3 処分場は母岩にどのような要求条件を求めるか？立地と立地審査に関する地球科学的適合性指標及び基準 (SKB, 2000)

沿岸部に特有となる課題抽出の視点などが示唆されるこれらの技術資料の内容については、次項 (4.1.3 項) に整理する。

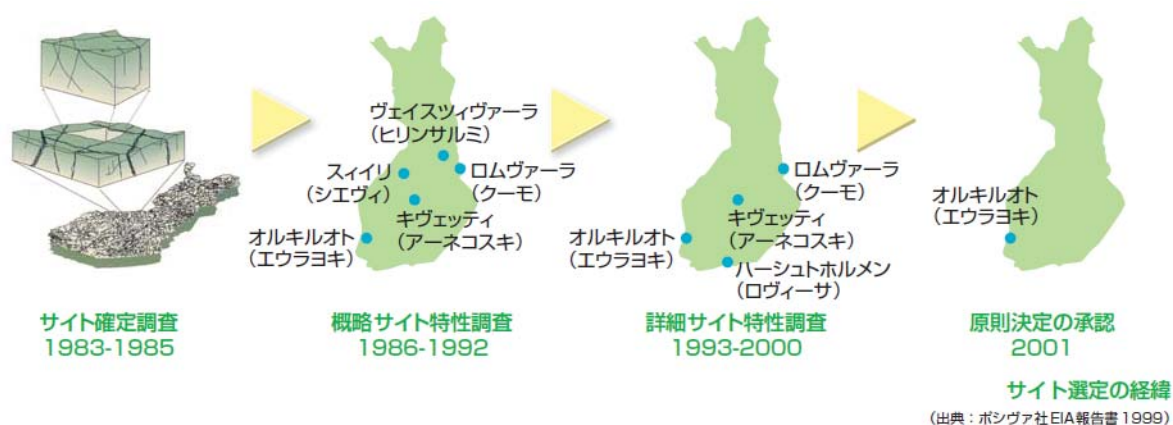
(2) フィンランドの地層処分事業の進め方と沿岸部に関連する既存の知見を含む資料

1) 地層処分事業の進め方

フィンランドにおける使用済燃料の管理に関する利用可能なオプションの研究は、1970年代中頃から開始された。その研究過程において、地層処分が利用可能なオプションの一つとして考慮され、1978年には地層処分の実現可能性に向けた体系的な研究が開始された (Posiva, 2000)。

現在のオルキオトの選定に至るフィンランドのサイト選定活動は、1983年の政府決定により定められた地層処分の実施に向けた3段階の調査プロセス (併せてその目標時期を提示) に沿って、当時の実施主体である電力会社⁴がサイト選定作業に着手した。図 4.1-5 に示すように、3段階の調査は、①サイト確定調査、②概略サイト特性調査、③詳細サイト特性調査という段階的 (シーケンシャル) な調査で構成された。

第1段階のサイト確定調査では、全国レベルでの地質環境等に関する情報から、次段階の調査 (概略サイト特性調査) を行う調査エリア (3~10km²) を絞り込むことを目的としたものである。第2段階以降の調査は、特定のエリアに対する地上からの調査である。わが国の精密調査に相当する調査は、最終処分サイトを決定した原則決定の後に、将来の処分場の一部となることを前提とした地下特性調査施設 (ONKALO と称されている施設を2004年より建設) を利用して、地下の詳細な調査や適用技術の実証などが行われている。このような段階的な調査の進展において、第2段階の概略サイト特性調査以降にオルキオトが、更に第3段階の詳細サイト特性調査ではハーシュトホルメンが、沿岸部の候補サイトとして調査の対象とされた (Posiva, 2000)。



図出典：(経済産業省, 2015) より

図 4.1-5 フィンランドのサイト選定フロー

⁴ 現在の実施主体である Posiva 社は、1995年に2つの電力会社の共同出資により設立されている。

2) 沿岸部に関連する既存の知見を含む資料

上述した第1段階のサイト確定調査は、次の2つのステップで第2段階の調査エリアの絞り込みが試みられた(図4.1-6参照)。

- 1) 地域ブロック(100~200 km²)の選別
- 2) 調査エリア(3~10 km²)の絞り込み

地域ブロックの選別は、衛星写真や地質学・地理学関連等の文献調査によって国内の大規模な破砕帯を特定し、これらを境界としてフィンランド国内を数百の地域ブロックに分割することが目的であった。この調査で使われる技術や既存情報は(衛星画像、航空写真、地形図など)、一方が海岸に接する区域には不向きとされた。ただし、原子力発電所が存在し、発電所廃棄物の処分計画が進展していた沿岸部のオルキオトについては、地下の詳細な情報が既に得られていたため、この段階における調査エリアの候補の一つに加えられていた(Posiva, 2000)。

以上の経緯から、第1段階のサイト確定調査の段階では、沿岸部を特別に優先させる意図は見られないが、第2段階の概略サイト特性調査以降では、沿岸部にあるオルキオトやハーシュトホルメンが調査の対象とされたことから、第2段階以降に取りまとめられた技術資料では、沿岸部に特有となる事項に関する課題認識や対応検討等の内容が含まれている。わが国の概要調査段階に相当する、そのような技術資料の例として次のようなものがある(第2段階及び第3段階のサイト調査結果やそれを踏まえた安全性の評価結果などを包括的に取りまとめたもの)。

- ・1992年：TVO-92「使用済燃料処分に関する安全性評価」(TVO, 1992)
- ・1996年：TILA-96「使用済燃料処分の中間安全評価報告書」(Posiva, 1996)
- ・1999年：TILA-99「ハーシュトホルメン、キヴェッティ、オルキオトならびにロムヴァーラにおける使用済燃料処分の安全性評価」(Posiva, 1999)

上記のTVO-92は、図4.1-5に示した5地点に関する第2段階の概略サイト特性調査(1986~1992年)の結果を踏まえたものである。1996年のTILA-96を経た1999年のTILA-99は、4地点に関する第3段階の詳細サイト特性調査(1993~2000年)の結果を踏まえたものであり、地層処分施設の立地をオルキオトに決めた原則決定の際に提示されたものである。また、上記の技術資料で認識された課題に対して、どのような検討を経て要件や規準として整理がなされたかといった点で、次のような技術資料も参考となる。

- ・2009年：Posiva WR2009-29「岩石適格性規準(RSC)プログラム中間報告」(Posiva, 2009)

沿岸部に特有となる課題抽出の視点などが示唆されるこれらの技術資料の内容については、次項(4.1.3項)に整理する。

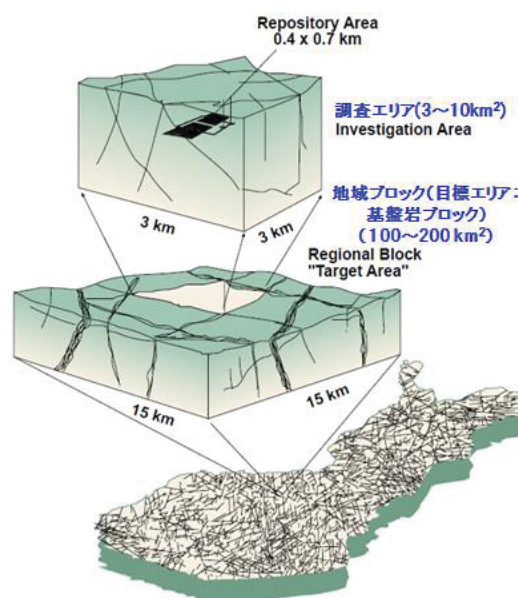


図 4.1-6 サイト確定調査のスケール

4.1.3 課題と対策案の整理

前項において、沿岸部に特有となる事項に関する知見等を含む既存の技術資料を整理した。それらから示唆される沿岸部に係る課題と対策案等について、(1)スウェーデン、(2)フィンランドの順で以下に整理する。

これらの整理を概観すると、スウェーデン及びフィンランドにおける先行的な検討事例から、沿岸部に関連するものとして、次のような点に着目した課題認識のもとに対策等が検討されてきたことが窺える⁵。

- 1)人工バリア等のニアフィールド構成要素（特に、キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材）に期待する安全機能に及ぼす影響の観点から、主に地下水化学（塩水の存在）に着目。
- 2)上記の地下水化学環境の変化をもたらす地下の水理環境の変化に着目。
- 3)水理環境の変化に影響を及ぼす主たる要因として気候サイクルに伴う氷河作用に着目。

概括的には、1)については人工バリア構成要素の安全機能に影響を及ぼす地下水組成条件等に係る知見を踏まえた母岩環境（地下水化学環境）に係る要件や規準の検討、2)及び3)については主にサイトの地下環境の詳細把握による Site Description Model [SDM]の開発の枠内における水理モデルの開発としての検討に注力がなされてきたといえる。また、3)の氷河作用そのものに起因する変遷の影響の一部は（例えば海水準変動に伴う海岸線の変化や涵養・流出域の変化など）、気候変動に係るシナリオとして安全評価の枠内での取り扱いが検討されてきた。

以下の整理では、工学技術の観点から、主に上記の1)及び2)を中心に、沿岸部に関連するものを抜粋している。両国が KBS-3 処分概念を採用していることも踏まえ、次のような点を考慮しつつ整理していることに留意されたい。

- ・上記1)のうち、塩水環境が銅製キャニスタへ及ぼす影響に関する多くの知見等が記述されているが、本書の整理ではそれらを除外している（銅製キャニスタの導入は、現時点で両国固有の概念）。
- ・KBS-3 処分概念では、セメント系材料や金属材料（Fe）の利用箇所は限定的であり、セメント系材料に関する上記1)の観点での記述は限られているものの、可能な範囲で関連知見を抽出する。
- ・沿岸部に固有のものではないが、一般的に、人工バリアの構成要素間、あるいは人工バリアと母岩領域間の相互作用や相互プロセスが、熱（T）、水理（H）、力学（M）ならびに化学的（C）の観点から、考慮すべき事項として挙げられている。以下に整理する両国の技術資料では、このような相互作用を沿岸部に固有のものとして捉えていないことから、本書では、その点についての整理は行っていないが、例えば、塩水環境が及ぼす人工バリアの個々の構成要素への影響を、相互作業にも留意してシステム全体として捉えておく必要がある。

なお、以下の両国の知見等の整理では、地下水の塩分濃度について、“総溶解性蒸発残留物濃度（TDS）[g/L]”という単位を使っていることに留意されたい。TDSは Total Dissolved Solids の略で、水中に溶解している全ての物質の総濃度（塩化物を含む）を指すものである。例えば SKB レポート（R-98-16）では、TDS を地下水の塩分と処分場機能とを結び付ける最良のパラメータと位置付けている（多少の相違はあるが、TDS は塩化物濃度に比例し、塩化物濃度に係数 1.7 を乗じることによって近似値を算出できるとしている）（SKB, 1998b）。

⁵ 地層処分の実施主体である Posiva 社（フィンランド）と SKB 社（スウェーデン）の協力関係に基づく研究開発等の共同実施等の背景から（局所的な違いはあるものの両国で一般的に類似する母岩環境に対して、同様の KBS-3 処分概念の適用が計画されている）、両国は同様の課題認識に基づき対策案等の検討が進められてきたことが関連文献等から示唆される。

(1) スウェーデンにおける沿岸部の処分場立地に係る課題認識と対策案

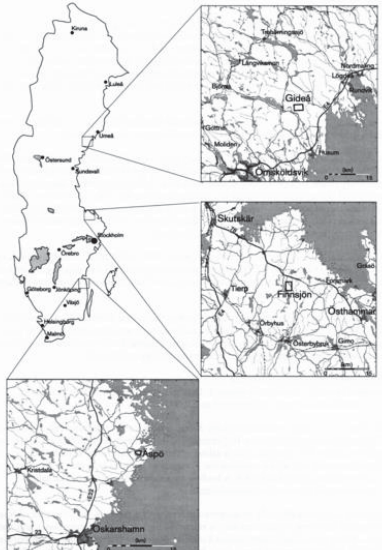
既に述べたように、1992年にSKB社が取りまとめたRD&D92で示された三つの調査のうち、総合立地調査（スウェーデン全土を対象としたゼネラルな背景情報の整理）において、サイト選定における適格性の見通しの観点から、沿岸部と内陸部の相対的な比較検討がなされている。結果として、沿岸部あるいは内陸部のいずれかの優位性を示すことはできないとの結論ではあるが、ゼネラルな観点からいくつかの一般的な差異が整理された。

1970年代からのKBS処分概念開発と並行して実施されたスウェーデン国内の地質環境調査で得られた情報（既存の調査データ等を含む）を活用した分析結果は、総合立地調査として行われた四つの調査の一つとして、1998年にSKBレポートとして取りまとめられている（SKB, 1998b）。その際、例えば、地下水化学の観点からは、既存の全国1万点を超える湧水サンプリング分析データやSKB社が独自に行った大深度ボーリング調査結果を活用するとともに、並行して取りまとめられたSR-97で扱われた沿岸部の特性に関する分析結果なども活用されている（表4.1-2参照）（SKB, 1999）。

このような詳細な分析結果をベースとして、その後に取りまとめられた技術レポートでは、次のような観点から整理が行われている。以下に、次の二つの観点から、認識された課題や検討された対応策等について整理する。

- 1) 重要な立地要素の観点からの沿岸部と内陸部の優劣の整理
- 2) 立地における母岩に関する地球科学的適合性指標・基準の観点からの整理

表 4.1-2 使用済燃料のための深地層処分場（SR97）で扱われた三つの仮想的サイト

<p>使用済燃料のための深地層処分場 SR97 閉鎖後の安全性</p> <ul style="list-style-type: none"> ○本書において、閉鎖後長期の安全性を示すうえで、三つの仮想的な処分場サイトを対象に、安全評価におけるサイトの特性を説明。 ○仮想サイトであるが、扱われた情報は次の3地域の実データから得られたもの（右図）。 <ul style="list-style-type: none"> ・Småland（スウェーデン南部の）Äspö ・Uppland（スウェーデン中部）の Finnsjön ・Ångermanland（スウェーデン北部）の Gideå ○これらのサイトは、国内の安定した地質環境を代表するものとして選定（北部／中部／南部）。これらの3サイトは比較的海岸に近く、Äspöは沖合の島の中にある。 ○沿岸部に特有の特性等については、特に Äspö を中心に分析し、安全評価でどのように考慮すべきかを整理。 	 <p style="font-size: small;">Figure 6-2. Data for the hypothetical repository sites Äspö, Beberg and Ceberg are taken from Äspö, Finnsjön and Gideå, respectively.</p>
---	---

図出典：（SKB, 2000）より

1) 課題認識と対策案：重要な立地要素の観点からの沿岸部と内陸部の優劣の整理

SKB社は1998年に研究開発実証計画98（RD&D98）を取りまとめている（SKB, 1998a）。その中で、1998年のSKBレポート（SKB, 1998b）で示された沿岸部と内陸部に比較検討に係る知見等に基づき、立地の観点から沿岸部と内陸部の相違等に関する一般的見解を整理している。

同整理では、適格性に関する判断は対象となる地域固有の調査に基づくことが必要であるとの認識から、沿岸部と内陸部の観点で今後の立地調査に適した地域を指定することはできないとしつつも、1)閉鎖後長期の安全性、2)技術（経済的観点を含む）の観点から、沿岸部の立地に関する優劣（メリット／デメリット）について、以下のように一般論として概念的に整理している（以下、（SKB, 1998a）の§6.3.2より）。

①閉鎖後長期の安全性

長期安全性に係る主要な影響要素として、気候サイクルに伴う氷河作用を挙げている。スウェーデン北部では今後数千年のうちに氷床に覆われ、南部でも今後数万年後に氷床に覆われることが想定されており、このような氷河作用に関連して考慮すべき事項と沿岸部での立地への影響を次のように整理している（一部、北部と南部との関係を含む）。

- 大陸氷床は基盤岩を生活圏から遮蔽する効果的な追加バリアを構成する：人間侵入のリスクは事実上排除される。【肯定的影響】
- 氷河または氷床が退く退氷が力学および水理学的条件の変動を発生させる：後氷期断層の移動が、大部分の氷冠が後退した時点に起きた基盤岩内の急速な負荷の変化の表れであることを示す兆候が様々な地域で確認されている。【否定的影響（不利な条件）】
- 主として地下水に関するものとして、
 - ・沿岸部の動水勾配は比較的小さい。【利点】
 - ・処分場から海岸までの流動経路（流出条件）が相対的に短くなる可能性がある。【欠点（ただし海水による希釈は利点となる）】
- 将来にわたる地下水の化学的組成及び流動変化によって、処分場環境の長期変遷の予測が困難となる可能性。【マイナス要素】
 - ・こうした変化は最終的に、気候変動（特に氷河サイクルが終了した後）、後氷期の隆起および海水面の変化の複合的な結果として起こる海岸線の移動に左右される。
 - ・これらの現象は、長期的な流動パターンの変化（湧出域が涵養域になる、あるいはその逆となるような変化）を引き起こす。
 - ・更に、海洋環境が陸地になるといった受容体条件の根本的な変化を生じさせる可能性がある。
 - ・沿岸部との比較において見た場合、内陸部への立地の方が、地下水条件が長期的には安定しており、予測も立てやすい。
- 塩水地下水の存在（更なる重要な要素）
 - ・沿岸部の方が、塩水地下水の存在がより一般的であると判断することができる。
 - ・沿岸に近い場所では、処分場深度において中程度の塩分（5 g/L程度）が見られるのが一般的である。ただし、エスポ岩盤研究所では（ラクセマル半島で掘削された1,000mを超える深度の試錐孔）、深度がより大きくなると、きわめて塩分濃度が高いブライン水に近い地下水が確認されている。
 - ・プラス効果となり得る事項
 - －比較的表に近い場所の塩水地下水の存在は地下水循環が緩やかであることを示唆
 - －塩水地下水が存在する基盤岩では将来に深い井戸が掘削される可能性が少ない
 - ・マイナス効果となり得る事項
 - －坑道の埋め戻し材にネガティブな影響を与える可能性
 - ⇒ただし、材料の組成変更等で補完が可能との見解（一方で、変更に伴う技術的な複雑さの増加と共にコストが高くなる可能性がある）

⇒塩分がきわめて高い場所は避けなければならない（圧縮ベントナイトの緩衝材としての機能が損なわれる可能性）

※塩水地下水の存在に関して、SKBは1998年のジェネリックな段階において、沿岸部の一般的な特性を踏まえて、処分場立地に係る工学的観点からの留意点を次のように整理している（SKB, 1998b）。ただし、4.1.1項で述べたように、例えば、フォルスマルクサイトを対象とした周期的な氷河条件を加味した地下水流動モデルに基づくシミュレーション解析など、その後の候補サイトの具体化や技術的な取組を経て、これらへの適切な対処や下記のような懸念される環境は想定されることが確認されている（SKB, 2011）。

- 地層処分場の設計条件に影響を及ぼす塩分濃度を伴う地下水が存在する可能性は、主として定置坑道の埋め戻し材に関係する。塩水による長期性質の悪化を回避するためにその組成を調整する必要性が生じる可能性がある。
 - ・圧縮ベントナイトで構成される緩衝材の機能に影響を及ぼすには、“総溶解性蒸発残留物濃度 [TDS] > 200g/L”である必要があり、スウェーデンでは一般的にそのような環境は想定されない。
 - ・むしろ、混合土となる処分坑道の埋め戻し材（重量比15%のMX-80ベントナイトと85%の粉碎された岩石の混合土を想定）が、塩分濃度に対してよりクリティカルなものとなる。
- 処分場自体が地下水の状態を擾乱することにも配慮が必要である。処分場が閉鎖され、地下水面が自然の水位に戻るまで、地下水は排水による処分場と周囲との圧力差の影響のもとで局所的に処分場に向かって移動することになる。処分場の下に塩水があり、処分場深度とその塩水とのレベル差が十分でない場合、塩水が下から処分場に向かって引き上げられる可能性がある。

②技術（経済的観点を含む）

輸送面及び塩水地下水が存在することに伴う影響の観点から、以下のような課題や見解を示している。

- 輸送距離が長くなる【以下、北部や内陸部に係る否定的影響（相対的に沿岸部は有利な影響となる）】
 - ・国内外の実績により、輸送に伴う放射線学的安全性は、輸送距離や方法にかかわらず高水準に保つことができる。
 - ・一方、他の貨物輸送と同様に、通常事故リスクと環境負荷を生じさせる可能性がある：輸送経路（鉄道や道路）に係る建設活動が必要となる可能性があり、環境への悪影響やコスト増の可能性もある（他方、地域インフラストラクチャーの改善というメリットも想定される）。
 - ・コスト増は約5%程度との試算もあり、輸送に関して、“この種の輸送は安全面および技術面からは実現可能であり、「離れた場所」への立地に伴う追加コストはさほど大きな課題とはならない”。
 - ・一方で、輸送の問題は、他の何よりも、国民の態度および世論に左右される問題となる可能性がある（多くの人々は放射性物質の輸送を、危険、不適切、あるいは不必要なもののみなしている。こうした懸念は、それが技術的に十分な根拠を伴うものであるかどうかにかかわらず、現実存在するものであることを認識しておく必要がある。）

○塩水地下水の存在

- ・建設および操業段階に関する見通しとして、沿岸／内陸部への立地に関して一般的な意味で重要な意味を持ち得る何らかの要素を指摘するのは困難としつつも、塩水の存在は、安全に関する影響のほかに、操業期間中の地下施設の維持管理や保守の必要性を拡大する可能性を指摘。

※1998年のジェネリックな段階において、沿岸部の一般的な特性を踏まえて、SKBは沿岸部での処分場立地に関する技術的な留意事項として、塩水地下水の存在に伴う地下施設の維持管理の課題を次のように整理していた（SKB, 1998b）。ただし、これらの懸念については、上述したフォルスマルクサイトを対象とした地下水流動モデルに基づくシミュレーション解析などによって、そのような影響が想定されないことが確認されている（SKB, 2011）。

- ・pH値が低い場合や塩分濃度が高い場合には金属構造物の腐食が促され、他の材料の劣化が促進される可能性がある。影響を受ける設備の例として、岩盤補強材、立坑エレベータ装置及び電気設備が挙げられる。
- ・ただし、地下水流入に対するシーリングの強化、設備上での結露が生じないような換気システムの改善、設備に使用される材料選択への配慮、維持管理の強化等によって対処が可能である。

2) 課題認識と対策案：立地における母岩に関する地球科学的適合性指標・基準

母岩に関する地球科学的な適合性に関する指標や基準として、例えば、処分場深度における地下水化学環境の観点から塩分濃度に上限値を設けるなど、1998年のSKBレポートの段階において、既にいくつかの指標や基準が定量値として示されていた（SKB, 1998b）。

その後、2000年にSKB社が取りまとめた技術レポート（TR-00-12）では、母岩に対する要件を、指標や基準として定量化する試みがなされている⁶。TR-00-12は、沿岸部に特化して整理されたものではなく、母岩に関する以下の包括的な観点から、好適条件あるいは適合性に係る指標や基準が整理されている（SKB, 2000）。以下の「§」は、TR-00-12の原典資料における記載箇所を示している（太字で示したものについては、次ページ以降の①～③に詳述する）。

§4 地質学：地形学、土壌、岩石種、構造地質学（塑性剪断帯）、構造地質学（破碎帯と破碎面）

§5 岩石力学：初期岩盤応力、健岩部の力学特性、破碎部と破碎帯、岩盤全体の力学特性、熱膨張係数、将来の負荷（地震や将来の氷期などの外部事象）

§6 温度

§7 水文地質学：透過性、間隙率と貯留係数、**地下水特性**、地表の生態系、**境界条件と裏付けデータ**⁷

§8 化学（地下水の組成）：溶存酸素の発生の兆候、pH、**総蒸発残留物濃度（TDS）**、**地下水中の有機物質と他の構成物質**

§9 岩石の移動特性：定置孔の規模に対する流体のパラメータ、流路の特性、流路に沿った岩石マトリクスの特性

⁶ SKB技術レポート「SKB TR-00-12 “KBS-3処分場は母岩にどのような要求条件を求めるか？立地と立地審査に関する地球科学的適合性指標及び基準”」では、地層処分場の設置の観点から岩盤にどのような要求条件を設定し得るかという点から、母岩に対する要件を指標や基準として定量化する試みがなされている。

⁷ 建設・操業段階におけるベースラインからの擾乱にも関係する孔内圧力、地下水水頭ならびにニア・フィールドスケールでの地下水流、及び涵養域と流出域の特徴付けなど、独立したモデルパラメータとして水文地質学的モデルに含まれていないいくつかの異なる水文地質学的データ。これらは、モデルの妥当性確認（裏付けデータ）やモデルの境界条件設定のために利用される。

前記 1)に整理した沿岸部に特有となる課題や留意事項として認識された“氷河作用”および“塩水地下水の存在”との関係で、技術レポート (TR-00-12) における指標や基準に係る包括的な整理のうち、工学的観点から、①地下水化学 (地下水組成) 及び②水文地質学の二つが、関連するものとして挙げられる。それぞれ、好適条件や指標・基準設定の観点から、課題の詳細と対応策等について、TR-00-12 では以下のように整理されている (以下、沿岸部に特有となる事項を抜粋) (SKB, 2000)。また、海水系地下水に含まれるその他の鉱物との関係から、③地下水中の有機物質と他の構成物質、として整理された知見についても以下に参考として抜粋整理する。これら、①～③について、技術レポート (TR-00-12) で一覧表に整理された適格性指標等を、表 4.1.4 及び表 4.1.5 に抜粋掲載しておく (併せて参照されたい)。

①地下水化学 (地下水組成) の観点からの指標や基準

○地層処分場の機能に対する影響 (§8.1)

- ・緩衝材の安定性に対する影響 (§8.1.3) : 塩分濃度が上昇すると膨潤圧は減少する。その減少は、ベントナイトの圧縮度が低い場合に相対的に最大となる。
- ・岩石圏における遅延に対する影響 (§8.1.4) : 絶対的な要求条件はないが、総合的な岩石圏の機能は、統合的な安全評価で妥当な安全性を提供するのに十分でなければならない。保持特性に影響するのは、特に地下水の総合的な塩分濃度、pH、及び炭酸塩である

○総蒸発残留物濃度 (総合的な塩分濃度) (§8.4)

- ・総合的な塩分濃度 (=TDS : 総蒸発残留物濃度) は、主にベントナイトの安定性と放射性核種の収着能力に影響する。 (§8.4.1)
 - ー TDS が非常に高い場合、ベントナイトの膨潤能力は減少し、濃度が 100 g/L 以上の場合、2,000 kg/m³の密度を持つベントナイト緩衝材の膨潤能力は半分以上低下する。
 - ー 塩分濃度が高いと岩石が放射性核種を収着する能力も低下する。
 - ー 非常に高い塩分濃度 (TDS > 200 g/L) と非常に低い pH (pH < 3) の組み合わせも、銅のオーバーパックの安定性に影響する。しかし、このような低い pH は、鉱物と水の反応により処分場深度では発生し得ない。
- ・処分区域内では TDS < 100 g/L であることが要求条件である。 (§8.4.2)
- ・塩分濃度に関する包括的知識と様々な段階で得られる知識 (§8.4.3)
 - ー スウェーデン国内の深度の深い位置を流れる地下水の測定値から、深度 1,000m までは、TDS は 0~35 g/L の範囲内である。
 - ー 更に深い深度で、これ以上の濃度が発生する場合もある。1,700m の深度で最大 100 g/L の濃度が測定された。

塩分濃度が高い地下水が発生する深度は、原則的に、内陸部の方が海岸部より深い。フィンランドでは、800m 以深で 70g/L の TDS が測定された。

ーパラメータに関するサイト固有情報は、サイト調査に関連して掘削した大深度ボーリングによるサンプル測定値から取得した。詳細特

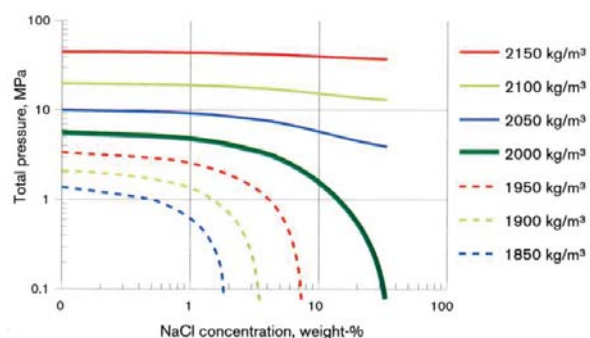


Figure 8-33. Swelling pressure as a function of salinity for Na-bentonite at different densities.

図出典 : (SKB, 1999) より

図 4.1-7 塩分濃度と膨潤圧の関係

性調査により、透過性が非常に低い岩石内の TDS について、新たな知識が得られる可能性がある。

※処分場深度における TDS に係る要求条件は、材料に取り込まれる水の塩分濃度の増加に伴い低下する緩衝材の膨潤能力との関係から設定されており、ベントナイト密度に強く依存することが図 4.1-7 のように把握されている⁸。

②水文地質学の観点からの指標や基準

○地下水の特性 (§7.4)

水文地質学的観点からは、地下水の密度と粘度に関する要求条件または好適条件はない。しかし密度条件を理解しておくことは重要であり、地下水モデルで考慮しなければならない。水文地質学的観点からは、一般的に塩分濃度が高いことが利点か欠点かを判断することはできない。しかし化学的な観点では、処分場深度における塩分濃度は、それほど高くはないことが明確な要求条件である。

○地下水流の諸側面に関係する境界条件 (§7.6)

水理モデルの妥当性確認（裏付けデータ）や境界条件設定のために使用できるデータやパラメータとして、考慮に入れるべき具体的な要素は次のとおり。

- 1) 動水勾配
- 2) 涵養域と流出域の分布
- 3) 土地の隆起などによる海岸線の変化

※上記の3つの要素のうち、沿岸部との関係で特に2)及び3)について、課題に関する対策の観点から次のように整理している (§7.6)。以下、いずれも安全評価のシナリオとして対処することとしているが、SR-97 では、表 4.1-3 に示す具体的な対応が検討されている。

・涵養域と流出域の分布：涵養域と流出域を地表の生態系の影響を説明するための安全評価の一部で考慮する。

深度の深い場所での地下水流の流速が、主に深い位置にある岩石の透過性によって決定されるとしても、水文地質学的モデルの境界条件を設定するために重要な情報を提供する。原則的に、処分場を涵養域の下に位置付けると有利である。これはそのような位置付けにより、処分場からの流路の長さを最大限に伸ばせるためである。しかし、処分場を通過する地下水は最終的には流出域に流れ込み、今日の地下水モデルは、これらの流出域が処分場からそれ程離れていない場所にあることを示唆している。これは大部分の循環が、岩盤構造と局所的な地形によって支配されているためである。従って涵養域と流出域を、地表の生態系の影響を説明するための安全評価の一部で考慮する。地表の生態系は潜在的な涵養域と流出域の優れた指標でもある。

・土地の隆起などによる海岸線の変化：氷河作用に伴うものとして安全評価のシナリオで解析する（気候変動に係るシナリオの枠内で考察・解析）

沿岸部に位置する全てのサイトの境界条件を変化させる。将来の氷河作用は、サイトの位置に関係なく、地下水流に大規模な影響を与えると考えられる。これら二つのプロセスの影響は、SR 97 の気候シナリオの枠内で考察・解析している。

⁸ MX-80 をベースに、塩水濃度及びベントナイト密度と膨潤圧の関係に関する試験・モデリング結果等が、SKB 技術レポート「SKBTR-97-31 “Bentonite swelling pressure in strong NaCl solutions Correlation between model calculations and experimentally determined data”」に整理されている（SKB, 1997）。

表 4.1-3 SR-97 の基本シナリオで考慮された沿岸部に特有となる事項

使用済燃料の地層処分場 SR 97—閉鎖後安全性 (SR97)

(以下、(SKB, 1999) の§8 より、気候サイクルによる氷河作用に伴う土地の隆起現象に係る基本シナリオでの考慮に係るものを抜粋要約)

○土地の隆起及びその生活圏への影響は基本シナリオに含まれる：現在の土地の隆起は、最新の氷河期の効果と見なされている（地殻曲降、後氷期地殻反動）。

○生活圏への影響：気候サイクル（氷床影響）による土地の隆起に伴う、連続的な湖の閉塞、植生の自然変化、処分場の再冠水による地下水の変化等が、生活圏の変化として考慮される。土地隆起に伴う将来の海岸線の移動について、沿岸部の Äspö（南部）が最も顕著な影響が表れるサイトである。逆に、海岸線から 5km 以上の距離のある中部や北部のサイトは大きな影響を受けない。

○地下水流れへの影響（水理事象の進展）：初期に、処分場周辺の地圏は建設及び操業の結果として部分的に排水される。排水は、しばしば高い塩分を持つ深部の地下水を、上昇流として知られる現象である処分場深度までの引き上げを引き起こす（右図は沿岸部 Äspö（南部）の水理モデル）。

排水及び元の地下水レベルへの復帰は、処分場の建設が進行し、定置後に処分場が埋め戻され、閉鎖されるに従って進展する。閉鎖後のある時間で、地下水位及び流れのパターンは元の状態に戻ることが予測される。これがどの位の時間を要するかについては、トンネル及び処分孔周辺の水の流れに依存しており、一般的には 10 年程度と予測される。

○地下水組成の長期的な事象進展：本進展の評価の枠組みは、生活圏からの水の流入及び生活圏への水の流出ならびに極深部の地下水との交換により決定される。事象の進展は、例えば沈殿量及び浅層の化学条件に支配される。処分場サイトでの地球化学的な事象の進展は、以下により決定される：

- ・今日の地球化学の状態
- ・地圏中における移行及び反応プロセス
- ・周囲との相互作用、上記の天候に依存性もある生活圏からの流入水、また生活圏への流出水

同様に、今日の地球化学の状態は、過去の気象条件ならびに移行や反応プロセスの結果である。地下水の化学組成の大きな変化は、第一義的には長期の気候変動に起因する。その気候変動は降水量及び上記の全ての流入・流出条件の変動を導き、また地下水組成へ大きな影響を与える。気候変動の効果は、気候シナリオにおいて議論される。基本シナリオにおいて土地の隆起は、特に流れのパターンに長期的な影響を与え、それにより地下水組成に長期的な影響を与える。

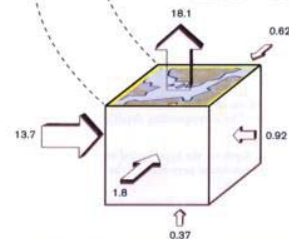
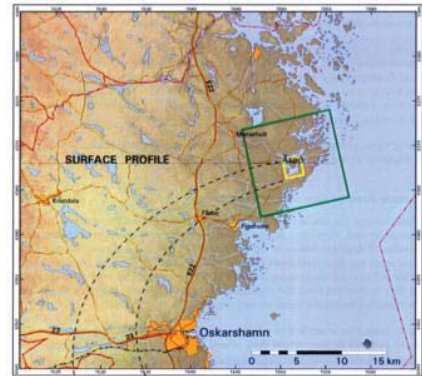


Figure 8-11. The upper figure shows the model area for large-scale (green) and local (yellow) groundwater modelling at Äspö. The lower figure shows aggregate flows over the boundary surfaces to the local model (litres/second) as calculated by the large-scale model. The local model area is 2,400 x 2,200 x 1,250 m³.

③地下水中の有機物質と他の構成物質の観点からの指標や基準⁹

○緩衝材の安定性に対する影響 (§8.1.3)

- ・粘土のゲルを化学的に安定させ、コロイド懸濁液に拡散させないためには、水が十分な正イオンを含むことが必要となる。粘土ゲルは二価イオン (Ca²⁺と Mg²⁺) の濃度が 4 mg/L 以上であれば安定する

○安全機能に対する影響 (§8.4.1)

- ・ベントナイトの安定性は Na⁺、Ca²⁺及び Mg²⁺の濃度により影響される。
- ・濃度が低ければベントナイトゲルの安定性が低下する可能性があり、それが原因でコロイド粒子が地下水で運ばれる可能性がある。

○要求条件と好適条件 (§8.5.2)

- ・処分場深度で、[Ca²⁺]+[Mg²⁺] > 4 mg/L の濃度であれば有利である。しかしこれ以上数値が高くても利点にはならない。

※以上のような知見は、SR-97 (SKB, 1999) の§8.9.3 において「緩衝材／埋め戻し材の化学事象の進展」として解説されている。

表 4.1-4 技術レポート (TR-00-12) で整理された適格性指標 (水文地質学)

Table B-4. Suitability indicators for hydrogeology

Cont. Table B-4

Geoscientific parameter	Reference to function in function table	Requirements regarding parameter	Preferences regarding parameter	Value range in Swedish crystalline bedrock	Possible suitability indicator	Criteria after feasibility study (FS) and after site investigation (SI)
Boundary conditions and supporting data					Data are primarily needed to build up credible system descriptions.	
Hydraulic gradient (and pressure)	Isolation, canister Retardation, rock		Local gradient <1% at repository level (no advantage if even lower). Take salinity into account.	0.05% till 0.6% for sites analyzed in SR 97	Data are not primarily useful as suitability indicators, but rather are needed to build up credible groundwater models.	FS: Areas with an unsuitably high gradient are screened out. SI: Gradient can be used in determination of boundary conditions for modelling.
Recharge/discharge	Retardation, rock		Advantage if long distance to discharge area (but retardation is determined mainly by the properties of the rock).		See "gradient"	FS: - SI: Assessment of location included in safety assessment.
Shoreline displacement	Retardation, rock		No preferences, but must be taken into account in modelling		See "gradient"	

⁹ 本知見について、(SKB, 1999) 及び次の資料を参照している : Laaksoharju M, Degueldre C, Skårman C, 1995. Studies of colloids and their importance for repository performance assessment, SKB TR 95-24 Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm. (Laaksoharju M, Degueldre C, 1995)

表 4.1-5 技術レポート (TR-00-12) で整理された適格性指標 (化学 [地下水組成])

Table B-5. Suitability indicators for chemistry (groundwater composition)

Geoscientific parameter	Reference to function in function table	Requirements regarding parameter	Preferences regarding parameter	Value range in Swedish crystalline bedrock	Possible suitability indicator	Criteria after feasibility study (FS) and after site investigation (SI)
Occurrence of dissolved oxygen	Isolation, canister Retardation, fuel Retardation, bentonite Retardation, rock	Absence of dissolved oxygen at repository level (indicated by negative Eh, occurrence of Fe(II) or occurrence of sulphide).		At repository depth the Eh values are negative, [Fe ²⁺] 5 µg/l – 10 mg/l sulphide conc.: 0.01 – 5 mg/l. Laaksoharju et al., 1993, 1998)	Yes	FS: No criteria (no data available) but there is no reason to believe that the requirement cannot be met. SI: At least one of the indicators Eh, Fe ²⁺ , HS ⁻ must be satisfied.
pH	Isolation, canister Isolation, bentonite Retardation, fuel Retardation, bentonite Retardation, rock		Undisturbed groundwater at repository level should have a pH in the range 6–10.	Below depths of 100 m, pH is as a rule 6<pH<10, but deviations (e.g. Stripa) occur. (Laaksoharju et al., 1993, 1998) Above 100 m the expected range is greater.	Yes	FS: No criteria (no coupling to surface water). SI: Below the –100 m level, quality-approved values should lie in the range 6–10.
TDS (Total Dissolved Solids)	Isolation, canister Isolation, bentonite Retardation, bentonite Recipient	TDS<100 g/l		Down to a depth of 1,000 m 0–35 g/l. Up to 100 g/l has been measured at 1,700 m depth (Laxemar). Depth to high TDS generally greater at inland locations. (Laaksoharju et al., 1993, 1998).	Yes	FS: No criteria SI: Quality-approved measured TDS at repository level must meet this requirement. Occasional higher values can be accepted if it can be shown that the water is located in areas that can be avoided.
DOC (Dissolved Organic Carbons)	Isolation, canister Isolation, bentonite Retardation, fuel Retardation, bentonite Retardation, rock			As a rule, [DOC]<10 mg/l at repository level. Higher values can occur temporarily during the construction period.	No	FS: No criteria SI: Attention if very high concentrations are measured.

Cont. Table B-5

Geoscientific parameter	Reference to function in function table	Requirements regarding parameter	Preferences regarding parameter	Value range in Swedish crystalline bedrock	Possible suitability indicator	Criteria after feasibility study (FS) and after site investigation (SI)
NH ₄ (ammonium)	Isolation, canister		Low concentrations		No	FS: No criteria SI: Attention if very high concentrations are measured.
Ca and Mg	Isolation, bentonite Retardation, bentonite Retardation, rock		[Ca ²⁺]+[Mg ²⁺]>4 mg/l at repository depth to ensure that the bentonite gels stably and does not create colloids (Laaksoharju et al., 1995). Higher values no advantage.	[Ca] in range 21–1,890 mg/l and [Mg] in range 1–110 mg/l (Laaksoharju et al., 1993, 1998). (i.e. preference always satisfied).	Yes	FS: No criteria SI: Special investigation required if measured concentrations deviate from preferences.
Colloids	Retardation, rock		Low conc. <0.5 mg/l	Median concentration of colloids in the groundwater is less than 0.05 mg/l (Laaksoharju et al., 1995).	Doubtful (preference carries little weight).	FS: No criteria SI: Attention if very high concentrations (see preferences) are measured.
Free gas	Isolation, canister Retardation, rock		Not free gas form at repository depth	Does not exist as a rule.	No	FS: No SI: Attention if very high concentrations are measured.
Ra, Rn	Working environment		Low concentrations		No, high concentrations can be managed by ventilation etc.	
Other components	Understanding					

(2) フィンランドにおける沿岸部の処分場立地に係る課題認識と対策案

既に述べたように、フィンランドの第 1 段階における全国レベルでの調査（サイト確定調査）では、沿岸部に特別な配慮は行われておらず、また、スウェーデンで当初に実施されたような沿岸部と内陸の相対比較に基づくサイト選定上の優劣といった分析も行われていない。ただし、第 2 段階の概略サイト特性調査以降、調査対象に含まれた沿岸部の特定地点における実際の地質環境条件等に対して、安全評価までを見据えた検討が行われている。

このような検討の経緯について、4.1.2 (2)で抽出した沿岸部に関連する既存の知見を含む主要な技術資料を概観する限り、フィンランドにおける沿岸部の処分場立地に係る課題抽出の視点は、スウェーデンとほぼ同様であり、主要な視点の一つは地下の人工バリア構成材に対する主に塩水の存在に伴う影響（地下水化学）、もう一つは、そのような塩水環境の変化をもたらす地下の水理環境の変化である。以下では、1999 年の原則決定申請時に取りまとめられた TILA-99 (Posiva, 1999) を対象に、塩水の存在及び水理環境の変化の観点から、工学技術に関連するものに絞って整理する。

また、Posiva 社は、処分場設計及びレイアウト設計に関する指針となる母岩要件の開発を、岩石適格性規準 (RSC) プログラムとして進め、2009 年に、その中間報告として規準等に関する予備的な検討と整理を行っている¹⁰ (Posiva, 2009)。TILA-99 までに認識された沿岸部に係る課題への対応の観点で(課題に対して、どのような要件や規準として整理がなされたかといった観点)、同技術資料で示された内容についても以下に整理する。

1) 課題認識と対策案：TILA-99 で示された知見

TILA-99 で対象とされた四つの地点（ハーシュトホルメン、オルキルオト、キヴェッティ、ロムヴァーラ）のうち、内陸部に位置するキヴェッティとロムヴァーラで得られた地下水サンプリングデータは、全て淡水に分類された。沿岸部に位置するオルキルオトについては、淡水、淡塩水、塩性水、強塩性水が混在し、その殆どがブラインタイプの地下水であることが確認された。また、地下 800m より深い所では、TDS の最大値として 69g/L を示すサンプリング結果が得られた。同じく沿岸部に位置するロムヴァーラでは、淡水 (TDS < 1 g/L) から塩性水 (TDS > 10 g/L) まで広がっており、観測された最大の TDS は 32 g/L であった (Posiva, 1999)。

このような地下環境（地下水化学環境）に対して、塩水の存在及び水理環境の変化等の観点から、以下のような整理が行われている (Posiva, 1999)。

① 極めて塩分の高い地下水に対する人工バリアの性能

- 緩衝材の圧縮ベントナイトと塩水との関係について、次のような知見が得られている。
 - ・ 塩水地下水は圧縮ベントナイトの膨潤能力および透水係数を低下させるものの、実験室での試験やモデルリング研究によれば、圧縮ベントナイトの密度が十分に高い（飽和時 2,000kg/m³）場合、極めて塩分の高い地下水（TDS で 100g/L まで）であっても必要な膨潤圧（約 5 MPa）が得られる。
 - ・ 一方、濃縮したブライン水（TDS > 100g/L）で機能を得るために必要なベントナイト密度は、その結果として、緩衝材としての圧縮ベントナイトの利点が逆に問題となる。
- 地下水の塩分は、粉碎岩石とベントナイトの混合物である埋め戻し材の膨潤能力にも影響を与える。
- 後述する地下水流動と移行解析、及び放出モデルや移行に係るパラメータに関して、塩水

¹⁰ 2012 年に更新版の報告書 (POSIVA Report 2012-24) が取りまとめられている (POSIVA, 2012b)。

地下水の影響は重要な役割を演じる（塩水環境において変化する緩衝材と埋め戻し材における収着・分配・拡散係数など：ニアフィールドやファーフィールドの移行パラメータにも影響）。

※TILA-99 では、緩衝材とセメント系材料（アルカリ影響）との相互作用のなかで、以下の留意事項も示している。

- ・カルシウムによるナトリウムの置換はカルシウムに富む地下水のある所ではどこでも起こり得るが、この置換が高圧密ベントナイトの性能にわずかながら影響を与えると考えられている。（ただし、当時実施されていた実験室における試験では、モンモリロナイト格子の変化や破壊を示す明らかな証拠は認められなかったとしている。）
- ・100～10,000年の時間枠における処分システムに及ぼす影響の一つ：シーリング材などのセメント系材料は浸入地下水と反応し、徐々にその品質が低下する。このプロセスの時間スケールはセメントの透水性、地下水流速、および地下水の組成により決まる。沿岸地域のサイトの、塩分が強くアンモニウムに富む地下水は、セメント系材料によるシーリング箇所に対して長期間にわたり腐食作用を及ぼすが、その割合は、内陸サイトにおける地下水よりも恐らく強力である。（ただし、セメント系材料によるシーリング箇所は、数万年から数10万年にわたってその低い透水性を維持すると結論付けている。）
- ・塩性が強い塩水系地下水及び緩衝材と埋め戻し材上のコンクリートから発生する超アルカリ性流体の影響について、更なる研究が必要である。

②流動と移行

○候補サイトに対する地下水流動および溶質の移行解析では、実施において次のような考慮がなされている。

- ・流動・移行解析は、地域スケール、サイトスケール、キャニスタ（処分孔）スケールで実施（亀裂ネットワークモデルを活用）。
- ・キャニスタスケールでの解析では、ニアフィールドを、インタクトな岩石のセクション、掘削損傷ゾーン（EDZ）、破砕帯ゾーンでモデリング（図 4.1-8）。

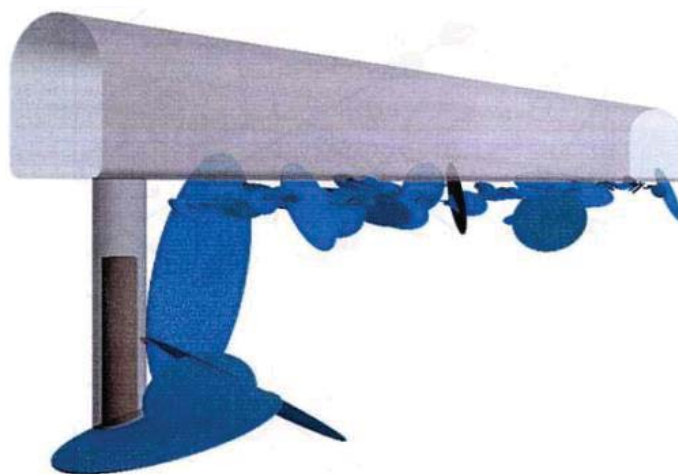


Figure 7-4. A flowpath from the deposition hole into the excavation damaged zone (Poteri & Laitinen 1999).

