平成31年度

高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 (沿岸部処分システム評価確証技術開発)

成果報告書

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター 一般財団法人 電力中央研究所

平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 (沿岸部処分システム評価確証技術開発)成果報告書 目次

本編

第1章	はじめに	
1-1	研究の背景と目的・・・・・	· 2
1-2	研究の概要と年度計画・・・・・	· 2
第2章	海陸連続3次元地質環境モデルの構築手法の高度化	
2-1	地質環境モデル構築に係るデータベースの整備と全国大地下水流動概念モデル	• 8
2-2	地質環境モデルの構築と地下水流動解析の高度化	· 28
第3章	海陸連続3次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得手法の高度化	
3-1	陸域から海域にかけての地質環境特性の把握技術の高度化(プッシュプル試験)	• 99
3-2	地下水の流出場及び海底地形把握技術の高度化・・・・・	114
第4章	沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化	
4-0	はじめに・・・・	126
4-1	再冠水に至る期間を対象とした性能評価手法に係る基盤整備・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	129
4-2	セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充・・・・・・	177
4-3	緩衝材の機能変化に係るデータの拡充・・・・・	209
4-4	緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充	243
4-5	沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化のまとめ	290
第5章	おわりに	
5-1	本研究の成果(結論)・・・・・	294
5-2	当該年度を終えての研究課題・・・・・	297

分冊 APPENDIX

- Appendix I 地質等公開データを使った3次元地質環境概念モデル
- Appendix II 地質概念モデルの構築と関連文献データベース
- Appendix III 浜里試験地の測量記録
- Appendix IV DD-4 孔の調査
- Appendix V XRD の分析結果
- Appendix VI 海底湧出地下水の探査に係る模擬実験および実海域試験
- Appendix VII 再冠水に至る期間を対象とした性能評価手法に係る基盤整備
- Appendix VIII セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充
- Appendix IX 緩衝材の機能変化に係るデータの拡充
- Appendix X 分野間連携 WG の記録
- Appendix XI 評価委員会の記録
- Appendix XII 知財運営委員会の記録

二次利用未承諾リスト

第1章 はじめに

1-1 研究の背景と目的

地層処分に対する国民理解を深めるために、国は2017年7月に科学的特性マップを公表し、NUMO は2018年11月に包括的技術報告書(レビュー版)を公開している。これにより、我が国の地層処分事 業は飛躍的に前進したと言える。我が国においては、原子力発電の利用に伴って既に放射性廃棄物が発 生しており、その処理・処分対策を着実に進める必要がある。放射性廃棄物の対策については、2000年 に成立した「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」(最終処分法)に基づき、地下 300m以深の安 定した地層に高レベル放射性廃棄物等を処分(地層処分)する方針である。高レベル放射性廃棄物等の 地層処分においては、天然の岩盤(天然バリア)と人工的な構築物(人工バリア)から構成される多重バ リアシステムによって長期的な安全確保がなされ、この処分システムの成立性や安全性に係る信頼性を 一層高めていくためには、天然バリアと人工バリアの特性把握と将来変化に係る調査評価技術の信頼性 向上が重要である。とりわけ重要視されている沿岸陸域から海底下においては、塩水の影響や海陸接合 部などの沿岸部固有の環境を考慮した、地質環境の調査技術・工学技術の高度化ならびに分野間の情報 伝達や相互技術理解に係る連携が必要不可欠である。

これらの状況を鑑み、本事業では沿岸部固有の環境を踏まえ、概要調査段階から精密調査段階で必要 となる地質環境の調査、工学に関する技術開発に対して総合的に取り組むことにより、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する。

1-2 研究の概要と年度計画

(1) 海陸連続3次元地質環境モデルの構築手法の高度化

概要調査段階から精密調査段階前半では、先ず既存情報に基づく対象地域の評価が必要となるが、陸 域と海底下で取得されている既存情報は、品質が違うことも多く、陸域から海域にかけての連続的で齟 齬のないデータの解釈を行い、その結果に基づき3次元地質環境モデルを構築する必要がある。そこで、 既存情報を用いた海陸連続3次元地質環境モデルの構築手法の検討を行う。

具体的には、各地域の既存情報に加えて、海上保安庁など公的機関の取得したデータを活用して、緻 密かつ効率的な海陸連続3次元地質環境モデルの構築手法を高度化する。また、(2)のボーリングを念 頭に、陸域を中心に既存の地質情報に基づく3次元地質環境モデルの構築方法と、その不確実性につい て検討する。さらには、海陸連続3次元地質環境モデルを用いた地下水の流動や滞留等に関する地下水 特性を把握する。当該項目の手法高度化は初年度より継続的に実施する。

(2) 海陸連続3次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得手法の高度化

地層処分事業では、構築したモデルやそのモデルを用いた解析結果の妥当性を示す必要がある。そこ で、以下の①~③を実施し、沿岸部に特化した調査技術の高度化並びに構築したモデルとモデルを用い た地下水流動解析結果の妥当性の検証を行う。

① 陸域から海域にかけての地質環境特性の把握技術の高度化

概要調査段階では、ボーリング孔の本数は限定されると想定されることから、効率的にモデ ルの妥当性検証や必要な地質環境データを取得する必要がある。そこで、陸域から海域にか けて、精度良く効率的に地質環境特性を把握する技術の高度化を行う。

具体的には、当該プロジェクトにおいて、陸域から海域に向けた斜坑掘削等を実施し、試料採取や坑

内計測手法の精度確認ならびに技術の高精度化を行いつつ、モデルの検討を行う。初年度は掘削地の選定や土地所有者、地域の自治体等への説明を行い、コンセンサスを得ることに注力する。実質的な掘削 は2年度目以降を予定している。ただし、既存井を用いたプッシュプル試験については、単孔を用いて 地下水の動き(微流速や滞留)を評価できることから、初年度より試験方法の高度化開発に取り組む。

② 地下水の流出場及び海底地形把握技術の高度化

地質環境モデルの妥当性を検証する上では、海底下における陸域からの地下水の流出場を 特定し、その水質の分析結果から陸域の化学的特徴を把握することが有効であり、地下水の 流出場を特定するためには海底地形を詳細に把握することが必要である。そこで、海底地形 の詳細把握に係る技術、陸域地下水の流出場の特定手法や流出している海底湧出地下水から陸 域地下水の化学的特徴の推定手法の高度化を行う。

具体的には、ROV 等を用いた現場試験と先端的な音響画像解析を組み合わせた調査手法を 開発して現場に適用することで海底湧出地下水の面的分布の把握を試みるとともに、現場試 験における課題を整理する。また、海底湧出地下水を採取して化学成分を分析することで、 その水質特性や年代(滞留時間)を明らかにする。これらの結果と、海底地形との関係性に ついても検討し、流出場の状況を特定する手法の高度化を図る。

③ 物理探査技術の高度化

海底下に処分場が建設される場合、海底面下の地層や断層などの地質構造を把握する必要がある。主 な手法としては物理探査が挙げられるので、海底面下の地層や地質構造を高精度に把握可能な物理探査 手法の確立・高度化を行う。

具体的には、次年度以降のボーリング孔掘削後に、①で掘削したボーリング孔と海底面の間でのトモ グラフィー試験を想定している。沿岸部には塩淡境界があり、淡水部の地下水は流速が早いが、塩水部 の地下水は長期間滞留することが知られていることから、地下水の分布状態から地質環境を推定し、処 分場設定時の安全性の確認に貢献できる情報を得るプロセスを確認する。

(3) 沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化

沿岸海底下に処分場が建設される場合、処分場建設に伴う地下水の流入や我が国の多用な海底地下水 の水質の幅を対象とした、坑道建設に必要な支保工等のセメント系材料の変質機構や緩衝材への影響を 評価する必要がある。そこで、浅部地下水と深部地下水の混合に伴う処分場建設への影響に係る解析技 術の確立・高度化を行う。また、既存情報等から我が国の海底下の地下水水質の幅を整理し、その幅の 中での坑道建設から再冠水に至るまでの坑道建設に必要な材料の変質機構や緩衝材への影響の定量化と その対策技術に関する検討を行う。

具体的には、沿岸部に特有な地下水化学環境を念頭に置き、処分場の建設・操業~閉鎖後の再冠水に 至る期間における、セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充(①)、及び緩衝材の機能変化 に係るデータの拡充(②)を行う。併せて、地質環境調査技術を用いた沿岸部の広域的なベースライン 情報と連携した水理解析技術の高度化を行うとともに、上記の個別材料の変質挙動に係る知見を組合せ た体系化手法の検討を進め、再冠水に至る期間を対象とした性能評価手法の基盤整備を行う(③)。また 緩衝材については、沿岸部特有の地下水環境下であることを考慮した人工バリア性能評価に資する、緩 衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関するデータの拡充を行う。取得したデータ等を通じ て、沿岸部の多様な地下水環境条件に柔軟に対応できる緩衝材の材料仕様に関する定量的な評価方法を 整備する(④)。さらに、工学設計技術が必要とするデータの品質や範囲などについては、年度ごとに地 質環境分野への情報提供(フィードバック)を行う機会を設ける(共同研究会議を想定)。

(4) 情報収集及び委員会の設置・運営

本事業の実施に当たり、国内外の関係機関や大学等との間で情報交換等を実施し、関連技術等につい ての最新情報を入手するとともに、成果の普及に努める。また、外部の専門家・有識者等で構成される 委員会を設置し、研究計画、実施方法、結果の評価等に関する審議・検討を3回/年程度行い、成果報告 書を取りまとめる。

具体的には、JAEA や NUMO 等の関連機関との連携を図りつつ、海外の関連機関の研究成果を収集 し、最先端の研究を実施している大学等の有識者のアドバイスを受けて研究の成果を効率的に発信する。 さらに、研究を実施する3者では共同研究会議を組織し、分野間ならびに組織間の連絡を密にして、研 究プロジェクトの効率化、適正化を図る。また、次世代技術者の育成についての手法や要件についても 議論・検討を行う。

事業内	細目						F	∃					
容		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
(1)海陸連 続3次元 地質環境 モデルの構 築手法の 高度化	 (1)海陸連続 3)次元地質 環境モデル 構築(A) (2)地質環境 モデルの構 築に関わる 検討(C) 	地元訪	地質環境	意情報の	既存デ- 双集と整 下水流動	-9の整理 3 次元 ¹ 3 次元 ¹ 理、地質 動解析、	里、DB 構 也質構造 也下水流	構築 モデルの 動解析 デルの構入	構築 (海域) 楽)不確実	↓ 生の影響 年度		報告	書作成
(2)海陸連 続3次元 地質環境 モデルの妥 当性の検	 ①陸域から 海域にかけ ての地質環 境特性の把 握技術の高 度化(A) ②地下水の 流出場及び 	地元説	明 →	既存	井を用し	いたプッシ.	ュプルテス 象とした5	トの実施 見場デー/	9 9 取得・ii	解析・化 年月 式料収集	学分析 ● ■ ● 夏取りまと	め、報告	書作成
証に向けた データ取得 手 法 の 高 度化	海底地形把 握技術の高 度化(A) ③物理探査 技術の高度 化(A)							F — 夕角华春	π・ 化字グ	年度	取りまと	→ め、報告	書作成

表 1-1-1 当該事業スケジュール(平成 31 年度)

内容	細目	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
	①セメント系材	課題	夏整理、	文献調	査、試験	計画							
	料の短期的な									浸润	責試験準	備	
	変質挙動に関										報告	書作成	
	する知見拡充									-			
	(R)												
	②緩衝材の機		試験	準備			力学試	験 化学	影響試	験			
	能変化に係る										報告	書作成	
(3)沿岸海	データの拡充												\rightarrow
底下特有	(R)												
の地質環	③再冠水に至		水理角	解析 課題	題整理お	よび高度	化検討						
境に <mark>着目</mark> し	る期間を対象と		性能評	価事	列調査お	よび具体	化のため	の整理					
た工学技	した性能評価										報告書	書作成	
術の <mark>高度</mark>	手法に係る基												
化	盤整備(R)												
	④緩衝材-オー	オーバー	パック挙	動試験	の条件の	検討、装	置等の経	隼備					
	バーパックの相				-			オーバ・	- パック挙	動試験	の実施		
	互作用と緩衝	試験条	件の調査	査、装置	等の準 <mark>備</mark>	ŧ.						•	
	材仕様に関わ				緩	衝材試料	和の基礎	物性取得	₽ ₽				
	るデータの拡充							緩衝材	せん断証	験法の	_{倹討・予}	備試験の	実施
	(C)									年度	取りまと	め、報告	書作成
委員会						*			*		+		
(予定)													

* A:AIST, R:RWMC, C:CRIEPIの略

第2章 海陸連続3次元地質環境モデルの構築手法の高度化

- 2-1 地質環境モデル構築に係るデータベースの整備と全国大地下水流動概念モデル
- (1) 背景と目的

地層処分に関わるパブリック・アクセプタンスを得るためには、市民レベルで地域の科学的特性に対 する十分な理解を得る必要がある。このため、GISやCADを使ったモデル化が重要となる。高精度 なモデル、すなわち地理学的に言うDM(Description Model:詳細説明モデルと呼ばれ、モデルはグリ ッド状になっている。各グリッドには物性値などの数値情報が格納されていて、マップ化や重ね合わせ が可能となっている)を作るための前提となるCM(Conceptual Model:概念モデル)を作り、地域の 地質や地形、地下水を概念的に理解して、地域モデルの適切なグリッドサイズや計算時間間隔などを設 定しなくてはならない。その後、事業実施者側では包括的技術報告書に示されたSDM(Site Descriptive Model:地質環境モデル)を使って地球科学情報の受け渡しをすることになる。本研究では、公的機関が これまでに発行している沿岸部の地球科学情報をもとに、先ず沿岸部のCMを構築することとした。対 象となる公的機関は、産業技術総合研究所、海上保安庁、石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC) などであるが、本年度は前2者のデータを中心に集積し、沿岸部を概観することとした。また、いくつ かの地域については、既存情報が豊富にあるため、これらを活用してCM作成後のDMやSDMがどの ように構築されるべきかを検討し、さらに地下水流動を概観する解析を試行している。

(2) 沿岸部地球科学情報(地質・地形・地下水)の集積

科学的特性マップ(資源エネルギー庁、2017年)で示された、好ましい特性が確認できる可能性が相 対的に高く、輸送面でも好ましい沿岸部を対象に集積すべきデータを表 2-1-1 に取りまとめた。本研究 では、このようにして作成された既存情報を段階的に更新可能な 3 次元地質構造モデルの基本モデルと して位置づけ、陸域・海域における地質調査データを統合した陸海統合 3 次元水理地質構造モデルを全 国レベルで整備することを目指している。主に既往の地形・地質図幅に基づいた 3 次元水理地質構造の 推定に対して、陸域、海域で取得された地震探査データから得られる地質構造を加えることにより、沿 岸域に着目した広域地下水流動解析の精度向上を図るものである。以下にそれぞれのデータの概要を示 す。

1) データ ID1 産業技術総合研究所 海洋地質図(図 2-1-1)

日本全国の沿岸部における海底地質図、表層堆積図を集めたラスター形式の地図データ。図の縮尺は 1:20 万、1:100 万、1:200 万、1:300 万の4種。海洋地質図は、モデル作成における地質データとして利 用できる。海底地質図には、断面図も載っており、地下の地質構造も判る様になっている。

2) データ ID2 海上保安庁 海底地形図(図 2-1-2)

日本領海基線の設定、大陸棚の決定及び海洋の利用、開発、環境保全、自然災害防止等の基礎資料と するため、海底の地形、地質構造の調査結果を示した図。図の縮尺は 1:1 万、1:5 万の 2 種。海底地形図 は、モデル作成における地質データとして利用できる。断面図は、海域により無い箇所もある。

₹-1 	0	0	0	×	0	0	0	0	0	0	0	0
重別	王挹刘摄	ı.	ı	1	0	I	I	ı	I	ı	I	0(陸域のみ)
:一夕利用祖	ē o	0	I.	I.	I.	I.	I.	I.	0	I.	0	I.
L.		0	I	0	0	I	I	I.	I	0	I	I
4√Jrur	T	I	I	I	https://oyberjapandatagsi.gojp/xyz/c om1/[k]/[y],pmg(平成元年以降) https://oyberjapandatagsi.gojp/xyz/c om2/[z]/[k]/[y],pmg(昭和63年以前)	http://services.arcgisonline.com/Arc GIS/rest'services/Ocean Basemap/ MapServer/tile/[2]/[1]/[1], png	-	I	I	I	1	I
タイル	自作 (画像→タイル)	自作 (画像→タイル)	I	自作 (画像→タイル)	タイルURL参照	タイルURL参照	I	自作 (画像→タイル)	I	自作 (shp→タイル)	自作 (shp→タイル)	自作 (shp→タイル)
GIS表示	タイル	タイル	屯	タイル	タイル	タイル	- ¢/L	タイル	鎌	タイル	タイル	タイル
糠轋	gqL dhs	ğdi	xdw	栄	栄	I.	dhs xml	tiff	pdf SEGY	dhs	3qi dhs	3qi dys
引用、受領	貸 中 昭	貸与品	賞中品	tttp://www.jmc.or.jp/engan shikei.html	tttp://www.jmc.or.jp/enganj ken.html	tttps://www.arcgis.com/ho ne/item.html?id=5ae9e138a 17842688b0b79283a4353f6	ittp://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gm old/meta/ksjshpgm⊢ 204.html	tttps://www.ngdc.noaa.gov/ ngg/global/	貸与品	減中品	貸与品	uttp://nrb- www.mit.go.jp/kokjo/inspect 'landclassification/land/l_na ional_map_5-1.html
運性系	世界測地系	日本測地系	I	世界測地系	世界測地系	中界测地系	日本測地系し	世界測地系	I	世界測地系	世界測地系	在 在 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日
投影法	ランベルト正角 円錐図法	メルカトル図法 ランベルト正角 円錐図法	I	メルカトル図法	メルカトル図法	メルカトル図法	I	メルカトル図法	I	I	I	I
位置	画像上に 緯度経度表示	画像上に 緯度経度表示	若允(OO祥)	地名 (広島、鳴門海峡など)	地名 (広島、鳴門海峡など)	I	3次メッシュコード	I	地図(北海道)	緯度経度	地図(北海道)、 地名(〇〇海域)	画像上に 緯度経度表示
4	7回 平面&断面 二次元	平面&断面 二次元	I.	世 王 次元	世 王 王 王	中 王 次 元	三次元	世 王 王 子	匣塷	三次元	平画 一次元	世 王 次元
用途	が曲 全国沿岸部 90ヶ所	全国沿岸部 191ヶ所	全国沿岸部 23ヶ所	全国沿岸部 35ヶ所	全国沿岸部 35ヶ所	省田全	有地学者	全世界	北海道沿岸 海域2ヶ所	全	北海道沿岸部 5ヶ所	全国陸域 99ケ所
	モアル作成・降机 地質境界面データ	海底面データ	I.	角底面データ	地質境界面データ 海底面データ	ビ ベ と と ー ン	ら── ≟ 里 휠 敏	ビ ースマップ	~ 一 二 里 皆 算 算 研	角底面データ	地質境界面データ 海底面データ	I
データ内容	全国90ヶ所の海底地質図、表層 堆積図、表層底質図 画像データ及びシェープファイル	画像データ(Jpg/191枚 pdfファイル101個	全国23ヶ所の石油・天然ガス 基礎調査報告書をスキャンした データ	全国35ヶ所の沿岸海域地形図 データではなく紙媒体	全国35ヶ所の沿岸海域 土地条件図 データではなく紙媒体	地図データ GISIC組み込んで利用する	全国の水深、渦流、藻場、潮流 データ。 シェープファイル、XMLファイル	地球の地形、海底地形を統合し たデータ。 geoTIFF回像2枚	基礎物理探查断面図20枚 SEGYデータ13個	(財)日本水路協会 海底地形デ ジタルテータ (シェーブファイル29ヶ野)	1 北海道立地質研究所 北海道沿 岸域の地質・底質図 (画像データ5枚)	日本全国99ヶ所
	ケーケーター 第二十二章 「四四四四四四四四四四四四四四四四四四四四四四四四四四四四四四四四四四四四	海底 地形 図	海域物理探査データ	沿岸海域地形図	沿岸海域土地条件図	OCEAN Basemap	国土数値情報沿岸海域 メッシュデータ	Bathymetry-Global-Relief	平成8年度、平成22年度 基礎物理探査	海鹿告帯ナジタレナータ	北海道沿岸域の地質・底質 図(画像デー95ヶ所)	土地分類基本調査
1 # 11	唐 御 御 田 御 王 御 兄	海上保安庁	JOGMEC		画工地理院	ESR社	国土交通省	NOAA	JOGMEC	(財)日本水路 協会	北海道立地賃 研究所	国土交通省
5	a –	2	e	4	ŝ	9	7	œ	6	10	Ξ	12

表 2-1-1 概念モデル作成に利用できる公開データ



図 2-1-1 海洋地質図の例:海洋地質図 8 西南日本外帯沖広域海底地質図



図 2-1-2 海底地質構造図:海底地質構造図 第 6323 号 3-S 小樽

3) データ ID3 JOGMEC 海域物理探査データ

基礎的な地質情報が不足している未探鉱地域等を主な対象として、国が石油・天然ガス資源のポテン シャルの概要を把握するための先導的調査活動を実施し、民間事業者による国内における探鉱・開発の 促進・活性化を図るとともに、最も安定的な供給源となる得る国産石油・天然ガス資源を確保する事を 目的とした調査報告資料である。海域の物理探査情報や試錐情報が掲載されている。

4) データ ID4 国土地理院 沿岸海域地形図 (図 2-1-3)

海洋空間の利用、海底資源の開発、沿岸漁業振興を始めとする各種の沿岸海域の開発利用、管理、保 全、防災等の諸計画の基礎資料として利用されることを目的とし作成された地図データ。等深線を基に 水深 25m 毎に5 段階に分け、段彩を加えている。

5) データ ID5 国土地理院 沿岸海域土地条件図(図 2-1-4)

沿岸部の陸部及び海部の土地条件を示す主題図。海底について、音波調査等による調査結果を分析し、 浸食や堆積の状況、傾斜等の分類、水深、海底の性質、海底の沖積層の厚さ等を表示した地図。

6) データ ID6 ESRI 社 OCEAN Basemap (図 2-1-5)

海洋 GIS の専門家が使用するよう設計されたベースマップ図。海底地形、海洋水域名、行政境界、都 市、内陸水域、道路の情報が含まれる。

7) データ ID7 国土交通省 国土数値情報沿岸海域メッシュデータ

日本沿岸域の推進、底質、渦流、藻場、潮流について、3 次メッシュ(1km メッシュ)毎に整備したデー タ。水深については、平均・最新・最浅水深を、底質については 3 次メッシュ内に最も多く存在する底 質の種類(26種)を、渦流及び藻場については、3 次メッシュにおける有無を、潮流については、上げ 潮及び下げ潮時の流速・流向を整備したデータ。

8) データ ID8 NOAA Bathymetry-Global-Relief (図 2-1-6)

フリーで利用可能な地球の地形、海底地形を統合したデータ。グリッドのセルサイズは緯度経度でいう1分、距離にすると約1.8kmの解像度となる。日本の規格だと3次メッシュ(1km メッシュ)に近い。

9) データ ID10 (財) 日本水路協会 海底地形デジタルデータ (図 2-1-7)

日本沿岸全域にわたり整備された海底地形データ。海域により等深線間隔が異なるが、取得推進デー タで求められる最大限の高密度等深線を収録している。海底地形データは、アスキーファイルとシェー プファイルの2種類がある。

10) データ ID11 北海道立地質研究所 北海道沿岸域の地質・底質図 北海道沿岸域における陸域の地質、海域の底質を表示した地図データ。



図 2-1-4 沿岸海域土地条件図:国土地理院



図 2-1-5 ArcGIS Ocean Basemap 概要



⊠ 2-1-6 ETOPO1 Global Relief Model



図 2-1-7 日本水路協会、海底地形デジタルデータ M7017 瀬戸内海東部

11) データ ID12 国土交通省 土地分類基本調査

国土地理院発行の縮尺 1:5 万地形図を基図として、土地利用の現況、土地の自然条件(地形、表層地 層、土壌)等を調査し、取りまとめた地図データ。

詳細に見ると、上記の情報には重複や齟齬が見られるが、それは文献調査時から概要調査にかけての 課題となると考える。概要調査におけるモデリングにおいては、各章の得られた情報を公開する必要が ある。

(3) データベースの構築

1) タイルデータの作成

マップの表示を高速化するためにタイル形式に成形した。タイルの大きさには世界基準仕様があり、1 つのタイルは正方形の 256 ピクセルの画像とされている。また、ズームレベルと呼ばれるタイルの縮尺 が定義されており、ズームレベル 0 はほぼ全世界が収まる 1 枚のタイル、ズームレベル 1 はこれを 2× 2 に分割した 4 タイル、ズームレベル 2 は 4×4 に分割した 16 タイルというようにズームレベルが上が るごとに縦横のタイル数が 2 倍に増える。Google マップ、OpenStreetMap、ArcGIS Online のベースマ ップ (地図) もこの仕様で公開されている。

タイルデータは、日本全国を包括する領域で作成する。この時のタイルデータ容量の概算を表 2-1-2 に示す。容量を考慮するとシステムとして現実的なレベルはズームレベル 10 までと判断した。ズームレ ベル 10 とした際の地図表示の一例を図 2-1-8 に示す。

集積したデータを、地形や地質の単位に基づき、概ね都道府県単位でデータベース化する。この時、 メタデータベースを構築する。このメタデータベースは、都道府県単位でデータセットの種類とデータ 取得年度、データ容量、データの内容などが表示されるようにする。メタデータは2Dマップ上で確認 できることとし、またエクセル等の表形式のデータとして内容が審議できるようにする。さらに、メタ データはデータベースとリンクさせた。メタデータの入力項目を表 2-1-3 に示す。データベースに含ま れる全データに対しメタデータを設定する。この地名 1、地名 2 より都道府県単位でデータの集計が可能 である。また、検索システムに利用できるよう検索用キーワードをメタデータに含めることを想定して いる。

2) GIS システムの構築

本研究では、集積したデータを GIS 上で閲覧できるようにしている。GIS は、デジタルデータを保管 する仮想サーバーとデータ通信を行うデータ通信プログラム、ユーザーが操作する PC にデータを可視 化するデータマッピングプログラム及びユーザーインターフェース(GUI: Graphical User Interface)で 構成されている。

3)検索システム

データ名、キーワードを入力する事で、沿岸部地球科学データベース内のデータを検索し、該当する データをリストアップするインターフェースを作成する。検索にはメタデータベースのデータ名、地名、 キーワードを参照する。データ検索を行う際は、形態素解析を使用し該当データを探索する。ここで使 用するモジュールは、京都大学情報学研究科-日本電信電話株式会社コミュニケーション科学基礎研究 所共同研究ユニットプロジェクトを通じて開発されたオープンソース形態素解析モジュールである MeCab を採用した。MeCab は、他の解析モジュールと比べ高速に動作し、言語に依存せず辞書データ の追加・編集が容易であることが特徴である。

ズーム レベル	スケー ル(※)	地図表示概要	日本全国が収 まるタイル枚 数	容量[MB]	容量 [GB]
5	300km		9	1	0
6	100km		36	5	0
7	50km		144	19	0
8	30km		576	77	0
9	20km	等高線・高速道路名が追加	2,304	307	0
10	10km	国道名・市区町村名が追加	9,216	1,229	1
11	5km	主要道路、行政区画が追加	36,864	4,915	5
12	3km	駅名が追加	147,456	19,661	20
13	1km	その他道路が追加	589,824	78,643	79
14	500m	丁区画表示が追加	2,359,296	314,573	315
15	300m	町名が追加	9,437,184	1,258,291	1,258
16	100m		37,748,736	5,033,165	5,033
17	50m		150,994,944	20,132,659	20,133
18	30m	学校・施設等のランドマーク名が追加	603,979,776	80,530,637	80,531

表 2-1-2 タイルデータ容量概算



図 2-1-8 ズームレベル 10 の地図表示(国土地理院地形図を利用)

メタデータ項目	内容		
ID	データ個別の ID		
種類	種類番号、表 1-2-1 のデータ ID に相当		
種類内 ID	集積データ内におけるデータ番号		
表示形式	GIS での表示形式番号		
データ名	データの名前		
作成日	データが作成された日時		
取得日	データを取得した日時		
入力日	データベースに組み込んだ日時		
形式	データ形式(ファイル拡張子)		
容量	データの容量		
地名1	データの所在、都道府県名		
地名 2	データの所在、市町村		
地名 3	データの所在、その他固有名詞		
キーワード	データ検索用キーワードの配列		

表 2-1-3 メタデータベース入力項目

(4) 概念モデル (CM) の作成

沿岸部地球科学データベースより、指定した領域に含まれる全データを抽出し3次元的に表示させた 概念モデルを自動的に表示できるようにした (プログラムを作成した)。概念モデルのデータ表示の一例 (幌延地域)を図 2-1-9 に示す。

地質モデルの大きさは、海岸線を挟んで海陸ともに 20~30 km程度、地形単位に相当する海岸線の長さを 含むものとした。実際の調査時には追加情報が含まれることもあると想定され、その場合には地球化学 情報などをふまえたモデル構築を行う。しかしながら、誰もがわかる情報(公開情報だけ)で概念モデ ルが作られることが透明性と公平性を担保することになる。また、探査結果の得られていない測線間の 地質構造、断層配置を推定し、3次元化された地層境界面及び断層面をモデル化した数値データを作成 することが必要となる。なお、3次元化に際しては、上記で整理した海洋・海底地質、海底地形等の既存 調査資料との整合性を確認することから、データセットに対するデータ密度の評価をしなければならな い。その際、処分場パネルの大きさを対照する必要がある。また、既往地震探査データによる陸海結合 3 次元水理地質構造モデル構築とその広域地下水流動解析への適用時に留意すべき課題とその対処策等に ついて検討し、将来の地上からの調査計画時に参照可能な知見として整理することが求められる。本研 究で作成したモデルを図 2-1-10 に示す。



図 2-1-9 データベースより作成した概念モデルのイメージ(地形・地質・物理探査データ)



(5) 全国大地下水流動概念モデル構築の試行

1)解析の手法

地下水流動に関わる概念モデルを構築する際、氷期サイクル(約12万年)を念頭に置き、2サイクル 以上の時間を見込んで解析を行い、現在判明している塩分と温度の分布を再現した。解析には地下水流 動と塩分・熱密度流の同時連成解析を実行した。なお、地下水流動と塩分・熱密度流の同時連成解析は、 密度依存を考慮した飽和・不飽和浸透流のオイラー法(有限要素法)による定式化、ならびに移流分散 のオイラリアン・ラグラジアン法(有限要素法、及び後退粒子追跡法・修正連続移動粒子追跡法)による 定式化に基づく時間変化に対応した断面二次元、三次元解析を実施している。塩分・熱密度流同時連成 解析を行う場合、安定解を得るために重要なクーラン基準、ペクレ基準があり、その基準を満たすよう に解析条件や状態変数(地下水流速)に応じたメッシュサイズや解析時間増分を定める必要がある。 本研究では、Dtransu-3D・EL(公開コード)を改良し浸透流と塩分濃度による密度流、温度による密度 流を同時に考慮できるようにしている。浸透の支配方程式として式(2-1-1)を用いている。式(2-1-1)では、 Darcy 則を不飽和領域にまで拡張定義すると、透水係数Kは飽和透水係数(地盤依存) K^{s} と相対透水係数 (飽和度依存) K_{r} の積で表すとする($K_{ii} \equiv K_{r}K_{ii}^{s}$)。ここで、 K_{r} は体積含水率 θ の関数である。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho K_r K_{ij}{}^s \frac{\partial \psi}{\partial x_j} + \rho \rho_r K_r K_{i3}{}^s \right) - \rho q = \rho (\beta S_s + C_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} + \rho_f \gamma \theta \frac{\partial c}{\partial t}$$
(2-1-1)

ここで、βは以下で定義するように、比貯留係数は飽和時のみ有効であるとする指標である。

 $\beta = \begin{cases} 0 : 不飽和領域\\ 1 : 飽和領域 \end{cases}$

ここで、 ψ : 圧力水頭、C: 濃度、 ρ_f : 淡水の密度、 ρ : 流体密度、 ρ_r : 密度比($\rho_r = \rho/\rho_f$)、 q: 体積内の単位体積当たりのシンク/ソース流量[L³/TL³](排水時、q > 0)、 S_S : 比貯留係数、 γ : 濃度に対する密度比、 C_S : 比水分容量(<u>specific capacity</u>) $\equiv \partial \theta / \partial \varphi$

物質移動の基礎方程式としては式(2-1-2)を用いている。一般的に物質移動の基礎方程式は、熱移動の 基礎方程式となることは分かっているので、式(2-1-2)を式(2-1-3)のように変換する事で熱を取り扱うこ ととした。

$$R\theta\rho\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta\rho D_{ij}\frac{\partial c}{\partial x_i}\right) - \theta\rho V_i\frac{\partial c}{\partial x_i} - R\theta\rho\lambda c - Q_c \qquad (2-1-2)$$

$$\{(1-n)\rho_s C_s + \theta \rho_w C_w\} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\theta \rho K_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \theta \rho_w C_w V_i \frac{\partial T}{\partial x_i} - Q_T \right\}$$
(2-1-3)

ここで、 θ :体積含水率、 ρ :流体密度、 D_{ij} :分散テンソル、c:濃度, V_i :実流速 Q_c :源泉項、 ρ_s :土粒子の密度、 C_s :土粒子の熱容量、 ρ_w :流体の密度、 C_w :流体の熱容量、T:温度、K:熱伝導テンソル、 Q_T :熱の源泉項、n:間隙率

また、Rθρλcは、放射能の半減期などを考慮する減衰係数の項なので、熱の式からは省いている。

次に、式 2-1-1 のように、物質移動の計算ループの後に熱の計算ループを追加して、物質移動と熱を 同時に取り扱うことを可能としている。

なお、密度流の計算時には、式(2-1-4)を使用している。

$$\rho = \rho_f(T) + \gamma \mathcal{C} \tag{2-1-4}$$

ここで、 ρ :流体の密度、 ρ_f :水の密度(温度の関数)、 γ :水溶性物質の密度比-1.0、 C:濃度($0 \leq C \leq 1$)

2) 幌延モデル(解析の事例)

地下水流動の概念モデルにおいては、先に DB から作る CM の事例として示した幌延沿岸部でのモデ リングの結果を例に挙げて示す。モデル全域における堆積層の分布を図 2-1-11 に示す。地質は、標高-4000m まで作成し、データがない深部の領域は P 層と仮定し設定した。解析に使用する各地質の物性値 を表 2-1-4 に示す。また、不飽和特性に関しても、更別層、勇知層、声問層、沖積層、稚内層ごとに固 有の値を設定して、海底面部分のモデル上面に対して水位 0m で水位固定条件を設定した。さらに、蒸 発散量は、土木学会より提唱されているソーンスウェイト法により 495.3 mm/year とした。本解析では、 24 万前から現代までの気候変動(海水準、気温、降雨量の変化)を考慮した解析を実施するため、各年 代の海水準を元に海岸線を変動させている。各年代の海水準は、図 2-1-12 に示す過去 35 万年間の海水 準変動曲線を設定した。また、水位境界条件に関しては海水準で水位一定とした。境界条件を設定する 節点は、海水準変動に合わせて変更した。初期水位は 24 万年前の条件を設定した定常解析を実施し、計 算結果を初期水位とした。この条件のもとに地下水流動の概要を計算した結果、全水頭のコンターを図 2-1-13 に示す。

以上の条件を満たす概念的な地下水概況計算を実施した結果を図2-1-14~16 に示した。これらの結果 は、いずれも公的な機関がこれまでに公開している情報のみを用いて実施した解析であり、概要調査前 の議論に利用できるものである。また、これらを効果的に使うことで、全国の各地で安全性等に係る市 民会話スタートの議論や、将来計画に係る実質的な議論の可能性が高まったと考えられる。



図 2-1-11 地質を考慮した幌延概念モデル 上:地質の分布、下:重ね合わせた概念モデル 既存データベースから作ったものであり、概要調査前の議論に利活用できる。

名称	地質時代	地質年代	対応地層	色
Н	Holocene	1万8千年前	沖積層	
Q3		15 万年前	沖積層	
Q2	Quaternary	70万年前	沖積層	
Q1		170万年前	沖積層	
N3		700 万年前	更別層	
N2	Neegono	1500 万年前	勇知層	
N1	iveogene	2200 万年前	声問層	
Р		-	稚内層	

表 2-1-4 幌延モデル、各年代の地質と地層名

表 2-1-5 幌延モデル、各地質の物性値

抽聲	夕称	佦	透水係数	比貯留係数	右动即陷索	
地貝	石仰	E	[m/day]	$[m^{-1}]$	有劝间原举	
沖積層	Н		0.0864	1.0E-05	0.6	
沖積層	Q3		0.0864	1.0E-05	0.6	
沖積層	Q2		0.0864	1.0E-05	0.6	
沖積層	Q1		0.0864	1.0E-05	0.6	
更別層	N3		0.0864	1.0E-05	0.6	
勇知層	N2		6.32E-05	1.0E-05	0.6	
声問層	N1		7.84E-04	1.0E-05	0.6	
稚内層	Р		9.85E-04	1.0E-05	0.5	

年代	降雨浸透量 [mm/year]
現代	148.4
1万年前	102.5
1万7千年前	0
2万5千年前	68.4
12 万年前	148.1
13 万年前	0
21 万年前	148.1
24 万年前	34.2

表 2-1-6 幌延モデル、各年代の仮定降雨浸透量

表 2-1-7 幌延モデル、各年代の仮定海水温と仮定外気温

年代	海水温[℃]	外気温[℃]
現代	13.0	6.8
1万年前	9.0	4.1
1万7千年前	0.0	-2.1
2万5千年前	6.0	2.0
12万年前	13.0	6.8
13万年前	0.0	-2.1
21 万年前	13.0	6.8
24 万年前	3.0	-0.1



図 2-1-12 海水準変動 (JAEA、1999)



図 2-1-13 全水頭コンター図(実線内が概観の範囲)



図 2-1-14 幌延モデル、CASE1、全水頭コンター図



図 2-1-15 幌延モデル、CASE1、濃度コンター図



図 2-1-16 幌延モデル、CASE1、温度コンター図

参考文献

資源エネルギー庁(2017):科学的特性マップ、

https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/maps/k agakutekitokuseimap.pdf (最終確認 2020.03.25)

2-2 地質環境モデルの構築と地下水流動解析の高度化

(1) 背景と目的

地質環境モデル(Site Description Model, SDM)とは、様々な捉え方があると思われるが、基本的に は、地質図と、地質図をベースにした熱・地下水・力学特性・化学といった地質環境特性の主題図を束ね たものである。SDMにおける地質図の重要な役割の一つは、各特性と地層との対応関係をもとに、各特 性の空間的広がりを説明する/推定することであると言える。したがって、地質図即ち地質モデルの不 確実性は、地質環境特性の空間的広がりの推定に影響すると考えられる。そこで本研究は、沿岸部の地 下水流動を取り上げ、地質モデルの不確実性が地下水流動に与える影響を検討する。

さて、科学的特性マップ(資源エネルギー庁、2017)において、沿岸部は輸送の観点から適性が高い とされている。しかしながら、海域では地質調査、特にボーリングなどが難しく、コストもかかるため、 情報が不足している。そこで、海域までを含めた3次元地質環境モデルの構築方法を検討する。併せて、 モデル化の手順について整理する。ここでは、来年度以降に、沿岸部の大深度ボーリング調査が計画さ れている駿河湾の富士川河口を対象に、地質環境モデルを構築し、地下水流動解析を試行する。

富士川河口を研究対象とした理由は、本地点が、①わが国でも有数の地殻変動が激しい地域であり、 地質分布・地質構造の作業仮説を複数議論しやすい、②地質や地下水に関して既存データが多い、③地 下水の流れが非常に速い地域の一つであり、地下水流動に関わる現象を把握しやすい、ことが期待され るためである。

この地点を対象として、具体的に、文献調査、地質モデル作成、地下水モデル作成、地下水流動解析、 原位置調査、調査結果の地質モデルへの反映という、図 2-2-1 に示すような一連の作業を行うことは、 調査の各段階での調査内容の確認や将来的な課題を抽出するうえで有益である。また、地質モデルや地 下水モデルが内包する不確実性や、それによってもたらされる影響に関する検討評価は重要であるが、 特に沿岸域では検討事例が少ない。

このため、本研究では、①繰り返しアプローチにより、沿岸部の地質評価〜地下水流動評価の一連の 地質環境モデル(ここでは地質モデル+地下水モデル)構築フローの高度化を図る、②地質モデル(想 定しうる地質分布・地質構造など)の不確実性が、地下水流動の評価に与える影響を明らかにする、③ 地質モデル・地下水モデルを修正するために必要な調査・評価方法を明らかにする。地質環境モデルは、 人工バリア、安全評価との分野間をつなぐ、インターフェースになると考えられる。

(2) 実施方法

本研究は、図 2-2-2 のフローチャートにしたがってモデル構築・修正作業とそれに関連する検討を進 めていく。③~⑧のステップを繰り返しながらモデルの精度を高めていくことが、前述の繰り返しアプ ローチに対応している。今年度は図 2-2-2 のうち①~⑦を実施した。以下に各ステップの実施内容・実 施結果を示す。

(3) 実施結果

1) 事例研究地域の設定

本ステップでは、検討の出発点として研究地域の設定を行った。始めに大まかな地域を仮設定したの ち、地形のみを考慮した地下水流動解析を実施して、次ステップ以降で検討対象とする領域を絞り込ん だ(図 2-2-3)。



図 2-2-1 繰り返しアプローチの概念図 (核燃料サイクル開発機構(2005)を一部改変)



図 2-2-2 本研究のフローチャート



※分水嶺で囲まれた範囲を包含し、富士川河口を中心として東西南北に各~20kmの地域 図 2-2-3 事例研究地域として設定した領域 (国土地理院の標準地図および数値標高モデルを使用)

① 事例研究地域を中心とした広域地形概要

事例研究地域を含む広域的な地形は、富士川を境に西側が静岡県中部地区、東側が東部地区と地形的 な特徴をもとに区分されている。中部地区は大井川と富士川に挟まれた駿河湾西岸地域を指し、北部に は 3,000m 級の山を含む赤石山脈が展開しており、これと並走する身延山地と丘陵が海岸付近にまで及 ぶ。東部地区は、糸魚川一静岡構造線を西縁とするフォッサマグナ地帯の南端にあたる。富士山(3,776m)、 愛鷹山(1,504m)、箱根火山、伊豆半島北部と続く火山地帯が形成される。駿河湾は日本で最も深い湾と して知られ、最深部は水深 2,500m に達する。富士川河口付近では海岸から 2km ほどで水深 500m に達 する。

事例研究地域の中心となる富士川は一級水系富士川の本流であり、水源は山梨県の鋸岳である。富士 川の延長は128km,流域面積は3,990km²であり、静岡県、山梨県、長野県にまたがる。富士川河口を中 心とした検討地域を設定したが、広域的な地形では、富士川流域が非常に広範囲にわたるため、上流側 の分水嶺位置の決定が困難であった。このため、上流側は甲府盆地、下流側は駿河について拡張して評 価領域の設定を行った。

② 地形のモデル化

事例研究地域の地形のモデル化は、陸域は国土地理院基盤地図情報数値標高モデル 10m メッシュ(国 土地理院、2016)を使用し、海底地形に関しては M7001 Ver2.2 関東南部データ(日本水路協会、2008) を使用した(図 2-2-4)。地形図はエコリス社の基盤地図情報標高 DEM 変換ツールを使用して GeoTif に 変換、海底地形情報は水深を標高に変換した点群データを GIS 上で統合した。なお、統合時の参照座標 系は JDG2000/UTM zone 54N である。水深を標高に変換する際には、宇久須と清水の最低水面である TP.-091m を用いた。統合した地形データ(以降、統合地形データ)は、数値解析モデル構築ソフトウェ アに対応した形式で出力し使用する。本件では、数値解析モデル構築ソフトウェアとして、地層科学研 究所の Geo-Graphia を使用し、地形データはこのソフトウェアがインポート可能な形式として、テキス ト形式の点群として出力した。図 2-2-4 は、GIS 上で統合した数値標高モデル 10m メッシュと海底地形 標高点群データを表示した図である。同図には、国土数値情報(国土交通省、2020)の河川の線形デー タを表示している。また、統合結果のデータを用いて作成した陸域から海域まで連続した地形コンター 図を図 2-2-4 に示す。

③ 数値モデルの作成

数値モデルは、富士川流域(甲府盆地を含む)と相模湾全域を包含するモデルとした。東西約 77km、 南北約 162km、駿河湾及び富士川流域を網羅する範囲(図 2-2-5)である。この領域で作成した数値解 析モデルを図 2-2-6 に示す。数値解析モデルは、水平方向を 500m グリッドで分割し、底盤標高を EL.-5,000 m に設定し、鉛直方向の分割数を 40 層とした(要素数:約 200 万)。

31





図 2-2-5 モデル化領域の鳥観図



図 2-2-6 モデル化領域の数値解析モデル

④ 解析条件

解析条件を表 2-2-1 に示す。地質モデルは均質とし、透水係数と降雨浸透条件に関する感度解析を行った。この結果、透水係数が 1.0×10⁶ m/s、降雨涵養量が 2,000 mm/y の場合が、後述する水位分布と 比較的近いため、この条件で解析を実施することとした。降雨涵養量は後述するように、土ほか (2006) によれば、2000mm/y 程度と想定されるため、ここではこの値に対して、実測値に整合的な水位(小野 ほか、2016)を形成する透水係数を求めた。ここでは、海水の密度影響を考慮した解析を実施しており、 海域の圧力境界条件には、海水の密度を考慮した静水圧を用いた。

⑤ 解析結果

数値モデルは、北側は富士川流域、南側は御前崎、伊豆半島の石廊崎を含む駿河湾全体を包含するモ デル(以下、広域モデル)であり、この広域モデルを使って、透水係数と降雨量に関する感度解析を行っ た。この結果、透水係数1.0×10⁶ m/s、降雨涵養量 2,000 mm/y の組み合わせが比較的実測値との整合 性が高かった。この時の解析結果として、全水頭分布(図2-2-7)、海水濃度(図2-2-8)、流速ベクトル (図2-2-9)を図化しており、それぞれ標高0m、-500m、-1,000mでの平面分布を図化している。海 域に解析結果の表示がない領域が存在するのは、海域の標高が深く、解析結果がその平面に存在しない ためである。すなわち、標高-500m 以深の領域が駿河湾に広く存在することを示している。

また、全水頭分布やダルシー流速の分布から赤線で区切った領域が、広域から切り出せる。すなわち、 駿河湾の富士川河口周辺については、広域的な地下水流動の影響を受けていない領域であると推測され る。これは、赤線で区切った領域が分水嶺となっていると考えられるためである。以上より、広域モデ ルと比較するために、赤線で区切った領域(以下、狭域モデル)を抽出し地下水流動解析を実施した。

この領域を切り出して解析した結果を図 2-2-10~図 2-2-12 に示す。比較のために、領域の大きさは広 域モデルと同じにしてあり、解析結果を表示する断面も同じにした。定性的ではあるが、全水頭、海水 濃度、ダルシー流速ともに、広域モデルと狭域モデルで同等の傾向を示した結果となった。このため、 狭域モデルだけを抽出し地下水流動解析しても、駿河湾の富士川河口周辺の地下水流動解析結果は広域 モデルと大きく変わらないと考えられる。以上の検討によって、この狭域モデルを地質モデルの作成な ど今後の検討に使用することとした。
		地下水流動	物質移行			
物性	直	透水係数:	間隙率:20 [%]			
		1.0×10^{-7} , $1.0 \times 10^{-6} [m/s]$	分散長:縦 200 [m]、横 50 [m]			
			分子拡散係数:1.0×10 ⁻⁹ [m ² /s]			
	陸域	降雨浸透条件:2,000 [m/y]	海水濃度:0			
境界条件	海域	静水圧(海水面)	海水濃度:1			
	その他	不透水境界	$\frac{\partial C}{\partial x} = 0$			
特記事	事項	海水の密度:ρ = 1 + 0.025C				
		ここに、ρは密度、Cは海水濃度				

表 2-2-1 解析条件







図 2-2-9 ダルシー流速分布







図 2-2-11 切り出した領域での海水濃度分布



2) 既往データの収集・精査

本ステップでは、前項で設定された領域(およびその周辺)の地質・地下水に関する既往データを収 集し、モデル作成に用いるデータの仕分けを実施した。

既往データの収集

前項で設定した調査範囲およびその周辺の地形・地質(構造)に関する既存の文献・資料の収集を実施した(Appendix II)。収集にあたっては、インターネット上の文献検索サイトや機関レポジトリ等の既往のデータベースを用いた。収集した文献・資料に関しては、地質モデルを作成するにあたり参照した情報ソースとして、後日、改めてアプローチできるようタイトル、発行年、巻、号、参照したURL等をまとめた文献一覧表を作成するとともに、外部査読または内部査読の有無に関して可能な範囲でチェックし、同表に合わせて表記した。なお、未公表情報は今回の収集対象としない。また、縮尺 20 万分の1 より小縮尺の地質図については、より大縮尺の地質図との情報の重複が認められることから、文献収集の対象外とした。

また、後の地下水流動解析に用いるため、調査範囲の地下水に関する既存の文献・資料も収集した(表 2-2-2、表 2-2-3)。検索や整理の方針は地形・地質(構造)に関する文献・資料と同様である。

検索の結果、地形・地質に関係する文献・資料を 77 件、富士山周辺の地下水関係の文献・資料を 55 件収集し、文献リストを作成した(Appendix II、表 2-2-2、表 2-2-3)。今回取り込めなかった既往文献・ 資料については、今後モデルを更新する際に新規資料として用いることとした。

② 収集したデータの精査

収集した文献、資料等に記載されている地形および地質(構造)に関する情報またはデータの種類と 内容を確認し、これらを一次データと二次データに分類した(表 2-2-4)。

ここでの一次データは、(原則として)著者の解釈に依らない客観的データや計測データ等と定義する。 これらは、文献情報に基づく検討において、続く地質概念モデル、地質モデル(地質図)の議論に際し議 論の共通基盤となるものであり、言い換えれば拘束条件である。ただし、厳密に言うならば、今回一次 データとして挙げたものにも不確実性はある。例えば、走向傾斜データの中には、周辺の他の走向傾斜 と不調和なものがあり、局所的な変形(スランプ、地すべり地塊など)に起因することもある。このた め、地質調査結果を地質図に取りまとめる際に、調査者の判断でデータの採否を行っている場合もある。 これらは、品質マネジメントの領域に入る課題でもある。今回は、そのような判断はモデル化段階での 判断に委ね、等しく一次データとして扱った。

また、概要調査において新たに取得されるデータは、多くは一次データに相当する。つまり、このデ ータの仕分けという考え方は、概要調査とそれに基づく地質モデルの構築に際しても共通である。

二次データは、一次データ以外の解釈を含むデータ(一次データに該当しないもの)と定義した。一 次データを組み立ててモデル構築を行うに際しての参考情報である。なお、優れた二次データ、例えば、 優れた既存の地質図は、それ自体をモデルとして採用してよい。逆に、既存の地質図の中には、作成時 以降の新しいデータにより否定されるものもありうる。なお、収集した情報またはデータのうち、佐藤・ 荒井(2016)および尾崎ほか(2016)に掲載されている高分解能音波探査解釈断面については、海上に おける反射法音波探査の実施結果(往復走時データをもとに作成された反射断面図)だけでなく、これ をもとに地形および地質(構造)の分布についての解釈を加えたものであるが、地質境界面または断層 面の分布位置および深度(標高)は、何らかの物性境界の存在を示す反射面の位置および深度(標高)に 基づく解釈結果であることから、反射面の位置と連続性については一次データとして扱った。

	No.	文献名	著者	発行年	掲載先	文献種別	対象地域	備考
地下水位	1	全国地下水資料台帳	国土交通省国土政策局		(Web)		領域全体	http://nrb- www.mlit.gojp/kokjo/inspect/landclassific ation/water/basis/underground/F9/exp.ht ml
水位、地化学	2	水文環境図 No.9「富士山」	小野昌彦ほか(産総研)	2016	(Web)		西部を除く領域	
地下水位	3	地下水位年表	全国鑿井協会	1981~ 2006		資料集	領域全体	
水文全般	4	富士山の水文学的研究-火山体の水文学序説-	山本荘毅	1970	地理学評論	査読付論文	西部を除く領域	
水文全般	5	富士山とその周辺の陸水	山本荘毅	1971	「富士山」総合学術調査報告書	報告書	西部を除く領域	
降水量、気温	6	気象庁ホームページ 各種データ・資料	気象庁		(Web)		領域全体	http://www.jma.go.jp/jp/yoho/
温泉	7	日本温泉·鉱泉分布図	金原啓司·長谷川功	2005	(現在はWeb配信)	資料集	領域全体	産総研発行
流量、降水量	8	水文水質データベース	国土交通省		(Web)		領域全体	http://www1.river.go.jp/
降水量、気温	9	メッシュ気候値2000	気象業務支援センター	-	-	データファイル	領域全体	
井戸、揚水量	10	地下水マップ静岡地域(その3、附属説明書)	国土交通省国土政策局	1999	(Web)	報告書	静岡県	http://nrb- www.mlit.gojp/kokjo/inspect/landclassific ation/water/w_national_map_cw.html
揚水量	11	平成26年度東部地域地下水賦存量調査結果概要	静岡県		(Web)			https://www.pref.shizuoka.jp/kankyou/ka- 060/documents/toubu_hp_kouhyou.pdf
透水係数	12	日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成	動力炉·核燃料開発事業団	1996		報告書	領域全体	PNC TN7450 96-002
水理全般、地化学	13	海域地質環境調査確証技術開発成果報告書	産業技術総合研究所	2014		報告書	領域全体	
水理全般、地化学	14	平成26年度 海域地質環境調査確証技術開発成果報告書	産業技術総合研究所	2015		報告書	領域全体	
透水係数、地化学	15	平成27年度 海域地質環境調査確証技術開発成果報告書	産業技術総合研究所	2016		報告書	領域全体	
透水係数、地化学	16	海域地質環境調査確証技術開発成果報告書 3箇年とりまとめ(総括報告書)	産業技術総合研究所	2016		報告書	領域全体	
透水係数	17	地下水の塩水化についての研究-第1報 熔岩帯水層の水理地質学的性質-	村下敏夫·岸和男	1967	地質調査所月報	研究所報告	平野部	
透水係数	18	本邦における地下水の塩水化	村下敏夫	1982	地質調査所月報	研究所報告	平野部	
透水係数	19	富士西・南麓の水文地質	佐藤昭	1986	地下水と井戸とポンプ	報告記事	主に平野部	
透水係数	20	都市における大規模地下工事と地下水の排水、圧送-静岡ターミナルビル新築工事-	大橋和朗ほか	1981	基礎工	報告記事	領域西隣	
透水係数	21	東海地方東部地域における地震予知研究ー地下水中のラドン自動連続観測とその結果に ついての考察ー	池田喜代治ほか	1981	地質調査所月報	研究所報告	領域西部	
透水係数	22	京浜潮田線管路新設工事の技術的諸課題	中島章治·北原正弘	1983	電力土木, 182	報告記事	他地域	
透水係数	23	地中送電線京浜潮田線シールド工事 ーおもに軟弱地盤層についてー	中島章治·有泉慶隆	1982	土木施工, 23(11)	報告記事	他地域	
透水係数	24	泥岩層での斜坑NATMの挙動 東電·京浜潮田線9工区	高橋武夫ほか	1984	トンネルと地下	報告記事	他地域	
透水係数	25	ベッドタウンにトンネルを掘る	笹尾禎	1974	土と基礎	報告記事	他地域	
透水係数	26	アンダーピニングエ法による地下鉄桜木町駅構築の築造	篠原博	1974	土と基礎	報告記事	他地域	

表 2-2-2 収集した文献(1)

	No.	文献名	著者	発行年	掲載先	文献種別	対象地域	備考
透水係数	27	地下水変動による斜面崩壊の予測	桑原啓三	1977	土と基礎	報告記事	他地域	
透水係数	28	特集 大深度掘削-最近の動向と事例集 事例集②LNG,LPG地下タンクの例	高木貞人	1990	基礎工	報告記事	他地域	
透水係数	29	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年 代測定法の適用–	長谷川琢磨ほか	2010	電中研報告	報告書	他地域	
透水係数	30	陥没性地すべり地帯に挑む -藤枝バイパス谷稲葉トンネル-	林幸一·吉田信	1979	トンネルと地下	報告記事	他地域	
透水係数	31	地すべりとトンネル 一岡部トンネルにおける地すべり対策一	末原忠司ほか	1975	トンネルと地下	報告記事	領域西隣	
間隙率	32	本邦産岩石の深部物性データ集	星野一男ほか	2001		報告書	領域全体	
間隙率	33	三島溶岩流中の岩罅地不水に関する研究-溶岩流断面における地下水の流速分布と 間ゲキ率ならびに地下水流動量の算定-	落合敏郎	1970	日本地下水学会誌	査読付論文	領域東隣	
地質年代	34	南部地域の地質	杉山雄一ほか(産総研)	2014	地質図幅説明書	図幅説明書	領域西部	
地質年代	35	横須賀地域の地質	江藤哲人ほか(産総研)	1998	地質図幅説明書	図幅説明書	他地域	
蒸発散	36	箱根仙石原地域における蒸発散量の推定	板寺一洋	2005	温泉地学研究所報告	研究所報告	他地域	
水収支	37	阿蘇火山流域における水収支に関する観測研究	下津昌司	1988	土木学会論文集	査読付論文	他地域	
水質、流動系	38	静岡県岳南地域工業用水源地域調査報告東海地域調査 第10報	比留川貴ほか	1957	地質調査所月報	研究所報告	主に平野部	
地下水年代	39	Estimation of Groundwater Residence Time Using the 36Cl Bomb Pulse	Tosaki, Y. et al.	2011	Groundwater	査読付論文	富士山周辺	
水質、流動系	40	富士山南麓の地下水質、流動と窒素汚染	鹿園直建ほか	2014	地学雑誌	査読付論文	富士山南麓	
地下水年代、水収支	41	富士山の地下水年代	戸崎裕貴·浅井和由	2017	地学雑誌	査読付論文	富士山周辺	
地下水年代	42	富士山の山麓湧水の ³ H/ ³ He年代	浅井和由·舆水達司	2019	地下水学会誌	査読付論文	富士山周辺	
トリチウム	43	富士宮市地下水の化学的・同位体的特徴	中井信之	1996	富士宮市域地下水調査報告書	報告書	富士山周辺	
トリチウム	44	富士山及び周辺の地下水・河川水の安定同位体組成とその水文学への応用	中井信之ほか	1995	ハイドロロジー	査読付論文	富士山周辺	
トリチウム	45	日本における地下水のトリチウム(I)	落合敏郎·川崎宏直	1972	用水と廃水	報告記事	富士山周辺	
トリチウム	46	日本における地下水のトリチウム(Ⅱ)	落合敏郎・川崎宏直	1972	用水と廃水	報告記事	富士山周辺	
トリチウム	47	東富士の地下水解析	落合敏郎	1995	リーベル出版	書籍	富士山周辺	
トリチウム	48	富士山およびその周辺の地表水のトリチウム濃度.高山茂美編:富士山の地下水流動系の研究	垣内正久	1995	科研費報告書	報告書	富士山周辺	
トリチウム	49	Tritium concentration in wine, rain and ground water	Takahashi, T. et al.	1969	Radioisotopes	査読付論文	富士山周辺	
同位体、富士山構造	50	富士山の地下水とその涵養プロセスについて	安原正也ほか	2007	荒巻ほか編 富士火山	書籍	富士山周辺	
富士山構造、水収支	51	富士山の地下水・湧水	土隆一	2007	荒巻ほか編 富士火山	書籍	富士山周辺	
富士山水収支	52	富士山の地下水涵養量について	土隆一	2004	地下水技術	報告記事	富士山周辺	
富士山構造、水収支	53	富士山の地質と地下水流動	土隆一	2017	地学雑誌	査読付論文	富士山周辺	
富士山構造	54	富士山の地形・地質	津屋弘達	1971	「富士山」総合学術調査報告書	報告書	富士山周辺	
富士山構造	55	日本の活火山 富士火山地質図解説	産総研HP	-	(Web)		富士山周辺	https://gbank.gsjjp/volcano/Act_Vol/fuji san/text/exp-2.html

表 2-2-3 収集した文献(2)

	・走向および傾斜 ・露頭他による地質の分布位置(ルートマップなど)
14 × ×	・ボーリング他による地質の分布位置 ・地形図 ・物理探査結果
一次ナータ	・年代分析結果 ・物性データ(化学分析データを含む)
	・微化石分析結果
	・地質図 ・地質断面図 ・地質境界面の等高線 ・重力図
	・地下水面の等高線 ・柱状図の対比図 ・地殻変動に関する情報
火ナータ	・地形区分図 ・等層厚線図 ・汀線分布図
	・地質構造に関する情報(活断層分布を含む)

表 2-2-4 一次データと二次データの具体的な項目

3)地質図/三次元地質モデルの作成

ここまで、地質モデルという用語をアプリオリに使ってきたが、これは基本的には、いわゆる地質図、 つまり、位置データを厳密に扱って組み立てたものである。地質図自体は過去にはアナログデータに限 られていたが、今日ではデジタルデータ、三次元的なグリッドデータで表現されるようになってきた。 したがって、グリッドデータをベースにした地質図をここでは特に三次元地質モデルと呼ぶことにする。

これに対し、地質モデルを構築する前段階として、作業仮説を定性的に表現するものという位置づけ で、地質概念モデルがしばしば作られる。簡単に言えば、作業仮説をポンチ絵にしたものである。地質 概念モデルを複数考えて議論することは、地質モデルの不確実性を把握する、あるいは、絞り込むため の基礎となる作業である。

本ステップでは、まず前項で収集・精査したデータのうち、一次データをマッピングし、モデル化の 議論の共通基盤を作る。これを拘束条件として、地質概念モデルを複数考える。続いて、その中から実 際にモデル化するものを選定し、三次元地質モデルを作成した。

① 地質概念モデルの作成

(a) 一次データのマッピング

調査範囲における一次データの位置関係と分布状況を把握し、議論の共通基盤(拘束条件)となる情報を明らかにすることを目的として、三次元地質モデリングソフトウェア Vulcan (Maptek Pty Ltd.)を 用いて一次データの空間マッピングを実施した。

調査範囲における地質要素として抽出した情報またはデータを、地理情報システム(Geographic Information System、GIS)を用いて集約し、地形および地質(構造)に関する一次データとしては、次の情報を三次元可視化データとしてVulcan に格納・整理した(図 2-2-13)。

・数値標高モデルおよび海岸線情報(国土地理院、2016)(図 2-2-3、図 2-2-13 参照)

・海底地形デジタルデータ(日本水路協会、2012)(図 2-2-4、図 2-2-13 参照)

・走向・傾斜データ(尾崎・杉山、2018;尾崎ほか、2016;杉山・松田、2014;柴、1991;杉山・下川、 1990)

・ボーリングほか地質記載データ(尾崎ほか、2016;中田ほか、2007;山元ほか、2007; Miyaji et al.、 1992;柴ほか、1990;由井・藤井、1989)

・露頭ほか地質記載(ルートマップ)(杉山・松田、2014)

(※各文献の書誌情報は Appendix II 参照)

また、地形および地質(構造)に関する二次データとしては、地質図、地質断面図、地質境界等高線、 空中磁気図、柱状対比図、地殻変動に関する情報、地形区分図、等層厚線図、活断層分布や走向線を含む 地質構造に関する情報のうち、次の4種類のデータについて GIS を用いて集約し、Vulcan に格納・整理 した。

・地質図および地質断面図(産業技術総合研究所20万分の1シームレス地質図V2、2020;尾崎・杉山、2018;尾崎ほか、2016;井川ほか、2016;杉山・松田、2014;松田、2007;岡村ほか、1999;Yamazaki、1992;杉山・下川、1990;松原、1989;沢村、1955)

・活断層分布(今泉ほか、2018;産業技術総合研究所活断層データベース、2020;海域地質構造マップ ワーキンググループ、2001;海域地質構造マップワーキンググループ、1999)

(※各文献の書誌情報は Appendix II 参照)



図 2-2-13 事例研究地域の地形ならびに地質に関わる一次データのマッピング

(b) モデル上の地質区分の設定

地質モデル/地質図は、使う目的に沿ってその精度や詳細の度合いを決める必要がある。実際、産業 技術総合研究所(旧・地質調査所)で刊行されている1/5万地質図幅と1/20万地質図幅では、前者の方 がより細かく地質を区分し、後者の方が地質区分を丸めている。尤も、1/20万地質図で丸めていると言 っても、事例研究地域の産業技術総合研究所シームレス地質図(1/20万の精度をもつ)では、29種類の 区分がなされている。

さらに細かいことを言えば、地質図には、岩相図と地層区分図といった分類がある。前者は、最も一 次データに近い地質のマッピングである。後者は、それを岩相層序区分(地層の種類によって分ける) という考え方に沿って、調査者が一括してできた地層区分(岩相層序区分単位/層、層群など)をマッ ピングしたものである。地質図の作成には、本来時間をかけてこのような手順を踏むが、文献調査のみ では、ここまで実施することは一般には困難である。

そこで、今回は本事業における初年度の第一段階の作業と位置づけ、一般的な地質とその透水性状を 考慮し、地層区分/地層境界をこの段階で丸める。ここでいう一般的な地質とその透水性状とは、地質 年代が新しいあるいは粗粒な堆積岩ほど、あるいは堆積岩よりは火山岩の方が、より高透水性といった 定性的な区分である(参考:菊地、1990)。これを念頭に、事例研究地域での地質モデル化では、年代層 序区分(ある特定の時代に形成された地層をまとめる)と岩相層序区分を組み合わせて次の6種類の地 質/地層に区分することとした(図2-2-14)。

- ・第四系堆積岩類(完新統)
- ・第四系堆積岩類(富士川沖層群、賀茂沖層群下部層および更新世の足柄層群)
- ・第四系火山岩類(新富士・古富士・小御岳・愛鷹・達磨山・井田火山噴出物)
- ・新第三系堆積岩類(後期中新世〜鮮新世の富士川層群)
- ・新第三系火山岩類(後期中新世〜鮮新世の富士川層群、7Maの石英閃緑岩ほか貫入岩)
- ・新第三系付加コンプレックス(中期中新世の西八代層群または丹沢層群相当)

次に、地層境界の設定について述べる。地層境界の設定に反映しうる情報としては、地層/岩相間の 上限/下限の境界のほか、物理探査の情報、例えば、地層の境界である可能性がある反射法地震探査で 把握された反射面、地質の分布を規制する地質構造(地層の走向・傾斜、断層の分布、褶曲構造)等の一 次データまたは二次データからなる。

事例研究地域では、基本的に、シームレス地質図の地層区分を丸め、区分された地層間の境界を採用 した。シームレス地質図のほか、事例研究地域では、尾崎・杉山(2018)、尾崎ほか(2016)、杉山・松 田(2014)、岡村ほか(1999)、杉山・下川(1990)、などの地質図幅を示した先行研究があるが、これら の地質図幅の地層境界とシームレス地質図のそれとの間に大きな食い違いはないことを確認している。 これは、シームレス地質図において、先行研究を参照した結果と推察される。断層については、概ね富 士川以西に、南-北に分岐・雁行しながら連続する糸魚川-静岡構造線とその派生と考えられる断層群(入 山断層など)がマッピングされており、今回はこれらも主要な地層境界として採用する。一方、事例研 究地域は、北米またはオホーツクプレート・ユーラシアプレート・フィリピン海プレートの境界部が走 り、境界部付近では複雑な地質構造が想定される。しかし、フィリピン海プレートと北米またはオホー ツクプレートの境界と目される断層は、富士山の東側では国府津-松田断層、神縄断層など、いくつか著 名な断層が知られているが、富士山直下および西側では富士山山体や沖積層などに覆われ、これらの西 方への連続性はよくわかっていない。これらについては、概念モデル/作業仮説の議論の中で取り扱う。



20万分の1シームレス地質図 v2(産業技術総合研究所地質調査総合センター)を一部改変して作成 (https://gbank.gsj.jp/seamless/index.html?lang=ja&p=sample)

(c) 地質概念モデルを作る上での一般的な留意点

先にも述べたように、ここでいう概念モデルとは、作業仮説を定性的に表現したものである。ただし、 この時点で定量的な議論を加えることを否定するものではない。

ここでは、地下水流動モデルへの展開を考慮し、地下水流動に影響を与えるような周囲よりも透水性 が高い地質・地質構造の分布を考える。

一般に、周囲よりも透水性が高い地質要素として、高透水性層(地層区分)、断層、不整合、貫入岩体 といったキーワードが挙げられる(図 2-2-15)。

例えば、透水性が低い泥岩層のシークエンス(地層の重なり)の中に透水性が高い砂岩が挟まれてい ることがある。また、透水性が高い地層の厚さ(あるいは深度方向の分布)もまた、地下水流動に影響を 与えることが考えられる。

断層が分布することにより、分布する地層が断層を介して地質が急変する、断層周辺で割れ目が多く 透水性が高い、逆に、粘土を多く挟む断層破砕帯/断層岩は遮水壁となるといったことが考えられる。 サイトに大規模な断層が分布する場合には、致命的となりかねない。また、断層の活動履歴(将来の活 動の可能性)が問題になる場合もある。

凹凸がある不整合面が想定される場合には、凹部に透水性が高い地層が埋没しているといったことが 考えられる。一般に、このような埋没した地層を見つけることは難しく、不整合の有無の見立てが重要 となる。また、単に、想定以上に深いところまで高透水性かつ/または軟質な地層が分布するといった ことも考えられる。

貫入岩体は、しばしば著しい高透水性を呈し、水みちとなる。規模が小さい場合は、グラウト遮水で 対応できる場合もあるが、規模が大きい場合、あるいは、処分場との位置関係によっては、サイトにと って致命的な高透水性箇所となりうる。

また、これらの事象が重なることも想定する必要があろう。例えば、不整合の下位にある断層あるい は貫入岩などである。

他にも、考慮すべき事象はあると思われる。要は、既存の地質データに基づいて、どれだけ想像力が 発揮できるか、技術力が問われている。

(d) 事例研究地域の地質概念モデルを作る上での留意点

上記の一般論に加え、先行研究で示された情報・作業仮説を参考に(近くで生じている地質現象の考慮)、事例研究地域の地下水流動に与える具体的な地質学的要因として、以下のことを考える。



図 2-2-15 地質概念モデル(作業仮説)を立案する上でのポイント

【地層区分】

沖積層/第四系更新統/先第四系(堆積岩類、付加体)の境界の不確実性を考える。事例研究地域は、 変動著しく、断層・褶曲に伴う沈降域、下刻侵食による深い谷の埋没などが想定しうる。先第四系の地 層は未区分であり、相対的な高透水性層が分布する可能性は残る。

地質モデルを作成するにあたり、抽出した地質要素について考慮または設定すべき事項(当該地質の 有無、当該地質の厚さ、地質境界面の分布下限標高、断層面の傾斜角度・方向など)を整理し、複雑な地 質境界面や断層面の空間分布に関する情報を調査範囲のスケールに応じて概念化した単案または複数案 の地質概念を設定した(表 2-2-5)。設定した地質概念については、調査範囲における地質断面図により、 複数の地質概念モデルとして図化した。

新第三紀堆積岩類の富士川層群については、概ね砂岩泥岩互層を主体とするものの、凝灰岩、凝灰角 礫岩、火山角礫岩など、やや透水性が異なることが想定される火山砕屑岩類が挟在する。新第三紀付加 コンプレックスについては、丹沢山地の屏風岩山を中心に地表分布が推定されている石英閃緑岩貫入岩 体が、松田(2007)における富士山体火山噴出物の基盤構造の一要素として推定されており、泥岩を主 体とする西八代層群および丹沢層群に併入する規模の大きい亀裂性岩盤となり得ることから、これを細 分するものである。

また、これらの概念モデルを作成するにあたっては、津屋(1968)、産業技術総合研究所(2014)など を参考に第四紀火山岩類の基底標高を 0m と推定した。また、松田(2007)、杉山・松田(2014)などを 参考に第四紀堆積岩類(足柄層群)の基底標高(-1km)、新第三紀堆積岩類(富士川層群)の基底深度(-2km)と地下地質構造を推定した。

一方、富士山体は、いずれも第四紀火山岩類である新富士火山岩類と古富士火山岩に大別されるが、 産業技術総合研究所(2014)は水理地質構造モデルにおいて、新富士火山噴出物(透水係数 10⁻⁵~10⁻¹m/s) と古富士火山噴出物(透水係数 10⁻⁷~10⁻³m/s)を区分しており、ここでの検討ではこれを踏襲する。

【断層】

事例研究地域は、糸魚川-静岡構造線の南端、北米またはオホーツクプレート・ユーラシアプレート・ フィリピン海プレートという3つのプレートの会合部にあたり、富士川河口付近や富士山東方に衝上断 層/逆断層、横ずれ断層が知られていることから、沖積層や新・古両富士山火山噴出物の下位に断層が 伏在していてもおかしくないと考えられる。このため、例えば、富士川河口断層帯および調査範囲東方 の丹沢山地南麓部に地表分布が推定されている神縄断層については、松田(2007)を参考に、ユーラシ アプレートとフィリピン海プレートの境界断層と考えられている駿河トラフへ連続し、上記の第四紀堆 積岩類(足柄層群)、新第三紀堆積岩類(富士川層群)、新第三紀付加コンプレックスの境界をなし、第四 系基盤の地体構造を規制する次の2つの構造線という仮説も考えられる。

なお、神縄断層-駿河トラフ構造線については、松田(2007)において引用されている杉村(1972)、 中村・島崎(1981)、Imanaga(1999)の見解をもとに採用したものである。同構造線は第四紀堆積岩類 および第四紀火山岩類により被覆されているものとされ、所在および分布は不確かである。

・大規模断層:御坂断層-富士川河口断層帯-駿河トラフ(プレート境界断層)

・大規模断層:神縄断層-駿河トラフ(プレート境界断層)

不確実性が想定される項目	概念モデル上の設定案(赤字:既往研究から複数案を想定)	A案を反映した概念モデル	B案を反映した概念モデル
①地層区分・分布・層厚			
第四紀完新世の堆積物の下限標高または厚さ	海岸線付近で最大層厚110m、内陸に向かって層厚を減じる	(共通) x 1 // / / / / / / / / / / / / / / / / / /	1 (Bard/Mar + 1) - (Bard/Mar
第四紀火山岩類(新富士・古富土・小御岳・ 愛属・遠磨山・井田火山噴出物)の下限標高 または厚さ	下限標高0mとし, 地表標高50m未満の南麓部で下限標高-150-0m	*	0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0
第四紀堆積岩類(富士川沖層群, 賀茂沖層群 下部層および更新世の足柄層群)の下限標高 または厚さ	最深部の下限標高-2000m	- j oljal	$ \begin{array}{c} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial r_{1}}{\partial r_{2}} \frac{\partial r_{1}}{\partial r_{2}} \frac{\partial r_{2}}{\partial r_{2}} \partial r_{$
第四系/先第四系(堆積岩類、付加体)の境 界の不確実性	各層の厚さから機械的に境界面を推定		
先第四系の中に(相対的な)高透水性層が分 布する可能性	今回は想定しない	1 第9月15日 - 連び	(Tel) (Tel)
第四紀堆積岩類に挟在する岩洞火山岩層の分 布, 下限標高または厚さ	A:岩淵安山岩層を第四紀堆積岩に含める B: 《 を第四紀火山岩層として分離する	W 1 B THE STATE ST	
新第三紀堆積岩類(後期中新世〜鮮新世の富 土川履群)の分布,下限標高または厚さ	A:下環境高-2000mとし、御坂山地東南藤振景帯-室土川河口断 層帯の東部では北東方向に層厚を減ずる北東-南西軸のチャネル状 に分布 B:①変と同じだが、御坂山地東南藤断層帯-富土川河口断層帯の 西部において覆瓦状構造をもって分布	* 1	· / · Ma. Mar. M. O. LARASLI DOO
和第二記穴山右頭(和第二記座俱右頭に伏住 する後期中新世〜鮮新世の富士川層群)の分 布,下限標高または厚さ	A:地質図および地質断面図をもとに設定 B:①案と同じだが、覆瓦状構造をもって分布	The second secon	W n ff n ff n ff n n Here an
②断層			
既往研究で知られている断層帯の(特に地下 深部での)位置・姿勢・変位			
- 富士川河口断層帯	【位置】 ・当断層帯は御坂山地東南緑断層帯とは繋がっていない 【姿勢】 A:南北走向、40-60°西傾斜 B:地下環部での姿勢については情報がない 【変位】 案四紀層を切って新第三紀の堆積岩と接きせている	N () () () () () () () () () (* 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
· 神繩 · 国府津一松田断赠带	【位置】 A:当断層帯は西方に延長して富士川河口断層帯に連続している B:当断層帯は富士川河口断層帯に連続していない 【変势】 A:東西走向、-45°北傾斜 B:地で深部で変勢については情報がない 【変位】 ・少なくとも下部更新統までは切断		N A A A A A A A A A A A A A A A A A A A
原往研究で知られていない(地表に現れてお らず物理探査等でも把握されていない)断層 帯の存在	A:未知の断層帯が地下深部に存在する B:存在しない	X	У
③貫入岩			
第四紀貫入岩の分布	A:地表で記載されている貫入岩は地下深部(モデルの最下面)ま で読いている B:地下深部まで読いていない	st i man	N I I I I I I I I I I I I I I I I I I I
新第三紀貫入岩の分布	A:丹沢山地に新第三紀に貫入した石英閃緑岩体の南西延長が富士 開出物の下にも存在 B:同石英閃緑岩体は丹沢山地にのみ分布し富士噴出物の下には存 在しない	// // // // // // // // // // // // //	e All (Second 11 and 12

表 2-2-5 概念モデルのリスト

【貫入岩】

事例研究地域の富士川沿いの沖積層下に、貫入岩が分布する可能性を連想させる事象は2つある。

1つ目は、富士山北東部で新第三系花崗閃緑岩が分布している事実である(松田、2007 など)。2つ目 は、富士川右岸の蒲原丘陵において、安山岩貫入岩の分布が記載されている点である(柴ほか、1990)。 これらは、少なくとも新第三紀以降に、丹沢層群、庵原層群などに貫入しており、これらの地層の分布 が想定される範囲の中に分布している可能性は否定できない。

分布位置については、推定するための情報が無い。既存の地質図の地質分布を参考に、花崗閃緑岩体 については比較的内陸側に、安山岩類については相対的に沿岸側に分布する可能性があると類推するの みである。

(e) 概念モデルの作成

前項で設定した地質概念について、調査範囲における地質断面図により、複数の地質概念モデルとして図化した。断面位置は、富士山を通る南北および東西断面、ならびに富士川河口を通る東西断面である(表 2-2-5)。

地質図/地質モデルの作成

(a) 採用する概念モデルの絞り込み

前項でリストアップした概念モデルから、実際にモデル化するものを絞り込む。事例研究地域の周辺 では、先に述べたように新第三紀以降の貫入岩や沈み込みに伴う衝上断層が分布していることが分かっ ているが、事例研究地域の地下深部におけるこれらの分布状況はほとんど分かっていない。このことは 地質構造そのものの不確実性を高めていることに加え、地下水の流動場にも影響を与える可能性がある ため、概念モデルの絞り込みにあたって優先的に検討するべき重要なポイントであると判断した。

【地層区分】

事例研究地域の深部の新第三系以下の地層の情報は乏しいため、今回は一括する。細分とその中での 高透水性箇所の存否については、今後の課題とする。

一方、主要な涵養域である富士山体については、新富士火山噴出物と古富士火山噴出物の透水性の差 異が想定され(産業技術総合研究所、2014)、この違いはさらに深部の地下水の流れに影響する可能性が ある。そこで、富士山体を一様とする場合と、富士山体を新富士火山噴出物と古富士火山噴出物に区分 した場合の地質モデルを作成することとした。

【貫入岩モデル】

繰り返しになるが、貫入岩体はしばしば透水性が高く、貫入岩を通して地下水が抜ける、あるいは供 給される可能性があり、その規模と分布位置によっては地下水流動に与える影響が大きい。

事例研究地域の東に位置する丹沢山地では、中新統の丹沢層群に大規模な石英閃緑岩体が貫入してい る(例えば、産業技術総合研究所 20 万分の1シームレス地質図 V2、2020)。この貫入岩体の西端(山中 湖付近)は富士山の噴出物に覆われていることから、富士山の直下の基盤岩にも貫入している可能性が 考えられる(松田、2007)。富士山の基盤に関する一次データは現時点ではほとんど得られていないため、 貫入しているかどうかやその位置・規模の推定は困難である。しかしながら、規模がある貫入岩が内陸 の山地の下に分布していた場合でも、その分布域は流れが停滞する領域であり、富士山~駿河湾を含む広 域の地下水流動への影響は少ないと考えられる(図 2-2-16)。



図 2-2-16 貫入岩の想定

【断層モデル】

これも繰り返しとなるが、断層が分布することにより、分布する地層が断層を介して地質が急変する、 断層周辺で割れ目が多く透水性が高い、逆に、粘土を多く挟む断層破砕帯/断層岩は遮水壁となるとい ったことが考えられる。サイトに大規模な断層が分布する場合には、致命的となりかねない。断層の活 動履歴(将来の活動の可能性)が問題になる場合もあるが、これについては今後の課題とする。

本地域はフィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込む境界付近に位置するため、沈み 込み運動に起因する低角の衝上断層が地下に分布している可能性が高い。地表付近に現れている断層帯 (富士川河口断層帯など)に関しては一次データが豊富に得られているものの、現れていない断層に関 してはその姿勢・変位・連続性等の一次データが全くない。そこで、既往研究に基づき、断層が分布する ならばどのようなものであるかという推定を行った。松田(2007)は、富士川河口断層帯と丹沢山地の 南縁にある神縄断層(神縄・国府津一松田断層帯)の二つの断層帯が、連続した、あるいは雁行した沈み 込み断層である可能性を指摘している。この想定に基づくと、駿河湾沿岸部の地下に大規模な断層帯が 分布することになる。この場合、断層沿いが不透水だと地下水が流れず、高透水だとそれに沿って流れ るため、断層付近で水圧が低下し、山地からの地下水流動(押し出し)が弱まり、海水が侵入しやすくな る。また断層の下盤側は、流速が弱まり、停滞域が形成される可能性がある(海水は高密度で重いため、 下方から侵入するが、陸域の地下水に押し戻される)(図 2-2-17)。すなわちこの仮想的な断層帯の有無 は、特に海岸付近の地下水流動場に対して、大きな影響を及ぼしうると考えられる。

【絞込みの結果】

今回は、貫入岩体の影響が相対的に小さいと判断し、富士山体の地層区分(古富士・新富士)と大規模 断層(神縄断層-駿河トラフ)の有無を考慮して複数のモデルを作成する。

(b) 地質モデルの作成

前項で絞り込んだ概念モデルに基づいて、現時点で考えうる位置情報を与え、三次元地質モデルを作成した。作成にあたっては、三次元地質モデリングソフトウェア Vulcan (Maptek Pty Ltd.)を使用した。

三次元地質モデルの作成作業は、仮想空間上に入力したデータセット(可視データ)をもとに地質概 念モデルを数値モデルとする作業であり、具体的には、調査範囲に分布する個々の地質境界面および個々 の断層面について、厚さをもたないグリッド/サーフェスモデルを作成する作業である。グリッド/サ ーフェスモデルとして作成する地質境界面と断層面は、これらの空間分布を定義する一次データおよび 二次データを含むものであるが、データ間については、地質境界面と断層面の推定断面線を追加すると ともに、三角網分割(triangulation)を用いた加重平均により空間補間を実施した。

作成した4つの三次元地質モデルの平面図および断面図を図2-2-18~図2-2-21に示す。







図 2-2-18 構造線無し・富士山体未区分の地質モデルの平面図および断面図



図 2-2-19 構造線有り・富士山体未区分の地質モデルの平面図および断面図



図 2-2-20 構造線無し・新富士/古富士以前を区分した地質モデルの平面図および断面図



図 2-2-21 構造線有り・新富士/古富士以前を区分した地質モデルの平面図および断面図

4)地下水モデルの作成

地質モデルを作成した領域を対象に地下水に関わる文献・資料を収集し地下水モデルを作成する。地 質モデルを作成した領域外に相当する近傍地域の文献・資料も、必要に応じて対象とする。地下水流動 に影響を与えるのは、地形、地質、地球物理、地下水理、水文、気象、地下水水質、地化学などであるた め、これらを取り扱っている文献・資料を収集する。

これらの調査結果に基づいて、地下水流動の概念モデルを作成する。概念モデルは、地下水流動にお いて主要な現象を表現するものであり、概念モデル作成時には地質モデルを考慮し、データの取捨選択 や解釈について記述することとした。

収集した文献は表 2-2-2 と表 2-2-3 に示す 55 文献である。

地形、地質、地球物理的な情報については、前述の地質モデルの作成で紹介されているため、ここで は水文、気象、地下水理、地下水水質、地化学を取り扱っている文献・資料の概要を示す。

① 水文

水文に関する情報は、国土交通省の「全国地下水資料台帳」(国土交通省、2020)、産業技術総合研究 所発行の「水文環境図 No.9「富士山」」(小野ほか、2016)、全国鑿井協会(1981~2003)の「地下水位年 表」、産業技術総合研究所発行の「日本温泉・鉱泉分布図および一覧」(金原、2005)、「水文水質データベ ース」(国土交通省、2020)等から収集・整理した。データの得られた主要な地点を図 2-2-22 示す。

(a) 井戸と地下水位

「全国地下水資料台帳」では富士市・富士宮市・南部町で計 22 ヶ所の井戸が記載され、その地下水位 は、地表面より上(自噴)から深度 478 m (富士山斜面の標高 1518 m 地点)まで様々である。「水文環 境図 No.9「富士山」」(小野ほか、2016)では富士山西麓から沿岸部にかけての地下水位分布が示され(図 2-2-23)、大局的には地形に調和的な分布であるが、富士山の斜面では地表面標高との差(地下水面の深 さ)が 300 m に達することや、沿岸部でコンターラインの屈曲した周囲より低いエリアがあることがわ かる。

地下水位の経年変化は富士市の平野部の3ヶ所で観測され、1979~2004年のデータがある。水位は深度3~5m付近にあり、降雨にやや遅れて変動するが、変動幅は最大1.5m程度であり、季節変動は明瞭である。

56



図 2-2-22 井戸、地下水位観測孔、河川流量観測地点等の位置

井戸は「全国地下水資料台帳」に示された地区名(富士市・富士宮市・南部町)をもとに、また、地下水位観測孔は「地下 水位年表」に示された所在地に基づき、それぞれ位置をプロットした。FGB と SKB は産業技術総合研究所のボーリング孔。 背景は国土地理院の電子国土 Web デジタル標高地形図を使用。赤枠は本検討の対象領域。



図 2-2-23 対象領域付近の地下水面図

「水文環境図 No.9「富士山」」。原典は静岡県の調査結果。 赤のコンターは 2013 年夏季、黒は 2013 年冬季の水位。数字は地下水面標高(m)。 赤枠は本検討の対象領域。 (b) 湧水と泉の分布

山本(1970)では富士山周辺の主要な湧水が示されている。さらに、湧水は標高 800m 付近より下に 比較的多く分布する。湧水量の総量は、富士山南麓で 10 m³/s、西麓で 15 m³/s と推定されている。「日 本温泉・鉱泉分布図および一覧」(金原、2005)には本検討の対象領域内に 10 の温泉・鉱泉が記載され、 多くは南部町と芝川町の富士川に近いエリアに分布する。40°C以上の高温泉はない。

山本(1971)によれば、富士山を3つのゾーンに区分し、標高2,000m以上の高標高部を無水域、標高800~2,000mを乏水域、標高0~800mを豊水域として区分している。無水域および乏水域が涵養域にあたり、豊水域が流出域にあたる。後述する水文環境図No.9「富士山」(小野ほか、2016)においても湧水の多くが標高800m以下に多く分布していることがわかる。湧水のメカニズムは、土(2011)により解説されている。湧水は、富士山からの溶岩流によって形成されており、溶岩流の表面は急激な冷却によって粗粒となり高透水、溶岩流の中心部はゆっくり冷却のため、緻密で透水係数が小さくなる。このような構造が、溶岩流が流れるたびに積み重なることで、高透水帯と低透水帯の層構造を形成し、被圧帯水層のような流動を形成している。

主な湧水池(白糸の滝、忍野八海、柿田川)では山麓下部の「新富士火山噴出物」から流出しているとしている(土、2007)。

(c) 河川流量

富士山周辺には大きな河川はないが、富士山の西側に富士川が流れている。「水文水質データベース」 (国土交通省、2020)では、富士川の4地点(表 2-2-6参照、上流より、南部、北松野、松岡、富山橋) での河川流量観測結果が示されている(図 2-2-22)。年平均値は南部で50 m³/s 程度、北松野と松岡で70 m³/s 程度で、年により数倍の違いがある。月別平均流量では、少ない月で各地点とも20~50 m³/s 程度 のことが多い。北松野と松岡の流量がほぼ同じもしくは、上流の北松野の方が多くなっており、河川水 の地下水への涵養や、地下水の河川水への涵養が有意でないことが想定される。

(d) 揚水量

「全国地下水資料台帳」(国土交通省、2020)では 22 井戸の揚水量(最大約 6,600 m³/day(約 240 万 m³/y))が記載されているが、実際の揚水井はこの他にも多数あるとみられる。また、静岡県では、県東部の揚水量について取りまとめている(静岡県、2014)。

「地下水マップ静岡地域(その3)」(国土交通省、2020)では市町やエリアごとに平均した揚水量(単 位面積当たりの揚水量)を表している。岳南地域の揚水量が1993年時点で144万m³/日(5.3億m³/ y)との記述もある(「地下水マップ静岡地域附属説明書」)。

2 気象

気象に関する情報は、気象庁のホームページで公開されているデータ(各種データ・資料(気象庁、 2020))、国土交通省の「水文水質データベース」(国土交通省、2020)、国土交通省の「地下水マップ静 岡地域(その3)」(国土交通省、2020)に基づき、降水量と気温のデータを収集・整理した。

対象領域内には気象庁の観測点が5ヶ所、国土交通省の観測点が3ヶ所ある(表 2-2-7、図 2-2-24)。 気象庁の観測点のうち富士山では降水量はなく、白糸は降水量のみであり、国土交通省の観測点はいず れも降水量のみである。

表 2-2-6 河川流量観測地点の諸元

観測地点	河川	所在地	緯度	経度	標高 (m)	備考
南部	富士川	南巨摩郡南部町内船	35°17'10″	138°27'36″	119.967	
北松野	富士川	富士市北松野	35°11'42″	138°34'59″	42.769	
松岡	富士川	富士市松岡	35°09'08″	138°37'37″	14.110	
富山橋	富士川	南巨摩郡身延町下山	35°25'08″	138°27'05″	135.490	※領域北縁の約6km上流

表 2-2-7 気象観測地点の諸元

	名称	所在地	緯度	経度	標高	観測項目	データ期間
	富士山	富士宮市富士山頂	35°21.6'	138° 43.6'	3775m	風向·風速, 気温, 日照時間, 積雪深	気温1932年~
気 象	白糸	富士宮市市原	35° 18.7'	138°34.7'	530m	降水量	1976年~
庁観測	南部	南巨摩郡南部町南部	35° 17.3'	138°26.7'	141m	降水量, 風向·風速, 気温, 日照時間	降水量1976年~ 気温1978年~
地点	富士	富士市厚原	35°11.1'	138° 39.8'	66m	降水量, 風向·風速, 気温, 日照時間	降水量1976年~ 気温1979年~
	清水	静岡市清水区興津中町	35° 03.2'	138°31.3'	3m	降水量, 風向·風速, 気温, 日照時間	1978年~
国 交	赤塚	御殿場市中畑字西沢	35°19'48″	138°48'11″	(1300m)	降水量	2002年~
(省観)	睦合	南巨摩郡南部町内船	35°16'59″	138°27'42″	(130m)	降水量	1989~1998年, 2002年~
地 点	松岡	富士市松岡	35°09'10″	138°37'42″	(15m)	降水量	2002年~

()の標高値は地形図上で読み取った概略の標高



図 2-2-24 気象観測地点

丸印は気象庁、四角は国土交通省の観測地点。背景は国土地理院電子国土 Web デジタル標高図を使用。 赤枠は本検討の対象領域。 (a) 降水量及び気温

年ごとの降水量と気温、月ごとの降水量と気温を整理すると、年降水量の変化は6~8年程度の周期で 繰り返しており、約2倍の変動幅がある。増減のパターンはどの観測点でも同様である。観測地点のう ち赤塚(標高1300m)では他地点の1.5~2倍の降水量となっており、赤塚は年間を通じて他地点よりも 降水量が多い。平均気温は富士山で-6℃、その他3地点では15℃前後となっている。

図 2-2-25 と図 2-2-26 には、気象データを空間補完したものとして、「メッシュ気候値 2000」(気象業 務支援センター) にある 1971~2000 年の 30 年平均の年降水量の分布を示す。メッシュ気候値 2000 で は、標高や起伏量など地形等の 16 の因子を用いた重回帰分析によって降水量や気温の空間分布を推定 し、3 次メッシュ単位(緯度 30 秒間隔、経度 45 秒間隔:約 1km 四方)で表示されている。

この図から、富士山体では降雨量が多く、3,000mm/yを超えるところもあり、平均的には 2,000~3,000 mm/y であると推定される。

(b) 蒸発散量

「地下水マップ静岡県附属説明書」(国土交通省、2020)では、領域内の4つの観測地点の1983~1992 年の10年間の気温データをもとに、ソーンスウェイト法によって蒸発散量が計算されている。ソーンス ウェイト法では月平均気温の関数として可能蒸発散量(土壌が十分に湿潤な状態での蒸発散量)が算出 され、夏季は過大、冬季は過小になると言われるものの、年間の値は実蒸発散量にほぼ相当するとした 報告(板寺、2005)もある。4地点の年間の可能蒸発散量は表 2-2-8 に示すように約710~830 mm/y と なっている。

水収支の観点からは、涵養量=降水量-蒸発散量-河川流出量の式で表されるが、「地下水マップ静岡 県附属説明書」(国土交通省、2020)では河川流出を0としたときの涵養量を「可能涵養量」(=降水量 -蒸発散量)と呼びこれも表示している。これによると可能涵養量は1,200~1,600 mm/y 程度となって いる。なお、河川流出を考慮すれば実際の涵養量はこれより小さいと考えられ、当地域同様に火山岩の 分布する阿蘇火山流域において涵養量が降水量の約50%という報告がある(下津、1988)。

③ 水理特性

(a) 透水係数

地層の透水係数については、梅田(1996)、梅田ほか(1995)に整理されており、これに富士川河口近 傍での産業技術総合研究所のボーリング調査結果(産業技術総合研究所、2015;2016b)と、当地域に関 わる文献、山本(1971)、村下・岸(1967)を合わせ、表2-2-9に示した。

沖積層(富士川砂礫層)の透水係数は、砂礫層で 10⁻⁵~10⁻⁴ m/s オーダーが多く(一部に 10⁻⁷ m/s)、 シルト層で 10⁻⁶ m/s オーダーである。新富士火山噴出物では 10⁻⁶~10⁻³ m/s オーダーで、中でも溶岩は 大きい。古富士火山噴出物では泥流堆積物の 10⁻⁷ m/s から溶岩の 10⁻³~10⁻² m/s オーダーにわたる。愛 鷹火山噴出物では 10⁻⁶~10⁻⁴ m/s、中新世の砂岩泥岩礫岩互層で 10⁻⁶ m/s のオーダーとなっている。

また、周辺地域に分布する地層の透水係数を表 2-2-10 に示した。さらに、地下水位観測地点に示さ れた揚水井での自然水位・揚水水位と揚水量を、Thiem の式(定常の井戸理論式)をもとに算出した透 水係数を表 2-2-11 に示す。対象の地層が明確でないが(地質から見て主に新富士火山分噴出物や古富 士火山噴出物と考えられる)、10⁻⁶~10⁻³ m/s オーダーであり、多くは 10⁻⁵~10⁻⁴ m/s オーダーとなって いる。



図 2-2-25 メッシュ気候値 2000 による年降水量の分布 統計期間は 1971~2000 年の 30 年間。白枠は本検討の対象領域。



図 2-2-26 メッシュ気候値 2000 による年平均気温の分布 統計期間は 1971~2000 年の 30 年間。白枠は本検討の対象領域。

	降水量 (mm/年)	可能蒸発散量 (mm/年)	可能涵養量 (mm/年)	所在地	緯度	経度	標高 (m)
白糸	2,284	712	1,572	富士宮市市原1114	35° 18.5'	138° 34.9'	530
南部	2,421	804	1,617	南部町南部4376	35° 17.1'	138° 27.0'	141
吉原	2,079	834	1,245	富士市石坂317	35° 10.7'	138°41.3'	65
清水	2,248	834	1,414	清水市興津中町	35°03.0'	138° 31.5'	3

表 2-2-8 代表地点における可能蒸発散量と可能涵養量

「地下水マップ静岡県附属説明書」。 可能涵養量=降水量-可能蒸発散量

可能蒸発散量は、気温をもとにソーンスウェイト法により計算されている。

区分	地層, 地質	透水係数 (m/s)	測定深度 (m)	試験方法	文献	緯度	経度
	富士川砂礫層	5.72E-05~1.03E-04	40.96-43.00	定流量揚水試験, 回復試験 ほか	産総研(2015)	35°06'59″	138° 37' 43″
	富士川砂礫層	7.27E-05~4.93E-04	57.10-58.60	定流量揚水試験, 回復試験 ほか	産総研(2015)	35°06'59″	138°37'43″
	富士川砂礫層	4.30E-05~5.80E-04	76.20-78.50	定流量揚水試験, 回復試験 ほか	産総研(2015)	35°06'59″	138°37'43″
	富士川砂礫層	2.73E-05~7.17E-04	94.60-96.65	定流量揚水試験, 回復試験 ほか	産総研(2015)	35°06'59″	138°37'43″
	富士川砂礫層	9.22E-06~8.01E-05	142.73-144.78	定流量揚水試験, 回復試験 ほか	産総研(2015)	35°06'59″	138°37'43″
	富士川砂礫層	1.69E-05~3.90E-04	172.48-174.53	定流量揚水試験, 回復試験 ほか	産総研(2015)	35°06'59″	138°37'43″
沖積層	富士川砂礫層	1E-05~5E-05	240	定流量揚水試験, 回復試験 ほか	産総研(2016b)	35°06'59″	138°37'43″
(~洪積層)	富士川砂礫層	6E-06~2E-05	298	定流量揚水試験, 回復試験 ほか	産総研(2016b)	35°06'59″	138° 37' 43″
	富士川砂礫層	6E-06~2E-05	349	定流量揚水試験, 回復試験 ほか	産総研(2016b)	35°06'59″	138°37'43″
	富士川砂礫層	4.84E-05~5.52E-04	150.83-157.33	定流量揚水試験, 回復試験 ほか	産総研(2015)	35° 07' 24″	138° 39'00″
	沖積層	6E-06~2E-05			佐藤(1986)●	35° 10'	138°41'
	砂礫,粘土	2E-04~3E-04			村下·岸(1967)	富士市街地の り,沼川沿い	南, 愛鷹山体寄
	シルト	1E-06~1E-05	8		大橋ほか(1981)●	34° 58.3'	138°23.3'
	砂礫	8E-03~2E-02		粒度組成より計算	大橋ほか(1981)●	34° 58.3'	138°23.3'
完新世	新富士火山噴出物 (溶岩,火山砂礫)	3E-06~6E-06			佐藤(1986)●	35° 10'	138°41'
火山噴出物 (新富士火山	富士火山溶岩層 (火山岩類)	1E-04~1E-03			村下(1982)●	35° 10'	138°41'
噴出物)	富士火山溶岩	1E-03~3E-03			村下·岸(1967)	富士市街地の 吉原市街地	南,
	古富士火山噴出物 (泥流堆積物)	2E-07~4E-07		揚水試験	佐藤(1986)●	35° 10'	138°41'
更新世 火山噴出物	古富士泥流 (火山砕屑物)	1E-07~1E-05			村下(1982)●	35° 10'	138°41'
(古富士火山 噴出物)		3E-04~7E-04			村下·岸(1967)	富士市街地の 吉原市街地	南,
	古期溶岩	1E-03~8E-02			山本(1971)	富士宮, 吉原	
更新世 火山噴出物	愛鷹火山 噴出物 (黒色火山砂礫)	2E-06	150	揚水試験	佐藤(1986)●	35° 10'	138°41'
(愛鷹火山 噴出物)	角礫混り火山砂礫	1E-04~2E-04			村下·岸(1967)	吉原市街地, 沼	日川沿い
中新統	和田島層群 小河内層群 (砂岩シルト岩礫岩 互層)	1.10E-06	49-54.5		池田ほか(1981) [●]	35° 03.1'	138°26.7'

表 2-2-9 対象領域に分布する地層の透水係数

梅田(1996)、梅田ほか(1995)およびその引用文献(●印のあるもの)、産業技術総合研究所(2015;2016b)、村下・ 岸(1967)、山本(1971)に基づき整理。各データがどの区分に属するかは、地層・地質をもとに判断。産業技術総合研 究所(2016b)は図から読み取った値。大橋ほか(1981)は対象領域の西側隣接地域のデータ。 周辺地域の地層の透水係数は、表 2-2-10 に整理した。

区分	地層, 地質	透水係数 (m/s)	測定深度 (m)	試験方法	文献	緯度	経度
	富士川層群= 和田島/小河内層群 (砂岩シルト岩礫岩 互層)	1.10E-06	49-54.5	-	池田ほか(1981)●	35° 03.1'	138°26.7'
	三浦層群(砂)	1E-06~1E-05オーダ-	-	-	中島ほか(1983)●	35° 31.1'	139° 40.4'
	三浦層群(細砂)	1E-05	20	-	中島ほか(1983)●	35° 31.1'	139° 40.4'
	三浦層群(細砂)	1E-06~1E-05才-ダ-	20	-	高橋ほか(1984)●	35° 28.9'	139° 35.7'
鮮新統~	三浦層群(泥岩)	1E-09~1E-07オーダ-	40	-	笹尾(1974)●	35° 36.7'	139°31.5'
中新統上部	三浦層群(礫混り砂)	1E-05~1E-04	40	-	笹尾(1974)●	35° 36.7'	139°31.5'
	三浦層群(細砂)	3.87E-06∼2.3E-05	30	湧水圧試験 揚水試験	篠原(1974)●	35° 26.8'	139° 38.0'
	三浦層群(シルト)	1E-09オータ [*] ー	6-16	-	桑原(1977)●	35°24.1'	139° 37.0'
	三浦層群(砂,砂礫)	1E-06~1E-05才-ダ-	16-22	-	桑原(1977)●	35°24.1'	139° 37.0'
	三浦層群(シルト)	1E-10~1E-08程度	30	-	高木(1990)●	35° 24.0'	139° 38.4'
	三浦層群	1E−07 程度 (5E−08~5E−07)	25-200	孔内透水試験	長谷川ほか(2010)	35°13'	139° 37'
	大井川層群 (風化泥岩)	1.34E-05~9.78E-05	50	-	林·吉田(1979)●	34° 51.4'	138° 12.6'
中新統 中~下部	大井川層群 (風化泥岩)	9.24E-06~2.40E-05	50	-	林·吉田(1979)●	34° 51.4'	138°12.6'
	葉山層群	1E-09 程度 (2E-11~2E-8)	210-480	孔内透水試験	長谷川ほか(2010)	35°13'	139°37'
古第三系	瀬戸川層群 (頁岩 一部砂岩)	1E-09~1E-08	40		末原ほか(1975)●	34° 54.8'	138° 17.7'
	花崗閃緑岩	3.99E-07	100	ルジオン	釜石(1990)●	(兵庫)	
	花崗閃緑岩	8.85E-07~1.03E-06	255-972	揚水試験	藤原ほか(1989)●	(長野)	
	閃緑岩	3.16E-07	9	-	菅原ほか(1981)●	(山形)	
閃緑岩類	花崗閃緑岩	4E-05~7E-05	-	-	三浦(1980)●	(島根)	
	花崗閃緑岩	2.66E-07~2.66E-06	30	ルジオン	田辺ほか(1980)●	(福岡)	
	閃緑岩	1.33E-07~2.66E-06	10-90	ルジオン	吉永(1984)●	(栃木)	
	花崗閃緑岩	1.33E-08~1.33E-07	25-80	ルジオン	前川ほか(1985)●	(三重)	

衣 Z-Z-10 月辺地域に刀削する地層の透水床数

●印は動力炉・核燃料開発事業団(1996)およびその引用文献

市町	丁 地区	自然水位 (GL.m)	揚水水位 (GL.m)	揚水量 (m ³ /day)	スクリーン深度 (m)	スクリーン長 (m)	掘削径 (mm)	口径 (mm)	透水係数 (m/s)	主な地質
	割	-4.10	-6.83	563	26.0 ~ 37.0	11.0	-	150	2.5E-04	玉石混り砂礫
	桑崎	-132.63	-133.34	1056	189.0-195.0 201.0-225.0 231.0-237.0 243.0-267.0	60.0	-	350	2.9E-04	凝灰角礫岩
	厚原	-37.65	-41.50	200	128.0-139.0 144.5-155.5	22.0	311	200	3.0E-05	玉石混り砂礫
	松本	-	-	10	20.0-30.0	10.0	-	100		-
	神谷	3.10	0.50	720	98.0-109.0 114.5-120.0	16.5	194	100	2.4E-04	玉石混り砂礫
ē	西	-3.00	-5.00	58	162.0-168.0 168.0-174.0 174.0-180.0	18.0	216	100	2.2E-05	玉石混り砂礫 ローム混り砂礫
邑	大淵	-	-	80	150.0-180.0	30.0	-	150		-
	大淵	-51.20	-69.67	510	126.0-131.5 137.0-153.5 159.0-164.5	27.5	311	200	1.3E-05	玉石混り砂礫
±	沢	-	-	1800	43.0-67.0	24.0	-	300		-
	中里	-	-	680	105.0-121.0	16.0	140	100		玉石混り火山砂礫
巿	天間	-4.29	-21.28	422	125.0-131.0 137.0-143.0 149.0-155.0	18.0	375	200	1.8E-05	玉石混り砂礫
	天間	-10.27	-13.60	239	22.0-33.0 38.0-39.5	12.5	140	100	8.0E-05	玉石混り火山砂礫 礫混りローム
	伝法	-	-	48	60.0-80.0	20.0	-	100		-
	伝法	-13.2	-13.3	57.6	31.5-37.0	5.5	130	100	1.5E-03	玄武岩 玉石混り火山砂礫
	田島	1.58	-3.17	6646	168.0-216.0	48.0	445	300	3.5E-04	玉石混り火山砂礫
	島田町	2.90	0.58	1754	203.0-209.0 221.0-239.0	24.0	311	150	4.2E-04	玉石混り砂礫
	比奈	-35.55	-39.8	156	64.0-76.0	12.0	115	100	4.3E-05	玉石混り火山砂礫
	本市場新田	-	-	9	22.0-30.0	8.0	-	100		-
副	粟倉	-478.20	-484.20	219	476.5-482.0 487.5-504.0 515.0-559.0	66.0	200	150	7.3E-06	火山砂礫 火山灰
士宮市	上	-64.60	-70.68	360	84.5-95.5 106.5-112.0 117.5-123.0	44.0	-	152	1.8E-05	礫混り火山砂礫 安山岩溶岩
	神田川町	0.00	-1.80	168	13.9-18.9	5.0	-	-	-	砂礫, 玉石混り粘土, 玉石混り火山礫
南部町	大和字青木	-4.11	-9.28	728	10.0-25.0	15.0		300	1.1E-04	-

表 2-2-11 地下水位等から算出した透水係数

「全国地下水資料台帳」に基づき整理。記載のないものは「-」で示す。

透水係数の算出では、影響半径を100m、帯水層厚をスクリーン長と仮定した。

(b) 間隙率

岩石の間隙率について「本邦産岩石の深部物性データ集」(星野ほか,2001)では対象領域内にデータ がなく、東側に分布する足柄層群(対象地区に分布する蒲原礫岩と同じ前期更新世の地層)において有 効間隙率が約7~18%との記載がある(表 2-2-12)。

落合(1970)は三島溶岩(新富士火山噴出物の一部)の間隙率を、放射能検層の結果に基づき、緻密 質で10%以下、多孔質で20~40%、空洞部で60~90%としている。また、戸崎・浅井(2017)では、元 のデータは不明であるが、富士市における溶岩の緻密部で5%以下、多孔質部で最大20%程度と述べら れている。

④ 地下水水質および地球化学

地下水水質と地球化学に関する情報は、主として産業技術総合研究所の「水文環境図 No.9「富士山」 (小野ほか、2016)」および海域地質環境調査確証技術開発成果報告書(産業技術総合研究所、2014; 2015;2016a;2016b)より収集し、これに個別の文献を加えて整理した。

(a) 地下水水質

地下水流動系に関わる地下水水質・地化学情報を表 2-2-13 に整理した。比留川ほか(1957)は、潤井 川付近を境に成分に不連続帯が認められ、西側の富士川水系と東側の富士山体系に分けられるとした。 鹿園ほか(2014)は富士市和田川付近において、東側の硝酸性窒素汚染がある愛鷹側水系と、西側の汚 染のない富士山裾野の水系が混合しているとした。Cl 濃度の分布については、図 2-2-27 に示す。

産業技術総合研究所(2016b)では、富士川河口付近のボーリング孔 SKB の溶存成分分布から、深度 0~57 m と深度 120 m 付近の 2 つの塩淡境界(ゾーン)およびその間の淡水ゾーンが認められている。

(b) 同位体

「水文環境図 No.9「富士山」(小野ほか、2016)」の酸素同位体比 δ¹⁸O の分布(図 2-2-28)では、全体に沿岸の平野部で重く、高標高域や富士山北側で軽い同位体比となっており、レイリー効果(重い同位体が先に水蒸気から降水となること)が表れている。ただし、沿岸部の深さ 180 m の井戸で δ¹⁸O が-10‰以下の軽い同位体比の地下水が見られることから、高標高域で涵養された地下水が沿岸域に到達している可能性が指摘されている。また、沿岸平野では和田川付近(図 2-2-28 の黒の矢印)を境に δ¹⁸O が西側で軽く東側で重い値となっており、鹿園ら(2014)が指摘した東西の流動系の違いを反映している可能性がある。

高標高部での涵養を示唆する軽い*δ*¹⁸O は、沿岸部の調査ボーリング孔でも見られる(産業技術総合 研究所、2016b:図 2-2-28)。

ストロンチウム同位体比⁸⁷Sr/⁸⁶Sr では沿岸ボーリング孔の淡水ゾーンの水が富士川水系であることが 示され、また、ラドン²²²Rn やヘリウム同位体比 ³He/⁴He からは断層付近での深部からの流体移動は示 されなかった(産業技術総合研究所、2016a)。

表 2-2-12 対象領域周辺に分布する岩石の物理特性

地層	岩相	有効間隙率 (%)	密度(g/cm ³)			产业	结由	级由
			自 <mark>然</mark> 状態	乾燥状態	湿潤状態	定地	神友	~ 柱皮
足柄層群	<mark>泥</mark> 岩	7.72	2.45	2.44	2.52	山北町洒水滝	35°21'12″	139°03'43″
足柄層群	<mark>泥</mark> 岩	17.86	1.96	1.90	-	小田原市地蔵堂	35° 18' 44″	139°01'35″
足柄層群	砂岩	12.07	2.48	2.43	2.55	山北町滝	35°22'30″	139°05'09″
足柄層群	<mark>泥</mark> 岩	7.1	2.39	2.34		山北町滝	35°22'30″	139°05'09″

「本邦産岩石の深部物性データ集」に基づき整理。試料はいずれも地表露頭より。

表 2-2-13	地下水流動系に関わる水質・	同位体
----------	---------------	-----

	項目	記述の概要	文献
水質	主要イオン等	富士宮市街地〜沼津の88井戸の地下水では、潤井川付近を 境に水質が変化し、西側が富士川水系の地下水、東側が富士 山体水系の地下水に区分される。	比留川ほか(1957)
		沿岸部の調査ボーリング孔 SKB では、溶存成分分布から深 度 0~57m と深度 120m 付近の 2 つの塩淡境界 (ゾーン) お よびそれらの間の淡水ゾーンが認められる。	産総研(2016b)
	NO ₃ -	富士市吉原地域の地下水は、西から東にかけて NO ₃ 濃度が 上昇している。和田川付近を境として分水界が存在し、富士 山麓からの非汚染地下水と、愛鷹由来の硝酸性窒素汚染地下 水が混合しているとみられる。	鹿園ほか(2014)
	Cl-	沿岸の一部には Cl濃度が高い地下水があり、地下水位が周 囲に比べて低い領域に相当することから、地下水利用に伴う 塩水浸入や過去の塩水の残存の可能性がある。	水文環境図 No.9 「富士山」
	V (バナジウム)	富士山体に近い湧水・地下水ほど高濃度であり、愛鷹山周辺 の湧水や富士川河川水では低い。	水文環境図 No.9 「富士山」
同位体	酸素同位体比	湾沿岸域の深度 180m の井戸でδ ¹⁸ O の低い地下水が存在 し、高標高域で涵養された地下水が沿岸域に到達している可 能性を示唆する。 海岸線沿いに東西方向の同位体比に変化が見られることは、 鹿園ほか(2014)が指摘した分水界の存在に整合的である。	水文環境図 No.9 「富士山」
		沿岸ボーリング孔 SKB の間隙水では、上部塩淡境界層より もその下の淡水ゾーンの同位体比が小さく、淡水地下水はよ り高標高部の涵養水と考えられる。その下方の地下水ではさ らに低い同位体比となっており、高標高の涵養水または最終 氷期の涵養水の可能性がある。	産総研(2016b)
	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	沿岸ボーリング孔 SKB の淡水ゾーンの地下水は、富士山の 溶岩や湧水よりも Sr 同位体比が高く、富士川河川水に近い 値を示す。	産総研(2016a)
	²²² Rn	沿岸域の断層周辺で ²²² Rn の高い地下水が見られる。 しかし、 ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr が砂礫層の影響を示す値であるため、断層 の影響ではない。	産総研(2016a)
	³ He/ ⁴ He	断層周辺の ²²² Rn が高い地下水は、他試料に比べて ³ He/ ⁴ He は高くなく、マントルヘリウム付加は断層と関係がない。	産総研(2016a)



図 2-2-27 CI 濃度の分布

「水文環境図 No.9 「富士山」」。2014 年度調査。沿岸部の井戸で見られる 200mg/L 以上の地下水は、海水の引き込みに よると考えられている。



図 2-2-28 酸素同位体比の分布

「水文環境図 No.9 「富士山」」に加筆。2014 年度調査。 全体に沿岸の平野部で重く、高標高域や富士山北側で軽い同位体比である。 沿岸部の井戸で δ¹⁸O が-10‰以下の軽い同位体比の地下水が見られる(図中の赤い矢印)。 和田川付近(図中の黒の矢印)を境に西側で軽く東で重い同位体比となっている。
(c) トリチウム

富士山南麓~西麓の湧水および地下水のトリチウム分析値を図 2-2-29 に整理し、採取年代により 2 つ に分けて表した。

1960 年代後半の試料では、深度 100 m 以深に及ぶ地下水では主に 2~3 TU の低い値を示している。 それより浅い地下水では 50 TU 以上の高い値が多い。湧水では 100 TU 以上の高い値である。

1990 年代前半の試料では全体に濃度は低くなっている。湧水では 3.7~8.7 TU で、富士宮付近では山 麓上部のほうが小さい傾向にある。地下水は 0.8~11.1 TU で、湧水に比べて範囲が広い。

中井(1996)は、富士山西麓(朝霧地区)と南西麓(富士宮地区)の複数のボーリング孔における複 数深度の地下水の酸素同位体比およびトリチウム濃度を示している。δ¹⁸O は深度とともに低くなり、深 部の地下水ほど高標高部での涵養水であることを表す。トリチウム濃度は、5~6 TU 付近を境に、これ より値の大きなグループでは深度とともに上昇するのに対し、これより値の小さなものは深度とともに 低下する。中井は、前者は降水中トリチウム濃度のピーク(1963 年頃)より後の低下期の涵養水、後者 はピーク前の上昇期の涵養水を表しているとし、δ¹⁸O の深度分布と合わせ、深層部の地下水ほど高高度 涵養型(滞留時間の長い水)、浅層部ほど低高度涵養型(滞留時間の短い水)であるとした。特に深度 103-145 mの地下水(古富士泥流中の地下水)は1.2TU の低い値で、δ¹⁸O も-11.3‰で最低値を示し、最も 高所で涵養され滞留時間も長かったことを示す(中井ほか、1995;中井、1996)。また、降水中トリチウ ム濃度の経年変化と半減期を考慮して地下水年代を推定し、若いもので 5~10 年、古いもので約 40 年 と見積もっている(年代推定では地下水の混合は考慮されていない)。

(d) 地下水年代指標

Tosaki et al. (2011) は富士山麓の湧水と地下水の ³⁶Cl 年代を求め、南麓・西麓では 30 年程度の滞留 時間であることを示している。

戸崎・浅井(2017)は富士山麓の地下水・湧水の年代測定の報告を整理し、トリチウムおよび³⁶Clの 示す年代が、新富士火山の地下水で 30~40 年以下であるのに対し、古富士火山の地下水では 60 年以上 を示すとしている。また、富士山麓の湧水の³H/³He および³⁶Cl は 20~30 年程度の年代を示している (浅井・輿水、2019)。

産業技術総合研究所(2016a、2016b)による沿岸部ボーリング孔の地下水の⁴He 年代および¹⁴C 年代 の測定結果では、塩水地下水の年代は淡水地下水に比べて 1~2 オーダー大きく、塩水地下水では 10,000 年以上の年代値が示されている。

71



図 2-2-29 地下水・湧水の位置とトリチウム濃度

⑤ 地下水流動の概念モデル

富士山は中新統の基盤上に形成された火山で、透水性に富む新富士火山噴出物の下に、難透水性の古 富士火山泥流が大規模な面的な広がりをもって分布する(図 2-2-30)。地下水は古富士火山の上を斜面下 方へと流れ、山麓下部で一部が湧水として湧出する(安原ほか、2007)。白糸の滝はこのような新富士火 山噴出物と古富士泥流の境界部に形成された湧水の代表である。また、新富士火山噴出物では溶岩流(厚 さ数 m~60 m 程度)や火山灰層などが何重にも重なった中を地下水が流れており、南西麓の湧玉池や南 東麓の柿田川湧水はその例とされる。

山麓の標高800m以下は湧水に富んだ豊水域(山本、1971)であるのに対し、高標高部は無水域(標高2000m以上)や乏水域(標高800~2000m)と呼ばれる涵養帯の役目を果たす部分である。無水域 や乏水域でも、粘土化した火山灰や溶岩緻密部が局所的難透水層となって小規模な湧水が形成されるこ とがある。

土(2007)は富士山麓の4地点の観測データ(白糸、吉原、御殿場、河口湖)に基づき、富士山の総 降水量を年間22億m³(約2500 mm/y)と見積もった。また、富士山西麓と西側山地(天子山地または 天守山地)との間を流れる芝川および潤井川の河川流量の実測値から、天子山地側からの流入量と揚水 地下水由来の水を差し引いて、富士山西側斜面での湧水量を約176万m³/日と推定した。この値を、富 士山西側斜面が富士山の全斜面に占める面積比で除し、富士山全体の湧水量を665万m³/日(約24億 m³/年)と見積もった。これを富士山全体における地下水涵養量としている。なお、標高800mより下の 山麓では降水が溶岩層間まで浸透しにくいこと(表層の溶岩流単層の緻密な中心部の存在によって鉛直 下方への透過が阻まれるため)を考慮し、その分を除けば涵養量は503万m³/日(約18億m³/年)にな るとしている。

安原ほか(2007)は、富士山全体にわたる降水と地下水(湧水、井戸水、風穴水)の酸素同位体比に ついてまとめ、山頂部の井戸水(涵養標高が明確)と中腹の局所的地下水流動系による湧水の値に基づ いて「地下水涵養線」を求めている。これに基づいて、地下水のる¹⁸O値が示す地下水涵養標高を、東麓・ 南麓・西麓の地下水の涵養標高でそれぞれ、1250~2200m、1100~2000m、1600~2250mと推定して いる。富士山中腹の局所流動系による湧水より、低標高の湧水の方が、高い涵養標高を示す山麓地下水 があることとなる。

さらに、安原ほか(2007)は、降水線と地下水涵養線の差、すなわち降水に対する涵養地下水のδ¹⁸O 値のシフトが涵養前の蒸発に伴う同位体分別を表すものとし、差の程度に基づいて蒸発率を求め、富士 山頂部で8%、北麓で12~28%、南麓で11~24%と推算した。ソーンスウェイト法により算出される蒸 発散量は、0.6~0.7 km³/y であり、降水量の27~32%となり、安原ほか(2007)の推定値よりもやや大き い値となっている。

これらの水収支の概略は表 2-2-14 のように整理される。

この涵養量からみて富士山体(体積 1200~1500 km³)は、間隙率を 10~20%と仮定すれば、単純に 考えて 67~176 年分の降水を蓄えうることとなる(戸崎・浅井、2017)。ただし、戸崎・浅井(2017)も述 べているように、多量の水が体積の小さい高透水性の新富士火山噴出物中を流れることにより滞留時間 は短くなっている。

地下水水位は、水文環境図 No.9「富士山」(小野ほか、2016)に見られるように、標高 800m より低い部分では概ね地形に従うが、富士山体内の水位については不明である。



図 2-2-30 富士山の模式断面図と地下水流動系

安原ほか(2007)。②は新富士火山噴出物内部の流れ、③は古富士火山の直上の流れで、これらは溶岩流末端で比較的大き な湧水を形成する。①は低透水層の存在等による斜面上の小規模な湧水。

	年間量	算出方法など
降水量	22 億 m ³ /年(2500 mm/年)	東西南北の山麓4地点の観測値による (1526~2789mm/年)
涵養量 (≒湧水量)	24 億 m ³ /年(665 m ³ /日) このうち溶岩層内に達するのは 18 億 m ³ /年	富士山西側斜面の湧水量 176= 芝川・潤井川の流量 244-天子山地からの流入量 19 -揚水地下水の量 49 富士山全体の湧水量(涵養量)665= 西側斜面の湧水量 176÷面積比(1/3.78)[万 m ³ /日] 標高 800m より下の斜面の降雨浸透分を除いた値
蒸発量	1.8~6.2 億 m ³ /年 (降水量の 8~28%)	δ ¹⁸ O-標高グラフにおける天水線と地下水涵養線の差より

表 2-2-14 富士山の水収支の概要

土 (2007)、安原ほか (2007) をもとに整理。

事例研究対象地域に分布する主要な水理地質区分とその透水係数の一覧を表 2-2-15 に示す。いずれも 透水係数に数オーダーの幅を持ち、特に火山性噴出物はその幅が大きい。

ただし、新富士・古富士火山性噴出物以外の地層については、ほとんどデータがない。これは、新富 士・古富士火山性噴出物の透水係数が高く、地下水も豊富なため、深部については開発する必要がなく、 調査結果もないものと推定される。このため、深部の地層やその透水係数については情報が全くない。 地下水の滞留時間は、トリチウム濃度が最もよく調べられており、GL.-100m 以浅の地下水中のトリチ ウム濃度は 5~80 TU となっており、熱核爆発実験後の降水を起源としていることと判断される。この ため、トリチウム濃度が良く調べられている新富士火山性噴出物については、数十年未満の滞留時間で あると推定される。

これらの結果をまとめると、富士山周辺の地下水流動は、主に降水を起源とし、蒸発量も20%程度で 降水量がほとんど涵養する。地下水は浅部の新富士堆積物を主に流れ、数十年未満の滞留時間を持つ。 高標高で涵養したものは、低標高に流出する傾向がある。深部の先第四系については、地質およびその 透水性ともに不明であるが、主に新富士・古富士火山性噴出物内を地下水が流れることから、透水係数 は小さいと推定される。

5) 地下水流動・物質移行解析

実施概要

作成された地下水流動概念モデルに基づいて、地下水流動・物質移行解析を実施する。本地点では、 地下水位、トリチウム濃度、水素・酸素同位体比が非常に良く調べられている。このため、これらを対象 に解析を実施する。また、広域的な地下水の滞留性を評価する目的で、⁴He および¹⁴C についても解析を 実施した。降雨涵養量については、文献調査結果からほぼ 2,000 mm/y 程度であることがわかっており、 事前の領域設定のための広域地下水流動解析結果から、透水係数は 1×10⁻⁶ m/s 程度が最適であること が確認できている。一方で、浅部の地質については、富士山火山噴出物の透水係数や間隙率が不明確で ある。また、深部については、データがほとんどなく、地質や地下水流動状況も明確でない。このため、 地質モデル作成時に抽出された不確実性を考慮した 4 ケースの数値解析モデルを作成した。これら、4 ケ ースの地下水流動・物質移行解析の結果から、調査地域における地質モデルの不確実性が地下水流動や 物質移行の評価に与える影響を明らかにする。

地数値解析モデルの作成

(a) 数値解析モデルの構築

2.1 の検討結果より、事例研究対象地域の数値解析モデル化の領域を図 2-2-31 に示す範囲とした。領域の大きさは、東西 41.2km、南北 62.25km である。数値解析モデルは、この領域を下記に示すように 分割した。数値解析モデルのメッシュを図 2-2-32 に示す。

- ・X軸方向:200m×206分割
- ・Y 軸方向:125m×124 分割 +250m×187 分割
- ・Z 軸方向:65 分割
- ・要素数:約340万要素

地質区分			透水係数 [m/s]	間隙率	備考
	汕巷屑	砂礫	10-5~10-4	30%	
第四紀	(平順)官	シルト	10-6	30%	
	完新世火山噴出物	新富士火山噴出物	10 ⁻⁶ ~10 ⁻³	溶岩緻密部:5% 溶岩多孔質部:20% その他:10~20%	溶岩部は特に大き い透水係数 間隙率は,関根ほ か(1996)の溶結 凝灰岩を参考
	更新世火山噴出物	古富士火山噴出物	10 ⁻⁷ ~10 ⁻²	溶岩緻密部:5% 溶岩多孔質部:20% その他:10~20%	溶岩部は特に大き い透水係数 間隙率は,関根ほ か(1996)の溶結 凝灰岩を参考
新第三紀	鮮新統~上部中新統	富士川層群 (砂岩・シルト岩・ 礫岩互層)	$10^{-10} \sim 10^{-5}$	30%	
	下~中部中新統	大井川層群 (風化泥岩)	10-9	30%	
古第三紀	古第三系	瀬戸層群 (頁岩,一部砂岩)	10 ⁻⁹ ~10 ⁻⁸	1%	間隙率は, 関根ほ か(1996)の頁岩 を参考
閃緑岩			10 ⁻⁸ ~10 ⁻⁵	1%	間隙率は, 関根ほ か(1996)の閃緑 岩を参考
断層		断層平行方向	周辺岩盤の透水係数よ り1~2オーダー大と 仮定		伝完
		断層直交方向		5070	

表 Z-Z-15 水理地貿符性一覧

※新第三紀、第四紀の堆積岩の間隙率は一律 30%を仮定



図 2-2-31 数値解析モデル化領域



図 2-2-32 数値解析モデル・メッシュ図

(b) 地質モデル

地質モデル構築時に取り上げられた4つのモデルは、下記の二つの項目の掛け合わせで4モデルとなる。

- ・ 富士山山体を新富士・古富士火山岩類で二分するか否か
- ・ 富士山山体を構成する地質の下位を第四系更新統堆積物と先第四系(堆積岩類と付加体)とし、 低角の衝上断層(スラスト)が分布するかしないか

上記を踏まえ数値解析モデルに設定する水理地質区分を表 2-2-16 に示す。水理地質区分は、新富士 火山噴出物、古富士火山噴出物およびその下位の地質区分として、新第三系堆積岩類〜第四系堆積物 を一括りとした。表 2-2-16 には、それぞれの地層の透水係数も併せて記載した。それぞれの透水係数 は、先の領域設定のための広域地下水流動解析結果に基づいて、浅部を 1×10⁶ m/s を中心にモデル化 した。断層の透水係数については、情報がないため影響が大きいと考えられる低透水の断層を設定し た。ここでは、基盤岩よりも 2 桁小さい透水係数を仮定した。間隙率に関する文献情報も少ないため、 間隙率は堆積岩の一般的な値である 20%とした。間隙率は主に物質移行解析の実流速を求める際に使 用するが、間隙率が倍になれば実流速は半分に、間隙率が半分になれば実流速は倍になり影響は透水 係数の変化よりも小さい。

(c) 水理地質を考慮した数値解析モデル

水理地質を考慮した数値解析モデルは表 2-2-16 の 4 ケースのモデル(Case1~4)となる。水理地質 区分をマッピングしたモデルの鳥瞰図を図 2-2-33、富士山—SKB 調査孔断面(南北断面射影)を図 2-2-34 に示す。図 2-2-33 および図 2-2-34 に示す地質区分を構築した数値モデルに反映させる。

- ③ 地下水流動解析·物質移行解析
- (a) 解析条件
- (i) 解析ケース

地下水流動・物質移行解析は、前述の水理地質を考慮した数値解析モデルの4ケース(Case1~Case4) を対象に、現況海水準、海退時海水準における定常解析を実施した。富士山-SKB 調査孔断面における 数値解析モデルの4ケース一覧を図2-2-35 に示す。

物性值	透水係数 [m/s]			間隙率 [-]	
地質区分	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
新富士火山噴出物 qv1			1×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁶	
古富士火山噴出物 qv	$1 \times 10^{\circ}$	$1 \times 10^{\circ}$	5×10 ⁻⁷	5×10 ⁻⁷	2004
基盤岩	1×10^{-7}	1×10^{-7}	1×10 ⁻⁷	1×10^{-7}	2070
断層 富士川断層 ftl 衝上断層 ktl	_	1×10 ⁻⁹	_	1×10-9	

表 2-2-16 水理地質構造区分







図 2-2-35 数値解析モデルの検討ケース 富士山一SKB 調査孔断面(南北面射影)

(ii) 解析条件

前述の通り、現況海水準と海退時海水準での定常解析を実施した。これは、現在の状況での地下水流 動状況を把握するためと、海退した際に地下水流動がどのように変化するかを評価するためである。 解析は、まず塩水による密度流の影響を考慮した地下水流動解析を実施し、その後、物質移行解析とし て、蓄積性物質(⁴He)、放射壊変する物質(¹⁴C)、トリチウム(³H)および酸素同位体比(δ¹⁸O)の 解析を実施した。

地下水流動と塩分濃度については、地下水の流動系と塩淡境界の位置を把握するために実施した。 蓄積性物質(⁴He)、放射壊変する物質(¹⁴C)、トリチウム(³H)については、地下水の滞留時間を評 価するために実施した。酸素同位体(δ¹⁸O)については、地層に涵養した地下水の流動経路を把握す ることを目的に実施した。解析条件はそれぞれの物質の特性を鑑みて表 2-2-17 のように設定した。海 域および陸域の解析条件は図 2-2-36 を示す。

地下水流動解析では、陸域の地表面は降雨境界条件とした。この境界条件は、圧力可変型の境界条件 で、圧力が0以下の場合には、所定の降雨量が設定されるが、圧力が0以上になる場合には、圧力を 0固定に変更する境界条件である。これは、圧力が0以上になる場合には、加圧注入になっており、地 表面よりも水面が高く、不自然な境界条件となっているため、これを避けるようにしている。塩分濃度 の境界条件も流量制御型の可変境界条件とした。これは、流入の場合は濃度固定とし、流出の場合は濃 度を内部依存にする境界条件である。塩分濃度によって圧力水頭が変化し、塩分濃度は全水頭によっ て移流分散が変化するため、連成解析を実施した。

⁴He の物質移行解析は、単位速度で発生する物質を設定した。これは Goode(1992)が提案した水理 的滞留時間を計算する方法と同じである。解析結果は、⁴He 濃度を発生速度で割ることで滞留時間を算 出することができる。境界条件は塩分と同じく流量による可変境界条件としている。³H と ¹⁴C は、半 減期を考慮して解析を行い、求めた濃度から滞留時間を計算している。これらの滞留時間の算出式は、 地下水年代測定に用いるものと同じものであり、原位置で取得したサンプルから地下水年代を測定す る手順を数値解析で実施しているだけである。

酸素同位体の物質移行解析は、酸素同位体の高度効果を固定境界条件として、境界条件に与えて解 析を実施した。ここでも流量依存型の可変式境界条件を用いている。

(b) 解析結果

解析結果は、各解析結果(地下水、塩分濃度、⁴He、³H、¹⁴C、δ¹⁸O)について、ケースごとに表示した。これは、地質モデルの違いが与える影響を明瞭にするためである。また、解析結果の図化は、地表面、EL.0m、EL.-500m、EL.-1,000m、SKB 調査孔を通る南北断面、SKB 調査孔および富士山山頂を通る断面で実施したが、SKB 調査孔および富士山山頂を通る断面が地下水の流動方向とも一致しており最も分かりやすいので、この断面図を結果として示す。図 2-2-37~図 2-2-39 に現況海水準における各ケースの解析結果を示す。図 2-2-40~図 2-2-42 に海退海水準における各ケースの解析結果を示す。

項目	陸域	海域	その他	特記事項
地下水	降雨境界条件	静水圧(密度考慮)	不透水	海水密度
	P<0: 2000 mm/y			ho =1+0.025C
	P≧0: P=0			C は海水濃度
塩分	Q≧0: C=0	Q≧0: C=0		地下水フラック
	Q<0: $\partial C / \partial x = 0$	C<0: ∂ C/ ∂ x=0		ス依存境界条件
⁴ He	Q≧0: C=0		単位発生速度	⁴ He 年代=C/M
	Q<0: $\partial C / \partial x = 0$		M=1 g/y	
³ H	Q≧0: C=1		半減期 12.3 年	年代=1/λ
¹⁴ C	Q<0: $\partial C / \partial x = 0$		半減期5,730年	ln(Co/C)
				崩壊定数λ
				=ln2/T
$\delta^{18}{ m O}$	$Q \ge 0$: C=0.00222	Q≧0: C=0		高度効果は、安
	Ele+5.18 (Ele:標高(m))	C<0: ∂ C/ ∂ x=0		原ほか(2007)を参
	Q<0: $\partial C / \partial x=0$			照

表 2-2-17 地下水流動解析・解析条件











図 2-2-39 現海水準での解析結果 (¹⁴C、³H)









図 2-2-42 海退海水準での解析結果 (¹⁴C、³H)

6)解析結果の評価

現況海水準の解析結果(図 2-2-37)では、全水頭分布は、富士山付近で最も高く、ボーリング孔付近 に向けて低下し、海域ではほぼ一定となっている。このため、地形に従った地下水流動となっている。 海域で全水頭が一定なのは流動がほとんどないためである。新富士と古富士が同じ透水係数のケース

(Case1&2)よりも、分割したケースの方(Case3&4)が、富士山山体において全水頭がやや増加してい るのがわかる。これは、古富士を分割し透水係数を下げたことで、富士山山体がやや流れにくくなって いるためである。海岸線付近において、断層を考慮していないケース(Case1&3)は流速に乱れがない。 一方で、断層を考慮したケース(Case2&4)は、流速分布が乱れている。後述する塩分分布の影響とも関 係するが、断層を考慮したケース(Case2&4)は淡水の陸域への流入が顕著になっている。

現海水準の塩分濃度分布(図 2-2-37)は、汀線付近に形成されている。前述のように断層を考慮した ケース(Case2&4)の方が、考慮していないケース(Case1&3)に比べて浅部で塩淡境界が張り出してい ることが分かる。これは、海岸付近にある断層による遮水効果で、沿岸付近での高い圧力が海域まで伝 わったためと考えられる。また、深部の塩淡境界は、内陸の断層は全水頭が下がったことにより、海水 浸入が大きくなったものと考えられる。ここでは実施していないが断層を高透水にした場合も、断層を 通じて山側からの圧力が低下するため、同様の現象が発生する。新富士と古富士の影響は、分布域が内 陸に位置しており、透水係数の変化が小さいこともあり、ほとんど認められない。

現況海水準の⁴He 年代(図 2-2-38)は、涵養域である富士山山体、特に高標高部では若く、標高の低下とともに古くなっている。新富士と古富士を分割した影響はそれほど顕著ではない。内陸の断層の影響は、深部で滞留時間が長くなる傾向に表れている。具体的には、断層を考慮したほうが、滞留時間が 10,000年の領域が山体側に広がり、沿岸付近でも広くなっている。全てのケースで、海域では滞留時間 が遅い領域が広く広がっている。これは海水域が基本的には受け側で動水勾配を持たないためである。 沿岸付近の海域において滞留時間がやや若くなるのは、塩淡境界付近で海水が淡水と混合して流出する ことにより、海水を塩淡境界に補給する必要があり、流速が速くなるためと考えられる。海域において は、海水は基本的に静水圧分布しているため、ほとんど流速は生じないが、微流速でも流入になる場合 には、滞留時間が0年になるため、海底面周辺では年代が若くなる傾向がみられる。

現況海水準での酸素同位体比(δ¹⁸O)(図2-2-38)は、高度効果を考慮して境界条件を設定している ため、高標高では大きい値、低標高では低い値となっている。なお、海域では0と設定している。新富 士と古富士の分割の影響は、酸素同位体比の比較的大きい分布(11‰)に影響を及ぼしており、新富士の 透水係数が高いと、この領域が下流側に広がる傾向がある。内陸部の断層の影響は、この11‰のライン をやや乱すような影響を与えている。新富士・古富士の分布域までは、比較的大きい酸素同位体比の領 域が深部まで広がるものの、それよりも下流側では、ほぼ一定の酸素同位体比になっている。酸素同位 体比の分布は、先の文献調査結果とも整合的であり、図2-2-28に示したように、低標高で涵養した酸素 同位体比の広がりが小さく、高標高で涵養したものの広がりが大きくなっている。例えば、10‰程度の ラインはちょうど新富士と古富士の切れるあたりで流出している。これは、図2-2-43に示す地表面分布 の解析結果によると明確であり、新富士と古富士の火山噴出物が切れるあたりで、高標高から涵養した 地下水が流出する形態となっている。

89



現況海水準の¹⁴C 年代(図 2-2-39)は、⁴He 年代と同様に涵養域である富士山山体で若く、標高の低下とともに古くなっている。海域には古い地下水が分布するが、海底面は流入の場合、滞留時間が 0 年になるため、若くなる。また、非常に古くなる部分については濃度が非常に小さくなるため、年代換算ができないところが一部発生している。新富士と古富士を分割した影響も顕著ではないが、断層の影響で山体側に滞留時間 10,000 年の領域が広がっている。また、断層がある場合には、平地部で滞留時間が短い領域が広がる。原因は不明であるが、形成されていた涵養域が断層の影響で小さくなったものと考えられる。

現況海水準の³H 年代(図 2-2-39)は、⁴He 年代や¹⁴C 年代と同様に、涵養域である富士山山体で若 く、標高の低下とともに古くなっている。³H は半減期が 12.3 年と若いため、低標高部や海域などの古い 地下水年代を示す領域では年代換算がうまくできないところが発生している。

海退海水準(E.L.-140m)の解析結果(図 2-2-40)では、現況海水準と同じく、全水頭分布は、富士山付 近で最も高く、海水準位置に向けて低下し、海域ではほぼ一定となっている。また、全水頭分布は、新富 士と古富士を同じ透水係数のケース(Case1&2)よりも、分割したケースの方(Case3&4)が、富士山山 体において全水頭がやや増加しているのがわかる。さらに、後述する塩分分布の影響とも関係するが、 断層があるケース(Case2&4)の方が、断層がないケース(Case1&3)よりも断層の影響で海底湧水が多く なっているように見られる。

海退海水準での塩分濃度分布(図 2-2-40)は、前述のように断層があるケース(Case2&4)の方が、 断層がないケース(Case1&3)よりも、塩淡境界が張り出している。これは、断層の遮水効果で内陸部の 高い水圧が海底下まで維持されるためと考えられる。塩淡境界の張り出しはかなり大きくなっている。 山体において濃度が縞模様になっているが、これは濃度が0を下回ったものと考えられる。このような 振動は物質移行解析ではたまに見られるが、解析への影響はほとんどないと考えられる。

海退海水準での⁴He 年代(図 2-2-41)、¹⁴C 年代および³H 年代(図 2-2-42)は、基本的な分布は海進時と同じであるが、沿岸付近の断層の影響で変化が大きくなっている。具体的には、海水準が下がり、 急峻な海底面が陸域になったことで、動水勾配が大きくなり、ボーリング孔付近が涵養域に変化している。さらに、低透水断層の影響により、ボーリング孔付近で涵養した地下水が海域へ流れ、古い地下水が海域へ押されることで、現況海水準より海退海水準の方がより海域に古い地下水が広がる傾向にある。 これらより、海水準の変動は、特に現況海岸線付近の滞留時間に大きく影響することが示唆される。

海退海水準での酸素同位体比(δ¹⁸O)(図 2-2-41)は、内陸部の分布は海進時と同じであるが、沿岸 付近が淡水域の張り出しの影響を受けて大きく変化する。特に断層がある場合、塩淡境界と同様に変化 が大きい傾向にある。

地下水流動・物質移行解析の結果より、富士山山体を新富士と古富士に分けたことによる地下水流動 の影響は小さいことが分かった。一方で、低透水断層を考慮した場合には、沿岸付近で全水頭が下がり 陸域への海水の侵入が促進された。また、⁴He 年代では滞留時間が 10,000 年の領域が山体側に広がり、 沿岸付近でも広くなった。これらのことから、本調査地域において低透水断層の有無は地下水流動・物 質移行を評価する上で大きな影響を与えることが分かった。

7) 不確実性低減のための対策の検討

この研究では、地質と地下水の調査・解析に焦点を絞っている。そこでここでは水理地質構造を明ら かにするために必要な野外調査に論点を絞りたい。 今回は事例研究地域の文献情報ベースでの検討である。これに続く現地調査として実施すべきことは、 本質的にはどこに何(地層・岩体、断層・褶曲など)があるかを明らかにするということに他ならず、他 の事業の地質調査と基本的には変わるところはない。調査によって、不確実性が小さくなることもあれ ば、新たな可能性を見出し、不確実性が大きくなることもありうる。

地層処分の概要調査の進め方については、これまでも NUMO と地層処分関係研究機関で検討されて きた。そこで、ここでは基本的な調査・評価の進め方、概要調査の在り方については、電力中央研究所の 検討事例である木方ほか(2010)に譲ることとする。本論では、事例研究地域でボーリング調査を設計 する際の留意点(掘削箇所、長さ、方向など)にさらに絞って検討する。

地層区分/地質分布については、サイトの候補地に処分場計画深度よりもやや長尺のボーリング調査 を実施することが基本であることは異論のないところであろう。深度については、当該地域の地質層序・ 地質構造を考慮して微調整が必要かもしれない。

貫入岩については、ボーリング調査の設計は非常に難しい。仮に、高角の貫入形態(岩脈)の場合に は、一般には鉛直ボーリングで捕まえられることは稀である。必要に応じてではあるが、斜孔を掘るこ とになるかもしれない。あるいは、想定される貫入岩体を覆う地層の厚さに応じて、物理探査で当たり をつけた上で、ボーリング調査実施箇所を決めるといったことも考えられよう。一方、間接的ではある が、既報の貫入岩体の層位を明らかにし、処分場を建設しようと考えている地層に貫入しうるかどうか を検討することも重要である。事例研究地域では、この論理に従って、地域の中で報告されているもの と同じ時代・同じ岩種の貫入岩があるかもしれないと考えている。

断層については、先にも述べた通り、北傾斜の低角断層を想定する。浅部で捉えようとするならば、 相対的に、コストが抑えられる反面、調査範囲は限られ、外す可能性(断層の上端より南側を掘ってし まう)が大きくなる。市街地が多く、掘削箇所を探す点でも難しかろう。一方、深部で捉えようとするな らば、相対的に、コストが大きくなるが、調査可能な範囲が広くなる。ただし、掘削が断層まで届かない という可能性を考える必要がある。なお、これらを考える前段階として、断層の両側で想定される地質、 断層の活動履歴などが明らかになっていることが望ましい。処分場を建設しようと考えている地層が断 層を切っているか断層に切られているかは基本情報である。

また、上記では北傾斜の低角断層を前提としたが、この前提が無いことも少なくないと予想される。 ボーリング孔で遭遇した断層の走向・傾斜を知るための調査として、孔内孔壁の写真撮影(ボアホール スキャナー)があるが、孔壁の状態によってはこの調査ができないことがある。この場合には、断層が 何と何の境界であるかの情報が一つの手がかりとなり、周辺地域の地質分布から、断層の姿勢を限定で きることもある。

さて、ここまでは、普通に考えられる留意点である。ただし、個別に論じてきたが、これらの事象の、 あるいはその組合せ事象の影響評価/優先順位の検討が必要となる。不確実性の低減というよりも留意 すべき不確実性の「選択」というべきかもしれない。

今回の地質モデルから地下水流動モデルを作成する過程で、まず、地質側からは、高透水性層・貫入 岩・断層を考慮した地質概念モデルを提示した。これを絞り込むにあたり、地下水側からは地下水流動 の概念モデルに影響を与える可能性が高い地質概念モデルについて助言があった。これをさらに突き詰 めていくと、地下水流動のシミュレーションを活用することも考えられる。しかし、後者は、多くのリ ソースを要する。したがって、思考実験をもっと積極的に取り入れるのが良いと考える。これは思考実 験であり、データのやり取りに留まらない本質的な分野連携である。 なお、情報が極めて乏しい中で、かつ、非常に限られた調査しかできないといった(調査者にとって 厳しい)条件下であれば、後者を選択し、科学的に想定しうる範囲で処分場にとって最も過酷な事象(条 件)またはその複数の組合せが、確認されないことを示すための最低限のボーリング調査といった方向 性を選択せざるを得ないかもしれない。

地下水流動については、本地点は、富士山体など浅部の結果については、前述のとおり、水圧、水 質、同位体など非常に多くのデータがそろっており、水収支などについても非常に良く検討されてい る。また、浅部は透水係数も大きく、地下水の供給量も大きいため、非常に活発に利用されている。こ のため、逆に深部について開発の必要がなく、データがほとんどないのが実情である。

深部の地質は、近年の富士山の噴出物などにおおわれており、どのような地質が分布しているかも明 確でなく、断層活動、貫入岩などの存在も明確でない。深部の地下水流動は、大局的には流量の大きい 浅部に強く影響を受けると考えられるが、地質およびその水理特性が不明なため、どのような流速とな っているかは未知である。

これらの不確実性を低減するには、富士山の噴出物の下に存在する地質を推定できる地点、例えば沿 岸部など、噴出物の堆積が少ない地点においてボーリング調査を行い、地質や水理特性を特定すること が有効であると考えられる。さらに、今回衝上断層の存在が推定されており、このような地下水流動方 向に対して垂直な構造の存在は、地下水流動に大きな影響を及ぼす可能性がある。このため、このよう な富士山から海域への方向に対して垂直な構造について、存在があるかどうかを確認することが重要で あると考えられる。あわせて、地殻変動が比較的大きい本地点では、地質の変遷の評価も重要になると 考えられる。また、深部の地下水は、そのような地質の変遷の影響を残している可能性があり、将来的 な予測のためにも、深部の地下水の水質や滞留時間を調査する必要があると考えられる。 参考文献

- 浅井和由、興水達司 (2019):富士山の山麓湧水の 3H/3He 年代、地下水学会誌、第 61 巻第 4 号、pp.291-298、2019.
- 井川怜欧、小野昌彦、神谷貴文、渡邊雅之、村中康秀、平野智章・丸井敦尚(2016):海陸シームレス地 質情報集、駿河湾北部沿岸域、海陸シームレス地質図 S-5、富士山周辺の水文調査、2016.
- 板寺一洋(2005):箱根仙石原地域における蒸発散量の推定、神奈川県温泉地学研究所報告、第 37 巻、 pp.51-56、2005.
- 今泉俊文、宮内崇裕、堤浩之、中田高(2018):活断層詳細デジタルマップ(新編)及び解説書、東京大 学出版会、2018.
- 梅田浩司、柳沢孝一、米田茂夫(1995):日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成、地下水 学会誌、第 37 巻第 1 号、pp.69-77、1995.
- 梅田 浩司(1996):日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成、動力炉・核燃料開発事業団、 PNC-TN7450 96-002、1996.
- 大橋和朗、森本仁(1981):都市における大規模地下工事と地下水の排水、圧送-静岡ターミナルビル新 築工事-、基礎工、91号、1981.
- 岡村行信、湯浅真人、倉本真一(1999):海洋地質図 52、20 万分の 1 駿河湾海底地質図及び同説明書、 通商産業省 工業技術院 地質調査所、1999.