図出典：(Posiva, 1999) より

図 4.1-8 SR97 におけるニアフィールドの流動経路のモデリング例

- ・沿岸部の候補サイトに関する解析では、予想される陸地の隆起（次の1,000年間）が地下水流動および地下水の塩分に与える影響を考慮。

○候補サイトに対する地下水流動および溶質の移行解析によって、以下の結果や知見が得られている。

- ・キャニスタスケールに落とし込んだ解析の目的の一つは、地下水の塩分の推移を評価すること。
- ・上記に関して、処分場深度（地下500m）におけるTDSは、オルキルトで19g/L（塩水性に分類）、ハーシュトホルメンで8.3g/L（淡塩水）との結果が得られた。両ケースで、処分場深度における地下水は今後1万年以内に起きる陸地の隆起の結果、淡水に変化する。

③安全評価における塩水の扱い

○上記①に示した、放出モデルや移行に係るパラメータに関する塩水地下水の影響は、安全評価においても、**what if** シナリオとして考慮。

○安全評価に基づく不確実性に係る議論では、工学設計と性能評価の観点から考慮すべき塩水の存在について、元々は淡水や汽水または塩性の地下水の区域に位置する処分場への深層塩水の浸透を生じさせる潜在的なメカニズムが想定されることを指摘（以下）。

- ・沿岸区域は地域の勾配に起因するプレート塩水の自然の流出スポットであることが指摘されている。
- ・沿岸サイトでは、氷、氷湖、海の下にあった期間が長く、気象上の地下水循環をあまり経験していない可能性。

○塩水の上昇運動は、処分場の操業期間中にはポンピングによって発生する。また、氷床と永久凍土も深層塩水の上昇運動を生じる可能性がある。さらに、塩分は永久凍土の解凍時に水中に集まる傾向がある。

2) 課題認識と対策案：岩石適格性規準（RSC）プログラム中間報告で示された知見

岩石適格性規準（RSC）プログラム（Posiva, 2009）は、処分場の建設許可段階以降の技術的な取組に資することを目的として、処分場設計及びレイアウト設計の指針となる母岩要件を定義・開発するものであり、母岩要件と共に、技術的な人工バリアの設計・製造及び実現に関する要件の設定などが検討された。以下に、その内容を紹介する中間報告は、プログラムの第1段階の整理として、Posiva社が2009年迄の検討成果を取りまとめたものである。

上記目的から、RSCプログラムは、母岩に関する性能目標の定義、規準の開発及び試験、母岩に関する工学目標の定義といった階層的なプロジェクトで構成されている。これらから、沿岸部に関連する事項（塩水の存在及び水理環境の変化等）について以下に要約整理する¹¹。

なお、本プログラムはオルキルトにおける地下特性調査施設（ONKALO）による地下の詳細な調査結果等が加味されており、開発される規準等は、オルキルトに設置する地層処分場への適用に最適化されたサイト・スペシフィックなものが含まれる可能性に留意が必要である。

¹¹ RSCプログラム中間報告では、主要な検討成果は「§4 長期的な安全性に関する母岩要件」、「§5 岩石適格性規準の開発」、「§6 母岩に関する工学的な目標」の3つのセクションで展開されている。§4は安全性（安全機能）に影響を及ぼす要因等に関する定性的な説明が主体となっており、その内容は本書にこれまでに整理した内容と重複する。§6は本中間報告の段階では体系的な整理に至っていない。このような状況を踏まえ、ここでの要約整理は、適宜§4の課題認識を参照しつつ、§5で示された知見等を中心に整理している。

①人工バリアの機能に関連する性能目標（緩衝材）

○地下水塩分濃度（TDS：総溶解性蒸発残留物濃度）

- ・地下水の塩分濃度は、ベントナイトの膨潤圧に影響を及ぼす。塩分が膨潤圧に及ぼす影響は、飽和状態における緩衝材の密度上昇に伴って低減する。SKB社のSR-Canによると、 $1,890\text{kg/m}^3$ を上回る緩衝材飽和時の密度を伴うMX-80とDeponit Ca-Nベントナイトの両方の膨潤圧は、NaCl及びCaCl₂の3mol/L(M)の塩水にさらされた場合でも、約1MPaの水準に留まる。総溶解性蒸発残留物濃度（TDS：g/L）の単位で示されるこれらの塩分濃度は、100 g/Lを大きく超える塩分濃度を意味しており、この水準の濃度は処分場深度で予想されるものではない。
- ・母岩に対する性能目標は、『性能目標：TDS < 70 g/L』である。現在の情報によれば、オルキルトにおける地下水の塩分濃度は、処分場深度である400～500mにおいて20g/Lをわずかに上回っている可能性があるが、坑道への水の漏出量が低く、鉛直方向の水理地質学的領域の透水量係数も低い場合には、高い塩分濃度が成立するとは考えられていない。

○二価陽イオンの総濃度

- ・緩衝材の化学的な侵食は、極めて低いイオン強度を伴う地下水が存在する場合に起こり得る。緩衝材の侵食を回避する必要性から、イオン強度は十分に高いものとなるべきである。二価陽イオンの総濃度は、目標値を上回っているべきである。
- ・母岩に対する性能目標は、『二価陽イオンの総濃度 > 10^{-3}M 』である。ただし、実地調査により、大深度では一般にこの目標は満たされていることが示されており、分類に具体的な規準を追加する必要はない。

※本中間報告では、緩衝材ベントナイトの変質に係るイオン交換に関して、必ずしも塩水濃度や塩水系地下水に含まれる他の鉱物との関係性を明示していないが、金属材料やセメント系材料など、他の構造物との相互作用の観点から次のような留意事項も示している。

- ・緩衝材の鉱物の変質は、高い温度の影響、ベントナイトとセメント系材料からの高pH浸出液ブルームとの間で生じる相互作用、あるいは鉄の腐食生成物との相互作用の結果として起こり得る。モンモリロナイトの長期的な安定性は、変化し続ける地下水条件による影響を受ける可能性もあり、これに伴ってモンモリロナイトがNaタイプからCaタイプに変化する可能性がある。金属製の構造物（特にFeを伴う構造物）との相互作用に起因する緩衝材の変質が生じる可能性もある（Feと粘土の間の相互作用プロセスに関する理解を深めるための調査活動の必要性を示唆している）。
- ・処分孔に至る地下水によって移行されるグラウト浸出液の影響も検討する必要がある（低pHグラウトの開発など）。

②人工バリアの機能性に関連する性能目標（埋め戻し材）

○地下水塩分濃度（TDS：総溶解性蒸発残留物濃度）

- ・埋め戻し材は、移行経路の形成を妨げ、坑道の力学的な安定性を高め、処分場への意図的でない人間侵入を防止する。さらに埋め戻し材は、緩衝材が膨潤して処分孔の外に出ないように、緩衝膨潤圧に対して十分な反圧を提供するものとなる。
- ・埋め戻し材が上述の機能を発揮するには、十分な膨潤圧（100～200kPa）が必要である。膨潤圧は、埋め戻し材の物質の特性に左右され、最も重要な要素として膨潤性物質の含有量及び密度が挙げられる。また塩分も膨潤圧に影響を及ぼすため、塩分濃度に関する設計上限値は35 g/Lである（海水の塩分濃度と類似した水準）。

- 建設作業、あるいは氷河期に引き起こされる擾乱に起因するかたちで、深層塩水の上昇が起こる可能性がある。サイトの経時的変化に関する記述に従い、処分場レベルにおける最大塩分濃度は、場合によってはそれを上回る水準に至ることも考えられるものの、20～25g/Lを下回る水準に維持されるものと予想されている。同様に、調査されたいくつかの埋め戻し材が比較的高い塩分濃度（7%）でも十分な膨潤圧を示すことができたように、材料の選択に応じて比較的高い濃度が許容される可能性もある。

③検討する必要があるその他の問題（地下水流動状況）

- 迅速な移行経路または塩水との潜在的な結び付き、更に他の不利な特徴の存在の把握のために、より小さなスケールによる地下水流動状況が解析・把握される必要がある。
 - ONKALO の坑道や処分場の掘削は、オルキルオトの大深度における地下水流動条件に影響を及ぼす。とくに、坑道や処分場の内部及び近辺における地下水面と塩分濃度分布にも変化が生じることが予想されている。しかしグラウトの実施によってこうした変化を緩和することができる。
 - 操業段階に、開いた状態にある掘削部分が原因となって塩水地下水の上昇が起きる可能性がある。ONKALO（深度約 540m に到達している）の影響を検討するモデルによって、処分場深度（440m）における最大塩分濃度（TDS：総溶解固形物濃度）は 15～20 g/L の範囲と推定されている。坑道が開かれた状態にある期間における、ベースライン・レベルからの増分は約 5 g/L である。
- ※本中間報告では、水理地質学的観点から、処分場レイアウトの決定における母岩環境の特徴付けにおいて、坑道への地下水の漏出と塩水のさらなる上昇を回避するために、効果的な工学的グラウト法が利用されれば、この点（小規模な透水性領域または亀裂）は受け入れ可能との考え方も示されている。また、この段階（2009 年）における今後の課題として、以下が示されている。
- ・塩分濃度分布に関する見積もり、また処分場レベルにおいて予想される最大塩分濃度に関する見積もりの改善が必要である（坑道沿いの流動及び処分孔へと至る流入の分布が考慮されるような予測の解像度への改善）。
 - ・地下水、流入量及び塩分濃度に関する様々な条件の予測に当たっては、建設によって引き起こされる擾乱を考慮に入れるだけでなく、長期安全性にとって関連性の高いものであるかどうかを検討することが重要である。

4.1.4 まとめ

本章の冒頭で述べたように、本節（4.1 節）では、次節以降に詳述する取組に資するべく、沿岸部の地層処分に特有となる“課題抽出の視点”を整理することを目的に、沿岸部での地層処分場の立地を進めているスウェーデンとフィンランドを対象に、先行的に行われた検討内容等の調査及び整理を行った。

前項までに整理した両国のこれまでの検討に係る技術資料等から、沿岸部に特有となる課題抽出の視点として、工学技術の観点から次のように整理できる。

- 人工バリア等のニアフィールド構成要素に期待する安全機能に及ぼす影響の観点から、特に地下水の化学条件（塩水の存在を含む地下水組成条件等）が重要である。その際、以下に留意が必要である。
- ・塩水環境について、ペントナイトで構成される緩衝材のみならず、処分坑道埋め戻し材等への影響にも留意が必要である。今後の仕様検討や安全機能の割り当てにも依存するが、

仕様設定の柔軟性（圧縮密度を上げられる可能性）の観点では、緩衝材よりも、混合土として調整幅に制約のある埋め戻し材への影響に留意が必要である。

- ・北欧の研究からは、必ずしも沿岸域に特化したものではないが、ベントナイトの変質（ゲル化した粘土の浸食）に影響するものとして、二価の陽イオンの総濃度にも注意を払っている。このことは、塩水系地下水に含まれる他の鉱物にも留意が必要であることを示唆している。
- ・セメント系材料への影響について、ベントナイト系緩衝材へのアルカリ影響への塩水地下水の関与のみならず、セメント系材料への塩水地下水による直接的な劣化影響も念頭に置かれている。
- ・上記のような個々の構成要素への影響のみならず、それらの相互作用や相互プロセスについて、THMCの観点からシステム全体として捉えておく必要性がある。

○処分場深度の地下水の塩分濃度の長期的な変遷挙動把握の観点から、以下に留意した地下の水力場の把握と将来の変遷挙動の見積（予測）が重要である。

- ・水力場の変遷は長期挙動のみならず、建設・操業期間の地下坑道の開放（排水）に伴う、地下深部の高塩分濃度水（北欧では一般的に深度の増加に伴い塩分濃度が増す）や、周囲の塩分濃度の高い滞留水やブライン水の引き込みの可能性にも留意が必要。
- ・上記の把握には、水力モデル（流動解析モデル）の開発において、地域スケールから、処分場スケール、処分孔スケール（ニアフィールド領域）へと解像度を上げる必要がある

※フィンランドでは、このようなスケール（ニアフィールド）での流動場の解析において、インタクトな岩石のセクション、掘削損傷ゾーン（EDZ）、破砕帯ゾーンをモデリングしたネットワークモデルで実施。その目的の1つに、地下水の塩分濃度の推移を評価することとしている。

○上記のような、塩水地下水による EBS 構成要素への影響低減策の1つとして、グラウトが挙げられている。

- ・更に、効果的なグラウト法により、地下の処分空間の有効活用も見込まれる（小規模な透水性領域や亀裂を受け入れられる）。
- ・上記スケール（ニアフィールド）での流動場の解析では、このようなグラウトの効果も加味されることが望ましい。

本節に示した調査や整理によって、上記のような課題抽出の視点が整理できた。一方で、両国で採用されている特徴的な処分概念（KBS-3）や、既に述べた整理の制約から、例えば下記事項に関する課題抽出の視点に関係する北欧での取組や検討の細部までは整理できていない。

- ・わが国で有望となる処分概念に基づく、人工バリアを含むニアフィールド構成要素（セメント系材料や金属材料（Fe）など）に対する地下水化学条件（塩水の存在を含む地下水組成条件等）の影響
- ・沿岸部の地下水化学条件（塩水の存在を含む地下水組成条件等）のもとでの、人工バリアを含むニアフィールド構成要素間の相互作用に関する理解と対策

ただし、これらについても、上記の課題抽出の視点を参考とすることで、沿岸部の特性等に関連して、更なる検討が必要となる課題等の整理・抽出が可能と考える。

参考文献

- 経済産業省資源エネルギー庁 “諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について 2015 年版” .
- Laaksoharju, M., Degueldre, C. and Skårman, C., “Studies of colloids and their importance for repository performance assessment”, SKB TR 95-24, 1995
- Posiva, “Interim report on safety assessment of spent fuel disposal TILA-96, 1996”, POSIVA 96-17, 1996.
- Posiva, “Safety assessment of spent fuel disposal in Hastholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara TILA-99”, POSIVA 99-07, 1999.
- Posiva, “The site selection process for a spent fuel repository in Finland - Summary report”, POSIVA.2000-15, 2000.
- Posiva, “RSC-Programme - Interim Report Approach and Basis for RSC Development, Layout Determining Features and Preliminary Criteria for Tunnel and Deposition Hole Scale”, Working Report 2009-29, 2009.
- Posiva, “Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Synthesis 2012”, POSIVA2012-12, 2012a.
- Posiva, “Rock Suitability Classification RSC 2012”, POSIVA Report 2012-24, 2012b.
- SKBF, “Handling of Spent Nuclear Fuel and Final Storage of Vitrified High Level Reprocessing Waste Volume I General”, 1997.
- SKBF, “Handling and Final Storage of Unreprocessed Spent Nuclear Fuel Volume I General”, 1978.
- SKBF, “Final Storage of Spent Nuclear Fuel - KBS-3 Summary”, 1983.
- SKB, “RD&D-PROGRAMME 92 SUPPLEMENT, TREATMENT AND FINAL DISPOSAL OF NUCLEAR WASTE, SUPPLEMENT TO THE 1992 PROGRAMME IN RESPONSE TO THE GOVERNMENT DECISION OF DECEMBER 16, 1993”, 1994.
- SKB, “General Siting Study 95, Siting of a deep repository for spent nuclear fuel”, SKB TR-95-34, 1995.
- SKB, “Bentonite swelling pressure in strong NaCl solutions Correlation between model calculations and experimentally determined data”, SKB TR-97-31, 1997
- SKB, “RD&D-Programme 98, Treatment and final disposal of nuclear waste, Programme for research, development and demonstration of encapsulation and geological disposal”, 1998a.
- SKB, “Nord-syd/Kust-inland, Generella skillnader i förutsättningar för lokalisering av djupförvar mellan olika delar av Sverige”, SKB R-98-16, 1998b.
- SKB, “Deep Repository for spent nuclear fuel, SR97 - Post closure safety, Main Report - Main Report Volume I”, SKB TR-99-06, 1999.
- SKB, “What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation”, SKB TR-00-12, 2000.
- SKB, “Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, Volume I”, SKB TR-11-01, 2011.
- TVO, “Safety analysis of Spent Fuel Disposal”, TVO-92, 1992.

4.2 人工バリア材料等を対象とする劣化や変質に関する現象の把握

4.2.1 はじめに

沿岸部における地層処分場を念頭に、ニアフィールド領域で用いられる様々な材料について、これまでの研究開発等で取得されたデータ等の調査を行い、既存の知見として整理する。また、現状の知見から不足しているデータや今後検討が必要な課題を整理する。その際、材料間の相互作用等に関する情報にも留意しつつ、検討対象材料をオーバーパック（腐食挙動）、緩衝材（劣化・変質挙動、膨潤挙動、流出挙動）、その他のニアフィールド構成材料（劣化・変質、流出挙動など）の三つに分類して整理する。さらに、この整理結果を踏まえて、試験時間や試験スケール等を考慮して、必要なデータ等を取得するための全体試験計画を立案する。立案に当たっては、閉鎖後の長期挙動評価への反映と、設計・施工等のエンジニアリングへの反映といった二つの観点に着目する。

既存の知見と課題の整理に当たっては、対象材料について、その挙動と影響因子を表 4.2-1 に示すように分類した。

表 4.2-1 対象材料とその挙動に影響を及ぼす因子の整理

材料		考慮すべき挙動
オーバーパック		不働態化
		酸素による腐食進展
		水の還元による腐食進展
		応力腐食割れ
		水素脆化
緩衝材		基本特性に対する化学的影響
		侵入・浸食
		残留密度差
		膨潤圧
		浸潤速度
		流出
		緩衝材定置方法による膨潤性能への影響
その他のニアフィールド構成材料	セメント	劣化・変質 相互影響 流出
	埋め戻し材	
	隙間充填材	
	支保	
	プラグ	
	グラウト	

4.2.2 既存の知見などの調査

表 4.2-1 の各材料について、これまでの研究開発等で取得されたデータ等の調査を行った。各材料で着目した挙動について調査研究の実施内容と成果を Appendix 1 にまとめた。またより詳細な成果を知見シートとして Appendix 3 に示した。

(1) オーバーパック

オーバーパックは、周囲を緩衝材に囲まれた状態で地下に定置される。定置後には、地下水が緩衝材中に浸潤し、緩衝材と化学的平衡状態にある緩衝材間隙水とオーバーパック材料である金属との化学反応により腐食が生じる。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）では、わが国で想定される代表的な地下水として以下が挙げられている（油井ほか, 1999）。

① リファレンスケースとして採用された地下水

安全評価の解析において、様々な解析ケースの比較の基準とする参照ケース

降水系還元性高 pH 型モデル地下水 Fresh-reducing-high-pH Groundwater (FRHP)

② 塩水の影響を受ける環境に処分場を建設した場合の地下水

リファレンスケースに対して、地質環境を変化させた想定ケース

海水系還元性高 pH 型モデル地下水 Saline-reducing-high pH Groundwater (SRHP)

③ 坑道安定性のために、コンクリート支保工を施工した場合の地下水

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

④ 地層の隆起など基本シナリオを変更した場合の地下水

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

降水系酸化性高 pH 型モデル地下水 Fresh-oxidizing-high-pH Groundwater (FOHP)

⑤ 参考地下水

降水系還元性低 pH 地下水 Fresh-reducing-low-pH Groundwater (FRLP)

海水系還元性低 pH 地下水 Saline-reducing-low-pH Groundwater (SRLP)

高炭酸系還元性中性型モデル地下水

Mixing-reducing-neutral-pH Groundwater (MRNP)

これらの代表的な地下水に対して、リファレンスケースの緩衝材仕様(1.6Mg/m³、クニゲル V1: ケイ砂=7:3)に沿って、間隙水化学モデルの構築、地球科学計算コード PHREEQC による化学平衡計算により、緩衝材の間隙に存在する平衡水の化学組成が求められている（小田ほか, 1999）。これらの緩衝材間隙水の化学組成について、オーバーパックの腐食に対する影響が大きいと考えられる化学種の濃度範囲と pH の範囲を表 4.2-2 に示す(核燃料サイクル開発機構, 1999)。

表 4.2-2 緩衝材間隙水中の化学種の濃度範囲と pH の範囲（計算値）
（核燃料サイクル開発機構,1999）

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

第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構, 1999）では、一般産業界を含む幅広い腐食研究の既存の報告と、表 4.2-2 の緩衝材間隙水の化学組成から、地層処分環境にてオーバーパックに生じると考えられる腐食挙動を抽出し腐食シナリオが構築されるとともに、腐食シナリオにおいて位置付けられる種々の現象について、文献調査や腐食試験を実施し、リファレンスケースのオーバーパックの腐食代が設定されている。このプロセスでオーバーパックの設計や寿命に大きな影響を与えると判断された五つの主たる腐食挙動について、これまでの知見を整理した。

- ・不働態化挙動
- ・酸素による腐食進展挙動
- ・水の還元による腐食進展挙動
- ・応力腐食割れ挙動
- ・水素脆化挙動

これらオーバーパックの腐食挙動については実験室規模での試験で詳細に調査が行われている。表 4.2-2 の間隙水組成は、実際にオーバーパックが曝される環境を考慮した試験条件を決定する際の環境因子の根拠とされている。また溶接封入の影響を評価するため、溶接部付きの試験片を用いた試験も実施されている。以下に、各挙動の既存の知見について示す。

1) 不働態化挙動

炭素鋼が不働態化した場合、孔食、すきま腐食、応力腐食割れなどの局部腐食の腐食形態となる可能性がある。オーバーパックの寿命を腐食代の設定で担保するためには、炭素鋼が不働態化せず、全面腐食の形態となることが前提となる。

緩衝材間隙水の化学種のうち、炭酸塩は炭素鋼の不働態化を促進し、塩化物イオン、硫酸イオンは不働態化を抑制する作用がある。また高 pH 条件ほど不働態化しやすい。一方、炭酸塩水溶液単独系ではアノード分極によって容易に不働態化する条件でも、圧縮ベントナイト中では不働態化が阻害される（Taniguchi et.al.,1998）。pH に対して炭酸塩濃度 0.1M 以下の条件で炭素鋼

が不働態化する条件を整理した結果から、緩衝材間隙水の pH が約 10.5 以上で炭素鋼の不働態化が生じると推定した。緩衝材に浸潤させる前の地下水と比較して緩衝材間隙水の pH は低下しており、間隙水の pH が 10.5 に達するのは浸潤させる地下水の pH が約 13 以上の場合と推定した。また、炭酸塩濃度が増加すると炭素鋼が不働態化する pH は小さくなり、0.5M 以上になると緩衝材間隙水の pH が 8.5 以下であっても不働態化することを確認した。溶接試験片を用いた実験でも母材と同様の挙動を示すことを確認した。(例えば、原環センター, 2010)

2) 酸素による腐食進展挙動

オーバーパックを地下に埋設後、初期の段階では緩衝材や埋め戻し材の間隙に存在する空気、および開放期間中の坑道からの酸素を酸化剤とした腐食が進行する。酸素による腐食挙動、腐食深さを把握するため、炭素鋼の母材、アーク溶接 (TIG: Tungsten Inert Gas、MAG: Metal active gas welding)、電子ビーム溶接 (EBW: Electron beam welding) により作製した溶接試験体を用いた浸漬試験を実施した。試験溶液は人工海水 (SSW: Synthetic Sea Water、ASTM D1141)、人工淡水 (SFW: Synthetic Fresh Water)、塩化物イオン濃度 0.18~0.28M (海水の約 1/3~1/2) の幌延深地層研究センターで採取した実地下水や模擬地下水で、試験条件は 80℃、溶液単独、空気吹込みである。

平均腐食深さ (X_m) は、試験前後の試験片の重量減少量を表面積で除して求めた。これまでに実施した最も長期の試験は TIG 溶接試験片の 3.6 年間であり、 $X_m = 0.407$ mm であった (原環センター, 2013)。最大腐食深さは (P) は、試験片の表面形状の計測結果から極値統計解析により推定した。炭素鋼の浸漬試験結果より、平均腐食深さに対する P は、全面腐食、孔食・すきま腐食それぞれに対して以下の経験式が導出されている。

$$\text{全面腐食 : } P(\text{mm}) = X_m + 7.5X_m^{0.5} \quad \text{式 4.2-1}$$

$$\text{孔食・すきま腐食 : } P(\text{mm}) = X_m + 6.4X_m^{0.25} \quad \text{式 4-2-2}$$

これらの経験式より、第 2 次取りまとめでは、酸素による平均腐食深さを 1.8 mm、最大腐食深さを 12 mm と設定した (核燃料サイクル開発機構, 1999)。溶接試験体についても同様の試験が実施されており、溶接材料を使用するアーク溶接法 (TIG、MAG) の溶接金属部で選択的な腐食が確認され、一部で母材の P を上回る結果となった。これについては溶接材料の改良で品質改善が出来る見通しを得ている (原環センター, 2010)。

3) 水の還元による腐食進展挙動

オーバーパックを地下に埋設して酸素が枯渇した後は、水を酸化剤とした腐食が進行する。この腐食挙動、腐食速度を把握するため、炭素鋼母材を用いた浸漬試験が実施された (核燃料サイクル開発機構, 1999)。実際の地層処分環境を模擬するため、リファレンスケースの緩衝材 (1.6 Mg m⁻³、クニゲル V1 : ケイ砂 = 7 : 3) と同じ配合・密度の圧縮ベントナイト中に試験片を埋め込み、低酸素雰囲気中に制御されたグローブボックス内で、試験溶液 (SSW、SFW) とともに容器に密封して浸漬試験を行った。試験前後の試験片の重量減少量を浸漬期間で除す方法で求めた平均腐食速度は 10 μm/y を下回っており、この速度を基に水の還元による腐食代 20 mm が設定されている。

溶接試験体 (TIG、MAG、EBW) についても同様の浸漬試験を行い、溶接手法が腐食挙動や速度におよぼす影響を調査している。浸漬試験後の試験片の表面形状計測の結果、酸素による腐食進展挙動で観察されたような、溶接部の選択的な腐食の発生は認められなかった。平均腐食速度

は、何れの条件においても浸漬 3 年間を経過した時点で $10 \mu\text{m/y}$ を下回ることが確認されている（原環センター, 2010）。

4) 応力腐食割れ挙動

炭素鋼の応力腐食割れ（SCC: Stress Corrosion Cracking）に関する既存報告及び表 4.2-2 に示した緩衝材間隙水の化学種の濃度範囲より、炭酸塩環境下で熱影響を受けた部位に SCC が生起する可能性があることが課題として抽出された（核燃料サイクル開発機構, 1999）。この課題に対して、オーバーパックで熱影響を受ける部位である溶接部や後熱処理部の SCC の感受性について、定電位分極と低歪速度引張試験（SSRT: Slow Strain Rate Test）を組み合わせた手法により SCC 感受性を評価し、感受性が消失する炭酸塩濃度と、表 4.2-2 に示した緩衝材間隙水での炭酸塩濃度（ 0.073mol/L ）を比較することで、実環境における SCC の生起について調査が行われた。

SSRT の予備試験として、 NaHCO_3 と Na_2CO_3 を 2:1 のモル比で混合した炭酸塩・重炭酸塩溶液中で SCC の感受性が高くなる活性溶解／不働態へ遷移する電位領域を取得した。同一組成の溶液中で引張試験片を取得した電位に保持しながら SSRT を実施し、試験後の破断面を走査型電子顕微鏡（SEM: Scanning electron microscope）で観察し、特徴的な SCC の破面である結晶粒界が現れた部分と延性破壊の破面を分類して SCC の破面率を算出し、感受性の判断指標とした。

1.5M から溶液濃度を変化させ濃度の影響を評価した結果、溶液濃度が低くなるほど SCC 感受性は低下し、0.2M で感受性が消失したことから、実際の緩衝材間隙水中の濃度では SCC が生起する可能性は低い。また部位ごとに SCC の感受性を比較した結果、炭素鋼母材の感受性が溶接部に比べて高くなった。これは今回の SCC が粒界進展型であり結晶粒界が相対的に大きい母材の方が亀裂進展しやすいことが影響していると推察される。

さらに、SCC の進展の駆動力となる溶接残留応力については、溶接後熱処理（PWHT: Post Weld Heat Treatment）で低減、または外面誘導加熱応力改善法（EIHSI: External Induction Heating Stress Improvement）でオーバーパック溶接部の表面を圧縮応力場にするといった、溶接部の品質改善手法によるオーバーパックの破損の可能性を減じる対策も検討されている（原環センター, 2013）。

5) 水素脆化挙動

3) に示した水の還元反応による炭素鋼の腐食では、対反応として生じた水素が鋼中に侵入し、水素脆化を引き起こすことが懸念される。水素脆化挙動の判断指標として鋼中水素濃度があり、腐食の進行に伴う水素濃度の経時変化を評価するための試験が継続して実施されており、炭素鋼母材については 10 年間、溶接部については 3 年間までの結果が報告されている。試験方法は「3) 水の還元による腐食進展挙動」と同一の低酸素雰囲気下での浸漬試験である。浸漬後の試験片内の水素濃度を昇温脱離分析（TDS: Thermal Desorption Spectrometry）で取得し、室温から 250°C までに放出された水素量が脆化に寄与する拡散性水素量として評価された。その結果、浸漬 3 年間までの水素濃度は、 0.1 ppm を下回ることが確認されている。この水素濃度は、炭素鋼の材料強度から経験的に得られている水素脆化の臨界水素濃度よりも 1 桁近く低いものであり、水素脆化の生起の可能性は低い（村田, 1981）。

(2) 緩衝材

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；2005；松本・藤田, 2011）。

また、再冠水時の緩衝材に対する地下水浸潤、塩水による緩衝材変質及び緩衝材の流出を把握するために試験を行っている（原環センター, 2015）。再冠水時の挙動に関する試験についても、塩水を想定した試験を実施しており、イオン強度による影響を把握するための試験には NaCl 溶液、ベントナイトの Ca 型化の影響を検討するものとして CaCl₂ 溶液を使用している。

試験で用いた NaCl 及び CaCl₂ 溶液は、イオン強度が 0.5 となるように調整している。なお、イオン強度 0.5 の NaCl 溶液は、海水相当（3%）である。表 4.2-3 に各試験に使用した液種についての一覧を示す。

表 4.2-3 緩衝材試験使用液種一覧

試験名	蒸留水	NaCl 溶液 (イオン強度)	CaCl ₂ 溶液 (イオン強度)
地下水浸潤速度	○	0.5	
密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響	○	0.5	
応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響	○	0.5	
定置方式による膨潤性への影響試験	○		
Ca 型化と飽和の可逆性の検討	○		3
実験室規模緩衝材流出試験	○	0.5	0.5
緩衝材流出に対する人工注水の効果	○	0.5	0.5

1) 基本特性

透水特性に関しては、海水系地下水を用いた場合、降水系地下水を用いた場合と比べて透水性が増加することが明らかとなっており、蒸留水および海水系地下水条件下における固有透過度と有効粘土密度の関係式が提示されている（菊池・棚井, 2005）。

熱特性（熱伝導率、比熱）に関しては、海水系地下水の場合においても蒸留水条件下と同等の値を示すことがわかっている（菊池・棚井, 2005）。

膨潤特性に関しては、海水系地下水を用いた場合、有効粘土密度が 1.36 Mg/m³ より小さくなると、蒸留水を用いた場合と比べて膨潤応力が低下することが明らかとなっており、蒸留水および海水系地下水条件下における膨潤圧と有効粘土密度の関係式が提示されている（菊池・棚井, 2005）。

圧密特性に関しては、間隙比と圧密圧力関係において、載荷過程は試験溶液条件によらずほぼ同一の関係を示すが、除荷時の変形量は蒸留水よりも小さくなり、また、除荷・再載荷過程における間隙比と圧密圧力関係上におけるヒステリシスは、蒸留水の場合に比べ小さくなった（菊池・

棚井, 2005)。

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おり、せん断中の応力-ひずみ関係は蒸留水の場合とほぼ同等の挙動を示した。有効応力経路については、各試験溶液で異なり、明確な相関関係は認められなかった。また、海水系地下水を用いた場合、間隙圧係数 B 値は $0.27 \sim 0.64$ となり、地盤工学会が定める B 値 0.95 以上という基準を下回ることが明らかとなった (菊池・棚井, 2005)。

強度・剛性に関しては、一軸圧縮強度、弾性係数ともに、多少ばらつきはあるものの、概ね塩濃度に依存して強度・剛性ともに低下する傾向が得られ、蒸留水および幌延地下水条件下における一軸圧縮強度と有効粘土密度の関係式が提示されている (菊池・棚井, 2005)。

2) 侵入・浸食現象

侵入・浸食特性に関しては、幌延地下水や人工海水などを用いた侵入試験、浸食試験が実施され、侵入および浸食ともに、海水地下水条件では抑制されることを確認した (松本・藤田; 2004 ; 2005 ; 2011)。

3) 残留密度差

イオン強度が密度分布を有する緩衝材の膨潤量及び密度均質化に及ぼす影響の把握のための試験を実施した。

密度の異なる均質供試体の膨潤量試験機のピストンを直列に繋ぎ、ピストンの変位を計測することによって界面の膨潤量を計測した。また、この際の膨潤量及び各供試体の乾燥密度を測定し、密度が均一化する過程を計測した。

二つの供試体のうち、高乾燥密度供試体の乾燥密度の値が大きい程、膨潤量が大きくなると考えられるが、本試験においても蒸留水の場合もイオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液を用いて実施した場合も、どちらも試験結果はこの考えに整合していた (原環センター, 2015)。

試験の結果から、以下のことがわかる。

- ・溶液に関わらず、密度差は残る。また、初期の密度差が大きいほど、残留密度差が大きい。
- ・ NaCl 溶液の方が残留密度差は大きい。

4) 膨潤圧

①密度差を持つ緩衝材の膨潤圧

蒸留水と、 NaCl 溶液 (0.5M) を用いて、密度差を持つ緩衝材間に発生する膨潤圧の計測を行った。装置は残留密度差を測定した際と同じ試験装置を用い、残留密度差と並行して膨潤圧を計測した。

膨潤圧の計測結果からは、蒸留水に比べ、 NaCl 溶液を通水したケースの方が、緩衝材は低い膨潤圧を示した。これまでの既存の試験結果でも、イオン強度が高くなることにより、膨潤圧が低くなることが確認されており、この試験体系でも、整合する結果が得られている (原環センター, 2015)。

② 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響

緩衝材に対する応力履歴が異なる場合には、必ずしも乾燥密度に対して膨潤圧が一意に決まるとは限らないと考えられる。このことを確認するため、乾燥密度が同じであるが、膨潤による応力履歴が異なる供試体を直列に繋いだ膨潤量試験を実施した。緩衝材供試体は2種類使用した。一つは正規圧密供試体であり、乾燥密度 1.6 Mg/m^3 に静的に締固めた後に体積拘束条件

で飽和したものである。もう一方は過圧密供試体であり、乾燥密度 1.8 Mg/m^3 に静的に締固めた後に乾燥密度 1.6 Mg/m^3 まで膨潤させながら飽和したものである。直列に繋いだ膨潤圧試験の供試体は密度差が無いため、乾燥密度に対して膨潤圧が決まっているのであれば膨潤変形は生じないと考えられる。

本試験では、蒸留水と NaCl 水溶液（イオン強度 0.5）を使用した。両供試体の飽和後の乾燥密度が同じになったところでピストンを繋いで、直列の膨潤量試験を開始した。平衡状態に達するまでの時間は、蒸留水のケースよりも NaCl 水溶液のケースの方が短かった。また、NaCl の正規圧密供試体単体の膨潤圧は、給水開始から単調減少傾向を示し蒸留水のケースより小さくなっている。これは、間隙水のイオン強度が膨潤圧に及ぼす影響によるものと考えられる（原環センター, 2015）。

5) 浸潤速度

一次元とみなすことのできる試験セルを用いた試験により、蒸留水と海水相当のイオン強度の NaCl 水溶液（0.5M）が緩衝材に浸潤する際の浸潤フロントの移動速度を取得した。長さ 1,000 mm、直径 50 mm の緩衝材供試体に対し、底面より上方向に溶液を浸潤させた。

飽和度が初期値より 1% 高くなったところを浸潤フロントとしてみた場合、NaCl 溶液に比べ、蒸留水の方が短時間で浸潤することが分かった。また、蒸留水の方が飽和途上の分布（遷移領域）が長い傾向にあった。1 m 厚さの緩衝材が飽和度 95% 以上になるには、試験結果を外挿すると、蒸留水で 78 年、NaCl 水溶液で 21 年となった（原環センター, 2015）。

この試験系では、溶液は毛細管現象により緩衝材へ浸潤する。NaCl 溶液の場合は緩衝材が凝集し、毛細管現象に寄与する空隙を塞ぐため、この差異が生じたものと考えられる。

6) 緩衝材定置方式による膨潤性能への影響

施工の際に異種の材料を用いることによって密度差が生じることの影響を把握するために土槽試験を実施した。ブロックとペレットを用いて、土槽内に両者の界面を接触させた供試体を作成した。体積を拘束した状態で、底面より注水を行った。ブロックとペレットで密度差があり、また、浸潤挙動にも違いがあるため、注水によりほぼ飽和した時点で解体し、密度分布を確認したところ、ブロック側に界面が移動し、密度が均質化する方向に進んでいたことがわかった。

本試験は蒸留水を用いての試験であるが、上記の 3) ~ 5) の膨潤挙動を考慮すれば、イオン強度を持つ溶液を通水することにより、ペレットの浸潤の仕方、膨潤圧が影響を受けるため、冠水後の密度分布に対する影響が蒸留水の場合と異なる可能性が大きい（原環センター, 2015）。

7) 緩衝材流出挙動

① 実験室規模での緩衝材流出試験

NaCl 溶液を通水した試験の場合、通水液が蒸留水の場合に比べ、総流量と緩衝材流出量の関係の勾配が初期には急であった。しかしながら、NaCl 溶液の場合は途中で勾配が水平になり、最終的には蒸留水の場合よりも NaCl 溶液の方が緩衝材流出量は小さくなった。これは、NaCl 水溶液のイオン強度の影響でモンモリロナイトの膨潤が抑制されるため、水みち内の流水にベントナイトが分散せずに沈殿するため、水みちが 1 本に収斂した後は、ベントナイトが試験器（セル）外に流出されなかったと考えられる（原環センター, 2015）。

蒸留水、NaCl 溶液及び CaCl_2 溶液（イオン強度はそれぞれ 0.5）を通水させ、水みちの収斂挙動を観察した（原環センター, 2015）。通水前に緩衝材内に水みちを設置し、収斂挙動に対す

る通水液種の影響を検討した。流速は 0.001~0.1 L/min の範囲である。以下のような結果が得られた。

- ・地下水成分に関わらず水みちは材料の界面（今回のケースでは緩衝材とセルの界面）に収斂する。
- ・蒸留水と NaCl 溶液を比較した場合、水みちの形態の変化は見られなかった。
- ・CaCl₂ 溶液を通水した場合には、Ca 型化の影響により、緩衝材の流出量が大きくなる傾向にある。
- ・CaCl₂ 溶液の場合には水みちが 1 本に収斂しなかった。これは、ベントナイトの Ca 型化による緩衝材の膨潤性能の低下からもたらされたものであると考えられる。

② 緩衝材流出に対する人工給水の効果

緩衝材に水みちが形成されないように制御しながら給水して、緩衝材が十分に膨潤すれば、界面には隙間や大間隙がなくなり、その後地下水が浸潤しようとしても緩衝材内には拡散でしか浸潤できず、水みちが形成され難いものと考えられる。この試験では緩衝材供試体に対し、蒸留水を事前に給水して膨潤させてから、溶液を通水した。

緩衝材供試体（乾燥密度は 1.5 Mg/m³）に対し、底面より通水した。通水液は蒸留水、NaCl 水溶液（イオン強度 0.5）、CaCl₂ 水溶液（イオン強度 0.5）である。以下のような結果が得られた（原環センター，2015）。

- ・人工給水による膨潤を事前に行うことによって、緩衝材の流出が抑制される。
- ・人工給水はイオン強度や Ca 型の影響を緩慢にする傾向がある。

(3) セメント

セメント系材料は、高レベル廃棄物処分においては、処分坑道の支保工、アクセス坑道や斜坑等の支保工、インバートなどの構造材として、また、TRU 廃棄物の地層処分においてはそれらに加えて、処分坑道のインバート、構造駆体、容器内及び容器外の充填材としての使用が考えられている。

セメント系材料は、処分場閉鎖後に施設内に流入する地下水との反応によって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による機械的特性や物質移行特性の変化、膨張性の 2 次鉱物の生成によるひび割れの発生や機械的特性の低下が考えられる。また、2 次的な影響として溶脱成分の他のバリア材料の機能への影響も想定される。

これまでにも、このようなセメント系材料の地下水との相互作用によるバリア機能や機械的特性の変化についての検討はされてきているが、沿岸部に設置された処分施設で考慮すべき事象として、海水成分の影響による劣化や変質について検討した。

1) 海水成分の影響とその機構に関する知見

土木学会編「コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の現状」（土木学会，2003）やセメント協会編「エンサイクロペディア」（セメント協会，1996）において、海洋構造物や海水によるコンクリートの劣化機構に関して以下のようにまとめられている。

- ・海水中の Mg²⁺と炭酸ガスにより、ブルーサイト（Mg(OH)₂）とアラゴナイト（CaCO₃）等を生成し、これらがコンクリート表面を覆うことによって、イオンの移動を抑制する。Mg²⁺イオンは OH⁻がある限り、ブルーサイトとして表層付近に析出するが、OH⁻イオンが少なくなると内部に浸透し、ケイ酸カルシウム水和物（C-S-H）を分解し、ケイ酸マグネシウ

ムを作る。

Cl⁻イオンはSO₄²⁻イオンよりも濃度が高く、拡散速度が大きいことから、コンクリート内部深くまで侵入しアルミネート系のセメン水和物と反応しフリーデル氏塩（3CaO・Al₂O₃・CaCl₂・10H₂O－3CaO・Al₂O₃・Ca(SO₄,Cl)・12H₂O）を生成する。フリーデル氏塩はSO₄²⁻共存下では不安定でエトリンガイトとセッコウ（CaSO₄）に変化する。

- ・ 海水中のCl⁻はカルシウムサルフォアルミネートの膨張を遅延させるため、OH⁻イオンがCl⁻イオンで置換される条件では、水の吸収によるエトリンガイトの膨張は抑制される。従って、海水中で生成するエトリンガイトは非膨張性である。
- ・ 海水中のコンクリートの主な劣化要因はエロージョンと結合成分の溶脱によるものであり、Ca(OH)₂の溶脱、硫酸カルシウムの沈殿、C-S-Hの分解、マグネシウムケイ酸塩となって組織が脆弱化することなどによるものである。

2) 海水系地下水との反応によるセメント系材料の溶脱劣化に関する知見

セメント系材料の溶脱劣化挙動のモデル化は、水和したセメントペーストを粉碎した粉末試料を用いた溶解試験によって、接触する地下水量を液／固比に置き換えることで、溶脱成分とその変遷を再現することで行われてきている。

既存の検討例では、普通ポルトランドセメント（OPC）に加え、JISに規定された混合セメントとしてフライアッシュセメント（FAC）、高炉セメント（BFSC）、シリカセメント（SC）のおのおのについて化学解析に必要な初期および変質時に生じる2次鉱物を、人工海水を用いて溶解試験を実施した結果をもとに設定し、解析結果が試験結果をおおむね再現できることが確認されており、海水成分の影響についても再現できることが示されている（例えば、原環センター，2007）。

3) 海水系地下水でのセメント変質によるセメント系構造材料の変化に関する知見

実構造物で起きる可能性のある劣化現象についての検討が、バルク試験体の長期浸漬により実施されている（例えば、原環センター，2007）。

OPC、FSC、BSFC及びSCの一辺20 mmのバルク試験体を人工海水に浸漬し、一定期間後に取り出し、その断面を観察することで、構造物に於ける変質現象について検討したところ、OPCを用いた試験体では、上述の海水成分の影響に示されたMgの影響による表面層の剥離が観られたが、その他の混合セメントを用いた試験体では表面に薄いブルーサイトの析出層が生成し、試験体内部への海水成分の浸透は観られなかった。

この結果の相違は、加速的な試験とする目的で水／セメント比を60%としたことにより、OPCでは海水成分の浸透が加速される一方、混合セメントではその硬化体の組織の緻密さ（OPCと比較して空隙径の小さい空隙が多い）に起因して海水成分の浸透が抑制されることに起因するものと考えられた。

4) ひび割れ導入供試体の通水および浸漬による透水挙動の変化に関する知見

ひび割れを導入したOPC試験体にイオン交換水および人工海水を用いて通水試験を実施し、いずれの場合にも透水性が速やかに低下し亀裂が閉塞することを確認した。亀裂の閉塞要因は地下水組成によって異なり、人工海水ではMg(OH)₂の析出が原因となっていた（原環センター，2006）。

また、拡散場を想定してひび割れ試験体を浸漬した場合でも、人工海水ではひび割れおよび表面に露出した空隙にMg(OH)₂が析出し、閉塞することが示された。

5) セメント系材料への塩化物イオンの浸透挙動

塩化物イオンの浸透は、鉄筋腐食の原因であるため、産業界でも広く検討されている現象である。地層処分を対象とした検討としては、セメント系材料の長期変質に伴う物質移行特性の変化をモデル化することを目的として塩化物イオンの拡散試験が実施され、その挙動がモデル化されつつある。

OPC および混合セメントを対象に、空隙構造を把握し、空隙内および水和鉱物内の移動をモデル化することで、拡散係数の変化をモデル化し、塩化物イオンの拡散プロファイルを再現できることが示されている。

以上のように、既存の知見を調査し整理した。各材料で着目した挙動について調査研究の実施内容と成果を Appendix 1 にまとめた。またより詳細な成果を知見シートとして Appendix 3 に示した。

4.2.3 課題と対策案の整理

前節で既存の知見として整理した材料ごとの挙動を元に、沿岸部に構築される地層処分場の地質環境条件において、人工バリアの成立性や信頼性の向上のために、課題や対策案を整理し Appendix 2 に示した。また挙動ごとの詳細な課題や対策は Appendix 3 に示した。

(1) オーバーパック

オーバーパックの腐食挙動に係わる既存の調査研究は、表 4.2-2 に示した緩衝材間隙水の化学組成を元に、生起が想定される不動態化挙動、酸素による腐食進展挙動、水の還元による腐食進展挙動、応力腐食割れ挙動、水素脆化挙動を対象とした。実験では模擬地下水として人工海水 (SSW: Synthetic Sea Water, ASTM D1141) や人工淡水 (SFW: Synthetic Fresh Water) を用いており、一般的な海水環境の化学組成でのオーバーパックの腐食挙動については一通りの知見が揃っている。一方で、SFW と SSW による試験は、化学組成の幅の両端における腐食挙動の取得に主眼を置いたものであり、その間に特異な現象が生じないことが前提にある。今後は、例えば沿岸部など、候補サイトの特定とともに地下環境が具体的に示されることを念頭に、腐食に影響をおよぼす地下水の化学組成の濃度をパラメータとして、既存の知見に基づく評価の信頼性を向上させることが重要である。

前項で着目した五つの腐食挙動について、課題の抽出および対策案をまとめた。

1) 不動態化挙動

緩衝材共存下での不動態化挙動は日本の地下水では上限レベルの炭酸塩濃度条件で検討しており、幅広い環境条件に対して保守的な評価が可能と考えられる。また、沿岸部では塩化物イオン濃度が比較的高いことから、降水系に比較して不動態化は阻害される傾向になると考えられる。塩化物イオンや硫酸イオン等の不動態化の抑制効果が期待できる化学種の不動態化条件（臨界 pH 等）への影響についてデータを拡充することによって沿岸部において不動態化がより生じにくいことを示すことが可能となる。また、沿岸部に特徴的な地下水水質として、炭酸塩濃度が比較的高い場合や他の不動態化を促進しうる化学種の共存の可能性がある場合にはその条件での不動態化の可能性について検討が必要である。炭素鋼が不動態化しうる場合には、塩化物イオン等によって局部腐食が容易に生じる可能性があり、その評価が必要となる。

2) 酸素による腐食進展挙動

SSW 単独、大気吹込み条件での浸漬試験の結果、オーバーパックの各部位を模擬した試験片のうち、アーク溶接 (TIG、MAG) の溶接部付き試験片で選択的な腐食が認められ、設定された腐食代を上回る可能性がある。この現象については溶接材料の化学成分の調整で品質改善出来る見通しがある。しかしながら、成分を改良した溶接材料を用いた溶接試験体に対しては、電気化学的手法や数点の試験片による浸漬試験など、簡易的な品質改善効果の確認に留まっている。試験データの拡充による品質改善手法の妥当性の確認が、オーバーパックの製作技術の成立性、腐食代の設定根拠の妥当性の提示のために必要である。

3) 水の還元による腐食進展挙動

水の還元による炭素鋼の腐食進展挙動は、リファレンスケースの緩衝材 (1.6 Mg m⁻³、クニゲル V1: ケイ砂=7:3) と同一の配合・密度の圧縮ベントナイト中に試験片を埋め込み、低酸素雰囲気中に制御されたグローブボックス内で、試験溶液 (SSW、SFW) に浸漬する方法で取得されている。緩衝材共存下の試験のため、試験片は表 4.2-2 に示した緩衝材間隙水環境に近い条件に曝露されていると考えられる。既存の成果における浸漬期間は、炭素鋼母材試験片で 10 年間、溶接部付き試験片で 3 年間となっている。溶接部付き試験片については、最長 10 年間の浸漬期間の腐食挙動の評価を目的とした浸漬試験を実施しており (原環センター, 2015)、より長期の腐食挙動や速度については、この知見が適用可能である。一方、長期的な腐食速度は被膜の形成挙動により異なる可能性があるため、沿岸部で特徴的な環境条件を踏まえたデータ拡充等により腐食進展挙動を確認する必要がある。

4) 応力腐食割れ挙動

炭素鋼の応力腐食割れ (SCC: Stress Corrosion Cracking) に関する既存の報告、および表 4.2-2 に示した緩衝材間隙水の化学種の濃度範囲より、炭酸塩環境下で熱影響を受けた部位に SCC が生起する可能性があることを課題として抽出し、SCC 感受性評価試験を実施している。これまでに検討対象とした SCC のメカニズムは、炭酸塩による不動態化に伴うものであり、「1) 不動態化挙動」で課題として挙げた、塩化物の不動態化抑制作用が SCC に与える影響を確認する必要がある。そのため、炭酸塩と塩化物の共存環境での SCC の感受性評価が必要である。また NN (Near-Nutral) pH 型 SCC など、他のメカニズムについても評価対象とすべきか、文献調査を実施して最新の知見を取り入れる必要がある。

5) 水素脆化挙動

「3) 水の還元による腐食進展挙動」を目的とした浸漬試験と平行して、最長 10 年間の鋼中水素濃度を評価するための浸漬試験を実施しており (原環センター, 2015)、緩衝材が共存する SSW・SFW 環境における鋼中水素濃度の経時変化についてはこの知見が適用可能である。一方、水素発生を律速する長期的な腐食速度は被膜の性状や形成挙動と関連があり、沿岸部での特徴的な環境条件と既存の実験で用いた SSW や SFW とではそれらが異なる可能性がある。「3) 水の還元による腐食進展挙動」にてデータ拡充のための試験片の被膜の性状調査等を実施し、沿岸部での特徴的な環境の影響の有無や程度を確認する必要がある。

6) 腐食評価の信頼性向上のための対策案

以上のように、地層処分環境下で、オーバーパックの安全機能に影響を及ぼす腐食挙動を、主に 5 つの挙動の観点から、既存の知見を踏まえたそれぞれの課題を整理した。オーバーパックの

安全機能である「所定の期間、地下水とガラス固化体の接触を防止する」を担保する腐食挙動について、既存の研究開発は、わが国の代表的な地質環境における地下水や緩衝材間隙水の化学組成を考慮して進めており、沿岸部で想定される塩水環境下においてもオーバーパックが成立する見通しは立っている。一方、既存の試験では各々の腐食挙動を網羅的に調査するため、SSW（人工海水）やSFW（人工淡水）での腐食環境の置き換えや、より厳しい環境での保守的な検討となっている部分がある。化学組成ごとの影響や複合的な影響については更なる調査研究が必要である。

オーバーパックの腐食評価の信頼性向上のための対策案として、腐食挙動の程度を化学組成ごとに整理し、沿岸部の地下環境特性を入力条件としたオーバーパックの腐食寿命の評価体系を整備することが重要である。実験手法は既存の知見を踏襲し、環境条件（化学成分）をパラメータとした腐食試験を実施し、各々の腐食挙動のデータの拡充を行うことが必要である。

(2) 緩衝材

4.2.2 項で示したように、塩水系地下水を考慮した試験が行われており、海水相当のイオン強度の溶液を使用することにより、塩水系地下水の場合の最大の影響を把握していると考えられる。その結果、大きく緩衝材機能が低減するという結果は得られておらず、緩衝材の乾燥密度を高める等の対策を講じることにより、緩衝材に求められる要件は満たされると考えられる。ただし、多様な組成の塩水系の地下水に適用する場合には、溶存成分をパラメータとしたデータの拡充が必要だと考えられる。以下に、緩衝材の特性毎に抽出された課題と今後の対策を示す。

1) 基本特性

4.2.2 項で示した緩衝材の基本特性のうち、せん断特性の検討において、圧密非排水三軸試験が実施されたが、せん断中の有効応力経路は各試験溶液で異なり、明確な相関関係は示されていない。また、地盤工学会が定める B 値 0.95 以上という基準を下回る結果が得られている。B 値が基準値を達成できていないことは、試験で得られる有効応力経路や限界応力比に影響を及ぼしている可能性がある。そのため、海水系地下水を用いた場合に B 値が基準値を達成するための手法を確立し、せん断特性に関するデータを拡充する必要がある。また、膨潤変形、長期圧密挙動に対する溶液種類の影響に関しては十分にデータが取得されていない。

2) 侵入・浸食特性

緩衝材の侵入・浸食特性に関する研究として、海水系地下水条件下では侵入・浸食現象が抑制される傾向が得られているものの、侵入現象を評価できるモデルの構築までには至っていない。また、浸食現象に関しては、海水系地下水条件下における臨界流速に係わるデータの拡充が必要である。

3) 残留密度差

NaCl 溶液を使った緩衝材の膨潤量及び密度均質化に及ぼす影響の把握のための試験では、蒸留水の場合に比較して残留密度差が大きいことが確認されている。そのため、施工時に緩衝材に密度分布ができた場合には、塩水環境化では密度分布の影響がさらに大きいと考えられる。また、NaCl 溶液での試験は行っているものの、溶存イオン種の影響については確認されていない。イオン交換により影響を受ける可能性もあるため、Ca、K、Mg などの影響についても確認することにより、塩水環境下での緩衝材の密度分布をモデル化して予測する際の信頼性を高めることができると考えられる。

4) 膨潤圧

蒸留水に比べ、NaCl 溶液を通水したケースの方が、緩衝材の膨潤圧は低い。また、応力履歴が異なる緩衝材の場合の平衡状態に達するまでの時間は、蒸留水のケースよりも NaCl 溶液のケースの方が短く、NaCl 溶液の場合の正規圧密供試体単体の膨潤圧は、給水開始から単調減少傾向を示し、蒸留水のケースより小さくなっている。間隙水のイオン強度が膨潤圧に及ぼす影響があると考えられるため、沿岸域の地下水組成を考慮した系統的な評価が必要である。膨潤圧は密度の均一化とつながるものであり、イオン交換による影響を膨潤圧の観点から評価することにより、幅広い溶液組成への適応ができると考えられる。

5) 浸潤速度

蒸留水と比較すると、海水相当のイオン強度の NaCl 溶液 (0.5M) が緩衝材に浸潤する際の浸潤フロントの移動速度は蒸留水とは異なり、試験結果を外挿すると、飽和度 95%以上になる速度は、NaCl 溶液の方が 3~4 倍速いと予測された。NaCl 溶液の場合は緩衝材が凝集することが影響していると考えられる。そのため、イオン強度による影響、及びイオン種による影響の有無を確認し、緩衝材の再冠水挙動の予測のためのモデルに反映することにより、緩衝材の長期挙動評価の初期状態の精度を上げることができる。

6) 緩衝材定置方式による膨潤性能への影響

緩衝材の材料が異なるもの (例えば、ブロック、ペレット) を使用して施工した場合、密度差が生じ、また、浸潤挙動にも違いがあるため、イオン強度を持つ溶液の場合には、その影響がさらに大きくなると考えられる。体積拘束した状態での膨潤の際には、緩衝材機能には大きな影響はないと予測できるが、冠水後の密度分布に対する影響を確認しておく必要がある。

二次元での試験では、浸潤の進行、膨潤後の密度分布が明確に測定できるため、イオン強度、並びにイオン種の緩衝材膨潤に対する影響を把握することが可能であると考えられる。そのため、溶液組成をパラメータとした試験を実施する。

7) 緩衝材流出挙動

NaCl 溶液による試験から、緩衝材流出量は小さいことが示された。一方で、Ca 型化の影響により、緩衝材の流出量が大きくなる傾向も示された。これは、ベントナイトの Ca 型化による緩衝材の膨潤性能の低下からもたらされたものであると考えられた。よって、緩衝材の流出はイオン種により挙動が変化すると考えられる。そのため、沿岸域での多様な溶液組成に対して、流出防止のための対策を考える際には、溶液組成による影響を把握する必要がある。

実験室規模の試験では、沿岸域の地下水組成の予測のもとに、イオン強度、溶存成分をパラメータとしてデータを取得する。

また、湧水を抑制する対策による緩衝材流出の防止のためには、実環境に即したものとするために、地下環境での試験等についても実施し、対策工の効果を評価する。

(3) セメント

セメント系材料の海水系地下水環境での変質および劣化現象については、これまでに海洋構造物や海岸付近の構造物の寿命評価等の観点から産業界での検討例があり、4.2.2 項でまとめたように、海水によるセメント系材料への影響やその機構についてはすでに知見の蓄積がある。また、セメント系材料の地層処分への適用のために、建設および操業期間の健全性および長期的な安全

性の観点から、これまでも国の基盤研究等で検討が実施されている。

それらは、処分サイトが選定される前の段階でのジェネリックな検討であったことに起因して、沿岸部での現実的な環境（具体的には、各地下水成分の濃度やセメント系材料の種類・配合等）を想定したものではなく、海水成分の影響を把握し、セメント系材料の機能に応じて影響を把握することを目的としたものであったために、多くは人工海水や海水濃度での模擬地下水を用いた検討であった。

そのため、今後沿岸域で想定される地下環境、特に地下水の各成分の濃度等を踏まえた施設設計等の適切な対応に向けて、必要なデータの蓄積等に係る課題を以下に抽出した。

1) 海水系地下水との反応によるセメント系材料の溶脱劣化のモデル化に関する課題

これまでの検討例（例えば、原環センター、2007）では、海水系地下水と降水系地下水とでは、溶脱等の化学変化を予測するための解析条件として用いる鉱物の設定が異なるため、その切り替えの閾値が必要であるが、その設定のためには、海水成分の濃度をパラメータとした試験が必要である。

2) 海水系地下水でのセメント変質によるセメント系構造材料の変化に関する課題

4.2.2(3)3)で既存の知見として述べたように、これらは人工海水での結果であり、海水成分の濃度によっては析出物の相違や空隙閉塞の度合い等が異なる可能性がある。特に海水成分の濃度が低い場合には、二次鉱物の析出が溶脱を上回る可能性があるため、海水成分濃度をパラメータとした確認が必要と考えられる。また、海水成分の浸透が抑制的となっているのは、混合セメント中の物質移行が遅いことに起因していることから、より長期での挙動を確認する必要がある。

3) セメント系材料に生じたひび割れの挙動に関する課題

マグネシウム塩の析出に伴う空隙閉塞や内部の溶脱抑制等は海水成分の濃度によって異なるため、濃度の異なる条件での挙動も確認する必要がある。また、ひび割れの閉塞は、上流からの物質供給に依存する傾向があるため、セメント種類によって挙動が異なる可能性がある。そのため、低濃度の海水系地下水での溶脱挙動等の確認とともに、混合セメント系での確認が必要となる可能性がある。

4) セメント系材料への塩化物イオンの浸透挙動に関する課題

塩化物イオンの浸透挙動については広く産業界で検討が進められている。説明性の向上の面でも、その適用を試みるとともに、地層処分への適用性を確認しておく必要がある。併せて、種々のセメント系材料の溶脱変質等に伴う塩化物イオンの拡散性の変化についてもモデルの信頼性を向上させることが重要である。

以上に基づき、課題と対策案を整理し Appendix 2 に示した。詳細な課題や対策は Appendix 3 に示した。

4.2.4 まとめ

前節までに、人工バリア等を構成する各要素に対して沿岸域で想定される海水系地下水との相互作用による機械的特性および化学的特性の変化に関する知見をまとめ、個別の課題について述べた。

オーバーパック、緩衝材、セメント系材料の各要素に対して、これまでに海水成分の影響や海水系地下水の影響を受ける環境での挙動を把握する目的で、主に人工海水を用いた種々の試験が

実施され、データが得られている。ただし、セメント系材料に関するこれまでの取組として強調したように、これらは処分サイトが選定される前の段階でのジェネリックな検討であったことに起因して、沿岸部での現実的な環境を想定したものではなく、海水成分の影響を把握し、セメント系材料の機能に応じて影響を把握することを目的としたものであったために、多くは人工海水や海水濃度での模擬地下水を用いた検討によって得られたものが中心となっている。

そこで、今後の課題としては、わが国の沿岸部をより具体的に想定した地下水組成およびイオン強度での各要素の挙動の把握と長期評価のためのデータの蓄積に加え、例えばオーバーパックであれば、その腐食挙動評価に必要な、緩衝材間隙水の組成、pH、Eh 等に関するデータの蓄積と、それらの条件に応じた影響の評価によって、海水系地下水の影響を受ける環境であっても、工学的な対策を講じることによってその影響を抑制または回避できることを示すためのデータの蓄積と長期挙動の確認が必要である。

参考文献

土木学会，土木学会編「コンクリートの化学的侵食・溶脱に冠する研究の現状」

(土木学会コンクリート委員会 化学的侵食・溶脱研究小委員報告,2003.6)，2003.