尾崎正紀、杉山雄一(2018):地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)「身延地域の地質」及び同説明 書、産業技術総合研究所 地質調査総合センター、2018.

- 尾崎正紀、水野清秀、佐藤智之(2016):海陸シームレス地質情報集、駿河湾北部沿岸域、海陸シームレ ス地質図 S-5、5 万分の1富士川河口断層帯及び周辺地域地質編纂図(同説明書)、産業技術総合研究 所 地質調査総合センター、2016.
- 落合敏郎 (1970):三島溶岩流中の岩簿地不水に関する研究 溶岩流断面における地下水の流速分布と間 ゲキ率ならびに地下水流動量の算定 – 、日本地下水学会誌、第11巻1-2号、pp7-16、2017.
- 海域地質構造マップワーキンググループ(1999):日本列島周辺海域の地質構造図、地質ニュース(口絵)、 no.541、pp.2-3、1999.
- 海域地質構造マップワーキンググループ(2001):日本周辺海域の中新世最末期以降の構造発達史(付図) 200万分の1日本周辺地域の第四紀地質構造図、海洋調査技術、vol.13、no.1、2001.
- 垣内正久(1995):富士山およびその周辺の地表水のトリチウム濃度、富士山の地下水流動系の研究、平成4・5・6年度文部科学研究費総合研究(A)研究成果報告書、pp.56-64、1995.
- 金原啓司(2005):日本温泉・鉱泉分布図及び一覧(第2版)、産業技術総合研究所、2005.
- 菊池宏吉、地質工学概論、土木工学社、1990.
- 気象業務支援センター(2000):メッシュ気候値2000年、2000.
- 経済産業省資源エネルギー庁、科学的特性マップ、2017.
- 国土地理院(2016):基盤地図情報 基本項目 海岸線、2016.
- 国土地理院(2016):基盤地図情報 数値標高モデル 10m メッシュ、2016.
- 佐藤智之、荒井晃作(2016):海陸シームレス地質情報集、駿河湾北部沿岸域、海陸シームレス地質図 S-
 - 5、20万分の1駿河湾北部沿岸域海底地質図及び同説明書、産業技術総合研究所 地質調査総合センター、2016.

- 沢村幸之助(1955):7万5千分の1地質図幅「沼津」及び沼津図幅地質説明書、通商産業省工業技術院 地質調査所、1955.
- 產業技術総合研究所(2014):平成 25 年度海域地質環境調查確証技術開発成果報告書、2014.
- 產業技術総合研究所(2015):平成26年度海域地質環境調查確証技術開発成果報告書、2015.

產業技術総合研究所(2016a):平成 27 年度 海域地質環境調查確証技術開発成果報告書、2016a.

- 産業技術総合研究所(2016b):海域地質環境調査確証技術開発成果報告書 3箇年とりまとめ(総括報告書)、2016b.
- 鹿園直建、荒川貴之、中野孝教(2014):富士山南麓の地下水質、流動と窒素汚染、地学雑誌、第123巻 第3号、pp.323-342、2014.
- 柴正博(1991):南部フォッサマグナ地域南西部の地質構造 静岡県清水市および庵原郡地域の地質 、 地団研専報、1991.
- 柴正博、大久保正寿・笠原茂・山本玄珠・小林滋・駿河湾団体研究グループ(1990):静岡県富士川下流 域の更新統、庵原層群の層序と構造、地球科学、vol.44、pp.205-223、1990.
- 下津昌司 (1988): 阿蘇火山流域における水収支に関する観測研究、土木学会論文集、第 393 号、pp.141-150、1988.

杉村新 (1972):日本付近におけるプレートの境界、科学、vol.42、pp.192-202、1972.

- 杉山雄一、下川浩一(1990):地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)「清水地域の地質」及び同説明 書、通商産業省工業技術院 地質調査所、1990.
- 杉山雄一、松田時彦(2014):地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)「南部地域の地質」及び同説明 書、産業技術総合研究所 地質調査総合センター、2014.
- 関根一郎、西牧均、石垣和明、原敏昭、斎藤章(1996):岩石の比抵抗値とその力学的性質とその関係、 土木学会論文集、No.541、III-35、pp.75-86、1996.
- 全国鑿井協会(1981~2003):地下水位年表、建設省河川局編、1981-2003.
- 土隆一(2007):富士山の地下水・湧水、富士火山、山梨県環境科学研究所、pp.375-387、2007.
- 土隆一(2011): 富士山の地下水・湧水. 荒牧重雄・藤井敏嗣・中田節也・宮地直道編:富士火山,日本 火山学会、375-387、2011.
- 土隆一(2017):富士山の地質と地下水流動、地学雑誌、第 126 巻 1 号、pp.33-42、2017.
- 津屋弘逵(1968):富士火山地質図(1:50,000)数値地質図 G-9(2002 発行、CD-ROM 版)、地質調査 所、1968.
- 戸崎裕貴、浅井和由(2017):富士山の地下水年代、地学雑誌、第126巻1号、pp.89-104、2017.
- 中井信之(1996):富士宮市地下水の化学的・同位体的特徴、富士宮市域地下水調査報告書、富士宮市、 pp.21-36、1996.
- 中井信之、菊田直子、土隆一(1995):富士山及び周辺の地下水・河川水の安定同位体組成とその水文学 への応用、ハイドロロジー、Vol.25、No.2、pp.71-81、1995.
- 中田節也、吉本充宏、藤井敏嗣(2007):先富士火山群、富士火山(荒牧重雄ほか編、山梨県環境科学研究所)、pp.69-77、2007.
- 中村一明、島崎邦彦 (1981):相模・駿河トラフとプレートの沈み込み、科学、vol.51、pp.490-498、1981. 日本水路協会 (2012):海底地形デジタルデータ (CD-ROM) M7001 Ver.2.2 関東南部、2012.
- 比留川貴、後藤隼次、池田喜代治(1957):静岡県岳南地域工業用水源地域調査報告東海地域調査第10

報、地質調査所月報、第8巻第4号、pp.187-198、1957.

- 星野一男、加藤碵一、深部物性データ編集委員会(2001):本邦産岩石の深部物性データ集、産業技術総 合研究所、2001.
- 松田時彦(2007):富士山の基盤の地質と地史、山梨県環境科学研究所、富士火山、pp.45-57、2007.
- 村下敏夫、岸和男 (1967):地下水の塩水化についての研究 第1報 熔岩帯水層の水理地質学的性質 、 地質調査所月報、第18巻6号、pp.379-392、1967.
- 松原彰子(1989):完新世における砂州地形の発達過程-駿河湾沿岸低地を例として-、地理学評論、 vol.62、pp160-183、1989.
- 安原正也、風早康平、丸井敦尚(2007):富士山の地下水とその涵養プロセスについて、富士火山、山梨 県環境科学研究所、pp.389-405、2007.
- 山元孝広、石塚吉浩、高田亮(2007):富士火山南西麓の地表および地下地質:噴出物の新層序と化学組 成変化、山梨県環境科学研究所、富士火山、pp.97-118、2007.
- 山本荘毅(1970):富士山の水文学的研究-火山体の水文学序説-、地理学評論、1970.
- 山本荘毅(1971):富士山とその周辺の陸水、富士山-富士山総合学術調査報告書、富士急行、pp.151-209、1971.

由井将雄、藤井敏嗣(1989):愛鷹火山の地質、地震研究所彙報、1989.

- Imanaga Isamu (1999) : Stratigraphy and tectonics of the Ashigara Group in the Izu collision zone, central Japan, Bull. Kanagawa Prefect. Museum, Natur. Sci., no.28, pp.73-106, 1999.
- Goode, D. J.(1996) : Direct simulation of groundwater age, Water Resources Research, Vol. 32, No.2, pp.289-296, 1996.
- Miyaji N.、Endo K.、Togashi S.、Uesugi Y. (1992): Tephrochronological history of Mt. Fuji "Volcanoes and geothermal fields of Japan"の一部、29th IGC field trip guide book vol.4、数値地質図 G-9 (2002 発行、CD-ROM 版)、地質調査所、1992.
- Tosaki Yuki, Tase Norio, Sasa Kimikazu, Takahashi Tsutomu, Nagashima Yasuo (2011) : Estimation of Groundwater Residence Time Using the 36Cl Bomb Pulse, Ground water, 49, 6, pp.891-902, 2011.
- Yamazaki Haruo (1992): Tectonics of a Plate Collision along the Northern Margin of Izu Peninsula、 Central Japan、地質調查所月報、vol.43、1992.

参考 URL

- 小野昌彦、井川怜欧、町田 功、丸井敦尚、村中康秀、神谷貴文、大山康一、伊藤 彰(2016):水文環境 図 No.9 「 富 士 山 」、 産 業 技 術 総 合 研 究 所 地 質 調 査 総 合 セ ン タ ー 、 https://gbank.gsj.jp/WaterEnvironmentMap/contents/fujisan/fujisan.htm (最終確認 2020.3.25). 気象庁:各種データ・資料、http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html (最終確認 2020.3.25).
- 気象業務支援センター、メッシュ気候値 2000 年、http://www.jmbsc.or.jp/jp/offline/cd0470.html (最終 確認 2020.3.25).
- 国土交通省:水文水質データベース、http://www1.river.go.jp/(最終確認 2020.3.25).
- 国土交通省国土政策局:国土数值情報、http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-W05.html(最終確認 2020.3.25).
- 国 土 交 通 省 国 土 政 策 局 : 全 国 地 下 水 資 料 台 帳 、 http://nrbwww.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/water/basis/underground/F9/exp.html (最終確認 2020.3.25).
- 国 土 交 通 省 国 土 政 策 局 : 地 下 水 マ ッ プ 静 岡 地 域 (そ の 3)、 http://nrbwww.mlit.go.jp/kokjo/tochimizu/F8/MAP/807003.jpg (最終確認 2020.3.25).
- 国 土 交 通 省 国 土 政 策 局 : 地 下 水 マ ッ プ 付 属 説 明 書 (静 岡 地 域)、 http://nrbwww.mlit.go.jp/kokjo/tochimizu/F8/MAP/807099.pdf (最終確認 2020.3.25).
- 国土地理院:電子国土 Web デジタル標高地形図、https://maps.gsi.go.jp(最終確認 2020.3.25).
- 産業技術総合研究所:20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2、https://gbank.gsj.jp/seamless/v2.html (最 終確認 2020.3.25).
- 産業技術総合研究所:活断層データベース、https://gbank.gsj.jp/activefault/(最終確認 2020.3.25).
- 資源エネルギー庁(2017): 科学的特性マップ、 https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/maps/ kagakutekitokuseimap.pdf(最終確認 2020.3.25).
- 静岡県環境部:平成 26 年度 東部地域地下水賦存量調査 結果概要、 https://www.pref.shizuoka.jp/kankyou/ka-060/documents/toubu_hp_kouhyou.pdf(最 終 確 認 2020.3.25).

第3章 海陸連続3次元地質環境モデルの妥当性の検証に 向けたデータ取得手法の高度化 3-1 陸域から海域にかけての地質環境特性の把握技術の高度化(プッシュプル試験)

(1) 背景

沿岸部海底下の地下水の流れを知ることは、沿岸部処分を考える際に極めて重要である。海底 下の地下水を海上ボーリング掘削等によって直接調査するのは費用や時間の面で困難である。そ のため、沿岸部陸域から、海底下の地下水の動きを知るための手法開発が必要である。

幌延の浜里試験地に設けた DD-2 孔 (スクリーン深度は GL-91.0~-99.7 m、図 3-1-1、図 3-1-2) から得られる地下水の涵養域は下沼周辺と考えられており、その年代は氷期降水である (Ikawa et al.、2014)。下沼から浜里までの距離は約 7 km であるため、仮に地下水年代を 2 万年とすると 地下水の平均流速は 7000÷20000=0.35 m/年となる。しかし、これはあくまで平均的な値であ り、現在の流速は反映されていない。それは海水準が変動しているためである。約 2 万年前から 約 7 千年前まで海水準が上昇し続けたことを考えると (日本原子力研究開発機構、2010)、この 深度領域の地下水の流速は、この期間、徐々に低下した可能性がある。

DD-2 地下水の流速については、酒井ほか (2012) のデータから推定できる。酒井らは深度 66.5 ~100 m に位置する「下部沖積層」付近の地下水位を調べており、浜里 (No.1 観測井) では+2.5 m、約 4.5 km 内陸側のビジターセンター付近の観測井 (No.2 観測井) では+2.9 m であると報告 した。ここから求められる平均動水勾配は 0.00009 となる。これに DD-2 で実測した透水係数 (1.3×10⁻⁵ m/s) と間隙率 (0.44)を用いると、地下水の実流速は 0.1 m/年程度と見込まれる。 一方、本年度実施した測量結果 (Appendix III 浜里試験地の測量)および、3 回の水位測定結果 によると、DD-2 孔の水位の平均値は+3.08 m である。そのため、この場合はビジターセンター 付近の観測井よりも水位が高くなるため、海側から陸側に水位が傾いていることになってしまう。 このように沿岸部の平均動水勾配は非常に小さく、地下水の動きを知ることは容易ではない。そ こで、本研究では前フェーズから実施中のプッシュプル試験を用い、深度 100 m 付近の地下水の 速さを推定した。



図 3-1-1 1.4 万年頃前の地下水流動の推定図

海水準は現在より 120 m 程度低かった(日本原子力研究開発機構、2010)。当時、サロベツ原野に降った雨は、 少なくとも地下 250 m 程度まで流動したと考えられ、プッシュプル試験を実施している DD-2 孔のスクリーン深 度(図の赤点。深度 95m 付近)でも地下水の流れは今日よりも速かったと推定される。





海水準が高くなると動水勾配が小さくなり、地下水流動が不活発になる。現在までにわかっているのは、サロベ ツ原野に降った雨は地表付近を流れて河川に流出することである。

(2) 流向流速計について

地下水の流速を知るためにはいくつかの方法がある。今日用いられている原位置地下水の流向 流速測定方法と単孔式の孔内流向流速測定方法を図 3-1-3 及び図 3-1-4 に示す。このうち、孔内 流向流速測定法には固体粒子追跡型と溶液濃度追跡型がある。溶液濃度追跡型はトレーサー希釈 濃度を計測するポイントダイリューション法を応用したホウ素をトレーサーとして用いる中性子 検出法、注水した蒸留水の希釈程度を計測して流向流速を求める電位差法、地下水に熱を与えて 流向流速を求める熱量法がある。しかし、流速がきわめて遅い場合、溶液濃度追跡型は水中での 拡散現象が避けられないため、最近では固体粒子追跡型に関する研究開発が盛んである(小林ほ か、2006)。地下水の流向流速測定方法については、小林ほか(2006)のほか、日本物理探鑛株 式会社もまとめている(表 3-1-1 日本物理探鑛株式会社ホームページ)。この表によると、電位差 法では最大で3m/年程度の流速まで測定できる可能性が示されている。しかしながら、DD-2 孔 地下水の想定される流速はこれよりも1オーダー低い。

極低流速領域に対応する流向流速計としては、戸井田ほか(2007)が開発した固体粒子追跡型 の流向流速計がある。これは粒径 150 μ m 程度の固体トレーサーの位置変化を超音波センサーに より感知するものであり、3×10⁻³m/年オーダーの計測データを得たと報告されている。 また、 Airmat 社が開発した AquaVISION は、テレビ法を原理として用いているが、ほぼ流速がゼロの 領域での計測が可能とされている(Greswell、2005)。これらの装置を沿岸部帯水層用に対応させ ることにより、極めて遅い地下水の挙動を把握できる可能性がある。

一方、本事業では地下水の速さに注目し、プッシュプル試験を応用した方法を用いた。本手法 では地下水の流向は推定できず、速さしか見積もることができないが、手法や解析が簡単であり、 単孔式揚水試験と本手法の道具立てが類似しているために、両者を連続して実施できる。このよ うに簡便さとコスト面で優れた手法であるが、その精度、信頼性については未知の部分が多い。 そこで、本研究ではプッシュプル試験を実施することにより地下水の速さを求めるとともに、そ の精度について議論を行った。

(3) プッシュプル試験とDD-2孔

プッシュプル試験に用いた観測井は北海道天塩郡幌延町浜里試験地にある DD-2 孔である。プ ッシュプル試験の手順は産業技術総合研究所ほか (2018)、DD-2 孔の構造および地質柱状図は産 業技術総合研究所ほか (2018)の Appendix WIIにて述べているため、ここでは省略する。試験対 象とした地層は被圧帯水層であり透水係数は 1.3~3.3×10⁻⁵ m/s、比貯留係数は 7.2×10⁻³ m⁻¹で ある。また、後述する地下水の速さの算出に関連する間隙率 n は DD-2 孔掘削時に採取したボー リングコアから得られた値の 0.44 を用いた。

なお、今年度は同じ敷地内にある DD-4 孔(深度 360 m)においてもプッシュプル試験を実施 する予定であったが、不具合が生じ断念した。この経緯については「Appendix IV DD-4 孔での 調査」に記す。



図 3-1-3 地下水の孔内流向流速測定方法の分類(小林ほか、2006)



図 3-1-4 単孔式の孔内流向流速測定方法の分類(地盤工学会、2004)

(4) 地下水の速さの算出

地下水の速さについては Leap and Kaplan (1988)の方法によって概算した。観測井において、 スクリーンが帯水層を完全に貫通している場合、特定の時間内tにおいてポンプにより被圧帯水層 に注水および揚水した水量は以下の式で与えられる。

$$V = \left| \int Q(t)dt \right|$$
(3.1-1)

Q(t): tの関数として表される流量〔L³〕

流量が一定の場合、式(3.1-1)は下のように積分される。

$$V = |Qt|$$
 (3.1-2)
Q: 一定流量、t: 注水または揚水の時間

帯水層が均質かつ等方であり、また、局所的な動水勾配が存在しない場合、式(3.1-2)の体積 V は下式で表される。

$$\mathbf{V} = \pi r^2 n b \tag{3.1-3}$$

r: 帯水層中を放射状に広がるトレーサー水の半径、 b: 帯水層の厚さ、 n: 有効間隙率

また、一定方向の定常流はダルシーの法則より、以下の通りである。
$$q/n = (K/n)(dh/dx)$$
 (3.1-5)

$$= (K/n)(an/ax) \tag{3.1-5}$$

$$q/n = v_a \tag{3.1-6}$$

$$q/n = x/\tau \tag{3.1-7}$$

q:比流量、K: 透水係数、h: 水頭、x: 一定方向の座標、va: 移流速度、τ:移動時間

ここで、調査井にトレーサーをパルス注水した時刻をtiとする。そのままにしておくとトレー サーパルスは地下水の移流にしたがい、下流に流れていく(図 3-1-5)。揚水を始めると(揚水開 始時刻をt_pとする)、トレーサーパルスは調査井に向かって流れ、時刻t_aでトレーサーパルスが調 査井に到達する。このとき、トレーサーは分散の影響をうけるため、トレーサーパルスの到達は トレーサーの質量重心とする。



したがって、時刻 t におけるトレーサー重心の位置は、

$$r = r_1 + r_2 + r_3$$
 (3.1-8)
 r_1 :時間 t_i から t_p のトレーサーの移動距離

r₂:時間t_Pからt_aにて揚水が実施されない場合の、トレーサーの移動距離

 r_3 :時間 t_p から t_a にトレーサーが揚水により移動した距離

また、

$$\int_{0}^{r_{1}} dr_{1} = v_{a} \int_{t_{i}}^{t_{p}} dt$$
(3.1-9)

$$\int_{r_1}^{r_2} dr_2 = v_a \int_{t_p}^{t_a} dt$$
(3.1-10)

式(3.1-9)および式(3.1-10)より、

$$r_1 = v_a (t_p - t_i)$$
(3.1-11)

$$r_2 = v_a (t_a - t_p) \tag{3.1-12}$$

$$\vec{x}(3.1-4)\mathcal{O}r^2 = (Q/\pi nb)t \, \& \, \emptyset \,, \tag{3.1-13}$$

$$2r(dr/dt) = (Q/\pi nb)$$
 (3.1-14)

$$2\int_{r_3}^{0} rdr = (Q/\pi nb)\int_{t_p}^{t_a} dt$$
(3.1-15)

右辺の積分範囲は t_P から t_a であり、これは距離 r_3 を移動するのに要する時間である。 したがって、

$$r_3 = -(Q/\pi nb)^{1/2} (t_a - t_p)^{1/2}$$
(3.1-16)

式(3.1-8)、式(3.1-11)、式(3.1-12)、式(3.1-16)より、

$$\mathbf{r} = v_a(t_p - t_i) + v_a(t_a - t_p) - (Q/\pi nb)^{1/2} (t_a - t_p)^{1/2}$$
(3.1-17)

$$\mathbf{T} = t_a - t_i \tag{3.1-18}$$

$$\mathbf{t} = t_a - t_p \tag{3.1-19}$$

とすると、 $t_p - t_i = t_a - t_i + t_p - t_a$ であるから、式(3.1-17)は、

$$\mathbf{r} = v_a T - (Q/\pi n b)^{1/2} t^{1/2}$$
(3.1-20)

注揚水井では

$$r = 0$$
 (3.1-21)

であるから、

$$v_a = \left[(Q/\pi nb)^{1/2} t^{1/2} \right] / T \tag{3.1-22}$$

が得られる。

以下、この式を用いて地下水の速さを求める。

(5) 結果

1) プッシュプル試験の試験装置および仕様

プッシュプル試験は 2012 年と 2017 年にも実施しており、本年度は 3 年目にあたるが、前の 2 年とは異なる点がある。まず、2012 年と 2017 年の試験では同一の請負者が試験システムを構築 したが、本年度の試験では請負者が代わっている。これは試験システムの構築を本事業での入札 案件として業者に依頼せざるを得ない関係上、生じたものである。したがって、試験精度という 面では不利になるが、別の視点から見れば、後述する試験の再現性は、請負者に大きく依存しな いことが示されたことになる。また、本年度の調査は諸般の事情により 11 月下旬~12 月の冬季 にかけて行われた。試験地では 11 月中旬になると最低気温が 0℃を下回るため、今年度は凍結防 止を考えた仕様となっている (図 3-1-6)。

プッシュプル試験の手順や仕様は過去の2回と同じである。詳細は産業技術総合研究所(2012)、 産業技術総合研究所ほか(2018)の通りであるが、簡単にまとめると、注揚水速度は約5L/min、 トレーサー水の注水量は900L、チェイサーの注水量は120Lである。すなわち、注水時間はト ータルで1020÷5=204分である。総揚水量は全注水量の10倍の10200Lであり、時間は2040 分であるが、後述の長期プッシュプル試験ではより長い時間揚水を実施した。この揚水期間中、 2~60分の間隔で水試料を採取し、産業技術総合研究所のPiccaro社製同位体分析装置にてトレ ーサーとした酸素安定同位体比(δ^{18} O)を測定した。トレーサー水は脱塩海水を用いているため その δ^{18} Oは海水に近い値であり、これに試薬を溶解させてDD-2孔の地下水水質に近づけた。 なお、本研究で用いた同位体分析装置の分析値のばらつき(変動係数)は δ Dの方がわずかに小 さい。しかし、後述するように長期プッシュプル試験では δ Dよりも δ^{18} Oの方が確からしい値 を示したため、ここでは δ^{18} Oをトレーサーとして用いた。チェイサーは敷地内の水井戸 (Appendix Ⅲ参照)より採取した。




図 3-1-6 試験の様子

本年度の調査は今までとは異なり、凍結・防寒対策として DD-2 孔を囲うとともに、トレーサー水は屋内にて 生成、管理を行った。 2) プッシュプル試験の再現性

プッシュプル試験による流速推定法は、Leap and Kaplan (1988) や Hall et al. (1991) によっ て論じられている古典的な方法であるが、本研究でターゲットとしているような極低流速場への 適用事例はない。0.1 m/年オーダーの地下水流速を推定するためには、注水から揚水までの待機 時間をかなり長くする必要があろう (図 3-1-5)。必要となる待機時間はプッシュプル試験の精度 にも関係してくるため、2012 年~本年度にかけて同一仕様で、合計4回のプッシュプル試験を実 施し、その再現性を求めた。

結果を図 3-1-7 および表 3-1-2 にまとめた。全ての破過曲線が同様の傾向を示しているが、拡 大すると値に若干のばらつきが確認される。2019 年の試験はピーク後の R/R₀の低下がやや速い。 これは、請負者が異なることにより、構築した試験システムに違いが生じたためと考えられるが、 DD-2 孔の経年的変化あるいはプッシュプル試験による注揚水を繰り返したことによって地層へ 物理的な影響を及ぼした可能性も考えられる。ただし、破過曲線の若干の違いは、今回の解析に は直接的な影響を及ぼさない。また、ピークの高さは 0.86~0.87 であり、0.01 の差が見られた (表 3-1-2)。2012 年の1回目の試験では (テスト 1:図 3-1-7 の 2012_1)、トレーサー水の δ^{18} O は-0.8%、DD-2 孔地下水は-11.7%である。この場合、揚水される地下水の δ^{18} O が-11.7%のときは R/R₀=0、 δ^{18} O = -0.8%のときは R/R₀=1 となるので、R/R₀での 0.01 の違いは δ^{18} O にして約 0.1‰に相当する。 δ^{18} O の分析誤差は $\pm 0.1\%$ なので、この差は有意な差とは言い難い。 $-方、\delta^{18}$ O の質量重心は、E/I が 0.56~0.60 の範囲であらわれたが、これは揚水開始から 112 分および 120 分経過したときに相当する。揚水開始から 80~120 分の間の水試料の採取間隔は 8 分であったため、これは採水 1 回分の違いである。したがって、R/R₀や E/I については同位体の 分析精度と採水頻度を高めることにより、より高い精度で求めることができると思われる。

一方、化学的に不活性とされている δ¹⁸Oの回収率は 100%に近くなることが期待されたが、 実際は 88~98%であった。回収率にはバックグラウンド値(DD-2地下水の δ¹⁸O値)が影響す るが、この値はそれぞれのテストの揚水終了前に採水された 5 回分の水試料の δ¹⁸O値の平均値 から算出したものである。実際の計算では、バックグラウンドに 0.03‰の誤差があると回収率に して約 2%の誤差となる。このことを考えると、全ての試験の回収率が 100%未満になることは 分析誤差に起因するとは考えられず、トレーサー水が系外へ流出したと考えざるを得ない。ただ し、回収率は帯水層の特性を評価するためのものであり、本手法で求めようとしている地下水の 速さには直接関係しない。むしろ、このような帯水層の特性を加味しても安定した E/I が得られ ていることは、本試験システムの再現性が高いことを示している。

108



図 3-1-7 4 回のプッシュプル試験の破過曲線

揚水地下水の破過曲線のグラフは、縦軸を正規化した δ^{18} O 値 (R/R₀)、横軸を揚水量/注水量 (E/I) とした。図 中のグラフは E/I の範囲を 0 から 1 とした拡大図である。

表 3-1-1 単孔式地下水流向流速測定方法(日本物理探鑛株式会社 HP) (流速の単位は m/年に変更した)

測定方法		測定原理	長所	短所
	熱中性子検出法	ホウ素を測定区間内に注入し、指向性を持た せた中性子検出器にて各方向のホウ素濃度を 観測する。ホウ素濃度の希釈状況の変化から 流速と流向を求める。ホウ素は熱中性子を好 んで取り込む性質があり、トレーサーとして 利用できる。	幅広い流速範囲で測定可能である (9.5~3 x 10⁴m/年)。	・装置が複雑である。 ・大きい孔径が必要である(観測孔径φ80mm)。 ・地下水の水質を変化させてしまう。
	電 位 差 法	地下水と比抵抗の異なる溶液(蒸留水、食塩 水等)を測定区間内に注入し、測定器の円周 上に設置された電気抵抗検出器にて電気抵抗 を観測する。注入溶液の希釈状況の変化から 流速と流向を求める。	・幅広い流速範囲で測定可能である (3~3 x 10³m/年)。 ・流向の精度がよい(±7.5°)。	 ・装置が複雑である。 ・地下水の電気伝導率により測定できない場合がある。 ・最大測定時間が大きい。やや大きい孔径が必要である (φ75mm~φ100mm)。
単 孔 式	熱量法	測定器に内蔵したヒーターにより地下水をあ たため、測定器の円周上に設置された温度セ ンサにて地下水の温度を観測する。地下水の 温度変化から流速と流向を求める。	・地下水が懸濁しても測定できる。 ・比較的小さい孔径で測定できる (φ50mm以上で測定可能)。 ・短時間で測定ができる (1箇所あたり約2時間)。	適用できる流速範囲が狭い (50~5×10³m/年)
	テレビ法	測定器に赤外線カメラを内蔵し地下水中を移 動する微粒子を観測する。微粒子の移動速 度、方向から流速と流向を求める。	 小さい孔径から測定できる(φ40 mmより測定可能)。 機材にも依るが、速い流れも測定 できる。 映像をビデオなどに記録でき、後 で再測定することができる。 	地下水が懸濁していると測定できない。
	レー ザー 法	レーザー光により干渉縞を発生させ、粒子が 干渉縞を横切る周期から流速と流向を求め る。	深い深度(200m)まで測定可能で ある。	_

表 3-1-2 同一仕様のプッシュプル試験の比較

 δ^{18} O の質量重心が現れるまでの時間を揚水量/注水量(E/I)で示した。例えば、この値が 0.56 であれば、注水量(1020 L)に対して、その 0.56 倍(571 L)揚水した時に、 δ^{18} Oの重心があらわれたことを意味する。

	実施日	ピーク	重心	回収率	地下水の速さ	
		R/R_0	E/I	%	m/min	m/y
テスト1	2012/10/7	0.86	0.56	92	7.3E-04	385
テスト2	2012/10/9	0.87	0.56	88	7.3E-04	385
テスト3	2017/10/5	0.86	0.60	98	7.4E-04	389
テスト4	2019/11/28	0.86	0.57	92	7.3E-04	386

3)長期プッシュプル試験による地下水の速さの算出

2012~2019年にかけて、注水から揚水までの待機時間を変化させた試験を合計4回実施した。 その結果を図 3-1-8 及び表 3-1-3 に示す。 δ^{18} Oの破過曲線のピークは待機時間が長くなるにつ れて低下する傾向が認められた。待機時間がゼロのケースではピークの R/R₀ は平均 0.86 である が、待機時間が 10 日になると 0.74、40 日では 0.48 と低下する。待機時間が 739 日の場合では 0.04 まで低下している。待機時間が 1802 日になると、ピーク時の δ^{18} O はバックグランドから わずかに+0.3‰であり、分析誤差±0.1‰にかなり近くなる。なお、 δ Dをトレーサーとすると、 ピーク時であってもバックグラウンドから+0.7‰であり、分析誤差 (δ D=±1‰) 以下となる。 これが本試験のトレーサーとして δ Dを用いずに δ^{18} Oを用いた理由である。なお、ピークが分 析誤差近くまで低下してしまう問題はトレーサー水の δ 値をより高くすることにより解決可能 である。今回用いたトレーサー水は δ^{18} O が数‰であるが、これは地下環境に配慮して脱塩海水 をトレーサーとして用いたためである (産業技術総合研究所、2013)。よって、トレーサー水とし て、より重い重水を使用すれば、待機時間が長くなってもピークの検出が可能になるだろう。

また、本手法では式(3.1-22)によって地下水の速さを算出するため、原理的には待機時間の 大小にかかわらず、算出される地下水の速さは同じになるはずである。しかし、表 3-1-3 にて示 されるように、地下水の速さは待機時間が 10 日では 9.2m/y、40 日では 2.4m/y、739 日では 0.30m/y となり、1802 日では 0.05m/y となった。この原因として注水時にトレーサー水の重心 がわずかに動いたことが考えられる。待機時間が短い場合は、このわずかな移動量が地下水の速 さとして算出されてしまい、地下水の速さが大きく算出されてしまったのだろう。この影響は待 機時間が長くなるにつれて相対的に小さくなる。待機時間が 739 日と 1802 日のケースでは、地 下水の速さは 0.30m/年、0.05m/年となり、これらの値は現場の動水勾配や揚水試験結果から得 られた値と比較すると、現実に近い値を示しているように見える。

(6) 結論

本プッシュプル試験システムは、平成 19 年度に始まる沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化 開発のなかで開発され(産業技術総合研究所、2013)、一連の事業のなかで分散長の算出だけでな く、チェイサーの影響、蛍光染料と同位体の破過曲線の違いなど重要な知見が得られてきた。そ して、沿岸部処分システム高度化開発および本事業にて示されたように、本試験システムは年間 1 m以下の極低速の地下水の速さを求めるための手法としても適用できる見込みが得られた。冒 頭で述べたように、2つの観測井を利用して正しい動水勾配を得ることが困難な状況においても、 本手法は地下水の速さを求めるための強力な調査方法になりうることが示された。さらに、(調査 対象とした帯水層中の地下水は海底下の地下水と連続していると考えられることから)本手法は 海底下の地下水の流れを推定するための有力な手法に成り得ると考えられる。

本手法の利点は、単孔式であること、地盤内の地下水の速さを求めることができること、単孔 式揚水試験と道具立てが近いこと等が挙げられるが、欠点としては、地下水の流向が求められな いこと、現時点では測定に多くの時間を要することが挙げられる。また、本手法は沿岸部の地下 水の動きを知るためには有効であるものの、処分岩体となる低透水の亀裂性岩盤に対してはその 適用可能性は不明である。今後は一連の調査で得られた破過曲線の形成メカニズムを明らかにし、 最適な待機時間、最適なトレーサー濃度を求めることや適用環境を考慮した検討が必要である。



図 3-1-8 長期プッシュプル試験で得られた δ¹⁸0 の破過曲線

	注水日	揚水日	待機時間	ピーク	重心	回収率	地下水の	速さ
			H	R/R_0	E/I	%	m/min	m/y
テスト0	2019/11/28	2019/11/28	0	0.86	0.57	92	7.3E-04	386
テスト1	2019/11/30	2019/12/10	10	0.74	0.69	102	1.8E-05	9.2
テスト2	2017/10/5	2017/11/14	40	0.48	0.75	71	4.7E-06	2.4
テスト3	2017/11/16	2019/11/25	739	0.04	3.75	32	5.7E-07	0.30
テスト4	2012/10/26	2017/10/2	1802	0.03	5.40	9	8.8E-08	0.05

表 3-1-3 長期プッシュプル試験の結果一覧

参考文献

- Greswell, R.B. (2005) : Higresolution in situ monitoring of flow between aquifers and surface waters. Environment Agency, UK, Science Report SC030155/SR4, 32p, 2005.
- Hall, S.H., Lutterell, S.P. and Cronin, W.E. (1991) : A method for estimating effective porosity and ground-water velocity. Ground Water, 29(2), pp171-174, 1991.
- Ikawa, R., Machida, I., Koshigai, M., Nishizaki, S. and Marui, A (2014) : Coastal aquifer system in late Pleistocene to Holocene deposits at Horonobe in Hokkaido, Japan, Hydrogeology Journal, vol.22, pp987-1002, 2014.
- Leap, D.I. and Kaplan, P.G. (1988) : A single-well tracing method for estimating regional advective velocity in a confined aquifer: Theory and preliminary laboratory verification. Water Resources Research, 24(7), pp993-998, 1988.
- Pickens, J.F. and Grisak, G.E. (1981) : Scale-dependent dispersion in a stratified granularaquifer. Water Resources Research, 17(4), pp1191-1211, 1981.
- 小林薫、近久博志、松元和伸、松田浩朗(2006):画像計測による孔内流向流速測定の取組みと今後の課題、土と基礎、54(5)、pp16-1、2006.
- 酒井利彰、井岡聖一郎、五十嵐敏文(2012): サロベツ原野南部における沖積層の水文地質構造と 地下水流動、応用地質、53(4)、pp172-182、2012.
- 戸井田克、田中真弓、長井 敏、鈴木建彦、佐藤光吉、小舞正文、大江俊昭、西垣 誠(2007): 超音波反射エコーを利用した孔内地下水 3 次元流向・流速計測手法について、地下水学会誌、 49(4)、pp291-307、2007.
- 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター (2010):幌延深地層研究計画 平成 21 年度 調査研究成果報告、95p、2010.
- 日本地下水学会(2009):地下水のトレーサー試験、技報道出版、378p、2009.
- 産業技術総合研究所、平成 24 年度 沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発 成果報告書、 521p、2013.
- 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(2018):平成29年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 沿岸部処分システム高度化開発、393p、2018.
- 産業技術総合研究所、日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力 中央研究所(2019)、高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 沿岸部処分シ ステム高度化開発 平成 27 年度~平成 30 年度 取りまとめ報告書、288p、2019.
- 日本物理探鑛株式会社 HP:
- https://n-buturi.co.jp/technology/geology/gwater/current/index.html (最終確認 2020.03.25)

3-2 地下水の流出場及び海底地形把握技術の高度化

(1) 背景

沿岸部では陸域から海域へ地下水が流動しており、その末端現象として海底から湧出する地下 水の存在が知られている。そのため、沿岸部における地層処分を想定した場合、地下水流動が放 射性核種の移行経路となる可能性があり、安全評価の観点からも沿岸部の地下水流動から流出に 至る実態を明らかにしておく必要がある。また沿岸部地質環境モデルの妥当性を検証する観点か らも、地下水の流出場を特定し、流出する地下水の化学的特徴から陸域地下水の特徴を把握する ことが必要である。

沿岸部における地層処分を想定した場合に求められる海底湧出地下水の探査手法については、 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」で取りまとめられてい る (産業技術総合研究所ほか、2016)。その中で、ROV (Remotely Operated Vehicle) や AUV (Automatic Underwater Vehicle)を用いて海底地形を把握する手法や、海中の映像や水質を基 に海底湧出地下水を探査する手法が示されている。特に AUV は様々な測定機器を搭載可能で、 一定間隔で均一に調査可能であることから広域の面的な探査に適していると考えられる。一方で、 広域の探査に対して海底湧出地下水が存在すると推定される範囲(狭域)での探査では、AUV の 航行速度や測定機器の応答速度などの兼ね合いによって湧出水の検出が難しいことも想定され、 推定される範囲の直近においてダイバーや ROV を用いた"点"での探査を行うほかない。このよ うな狭域における確実な湧出水を効率的に検出のためには、広域と狭域の間を補完する探査手法 の開発が必要である。

海底地形の把握や湧出現象を検出するという観点から、広域と狭域を補完するためには音響探 査の活用が挙げられる。海底熱水鉱床の探査では広域から狭域へと対象を絞り込む段階において 周波数の高いソナーを用いた探査が活用されており、例えば AUV に高周波のマルチビームソナ ーを搭載して探査を行い、熱水チムニー周辺の海底地形を把握するとともに、音波が海底面に到 達するまでのウォーターカラムに相当する部分の音響画像を解析して、熱水プルームを抽出した 事例が報告されている(水野ほか、2016)。また、ROV と音響探査を活用することで、熱水プル ームの体積やその挙動の評価が行われている(Rona et al.、2002; Rona et al.、2006; Rona and Light、2011)。さらに、高温でガスや重金属などに富む熱水プルームを対象とした探査のみなら ず、河口域に生じる塩水楔の検出や汽水湖における塩分躍層の挙動の解明にも音響探査が活用さ れている(福島ほか、1971;西村ほか、1994;徳岡ほか、1994)。これらの研究では、音響イン ピーダンスが異なる塩水と淡水の境界面で生じる音波の反射を捉えることで、塩分躍層を検出し ている。そのため、沿岸部において陸域の地下水が海底から湧出する際に顕著な塩分躍層が発生 しているならば、面的な音響探査によって沿岸部における湧出水を検出し、その空間分布を把握 できると考えられる。

そこで本事業では海底地形の詳細把握に係る技術、陸域地下水の流出場の特定手法や海底湧出 地下水から陸域地下水の化学的特徴の推定手法の高度化を目標として、本年度は特に ROV とサ イドスキャンソナーなどで得られる音響画像の解析を組み合わせた湧出水の探査手法を検証し、 実海域における試験を通じてその適用可能性や見出された課題の整理を行った。

(2) 海底湧出地下水に関する模擬実験

1) 実験概要および方法

海底湧出地下水の探査に関して、ROV と音響画像解析を組み合わせた探査手法を構築するた めに模擬実験を行った。なお、後述する実海域試験で対象とした領域における潮流の条件や急岸 部の存在、漁業活動が盛んであるといった現場状況を踏まえて、AUV の適用は現実的ではないと 判断されたため、本事業では船上からリアルタイムに操作できる ROV を用いて探査手法を検討 した。模擬実験は海上に設置された計測バージ(OKI シーテック社、沼津市内浦三津地先)にお いて行った。実験では計測バージ直下の水深約 33 m の海底に地下水湧出を模擬した水源を設置 し、淡水(水道水)を湧出させた(図3-2-1)。湧出水は海水面より上部に設置したタンクとポン プを用いて送水する形で行い、流量を1、4、7L/minの3段階に設定して実験を行った。なお7 L/min は今回用いた送水ポンプの仕様の上限値である。このような模擬水源に対して、ROV お よび高精度音響カメラ(Sound Metric 社製 ARIS Explorer 3000)を組み合わせた探査装置を用い て音響画像を取得した(図 3-2-2)。ROV には音響カメラに加えて、ナビゲーションシステムと 多項目水質計(YSI 社製 EXO1、底面から高さ 7cm に固定)を装着した。音響カメラの角度は俯 角 30°、45°、90°の3段階で検証した。音響カメラは周波数 1.8 MHz と3 MHz で探査可能 で、レンジは最大 15 m である。計測バージから ROV を投入後、海水の電気伝導度、塩分濃度、 水温、水深等を連続的に計測しつつ、高精度音響カメラによる探査を行った。なお模擬実験では ダイバーによる潜水を行い、模擬水源や観測機材が海底面上に適切に配置されていることを確認 している。

以上の条件において、海底湧出地下水の検出可否、検出可能な距離、現場試験における最適な 音響カメラの角度の設定、湧出量変化との関係性などについて検討した。なお模擬実験において 検討した項目や詳細については Appendix VIに記載し、本報告書では特に実海域での湧出水検出 における最適な機器設定と見出された課題について報告する。



図 3-2-1 実験の模式図(左図)と海底に設置した模擬水源の様子(右図)



図 3-2-2 高精度音響カメラを装着した ROV の様子

2) 模擬実験の結果

高精度音響カメラの周波数に関して、3.0 MHz と 1.8 MHz で得られた音響画像を比較して検討した結果、1.8 MHz で探査を行うことでより明瞭に海底湧出地下水を判別しやすいことが分かった(図 3-2-3)。また、音響探査の性質から 1.8 MHz の方が 3.0 MHz に比べて相対的に遠距離の探査に適しており、より広範囲で効率的な探査が行えると考えられる。

高精度音響カメラの角度に関しては、俯角 90°(海底面に対して直交方向)に設定することで より明瞭に湧出水を検出できた。俯角 30°や 45°の場合、音響画像中で湧出水に相当する音波 の反射に、海底面からの音波の反射が重なることで検出しにくい結果となった(Appendix VI参 照)。湧出水を検出可能な距離については、高精度音響カメラを俯角 90°に設定し、模擬水源の 直上から徐々に ROV を浮上させることで海底面からの高度を変えて検討した。その結果、模擬 水源からの湧出量が 7 L/min の条件において高度 7 m までは検出可能であった(図 3-2-4)。ROV の浮上や水平移動の際に起こりうる海中での揺動や、実験条件よりも小規模な湧出水が存在する 可能性もあることを踏まえて、海底面からの高度は 5 m 程度に設定して探査を行うことが現実的 であると判断した。

湧出量の変化に伴う音響画像の変化については、湧出量1L/min に比べて7L/min の場合に音響画像中で強いシグナルが認められたものの、両者の相関を定量的に示すためには取得した音響画像解析の数量を増やすなど引き続き検討が必要である。

(3) 実海域における試験

1) 試験概要および方法

模擬実験の結果を踏まえて、実海域においてROVと高精度音響カメラを用いた試験を行った。 対象とした海域は、海底湧出地下水の存在が報告されている駿河湾奥部の田子の浦港周辺である (図 3-2-5)。模擬実験で検討した結果を踏まえて、高精度音響カメラの角度を 90°、周波数を 1.8 MHz、海底面からの ROV までの高度を 5 m に設定して探査した。ナビゲーションシステム や水質計については模擬実験と同様の機器を用いた。また、高精度音響カメラでシグナルが認め られた地点では、ROV を海底に降下させて光学カメラで海底面の状況を撮影した。さらに、同地 点では ROV と採水器による湧出水の採水を試み、採水したサンプルの化学分析を行った。採水 は、平成 30 年度地層処分技術調査等事業「沿岸部処分システム高度化開発」(産業技術総合研究 所ほか、2019)で検討された採水器の内部に塩分濃度計を装着し、リアルタイムに塩分濃度を確 認しつつ行った。



図 3-2-3 周波数 3.0 MHz および 1.8 MHz で得られた音響画像 (高精度音響カメラの角度は 90°に固定、





図 3-2-4 海底からの高度を変化させた場合の音響画像

(高精度音響カメラの角度は 90°、周波数は 1.8 MHz、模擬水源の湧出量は 7 L/min)



図 3-2-5 実海域における探査地点

2) 試験結果

ROV と高精度音響カメラによる探査を行った結果、複数の地点で湧出水と思われる音響画像 が検出された。この中で特に大きな音波の反射が認められた地点で ROV を海底に降下させ、湧 出水を光学カメラで撮影した。そのうち地点2(水深 134 m)、地点3(水深 132 m)、地点4(水 深 132 m)における音響画像と底層の様子を図 3-2-6~図 3-2-8に示す。地点2については模擬 実験で確認されたような音響画像が得られ、海底面に降下して観察すると淡水と塩水との混合で 見られる揺らぎが光学カメラで確認できた。地点3は全体として細かな堆積物の中に、より粗粒 の砂状の堆積物が見られる場所で湧出水と思われる揺らぎが確認された。地点4においても同様 の音響画像が取得され、海底面には窪地と砂状の堆積物が存在し、その場所から湧出している様 子が確認できた。

また各地点において採水した湧出水の現地測定結果を表 3-2-1、代表地点として地点 2 におけ る分析結果を表 3-2-2 に示す。湧出水については顕著な塩分濃度の低下が確認され、水深 130 m を超える海底から淡水を含んだ地下水が湧出していることが分かった。湧出水の組成が全体とし て淡水組成を示すか、淡水を含む汽水(塩淡境界周辺の地下水など)であるかは明らかではない が、ここでは沿岸部内陸の井戸で採水した淡水地下水と駿河湾の海水との間で、2 成分混合を仮 定して陸域地下水の割合を計算した。各種の地化学トレーサーを基に陸域地下水の割合を計算す ると、地点 2 では陸域地下水が 4~5 割程度混合していると推定される。今後、実海域における 採水事例の蓄積や、より淡水の割合が高い試料の採取とその年代評価を進める必要がある。

以上の結果から、本探査手法が沿岸部における海底湧出地下水の効率的な検出のために活用で きることが期待される。有光層以深では光学カメラで5m先の物体を視認することはできないた め、本手法が広域と狭域を補完する手法として有効といえる。また水深130m程度の場所でも十 分に検出可能であることが分かり、海水準変動を踏まえた氷期の汀線に相当する現海域での探査 においても適用可能な手法といえる。一方で、実海域試験においては不安定な気象・海象条件に あり、実海域での試験回数が限られていた。そのため、本手法の試行回数が十分ではなかったこ とから、現場でのさらなる事例蓄積が必要である。また、沿岸部における地下水年代を評価する ためには、より淡水の混合率が高い試料が望ましいため、採水器の改良や採水地点の検討なども 含めて事例蓄積を進める必要がある。

120



図 3-2-6 地点 2 における音響画像(左図)と底層の状況(右図)



図 3-2-7 地点3における音響画像(左図)と底層の状況(右図)



図 3-2-8 地点4における音響画像(左図)と底層の状況(右図)

地点番号	水深 (m)	ROV 側面で測定し た電気伝導度の 最小値 (mS/cm)	ROV 側面で測 定した塩分濃度 の最小値 (ppt)	採水器内で 測定した塩 分濃度の最 小値 (ppt)と 海水に対す る比(%)	採水したサンプ ルの電気伝導度 (mS/cm)と 海水に対する比 (%)
2	134	52.1	34.3	15.6 (44.8)	27.0 (51.1)
3	132	48.1	31.4	19.4 (55.6)	31.8 (60.2)
4	133	47.0	30.6	17.8 (51.1)	37.9 (71.8)
海水	30	52.8	34.8	-	-

表 3-2-1 採水したサンプルの水質測定結果

表 3-2-2 地点 2 における水質分析結果と陸域地下水との混合率の計算結果

武	地上の	海水	陸域地下水の平均値	陸域地下水混合率(%)
风力	地点 乙		(最小值~最大值)	平均值(最小值~最大值)
δ ¹⁸ O (‰)	-3.8	0.2	-9.5 (-10.4~-8.5)	41 (37~45)
δD (‰)	-24	1	-61 (-67~-54)	41 (37~46)
Na (mg/L)	6,137	11,141	20 (15~25)	45 (45~45)
Cl (mg/L)	10,788	19,628	25 (5~57)	45 (45~45)
$V (\mu g/L)$	26.8	2.9	56.9 (44.0~71.5)	46 (35~58)
Si (µg/L)	9,116	387	16,756 (15,852~18,207)	54 (49~56)

(4) 本事業で得られた成果と見出された課題

模擬実験と実海域での試験の結果、ROV と高精度音響カメラによる探査手法は、海底湧出地下 水の検出に有効である可能性が示された。この手法は、沿岸部における広域と狭域の間を補完す る探査手法の一つとして活用が期待できる。今後、探査手法の信頼性を向上させるためには、実 海域における試験回数を増やして事例を蓄積する必要がある。本手法における課題として、図 3-2-6 の音響画像上部に見られるようなノイズの存在が挙げられる。実海域ではマリンスノーや魚 類等の生物がノイズとして現れることがあり、同じくノイズとして検出される地下水湧出のみを 効率的に抽出しなければならない。また1フレームの音響画像は 30 万程度の音圧データから構 成されており、1時間の探査を行うと 36000 フレームのデータが得られる。今年度事業では音圧 データに対して閾値を決めた上で、研究者の目視によって湧出水の検出を行っているため、解析 作業に多大な時間を要した。以上のような膨大なデジタルデータを基に効率的な検出や解析を進 めるためには、ソフトウェアの活用なども必要になると考えられる。

湧出地点周辺の状況を光学カメラで見ると、細かな沈殿物が認められる場所、椀型の窪みに砂が堆積して湧出している場所(図 3-2-8)、亀裂とその周辺に砂や小石が堆積する場所などに位置しており、湧出地点周辺の堆積物や構造に違いが認められた。地下水の湧出が認められなかった地点では、光学カメラの画像から泥状の堆積物が確認されていることを踏まえると、地下水の湧出によって周辺の堆積物が乱されている可能性がある。この点については湧出地点周辺での海底堆積物の採取によって検証できると考えられる。

探査実施に当たって考慮すべき点として、現場海域の条件に合わせた探査時期の設定が挙げら れる。今回の試験を実施した駿河湾は潮流が速く、ROVの姿勢や高度の維持が難しい時間帯もあ った。また上述のように不安定な気象・海象条件にあったため、実海域での試験回数に限りがあ った。そのため、現場海域の気象・海象条件を十分に理解し、十分な作業時間を確保して適切な 時期・時間帯に調査を行う必要がある。 参考文献

- Rona, P. A., Jackson, D. R., Bemis, K. G., Jones, C. D., Mitsuzawa, K., Palmer, D. R. and Silver, D. (2002) : Acoustics advances study of sea floor hydrothermal flow, EOS, Transactions American Geophysical Union, 83(44), 497, 501-502, Oct., 2002.
- Rona, P. A., Bemis, K. G., Jones, C. D., Jackson, D. R., Mitsuzawa, K. and Silver, D. (2006) : Entrainment and bending in a major hydrothermal plume, Main Endeavour Field, Juan de Fuca Ridge, Geophysical Research Letters, 33(19), L19313, doi:10.1029/2006GL027211, Oct., 2006.
- Rona, P. and Light, R. (2011) : Sonar images hydrothermal vents in seafloor observatory, EOS, Transactions American Geophysical Union, 92(20), 169-170, May, 2011.
- 福島久雄、八鍬 功、高橋 将(1971):石狩川河口における二,三の問題、第 18 回海岸工学講 演会論文集、431-435、1971.
- 水野勝紀、小島光博、片瀬冬樹、三尾有年、浅田 昭(2016):海底熱水鉱床の音響探査の最前線、 日本音響学会誌、72(8)、477-483、2016.
- 西村清和、安間 恵、土屋洋一、松田滋夫、徳岡隆夫、井内美郎(1994):塩水楔調査のための水 中音響探査機の開発、LAGUNA(汽水域研究)、1、1-9、1994.
- 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(2016)、平成 27 年度沿岸部処分システム高度化開発報告書、139p、2016.
- 産業技術総合研究所、日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力 中央研究所(2019): 平成 30 年度沿岸部処分システム高度化開発報告書、356p、2019.
- 徳岡隆夫、大西郁夫、三瓶良和、瀬戸浩二、田村嘉之、高安克己、安間 恵、土屋洋一、松田滋 夫、井内美郎、西村清和(1994):音波探査による中海・宍道湖の塩分躍層の検討とその意義、 LAGUNA(汽水域研究)、1、11-26、1994.

第4章 沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の 高度化

4-0 はじめに

概要調査段階以降に必要となる工学技術の高度化の観点では、平成 27 年度の沿岸部処分シス テム高度化開発において、沿岸部における処分システムの構築を念頭に、沿岸部の特性などに関 連したこれまでの地層処分研究開発の成果の再整理を行い、再検討が必要な課題などが抽出・整 理された(産業技術総合研究所、原子力機構、原環センター、電中研、2016)。これらの整理結果 は、並行して進められた「沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会」に適宜 提供され、平成 28 年 8 月の同研究会のとりまとめでは、"海域を含めた沿岸部において地層処分 を実現するために必要な基本的な技術は概ね整備されている"としつつも、"今後、技術の高度化 に引き続き取り組むことで、さらに信頼性を高めることが重要である"と結論付け、併せて技術の 高度化に向けて取り組むべき課題とその方向性が示された(沿岸海底下等における地層処分の技 術的課題に関する研究会、2016)。工学的対策に関する検討は、塩水環境下における性能の確認が 必要であり、化学場の影響を考慮した人工バリアの設計に資するものである。

このような沿岸部研究会における議論を踏まえ、平成28年度からの3ヵ年に、工学技術の高 度化に向け、設計や施工等のエンジニアリングや操業中の安全確保への反映、及び閉鎖後の長期 挙動評価への反映の2つの観点から、海水や海水を希釈した塩水等での環境下での構成材料(オー バーパック、緩衝材、セメント系材料)の各種特性に関する「①人工バリア材料等に関する劣化や 変質に関する現象の把握(各種特性等のデータ拡充)」、及び溶液型グラウト材の海水下での適用性 や総合的な評価方法に関する「②塩水環境下ニアフィールド(NF)領域での処分システムの成立性 に係る手法の提示」検討を進めた(産業技術総合研究所、原子力機構、原環センター、電中研、 2019)。

地質環境調査技術によって得られる沿岸部の初期ベースラインは、地下施設の建設・操業に伴 う坑内湧水の排水等によって擾乱を受ける。特に沿岸部では、浅部の塩水系地下水の影響など、 操業期間中の水理及び化学場の擾乱を注意深く評価する必要がある。沿岸海底下に処分場が建設 される場合、処分場建設に伴う地下水の流入や我が国の多様な海底地下水の水質の幅を対象とし た、坑道建設に必要な支保工等のセメント系材料の変質機構や緩衝材への影響を評価する必要が ある。また、NUMOによりとりまとめられた、包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整 備機構、2018)では、ジェネリックな環境での地層処分の実現性が示され、第4章の処分場の設 計と工学技術では、処分場の設計について、所要の安全機能を確保するための設計の考え方や方 法論や想定される建設・操業・閉鎖の手順、およびそれらに適用する技術の工学的な実現性が示 された。沿岸部環境に関しては、海水相当の地下水での実現性が示されており、多様な地下水に 対応すべく、データの拡充が望まれるものと考えられる。

そこで、本事業では、これまでの成果を踏まえ、処分場建設に伴う浅部地下水と深部地下水の 混合や湧水等への影響に係る水理場の解析技術及び処分場の成立性に関する手法の整理を行うこ ととした。また、既存情報等から我が国の海底下の地下水水質の幅を整理し、その幅の中での坑 道建設から再冠水に至るまでの坑道建設に必要な材料の変質機構や緩衝材への影響の定量化とそ の対策技術に関する検討を行うこととした。

具体的には、沿岸部に特有な地下水化学環境を念頭に置き、処分場の建設・操業~閉鎖後の再 冠水に至る期間におけるセメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充(4-2節)、及び緩 衝材の機能変化に係るデータの拡充(4-3節)を行う。併せて、地質環境調査技術を用いた沿岸 部の広域的なベースライン情報と連携した水理解析技術の整備を行うとともに、上記の個別材料 の変質挙動に係る知見を組合せた体系化手法の検討を進め、再冠水に至る期間を対象とした性能 評価手法の基盤整備を行う(4-1節)。また緩衝材については、沿岸部特有の地下水環境下である ことを考慮した人工バリア性能評価に資するデータの拡充を行う。取得したデータ等を通じて、 沿岸部の多様な地下水環境条件に柔軟に対応できる緩衝材の材料仕様に関する定量的な評価方法 を整備する(4-4節)。 参考文献

- 産業技術総合研究所、日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力 中央研究所、平成 27 年度地層処分技術調査等事業(沿岸部処分システム高度化開発)報告書、 2016.
- 産業技術総合研究所、日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力 中央研究所、高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(沿岸部処分システム 高度化開発)平成 27 年度~平成 30 年度取りまとめ報告書、2019.
- 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告:わが国における安全な地層処分の実現 適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築 (レビュー版)、2018.
- 沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会、とりまとめ、2016.

https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/report_01.ht ml (最終確認 2020.03.25)

4-1 再冠水に至る期間を対象とした性能評価手法に係る基盤整備

(1) 概要

1)背景及び目的

沿岸部での処分場の工学的成立性を示すには、設計・施工を通して構築されるニアフィールド (以下、NF という)領域での処分システムの成立性を提示することが重要である。これまでに、 フィンランド POSIVA 社の評価体系 (Posiva、2012b)を参考にして、わが国の沿岸部における 建設から再冠水完了までの NF 領域での処分システムの成立性を示すための手法の素案(図 4-1-1) を提示した (産業技術総合研究所、原子力機構、原環センター、電中研、2019)。この手法の概要 は、以下のとおりである。

① 地層処分による長期的な安全性を確保するための基本的な概念である「隔離」と「閉じ込め」 を実現するために、処分場が有すべき安全機能を定義する。

② 安全機能の確実な履行に向けて人工バリア等が有すべき性能目標を示す。

③ 人工バリア等の性能目標を満たすような設計仕様を示す。

④ 処分場位置の地下環境や設計仕様を初期状態として、性能評価を実施する。

ここで性能評価とは、フィンランド POSIVA 社の"Performance Assessment" (Posiva、2012b) を参考とし、「地質環境を含む処分システムの構成要素に関する短期〜長期の変遷挙動(状態変化 や機能変化)について分析・評価を実施し、要件や性能目標の達成を確認すること」を示す。性 能評価は、処分システムの変遷挙動を示すものであり、その結果は安全評価(線量評価を伴う処 分場の安全性の評価)のシナリオ抽出や処分場構成要素の設計へのフィードバックに貢献する。 また、性能評価は、段階的にまとめられるセーフティケースの中で実施され、段階が進むにつれ て情報が密となり、より確からしい性能評価が実施されることになる。

これまでに、図 4-1-1 について、塩水環境下における緩衝材の流出とセメント系材料の Ca 溶 脱の 2 つの現象を例に水理解析手法と連携して成立性の評価手法の妥当性を確認したが、構成要 素の設計仕様に基づく要件管理と比較すると性能評価に関してはエキスパートジャッジに頼る部 分が多かった。エキスパートジャッジは、専門家の深い知識で判断がなされる一方で、評価者に よる評価の違い等が懸念される(産業技術総合研究所、原子力機構、原環センター、電中研、2019)。

そこで本事業では、性能評価手順の体系化を目的として、沿岸部を含むわが国の多様な地質環境に対応した性能評価手順書素案を作成する。本年度は、性能評価に関する基盤情報を整備し、 その情報を踏まえて性能評価手順書素案作成に必要な実施内容の具体化を行う。

処分システムの構成要素に関する変遷は、図 4-1-2 に示すように、建設・操業~再冠水完了の 期間に、水理及び化学場の NF 領域での擾乱の影響を受ける。特に、沿岸部では、陸域とは異な り、現降水、氷期降水、現海水、化石海水などの多様な化学組成の地下水が分布しているため、 地下水を引き込むことにより、NF 領域の化学組成が擾乱期に変化する可能性がある。これまで に、建設・操業~再冠水完了の水理場の擾乱が NF 領域での処分システムに与える影響を評価

(性能評価)するための水理解析手法を構築し、解析により得た処分場周辺の地下水流動や湧水 量を用いて処分システムの成立性評価を行った。なお、これまでの水理解析手法は、多様な地下 水の化学組成を考慮するための塩水の密度の考慮や、立坑・斜坑等の処分場の詳細な設計のモデ ル化をしていない(産業技術総合研究所、原子力機構、原環センター、電中研、2019)。また、 堆積岩系を対象とした検討であったことから、多様な地質環境等に対応する必要があると考えら れる。そこで本事業では、建設・操業~再冠水完了の水理場の擾乱が NF 領域での処分システム に与える影響を確からしく評価(性能評価)することを目的に、沿岸部及び多様な地質環境に対 応した性能評価に資する水理解析技術の整備をする。本年度は、水理解析技術の整備に向け、性 能評価における水理解析上の課題を整理し、水理解技術の整備に必要な実施内容を具体化する。

以上の検討をもとに、地質環境情報から水理解析、性能評価への一連の流れを試行することに より、処分場の設計の観点から地質環境情報のうち重要な事項を抽出する等、地層処分事業の連 携にも役立てるものとする。



図 4-1-1 わが国における処分システム成立性を示すための手法の素案



図 4-1-2 処分システムの状態の変遷と擾乱のイメージ

- 2) 実施内容
- ① 平成 31 年度からの 5 ヵ年

本事業の目的は、わが国の多様な地質環境に対応した、また、沿岸部に対応した性能評価をよ り確からしく実施できるように、性能評価手法の体系化を進めることであり、前述の1)に基づ き、本事業5か年での実施内容は以下の2つが挙げられた。

- 性能評価手法の体系化
- 水理解析技術の整備

性能評価手法の体系化では、わが国の多様な地質環境や処分概念、また、沿岸部に対応した性 能評価の手法等を体系的に示した性能評価手順書の素案を作成する。加えて、作成した性能評価 手順書素案により性能評価を試行し、実用性や課題の抽出をする。

なお、本事業では、以下の内容を考慮して実施する。

- 定量的に評価できるように目指す(緩衝材流出量許容値など、数値による評価基準を作る)。
- ・ 性能評価の実施に必要とされる地質環境情報(項目)とその精度について整理し、その整理した内容を地質環境モデル(以下、SDM という)の構築に反映することができるかを地質環境調査技術分野と議論する(地質環境分野の検討及び本検討に役立てる)。
- ・ 性能評価の対象物は、NF 構成要素(緩衝材、オーバーパック、埋め戻し材、支保、プラグ等) とする。
- ・ 性能評価期間は、建設・操業~再冠水完了(ベースライン復旧)に限るものとする。
- 性能評価を実施する段階は概要調査段階とする。

水理解析技術の整備では、わが国の多様な地質環境や処分概念、また、沿岸部に対応した性能 評価のより確からしい実施を踏まえて、性能評価に係る水理解析上の課題を整理し、水理解析技 術の整備に必要な内容を具体化して進める。なお、高度化した水理解析技術は、上記の性能評価 手順書素案に沿った性能評価の試行に用いる。

平成 31 年度の実施内容

上記の5ヵ年の実施内容を踏まえ、本年度は、以下の検討を実施した。

- ・ 性能評価手法の体系化に向けた検討
- 水理解析技術の整備に向けた検討

性能評価手法の体系化に向けた検討では、性能評価の国外の事例等を調査して、沿岸部における性能評価手順書素案の作成に向けた基盤情報として整理し、実施内容を具体化する。

水理解析技術の整備に向けた検討では、性能評価との連携を踏まえた水理解析上の課題の整理に より、沿岸部における性能評価を踏まえた水理解析技術の整備にあたり実施すべき内容を具体化 する。ここでは、一部の実施内容に関して予備解析による検討も実施した。

また、上記の2つの検討で具体化した内容を踏まえ、本事業の実施事項を具体化する。

(2) 性能評価手法の体系化に向けた検討

1) はじめに

わが国における沿岸部に対応する性能評価手順書素案を作成に向けて実施内容を具体化するに あたり、基盤情報の整備として先行的に性能評価を検討している海外事例やわが国の現状を調査、 整理し、沿岸部に対応した性能評価をする上で考慮すべきことを把握する必要がある。ここでは、 性能評価手順書素案の作成に向けた実施内容の具体化を以下の手順をもって実施した。

性能評価に係る国内外の検討事例の調査

性能評価に関する基盤情報を整備するため、先行的に性能評価の検討を進めている諸外国 から、沿岸部に処分する国(フィンランド、スウェーデン)と非沿岸部に処分する国(スイ ス)を選定し、各国における性能評価に係る内容を、セーフティケース文書を対象に調査し た。また、わが国における性能評価に関する最新の取組状況を把握するため、NUMO包括的 技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構、2018)の調査を実施した。なお、以後、 NUMO包括的技術報告書レビュー版をNUMO-SCとする。

調査結果は、性能評価の流れ、性能評価項目、性能評価項目ごとの評価手法の観点で整理した。

沿岸部における性能評価手法の検討

性能評価にかかる国内外の検討事例の調査結果から、沿岸部処分国と非沿岸部処分国の性 能評価に係る内容の比較検討等を実施し、沿岸部における建設から再冠水完了までの NF 処 分システムの性能評価を実施する上で考慮すべきことについて検討した。

 ・ 性能評価手順書素案作成に向けた実施内容の検討

性能評価にかかる国内外の検討事例の調査結果及び沿岸部における性能評価手法の検討の 結果を踏まえて性能評価手順書素案の作成に向けた実施内容の検討を行った。

2) 性能評価に係る国内外の先行的な検討事例の調査

性能評価に関する基盤情報の整備を行うために、国外の先行的な検討事例を調査した。調査対 象国は、沿岸処分国としてフィンランド (POSIVA) とスウェーデン (SKB)、非沿岸処分国とし てスイス (Nagra)を対象とし、調査対象文献は各国のセーフティケース相当文書を主とした (Posiva、2012a; Posiva、2012b; SKB、2011; Nagra、2002)。また、わが国における性能評価 の最新の取組状況を把握するため、NUMO-SC の調査を実施した。

調査内容は、以下のとおりである。なお、NUMO-SC は、下記の事項に関連する事項を抽出した。

- ・ 人工バリアシステム構成の概要
- ・ 性能評価の位置付け(性能評価の流れ)
- ・ 性能評価項目の整理
- 性能評価項目毎の評価手順の整理(流れ、モデル、データ種類等)

各国ごとの調査結果の詳細は、Appendix VIIに示す。

以上の調査結果に対し、①性能評価の流れ、②性能評価項目、③性能評価項目毎の評価手順で整 理する。

性能評価の流れに関する調査結果

性能評価(処分システムの変遷挙動に関する評価)の流れについては、調査した海外3か国で 用いられる用語等は異なるものの、おおよその流れは図4-1-3のような5つのステップで示すこ とができた。ここでは、海外3か国の事例の調査結果から示されたおおよその性能評価の流れの それぞれのステップの要約を示す。

ステップ1:前提条件の確認

調査した海外事例では、性能評価の前提条件として、セーフティケースの中で性能評価よりも 前に設定されている安全機能(処分場構成要素が処分場の安全のために発揮しなければならない 機能)や初期状態(処分場構成要素の施工直後の品質)などを整理し、確認している。これらは 性能評価の初期状態や性能評価結果の判断基準として用いられる。

ステップ2:評価期間の設定

フィンランドやスウェーデンでは、評価期間として4つの期間が設けられているがその設定方 法は国によって異なる。フィンランドでは気候変遷の評価結果から、スウェーデンでは気候変遷 の評価に加え放射能毒性の評価結果から導出している。スイスは評価期間の設定はされていない が、性能評価項目ごとに適した評価期間を設定して評価を実施している。

・ ステップ3:性能評価項目の選定

調査した海外事例では、性能評価項目として、処分場構成要素の性能に影響があると考えられ る現象が示されている。これらの項目は FEP やそれまでの研究成果から抽出されているが、その 抽出の基準などは今回調査した範囲では見受けられなかった。

• ステップ4:評価の実施

調査した海外事例では、それぞれの評価期間内で選定された性能評価項目に対し、どのような 変遷が起こるのかを試験や解析などの手法を用いて評価している。



ステップ5:評価結果の記載

調査した海外事例では、推定した結果に対し、前提条件で確認した指標などを用いて該当する 処分システムの性能を評価し、文章や図で示している。フィンランドやスウェーデンでは評価結 果に対し、指標を用いて定性的あるいは定量的な記述がある。

NUMO-SC について、前述の本検討より示した5つの各ステップに関わる事項を安全評価の基本手順の中より整理した。本事業で性能評価手法の検討を行うにあたり、NUMO で定められている性能評価の前提となるような情報は考慮が必要である。

ステップ1(前提条件の確認)に関連して、NUMO-SCにおける安全評価に関する一連の作業 は、期待する安全機能を発揮するよう、適切な手順によって選定されたサイトの地質環境条件(第 3章で示した検討対象母岩に対する地質環境モデル)と、その地質環境条件を考慮した設計(第 4章に示したような検討対象母岩の分類に応じた設計仕様例)によって構築される処分場を対象 として実施している。

ステップ 2(評価期間の設定)に関連して、安全評価の基本手順で示されているシステムとし てのふるまいに関する記述において作成するストーリーボードの中で、以下の5つに分けられて いる。

- ・ 建設・操業(から処分場閉鎖までの期間)
- ・ 処分場閉鎖から再冠水完了までの期間(T₁)
- ・ 再冠水完了から放射性核種の移行が生ずるまでの期間(T₂)
- 放射性核種の移行が生じてから現在の地質環境の特性が大きく変化しないと考えられるまでの期間(T₃)
- ・ 地質環境の特性に関する不確実性が増大する期間(T₄)

ステップ 3(性能評価項目の選定)について、性能評価項目の抽出方法は、今回の海外事例の 調査の範囲では見出すことはできなかった。一方で NUMO-SC の安全評価の基本的手順で示さ れている安全機能要因分析では、処分場の各構成要素の安全機能を規定する物理・化学的諸量(以 下、状態変数という)を抽出し、NUMO FEP リスト(NUMO-SC の付表 6-1 参照)の FEP から 抽出して状態変数と安全機能を結び付けている。FEP とは、地層処分システムの各要素の特性

(Feature)、特性に影響を与える事象 (Event)、地層処分システムの時間的変遷の過程 (Process) の略称のことである。この安全機能と FEP を結び付ける考え方は、処分場構成要素の性能に影響 があると考えられる現象を示す性能評価項目の選定と類似したものと考えられ、安全機能要因分 析は性能評価項目の選定方法として有用な情報である可能性がある。また、これとは別に、 NUMO-SC の付属書 4-14「緩衝材の設計要件と評価項目の設定(高レベル放射性廃棄物処分場)」 では、緩衝材への影響が懸念される要因としてコロイドの形成やイライト化といった現象とそれ に関連する FEP 項目が示されており、これらから性能評価項目を抽出できる可能性がある。

ステップ4(評価の実施)及びステップ5(評価結果の記載)について、NUMO-SCの安全評価の基本的手順で関連する事項として、安全機能要因分析で抽出した FEP が状態変数に与える影響を現象解析などの手法を用いて分析する安全機能影響分析が考えられる。

また、NUMO-SC では、地層処分システム全体のふるまいを俯瞰し、時間・空間スケールに関する整合性を確認できるようにする表現方法としてストーリーボードが導入されており、調査し

た海外事例のセーフティケースを参考にした性能評価の手順の流れで示されるタイミングと異なるものの、処分システムの変遷を図示したものとして本検討の参考になると考えられる。

性能評価項目に関する調査結果

調査した海外事例では、性能評価項目として大まかな変遷プロセスとそれに付随する現象を示 している。これらについて、それぞれ評価される処分場構成要素、現象の熱、水理、応力、化学、 核種移行(以下、THMCR という)によって分類することができた。各国の性能評価項目につい て処分場構成要素、THMCR ごとに分類した整理結果を表 4-1-1 に示す。

③ 性能評価項目毎の評価手順に関する調査結果

調査した海外事例では、性能評価項目ごとの評価手順は、評価項目ごとに様々であるが、解析 のみならず、実験室もしくは原位置における試験の結果に基づく評価が実施されている。性能評 価項目の数は多く、本年度は水理解析が関連する地下水流動、地下水組成(塩分濃度、イオン強 度、Cl-濃度)等を調査した。調査結果については Appendix VIIに示す。なお、評価手順、すなわ ち解析方法や試験方法についてはセーフティケース相当文書には記載がなく、引用文献などに記 載されている場合が多い。

処分場				性能評価項目		
構成要素	THMCR分粒	フィン	ランド(沿岸国)	スウェーデン	ン (沿岸国)	フノフ (北)() () () () () () () () () () () () ()
	11111010/1/984	掘削・操業から閉鎖まで	閉鎖後1万年まで	掘削/操業期	閉鎖後当初の温暖期	ハイス (外伯岸国)
	熱	温度変化	温度変化	温度変化	熱的変遷	温度変化
						再写水浴の水理出況 オパリナス・クレイ
	水理	地下水流動	地下水流動	地下水面の低下、浅部水の浸潤	地下水流動	丹旭小後の小哇八虎、オパリノス・クレイ
						甲での移流、EDZに沿った地下水の流れ
		EDZ		EDZの形成		掘削の影響
		掘削に上る単般指復				油III*>影·音
母星		による石盈頂	熱的スポールング	加公司のED7 トフポーリング	熱的スポールング	
母石	力学		怒的スルーリンク	処方れのEDZとヘルーリンク	然的へかーリンク MERの再送姓化 (NER EE)	
		图1007开西1111	例信の行行注任	例/置0/丹伯注化		
			<i><i>yy-y</i></i>	山産江社の狂欢	クリーノ・ルテンンヤル	
				地震沽動の誘発	地殻構造上の圧縮、水河地殻平衡調整	
					塩分濃度及び天然地下水成分濃度の変	核種移行の地球化学的な遅延、ガス移行、
	化字	地卜水組成	地卜水組成	深層塩地下水のアップコーニング	運	母岩中への喜nHプルームの移行
					12 E	母石中····阿pHI/// 云0/移门
	熱				熱的変遷	
		産金しての土労ぬ影響	腐食	腐食	腐食 (銅、不飽和)	腐食、腐食生成物
	力学・化学	腐食とその刀字的影響	力学的荷重		緩衝材の膨潤が及ぼす力学的な影響	
キャニスタ	22.1 10.1				版图书》》版图《 天体 / / / 日子家形 量	破損メカニズム
	化学					ガマ惑生
	七十	土吃田	土晦里			大力光王
	成外際	不瞄介	不确介	泪底恋儿	12 友温 座の八 左	太陽外
	烈	温度変化	温度変化	温度爱化	ヒーク温度の分布	
	力学					坑道の収縮及びベントナイトの圧縮
		パイピング/エロージョン		パイピング/エロージョン		
			飽和プロセス		飽和	再冠水
	水理・力学		膨潤及び均質化		均質化、上方に向けた膨張	
			緩衝材ベントナイトの埋戻材への膨潤			
				底板/パッケージ間の水理学的相互作用	底板/緩衝材の力学的な相互作用	
	化学	酸素の枯渇及びnH変化		酸素消費		
		コロイド生成		マロイド屋	コロイドル毎世	
		セイントを温出液の影響	セイント温出液の影響			コンクリート制造道支程による恋好
緩衝材		ことしまずもの影響	ビバンド夜山放り影響			コンクリード表列道文体による友貞
		ンリカノルの影響	「目」と泪南丁での世代ル労め変遷		了約600%上方須押開	開始土和土
			上升しに温度下での地球化子的変遷		小即相段階と高温期间	间原水租成
			モンモリロナイトの変質		鉱物の構造変化	烈发質、鉱物字的发化
			熱的ステージでのセメンテーション		セメント化	
			飽和後の間隙水化学・陽イオン交換体化学		塩分濃度の効果	
			微生物活動			
			硫化物フラックス			
					底板/緩衝材の化学的な相互作用	
						酸化還テフロントの貫入(お射線公解)
						政に速几/ロノトの員八 (成別称力件)
						ガス移行
	力学					坑道の収縮及びベントナイトの圧縮
		バイビング/エロージョン		バイビング/エロージョン		
			飽和プロセス	プラグの水飽和とそのシーリング能力	飽和	再冠水
	水理・力学		膨潤及び均質化		均質化	
	1		緩衝材ベントナイトの埋戻材への膨潤			
				底板パッケージ間の水理学的相互作用		
				ガラウト 吹き付けコンクリート及び	•	
	力学・化学	コンクリート構造物の変化	処分坑道プラグの変化			立坑及び坑道シールの変遷
				コンクリートがpHに及ほず効果		
		酸素の枯渇及びpH変化		酸素消費		
埋め戻し材		コロイド生成		コロイド層	コロイド化放出	
		セメント系浸出液の影響				
		シリカゾルの影響				
					て約5000以上宣泪期間 お八連座の効	
	11.224		飽和後の間隙水化学		小剋和技層と向値期间、塩万俵度の効	間隙水組成
	化学				果	
			硫化物の生成と微生物活動			
			セメントー粘土相互作用		セメント化	コンクリート製坑道支保による変質
			鉄	1	鉱物の構造変化	鉱物学的変化
			8A 10-11-11-1-11-11-1		网络内容研想发出	酸化温テフロントの書入(抜射線公配)
						超108元/ビイドの夏八(版約漱分階)
	-1. TH -1. YY	間部社の変化	目離社の恋仏			ル ^ 作例1」
閉鎖材	水理・刀字	加頭材の変化	国際プロジェア	1	1	
	刀子・化字	コンクリート構造物の変化	困興ノフクの変化	I		

表 4-1-1 調査した 3 か国の性能評価項目のまとめ

3) 沿岸部における性能評価手法の検討(調査結果のまとめ)

沿岸部における性能評価手法を整備するために、(2)の調査結果から、沿岸部処分国(フィン ランド、スウェーデン)と非沿岸部処分国(スイス)の性能評価項目を比較し、沿岸部処分国と 非沿岸部処分国における性能評価の違いを検討した。その検討結果の概要を以下に示す。

・ 性能評価項目において、沿岸部処分国と非沿岸部処分国で共通するものが多く、沿岸部 特有の違いよりも地質環境の違いによる性能評価項目の違いが見受けられた。

・ 沿岸部処分国と非沿岸部処分国の間の違いは、各性能評価項目の評価の与条件として表 現されるものと考えられた。

・ 与条件とは、例えば、性能評価項目「緩衝材の変質」を評価する場合には「地下水組成
 (≒塩水影響)」を考慮していると考えられる。これらの評価の上での条件についてここでは
 与条件と示す。

沿岸部に関わる与条件がある可能性のある性能評価項目として、「キャニスタの腐食」、
 「緩衝材の変質」等が挙げられる。

今後は、これらの性能評価項目に関して、沿岸部処分国と非沿岸部処分国の違いの影響
 が及ぶ与条件を、どのような手法や精度に基づき取得・設定しているかを把握することが、
 今後の性能評価手順書素案の作成における課題となる。

4) 性能評価手順書素案作成に向けた実施内容の検討(検討方法の具体化のまとめ)

2)及び3)の結果を受けた、わが国における沿岸部における性能評価手順書素案の作成に以下の検討を行う項目は、以下に示す。

性能評価手順書素案の作成には以下の項目の検討が必要と考えられる。

- 性能評価の流れの検討
- ・ 性能評価項目の選定の検討
- 性能評価項目ごとの評価手法の検討
- ・ 上記項目を通した性能評価の試行による手法の実用性確認

性能評価の流れについては、図 4-1-3 で示されたおおよその性能評価の流れ(5 つのステップ) を示した。今後は見直しに加え、試行にあたっては NUMO-SC で示される情報を参考にしなが ら検討を行うこととする。

性能評価項目の選定方法について、その選定方法は今回の海外事例の調査範囲では見受けられ なかったが、NUMO-SC における「安全機能要因分析」や「設計要因と評価項目」などの知見や 情報は参考となる可能性がある。

性能評価項目ごとの評価手法については、例えば性能評価項目に対し、評価を実施する時点で の最新知見を収集し、後述する水理解析技術の高度化に向けた検討で構築する水理解析手法と連 携した評価手法を作成する。

性能評価の試行による手法の実用性確認では、上記で検討された性能評価項目やその他の設定 を参照して評価を実施し、該当する性能評価項目として挙げられた処分システムの状態変遷を推 定する一連の流れを試行することで、性能評価項目の選定や、その評価方法の実用性や課題を示 す。 (3) 水理解析技術の整備に向けた検討

1) はじめに

沿岸部では、現降水、氷期降水、現海水、化石海水などの多様な化学組成の地下水が分布しているため、処分場内に地下水を引き込む際に、時間の経過に伴い湧水の化学組成が変化する可能性があり、NF領域での処分システムの構成材料の機能が変遷する可能性がある。そのため、NF 領域での処分システムのより確からしい性能評価を行うためには、水理解析によって湧水量に加 え化学組成などを推定して供することが有効と考えられる。

湧水の量や化学組成は、地質環境(例えば、薄層、断層、海水より高濃度な化石海水)や処分 場設計(例えば、立坑・斜坑)などの影響を受ける可能性がある。そのため、より確からしい性 能評価にするには、これらの湧水の化学組成や湧水量に影響を与える要因を考慮した水理解析を 実施して、より確からしい推定が必要である。上記を踏まえると、沿岸部における性能評価に有 益な水理解析を行うには、適切な水理解析手法を選択し、地質環境を適切に考慮する必要がある。

本事業は、上記を踏まえ、これまでに構築した三次元の三段階のネスティングモデルによる広 域の地下水流動から処分場周辺の詳細な地下水の挙動が解析可能な水理解析手法(産業技術総合 研究所、原子力機構、原環センター、電中研、2019)をもとに、水理解析技術高度化に向けた検 討を実施する。平成 31 年度は、検討課題を明確にするために性能評価で必要となる地下水に関 する情報を暫定的に整理し、それらを予測する上で水理解析の設定すべき事項やそれらの影響を、 二次元の地質環境モデルにより予備解析を行い確認した。実施項目を以下に示す。

- ・ 性能評価に必要な地下水に関する情報の整理
- ・ 性能評価との連携のための水理解析手法における課題の整理
- 沿岸部の水理解析に考慮すべき要因の影響検討(予備解析)
- 水理解析技術高度化に向けた実施内容の具体化

2) 性能評価に必要な地下水に関する情報の整理

水理解析手法の検討を進めるために、NUMO-SC 付属書 4-14 の緩衝材への影響が懸念される 要因より地下水に関連する事項を調査して、性能評価に必要な情報を暫定的に整理した。その結 果を表 4-1-2 に示す。性能評価に必要な地下水に関する情報は、地下水静水圧、処分孔湧水量、 湧水の水質の3つであった。なお、今後の性能評価手法の検討でこの他に必要な情報があるか を確認し、水理解析手法の検討に反映することとする。

3) 性能評価と連携するための水理解析手法における課題の整理

性能評価に必要な情報を得るための水理解析手法の整理

前述(2)で整理した性能評価に必要な地下水に関する情報を得るために、一般的に用いられ る水理解析手法と解析対象のスケールを表 4-1-3 に示す。なお、性能評価では地下水の水質(化 学組成)が必要とされるが、地下水流動解析で取り扱うことは技術的に難しく、まずはどの程度 の遠方の地下水を処分場に水を引き込むか等の情報を得るために、地下水の水質を塩水の濃度に 置き換えて解析を実施することとした。 圧力分布や湧水量を得るためには地下水流動解析が、湧水の塩分濃度を得るためには密度流及 び移流分散解析がそれぞれ用いられる。密度流解析は、塩分濃度の変化による流体密度の変化を 考慮した解析である。なお、流体密度は温度によって変化するが、ここでは、温度を一定として 温度による流体密度の変化を考慮しない。そして、得たい情報が時間的に変化しうるかにより定 常・非定常の別が、解析対象が不飽和領域を含むか否かにより飽和・飽和 - 不飽和の別が選択さ れる。定常解析は、非定常解析の支配方程式から非定常項を除いた数値モデルによるものであり、 通常、数値解析手法としては非定常解析よりも容易である。また、飽和流は飽和 - 不飽和流の特 殊な場合に位置付けられる。さらに、地下水流動解析は、密度流解析で流体密度を一定とした特 殊な場合と考えることができる。

以上のことから、次項において課題を抽出する対象の解析手法としては、表 4-1-3 に示した全ての解析手法を包含する非定常飽和 - 不飽和密度流及び移流分散解析を取り上げることした。

影響が 懸念される要因	内容	性能評価に必要な情報	水理 解析
定置時の 隙間充填不足	緩衝材の膨潤量に対して定置時の隙間が大きく, 閉鎖後長期においても隙間 が残存し, 移行経路となることが懸念される。	処分孔 湧水の水質	0
オーバーパックの 腐食膨張, 岩盤ク リープ	オーバーパックの腐食膨張および岩盤クリープにより緩衝材の体積が減少す ると圧密反力の増加をもたらす。この反力と地下水静水圧を足し合わせた応 力がオーバーパック耐圧強度を上回ると、オーバーパックを破損させること が懸念される。 また、緩衝材が変形すると、発生したせん断応力によっ て、緩衝材中にせん断破壊が発生し、廃棄体などに対する支持力を消失する ことが懸念される。	地下水静水圧、 緩衝材の圧密応力	0
ガスの発生	オーバーパックの腐食, 水の放射線分解ガスにより生成されるガスが人工バ リア内部で発生して蓄積し, 破過することで水みちを形成することが懸念さ れる。	処分孔湧水の 水質	0
パイピング現象に よる緩衝材の流出	パイピング現象によって,緩衝材が流出し,閉鎖後長期にわたる隙間の残 存,密度の低下が懸念される。	処分孔湧水量、 湧水の水質	0
緩衝材の変質(セ メント/ベントナイ ト相互作用)	横置き・PEM方式の場合,支保工,インバート,台座などのコンクリート製 残置物が緩衝材周辺に存在するため,緩衝材表面のベントナイトが他鉱物に 変質または Ca型化されるといった影響を受けることが懸念される。	地下水静水圧,緩衝材 の圧密応力	0
緩衝材の変質 (地下水反応)	地下水に Caイオンが含まれている場合, ベントナイトの交換性陽イオンが 置換され, 膨潤性や低透水性が変化することが懸念される。	処分孔湧水の水質	0

表 4-1-2 性能評価に必要な情報(地下水に関する情報のみ抽出)

本検討で整理

NUMO-SC 付属書 4-14 (原子力発電環境整備機構, 2018)を参照

□で囲んだ部分が性能評価に必要な地下水に関する情報

+	1 1	2				ムカエイ インエーレ		\rightarrow /
.	/ _ _	. イ		ンバームフ	<i>Tー X</i> へ (ノ) 7尺 +中・	〒2 ホトー 土ヽエ と		$\chi T = I \chi$
1X	+-T-	J	心女 (1月111)	に口つ/		肝小丁ムし	· //+/// // 3/ 3/ //	\mathcal{N}

性能評価に必要な情報	一般的に用いられる	解析対象の
	水理解析手法	スケール*
処分施設閉鎖後の	定常飽和地下水流動解析	ーアフィッルド
処分孔近傍の	(又は長期非定常飽和密度流及び	(NE)
静水圧分布	移流分散解析)	(NF)
坑道及び処分孔の	北宁党的和《乙韵和州下水运动舰长	ニアフィールド
湧水量	升足吊起相 个起相地 门 小	(NF)
坑道及び処分孔湧水の	非定常飽和 - 不飽和密度流及び	ニアフィールド
水質(塩分濃度)	移流分散解析	(NF)

* 境界条件を設定するために、より大きなスケールについての解析も必要となる。
水理解析手法における現状と課題の整理

ここでは、前項での整理結果を踏まえ、性能評価に必要な情報を提供するために使用される各 種の水理解析手法について、現状と課題を整理する。

(a) 流れのモデル化

岩盤中の地下水の流れのモデル化手法は、岩盤を連続多孔質媒体としてとらえ、その単位断面 積を通過する平均的な流れとして取り扱う方法と、岩盤中の亀裂の連絡のみが流れに寄与すると 考え、これだけを流れの場として抽出して取り扱う方法、そして、これらを混合した方法の3つ に大別できる。

1番目の方法によるモデルを連続多孔質媒体モデル(以下、CPM モデルという)と呼び、これ は堆積岩、亀裂性岩盤の両方に用いられる。また、2 番目の方法では、岩盤の亀裂を様々な半径 と方向をもつ仮想的な円形亀裂の集合で表現し、仮想円形亀裂面が相互に交差している部分を辿 ったネットワークが優先的な地下水流動経路となると見なすモデルが主流であり、これを離散亀 裂ネットワークモデル (以下、DFN モデルという) と呼ぶ (重野・宮川、1995;鈴木ほか、2009)。 この方法は、専ら亀裂性岩盤に対して用いられ、モデルの構造自体が透水性の異方性を表現する ことになる。そして、3番目の方法には、CPM モデルと DFN モデルを組み合わせたハイブリッ ド法と、DFN モデルで表現される透水性の異方性を CPM モデル中の個々の要素に等価な透水性 として付与する等価連続多孔質媒体モデル(以下、ECPM モデルという)の2通りがある。 DFN モデルは CPM モデルよりも新しい手法で、モデル化の難易度がより高いが、近年の計算 機の高速化と扱えるデータの大容量化により、実用性を高めてきている。DFN モデルは、個々 の亀裂をモデル化する都合上、大きなスケールを対象とする場合には考慮すべき亀裂及びその連 絡の数が膨大になり、計算負荷の面で問題が生じることが多い。この問題は、DFN モデルで粒 子追跡法による地下水の物質移行の解析を行う場合に、より顕著になる。このため、大きなスケ ールでの物質移行の検討には、DFN モデルに基づく ECPM モデルを使用したり、CPM モデル と DFN モデルとのハイブリッドモデルを使用したりすることが多い。

(b) 支配方程式(数学モデル)

ここでは、非定常飽和 - 不飽和密度流(密度依存を考慮した浸透流)と、浸透流に伴う溶質の 移流分散の支配方程式(数学モデル、数理モデルとも呼ぶ。)について述べる。支配方程式の誘導 については、日本地下水学会の成書が参考になる(日本地下水学会 地下水流動解析基礎理論の とりまとめに関する研究グループ、2010)。

三次元の非定常飽和 - 不飽和密度流の支配方程式は、ダルシー則を不飽和領域まで拡張した運動方程式であるバッキンガム・ダルシー式と、連続の式から式 4-1-1 で表すことができる。

ここに、 ρ は流体(地下水)の密度、 ρ_f は淡水の密度、 K_r は比透水係数(飽和透水係数に対する 不飽和透水係数の比で、体積含水率 θ の関数)、 K_{ij}^s は飽和透水係数(テンソル)、 ψ は流体の圧力水 頭 (淡水密度で表した水頭値)、 $\rho_r = \rho/\rho_f$ は流体と淡水の密度比、Qはソース・シンク項 (体積流量)、 β は飽和領域で1、不飽和領域で0となるスイッチングパラメータ、 S_s は比貯留係数、 θ は体積含水率、 $C_s = d\theta/d\psi$ は比水分容量、cは溶質濃度、 $\gamma = (\rho - \rho_f)/\rho_f c$ は溶質濃度に対する密度比である。なお、式 4-1-1 はアインシュタインの縮約記法を使用しており、三次元の場合、添字はi, j = 1, 2, 3である。

式 4-1-1 において、流体の物性と流れの場である岩盤の透水・保水特性はパラメータであり、 青色で示されている。また、未知数である圧力水頭 ψ と、 ψ と一価関係を仮定している体積含水率 θ は橙色で、次式 4-1-2 に示す移流分散の支配方程式の未知数cと、それに結び付けられている流 体密度 ρ は緑色で示されている。

一方、三次元浸透流下での溶質の移流分散の支配方程式は、次式 4-1-2 で表される。

ここに、Rは溶質の遅延係数、 D_{ij} は分散係数(テンソル)、 v_i は、流体のフラックスを q_i とするとき、 $v_i = q_i/\theta$ で定義される流体の実流速、 λ は減衰定数、 Q_c はソース・シンク項(質量流量)である。

式 4-1-2 において、遅延係数R、分散係数 D_{ij} 及び減衰定数 λ は、溶質と岩盤の特性を示すパラメ ータであり、青色で示されている。また、未知数であるcと、それに結び付けられている流体密度 ρ は緑色で、密度流の支配方程式の未知数である圧力水頭 ψ と、 ψ と一価関係を仮定している体積 含水率 θ 及び密度流の運動方程式から得られる v_i は橙色で示されている。

なお、分散係数には、拡散係数を含む形で示した、実流速に依存する次式 4-1-3 を用いる (Bear、 1972)。

ここに、 α_L は縦分散長、 α_T は横分散長、 $\|v\|$ は実流速v(ベクトル)の大きさ、 α_m は分子拡散 係数、そして τ は屈曲率である。なお、 δ_{ii} はクロネッカーのデルタである。

前掲式 4-1-1 と式 4-1-2 を連立させたものが、非定常飽和 - 不飽和密度流及び移流分散解析の 支配方程式である。これらの支配方程式に関する理論は現状でほぼ完成しており、課題と言える ものは特にない。議論の余地がありうるとすれば、式 4-1-3 に示した分散係数の与え方であるが、 同式は現状で最も広く用いられているものであり、特に問題はないと判断される。

(c) モデルのパラメータ

前掲式 4-1-1 と式 4-1-2 で示される支配方程式には課題はない一方で、モデルパラメータの設 定にはいくつかの課題がある。主要なモデルパラメータの測定方法と設定上の課題を表 4-1-4 の 通りに取りまとめた。

モデルパラメータ	測定方法	難易度	値の信頼性	設定上の課題
透水係数	原位置試験	低	中	ばらつき、異方性
不飽和透水係数	要素試験	高	低	信頼性、代表性
水分特性曲線	曲線 要素試験		低	信頼性、代表性、
				ヒステリシス
比貯留係数	原位置試験	中	高	ばらつき
分散長	原位置試験	中	低	ばらつき、異方性
分子拡散係数	要素試験	低	高	—
屈曲度	要素試験	低	中	代表性

表 4-1-4 モデルパラメータの測定方法と設定上の課題

モデルパラメータは、測定値が得られればそれに基づいて設定することが望ましいが、測定値 がないものや、測定の難易度が高いものについては、推定値が用いられることが多い。対象が自 然岩盤であるため、パラメータの値にはばらつきがあると想定されるが、一般にこのばらつきを 決定することは難しい。これはほとんどのパラメータに共通する課題である。また、パラメータ に異方性がある場合、設定に困難が伴う。

以上のように、パラメータの設定には課題が残されているが、実用性の観点からは、測定値に 基づくにせよ、推定値に基づくにせよ、ばらつきを想定してある程度の幅を持たせた設定する以 外に、有効な手段はないものと判断される。

(d) 解析実施上の課題

解析実施上の課題としては、移流分散を含む解析の場合、広域からニアフィールドまでの階層 的な空間スケールに対応した密度流・移流分散解析手法が確立されていないこと、化石海水を考 慮する場合の初期・境界条件の設定方法が確立されていないこと、多様な水理地質構造について の適用性の検討が十分でないことなどが挙げられる。以下、それぞれについて解説する。

(i)階層的な空間スケールに対応した密度流・移流分散解析手法の確立

性能評価のための水理解析においては、広域からニアフィールドまでの幅広いスケールについ て解析を実施する必要があるため、実用上、モデルを空間スケールに対して階層的に設定し、モ デル間で初期・境界条件を受け渡す必要があると考えられる。

階層的な空間スケールのモデルを用いて密度流・移流分散解析を行う場合、適切な初期・境界 条件の受け渡しを行うためには、各スケールのモデルの規模や、境界条件の設定方法について検 討を行う必要がある。地層処分分野における解析の実績としては、JAEA による瑞浪超深地層研 究所周辺の中域・サイトスケールモデルや、幌延深地層研究所周辺の広域・サイトスケールモデ ルが挙げられるが、実数が少なく、手法が確立されているとは言い難い状況にある。

適切な初期・境界条件の受け渡しに関しては、水理地質条件を考慮する必要がある。例えば、 断層や薄層に起因する異方性岩盤を対象とする場合、境界面の断層に相当する箇所にどのような 境界条件を与えるべきかについては難しい課題である。

また、階層的な空間スケールのモデルを用いる場合、立坑、斜坑、アクセス坑道及びその他の 坑道といった処分施設構造を、モデルの規模に応じて適切にモデル化する必要があるが、このよ うな試みは十分には行われておらず、現状で手法が確立したとは言い難い。

(ii)化石海水を考慮する場合の初期・境界条件の設定方法の確立

沿岸部の地盤中の流速の遅い領域には、岩石-水反応の結果、現在の海水とは成分の異なる化石 海水が存在している可能性がある。このような化石海水の分布域は、調査では判明しにくいため、 空洞掘削後に異なる組成の地下水が流入してくることによって、その存在が示唆されることも起 こりうると考えられる。

沿岸部を対象とした密度流・移流分散解析を行う場合、このような状況を想定して、化石海水 を考慮した解析手法を整備する必要があると考えられるが、現状では一般的にこのような解析を 行う場合の初期・境界条件の設定方法が確立されていない状況にある。

(iii)多様な水理地質構造についての適用性

例えば、NUMO-SC では、代表的な岩種と水理地質構造のモデルとして、深成岩類、新第三紀 堆積岩類及び先新第三紀堆積岩類が挙げられている。前事業までの検討では、このうち新第三紀 堆積岩類をモデル化しており、様々な地質構造についての適用性の検討が十分でない状況にある。 諸外国では、例えば、フィンランド、スウェーデンは処分サイトの結晶質岩(深成岩類)をモデ ル化して水理解析を実施し、その結果をもって性能評価が実施されている。ただし、これらのモ デルがわが国における地質の特徴を踏まえているとは限らず、改めてわが国における様々な地質 構造についての適用性を検討していく必要がある。

4) 沿岸部の水理解析に考慮すべき要因の影響検討

① 概要

NF 領域での処分システムの性能評価を考える上で、沿岸部というサイトの性質に起因する影響要因としては、主に塩水による NF 領域での処分システムへの地球化学的な影響が考えられる。 このため、処分場周辺の塩水分布及び処分場へ到達する塩水を含む湧水量を把握することは重要 である。そこで、ここでは処分場周辺の塩水分布及び処分施設の湧水に主に着目した整理を実施 する。

具体的には、処分場への塩水流入に関する影響要因の感度解析を密度流解析によって行い、各 影響要因の影響の程度の把握を試みた。影響要因のうち水理地質構造に関して、比較的影響が大 きいと考えられる高透水性の媒体として薄層や断層を、解析手法に関するものとして、塩分濃度 を把握する為に実施した密度流や海水準変動の考慮の有無を挙げて検討を行った。また、化石海 水についても検討を行った。

なお、本検討は三次元の密度流解析で行うことが望ましいが、平成 31 年度は、鉛直二次元モデ ルを用いた予備解析を行い、検討の方向性を具体化することとした。表 4-1-5 に各影響要因の検 討内容を記載する。

② 解析方法

(a) 解析の手順

解析の手順を図 4-1-4 に示す。解析は、建設・操業前の初期水理場及び塩分濃度分布を設定す るための海水準変動解析(初期状態作成解析)と、建設・操業中を想定した坑道掘削後解析の 2 段階により行った。前者は更に洗い出し段階と氷期一間氷期サイクル段階に分けられ、洗い出し 段階ではモデルが海没した状態(モデルの最高標高の位置に汀線がある状態)を初期状態とし、 一定速度で海水準を低下させた。氷期一間氷期サイクル解析では、洗い出し解析によってある程 度海水準を低下させた状態を初期状態として、それ以降の海退・海進を含む海水準の低下をシミ ュレートした。次に、坑道掘削後解析として海水準変動解析の最終的な結果(海水準が現汀線位 置)を初期状態とし、処分施設の坑道開放状態を維持して100年間の解析を実施した。なお、こ れらの解析は基本的に塩水の密度を考慮した飽和・不飽和の密度流解析により実施した。

想定した影響要因	検討内容	検討項目
	高透水性薄層の有無	
薄層	やそのモデル化手法	
	による影響	
断層	断層による影響	・塩分濃度分布
家庄达	密度流の考慮の有無	・処分施設湧水量
备度机	による影響	・処分場への塩水
海水淮亦動	海水準変動の考慮の	の引き込み領域
两小毕 发到	有無による影響	
化二海亚	高濃度の化石海水に	
山山毋小	よる影響	

表 4-1-5 処分場周辺の塩水分布に関する影響要因と検討内容



(b) 解析コード

解析コードには、有限要素法による二次元飽和・不飽和浸透流及び移流分散解析プログラムである Dtransu-2D-EL を使用した。このコードの詳細は Appendix VIIに示す。

(c) 解析ケース

解析ケースは、前掲表 4-1-5 の各要因に基づき設定した。高透水性の薄層及び断層は水理地質 構造としてモデル化した(後述(d))。高透水性の薄層に関しては、考慮なし(モデル化しない) の場合、透水異方性(透水係数を地下水の流動方向に応じて異なる設定とした)を持たせて泥岩 と一つの地層としてモデル化した場合、高透水性の薄層(砂岩相当)としてモデル化した場合の 3パターンを設定した。断層は、断層なしの場合と断層ありの場合の2パターンを設定した。こ れら(薄層と断層と坑道の状態)を組み合わせてケース設定を行った。その他に、塩水密度を考 慮しないケース(密度流なし[浸透流解析、移流分散解析])を設定し、密度流の考慮の有無によ る比較を行った(浸透流解析は case013 及び case014、移流分散解析は case013c 及び case014c)。 同様に洗い出し解析のみのケースを設定することによって海水準変動の有無による比較も行った。 化石海水は、化石海水を人工バリアへの影響が懸念される高濃度の塩水と仮定したケースによっ て、化石海水の考慮の有無による比較を行った。また、前掲表 4-1-5 の各要因のうち塩水の引き 込み領域は、設定した各ケースで評価した。解析ケース一覧を表 4-1-6 に示す。

(d) 解析モデル

(i)概要

解析モデルは初期の塩濃度分布を評価するため、山地から大陸傾斜までを考慮できる広域のモ デルとした。地表面形状は、平成28年度地層処分技術調査等事業沿岸部処分システム高度化開 発において作成した解析モデル(産業技術総合研究所、原子力機構、原環センター、電中研、2017) と同様とした。水理地質構造は新第三紀堆積岩類、処分施設位置は汀線から海域に10km、深度 GL.-500mとし、施設の幅は処分場全体のパネルレイアウトから2kmと仮定した。解析メッシュ は100m×100mの要素サイズを基本とし、地表面部分及び後述する薄層と断層の部分に関して 細分化した。解析モデルにおける各対象の設定を表4-1-7に、解析メッシュ図を図4-1-5に示す。 また、地表面形状及び水理地質構造に関する詳細な内容を以降の(ii)、(iii)において記載する。

		薄層		断	層	密度	度流	坊	ī道	
解析ケース	考慮なし	透水異方性	要素として	なし	あり	考慮あり	考慮なし	掘削前	掘削後	備考
		で考慮	モデル化							
case001	0			0		0		0		坑道掘削前(case002)の初期条件作成
case002	0			0		0			0	
case003		0		0		0		0		坑道掘削前(case004)の初期条件作成
case004		0		0		0			0	
case005			0	0		0		0		坑道掘削前(case006)の初期条件作成
case006			0	0		0			0	
case007	0				0	0		0		坑道掘削前(case008)の初期条件作成
case008	0				0	0			0	
case009		0			0	0		0		坑道掘削前(case010)の初期条件作成
case010		0			0	0			0	
case011			0		0	0		0		坑道掘削前(case012)の初期条件作成
case012			0		0	0			0	
case013	0			0			0	0		密度流考慮か否か以外は、case001と同様の設定
case013c	0			0			0	0		移流分散解析、case001と同様の設定
case014	0			0			0		0	密度流考慮か否か以外は、case002と同様の設定
case014c	0			0			0		0	移流分散解析、case002と同様の設定
case015	0			0		0		0		海水準変動解析において、氷期-間氷期サイクルを 考慮しない。それ以外は、case001と同様の設定
case016	0			0		0		0		洗い出し解析後、EL2000m以下を化石海水(比濃 度2.0)に設定。それ以外は、case001と同様の設定
case017	0			0		0			0	洗い出し解析後、EL2000m以下を化石海水(比濃 度2.0)に設定。それ以外は、case002と同様の設定

表 4-1-6 解析ケース一覧

表 4-1-7 解析モデルの各対象の設定

対象	説明
地表面形状	平成28年度地層処分技術調査等事業 (沿岸部処分システム高度化開発)業務を参照
水理地質構造	包括的技術報告書レビュー版の <u>新第三紀堆積岩</u> の 水理地質構造を参照
処分施設	位置 : 海域10km、深度GL500m 領域 : 幅2km
解析メッシュ	100m×100mメッシュを基本とした 地表面部分及び後述する断層と薄層の部分に関して細分化



図 4-1-5 解析メッシュ図(薄層なし、断層あり)

(ii)地表面形状

地表面形状は、NUMO の SDM において設定されていないため、平成 28 年度地層処分技術調 査等事業沿岸部処分システム高度化開発業務(産業技術総合研究所、原子力機構、原環センター、 電中研、2017)において用いた二次元鉛直モデルの設定と同様とした。このモデルは、平成 27 年 度地層処分技術調査等事業直接処分代替処分研究開発業務(日本原子力研究開発機、2016)にお ける広域スケールの地形モデルを参考に陸域の低地から海域の大陸傾斜までの地形を設定し、そ れに陸域の山地・丘陵の領域を新たに追加したものである(図 4-1-5 (a)参照)。

わが国の沿岸部の地形を考えると、多くの場合、陸域には汀線の近くに低地や台地があり、そ こから内陸部へ向かうにつれて丘陵、山地と変化する。一方、海域には汀線近くに大陸棚があり、 その沖合には傾斜がより大きい大陸傾斜が存在する。そこで、陸域は、汀線に接続する低地・台 地とその内陸側に存在する山地・丘陵部を、海域は、汀線に接続する大陸棚とその沖合に存在す る大陸傾斜を設定した。鉛直二次元モデルにおいて、各地形区分の傾斜及び幅は、わが国の地形 に関する既往統計データを参考とした。陸域の地形勾配は、わが国の地形の統計データから(若 松ほか、2005)、海域の地形勾配は、文献値や海域地形のサンプル値に基づいてそれぞれ設定した (日本第四紀学会、1987;米倉、1981;茂木、1996)。設定した陸域・海域の地形勾配を表 4-1-8 に示す。また、大陸棚の幅は、日本の沿岸部のサンプル値に基づいて設定し、その他の地形区分 の幅は、地下施設の設置範囲を勘案して、それぞれ大陸棚の幅と同じ値に設定した。

(iii)水理地質構造

水理地質構造モデルは、NUMO-SC に記載されている新第三紀堆積岩類の地質環境概念モデ ルを参照にして作成した。これを(ii)の地形区分を当てはめると、山地・丘陵相当部は深成岩 類相当となり、低地・台地相当部、大陸棚部は古第三紀堆積岩類(基盤堆積岩)と新第三紀堆積 岩類相当となる。また、それぞれの表層には上部割れ目帯と被膜堆積岩層(第四紀堆積岩類)と なることから、これらを水理地質構造としてそれぞれモデル化した。このうち新第三紀堆積岩類 は、NUMO の SDM における層厚(算術平均値)及び層序の設定を参照して表 4-1-9 のように 設定した。ただし、泥岩層は処分施設底部の泥岩が薄くなりすぎないように層厚を 449m から 500m に変更した。大陸傾斜は、陸域プレートと海域プレートの遷領域に当たるが、陸域プレー トの地層がそのまま続いていると仮定し、大陸棚の地層の傾斜をモデル境界まで延長した。第四 紀層(被膜堆積岩層)及び上部割れ目帯は海域に向かうに従って薄くなると考え、山地・丘陵部 で100~200m、低地・台地相当及び大陸棚で 100m、大陸傾斜で 50~100m とした。地層の広が り(水平層[0-10°]、単斜層[10-90°]、褶曲層)は、影響の程度を明瞭にするため水平層とし た。

152

	山地・丘陵相当	低地・台地相当	大陸棚	大陸傾斜
勾配	0.1	0.018	0.009	0.079
(角度)	(5.7°)	(1°)	$(0.5^\circ$)	(4.5°)

表 4-1-8 鉛直二次元モデルに設定した陸域、海域の地形勾配(傾斜)

表 4-1-9 新第三紀堆積岩類の地質区分と層厚

(NUMO-SCより抜粋して一部加筆修正、全体層厚を2000mと仮定、地表面から順に記載)

地層区分	層厚(m)
泥岩層	500(449)
砂岩層	62
泥岩層	449
砂岩泥岩互層	311
砂岩層	462
礫岩層	268

※カッコ内は変更前 (NUMO-SC) の値

○薄層について

一般的に水理地質構造上一つの地層とみなされている層においても、ボーリング柱状図等を確認すると実際には性質の異なる薄い地層が形成されている場合も多々ある。そのため地層を等価な媒体と仮定し透水係数を設定した場合、場所によってはかなり異なった湧水量が計測されることもある。そこで、本検討では上部の泥岩層に高透水性の薄い層があると仮定しモデル化を行った。モデル化した薄層の位置は、施設掘削の影響を比較的受けやすい領域として、処分施設の上部約 125 m 上方の泥岩層に 50 m 厚の層とし、地層の傾斜に沿った形でモデル化した。図 4-1-6 に薄層をモデル化したケースの施設周辺領域の解析メッシュ拡大図を示す。

○断層について

断層は、NUMO-SC に示されている新第三紀堆積岩類の SDM のうち、広域スケールモデルに おいてモデル化されている断層を基に設定した。NUMO-SC においては、断層を 1km 未満、1 ~10km、10km 以上に分けて対処の考え方(表 4-1-10 参照)を決めており、広域スケールモデル においては 1km 以上の断層をモデル化の対象としている。 一方、 本検討では二次元モデルを用い るため、奥行き方向は無限大となる。そのため 10km 未満の断層はモデル化すると過大な評価と なると考え、10km 以上の断層のみを対象とした。広域スケールモデル及び広域スケールモデル の断層のデータを図 4-1-7 (a)、図 4-1-7 (b)に示す。本検討において作成した解析モデルと比較 すると、水平方向及び深度方向に領域が不足している。そのため、水平方向は影響の比較的大き いと考えられる施設周辺付近(汀線から大陸棚の範囲)に断層を配置することとし、丘陵部分及 び大陸傾斜部分は断層をモデル化しなかった。深度方向は断層を傾斜方向に伸展させることによ って補完した。作成した二次元モデルと広域スケールモデルの断層を重ね合わせた図を図 4-1-7 (c)に、二次元モデルに反映させた広域スケールモデルの断層の位置を図 4-1-7 (d)に示す。また、 |断層の幅は NUMO-SC において断層長さの 1/100 と設定していることから、本検討では長さを 一律に 10km と仮定し断層の幅は 100m に設定した。なお、本検討において検討した断層は処分 施設から十分な離間距離があり、施設と繋がるような高透水性の媒体による連続性がないものと した。

(e) 初期条件及び境界条件の設定

海水準変動解析のうち洗い出し解析の初期条件及び境界条件を図 4-1-8、図 4-1-9 に、氷期-間 氷期サイクル解析の境界条件を図 4-1-10 に、坑道掘削後解析の境界条件を図 4-1-11 に示す。洗 い出し解析は海没状態をモデルの初期状態とし、氷期一間氷期サイクルの開始する海水準(EL.+ 216m)まで、境界条件によって海水準を低下させた。氷期-間氷期サイクル解析は後述する図 4-1-12 に示す相対的な海水準変動を考慮しながら、現汀線位置(EL.0m)まで海水準を低下させ た。坑道掘削後解析は、処分施設の位置に境界条件として大気圧解放条件(圧力水頭 = 0)を設 定し計算を行った。



薄層は、層厚 50m とする。

薄層下端から施設上端の間は約 125m である。

図 4-1-6 薄層モデルの位置(図 4-1-5 (b)図の領域、薄層あり/断層あり)

表 4-1-10	断層に対す	る対処の考え方

(NUMO-SCより抜粋)

断層長さ	地質環境モデルの構築における考え方	地下施設の設計での取り扱い
10 km 以上	活断層の可能性がある断層と想定する。 文献調査から精密調査の前半の段階におい て除外する断層として取り扱う。 広域スケールの地質構造モデルで記載する が,処分場スケールのモデル領域からは除外 するように扱う。	左記の対応により、地下施設レイアウト の検討では対象とならない。
1~10 km	文献調査から精密調査の前半の段階におい てその位置や特性を概ね把握できる断層。 広域スケールおよび処分場スケールの地質 環境モデルにその分布が記載される断層 。	異常出水などにより掘削に支障を生じ る可能性があるため、断層が分布する 領域に処分坑道を配置しない。
1 km 未満	母岩中に普遍的に分布しているため、概要調 査および精密調査の段階において すべて を 検出することは現実的ではなく、その性状の 把握や統計量の算出を目的とした調査・評価 を行うこととなる。 パネルスケールの地質環境モデル で記載さ れる断層。	処分区画の設置領域に分布することを 許容して取り扱う。湧水対策の観点か ら処分坑道または処分孔の掘削,緩衝 材の施工に支障が生じる可能性がある 場合には、分布箇所に人工バリアを施 工しない。



図 4-1-7 二次元モデルに反映させた断層の位置



図 4-1-8 洗い出し解析における初期条件(密度流を考慮する場合)







図 4-1-10 氷期-間氷期サイクル解析の境界条件(密度流を考慮する場合)





(f) 海水準変動の設定方法

有限要素法による数値計算において隆起浸食等の地盤の変動を構造的に考慮することは難しい ことから、海水準変動は地盤の変動と海水準を合わせた相対的な海水準変動によって考慮した。 この相対的な海水準変動は、平成28年度地層処分技術調査等事業(直接処分代替処分研究開 発)(日本原子力研究開発機構、2017)を参考とし、汎世界的な海水準変動と、隆起速度から侵 食速度を差し引いた見かけの隆起速度の関係に基づいて設定した。この設定にあたっての、海水 準変動、隆起速度及び侵食速度の検討はAppendix VIIに示す。

本検討では、侵食速度/隆起速度の比を 1/3 とし、海水準変動及び見かけの隆起速度を次のと おり設定した。

・海水準変動 :変動周期 12 万年(海退期間 10.8 万年、海進期間 1.2 万年)

変動量 125m (隆起・侵食を考慮しない値)

・見かけ隆起速度: 0.2m/1000 年

(隆起速度:0.3m/1000 年、侵食速度/隆起速度の比は 1/3)

上記の見かけ隆起速度を考慮した解析上の海水準変動を図化したものを図 4-1-12 に示す。

(g) 化石海水の検討手法

化石海水を明確に定義することは難しいが、ここでは氷期-間氷期サイクルの間において淡水で 置き換わらなかった地下水と定義した。また、高濃度な塩水が緩衝材の膨潤挙動などに影響を与 える可能性があることを考慮して、ここでは化石海水として人工バリアへの影響が懸念される高 濃度の塩水を仮定した。検討手法としては、洗い出し解析の結果(case001)のうち基盤堆積岩相 当の深度(EL.-2000m)以下の領域を高濃度塩水(比濃度2.0)とし、氷期-間氷期サイクル解析 の初期条件とした。次にこの初期条件を用いて氷期-間氷期サイクル解析、坑道掘削解析を行うこ とによって、化石海水の分布や掘削後の処分施設の湧水量や比濃度への影響の検討を行った。

(h) 解析用物性值

解析用物性値は薄層や断層を除いて全て共通の設定とした。基本的に包括的技術報告書のレビュー版に記載されている統計値(原子力発電環境整備機構、2018)とし、記載されていない物性値に関しては一般的な知見を基に設定した(設定の基となった知見は Appendix VIIに示す)。解析物性値一覧を表 4-1-11、表 4-1-12 に示す。また、降雨は日本の年平均降水量(30 年平均)から1720 mm/年(国土交通省ホームページ)とし、降雨浸透率は 20%に設定した。

- ③ 解析結果
- (a) 海水準変動解析
- (i)洗い出し解析

洗い出し解析の結果のうち、汀線位置を氷期一間氷期サイクル解析の初期状態まで移動させた 状態(807万年後、EL.+216m)の比濃度分布図と流速コンター+ベクトル図は Appendix VIIに 示す。これらの結果からの考察を以下に記す。なお、本報告書には、図 4-1-13 に密度流考慮の 有無の比較として case001 及び case013c の比濃度コンター図を示す。

山祥	地园夕	透水係数(m/s)		古动即欧安	比貯留係数	分散長(m)		実効拡散係数
石悝	地層名	鉛直	水平	有刈间原平	(1/m)	縦	横	(m^2/s)
烫击中	上部割れ目帯	1.4E-06		0.050	1.0E-06	100	10	9.0E-13
床成石	基盤花崗岩	1.4E-08		0.008	2.6E-07	100	10	9.0E-13
	第四紀層	1.0E-05		0.290	4.7E-05	100	10	1.0E-11
	泥岩層	2.3E-08		0.290	3.2E-06	100	10	1.0E-11
	砂岩層	5.3E-07		0.220	3.2E-06	100	10	1.0E-11
堆積岩	砂岩泥岩互層	2.3E-08 5.3E-07		0.250	3.2E-06	100	10	1.0E-11
	礫岩層	6.5E-08		0.180	3.2E-06	100	10	1.0E-11
	基盤堆積岩	1.1E-08		0.035	3.8E-07	100	10	3.0E-13
	断層(10km以上の亀裂)	5.4E-07		0.250	3.2E-06	100	10	1.0E-11

表 4-1-11 解析物性值

表 4-1-12 薄層のモデル化による透水係数の違い

港屋のエデルル	透水係	数(m/s)	供考	
海層のモアル化	鉛直	水平	通方	
透水異方性で考慮	2.5E-08	7.4E-08	薄層と泥岩層を併せて一つの地層とみなし 透水異方性を設定することでモデル化	
要素としてモデル化	5.3E	-07	薄層を高透水性の地層(砂岩層相当)とし てモデル化	



case001、薄層なし、断層なし、密度流考慮あり、汀線位置:EL. +216m



- 塩淡境界は新第三紀堆積岩類の領域(EL.-2,000m以浅)において透水係数が比較的大きい 為、汀線よりやや海側に張り出す形となっている。
- 密度流を考慮したケース(case001)の流速場は塩淡境界付近特有の流動場が形成されている。具体的には、塩水領域(海域)は陸域の塩淡境界の深部に潜り込むような流動場となり(Appendix VII 図 3-2 参照)、淡水領域(陸域)は丘陵から涵養して汀線から塩淡境界付近にかけて湧き出すような流動場となっている。一方、密度流を考慮しないケース(case013c)は、密度流を考慮したケース(case001)よりも丘陵から涵養し海底面から湧き出す領域が広くなっている(Appendix VII 図 3-9 参照)。

(ii)氷期-間氷期サイクル解析

氷期-間氷期サイクル解析の結果のうち、計算例として case001 の最大海進時の各サイクルの比 濃度分布図と流速コンターとベクトル図及び 9 サイクル目の海進海退の一連の結果、各ケースの 9 サイクル目の最大海進時 (108 万年後)の比濃度分布図と流速コンターとベクトル図及び濃度差 コンター図を Appendix VIIに示す。これらの結果からの考察を以下に記す。なお、本報告書には、 薄層モデル化の違い、断層の有無、海水準変動考慮の有無の比較、また、化石海水の考慮の有無 を比較した case001、case003、case005、case007、case013c、case015 及び case016 の比濃度に関 するコンター図を図 4-1-14、図 4-1-15 に示す。

- 塩淡境界位置について調査結果が多くあるわけではないが、一般的に汀線から数 km 以内と 考えられている(丸井・林、2001;丸井ほか、1999)。今回の解析結果においては、図 4-1-14、
 図 4-1-15 に示すように、海水準変動を考慮したいずれのケースでも汀線から 10 数 km の位 置に形成されており、かなり沖合に位置している。この理由は、新第三紀堆積岩類の地層を 一様に水平地層とした事及び NUMO の SDM の設定において透水係数が比較的大きい値の ためと考えられる。
- 薄層を考慮したケース(case003、case005)の薄層周辺において流速の変化は明瞭には分か らないが(Appendix Ⅶ 図 3-26、図 3-27 参照)、塩淡境界が若干ではあるが海域に広がるよ うな傾向となっている。
- 断層を考慮したケース(case007)の断層周辺では比較的流速が大きくなり、その影響で流速 の方向に比濃度分布に凹凸が生じている。
- 海水準変動解析(氷期-間氷期サイクル解析)の有無による影響を case001 及び case015 で 比較すると、塩淡境界の位置が大きく変わっている。case001(海水準変動考慮)では汀線か ら海側に 12~13km 程度の位置にあり処分施設位置付近となるが、case015(海水準変動考慮 なし)では海側に 5km 程度の位置となり、処分施設位置付近は塩水となっている。



0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 図 4-1-14 比濃度コンター図(9 サイクル目の最大海進時、108 万年後、拡大図)



○化石海水を考慮したケース (case016) について

- 塩淡境界の深い深度の領域に着目すると、化石海水が分布する深度において化石海水を考慮しないケース(case001)と比較すると、淡水領域により深く入り込むような傾向となっている。これは、化石海水の方がより重たい為、ポテンシャルのつり合いが取れる位置が陸側に移動したと考えられる。
- 境界条件は比濃度に応じた柔軟性を持った設定に現状の解析コードが対応しないため、右端 境界は比濃度を 1.0 の静水圧とした。そのため、今回の解析結果は、境界条件の設定によっ て大陸棚部は比濃度及び圧力が下がるような傾向になったと推察される。

(b) 坑道掘削後解析

坑道掘削後解析の結果のうち、各ケースの施設掘削 100 年後の比濃度分布と流速コンター及び ベクトル図、処分施設の総湧水量の経時変化、施設中央位置における比濃度の経時変化、比濃度 の差分コンター図 (case002 を基本)、塩水の引き込み領域(掘削開始 100 年後において処分施設 位置に到達する流跡線の掘削直後からの移行経路)を Appendix VIIに示す。これらの結果からの 考察を以下に記す。なお、本報告書には、処分施設の総湧水量の経時変化、施設中央位置におけ る比濃度の経時変化をそれぞれ図 4-1-16 及び図 4-1-17 に、塩水の引き込み領域(掘削開始 100 年後において処分施設位置に到達する流跡線の掘削直後からの移行経路)を図 4-1-18 及び図 4-1-19 に、case008 の実流速コンター及びベクトル図と比濃度コンター図をそれぞれ図 4-1-20 及 び図 4-1-21 に示す。



図 4-1-16 処分施設湧水量の経時変化(上:5年間、下100年間)



図 4-1-17 比濃度分布の経時変化(処分施設中央位置、汀線から 10km)



case002(薄層なし、断層なし、密度流あり)



case004(薄層あり:透水異方性、断層なし、密度流あり)



case006(薄層あり:要素で考慮、断層なし、密度流あり)

図 4-1-18 流跡線図 (case002、case004、case006、緑:施設上面に到達する流跡線、 青:施設底面に到達する流跡線、case006 の赤い層は薄層)



case008(薄層なし、断層あり、密度流あり)



case014 (薄層なし、断層なし、密度流なし[浸透流解析])



case017 (薄層なし、断層なし、密度流あり、化石海水考慮)

図 4-1-19 流跡線図(case008、case014、case017、緑:施設上面に到達する流跡線、 青:施設底面に到達する流跡線)



図 4-1-20 実流速コンター及びベクトル図 (case008、薄層なし、断層あり、密度流あり 100 年後)



図 4-1-21 比濃度分布図(case008、薄層なし、断層あり、密度流あり 100 年後)

(i)各ケースの共通の傾向

図 4-1-16 によれば、いずれのケースでも坑道掘削後は周囲の地下水を引き込んでいる。流量は 掘削初期に高い湧水量を示すが、10 年程度でほぼ一定となり、それ以降は大きな変化はない。図 4-1-17 によれば、中央施設位置の比濃度は約 0.1 と淡水に近い状態から掘削後 100 年で 0.4~0.5 に上昇した。図 4-1-18 及び図 4-1-19 によれば、塩水の引き込み領域はどのケースも大きな違い はない。

(ii)水理地質構造について

○薄層について

薄層の有無によって比較すると、図4-1-16によれば、薄層を考慮したケース(case004、case006) の方が、流量が1割程度多くなっている。図 4-1-17 によれば、比濃度は、掘削開始時におい てはほとんど差が見られないが、時間の経過とともに薄層を考慮したケースの方の比濃度が 高くなり、100 年後に比濃度で約 0.1 程度高くなる。図 4-1-18 によれば、塩水の引き込み領 域は施設上面が到達点となっている流跡線(緑線)は、薄層を考慮したケースにおいて、施 設上部から流入してくる流跡線のうち施設端の流跡線の移行経路が水平方向に広がっている。 薄層のモデル化手法について比較すると、図 4-1-16 によれば、薄施設湧水量は透水異方性で モデル化したケースの方が若干多くなるがほぼ同様の流量となっている。図 4-1-17 によれ ば、比濃度は初期状態ではほぼ変わらないが、時間の経過に従って透水異方性でモデル化し たケース (case004) の方が要素でモデル化したケース (case006) より高くなっている。この 要因は、透水異方性でモデル化すると一様に透水係数(特に水平方向について)が大きくな り、上部の泥岩層において流速が大きい領域が水平方向に広がるため、施設領域と連続性が ない薄層を要素でモデル化したケースより施設湧水量及び比濃度が高くなったと考えられる。 同様の理由で塩水の引き込み領域は、薄層を要素でモデル化したケース(case006)において は、施設上部から流入してくる流跡線のうち施設端に当たる流跡線が薄層部分に入って水平 方向に広がっている、透水異方性でモデル化したケース(case004)は同様の位置の流跡線が 泥岩層の斜め上方向に比較的均一に広がっている(図 4-1-18)。

○断層について

- ・ 断層を考慮しているケース(case008)は断層部分において流速が大きくなっており(図 4-1-20)、それに伴って比濃度分布も断層周辺及び塩淡境界付近において、流速方向に変化が みられ、特に地表面の浅い部分にあたる領域において比濃度が高くなっている(図 4-1-21)。 ただし、処分施設の比濃度自体に変化はほとんどないことから、影響は限定的であると考え られる。
- 図 4-1-16 によれば、断層を考慮しているケースの施設流量は若干大きくなっている。図
 4-1-17 によれば、比濃度は掘削開始時において2割程度比濃度が大きくなっているが、掘削
 後時間の経過とともにその差は小さくなる。時間の経過に伴って差が小さくなる要因は、処
 分施設の掘削によって形成される水理場の影響が大きいためと考えられる。
- · 図 4-1-18 及び図 4-1-19 によれば、断層の有無によって塩水の引き込み領域に大きな変化は 見られなかった。

上記より、10km 以上の断層とみなされるような断層であっても今回のように適切な離間距 離(施設の端から4km)があれば施設湧水量に与える影響は限定的であると考えられる。た だし、初期の塩分濃度には有意な差があることから、初期の塩濃度分布が影響を及ぼす場合 は断層を考慮に入れる必要性があると考えられる。

(iii)密度流の考慮の有無について

- 図 4-1-16 によれば、密度流を考慮しないケース(case014)の方が掘削初期の湧水量がかなり大きくなったが、施設掘削してから 100 年後はほとんど変わらない結果となった。初期状態における湧水量は、密度流を考慮することで海側のポテンシャルが高くなり、モデル全体として流速が小さくなったためと考えられる。
- ・ 図 4-1-18 及び図 4-1-19 によれば、塩水の引き込み領域は密度の考慮の有無で大きな変化は 無い。

(iv)化石海水について (case017)

- 図 4-1-16 によれば、施設湧水量は化石海水の考慮の有無で有意な差は見られなかった。これは、海域の流動場が基本的に塩淡境界の下側に潜り込むような傾向となっていることから、
 移流によって化石海水の分布は比較的深い深度のみに限定されていると考えられる。
- 図 4-1-17 によれば、処分施設の比濃度は化石海水を考慮することによって 0.01 大きくなる 傾向となっている。これは、化石海水は深い領域から基本的に動かないものの、海水準変動 による水平方向の流速場の変化に伴ってある程度海域全体に分散されたためと考えられる (主に横分散長の影響)。
- ・ 図 4-1-18 及び図 4-1-19 によれば、塩水の引き込み領域は化石海水の有無で大きな変化は無かった。
- ④ まとめ

沿岸部の水理解析に考慮すべき要因の影響検討として、初期状態の作成のために海水準変動解 析を行った後、坑道を掘削した状態で100年間解析を実施し、各影響要因の影響の程度について、 施設及び施設周辺の塩濃度分布及び処分施設の湧水量に主に着目した整理を行った。各影響要因 は、水理地質構造における要因として薄層、断層を挙げ、解析手法における要因として、密度流 の考慮の有無、海水準変動の考慮の有無、高濃度の化石海水を挙げてそれぞれについての影響の 検討を行なった。各影響要因の検討結果のまとめを表 4-1-13 に示す。

これらの検討より得られた水理解析技術高度化の検討の方向性を以下に示す。

薄層

水理地質構造として薄層のモデル化手法に関しては、処分施設との連続性の有無によって適切 なモデル化は変わると考えられる。広域スケールモデルで検討する段階(概要調査段階)におい ては、薄い地層の連続性が判断できるほどの情報は得られないと考えられることから、感度解析 的に等価透水係数としてモデル化したケースと、施設と連続性がある薄層をモデル化したケース を共に検討することが必要と考えられる。

表 4-1-13 地下水に関する情報へ及ぼす各影響要因の影響のまとめ

影響要因		濃度分布		済水昌	塩水の引き	(# 老	
		掘削前	100年後	<i>)</i> 馮小里	込み領域	111.方	
水理	薄	透水異方性	×	0	0	0	薄層は高透水でモデル化した影響もあり、湧
地質	層	要素で モデル化	×	0	0	0	小里や堀削影音領域への影音が認められ る。
構造		断層 ^{※1}	0	×	×	×	海水準変動の影響で初期の塩濃度分布へ の影響が認められる。
解		密度流 ^{※2}	Ø	×	0	×	掘削前の初期の濃度分布及び掘削直後の 湧水量への影響が大きい
析手	ž	毎水準変動	Ø	_		-	坑道掘削前の塩分濃度分布(塩淡境界位 置)に大きな影響がある
法 		化石海水	0	0	×	×	

(◎:影響大、○:影響小、×:影響ほとんどなし)

断層

断層の考慮の有無は大きな影響は与えないと考えられるが、施設掘削前において比濃度に差異 が認められることから、この差が検討対象において有意なものであれば留意する必要性がある。 ただし、本検討における断層は処分施設の端から十分な離間距離(約4km)があるため、これよ りも距離が近いような場合や、高透水性の地層等との関連性が認められる場合、透水性の低い断 層の場合(粘土質断層ガウジ等)は、本検討と異なる傾向となる可能性がある点についての検討 が必要である。

· 密度流解析

解析手法のうち、密度流解析の有無は施設湧水量で比較すると、掘削後10年程度で一定となり 大きな差異は認められないが、掘削直後においては密度流を考慮しない場合の方がより施設湧水 量は多くなる。また、密度流を考慮せず塩水の濃度分布を検討すると、かなり遠方の海域まで塩 淡境界(淡水)が移動する。このことから、塩水の濃度分布を考慮する上で密度流解析は実施す る必要性がある。

· 海水準変動

海水準変動は考慮の有無で処分施設掘削前の塩濃度分布(塩淡境界位置)が大きく変わること から考慮する必要性がある。ただし、解析上どのような設定にすることがより適切かという点に ついては、検討(議論)する余地がある。

· 化石海水

化石海水に関する検討は、処分施設周辺の比濃度分布に影響がある結果となったことから考慮 する必要性があると判断できるが、解析上の設定、特に初期状態や境界条件の適切な設定につい ては、今後も検討を続ける必要性がある。

5)水理解析技術の整備に向けた実施内容の具体化

水理解析技術の整備における検討課題を明確にするために、前述3)において性能評価に必要 な情報を求める上での水理解析上の課題の整理を、前述4)において沿岸部の水理解析に考慮す べき要因の影響の検討を実施した。これらの結果を踏まえ、水理解析技術高度化に向けた実施内 容を具体化する。

沿岸部を対象とした水理解析手法としては、前述3)において、階層的なスケールにおける解 析手法(ネスティング)が確立されていないことを課題として挙げた。

具体的には、広域からニアフィールド領域に至るまでの密度流解析を行う上での、境界条件や 初期条件の設定と、過年度から課題に挙がっているモデル化する処分施設の構造等(立坑、斜坑) に関する知見の整理、薄層や断層に起因する影響として解析物性値や境界条件の設定方法につい て取り組むものとする(薄層、断層の設定方法の検討方針は、前述4)④を参考にする)。これに よって、塩淡境界周辺の処分施設建設における地下水流動場の経時的な変化の把握や塩水(深部 地下水)の引き込み領域や坑道湧水の塩濃度変化の評価手法の構築を試みる。さらに、前述3) において、化石海水については評価手法が確立されていないことを挙げ、また、前述4)におい て、化石海水が処分施設周辺の塩分濃度に影響を与える可能性があることが示されたことから、 建設・操業過程に関しての影響の有無を含めて、化石海水の設定方法の検討を行う。以上の検討 を実施するために、処分施設の構造として立坑や斜坑等を考慮した水理地質構造モデルの構築を 行い、その水理地質構造を用いて上記の検討を行うものとする。

性能評価の一部としての水理解析手法の適用性・有効性の確認としては、ほとんど実績がない ことから、最終的に性能評価の試行を課題として挙げた。地質調査で得られた地質環境情報等を 考慮して坑道周辺の構成要素を適切にモデル化した水理地質構造モデルを作成し、それまでに実 施した沿岸部を対象とした水理解析手法の結果を踏まえて、性能評価の試行を実施する。

水理解析技術の整備に関する全体研究計画を表 4-1-14 に示す。

	実施項目	中华中央の東西	実施年度				
禄思		天肥内谷の椀安	2019	2020	2021	2022	2023
1. 沿岸部を対象とした水理解析手法とその適用性	とした水理解析手法とその適用性 1. 沿岸部を対象とした水理解析手法とその適用性に関する検討						
(1) 塩水の影響を検討するための、広域からニア フィールド(NF)までの階層的な空間ス ケールに対応した密度流・移流分散解析手法	(1)塩水の影響を検討するための、階層的な空間 スケールに対応した密度流・移流分散解析方 法に関する検討	広域からニアフィールドに至る階層的な空間スケー ルでの密度流・移流分散解析手法及びその適用性に 関する検討					
の確立		モデルの規模に応じた立坑、斜坑、その他坑道及び 周辺構成要素のモデル化手法に関する検討					
		亀裂や薄層に起因する異方性岩盤を対象とした物性 や境界条件の設定方法及びそれらの簡略化方法に関 する検討					
		建設・操業から再冠水までの期間におけるニア フィールド領域の構成要素の水理状態と塩水の影響 の検討					
 (2) 化石塩水のような特殊な初期・境界条件の設 定方法の確立 	(2) 化石塩水の設定方法に関する検討	左記の検討					
(3) 多様な水理地質構造についての適用性	(3) 多様な水理地質構造のモデル化に関する検討	地質環境分野から提供されるSDMを用いた解析用モ デルの構築					
2. 性能評価の一部としての水理解析手法の適用性・ 有効性の確認	2. 性能評価の試行のための水理解析の実施	地質環境分野から提供されるSDMに基づく解析モデ ルを用いた一連の水理解析の実施					

(4) 本フェーズの実施計画の具体化

(2)4)と(3)5)で具体化した性能評価手法の体系化及び水理解析技術の高度化における実施内容を踏まえて作成した本フェーズの実施計画を表 4-1-15 に示す。

(5) 性能評価手法の体系化及び水理解析技術の整備に関するまとめ

わが国における沿岸部における性能評価手順書素案の作成に向けて、性能評価にかかる国内外の検討事例の調査、沿岸部における性能評価手法を整備する上での検討を実施し、これらの調査 と検討の結果を踏まえて性能評価手順書素案作成に向けた実施内容を具体化した。

性能評価にかかる国内外の検討事例の調査では、先行的に性能評価の検討を進めている諸外国 から、沿岸部に処分する国(フィンランド、スウェーデン)と非沿岸部に処分する国(スイス) を選定し、各国における性能評価に係る内容(性能評価の流れ、性能評価項目、評価項目ごとの 評価手法など)についてセーフティケース文書を対象に調査した。また、わが国における性能評 価の現状を把握するため、NUMO-SCを調査した。調査結果の概要は以下のとおりである。

- 調査した海外事例の性能評価の流れは、前提条件の確認、評価期間の設定、性能評価項目の 選定、評価の実施、評価結果の記載の5つのステップで示すことができる。
- 調査した海外事例の性能評価項目は、処分場構成要素の性能に影響があると考えられる現象 により示されている。一方、NUMO-SCにおいても、処分場構成要素の性能に影響があると 考えられる現象が整理されている。

沿岸部における性能評価手法を整備する上での検討では、上記の性能評価にかかる国内外の検 討事例の調査結果から、沿岸部処分国と非沿岸部処分国の性能評価項目を比較し、沿岸部処分国 と非沿岸部処分国における性能評価の違いを検討した。その検討の結果、沿岸部処分国と非沿岸 部処分国の間の違いは、各性能評価項目の評価の与条件(評価の上での条件、例えば、性能評価 項目「緩衝材の変質」を評価する場合に考慮される「地下水組成(≒塩水影響)」)の違いとして 表現されるものと考えられ、今後は、これらの性能評価項目に関して、沿岸国と非沿岸国の違い の影響が及ぶ与条件を、どのような手法や精度に基づき取得・設定しているかを把握することが、 今後の性能評価手順書素案の作成における課題となるという結論を得た。

上記の調査と検討の結果より、わが国における沿岸部における性能評価手順書素案作成に向け て実施すべき内容として、性能評価の流れの検討、性能評価項目の検討、性能評価項目ごとの評 価手法の検討、これらを通した処分システムの状態変遷の推定の試行が考えられる。

わが国における沿岸部における性能評価を実施する上での水理解析技術の高度化に向けて、性 能評価に必要な地下水に関する情報を整理し、これらの情報を求めるのに用いられる水理解析手 法の課題を整理した。また、沿岸部の水理解析に考慮すべき要因の影響検討を予備解析により実 施した。これらを踏まえ、水理解析技術の高度化する上での実施内容を具体化した。

性能評価に必要な地下水に関する情報は、地下水静水圧、処分孔湧水量、湧水の水質であり、 これらの情報を求めるのに用いられる水理解析手法の課題として、階層的な空間スケールに対応 した密度流・移流分散解析手法が確立されていないなどが挙げられた。

また、沿岸部の水理解析に考慮すべき要因の影響の予備解析による検討は、考慮すべき要因と して薄層、断層、密度流の考慮の有無、海水準変動の考慮の有無、海水より高濃度の化石海水を 挙げて実施した。検討の結果、すべての要因で性能評価に必要な塩分濃度分布、処分施設湧水量、 塩水の引き込み領域の少なくとも一つに影響を与えた。この結果から、これらの要因について考 慮が必要であることが示された。

これらを踏まえ、水理解析技術の整備をする上での実施内容として、階層的なスケールにおけ る解析手法(ネスティング)の確立、化石海水の設定方法の検討などが挙げられた。

性能評価手法の体系化と水理解析技術の整備の実施計画を表 4-1-15 に示す。これらの検討を もとに、地質環境情報から水理解析、性能評価への一連の流れを試行することにより、処分場の 設計の観点から地質環境情報のうち重要な事項を抽出する等、地層処分事業の連携にも役立てる 取組みを進めていく。

実施内容		2020 年度	2021 年度	2022 年度	2023 年度
性能評価手法 の体系化	性能評価の流れの検討				
	性能評価項目の選定の検討				
	性能評価項目ごとの評価手法				
	の検討				
	性能評価手順書素案の策定				
水理解析技術 の高度化	塩水の影響を検討するため				
	の、階層的な空間スケールに				
	対応した密度流・移流分散解				
	析方法に関する検討				
	化石海水の設定方法に関する				
	検討				
性能評価手法 の体系化 (性能評価手 順書素案に よる試行)	試行のための水理地質構造モ				
	デル化(多様な水理地質構造				
	のモデル化に関する検討も含				
	む)				
	性能評価手順書素案の試行				
	(性能評価のための水理解析				
	の実施)				
	性能評価手順書素案の見直し				
	性能評価手順書素案の課題の				
	抽出				

表 4-1-15 4 年間の実施計画

参考文献

- Bear, J (1972) : Dynamics of fluids in porous media, Dover Publications, pp.122-125, 1972.
- Nagra (2002) : Project Opalinus Clay Safety Report : Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste, NTB-02-05, 2002.
- Posiva (2012) : Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto –Performance Assessment 2012, POSIVA 2012-04, 2012a.
- Posiva (2012) : Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto Synthesis 2012, POSIVA 2012-12, 2012b.
- SKB (2011) : Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, SKB TR-11-01, 2011.
- 丸井敦尚、林 武司(2001):塩淡境界面の三次元的形状把握に関する研究、資源と素材、117、 pp.816-821、2001.
- 丸井敦尚、林 武司、内田洋平(1999):千葉県蓮沼海浜公園における地下水流動と塩淡境界に関する研究-その3:海底湧出地下水調査、地質ニュース,540、pp.45-48、1999.
- 重野喜政、宮川公雄(1995):地下水流動・物質移行解析における割れ目ネットワークモデルの現 状と課題、電中研報告、U95009、30p.、1995.
- 鈴木俊一、本島貴之、井尻裕二、青木広臣(2009):確率統計理論による亀裂特性データの相互関 係の整理と数値解析モデルによる妥当性検討、土木学会論文集 C、65(1)、pp.185-195、2009. 茂木昭夫(1996):大陸斜面、町田ほか編,『新版 地学事典』、平凡社、p.755a.、1996.
- 若松加寿江、松岡昌志、杉浦正美、久保純子、長谷川浩一(2005):日本の地形・地盤デジタルマ ップ、東京大学出版会、2005.
- 米倉伸之(1981):大陸斜面、地団体研究会編、『地形学辞典』、二宮書店、p.353b.、1981.
- 日本第四紀学会(1987):『日本第四紀地図』、東京大学出版会、1987.
- 日本地下水学会(2010):地下水流動解析基礎理論のとりまとめに関する研究グループ、地下水シ ミュレーション--これだけは知っておきたい基礎理論--、技報堂出版、232p.、2010.
- 原子力発電環境整備機構:包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の実現一適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築-レビュー版、NUMO-TR-18-03、2018.
- 日本原子力研究開発機構:平成 27 年度地層処分技術調查等事業直接処分等代替処分技術開発、 2016.
- 日本原子力研究開発機構:平成 28 年度地層処分技術調査等事業直接処分等代替処分技術開発、 2017.
- 産業技術総合研究所、日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力 中央研究所、平成28年度地層処分技術調査等事業沿岸部処分システム高度化開発、2017.
- 産業技術総合研究所、日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力 中央研究所:高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 沿岸部処分システム高 度化開発 平成 27 年度~平成 30 年度 取りまとめ報告書、2019.
- 国 土 交 通 省 , 日 本 の 水 収 支 : http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_tk2_000012.html (最終確認 2020.03.25)

4-2 セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充

(1) はじめに

1)背景および目的

処分場におけるセメント系材料は、処分坑道やアクセス坑道の支保工、インバートなどの構造 材などに使用されることが考えられる。一方で、セメント系材料は地下水や海水などとの反応に より変質することが知られており、主な変質として、水和鉱物の溶脱や膨張性の二次鉱物の生成 などが想定される。また、それらの影響により、機械的特性や物質移行特性の変化、ひび割れの 発生などが起こることが考えられる。そのため、処分システムの成立性の評価にあたり、短期的 には、沿岸部における処分場の建設・操業~閉鎖後の再冠水に至る期間における空洞安定性など に関する評価に向け、沿岸部に特有な地下水化学環境を念頭に置き、セメント系材料の化学変質 に伴う機械的強度の変化を把握することが必要である。

これまでに、沿岸部環境での地層処分における処分システムの成立性の評価にあたり、支保工 などに使用されるセメント系材料について、海水相当の塩水に比べ、沿岸部における陸域からの 地下水により希釈された海水系の地下水での化学変質挙動が機械的特性に及ぼす影響に関する知 見が不足していた。そこで、その部分の知見拡充を目的に、希釈した人工海水にセメントペース ト試料を浸漬し、化学変質挙動および機械的特性に関するデータを取得して知見を整理してきた (産業技術総合研究所、原子力機構、原環センター、電中研、2017;2018;2019)。

その結果、塩水の化学組成により二次鉱物生成量や種類などの化学変質挙動が異なること、そ れにより機械的強度特性の変化が異なることがわかり、塩水化学組成や化学変質挙動の種類によ っては強度低下の可能性があることが懸念された。しかし、それらの関係については、明確にす るほどの十分なデータや知見は得られておらず、今後、データを拡充して整理し、明らかにして いく必要がある。また、それらの関係性については、沿岸海底下の水質(化学組成)の幅を考慮 したデータ、モルタルやコンクリートでのデータが必要となる。加えて、処分場の成立性評価の 試行において、水理解析結果を用いて試験結果と合わせて評価を行ったが、セメント系材料への 水の接触について、解析と試験条件の整合にも課題があった。

そこで本業務では、下記(I)~(III)に関する知見を取得、拡充して体系的に整理し、5か年 程度の計画で、ニアフィールド領域の水理解析技術と連携して支保工などのセメント系材料を用 いた構造物の機械的強度を評価し、沿岸部における処分場の再冠水完了までの空洞安定性などの 評価に繋げ、処分場の設計や塩水化学組成などより機械的強度を推定する手法を提示することを 目的とする。なお、その中で得られた知見より、塩水による化学変質や塩化物イオン浸透の抑制 対策についても整備することを目指す。

- (I)塩水化学組成(沿岸部の地下水化学組成を考慮)と二次鉱物生成量など(化学変質)の関係の把握
- (II) 二次鉱物生成種類など(化学変質)と機械的挙動の関係の把握
- (Ⅲ)沿岸部における現実的な処分場の地下環境条件(地下水化学組成、セメント系材料と岩盤との接触部付近での地下水流動や流量)及び材料(モルタル、コンクリートなど)での化学変質と機械的挙動の把握

2) 実施概要

本業務では、現実の処分場の支保工などのセメント系材料を用いた構造物を想定した化学的な 変質や機械的強度の変化を把握するための検討を実施する。しかし、現実的な材料(モルタルや コンクリート)の多くは、空隙が少なく緻密であるため外部からの影響による化学変質が緩慢と なり、分析に必要な変質領域が十分に得られないことが想定される。したがって本業務では、以 下の2項目に分けて試験を実施し、検討する。

- ・コンクリート及びモルタル中で化学変質が主に起こるセメントペーストの試料を用いて前述の
 (I)及び(II)を把握するセメント系材料の化学変質と機械的挙動に関する検討((3))
- ・コンクリート試料を用いて前述の(Ⅲ)を把握する現実的な条件および材料におけるセメント 系材料の機械的強度の評価手法に関する検討((4))

平成 31 年度は、文献調査により知見を整理し、その結果に基づいて試験計画を検討した。加えて、来年度以降の試験に用いる試験体の作製を行った。

- (2) 試験計画の策定に係る既往の知見の調査
- 1)調査概要

試験計画において、処分場の設計や環境条件に対応する試験条件を設定するために、文献により調査した。調査概要を表 4-2-1 に示す。

- 2) 調査結果
- 沿岸部の地下環境を想定した地下水組成に関する調査

本調査では、沿岸海底下の地下水化学組成を考慮した試験に用いる塩水の条件を設定するため に、日本国内の地下水調査の結果のうち沿岸部の地下水化学組成に関する情報を、平成 30 年度 沿岸部処分システム高度化開発報告書(産業技術総合研究所、原子力機構、原環センター、電中 研、2019)の「2-2 沿岸部の地下水長期安定性に関わる研究」に記載されている地下水の分析結 果を中心に整理した。調査結果の一部は Appendix WIIに示す。

整理においては、まず、地下水の主要溶存イオンの分析結果を示したヘキサダイヤグラムを、 地下水中の塩分濃度と地下水年代から4つに区分した地下水区分(現海水、化石海水、現降水、氷 期降水)ごとに分けた後、さらに地下水の水質タイプ(Na-Cl型、Ca-Cl型など)ごとに分けた。 さらに、人工海水の Cl濃度を基準に、各地下水が人工海水の何倍程度の濃度か、水質タイプ(例 えば Na-Cl型)にどのような成分が混合したものか、といった観点をふまえて整理した。

ヘキサダイヤグラムの図の表示例を図 4-2-1 に、現海水と化石海水の整理結果を図 4-2-2 に、 現降水の整理結果を図 4-2-3 に、氷期降水の整理結果を図 4-2-4 に示す。整理結果より、各地下 水がどのような特徴を有しているかなどを確認した。

各地下水を人工海水の成分比率と比較して以下に分類して示す。なお、複数の型の地下水の混 合は成分からの予想で記載した。
	各検討の試	験計画検討への活用
調査内容	4-2(3) セメン ト系材料の化学 変質と機械的挙 動に関する検討	4-2(4) 現実的な条件及 び材料におけるセメント 系材料の機械的強度の評 価手法に関する検討
①沿岸海底下の塩水化学組成	0	0
②塩水化学成分と化学変質挙動及び 化学変質挙動と機械的強度	0	0
③セメント系材料の変質試験方法	0	0
④処分場で使用が想定されるセメント系材料 (コンクリート種類、セメント種類、配合など)	0	0
⑤沿岸海底下の地下水の流動条件	Δ	0
⑥現実的な地下環境を想定した試験方法	-	0

表 4-2-1 調査概要

※△:参考情報とする



図 4-2-1 ヘキサダイヤグラムの図の表示例

地下水区分		現淮	 再水		化石海水			
水質タイプ	Na-(CI型	Ca-	CI型	Na-Cl型			Ca-Cl型
Cl濃度(人工海 水に対して)	3/10倍以下	8/10倍以上	3/10倍以下	4/10~7/10倍	3/10倍以下	4/10~7/10倍	8/10倍以上	4/10~7/10倍
	-200 0 200 0 2/10	-600 600 8/10	-200 200 2/10	-600 600 7/10	-200 200 2/10	-400 400 -400 400	-600.0 600.0 9/10	-400 400 7/10
	-200 200 2/10	-600 600 8/10	-200 200 2/10		-200 200 2/10	-400 400 5/10	-600 600 10/10	
	-200 200 2/10	-600 600 70/10	-200 200 3/10		-200 200 2/10	-400 400 5/10	-600 600 10/10	
ヘキサダイ ヤグラム		-600 600 10/10			-200 200 2/10	-400 400 5/10		
					-200 200 3/10	-400 400		
	参考:人工海水	参考:1/10人工海			-200 200 3/10			
	-600 600	-60 60			-200 200 3/10			

図 4-2-2 現海水と化石海水のヘキサダイヤグラムの整理結果

地下水 区分		現降水										
水質タ イプ		Na-	CI型		Na-S	60₄型	Ca−SO₄型	Na-H0	CO3型			
混合が 考えら れえる 他の水 質タイプ	Na−SO₄ Ca−SO₄	Na−SO₄ Na−HCO₃	Na−SO₄ Ca−SO₄ Na−HCO₃	-	Ca−SO₄ Na−HCO₃	Ca-SO4	Na-SO4	Na−SO₄	-			
	-30 30	-15 15 1/100	-5 5 2/1000	-50 50 9/100	-2 2 -2 2 -2 1/10000	-30 30 9 1000	-30 30	-10 10 1/100	-5 5			
ヘキサ ダイヤ グラム	-30 30 2/100		-15 15 1/100	-50 50 6/100		-30 30	-40 40 -40 40		-5 5 2/100			
	-30 30 8/1000								-5 5 1/100			

図 4-2-3 現降水のヘキサダイヤグラムの整理結果

地下水区分	*期降水										
水質タイプ			Na-CI型			Ca-Cl型	Na−SO₄型	Na-H(CO3型		
混合が考え られえる他 の水質タイプ	Na-HCO3	Na−SO₄ Na−HCO₃	Na−SO₄ Ca−SO₄	Ca-Cl	-	Na-HCO ₃	-	Na−SO₄	-		
	-20 20 2/100	-70 70 4/100	-40 40 2/100	-40 40 5/100	-40 40 3/100	-20 20 2/100	42 -50 50 8/1000	-20 20 6/1000	-30 30 1/100		
	-20 20 3/100		-20 20 3/100	-40 40 3/100				-20 20	-30 30 1/100		
ヘキサダイ									-100 100 2/100		
ヤグラム									-80 80 4/10000		
									-10 0 10 3/1000		
									-20 20 5/1000		

図 4-2-4 氷期降水のヘキサダイヤグラムの整理結果

現海水

・ Na-Cl型

- Cl 濃度が人工海水の 3/10 倍以下:海水に Ca-Cl 型が混合

- Cl 濃度が人工海水の 8/10 倍以上:化学種(イオン)の比率が人工海水と同等

・ Ca-Cl 型

- 人工海水と比較して Cl 濃度が 7/10 倍以下、Ca の比率が高く、Na+K、Mg の比率が低い

化石海水

- ・ Na-Cl型
 - Cl 濃度が人工海水の 3/10 倍以下:化学種(イオン)の比率が人工海水と同等

海水に Na-SO₄型が混合

海水に Na-HCO₃型が混合

- Cl 濃度が人工海水の 4/10~7/10 倍:化学種(イオン)の比率が人工海水と同等 海水に Ca-Cl 型が混合

- Cl 濃度が人工海水の 8/10 倍以上:人工海水と比較すると、Mg と SO4の比率が低い

・ Ca-Cl 型

- 人工海水と比較して Cl 濃度が 7/10 倍程度、Ca の比率が高く、Na+K、Mg の比率が低い

現降水(Cl濃度は全て人工海水の1/10倍以下、概ね1/100倍程度以下)

- ・ Na-Cl型
 - 化学種(イオン)の比率が人工海水と同等
 - Na-Cl型、Na-SO4型及び Ca-SO4型の混合
 - Na-Cl型、Na-SO4型及び Na-HCO3型の混合
 - Na-Cl型、Na-SO4型、Ca-SO4型及びNa-HCO3型の混合
- ・ Na-SO4型
 - Na-SO₄型及び Ca-SO₄型の混合
 - Na-SO₄型、Ca-SO₄型及び Na-HCO₃型の混合
- ・ Ca-SO4型
 - Ca-SO4型及び Na-SO4型の混合
- ・ Na-HCO3型
 - 人工海水と比較して Na と HCO₃の比率が高い
 - Na-HCO₃型及び Na-SO₄型の混合

氷期降水(Cl 濃度は全て人工海水の 1/10 倍以下、概ね 1/100 倍程度以下)

・ Na-Cl 型

-化学種(イオン)の比率が人工海水と同等

- Na-Cl 型及び Na-HCO₃型の混合
- Na-Cl型、Na-SO4型及び Na-HCO3型の混合
- Na-Cl型、Na-SO4型及び Ca-SO4型の混合
- Na-Cl 型及び Ca-Cl 型の混合
- ・ Ca-Cl型
 - Ca-Cl 型及び Na-HCO₃型の混合
- ・ Na-SO₄型
 - 人工海水と比較すると、Na と SO4の比率が高い
- ・ Na-HCO3型
 - -人工海水と比較すると、NaとHCO3の比率が高い
 - Na-HCO₃型及び Na-SO₄型の混合

塩水化学成分と化学変質挙動及び化学変質挙動と機械的強度に関する調査

本調査では、試験で用いる塩水の条件を設定する際に有益となる情報を取得するために、セメ ント系材料の強度に影響を与えることが想定される化学変質に影響する塩水化学成分などについ て整理した。

整理においては、はじめに、土木学会の小委員会報告書(土木学会、2003;2018)の記載内容 及び平成 28~30 年度に実施された沿岸部処分システム高度化開発における塩水環境下における セメント系材料の機械的強度の変化に関する検討(産業技術総合研究所、原子力機構、原環セン ター、電中研、2017;2018;2019)で得られた結果より、沿岸部における処分場のセメント系材 料で起こることが想定される化学変質現象を整理した。次に、塩水による化学変質と機械的強度 に関する情報を既往の文献より取得し、化学変質に影響する塩水化学成分及び変質部分の強度の 変化などを整理して着目すべき塩水化学成分を検討した(表 4-2-2)。既往の文献の調査より取得 した情報の詳細は Appendix VIIIに示す。

検討の結果、化学変質に影響する塩水化学成分としてあげた成分のうち、Ca については、基本 的に、強度低下につながる化学変質については抑制するものと考えられる。したがって、試験に 用いる塩水化学組成を判断する過程においては、コンクリートの強度低下の可能性がある化学変 質に影響する成分である、Cl、HCO₃、SO₄、Mg に主に留意する事とした。また、本業務では、 機械的強度の低下への影響を鑑み、以下の化学変質現象を中心に確認する事とした。

- Ca 溶脱:空隙の増加
- ・ 炭酸化: C-S-H の分解による強度低下の可能性、または、pH 低下による鉄筋腐食の促進の可 能性(鉄筋コンクリートのみ)
- ・ 硫酸塩化合物の生成:エトリンガイト生成による膨張に伴う劣化
- Mg 系二次鉱物の生成: M-S-H による強度低下の可能性

なお、セメント系材料の化学変質ではないが、鉄筋コンクリートにおける塩化物イオン浸透に よる鉄筋腐食については、支保工の強度に影響するため留意する必要がある。

表 4-2-2 強度に影響を与えることが想定される化学変質に影響する着目すべき 地下水化学成分の整理結果

化学変質に影響す る塩水化学成分	化学変質	変質の起こる場所	生成する 二次鉱物	変質の影響	変質部分の 強度の変化	着目の程度 ^{注)}
CI	Ca溶脱	界面近傍の内部 — 空隙の増		空隙の増加	低下	必須
HCO₃ , (※Ca)	CaCO₃沈殿	界面の外部	CaCO ₃	閉塞、化学変質の抑制	増加	小
HCO3	炭酸化	界面近傍の内部	CaCO ₃	閉塞、化学変質の抑制 (炭酸化が極端に進むと C-S-Hの分解が起こる 可能性。また、pH低下に よる鉄筋腐食の促進の 可能性)	増加 (C-S-H分解、 鉄筋腐食が起 きると低下の可 能性)	ф
SO4		界面近傍の内部	CaSO ₄	閉塞、化学変質の抑制	低下の可能性	小
SO4	. 硫酸塩化合物 の生成	界面近傍の内部	エトリンガイト	エトリンガイト生成 による膨張に伴う劣化	低下	中
	Mg系二次鉱物	界面の外部	Mg(OH) ₂	閉塞、化学変質の抑制	増加の可能性	小
Mg	の生成	界面近傍の内部	M-S-H	空隙部ICM-S-H生成	低下の可能性	大
-	フリーデル氏塩 の生成	内部	フリーデル氏塩	アルミネート化合物が フリーデル氏塩に変化	変化なし	小

※:主にセメント系材料に含まれる Ca により CaCO₃が生成する事例が多い。

注):着目の程度についての評価基準は、以下の通り。

・必須:強度低下が起こることが明らかである。

・大:前フェーズで強度低下が起こる可能性が見出されている。

- ・中:前フェーズでは二次鉱物の生成が認められなかった、もしくは、二次鉱物とは直接的に関係しないが、起きると強度低下の可能性がある。
- ・小:強度低下の可能性が小さい。

③ セメント系材料の変質試験方法に関する調査

前述の②の調査の結果、セメント系材料は沿岸海底下の地下水と反応することで6種類の化学 変質を起こす可能性が示された。そこで、本検討における変質試験方法に関してセメント系材料 の変質試験方法を調査し整理した。なお、調査結果の詳細は Appendix VIIIに示す。

調査の結果、候補となる試験として、「粉末試料の浸漬試験」「塊状試料の浸漬試験」「通水試験」 「硝酸アンモニウム溶液浸漬試験」「電気泳動試験」の5種類の方法を抽出した。

塊状試料の浸漬試験は、空隙構造の影響が反映された化学変質が確認できて機械的特性の変化 も評価できる。しかし、緻密な試験体では変質の進展が遅く、変質域が僅かしか得られないと報 告されており(産業技術総合研究所、原子力機構、原環センター、電中研、2017;2018;2019)、 実用的な試験期間で分析に必要な十分に変質した試料を得ることができない。したがって、地下 水成分が浸透しやすい高空隙率のペーストの配合を設定するなど対策を講じる必要がある。

粉末試料の浸漬試験は、試験水準として固液比を幅広く設定することにより、長期にわたり地 下水の化学成分がセメント系材料に作用した場合のセメント水和物の溶解・沈殿現象を評価でき ると考えられ、変質条件と変質量の確認に最も適した試験であるものの、試料形状が粉末であり、 機械的特性を評価できない。そのため、得られる結果は塊状試料の浸漬試験の結果と合わせて解 釈する必要がある。

通水試験は、塊状試料の浸漬試験と同様に機械的特性を評価できる他、ドライビングフォース を大きくすれば、これに比例して溶液が透過することから、限られた期間で変質域を多くできる。

しかし、変質機構が移流による成分の浸透と固相との反応であることから、試料の拡散変質を 想定した方法ではない。更には、本法で変質できる試験体は、高空隙率で空隙径が大きいことが 条件となるため、高空隙率の試験体を作製しても空隙径が小さくなる混合セメント系材料では適 用が困難である。したがって本法は、高空隙率で空隙径が大きくなる OPC 試験体において、生 成した鉱物と機械的強度の関係を確認するために適用することが好ましいと言える。

電気泳動試験は、その試験方法の性質上、地下水の化学成分の影響を加えた試験を実施するこ とができない。

硝酸アンモニウム浸漬試験は、硝酸アンモニウムが浸漬溶液中に存在することから、地下環境 下で生じると思われる地下水の化学成分とセメント系材料との反応を評価することが難しい。

表 4-2-3 に各試験方法を比較して示す。以上の特長を鑑み、地下水の化学成分との相互作用に よるセメント系材料の化学変質及び機械的特性に関する試験は、上述のように、「塊状試料の浸漬 試験」「粉末試料の浸漬試験」「通水試験」を併用した、データの取得が必要と考えられる。

変質試験	i						本業務で想	眼定される・	セメント系材料	料の化学変質	t
試験名	試料 形状	変質機構	変質試験 の効果	模擬地下水 の適用	機械的強度 の評価	Ca溶脱	CaCO ₃ 沈殿	炭酸化	硫酸塩化合 物の生成	Mg系二次 鉱物の生成	フリーデル 氏塩の生成
浸漬試験	粉末	平衡反応	大	可	×	0	0	0	0	0	0
	塊状	成分拡散	小	可	0	0	0	0	0	0	0
通水試験	塊状	成分移流	大※1	可	0	0	0	0	0	0	0
硝酸アンモニウム 溶液浸漬試験	塊状	溶解度 調整	大	不	0	0	×	×	×	×	×
電気泳動 試験	塊状	電気泳動	大	不※2	0	0	×	×	×	×	Δ

表 4-2-3 各変質試験方法の特性

○:想定している化学変質が起こる。

△:想定している化学変質に類似した変質が起こる。

×:想定している化学変質が起こらない。

※1:低水比、混合セメント系材料等の緻密材料には適用できない。

※2:NaCl 溶液に限り実績あり。(塩素の見掛けの拡散係数の評価)

④ 処分場で使用が想定されるセメント系材料(現実的な材料)の調査

本調査では、試験に供するセメント系材料を設定するため、処分場で使用が想定されるセメン ト系材料を用いた構造物を抽出した後、それらに関する配合について整理した。

処分場で使用が想定されるセメント系材料を用いた構造物は、NUMO の包括的技術報告書レ ビュー版(以下、NUMO-SC)(原子力発電環境整備機構、2018)の「付属書 4-32 坑道の支保設 計における初期設定の考え方」及び土木学会が発行するトンネル標準示方書(土木学会、2016) より情報を得て抽出した(表 4-2-4)。その結果、以下の3種類のコンクリートが挙げられた。

- ・ 吹付けコンクリート
- シールドコンクリート (セグメント)
- ・ 現場打設コンクリート (二次覆工コンクリートやインバート等)

抽出したそれぞれのセメント系材料を用いた構造物の配合は、既往のトンネルの施工事例を中 心に、施工事例が少ない場合は、現場で使用する材料を模した試験体を用いた研究事例も含めて 調査した。配合に関する主な調査結果を表 4-2-5 に示す。なお、調査結果の詳細は Appendix Ⅷ に示す。

調査結果より、使用するセメントは、大半で普通ポルトランドセメント(以下 OPC)が使用さ れていたが、耐海水性を持たせるために混合セメントを使用する例も認められたため、試験には OPC、フライアッシュセメント(以下 FAC)、高炉セメント(以下 BFSC)の3種類を用いるの が良いと考えられた。配合の諸条件については、本調査結果を参考に設定することとした。

衣 4-2-4 処分场 () 伊田が忠正されるセメノト糸材料を用いた陣頂	治物の調査論	古果
--------------------------------------	--------	----

処分場で使用が想定される セメント系材料を用いた構造物	調査により得られた情報
吹付けコンクリート	放射性廃棄物処分場の支保工の初期設定例では、セメント系材料として吹付けコンクリートが示されている(NUMO-SC) 処分施設を建設する際に想定される工法の観点からは、使用されるセメント系材料として、 山岳工法の支保工に使用される主要なセメント部材として吹付けコンクリートが挙げられ る(土木学会トンネル標準示方書)
シールドコンクリート (セグメント)	処分施設を建設する際に想定される工法の観点から、シールド工法に使用される主要なセメント部材としてセグメントが挙げられる(土木学会トンネル標準示方書)
現場打設 コンクリート	放射性廃棄物処分場の支保工の初期設定例では、セメント系材料として二次覆工コンク リート(無筋コンクリート)が示されている(NUMO-SC)

表 4-2-5 配合に関する主な調査結果

処分場で使用が 想定されるセメ ント系材料を用 いた構造物	使用されている セメントの種類	水結合材比	骨材 最大寸法	その他(補足情報など)
吹付け コンクリート	OPCが最多。耐海 水性および化学抵 抗性を持たせるた めに高炉セメント を用いた例もあり	40~50%が 多い	15~20mmの ケースが多い	実際に工事にて採用された配合の記載を整理
シールド コンクリート (セグメント)	OPCが最多。海底 トンネル用に塩素 の浸透抑制を意図 して高炉セメント を用いた例もあり	30~40%が 多い	15~20mmの ケースが多い	レディメイドの商品であるために、実際に工事で用い られたセグメントの配合の報告は見つからず、実験室 的検討の情報を整理
現場で 打設される コンクリート	OPCがほとんど	40%が多い	20~25mmの ケースが多い	現場打設コンクリートの例として、シールドトンネル を現場打設した場合の1次覆工と2次覆工の双方の例か ら、コンクリート配合に関する情報を整理 なお、1次覆工と2次覆工に用いられたコンクリートに は明確な差異が認められなかった

⑤ ニアフィールド(現実的な環境条件)の環境に関する調査

試験においてニアフィールド(現実的な環境条件)を再現するにあたり、沿岸部の処分場環境 では地下水の化学組成の影響の他に地下水流動の影響が考えられる。セメント系材料を用いた構 造物に岩盤側から地下水が接触してセメント系材料が化学的変質を受け、機械的強度が変化する ことが想定され、その変質の程度は接触する地下水量に影響されるため、主に地下水流量につい ての調査を行った。平成30年度沿岸部処分システム高度化開発報告書の「3-2-2ニアフィールド 領域での処分システム構成材料の成立性と品質確保の方法の提示」において、水理解析により処 分坑道の壁面に接触する地下水の流速を求めているため、その情報を整理した。詳細は Appendix WIIC示す。

その結果、平成 30 年度報告書の水理解析により求めた地下水流速の情報より、処分坑道の壁 面 1m²に1分あたり接触する地下水量に換算すると、流速の早い箇所では、底盤で 186ml/m²・ min、側壁で 40.8ml/m²・min となった。なお、平成 30 年度報告書の水理解析では、処分坑道の 底盤と側壁の流速を求めていたが、空洞安定性の観点からは側壁の化学変質を考慮したほうが良 いと考えられる。そのため、側壁の流量 40.8ml/m²・min を参考とする。

⑥ 現実的な地下環境を想定した試験方法に関する調査

沿岸部における処分場において、現実的環境条件ではセメント系材料を用いた構造物に岩盤側 から地下水が接触してセメント系材料が化学的変質を受け、機械的強度が変化することが想定さ れる。そこで、その状況を模擬した、水の流動にセメント系材料を作用させる試験を実施するに 当たり、参考となる試験方法について調査を行った。調査結果の詳細は Appendix VIIIに示す。

その結果、候補として、「フロースルー試験」及び「マイクロリアクタ流水試験」が挙げられた。 ともに一定流速で試料の界面に純水や模擬地下水を通水することにより、固体試料表面と透過す る液相との相互作用を評価する試験方法である。固相の表面と反応する液相は、リザーブタンク から一定組成の液相が常に供給されることが特徴で、固相の溶解に伴う液相中の化学成分変化の 影響を受けない。また、固相と反応する液相の容積を制限することにより、固相表面から溶解す るわずかな化学成分の濃度変化を評価することが可能になっている。セメント系材料を対象とし た固体表面の溶解試験を「フロースルー試験」、ガラス固化体を対象とした固体表面の溶解試験を 「マイクロリアクタ流水試験」と称しており、実施している内容については、どちらも同じ試験 の構成である。

(3) セメント系材料の化学変質と機械的挙動に関する検討

1) 試験計画の検討

本項では、4-2(2)項の調査結果に基づいて、標記の試験計画を検討した。ここでは、沿岸部 の地下水組成を考慮した塩水化学組成と二次鉱物生成量など(化学変質)の関係及び二次鉱物種 類など(化学変質)と機械的挙動の関係を把握するため、機械的強度に影響を与えるパラメータ ーの体系的な整理及び鉱物の変化量や種類と機械的強度の関係などの関係を整備する計画を検討 した。そこで、標記の検討目的を鑑みた上で、鉱物種と機械的強度の知見及び沿岸部の地下水化 学組成を考慮した生成する鉱物種や量の生成条件に関わる化学的変質の知見の整備を目指し、試 料や溶液、変質試験方法を選択した方法論を整理した。①~③に試験に関する検討結果、④に分 析項目、⑤に5ヵ年の試験スケジュール案をそれぞれ示す。

試験体種類と配合

本検討では、コンクリートまたはモルタル中の化学変質が主に起こるペースト試料(4-2(4) 項の検討で用いるコンクリート試料のペースト部分に相当する試料)を用いた。セメントの種類 は OPC、BFSC、FAC の3種類とした。配合については、以下の点に留意して設定した。ペース ト試料の配合の設定条件を表 4-2-6 に示す。

- ・各コンクリート中のペースト部分に相当する試料を作製するため、コンクリート配合の骨材 と高性能急結剤(理由は下記に示す)を除く、混和材置換率と急結剤添加量をコンクリート 配合と同様とした。水セメント比は、コンクリート配合と同じ試料の他、変質を容易にする 目的で間隙を多くするために水セメント比を大きくした試料も作製する。
- ・4-2(4)項の検討で用いる吹付けコンクリート試料の作製の際に添加する急結剤と同じ量 (単位セメント量に対し10mass%)を同様に添加する。
- ・コンクリート及びモルタルでは、化学混和剤を使用するが、ここでは、まずセメントペーストの基本的な化学変質と機械的強度の関係を把握するため添加をしない。
- ・4-2(4)項の検討で用いるシールドコンクリートと現場打設コンクリートのペースト部分に 相当する試料は、同一に作製した試料に対し、シールドコンクリートに相当する試料では、 セメント系材料の短期的な水和反応の促進を想定した蒸気養生、現場打設コンクリートに相 当する試料では、一般的な水和反応の進行を想定した常温養生を行う。
- 溶液の種類

地下水組成のヘキサダイヤグラムを整理した結果より、海水系地下水と降水系地下水に分類し、 それぞれの水質タイプ(〇〇型または〇〇型と〇〇型の混合など)に対して化学変質と機械的強度 に関する知見の有無を整理した。さらに、知見のある場合は、課題として残っていることはない かを整理した。一方、知見のない場合は、分類方法を検討し、課題とともに整理した。整理結果 を表 4-2-7 に示す。

整理結果を踏まえ、沿岸部で想定される地下水の種類に対して、セメント系材料に関するデー タを網羅的に整備することを目指し、今後以下に示す観点で取得していく必要がある。 〇人工海水と同等の成分比率の地下水

- ・人工海水(またはそれを 1/10 倍や 1/100 倍に希釈)を用いて吹付けコンクリートの知見拡充。また、人工海水と 1/10 倍希釈した人工海水、1/10 倍希釈した人工海水と 1/100 倍希 釈した人工海水の間の溶液での試験データの拡充をする。
- ○人工海水の成分比率と比較して濃度の高い成分がある地下水
 - ・整理結果を踏まえ、似ている成分比率のものは、想定される化学変質について机上で精査 し、代表的な成分比率の溶液を設定して試験を実施する。
 - ・試験の順序は、まず、人工海水の成分比率と比較して単一成分のみが高い場合の検討を行い、それぞれの成分比率が高い場合の影響を明確にする。
 - ・次にその結果を踏まえ、人工海水の成分比率と比較して複数の成分比率が高い場合の試験
 に用いる溶液条件を検討、設定して試験を行い、複数の成分が高い場合の影響を検討する。

	酉	记合設定条件
ペースト試料	セメント種類	水/セメント(結合材) (%)
吹付けコンクリート	OPC	45、80
のペースト部分に 相当する試料	BFSC	45、80
	FAC	45、80
シールドコンクリート	OPC	40、80
のペースト部分に	BFSC	40、80
相当する試料	FAC	40、80
現場コンクリート	OPC	40、80
のペースト部分に	BFSC	40、80
相当する試料	FAC	40、80

表 4-2-6 ペースト試料の配合設定条件

注) 混和材置換率(内割り)は、BFSC で 45%、FAC で 30%。

表 4-2-7 試験に用いる溶液条件の整理結果

	地下水データの種類	知見の有無	過去の知見または分類の方法	課題
海水系	Na-Cl型 (人工海水と同等の成分比率、人工 海水と同等~1/10倍濃度)	0	人工海水、 1/10倍希釈人工海水での試験データ	・人工海水と1/10倍希釈人工海 水の間のデータが不足 ・吹付けコンクリート試料を対象 としたデータが不足
海水系 地下水 (現海水、 化石海水)	Na−Cl型とNa−SO₄型の混合		各型及び各型の混合の組み合わせを 人工海水の成分比率と比較して、比率	
	Na−Cl型とNa−HCO₃型の混合	,	が高い成分とそのパターンを整理する	人工海水の成分比率と比較し
	Na-Cl型とCa-Cl型の混合	×	と、以下の通りとなる。 ・Ca	が高い場合のデータが不足
	Ca-CI型		•SO4 •HCO3	
	Na-Cl型 (人工海水と同等の成分比率、人工 海水の1/10~100倍濃度)	0	1/10倍希釈人工海水、 1/100倍希釈人工海水での試験データ	・1/10倍と1/100倍希釈人工海 水の間のデータが不足 ・吹付けコンクリート試料を対象 としたデータが不足
	Na-Cl型とCa-Cl型の混合			
降水系 地下水 (現降水、 氷期降水)	Na-CI型とNa-HCO ₃ 型の混合 Na-CI型、Na-SO4型及びCa-SO4型 の混合 Na-CI型、Na-SO4型及びNa-HCO ₃ 型の混合 Na-CI型、Na-SO4型、Ca-SO4型及 びNa-HCO ₃ 型の混合 Ca-CI型とNa-HCO3型の混合 Na-SO4型 Na-SO4型とCa-SO4型の混合 Na-SO4型とCa-SO4型の混合 Na-SO4型、Ca-SO4型及びNa-HCO ₃ 型の混合 Na-HCO ₃ 型 Na-HCO ₃ 型とNa-SO4の混合	×	各型及び各型の混合の組み合わせを 人工海水の成分比率と比較して、比率 が高い成分とそのパターンを整理する と、以下の通りとなる。 ・Ca ・SO4 ・HCO3 ・Ca + SO4 ・Ca + HCO3 ・Ca + SO4 + HCO3 ・SO4 + HCO3	左列で整理した、各成分が人工 海水の成分比率より高い場合 のデータが不足

③ 変質試験方法

調査結果より、塩水化学組成と化学変質及び化学変質と機械的挙動の関係性を確認することを 目的に、それに最も適している塊状試料の浸漬試験を実施する。しかし、この試験だけではデー タが不足する可能性を鑑みて、調査結果を踏まえ、補完するための試験として粉末試料の浸漬試 験、通水試験を実施する。塊状試料の浸漬試験にてデータが不足する点は、具体的には、変質進 行が成分の拡散現象に依存し緩慢なため、変質領域が狭いと化学変質に関する空隙構造に関する 情報が得られない可能性である。また、化学変質の経時的な変化等が試験期間に確認できないと、 変遷過程が予測できない可能性がある。

これらを踏まえ、溶解や沈殿等の化学変質挙動が起こりやすい空隙率の大きい試料で塊状浸漬 試験を実施する。加えて、加速的に変質させる通水試験を実施する。また、塊状試験よりも化学 変質が短期間で起こる粉末浸漬試験により塩水化学組成と試料の鉱物変化に関するデータを取得 し、塊状試料での試験水準の選定に役立てる。

本検討での変質試験の方法とそれぞれのデータの取得項目を整理して図 4-2-5 に示す。また、 塊状試料の浸漬試験の模式図を図 4-2-6、通水試験の模式図を図 4-2-7 に示す。

なお、通水試験は変質が移流で進むこと、実環境では移流場の環境も考えられることから、移 流場での挙動を把握する観点も踏まえて実施を検討する。

④ 分析項目

本業務では、設計条件(セメント系材料種類)や塩水条件(化学成分)などから想定される化 学変質を把握し、その時の機械的強度を推定することを目的としている。そこで、変質試料の微 小領域の機械的強度をマイクロビッカース硬度測定により取得し、化学変質と微小領域の機械的 強度の関係を取得する。また、微小領域の機械的強度からマクロの機械的強度を予測するために、 初期試料について、マクロの機械的強度を一軸圧縮強度試験、微小領域の機械的強度をマイクロ ビッカース硬度測定により取得し、マクロの機械的強度と微小領域の機械的強度の関係を取得す る。得られたそれぞれの関係を用いて、化学変質に伴う機械的強度を推定する。なお、機械的強 度の変化には空隙構造が影響を及ぼすことから、空隙構造に関するデータを水銀圧入式ポロシメ ータにより取得し、前述の機械的強度推定の有益な情報とする。以上の手順により、それぞれの 地下水の水質や材料におけるデータを取得し、地下水組成や材料設計に対して化学変質の変遷を 考慮した機械的強度の予測が出来るようにデータを拡充していき、処分場の成立性の評価に有益 なデータを整備する。

分析項目一覧を表 4-2-8 に示す。塊状試料に化学変質が生じる領域では、化学組成や鉱物相が 変化している可能性が高いため、変質域の大きさによって EPMA 測定又は SEM 像観察、加えて 粉末 X 線回折測定を行う。前述に挙げた水銀圧入式ポロシメータと粉末 X 線回折測定は、試料の 量を確保する必要性から、変質領域を簡易に評価できる呈色確認を行い、変質域が明らかに少な い試験体では、分析方法を変更するか、変質試験に通水試験を適用するなどを検討しつつ試験を 進める。粉末試料の浸漬試験で得た試料は、固相分析として粉末 X 線回折測定のみ行い、変質の 前後等で溶解した水和物と沈殿した鉱物を把握する。液相の分析により、固相の化学変質挙動の 解釈に役立てる。



図 4-2-6 塊状のペースト試料を用いた浸漬試験の模式図

補助台



図 4-2-7 塊状のペースト試料を用いた通水試験の模式図

			変質試験			
分析項目		初期試料	粉末試料の 浸漬試験	塊状試料の 浸漬試験	通水試験	
外観観察	呈色確認			0	0	
	(目視観察)			_	_	
	一軸圧縮	\bigcirc				
機械的強度	強度試験	0				
の確認	マイクロ	\bigcirc		\bigcirc	\bigcirc	
	ビッカース	Ŭ		Ŭ	Ŭ	
	粉末X線	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	
	回折測定				0	
鉱物相	EPMA 測定又は			\bigcirc	\bigcirc	
の分析	SEM 像観察					
	水銀圧入式	\bigcirc		\bigcirc	\bigcirc	
	ポロシメータ	\bigcirc		\bigcirc	\bigcirc	
液相の分析	組成濃度		0			
和文石の刀が	及び pH					

表 4-2-8 ペースト試料の分析項目一覧

⑤ 試験スケジュール案

④までの実施内容に関する5ヵ年の試験スケジュール案を表4-2-9に示す。

データ取得試験は段階的に各試験により検討や補完をしつつ進め、化学変質挙動と機械的強度 の関係について検討し、処分場の成立性の評価のためのデータを整備する。加えて、化学変質等 の抑制対策についても検討を行うものとした。

2) セメントペースト試料の作製

試験計画で設定した配合条件に基づき、以下に示す練混ぜ配合や作製条件でセメントペースト 試料を作製した。以下に、使用材料や試料の作製条件などの概略を記す。

使用材料

セメントペースト試料作製に用いた使用材料を表 4-2-10 に示す。なお、急結剤は、セメント鉱 物系急結剤(太平洋マテリアル社製の太平洋ショットマスターA(高強度用))を用いた。

② セメントペースト試料の配合

吹付けコンクリートのセメントペースト部分に相当する試料の配合を表 4-2-11 に、シールド コンクリート及び現場打設コンクリートのセメントペースト部分に相当する試料の配合を表 4-2-12 に示す。

③ 試料の作製条件

試料は、一軸ホバートミキサを用いて、練混ぜ量 2L または 4L で練混ぜて作製した。なお、シ ールドコンクリート及び現場打設コンクリートのセメントペースト部分に相当する試料では、全 てのセメント系材料及び W/C でブリーディングが発生したため、材料分離による不均質が発生 しない様、静置、練混ぜを繰り返し、段階的に材料分離を低減させ充填に適した粘性のペースト を作製した。作製した試料の養生条件は、以下の通りである。

●吹付けコンクリート及び現場打設コンクリートのペースト部分に相当する試料

- ・養生温度 : (20°C±3°C)
- ・養生環境
 :密封し炭酸化の影響を低減させた水中浸漬
- ・養生期間
 :6ヵ月(予定)

●シールドコンクリートのペースト部分に相当する試料

シールドコンクリートの養生条件と合わせるため、蒸気養生(60℃で2時間)後、常温に戻し、 吹付けコンクリート及び現場打設コンクリートのペースト部分に相当する試料と同条件で養生を 行った。



表 4-2-9 5ヵ年計画のペースト試料を用いた試験のスケジュール案

表 4-2-10 セメントペースト試料作製に用いた使用材料

		材料	詳細	密度 (g/cm ³)
練水	W	上水	-	1.00
セメント	С	普通ポルトランドセメ ント	太平洋セメント製	3.16
泪和材	FA	フライアッシュ	東北発電工業製:東北フライアッシュ II 種	2.20
在它不且17月	BS	高炉スラグ	関東エスメント社製:エスメント 4000	2.89
急結剤	А	急結剤	成分:セメント鉱物系 太平洋マテリアル社製:太平洋ショットマスターA (高強度用)	_

試験体	混和材/	W/C	計量値(g) ※					
の種類	粉体(%)	(%)	W	С	FA	BS	Q	
OPC	0	45	1350	3000			300	
OFC	0	80	1600	2000			200	
FAC	30	45	1350	2100	900		300	
PAC	50	80	1600	1400	600		200	
BESC	45	45	1350	1650		1350	300	
DISC	40	80	1600	1100		900	200	

表 4-2-11 吹付けコンクリートのペースト部分に相当する試料の練混ぜ配合

※約 2L 練混ぜ時の配合

表 4-2-12 シールドコンクリート及び現場打設コンクリートの ペースト部分に相当する試料の配合

試験体	混和材/	W/C	計量値 (g) ※			
の種類	粉体(%)	(%)	W	С	FA	BS
OPC	0	40	1200	3000		
OFC	OPC 0	80	1600	2000		
FAC	20	40	1200	2100	900	
FAC	30	80	1600	1400	600	
BFSC	45	40	1200	1650		1350
	45	80	1600	1100		900

※約 2L 練混ぜ時の配合

(4) 現実的な条件及び材料におけるセメント系材料の機械的強度の評価手法に関する検討 1)試験計画の検討

本項では、4-2(2)項の調査結果に基づいて、標記の試験計画について、標記検討の目的を鑑 みた上で、現実的な条件及び材料における、生成する二次鉱物と機械的強度の知見、変質特性(変 質速度など)と機械的強度の知見拡充を目指し、試料や溶液、変質試験方法を選択した方法論を 整理した。①~③に試験に関する検討結果、④に分析項目、⑤に長期予測に関する解析、⑥に5 ヵ年のスケジュール案をそれぞれ示す。

① 試験体種類と配合

文献調査結果より、試験に用いるコンクリート試料は、吹付けコンクリート、シールドコンク リート、現場打設コンクリートの3種類とした、また、使用するセメントは、それぞれのコンク リートについて、OPC、FAC、BFSCの3種類とした。したがって、合計9種類のコンクリート 試料となる。

これらのコンクリートの配合は、調査結果を参考に設定した。各試験体の配合設定条件を表 4-2-13 に示す。なお、BFSC、FAC の混合セメントは OPC と比較して配合例が少ないため、OPC の配合をもとにした。FAC 及び BFSC の混和剤添加量は、それぞれ 30% (C種)、45% (B種) とした。

溶液の種類

変質試験に用いる溶液の条件は、4-2(3)の浸漬試験との連携が必要であることから、今後、 選定する 4-2(3)の溶液条件を参考に決定するものとした。

③ 変質試験方法

調査の結果選定した吹付けコンクリート、シールドコンクリート、現場打設コンクリート(覆 エコンクリート、インバート等)は、図 4-2-8 に示す様に、処分場における部材周辺の条件が異 なるため、それらに合わせた変質試験方法を検討した。吹付けコンクリートは岩盤壁面との隙間 を地下水が移動すると考えられるため、変質試験は図 4-2-9 に示すように動的条件で地下水量が 多い環境を模擬できるフロースルー試験を適用し、試料は一面を接液面としてその他の面を被覆 する。模擬地下水との接液面は、岩盤への吹付け面を想定し型枠面とする。流量は、調査結果を 参考に「6ml/cm²/日程度(150ml/1試料面/日)」とする。シールドコンクリート及び現場打設 コンクリートは、低透水、遮水の処置が施されるため、静的または微動条件で地下水量が少ない 環境を模擬できるように、変質試験は図 4-2-10 に示す様に浸漬試験を選択した。

④ 分析項目

本検討での分析項目一覧を表 4-2-14 に示す。各分析についての考え方や観点は、4-2(3)1) ④と同様である。

		配合設筑	定条件		
試料種類	セメント	セメント量	水/セメント	細骨材率	
	種類	(kg/m^3)	(%)	(%)	
	OPC	450	45	60	
吹付け コンクリート	BFSC	450	45	60	
	FAC	450	45	60	
	OPC	400	40	40	
シールト コンクリート	BFSC	400	40	40	
	FAC	400	40	40	
現場	OPC	400	40	40	
	BFSC	400	40	40	
	FAC	400	40	40	

表 4-2-13 コンクリート試料の配合設定条件

注) 混和材置換率(内割り)は、BFSC で 45%、FAC で 30%。



図 4-2-8 各コンクリートの部材周辺の条件



図 4-2-9 フロースルー法を用いた変質試験(吹付コンクリート)



図 4-2-10 浸漬法を用いた変質試験(シールド及び現場打設コンクリート)

			変質	試験
分析	項目	初期試料	フロースルー 試験	浸漬試験
外観観察	呈色確認 (目視観察)		0	0
機械的強度	一軸圧縮 強度試験	0		
の確認	マイクロ ビッカース	0	0	0
	粉末 X 線 回折測定	0	0	0
鉱物相 の分析	EPMA 測定又は SEM 像観察		0	0
	水銀圧入式 ポロシメータ	0	0	0

表 4-2-14 コンクリート試料の分析項目一覧

⑤ 再冠水完了までの化学変質挙動の予測手法の検討

本業務で実施する変質試験の期間は、処分場での成立性の評価を行う期間に比較すると短い。 そのため、機械的強度を予測するにあたり、セメント系材料の鉱物の変遷とその深度等の化学変 質挙動の時間変遷に関する数値解析を適用した手法が有効と考えられる。また、シールドコンク リートや覆エコンクリートへは、塩化物イオンの浸透により内部の鉄筋が腐食し、ひび割れが発 生することも処分場の構成部材の機械的強度の低下要因として考えられることから、これまでに 化学変質と塩化物イオン浸透に関する数値解析による予測手法を検討してきた(産業技術総合研 究所、原子力機構、原環センター、電中研、2019)。そこで、沿岸部における処分場構成材料の再 冠水完了までの化学変質等について、4-2(3)及び4-2(4)の試験結果を基に数値解析による 予測手法の適用性について検討を進める。

⑥ 試験スケジュール案

⑤までの実施内容に関する5ヵ年の計画の試験スケジュール案を表 4-2-15 に示す。

フロースルー試験と浸漬試験は、一定の試験期間(例えば5ヶ月)で一度試料を取り出し、変 質の進行を外観観察で確認する。観察結果を受け、試験の継続に問題が無いと判断した場合は、 例えば試験開始10ヶ月後に詳細分析を行う。そして、試験期間30ヶ月の試験体を取り出し詳細 分析を行う。これらの試験から得られるデータを用いて、処分場の成立性の評価のためのデータ を整備すると共に、化学変質等の抑制対策についても検討を行うものとした。沿岸部における処 分場構成材料の再冠水完了までの化学変質等について、数値解析による予測手法の適用性につい て検討し、必要に応じ具体的な検討を進めることとした。

項目	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度
(1)試験条件を設定するための調査 (材料条件、地下水組成、地下水流動等)					
(2)調査結果を反映した試験計画の策定	調査結果 を反映	策定した試験計画 の実施			
(3) 現実的な材料と環境条件で化学変質 した試験体の機械的強度の評価					
①セメント構造物を想定した現実的な 試験体の作製	調査結果 <mark>↓</mark> を反映				
②現実的条件下の変質試験(全工程)		·			
a) フロースルー試験		5Mで簡易評価	10Mで詳細評価		30Mで詳細評価
b)浸漬試験		5Mで簡易評価	10Mで詳細評価		30Mで詳細評価
③地下水成分の浸透と鉱物変化に関わる モデルの検討(長期予測)		試験 反映	結果を した解析		
(4) 塩化物イオンの浸透と化学変質の抑制 対策の整備		試験反映	結果 を した解釈		
(5) 機械的強度の評価手法の構築		試験	結果を ようした 解釈		•

表 4-2-15 5ヵ年計画のコンクリート試料を用いた試験のスケジュール

3) コンクリート試料の作製

試験計画で設定した配合条件に基づき、各コンクリート試料を作製した。以下に、使用材料や 試料の作製条件などの概略を記す。

① 吹付けコンクリート試料

吹付けコンクリートは、ベースコンクリートをノズルまで圧送し、ノズルの直前で別のポンプ で送られた急結剤と混合して吹付けて施工する。ベースコンクリートはレディミクストコンクリ ートのプラントで製造した(コンクリートミキサは最大 3m³まで製造可能な二軸強制撹拌式)。 ベースコンクリート作製に用いた使用材料を表 4-2-16 に、ベースコンクリートの配合を表 4-2-17 に示す。なお、急結剤は、表 4-2-10 に示すものを使用した。

試験体製造は下記の条件にて実施し、吹付けの際に吐出状況(圧送性)や材料分離、はね返り 及び急結剤材の添加量(セメントとの質量比で10%、吹付け終了後に添加量を確認)の観点から コンクリートの品質を確認した。吹付コンクリートの試験体の作製状況を図 4-2-11 に示す。

- ・吹付け方式 :湿式吹付け方式
- ・吐出速度 : 12m³/hr
- ・吹付け量 :1.5m³

・打設形状 : W400×L500×H300の型枠、初期強度測定用供試体

吹付けコンクリートの硬化性状は、圧縮強度を材齢 28 日で測定し、いずれの配合も設計基準 強度 36N/mm²を満足することで確認した(表 4-2-18)。初期強度の試験結果は割愛する(材齢 28 日で強度を確認したため)。なお、圧縮強度および変質試験用の試験体は、上記の吹付けコンクリ ートから φ 100×200mm のコアボーリングにより採取した。

シールドコンクリート及び現場打設コンクリート

シールドコンクリート及び現場打設コンクリート試料の作製に用いた使用材料を表 4-2-16 に、 配合を表 4-2-19 にそれぞれ示す。練混ぜは、55L の強制練りパン型コンクリートミキサを用い た。打設後の養生は、現場打設コンクリート試料は 20℃の環境下で封かん養生、シールドコンク リートは 60℃にて 2 時間の蒸気養生を行った。蒸気養生後は 20℃の環境下で封かん養生をした。

(5) セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充のまとめ

本業務では、ニアフィールド領域の水理解析技術と連携して支保工などのセメント系材料を用 いた構造物の機械的強度を評価し、沿岸部における処分場の再冠水完了までの空洞安定性などの 評価に繋げ、処分場の設計や塩水化学組成などより機械的強度を推定する手法を提示することを 目的とする。

そこで、塩水化学組成(沿岸部の地下水化学組成)と二次鉱物生成量など(化学変質)の関係 及び化学変質と機械的挙動の関係を把握する検討を実施する。また、沿岸部における現実的な処 分場の地下環境条件(地下水化学組成、セメント系材料と岩盤との接触部付近での地下水流動や 流量)及び材料(モルタル、コンクリートなど)での化学変質と機械的挙動に関する検討を実施 する。平成31年度は、文献調査により知見を整理し、その結果に基づいて試験計画について検討 し、溶液の組成、コンクリート種類、変質試験方法、分析方法及びとりまとめの方法等を検討し、 加えてスケジュール案を示した。加えて、試験体の作製を行った。

今後は、効率的に試験を進めるため、さらに溶液の組成、変質試験方法、分析方法等を最適化 し試験を実施する必要がある。データ取得のための試験は、段階的に各試験により検討や補完、 連携をしつつ進めると共に、化学変質挙動と機械的強度の関係について検討しつつ、処分場の成 立性の評価のためのデータを整備すると共に、化学変質等の抑制対策についても検討を実施して いく。 表 4-2-16 ベースコンクリート、シールドコンクリート及び現場打設コンクリートの作製に

材料		材料	詳細(製造・種類・産地)	密度(g/cm ³)
練混ぜ水	W	上水	_	1.00
セメント	С	普通ポルトランドセメント	太平洋セメント製	3.16
混和材	FA	フライアッシュ	東北発電工業製 東北フライアッシュⅡ種	2.20
126711112	BFS	高炉スラグ微粉末	関東エスメント製 エスメント 4000	2.89
	S1	細骨材(細目)	石灰石骨材(山口県美袮市大嶺町北分)	2.66
	S2	細骨材(粗目)	石灰石骨材(山口県美袮市大嶺町北分)	2.66
骨材	G	粗骨材(1505)※1	砕石骨材(山口県下関市小月町)	2.74
	G1	粗骨材(1005)※2	砕石骨材(山口県下関市小月町)	2.74
	G2	粗骨材(2010)※2	砕石骨材(山口県下関市小月町)	2.74
混和剤	SP1	高性能減水剤※1	BASF 製 マスターグレニウム NT-1000	—
126/111/11	SP2	高性能減水剤※2	BASF 製 マスターグレニウム 8000S	_

使用した材料

※1は吹付けコンクリート、※2はシールド及び現場打設コンクリート試料の作製のみに使用

表 4-2	2-17	ベースコンクリートの配合

町ム	W/B	s/a	混和材/			単位	量(kg/n	m ³)			SP1 の 送加速
HC'H'	(%)	(%)	(%)	W	С	FA	BFS	S1	S2	G	亦加率 (C×%)
OPC			_	203	450	_	_	606	404	673	
FAC	45	60	30	203	315	135	-	591	394	657	0.2
BFSC			45	203	247	_	203	600	400	667	



図 4-2-11 吹付け状況 (OPC と FAC)

副人	吹付けコンクリー	ト(コア供試体)		
	見掛けの密度 (g/cm ³)	圧縮強度(N/mm ²)		
OPC	2.37	57.4		
FAC	2.39	50.7		
BFSC	2.39	62.9		

表 4-2-18 吹付けコンクリートの圧縮強度試験結果(材齢 28 日)

表 4-2-19 シールドコンクリートと現場打設コンクリートの配合

	W/C	s/a	混和材 /				単位量	(kg/m ³)				SP2 の 添加率
配合	(%)	(%)	, 粉体比 (%)	W	С	FA	BFS	S1	S2	G1	G2	(B ×%)
OPC			_	140	350	_	_	467	311	467	701	0.5
FAC	40	40	30	140	245	105		458	305	458	687	0.3
BFSC			45	140	192	—	158	464	309	464	697	0.4

参考文献

土木学会、コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の現状、2003.

土木学会、セメント系構築物と周辺地盤の化学的相互作用研究小委員会(345 委員会)第2期 成 果報告書、2018.

- 土木学会、2016 年度改訂 トンネル標準示方書 [共通編]・同解説 [シールド工法編]・同解説、 2016.
- 原子力発電環境整備機構、包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の実現―適切なサ イト選定に向けたセーフティケースの構築― レビュー版、NUMO-TR-18-03、2018.
- 産業技術総合研究所、日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力 中央研究所、平成28年度地層処分技術調査等事業沿岸部処分システム高度化開発報告書、2017. 産業技術総合研究所、日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力 中央研究所、平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業沿岸部処分 システム高度化開発報告書、2018.
- 産業技術総合研究所、日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力 中央研究所、平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業沿岸部処分 システム高度化開発報告書、2019.

4-3 緩衝材の機能変化に係るデータの拡充

(1) はじめに

これまでに実施された緩衝材の機能変化に関するデータ取得において、緩衝材の長期変質だけ でなく、再冠水時の変質、膨潤、流出に関して、蒸留水、海水相当イオン強度を持つ NaCl 水溶 液および CaCl₂水溶液を用いた試験が行われ、緩衝材の挙動把握がなされている。しかしながら、 イオンを含む溶液でのデータは十分ではなく、海水のように複数のイオンを含む溶液に対する浸 潤挙動、密度の均質化、緩衝材流出挙動等の再冠水時に起こる緩衝材の力学的変化は確認されて いなかった。そのため、平成 28~30 年度に沿岸部における建設から再冠水完了までの処分場の 工学技術に関して、処分場の構成材料である緩衝材の変質、膨潤、流出挙動に関するデータ取得 を目的に、人工海水、各種溶存イオン、イオン強度など、沿岸部における地層処分環境の地下水 の化学成分に着目した試験が行われた(産業総合研究所、原子力機構、原環センター、電中研、 2019)。これによりデータが拡充され、イオン種、イオン強度が及ぼす緩衝材の機能への影響につ いて示したが、まだ十分とは言えず、塩水系地下水の化学成分の及ぼす緩衝材の機能への影響を 系統的に把握する必要がある。そこで、本事業では、沿岸部に賦存する地下水の組成を念頭に、 溶存陽イオンの、緩衝材の主成分であるベントナイトの膨潤性、透水性および化学的な影響を系 統的に把握し、多様な塩水系地下水の組成に対応して緩衝材の挙動を評価できる知見を得ること を目的として実施することとした。平成 31 年度は、緩衝材の膨潤率及び透水性のイオン種やイ オン強度の影響に関する試験、高イオン強度でのイオン交換挙動に関する試験を開始し、それぞ れのモデル化手法や挙動を予測するための解析手法への反映について検討をした。

(2) 緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握試験

1)背景と目的

緩衝材の設計では、緩衝材の自己シール性を確保するために、最大膨潤率が隙間体積比の2倍 以上となるように厚さと密度を設定している。塩水環境下では、緩衝材の膨潤性が低下すること が知られており、自己シール性の確保のためには塩水環境下の方が乾燥密度を高くする必要があ る。必要な乾燥密度は人工海水を用いた試験に基づいて設定されているが、多様な地下水組成を 考えた場合に、溶存イオンに応じた膨潤率を把握しておくことが有用であると考えられる。

これまでに、最大膨潤率と初期有効粘土密度の関係が取得された(田中・中村、2005;戸井田 ほか、2005)。また、原位置の幌延地下水を用いた膨潤率の測定がされている(原環センター、 2019)。本業務では、多様な塩水系地下水に対応して緩衝材の膨潤率を評価できる知見を得るこ とを目的に、溶存陽イオンとして海水組成を考慮した場合に把握しておくべき主要な成分である Na⁺,Ca²⁺,K⁺,Mg²⁺を対象としたイオン種に関する膨潤率への影響試験を実施する。この試験によ って、膨潤率に特に影響を与える陽イオン種が明らかになれば、膨潤率を確保するために着目す べき地下水中の成分がわかるとともに、場の地下水組成に応じた施工を考えることができること になる。今年度は、陽イオン種のうち一価の Na⁺と K⁺を対象とした試験を実施する。また、膨潤 が定常に至った場合には、地下水の組成変化に対する膨潤挙動の応答を確認するため、通水液を 交換した試験を行う。これによって、膨潤に対する陽イオンの影響が可逆的であるかどうかが確 認でき、地下環境の変化に応じて地下水組成が変わった場合(例えば、塩水環境から淡水環境へ の変化)に緩衝材の膨潤性が変化するかどうかの知見が得られる。 2) 試験方法

膨潤率に係る試験では、図 4-3-1 に示すような試験装置を使用した。この試験装置のピストン とセルとの摩擦を考慮した上載圧は概ね 8.8kPa 程度である。なお、力学的には、緩衝材の自重と 膨潤圧が釣り合うまで膨潤するが、ピストンの重さやピストンとセルの摩擦などが及ぼす影響が 大きいため、全ての試験で同じ型の試験装置を使用した。

本試験は、境界条件として一次元・鉛直方向への膨潤量を取得する試験であるため、供試体の 直径は任意であるが、直径が小さくなるほど膨潤量に対して供試体とセルの間の摩擦の影響が大 きくなる。そのため、過去の実績から供試体直径は 60mm を基本とした。供試体の高さは、高い ほど密度分布が発生すること、セルと供試体間の摩擦の影響が大きくなること、膨潤量が定常に 至るまでに時間が掛かることなどの短所があるため、過去の実績から 5mm とした。初期含水比 は、7.1%として静的締固めにより供試体を作製した。

表 4-3-1 に試験ケースを示す。乾燥密度を 1.2、1.6、2.0Mg/m³の 3 水準、使用する液種を表に 示す 4 種類として、全 12 ケースについて試験を実施した。

また、膨潤が定常に至ったと判断される陽イオンを通水したケースについては、必要に応じて 通水液をイオン交換水に切り替えて、膨潤挙動をさらに計測する。



図 4-3-1 本業務で使用する緩衝材膨潤量に係る試験装置のイメージ

表 4-3-1	試験ケース
	H V.J/ V

設定 条件	供試体	乾燥 密度 Mg/m ³	有効 ベントナイト 乾燥密度 Mg/m ³	供試体 寸法 mm	液種	備考
荷重一定 8.8kPa	ケイ砂 30wt%混合 クニゲル V1	1.2	0.967	Φ60×Η5	・ イオン交換水	NaCl+ KCl(0.5M); NaCl と KCl を 1:1 で混合
		1.6	1.359		 NaCl(0.5M) KCl(0.5M) NaCl+ KCl(0.5M) 	
		2.0	1.794			

3) 測定結果

液種ごとの膨潤率の測定

図 4-3-2 に、溶存陽イオンを含む液種ごとの膨潤量・膨潤率の 32 日目までの経時変化を示す。 どのケースでも、初期乾燥密度が大きいほど、膨潤率が大きく、半日程度で膨潤挙動が定常状態 に至った。図 4-3-3 には、イオン交換水のケースも含めた密度ごとの 32 日目までの膨潤量・膨潤 率の経時変化を示す。(d)は、乾燥密度 2.0Mg/m³の膨潤量・膨潤率の経時変化の拡大図である。 乾燥密度 1.2 Mg/m³では、イオン交換水のケースよりも KCl のケースの膨潤率が一時的に大きく なったが、イオン交換水のケースの膨潤量が増した結果、KCl より大きくなった。乾燥密度 1.6、 2.0Mg/m³のケースでは、膨潤率が NaCl+KCl>NaCl>KCl の順となっており、膨潤率は使用す る液種に依存していることを示唆している。ただし、2.0Mg/m³のケースではその差はわずかで ある。乾燥密度 1.2Mg/m³のケースでは、膨潤率の大きさと使用する液種の関係が他のケースと 異なるが、これは、密度が低いために膨潤性能が低く、装置のピストンとセルの摩擦のばらつき などの影響が液種の影響よりも大きい可能性がある。

図 4-3-4 にイオン交換水を浸潤させたケースの結果を示す。膨潤はまだ定常に至っていない。 イオン交換水の場合とイオン強度 0.5 の溶液では、膨潤挙動(膨潤速度)に大きな差があること がわかる。途中、膨潤量・膨潤率の変化に屈曲が見られるのは、浸潤させるための動水勾配がビ ュレットを用いている等の理由により一定ではないためと考えられる。屈曲が起こることは、間 隙水の移流により塩濃度が低下することが膨潤を早める原因である可能性があることを示唆する。

② イオン交換水への液交換による膨潤挙動

定常状態に至った NaCl のケースと KCl のケースについて、使用する液種をイオン交換水に交換して膨潤挙動の変化に関する測定を行った。図 4-3-5 に溶液交換後も含む液種ごとの膨潤量・ 膨潤率の経時変化を示す。図から、NaCl と KCl の両ケースとも、使用する液をイオン交換水に 交換したことによって再び膨潤し始めた。さらに、KCl のケースでは、イオン交換水に交換した 直後に、一時的ではあるが、乾燥密度 1.2Mg/m³のケースが乾燥密度 1.6Mg/m³のケースよりも 膨潤率が大きくなり、NaCl のケースにおいても、乾燥密度 1.6Mg/m³のケースが乾燥密度 2.0Mg/m³のケースよりも膨潤率が大きくなった。これは、乾燥密度が高い場合にはイオン交換 水に置き換えた後に、それまで間隙を満たしていた NaCl 水溶液や KCl 水溶液が希釈されるまで に時間を要するためであると考えられる。したがって、これらの逆転現象は一時的なものであり、 試験時間の経過に伴って乾燥密度が大きいほど膨潤率が大きくなると考えられる。



図 4-3-2 液種ごとの膨潤量・膨潤率の経時変化(32 日目まで)



図 4-3-3 密度ごとの膨潤率の経時変化



図 4-3-4 イオン交換水の浸潤による膨潤量・膨潤率の経時変化



図 4-3-5 液交換した NaCl 水溶液と KCl 水溶液の膨潤量・膨潤率の経時変化
③ 再冠水過程での溶存陽イオンの力学的な影響の整理

図 4-3-6 には、初期有効ベントナイト乾燥密度と最大膨潤率の関係に関する既往の研究成果(日本原子力研究開発機構・原環センター、2019;田中・中村、2005;戸井田ほか、2005)と共に、 本研究の結果を示す。既往の研究では、初期有効ベントナイト乾燥密度が大きくなるほど最大膨 潤率は大きくなり、その関係は線形である。

ここで、膨潤率は、力学的には体積ひずみ ε_v と同等であり、初期乾燥密度 ρ_{d0} と体積ひずみ ε_v の関係は、力学的に膨潤後の乾燥密度 ρ_d を用いて次式で表される。

$$\varepsilon_{v} = \frac{\Delta V}{V_{0}} = \frac{V - V_{0}}{V_{0}} = \frac{\frac{V}{M} - \frac{V_{0}}{M}}{V_{0}M} = \frac{\frac{1}{\rho_{d}} - \frac{1}{\rho_{d0}}}{\frac{1}{\rho_{d0}}} = \frac{\rho_{d0}}{\rho_{d}} - 1 = \left(\frac{1}{\rho_{d}}\right)\rho_{d0} - 1$$
$$\varepsilon_{v}(\%) = \left(\frac{100}{\rho_{d}}\right)\rho_{d0} - 100$$

そのため、初期乾燥密度pd0と体積ひずみ&の関係は、その勾配が膨潤後乾燥密度で決まる(膨 潤後の乾燥密度が初期乾燥密度によらず一定と仮定)ということが導かれる。図 4-3-7 に、上述 の式に従って整理した初期乾燥密度と膨潤後乾燥密度の関係を示す。この図の直線の勾配は 100/pdである。

図 4-3-7 に示すように、本検討におけるイオン強度が 0.5M の溶液と既往の研究(日本原子力 研究開発機構、原環センター、2019)の模擬幌延地下水で最大膨潤率が同程度となった。また、 本検討のイオン交換水(H₂O)の方が既往検討の蒸留水よりも最大膨潤率が小さい。本検討のイ オン交換水のプロットは定常に至っていないため、膨潤挙動の推移をさらに計測する必要がある。

図 4-3-7 に示すように、既往検討では初期乾燥密度と最大膨潤率の関係に線形性があるのに対 し、本検討ではこの関係の線形性が低い。この関係に線形性があることは、最大膨潤時の乾燥密 度は初期乾燥密度によらず一定であることを意味し、この関係の線形性が低いことは、最大膨潤 時の乾燥密度は初期乾燥密度によって異なることを意味する。基本的には低乾燥密度に締固めた 場合と高乾燥密度に締固めた場合では応力履歴(弾性領域の大きさ)が異なり、この場合は初期 乾燥密度と最大膨潤率の関係の線形性が低くなる。この関係が線形性を持つには化学的な作用に よる応力履歴の喪失などの説明が必要となる。化学的な作用による応力履歴の喪失については、 既往の研究(原環センター、2013)において、モンモリロナイト含有率やイオン強度の影響を受 けることが示されている。これらを踏まえると、本検討と既往の研究の結果の差がベントナイト のロットの違いによるモンモリロナイト含有率の違いの影響である可能性もあるが、その理由は 現状では不明である。

膨潤率試験における結果は、供試体に載っている冶具の重さとベントナイトの膨潤圧の釣り合いで決まる。様々な推定式が提案されているが、供試体内部の密度の不均質性や供試体と試験機の間の摩擦なども影響するため、その妥当性の説明は難しい。その一方で、供試体の膨潤挙動をマクロな応答として力学的推定式が提案されている(小林ほか、2007)。この式は、既往の研究 (例えば、日本原子力研究開発機構・原環センター、2019)においても採用しており、モンモリロナイト含有率によって、平衡膨潤量と平衡膨潤圧の関係が推定可能である。今後、本業務では、この完全飽和線を用いた力学推定式によって試験結果を整理し、その信頼性と妥当性を議論する必要がある。



図 4-3-6 初期乾燥密度と最大膨潤率の関係



図 4-3-7 初期乾燥密度と最大膨潤率の関係

4) まとめ

塩水系地下水中に溶存する陽イオンの膨潤性への影響を把握するために、膨潤率の測定試験を 行った。今年度はイオン交換水、Na⁺イオン、K⁺イオンを対象に乾燥密度を1.2、1.6、2.0Mg/m³ の供試体を使って同じ温度・湿度環境下で実施した。

イオン交換水のケースは膨潤挙動が続いており、定常状態に至っていない。それに対し、陽イ オンを含んだ溶液では、定常に至るのが非常に早く、半日程度でほぼ定常に達した。乾燥密度 2.0Mg/m³の供試体の試験では、膨潤率はイオン種による膨潤率の差は小さかった。乾燥密度 1.6、 2.0Mg/m³のケースでは、NaCl+KCl>NaCl>KCl の順となっており、膨潤率は使用する液種に 依存することが示唆された。乾燥密度 1.2Mg/m³のケースでは、膨潤率の大きさと使用する液種 の関係が他のケースと異なるが、これは、密度が低いために膨潤性能が低く、装置のピストンと セルの摩擦のばらつきなどの影響が液種の影響よりも大きい可能性がある。

NaCl のケースと KCl のケースは、膨潤挙動が定常になった後に、浸潤させる液をイオン交換 水に交換して試験を行った。その結果、再び膨潤が始まり、膨潤量が増加している。この再膨潤 が初めからイオン交換水を通水した場合と同じレベルに達するかどうかを見極めるためには定常 に達するまで試験を継続する必要がある。

膨潤率試験結果を初期有効ベントナイト乾燥密度と最大膨潤率の関係によって整理した。その 結果、本検討では、初期有効ベントナイト乾燥密度と最大膨潤率の関係の線形性が既往検討より 低かった(田中ほか、2005;戸井田ほか、2005)。既往の研究でなされているように、初期乾燥 密度と最大膨潤率の関係が線形関係という整理方法が成立する場合、初期乾燥密度によらず最大 膨潤時の乾燥密度は一定であることになる。一方、低乾燥密度に締固めた場合と高乾燥密度に綿 固めた場合では、応力履歴(弾性領域の大きさ)が異なることなり、初期乾燥密度によらず、最 大膨潤時の乾燥密度は一定であるという仮定には、化学的な作用による応力履歴の喪失など、応 力履歴の影響を変化させる要因について更なる説明が不可欠である。ベントナイトのロットの違 いによるモンモリロナイト含有率の違いの影響である可能性も考えられるが、現状では特定でき ていない。今後の統一的な条件下での膨潤率試験による更なるデータ拡充が重要と考えられる。

本年度は、一価のイオンである Na⁺イオンと K⁺イオンに関する試験を行ったが、来年度以降に Ca²⁺、及び Mg²⁺の試験を実施する予定であり、系統的なデータ取得により、陽イオン種の影響に ついて検討していく。

(3) 塩水系地下水成分による緩衝材の透水性に関する検討

1)背景と目的

これまでの研究において、緩衝材は塩水で飽和させた方が淡水で飽和させた場合より、透水性 が高まることが知られている。しかし、多様な沿岸部海底下の地下水組成に対応できるようにす るためには、イオン種による透水性への影響を把握しておく必要がある。これによって、地下水 組成に応じた緩衝材の透水性の予測に資することができると考えられる。本検討では、イオン種 による透水性への影響の把握を目的に、ベントナイトに塩水系地下水の主要陽イオン (Na、Ca、 Mg 及び K)を含む溶液を通水する試験を行い、これらの陽イオンが透水性に及ぼす影響に関す るデータを取得する。 2) 試験方法

カラム通水試験の模式図を図 4-3-8 に示す。ベントナイトの飽和の効率を良くするため、送液 はカラム下方から上方へと行った。HPLC ポンプとリリーフ弁による圧力調整により、カラム下 端の入口に溶液による一定圧を与え、同時にカラム上端の出口を大気圧として、カラム上下端に 動水勾配を生じさせることにより、溶液を通水した。試験は、全て差圧 2.5MPa の一定値を維持 して実施した。

このとき、出口側のガラスキャピラリーと遠沈管を用いたサンプラー容器で一定時間 Δt 内の通 水した溶液の体積変化 ΔV_f を読み取り、流量Qを測定した。そして、カラム上下端の圧力差 ΔP を、 溶液の密度 ρ_f 及び重力加速度gを用いて水頭差 Δh に変換し、これとカラムの断面積Aより透水係 数kを算出した。(式 4-3-1~式 4-3-3)

$$Q = \frac{\Delta V_f}{\Delta t}$$
式 4-3-1
$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho_f g}$$
式 4-3-2
$$k = \frac{QL}{\Delta hA} = \frac{\Delta V_f L}{A\Delta h\Delta t}$$
式 4-3-3

カラム通水試験の試験条件と分析項目を表 4-3-2 に示す。

ベントナイトの充填密度は、通液に要する時間を考慮して、乾燥密度で1.0 Mg/m³とした。こ れらは、含水量を求めたベントナイト(クニゲルV1)を秤量し、治具を用いて油圧プレスで成型 した後、X線透過率の高い PEEK 樹脂で作成したカラムに充填し、試験に供した。通水溶液は、 純水(蒸留水)、10 倍希釈海水(10%SW)、2 倍希釈海水(50%SW)及び海水(100%SW)を用 い、順に切り替えて段階的に濃度を上げた。通水の切り替えは、透水係数の安定性や排出液の液 量がベントナイトの空隙体積に対して十分大きいことを確認した後に行った。

カラムからの排出液については、ICP-AES により陽イオン(Na⁺、K⁺、Ca²⁺及び Mg²⁺)の定量 を、イオンクロマトグラフィーにより陰イオン(Cl⁻及び SO₄²⁻)の定量を、pH 計により水素イ オン濃度(pH)の測定をそれぞれ行った。



図 4-3-8 カラム通水試験の模式図 (カラムの内径×高さは 20mm×10 mm)

表 4-3-2 カラム通水試験の試験条件と分析項目

固相	通水溶液	透水係数測定	分析項目及び手法
クニゲル V1	H ₂ O	通水中に数回	(液相)
(密度 1.0)	10% SW		ICP-AES (Na, K, Ca, Mg)
	50% SW		IC (Cl, SO ₄), pH
	100% SW		
	の連続通水		

3)透水係数の変化

試験ケースは2ケースであり、1ケース目はベントナイトの充填後、試験実施前に蒸留水で飽 和させた後も通水を行ったもの、もう1ケースは充填後未飽和な状態に通水したものである。以 下、前者を「純水飽和カラム」、後者を「未飽和カラム」と呼ぶ。通水試験に用いた各溶液の化学 組成と通過液量体積を表 4-3-3 に示す。

純水飽和カラムへの通水過程の通過流量の変化と、測定された通過流量と透水係数の変化を図 4-3-9 に示す。溶液 50%SW までの通水では、通過流量と透水係数には変化がほとんど見られず、 100%SW へと切り替えて初めてこれらの値は急激に上昇したことがわかる。また、短期間の観測 ではあるが、100%SW 通水の最後には透水係数がやや低下した。

未飽和カラムへの通水試験の結果を、純水飽和カラムと同様に図 4-3-10 に示す。カラム内を破 過した直後の流速がやや速く、その後はわずかに減速している。透水係数は未飽和から飽和過程 の値と、飽和後の終盤に測定した値をプロットしているが、後者は一桁低下した。

以上の通水試験の結果を表 4-3-4 にまとめて示す。透水係数の変化は、イオン交換による層間 距離と粒子の大きさの変化が要因の一つとなっていると考えられる。そのため、浸潤状態で XRD を測定することにより、層間距離と粒子径を測定した。Appendix IXにその結果を示す。圧縮状態 の緩衝材では、層間への水の進入が妨げられるため、圧縮していない場合の層間距離とは異なる ことも予想されるが、イオン交換による影響の基礎データとして今後の検討の参照データとする。

測定項目	0% SW	10% SW	50% SW	100% SW		
pН	7.12	7.18	7.97	8.16		
Na (mM)	0.525	32.189	220.816	415.274		
K (mM)	0.182	0.981	3.991	7.324		
Ca (mM)	0.001	0.558	2.559	5.264		
Mg (mM)	0.002	2.697	12.519	25.633		
Cl (mM)	0.111	59.111	291.961	583.018		
$SO_4 (mM)$	0.001	3.185	11.368	31.575		
純水飽和ケース						
通水体積(海水濃 度ごと) (ml)	2.34	9.48	13.33	16.05		
累積通水体積(ml)	2.34	11.82	25.15	41.20		
未飽和ケース						
累積通水体積(ml)	-	-	-	7.15		

表 4-3-3 通水試験に用いた溶液の化学組成と通水体積



(a:累積通過流量;b:通過流量と透水係数)



図 4-3-10 未飽和カラムへの通水(a:累積通過流量;b:通過流量と透水係数)

カラム	通水液(IS = 0.0-0.7)	排水量 (µl)	時間 (s)	圧力 (MPa)	通過流量 (µℓ/s)	透水係数 (m/s)
	0% SW		0	2.00	0.01207	1.960E-12
統大会和	0% SW	2480	237900	2.50	0.00984	1.278E-12
一般小記和	10% SW	9340	1434300	2.50	0.00827	$1.074 \text{E}{}^{-12}$
7774	50% SW	13400	3185400	2.50	0.01100	1.429E-12
	100% SW	27900	3469020	2.50	0.08568	1.113E-11
未飽和	100%SW	6900	128520	2.50	0.0603271	7.838E-12
カラム	100%SW	250	167700	2.50	0.0063808	8.290E-13

表 4-3-4 カラム通水試験における通過流量及び透水係数の変化

4) 通水後溶液の化学組成変化

カラムを通水後、回収された溶液について、pH 及びイオン濃度を測定した。純水飽和カラムを 通過した溶液の陽イオン濃度変化を図 4-3-11 に、陰イオン濃度変化を図 4-3-12 に示す。なお、 各イオンの濃度変化図において、カラム流入前の溶液中の濃度を破線で示した。純水である 0%SW の通水において、回収溶液の Na 濃度、Ca 濃度がすでに通水溶液よりも高いのは、ベント ナイト中に含まれていた塩が溶液に溶けた可能性がある。10%SW の通水において、回収溶液の K 濃度、Ca 濃度、Mg 濃度が通水溶液より低いのは、ベントナイト層間の Na がそれぞれのイオ ンに交換されたことが考えられる。通水溶液の変更に対し、回収溶液の Na 濃度、K 濃度、Ca 濃 度はよく応答しているが、回収溶液の Mg 濃度のみが 50%SW までほとんど溶出しなかった。

なお、未飽和カラムへの通水は海水 100%のみを使用しており、通水時間が短いこともあり、 回収溶液の変化の傾向は見られなかった。

5)まとめ

イオン種による透水性への影響の把握を目的に、ベントナイトを純水で飽和させた後、純水、 10 倍希釈海水(10%SW)、2 倍希釈海水(50%SW)及び海水(100%SW)を順に通水する試験 (純水飽和カラム試験)と未飽和なベントナイトに海水(100%SW)を通水する試験(未飽和カラ ム試験)を実施した。

純水飽和カラム試験では、溶液 50%SW までの通水では、透水係数には変化がほとんど見られ ず、100%SW へと切り替えて初めてこの値は急激に上昇し、短期間の観測ではあるが、100%SW 通水の最後には透水係数がやや低下した。10%SW の通水において、回収溶液の K 濃度、Ca 濃 度、Mg 濃度が通水溶液より低いのは、ベントナイト層間の Na がそれぞれのイオンに交換され たことが考えられる。通水溶液の変更に対し、回収溶液の Na 濃度、K 濃度、Ca 濃度はよく応答 しているが、回収溶液の Mg 濃度のみが 50%SW までほとんど溶出しなかった。

未飽和カラム試験では、透水係数は未飽和から飽和になる間はほぼ変化がないが、飽和後の終 盤になると一桁低下した。また、海水 100%SW のみを使用しており、通水時間が短いこともあ り、回収溶液の変化の傾向は見られなかった。

純水飽和カラム試験で得られた透水係数の変化と回収溶液のイオン種ごとの濃度の変化は、後述の「4-3(5)圧縮ベントナイトへの浸潤とイオン交換反応の進展についての解析的評価」にて、 イオン交換より透水係数が変化するモデルを用いたシミュレーションによって再現できるかを試 行する。

223



◆は下から 0%SW、10%SW、50%SW、100%SW の通水前のイオン濃度と pH 図 4-3-11 純水飽和カラムの通水溶液の化学組成変化(陽イオン)



◆は下から 0%SW、10%SW、50%SW、100%SW の通水前のイオン濃度 図 4-3-12 純水飽和カラムの通水溶液の化学組成変化(陰イオン)

(4) イオン交換選択性に関する検討

1)背景と目的

平成 28 年度からの沿岸部の地下水組成を考慮した再冠水挙動に係る試験では、イオン強度、 及びイオン種により緩衝材の力学的な特性に対して影響があることが示された(産業技術総合研 究所、原子力機構、原環センター、電中研、2019)。また、イオン交換選択係数にイオン強度依存 性があることが試験により示唆された(産業技術総合研究所、原子力機構、原環センター、電中 研、2019)。イオン強度やイオン種の影響を受けたイオン交換反応が、緩衝材の特性を変化させる ことを踏まえると、多様な組成の地下水に適用できるイオン交換選択性の知見が地下水組成に応 じた緩衝材の挙動を予測する上で必要である。

本検討では、多様な組成の地下水に対応して解析的な評価に適応できるイオン交換選択係数を 得ることを目的に、イオン強度がイオン交換選択係数に与える影響に係るデータ取得した。既往 の文献データと試験で得られたイオン強度の高い条件でのイオン交換選択性を合わせて整理し、 解析に反映するためのイオン交換選択係数について検討した。

2) イオン交換選択性のイオン強度依存性に関する試験

試験方法

イオン強度を 0.025 から 0.5 まで 5 段階に変化させた NaCl、KCl、MgCl₂、CaCl₂単成分系溶 液(交換溶液 1)と、イオン強度 0.5 及び 0.125 の NaCl-KCl、NaCl-CaCl₂、NaCl-MgCl₂、CaCl₂-MgCl₂混合系溶液(二成分系、交換溶液 2)を用いて、Na型モンモリロナイト(クニピアF)と の間のイオン交換反応試験を実施した。試験条件を表 4-3-5 に示す。

Na 型モンモリロナイト (クニピア F) と表 4-3-5 に示す溶液を遠沈管内で混合し、25℃で、48 時間のバッチ式試験によりイオン交換させ、交換平衡後の溶液を遠心分離して、分析に用いた。 イオン交換前の溶液と交換後の上澄み液については、ICP-AES により陽イオン (Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 及び Mg²⁺)の定量を、イオンクロマトグラフにより陰イオン (Cl⁻及び SO₄²⁻)の定量を、pH 計 により水素イオン濃度 (pH)の測定をそれぞれ行った。なお、交換平衡前後の固相の交換イオン 量は、液相のイオン濃度変化から算出する方法と、モンモリロナイトを直接 FESEM-EDS 分析す る方法の 2 通りにより求めた。

固 相	イオン 強度	交換溶液 1 (SW (海水) は海水系、 SW 以外は単成分系)			イオン 強度		交換》 (二成)	容液 2 分系*)			
ク	0.500										
11	0.375						0.500	N _a Cl _a	N _a Cl _a	N _a Cl _a	$C_{\alpha}C_{1}$
F	0.250	NaCl	KCl	$CaCl_2$	$MgCl_2$	SW		NaCI-	NaCI-	MaCl-	$M_{\alpha}Cl_{2}$
ア	0.125						0.125	KUI	CaC12	wigC12	MgC12
F	0.025										

表 4-3-5 モンモリロナイトのイオン交換反応試験の条件

*二成分系の溶液は、イオン強度 0.500 及び 0.125 に固定し、成分比率を変えて試験に用いた。

試験結果

単成分系(NaCl、KCl、CaCl₂、MgCl₂、SW の 0.025-0.5M)におけるモンモリロナイト(KF)の H/Na、K/Na、Ca/2Na、Mg/2Naの分配を得るために、バッチ溶液の平衡前後の ICP-AES 溶液 分析によって求めた吸着成分組成と、平衡後に回収したモンモリロナイトの FESEM-EDS 固相分 析によって求めた化学構造式(モンモリロナイト構造式の中に O 原子が 22 個あることに基づく) から吸着成分組成を定量することによって求めた。結果により陽イオン成分比を平衡溶液の陽イ オン活量比に対してプロットしたものを図 4-3-13 および図 4-3-14 にそれぞれに示す。これらの プロットの直線回帰の各勾配が(固液間)分配係数となる。液相分析から求めた分配係数値と固 相分析による値では特に Ca/Na、Mg/Na について大きな差異が認められた。

二成分系、希釈海水を用いた海水系についても同様に分配係数を求めた。溶液組成から求めた 分配係数と、固相分析から求めた値の間には、単成分系でのイオン交換時よりも大きな差異が認 められ、特に Ca、Mg は強く固相に分配されているものがあることがわかった。

なお、イオン交換選択係数の算出は、以下の方法によった。

モンモリロナイトの $\{001\}$ 面上のイオン交換サイトを Z(負帯電)とし、交換陽イオンを Me_1^+ 、 Me_2^{n+} とすると、イオン交換の式は次のようになる。

$$nZMe_1 + Me_2^{n+} = Z_nMe_2 + nMe_1^+$$
 式 4-3-4

ここで、交換サイトは活量係数 1.0 の理想混合系と考え、Me₁が吸着した交換サイトのモル量を(ZMe₁)、溶液中の陽イオンの活量を{Me}とすると、イオン交換選択係数K_dは次式で求められる。

$$K_{d} = \frac{(Z_{n}Me_{2}) \times \{Me_{1}^{+}\}^{n}}{(ZMe_{1})^{n} \times \{Me_{2}^{n+}\}} = \frac{\frac{(Z_{n}Me_{2})}{(ZMe_{1})^{n}}}{\frac{\{Me_{2}^{n+}\}}{\{Me_{1}^{+}\}^{n}}}$$
 $\overrightarrow{\mathbb{T}} 4-3-5$

今回の単成分系、二成分系及び海水系の交換溶液について得られた Na ベースの陽イオン交換 選択係数を表 4-3-6 に示す。表中には、TRU 二次レポートの値も示した。

また、4-3(3) 項で述べた通水試験で得られた通水前後の溶液中の陽イオン濃度、その差分(吸 脱着分)及び初期のベントナイト中の陽イオン濃度を積算することで、通水試験におけるカラム 全体の分配係数を知ることができる。そのために必要なクニゲル V1(KV)の交換性陽イオン量 は、モンモリロナイト濃度を53.0wt.%として、クニピアF(KF;モンモリロナイト率98%以上) の交換性陽イオン量(CEC)から求めた。なお、CECは乾燥試料と純水浸漬試料ではやや異なる ため、純水飽和カラムについては純水浸漬後の湿潤モンモリロナイト(KF)の CEC 分析値を用い た。損失した陽イオン量に初期のクニゲル V1の交換性陽イオン量を加算したものが交換した陽 イオン量となり、活量係数は1とし、活量計算を行い、その比から分配係数を求めた。純水飽和 カラムでの陽イオン選択係数 Kdを求めた結果を表 4-3-7 に示す。

それぞれの試験、分析によって得られた陽イオン交換選択係数は一致しておらず、平成 31 年 度の試験の結果のみでは、イオン強度の高い条件でのイオン交換選択係数を決めることはできな かった。しかし、得られたイオン交換選択係数についての既往の文献データと合わせて概観する と、イオン交換選択係数は、イオン強度によって変化し、イオン半径の効果がある可能性もある と考えられる。これについて、今後試験によって確認していく。

TRU 二次レポートで取りまとめられている選択係数はすべて、10mM 程度の希薄な溶液にお ける実験値であり、これは Na に対するイオン半径比と良い相関を示している(電気事業連合・ 核燃料サイクル開発機構、2005)。本検討で取得したイオン交換選択係数は、高イオン強度溶液で のイオン交換試験では非常に広範囲にばらつくが、多くは低イオン強度のデータよりも小さな値 である。このことは、高いイオン強度では、モンモリロナイトのイオン交換サイトは、水和状態 の変化によって膨潤性が著しく失われ、層間は局所的に閉塞してしまっていると考えられる。ま た、大量の陽イオンの存在によって、溶液に露出している(001)吸着界面は自由なイオン交換がで きなくなっている可能性もある。さらに、水和した陽イオンの吸着によるモンモリロナイト膨潤 を、陽イオンの浸透圧として考えると、浸透圧以上の加圧状態にあったモンモリロナイトでは陽 イオン交換挙動も大きく変化することになる。今後検討すべき課題としては、

① 一軸加圧状態のイオン交換と膨潤挙動の観察

② 吸着した陽イオンの水和構造と、陽イオン活量の推定

などが挙げられる。これらは、ベントナイトの加圧状態、積層状態と、陽イオン分配係数の間の 関係を明らかにするために必要である。

イオン交換選択係数として希薄な溶液で求めた値(例えば TRU 二次レポートで使われている イオン交換選択係数)は、最大値に近いものであり、海水系地下水条件においては、それらの値 よりも小さなイオン交換選択係数で評価することができると思われる。すなわち、Na 型モンモリ ロナイトへの Na 以外の陽イオンの取り込みは、予想値よりも小さく、結果として緩衝材の膨潤 特性の低下の程度も大きくないことが推測される。今後さらに試験を行い、条件の設定や分析方 法等を考慮して検討を進める必要がある。



(FESEM-EDS 分析による)

表 4-3-6 陽イオン交換選択係数(LogKd Cat/Na)の比較

Cation	イオン半	TRU 二次	単成分系	単成分系	二成分系	二成分系	二成分系	二成分系	海水系	海水系
	径比率	レポート*	(IS≦0.5)	(IS≦0.5)	(IS=0.5)	(IS=0.5)	(IS=0.125)	(IS=0.125)	(IS<0.5SW)	(IS<0.5SW)
	Cat/Na		ICP-AES	EDS	ICP-AES	EDS	ICP-AES	EDS	ICP-AES	EDS
Na-H	0.32	1.26	-**	-2.540	2.798	-**	3.208	2.679	-0.422	-**
Na-K	1.40	0.42	-0.776	-0.914	0.238	-0.605	-1.315	-0.173	-**	2.217
Na-Ca	0.95	0.69	-2.201	-0.729	-1.633	_**	-**	-0.765	2.491	_**
Na-Mg	0.75	0.67	-2.081	-1.278	-1.457	0.103	_**	-0.927	-1.658	_**

*電気事業連合・核燃料サイクル開発機構, 2005

**Kdの値が負となり、陽イオン選択係数LogKdが算定不可

項目	Na に対する 陽イオン選択係数 LogKd Cat/Na	イオン 半径比率 Cat/Na
рН	0.89	0.322
Na (mM)	0.00	1.000
K (mM)	0.44	1.398
Ca (mM)	-*	0.949
Mg (mM)	0.38	0.754

表 4-3-7 純水飽和カラムにおける陽イオン選択係数

*カラム通水試験において、純水飽和カラムに流入し た Ca より流失した Ca の方が多く、Kd の値が負 となり、Ca の Na に対する陽イオン選択係数 LogKd が算定不可 ③ まとめ

多様な組成の地下水に対応して解析的な評価に適応できるイオン交換選択係数を得ることを目 的に、イオン強度を 0.025 から 0.5 まで 5 段階に変化させた NaCl、KCl、MgCl₂、CaCl₂単成分 系溶液と、イオン強度 0.5 及び 0.125 の NaCl-KCl、NaCl-CaCl₂、NaCl-MgCl₂、CaCl₂-MgCl₂混 合系溶液(二成分系)を用いて、Na型モンモリロナイト(クニピアF)との間のイオン交換反応 試験を実施した。交換平衡前後の固相の吸着イオン量は、液相のイオン濃度変化から算出する方 法と、モンモリロナイトを直接 FESEM-EDS 分析する方法の 2 通りにより求めた。

それぞれの試験、分析によって得られた陽イオン交換選択係数は一致しておらず、平成 31 年 度の試験の結果のみでは、イオン強度の高い条件でのイオン交換選択係数を決めることはできな かったが、得られたイオン交換選択係数についての既往の文献データと合わせて概観すると、イ オン交換選択係数は、イオン強度によって変化し、イオン半径の効果がある可能性もあると考え られる。これについて、今後の課題であり、試験によって確認していく。

水和した陽イオンの吸着によるモンモリロナイト膨潤を、陽イオンの浸透圧として考えると、 浸透圧以上の加圧状態にあったモンモリロナイトでは陽イオン交換挙動も大きく変化することに なる。今後検討すべき課題としては、

● 一軸加圧状態のイオン交換と膨潤挙動の観察

● 吸着した陽イオンの水和構造と、陽イオン活量の推定

などが挙げられる。これらは、ベントナイトの加圧状態、積層状態と、陽イオン分配係数の間の 関係を明らかにするために必要である。

イオン交換選択係数として希薄な溶液で求めた値は、最大値に近いものであり、海水系地下水 条件においては、それらの値よりも小さなイオン交換選択係数で評価することができると思われ る。すなわち、Na型モンモリロナイトへのNa以外の陽イオンの取り込みは、予想値よりも小さ く、結果として緩衝材の膨潤特性の低下の程度も大きくないことが推測される。4-2-2(2)①で 整理した沿岸部における地下水の化学組成を参考にイオン強度や陽イオン濃度等の試験条件に考 慮する必要がある。今後さらに試験を行い、条件の設定や分析方法等を考慮して検討を進める必 要がある。

(5) 圧縮ベントナイトへの浸潤とイオン交換反応の進展についての解析的評価

1)背景と目的

沿岸部の地下水組成には多様なバリエーションがありうるため、緩衝材には再冠水時に様々な イオン組成・強度の地下水が浸潤する可能性がある。このとき、緩衝材層間陽イオンは、既往の 検討や先の実験により示されたように変化すると考えられる。緩衝材に様々なイオン組成・強度 の地下水が浸潤する過程では、地下水中の陽イオンが緩衝材中のベントナイトと交換しながら移 行する。この過程を詳細にモデル化するには、水の飽和 - 不飽和浸透流およびイオンの移流分散 モデルを基本として、ベントナイトの陽イオン交換を考慮する必要がある。

緩衝材の浸潤挙動のモデル化には、これまで主として蒸留水または人工海水を通水溶液として おり、多様な組成の塩水系地下水の浸潤を想定したモデル化は、まだ十分に行われていない。本 検討では、様々な組成が想定される塩水環境下での再冠水挙動の予測手法に用いることを目的と して、圧縮ベントナイト試験体に海水組成を考慮した水溶液を透水させた場合のイオン交換の進 行や間隙水組成の変化等を解析的に予測する手法について検討した。

2)解析モデルの検討

陽イオン交換を伴うベントナイトの浸潤挙動は、基本的に水の飽和一不飽和浸透流と陽イオン 交換を考慮した移流分散との連成現象であり、その支配方程式に関する理論的検討は、これまで 多くの研究がなされてきた。この支配方程式の導出については、Appendix IXに示す。なお、支配 方程式のパラメータのうちイオン交換選択係数については、液固比の大きい分散系では現象のモ デル化が進んでいるものの、液固比の小さい圧縮系では、まだ現象の理解が不十分な点がある。 この点については、本年度実施したイオン交換選択係数の検討結果を参考に設定することとした。 また、間隙水や交換サイトのイオン組成が透水係数に与える影響のモデル化に関して、Appendix IXに示すように既往の研究結果を整理した。その結果から、モデルの複雑さと実用性のバランス を考慮して、水は膨潤したモンモリロナイトの層間を流れるものとし、層間の透水性を、交換サ イトに吸着したイオンや最大の膨潤体積ひずみによって決まる層間距離dの関数としたモデル (Komine、2008;小峯、2008、以下 Komine モデルと呼ぶ)を基にすることとした(このモデル の詳細は、Appendix IXに示す)。同モデルでは、透水係数が陽イオンごとの透水係数の加重平均 により求められ、イオン交換が透水係数に及ぼす影響を考慮できる。

3)解析モデルの設定

本年度は、飽和状態の Na 型ベントナイトに塩水が侵入したときの陽イオン交換と透水係数の 変化を解析的に予測するためのモデルの実装を行った。ベースとなる解析コードには、 PHREEQC-Transを用いた。同コードは、飽和浸透流および移流分散と地球化学的反応の連成解 析機能を有しており、飽和浸透流下での陽イオン交換を伴う移流分散をシミュレート可能である。 また同コードには、タイムステップごとの地球化学的反応の結果に基づいて透水係数を変化させ る機能があるため、Komine モデルも実装して用いることにした。

4) カラム通水試験の解析的評価

① 概要

前節で実装した解析コードを用い、4-3(3)項の塩水を通水させるカラム試験と同様の条件での 解析を行い、流出液の陽イオン濃度および pH の変化をシミュレートした。透水係数については、 Komine モデルで計算されるイオン種ごとの透水係数の値の違いが、Na イオンが吸着している状 態を基準として-4%~+9%の範囲であり、本年度の海水の濃度をパラメータとした解析の設定 では、層間陽イオンの変化は透水係数に影響をほとんど及ぼさないと考えられるため、本年度の 解析の検討対象とはしなかった。

2 解析用メッシュ

解析次元は一次元とし、全長はカラム通水試験と同じ 10mm とした。これを 10 等分に領域分 割し、解析コード用のメッシュを作成した。

③ 解析条件

ここには、解析条件を主に示し、解析条件設定の方法や根拠の詳細は Appendix IXに示す。

浸透流及び移流分散解析用のパラメータは、表 4-3-8 に示すとおりである。モデルの水理境界 条件は、流入側である下端の水圧を試験で設定した(ゲージ圧)2.5MPa で一定とし、上端を大気 圧で一定とした。溶質濃度の境界条件については、流入側である下端を試験で設定した流入溶液 の化学組成で一定とし、溶液を切り替えた時点で変更した。また、上端は濃度勾配一定とし、上 端に達した溶液組成がそのまま流出するものとした。

通水カラム内の化学組成は、鉱物組成と溶液組成からなる。Na 型ベントナイト(クニゲル V1) に含まれる鉱物組成を設定するにあたり、溶解・沈殿を考慮するものとしないものとに分類した。 また、前者については、更に化学平衡を仮定するものと速度論的溶解を考慮するものとに分類し た。その結果を表 4-3-9 に示す。

溶解・沈殿を考慮する鉱物として、モンモリロナイト、方解石、黄鉄鉱を選定し、速度論モデ ルには、PHREEQC Ver.2 (Parkhurst and Appelo、1999) 及び Ver. 3 (Parkhurst and Appelo、 2013)に付属する熱力学データベースである phreeqc.dat 中のものを使用した (Plummer et al.、 1978; Williamson and Rimstidt、1994)。

イオン交換サイトのイオン交換選択係数には、本年度実施したバッチ試験の結果の中から、な るべく値のばらつきが小さいものを用いた。但し、このイオン交換選択係数は、前節で述べたよ うにさらに検討が必要であり、本年度は解析方法の検討を行うための仮の設定である。具体的に は、前掲表 4-3-6 に示すイオン強度(IS) 0.5 未満の範囲の単成分系の試験の、ICP-AES による 分析結果に基づく Kd 値を用いた。ただし、前掲表の値は Vanselow の選択係数(Vanselow、1932) に相当するものであり、PHREEQC-Trans では、電荷分率をベースにした Gaines & Thomas(G&T) の選択係数(Gaines and Thomas、1953)の方が扱いやすいことから、これに変換した値を用いた。 解析に使用した G&T の選択係数を表 4-3-10 に示す。

初期鉱物組成は表 4-3-11 に、初期溶液組成は表 4-3-12 に、初期のイオン交換サイトのイオン 種組成は表 4-3-13 に示すとおりである。表 4-3-11 には、初期空隙率の計算に用いた式量及び密 度も併せて示した。

表 4-3-8 浸透流及び移流分散解析用のパラメータ

初期透水係数(m/s)	初期有効間隙率	分子拡散係数(m²/s)	分散長(m)
$2.05 imes 10^{-12}$	0.631	$2 imes 10^{-12}$	10-4

表 4-3-9 Na 型ベントナイトの鉱物組成とモデル上の溶解・沈殿の扱い

鉱物名	組成 (%)	溶解・沈 殿の考慮	化学平衡・ 速度論の別	備考
モンモリロナイト	59		化学平衡	平衡定数を小さくした
方解石(カルサイト)	4	する	法由补	phreeqc.dat の速度論モデ
黄鉄鉱(パイライト)	1		述及論	ルに係数を掛けて使用
石英(玉髄を含む)	30	1 7211		_
長石	6	U/2 V '		_

表 4-3-10 解析に使用したイオン交換選択係数

	Ca/Na	K/Na	Mg/Na
選択係数 LogKd(G&T)	-1.562	-0.5367	-1.079

表 4-3-11	解析における初期鉱物組成

鉱物名	化学式	式量 (g/mol)	密度 (g/cm3)	初期濃度* (mol/L)
Na モンモリロナイト	$Na_{0.33}Al_{2.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2$	367.55	2.73	1.0652
方解石(カルサイト)	CaCO ₃	100.09	2.71	0.3996
黄鉄鉱(パイライト)	FeS_2	119.11	5.13	0.0833

* 空隙を含む単位体積当たりの量

表 4-3-12 解析における初期溶液組成

陽イ	オン	陰イオン・その他		
親種	初期濃度* (mM)	親種	初期濃度* (mM)	
H (pH)	8.654	Cl	6.363E-1	
Na	5.851E-1	S(6)	1.028E-2	
Ca	1.254E-3	C(4)	1.289E-1	
K	2.028E-1	Si	8.648E-3	
Mg	2.502E-3	O(0)	6.121E-1	
Fe	4.638E-3			
Al	4.560E-3			

* 溶液の濃度

表 4-3-13 解析におけるイオン交換サイトの初期イオン種組成

化学式*	初期濃度** (mol/L)	化学式*	初期濃度** (mol/L)
NaX	4.892E-1	KX	4.926E-2
CaX_2	1.497 E-2	MgX_2	9.094E-2

* イオン交換サイトを X⁻¹で表したときの組成式 ** 空隙を含む単位体積当たりの量

④ 解析結果と考察

(a) 流出側における pH ならびに主要陽イオン

流出側における pH の変化を図 4-3-15 に、主要陽イオン (Na、Ca、K および Mg)の濃度変化 を図 4-3-16 に示す。これらの図には、カラム通水試験での流出液の実測値を示すとともに、流入 側境界条件として設定した値をプロットした。また、図 4-3-17 には、解析により得られたカラム 下流端(上端)におけるベントナイトのイオン交換サイトのイオン種別の占有割合(電荷当量で 表示)の変化を示す。

流出側での pH およびイオン濃度は、カラム内でのイオン交換や化学反応が流入側の溶液濃度 に対して顕著なものでなければ、各溶液の通水期間の終わりには流入側の値に近くなると考えら れる。解析結果のグラフによると、pH および各イオンの濃度は、後半(2 倍希釈海水(50%SW) の通水)以降は、やや急激な変化を示した後にほぼ一定となっており、これ以降は、カラム内の ベントナイトの化学的状態、具体的にはイオン交換サイトの状態や鉱物の溶解沈殿反応がほぼ定 常になったと判断される。試験の実測値も、K および Mg を除いてはそのような傾向となってお り、さらに K および Mg についても、50%SW の通水の最終段階ではほぼ流入側溶液組成になっ ていることから、この濃度海水の通水以降は、ベントナイトの化学的状態はほぼ定常にあると判 断される。

なお、50%SW の通水を開始した直後には、解析結果において pH およびイオン濃度に急激な 変化がある。その原因は、図 4-3-17 に示すイオン交換サイトの状態変化で説明可能である。すな わち、50%SW には大量の Na イオンが含まれるため、イオン交換サイトは Na イオンでほぼ置換 されることになるが、その過程が pH およびイオン濃度の変化として短期間だけ現れたものであ る。

50%SW の通水以前、すなわち、蒸留水や10倍希釈海水(10%SW)の通水時には、陽イオン 濃度の実測値と解析結果に差異がみられる。これは、陽イオン交換選択係数の設定が実際と異な っていたことと、カラム内に残留していたベントナイト含有のイオンの影響を受けていたためと 考えられる。これらの点については、今後適切な値の設定により、改善を図る必要がある。なお、 この期間においても、pH は実測値と解析結果が整合している。このことから、カルサイトおよび パイライトの溶解速度を適切に設定すれば、実測値の pH 変化を再現可能であることが示された と言える。ただし、この結果をもって、解析の設定がカラム内の鉱物溶解を真に表現していたと いうことはできず、例えば炭酸濃度の測定など、その他の実測値により検証すべきであると考え られる。

なお、100%SW を通水した後、試験においては透水係数が2オーダー以上大きくなったのは、 100%SW を通水した後の透水係数の変化が、イオン交換とは別のメカニズムによって生じたため と推察され、具体的には、イオン強度の増大によるモンモリロナイト層間距離の縮小と、層外間 隙の増大が想定される。これについては、田中らのモデル(田中ほか、2009)が適用できる可能 性があり、今後の課題である。

235



図 4-3-15 カラム通水試験における流出液の pH 実測値とシミュレーションによる 計算値との比較



図 4-3-16 カラム通水試験における流出液の Na 濃度、Ca 濃度、K 濃度、Mg 濃度の 実測値とシミュレーションによる計算値との比較



イオン交換サイトのイオン種の割合

⑤ まとめ

圧縮ベントナイトに海水組成を考慮した水溶液を通水させたときのイオン交換の進行、間隙水 組成の変化および透水係数の変化を解析的に予測する手法について検討した。解析手法としては、 水の飽和 - 不飽和浸透流と陽イオン交換を考慮した移流分散の連成解析を用いた

この解析コードを用いて、海水を用いて濃度を段階的に変化させながら通水させる試験(4-3 (3)項の試験)と同様の条件での解析を行い、流出液のpH およびイオン濃度の変化をシミュ レートした。解析において、パラメータの一つであるイオン交換選択係数には、本年度のバッチ 試験(4-3(4)項の試験)のうち、イオン強度 0.5 未満の単成分系で実施され、ICP-AES による 測定から得られた値を用いた。なお、流出液のpH 変化を再現するため、ベントナイトに含まれ るカルサイトとパイライトの速度論的溶解を考慮した。

解析結果の pH は、10 倍希釈海水の通水までは実測値の変化をほぼ再現した。このことから、 実測値の pH 変化がカルサイトとパイライトの溶解により説明可能であることが示された。一方、 この期間の陽イオン濃度の実測値と解析結果には、差異がみられた。この原因として、陽イオン 交換選択係数の設定が実際と異なっていたことや、陽イオンの濃度変化がカラム内に残留してい たベントナイト含有のイオンの影響を受けていたことなどが考えられる。これらの点については、 今後適切な値の設定により、改善を図る必要がある。

なお、解析結果から、2 倍希釈海水を通水した後は、カラム内のベントナイトの化学的状態が ほぼ定常となり、イオン交換反応等が進行していないことが示唆された。試験結果も同様の変化 を示していることから、同様の状態にあったと推察される。

試験では実濃度の海水を通水した後、透水係数が2オーダー以上大きくなったが、これは、海 水を通水した後の透水係数の変化が、イオン交換とは別のイオン強度等によって生じたためと推 察され、これを考慮したモデルの実装が必要と考えられた。

以上のことから、圧縮ベントナイトに様々な組成の海水系地下水が浸潤した際の挙動を解析的 に予測する手法として、今回実施した飽和状態についての解析コードが適用できると考えられる。 今後の課題としては、実験的検討を通じたイオン交換選択係数の適切な設定、イオン強度が高い 水が浸潤した際の構造変化を考慮できるモデルの実装、不飽和状態での浸潤過程のモデルの実装、 並びに同時に起こる地球化学反応のモデルの開発などが挙げられる。

(6) 緩衝材の機能変化に係るデータ拡充のまとめ

本事業は、沿岸部に賦存する地下水の組成を念頭に、溶存陽イオンの力学的および化学的な影響を系統的に把握し、多様な塩水系地下水の組成に対応して緩衝材の挙動を評価できる知見を得ることを目的にして、緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握試験、塩水系地下水成分による緩衝材の透水性に関する検討、イオン交換選択係数に関する検討、圧縮ベントナイトへの 浸潤とイオン交換反応の進展についての解析的評価を実施した。

緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握試験では、イオン交換水、Na⁺イオン、K⁺イ オンを対象に乾燥密度を1.2、1.6、2.0Mg/m³の供試体によって実施した。初期有効ベントナイト 乾燥密度と最大膨潤率の関係の線形性が既往検討(田中ほか、2005;戸井田ほか、2005)より低 く、その理由は現状では特定できていない。今後の統一的な条件下での膨潤率試験による更なる データ拡充が重要と考えられる。 塩水系地下水成分による緩衝材の透水試験では、ベントナイトを純水で飽和させた後、純水、 10 倍希釈海水、2 倍希釈海水及び海水を順に通水する試験を実施した。試験では透水係数も取得 し、2 倍希釈海水までの通水では透水係数には変化がほとんど見られず、実海水では透水係数が 急激に上昇することがわかった。イオン交換反応の進行をみるために、排水として回収した溶液 中の陽イオン組成を測定した。回収溶液に、当初から陽イオンの流出が見られ、イオン交換とと もに、随伴鉱物等からの陽イオンの溶出が起こっていることが示されたが、Mg 濃度のみが 2 倍 希釈海水までほとんど溶出しなかった。この通水試験で得られた回収溶液のイオン濃度の変化は、 圧縮ベントナイトへの浸潤とイオン交換反応の進行については解析的に再現できるかを試みた。

イオン交換選択係数に関する検討では、多様な組成の地下水に対応して解析的な評価に適応で きるイオン交換選択係数を得ることを目的に、イオン強度を0.025から0.5まで5段階に変化さ せたNaCl、KCl、MgCl₂、CaCl₂単成分系溶液と、イオン強度0.5及び0.125のNaCl-KCl、NaCl-CaCl₂、NaCl-MgCl₂、CaCl₂-MgCl₂混合系溶液(二成分系)を用いて、Na型モンモリロナイト(ク ニピアF)との間のイオン交換反応試験を実施した。交換平衡前後の固相の吸着イオン量は、液 相のイオン濃度変化から算出する方法と、モンモリロナイトを直接FESEM-EDS分析する方法の 2通りにより求めた。それぞれの試験、分析によって得られた陽イオン交換選択係数は一致して おらず、平成31年度の試験の結果のみでは、イオン強度の高い条件でのイオン交換選択係数を 決めることはできなかった。得られたイオン交換選択係数についての既往の文献データと合わせ て概観すると、イオン交換選択係数は、イオン強度によって変化し、イオン半径の効果がある可 能性もあると考えられるが、これについて、今後試験によって確認していく。

圧縮ベントナイトでのイオン交換反応の進行についての解析的評価では、上記の間隙水や交換 サイトのイオン組成を移流分散および地球化学反応解析によって、上記の海水のカラム通水試験 と同様の条件での解析を行った。流出液の pH およびイオン濃度の変化をシミュレートし、pH に ついては、10 倍希釈海水の通水までは実測値の変化をほぼ再現した。しかし、この期間の陽イオ ン濃度の実測値と解析結果には差異がみられ、この原因として、陽イオン交換選択係数の設定が 実際と異なっていたことや、陽イオンの濃度変化がカラム内に残留していたベントナイト含有の イオンの影響を受けていたことなどが考えられる。これらの点については、今後適切な値の設定 により、改善を図る必要がある。一方、試験では実濃度の海水を通水した後、透水係数が2オー ダー以上大きくなったが、これは、この透水係数の変化が、イオン交換とは別のメカニズムによ って生じたためと推察され、これを考慮したモデルの実装が必要と考えられた。以上のような結 果により、今後の課題としては、実験的検討を通じたイオン交換選択係数の適切な設定、イオン 強度が高い水が浸潤した際の構造変化を考慮できるモデルの実装などが挙げられる。

以上の成果をもとに、今後の沿岸部の地下水環境における試験データの拡充と挙動のモデル化、 解析手法への反映を進める。試験データの取得にあたっては、別途整理が進められている地下水 の化学組成データを参考にすることで、多様な地下水への対応する緩衝材の機能に関するデータ を効率的に取得していく。 参考文献

- Gaines, G.L.Jr. and Thomas, H. C. (1953) : Adsorption Studies on Clay Minerals. II. A Formulation of the Thermodynamics of Exchange Adsorption, The Journal of Chemical Physics, Vol.21, No.4, pp.714-718, 1953.
- Komine, H (2008) : Theoretical equations on hydraulic conductivities of bentonite-based buffer and backfill for underground disposal of radioactive wastes., J. Geotech. Geoenviron. Eng., 134(4), pp. 497-508, 2008.
- Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J.(1999) : User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations., U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 99-4259, 312p, 1999.
- Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J.(2013) : Description of input and examples for PHREEQC version 3—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations, U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 497 p., 2013.
- Plummer, L.N, Wigley, T.M.L. and Parkhurst, D.L.(1978) : The kinetics of calcite dissolution in CO2–water systems at 5° C to 60° C and 0.0 to 1.0 atm CO2, American Journal of Science, 278, pp.179-216, 1978.
- Vanselow, A.P. (1932) : Equilibria of the base exchange reactions of bentonites, permutates, soil colloids and zeolites, Soil Sci., 33, 95~113, 1932.

Williamson、M.A. and Rimstidt、J.D. (1994): The kinetics and electrochemical rate-determining step of aqueous pyrite oxidation.、Geochimica et Cosmochimica Acta、58、pp.5443-5454、1994. 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、サイク ル機構技術資料、JNC TN8430 2004-005、86p、2005.

- 小林一三、戸井田克、笹倉 剛、太田秀樹 等(2007):含水比線と等飽和度線を用いた締固めベン トナイトの圧縮・膨潤挙動の解釈、土木学会論文集 C Vol.63 No.4、1065-1078、2007.
- 小峯秀雄(2008):各種ベントナイトの透水係数に対する透水係数理論評価式の適用性、土木学会 第 63 回年次学術講演会(平成 20 年 9 月)講演要旨集、CS05-13、pp.193-194、2008.
- 田中幸久、長谷川琢磨、中村邦彦(2009):海水の濃度が各種ベントナイトの透水係数ならびに 膨潤圧に及ぼす影響のモデル化、土木学会論文集 C Vol65、No.1、66-84、2009.
- 田中幸久、中村邦彦(2005):海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響、土木学会論文集、No.806/III-73、pp.93-111、2005.
- 戸井田克、笹倉 剛、横関康祐、小林一三、渡邉賢三、芦澤良一(2005):人工バリア材料の力学 的物性取得試験、JNC TJ8400 2004-036、2005.
- 電気事業連合、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.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター、地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術:人 エバリア長期性能評価技術開発人工バリアの長期挙動の評価、平成 24 年度 報告書、経済産業

省資源エネルギー庁放射性廃棄物対策課 HP、2013.

- 原子力環境整備促進・資金管理センター、高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発 事業、処分システム工学確証技術開発処分システム工学確証技術開発人工バリア品質/健全 性評価手法の構築 – 緩衝材、平成29年度報告書、経済産業省資源エネルギー庁放射性廃棄物 対策課 HP、2018.
- 核燃料サイクル開発機構、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地 層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊3地層処分システムの安全評価、JNC TN1400 99-023、1999.
- 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、高レベル放射性廃棄物等の 地層処分に関する技術開発事業、ニアフィールドシステム評価確証技術開発、平成 30 年度 報 告書、経済産業省資源エネルギー庁放射性廃棄物対策課 HP、2019.
- 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:高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 沿岸部処分システム 高度化開発 平成 27 年度~平成 30 年度 取りまとめ報告書、2019.