原環センター，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 平成 18 年 3 月,2006.

原環センター，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 平成 19 年 3 月,2007.

原環センター，平成 21 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分:処分システム工学要素技術高度化開発報告書(第 2 分冊)人工バリア品質評価技術の開発(1/2)オーバーパック,2010.

原環センター，平成 22 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学要素技術高度化開発報告書(第 1 分冊)人工バリア品質評価技術の開発 オーバーパック,2011.

原環センター，平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 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,2013.

原環センター 平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書(第 1 分冊)人工バリア品質/健全性評価評価手法の構築－オーバーパック,2015.

原環センター 平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書(第 2 分冊)人工バリア品質/健全性評価評価手法の構築－緩衝材,2015.

核燃料サイクル開発機構，わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－ 分冊 2 地層処分の工学技術, JNC-TN1400-99-022,1999
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.

村田明美, APC, HE を通しての水素の役割, 第 78・79 回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, 1981
小田治恵, 柴田雅博, 油井三和, 地層処分研究開発第 2 次とりまとめにおける緩衝材間隙水化学の評価, JNC-TN8400 99-078, 1999.

セメント協会:セメント協会編「C&C “CEMENT&CONCRETE”エンサイクロペディア :「セメント・コンクリート化学の基礎解説」」, 1996.

Taniguchi, N., Honda, A. and Ishikawa, H., EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PASSIVATION BEHAVIOR AND CORROSION RATE OF CARBON STEEL IN COMPACTED BENTONITE, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. vol.506 pp.495-500,1998.

油井三和, 笹本 広, Arthur, R. C., Groundwater Evolution Modeling for the Second Progress Performance Assessment (PA) Report, JNC-TN8400 99-030, 1999.

4.3 グラウト設計及び影響評価技術の開発

4.3.1 はじめに

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。

4.3.2 既存の知見などの調査

(1) 海底下構造物におけるグラウト技術の情報調査

1) 青函トンネルの事例

国内においては青函トンネルの施工事例が有名である。青函トンネルは、地上部も含めた延長が約 53.850km（海底部 23.3km）、海底下約 100m（海水面下 240m）に掘削されている。1964年に北海道側の斜坑口の掘削が開始され、1985年に本坑が全貫通した（北川ほか, 1986）。グラウト技術は、揚水量をできるだけ少なくして揚水費の軽減を図る必要があったため、止水のための補助工法として適用され、完成までに幾度の改良が重ねられてきた。グラウト材料は幾度の改良が重ねられ、1974年以降は対象とする地質によらず LW グラウト（高炉コロイドセメントに 1号水ガラス 75%液を混合したものが採用）が基本となった。注入圧力は、大きすぎると対象地山を破壊し、注入有効範囲外に大きく逸出する可能性があることから、段階的な注水試験により限界応力を見極め、これよりやや大きめである湧水圧の 2~3 倍（7.5~8.0MPa 程度）が採用されている。注入範囲は、掘削にともなって想定されるゆるみ範囲外まで注入し、グラウト注入範囲で水圧を抵抗させ、支保工や覆工に直接水圧を作用させないという方針に基づき、解析結果から堅岩部でトンネル断面の 3 倍程度、破碎帯部でトンネル断面の 5~6 倍程度が採用された。

青函トンネルの作業坑壁面からの坑内湧水の化学分析が継続的に実施されており、津軽海峡で採取された海水の分析結果と比較されている（秋田ほか, 2011）。それによると、トンネルの共用開始後 20 年間、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} の化学成分について、ほぼ一定の傾向であるとともに、坑内湧水と海水の化学成分に顕著な違いがないことが明らかになっている。

セメント水ガラス材料の耐海水性についての室内試験（強度特性）と化学分析結果の経年変化から、グラウト施工後 30 年が経過しても安定した性状を維持していることが確認されている（秋田ほか, 2011 ; 秋田, 2011）

2) 国家石油ガス備蓄基地プロジェクトの事例

近年では、岡山県倉敷と愛媛県波方における国家石油ガス備蓄基地プロジェクトにおける施工事例がある。ただし、倉敷と波方については、厳密な意味での海底下とはいえず、施設の一部が海底下にある。施設の最深部は、地表から 180~190m 程度である。ここでは、倉敷における施工事例を示す（辻ほか, 2015）。

倉敷の水封式岩盤貯槽空洞の掘削に際しては、全域にプレグラウトを実施するとともに、必要に応じてポストグラウトが実施された。材料は超微粒子セメントが基本であったが、マイクロフラクチャ発達部については溶液型グラウトが適用され、改良目標 0.25~0.65Lu が達成された（小林ほか, 2013; 2014）。また、溶液型グラウトの採用にあたって、現地湧水を用いた促進養生試験に基づけば、50 年にわたりホモゲル強度が増進すること、現地湧水ではシリカの溶脱が促進しないことが確認されている（延藤ほか, 2013）。

3) 北欧の事例

北欧では、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、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ているものの課題が多いとされている。沿岸域のエスポ HRL の深度 450m の TASS トンネルや、ONKALO の demonstration 2 トンネルにおいて実証試験および実適用が開始されている (Funehag et al., 2011; Kalle et al., 2013)。ただし、海水条件下での固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。

(2) グラウト技術に関する既存の研究成果

地層処分技術に関する研究開発としては、幌延および瑞浪の深地層研究所における研究例、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」を挙げることができる。幌延においては、日本原子力研究開発機構が開発した低アルカリ性セメントを材料としたグラウト施工が実施され、湧水抑制対策としての効果が確認された (岸ほか, 2010)。瑞浪では、岩盤の透水係数に応じて普通ポルトランドセメント、超微粒子セメントならびに溶液型の材料を用いたグラウト施工が実施され、湧水抑制効果が確認されている (Sato et al., 2014)。また、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」が平成 19 年度から 24 年度まで実施され、グラウトデータベースやガイドラインとして取りまとめられている (日本原子力研究開発機構 HP, 2013a ; 2013b)。いずれも、沿岸部を対象としたものではないため、沿岸部を対象とした際の課題の抽出は別途必要となる。

以上に基づき、グラウト技術に関する既存の知見を Appendix 1 に示す。

4.3.3 課題と対策案の整理

(1) 海水系地下水条件における課題整理

諸外国、特に北欧では、フィンランドの処分サイトであるオルキオト、スウェーデンの地下研究施設があるオスカーシャムも処分サイトであるエストハンメルも沿岸域である。日本の深地層の研究施設である幌延と瑞浪は沿岸域ではなく、北欧のこれらの地域における海水条件で考慮すべき課題についての研究開発は行われていない。一方、平成 19 年度から 24 年度まで、幌延町の沿岸域を対象として、資源エネルギー庁の委託事業「沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発」が行われた。研究開発の内容としては、物理探査とボーリング調査などの地質環境調査が中心であり、施工技術などの工学技術や安全評価は対象外であった。

上記の、海底下構造物や沿岸域におけるグラウト施工の事例については、さらに詳細な文献調査が必要ではあるものの、

- ・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

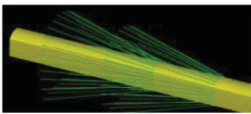
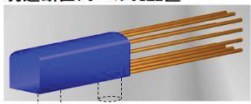

と言える。

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表 4.3-1 に示す。

本事業においては、処分坑道なら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する。

以上に基づき、グラウト技術に関する課題と対策案を Appendix 2 に示す。

表 4.3-1 地層処分事業を想定した許容湧水量の目安およびグラウト技術の検討例
(日本原子力研究開発機構,2013b)

0 m	部位		許容湧水量 の目安*	グラウト材料	注入工法	注入装置	選定のプライオリティ		
	300 m	浅部	アクセス 連絡坑道	1L/min/m	OPC or 低アルカリ性 セメント	従来の孔配置 	既存技術で対応可能 ・高圧対応バックカー ・ジェットグラウトポンプ	長期安全性 ↓ ↑	建設・保業 ↑ ↓
深部			1L/min/m	OPC or 低アルカリ性 セメント					
1000 m	処分坑道	処分孔 整置置き	1L/min/m	低アルカリ性 セメント or 溶液型	坑道断面内への孔配置 	・高圧バルブ(流量圧力制御装置)	大	小	小
	処分孔		0.6L/min/pit	溶液型	対応困難な場合は従来の孔配置				
	処分坑道横置き	処分坑道	0.6L/min/m	溶液型	坑道断面内への孔配置 グラウト孔 Fractures  アクセス・連絡坑道 処分坑道	・暴噴対策装置			

(2) 全体試験計画の策定

上述した研究開発の現状を踏まえて、以下のとおり全体試験計画を立案した。

○目標

海水条件下での溶液型グラウトの設計及び影響評価技術の体系化

○課題

- ・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

○実施内容

- ・既存の知見及び課題の整理
 - ✓ 海水条件下で実施したグラウトに関する知見の収集・整理（文献調査）
 - ✓ 北欧における溶液型グラウトの実施状況の視察
 - ✓ 海水条件下での溶液型グラウトの課題抽出
- ・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
 - ✓ 海水条件下での溶液型グラウトの室内試験（粘性、固化時間、強度、塩分濃度、pH 調整、添加剤等）
 - ✓ 溶液型グラウトの化学的メカニズムの解明
 - ✓ 長期耐久性を評価するモデル・数値解析の適用性の検討
- ・グラウト設計技術の更新・適用性確認
 - ガイドライン（資源エネルギー庁「地下坑道施工技術高度化開発」）の更新
- ・グラウトの影響評価技術の更新・適用性確認
 - ガイドライン（資源エネルギー庁「地下坑道施工技術高度化開発」）の更新

今後の更なる文献調査や課題の整理を踏まえて、これらの実施内容を最適化しつつ、順次実施していく。グラウト技術に関する知見、課題と今後の試験計画を Appendix 3 にまとめて示す。

4.3.4 まとめ

青函トンネル等の海底下構造物の情報を調査し、セメント系のグラウト材料については、海水条件下でも長期の耐久性を示す知見が確認された。処分坑道や処分孔周辺での適用が想定される溶液型グラウトについては、北欧の地層処分事業においても技術が確立しているとは言えず、海水条件下における技術の整備を課題として抽出した。今後、溶液型グラウトの特性データの拡充等を進め、設計技術、影響評価技術を順次整備していくこととした。

参考文献

- 秋田勝次, セメント系薬液注入材の耐久性に関する研究 京都大学博士論文, 2011.
- 秋田勝次, 井浦智実, 朝倉俊弘, 海底トンネルで施工されたセメント水ガラス注入材の長期材料特性と性能の評価, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol. 67, No. 2, pp.95-107, 2011.
- Funehag, J. and Emmelin, A., Injekteringen av TASS-tunneln Design, genomförande och resultat från förinjekteringen, SKB R-10-39, 2011.
- 延藤 遵, 小林伸司, 征矢雅宏, 島田俊介, 小山忠雄, 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 2) -現場条件を考慮した溶液型グラウトの長期安定性確認試験-, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), p.VI-195, 2013.
- Hollmén, K., Sievänen, U., Funehag, J., Granberg, N., Lyytinen, T., Syrjänen, P. and Säippä, J., Colloidal Silica-Grouting in Demonstration Tunnel 2 in ONKALO, POSIVA Working Report 2012-84, 2013.
- 小林伸司, 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 回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), p.VI-194, 2013.
- 小林伸司, 宮嶋保幸, 水道 健, 金戸辰彦, 山本浩志, 前島俊雄, 倉敷 LPG 貯槽建設工事における高水圧下のグラウト施工実績と改良効果の評価について, 第 42 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.125-130, 2014.
- 岸 裕和, 泉 敦, 戸井田 克, 地層処分におけるグラウト技術の高度化開発 5, 幌延 URL 原位置適用性試験, 土木学会平成 22 年度全国大会第 65 回年次学術講演会講演概要集(DVD-ROM), pp.91-92, 2010.
- 北川修三, 石川文夫, 服部修一, 秋田勝次, 上田昭二三, 先山友康, 星加博二, 前田憲一, 深沢成年, 早坂治敏, 塚原隆雄, 佐々木幹夫, 村井富泰, 川原敏明, 鎌田 鼎, 民野幸蔵, 青函トンネル技術のすべて, 鉄道界図書出版株式会社, 1986.
- 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 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), 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事業 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 ヶ年報告書, 2013b.
- 日本原子力研究開発機構, グラウトデータベース, <https://groutdb.jaea.go.jp/grout/>, 2016.
- Sato, T., Mikake, S., Kobayashi, S. and Tsuji, M., Status of grouting to reduce groundwater inflow into deep shafts and galleries in the Mizunami Underground Research Laboratory, Japan, Proceedings of 8th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS-8) (USB Flash Drive),

2014.

辻 正邦, 小林伸司, 延藤 遵, 杉山博一, 大深度の岩盤止水を目的とした活性シリカコロイドの適用, 基礎工, Vol.43, No.10, 2015.

4.4 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

4.4.1 はじめに

地層処分に関するこれまでの研究開発の成果、知見からは人工バリアシステムの成立性とその品質確保は処分場における湧水条件と密接に関わることが把握されつつある。これらの知見に基づくと、人工バリアシステムの成立性とその品質確保は、それが定置、設置される処分場のある領域における湧水条件、そしてそれに対応する湧水対策について考慮が求められる。一方、人工バリアシステムと呼ばれる領域は様々なスケールで検討することが可能である。処分孔1本当たり、あるいは特定の1本を挟んだ都合3本の処分孔、あるいは処分坑道1本分、さらにはパネル1面分という捉え方も可能である。従って、人工バリアシステムに対して湧水対策という用語を用いる場合、考慮する対象、範囲、方法を設定し、対象とする系を総合的に評価することが必要である。処分場における湧水とは岩盤中の地下水に起因することから、考慮する対象の範囲は人工バリアシステムを取り囲む周辺岩盤を含むニアフィールド領域とすることが妥当である。

沿岸部に設置する地層処分システムの成立性を提示するには、人工バリアと周辺岩盤を含めたニアフィールド領域を対象とした処分システム全体について、操業段階及び閉鎖後長期の双方の安全性が確保される見通しを示す必要がある。

これらの安全確保を検討する際、廃棄体を内包し、その外側では岩盤と接することになる緩衝材が当初の要求機能（安全要件）を満たしてその品質が確保されることが、操業段階及び閉鎖後長期の安全性を確保するためには必須となる。そこで、この方法等の提示に向けて、特に塩水湧水による緩衝材の流出の防止に着目しつつ、水理地質構造モデルに基づく地下水流動解析から得られる湧水環境条件から、各種材料の特性、仕様等を評価する解析的手法の調査を行い、今後の対応技術の整備に向けた課題を整理し、全体計画の策定を行う。

この検討は、塩水条件下にも適用が可能なニアフィールド領域での人工バリアシステムの成立性と品質確保に係る方法を、ある程度定量的に提示できる手法（解析、設計、製作、施工の各手法を含む）としての開発に向けたものとなる。これが準備できれば、概要調査段階での処分場の概念設計の支援に反映が可能となる。人工バリア単体の設計ではなく、塩水環境下で適切な機能を発揮するニアフィールド領域に関わる人工バリアと主要な部材（支保、隙間充填材、埋め戻し材、プラグ、グラウト）の設計、製作、施工などの各方法に対して基本情報を提供することが可能となる。

処分システムの成立性と品質確保の方法の検討における地層処分の3分野（地質環境調査技術、工学技術、安全評価技術）の関連を図4.4-1に、検討課題と成果提示に向けた検討の全体像を図4.4-2に示す。

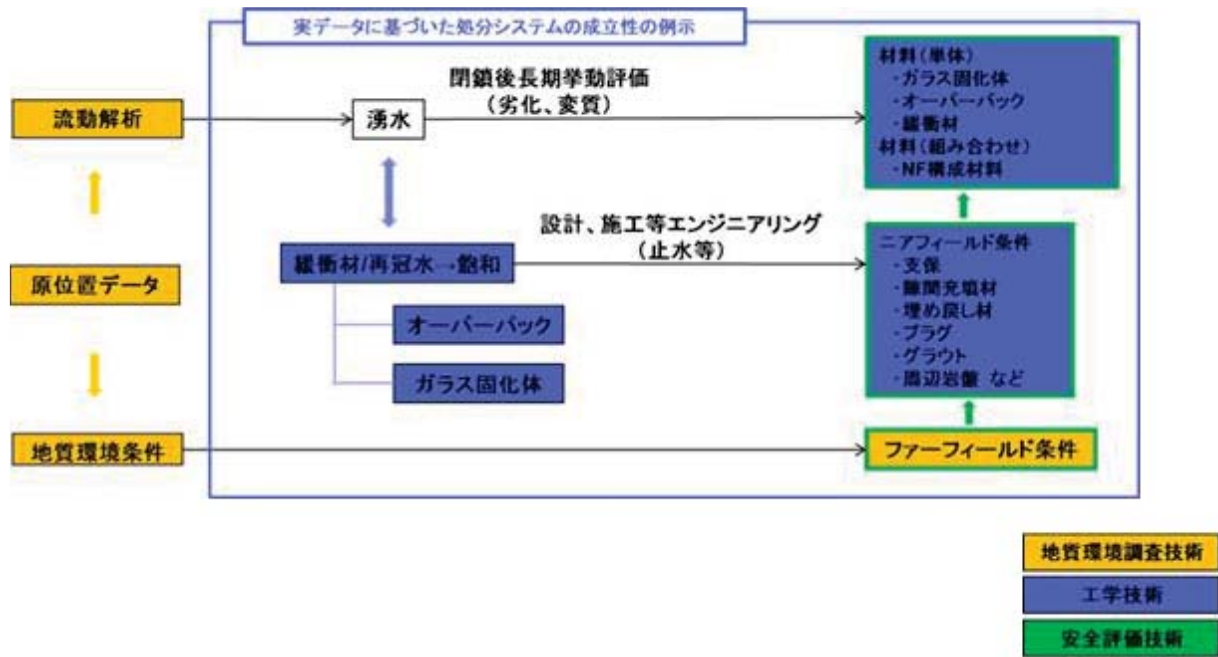


図 4.4-1 本検討の位置づけ

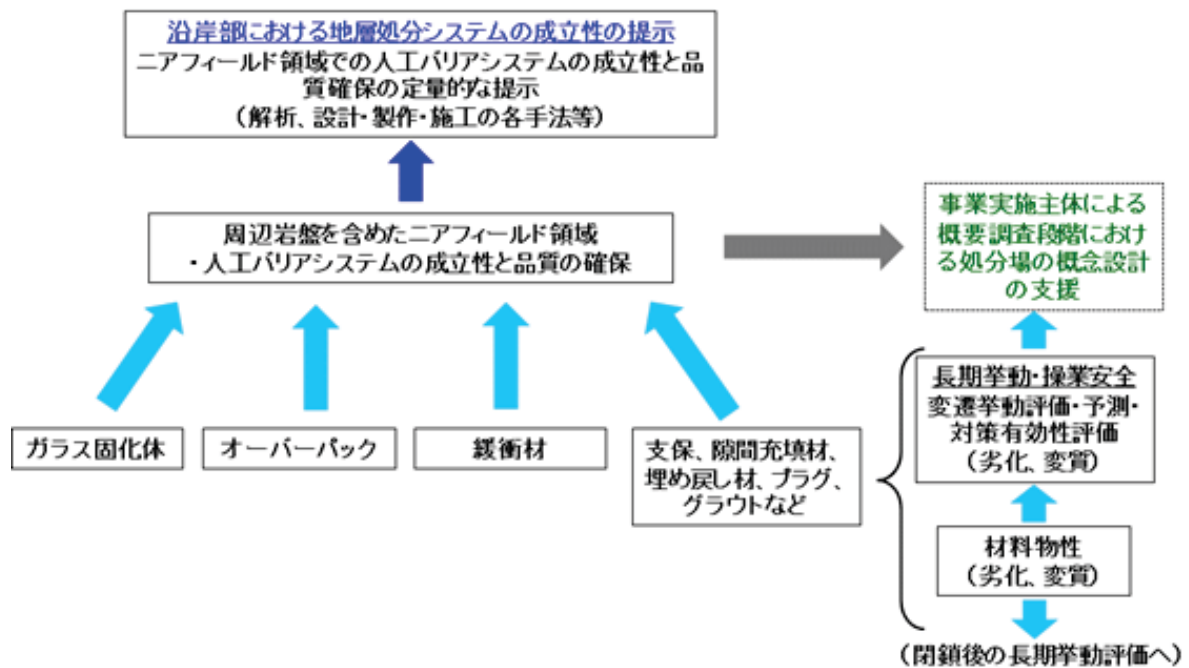


図 4.4-2 検討課題と成果提示に向けた検討の全体像

4.4.2 既存の知見などの調査

4.4.1 項で示した人工バリアシステムと湧水の関係は、湧水条件下に置かれた緩衝材の膨潤挙動と流出挙動に代表される。これらの挙動については、スウェーデンの地層処分実施主体であるSKBにより、処分孔における湧水（water inflow）がそこに設置された緩衝材をバイパスし、水道が形成されて緩衝材が流出する現象が piping & erosion として指摘されたことに始まる。

当初この現象が発生する条件として、処分孔 1 本当たりの湧水量が 0.1L/min を超えた場合とされていた (SKB, 2006a; 2006b)。その後、調査、検討が進み、現在の SKB の見解は、以下の三つの条件が同時に満たされた場合にパイピングが発生して水道が維持されるとの判断に至っている (SKB, 2011)。

- ①岩盤割れ目の水圧 (P_{wf}) が、緩衝材からの総抵抗圧力と緩衝材のせん断抵抗力の和より高くなること。
- ②緩衝材の透水係数が十分に低く、従って緩衝材中への水の流入が抑止され、結果水圧が上記の P_{wf} に維持されること。
- ③水道が開口した状態のままとなるよう、流入する水の流路が維持され、流出した緩衝材が持ち去られること。

これらの条件の成立は、緩衝材の仕様、および設置した場所の状態に依存する。特に、SKB が前提とする緩衝材の設計要求は、膨潤圧が 3~10MPa、透水係数は $10^{-12}m/s$ (ベントナイトとして MX-80 が候補の一つ) である。また緩衝材が設置される地質環境は花崗岩であり、割れ目の中の地下水流れが卓越したものとなる。わが国では、緩衝材はベントナイトとしてクニゲル V1 を候補材として珪砂を重量比で 30%混合することとしている。また処分場の候補地は未定であり、従って地質環境条件は幅広に考えておくことが求められる。このような観点から、国の基盤研究開発として緩衝材の流出挙動の調査を進めている (原環センター, 2015; Suzuki et al., 2013)。その状況については 4.2 節に示した。

4.4.3 課題と対策案の整理

使用済燃料を対象とした沿岸部での地層処分場の立地計画を具体化しているスウェーデンとフィンランドについて 4.1 節に関連情報を整理した。処分場の設置場所である地質環境の調査方法として、エリアを広域から狭域へ絞り込む手法が両国で共通して取られている。スウェーデンでは、総合立地調査⇒フィージビリティ調査⇒サイト調査、フィンランドでは地域ブロック (100~200 km²) の選別⇒調査エリア (3~10 km²) の絞り込み、がそれに当たる。こうした調査プロセスを経た両国における課題認識の視点を整理してみると、両者に共通的な課題認識と共に対策が検討されている項目として、塩水の存在に関して、地下水化学環境の変化をもたらす地下の水理環境の変化がある。

塩水地下水の存在に関するスウェーデンの課題認識は、具体的には閉鎖後長期の安全性を視野に入れた際の坑道埋め戻し材と緩衝材に与えるネガティブな影響として、その機能が損なわれることを挙げている。

フィンランドにおける沿岸部処分場に関する課題認識はスウェーデンのそれと同様と考えられ、一つは人工バリア材料に対する化学的な影響であり、もう一つはそのような塩水環境の変化をもたらす地下水の水理環境の変化である。これら工学技術に関連する課題について、両国での対応の観点を整理すると、一つは塩水がベントナイトの膨潤圧や透水係数を低下させることから、緩衝材としての圧縮ベントナイトの密度 (乾燥密度) が重要になることが挙げられる。また、塩水環境での緩衝材と埋め戻し材への塩性地下水の影響については、地下水の流動および溶質の移行を予測 (解析) する際に、解析対象となる領域のスケールを意識 (地域、サイト、キャニスタの 3 つのスケール) することと、キャニスタスケール (ニアフィールド) での解析における岩石、掘削影響領域、破碎帯ゾーンを意識してモデリングすることが読み取れる。また、緩衝材の機能発揮に関連して、埋め戻し材の材料としての特性 (膨潤性、従って膨潤性物質の含有量と密度)

の重要性が指摘されている。これらは最終的には、処分場候補地での地質環境条件を踏まえて、その対応を具体化するという問題であり、例えば、先行するフィンランドでは、オルキオトの ONKALO での影響を検討するモデルにおいて、塩水地下水の塩分濃度の他に、地下水流動条件（坑道への地下水の漏出と塩水レベルの上昇に関連）に影響を及ぼすものとして、グラウトの施工とその効果を見積もることの重要性が示されてきた。

以上の関連情報の整理から類推される沿岸部での処分場における、工学技術の課題の着眼点（視点）は、人工バリア材料自身の長期性能に関する塩水の影響、および処分場における人工バリアの機能発揮に対する塩水影響評価と対策に関する設計的な検討の二つに大別される。前者に関する知見と課題は 4.2 節に整理している。後者への対応を具体化するには、4.2 節の知見を活しつつ、考えるべき領域を人工バリア材料単体からその周囲、すなわちニアフィールドに拡大し、そこに関連する各種の材料や部材の効果、機能を考慮する必要がある。これより、4.1～4.3 節で整理した既存の知見、課題、並びに既に開始、継続している緩衝材の流出現象に関する国の基盤研究開発の成果等を活用した、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に関する今後の研究開発について、以下のように認識して課題を設定していくことで、より有効で合理的な工学的対策につながるものと判断される。

(1) 今後の研究、技術開発の視点として意識すべきこと

緩衝材の再冠水時の挙動、特に湧水影響とその対策を中心に置いた処分システムの成立性の確保の観点から、その検討の視点を整理すると以下ようになる。

- ①緩衝材に関しては、湧水条件下での流出挙動が懸念されることから、その現象把握と対策の検討は重要な課題となる。
- ②これまでの研究開発の成果や知見から、緩衝材の（人工バリアシステムの）成立性とその品質確保は処分場における湧水条件と密接に関わることが把握されつつある。
- ③緩衝材はその内部に廃棄体（ガラス固化体とオーバーパック）を内包していることから、その流出挙動は人工バリアシステムの成立性とその品質確保に大きく影響する。
- ④従って、湧水対策について有効で合理的な対策を提示することが求められる。
- ⑤湧水すなわち地下水の流入という視点から、その対策については考慮する対象、範囲、手法を適切に設定することが必要となる。
- ⑥範囲は周辺岩盤を含むニアフィールド領域で、この領域において、緩衝材の成立性とその品質確保を、ある程度定量的に提示できる手法（解析、設計、製作、施工の各手法を含む）を提示することが重要である。
- ⑦ここでは、緩衝材（人工バリア）単体の設計、製作、施工のみを意識するのではなく、湧水（塩水）環境下で適切な機能を発揮するニアフィールド領域関連部材（人工バリア材料＋主要部材（支保、隙間充填材、埋め戻し材、プラグ、グラウトなど））を対象として、それらの設計、製作、施工に必要な基本情報を提供する。
- ⑧以上の結果として、緩衝材が維持される（成立し、品質が確保される）条件を提示することで、緩衝材とその周囲のニアフィールド構成材料を含めた処分システムとしての成立性と品質確保の方法の提示につなげる。
- ⑨これにより概要調査段階での処分場の概念設計を支援する。

(2) 課題抽出の視点

上記の整理から、今後取り組むべき課題抽出の視点は、以下のように整理される。

- ①ニアフィールドの環境条件として「湧水／動水勾配」を考慮。人工バリア材料とその周辺岩盤を含むニアフィールド領域における処分システムを念頭において、緩衝材の成立性と品質確保に係る課題を抽出する。
- ②課題への取り組みは、ニアフィールド領域を検討対象エリアとして、次の二つの視点から進めるものとする。
 - a. 水理特性（湧水条件）の評価、把握
 - b. 処分システム構成材料の抽出とそれらの仕様、組み合わせ、配置などの基本条件の検討

ニアフィールド領域において、処分システム構成材料が機能的に成立し、その品質が処分システムとしての要求を満たしていることを説明する方法を提示することが、本項の最終的な成果である。上記 b.はその方法提示のための処分システムに関するエンジニアリング的な検討であり、対象領域とそこで考慮する現象から上記 a.と連携して進める必要がある。

以上のような認識に基づき、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に関する検討に関する知見、課題と今後の取組が必要と考えられる試験計画を Appendix 3 に示す。

4.4.4 まとめ

工学技術としての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について、地質環境調査技術と安全評価技術との関係を整理した上で、その方法提示に向けた検討の全体像をまとめた。操業段階と閉鎖後長期の処分システムの安全確保を考えるうえで、その対象を個々の人工バリア材料だけではなく、ニアフィールド領域において関連する部材に広げること、およびそこでの湧水条件に着目することが本検討の特徴である。

湧水という点からは緩衝材と地下水の相互作用である、吸水、膨潤、あるいは再冠水過程での流出挙動が人工バリアシステムの成立には深く関わっており、この影響をニアフィールド領域で解明して、対策を立てる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。従って、岩盤から緩衝材側に流入する地下水の湧水条件（水圧、流量、流速など）を把握して、特に、沿岸部で想定される塩水地下水との関係で、それと緩衝材との相互作用を整合させることが求められると考えた。本項の検討は、緩衝材の挙動、特に再冠水時のそれを湧水条件と結び付け、閉鎖後長期にわたる所定の性能を閉鎖前の操業段階でいかに構築するかに焦点を当てたものであり、その検討領域がニアフィールドということになる。従って、この領域における水理の状態を知ることが、検討には不可欠となる。既存の知見によれば、こうした水理条件の検討は、地下水流動を知るという視点から、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の手法に依るところが大きい。一方、緩衝材の吸水、膨潤、流出といった挙動はスケールや材料物性等を変えた実験的な手法で観察、把握、考察することになるが、本来、その与条件となる湧水条件は、緩衝材以外の、隙間充填材、埋め戻し材、支保、グラウト、プラグなどのニアフィールド構成材料の効果を加味し影響を受けたものとなる。

これより、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については、次の二つの視点で検討を進める必要があると考え、今後の課題への取り組み方法を整理した。

- ・解析に基づく検討対象領域での水理特性（湧水条件）の評価、把握
- ・エンジニアリングの視点からの、処分システム構成材料の抽出とそれらの仕様、組み合わせ、

配置などの基本条件の検討

なお、上記の 2 点は検討領域や関連材料の特性に関して、相互に関与しながら検討を進めることが重要と考えられる。

参考文献

原環センター，平成 26 年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書（第 2 分冊）－人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材，2015.

SKB, Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation, Main report of the SR-Can project, SKB TR-06-09, 2006a.

SKB, Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can, SKB TR-06-18, 2006b.

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 Vol I-III, 2011.

Suzuki, K., Asano, H., Yahagi, R., Kobayashi, I., Sellin, P., Svemar, C. and Holmqvist, M., Experimental investigations of piping phenomena in bentonite-based buffer materials for an HLW repository, Clay Minerals, 48, pp.363-382, 2013.

5. 沿岸部における安全評価技術の高度化開発

5.1 はじめに

沿岸部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、沿岸部の特徴などを、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などの) 評価の枠組み」、「評価モデル」、「評価パラメータ」及び「影響評価」の観点で分析する。そのうえで、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・成果などを考慮・反映しながら、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、技術及びそれら特徴が安全評価結果に及ぼす影響に関する知見などの技術基盤の整備を行う。

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、それぞれについて既存の知見と課題の整理及び研究計画の立案を行う(以下の i) 参照)。そのうえで、核種移行評価と生活圏評価を沿岸部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(以下の ii) 参照)を行う。さらに、核種移行評価では特に地下水流動状況や地下水化学などの特徴を取り込んだ評価技術と評価事例の整備・高度化(以下の iii) 参照)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路や核種の移行経路及び被ばく経路・形態などの特徴を取り込んだ評価技術と評価事例の整備・高度化(以下の iv) 参照)を行う。

i) 既存の知見及び課題の整理、計画立案

沿岸部での処分の安全評価技術の検討に資する調査として、平成 27 年度は、海外での検討事例、特に沿岸部での処分場立地を進めている国を対象に、技術的観点から検討や対策などが進められた事例などを調査する。これにより、沿岸部における安全評価技術上の特徴に対する今後の対応技術の整備に向けた課題を整理し、全体計画の策定を行う。

なお、事例調査については、処分以外の分野での類似事例などについての調査も継続して行う。

ii) 評価の枠組みの整備

i)の事例調査による安全評価において留意すべき沿岸部の特徴などの整理を踏まえて、核種移行評価と生活圏評価のそれぞれの枠組みを前提条件などの整合性にも留意しつつ整理する。核種移行評価については、評価シナリオの作成に必要な FEP の整理やその安全機能への影響の分析、また、生活圏評価については、移行経路や被ばく経路の分析などを行うことで、沿岸部の特徴などを踏まえた評価の枠組みを整備する。

本項目は、平成 27 年度に i)での計画立案において実施内容を検討し、それに基づいて平成 28 年度以降に実施する。

iii) 核種移行モデル・パラメータ整備及び影響評価

核種移行評価に係るモデル・パラメータの整備については、沿岸部の特徴を考慮するための評価モデルの拡充や評価パラメータの整備のためのデータ拡充の方針を具体化するとともに、それに基づく現象論モデルの更新、評価に必要なデータの拡充と評価パラメータの設定手法の整備、評価パラメータの不確実性の設定、核種移行評価モデルの設定を行い、核種移行評価への影響評価及び感度解析を通じて核種移行評価上の影響の大きな沿岸部の特徴を明らかにする。

本項目は、平成 27 年度に i)において実施内容を検討し、それに基づいて平成 28 年度以降に実施する。

iv) 生活圏評価モデル・パラメータ整備及び影響評価

生活圏評価に係るモデル・パラメータの整備については、沿岸部の特徴を考慮するための評価パラメータの設定手法の整備、評価パラメータの不確実性の設定、生活圏評価モデルの設定を行い、生活圏評価への影響評価及び感度解析を通じて生活圏評価上の影響の大きな沿岸部の特徴を明らかにする。

本項目は、平成 27 年度に i)において実施内容を検討し、それに基づいて平成 28 年度以降に実施する。

平成 27 年度は、上記に基づき、沿岸部での処分の安全評価技術の検討に資する調査として、沿岸部での処分場立地を進めている国を含めた国内外の検討事例を対象に、技術的観点から検討や対策が進められた事例などを既存の知見として調査し整理した（5.2 節参照）。また、沿岸部における安全評価技術上の特徴に対する今後の対応技術の整備に向けた課題を整理し、各課題に関する対策案を整理した（5.3 節参照）。

5.2 節での既存の知見などの調査及び 5.3 節での課題と対策案の整理では、安全評価の主要な検討プロセスに沿って以下の項目ごとに調査や検討を行いその結果を整理した。

(1) 現象理解関係

場や人工バリアの変遷に関する特徴、核種移行挙動に関する特徴などを対象とする

(2) 核種移行特性関係

核種移行特性に係る個別現象モデル、パラメータ設定などを対象とする

(3) 核種移行評価関係

核種移行評価に係るシナリオ設定、モデル設定、評価事例などを対象とする

(4) 生活圏評価関係

生活圏評価に係る移行経路・被ばく経路のモデル設定、パラメータ設定などを対象とする

5.2 既存の知見などの調査

本節では、沿岸部での処分の安全評価技術の検討に資する調査として、沿岸部での処分場立地を進めている国を含めた国内外の検討事例を対象に、技術的観点から検討や対策が進められた事例などを既存の知見として調査し整理した。なお、既存の知見のひとつである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）については、以下「第 2 次取りまとめ」という。

(1) 現象理解関係

本項では、場や人工バリアの変遷に関する特徴、核種移行挙動に関する特徴などを対象とした現象理解関係の調査として、以下のサブ項目を設定し、調査及び調査結果の整理を実施した。

- ・ 地下水環境
- ・ 人工バリア挙動、核種移行挙動
- ・ 天然バリア中のコロイド、有機物、微生物影響

・ 地下水環境

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。

このような地下水環境を対象として、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の体系化が進められ（例えば、今井ほか, 2009; 産業技術総合研究所, 2012 (pp.11-72) ; 電力中央研究所, 2013 (pp.11-122)), 核種移行を評価する手法の整備が進められてきている（原子力発電環境整備機構, 2011b (pp.44-52) ; 2011c (pp.7-86-7-92))。いずれの地下環境の評価例にも、Dtransu-3D・EL (菱谷ほか, 1999) や SEAWAT (Guo and Langevi, 2002) などの多孔質媒体を仮定した数値モデルが適用されている。

しかしながら、花崗岩に代表される結晶質岩などの亀裂性媒体では、亀裂中の地下水流動による塩分の移動に加えて、亀裂に接する岩石マトリクス部での拡散により塩分の移動に遅延が生じる。例えば、海水系地下水環境の場が海退により淡水系地下水環境に変化する場合には、まず亀裂が淡水系地下水により置換され、その後マトリクス部の塩分が拡散により亀裂に移動する。したがって、マトリクス部の地下水化学組成の変化は亀裂部に比べて遅くなる。SKB や Posiva は、フォルスマルクやオルキルトの処分場候補地を対象とした海水準変動による地下水環境の長期的な変遷の評価に際して、このような亀裂中の流動と塩分のマトリクス拡散による遅延効果の連成の影響を考慮した数値解析モデル (Hoch and Jackson, 2004) を適用している (SKB, 2011 (p.338); Posiva, 2013 (p.164))。

・人工バリア挙動、核種移行挙動

圧縮ベントナイト間隙水については、これまで淡水系地下水環境と海水系地下水環境でのベントナイト間隙水の化学的環境が評価されており（例えば、第 2 次取りまとめ (核燃料サイクル開発機構, 1999 (p.VI-82))、沿岸部で想定される淡水系地下水環境や海水系地下水環境における間隙水環境の評価は、これまでの評価結果を適用することが可能である。また、処分場の地下水環境が海水系から淡水系へ、またはその逆へと変化した場合には、ベントナイト間隙水の化学的環境が大きく変化する可能性が考えられる。このような間隙水環境の変化は、SKB においてフォルスマルク地域を対象とした評価例があり (Arcos et al., 2006)、これに基づく、気候変動の影響による地下水環境の変化に対して、システムの安全性能に影響を及ぼすようなベントナイト間隙水の化学的環境の変化は起こらないとされている (SKB, 2011 (p.528))。

緩衝材である圧縮ベントナイトの変質については、100°C以下の条件ではベントナイトの長期安定性に影響を及ぼす顕著な変質、変化は起こらないと評価されており (柴田ほか, 2004)、セメント系材料との相互作用によるベントナイトの変質についても、地層処分の長期的性能に悪影響を及ぼす可能性は少ないと評価されている (電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005 (pp.4-24-4-57))。また、オーバーパック材料の腐食に起因する鉄との相互作用によるベントナイトの変質についても、変質はオーバーパック近傍に限られると考えられている (日本原子力研究開発機構, 2013 (pp.136-142))。これらの変質の要因は、高温、高 pH 間隙水、金属鉄の存在であり、沿岸部で想定される海水系地下水環境がこれらの要因に及ぼす影響は少ないと考えられる。そのため、現状の知見に基づけば、沿岸部においてもシステムの安全性能に影響を及ぼすような緩衝材の変質は起こらないものと考えられる。

圧縮ベントナイトのコロイドフィルトレーション効果に関しては、NaClO₄濃度 0.001mol/l において、粒径 2nm の金コロイドが 1.0Mg/m³以上の乾燥密度の圧縮ベントナイトを透過しないことが確認されている (Holmboe et al., 2010)。そのため、淡水系地下水環境においては、圧縮ベントナイトのコロイドフィルトレーション効果により、人工バリア内で発生するコロイドは移行が抑制されると考えられる。一方で、海水系地下水環境での圧縮ベントナイトのコロイドフィル

トレーション効果に関する報告はほとんどなされていない。また、圧縮ベントナイト周りの地下水の流れでの浸食により生成するベントナイトコロイドについては、地下水中のイオン強度が4mM以上では安定して存在しないとされており（SKB, 2011 (p.399)、海水系地下水では生成しないと考えられる。

- ・天然バリア中のコロイド、有機物、微生物影響

天然バリア中の核種移行に及ぼすコロイドの影響については、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値を採用し、核種移行への影響評価が行われている（例えば、第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構, 1999 (pp.VI-52-VI-56)）。沿岸部において想定される海水系地下水などのイオン強度の高い地下水環境においては、コロイドの安定性が低いことから、地下水中のコロイド濃度が低く抑えられると考えられる（例えば、Degueldre et al., 1996）。そのため、上記の評価を採用することは、沿岸部を対象としたコロイド影響の評価においても保守的な評価になると考えられる。

有機物や微生物については、陸域の地下だけでなく、沿岸部の地下や海底深部地下においても、錯形成能を有する有機物や生きた微生物が広域的に豊富かつ多様に存在することが報告されている（Inagaki et al., 2015 ; Pedersen et al., 2014 ; Hallbeck, 2010 ; Mäkelä and Manninen, 2007）。これらの有機物や微生物は、核種との錯形成や微生物細胞への核種の収着、代謝反応に伴う濃集・鉱物化・細胞外への錯体生成などによって、放射性核種の移行に影響を及ぼすと考えられている（Terashima et al., 2012 ; Lloyd and Macaskie, 2002 ; Pedersen, 2005）。有機物や微生物の核種移行に及ぼす影響については、その存在量や多様性、核種との相互作用特性が塩分濃度や有機物濃度や有機物の種類などの地下水水質や地質などの環境条件に大きく依存することから、沿岸部の地下環境の長期的変遷を考慮した有機物及び微生物特性評価を行う必要がある。沿岸部の地下環境を対象とした有機物・微生物の特性についての研究に関しては、花崗岩の処分候補地を対象としてフィンランドのオルキオトやスウェーデンのフォルスマルクで実施されており、有機物・微生物の存在量やその種類について詳細な調査報告がなされている（Haveman et al., 1999 ; Mäkelä and Manninen, 2007 ; Pedersen, 2008 ; Hallbeck, 2010 ; SKB, 2010a ; Pedersen, 2013 ; 日本原子力研究開発機構, 2013 ; Pedersen et al., 2014）。また、日本国内では、沿岸部の地下環境を対象として、地球深部探査船「ちきゅう」による統合国際深海掘削計画（IODP）の中で、青森県八戸市沖の約80 kmの地点（水深1,180m）における海底下2,466mまでの堆積物コア試料から、メタン生成菌の培養の成功例が報告されるとともに、微生物活性が地質条件や有機物特性に依存していることが示されている（Inagaki et al., 2015）。その他、関東平野の沖積層を対象とした微生物調査（Takeuchi et al., 2009 ; Takeuchi et al., 2011）や、幌延地域の地下水を対象とした微生物調査結果が報告されている（Ise et al., 2016 ; Shimizu et al., 2006）。これらの国内外における既存の研究成果からは、沿岸部地下の微生物特性は、メタン生成菌や嫌氣的メタン酸化菌、海底下で多く検出される未培養微生物群などが優占して存在し、陸域地下環境とは異なる代謝反応特性を有することが示されている。したがって、微生物代謝反応が地下の酸化還元状態に及ぼす影響や核種移行挙動影響などを評価する際に、陸域地下とは異なる代謝メカニズムを考慮する必要があると考えられるが、沿岸部におけるこれらの既存報告は、沿岸部に特徴的な微生物代謝反応の理解や、地層処分システムに及ぼす影響への概略的評価に参照可能である。

(2) 核種移行特性関係

本項では、核種移行特性に係る個別現象モデル、パラメータ設定などを対象とした調査として、以下のサブ項目を設定し、調査及び調査結果の整理を実施した。

- ・ 溶解度
- ・ 収着・拡散
- ・ 溶解度

核種移行特性パラメータとして重要な溶解度については、対象となる元素の溶解や錯生成に関する熱力学データを収集・整備し、熱力学データベース (TDB) を構築した上で、淡水系地下水と海水系地下水環境での放射性核種の溶解度を評価している (例えば、核燃料サイクル開発機構, 1999)。諸外国でも同様に、TDB を構築した上で溶解度を評価している。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。

溶解度の評価では、塩濃度が評価結果に影響を与える。海水系地下水及びそれに対応するベントナイト間隙水の塩濃度は 0.7 mol/dm^3 程度と想定されている。この値は、Debye-Hückel 式のような簡易な活量補正式で対応できる範囲を超えているものの、最新の熱力学データベース (JAEA-TDB) (Kitamura et al., 2014) ではこのような塩濃度にも適用可能な活量補正モデル (SIT 法) (Grenthe and Puigdomenech, 1997) を導入しており、このモデルに必要なイオン相互作用係数についても整備を進めている。SIT 法については、フランス Andra やスイス Nagra が整備を進めている熱力学データベース (Andra では“ThermoChimie” (Grivé et al., 2015)、Nagra では“Nagra/PSI-TDB” (Thoenen et al., 2014)) でも採用されている。一方、ドイツや米国などでは、評価の対象となる地下水中の塩濃度が $5\sim 6 \text{ mol/dm}^3$ 程度であり、SIT 法の適用範囲 ($\leq 3.5 \text{ mol/kg} \approx 3 \text{ mol/dm}^3$) (Grenthe and Puigdomenech, 1997) を超えていることから、より高塩濃度条件に適用可能な Pitzer モデルを採用している (Moog et al., 2015; Reed et al., 1999)。

溶解度の評価では、各溶存化学種のイオン相互作用係数も評価結果に影響を与える。各溶存化学種のイオン相互作用係数は、塩 (電解質) の種類ごとに導出される。その導出方法は実験的なものに限定されており、溶存化学種のもつ電荷の絶対値が大きくなるほどイオン相互作用係数も大きくなるという傾向は見られるものの、理論的な系統性は見当たらない。陽イオン種の熱力学データなど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に過塩素酸塩が用いられることが多いため、過塩素酸イオンに対するイオン相互作用係数はある程度整備されている一方で、沿岸部の地下環境で想定される海水系地下水での塩化物イオンに対するイオン相互作用係数の整備はまだ不十分である。ThermoChimie (Grivé et al., 2015) では、塩化物イオンに対するイオン相互作用係数を推定しているが、推定方法については不明である。一方、Nagra/PSI-TDB の最新版 (Thoenen et al., 2014) では、過塩素酸イオンに対するイオン相互作用係数と塩化物イオンに対するイオン相互作用係数の相関を調べるなど、イオン相互作用係数を推定する方法について記載がある。

その一方で、溶解度を制限する固相については、想定する pH や酸化還元電位が第 2 次取りまとめ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) (核燃料サイクル開発機構, 1999, (表 6.1.3.2-3)) から大きく変動しない限り、第 2 次取りまとめで設定したものから大きく変わることはないと考えられる。

- ・ 収着・拡散

沿岸域における人工バリア (緩衝材) 及び天然バリア (岩盤) 中の核種の収着・拡散現象を評価するうえでは、沿岸部における地下水組成の影響を考慮する必要がある。具体的には、地下水組成として海水など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。

沿岸部あるいは海水系地下水を対象とした評価に関し、従来から採用されてきたアプローチは、降水系地下水に加えて、海水系地下水条件での収着・拡散データを取得・整備し、それぞれの条件でのパラメータを設定する方法である。例えば、第2次取りまとめやスウェーデンSKBのSR-Can (SKB, 2006; Crawford et al., 2006) などでは、この手法が採用されている。このような海水系地下水を含む多様な環境条件における核種移行パラメータ設定を可能とするため、これまでに緩衝材や岩石を対象に、海水系地下水条件を含む多様な環境条件で取得された国内外の実測データを、収着・拡散データベース (JAEA-SDB/DDB) として段階的に整備・拡充してきた (例えば、館ほか, 2009; 栃木・館, 2009; Tachi and Suyama, 2016; 館・陶山, 2016)。また、多様な環境条件に対応した収着・拡散特性の変化を評価可能とするための、メカニズム理解に基づく現象論的収着・拡散の開発についても、OECD/NEAの収着プロジェクトにおける最新モデルやその適用性に関する国際的コンセンサスやモデル化のガイドラインなど (OECD/NEA, 2012) を踏まえ、モデル開発を進めてきた。特に緩衝材のモデルについては、多数の核種とベントナイト密度や塩濃度など多様な環境条件に適用可能な収着・拡散 (収着モデルはイオン交換と表面錯体反応を考慮、拡散モデルについては静電的な相互作用を電気二重層モデルとして考慮) を構築しており (例えば、Tachi et al., 2014a; 2014b; Tachi and Yotsuji, 2014)、降水系地下水から海水系地下水までの幅広い地下水条件での収着・拡散パラメータの設定や変動の評価が可能である。また、岩石への収着についても、幌延の泥岩 (堆積岩)、スイスグリムゼルの花崗岩 (結晶質岩) を対象に、主要核種を対象として、塩濃度依存性のデータを整備し、その影響メカニズムを把握しつつ、緩衝材系のモデルをもとに粘土鉱物の支配的寄与を仮定したモデル化の検討も進めてきた (例えば、Tachi et al., 2011; 2015)。さらに、このような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などを活用しつつ、対象とする条件に応じた収着・拡散パラメータを設定するための手法の体系化を進めてきており (例えば、柴田ほか, 2015; Tachi et al., 2014c)、沿岸部の条件が与えられれば、これらの手法に基づきパラメータを設定することが可能である。

一方で、近年の諸外国におけるサイトスペシフィックな評価においては、沿岸部の地下水組成の長期変遷のより現実的な評価が検討されている。例えば、スウェーデンSKBのSR-Siteでは、実サイト条件での現在の地下水組成に加えて、長期的な地下水組成 (塩濃度) の時間変化をモデルにより評価したうえで、Csなどの一部の元素を対象に、イオン交換反応を考慮した収着モデルによって塩濃度の変化に応じた収着分配係数を評価している (SKB, 2011; Crawford, 2010)。また、フィンランドPosivaのTURVA-2012においても、現在の地下水組成に加え、長期変遷を考慮して7種類の地下水を設定し、それぞれの地下水組成での岩石への収着分配係数を設定している (Posiva, 2012a; Hakanen et al., 2014)。TURVA-2012では、さらに、これら長期の地下水変遷を考慮した緩衝材中の間隙水組成の変遷、それに応じた収着・拡散パラメータの設定までを検討している (Hellä et al., 2014; Wersin et al., 2014)。これらのアプローチは、地下水組成の時間変遷を、複数の地下水組成、あるいはその段階的な変化として考慮するものであるが、地下水組成の時間変遷のモデル解析に、その地下水変遷に応じた収着特性変化を評価可能な収着モデル (イオン交換、表面錯体モデル) を組み込んで、核種移行計算までを行うための方法論 (smart Ka) についても検討がなされつつある (Trincherro et al., 2014; 2016)。この方法論については、後述の(3)にも関連する情報を示している。