4-4 緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充

(1) はじめに

1)背景および目的

沿岸部および沿岸海底部(以下、沿岸部)は特有の地質・地下水環境であり、地層処分場とし て想定した場合、少なからず地下水の海水成分を考慮する必要がある。地層処分場で使用が想定 される人工バリアのうち、緩衝材について、地下水の動きを抑制する止水性、各バリア材との隙 間を閉塞させる自己シール性の観点から、透水係数が低く膨潤率の大きい Na 型ベントナイト (あ るいは砂・Na 型ベントナイト混合土) に関する多くの研究がなされている (例えば、小峯・緒方、 1999)。一方で、ベントナイトの膨潤変形試験中に試料に供給する溶液を純水と人工海水の場合 で比較した研究では、Na 型ベントナイトは人工海水濃度が大きくなるほど最大膨潤率が小さく なること(田中・中村、2004)や、またイオン濃度の影響をうけやすいことなどが知られている (直井ほか、2005)。このため、Na型ベントナイトに加え、代替えオプションとなり得る海水と の平衡を考慮したイオン型の異なるベントナイト(例えば、層間陽イオン組成が主に 2 価の Ca 型/Ca 型化ベントナイト等)に着目することも、処分場の頑健性を高める上で重要と考えられる。 沿岸部の地下水環境が塩分を含むことを考慮し、また、イオン型の異なるベントナイトを用いた 場合において、人工バリア性能評価上の不確実性としては、①膨潤性が異なると予想される緩衝 材中のオーバーパックの変位(移動)挙動(緩衝材とオーバーパックの力学的相互作用)、②オー バーパックの変位に伴い緩衝材中に生じるせん断帯の自己修復性、③物質移行-化学反応におけ る二次生成物種の想定と沈殿による効果、等が考えられるが、特にイオン型の異なるベントナイ トではあまり検討されていない。

オーバーパックの変位挙動は、周辺材料(緩衝材や岩盤)との複合挙動であり、周辺材料の力 学特性に強く依存する。また、不飽和から飽和に至る再冠水期は数十年にわたる。このため、オ ーバーパックの変位とそれにともなう緩衝材の変形に関する力学的相互作用は模型試験によって 現象を把握する必要があるが、イオン型の異なるベントナイトを使用したり沿岸部の地下水環境 を考慮した模型試験の事例は見当たらず、知見がない。また、オーバーパックの変位や腐食膨張 等にともない緩衝材に生じるせん断帯の物質移行特性、また化学的雰囲気次第では、二次生成物 のクロッギングが物質移行を変化させる可能性については、模型試験では捉えきれず、要素試験 の難易度も高い。

このため本研究では、沿岸部特有の地下水環境下であることを考慮した人工バリア(緩衝材) 性能評価に資する緩衝材仕様に関するデータの拡充を行うことを目的とする。取得したデータ等 を通じて、沿岸部の多様な地下水環境条件に柔軟に対応できる緩衝材の材料仕様に関する定量的 な評価手法の整備を目指す。

2) 試験計画および実施内容

① 本研究の中長期的な目的(試験計画)

本研究の中長期的な目的は、前述したとおり、以下の2点である。

- 沿岸部特有の地下水環境下であることを考慮した人工バリア(緩衝材)性能評価に資するデ ータの拡充を行う。
- 取得したデータ等を通じて、沿岸部の多様な地下水環境に柔軟に対応できる緩衝材の材料仕

様に関する定量的な評価手法の整備を目指す。

1つ目について、具体的には、オーバーパックの変位挙動と緩衝材の変形の相互作用を評価す るための物理模型試験と、緩衝材に生じるせん断等の局所現象を評価するための要素試験を実施 することである。

2つ目については、言い換えれば、海水(塩水)環境下における人工バリア(緩衝材)の機能 変化を把握し、水質変化に起因する不確実性の低減が見込め、設計へフィードバックできる材料 仕様選定に資する知見を得ることである。

これらの目的達成に資するための試験計画を表 4-4-1 に示す。

本年度の実施内容

試験計画に基づき、本年度の実施内容は以下の通りである。

要素試験に関しては、試料の条件を定めると共に、せん断透水試験を実施するための検討を行い、試験環境を整備する。具体的には、試験試料の調製として、Na/Ca 型ベントナイトを調達し、 層間陽イオン組成などの基本的な性質を調べる。また、今後実施するせん断透水試験(自己修復 性試験)のために、人工海水を用いた力学予備試験(膨潤圧試験・透水試験・三軸圧縮試験)を 行い、ここで得られる基礎物性を含めた透水性や強度変形特性を参考に、せん断透水試験を実施 するための準備を行う。

模型試験に関しては、塩水を用いた模型試験を実施できる環境を整備するとともに、遠心載荷 装置を用い金属容器に緩衝材とオーバーパックを封入した条件、すなわち緩衝材の変形を拘束し た単純模型試験を実施し、緩衝材との力学的相互作用を考慮したオーバーパックの変位挙動を把 握する。具体的には、塩水に対応した試験環境の整備として、遠心載荷装置の試験系(送水ポン プ、配管、容器)の部品を交換し、試験環境を整備する。また、単純模型試験を実施するために、 試料の条件や境界条件を検討し、圧縮整形された Na/Ca 型ベントナイトにオーバーパックを封 入、人工海水を用い、再冠水下におけるオーバーパックの変位挙動を把握する。

		FY H31(R01) (2019)	FY R02 (2020)	FY R03 (2021)	FY R04 (2022)	FY R05 (2023)
要素試験	試験環境整備・試験 手順の検討					
	透水性に対する海 水影響の検討					
	力学的観点からの 自己修復性の検討					
	化学的観点からの 自己修復性の検討					
模型試験	試験環境整備					
	変形拘束条件の単 純模型試験					
	応力拘束条件の複 雑模型試験					

表 4-4-1 本研究に関わる全体の試験計画

(2) 要素試験

1) 要素試験の背景および目的

沿岸部で地層処分場を想定した際、化石海水を含む様々な組成の海水が再冠水の初期段階から 緩衝材に浸透することが想定される。人工バリア(緩衝材)の性能に関わる沿岸部特有の課題と して、緩衝材の候補となるベントナイトは、海水により高イオン強度による凝集やイオン交換反 応が生じ、工学的性質に変化をもたらす。人工海水や幌延地下水を用いた室内試験は数多く実施 されているが、圧縮ベントナイトにおけるイオン交換の程度(反応領域やその拡大速度)が不明 であること、イオン強度とイオン交換による影響を区別することが困難であること、高濃度の海 水影響に関するデータが少ないこと、などの点で設計や性能評価に用いる知見が不足している。

また沿岸部の地下水環境では、浸透圧膨潤を期待しにくい高イオン強度条件、あるいは、拡散 二重層の発達を期待しにくい2価の層間陽イオン組成比率が高まることが想定される。緩衝材に 期待される性能には自己修復性があるが、オーバーパックの変位や腐食膨張も考慮すると、比較 的大きなせん断変形後のローカルな透水性変化も短絡経路の観点からは重要である。一方で、変 形を受けたベントナイトの透水性変化に関する知見は乏しく、特に、粘土のせん断方向に沿った 透水性・自己修復性の評価はほとんど行われていない。加えて、せん断変形により仮にローカル な透水領域が形成される場合、力学-化学の観点から自己修復の可能性についての基礎的な知見 が乏しい。

このため要素試験では、沿岸部の地下水化学環境に対して設計で柔軟に対応できること、また、 設計で対応できる範囲を明らかにすることを念頭に、緩衝材の低透水性や自己修復性に関するデ ータと評価方法を整備する。また、海水影響による性能変化の幅・不確実性の少ない材料仕様オ プションに結びつけることも視野に入れて検討を行う。

具体的には、飽和初期段階から海水が圧縮ベントナイトに浸透することで、高イオン強度によ る凝集やイオン交換反応が進行すると考えられることから、各々の影響を区別した上で、ベント ナイトの工学的性質(低透水性、自己修復性等)の変化を明らかにする。平成 31 年度は、第一 に、供試体条件の考え方について検討した。第二に、海水環境下における圧縮ベントナイトの透 水性と自己修復性を調べるための試験環境整備に先駆けて、予備的検討を行った。

2) 試験方法・装置

はじめに、供試体条件の考え方について述べる。圧縮ベントナイトに海水が浸潤すると、イオ ン強度に応じた凝集とイオン交換反応が同時に進行する。特に後者については、海水の浸潤面か ら順にイオン交換が生じ、供試体内においてモンモリロナイトの交換性陽イオン組成に不均一性 が生じやすいと予想される。間隙水水質の変動が想定される場合には、イオン交換後の状態に応 じて、その時の膨潤性や透水性が異なってくると考えられる。沿岸海底部では、処分で使用され るベントナイトに対して大量の海水が存在し、長期にわたって圧縮ベントナイトに海水が浸透す ると考えられる。こうした想定のもと、要素試験で主に対象とする状態としては、海水とベント ナイトのイオン交換反応が平衡状態に至った時点とした。あらかじめ海水を用いてイオン交換処 理を施した試料を用い、イオン比を一定とした上で海水濃度をパラメータとすることにより、イ オン交換反応の進行はほぼ生じない状態において、イオン強度の影響に焦点を絞って検討する。 一方で、海水の通水初期における透水性やイオン交換も比較のために重要である。これについて は、試験環境整備のための基礎データにすることを兼ねて、予備的検討として進める。供試体の 密度条件については、我が国において数多くの調査実績がある仕様として、クニゲル V1-砂混合 土(乾燥質量比 7:3)の乾燥密度 1.6 Mg/m³を基本ケースとした。後述するとおり、クニゲル V1 以外のベントナイトも使用するため、ベントナイトの種類が異なる場合にも出来る限り平等な条 件で比較検討を行えるように、上記基本ケースの有効モンモリロナイト密度に統一することした。

予備的検討として透水係数、膨潤圧、三軸せん断特性を調べた。透水係数および膨潤圧の測定 で使用した装置の構造を図 4-4-1 に示す。海水を使用するため装置の素材はステンレス製である。 直径 60 mm、高さ 20 mm の円柱形供試体を直接リング内にて締固め、高分子フィルターとポー ラスメタルを供試体の両端面に接触させた状態で試験セルを組み立てた。配管等に空気が残留す ることを避けるため、真空ポンプで減圧した状態から、溶液を供試体下部から供給した。供試体 上部側から流出水を確認してから、片面給水状態として背圧(ここでは給水圧)を高め、ビュレ ットにより吸水量を測定した。この時の圧力増分と吸水量を用いて、河野・西垣(1982)の方法 により、供試体の飽和度を推定した。推定された飽和度が 99%以上であることを確認した後に、 通水を再開し、透水係数を測定した。飽和度の推定と透水係数の計算については、渡邊ほか(2013) に記載されているので参照されたい。透水係数を取得した後、通水を止め、間隙水圧を大気圧と ほぼ同等とした状態において、平衡膨潤圧を測定した。ここでは、通水初期における海水影響を 把握する目的により、速やかに供試体を解体し、イオン交換の程度を調べるため抽出陽イオン分 析を行った。供試体を高さ方向に三分割し、それぞれアルコール洗浄の後に SFSA 改良法(佐治 ほか、2005)により抽出陽イオン量(Na、K、Ca、Mg)を測定した。

三軸せん断特性を調べるために使用した装置の概略を図 4-4-2 に示す。海水を使用するため、 海水と触れる部品類はステンレス製である。供試体の直径 20 mm、高さ 40 mm の円柱形である。 供試体の飽和に時間を要するため、ステンレス製の飽和セルを用いて、溶液に浸漬させることで 供試体の飽和度を予め高めた。浸漬のための人工海水は 1.5 L であり、この時の液固比は 78~106 となる。飽和セルから供試体を脱型して直ちに寸法と湿潤質量を測定し、三軸圧縮試験装置にセ ットした。供試体の両端面とポーラスメタルの間には高分子フィルターを設置した。試験装置を 組み立ててから即時に、ゴムスリーブを介して、膨潤圧相当の拘束圧を等方的に供試体に作用さ せ、排水状態とした。これにより、供試体が膨潤変形することを抑制した。その後、背圧を 0.5 MPa 程度作用させ、間隙圧係数 B 値が 0.9 以上となることを確認した後、有効拘束圧 2 MPa ま で等方圧密を行った。圧密後、非排水条件のもと、ひずみ速度 0.01%/min により軸圧縮した。な お、供試体の間隙水と周辺水の水質が著しく異ならないように、飽和セルの脱型直前で使用され ていた浸漬溶液を用いて三軸圧縮試験装置の配管内を満たした。試験後は、透水-膨潤圧試験と 同様に抽出陽イオン量の分析を行った。

試料の基礎物性としては、土粒子の密度とメチレンブルー吸着量を測定し、密度の計算等に用 いた。土粒子の密度は、JISA 1202:2009「土粒子の密度試験方法」を参考にした。変更点として は、ベントナイトをイオン交換水に分散させた後、真空ポンプを用いて減圧することにより脱気 を行った。メチレンブルー吸着量は、JISZ 2451:2019「ベントナイトなどのメチレンブルー吸着 量の測定方法」により測定した。



図 4-4-1 透水 – 膨潤圧試験装置の概略



図 4-4-2 飽和セルおよび三軸圧縮試験装置の概略

3) 試料

本研究では、Na型ベントナイトとしてクニゲル V1 (クニミネ工業)を、Ca型ベントナイトと してクニボンド (クニミネ工業)を、混合用の砂として 50%粒径が約 0.2 mm のケイ砂を使用し た。本研究では、海水影響による性能変化の幅・不確実性の少ない材料仕様オプションに結びつ けることも視野に入れて検討を行うこととしている。海水に含まれる Mg イオンや Ca イオンと のイオン交換を考慮し、初期試料の状態において交換性 Mg イオンや交換性 Ca イオンが多いベ ントナイトに着目した。入手のしやすさから、ここでは主要な交換性陽イオンが Ca イオンとな るクニボンドを選択した。

要素試験には数ヵ月以上の試験期間を要することも想定されたことから、水質の安定性を優先 し、人工海水を使用することとした。具体的には、試薬としてマリンアート SF-1(大阪薬研)を 使用した。マリンアートの成分表を表 4-4-2 に示す。陽イオンについては Na が最も高く、次い で Mg である。

4) 試験条件

要素試験の全体計画としては、前述した供試体条件の考え方に基づき、表 4-4-3 に示す試験条件となる。有効モンモリロナイト密度を統一するため、各試料のモンモリロナイト含有率に応じて乾燥密度を調整することになる。予備試験においては、クニゲル V1 単体の乾燥密度 1.50Mg/m³ とクニボンド単体の乾燥密度 1.12Mg/m³を先行的に実施した(表 4-4-4)。海水の濃度は、予備試験では表 4-4-2 に示した標準濃度とし、今後、希釈率を変えることでイオン比を一定とした上で イオン強度を変えることとする。

イオン種	濃度(mg/L)	濃度(mmol/L)
Na	9860	429
Ca	402	10
K	346	9
Mg	1165	48
Al	9×10^{-4}	3×10 ⁻⁵
Fe	1×10-3	2×10^{-5}
SO_4	2596	27
Cl	17594	496
CO_3	134	2
Br	63	1
F	1.3	0.07
NH_4	2×10-3	9×10 ⁻⁵
Ι	6×10 ⁻³	$5 imes 10^{-5}$
В	8.7	0.81
Sr	7.1	0.08
Li	0.2	0.02
Mn	2×10^{-4}	3×10 ⁻⁶
Co	5×10^{-4}	8×10 ⁻⁶
W	1×10-3	6×10-6
Mo	1×10-2	1×10-4

表 4-4-2 人工海水 (マリンアート SF-1)の成分表

表 4-4-3 要素試験における供試体条件

試料	乾燥密度 (Mg/m ³)	有効モンモリロナイト 密度(Mg/m ³)	
クニゲル V1-砂混合土(7:3)	1.60	1.00	
海水平衡クニゲル V1-砂混合土 (7:3)	1.60	1.00	
クニボンド	1.12	1.00	
海水平衡クニボンド	1.12	1.00	
予備試験の種類	測定項目	クニゲル V1 単体	クニボンド 単体
----------	---------------------------------------	---------------	-------------
透水-膨潤圧試験	含水比(%)	12.1	17.8
	乾燥密度(Mg/m ³)	1.50	1.11
	有効モンモリロナイト 密度 (Mg/m ³)	1.13	1.00
三軸圧縮試験	含水比(%)	12.1	17.8
	乾燥密度(Mg/m ³)	1.48	1.11
	有効モンモリロナイト 密度 (Mg/m ³)	1.10	0.97

表 4-4-4 要素試験における供試体条件(予備的検討)

5)結果および考察

はじめに、クニゲル V1 およびクニボンドの基礎物性について述べる。各ベントナイトの土粒 子の密度とメチレンブルー吸着量を表 4-4-5 に示す。クニゲル V1 とクニボンドの土粒子の密度 はそれぞれ 2.769 Mg/m³ と 2.672 Mg/m³ であった。クニゲル V1 とクニボンドのメチレンブルー 吸着量は、81 mmol/100g と 122 mmol/100g であった。モンモリロナイト含有率を計算するため には、純モンモリロナイトのメチレンブルー吸着量で上述した値を除する必要がある。渡邊・横 山(2020) はクニピア F およびクニボンドから水簸した粒径 0.2×10⁻⁶m 以下画分のメチレンブ ルー吸着量を測定している。これを参考に、クニゲル V1 とクニボンドのそれぞれに含まれるモ ンモリロナイトのメチレンブルー吸着量を 140 mmol/100g および 150 mmol/100g と仮定して、 モンモリロナイト含有率を計算した。その結果、クニゲル V1 とクニボンドのモンモリロナイト 含有率はそれぞれ 57.9%と 81.3%と推定された。

透水係数とポアボリューム比(間隙体積に対する通水量)を図 4-4-3 に示す。通水量が少ない 段階から試験終了時まで、透水係数はほぼ一定の値で推移した。クニゲル V1 とクニボンドの透 水係数はそれぞれ 2.5×10⁻¹² m/s と 1.3×10^{-12} m/s であった。クニゲル V1 とクニボンドの平衡膨 潤圧はそれぞれ 651 kPa と 1063 kPa であった。透水-膨潤圧試験前後の試料の抽出陽イオン量 およびその割合を図 4-4-4 に示す。クニゲル V1 では、試験後には抽出 Mg イオン量の割合が増 え、一方、抽出 Na イオン量の割合が減ったことから、Mg と Na のイオン交換が進行したと考え られる。クニボンドでは、試験後には抽出 Na イオン量の割合が増え、一方、抽出 Ca イオン量の 割合が減ったことから、Na と Ca のイオン交換が進行したと考えられる。

圧密非排水三軸圧縮試験の結果を図 4-4-5 に示す。クニゲル V1 については、軸ひずみ 10%程 度で軸差応力の最大値を示し、その後、軸差応力はわずかに低下しながらほぼ一定値となった。 クニボンドについては、軸ひずみ 7%程度で軸差応力の最大値を示した後、軸差応力は 40%ほど 低下し、軸ひずみ 20%ではほぼ一定値となった。軸ひずみ 20%における軸差応力を有効拘束圧で 除して応力比を求めると、クニゲル V1 とクニボンドではそれぞれ 0.43 と 0.35 であった。有効 応力経路からは、せん断に伴い過剰間隙水圧が発生することにより、平均有効応力は低下するこ とが分かった。この傾向は、クニボンドよりクニゲル V1 の方が顕著であった。限界状態線の傾 きの参考値としては、クニゲル V1 とクニボンドではそれぞれ 0.52 と 0.40 であった。三軸圧縮 試験前後の試料の抽出陽イオン量およびその割合を図 4-4-6 に示す。クニゲル V1 では、試験後 には抽出 Mg イオン量の割合が増え、一方、抽出 Na イオン量の割合が減ったことから、Mg と Na のイオン交換が進行したと考えられる。クニボンドでは、試験後には抽出 Na イオン量の割合 が増え、一方、抽出 Ca イオン量の割合が減ったことから、Na と Ca のイオン交換が進行したと 考えられる。この傾向は、透水-膨潤圧試験の結果と同じであった。

252

測定項目	クニゲル V1	クニボンド
土粒子の密度 (Mg/m ³)	2.769	2.672
メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)	81	122
モンモリロナイト含有率 (%)	57.9	81.3

表 4-4-5 本研究で使用したベントナイトの基礎物性









図 4-4-4 透水 – 膨潤圧試験前後の試料の抽出陽イオン量



図 4-4-5 圧密非排水三軸圧縮試験の結果





図 4-4-6 三軸圧縮試験前後の試料の抽出陽イオン量

6) せん断透水試験容器の試作

予備的検討により得られた透水係数、膨潤圧、せん断強度を参考にすることで、任意のせん断 ひずみにおける透水量を測定可能なせん断透水試験容器(試験セル)を試作し、試験環境の整備 を行った(図 4-4-7)。

試作した試験セルでは、供試体の飽和過程において膨潤圧を測定することを可能とした。人工 海水を使用することと膨潤圧を考慮して、試験セルはステンレスを用いた。

今後、この試験で使用した供試体の状態を顕微鏡で観察する。この時、過度な乾燥により供試体の状態がせん断透水時と著しく異なる可能性が考えられたことから、電子顕微鏡の低真空モードにおいて気化が非常に遅い液体を試料に浸潤させて観察する方法を事前に検討した。今後は、検討した方法を用いて、せん断透水試験と供試体の分析を進める。

7)まとめ、および今後の課題

要素試験において主な対象とする状態は、ベントナイトが十分量の海水と接触を繰り返し、イ オン交換反応が平衡状態に至った時点とした。試料の準備としては、あらかじめ海水を用いてイ オン交換処理を施した試料を用いることとした。試料として Na 型および Ca 型のベントナイト を用いることから、比較のために供試体作製時には、有効モンモリロナイト密度を統一すること とした。溶液としては、市販の人工海水試薬を用い、イオン比を一定とした上で海水濃度を変化 させることとした。これにより、イオン交換反応の進行はほぼ生じない状態において、イオン強 度の影響に焦点を絞って検討を進めることができると考えた。一方で、海水の通水初期における 透水性やイオン交換も重要であることから、試験環境整備のための基礎データにすることを兼ね て、予備的検討を行った。具体的には、人工海水の通水初期段階における透水係数と平衡膨潤圧 を取得すると共に、試験前後の試料の抽出陽イオン量の分析を行った。また、人工海水により飽 和させた時の三軸せん断特性を調べ、ここでも同様に試験前後の試料の抽出陽イオン量の分析を 行った。いずれの試験においても、試験後には Na と Mg のイオン交換が進行していると考えら れた。

以上の結果を基に、緩衝材の低透水性や自己修復性に関するデータを取得するため、試験環境 の整備を進めた。

今後は、上述した考え方に基づいて、ベントナイト系材料の透水性や自己修復性に及ぼす海水 の影響を検討する。



図 4-4-7 試作されたせん断透水試験容器(赤枠内)

(3) 模型試験

1) 模型試験の背景および目的

緩衝材中に埋設される廃棄体(オーバーパック)について、閉鎖後初期の数十~百数十年にわ たる再冠水期間において緩衝材との力学的相互作用によって変位(移動)が生じる。オーバーパ ック下方からの再冠水を考えた場合、定性的には下部の緩衝材が膨潤することにより、緩衝材の 膨潤圧によりオーバーパックを上方に押し上げ、再冠水が進み上部の緩衝材に間隙水が達すると その膨潤圧により押し返され沈下する。オーバーパックの変位挙動は、周辺材料(緩衝材および 岩盤)との複合挙動であり直接的に影響し、周辺材料の力学特性に強く依存することが知られて いる(例えば、原子力環境整備促進・資金管理センター、2016)。このため、不飽和から飽和に至 る再冠水期のオーバーパックの変位とそれにともなう緩衝材(および岩盤)の変形に関する力学 的相互作用を、物理模型試験等の手法によって把握する必要がある。一方で、再冠水は数十百年 以上の期間と想定され、数十年単位の模型試験を実施することは現実的でない。

地盤工学分野において利用されている遠心力載荷装置は、実験試料に数十Gの遠心力を付加す ることができる装置である。同装置を利用した遠心力模型試験は、実物の1/nサイズの縮尺模型 を作製して nG 場で試験を行うことで、遠心力の効果(相似則)により縮尺模型上で実物と相似 な位置において同じ物理現象(応力、弾性変形、熱、地下水の移動など)や、ダルシー則を満た した場において時間を n²倍加速して現象を得る試験技術である。この技術を地層処分研究に適用 した中村・田中(2004)では、オーバーパックを Na 型ベントナイト中に封入した上で金属製の 容器に収納し、蒸留水および人工海水を間隙水としたオーバーパックの沈下挙動を把握する遠心 力模型試験が約40日間(実物換算時間約100年)実施されている。その結果、蒸留水と人工海 水ではオーバーパックの沈下が開始する時間や沈下量が大きく異なる結果が得られている。一方 で、膨潤特性の異なるイオン型の異なるベントナイトと人工海水を用いた試験は行われておらず、 沿岸部の塩水を含む環境でのオーバーパックの変位挙動(緩衝材との力学的相互作用)は不明で ある。

このため、本研究では、膨潤が Na 型ベントナイトとは異なるベントナイトを用い、不飽和~ 飽和期の数十年程度のオーバーパックの変位(移動)挙動の把握のために、相似則に基づく遠心 時間加速試験を実施する。

具体的には、沿岸部の地下水(塩水)を用いた遠心力模型試験を実施できる環境を整備すると ともに、中村・田中(2004)を参考に、Na型ベントナイトおよびイオン型の異なるベントナイト 緩衝材にオーバーパックを封入した状態でオーバーパックの変位挙動等を把握する遠心力模型試 験を実施する。

2) 試験装置

① 超長期遠心載荷岩盤実験装置

本研究で使用した遠心力載荷装置は、(一財)電力中央研究所所有の超長期遠心載荷岩盤実験装置(日鉄レールウェイテクノス社製)で、回転アームが4柱ビーム式(模型搭載側、カウンターウエイト側固定)、総質量約80t、最大有効半径3.2 mの装置であり、直径約10mのコンクリートピット内に格納している(図4-4-8)(Nishimoto et al.、2016)。本装置で付与できる最大遠心加速度は、静的条件で100G(167.2rpm)である。模型を搭載するプラットホームの面積は、2.64

m²(1.60 m×1.65 m)と同規模の遠心力載荷装置と比較して非常に広く、大型模型が搭載可能で ある。プラットホームには最大で150G・ton(100G 時に最大1.5ton)積載でき、任意の遠心加 速度で着座できる油圧着座方式を採用している。バランス機構は、長期間の運転を考慮し複雑な 制御を行わない手動カウンターバランス方式を採用している。中心回転軸には動力用スリップリ ング(4極、AC200V/60A および2極、AC100V/60A)、制御用スリップリング(17極)、通信用 無線 LAN 機器(2セット)、油圧・水圧・空圧を付与できるロータリージョイント(各2ポート) を設置ており、機外から回転体内部へ電力や油圧等を供給できる。また、圧力容器の応力制御の ために、回転軸付近のアーム上面に圧力発生装置(送水ポンプ)を8台搭載している。圧力発生 装置の制御および実験データは無線LANを通じて計測室内の PC で制御・保存する。

本装置の最大の特徴は、最長6ヶ月間連続運転が出来る仕様である(既存の同規模の遠心力載 荷装置は通常数時間~数十時間程度)。また、長期運転を行うことから、装置を格納しているコン クリートピット内は空気抵抗による温度上昇を防止するために大型空調設備による温度一定制御 が可能である。加えて本体装置の瞬停対策用電源装置も備えている。



図 4-4-8 超長期遠心載荷岩盤実験装置の概略図(上)と装置全景(下)

② X線CT装置

X線 CT 撮影は、(一財)電力中央研究所 地球工学研究所所有の医療用マルチスライスヘリカ ル CT スキャナ (東芝メディカルシステムズ社製、Aquilion64 TSX-10 1A)を使用し CT 画像を 取得した (図 4-4-9)。マルチスライスヘリカル CT スキャナは、寝台が移動し X線照射源と検出 器が対象物の周囲を螺旋状に回転しデータを取得する装置である。Aquilion64 は同時に 64 列の 断面データを収集でき、空間分解能は最小で 0.35 mm である。ガントリー開口径は 72 cm で最 大撮影領域径は 50cm、最大積載可能質量は 200 kg である。撮影時の管電圧は 135 keV、撮影時 間は試料の大きさにもよるが数秒程度である。

3)相似則

① 遠心模型試験における静的場の相似則(一般論)

(a) 遠心模型試験の意義

遠心模型試験とは、遠心力を付与できる遠心力載荷装置に幾何学的に縮小(1/n)された小型模型を設置し、nGの遠心加速度が作用する場で小型模型の挙動を調べる「物理模型実験」の一つの 手法である。このため化学的な挙動については原則、対象にしていない(物理式に換算できる現 象についてはその限りではない)。

小型・大型、重力場・遠心力場等、ほかの物理模型実験と同様、その直接的な目的は対象で生 じる相互作用(土木分野であれば、地盤あるいは地盤と構造物の相互作用など)を観測、解釈、 解析することである。

物理模型実験において、重力場、遠心力場問わず、模型と実物とを関連づけるために相似則が 用いられる。相似則は従来様々な角度から解説されてきた(例えば、木村ほか、1987; Taylor、 1995; Craig et al.、1988)。

基本的に要約すると、

ある現象に影響する独立なパラメータをすべてリストアップし、バッキンガムの *Π* 定理により 関係する無次元量を求め、1つひとつの無次元量が縮尺模型と実物で共通な値を持つ様に相似率 を決定する。

現象を表現する構成関係(物理法則の定式化や支配方程式)を模型と実物で共通に満足する様に 相似率を決定する。

である[7]。すなわち、単なる幾何学的相似則のみならず、力学的相似則を満足することが求めら れる。ここで一般的な物理量に対して、バッキンガムの Π定理から求まる静的条件における遠心 力場の相似則を表 4-4-6 に示す。なお相似則については、Garnier et al. (2007) が 15 のカテゴリ に分けて現状までの知見および未解決の課題について詳細な整理をしている。詳細はそちらを参 照されたい。

262



図 4-4-9 医療用マルチスライスヘリカル CT スキャナ

物理量		無次元数	相似条件	相似率 (模型/実物)
加速度	а		$\Pi_a =$	n
模型寸法	l		$\Pi_l =$	1/n
土密度	ρ		$\Pi_{ ho} =$	1
土粒子寸法	d	dЛ	$\Pi_d =$	1
間隙比	е	е	$\Pi_e =$	1
飽和度	S_r	S _r	$\Pi_{Sr} =$	1
液体密度	ρ_l	$ ho_l/ ho$	$\Pi_{\rho l} = \Pi_{\rho} =$	1
表面張力	σ_t	$\sigma_t / \rho_l a dl$	$\Pi_{\sigma t} = \Pi \rho \ \Pi_a \ \Pi_d \ \Pi_l =$	1
毛管上昇	h_{c}	$h_c \rho_l a d / \sigma_t$	$\Pi_{hc} = \Pi_{\sigma t} \Pi_{\rho}^{-1} \Pi_{d}^{-1} \Pi_{d}^{-1} =$	1/n
粘性	η	$\eta / (ho_l d(al)^{1/2})$	$\Pi_{\eta} = \Pi_{\rho} \Pi_{d} \Pi_{a}^{1/2} \Pi_{l}^{1/2} =$	1
透水係数	k	$k\eta/(d^2\rho la)$	$\Pi_k = \Pi_d^2 \Pi_\rho \Pi_a \Pi_\eta^{-1} =$	n
温度	Т	Т	$\Pi_T =$	1
土粒子摩擦角	φ	arphi	$\Pi_{\varphi} =$	1
土粒子強度	σ_{c}	$\sigma_c/\rho al$	$\Pi_{\sigma c} = \Pi_{\rho} \Pi_a \Pi_l =$	1
粘着力	с	c/pal	$\Pi_c = \Pi_\rho \Pi_a \Pi_l =$	1
弾性率	Ε	E/pal	$\Pi_E = \Pi_\rho \Pi_a \Pi_l =$	1
変位	δ	δ	$\Pi_{\delta} =$	1/n
応力	σ	σ/pal	$\Pi_{\sigma} = \Pi_{\rho} \Pi_{a} \Pi_{l} =$	1
ひずみ	З	З	Π_{ε} =	1
時間(層流)	t_f	$t_f(k/l)$	$\Pi_{tf} = \Pi_l \Pi_k^{-1} =$	$1/n^{2}$
時間(クリープ)	t _c	t _c	$\Pi_{tc} =$	1

表 4-4-6 静的場における遠心場の相似測

(b) 遠心模型試験の優位点

遠心模型試験の大きな優位点として、

・実物と相似な位置において等価な自重応力状態を再現できること

・圧密やダルシー則を満たすような透水現象などの時間を加速して再現できる(実時間換算する と時間短縮の効果)こと

である。

1つ目の自重応力が構造物や地盤におよぼす影響の問題に関しては、自重応力が実物と大きく 違う模型実験では、実際の現象をうまく再現することが難しい。例えば、実物の地盤内で直径 10 mのトンネルを施工することは容易ではないが、縮尺を 1/100 にした直径 10 cmの穴を岩石試 料に空けることは容易である。これは自重応力が小さい模型だからできることであり、逆に、実 際の現場の実応力を小型の模型実験で検証することの難しさを表している。実規模レベルの大型 模型実験や現場実験は、場所、時間、経済的な制約によって実施は必ずしも容易ではない。この ような問題に関しては、実際に起こり得る事象を小型の模型実験で再現できる遠心力模型試験が 有効である。遠心力模型試験は、縮尺 1/nの模型に遠心加速度 nG を作用させることにより、実 物と1:1対応の応力レベルを模型に発生させることができる。これにより、模型岩盤やオーバー パックの自重応力や水圧のヘッド差の違いなど粒子レベルでの挙動、 模型全体での挙動が実現 象と模型とで相似性が成立する。

2つ目の時間の加速とは、圧密現象や、ダルシー則が成立するような非常に緩やかな流れの場 合において、地盤中を浸透する水の流れなどの現象の時間を模型上で加速して再現する。すなわ ち遠心場での実験を実現象に換算すると時間短縮の効果が得られる。簡単には、地盤中のゆっく りした水の浸透、圧密、膨潤等のゆっくりとした水の流れで現象が支配されるものについて、1/*n* に縮尺した小型模型に *n*G の遠心加速度を与える。これにより、距離が 1/*n*、現象の速度(水頭 差)が *n* 倍になるために、時間が 1/*n*²に縮尺されることになるという、現象の時間を短縮してい る。なお、対象としている時間依存現象が、1つのプロセス(例えば、沈下、圧密、拡散、熱伝 導など)に依存する場合は、重力場模型実験でも現象の観測は可能であるが、2つ以上の現象(例 えば、移流・拡散問題)となると時間に関する相似率を合わせるためには、遠心模型は有効な手 段となる。ただし、後述するように、全ての時間依存の現象に関する相似率が合うわけではない ことに注意が必要である。

(c) 遠心模型試験の適用限界

ある実物に対する縮尺模型実験を行うには、モデル化にあたって何らかの近似を行い、幾つか の条件については実物と異なった設定をすることは避けられない。模型地盤には、実物にはない 実験容器という境界が存在することはその一例である。遠心模型試験においても相似則に関する 幾つかの問題に加え、このような実験環境上の問題もある。

相似則が満足されないことが遠心模型試験結果に及ぼす影響を調べるには、Modeling of prototype や Modeling of models といった手法がとられる。Modeling of prototype は遠心模型と 対応する実物を比較するものであり、Modeling of models は同一寸法の実物に対応する遠心模型 試験を異なる縮尺比で行って比較するものである。前者は遠心模型の妥当性を検討する直接的な 手法であり、最も信頼がおけるものといえるが、スケールが大きく異なるものを比較するため地 盤条件や実験装置等の実験条件を両者で同一とすることが難しいという問題がある。一方、後者 は異なる縮尺の遠心模型実験で整合した結果が得られれば、それを外挿して縮尺比=1の実物も 整合した結果となることを期待するものである。Modeling of models では縮尺比をできるだけ広 い範囲に変化させることが重要である(岡村ほか、2004)。

遠心模型試験における代表的な問題として、相似則上のいわゆる粒子寸法効果がある。実物の 土質材料と同じ強度・変形特性を有する相似粒度材料を得ることは一般的には困難であるため、 通常、模型実験では実物と同じ材料が用いられるが、この場合粒子寸法に関する縮尺が模型の縮 尺と一致しない。Tatsuoka et al. (1997) では 0.1~0.5 mm の粒径からなる砂地盤模型を用い砂 地盤上の帯基礎の支持力実験を重力場、遠心力場で実施した。重力場では基礎幅 5~500 mm、遠 心力場では 30mm に対して遠心加速度を変え(10~100G)実験を行った。その結果、同じ長さ に相当するそれぞれの基礎幅において支持力係数には明確な差が見られ、寸法効果の影響が見ら れた。また、基礎幅が 1000 mm 以上の大きな基礎幅ではその差が減少しており、粒子寸法効果 が限られた範囲で顕著に現れることも示した。一方で、Kusasabe (1995) は帯基礎を含む既往の 基礎に関する遠心模型試験の結果をコンパイルし、Modeling of models の結果として示した。こ れによると、遠心加速度 20~80G 場においていずれの実験結果でも支持力は縮尺に因らず一定 で、粒子寸法効果が認められなかった。このように、粒子寸法効果が実験結果に顕著に表れると する意見や必ずしも顕著に表れないとする意見があり、必ずしも明確になっていないが、基礎の ごく周辺で生じるせん断などの局所現象を再現する場合や、対象が土粒子径に比べ十分に大きく ない場合には影響が現れる可能性がある(Kusakabe、1995;Tatsuoka et al.、1997;岡村ほか、 2004)。

すなわち、生じる局所現象や粒子径が評価する現象の挙動より十分に小さく(例えば、0.1 mm 程度の粒子径から成る砂地盤模型に設置された杭において、杭の変位が 5~10 mm 程度計測され る等、粒子径より変位が充分に大きい場合など)、人工材料や緻密な岩盤の様な連続体であれば寸 法効果は現れにくいと考えられる。

中村・田中(2004)では、遠心模型試験におけるベントナイトの圧密、膨潤変形における相似 則の成立性を検討するために、厚さや密度が異なる供試体を用いた圧密試験、膨潤変形試験を実 施している。その結果、膨潤ひずみと t/H (t:時間、H:層厚)の関係において供試体の寸法の 影響がほとんど無く寸法則が成立すること、これといくつかの仮定から膨潤変形、圧密に関する 時間の相似則が成立することを導いている。その上で、電力中央研究所・電気事業連合会(緒方 ほか、1999)が提案した処分施設を対象に、Na型ベントナイトとオーバーパックからなる縮尺 模型を作成し鋼製容器に封入した上で、模型に注水、30、50、100G場(1/30、1/50、1/100 サ イズの模型)においてオーバーパックの鉛直変位を計測する Modeling of models を実施した。そ の結果、遠心力の大きさに依らず、実物換算変位量がほぼ等しく、沈下傾向が変化する時間がほ ぼ同じで、沈下の傾向が似通った挙動であったことを示した。このことは、ベントナイトにおけ る透水、圧密、膨潤変形を通じて、オーバーパックの移動(浮上・沈下挙動)の相似則が成立す ることを示している。

地層処分研究における遠心模型試験の意義

ニアフィールドで想定される現象は、熱と間隙流体と岩盤・土からなる二相混合体の THM 連

成挙動と考えることができ、実物と模型が同じ材料であると仮定した場合、遠心場の相似則を適 用したニアフィールド模型を用いた遠心模型試験の最大の意義は時間の加速にある。実物と同じ 材料の縮尺模型に遠心加速度を付与することで、縮尺模型上で例えば表 4-4-6 で示すような物理 量に関連するニアフィールドで生じる諸現象に対して、長期挙動に相当するデータが得られる。

具体的には、例えば実寸法の 1/50 の模型を遠心力 50G 場において実験を行えば、地下水の移動やそれにともなう緩衝材の膨潤変形、緩衝材で生じる応力等によるオーバーパックの移動や周辺岩盤の変形、温度の分布などが実物換算時間の 1/2500 に短縮されて、15 日間の実験で約 100年に相当する長期挙動のデータを得たことになる。

一方で、土または岩盤の骨格の粘弾性的な特性に基づく経時的な変形(クリープひずみ)に関 しては一般的には相似則が成立しないことが知られている。さらに高温条件下におけるクリープ ひずみは常温下に比べその変形量は大きい傾向であることも知られている(例えば、岡田、2006)。

また、粒子径等を考慮した縮尺材料を用意することは困難であることから、実物と模型が同じ 材料として試験を実施することとなる。

このような課題点を整理しつつ、遠心力模型試験で得られる結果は「ある小寸法の実物」におけ る挙動として扱い、ニアフィールドにおける THM 挙動について推定するものである。

③ 模型の材料(試料)

遠心力模型試験に使用する試料を検討するため、既往文献から緩衝材としてのベントナイトが 有する物性について把握した。

緩衝材とオーバーパックの相互作用に関して、核燃料サイクル開発機構「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性–地層処分研究開発第2次とりまとめ–」(以下、HLW 第2次取りまとめ)(核燃料サイクル開発機構、1999)では、乾燥密度1.6 Mg/m³の30 wt%ケイ 砂混合 Na 型ベントナイトの力学的パラメータを使用し解析を行った。解析の結果、縦置きの場合 10,000 年経過時のオーバーパックの沈下量を5.1 mm 程度とした。HLW 第2次取りまとめに おける条件は処分場周辺の環境条件や緩衝材の設計条件の多様性に対しての一つのリファレンス ケースとなっており、以降の研究ではこのリファレンスケースを基に試験条件を細分化して研究 が進められている。試験条件は大きく分けて、④使用する試料と 圓環境的要素の2つの条件に分けられる。

④使用する試料

- ・交換性陽イオン
- ・有効モンモリロナイト密度
 - ・ベントナイト乾燥密度
 - ・ベントナイト中のモンモリロナイト含有率
 - ·砂配合率

B環境的要素

- ・処分場岩盤中の間隙水の塩分濃度(水-海水)
- ・廃棄体からの熱の影響

④の使用する試料について、ベントナイトのうちモンモリロナイトに吸着されている主な陽イ オンが存在し、Na型モンモリロナイトを多く含有するベントナイトを Na型ベントナイト、Ca 型モンモリロナイトを多く含有するベントナイトを Ca 型ベントナイトという。それぞれのイオ ン型の膨潤特性として、純水を用いた膨潤圧試験においては Na 型ベントナイトよりも Ca 型ベ ントナイトのほうが高い膨潤圧を発生するが、膨潤変形試験では Ca 型ベントナイトよりも Na 型 ベントナイトのほうが膨潤率は大きい(小峯・緒方、1999)。緩衝材としては地下水の動きを抑制 する止水性、各バリア材との隙間を閉塞させる自己シール性の観点から、透水係数が低く膨潤率 の大きい Na 型ベントナイトの研究が多いが、Na 型ベントナイトはイオンの作用に弱いなどの課 題が考えられる(関根ほか、2005)。また、膨潤変形実験においても試料を拘束する鉛直圧が高い ほど交換性陽イオンによる影響は小さくなり、約 200 kPa 以上ではどの交換性陽イオンでも同程 度のモンモリロナイト膨潤体積ひずみとなる(小峯・緒方、2002)。

ベントナイトの膨潤体積ひずみ量や発生する膨潤圧の程度は、実験時の密度に関するパラメー タに大きく依存する。小峯・緒方(1996)では砂とベントナイトの配合率と乾燥密度を変えて実 験による膨潤特性の定量的評価を行い、乾燥密度が大きくベントナイトの配合率が大きいほど膨 潤圧および膨潤変形量が増大する傾向を示した。その後、乾燥密度やベントナイト配合率といっ たパラメータでは、別のイオン型のベントナイトを使用したときに統一的な解釈ができないため、 有効モンモリロナイト密度(有効モンモリロナイト間隙比)等によって整理されている。渡邊ほ か(2013)では Ca 型ベントナイトに対して精度の良い透水試験手法について検討するとともに、 有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係を統一的に示した。

⑧の環境的要素のうち、沿岸部処分を想定した場合には地下水の海水成分を考慮する必要がある。ベントナイト試料の膨潤変形試験中に試料に供給する溶液を純水と人工海水で比較した研究(田中・中村、2004)では、Na型およびNa交換型ベントナイトは人工海水濃度が大きくなるほど最大膨潤率が小さくなるが、Ca型ベントナイトの膨潤率には人工海水濃度の影響はほとんどなかった。また、膨潤圧試験ではNa型よりもCa型のほうが初期乾燥密度と最大膨潤圧に与える人工海水濃度の影響は小さいことを示した。直井ほか(2005)においてもCa型ベントナイトの膨潤特性は同様に得られており、Na型ベントナイトよりもCa型ベントナイトのほうが人工海水による膨潤特性への影響を受けにくいことがわかっている。廃棄体からの熱を想定した高温履歴による影響を評価した実験では、Na型のクニゲルV1では120°Cの加熱日数とともに膨潤圧が減少するが、高温履歴の透水係数への影響は小さかった(横山・田中、2012)。また、Ca型およびNa交換型ベントナイトの膨潤特性には高温履歴の有無による影響はほぼなかった(田中・中村、2004)。

④、⑧のように緩衝材性能は様々な条件により変化するが、緩衝材とオーバーパックの相互作用について、HLW 第2次取りまとめではオーバーパックの鉛直方向変位に対する沿岸域処分を想定した場合の海水の影響や、緩衝材の密度や種類を変更したときの影響は検討されていなかった。そこで中村・田中(2004)では長期にわたるオーバーパックの鉛直方向変位現象を時間短縮して再現可能な遠心力載荷装置を用いて、緩衝材密度や塩水濃度がオーバーパックの鉛直方向変位現象に及ぼす影響について試験した。その結果、緩衝材の乾燥密度に対しては、乾燥密度の増加に伴い膨潤圧が増加し、オーバーパックの沈下量が小さくなることを確認している。また、純水と10%および100%人工海水濃度を溶液として用いた実験では、純水環境下と10%人工海水濃度におけるオーバーパックの沈下量はおおむね同等であったが、100%の人工海水濃度環境では

オーバーパックが浮上した結果と得ている。これは人工海水によって緩衝材の膨潤性能が十分に 発揮されず、緩衝材と試験容器の間に隙間が残存していたためと考察されている。

また、緩衝材とオーバーパックの相互作用についてもクニゲル V1 (国内産 Na 型ベントナイト)を使用して研究されてきたが、処分場周辺の地下水特性や経済性の観点から、緩衝材として他のベントナイトを使用することも考えられる。そこで中村・田中 (2009)では3つのベントナイト (国内産 Na 型、国外産 Na 型、Na 交換型)を使用して遠心力模型試験を行った。結果としてこの3種類のベントナイトにおいて種類と密度によらず、ベントナイトの平衡膨潤圧が同等であればオーバーパックの実物換算沈下量は同等であることを示した。一方でリファレンスとして使用されている Na 型および Na 交換型ベントナイトのみによる実験結果であり、代替オプションとなり得る海水との平衡を考慮した異なるイオン型の Ca 型/Ca 交換型ベントナイトに関する検討はなされていない。

田中(2012) ベントナイトの吸水膨潤による変形はサクションの減少により飽和過程で生じる ものと浸透圧により飽和後に生じるものに分け、非線形弾性体の不飽和膨潤モデルが提案された。 加えて、田中(2012) では数値シミュレーションと中村・田中(2009) で行われた異なる有効粘 土密度ごとの Na 型ベントナイト遠心力模型試験結果を比較し、ベントナイト飽和後のオーバー パックの沈下量が計算結果と実測結果は良く整合していたことを示した。

これまでの緩衝材とオーバーパックの力学的相互作用に関する研究の問題点として、Ca 型ベ ントナイトを使用したときのオーバーパックの変位について知見がないことが挙げられる。さら に沿岸域処分における海水の影響を考慮した Na 型、Ca 型ベントナイトの緩衝材としての機能の 比較はなされていない。そこで本報告では、試料としてリファレンスケースと比較するための国 内産 Na 型ベントナイトと、国内で入手しやすい Ca 型ベントナイトを使用する。また、試料内に 注入する試験溶液(間隙溶液)を純水と人工海水の2条件(計4条件)行い、緩衝材とオーバー パックの相互作用へのベントナイトのイオン型と人工海水の影響を比較する。 4) 試験対象の条件

試料対象の条件として、Na型ベントナイトとCa型ベントナイトを使用し、それぞれベントナ イトと珪砂6号の7:3の混合土とした。締固め時の混合土の含水比はデシケーター内で加水およ びシリカゲル乾燥により10%に調整した。試験条件として縦置き処分を対象とし、模型の縮尺は 1/30、遠心加速度は30Gとした。また、締固め時に混合土内にオーバーパック模型を設置した。 オーバーパックの密度は実物相当のガラス固化体を含めた全密度に合わせ、SUS316Lを加工し 6.35 Mg/m³とした。模型は遠心力載荷装置に設置する金属製の小型圧力容器内に直接締め固め ることで作製した(図 4-4-10)。なお締固め時には圧力容器側面に設置する水分計、水位計およ び圧力計のセンサーはダミーの模型を使用し、締固め後にセンサー類を設置した。境界条件は金 属容器に封入した変形拘束条件であり、模型下面から試験用溶液を注入し上方に排水する排水条 件である。模型の温度は模型外部で調整し25℃とした。試験溶液として純水と人工海水を使用し た。海水は長期試験や複数回利用における品質の安定性の観点から人工海水(マリンアート)を 使用した。試験時の注水圧は1MPaであり図 4-4-11 に示す装置を用いて注水した。なお試験に 先立ち、事前検討として、模型を設置するスペースが広い中型の圧力容器(図 4-4-12)を用いて 予備試験を行い、本試験における手順等を検討した。

試験の実施期間は 2020 年 1 月 8 から 1 月 27 日であり、実物換算時間 47 年分に相当する。遠 心力模型試験後に、金属製容器から試料を取り出し、X 線 CT 画像撮影を行った。その後、各試 料から高さごとに 11 ヶ所から小分けした試料を採取し、その含水比を測定して遠心力模型試験 後の試料の高さごとの飽和度 *S*_r(%)を算出した。













図 4-4-12 中型圧力容器の概略

5) 結果

① 模型内の溶液の水位/水分量

試料中の間隙水の移動を把握するため、純水を注入する試験では水分量センサーを、人工海水 を注入する試験では水位センサーで測定した。水分量センサーは交流電流を印加し、電流(電気 伝導度)の変化から飽和度を推定できる。しかし水分量センサーの個別のキャリブレーションは 困難であるため行っていないが、出力電圧が3V以上で安定した場合間隙水で飽和したとみなせ る。人工海水は電気抵抗率が低く間隙水に接触するとすぐに出力電圧が飽和するため、直流電流 を印加する水位センサーを使用した。水位センサーは間隙水圧が電極(2 極)に接触すると通電 するため、通電したときに水位センサーを設置した高さまで水位が到達したことを示す。

図 4-4-13 に水分量センサーおよび水位センサーの経時変化の結果を示す。横軸の下部には試 験時間を、上部には実物換算したときの経過時間(年)を、縦軸には供試体底面からそれぞれ実 物換算 351 mm、1275 mm、1851 mm、3280.5 mm における水分量計/水位計の出力電圧(V)で ある。Na 型ベントナイトの実験については計測機器の不具合により計測することができなかっ た。Ca 型ベントナイトについても d=351 mm も計測機器の不具合により計測することができな かった。Ca 型ベントナイトの純水条件(図 4-4-13(a))では、実物換算経過時間約2 年から d=1275 mm の水分計出力電圧が上昇し、経過時間ごとに d=1851 mm、3280.5mm も上昇し始めた。 d=1275 mm では実物換算経過時間約6 年で飽和に、d=1851 mm は約13 年で飽和に達した。Ca 型ベントナイトの人工海水条件(図 4-4-13(b))では試験溶液の注入とほぼ同時に d=3280.5mm まで水分計圧力電圧が反応した。その後水分計圧力電圧が一度減少する傾向が見られるが、試験 後に電極を確かめたところ、海水による電極の腐食等は見られなかった。

2 緩衝材の応力

図 4-4-14 に緩衝材応力の経時変化の結果を示す。横軸の下部には実験時間を、上部には実物換 算したときの経過時間(年)を、縦軸には供試体底面と、底面から 351 mm、1275 mm、1851 mm、 3280.5 mm、頂部にそれぞれ設置した圧力計から得られた応力を示している。緩衝材応力は遠心 加速度を与えて安定した値を 0MPa としており、注水圧と側面に作用する緩衝材の膨潤圧の和と 言える。なお、グラフ上で一時的に緩衝材応力が減少してすぐにもとの緩衝材応力に戻るのは、 注水用のポンプに試験溶液を給水する作業のためである。

Na 型ベントナイト – 純水条件(図 4-4-14(a))では注水の開始とともに底面の緩衝材応力が上 昇し、注水圧と同じ 1MPa に達するまでに実物換算経過時間約 2 年を要している。これは注水口 と圧力計が離れていることによって試験溶液の到達とベントナイト膨潤圧の発揮を感知するまで の時間と考えられる。d=351 mm も経過時間とともに緩衝材応力が上昇している。d=1275 mm も実物換算時間約 30 年から徐々に緩衝材応力が上昇する傾向が見られる。d=1851 mm は実験初 期にやや高い値となったが経過時間とともに緩衝材応力は落ち着いている。頂部においてほとん ど緩衝材応力はかからなかったが、試験後に試料を確認しても乾燥していたために頂部まで試験 溶液は到達しておらず、膨潤圧も発生しなかったためである。 Na 型ベントナイト – 人工海水条 件(図 4-4-14(b))では、注水開始とともに底面の緩衝材応力は 1.0 MPa に達した。d=351 mm においても実物換算経過時間 5 年未満に緩衝材応力 1.0 MPa となった。d=1275 mm 以上では増 圧器中の試験水の補充作業により緩衝材応力の出力にばらつきがでてしまったが、実物換算経過 時間 20 年以降はどの圧力計も近い値となった。Ca 型ベントナイト-純水条件(図 4-4-14(c)) で は、注水開始から短い期間に底面と d=351 mm の緩衝材応力が 1MPa を超えた。その後 d=1275 mm、1851 mm、3280.5 mm、頂部においても順に緩衝材応力が上昇した。緩衝材応力と水分計 出力電圧(図 4-4-13(a))を比較すると、緩衝材応力よりも水分計出力電圧の上昇のほうが速く、 同じ高さに試験溶液が到達した後に緩衝材応力が大きく発生した。Ca 型ベントナイト-人工海 水条件(図 4-4-14(d)) では、注水開始とともに全ての圧力計で緩衝材応力が 1.0 MPa に近い値 が出力された。実物換算時間 10 年後からはどのセンサーも似たトレンドを示しており、試料全 体が飽和し均質な挙動になったと考えられる。



図 4-4-13 水分量センサーおよび水位センサーの経時変化







③ オーバーパックの鉛直変位

図 4-4-15 にオーバーパックの鉛直方向の変位量の経時変化を示している。横軸の下部には実 験時間を、上部には実物換算したときの経過時間(年)を、縦軸には実物換算オーバーパック変 位量 (mm)を示している。実物換算オーバーパック変位は浮上方向を正、沈下方向を負とした。 なお、緩衝材応力の図と同様に、一時的にオーバーパックが沈下する現象は、注水用のポンプに 試験溶液を給水する作業のためである。Na 型ベントナイト-純水条件(図 4-4-15(a))では、試 験終了の実物換算時間 47 年においてもオーバーパックが浮上し続けた。この結果は試験終了ま でにオーバーパック下部の d=351 mm の緩衝材応力が徐々に上昇していること(図 4-4-14(a)) と整合性が良い。Na 型ベントナイト-人工海水条件(図 4-4-15(b))では、実物換算経過時間約 6年後に大きくオーバーパックが浮上し、約14年後から沈下に転じた。実物換算時間約6年まで にオーバーパック下部の d=351 mm で緩衝材応力が上昇しており (図 4-4-14(b))、その後オーバ ーパック上部にも注水による膨潤圧が発生し沈下したと言える。Ca 型ベントナイト – 純水条件 (図 4-4-15(c))では注水開始とともにオーバーパックは大きく浮上し、実物換算時間 30 年後に は実物換算 80 mm 浮上した。しかし試験終了後に試料およびセンサーを観察したところ、オー バーパックの変位を測定するギャップセンサーの樹脂部分にオーバーパック模型が入り込んでお り、オーバーパック模型がギャップセンサーに衝突することで浮上が止まったと考えられる。し たがって実換算時間 30 年以降は正確な浮上量でない可能性が高い。Ca 型ベントナイト – 人工海 水条件(図 4-4-15(d))では注水開始時に実物換算オーバーパック変位 8 mm ほど浮上し、その 後は沈下を続ける傾向が得られた。注水開始時にオーバーパック下部の緩衝材が膨潤し、その後 すぐに供試体上部まで注水されて膨潤し、緩衝材とオーバーパックが沈下したと考えられる。



遠心力模型試験後、金属製容器から取り出した試料の X 線 CT 画像を図 4-4-16 に示す。X 線 CT 画像は撮影する物体の密度が高いほど CT 値が高くなり、図中の黒色は試料周辺や試料中の 間隙を、白色はオーバーパックの金属を示している。緩衝材部分は試料の密度と飽和度により CT 値が決まり、同じ乾燥密度条件であれば飽和度が高いほうが白色に近い灰色で表される。なお、 CT 画像撮影の性質上、金属製のオーバーパックと緩衝材や、緩衝材と試料周囲の空気のように 密度差が大きい境界付近は平均化されやすく偽像も発生しやすい。また、試料中のき裂は試料を 金属製容器から取り出したときの応力解放によって生じたものと考えられる。図4-4-16のA-A'、 B-B'、C-C'、D-D'は図 4-4-17 から図 4-4-20 に示す CT 値の分布に対応している。図 4-4-17(a) は試験後の Na 型ベントナイト – 純水条件の鉛直方向の CT 値を示している。試料底面から約 20m m 付近で CT 値が高く、緩衝材応力が 11.7 mm(実物換算 d=351 mm)で高くなっていることと 整合的である。また、CT 値としては 0~40 mm までの方が 40 mm 以上よりも高い値となってお り、約 40 mm まで試験溶液が浸潤したと推察される。高さごとの水平断面の緩衝材部分の CT 値 を比較すると、D-D'断面よりも B-B'、C-C'断面の CT 値が低い。図 4-4-18 は Na 型ベントナイ トー人工海水条件の試験後の各地点での CT 値を示しており、高さごとの明瞭な差は見られず全 体的に試験溶液が飽和したと考えられる。 図 4-4-19、 図 4-4-20 はそれぞれ Ca 型ベントナイト-純水、人工加水条件の試験後の各地点での CT 値を示している。 Ca 型ベントナイトは試験時の乾 燥密度が Na 型ベントナイトの乾燥密度より小さい条件で行ったため、全体的に Na 型ベントナ イトよりも CT 値が小さい。Ca 型ベントナイトの条件では高さごとの明瞭な差異はなく、全体的 に試験溶液が全体的に浸潤したと考えられる。

⑤ 模型(緩衝材部)の密度測定

X線 CT 撮影後、試料を高さごとに 11 箇所から混合土を採取し飽和度を取得した結果を図 4-4-21 に示す。遠心載荷中にベントナイトが膨潤し、試験後に金属製容器から取り出しているた め、場所により飽和度 100%を超えるなどある程度の誤差は存在する。図 4-4-21(a)の Na 型ベン トナイト – 純水条件の結果では、緩衝材底面では飽和度が高く、底面から 30 mm から飽和度が 低くなり、50 mm から上部はほぼ一定の値であった。この傾向は緩衝材応力や X線 CT の結果と 調和的である。他の Na 型ベントナイト – 人工海水条件、Ca 型ベントナイト – 純水、人工海水条 件では飽和度は一定に近い結果であった。

279



(a)Na 型ベントナイト - 純水条件、(b)Na 型ベントナイト - 人工海水条件、
 (c)Ca 型ベントナイト - 純水条件、(d)Ca 型ベントナイト - 人工海水条件。
 図 4-4-16 試験後の CT 撮影結果









図 4-4-18 Na 型ベントナイト-人工海水条件、試験後各地点の CT 値



図 4-4-19 Ca 型ベントナイト-純水条件、試験後各地点の CT 値



(a) Ca 型ベントナイト-人工海水条件、 鉛直方向 A-A'断面の CT 値

(b) Ca 型ベントナイト-人工海水条件、水平方向 B-B'断面の CT 値

B'



(c) Ca 型ベントナイト-人工海水条件、水平方向 C-C'断面の CT 値

(d) Ca 型ベントナイト-人工海水条件、 水平方向 D-D'断面の CT 値

図 4-4-20 Ca 型ベントナイト-人工海水条件、試験後各地点の CT 値



(c)Ca 型ベントナイト - 純水条件、(d)Ca 型ベントナイト - 人工海水条件。 図 4-4-21 試験後の緩衝材の飽和度

6)考察

Na型ベントナイトの純水条件では図 4-4-14(a)から、底面と d=351 mm に試験溶液が浸潤し、 順番に緩衝材応力が上昇した。これは図 4-4-15(a)に示されるようにオーバーパックの下部で試 料が膨潤し、試験終了時までオーバーパックが浮上し続けたことや、試験後の緩衝材の飽和度(図 4-4-17(a)、図 4-4-21(a))とも整合的である。田中・中村(2004)ではオーバーパック上部の試 料が試験溶液で飽和して膨潤し、金属容器と試料の隙間を埋めて膨潤圧が発揮されるとオーバー パックが沈下することを示した。したがって本報告の試験でも、試験を続けて頂部まで粘土試料 の膨潤が完了した場合、オーバーパック上部での膨潤圧が発揮してオーバーパックが沈下すると 考えられる。Ca型ベントナイトの純水条件でも図 4-4-14(c)に示された通り、試料の底面から上 方に順に試験溶液が浸潤し緩衝材応力が発揮した。Na型ベントナイト-純水条件よりも Ca型ベ ントナイト-純水条件のほうが純水の浸潤は速かった。この結果はそれぞれの透水係数や乾燥密度 の違いと調和的である。

次に、Na型ベントナイトとCa型ベントナイトの人工海水の影響について考察する。本報告の 試験では、試験容器内に設置された圧力センサーによる緩衝材応力が上昇した時間から、Na型ベ ントナイトおよびCa型ベントナイト共に、試験溶液が純水よりも人工海水のほうが試料内への 試験溶液の浸潤が速かった。小峯ほか(2011)は圧密試験から得られる透水係数を比較し、Na型 ベントナイト単体の乾燥密度が 1.9~2.1 Mg/m³と高い条件において、人工海水環境下の透水係 数は蒸留水環境の場合と大きな差異はないとした。一方、乾燥密度が 1.9 Mg/m³(有効モンモリ ロナイト密度 1.55 Mg/m³)以下の条件では人工海水環境下における透水係数が蒸留水環境の場 合と比べ高くなる傾向が示されている。さらに、乾燥密度 1.6 Mg/m³(有効モンモリロナイト密 度 1.23 Mg/m³)付近では人工海水環境下における透水係数は蒸留水の場合の 2~5 倍程度高くな る結果を得ている。

Ca 型ベントナイトについては蒸留水と人工海水による透水係数の違いは見られず、Ca 型ベン トナイトの膨潤圧・膨潤変形特性は人工海水の影響を受けにくい特徴(中村・田中、2004;直井 ほか、2005)と同様に、透水係数も人工海水の影響は小さいと考察した。長谷川(2004)では、 Na 型ベントナイトと Ca 型ベントナイトの純水および人工海水条件で水分拡散係数を求めた。 蒸 留水を用いた場合には水分拡散係数は有効モンモリロナイト密度に依存せずほぼ一定値であった が、人工海水を用いた場合には水分拡散係数は有効モンモリロナイト密度に依存し、有効モンモ リロナイト密度の増加にともなって水分拡散係数が減少する傾向を得ている。結果的に Na 型べ ントナイトと Ca 型ベントナイトによる有意な差はなく、 有効モンモリロナイト密度 1.23 Mg/m³ 以下では水と人工海水の水分拡散係数の差があることを示した。従って本報告での試験で Na 型 ベントナイトにおいて純水よりも人工海水条件のほうが試験溶液の浸潤が速かったことは、透水 係数および浸潤速度からも整合的である。Ca 型ベントナイトについては、透水係数は人工海水の 影響は小さいものの、浸潤速度に関しては有効モンモリロナイト密度 1.0 Mg/m³以下の小さい条 件において、Ca 型ベントナイトも蒸留水と人工海水条件では違いが現れると考えられる。ただ し、図 4-4-13(b)の通り、Ca 型ベントナイトの人工海水条件では注水後ただちに上部まで浸潤し ていることから、浸潤速度の違いだけでなく、試料と金属容器の間を流れる側面流等の影響も考 えられる。
7)まとめ、および今後の課題

今回はオーバーパックおよび緩衝材模型を金属製の試験容器に封入し、模型内の水分量/水位、 緩衝材応力、オーバーパックの鉛直変位について遠心力模型試験により時間加速の相似則を適用 し、長期相当の挙動を得た。結果として、試料内への試験溶液の浸潤速度は既往研究と整合的で あった。また、沿岸域処分における海水の影響を考慮した Na 型、Ca 型ベントナイトの緩衝材と しての機能と、オーバーパック鉛直変位量について比較できた。さらに、オーバーパックの浮上・ 沈下挙動について Na 型ベントナイト – 純水・人工海水条件、Ca 型ベントナイト – 人工海水条件 において緩衝材応力の発揮と調和的な結果であった。Ca 型ベントナイト – 純水条件では浮上が 続きギャップセンサーでは適切なオーバーパックの変位量が取得できなかったことから、オーバ ーパックの変位量が大きいと想定される場合はデータ取得方法の改良が必要である。

今後の課題として、異なる境界条件や、異なる乾燥密度(有効モンモリロナイト密度)におけ る実験の実施や、オーバーパックを発熱させた試験の実施が考えられる。Na型ベントナイトのイ オン交換水を使用した実験では 90°C程度の高温履歴を付与しても透水性や膨潤圧などは実質的 には変化しないことが知られているが(横山・田中、2012)、注入する試験溶液として人工海水条 件での知見はなく、さらにオーバーパックとの相互作用について検討する必要がある。 参考文献

- Craig, W. H., James, R., G., Schofield, A. N. (1988) : Centrifuges in soil mechanics, Balkema Rotterdam, 1988.
- Garnier, J., Gaudin, C., Springman, S. M., Culligan, P. J., Goodings, D., Koning, D., Kutter, B., Phllips, R., Randlph, M. F., Thorel, L. (2007) : Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling, Int. J. Phys. Model. Geoechnics, vol. 7, no. 3, pp.1-23, 2007.
- Kusakabe, O. (1995) : 6. Foundations, in Geotechnical Centrifuge Technology, R. N. Taylor, Ed. Blackie Academic & Professional, pp.118-197, 1995.
- Nishimoto, S., Sawada, M., Okada, T. (2016) : New Rapid Evaluation for Long-Term Behavior in Deep Geological Repository by Geotechnical Centrifuge. Part 1: Test of Physical Modeling in Near Field Under Isotropic Stress-Constraint Conditions, Rock Mech. Rock Eng., vol. 49, pp.3323-3341, 2016.
- Taylor, R. N. (1995) : Geotechnical Centrifuge Technology. London, Blackie Academic & Professional, 1995.
- Tatsuoka, F., Goto, S., Tanaka, T., Tani, K., Kimura, Y. (1997) : Particle size effects on bearing capacity of footing on granular material, Deformation and progressive failure in geomechanics: IS-NAGOYA '97 . Pergamon, Nagoya, Japan, pp.133-138, 1997.
- 小峯秀雄、緒方信英(1999):高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式 の提案-砂とベントナイトの配合割合およびベントナイト中の陽イオンの種類・組成の影響-、 電力中央研究所報告、U99013、1999.
- 直井優、小峯秀雄、安原一哉、村上哲、百瀬和夫、坂上武晴(2005):各種ベントナイト系緩衝材の膨潤特性に及ぼす人工海水の影響、土木学会論文集、no.785/Ⅲ-70、pp.39-49、2005.
- 田中幸久、中村邦彦(2004):海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響、電力中央研究所報告、N04007、2004.
- 河野伊一郎、西垣誠 (1982):室内透水試験法に関する 2、3 の考察、土質工学会論文報告集、vol. 22、no.4、pp.181-190、1982.
- 佐治慎一、伊藤雅和、柴田雅博、神徳敬、磯貝武司(2005):河川水と接触したベントナイト鉱床の化学特性変化---試料採取と分析結果--、核燃料サイクル開発機構研究報告、JNC TN8400 2005-017、pp.79-80、2005.
- 渡邊保貴、田中幸久、中村邦彦、廣永道彦(2013): Ca 型ベントナイト混合土の透水試験方法(その1)-室内締固め供試体に対する剛性容器を用いた方法-、電力中央研究所研究報告、N13005、2013.
- 渡邊保貴、横山信吾 (2020):メチレンブルー吸着試験の測定精度を考慮したベントナイトのモン モリロナイト含有率の評価、土木学会論文集 C、vol.76、no.1、pp.26-39、2020.
- 長谷川琢磨、ベントナイトの透水・浸潤特性への海水影響、電力中央研究所報告、N04005、2004.
- 木村孟、日下部治(1987):講座 遠心模型実験 2.序論、土と基礎、vol. 35、no. 11、68-74、1987. 小峯秀雄、緒方信英(1996):放射性廃棄物のための砂・ベントナイト混合材料の膨潤特性とその 評価法、電力中央研究所報告、U96029、1996.
- 小峯秀雄、緒方信英(1999):高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式

の提案-砂とベントナイトの配合割合およびベントナイト中の陽イオンの種類・組成の影響-、 電力中央研究所報告、U99013、1999.

- 小峯秀雄、緒方信英(2002):砂・ベントナイト混合材料および各種ベントナイトの膨潤特性、土 木学会論文集、no. 701/III-58、pp.373-385、2002.
- 小峯秀雄、安原一哉、村上哲(2011):人工海水環境下における各種ベントナイトの透水係数、土 木学会論文集 C、vol. 67、no. 2、pp.276-287、2011.
- 中村邦彦、田中幸久(2004):高レベル放射性廃棄物処分孔での廃棄体の沈下挙動-遠心模型実験 と簡易沈下予測法の提案-、電力中央研究所報告、U03074、2004.
- 中村邦彦、田中幸久(2009):ベントナイトの種類と密度がオーバーパックの沈下量に与える影響、土木学会論文集 C、vol. 65、no. 1、pp.85-96、2009.
- 直井優、小峯秀雄、安原一哉、村上哲、百瀬和夫、坂上武晴(2005):各種ベントナイト系緩衝材の膨潤特性に及ぼす人工海水の影響、土木学会論文集、no.785/Ⅲ-70、pp.39-49、2005.
- 緒方信英、小崎明郎、植田浩義、朝野英一、高尾肇(1999):高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術-その4人工バリアの設計と製作一、原子力バックエンド研究、vol.5、no.2、pp.103-121、1999. 岡田哲実(2006):高温環境下における堆積軟岩の力学特性(その2)-一軸圧縮試験によるクリープ特性の温度依存性の評価、電力中央研究所報告、N05057、2006.
- 岡村未対、竹村次朗、上野勝利(2004):遠心模型実験-実験技術と実務への適用- 2.遠心模型の相 似則、実験技術-利点と限界、土と基礎、vol. 52、no. 10、pp.37-44、2004.
- 関根一郎、田中徹、柴田靖、小峯秀雄(2005): Na 型、Ca 型ベントナイトを使用した放射性廃棄 物処分施設用埋め戻し材料の透水性比較、土木学会第 60 階年次学術講演会、3-318、2005.
- 田中幸久、中村邦彦(2004):海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響、電力中央研究所報告、N04007、2004.
- 田中幸久(2012):締固めたベントナイトの吸水膨潤過程のモデル化(その2)-飽和・不飽和ベントナイトの膨潤モデルの提案とその検証-、電力中央研究所報告、N11035、2012.
- 横山信吾、田中幸久(2012):イオン交換水で飽和したベントナイト系材料の透水性と膨潤特性に 及ぼす熱影響に関する実験的影響、電力中央研究所報告、N11021、2012.
- 渡邊保貴、田中幸久、中村邦彦、廣永道彦(2013): Ca 型ベントナイト混合土の透水試験方法(その1)-室内締固め供試体に対する剛性容器を用いた方法-、電力中央研究所報告、N13005、2013.

JISA 1202:2009、土粒子の密度試験方法、2009.

- JIS Z 2451:2019、ベントナイトなどのメチレンブルー吸着量の測定方法、2019.
- (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター、平成27年度地層処分技術調査等事業「処分シ ステム工学確証技術開発」報告書(第3分冊)-人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構 築-、2016.
- 核燃料サイクル開発機構、わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性; 地層 処分研究開発第2次取りまとめ(分冊2)地層処分の工学技術、JNC-TN1400-99-022、1999.

4-5 沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化のまとめ

これまでの沿岸部における工学技術の検討成果を踏まえ、沿岸部における処分場の成立性に影響が想定される多様な地下水の水質の影響や処分場建設による、地下水の引き込みに伴う再冠水 完了までの水理環境の擾乱の影響を考慮した、処分場の成立性を評価する手法、及び構成材料の 地下水に対する機能変化のデータの整備をすることとし、平成31年度より概ね5年間の計画で 工学技術に関する検討を開始した。実施内容の4項目である、性能評価手法の体系化と水理解析 技術の整備、セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充、及び、緩衝材の機能変化に 係るデータ拡充の各実施項目に関して、背景、目的及び課題設定は、4-1から4-4の各節への記 載とし、成果の概要を以下に示す。

4-1 性能評価手法の体系化及び水理解析技術の整備では、わが国における沿岸部における性能 評価手順書素案の作成に向けて、性能評価にかかる国内外の検討事例の調査し性能評価の流れや 性能評価項目を把握し、沿岸部における性能評価手法を整備する上での性能評価項目や各項目の 評価手法の整備が必要な点を把握した。また、NUMOの包括的技術報告書レビュー版より、安全 機能要因分析等の性能評価項目の抽出手法などわが国における性能評価の作成に参考となる情報 を確認した。これらの調査と検討の結果を踏まえて性能評価手順書素案作成に向けた実施内容を 具体化した。性能評価を実施する上での水理解析技術の整備に関し、性能評価に必要な地下水に 関する情報を整理し、これらの情報を求めるのに用いられる水理解析手法の課題を整理した。ま た、沿岸部の水理解析に考慮すべき要因の影響検討を予備解析により実施した。これらを踏まえ、 水理解析技術を整備する上での実施内容を具体化した。これらの検討をもとに手法の構築・整備 を進め、地質環境情報から水理解析、性能評価への一連の流れを試行することにより、処分場の 設計の観点から地質環境情報のうち重要な事項を抽出する等、地層処分事業の連携にも役立てる 取組みを進めていく。

4-2 セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充は、ニアフィールド領域の水理解析 技術と連携した支保工などのセメント系材料を用いた構造物の機械的強度の評価手法を検討し、 沿岸部における処分場の再冠水完了までの空洞安定性などの評価に反映することを目的として、 処分場の設計や塩水化学組成などより機械的強度を推定する手法を提示するための検討を実施し た。具体的には、塩水化学組成(沿岸部の地下水化学組成)と二次鉱物生成量など(化学変質) の関係及び化学変質と機械的挙動の関係と沿岸部における現実的な処分場の地下環境条件(地下 水化学組成、セメント系材料と岩盤との接触部付近での地下水流動や流量) 及び材料 (モルタル、 コンクリートなど) での化学変質と機械的挙動に関する検討を実施する。 平成 31 年度は、文献調 査により知見を整理し、その結果に基づいて試験計画について検討し、溶液の組成、コンクリー ト種類、変質試験方法、分析方法及びとりまとめの方法等を検討し、加えてスケジュール案を示 した。加えて、試験体の作製を行った。なお、地下水の化学組成の分類では、平成 30 年度までの 地質環境分野で取得した地下水の分析データを活用し、分野間で連携して進めた。今後は、デー タ取得のための試験を効率的に進めるために、さらに溶液の組成、変質試験方法、分析方法等を 最適化して段階的に複数の変質試験を連携させて化学変質挙動と機械的強度の関係について検討 し、処分場の成立性の評価のためのデータを整備すると共に、化学変質等の抑制対策についても 検討を実施していく。

4-3 緩衝材の機能変化に係るデータ拡充では、沿岸部に賦存する地下水の組成を念頭に、溶存 陽イオンの力学的および化学的な影響を系統的に把握し、多様な塩水系地下水の組成に対応して 緩衝材の挙動を評価できる知見を得ることを目的にして、緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオン の影響把握試験、塩水系地下水成分による緩衝材の透水性に関する検討、イオン交換選択係数に 関する検討、圧縮ベントナイトへの浸潤とイオン交換反応の進展についての解析的評価を実施し た。ベントナイトの膨潤挙動について、塩水におけるイオン強度や陽イオンを考慮した膨潤率試 験を行い初期有効ベントナイト乾燥密度と最大膨潤率の関係によってデータを整理した結果、線 形性が既往の検討より低く、原因として応力履歴の喪失の影響が推定されたことから、これを考 慮した既往の手法によるモデル化を探索した。加えて、透水性に関する試験で希釈した海水から 段階的に濃度を高くすることにより陽イオン交換と透水係数の上昇の挙動を確認した。このデー タを活用し、圧縮ベントナイトに海水組成を考慮した水溶液を通水したときのイオン交換の進行、 間隙水組成の変化および透水係数の変化を解析的に予測する手法に関し、水の飽和 - 不飽和浸透 流と陽イオン交換を考慮した移流分散の連成解析の適用性を確認し、課題を整理した。この解析 手法に用いる、高イオン強度でのイオン交換選択係数の設定に関するデータを取得した。既往の 文献データと合わせて整理したが、陽イオン交換選択係数は一致しておらず、吸着した陽イオン の水和構造と陽イオン活量の推定や一軸加圧状態のイオン交換と膨潤挙動の観察を課題として抽 出した。以上の成果や課題をもとに、今後の沿岸部の地下水環境における試験データの拡充と挙 動のモデル化、解析手法への反映を進める。試験データの取得にあたっては、別途整理が進めら れている地下水の化学組成データを参考にすることで、多様な地下水への対応する緩衝材の機能 に関するデータを効率的に取得していく。

4-4 緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充では、沿岸部特有 の地下水環境(海水)を考慮し、Na型ベントナイトに加えて代替オプションとなり得る海水との 平衡を考慮したイオン型の異なる材料(Ca 型/Ca 型化ベントナイト等)に着目した検討を行っ た。すなわち、塩分を含む環境では、①緩衝材中のオーバーパックの変位(移動)挙動、②オー バーパックの変位に伴い緩衝材中に生じるせん断帯の自己修復性、③物質移行 – 化学反応におけ る二次生成物種の想定と沈殿による効果、等について、特にイオン型の異なるベントナイトでは あまり検討されていない。このため、緩衝材に生じるせん断等の局所現象を評価するための要素 試験が実施出来るような環境整備(予備試験等)と、緩衝材の変形とオーバーパックの変位挙動 の力学的相互作用を評価するための物理模型試験を行った。要素試験の環境整備では、人工海水 と Na 型および Ca 型のベントナイトを用い、これらの透水、膨潤圧、三軸圧縮試験を行った。得 られた物性値について、次年度以降実施する自己修復性試験のための装置仕様に反映し、多機能 リングせん断試験装置を試作した。物理模型試験では、オーバーパックおよび緩衝材の縮尺模型 を金属製の試験容器に封入し、オーバーパックの鉛直変位等について、時間加速の相似則を適用 した遠心力模型試験により、約 50 年相当の挙動を得た。結果として、海水の影響を考慮した Na 型、Ca 型ベントナイトの緩衝材におけるオーバーパック鉛直変位量について比較できた。さら に、オーバーパックの浮上・沈下挙動について緩衝材応力の発揮と概ね調和的な結果であった。 今後は、要素試験では、試作した装置の試験手順や試験後の試料の観察方法等を検討し、せん断 透水試験と試料の分析を進める。また模型試験では、今年度の結果に基づき、境界条件等を再検

討し、海水環境下における緩衝材-オーバーパックの力学的相互作用に関する試験データの蓄積 を行う。

4章の工学技術に関する検討は、今後、各実施内容において抽出した課題や計画をもとに進め ることとし、必要に応じ実施項目間の連携を取り、沿岸部における処分場の成立性やその評価に 関する技術の高度化を図る。加えて、地質工学分野との情報受け渡し等の分野間の連携の検討成 果を工学技術の検討に活用して効率的に進めるものとする。

第5章 おわりに

5-1 本研究の成果(結論)

(1)海陸連続3次元地質環境モデルの構築手法の高度化

1)沿岸部地質環境データベースの構築と解析

本研究では、日本列島の沿岸部に関わる3次元的な地質と地形データをデータベースに集約 した。これを用いて、任意の地点において3次元的な地質概念モデルの作成を可能にしたほ か、密度依存を考慮した地下水流動と塩分・熱密度流の同時連成解析を実施したことで、地下水 が流動している帯水層(移流場)より深い地層で地下水流速が遅くなり、0.1mm/year以下の拡 散場となっていることが推定された。また、地下温度についても深度500mより深い地点におい ては、同深度の地層で温度がほぼ一定となっており安定的な地下環境であると確認できた。さら に、深部地下水特性解析により、塩分密度流と温度密度流の相互干渉が確認され、連成解析機能 の必要性と実用性が確認された。今後は、詳細な電磁場探査結果が無くても、連成解析を併用で きれば探査対象外の領域を補間し地層処分に適した地質環境選定が行えることが期待できた。

2) 地質・地形要素を考慮した大規模地下水流動解析

富士川河口周辺を対象に、既存の情報に基づく3次元地下水環境モデルの構築方法とその不確 実性が地下水流動の予測に与える影響を評価した。既存の文献・資料を収集し、3次元地質モデ ルを作成した。大部分の領域を火山性噴出物で覆い隠されているため、深部の情報が乏しく、断 層の有無や深部の地層について不確実性を有するモデルとなった。これに基づいて地下水流動解 析を実施した結果、断層や深部の地層の不確実性が、塩淡境界や深部の滞留時間に影響を与える ことがわかった。今後、物理探査やボーリング調査で深部を調査する必要があると考えられる。

(2)海陸連続3次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得手法の高度化 1)プッシュプル試験

プッシュプル試験システムを用い、帯水層中の地下水の速さの推定をおこなった。プッシュプ ル試験自体は 1980 年代から用いられてきた古典的なものだが、極低流速場における適用例はな い。極低流速場へ適用するためには、帯水層を構成する物質に対し、トレーサーの収着を極力防 ぐことと、待機時間をできるだけ長くすることという2つ課題があった。そこで、トレーサーと して化学的に不活性な同位体を用い、さらにトータルで 7 年間の時間をかけて実験をおこない、 その成果をまとめた。

・広い海岸平野の深度100mに位置する、氷期降水(地下水年代が1万年以上の地下水)の速さ は0.05 m/y以下と推定された。したがって、この氷期降水はほとんど流動していないことが示さ れた。この事実は、氷期降水と連続する海底下の地下水が今日ほとんど動いていないことを強く 示唆するものである。

・このような極低流速場で地下水の速さを実測する方法は極めて限られている。さらに、沿岸部 では潮汐の影響もあるため、2つの観測井を利用して正しい動水勾配を得ることが困難な場合が 多い。このような条件においても、本手法は地下水の速さを求めるための強力な調査方法になり うることが示された。

・本システムは長期にわたり、システムの組み立てと撤去を繰り返しただけでなく、請負者も変 更になった。しかし、繰り返しの試験によって得られた破過曲線の再現性は、本手法が十分に実 用に耐えられることを示した。

・プッシュプル試験は単孔式揚水試験と道具立てが近く、揚水試験から続けて実施できる。また、 地下水の速さを測定中は特別な注意を払う必要がない。この点はコストの面で重要である。

2) 海底湧出地下水調查

・模擬実験と実海域での試験の結果、ROVと高精度音響カメラによる探査手法は、海底湧出地下 水の検出に有効である可能性が示された。

・海域作業の進捗は陸域に比べて現場の気象・海象条件に大きく左右されるため、十分な作業時 間を確保して適切な時期・時間帯に調査を行う必要がある。

(3)沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化

これまでの沿岸部における工学技術の検討成果を踏まえ、沿岸部における多様な地下水の水質 の影響や、処分場建設による地下水の引き込みに伴う再冠水完了までの水理環境の擾乱の影響を 考慮した、処分場の成立性を評価する性能評価手法、及び構成材料の地下水に対する機能変化の データの整備をすることとした。

沿岸部における処分場の成立性を評価するための、性能評価手順書素案を作成することとし、 国内外の検討事例の調査により性能評価の項目及び評価手法の整備が必要な点を把握した。また、 性能評価を実施するための水理解析技術の整備に向けて、多様な地下水組成の流動を考慮するた めの密度流解析、化石海水の設定、断層や薄層の影響など沿岸部の水理解析に考慮すべき事項に ついて予備解析により把握した。これらに基づいて性能評価手法及び水理解析手法の整備に向け た実施内容を具体化した。

処分場の構成材料に関して、セメント系材料及び緩衝材の上述のデータ整備に取組むこととし、 セメント系材料に関しては、支保工等の空洞安定性等の評価に向けた短期的な化学変質挙動と機 械的強度に関する知見の拡充のために、平成 30 年度までの地質環境分野で取得した地下水の分 析データを活用し、分野間で情報を活用し試験計画を検討した。

緩衝材に関し、機能変化に関するデータの拡充として、塩水におけるイオン強度や陽イオンを 考慮した緩衝材の膨潤率、透水性、イオン交換選択係数に関する試験を実施した。膨潤性に関し、 初期有効ベントナイト乾燥密度と最大膨潤率の関係によるデータ整理の結果、線形性が既往検討 より低いことを把握し、モデル化の方法を検討した。

加えて、緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充について、緩 衝材の代替オプションとなり得る海水との平衡を考慮したイオン型の異なる材料(Ca型/Ca型化 ベントナイト等)に生じるせん断等の局所現象を評価するための要素試験が実施出来るような環 境整備(予備試験と多機能リングせん断試験装置試作)と、緩衝材の変形とオーバーパックの変 位挙動の力学的相互作用を評価するための物理模型試験を行なった。遠心模型試験では、海水の 影響を考慮した Na型、Ca型ベントナイトの緩衝材におけるオーバーパック鉛直変位量について 比較でき、オーバーパックの浮上・沈下挙動について緩衝材応力の発揮と概ね調和的な結果であ った。 (4)沿岸部処分システム評価確証技術開発プロジェクトにおける分野間連携と人材育成事業への協力体制の構築

当該事業においては、分野間連携 WG を立ち上げ、Appendix X に示す活動を実施した。各分 野の実績をふまえた情報交換や次年度事業における成果を効率的に上げるためのデータ交換やそ の要求を実質的に行っている。最終年度に向けての成果が期待される。また、当該研究の成果や ノウハウを資源エネルギー庁が委託する他の事業の人材育成プログラムにも活用できる手段を模 索し始めている。

5-2 当該年度を終えての研究課題

データベースの整備と沿岸部地下水流動解析においては、地形地質を考慮した高精度な地下水 流動解析を実施しつつ、全国大で公開されている情報だけを使った日本列島沿岸部の3次元地質 環境モデルの構築に始まり、不確実性を含めた地下水流動解析との対比が行える状態になった。 これを、将来に向けてシステム化(システマティック解析)してゆく必要があり、さらには試験 地を実際に設定して地質環境を評価するための確証実験が求められる。

ボーリング調査地点を対象に地質モデルの作成とそれに基づく地下水流動解析を実施したが、 深部の情報が少ないため、深部の特性については不確実性が高い結果となった。このため、物理 探査やボーリング調査を行い、深部の情報を増やす必要がある。また、調査結果に基づいて、地 質モデルの更新や地下水流動解析を実施し、地質環境モデルの構築方法について検討していく必 要がある。

プッシュプル試験においては、今後得られた破過曲線の形成メカニズムを数値解析などによっ て明らかにすることが必要である。これにより、最適な待機時間、最適なトレーサー濃度を明ら かにするとともに、待機時間と分散長の関係を求めて、プッシュプル試験の高度化につなげるこ とが求められる。今回は地下水の速さを見積もるために5年間を要したが、今後の解析により待 機時間は大きく短縮可能になる可能性が高いと考える。また、処分岩体となる低透水の亀裂性岩 盤に対する適用を試みる必要がある。

海底湧出地下水研究においては、実海域における試験回数を増やすとともに、ソフトウェアを 活用した効率的な画像解析を進め、探査手法の信頼性を向上させる必要がある。さらに、湧出地 点周辺の堆積物や構造は、湧出がない地点と比較して違いが認められており、湧出と海底地形や 堆積物との関係性を検討するために、海底堆積物の採取が必要と考えられる。

工学技術においては、処分場の成立性を評価するため、性能評価手法及び水理解析手法の整備 に向け実施内容を具体化してきた、これらの検討をもとに手法の構築・整備をさらに進め、地質 環境情報から水理解析、性能評価への一連の流れを試行することにより、処分場の設計の観点か ら地質環境情報のうち重要な事項を抽出する等、地層処分事業の連携にも役立てる取組みを進め ていくことを考えている。緩衝材・オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡 充についても情報の整備と物理模型試験を通して、データの拡充・整備を進めていく予定である。

地質環境分野と工学技術分野の連携に関する検討・試行は、今後も積極的に進めることとし、 分野間における具体的な情報交換がもたらす効果を見える化することや評価技術の高度化に貢献 するための手法を探り、成果発表できる段階にまで高める。加えて、プロジェクトの効率的かつ 適正化に貢献できた要素を抽出できることを念頭にプロジェクトを進めるものとする。 平成31年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 (沿岸部処分システム評価確証技術開発) 成果報告書 分冊

APPENDIX

Appendix 目 次

Appendix I 地質等公開データを使った3次元地質環境概念モデル

Appendix II 地質概念モデルの構築と関連文献データベース

Appendix III 浜里試験地の測量記録

Appendix IV DD-4 孔の調査

Appendix V XRD の分析結果

Appendix VI 海底湧出地下水の探査に係る模擬実験および実海域試験

Appendix VII 再冠水に至る期間を対象とした性能評価手法に係る基盤整備

Appendix VIII セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充

Appendix IX 緩衝材の機能変化に係るデータの拡充

Appendix X 分野間連携 WG の記録

Appendix XI 評価委員会の記録

Appendix XII 知財運営委員会の記録

Appendix I

地質等公開データを使った3次元地質環境概念モデル

地質等公開データ(当該事業開発 DB)を使った3次元地質環境概念モデル

1. はじめに(モデリング)

本邦沿岸部を概観する意味を込めて、本研究では既存公表資料だけによるデータを取り まとめ、地質環境のモデリングと概念的な地下水流動解析を実施し、地域を概観できるよ うにした。まずは、①幌延モデルと②駿河湾モデルを例に挙げ、堆積層の地質構造、地球 科学特性を検証できるような構成となっているかを確認し、必要に応じて再構築や詳細解 析ができるようにした。

- ① 既存資料から作成した地質断面モデルを地球科学特性(THMC)との対比検証 研究開始時に、指定地域の既存資料(地質・地形など)および海底物理探査(Seismic) データから作成した地形や堆積層の地質・構造、地球科学特性(THMC が評価できる こと)等とを対比する。
- ② 地質断面モデルをメタデータベースの一覧に追記し再整理 データに相違が認められる場合には、地質断面モデルを修正し、メタデータベース (海域地質図ならびに海底堆積物図)の一覧に追記する形で整理しなおす。
- ③ 地質断面モデルその他の貸与データを用いた、3D 地質モデルの再構築 必要と認められた場合、上述の地質断面モデル及びその他のデータ(場所によって は 3D マップデータがある)を用いて、3D 地質モデルの再構築を行う。
- ④ 海水準変動を考慮できる適切な地下水流動解析領域の設定 地下水流動解析における評価範囲は、60 km×50 km(平面)×5 km(深度)程度とする。 本研究で構築する3D地質モデルの範囲は、評価範囲を包含し、かつ、海水準変動を 考慮できる適切かつ最小領域を設定する。
- ⑤ 地質モデル (SDM)を適切に表現できる地質モデルの設定 評価範囲については、水平方向の格子分割は 500m 以下とし、深度方向の格子分割は 対象地域の地質モデル (SDM) を適切に表現できるように設定する。

(1)幌延モデル

幌延モデルにおける地質断面図の位置を図1に示す。この中で MN 断面および CD 断面にて、地質断面図と積層標高データ(全国 1km 格子、産業総合研究所))により作成した地層境界面を比較した。

MN 断面での比較を図 2 に CD 断面での比較を図 3 に示す。この段階で、地質断面図 を正確には表現できていないことがわかる。



図 2 MN 断面での比較



図 3 MN 断面での比較

(2)駿河湾モデル

駿河湾モデルにおける地質断面図の位置を図4に示す。この中で OP 断面および GH 断面にて、地質断面図と積層標高データ(全国 1km 格子)により作成した地層境界面を 比較した。OP 断面での比較を図5に GH 断面での比較を図6に示す。ある程度は、地 質断面と同程度の範囲で作成されているが、深い地質のデータがない事がわかる。





図 5 OP 断面での比較



図 6 GH 断面での比較

2. 地域における不確実性解析

幌延モデル、駿河モデル2地域を選定し、不確実性の解析を行う。解析モデルは、上で 作成した3次元解析モデルを使用し物理定数についてもそのまま使用した。不確実性につい ては、①地質学的要素の不確実性、②隆起浸食の不確実性を考慮して将来の隆起による 海水面の変動の度合いの程度を変えて3パターンの検討を行った。

(1) 幌延モデルにおける不確実性解析

幌延モデルで使用した解析条件を示す。

・物性値

表1から表3に示した各材料定数を使用して3次元解析を行った。また、不飽和特性は、 図7を使用した。

名称	透水係数 [m/day]	比貯留係数 [m ⁻¹]	有効間隙率
Н	0.0864	1.0E-05	0.6
Q3	0.0864	1.0E-05	0.6
Q2	0.0864	1.0E-05	0.6
Q1	0.0864	1.0E-05	0.6
N3	0.0864	1.0E-05	0.6
N2	6.32E-05	1.0E-05	0.6
N1	7.84E-04	1.0E-05	0.6
Р	9.85E-04	1.0E-05	0.5

表1幌延モデル、各地質の物性値(浸透流)



図 7 幌延モデル、不飽和特性

名称	縦分散長 [m]	横分散長 [m]	分子拡散係数 [m2/day]	屈曲率	遅延係数
Н	200	20	8.64E-06	1	1
Q3	200	20	8.64E-06	1	1
Q2	200	20	8.64E-06	1	1
Q1	200	20	8.64E-06	1	1
N3	200	20	8.64E-06	1	1
N2	200	20	8.64E-06	1	1
N1	200	20	8.64E-06	1	1
Р	200	20	8.64E-06	1	1

表2幌延モデル、各地質の物性値(塩分濃度密度流)

表3幌延モデル、各地質の物性値(温度密度流)

名称	ρs [kg/m3]	Cs [J/(kg•K)]	熱伝導係数(土) [W/(m・K)]
Н	2428	779.5	1.038
Q3	2428	779.5	1.038
Q2	2428	779.5	1.038
Q1	2428	779.5	1.038
N3	2428	779.5	1.038
N2	2428	779.5	1.038
N1	2428	779.5	1.038
Р	2471	793.4	1.389

・不確実性条件と境界条件

幌延モデルで使用した解析条件を表4に示した。隆起量の違いにより CASE1 から CASE3 までを検討した。

	CASE1	CASE2	CASE3	
隆起による	30m隆起した場合	40m隆起した場合	50m隆起した場合	
海水面の変動量	(海水面が 30m 低下)	(海水面が 40m 低下)	(海水面が 50m 低下)	
降雨条件	海水面より標高の高い地表面に、148.4mm/year を与える			
温度境界条件	海水に接している地表面:13.0℃			
	海水面より標高の高い地表面:6.8℃			
	モデル底面:100°C			
濃度境界条件	海水に接している地表面:相対濃度 1.0			
降雨を与えている地表面:相対濃度 0.0				

表4幌延モデル不確実性条件、境界条件

・解析結果

CASE1 から CASE3 の各条件で計算を行った 10 万年後の解析結果を示す。CASE1 の各 結果を図 8 から図 10 に示す。CASE2 の各結果を図 11 から図 13 に示す。CASE3 の各結 果を図 14 から図 16 に示す。



図8幌延モデル、CASE1、全水頭コンター図



図9幌延モデル、CASE1、濃度コンター図



図 10 幌延モデル、CASE1、温度コンター図



図 11 幌延モデル、CASE2、全水頭コンター図



図 12 幌延モデル、CASE2、濃度コンター図



図 13 幌延モデル、CASE2、温度コンター図



図 14 幌延モデル、CASE3、全水頭コンター図



図 15 幌延モデル、CASE3、濃度コンター図



図 16 幌延モデル、CASE3、温度コンター図

(2) 駿河モデルにおける不確実性解析

駿河モデルで使用した解析条件を示す。

・物性値

表5から表7に示した各材料定数を使用して3次元解析を行った。また、不飽和特性は、 図17を使用した。

名称	透水係数 (水平方向) [m/day]	透水係数 (鉛直方向) [m/day]	比貯留係数 [m ⁻¹]	有効 間隙率
A_I	0.0864	0.0864	1.0E-05	0.1
uY	0.0864	0.0864	1.0E-05	0.1
Mz_S	0.0864	0.0864	1.0E-05	0.1
Sg_Fj	8.64E-04	8.64E-04	1.0E-05	0.1
Bs	8.64E-04	8.64E-04	1.0E-05	0.1
Tk	0.0864	0.0864	1.0E-05	0.1

表5駿河モデル、各地質の物性値(浸透流)



図 17 駿河モデル、不飽和特性

名称	縦分散長 [m]	横分散長 [m]	分子拡散係数 [m2/day]	屈曲率	遅延係数*
A_I	200	20	8.64E-06	1	1
uY	200	20	8.64E-06	1	1
Mz_S	200	20	8.64E-06	1	1
Sg_Fj	200	20	8.64E-06	1	1
Bs	200	20	8.64E-06	1	1
Tk	200	20	8.64E-06	1	1

表6駿河モデル、各地質の物性値(塩分濃度密度流)

表7駿河モデル、各地質の物性値(温度密度流)

夕称	ho s	Cs	熱伝導係数(土)
1111	[kg/m3]	$[J/(kg \cdot K)]$	$[W/(m \cdot K)]$
A_I	2500	750	1.5
uY	2500	750	1.5
Mz_S	2500	750	1.5
Sg_Fj	2500	750	1.5
Bs	2500	750	1.5
Tk	2500	750	1.5

・不確実性条件と境界条件

駿河モデルで使用した解析条件を表8に示した。隆起量の違いにより CASE1 から CASE3 までを検討した。

	CASE 1	CASE 2	CASE 3
	100m隆起した場合	150m隆起した場合	200m隆起した場合
隆起による 海水面 の変動量	(海水面が 100m 低	(海水面が 150m 低	(海水面が 200m 低
	下)	下)	下)
		海水面より標高の高い地表面に、	
降雨条件		949.5mm/year を与える	
		海水に接している地表面:22.8℃	
温度境界条件		海水面より標高の高い地表面:17.4°C	
漕 亩 培 思 冬 代		海水に接している地表面:22.8℃	
(反)又%1↑本目		海水面より標高の高い地表面:17.4°C	

表8駿河モデル不確実性条件、境界条件

・解析結果

CASE1 から CASE3 の各条件で計算を行った 10 万年後の解析結果を示す。CASE1 の各 結果を図 18 から図 20 に示す。CASE2 の各結果を図 21 から図 23 に示す。CASE3 の各結 果を図 24 から図 26 に示す。



図 18 駿河モデル、CASE1、全水頭コンター図



図 19 駿河モデル、CASE1、濃度コンター図







図 21 駿河モデル、CASE2、全水頭コンター図



図 22 駿河モデル、CASE2、濃度コンター図



図 23 駿河モデル、CASE2、温度コンター図



図 24 駿河モデル、CASE3、全水頭コンター図



図 25 駿河モデル、CASE3、濃度コンター図



図 26 駿河モデル、CASE3、温度コンター図

3. 考察

3-1 緒言

地層処分技術の確立のため、地域の地質環境特性を科学的に明らかにする必要がある。特 に 天然バリアと人口バリアの特性を理解したうえでの処分システムの安全性を評価する技 術開発 が求められており、本研究では、資源エネルギー庁より受託する沿岸部処分システム 評価確証技 術開発に係る沿岸部の広域・長期地下水流動解析を行うことを目的とした。高レ ベル放射性廃棄 物地層処分事業においては長期間に及ぶ広域地下水流動解析が必要であり, 特に沿岸部の深部 にまで及ぶ停滞性の地下水不動領域の有無を調査するためには,海域と 陸域を結合したシーム レスな 3 次元水理地質構造モデルによる地下水流動解析が求められる。深地層の地下水環境 を把握するため、先ず指定地域における 3D 地質モデルの再構築と検証を実施し、指定地域にお ける広域・長期地下水流動解析を実施した。

□沿岸部処分システム評価確証技術開発に関する項目

- 1) 例示地域における3D 地質モデルの再構築と検証
 - ① 既存資料から作成した地質断面モデルを地球科学特性(THMC)との対比検証
 - ② 地質断面モデルをメタデータベースの一覧に追記し再整理
 - ③ 地質断面モデルその他の貸与データを用いた、3D 地質モデルの再構築
 - ④ 海水準変動を考慮できる適切な地下水流動解析領域の設定
 - ⑤ 地質モデル (SDM)を適切に表現できる地質モデルの設定
- 2) 例示地域における広域・長期地下水流動解析
 - 密度依存を考慮した地下水流動と塩分・熱密度流の同時連成解析
 - ② 解析プログラムおよびフロント・エンドプロセッサの修正
 - ③ 3地域における不確実性解析

3-2 例示地域における 3 次元地質環境モデルの再構築と検証ステム構築

既存資料から作成した地質断面モデルを地球科学特性(THMC)との対比検証を行い、3D 地質モデルの再構築を行った。対比検証の結果、堆積層標高データ(全国1km格子、産業総 合研究所))により作成した地層境界面は、地質年代で分かれており、海洋地質図との一致 は見られず、また、対象範囲の地層構造を表現できるだけの情報が無かった為、堆積層標高デ ータの地形データのみを使用することとした。指定地域の解析モデルの地質境界面の作成 については、海洋地質図(産業総合研究所)の資料内の断面図を使用して地質境界の入力を 行った。図 4-1 に使用した海洋地質図の断面図一つである駿河湾モデルを例に示す。



図 27 駿河湾モデル 海洋地質図(断面図)

3-3 例示地域における広域・長期地下水流動解析

この際、氷期サイクル(約12万年)を念頭に置き、2サイクル以上の時間を見込んで解析 を行い、現在判明している塩分と温度の分布を再現する。解析には地下水流動と塩分・熱密度流 の同時連成解析を行う。なお、地下水流動と塩分・熱密度流の同時連成解析は、密度 依存を考慮し た飽和・不飽和浸透流のオイラー法(有限要素法)による定式化、ならびに移 流分散のオイラ リアン・ラグラジアン法(有限要素法、及び後退粒子追跡法・修正連続移動 粒子追跡法)によ る定式化に基づく時間変化に対応した断面二次元、三次元解析を実施した。

・塩分・温度密度流の確認解析

広域・長期地下水流動解析のモデルを作成する前に、塩分密度流解析、温度密度流解析及び 連成解析の確認解析を実施し、解析結果に影響を及ぼす条件・パラメーターを調査した。結果 として、解析モデルの構築においては、クーラン数、ペクレ数の基準を満たすようなモ デルを作成する必要がある事が確認できた。

各種パラメーターによる解の安定性については、クーラン数は、安定解を得る為に 1.0 以 下となるようメッシュサイズ、流速(透水係数)、ΔTを設定する必要があった。

ペクレ数は、温度密度流の場合移流と拡散(塩分密度流の場合移流と分散)の影響度を示 すパラメーターであり、ペクレ数を大きくすると安定解が得られず、小さくし過ぎると移流の 影響が無くなってしまうため、解析の目的に応じて最適なペクレ数を設定する必要がある。 温度密度流においてペクレ数に関係するパラメーターは、熱拡散係数、熱伝導率、流速、メッシ ュサイズであるが、熱伝導率を調整すると移流の影響を正しく評価することができなくな るため、メッシュサイズ、流速(透水係数)を調整してペクレ基準を満たすようにした。状 況に応じてペクレ数は、下記のように設定する。 ・対流と拡散の影響が同じ位の解析を実施する場合:ペクレ数を1程度とする。

・対流の影響が大きい解析を実施する場合:ペクレ数を1以上とする。

・拡散の影響が大きい解析を実施する場合:ペクレ数を1以下とする。

た地下水面標高データと解析結果が概ね一致することを確認した。

・密度依存を考慮した地下水流動と塩分・熱密度流の同時連成解析

密度依存を考慮した地下水流動と塩分・熱密度流の同時連成解析の検討を行った。①幌 延モデル、②駿河モデルともに、3次元モデルにより地下水浸透流解析及び地下水流跡線 解析を実施し流動場を求めて、断面2次元モデルにおいて密度依存を考慮した地下水流動 と塩分・熱密度流の同時連成解析を実施した。

代表的な結果として図 4-1 に幌延地域での塩分濃度と、参考資料 21 の電磁法探査結果と 比較した図を示した。ここで、取りまとめたデータ(各堆積層の地質境界面データ)と電 磁法探査結果の地質構造が異なっていた為、各堆積層の地質境界面データを適用したモデ ル(DB モデル)と電磁法探査結果を適用したモデル(同定モデル)でそれぞれ解析を実 施し、結果を比較した。両モデルの解析結果を表 4-1 に示す。また、塩分濃度コンター図 の比較を図 4-2 に示す。図の黒線は、相対濃度 0.9 (比抵抗 0.5[Ω·m])に相当するライン を図示したものである。



図 28 モデル別塩分濃度コンター図

モデル	地質構造	透水係数	モデル全長 [km]	結果
DB モデル	 「4.各種データの可 視化」の各堆積層 の地質境界面 データを基に作成 	既往論文を 参考に設定	約 75	淡水領域は更別層を水みちとして分布し ており、電磁法探査結果と比較して地質 構造が異なる領域で淡水領域の分布に差 が見られた。

表9モデル別解析結果及び電磁法探査結果との比較
4. まとめ

幌延モデル、駿河モデルについて、既存公表データを使ったモデリングとこれに基づい て不確実性の解析を行った。具体的には、地層処分技術の確立のため、沿岸域における地 下水・地質環境の特性に着目して、地表から深部に至る地下水の水理構造の一般化を解明 することを目的とし、堆積層の構造、塩分濃度、地下水年代、地下温度についてこれまで に調査されたデータを使用して、日本列島沿岸部における深部地下水特性を確認する為、 密度依存を考慮した地下水流動と塩分・熱密度流の同時連成解析を行った。また、将来予 測ために、不確実性の解析を行い検討可能性の評価を行っている。

その結果、地質環境特性を見ると、地下水が流動している帯水層(移流場)より深い地 層で地下水流速が遅くなり、0.1mm/year 以下の拡散場となっていた。また、地下温度に ついても深度 500m より深い地点においては、同深度の地層で温度がほぼ一定となってお り安定的な地下環境と確認できた。さらに、深部地下水特性解析の実施により、塩分密度 流と温度密度流の相互干渉が確認され、連成解析機能の必要性と実用性が確認された。今 後は、詳細な電磁場探査結果が無くても、連成解析を併用できれば探査対象外の領域を補 間し地層処分に適した地質環境選定が行えることが期待できた。 Appendix II

地質概念モデルの構築と関連文献データベース

地質概念モデル・地質モデル作成に用いた文献一覧および地質概念モデルの解説

1. 収集した文献・資料の一覧

三次元地質モデル作成にあたり、今年度は合計 84 件の事例研究地域に係る文献・資料を収集 した。表 1-1~表 1-4 に収集した文献・資料の一覧を示す。また、各文献・資料に含まれてい る一次データ及び二次データの種類についても、同表に併せて掲載した。

表 1-1 収集した文献, 資料等(1)

				1					一次ラ	データ								二次	データ							
No. 著者	隆行年 文献名	揭載先	種類	査読 種別	陸城	走 向・ 傾斜 他	ボー リン グ他	地形 図(読 取)	物理 探查	物 年代 分析 化学 分析	花粉 分析	微化 石分 析	その 他	地質 地質 断 図 図	質面 地境等線	質 界 重力 高 図	空中 磁気 図	地下 水 高 線 など	E状 t比 変	地 設 動 図	形 等層 分 厚線 図		》 」 構造	その 他	入手 状況	偏考
1 (国研)產業技術総合研究所	2019 20万分の1日本シームレス地質図V2, データ更新日2019 年 3月22日	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	地質図	-	陸域		_	_	-		-	_	-	0 -			-	_			_	-	-	-	0	・web公開情報(日本全域shapeファイル)
2 尾崎正紀・杉山雄一	2018 (加) 2018 (1) 2017 (1) 2017 (1) 2017 (1) 2017 (1) 2017 (1) 2017 (1) 2017 (1) 2018 (1) 2018	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	地質図	-	陸域		-	_	-		-	-	-	0 0			-	-			_	-	-	-	0	
3 今泉俊文・宮内崇裕・堤浩之・中田高 編	2018 活断層詳細デジタルマップ[新編] (USBメモリ)及び解説書	東京大学出版会	活断層 分布図	-	陸域		-	-	-		-	-	-				-	-			_	-	○ 活断 層	-	0	
4 尾崎正紀・水野清秀・佐藤智之	海陸シームレス地質情報集, 駿河湾北部沿岸域, 港陸 2016 シームレス地質図8-5,5万分の1富士川河口断層帯及び周 辺地域地質編纂図(同説明書)	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	地質図	-	陸域 海域	0 -	0	_	-	〇 〇 火山 灰	-	-	-	0 -			-	-	0 () -	_	-	-	-	0	 ・ボーリング他一次データのうち,地質柱状図は標高不明 ・ボーリング他一次データのうち,ボーリング地質柱状図は丸井ほか (2015, 2016)の引用
丸井软尚,光畑裕司,町田功,横田俊之,小野昌彦,樽 沢春菜,越谷賢,磯前沙也加,橋瀬蜀一郎,井川怜欧, 5 上田匠(編:国立研究開発法人 産業技術総合研究所)	2016 海域地質環境調查確証技術開発 平成27年度 成果報告書 (平成28年3月)	経済産業省 資源エネ ルギー庁	報告書	-	陸域 沿岸 域		0	_	0	 ○ 地下 水 化学 	-	_	○ 流況	0 0	- 0		_	0			_	-	-	○ 流動 解析	0	 ・ボーリングの一次データに各種検層ログ・逸水箇所・水理試験結果 (水 理定数)を含む ・化学分析の一次データに地球化学・XRD・全岩組成を含む ・地質図と地質断面図は他文献からの引用
6 狩野謙一・伊藤谷生・渡辺俊樹・小田原啓・山本玄 珠・藤原明・阿部進	富士川河口断層帯における2014年度浅部高分解能地下 2016 構造探査の結果報告,日本地質学会第123年学術大会, セッションID R14-O-4	日本地質学会学術大 会講演要旨	講演要旨	-	陸域		-	_	0	-	-	-	-				-	-			_	-	-	-	0	 ・富士川周辺 ・物理探査一次データは反射法地震波トモグラフィ解析断面(位置不明)
7高田亮・山元孝広・石塚吉浩・中野俊	2016 富士火山地質図(1:50,000, 第2版, 第2刷)及び同説明書, 特殊 地質図12	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	地質図 説明書	-	陸域		-	-	-		-	-	-	0 -			-	-			_	-	-	-	0	・富士山
8 佐藤智之・荒井見作	海陸シームレス地質情報集, 駿河湾北部沿岸域, 海陸シー 2016 ムレス地質図S-5,20万分の1駿河湾北部沿岸域海底地質図 及び同説明書	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	地質図	-	海域		-	-	○ 音探 断面		-	_	-	0 0) -		-	_			_	-	-	-	0	
9 西田尚央・池原研	海陸シームレス地質情報集, 駿河湾北部沿岸域, 海陸シー 2016 ムレス地質図S-5, 駿河湾北部沿岸域の海底堆積物の特徴 とその堆積プロセス	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	説明書	_	海域	0 -	0	-	-	 〇 粒度 分布 	-	-	-				-	_			_	-	-	-	0	 ・ボーリング他一次データは、約5000cal yr BP以降の海底堆積物の 地質 柱状図、コア写真など
10 石原武志・水野清秀	海陸シームレス地質情報集,駿河湾北部沿岸域,海陸シー 2016 ムレス地質図S-5,駿河湾北部沿岸域における平野地下の 浅部地質構造	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	説明書	_	陸域		0	-	-	0 -	-	-	-	0 0		- c	-	-			_	-	-	-	0	
11 伊藤忍・山口和維	海陸シームレス地質情報集, 駿河湾北部沿岸域, 海陸シー 2016 ムレス地質図S・5, 富士川河口地域における反射法地震探 査	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	説明書	_	陸域		-	-	0		-	-	-	- (- (-	_			_	-	-	-	0	
12 山口和雄・伊藤忍	海陸シームレス地質情報集, 駿河湾北部沿岸域, 海陸シー 2016 ムレス地質図S・5, 静岡市三保半島先端陸域の浅部地下構造	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	説明書	_	陸域		0	-	0		-	-	-				-	_			_	-	-	-	0	
13 大熊茂雄・駒澤正夫・石原丈実・上嶋正人	海陸シームレス地質情報集, 駿河湾北部沿岸域, 海陸シー 2016 ムレス地質図S-5, 20万分の1駿河湾北部沿岸域重力図 (プ ーゲー異常) 及び同説明書	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	重力図	-	陸域 海域		-	_	-		-	_	-			- 0	-	_			_	-	-	-	0	
14 大熊茂雄・中塚正・山谷祐介	海陸シームレス地質情報集, 駿河湾北部沿岸域, 海陸シー 2016 ムレス地質図S-5, 20万分の1 駿河湾北部沿岸域空中磁気図 (全磁力異常)及び同説明書	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	空中 磁気図	-	陸域 海域		-	_	-		-	_	-				0	_			_	_	-	-	0	
15 井川怜欧・小野昌彦・神谷貴文・渡邊雅之・村中康 秀・平野智章・丸井教尚	2016 海陸シームレス地質情報集, 駿河湾北部沿岸域, 海陸シ ームレス地質図S-5, 富土山周辺の水文調査	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	説明書	-	陸域		0	_	-	 − 地球 化学 	-	_	-				-	-			_	-	-	-	0	
16 大熊茂雄・駒澤正夫・石原丈実・上嶋正人・尾崎正 紀・水野清秀・佐藤智之	海陸シームレス地質情報集, 駿河汚北部沿岸域, 海陸シー 2016 ムレス地質図S-5,5万分の1富士川河口断層帯及び周辺地 域地質一重力図	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	重力図	-	陸域 海域	0 -	-	-	-		-	_	-	0 -		- 0	-	-			_	-	-	-	0	
17 大熊茂雄・中塚正・山谷祐介・尾崎正紀・水野清秀・佐 藤智之	海陸シームレス地質情報集, 駿河汚北部沿岸域, 海陸シー 2016 ムレス地質図S-5,5万分の1富士川河口断層帯南部地質– 空中磁気図	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	空中 磁気図	-	陸域 海域	0 -	-	_	-		-	-	-	0 -			0	-			_	-	-	-	0	
18 尾崎正紀・佐藤智之・荒井晃作	海陸シームレス地質情報集, 駿河湾北部沿岸域, 海陸 2016 シームレス地質図S-5, 20万分の1 駿河湾北部沿岸域海陸地 質図	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	地質図	-	陸域 海域		-	-	-		-	_	-	0 -			-	-			_	-	-	-	0	
19 大熊茂雄・駒澤正夫・石原丈実・上嶋正人・尾崎正 紀・佐藤智之・荒井晃作	海陸シームレス地質情報集, 駿河湾北部沿岸域, 海陸シー 2016 ムレス地質図S・5, 20万分の1駿河湾北部沿岸域地質 一重力図	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	重力図	-	陸域 海域		-	_	-		-	-	-	0 -		- 0	-	-			_	-	-	-	0	
20 大熊茂雄・中塚正・山谷祐介・尾崎正紀・佐藤智之・荒 井晃作	海陸シームレス地質情報集, 駿河湾北部沿岸域, 海陸シー 2016 ムレス地質図S-5,20万分の1駿河湾北部沿岸域地質 一空中磁気図	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	空中 磁気図	-	陸域 海域		-	-	-		-	_	-	0 -			0	-			_	-	-	-	0	
21 大熊茂雄・中塚正・中野俊・佐藤秀幸・大久保綾子	2016 空中磁気図47,2万5千分の1富士火山地域高分解能空中磁 気異常図	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	空中 磁気図	-	陸域		-	-	-		-	_	-				0	-			_	-	-	-	0	
22 国土地理院	2016 基盤地図情報 数値標高モデル(10mメッシュ)	国土地理院	DEM	-	陸域		-	0	-		-	-	-				-	-			_	-	-	-	0	・web公開情報(事例研究地域を含むXMLをダウンロード) ・5mメッシュDEMは、同じ測量成果に基づくデータとして網羅されてい ない
23 国土地理院	2016 基盤地図情報 基本項目 海岸線	国土地理院	海岸線	-	陸域 海域		_	0	-		-	-	-				-	_			_	-	-	-	0	・web公開情報(事例研究地域を含むXMLをダウンロード)
丸井教尚,光畑裕司,町田功,横田俊之,井川怜欧, 上田匠,小野昌彦,平野智章,越谷賢,楠瀬動一郎, 檀沢春菜,小原直樹,吉澤拓也(編:独立行政法人 産業 技術総合研究所)	2015 海域地質環境調查確証技術開発 平成26年度 成果報告書 (平成27年3月)	経済産業省 資源エネ ルギー庁	報告書	_	陸域 沿岸 域		0	0	0	 ○ 地下 水 化学 	-	-	_	0 0		o –	_	0			_	_	-	○ 流動 解析	0	 ・ボーリングの一次データに各種検層ログ・逸水箇所・水理試験結果 (水 理定数)を含む ・化学分析の一次データに地球化学・XRD・全岩組成を含む ・地質図と地質断面図は他文献からの引用 満底地形および底質判読結果を含む
丸井敦尚・光畑裕司・町田功・横田俊之・井川怜欧・上田 25 匹 小野昌彦・平野智章・楠珈勤一郎・古宇田亮一 小原 直樹・越谷賢・榑沢奉菜・伊藤成輝・吉澤拓也・西崎聖史 (編:独立行政法人 産業技術総合研究所)	2014 海域地質環境調查確証技術開発 平成25年度 成果報告書 (平成26年3月)	経済産業省 資源エネ ルギー庁	報告書	-	陸域 沿岸 城	- トレ ンチ	-	_	0	 − ○ 地下 水 化学 	-	_	-	0 0	- 0		-	0			_	-	-	○ 流動 解析	0	 ・地質図と地質断面図は他文献からの引用 ・水理地質構造モデルの概要(富士山体の水理地質区分)記事あり

表 1-2 収集した文献, 資料等(2)

											一次デー	-9								二次	データ							
No.	著者	発行年	文献名	揭載先	種類	査読 種別	陸域 <i>上</i> 海域 傾斜	露頭他	ボー リン グ他	地形 図(読 取)	物理 年 探査 分	年代 性 分析 化 分	ッ ・ 花粉 学 分析 析	微化 石分 析	その 他	地質図	地質 断面 図 線	重力図	空中 磁気 4 図 <i>j</i>	<u>地下</u> 水 本 察 線 よど	主状 ¹ 引 型	地殻 「 王動	也形 等履 ≤分 厚線 図 図	層 汀分図	線 布 構造	その 他	入手 状況	偏考
26	高須賀俊文・藤本光一郎・萬年一剛	2014	静岡県裾野市十里木の坑井試料に基づく富士・愛鷹両火 山と基盤の地質, 日本火山学会, セッションID P1-18	日本火山学会講演予 稿集	講演要旨	-	陸域 -	_	0	_	0			_	_	_		-	_	_	-	-				-	0	 ・富士山及び愛鷹山、一次データは実施位置と詳細が不明(地下地質分布 に関する記事あり)
27	杉山雄一・松田時彦	2014	地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)「南部地域の地 質」及び同説明書	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	地質図	-	陸城〇〇	0	-	0	_	- (- c	0	-	0	0 –	0	-	-	-	-			- 0	-	0	・露頭他の一次データとして多数のルートマップあり
28	高田亮・山元孝広・石塚吉浩・中野俊	2014	富士火山地質図(1:50,000, 第2版, Ver.1, , CD-ROM)	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター研究資料集	地質図	-	陸城 -	-	-	-	_			-	-	0		-	-	-	-	-				-	0	
29	(財)日本水路協会 海洋情報研究センター 情報事業部	2012	海底地形デジタルデータ(CD-ROM) M7001 Ver.2.2 関東南 部	(財)日本水路協会	等深線	-	海域 -	-	-	0	_			-	_	_		-	-	-	-	-				-	0	
30	杉山雄一,水野清秀,狩野謙一,村松武,松田時彦,石 塚治,及川輝樹,高田亮,荒井晃作,岡村行信,実松健 造,高橋正明,尾山洋一,駒津正夫	2010	20万分の1地質図幅「静岡及び御前崎」(第2版)	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	地質図	_	陸域 _ 海域	_	-	_	_			_	_	0		-	-	-	-	-				_	0	
31	松田時彦	2007	富士山の基盤の地質と地史	富士火山(荒牧重雄 ほか編,山梨県環境 科学研究所)	論文	_	陸域 —	-	-	0	_			-	_	0		0	-	-	-	_				_	0	 富士山 ・地質図(二次データ)として、基盤の推定地質区分図を含む ・図5の升沢山地の南北断面概念図(松田,2000)は調査範囲外だが基盤構造の参考となる
32	山元孝広・石塚吉浩・高田亮	2007	富士火山南西麓の地表および地下地質:噴出物の新層序 と化学組成変化	富士火山(荒牧重雄 ほか編,山梨県環境 科学研究所)	論文	-	陸域 —	-	0	-	_	0	- c	_	_	0		-	-	-	-	-				_	0	・畜土山
33	中田節也・吉本充宏・藤井敏嗣	2007	先富士火山群	富士火山(荒牧重雄 ほか編,山梨県環境 科学研究所)	論文				0																		0	
34	町田洋・松田時彦・海津正倫・小泉武栄 編	2006	日本の地形5 中部 2-3 駿河湾沿岸	東京大学出版会	図書	-	陸域 -	-	-	-	-			-	-	-	0 –	-	-	-	-	-	0 -		- ○ 断層	_	0	
35	日本地質学会 編	2006	日本地方地質誌4 中部地方 16.4 小河内層	朝倉書店	図書	-	陸域 〇	-	-	_	_		- -	-	_	0		-	_	-	_	-	- -		- 0	-	0	
36	国土地理院	2004	火山土地条件調查報告書(富士山地区),技術資料D2- No.48	国土地理院	説明書	-	陸域 一	-	-	-	-			-	-	_		-	-	-	-	-	0 -			-	0	
37	国土地理院	2003	5万分の1火山土地条件図「富士山」及び解説書	国土地理院	地形区分 図説明書	-	陸域 -	-	-	_	-		- -	-	_	-		-	-	-	-	_	0 -		- -	-	-	・web公開情報(地理院地図),地理院タイル ・刊行図未入手
38	尾崎正紀・牧本博・杉山雄一・三村弘二・酒井彰・久保 和也・加藤禎一・駒澤正夫・広島俊男・須藤定久	2002	20万分の1地質図幅「甲府」	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	地質図	-	陸域 -	-	-	_	_			-	_	0		0	-	-	-	-				-	0	・第2図(重力異常の2㎞の上方接続残差)に基図なし
39	海域地質構造マップワーキンググループ	2001	200万分の1 日本周辺地域の第四紀地質構造図	海洋調査技術	論文				0																		0	
40	松田時彦	2000	丹沢山地-衝突されて高くなった山地, 貝塚爽平ほか編 『関東・伊豆小笠原』	東京大学出版	書籍		陸域																					
41	Imanaga I	1999	Stratigraphy and tectonics of the Ashigara Group in the Izu collision zone, central Japan	Bull . Kanagawa Prefect. Museum, Natur. Sci.	論文		陸域																					
42	間村行信・湯浅真人・倉本真一	1999	海洋地質図52,20万分の1駿河湾海底地質図及び同説明書	通商産業省 工業技術 院 地質調査所	地質図	-	海域 -	0	_	0	0	0 0	- c	-	-	0	0 -	0	0	-	-	-				-	0	
43	海域地質構造マップワーキンググループ	1999	日本列島海域地質構造図(日本周辺海域の地質構造マッピ ング[1])	地質ニュース	論文				0																		0	
44	駒澤正夫・広島俊男・長谷川功・村田泰章・杉山雄一	1997	50万分の1活構造図8「東京」(第2版)及び同説明書, 重力構 造図	通商産業省 工業技術 院 地質調査所	活断層 分布図	-	陸域 -	-	-	-	_			-	-	_		0	_	-	-	-			- 0	-	○ 紙媒 体	 説明書未入手
45	佐竹健治・石田瑞穂・杉山雄一	1997	50万分の1活構造図8「東京」(第2版)及び同説明書, 地震構 造図	通商産業省 工業技術 院 地質調査所	活断層 分布図	-	陸域 一	-	-	-	-			-	-	-		-	-	-	-	-			- 0	-	○ 紙媒 体	· 説明書未入手
46	杉山雄一・須貝俊彦・井村隆介・水野清秀・遠藤秀 典・下川浩一・山崎晴雄	1997	50万分の1活構造図8「東京」(第2版)及び同説明書, 活構造 図	通商産業省 工業技術 院 地質調査所	活断層 分布図	-	陸域 -	-	-	-	-			-	_	0		-	-	-	-	_			- 0	-	○ 紙媒 体	• 説明書未入手
47	下川浩一・木野清秀・山崎晴雄・高橋亨・安藤伸・吉田 堯史	1996	富士川断層系における断層活動履歴調査(第四紀), 日本地 質学会第103年学術大会, セッションID 80	日本地質学会学術大 会講演要旨	講演要旨	-	陸城 -	0	-	-	0			-	_	_		-	-	_	-	_				-	0	・富士川周辺
48	静岡県	1996	平成7年度 富士川河口断層帯に関する調査成果報告書 (文部科学省交付金による活断層調査成果報告書)	地震調査研究推進本 部	報告書	-	陸域 沿岸 ○ 域	0	0	0	0	0 -		-	_	0		-	-	-	-	-				-	-	 ・富士川周辺 ・web公開情報(報告書本紙については文部科学省研究開発局地震・防災 研究課で閲覧)
49	金栗聡・天野一男	1995	南部フォッサマグナ富士川谷南東部に分布する富士川層 群の地質とナンノ化石層序	地質学雑誌	論文	外部 査読	陸域 〇	0	_	_	- 5	0 ナン - ノ		0 ナン ノ	_	0	0 -	_	_	-	0	-			- 走向 線	-	0	 富士川周辺、ルートマップ及びルート地質柱状図あり
50	Yamazaki H.	1992	Tectonics of a Plate Collision along the Northern Margin of Izu Peninsula, Central Japan	地質調査所月報	論文	外部 査読	陸域 —	-	0	_	-	0 -		-	_	0	0 0	-	-	-	-	-	0 -	. (0	-	0	 ・富士川周辺、伊豆海脚に相当する基盤高度分布図あり ・地質断面図は、町田ほか編(2006)に引用されている
<u> </u>				•														· · ·										

表 1-3 収集した文献, 資料等(3)

	1				1	1					一次デ	ータ									二次	データ						1	
No. 著者	発行年	文献名	掲載先	種類	査読 種別	陸域 / 海域	走 向・ 傾斜	露頭 他	ボー リン グ他	地形 図(読 取)	物理 探査	年代 性 分析 化 分	物 主・ 花 ご学 分 分析	花粉 分析	微化 石分 析	の地	地質 地質 断可 図 図	町 地 第 町 第 線	質 界 重力 高 図	空中 磁気 図	地下 水 株 線 など	主状 対比 図	盘 動 図	形 等月 分 厚利 図		泉 地質 構造	その 他	入手 状況	偏考
51 Miyaji N., Endo K., Togashi S. and Uesugi Y.	1992	Tephrochronological history of Mt. Fuji(地質調査所発行 29th IGC field trip guide book vol.4 "Volcances and geothermal fields of Japan"の一部),数値地質図G-9(2002 発行、CD-ROM版)	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	案内書	-	陸域	_	0	-	-	-	0	0	- :	○ 珪藻 -	- (0 0	_	_	-	-	-		0	-	_	-	0	 ・富士山,等層厚線図は複数時期に噴出した火山灰,スコリア,溶岩及 び岩屑なだれのもの ・富士山体のスケール無し模式断面図(Tsuya,1938)あり
52 柴正博	1991	南部フォッサマグナ地域南西部の地質構造-静岡県清水 市および庵原郡地域の地質-	地団研専報	図書	-																							-	・富士川周辺
53 柴正博・大久保正寿・笠原茂・山本玄珠・小林滋・駿河 湾団体研究グループ	1990	静岡県富士川下流域の更新統,庵原層群の層序と構造	地球科学	論文	外部 査読	陸域	0	0	-	-	_	-	-	-	— 礫 組) 種 (成	0 0	-	0	-	_	-		_	_	○ 走向 線	○ 古地 理図	0	 ・富士川周辺 ・ルートマップあり ・庵原層群の走向線図あり
54 杉山雄一・下川浩一	1990	地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)「清水地域の地 質」及び同説明書	通商産業省 工業技術 院 地質調査所	地質図	-	陸域	0	-	-	○ 接峰 面図	-	0	0	0	0 -	- (0 0	-	0	_	_	-		-	-	0	-	0	・模式柱状図(正確な位置の特定不可)は露頭他の一次データとしな い
55 松原彰子	1989	完新世における砂州地形の発達過程-駿河湾沿岸低地を 例として-	地理学評論	論文	外部 査読	陸域	-	-	-	-	-	0	-	-			- 0	_	_	-	_	-		-	-	-	-	0	 ・浮島ヶ原 ・ボーリング他の一次データ記載なし(オールコアボーリング結果など 、 ・ボーリング他の一次データ記載なし(オールコアボーリング結果など 、 と、 ・焼貨断面図は、町田ほか編(2006)に加筆引用されている
56 Ibaraki M.	1989	Geologic ages of the Neogene sequences of the South Fossa Magna based on planktonic foraminifera.	Rept. Fac. Sci., Shizuoka Univ.	紀要																								_	• 富士川周辺
57 由井将雄·藤井敏嗣	1989	愛鷹火山の地質	地震研究所彙報	紀要		陸域	0	0	_	0	-	0	0	-		- (0 –		-	-	_	-		0	_	-	-	0	・愛慮山 ・愛原他の一次データとして須津川に沿うルート柱状図あり ・露頭他の一次データとして三島ローム層,丹那ローム層,下和田テ フ 戸園の柱状図あり(位置不明) ・様式柱状図 (Fig.12) は露頭他の一次データとしない
58 Tsuya H., Machida H. and Shimozuru D.	1988	Explanatory note for geologic map of Mt. Fuji (second printing)(地質調查所発行 1:50,000 富士火山地質図 第2 刷の解説書), 数値地質図G-9(2002発行, CD-ROM版)	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	地質図 説明書	-	陸域	_	0	_	0	_	_	0	-	- 古 書) "文 (書	0 -	_	_	_	_	-		0	_	-	_	0	 ・富士山 ・等層厚線図は"Fuji Tephra"のもの ・1988年複製の第2刷は津谷(1968の火山地質図と同図と思われる
59 日本の地質『中部地方 I』 編集委員会 編	1988	日本の地質4 中部地方 I 3.3 南部フォッサマグナ地域およ び周辺地域 (2) 南部フォッサマグナ地域 4.富士川谷およ び5.竜爪山地-高草山地域-竜爪層群	よ よ 共立出版	図書	-	陸域	0	-	-	-	-	-	_	-		- (0 –	_	-	-	-	-		_	_	-	-	0	
60 嶋村清	1986	駿河トラフ底の地形及び地質構造-衝突境界近傍の沈み 込み帯についての地質学的考察-	地学雑誌	論文	外部 査読	海域	-	-	_	0	0	-	-	-			- -	_	-	-	-	-	- -	_	_	-	_	0	
61 高橋稠	1986	日本水理地質図38,5万分の1静岡県安倍川下流域水理地質 図	通商産業省 工業技術 院 地質調査所	地質図	-	陸域	-	-	-	-	_	-	-	-		- (0 –	_	-	-	_	-		_	_	-	-	0	
62 杉山雄一・下川浩一	1982	静岡県庵原地域の地質構造と入山断層系	地質調査所月報	論文	内部 査読	陸域 海域	0	0	-	0	-	-	-	-	—	○ 泉強 (変	0 0	-	-	_	-	-	- -	_	_	-	_	0	・富士川周辺 ・走向・傾斜として断層面(碟破断面など)のデータを含む
63 駿河湾団体研究グループ	1982	静岡県庵原地域の地質層序と地質構造	地団研専報	論文		陸域	-	-	-	-	-	-	-	-		- (0 0	-	_	-	-	-		_	_	○ 走向 線	_	0	・富士川周辺
64 中村一明・島崎邦彦	1981	相模・駿河トラフとプレートの沈み込み	科学	論文		陸域																							
65 国土地理院	1981	土地条件調查報告書 (静岡地区)	国土地理院	報告書	-	陸域	-	-	0	0	-	-	_	-		- (0 0	-	-	-	-	-	- c	0	0	0	-	0	・浮島ヶ原,富士川周辺
66 山崎晴雄・坂本亨・秦光男・倉沢一・垣見俊弘・羽田野 誠一・町田洋・大八木規夫	1981	駿河湾北岸部における活断層の地質学的研究	東海地域の地震予知 に関する総合研究報 告書	報告書	-																							-	・富士川周辺
67 恒石幸正・塩坂邦雄	1981	富士川断層と東海地震	応用地質	論文	外部 査読	陸域	-	0	-	-	_	-	_	-	- 古 書) 文 ·文	- 0	_	_	_	_	-		_	_	-	_	0	・富士川周辺 ・富士川断層の地表分布図(トレース線)あり
68 大塚謙一	1980	駿河湾における研究船淡青丸の KT·77·7 および KT·78·19 次 航海で採取されたピストンコア試料について	; 静岡大学地球科学研 究報告	紀要	-	海域	-	-	0	-	_	-	-	-				_	_	-	_	-		-	-	-	-	0	
69 山崎晴雄	1979	プレート境界部の活断層-駿河湾北岸内陸地域を例にし て-	月刊地球	論文	-	陸域	-	-	-	-	-	-	_	-			- 0	-	-	-	-	-	- C	_	_	○ 活断 層	-	0	・富士川周辺
70 海上保安庁	1978	5万分の1 海底地質構造図 6362号5-S「駿河湾北部」	海上保安庁	地質図	-	海域	-	-	_	-	_	-	-	_		- (0 –	_	_	-	_	-		_	_	-	-	0	・調査報告書なし
71 広川治・今井功・坂本亨・奥村公男・須田芳朗・小川健 三・北島真理子	1976	20万分の1地質図幅「静岡及び御前崎」	通商産業省 工業技術 院 地質調査所	地質図	-	陸域 海域	-	-	-	-	-	-	_	-		- (0 -	_	-	-	-	-		_	_	-	-	0	
72 垣見俊弘・衣笠善博・木村政昭	1973	構造図2,50万分の1後期新生代地質構造図 東京	通商産業省 工業技術 院 地質調査所	地質図	-	陸域	-	-	-	-	_	-	-	-		- (0 –	0	_	-	_	-		-	-	0	-	0	
73 杉村新	1972	日本付近におけるプレートの境界	科学	論文		陸域																							
74 津屋弘递	1968	富士火山地質図(1:50,000, 地質調查所発行), 数值地質図 G-9(2002発行, CD-ROM版)	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	地質図	-	陸域	-	-	-	-	-	-	-	-		- (0 0	_	-	-	-	-		_	_	-	-	0	· 窗土山
75 Tsuya H.	1968	Geology of Volcano Mt. Fuji(地質調查所発行 1:50,000 富 土火山地質図の解説書), 数値地質図G-9(2002発行, CD- ROM版)	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	地質図 説明書	-	陸域	-	-	-	-	-	-	0	-		- (0 -	_	-	-	-	-		_	_	-	-	0	・富士山

表 1-4 収集した文献, 資料等(4)

									一次デ	ータ										二次	データ									
No. 著者	^{発行年 文献名}	揭載先	種類	査読 種別	陸域 / 海城	走 向・ 傾斜	露頭 他	ボーン グ他	地形 図(読 取)	物理 探査	年代 分析	物 性・ 化学 分析	花粉 分析	微化 石分 析	その 他	地質図	地質 断面 図 線	質 界 重7 高 図	5 空 磁 図	地 水 気 新 な	下に有いた	状 比 変動	地 7 図	形 等 引 厚 図	層 汀 線 分 図	「線 」 有 1	地質 構造	その 他	入手 状況	備考
76 藏田延男	日本水理地質図14,5万分の1富士山域水理地質図および説 1967 明書 富士山の地下水・既往の調査成果の水理地質学的総括	通商産業省 工業技術 院 地質調査所	地質図	-	陸域	-	_	0	_	-	-	-	_	_	-	0	0 -		_				-	-		-	_	-	0	
77 池田俊雄	1964 東海道における沖積層の研究	東北大学理学部地質 学古生物学教室研究 邦文報告	紀要	-	陸域	-	-	0	_	_	-	-	0	-	_	0	0 -		-				-	-		-	-	-	0	・浮島ヶ原ほか
78 松田時彦	1961 富士川谷新第三系の地質	地質学雑誌	論文	外部 査読	陸域	0	_	-	_	-	-	-	_	-	-	0	0 -		_		. (- c	-	_		-	_	-	0	・富士川周辺
79 渥美武六	1960 岳南-田子の浦港周辺の地下水と地下構造について	地学雑誌	論文	外部 査読	陸域	-	_	0	_	-	-	_	_	-	_	-	0 -		_				-	_		-	_		0	・浮島ヶ原
80 佐々木実	1959 富士山西南麓の地質と地下水	地学雑誌	論文	外部 査読	陸域	-	_	0	0	-	-	-	_	-	_	0	0 -		_				-	_		-	_	-	0	・富士山
81 沢村幸之助	1955 7万5千分の1地質図幅「沼津」及び沼津図幅地質説明書	通商産業省 工業技術 院 地質調査所	地質図	-	陸域	0	-	-	-	_	-	0	-	-	_	0	0 -		_				-	_		-	-	-	0	
82 通商産業省工業技術院地質調査所・(国研)産業技術総合研究 所	海域地質構造データベース, 東海沖音波探査プロファイル (TOK16.01, 17.01, 18.01, 19.01)	(国研)産業技術総合研 究所 地質調査総合セ ンター	データ ベース	-	海域	-	_	-	_	0	-	-	_	-	_	_			_		-		-	_		_	_	-	0	 ・ 駿河湾を含む東海沖 ・ web公開情報 ・ 深度方向は往復走時(秒)と思われる
83 (国研)土木研究所	国土地盤情報検索サイト KuniJiban	_	データ ベース	-	陸域	-	-	0	_	-	-	-	-	-	_	_			_				-	_		-	_	-	-	・web公開情報
84 (国研)產業技術総合研究所	活断層データベース	_	活断層 分布図	-	陸域	-	_	-	_	-	-	_	_	-	_	_			_				-	_		- 1	○ 活断 層	-	_	・web公開情報

2. 作成した地質概念モデルの一覧

1.で示した文献・資料中の一次・二次データに基づいて作成した地質概念モデル(作業仮 説を定性的に表現したもの)を、図 2-2~図 2-13 に示す。作成にあたり、全ての概念モデル に共通とした設定について、以下に記述する。

○全概念モデルに共通する設定

- 地層区分については、報告書本体で示した通り、以下の 6 種類を設定した。
 - ➤ 第四系堆積岩類(完新統)
 - 第四系堆積岩類(富士川沖層群、賀茂沖層群下部層および更新統の足柄層群)
 - ▶ 第四系火山岩類(新富士・古富士・小御岳・愛鷹・達磨山・井田火山噴出物)
 - 新第三系堆積岩類(上部中新統~鮮新統の富士川層群)
 - ▶ 新第三系火成岩類(上部中新統∼鮮新統の富士川層群、7Maの石英閃緑岩ほか貫入岩)
 - 新第三系付加コンプレックス(中部中新統の西八代層群または丹沢層群相当)
- 各層の分布と層厚、および断層以外の地層境界については、収集した文献を基に設定した。(富士山直下の第四系・新第三系堆積岩類の分布のみ、後述する神縄断層の西方延長の 有無によって地質概念モデル間で異なる。)
- 断層については、上記地層区分の境界に相当する大規模なもののみを地質概念モデルに 反映し、そこから派生した断層は無視する。
- ・ 蒲原丘陵南東端に露出する貫入岩(複輝石角閃石安山岩等)については、地表で記載されている規模の岩体がモデル底面まで垂直に分布していると仮定して地質概念モデルに 取り込んだ。また、付近の断層との間の切断関係を示すデータがないため、地質概念モ デル中ではひとまず切断関係を無視して表した。

上記の共通設定に加えて、今回は①神縄断層の西方延長 ②富士山直下の貫入岩 ③蒲原丘陵以 東の未知の断層および貫入岩 の 3 点に関して可能性を複数想定し、複数のモデルを作成した。 最終的に作成した地質概念モデルは表 2-1 に示す 12 種類となった。地質概念モデルごとの個別 設定の詳細および根拠については、各地質概念モデル図の後に続けて示す。

なお、各地質概念モデル図は、事例研究地域における 3 つの地質断面図(断面 A~C)で表す。 各断面図の地図上での位置を図 2-1 に示す。

	神約	電断層(KTL)の西3	延長	富士山直	下の貫入岩	蒲原丘陵 未知の断	以東の地下に í層・貫入岩	本研究で 地質モデ
地質概念モデル	駿河トラフへ連続	富士山体地下まで 延長も駿河トラフ には連続しない	富士山体地下ま で延長しない	有り	無し	有り	無し	ルに採用 したもの
1	0				0		0	0
2		0			0		0	
3			0		0		0	0
4	0			0			0	
5		0		0			0	
6			0	0			0	
7	0				0	0		
8		0			0	0		
9			0		0	0		
10	0			0		0		
(1)		0		0		0		
(12)			0	0		0		

表 2-1 各地質概念モデルの条件設定



図 2-1 地質概念モデルの断面図位置 (国土地理院の標準地図および数値標高モデルを使用)

(1) 地質概念モデル①



断面A(富士山山頂を通る南北断面)



断面B(富士山山頂を通る東西断面)



断面C(富士川河口を通る東西断面)





地質概念モデル①は、初めに述べた全モデル共通設定に加えて、以下の個別設定に基づいて作 成した。

1) 神縄断層が西方に延長し駿河トラフに連続している。(断面 A・C)

2) 富士山直下の貫入岩体(石英閃緑岩体)は存在しない。(断面 A・B)

3) 蒲原丘陵以東の沿岸部地下に未知の断層や貫入岩は存在しない。(断面 C)

・1)について

松田(2007)では、杉村(1972)、中村・島崎(1981)、Imanaga(1999)を引用して、 事例研究地域東方の丹沢山地南縁に分布する神縄断層(北傾斜の逆断層)が大きく湾曲しな がら西方に延長し駿河トラフに連続しているという考え方を示している。この見解を直接支 持もしくは棄却する一次データは今回調査した範囲では得られていないが、本地域の地質構 造を考える上でも、また後の地下水流動解析を行う上でも重要であると考え、今回の検討に おいては一つの作業仮説として取り上げることとした。

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しいものと仮定し、丹沢山地において新第三系付 加コンプレックス(丹沢層群)と第四系堆積岩(足柄層群)を境している神縄断層が、富士山 南麓と富士川河口の地下を横切って駿河トラフに連続している(図中 KTL)と設定した。断層 面の傾斜は、松田(2000)で示されている丹沢山地の南北方向地質断面図を参考に 45° と設 定した。

・2)について

松田(2007)では、丹沢山地に分布する丹沢層群およびそこに貫入している石英閃緑岩体が、 露出の西端部において山地地形を維持したまま富士の噴出物に覆われていることに基づいて、富 士山体の直下に石英閃緑岩体の延長が分布している可能性を指摘している。この見解を直接支持 もしくは棄却する一次データは今回調査した範囲では得られていないが、本地域の地質構造を考 える上でも、また後の地下水流動解析を行う上でも重要であると考え、今回の検討においては一 つの作業仮説として取り上げることとした。

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しくないと仮定し、富士山直下に石英閃緑岩体(を含む貫入岩体)が分布しないと設定した。

・3)について

柴ほか(1990)では、富士川河口西方の蒲原丘陵の南西部において、下部〜中部更新統の庵 原層群に複輝石角閃石安山岩体等が貫入していると記載されている。一般に、貫入岩体は高透水 性が懸念される。蒲原丘陵以東の沿岸部平野地域の沖積層下には、庵原層群に相当する第四系堆 積岩層が分布していると考えられる。沖積層に覆われて直接確認できないが、蒲原丘陵と同様に 庵原層群(あるいはこれに年代対比される地層)に安山岩体が貫入している可能性も考えられる。

また、本事例研究地域はフィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込む境界部に あたることから、活発な地殻変動が想定され、地表付近では断層が確認されていない地域であっ ても、沈み込みに伴うスラスト等の断層が地下深部に分布している可能性が否定できない。これ らを踏まえて、蒲原丘陵以東の沿岸部平野地域の沖積層下における貫入岩体や逆断層の分布も一 つの作業仮説である。

一方、このモデルでは、未知の貫入岩体や逆断層は分布していないと設定した。

32

(2) 地質概念モデル②





断面B(富士山山頂を通る東西断面)



断面C(富士川河口を通る東西断面)

凡例
第四系堆積岩類(完新統)
第四系火山岩類(新富士・古富士・小御岳・愛鷹山等)
第四系堆積岩類(更新統)
新第三系堆積岩類(富士川層群)
新第三系火成岩類(富士川層群、石英閃緑岩等)
新第三系付加コンプレックス(西八代層群、丹沢層群相当)
大規模断層
KTL:神縄断層(一駿河トラフ)
FTL:御坂断層—富士川河口断層帯—駿河トラフ



地質概念モデル②は、初めに述べた全モデル共通設定に加えて、以下の個別設定に基づいて作 成した。

1) 神縄断層は西方に延長するが駿河トラフには連続しない。(断面 A・C)

2) 富士山直下の貫入岩体(石英閃緑岩体)は存在しない。(断面 A・B)

3) 蒲原丘陵以東の沿岸部地下に未知の断層や貫入岩は存在しない。(断面 C)

・1)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が部分的に正しいものと仮定した。すなわち、丹沢 山地において新第三系付加コンプレックス(丹沢層群)と第四系堆積岩(足柄層群)を境し ている神縄断層は、富士山南麓の地下までは西方延長しているが、富士川河口付近までは延 長しておらず駿河トラフに連続していないと設定した(図中 KTL)。断層面の傾斜は、松田 (2000)で示されている丹沢山地の南北方向地質断面図を参考に 45°と設定した。

・2)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しくないと仮定し、富士山直下に石英閃緑岩体(を含む貫入岩体)が分布しないと設定した。

・3)について

このモデルでは、未知の貫入岩体や逆断層は分布していないと設定した。

(3) 地質概念モデル③













地質概念モデル③は、初めに述べた全モデル共通設定に加えて、以下の個別設定に基づいて作 成した。

1)神縄断層は西方に延長しない。(断面 A・C)

2) 富士山直下の貫入岩体(石英閃緑岩体)は存在しない。(断面 A・B)

3) 蒲原丘陵以東の沿岸部地下に未知の断層や貫入岩は存在しない。(断面 C)

・1)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しくないものと仮定した。すなわち、丹沢山地に おいて新第三系付加コンプレックス(丹沢層群)と第四系堆積岩(足柄層群)を境している神縄 断層は、西方に延長しておらずしたがって駿河トラフにも連続していないものと設定した。

2)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しくないと仮定し、富士山直下に石英閃緑岩体(を含む貫入岩体)が分布しないと設定した。

・3)について

このモデルでは、未知の貫入岩体や逆断層は分布していないと設定した。

(4) 地質概念モデル④



断面A(富士山山頂を通る南北断面)



断面B(富士山山頂を通る東西断面)



断面C(富士川河口を通る東西断面)





地質概念モデル④は、初めに述べた全モデル共通設定に加えて、以下の個別設定に基づいて作 成した。

1) 神縄断層が西方に延長し駿河トラフに連続している。(断面 A・C)

2) 富士山直下の貫入岩体(石英閃緑岩体)は存在する。(断面 A・B)

3) 蒲原丘陵以東の沿岸部地下に未知の断層や貫入岩は存在しない。(断面 C)

・1)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しいものと仮定し、丹沢山地において新第三系付 加コンプレックス(丹沢層群)と第四系堆積岩(足柄層群)を境している神縄断層が、富士山 南麓と富士川河口の地下を横切って駿河トラフに連続していると設定した(図中 KTL)。断層 面の傾斜は、松田(2000)で示されている丹沢山地の南北方向地質断面図を参考に45°と設 定した。

・2)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しいと仮定し、富士山直下の新第三系付加コンプ レックス中に石英閃緑岩体の分布を設定した。この岩体の規模に係る一次データは現時点では得 られていないため、松田(2000)の地質断面図等を参考にして、丹沢山地の石英閃緑岩体と同 程度の規模で設定した。

・3)について

このモデルでは、未知の貫入岩体や逆断層は分布していないと設定した。

(5) 地質概念モデル⑤















地質概念モデル⑤は、初めに述べた全モデル共通設定に加えて、以下の個別設定に基づいて作 成した。

1) 神縄断層は西方に延長するが駿河トラフには連続しない。(断面 A・C)

2) 富士山直下の貫入岩体(石英閃緑岩体)は存在する。(断面 A・B)

3) 蒲原丘陵以東の沿岸部地下に未知の断層や貫入岩は存在しない。(断面 C)

・1)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が部分的に正しいものと仮定した。すなわち、丹沢 山地において新第三系付加コンプレックス(丹沢層群)と第四系堆積岩(足柄層群)を境し ている神縄断層は、富士山南麓の地下までは西方延長しているが、富士川河口付近までは延 長しておらず駿河トラフに連続していないと設定した(図中 KTL)。断層面の傾斜は、松田 (2000)で示されている丹沢山地の南北方向地質断面図を参考に 45°と設定した。

・2)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しいと仮定し、富士山直下の新第三系付加コンプ レックス中に石英閃緑岩体の分布を設定した。この岩体の規模に係る一次データは現時点では得 られていないため、松田(2000)の地質断面図等を参考にして、丹沢山地の石英閃緑岩体と同 程度の規模で設定した。

・3)について

このモデルでは、未知の貫入岩体や逆断層は分布していないと設定した。

(6) 地質概念モデル⑥



断面A(富士山山頂を通る南北断面)



断面B(富士山山頂を通る東西断面)







地質概念モデル⑥は、初めに述べた全モデル共通設定に加えて、以下の個別設定に基づいて作 成した。

1) 神縄断層は西方に延長しない。(断面 A・C)

2) 富士山直下の貫入岩体(石英閃緑岩体)は存在する。(断面 A・B)

3) 蒲原丘陵以東の沿岸部地下に未知の断層や貫入岩は存在しない。(断面 C)

・1)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しくないものと仮定した。すなわち、丹沢山地に おいて新第三系付加コンプレックス(丹沢層群)と第四系堆積岩(足柄層群)を境している神縄 断層は、西方に延長しておらずしたがって駿河トラフにも連続していないものと設定した。

・2)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しいと仮定し、富士山直下の新第三系付加コンプ レックス中に石英閃緑岩体の分布を設定した。この岩体の規模に係る一次データは現時点では得 られていないため、松田(2000)の地質断面図等を参考にして、丹沢山地の石英閃緑岩体と同 程度の規模で設定した。

・3)について

このモデルでは、未知の貫入岩体や逆断層は分布していないと設定した。

(7) 地質概念モデル⑦



断面A(富士山山頂を通る南北断面)







凡例
 第四系堆積岩類(完新統)
 第四系火山岩類(新富士・古富士・小御岳・愛鷹山等)
 第四系堆積岩類(更新統)
 新第三系堆積岩類(富士川層群)
 新第三系火成岩類(富士川層群、石英閃緑岩等)
 新第三系付加コンプレックス(西八代層群、丹沢層群相当)
 大規模断層
 KTL:神縄断層(一駿河トラフ)
 FTL:御坂断層—富士川河口断層帯—駿河トラフ
 図 2-8 地質概念モデル⑦

地質概念モデル①は、初めに述べた全モデル共通設定に加えて、以下の個別設定に基づいて作 成した。

1) 神縄断層が西方に延長し駿河トラフに連続している。(断面 A・C)

2) 富士山直下の貫入岩体(石英閃緑岩体)は存在しない。(断面 A・B)

3) 蒲原丘陵以東の沿岸部地下に未知の断層や貫入岩が存在する。(断面 C)

・1)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しいものと仮定し、丹沢山地において新第三系付 加コンプレックス(丹沢層群)と第四系堆積岩(足柄層群)を境している神縄断層が、富士山 南麓と富士川河口の地下を横切って駿河トラフに連続していると設定した(図中 KTL)。断層 面の傾斜は、松田(2000)で示されている丹沢山地の南北方向地質断面図を参考に45°と設 定した。

・2)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しくないと仮定し、富士山直下に石英閃緑岩体(を含む貫入岩体)が分布しないと設定した。

・3)について

柴ほか(1990)では、富士川河口西方の蒲原丘陵の南西部において、下部~中部更新統の庵原 層群に複輝石角閃石安山岩体等が貫入していると記載されている。蒲原丘陵以東の沿岸部平野地 域の沖積層下には、庵原層群に相当する第四系堆積岩層が分布していると考えられ、蒲原丘陵と 同様に貫入岩体が分布している(ただし沖積層に覆われて直接確認できない)可能性が否定でき ない。また、本事例研究地域はフィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込む境界 部にあたることから、活発な地殻変動が想定され、地表付近では断層が確認されていない地域で あっても、沈み込みに伴うスラスト等の断層が地下深部に分布している可能性が否定できない。 これらを踏まえて、蒲原丘陵以東の沿岸部平野地域の沖積層下における貫入岩体や逆断層の分布 も一つの作業仮説として取り扱う。

このモデルでは、未知の貫入岩体や逆断層が分布すると設定した。これらの貫入岩・断層の位 置や規模に係る一次データは得られていないため、蒲原丘陵付近の逆断層(図中の FTL) や貫 入岩体と同規模のものを適当な水平位置に分布させることとした。上限深度については、蒲原丘 陵付近の貫入岩・断層を参考に、いずれも第四系堆積岩類(更新統)中とした。 (8) 地質概念モデル⑧















地質概念モデル⑧は、初めに述べた全モデル共通設定に加えて、以下の個別設定に基づいて作 成した。

1) 神縄断層は西方に延長するが駿河トラフには連続しない。(断面 A・C)

2) 富士山直下の貫入岩体(石英閃緑岩体)は存在しない。(断面 A・B)

3) 蒲原丘陵以東の沿岸部地下に未知の断層や貫入岩が存在する。(断面 C)

・1)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が部分的に正しいものと仮定した。すなわち、丹沢 山地において新第三系付加コンプレックス(丹沢層群)と第四系堆積岩(足柄層群)を境し ている神縄断層は、富士山南麓の地下までは西方延長しているが、富士川河口付近までは延 長しておらず駿河トラフに連続していないと設定した(図中 KTL)。断層面の傾斜は、松田 (2000)で示されている丹沢山地の南北方向地質断面図を参考に 45°と設定した。

・2)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しくないと仮定し、富士山直下に石英閃緑岩体(を含む貫入岩体)が分布しないと設定した。

・3)について

このモデルでは、未知の貫入岩体や逆断層が分布すると設定した。これらの貫入岩・断層の位 置や規模に係る一次データは得られていないため、蒲原丘陵付近の逆断層(図中の FTL) や貫 入岩体と同規模のものを適当な水平位置に分布させることとした。上限深度については、蒲原丘 陵付近の貫入岩・断層を参考に、いずれも第四系堆積岩類(更新統)中とした。 (9) 地質概念モデル⑨











断面C(富士川河口を通る東西断面)



地質概念モデル⑨は、初めに述べた全モデル共通設定に加えて、以下の個別設定に基づいて作 成した。

1) 神縄断層は西方に延長しない。(断面 A・C)

2) 富士山直下の貫入岩体(石英閃緑岩体)は存在しない。(断面 A・B)

3) 蒲原丘陵以東の沿岸部地下に未知の断層や貫入岩が存在する。(断面 C)

・1)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しくないものと仮定した。すなわち、丹沢山地に おいて新第三系付加コンプレックス(丹沢層群)と第四系堆積岩(足柄層群)を境している神縄 断層は、西方に延長しておらずしたがって駿河トラフにも連続していないものと設定した。

·2)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しくないと仮定し、富士山直下に石英閃緑岩体(を含む貫入岩体)が分布しないと設定した。

・3)について

このモデルでは、未知の貫入岩体や逆断層が分布すると設定した。これらの貫入岩・断層の位 置や規模に係る一次データは得られていないため、蒲原丘陵付近の逆断層(図中の FTL) や貫 入岩体と同規模のものを適当な水平位置に分布させることとした。上限深度については、蒲原丘 陵付近の貫入岩・断層を参考に、いずれも第四系堆積岩類(更新統)中とした。





断面A(富士山山頂を通る南北断面)



断面B(富士山山頂を通る東西断面)







地質概念モデル⑩は、初めに述べた全モデル共通設定に加えて、以下の個別設定に基づいて作 成した。

1) 神縄断層が西方に延長し駿河トラフに連続している。(断面 A・C)

2) 富士山直下の貫入岩体(石英閃緑岩体)は存在する。(断面 A・B)

3) 蒲原丘陵以東の沿岸部地下に未知の断層や貫入岩が存在する。(断面 C)

・1)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しいものと仮定し、丹沢山地において新第三系付 加コンプレックス(丹沢層群)と第四系堆積岩(足柄層群)を境している神縄断層が、富士山 南麓と富士川河口の地下を横切って駿河トラフに連続していると設定した(図中 KTL)。断層 面の傾斜は、松田(2000)で示されている丹沢山地の南北方向地質断面図を参考に45°と設 定した。

・2)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しいと仮定し、富士山直下の新第三系付加コンプ レックス中に石英閃緑岩体の分布を設定した。この岩体の規模に係る一次データは現時点では得 られていないため、松田(2000)の地質断面図等を参考にして、丹沢山地の石英閃緑岩体と同 程度の規模で設定した。

・3)について

このモデルでは、未知の貫入岩体や逆断層が分布すると設定した。これらの貫入岩・断層の位 置や規模に係る一次データは得られていないため、蒲原丘陵付近の逆断層(図中の FTL) や貫 入岩体と同規模のものを適当な水平位置に分布させることとした。上限深度については、蒲原丘 陵付近の貫入岩・断層を参考に、いずれも第四系堆積岩類(更新統)中とした。 (11) 地質概念モデル⑪













地質概念モデル⑪は、初めに述べた全モデル共通設定に加えて、以下の個別設定に基づいて作 成した。

1) 神縄断層は西方に延長するが駿河トラフには連続しない。(断面 A)

2) 富士山直下の貫入岩体(石英閃緑岩体)は存在する。(断面 A・B)

3) 蒲原丘陵以東の沿岸部地下に未知の断層や貫入岩が存在する。(断面 C)

・1)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が部分的に正しいものと仮定した。すなわち、丹沢 山地において新第三系付加コンプレックス(丹沢層群)と第四系堆積岩(足柄層群)を境し ている神縄断層は、富士山南麓の地下までは西方延長しているが、富士川河口付近までは延 長しておらず駿河トラフに連続していないと設定した(図中 KTL)。断層面の傾斜は、松田 (2000)で示されている丹沢山地の南北方向地質断面図を参考に 45°と設定した。

・2)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しいと仮定し、富士山直下の新第三系付加コンプ レックス中に石英閃緑岩体の分布を設定した。この岩体の規模に係る一次データは現時点では得 られていないため、松田(2000)の地質断面図等を参考にして、丹沢山地の石英閃緑岩体と同 程度の規模で設定した。

・3)について

このモデルでは、未知の貫入岩体や逆断層が分布すると設定した。これらの貫入岩・断層の位 置や規模に係る一次データは得られていないため、蒲原丘陵付近の逆断層(図中の FTL) や貫 入岩体と同規模のものを適当な水平位置に分布させることとした。上限深度については、蒲原丘 陵付近の貫入岩・断層を参考に、いずれも第四系堆積岩類(更新統)中とした。 (12) 地質概念モデル12



断面A(富士山山頂を通る南北断面)



断面B(富士山山頂を通る東西断面)



断面C(富士川河口を通る東西断面)



地質概念モデル⑥は、初めに述べた全モデル共通設定に加えて、以下の個別設定に基づいて作 成した。

1) 神縄断層は西方に延長しない。(断面 A・C)

2) 富士山直下の貫入岩体(石英閃緑岩体)は存在する。(断面 A・B)

3) 蒲原丘陵以東の沿岸部地下に未知の断層や貫入岩は存在しない。(断面 C)

・1)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しくないものと仮定した。すなわち、丹沢山地に おいて新第三系付加コンプレックス(丹沢層群)と第四系堆積岩(足柄層群)を境している神縄 断層は、西方に延長しておらずしたがって駿河トラフにも連続していないものと設定した。

・2)について

このモデルでは、松田(2007)の見解が正しいと仮定し、富士山直下の新第三系付加コンプ レックス中に石英閃緑岩体の分布を設定した。この岩体の規模に係る一次データは現時点では得 られていないため、松田(2000)の地質断面図等を参考にして、丹沢山地の石英閃緑岩体と同 程度の規模で設定した。

・3)について

このモデルでは、未知の貫入岩体や逆断層が分布すると設定した。これらの貫入岩・断層の位 置や規模に係る一次データは得られていないため、蒲原丘陵付近の逆断層(図中の FTL) や貫 入岩体と同規模のものを適当な水平位置に分布させることとした。上限深度については、蒲原丘 陵付近の貫入岩・断層を参考に、いずれも第四系堆積岩類(更新統)中とした。 Appendix III

浜里試験地の測量記録

1. はじめに

浜里試験地は、北海道天塩郡幌延町浜里 100 に位置する。この試験地は、海岸線より約 300 m 内陸に位置し、地形的には海岸部に発達する砂丘列上にある。本試験地においては平成 19 年度より 研究がおこなわれており、約 50×60 m 四方の試験地内に DD-1~DD-4 や水井戸と呼ばれる観測 井が設けられてきた。本年度はこれらの観測井の水準測量、地点測量を実施し、地下水位観測を開 始した。

観測井の配置は図1の通りである。SFI-1とSFI-2は平成20年度に掘削された掘削孔であるが 現在は存在しない。

2. 測量前の水位

測量の前に各井戸の様子を確認した。各観測井の写真を写真1~5、井戸管頭部のイラストを図 2 に示す。各観測井の地盤標高と管頭標高の測定方法については次節で述べる。

・水井戸(地盤標高+5.37 m、管頭標高+4.96 m)

2019 年 9 月の様子は写真 1 および写真 2 の通りである。スクリーンは GL-5.2~-21.0 m、 掘削時の自然水位は GL-3.5 m であった (産総研, 2010)。そのため、自然水位は+1.87 m とな る。2019 年 10 月 22 日 9:47 の水位は、管頭より-3.34 m の位置にあった。したがって水位は +1.62 m である。

・DD-2(地盤標高+5.46 m、管頭標高+5.71 m)

ケーシングは VP-50 の塩ビ管であり、スクリーンは開口率が 5%で GL-90.7~-99.7 m に位置する (産総研, 2010)。管頭標高は+5.71 m である (写真 3)。2019 年 10 月 22 日 9:55 の水位は管頭より-2.65 m であった。したがって、水位は+3.06 m である。この井戸の水位は潮汐変動しており、2010 年の記録では 3 ヵ月間で最大 0.5 m 程度変化している。また、2019 年夏から冬にかけてスクリーン深度に CTD センサーを設置し、水温と電気伝導度を測定したが、3 ヵ月間でほとんど変化は認められなかった。

・DD-3(地盤標高+5.35 m、管頭標高+5.27 m)

ケーシングは VP50 の塩ビ管であり、スクリーンは開口率 5%で GL-132.5~-147.5 m に位置する。管頭標高は+5.27 m である (写真4;産総研, 2011)。2019 年 10 月 22 日 10:00 に井戸内の水面は管頭より-1.53 m の距離にあった。したがって、水位は+3.74 m である。水位は 1 年半の間に最大 35 cm 程度の水位変化が生じている。DD-2 と同様に夏から冬にかけて CTD センサーをスクリーン位置まで降ろして連続観測を実施したが、水温、電気伝導度ともにほとんど変化が認められなかった。

・DD-4(地盤標高+5.18 m、管頭標高+5.84 m)

スクリーン部の孔径は100A であり、開口率は30%である(写真5:産総研ほか,2019)。2019 年10月17日13:00の水位は管頭から-0.49mの位置にあった。したがって、水位は+5.35m

である。2018 年 11 月 27 日はパッカーをかけて間隙水圧を測定しているが、そのときの等価淡水 水頭(25 ℃)は+5.26 m であり、ほぼ地表面である。2019 年 10 月の調査で本観測井の 340 m 以 深は泥のようなものが堆積していた(ゲル状であり固結しておらず、泥の中に測器等を降ろせる 状態)。これについては別のアペンディクスにて述べる。

3. 水準測量

水準測量で用いた資機材を表 1 に、水準測量で測定した観測孔の標高を表 2 に示す。水準測量 は、4 つの観測孔(水井戸、DD-2 孔、DD-3 孔、DD-4 孔)の地盤標高および管頭標高を、近傍 の基準点(四等三角点「学校跡」:基準点コード TR46741359501)からオートレベルとスタッフ を用いて 0.01 m の単位で測定した。

4. 地点測量

地点測量で使用した資機材を表3に示す。地点測量は、4つの観測孔と調査地における代表的 な構造物の位置を、GNSS 測位機を用いて求めた。

5. 地下水モニタリング

観測孔に設置したモニタリング機器を表 4 に,設置したモニタリング機器の仕様を表 5 に,モニタリング機器設置時の孔内水位を表 6 に示す。観測孔には、スクリーン区間の中央部に CTD センサー、地下水位付近に TD センサーを設置した。CTD についてはクロスチェックのため 2 台設置しているので、1 つの試験井につき最大 3 台のセンサーが設置されている。また,試験地に大気 圧補正用の圧力計も設置した。

参考文献

産業技術総合研究所,平成 21 年度 沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発成果報告書,325p, 2010.

産業技術総合研究所,平成22年度沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発成果報告書,433p, 2011.

産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中央 研究所,平成 30 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 沿岸部処分 システム高度化開発報告書,369p,2019.


図1 井戸の配置図



DD-3



DD-4



水井戸



図2 測量地点の詳細図

名称	仕様			製作所	数量
	望遠鏡	像:正立倍 率:31× 視界:1°31′ 分解力:4″ 最短合焦距離(先端まで):21cm 合焦方法:一軸粗微動 スタジア乗数:101 スタジア乗数:101 スタジア加数:1 接眼レンズ:交換可(H使用時 37×,L使用時 20×) 円形気泡管感度:10′/3mm 自動補正範囲:32′(±17′) 精 実 略 底板方式:球面・平面面座標方式		(株)ニコン・ トリンブル	1 台
	精度整				
	亚 準 台	三脚ねじ: W5/8", M35×2			
	本 体	形状:L220×W136×D142mm 質量:1.7kg			
その他	レベル用三脚(W5/8"), スタッフ(3m)		-	-	1式

表1 水準測量で使用した資機材

表2水準測量で測定した観測孔の標高

観測剤	標高 (TP+m)		備老	
西心达110	地盤高	管頭	בי מוע	
DD-2	5.46	5.71	管頭は塩ビソケット上面	
DD-3	5.35	5.27	地盤高はコンクリート上面	
DD-4	5.18	5.54, 5.84	管頭はフランジ上面 2 箇所	
水井戸	5.37	4.96		

表 3	地点測量で使用した資機材

名称	仕様	型式	製作所	数量
GNSS 受信器	受信電波:GG, GDNT, GGDNT チャ ンネレ数: 226ch 対応衛星:GPS L1/L2 GLONASS L1/L2 SBAS(WAAS/EGNOS/MSAS) 精度:水平(±3mm+0.8ppm)m.s.e スタティック 鉛直(±4mm+1.0ppm)m.s.e スタティック 表示部:640×480 3.7inch カラ- TFT 液晶内 部メモリ:1GB (+外部メモリ SD/SDHC) 通 信:WCDMA, Bluetooth 寸法:L215×W93×D53mm 質量:0.77kg (バッテリ含む) 電源:内蔵バッテリ(入力 10-15VDC)	GRS-1 GGDN	(株)トプコン	1
アンテナ	受信電波:GDNT,GGDNT 対応衛星:GPS L1/L2,GLONASS L1/L2 アンテナ感度:30±2dB 寸法:L142×W142×D54mm 質量:0.492kg	PG-A1	(株)トプコン	1
ネット ワーク	サービス方式:VRS(Ntrip 方式) ※ネットワーク型 RTK-GPS による公 共測量作業マニュアル(案)に適合	L40A	日本 GPS データサービス	-
その他	通信用携帯端末、アンテナケーブル、 ポール、ポール固定用二脚	_	_	一式

表4観測孔に設置したモニタリング機器

CTD センサーは観測孔のスクリーン中央付近(水井戸は 13.4 m, DD-2 孔は 95.2 m, DD-3 孔は 140.0 m, DD-4 孔は 342.6 m) に設置した。モニタリングにおける測定時間の間隔は 1 時間とした。

観測孔	スクリーン中央に 設置するセンサー		地下水位付近に 設置するセンサー	大気圧観測
水井戸	AquaTroll200	CTDダイバー水位計	セラダイバー水位計	
DD-2孔	AquaTroll200	CTDダイバー水位計	セラダイバー水位計	
DD-3孔	AquaTroll200	CTDダイバー水位計	セラダイバー水位計	
DD-4孔	AquaTroll200		セラダイバー水位計	
D型ハウス				BaroTroll
D型ハウス				Baroダイバー

機材・材料	名称	備考	数量
CTDセンサー	In-Situ製 AquaTROLL200	 水位測定範囲:30・100・300・500psia 精度:±0.05%FS@15℃,±0.1%FS@0~50℃ 分解能:0.005%FS以上 導電率測定範囲:5~100,000µS/cm 精度:読取値の±0.5%+1µS/cm@<80,000µS/cm 読取値の±1.0%@>80,000µS/cm 分解能:0.1µS/cm 動作温度:-5~50℃ 精度:±0.1℃ 分解能:0.01℃以上 	4台
TDセンサー	vanEssen製 Cera-Diver-DI701	水位測定範囲:10mH ₂ O 精度:±0.2cmH ₂ O 分解能:0.08cmH ₂ O 動作温度:0~50℃ 精度:0.01℃	4台
大気圧計	In-Situ製 BaroTROLL	測定範囲:30psia 精度:±0.05%FS@-5~50℃ 分解能:0.005%FS以上 動作温度:-5~50℃ 精度:±0.1℃ 分解能:0.01℃以上	1台
	vanEssen製 Baro-Diver-DI800	測定範囲:1.5mH ₂ O 精度:±0.5cmH ₂ O 分解能:0.03cmH ₂ O 動作温度:-10~50℃	1台

表5観測孔に設置したモニタリング機器の仕様

表6モニタリング機器設置時の孔内水位

観測孔	孔内水位(手計;	管頭 -m)
DD-2	-2.60	2019/12/22 12:00
DD-3	-1.55	2019/12/22 12:00
DD-4	-0.47	2019/12/22 13:00
採水井戸	-3.11	2019/12/22 12:00







写真2(右):水位測定を実施した管頭



写真 3 DD-2 孔での水位測定 管頭標高は地盤から 25 cm の位置に ある塩ビ管の管頭の標高である。



写真 4 DD-3 孔での水位測定 黒いゴム製のキャップがあり、その中 に井戸がある。



写 真 5 DD-4 孔 フランジが 2 つあり、図 2 の管頭 1、 管頭 2 に相当する。

Appendix IV

DD-4 孔の調査

1. はじめに

北海道天塩郡幌延町浜里 100 に位置する浜里試験地にて、本年度は深度 100 m の DD-2 孔にお けるプッシュプルテストを実施し、その成果は報告書にて記載した通りである。一方、これとは別 に DD-4 孔 (図 1: 深度 360 m) における大深度のプッシュプルテストも計画されていた。DD-4 の試験システムは図 2 の通りである。2019 年 10 月 20 日にプッシュプルテストの取り掛かりと して、試験装置(図 3)を孔内に降下したところ、スクリーン区間の最上部付近から下方への降下 ができなかった。そこでボアホールカメラを用いた孔内観察を実施したところ、当該区間には沈殿 物があることが明らかになり、本年度の試験を断念した。以下にこのときの調査結果を報告する。

2. 経緯と結果

経過を時系列で示す。

① 10月20日14:30~15:30

孔内状況を確認するため、ワイヤーに重りを吊るして孔内へ降下させた。管頭-350 m まで降下 できることを確認した。

② 10月22日8:30~15:00

試験装置を編成し、孔内へ降下を試みた(図4、写真1)。管頭-337.6 m付近から降下することができなかった。

③ 10月23日7:30~12:00

試験装置を回収して装置の状況を確認した(写真 2)。装置の最下部に設置した先端コーン(外 径 95 mm)に擦り傷を確認した(写真 3)。このような傷がついた可能性として、装置編成時に湾 曲が生じ、装置が管に接触したことが考えられる。また、有孔管に砂や泥が侵入しており(写真 4)、孔内は濁りがあるものと推定された。

④10月23日14:00~17:30

試験装置を再編成して孔内へ再び降下を試みた。接触した先端コーンをはずして降下を試みたものの、やはり管頭-337.6 m 付近から降下することができなかった。

④ 10月24日15:00~16:30

口元から試験的に揚水した。昨年度(揚水量 25 L/min で水位降下 2 m)と比較して、本年度は 14 L/min の揚水量で水位降下量 2.5 m を超えており、井戸能力がかなり低下していた。

⑤ 10月25日8:00~12:00

試験装置を回収して装置の状況を確認した。装置の最下部付近にあたるパッカー下部の外径85 mmの箇所に擦り傷を確認した(写真5、6)。擦り傷が生じた鋼管の外径は観測孔の内径より10

mm 以上細いものである。そのため、スクリーンの一部が壊れており、ボーリング孔内に突出している可能性も考えられる。

⑧10月31日8:00~15:00

ボアホールカメラ(仕様は表1参照)を用いて観測孔の内部を管頭-337.54 mまで撮影した。 撮影された写真を深度が浅い方から深い方に向かって写真7~9に示す。写真7~9は GL-20.18 ~-332.20 m までの画像であり、ケーシングが確認される。GL-332 m あたりから徐々に濁りが激 しくなることがわかる。写真10は GL-304 m 周辺の画像であり、パッカー付きベルカラーが映って いる(図1参照)。写真11は GL-336.53 m 以深の画像である。この付近から沈殿物が堆積して孔 を閉塞している。ボアホールカメラはこの沈殿物の中を自重で降下していることから、沈殿物は固 結していないと思われる。しかしながら、カメラを孔底まで降下させることはできなかった。

3. 考察

試験装置が孔底まで降下せず、表面に擦り傷が発生した原因として 2 つの可能性が考えられる。 1 つは試験装置が湾曲し、それが孔内壁面と接触した可能性である(図 6 左)。これは写真 2 から も分かる通り、本年度の試験装置の降下・回収はラフターを用いて行われており、つり上げの過 程で一時的に揚管に変形が生じたことを原因とする考えである。揚管の曲がりについては写真 1 にあるように、管頭に入れる直前で改めて修正しているが、若干の変形が残っていた可能性もあ る。この可能性を排除するためには、揚管の降下および回収にはコストはかかっても櫓を用いる 必要がある。もう 1 つの可能性として、DD-4 孔のスクリーンが変形しており、それが試験装置 と接触した可能性である(図 6 右)。DD-4 孔で使用しているスクリーンはステンレス製のジョン ソンスクリーンであり(写真 12)設計上の耐圧は十分である。しかし、DD-4 孔掘削時の構造図 においてパッカー式ベルカラーの位置が GL-303.13 m となっている一方で(図 1)、ボアホールカ メラの孔内撮影では GL-304.5 m 付近に確認される(写真 10)。このことから、図 6 右のようにス クリーンが変形してその上部のケーシングが下に動いたために、パッカー式ベルカラーが下に移 動した可能性が考えられる。ただし、ボアホールカメラで測定された深度にはケーブルの伸びな どの変形が考慮されていないため、この差の有意性については必ずしも信頼できるものではない。

また、DD-4 孔の深度約 336 m 以深にみられた沈殿物については、画像の様子から泥水が残留 したものと推定される。このように判断した理由は、当該深度の地質(写真 13)と画像中の沈殿 物の様子が異なるためである。そのため、スクリーン外の地層がボーリング孔内に入ってきたの ではなく、掘削時の泥水が残留していたと推定される。DD-4 孔掘削後には洗浄をおこない、地 下水が透明になったことを確認したが、孔内の洗浄が不十分であった可能性がある。次年度以降、 改めて孔内の状況を正しく把握するための作業が必要である。 参考文献

産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中央 研究所,平成 30 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 沿岸部処分 システム高度化開発報告書,369p,2019.

表1DD-4孔の孔内撮影に使用したボアホールカメラの仕様

プローブ	2WAY(前方,側方)孔内観察カメラ(フォーカス機能付)
外径	Φ60mm
適用口径	Ф66mm~Ф400mm
長さ及び重量	長さ700mm、5.0Kg
材質	ステンレス(SUS304)
動作環境	温度0℃~60℃、耐圧300m 3Mpa
カメラ解像度	NTSC 水平768本、鉛直494本(有効画素数 38万画素、総画素数41万画素)
カメラ照明	白色LED
回転	コントローラーからの操作により左右360°回転(側方観察カメラ)
コントローラー	
外形及び重量	W:270mm D:230mm H:170mm 4.0Kg
動作環境	0~40°C
供給電源	AC100/240V
カメラ制御	フォーカス調整、側方カメラ回転(左右360°)、カメラ切り替え(前方/側方)
画像表示	内蔵5インチカラーLCDモニタ(解像度、水平960本、鉛直234本)
深度表示	整数3桁、小数2桁(999.99m) 深度数値を画面にインポーズ
深度設定	深度プリセット機能
その他	外部ビデオ出力端子(RCAコネクタ)、USB端子(A-Bタイプ)
ケーブル&ウインチ	
ケーブル	Φ5.6mm、長さ500m 5芯検層用
外形および重量	W:520mm D:500mm H:400mm、40Kg(AC100V)、42Kg(AC100/240V)
駆動方式	モーター駆動、手動切り替え
昇降速度	0~5m/分
供給電源	AC100V, AC100/240V
深度計測プーリー	
外形および重量	BIP-Vプーリー(径180mm、5.0Kg)
最少計測	1mm(0.25mm/P)



図 1 DD-4 孔ケーシングプログラム (産総研ほか, 2019)



図 2 DD-4 孔における試験装置の概要



図 3 DD-4 孔の孔内に降下させた試験装置の概要



昨年度は 25 L/min の揚水時に水位降下量は 2 m であったが、今年度は 14 L/min で水位降下 2.5 m 以上となっており、比湧出量が半分以下であることがわかる。



```
図 6 DD-4 孔の不具合のイメージ図
```



写真1 試験装置の降下作業の様子



写真2 試験装置の回収作業の様子



写真3装置の最下部に設置した先端コーンの擦り傷の様子



写真4 有孔管に付着した砂や泥



写真5 パッカー下部の擦り傷1



写真6 パッカー下部の擦り傷2



写真7ボアホールカメラで撮影した DD-4 孔の孔内の様子1(写真右上の数字は深度)



写真8ボアホールカメラで撮影した DD-4 孔の孔内の様子2



写真9ボアホールカメラで撮影した DD-4 孔の孔内の様子3



写真10 ボアホールカメラで撮影した DD-4 孔の孔内の様子 4



側方視カメラ映像 沈降物が全面に堆積する。

沈降物が全面に堆積する。

沈降物が全面に堆積する。

写真 11 ボアホールカメラで撮影した DD-4 孔の孔内の様子 5



写真 12 DD-4 孔で使用したスクリーン







写真 13 スクリーン深度周辺のボーリングコアの様子 DD-1 孔より採取。左上の数値は深度。 Appendix V

XRD の分析結果

1. はじめに

平成 19~24 年度までにおこなわれた「沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発」において、 北海道天塩郡幌延町浜里 100 の浜里試験地において、深度 1200 m の DD-1 孔の掘削をおこない、ボ ーリングコアを採取した。その後、産総研ではこのコアを真空パックにして冷蔵庫にて保管してき たが、採取から 10 年が経過しようとしており、今年度これらのコア試料を廃棄処分することになっ た。しかし、これらの地質試料は簡単に採取できるものではなく、今後も調査が続き、再び本ボー リングコアの情報が必要になる可能性もある。このような理由で、本年度はコア試料の鉱物組成を 調べることにした。

分析に供した試料数は86 試料であり、全深度を綿密に測定することはできなかった。そこで、 特にアクセスの難しい深度300m以深を重点的に測定した。これら試料に対しては、不定方位法に よる回折実験を行い、その結果から粘土鉱物の存在が推定された試料に関してのみ、水ひ処理、エチレ ングリコール処理、塩酸処理および熱処理ならびにそれぞれの処理を施した試料に対して定方位法 による回折実験をおこなった。また、同定した鉱物に対する石英指数を求めた。分析結果について は3つのエクセルファイルにまとめた。

2. 提出物

エクセルデータ3ファイル

- ・X線回折_検出鉱物と石英指数.xlsx
- ・X線回折チャートテキストデータ(定方位).xlsx
- ・X線回折チャートテキストデータ(不定方位).xlsx

Appendix VI

海底湧出地下水の探査に係る模擬実験および実海域試験

1 はじめに

本年度事業では ROV とサイドスキャンソナーなどで得られる音響画像の解析を組み合わせた探査手法を検証し、実海域における試験を通じてその適用可能性や見いだされた課題の整理を行った。ここでは模擬実験および実海域試験の補足情報について記載する。

2 模擬実験

(1) 実験の概要

模擬実験は海上に設置された計測バージ(OKI シーテック社、沼津市内浦三津地先)で 行った。図 1 に模擬実験の模式図を示す。計測バージ直下の水深約 33m の海底に地下水湧 出を模擬した水源(図 2)を設置し、淡水(水道水)を湧出させた(図 1)。模擬水源は計 測バージに設置されているタンクから、ホースを計測バージの長辺の直下の海底に這わせ る形で配置した。あらかじめ地域の水道水をタンクに貯留しておき、水上に設置したポンプを 用いて送水した。送水量を流量計で記録しつつ 1、4、7 L/min の 3 段階に設定して実験を 行った。なお 7 L/min は今回用いた送水ポンプの性能の上限値である。実験中はダイバー による潜水を行い、模擬水源の設置や実験中の海底付近の様子を撮影した(図 3)。

この模擬水源に対して、ROV と高精度音響カメラ(Sound Metric 社製 ARIS Explorer 3000)を組み合わせた探査装置を用いて音響画像を取得した(図 4)。音響探査は河口域や 汽水湖における塩分躍層の検出が行われてきた(福島ほか、1971;西村ほか、1994;徳岡 ほか、1994)。その原理は音響インピーダンスが異なる淡水と塩水の間で生じる境界面で 一部反射する音波を捉えるものである。海底地下水湧出については、陸域の淡水地下水と海水 の間で塩分躍層が生じる可能性があることから高精度音響カメラを用いる探査手法に着目 した。

今回用いた高精度音響カメラは、海底地形等の測量に用いられる一般的なサイドスキャンソナーに比べて高周波の音波を発信するもので、短距離の精密な探査に適している。今回使用した ARIS Explorer 3000 の仕様は耐圧 300m、周波数 1.8 MHz と 3.0 MHz で探査可能であり、レンジは最大 15m である(Sound Metrics 社製品情報より)。音響カメラは ROV 本体の下部に特注で作成したフレームを装着し、フレーム内に固定する方式として一定の角度で音響画像を取得できる形とした(図 4)。高精度音響カメラは方位角 30°、仰角 14°の扇状に音波を発信し、その反射波を記録する(図 5)。

ROV にはナビゲーションシステムと多項目水質計(YSI 社製 EXO1、底面から高さ 7cm に固定)を装着した。実験で検証した音響カメラの角度は水平面から俯角 30°、45°、90°の3 段階である。計測バージからROV を投入後、海水の電気伝導度、塩分濃度、水温、水 深等を連続的に計測し、海底の状況を観察し、高精度音響カメラにより撮影した。



図1模擬実験の模式図(左図:側面から見た図、右図:上方から見た図)



図 2 模擬水源の湧出口 (ステンレス板上に塩ビパイプを上向きに固定してホースを接続した)



(a)

(c)

(d)



図 3 (a)計測バージ開口部から ROV を投入する様子、(b)海中での ROV 動作の様子、 (c)設置支援と撮影を行うダイバー、(d)海底に設置した模擬水源の様子:塩ビパイプから淡水が 湧き出し、揺らぎが確認できる



図 4 高精度音響カメラ(Sound Metric 社製 ARIS Explorer 3000)の設置状況 (ROV の下部にフレームを装着し、音響カメラを固定した)



図 5 高精度音響カメラの音波発信の模式図

- (2) 実験で検討した項目および結果
- 1) 高精度音響カメラの角度および周波数の検討

高精度音響カメラを俯角 30°、模擬水源の湧出量を 7 L/min の実験結果を図 6 に示す。 音響カメラの角度を 30°として検討した結果、湧出水の検出が可能な場合と、検出が困難な 場合が認められた。この原因として、発信する音波の範囲に対する、湧出水と海底面の位置関係 が関わっているためである。すなわち、湧出水の周囲がウォーターカラムに相当する場合は湧出 水に伴う音波の反射を判別できるが、海底面からの反射が湧出に伴う反射と重なる場合は音 響画像での判別が困難になったと考えられる(図 6)。また音響カメラを俯角

45°として検討した結果、30°と同様に検出が困難な場合が確認された。以上の結果を踏まえると、本事業の報告書で述べた通り、高精度音響カメラを俯角 90°に固定して探査することで、明瞭かつ効率的に湧出水の検出が可能であることが分かった(図7)。

周波数を変えた場合の音響画像の結果(図 7)を見ると、周波数 3.0 MHz においても湧 出水の検出は可能であるが、1.8 MHz においてより明瞭に湧出水の全体像を検出できた。 また音響探査の性質から、周波数が低い方がより遠距離の探査に向いていることからも、本事 業の目的において 1.8 MHz での探査が適切であると結論づけた。



図 6 高精度音響カメラを俯角 30°にした場合の音響画像 (左図:湧出水の検出が可能、右図:湧出水の検出が困難)



図 7 高精度音響カメラを俯角 90° にした場合の音響画像 (本事業報告書の 3-2 に掲載。高精度音響カメラの角度は 90° に固定、 海底面とカメラの間はウォーターカラム:水柱に相当する。)

2) 音響画像解析による湧出量推定手法の検討

高精度音響カメラを俯角 90°に設定し、模擬水源の湧出量を 1、4、7 L/min と変えた場合の音響画像を比較し、湧出量との相関について検討した。その方法としては、音響画像に対して一定の閾値を決め、湧出水に伴う反射の範囲(以下、反射面積とする)と背景を分離して算出し、模擬水源の湧出量と比較するものである。具体的には、湧出水に伴う反射(音圧)と 背景のノイズ(音圧)との閾値を、音響カメラから 2 mまでの範囲(以下、閾値算出範囲)における音圧の平均値+3 σ として決定した。また各湧出量の条件において、それぞれ 3 枚の音響画像データを抽出し、それらの反射面積を算出した。

音響画像の反射面積と湧出量の比較結果を図 8 に示す。概ね 3 段階の湧出量変化に伴っ て、反射面積は増加していることが分かる。そのため、同じ条件で探査ができれば、音響画像 を基に湧出量を推定できる可能性がある。一方で、ダイバーが閾値算出範囲に映りこんだ場合 には算出される反射面積が小さくなり、推定される湧出量が見かけ上小さくなった。実海域で の試験においても、魚類などのノイズが含まれる可能性は高いため、解析時に注意深く閾値を 検討する必要がある。

現時点では解析した音響画像の数が限られているため、解析数量を増やして本計算手法 の妥当性や信頼性の検証を進める必要がある。今回の評価手法は2次元断面から計算する ものであるが、湧出水周辺で異なる断面の音響画像を取得できれば、3次元的な音響画像デー タに基づいて湧出量を推定することにもつながると期待される。





3 実海域における検討内容

(1) 3 次元画像による海底微地形の把握

実海域試験では、高精度音響カメラによる探査、海底湧出地下水の撮影と採水に加えて、海 底微地形把握の技術についても検討を進めた。これは海底湧出地点付近の微地形を把握す ることで、湧出水との関係(湧出に伴って生じる、あるいは湧出への関与が想定される地形) を検討するために用いる。微地形を把握する方法としては、ROV を湧出地点周辺で高解像 度カメラを用いて複数枚の画像を取得し、画像中の基準となる点を基に海底微地形の立体化 を試みた。今回は現場で取得した画像を写真測量ソフトウェア(PIX4D 社製 PIX4D mapper)により、撮影した動画から静止画像を抽出し、特徴点を基にオルソモザイク画像 および 3D モデルを作成した。

図 9 および図 10 に地点 2 と地点 3 (本事業報告書参照) 周辺における海底微地形の 3D モデルを示す。地点 2 周辺では崖の末端部に存在する段差を確認できた。地点 3 周辺では やや不明瞭であるものの、海底面の凹凸の状況が確認できた。今年度の試験では、実海域試験 を行った時期の潮流が速く、海中の濁りが強い状況にあったために海底における鮮明な映 像を撮ることができず、オルソモザイク画像および 3D モデルの作成が困難であった。その ため、気象や海象の条件を十分に考慮して適切な時期に試験を行う必要がある。



図 9 地点 2 付近の 3D モデル(ソフトウェのoud compareを用いて表示)



因 10 地点 3 付近の 3D モデバソフトウェのoudcompare を用いて表示)
(3) 採水した湧出水の分析結果

平成 30 年度地層処分技術調査等事業「沿岸部処分システム高度化開発」において、 ROV とピストン式の採水器を用いた実海域における採水技術の検討がおこなわれた(産業 技術総合研究所ほか、2019)。本事業ではその採水器の内部に塩分濃度計を取り付けて、音 響探査で検出された湧出水を対象に採水を行った。地点 2~地点 4 における採水時の様子を 図 11~図 13 に、地点 3 および地点 4 における分析結果を表 1 と表 2 に示す(地点 2 における分析結果は報告書 3・2 参照)。

実海域での試験および室内分析の結果から、2 成分混合を仮定して陸域の淡水地下水の 混合率を算定すると、それぞれの地化学成分によるばらつきがあるものの 3~6 割程度とい う結果が得られた。今回装着した塩分濃度計によって、リアルタイムで塩分濃度を確認で きるため、採水中に得られるデータを踏まえて、採水地点の変更も可能である。今後は実 海域における試行回数を増やすことや、地下水年代を評価するための試料の採取が必要で ある。



図 11 地点 2 の海底面の状況(左図)と採水時の様子(右図) (右図の手前に採水器の採水口が位置している)



図 12 地点 3 の海底面の状況(左図)と採水時の様子(右図) (海底に魚類が確認できる)



図 13 地点 4 の海底面の状況(左図)と採水時の様子(右図)

成分	地点 3	海水	陸域地下水	陸域地下水混合率(%)
			平均值 (最小值~最大值)	平均值(最小值~最大值)
δ ¹⁸ O (‰)	-3.5	0.2	-9.5 (-10.4~-8.5)	38 (34~42)
δD (‰)	-22	1	-61 (-67~-54)	38 (34~42)
Na (mg/L)	6,379	11,141	20 (15~25)	43 (43~43)
Cl (mg/L)	11,216	19,628	25 (5~57)	43 (43~43)
V (µg/L)	26.2	2.9	56.9 (44.0~71.5)	45 (34~57)
Si (µg/L)	9,326	387	16,756 (15,852~18,207)	55 (50~58)

表1 地点3における分析結果と陸域地下水の混合率推定

表 2 地点 4 における分析結果と陸域地下水の混合率推定

成分	地点 4	海水	陸域地下水	陸域地下水混合率(%)
			平均值(最小值~最大值)	平均值(最小值~最大值)
δ ¹⁸ O (‰)	-2.2	0.2	-9.5 (-10.4~-8.5)	25 (23~28)
δD (‰)	-14	1	-61 (-67~-54)	25 (23~28)
Na (mg/L)	8,028	11,141	20 (15~25)	28 (28~28)
Cl (mg/L)	14,157	19,628	25 (5~57)	28 (28~28)
V (µg/L)	18.5	2.9	56.9 (44.0~71.5)	30 (23~38)
Si (µg/L)	5,942	387	16,756 (15,852~18,207)	34 (31~36)

参考文献

- 福島久雄、八鍬 功、高橋 将(1971):石狩川河口における二,三の問題、第18回海岸 工学講演会論文集、431-435、1971
- 水野勝紀、小島光博、片瀬冬樹、三尾有年、浅田 昭(2016):海底熱水鉱床の音響探査の 最前線、日本音響学会誌、72(8)、477-483、2016
- 西村清和、安間 恵、土屋洋一、松田滋夫、徳岡隆夫、井内美郎(1994):塩水楔調査のための水中音響探査機の開発、LAGUNA(汽水域研究)、1、1-9、1994、3月
- 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(2016)、平成 27 年度沿岸部処分システム高度化開発報告書、139p、2016 産業 技術総合研究所、日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中

央研究所(2019): 平成 30 年度沿岸部処分システム高度化開発報告書、356p、 2019

徳岡隆夫、大西郁夫、三瓶良和、瀬戸浩二、田村嘉之、高安克己、安間 恵、土屋洋一、松田滋 夫、井内美郎、西村清和(1994): 音波探査による中海・宍道湖の塩分躍層の検討とその 意義、LAGUNA(汽水域研究)、1、11-26、1994、3月

Sound Metrics ARIS Explorer 3000 製品ページ:

http://www.soundmetrics.com/Products/ARIS-Sonars/ARIS-Explorer-3000 (最終閲覧日:2020年1月27日) Appendix VII

再冠水に至る期間を対象とした性能評価手法に係る基盤整備

1. はじめに

本付属書は、平成 31 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 (沿岸部処分システム評価確証技術開発)のうち 4-1(2) 性能評価手法の体系化に向けた検 討に関する性能評価に係る国内外の先行的な検討事例の調査結果について、また、4-1(3)水 理解析技術の高度化に向けた検討に関する沿岸部の水理解析に考慮すべき要因の影響検討 における解析コード、海水準変動解析(施設掘削前解析)の設定方法の詳細、解析用物性値 及び解析結果について、それぞれ報告書本文中に詳細に掲載できなかった内容を記したも のである。

2. 性能評価手法の体系化に向けた検討

2.1 性能評価に係る国内外の先行的な検討事例の調査

性能評価に関する基盤情報の整備を行うために、国外の先行的な検討事例を調査した。諸 外国の調査対象国は、沿岸処分国としてフィンランド(POSIVA)とスウェーデン(SKB)、 非沿岸処分国としてスイス(Nagra)を対象とし、調査対象文献は表 2-1 に示すとおりであ る。また、わが国における性能評価の最新の取組状況を把握するため、NUMO包括的技術 報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018、以下、NUMO-SCとする)の調査を実 施した。調査内容は、以下のとおりである。なお、NUMO-SCは、下記の事項に関連する 事項を抽出した。

- ・ 人工バリアシステム構成の概要
- ・ 性能評価の位置付け(性能評価の流れ)
- ・ 性能評価項目の整理
- ・ 性能評価項目毎の評価手順の整理(流れ、モデル、データ種類、等)

この Appendix には、報告書本文中には掲載できなかった性能評価に係る国内外の先行的な 検討事例(フィンランド、スウェーデン、スイス、日本)の調査結果を記した。

調査対象国	調查対象文献候補※		
フィンランド	• Posiva: Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Synthesis 2012, POSIVA 2012-12, (2012).		
	• Posiva: Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel a Olkiluoto - Performance Assessment 2012, Posiva 2012-04, (2012)		
	• Posiva: Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel a Olkiluoto, - Features, Events and Processes 2012, Posiva 2012-07, (2012).		
スウェーデン	• SKB: Long-term safety for the final repository for spent nuclear field at Forsmark, Main report of the SR-Site project, SKB TR-11-01, (2011).		
	• SKB: Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-47, (2010).		
	• SKB: FEP report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-45, (2010).		
スイス	• Nagra: Project Opalinus Clay Safety Report: Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste, NTB-02-05, (2002).		
	• Nagra: Project Opalinus Clay Models, Codes and Data for Safety Assessment: Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste, NTB-02-06, (2002).		
	• Nagra: Project Opalinus Clay FEP Management for Safety Assessment: Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste, NTB-02-23, (2002).		
	 Nagra, The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland, Technical Report 16-02, December 2016 		

表 2-1 性能評価に係る諸外国の先行的な検討事例の調査対象文献

※:太字は各国セーフティケース報告書のメインレポート

2.1.1 国外における先行的な検討事例の調査—フィンランド

(1) 人工バリアシステム構成の概要

フィンランドの処分概念は堅置きである。フィンランドでは、地層処分場の長期安全原則 において、表 2-2 のように人工バリアが定義されており、それぞれの人工バリア構成要素 に対して、表 2-3 に示す安全機能が割り当てられている。フィンランドでは、これらの人 エバリア構成要素のそれぞれの設計に関する要件を、要件管理システム (VAHA)を用いて、 表 2-4 に示すように階層的に管理している。

表 2-2 長期安全原則における人工バリアの定義

(POSIVA2012-12 (Posiva, 2012a))

人工バリアは以下の構成とする。
a) <u>キャニスタ</u>:環境に悪影響を及ぼす可能性がある放射性核種を閉じ込める。
b) <u>緩衝材</u>:キャニスタを保護するためにキャニスタと母岩の間に設置される。
c) <u>埋め戻し材及びプラグ</u>:緩衝材を保持し、母岩の条件が回復することを助ける。
d) <u>閉鎖材</u>:地表から処分場を隔離するための埋め戻し・シーリング材。

表 2-3 人工バリア構成要素に割り当てられた安全機能

バリア	安全機能
キャニスタ	▶ 使用済燃料の長期間にわたる閉じ込めを確保する。この安全機能は、キャニス
	タ鋳鉄インサートの力学的な強度とそれを取り囲む銅の耐食性に基づくもので
	ある。
緩衝材	▶ 予測の比較的容易でキャニスタにとって有利に働く力学的、地球化学的及び水
	理地質学的な条件に寄与する。
	▶ キャニスタを、使用済燃料及び関連する放射性核種の完全な閉じ込めという安
	全機能を損なう可能性のある外的プロセスから保護する。
	▶ キャニスタの破損が生じた場合にも、放射性核種の放出を制限し、遅延させ
	る。
処分坑道	▶ 緩衝材及びキャニスタにとって良好かつ予測の比較的容易な力学的、地球化学
埋め戻し材	的及び水理地質学的な条件に寄与する。
	▶ 起こり得るキャニスタ破損事象の発生後に、放射性核種放出を制限し、遅延さ
	せる。
	▶ 処分坑道周辺岩石の力学的な安定性に寄与する。
閉鎖材	▶ 地下開口部によって、地表環境及び人間、植物及び動物の通常の居住/生息地か
	らの処分場の長期的な隔離が損なわれる事態を防止する。
	▶ 開口部を通じた重要な透水性流動経路の形成を防止することにより、その他の
	人工バリアにとって良好かつ予測の比較的容易な地球化学的及び水理地質学的
	な条件に寄与する。
	▶ 処分場からの有害物質への流入及び放出を制限し、遅延させる。

(POSIVA2012-12 (Posiva, 2012a))

表 2-4 要件管理システム(VAHA)における人工バリア構成要素の設計に関する 要件の階層

(POSIVA2012-12	(Posiva, 2012a))
----------------	------------------

要件	内容	
性能要件	安全機能の確実な履行に向けた、人工バリアの性能	
(Performance Requirements)	目標(Performance Targets)。	
設計要件	州北西州な去たナための人工バリアの乳計西州	
(Design Requirements)	住能要件を充だすための人工パリアの設計要件	
設計仕様		
(Design Specifications)	、 は し 、 と は の 、 と は の 、 、 と で 、 、 、 、 と 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	

(2) 性能評価の位置付けや流れなど

1) セーフティケースにおける性能評価の位置付け

フィンランドのセーフティケース報告書のメインレポート (POSIVA2012-12) の目次構 成を表 2-5 に示す (Posiva, 2012a)。また、POSIVA2012-12 に示されている、フィンラン ドにおけるセーフティケース構築のためのアプローチを図 2-1 に示す。表 2-5 及び図 2-1 から、フィンランドにおける性能評価のセーフティケースにおける位置付けは、以下であるこ とが読み取れる。

- ▶ 性能評価は、設計基準(Design Basis)と核種移行評価の間に位置付けられる。
- ▶ 性能評価は、設計基準に基づいて設定された処分場設計をインプットとして実施 され、その結果は、設計基準にフィードバックされる。
- ▶ 性能評価の結果は、核種移行評価へのインプットとして用いられる。
- ▶ 性能評価の結果は、セーフティケースの構成要素の一つとなる。

表 2-5 フィンランドのセーフティケース報告書(TURVA-2012)のメインレポート (POSIVA2012-12(Posiva, 2012a))の目次構成

目 次 構 成
1 序 論
2 方法論
3処分システムの記述
4 特性、事象及びプロセス (FEP)
5 モデル及びデータ
5.1 気候の変遷及び気候に起因するプロセスに関するモデル及びデータ
5.2 性能評価及び放射性核種放出シナリオ作成のキーとなるモデル及びデータ
5.3 放射性核種の放出シナリオの解析のためのモデル及びデータ
5.4 生物圏評価のためのモデル及びデータ
6 処分場システムの性能評価
6.1 掘削及び操業から処分施設の閉鎖まで
6.2 閉鎖後 1 万年間の変遷
6.3 反復的な氷期サイクルが生じる 1 万年後以降の期間
6.4 性能及び不確実性に関する要約
7 放射性核種放出シナリオの作成と計算ケース
8 放射性核種放出シナリオの評価
9 補足的検討及び裏づけとなる証拠
10 法規制要件の順守及び関連する不確実性
11 信頼性の表明

□:性能評価に関わる箇所



PSAR:予備的安全評価報告書(建設許可申請) FSAR:最終安全評価報告書(操業許可申請)

図 2-1 セーフティケース構築のためのアプローチ (POSIVA2012-12 (Posiva, 2012a))

2) 性能評価期間の考え方

フィンランドの性能評価では、以下に示す4つの期間において、性能要件に潜在的に影響 を及ぼし得る様々な変遷プロセスが検討されている。これら4つの期間に分けている理由 については、直接的な記載は見られない。

本業務で対象としている操業(建設・施工・閉鎖)~再冠水(ベースライン復旧) I至 る期間に相当するのは、下線部の2者である。

- ▶ 掘削及び操業期間から閉鎖まで
- ▶ 閉鎖後1万年まで(再冠水に関する評価はこの期間に該当)
- 閉鎖後1万年から次期氷期の終了(約17万年後)まで
- ▶ 次期氷期の終了から 100 万年まで(氷期サイクルの繰り返し)

それぞれの期間における性能要件の達成に関する評価が、人工バリア及び母岩への時間 的・空間的負荷を考慮に入れた上で実施されている。例えば、安全裕度を計算し、設計のロ バスト性を立証するために、可能な場合には常に、定量的な評価が実施されている。不確実 性に着目した上で、性能要件からの逸脱に繋がる可能性がある条件が特定され、その種の逸脱が 発生する可能性とその影響が見積もられている。

3) 性能評価の流れ

フィンランドのセーフティケース報告書は、メインレポートと、それを補足するサブレポート群で構成されており、性能評価については、その詳細が、これらサブレポート群のうちの 一つである性能評価報告書(POSIVA2012-04)に示されている(Posiva, 2012b)。ここで は、性能評価報告書は、その目次構成自体が、フィンランドが考える性能評価の流れを反映し ていると考えられることから、POSIVA2012-04の目次構成を表 2-6に示す。

フィンランドの性能評価では、前提となる処分場構成要素の性能要件(2章)と初期状態 (3章)を示した上で、evolution-related FEPs(主に処分システムの物理的状態に影響す る FEP)の分析を行って、性能評価において考慮すべき evolution-related FEPs を抽出し ている(4章)。その後、2)に示した評価期間ごとに、設定した性能評価項目のそれぞれに 対して評価を実施し(5~8章)、性能要件が達成されることの確認を実施している(9章) (図 2-2 にイメージを示す)。

表 2-6 フィンランドのセーフティケース報告書(TURVA-2012)の性能評価報告書

目 次 構 成
1序論
2 性能要件(Performance Requirements)
3 初期状態
4 Evolution FEPs 及び処分場システム性能
5 処分場システム性能-掘削及び操業期間
5.1 地圏の水理学的及び地球化学的変遷
5.2 ニアフィールドの熱的変遷
5.3 ニアフィールド岩盤の力学的変遷
5.4 緩衝材及び埋戻材の力学的及び水理学的変遷
5.5 緩衝材及び埋戻材の地球化学的変遷
5.6 閉鎖材に関する力学的、水理学的及び地球化学的変遷
5.7 キャニスタ腐食
5.8 未臨界
5.9 まとめ
6 処分場システム性能-閉鎖後 1 万年までの変遷
6.1 地圏の水理学的及び地球化学的変遷
6.2 ニアフィールドの熱的変遷
6.3 岩盤の力学的変遷
6.4 緩衝材及び埋戻材の力学的及び水理学的変遷
6.5 緩衝材の地球化学的変遷
6.6 埋戻材の地球化学的変遷
6.7 閉鎖材構成要素に関する力学的、水理学的及び地球化学的変遷
6.8 キャニスタ腐食
6.9 キャニスタへの力学的荷重
6.10 未臨界
6.11 まとめ
7 処分場システム性能-長期の変遷
8 氷期サイクルの繰り返しによる変遷に関する議論
9 性能目標(Performance Targets)及び目標特性(Target Properties)の達成
10 結 論

□:操業(建設・施工・閉鎖)~再冠水(ベースライン復旧)に至る期間に関わる箇所



図 2-2 フィンランドにおける性能評価の流れのイメージ

(3) 性能評価項目の整理

1) 性能評価項目の選定方法

フィンランドにおける性能評価項目の選定方法に関わる記述を表 2-7 に示す。フィンラ ンドでは、FEP を主に処分システムの物理的状態に影響する FEP である "evolutionrelated-FEPs" と、主に放射性核種移行に影響する FEP である "migration-related FEPs" とに分け、前者を、地層処分システム構成要素に潜在的に影響を及ぼし得る変遷プロセスとして 用いている。例えば、緩衝材及び埋戻材については、以下の "evolution-related FEPs" (変遷プロセス) が示されている。

- ▶ 熱伝達
- ▶ 水の浸入及び膨潤
- パイピング・エロージョン
- ▶ 化学的エロージョン
- 間隙水の放射線分解
- ▶ モンモリロナイトの変質
- ▶ 随伴鉱物の変化
- ▶ 凍結及び解凍

これら"evolution-related FEPs"(変遷プロセス)の各グループについて、性能目標に影響を与える可能性のある潜在的負荷やその他の因子をまず特定し、それらの変遷について記述することとしており、この部分が、性能評価項目の選定であると考えられる。ただし、

"evolution-related FEPs"(変遷プロセス)から、どのように性能評価項目に落とし込んでいるかに関する具体的な記載は見られない。

表 2-7 性能評価項目の選定に関わる記述

(POSIVA 2012-04 (Posiva, 2012b))

4 EVOLUTION FEPS [*] 及び処分場システム性能
本章では、バリア性能に影響を与える可能性のある重要なプロセスが特定されていることを確認するた
<u>めこ2章で列挙した性能目標及び目標特性(VAHA L3)を、人工バリア及び岩盤の変遷に関わる FEP に</u>
照らして確認する。この一環として、性能評価(PA)において考慮した包括的な気候変遷 FEP を示
す。以下に示す FEP を、本報告書の 5 章から 8 章までに示す処分システム性能解析において考慮する。
4.3 緩衝材及び埋戻材の性能に影響する Evolution FEPs
緩衝材及び埋戻材の長期安全機能については 1.5 節に、性能目標については 2.1.2 項及び 2.1.3 項に示し
た。処分坑道ブラグは、性能目標を設定する際(2.1.3 項)は埋戻材と共に考慮しているが、その性能に
ついては、4.4 節で個別に取扱っていることに注目する必要がある。
緩衝材及び埋戻材の安全機能及び性能目標の達成は、設計、製造及び定置における良好な品質管理によ 「「「ままえ」開いたにえ (線等社界が開業社会 P」」、「「」、「おまま」、線等社界が開業社会の企業
ってでさる限り催保される(綾餌材及い理戻材の Production Line 報告書)。綾餌材及い理戻材の女全機
<u>される熱やその伝達)などの影響を受けると考えられる。これらの要因を考慮すると、綾側材及い理房</u> 体 の歴治において来慮すべき亦運プロセスは以下の通りできる。
<u>の性能にわいてろ慮すべき炎達ノロセスは以下の通りである。</u> この1/001 執行法(加盟の担照信任の期間のカルマはよれ、加益とは、北京本が執行法は言語よう。
• 5.2.1/6.2.1 熱伝達(初期の温暖気候の期間のみ自しはよる。留息尽は、非効率な熱伝達は高温をもな
し、特に緩倒材のモンモリロデイトの挙動に影響する可能性がある点である。モンモリロディー
イトの変質を変敗のこと。) L3-BUF 6 に関連する。 - 500/200 セの浸入及び膨調 (物所ルに関連ナス の音ちけ このプロセスけ国辺出船もとの地下)
• 5.2.2/6.2.2 <u>小の侵入及び膨</u> () (均則化に) (均則化に) (均則化し) (1 () () () () () () () () () () () () ()
八で漱仏建に依仕りる息(める。)L5-D0F-4, L4-D0F-2, L4-D0F-9, L4-D0F-10, L5- DAC-5 I A-DAC-9 I A-DAC-90 I A-DAC-90 /7 開演-オス
DAG 5, L4 DAG 2, L4 DAG 50, L4 DAG 20 に関連する。 • 59 9/6 9 9 パイピング・エロージョン (加公社の加公信道として通知た位置を選択することに上加
- 5.2.5/0.2.5 <u>パイビンノ・エロージョン</u> (応力化てた力が追こして過労な位置を送伏することによる パイピング • エロージョンの範囲け限定されると考うられる)ト記と同じ悪性に関連す
ス
。 • 59 //6 9 / 化学的エロージョン(極めて塩分濃度の薄い地下水が処分堤深度に到達すろ堤合のみに当
0.2.40.2.4 $(1-1)$
• 525 間隙水の放射線分解の影響は非常に小さいため、緩衝材及び埋戻材の性能評価において考
慮する必要はない。Process Report 2007 (Miller and Marcos 2007)及び Features. Events
and Processes 報告書に記載の理由を参照のこと。
・5.2.6/6.2.5 モンモリロナイトの変質 L3-BUF-4. L4-BUF-2. L4-BUF-9. L4-BUF-16. L3-BAC-5. L4
BAC-2, L4-BAC-30, L4-BAC-28 に関連する。
• 5.2.7/6.2.6 随伴鉱物の変化 L3-BUF-21, L4-BUF-19, L3-BAC-13, L4-BAC-18 に関連する。
• 5.2.8/6.2.7 微生物活動L3-BUF-4,L3-BUF-21,L4-BUF-5,L4-BUF-19,L3-BAC-5,L3-BAC-13,L4-
BAC-18 に関連する
• 5.2.9/6.2.8 <u>凍結及び解凍</u> 緩衝材及び埋戻材の凍結及び解凍が発生したとしても、緩衝材及び埋戻材
の長期性能に影響を及ぼすことはない。(下記及び Schatz and Martikainen 2010 を参
照)
4.6 処分場性能の評価方法
評価の時間枠を、掘削及び操業から閉鎖段階の終了まで(5章)、その後の1万年間(6章)及びそれ
以降次期氷河期終了までの長期変遷(7 章)に分割する。8 章では、次期氷河期終了以降に予想される変
遷と氷期サイクルの繰り返しの影響について議論する。
各時間枠では、この4章で示した性能目標に影響を与える可能性のある様々な変遷プロセスに関する体系
的な評価を実施する。プロセスの各グループについて、性能目標に影響を与える可能性のある潜在的負
荷やその他の因子をます特定し、それらの変遷について記述する。その後、性能目標に関するこれら
FEP (本報告書では、プロセス、潜在的負荷、その他の因子とも呼ばれる)の影響を評価する。性能目
標の達成に関する个確実性が特定されているが、それらの詳細はFormulation of Radionuclide Release
Scenarios 報告書において 取扱い、 Kadionuclide Kelease Scenarios for the Repository System 報告書
において評価する。
<u>9 早から / 早では、処分ンステムにおいて才想される熱的、水理的、刀字的及び地球化字的変遷につい</u>
<u>、これり変遷か 2.1</u> 即に不した性能日標で日標将性にとのよりな影響を及ばすかに里点を直いて記述
<u>りる。</u> り1111110/11さいもしてはり1111110/打吊に小さい復乱争家(例えは、右盤せん町)の発生について ま考慮する
※POSIVA では、FEP を、evolution-related FEPs(主に処分システムの物理的状態に影響するFEP)と

migration-related FEPs(主に放射性核種移行に影響する FEP)に分類している(POSIVA 2012-07, (POSIVA, 2012c))

2) 性能評価項目一覧

本業務で対象としている操業〜再冠水に至る期間に相当する「掘削及び操業期間から閉鎖 まで」、及び「閉鎖後1万年まで」のそれぞれについて、処分場構成要素ごとの性能評価項 目を以下に示す。性能評価報告書(POSIVA2012-04)の5~8章では、性能評価の内容が、 性能評価項目ごとにまとめられていることから、5~8章の目次が、そのまま各評価期間の 性能評価項目一覧と見なすことができる(Posiva, 2012b)。このため、ここでは、まず、対象と する評価期間に関する POSIVA2012-04の章の目次をそのまま示した後、それらを、弊社の判 断で処分場構成要素及び THMCR にて分類・整理した。

なお、本業務の対象は人工バリアであるが、母岩の性能評価結果は、人工バリアの性能評価 の与条件になりうることから、以下では、人工バリアに加えて、母岩の性能評価項目も示し ている。

①「掘削及び操業期間から閉鎖まで」の性能評価項目一覧

「掘削及び操業期間から閉鎖まで」についての性能評価の内容については、POSIVA2012-04の5章に示されている(Posiva, 2012b)。その目次構成を表 2-8に、目次構成に基づき弊社の判断で THMCR ごとに整理した「掘削及び操業期間から閉鎖まで」の性能評価項目 一覧を表 2-9に、それぞれ示す。

大項目	小項目
地圏の水理学	地下水流動
的及び地球化	地下水組成
学的変遷	・地下水中の塩分
	・pH及び酸化還元状態
	・ 地下水中の溶存イオン及び硫化物
	 ・操業期間中の地圏における硫化物の変化に関するモデル化
	・操業期間中の微生物活動
	・建設中のセメント起源のコロイド
ニアフィール	ニアフィールドにおける温度変化
ドの熱的変遷	
ニアフィール	EDZ (Excavation Damaged Zone)
ド岩盤の刀字	・ 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一
的変遷	断層の再活性化 (Reactivation of fractures)
緩衝材及び埋	パイピング/エロージョン
戻材の力字的 	・処分れにおける重量減少量
及び水埋字的	・影響を受ける処分扎の数
发遷	・奇与する水重
	・ 夜後水中の固相さ有重 - 加八応送冊戸社の重号減小号
经金井卫工	シンガル道理氏的の重重減少重 酸素の計測及び、TF 本化
被側 材 及 い 埋 三 せ の 地 球 ル	販売の伯肉及い pll 変化 コロイド生成
戻村の地球化	- マフィール じたわけて カイン (1 万月山) 次の彫郷
子时发麾	ーノノイールトにわけるセメノト米反田攸の影響
	・ビアン下ボ材料の反山 - 当般中での温山遊の我行
	 ・セメント系浸出液と粘土/モンモリロナイトの相互作用
	その他のシール材物質の浸出ーシリカゾル
閉鎖材に関す	操業期間中の閉鎖埋戻材の変化
る力学的 水	撮業期間中の閉鎖プラグ及TX机分坊道プラグ材におけるコンクリート構成更素の変化
理学的及び地	・コンクリート耐久性に関する概要
球化学的変遷	・設置後 100~200 年間のHZ20(hydrogeological zones)上部の標準コンクリート
	の変化
	・ 設置後 100~200 年間のHZ20 下部の低 pH 自己充填コンクリートの変化
キャニスタ腐	定置前の空気による腐食(Atmospheric corrosion)
食	ハンドリング及び操業要因による腐食
	応力腐食割れ
	残留水の放射線分解による内部腐食(internal corrosion)
	不飽和緩衝材中の外部腐食(External corrosion)
	処分孔内の好気性腐食(Aerobic corrosion)
	高塩分濃度の地下水における銅腐食
	キャニスタへの力学的影響
未臨界	-

表 2-8 性能評価報告書(POSIVA2012-04 (Posiva, 2012b))の5章の目次構成

表 2-9	「掘削及び操業期間か	ら閉鎖まで」の性能評価項目一覧
	/ᇤᄼᇉᆓᆃᆂᆂ	

処分場	性能評価項目				
構成要素	THMCR 分類	項目			
母岩	熱	温度変化			
	水理	地下水流動			
	力学	EDZ			
		掘削による岩盤損傷			
		断層の再活性化			
	化学	地下水組成			
キャニスタ	力学・化学	腐食とその力学的影響			
	放射線	未臨界			
緩衝材	熱	温度変化			
	水理・力学	パイピング/エロージョン			
	化学	酸素の枯渇及び pH 変化			
		コロイド生成			
		セメント系浸出液の影響			
		シリカゾルの影響			
埋め戻し材	水理・力学	パイピング/エロージョン			
	力学・化学	処分坑道プラグにおけるコンクリート構造物の変化			
	化学	酸素の枯渇及び pH 変化			
		コロイド生成			
		セメント系浸出液の影響			
		シリカゾルの影響			
閉鎖材	水理・力学	閉鎖材の変化			
	力学・化学	閉鎖プラグにおけるコンクリート構造物の変化			

(処分場構成要素、THMCR にて分類)

②「閉鎖後 1 万年まで」の性能評価項目一覧

「閉鎖後 1 万年まで」についての性能評価の内容については、POSIVA2012-04 の 6 章に 示されている(Posiva, 2012b)。その目次構成を表 2-10 に、目次構成に基づき弊社の判断 で THMCR ごとに整理した「閉鎖後 1 万年まで」の性能評価項目一覧を表 2-11 に、それ ぞれ示す。

大項目	小項目
地圏の水理学	地下水流動
的及び地球化	地下水組成
学的変遷	・地下水中の塩分
, model	• nH 及び酸化還元状態
	・地下水中の溶存イオン及び硫化物
ニアフィール	
ドの熱的変遷	
岩盤の力学的	熱的スポーリング(Thermally induced spalling)
変遷	断層の再活性化(Reactivation of fractures)
	クリープ
緩衝材及び埋	飽和プロセス
戻材の力学的	 ・ 亀裂間の岩盤から水が供給されると仮定したシミュレーション(岩盤透水係数>)
及び水理学的	0)
変遷	膨潤及び均質化
	・ 膨潤と均質化のカップリング
	緩衝材及び埋戻材の均質化
	 数値モデルからの均質化の証拠
	 ・緩衝材の均質化の試験データ
	・埋戻材の均質化の試験での証拠
	 パイピングチャンネルの均質化及び自己シール
	 緩衝材の埋戻材への膨張
	飽和緩衝材ベントナイトの飽和埋戻材への膨潤
緩衝材の地球	予測範囲内で上昇した温度下での地球化学的変遷
化学的変遷	モンモリロナイトの変質
	熱的ステージでのセメンテーション
	飽和後の緩衝材の間隙水化学及び陽イオン交換体化学
	緩衝材中での微生物活動
	緩衝材への硫化物フラックス
	緩衝材へのセメント浸出液の影響
埋戻材の地球	飽和後の埋戻材間隙水化学
化学的変遷	埋戻材中での硫化物の生成と微生物活動
	埋戻材中でのセメントー粘土相互作用
	埋戻材中での鉄-粘土相互作用
	・ 鉄/鋼の腐食において硫酸還元バクテリアにより生成される硫化物
閉鎖材構成要	閉鎖埋戻材材料の変化
素に関する力	閉鎖プラグ及び処分坑道プラグの変化
学的、水理学	
的及び地球化	
学的変遷	
キャニスタ腐	緩衝材飽和中における腐食
食	緩衝材飽和後における腐食-硫化物腐食
	緩衝材間隙水の放射線分解によるキャニスタの外部腐食
キャニスタへ	静水圧による荷重
の力学的荷重	ベントナイトの不均等な膨潤による圧力
	荷重の組み合わせ
	岩盤せん断荷重の評価
未臨界	-

表 2-10 性能評価報告書(POSIVA2012-04(Posiva, 2012b))の6章の目次構成

表 2-11 「閉鎖後1万年まで」の性能評価項目一覧

処分場	性能評価項目			
構成要素	THMCR 分類	項目		
母岩	熱	温度変化		
	水理	地下水流動		
	力学	熱的スポーリング		
		断層の再活性化		
		クリープ		
	化学	地下水組成		
キャニスタ	力学	力学的荷重		
	化学	腐食		
	放射線	未臨界		
緩衝材	熱	温度変化		
	水理・力学	飽和プロセス		
		膨潤及び均質化		
		緩衝材ベントナイトの埋戻材への膨潤		
	化学	予測範囲内で上昇した温度下での地球化学的変遷		
		モンモリロナイトの変質		
		熱的ステージでのセメンテーション		
		飽和後の間隙水化学及び陽イオン交換体化学		
		微生物活動		
		硫化物フラックス		
		セメント浸出液の影響		
埋め戻し材	水理・力学	飽和プロセス		
		膨潤及び均質化		
		緩衝材ベントナイトの埋戻材への膨潤		
	化学	飽和後の間隙水化学		
		硫化物の生成と微生物活動		
		セメントー粘土相互作用		
		鉄-粘土相互作用		
閉鎖材	水理・力学	閉鎖材の変化		
	力学・化学	閉鎖プラグ及び処分坑道プラグの変化		

(4) 性能評価項目ごとの評価手順の整理

ここでは、(3) 2) に示した性能評価項目のうち、本業務で着目している水理解析に関わる性能評価項目(水理、地下水化学)として以下を抽出し、それらについて、性能評価報告書(POSIVA2012-04)等の記述を基に、その流れ、モデル、データ種類などといった性能評価手順の整理を実施した(Posiva, 2012b)。

- ▶ 地下水流動
- ▶ 地下水組成(塩分)
- ▶ パイピング/エロージョン

1) 地下水流動

性能評価報告書(POSIVA2012-04)では、地下水流動解析として、以下の2つのスケールの評価について、使用したモデルや、それによる結果の概要が示されている(Posiva, 2012b)。ここでは、それぞれのスケールの評価の概要についてまとめる。

- ▶ サイトスケール:処分場領域への地下水流入量の評価
- ▶ 処分場スケール:処分坑道/処分孔への地下水流入量の評価

① サイトスケール

サイトスケールの地下水流動解析では、FEFTRA コードを用いて、ECPM (Equivalent Continuous Porous Medium) 及び DP (Dual Porosity)の組み合わせにより、以下の5つの期間に対して、処分場領域への地下水流入量が評価されている(Löfman and Karvonen, 2012)。評価に際しては、レイアウトや水理地質モデルが異なる3パターンのモデル(表 2-12)が考慮されている。操業期間の評価では、アクセス経路が操業期間全体にわたって開口したままである中で、処分場が段階的に建設され、特定パネルの坑道が操業期間中の必要な時期に開口していると仮定されている(各パネルは8~16年間開口状態としている)。

- ➢ ONKALO 掘削期
- 約 100 年間の操業期間
- ▶ 閉鎖後温暖期
- ▶ 永久凍土期
- ▶ 氷河期

表 2-12 サイトスケールの地下水流動解析で考慮している3パターンのモデル

(POSIVA 2012-04 (Posiva, 2012b))

流動モデル	記述				
	基本ケース。水理地質構造モデル 2008。5500 tU の使用済燃料の処分場レ				
	イアウト。このケースでは、HZ(後述)と SFR(後述)の水理特性は半均				
	質 (SH: Semi-Homogeneous)。これは、ほとんどの HZ に対して均質な特				
	性を適用する一方、SFR に対しては深度ごとに深度に依存した均質な特性				
200061	を適用することを意味する。水理特性は、掘削孔の交差部で測定された透水				
200950	量係数の実効値としての幾何平均に基づく。塩分移行関連の特性のいくつか				
	(拡散間隙率や分散長)は、全モデル領域において均質。Site Description				
	2008 における補正基本ケースも同様の SH 特性。				
	上部境界条件は、表層水理モデル(SHYD モデル)の結果に基づく。使用済				
	燃料の崩壊熱による熱影響は、温暖期のみ考慮。				
	水理地質構造モデル 2010。9000 tU の使用済燃料の処分場レイアウト。地				
	下水流動モデルでは、全坑道が、処分坑道床面の平均深度 410m に位置。更新				
	された値以外は、2009SH と同様、HZ と SFR の水理特性は半均質(SH:				
2011SH	Semi-Homogeneous)。半均質(SH:Semi-Homogeneous)の水理特性は一				
	部、Site Description 2008 で実施された補正に基づく。				
	上部境界条件は、2009SH と同様、SHYD モデルの結果に基づく。使用済燃				
	料の崩壊熱による熱影響は無視。				
	水理地質構造モデル 2010。9000 tU の使用済燃料用に 2011 年に設計された				
	処分場レイアウト。不連続亀裂ネットワークモデルに基づき高度化した不均質				
	(HE : Heterogeneous)水理特性。2011SH と同様の HZ モデル及びレイア				
2011HE	ウトだが、HZ と SFR に不均質(HE: Heterogeneous)水理特性を適用特				
	性は、オルキルオトサイトの DFN(Discrete Fracture Network)モデルの				
	ECPM 表現に基づく。				
	上部境界条件は、2013 年の成果に基づく。使用済燃料の崩壊熱による熱影				
	響は無視。				

サイトスケールの地下水流動解析では、岩盤を以下の2つの透水性ユニットに分割する方 法により亀裂母岩を概念モデル化している。これら2つの透水性ユニットの水理特性が、決 定論的もしくは確率論的な等価連続間隙媒体(ECPM: Equivalent Continuous Porous Medium)手法によりモデル化されている(図 2-3)。ECPM 手法では、これら2つの透水 性ユニットのそれぞれにおける亀裂システムを、平均的(サイトスペシフィックデータによ り設定)もしくは確率論的な特性を代表する単一連続体として扱っており、水は亀裂システ ム内のどこでも流れると仮定している。

- ▶ 平面状の水理地質ゾーン(HZ: Planar Hydrogeological Zones)
- ▶ まばらな亀裂岩盤(SFR : Sparsely Fractured Rock)



(左:実際の母岩、右:ECPM モデル、上:HZ なし、下:HZ あり)
 図 2-3 実際の母岩とその ECPM モデル化のイメージ
 (POSIVA Working Report 2012-35 (Löfman and Karvonen, 2012))

モデルは、オルキルオト島全体及び深度 2,000m の範囲をカバーしている。横方向の境界は、 境界条件の影響を最小化するため、オルキルオト島の遠方としている。本業務の対象としている 温暖期については、モデルの横方向及び下部の境界条件は不透水境界としており、上部(現在の 海面レベル)の境界条件は水頭境界としている。上部の境界条件は、将来における隆起や海 面上昇に起因する地下水面上昇などといった時間変化を考慮しており、それらは、表層水理 モデル(SHYD モデル: Surface HYDrological model)により提供される

(図 2·4)。また、操業期間において開口している坑道は、モデルにおいて空洞とはせず、 実際の坑道形状のワイヤーフレームモデルを表す要素メッシュのノードに適用する境界条 件として表現されている。具体的には、ノードが位置する深度に基づく大気圧を適用した水理 シンクとして扱われている。

なお、温暖期において、使用済燃料の崩壊熱による熱影響を考慮する地下水流動モデル 2009SH では、処分坑道のノードが熱の点ソース(処分スケジュールに応じ時間依存)とし て扱われている。



図 2-4 サイトスケールの地下水流動モデル 2009SH 及び 2011SH における温暖期の地表 (現在の海面レベル)での境界条件として用いている水頭分布 (POSIVA 2012-04 (Posiva, 2012b))

モデル化の主な結果は、モデルボリューム内における地下水流量である。特に、参照ボリ ューム(Reference Volume:図 2-5)の接面からの流出入を考慮した参照ボリューム (Reference Volume)への地下水流出入量や操業期間の坑道への地下水流入量が計算され る。参照ボリューム(Reference Volume)は、深度 370~470mに位置しており、その外側 境界は、近傍の水理地質ゾーンとの交差を最小とするため、処分場の近傍を設定している。





図 2-5 参照ボリューム(Reference Volume:灰色部分)のイメージ (POSIVA 2012-04 (Posiva, 2012b))

ここでの地下水流動解析に用いられているデータ種類やその設定値に関する情報は、性 能評価報告書(POSIVA2012-04)にはほとんど示されていない。ここでは、性能評価報告 書(POSIVA2012-04)の引用元の文献(Löfman and Karvonen, 2012)に示されているパ ラメータ表等を列挙する。(表 2-13~表 2-18)

	<i>T</i> [m ² /s]	2b [m]	2a [m]	外[-]	dave [m]
HZ001 (0-200 m)	7.9.10-6	2.4.10-3	5.8	4.1.10-4	4.4
HZ001 (200-300 m)	5.9·10 ⁻⁸	4.7·10 ⁻⁴	5.8	8.0·10 ⁻⁵	4.4
HZ004	1.3.10-7	0.4.10-3	2.5	1.6·10 ⁻⁴	5.0
HZ008	3.2.10-6	1.0.10-3	1.0	1.0.10-3	21.3
HZ19A	2.6.10-5	2.2.10-3	1.1	2.0.10-3	4.7
HZ19B	3.2.10-7	7.0.10-4	1.2	5.8.10-4	3.2
HZ19C	6.3·10 ⁻⁵	3.7·10 ⁻³	1.4	2.8.10-3	3.1
HZ20A	1.5.10-5	2.6.10-3	1.1	2.4.10-3	3.6
HZ20B	9.0.10-6	1.7·10 ⁻³	2.5	6.8·10 ⁻⁴	7.2
HZ21	3.0.10-6	2.5·10 ⁻³	1.5	1.6.10-4	10.4
HZ099	2.0.10-7	0.5.10-3	2.0	2.5·10 ⁻⁴	7.8
LIN1-5	1.0.10-6	1.0.10-3	1.0	1.0.10-3	1.0

表 2-13 2009SHの水理地質ゾーン(HZ)の透水特性 (POSIVA Working Report 2012-35(Löfman and Karvonen, 2012))

表 2-14	2011SH/2011HE の水理地質ゾーン(HZ)の	D透水特性
(POSIVA	Working Report 2012-35 (Löfman and Karvon	en, 2012))

	<i>T</i> [m ² /s]	2b [m]	2a [2a [m]		[-]	daw [m]
			median	mean	median	mean	
HZ001	1)	1.5.10-3	5.8	5.8	2.6.10-4	2.6.10-4	2.0
HZ008	3.2.10-6	8.3.104	2.0	3.0	4.1.10-4	2.8·10 ⁻⁴	8.0
HZ19A	1.0.10-5	1.3.10-3	1.0	1.4	1.3.10-3	9.5·10 ⁻³	4.0
HZ19B	4.5.10-6	1.4.10-3	1.5	2.1	9.5.104	6.7.10-4	4.0
HZ19C	5.1.10-6	1.1.10-3	1.2	1.8	9.4·10 ⁻⁴	6.3·10 ⁻⁴	2.0
HZ20A	4.6.10-6	8.8·10 ⁻⁴	1.9	2.6	4.8·10 ⁻⁴	3.4.10-4	8.0
HZ20B	2.8.10-6	8.3.10-4	2.0	3.0	4.1.10-4	2.8·10 ⁻⁴	8.0
HZ21	1.3.10-8	3.3.104	2.8	3.6	1.2.104	9.2·10 ⁻⁵	8.0
HZ21B	5.0·10 ⁻⁷	4.7.104	3.2	4.0	1.5.104	1.2.10-4	8.0
HZ039	6.4.10-6	1.4.10-3	1.3	1.3	1.1.10-3	1.1.10-3	4.0
HZ099	2)	4.4.104	1.3	2.9	3.3.104	1.5.104	8.0
BFZ100	3)	6.6.104	1.0	1.2	6.6.10-4	5.6.104	2.0
HZ146	4)	7.9.104	0.9	1.8	8.5·10 ⁻⁴	4.3·10 ⁻⁴	4.0
BZF214	5)	9.7·10 ⁴	0.7	0.7	1.5.10-3	1.5.10-3	2.0
LIN2-5	5)	9.7.104	0.7	0.7	1.5.10-3	1.5.10-3	2.0
1) Depth-dependent: 3.6-10 ⁻⁶ at 0-200m. 5.9-10 ⁻⁸ at 200-300m							

2) Depth-dependent: decreases exponentially from 2.3·10⁻⁶ to 1.0·10⁻⁷ at 0-600 m

3) Depth-dependent: decreases exponentially from $3.4\cdot10^{-7}$ to $1.0\cdot10^{-9}$ at $0\cdot200$ m, $1.0\cdot10^{-9}$ at >200 m

4) Depth-dependent: decreases exponentially from $3.1 \cdot 10^{-5}$ to $1.0 \cdot 10^{-7}$ at 0.500 m, $1.0 \cdot 10^{-7}$ at > 500 m

5) Depth-dependent: decreases exponentially from $1.5 \cdot 10^{-5}$ to $3.0 \cdot 10^{-9}$ at 0.1000 m, $3.0 \cdot 10^{-9}$ at > 1000 m

Depth [m]	<u>K [m/s]</u>	Kannels [m/s]	2b [m]	2a [m]	ø[-]		
0-50	1.0·10 ⁻⁷ (H) 1.0·10 ⁻⁸ (V) *)	2.0.10-9	5.5·10 ⁻⁴	1.7	3.2·10 ⁻⁴		
50-100	3.2·10 ⁻⁸ - 5.0·10 ⁻⁹ **)	3.0·10 ⁻¹⁰	4.0 ·10 ⁻⁴	3.0	1.3.104		
100-200	5.0·10 ⁻⁹ - 1.3·10 ⁻¹⁰ **)	3.0·10 ⁻¹¹	3.0 · 10 ⁴	6.1	4.9·10 ⁻⁵		
200-300	1.3.10 ⁻¹⁰	3.0-10 ⁻¹¹	2.5 ·10 ⁴	11.8	2.1·10 ⁻⁵		
300-400	1.3.10-10	3.0·10 ⁻¹¹	3.3 ·10 ⁻⁴	18.7	1.8·10 ⁻⁵		
400-500	3.0.10-11	3.0-10 ⁻¹¹	3.3 ·10 ⁴	18.7	1.8·10 ⁻⁵		
500-2000	3.0.10 ⁻¹¹	3.0-10 ⁻¹¹	3.8 · 10 ⁻⁴	35.5	1.1.10 ⁻⁵		
 *) On the depth interval 0-50 m the hydraulic conductivity is anisotropic; the horizontal component (H) being ten-fold to the vertical component (V) **) The decreases exponentially at a depth interval 50-200 m (see Figure 4-4). 							

表 2-15 2009SHのまばらな亀裂岩盤(SFR)の透水特性 (POSIVA Working Report 2012-35(Löfman and Karvonen, 2012))

表 2-16	2011SH のまばらな亀裂岩盤	(SFR)	の透水特性
	(POSIVA Working Report 2	012-35)	

Depth [m]	K[m/s]	2b [m]	2a [m]		ør[-]	
			median	mean	median	mean
0-50	1)	5.7·10 ⁻⁴	1.2	1.8	4.9.10-4	3.2·10 ⁻⁴
50-100	1)	3.5 ·10 ⁻⁴	1.6	3.4	2.1.10-4	1.0·10 ⁻⁴
100-200	1)	2.7 ·10 ⁻⁴	2.8	8.2	9.6·10 ⁻⁵	3.3·10 ⁻⁵
200-300	2)	2.4 ·10 ⁻⁴	8.3	24.4	2.8·10 ⁻⁵	9.7·10 ⁻⁶
300-500	2)	2.5 ·10 ⁻⁴	12.7	30.0	2.0.10-5	8.3·10 ⁻⁶
500-2000	1.5.10 ⁻¹¹	3.0 ·10 ⁻⁴	44.5	63.5	6.6·10 ⁻⁶	6.6·10 ⁻⁶

1) Depth-dependent: decreases exponentially from $3.0 \cdot 10^{-7}$ to $1.5 \cdot 10^{-10}$ at 0-200 m. On the depth interval 0-50 m the hydraulic conductivity is anisotropic; the vertical component being tenth of the horizontal component ($3.0 \cdot 10^{-9}$).

2) Depth-dependent: decreases exponentially from 1.5-10⁻¹⁰ to 1.5-10⁻¹¹ at 200-500 m

Panel	Length of tunnels [m]	Panels open [years]						
		ONKALO time	Oper. time	Calendar time	Duration			
1	2870	15.2-23.4	0.0-8.2	2020.0-2028.2	8.2			
2	5710	23.4-39.7	8.2-24.5	2028.2-2044.5	16.3			
3	5580	39.7-55.6	24.5-40.4	2044.5-2060.4	15.9			
4	4640	55.6-68.8	40.4-53.6	2060.4-2073.6	13.2			
5	4660	68.8-82.1	53.6-66.9	2073.6-2086.9	13.3			
6	4940	82.1-96.2	66.9-81.0	2086.9-2101.0	14.1			
7	3880	96.2-107.3	81.0-92.0	2101.0-2112.0	11.1			

表 2-17 2011SH/2011HE の操業スケジュール (POSIVA Working Report 2012-35(Löfman and Karvonen, 2012))

表 2-18 2011SH/2011HEの操業スケジュール

(POSIVA Working Report 2012-35 (Löfman and Karvonen, 2012))

Panel	Length of tunnels [m]	Panels open [years]				
		ONKALO time	Operational time	Calendar time	Duration	
1	6380	15.2-27.9	0.0-12.6	2020.0-2032.6	12.6	
2	5410	27.9-38.7	12.6-23.3	2032.6-2043.3	10.8	
3	4300	38.7-47.2	23.3-31.8	2043.3-2051.8	8.5	
4	6700	47.2-60.5	31.8-45.2	2051.8-2065.2	13.3	
5	5850	60.5-72.1	45.2-56.8	2065.2-2076.8	11.6	
6	8360	72.1-88.6	56.8-73.3	2076.8-2093.3	16.5	
7	4940	88.6-98.4	73.3-83.1	2093.3-2103.1	9.8	
8	7300	98.4-112.8	83.1-97.5	2103.1-2117.5	14.4	
9	4250	112.8-121.3	97.5-106.0	2117.5-2126.0	8.5	

② 処分場スケール

処分場スケールの地下水流動解析では、ConnectFlow コードを用いて、DFN (Discrete Fracture Network) により透水性亀裂を模擬したモデルによって、以下の3つの期間に対して、処分坑道や処分孔への地下水流入量が評価されている (Hartley et al., 2013a, b, c)。 DFN モデルは、透水性亀裂が相互に結合したネットワークを模擬したモデルであり、特に、処分場スケールのように情報が少なく、かつ、局所的スケールの場合には、確率論的なモデルで表現される。

- ▶ 約 100 年間の操業期間(Base Case Model)
- ▶ 閉鎖後温暖期(Base Case Model)
- ▶ 氷河期(氷床の存在を考慮した Variant Model)

処分場スケールの地下水流動解析に向けては、決定論的に表現された水理ゾーン

(Hydrozone:図 2-6 の紫色部分)と、その周辺において確率論的に表現されたまばらな 亀裂岩盤(SFR: Sparsely Fractured Rock)を組合わせる方法を採用している。亀裂母岩 の上部には、約 2 m の第四紀堆積層を考慮している。まばらな亀裂岩盤(SFR: Sparsely Fractured Rock)は、さらに、サイトデータの解釈を通して設定される亀裂の形状や水理特性 の空間的バリエーションを表現する水理ドメイン(Hydraulic Domain:図 2-6 の紫色以外 の部分)に細分される。



図 2-6 深度 410m における水理ゾーン(Hydrozone:紫線)と4つの水理ドメイン (Hydraulic Domain:青・緑・橙・赤)のイメージ (POSIVA Working Report 2012-42(Hartley et al., 2013b))

処分場スケールのモデルは、図 2-7 及び図 2-8 に示すように、より大きなスケールであ る地域スケール(Regional スケール)やサイトスケールのモデルを境界条件/初期条件と して用いている。各スケールの概念モデルを表 2-19 及び図 2-9 に、モデル化手法を表 2-20 に、それぞれ示す。また、各スケールのモデルを用いた評価フローを図 2-10 に示す。



図 2-7 スケールごとの概念モデルとデータの流れのイメージ (POSIVA 2012-04 (Posiva, 2012b))



(赤:地域スケール、青:サイトスケール、緑:処分場スケール)
 図 2-8 スケールごとのモデル化の範囲
 (POSIVA Working Report 2012-42 (Hartley et al., 2013b))

特性	地域スケール	サイトスケール	処分場スケール
水理ゾーン (Hydrozone)	ECPM	単一亀裂表面/ECPM	単一亀裂表面
水理ドメイン (Hydraulic Domain)	ECPM	DFN⁄ECPM	DFN
土壌ドメイン	CPM	CPM	無し
主要坑道	無し	等価亀裂	CPM
処分坑道	無し	等価亀裂	CPM
処分孔	無し	無し	CPM
他の地下開口部	無し	等価亀裂	等価亀裂
EDZ	無し	等価亀裂	等価亀裂
処分孔周囲の岩盤損傷	無し	無し	等価亀裂

7.7km

表 2-19 スケールごとの概念モデルにおける表現方法 (POSIVA 2012-04 (Posiva, 2012b))

1. Regional scale (output: p and ρ)

Time evolving boundary conditions for p and C Equivalent Continuous Porous Medium (ECPM) Upscaled DFN -2035m 2. Repository-scale (output: q, Qeq, tw, F, L, particle tracks, inflows) ~2.5km Pressure (p) from Regional Scale solution DFN СПОССАНИИ -410m Density (P) from Regional Scale solution -900m 3. Site-scale (output: continuation of t_w and F, particle exit locations) 7.7km 5.3km Pressure (p) from Regional Scale solution -410m ECPM DFN -1400m Density (P) from Regional Scale solution _ 1 -2035m 図 2-9 スケールごとの概念モデルの簡略図 (POSIVA Working Report 2012-42 (Hartley et al., 2013b))

表 2-20	スケールごとのモデル化方法	(Base Case Model)
	(POSIVA 2012-04 (Posiva,	2012b))

特性	地域スケール	サイトスケール	処分場スケール
開始時期	6000 BC	2000 AD	2000 AD
終了時期	12000 AD、50000 AD	12000 AD	5000 AD
		不連続亀裂ネットワーク	CPM で表現した坑道を組み
法動エニル	多孔質媒体中の飽和流動	(DFN) を組み込んだ多孔質	込んだ不連続亀裂ネットワー
流動モデル	(ECPM/CPM)	媒体(ECPM/CPM)中での	ク(DFN)中での細分した時
		細分した時間ごとの飽和流動	間ごとの飽和流動
移行モデル	二重空隙	単一空隙	単一空隙
	塩分濃度:S(x,y,z,t)	塩分濃度 : S(x,y,z,t)	塩分濃度 : S(x,y,z,t)
	温度 : T(z)	温度 : T(一定)	温度 : T(一定)
地下小村住	密度: ρ(S, T)	密度: ρ(S)	密度: ρ(S)
	粘度:μ(T)	粘度 : μ (一定)	粘度 : μ (一定)
	1. 複数不均質リアライゼーション	1. 複数不均質リアライゼーション	1. 複数不均質リアライゼーション
モデル化手法	2. 一時境界条件	2. 時間ごとの固定境界条件	2. 時間ごとの固定境界条件
	3. タイムステップごとの参	3.時間ごとの一致流量	3.時間ごとの一致流量
	照地下水における流動及	4.時間ごとの定常流パーティクル	4.時間ごとの定常流パーティクル
	び移行評価	トラッキンク゛	トラッキンク゛
V A UL A	時間ごしの水口及び密度	パーティクルトラッキング性能指標、出	流動及びパーティクルトラッキング性能
次山刀	时间ことの水圧及の宿及	口位置	指標
一次山土	加公担での指公連座の亦運	時間ブレの粒乙山口位署	操業期間における処分孔への
一次山刀	た力物での塩刀振皮の変遷	时间ここの松丁山口江県	地下水流入量、坑道への流量



(POSIVA Working Report 2012-42 (Hartley et al., 2013b))

水理ドメイン(Hydraulic Domain) に適用している DFN (Discrete Fracture Network) モデル (図 2-11) は、地下水が流れる亀裂を明示的に表現し、これら亀裂に関する構造的 水理量 (Structural-hydraulic quantities) は、確率論的に表現される。



図 2-11 DFN (Discrete Fracture Network) モデルのイメージ (POSIVA Working Report 2012-42 (Hartley et al., 2013b))

DFN (Discrete Fracture Network) モデルの作成には、地下水が流動する可能性がある 亀裂の方向、強度(intensity)、サイズ及び透水量係数の統計的分布が必要である。これらの うち、亀裂の強度(intensity)とサイズの分布については不確実性が大きいため、以下の 3ケースが想定されている。また、透水量係数についても、サイズとの相関性について、相 関、半相関、無相関の3ケースが想定されている(表 2-21)。

- ➤ Case A: 地下水が流動する可能性がある亀裂の強度(intensity)は、開口亀裂の強度(intensity)の推定に基づく。このケースでは、亀裂サイズの関数として、べき乗則サイズモデルを用いる。
- Case B: 地下水が流動する可能性がある亀裂の強度(intensity)は、Posiva Flow Log (PFL)により検出された地下水流動亀裂の強度(intensity)の推定 に基づく。このケースでは、対数正規サイズモデルを用いる。
- ➤ Case C: 地下水が流動する可能性がある亀裂の強度(intensity)は、全亀裂の強度 (intensity)の推定に基づく。このケースでは、亀裂サイズの関数として、グ ローバルベき乗則サイズモデルを用いる。

表 2-21 亀裂の透水量係数とサイズとの相関性

Туре	Description	Relationship	Parameters
Correlated	Power-law relationship	$\log(T) = \log(a r^{b})$	a,b
Semi- correlated	Log-normal distribution about a power-law correlated mean	$\log(T) = \log (a r^{b}) + \sigma_{\log(T)} \operatorname{N}(0, 1)$	a, b, $\sigma_{\log(T)}$
Uncorrelated	Log-normal distribution about a specified mean	$\log(\mathit{T}) = \mu_{\log(\mathit{T})} + \sigma_{\log(\mathit{T})} \operatorname{N}(0, 1)$	$\mu_{\log(T)}$, $\sigma_{\log(T)}$

(POSIVA Working Report 2012-42 (Hartley et al., 2013b))

緩衝材が定置される処分孔や埋め戻し材などにより埋め戻される坑道は、均質な特性を 有すると見なすことができるため、決定論的で均質の CPM (Continuous Porous Medium) モデルにて表現している。処分場スケールの CPM モデルのイメージを図 2-12 に示す。ま た、モデル化された処分坑道及び処分孔とその下部のイメージを図 2-13 に示す。図 2-13 における緑色部分が処分坑道、黄色部分が処分孔 (CPM モデル) であり、桃色部分が EDZ (等価亀裂)、青色部分と赤線部分が処分孔周囲の岩盤損傷領域(等価亀裂)である。処分 孔周囲の岩盤損傷領域は、青色部分が処分孔と面する亀裂領域を模擬しており、赤色部分が 処 分孔と交差する亀裂領域を模擬している。EDZ と処分孔周囲の岩盤損傷領域の透水量係数に ついては、前者が10⁻⁸ m²/s、後者がその1/4 といった大きな値を使用している(表 2-33)。



図 2-12 処分場スケールの CPM(Continuous Porous Medium)モデルのイメージ (POSIVA Working Report 2012-42(Hartley et al., 2013b))



図 2-13 地下水流動解析のためにモデル化された処分坑道及び処分孔 (POSIVA2012-04 (Posiva, 2012b))

ここでの地下水流動解析に用いられているデータ種類やその設定値に関する情報は、性 能評価報告書(POSIVA2012-04)にはほとんど示されていない。ここでは、性能評価報告 書(POSIVA2012-04)の引用元の文献(Hartley et al. 2013a, b, c)に示されているパラメ ータ表等を列挙する。(表 2-22~表 2-32、図 2-14)

表 2-22 水理地質ゾーンの深度別の透水量係数の幾何平均

Elevation (m)	HZ19A, HZ19B, HZ19C	HZ20A, HZ20B T (m ² /s)	BFZ100 T (m ² /s)	Lineaments T (m ² /s)	Other Hydrogeological
	1 (11 /3)	1 (1173)			201103. 1 (11173)
0	1.58E-05	4.76E-06	1.77E-06	1.00E-05	9.94E-06
-100	6.17E-06	3.78E-06	7.44E-07	5.01E-06	4.18E-06
-200	2.42E-06	3.00E-06	3.13E-07	2.51E-06	1.76E-06
-300	9.47E-07	2.38E-06	1.32E-07	1.26E-06	7.39E-07
-400		1.89E-06	5.53E-08	6.31E-07	3.11E-07
-500		1.50E-06	2.33E-08	3.16E-07	1.31E-07
-600		1.19E-06	9.78E-09	1.58E-07	5.50E-08
-700		9.43E-07		7.94E-08	2.31E-08
-800		7.48E-07		3.98E-08	9.72E-09
-900		5.94E-07		2.00E-08	4.09E-09
-1000		4.71E-07		1.00E-08	1.72E-09
-1500				3.16E-10	
-2000				1.00E-10	

(POSIVA Working Report 2012-42 (Hartley et al., 2013b))
表 2-23 水理地質ゾーンの深度別の透水量係数(常用対数値)の幾何平均及び標準偏差 (POSIVA Working Report 2012-42(Hartley et al., 2013b))

Hydrogeological zones	Elevation (m)	Geometric mean Log(Transmissivity) [m²/s]	Standard Deviation of Log(Transmissivity)
HZ19A, HZ19B,	Above -150m	-5.13	0.85
HZ19C	-150m to -400m	-5.61	0.62
	Above -150m	-5.71	0.80
HZ20A, HZ20B	-150 to -400m	-5.30	0.84
	Below -400m	-5.83	0.70
BE7400	Above -50m	-5.90	0.57
DF2100	-50m to -400m	-7.25	1.33
120140	Above -50m	-4.81	0.53
Other	-50m to -150m	-5.78	0.62
zones	-150m to -400m	-6.39	0.83
201100	Below -400m	-6.80	0.86

表 2-24 水理地質ゾーンの亀裂特性

(POSIVA Working Report 2012-42 (Hartley et al., 2013b))

Zone	Mean transport aperture [mm]	Mean flowing fracture space [m]	Flow porosity [-]
BFZ100	0.7	1.174	5.6E-04
Bound Lin *)	1.0	0.650	1.5E-03
HZ001	1.5	5.805	2.6E-04
HZ039	1.4	1.300	1.1E-03
HZ099	0.4	2.865	1.5E-04
HZ146	0.8	1.820	4.3E-04
HZ19A	1.3	1.381	9.5E-04
HZ19B	1.4	2.109	6.7E-04
HZ19C	1.1	1.762	6.3E-04
HZ20A	0.9	2.619	3.4E-04
HZ20B (+HZ008)	0.8	2.982	2.8E-04
HZ21	0.3	3.620	9.2E-05
HZ21B	0.5	3.961	1.2E-04

	Thin soil layer			
Grid Size 50 m x 50 m x 50 m	Grid Size 25 m x 25 m x 25 m	Grid Size 50 m x 50 m x 50 m		
Grid Size 50 m x 50 m x 100 m				

図 2-14 地域スケールモデルで用いている有限要素グリッドのサイズ (POSIVA Working Report 2012-42 (Hartley et al., 2013b))

表 2-25 地域スケールの ECPM モデルでの等価透水係数(常用対数値)の平均及び標準

Domain	Depth Zone	Mean Kerr	Mean Kerr	Std. Dev.	Std. Dev.
		Dase Case	SUM	Dase Case	SUM
NHU	1	-1.39	-1.41	0.60	0.60
NHU	2	-8.46	-8.52	0.76	0.73
NHU	3	-9.19	-9.35	0.91	0.87
NHU	4	-10.27	-10.66	0.55	0.54
NHU	3R	-9.73	-	0.82	-
NHU	4R	-10.32	-	0.71	-
CHUW	1	-7.27	-7.34	0.63	0.56
CHUW	2	-8.37	-8.53	0.86	0.86
CHUW	3	-9.13	-8.90	1.00	0.97
CHUW	4	-10.11	-10.48	0.61	0.54
CHUW	3R	-10.50	-	0.60	-
CHUW	4R	-10.17	-	0.74	-
CHUE	1	-7.42	-7.56	0.85	0.67
CHUE	2	-8.91	-8.88	0.88	0.78
CHUE	3	-9.21	-9.40	0.81	0.83
CHUE	4	-10.09	-10.48	0.61	0.54
CHUE	3R	-9.92	-	0.00	-
CHUE	4R	-10.38	24	0.81	-
SHU	1	-7.35	-7.43	0.54	0.49
SHU	2	-8.56	-8.65	0.79	0.76
SHU	3	-9.54	-9.56	0.76	0.74
SHU	4	-10.15	-10.48	0.59	0.54

(POSIVA Working Report 2012-42 (Hartley et al., 2013b))

偏差

表 2-26 地域スケールの ECPM モデルでの kinematic porosity(常用対数値)の平均及び 標準偏差

Domain	Depth Zone	Mean φ	Mean φ	Std. Dev.	Std. Dev.
Domain	Depth Zone	Base Case	SDM	Base Case	SDM
NHU	1	-3.93	-4.06	0.20	0.26
NHU	2	-4.28	-4.36	0.20	0.18
NHU	3	-4.61	-4.72	0.24	0.21
NHU	4	-5.03	-4.87	0.18	0.05
NHU	3R	-4.70	-	0.20	-
NHU	4R	-4.94	-	0.21	-
CHUW	1	-3.83	-3.98	0.22	0.24
CHUW	2	-4.23	-4.36	0.24	0.22
CHUW	3	-4.70	-4.69	0.33	0.27
CHUW	4	-4.96	-4.85	0.20	0.04
CHUW	3R	-4.90	-	0.17	-
CHUW	4R	-4.90	-	0.22	-
CHUE	1	-3.93	-4.09	0.29	0.24
CHUE	2	-4.46	-4.50	0.26	0.20
CHUE	3	-4.68	-4.83	0.26	0.23
CHUE	4	-4.95	-4.85	0.17	0.04
CHUE	3R	-4.85	-	0.00	-
CHUE	4R	-4.92	-	0.20	-
SHU	1	-3.90	-4.00	0.20	0.21
SHU	2	-4.31	-4.38	0.21	0.20
SHU	3	-4.80	-4.87	0.24	0.24
SHU	4	-4.97	-4.85	0.15	0.04

(POSIVA Working Report 2012-42 (Hartley et al., 2013b))

表 2-27 地域スケールモデルにおける各種パラメータ

(POSIVA Working Report 2012-42 (Hartley et al., 2013b))

Parameter	Current study	SDM	
Recharge	120 mm/a	120 mm/a	1
Diffusion accessible porosity	0.5%	1%	
Molecular diffusivity	1 10 ⁻⁹ m ² /s	1 10 ⁻⁹ m ² /s	
Effective diffusion coefficient	6 10 ⁻¹⁴ m ² /s	1 10 ⁻¹³ m ² /s	
Surface temperature	6.0 C	7.2 C	
Geothermal gradient	0.014 C/m	0.015 C/m	
Longitudinal dispersion length	30 m	30 m	
Transverse dispersion length	15 m	15 m	

表 2-28 水理ドメイン NHU の DFN モデルパラメータ (Case A)

Set	Distribution	Pole orientation F: trend, plunge, conc. B: (trend, plunge), conc.1, conc.2, rot.	Case A power-law (k_r, r_0) $r_{min} = r_0$ $r_{max} = 564 \text{ m}$	Intensity P _{32,open}	Transmissivity model C: (a,b) SC: $(a, b, \sigma_{log(T)})$ UC: $(\mu_{log(T)}, \sigma_{log(T)})$
			(-, m)	(m ² /m ³)	$T(m^2s^{-1})$
Dep	th Zone 1				
EW	Fisher	181.9, 8.4, 10.2	(2.68, 0.04)	0.60	C: (6.0E-8, 0.7) SC: (1.0E-7, 0.5, 0.7) UC: (2.0E-7, 0.5)
NS	Fisher	95.5, 6.2, 7.6	(2.70, 0.04)	0.51	C: (1.2E-7, 0.7) SC: (1.8E-7, 0.4, 0.7) UC: (5.0E-7, 0.6)
SH	Bingham	(284.7, 83.3) -6.6, -2.9, -157.5°	(2.56, 0.04)	2.02	C: (1.0E-7, 0.9) SC: (1.5E-7, 0.6, 0.8) UC: (4.0E-7, 1.1)
Dept	th Zone 2				
EW	Fisher	181.9, 8.4, 10.2	(2.60, 0.04)	0.29	C: (7.0E-9, 0.85) SC: (1.0E-8, 0.5, 0.4) UC: (3.0E-8, 0.6)
NS	Fisher	95.5, 6.2, 7.6	(2.41, 0.04)	0.29	C: (5.0E-9, 0.75) SC: (7.5E-9, 0.5, 0.7) UC: (3.0E-8, 0.7)
SH	Bingham	(284.7, 83.3) -6.6, -2.9, -157.5°	(2.43, 0.04)	0.84	C: (4.0E-9, 0.9) SC: (8.5E-9, 0.5, 0.9) UC: (4.0E-8, 1.1)
Dep	th Zone 3				
EW	Fisher	181.9, 8.4, 10.2	(2.50, 0.04)	0.17	C: (8.0E-10, 0.75) SC: (6.0E-9, 0.3, 0.3) UC: (9.0E-9, 0.5)
NS	Fisher	95.5, 6.2, 7.6	(2.45, 0.04)	0.18	C: (1.5E-9, 0.8) SC: (6.0E-9, 0.3, 0.8) UC: (2.0E-8, 1.0)
SH	Bingham	(284.7, 83.3) -6.6, -2.9, -157.5°	(2.42, 0.04)	0.47	C: (7.0E-10, 1.1) SC: (6.0E-9, 0.4, 1.25) UC: (4.0E-8, 0.9)
Dept	th Zone 4				
EW	Fisher	181.9, 8.4, 10.2	(2.40, 0.35)	0.10	C: (6.0E-11, 0.8) SC: (6.0E-11, 0.7, 0.6) UC: (7.0E-10, 0.7)
NS	Fisher	95.5, 6.2, 7.6	(2.40, 0.35)	0.12	C: (5.0E-11, 0.8) SC: (5.0E-11, 0.7, 0.4) UC: (7.0E-10, 0.6)

-6.6, -2.9, -157.5° (2.40, 0.35) 0.21

C: (3.0E-11. 1.0) SC: (7.0E-11, 0.7, 0.7) UC: (7.0E-10, 1.0)

SH

Bingham

(284.7, 83.3)

_				-	
Set	Distribution	Pole orientation F: trend, plunge, conc. B: (trend, plunge), conc.1, conc.2, rot.	Case A power-law (k_r, r_0) $r_{min} = r_0$ $r_{max} = 564 \text{ m}$	Intensity P _{32,open}	Transmissivity model C: (a,b) SC: $(a, b, \sigma_{log(T)})$ UC: $(\mu_{log(T)}, \sigma_{log(T)})$
			(-, m)	(m^{2}/m^{3})	$T(m^2s^{-1})$
Dep	th Zone 1				
EW	Fisher	(176.0, 4.4), 9.4	(2.68, 0.04)	0.49	C: (3.0E-8, 0.8) SC: (8.0E-8, 0.4, 0.6) UC: (2.0E-7, 0.6)
NS	Fisher	(270.4, 0.2), 8.3	(2.57, 0.04)	0.57	C: (3.0E-8, 0.7) SC: (6.0E-8, 0.6, 0.6) UC: (8.0E-8, 0.8)
SH	Bingham	(300.1, 78.9) -5.7, -4.4, 50.6°	(2.53, 0.04)	2.09	C: (7.0E-8, 0.9) SC: (1.2E-7, 0.7, 0.8) UC: (7.0E-7, 1.1)
Dep	th Zone 2				
EW	Fisher	(176.0, 4.4), 9.4	(2.58, 0.04)	0.21	C: (8.0E-9, 0.8) SC: (9.0E-9, 0.6, 0.4) UC: (2.0E-8, 1.1)
NS	Fisher	(270.4, 0.2), 8.3	(2.52, 0.04)	0.25	C: (1.5E-8, 0.8) SC: (1.0E-8, 0.6, 0.6) UC: (4.0E-8, 0.9)
SH	Bingham	(300.1, 78.9) -5.7, -4.4, 50.6°	(2.45, 0.04)	0.91	C: (1.2E-8,0.8) SC: (1.0E-8, 0.6, 0.6) UC: (6.0E-8, 0.8)
Dep	th Zone 3				
EW	Fisher	(176.0, 4.4), 9.4	(2.50, 0.04)	0.11	C: (2.2E-9, 0.7) SC: (4.0E-9, 0.7, 0.6) UC: (1.0E-8, 0.8) C: (6.0E-9, 0.6)
NS	Fisher	(270.4, 0.2), 8.3	(2.65, 0.04)	0.13	SC: (1.0E-8, 0.2, 0.2) UC: (1.7E-8, 0.4)
SH	Bingham	(300.1, 78.9) -5.7, -4.4, 50.6°	(2.35, 0.04)	0.34	C: (2.0E-9, 1.2) SC: (1.0E-9, 1.0, 1.0) UC: (6.0E-8, 1.1)
Dep	th Zone 4				
EW	Fisher	(176.0, 4.4), 9.4	(2.40, 0.60)	0.07	C: (7.0E-11, 0.7) SC: (5.0E-11, 0.8, 0.2) UC: (3.0E-10, 0.5)
NS	Fisher	(270.4, 0.2), 8.3	(2.40, 0.60)	0.08	C: (8.0E-11, 0.9) SC: (6.0E-11, 0.7, 0.5) UC: (5.0E-10, 0.8)
SH	Bingham	(300.1, 78.9) -5.7, -4.4, 50.6°	(2.40, 0.60)	0.17	C: (6.0E-11, 1.0) SC: (5.0E-11, 1.0, 0.6) UC: (1.0E-9, 0.9)

表 2-29 水理ドメイン CHUW の DFN モデルパラメータ (Case A) (POSIVA Working Report 2012-42 (Hartley et al., 2013b))

表 2-30 水理ドメイン CHUE の DFN モデルパラメータ (Case A)

Set	Distribution	Pole orientation F: trend, plunge, conc. B: (trend, plunge), conc.1, conc.2, rot.	Case A power-law (k_r, r_0) $r_{min} = r_0$ $r_{max} = 564 \text{ m}$	Intensity P _{32,open}	Transmissivity model C: (a,b) SC: $(a, b, \sigma_{log(T)})$ UC: $(\mu_{log(T)}, \sigma_{log(T)})$
			(-, m)	(m^2/m^3)	$T(m^2s^{-1})$
Dept	h Zone 1				
EW	Fisher	(176.3, 0.4), 7.2	(2.65, 0.04)	0.44	C: (3.0E-8, 0.5) SC: (9.0E-9, 0.6, 0.5) UC: (1.0E-7, 0.5)
NS	Fisher	(95.3, 0.3), 6.9	(2.64, 0.04)	0.61	C: (1.0E-7, 0.45) SC: (1.0E-7, 0.4, 0.4) UC: (5.0E-7, 0.5)
SH	Bingham	(309.9, 78.6) -5.7, -4.0, 62.8°	(2.57, 0.04)	1.73	C: (2.0E-8, 1.2) SC: (2.0E-7, 0.7, 0.8) UC: (8.0E-7, 1.0)
Dept	h Zone 2				
EW	Fisher	(176.3, 0.4), 7.2	(2.44, 0.04)	0.26	C: (1.0E-8, 0.3) SC: (8.0E-9, 0.2, 0.5) UC: (2.0E-8, 0.4)
NS	Fisher	(95.3, 0.3), 6.9	(2.49, 0.04)	0.24	C: (2.0E-8, 0.4) SC: (2.0E-8, 0.2, 0.7) UC: (5.0E-8, 0.4)
SH	Bingham	(309.9, 78.6) -5.7, -4.0, 62.8°	(2.55, 0.04)	0.81	C: (3.0E-8, 0.4) SC: (2.0E-8, 0.4, 0.5) UC: (1.0E-7, 0.5)
Dept	h Zone 3				
EW	Fisher	(176.3, 0.4), 7.2	(2.48, 0.04)	0.21	C: (3.0E-9, 0.2) SC: (5.0E-9, 0.3, 0.2) UC: (8.0E-9, 0.2)
NS	Fisher	(95.3, 0.3), 6.9	(2.57, 0.04)	0.12	C: (2.0E-9, 0.2) SC: (1.0E-9, 0.2, 0.6) UC: (8.0E-9, 0.3)
SH	Bingham	(309.9, 78.6) -5.7, -4.0, 62.8°	(2.44, 0.04)	0.40	C: (4.5E-9, 0.8) SC: (1.0E-8, 0.6, 0.4) UC: (3.0E-8, 0.7)

(POSIVA Working Report 2012-42 (Hartley et al., 2013b))

表 2-31 水理ドメイン SHU の DFN モデルパラメータ (Case A)

Set	Distribution	Pole orientation F: trend, plunge, conc. B: (trend, plunge), conc.1, conc.2, rot.	Case A power-law (k_r, r_0) $r_{min} = r_0$ $r_{max} = 564$ m	Intensity P _{32,open}	Transmissivity model C: (a,b) SC: $(a, b, \sigma_{log(7)})$ UC: $(\mu_{log(7)}, \sigma_{log(7)})$
			(-, m)	(m ² /m ³)	$T(m^2s^{-1})$
Dept	th Zone 1				
EW	Fisher	(166.79,1.38), 11.23	(2.66, 0.04)	0.62	C: (1.2E-7, 0.6) SC: (8.0E-8, 0.6, 0.8) UC: (4.0E-7, 1.0))
NS	Fisher	(278.25,8.66), 7.36	(2.65, 0.04)	0.55	C: (6.0E-8, 0.5) SC: (4.0E-8, 0.5, 0.9) UC: (1.0E-7, 0.7)
SH	Bingham	(275.66,79.36) -4.2, -3.8, -141.3°	(2.48, 0.04)	1.55	C: (1.5E-7, 0.65) SC: (1.3E-7, 0.65, 0.5) UC: (3.0E-7, 0.8)
Dept	th Zone 2				
EW	Fisher	(166.79,1.38), 11.23	(2.42, 0.04)	0.44	C: (9.0E-9, 0.4) SC: (1.5E-8, 0.2, 0.5) UC: (2.0E-8, 0.6)
NS	Fisher	(278.25,8.66), 7.36	(2.71, 0.04)	0.21	C: (1.5E-8, 0.4) SC: (3.0E-8, 0.3, 0.3) UC: (3.0E-8, 0.4)
SH	Bingham	(275.66,79.36) -4.2, -3.8, -141.3°	(2.41, 0.04)	0.63	C: (1.1E-8, 0.4) SC: (1.5E-8, 0.3, 0.5) UC: (3.0E-8, 0.6)
Dept	th Zone 3				
EW	Fisher	(166.79,1.38), 11.23	(2.73, 0.04)	0.15	C: (5.0E-10, 0.3) SC: (5.0E-10, 0.3, 0.3) UC: (1.0E-9, 0.3)
NS	Fisher	(278.25,8.66), 7.36	(2.65, 0.04)	0.13	C: (2.0E-9, 0.3) SC: (2.0E-9, 0.3, 0.3) UC: (1.0E-8, 0.3)
SH	Bingham	(275.66,79.36) -4.2, -3.8, -141.3°	(2.33, 0.04)	0.33	C: (9.0E-9, 0.3) SC: (9.0E-9, 0.3, 0.3) UC: (3.5E-8, 0.45)

(POSIVA Working Report 2012-42 (Hartley et al., 2013b))

表 2-32 埋め戻し後の処分施設の寸法及び水理特性

Width / Separation (m) Hydraulic Height (m) Porosity (-) conductivity diameter (m) (m/s)ONKALO / Ground to -200 repository Central m: 1.0.10⁻⁷ m/s level: 0.4 tunnels. -200 m to up to -300m: vehicle 300 m: 1.0-10⁻⁸ 6.7 m 6.0 m 0.35 connections m/s above -300m: and central Below -300 m: tunnel 0.25 1.0.10⁻⁹ m/s connections LO1&2: 3.60 m Deposition 1.0-10⁻¹⁰ m/s OL1&2: 4.00 m 3.5 m 0.4 tunnel OL3&4: 4.00 m LO1&2: 6.60 m LO1&2: 7.2 m Deposition OL1&2: 7.80 m OL1&2: 9.0 m 1.0 10⁻¹² m/s 1.75 m 0.42 hole OL3&4: 10.6 m OL3&4: 8.25 m Ground to -200 repository m: 1.0.10⁻⁷ m/s level: 0.4 -200 m to up to -300m: 300m: 1.0-10"8 Shafts N/A 4.0 m 0.35 m/s above -300m: Below -300m: 0.25 1.0.10⁻⁹ m/s Repository for low and 1.0.10⁻⁴ m/s 12 0.25 18 intermediate level waste

(POSIVA Working Report 2012-48 (Hartley et al., 2013c))

表 2-33 EDZ 及び処分孔周囲の岩盤損傷領域の特性

(POSIVA Working Report 2012-48 (Hartley et al., 2013c))

	Length (m)	Thickness (m)	Transmissivity (m ² /s)	Porosity (-)
Rock damage around deposition holes	LO1&2: 7.70 m OL1&2: 6.50 m OL3&4: 8.15 m	0.1 m	0.23 10 ⁻⁸ m ² /s	0.02
Excavation damaged zone	4 m with 0.5 m discontinuity	0.4 m	1.0·10 ⁻⁸ m ² /s	0.01

2) 地下水組成(塩分)

本業務では、わが国の沿岸部における地層処分の実施を念頭においていることから、ここで は、地下水組成のうち、沿岸部に関わりが深いと考えられる塩分濃度について、特に着目する こととした。性能評価報告書(POSIVA2012-04)では、塩分濃度の変遷の評価、もしくは 塩分濃度を含む地下水組成の変遷の評価として、以下の2種類のモデルを用いた評価につ いて、使用したモデルや、それによる結果の概要が示されている(Posiva, 2012b)。ここでは、 それぞれの評価の概要についてまとめる。

- 地下水流動による塩分の移行モデル(ECPM (Equivalent Continuous Porous Medium)及び DP (Dual Porosity)の組み合わせ)
- ▶ 反応移行モデル (Reactive Transport Model)

① 地下水流動による塩分の移行モデル

性能評価報告書(POSIVA2012-04)に示されている、地下水流動による塩分の移行モデルを用いた塩分濃度の変遷の評価は、(4)1)①に示したサイトスケールの地下水流動解析の中で実施されており、FEFTRAコードを用いて、ECPM(Equivalent Continuous Porous Medium)及びDP(Dual Porosity)の組み合わせにより、以下の5つの期間に対して、処分場領域での塩分濃度の変遷が評価されている(Löfman and Karvonen, 2012)。

- ➤ ONKALO 掘削期
- 約 100 年間の操業期間
- ➤ 閉鎖後温暖期
- ▶ 永久凍土期
- ▶ 氷河期

塩分の移行モデルとしては、二重空隙モデル(DP)が用いられている。二重空隙モデル (DP)では、母岩が、移流/分散が支配的な移行プロセスとなる亀裂部分と、拡散が支配 的な移行プロセスとなるマトリクス部分の 2 つの要素で構成されるとしてモデル化してい る。(図 2-15)



図 2-15 二重空隙モデル(DP)のイメージ (POSIVA Working Report 2012-35(Löfman and Karvonen, 2012))

モデルの範囲は、(4) 1) ①に示したサイトスケールの地下水流動解析モデルの範囲と 同様である。塩分濃度の初期条件や境界条件は、2004 年時点の擾乱のない地下水流動条件 に基づいており、それらは、8,000 年前を評価開始時刻とした古水理地質シミュレーション 結果に基づいて設定している。古水理地質シミュレーションにおける初期条件(すなわち、 8,000 年前)を図 2-16 に、境界条件(地表)の時間変化を図 2-17 に、それぞれ示す。初 期条件は深度別に変動させており、水平方向では一定の値としている。また、モデルの横方 向及び下部の境界条件は、初期条件が継続するとしている。



図 2-16 古水理地質シミュレーションにおける初期条件(8,000年前) (POSIVA Working Report 2012-35(Löfman and Karvonen, 2012))



図 2-17 古水理地質シミュレーションにおける境界条件(地表)の経時変化 (POSIVA Working Report 2012-35(Löfman and Karvonen, 2012))

ここでの塩分濃度の変遷の評価に用いられているデータ種類やその設定値に関する情報 は、性能評価報告書(POSIVA2012-04)にはほとんど示されていない。ここでは、性能評 価報告書(POSIVA2012-04)の引用元の文献(Löfman and Karvonen, 2012)に示されて いるパラメータ表(表 2-34)を示す。

表 2-34 塩分濃度の変遷の評価等に関連するパラメータの設定値 (POSIVA Working Report 2012-35 (Löfman and Karvonen, 2012))

Symbol	Parameter	Value
P 0	Fresh water density at the reference temperature (20°C)	998.0 kg/m ³
Pice	Density of ice	900.0 kg/m ³
ac	Density dependence on salinity (TDS)	0.76 [-]
a ₇	Thermal expansion coefficient of water (mean value for range 20°C-60°C)	0.385 kg/m ³ /K
<i>μ</i> ο	Viscosity of fresh water at the reference temperature (20°C)	1.0·10 ⁻³ kg/(ms)
EL	Longitudinal dispersion length	25 m
ET	Transverse dispersion length	1.0 m (depth 0-50m)
		25% of eg (depth 50-2000 m)
Do	Molecular diffusion in water	1.0.10 ⁻⁹ m ² /s
ϕ'	Diffusion porosity of rock	1.0-10 ⁻² (base case)
		5.0.10 ⁻³ (sensitivity case)
		2.0.10 ⁻³ (sensitivity case)
λ	Thermal conductivity of rock at the temperature 60 $^{\circ}\mathrm{C}$	2.61 W/m/K
CT	Specific heat of rock at the temperature $60^{9}\mathrm{C}$	784 J/kg/K
Pr	Density of rock	2749 kg/m ³
N(cr pr)	Thermal diffusivity at the temperature $60^{\circ}\mathrm{C}$	$1.21 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{2/s}$

② 反応移行モデル

反応移行モデルを用いた、塩分濃度を含む地下水組成の変遷の評価では、FASTREACT コードを用いて、地下水流動と化学反応を組合わせたモデルにより、以下の3つの期間に 対して、塩分濃度を含む地下水組成の変遷が評価されている(Trinchero et al., 2013)。

約 100 年間の操業期間

- ▶ 閉鎖後温暖期
- ▶ 氷河期(氷床融解期間のみ)

この評価での概念モデルは、処分場深度の地下水の水理化学的変遷は、処分場領域の地表からの降雨浸透の結果に基づくとの仮定に依っている。浸透水は、岩盤や亀裂中の鉱物と地球 化学的な反応の影響を受けることとなる。ここでの評価の主な結果は、処分場の坑道と涵養 の流路の交点を表現するノードにおける地下水組成である。

FASTREACT (FrAmework for STochastic REACtive Transport) は、地下水流動と化 学反応を組合わせたコードであり、粒子の軌跡と流線を定義するためのパーティクルトラ ッキング手法と、移行途上での化学反応を考慮することができる。流線は、トラベルタイムと 解釈される縦座標により特徴づけられ、(4) 1) ①に示したサイトスケールの地下水流動解 析モデルの 2009SH により得られた流速場に基づいて定義された。すなわち、流線は、選 択した時刻における地下水流動と塩分濃度のスナップショットを与えるものとなる。流線 は、2) ①に示した二重空隙モデル (DP) に類似しており、流線における移流/分散とマト リクス拡散に加えて、速度論的及び平衡論的化学反応を考慮できる。ただし、操業期間に関 しては、マトリクス拡散を無視した単一空隙モデルが用いられている。

水理地球化学計算には、PHREEQC-2を用いており、熱力学データベースは、 PHREEQC.dat データベースを用いている。

モデルにおいては、浸透水(温暖期においては降雨及び海水)と初期地下水の混合と、母 岩中での亀裂充填鉱物と混合水との反応が評価される。温暖期においては、初期の参照地下 水組成の分布は、2)①に示した塩分濃度の分布を用いており、その種類は以下の通りであ る。