(3) 核種移行評価関係

安全評価では、まず、処分環境の場の特徴やそこで発生するプロセスや事象を整理し、処分システムに及ぼす可能性のある影響をシナリオとして記述する。このシナリオは安全評価の枠組み

をあたえるものであり、設定されたシナリオに対してそれが処分システムの安全性に与える影響を定量的に検討・分析するための解析ケースの設定、解析に用いるモデルとパラメータの設定及び評価が行われる。

本項では、核種移行評価に係るシナリオ設定、モデル設定、評価事例などを対象とした調査として、以下のサブ項目を設定し、地下水シナリオを中心とした調査及び調査結果の整理を実施した。

- ・ シナリオ
- ・ 核種移行モデル

・シナリオ

まず、わが国の検討状況として、第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構、1999（pp.VI-75-79, p.VI-96））では、地質環境不確実性ケースとして、基本シナリオに対する解析ケースとして海水系地下水条件下での核種移行特性を設定した評価が実施されている。また、第2次取りまとめでは、海水準変動のシナリオを想定し、塩淡境界の周期的な変動による地下水化学の変化を考慮した概略的な評価が実施されている（核燃料サイクル開発機構、1999（pp.VI-101-102））。

第2次取りまとめ以降の進展としては、沿岸部陸域も対象に含めた上で、地史及びモダンアナログ的な考え方にに基づき、隆起・侵食／沈降・堆積及び海水準変動の複合的な影響による地表環境や地質環境条件の変化のパターンを考慮したシナリオ構築手法が開発されている（川村ほか、2010）。また、安全機能と FEPs を基軸としたシステム変遷の記述手法が示され、その手法を、隆起・侵食による深度減少及び氷期サイクルに伴う気候・海水準変動の影響を考慮した領域に適用した事例がある（Kurikami et al., 2011）。さらには、沿岸部海域の地下を対象として、隆起・侵食及び海水準変動による標高・地形勾配・汀線・塩淡境界の変化に基づきシステム変遷を記述するための手順が開発されるとともに、沿岸部でのシステムの変遷を、母岩の透水性と塩淡境界の追従性の有無の関係性に着目して類型化した事例がある（原子力発電環境整備機構、2011a）。これらの成果は、対象とする沿岸部の特徴に応じた地質環境情報や処分場の仕様が設定されることで、沿岸部でのシナリオ構築に適用可能と考えられる。

次に、諸外国の検討状況として、沿岸部を候補地とするスウェーデンにおいては、安全評価において取り扱う重要な現象として、地下施設建設に伴い地下水流動が短期的に変化すること、永久凍土、氷河の形成・後退、地球温暖化により海岸線の位置や地下水流動が変化すること、海水準変動に伴い海水・湖水が現在の陸域に浸入することなどが考えられている（SKB, 2011）。同様に沿岸部を候補地とするフィンランドにおいては、安全評価においてシステムの長期変遷を取り扱う上で重要な現象として気候変動が考えられている（Posiva, 2012b, pp.91-93）。特に、氷期には永久凍土と氷床が形成され、地形・海岸線の位置と地下水流動が変化することなどが想定されている（Posiva, 2012b, pp.25-28）。これら諸外国の事例の基本的な考え方や手法は、わが国の地質環境条件並びに対象とする沿岸部の特徴や工学的対策を加味した上で、沿岸部でのシナリオ構築において参考になると考えられる。

なお、国際機関における取組としては、OECD/NEA が放射性固体廃棄物処分場の閉鎖後の安全性に関する特性 (Feature)、出来事 (Event)、プロセス (Process) を特定・分類し、国際 FEP リストとして取りまとめている (OECD/NEA, 2000)。国際 FEP リストは、各国での経験に基づき、特定の地質環境条件や処分場の設計に依存せず、閉鎖後の安全性に関する要因を包括的に分類したものであり沿岸部で考慮すべき要因も含まれている。また、地層処分安全評価のシナリオ構築に関する各国の経験や知識を共有することを目的としたワークショップが開催されている (OECD/NEA, 2001 ; 2015)。これらの国際的な知見は、沿岸部でのシナリオ構築において参考

になるものと考えられる。

・核種移行モデル

まず、わが国の検討状況として、第2次取りまとめでは、人工バリア中の核種移行モデルとして、安全機能に関連する現象を簡略化して表現し、ガラスの溶解、溶解度による核種濃度の制限、緩衝材中での拡散と収着による移行遅延を考慮した一次元のモデルを用いている（核燃料サイクル開発機構, 1999 (pp.V-21-28)）。一方、天然バリア中の核種移行モデルとしては、人工バリアとその近傍の岩盤の性能を重視するニアフィールドアプローチに基づき、人工バリア近傍の比較的狭い領域の岩盤に対して、亀裂内の移流・分散による移行と岩石基質部内の収着・拡散による移行遅延を一次元平行平板モデルで表現し、さらに、移行経路の透水性の不均質性を考慮するために複数の一次元平行平板モデルを重ね合わせたモデルを用いている（核燃料サイクル開発機構, 1999 (pp.V54-58)）。また、このモデルは、三次元亀裂ネットワークモデルを用いた解析結果との比較などにより妥当性が確認されている。

第2次取りまとめ以降の進展としては、沿岸部陸域を対象として、わが国では山地を除けば隆起速度が侵食速度より大きい傾向があることを踏まえ、隆起速度と侵食速度の違い及び海水準変動との複合的な影響による地表環境や地形の変化を、地質環境条件（例えば、地下水流速、地下水組成）の時間変化及び核種移行パラメータ（例えば、溶解度、分配係数）の時間変化として設定する手法が例示されている（川村ほか, 2010；Ebashi et al., 2014）。さらには、このような天然現象がシステムに与える影響を効率的に解析するためのツールとして、第2次取りまとめ時点での核種移行解析モデルをベースとしつつ、パラメータの時間変化を考慮可能とした核種移行解析モデルが整備されている（小尾ほか, 2010）。なお、遠い将来における極端な想定の見通しとして処分場が地表に接近した際の評価技術として、河川侵食の特徴（例えば、下流域では隆起・侵食の速度が比較的遅く、幅広い領域が一様に侵食されること）に着目し、河川の流域区分に応じた侵食形態の概念モデルが構築され、侵食により処分場が削剥され核種が人間環境に放出されることを想定した影響評価が試行されている（Miyahara et al., 2009；Kawamura et al., 2010；Miyahara et al., 2011；注連本ほか, 2013；Wakasugi et al., 2013）。さらには、沿岸部海域の地下を対象として、複数の空間スケールにまたがる地下水流動と核種移行解析を、気候・海水準変動及び隆起・侵食に伴う変化を考慮しつつ連携させる手法が開発され、仮想的な地質環境条件に対する評価が試行されている（原子力発電環境整備機構, 2011b；日本原子力研究開発機構, 2016）。

対象とする沿岸部の特徴に応じた地質環境情報、処分場の仕様、移行経路情報や移行特性が設定されると、これらのモデルや手法を用いて、沿岸部での核種移行解析を、複数の空間スケール対象にそれらに関連づけながら実施することが可能と考えられる。

次に、諸外国の検討状況として、沿岸部を候補地とするスウェーデン及びフィンランドについて記述する。

スウェーデンでは、気候変動や海水準変動を考慮し、建設・操業段階、閉鎖後初期（間氷期）、閉鎖後長期（氷期）という時間スケール並びにリージョナル、サイト、処分場という空間スケールに区分した上で、地下水流動解析及び粒子追跡法が実施され、その結果として得られる地下水流動の状況とその変化を、核種移行パラメータ（地下水移行時間、F 値：亀裂内の移行抑制値、 Q_{eq} ：緩衝材と交差する亀裂の接触面における等価流量など）の変化として設定することで安全評価に取り込んでいる（Joyce et al., 2010 (pp.52-65)；SKB, 2011 (pp.338-339)）。人工バリア中の核種移行モデルについては、キャニスタのピンポール中の拡散移行、処分孔からの移行経路の違い（ Q_1 ：処分孔と交差する亀裂への拡散、 Q_2 ：処分坑道の底面の掘削影響領域への拡散、 Q_3 ：処分坑道を交差する亀裂への拡散）を考慮して、緩衝材や埋め戻し材中の複数の拡散経路を

モデル化している (SKB, 2010b (pp.297-319) ; SKB, 2011 (pp.647-648))。天然バリア中の核種移行モデルについては、第 2 次取りまとめの核種移行モデルと同様なプロセスを対象として、亀裂内の移流・分散による移行と岩石基質部内の収着・拡散による移行遅延を想定した一次元のモデルが用いられている (SKB, 2010b (pp.42-43) ; SKB, 2011 (pp.649-650))。

フィンランドでは、人工バリアの核種移行モデルについて、第 2 次取りまとめの核種移行モデルと同様なプロセスを対象としているものと考えられる。ただし、天然バリア中の移行経路の違い (F-path : キャニスタに対して処分孔を交差する亀裂による移行、DZ-path : 処分坑道の底面における掘削影響領域による移行、TDZ-path : 処分坑道と交差する亀裂及び処分坑道による移行) を考慮して、緩衝材や埋め戻し材中の複数の拡散経路をモデル化している (Posiva, 2012 (pp.113-119))。一方、天然バリア中の核種移行モデルについては、第 2 次取りまとめの核種移行モデルと同様なプロセスを対象として、亀裂内の移流・分散による移行と岩石基質部内の収着・拡散による移行遅延を想定したモデルが用いられている (Posiva, 2012b (pp.117-119))。

これらのモデルは、対象とする沿岸部の地質環境条件並びに坑道周辺の地質環境の調査結果や工学的対策を加味した上で、沿岸部における天然バリアの核種移行解析、特に処分孔ごとの特徴を加味した核種移行解析の考え方を設定する際に参考になると考えられる。

さらに、SKB と Posiva は、地下水環境のダイナミックな変化を考慮した先進的な核種移行評価手法の開発を進めている。Trincherio et al. (2014; 2016) は、氷河期などの気候変動の影響で時間的に変化する地下水流動の変化とそれに起因して変化する地下水の化学的環境 (例えば、塩分濃度の変化) の評価結果から分配係数 K_d の空間分布とその時間変化を整理する“smart K_d ”と呼ばれる方法を提案している (この方法論については、前述の(2)にも関連する情報を示している)。そして、地下水流動解析から抽出される流線に沿って空間的・時間的に変化する K_d を smart K_d から抽出して、粒子追跡法による核種移行解析コード MARFA (Painter and Mancillas, 2013) へ適用する解析ツールを開発するとともに、フォルスマルクを対象とした解析事例として、氷河が溶けた水が涵養した地下水と降水が涵養した地下水の相互作用による地下水の化学的環境の変化が核種移行評価結果に与える影響などを示している。

(4) 生活圏評価関係

生活圏評価では、人間の生活環境である地表環境における核種移行のプロセスとこれによる被ばくの形態 (被ばく経路) についてモデルを構築して、人間が受ける放射線影響 (例えば、放射線量など) を評価する。

本項では、生活圏評価に係る生活圏評価に係る移行経路・被ばく経路のモデル設定、パラメータ設定などを対象とした調査及び調査結果の整理を実施した。

沿岸部を対象とした例として、スウェーデンやフィンランドなどにおいては、沿岸部の処分場サイトにおける地表環境条件の特徴に対応可能となる生活圏評価モデルとパラメータを整備している。例えば、スウェーデン SKB においては、既存の生活圏評価において採用されている相互作用マトリクスを用いた移行プロセスの整理の考え方 (BIOMASS Methodology (IAEA, 2003 (整理の考え方の基本的な手順については FIG. A2 参照))) をベースとして、沿岸部を含む水域生態系において考慮すべき環境構成要素と移行プロセスの整理を実施している (Aquilonius, 2010 ; Saetre et al., 2013)。ここでは、沿岸部を含む水域生態系において、15 の環境構成要素 (水や土壌などの環境媒体に加えて、一次生産者、草食/肉食動物などの生物群も考慮) と 51 のプロセスをマトリクス形式で整理し (Aquilonius, 2010 (Figure 8-2))、さらに、プロセスに関しては、生物学的プロセス、人間の行動に関連するプロセス、化学的・力学的・物理的プロセス、物質移行プロセス、放射線学的・熱的プロセス、地表環境の変遷に係るプロセスに分類している。整理し

たプロセスのうち、スウェーデンの地層処分場サイト及び中低レベル放射性廃棄物処分場サイトであるフォルスマルクの環境条件において重要となる 34 のプロセスを抽出し、生活圏評価モデル構築のための材料としている。環境構成要素と移行プロセスの整理に用いた相互作用マトリクスの構成は、水域生態系（沿岸部を含む）を対象としたもの（Aquilonius, 2010 (Figure 8-2)）と陸域生態系を対象としたもの（Aquilonius, 2010 (Figure 8-3)）で違いはない。ただし、プロセスの重要度に関しては、考慮する環境の違いにより、若干の相違が見られる。例えば、フィルターフィーダー（水を大量に飲み込み餌をヒゲで濾して食べる動物）に関連するプロセスは、水域生態系（沿岸部を含む）では考慮するものの、陸域生態系では考慮しないことから、マトリクス上で無関係のプロセスと分類されている。また、フィンランド Posiva が作成した TURVA-2012 では、水域生態系におけるプロセス（例えば、沈殿や再浮遊）は淡水域と沿岸部で同様の挙動を示すとして同じ評価式を用いている（例えば、Posiva, 2014 (Table 2-1)）。沈殿速度や再浮遊率などのパラメータについては、それぞれの環境の特徴を考慮しているものの、内陸部における検討の成果が沿岸部における評価にも活用できる事例の一つとして捉えることができる。

一方、地表環境が特定された場合に、その特徴に対応可能となる生活圏評価モデルとパラメータを体系的に整備することを目的として、天然バリアから生活圏への核種放出域（Geosphere-biosphere interface、以下、GBI）の候補としての沿岸部の環境（沿岸部海域、潮間帯、周辺海洋）を考慮した生活圏評価モデルの構築を実施してきた（加藤ほか, 2001a）。この検討を通じて、第 2 次取りまとめなどにおいて採用された生活圏モデル構築手法（IAEA, 2003）は、干満の影響を大きく受ける潮間帯や、海洋拡散による希釈効果が期待される周辺海洋を GBI として想定する場合にも適用できることが確認された。沿岸部海底下環境に対する GBI が設定されれば、この検討において構築したモデルに基づく基本的な影響評価は可能であると考えられる。あわせて、気候海水準変動を考慮した生活圏評価手法の検討を実施し、沿岸部を含む地表環境条件の変動を考慮した場合において考慮すべき影響要因（例えば、気候の寒冷化を想定した場合の水循環量の変化）について検討するとともに、それら影響要因を考慮することが評価結果に与える影響を考察した（加藤ほか, 2001b；鈴木ほか, 2006）。沿岸部の地表環境情報が設定されれば、時間変化を考慮する場合の地表環境の状態設定をはじめとして、沿岸部の環境に特徴的な移行プロセスの抽出・設定に部分的あるいは将来的に活用できる可能性がある。

また、沿岸部に特有なパラメータの整備に関しては、全国レベルのジェネリックな海洋環境における環境移行パラメータが収集されている。例えば、日本の主要河川の塩分勾配がみられる沿岸河口域における堆積物-海水分配係数や沿岸河口域に生息する海産生物（海藻、貝類、甲殻類）の濃縮係数について、IAEA（2004）に示された方法と同様に導出し、以下のデータベースが整備されている。

- ・沿岸堆積物-海水間分配係数データベース（沿岸 Kd）（Takata et al., 2010a；2012；2013；2016）
- ・海水-海産生物濃縮係数データベース（沿岸 CR）（Takata et al., 2010b；2011；Tagami and Uchida, 2013；IAEA, 2014）

5.3 課題と対策案の整理

本節では、5.2 節での調査・整理を踏まえ、沿岸部における安全評価技術上の特徴に対する今後の対応技術の整備に向けた課題を整理するとともに、各課題に関する対策案を整理した。なお、課題と対策案の整理は、5.2 節で示したサブ項目ごとに実施した。

(1) 現象理解関係

5.2 節に記述したように、国内外での検討において、地下水環境及び人工バリア挙動、核種移行

挙動についての評価事例が存在しており、評価条件が設定されれば、それらを活用した概略的な現象理解はできる状態となっている。その一例として、沿岸部の地下水環境を対象とした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の検討例、淡水系地下水環境と海水系地下水環境でのベントナイト間隙水の化学的環境の評価例、圧縮ベントナイトの変質に関する検討例、圧縮ベントナイトのコロイドフィルトレーション効果に関する検討例、天然バリア中の核種移行に及ぼすコロイド・有機物・微生物の影響に関する検討例を示した。これらのことから、対象とする沿岸部の特徴に応じた地質環境情報や処分場の仕様が設定されることで、沿岸部での主要な現象に関する基本的な検討は可能と考えられる。

今後、(2)項以降に述べる核種移行特性、核種移行評価、生活圏評価の適用性向上・高度化の基盤をより確かなものにしていくために、沿岸部を対象とした現象理解の拡充が必要となるのは、主に以下に挙げる点である。

・地下水環境

わが国における沿岸部を対象に、海水準変動、隆起・侵食などによる地形変化、あるいはその組み合わせが地下水環境に与える影響を評価する手法整備の一環として、亀裂中の地下水の流動と岩石マトリクス部への塩分の拡散を考慮した数値解析モデルを用いた地下水環境評価を実施する必要がある。そのため平成 28 年度は、5.2(1)で示した SKB や Posiva の事例 (SKB, 2011 ; Posiva, 2013) を参考に、既存の数値解析モデル (Hoch and Jackson, 2004) などを利用して、わが国の沿岸部で想定される地形モデルを仮想的に設定し、海水準変動、隆起・侵食などによる地形変化、あるいはその組み合わせが地下水環境に与える影響の検討に着手する。なお、Hoch and Jackson (2004) が開発した数値解析モデルは亀裂性媒体を対象とした解析において多孔質媒体への近似解を用いている。そのため、より現実的な数値解析モデルの開発として、亀裂ネットワークモデルを直接用いた亀裂中の地下水の流動と岩石マトリクス部への塩分の拡散を対象とした解析ツールの開発を進めることも課題である。

・人工バリア挙動、核種移行挙動

処分場の地下水環境が海水系から淡水系へ、またはその逆へと変化した場合の圧縮ベントナイト間隙水の化学的環境の変化は、間隙中に存在するオーバーパック材料由来の鉄腐食生成物の沈殿や溶解挙動に影響を及ぼす可能性がある。間隙水中の鉄イオン濃度の変化は、オーバーパックの腐食速度などに影響を及ぼす可能性があるものの、鉄腐食生成物の存在を考慮した上での、上記のような地下水環境の変化に伴う間隙水の化学的環境の変化についての評価はなされておらず、今後、検討が必要な課題の一つである。

緩衝材の変質が及ぼす影響については、鉄との相互作用による緩衝材の変質に関して、これまでにモデルによる変質評価が試みられており、システムの安全性能に影響を及ぼすような大きな変質は起こらないと予測されている (日本原子力研究開発機構, 2013)。しかしながら、現状の評価は概念的なモデル評価にとどまっており、より精度の高い変質評価モデルを構築していくことが課題である。

コロイドが核種移行に及ぼす影響については、報告例がほとんどない海水系地下水における圧縮ベントナイトのコロイドフィルトレーション効果について明確にすることが課題の一つである。また、淡水系地下水においては、緩衝材の浸食によるベントナイトコロイドの生成が否定できないことから (電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005)、地下水環境が海水系地下水から淡水系地下水へ変化する場合についての緩衝材の浸食やコロイド生成挙動についての検討を行う必要がある。

- ・天然バリア中のコロイド、有機物、微生物影響

沿岸部の地形及び地質を対象とする場合、陸域地下とは異なる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伴う地球化学条件の長期変遷により、原位置環境でのコロイド、有機物、微生物特性も影響を受けることが考えられる。これまでに、天然地下水中的コロイド濃度の測定やコロイドを構成する鉱物などについての報告例は少なく、特に沿岸部で想定される海水系地下水中に存在するコロイドの分析や安定性の評価は、核種移行に及ぼすコロイド影響の評価精度を向上させる上での課題である。有機物、微生物影響に関しては、既存の知見を参照して評価シナリオを構築しつつ、それらの信頼性向上に向けた特性データの整備やモデルの拡充を行うとともに、塩分濃度や酸化還元状態などの地球化学条件の長期変遷に伴う有機物特性変化及び微生物の代謝活性変化を評価するための手法を構築する必要がある。そのために、沿岸部の様々な地質年代や地球化学条件を対象とした調査及び情報の整理を行うとともに、地球化学条件の長期変遷に関わる解析結果を参照しながら、微生物活性特性の変遷などに関わる予測解析ツールの開発を進めることが重要である。また、特性データの整備にあたっては、既存のボーリング調査手法をある程度適用可能であると考え、高塩分濃度を対象とした地下水中的コロイドや溶存有機物の回収・分析などに関する評価手法については、今後開発を進める必要がある。

(2) 核種移行特性関係

5.2 節に記述したように、国内外での検討において、重要な核種移行特性パラメータである溶解度及び収着・拡散についてのモデル、データ及びパラメータ設定手法の整備が進められてきており、評価条件が設定されれば、それらを活用した概略的な核種移行特性の評価はできる状態となっている。その一例として、溶解度設定については、影響を及ぼす塩濃度や溶存化学種のイオン相互作用係数の検討例を示した。また、人工バリア（緩衝材）及び天然バリア（岩盤）中の核種の収着・拡散については、様々な条件でのデータ取得とそのデータベース化、メカニズム理解に基づく現象論的収着・拡散の開発及びそれらの収着・拡散パラメータの設定や変動の評価への適用に関する検討例を示した。これらのことから、対象とする沿岸部の特徴に応じた地質環境情報や処分場の仕様が設定されることで、沿岸部での主要な現象に関する基本的な検討は可能と考えられる。

今後、沿岸部を対象とした核種移行特性の設定のための手法やモデルの適用性向上・高度化に向けた検討を進めていく上で重要となるのは、以下に挙げる点である。

- ・溶解度

5.2(2)に記載のとおり、信頼性の高い溶解度評価を行うためには、海水系地下水として想定される高濃度の塩化物系電解質（例えば塩化ナトリウム）水溶液中における活量評価の信頼性を高める必要がある。そのためには、塩化物イオンに対するイオン相互作用係数の整備が必要である。既存の文献情報は限られているため、既存の情報を整理するとともに、イオン相互作用係数の系統性についても検討を進める必要がある。また、イオン相互作用係数が報告されている元素が限定的であることから、イオン相互作用係数の他の元素や化学種への適用性についても検討する必要がある。必要に応じて、溶解度試験などのデータ取得を行うこととする。

- ・収着・拡散とパラメータ設定

5.2(2)に記載の通り、沿岸部に係る収着・拡散関連の今後の課題としては、大きく二つの視点が

ある。一つは、沿岸部あるいは海水系地下水での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条件でのデータ及びモデルの拡充である。もう一つは、沿岸部の地質・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・拡散現象の取り扱いに関する課題である。

海水系地下水でのデータ・モデルの拡充については、緩衝材については、5.2(2)に示した通り、ある程度基本的なモデルを構築してきたところであり、多数の核種での海水系地下水でのデータ、海水系地下水の影響に加えてセメントなどのバリア材共存影響も考慮した現実的な条件でのデータなどの拡充及び多様な核種と環境条件に適用可能とするモデルの改良が課題である。岩石については、重要な核種と代表的な岩種のバリエーションに対応するため、近年の諸外国における海水系地下水に着目したデータ拡充やパラメータ設定事例(例えば、Crawford, 2010; Vilks, 2011)に関連する情報を継続的に収集・整理するとともに、多様な核種や岩種のバリエーションへの対応を含めた不足データの拡充やそれらデータに基づくモデルの改良が必要である。一方で、沿岸部での地質・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・拡散の取り扱いについては、SKB や Posiva で検討されているような現実的な地下水変遷モデルの検討とあわせ、それらと連動したパラメータ変動評価を可能とするようなモデル・評価体系の構築が考えられる(後述の(3)にも関連する記載あり)。また、長期の時間スケールの地質・地下水環境の変遷及びそれに伴う核種移行評価を検討するうえでは、Posiva でも検討されているようなナチュラルアナログ的なアプローチ(Smellie et al., 2014)についても検討していく必要がある。

(3) 核種移行評価関係

5.2 節に記述したように、国内外での検討において、シナリオ開発や核種移行解析のための方法論やツール及び評価事例が存在しており、評価条件が設定されれば、それらを活用した概略的な影響解析が実施可能な状態となっている。その一例として、海水準変動や隆起・侵食を考慮したシナリオ開発手法の検討例、また核種移行モデルについての国内外の検討例を示した。これらのことから、対象とする沿岸部の特徴に応じた地質環境情報や処分場の仕様が設定されることで、沿岸部でのシナリオ構築や核種移行に関する基本的な検討は可能と考えられる。

今後、沿岸部を対象としたシナリオ開発や核種移行解析のための手法やモデルの適用性向上・高度化に向けた検討を進めていく上で重要となるのは、以下に挙げる点である。

・シナリオ

既存のシナリオ構築手法は、基本的に沿岸部にも適用できると考えられるが、沿岸部の特徴をより適切にシナリオに反映できるようにしていくことが必要になる。そのためには、まず、わが国における沿岸部の特徴を類型化した上で、各類型での地質環境条件とその変遷を設定することが必要である。この際、地下水移行シナリオの評価において鍵となる地下水流動と地下水化学の変遷に着目して、地質環境調査と連携して進めること、また、海水準変動や隆起・侵食などの自然事象による地質環境条件の変遷について自然事象調査と連携して進めることが肝要である。次に、設定した地質環境条件を対象として、沿岸部に共通的あるいは特定の状況において顕著になる主な内部擾乱要因(例えば、地下水流動の不均質性と時間変化、沿岸海底下での有機物・微生物の挙動)と外部擾乱要因(例えば、海底地形の変化や降水と塩水の遷移域の変遷)の同定及び同定した要因に着目したシナリオ設定(基本シナリオと変動シナリオ)を試行していくことが必要となる。さらに、処分場が海底下に位置する場合における人間侵入シナリオについてのシナリオの様式化方法及びシナリオ設定に用いる海底下における活動実績などに関する情報を整備しておく必要がある。

・核種移行モデル

一般に、地質媒体中における核種移行の評価は単純化された移行経路を対象に一定の K_d が用いられる（例えば、第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構, 1999 (pp. V54-58)））。沿岸部では、淡水性地下水と塩水性地下水が分布し、海水準変動の影響を強く受けることから地下水環境の長期的な変遷を適切に考慮した評価体系の整備が重要である。また、5.2(3)で述べた smart K_d の概念のような地下水流動と地下水の化学的環境の変遷を連成して時間的・空間的に変化する核種の移行経路情報（例えば、分配係数、移行経路、流速、移行時間など）を評価することのできるツールの開発、核種移行特性のデータベースやパラメータ設定手法の拡充（前述の(2)にも関連する記載あり）及びそれらを適切に組み合わせた核種移行解析手法の開発を進める必要がある。この際、地質環境条件の類型化及び沿岸部に特徴的な事象の影響を複数の時空間スケールに応じて分類することなどを行った上で、種々の不均質性や不確実性に対応可能な核種移行解析手法の整備となるように、既存のモデルや解析コード及びパラメータの適用範囲を確認するとともに、改良・高度化が必要な場合にはその課題を明確にして対応を進めていくことが必要である。

(4) 生活圏評価関係

5.2 節に記述したように、国内外での検討において、地表環境における核種移行／被ばく評価モデル構築のためのツール（考慮すべき環境構成要素や移行プロセスを整理した相互作用マトリクス、モデル・パラメータセットなど）は整備・高度化されており、評価条件が設定されれば、それらを活用した概略的な影響解析が実施可能な状態となっている。その一例として、沿岸部の環境が GBI の候補となった場合の生活圏評価モデル構築や、気候海水準変動を考慮した生活圏評価手法の検討を示した。また、国内の幅広い地表環境条件（沿岸部を含む）を対象とした環境パラメータ設定のためのデータベースも整備されていることから、沿岸部海底下環境が設定できれば、既存のモデルに基づく基本的な検討は可能と考えられる。

今後、沿岸部を対象とした生活圏評価におけるモデルの適用性向上・高度化やデータベースの充実に向けた検討を進めていく上で重要となるのは、以下に挙げる点である。

- ・諸外国での沿岸部での検討事例などを踏まえ、沿岸部を対象にした評価で考慮すべき事項（例えば、沿岸部を含む水系生態系に特有な生物の存在に伴う移行プロセスへの影響、干満・海洋拡散といった沿岸部特有の物質移行プロセス）やその生活圏での GBI の設定方法及び核種移行・被ばくのモデルとしての表現方法などの分析
- ・前述の分析と「現象理解」において検討する沿岸部における特徴的な場の特性やその変遷の安全評価の観点での類型化などを踏まえた、生活圏評価に関する場の想定とそれに対する考慮すべき GBI と移行プロセス及びそのモデル化の主要なパターンを設定するとともに、必要に応じて GBI 変遷（沿岸海底下地形の変化を含む）の考慮の方法についても検討（他分野との横断的な連携が必須）
- ・前述での設定に対する IAEA や SKB などが開発した既存のモデル構築手順（例えば、BIOMASS Methodology）、ツール（FEP リストや相互作用マトリクス）、パラメータ設定手法及び既存の評価で用いられたモデル・パラメータ（移行係数、濃縮係数、分配係数など）の適用性の確認（含む、仮想的な沿岸部の環境における GBI 設定と地表環境での核種移行／被ばく評価モデル構築の試行）
- ・前述の適用性確認を通じての、生活圏評価に用いる核種移行・被ばくモデルとパラメータの信頼性の向上や対象とする沿岸部の特徴に応じた評価が行えるなどの柔軟性向上のためのモデルの改良・高度化、データベース拡充に関する課題の整理と対応の実施

5.4 まとめ

平成 27 年度は、沿岸部での処分の安全評価技術の検討に資する調査として、海外での検討事例、特に沿岸部での処分場立地を進めている国を対象に、技術的観点から検討や対策が進められた事例などを既存の知見として調査し整理した (5.2 節参照)。調査と整理は、安全評価の主要な検討プロセスに沿って、「(1) 現象理解関係」、「(2) 核種移行特性関係」、「(3) 核種移行評価関係」、「(4) 生活圏評価関係」の項目ごとに、必要に応じてさらに下位のサブ項目を設定して実施した。その結果、対象とする沿岸部の特徴に応じた地質環境情報や処分場の仕様が設定されることで、上記の主要な検討プロセスを沿岸部を対象として概略的に実施することは可能と考えられた。

今後、沿岸部を対象とした安全評価をより信頼性を持って行うためには、安全評価の主要な検討プロセスに関する技術や知見の向上が重要であり、特に沿岸部で想定される海水系地下水環境、淡水系地下水と海水系地下水の分布やその時間変化、それらに依存して変化する地下水や塩分の移動などを適切に考慮できるように、データの拡充、評価手法やツールの改良・高度化、評価事例の蓄積などが必要となる。5.3 節では、このような観点で、沿岸部における安全評価技術上の特徴に対する今後の対応技術の整備に向けた課題を整理するとともに、各課題に関する対策案を整理した。

参考文献

- Aquilonius, K. (Ed.), *The marine ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp, SR-Site Biosphere*, TR-10-03, 504p, 2010.
- Arcos, D., Grandia, F. and Domènech, C., *Geochemical evolution of the near field of a KBS-3 repository*, SKB TR-06-16, Svensk Kärnbränslehantering AB., 2006.
- Crawford, J., Neretnieks, I. and Malmström, M., *Data and Uncertainty Assessment for Radionuclide Kd Partitioning Coefficients in Granitic Rock for Use in SR-Can Calculations*, SKB Technical Report, R-06-75, 2006.
- Crawford, J., *Bedrock K_a Data and Uncertainty Assessment for Application in SR-Site Geosphere Transport Calculations*, SKB Technical Report, R-10-48, 2010.
- Degueldre, C., Grauer, R., Laube, A., Oess, A., and Silby, H., *Colloid properties in granitic groundwater systems. II: Stability and transport study*, Applied Geochemistry, Vol. 11, 1996, pp. 697–710, 1996.
- 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取りまとめ一, JNC TY1400 2005-013 FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005.
- 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.
- Ebashi, T., Kawamura, M., Inagaki, M., Koo, S., Shibata, M., Itazu, T., Nakajima, K., Miyahara, K. and Apted, M. J., “Relative Rates Method” for Evaluating the Effect of Potential Geological Environmental Change due to Uplift/Erosion to radionuclide migration of High-level Radioactive Waste, *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXVII*, pp.39-45, 2014.
- 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 (I): シナリオ構築技術の高度化, NUMO-TR-10-09, 71p, 2011a.
- 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, 2011b.
- 原子力発電環境整備機構, 地層処分事業の安全確保 (2010 年度版) - 確かな技術による安全な地層処分の実現のために -, NUMO-TR-11-01, 770p, 2011c.

- Grenthe, I., and Puigdomenech, I., Modelling in aquatic chemistry, OECD Publications, 724 p, 1997.
- Grivé, M., Duro, L., Colàs, E. and Giffaut, E., Thermodynamic data selection applied to radionuclides and chemotoxic elements: An overview of the ThermoChimie-TDB, Appl. Geochem., 55, 85-94, 2015
- Guo, W., and 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, 2002.
- Hakanen, M., Ervanne, H. and Puukko, E., Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto – Radionuclide Migration Parameters for the Geosphere, POSIVA 2012-41, 2014.
- Hallbeck, L., Principal organic materials in a repository for spent nuclear fuel, SKB TR-10-19, 2010.
- Haveman, S.A., Pedersen, K., and Ruotsalainen, P., Distribution and metabolic diversity of microorganisms in deep igneous rock aquifers of Finland. Geomicrobiology Journal, Vol. 16,, pp. 277-294, 1999.
- Hellä, P., Pitkänen, P., Löfman, J., Partamies, S., Vuorinen, U. and Wersin, P., Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto – Definition of reference and bounding groundwaters, buffer and backfill porewaters. POSIVA 2014-04, 2014.
- 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.
- Holmboe, M., Wold, S. and Jonsson, M., Colloid diffusion in compacted bentonite: microstructural constraints: Clays and Clay Minerals, Vol. 58, pp. 532-541, 2010.
- IAEA, "Reference Biospheres" for solid radioactive waste disposal, Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOSphere Modelling and ASSEssment (BIOMASS) Programme, Part of the IAEA Co-ordinated Research Project on Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS), IAEA-BIOMASS-6, 560p, 2003.
- IAEA, Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment, IAEA Technical Reports Series No.422, IAEA, Vienna, 95p, 2004.
- IAEA, Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer to wildlife, IAEA Technical Reports Series No.479, IAEA, Vienna, 211p, 2014.
- 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.
- 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 coal-bearing sediment down to ~2.5 km below the ocean floor. Science, Vol. 349, 2015, pp. 420-424.

- 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*, (accepted) DOI: 10.1080/01490451.2016.1152329, 2016.
- Joyce, S., Simpson, T., Hartley, L., Applegate, D., Hoek, J., Jackson, P., Swan, D., Marsic N. and Follin, S., Groundwater flow modelling of periods with temperate climate conditions – Forsmark, SKB R-09-20, 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.
- 加藤智子, 鈴木祐二, 石黒勝彦, 内藤守正, 池田孝夫, Little, R., 海域を核種放出域とする地層処分生物圏評価の代替モデルに関する検討, JNC TN8400 2001-013, 94p, 2001a.
- 加藤智子, 石原義尚, 鈴木祐二, 内藤守正, 石黒勝彦, 池田孝夫, Little, R., 気候変動による影響を取り入れた地層処分安全評価の生物圏モデルの検討, JNC TN8400 2001-003, 121p, 2001b.
- 川村 淳, 牧野仁史, 笹尾英嗣, 新里忠史, 安江健一, 浅森浩一, 梅田浩司, 石丸恒存, 大澤英昭, 江橋 健, 小尾 繁, 柴田雅博, 稲垣学, 高レベル放射性廃棄物地層処分にかかわる天然現象影響に関する研究, JAEA-Research 2010-027, 2010.
- Kawamura, M., Tanikawa, S., Niizato, T. and Yasue, K., Development of methodology to construct a generic conceptual model of river-valley evolution for performance assessment of HLW geological disposal, *Proceedings of 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM 2010)*, pp.331-338, 2010.
- Kitamura, A., Doi, R. and 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 2014-009, 2014.
- 小尾 繁, 稲垣 学, Goldsim による核種移行パラメータの時間変化を考慮した地層処分核種移行解析モデルの構築, JAEA-Data/Code 2010-006, 2010.
- Kurikami, H., Niizato, T. and Yasue, K., A Study on time frame definition and reference evolution of the geological system for safety assessment: Case study on the Horonobe URL site, *Proceedings of 19th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-19)*, Suita, Japan, in CD-ROM, 10p, 2011.
- Lloyd, J.R., and Macaskie, L.E., Biochemical basis of microbe-radionuclide interactions. In: Keith-Roach, M.J., Livens, F.R. (eds). *Interactions of microorganisms with radionuclides*. Amsterdam: Elsevier, pp.313-342, 2002.
- Mäkelä, J., and Manninen, P., Humic and fulvic acids in groundwater. POSIVA Working Report 2007-23, 2007.
- Miyahara, K., Inagaki, M., Kawamura, M., Ebina, T. and Mckinley, I. G., Disruptive effects on a HLW repository due to uplift-erosion in the distant future, *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXIII, Mat. Res. Soc. Sym. Proc.*, Vol.1193, pp.177-184, 2009.
- Miyahara, K., Kawamura, M., Mckinley, I.G., Inagaki, M. and Ebina, T., Consequence Analysis of Fluvial Erosion Scenarios for a HLW Repository, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol.48, No.7, pp.1069-1076, 2011.

- Moog, H. C., Bok, F., Marquardt, C. M. and Brendler, V., Disposal of nuclear waste in host rock formations featuring high-saline solutions – Implementation of a thermodynamic reference database (THEREDA), *Appl. Geochem.*, **55**, 72-84, 2015.
- 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処分システム化学影響評価高度化開発—6 ヶ年研究成果の取りまとめ— 2013.
- 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 直接処分等代替処分技術開発報告書, 2016.
- OECD/NEA, Scenario Development Methods and Practice, An Evaluation Based on the NEA Workshop on Scenario Development, May 1999, OECD/Nuclear Energy Agency, 2001.
- OECD/NEA, Features, events and processes (FEPs) for geologic disposal of radioactive waste – An international database, Nuclear Energy Agency, OECD/Nuclear Energy Agency, Paris, 2000.
- OECD/NEA, NEA Sorption Project. Phase III: Thermodynamic sorption modeling in support of radioactive waste disposal safety cases, OECD/Nuclear Energy Agency, Paris, 2012.
- OECD/NEA, 2015 IGSC Scenario Development Workshop, June 2015, OECD/Nuclear Energy Agency. <https://www.oecd-nea.org/rwm/workshops/igsc2015/> (2016.3.22), 2015.
- Painter, S., and Mancillas, J., MARFA User's Manual: Migration Analysis of Radionuclides in the Far Field, POSIVA Working Report 2013-01, Posiva Oy, 2013.
- Pedersen, K., Microorganisms and their influence on radionuclide migration in igneous rock environments. *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences*, **6**, pp. 11-15, 2005.
- Pedersen, K., Microbiology of Olkiluoto Groundwater 2004-2006, POSIVA 2008-02, 2008.
- Pedersen, K., The Microbe project. Achievements of a 10-year research programme. SKB R-13-49, 2013.
- Pedersen, K., Bomberg, M., and Itävaara, M., Summary report microbiology of Olkiluoto and ONKALO groundwater, POSIVA 2012-42, 2014.
- Posiva, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Performance assessment 2012, POSIVA 2012-04, 2012a.
- Posiva, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Synthesis 2012, POSIVA 2012-12, 2012b.
- 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.
- Posiva, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Radionuclide Transport and dose assessment for the humans in the biosphere assessment BSA-2012, POSIVA 2012-31, 380p, 2014.
- Reed, D. T., Clark, S. B. and Rao, L., Actinide Speciation in High Ionic Strength Media – Experimental and Modeling Approaches to Predicting Actinide Speciation and Migration in the Subsurface, Springer, 1999.
- Saetre, P. Nordén, S., Keesmann, S., and Ekström, P-A., The biosphere model for radionuclide transport and dose assessment in SR-PSU, R-13-46, 156p, 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.
- 柴田雅博, 笹本 広, 神徳 敬, 油井三和, 緩衝材の長期安定性評価技術の現状, JNC TN8400 2004-010, 2004.

- 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), JAEA-Research 2014-030, 2015.
- 注連本英典, 山口正秋, 若杉圭一郎, 柴田雅博, 高レベル放射性廃棄物処分場を対象とした隆起・侵食および気候・海水準変動による影響評価手法の検討—わが国における河川侵食による地形変化モデルの構築—, JAEA-Research 2013-012, 2013.
- 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, Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main report of the SR-Can project. SKB Technical Report, SKB TR-06-09, 2006.
- SKB, Geosphere process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-48, 2010a.
- SKB, Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-50, 2010b.
- 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, 2011.
- Smellie, J., Pitkänen, P., Koskinen, L., Aaltonen, I., Eichinger, F., Waber, N., Sahlstedt, E., Siitari-Kauppi, M., Karhu, J., Löfman, J. and Poteri, A., Evolution of the Olkiluoto site: Palaeohydrogeochemical considerations. POSIVA 2014-27, 2014.
- 鈴木祐二, 加藤智子, 牧野仁史, 大井貴夫, TRU 廃棄物処分に特有な放射性核種を考慮した生物圏評価データセットの整備と線量への換算係数の算出, JAEA-Data/Code 2006-011, 277p, 2006.
- 舘 幸男, 栃木善克, 陶山忠宏, 齋藤好彦, Ochs, M., 油井三和, 地層処分安全評価のための核種の収着・拡散データベースシステムの開発, 日本原子力研究開発機構技術資料, JAEA-Data/Code 2008-034, 2009.
- Tachi, Y., Yotsuji, K., Seida, Y. and Yui, M., Diffusion and sorption of Cs⁺, I⁻ and HTO in samples of the argillaceous Wakkanai Formation from the Horonobe URL, Japan: Clay-based modeling approach, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 6742-6759, 2011.
- Tachi, Y. and Yotsuji, K., Diffusion and sorption of Cs⁺, Na⁺, I⁻ and HTO in compacted sodium montmorillonite as a function of porewater salinity: Integrated sorption and diffusion model, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.132, pp.75-93, 2014.
- Tachi, Y., Ochs, M. and Suyama, T., Integrated sorption and diffusion model for bentonite. Part 1: Clay-water interaction and sorption modeling in dispersed systems, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol.51, No.10, pp.1177-1190, 2014a.
- Tachi, Y., Yotsuji, K., Suyama, T. and Ochs, M., Integrated sorption and diffusion model for bentonite. Part 2: Porewater chemistry, sorption and diffusion modeling in compacted systems, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol.51, No.10, pp.1191-1204, 2014b.
- Tachi, Y., Ochs, M., Suyama, T. and Trudel, D., K_d setting approach through semi-quantitative estimation procedures and thermodynamic sorption models: A case study for Horonobe URL conditions, In: Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXVII, Materials Research Society Symposium Proceedings, vol.1665, pp.149-155, 2014c.

- Tachi, Y., Ebina, T., Takeda, C., Saito, T., Takahashi, H., Ohuchi, Y., and Martin, A.J., Matrix diffusion and sorption of Cs⁺, Na⁺, I⁻ and HTO in granodiorite: laboratory-scale results and their extrapolation to the in situ condition, *J. Contam. Hydrol.* 179, pp.10–24, 2015.
- Tachi, Y. and Suyama, T., Development of JAEA Sorption Database (JAEA-SDB): Update of sorption/QA data in FY2015, JAEA-Data/Code 2015-028, 2016.
- 館 幸男, 陶山忠宏, 緩衝材及び岩石中の拡散データベース(JAEA-DDB)の整備; 2015 年度におけるデータ拡充, JAEA-Data/Code 2015-027, 2016.
- Tagami, K., and Uchida, S., Marine and freshwater concentration ratios (CR wo-water): review of Japanese data. *J. Environ. Radioactiv.* 126, pp.420-426, 2013.
- Takata, H., Aono, T., Tagami, K. and Uchida, S., Sediment-water distribution coefficients of stable elements in four estuarine areas in Japan. *J. Nucl. Sci. Technol.* 47, pp.111-122, 2010a.
- Takata, H., Aono, T., Tagami, K., and Uchida, S., Concentration ratios of stable elements for selected biota in Japanese estuarine areas. *Radiat. Environ. Biophys.* 49, pp.591-601, 2010b.
- Takata, H., Aono, T., Tagami, K., and Uchida, S., Determination of naturally occurring uranium concentrations in seawater, sediment, and marine organisms in Japanese estuarine areas. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 287, pp.795-799, 2011.
- Takata, H., Aono, T., Tagami, K. and Uchida, S., Influence of dissolved organic matter on particle-water interactions of Co, Cu and Cd under estuarine conditions. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 111, pp.75-83, 2012.
- Takata, H., Zheng, J., Tagami, K., Aono, T., Fujita, K., Yamasaki, S.-i., Tsuchiya, N. and Uchida, S., Distribution coefficients (K_d) of stable iodine in estuarine and coastal regions, Japan, and their relationship to salinity and organic carbon in sediments. *Environ. Monitor. Assess.* 185, pp.3645-3658, 2013.
- Takata, H., Aono, T., Tagami, K. and Uchida, S., A new approach to evaluate factors controlling elemental sediment–seawater distribution coefficients (K_d) in coastal regions, Japan. *Sci. Total Environ.* 543, pp.315-325, 2016.
- 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, H.A., 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.804-8159, 2012.
- Thoenen, T., Hummel, W., Berner, U. and Curti, E., The PSI/Nagra chemical thermodynamic database 12/07, Nagra Working Report NAB 14-49, 2014.
- 栃木善克, 館 幸男, 緩衝材及び岩石中での核種の拡散データベースの整備, JAEA-Data/Code 2008-035, 2009.

- Trincherro, P., Painter, S., Ebrahimi, H., Koskinen, L., Molinero, J. and Selroos, J. O. , Efficient Modelling of Radionuclide Transport in Highly Heterogeneous Media and Under Variable Hydrochemical Conditions Using an "Intelligent Kd" Approach, AGU 2014 Fall Meeting, H21B-0725, 2014.
- Trincherro, 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.
- Vilks, P., Sorption of selected radionuclides on sedimentary rocks in saline conditions – Literature review. NWMO TR-2011-12, 2011.
- Wakasugi, K., Nakajima, K., Shimemoto, H., Shibata, M. and Yamaguchi, M., Bounding Analysis of Uplift and Erosion Scenario for an HLW Repository, Proceedings of 21st International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 21), Chengdu, China, ICONE21-16724, in DVD-ROM, 2013.
- Wersin, P., Kiczka, M. and 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.