- ▶ 炭酸塩リッチな薄い塩水
- ▶ 硫酸塩リッチな薄い塩水
- ▶ 薄い塩水
- ▶ 塩水
- ▶ 濃い塩水

反応移行モデルを用いた、塩分濃度を含む地下水組成の変遷の評価の流れを図 2-18 に示す。 また、用いられているデータ種類やその設定値に関する情報として、性能評価報告書

(POSIVA2012-04) に示されているものを以下に列挙する (POSIVA, 2012b、表 2-35~表 2-37)。

表 2-35 参照地下水の化学組成

(POSIVA2012-04 (POSIVA, 2012b))

	Brackish HCO ₃	Brackish SO ₄	Brackish Saline Water	Saline water	Highly Saline water
Sample	KR4_81_1	KR6_135_8	KR20_465_1	KR10_498_1	KR12_741_1
TDS (mg/L)	1122	7225	10544	22099	49483
Ionic Strength	0.02	0.15	0.22	0.48	1.13
pН	7.4	7.6	7.4	8	8.2
Total Concentrations	(mol/L)				
CI	9.90x10 ⁻³	1.13x10 ⁻¹	1.81x10 ⁻¹	3.81x10 ⁻¹	8.63x10 ⁻¹
SO4	9.58x10 ⁻⁴	4.79x10 ⁻³	2.10x10 ⁻⁴	1.00x10 ⁻⁵	5.00 x10 ⁻⁵
DIC	4.87x10 ⁻³	1.86x10 ⁻³	5.50x10 ⁻⁴	1.10x10 ⁻⁴	4.00 x10 ⁻⁵
SiO ₂	2.00x10 ⁻⁴	3.92x10 ⁴	3.60x10 ⁻⁴	2.80x10 ⁻⁴	2.10 x10 ⁻⁴
PO4	3.87x10 ⁻⁶	-	-	1.05x10 ⁻⁷	2.63 x10 ⁻⁶
F	3.16x10 ⁻⁵	1.58x10 ⁻⁵	5.26x10 ⁻⁵	6.32x10 ⁻⁵	6.32 x10 ⁻⁵
Br	1.75x10 ⁻⁵	1.65x10 ⁴	5.51x10 ⁻⁴	1.19x10 ⁻³	2.55 x10 ⁻³
AI	1.48x10 ⁻⁸	-	-	3.70x10 ⁻⁷	2.22 x10 ⁻⁶
Na	1.31x10 ⁻²	7.70x10 ⁻²	1.15x10 ⁻¹	2.10x10 ⁻¹	3.61 x10 ⁻¹
к	2.48x10 ⁻⁴	4.87x10 ⁻⁴	2.80x10 ⁻⁴	3.60x10 ⁻⁴	4.90 x10 ⁻⁴
Са	1.34x10 ⁻³	1.63x10 ⁻²	3.24x10 ⁻²	8.91x10 ⁻²	2.55 x10 ⁻¹
Mg	7.40x10 ⁻⁴	7.41x10 ⁻³	2.60x10 ⁻³	1.60x10 ⁻³	1.50 x10 ⁻³
Fe	1.15x10 ⁻⁵	6.45x10 ⁻⁸	2.50x10 ⁻⁶	2.00x10 ⁻⁶	3.80 x10 ⁻⁷
Mn	3.46x10 ⁻⁸	2.18x10 ⁻⁵	5.83x10 ⁻⁶	7.28x10 ⁻⁶	9.28 x10 ⁻⁶

表 2-36 浸透水の化学組成

(POSIVA2012-04 (POSIVA, 2012b))

	Meteoric wáter	Altered Meteoric Water after equilibrium	Baltic seawater (1)	Glacial Meltwater (1)
Sample	PVP4_2			
Ionic Strength	0.01		0.997	0.0324
рН	7.3	7.2	7.7	5.8
Eh (mV)		48	789	919
Total Concentra (mol/L)	ations		<u>_</u> 1	Concentration (mmol/L)
CI	1.69x10 ⁻³	1.69x10 ⁻³	8.53x10 ⁻²	
SO4	4.99x10 ⁻⁴	4.99x10 ⁻⁴	4.68x10 ⁻³	5.2x10 ⁻⁴
DIC	5.80x10 ⁻³	5.69x10 ⁻³		2.6x10 ⁻³
SiO ₂	3.56x10 ⁻⁴	3.56x10 ⁻⁴	9.65x10 ⁻⁶	1.7x10 ⁻⁴
PO ₄	2.11x10 ⁻⁷	2.11x10 ⁻⁷		3.1x10 ⁻⁶
F	3.16x10 ⁻⁵	3.16x10 ⁻⁵	1.42x10 ⁻⁵	
Br	1.25x10 ⁻⁶	1.25x10 ⁻⁶	1.29x10 ⁻⁴	1.2x10 ⁻⁵
AI	9.64x10 ⁻⁸	9.64x10 ⁻⁸		3.7x10 ⁻⁶
Na	1.07x10 ⁻³	1.07x10 ⁻³	7.70x10 ⁻²	6.5x10 ⁻³
к	1.71x10 ⁻⁴	1.71x10 ⁻⁴	1.69x10 ⁻³	3.8x10 ⁻³
Са	2.30x10 ⁻³	2.20x10 ⁻³	2.00x10 ⁻³	3.2x10 ⁻³
Mg	6.49x10 ⁻⁴	6.49x10 ⁻⁴	9.00x10 ⁻³	4.1x10 ⁻³
Fe	9.51x10 ⁻⁵	9.51x10 ⁻⁵		1.8x10 ⁻⁶
Mn	2.28x10 ⁻⁵	2.28x10 ⁻⁵		

表 2-37 地下水組成の変化面深度

(POSIVA2012-04 (POSIVA, 2012b))

Interfere	Depth (masl)		
Internace	Profile A	Profile B	
Brackish HCO ₃ /Brackish SO ₄ (S1/S2)	-120.0	-	
Brackish SO4/Brackish saline (S2/S3)	-380.0	-	
Brackish saline/Saline (S3/S4)	-460.0	-460.0	
Saline/Highly saline (S4/S5)	-575.0	-575.0	



図 2-18 反応移行モデルによる塩分濃度を含む地下水組成変遷の評価の流れ (POSIVA2012-04 (POSIVA, 2012b))

3) パイピング/エロージョン

性能評価報告書(POSIVA2012-04)では、パイピング/エロージョンについて、地下水 流動解析や、実験室もしくは原位置における試験の結果に基づき、パイピング/エロージョン による緩衝材及び埋め戻し材の重量減少量を評価しており、その評価手順(流れ)は図2-19の通りである(POSIVA, 2012b)。以下に、評価手順(流れ)の各構成要素における記載 内容の概要をまとめる。



図 2-19 フィンランドにおけるパイピング/エロージョンの影響評価の手順

① パイピング/エロージョンによる重量減少量評価式の導出

性能評価報告書(POSIVA2012-04)では、パイピング/エロージョンによる粘土の浸食は、粘土による水の吸収率、粘土の膨張率、流路へ流入する流量、地下水の化学組成、及び、粘土と水の境界面の特性などによって左右されるとしている(POSIVA, 2012b)。ただし、これらの依存性の詳細が不明であるため、粘土材の浸食については純粋に経験則に基づいた、以下の評価式を用いている。

$$Ms = Cs \times Q_W \times t$$

ここで、

Ms:パイピング/エロージョンによる重量減少量(kg)
 Cs:浸食水中の固相含有量(kg/m³)
 Qw:パイピング/エロージョンに寄与する水量(m³/y)
 t:評価期間(y)

② 影響を受ける処分孔の数の評価

性能評価報告書(POSIVA2012-04)では、上記 1)に示した地下水流動解析の結果から、 パイピング/エロージョンの影響を受ける処分孔の数を、最大で全処分孔の 1/3 と設定して いる(POSIVA, 2012b)。これは、処分孔への地下水流入量が 0.001 L/分より小さい場合に は、パイピングに至る前に流入した地下水が粘土によって吸収されるか、パイピングに至った としても、顕著なエロージョンが発生する前に自己シーリングするとの仮定(今後、検証の 必要ありとしている)に基づくものであり、地下水流動解析の結果、処分孔への地下水流入 量が 0.001 L/分以上となる処分孔が、全体の 35%となったことによるものである。

③ パイピング/エロージョンに寄与する水量の評価

性能評価報告書(POSIVA2012-04)では、パイピング/エロージョンに寄与する総水量 を、緩衝材及び埋め戻し材と母岩との隙間を充てんするペレット間の空隙体積、及び埋め戻し 材ブロック間のギャップの体積等に基づいて算出しており、その最大値を 740 m³ と推定し ている(POSIVA, 2012b)。

その上で、上記 1) に示した地下水流動解析から、処分坑道のほとんどに常にいくつかの 流入点があり、かつ、1 つの処分坑道あたり少なくとも 2~3 の処分孔に流入があるとの結 果や、1 つの処分坑道への総流入量は、常に当該坑道の処分孔 1 つあたりの流入量よりも大 きいとの結果から、処分孔 1 つあたり、185~370 m³の水量が流入すると仮定している。

④ 浸食水中の固相含有量の評価

性能評価報告書(POSIVA2012-04)では、浸食水中の固相含有量を試験データに基づいて設定している。その値は、ベースケースで1g/Lとしており、さらに、不確実性への対処として、2g/L、4g/L、10g/Lも設定している(POSIVA, 2012b)。

⑤ パイピング/エロージョンによる重量減少量の評価

性能評価報告書(POSIVA2012-04)では、上記①~④に示した評価に基づき、緩衝材の パイピング/エロージョンによる重量減少量を、最大で185kgと見積もっている(POSIVA, 2012b)。この値は、処分孔1つあたりの緩衝材重量20,300~24,300kgの1%以下であり、 緩衝材の平均密度は、透水性や膨湿圧に著しい影響を及ぼさない程度に留まると予想され るとしている。

また、埋め戻し材については、パイピング/エロージョンによる重量減少量を、最大で 13,000 kg と見積もっているが、喪失した埋め戻し材は、処分坑道内に再分配されるとして いる。また、このような重量減少が、仮に狭い領域において発生した場合には、埋戻材の性能に 影響を及ぼす可能性があるが、狭い領域においてそのような喪失が発生するには、大きな地 下水流量が必要であり、そのような領域は処分坑道への地下水流入量の上限 0.25 L/分

(約1,300m³/y)により排除されるため、性能目標に影響を及ぼすことはないとしている。

2.1.2 国外における先行的な検討事例の調査—スウェーデン

(1) 人工バリアシステム構成の概要

スウェーデンの処分概念は堅置きである。スウェーデンのセーフティケース報告書 SR-Site (SKB, 2011)では、人工バリアはキャニスタ、緩衝材、埋戻し材の3つが定義(表 2-38)され ており、それぞれの人工バリア構成要素に対して、表 2-39 に示す安全機能が割り当てられ ている。また、これに加えて地圏(母岩)と燃料に対しても安全機能が割り当てられている ため、これらについても合わせて記載する。

表 2-38 スウェーデンにおける人工バリアの定義

人工バリアは以下の構成とする。
a) <u>キャニスタ</u> : 内部の使用済燃料を完全に閉じ込める。
b) <u>緩衝材</u> :キャニスタ周辺における水の流動を制限すること及びキャニスタを処
分孔内の所定の位置に保つこと
c) 処分坑道 <u>埋め戻し材</u> :緩衝材を所定の位置に保つこと、そして処分坑道におけ
る地下水の流動を制限すること
d) <u>閉鎖材</u> : 意図しない処分場への侵入を防ぎ、地下開口部を通じた地下水移行を
制限すること。

表 2-39 人工バリア構成要素に割り当てられた安全機能

(SKB TR-11-01	(SKB, 2011))
	L. A DR AL

バリア		安全機能
キャニスタ	閉じ込め	 >>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>
	遅延	 ▶ 移行抵抗の提供 ▶ 燃料の臨界回避
緩衝材	閉じ込め	 移流移送の制限 微生物活動の低減 湿気を帯びた岩石の剪断移動 変換抵抗(温度に関する要件) キャニスタの沈み込みの防止 キャニスタ及び岩石にかかる圧力の制限
	遅延	 > コロイドの濾過 > 放射性核種の収着 > 気体の通貨を可能にする
処分坑道	閉じ込め	▶ 緩衝材の膨張に対する反作用
埋め戻し材	遅延	 ▶ 移流移行の制限 ▶ 放射性核種の収着
地圈 (母岩)	閉じ込め	 化学的に良好な条件の提供 良好な水文地質学的条件及び移行条件の提供 力学的に安定した環境の提供 良好な熱条件の提供
	遅延	 ▶ マトリクス拡散及び収着 ▶ 低いコロイド濃度
燃料	閉じ込め	-
	遅延	 ▶ 放射性核種の閉じ込め ▶ 沈殿 ▶ 臨界の回避

(2) 性能評価の位置付けや流れなど

1) セーフティケースにおける位置付け

スウェーデンのセーフティケース報告書 SR-Site (SKB, 2011) は全部で 11 のステップ の構成であり、並行して実施するステップ (concurrent) と順次実施するステップ (consecutive) がある。プロジェクトマネジメントの観点から、各ステップは大きな統合 的な安全評価プロジェクトにおけるサブプロジェクトと捉えることができる。これらのス テップ構成を図 2-20 に示す。破線より上の最上部にある囲みは、評価に用いるインプット である。SR-Site では性能評価という用語は用いられていないが、ステップ5 で定義された 安全機能及び安全機能指標に基づき処分場の変遷について調査するという方法から、「7 基 本的変遷の定義と解析」が性能評価に位置付けられると考えられる。

基本設計	サイト記述 (Site Description)	R&D の成果	以前の評価結果	FEP データベース
	 特性、事象、プロセー 初期状態 内部フ 	ス(FEPs)の処理(c [°] ロセス 外部要因	 h3)]	
2a サイト初期状態の記述(ch4) 2b 人工バリアシスラ 状態の記述(ch5)			A初期 (ch5) ーサイト適合	レイアウトの記述 Nを含む
3 外部条件の記述 (ch6) -気候及び気候関連問題 -将来的な人間活動			4 プロセス報告書の編 モデルを含む処理方法(i纂(ch7) の取り扱い
5 安全機能及び安全機能指標の定義(ch8) ーシステムの安全機能 ー測定可能な/計算可能な安全機能指標 ー安全機能指標の基準値			6 入力データの編纂((ch9)
7 基本的変遷の定義と解析(ch10) 処分場の変遷の調査 -最近の 120,000 年の氷河期の反復 -温室効果ガスの増加による地球温暖化バリアント				
 8 シナリオの選定(ch11) -基本的変遷の結果 -FEPの解析 -安全機能 			9 以下に関わる選択し -閉じ込め(ch12) -遅延(ch13)	たシナリオの解析
 10 追加の解析(ch14) -将来的な人間活動に関するシナリオ -最適化及び BAT -除外された FEPs の妥当性 -100万年を超える期間 -ナチュラルアナログ 		-	1 1 結論(ch15) -規制基準の順守状況 -設計、R&D、サイト ック	調査へのフィードバ

図 2-20 SR-Site 安全評価の主要 11 ステップの概略(SKB TR-11-01 (SKB, 2011))

2) 性能評価期間の考え方

スウェーデンでは放射線安全機関(SSM)の「SSMFS 2008:37:規則の適用に関する一 般勧告」において、閉鎖後の最初の 1,000 年間では使用済燃料の放射能毒性(radiotoxicity) が高いこと、並びに、その比較的近い将来については予測能力が高い、という二つの理由を踏 まえて、閉鎖後の最初の 1,000 年間を対象とした、より詳細な解析に関する規制要求事項が ある。また、1,000 年経過後はリスク解析を約 10 万年または氷期1サイクルを含むことが 求められている(表 2-40)。これらの観点から、基本的変遷の基本ケースの解析は、以下の4 つの期間に分けて整理されている。このうち、本業務で対象としている操業(建設・施工・閉 鎖)~再冠水(ベースライン復旧)に至る期間に相当する①及び②(下線箇所) にいて、以 降で整理する。

- ① <u>掘削/操業期 (The excavation/operational period)</u>
- ② 処分場閉鎖後の最初の 1,000 年間、及びレファレンス氷期サイクル当初の温暖期
- ③ 氷期サイクル当初の残りの期間
- ④ 氷期サイクルの2回目から、処分場閉鎖後 100 万年までの期間

なお、①~④の基本ケース以外に、SR-Site (SKB, 2011) では将来の気候、したがって 外部条件が、人為的に作り出された温室効果ガスの放出によって著しい影響を受けると仮 定した「地球温暖化バリアント」を、氷期サイクル全体にわたって解析している。温暖化に伴 い初期の海水面上昇や当初の温暖期が長期間継続することを想定しているが、SR-Site にお いて安全機能指標への影響は無いと結論付けられていることから、「地球温暖化バリアント」 は対象とせず、本検討においては上記の基本ケース①~④を対象とする。

また、上記①~④のように評価期間を設定した考え方について、表 2-40 に報告書の記載の抜粋を示す。

表 2-40 スウェーデンにおける評価期間の考え方に関する記述の抜粋

(SKB TR-11-01 (SKB, 2011))

- ・放射線安全機関 (SSM) の「SSMFS 2008:37 規則」では「処分場を閉鎖後最初の 1,000 年間に対して は、処分場のバリア性能の評価は人の健康と環境に対する影響の定量的な解析に基づかなければならな い」、「処分場を閉鎖後最初の 1,000 年間が過ぎた後の期間に対しては、処分場のバリア性能の評価は処 分場の特性、その環境、及び生物圏が変遷するさまざまな考え得るシーケンスに基づかなければならな い • 放射線安全機関 (SSM) の「SSMFS 2008:37 規則の適用に関する一般勧告」では、使用済燃料の処分場 に関して「...+分に予測可能な外的影響(strains)を例証するために、リスク解析は少なくとも約 10 万年、 または氷期1サイクルに当たる期間を含むべきである。リスク解析の期間は、最大でも 100 万年とし、 処分場の防護能力の改良可能性についての重要な情報をもたらす限りの期間まで拡張されるべきであ る。」と述べられている。
 ・
 か射線安全機関
 (SSM)
 の「SSMFS 2008:37 規則の適用に関する一般勧告」では、最初の 10 万年に
 ける定量的なリスク解析に関して、「計算されたリスクに対する確信度(confidence)を強化するために、 処分場の防護能力に関する補完的指標となるもの、例えばバリア機能、放射性核種フラックス及び環境 における濃度が使用されるべきである。」と述べている。 約 10 万年を越える期間に対して、SSM の「SSMFS 2008:37 規則の適用に関する一般勧告」はさらに 「規則で定められている個人リスクに関する基準に対して、算出されたリスクの値を厳格かつ定量的に 比較することは意味をなさない。処分場の防護能力の評価は、バリア機能、放射性核種フラックス及び 環境における濃度のような、処分場の防護能力の関する複数の補完的指標を用いて、算出されたリスク に関する考察に基づくべきである。」と述べている。 ・約 10 万年経過後の使用済燃料の放射能毒性は、燃料生産に使用された天然ウラン鉱石のものと同等に なっている /Hedin 1997/。核燃料サイクルのあらゆる部分(U-235 濃縮の前に分離されるウランの娘核 種、濃縮工程から生じた減損ウラン--これは核燃料として使用されない、濃縮ウランを加工・使用した後発 生活理練科の毒性を合計しても、図 2-1 に示すように、10 万年後には利用されたウラン鉱石のものと 同程度になる。後者の比較は、原子炉の内部で消費された天然の U-235 と U-238 の量の放射能毒性を、当 該原子炉で新たに作り出され、かつ 10 万年後でも残っている生成物(核分裂生成物とアクチニド)の 放射能毒性と比較することに相当する。 ・安全評価の時間スケールを正当化すると考えられる他の基準として、当該処分場からのピーク線量が発 生する時点が解析対象期間内にあるべきということが挙げられる。しかし長い時間スケールでは、典型 的には 100 万年の評価期間の終了時にピーク線量が出現する。この理由は、処分された U-238 から自然 発生する Ra-226 の成分が成長すること、そして〔そのような長い時間スケールでは〕バリアシステム の劣化は避けられないためである。SR-Can 安全評価もまさにこのケースであった。KBS-3 概念は、〔キ ャニスタへの〕「封入」によって廃棄物を遠い将来まで閉じ込めることが狙いであるため、安全評価の時間スケ ールを決めるための基準としては、ピーク線量が出現するまでとする基準は不適切であると考えた。 • SR-Site では、評価の時間スケールは 100 万年とした。この時間スケールは前記で引用した一般勧告に したがっている。さらにこの期間は、インベントリの放射能毒性が、その元となった量の天然ウラン 鉱石のものと同等水準まで低減するのに必要な時間よりも長い。100万年以後に廃棄物の中に残ってい る主要な放射性核種は、天然ウラン鉱石にも存在する U-238 のような超長寿命核種であることにも注意 されたい。 • "SSMFS 2008:37 規則の適用に関する一般勧告"で述べられているように、定量的なリスク基準は最初 の約 10 万年の期間中には定量的な規制限度として適用でき、その後は処分場のバリア性能を議論する ための基盤として使用できる。したがって、SR-Site のリスク計算は 100 万年まで延長し、SSM の一般 勧告にしたがって、その結果を第15章で述べる適合の議論で使用する。 ・閉鎖後の最初の 1.000 年間では使用済燃料の放射能毒性が高いこと、並びに、その比較的近い将来につ いては予測能力が高い、という二つの理由を踏まえて、閉鎖後の最初の 1,000 年間を対象とした、より 詳細な解析に関する規制要求事項がある。この規制要求事項に関しては、処分場の初期の一過的な変遷 を解析しており、部分的には満足している。その解析は、第10章の基本的変遷の記述部分にある。閉鎖
 - 後の最初の 1,000 年間を対象とした、より詳細な解析に関する規制要求事項を完全に満足するために、 仮想的な早期バリア損傷についても扱った上で改めて、この期間におけるバリアシステムの機能性を検 討した結果をこの総括報告書の後の方で示す。詳細はセクション 13.9.5 を参照のこと。

3) 性能評価の流れ

スウェーデンのセーフティケース報告書 SR-Site (SKB TR-11-01) では、その目次構成 自体が、スウェーデンの考える評価の流れを反映していると考えられることから、その目次構 成を表 2-41 に示す。

スウェーデンの性能評価では、FEP の処理による FEP カタログの作成(3章)、初期状態や外部条件、内部プロセスの取り扱い(5章~7章)、安全機能指標等の定義(8章)を基に、10章において評価期間ごとに性能評価を行い、同章の評価期間ごとのまとめとして安全機能指標を満たしていることを確認している。(図 2-21 にイメージを示す。)

また、スウェーデンの安全評価では SR-Site のために SKB 社独自の FEP データベース (SKB FEP データベース)を構築している。SR-Can FEP カタログは SR-Can 評価での取 り扱いに必要な全ての FEP を含んだものであり、本質的に SKB FEP データベースに含ま れる FEP のサブセットである。SR-Site FEP カタログは SR-Can FEP カタログの後継バ ージョンであり、SR-Can では取り扱っていなかったシステム構成要素に加えて、生物圏も 定義して組み込まれている。SR-Site FEP カタログに含まれる FEP の分類は以下の通りで あり、その取り扱いが図 2-22 のように整理されている。

- ➤ 初期状態 FEP
- プロセス:燃料、キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材、坑道プラグ、中央エリア、トップシール、処分孔内の底板、ボアホールシール、地圏で発生するプロセス
- 変数:燃料、キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材、坑道プラグ、中央エリア、トップシール、処分孔内の底板、ボアホールシール、地圏の状態を表現する変数
- ➤ 生物圈 FEP
- ➢ 外部 FEP
- 方法論自体に係わる事項

表 2-41 スウェーデンの SR-Site プロジェクト総括報告書 (SKB TR-11-01 (SKB,

目 次 構 成		
1はじめに		
2 方法論		
3 FEP の処理(FEP processing)		
4フォルスマルク・サイト		
5 処分場の初期状態		
6 外部条件の取り扱い		
7内部プロセスの取り扱い		
8 安全機能と安全機能指標		
9入力データの編纂		
10 基本的変遷の解析―フォルスマルクでの処分場の場合		
10.1 はじめに		
10.2 掘削期と操業期		
10.3 閉鎖後当初の温暖期		
10.4 レファレンス氷期サイクルの残存部分		
10.5 その後の氷期サイクル		
10.6 地球温暖化バリアント		
10.7 基本的変遷の解析から得られた結論		
11 シナリオの選定		
12 選定したシナリオに関する閉じ込め能力の解析		
13 選定したシナリオに関する遅延能力の解析		
14 補足的な解析と裏付けとなる論拠		
15 結 論		
16 参考文献		

2011))の目次構成

□:性能評価に関わる箇所



図 2-21 スウェーデンにおける性能評価の流れのイメージ





4) 性能評価項目の選定方法

図 2-23 に示す FEP チャートによって、初期状態の様々な要素、変数、プロセス及び安 全機能指標の間の関係の全体像がもたらされる。このチャートは、専門家がシステムを定性 的に解析する上で役立つだけでなく、SR-Site において、その他の情報源と組み合わされた 上で、シナリオの選定や解析に利用されている。このように、スウェーデンのセーフティケー ス報告書(SKB TR-11-01)においては FEP チャート及び安全機能指標の流れについては 記載があるが、この安全機能指標から性能評価項目を選定した方法については記載されて いなかった。



図 2-23 閉じ込めとの関連性の高い要素のうち燃料/キャニスタを抜粋した SR-Site の

FEP チャート



(3) 性能評価項目の整理

1) 性能評価項目の一覧

本業務で対象としている操業~再冠水に至る期間に相当する「掘削/操業期」及び「閉鎖 後当初の温暖期」のそれぞれについて、処分場構成要素ごとの性能評価項目を以下に示す。 SR-Site プロジェクト総括報告書(SKB TR-11-01)の10章において、性能評価の内容 が、期間及び性能評価項目ごとにまとめられていることから、10章の該当箇所の目次がそ のまま性能評価項目一覧と見なすことができる(SKB, 2011)。このため、ここでは、まず、

対象とする評価期間に関する章の目次をそのまま示した後、それらを、処分場構成要素及び THMCR にて分類・整理した。

「掘削/操業期」の性能評価項目一覧

「掘削/操業期」についての性能評価の内容については、SKB TR-11-01 の 10 章に示されている。その目次構成を表 2-42 に、目次構成に基づき整理した「掘削/操業期」の性能評価項目一覧を表 2-43 に、それぞれ示す。

表 2-42 SR-Site プロジェクト総括報告書(SKB TR-11-01(SKB, 2011))10.2 章の目次

大項目	小項目
ニアフィール ドの熱的変遷	ニアフィールドの熱的変遷
掘削に起因す るニアフィー ルド岩石の力 学的な変遷	 ・処分孔の EDZ とスポーリング(岩の剥離) ・掘削作業によって坑道の周囲に誘発される新しい亀裂の形成 – 「EDZ」の形成 ・ 亀裂の再活性化 ・ 地震活動の誘発
水理地質学的 な変遷	 ・地下水面の低下、浅部水の浸潤ならびに深層塩地下水のアップコーニング ・流入量の計算 ・処分場への流入量 ・流入排除規準
緩衝材、埋め 戻し材及びプ ラグの変遷	 ・プラグの水飽和とそのシーリング能力 ・パイピングエロージョン ・処分孔における浸食量の推定 ・処分坑道において浸食された物質 ・ベントナイト物質喪失後の均質化 ・底板/パッケージ間の水理学的相互作用
処分場内及び その周囲にお ける化学的変 遷	 ・サイトにおける天然地下水条件 ・塩分濃度(アップコーニング効果) ・酸化還元条件 ・グラウト、吹き付けコンクリート及びコンクリートが pH に及ぼす効果 ・鉱物の沈殿/溶解 ・有機物及び微生物のプロセスが及ぼす効果 ・SFR との相互作用 ・埋め戻し材における酸素消費 ・コロイド層 ・キャニスタの腐食

構成

表 2-43 「掘削/操業期」の性能評価項目一覧

(処分場構成要素、THMCR にて分類)

処分場	性能評価項目		
構成要素	THMCR 分類	項目	
母岩	熱	温度変化	
	水理	地下水流動	
	力学	処分孔の EDZ とスポーリング(岩の剥離)	
		掘削作業によって坑道の周囲に誘発される新しい亀裂の形成 -	
		EDZ」の形成	
		亀裂の再活性化	
		地震活動の誘発	
	化学	地下水組成(塩分)	
キャニスタ	力学・化学	腐食	
緩衝材	熱	温度変化	
	水理・力学	パイピングエロ―ジョン	
		底板/パッケージ間の水理学的相互作用	
	化学	酸素消費	
		コロイド層	
埋め戻し材	水理・力学	パイピングエロ―ジョン	
		プラグの水飽和とそのシーリング能力	
		底板/パッケージ間の水理学的相互作用	
	力学・化学	グラウト、吹き付けコンクリート及びコンクリートが pH に及ぼ	
		す効果	
	化学	酸素消費	
		コロイド層	

② 「閉鎖後当初の温暖期」の性能評価項目

「閉鎖後当初の温暖期」についての性能評価の内容については、SKB TR-11-01 の 10.3 章に示されている。その目次構成を表 2-44、表 2-45 に、目次構成に基づき整理した「閉 鎖後当初の温暖期」の性能評価項目一覧を表 2-46 に、それぞれ示す。

表 2-44 SR-Site プロジェクト総括報告書(SKB TR-11-01(SKB, 2011))10.3 章の目次

大項目	小項目
生物圈	・長期的な生物圏の進展にとって重要なプロセス
	・処分場閉鎖後の最初の 1,000 年間
	・フォルスマルクにおける 1,000 年後から当初の温暖期が終了するまでの時期での
	生物圏の進展
ニアフィールドの	・緩衝材のピーク温度の分布
熱的変遷	・定置順序の重要性
	・熱的変遷
岩石の力学的な変	・モデル化方法
遷	・ファーフィールドにおける亀裂の再活性化
	・ニアフィールド亀裂の再活性化
	・ 地殻構造上の圧縮及び/または氷河地殻平衡調整
	・岩盤における亀裂の形成 - 熱的に誘発されたスポーリング
	・クリープ・ポテンシャル – 時間依存性の変形
水理地質学的な変	• 飽和
遷	・水理地球化学面での変遷
	・生物圏における湧出場所
	・性能尺度
	・希薄水の浸透
	・処分坑道の EDZ 及び頂部空間
	・スポーリングの効果
	• SDM サイト関連モデル・バリアント
	・代替DFN 透水量係数/サイス関係
	 生し得る変形帯 土体工の20またたぎただ料
	・木修止の鉛直方回透水係数
	・払大された空間的な変動り能性
加八担由がたまいま	・シーリングされていないホーリング北
処分場内外にわけて て ル 学 的 な 赤 画	 ・ セブル化 ・ 塩八濃度の亦運
る化子的な変遷	 ・塩汀辰皮の変遷 ・その他の王姥地下水式八の濃度の亦運
	・ての他の人公地下小成力の最良の変遷
	・ 防イ A イ ・ カリウム 磁化物 鉄 H。 CH 及び 滚 左 右 継 炭 素
	• nH 及び重炭酸塩
	・塩化物と硫酸塩
	・コロイド
	・酸化還元冬件の変遷
	・グラウト、吹き付けコンクリート及びコンクリートが nH に及ぼす効果
	・グラウト孔におけるグラウトの劣化
緩衝材及び埋め戻	 ・埋め戻し材の飽和
し材の飽和	 ・緩衝材の飽和
	・乾燥岩石ケースにおける水分再分配
	・フォルスマルク・サイトにおける水理条件への適用

構成(1/2)

表 2-45 SR-Site プロジェクト総括報告書(SKB TR-11-01(SKB, 2011))10.3 章の目次

人項目	小項目
膨潤及び膨潤圧	・緩衝材の均質化
	・埋め戻し材の均質化
	・緩衝材の上方に向けた膨張
	・処分孔内でのキャニスタの移動
	・ベントナイト物質の喪失が起きた後の均質化
	・緩衝材の喪失
	・埋め戻し材物質の喪失後の均質化
	・移流条件が成立する可能性
緩衝材と埋め戻し	・不飽和段階と高温期間
材の化学面での変	・鉱物の相転移 (mineral transforamtion)
遷	・塩分濃度の効果
	・セメント化 (cementation)
緩衝材と埋め戻し	・コロイド化放出が起こり得る条件
材のコロイド化放	・緩衝材喪失に関する定量化
出	・緩衝材における移流に至るルート
	・処分坑道埋め戻し材の浸食率
	• 飽和期間
底板を伴う緩衝材	・透水性亀裂と結びついた緩衝材における地球化学的な変遷
とプラグを伴う埋	・埋め戻し材における、さらには透水性亀裂と連絡されていない緩衝材における地
め戻し材の高温期	球化学的な変遷
間後の変遷	・フォルスマルク・サイトにおける地球化学的な条件の適用
	・底板/緩衝材の化学的相互作用
	・底板/緩衝材の力学的な相互作用
	・処分坑道ブラクのコンクリートの劣化
	・ 坑迫 プフク 崩壊 後の 埋め 戻し 材の 膨 潤
	 ・キャニスタの次み込み ・ ※毎日みび畑ゆ戸1日に対すて浸添に効果
というなの志運	 ・ 核側 材 及 い 埋 の 戻 し 材 に 対 身 る 夜 透 庄 刻 朱 か 地 か 運
キャニスタの変遷	・ 然的发達
	 ・ 核側州の服用が及ばり刀子的な影響 ・ 約の府舎
	・ 卵の腐良
	・版側的及び埋め戻し物の與軟弧 ・経衛は及び囲め声しなに方左よる広範指畳三細菌(CDP)
	・版画的及び生の床し物に行任りる硫酸塩逐ル神困(SND) ・地下水に今まれる磁化物 — 損傷のない経衛材
	・ 今面的か約和冬代でけかい世能における府會
	・ 机分孔における 務盗条件
	・銅腐食に関する解析の概要
中心区域 最上部シ	・中心反域と最上部のシール材
ール及びボーリン	・ボーリング孔シールの変遷
グ孔プラグの変遷	
閉鎖後当初の温暖	・岩石安全機能
期に関連する安全	 ・緩衝材の安全機能
機能	・埋戻し材の安全機能
	・キャニスタの安全機能
	・高温-飽和段階の後の緩衝材/埋め戻し材の状況
	・放射性核種の移行に関する結論

構成(2/2)

表 2-46 「閉鎖後当初の温暖期」の性能評価項目一覧

(処分場構成要素、THMCR にて分類)

処分場	性能評価項目						
構成要素	THMCR 分類	項目					
母岩	熱	熱的変遷					
	水理	地下水流動					
	力学	ファーフィールドにおける亀裂の再活性化					
		ニアフィールド亀裂の再活性化					
		地殻構造上の圧縮及び/または氷河地殻平衡調整					
		岩盤における亀裂の形成 - 熱的に誘発されたスポーリング					
		クリープ・ポテンシャル – 時間依存性の変形					
	化学	地下水組成(塩分)					
	,	その他の天然地下水成分の濃度の変遷					
キャニスタ	熱	熱的変遷					
	力学・化学	銅の腐食					
		緩衝材の膨潤が及ぼす力学的な影響					
緩衝材	熱	ピーク温度の分布					
	水理・力学	飽和					
		均質化					
		上方に向けた膨張					
		底板/緩衝材の力学的な相互作用					
	化学	不飽和段階と高温期間におけるベントナイトの鉱物学的変化					
		鉱物の相転移 (mineral transforamtion)					
		塩分濃度の効果					
		セメント化					
		コロイド化放出					
		底板/緩衝材の化学的な相互作用					
埋め戻し材	水理・力学	飽和					
		均質化					
	化学	不飽和段階と高温期間におけるベントナイトの鉱物学的変化					
		鉱物の相転移					
		塩分濃度の効果					
		セメント化					
		コロイド化放出					

(4) 性能評価項目ごとの評価手順の整理

ここでは、(3) 1) に示した性能評価項目のうち、本業務で着目している水理解析に関わる性能評価項目(水理、地下水化学)として以下を抽出し、それらについて、その流れ、 モデル、データ種類などといった性能評価手順の整理を実施した。

- ▶ 地下水流動
- ▶ 地下水組成(塩分)
- ▶ パイピングエロージョン

1) 地下水流動

① はじめに

SR-Site で SKB 社が用いた水理地質学的なモデル化のシステム・アプローチでは、地圏 を3種類の水理学的領域—HCD、HRD、HSD—に分割している。(図 2-24)

- HCD(導水体領域: Hydraulic Conductor Domain)は、決定論的にモデル化した変 形帯を示す。
- HRD(含水岩体領域: Hydraulic Rock mass Domain)は、変形帯の間に存在する比較的亀裂を起こしていない岩盤を示す。
- HSD(含水土壌領域: Hydraulic Soil Domain)は、表層土(第四紀の堆積物)を示す。



図 2-24 結晶質岩とレゴリス(第四紀堆積物)の3つの水理学的領域への分割 (SKB R-09-19 (Svensson and Follin, 2010))

図 2-25 に、岩盤領域—HCD と HRD—に関連する安全機能に関して実施された3件の 流動モデル化研究 (Svensson and Follin, 2010; Joyce et al., 2010; Vidstrand et al., 2010)の概括を示す。図 2-25 には、それぞれの岩盤流動モデル化調査で取り扱われ、その 結果が TR-11-01 に示されている期間も示している。これら3件の研究は、異なるモデル化 チームが異なったコンピュータ ・コードを使用して行っている。文献 (Svensson and Folin, 2010; Vidstrand et al., 2010)で実施された研究では「DarcyTool」を使用している。その 一方で文献(Joyce et al., 2010)では「ConnectFlow」を使用している。



図 2-25 岩盤に関連する安全機能に関して実施された流動モデル化の概略(SKB TR-11-01 (SKB, 2011))

図 2-26 に示すように、水理地質学的な基本ケース・モデル(hydrogeological base case model)は、温暖期のモデル化において導出したものである。このモデルは、SR-Site に固 有の特徴を組み込むためにわずかな修正が加えられていることを除き、基本的に SDM-Site モデルと同じであり、いずれもモデル化ツール ConnectFlow を使用して導出したものであ る。



CF : ConnectFlow DT : DarcyTools

図 2-26 SDM-Site モデル、水理地質学的な基本ケース、基本ケース及び様々な バリアントの間の関係(SKB TR-11-01 (SKB, 2011))

異なった塩分濃度を持つ地下水の空間的な分布を、全ての時期についてモデル化する。こ の理由は、流体密度のばらつきが、流動場及び異なった化学組成をもつ水との間で生じる相 互作用に影響を及ぼすためである。特に、最上部の境界線から処分場深度に至る淡水の移行と、 地下深部からの塩水のアップコーニング(わき上がり)現象を詳細に解析する。亀裂水 (fracture water)の塩分濃度は以下のとおり整理されている。

- ▶ 岩盤最上部 100m における亀裂水の塩分濃度は、この深度より下の亀裂水のそれよりも低い値
- ▶ -100~-800mの範囲では塩分濃度は約1重量%

これより深いところでは、塩分濃度は深度が増すにつれて著しく上昇すると予想している。-2,000m における塩分濃度は、ラクセマルで掘削された深さ 1,660m のボーリング で入手したデータに基づき、7wt%と設定。

掘削期と操業期

掘削期と操業期における地下水流動モデル化は、DarcyTools モデル化ツールを用いて実施されている。このモデル化にとって鍵となる要素を次に列記する。

- ▶ 計算格子において空間的に異なる解像度を許容する「構造化されていない格子」。SR-Site の場合、処分場近辺については細かな格子が使用された。
- 処分場に向けた詳細な流入のシミュレーションを可能にする「坑道ルーチン」。この 中には、グラウトの効率及びキャニスタ破損の解析が含まれる。
- ▶ 地下水面の低下において空間的なばらつきを許容する「井水面アルゴリズム」。SR-Siteでは、グラウト効率の関数の一つとしての地下水面の擾乱(低下)を解析する。
- ▶ 「可変密度流動」。SR-Site では、深い場所に存在するより塩分濃度の高い水のアッ プコーニングが起こる可能性を解析する。
- ▶ 埋め戻し後の坑道の飽和状態に関する調査のためのアプローチ。SR-Siteでは、当初 は不飽和状態にある埋め戻し材の水和プロセスを、いくつかの方法で解析する。
- ▶ 空間的なばらつきを伴う「等価連続多孔質媒質」(ECPM)の様々な特性。SR-Site では、変形帯のアップスケーリングを通じて、さらには ConnectFlow モデル化ツールを用いた温暖気候条件の地下水流動モデル化において実施された「離散亀裂ネットワーク」(DFN)モデルのリアリゼーションを通じて、ECPMの特性を導出している。
- ECPM モデル化の伝統的なアプローチは、亀裂を伴わない計算格子の全ての部分に 比較的低い透水係数を割り当てることである。Svensson and Follin (2010)では、 亀裂が交差していない格子セルを削除する、すなわち「等価不連続多孔質媒質」 (EDPM: equivalent discontinuous porus medium)を作成している。

操業期は、3つの異なる操業ステージ(A、B、C ステージ)を検討している。図 2-27 を 参照のこと。これらの3つのステージは順番に実行される。最初のステージ A は 15 年間、 ステージ B も 15 年間、さらにステージ C は 20 年間継続し、総操業期間は 50 年間である。 これらの異なったステージは、処分場の一部分が開かれた状態に維持される一方で、その他 の部分はまだ掘削されてもいないか、既に埋め戻されていることを意味する。さらに、それ ぞれのステージを対象に、グラウト効率に関して以下の3種類のレベルを設定して評価す る。

- レベルI: 処分場との連絡を伴う全てのセルの透水係数の最大値が10⁻⁷ m/sである。
- レベルII: 処分場との連絡を伴う全てのセルの透水係数の最大値が10⁻⁸m/sである。
- レベルⅢ:処分場との連絡を伴う全てのセルの透水係数の最大値が10⁻⁹m/sであるが、
 例外として、グラウトされない部分の透水係数が10⁻⁶m/s以上であるとモデル化する。
 〔本来であれば〕この例外部分の透水係数の最大値は10⁻⁸m/sである。



3 つの操業ステージ(A,B,C)は、緑色、青緑色(turquoise)及びピンク色によって色分けしている。CA = 中心区域、DA = 定置区域、MT = 運搬坑道及び主坑道、VS = 換気立坑。

図 2-27 調査された処分場レイアウトの様々な部分の定義(SKB TR-11-01 (SKB, 2011))

表 2-47 に、異なった操業ステージとグラウトレベルに関して、ECPM モデル・グリッド を用いて算出した流入量を示した。総流入量は、操業ステージ(A~C)及びグラウト効率 レベル(I~III)に応じて、8~51 L/s の間で変化する。上述のケース、すなわち操業ステ ージ C 及びグラウトレベル II の場合の流入量は、28 L/s となっている。こうした流入は主 として、処分場境界で起こる。その理由は、最も大きな勾配が処分場とその外側の岩体の間の 境界で成立するという事実にある。同様に興味深いこととして、グラウトレベル I (すなわ ち最も低いグラウトレベル)の場合に、主な流入が斜坑で起こることが挙げられる。この 斜坑は、フォルスマルク ・ サイトの浅部に見られる透水係数の高い岩床節理を突き抜けてい るものである。したがって、大きな流入はグラウト効率が低いケースにおいて生じることにな る。

表 2-47 3つの操業ステージ(A~C)と3種類のグラウト効率(I~III)を対象に、処分場の様々な部分に関して算出された流入速度(L/s)。CA = 中心区域、DA = 定置区域、
 MT = 運搬坑道及び主坑道、VS = 換気立坑。(SKB R-09-19 (Svensson and Follin, 2010))

Part of repository	Grouting level I Operation stage			Grouting level II Operation stage			Grouting level III Operation stage		
	A	в	С	A	в	С	А	в	с
CA	4	4	5	2	2	2	1	1	1
DA-A	6	-	1. 2	4		-	3		
DA-B	-	8	_	-	6	-	-	3	-
DA-C	-	-	9	-	-	8	-	-	4
RAMP	16	17	17	6	6	6	2	2	2
MT-A	6	6	7	4	4	5	2	2	2
MT-B	_	1	1	-	1	1	-	0	0
MT-C	-	-	9	-	-	5	-	-	2
VS1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
VS2	-	2	2	-	1	1	-	0	0
Total	33	39	51	17	21	28	8	8	11

閉鎖後当初の温暖期

温暖期における地下水流動モデル化にとって鍵となる要素を次に列記する。また、温暖期 において使用している3種類のモデルスケールについて、図2-28及び表2-48に整理する。

- SR-Site において、検討する温暖期における地下水流動にとって主要な水理学的駆動力は、降水量に起因するフラッシングである。そして現在も進んでいる海岸線の変位は、フラッシング・パターンの連続的な変化を意味する。
- ▶ モデルの出発点は紀元前 8000 年、すなわちフォルスマルク区域が約 100m の水中に 没した時期である。
- ▶ フォルスマルクの場合、SR-Site で検討する温暖期における地下水流動にとって主要 な水理学的駆動力は、降水量に起因するフラッシングである。
- ▶ 不連続媒体(DFN)での流動と連続的多孔質媒体(ECPM 及び CPM)での流動を一 つのシーケンスととらえる概念を採用
- ▶ 3種類の「モデルスケール」―「広域スケール」「処分場スケール」「サイトスケール」

—を使用



図 2-28 モデルスケール及びスケール間のデータ転送の概念図(SKB R-09-20(Joyce et al., 2010))

表 2-48	温暖期において使用す	るモデルスケールの根	ŧ要(SKB TR-11-01	(SKB, 2011))
--------	------------	------------	-----------------	--------------

広域スケール	処分場スケール	サイトスケール
• 「可変密度圧力解」(variable-density pressure	・広域スケール・モデルから定常圧力解を計算しておく。この	・サイトスケール・モデル領域は広域ス
solutions)を、連続多孔質媒体概念に基づく過渡流動	力解は、モデル領域境界において圧力がある一定値をとることモ	ケ
モデルで使用するために導出する。塩の移流による移行	デル領域全体の密度場が一定(しかし空間的にはばらつきを伴	ール・モデル領域と大きさの面で同じて
は、二重間隙率「岩石マトリクス拡散」(RMD) プロセス	う)であることを仮定して得た値である。したがって処分場スケ	あるが、流動概念を組み合わせたものを
のもとにある。	ール・モデルでは、岩塩の移流による移行やマトリクス撒は生	使用する。しかし、スケールが異なって
• 紀元前 8000 年から西暦 1000 年までの期間において、	じないことになる。すなわち、塩分濃度場は固定されている。	いることから、この流動概念の組み合わ
分場区域は海水中(リットリナ海)に没しており、長い	• 処分場スケール・モデル領域の物理的寸法は、計算作業面で (せは、処分場スケール・モデルのそれと
期間にわたり海水で覆われていた。 西暦 1000 年から西	制約のために限定せざるをえない。このため、3つの処分場	は若干異なっている。この点で、流動概
暦 12000 年の期間には陸地条件が優勢であり、地下水は	ブロックを使用することにした。それぞれの処分場ブロックに	念が公式に埋めこみアプローチ(このア
天水によるフラッシングにさらされる。現在から西暦	ついて導き出された圧力溶解は、処分場を取り囲む亀裂を伴う	プローチでは、圧力と物質フラックスの
12000 年までの期間の海岸線の変位によって、当該区域	岩盤の離散亀裂ネットワーク・モデル(DFN)媒体の表現に	両方の連続性が拘束方程式を用いて確保
は鉛直方向に、合計で約 40m 上向きに変位することにな	基づいている。この点で、処分場スケール ・ モデルで実現された	される)を通じて組み合わせていること
る。	処分場の特徴の一部(すなわち、斜坑、立抗、中心区域及び搬送	を指摘できる。
• 広域スケール・モデルからの出力情報は、圧力、塩分	と 坑道)を個別方式でモデル化する一方で、その他(すなわち処	 サイトスケール・モデルに関しては、定
度、地下水成分の濃度、レファレンス水の比率、流体密	分孔、処分坑道及び主要坑道)を連続多孔質媒体としてモデル	常状態圧力溶解が、処分場スケール・ モ
度から構成される。レファレンス水の塩分濃度及び比率	化している。	デルの場合と同じ方法により、あらかじ
は、処分場近辺の化学条件の分析に対する入力情報とし	・処分場スケール・モデルからの出力情報は、2種類の性能尺	め定義された時間断片について導き出さ
て使用する。シミュレーションした圧力及び密度は、よ	度	れる。したがってサイトスケール・ モデ
り詳細なモデル・スケール(すなわち、処分場スケール	(performance measures) によって構成される。	ルでは、広域スケール・モデルの 場合
及びサイトスケール)で実施する地下水流動モデル化の	1. 「累積移流移動時間」(tw[T])及び「流動関連移行抵抗 ¹ 」(放	とは対象的に、塩の移流移行やマトリクス
初期条件及び境界線条件を定義するために用いる。	出粒子のF[TL ⁻¹])	拡散は起こらない。
	2.処分孔位置における「ダルシー・フラックス」(q[LT ⁻¹])及	
	び「等価流動速度」 (Q _{eq} [L ³ T ⁻¹])	

¹流動関連移行抵抗は、亀裂内を移行する溶質に起こり得る保持の流動に関連する側面を定量化するエンティティの一つであり、1本の流動経路沿いに積分される。流動 関連移行抵抗が現在の分析で計算方法に関する記述は、文献(Joyce et al., 2010)に示されている。またそのまとめが、『データ報告書』と文献(Selroos and Follin, 2010)に示されている。さらに流動関連移行抵抗に関する包括的な、そしてより一般的な記述は、例えば文献(Crawford and Sidborn, 2009)に見ることができる。
2) 地下水組成(塩分)

採掘段階および操業段階における地下水移行のモデル(R-09-19)では、Darcy tools によってモデル化を行い、塩分濃度の変遷を評価している(Svensson and Follin, 2010)。ここでは、評価の条件と評価結果の概要についてまとめる。

評価の条件

掘削段階と操業段階におけるシミュレーションとして、塩分濃度は、モデル化された処分場 から数キロ程度離れた領域で定常化するとしている。この定常領域における塩分濃度は、海岸 線の変位シミュレーションと、完新世の期間、すなわち紀元前 8000 年から 2000 年の間の Forsmark 地域のバルト海の塩分の変化から導出される。(図 2-29)



図 2-29 紀元前 8000 年から 2000 年における海岸線と塩分濃度の推移(SKB R-09-19 (Svensson and Follin, 2010))

モデル領域の横方向の表層は、完新世の期間に不浸透性の境界(流れも塩の拡散もない) としてモデル化され、紀元前 8000 年の初期条件は、SDM で使用された条件に準拠してい る(表 2-49)。

表 2-49 想定される初期条件における塩分濃度(紀元前 8000 年時点)(SKB R-09-19 (Svensson and Follin, 2010))

領域	深度間隔 初期塩分濃	
下盤(footwall)	地表~-350m	0%
	-350m~-1,500m	7.2%まで直線的に増加
	-1,500m以下	7.2%
その他の場所	地表~-500m	0%
	-500m~-2,300m	7.2%まで直線的に増加
	-2,300m以下	7.2%

モデル領域の上面の地上部分では、すべてのシミュレーションで平均降水量 130 mm/y (真水)が固定最大値として与えられる。同様に、モデル領域の底面は、すべてのシミュレーションで塩分が固定された不浸透性の境界としてモデル化される。

② 評価の結果

図 2-30 は、西暦 2000 年において、-465m における塩分の重量%のシミュレーション結 果を示す。x=5,500、y=6,500 を中心とする図 2-30 の領域は、下盤(footwall)の目標体積

(target volume) と一致しており、Forsmark の最終処分場の母岩として提案されている。

目標体積における塩分量のシミュレーションの結果は、1%未満となっており、Forsmark にて 実施されたコアボーリング(7か所で実施)における総溶解性固形物(TDS)の濃度と 比較しても、類似した結果となることが確認されている(図 2-31)



図 2-30 西暦 2000 年における深さ 465m 地点での塩分濃度の評価結果(SKB R-09-19 (Svensson and Follin, 2010))



図 2-31 Forsmark でのコアボーリングにおける総溶解性固形物の測定結果 (SKB R-09-19 (Svensson and Follin, 2010))

また、グラウトレベルII (grouting level 2) および操業段階 C (operation stage C) に おける、処分場の深さに対する塩分分布についても評価されている。図 2-32 に、各深さに おける塩分分布を示す。深さ 465m (図 2-32 の中段)のシミュレーション結果では、下部 から塩分濃度の高い地下水が、主に立坑および斜坑が配置されている処分場に流入するの に対し、レイアウトの他の部分の地下水組成はより希釈されているとみられ、すなわち、処分 場の上部に存在する、塩分濃度の低い地下水の影響を受けることを示唆している。

一方で、深さ 300m (図 2-32 の上段)のシミュレーション結果では、塩分濃度が初期濃 度よりも高い地下水が、掘削段階および操業段階に浸透する可能性があることを示唆して いる。このような塩分濃度の高い水源は、汽水バルト海と考えられ、流入源となり得る箇所は、 シート結合部と考えられる。



図 2-32 深さ300m(上段)、465m(中段)、600m(下段) における塩分濃度の評価結果 (左図:処分場建設前の条件、右図:グラウトレベルIIの操業段階 C 終了時の条件) (SKB R-09-19 (Svensson and Follin, 2010))

3) パイピングエロ—ジョン

スウェーデンのセーフティケース報告書(SR-Site)及びその下位文献(TR-10-47)では、 パイピング/エロージョンについて、地下水流動解析や、実験室もしくは原位置における試 験の結果に基づき、下記の処分構成要素について、パイピング/エロージョンによる定量及び 定性的な影響評価を実施している(SKB, 2011; SKB, 2010a)。

- 緩衝材
- ② 処分坑道埋め戻し材
- ③ プラグ
- ④ 処分場中央エリア埋め戻し材
- ⑤ 上部閉鎖材 (top seal)
- ⑥ 底板 (bottom plate) ※処分孔底部を十分に平坦なものとする目的で設置
- ⑦ ボアホールシール

上記のうち、定量的な影響評価が報告されている要素は、①及び②であり、パイピング/ エロージョンによる緩衝材及び埋め戻し材に使用されるベントナイトの浸食による累積重 量を評価している(さらに②の評価方法は、①と同様であることが示されている)。このた め、ここでは、緩衝材及び埋め戻し材についてのみ対象とし、その評価手順(流れ)は下記の 通りである。以下に、評価手順(流れ)の各構成要素における記載内容の概要をまとめる。

- 設計要領に従う処分孔の選定
- 処分孔並びに処分坑道内の間隙容量の把握
- 浸食試験結果を踏まえた指数モデルの開発
- パイピング/エロージョンによる浸食累積量の評価

設計要領に従う処分孔の選定

セーフティケース報告書(SR-Site)において、水の流入によるベントナイトの喪失が 100kg を上回らないよう、処分孔に流入する水の制限は 150m³と設定されている(SKB, 2011)。ただし、現在(報告書作成時)のところ、処分孔と交差する亀裂の透水量係数の具 体的数値は設定されておらず、「十分低くあるべき」とされているのみである。

この設計要領に従い行われた基本設計では、上記制限を満足するために、下記の基準に基づく処分孔の選定が行われることとされた。

・流入速度が 0.1L/分を上回る処分孔は回避される

この選定基準に基づき、候補サイトで基本ケースに関するリアライゼーションと EDPM(equivalent discontinuous porous medium : 等価不連続多孔質媒質)グリッドモ デルを利用した結果、選定基準を満足しない処分孔は、全数 6,916 ヶ所のうち、88 ヶ所と 評価されている。(図 2-33)



図 2-33 合計 6,916 ヵ所の処分孔位置のうちの選定基準に適合しない 88 ヵ所の 処分孔位置の図解(SKB TR-11-01(SKB, 2011))

② 処分孔並びに処分坑道内の間隙容量の把握

セーフティケース報告書(SR-Site)及びその下位文献(TR-10-47)によれば、処分孔から坑道に至る、またある程度まではプラグを介して外部に至る浸食物質の移動は、ある程度まで、浸食を引き起こす水の総量に応じて変化する(SKB, 2010a)。このため、緩衝材と埋め戻し材に使用されるベントナイトペレット充填材に存在する空隙の容量を把握することが重要となる。全長 300m、50 か所の処分孔を含む処分坑道の緩衝材及び埋め戻し材の総間隙容量は約 1,050m³と見積られている。現在(SR-Site 報告書作成時)のところ、プラグがどの程度の健全性を維持できるかは原位置試験などを通じて今後検討されるが、仮に坑道内の20%の水がプラグを介して流入するとすれば、坑道内に流れ込む可能性のある総水量は、約 1,250m³と推察されている。

③ 浸食試験結果を踏まえた指数モデルの開発

セーフティケース報告書下位文献(TR-10-47)によれば、様々な異なる物質や条件によ る浸食試験結果に基づき、浸食されるベントナイト累積量は、浸食を引き起こす水の累積量と の関連性があることが分かっており(図 2-34)、その関係は、次式として提案されている (SKB, 2010a)。

 $\mathbf{m}_{\mathrm{s}} = \beta \cdot (\mathbf{m}_{\mathrm{W}})^{\alpha}$

ここで、

m_{s} :	浸食されたベントナイトの累積重量	(g)
m_w :	浸食を引き起こす水の累積重量	(g)
β :	0.02~2.0(一定の累積水流における浸食レベルにより定義)	(-)
α :	0.65 (msと mwの間の直線関係の傾きにより定義)	(-)

④ パイピング/エロージョンによる浸食累積量の評価

上述の「②処分孔並びに処分坑道内の間隙容量の把握」に基づき、坑道内に流れ込む可能性 のある総水量を約 1,250m³ と見積られる場合で、極端な試算(流入した水の全量が 1 本の 処分孔に流入した場合)では、浸食されるベントナイト重量は、16.4~164kg となる。ただ し、「①設計要領に従う処分孔の選定」で受け入れられた処分孔の場合、流入量の制限 (150m³)を下回るため、この結果として 4~41kg となると見積もられている。

また、処分坑道については、発生しうる最大の浸食累積量は 1,640kg と試算されていた。しかしながら、全長 300m の処分坑道で使用される埋め戻し材の総量は約 10,200t であり、1,640kg 程度の浸食量は埋め戻し材の性能に関して無視できるとされている。



図 2-34 様々な浸食試験結果に基づくベントナイト浸食累積重量と浸食を引き起こす水の累積重量との関係
 (SKB TR-10-47 (SKB, 2010a))

2.1.3 国外における先行的な検討事例の調査—スイス

(1) 人工バリアシステムの概要

スイスにおける地層処分場のサイト選定は、Nagra と地元州の専門家グループの間でオ パリナス ・ クレイが好ましいと合意し、次のプロセスとしてボーリング調査の掘削許可を申 請している段階である。

スイスにおける地層処分場のイメージを図 2-35 に示す。図 2-35 は、透水性の低いオパ リナス • クレイ層の中央に処分場を配置した場合のイメージであり、使用済燃料 (SF)、高 レベル放射性廃棄物 (HLW)、および長寿命中レベル廃棄物 (ILW)の3種類の廃棄物が処分 されることを示している。処分場に設置される人工バリアには以下の3点の安全機能が定 められている。

- ▶ 環境からの隔離
- ▶ 放射性核種の長期閉じ込め
- ▶ 崩壊および、環境への放出の低減

この安全機能を満たすため、Nagra では SF(使用済燃料) / HLW(高レベル放射性廃 棄物)/ ILW(長寿命中レベル廃棄物)のそれぞれに対して、安全基盤を割り当てている。 図 2-36、図 2-37 に、本検討に関係する SF、及び HLW の人工バリアシステムに対する安 全基盤の割り当てを示す。

上記のようにスイスでは、人工バリアに期待する機能を安全基盤として記載しており、フィ ンランドやスウェーデンのように「人工バリアの定義」といった単語は使用していない。



図 2-35 スイスにおける処分場レイアウト (NTB-16-02_Fig4-5 (Nagra, 2016))



図 2-36 SF における人工バリアシステムの安全基盤 (NTB-16-02_Fig4-1 (Nagra, 2016))



図 2-37 HLW における人エバリアシステムの安全基盤 (NTB-16-02_Fig4-2 (Nagra, 2016))

- (2) 性能評価の位置付けや流れなど
- 1) セーフティケースにおける位置付け

スイスにおける性能評価の調査のため、"TECHNICAL REPORT 02-05"を参考にし、 調査結果を以下にまとめた(Nagra, 2002a)。

"TECHNICAL REPORT 02-05"ではセーフティケース構築の手順を"Project Entsorgungsnachweis報告書(廃棄証明プロジェクト報告書)"から引用しており、図 2-38 のように示されている。図 2-38 は、セーフティケース、すなわち、チューリッヒ ・ ワイン ランドのオパリナス・クレイにある SF、HLW、および ILW の処分場の長期的な安全性を 検討するための簡略化されたフローチャートを示している。性能評価に関する記載は、5 章 にシステム変遷として処分場構成要素の変遷に関する記述がみられ、続く 6 章では安全評価を実施するための評価ケースの特定、7 章は安全評価(処分システムの性能評価との名称 は用いているものの、実態は安全評価)が実施される。

このため、本業務にて対象とする性能評価は、5章(赤フォント)に含まれると判断した。



図 2-38 セーフティケース構築のための概略(NTB-02-05(Nagra, 2002a))

2) 性能評価期間の考え方

スイスにおける評価期間の設定は、「最長で 100 万年までの期間とする」とある。関係す る記述を"TECHNICAL REPORT 02-05" § 2.6.4.3 より抜粋し表 2-50 に示す (Nagra, 2002a)。

表 2-50 スイスの性能評価期間の考え方に関わる記述

(NTB-02-05	§ 2.6.4.3	(Nagra, 2002a))))
------------	-----------	----------------	----	---

抜粋元	内容
TECHNICAL REPORT 02-05	- 廃棄体は、重大な危険をもたらす期間にわたって
§2.6.4.3 解析実施のための体系的	処分システムの安全性を評価されなければならな
かつ定義された手法	い。HSK-R-21 指針が要求しているように、遠い将
	来まで定量解析が行われなければならない。ただし、
• 評価において考慮すべき時間ス	結果の分析を行う際には、モデルの適用性の限界に
ケール	ついて認識しなければならない。この解析では、
	HLW に関する Nagra の先の安全評価 (Nagra
	1994a)におけるように、主な焦点は <u>最長で 100 万</u>
	<u>年までの期間とする</u> 。また解析は、システムが良好
	な性能を担保する百万年を超えて、更に数百万年持
	続するという議論によって補完される。よって、遠
	い将来に対していくつかの仮定はもはや適用不能で
	あるかもしれないことが認識されてはいるが、 <u>定量</u>
	計算は最長で 1000 万年まで行われる。

3) 性能評価の流れ

"TECHNICAL REPORT 02-05"の5章に性能評価の流れに関する記載が見られる (Nagra, 2002a)。Nagra が設定する性能評価は、以下の手順により実施される。

- ① 前提条件(処分場システムや安全機能((1)参照))に対して、OPA FEP の開発・分析や専門家との議論に基づき、安全性に最も関係のある現象(本業務における性能評価項目とみなした)の特定を行う。
- ② ①と並行して評価期間の設定を行う。使用済燃料の放射能毒性が天然ウランレベルまで低下する期間が 100 万年オーダーであるとの結果から、この期間は処分場システムも使用済燃料を人間環境から隔離すべきとされ、100 万年間が設定されている。
- ③ 各性能評価項目の評価を実施し、安全概念の記述に資する。安全概念とは、処分場シ ステムがどのように安全性を提供するかを定性的に記述したものであり、システムの 特性及び変化に関する現実的に考えられるあらゆる可能性に対して、安全機能が適切 なレベルの安全性を提供することを示すものである。

関係する箇所を抜粋し、表 2-51 に示す。また表 2-51 の内容を参考にし、性能評価の流 れを図 2-39 に整理し示す。

表 2-51 スイスの性能評価の流れに関わる記述

(NTB-02-05 § 5.1 (Nagra, 2002a))

	抜料	华元	内容
TECHN	IICAL	REPORT	安全評価計算の時間枠は約百万年である。本項は、こ
02-05	\$5.1	本章の目的と	の期間にわたって処分システムのすべての構成要素が
範囲			どのように変化するかの記述に焦点を当てたものであ
			る。主要なシステム構成要素について、重要な現象(温
			度関連、放射線関連、水理、力学、化学及び生物学的な
			現象)とそれらについて予測される時間変化が記述さ
			れ、各種構成要素に対して予測される影響についての議
			論が行われる。これによって、処分場に関して予測され
			る、変化経路が導かれる。種々の現象、それらの発生時
			期、及びそれらとその他の現象との相関に対して割り当
			てられた不確実性の程度に基づいて、変化に存在する
			『予測される変化からの偏差』と呼ばれる不確実性につ
			いても論じられる。それらは、安全機能に寄与する重要
			な現象(安全基盤)について論ずるための基盤となるも
			のであり、そこから評価ケースの策定(第6章)及び評
			価(第7章)と進んでいく。最初に、システム変化に対
			する気候、地表環境及び地質に関わる境界条件が提示され
			る。これには隆起/浸食、気候変動、ネオテクトニク事象
			などのような長期的なプロセスも含まれる。次いで、
			廃棄物の存在によって引き起こされ、境界条件によって
			影響を受けるニアフィールド及びファーフィールドの
			変化について、核種の移行に関わるあらゆる側面を含め
			て議論される。ニアフィールドとは、EBS、及び、廃棄
			物の存在と掘削によって誘発される熱、水埋、化字及び
			力字的な変化による影響をかなり受ける廃棄物処分坑
			道直近周辺の岩石領域(坑道から数 m までの範囲) と
			定義されている。ファーフィールドとは、この範囲を超
			えた、上述したような影響が十分に小さい母岩及び地圏領
			域とされている。
			処分システムについて予測される変化の記述は、安全性
			に最も関係のある現象についての解析及び専門家の判
			断に基ついたものである。こうした現象は、3.7.4 節及び
			3.7.5 前で概記した FEP (特性、事象及びプロセス) 手
			順を通して、また種々の専門家との議論を通して特定さ
			れたものである。FEP 手順については Nagra(2002c)
			の中でより詳細に議論されている。



(上記表 2-51 及び NTB-02-05 § 3.7.2 の記述を基に作成(Nagra, 2002a))

Nagra "TECHNICAL REPORT 02-05"においては、2章で処分場の選定と安全評価に 関する指針や原則を定めており、3章で安全評価に至るまでの手順が示されている(Nagra, 2002a)。この手順により、処分場が安全であり関連するすべての安全基準に適合する、と いった裏付けが示される。4章では処分システムの特性について示しており、5章のシステ ム変遷(性能評価)の評価に用いられる。5章はシステム変遷として処分システムのすべて の構成要素がどのように変化するかの記述に焦点を当てており、主要なシステム構成要素 が温度、放射線、水理、力学、化学及び生物学的な現象と、それらについて予測される時間変化 が記述され、各種コンポーネントに対して予測される影響について示されている。

Nagra における性能評価の流れは 5 章の目次構成の通りと考え、以下の表 2-52 に、

"TECHNICAL REPORT 02-05"の全体目次構成と 5 章(赤枠部分)を示し、表 2-53~ 表 2-55 に、5 章のさらに細分化した目次構成を記載し、性能評価項目の抽出に至る流れを示す。

表 2-52 "TECHNICAL REPORT 02-05"の目次構成(Nagra, 2002a)

目次構成
1はじめに
2 処分システムの選定と安全評価に関する指針及び原則
3 セーフティケースの構築手法
4 オパリナス・クレイ中のSF/HLW/ILW 処分システム記述
5 システム変遷
5.1 本章の目的と範囲
5.2 気候,地表環境及び地質条件
5.3 SF/HLW のニアフィールドの変遷
5.4 ILW のニアフィールドの変遷
5.5 ファーフィールドの変遷
5.6 処分場の変遷に対する想定外の人間活動の影響
5.7 処分場システム変遷の概要
5.8 選定された処分システムに関する防護及び長期安全性に関する目標への適合性
6. 安全概念及び評価ケースの特定
7. 処分システムの性能の評価
8. セーフティケース:主要な議論と結果
9. 結 論
付録 1 決定論的及び確率論的評価計算におけるパラメータ値,確率密度関数及びその適用
付録 2 評価ケースを評価するための重要データ
付録 3 代替安全・性能指標の背景
付録 4 セーフティケースの構築における様々なグループの役割及びグループ間交流
付録 5 用語の定義
参考文献

大項目	中項目	小項目	性能評価項目の抽出
本章の目的と範囲			
気候、地表環境及び	気候変動、地表環境の変遷	はじめに	
<u>地質条件</u>	及び将来の人間生活に関す	気候変動	
		地表環境の変遷	
		<u>将来の人間生活に関</u> する仮定	
地質条件の変遷	はじめに		
	オパリナス・クレイの圧密		
	<u>度及び水理学的な過圧変</u> 化		
	母岩特性及び水理状況に 対する隆起浸食の影響		
	地質学的な低頻度事象の 潜在影響		
<u>SF/HLW のニア</u>	放射線学的な関連プロセス	使用済燃料	・放射性崩壊と崩壊熱
<u>フィールドの変遷</u>			・臨界
		111 117	• 放射線損傷
		<u>ΠLW</u> ス測さわてお射始学	•
		的な関連挙動からの	
		<u> </u>	
	SF/HLW のーノフィール ドにおける泪底亦化	<u>」「例される変化</u> 予測される効的労動	
		<u>」がしていていたいですができました。 からの逸脱</u>	
	SF/HLW のニアフィール	ニアフィールド母岩	・掘削の影響
	下における水理変化	<u>及びヘントナイト理</u> め戸しシステムの亦	・ニアノイールトの心水 ・ガスの発生とベントナイ
		<u>の戻しシハアムの変</u> 遷	ト中の移行
			・予測される流体力学的挙
			動からの偏差
		SF/HLW キャニスタ	・予測されるキャニスタの
		の水理変化	流体力学的挙動からの偏 差
	SF/HLW のニアフィール	SF/HLW のニアフィ	• 概観
	ドの化学変化	<u>ールドの間隙水化学</u>	 ニアフィールド内の酸化 ニタルの変化
		<u>の変化</u>	退元余件の変化 ・-アフィールドで予測さ
			れるレドックス化学から
			の偏差
		<u>ベントナイトの間隙</u>	・ニアフィールド内のベン
		水組成	トナイト間隙水の変化
			・予測されるニアフィール
			ト内间隙水組成からの偏 差
		ベントナイトの鉱物	 ・予測されるベントナイト
		学的変化	の物理化学的挙動からの 偏差
		SF/HLW キャニスタ	・予測されるキャニスタ腐
		<u>の腐食</u>	食挙動からの偏差

表 2-53 システム変遷 詞	評価手順(1/3)
-----------------	-----------

大項目	中項目	小項目	性能評価項目の抽出
SF/HLW のニア	SF/HLW のニアフィール	破損後のSF キャニス	・ジルカロイ及びその他の
<u>フィールドの変遷</u>	ドの化学変化	タ内での化学プロセ	金属部品の腐食
		<u>7</u>	・核分裂生成物及び放射化
			生成物の選択的浸出
			・燃料マトリクスの溶解
			・揮発性放射性核種の生成
			 予測される SF の放射性
			核種放出挙動からの偏差
		IIIWの密紹	- 研想後の HIW キャーフ
		<u> IILW の俗件</u>	タ内での化学プロセス
			 予測される HLW ガラスの
			腐食挙動からの偏差
		SF/HLW のニアフィ州	マ・キャニスタ/ベントナイ
		ドにおける化学プロ	トリング境中での放射性
		セスと核種移行	核種の沈殿
			・ベントナイト埋め戻し材
			中での拡散と収着
			・予測されるニアフィール
			ド内核種移行挙動からの 偏差
ファーフィールド	立坑及び坑道シールの変遷		 ・予測される変化からの偏
の変遷			差
	オパリナス・クレイ中での	オパリナス・カレイロ	・淡左ガスの移流及び扩散
	ガス移行	でのガスに上ろ核種	• 一相流
		移行メカニズム	
			・微小なガスフラックの形
			成
		SF/HLW 処分坑道で	
		のガスの蓄積と坑道	
		からの移行	
		予測される変化から	
		<u>の逸脱</u>	
	ファーフィールドの核種移	処分場再冠水後の水	・予測される変化
	<u>行条件の変化</u>	<u>埋状况</u>	・代替変化
		オパリナス・ クレイ	・予測される変化
		中での核種移行	
		ファーフィールドで	・ オパリナス ・ クレイ中の
		予測される移行条件が	核種移行に対する割れ目
		<u>らの逸脱</u>	流れの影響
			・オパリナス・クレイへの
			F 190 の収益がパッ
			129の収有かて口
			 シテーショールトでの放 射性核種の淡解阻度
			• 放射性核種の収差に対す
			る高 nH プルームの影響
			・斜坑及び立坑を诵した流
			n
			・ファーフィールドの酸化
			還元条件影響
			・コロイドによる移行の促
			進

表 2-54 システム変遷 評価手順(2/3)

大項目	中項目	小項目	性能評価項目の抽出
処分場の変遷に対			
<u>する想定外の</u> 」 問題新の影響			
人間活動の影響	王妹バリアみバトエバリア		・オポリナフ・カレイ
<u>処力場システム変</u> 凄の概要	の長期性能に関する証拠の		・オハリテス・クレイ
	概要- ナチュラルアナロ		・キャニスタの腐食
	グとフィールド研究		•使用済燃料
			・放射性核種の溶解度
	<u>処分システム変遷の予測と</u> その逸脱の概要		
選定された処分	全般的な処分原則		・受動的安全性と防護
<u>シ</u> ステムに関する	サイト及び設計に関する原		・多重の受動的バリア
防護及び長期安	<u>則</u>		・バリアシステムによって
全性に関する目			提供される多重の安全機
<u>標への適合性</u>			能
			・バリアシステムの安定性
			と女寿仰性
			明告先家の回歴及の有音
			・人間侵入の可能性とその
			影響の低減
	処分場の立地に関する原則		・安定性
			・好ましい母岩特性
			・探査(調査) 可能性 ・予測可能性
	処分場の設計及び実施に関		・封じ込め及び緩和
	<u>する原則</u>		 SF 及びHLW に対する完
			 ・冗長性(有害現象及び不)
			確実性に対する感度のな
			さ)
			・実施の信頼性及び実証済
			みの技術・材料への依存
			・実施の柔軟性
			・ モニタリンクを取り入れ た 宇旋のための注音深
			い。安心のための在息休
			・処分場閉鎖の信頼性

表 2-55 システム変遷 評価手順(3/3)

(3) 性能評価項目の整理

1) 性能評価項目の選定方法

(2) 3) にて抽出された性能評価項目は、FEP を参照しつつオパリナス・クレイ条件 での性能評価項目としてさらに精査される。(図 2-39 参照)。よって本項では、Nagra が作 成した性能評価項目の精査に用いる、オパリナス ・ クレイの FEP (OPA FEP) 作成方法に ついて記述する。

オパリナス・クレイの FEP (OPA FEP) は、"TECHNICAL REPORT 02-05" § 3.7.2 によれば、国際 FEP リストを監査し、作成すると示されている。この選定作業では、処分 システムとその性能に関する幅広い知識を持つ評価専門家が、特定の設計オプション、地質環 境の特性、およびその安全性に基づいて、処分システムとその安全性の理解に照らしてスクリ ーニングを実施する。このスクリーニングにより、482 項目の国際 FEP リストのうち 35 項目が除外され、オパリナス・クレイの FEP (OPA FEP) リストとして 447 項目まで 絞り込まれる。専門家により除外された 35 項目のスクリーニング結果の要約を表 2-56 に 示す。

また、オパリナス・クレイの 447 項目の全 FEP リストは、 "NTB-02-23_Appendix2"に 記載されている (Nagra, 2002c)。

表 2-56 オパリナス・クレイの FEP (OPA FEP) スクリーニング結果の要約

(NTB-02-23_Table3.4-1 (Nagra, 2002c))

スクリーニング理由	
FEP (OPA FEP) カテゴリ番号と名称	カテゴリ内の番号と名称
設計またはサイト選択による回避	
5.3 ILW 埋め戻しとコンクリートライナ	1.05.1 排水システム
11.地質 P&E(ENVIRONMENTAL	2.10 熱水活動
PROCESSES)	
保守的に軽視されている	
8.坑道と立坑	3.02 基本的な溶解度
10.生物圈	2.04 ろ過
すべての場合に保守的な仮定が含まれる	
2.2 使用済燃料	4.03 破損した燃料
設計によって回避される効果[1]	
2311W 廃棄休お上びパッケージ	401 SF / HLW との共同処分の影響
11ベントナイト経術材	1019HCBブロックの構造更表の庭食
2.1 シーンケール仮国内	1.01.2 HOD / ビノノの神道安示の病長 4.01 ナイルまたけ右地流体の法由
0.りに追こ 立りに	4.01 オイルまたは有機(()体の) 加山
他の FEP と比較して無視できる	
6.1 Bentonite-母岩境界面	1.01.1 ロックボルトと金網
6.3 コンクリートー母岩境界面	1.01.1 ロックボルト
7. オパリナス・クレイ母岩	2.05 微生物活動
無視できる効果[2]	
41ベントナイト緩衝材	2.07 微生物活動
61ベントナイトー母告増界面	1.07 微生物活動
63 コンクリートー母と一日の一日の一日の一日の一日の一日の一日の一日の一日の一日の一日の一日の一日の一	1.07 微生物活動
8 抗道と立抗	1.07 版上初语動 4.04 ILW からの化学プルーム(Chemical plume)
E 期的か安全性に対する毎月できる影響[9]	
	4.09 ハンノドリング中の東海
2.1 111.1 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1	4.02 小 γ
2.2 使用例約杯 93 HW 感報休な上びパッケージ	4.02 ハンドリング 〒07 \mp 00 4.00 9 ハンドリング 中の 車故
オポリナフ カレイズけ知夜されたい	4.00.27 9 1997109事成
	1 10 方解石の不相則か符
加八相条件では防理的にて可能	
	4.09 技の喧思
2.3 ILW 廃来(やわよし、ツリーン 11 ベントナイト経衛は	4.03 核の确介 9.00 ベントナイトエロージョン
4.1、シーノイト版画内	
評価されしていないオノンヨン[3]	2.02.0日/1日1141/11/2/2121/11/11/11/11/11
1.0 配直と設計	3.03 SF / HLW 処分ハイル・代替設計
1.0 能 単 こ 政 司	0.001LW 观历外担气\省祆矸
2.2 使用済燃料	1.07 化字的に有毒な汚染物質
2.3 ILW 廃棄体およびバッケージ	1.03 化字的に有害な成分
10.生物圏	4.02 非放射線影響
10.生物圏	4.03 生活圏以外に対する放射線の影響
13.将来の人間活動	2.02 表面汚染(土壤、河川)
13.将来の人間活動	2.03 地下水汚染
13.将来の人間活動	3.03 処分の記録、マーカー
オパリナス • クレイでの観測により除外[5]	
7. オパリナス・クレイ母岩	4.04 塩水地下水の侵入
8. 坑道と立坑	4.03 塩水地下水の侵入
HSK/KSA 規制により除外	
13.将来の人間活動	3.01 意図的な侵入
13.将来の人間活動	3.04 計画の制限

スクリーニングの理由の詳細な説明:

[1] 設計は、重大な影響の可能性を回避するように調整される。

[2] 重大な影響は予想されない。

[3] 評価で考慮されていない代替設計コンセプトを指す。

[4]評価の範囲外のシステム要素、オプション、またはエンドポイント。

[5] サイトの理解によると、システムには関係ない。

表 2-56 のスクリーニング作業を行った結果、**TECHNICAL REPORT 02-05**" § 5.7.2 では処分システムの安全性に関連する重要な特性及び現象を以下の3つのカテゴリごとに振り分け、性能評価項目の整理を行っている(Nagra, 2002a)。性能評価項目の整理に関する箇所を抜粋し、表 2-57 に示す。

1. レファレンス処分システムの通常の変化及び偏差に関わるもの

2. システム設計基準および設計代替案の挙動に関わるもの

3. 推測的な現象(人間活動あるいは地表環境の変化を含む)

表 2-57	′ スイ	′ スの性能評価項目	の整理に関す	る記述
--------	------	------------	--------	-----

(NTB-02-05 § 5.7.2 (Nagra, 2002a))

抜粋元	内容
TECHNICAL REPORT	処分システムの安全性に関連する重要な特性及び現象が、
02-05 §5.7.2 処分システム	予測される変化、また不確実性及び可能性のある偏差ととも
変遷の予測とその逸脱の概要	に,表 5.7-1 (本報告書の表 2-58) にまとめられている。以
	下に示す 3 つのカテゴリの現象/変化を定義することがで
	きる。
	1.レファレンス処分システムの通常の変化及び偏差に関わ
	るもの
	2.システム設計基準および設計代替案の挙動に関わるもの
	3. 推測的な現象(人間の行動あるいは地表環境の変化を含
	む)に関わるもの
	こうした現象及び変化が、第6章(安全概念及び評価ケー
	スの特定)及び7章(処分システムの性能の評価)で記述さ
	れる評価ケースを策定するためのベースを提供する。
	偏差の影響が及ふ範囲は図 5.7-1 (本報告書の図 2-40) に
	よとめられている。本車で慨説されているような丁測される変
	化ンナリオは、図の頂部を傾切っている緑色のホックスで表現
	されている。このシナリオでは、粘土ハリナ(すなわら、ヘン
	トフィトとオハリフス ・ クレイの総体) は発生する現象によ
	つくはどんと愛乱を受けり、非常に反射間にわたり核種の移
	けを削減することによつし廃業物を効果的に隔離する。処分 相歴的に影響な及ばまたとゆて重要現象に対して予測され
	場性能に影響を及ばりめりゆる里安呪家に対してア側され て亦化からの原業が、た側の別に手されていて、個々の現象
	る変化からの偏左か、左側の列に小されている。個々の現象
	に刈して、てい影響が及ぶり能性ののる範囲が傾降(ハー)で テキれている 個うげ 代鉄気信は生物図のなに影響すての
	小C40 (いつ) 別んは、11官以医は主初圏のみに影響りるの で 構体けての範囲だけに引かれている 希公けけ 旦当た
	く、1期124はこの範囲にりにりになんです。 「「「「「「」」に当れていた」」である」を教行(正)
	$[$ $c_{\rm AX}$ し、 $m_{\rm V}$ '1 $m_{\rm H}$ '1 $m_{\rm H}$ " what II :] $\gamma = \Lambda$ しのることを衣しし
	いる。

2) 性能評価項目の一覧

① 性能評価項目一覧

1) に示した性能評価項目の選定方法により、Nagra では性能評価項目(文献中では「安全機能に寄与する重要な現象」として表記される)が設定されている。

Nagra における性能評価項目は、予測される変化、また不確実性及び可能性のある偏差 とともに以下の 3 項目ごとに取りまとめるとしている(前述の表 2-57 参照)。

- 1. レファレンス処分システムの通常の変化及び偏差に関わるもの
- 2. システム設計基準および設計代替案の挙動に関わるもの
- 3. 推測的な現象(人間活動あるいは地表環境の変化を含む)

上記 3 項目それぞれの性能評価項目のまとめは、"TECHNICAL REPORT 02-05" § 5.7.2 の Table.5.7-1~3 にまとめられているため、本項ではそれらを以下の表 2-58~表 2-60 に示す (Nagra, 2002a)。また偏差の影響が及ぶ範囲をまとめた図を抜粋し図 2-40 に示す。

衣 2-50 起力シスプム支援に固定する主要な特に及び現象(レンデレンス起力シスプム	表 2-58	処分システム変遷に関連する重要な特性及び現象	(レファレンス処分システム
--	--------	------------------------	---------------

安全関連の特性、	現象及び変化			
システムコンポ 安全機能に寄与す ーネント る重要な現象		予測される変化	不確実性及び考えられる偏差	
処分場	処分場レイアウ ト、全廃棄物イン ベントリ及び設計	レファレンス設計パラメー タ。60年間運転による廃 棄物インベントリ(現在の 発電所のみ)	より大きな廃棄物インベントリ (300GWa(e)の発電)に対する代替レ イアウト	
	SF/HLW/ILWの EBS:設計パラメ ータ	レファレンス設計パラメー タ	設計代替案を参照	
使用済燃料	放射能インベント リ及び崩壊プロセ ス (熱及び放射 線)	放射性核種のインベント リ。半減期及び崩壊熱は明 瞭。3種類のキャニスタ・ インベントリ(BWR UO ₂ 、PWR UO ₂ 及びPWR MOX/UO ₂):平均燃焼度 48GWd/t _{IHM}	各キャニスタタイプには、IRFの変化 性、燃焼度の変化性あり。	
	被覆管の破損及び 腐食	短期破損(亀裂)の可能 性。部分破損した被覆管か らの緩慢な放出。ジルカロ イからの放射化生成物の緩 慢な腐食速度律速放出。被 覆管の酸化膜からの有機 14Cの優先的な放出		
	IRFの浸出	キャニスタ破損時のIRFの 溶解	MOX燃料及び高燃焼度UO2燃料のIRF に関する情報が限定的	
	SFマトリクスの 溶解	H₂の還元能力による極め て遅い溶解速度(溶解度コ ントロール)での溶解	a放射線分解による燃料表面での酸化 条件の形成(溶解速度はa放射能に比 例して低下)。燃料マトリクスからの有 機 ¹⁴ Cの優先的な放出。高酸化剤収率を 仮定した『What if?』ケース	

の通常の変化及び偏差に関わるもの)(NTB-02-05 Table.5.7-1 (Nagra, 2002a))

安全関連の特性、現象及び変化					
システムコンポ ーネント	安全機能に寄与す る重要な現象	予測される変化	不確実性及び考えられる偏差		
	臨界	設計基準(形状、燃焼度ク レジット)により回避			
HLWガラス	放射能インベント リ及び崩壊プロセ ス(熱及び放射 線)	放射性核種のインベント リ。半減期及び崩壊熱は明 瞭。2種類のHLWガラスタ イプを設定(BNFL及び COGEMA)			
	ガラスの溶解	各ガラスタイプについて室 内実験に基づいた異なる溶 解速度	長期の外挿は不確実:速度を100倍あ るいは20分の1に設定		
	破損メカニズム	短い有酸素腐食フェーズ。 限定的な孔食及び微生物腐 食。緩慢な嫌気性腐食。 SCCなし:寿命1万年	1,000年で閉じ込め機能の喪失をもたら すような考え難い短期破損(例えば、 SCCに関する不確実性)。残留移行抵 抗は考慮せず		
鋼製SF/HLWキ	ガス発生	低発生速度で継続的にH ₂ ガスを生成する嫌気性腐食	嫌気性腐食速度の不確実性。ガスによ る間隙水の(SFキャニスタの間隙空間 からの)転移の可能性		
ヤニスタ	腐食生成物:収着 及び酸化還元効果	放射性核種の腐食生成物へ の収着(定量化は困難)。 腐食は還元条件の形成に寄 与			
	腐食生成物:体積 膨張効果	1万年というキャニスタ寿 命の前の、キャニスタ荷重 に対する小さな影響			
SF/HLW	放射性核種の沈殿	 多くの放射性核種に対する ニアフィールド内(キャニスタ/ベントナイト間隙 水)での溶解度制限。還元 条件。RaのBa及びSrとの 共沈 	溶解度に不確実性。酸化条件のニアフ ィールドの 『What if?』ケースに対す る溶解度も設定		
	再冠水	緩慢な再冠水。腐食及び放 射性核種放出の遅延	再冠水に要する時間が不確実(~100 年-数100年)		
	核種移行	拡散のみ。良好な収着。化 学的安定性(大量の物質、 外側境界での低流量、オパ リナス・クレイとの鉱物学 的な類似性)。コロイドの ろ過	拡散率及びベントナイトへの収着に関 する不確実性		
ベントナイト	熱変質	温度を低く保つために UO ₂ /MOX燃料集合体を混 合させることによる劣化の 緩和。膨潤あるいは可塑性 に対する影響はほとんどな し	ある程度のセメンテーション及びキャ ニスタ近傍での拡散率の増大		
	追加の移行プロセ ス (Onsager)	影響は小さいと考えられ る。1,000年以降の駆動力 は小さい			
	酸化還元フロント の貫入(放射線分 解による酸化)	 H ₂ 及びFeによる酸化剤の 除去	酸化還元フロント貫入の可能性を除外 できる証拠があると考えられる。 『What if?』ケースのみ		
	ガス移行	経路拡張による岩石中への 放出。地下水放逐は無視			
	微生物影響	稠密なベントナイト中で微 生物は生存不能。有意な影 響なし			

安全関連の特性、	全関連の特性、現象及び変化				
システムコンポ ーネント	安全機能に寄与す る重要な現象	予測される変化	不確実性及び考えられる偏差		
ベントナイト /EDZ	EDZ に沿った地下 水の流れの増大	約10倍高い長期透水係 数。割れ目の連結性の欠 如。EDZの連結は処分坑 道末端のベントナイトシー ルで制限	仮想的なEDZ透水係数10 ⁻¹⁰ ms ⁻¹		
	ガス移行	EDZに沿った又母岩中へ の経路拡張。岩石中への毛 管漏洩。ベントナイト、 EDZの地下水移行特性の 変化は予測されない。			
	坑道の収縮及びベ ントナイトの圧縮	(冠水と同時に)キャニス タ破損前に完了する可能性 が高い圧縮は、ベントナイ トの膨潤によって制限され る。	長期の非常に緩慢な圧縮		
モルタル/EDZ境 界	母岩中への高pH プルームの移行	岩石中の間隙率の低減。自 己シール(保守的に無 視)。反応フロントの深さ は極めて限定的	マスバランスに基づいた、オパリナ ス・クレイの最大4mの擾乱		
坊道/斜坊/ 立坊シ	坑道埋め戻し材 /EDZ中での移流 による核種移行	効果的な密封;限定的な EDZ透水係数、効果的な シール、比較的低い動水勾 配によって優先的移行なし	有効性の乏しいシール:操業坑道埋め 戻し材、坑道のEDZ、斜坑及び立坑中 での優先的な移行(EDZの透水係数は 最大10 ⁻¹⁰ ms ⁻¹)		
坑道/斜坑/立坑シ ール	坑道、斜坑及び立 坑に沿った、揮発 性 ¹⁴ Cを含むガス の移行	揮発性 ¹⁴ Cは予測されな い;もし形成された場合に は、母岩及びEDZ中の移 行経路を通って移動する可 能性あり:シールは有効	揮発性 ¹⁴ Cを含むガスが坑道、斜坑及び 立坑に沿って移行される可能性:シー ルの有効性は乏しい		
	処分坑道の上下の オパリナス・クレ イ中の鉛直方向移 行経路の長さ	代表的経路長~50m。最小 経路長は40m	短い経路長に関する『What if?』ケー ス		
	オパリナス・クレ イ中での移流	流量は~10 ⁻¹⁴ ms ⁻¹ であり、 拡散支配の溶質移行が起こ る	±10倍の不確実性;ガス圧の蓄積、坑 道の収縮、氷河荷重による過圧の過渡 的上昇はすべて流れに影響する可能性 あり。高流量に関する『What if?』ケ ース		
	核種移行の地球化 学的な遅延	収着プロセスによる大部分 の放射性核種の遅延。効果 的なコロイドろ過	収着係数に不確実性。 ¹²⁹ Iについて K _d =0とした『What if?』ケース		
母岩	ガス移行	溶存ガスの拡散、二相流及 びガス移行経路の拡張;低 発生速度及び応力条件によ る二相流の緩慢な水平方向 伝播(均質ガス流動)とガ ス移行経路の拡張、経路の 自己シール。揮発性 ¹⁴ Cの 緩慢な同時移行	連続的なガス移行経路に沿った揮発性 ¹⁴ Cの急速な移行:『What if?』ケース		
	不均質流れ	母岩の不均質性はほとんど ない(層状構造であり、水 理的にアクティブな不連続 面がない)。自己シールは 効果的	未検出の不連続面(自己シールのため 影響は無視小であるが)。不均質流れの 可能性を排除できる証拠があると思わ れるが、透水量係数を増した移行経路 に関する『What if?』ケースを考慮		

表 2-59 処分システム変遷に関連する重要な特性及び現象 (システム設計基準および設計代替案の挙動に関わるもの)

設計基準及び設計	設計基準及び設計代替案に関わる安全関連の現象/変化				
システムコンポ	安全機能に寄与	想定レファレンスケース	設計オプション仮定及び残留不		
ーネント	する重要な現象		確実性		
使用済燃料	処分のためのイ ンベントリの設 定	現在の発電プラントを60年間運 転	SFのインベントリが増大 (300GWa(e)シナリオ)		
SF/HLWキャニ スタ	キャニスタ破損 プロセス	SF/HLW用の鋼製キャニスタ: 設計寿命1万年	Cu製キャニスタ寿命>10 ⁵ 年; 1000体に1体が瞬時に破損(品 質保証)、残留移行抵抗(ピン ホール)		
	H₂ガス発生	SF/HLW用の鋼製キャニスタ: H₂ガスが継続的に発生	キャニスタの外部胴材料として Cu、Ni合金あるいはTiを選 定。有意なガス発生が起こるの は破損キャニスタのみ。ガス発 生が無視小の代替インサートの 使用		
ベントナイト /EDZ	コンクリート製 坑道支保による 変質	設計基準によって回避 (SF/HLW処分坑道にはコンク リート製支保は不要)	Sf/HLW坑道に薄いコンクリー ト製あるいはポリマー製の支保 が必要となる可能性あり。影響 は小さいと予測される		

(NTB-02-05 Table.5.7-2 (Nagra, 2002a))

表 2-60 処分システム変遷に関連する重要な特性及び現象

(推測的な現象(人間活動あるいは地表環境の変化を含む))

(NTB-02-05 Table.5.7-3 (Nagra, 2002a))

推測的な現象/	推測的な現象/変化				
システムコン ポーネント	安全機能に寄与 する重要な現象	優先的仮定	代替仮定		
地表環境	地形の変化	現在のライン滝下方のライン渓谷 のような浸食性川谷部分を谷底の 第四紀砂礫中への排出と仮定(レ ファレンス生物圏)	正味の堆積が起こる川谷部 分、湿地帯、谷の斜面の湧水 (泉)への深部地下水の流出		
	気候の変動	『氷室 (Icehouse)』気候レジー ム;レファレンス生物圏では現在 の気候を仮定	代替気候(湿潤気候、乾燥気 候、周氷河気候)		
	将来の人間活動	未知のため、現在の食生活及びロ ーカルな食料生産を仮定(レファ レンス生物圏)	周氷河気候における代替人間 行動;Malm帯水層中への深 井戸		
母岩	処分場への偶然 の試錐孔貫通	現在の掘削技術を仮定: 試錐孔はシールされるか、崩壊し て自己シールする。キャニスタは (部分的に腐食した場合でも)脆 弱ではない	シールされない支保付試錐 孔。処分場からその下方の帯 水層まで貫通。試錐孔中への ニアフィールド間隙水のリー ク		
坑道/斜坑/立 坑シール	斜坑を埋め戻す ことなく処分場 を放棄	設計基準によって影響を最小化。 シールは、シール付操業坑道を含 めて、廃棄物を格納する処分坑道 を隔離する			



図 2-40 予測される処分システム変遷により想定される逸脱の影響範囲 (Nagra,

2002a)

② 性能評価項目の THMCR 整理

前項までにまとめた性能評価項目を THMCR の視点で整理した。以下の表 2-61 に"レ ファレンス処分システムの通常の変化及び偏差に関わるもの"を、表 2-62 に"システム設 計基準及びの設計代替案の挙動"を、表 2-63 "推測的な現象(人間活動あるいは地表環境 の変化を含む)"を、それぞれ示す。

上記まとめに際し、例えば表 2-61「処分坑道の上下のオパリナス・クレイ中の鉛直方向 移行経路の長さ」のように「安全機能に寄与する重要な現象」であるが、性能評価における THMCR 分類のいずれにも該当しないと判断した項目は斜線とした。

加八坦排中軍主	安全機能に寄与	する重要な現象
処分场博成安系	THMCR分類	性能評価項目
加八坦	放射線	処分場レイアウト、全廃棄物インベントリ及び設計
処分場	力学	HLW/ILWのEBS:コンクリート製坑道支保による変質
	熱・放射線	放射能インベントリ及び崩壊プロセス(熱及び放射線)
(十日)之(44)(1)	力学・化学	被覆管の破損及び腐食
使用消燃科	放射線	IRF(instant release fraction)の浸出
	放射線	臨界
III WARD A	熱・放射線	放射能インベントリ及び崩壊プロセス(熱及び放射線)
HLWカラス	熱	ガラスの溶解
	力学・化学	破損メカニズム:短い有酸素腐食フェーズ。限定的な孔食
	1122	ガス発生:低発生速度で継続的にH2ガスを生成する嫌気性
鋼製HLWキャニ	112子	腐食
スタ	//、学会 十年春年9年	腐食生成物:放射性核種の腐食生成物への収着及び酸化還
	化子・放射線	元効果
	力学	腐食生成物:体積膨張効果
	水理	再冠水:腐食及び放射性核種放出の遅延
	放射線	核種移行
ベントナイト	熱	熱変質
	化学・放射線	酸化還元フロントの貫入(放射線分解による酸化)
	化学	ガス移行
	水理	EDZに沿った地下水の流れの増大
ヘントナイト	力学	ガス移行:EDZに沿った母岩中への経路拡張。
/EDZ	力学	坑道の収縮及びベントナイトの圧縮
モルタル/EDZ境	化学	母岩中への高pHプルームの移行:岩石中の間隙率の低減。
<u> </u> 水 長 送 ()) に 大 に 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	七年中幼	
<u> </u>	<u></u>	が道理の戻し物/EDZ中での移航による核種移行
	164	現し、料現及い立地に行うた、弾光性(1)を含むカへの移行 加入に送った。 たい、中光性(1)を含むカへの移行
		処分巩迫の上下のオハリナス・クレイ中の鉛直方回移行経
	71/ +==	
回出	小 <u></u> 化学	
 		
	上学 化学	ルイ移行:浴仔カイの拡散、二相流及いカイ移行経路の拡 調 低変化法 東東 び ままを供な トスニ ね 法 の 約月 お ト 王 士
	刀子・化子	辰; 低充生 歴度及い応刀余 午による 二相流の 緩慢な水平万 白に 焼(物飯 ガュ ホ 新) し ガュ ならない の 広ま
		回伝播(均質刀ろ流動)と刀ろ移仃栓路の拡張

表 2-61 性能評価項目(レファレンス処分システムの通常の変化及び偏差)

加八坦排中軍主	安全機能に寄与する重要な現象		
処分場構成安素	THMCR分類	性能評価項目	
システムコンポ ーネント		超常現象:想定レファレンスケース	
使用済燃料		処分のためのインベントリの設定	
HLWキャニス	力学・化学	キャニスタ破損プロセス:HLW用の鋼製キャニ スタ:設計寿命1万年	
2	力学・化学	H ₂ ガス発生	
ベントナイト /EDZ		コンクリート製坑道支保の変質 : (処分坑道にコンクリート製支保は不要)	

表 2-62 性能評価項目(システム設計基準及びの設計代替案の挙動)

表 2-63 性能評価項目(推測的な現象(人間活動あるいは地表環境の変化を含む))

加八担排出而主		安全機能に寄与する重要な現象		
処分場構成安系	THMCR分類	性能評価項目		
		地形の変化:現在のライン滝下方のライン渓谷		
		のような浸食性川谷部分を谷底の第四紀砂礫中		
		への排出と仮定		
地表環境		気候の変動:『氷室(Icehouse)』気候レジー		
		ム;レファレンス生物圏では現在の気候を仮定		
		将来の人間活動:未知のため、現在の食生活及		
		びローカルな食料生産を仮定		
		処分場への偶然の試錐孔貫通:現在の掘削技術		
母岩		を仮定。試錐孔はシールされるか、崩壊して自		
		己シールする。		
		斜坑を埋め戻すことなく処分場を放棄:		
坑道/斜坑/立坑		設計基準によって影響を最小化。シールは、シ		
シール		ール付操業坑道を含めて、廃棄物を格納する処		
		分坑道を隔離する。		

(4) 性能評価項目ごとの評価手順の整理

前項までの結果により、Nagra における水理解析関係の性能確認項目として、以下の3 点を挙げることができる。しかしながら、ここまでに参照した文献の中には、ベントナイト の再冠水、EDZ に沿った地下水の流れ、オパリナス・クレイ中の移流に関する記述は結論 のみが簡潔に記載されているだけで、結論に至るまでの手法(解析の流れやモデルなど)の 記載は見られなかった。

- ▶ ベントナイトの再冠水
- ▶ EDZに沿った地下水の流れ
- ▶ オパリナス・クレイ中の移流

一方で、"TECHNICAL REPORT NTB16-03" *では処分場から周辺岩盤への地下流量 入量を解析した記述がみられ、以下の2項目の解析が行われていた(Diomidis et al., 2016)。

・母岩とUCU(上部閉じ込めユニット)間の流量の解析

・処分場構造から斜坑への流量の解析

図 2-41 に母岩と UCU (上部閉じ込めユニット)間の流量の解析結果を示し、解析結果 に対する考察部分を表 2-64 に抜粋し示す。また、図 2-42 に処分場構造から斜坑への流量 の解析結果を示し、考察部分を表 2-65 に抜粋し示す。

また、上記解析に用いたパラメータを表 2-66~表 2-68 に、評価に用いた用語の説明図 を図 2-43 に抜粋し示す。

※NTB16-03 はガス評価に関する文献であったが、水理解析に用いられたパラメータと 評価結果の記載が見られるため、本調査にて参考にした。また、NTB16-03 では水理解 析モデルに関して TOUGH-2 を用いた、とあるが、TOUGH-2 に関する引用元の文献 (NTB 02-03) がドイツ語のため調査を見送った。

表 2-64 母岩と UCU(上部閉じ込めユニット)間の流量の解析結果に関する記述 (NTB-16-03 § 4.4.4 (Diomidis et al., 2016))

記 亚
図 4·20(本項の図 2·41)は、選択したシミュレーションバリアントのオパリナス・
クレイから UCU への累積水流を示している。一般に、廃棄体によって坑道の温度が上
昇する段階では、熱膨張差および処分坑道周囲の母岩の圧力の増加により、最初に UCU への
水置換が行われる。その結果、処分場近傍でより高い圧力が生じる。約1,000年後、熱が放
散され、処分場および処分場近傍の圧力が静水圧に戻ると、地下水の流れは逆方向にな
る。約 1 万年後、処分場でのガス圧の蓄積により、地下水はオパリナス ・ クレイから
UCU に再び移動し、大きく異なる 2 つの圧力変化のシミュレーション結果が見られる。
具体的には、シールを設定したシミュレーションでは UCU への水移動が少なく、処分場
全体の圧力が低くなり、再飽和が速くなる。全体として、トンネルとシールの透過性の組
み合わせにより、閉鎖後期のオパリヌス • クレイと UCU の間の累積水量を決定できる
ことが示されている



(NTB-16-03_Fig.4-20 (Diomidis et al., 2016))

表 2-65 処分場構造から斜坑への流量の解析結果に関する記述

(NTB-16-03 § 4.4.4 (Diomidis et al., 2016))

記述

処分場構造から斜坑への流量 図 4-21 (本項の図 2-42) は、V4 シールおよび周囲の EDZ から処分場斜坑への水フラック ス (water flux)の経時変化を示している。閉鎖後の初期では、処分場内の圧力が低いため、 水は斜坑からアクセス坑道に流れて主要施設 (main facility)に流れこむ(図 2-42)の負の 流量)。その後、処分場内の圧力の蓄積によって水がアクセス坑道から斜坑に移動すると流向が 逆になる。この結果は、V4 処分場シールの重要な役割を示している。V4 シールの透水係数性 が高いと、閉鎖後初期の斜坑からの水の流入が大きくなり(図 2-42 の負のフラックスが高い値 で示される)、アクセス坑道、操業坑道 (operation tunnel)、およびテスト領域の部分的な再飽 和が生じる。後の時点(5,000 年以上)では、これらのバリアントでは、処分場での圧力の蓄積 により、斜坑に向かう流速がそれに応じて高くなる。斜坑に向かう水フラックス は、すべてのバリアントで 10 万年間、V4 シールおよび EDZ 90 m²の断面積 (Papafotiou and Senger 2016)において、3×10⁻¹¹ m/s 未満の値となる。



図 2-42 V4 シールおよび EDZ から処分場斜坑への水フラックスの経時変化 (NTB16-03_Fig.4-21 (Diomidis et al., 2016))

表 2-66 処分場コンポーネントの透過率[m²]および長さ[m](括弧内)を考慮した シミュレーションバリアント

Simālātion varianīts	₩22 pH9\$9	Vg 3:seal	144 sealu	V5 d'999	T成道rel
BC	10-16	5×10^{-18}	5 × 10 ⁻¹⁸ (40)	10-16	10-15
V2a	$5 imes 10^{-18}$	5×10^{-18}	5 × 10 ⁻¹⁸ (40)	10 ⁻¹⁶	10-15
V2b	10-18	5×10^{-18}	5 × 10 ⁻¹⁸ (40)	10 ⁻¹⁶	10-15
V3a	10-16	10 ⁻²⁰	5 × 10 ⁻¹⁸ (40)	10-16	10-15
V3b	10-16	2×10^{-21}	5 × 10 ⁻¹⁸ (40)	10 ⁻¹⁶	10 ⁻¹⁵
V3c	10-16	10-16	5 × 10 ⁻¹⁸ (40)	10-16	10-15
V4a	10-16	5 × 10 ⁻¹⁸	10 ⁻¹⁸ (60)	10 ⁻¹⁶	10-15
V4b	10-16	5×10^{-18}	10 ⁻¹⁸ (20)	10-16	10-15
V4c	10-16	5×10^{-18}	10 ⁻¹⁶ (40)	10-16	10-15
V4d	10-16	10-16	10 ⁻¹⁶ (40)	10 ⁻¹⁶	10-15
V5	10-16	5 × 10 ⁻¹⁸	5 × 10 ⁻¹⁸ (40)	5×10^{-18}	10-15
Tun	10-16	5×10^{-18}	5 × 10 ⁻¹⁸ (40)	10-16	10 ⁻¹⁶
V4e	$5 imes 10^{-18}$	10 ⁻²⁰	10 ⁻¹⁸ (60)	$5 imes 10^{-18}$	10 ⁻¹⁶
V4f	5 × 10 ⁻¹⁸	2×10^{-21}	10 ⁻¹⁸ (60)	10-18	10 -17

(NTB16-03_Fig.3-5 (Diomidis et al., 2016))

表 2-67 オパリナス・クレイと EDZ の異なる 2 相流パラメータを考慮した シミュレーションバリアント

Simulation variants	BC	OPA	Slra	Slrb	Gma	Gmb
van Genuchten P ₀ [Pa]	3.4×10^{7}	1.8×10^{7}	3.4×10^{7}	3.4×10^{7}	3.4×10^7	3.4×10^{7}
van Genuchten n	1.6	1.67	1.6	1.6	1.6	1.6
Slr for P _c -S	0.01	0.01	0.5	0.01	0.01	0.01
Slr for K _r -S	0.5	0.5	0.5	0.01	0.5	0.5
K _r -S OPA	van Gen.	van Gen.	van Gen.	van Gen.	Grant	van Gen.
K _r -S EDZ	van Gen.	van Gen.	van Gen.	van Gen.	van Gen.	Grant

(NTB16-03_Fig.3-6 (Diomidis et al., 2016))

注記) 網掛けのエントリは、ベースケースに関して変更されたシミュレーションバリアントの パラメータを示す (Pc-S - 水分保持曲線/ van Genuchten、Kr-S - 相対透磁率曲線 / vanGenuchten-Mualem.Helmig1996 を参照)。

表 2-68 さまざまなガス発生率を考慮したシミュレーションバリアント

Simulation variants	BC	AG	K09	UB	LB
From waste	Base case	Base case, distinguish between L/ILW-AG1 and L/ILW-AG2	Base case	Upper bounding rates	Lower bounding rates
From building and emplace- ment materials	Base case	Base case	No gas generation	Upper bounding rates	Lower bounding rates

 $(NTB16-03_Fig.3-7 \ (Diomidis \ et \ al., \ 2016))$

注記)網掛けのエントリは、ベースケースに関して変更されたシミュレーションバリアントの パラメータを示す。


上:平面図 中央:処分坑道のXZ 断面図(縦断面図) 左下:処分場シールとアクセス坑道を含む平 面の詳細図。 右下:操業坑道と立坑を示すXZ 断面図(斜体で指定された長さ:参照概念)。

- (1) L/ILW 処分坑道(断面K09、200 m)
- (2) V5 プラグ (20 m)
- (3) 分岐坑道(Branch tunnels) (97 m)
- (4) 操業坑道(Operation tunnel)
- (5) 換気坑道
- (6) V2 プラグ (60 m)
- (7) 試験エリア
- (8) 監視通路(Observation gallery)
- (9) パイロット施設(断面K09、45m)
- (10) パイロット分岐坑道(Pilot branch tunnel)
- (11) アクセス坑道
- (12) V4 処分場プラグ(V4 repository plug) (30-40 m)
- (13) アクセス坑道/斜坑(このモデルでは明示的に表されていない)
- (14) V3 $\sim i \nu$ (47 m)
- (15) 操業立坑(Operation shaft)
- (16) 上部封じ込めユニット
- (17) 下部閉じ込めユニット

図 2-43 モデルの構成例

(NTB16-03_Fig.3-9 (Diomidis et al., 2016))

2.1.4 わが国における NUMO-SC の調査

わが国における性能評価に関する最新の取組状況を把握するため、NUMO 包括的技術報 告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)の調査を実施した。

(1) 人工バリアシステムの構成

1) 人工バリアの構成

NUMO-SC で対象とする高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリアは、高レベル放射性 廃棄物に対しては、ガラス固化体、ガラス固化体を格納する堅固な金属製の容器であるオーバ ーパック、天然のベントナイトを主成分とする緩衝材から構成される(NUMO-SC の図 4.2-2 参照)。

NUMO-SC では、人工バリアの定置方式として、堅置き方式と横置き方式の場合を対象 として検討しているが、堅置き方式に対しては、ブロック状に成形した緩衝材を処分孔に積み 上げる方法(以下、堅置き・ブロック方式という)について、関係研究機関にて実証試験 どの技術開発を実施してきたことから、この処分概念を検討の対象としている。一方、横置 き方式については、PEM(Prefabricated Engineered Barrier System Module の略:地上施 設で廃棄体を人工バリアと一体化したモジュールを地下施設に搬送し、定置する技術)を 対象としている(以下、横置き・PEM 方式という)。

本業務では竪置き・ブロック方式を中心として調査を実施した。

2) 安全機能

NUMO-SC では、処分場の閉鎖後長期の安全性に関する安全機能を具体化し、これらを 担う処分場の構成要素に関連付けられている。高レベル放射性廃棄物処分場の安全機能と 構成要素の関係は、NUMO-SC の表 4.2-4 に示されている。

閉じ込めに関する安全機能については、以下のように処分場がふるまうことを期待して、 放射性物質の浸出抑制および移行抑制の機能をさらに具体化して設定されている。

○ 高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリア

- ガラス固化体をオーバーパックに封入することで、ガラス固化体に地下水が接触することを防止し、地下水への放射性物質の溶出を抑制する。この間にガラス固化体の有する放射能は放射性物質のそれぞれの半減期にしたがって減衰する。
- オーバーパックの機能が喪失してもガラス固化体の水に溶けにくいという特性により、 放射性物質の地下水への溶出を抑制する。
- ・緩衝材は地下水と接触することによって膨潤し、オーバーパックへの力学的な擾乱に対する緩衝機能をもつ。また、地下水の流れを抑制するとともに、地下水中に溶出した放射性物質を収着することでその移行を遅延させ、その間に放射性物質の放射能が減衰することによって大半の放射性物質を人工バリア内にとどめ、周辺の母岩への移行を

抑える。さらにコロイドによる放射性物質の移行を妨げる。

○埋め戻し材・止水プラグ

 処分場の操業のために建設した坑道は、閉鎖後に放射性物質の移行経路とならないよう に低透水性の材料で埋め戻すとともに、閉鎖を確実にするために止水プラグを設置す る。

○地質環境

・地下深部の処分場と人間の生活圏の間には広大な地質媒体が存在しており、処分場に埋設された放射性物質は人間の生活環境から物理的に隔離される。放射性物質の一部が人工バリア周辺の岩盤中に移行したとしても、処分場が設置されるような地下深部では地下水の流れが極めて遅く、化学環境が還元性であることから放射性物質の地下水への溶解は低く制限される。また、溶出した放射性物質は岩盤に収着されて生活圏に到達するまでに長い時間を要し、その間に放射能は減衰する。

NUMO-SC では、人工バリアの設計対象として高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリ アの構成要素について、期待する閉鎖後長期の安全性に関する安全機能(NUMO-SC の表 4.2 -4 参照)に対して、三種類の地質環境モデル(深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三 紀堆積岩類)、堅置き ・ ブロック方式、横置き ・ PEM 方式のそれぞれの処分概念に対し共 通して適用できる人工バリアの構成要素の仕様が示されている(NUMO-SC の図 4.4-1 参 照)。

(2) 性能評価の流れと関連すると考えられる要素

NUMO-SC で、性能評価の流れと関連していると考えられる要素が安全評価の基本手順の中にあった。そのため、ここでは、NUMO-SC の安全評価について調査することとした。

1) 安全評価の全体手順

NUMO-SC では、安全評価手法は、実施主体としてサイト選定時に実施する安全評価の 雛型とすることが意図されている。このため、わが国に広く分布する代表的な母岩に対して、 NUMO-SC 第3章で構築した検討対象母岩に対する現実的な地質環境モデルと、その特徴 を考慮した設計によって構築される処分場(設計仕様例は NUMO-SC 第4章に示されている) を対象として、安全評価における保守主義を原則としつつ、その特徴を可能な限り現実 的に取 り扱うという、より実践的な方法論を適用し、わが国で考えられる処分場の安全性に ついて論じ ていている。このため、第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999)や第2次 TRU レポート(電気事業連合・核燃料サイクル開発機構, 2005)以降の科学技術的知見や研究開 発の成果に基づき、以下のような点に特に配慮されている。

- 処分場の地層処分システムとしてのふるまいに関する空間的、時間的な不確実性を適切 に取り扱うため、最新の科学的知識に基づいてシナリオを記述するとともに、その発生可 能性と影響の大きさを併せて評価するリスク論的な考え方を導入した安全評価の枠組み を構築する。
- ・地質環境特性に応じたサイトの適性の相互比較、ならびに処分施設設計の最適化に向けて、母岩中の断層や割れ目の空間的な分布、坑道・人工バリア構成要素などの詳細な配置・形状および相互作用による時間的な特性変化など、処分場の地層処分システムとしてのふるまいに関する現実的な条件を反映して、地下水流動および核種移行挙動の評価を可能とするシナリオやモデル、データセットを用いる。
- 安全評価結果の説明性や信頼性を確保するため、シナリオ設定の網羅性と十分性、モデルやデータセットの設定根拠などに関する追跡性の向上を図る。

NUMO-SC で用いた安全評価の方法論は、国際的に認められている一般的な進め方に沿ったものである。一連の作業は、期待する安全機能を発揮するよう、適切な手順によって選定されたサイトの地質環境条件(検討対象母岩に対する地質環境モデル)と、その地質環境条件を考慮した設計(検討対象母岩の分類に応じた設計仕様)によって構築される処分場を対象として実施されている。

安全評価の基本的手順は NUMO-SC の図 6.2-1 に示されている。これは、高レベル放射 性廃棄物処分場と TRU 等廃棄物処分場に対して基本的に同じとしている。ここでは、 NUMO-SC の図 6.2-1 内に示されている安全機能影響分析までを性能評価の流れに関連 すると考えられる部分と見て調査する。

2) 性能評価の流れ

NUMO-SC の図 6.2-1 に示されている「NUMO-SC における安全評価の基本手順」の流 れに従い安全評価の流れの内容を以下に示す。このうち、本検討で対象としている性能評価 に関連すると考えられる部分に色を付けた。以降、これらについて詳細を示す。

① システムとしてのふるまいに関する記述 (ストーリーボードの作成)

- ② 安全機能要因分析 (要因分析)
- ③ 安全機能影響分析 (影響分析)
- ④ 現象解析

① システムとしてのふるまいに関する記述

評価対象とする処分場の構成要素のTHMC 状態変化とその条件での安全機能の発揮の仕方 を、地質環境モデルの空間スケールと処分場の建設 ・ 操業によって元の地質環境が変化した状 態から閉鎖後の長期間を対象とする時間スケールを念頭において記述するとしている。

上記の様に<u>地層処分システム全体のふるまいを俯瞰し、時間 • 空間スケールに関する整</u>合 性を確認できるようにする表現方法としてストーリーボードを導入している。

NUMO-SC 中で記載した地質環境モデルと人工バリアから構成される処分場に付与され る閉鎖後の安全機能から、閉鎖後に期待される処分場のシステムとしてのふるまいや放射 性核種移行のふるまいを示されている。建設・操業を経て閉鎖された時点のシステムの状態 が時間・空間的にどのように変遷するか考慮してストーリーボードの作成例が示されてい る (NUMO-SC の図 6.3-1 参照)。そこでは、以下の 4 項目について検討が示されている。

- (a) 評価対象とする処分場
- (b) 評価対象核種と放射能インベントリ
- (c) 空間スケールの取り扱い
- (d) 評価期間の取り扱い

上記の(a)~(d)を対象として、母岩や廃棄物の種類、廃棄物定置方式のオプションを組み 合わせた種々の処分場のふるまいをストーリーボードとして共通的に取り扱うため、四つ の時間枠とニアフィールド、パネル、処分場および広域という四つの空間スケールを用いて表 現している。

各項目の概要について以下に示す。

(a) 評価対象とする処分場

ストーリーボードを作成するための NUMO-SC で対象とする処分場は、新第三紀堆積岩 類、先新第三紀堆積岩類の三つの地質環境と、Cl-濃度の低・高を考慮した二種類のモデ/冰 質地下水水質と、竪置きブロック方式および横置き • PEM 方式の組み合わせを前提とて いる (NUMO-SC の表 6.1 -1 参照)。 安全評価を実施する際に考慮する処分場の構成要素は NUMO-SC の表 6.1-2 に、また、 深成岩類の処分場、新第三紀堆積岩類の処分場、先新第三紀堆積岩類の処分場の具体的な構成 要素の形状や配置などは、それぞれ NUMO-SC の図 6.1-1、図 6.1-2、図 6.1-3 に示されて いる。

(b) 評価対象核種と放射能インベントリ

ガラス固化体の評価対象核種と放射能インベントリは諸外国における選定方法を参考に、 ICRP に挙げられている、252 核種から半年以上の半減期を有する核種を抽出した。地下水 を介した核種移行に関するシナリオに対する評価対象核種に関しては、第2次取りまとめ (核燃料サイクル開発機構, 1999) で対象とした核種を基本に、諸外国の実施主体がガラス 固化体または使用済燃料といった高いレベルの放射能を有する廃棄体を対象とした安全評 価において着目している評価対象核種であり、地下環境中において沈殿が生じにくく、人工 バリアや地質環境への収着量が極めて小さいと考えられる C-14、Cl-36、および I-129 を 新たに重要な核種として加えた。Pd-107 と Sm-151 については、諸外国の実施主体が着 目している核種を参考にして、重要性が低いものとして除外した。稀頗度事象シナリオや人 間侵入シナリオに対しては、半減期が比較的短いものの、その放射能や放射線学的影響が大き い核種である Sr-90、Cs-137 と、内部被ばくに対する重要度が高いアクチノイド系列の核 種を加えることとした。選定した評価対象核種とそれらの 50 年間の一時貯蔵管理の期 間後におけるガラス固化体 1 本あたりの放射能は NUMO-SC の表 6.1-3 に示されている。

(c) 空間スケールの取り扱い

NUMO-SC では空間スケールの取り扱いは以下に示す 4 つのスケールを設定し、検討対象の特性を考慮してそれぞれのスケールを選定して検討を実施している。

地質環境モデルの構築、および処分施設の設計では、処分場を異なる空間スケールに分けて 取り扱っている。安全評価においても、それらと整合的にこれを実施するため、複数の空間ス ケールを設定した。処分場の安全性の評価にあたって考慮すべき重要なシナリオは、長い期間 のうちに廃棄体中の放射性核種が地下水に溶出し、地下水の流れに伴って地質環境中を移 動した後、生活圏に移動することを想定するものである。このようなシナリオに対して線量を 算出する方法としては、例えば、個々の廃棄体から人工バリア、地質環境を経由して生活圏 まで移行する放射性核種の三次元的な広がりをシミュレーションし、放射性核種が流出す る地点や地域の特徴を考慮した生活圏のモデル化によって線量を計算することが考えられ る。これを行うためには、詳細な地質環境条件と人工バリアや処分施設全体を表現した三次元 の大規模な核種移行解析モデルが必要となるが、一般に空間スケールが大きくなるほど不 均質な場を対象とした空間モデルの不確実性が大きくなること、また、三段階のサイト調査 においては空間スケールなどを絞り込みつつ、取得する地質環境情報の詳細度が次第に高 められていくことから、現時点でこうした広域にわたる詳細な三次元モデルを 構築することは適切ではない。また、計算機能力を考慮して合理的に解析を実施するために、安 全評価の対象スケールは、対象とする地質環境モデルと処分場の設計に関する空間スケール の考え方を踏まえ、次のような複数の空間スケールに対応した核種移行挙動を評価す ること として、それぞれのスケール間で核種の移行率を接続させることを基本とした。

このため、空間スケールはニアフィールドスケール、パネルスケール、処分場スケール、広 域スケールの4つのスケールを適切に考慮して取り扱うこととしている。

i ニアフィールドスケール

人工バリアおよび処分坑道とその周辺 100 メートル程度の母岩を含むニアフィールドスケール。廃棄体からの三次元的な核種移行挙動を精緻に解析する。

ii パネルスケール

パネルスケール(数百 m×数百 m 程度)では一つの処分区画全体に対する 核種移行解析が対象となる。パネルスケールは、ニアフィールドの詳細な核 種移行挙動を評価したうえで、処分区画内における処分坑道や主要坑道、取 付け坑道の配置などの施設設計の影響や、より広範囲の母岩特性の空間的分 布を考慮した評価を行うことを目的としている。 iii 処分場スケール

処分場スケール(数 km×数 km 程度)では、パネルスケールからの核種の 移行率を入力として、処分場全体(面積 10 km² 程度)とその周辺数百 m 程度の岩盤を含む領域を対象とした核種移行解析を行う。設計された処分施 設全体の性能、ニアフィールドスケールやパネルスケールで取り扱う領域よ りさらに広い領域の母岩の核種移行遅延効果などを反映した評価を行うこと を可能とする。

iv 広域スケール

広域スケール(数+ km×数+ km 以上)では、処分場スケールにおける解 析によって得られる核種の移行率を入力として、地下深部に建設される処分 場から地表までに存在している広大な地質環境を経て生活圏に至る過程を対 象とした核種移行を取り扱う。地下施設設置深度から地表付近までの岩盤に おける核種の移行遅延や機械的分散など、サイト固有の地質環境に期待され る安全機能を考慮した評価を行うことができる。

(d) 評価期間の取り扱い

NUMO-SC では、評価期間の取り扱いは諸外国における取り扱いを参考としつつ、第2 次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999)や第2次 TRU レポート(電気事業連合・ 核燃料サイクル開発機構, 2005)と同様に、対象とする処分場のふるまいを理解するという 観点から、計算上最大の線量が現れるまでの時期が確認できるように評価解析を行うことと している。

また、ストーリーボードで取り扱う期間を、閉鎖後の処分場のシステムとしてのふるまいに 関して、建設 ・ 操業を経て閉鎖された時点のシステムの状態が時間 ・ 空間的にどのよな 変遷するか、またそれに応じて放射性核種はどのように移行するのかを論じるために次の 5つ の期間を設定している。

- ・建設・操業(から処分場閉鎖までの期間)
- ・T1: 処分場閉鎖から再冠水完了までの期間
- T₂: 再冠水完了から放射性核種の移行が生ずるまでの期間
- T₃: 放射性核種の移行が生じてから現在の地質環境の特性が大きく変化しないと考えれ るまでの期間
- T4: 地質環境の特性に関する不確実性が増大する期間

本業務では「建設 ・ 操業~再冠水完了までの期間」を対象としているため、以降、T1 (関 する内容のみ記載する。

② 安全機能要因分析(要因分析)

NUMO-SC では、①システムとしてのふるまいに関する記述におけるストーリーボード のシナリオを作成する際に、シナリオを具体的に作成するため、上述した処分場の地層処分シ ステムとしてのふるまいの記述をより詳細に分析し、地層処分システムの THMC 状態とそ れに対応して安全機能がどのように変化するかについて、最も可能性が高いと考えられる ふるまいと、それに対する不確実性を考慮したふるまいを、より明確に区分することが可能か を検討しておく。まず、処分場の各構成要素が有する安全機能を規定する物理・化学**路**量 (以下、状態変数という)を明らかにする。

安全機能要因分析は、それぞれの安全機能に関する状態変数に対して影響を及ぼす可能 性があると考えられる要因を、NUMO FEP リストの FEP から抽出して関係付けたものと 定義されている。

(a) 状態変数の抽出

NUMO-SC では、トップダウンアプローチに従って、最新の科学的知見を踏まえ、まず、対象とする処分場の各構成要素の安全機能を規定する物理的・化学的性質などを状態変数して 抽出するとしている。

状態変数の抽出の考え方は、以下のとおりとしている。

- 各安全機能の発現メカニズムや、これに関連する最新の科学的知見の適用
- 特に、安全機能を表現する定量的なモデルが提案されている場合は、モデルに含まれているパラメータやそれに影響を与える物理的・化学的変数を考慮
- 安全機能に直接的な影響を及ぼす状態変数を網羅的に抽出

これらの考え方をもとに NUMO-SC の図 6.3 -4 に緩衝材の安全機能である「放射性物質 の移流による移行の抑制」、「コロイド移行の抑制」および「放射性物質の収着」に対し、抽出し た状態変数の一例が示されている(これを状態変数関連図という)。

例えば、「放射性物質の移流による移行の抑制」という安全機能については、ベントナイト が地下水によって膨潤し、緩衝材中の間隙が減少すること、および施工時に緩衝材ブロック間、 あるいは緩衝材とほかの構成要素との間に残存する隙間が自己シールされることにより成 立する。しかし、長期間のうちには、例えば、地下水中に緩衝材が少しずつ流出し緩衝材の 「密度」が低下することによって、あるいはパイピングに伴う緩衝材の「間隙構造」の変化や 「厚さ」の減少によって間隙が増加することで、放射性物質の移流による移行が生ずる可能性 がある。緩衝材の変質(オーバーパックやセメント系材料との相互作用)やモンモリロナイ トのイオン交換(Ca型化や Fe型化など)に伴う「鉱物組成」の変化により透水性が増加 する場合も、こうした要因となりうる。その他、「温度」の上昇による緩衝材の熱変質が、 移流による移行の抑制機能に影響を及ぼす可能性がある。また、地下水と緩衝材の反応などに よるイオン強度の変化などの「間隙水水質」の変化により、モンモリロナイト 層間の微細構造の変化によって透水性が変化し、それが放射性物質の移流による移行の抑 制機能に影響を与えることが考えられる。

これらを踏まえて、「密度」、「鉱物組成」、「間隙構造」、「厚さ」、「温度」、「間隙水水質」を、 「放射性物質の移流による移行の抑制」という緩衝材の安全機能に影響する状態変数として抽出 している。

なお、付属書 6-6 に上記のような考え方で全ての安全機能に対する状態変数が整理されているが、2019 年 12 月時点では付属書は未公表である。

(b) 状態変数に影響を及ぼす FEP の抽出(要因分析図の作成)

上記の結果から安全機能の将来的な変遷を分析する。そのため、安全機能に関係付けた状態変数に対し、前述した処分場のシステムとしてのふるまいに関する理解に基づき、ボトムア ップアプローチにより網羅的に整理した FEP を関連づける(これを NUMO-SC 中では要 因分析図という)。

(i) NUMO FEP

一般的な国際 FEP1リストの階層や分類方法を踏襲し、わが国の地層処分で考慮すべき自 然条件や廃棄物の特徴などに照らし合わせて FEP の追加や削除を行うことによって NUMO FEP リストを作成した。

NUMO FEP リストは 284 個の FEP から構成される。NUMO FEP リストの構成の概略 は NUMO-SC の図 6.3 -3 に示されている。

NUMO-SC で示した NUMO FEP リストは、科学技術の進歩や研究開発による知見の拡充、今後進められる安全規制の策定、サイト調査で得られた情報などに応じて適宜見直していくとしている。

(ii) 要因分析図の作成

要因分析図においては以下のような基本的考え方やルールに基づき、NUMO FEP リストとして抽出した FEP を、状態変数を介して安全機能と結び付け、安全機能が影響を受けると考えられる FEP を明らかにしている。

- 有害化学物質によるリスクにかかわるものについては、NUMO-SC の安全評価においては取り扱わない。これは、国内の安全規制においてはそうではないこと、また、有害化学物質を含む TRU 等廃棄物については、廃棄体仕様が決定していないものもあり、評価が困難であることによる。
- ・ 閉鎖後の処分場の安全機能に影響を及ぼす自然過程に関する FEP を対象とすること

¹ OECD/NEA では、こうした構造化に留意して、特定の地質環境条件や処分場概念に限定することなく利用することを目 的としたFEP リスト、NUMO 包括的技術報告書中ではi-FEP と記載されている。

とし、人為事象に関する人間侵入 FEP については、人間侵入シナリオに関連させて 取り扱いを検討する。

- ・ 処分場閉鎖前に行われるサイト選定のための調査や処分場の設計 ・ 建設 ・ 操業 閉 鎖などに関連して NUMO FEP リストに抽出されている FEP のなかには、安全機能 の初期状態を与えるものや、それが予期したとおりにならなかった場合に閉鎖後の処 分場の安全機能に影響を及ぼす可能性について考慮すべきものがある(例えば前提 条件 FEP や品質管理 FEP)。こうした FEP については、要因分析および後述する影 響分析の後、シナリオを選定する際に、その前提となる条件の不確実性としてどのように 扱うかを検討する。
- 核種の移行挙動を表現するような FEP(例えば、F2.4.1.2 溶解」や「F2.4.1.3 拡散」 などの核種移行 FEP)は、安全機能の状態変遷の結果として表現されるものである ことから、安全機能の要因分析や後述する影響分析においては考慮しない。シナリオの 記述に際しては、核種の移行挙動を含んだものとすることが必要であり、核種移行 FEP が漏れなく考慮されていることを確認する。
- プロセス間の連成(※)については要因分析図上には明示的に表示されないが、影響 分析の過程ではこうした連成による相互作用も考慮してシナリオ上の不確実性を分 析する。

※NUMO FEP リストにおいては、処分場や母岩で発生するプロセスを熱的プロ セス、水理学的プロセス、力学的プロセス、化学的プロセスに分類しており、 これらのプロセスの連成を記述する

生活圏における核種移行と被ばくに関するシナリオについては、特定のサイトを対象としていない現段階では、第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999)と同様な考え方に基づく一般化した生活圏評価モデルを、NUMO FEP リストの生活圏FEP を参照しつつ作成することとした。

以上の考え方を適用し、対象とする FEP について、その定義に従い最新の科学的知見に 基づいて状態変数への影響の有無を判断した。

NUMO-SC の図 6.1-5 に、一例として、緩衝材の安全機能である「放射性物質の収着」 について、状態変数として抽出した「鉱物組成」、「間隙水水質」、「密度」とそれぞれに影響を 与える統合 FEP との関係を示した要因分析図が示されている。

なお、付属書 6-7 に上記のような考え方で他の安全機能に関する要因分析図が整理されているが、付属書 6-7 は、2019 年 12 月時点では未公表である。

③ 安全機能影響分析(影響分析)

NUMO-SC では統合 FEP を対象にして、最新の科学的知見をもとに、閉鎖後の処分場のシ ステムとしてのふるまいを念頭に、安全機能の最も確からしい状態を規定する状態変数に対す る影響を検討し、シナリオ解析で考慮すべき現状の知見の不確実性について分析することによ って、想定される安全機能の状態を基本シナリオ、変動シナリオもしくは稀頻度事象シナリオの 区分のいずれかで取り扱うかを決定した。このような検討に基づいて、安全機能の最も確からしい 状態と、それに付随するシナリオ上考慮すべき不確実性、FEP のシナリオ上の取り扱い区分に ついて、安全機能ごとに一覧表(以下、「影響分析表」という) として取りまとめた。

影響分析表の作成においては、要因分析で抽出した FEP にかかわる現象が、安全機能へ 影響を及ぼす可能性やその程度について、既存の文献に基づく種々の科学的情報のみなら ず、対象とする処分システムについて実施した様々な現象解析の結果などを通じて分析が 実施されている。(表 2-69)

影響分析を行う中で、安全機能への影響の程度が無視できると判断された要因は、シナリオ の設定においては考慮しない。また、安全機能を発揮するレベルをより高めるように作用する 要因についても明らかにし、これらのうち定量的な評価に必要なモデル/コードやデータ ベースが整備されていないものは、現状ではシナリオ評価上、保守的に無視している。影響 分析表は、高レベル放射性廃棄物処分場における安全機能を期待する処分場の構成要素に 対応して作成している。

例として、緩衝材の安全機能「放射性物質の収着」に関する要因分析図に対して、シナリオ 上の取り扱いに関する主要な統合 FEP の分析結果を抜粋してまとめた影響分析表の一部が NUMO-SC の表 6.3 -2 に示されている。

表 2-69 NUMO-SC において実施した現象解析と対応する付属書一覧(高レベル放射性廃棄物処分場)

(NUMO-SC 表 6.3-1を基に高レベル放射性廃棄物処分場のみ抜粋)

here i en	lint				
	微安 微安	太字 —2019 年 12 月時点において未公表			
オーバーパックと緩衝材およ	オーバーパックの腐食に伴って放出される鉄イオンと	6-8 影響分析に用いた現象解析			
び埋め戻し材の化学・物質移行	の反応による緩衝材の化学的な変質挙動が安全機能に				
連成解析	与える影響を評価する。				
セメント系材料と緩衝材およ	セメントの溶脱に伴って生成する高 pH, 高Ca 濃度の	6-8 影響分析に用いた現象解析			
び埋め戻し材の化学・物質移行	地下水との反応による緩衝材の化学的な変質挙動が				
連成解析	安全機能に与える影響を評価する。				
セメント系材料と母岩の 化学 -物質移行連成解析	セメントの溶脱に伴って生成する高 pH, 高Ca 濃度の	6-8 影響分析に用いた現象解析			
	地下水との反応による母岩の化学的な変質挙動が安				
	全機能に与える影響を評価する。				
構造躯体の化学・物質移行	構造躯体中のセメントの溶脱が構造躯体の透水係数に	6-16 セメント系材料の透水性評価			
連成解析	与える影響を評価する。				
緩衝材の自重沈下解析	再冠水後の長期を対象とし、オーバーパックの自重に	4-17 緩衝材の長期健全性の評価(高レベル放射性廃棄物処分場)			
	よる長期的な沈下挙動に伴う付加的な荷重に対する緩				
	衝材の力学的な安定性を評価する。				
腐食膨張解析	再冠水後の長期を対象とし、岩盤クリープやオーバー	4-17 緩衝材の長期健全性の評価(高レベル放射性廃棄物処分場)			
	パックの腐食膨張に伴う付加的な荷重に対する緩衝材				
	の力学的な安定性を評価する。				
地震応答解析	大規模な地震動に対する緩衝材などの人工バリアの	4-17 緩衝材の長期健全性の評価(高レベル放射性廃棄物処分場)			
	力学的な安定性を評価する				
		4-39処分坑道中心間距離の設定における廃棄体熱影響の検討(竪置			
執伝道解析		き・ブロック方式)			
ボロム・寺カキル1	元末件の元前による板固内の価反工力を計画する。	4-40処分坑道中心間距離の設定における廃棄体熱影響の検討(横置			
		き・PEM 方式)			

④ 現象解析

NUMO-SC では、現象解析を「処分場のそれぞれの構成要素について考慮すべき THMC 状態 変化に関する解析」と定義している。

NUMO-SC では、上記の表 2-69 で示した現象解析のうち、2019 年 12 月時点で付属書が公表 されている「緩衝材自重沈下解析」、「腐食膨張解析」、「地震応答解析」について、以下にまとめた。

(a) 緩衝材自重沈下解析

「緩衝材自重沈下解析」は、NUMO-SC 付属書 4·17 緩衝材の長期健全性評価において、「ニア フィールドの状態変化に対する力学的安定性」の評価の一部として実施されている。緩衝材の設計において、 「ニアフィールドの状態変化に対する力学的安定性」に関する確認方法と指標および基準が NUMO-SC 付 属書 4·17 の表 1 に示されている。

この解析では、自重による緩衝材の圧密沈下挙動への影響を評価するので、岩盤クリープとオ ーバーパックの腐食膨張を伴う複合的な現象は扱わないため、地質環境モデルは深成岩類のモデ ルの場合で代表させるとしている。

処分概念において、竪置き ・ ブロック方式と横置き ・ PEM 方式に対するモデル化を実施しい る。NUMO-SC 付属書 4-17 の図 1、図 2 参照各モデルに対して、解析コード(GRASP(杉江, 1995))を用いて、オーバーパック(底部)の沈下量の経時変化の解析が実施されている。解析結 果として、各モデルにおけるオーバーパック沈下量の経時変化が NUMO-SC 付属書 4-17 の図 3 に示されている。

(b) 腐食膨張解析

NUMO-SC 付属書 4-17 において、基本的な設計要件を満足するように設定した暫定的な緩衝 材仕様に対して長期健全性の評価を行い、「ニアフィールドの状態変化に対する力学的安定性」につ いて検討されている。この「ニアフィールドの状態変化に対する力学安定性」の評価において

「腐食膨張解析」を実施している。「腐食膨張解析」による「ニアフィールドの状態変化に対する力 学的安定性」に対する設計での確認方法と指標および基準が NUMO-SC 付属書 4-17 の表 1 に示さ れている。

この解析では、オーバーパックの腐食膨張による応力の増加に対しても緩衝材が破壊に至らず オーバーパックを安定して支持できることを確認している。また腐食膨張によりオーバーパック に作用する外力を岩盤クリープの影響(新第三紀堆積岩の場合)も考慮されている。このため、 設計で取り扱う緩衝材からの応力が安全側に大きく評価されるように、モデル化する範囲や変位 拘束条件を設定されている。竪置き ・ ブロック方式(深成岩類)の解析モデル、横置き ・ HM 方 式(深成岩類)の解析モデル及び横置き ・ PEM 方式(深成岩類)の解析モデルは NUMO-SC 付 属書 4-17 の図 4、図 5、図 6 に示されている。 付属書 4-17 では上記の各モデルを用いて、以下について結果がまとめられている。

- ・オーバーパックの腐食量と緩衝材の変位量の関係(NUMO-SC 付属書 4-17 の図 7 参照)
- ・オーバーパックに作用する応力と腐食量の関係(NUMO-SC 付属書 4-17 の図 9 参照)
- ・オーバーパック胴部に作用する応力の比較(NUMO-SC 付属書 4-17 の図 10 参照)
- ・設置から腐食膨張完了に至る緩衝材部分の破壊接近度の分布(NUMO-SC 付属書 4-17 の図 11 参照)
- ・緩衝材底部要素の有効応力経路(NUMO-SC 付属書 4-17 の図 11 参照)

(c) 地震応答解析

NUMO-SC 付属書 4-17 の表 4 において、「地震動に対する力学的安定性」に対する設計での確認 方法と指標および基準が示されている。

人工バリアの力学的安定性を最新の方法により評価することとして、緩衝材を二相系の連成問題として取り扱われており、有効応力法による三次元弾塑性地震応答解析を実施されている。検討用地震動には、距離減衰式に基づいた経験的な方法で最も大きな速度応答スペクトルを与える地震動(以下,耐専波という)に加えて、国内の地震観測記録の中から最大級の地震動として、 プレート間地震動に 2011 年東北地方太平洋沖地震における牡鹿波、内陸地殻内地震動に 2000 年 鳥取県西部地震における伯太波を選定し検討に用いられている。 解析は処分孔竪置き・ブロック方式に比べて水平方向の加振に対して保守側の検討になると考 えられる処分坑道横置き方式を対象とされている。地質環境モデルは地震時の変形に対して保守 側の検討になると考えられる新第三紀堆積岩類を対象とし、人工バリアの設置深度は深度 500 m とされている。解析モデルの概念図は NUMO-SC 付属書 4-17 の図 16 に示されている。

付属書 4-17 では上記の各モデルを用いて、以下について結果がまとめられている。

- ・最終時刻における緩衝材の体積ひずみと過剰還元劇水圧の分布 (NUMO-SC 付属書 4-17 の 図 18 参照)
- ・緩衝材は解禁節度の最大応答分布(NUMO-SC 付属書 4-17 の図 19 参照)
- ・オーバーパックの Mises 応力の最大応答値分布 (NUMO-SC 付属書 4-17 の図 20 参照)

これらを総合して人工バリアを構成する人工バリアに対して長期安全性評価が実施されている。

(3) 性能評価項目と関連すると考えられる要素

前述の(2) 3) ②の安全機能要因分析では、処分場の各構成要素の安全機能を規定する物理・化 学的諸量(以下、状態変数という)を抽出し、NUMO FEP リストの FEP から抽出して状態変数 と安全機能を結び付けている。この安全機能と FEP を結びつける考え方は、処分場構成要素の 性能に影響があると考えられる現象を示す性能評価項目の選定と類似したものと考えられる。ま た、これとは別に、NUMO-SC の付属書 4-14「緩衝材の設計要件と評価項目の設定(高レベル放 射性廃棄物処分場)」では、緩衝材への影響が懸念される要因としてコロイドの形成やイライト化と いった現象とそれに関連する FEP 項目が示されており、これらから性能評価項目を抽出できる 可能性がある。

(4) 性能評価項目ごとの評価手順と関連すると考えられる要素

前述の(2) 3) ④の現象解析が性能評価項目ごとの評価手順に関連すると考えられる。NUMO-SC の付属書 4-14「緩衝材の設計要件と評価項目の設定(高レベル放射性廃棄物処分場)」の緩 衝材への影響が懸念される要因を性能評価項目とすると、(2) 3) ④の緩衝材自重沈下解析、腐食 膨張解析、地震応答解析はそれぞれオーバーパックの沈下、オーバーパックの腐食膨張・岩盤ク リープ、地震動の作用の評価手順などが参考になると考えられる。

3. 水理解析技術高度化に向けた検討

3.1 沿岸部の水理解析に考慮すべき要因の影響検討

人工バリアシステムの性能評価を考える上で、沿岸部というサイトの性質に起因する影響要 因としては、主に塩水による人工バリアへの地化学的な影響が考えられる。このため、処分場周 辺の塩水分布及び処分場へ到達する塩水を含む湧水量を把握することは重要である。そこで、こ こでは処分場周辺の塩水分布及び処分施設の湧水に主に着目した整理を実施する。具体的には、 処分場の塩水流入に関する影響要因の感度解析を密度流解析によって行い、各影響要因の影響の 程度の把握を試みた。

この Appendix には、報告書に詳細に掲載できなかった沿岸部の水理解析に考慮すべき要因の 影響検討における解析コード、海水準変動解析(施設掘削前解析)の設定方法の詳細、解析用物 性値及び解析結果を記した。

3.1.1 解析コード

解析コードには、有限要素法による二次元飽和・不飽和浸透流及び移流分散解析プログラムである Dtransu-2D・EL(以下 Dtransu と呼ぶ)を使用した。

Dtransu は、飽和 ・ 不飽和浸透流の支配方程式として、支配方程式(リチャーズ方程式) (流体の密度による移動の項を付け加えた次式を用いている(西垣ほか, 1995)。

$$\rho \underset{\mathbf{f}}{\rho} \frac{\partial c}{\partial t} + \rho \{\beta S_{s} + C_{s} c\theta\} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_{i}} \{\rho K^{s} K c\theta\} \frac{\partial \varphi}{\partial x_{j}} + \rho K^{s} K c\theta \} \rho$$

ここで、 ϕ : 圧力水頭、 θ : 堆積含水率、Ss: 比貯留係数、 $C_{s}c\theta$): 比水分容量、 K_{ij}^{s} : 飽和透水テンソル、 K_{r} : 比透水係数、t: 時刻、 β : 飽和領域で 1、不飽和領域で 0、 ρf : 溶媒の密度、 ρ : 流体の密度、 ρr : 溶媒の密度、 ρf に対する流体の密度比($\rho / \rho f$)、 γ : 溶質の密度比、である。

また、溶質の移流・分散の支配方程式には、移流拡散方程式に溶質の減衰、吸い込み及び湧き 出しの項を加えた次式を用いている。(西垣ほか, 1995)

$$R_{\rm d}\theta\rho\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_{\rm i}} \left(\frac{\theta\rho D}{ij} \frac{\partial c}{\partial x_{\rm i}} \right) - \frac{\partial}{\partial x_{\rm i}} \frac{c}{\partial x_{\rm i}} + \frac{\partial}{\partial x_{\rm i}} \frac{c}{\partial \rho v_{\rm i}c} - \frac{\theta\rho\lambda R_{\rm d}c}{\rho \rho \lambda R_{\rm d}c} - Q_{\rm c}$$

ここで、c: 比濃度 (0 \leq c \leq 1、最大濃度を 1 として正規化したもの)、Rd: 遅延係数、Dij: 分散テンソル、 v: 間隙流速ベクトル、 ρ : 流体の密度、 λ : 減衰定数、Qc: 源泉項(吸い込みと 湧き出しを合わせたもの) である。

3.1.2 海水準変動解析の設定方法

数値計算(FEM)において隆起浸食等の地盤の変動を構造的に考慮することは難しいことから、 海水準変動は地盤の変動と海水準を合わせた相対的な海水準変動によって考慮した。この相対的 な海水準変動は、平成 28 年度地層処分技術調査等事業(直接処分代替処分研究開発)(日本原子力 研究開発機構, 2017)を参考とし、汎世界的な海水準変動と、隆起速度から侵食速度を差し引いた 見かけの隆起速度の関係に基づいて設定した。 過去 35 万年間の海水準変動は、およそ 12 万年周期で高海面期と低海面期が繰り返し生じてお り、海水準の変動量は、現在比+5~-120m 前後である。日本列島の沿岸域における過去約 10 万 年間の隆起速度は 0~0.3m/1000 年の地域が多い(地質環境の長期安定性委員会編, 2011)。この ことから、隆起速度は沿岸部で最も分布領域の広い 0~0.3m/1000 年の最大値である 0.3m/1000 年とした。

次に、侵食速度については、海成段丘を対象に開析谷の堆積から算出した侵食速度と隆起速度の相対関係を検討している。それによると、最終間氷期に形成された海成段丘では、過去12.5万年間の侵食量が隆起量に比例して増加する傾向を示すとともに、離水後約12.5万年の段丘では、開析谷の平均深度は隆起量の20~30%、隆起した体積の10~20%が侵食で失われるとされる(藤原ほか,2005)。また、侵食速度の隆起速度に対する比率は、時間とともに増加し、軟岩からなる丘陵地域では40~45万年、硬岩からなる山地では100万~数百万年程度隆起が継続すると、両者は平衡状態に達するとの見解が示されている。この平衡状態における侵食速度と隆起速度の比は1となる。

隆起速度と侵食速度が釣り合った平衡状態に達するまでの時間は、隆起速度により異なるが、 丘陵では 40~65 万年(柳田ほか, 2004)、山地では 100 万年ないし数百万年(Ohmori, 1985; Ohmori, 1993)と考えられている。Ohmori (1978)の山地高度変化曲線のモデルに基づき、隆 起速度の異なる山地高度変化曲線を検討した結果(浅森ほか, 2012)によれば、0.5m/1000 年の 隆起速度を有する山地における 100 万年後の平均高度は 350m 程度と考えられる。100 万年間の 隆起量 500 m(隆起速度 0.5m/1000 年×100 万年)から 100 万年後の平均高度 350 m を減じた 150 m を 100 万年間における平均的な侵食速度とすると、侵食速度は 0.15m/1000 年(=150m/100 万年)と算出され、侵食速度(0.15m/1000 年)と隆起速度(0.5m/1000 年)の比は、約 0.3 とな る。

このため本業務では、単純化するため、侵食速度/隆起速度の比を 1/3 とし、海水準変動及び 見かけの隆起速度を次のとおり設定した(図 3-1)。

海水準変動:変動周期12万年(海退期間10.8万年、海進期間1.2万年)
変動量 125m(隆起・侵食を考慮しない値)

• 見かけ隆起速度: 0.2m/1000 年

⁽隆起速度: 0.3m/1000年、侵食速度/隆起速度の比は 1/3)



3.1.3 解析物性值

解析用物性値は薄層や断層を除いて全て共通の設定とした。基本的に包括的技術報告書のレビ ュー版に記載されている統計値とし、記載されていない物性値に関しては一般的な知見を基に設 定した。比貯留係数は力学定数から次式により計算した(徳永, 1998)。

$$S_{s} = \rho g \left(\frac{1}{K_{V}} + \frac{\varphi}{K_{f}} \right)$$

ただし、 S_s は比貯留係数、 ρ_f は流体(水)の密度(20℃で998 kgm⁻³)、gは標準重力加速度(9.81 m/s)、 φ は間隙率、 K_f は水の体積弾性係数(20℃で2.19 GPa)である。また、 K_V は多孔質体である岩石の体積弾性係数で、排水条件下での体積弾性係数K及び剛性率Gと次式の関係にある。

$$K_{\rm V} = K + \frac{4}{3}G$$

溶質の分散長は、流下距離の 1/10~1/100 と一般的に言われている。今回のケースは、海水準 変動による汀線の移動距離を流下距離と捉えると、低地 ・ 台地相当部及び大陸棚部で約 10km 程 度となる。そこで、縦分散長はその 1/100 倍の 100m,横分散長は縦分散長の 1/10 倍の 10m と した。また、実効拡散係数は、包括的技術報告書レビュー版に記載されている基本ケースの母岩 中の核種のうち塩素イオンを対象とした値を用いた。遅延係数は、塩素イオンが非収着性と考え られることから 1.0 を用いた。解析物性値一覧を表 3-1 に示す。

山圩		透水係数(m/s)		十九日四十十	比貯留係数	分散長(m)		実効拡散係数
石裡	地層名	鉛直	水平	有効间原率	(1/m)	縦	横	(m²/s)
深成岩	上部割れ目帯	1.4E-06		0.050	1.0E-06	100	10	9.0E-13
	基盤花崗岩	1.4E-08		0.008	2.6E-07	100	10	9.0E-13
堆積岩	第四紀層	1.0E-05		0.290	4.7E-05	100	10	1.0E-11
	泥岩層	2.3E	E-08	0.290	3.2E-06	100	10	1.0E-11
	砂岩層	5.3E-07		0.220	3.2E-06	100	10	1.0E-11
	砂岩泥岩互層	2.3E-08	5.3E-07	0.250	3.2E-06	100	10	1.0E-11
	礫岩層	6.5E-08		0.180	3.2E-06	100	10	1.0E-11
	基盤堆積岩	1.1E-08		0.035	3.8E-07	100	10	3.0E-13
	断層(10km以上の亀裂) 5.4E-07		0.250	3.2E-06	100	10	1.0E-11	

表 3-1 解析物性值

3.1.4 解析結果

(1) 海水準変動解析

1) 洗い出し解析

洗い出し解析の結果のうち、汀線位置を氷期―間氷期サイクル解析の初期状態まで移動させた 状態(807 万年後、EL.+216m)の比濃度分布図と流速コンター及びベクトル図を図 3-2~図 3-10 に示す。

2) 氷期-間氷期サイクル解析

氷期・間氷期サイクル解析の結果のうち、計算例として case001 の最大海進時の各サイクルの 比濃度分布図と流速コンター及びベクトル図を図 3-11~図 3-14 に、9 サイクル目の海進海退 の一連の結果を図 3-15 及び図 3-16 に示す。また、各ケースの 9 サイクル目の最大海進時(108 万年後)の比濃度分布図と流速コンター及びベクトル図を図 3-17~図 3-30 に、濃度差コンター 図を図 3-31 に示す。



図 3-2 解析結果(case001、薄層なし、断層なし、汀線位置: EL. +216m)



図 3-3 解析結果(case003、薄層:透水異方性、断層なし、汀線位置: EL. +216m)



図 3-4 解析結果(case005、薄層:要素でモデル化、断層なし、汀線位置:EL.+216m)



図 3-5 解析結果 (case007、薄層なし、断層あり、汀線位置: EL. +216m)



図 3-6 解析結果(case009、薄層:透水異方性、断層あり、汀線位置:EL.+216m)



図 3-7 解析結果(case011、薄層:要素、断層あり、汀線位置:EL.+216m)



図 3-8 解析結果(case013、薄層なし、断層なし、浸透流解析、汀線位置: EL. +216m)



図 3-9 解析結果(case013c、薄層なし、断層なし、移流分散解析、汀線位置: EL. +216m)



216m)





図 3-12 比濃度コンター図 (case001、5~9 サイクル目の最大海進時)



図 3-13 実流速コンター図及びベクトル図(case001、1~4 サイクル目の最大海進時)



図 3-14 実流速コンター図及びベクトル図(case001、5~9サイクル目の最大海進時)





図 3-16 実流速コンター図及びベクトル図(case001、9サイクル目)



図 3-17 比濃度コンター図(9サイクル目の最大海進時、108万年後)



図 3-18 比濃度コンター図(9サイクル目の最大海進時、108万年後)



図 3-19 比濃度コンター図(9 サイクル目の最大海進時、108 万年後、拡大図)






図 3-22 比濃度コンター図(9サイクル目の最大海進時、108万年後、拡大図)



図 3-23 比濃度コンター図(9サイクル目の最大海進時、108万年後、拡大図)



図 3-24 実流速コンター図及びベクトル図(9サイクル目の最大海進時、108万年後)



図 3-25 実流速コンター図及びベクトル図(9サイクル目の最大海進時、108万年後)



図 3-26 実流速コンター図及びベクトル図 (9 サイクル目の最大海進時、108 万年後、拡大図)



図 3-27 実流速コンター図及びベクトル図 (9 サイクル目の最大海進時、108 万年後、拡大図)



図 3-28 実流速コンター図及びベクトル図 (9 サイクル目の最大海進時、108 万年後、拡大図)



図 3-29 美流速コンター及びヘクトル図 (9 サイクル目の最大海進時、108 万年後、拡大図)



(9 サイクル目の最大海進時、108 万年後、拡大図)



(2) 坑道掘削後解析

坑道掘削後解析の結果のうち、各ケースの施設掘削 100 年後の比濃度分布と流速コンター及び ベクトル図を図 3·32~図 3·48 に示す。また、処分施設の総湧水量の経時変化を図 3·49 に、施 設中央位置における比濃度の経時変化を図 3·50 に示す。また、比濃度の差分コンター図 (case002 を基本)を図 3·51、図 3·52 に示す。塩水の引き込み領域は流跡線解析によってその範囲の把握 を行った。具体的には、掘削開始 100 年後において処分施設位置に到達する流跡線の掘削直後か らの移行経路を算出した。流跡線解析の結果を図 3·53~図 3·56 に示す。



図 3-32 比濃度分布図(case002、薄層なし、断層なし、100年後)





図 3-34 比濃度分布図(case004、薄層:透水異方性、断層なし、100年後)



(case004、薄層:透水異方性、断層なし、100 年後)



図 3-36 比濃度分布図(case006、薄層:要素で考慮、断層なし、100年後)



(case006、薄層:要素で考慮、断層なし、100 年後)





図 3-39 実流速コンター図及びベクトル図(case008、薄層なし、断層あり、100年後)



図 3-40 比濃度分布図(case010、薄層:透水異方性、断層あり、100年後)



(case010、薄層:透水異方性、断層あり、100 年後)



図 3-42 比濃度分布図(case012、薄層:要素で考慮、断層あり、100年後)



(case012、薄層:要素で考慮、断層あり、100 年後)



図 3-44 実流速コンター図及びベクトル図 (case014、薄層なし、断層なし、密度流考慮なし[浸透流解析]、100 年後)



(case014c、薄層なし、断層なし、密度流考慮なし[移流分散解析]、100 年後)



図 3-46 実流速コンター図及びベクトル図 (case014c、薄層なし、断層なし、密度流考慮なし[移流分散解析]、100 年後)



図 3-47 比濃度分布図(case017、薄層なし、断層なし、化石海水考慮、100年後)



図 3-48 実流速コンター図及びベクトル図 (case017、薄層なし、断層なし、化石海水考慮、100 年後)



図 3-49 処分施設湧水量の経時変化



図 3-50 比濃度分布の経時変化(処分施設中央位置、汀線から 10km)





図 3-52 濃度差コンター図(拡大図、100年後)



達する流跡線)



達する流跡線)



達する流跡線)



達する流跡線)



流跡線)

参考文献

- 浅森浩一, 丹羽正和, 花室孝広, 山田国見, 草野友宏, 幕内 歩, 高取亮一, 國分陽子, 松原章浩, 石丸恒存, 梅田浩司, 地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書(平成23年度), JAEA-Research 2012-024, 132p., 2012.
- Crawford J, Sidborn M, Bedrock transport properties Laxemar. Site descriptive modelling.SDM Site Laxemar. SKB R-08-94, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2009.
- 電気事業連合,核燃料サイクル開発機構,TRU 廃棄物処分技術検討書一第 2 次 TRU 廃棄物 処分研究開発取りまとめー,JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005.
- Diomidis, N., Cloet, V., Leupin, O.X., Marschall, P, Poller, A., Stein, M, Production, consumption and transport of gases in deep geological repositories according to the Swissdisposal concept. Nagra Tech. Rep. NTB 16-03, 2016.
- 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,11(2), pp.139-146., 2005.
- 原子力発電環境整備機構,包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の実現–適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築-レビュー版,NUMO-TR-18-03, 2018.
- 核燃料サイクル開発機構,わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地 層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊3地層処分システムの安全評価,JNC TN1400 99-023, 1999.
- Hartley, L., Appleyard, P., Baxter, S., Hoek, J., Roberts, D. & Swan D., Development of a hydrogeological discrete fracture network model for the Olkiluoto Site Descriptive Model 2011. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. Working Report 2012-32, 2013a.
- Hartley, L., Hoek, J., Swan, D., Appleyard, P., Baxter, S., Roberts, D. & Simpson, T., Hydrogeological modelling for assessment of radionuclide release scenarios for the repository system 2012. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. Working report 2012-42, 2013b.
- Hartley, L., Hoek, J., Swan, D., Baxter, S. & Woollard, H., Hydrogeological discrete fracture modelling to support Rock Suitability Classification. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. Working Report 2012-48, 2013c.
- HSK/KSA, "Guideline for Swiss Nuclear Installations HSK-R-21/e: Protection Objectives for the Disposal of Radioactive Waste"; Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate (HSK), Federal Commission for the Safety of Nuclear Installations (KSA). HSK, Villigen., 1993.
- Joyce, Steven, Simpson, Trevor, Hartley, Lee, Applegate, David, Hoek, Jaap, Jackson, Peter, Swan, David, Marsic, Niko, and Follin, Sven., Groundwater flow modelling of periods with temperate climate conditions - Forsmark., SKB-R-09-20, Svensk Kärnbränslehantering AB., 2010.
- Löfman, J. and Karvonen, T., Simulations of hydrogeological evolution at Olkiluoto. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. Working Report 2012-35, 2012.
- Miller, B. and Marcos, N., Process report. FEPs and scenarios for a spent fuel repository at Olkiluoto. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2007-12. 274 p, 2007.
- Nagra, Project Opalinus Clay Safety Report: Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste, NTB-02-05, 2002a.
- Nagra, Project Opalinus Clay Models, Codes and Data for Safety Assessment: Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-

level waste, NTB-02-06, 2002b.

- Nagra, Project Opalinus Clay FEP Management for Safety Assessment, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste, NTB-02-23, 2002c.
- Nagra, The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland, Technical Report 16-02, 2016.
- 西垣 誠, 菱谷智幸, 橋本 学, 河野伊一郎, 飽和 ・ 不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地 下水流の数値解析手法に関する研究. 土木学会論文集, No.511, Ⅲ-30, 135-144, 1995.
- Ohmori, H., A comparison between the Davisian scheme and landform development by concurrent tectonics and denudation, Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo, 17, pp.19-28., 1985.
- Ohmori, H., Changes in the hypsometric curve through mountain building resulting from concurrent tectonics and denudation, Geomorphology, 8, pp.263-277., 1993.
- Ohmori, H., Relief structure of the Japanese mountains and their stages in geomorphic development, Bulletin of Department of Geography, University of Tokyo, 10, pp.31-85., 1978.
- Papafotiou, A. & Senger, R., Sensitivity analyses of gas release from a SF/HLW repository in the Opalinus Clay including the microbial consumption of hydrogen. Nagra Working Report NAB 16-08, 2016.
- Posiva, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto Synthesis 2012, POSIVA 2012-12, 2012a.
- Posiva, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto –Performance Assessment 2012, POSIVA 2012-04, 2012b.
- Posiva, "Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto, Features, Events and Processes 2012", Posiva 2012-07, 2012c.
- Projekt Opalinuston Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technical Report NTB 02-03. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Trinchero, P., Román-Ross, G., Maia, F. & Molinero, J. Hydrogeochemical evolution of the Olkiluoto site. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. Working Report, 2013.
- Schatz, T. and Martikainen, J., Laboratory studies on the effect of freezing and thawing exposure on bentonite buffer performance: Closed system tests Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2010-06. 58 p, 2010.
- Selroos, J-O. and Follin, S., SR-Site Groundwater Flow Modeling Methodology, Setup and Results. SKB R-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB., 2010.
- SKB, Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-47, 2010a.
- SKB, FEP report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-45, 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, 2011.
- 杉江茂彦,3次元地盤/地下水連成解析プログラム GRASP3D の解析理論と粘土の力学挙動 17 解 析への応用,大林組技術研究所報, No.51, pp.15-22, 1995.
- Svensson, U., and Follin, S., Groundwater flow modelling of the excavation and operational

phases - Forsmark, SKB R-09-19, Svensk Kärnbränslehantering AB., 2010.

地質環境の長期安定性研究委員会編,『日本列島と地質環境の長期安定性』,地質リーフレット 4, 日本地質学会, 2011.

徳永朋祥, 貯留係数に関する一、二の議論, 応用地質, 39(5), pp.475-479, 1998.

- Vidstrand P, Follin S, Zugec N, Groundwater flow modelling of periods with periglacial and glacial climate conditions Forsmark. SKB R-09-21, Svensk Kärnbränslehantering AB., 2010.
- 柳田 誠,藤原 治,後藤憲央,佐々木俊法,谷密度と起伏量による丘陵の定義,地学雑誌,113, pp.835-847.,2004.

Appendix VII

セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充

セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充 補足資料

1. はじめに

本付属書は、平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(沿岸部 処分システム評価確証技術開発)のうち 4-2(2)項の「試験計画の策定に係る既往の知見の調査」 に関して、報告書本文中には詳細に掲載できなかった調査結果を記したものである。

2. 試験計画の策定に係る既往の知見の調査

2.1 沿岸部の地下環境を想定した地下水組成に関する調査

沿岸海底下の地下水化学組成を考慮した試験に用いる塩水条件を設定するために、日本国内の 地下水調査の結果のうち沿岸部の地下水化学組成に関する情報を中心に調査した。

2.1.1 調查方法、調查対象

1) 平成 30 年度沿岸部処分システム高度化開発報告書

平成 30 年度沿岸部処分システム高度化開発報告書(産業総合研究所,原子力機構,原環センター,電中研,2019)の「2.2 沿岸部の地下水長期安定性に関わる研究」に記載されている地下水の 分析結果を調査してまとめた。

2) その他の文献情報

国立国会図書館のホームページ内の蔵書検索システムにより、「地下水 and 化学成分」で検索した結果、137 件が、「地下水 and 化学組成」で検索した結果、145 件が、それぞれ該当した。内容確認のうえ、塩水化学成分が詳細に掲載された報告を選択した。また雑誌「地下水技術」(一般社団法人地下水技術協会)より、塩水化学成分が詳細に掲載された報告 2 件を選択した。なお、こちらの調査においては、沿岸部に限定せず情報を入手した。

2.1.2 調査結果

1) 平成 30 年度沿岸部処分システム高度化開発報告書

平成 30 年度沿岸部処分システム高度化開発報告書(以下、平成 30 年度報告書)には、北海道 天塩郡幌延町浜里における、海岸から 300m の 1,143m の深さの地下水の水質分析結果が示され ている(表 2-1)。また、平成 30 年度報告書には、同地点の異なる深さの主要溶存イオンの分析結 果が、ヘキサダイアグラムで示されている(図 2-1)。これらの図表からは、浜里の地下 300m付近 と 1,000m 付近とでは地下水の塩分濃度が異なっていることが確認される。 表 2-1 浜里 DD-1 孔 1,143m 水質分析結果(平成 30 年度報告書 表 2.2-1)

表 2.2-1 DD-1 孔 1,143 m 水質分析結果(採水日 2018 年 11 月 3 日:地上)

浜里1143m 2018/11/3

項目	単位	値	項目	単位	値
スクリーン	m	1142.5 ~ 1143.5	В	ppb	13000
緯度	°(degree)	141.688167	A	ppb	6
経度	°(degree)	44.994782	Mn	ppb	680
水温	°C	14.1	Fe	ppb	661
pH		9.09	Rb	ppb	126
EC	µS/cm@25°C	45800	Sr	ppb	488
DO	mg/L	0.0	Cs	ppb	-
Ehshe	mV	-88	Ba	ppb	204
アルカリ度 (pH4.3)	meq/L	53.0	Pb	ppb	126
F'	mg/L	-	Si	ppm	3
Cľ	mg/L	16295	δ ¹⁸ O	%0	2.4
NO2	mg/L	-	δD	%	-15
Br	mg/L	171	δ ¹³ C	%0	-1.1
NO3	mg/L	1	14C	pMC	2.8
SO42-	mg/L	33			
PO43-	mg/L	-			
Na ⁺	mg/L	11638			
K*	mg/L	386			
Mg ²⁺	mg/L	23			
Ca ²⁺	mg/L	4			

注)

封圧採水のため、水温は正確ではない。



図 2-1 浜里 DD-1 孔の地下水の分析結果(平成 30 年度報告書) 図 2.2-6)

加えて、平成 30 年度報告書には、沿岸部の 1,000m 級のボーリング孔や温泉井の 62 地点で測 定した地下水の主要溶存イオンの分析結果が、ヘキサダイアグラムで示されている(図 2-2)。同図 には、併せて地下水の水質タイプ(Na-Cl 型、Ca-Cl 型など)が記載されている。

これらのヘキサダイアグラムに示された地下水化学組成は、地下水中の塩分濃度と地下水年代 から、地下水を「氷期降水」、「現降水」、「化石海水」及び「現海水」の4つに区分(以下、便宜 的に地下水区分と記す)されている。なお、平成 30 年度報告書には、沿岸部の地下水分布の概念 図が示されている。(図 2-3)

地下水区分ごとの主要成分の濃度を整理したものを表 2-2 及び図 2-4~図 2-9 に記す。いずれ の地下水も成分濃度に幅があり、海水と降水が混合していると考えられる。

また、比較のため、平成 28 年度~30 年度沿岸部処分システム高度化開発(産業総合研究所,原 子力機構,原環センター,電中研,2017;2018;2019)で使用した人工海水(八洲薬品社、金属腐 食試験用アクアマリン)の濃度を表 2-3 に示す。主要成分濃度からは、人工海水は表 2-2 の現海 水、1/10 人工海水は Cl 濃度がやや高めながら他の成分濃度範囲は表 2-2 の現降水、1/100 人工 海水は表 2-2 の現降水に相当する。

現海水の濃度範囲の上限は、CaとHCO₃を除き海水中の各成分の濃度と同等である。Caは海水中に 400mg/l 程度、HCO₃は 150mg/l 程度含まれているが、現海水の濃度範囲はこれを上回っている。また、化石海水は人工海水より Ca 濃度が高いものも存在する。HCO₃ 濃度については、地下水年代が新しい現海水と現降水については人工海水程度の濃度が上限であったが、地下水年代の古い化石海水と氷期降水は人工海水の濃度を大幅に上回るものも存在する。


図 2.2-28 ヘキサダイアグラム (赤線は 10 倍にした濃度) ダイヤグラム左上の数値は番号。560 と 1050 は過年度に採取した新潟平野の深層地下水

図 2-2 62 地点の水質分析結果(平成 30 年度報告書 図 2.2-28)



図 2.2-26 沿岸部での地下水分布の概念図

図 2-3 沿岸部での地下水分布の概念図(平成 30 年度報告書 図 2.2-26)

	氷期降水	現降水	化石海水	現海水
Na	1,500mg/1以下 大半が500mg/1以下	1,100mg/1以下 大半が700mg/1以下	2,500~12,000mg/1	1,000~11,000mg/1
Ca	220mg/1以下	600mg/1以下	4,600mg/1以下 大半は600mg/1以下	350~4,200mg/1 多くは1,000mg/1以下
Mg	100mg/1以下 大半は1桁台	大半は1桁mg/1 一部100mg/1程度	10~600mg/1	1,500mg/1以下
C1	900mg/1以下	大半は400mg/1以下 一部1,800mg/1程度	3,000~19,000mg/1	2,900~19,500mg/1
HCO3	大半は20~1,000mg/1 2点のみ2,000mg/1~ 4,800mg/1の範囲	200mg/1以下 大半は100mg/1以下	1,500mg/1以下 浜里DD-1孔のみ2,000~ 3,800mg/1	250gm/1以下
S04	0~200mg/1 一部1,600mg/1程度	20~1,600mg/1	大半は40mg/1以下 1点のみ1,200mg/1	2,600mg/1以下

表 2-2 地下水区分ごとの主要溶存イオン濃度範囲

度(単位:mg/l) 人工海水 1/10人工海水 1/100人工海水 Na 10.900 1.090 109 Ca 393 39.3 3.93 Mg 1,260 126 12.6 CI 19,500 1,950 195 HCO₃ 147 14.7 1.47 2.730 273 27.3 SO4

表 2-3 平成 28 年度~30 年度沿岸部処分システム高度化開発で使用した人工海水の主要成分濃 度 (単位・mg/l)

八洲薬品社、金属腐食試験用アクアマリンの製品の仕様値から算出



図 2-4 地下水区分ごとの Na イオン濃度 左:濃度が線形目盛、右:濃度が対数目盛

赤の破線は、平成 28 年度~30 年度沿岸部処分システム高度化開発での人工海水の濃度を示す





赤の破線は、平成 28 年度~30 年度沿岸部処分システム高度化開発での人工海水の濃度を示す



図 2-6 地下水区分ごとの Mg イオン濃度

左:濃度が線形目盛、右:濃度が対数目盛

赤の破線は、平成 28 年度~30 年度沿岸部処分システム高度化開発での人工海水の濃度を示す





赤の破線は、平成 28 年度~30 年度沿岸部処分システム高度化開発での人工海水の濃度を示す





左:濃度が線形目盛、右:濃度が対数目盛

赤の破線は、平成 28 年度~30 年度沿岸部処分システム高度化開発での人工海水の濃度を示す



図 2-9 地下水区分ごとの SO4 イオン濃度 左:濃度が線形目盛、右:濃度が対数目盛

赤の破線は、平成 28 年度~30 年度沿岸部処分システム高度化開発での人工海水の濃度を示す

ここで、この結果をさらに地下水の水質タイプ(Na-Cl型、Ca-Cl型など)ごとに分け、人工 海水の Cl 濃度を基準に、各地下水が人工海水の何倍程度の濃度か、各水質タイプ(例えば Na-Cl型)にどのような成分が混合したものか、といった観点を踏まえて整理した。この整理結果については、報告書本編に記載した。

2) その他の文献情報

各文献で報告されている地下水化学成分の一覧を表 2-4~表 2-9 にまとめた。表には報告年の 古いものから順に掲載した。以下、各報告について、概要を記す。なお、括弧内の(No.)は、 表 2-4~表 2-9 の文献 No.を示す。

池田(池田, 1985) (No.1) は海岸平野における被圧地下水の塩水化地域のうち、比較的規模の大きい静岡県の3地区(富士、磐田、浜松)の塩水化機構を研究した。いずれの地域でも塩水化の前に地下水位の低下が進んでおり、帯水層への海水の侵入が塩水化の原因と考えられた。

石塚ら(石塚ら, 1994) (No.2) は青森県の黒石扇状地の地下水質について地球化学的な検討 を行った。井戸の深度別に、また市街地の地域別に水質を比較した。

梁(梁,1996)(No.3)は化学成分及び環境同位体組成により、神奈川県の秦野盆地の地下水の流 動系を推定した。表に示した水質データのうち、地点 1~27 は浅部の、28~33 は深部の地下水 である。

栃本ら(栃本ら,2003) (No.4) は三原山の火山活動の影響による地下水中の無機成分への影響を、2002年の5月と11月に16か所の井戸及び1か所の湧水から採水し、分析調査した。

向井ら(向井ら, 2009) (No.5) は神社仏閣に井戸が多く、容易に地下水を採取できる京都に おいて、29 か所から井戸水を採取し、各種成分の分析を行った。

町田ら(町田ら, 2016) (No.6) は苫小牧周辺の 26 地点にて地下水を採取し、各種成分の分析を 行い、その結果から当地域における広域地下水流動の概念モデルを示した。

丸井ら(丸井ら, 2016)(No.7)は日本列島の南海部沿岸域に焦点を当て、深部の地下水水質の 調査を行った。

これらの情報からは、主要成分濃度の範囲は、表 2-2 に示した範囲内であることが確認された。

参考文献

- 池田喜代治,海岸平野における塩水化地下水の水・堆積物相互作用と化学組成,陸水学雑誌, Vol.46, pp.303-314, 1985.
- 石塚伸一,工藤真哉,佐藤真理子,黒石扇状地における地下水質の地球化学的検討,青森県環境保 健センター研究報告, No.5, pp.36-44, 1994.
- 町田功, 福本幸一郎, 森野祐助, 丸井敦尚, 苫小牧周辺の広域地下水流動概念モデル, 地下水技術, Vol.58、3・4号, pp.1-11, 2016.
- 丸井敦尚,小野昌彦,町田功,日本列島南海沿岸部の深部地下水特性,地下水技術, Vol.58, 3・4 号, pp.23-28, 2016.
- 向井浩,治田隆宏,田中里志,井水の化学成分に基づく京都盆地北部市街域の地下水系の解析, 地球化学, Vol.43, pp.45-57, 2009.

梁海根,秦野盆地の都市水文環境,平成8年度博士論文(立正大学),1996.

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

産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力 中央研究所,平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業沿岸部処 分システム高度化開発報告書,2018.

産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力 中央研究所,平成30年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業沿岸部処 分システム高度化開発報告書,2019.

栃本博, 関山登, 瀬戸博, 真木俊夫, 伊豆大島の水道原水の化学成分濃度および特性, 東京都健康安 全研究センター研究年報, 通号54, pp.275-282, 2003.

表 2-4 地下水化学成分の調査結果-1

			# 1.8 *			揮宣	泥さ	探水時間	大油									水質								
No.	文献	地域	************************************	特徵	地点	小示同	1XC	177/149799		nН	Ec ^{*1}	DO^{*2}	Li	Na	K	NH4	Ca	Mg	F	Cl	Br	HCO ₃	NO ₂	NO ₃	SO_4	PO ₄
	Sele we use the St. St. Ste Martin	ster. 1	eden i Sele da met			m	m		°C	pii	µS∙cm ⁻¹								mg/l						1. 100 154	
	池田喜代治、海岸平野における塩水化地	富士 (静 岡)	富士浴着層および愛鷹	海岸平野における被圧地下水の塩水化地域の	1		150		15.6	7.2				6.0	2.4		12.0	4.3		5.1					5.0	
	下水の水・堆積物相互作用と化学組成、陸水		火山砂礫層	うち比較的規模の大きい3地区の塩水化機構	2		100		16.7	6.6				500.0	19.7		280.8	110.8		1414.0					229.6	
	学雑誌、Vol.46、 pp.303-314、1985.10			を研究した。いずれの 地域でも塩水化の前に	3		70		14.3	6.5				2910.0	62.6		525.7	445.1		6156.0					872.4	
				地下水位の低下が進ん でおり、帯水層への海	4		107		15.1	6.8				9150.0	335.0		435.3	1148.0		16741.0					2315.0	
				水の侵入が塩水化の原 因と考えられた。	5		107		15.9	7.0				1350.0	62.5		70.0	129.3		2344.0					327.0	
					6		107		14.9	7.0				8096.0	301.0		408.2	1009.5		14807.0					2088.0	
					7		100		14.8	7.1				10200.0	508.0		417.1	1244.8		18281.0					2535.0	
					8		135		15.5	7.5				51.8	6.5		184.5	62.9		497.5					63.5	
					9		100		15.8	7.7				243.0	19.0		457.0	148.1		1448.1					194.1	
					10		90		13.7	7.4				636.0	17.7		453.3	149.2		1996.5					255.1	
					11		84		17.6	7.5				2170.0	61.1		1598.9	598.8		7089.0					870.2	
1					12		90		15.8	7.2				1340.0	48.7		1105.5	427.0		4708.5					626.9	
		磐田(静 岡)	磐田原礫層		1		80		16.5	7.0				229.0	1.4		16.0	23.0		370.0					53.1	
					2		70		16.7	7.0				590.0	2.5		45.0	56.9		962.0					97.0	
					3		80		<u>19.8</u>	6.6				1340.0	6.6		42.5	110.0		2046.0					23.7	
	同上			同上	4		150		17.2	7.3				3200.0	14.0		338.1	407.5		6740.5					684.0	
					5		83		18.6	6.5				4100.0	16.3		337.3	586.1		7790.0					967.6	
					6		100		20.0	6.6				5650.0	35.0		478.8	769.3		10640.0					1315.4	
		浜松 (静)	砂碟層		1		80		15.2	7.1				12.5	0.4		5.3	2.8		2.7					12.5	
		10017			2		99		19.6	7.1				165.0	1.0		39.5	17.5		357.5					12.5	
	同上			同上	3		60		18.3	6.5				128.0	4.0		242.7	125.6		925.3					69.0	
					4		80		20.2	6.5				475.0	6.0		681.0	359.8		2761.6					727.0	
					5		80		17.9	6.6				89.0	10.4		812.0	518.6		3816.3					432.0	
	石塚伸一、工藤真哉、	黑石(青		黒石扇状地の地下水質		浅井戸	5~30				250			18.4	3.7		13.9	5.3		20.9				24.2	22.2	
	状地における地下水	25.		検討を行った。井戸の		深井戸	100				193			14.9	1.5		12.2	5.0		9.2				0.3	10.6	
2	青森県環境保健セン			の地域別に水質を比較		市街地	東側	$1992.9 \sim 12$ 1993.7 ~ 10						13.4	1.4		15.3	4.7		13.8				17.7	14.1	
	pp.36-44, 1994			0/2.		市街地	中央	1990.7 - 10						19.1	3.7		16.2	5.2		23.4				42.7	21.8	
						市街地	西側							32.2	7.0		18.6	7.1		43.0				33.9	52.9	

*1:電気伝導度、*2:溶存酸素

表 2-5 地下水化学成分の調査結果-2

						面中		*?~~ ======	山い田									水 質								
No.	文献	地域	帯水層の 地質等	特徵	地点	係向		沐小时朔	水值	" Н	Ec ^{*1}	DO^{*2}	Li	Na	Κ	NH4	Ca	Mg	F	Cl	Br	HCO ₃	NO ₂	NO ₃	SO_4	PO ₄
						m	m		°C	рп	$\mu S \cdot cm^{-1}$								mg/l							
	梁海根、秦野盆地の都 市水文環境、平成8年	秦野(神 奈川)		化学成分および環境同 位体組成により、素野	1	78		1995.4.29	14.2	6.6	284			2.1	0.79		21.6	10.7		21.4		48.8		4.4	29	
	度博士論文(立正大 学)			盆地の地下水の流動系 を推定した。地点1~	2	85		1995.4.29	16.7	7.1	270			1.2	0.20		28.0	12.6		9.7		73.1		3.4	27	
				27は浅部の、28~33は 深部の地下水。	3	85		1995.4.29	17.1	7.1	308			6.5	0.30		34.4	11.4		17.7		134.0		2.7	29	
					4	75		1995.4.29	15.9	6.9	313			3.8	0.30		29.6	12.1		18.3		59.7		3.4	38	
					5	110		1995.4.29	14.8	6.8	271			4.0	0.49		20.8	11.1		7.9		42.7		4.6	43	
					6	149		1995.4.29	16.7	7.0	325			2.2	0.20		30.4	15.0		14.0		64.6		6.2	29	
					7	98		1995.5.2	17.0	7.2	263			5.0	0.20		29.6	11.1		8.8		61.0		<u>3.9</u>	25	
					8	98		1995.5.2	17.4	7.2	257			1.3	0.20		27.2	11.1		8.7		61.0		4.6	26	
					9	105		1995.5.2	17.9	7.1	275			1.6	0.30		26.4	13.1		10.3		62.2		4.5	33	
					10	130		1995.5.2	16.9	7.1	287			5.1	0.30		28.8	9.7		16.2		63.4		3.6	33	
					11	113		1995.5.2	18.3	6.9	281			10.3	1.59		28.0	5.3		12.3		61.7		2.5	26	
					12	112		1995.5.2	16.8	7.1	262			0.8	0.20		26.4	11.1		12.5		48.8		3.6	28	
					13	115		1995.5.2	17.5	6.8	319			1.1	0.39		30.4	13.1		11.1		63.4		7.4	39	
					14	113		1995.5.3	18.1	7.1	31 <mark>3</mark>			1.4	0.10		29.6	14.0		<mark>11.3</mark>		73.1		4.7	32	
					15	120		1995.5.2	18.1	6.8	205			1.3	0.30		20.0	17.0		10.9		57.3		4.5	39	
					16	150		1995.5.3	15.7	6.8	191			4.9	0.10		12.8	5.8		7.0		67.1		3.4	25	
3					17	152		19 <mark>95.5</mark> .3	17.4	7.1	230			2.6	0.30		20.0	9.7		7.2		48.8		4.2	35	
					18	182		1995.5.3	16.2	6.9	332			3.6	0.79		32.8	16.0		15.6		94.1		0.6	24	
					19	180		1995.5.3	16.6	7.1	177			5.5	0.20		18.4	6.8		4.5		54.9		1.1	16	
					20	215		1995.5.3	16.6	6.9	235			2.5	0.20		22.4	11.6		4.8		61.0		2.9	32	
					21	220		1995.5.3	18.0	6.7	275			1.9	0.99		21.6	11.6		16.1		59.7		6.8	19	
					22	205		1995.5.3	16.3	6.7	209			6.2	1.09		16.8	6.3		3.4		61.0		3.3	20	
					23	190		1995.5.3	16.2	6.7	229			0.8	0.30		28.8	6.3		9.5		54.9		3.3	30	
					24	195		1995.5.4	13.9	6.7	275			2.2	0.39		24.8	12.1		11.0		73.1		3.1	23	
					25	165		1995.5.4	17.2	7.0	205			1.2	0.30		23.2	8.2		4.8		64.6		1.4	8	
					26	145		1995.5.4	16.9	6.9	226			1.9	0.20		21.6	10.2		7.3		58.5		2.4	27	
					27	75		1995.5.4	14.9	6.9	311			6.7	0.39		28.0	17.0		17.8		62.2		2.6	37	
					28	90		1996.7.6	17.2	6.9	333			1.3	0.30		39.2	7.7		25.4		138.0		3.8	32	
					29	110		1996.7.6	17.8	6.9	344			1.8	0.20		39.2	1.4		28.0		91.8		1.4	75	
					30	120		1996.7.6	17.0	6.9	284			1.1	0.20		32.8	11.1		16.8		161.0		3.8	29	
					31	150		1996.7.6	16.6	6.9	246			1.2	0.30		39.6	8.2		10.6		115.0		3.7	23	
					32	180		1996.7.6	15.7	6.9	205			0.9	0.10		21.6	9.2		8.2		68.9		2.2	18	
					33	195		1996.7.6	16.5	6.9	197			1.4	0.20		21.6	8.7		7.2		68.9		2.0	19	

*1:電気伝導度、*2:溶存酸素

表 2-6 地下水化学成分の調査結果-3

						博言	175 kr	きと早生	大海									水 質								
No.	文献	地域	帝水層の地質等	特徵	地点	小市同	UKC	派尔时期	小価	pH	Ec ^{*1}	D0 ^{*2}	Li	Na	K	NH4	Ca	Mg	F	Cl	Br	HCO3	NO ₂	NO ₃	SO4	PO ₄
	栃太遠、闇山谷、瀬戸	伊豆大島		三原山の火山活動の影		m	m		°C	7.0	µS.cm	-	0.01	100	0		70		mg/l	000	0.0	150		0.1	47	
	博、真木俊夫、伊豆大	(東京)		響による地下水中の無	1				19.3	7.2	1020		0.01	106	8		79	44	0.1	266	0.9	150		2.1	40	
	島の永道原水の化学成分濃度および特性、			機成分への影響を、 2002年の5月と11月に	2				20.8	7.6	710		ND	83	7		61	32	0.2	168	0.5	140		1.6	30	
	東京都健康安全研究センター研究年報、通			16か所の井戸および1 か所の湧水から採水	3				20.0	7.6	548		ND	57	5		56	22	ND	101	0.3	165		1.2	22	
	号54、pp.275-282、 2003			し、分析調査した。5 月の結果。	4				20.9	7.3	922		ND	89	9		83	46	0.1	239	0.8	153		1.3	39	
					5		65~		18.6	7.6	2980		ND	320	11		292	108	ND	1100	3.7	83		1.9	140	
					6		115		16.3	7.6	1520		ND	160	8		99	70	0.2	492	1.6	82		2.3	69	
					7		í.		22.5	7.0	1510		0.04	190	17		80	63	0.3	403	1.3	236		1.0	68	
					8				20.6	7.0	1740		0.02	220	15		104	69	0.2	517	1.7	205		1.1	83	
					9			2002.5	18.8	7.6	345		ND	28	3		45	18	0.1	44	0.1	129		1.8	14	
					10				19.7	7.6	505		ND	52	4		50	21	0.2	119	0.3	108		1.3	22	
					11		湧水		18.4	7.6	123		ND	9	1		17	5	0.4	10	ND	44		1.0	6	
					12				24.5	7.0	2500		0.10	410	33		132	73	0.1	796	2.6	262		0.5	100	
					13				23.6	7.0	689		0.03	56	10		96	44	0.2	40	0.1	375		0.8	16	
					14		65~ 115		21.1	7.2	490		0.01	43	6		66	31	0.1	34	0.2	243		1.8	13	
					15				18.3	7.3	650		0.03	66	6		50	41	0.2	148	0.4	102		0.8	67	
					16				18.4	7.6	1100		0.02	130	10		65	59	0.3	302	1.0	109		0.7	97	
4					17		7		18.5	7.2	2720		0.03	480	28		69	96	0.3	926	3.0	166		0.8	169	
	同上	同上	1	同上。11月の結果。地	1				18.6	7.2	805		0.02	94	7	Î	60	32	ND	200	0.7	83		2.3	33	
				たので11月はなし。	2				20.0	7.4	682		ND	79	7		58	28	ND	155	0.5	143		1.5	27	
					3				20.7	7.4	535		ND	57	5		58	25	ND	90	0.3	170		1.2	20	
					4				21.4	7.3	944		ND	88	9		85	45	0.1	252	0.8	153		1.3	38	
					5		65~		17.8	7.6	1010		ND	76	5		103	51	0.1	305	1.0	82		2.1	40	
					6		115		18.6	7.6	752		ND	68	5		73	42	ND	191	0.7	102		5.4	36	
					7				23.1	7.0	1380		0.03	194	15		75	56	0.2	375	1.2	238		1.1	59	
					8			0000 11	19.8	7.0	1610		0.02	210	14		95	62	0.1	489	1.6	187		1.1	74	
					9			2002.11	17.7	7.6	304		ND	26	3		43	18	ND	34	0.1	112		2.0	12	
					10				18.3	7.4	658		ND	65	6		65	32	ND	161	0.5	125		0.9	26	
					11		湧水		15.3	7.6	126		ND	6	1		18	6	0.3	10	ND	47		1.1	6	
					13				23.5	7.0	658		0.02	55	9		93	40	0.1	39	0.1	306		1.3	15	
					14		65~		19.3	7.2	415		0.01	37	5		58	25	ND	28	0.2	201		2.3	12	
					15		115		17.8	7.3	656		0.02	66	6		51	39	0.1	144	1.7	107		0.8	66	
					16				17.6	7.2	1120		0.02	147	10		65	55	0.1	307	0.5	115		0.7	93	
					17		7		17.7	7.2	2500		0.02	474	25		67	90	0.3	802	1.0	175		0.8	152	
		ļ		I		10000 Mar. 2000	Same and the	and the second of the			2000					1										<u> </u>

*1:電気伝導度、*2:溶存酸素

表 2-7 地下水化学成分の調査結果-4

						插直	資金	物动作	-iz ∖et									水質								
No.	文献	地域	帯水層の 地質等	特徴	地点	惊向		环小吋积	小価	рH	Ec ^{*1}	DO^{*2}	Li	Na	K	NH4	Ca	Mg	F	Cl	Br	HCO3	NO_2	NO ₃	SO_4	PO ₄
		吉松 / 吉		·****//#\$\$>=**=***		m	m		ĉ	pii	µS∙cm ^{'1}								mg/l							
	中里志、井水の化学成	京都 (京 都)		神社仏閣に开戸が多く、容易に地下水を採	1		-		12.0	7.3	147			7.31	1.93		12.3	3.49		10.8		41.2		0.527	9.63	
	分に基づく京都盆地北部市街域の地下水系			取できる京都におい て、29か所から井水を	2		150		14.1	6.9	168			12.7	3.29		9.38	3.72		4.65		47.4		1.65	19.1	
	の解析、地球化学、 Vol.43、pp.45-57、			採取し、各種成分の分 析を行った。	3		58		15.2	6.4	282			18.5	5.02		20.8	5.58		59.6		27.5		7.88	8.60	
	2009				4		80		11.9	6.3	-			14.9	3.88		10.0	3.74		17.6		16.8		37.7	5.14	
					5		40		9.2	6.2	228			18.5	4.43		17.9	5.12		15.6		26.0		14.1	-	
					6		40		9.0	7.3	-			15.6	1.24		18.6	7.03		15.0		58.0		17.8	20.7	
					7		20		14.1	6.5	236			13.5	6.23		12.2	3.46		14.2		35.1		5.27	27.0	
					8		100		14.4	6.2	-			8.90	1.67		9.58	3.00		9.65		30.5		1.77	13.3	
					9		-		12.2	6.8	28			2.16	0.50		0.53	0.92		2.83		3.1		2.09	4.38	
					10		-		8.0	6.7	50			7.22	0.94		0.48	1.18		4.51		13.7		0.023	2.49	
					11		90		7.5	6.2	150			15.1	3.01		5.99	3.58		18.5		16.8		15.9	11.1	
					12		-		10.0	6.8	31			3.01	0.43		0.73	0.95		4.30		6.1		0.775	4.49	
					13		-		6.0	6.9	37			4.56	0.40		0.23	0.90		2.72		7.6		0.527	3.14	
					14		-		5.1	7.0	54			5.68	0.88		2.48	1.36		4.41		10.7		1.84	9.14	
5					15		-	$ \begin{array}{c} 1994.12.20 \\ \sim 25 \end{array} $	14.9	5.7	47			5.49	1.62		0.77	1.40		7.04		6.1		1.47	1.08	
					16		33		16.8	6.0	172			12.0	2.82		15.1	3.20		15.1		36.7		9.70	18.4	
					17		8		17.1	6.8	178			11.5	3.44		17.8	3.25		16.7		36.7		10.1	19.9	
					18		20		16.1	6.9	166			10.5	3.12		15.3	3.08		16.2		39.7		6.99	16.8	
					19		15		16.7	6.6	229			14.1	3.45		20.4	4.64		16.4		45.8		19.6	24.8	
					20		60		13.8	6.9	271			18.8	7.23		18.5	5.22		21.8		42.8		32.8	23.7	
					21		30		19.0	6.6	269			25.9	6.88		16.5	4.41		22.0		48.9		19.3	28.3	
					22		-		15.8	5.9	359			28.8	15.6		21.9	5.87		35.9		47.4		36.8	34.7	
					23		20		17.9	5.8	228			23.7	7.31		10.2	1.73		28.3		26.0		24.6	15.7	
					24		-		12.2	6.8	230			14.7	2.60		13.4	7.78		29.0		53.5		10.4	9.19	
					25		-		11.1	6.5	176			5.84	0.32		17.6	7.76		2.72		70.3		0.153	22.6	
					26		-	1	12.8	7.8	40			1.75	0.34		3.59	1.82		2.79		12.2		0.004	-	
					27		-	1	7.0	8.3	142			4.17	2.11		19.0	3.58		4.68		65.7		3.03	5.52	
					28		-	1	11.8	8.8	213			4.71	0.63		40.0	1.85		3.16		106.9		1.26	14.9	
					29		-	1	10.0	6.4	36			2.37	1.11		3.26	1.09		5.37		7.6		0.004	2.43	

*1: 電気伝導度、*2:溶存酸素

表 2-8 地下水化学成分の調査結果-5

						博宣	渡さ	探水時間	水泪									水 質								
No.	文献	地域	帯水層の 地質等	特徵	地点	小水山	17KC	17/75-791	/八二	рH	Ec ^{*1}	DO^{*2}	Li	Na	K	NH4	Ca	Mg	F	Cl	Br	HCO ₃	NO_2	NO3	SO_4	PO ₄
						m	m		°C	7	µS. _{cm} ⁻¹								mg/l							
	町田功、福本幸一郎、 森野祐助、丸井敦尚、	苫 小牧 (北海	泥炭、火山 噴出物	苫小牧周辺の26地点に て地下水を採取し、各	1	28.81	71.2	2017.1.20	9.9	9.3	200	0.1	0.0	21	6	0	9	6	0.1	7	1943				8	
	苫小牧周辺の広域地下水流動概念モデル、	10)		種成分の分析を行い、その結果から当地域に	2	5.80	28	2017.1.17	10.1	7.2	620	198	0.0	37	5	1	50	15	0.1	79	1.0		2		44	
	地下水技術、Vol.58、 3·4号、pp.1-11、2016			おける広域地下水流動 の概念モデルを示し	3	9.78	30.2	2017.1.17	4.7	7.6	390	143	0.0	36	16	4	16	13	0.2	8	141		0.1	4.6	0	1.2
				た。	4	6.94	183.1	2017.1.17	12.9	8.1	650	0.0	0.0	30	19	4	43	31	0.2	60	193		×		8	0.3
					5	6.13	1194	2017.1.19	15.9	7.7	24300	0.8	0.4	5610	185	21	466	71	E.	9775	28.6		-	1.00	Ξ.	-
					6	4.39		2017.1.17	12.1	8.1	920	3.5	0.0	45	28	5	49	49	0.1	127	1		~	- 63	0	0.3
					7	6.88	18	2017.1.16	10.6	<mark>7.</mark> 7	360	0.0	0.0	73	5	3	5	2	0.4	7	18		×	-	×	7.9
					8	7.62	2.4	2017.1.17	11.5	8.2	500	0.7	0.0	17	8	2	18	9	0.3	12			×	100	×	0.5
					9	6.48	112	2017.1.18	8.3	7.9	330	0.6	0.0	20	12	3	23	12	0.3	9				- 28.0	~ ^	0.6
					10	6.93	4	2017.1.20	9.9	6.6	260	0.1	0.0	19	3	1	18	7	0.0	31	-		-	-	ð	
					11	6.91	138.1	2017.1.17	11.0	8.2	470	0.0	0.0	80	11	3	11	9	0.3	6	10			120	0	11.4
					12	6.42	4.5	2017.1.19	11.1	6.5	270	0.1	0.0	12	3	2	16	9	0.1	12	0.81		-	0.1	1	21
6					13	5.56	0.1	2017.1.16	12.0	6.5	450	0.1	0.0	32	11	3	17	19	0.2	21			-		0	
					14	6.10	0.5	2017.1.16	12.2	6.6	720	0.1	0.0	27	9	4	74	30	0.2	19	12		3	10	18	3
					15	5.30	29.7	2017.1.20	13.9	6.9	400	0.1	0.0	16	2	1	22	10	0.0	21	1		10	2	4	1
					16	4.20	35.8	2017.1.17	11.2	7.3	1610	0.0	0.0	82	14	2	141	52		249	0.8			141	318	×
					17	4.86	295.1	2017.1.18	15.3	8.6	250	0.2	0.0	32	11	2	10	4	0.1	5						0.9
					18	16.40	3.6	2017.1.19	9.0	6.9	90	10.8	120	7	2		8	1	2	7	120		2	4.7	5	
					19	17.47	162.5	2017.1.16	8.6	8.2	250	0.0	0.0	52	10	3	9	5	0.1	4			2	1		3.1
					20	4.40	5.6	2017.1.19	10.0	7.5	250	0.1	0.0	24	5	1	12	12	0.1	5						1.8
					21	15.65	3.5	2017.1.18	9.2	7.0	110	7.7		8	2		10	1	0.0	6	1.0			14.8	7	
					22	15.80	84.2	2017.1.18	9.0	8.0	590	0.0	0.0	81	17	10	13	13	0.2	4	1.4				~	2.9
					23	1.94	6	2017.1.20	11.2	6.9	390	0.1	0.0	26	3	1	28	9	5	46				140	24	-
					24	1.95	6.7	2017.1.18	9.7	6.6	610	1.7	0.0	40	16	0	63	8	0.1	16				2.7	179	20

*1: 電気伝導度、*2:溶存酸素

表 2-9 地下水化学成分の調査結果-6

							STR. Sr.										水 質								
No.	文献	地域	帯水層の 地質等	特徵	No.	市区町村 (都道府県) ^{*1}	(朱己	水温	ਾਸ	Ec^{*2}	D0 ^{*3}	Li	Na	K	NH ₄	Ca	Mg	F	Cl	Br	HCO ₃	NO ₂	NO ₃	SO_4	PO ₄
							m	°C	pii	µS. _{cm} ^{.1}								mg/l							
	丸井敦尚、小野昌彦、 町田功、日本列島南	日本列島 の南海沿		日本列島の南海部沿岸 域に焦点を当て、深部	1	新潟市(新潟)	1050						8075	353	158	299	455		14690	86	338				
	海沿岸部の深部地下	岸部各地		の地下水水質の調査を	2	新宿区(東京)	70~118						9.5	2.1		3 <mark>0.</mark> 9	9.8	0.1	15.5		124		2.4	9.2	0.1
	Vol.58、3·4号、pp.23-			11-572.	3	文京区(東京)	80~108						12.4	2.2	0.3	40	8.5	0.1	18.5		106			31.4	0.1
	28, 2016				4	文京区(東京)	70~104						15.3	2.7	0.5	28. <mark>1</mark>	5.2	0.1	9.3		78			20.0	0.1
					5	港区(東京)	900~1490					0.5	8718.3	242.2	137.1	306.8	152.6		14678.5	75.9	327				
					6	the sup side	600					0	78	14	0	25	0	0	10		333			15	1
					7	豊田市 (愛知)	200					0	50	1	0	11	0	0	5		134			6	
					8	L 20 Vertilet annu an	50					0	9	2		11	1	0	5		29		0	13	0
					9		600					0	607	87	7	5	0	2	11		1314			240	
					10	長浜市 (滋賀)	200					0	133	132	0	206		1	4		2180			1	
					11		30						20	1		14	1	0	4		71		2	12	
					12		580					0	53	1	0	7	0	13	16		62	0		21	
					13	串本町 (和歌山)	202					0	43	4		3	2	0	11		55			36	
					14		43					0	42	12	0	182			13		1234			11	
					15	(- 1)	600					0	122	43	0	3	0	5	5		331			6	
					16	紀北町 (三重)	204					0	42	7	0	20	0	1	õ		113			24	
					17		39.5					0	57	16	0	33	0	0	5		393			11	
7					18	ملحظة	503					0	511	33	0	1	0	13	14		1235			19	2
1					19	津市 (三重)	198					0	429	3		1	0	6	4		1035			1	2
					20		12						7	2		10	2	0	5		42		1	6	
					21	1214-	355					0	116	10	1	1	0	1	10		261			23	
					22	須崎巾 (高知)	91					0	43	2		10	1	0	7		113			16	
					23		16					0	18	1		23	4	0	10		97			17	
					24	~ - +	600					0	76	72		15	0	0	14		234	4		42	1
					25	至尸巾 (高知)	200					0	148	11	0	5	1	1	14		319		3	46	1
					26		40					0	50	7	1	16		0	13		106	1		47	
					27	上任法人士	600.1					0	39	3		20	3	3	19		107			19	
					28	土佐淯水巾 (高知)	253.23					0	18	2	0	19	3	2	14		67			14	0
					29		148.9					0	28	5	0	24	2	2	23		89			12	0
					30	西予市	200.5						19	2		13	4	0	6		92		5	0	1
					31	(愛媛)	30						28	8		16	7	0	5		224			0	1
					32	西尾市	不明					0	18	5		12	1	0	6		71			8	
					33	(愛知)	不明					0	14	4		26	3	0	6		104			9	
					34	高知市(高知)	600					1	3268	24	3	2779	582		10994	27	71			408	43
					35	新居浜市 (愛媛)	280						3836	22		5312	789		16176		9			911	82
					36	田辺市 (和歌山)	376					1	265	9	1	1	0	3	2		672			1	1

*1:文献には当該地の緯度、経度データのみ記載のため転換ソフト(緯度経度住所コンバータ Usoinfo)により特定、*2:電気伝導度、*3:溶存酸素

2.2 塩水化学成分と化学変質挙動及び化学変質挙動と機械的強度に関する調査

試験で用いる塩水の条件を設定する際に有益となる情報を取得するために、セメント系材料の 強度に影響を与えることが想定される化学変質に影響する塩水化学成分などについて整理した。 整理においては、はじめに、沿岸部における処分場のセメント系材料で起こることが想定される 化学変質現象を整理した。また、地層処分場のアナログとして、地下に設置する処分場特有のセ メント系材料の化学変質要因の有無を調査することを目的に、既存のトンネルの鉄筋腐食以外の 劣化事象及び劣化要因を調査した。次いで、化学変質に影響する塩水化学成分及び変質部分の強

度の変化などを整理して着目すべき塩水化学成分を検討するために、塩水による化学変質と機 械的強度に関する情報を既往の文献より取得した。

2.2.1 調查方法、調查対象

1) 沿岸部における処分場のセメント系材料で起こることが想定される化学変質現象の調査

土木学会の小委員会報告書(土木学会,2003;2018)の記載内容及び平成28~30年度に実施 された沿岸部処分システム高度化開発における塩水環境下におけるセメント系材料の機械的強度 の変化に関する検討(産業総合研究所,原子力機構,原環センター,電中研,2017;2018;2019) で得られた結果より、沿岸部における処分場のセメント系材料で起こることが想定される化学変 質現象を整理した。

2) 既存のトンネルの劣化事象及び劣化要因の調査

既存のトンネルの劣化事象及び劣化要因について調査した。調査方法は以下のとおりである。

- ・国立国会図書館のホームページ内の蔵書検索システムにより「トンネル and コンクリート and 劣化」で検索した結果、178 件が該当、また「トンネル and コンクリート and 耐久性」 で検索した結果、154 件が該当した。内容確認のうえ、適切あるいは参考になると思われる報 告を選択した。
- ・太平洋セメント中央研究所の図書室の蔵書より、雑誌「トンネルと地下」(一般社団法人日本 トンネル技術協会)などを確認し、適切あるいは参考になると思われる報告を選択した。

3) 塩水による化学変質と機械的強度に関する調査

塩水や地下水によるコンクリートの化学変質に関する情報及び塩化物イオンの浸透によるコン クリートの機械的強度への影響を調査した。また、併せて混和材がコンクリート中への塩化物イ オン浸透に及ぼす影響についても調査した。調査方法は以下のとおりである。

- ・雑誌「セメント・コンクリート」(一般社団法人セメント協会)について、同誌の検索シス テムでキーワード検索した結果、「塩水」、「汽水」は0件、「海水」27件、「地下水」1件、 「淡水」3件が該当したが、内容確認の結果、いずれも本調査には無関係であった。
- ・雑誌「コンクリート工学」(公益社団法人日本コンクリート工学会)について、同誌の検索 システム(1995年1月号以降が対象)でキーワード検索した結果、「塩水」1件が該当したが、 内容は本調査とは無関係であった。「汽水」、「地下水」、「淡水」は該当0件であった。
- ・「セメント技術大会講演要旨」、「セメント技術年報」及び「セメント・コンクリート論文 集」(一般社団法人セメント協会)について、検索システムでキーワード検索した結果、「塩 水」4件が該当し、内容確認のうえ2件を選択した。「汽水」は0件、「地下水」は1件該当し が、内容は本調査とは無関係であった。
- ・「コンクリート工学年次論文報告集」(公益社団法人日本コンクリート工学会)について、 ホームページ内の検索システムでキーワード検索した結果、「塩水」15件が該当し、内容確

認のうえ1件を選択した。「汽水」、「淡水」は該当0件、「地下水」は1件該当したが、内容 は本調査とは無関係であった。

- ・国立国会図書館のホームページ内の蔵書検索システムにより、「コンクリートand地下水」 で検索した結果、422件が該当した。内容確認のうえ、「コンクリート工学年次論文報告集」 2007年に掲載された報告1件を選択した。
- ・雑誌「セメント・コンクリート」(一般社団法人セメント協会)より、コンクリートの海中 長期曝露に関する報告 3 件を選択した。
- ・「セメント技術大会講演要旨」、「セメント技術年報」及び「セメント・コンクリート論文 集」(一般社団法人セメント協会)について、検索システムで、「高炉スラグ」、「フライ アッシュ」、「シリカフューム」などの混和材が塩化物イオンの浸透性におよぼす影響の報 告を検索し、該当するものを選択した。

2.2.2 調査結果

1) 沿岸部における処分場のセメント系材料で起こることが想定される化学変質現象の調査

土木学会のコンクリート委員会化学的侵食・溶脱研究小委員会(323 委員会)の報告である「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)には、コンクリートの主な 劣化事象として以下の3点が示されている。

- 水和物の分解
- 2. 膨張性化合物の生成
- 水和物の溶脱

1.の水和物の分解は、酸によるセメント水和物の分解である。放射性廃棄物の処分場を強酸性 地下水の環境下に設置する可能性は低いと考えられるため、本業務において検討する対象からは 除外してよいと考えられる。

2.の膨張性化合物の生成は、硫酸塩を含む地下水とセメントペーストが反応することで生じる 硫酸塩劣化が示されている。これが生じると、ひび割れ部には以下の機構により剥離が生じると ある。

- ・ AFmやC-A-Hがセッコウの供給によりエトリンガイトとなる反応
- Ca(OH)₂とC-S-Hが硫酸イオン(硫酸アルカリなど)の供給によりセッコウとシリカゲル となる反応
- ・ C-S-HとCa(OH)2が硫酸イオンと炭酸イオンの供給によりソーマサイトとなる反応
- ・ Ca(OH)₂とC-S-Hが硫酸マグネシウムの供給により、セッコウ、ブルーサイト(Mg(OH)₂)、シ リカゲルとなる反応

また、2.に関しては、海水の作用によりC-S-H がマグネシウム珪酸塩になる事も紹介されている。 この他に、膨張性化合物の生成とは異なるが、海水中の炭酸イオンによる中性化も挙げられてい る。

- 3.については、以下が示されている。
 - コンクリートが溶存成分の少ない外部水と接すると、細孔液中と外部水の濃度勾配を駆動 力としてCa²⁺とOH:が外部液へと移動し、その量に見合うだけのCa²⁺とOH:がセメント水 和物から溶解する。Ca(OH)₂が消失した部分ではC-S-Hの溶解が起きる。Ca(OH)₂やC-S-Hの溶解に伴い空隙が増加し、C-S-HのCa/Siモル比が低下した部位は脆弱化する。
 - コンクリートに高濃度の塩化物イオンが作用する場合の劣化機構は十分に解明されていないが、塩化物イオンの浸透によってCa(OH)2の溶解が生じるとともにフリーデル氏塩や塩基性の複塩を生成する。

また、海洋環境下におけるコンクリートの劣化について、「セメント系構築物と周辺地盤の化学的 相互作用研究小委員会(345 委員会)第2期成果報告書」(土木学会,2018)では、コンクリート 表面から奥に向けて領域を区切り、それぞれの鉱物や空隙について以下のように説明している。

Crust:カルサイトの緻密な層(一部をブルーサイトが充填)

①:炭酸化(表面にはカルサイト/ブルーサイト)、Ca濃度が低い

②:ゲル状物質、M-S-H、炭酸化

③:エトリンガイト、ソーマサイト、石膏、空隙の粗大化、生成物の空隙充填

④:③と⑤の遷移領域

⑤:変質影響なし、フリーデル氏塩、まれに Hadley 粒子中のフリーデル氏塩

更に、平成 28~30 年度に実施された沿岸部処分システム高度化開発における塩水環境下にお けるセメント系材料の機械的強度の変化に関する検討(産業総合研究所,原子力機構,原環センタ ー,電中研, 2017; 2018; 2019)では、セメントペースト硬化体を用いた浸漬試験から以下が確認 された。

- セメント種類により化学変質の程度が異なった。
- 化学変質の程度と塩水濃度との間に明確な線形関係は認められなかった。
- ・ Ca溶脱部で硬度が低下した。
- ・ 混合セメントにおいてC-S-Hの変質と思われるMg系二次鉱物生成の可能性が示唆され、 その部分では硬度の低下が認められた。

以上を踏まえ、沿岸部における処分場のセメント系材料で起こることが想定される化学変質現象としては、以下の 6 つの化学変質が考えられる。

I . Ca 溶脱

- Ⅱ. CaCO3 沈殿
- Ⅲ. 硫酸塩化合物の生成IV.
- Mg系の二次鉱物の生成
- V. フリーデル氏塩の生成
- VI. 炭酸化

ここで、上記に示した化学変質は、実際の沿岸部の地下環境における化学変質と異なる可能性 も考えられる。そこで、地層処分場のアナログとして、トンネルの鉄筋腐食以外の劣化事象及び 劣化要因を調査し、地下に設置する処分場特有のセメント系材料の化学変質要因の有無を調査し た。また、上記 I ~ VI及びトンネルの調査結果から見出された化学変質に影響する塩水化学成分 及び変質部分の強度の変化などを整理して着目すべき塩水化学成分を検討するために、塩水によ る化学変質と機械的強度に関する情報を既往の文献より取得した。また、併せてセメント系材料 の化学変質の抑制につながる知見についても調査した。

2) 既存のトンネルの劣化事象及び劣化要因の調査

各報告の内容を一覧表にまとめた(表 2-10~表 2-13)。一覧表には報告年の古いものから順に掲載した。表 2-10~表 2-13 に示した調査結果より、本調査では、前記の海洋環境下でのセメント系材料の化学変質 I ~ VI以外に、酸性の地下水による劣化、蒸気機関車の煤煙の影響による劣化及び混和剤として用いられた珪藻土の影響による劣化が示された。これらは、今後沿岸部に設

置する放射性廃棄物処分場環境では起こりにくい現象と考えられる。したがって、本調査範囲で は、既設のトンネルの劣化事象の調査結果から地下に設置する処分場に特有のコンクリートの化 学変質を抽出することはできなかった。

No.	文献タイトル	出典	著者および所属	トンネルの 観 要 (道路、鉄道等)	環境 (山岳、火山帯、 海底等)	材料、工法	調査内容と状況	劣化の有無、その事象	劣化要因	その他、特記事項
1	三国トンネルにおけ る酸性湧水による巻 き立てコンクリート の侵食とその対策	セメント・コン クリート No.292 pp.20- 27 1971.6	鈴木道雄、諏訪義雄 建設省関東地方建設 局高崎工事事務所	一般国道17号線 群馬と新潟の県境 全長1218m 幅員 7.6m 1959年供用開 始	標高1100mの三国 山脈発生源は明ら かではないがpH3 程度の漏水に曝さ れる	OPCコンクリート (W/C=70%,C=220kg/ m ³) 新オーストラリア (オーストリアの間違 いと思われる)式逆巻 き覆工	1968年8月から実施された補強工 事に先立ち、漏水の水質、水量、 覆エコンクリートの圧縮強度と酸 による浸食状況を調査した。	工事中から酸性水の漏水が著し かったため水ガラス注入やモルタ ル拭き付けなどの対策を行った が、1963年頃より漏水が再発、 冬季の結氷によるモルタル剥離が 目立つようになり、1966年頃に は本体コンクリート全体に酸劣化 が及んだ。	pHが最低2.28、最高6.68、平均 3.34(1958年)という酸性の湧水	漏水防止と巻き立てコンクリート の補強工事を実施
2	50年を経過した海底 トンネル 関門トン ネルの健全度調査	トンネルと地下 第23巻 pp.113-119 1992.2	江 村康博、福元俊国 九州旅客鉄道	関門海峡の鉄道トン ネル 1942年竣工 3614m(下り線) 世界初の海底長大ト ンネル	海底	工区により山岳工法、 シールド工法、圧気工 法、潜函工法、開創工 法	覆エコンクリートから採取したコ アについて、強度性状、中性化深 さ、塩分浸透深さなどを測定。	強度性状は十分、中性化は認めら れず、塩分浸透深さは50年経過し たコンクリートとしては低い値で あり、健全なコンクリートであっ た。	海底という過酷な環境であるが健 全性が維持されている。	10年ごとにコア採取調査を行って いる。40年経過時の結果と比べ て、圧縮強度は向上が認められ た。
3	激動の半世紀を経た 関門トンネルのコン クリート	セメント・コン クリート No.557 pp.13- 21 1993.7	日高巖 九州旅客鉄道	関門海峡の鉄道トン ネル 1942年竣工 3614m(下り線) 世界初の海底長大ト ンネル	海底	工区により山岳工法、 シールド工法、圧気工 法、潜函工法、開剤工 法 高炉セメント使用	覆エコンクリートから採取したコ アについて、強度性状、中性化深 さ、塩分浸透深さなどを測定。	強度性状は十分、中性化は認めら れず、塩分浸透深さは50年経過し たコンクリートとしては低い値で あり、健全なコンクリートであっ た。	同上	・現在地下鉄建設に使用される工 法のほとんどが本トンネルに用い られており、当時の土木技術の粋 を集めた工事であった。特にシー ルド工法は日本初。 ・40年経過時の調査結果と比べ て、圧縮強度は向上が認められ た。
4	化学センサーによる 海底トンネルの漏水 流量測定	トンネルと地下 第33巻 pp.581- 587 2002.7	坂井宏行、平岩征一 鄧、川野輝信 鉄道総合技術研究所 興和化成 九州旅客鉄道	関門海峡の鉄道トン ネル	海底	記述なし	記述なし	記述なし	記述なし	トンネル内の漏水は海水と地下水 が混合したものであり、そのナト リウムイオン濃度が漏水の流量と 高い相関があることを見出した。 またガラス電極式の携帯型分析器 により、ナトリウムイオンの定量 を現地で実施可能とした。以上よ り、従来の三角ぜきを用いた方法 と比べて大幅に省力的に、トンネ ル内の漏水量を把握することが可 能になった。
5	供用60年を経た関門 トンネルのコンク リートの物性	セメント・コン クリート No.676 pp.26-32 2003.6	宮武洋之、長田晴道 九州旅客鉄道 ジェイアール九州コ ンサルタンツ	関門海峡の鉄道トン ネル 1942年竣工 3614m(下り線) 世界初の海底長大ト ンネル	海底	工区により山岳工法、 シールド工法、圧気工 法、潜函工法、開創工 法 高炉セメント使用	覆エコンクリートから採取したコ アについて、強度性状、中性化深 さ、塩分浸透深さ、細孔径分布な どを測定。XRDとTG-DTA、化学 成分分析も実施。	圧縮強度、中性化は50年時とほ ぼ同等。XRDでは、一部のコア にフリーデル氏塩が認められた (V)。化学成分分析では、40 年、50年、60年と徐々にCaOが 減少傾向(1)。しかし全体的に コンクリートは健全。	記述なし	

表 2-10 既存のトンネルの劣化事象の調査結果-1

6	トンネル覆エコンク リートの劣化につい て	コンクリートエ 学年次論文集 Vol.26 No.1 pp.759-764 2004年	上田洋、松田芳範、 西尾壮平、佐々木孝 彦 鉄道総合技術研究所 東日本旅客鉄道	劣化の見られた鉄道 トンネル6箇所 竣工年は1923、 1924、1927、1937、 1939、1950年	記述なし	3箇所はコンクリー ト、2箇所はコンク リートブロック、1箇 所は側壁がコンクリー ト、アーチがコンク リートブロック	現地調査と採取したコアの分析 (目視観察,XRD,XRFEDX)を実 施。コアの外観から、劣化の主要 因は二つに大別できると考えられ た。	2箇所のトンネルは外部からの硫 酸イオンによる劣化と思われ、エ トリンガイトや硫酸ナトリウムが 検出された(III)。	4箇所のトンネルは蒸気機関車の 煤煙に由来する窒素酸化物や硫黄 酸化物により生成した酸性水によ る劣化と思われた。	蒸気機関車の煤煙によるコンク リートへの影響は1918年の文献 でも指摘されている。
7	珪藻土が混和された トンネル覆エコンク リートの劣化特性	鉄道総研報告 Vol.21 No.2 pp.11-16 2007 年	上田洋、西尾壮平、 松田芳範 鉄道総合技術研究所 東日本旅客鉄道	1928年に建設された 単線馬蹄形の鉄道ト ンネル 覆工はコン クリート 当初より 電化されており蒸気 機関車の煤煙の影響 はない	記述なし	記述なし	□アを採取し外観観察、中性化深 さ測定、XRD、SEM/EDS、細孔 径分布測定。	表面から90mmほどが変色かつ脆 弱化。しかし分析結果は酸や硫酸 イオンによる劣化を否定。コンク リートに珪藻土が混和されている 可能性あり。	珪藻土を混和したコンクリート試 験体で再現試験を実施。珪藻土は スランプを低下させた。珪藻土混 和コンクリートは中性化が早く、 水結合材比が高いとさらに顕著。 また中性化により圧縮強度が低下 した。以上の結果から、本トンネ ルのコンクリートは珪藻土を混和 した水結合材比の高いものであ り、その中性化により脆弱となっ たものと考えられた(II)。	
8	横浜市地下鉄におけ るコンクリート側壁 の塩害の調査と耐久 性診断システムによ る評価	建設の施工企 画、pp.68-72、 2007.11	東邦和、宮村貫雄、 青木進 奥村組 横浜市交通局	機浜市営地下鉄高島 町駅部平沼町立坑 1974年2月竣工 調査時は33年経過	海岸近くにあり周 辺の地下水は塩分 を合有 (4580mg/l)	記述なし	厚さ1000mmの躯体壁より貫通⊐ アを採取し、塩素の内部における 分布、圧縮強度を測定。耐久性診 断・評価システムにより塩害の進 行を予測。	□アの地山側で最大5.5kg/m ³ の 塩素が検出された。圧縮強度は 41.1N/mm ² と設計基準の 21N/mm ² に対して問題ない値で あった。漏水からの塩素の侵入に より内側鉄筋に腐食が発生してい るが、鉄筋かぶりが大きいため腐 食ひび割れの発生は少なかった。 予測結果からも、躯体の劣化が急 速に進むことはないと判断され た。	塩素の進入による鉄筋腐食	
9	Thaumasiteの生成に よるセメント系補修 材の劣化	コンクリートエ 学年次論文集 Vol.30 No.1 pp.687-692 2008年	上田洋、西尾壮平、 渡邊恭崇、一條健吾 鉄道総合技術研究所 西日本旅客鉄道	1890年に建設された 単線馬蹄形の鉄道ト ンネル 覆工はレン ガ	山間部 夏季の最 高気温35°C程度 冬季の最低気温- 5°C程度	当初のレンガ覆工上に 1990年代に補修材(ボ リマーモルタル)吹き 付け	補修材とレンガの界面が白色・脆 弱化。この部分を採取し中性化の 確認、XRD、SEM/EDSを実施。 漏水のpHとSO₄分析。	補修材とレンガの界面が白色・脆 弱化。	Thaumasiteの生成(III)。硫酸 イオンは補修材に急結材として配 合された硫酸アルミニウムに由来 すると考えられた。	
14	関門国道トンネルの 現況	コンクリートエ 学 Vol.46 No.9 pp.65-70 2008年	福永靖雄、城間博通 西日本高速道路 高速道路総合技術研 究所	1958年供用開始 3461m	海底	建設当初は普通コンク リート 昭和54年およ び平成元年に実施した 打ち替えは早強コンク リート	RC床版と覆エコンクリートにつ いて圧縮強度、中性化深さ、塩化 物イオンの侵入の評価を昭和60 年、平成10および15年などに実 施。	現状でコンクリートに劣化は見ら れない。部分的な浮きや剥離はあ る。 床版:圧縮強度は設計基準強度の 24N/mm ² を上回る。中性化深さ は1mm。塩素は鉄筋の腐食が発 生するレベル。	記述なし	

表 2-11 既存のトンネルの劣化事象の調査結果-2

Γ		関門鉄道トンネル	コンクリートエ	朝倉俊弘、久楽博、	関門海峡の鉄道トン	海底	覆エコンクリート:無	維持管理のための調査について記	コアの圧縮強度試験から考えて、	記述なし	RCセグメントの材齢1年強度は
			学	鶴英樹、瀧口将志	ネル		筋、C:S:G=1:2:4(容	述あり	覆エコンクリートに問題となるほ		1080kgf/cm ² に達!。 高性能減水
			Vol.46 No.9	京都大学大学院			着) W/C=0.4 C=400	坑内調査(外観、変状、打音、断	どの化学的腐食は生じていない。		初のない時代としてけ警察的とし
			nn 71-75	力制族安维道			~.450kg/m ³				
	11		2009年								C
			2000-				RC27X2F:	煤烧制 <u>工</u> (調小量3回/平、工数			
							C:S:G=1:0.7:1.8 (重				
							重)W/C=0.28	彼エコングリートのコア試験			
								10年こと			
		鉄道トンネルにおけ	トンネルと地下	上田洋	1890~1950年に開業	記述なし	記述なし	浸食部分について粉末X線回折や	いずれも覆工あるいは表面補修材	覆工の劣化は(①酸による劣化、	現場における目視判定の目安が示
		る覆エコンクリート	第42巻	鉄道総合技術研究所	した12トンネル。覆			電顕観察などを適宜実施。	が侵食。	②硫酸塩による劣化(古典的硫酸	され、また維持管理方法について
		の劣化と維持管理	pp.453-460		エは1890年のみレン					塩劣化)(Ⅲ)、③ソーマサイト	言及している。
			2011.6		ガで、ほかはコンク					による劣化(Ⅲ)、④セメント代	
					リートまたはコンク					用品による劣化 に分類される。	
					リートブロック。					①蒸気機関車の煤煙に起因するで	
										あり、最も多いケース。	
										②硫酸イオンを多く含む漏水によ	
	12									3。	
										③1890年のトンネルの補修材の	
										レンガとの界面が劣化。硫酸アル	
										ミニウムに由来する硫酸イオンが	
										原因。	
										④1928年の2トンネルに見られ。	
										珪藻十などの混和が原因と推測 。	
		····································	コンクリート進	山土如 金燕美东	また出て始め感知に	しいきょうのほう	開約または港京工法		海上 研究应本	ちまけ浸むになったさめた変更で	
		地下鉄トンイルにわ	コンクリート病	山中穷、此膝获尽、	東京地下鉄の感潮河	トンイル内の調水		酒水のるいは酒水跡が現者に兄り れた地上の別時にわいて、以知日	和小。	過音は調水近傍の同所的な範囲で 法伝していてた。 フポタノ	
		りる過音先生衆計の	這初の 冊隊、 冊	小饭吃炒、汤日和	川環(海の朝の下海	の追索震度の例	設計基準強度21N/mm*			進行しているケースか多く、沿岸	
		検討	強、アッフク	太、大即信明	の影響を受ける河川	16100mg/1 (河口	W/C 53%			部の構造物のように、飛来塩分か	
			レード論又報告	東京地下鉄	域)の箱型トンネル	から3km)	C 320kg/m ³	し温素を分析、かぶり深さ測定、		部材全体に作用して劣化する一般	
	13		集、第11巻、	国際建設技術研究所	5路線の7区間30地点	4300mg/I (河口か		はつり調査による鉄筋腐食度評価		的な塩害劣化とは異なっていた。	
			pp.147-154、	東京工業大学大学院	施工は1955~74年	514km)		を行った。			
			2011.11		(調査時の経過年数						
					36~55年)						
		青函トンネルにおけ	トンネル工学報	芳賀康司、佐原圭	鉄道用海底トンネル	最深海底から100m	OPC吹付けコンクリー	吹付けコンクリートについて40	圧縮強度:3~44年 低下傾向なく	中性化の原因記載なし(内空側で	・エトリンガイト生成、フリーデ
		る吹付けコンクリー	告集	介、渡邊修、秋田勝	ただし、評価対象は	海水の水圧2.4Mpa	<u>۲</u>	年以上継続してコアを採取し調	長期耐久性保持	あるため、空気要因の炭酸化と推	ル氏塩生成、塩素濃度と圧縮強度
		トの性状および長期	第23巻	次 鉄道建設・運	本坑でない作業抗、	薬剤注入で止水場	乾式工法	査。物理的試験(強度、超音波速	中性化深さ:3~44年 年1.3■■程度	測される)岩盤側の評価なし。	の相関は確認されない。(鉱物生
		耐久性の評価	рр.269-276	輸施設整備支援機構	先進導坑。		半湿式工法	度、単位体積重量)と化学的試験	XRDではフリーデル氏塩を確認		成量はXRDの回折強度CPSで評
			2013年				分割練混ぜ工法	(中性化深さ、XRD、pH、塩素	(V)		価)
							の多様	濃度)を実施。	25年経過時のCI濃度 2000 mg/		・強度観点から施工40年時点で
	14								kg程度		は耐久性を保持と評価。
									※上記各結果変動大		・圧縮強度の低い箇所で中性化の
											深い傾向が一部の個所に見られ
											今後の継続調査で注視するとして
											1.3.
											・配合例の記述あり
			1								

表 2-12 既存のトンネルの劣化事象の調査結果-3

表 2-13 既存のトンネルの劣化事象の調査結果-4

	川崎航路トンネルの	第30回日本道路	下西勝、白木孝雄	首都高速湾岸線の海	海底	記述なし	コンクリートよりコアを採取し中	管理通路内のコンクリート隔壁の	試験結果より、躯体コンクリート	
	損傷と補修の検討	会議	首都高速道路	底トンネル			性化深さ、塩素濃度などを、また	一部に、数メートル四方にわたる	を介しての海水の浸透ではなく、	
		2013年		1994年開通			滞水について塩素濃度を測定。	浮き、剥離、鉄筋露出、錆汁など	ひび割れなどによる部分的な漏水	
								の損傷が発見された。付近に溜	による鉄筋腐食が主原因と考えら	
								まった水の塩分濃度は0.3%程	れた。	
								度、未損傷個所付近の溜水の塩分		
								は0~0.1%程度であった。採取し		
15								たコアについて求めた中性化深さ		
15								は8~17mm、また表面から深さ		
								10cm程度まで塩素濃度が非常に		
								高くなっていた。その値は、土木		
								学会式による計算値と、中性化の		
								影響のあると考えられる深さ1cm		
								をのぞいて、ほぼ一致した。		
	長期間供用した地中	地下空間シンボ	岩波基、大石敬司、	①信濃川の大河津固	①常に河川水中に	記述なし	コアの外観観察、配合推定、力学	①②③のいずれも圧縮強度の低下	①については流水との長時間の接	70~80年ほど供用された3構造物
	構造物におけるコン	ジウム論文・報	新井泰、沢木大介	定堰(1922年竣工)	あった		的性質、細孔径分布、電顕観察、	はほとんど生じていない。	触によるセメント分の溶出が推察	のコンクリートについて、物理的
	クリートの品質につ	告集	長岡工業高等専門学	②神奈川県相模原市	②相模台地		EPMAによる元素マッピングを実		された。	性質や表面部の化学的な変質を評
16	いて	第20巻	校	の新戸相武台トンネ	③都心の沖積平野		施。			価し、周辺の地盤や防水方法との
		pp.221-232	東京地下鉄	ル (1936年竣工)						関係を考察した。
		2015年	太平洋コンサルタン	③東京地下鉄の駅						
			F	(1932年竣工)						

3) 塩水による化学変質と機械的強度に関する調査

① 塩水や地下水によるコンクリートの変質への影響

塩水や地下水による既設構造物のコンクリート及び地層処分場を想定したセメント系材料の化 学変質に関する文献情報を以下に記す。

藤原ら(藤原ほか,1991)は、汽水域の地中環境にて約 60 年間経過した河川護岸のコンクリートについて、表面から内部方向への変質の変化を把握するため、表面からの深さごとに水和物相の分析や細孔径分布の評価を行った。

接触していた土壌の間隙水は、塩化物イオン、硫酸イオン、ナトリウムイオンの濃度が高く、 明らかに海水の影響を受けていた。塩化物イオン濃度は 5,420~9,260mg/l であり、海水の標準値を 19,350mg/l とすると、30~50%程度の海水を含むものと判断された。内部から採取したコンクリ ートの圧縮強度及び透水係数は通常の 10~100 倍程度の大きな値であった。細孔径分布は、内部 側と比べ表面付近ほど、1~10µm 程度の大きな空隙が多く、0.01µm 程度の微細な空隙が少な い事を示し、表面付近では炭酸化、さらにはカルシウムの溶出が生じていると考えられた。コン クリートの表面から所定の深さにおいて採取し、1.5cm 角程度に調整したモルタル部分を、その 10 倍質量の蒸留水に 20 日間浸漬した後に測定した pH は、表面から深さ 2~4cm 程度までにお いて、それよりも内部と比べて低くなっており、セメント成分中のアルカリ及びアルカリ土類金 属の溶出が関係すると考えられた。セメントと骨材の質量比に相当するコンクリートの CaO/insol.の分析値も、pH と同じ傾向を示した。水和物相は、C-S-H が主であった。ポルトラン ダイト (Ca(OH)₂) は表面から内部まで、まったく検出されなかった。カルサイト (CaCO₃) は表 面付近で多く、内部では少なかった。アルミネートの水和物としてフリーデル氏塩が確認されたが、 内部に比べて表面付近では少なかった。

これらの結果から、練混ぜ水と接触水のいずれが起源であるかは特定できないが、塩化物イオンの作用によりフリーデル氏塩が生成したこと、しかし表面付近では炭酸化の進行により分解したことが推察された。

放射性廃棄物の地層処分施設に使用されるセメント系材料の溶脱が重要視され、その予測手法 が種々提案されているが、その多くは純水を用いた試験結果に基づいていることに鑑み、蔵重ら (蔵重ほか,2007)は、実際の地下水に含まれる成分として塩化物イオンと炭酸水素イオンに着 目し、それらが溶脱に及ぼす影響を純水と比較しながら明らかにした。セメントペースト試験体 は、普通セメント及び水和発熱や収縮性状の優位性から処分施設への適用が検討されている低熱 セメントを用いて作製した。純水、塩化ナトリウム水溶液、塩化ナトリウム・炭酸水素ナトリウ ム混合水溶液に浸漬し、一定期間ごとに水溶液を分析し、また EPMA による Ca 濃度の面分析に より、溶脱の程度を評価した。塩化ナトリウム水溶液は、塩化物イオン濃度が海水程度

(17,000mg/l)とその 1/10 の 2 種類とした。

実験の結果、塩化ナトリウム水溶液では純水に比べて溶脱は促進され、その程度は塩化物イオン濃度が高い方が顕著であった。これは、イオン強度の増大によるポルトランダイト(Ca(OH)₂) 等の溶解度の上昇により説明できるとした。一方、これに炭酸水素イオン(40mg/l)が加わると溶脱は抑制され、溶脱量は純水の場合をも下回ること、抑制は塩化物イオン濃度が低いほど大きいこと、炭酸水素イオン濃度が 400mg/l の場合はさらに抑制が著しいことが示された。炭酸水素イオンによる抑制は、試験体表層におけるカルサイト(CaCO₃)の生成によるものと考察した。

山本ら(山本ほか,2013)は、高レベル放射性廃棄物の地層処分施設に使用されるセメント系 材料選定の基礎的情報として、塩水及び淡水模擬地下水中におけるグラウト用セメント硬化体の、溶 脱変質後の構成相及び空隙径分布を評価した。配合は、耐硫酸塩型セメントとシリカフュームを使用 し、通常型配合及びシリカフュームを多くした低アルカリ型の配合とした。それらよりセ メントペーストを調製し、28 日間養生後に切断して 20×20×0.5mm の薄板試料を作製した。模 擬地下水は淡水系及び海水系とし、海水系の塩化物イオン濃度は 14,726mg/l とした。これらと イオン交換水を用い、薄板試料のタンクリーチング試験を実施した。6 週間ごとに液を交換し、 30 週間後に浸漬液の組成分析と、薄板試料の X 線回折試験(XRD)、細孔径分布測定を実施した。 試験後の水溶液中の Ca 濃度より、イオン交換水では低アルカリ配合に比べ通常配合の方が Ca 溶 脱が多く定常的な溶脱を示したこと、淡水では通常配合の 1 回目液交換時に溶脱が確認されたの みであったこと、海水では低アルカリ配合でも定常的な溶脱が認められたことが示された。

XRD で構成相を確認した結果、通常配合ではいずれの溶液でも浸漬によりポルトランダイト (Ca(OH)₂)とエトリンガイトが消失した。また、炭酸水素イオンを含む淡水ではカルサイト (CaCO₃)が生成した。また海水ではフリーデル氏塩が確認された。低アルカリ配合ではいずれ の水でも浸漬により C-S-H の減少とエトリンガイトの消失、淡水ではカルサイトの生成が確認さ れた。低アルカリ配合の細孔径分布より、いずれの水の場合も C-S-H の溶脱を示唆する変化が認め られた。

以上のように、本調査の範囲では、Ca 溶脱、CaCO₃の生成、フリーデル氏塩の生成が確認された。また、Ca 溶脱が、Cl-により促進され、HCO₃により抑制されることが分かった。

② 混和材が塩化物イオン浸透におよぼす影響

高炉スラグ、フライアッシュ、シリカフュームなどの混和材の使用は、空隙を緻密化してコン クリートへの塩化物イオンの浸透を抑制するという実験結果が多数報告されている。混和材ごと に代表的な報告の概要を以下に記す。

大即ら(大即ほか,1991)は、普通ポルトランドセメント(以下、OPC)に高炉スラグ、フラ イアッシュ、シリカフュームをそれぞれ内割りで 50%、30%、10%混和したセメントを用いて φ 5×10cm のモルタル試験体を作製し、これを塩化物イオン濃度 20,000ppm の塩水に 3 日浸漬、 ついで 4 日乾燥の繰り返し試験を行った。一定期間経過ごとに試験体中の可溶性塩化物イオンを 定量した結果、混和材を使用した場合は同一水セメント比(W/C=50%)あるいはそれよりも低い 水セメント比(W/C=40%)の混和剤を使用していないモルタルと比べて、可溶性塩化物イオンの 含有量は少なく、混和材の使用が塩化物イオンの浸透抑制に効果的であることを確認した。

鳥居ら(鳥居ほか, 1991)は、塩水への浸漬と乾燥を繰り返した試験体より、圧搾により細孔 溶液を抽出し、化学分析を行い、CI/OH[・](mol/l)比が鉄筋腐食と密接に関係し、これがある値を 超えると激しい腐食を生ずることを明らかにした。セメントは OPC に高炉スラグ、フライアッ シュ、シリカフュームを混和したものであり、混和率はそれぞれ内割りで 50%、30%、10%である。 表面から深さ 25mm に鉄筋を埋設した 10×10×40cm の試験体を、3%NaCl 水溶液に 8 時間浸漬、 ついで 16 時間乾燥を繰り返した。2 年経過後、細孔溶液を抽出し CI/OH⁻比を求めた結果、鉄筋位 置に相当する深さ 25~50mm における値は、OPC で 2~3 であるのに対し、混和材を使用した 場合はいずれも 0.1~0.2 と低い値であり、鉄筋の腐食もほとんど確認されなかった。

島崎ら(島崎ほか,2011)は、普通、中庸熱及び低熱ポルトランドセメントに高炉スラグ、フライ アッシュ、石灰石微粉末を混和したセメントのコンクリート 32 点について、実際の海水影響環境 における暴露試験を行い、一定期間経過ごとに塩化物イオン含有量や細孔径分布の評価などを行 った。感潮暴露 10 年経過後の塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、OPC に比べて石灰石微粉末 を除く混合セメントの方が著しく小さくなり、混合セメントによる塩化物イオンの浸透抑制効果 が認められたとしている。また、5 年及び 10 年経過後の 32 点の塩化物イオンの見掛けの拡散係 数は、セメントの種類と関係なく総細孔量との相関が見られ、総細孔量が小さくなるに従っ て見掛けの拡散係数は小さくなる傾向を示すことから、緻密な細孔構造は遮塩性に優れると言えると考察している。

高炉スラグについて、鳥居ら(鳥居ほか,1996)は、OPC に高炉スラグを内割りで 30%、50%、70%混和したセメントのコンクリートについて、濃度 30%の塩化カルシウム溶液に 7 日浸漬と 7 日乾燥の繰り返し試験を行い、一定期間経過ごとに塩化物イオンの浸透深さを硝酸銀水溶液噴霧 法により求めた。OPC に高炉スラグを混和したコンクリートでは OPC を用いたコンクリートと 比べて塩化物イオン浸透深さは小さく、その差は水結合材比 35%と比べて 55%において明らか であった。

フライアッシュについて、久保田ら(久保田ほか,2001)は、JIS 規格外のいわゆる低品質フラ イアッシュの可能性を検証するため、2 種類のフライアッシュを混和したセメントよりφ5×10cm のモルタル試験体を作製し、5%NaCl 水溶液 8 時間噴霧、外気導入 16 時間の繰り返し試験を合 計 273 日間にわたり実施した。273 日経過後に、試験体の暴露面から 10mm ごとに測定した塩化 物イオン含有量は、表面付近ではフライアッシュ無混和の方が低かったが、内部に向かうほどフ ライアッシュ混和の方が低くなり、低品質フライアッシュでも塩化物イオンの浸透抑制効果が確 認された。

シリカフュームについて、添田ら(添田ほか, 1988)は、国内産 1 種類及び外国産 2 種類のシ リカフュームを OPC に内割りで 10、20、30%混和したセメントを用いて 10×10×40cm の試験 体を作製し、材齢 28 日まで 20℃水中養生した後、40℃一定の環境下で 3%NaCl 水溶液を連続 噴霧し、1、2、3 ヶ月における塩化物イオンの浸透深さを硝酸銀水溶液噴霧法により求めた。い ずれのシリカフュームでも浸透深さは OPC と比べて減少した。ただし 10%と 30%であまり大き な差はなく、混入率を多くしても効果はさほど変わらないと判断された。

混和材を併用する効果を評価するため、添田ら(添田ほか, 1991)は、OPC にフライアッシュ とシリカフュームを混和したセメントを使用し、かぶり 10mm と 20mm の位置に鉄筋を埋設し た 10×10×40cm の試験体を作製し、中性化促進試験及び 3%NaCl 水溶液噴霧を 3 ヶ月間実施し た後、中性化深さ、塩化物イオン浸透深さ及び鉄筋発錆面積率の測定を行った。混和材(フライ アッシュ+シリカフューム)は内割りで 30%混和とし、フライアッシュとシリカフュームの比率 は 100:0、80:20、60:40 とした。シリカフュームの混和率の増加により中性化深さはやや大 きくなるが、塩化物イオンの浸透深さは普通コンクリートの半分程度に低下した。また鉄筋の発 錆は、かぶり 20mm ではほとんど見られなかったが、かぶり 10mm ではシリカフュームの混和 率の増加により発錆面積率が大きく低減することが確認された。

以上のように、混和材を使用して緻密なコンクリートを作製する事で、塩化物イオンの浸透を 抑制できると考えられる

③ 塩水の浸透による機械的強度への影響

地下水や汽水など希薄な塩化物イオンを含む水との接触による機械的強度への影響を評価した 報告は確認できないが、海水浸漬によるコンクリートの圧縮強度の経年変化を追跡した報告は複 数が確認された。以下にその概要を記す。

竹田(竹田,2007)は、3 種類のセメント(普通、高炉 B 種、耐硫酸塩)を用いた 90×180×900mm の試験体を清水港において海中に浸漬し、最長 10 年までの強度や塩化物イオンの浸透、鉄筋腐 食などの評価結果を報告している。OPC を用いたコンクリートの圧縮強度は、飛沫帯と海上大気 中では 1~10 年でほぼ変化はなかったが、海中では 3~6 年で約 50N/mm² から 40 N/mm² 程度 に低下した。竹田(竹田ほか,1996)には同じデータが掲載されており、そこでは海中での強度 低下には、海水中の硫酸塩と反応して生成されるエトリンガイトの生成量と海水中におけるカル シウムの溶出量の複合による影響と考えられるとしている。

濱田ら(濱田ほか,2007)は、5 種類のセメント(普通、早強、中庸熱、高炉 B 種、アルミナ) を用いた ϕ 15×30cm の試験体を久里浜湾において海中に浸漬し、30 年経過時において物理的性 状、生成物や微細組織、塩化物イオンの浸透状況、内部鉄筋の腐食状況を評価した。圧縮強度は アルミナセメントを用いた試験体を除いて、初期材齢(28 日、アルミナセメントは1日)の1.1 ~1.3 倍を示し、海水浸漬による強度低下は生じていなかった。コンクリートは長期間海水と接 触した場合も、ある期間までは強度低下は生じないという一般的な傾向を示唆する結果であった。アル ミナセメントを用いた試験体の強度低下は、水和生成物である CaO・Al₂O₃・10H₂O の 3CaO・ Al₂O₃・6H₂O への転移によるものと考えられた。XRD の結果、普通及び早強を用いた試験体で は表層部と内部の物質に差異は見られなかったが、高炉 B 種を用いた試験体では表層部のみにエ トリンガイトとフリーデル氏塩が確認され、外来塩化物イオンの影響が表層部に限られることを

示した。

西田ら(西田ほか,2016)は、5種類のセメント(普通、高炉 A種、高炉 B種、高炉 C種、フ ライアッシュ B種)を用いた φ 15×30cm の試験体を鹿児島湾において海中に浸漬し、27年経過 時に圧縮強度、中性化深さ、電気抵抗率、塩化物イオン濃度分布を評価した。本報告の主題は真 水が得られない環境における海水練りコンクリートの可能性の検討であるが、比較として水道水 で練った試験体も評価対象としている。水道水で練ったコンクリートの 27 年経過時の圧縮強度 の材齢 28 日に対する比率は、いずれのセメント種類を用いた試験体でも1を超えており、海水 浸漬中の強度増進が確認された。

以上の調査結果からは、海水浸漬したコンクリート試験体では、Ca 溶脱、エトリンガイト(硫酸塩化合物)の生成、水和生成物の相転移が起きて強度低下が起きる可能性があることが確認された。これらのうち、Ca 溶脱部については、セメントペーストを用いた試験の結果ではあるが、 平成 28~30 年度の沿岸部処分システム高度化開発での検討(産業総合研究所,原子力機構,原環 センター,電中研,2017;2018;2019)にて硬度の低下を確認している。また同検討において、水 和生成物の相転移については、文献の化合物とは異なるものの、混合セメントペーストにおける C-S-H の変質等 Mg 系二次鉱物が硬度低下に影響する可能性が示唆されている。

また、本調査の結果に加え、既存のトンネルの劣化事象の調査結果に示したように青函トンネルの吹付けコンクリートに関する報告(芳賀ほか,2013)では、圧縮強度の低い箇所で中性化が深くなる傾向が一部の個所に見られた、とある。このことから、中性化(炭酸化)の初期段階で Ca(OH)2が CaCO3に変化する場合、強度はむしろ増加するが、更に炭酸化が進んで C-S-H が分解すると強度低下が起こる可能性が考えられる。

以上の本項での調査結果を踏まえ、沿岸部における処分場のセメント系材料で起こることが想 定される化学変質に影響する塩水化学成分及び変質部分の強度の変化などを整理して着目すべき 塩水化学成分を検討した。検討結果については、報告書本編に記載した。

参考文献

朝倉俊弘, 久楽博, 鶴英樹, 瀧口将志, 関門鉄道トンネル, コンクリート工学, Vol.46, pp.71-75, 2008.

- 東邦和, 宮村貫雄, 青木進, 横浜市地下鉄におけるコンクリート側壁の塩害の調査と耐久性診断 システムによる評価, 建設の施工企画, pp.68-72, 2007.
- 土木学会, コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の現状, 2003.
- 土木学会, セメント系構築物と周辺地盤の化学的相互作用研究小委員会(345 委員会)第2期 成果報告書, 2018.
- 江村康博, 福元俊国, 50 年を経過した海底トンネル 関門トンネルの健全度調査, トンネルと地下, 第 23 巻, pp.113-119, 1992.
- 藤原靖, 丸屋剛, 大脇英司, 塩水水質で地中環境にあるコンクリートの変質に関する研究, コンク リート工学年次論文集, Vol.13, No.1, pp.677-682, 1991.
- 福永靖雄,城間博通,関門国道トンネルの現況,コンクリート工学, Vol.46, pp.65-70, 2008.
- 芳賀康司, 佐原圭介, 渡邉修, 秋田勝次, 青函トンネルにおける吹付けコンクリートの性状および 長期耐久性の評価, トンネル工学報告集, 第 23 巻, pp.269-276, 2013.
- 濱田秀則, Tarek Uddin Mohammed,山路徹, 30 年間常時海水中に暴露されたコンクリートの性状
 状長期暴露試験結果より、セメント・コンクリート, No.724, pp.26-33, 2007.
- 日高巖,激動の半世紀を経た関門トンネルのコンクリート,セメント・コンクリート,

No.557, pp.13-21, 1993.

- 岩波基,大石敬司,新井泰,沢木大介,長期間供用した地中構造物におけるコンクリートの品質 について,地下空間シンポジウム論文・報告集,第20巻,pp.221-232,2015.
- 久保田貴史, 越後卓也, K.O.AMPADU, 鳥居和之, 塩水噴霧環境下における低品質フライアッシュ含有モルタルの鉄筋腐食性状, セメント・コンクリート論文集, No.55, pp.471-477, 2001.
- 蔵重勲, 廣永道彦, 庭瀬一仁, 塩化物・炭酸水素イオン共存溶液中におけるセメント硬化体の溶 脱挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.909-914, 2007.
- 宮武洋之,長田晴道,供用 60 年を経た関門トンネルのコンクリートの物性,セメント・コンクリ ート, No.676, pp.26-32, 2003.
- 西田孝弘, 皆川浩, 斎藤豪, 山路徹, 海洋環境に 27 年間曝露した海水練りコンクリートの物性評価, セメント・コンクリート, No.831, pp.13-18, 2016.
- 大即信明,中下兼次,長瀧重義,塩分環境下におけるセメント硬化体中の鋼材腐食に及ぼす混和 材の影響,セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.538-543, 1991.
- 坂井宏行, 平岩征一郎, 川野輝信, 化学センサーによる海底トンネルの漏水流量測定, トンネルと 地下, 第 33 巻, pp.581-587, 2002.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力 中央研究所,平成28年度地層処分技術調査等事業沿岸部処分システム高度化開発,2017.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力中 央研究所,平成 29 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業沿岸部処分 システム高度化開発報告書,2018.
- 産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力 中央研究所,平成30年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業沿岸部処 分システム高度化開発報告書,2019.
- 島崎泰,泉尾英文,石中正人,審良善和,海洋環境下に長期暴露した各種セメントを用いたコンク リートの物性と鉄筋腐食,セメント・コンクリート論文集, No.65, pp.326-333, 2011.
- 下西勝, 白木孝雄, 川崎航路トンネルの損傷と補修の検討, 第30回日本道路会議, 2013.
- 添田政司, 大和竹史, 江本幸雄, コンクリートの化学的抵抗性に及ぼすシリカフュームの影響,

セメント技術年報, 42, pp.132-135, 1988.

- 添田政司, 大和竹史, 江本幸雄, 混和材の併用がコンクリートの化学的耐久性に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.228-233, 1991.
- 鈴木道雄, 諏訪義雄, 三国トンネルにおける酸性湧水による巻き立てコンクリートの侵食とその 対策, セメント・コンクリート, No.292, pp.20-27, 1971.
- 竹田宣典,長期暴露試験を考える その意義と舞台裏,セメント・コンクリート, No.724, pp.19-25, 2007.
- 竹田宣典, 十河茂幸, 相原功, 海洋環境下における各種コンクリートの塩分浸透と鉄筋の腐食 (その2) -10 年暴露試験に基づく塩分浸透予測と鉄筋腐食に関する検討-, 大林組技術研 究所報, No.52, pp.95-100, 1996.
- 鳥居和之,川村満紀,浅野篤郎,鉱物質混和材を使用したコンクリートの細孔溶液の組成と鉄筋 腐食抑制効果,セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.520-525, 1991.
- 鳥居和之,川村満紀,笹谷輝彦,高炉スラグ微粉末コンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性,セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.456-459, 1996.
- 上田洋, 松田芳範, 西尾壮平, 佐々木孝彦, トンネル覆工コンクリートの劣化について, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.759-764, 2004.
- 上田洋, 西尾壮平, 松田芳範, 珪藻土が混和されたトンネル覆工コンクリートの劣化特性, 鉄道総研 報告, Vol.21, No.2, pp.11-16, 2007.
- 上田洋, 西尾壮平, 渡邉恭崇, 一條健吾, Thaumasite の生成によるセメント系補修材の劣化, コ ンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.687-692, 2008.
- 上田洋,鉄道トンネルにおける覆工コンクリートの劣化と維持管理,トンネルと地下,第 42巻, pp.453-460, 2011.
- 山本努, 武藤義彦, 小椋紀彦, 葛目和宏, 大即信明, 地下鉄トンネルにおける塩害発生条件の検討, コ ンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第11巻, pp.147-154, 2011.
- 山本武志,藤﨑淳,植田浩義,各種セメント硬化体の模擬地下水中における溶脱変質状態の比較,第 67回セメント技術大会講演要旨 2013, pp.34-35, 2013.

2.3 セメント系材料の変質試験方法に関する調査

2.2 の調査の結果、セメント系材料は沿岸海底下の地下水と反応することで 6 種類の化学変 質を起こす可能性が示された。そこで、本検討における変質試験方法に関してセメント系材料の 変質試験方法を調査し整理した。

2.3.1 調查方法、調查対象

長期間にわたるセメント系材料の地下水との接触による変質については、放射性廃棄物の処分 施設の構造材として使用されたコンクリートの長期にわたる変質や特性変化に対する研究が多く 実施されている。本調査においては、文献検索サイトの J-STAGE、国立研究開発法人日本原子力研 究開発機構の研究開発成果検索・閲覧(JOPSS)サイト,電力中央研究所の論文データベースを対 象として、「セメント、モルタル、コンクリート」と「変質、溶解」をキーワードとして検索した結果 から文献を選定した。

2.3.2 調査結果

セメント系人工バリア材料の長期性能評価に関する各種溶脱試験法の適用性(山本ほか,2005) では、放射性廃棄物処分施設の建設に供されるセメント系材料に対する長期耐久性評価手法の確 立のための研究の一環として、各種溶脱試験法を同一のブロック状ペースト試料に適用して各種 イオンの溶脱の進行過程と細孔構造など溶脱に伴う諸特性の変化を比較評価している。セメント 系材料の溶脱現象を評価するための試験法として、水和物の溶解モデルを検討する際に適切とさ れる粉末状試料を用いた溶解法、溶脱に伴う硬化体の細孔量など物理的特性の変質を評価するた めの浸漬法、通水法及び通電法(電気的泳動法)の4種類の手法に大別している。本調査では、こ れら4種類の変質方法に加えセメント系材料の変質を促進する方法として新たに提案されている 硝酸アンモニウム水溶液に浸漬する方法について調査した。各文献の概略を下記に記載する。

1) 粉末試料の変質試験

瀬野ら(瀬野ら,2016)は、硬化したセメントペースト試料を粉砕した粉体試料をイオン交換 水に浸漬して長期的な pH 挙動の把握を行っている。セメントは、日本原子力研究開発機構が低 アルカリ性セメントの候補として検討しているフライアッシュ高含有シリカフュームセメント

(High-volume Flyash Silicafume Cement、以下、HFSC) と OPC の 2 種類について検討して いる。

液相の分析は、pH、化学成分(Cl⁻、SO₄²⁻、Ca、Si、Al、Fe、Mg、Na、K、S)を実施している。固相の分析は、化学成分(強熱減量(ig.loss)、CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、Na₂O、K₂O、,SO₃)、熱重量示差熱分析(TG-DTA)、結晶相解析(XRD)、形態観察(SEM)を実施している。

杉山ら(電力中央研究所,2000)は、セメント硬化体が地下水と接触した場合の溶解反応に注 目し、 接触液量を変化させた条件でセメント水和物に生じる変質反応を化学的な観点から検討 している。

OPC、高炉スラグ混合セメント(OPC:高炉スラグ=1:9、以下 OPC/BFS)及び HFSC のセ メント硬化体を作製し、粒径 250 マイクロメートル以下に粉砕した粉体試料を用いて溶解変質試 験を実施している。

実処分場におけるセメント水和物の溶解変質は、地下水の流入に伴い構成成分が溶解し、地下 水の流出によって処分施設から取り除かれることによって起こることから、セメント水和物構成 成分の溶出の進行に伴う変質挙動を液固比を変化させた溶解実験を行うことで表現できるとして いる。長期間にわたるセメント水和物の溶解反応を想定できる液固比の条件としては、処分施設 に流入する地下水流速と施設に使用されるセメント量を仮定して 10:1、100:1 及び 1000:1 の 3 点を設定している。

変質試験の結果から、OPC のセメント硬化体の水和物では、水和反応の進行とポルトランダイト (Ca(OH) 2) の溶解による構成鉱物の組成変化が見られ、OPC/BFS 及び HFSC のセメント硬化体の水和物では構成鉱物の溶解度が低いため組成に大きな変化はないことを確認している。

セメント水和物の溶解平衡時の pH、Ca 及び Si 濃度を固相中の Ca/Si 比の関数として整理し 既往の知見と比較した結果、OPC 及び OPC/BFS を用いたセメント硬化体の水和物では pH、Ca 濃度ともに同じ Ca/Si 比に対して文献値よりも低く、エトリンガイトなど他の構成鉱物の存在を 考蔵した評価が必要としている。また、HFSC を用いたセメント硬化体の水和物の溶解特性はカ ルシウムシリケート水和物の溶解特性の文献値とほぼ一致したとしている。

杉山ら(電力中央研究所,2004)は、海水を模擬した NaCl 溶液中の C-S-H ゲルの化学的な変 質現象を実験的に把握するとともに、反応機構の検討により NaCl 濃度が C-S-H ゲルの変質に与 える影響因子を明らかにすることを目的に粉末状試料の浸漬試験を実施している。

酸化カルシウムとケイ酸ゲルから C-S-H ゲル(Ca/Si=0.65、0.83、0.9、1.1、1.2)を合成し、

粒径 250μm以下に粉砕した粉末試料を対象として試験を実施している。

NaCl 濃度が高いほど Ca が顕著に溶出する結果が得られている。一方 Si の溶出率は Ca/Si に 依存し、低 Ca/Si (0.65、0.83、0.9) ではほとんど溶出していない。高 Ca/Si (1.1、1.2) では、 溶液の Na 濃度が高くなると Ca とともに Si が溶出していた。これらは、Ca/Si による収着機構 の違いを示唆していると考えられると考察している。

2) 塊状試料による浸漬試験

蔵重ら(蔵重ら,2007)は、ブロック状のセメントペースト硬化体を塩化ナトリウム溶液及び 塩化ナトリウムと炭酸水素ナトリウム混合溶液に浸漬してセメント系材料の溶解変質挙動の評価 を実施している。

地下水に高濃度の塩化物イオンが含まれる場合の溶脱挙動を把握することを目的として濃度の 異なる 2 種類の塩化ナトリウム溶液とイオン交換水を用いて浸漬試験を実施している。各浸漬期 間の浸漬液の pH 上昇を OH・の溶出量に換算して評価している。溶液種類の影響を比較すると、 供試体種類に係わらずイオン交換水に浸漬した試料に比べ、塩化ナトリウム溶液に浸漬した試料 の液相で OH・溶出量が多くなっている。一方、供試体種類の影響に着目するといずれの溶液浸漬 においても低熱ポルトランドセメントを使用することで OH・の溶出量は低減している。Ca²⁺の溶出 量についても、同様の傾向が確認されており、イオン交換水より塩化ナトリウム溶液に浸漬した 場合で多くなり、低熱ポルトランドセメントを使用した供試体で少なくなると報告されている。

実際の海水系地下水や海水に含まれている HCO₃がセメント硬化体の細孔溶液のように高い pH 条件下で容易に Ca²⁺と反応して炭酸カルシウム(Calcite:CaCO₃)の沈殿を生じ、溶脱が抑制 されることを評価する目的で、塩化ナトリウム及び炭酸水素ナトリウム混合溶液への浸漬試験が 実施されている。OH・の溶出は, HCO₃ 濃度の設定値が 400mg/L の溶液への浸漬で大幅に抑制さ れることを明らかにしている。Ca²⁺溶出量の推移も同様の傾向を示し、浸漬溶液の HCO₃ 濃度が 高いほど反応によって供試体表層に生じる炭酸カルシウムの沈殿量が多くなり、供試体内部から の成分溶出を抑制するものと理解できるとしている。

EPMA による固相断面の元素濃度分布測定結果から、浸漬溶液の NaCl 濃度が高いほど Ca の 溶脱がより深部まで進展することを確認している。

固相断面の EPMA 測定結果から、52 週間にわたるブロック試料による溶液交換型浸漬試験に おける Ca の溶脱領域はごく表層に限られていることが確認されている。

三浦ら(三浦ら,2014)は、モルタルを対象に準微視的視点にたち Ca 溶脱により変化する物 理化学的性質と力学的性質との関係を評価することを目的に、モルタルの薄片供試体による浸漬 試験を実施し、Ca 溶脱により刻々と変化する物理化学的性質とそれに伴って変化する力学的性 質の同定を実施している。具体的には、イオン交換水及び NaCl 溶液に薄片供試体を最大 360 日 間浸漬させ、浸漬後に曲げ試験及び直接二面せん断試験を行うことで、弾性係数、曲げ強度、破 壊エネルギー、引張軟化曲線、引張強度、せん断強度の測定を行っている。さらに、力学試験後 の薄片供試体を用いて水酸化カルシウム(以下、CH)量、C-S-H量、空隙率、細孔径分布の定量 分析を行っている。

物理化学的性質の変化として測定した水和物量の経時変化では、いずれの溶液に浸漬した場合でもその推移は大きく変わらず、イオン交換水は浸漬 270 日、NaCl 溶液は浸漬 180 日において薄片供試体中の CH の消失が確認されている。

物理化学的性質の変化として測定した空隙率の経時変化では、イオン交換水に浸漬した場合、 空隙率は 180 日まで増加してそれ以降は若干低下し、NaCl 溶液に浸漬した場合は、イオン交換 水に浸漬した場合より空隙率が顕著に増加しており、浸漬後 180 日まで増加してそれ以降はほぼ 変化がないと報告している。

物理化学的性質の変化として測定した水銀圧入法による細孔径分布の経時変化では、浸漬期間 の増加に伴ってより粗大な空隙が増加することを確認している。

Ca 溶脱によって変化する物理化学的性質とそれに伴って変化する力学的性質の関連性では、 全体的な傾向としてイオン交換水に浸漬した場合と NaCl 溶液に浸漬した場合の関係が非常に類 似していることが確認されている。それぞれの溶液において生じる Ca の溶脱現象が物理化学的 性質と力学的性質に及ばす影響は同様であるとしている。

山本ら(山本, 2006)は、OPC、フライアッシュ混合セメント(FAC)、そして低熱ポルトラン ドセメント(LPC)を使用したブロック状の試験体の浸漬試験を実施し、拡散による溶解変質試 験を実施している。固相の評価として、試料断面の Ca 濃度の分布を EPMA で測定しており、水 酸化カルシウムの分布を観察している。

3) 塊状試料による通水試験

武井ら(太平洋コンサルタント,鹿島建設,2002,2003)は、水セメント比 85%ならびに 105% のセメントペーストを試料として、通水法による劣化過程での各特性の変化を取得している。通 水試験によって水セメント比の比較的高い試料に対して、直接的に一軸圧縮強度等、元素の溶出、 空隙率及び透水係数を測定し、カルシウムの溶出に伴う①一軸圧縮強度等、②空隙率、③透水係数 のそれぞれの変遷について検討している。圧縮強度の変化は、既往の研究においてビッカース硬度 と圧縮強度との間に相関があることが報告されていることから、水セメント比の異なる未変質試料 において実測したビッカース硬度と一軸圧縮強度との関係から変質試料の圧縮強度を推定している。

通水試験ではカラム内に固定した円柱状セメントペースト硬化体に加圧した水を透過させてい る。通水は供試体の上部から下部の方向へおこない、供試体内を通過した液相はポリボトルに集 め定期的に採取している。このボトルは炭酸化を防ぐためアルゴン雰囲気のグローブボックス内 に設置している。また、通水液には、溶存炭酸ガスの低減措置を施したイオン交換水を用いてい る。

EPMA の分析結果からは、通水劣化試料においては通水した上部から劣化が進行し、溶脱が不均 質に進行したことがわかる。W/C=85%では W/C=105%と比較し溶脱が不均質に進行し、舌状に試 料下部まで CaO が溶出した領域が認められ、水みちの形成が示唆される。SO3は CaO の分布と ほぼ同じ挙動を示したが、劣化部最下部である健全部との境界付近に高濃度の場所が見られ、これは 単なる溶解だけでなく析出現象が起こっている可能性があるとしている。

圧縮強度は、どちらの水セメント比ともに積算液固比 90 において大きな低下が見られた。化 学的な評価から試料上部より劣化が進行していることが確認されたが、ここで得られた圧縮強度 は基本的に劣化の著しい供試体上部の強度であると考えられる。積算液固比 90 における圧縮強 度の低下率は、W/C=85% で 42%、W/C=105%で 57%であった。圧縮強度は液固比とともに低下 するが、変遷初期で大きく低下し積算液固比が大きくなるほど低下の度合いは緩やかとなった。こ の傾向は、W/C=85%、105%ともに非常によく一致していた。

4) 電気化学的劣化促進試験

蓮本ら(蓮本ら,2005)は、地下水などに常時接触しているコンクリート構造物に生じるカル シウム成分の溶脱による劣化現象を電気化学的劣化促進試験を実施して人工的に作り出し、溶脱 したコンクリート試験体の拡散係数の評価を行っている。

促進試験は、試料をアクリル板に固定し、その両側から挟むように設置した水槽にイオン交換 水を満たし、内部に電極を配置して通電し、Ca イオンを移動させるものである。劣化程度の異な る試料を作るため4試料で試験を行っている。電極間の電位差は 15V を中心に設定している。

Ca 量の経時変化はそれぞれ供試体の特徴もあるが溶出量に差がつく結果となっている。拡散 試験後の試料の一部を取り出し、細孔径分布と EPMA 観察を行っている。

細孔径分布測定結果は、空隙量にあまり差がみられない結果となっている。

斉藤ら(斉藤ら,1994)は、Ca イオンの溶脱に伴うセメント水和物の変質促進試験方法としての電気的手法の適用性について検討している。

変質試験は縦 22 cm、横 20 cm、厚さ 10 cmのアクリル板のほぼ中央に内径 6 cmの穴をあけ、その中にシリコン系の樹脂で試験体を埋め込んで実施している。モルタル試料を埋め込んだアクリル板の両側に約 1 リットルのイオン交換水を入れたガラス容器を固定し、その中に白金電極と SUS 電極を 12 cmの間隔になるように設置している。電極の一方は直流の定電圧装置の陽極に、 他方は電流計を介して陰極に接続している。電位勾配は、5V/cmとなるように電圧は 60V としている。試験期間は 4 カ月、6 カ月及び 12 カ月としている。

Ca の溶解状況を評価するため両極側の水を全量交換して陰極の回収液の Ca 濃度の測定を実施している。水の交換は、試験開始から 1 カ月間は 1 週間に 1 回、その後は 10 日に 1 回の割合を原則として実施している。

所定の試験期間終了後の試験体を取り出し試験体の長さ方向の断面の観察を実施し、目視で識別した変質の境界で試料を分割し、XRD 測定でセメント水和物の種類を、熱分析、化学分析の結果から C-S-H の Ca/Si を算出している。変質に伴う水和組織の変化を評価するため単位容積質量と 含水率及び総細孔量と細孔径分布を測定している。

この試験によって内部は未変質のままで、陰極側表面に向かうほど Ca が溶出することに伴う 変質が進行した状態となっていることを確認している。また、この変質状況は水と接しているコ ンクリートから Ca が徐々に溶解していく際、先ず Ca (OH) 2が、続いて C-S-H が溶解してい くメカニズムをほぼ再現している。

横田ら(横田, 2013)は、W/C を 0.4、0.5、0.6 とした OPC ペーストの供試体を作製し、20℃ の水中で 28 日及び 2 年まで水中養生した後、縦 40 mm、横 40 mm、厚さ 5 mmの薄片試料を切り出 して作製して浸漬法と電気的手法によるセメント水和物の溶脱を評価している。

浸漬法では 1.5L のイオン交換水に薄片資料 2 枚を浸漬し、5 週間毎に全量液交換して 20 週間 の浸漬を実施している。電気的手法による溶出試験では、単位暴露面積当たりの付加電流は 25A/m²の一定とし、2、4、6、8 時間、1 週間及び 2 週間の促進試験を実施している。

試験の結果、CH 以外の C-S-H などの Ca 水和物やエーライト及びビーライトのようなカルシウムを含む構成化合物からの溶出挙動が通電時間により異なることが確認されたと報告している。

5) 硝酸アンモニウム水溶液浸漬による促進劣化試験

青山ら(青山ら,2012)は、数万年オーダーでのイオン移動現象を予測するにはセメント硬化体の変質を考慮する必要があると考え、セメント硬化体の Ca 溶脱に伴う空間構造の変化を考慮したイオン移動予測モデルの構築を目的とした研究を実施している。また、構築したイオン移動 予測モデルの妥当性を検証するため、Ca 溶脱の予測及び塩化物イオンの浸透量を予測し、実測 値との比較を行っている。促進 Ca 溶脱試験には硝酸アンモニウム水溶液による浸漬法を用いて いる。予測値と既往の研究における実測値(山本ら,2005)との比較では、実測値と推定値は概 ね一致する結果が得られ、Ca 溶脱に関する本モデルの妥当性が確認できたとしている。

Carde ら(Carde ら, 1997)は、セメントの新しい促進劣化試験方法として、NH4NO3 溶液を 用いた促進溶脱試験を提案している。硬化したセメントが溶脱するには時間がかかるが、NH4NO3 溶液に浸漬することによって溶脱と同様の Ca(OH)2 の溶解及び C-S-H のカルシウムの溶脱を促 進する効果が得られるとしている。

NH4NO3 は水に易溶であり Ca と結合すると優先的に溶解度の高い Ca(NO3)2 を生成し、アン モニウムガスが発散するという特徴を持つ。ただし Ca(NO3)2 とアルミン酸水和物が湿潤状態か ら乾燥状態に変わる際には $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Ca(NO_3)_2 \cdot 10H_2O$ が析出し、これによって微細ひび 割れができてしまうとしている。

イオン交換水 (pH4.5) 浸漬 7 ヶ月と NH4NO3 溶液浸漬 48 時間の XRD の測定結果及びイオ ン交換水 (pH4.5) 浸漬 3 か月と NH4NO3 溶液浸漬 1 日の EPMA の Ca 濃度プロファイルの結 果から、二つの方法で概ね同等の溶脱領域となる試料が得られたとしている。エトリンガイトに ついてはイオン交換水では表層部で溶解したが、NH4NO3 溶液では残存するという違いが確認さ れている。ここで同じ劣化部の厚さになるまでかかる時間を比較すると、この二つの方法の劣化 速度の差はおよそ 100 倍と推定している。

Segura ら(Segura ら、2013)は、硬化体を NH4NO3 溶液に浸漬して溶脱させ、溶脱深さや間隙、カルシウム含有量、超音波伝播速度などを測定し、溶脱の進行に関連する様々な分析・測定結果を示している。

以上の文献の記載内容を踏まえ、各変質試験の特徴について簡潔に記すとともに、その特徴に ついて比較し、本検討における変質試験方法として適している方法を整理した。その結果は本編 に記す。

参考文献

- 青山琢人,胡桃澤清文,名和豊春,村上祐翔,カルシウム溶脱を考慮したセメント硬化体の物質 移動予測モデルの構築, Cement Science and Concrete Technology, Vol.66, pp. 311-318, 2012.
- 蓮本清二,内田善久,中野靖,南部茂義,白土博司,人見尚,竹田宣典,浸漬試験による溶脱コ ンクリートCa拡散係数の検討,土木学会第60回年次学術講演会,pp. 453-454, 2005.
- 蔵重勲,廣永道彦,庭瀬一仁,塩化物・炭酸水素イオン共存溶液中におけるセメント硬化体の溶脱 挙動,コンクリート工学年次論文集,Vol.29,No.1, pp. 909-914, 2007.
- 三浦泰人,佐藤靖彦,メソスケールでのCa溶脱により変化するモルタルの力学的性質と物理化学 的性質の関係評価,コンクリート工学論文集,第25巻,pp. 109-118, 2014.
- 斉藤裕司,中根淳,藤原愛, Ca イオンの溶脱に伴うセメント水和物の変質促進試験法 としての電気的手法の適用性,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp. 901-906, 1994.
- 瀬野康弘,野口聡,中山雅,杉田裕,低アルカリ性セメント系材料の長期浸漬試験,JAEA-Technology, 2016.
- 武井明彦,大和田仁,藤田英樹,根岸久美,日比谷啓介,横関康祐,渡邉賢三,安田和弘,セメ

ント系材料の水理・力学特性の変遷に関する研究II, JNC TJ8400 2003-047, 2003.