6. おわりに

本事業は、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）として、経済産業省資源エネルギー庁から、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、電力中央研究所の四者が受託して実施し、本報告書に事業の成果を取りまとめた。

具体的には、2 章に研究会の事務局支援の実績を述べ、3 章～5 章では、沿岸部における地層処分技術の信頼性及び安全性の更なる向上を図ることを目的として、概要調査段階以降に必要な技術の高度化について、それぞれ、沿岸部における地質環境の調査技術、工学技術、安全評価技術の高度化開発として実施した結果について示した。

今後は、3 章～5 章で述べた成果や今後の課題、「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」での議論を踏まえながら、事業を進める。本事業は、重要性や緊急性の異なる様々な課題に対して柔軟に取り組む観点から、技術開発計画の詳細や実施、またはその見直しや再設定等に関しては、資源エネルギー庁と緊密に調整しながら行う。

Appendixes（4章関連）

Appendix 1 既存の成果整理表

Appendix 2 課題と対策案の整理表

Appendix 3 知見、課題、試験計画の一覧表

Appendix 1 既存の成果整理表

第 4 章 Appendix 1

既存の成果整理表

材料	挙動	これまでの実施内容	成果
オーバーパック	不動態化挙動	<p><u>電気化学的手法による炭素鋼の不動態化挙動評価</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材を模擬したベントナイト中でアノード分極測定を行い、不動態化の有無を調査した。 ・炭素鋼の不動態化を促進する化学種である炭酸塩を含む水溶液、コンクリートとの接触を考慮した高 pH の水溶液を試験溶液に使用した。 ・TIG、MAG、EB(電子ビーム)による溶接試験片を用いた試験も実施した。 ・緩衝材間隙水の pH を pH 試験紙を用いて測定し、不動態化の生じる pH 条件についても評価した。 	<ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の共存によって炭素鋼の不動態化は阻害されることを確認した。 ・わが国の地下水条件における炭酸塩濃度の範囲では、緩衝材中で不動態化が生じるのは緩衝材間隙水の pH が約 10.5 以上の場合であり、緩衝材間隙水がこの値に達するのは地下水の pH が約 13 以上の場合と推定された。溶接部においても母材と同様の挙動を示すことを確認した。 ・炭酸塩濃度が 0.5M 以上になると、緩衝材中でも容易に不動態化することを確認した。
オーバーパック	酸素による腐食進展挙動	<p><u>実験データに基づくオーバーパックにおける腐食深さ評価式の構築</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・炭素鋼に全面腐食が生じる人工海水(SSW)、人工淡水(SFW)、幌延地下水中で浸漬試験を行い、平均腐食深さ、最大腐食深さを測定した。 ・炭素鋼が不動態化して孔食またはすきま腐食が生じる塩化物イオンを含むアルカリ性水溶液中でも浸漬試験を行い、全面腐食の場合と同様の評価を実施した。 ・TIG、MAG、EB(電子ビーム)による溶接試験片を用いた試験も実施した。 ・平均腐食深さと孔食係数(最大腐食深さと平均腐食深さの比)の関係で整理し、天然水中での事例との比較により腐食局在化の傾向を確認した。 ・最大腐食深さについては極値統計解析により実機での最大腐食深さを推定し、平均腐食深さから実機最大腐食深さを保守的に推定する関係式を検討した。 <p><u>酸素によるオーバーパック最大腐食深さの評価</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・人工バリア仕様からオーバーパック 1 体あたりの酸素量を算出してそれに対する平均腐食深さを算出した。 ・この平均腐食深さに対して上記により得られた関係式から最大腐食深さを算出した。 	<ul style="list-style-type: none"> ・炭素鋼の孔食係数は平均腐食深さの増加とともに低下する、すなわち腐食の進展とともに均一化する傾向があることを確認した。また、この挙動は天然水中の事例と整合することを確認した。 ・平均腐食深さから酸素による最大腐食深さを導出する経験式を提示した。 ・第 2 次取りまとめでの人工バリア仕様に対して酸素による最大腐食深さは約 12mm と評価された。 ・溶接部については TIG および MAG 溶接試験片の溶接金属部に選択的な腐食が観察され、比較的大きな孔食係数を示す場合もあったが既存のデータの範囲内と値となった。
オーバーパック	水の還元による腐食進展挙動	<p><u>水を酸化剤とした炭素鋼の全面腐食挙動評価</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・低酸素濃度の水溶液中で炭酸塩濃度、塩化物イオン濃度、pH をパラメータとして浸漬試験を行い、炭素鋼の腐食に及ぼすこれらの因子の影響を評価した。 ・人工海水(SSW)、人工淡水(SFW)、炭酸塩水溶液を用いて圧縮ベントナイト中で浸漬試験を行い、重量法により平均腐食深さを測定した。 ・TIG、MAG、EB(電子ビーム)による溶接試験片を用いた試験も実施した。 ・圧縮ベントナイト中における腐食量、腐食速度の経時変化と腐食進展に及ぼす溶液組成、温度の影響を評価した。 	<ul style="list-style-type: none"> ・低酸素濃度下において、炭酸塩濃度、塩化物イオン濃度、pH による平均腐食速度への影響は小さいことを確認した。 ・圧縮ベントナイト中でも人工海水、人工淡水で腐食進展に大きな違いは認められないことを確認した。 ・10 年間にわたる試験結果から、長期的な腐食速度は $1 \mu\text{m}/\text{y}$ 程度と推定され、第 2 次取りまとめ等で設定された寿命評価上の腐食速度 ($10 \mu\text{m}/\text{y}$) が十分保守的であることを確認した。 ・室内試験データとナチュラルアナログデータの比較を行い、室内試験データの外挿とナチュラルアナログデータが概ね整合することを確認した。 ・長期的な腐食進展は皮膜の形成挙動と関連しており、炭酸鉄皮膜の形成されやすい条件(高温、高炭酸塩等)で腐食進展も抑制される傾向にあることを確認した。 ・溶接試験片においても母材とほぼ同様の腐食挙動であり、溶接部付近に選択的な腐食も見られないことを確認した。
オーバーパック	応力腐食割れ挙動	<p><u>炭酸塩環境における応力腐食割れ(SCC)感受性評価</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・炭素鋼に応力腐食割れが生じる代表的な環境として炭酸塩環境を NaHCO_3、Na_2CO_3 溶液中で低歪速度法(SSRT)により応力腐食割れ感受性を調べた。 ・予備試験で取得した、活性溶解/不動態化の遷移域の電位で保持しながら SSRT を実施した。 ・破断面を SEM 観察し、破面に占める粒界割れの面積率を SCC 感受性指数として算出した。 	<ul style="list-style-type: none"> ・炭酸塩水溶液中では濃度が低下するに従って感受性が低くなり、0.2M 溶液では感受性が消失すことを確認した。 ・溶接部の感受性は母材よりも低くなることを確認した。

材料	挙動	これまでの実施内容	成果
オーバーパック	水素脆化挙動	<p>低酸素濃度下における水素吸収量評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・腐食量評価の試験と同様に人工海水(SSW)、人工淡水(SFW)を用い、浸漬後の試験片に吸収された水素を分析した。 ・水素抽出曲線(API-MS法)より、脆化に寄与するとされる拡散性水素の濃度を評価した。 ・母材、熱影響部、溶接金属それぞれについて水素吸収量の評価を行った。 	<ul style="list-style-type: none"> ・母材、熱影響部、溶接金属ともに拡散性水素濃度は0.1ppmを十分下回っており、水素脆化が問題となる濃度(~1ppm以上)には達しないことを確認した。
緩衝材	基本特性	<p>緩衝材の基本特性に対する溶液種類の影響</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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、一軸圧縮試験を実施 	<p><u>透水特性</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・海水系地下水を用いた場合、降水系地下水を用いた場合と比べて透水性が増加することが分かった。 ・蒸留水および海水系地下水条件下における固有透過度と有効粘土密度の関係式を提示した。 <p><u>熱特性</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・熱特性(熱伝導率、比熱)に関しては、海水系地下水の場合においても蒸留水条件下と同等の値を示すことがわかった。 <p><u>膨潤特性</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・海水系地下水を用いた場合、有効粘土密度が1.36Mg/m³より小さくなると、蒸留水を用いた場合と比べて膨潤応力が低下することが分かった。 ・蒸留水および海水系地下水条件下における膨潤圧と有効粘土密度の関係式を提示した。 <p><u>圧密特性</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・間隙比と圧密圧力関係において、載荷過程は試験溶液条件によらずほぼ同一の関係を示した。しかしながら、除荷時の変形量は蒸留水よりも小さくなり、また、除荷・再載荷過程における間隙比と圧密圧力関係上におけるヒステリシスは、蒸留水の場合に比べ小さくなった。 <p><u>せん断特性</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・海水系地下水を用いた圧密非排水三軸試験でのせん断中の応力-ひずみ関係は、蒸留水の場合とほぼ同等の挙動を示した。有効応力経路については、各試験溶液で異なり、明確な相関関係は認められなかった。 ・海水系地下水を用いた場合、間隙圧係数B値は0.27~0.64となり、地盤工学会が定めるB値0.95以上という基準を下回った。 <p><u>強度・剛性特性</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・一軸圧縮強度、弾性係数ともに、多少ばらつきはあるものの、概ね塩濃度に依存して強度・剛性ともに低下する傾向が得られた。 ・蒸留水および幌延地下水条件下における一軸圧縮強度と有効粘土密度の関係式を提示した。
緩衝材	侵入・浸食現象	<p>緩衝材の侵入・浸食挙動に対する溶液種類の影響</p> <ul style="list-style-type: none"> ・幌延地下水や人工海水などを用いた侵入試験、浸食試験を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ・海水および蒸留水に対する緩衝材の浸入および浸食試験から、浸入および浸食ともに、海水条件で抑制されることを確認した。
緩衝材	残留密度差	<p>ベントナイト緩衝材の残留密度差に対するイオン強度の影響</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ケイ砂30%混合Na型ベントナイト試験体に蒸留水とNaCl水溶液(イオン強度0.5海水相当)を通水 <p>高密度の供試体と低密度の供試体を連結させた装置を用い、注水により緩衝材を膨潤させ、圧縮することで、均質化が進行する挙動を測定。膨潤圧が釣り合った時点におけるそれぞれの乾燥密度を取得し、残留密度差を取得した。</p>	<p>蒸留水に比べてNaCl水溶液で膨潤させた方が、緩衝材中の残留密度差は大きい。</p>

材料	挙動	これまでの実施内容	成果
緩衝材	膨潤圧	<p>緩衝材膨の膨潤圧に対する溶液種類の影響</p> <p>・ケイ砂 30%混合 Na 型ベントナイト試験体に蒸留水と NaCl 水溶液を通水した場合の緩衝材の膨潤圧の計測を行った。装置は残留密度差を測定した際と同じ試験装置であり、残留密度差と並行して膨潤圧を計測した。</p>	蒸留水に比べて NaCl 水溶液の方が、緩衝材の膨潤圧は小さくなることを確認した。
緩衝材	浸潤速度	<p>浸潤速度に対する塩水の影響</p> <p>・ケイ砂 30%混合 Na 型ベントナイト試験体に蒸留水と NaCl 水溶液を通水。溶液ごとの地下水浸潤フロント(不飽和領域と飽和領域の境界線)を取得した。</p>	<p>①飽和度 1%に達した浸潤面を浸潤フロントと定義した場合、NaCl 溶液よりも蒸留水のケースの方が早く浸潤フロントの進展が速い。</p> <p>②飽和度 95%に達した浸潤面を浸潤フロントと定義した場合、蒸留水よりも NaCl 溶液の方が浸潤フロントの進展が速い。</p> <p>③飽和度が初期値から 1%増加した地点から飽和度が 95%を超える地点を飽和度の遷移領域とし、蒸留水と NaCl 溶液の遷移領域を比較すると、飽和度の遷移領域は NaCl の方が短く、蒸留水の方が長いことが示された。NaCl の方が高飽和度領域が供試体下部にある厚さで存在することになる。蒸留水を給水した場合には、供給水が供試体上部に吸い上げられるために遷移領域が長くなり、高飽和度領域の厚さは小さくなったと考えられた。</p>
緩衝材	流出挙動	<p>緩衝材中に形成された水みちにおよぼすイオン強度及び Ca 型化の影響</p> <p>・ケイ砂 30%混合 Na 型ベントナイト試験体に蒸留水、NaCl、CaCl₂ 水溶液を通水し、流出現象に与える影響を水みちの形態の比較により検討した。</p> <p>試験は、直径 100mm、高さ 50mm の緩衝材供試体をアクリルセルの中に入れ、各溶液を 0.1L/min の流量で注水することによって行った。</p>	<p>①イオン強度の影響</p> <p>イオン強度が大きくなると、蒸留水の場合に比べて水みちからのベントナイトの流出量が減少する傾向があった。</p> <p>②Ca 型化の影響</p> <p>Ca 型化の影響により緩衝材の膨潤性能が低下するため、水みちをシールする(自己修復)機能が低下することがわかった。</p>
緩衝材	緩衝材定置方法による膨潤性能への影響	<p>緩衝材ブロックとペレットを併用した場合のイオン強度の影響</p> <p>緩衝材ブロックとペレットを用いて密度差をつけた幅 700mm、奥行き 150mm、高さ 200mm の緩衝材供試体を作製し、この供試体の底面より溶液を通水させ、緩衝材ブロックとペレット近傍の浸潤挙動、および膨潤後の密度分布を測定した。</p> <p>飽和度の上昇は供試体背面に設置した電極による比抵抗によって、測定した。比抵抗と飽和度の関係は予め既知の飽和度のベントナイトを用いて取得した。</p>	<p>①蒸留水を通水した場合、ペレット部分はその場で膨潤したが、塩水の場合は異なることを確認した。</p> <p>②通水した当初、相対的に密度の高いブロック部の膨潤圧が高いが、時間が経過するとペレット部の膨潤圧が大きくなる一方で、ブロック部の膨潤圧が低下する傾向を示した。これは、ブロック部が膨張することにより、ペレット部が圧縮された結果である。こうした挙動は、上記の膨潤圧、浸潤速度に対するイオン強度(NaCl 溶液)の影響を考えれば、イオン強度により影響を受けると予想できる。</p>
緩衝材	流出挙動	<p>緩衝材流出挙動に関するイオン強度及び Ca 型化の影響</p> <p>・ケイ砂 30%混合 Na 型ベントナイト試験体に蒸留水、NaCl、CaCl₂ 水溶液を通水し、流出現象に与える影響を水みちの形態の比較により検討した。試験は、直径 100mm、高さ 50mm の緩衝材供試体をアクリルセルの中に入れ、各溶液を 0.1L/min の流量で注水することによって行った。</p>	<p>①イオン強度の影響</p> <p>イオン強度が大きくなると、蒸留水の場合に比べて水みちからのベントナイトの流出量が減少した。</p> <p>②Ca 型化の影響</p> <p>Ca 型化の影響により緩衝材の膨潤性能が低下するため、水みちのシール(自己修復)機能が低下する傾向を確認した。</p>
セメント/ NF 構成材料	劣化・変質	<p>海水系地下水でのセメント変質モデル構築のための粉末浸漬試験</p> <p>・OPC、フライアッシュセメント、高炉セメントの溶解変質モデル(考慮する固相の設定)のため、人工海水(アクアマリン)での溶解試験を実施</p>	<p>地下深度が浅い場合、および地下水での濃縮があるような場合の高い濃度で考慮すべき固相のデータを得た。</p> <p>・薄い海水系地下水での適用性については確認が必要</p> <p>・考慮すべき固相として、Mg(OH)₂、フリーデル氏塩などを抽出。</p> <p>・海水濃度では Mg による Ca の置換が速やかに起こり、pH は 11 程度まで早期に低下する。</p>
セメント/ NF 構成材料	劣化・変質	<p>構造物への海水影響の推定</p> <p>・海水系地下水でのセメント浸漬試験(バルク試験体)</p>	<p>地下深度が浅い場合、および地下水での濃縮があるような場合の構造物における状態変化に関するデータを得た。</p> <p>・薄い海水系地下水での適用性については確認が必要</p>

材料	挙動	これまでの実施内容	成果
		・OPC、フライアッシュセメント、高炉セメントの 20mm 角の試験体を人工海水の浸漬半年以上浸漬	混合セメント等で、構造物が緻密(空隙系が小さい、空隙率が低い)な場合、短期間に表面に $Mg(OH)_2$ の層を形成し、それ以上反応が進まない状態となったが、普通セメントを用いた試験体では、Mg への置換の影響(収縮等)で、変質領域の剥離等の影響が見られた
セメント/ NF 構成材料	劣化・変質	<u>ひび割れへの海水影響(拡散場)</u> ・人工的にひび割れを導入した普通セメント試験体および高強度高緻密コンクリート試験体を人工海水に浸漬し、一定期間後に拡散試験を実施するとともに、ひび割れ周囲の状態を EPMA 等で観察	地下深度が浅い場合、および地下水での濃縮があるような場合の構造物における状態変化に関するデータを得た。 ・薄い海水系地下水での適用性については確認が必要 ひび割れ内に $Mg(OH)_2$ および/またはフリーデル氏塩の析出が生じ、閉塞、または拡散係数、透水係数ともに低下が見られた。
セメント/ NF 構成材料	劣化・変質	<u>ひび割れへの海水影響(移流場)</u> ・人工的にひび割れを導入した普通セメント試験体に人工海水を通水し、透水係数の変化を観察した。	地下深度が浅い場合、および地下水での濃縮があるような場合の構造物における状態変化に関するデータを得た。 ・薄い海水系地下水での適用性については確認が必要 ひび割れ内に $Mg(OH)_2$ の析出が生じ、閉塞が見られた。
セメント/ NF 構成材料	劣化・変質	<u>海水環境でのナチュラルアナログ</u> ・地下水面が深度 2m 程度の護岸内にある構造物(セメント工場のロータリーキルン基台の基礎コンクリート(地下水面下))から採取したコアの分析	海水濃度での長期影響 ・材例 80 年で、地下水の影響(中性化領域)は表面から数 cm 程度 ・Mg および S の影響は表面近傍に限られるが、塩素の浸透はより深い位置まで影響あり。(鉄筋の腐食等への考慮が必要) ・推定配合から考えられる強度とコアの強度とは大きく違わない。
セメント/ NF 構成材料	セメントーベントナイト相互影響	<u>セメントーベントナイト海面の海水系地下水での挙動</u> ・接触供試体を人工海水環境に年単位で浸漬。	地下深度が浅い場合、および地下水での濃縮があるような場合の構造物における状態変化に関するデータを得た。 ・薄い海水系地下水での適用性については確認が必要 イオン交換水および降水系地下水との差は見られなかった。 ・2 次鉱物は主に C-S-H ・カルシウムが到達した領域でも、カルシウム型化はあまり進んでいない。
グラウト/ NF 構成材料	流出挙動	<u>低アルカリ性セメントのグラウト材料としての適用性確認</u> ・幌延深地層研究センターにおいて、坑道掘削前のプレグラウトに低アルカリ性セメントを用いてグラウトを実施し、湧水抑制対策としての適用性を確認。	・低アルカリ性セメントの幌延 URL の岩盤に対する適用性、透水性低減傾向およびグラウト到達性状を確認した。 ・限界圧力程度の注入により、注入孔からのグラウト材料が確認孔で確認できたことから低アルカリ性セメントの浸透性が示された。 ・グラウト注入後のルジオン値が低下したことから、低アルカリ性セメントの止水性が示された。

Appendix 2 課題と対策案の整理表

第4章 Appendix 2

課題と対策案の整理表

材料	挙動	課題	対応策
オーバーパック	不動態化挙動	緩衝材共存下での不動態化挙動は日本の地下水では上限レベルの炭酸塩濃度条件で検討しており、幅広い環境条件に対して保守的な評価が可能と考えられる。また、沿岸部では塩化物イオン濃度が比較的高いことから、降水系に比較して不動態化は阻害される傾向になると考えられる。 塩化物イオンや硫酸イオン等の不動態化の抑制機能が期待できる化学種の不動態化条件(臨界 pH 等)への影響についてデータを拡充することによって沿岸部において不動態化がより生じにくいことを示すことが可能となる。また、沿岸部に特徴的な地下水水質として、炭酸塩濃度が比較的高い場合や他の不動態化を促進しうる化学種の共存の可能性がある場合にはその条件での不動態化の可能性について検討が必要である。	沿岸部における地下水成分のうち、不動態化を促進する化学種(例えば炭酸塩)と不動態化を阻害する化学種(例えば塩化物イオン、硫酸イオン)に着目する。それぞれの濃度または濃度比を変えた試験溶液や沿岸部での特徴的な地下水組成を考慮した水溶液を用いて電気化学試験等により、緩衝材中における炭素鋼の不動態化に関するデータを拡充する。既存の不動態化条件に対するデータとの比較により、沿岸部では不動態化が抑制傾向となることを確認する。
オーバーパック	酸素による腐食進展挙動	人工海水(SSW)、人工淡水(SFW)といった代表的な溶液条件での腐食局在化の知見がある。SSW 単独、大気吹込み条件での浸漬試験の結果、オーバーパックの各部位を模擬した試験片のうち、アーク溶接(TIG、MAG)の溶接部付き試験片で選択的な腐食が認められ、設定された腐食代を上回る可能性がある。この現象については溶接材料の化学成分の調整で品質改善出来る見通しがある。しかしながら、成分を改良した溶接材料を用いた溶接試験体に対しては、電気化学的手法や数点の試験片による浸漬試験など簡易的な品質改善効果の確認に留まっている。試験データの拡充による品質改善手法の妥当性の確認が、オーバーパックの製作技術の成立性、腐食代の設定根拠の妥当性の提示のために必要である。	化学成分を改良した溶接材料を用いて溶接試験体から腐食試験片を作製し、SSW、SFW 中での浸漬試験データの拡充を行う。 地質環境特性として沿岸部に特徴的な地下水水質が抽出され、不均一な腐食を促進する化学種濃度の高い地下水条件となる可能性がある場合には、その条件で試験を実施する。
オーバーパック	水の還元による腐食進展挙動	これまでの実験データが示すように、低酸素濃度下では地下水水質による腐食速度への影響は小さく、沿岸域においても腐食速度は既存のデータの範囲内と推定される。一方、長期的な腐食速度は皮膜の形成挙動により異なる可能性があり、沿岸部で特徴的な環境条件を踏まえたデータ拡充等により腐食進展挙動を確認する必要がある。	降水と海水の混合した地下水組成や沿岸部に特徴的な地下水条件で低酸素濃度雰囲気における炭素鋼の腐食進展挙動を調査する。 海水系地下水と降水系地下水が混合した地下水を想定し、混合割合や混合前組成などを変えた条件で浸漬試験する。 地質環境特性として沿岸部に特徴的な地下水水質が抽出された場合にはその条件で試験を実施する。
オーバーパック	応力腐食割れ挙動	既存の知見で検討対象とした SCC のメカニズムは、炭酸塩による不動態化伴うものであり、「不動態化挙動」で課題として挙げた、塩化物の不動態化抑制作用が SCC に与える影響を確認する必要がある。そのため、炭酸塩と塩化物の共存環境での SCC 感受性評価が必要である。また NNP 型 SCC など、他のメカニズムについても評価対象とすべきか、文献調査を実施して最新の知見を取り入れる必要がある。	降水と海水の混合した地下水組成や沿岸部に特徴的な地下水条件を考慮しつつ、応力腐食割れ感受性に関与する化学種に着目して沿岸部の地下水に含まれる種々の化学種の共存下での応力腐食割れ感受性を実験的に確認する。 ・海水中成分のうち、応力腐食割れをもたらす炭酸塩のほか、不動態化や局部腐食に影響を及ぼす塩化物イオン、硫酸イオンなどの化学種にも着目。 ・母材と溶接金属部、熱影響部の比較。
オーバーパック	水素脆化挙動	水素発生を律速する長期的な腐食速度は被膜の性状や形成挙動と関連があり、沿岸部での特徴的な環境条件と既存の実験で用いた SSW や SFW とではそれらが異なる可能性がある。「水の還元による腐食進展挙動」と同一の浸漬試験を実施し、腐食挙動と水素吸収挙動の関連を確認する必要がある。	降水と海水の混合した地下水組成や沿岸部に特徴的な地下水条件で低酸素濃度雰囲気における炭素鋼の水素吸収挙動を調査する。 ・海水系地下水と降水系地下水が混合した地下水を想定し、混合割合や混合前組成などを変えた条件で浸漬試験を行う。 「3) 水の還元による腐食進展挙動」にてデータ拡充のための試験片の被膜の性状調査等を実施し、沿岸部での特徴的な環境の影響の有無や程度を確認する必要がある。 ・地質環境特性として沿岸部に特徴的な地下水水質が抽出された場合にはその条件で試験を実施。 ・母材と溶接金属部、熱影響部の比較。

材料	挙動	課題	対応策
緩衝材	基本特性	<p>緩衝材の膨潤変形に対する溶液種類の影響</p> <ul style="list-style-type: none"> ・蒸留水および海水系地下水に対する膨潤変形特性を調べる必要がある。 <p>緩衝材の長期圧密挙動に対する溶液種類の影響</p> <ul style="list-style-type: none"> ・長期挙動(二次圧密挙動)に与える各試験溶液の影響を調べる必要がある。 <p>緩衝材のせん断特性に対する溶液種類の影響</p> <ul style="list-style-type: none"> ・海水系地下水を用いた場合の間隙圧係数B値に関する検討を実施する必要がある。 ・せん断特性に与える各試験溶液の影響を把握する必要がある。 	<p>緩衝材の膨潤変形に対する溶液種類の影響の把握</p> <ul style="list-style-type: none"> ・蒸留水および海水系地下水に対する膨潤変形試験を実施し、膨潤変形特性に与える各試験溶液の影響を検討する。 <p>緩衝材の長期圧密挙動に対する溶液種類の影響の把握</p> <ul style="list-style-type: none"> ・長期圧密試験を実施し、蒸留水および海水系地下水に対する緩衝材の長期挙動を把握する。 <p>緩衝材のせん断特性に対する溶液種類の影響の把握</p> <ul style="list-style-type: none"> ・海水系地下水を用いた場合の間隙圧係数B値に関する検討を実施する。 ・せん断特性に与える各試験溶液の影響を検討する。
緩衝材	侵入・浸食現象	<p>海水系地下水条件下では侵入・浸食現象が抑制される傾向が得られているものの、限られた一部のデータである。浸食現象については、浸食が発生する臨界流速に係わるデータの整備を進める必要がある。浸入現象については、現象を評価できるモデルの構築が課題である。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・降水系地下水および海水系地下水条件下での侵入現象のモデル化に向けた検討を行う。 ・海水系地下水条件下での浸食現象に関するデータを拡充する。
緩衝材	残留密度差	<p>既存の試験では、蒸留水との対比として、NaCl 水溶液イオン強度 0.5 の試験を行っており、NaCl 溶液の場合に残留密度差が大きくなることが分かっている。塩水環境を考えた場合、イオン強度の影響、並びに組成による残留密度差への影響の把握が必要である。特に、Ca、Mg、K など含んだ溶液の場合は、浸潤と同時にイオン交換反応が進行することが予想され、また、膨潤挙動もイオン強度によって影響を受けることがわかっているため、密度の均質化に対して、溶液組成が影響を及ぼす可能性が大きいと、データの拡充による確認が必要である。</p>	<p>密度の均一化についての試験は、NaCl 溶液での試験は行っているものの、溶存イオン種の影響については確認されていない。イオン交換により影響を受ける可能性もあるため、Ca、K、Mg などの影響についても確認することが必要である。比較のために、既存の試験を踏襲した条件での試験によって実施する。</p>
緩衝材	膨潤圧	<p>既存の試験では、蒸留水と NaCl 水溶液イオン強度 0.5 の試験を行っており、膨潤圧に差が見られた。人工海水等での試験例もあるが、試験条件が統一されていないため系統的な評価はされていない。塩水環境を考えた場合、イオン強度の影響、並びに組成による膨潤挙動への影響を系統的に把握することが必要である。</p>	<p>沿岸域の地下水組成を考慮した系統的な評価が必要である。膨潤圧は密度の均一化とつながるものであり、イオン交換による影響を膨潤圧の観点から評価することにより、幅広い溶液組成への適応ができると考えられるため、試験を実施する。</p>
緩衝材	浸潤速度	<p>既存試験において、蒸留水は毛細管現象により浸潤すること、NaCl 溶液(イオン強度が高い溶液)では緩衝材が凝集することにより毛細管現象が起きにくくなることにより浸潤速度に差が見られた。沿岸部の地下水組成を考えた場合、イオン濃度の影響、並びに組成による浸潤速度への影響の把握が必要である。特に、Ca、Mg、K など含んだ溶液の場合は、浸潤と同時にイオン交換反応が進行することが予想され、イオン交換による化学変質による浸潤速度への影響があると考えられる。そのため、溶液組成が変わった場合のデータを拡充し、浸潤を予測するモデルを作ることが必要である。</p>	<p>浸潤速度がイオン強度による毛細管現象への影響によって変化することが把握されているため、海水系地下水中での緩衝材の膨潤挙動をモデル化するためには、イオン強度、イオン種をパラメータとした試験を行う。データの拡充により、モデルを更新し、長期挙動の初期状態の予測精度を高める。</p>
緩衝材	緩衝材定置方法による膨潤性能への影響	<p>緩衝材ブロックとペレットを併用して定置した場合、膨潤性能の違いにより、密度分布が生じる可能性がある。この影響について、土槽試験により、二次元膨潤挙動を調査している。沿岸部の地下水組成を考慮した場合にも、緩衝材ブロックとペレットを併用した場合の膨潤性能を確認することが必要である。</p>	<p>二次元での試験では、浸潤の進行、膨潤後の密度分布が明確に測定できるため、イオン強度、並びにイオン種の緩衝材膨潤に対する影響を把握することが可能であると考えられる。そのため、溶液組成をパラメータとした試験を実施する。</p>
緩衝材	流出挙動	<p>緩衝材の水みちの形成は、水みち近傍の膨潤圧と水圧の関係で生じると考えられる。そのため塩水環境下で緩衝材の流出挙動を考える際にはイオン強度の影響、並びに組成による緩衝材の膨潤圧への影響を考える必要がある。沿岸域での地下水組成を考慮すれば、海水中に含まれるイオンについて検討を要する。例えば、Ca、Mg、K など含んだ溶液の場合は、浸潤と同時にイオン交換反応が進行することが予想されるため、イオン交換による化学変質によって緩衝材の膨潤圧などが変化すると考えられる。また、水みちに対する自己シール性についても溶液組成による影響を把握する必要がある。</p>	<p>緩衝材の流出はイオン種により挙動が変化することが分かっている。沿岸域での多様な溶液組成に対して、流出防止のための対策を考える上で、溶液組成による影響を把握する。そのため、試験はイオン強度、溶存成分をパラメータとし、実施する。</p>

材料	挙動	課題	対応策
セメント/ NF 構成材 料	劣化・変質	・人工海水での試験結果と、降水系地下水での試験結果が異なる事象(バルク表面への Mg(OH) ₂ 析出による空隙閉塞、溶脱抑制)について、その影響範囲または濃度と影響との関係の把握。 とくに、これらは溶脱と析出との競争反応となっており、いずれが主要な反応となるかが濃度で決まるため、その閾の確認が必要。	・濃度の異なる海水系地下水でのバルク試験体等の浸漬 →バルク試験体を用いた試験には時間がかかるので、早期に開始し、試験期間を確保し、一定期間ごとに分析等を実施する。 対象とするセメント系材料は
セメント/ NF 構成材 料	劣化・変質	<u>海水影響下での強度の変化</u> ・溶脱が主要な反応となる場合には、高イオン濃度および Mg ²⁺ 、SO ₄ ²⁻ の影響により、溶脱が促進されるため、短期的な強度の低下に関するデータ取得が必要。	・OPC ・HFSC ・フライアッシュセメント(A~C:フライアッシュ量を変えることで Ca 量をコントロールする) ・高炉セメント(A~C:スラグ量を変えて、アルミニウムおよび Ca 量をコントロールする)
セメント/ NF 構成材 料	劣化・変質	<u>構造物への海水影響の推定</u> 海水系地下水でのセメント浸漬試験(バルク試験体) ・Ca と Mg との置換が起きるため、セメント種類の影響が大きくなる可能性がある。 ・緻密な材料(混合セメント)では、Mg(OH) ₂ 層の生成による溶脱抑制等の見られる濃度範囲を知る必要がある。一方、普通セメントでは、Mg 置換による Mg(OH) ₂ の析出の影響範囲を知る必要がある。(材料ごとの地下水組成への適用範囲)。	
セメント/ NF 構成材 料	劣化・変質	<u>海水系での変質モデルの適用範囲の確定</u> ・成果で述べたように、海水系地下水環境では Mg ²⁺ および SO ₄ ²⁻ の影響を考慮する必要がある。これらは海水濃度(人工海水)では析出側の反応として考慮する必要があり、C-S-H および Ca(OH) ₂ に含まれる Ca が Mg(OH) ₂ として析出するものとして評価できる可能性があるが、これらイオン種の濃度が低い場合には、Mg(OH) ₂ として析出せず、C-S-H に含まれる Ca の一部を置換する反応がメインになる可能性がある。そのため、地下水濃度と反応との閾を見極める、または統一的な変質モデルの構築のいずれかが必要と考えられる。	・粉末およびバルクでの浸漬および液交換による溶解試験の実施。 ・安全性評価のための基礎データとしても必要なため、早期に実施する必要がある。 ・粉末での試験は試験期間 1 年程度
セメント/ NF 構成材 料	セメントーベントナイト相互影響	<u>低濃度の海水系地下水での現象確認</u>	新たに試験を開始する必要がある。 ・現実的な材料の組み合わせでは、反応による 2 次鉱物の析出等が確認できるためには、半年~数年以上を要するため、アナログ的な活用方法も含め、早期に着手し、超試験を視野に進める必要がある。(最低 3 年~5 年、できれば 10 年程度)
グラウト/ NF 構成材 料	流出挙動	<u>海水条件下における溶液型グラウトの適用性の評価</u> (<u>海水条件下におけるゲルタイム等の設計、施工方法、影響評価手法</u>)	・海水条件下における溶液型グラウトに関する既存の知見及び課題の整理 ・グラウト特性データの拡充(室内試験)・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

Appendix 3 知見、課題、試験計画の一覧表

第4章 Appendix 3

知見、課題、試験計画の一覧表

- ・ オーバーパック (シート No. Op-01～05)
- ・ 緩衝材 (シート No. Bf-01～07)
- ・ セメント系材料 (支保、構造躯体および充填材) (シート No. Cm-01～04)
- ・ グラウト (シート No. Gr-01)
- ・ ニアフィールド領域での処分システム構成材料 (シート No. Nf-01～02)

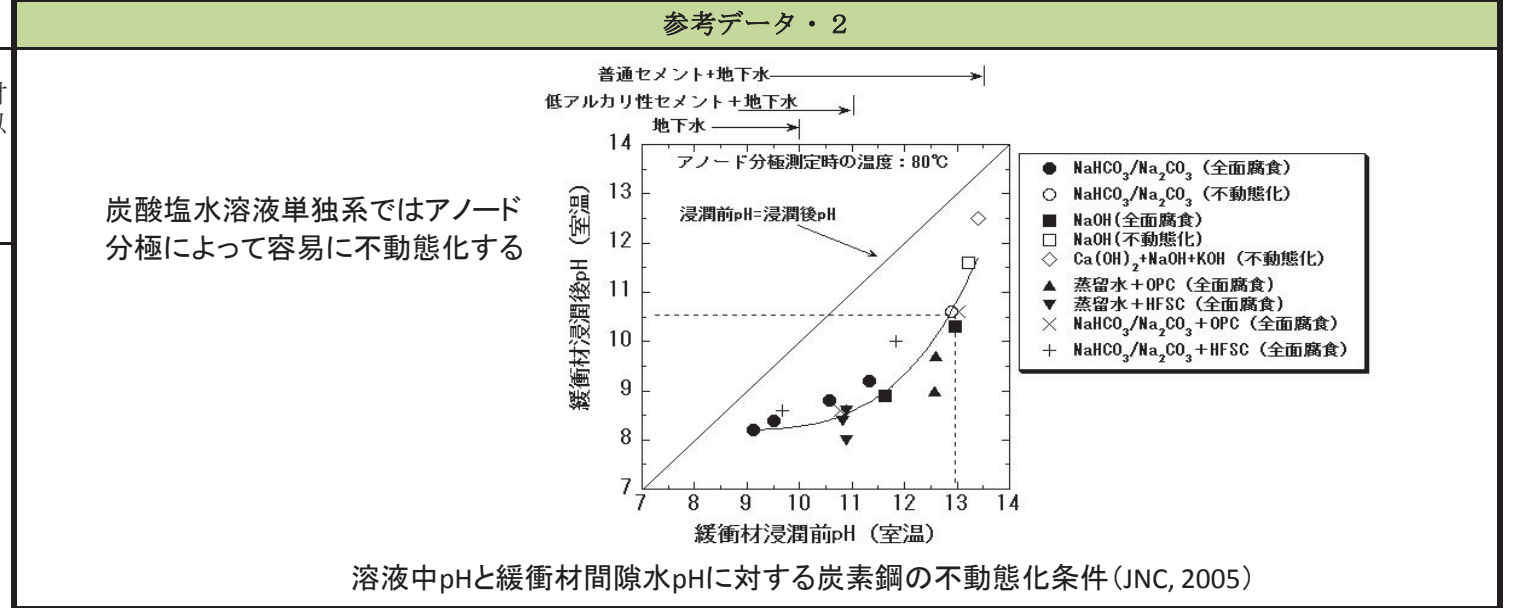
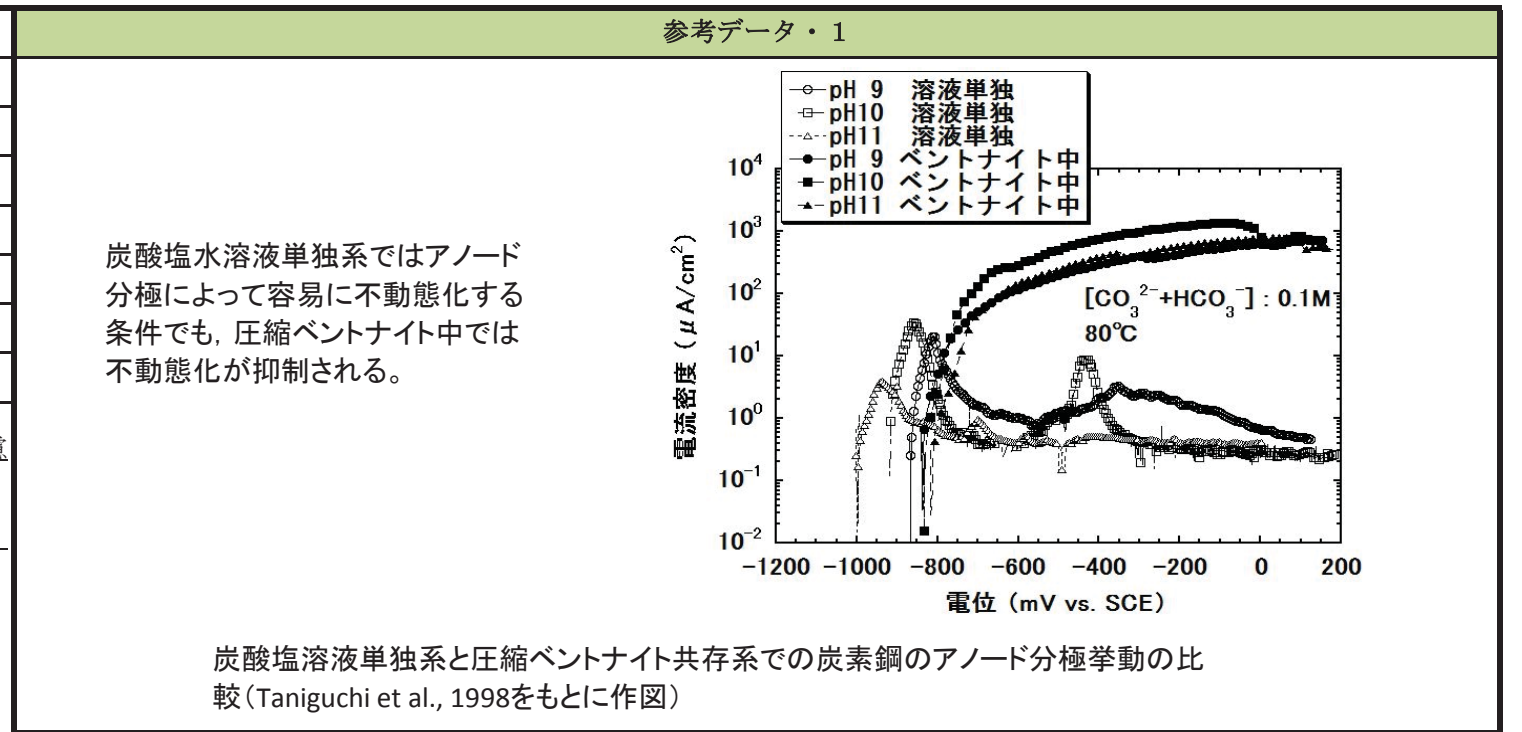
シートNo.	Op-01		
対象材料	オーバーパック		
対象分野	腐食（不動態化挙動）		
開発レベル	基礎物性	Labスケール	
実施期間（年度）		Phase2/H16～H24	Phase3/H25～
開発のキーワード	炭素鋼	炭酸塩	pH
試験条件	炭酸塩溶液、コンクリート接触水		
実施事項	電気化学的手法による炭素鋼の不動態化挙動評価		

基本情報	実施内容	<ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材を模擬したベントナイト中でアノード分極測定を行い、不動態化の有無を調査した。 ・炭素鋼の不動態化を促進する化学種である炭酸塩を含む水溶液、コンクリートとの接触を考慮した高pHの水溶液を試験溶液に使用した。 ・TIG、MAG、EB(電子ビーム)による溶接試験片を用いた試験も実施した。 ・緩衝材間隙水のpHをpH試験紙を用いて測定し、不動態化の生じるpH条件についても評価した。 		
	現状の成果	<ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の共存によって炭素鋼の不動態化は阻害されることを確認した。 ・わが国の地下水条件における炭酸塩濃度の範囲では、緩衝材中で不動態化が生じるのは緩衝材間隙水のpHが約10.5以上の場合であり、緩衝材間隙水がこの値に達するのは地下水のpHが約13以上の場合と推定した。溶接部においても母材と同様の挙動を示すことを確認した。 ・炭酸塩濃度が0.5M以上になると、緩衝材中でも容易に不動態化することを確認した。 		

既往成果情報	<ul style="list-style-type: none"> ・炭素鋼の不動態化は、孔食、すきま腐食、応力腐食割れなどの局部腐食を引き起こす要因となる。適切な腐食代の設定によるオーバーパックの寿命評価のため、地層処分環境では不動態化せず、全面腐食の形態となることを示す必要がある(JNC, 1999)。 ・代表的な地下水成分のうち、炭酸塩は炭素鋼の不動態化を促進し、塩化物イオン、硫酸イオンは不動態化を抑制する作用がある。また、高pH条件ほど不動態化しやすい(Marsh et al., 1983)(大場ほか, 1996)。 ・炭酸塩水溶液単独系ではアノード分極によって容易に不動態化する条件でも、圧縮ベントナイト中では不動態化が阻害される(参考データ1: Taniguchi et al., 1998)。 ・炭酸塩濃度0.1M以下の条件で炭素鋼が不動態化する条件をpHに対して整理すると、緩衝材間隙水pHが約10.5以上の場合と推定された(参考データ2: JNC 2005)。間隙水中では緩衝材に浸潤させる前と比較してpHが低下しており、間隙水pHが10.5に達するのは浸潤させる溶液のpHが約13以上の場合と推定される。 ・炭酸塩濃度が増加すると不動態化するpH領域は拡大し、0.5M以上になると間隙水Hが8.5以下であっても不動態化する(谷口ほか, 1999)。 ・溶接試験片を用いた実験でも母材と同様の挙動となる(原環センター, 2006)。
	<p>炭酸塩水溶液単独系ではアノード分極によって容易に不動態化する</p>

課題	<p>緩衝材共存下での不動態化挙動は日本の地下水では上限レベルの炭酸塩濃度条件で検討しており、幅広い環境条件に対して保守的な評価が可能と考えられる。また、沿岸部では塩化物イオン濃度が比較的高いことから、降水系に比較して不動態化は阻害される傾向になると考えられる。塩化物イオンや硫酸イオン等の不動態化の抑制機能が期待できる化学種の不動態化条件(臨界pH等)への影響についてデータを拡充することによって沿岸部において不動態化がより生じにくいことを示すことが可能となる。また、沿岸部に特徴的な地下水水質として、炭酸塩濃度が比較的高い場合や他の不動態化を促進する化学種の共存の可能性がある場合にはその条件での不動態化の可能性について検討が必要である。</p>
----	---

出典情報	<ul style="list-style-type: none"> ・JNC, 1999, 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、分冊2地層処分の工学技術、JNC TN1400 99-022, 1999. ・Marsh, G. P., Bland, I. W., Desport, J. A., Naish, C., Westcott, C and Taylor, L. J., CORROSION ASSESSMENT OF METAL OVERPACKS FOR RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL, European Appl. Res. Rept.-Nucl. Sci. Techno./, Vol. 5, No. 2, pp. 223-252 (1983). ・大場和博、原信義、杉本克久、本田明、石川博久: ベントナイト接触水中における炭素鋼の不動態化と脱不動態化、材料と環境、vol. 45, pp. 209-216 (1996). ・Taniguchi, N., Honda, A., Ishikawa, H., EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PASSIVATION BEHAVIOR AND CORROSION RATE OF CARBON STEEL IN COMPACTED BENTONITE, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. vol. 506 pp. 495-500 (1998). ・JNC, 2005, 核燃料サイクル開発機構: 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築-平成17年取りまとめ- 分冊2 工学技術の開発、JNC-TN1400 2005-015 (2005). ・谷口直樹、森本昌孝、本田明: ベントナイト中における炭素鋼の不動態化条件の検討、サイクル機構技報No. 4, 87-91 (1999). ・原環センター, 2006, 平成17年度 地層処分技術調査等バリア機能総合調査報告書-人工バリア特性体系化調査- (2006).
------	--



全体試験計画	<p>沿岸部における地下水成分のうち、不動態化を促進する化学種(例えば炭酸塩)と不動態化を阻害する化学種(例えば塩化物イオン、硫酸イオン)に着目する。それぞれの濃度または濃度比を変えた試験溶液や沿岸部での特徴的な地下水組成を考慮した水溶液を用いて電気化学試験等により、緩衝材中における炭素鋼の不動態化に関するデータを拡充する。既往の不動態化条件に対するデータ(例えば参考データ2)との比較により、沿岸部において不動態化が抑制傾向となることを確認する。</p>
出典情報	<p>不動態化挙動への影響を地下水の化学組成ごとに整理し、沿岸部の地下環境特性を入力条件としたオーバーパックの腐食寿命の評価体系を整備する。環境条件(化学成分)をパラメータとした腐食試験を実施し、データの拡充を行う。</p>

シートNo.	Op-02		
対象材料	オーバーパック		
対象分野	腐食（酸素による腐食進展挙動）		
開発レベル	基礎物性	Labスケール	
実施期間（年度）		Phase2/H16～H24	Phase3/H25～
開発のキーワード	炭素鋼	全面腐食	孔食、すきま腐食
試験条件	人工海水、人工淡水、幌延地下水、アルカリ性水溶液		
実施事項	酸化性雰囲気での浸漬試験による腐食進展挙動評価		

実施内容

実験データに基づくオーバーパックにおける腐食深さ評価式の構築
 ・炭素鋼に全面腐食が生じる人工海水（SSW）、人工淡水（SFW）、幌延地下水中で浸漬試験を行い、平均腐食深さ、最大腐食深さを測定した。
 ・炭素鋼が不動態化して孔食またはすきま腐食が生じる塩化物イオンを含むアルカリ性水溶液中でも浸漬試験を行い、全面腐食の場合と同様の評価を実施した。
 ・TIG、MAG、EB(電子ビーム)による溶接試験片を用いた試験も実施した。
 ・平均腐食深さと孔食係数（最大腐食深さと平均腐食深さの比）の関係で整理し、天然水中での事例との比較により腐食局在化の傾向を確認した。
 ・最大腐食深さについては極値統計解析により実機での最大腐食深さを推定し、平均腐食深さから実機最大腐食深さを保守的に推定する関係式を検討した。

酸素によるオーバーパック最大腐食深さの評価
 ・人工バリア仕様からオーバーパック1体あたりの酸素量を算出してそれに対する平均腐食深さを算出した。
 ・この平均腐食深さに対して上記により得られた関係式から最大腐食深さを算出した。

現状の成果

- 炭素鋼の孔食係数は平均腐食深さの増加とともに低下する、すなわち腐食の進展とともに均一化する傾向があることを確認した。また、この挙動は天然水中の事例と整合することを確認した。
- 平均腐食深さから酸素による最大腐食深さを導出する経験式を提示した。
- 第2次取りまとめでの人工バリア仕様に対して酸素による最大腐食深さは約12mmと評価した。
- 溶接部については一部選択的な腐食が観察されたが、品質改善の見通しを得ており、孔食係数は既往のデータの範囲内であることを確認した。

既往成果情報

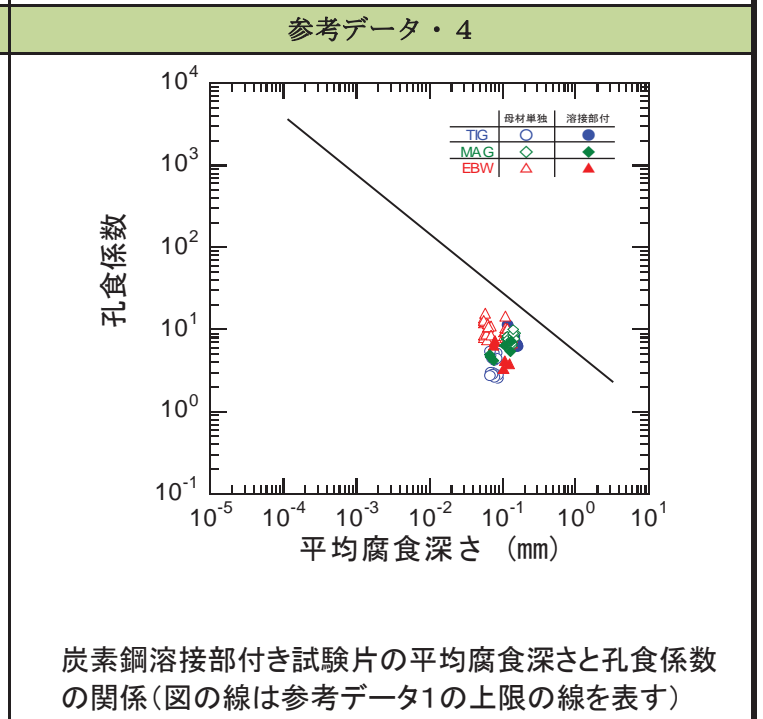
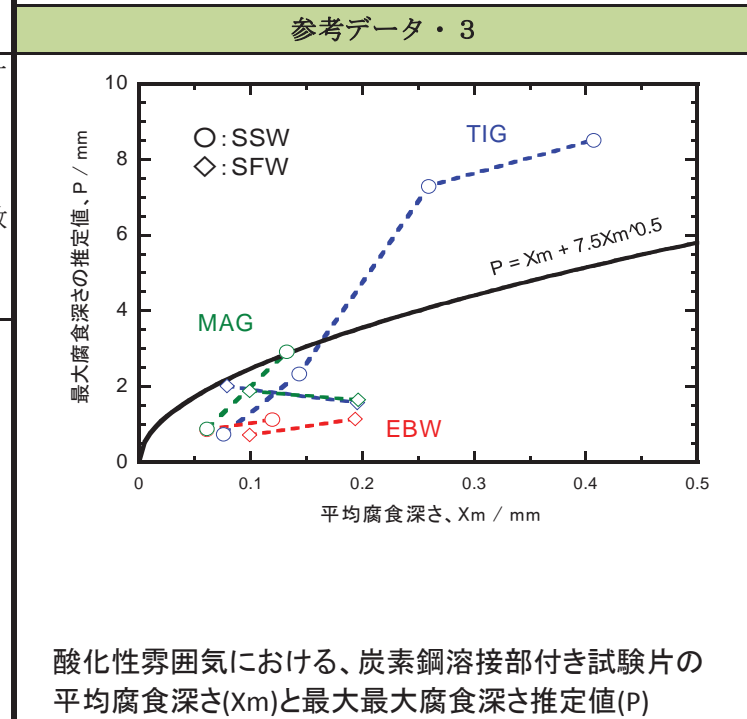
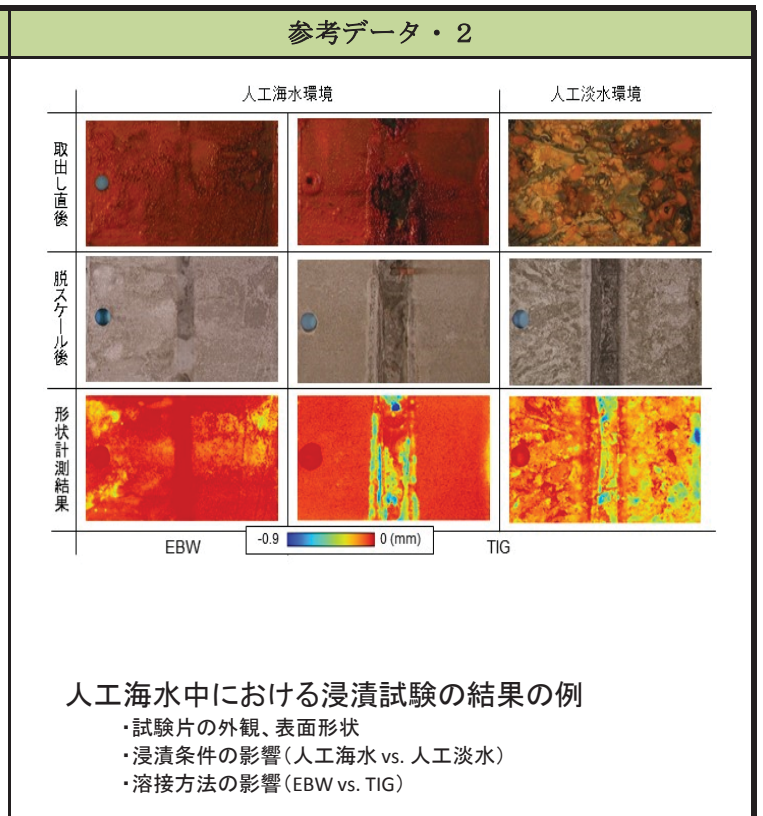
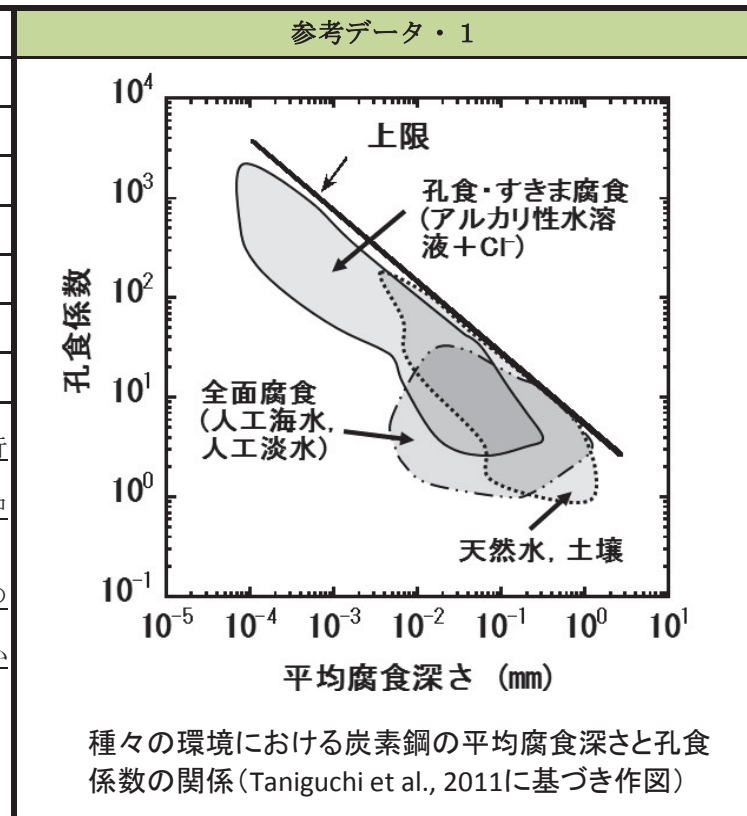
- 全面腐食の孔食係数平均腐食深さが大きいほど小さくなる傾向がある。孔食、すきま腐食の孔食係数は平均腐食深さが大きいほど小さくなる傾向がある。天然環境での事例においても平均腐食深さが大きいほど孔食係数は小さくなることを確認した(参考データ1: Taniguchi et al., 2011)。
- 全面腐食と孔食・すきま腐食に対して平均腐食深さ(Xm)から最大腐食深さ(P)を算出する経験式が検討されており Taniguchi et al., 2011) (PNC, 1992)、現時点のオーバーパック寸法については以下の式を導出した。
 全面腐食: $P(\text{mm}) = X_m + 7.5X_m^{0.5}$ 孔食・すきま腐食: $P(\text{mm}) = X_m + 6.4X_m^{0.5}$
- 溶接部付きでは、アーク溶接であるTIGやMAGでは試験片の溶接金属部に選択的な腐食が観察され(参考データ2: 原環センター, 2008)、比較的大きな孔食係数を示す場合もあった。平均腐食深さ(Xm)に対して最大腐食深さの推定値(P)をプロットすると、選択的な腐食の影響によりTIGやMAGで母材の推定値を上回る傾向が見られた(参考データ3: 原環センター, 2012)。選択的な腐食が生じたとしても、溶接部付き試験片の平均腐食深さに対する孔食係数は、想定された範囲にあることを確認した(参考データ4: 原環センター, 2008)。
- アーク溶接部で生じた選択的な腐食については、溶接材料の化学成分の調整で改善出来る見通しを得ている。
- 人工淡水(SFW, 2.5mM NaHCO3+0.01M NaCl)の方が、人工海水(SSW, ASTM D1141)よりも腐食深さは小さい。

課題

模擬地下水として人工海水や人工淡水を用いており、一般的な海水環境の化学組成でのオーバーパックの腐食挙動については一通りの知見が揃っている。アーク溶接試験片では選択的な腐食が認められ、設定された腐食代を上回る可能性がある。この現象については溶接材料の化学成分の調整で品質改善出来る見通しがあるが、成分を改良した溶接材料を用いた溶接試験体に対しては、電気化学的手法や数点の試験片による浸漬試験など簡易的な品質改善効果の確認に留まっており、データの拡充が必要である。

出典情報

- Taniguchi, N., Suzuki, H., Kawasaki, M., Naito, M., Kobayashi, M., Takahashi, R and Asano, H, Propagation behaviour of general and localised corrosion of carbon steel in simulated groundwater under aerobic conditions, CST, Vol.46, No.2, pp.117-123(2011).
- PNC, 1992, 石川博久、本田明、鶴留浩二、井上邦博、小畑政道、佐々木憲明: オーバーパックの候補材料選定と炭素鋼オーバーパックの寿命評価、PNC TN8410 92-139(1992).
- 原環センター, 2008, 平成19年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書(第2分冊) -人工バリア品質評価技術の開発- (2008).
- 原環センター, 2012, 平成23年度地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書(第2分冊) -人工バリア品質評価技術の開発- (2012).



全体試験計画

溶接部の最大腐食深さが母材を上回る現象については、溶接材料の化学成分の調整で品質改善出来る見通しがある。試験データの拡充による品質改善手法の妥当性の確認が、オーバーパックの製作技術の成立性、腐食代の設定根拠の妥当性の提示のために必要である。

- 化学成分を改良した溶接材料を用いて溶接試験体から腐食試験片を作製し、SSW、SFW中での浸漬試験データの拡充を行う。
- 地質環境特性として沿岸部に特徴的な地下水水質が抽出され、不動態化を促進する化学種濃度の高い地下水条件となる可能性がある場合には、その条件で試験を実施する。

不動態化挙動への影響を地下水の化学組成ごとに整理し、沿岸部の地下環境特性を入力条件としたオーバーパックの腐食寿命の評価体系を整備する。環境条件(化学成分)をパラメータとした腐食試験を実施し、データの拡充を行う。

シートNo.	Op-03		
対象材料	オーバーパック		
対象分野	腐食（水の還元による腐食進展挙動）		
開発レベル	基礎物性	Labスケール	
実施期間（年度）		Phase2/H16～H24	Phase3/H25～
開発のキーワード	炭素鋼	全面腐食	低酸素濃度
試験条件	人工海水、人工淡水、幌延地下水、炭酸塩／塩化物水溶液		
実施事項	低酸素濃度雰囲気での浸漬試験による腐食進展挙動評価		
実施内容	<p>水を酸化剤とした炭素鋼の全面腐食挙動評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・低酸素濃度の水溶液中で炭酸塩濃度、塩化物イオン濃度、pHをパラメータとして浸漬試験を行い、炭素鋼の腐食に及ぼすこれらの因子の影響を評価した。 ・人工海水（SSW）、人工淡水（SFW）、炭酸塩水溶液を用いて圧縮ベントナイト中で浸漬試験を行い、重量法により平均腐食深さを測定した。 ・TIG、MAG、EB(電子ビーム)による溶接試験片を用いた試験も実施した。 ・圧縮ベントナイト中における腐食量、腐食速度の経時変化と腐食進展に及ぼす溶液組成、温度の影響を評価した。 		
現状の成果	<ul style="list-style-type: none"> ・低酸素濃度下において、炭酸塩濃度、塩化物イオン濃度、pHによる平均腐食速度への影響は小さいことを確認した。また、圧縮ベントナイト中でも人工海水、人工淡水で腐食進展に大きな違いは認められないことを確認した。 ・10年間にわたる試験結果から、長期的な腐食速度は$1\mu\text{m/y}$程度と推定し、第2次取りまとめ等で設定された寿命評価上の腐食速度（$10\mu\text{m/y}$）が十分保守的であることを確認した。 ・室内試験データとナチュラルアナログデータの比較を行い、室内試験データの外挿とナチュラルアナログデータが概ね整合することを確認した。 ・長期的な腐食進展は皮膜の形成挙動と関連しており、炭酸鉄皮膜の形成されやすい条件（高温、高炭酸塩等）で腐食進展も抑制される傾向にあることを確認した。 ・溶接試験片においても母材とほぼ同様の腐食挙動であり、溶接部付近に選択的な腐食も見られないことを確認した。 		

・炭酸塩と塩化物を含む水溶液中での1年間の浸漬試験では、炭酸塩濃度、塩化物イオン濃度、pHによる平均腐食速度への影響は小さい。ただし、炭酸塩濃度が高く、pHも高い条件では比較的小さな腐食速度が観察されている（参考データ1：本田ほか、1997）。

・圧縮ベントナイト中の試験では、人工海水と人工淡水で腐食進展挙動に大きな違いは認められず、いずれも長期的には $1\mu\text{m/y}$ 以下の腐食速度となった。また、温度による腐食への影響が認められ、浸漬初期には温度の低い 50°C のほうが 80°C よりも小さな腐食量であるが、経時的な腐食抑制も小さく、長期的には腐食速度が逆転する現象がみられた（参考データ2：谷口ほか、2010）。

・室内試験データを外挿すると、比較的還元性の条件に埋設されていたと推定される天然の考古学的鉄製品の腐食データ（Yoshikawa et al., 2008;）と概ね整合する（谷口ほか、2010）。

・圧縮ベントナイト中では FeCO_3 、 $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{CO}_3$ といった鉄炭酸塩の皮膜が形成されており、炭酸鉄が沈殿しやすい条件（高温または高炭酸塩濃度）ほど腐食抑制の効果が大きい（谷口ほか、2010）。

・幌延地下水条件においても1年以下の短期の腐食データが取得されており、腐食速度は既往のデータの範囲内の値が得られている（谷口ほか、2006）。

・圧縮ベントナイト中におけるTIG、MAG、EB溶接試験片については、溶接手法による違いは認められず、母材と比較しても同等の腐食速度が得られている（参考データ4、Kabayashi et al., 2011）。

これまでの実験データが示すように、低酸素濃度下では地下水水質による腐食速度への影響は小さいと考えられ、沿岸域においても腐食速度は既往のデータの範囲内と推定される。一方、長期的な腐食速度は皮膜の形成挙動により異なる可能性が示されており、沿岸部で特徴的な環境条件を踏まえたデータ拡充等により腐食進展挙動を確認することが課題である。

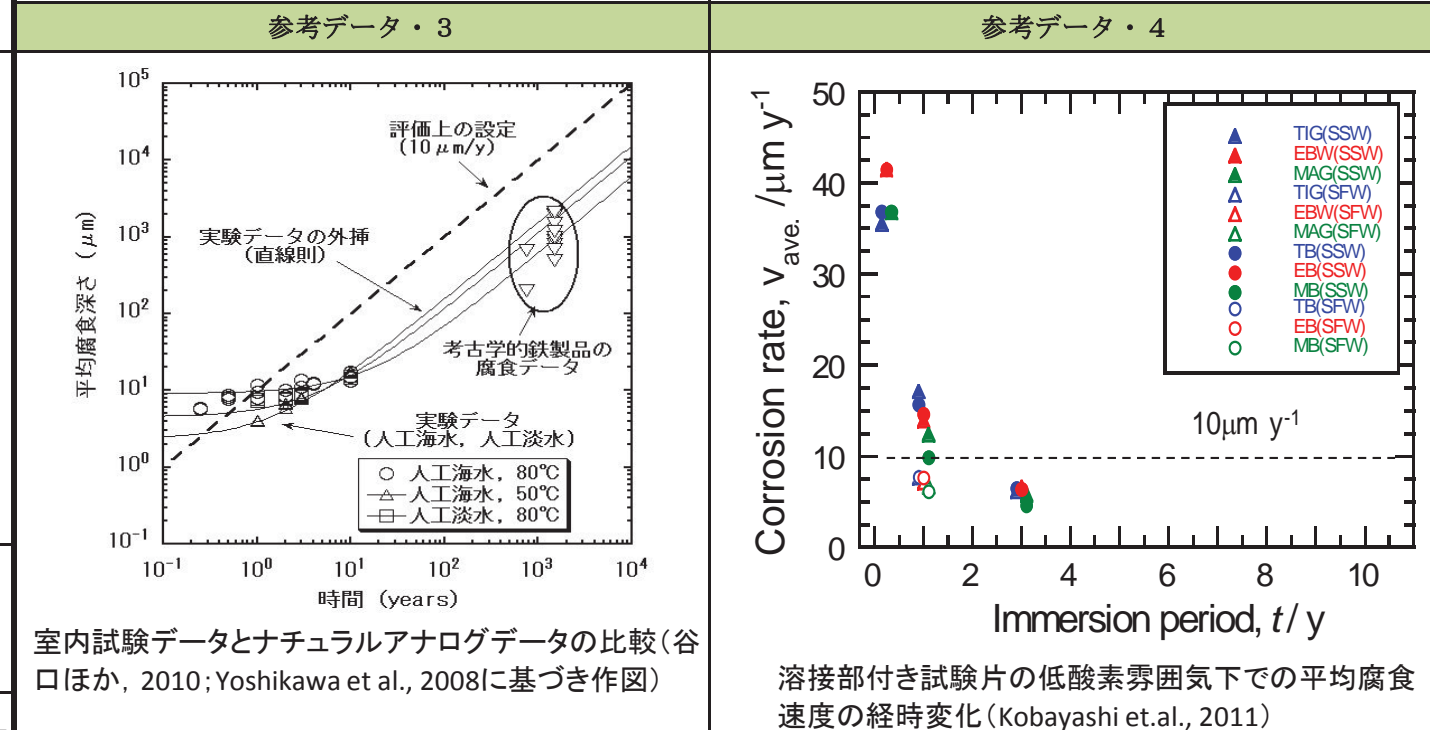
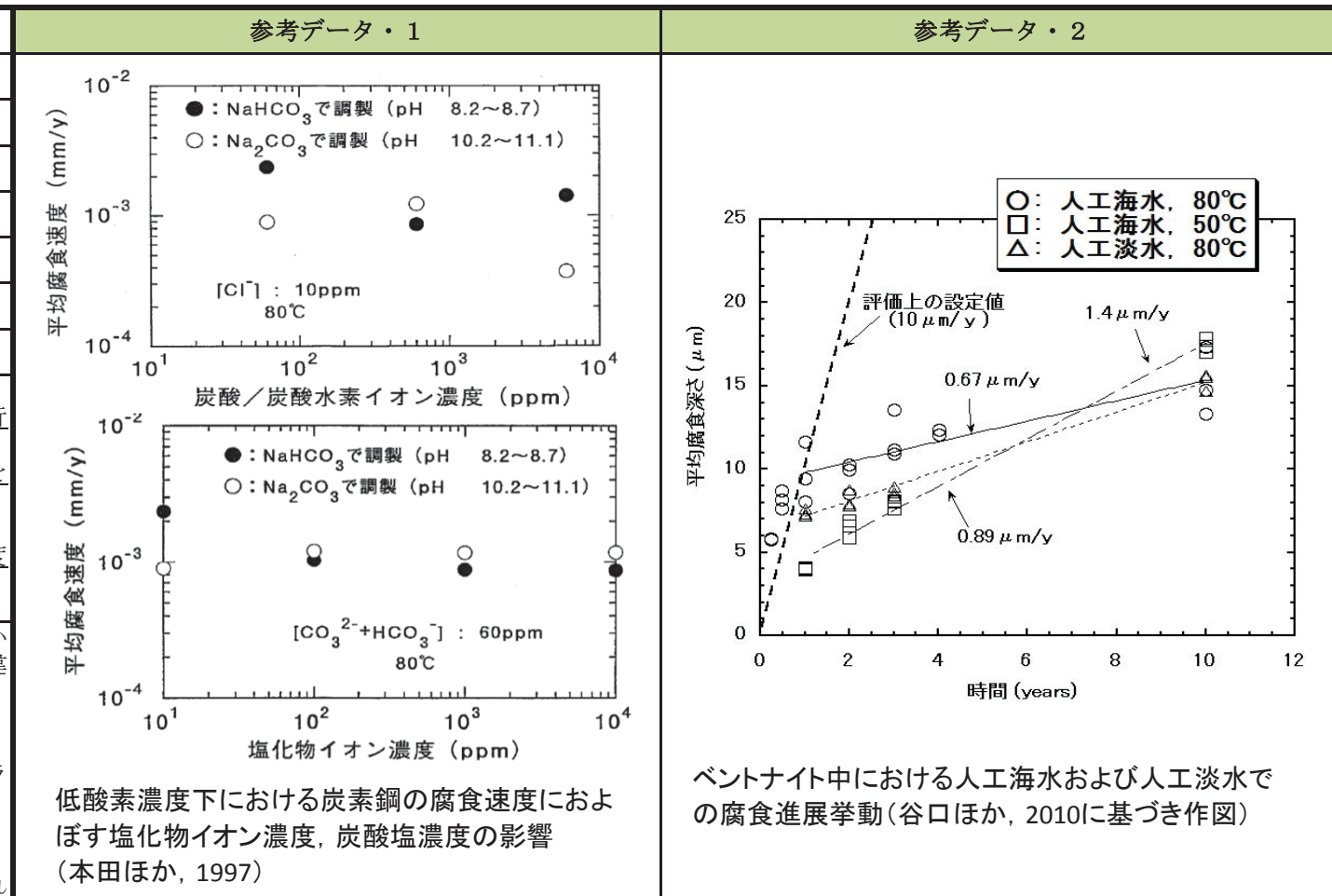
・本田明, 谷口直樹, 石川博久, 藤原和雄, 低酸素濃度条件下における炭素鋼の腐食挙動の実験的検討, 動燃技報, No. 104, 125-134(1997).

・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(2010).

・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, No. 2, pp. 212-216(2011).

・Yoshikawa, H, Gunji, E and Tokuda, M, Long term stability of iron for more than 1500 years indicated by archaeological samples from the Yamato 6th tumblers, Journal of Nuclear Materials, Vol. 379, pp.112-117(2008).

・Yoshikawa, H, Ueno, K, Yui, M, APPLICATION OF ARCHAEOLOGICAL ANALOGUES FOR A REPOSITORY SAFETY CASE: ARGUMENTS SUPPORTING THE WASTE CONTAINER LIFETIME, Symposium Proceedings of "Safety Cases for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand?", 365-371, OECD(2008).



全体試験計画

より具体的な挙動を把握するため、沿岸部で想定される環境条件の特性を踏まえ、海水と降水の中間的な濃度条件等に対する腐食挙動を確認する。

- ・海水系地下水と降水系地下水が混合した地下水を想定し、混合割合や混合前組成などを変えた条件で浸漬試験を行う。
- ・溶接部付きの試験片に対する5年超の浸漬試験は、別途「処分システム工学確証技術開発」で実施中である。

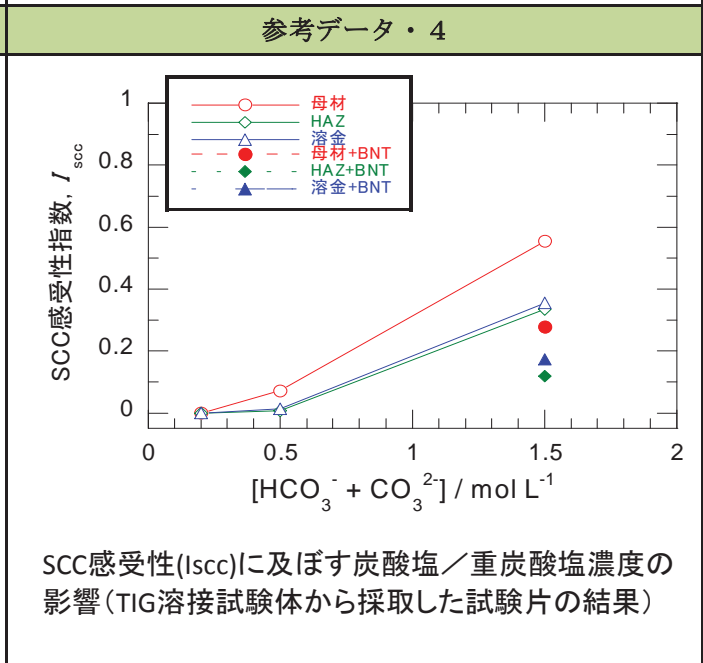
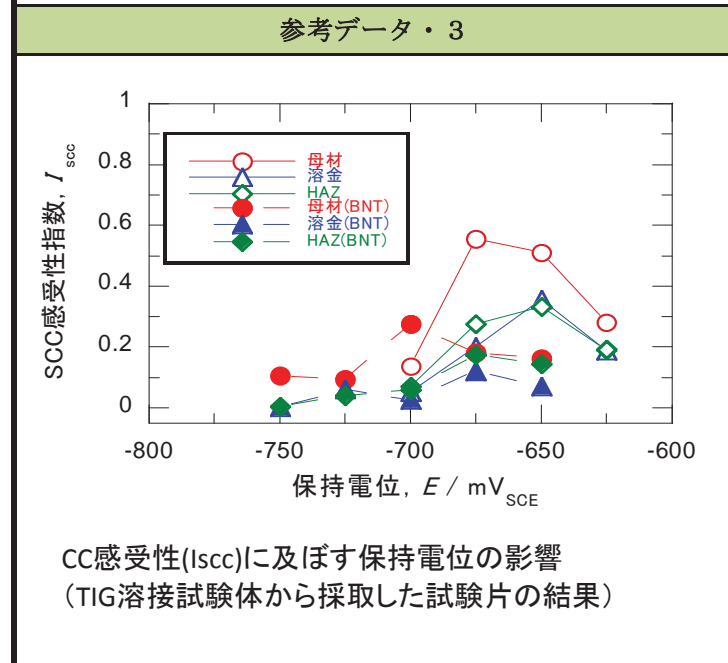
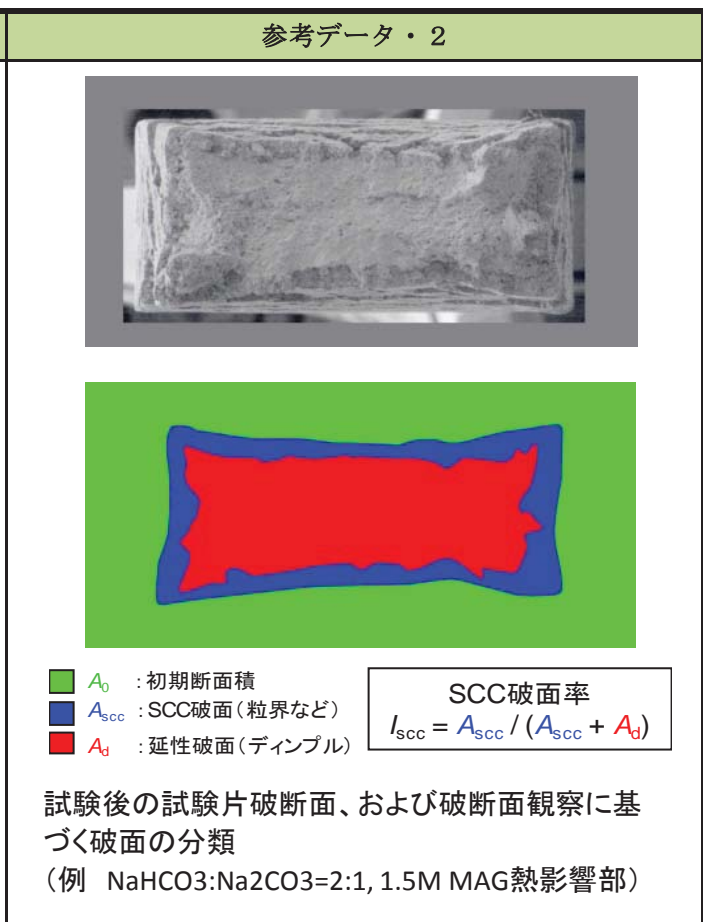
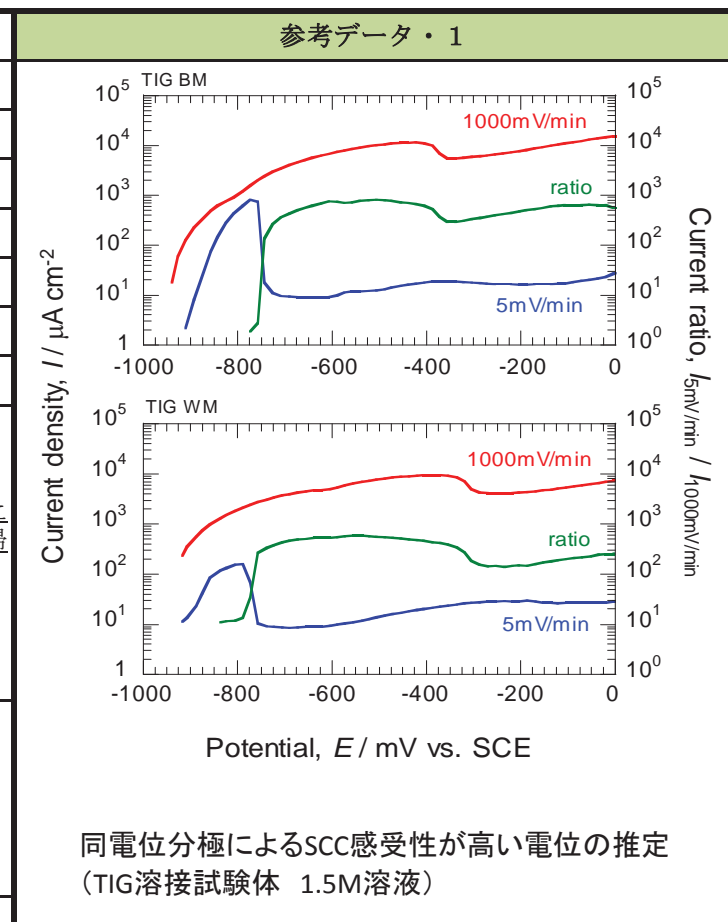
シートNo.	Op-04			
対象材料	オーバーパック			
対象分野	腐食 (応力腐食割れ挙動)			
開発レベル	基礎物性	Labスケール		
実施期間 (年度)	Phase2/H16~H24	Phase3/H25~		
開発のキーワード	炭素鋼	応力腐食割れ	炭酸塩	溶接部
試験条件	炭酸塩水溶液	引張試験	感受性評価	
実施事項	低歪速度法による炭酸塩溶液中での応力腐食割れ感受性評価			

基本情報	実施内容	<p>炭酸塩環境における応力腐食割れ(SCC)感受性評価</p> <p>応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking, SCC) に関する既往の報告および地下環境データより、熱処理や溶接時の入熱を受けた鋼の炭酸塩溶液中でSCC感受性評価の必要性がある。溶接や後熱処理が炭素鋼OPのSCC感受性におよぼす影響を、SSRT(Slow Strain Rate Test)で評価した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・応力腐食割れの感受性が高いとされる活性溶解/不働態化の遷移域の電位を取得するため、掃引速度を変えた動電位分極試験を予備試験として実施した。 ・溶接封入の影響を評価するため、TIG、MAG、EBW溶接試験体から引張試験片を採取し、SSRTを実施した。 ・破断面をSEM観察し、破面に占める粒界割れの面積率をSCC感受性指数として算出した。
	現状の成果	<ul style="list-style-type: none"> ・炭酸塩/重炭酸塩溶液下でのSCC感受性が高いと考えられる活性溶解/不働態化が遷移する電位領域は、-750~-400mVSCEであった。 ・定電位SSRTにより、炭酸塩環境下での不働態化を伴う炭素鋼のSCC感受性を網羅的に取得した。 ・地層処分環境での炭酸塩が影響する炭素鋼OPのSCC生起の可能性は低いことを確認した。

既往成果情報	<ul style="list-style-type: none"> ・地下環境での炭酸塩雰囲気模擬するため、NaHCO₃とNa₂CO₃を2:1で混合した溶液を使用した。溶液濃度は1.5M(1.0M+0.5M)、0.5M(0.333M + 0.167M)、0.2M(0.133M + 0.067)の3種類とした。SCC感受性が消失する濃度と実際の地下環境での濃度(0.067M)を比較することで、SCC生起に係わるの環境因子の影響を調査した。 ・定電位SSRTに先立ち、炭酸塩環境下での不働態型SCCの感受性が高くなる活性溶解/不働態化の遷移域の電位範囲を、動電位分極測定で取得した。掃引速度を変えた分極試験の結果より、1.5M炭酸塩溶液では-750~-400mVSCEの電位範囲に活性溶解/不働態化の遷移域があることを確認した(参考データ: 1)。この電位領域は他の溶接方法や溶接部位でも同様の傾向である。 ・取得した電位領域で保持しながらSSRTを実施し。試験後の破断面をSEMで観察した。引張試験片の断面減少率、破断伸びの低下の割合、SCC破面率のうち、SCC破面率を感受性の指標とした。SEM観察の結果より、特徴的なSCC破面である結晶粒界が現れた部分と延性破壊の破面を分類してSCC破面率を算出した。電位と濃度の影響を評価した(参考データ: 2)。 ・保持電位を変えたSSRT試験の結果、1.5M溶液では-700~650mV付近で感受性が最も高くなることを確認した(参考データ: 3)。 ・溶液の濃度を変化させ各部位ごとに最も高い感受性指数を濃度に対してプロットし、SCC感受性に及ぼす炭酸塩濃度の影響を評価した。その結果以下の知見を得た(参考データ: 4) <ul style="list-style-type: none"> ○溶液濃度が低くなるほどSCC感受性は低下し、0.2Mで感受性が消失した。 ○母材の感受性が最も高くなったが、これは今回のSCCが粒界進展型であり結晶粒界が大きい母材の方が亀裂の進展しやすいことが影響していると推察される。感受性の観点では溶接は炭素鋼OPのSCCによる破損の可能性に影響しない封入方法である。
	<p>知見で検討対象としたSCCのメカニズムは、炭酸塩による不働態化に伴うものであり、「不働態化挙動」で課題として挙げた、塩化物の不働態化抑制作用がSCCに与える影響を確認する必要がある。そのため、炭酸塩と塩化物の共存環境でのSCC感受性評価が必要である。またNNpH型SCCなど、他のメカニズムについても評価対象とすべきか、文献調査を実施して最新の知見を取り入れる必要がある。</p>

課題	<p>知見で検討対象としたSCCのメカニズムは、炭酸塩による不働態化に伴うものであり、「不働態化挙動」で課題として挙げた、塩化物の不働態化抑制作用がSCCに与える影響を確認する必要がある。そのため、炭酸塩と塩化物の共存環境でのSCC感受性評価が必要である。またNNpH型SCCなど、他のメカニズムについても評価対象とすべきか、文献調査を実施して最新の知見を取り入れる必要がある。</p>
----	---

出典情報	<p>原環センター、2008、平成19年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書(第2分冊) -人工バリア品質評価技術の開発- (2008)。</p>
------	--



全体試験計画	
<p>降水と海水の混合した地下水組成や沿岸部に特徴的な地下水条件を考慮しつつ、応力腐食割れ感受性に関与する化学種に着目して沿岸部の地下水に含まれる種々の化学種の共存下での応力腐食割れ感受性を実験的に確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・海水中成分のうち、応力腐食割れをもたらす炭酸塩のほか、不働態化や局部腐食に影響を及ぼす塩化物イオン、硫酸イオンなどの化学種にも着目。 ・母材と溶接金属部、熱影響部の比較。 	<p>一方SCCを含む割れに対しては割れの駆動力となる溶接残留応力を、溶接封入後にPWHT(Post Weld Heat Treatment)で低減、またはEIHSI(External Induction Heating Stress Improvement)でOP表面に圧縮応力場に改善し、環境因子に因らない対策も検討している。</p>

シートNo.	Op-05		
対象材料	オーバーパック		
対象分野	腐食（水素脆化挙動）		
開発レベル	基礎物性	Labスケール	
実施期間（年度）		Phase2/H16～H24	Phase3/H25～
開発のキーワード	炭素鋼	拡散性水素	低酸素濃度
試験条件	人工海水、人工淡水		
実施事項	低酸素濃度雰囲気での浸漬試験による水素吸収量評価		
実施内容	<p>低酸素濃度下における水素吸収量評価</p> <ul style="list-style-type: none"> 腐食量評価の試験と同様に人工海水（SSW）、人工淡水（SFW）を用いて低酸素濃度下で浸漬試験を行い、浸漬後の試験片に吸収された水素を分析した。 水素抽出曲線（API-MS法）より、脆化に寄与するとされる拡散性水素の濃度を評価した。 母材、熱影響部、溶接金属それぞれについて水素吸収量の評価を行った。 		
現状の成果	<ul style="list-style-type: none"> 母材、熱影響部、溶接金属ともに拡散性水素濃度は0.1ppmを十分下回っており、水素脆化が問題となる濃度（～1ppm以上）には達しないことが確認された。 		

・低酸素雰囲気下での腐食により発生する水素の炭素鋼内への侵入挙動を評価する手法
 オーバーパックの溶接試験体から浸漬試験片を採取し、緩衝材内に埋め込まれた状態を再現するためチタンカラム内に圧縮ペントナイトとともに封入した。チタンカラムを人工淡水（SFW、2.5mM NaHCO3+0.01M NaCl）の方が、人工海水（SSW、ASTM D1141）とともに容器に入れ、低酸素雰囲気に制御されたグローブボックス内で保管した（参考データ・1）。

・炭素鋼中の水素の分析
 所定の期間浸漬した試験片内の水素を、昇温脱離ガス分析法（TDS: Thermal Desorption Spectrometry）にて分析した。各温度に放出水素濃度のスペクトルを取得し、水素脆化に寄与するとされる室温～250℃付近までに放出される拡散性水素の濃度を得た（参考データ・2）。

・自然浸漬試験における鋼中水素濃度の変化
 これまでに実施された浸漬試験は、30日、90日、1年、3年間である。3年間の浸漬期間後の鋼中の拡散性水素の濃度は0.1ppm程度であった。水素濃度は部位（母材、熱影響部、溶接金属）や、溶接手法（TIG、MAG、EBW）であり差は見られなかった。

水素は水の還元反応に伴って発生する。シートNo. OP-03に示したように、腐食速度に大きな差がない。また水素の吸収挙動は炭素鋼自体で大きな差がないため、どの試験体や部位でも水素濃度に差が無いと考えられる（参考データ・3）。

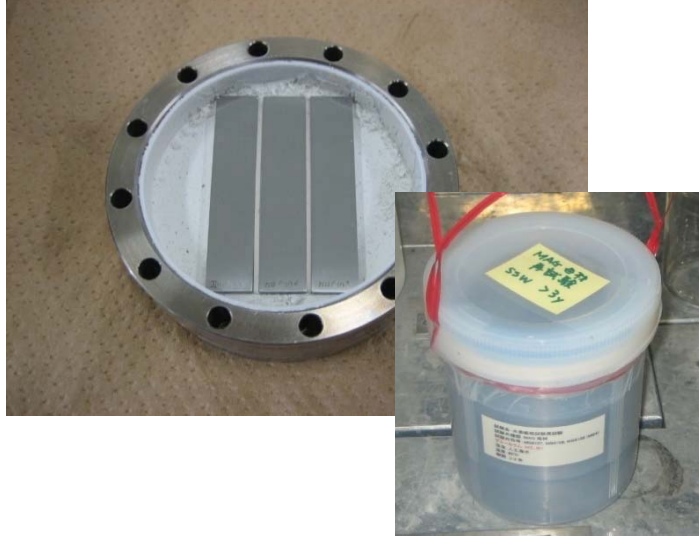
・水素脆化感受性の評価
 水素脆化の生起は、鋼中の拡散性水素濃度と材料強度に関連があり、ある強度における水素脆化生起の経験的な臨界水素濃度がある。炭素鋼母材や溶接部のビッカース硬さ試験を行い硬さから引張強さを推定し、浸漬試験で取得した拡散性水素の濃度を評価した。その結果、臨界水素濃度（約1ppm）に対して十分な余裕があることがわかった（参考データ・4、松田1989を元に作成）。

水素発生量は腐食量、水素発生速度は腐食速度と対応するため、低酸素雰囲気での浸漬試験と課題は共通となる。

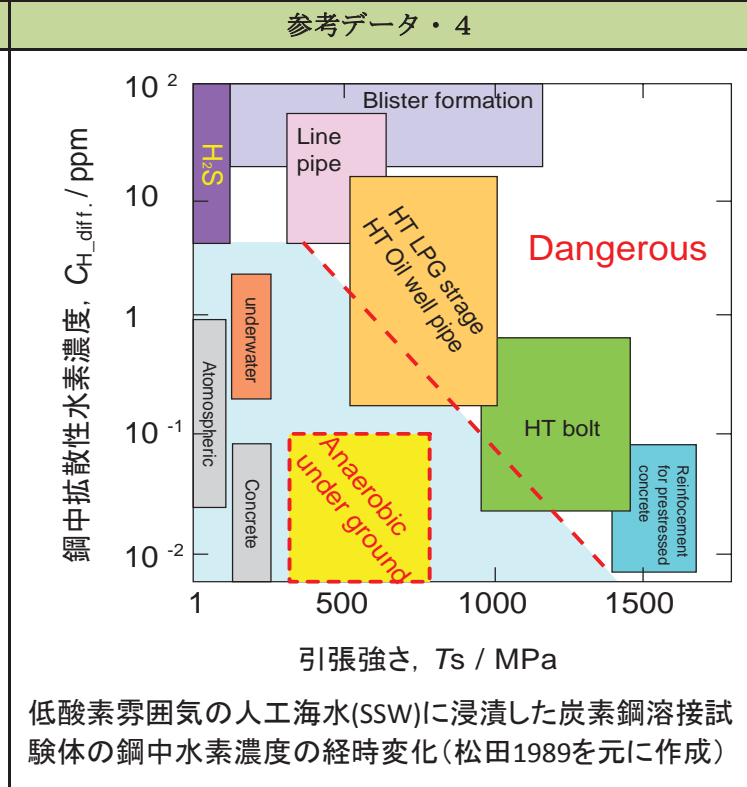
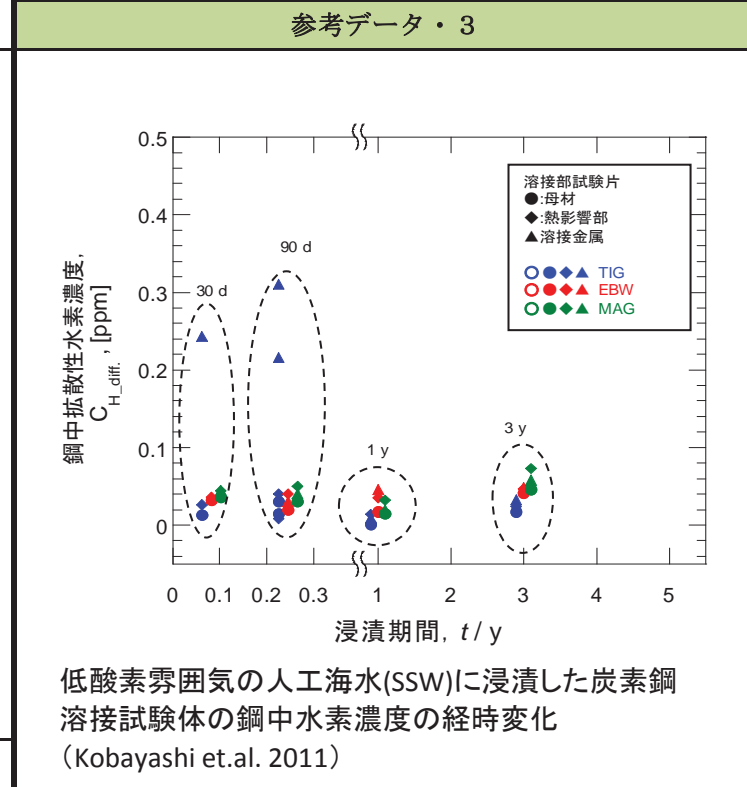
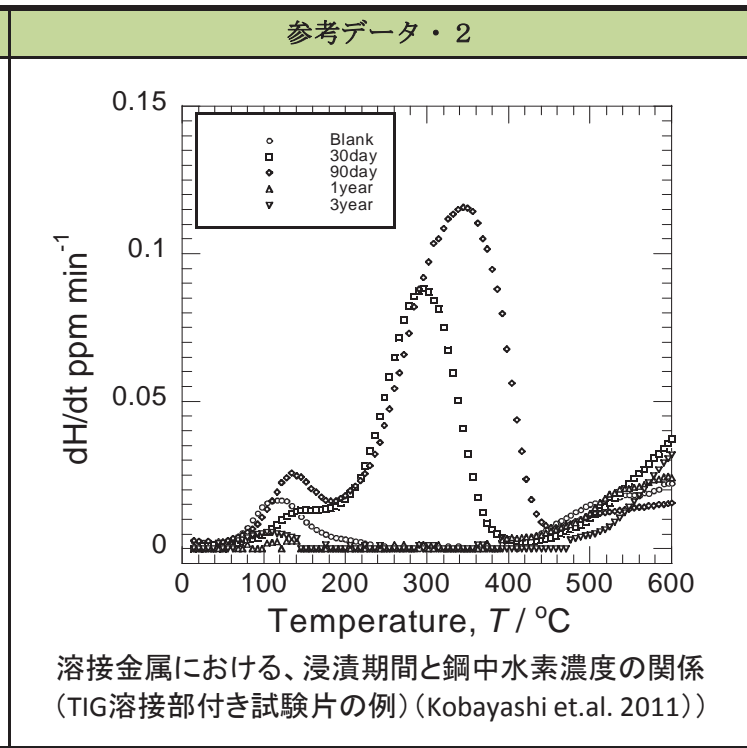
これまでの実験データが示すように、低酸素濃度下では地下水水質による腐食速度への影響は小さいと考えられ、沿岸域においても腐食速度は既往のデータの範囲内と推定される。一方、長期的な腐食速度は皮膜の形成挙動により異なる可能性が示されており、沿岸部で特徴的な環境条件を踏まえたデータ拡充等により腐食進展挙動を確認することが課題である。

・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, No.2, pp.212-216(2011).
 ・松田晋作、遅れ破壊、日刊工業新聞社、1989.

参考データ・1



水素分析用の試験片と浸漬試験の様子



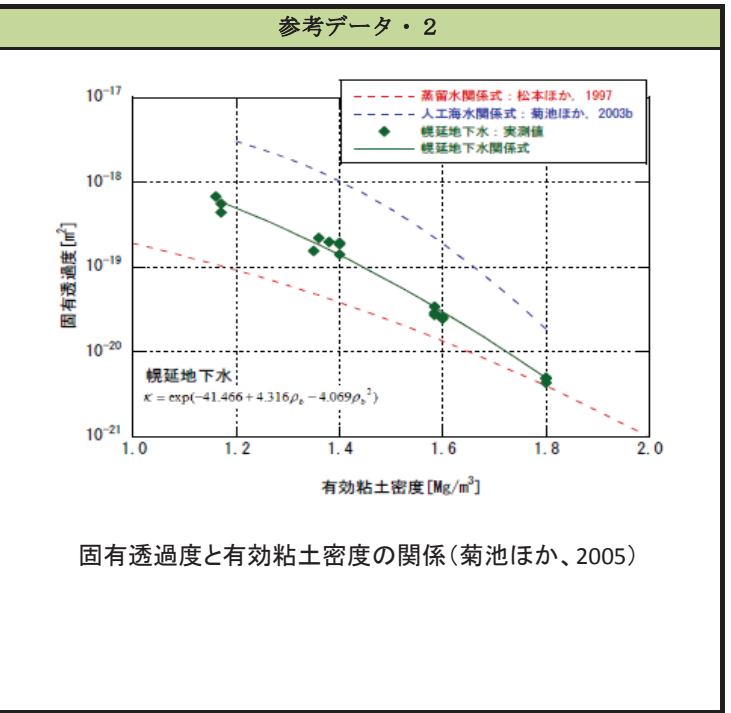
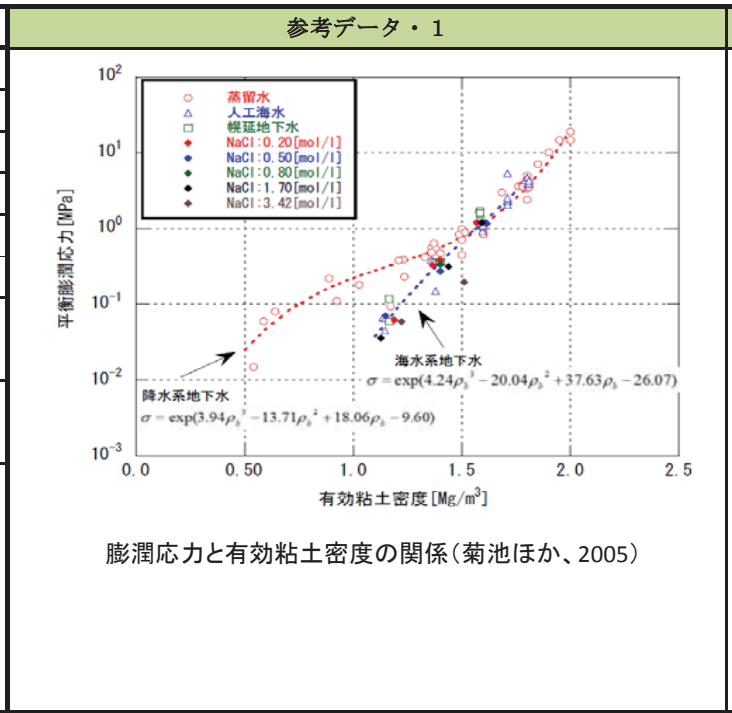
全体試験計画

降水と海水の混合した地下水組成や沿岸部に特徴的な地下水条件下で低酸素濃度雰囲気における炭素鋼の水素吸収挙動を調査する。

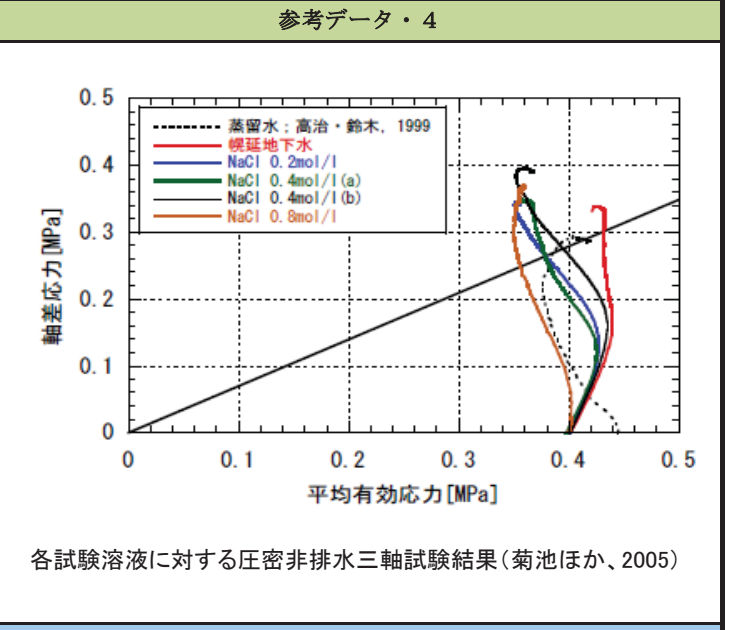
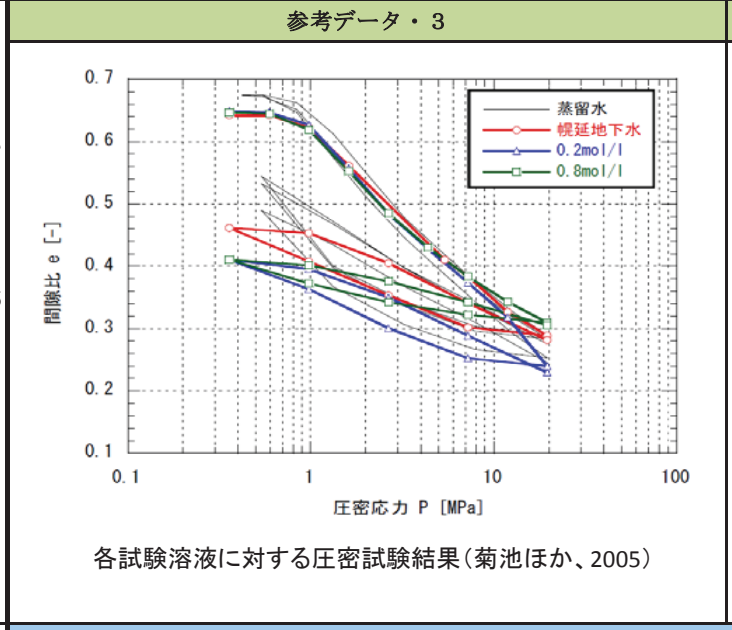
- 海水系地下水と降水系地下水が混合した地下水を想定し、混合割合や混合前組成などを変えた条件で浸漬試験。
- 地質環境特性として沿岸部に特徴的な地下水水質が抽出された場合にはその条件で試験を実施。
- 母材と溶接金属部、熱影響部の比較。

・溶接部付きの試験片に対する5年超の浸漬試験は、別途「処分システム工学確証技術開発」で実施中である。

基本情報	シートNo.	Bf-01			
	対象材料	緩衝材			
	対象分野	緩衝材の基本特性			
	開発レベル	基礎物性	Labスケール		
	実施期間(年度)				
	開発のキーワード	地下水組成	膨潤特性	力学特性	透水特性
	試験条件	熱特性			
実施事項	・幌延地下水や人工海水などを用いた膨潤圧試験、透水試験、標準圧密試験、圧密非排水三軸試験、一軸圧縮試験、熱物性測定試験				
実施内容	①幌延地下水や人工海水などの条件下での膨潤特性に関するデータを拡充した。②幌延地下水や人工海水などの条件下での透水特性に関するデータを拡充した。③幌延地下水や人工海水などの条件下での熱特性に関するデータを拡充した。④幌延地下水や人工海水などの条件下での力学特性に関するデータを拡充した。				
現状の成果	①②④緩衝材仕様および埋め戻し材仕様における膨潤特性、透水特性、力学特性に関して、海水系地下水条件下(幌延地下水、人工海水、NaCl 溶液)では、蒸留水条件下に比して、求められる機能が低下する傾向が示された。 ①②④膨潤圧、透水係数、一軸圧縮強度に関しては試験条件に応じた関係式が提示されており、幅広い塩水環境に対して適用可能となっている。 ③熱特性(熱伝導率、比熱)に関しては、海水系地下水を用いた場合においても降水系地下水を用いた場合と同等の値が得られた。				



① 海水系地下水を用いた場合、有効粘土密度が1.36Mg/m³より小さくなると、蒸留水を用いた場合と比べて膨潤応力が低下することが分かった(参考データ1)。
 ② 海水系地下水を用いた場合、蒸留水を用いた場合と比べて透水性が増加することが分かった(参考データ1)。
 ①②④ 膨潤圧(参考データ1)、透水特性(参考データ2)、一軸圧縮強度に関しては有効粘土密度を用いて関係式の一般化を図った。
 ③ 緩衝材の熱特性に関しては、海水系地下水の場合においても蒸留水条件下と同等の値が得られ、塩濃度の影響を考慮する必要がないことが示唆された。
 ④ 標準圧密試験結果(参考データ3)における間隙比と圧密圧力関係において、載荷過程は試験溶液条件によらずほぼ同一の関係を示した。しかしながら、除荷時の変形量は降水系地下水よりも小さくなり、除荷・再載荷過程による間隙比と圧密圧力関係上におけるヒステリシスは降水系地下水に比べ小さくなった。
 ④ 圧密非排水三軸試験のせん断中の応力-ひずみ関係は蒸留水条件とほぼ同等の挙動を示した。有効応力経路(参考データ4)については各試験溶液で異なり、明確な相関関係は認められなかった。また、間隙圧係数B値は0.27~0.64となり、地盤工学会が定めるB値0.95以上という基準を下回った。



課題

①緩衝材の膨潤変形に対する溶液種類の影響
 膨潤圧に関するデータは拡充されてきているが、膨潤変形に関するデータは少ない。再冠水時における緩衝材の埋戻材への膨出挙動等の変形挙動を適切に評価するためには、蒸留水および海水系地下水に対する膨潤変形に関するデータの拡充も必要である。
 ④緩衝材の長期圧密挙動に対する溶液種類の影響
 標準圧密試験により圧密特性に与える試験溶液条件の影響を検討してきたが、長期挙動評価のためには、二次圧密に与える試験溶液条件の影響についてのデータも拡充する必要がある。
 ④緩衝材のせん断特性に対する溶液種類の影響
 圧密非排水三軸試験において、海水系地下水を用いた場合せん断中の有効応力経路は各試験溶液で異なり、明確な相関関係は認められなかった。また、海水系地下水を用いた場合、地盤工学会が定めるB値0.95以上という基準を下回った。B値が基準値を達成できていないことは、試験で得られる有効応力経路や限界応力比に影響を及ぼしている可能性がある。そのため、海水系地下水を用いた場合にB値が基準値を達成するための手法を確立し、せん断特性に関するデータを拡充する必要がある。

全体試験計画

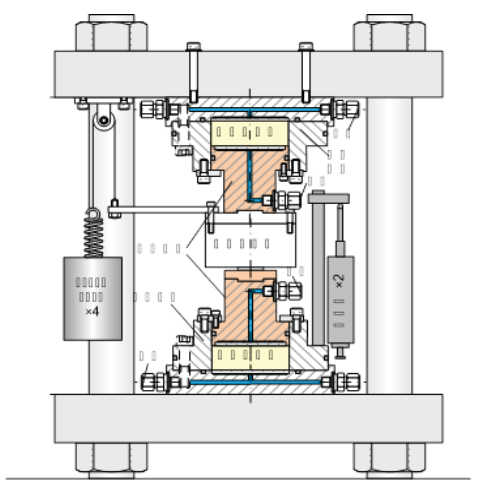
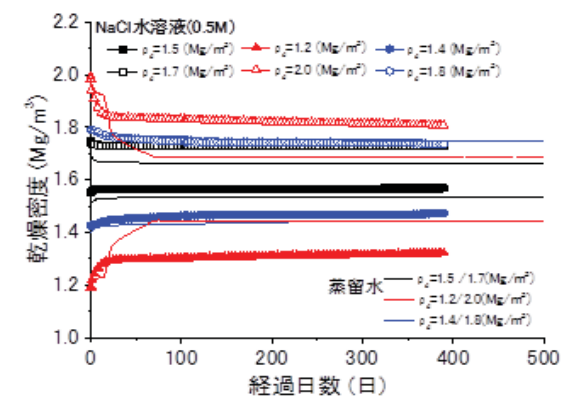
①緩衝材の膨潤変形に対する溶液種類の影響の把握
 ・蒸留水および海水系地下水に対する膨潤変形試験を実施し、膨潤変形特性に与える各試験溶液の影響を把握する。
 ④緩衝材の長期圧密挙動に対する溶液種類の影響の把握
 ・蒸留水および海水系地下水を用いた長期圧密試験を実施し、緩衝材の長期挙動を把握する。
 ④緩衝材のせん断特性に対する溶液種類の影響の把握
 ・海水系地下水を用いた場合の間隙圧係数B値に関する検討を実施する。
 ・せん断特性に与える各試験溶液の影響を検討する。

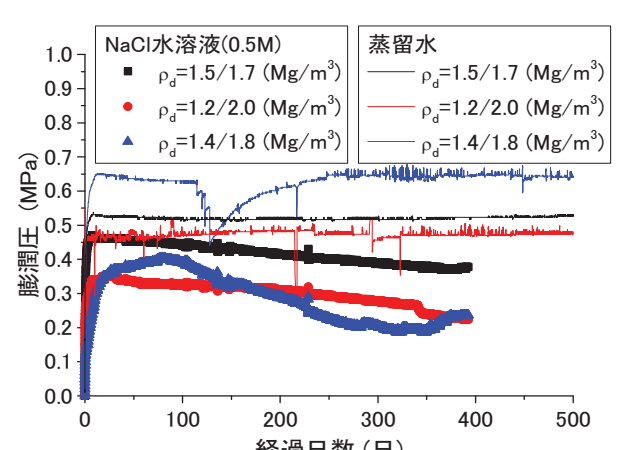
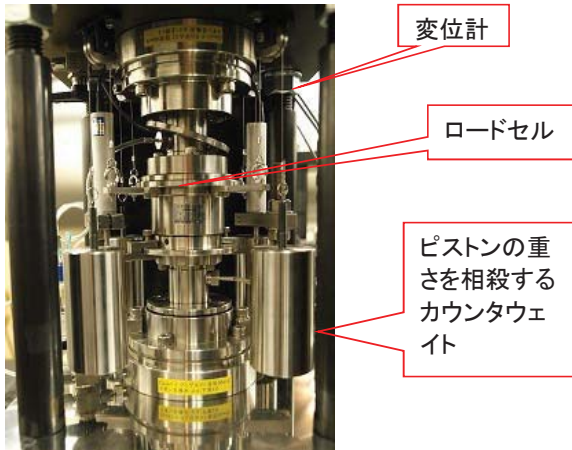
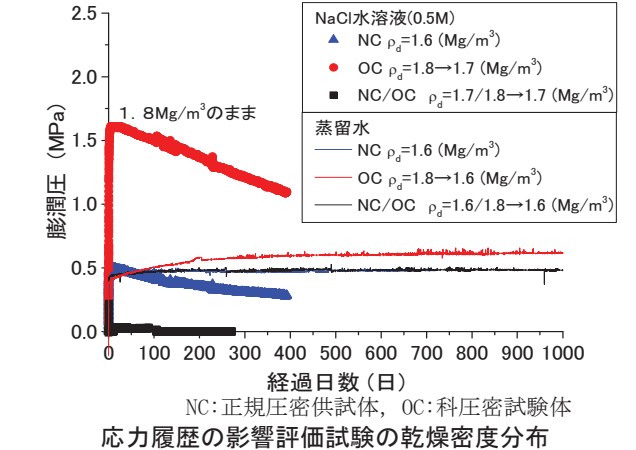
出典情報

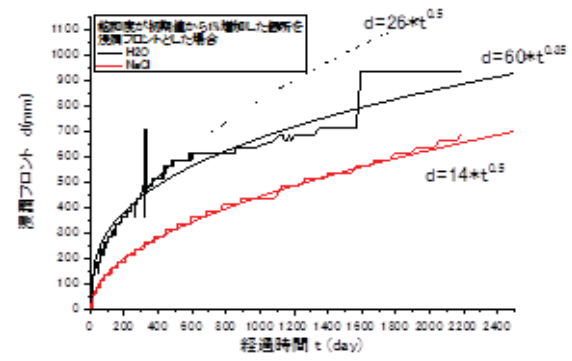
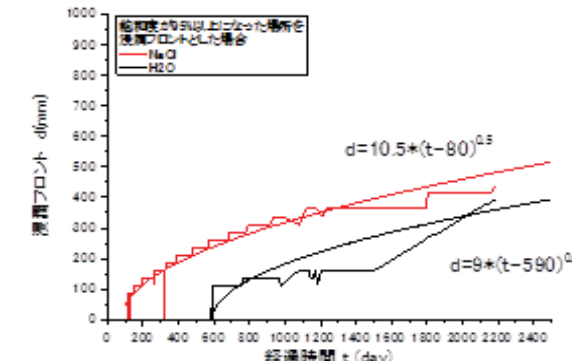
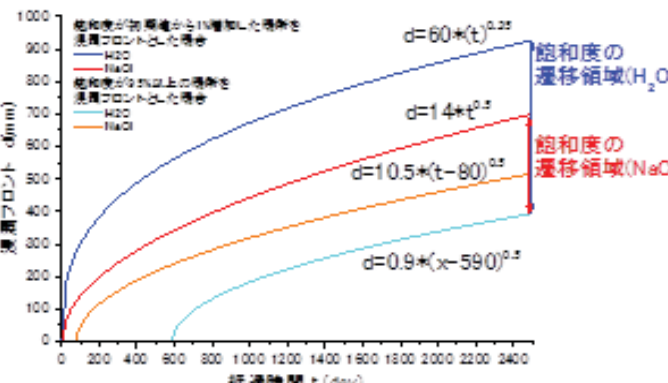
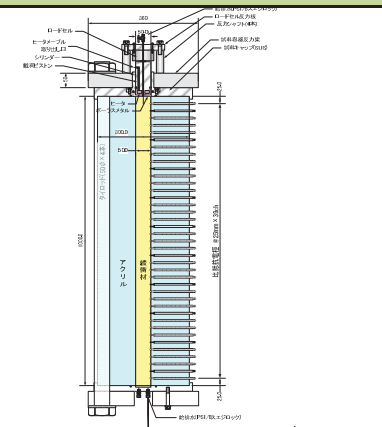
菊池広人、棚井憲治(2005): 幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験、JNC TN8430 2004-005.

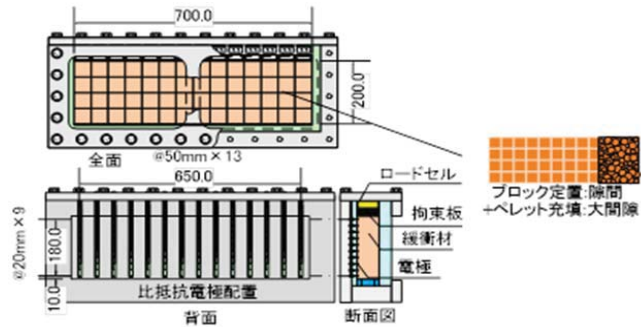

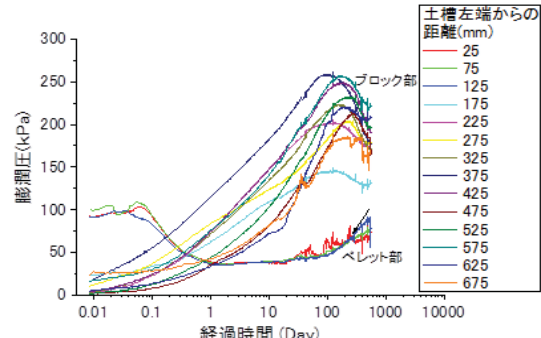
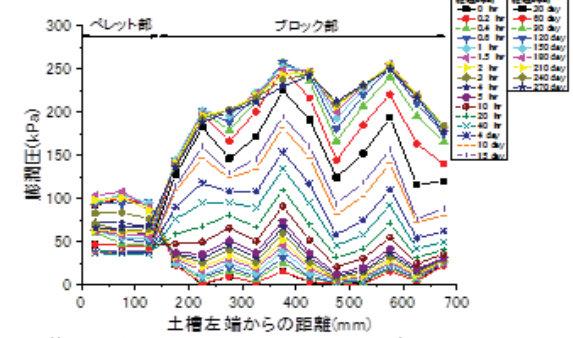
2年目から2年間: 蒸留水および海水系地下水条件下での膨潤変形に関するデータ取得。海水系地下水環境下における間隙圧係数B値に関する検討。海水系地下水を用いた長期圧密試験の開始。
 3年目から: 試験データ取得。必要に応じて試験条件の見直し。
 4年目: データとりまとめ。沿岸域での緩衝材の基本特性の評価。

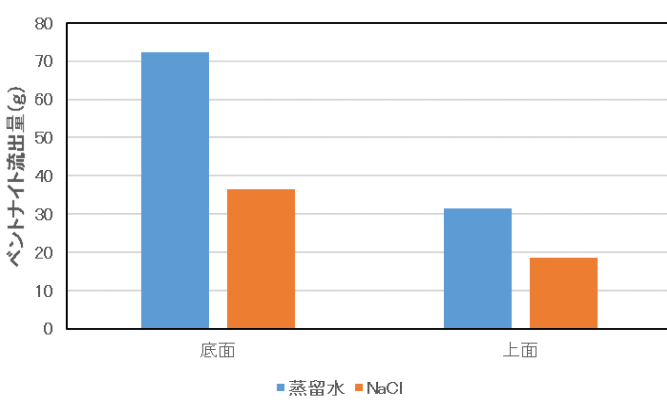
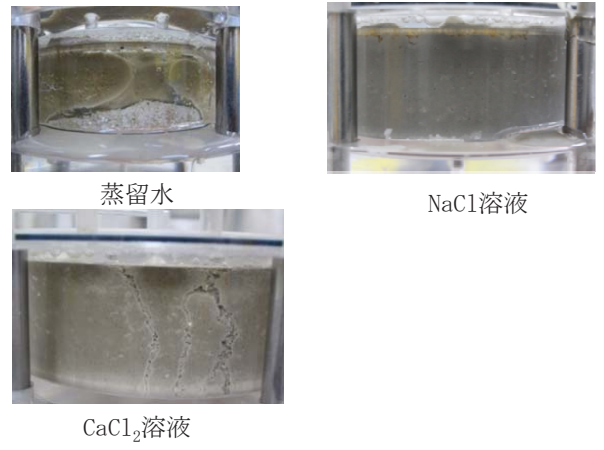
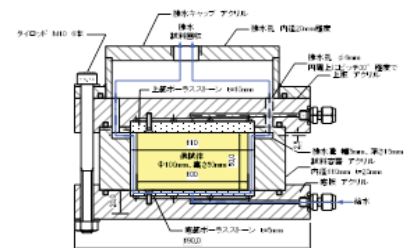
基本情報	シートNo.	Bf-02			参考データ・1	参考データ・2
	対象材料	緩衝材				
	対象分野	緩衝材の浸入/浸食特性				
	開発レベル	基礎物性	Labスケール			
	実施期間 (年度)					
	開発のキーワード	地下水組成	侵入現象	侵食現象		
試験条件						
実施事項	<ul style="list-style-type: none"> 幌延地下水や人工海水を用いた侵入試験 幌延地下水相当 (I=0.2 mol/L) ならびに人工海水相当 (I=0.64 mol/L) のNaCl 溶液を用いた浸食試験 			侵入試験における比例定数とイオン強度の関係(松本ほか、2005)	侵入距離と時間の関係(松本ほか、2011)	
実施内容	<ul style="list-style-type: none"> 蒸留水および海水系地下水の二つの水質環境における緩衝材の浸入試験を実施した。また、X線CTによって亀裂侵入部における密度分布に関するデータを取得した。 降水および海水系地下水の二つの水質環境における緩衝材の浸食試験を実施した。 					
現状の成果	上記の海水および蒸留水に対する緩衝材の浸入および浸食試験から、浸入および浸食ともに海水条件下で抑制されることを確認した。					
既往成果情報	<ul style="list-style-type: none"> 蒸留水・人工海水・幌延地下水を用いて侵入試験を実施した。その結果、人工海水・幌延地下水では、ベントナイトの亀裂中への侵入が、蒸留水の結果と比較し、著しく小さくなることが分かった。また、蒸留水・人工海水・幌延地下水の水質をイオン強度で整理し、比例係数(侵入距離(mm)と経過時間\sqrt{t} (hr^{1/2})の関係における直線の傾き)とイオン強度の関係を整理した(参考データ1)。その結果、ベントナイトの侵入挙動は、イオン強度が大きくなるほど侵入が抑制されることが分かった。(松本ほか、2004、2005) 侵入距離は\sqrt{t} に比例して増加していくが、試験条件によらず時間経過にともない進展が収束し、侵入現象は永久には継続しないことが示唆された。(参考データ2) (松本ほか、2011) 亀裂内に侵入したベントナイトの平均的な乾燥密度は、試験条件によっても違いがあるものの、0.4Mg/m³以下の乾燥密度となることを把握した。(松本ほか、2005、2008) 幌延地下水相当 (I=0.2 mol/L) ならびに人工海水相当 (I=0.64 mol/L) のNaCl 溶液を用いた浸食試験の結果、平均流速8×10^{-6} m/s で浸食コロイドは認められないことから、本条件下では、緩衝材を起源とするベントナイトコロイドが生成・移行しないことを概略的に把握した。海水系地下水条件下での臨界流速(浸食が発生する流速)の特定にはいたっていない。(松本ほか、2005) 			参考データ・3	参考データ・4	
課題	<ul style="list-style-type: none"> 海水系地下水条件下では侵入現象が抑制される傾向が得られているものの、侵入現象を評価できるモデルの構築まではいたっていない。 臨界流速に係わるデータの拡充を進める必要がある。 			全体試験計画		
				<ul style="list-style-type: none"> 蒸留水および海水系地下水条件下での侵入現象評価モデルの構築に向けた検討を行う。 海水系地下水条件下での浸食現象における臨界流速に係わるデータを拡充する。 		
出典情報				2年目から2年間：既往の知見の整理。浸食試験条件の検討。 3年目：侵入挙動のモデル化の検討。浸食試験の実施。 4年目：侵入挙動のモデル化の検討。浸食試験データのとりまとめ。		
	松本一浩、棚井憲治 (2004)：緩衝材の流出/侵入特性、JNC TN8400 2003-035。 松本一浩、棚井憲治 (2005)：緩衝材の流出/侵入特性(Ⅱ)、JNC TN8400 2004-026。 松本一浩、藤田朝雄 (2011)：緩衝材の流出/侵入特性(Ⅲ)、JAEA-Research 2011-014。					

基本情報	シートNo.	Bf-03			参考データ・1	参考データ・2												
	対象材料	緩衝材			 <p>均一化試験装置概略図 (原環センター, 2015) 接触させずにピストンを直列につなぎ、力のつり合いが取れる方向に変位する過程を計測した。</p>	<p>均一化試験供試体組み合わせ (原環センター, 2015)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Case1</th> <th>Case2</th> <th>Case3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>高密度(Mg/cm³)</td> <td>1.8</td> <td>2.0</td> <td>1.7</td> </tr> <tr> <td>低密度(Mg/cm³)</td> <td>1.4</td> <td>1.2</td> <td>1.5</td> </tr> </tbody> </table> <p>密度差のある供試体の組み合わせで試験を行った。</p>		Case1	Case2	Case3	高密度(Mg/cm ³)	1.8	2.0	1.7	低密度(Mg/cm ³)	1.4	1.2	1.5
		Case1	Case2	Case3														
	高密度(Mg/cm ³)	1.8	2.0	1.7														
低密度(Mg/cm ³)	1.4	1.2	1.5															
対象分野	緩衝材の密度																	
開発レベル	基礎物性	Labスケール																
実施期間(年度)	Phase2/H18~H24	Phase3/H25~																
開発のキーワード	密度分布	緩衝材膨潤量																
試験条件	地下水組成																	
実施事項	密度分布を有する緩衝材の膨潤量及び密度均質化へのイオン強度の影響を調査した。																	
実施内容	密度の異なる均質供試体の膨潤量試験機のピストンを直列に繋ぎ、ピストンの動きを計測することによって界面の膨潤量を計測する。またこの際の膨潤量及び各供試体の乾燥密度を測定し、密度が均一化挙動を確認した。																	
現状の成果	密度の異なる緩衝材は、力学的には完全に均一化せず、密度差が残留した状態で釣り合うことが示唆された。膨潤のために注水する液相を蒸留水とNaCl溶液とした場合の比較により、イオン強度が大きいほうが残留密度差が大きいことが明らかとなっている。試験は平衡状態が把握できるまで継続の予定。																	
既往成果情報	<p>ベントナイト系材料は、再冠水過程において膨潤し、初期に密度差があっても均質化する傾向がある程度見られるものの、最終的には密度差を残したままで膨潤変形が収束していることが示唆された。実際の処分場では、地下水にイオンが含まれるため、イオンによる均質化への影響を考慮する必要がある。</p> <p>本試験では、蒸留水及びNaCl溶液(イオン強度0.5 海水相当)を用い、緩衝材供試体の膨潤挙動と密度均質化挙動を取得した。試験装置【参考データ1】は高密度供試体と低密度供試体を直列で連結したものをを用いており、注水により緩衝材を膨潤させた。高密度供試体が膨潤することによって低密度供試体を圧縮することで、均質化が進行する【参考データ2】。</p> <p>力学理論に照らせば、この傾向は膨潤圧が釣り合うまで生じるはずである。この釣り合った時点におけるそれぞれの乾燥密度を取得し、密度差を取得する。</p> <p>本試験では、通水液として蒸留水とNaCl溶液を用いた場合の両者を比較することによって、膨潤挙動に対して、間隙水のイオン強度が及ぼす影響を評価した。いずれの高密度供試体と低密度供試体の組み合わせでも、NaCl溶液を通水させた方が残留密度差が大きい。【参考データ3】</p>																	
	 <p>緩衝材均質化試験結果(原環センター, 2015)</p> <p>いずれの高密度供試体及び低密度供試体の組み合わせでも、NaCl溶液を通水させた方が残留密度差が大きかった。</p>																	
課題	<p>・既往の試験では、蒸留水と対比して、NaCl水溶液イオン強度0.5の試験を行っている。塩水環境を考えた場合、イオン強度の影響、並びに組成による残留密度差への影響の把握が必要である。特に、Ca、Mg、Kなど含んだ溶液の場合は、浸潤と同時にイオン交換反応が進行することが予想され、また、膨潤挙動もイオン強度によって影響を受けることが知られているため、密度の均質化に対して、溶液組成が影響を及ぼす可能性が大きい。そのため、密度均質化への影響を把握することが必要である。</p>																	
	<p style="text-align: center;">全体試験計画</p> <p>密度の均一化についての試験は、NaCl溶液での試験は行っているものの、溶存イオン種の影響については確認されていない。イオン交換により影響を受ける可能性もあるため、Ca、K、Mgなどの影響についても確認することが必要である。比較のために、既往の試験を踏襲した条件での試験が望ましい。</p> <p>試験の条件としては、以下の溶液での試験を実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CaCl₂による密度均質化試験 ・KClによる密度均質化試験 ・MgCl₂による密度均質化試験 ・NaCl0.25Mによる密度均質化試験 <p>これらの試験を行うことにより、海水系地下水の主成分の影響を把握でき、多様な地下水組成の影響を評価できると考える。</p>																	
出典情報	<p>・(公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成26年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書(第2分冊) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築—緩衝材</p> <p>密度均質化の試験は、力学的に完全に釣り合うまで実施すると時間のかかる試験であり、蒸留水による試験は2500日を超える試験を継続中である。しかし、その傾向が長期試験により得られているため、試験期間は100~200日とすることにより、結果の評価ができると考えられる。3年間の期間の中で、試験を実施し、その結果により多様な塩水に対する評価をするためのパラメータを得る。</p>																	

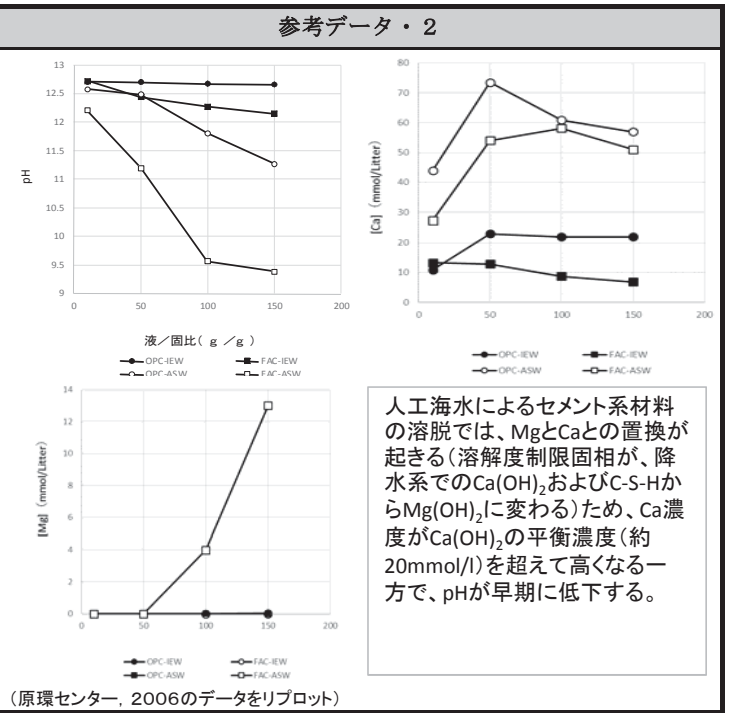
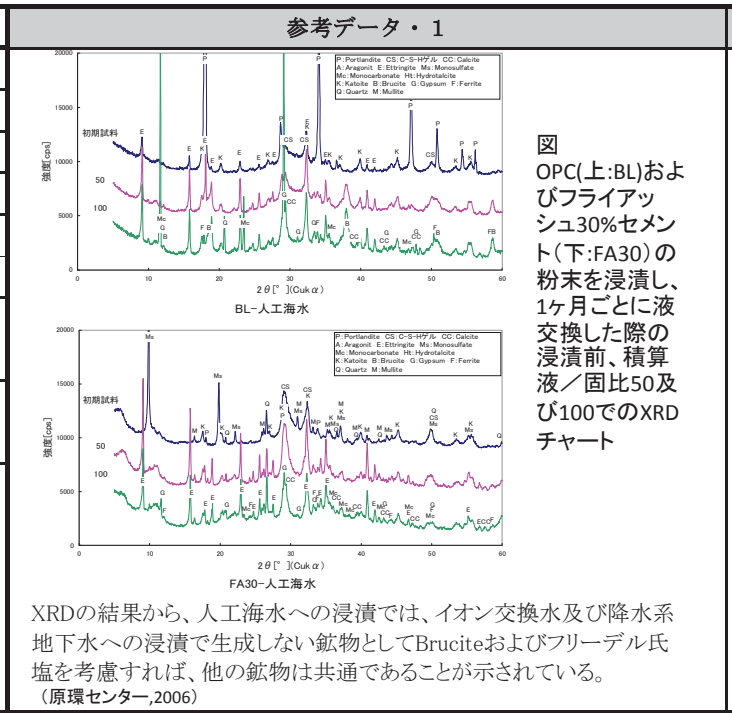
基本情報	シートNo.	Bf-04	参考データ・1	参考データ・2	
	対象材料	緩衝材	 <p>膨潤圧測定結果 (原環センター、2015)</p> <p>蒸留水とNaCl水溶液を通水した緩衝材の膨潤圧を比較すると、常にNaCl水溶液を通水した緩衝材の膨潤圧が低い。</p>	 <p>膨潤圧測定のための装置 (原環センター、2015)</p>	
	対象分野	膨潤圧			
	開発レベル	基礎物性			Labスケール
	実施期間(年度)	Phase2/H18~H24			Phase3/H25~
開発のキーワード	ペントナイト	膨潤圧			
試験条件	地下水組成				
実施事項	緩衝材膨潤圧に対するイオン強度の影響を密度均質化試験の実施と同時進行で取得した。				
実施内容	密度の異なる均質供試体の膨潤量試験機のピストンを直列に繋ぎ、緩衝材を膨潤させた。その際、異なる密度の供試体に挟まれたロードセルは、膨潤圧が釣り合うまでは常に低乾燥密度の膨潤圧を計測する。ここでは、蒸留水とNaCl(0.5M、海水相当)を使用し、それぞれの溶液に対する膨潤圧を計測した。				
現状の成果	試験の結果、イオン強度が大きいほど、緩衝材の膨潤圧が低いことが明らかとなった。				
既往成果情報	<p>ペントナイトの膨潤圧は、接触するオーバーバック及び埋め戻し材などの設計を行う上で重要なパラメータとなる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・蒸留水と、NaCl溶液(0.5M、海水相当)緩衝材の膨潤圧の計測を行った。 <p>装置は残留密度差を測定した際と同じ試験装置である。この装置を用いて、残留密度差と並行して膨潤圧を計測した。膨潤圧の計測結果からは、蒸留水に比べ、NaCl溶液を通水したケースの方が、緩衝材は低い膨潤圧を示した。【参考資料1】この結果は、既往の研究でもデータが多くみられ、整合した結果である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材に対する応力履歴が異なった場合には、必ずしも乾燥密度に対して膨潤圧が一意に決まるとは限らないと考えられる。乾燥密度が同じであるが、膨潤による応力履歴が異なる供試体を直列に繋いだ膨潤量試験を実施した。1つは正規圧密供試体であり、乾燥密度1.6Mg/m³に静的に締固めた後に体積拘束条件で飽和したものであり、もう一方は乾燥密度1.8Mg/m³に静的に締固めた後に乾燥密度1.6Mg/m³まで膨潤させながら飽和した過圧密供試体である。蒸留水とNaCl水溶液(イオン強度0.5)を使用し、両供試体の飽和後の乾燥密度が同じになったところでピストンを繋いで、直列の膨潤量試験を行った。平衡状態に達するまでの時間は、蒸留水のケースよりもNaCl水溶液のケースの方が短かった。また、NaClの正規圧密供試体単体の膨潤圧は、給水開始から単調減少傾向を示し蒸留水のケースより小さくなっている。これは、間隙水のイオン強度が膨潤圧に及ぼす影響によるものと考えられる。 		参考データ・3	参考データ・4	
	 <p>膨潤圧測定結果 (原環センター、2015)</p> <p>膨潤圧が異なる。NaCl₂溶液の場合、平衡に達するまでの時間が短く、膨潤圧は小さくなった。</p>		<p>全体試験計画</p> <p>密度均一化試験と同時に計測ができるため、データ取得は均一化試験を実施することにより取得することができる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CaCl₂による密度均質化試験 ・KClによる密度均質化試験 ・MgCl₂による密度均質化試験 ・NaCl-0.25Mによる密度均質化試験 <p>これらの試験を行うことにより、海水系地下水の主成分の影響を系統的に把握でき、多様な地下水組成の影響を評価できると考える。</p>		
課題	<p>・既往の試験では、蒸留水との対比として、NaCl水溶液イオン強度0.5の試験を行っている。ここで示した試験系以外で人工海水での試験例はあるが、蒸留水との比較で明確な傾向は見出されていない。これは試験条件が統一されていないことによることも考えられ、塩水環境を考えた場合、イオン強度の影響、並びに組成による膨潤挙動への影響を系統的に把握することが必要と考えられる。特に、Ca、Mg、Kなど含んだ溶液の場合は、浸潤と同時にイオン交換反応が進行することが予想される。現在、Ca型化の影響については、基盤事業で実施している他の試験で検討しているが、その他のイオン交換による化学変質による膨潤挙動に対する影響は実験的に得ることができていない。</p>				
出典情報	<p>・(公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成26年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書(第2分冊) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築—緩衝材</p> <p>密度均一化試験により、膨潤圧も取得する。膨潤圧が一定になるためには、参考データ1によれば100~400日の期間が想定されるが、安定したデータを得る試験方法についての知見も得られているため、各イオン種からの影響の評価に反映できる傾向は200日程度の期間で得られると考えられる。3年間の中で試験を実施する。</p>				

基本情報	シートNo.	Bf-05	参考データ・1 	参考データ・2 	
	対象材料	緩衝材			
	対象分野	地下水浸潤速度			
	開発レベル	基礎物性			Labスケール
	実施期間(年度)	Phase2/H19~H24			Phase3/H25~
	開発のキーワード	ベントナイト			地下水組成
試験条件	地下水組成				
実施事項	一次元が成り立つと考えられる簡単な境界条件における水と海水相当のイオン強度のNaCl水溶液(0.5M)が緩衝材に浸潤する際の浸潤フロントの移動速度の取得				
実施内容	長さ1000mm、直径50mmの緩衝材供試体に対し、底面より溶液を浸潤させた。浸潤させた液種は、蒸留水及び塩水(NaCl水溶液イオン強度0.5)である。				
現状の成果	飽和度1%の上昇を浸潤フロントとした場合、NaCl溶液に比べ、蒸留水の方が浸潤速度が速く、飽和途上の分布(遷移領域)が長いことがわかった。しかし、1m厚さの緩衝材が飽和度95%以上になるには、蒸留水で78年、NaCl水溶液で21年を要することが試験結果より予想され、速度は逆転している。これは、この試験系では溶液は、毛細管現象により緩衝材へ浸潤するのに対し、NaCl溶液の場合は緩衝材が凝集し、毛細管現象に寄与する空隙を塞ぐため、蒸留水との差異が生じているものと考えられる。				
既往成果情報	放射性廃棄物処分施設の再冠水期間中にその緩衝材に発生する事象について解析的に検討する場合、緩衝材中の浸潤面の移動や飽和度変化などが重要なパラメータとなる。本試験では、蒸留水とNaCl溶液を通水液として使用し、溶液ごとの地下水浸潤フロント(不飽和領域と飽和領域の境界線)を取得した。結果として以下ようなことが得られた。 (1) 飽和度1%に達した浸潤面を浸潤フロントと定義した場合、NaCl溶液よりも蒸留水のケースの方が浸潤フロントの進展が速い。 【参考データ1】 (2) 飽和度95%に達した浸潤面を浸潤フロントと定義した場合、蒸留水よりもNaCl溶液の方が浸潤フロントの進展が速い。【参考データ2】 (3) 飽和度が初期値から1%増加した地点から飽和度が95%を超える地点を飽和度の遷移領域とすると、飽和度の遷移領域はNaClの方が短く、蒸留水の方が長いことが示された。このため、給水した際に、NaClの方が高飽和度領域が供試体下部にある厚さで存在することになる。蒸留水を給水した場合には、供給水が供試体上部に吸い上げられるために遷移領域が長くなり、高飽和度領域の厚さは小さくなる。【参考データ3】 以上のような現象は、浸潤が毛細管現象によって、起こっていると考えると、イオン強度が高い場合には、緩衝材中のベントナイトが凝集するために、毛細管現象が妨げられるために浸潤フロントの進展が遅いという説明ができる。浸潤フロントが遅いため、飽和度の進展領域が狭くなる。しかし、通水された溶液は、通水口から近いところから溜まっていくため、飽和度95%となるフロントの進展はイオン強度のある溶液を通水した場合の方が早くなる。 (4) 浸潤速度が拡散方程式の解が時間の平方根に比例することに概ね整合する結果を取得することができた。				
	参考データ・3 	参考データ・4 			
課題	・浸潤溶液組成の影響 イオン強度が高くなることによって、浸潤速度は変化することが明らかとなったが、Na型のベントナイトを使った場合、Ca, Mg, Kなどのイオン交換する成分が浸潤する溶液に含まれている場合には、浸潤と同時にイオン交換反応が進行すると考えられるため、浸潤速度も影響を受けると考えられる。試験によって確認することが必要である。 ・膨潤変形を伴う浸潤速度の取得。 実際の処分場環境での緩衝材への地下水浸潤は、緩衝材の膨潤変形も伴っているものと考えられる。この膨潤変形に伴って緩衝材の浸潤領域の乾燥密度は低下するため、前述のような乾燥密度一定条件下での浸潤状況とは異なることが予想される。緩衝材の流出現象が懸念されるような条件では緩衝材の周辺には隙間が存在し、その隙間を緩衝材がシール(膨潤)する過程で流出現象が発生する。この流出現象は、湧水量に比べて湧水が緩衝材に浸潤する速度が小さい場合に発生するものと考えられるため、このような膨潤変形条件下での浸潤速度取得も重要であると考えられる。				
	全体試験計画 浸潤速度は、再冠水時の水理・力学的挙動のモデル化並びに膨潤性鉱物の不飽和浸潤解析のパラメータとして用いる。蒸留水及びNaCl溶液での密度一定条件の一軸浸潤試験を実施しているが、沿岸域での緩衝材再冠水挙動の評価のためには、沿岸域で予想される地下水組成に即した浸潤速度を適用することが必要である。そのため、以下のような試験により、浸潤速度を取得する。 ・人工海水による浸潤速度取得試験 ・イオン強度0.25M(海水の1/2程度)による浸潤速度取得試験				
出典情報	(公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成26年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書(第2分冊)人工バリア品質/健全性評価手法の構築—緩衝材 浸潤速度の取得には長期にわたる試験が必要である。しかしながら、これまでの知見をもとに、必要な供試体の大きさ等を決めることができ、また、透水係数も同時に測定するなどの試験装置の設計が可能である。そうした考慮をしても1年以上の試験期間が想定されるため、本試験は2年目に着手し、2年程度の長期試験を行う。				

基本情報	シートNo.	Bf-06	参考データ・1 	参考データ・2 	
	対象材料	緩衝材			
	対象分野	浸潤挙動			
	開発レベル	基礎物性			Labスケール
実施期間(年度)	Phase2/H18~H24	Phase3/H26~			
開発のキーワード	緩衝材	緩衝材ブロック	ペレット		
試験条件	地下水組成				
実施事項	緩衝材ブロック+ペレット充填した場合の地下水の二次元浸潤挙動の把握				
実施内容	ブロックとペレットを用いて土槽内に密度を付けた状態で供試体に溶液を通水させ、浸潤挙動を把握した。浸潤させた溶液は蒸留水であるが、NaCl溶液の試験ケースについても結果を実施中である。				
現状の成果	蒸留水を二次元を模した土槽に通水した結果、下記の成果を得ることができた。 ・ベントナイトペレットがその場で球形を保ったまま膨潤した。 ・膨潤がある程度進むと、膨潤したペレットが水の流れをせき止め、水が供給されないペレット部が形成される。 ・通水した当初、相対的に密度の高いブロック部の膨潤圧が高いが、時間が経過すると、ペレット部をブロック部が押しはじめ、ペレット部の膨潤圧が大きくなる一方で、ブロック部の膨潤圧が低下する。 ・ブロック部、ペレット部共に、通水後は均等な膨潤圧分布になる傾向を示している。 ・別途試験においては、ブロックはイオン強度のある溶液中では一旦崩れ、下部に沈殿しながら浸潤し、膨潤することが観察された。そのため、二次元の試験では蒸留水とは異なる膨潤挙動を示すことが推測される。			蒸留水を通水した場合のベントナイトブロックペレット ペレット部分は、球形を保ったままその場で膨潤した。	
既往成果情報	実際の緩衝材の施工では、施工に伴う密度分布が生じる可能性があり、生じた密度分布がその後の膨潤によりどのように変化するかを把握することは、施工の基準を決める上でも重要な知見である。 緩衝材ブロックとペレットを用いて密度差をつけた幅700mm、奥行き150mm、高さ200mmの緩衝材供試体を作製した。【参考データ1】この供試体の底面より溶液を通水させ、緩衝材ブロックとペレット近傍の浸潤挙動、および膨潤後の密度分布を測定した。飽和度の上昇は供試体背面に設置した電極による比抵抗によって、測定した。比抵抗と飽和度の関係は予め既知の飽和度のベントナイトを用いて取得した。試験は蒸留水によるケースで実施しており、以下の結果が得られている。 (1) 蒸留水を通水した場合、ペレット部分はその場で膨潤した。【参考データ2】 (2) ある程度ペレット部分の膨潤が進むと、蒸留水のケースでは、ペレットの膨潤により水を通さなくなり、供試体の上方に空隙が発生した。 (3) 通水した当初、相対的に密度の高いブロック部の膨潤圧が高いが、時間が経過するとペレット部の膨潤圧が大きくなる一方で、ブロック部の膨潤圧が低下する傾向を示した。これは、ブロック部が膨張することにより、ペレット部が圧縮された結果であると考えられる。【参考データ3】 (4) ブロック部及びペレット部ともに通水時間が経過するとともに膨潤圧が低下した。今後、給水を続けると均等な膨潤圧分布を示すものと予想される。【参考データ4】			参考データ・3 	参考データ・4 
	ブロック部とペレット部の膨潤圧の経時変化 (原環センター, 2015) ブロック部の膨潤圧はペレット部よりも大きい。膨潤が進むと、ブロック部の膨潤圧が低下する一方で、ペレット部は減少した。これは、ブロック部が相対的に密度の低いペレット部を圧縮した結果によるものと考えられる。			蒸留水を通水した場合の膨潤圧の変遷 (原環センター, 2015) ペレット部(土槽左端150mm程度までの距離)では、通水開始1.5時間後、膨潤圧が減少傾向にある。ブロック部(左端150mm以上の部分)は、膨潤圧が高い部分(350mm、575mm付近)で膨潤圧が減少傾向にあり、ペレット部と同様、均等な膨潤圧分布に近づいている。	
課題	・既往の試験では、蒸留水のみを通水したケースのみ実施している。沿岸域の塩水環境を考えた場合には、予想される地下水組成から、イオン強度の影響、溶存成分による浸潤速度への影響の把握が必要である。特に、Ca、Mg、Kなど含んだ溶液の場合は、浸潤と同時にイオン交換反応が進行することが予想されるため、。			全体試験計画 イオン交換による化学変質による膨潤挙動への影響に関して、二次元での試験によって浸潤過程を計測すること、あるいは膨潤後の密度分布を測定することにより、イオン強度の緩衝材膨潤に対する挙動を観察することが可能であると考えられる。これまでに、NaCl溶液を一次的に通水した試験を実施し、蒸留水とNaCl溶液の浸潤速度、流出現象については結果を取得できているため、本試験系で二次元でのNaCl溶液膨潤挙動を得ることにより、イオン強度の膨潤挙動への影響を検討することができると考えられる。本試験系で二次元の挙動評価を行うことにより、溶液組成の影響が顕著に表れ、塩水環境下での緩衝材の基礎特性を明確にできると考えられる。小型試験等で影響が明らかになった成分を添加した以下のような試験を行う。 ・イオン強度が0.25M付近での二次元浸潤試験(海水の1/2相当、実施中の海水相当の試験と対比) ・Caイオンの密度分布への影響試験 ・Kイオン等の密度分布への影響試験	
	出典情報	(公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成26年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書(第2分冊)人工バリア品質/健全性評価手法の構築-緩衝材 本試験は数か月の通水により二次元の飽和過程を継続的に測定する。また、飽和後解体し、密度分布、含水率等を測定する。3年間の期間中に、3~4ケースの試験を実施する。			

基本情報	シートNo.	Bf-07			参考データ・1	参考データ・2				
	対象材料	緩衝材			 <p>ベントナイト流出量 (原環センター, 2015)</p>	 <p>水みちの形態 (原環センター, 2015)</p>				
	対象分野	緩衝材流出								
	開発レベル	基礎物性	Labスケール							
	実施期間 (年度)	Phase2/H18~H24	Phase3/H25~							
開発のキーワード	緩衝材流出	イオン強度	Ca型化							
試験条件	地下水組成									
実施事項	溶液種による緩衝材の流出現象への影響を評価									
実施内容	ケイ砂30%混合Na型ベントナイト試験体に蒸留水、NaCl、CaCl ₂ 水溶液を通水し、緩衝材側面に発生した水みちの形態の観察し、溶液種による緩衝材流出現象への影響を把握した。									
現状の成果	<p>試験結果より、下記の結果を得ることができた。</p> <p>①イオン強度の影響 イオン強度が大きくなると、蒸留水の場合に比べて水みちからのベントナイトの流出量が減少する傾向が確認された。【参考データ3】</p> <p>②Ca型化の影響 Ca型化の影響により緩衝材の膨潤性能が低下するため、水みちをシールすることが難しくなる傾向が確認された。</p>									
既往成果情報	<p>再冠水時には、膨潤のため低密度になった緩衝材に水みちができることにより自己シール出来ない状態で流出現象が継続する可能性がある。一旦、水みちが生じると、緩衝材がその性能を損ねる程の量が流出することが懸念される。生じた水みちは、蒸留水では発生当初は多数存在しても、時間が経過すると共に数本に収斂し、最終的には1つの大きな水みちになる傾向が観察された。</p> <p>本研究では、蒸留水、NaCl溶液及びCaCl₂溶液を用いて、ベントナイト流出量の計測した。また、イオン強度及びCa型化が流出現象に与える影響を水みちの形態の比較により検討した。</p> <p>試験は、直径100mm、高さ50mmの緩衝材供試体をアクリルセル【参考データ4】の中に入れ、各溶液を0.1L/minの流量で注水することによって行った。その結果得られた知見は以下の通りである。</p> <p>(1)セルからの排出される液中のベントナイト量の定量結果から、蒸留水を通水した場合よりNaCl溶液を通水した場合の方がベントナイト量が少ない傾向があることが分かった。【参考データ1】</p> <p>(2)水みちの形態の比較では、蒸留水とNaClは共に1本の水みちに収束したのに対し、CaCl₂溶液を通水させた場合は、水みちが収斂せず、複数の水みちが残った。【参考データ2】</p> <p>(3)総流量と緩衝材流出量の関係を見ると、塩水を通水した場合には初期には流量に対しての緩衝材流出量が多いが、流量が多くなると緩衝材流出が抑制された。【参考データ3】</p> <p>以上の結果から、緩衝材の流出には溶液組成が影響することは明らかであり、流出現象が水圧と緩衝材の膨潤圧の関係により生じるという知見もあることから、膨潤圧に影響を及ぼす塩水は、緩衝材流出現象に影響すると考えられる。</p>				参考データ・3	参考データ・4				
	 <p>総流量と緩衝材流出量の関係 (原環センター, 2015)</p> <p>Na型ベントナイト (クニゲルV1) による試験では、緩衝材流出量は塩水を通水した時には、当初は流出量が多いものの、流量が多くなると緩衝材流出が抑制された。</p>				 <p>通水セル概略図 (原環センター, 2015)</p>					
課題	<p>緩衝材の水みちの形成は、水みち近傍の膨潤圧と水圧の関係で生じると考えられる。そのため塩水環境下で緩衝材の流出挙動を考える際にはイオン強度の影響、並びに組成による緩衝材の膨潤圧への影響の把握が必要であると考えられる。既往の試験では蒸留水との対比として、NaCl水溶液、CaCl₂水溶液イオン強度0.5Mの試験のみ実施している。しかし、沿岸域での地下水組成を考慮すれば、海水中に含まれるその他のイオンについて今後検討する必要があると考えられる。例えば、Mg、Kなど含んだ溶液の場合は、浸潤と同時にイオン交換反応が進行することが予想されるため、イオン交換による化学変質によって緩衝材の膨潤圧などが変化すると考えられる。</p>					<p>全体試験計画</p> <p>これまでに蒸留水及びNaCl水溶液を通水した場合の緩衝材流出に関するデータがスケール効果も含め、緩衝材流出に関するデータが取得されている。そのため、塩水環境を考慮して溶液組成の影響に関しての試験は、小型セルでの試験を行うことにより、その影響を評価することができると思われる。</p> <p>以下のような試験を行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> 溶液組成の影響；K, Mg, 混合系等 イオン強度の影響；塩水1/2、塩水1.5倍等 				
	出典情報	(公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成26年度 地層処分技術調査等事				<p>試験は、沿岸域で想定すべき地下水組成の調査に基づき、組成の影響が評価できるよう、試験条件を定めて行う。年度毎に2~3ケースの試験を行う。</p>				

基本情報	シートNo.	Cm-01		
	対象材料	セメント系材料（支保、構造躯体および充填材）		
	対象分野	化学変質		
	開発レベル	基礎物性	Labスケール	
	実施期間（年度）	Phase1/H12～H17	Phase2/H18～H24	Phase3/H25～
	開発のキーワード	溶脱モデル		
	試験条件	地下水組成		
実施事項	・海水系地下水でのセメント変質を再現できる変質モデルの検討（溶解試験結果の解析での再現）			
実施内容	イオン交換水、FRHP模擬地下水及び人工海水（アクアマリン）を用いて溶解試験を実施し、その結果を再現できる溶脱変質モデルを構築した。			
現状の成果	海水成分のうち、マグネシウムおよび塩素を含む鉱物として、ブルーサイト、ハイドロタルサイト、フリーデル氏塩などを考慮することで、溶解試験の結果を再現することができるが示されている。また、ケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)のカルシウムがマグネシウムによって置換されたM-S-Hを考慮できる熱力学モデルも開発されつつある。			



降水系地下水と比較して影響が大きい化学種としてMg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻を考慮する必要がある。普通セメント（OPC）、フライアッシュセメント（FAC）、高炉セメント（BFSC）及びシリカセメントについて粉末を浸漬し、各液/固比でpHの変化がなくなった後に固液を分離し、それぞれの分析を行った。

(1) 固相のXRDでは、イオン交換水及び降水系模擬地下水で確認されなかった鉱物としてMg(OH)₂（Brucite）、Katoite及びフリーデル氏塩とが観察された[参考データ1]。

(2) 液相の分析結果からは、人工海水では比較的低液/固比からpHが11以下まで低下することが示された[参考データ2]。

(3) この浸漬試験の結果を再現するためのセメント系材料の溶解変質モデルについて検討し、まず、溶解変質を再現するための初期の水和物組成の設定について、初期水合鉱物の分析結果及び溶解試験での固相分析の結果を基にAtkinsの水和物モデルをモディファイすることで混合セメントについても設定できることを示した[参考データ3]。次に溶解変質過程で考慮する2次鉱物について、上記XRDの結果および液相の化学組成を再現するための設定（鉱物種の選定）を検討し、MgによるCaの置換（Mg(OH)₂の析出）、Mgとの置換で放出されたCaのAFtとしての固定（混合セメント等で間隙水へのアルミニウムの供給がある場合）およびAFtのSO₄²⁻のCl⁻による置換（フリーデル氏塩の析出）を考慮することで、変質現象を再現できることが示された[参考データ4]。

(4) 海水成分の影響としては、土木学会がまとめており（土木学会, 2003）、ブルーサイト及びアラゴナイトによる物質移動の抑制、塩化物イオンの浸透によるフリーデル氏塩の析出、硫酸イオンの供給によるエトリングタイトの生成、M-S-Hの生成による結合成分の分解等があげられている。このうちセメント系材料の性能に大きな影響を及ぼすのは、マグネシウムによる置換（M-S-Hの生成）といわれている。

参考データ・3

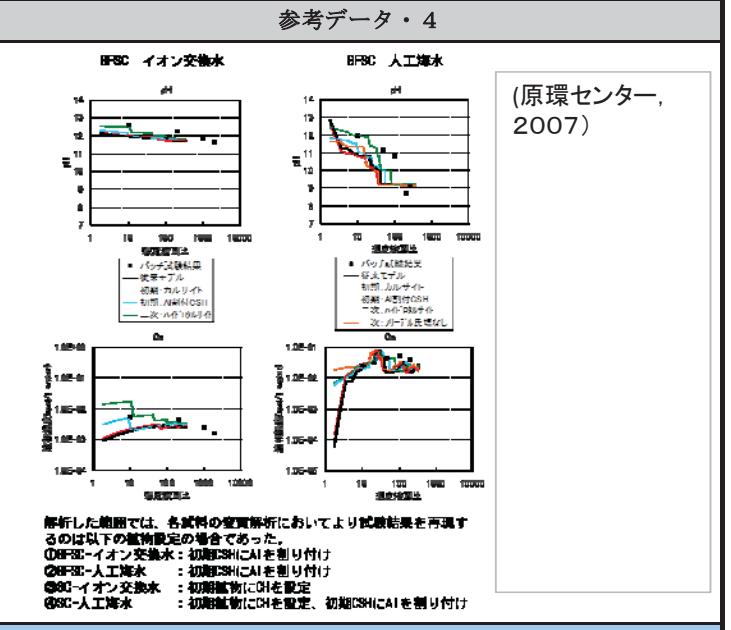
表 3.1.1-23 粉末X線回折測定による出発試料の鉱物相の同定結果

	BL	FA15	FA30	FB15	FB30
E	○	×	×	○	○
A	×	○	○	○	○
F	△	△	△	△	△
K	○	○	○	○	○
P	○	○	△	○	△
●	○	○	○	○	○
B	×	×	×	×	×
C	×	×	×	×	×
M	×	○	○	○	○
Q	×	○	○	○	○

○：X線回折ピークが明確に確認できたもの
 △：X線回折ピークがわずかに確認できたもの
 ×：X線回折ピークが明確には確認できなかったもの
 E：Etringite (3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂O)
 A：Monosulfate (3CaO·Al₂O₃·CaSO₄·12H₂O)
 F：フェライト相 (4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃ 未水和セメント鉱物)
 K：Katoite (3CaO·Al₂O₃·SiO₂·4H₂O)
 P：Portlandite (Ca(OH)₂)
 ●：C-S-H ゲル (xCaO·ySiO₂·zH₂O)
 B：Belite (B-2CaO·SiO₂ 未水和セメント鉱物)
 C：Calcite (CaCO₃)
 M：Mullite (3Al₂O₃·2SiO₂)
 Q：Quartz (SiO₂)

（原環センター,2006）

溶脱変質のモデル化のための初期の鉱物相のデータとして、各混合セメントの水和生成物についてXRD分析を実施し、未水和成分を除けば、定義すべき鉱物はOPCと同等の組み合わせで良いことを示した。また、初期の鉱物の存在割合はAtkinsの固相の設定方法のうち、アルミニウムの帰属を変更（必要以上に多くのAFtを仮定しない）することで、混合セメントにも適用できることを示した。



課題

海水系および降水系の化学モデルの適用範囲の確認（主にTRU）
 化学解析モデルの検討に用いられる海水系の模擬地下水には、サイト条件が決まらない段階では幅が広すぎるために人工海水（アクアマリン等・・・ASTMのものではない）が広く使われている。従って、多くのデータは海水濃度で取得されたものである。海水系と降水系とでデータセットを変えるまたは考慮する鉱物種を変える場合、その閾値を考慮しておく必要がある。溶脱変質の過程でMgとCaとの置換が起こるため、海水系地下水での長期変質を解析によって再現するためには、置換の結果生じるM-S-Hの溶脱特性に関するデータ及び熱力学データの取得が必要である。

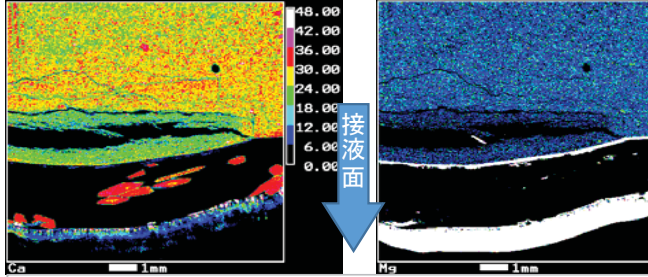
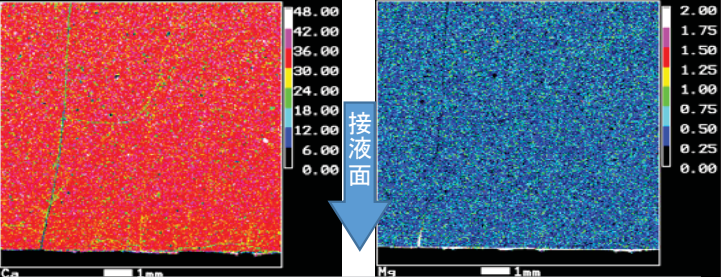
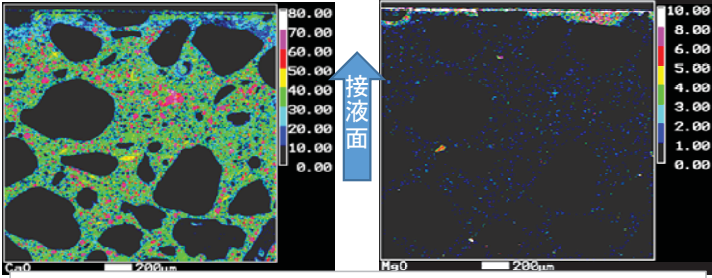
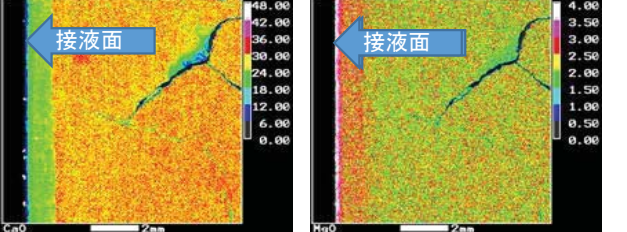
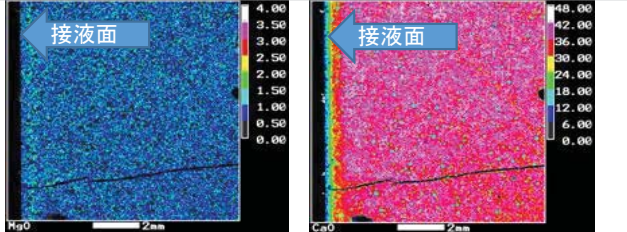
全体試験計画

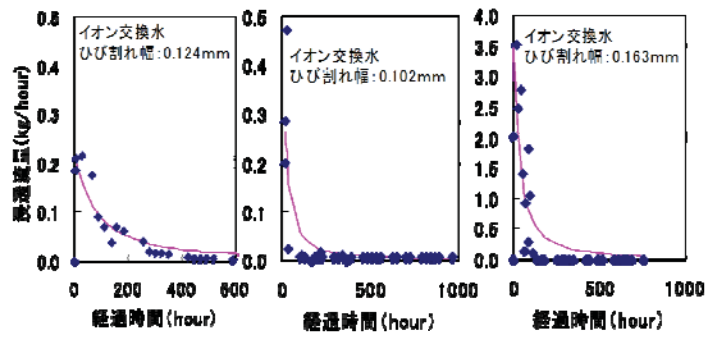
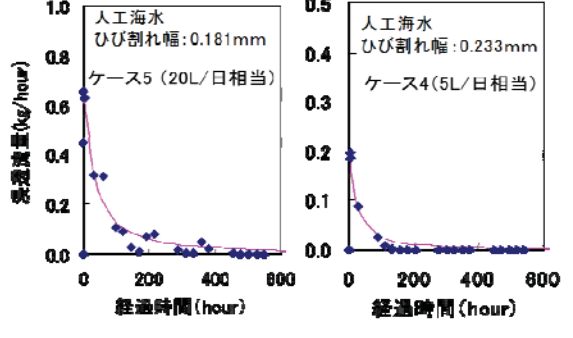
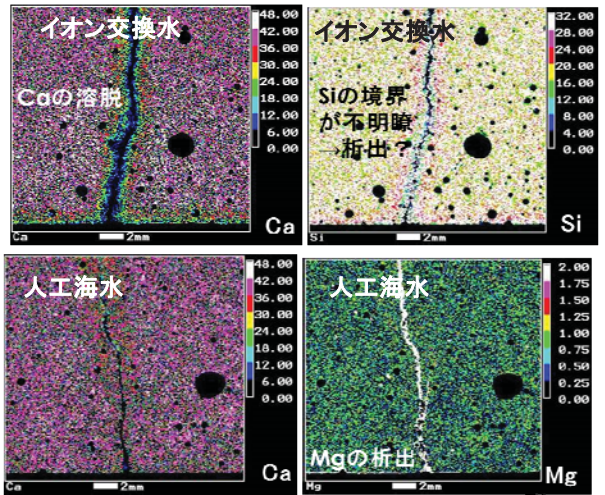
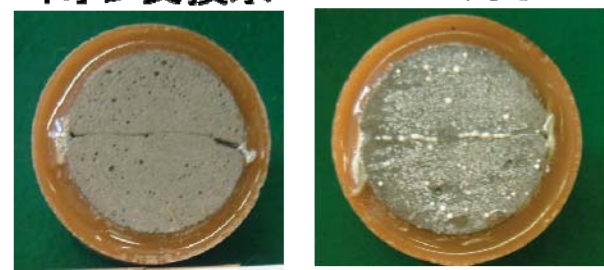
【計画の概要説明】
 すでに人工海水を用いたデータ取得は実施されているが、解析に用いるデータセットが海水系と降水系とで異なるため、その適用範囲を確認するために、濃度をパラメータとした変質試験を実施する必要がある。また、マグネシウムやアルミニウムでのカルシウム置換による、M-S-HやC-A-S-Hの生成のセメント系材料の諸特性への影響が大きいことから、これらの生成に係る熱力学データ（これまでに整備されていない）の整備が重要である。
 そこで、平成27年度に抽出した課題をもとに、以下の各項目を実施する。
 (1) 平成27年度に抽出した左記課題を解決するための詳細試験計画を平成28年度上期を目処に策定する。
 (2) 地下水中の海水成分濃度をパラメータとした溶脱変質挙動の把握
 (3) M-S-HおよびC-A-S-Hの熱力学データの整備
 (4) 上記(2)および(3)の成果のとりまとめ

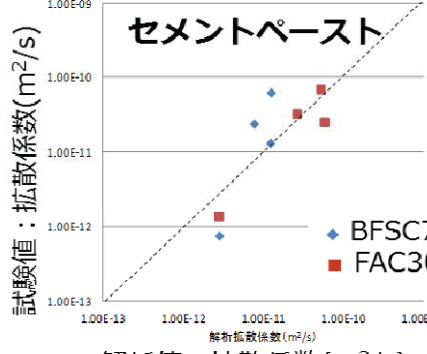
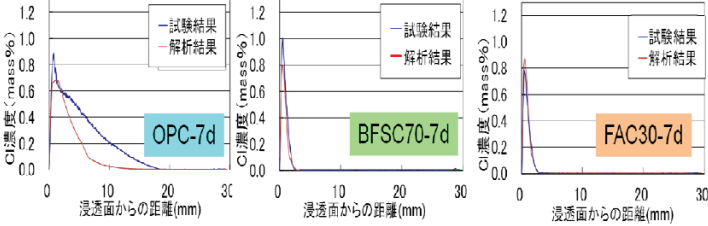
出典情報

原環センター, 2006, 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認試験—報告書
 原環センター, 2007, 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認試験—報告書
 土木学会, 2003, 土木学会編「コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の現状」, 土木学会コンクリート委員会、化学的侵食・溶脱研究小委員会報告

【試験項目についての年度展開】
 上記(2)および(3)については一部が基盤研究として実施されている、またはこれまでに実施された基盤研究の成果を利用することから、当初半年程度を目処に、詳細な実施及び試験計画・データ取得計画を策定することとし、個々の試験の必要性も含めて検討する。その後、(2)および(3)についてデータ取得を開始するが、セメント系材料の長期的な特性変化をモデル化するためには、十分に水合した資料を用いて試験を行う必要があることから、試料作成時に十分な養生期間を確保することとする。また、これらの成果をとりまとめる。ただし、長期的な挙動把握が必要とされる場合や、試験期間を長く取る必要があるものについては、詳細計画策定時に明示し、その対応を考慮することとする。

基本情報	シートNo.	Cm-02			参考データ・1	参考データ・2
	対象材料	セメント系材料（支保、構造躯体および充填材）			<p>水/セメント比 (W/C) =60の普通セメントのセメントペースト硬化体から、一辺が20mmの立方体を切り出し、5面をエポキシ樹脂でシールして人工海水（アクアマリン）に浸漬し、10ヶ月後に暴露面に直交するように切断して、切断面を電子線励起X線マイクロアナライザー（EPMA）を用いて面分析した（下図）。その結果、暴露面から1cm程度の範囲でCaのMgによる置換とその際の体積変化によるものと考えられる剥離とが観察された。</p>  <p>図 人工海水に10ヶ月浸漬したOPCブロックのCaおよびMg濃度の分布 (原環センター,2006)</p>	<p>水/セメント比 (W/C) =60のフライアッシュセメント（フライアッシュ30%）のセメントペースト硬化体から、一辺が20mmの立方体を切り出し、5面をエポキシ樹脂でシールして人工海水（アクアマリン）に浸漬し、10ヶ月後に暴露面に直交するように切断して、切断面を電子線励起X線マイクロアナライザー（EPMA）を用いて面分析した（下図）。その結果、普通セメントで観られたCaのMgによる置換は暴露面のごく表層にとどまっており、表層の剥離やCaの溶脱促進等は観られなかった。この結果は粉末試料での変質試験結果や高空隙資料の通水試験結果とは異なっており、緻密な硬化体を用いることで、海水成分による変質を抑制できることを示している。</p>  <p>図 人工海水に10ヶ月浸漬したFACブロックのCaおよびMg濃度の分布 (原環センター,2006)</p>
	対象分野	化学変質				
	開発レベル	基礎物性	Labスケール			
	実施期間（年度）	Phase1/H12～H17	Phase2/H18～H24	Phase3/H25～		
	開発のキーワード	変質影響				
試験条件	地下水組成					
実施事項	・海水系地下水でのセメント変質によるセメント系構造材料の変化に関する検討（バルク試験体での浸漬試験）					
実施内容	バルク試験体の長期浸漬により、実構造物で起きる可能性のある劣化現象について検討した					
現状の成果	バルク試験体の浸漬試験では、OPCではMgによる置換に起因する体積変化により反応部が表面から剥離する減少を確認（JAEAの通水試験でも同様にMgによる置換影響が大）したが、これに対してFAC、では表面にMg(OH)2相が形成され、変質が進まないことを確認した。廃棄体開発における高強度高緻密コンクリートの長期（7年）浸漬の結果でも、変質に進行していないことから、緻密な組織を持つ（海水成分の浸透が抑制される）セメント系材料では、溶脱変質よりも空隙閉塞等による内部への物質移行抑制効果が勝っていることが推察された。					
既往成果情報	<p>普通セメント（OPC）、フライアッシュセメント（FAC）、高炉セメント（BFSC）及びシリカセメントについてバルク試験体を浸漬し、一定期間（9ヶ月～10ヶ月）経過後にその組織を観察した。</p> <p>（1）試料断面のEPMAによる分析結果では、いずれの試験体でも暴露面にはマグネシウムを主成分とする析出物が確認されたが、その量は用いたセメントによって異なった。</p> <p>（2）普通セメントを用いた試験体（水/セメント比=60%）では、Mgの析出部分の表面からの剥離が観られた。[参考データ1]。</p> <p>（3）フライアッシュセメント及び高炉セメントを用いた試験体では、Mgの析出は、試験体のごく表面に限られており、表面層の剥離等は観られなかった。また、試験体内部のEPMAによる面分析の結果からは、塩素の浸透が観られる以外にCa、Si、Al等の変化はほとんど見られなかった。[参考データ2]また、TRU廃棄物の地層処分代替技術として開発してきたC-14の長期閉じこめ容器に用いる高強度高緻密コンクリート（呼び強度200MPa）について、7年間人工海水に浸漬した結果でも、FACと同様に、接液面にMgの層が形成するものの、顕著な溶脱劣化や表面層の剥離は観察されず、また、予測された硫酸塩析出等による剥離、破壊も起こっていなかった。[参考データ3]</p> <p>（4）高炉セメント（BFSC）およびシリカセメントでも同様にバルク試験体の浸漬に於いても、変質の到達深さは異なるものの、OPCで観られたような表層の剥離等の激しい劣化は確認されなかった[参考データ4]。</p>					
	参考データ・3					
	<p>厚さ10mmの高強度高緻密コンクリート（超高強度繊維補強コンクリートの一種）製の円盤試験体の側面および底面をエポキシ樹脂でシールし、水圧1MPaおよび10MPaの模擬海水（目的が硫酸塩影響の確認であったため、SO_4^{2-}、Mg^{2+}、K^+、Na^+、Cl^-濃度を海水濃度および海水濃度の10倍に調整したもの）に浸漬し、6年後経過後に底面に直交する面で切断し、その断面を観察した。その結果、ごく表層にMgの析出が観られる以外に変質は観られなかった。</p>  <p>図 人工海水に浸漬した高強度高緻密コンクリートのCaおよびMg濃度の分布 (原環センター,2010)</p>					
	参考データ・4					
<p>人工海水に9ヶ月浸漬したBFSCブロックのCaおよびMg濃度の分布</p>  <p>人工海水に9ヶ月浸漬したシリカセメントブロックのCaおよびMg濃度の分布</p>  <p>図 人工海水に9ヶ月浸漬したシリカセメントブロックのCaおよびMg濃度の分布 (原環センター,2009)</p>						
課題	<p>・変質試験等に用いられる海水系の模擬地下水には、サイト条件が決まらない段階では幅が広すぎるために人工海水（アクアマリン等・・・ASTMのものではない）が広く使われている。従って、多くのデータは海水濃度で取得されたものである。マグネシウム塩の析出に伴う空隙閉塞や内部の溶脱抑制等は海水成分の濃度によって異なるため、濃度のことなる条件での挙動も確認する必要がある。</p> <p>・また、10ヶ月までの試験では反応および海水成分の浸透が緩慢なために、影響が顕著にならなかった可能性があることから、より長期間浸漬した試験体での確認が必要である。</p> <p>・このような状態での機械的特性（圧縮強度、ヤング率等）の変化に関するデータを取得しておく必要がある。</p>			<p>【計画の概要説明】</p> <p>すでに人工海水を用いたデータ取得は実施されているが、海水系と降水系とで挙動が異なるため、その適用範囲を確認するために、濃度をパラメータとした長期浸漬試験を実施する必要がある。また、これまでに得ている結果が過渡的なものでないことを確認するため、長期浸漬試験体の分析を実施する必要がある。</p> <p>あわせて、海水系地下水環境での構造物の機械的特性の変化について明らかにする必要があることから、機械的特性についてもデータ取得の必要がある。</p> <p>そこで、平成27年度に抽出した課題をもとに、以下の各項目を実施する。</p> <ol style="list-style-type: none"> 平成27年度に抽出した左記課題を解決するための詳細試験計画を策定する。 これまでに基盤研究等で実施し、浸漬を継続している試験体の分析による長期挙動の確認 濃度をパラメータとしたバルク試験体の浸漬による挙動確認 機械的特性取得のための長期浸漬試験 上記（2）（3）および（4）の成果のとりまとめ 		
	<p>原環センター,2006,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認試験－報告書</p> <p>原環センター,2007,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認試験－報告書</p> <p>原環センター,2009,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 報告書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－</p> <p>原環センター,2010,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 ヨウ素・炭素処理・処分高度化開発 報告書（第2分冊）－C-14の長期閉じこめ技術の高度化－</p>			<p>【試験項目についての年度展開】</p> <p>上述のように、上記（2）については初期のデータがすでに基盤研究で取得されており、試験体の浸漬が継続されていることから、その分析を実施する。（3）および（4）については、当初半年程度を目処に、詳細な実施及び試験計画・データ取得計画を策定することとし、その後、（3）および（4）についてデータ取得を開始するが、セメント系材料の長期的な特性変化をモデル化するためには、十分に水和した試料を用いて試験を行う必要があることから、試料作成時に十分な養生期間を確保することとする。これらの成果をとりまとめる。ただし、長期的な挙動把握が必要とされる場合や、試験期間を長くとする必要があるものについては、詳細計画策定時に明示し、その対応を考慮することとする。</p>		
出典情報	<p>原環センター,2006,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認試験－報告書</p> <p>原環センター,2007,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認試験－報告書</p> <p>原環センター,2009,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 報告書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－</p> <p>原環センター,2010,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 ヨウ素・炭素処理・処分高度化開発 報告書（第2分冊）－C-14の長期閉じこめ技術の高度化－</p>			<p>【試験項目についての年度展開】</p> <p>上述のように、上記（2）については初期のデータがすでに基盤研究で取得されており、試験体の浸漬が継続されていることから、その分析を実施する。（3）および（4）については、当初半年程度を目処に、詳細な実施及び試験計画・データ取得計画を策定することとし、その後、（3）および（4）についてデータ取得を開始するが、セメント系材料の長期的な特性変化をモデル化するためには、十分に水和した試料を用いて試験を行う必要があることから、試料作成時に十分な養生期間を確保することとする。これらの成果をとりまとめる。ただし、長期的な挙動把握が必要とされる場合や、試験期間を長くとする必要があるものについては、詳細計画策定時に明示し、その対応を考慮することとする。</p>		

基本情報	シートNo.	Cm-03			参考データ・1	参考データ・2
	対象材料	セメント系材料（支保、構造躯体および充填材）			<p>模擬ひび割れを有するOPC供試体に水頭圧1kPaでイオン交換水を通水した場合、ひび割れ幅が180μm程度まででは、いずれの場合でも流量が急激に低下し、数100時間程度でひび割れが閉塞することが示された。 (原環センター 2007)</p>  <p>図 ひび割れ供試へのイオン交換水通水時の流量の変化 (水頭圧=1kPa)</p>	<p>参考データ1と同様の方法で人工海水を通水した場合には、さらにひび割れ幅が230μm程度でも200時間程度までにひび割れが閉塞することが示された。 (原環センター,2007)</p>  <p>図 ひび割れ供試への人工海水通水時の流量の変化 (水頭圧=1kPa)</p>
	対象分野	化学変質				
	開発レベル	基礎物性	Labスケール			
	実施期間（年度）	Phase1/H12～H17	Phase2/H18～H24	Phase3/H25～		
	開発のキーワード	変質影響				
試験条件	地下水組成					
実施事項	・セメント系材料に生じたひび割れの挙動の検討					
実施内容	・セメント系材料に生じたひび割れを模擬したひび割れ導入供試体の通水および浸漬による透水挙動の確認					
現状の成果	<p>・ひび割れを有する試験体の浸漬および通水のいずれのケースでも、透水係数・拡散係数の低下が観られ、これらは亀裂内での2次鉱物の析出によるものと考えられた。ひび割れ内の析出物を分析したところ、イオン交換水ではC-S-H等のシリカ系の鉱物の析出が、人工海水では、Mg(OH)₂がそれぞれ閉塞の原因となっていることが分かった。</p>					
既往成果情報	<p>(1) 模擬ひび割れを有するセメント系材料（普通セメント）供試体にイオン交換水および人工海水を通水し、その透水係数の変化を取得した結果、いずれの場合でも速やかに透水係数が低下し、亀裂が閉塞した[参考データ1][参考データ2]。 (2) この亀裂の閉塞の原因は、人工海水ではMg(OH)₂の亀裂への析出が極めて短期間に起こることが、イオン交換水ではC-S-H等の析出が緩やかに起こることが、それぞれ原因であることが分かった[参考データ3] (3) ひび割れを有する試験体を人工海水に浸漬した後、外観を観察したところ、ひび割れおよび表面に露出した空隙をMg(OH)₂が充填している様子が確認された[参考データ4]</p> <p>これらを総合すると、セメント系材料に生じた亀裂は地下水との反応によって閉塞傾向となる見通しが得られている。</p>					
	参考データ・3	参考データ・4	 <p>図 通水後の亀裂の観察結果(充填および溶脱の状態) (原環センター,2007)</p>			
課題	<p>・変質試験等に用いられる海水系の模擬地下水には、サイト条件が決まらない段階では幅が広すぎるために人工海水（アクアマリン等・・・ASTMのものではない）が広く使われている。従って、多くのデータは海水濃度で取得されたものである。マグネシウム塩の析出に伴う空隙閉塞や内部の溶脱抑制等は海水成分の濃度によって異なるため、濃度のことなる条件での挙動も確認する必要がある。 ・ひび割れの閉塞は、上流からの物質供給に依存する傾向があるため、セメント種類によって挙動が異なる可能性がある。そのため、他の試験（低濃度の海水系地下水での溶脱挙動等）の結果に応じて、混合セメント系での確認が必要となる可能性がある。</p>					
	【計画の概要説明】 すでにOPCについて人工海水を用いたデータ取得は実施されているが、海水系と降水系とで挙動が異なるため、その適用範囲を確認するために、濃度をパラメータとした長期浸漬試験を実施する必要がある。また、ひび割れの閉塞はひび割れでの物質供給によって析出物の種類及び量が異なることが示されており、セメント種類によっては閉塞性が異なる可能性がある。そこで、平成27年度に抽出した課題をもとに、以下の各項目を実施する。 (1) 平成27年度に抽出した課題を解決するための詳細試験計画を平成28年度上期を目処に策定する。 (2) 濃度およびセメント種類をパラメータとしたひび割れ試験体の浸漬および通水による挙動確認 (3) 上記(2)の成果のとりまとめ		 <p>図 イオン交換水および人工海水への浸漬後の亀裂供試体の外観 (原環センター,2007)</p>			
出典情報	原環センター,2007,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認試験—報告書			<p>【試験項目についての年度展開】 上述のように、当初半年程度を目処に、詳細な実施及び試験計画・データ取得計画を策定することとし、その後、(2)についてデータ取得を開始するが、セメント系材料の溶脱を含む挙動については未水和成分の水和の影響を無視できないことから、十分に水和した試料を用いて試験を行う必要があるため、試料作成時に十分な養生期間を確保することとする。また、ひび割れの挙動は、溶脱試験等の結果に基づいて予測した上で試験によって確認する必要があることから、詳細試験計画策定時には他の試験の成果を取り込めるよう、準備の開始時期について考慮することとする。</p>		

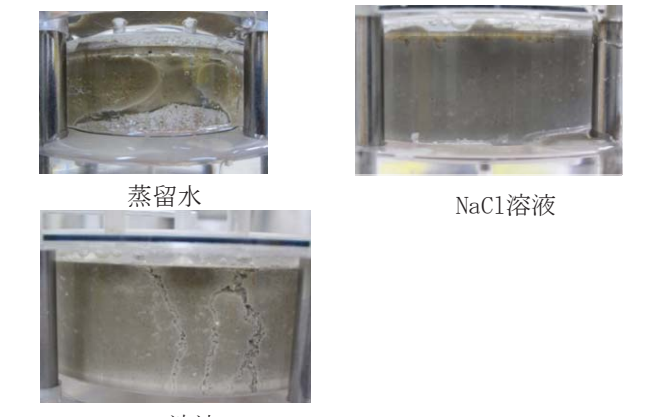
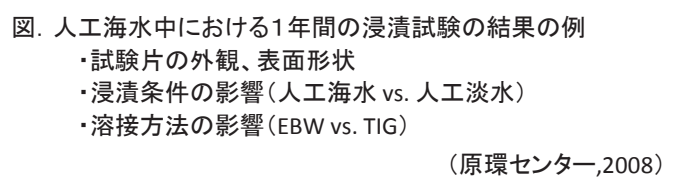
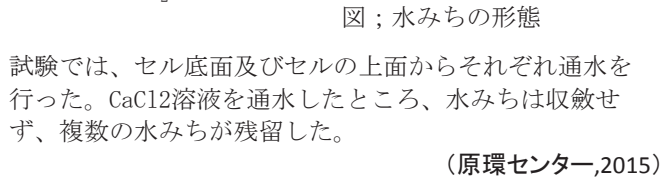
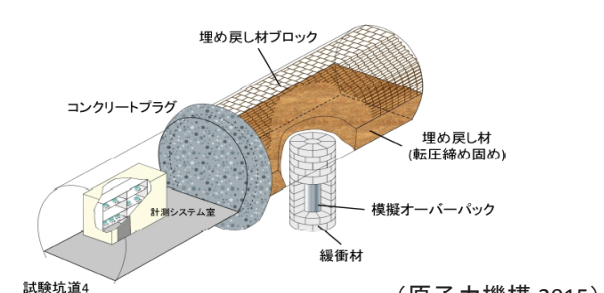
基本情報	シートNo.	Cm-04			参考データ・1	参考データ・2
	対象材料	セメント系材料（支保、構造躯体および充填材）			<p>フライアッシュセメント、高炉セメントの初期物性値を元に、これまでのモデルで変質時の拡散係数を解析した。試験と概ね整合した。</p>  <p>図 空隙構造を加味した塩化物イオンの拡散係数の実験値と予測値との比較</p> <p>(原環センター,平成24年度 人工バリア長期性能評価技術高度化開発 報告書 とりまとめ報告書)</p>	<p>OPC, フライアッシュセメントおよび高炉セメントについて、空隙構造およびC-S-Hの微細構造を反映させた拡散挙動モデルを用いて解析を行って得た拡散プロファイルは、拡散試験の結果(供試体断面のEPMA観察によって得た濃度プロファイル)をよく再現できていた。</p>  <p>図 各セメントペーストへの塩化物イオンの浸透プロファイルの解析結果とEPMAによる実測値との比較</p> <p>(原環センター,平成24年度 人工バリア長期性能評価技術高度化開発 報告書 とりまとめ報告書)</p>
	対象分野	化学変質				
	開発レベル	基礎物性	Labスケール			
	実施期間(年度)	Phase1/H14～H18	Phase2/H19～H24	Phase3/H25～		
開発のキーワード	変質影響					
試験条件	地下水組成					
実施事項	・セメント系材料への塩化物イオンの浸透挙動の調査及び検討					
実施内容	セメント系材料の長期変質に伴う物質移行特性の変化をモデル化することを目的とした塩化物イオンの拡散試験及び拡散挙動のモデル化が実施されている。					
現状の成果	<ul style="list-style-type: none"> ・セメント系材料の溶脱等に伴う物質移行特性の評価手法の検討の中で塩化物イオンを用いた拡散試験が実施されており、普通セメントを始め、各種混合セメントについても塩化物イオンの拡散係数が取得されている。 ・溶脱劣化に伴って、塩化物イオンの拡散係数も変化するため、溶脱時の物質移行特性を予測するための手法も検討されている。 ・併せて、土木・建築をを中心とした産業界でも、コンクリート構造物の経年劣化の主な原因となる塩化物イオンの浸透挙動の評価手法について検討されている。 					
既往成果情報	<p>(1) 産業界に於ける検討でも、海水の影響や塩化物イオンの浸透に関する検討は広く実施されており(たとえば下記出典情報の(1))、その成果を地層処分に於ける構造物の評価に適用できる可能性がある。</p> <p>(2) 海水成分の影響としては、土木学会がまとめており(出典情報の(2))、ブルーサイト及びアラゴナイトによる物質移動の抑制、塩化物イオンの浸透によるフリーデル氏塩の析出、硫酸イオンの供給によるエトリングタイトの生成、M-S-Hの生成による結合成分の分解等があげられている。このうちセメント系材料の性能に大きな影響を及ぼすのは、マグネシウムによる置換(M-S-Hの生成)といわれている</p> <p>(3) セメント系材料の地下水等との反応による変質挙動および変質に伴う性能変化に関する評価を目的として実施されている物質移行特性の変化に関する検討に於いて、溶脱による空隙構造の変化に起因する拡散挙動の変化をモデル化する目的で、塩化物イオンの浸透挙動が取得されている。併せてその拡散モデルについても検討されており、溶脱時を含めた拡散係数の取得および予測解析[参考データ1]、および、塩化物イオン浸透時の濃度プロファイルの再現[参考データ2]が実施されている。</p>				参考データ・3	参考データ・4
課題	<ul style="list-style-type: none"> ・塩化物イオンの浸透挙動については広く産業界で検討が進められている。説明性の向上の面でも、その適用を試みるとともに、地層処分への適用性を確認しておく必要がある。 ・併せて、種々のセメント系材料の溶脱変質等に伴う塩化物イオンの拡散性の変化についてもモデルの信頼性を向上させることが重要である。 				<p>【計画の概要説明】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・塩化物イオンの浸透は、鉄系の補強材(鉄筋等)の腐食劣化の原因であることから、近年、おもに、土木および建築の分野で構造物の寿命評価や補修等の必要性の判定等の観点から、コンクリート構造物に関する塩化物イオンの浸透挙動の評価手法に関する研究開発が行われている。一方、セメント系材料の溶脱劣化に伴う物質移行特性の変化のモデル化の観点からのデータ取得も実施されている。そこで、平成27年度に抽出した課題をもとに、以下の各項目を実施する。 (1) 平成27年度に抽出した左記課題を解決するための詳細試験計画を平成28年度上期を目処に策定する。 (2) 産業界で実施されている塩化物イオンの浸透挙動評価についてその手法及び適用性に関する調査。 (3) 基盤研究に於いて検討されてきた物質移行モデルの適用性確認及び信頼性の向上 (4) 上記(2)および(3)の成果のとりまとめ 	
出典情報	<p>(1)たとえば 濱田 秀則ら, 1999, 濱田 秀則, 中橋 一壽, 黒木 隆二, "高強度コンクリートの塩化物イオン浸透性および内部鉄筋の防食性に関する促進試験(腐食・防食)", コンクリート工学年次論文報告集 21(2), 979-984.</p> <p>(2)土木学会, 2003 土木学会編「コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の現状」, 土木学会コンクリート委員会、化学的侵食・溶脱研究小委員会報告</p> <p>(3)原環センター, 2013, 平成24年度 地層処分技術調査等委託費 TRU廃棄物処分技術 報告書人工バリア長期性能評価技術開発 とりまとめ報告書</p>				<p>【試験項目についての年度展開】</p> <p>上述のように、産業界ですでにモデル化が進められていることから、その調査を実施し、適用範囲、対象期間等の観点から地層処分への適用性について検討する。</p> <p>併せて、これまでに基盤研究で開発してきた物質移行特性の評価手法の適用検討および信頼性向上のための試験について当初半年程度を目処に、詳細な実施及び試験計画・データ取得計画を策定することとする。その際(1)の成果と併せてモデル化の方針を検討する。これを受けて(3)に必要な試験の呼びモデル化検討を実施する。詳細計画策定の中で長期試験の必要性が認められた場合には、その旨計画に明示し、その対応を考慮することとする。</p>	

基本情報	シートNo.	Cm-05			参考データ・1	参考データ・2
	対象材料	セメント系材料			 <p>バッチ試験</p> <p>通水試験</p>	 <p>● OPC-実験 — OPC-計算 ● HFSC-実験 — HFSC-計算</p>
	対象分野	劣化	変質			
	開発レベル	基礎物性	Labスケール			
	実施期間 (年度)					
	開発のキーワード	セメント系材料	フライアッシュ高含有シリカフェームセメント	化学反応モデル		
試験条件	海水系地下水					
実施事項	処分施設閉鎖後における充填材（セメント系材料）の長期的な挙動を評価するためのモデル開発を行った。					
実施内容	普通ポルトランドセメント(OPC)及び低アルカリ性セメントとしてフライアッシュ高含有シリカフェームセメント(HFSC)を用いたセメント硬化体を対象としてモデル開発に必要なデータを取得し、化学反応と物質輸送連成モデルに反映させることにより、セメント系材料の長期的な挙動を評価するためのモデルを開発した。					
現状の成果	<ul style="list-style-type: none"> 化学反応モデルについては、イオン交換水に対するバッチ式浸漬実験については、OPC硬化体及びHFSC硬化体ともに計算値は実験結果を概ね再現できるモデルを構築した（日本原子力研究開発機構，2015）。 物質輸送モデルについては、HFSC硬化体に対するイオン交換水を用いた通水試験により新たな物質輸送モデルを構築した（日本原子力研究開発機構，2015）。 化学反応及び物質輸送連成解析において、上記構築した化学反応モデル及び物質輸送モデルを反映させることにより、HFSC硬化体の通水試験における全体的な変質現象の推移の傾向を再現した（日本原子力研究開発機構，2015）。 					
既往成果情報	<ul style="list-style-type: none"> OPCを用いたセメント系材料の変質挙動に関わるデータは豊富である（例えば、Atkinson, A., 1985）。 セメント材料の長期変質モデル開発において、バッチ式の浸漬試験や通水試験等が実施されている（日本原子力研究開発機構，2015）[参考データ1]。 海水系地下水については、標準的な組成に対して化学反応モデルに対するデータ取得やモデル化が実施されている（日本原子力研究開発機構，2015）[参考データ2]。 物質輸送のモデル化については、透水係数と間隙率との関係で定式化が実施されている（日本原子力研究開発機構，2015）[参考データ3]。 変質挙動評価モデルとして、化学反応と物質輸送モデルとを連成させたモデルが主に使用されている（例えば、電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005，日本原子力研究開発機構，2015 [参考データ4]）。 				参考データ・3	参考データ・4
	 <p>図 OPC硬化体及びHFSC硬化体の透水係数の定式化</p>				 <p>図 化学反応及び物質輸送連成モデルによるHFSC通水実験の再現計算</p>	
課題	<ul style="list-style-type: none"> 海水系地下水として、標準的な組成の人工海水のみを用いており、様々な塩水に対してバッチ式浸漬実験を行い、モデルの適用性確認が必要である。 物質輸送モデルを表すセメント硬化体の透水係数係数について、海水系地下水に対する適用性の確認が必要である。 				全体試験計画	
	<p>OPC及びHFSCの2種類のセメントを対象に、以下の項目を実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 初年度は、計画の検討及び計画の策定を行う。 上記2種類のセメント系材料を対象にし、既存の評価モデルやセメント水和物関連の熱力学データを用いて、バッチ試験等で予想される結果についてシミュレーションを行う。 シミュレーションの結果より、実施すべき試験条件を絞り込み、バッチ式浸漬試験等にてデータ取得を行う。 既存の評価モデルの適用性確認を行うとともに、結果に応じて、モデルの改良や熱力学データの整備を行い、多様な海水条件においても適用できるモデルを整備する。 					
出典情報	<p>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-4カ年研究成果の取りまとめ-報告書(2015)。</p> <p>Atkinson, A: The Time Dependency of pH within a Repository for Radioactive Waste Disposal, AERE-R 11777, UKAEA(1985).</p> <p>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取りまとめ-, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02(2005)。</p>				<p>上述のように、既往の成果において、評価モデルが開発されていることから、シミュレーションを実施しながらデータ取得を行い、モデルの適用性確認を行い、モデルを整備する。</p>	

基本情報	シートNo.	Cm-06	参考データ・1	
	対象材料	セメント系材料、ベントナイト系材料等の人工バリア材料		 <p>Naスメクタイトの割合</p> <p>スメクタイト部分密度</p> <p>※初期は 0.85</p> <p>※初期は 0.92</p> <p>図 緩衝材を使用するバリアシステムに対する連成解析結果 (10,000年後)</p>
	対象分野	化学変質	力学挙動	
	開発レベル	評価システムのプロトタイプの開発		
	実施期間 (年度)	H25	H26	
	開発のキーワード	連成解析	マルチスケール性	
	試験条件			
実施事項	連成解析プロトタイプシステムの開発			
実施内容	TRU廃棄物処分施設の長期的状態変遷の原因となるバリアシステムの化学-物質輸送-力学連成挙動を合理的に評価するための連成解析プロトタイプシステムの開発			
現状の成果	<p>① TRU廃棄物処分施設を対象に、緩衝材としてベントナイト系材料を使用するバリアシステムと、緩衝材を使用せずにセメント系材料で坑道内部を埋め戻すバリアシステムについて、異種材料間の境界や割れ目近傍等における変質等の局所スケールでの解析結果を、処分施設断面から成る全体スケールへ空間的に内挿・補完するための連携ルールを構築した。</p> <p>② 上記で構築した連携ルールに基づき解析を行う連成解析システムのプロトタイプを構築した。本システムでは、力学、化学、物質輸送に係る個別の現象解析ツールとして、化学-物質輸送連成解析コードQPACと力学挙動解析コードMACBECEを採用し、これらの改良に伴う連成解析システムの修正を最小限とするために、解析コード間の情報の授受等を管理するミドルウェアとこれらの解析コードを、インターフェイス機能を有するプログラム(プラグイン)を介して連携させるものとした。</p>			
既往成果情報	<p>開発した連成解析プロトタイプシステムを用いて、降水系地下水を想定し、1)緩衝材としてベントナイトを使用するバリアシステムと、2)緩衝材を使用せず坑道内部をセメント系材料で埋め戻すバリアシステムを対象とする化学-物質輸送-力学連成挙動解析を実施した。</p> <p>1)緩衝材としてベントナイトを使用するバリアシステム 坑道下部の緩衝材が薄い領域やセメント系材料(支保工等)との境界近傍領域において、緩衝材のCa型化とスメクタイト部分密度の低下が生じた。その他の領域では、緩衝材のイオン型はNa型が支配的であり、スメクタイト部分密度の低下も軽微であることが示された。[参考データ1]</p> <p>2)緩衝材を使用せず坑道内部をセメント系材料で埋め戻すバリアシステム 割れ内部での二次鉱物沈殿挙動に対する地球化学モデルの不確実性を考慮して、割れ内部での二次鉱物沈殿を想定しない場合と、想定する場合について解析を実施した。前者では、割れ近傍でのCa溶脱の進展と、割れ内部のpH低下が生じたが、後者の場合では、これらの作用が抑制されることが示された。[参考データ2]</p>		参考データ・2	
	<p>割れ内部の二次鉱物の沈殿を考慮しない場合の割れ内部のpH分布</p> <p>割れ内部の二次鉱物の沈殿を考慮する場合の割れ内部のpH分布</p>  <p>図 緩衝材を使用しないバリアシステムに対する連成解析結果 (8,000年後)</p>			
課題	<p>上記の連成解析プロトタイプシステムは、降水系地下水環境が想定される内陸部のサイトに処分施設が建設されることを想定して開発されたが、沿岸域に処分場が建設される場合は、海水系地下水との反応によるセメント系材料、ベントナイト系材料の変質・劣化による影響を考慮することが必要となる。また、次回の氷期に生ずると予想されている海退に伴って、ニアフィールドの地下水条件が海水系地下水から降水系地下水へ変遷することも考えられ、今後、このような地質環境条件の変化による影響を取り入れた評価システムを構築することが必要となる可能性がある。</p>		<p>全体計画</p> <p>H28年度においては沿岸域におけるニアフィールド複合現象評価の技術的課題を抽出し、次年度以降、課題の検討結果に基づき評価手法の構築を進める。</p>	
	出典情報	<p>[参考データ1][参考データ2] 日本原子力研究開発機構 (2015)：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。 日本原子力研究開発機構 (2015)：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-4ヵ年研究成果の取りまとめ 報告書。</p>		

基本情報	シートNo.	Gr-01	参考データ・1	参考データ・2	
	対象材料	グラウト			
	対象分野	流出挙動			
	開発レベル	原位置			
実施期間(年度)	Phase2/H18~H24	Phase3/H25~	参考データ・3	参考データ・4	
開発のキーワード	グラウト	湧水対策	湧水対策	溶液型	
試験条件	海水系地下水				
実施事項	地質環境条件(岩盤の透水係数)に応じた坑道掘削時の湧水抑制対策(グラウト)の実施				
実施内容	深地層の研究施設において、坑道掘削時にプレグラウト(あるいはポストグラウト)を実施し、湧水量の低減を図った。岩盤の透水係数(ルジオン値)に応じて、使用する材料を選択し、注入孔や効果確認孔におけるルジオン試験や湧水量による効果を確認した。				
現状の成果	<ul style="list-style-type: none"> ・低アルカリ性セメントの幌延URLの岩盤に対する適用性、透水性低減傾向およびグラウト到達性状を確認した。 ・限界圧力程度の注入により、注入孔からのグラウト材料が確認孔で確認できたことから低アルカリ性セメントの浸透性が示された。 ・グラウト注入後のルジオン値が低下したことから、低アルカリ性セメントの止水性が示された。 				
既往成果情報	<ul style="list-style-type: none"> ・土木分野(ダム、道路・鉄道トンネル等)における、普通ポルトランドセメントを使用したグラウトは実績が豊富。 ・青函トンネルでは、普通ポルトランドセメントを使用したグラウトが行われ、注入したグラウトの長期耐久性が確認されている(秋田, 2011)。 ・瑞浪および幌延において、坑道掘削時にプレグラウト(あるいはポストグラウト)を実施し、湧水量の低減を図った。岩盤の透水係数(ルジオン値)に応じて、使用する材料を選択し、注入孔や効果確認孔におけるルジオン試験や湧水量による効果を確認した(岸ほか, 2010, Sato, et al., 2014)。 ・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」において、地層処分を目的としたグラウト技術や影響評価手法の開発が行われ、グラウトデータベースならびにガイドラインが策定されている(原子力機構, 2013a, b)。 ・スウェーデンハードロックラボラトリー、フィンランドオルキルオトにおいて溶液型グラウトの適用試験が行われているが、課題があり、技術が確立しているとは言い難い。 				
	<ul style="list-style-type: none"> ・海水条件下における溶液型グラウトの適用性の評価(海水条件下におけるゲルタイム等の設計、施工方法、影響評価手法) 	<p align="center">全体試験計画</p> <p>海水条件下での溶液型グラウトの設計、及び影響評価技術の体系化を念頭に以下の項目について調査研究を行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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 			
課題					
出典情報	<ul style="list-style-type: none"> ・秋田勝次(2011):セメント系薬液注入材の耐久性に関する研究, 京都大学博士論文 ・岸裕和ほか(2010):地層処分におけるグラウト技術の高度化開発, 5; 幌延URL原位置適用性試験, 土木学会平成22年度全国大会第65回年次学術講演会講演概要集(DVD-ROM), 91-92. ・Sato, T., Mikake, S., Kobayashi, S., Tsuji, M. (2014): Status of grouting to reduce groundwater inflow into deep shafts and galleries in the Mizunami Underground Research Laboratory, Japan, Proceedings of 8th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS-8) (USB Flash Drive). ・原子力機構(2013a):平成24年度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)。 ・原子力機構(2013b):平成24年度地下坑道施工技術高度化開発 6ヵ年報告書。 			<p>上記の計画の4項目を3年間で実施し、その成果を、グラウト設計技術とグラウトの影響評価技術のガイドライン更新に反映する。</p>	

基本情報	シートNo.	Nf-01			参考データ・1	参考データ・2																																																																																																																																																								
	対象材料	ニアフィールド領域での処分システム構成材料			幌延深地層研究所のボーリングセータに基づく割れ目卓越方向分データ (原環センター, 2015) Hatanaka, K., Lim, Doo-Hyun and Ishii, E. : Geo-descriptive modeling of water conducting features characterized in sedimentary formations in Horonobe area of Japan, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.1265, 1265-AA-06-04, 2010.	割れ目ネットワークモデルの作成方法 (原環センター, 2015) 																																																																																																																																																								
	対象分野	水理特性 (湧水条件)																																																																																																																																																												
	開発レベル																																																																																																																																																													
	実施期間 (年度)	Phase1/H27~H30																																																																																																																																																												
	開発のキーワード	緩衝材	ニアフィールド領域	ニアフィールド構成材料			地下水流動解関																																																																																																																																																							
試験条件	異なる水質 (純水と塩水) での緩衝材 (ペントナイトと珪砂:70:30) の流出挙動など⇒4.2参照。																																																																																																																																																													
実施事項	緩衝材の流出挙動⇒4.2参照																																																																																																																																																													
実施内容	緩衝材の流出挙動⇒4.2参照																																																																																																																																																													
現状の成果	緩衝材の流出挙動⇒4.2参照																																																																																																																																																													
既往成果情報	1. 緩衝材の流出挙動 既往の試験は緩衝材単体と湧水との関係を、Lab試験、URLでの現位置試験により、緩衝材の流出挙動を観察している。定置後の緩衝材が湧水により流出することで品質が劣化 (低下) する状況を、以下をパラメータとして観察し、その現象理解を進めている段階。 <ul style="list-style-type: none"> 湧水 (化学) : 組成 湧水 (物理) : 流速、流量、水圧 緩衝材 (化学) : 珪砂混合 緩衝材 (物理) : 乾燥密度 以上に関連して、密度均質化 (異なる2つの乾燥密度を持つ緩衝材の膨潤による密度の均質化現象)、ペントナイトのNa型からCa型への変化の様子、緩衝材の浸潤速度 (飽和に要する時間) の測定などを実施。				参考データ・3	参考データ・4																																																																																																																																																								
	2. 地下水流動の検討 緩衝材の流出現象と湧水条件に着目し、止水対策による湧水量の低減効果の評価を行う試みとして、緩衝材設置時の処分孔への地下水流入状態を、実地下環境 (幌延URL) の水理地質データに基づく解析的検討がなされている。その特徴は、 <ul style="list-style-type: none"> 堆積岩の割れ目が透水性を支配する水理地質構造モデルによる評価 (割れ目ネットワークモデル) 実地下環境条件 (地質調査結果) に基づく割れ目の幾何学的パラメータセットの整備 解析対象領域における割れ目ネットワークモデル (割れ目の密度、卓越方向、長さ、空間の分布など) の作成 水理モデル構築のための実地下環境に関する水理データの整理 解析コードと解析モデルを用いた対象領域における透水性の算定 (透水量係数分布の算出) 				水理モデル構築のための実地下環境に関する水理データ (例) として、幌延深地層研究所の水理データとして以下の文献を参照 (原環センター, 2015) 。 <ul style="list-style-type: none"> Ota, K., Abe, H. and Kunimaru, T. : Horonobe Underground Research Laboratory Project Synthesis of phase 1 Investigations 2001-2005, JAEA Research 2010-068, 2010. Aoyagi, K., Tsusaka, K., Nohara, S., Kubota, K., Tokiwa, T., Kondo, K. and Inagaki, D. : Hydrogeomechanical Investigation of an Excavation Damaged Zone in the Horonobe Underground Research Laboratory, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 2014. 藪内、國丸、石井他：幌延超深地層研究計画 換気立坑先行ボーリング (PB-V01孔) 調査報告書-岩盤の水理特性調査-, JAEA-Data/Code 2008-026, 2009. 	処分孔湧水量算定結果 (原環センター, 2015) <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">リアライゼーション</th> <th colspan="10">処分孔 No. (L/min)</th> <th rowspan="2">合計</th> <th rowspan="2">湧水 0.1L/min 以下の処分孔の数</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>16.73</td> <td>0.00</td> <td>312.19</td> <td>18.26</td> <td>32.11</td> <td>0.05</td> <td>122.06</td> <td>0.01</td> <td>0.02</td> <td>13.87</td> <td>515</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.05</td> <td>317.74</td> <td>55.16</td> <td>0.03</td> <td>49.74</td> <td>40.97</td> <td>0.03</td> <td>0.01</td> <td>464</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.05</td> <td>34.76</td> <td>8.22</td> <td>11.19</td> <td>0.00</td> <td>12.69</td> <td>0.13</td> <td>107.30</td> <td>28.42</td> <td>0.00</td> <td>203</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>67.14</td> <td>0.01</td> <td>0.00</td> <td>0.01</td> <td>0.03</td> <td>12.96</td> <td>0.00</td> <td>0.50</td> <td>24.72</td> <td>35.82</td> <td>141</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>2.61</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>32.83</td> <td>40.93</td> <td>0.01</td> <td>38.93</td> <td>113.68</td> <td>229</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>9.78</td> <td>7.57</td> <td>9.13</td> <td>32.75</td> <td>45.54</td> <td>41.81</td> <td>55.86</td> <td>0.00</td> <td>23.30</td> <td>27.31</td> <td>253</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>138.33</td> <td>49.90</td> <td>188.59</td> <td>0.14</td> <td>118.60</td> <td>50.91</td> <td>0.07</td> <td>20.92</td> <td>48.59</td> <td>107.96</td> <td>720</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>18.43</td> <td>3.24</td> <td>0.00</td> <td>0.04</td> <td>30.55</td> <td>35.55</td> <td>26.00</td> <td>66.23</td> <td>8.57</td> <td>0.01</td> <td>190</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>10.26</td> <td>0.00</td> <td>59.68</td> <td>23.14</td> <td>5.05</td> <td>0.00</td> <td>0.01</td> <td>0.02</td> <td>0.01</td> <td>172.73</td> <td>271</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>2.06</td> <td>0.16</td> <td>0.00</td> <td>0.10</td> <td>0.16</td> <td>0.06</td> <td>0.00</td> <td>0.06</td> <td>28.59</td> <td>0.00</td> <td>29</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table> <p>赤字は 0.1L/min 以上の処分孔</p>	リアライゼーション	処分孔 No. (L/min)										合計	湧水 0.1L/min 以下の処分孔の数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	16.73	0.00	312.19	18.26	32.11	0.05	122.06	0.01	0.02	13.87	515	4	2	0.00	0.00	0.05	317.74	55.16	0.03	49.74	40.97	0.03	0.01	464	6	3	0.05	34.76	8.22	11.19	0.00	12.69	0.13	107.30	28.42	0.00	203	3	4	67.14	0.01	0.00	0.01	0.03	12.96	0.00	0.50	24.72	35.82	141	5	5	0.00	0.00	2.61	0.00	0.00	32.83	40.93	0.01	38.93	113.68	229	5	6	9.78	7.57	9.13	32.75	45.54	41.81	55.86	0.00	23.30	27.31	253	1	7	138.33	49.90	188.59	0.14	118.60	50.91	0.07	20.92	48.59	107.96	720	1	8	18.43	3.24	0.00	0.04	30.55	35.55	26.00	66.23	8.57	0.01	190	3	9	10.26	0.00	59.68	23.14	5.05	0.00	0.01	0.02	0.01	172.73	271	5	10	2.06	0.16	0.00	0.10	0.16	0.06	0.00	0.06	28.59	0.00	29
リアライゼーション	処分孔 No. (L/min)										合計	湧水 0.1L/min 以下の処分孔の数																																																																																																																																																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																																																																																																				
1	16.73	0.00	312.19	18.26	32.11	0.05	122.06	0.01	0.02	13.87	515	4																																																																																																																																																		
2	0.00	0.00	0.05	317.74	55.16	0.03	49.74	40.97	0.03	0.01	464	6																																																																																																																																																		
3	0.05	34.76	8.22	11.19	0.00	12.69	0.13	107.30	28.42	0.00	203	3																																																																																																																																																		
4	67.14	0.01	0.00	0.01	0.03	12.96	0.00	0.50	24.72	35.82	141	5																																																																																																																																																		
5	0.00	0.00	2.61	0.00	0.00	32.83	40.93	0.01	38.93	113.68	229	5																																																																																																																																																		
6	9.78	7.57	9.13	32.75	45.54	41.81	55.86	0.00	23.30	27.31	253	1																																																																																																																																																		
7	138.33	49.90	188.59	0.14	118.60	50.91	0.07	20.92	48.59	107.96	720	1																																																																																																																																																		
8	18.43	3.24	0.00	0.04	30.55	35.55	26.00	66.23	8.57	0.01	190	3																																																																																																																																																		
9	10.26	0.00	59.68	23.14	5.05	0.00	0.01	0.02	0.01	172.73	271	5																																																																																																																																																		
10	2.06	0.16	0.00	0.10	0.16	0.06	0.00	0.06	28.59	0.00	29	5																																																																																																																																																		
課題	最終的に緩衝材と接することになる湧水条件を、処分孔単独ではなく、ニアフィールド領域における構成材料の存在を考慮した状態の下で把握する。これにより、ニアフィールド領域の特徴を背景とした緩衝材の成立性と品質確保についてその知見を整理する。そのために、検討する領域と対象物を整理し、検討手法としての解析手法 (地下水流動解析) について現状の知見を整理する。				全体試験計画																																																																																																																																																									
	沿岸部に設置される地層処分場のニアフィールド領域における処分システムの成立に必要な緩衝材仕様や関連部材の仕様、効果、施工方法などについて検討評価を行うために、地層処分場が設置される地質環境特性とニアフィールド領域に設置される構成材料の諸特性と、広域→処分場→処分坑道→処分孔というスケールとそれら相互の境界条件に留意して、地下水流動解析手法 (解析モデルと解析コード) を整備する。				(1) 考慮、留意事項の抽出と整理 沿岸部における地下水流動解析において考慮、留意すべき事項を整理する (2) 地下水流動解析の対象領域に関する調査、検討 ニアフィールド領域の地質環境特性や構成材料 (部材) を考慮した地下水流動解析を行うために、広域の水理解析モデルを基にしたスケールダウン (広域→処分場スケール→処分坑道スケール→処分孔スケール) の手法を検討する (3) 解析モデルの検討 人工バリア材料の状態変遷や湧水対策の有効性を考慮、評価する水理解析モデルを検討する (緩衝材等に関する試験結果も踏まえる) (4) まとめ ニアフィールド領域における処分システム構成材料の特性を考慮した地下水流動解析手法を例示する																																																																																																																																																									
出典情報	・公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター (2015), 平成26年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書 (第2分冊) -人工バリア品質/健全性評価手法の構築-緩衝材, 平成27年3月、				上記の計画の4項目を3段階 ((1)は1年目に終了) に分けて3年間で実施する。																																																																																																																																																									

基本情報	シートNo.	Nf-02			参考データ・1	参考データ・2
	対象材料	ニアフィールド領域での処分システム構成材料			オーバーパックの腐食挙動の評価例、4.2のシートから引用。	緩衝材の流出挙動の評価例、4.2のシートから引用
	対象分野	エンジニアリング				
	開発レベル					
実施期間(年度)	Phase1/H27~H30			<p>図. 人工海水中における1年間の浸漬試験の結果の例</p> <ul style="list-style-type: none"> 試験片の外観、表面形状 浸漬条件の影響(人工海水 vs. 人工淡水) 溶接方法の影響(EBW vs. TIG) <p>(原環センター,2008)</p>	<p>図; 水みちの形態</p> <p>試験では、セル底面及びセルの上面からそれぞれ通水を行った。CaCl2溶液を通水したところ、水みちは収斂せず、複数の水みちが残留した。</p> <p>(原環センター,2015)</p>	
開発のキーワード	ニアフィールド	ニアフィールド構成材料	設計、施工、品質	地下水流動		
試験条件	Lab試験⇒4.2参照	原位置試験⇒4.2参照				
実施事項	緩衝材の流出挙動⇒4.2参照					
実施内容	緩衝材の流出挙動⇒4.2参照					
現状の成果	緩衝材の流出挙動⇒4.2参照					
既往成果情報	<p>1. 緩衝材の流出挙動(シートNo. Nf-01と共通)</p> <p>既往の試験は緩衝材単体と湧水との関係を、Lab試験、URLでの現位置試験により、緩衝材の流出挙動を観察している。定置後の緩衝材が湧水により流出することで品質が劣化(低下)する状況を、以下をパラメータとして観察し、その現象理解を進めている段階。</p> <ul style="list-style-type: none"> 湧水(化学): 組成 湧水(物理): 流速、流量、水圧 緩衝材(化学): 珪砂混合 緩衝材(物理): 乾燥密度 <p>以上に関連して、密度均質化(異なる2つの乾燥密度を持つ緩衝材の膨潤による密度の均質化現象)、ベントナイトのNa型からCa型への変化の様子、緩衝材の浸潤速度(飽和に要する時間)の測定などを実施。</p> <p>2. ニアフィールド領域における処分システム構成材料の基本条件の検討(エンジニアリング)</p> <p>オーバーパック、緩衝材、埋戻し材、プラグなど個別の部材に関する物性、劣化・変遷現象や機能の確認に関する調査、試験は下記を例として実施されている。一方、これらの関連部材を組合せて地下水流動、湧水、止水の点から、処分システムとしての成立性や関連する構成部材の品質に関する統合的な検討は今後の課題である。</p> <ul style="list-style-type: none"> オーバーパックの腐食挙動調査(水質、酸化還元条件、緩衝材共存、溶接部などを考慮⇒4.2参照) 緩衝材(浸潤、膨潤、密度変化、各種の変質、流出挙動などを考慮⇒4.2参照) 埋戻し材(原位置での実証的な挙動確認⇒幌延URLでの人工バリア性能確認試験) プラグ(原位置での実証的な性能確認試験⇒SKB/Aspoでの実規模試験) 				<p>参考データ・3</p> <p>埋め戻し材の実規模スケール試験(幌延/人工バリア性能確認試験)</p> <p>堅置き定置方式において、緩衝材設置完了後、上部坑道(長さ約7m部分)を、ベントナイト(40%)に350m調査坑道掘削土(ズリ)(60%)を混合した埋め戻し材を用いて埋め戻し。坑道下部はハンドガイドローラーによる現場転圧締め固め、上部はプレス機による圧縮成型した埋め戻し材ブロック(縦30cm×横30cm×高さ10cm、16.5kg)を積載施工。一番手前は、埋め戻し材の崩落防止用の鋼製土止め壁を設置。その後、埋め戻し材の膨潤や埋め戻した部分からの漏水防止のために厚さ3mのコンクリートプラグ(低アルカリ性セメント系材料使用)を施工。</p>  <p>(原子力機構,2015)</p>	<p>参考データ・4</p> <p>プラグの実規模スケール試験(スウェーデン/SKB/Aspoでのプラグ施工試験。-450m地点。Domplu/Dome plug)</p> <p>補強材無しの低pHコンクリート製プラグの止水性能確認試験。水圧は4MPa~10MPaを想定。プラグからの湧水を3年間観察。水圧維持のためのwater injectionとその時のプラグからの漏水量(1/min)を2014年2月から測定。同時に内部のベントナイトの膨潤圧、プラグにかかる応力とプラグ/岩盤間の変位等を測定。</p>  <p>(SKB,2015)</p>
	課題	<p>沿岸部に設置する地層処分システムの成立性を提示するには、人工バリアと周辺岩盤を含めたニアフィールド領域を対象とした処分システム全体について、操業段階及び閉鎖後長期の双方の安全性が確保される見通しを示す必要がある。</p> <p>これらの安全確保を検討する際、廃棄体を内包し、その外側では岩盤と接することになる緩衝材が当初の要求機能(安全要件)を満たしてその品質が確保されることが、操業段階及び閉鎖後長期の安全性を確保するためには必須となる。そこで、この方法等の提示に向けて、特に塩水湧水による緩衝材の流出の防止に着目しつつ、水理地質構造モデルに基づく地下水流動解析から得られる湧水環境条件を念頭に、ニアフィールドの各種構成材料の特性、仕様等を評価する解析的手法を含めた予察的なエンジニアリング手法の調査、検討を行い、関連部材の種類、組合せ、配置、その効果などを統合的に評価する方法を提示することが求められる。</p>				<p>全体試験計画</p> <p>沿岸部に設置される地層処分場での処分システムの成立性について、ニアフィールドを検討対象領域とし、それに関わる構成材料(緩衝材や関連部材)の仕様、機能、施工方法、組合せなどのバリエーションに配慮した検討、評価を行う手法を整備する。その際、地層処分場が設置される地質環境条件や地下水流動などの場の特徴については、広域→処分場→処分坑道→処分分孔というスケールと境界条件に留意する。</p> <p>(1) 関連部材の抽出、整理 ニアフィールド領域を構成する人工バリア材料とその他の関連部材を抽出し、技術要件、基本仕様を整理する。</p> <p>(2) 地下水流動解析との接点の整理 別途実施する、沿岸部における地下水流動解析に関わるスケール、境界条件、部材、パラメータなどとの接点の定量的な整理</p> <p>(3) 処分システムの妥当性提示のための検討 ニアフィールド領域の地質環境特性や構成材料(部材)の特徴を考慮した処分システムの妥当性の評価、提示方法の検討</p> <p>(4) 処分システムの品質確保に関する検討 ニアフィールド領域での処分システム構成材料の品質確保上必要な考慮事項、技術要件等の検討</p> <p>(5) まとめ ニアフィールド領域での処分システム構成材料が機能的に成立し、その品質が処分システムとしての要求を満たしていることを説明する方法の提示</p>
出典情報	<ul style="list-style-type: none"> 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター(2008),平成19年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書(第2分冊)ー人工バリア品質評価技術の開発,平成20年3月 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター(2015),平成26年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確認技術開発報告書(第2分冊)ー人工バリア品質/健全性評価手法の構築ー緩衝材,平成27年3月 日本原子力研究開発機構,幌延深地層研究計画(2015),平成26年度調査研究成果報告,JAEA-Review 2015-017 SKB(2015),Aspo Hard Rock Laboratory Annual Report 2014, SKB TR-15-10 				<p>上記の計画の(1)~(4)項目を3段階((1)は1年目に終了)に分けて3年間で実施し、全体のまとめ(5)につなげる。</p>	