- 山本武志,広永道彦,芳賀和子,庭瀬一仁,セメン系人工バリア材料の長期性能評価に関する各 種溶脱試験方法の適用性,コンクリート工学論文集, Vol. 16, No. 2, pp. 23-35, 2005.
- 山本武志,広永道彦,各種セメント系人工バリア材料の溶脱特性の評価,コンクリート工学年次 論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 713-718, 2006.
- 横田弘,橋本勝文,佐々木亮輔,電気的促進試験を用いたセメント水和物溶脱の評価,生産研究, 65巻,4号,pp. 207-211, 2013.
- 杉山大輔,藤田智成,中西潔,水との接触によるセメント水和物の化学的変質,電力中央研究所 報告,研究報告U99044,2000
- 杉山大輔,藤田智成,海水系地下水中におけるカルシウムシリケート水和物の化学的変質,電力 中央研究所報告,研究報告T03056,2004
- Christophe Carde, Raoul Francois, Effect the leaching of calcium hydroxide from cement paste on mechanical and physical properties, Cement and Concrete Research, Vol.27, No.4, pp.539-550, 1997
- C. Carde, G. escadeillas, R. Francois, Use of ammonium nitrate solution to simulate and acdelerate the leaching of cement pastes due to de-ionized water, Magazine of Concrete Research, Vol. 49, issue 181, pp.295-301, 1997
- I. Segura, M. Molero, S. Aparicio, J.J. Anaya, A. Moragues, Decalcification of cement mortars: Characterisation and modelling, Cement & Concrete Composites, Vol. 35, pp.136-150, 2013

2.4 処分場で使用が想定されるセメント系材料(現実的な材料)の調査

試験に供するセメント系材料を設定するため、処分場で使用が想定されるセメント系材料を用いた構造物を抽出した後、それらに関する配合について整理した。

2.4.1 調查方法、調查対象

1) 処分場で使用が想定されるセメント系材料を用いた構造物の抽出

処分場で使用が想定されるセメント系材料を用いた構造物を、主に以下より情報を得て抽出した。

・NUMOの包括的技術報告書レビュー版(以下、NUMO-SC)(原子力発電環境整備機構, 2018)

・土木学会が発行するトンネル標準示方書(土木学会, 2016)

2) 抽出したセメント系材料を用いた構造物の配合に関する情報

抽出したそれぞれのセメント系材料を用いた構造物の配合を、既往のトンネルの施工事例を中 心に、施工事例が少ない場合は現場で使用する材料を模した試験体を用いた研究事例も含めて調 査した。調査方法は以下のとおりである。

- ・トンネル工事の事例報告が豊富に掲載されている雑誌「トンネルと地下」(一般社団法人日本トンネル技術協会)について、1984年10月号~2019年11月号の目次を確認した。「シールド」、「セグメント」、「吹付け」に関する報告のうち、配合の記載のあるもの26件を選択した。
- ・雑誌「セメント・コンクリート」(一般社団法人セメント協会)について、同誌の検索システムで「シールド」、「セグメント」、「吹付け」で該当したもの38件の内容を確認し、配合の記載のあるもの8件を選択した。
- ・雑誌「コンクリート工学」(公益社団法人日本コンクリート工学会)について、同誌の検索シ ステム(1995年1月号以降が対象)で「シールド」、「セグメント」、「吹付け」で該当したもの

38件の内容を確認し、配合の記載のあるもの4件を選択した。

- ・「セメント技術年報」、「セメント・コンクリート論文集」(一般社団法人セメント協会)について、検索システムで「シールド」、「セグメント」、「吹付け」で該当したもの84件の内容を確認したが、配合の記載のあるものはなかった。
- ・公益社団法人土木学会のホームページの目録書誌検索(2004年までが対象)でキーワード検索した。雑誌「土木学会誌」について、「吹付け」で2件が該当、「トンネル×海底」で36件が該当したが、いずれも配合の記載のあるものはなかった。「土木学会論文集」について、「吹付け」で該当したもの40件の内容を確認し、配合の記載のあるもの3件を選択した。
- ・、雑誌「土木技術」(土木技術社)、「コンクリート工学年次論文報告集」(公益社団法人日本 コンクリート工学会)、「トンネル工学論文集」(公益社団法人土木学会)、「吹付けコンクリー ト指針(案)」(公益社団法人土木学会)に記載のあった配合を抽出した。

2.4.2 調査結果

1) 処分場で使用が想定されるセメント系材料を用いた構造物の抽出

NUMO-SC (原子力発電環境整備機構, 2018)の4章には、支保工に関係する設計要件として、「空洞安定性」及び「坑壁剥離防止」が挙げられている。また、「付属書 4-32 坑道の支保設計における初期設定の考え方」には、高レベル放射性廃棄物処分場の支保工の初期設定例が示されている。ここには、セメント系材料として吹付けコンクリートと二次覆エコンクリートが示されている。処分坑道には基本的に二次覆工の施工は想定されていないが、新第三紀堆積岩類の地質環境における TRU 廃棄物処分場の処分坑道については、NUMO-SC「付属書 4-36 処分坑道断面の設定 (TRU 等廃棄物処分場)」の図 13 に、二次覆工を施工する概念が示されている。一般のトンネルにおいては二次覆工には裏面排水処理が施工されるため、その場合、地下水の影響は外側の吹付けコンクリートと比較すると限定的であると考えられる。

処分施設を建設する際に想定される工法からも、使用されるセメント系材料を検討した。土木 学会が発行するトンネル標準示方書(土木学会,2016)では、主要なトンネルの工法として、山 岳工法、シールド工法、開削工法の3つの工法が示されている。このうち、開削工法は地表面を 掘削し構造物を築造する工法であるため、トンネルの深度は数十m程度である。そのため、処分 坑道の深度が300m以深となる地下施設は、山岳工法かシールド工法、またはこれらの併用で築 造されることが想定される。山岳工法の支保工に使用される主要なセメント部材として「吹付け コンクリート」があり、青函トンネル(持田ほか,1976)等での使用実績がある。吹付けコンク リート(モルタル)は、圧縮空気等で施工面にコンクリートを吹付ける観点から流れ落ちない様 に急速施工(硬化)させるための混和剤が多く加えられている特徴を持つ。

シールド工法に使用される主要なセメント部材として「セグメント」があり、支保工と覆工コ ンクリートの両方の役割を担っている。東京湾アクアトンネル(朝倉ほか,1997)等での使用実 績がある。コンクリートセグメントは工場で作製し、シールドマシンにより掘削と同時に現場で 組み立てられ設置される。セグメント製品の多くは出荷を早くするため加熱養生が施される。

以上を踏まえ、本業務の主な試験対象材料としては、「吹付けコンクリート」と「コンクリートセ グメント」に加え、二次覆工コンクリートやインバート等の現場にて打設されるコンクリートが挙げら れた。

2) 抽出したセメント系材料を用いた構造物の配合に関する情報

各文献に記載された配合を、「吹付けトンネル」、「シールドトンネルのセグメント」、「現場打節」 に分けて、一覧表にまとめた(表 2·14~表 2·22)。一覧表には、報告年の古いものから順に掲載 した。以下、三分類のそれぞれについて、配合の概観を記す。

・吹付けトンネル

実際の工事にて採用された配合の記載が豊富に見られた。表 2-14~表 2-18 に 57 の配合を掲載した。なお、括弧内の(No.) は表 2-14~表 2-18 の文献 No.を示す。

骨材の最大寸法は 15~20mm のケースが多かった。水セメント(結合材) 比は 40~50%が多 かった。セメント種類は、特に記載のないものを OPC とすると 40 例以上と最多であった。早強 ポルトランドセメント(以下、HPC)は 7 例あった。高炉 B 種(以下、BB)は 3 例あり、その うちの 1 例(No.28)は海岸近くの液化石油ガス備蓄の地下タンクであり耐海水性を意図して、 もう 1 例(No.22)は高速道路のトンネルであり化学抵抗性を意図して、それぞれ BB を使用し たケースであった。

・シールドトンネルのセグメント

吹付けとは異なり、実際の工事に使用されたセグメントの配合の報告は見つからなかった。施 工者にとってセグメントはレディメイド商品であるので、工事報告に記載すべき性能情報は大き さや形状などの諸元が主となり、コンクリートの配合にまで言及するケースがほとんどないこと によると思われる。したがって選択した報告はいずれも、実験室的検討に関するものである。表 2-19 及び表 2-20 には 22 の配合を掲載した。なお、括弧内の(No.)は表 2-19 及び表 2-20 の 文献 No.を示す。

骨材の最大寸法は 15~20mm のケースが多かった。水・セメント(結合材) 比は 30~40%が 多かった。セメント種類は、特に記載のないものを OPC とすると、大部分を占めた。一方、高炉ス ラグ微粉末を混和材として使用した配合が 5 例あり、そのうちの 1 例 (No.4) は、アクアラインの 海底トンネル用セグメントのコンクリートの配合選定試験であり、塩化物イオンの浸透抑制を意 図して高炉スラグ微粉末を使用したものであった。

なお、セグメントの製造に際しては蒸気養生を施す事が一般的とされている。

・現場打設

現場打設コンクリートの例として、シールドトンネルを現場打設した工事にて採用された配合 例と、実験室的検討に関する報告の双方が見られた。また、現場打設コンクリートの例は 1 次覆 工と 2 次覆工の双方が認められたが、これらの間に明確な差異は認められなかった。括弧内の (No.) は表 2-21 及び表 2-22 の文献 No.を示す。

骨材の最大寸法は 20~25mm のケースが多かった。水・セメント比は 40%以上が多かったが、 締固めが不要の高流動コンクリートの 31.4%という値も見られた (No.7)。セメント種類は、特 に記載のないものを OPC とすると、ほとんどが OPC であり、HPC も 1 例 (No.2) 見られた。 混和材を用いたケースは見られなかった。

以上の調査結果から、耐海水性や成分浸透の抑制を目的に調合されたセメントではない他、長期的にはトンネルの空洞安定性を低下させるアルカリ骨材反応への寄与も懸念されるが、OPC が、 地上、地下トンネルや汽水、塩水環境に関わらず、使用実績が最も多かった。なお、2.2 項 に 示 したように、OPC を用いたコンクリートでも、青函トンネルや関門トンネル等の塩水流入量の多い 構造物でも数十年機能している。また、耐海水性、塩化物イオン浸透の抑制を意図して高炉セ メ ントを使用している例も認められた。

以上の結果を参考に、配合の諸条件を設定することとし、その内容については報告書本編に記

参考文献

- 足立幸郎,藤井康男,青山哲也,川村彰誉,耐火型合成セグメントの火災時構造安定性に関する研究, トンネルと地下, Vol.38, pp.549-557, 2007.
- 千野彰, 萩野幸男, 堀川洋一郎, 防水シートを用いたシールドトンネルの2次覆工, トンネルと地下, Vol.20, pp.301-307, 1989.
- 中部電力,シールドトンネル二次覆工の新技術 スチールセグメントへのコンクリート吹付けの 適用,中部電力 技術開発ニュース, No.73, 1997.
- 土木学会, 吹付けコンクリート指針(案) [トンネル編] 第1版・第1冊, 2005.
- 土木学会,2016年度改訂 トンネル標準示方書 [共通編]・同解説 [シールド工法編]・同解説,2016. 江口洋一,澤田日出夫,斎藤克己,川添純雄,切土除荷のトンネル設計と低粉じん吹付けの試行
- 第二名神高速道路 安坂山トンネル,トンネルと地下, Vol.35, pp.779-787, 2004. 福留和人,長沢教夫,杉山律,喜多達夫,笹川幸男,各種高強度吹付けコンクリートの強度特性およ
- び大断面トンネルにおける試験施工, 土木学会論文集, No.602/VI-40, pp.123-137, 1998.
- 深沢成年,種田昇,橋本浩市,開業を迎えた北海道新幹線(新青森・新函館北斗間)のトンネル群, トンネルと地下, Vol.47, pp.315-325, 2016.
- 原子力発電環境整備機構,包括的技術報告:わが国における安全な地層処分の実現-適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築-(レビュー版),NUMO-TR-18-03,2018.
- 郷内勝栄,小林宣茂,梅香家俊文,津田昌秀,シールドの直打ちコンクリート覆工 JR桜木町 駅構内下水道、トンネルと地下、Vol.20, pp.195-200, 1989.
- 後藤守,岡崎和彦,尾上誠一,高強度吹付けコンクリートにより大土かぶりを克服 一般国道 194号 寒風山トンネル,トンネルと地下, Vol.29, pp.17-24, 1998.
- 芳賀康司, 佐原圭介, 渡邉修, 秋田勝次, 青函トンネルにおける吹付けコンクリートの性状および長期耐久性の評価, トンネル工学報告集, 第23巻, pp.269-276, 2013.
- 原田保雄,大石晋之助,北山裕康,金子誉,低粉じん吹付けコンクリートに挑む 山陽自動車道 郷分トンネル,トンネルと地下, Vol.19, pp.183-190, 1988.
- 樋口正典, 竹内光, 井出一雄, 下水道のシールドトンネル接続部補強工への適用, セメント・コンク リート, No.558, pp.116-121, 1993.
- 久湊豊,登坂敏雄,石井卓,石田積,短時間高剛性吹付けコンクリートの施工試験 -北陸新幹線 第2魚津トンネルー,トンネルと地下,Vol.38, pp.851-857, 2007.
- 本田智昭, 古市耕輔, 鈴木義信, 佐久間靖, 耐火コンクリートを用いたプレキャストセグメントの実験的諸検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.447-452, 2007.
- 飯田廣臣, 野々村政一, 磯谷篤実, シールドを用いた場所打ち支保(SENS)の耐荷機構に関する 研究, トンネルと地下, Vol.39, pp.515-523, 2008.
- 石井浩司,藤元安宏,橋本博英,金井和彦, PCNet セグメントの組立実証試験, コンクリート工学, Vol.39, pp.22-28, 2001.
- 岩本英將,岸本光弘,安井義則,吉田安利,大断面トンネルを多様な施工技術で掘削 -第二東 名高速道路 金谷トンネルー,トンネルと地下,Vol.39, pp.99-110, 2008.
- 加賀秀治,山本康弘,伊東靖郎,S.E.C.方式による大容量自動吹付けコンクリート工法,セメント・ コンクリート, No.404, pp.16-25, 1980.
- 鬼頭誠, 青景平昌, 笹谷輝勝, 林英雄, 直打ちライニング工法で構築された覆工コンクリートの品質, コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, pp.967-972, 1990.
- 木内勉, 西崎晶士, 栗林勇司, 森直樹, 新開発の吹付けコンクリートを用いた軟岩地山トンネルの高 速掘進, コンクリート工学, Vol.45, pp.31-37, 2007.
- 倉木修二, 松尾久幸, 高流動コンクリートを試用したセグメントの製造 その現状と展開, セメ ント・コンクリート, No.701, pp.40-47, 2005.
- 桑原力, 山田一宇, 出頭圭三, 膨張性混和材を用いたコンクリートセグメントに関する研究, セメント・コンクリート, No.303, pp.26-33, 1972.
- 前川秀人,五十嵐高,藤井宣,平野健吉,酸性液体急結剤と粉体助剤を用いた低粉じん吹付け -東北中央自動車道 栗子トンネル西避難坑-,トンネルと地下, Vol.39, pp.899-904, 2008.
- 増田隆,藤岡正男,関根信哉,高海水圧作用下におけるRC セグメントの耐久性に関する研究,コン クリート工学年次論文報告集,12-1, pp.609-614, 1990.
- 松崎茂樹,山本稔,下水道シールドトンネルの2次覆工に関する研究(1) 現場実態調査と実規 模若材令脱型実験,トンネルと地下, Vol.17, pp.763-773, 1986.
- 三谷浩二,海瀬忍,吉武勇,中川浩二,鋼繊維補強吹付けコンクリートのトンネル試験施工とその適用性評価,土木学会論文集,No.714/VI-56, pp.33-42, 2002.
- 三浦律彦,竹田宣典,高強度吹付けコンクリートの耐久性改善に関する研究,大林組技術研究所報, No.75, pp.1-6, 2011.
- 森山守,海瀬忍,築地功,平間昭信,東海北陸自動車道 飛騨トンネル避難坑工事 -吹付けコ ンクリートによる二次覆工-,コンクリート工学, Vol.46, pp.49-53, 2008.
- 室充,市川健作,樋田瑞明,平間昭信,新しい急結剤を用いた吹付けコンクリートの試験施工 中央自動車道(改築) 新岩殿トンネル、トンネルと地下, Vol.32, pp.25-31, 2001.
- 永井宏生,金山洋一,前田昌康,岩崎武,ロックボルトと吹付けコンクリートによる円形立坑の 施工,トンネルと地下, Vol.19, pp.971-976, 1988.
- 長野実,畑昌幸,笹尾正,SFRC 吹き付けによるトンネルの改築 山陰本線長沢トンネル,トンネルと地下, Vol.17, pp.343-350, 1986.
- 長野祐司, 丸山信一郎, 柳田利行, 西川昌伸, 坑内作業環境向上に寄与する遠心力トンネル吹付け工法, セメント・コンクリート, No.709, pp.41-47, 2006.
- 日本トンネル技術協会「セグメントの新技術」連載講座小委員会,連載講座 セグメントの新技術(10) 遠心力締固めRC セグメント,高流動コンクリートセグメント,トンネルと地下,Vol.30, pp.561-567, 1999.
- 大黒俊幸,高橋弘,後藤弘敏,メッセルシールドで地下鉄を掘る 仙台市地下鉄 五ツ橋工区, トンネルと地下, Vol.16, pp.701-710, 1985.
- 大窪克己,明道俊治,伊東淳,川上正史,高強度鋼繊維補強吹付けコンクリートの開発 工学的 諸性質に関する一考察,トンネルと地下, Vol.29, pp.893-897, 1998.
- 大窪克己,片寄学,白畑智幸,藤本克郎,スラリー急結剤を用いた吹付けコンクリートの効果 第二東名高速道路 静岡第六トンネル,トンネルと地下,Vol.35, pp.335-342, 2004.
- 中井雅司,村田浩一,堀川直毅,フライアッシュで坑内作業環境を改善 北海道電力 京極発 電所放水路トンネルー、トンネルと地下, Vol.37, pp.43-54, 2006.
- 桜井三男,野田豊範,新関門トンネルの吹付コンクリート,土木技術, Vol.28, pp.69-79, 1973.1 佐々木幹夫,佐原圭介,井浦智美,川嶋潤二,場所打ち支保システムによる山岳密閉シールド
 - 東北新幹線 三本木原トンネルー、トンネルと地下、Vol.36, pp.295-303, 2005.

- 佐藤達雄,三谷浩二,遠藤祐司,細谷多慶,高強度吹付けコンクリートの施工試験 磐越自動車道 鞍 手山トンネル,トンネルと地下, Vol.29, pp.699-705, 1998.
- 白石和雄, コンクリートセグメントの製作と工場施設, セメント・コンクリート, No.248, pp.11-19, 1967.
- 杉山律,トンネル用吹付けコンクリート,セメント・コンクリート, No.728, pp.38-43, 2007.
- 田島功,木全俊雄,宮内國一,合田稔,液状急結剤で吹付けコンクリートの粉じん対策 国道 361 号 権兵衛トンネル,トンネルと地下, Vol.35, pp.515-519, 2004.
- 高木隼二, 超早強セメントを用いた鋼繊維補強吹付けコンクリートの基礎実験と実施工, セメント・コンクリート, No.389, pp.8-15, 1979.
- 高橋佑弥,石田哲也,山本努,小椋紀彦,塩害環境下にある地下シールドトンネルの漏水履歴推定と 鋼材腐食解析,コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.835-840, 2013.
- 田村正明, 菅井雅之, 北村昌文, 加藤卓男, 内水圧がかかる 2 分割断面管渠を 300kg/m³の高密度 配筋で二次覆工 -東京都下水道 勝島ポンプ所流入管渠-, トンネルと地下, Vol.45, pp.115-123, 2014.
- 田沼孝彦, 霞ヶ浦と利根川を泥水シールドで結ぶ 霞ヶ浦利根川連絡水路, トンネルと地下, Vol.21, pp.21-27, 1990.
- 寺田博貴,子田康弘,岩城一郎,高耐久シールドセグメントコンクリートの耐久性評価に関する検討,土木学会東北支部技術研究発表会(平成 21 年度), V-1, 2009.
- 内田恵之助,和佐勇次郎,阿部廣二,井上啓明,高炉スラグ微粉末を使用した大型セグメント用コン クリートの性質に関する実験的研究,土木学会論文集,No.490/V-23, pp.51-60, 1994.
- 山本平, 横田和直, 小柳司, 清水良純, アジアとヨーロッパをつなぐ「ボスポラス海峡横断鉄道トン ネル」 -100 年の耐用年数を保証する強度, 耐久性と止水性能を備えた構造物-, コンクリ ート工学, Vol.52, pp.1007-1012, 2014.

表 2-14 吹付けコンクリートの配合の調査結果(その 1)

								Ť	日 (1	セメントの	の種類は	文献中に	明記され	ている場	合
No	文献	対象構造物	現地の地形、 地質等	特徵	設計基準	Gmax	Slump	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	W	с	S	G	
	桜井三男、野田豊範、新関門トンネル	新幹線のトンネ	粘板岩、チャート	新関門トンネルでは地質良好区間に	24.02	(mm)	(cm)		=0	@5		(kg/ 300	/m)	714	-
1	の吹付コンクリート、土木技術、Vol.28、 pp.69-79、1973.11	ル:山陽新幹線 新関門トンネル (山口・垣岡)	など	吹付けコンクリートが採用された。	料机	20			50	60		(OPC)	1207	/14	思
	古中焼ご 切目沿みかれる田いを確	(山口・福岡)		26年学年の1 タナン海子のけけ越ら田	本坑			-	-		-	305	1264	702	急
2	高小単一、短年短ピスントを用いた詞 繊維補強吹付けコングリートの基礎実 験と実施工、セメント・コングリート、 No.389、pp.8-15、1979.7	 	-	短度管理のしてすい運気以内け機ど用 い、早強性を有する吹付けSFRCの検討 がまったく行われていないことか ら、"湿式吹付け様による超早強セ メントを用いた吹付けSFRC"の諸物 性を評価するとともに、実際のトンネ ルにおいて施工した。	-	10	0~2	4	45	70	168	373 (UHPC)	1243	550	遅粉
3	加賀秀治、山本康弘、伊東靖郎、 S.E.C.方式による大容量自動吹付けコ ンクリート工法、セメント・コンクリート、 No.404、pp.16-25、1980.10	鉄道トンネル:国 鉄福知山線第2名 塩トンネル(兵 庫)	-	従来の湿式や乾式とは異なる新しい工 法としてS.E.C. (Sand Enveloped with Cement、分割練り混ぜ)吹付 け工法を検討し、基礎実験を行うと ともに、実際のトンネルに施工した。	-		-	1	49.5		173	350	1273	580	急減
4	長野実、畑昌幸、笹尾正、SFRC吹き 付けによるトンネルの改築 山陰本 線長沢トンネル、トンネルと地下、 Vol. 17、pp. 343-350、1986.5	65年経過した鉄道 トンネルの改築: 山陰本線長沢トン ネル(島根)	-	大正10年竣工トンネルの覆工レンガを SFRC吹付けで補強。	~	10	18	~	50.0	65.0	220	440 (OPC)	983	550	Al 急鋼
5	原田保雄、大石晋之助、北山裕康、 金子誉、低粉じん吹付けコンクリー トに挑む 山陽自動車道 郷分トン ネル、トンネルと地下、 Vol.19、 pp.183-190、1988.3	高速道路のトンネ ル:山陽自動車道 獅分トンネル(広 島)	古生層の粘板岩	作業環境向上のため 粉じん抑制 剤ハ イナトムを試用。	~	×	~		50.0	60.0		360	1076	745	急粉
6	永井宏生、金山洋一、前田昌康、岩 崎武、ロックボルトと吹付けコンク リートによる円形立坑の施工、トン ネルと地下、 Vol.19、 pp.971- 976、1988.12	鉄道トンネルの立 抗:東葉高速線 習志野台トンネル 坪井工区 (千葉)	<u>洪</u> 積台地 ロー ム、凝灰質粘 土、砂質土	吹付けコンクリートとロックボルトを 支保部材とした 大断面円形立坑 の施 工。	~	15		~	50.0	60.0	180	360	1093	728	急
7	中部電力,シールドトンネル二次覆 工の新技術 スチールセグメントへ のコンクリート吹付けの適用、中部 電力 技術開発ニュース、No.73、 1997.7	洞道シールドトン ネルのスチールセ グメントへの吹付 けによる二次覆工 の施工:名北東洞 道(愛知)	-	急曲線を含むためスチールセグメント の使用が不可欠な 小断面シールドト ンネルにおける二次覆工施工の効率 化が図られる。	~		15±2	4.5±1.5	49.0	55.0	196	400 (OPC)	891	727	高 ×(液
	後藤守、岡崎和彦、尾上載一、高強 度吹付けコンクリートにより大士か ぶりを克服 一般国道194号 寒風 山トンネル、トンネルと地下、	国道のトンネル: 国道194号線 寒 風山トンネル (高 知・愛姆)	山間部 泥質片 岩	吹付けコンクリートの高強度化と厚 さの割り増しにより支保耐力の向上を 図った。高強度化のためシリカヒュー ムを配合した。設計基準確は標準的	28d: 180kgf/cm ²		10±2	4±1	59.7	62.0	215	360			盲
8	Vol. 29, pp. 17-24, 1998.1	工期:1988.9~ 1998.10		な28日180kgf/cm ² に対し7日で250およ び290kgf/cm ² とした。	7d: 250kgf/cm ²	-	20±2	4±1	59.7	70.0	215	360			シ 高
					7d: 290kgf/cm ²	-	20±2	4±1	53.8	70.0	215	400		-	シ 高
9	佐藤達雄、三谷浩二、遠藤祐司、細 谷多慶、高強度吹付けコンクリート の施工試験 磐越自動車道 鞍手山 トンネル、トンネルと地下、	高速道路のトンネ ル:	山間部 新第三 紀層、先第三紀 の花崗岩類の変 成岩	吹付けコンクリートの高強度化により吹付け厚さを薄くし建設コストの削減を図った。急結剤と高性能減水剤を 組み合わせた配合により高強度化を		13	-	-	45.0	60.5	203	450 (OPC)	991	673	高0.急
	Vol. 29、 pp. 699-705、1998.8	工期:1996.3~ 1998.7		図った。	従来型	13	- 24		61.0	60.5	220	360 (OPC)	1040	705	急

だけ記載) 混和剤ほか (結剤:QP500同等品 12kg/m³ a結剤:13kg/m³ 延型AE减水剤:C×0.25% 末型急結剤 結剤 14kg/m³ t水剤 2.1kg/m³ E減水剤:ボゾリスNo.70 1.1kg/m³ 息結剤:デンカナトミック 5%(おそらくC×) 剛繊維:1vol%=80kg(おそらくC×) は結剤:ナトミック C×6.5% としん抑制剤:ハイナトム C×0.15% 、結剤 C×5% 5性能減水剤:ポリグリコールエステル誘導体 C 0.6% (体急結剤:水溶性アルミニウム塩 高性能AE減水剤 C×0.7% /リカヒューム 25kg/m³ 高性能AE減水剤 C×2.5% /リカヒューム 25kg/m³ 寄性能AE减水剤C×2.3% 島性能減水剤:ポリエチレングリコールエステル系C× .9% 息結剤:ナトミックT 10(CSA系) C×8~12% a結剤:ナトミックT 5(CA系) C×8~12%

表 2-15 吹付けコンクリートの配合の調査結果(その2)

10	福留和人、長沢教夫、杉山律、喜多 達夫、笹川幸男、各種高強度吹付け コンクリートの強度特性および大断 面トンネルにおける試験施工、土木 学会論文集、No.602/VI-40、 pp.123-137、1998.9	高速道路のトンネ ル:東名高速 日 本坂トンネル (静 岡)	-	高強度吹付けコンクリートを適用する ことによる 大断面トンネル 施工の合 理化、コストダウンの可能性を検証す るため、各種配合の実験室評価を行 い、その結果を元に選定した配合を実 際のトンネル工事に適用した。	_	-	-	-	40 (W/B)	60.0	180	450 (OPC)	1032	705	高怕 急衆 10.(
11	大窪克己、明道俊治、伊東淳、川上 正史、高強度鋼繊維補強吹付けコン クリートの開発 工学的諸性質に関 する一考察、トンネルと地下、 Vol.29、 pp.893-897、1998.10	高強度鋼繊維補強 吹付けコンクリー トの室内実験	-	教岩地山 に適する高強度吹付けコン クリートとして、液体急結剤、鋼繊 維、シリカヒューム、高性能減水剤を 用いたコンクリートを検討した。	-	10	-	2.5	38 (W/B)	70.0	166 (total 200)	500	1071	464	シリ網高協制
12	室充、市川健作、樋田瑞明、平間昭 信、新しい急結剤を用いた吹付けコ ンクリートの試験施工 中央自動車 道(改築) 新岩殿トンネル、トン ネルと地下、 Vol.32、 pp.25-31、 2001.1	高速道路のトンネ ル:中央自動車道 (改築) 新岩殿 トンネル (山梨)	-	はね返りによる 繊維の損失の低減 を 図った吹付けコンクリートの試験施 工。連続的にスラリー化した粉体急結 剤を供給する吹付けシステム(スラ リーショットシステム)を用いた。	-	15	-		40.8	68.0	204	500 (HPC)	1087	516	高性 割 約 約 約 約 約 約 約 約 約 約 約 約 約
	三谷浩二、海瀬忍、吉武勇、中川浩 二、銅繊維補強吹付けコンクリート のトンネル試験施工とその適用性評 価、土木学会論文集、No.714/VI- 56、pp.33-42、2002.9	高速道路のトンネ ル:中央自動車道 (改築) 新岩殿 トンネル(山梨)		はね返りによる鋼繊維の損失の低減 を図るため、4種類の吹付けコンク リートを実際のトンネル工事に試験施 工し、現地にて熟練の技術者がそれ ぞれの適用性を評価した。	-	15	-	-	35.4 (W/B)	60.0	230	650 (BB)	835	561	鋼結 高性 CA
					-	15	-	-	37.9 (W/B)	65.0	220	580 (HPC)	970	526	鋼維 高性 液体
13			-		-	15	-	-	35.1 (W/B)	70.0	200	525 (HPC)	1077	469	鋼シ高7.4. 済 検
					-	15	-	-	40.8 (W/B)	68.0	204	500 (HPC)	1087	516	鋼績 高竹 粘調 CS
14	大窪克己、片寄学、白畑智幸、藤本 克郎、スラリー急結剤を用いた吹付 けコンクリートの効果 第二東名高 速道路 静岡第六トンネル、トンネ ルと地下、Vol.35、pp.335-342、 2004.5	高速道路のトンネ ル:第二東名 静 岡第六トンネル (静岡) 工期:2000.2~ 2004.5	安倍川山地南端 部 砂岩、泥 岩、それらの互 層	スラリーショットシステムによる吹付 けの現場施工。大幅な おじんの低減 が実現された。はね返り率の低減に も有効であり、強度発現も問題なかっ た。	i.				49.0	59.0	189	450 (OPC)	998	704	高竹急殺
					従来型	-	-	-	45.0	62.0	203	450 (OPC)	1026	639	高竹 急殺
15	田島功、木全俊雄、宮内國一、合田 稔、液状急結剤で吹付けコンクリー トの粉じん対策 国道361号 権兵 衛トンネル、トンネルと地下、 Vol. 35、pp. 515-519、2004.7	国道のトンネル: 国道361号線 権 兵衛トンネル(長 野) 工期:1998.3~	-	粉体急結剤に代わり粉じんの発生を大 幅に低減できる低アルカリ型液状急結 剤を用いた吹付けコンクリートの現場 施工試験。はね返り、粉じん発生と もに低減。		13	20±2		40.0	61.0	-	480 (OPC)	4	2+2	高信命編
		2005. 3			従来型	13	18±2.5		45.0	70.0		450 (OPC)	-	-	高竹 急約 鋼縦

性能減水剤:ポリエチレングリコール系 結剤:カルシウムサルホアルミ系 C×1.1% 0%)カヒューム:50kg/m³ 繊維 60kg 性能減水剤:メラミン系 13kg 結剤:アルミン酸塩系 性能減水剤:ポリグリコールエステル誘導体 7kg/m³ 調剤:セルロース系化合物 0.15kg/m³ 繊維:78.5kg/m³=1.0vol%, 結剤:カルシウムサルフォアルミ系 50.0kg/m³+水 $.0 \text{kg/m}^3$ 繊維 78.5kg/m³ 生能減水剤:ポリグリコールエステル系 5.20kg/m³ 粉体急結剤 32.5kg/m³ 繊維 78.5kg/m³ 性能減水剤:ポリグリコールエステル系 5.80kg/m³ 体急結剤 58.0kg/m³ 繊維 78.5kg/m³ リカヒューム 45kg/m³ 性能減水剤:ポリグリコールエステル系 41kg/m³ 添型養生剤 5.00kg/m³ 体急結剤 42.0kg/m³ 繊維 78.5kg/m³ 性能減水剤:ポリグリコールエステル系 7.00kg/m³ 調剤 0.15kg/m³ A粉体急結剤 50.0kg/m³+水35kg/m³ 性能減水剤:ポリエチレングリコール系 6.30kg/m³ 詰剤:カルシウムサルフォアルミ系 45kg/m³ 結助剤:水溶性高分子化合物 0.09kg/m³ 性能減水剤:ポリエチレングリコール系 4.95kg/m³ 結剤:カルシウムサルフォアルミ系 45kg/m³ 生能減水剤:ポリカルボン酸系 4.32kg/m³ 結剤:液状 水溶性アルミニウム塩 繊維:40kg/m³ 生能減水剤:ポリカルボン酸系 3.38kg/m³ 結剤:粉体 繊維:40kg/m³

表 2-16 吹付けコンクリートの配合の調査結果(その3)

				P1 - P		• •									
16	江口洋一、澤田日出夫、斎藤克己、 川添純雄、切土除荷のトンネル設計 と低粉じん吹付けの試行 第二名神 高速道路 安坂山トンネル、トンネ	高速道路のトンネ ル:第二名神 安 坂山トンネル(三 重)	山間部 花崗岩	アルカリフリー液体急結剤を使用した 低粉じん吹付け工法の現場施工。は ね返り、粉じん発生ともに低減。	-	15	18±2	-	51.4	67.0	185	360 OPC)	1235	620	高急
	ルと地下、Vol.35、pp.779-787、 2004.10	掘進期間:2000.7 ~2001.8			従来型	15	8±2	-	56.9	59.0	210	368 (OPC)	1043	739	急
17	中井雅司、村田浩一、堀川直毅、フ ライアッシュで坑内作業環境を改善 ー北海道電力 京極発電所放水路ト ンネルー、トンネルと地下、 Vol. 37、pp. 43-54、2006.1	水路トンネル:京 極発電所放水路ト ンネル(北海道) 掘進期間: 2002.11~2004.10	山間部 安山 岩、デイサイト	粉じん低減 の目的でフライアッシュ を配合した吹付けコンクリートの現場 施工。粉じん発生は低減された。	-	15	15	-	60 (W/B)	-	216	288 (OPC) +FA 72	923 + FA 84	691	急
					従来型	15	12	-	62.0	-	223	360 (OPC)	1030	694	急
18	長野祐司、丸山信一郎、柳田利行、 西川昌伸、坑内作業環境向上に寄与 する遠心力トンネル吹付け工法、セ メント・コンクリート、No.709、 pp.41-47、2006.3	国道のトンネル: 国道135号線 立 岩トンネル(静 岡) 工期:2003.10〜 2005.6	-	粉じんの発生を低減するために開発 された遠心カトンネル吹付け工法 の、実際のトンネルへの適用例。国道 のトンネルおよび小断面として下水道 トンネルに適用した。	_	-	-	-	58.0	58.0	209	360	1030	755	急
		下水道トンネル: 相模原トンネル (神奈川) 工期:2003.6~ 2006.2	-		-	-	-	-	56.0	65.0	202	360	1075	596	急
19	木内勉、西崎晶士、栗林勇司、森直 樹、新開発の吹付けコンクリートを 用いた軟岩地山トンネルの高速掘 進、コンクリート工学、Vol.45、 pp.31-37、2007.4	新幹線のトンネ ル:北陸新幹線 峰山トンネル(新 潟) 工期: 2001.10~2007.7	泥岩	吹付け直後から強度を発現する初期 高強度吹付けコンクリートを用い、 鋼製支保工を省略した新支保パターン により、高速掘進に取り組んだ工事事 例。高強度混和材と急結剤を併用す ることで、ごく早期にエトリンガイ トを生成させ、高速度を発現するもの	-	-	24~26	-	45 (W/B)	70.0	200	380	1073	530	シ石高カク
				で、10分で3N/mm ⁻ 以上を発現する。	従来の高品 質吹付け	-	14±2	-	60 (W/ (C+sf)	62.0	216	342	966	682	シ 石 添
	杉山律、トンネル用吹付けコンク リート、セメント・コンクリート、 No. 728、pp. 38-43、2007. 10	新幹線のトンネ ル:九州新幹線 浜崎トンネル(熊 本) 工期:2000.3~ 2003.3	-	3種混合 (OPC+sf+LS)セメントの SEC湿式吹付け方式。	-	15	8±2	-	60 (W/B)	62.0	216	342 (OPC)	997	676	シ 石 添
		鉄道トンネル:神 戸電鉄 有馬トン ネル (兵庫) 工期:1995.1~4	-	樹脂繊維補強吹付けコンクリート工 法によるシングルシェルライニング。	-	15	20±2.5	-	58.5	59.5	240	410	958	653	ビ 高
20		国道のトンネル: 国道13号線 新主 寝坂トンネル(山 形) 工期:2000.8~ 2004.12	-	低粉じん乾式吹付け工法による濁水 処理の環境負荷低減。	18N/mm ²	-	-	-	50.0	-	-	360	-	-	急粉
		高速道路のトンネ ル:中国横断自動 車道 夫婦岩トン ネル(島根) 工期:1998.6~ 2001.3	-	凝結遅延剤 によるベースコンクリー トの練置き。	18N/mm ²	-	-	-	59.0	-	-	360	-	-	凝急

[性能減水剤:X-404CV C1.4%] 結剤:アルカリフリー液体AFK777J (結剤:粉体 は結剤:カルシウムアルミネート系粉体 は結剤:カルシウムアルミネート系粉体 (結剤:粉体 C×7.0% 、結剤:粉体 C×7.0% リカヒューム 20kg/m³ 「灰石微粉末 127kg/m³ i強度混和材:デンカΣショットS 44kg/m³ ルシウムサルフォアルミ系急結剤:デンカナトミッ 7 Type 10S 36kg/m³ /リカヒューム 18kg/m³ 「灰石微粉末 114kg/m³ 加剤 2.52kg/m³ /リカヒューム 18kg/m³ 「灰石微粉末 70kg/m³ 加剤 1.8kg/m³ 「ニロン繊維 6.5kg/m³ 5性能AE減水剤 2.87㎏/m³ a結剤 C×5.5% だん低減剤 C×0.1% 結遅延剤 C×5% (結剤 C×7%

表 2-17 吹付けコンクリートの配合の調査結果(その 4)

21	久湊豊、登坂敏雄、石井卓、石田 積、短時間高剛性吹付けコンクリー トの施工試験 −北陸新幹線 第2 魚津トンネル-、トンネルと地下、 Vol.38、pp.851-857、2007.12	新幹線のトンネ ル:北陸新幹線 第2魚津トンネル (富山)	-	高レベル放射性廃棄物処分施設の トンネルに活用することを第一の目的 として開発された短時間高剛性吹付 けコンクリートの現場試験施工。同コ ンクリートは材齢3時間で剛性15~20k N/mm ² 以上(圧縮強度として15~ 20N/mm ² 以上)であり、短時間で高い 剛性を発現するため、掘進の高速化に 対応できる。模擬トンネルでの施工試 験で性能が確認されていたが、実現場 での適用性を確認した。	-	-	20~25	-	28.5 (W/B)	60.0	185	550 (HPC) + Σ 100	943	641	∑:高急
22	岩本英將、岸本光弘、安井義則、吉 田安利、大断面トンネルを多様な施 工技術で掘削 -第二東名高速道路 金谷トンネル-、トンネルと地下、 Vol.39、pp.99-110、2008.2	高速道路のトンネ ル:第二東名 金 谷トンネル(静 岡) 工期:1997.3~ 2005.12	泥質岩、砂岩・ 頁岩互層	約4500~4600mと第二東名で最長の金 谷トンネルの工事には多様な技術が採 用された。高強度吹付けコンクリート には材料リサイクル、低アルカリ化、 化学抵抗性の観点から高炉B種セメン トが用いられた。	-	-	-	-	42.0	56.0	190	450 (BB)	918	718	混
	森山守、海瀬忍、築地功、平間昭 信、東海北陸自動車道 飛騨トンネ ル避難坑工事 -吹付けコンクリー トによる二次覆工-、コンクリート	 高速道路のトンネ ル:東海北陸自動 車道 飛騨トンネ ル西避難坑(岐 	花崗岩、流紋 岩、花崗斑岩、 片麻岩	従来の覆エコンクリートと同等以上の 性能を有する高強度繊維補強吹付け コンクリートによる二次覆工の施工記 録。	乾式	-	-	-	45.0	80.0	203	450	1284	323	が急
23	工学、Vol.46、pp.49-53、2008.4	阜)			湿式	-	18	-	45.0	65.0	203	450	1059	559	ボ高粉急
24	前川秀人、五十嵐高、藤井宣、平野 健吉、酸性液体急結剤と粉体助剤を 用いた低粉じん吹付け -東北中央 自動車道 栗子トンネル西避難坑 -、トンネルと地下、Vol.39、 pp.899-904、2008.12	 高速道路のトンネ ル:東北中央自動 車道 栗子トンネ ル西避難坑(福 島・山形) 	 奥羽山脈 福島 川:花崗岩、石 英安山岩、流紋 岩 山形側:凝 灰岩、砂岩・泥 岩 互層 	粉じん低減 の目的で開発された酸性 液体急結剤とスラリー化された複合急 結剤を用いる吹付けコンクリートの国 内初の実証事例。	-	-	18±2	-	49.0	60.0	196	400	1039	732	減急ミ
25	三浦律彦、竹田宣典、高強度吹付け コンクリートの耐久性改善に関する 研究、大林組技術研究所報、 No.75、pp.1-6、2011	高強度補強吹付け コンクリートの耐 久性に関する室内 実験	-	吹付けコンクリートのみで覆工を構築 するシングルシェル構造が提案され、 吹付けコンクリートの耐久性が重要視 されつつあることに鑑み実施した高 強度吹付けコンクリートの室内実 験。	-	13	-	7.5±1.5	35.0	60.0	195	557 (OPC) + FA 111	877	596	高 AI 急
	同上 比較月	月の従来型配合(第:	二東名で使用され	た高強度配合)	$36N/mm^2$	13	-	4±1.5	45.0	65.0	203	450 (OPC)	1081	593	高急
	芳賀康司、佐原圭介、渡邉修、秋田勝次、青函トンネルにおける吹付け	鉄道の海底トンネ ル:青函トンネル		青函トンネルの作業坑や先進導坑のシ ングルシェル構造吹付けコンクリート	トルクレット	-	-	-	45	60	-	352 (OPC)	1155	775	急
26	コンシリードのIHA わる U 長期 耐久 性の評価、トンネル工学報告集、第 23巻、pp.269-276、2013.11	↓ 目 ★★ * 4し(毋又旦)	-	にして、C、40年以上にわたる注状の 評価を行っている。	アリバー	1	3	2	50.0	65.0	ā	360 (OPC)	1240	670	急
27	深沢成年、種田昇、橋本浩市、開業 を迎えた北海道新幹線(新青森・新 函館北斗間)のトンネル群、トンネ ルと地下、Vol.47、pp.315-325、	新幹線のトンネ ル:北海道新幹線 渡島当別トンネル (北海道)	-	輸入に依存するシリカヒュームや採取 時の環境への負荷が大きい石灰石の代 りに、北海道で安定供給が可能なフ ライアッシュと高炉スラグ微粉末	-	15	18±2	-	56.0	62.0	202	360	1057 + FA 42 + BSF 18	702	高
	ZU16.5	掘運期間:2005.9 ~2009.8		の使用を試みた。	従来型	15	8±2	-	60 (W/B)	62.0	216	342 + sf 18	1039 + LS 60	686	高

:高強度用混和材ΣショットSH 性能減水剤FTN-30W 22kg/m³ 結剤ナトミック 66kg/m³ 和剤 5.4kg/m³ リプロピレン繊維 1vol% 結剤:T-10 US50 C×8% りプロピレン繊維 0.75vol%]性能減水剤 C×1.6% じん低減剤 C×0.08% 結剤: T-10 US50 C×10% 达刹:6kg/m³ a結剤・助剤:ナトミックLSA 32kg/m³、ナト ックUSS 16kg/m³ |性能AE減水剤:ポリカルボン酸系 C×1.3%| E剤:陰イオン系 C×0.06% 結剤:カルシウムサルフォアルミ系 C×7% |性能AE減水剤:ポリカルボン酸系 C×0.8% 結剤:カルシウムサルフォアルミ系 C×7% 結剤:イソクレット 結剤:QP 500 ;性能減水剤: 2.7kg/m³ 好性能減水剤:1.8kg/m³

表 2-18 吹付けコンクリートの配合の調査結果(その5)

	土木学会, 吹付けコンクリート指針 (案)[トンネル編]、土木学会、第 1版・第1冊、2005	高速道路のトンネ ル:第二東名 清 水第四トンネル (静岡) 工期:2000.3~ 2008.2	-	早 強セメント を用いた高強度吹付け コンクリート。	36N/mm ²	-	22±2	-	45.0	62.0	-	450 (HPC)		-	高 カ/
		液化石油ガス地下 備蓄・波方基地 (愛媛) 工期:2002~2008	-	耐海水性、耐水性 および作業環境 (粉じん発生)を改善した高強度低溶 出型吹付けコンクリート。	-	-	-	-	50.0	65.0	200	400 (BB) +FA104	-	-	高急ス
		高速道路のトンネ ル:第二東名 静 岡第六トンネル (静岡) 工期:2000.2~ 2004.5	-	スラリー急結剤を用いた高強度吹付 けコンクリート。	-	-	-	-	42.0	59.0	189	450 (OPC)	998	704	高信急に
		高速道路のトンネ ル:東海北陸道 袴腰・城端トンネ ル避難坑(富山) 工期:1997.3~	-	乾式吹付けコンクリートにおける は ね返りの低減。	-	-	-	-	52.5 (W/B)	65.0	201	360 (OPC) + sf 23	1017	614	炭減急
		1999.3			従来	-	-	-	52.5 (W/B)	65.0	189	360 (OPC)	1164	634	急
28		高速道路のトンネ ル:近畿自動車道 島田トンネル(和 歌山) 工期:1998.3~ 2002.3	-	早強セメントとアルカリフリー液 体急結剤を用いた低粉じん吹付けコ ンクリート。	-	-	-	-	56.1	60.0	~	360 (HPC)	-	-	高 (ア)
		高速道路のトンネ ル:第二名神高速 安坂山トンネル (三重) 工期:1999.9~ 2004.3	-	アルカリフリー液体急結剤を用いた 低粉じん吹付けコンクリート。	-	15	18±2	-	51.4	67.0	185	360	1235	620	高 アノ
		水路トンネル:中 里注水トンネル (北海道) 工期:2002.11~ 2006.2	-	小断面・長距離圧送における粉じん 抑制対策。	18N/mm ²	-	-	-	59.4 (W/B)	-	-	360	-	-	粉急
		道路トンネル:瀬 戸都市計画道路菱 野線 菱野トンネ ル(愛知) 工期:1999.4~ 2002.9	-	遠心力 を利用した吹付け機械。	18N/mm ²	-	-	-	56 (W/B)	-	-	360	-	-	急;
		新幹線のトンネ ル:北陸新幹線 飯山トンネル(長 野) 工期:2000.3~	-	膨圧 トンネルにおける繊維補強吹付 けコンクリートによる支保工変状対 策。	18N/mm ²	15	14±2	-	60 (W/B)	62.0	224	354	944	648	シ石混繊

性能減水剤:NT-1000H C×1.1% リルシウムアルミネート系粉体急結剤 性能減水剤:FTN-30 5.6kg/m³ 結助剤:FTN SD 0.2kg/m³ 結剤:ナトミックUS-50 40kg/m³ : ラリー水(急結剤のスラリー化) : 28kg/m³ |性能減水剤:FTN-30 6.3kg/m³ 結助剤:FTN SD 0.09kg/m³ 結剤:ナトミックUS-50 45kg/m³ ラリー水(急結剤のスラリー化):31.5kg/m³ 酸カルシウム 115kg/m³(はね返り、粉じん低 結剤:カルシウムアルミネート系粉体 B×7% 結剤:カルシウムアルミネート系粉体 B×7% ;性能減水剤 4.60kg/m³ ルカリフリー液体急結剤:AFK 777 话能減水剤 C×1.4% ・ルカリフリー液体急結剤:AFK-777 じん低減剤 C×0.15% は結剤:デンカナトミック Type 5 C×6.8% は結剤:カルシウムアルミネート系粉体 C×7% リカヒューム 18.7kg/m³ 「灰石微粉末 100kg/m³ l和剤 1.87kg/mm² 滩バルチップ 9.1kg/m³

表 2-19 セグメントの配合の調査結果(その 1)

				12 2 10				. ~ u~							
									配合(セメント	の種類は	は文献中に明	月記され`	ている場	合だけ記載)
No.	文献	内容、対象構造物	特徴	鉄筋の有無	設計基準 強度	G _{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	W	C (kg/r	S n ³)	G	- 混和剤ほか
1	自石和雄、コンクリートセグメント の製作と工場施設、セメント・コン クリート、No.248、pp.11-19、 1967.10	地下鉄のシールドトンネ ル:営団地下鉄5号線富 岡町工区(東京) 工期:1964.9~1967.2	営団地下鉄5号線(東西線)工事に際 し、専用のセグメント工場を設け、作 製を行った。	有	-	20	3~6	3	39.5	39.2	154	390 (OPC)	720	1124	混和剤:ポゾリスNo.5 C×0.5%
2	桑原力、山田一字、出頭圭三、膨張 性混和材を用いたコンクリートセグ メントに関する研究、セメント・コ ンクリート、No.303、pp.26-33、 1972.5	を膨張性混和材を用いたコ ンクリートセグメントの 性能評価	カルシウムサルフォアルミネート系の 膨張性混和材を用いたコンクリートに より作製したセグメントについて、強 度や温度差によるひび割れと混和材添 加量の関係、実物大セグメントの載荷 によるひずみやたわみ、などの試験を 行った。	有	-	20	0.7	2.1	32.3	38	152	414	667	1126	膨張性混和材:カルシウムサルフォアルミ系 56kg/m ³ 分散剤:サンフローS 1.175kg/m ³
3	増田隆、藤岡正男、関根信哉、高海 水圧作用下におけるRCセグメントの 耐久性に関する研究、コンクリート 工学年次論文報告集 12-1。	 海底シールドトンネルに 用いるセグメントの塩素 イオン浸透等に関する室 内実験 	東京湾横断道路のシールドトンネルに は高海水圧が作用し、通常より塩素浸 透が速いことが予測されるため、試験 体にて海水浸透試験を行った。配合は	田記一部	RC	20	3	2	35	40	140	400 (OPC)	742	1156	高性能滅水剤:C×4.0%
	pp.609-614, 1990		RCセグメントと二次覆工の2種類とした。		二次覆工	20	15	4	56.3	49	169	300 (OPC)	887	959	高性能滅水剤:C×1.8%
4	内田恵之助、和佐勇次郎、阿部廣 二、井上啓明、高炉スラグ激粉末を 使用した大型セグメント用コンク リートの性質に関する実験的研究。	東京湾横断道路シールド トンネルに用いるセグメ ント用コンクリートの配 合選定に関する室内実験	海底シールドトンネルの耐久性向上 のため、高炉スラグ微粉末使用の効果 を実験検討。東京湾横断道路トンネル への使用を想定。	明記無し	比較配合	20	3.0±1.0	2.0±1.0	34.5	37.0	138	400	688	1217	ナフタレンスルホン酸系高性能減水剤 4.8kg/m ³
-	土木学会論文集、No.490/〒-23、 pp.51-60, 1994.5				-	20	3.0±1.0	2.0±1.0	34.5	37.0	138	200 (OPC)+ BSF200	683	1207	ナフタレンスルホン酸系高性能滅水剤 4.3kg/m3
	日本トンネル技術協会「セグメント の新技術」連載講座小委員会,連載 講座 セグメントの新技術(10) 遠 心力線面め取せグメント 高流動コ	遠心力締固め法によるセ ゲメント製造の検討実験	コンクリートの品質向上と製造費低減 を目的とし、従来の振動締固の法に替 わり、ヒューム管製造で実績のある違 心力締囚の法を日本で初めてセグメン		-	15	5.0±1.0	1.5±1.0	33.0 (W/B)	43.0	165	350 +BFS 150	733	1005	混和剤 6.5kg/m ³
	ンクリートセグメント、トンネルと 地下、Vol.30、pp.561-567、1999.6		ト製造に適用することを試みた。製品 は1996年、東京ガスのシールドトンネ ルに使用された。		-	15	5.0±1.0	1.5±1.0	34.0 (W/B)	43.0	160	329 +BSF 141	750	1028	混和剤 6.1kg/m ³
5		mater baland from the test of the test		有	-	15	5.0±1.0	1.5±1.0	35.0 (W/B)	43.0	157	315 +BSF 135	760	1042	混和剤 5.9kg/m ³
	連載講座 セクメントの新技術(10) 遠心力締固めRCセグメント、高流動 コンクリートセグメント、トンネル ト地下 Vol 30 pp 561-567		製造工程や工場設備の一部省暗および 型枠の簡素化による製造 畳低 減を目的 とし、高流動コンクリートによるセグ メントの製造を試みた 製品は重言雪		高流動	-	-	2.0	31.6	53.6	187	592	846	821	高性能AE减水剂 C×1.8%
	1999.6	Politika I. P. I. I. add	カの管路に使用された。		従来		-	2.0	35.2	43.5	148	420	792	1150	高性能减水剂 C×2.0%
6	石井浩司、藤元安宏、橋本博英、金 井和彦、PCNetセグメントの組立実 証試験、コンクリート工学、 Vol.39、pp.22-28、2001.2	2 PC構造のセグメントの実 物大組立試験	PC構造とすることにより耐力向上、厚 さや鉄筋量の減少によるコスト低減を 図ったセグメントの、実物大組立試 験。	有	50N/mm ²		20	-	42.0	45.0	151	360	816	1012	混和剤: 3.6kg/m ³
7	倉木修二、松尾久幸、高流動コンク リートを試用したセグメントの製造 その現状と展開、セメント・コンク リート、No.701、pp.40-47、2005.7	高流動コンクリートセグ メント製造の検討実験 	研究開発の現状を紹介。	明記無し	高流動	-	65±5 (スラン プフ ロー)	2±1	35.0	55.3	175	500	924	773	混和材:石灰石徽粉末 60kg/m ³ 混和剤:ポリカルボン酸系 4.00kg/m ³
					従来		3±1.5	2±1	35.2	43.5	148	420	792	1150	混和剤:ポリカルボン酸系 8.40kg/m ³
8	本田智昭、古市耕輔、鈴木義信、佐 久間靖、耐火コンクリートを用いた プレキャストセグメントの実験的諸 検討、コンクリート工学年次論文 集、Vol.29、No.1、pp.447-452、 2007	耐火コンクリートを用い たセグメントの検討実験	耐火性能を高めるためボリブロビレン 短繊維を混入したコンクリートによ り、実大セグメントを模擬した一般部 および継手部の試験体を作製し、耐火 性能に関する各種試験を行った。	有		20	3±1.5	1.5±1.5	34 (W/B)	46.0	152	223 (OPC) + BSF 223	827	989	ポリカルボン酸系高性能減水剤 2.9kg/m ³ ポリプロピレン繊維 1.82kg/m ³

表 2-20 セグメントの配合の調査結果(その 2)

9	足立幸郎、藤井康男、青山哲也、川 村彰誉、耐火型合成セグメントの火 災時構造安定性に関する研究、トン ネルと地下、Vol.38、pp.549-557、 2007.8	・の 耐火性能を高めるためポリアセタール 繊維を混入したコンクリートにより作 製したセグメント本体部および継手部 の供試体について、耐火性能に関する 各種試験を行った。	有	-	-	3±1.5	1.5±1.5	38.5 (W/B)	39.0	150	370 + 膨 張材 20	716	1142	混 ポ
	寺田博貴、子田康弘、岩城一郎、高 セグメント向けコン	海底シールドトンネルのセグメントの		基本配合	-	-	-	34.9	43.5	136	390	850	1111	高
	耐久シールドセクメントコンクリー リートの塩害促進試験 トの耐久性評価に関する給封 +	前久住を考慮し、セクメントの基本配合試験体お上び塩実対策を施した試験		塩害対策1	-	-	-	36.4	43.5	142	370	842	1100	結
10	学会東北支部技術研究発表会(平成	体をNaCl溶液に浸漬し鉄筋腐食をモニ	明記無し	塩害対策2	~	~	-	34.9	43.5	136	390	850	1111	防
	21年度) 、V-1、2009	タリングした。		一般構造用	-	-	-	64.0	48.8	162	253	989	989	Al
11	高橋佑弥、石田哲也、山本努、小椋 塩害環境下にあるシ- 紀彦、塩害環境下にある地下シール ドトンネルの漏水履歴 ドトンネルの漏水履歴推定と鋼材腐 よび鋼材腐食の推定 食解析、コンクリート工学年次論文 集、Vol.35、No.1、pp.835-840、 2013	・ル 東京湾の感激域にある河川下のシール まおドトンネルを対象とし、同トンネルの セグメント(材齢43年)について、漏 水履歴と鋼材腐食をモデル計算した。	有		20	3~6	3.0	39.5	40.0	154	390	726	1123	混
12	山本平、横田和直、小柳司、清水良 純、アジアとヨーロッパをつなぐ ボラス海峡横断鉄道トンネ ル」 -100年の耐用年数を保証す る強度,耐久性と止水性能を備えた 構造物-、コンクリート工学、 Vol. 52、pp. 1007-1012、2014.11	 ス DEF対策の観点からCsA量とS0s量を調整 ン したCEM I(中庸 数タイプ)セメントを 使用し、スランプ18±3cmの低水セメン ト比、ノンAE高性能減水剤コンクリートとした。 	明記無し	$50 \mathrm{N/mm}^2$		18±3	1.0	31 (W/B)		139	450 (CEM I)	1017	864	高

昆和剤 2.54kg/m³ ポリアセタール繊維 0.2%

高性能減水剤 9.69kg/m³ 吉晶増殖材 20kg/m³ 高性能減水剤 9.69kg/m³ 方錆被膜材 0.6kg/m³ 高性能減水剤 9.69kg/m³

AE減水剤 2.68kg/m³

是和剤 1.95kg/m³

5性能AE減水剤 3.38kg/m³

表 2-21 現場打設コンクリートの配合の調査結果(その 1)

									配合	(セメン	トの種類	は文献。	中に明記さ	きれている	6場合だ	け記載)
No.	文献	内容、対象構造物	現地の地形、 地質等	特徴	鉄筋の有無	設計基準 強度	G _{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	w	C (kg/	S /m ³)	G	混和剤ほか
1	大黒俊幸、高橋弘、後藤仏敏、メッ セルシールドで地下鉄を掘る 仙台 市地下鉄 五ツ橋工区、トンネルと	地下鉄シールドトン ネルの2次覆エコンク リート:仙台市地下 鉄 王い橋エロ(宮	段丘 凝灰質シ ルト、浮石質凝 灰岩、火山礫凝 原告、彩山礫凝	2次覆工は、セグメント部は巻き厚300 mmの無筋コンクリート、鋼製支保工部 は巻き厚565mmの鉄筋コンクリート。	有	210kgf/cm ²	25	18 ± 2.5		56.0	44.9	185	330	762	976	混和剤 0.660kg/m ³
	1985.7	鉄 五ノ橋工区 (宮 城) 着工:1981	灰石、硬灰石質 シルトの互層			$240 \mathrm{kgf/cm}^2$	25	18 ± 2.5		53.0	44.4	185	349	747	976	混和剤 0.698kg/m3
2	松崎茂樹、山本稔、下水道シールド トンネルの2次覆工に関する研究 (1) 現場実態調査と実規模若材 令脱型実験、トンネルと地下、 Vol.17、 pp.763-773、1986.10	下水道シールドトン ネルの2次覆エコンク リートの実態調査	-	下水道シールドトンネルに欠かせない 2次覆工はこれまで経験的に施工され ており、問題が生じなかったため、ほ とんど研究されていない。この状況を 鑑みての実態調査。下水道シールド トンネルの2次覆工の厚さは、セグメ ントの内径にかかわらず20~25cmで あった。一般的な配合が右である。セ メントがIPCである理由は定かではな いが、安全側を見込んだものと推察。	明記無し	7d ≧ 210kgf/cm ²	25	2	-	-			320 (HPC)			-
	松崎茂樹、山本稔、下水道シールド トンネルの2次覆工に関する研究 (1) 現場実態調査と実規模若材	下水道シールドトン ネルの2次覆エコンク リートの実規模実験		2-	ta	-	20	15 ± 2.5	5±1	53.7	44.5	172	320 (OPC)	796	1017	AE濾水剤:ポゾリスNo.70 0.800kg/m ³
	令脱型実験、トンネルと地下、 Vol.17、 pp.763-773、1986.10	(若材令での脱型)		12	ET.		20	15 ± 2.5	5±1	62.9	46.0	170	270 (OPC)	842	1017	AE滅水剤:ポゾリスNo.70 0.675kg/m ³
3	郷内勝栄、小林宣茂、梅香家俊文、 津田昌秀、シールドの直打ちコンク リート覆工 JR桜木町駅構内下水 道、トンネルと地下、Vol.20、 pp.195-200、1989.3	下水道シールドトン ネルの1次覆エコンク リート:JR桜木町駅 構内の下水道(神奈 川)	海岸線を埋立て た低地 泥岩層	セグメントの代りにシールドテール部 でコンクリートを直打ちする (ECL 工法)	有	270kgf/cm ²	25	18±2	4±1	49.0	43.0	173	353	757	1026	AE濾水剤使用
4	千野彰、萩野幸男、堀川洋一郎、防 水シートを用いたシールドトンネル の2次覆工、トンネルと地下、 Vol.20、pp.301-307、1989.4	地下鉄シールドトン ネルの2次覆エコンク リート横浜地下鉄1号 線柏尾川工区(神奈 川) 工期:1979.3~ 1984.2	丘陵地、沖積低 地 砂とシルト の互層	シールドトンネルは 4年経過後 も健全 であった。	有	210kgf/cm ²	25	12±2.5	4±1	43.0		162	254	790	1081	AE剤 0.057kg/m ³ 混和剤 30kg/m ³
5	田沼孝彦、霞ヶ浦と利根川を泥水 シールドで結ぶ 霞ヶ浦利根川連絡 水路、トンネルと地下、 Vol.21、	連絡水路シールドト ンネルの2次覆エコン クリート:霞ヶ浦利	沖積低地 粘 土と砂の互層	-	有	270kgf/cm ²			-	48.0	44.2	160	334	798	1010	
	pp.21-27, 1990.1	根川連絡水路(茨 城)			11	270kgf/cm ²	-			48.0	49.0	170	354	864	902	×
6	鬼頭誠、青景平昌、笹谷輝勝、林英 雄、直打ちライニング工法で構築さ れた覆工コンクリートの品質、コン クリート工学年次論文報告集、12- 1、pp.967-972、1990	実物大実験	-	日本に特徴的な高水圧かつ軟弱な地 盤に対応可能な直打ち覆エコンクリー ト施工法として、加圧脱水性を抑えた 「粘性コンクリート」と「ジャッキ自 動制御システム」の組合せを開発し、 大型実験土槽に造成した滞水砂層のモ デル地盤にて実物大施工実験を行っ た。	有		20	50±5 (スランプ フロー)	2±1	55.0	55.0	180	327	802	824	特殊混和剤 0.655kg/m ³ 高性能減水剤 3.08kg/m ³ フライアッシュ 171kg/m ³ スチールファイバー 78kg/m ³

表 2-22 現場打設コンクリートの配合の調査結果(その 2)

7	樋口正典、竹内光、井出一雄、下水 道のシールドトンネル接続部補強工 への適用、セメント・コンクリー ト、No.558、pp.116-121、1993.8	下水道トンネル : 横 浜市下水道局 (神奈 川)	-	結固めが不要の高 流動コンクリート の、下水道シールドトンネルの二次覆 エエ事への適用例。	有	300kgf/cm ²	20	58~60 (スランプ フロー)	4±1	31.4	51.1	162	516	802	801	高性能AE減水剤:アミノスルホン酸系 C ×1.6% AE助剤 C×0.025~0.03%
8	佐々木幹夫、佐原圭介、井浦智美、 川嶋潤二、場所打ち支保システムに よる山岳密閉シールド -東北新幹 線 三本木原トンネルー、トンネル と地下、Vol.36、pp.295-303、 2005.4	新幹線のトンネル: 東北新幹線 三本木 原トンネル(青森) 掘削期間:2001.8〜	砂層、火山灰質 シルト、粘性土 層	1次覆工として、厚さ300mmの無筋コン クリートを現場打設した。	無	28d 30N/mm ²	ъ.,	-	ъ.	35.0	38.0	190	543	597	948	増粘剤A W×4.0% 増粘剤B W×4.0% 高性能AE減水剤 C×3.2%
9	飯田廣臣、野々村政一、磯谷篤実、 シールドを用いた場所打ち支保 (SENS)の耐荷機構に関する研究、 トンネルと地下、Vol.39、pp.515- 523、2008.7	新幹線のトンネル: 東北新幹線 三本木 原トンネル(青森) 掘進期間:2004.7~ 2006.11	砂質土層、粘性 土層	-	無								同	Ł		
10	田村正明、菅井雅之、北村昌文、加 藤卓男、内水圧がかかる2分割断面 管渠を300kg/m ³ の高密度配筋で二次 覆工 一東京都下水道 勝島ポンプ 所流入管渠-、トンネルと地下、 Vol.45、pp.115-123、2014.2	水路トンネル:東京 都下水道 勝島ポン プ所流入管渠(東 京) 工期:2008.3~ 2014.3	-	中流動コンクリート	有	27N/mm ²	20	50 (スランプ フロー)	-	51.0	48.6	175	343 (OPC)	864	932	混和剤 4.8kg/m ³

2.5 ニアフィールド(現実的な環境条件)の環境に関する調査

試験においてニアフィールド(現実的な環境条件)を再現するにあたり、沿岸部の処分場環境 では地下水の化学組成の影響の他に地下水流動の影響が考えられる。セメント系材料を用いた構 造物に岩盤側から地下水が接触してセメント系材料が化学的変質を受け、機械的強度が変化する ことが想定され、その変質の程度は接触する地下水量に影響されるため、主に地下水流量につい ての調査を行った。

2.5.1 調查方法、調查対象

1) 平成 30 年度沿岸部処分システム高度化開発報告書の情報

平成 30 年度沿岸部処分システム高度化開発報告書(産業総合研究所,原子力機構,原環センター,電中研,2019)の「3.2.2 ニアフィールド領域での処分システム構成材料の成立性と品質確保の方法の提示」において、水理解析により処分坑道の壁面に接触する地下水の流速を求めているため、その情報を整理した。

2) NUMO の包括的技術報告書レビュー版の情報

NUMO の包括的技術報告書レビュー版(原子力発電環境整備機構, 2018)の「第4章 処分場の設計と工学技術」及び関連する付属書から、処分場における地下水の湧水量に関する試算結果に関する情報を得た。その試算結果に基づき、処分坑道の支保工 1m² あたりの地下水流量を試算した。

2.5.2 調査結果

1) 平成 30 年度沿岸部処分システム高度化開発報告書の情報

平成 30 年度沿岸部処分システム高度化開発報告書の「3.2.2 ニアフィールド領域での処分シス テム構成材料の成立性と品質確保の方法の提示」には、水理解析により求めた地下水流速が以下 のように示されている。

坑道壁面に対して平衡方向のダルシー流速は、流速の早い箇所で

・3.1×10⁻⁶m/s(底盤)

・6.8×10⁻⁷m/s(側壁)

である。なお、平均的にはそれぞれ上記の 1/10、1/5 程度である。

上記の流速から、処分坑道の壁面 1m² に 1 分あたり接触する地下水量に換算すると、流速の早 い箇所では以下の通りである。これらのうち、空洞安定性の観点からは側壁の化学変質を考慮し たほうが良いと考えられる。

・底盤: $3.1 \times 10^{-6} \text{m/s} = 3.1 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s} = 3.1 \text{ml/m}^2 \cdot \text{s} = 186 \text{ml/m}^2 \cdot \text{min}$

・側壁: $6.8 \times 10^{.7}$ m/s = $6.8 \times 10^{.7}$ m³/m² · s = 0.68ml/m² · s = 40.8 ml/m² · min



図 2-10 水理解析による流量・流速算出位置(平成 30 年度報告書の図 3.2-21)

表 2-23 平成 30 年度のセメント系材料の浸漬試験と水理解析結果における地下水流速の比較 (平成 30 年度報告書の表 3.2-10)

	塩水浸漬試験	比較	支保工裏面側の流速 (水理解析)
接触面 近傍の 流速	容器内をスターラーで攪拌しているので、小 さく見積もっても、10 ⁻³ m/s 程度であると想定 される。	>	坑道壁面に対して平行方向のダル シー流速は、流速の速い箇所で、 3.1×10 ⁻⁶ m/s(底盤)、6.8×10 ⁻⁷ m/s (側壁)である。
浸の頗基流 渡換にく	交換する水の流量が 500mL/月であるので、 下図のような実験系と考えた場合、 交換流量 Vw を 1/3 乗することで直方体の 1 辺長さ (=試験片 A と接する面の移動距離) を算出する。 算出した試験片 A と接する面の移動距離を 交換期間 tr で割ることで流速とした。 $v = \frac{V_w}{t_r} = \frac{V_w^{1/3}}{t_r} = \frac{\sqrt[3]{500} \text{ cm}}{1 \text{ month}}$ $= 3.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ ^{REMEDICE HERE:} ^{SOUTH} (=SUTATION) (X = 500 \text{mL}) (X = 500 \text{mL})	<	同上なので、流速の速い箇所で、 3.1×10 ⁻⁶ m/s(底盤)、 6.8×10 ⁻⁷ m/s(側壁)である。 (なお、平均的にはそれぞれ上記 の 1/10, 1/5 程度である。)

表 3.2-10 塩水浸漬試験と地下水流動解析結果における流速の比較

2) NUMO の包括的技術報告書

地下水の大局的な流動に関して、NUMO の包括的技術報告書レビュー版(以下、NUMO-SC) の第4章では、排水設備の能力を設定するために、グラウト幅 3m の場合の全坑道で恒常的に発 生する湧水量(恒常湧水量)の推定を行っている。ここでは、岩種別には深成岩類の恒常湧水量 が最も多いとの結果が示されている。この結果と、高レベル放射性廃棄物処分場の設計オプショ ンごとの掘削土量を掲載した表(NUMO-SC 表 4.5-23)に記された坑道の延長からは、高レベル 放射性廃棄物処分場では横置き・PEM 方式のほうが坑道 1km 辺りの恒常湧水量が多かったため、 トンネル断面 1m² あたり 1 分間の地下水流量の試算を試みた。

試算にあたっては、坑道が全て処分坑道であると仮定した。これについては、連絡坑道、アク セス斜坑及びアクセス立坑の断面積が処分坑道より大きい事から、試算されるトンネル断面 1m² あたり 1 分間の湧水量は保守的な値になると判断した。

高レベル放射性廃棄物処分場の横置き・PEM 方式の処分坑道断面は NUMO-SC の図 4.5-4 に 示されるとおりである。深成岩類の処分環境における処分坑道断面は同図の(a) に示される形状 である。NUMO-SC の表 4.5-23 にはこのときの坑道の総延長が 159km と示されている。 これらの情報から、処分坑道の総表面積を算出すると、以下のようになる。

壁面(垂直立ち上がり部):高さ1.55m×総延長159,000m×2面=492,900m² 天井部:2×3.14×半径2.4m×1/2(半円のため)×総延長159,000m=1,198,224m² 底面部:幅4.8m×総延長159,000m=763,200m² 合計(処分坑道の総表面積):2,454,324m²

全坑道からの恒常湧水量が 10.4m³/min であるので、処分坑道の壁面 1m² あたり 1 分間の地下 水流量は、以下のように試算された。

 $10.4 \text{m}^3/\text{min} \div 2,454,324 \text{m}^2 = 4.2 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min} = 4.2 \text{m}^1/\text{m}^2 \cdot \text{min}$

この値は、前述の水理解析で求めた、流速の早い箇所の地下水流速に基づく地下水流量(底盤: 186 ml/m²・min、側壁:40.8 ml/m²・min)よりは小さい値であった。坑道内の湧水量に基づき 試算したため、坑道の支保工を通過した地下水量だけを考慮した可能性があり、処分坑道の壁面 に接触する地下水量を過小評価している可能性が否定できない。

以上より、湧水量(恒常湧水量)の推定に基づき試算した地下水流量は、処分坑道の壁面に接触する地下水量を過小評価している可能性が否定できなかったため、水理解析結果の地下水流量 を参考とするのがよいと考えられる。

参考文献

原子力発電環境整備機構,包括的技術報告:わが国における安全な地層処分の実現-適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築-(レビュー版),NUMO-TR-18-03,2018.

産業技術総合研究所,日本原子力研究開発機構,原子力環境整備促進・資金管理センター,電力 中央研究所,平成30年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業沿岸部処 分システム高度化開発報告書,2019.

2.6 現実的な地下環境を想定した試験方法に関する調査

沿岸部における処分場において、現実的環境条件ではセメント系材料を用いた構造物に岩盤側 から地下水が接触してセメント系材料が化学的変質を受け、機械的強度が変化することが想定さ れる。そこで、その状況を模擬した、水の流動にセメント系材料を作用させる試験を実施するに 当たり、参考となる試験方法について調査を行った。

2.6.1 調查方法、調查対象

文献検索サイトの J-STAGE、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の研究開発成果検索・閲覧(JOPSS)サイトの論文データベースを対象として、「セメント、モルタル、コンクリート、ガラス固化体」と「変質、溶解、マイクロリアクタ、フロースルー試験」をキーワードとして検索した結果から文献を選定した。

2.6.2 調査結果

1) フロースルー試験

Sugiyama ら(Sugiyama, 2007)は、亀裂を模擬したセメントカラム試料を用いたフロースルー試験を行い、排出された水の化学組成の変化と、ポルトランダイトとケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)の溶解が支配的な固体マトリックス中の鉱物成分の分布を観察している。

この研究では、C-S-H の溶解を観察するために、単純な亀裂が導入された人工的な亀裂をもつ 円柱状硬化セメントサンプルを準備し、蒸留水を使用したフロースルー試験を実施している。固 相の鉱物組成と液相の化学組成の変化は、選択されたセメント鉱物とセメント由来の元素(Ca、 Si)の浸出に関して評価されている。蒸留水は、リザーブタンクから室温で 2.5cm³/h の一定速度 (ダルシー流速:4.5×10⁻⁵m/s) で亀裂に流している。

Bisschop ら (Bisschop, 2013) は、エーライトとポルトランドセメントクリンカーの溶解速度 をフロースルー試験によって評価している。

この研究では、実験室の脱イオン水を利用した簡単なフロースルー試験が開発されている。流 量は、蛇口を締めたり開いたりすることによって手動で制御し、通常は長期間一定のままで実験 している。また、一定の時間間隔でチューブから出てくる水の量を測定することにより流量を定 期的に確認している。 0.1, 1 または 31/min の流速で試験を実施し、溶解時間は 1、3 及び 6 時 間としている。

試験後の SEM 画像から、本試験は単相または多相セメントの溶解速度を測定する方法として 適切であるとしている。合成したエーライトとクリンカー中のエーライトの溶解速度は、それぞ れ最高 4.55 及び 13.6 m / s の流速で妥当な再現性を示しており、脱イオン水で測定された溶解速 度は、他の研究で測定された溶解速度と同程度であったと報告している。

この方法の利点は、フローセルが流体力学的に適切に設計されており、溶解反応の化学がわかっている場合に拡散流束を予測できることであると報告している。

2) マイクロリアクタ流水試験について

稲垣ら(稲垣ら,2008)(酒谷ら,2010)は、マイクロリアクタ流水試験によって高レベルガ ラス固化体の溶解速度を評価している。高レベルガラス固化体の溶解、変質は処分環境条件によ って大きく変化する。信頼性の高いガラス固化体の性能評価には様々な溶液条件におけるガラス の溶解及び変質挙動を体系的、速度論的に評価する必要があるが、これまでの静的溶解試験(ガ ラスを一定体積の溶液に浸漬させる試験)ではガラス溶解に伴い反応溶液の組成、pH が変化す るため任意の一定溶液条件における測定が難しかった。この課題を解決するためにマイクロリア クタを用いる流水試験を提案している。

マイクロリアクタ流水試験装置の概要は、以下のとおりである。30mm×10mm×4mmの板状のガラス試料に、20mm×2mmの反応面積で深さ 0.16mmの溝を流路として、反応溶液をシリンジポンプから一定流速で供給することにより、任意の溶液条件での反応を継続するシステムとなっている。

流れる溶液とガラス試料を接触反応させ、反応後の溶液を順次サンプリングし、Si、B、Cs 濃度を ICP-MS により測定することで、溶解速度を評価している。また、触針式表面粗さ計を用いてガラス試料の溶解深さを測定し、溶液測定結果との整合性を評価している。

本試験では固相と液相の分析結果が整合しており、より正確なデータであろうと結論付けている。

以上より、フロースルー試験及びマイクロリアクタ流水試験は、ともに一定流速で試料の界面 に純水や模擬地下水を通水することにより、固体試料表面と透過する液相との相互作用を評価す る試験方法である。固相の表面と反応する液相は、リザーブタンクから一定組成の液相が常に供 給されることが特徴で、固相の溶解に伴う液相中の化学成分変化の影響を受けない。また、固相 と反応する液相の容積を制限することにより、固相表面から溶解するわずかな化学成分の濃度変 化を評価することが可能になっている。

今回調査した文献では、セメント系材料を対象とした固体表面の溶解試験では「フロースルー 試験」、ガラス固化体を対象とした固体表面の溶解試験では「マイクロリアクタ流水試験」と称してい るが、実施している内容については、どちらも同じ試験の構成となっている。

参考文献

- Jan Bisschop a,b, Alexey Kurlov, A flow-through method for measuring the dissolution rate of alite and Portland cement clinker, Cement and Concrete Research 51, pp. 47–56, 2013.
- 稲垣八穂広,牧垣光,出光一哉,有馬立身,三ツ井誠一郎,馬場恒孝,野下健司,マイクロリア クタ流水試験によるガラス固化体溶解速度の pH 依存性評価,日本原子力学会「2008 年秋の 大会」, p. 655, 2008.
- 酒谷圭一,稲垣八穂広,牧垣光,出光一哉,有馬立身,三ツ井誠一郎,野下健司,マイクロリア クタ流水試験によるガラス固化体溶解/変質の速度論的評価:ガラス初期溶解速度の pH/ 温度依存性,日本原子力学会「2010 年秋の大会」,p.207,2010.
- Daisuke Sugiyama, Tomonari Fujita, Taiji Chida, Masaki Tsukamoto, Alteration of fractured cementitious materials, Cement and Concrete Research 37, pp. 1257–1264, 2007.

Appendix IX

緩衝材の機能変化に係るデータの拡充

緩衝材の機能変化に係るデータの拡充 補足資料

1. はじめに

本付属書は、平成 31 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(沿岸 部処分システム評価確証技術開発)のうち 4-3(3)項の塩水系地下水成分による緩衝材の透水性に 関する検討に関して、ベントナイトの層間陽イオンによる層間距離と土粒子径の変化を、また、 4-3(5)項の圧縮ベントナイトへの浸潤とイオン交換反応の進展についての解析的評価に関して、 陽イオン交換を伴うベントナイト浸潤挙動の支配方程式導出、イオン組成が透水係数に与える影 響のモデル化の既往の研究の整理(Komine モデルなど)、カラム通水試験の解析条件設定をにつ いてそれぞれ記したものである。

2. 塩水系地下水成分による緩衝材の透水性に関する検討

2.1 ベントナイトの層間陽イオンによる層間距離と土粒子径の変化

本年度の試験で観測された透水係数の変化(4-3(3)項参照)は、

- ① イオン交換による空隙径の物理的な減少
- ② 間隙水のイオン強度変化による実効空隙径の変化

の2 つの効果によると考えられる。前者は各陽イオン交換後のモンモリロナイト d001 の変化お よび結晶子のサイズ(歪み)により、後者はゼータ電位(表面電位)とイオン強度に基づく DLVO 曲線により支配されていると予想される。ここでは、①についての定性的な評価を、XRD を用い た測定を試みる。

XRD 測定では d001 と結晶子のサイズ(<001>積層周期)を回折ピークの半値幅(FWMH: Full width half maximum)から読み取り、シェラーの式によって推定することができる。測定対象は 純度の高いモンモリロナイトとし、これを予め H+型として用いた。試料に所定の溶液を加えてゲ ル状にしてイオン交換させ、含水状態のまま、μ-XRD 装置を使ってその場測定を行う。

1) 試験方法

試験装置及び試料

モンモリロナイトはクニピア・F、H+型(以下、H-KFと記す。)を用いた。

図 2-1 に、試験装置の概念図を示す。μ-XRD 装置は Rigaku RINT-Rapid I を用い、Cu Ka (30 kV, 40 mA, 300 μm spot) にて測定した。

用いたモンモリロナイトとイオン交換溶液の条件を表 2-1 に示す。交換溶液のイオン強度は、 海水(SW)を除き 0.5 とした。なお、イオン交換が確実に行われたかを確認するために、強いイオ ン交換特性を持つ CsCl 溶液(0.5 M)も用いて、試験データの確実性を補強した。



図 2-1 モンモリロナイトゲルのその場 XRD 分析の概念図

ベントナイ ト	層間距離 周期測定	バッチ交換溶液	測定データ
クニピア F	µ-XRD	H_2O	d_{001} (Å)
(H+型)		$0.5 \mathrm{M} \mathrm{NaCl}$	FWHM (Å)
		$0.5 \mathrm{M} \mathrm{KCl}$	
		$0.167~M~CaCl_2$	
		$0.167~\mathrm{M~MgCl_2}$	
		SW	
		$0.5M \mathrm{~NH_4Cl}$	
		$0.5 \mathrm{M} \mathrm{CsCl}$	

表 2-1 その場 *µ* -XRD 分析の測定条件

2 試験結果

XRD 分析の結果を図 2-2 に示す。得られた doo1 回折ピークとベースラインからの半値幅 (FWHM: full width at half maximum)を元に、格子定数、シェラー式に基づく結晶子のサイズ (C-size)、モル体積の計算結果を表 2-2 に示す。

ピークの鋭かった K, NH4, Mg, Ca における結晶子のサイズがそれ以外の場合の約2倍の値 となっていて、これらの条件でのモンモリロナイトの積層状態が安定化していることが定量的 にわかる。海水では Na 型よりは大きな結晶子サイズであることがわかる。詳細にみると、doo1 ピークは2つ存在しており、一つは Na 型でのピークに共通の位置を保っているように見える。

高濃度の SW 系での d001 は長く、Ca, Mg 型と同じ値を示すが、結晶子サイズが Ca, Mg 型 よりもさらに大きかった(16 nm 以上)。つまり、モンモリロナイトの(001) 積層が長周期であ ることを意味する。しかし低濃度では後述するが Na-K 混合系のピークに近いものとなって結 晶子サイズは小さくなっており、短周期積層体が卓越していると言える。



図 2-2 H-KF モンモリロナイト及びそのイオン交換後のその場 XRD 分析

Туре	d001 =c (Å)	a	b	β	V uc (m ³)	V/Vair	V/VNa	Ζ	Density	MV (cm ³ /mol)	FWHM (°)	C-size (nm)
Air	12.26	5.17	8.94	99.9	$5.582 \text{E}{-}28$	1.00	0.80	1	2.20	336.17	0.66	13.34
Н	13.62	5.17	8.94	99.9	6.201E-28	1.11	0.89	1	1.98	373.46	2.12	4.16
Na	15.35	5.17	8.94	99.9	6.989E-28	1.25	1.00	1	1.76	420.89	1.64	5.38
Κ	12.96	5.17	8.94	99.9	5.901E-28	1.06	0.84	1	2.08	355.36	1.11	7.94
Ca	18.61	5.17	8.94	99.9	8.473E-28	1.52	1.21	1	1.45	510.28	0.88	10.08
Mg	18.78	5.17	8.94	99.9	8.551E-28	1.53	1.22	1	1.44	514.94	1.04	8.52
\mathbf{Cs}	12.5	5.17	8.94	99.9	5.691E-28	1.02	0.81	2	2.16	342.75	0.50	17.57
\mathbf{NH}_4	12.61	5.17	8.94	99.9	5.742E-28	1.03	0.82	1	2.14	345.76	0.70	12.62
SW	18.88	5.17	8.94	99.9	8.596E-28	1.54	1.23	1	1.43	517.68	0.54	16.38

表 2-2 H-KF モンモリロナイトのイオン交換後の格子定数とモル体積

③ 考察

陽イオン交換挙動はその場 XRD 測定を用いることで比較的精度良くその結晶学的特性をとら えることができた。イオン交換によって変化する層間距離は水和イオンのサイズを反映している と考えられ、強い水和をもつ Ca, Mg 系のイオン交換では予想通り層間距離が長く、また K は短 いという結果を得た。Na を含む実験系での交換後モンモリロナイトには Na に帰属する回折ピ ークが残り続けることから、Na とその他のイオンのイオン交換は分子層単位で起こり混合層を 形成している可能性が示唆された。

さらに、回折ピークの鋭さを表す半値幅(FWHM)を使った結晶子の比較では、層間距離が長い Ca, Mg, SW 系で大きな値を示し、これらの 2 価陽イオンの交換は積層構造を長周期化させ、水 和によって膨潤しながらも積層粒子を安定化させる働きがあると言える。したがって、積層粒子 (スタック)の粗大化が起きることで、余剰空隙が増加し、空隙率や透水係数が増大することが 予測される。反対に、スタックが小さければ、充分な膨潤がなくても空隙は充填され、透水係数 は低く維持できると考えられる。すなわち、Ca や Mg については、それ自身は膨潤にも寄与する

以上のように、今回の測定は、ゲル状に充分に膨潤した状態での測定であったが、得られた結 晶子径等の情報により、層間イオンの交換によりベントナイト粒子の形態が推測でき、圧縮され たベントナイトの透水性に関するメカニズムの推定に反映できると考えられる。この推定を試験 により、確認することが今後必要である。

3. 圧縮ベントナイトへの浸潤とイオン交換反応の進展についての解析的評価

3.1 陽イオン交換を伴うベントナイト浸潤挙動の支配方程式導出

が粒子の再配置を促進させるため、空隙を増大させる働きをすると考えられる。

イオン交換を伴う浸透流下の物質移行モデルとして、ここでは中川ほかによるものを整理して示す (中川ほか, 2004)。本検討で使用したものも、基本的な考え方は同一である。

まず、陽イオン交換について述べる。一価の陽イオン交換体(固相)を X^- で表す。これに価数が z_i の iイオン(M_i)が吸着しており、価数が z_j であるjイオン(M_j)と交換するものとする。iイオンとjイオンとの イオン交換反応を一般化して示すと、次式のようになる。

上記の反応の平衡定数は、質量作用の法則により、次式で与えられる。

ここに、{Y}は化学種 Yの活量である。

溶液中の iイオンの活量{ M_i }は、その濃度を C_i 、活量係数を γ_i とすると、 $\gamma_i C_i$ で表される。活量係数 γ_i を求める式として、代表的なものに拡張 Debye-Hückel 式があるが、この式の適用範囲はイオン強度が 0.1 程度までとされており、海水のようなイオン強度約 0.7 の溶液には適用しがたい。そこで、ここでは イオン強度が 0.5 程度まで適用できるとされる次の Davies 式で表すこととする。

ここに、Aは温度依存のパラメータ、Iは溶液のイオン強度である。

ー方、iイオンが吸着した交換体の活量 $\{M_i X_{z_i}\}$ を厳密に求めることは難しく、何らかの仮定が必要になる。ここでは交換体が理想混合系、すなわち活量係数が 1 であるとし、 $\{M_i X_{z_i}\}$ が次の式 3.1-4 で表されるモル分率で置き換えられるものとする。

ここに、 $(M_i X_{z_i})$ はiイオンが吸着した交換体のモル量(mol/L-soil)である。

上記のモル分率 χ_i を用いて表した平衡定数は次の式 3.1-5 のようになる。これは Vanselow の(イオン交換)選択係数と呼ばれている。本報告書では、特に断らない限り、この Vanselow の選択係数を用いる。

$$\mathbf{K}_{M_{j}/M_{i}}^{\mathbf{v}} = \frac{\{M_{i}\}^{z_{j}}\chi_{j}^{z_{i}}}{\{M_{j}\}^{z_{i}}\chi_{i}^{z_{j}}}$$

$$\vec{\mathfrak{X}} 3.1-5$$

交換体の量が変化しないとすると、次の式 3.1-6 で表される電荷分率 E_i (*i*イオンで占められた交換体の電荷の割合)について、式 3.1-7 の拘束条件が存在することになる。

$$E_i = \frac{z_i(M_i X_{z_i})}{\sum_k z_k(M_k X_{z_k})}$$

$$\overrightarrow{X} 3.1-6$$

次に、多孔質体中のイオンの移動を伴う保存則について述べる。*i*イオンの陽イオン交換体上の保存式 及び一次元流れでの液相中の保存式は、それぞれ次の通りである。

ここに、 C_i^{ex} は*i*イオンの交換体上の濃度(mol/L-soil)、 S_i^{ex} は*i*イオンのイオン交換反応項である。また、*u*は浸透流速(フラックス)、 θ は体積含水率、*D*は分散係数である。

一般に、分散係数Dは式 3.1-10 に示す Bear の式で表す。
$$D = \alpha_L u' + D_m$$
式 3.1-10

ここに、 $u' = u/\theta$ は実流速、 α_L は分散長、 D_m は分子拡散係数である。 式 3.1-8 と式 3.1-9 を辺々合計すると、次式のようになる。

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = -\frac{\partial u C_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D \frac{\partial C_i}{\partial x} \right)$$

$$\vec{\mathfrak{X}} 3.1-11$$

ここに、 T_i は*i*イオンの土1Lあたりのトータル量(mol/L-soil)で、次式で求められる。

$$T_i = \theta C_i + C_i^{ex} = \theta C_i + \rho_b Q E_i / z_i$$
 $\vec{x} 3.1-12$

ここに、 ρ_b は乾燥密度(kg-soil/L-soil)、Qは陽イオン交換容量(mol_o/kg-soil)、 E_i は*i*イオンの電荷分率(-)、 z_i は*i*イオンの価数(mol_o/mol)である。

なお、浸透流速 uは、Darcy 則を不飽和領域に拡張した次の Darcy-Backingham 式で表される。

ここに、 $k(\theta)$ は不飽和透水係数で、体積含水率の関数、 ψ は間隙水の水ポテンシャルである。 式 3.1-13 と連続の式から、式 3.1-14 に示す一次元の Richards 式が得られる。

浸透流下での陽イオンの交換を伴う移動(移流分散)の計算は、式 3.1-7 の拘束条件の下、先の検討 で得られたイオン交換選択係数の式 3.1-5 と、式 3.1-11 及び式 3.1-14 を連立させて解くことにより行う。

3.2 イオン組成が透水係数に与える影響のモデル化の既往の研究の整理

ここでは、ベントナイト系材料の間隙水や交換サイトの陽イオン組成が同材料の透水係数に与える影響について検討した研究のうち、透水係数のモデル化を試みているものを整理して示す。

伊藤・三原は、山形県月布産のベントナイトを用いたベントナイト系材料についての既往の透水試験 結果を参照し、試験条件から密度、ベントナイト混合率、陽イオン交換、試験溶液濃度などの影響を整 理して、透水係数の変遷評価式を経験的に設定している(伊藤・三原,2005)。

同研究では、広範なベントナイト混合率の材料への適合性を考慮する目的から、ベントナイト混合土の透水係数Kを、基本的に式 3.2-1 のようなベントナイト部分間隙比e_{be}(有効ベントナイト乾燥密度ρ_{db}と同義の指標)との両対数線形関係で表されるとしている。

$$\log K = \log A + B \log e_{be}$$

式 3.2-1

ここに、A及びBは、透水係数に影響する e_{be} 以外の要因によって決まるパラメータである。なお、 e_{be} 、 ρ_{db} の定義については、次の図 3-1 を参照されたい。



図 3-1 有効ベントナイト乾燥密度の概念

その上で、陽イオン交換(カルシウム型化)の影響は交換性ナトリウム率(Exchangable Sodium Percentage; ESP)の変化で表すことができることを述べ、既往の試験結果について式 3.2-1 によるフィ ッティングを行い、パラメータA及びBを ESP の関数として次のように求めている(式 3.2-2、式 3.2-3)。

$$A = 5.78 \times 10^{-13} + 1.00 \times 10^{-13} \exp(5.71 - 11.43ESP)$$
 $\exists 3.2-2$

$$B = 7.51 - 5.74ESP$$

式 3.2-3

伊藤・三原の研究は、式 3.2-1 を基本的なモデルとして、同種のベントナイトについての既往の測定 値を用い、モデルパラメータと影響要因との相関式を作成したものである(伊藤・三原, 2005)。そこに は交換性陽イオンの違いによる微細な間隙構造の変化や、流れのメカニズムに関する考察は見られない。 このような検討を行ったものとしては、次に挙げる Komine や田中らの研究がある(Komine, 2008; 田 中ほか, 2009)。

Komine は、緩衝材・埋戻し材の透水係数 kと相関性の高いマクロなパラメータとして、モンモリロ ナイトの膨潤体積ひずみ ε_{sv}^* を導入し、これとモンモリロナイト結晶の層間隔 $2d_i$ (ここに、*i* は交換性 陽イオンの種類を意味し、 d_i は *i* により異なる。)を関連付け、さらに水はベントナイトの層間を平面 Poiseuille 流により流れるとして、 d_i を用いて陽イオン *i*を含むベントナイト層間の透水係数 k_i を求め、 最終的にk を k_i の加重平均として求める評価式を提案した(Komine, 2008)。この評価式を式 3.2-4 から 式 3.2-9 に示す。なお、このような層間の透水性を層間距離dの関数としたモデルを以下、Komine モデ ルと呼ぶ。。

$$d_{i} = \frac{\varepsilon_{sv}^{*}}{100} \{ t + (R_{ion})_{i} \} + (R_{ion})_{i}$$
 $\vec{\mathbb{X}} 3.2-6$

$$\varepsilon_{sv}^{*} = \left\{ e_{0} + \frac{\varepsilon_{smax}}{100} (e_{0} + 1) \right\} \\ \times \left\{ 1 + \left(\frac{100}{C_{m}} - 1 \right) \frac{\rho_{m}}{\rho_{nm}} + \left(\frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_{m}} \frac{\rho_{m}}{\rho_{sand}} \right\}$$
 $\overrightarrow{x} 3.2-7$

 $\times 100$

$$\rho_{solid} = \frac{\frac{100}{C_m} \frac{100}{\alpha} \rho_m}{\left\{ 1 + \left(\frac{100}{C_m} - 1\right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left(\frac{100}{\alpha} - 1\right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\}}$$

ここに、*k*は緩衝材・埋戻し材の透水係数(m/sec)、*EXC_i*は含まれるモンモリロナイトの交換性陽イ オン*i*の交換容量(meq/g)(*i*は Na⁺, Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺のいずれかの交換性陽イオンを示し、以下の*i*はこ れと同じ意味である。)、*CEC*は陽イオン交換容量(meq/g)、*d_i*はモンモリロナイト結晶層間距離の 1/2 (m)、 γ_{aw} はモンモリロナイト結晶層間中の水の密度(Pa/m)、 μ_{aw} はモンモリロナイト結晶層間距離の 1/2 (m)、 γ_{aw} はモンモリロナイト結晶層間中の水の密度(Pa/m)、 μ_{aw} はモンモリロナイト結晶層間中の水 の粘性係数(Pa・sec)、(*R_{ion}*)*_i*はモンモリロナイト結晶層間中の交換性陽イオン*i*の非水和イオン半径 (m)、*t*はモンモリロナイト結晶層厚(m)、 ε_{sv}^* はモンモリロナイトの膨潤体積ひずみ(%)、 ε_{smax} は緩 衝材・埋戻し材の最大膨潤率(%)、 e_0 は緩衝材・埋戻し材の間隙比、 C_m はベントナイトのモンモリロナ イト含有率(%)、 ρ_m はモンモリロナイトの土粒子密度(Mg/m³)、 ρ_{nm} はベントナイトに含まれるモン モリロナイト以外の鉱物の土粒子密度(Mg/m³)、 ρ_{d0} は緩衝材・埋戻し材の乾燥密度(Mg/m³)、 ρ_{sand} は砂の土粒子密度(Mg/m³)、そして α はベントナイト配合率(%)である。

なお、式 3.2-4 から式 3.2-9 を用いて透水係数を求めるにあたり、式 3.2-5 で層間水の密度 γ_{aw} と粘性 係数 μ_{aw} が必要になるが、Komine はこれらの比 γ_{aw}/μ_{aw} を、自由水のそれ γ_{fw}/μ_{fw} とフィッティングパ ラメータRの逆数との積として次式 3.2-10 のように表す方法を提案している(Komine, 2008)。

$$\frac{\gamma_{aw}}{\mu_{aw}} = \frac{1}{R} \frac{\gamma_{fw}}{\mu_{fw}}$$
 $\ddagger 3.2-10$

上記 Rの値として、Komine は既往の研究を参考に、ベントナイトについて提案されたR= 79 と、シ ルト質粘土について提示されたR= 14 を取り上げ、実際に圧縮ベントナイトについて測定された透水係 数が、これらの値から計算された範囲に入ることを示している。(Komine, 2008)

Komine の評価式(Komine, 2008)は、ベントナイトの種類や配合率が異なる緩衝材や埋戻し材の透水係数を、統一的な方法により、ある程度演繹的に予測可能とした点に大きな意義がある。ただし、Ca型ベントナイトであるクニボンドの透水係数にはバラツキがあるため、これを予測するにはパラメータ Rに幅を持たせる必要があると推察される。また、あるベントナイトについてイオン交換前後での透水 係数を共通のパラメータで予測できれば大変有用であるが、これについての適用性は示されていない。

なお、Komine の評価式(Komine, 2008)は、次の点に論理の矛盾があると思われる。交換性陽イオン iの違いによる影響は、層間距離 d_i 、交換容量 EXC_i としてモデルに組み込まれており、このうち d_i は、式 3.2-6 により ε_{va} と結び付けられている。しかし、 ε_{va} はあくまでも平均的なパラメータであるから、これと結び付けられる層間距離は平均値 $\Sigma_i(d_i)/n$ であるべきである。

田中らは、各種濃度の海水によるベントナイトの透水係数及び膨潤圧への影響を統一的に説明可能な モデルの構築を試みている(田中ほか,2009、以下、田中モデルと呼ぶ)。このモデルは複雑であるため、 本報告では詳細を省略するが、Komine モデルとの比較によりモデルの要点を述べると、次の通りであ る。

- ① Komine モデルと同様に、ベントナイト中の水の流れを平面 Poiseuille 流で模擬している。 ただし、間隙を結晶間(層間)とスタック(結晶子)間の2種類に区別し、前者の幅を一 定とし、後者を可変としている。
- ② Komine モデルがモンモリロナイト結晶間の水の粘性をフィッティングパラメータとしているのに対し、結晶間およびスタック間の水の粘性を演繹的に求めている。まず、結晶間の電位分布を、1価、2価のイオンが混合した溶液に対するものとして、拡散二重層理論から求めている。
- ③ そして、②の電位分布を用いて、結晶間の流速分布を結晶面からの距離の関数として求め、 平面 Poiseuille 流の運動方程式を積分することにより、流速を得ている。
- ④ Komine モデルがモデル上、結晶の配位を一方向としているのに対し、供試体中に結晶がランダムな方向に配位しているものと仮定し、実効流路長を積分値として求め、見かけの動水勾配を計算している。

Komine モデルにおいて、交換性イオン種の影響は、水が流れるとしているベントナイトの結晶間距離として現れ、これが透水性に寄与することになる。一方、田中モデルにおいては、ベントナイトの結晶間距離を一定としており、交換性イオン種の影響は、間隙中のバルクのイオン濃度を介して前述の②の電位分布として現れ、それが前述③の結晶間およびスタック間の水の粘性を決定し、透水性に影響を及ぼすことになる。なお、スタック間の距離はスタック数mにより決まるが、これを演繹的に求めるのではなく、当モデルを用いた実測透水係数や実測膨潤圧からの逆算により求めている(田中ほか,2009)。即ち、フィッティングパラメータとしている。

田中モデルは、Komine モデルを更に演繹的にしたものと言える。特に、バルク溶液のイオンの電荷 密度による透水係数への影響を示しており、この点が様々な化学組成の地下水が透水係数に与える影響 を調べようとする本検討の目的と合致している。しかしながら、田中モデルはやや複雑であり、Komine モデルが様々な圧縮ベントナイトについて検証されていることを踏まえると、実用的には後者でも問題 ないと推察される。そこで、モデルの複雑さと実用性のバランスを考慮して、本検討では試行的に Komine モデルを採用することとした。

3.3 カラム通水試験の解析条件設定

1) 説明の方針

ここでは、解析に用いたパラメータと、解析における初期・境界条件について解説する。これらは、 飽和浸透流および移流分散に関するものと、地球化学的反応に関するものの 2 つに大別されるため、こ の順序で以下に記す。

2) 浸透流および移流分散

浸透流及び移流分散解析用のパラメータを表 3-1 に示す。透水係数の初期値は、Komine モデル (Komine, 2008) に基づき、後述するイオン交換サイトの初期のイオン種割合を用いて計算した値であ る 2.05×10⁻¹² m/s とした。また、初期空隙率は、通水試験で設定した乾燥密度 1.0 Mg/m³ と、ベント ナイトの土粒子密度 2.71 Mg/m³ から求めた 0.631 とし、これが有効間隙率に等しいとした。なお、ベ ントナイトの土粒子密度は、後述するベントナイトの鉱物組成および鉱物の密度から計算により求めた。 分子拡散係数は、第 2 次取りまとめ(電気事業連合・核燃料サイクル開発機構, 2005)を参考に、2× 10⁻¹² m²/s とした。分散長は、モデル長の 1/100、メッシュ長 1mm の 1/10 である 0.1mm (10⁻⁴ m) と した。

表 3-1 浸透流及び移流分散解析用のパラメータ

初期透水係数 (m/s)	初期有効間隙率	分子拡散係数 (m²/s)	分散長 (m)
$2.05 imes 10^{-12}$	0.631	2×10^{-12}	10-4

モデルの水理境界条件は、流入側である下端の水圧を試験で設定した(ゲージ圧)2.5 MPa で一定とし、上端を大気圧で一定とした。溶質濃度の境界条件については、流入側の下端を試験で設定した流入 溶液の化学組成で一定とし、溶液を切り替えた時点で変更した。また、上端は濃度勾配一定とし、上端 に達した溶液組成がそのまま流出するものとした。

3) 地球化学的反応

通水カラム内の化学組成は、鉱物組成と溶液組成からなる。鉱物組成を設定するにあたり、Na型ベントナイト(クニゲル V1)に含まれる鉱物を、溶解・沈殿を考慮するものとしないものとに分類した。また、前者については、更に化学平衡を仮定するものと速度論的溶解を考慮するものとに分類した。その結果を表 3-2 に示す。

表 3・2 中の Na 型ベントナイトの鉱物組成は、菊池・棚井の論文を参考にして設定した(菊池・棚井, 2005)。この中から、溶解・沈殿を考慮する鉱物として、モンモリロナイト、方解石及び黄鉄鉱を選定 した。モンモリロナイトを選定したのは、Komine の透水係数評価式(Komine, 2008)を使用するため の便宜的なものであり、解析上は平衡定数を小さい値とすることにより、溶解・沈殿をほぼ無視できる ようにした。一方、方解石、黄鉄鉱は、比較的溶解・沈殿しやすい鉱物として、pH 調節のために選定 した。方解石及び黄鉄鉱の溶解・沈殿速度のモデルには、PHREEQC Ver.2 (Parkhurst and Appelo, 1999)及び Ver. 3 (Parkhurst and Appelo, 2013)に付属する熱力学データベースである phreeqc.dat 中 のものを使用した (Plummer, Wigley and Parkhurst, 1978, Williamson and Rimstidt, 1994)。ただし、 方解石については速度が大きすぎるため、phreeqc.dat 中のモデルに係数(10⁻³)を掛けたものを使用し た。

鉱物名	組成 (%)	溶解・沈殿 の考慮	化学平衡・ 速度論の別	備考
モンモリロナイト	59		化学平衡	平衡定数を小さくした
方解石(カルサイト)	4	する	油 由 訡	phreeqc.dat の速度論モデ
黄鉄鉱(パイライト)	1		还及诫	ルに係数を掛けて使用
石英(玉髄を含む)	30	1 721.)		
長石	6			

表 3-2 Na 型ベントナイトの鉱物組成とモデル上の溶解・沈殿の扱い

モンモリロナイトに含まれるイオン交換サイトのイオン交換選択係数には、本年度実施したバッチ試 験の結果の中から、なるべく値のばらつきが小さいものを用いることとした。具体的には、イオン強度

(IS) < 0.5 の範囲の単成分系の試験の、ICP-AES による分析結果に基づく Kd 値を選定した(報告書本編の表 4-3-6)。ただし、その値は Vanselow の選択係数(Vanselow, 1932)に相当するものであり、 解析コードとして用いる PHREEQC-Trans では、電荷分率をベースにした Gaines & Thomas (G&T) の選択係数(Gaines and Thomas, 1953)の方が扱いやすいことから、これに変換した値を用いた。解 析に使用した G&T の選択係数を表 3-3 に示す。

表 3-3 解析に使用したイオン交換選択係数

	Ca/Na	K/Na	Mg/Na				
選択係数 log KdG&T	-1.562	-0.5367	-1.079				

初期の鉱物組成及び溶液組成には、次の①から③を混合させてから 3 日後の状態を、地球化学的反応 計算コード PHREEQC Ver. 3.6 (Parkhurst and Appelo, 2013)を用いて計算したものを用いた。計算に 必要な熱力学データベースには、PHREEQC Ver. 3.6 に付属の phreeqc.dat に Na 型モンモリロナイト の溶解・沈殿平衡を加えたものを用いた。なお、3 日とは、試験開始前に供試体であるベントナイト中 の通水飽和を行っていた段階で、通水溶液(蒸留水;0% SW)が通過するのに要する時間(平均滞留時 間)に相当する。③のイオン交換サイトの存在量は、菊池・棚井の論文(菊池・棚井, 2005)を参考に、 ベントナイトの CEC を 75 meq/100g とし、ベントナイト中に Na 型モンモリロナイトが 59%含まれる として計算により求めた。

- 報告書本編 4-3(3)項のカラム通水試験で使用した 0% SW の化学組成(表 3-4 の 0% SW)の 水を、大気組成の O₂及び CO₂と平衡させたもの
- ② 溶解・沈殿を考慮する鉱物(Na型モンモリロナイト、方解石及び黄鉄鉱)
- ③ 前掲表 3-3 に示したイオン交換選択係数を持つイオン交換サイト

測定項目	O% SW	10% SW	50% SW	100% SW			
рН	7.12	7.18	7.97	8.16			
Na (mM)	0.525	32.189	220.816	415.274			
K (mM)	0.182	0.981	3.991	7.324			
Ca (mM)	0.001	0.558	2.559	5.264			
Mg (mM)	0.002	2.697	12.519	25.633			
C1 (mM)	0.111	59.111	291.961	583.018			
SO_4 (mM)	0.001	3.185	11.368	31.575			
	純フ	k飽和ケース					
通水体積(海水濃 度ごと) (m1)	2.34	9.48	13.33	16.05			
累 積通水体積 (m1)	2.34	11.82	25.15	41.20			
未飽和ケース							
累 積通水体積 (m1)	_	_	_	7.15			

表 3-4 カラム通水試験に用いた溶液の化学組成と通水体積

初期鉱物組成を表 3-5 に、初期溶液組成を表 3-6 に、初期のイオン交換サイトのイオン種組成を表 3-7 に示す。表 3-5 には、初期空隙率の計算に用いた式量及び密度も併せて示した。

鉱物名	化学式	式量 (g/mol)	密度 (g/cm3)	初期濃度 * (mol/L)
Na モンモリロナイト	Na _{0.33} A1 _{2.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂	367.55	2.73	1.0652
方解石(カルサイト)	CaCO ₃	100.09	2.71	0.3996
黄鉄鉱(パイライト)	FeS_2	119.11	5.13	0.0833

表 3-5 解析における初期鉱物組成

* 空隙を含む単位体積当たりの量

表 3-6 解析における初期溶液組成

陽イ	オン	陰イオン・その他			
親種	初期濃度* (mM)	親種	初期濃度* (mM)		
H (pH)	8.654	Cl	6.363E-1		
Na	5.851E-1	S(6)	1.028E-2		
Ca	1.254E-3	C(4)	1.289E-1		
K	2.028E-1	Si	8.648E-3		
Mg	2.502E-3	O(0)	6.121E-1		
Fe	4.638E-3				
Al	4.560E-3				

* 溶液の濃度

表 3-7 解析におけるイオン交換サイトの初期イオン種組成

化学式*	初期濃度** (mol/L)	化学式*	初期濃度** (mol/L)			
NaX	4.892E-1	KX	4.926E-2			
CaX_2	1.497E-2	MgX_2	9.094E-2			
- ノーン、大佐山ノレナヤコズキレナしたの知子子						

* イオン交換サイトをX⁻¹で表したときの組成式

** 空隙を含む単位体積当たりの量

境界条件となる流入溶液の化学組成は、前掲表 3-4 に示すように報告書本編 4-3(3)項のカラム通水試験に用いた溶液の化学組成とした。ただし、同表に示されているイオン種の濃度では電荷のバランスが 取れないため、Clの濃度を減らすことにより電荷のバランスをとった。

参考文献

- 電気事業連合,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.
- 伊藤弘之, 三原守弘, ベントナイト系材料の飽和透水係数の変遷評価式, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2005-029, 44p., 2005.
- Gaines, G.L.Jr. and Thomas, H. C., Adsorption Studies on Clay Minerals. II. A Formulation of the Thermodynamics of Exchange Adsorption, The Journal of Chemical Physics, Vol.21, No.4, pp.714-718, 1953.
- 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, サイクル機構 技術資料, JNC TN8430 2004-005, 86p., 2005.

- Komine, H, Theoretical equations on hydraulic conductivities of bentonite-based buffer and backfill for underground disposal of radioactive wastes., J. Geotech. Geoenviron. Eng., 134 (4), pp. 497-508, 2008.
- 中川啓,和田信一郎, 籾井和朗, CIP 法と化学平衡計算による飽和土壤中の多成分溶質反応輸送解 析,土木学会論文集, 761/II-67, pp.81-89, 2004.
- Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J., User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations., U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 99-4259, 312p., 1999.
- Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J., Description of input and examples for PHREEQC version 3-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 497 p., 2013.
- Plummer, L.N, Wigley, T.M.L. and Parkhurst, D.L., The kinetics of calcite dissolution in CO₂–water systems at 5°C to 60°C and 0.0 to 1.0 atm CO₂, American Journal of Science, 278, pp.179-216, 1978.
- 田中幸久,長谷川琢磨,中村邦彦,海水の濃度が各種ベントナイトの透水係数ならびに膨潤圧に 及ぼす影響のモデル化,土木学会論文集 C, Vol65, No.1, 66-84, 2009.
- Vanselow, A.P., Equilibria of the base exchange reactions of bentonites, permutates, soil colloids and zeolites, Soil Sci., 33, 95~113, 1932.
- Williamson, M.A. and Rimstidt, J.D.: The kinetics and electrochemical rate-determining step of aqueous pyrite oxidation., Geochimica et Cosmochimica Acta, 58, pp.5443-5454, 1994.

Appendix X

分野間連携 WG の記録

1. はじめに

1.1 背景

高レベル放射性廃棄物の処分事業の実施に際しては、様々な技術の適用が必要である。処分事業 においては、これらの技術を地質環境、工学技術(処分場の設計)、安全評価の3つの分野に区分 し、これらの分野を有機的に結びつける、換言すればこれらの分野を連携することにより、事業を 円滑にかつ安全に進めることを目指している。

処分事業はいまだ開始してはいないものの、このような趣旨に沿って、JAEAでは分野内や分野間の連携を図りつつ、幌延や瑞浪での地下研究施設での作業を進めており、ここで蓄積された知見が 将来の処分事業に生かされることが期待されている。

一方、高レベル放射性廃棄物処分事業の実施主体であるNUMOにおいては、適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築を目指して作業を進め、これらの成果を「包括的技術報告:我が国における安全な地層処分の実現」として取りまとめている。本作業はあくまでも、現在の技術的な知見に基づき一般的なデータを用いて仮想的な作業を行っている。この作業を進める際には、3つの分野が連携して多様な地形、地質条件に則した地質環境モデルを作成している。

2017年に公表された科学的特性マップでは、特に輸送でも好ましい地域として沿岸域に焦点を当 てており、これらの情勢を受けて本受託研究の前フェーズである「沿岸部処分システム高度化開発 (平成27年度~平成30年度)」が、AIST、JAEA、RWMC、CRIEPIの4者共同研究としておこなわれた。 これは複数機関による初めての沿岸部にかかる共同研究である。当初、この事業では4機関はそれ ぞれの要素研究を遂行することとしていたが、研究が進むにつれて機関間や分野間の連携が可能で はないか、との意見が出されるようになってきた。その下地にあったのは共同研究の形をとったこ とである。各研究機関の研究者が顔を合わせて進捗を報告しあったことで、徐々に打ち解け合い、 議論が活発化したことが最も大きな理由である。その後、連携を意識した多くのミーティングをお こなったが、専門分野が近い場合はたとえ研究機関が異なっていても連携が十分になされたものの、 分野間の連携には大きな困難があることがわかってきた。

分野間の連携に関しては、後述するSupply listおよびRequirement listの必要性や、実際の研 究地をもとにした地質環境から安全評価までの一連の流れを実施する必要性などが論じられた。し かしながら、当該事業はもともと要素研究の遂行が目的であったこともあり、具体的な成果とする には至らなかった。加えて、連携のための目的が定まっていなかったこと、実務者の協議体がなか ったこと、連携にあたりリーダーシップを発揮する者の不在等が課題としてあげられた。

1.2 目的

以上の背景を受けて、今年度開始した受託研究「沿岸部処分システム評価確証技術開発」では、 改めて分野間連携の体制を構築し、以下の目的を設定した。

・分野間連携の具体的な検討を実施する実務者による協議体(分野間連携WG)を設置し、前フェーズの受託事業により取得したデータを用いて分野間連携の在り方を検討する。

・検討した結果に基づき、今フェーズの受託事業での効率的な連携を模索する。

また、以上の目的を踏まえて作業目標を以下のように設定した。

 分野内および分野間の連携により不確実性を低減するための効率的かつ実効的な調査・評価体系 を構築する。

2. 分野間連携の進め方

2.1 基本方針

分野間連携については、過去にも同様な試みがされているが、公開された成果はない。これまで の分野間連携では、各分野が提供できるデータリスト(Supply List)と他分野へ要求するデータ リスト(Requirement List)による連携を図ってきたが、この手法では、各分野での情報の共有化 ができても、具体的なアクションにつなげにくい。一方、NUMOのセーフティケースの構築に際して はSite Descriptive Model (SDM)をインターフェースにした各分野間の連携が図られている。そ こで、本事業での分野間連携に際しても、これと同様にSDMをインターフェースに連携を進めるこ ととした。また、対象地点としては、これまでにデータが蓄積されており、今後とも調査が実施さ れる予定の駿河湾地域と幌延沿岸域とした。



図-1 SDMをインターフェースとした分野間連携の概念

技術分野については、NUMOの包括的技術報告によれば、"地質環境の調査・評価"、"処分場の 設計"および"安全評価"の3分野となっているが、先行するフィンランドやスウェーデンでのセ ーフティケースではこれらの3分野に"性能評価"を含めた4分野の構造となっているため、今回の 検討でも4分野の構造として取り扱うこととした(図-2)。

ただし、今回のプロジェクトにはJAEAが参加しておらず、このため現状では性能評価、安全評価の分野の参加がないため、当面は"地質環境の調査評価"と"工学特性(処分場設計)"の2分野での連携から開始する。



沿岸部を対象に初期の限定的なフィールドデータからSDMを構築するための手法やその際の不確 実性の評価方法を具体化するような方向で連携を進め、分野間連携の在り方を検討する。検討され た分野間連携の在り方に基づき本フェーズの共同研究を進め、連携の在り方をブラッシュアップするとともに、効率的な共同研究の推進に寄与する。

2.2 分野間連携WGの概要

背景でも述べたように、本受託事業は基本的には要素技術開発であり、分野間連携に関しては副 次的な作業となる。すなわち要素技術開発を主体としてその中で分野間連携をすることにより、よ り効率的な研究開発を行うことになる。そのためには、各機関、さらには分野間の情報共有や共通 の目標設定が必要となる。このための体制として、各研究機関で研究の実務を担当する研究者を構 成委員とする分野間連携WGを立ち上げた。

今年度の段階では共同研究に参加する産総研、RWMC、CRIEPIから委員およびオブザーバー選出した。また、前フェーズで参加したJAEAからはこれまでの知見をもって本委員会をサポートしてもらうために"パートナー"として、実施主体のNUMOからは事業者の立場からの要望や助言を得るために"アドバイザー"として参加してもらうこととした。

今年度は2019年8月26日に第1回のWGを開催し、これまでに7回のWGを開催した。WGの活動状況を 表-1に、それぞれの議事内容を表-2に取りまとめ、WGの議事録を資料 - 1~資料 - 7として示した。

		開催	参 加 者		107			
	開催日時	場所	産総研	電中研	RWMC	JAEA	NUMO	概要
第1回	2019年8月26日 10時~12時	電中研 大手町	木方、丸 井、町田、 井川	幡谷、 長谷川	大和田、 林、江守			キックオフ
第2回	2019年9月10日 15時~17時	原環セン ター	木方、 丸井、 町田、 井川	幡谷、 長谷川	大和田、 林、江守、 吉田、佐 原、徳島		太田	活動方針と内 容
第3回	2019年10月2日 15時~17時30分	産総研	木方、 丸井、 町田、 井川	幡谷、 長谷川、 楠原、 岡本				地質モデルに 関する情報共 有(産総研の これまでの調 査情報の共 有)
第4回	2019年11月15日 15時~16時45分	電中研 大手町	木方、丸 井、町田、 井川	幡谷、 長谷川、 西本	大和田、 林、江守、 佐原	水野、三ツ 井、小松	太田、 三枝	地質モデルの 構築
第5回	2020年1月23日 14時~16時30分	産総研	木方、 丸井、 町田、 井川	幡谷、 長谷川、 西本	大和田、 林、佐原	水野、三ツ 井、小松	三枝	水理地質モデ ルの構築と地 下水水質の情 報提供
第6回	2020年2月12日 15時~17時20分	電中研 我孫子	木方、 丸井、 町田、 井川	幡谷、 長谷川、 西本	大和田、 林、佐原、 徳島			分野間連携の 成果と課題、 来年度計画と 分野間連携を 視野に入れた 計画変更の可 能性
第7回	2020年3月23日 15時~16時30分	Web会議	木方、 丸井、 町田、 井川	幡長西楠 公川、 荷原、 岡 本	大和田、 林	水野、仙波		駿河湾におけ るボーリング 調査での連携 (連携を視野 に入れたボー リング調査の 体系)

表-1 分野間連携WGの活動状況
表-2 分野間連携WGの討議概要					
	開催日時	概要、目的	主な議論の項目		
第1回	2019年8月26日 10時~12時	キックオフ	今年度から本格化させる分野間連携について, 昨年度までの反省点および課題を抽出したあと, 今年度以降の実施体 制および実施内容について打ち合わせを行った。		
第2回	2019年9月10日 15時~17時	活動方針と内容	第3回運営会議での全体計画や報告のタイミングに関する 決定事項を受けて、活動方針や内容について検討した。		
第3回	2019年10月2日 15時~17時30分	地質モデルに関 する情報共有	分野間連携の基となる駿河湾の地質モデルを電中研が構築するにあたり、これまでに産総研が実施した事業内を関する情報共有を行った。さらには地質環境特性分野内連携を考慮に入れた地質モデルの構築について議論した。		
第4回	2019年11月15日 15時~16時45分	地質モデルの構 築	駿河湾の地質環境モデルについての経過報告とそれにつ いての議論を実施した。また、地質環境と工学技術の連携 で必要となるデータについての説明がなされ、説明内容に ついて議論した。		
第5回	2020年1月23日 14時~16時30分	水理地質モデル の構築と地下水 水質の情報提供	 ・これまでの会議を振り返り、今後の効率的な議論にむけて 3つの前提条件を確認した。 ・現在、実施中の地質モデルの構築方法や地下水流動解 析悔結果について報告がなされ、分野内連携の観点から 議論された。 ・工学分野からのリクエストにこたえる形で現状で想定され る国内の深部地下水の水質組成と将来的な水質の変遷に ついて紹介された。 ・分野間連携の最終目標とそれを踏まえた今後5年間のス ケジュールについて議論された。 		
第6回	2020年2月12日 15時~17時20分	分野間連携の成 果と課題、来年度 計画と分野間連 携を視野に入れ た計画変更の可 能性	来年度以降の要素技術を中止とした連携の方向性を確認 するために、以下の観点で情報を共有した。 ・今年度の作業で分野間連携としての成果と課題 ・来年度の研究計画について ・分野間連携を踏まえたうえでの来年度計画変更の可能性		
第7回	2020年3月23日 15時~16時30分	駿河湾における ボーリング調査で の連携	来年度産総研が予定している駿河湾における水理特性調 査の観点からのボーリング調査に、、他分野との連携の視 点で実施する調査項目を検討する。このために以下の情報 を共有した。 ・これまでに構築された地質モデルの概要 ・産総研が予定している水理特性に関する調査計画 ・工学特性が要望する調査項目(材料の耐久性および処分 場設計の観点から)		

第1回 分野間連携WG(キックオフミーティング) 議事録

日時;2019年8月26日 10:00~12:00 場所:電中研大手町オフィス 参加者:(敬称略、※1はオブザーバー) 電中研:幡谷・長谷川・西本(欠席) 原環センター:江守^{*1}・大和田・林 産総研:木方(WGリーダー)・丸井^{*1}・町田・井川

議事

今年度から本格化させる分野間連携について,昨年度までの経緯を確認した後に,上記資料に基づき,今年度以降の実施体制および実施内容について打ち合わせを行った。詳細は以下のとおりである。

(1) これまでの経緯

過去の運営会議議事録から2017年度に連携について活発に議論した形跡があるが、2018年度はほ とんど議論された形跡がない。要因としては、連携のための目的が定まっていなかったこと、実務 者の協議体がなかったこと、連携にあたりリーダーシップを発揮する者の不在等があげられる。

(2) 今後の活動について

- 連携の形としては、NUMO が包括的報告書に示した SDM(情報構造や整備手順)を分野間連携のインターフェースとして、各機関が連携するような形とする。対象は、幌延と静岡(駿河湾)。
- 前フェーズの実データを用いて、初期的な SDM からの更新を行うことで、分野間連携の在り 方について検討する。
- 検討された分野間連携の在り方に基づき本フェーズの共同研究を進め連携の在り方についてブラッシュアップするとともに、効率的な共同研究の推進に寄与する。
- NUMOには次回から, JAEAにもなるべく早い段階で参加してもらうようにする。
- フレーム(検討方針や分野間連携の骨組み)は初年度に作る。
- 第一回評価委員会(8/29)において活動内容について委員の方から承認を得る。

(3)参加機関産総研・電中研・原環センター・NUMO*JAEA (2021年度以降に参加予定)

(4) スケジュール

できる限り運営会議と同日にWG会議を実施する(2カ月に1回程度)。 次回候補日:9/2,9/3,9/9,9/10の午後3時~5時 場所:9/9以外は原環センターで実施可能。9/9は電中研となる可能性もある。 ⇒9/9の場合は電中研での実施が決定

第2回 分野間連携WG 議事録

日時:2019年9月10日 15:00~16:45 場所:原環センター会議室 参加者:(敬称略、※1はオブザーバー、※3はアドバイザー) 産総研:木方、町田、井川、丸井^{*1} 電中研:幡谷、長谷川 RWMC:大和田・林・江守^{*1}・吉田^{*1}・佐原^{*1}・徳島^{*1} NUMO^{*3}:太田

議事

初めにプロジェクトリーダーの丸井から参加者に対し、第3回運営会議での決定事項について以下の報告を行った。

- ・中間とりまとめ:概要調査に資することを目標に本プロジェクトの3年目を目処に作成
- ・最終報告書:概要調査の残された課題、精密調査への貢献を目標に作成

その後、連携WGリーダーの木方から資料2に基づき参加者に対し今後の活動方針や活動内容について報告があり、その後、関係者間で検討を実施した。詳細は以下のとおり。

(1) 今後の連携課題の検討について

- 分野間連携については資エ庁からの強い意向がある。また我々が事業を進めるにあたり、処分 事業への貢献が重要であると認識している。
- 駿河湾沿岸域を対象とした SDM をインターフェースとした分野間連携を模索する。
- 安全評価や性能評価の分野で JAEA や NUMO との連携は必要である。
- 作業の実施期間はひとまず中間審査を意識して2年間とする。

(2) SDMについて

- NUMOの包括的技術報告書では3岩種の検討対象母岩について SDM を構築した。
- 沿岸域では海水準変動等により、地下の地質環境が時空間的に変化すると想定され、そのよう な変化を考慮したうえで、将来にわたって地層処分に適した特性が維持されると想定される地 質環境をターゲットに SDM を構築することは適切である。
- SDM の対象地域は駿河湾沿岸域とする。地質モデルについては、電中研と産総研の関係者で検討を行なう。将来予測は必要だが、火山噴火など不必要な要素は考慮しない。

(3) SDMを用いた連携の意義

● 不確実性の低減させることが重要。概要調査全体の不確実性を低減させることを目標にする必要はない。むしろ、どのように連携すればどこの不確実性を低減できるのかをしっかりと把握することが重要

(4) NUMOとの協力について

- 沿岸域におけるサイト調査に特化して連携し、法定要件や処分場の設計・安全評価側からの要 求事項、その要求に応えるための地質環境調査方法を整理するとともに、実際の調査を通じて、 その体系的な技術の適用性を確認することは概要調査に役に立つ。
- NUMO として WG に協力することは問題ないと考えられるが、その可否や協力のスタイルについては事前に資エ庁から了承を得ておく必要はある。
- NUMOの内部連携等で出た課題については、参考のために共有してもらいたい。

第3回 分野間連携WG(地質モデル構築に関する打ち合わせ) 議事録

日時:2019年10月2日 15:00~17:30 場所:産総研 地下水研究グループ居室 打ち合わせコーナー 参加者:(敬称略、※1はオブザーバー) 産総研:木方、町田、井川、丸井^{*1} 電中研:幡谷、長谷川、楠原^{*1}、岡本^{*1} 元産総研職員:小原、平野(スカイプによる参加)

議事

前回の第2回WGの議論を踏まえて、電中研が計画している駿河湾を対象とした地質のSDMに基づき 地質環境特性分野内(地質-水理地質)および地質環境特性—工学特性の分野間連携を行うことと なった。

連携に関する議論に先立ち、産総研が過去に実施した、駿河湾地域における地質モデルの構築と 広域・長期地下水流動解析に関する概要を当時の実務者より説明を受け、情報の共有を図った。

今回は分野間連携WGのうち地質環境特性に係わる関係者により、NUMOの本事業に対する要望を勘案し、さらには地質環境特性分野内連携を考慮に入れた地質SDMの構築について議論した。

(1) 駿河湾における広域・長期地下水流動解析結果についての説明

- 電中研は駿河湾を対象に地質の SDM 構築を目指している。一方、産総研では、過去に既存デー タを中心に駿河湾を含めた広域の地質・地形モデルを構築し、これに基づき広域・長期の地下 水流動解析を実施した。
- 電中研の SDM 構築に資するために、産総研の研究概要を当時の実務担当者から説明した。
- 産総研の地質モデルは、それまでの既存の公開情報に基づき構築されている。なお、入山瀬断層については水理的にサンドイッチ構造と想定したケースでの解析を実施しており、この構造は既存情報を参照されておらず、一般的な概念として導入されている。
- 一方、水理基盤に相当する地質については、地層区分を含め各地層の性状などの既存情報があるものの、各層の空間分布に関する既存情報が不足している等の観点から、今回のモデルでは単一の地層として取り扱っている。
- 富士川下流域における揚水量データは Excel ファイルとしてまとまっており、平野からデータ を入手可能。ただし二次利用にあたるため、産総研から許可を得る必要がある。

(2) NUMOの事業段階の課題とそれを踏まえた本事業への要望(特に地質環境特性)

- NUMO の包括技術報告書においても、我が国の代表的な地質体三種の SDM を構築しているが、そ れぞれに分類される地質体において収集された既存データを用いて一般像をモデル化している。
- NUMO としては収集した文献や資料に基づき、文献調査段階(初期的な)での地質 SDM を構築す る予定である。初期的な地質に関する SDM の構築に際して、本事業で実施する駿河湾における モデル構築によって得られた各種ノウハウを、文献調査段階の事業に反映したい希望がある。
- このため、駿河湾での初期的な地質 SDM 構築に際して、以下のような検討を行う必要がある。
- ・データ収集の取捨選択方法(データの信頼性に基づいた取捨選択、モデル構築に際しての必要性 からの取捨選択)
- ・データのモデルへの導入方法(生データを直接モデルへ導入、生データを一度加工したうえでモ デルへ導入)
- ・1次元もしくはポイントデータの3次元空間への展開方法(地質の不確実性を考慮した展開、地質 や地形条件を考慮した展開)
- ・モデル構築の作業手順(含む:分野内連携によるモデル構築の手順)
- 文献調査段階で構築した地質 SDM に基づき概要調査計画を立案することを予定している。多数 地区において同時に概要調査が開始された場合、概要調査計画立案に携わる技術者の不足が懸 念され、これを補うために概要調査計画の立案に係る基本的な考え方を用意する必要がある。
- このため、駿河湾で構築した地質 SDM に基づき、これまで産総研が現地において実施した各種の調査結果を参考に概要調査計画に係る検討を実施する。

(3) 地質SDM構築に向けて

- 産総研で構築した地質モデルは、既存の文献のみを参照しており、この点では文献調査段階の 初期的な地質 SDM に相当する。電中研で地質 SDM を構築する際の参考資料として利用できる。
- まずは、電中研が既往の文献情報を用いて初期的な地質 SDM を構築する。その際には、分野内 連携として水理地質との情報の受け渡しが必要である。

(4) その他

- NUMO の本事業への要望の一部は想定であるため、次回の WG の際に NUMO 担当者と要望について 齟齬がないかの確認を行う。また上記以外に要望があった場合は、その点を考慮した検討を行 う。
- 次回 WG において、地質環境特性分野と工学特性分野との連携について議論する。
- 次回 WG の日程については、11/11, 12, 14, 15

第4回 分野間連携WG 議事録

日時:2019年11月15日 15:00~16:45 場所:電力中央研究所会議室 参加者:(敬称略、※1はオブザーバー、※2はパートナー、※3はアドバイザー) 産総研:木方、町田、井川、丸井^{*1} 電中研:幡谷、長谷川、西本 RWMC:大和田・林・江守^{*1}・佐原^{*1} NUMO^{*3}:太田、三枝 JAEA^{*2}:水野、三ツ井、小松

議事

分野連携WGリーダーの木方より過去のWGの内容について確認を行った後、RWMCの佐原から人材育 成プログラムについての説明と質疑応答があった。次に電中研の長谷川による駿河湾の地質環境モ デルについての経過報告とそれについての議論を実施し、最後にRWMCの林より、地質環境と工学技 術の連携で必要となるデータについての説明がなされ、それぞれについて議論した。詳細は以下に 記す。

(1) 若手人材育成プログラムについて

事務局からの説明

・今年4月からの4か年事業(資エ庁)であり、来年1/8-10にセミナーを実施する。

・主な目的は人材育成プログラムの開発であり、学習指導要領のような形で資料をまとめることに なっている。

- ・人材育成の目的は、分野間連携ができる人を育てることである。また、他分野の専門家との高度 なコミュニケーションを取れる人材を育成する。
- ・今年度は、試行的に過年度の沿岸部のデータをもとに、演習を実施し、異分野間の相互理解につながるかどうかを検証する。
- ・基本的には単年での講義を考えているが、上級者向けの会をセミナー前後に設けたり、別途の日 程で開催することも考えている。
- <u>主なコメント</u>
- ・育成した人材像を明確にすべき(サイエンスコミュニケーターを育成したいのか、異分野間をつなぐブリッジマンを育成したいのか)また、育成期間を単年なのか複数年なのかを決めた方がよい。
- ・まずは、育成したい人材を明確にし、それに必要な授業形態や内容について、原環センターで考 えてもらいたい。分野間連携WGで提供できるものがあれば提供する。
- *なお、連携については、初歩的な内容(入り口論)のセミナーで対象とするテーマではないとの 意見も出たので、目的を明確にした上で、本当に必要かどうか検討が必要である。

(2) 駿河湾沿岸域の地質環境モデルについての経過報告 地質モデル:

- ・駿河湾を対象に、文献調査から概要調査までの一連の流れに沿ったモデル化を実施し、実施内容の確認や将来的な課題の抽出を行う。文献調査では複数のモデルが考えられるが、とりあえず2 種類くらいのモデルを作ることを想定している。
- ・地形モデルの範囲は次年度以降にボーリングが予定されている富士川河口付近を含む沿岸から 20km程度。地形モデルから涵養域と流出域を推定し、具体的な調査範囲を絞っていく。まだ作業 を始めたばかりだが、いくつか課題(北側の範囲や海の深度など)が出てきているので、それら の検討方法についても今後のためにまとめていく。
- ・地質については、ここまでに集めた77資料を分析している。これ以外の資料は、次年度以降の検 証(更新)のための資料と位置付ける。地質モデルについては、一次データ(著者の解釈は入っ ていないデータ)を使って概念モデル(作業仮説)を作る。データの乏しい地下水深部について どれだけの作業仮説を考えるかが課題である。

地下水モデル:

- ・地質モデルと同じ範囲でデータを収集し、地下水流動と地下水質の概念モデルを作成する。数値 解析については、もう少し作業が進んでから報告する。
- <u>分野連携について</u>
- ・地質一地下水:地質環境調査の不確実性が地下水流動に与える影響の大小を地下水パラメータご と検証し、地質環境調査にフィードバックする。
- ・地質・地下水-工学技術:数値解析に必要な初期パラメータに繋がる情報と地下環境の情報を共 有する。

課題

- ・岩盤や地下環境のバラつきを大きさの取り扱い(統計処理するには数が必要)
- ・解析コードの感度解析結果の整理
- ・現場試験データの精度の整理
- ・地質からの要素研究結果の流用の可否

一気通貫について

・安全評価までの過程を簡単でもいいので回してみることが重要。その結果、各パラメータの重み 付けや課題が見えてくると考えられる。

主な議論

・地質モデルをつくって流動解析をしても、地下水流動は再現できない可能性が高い。また、時間の制約などの理由から、広域地下水流動解析では詳細な地質モデルを作る必要はなく、詳細な地質 モデルを作るのはサイトの近傍だけでよいのではとの意見があった。

・これに対して、地下水が重要なことは理解するが、まず地質モデルを作ることがベースである。 地層処分を実施する前にどれだけ地域のことが理解できているかを示すためにも地質構造モデル

(概念図)は必要である。地質による安全性を説明して上で地下水を含めた水理地質構造モデルが 成り立つとの意見があった。

・地質、地下水、力学、地球化学などすべての概念モデルが共通の1つの絵の中に入っていることが理想である。SDMという共通フォーマットを介した連携の方法をNUMOが示しているので、それを 駿河湾をフィールドとしてテストすることで調査技術や方法論が整理されていくのではないか。

・連携の目的は不確実性を狭めることであり、不確実性を低減させるのは調査である。低減させる べき不確実性の要因(項目)を抽出するのが連携の目的だ。

・沿岸域特有の課題として、海側の分水界をどうやって決定するのかについて知見や知識を整理してほしい。

・海の場合は、塩淡境界が分水界になる。塩淡境界の場所は陸側からの地下水流動とそれを抑えている海とのバランスで決まると考えている。駿河湾は急峻な地形なので、海水準が変動してもそれほど塩淡境界の位置は変わらないと思うが、影響については確認する。

・工学技術の分野からは、沿岸域に分布する典型的な地下水の組成のデータ、それらの空間分布や 時間変遷に関する情報を共有してほしい。

(3) 工学特性からの要望

・工学側が求めている情報としては、

NFの構成材料については地下水の化学組成、地圧、温度、岩種など

NF処分システムの成立性にかかる評価手法:地質環境モデル(SDM)を用いた地下水流動解析

・処分場回りはより細かいグリッドデータがあることが望ましいので、そこをどうするかは課題としてある。

・提供されるデータに精度や不確実性などの情報を付けてもらえれば、それをもとにどのように使っていくか、また欲しい精度に関して検討して地質環境分野にフィードバックしていくことができると考えている。

主な議論

・工学分野への情報提供は、広域、処分場、パネルの3つのスケールでモデリングすることになるのか。

・モデルスケールの違いについては、工学側が細かいグリッドのデータを提供してほしいというこ とではない。最終的に工学側で解析する際に、仮に必要とするグリッド範囲のデータがなければ、 全てのグリッドに同じパラメータを与えるだけの話であって、その際にデータの精度を理解してお くことが重要。それが不確実性の評価としてきちんと説明できればよい。

・データの受け渡しをグリットサイズで議論するのは非現実的である。要は知りたい特性の空間的 な不均質性がどの程度であるかを把握し、地質をベースにTHMCの概念を整理した上で、知りたい情 報の不確実性を整理しながら、データを受け渡しについて議論していく方がよい。

(4) まとめ

- ・まずは地質と地下水の概念モデルを作る。
- ・その後、地質と地下水が連携して、地質モデルと水理地質構造モデルを作る。
- ・その結果を工学特性も含めて次回のWGで議論する。
- ・構成材料や安全評価の検討に必要なので、先のフェーズで産総研が集めた沿岸の深部地下水のデ ータ(システマティック区分に用いたデータ)は4者で共有する。また、駿河湾の沿岸域地下水 のデータについては推定年代も含めて産総研から原環センターに提供する。
- ・次の開催時期については、12月の中旬以降を予定する。
- ・1月31日の評価委員会では5年間の連携成果(予想)と今年度の連携成果を見せたいので次回のWG で方向性をまとめる。

第5回 分野間連携WG 議事録

日時:20120年1月23日 (14:00~16:30) 場所:産総研つくばセンター会議室 参加者: (敬称略、※1はオブザーバー、※2はパートナー、※3はアドバイザー) 産総研:木方、町田、井川、丸井^{*1} 電中研:幡谷、長谷川、西本 RWMC:大和田・林・佐原^{*1} NUMO^{*3}:三枝 JAEA^{*2}:水野、三ツ井、小松

議事

(1) 第4回議事メモ確認および議論の前提

WGリーダーの木方から前回までの会議の振り返りと、今後の議論にむけて以下の3つの前提条件を確認した。

・地質モデル構築をベースにし、THMCを付加してSDMを構築する。特にHである地下水流動を考慮した水理地質構造モデルの構築について分野内連携を意識する。

・今回は文献調査段階でのモデル構築であり、それを踏まえて概要調査計画を策定することになる。
 その観点で分野間においてモデルの課題を明らかにする。

・連携により不確実性を低減する。不確実性は一般的には調査により低減できることから、連携を することにより如何に効率的な調査をするか、また不必要なデータを取得しない、言い換えれば必 要最低限のデータを取得することについて分野間で合意する。

(2) 駿河湾沿岸部の地質モデルの構築について

説明の要点

現在、実施中の地質モデルの構築方法や地下水流動解析悔結果について報告がなされた。

- ・実施内容について、第2回評価委員会で名古屋大の吉田先生から駿河湾で研究を実施する意義を 技術的に説明した方がよいというコメントをもらった。
 そこで、①日本でも地殻変動が非常に激しい地域である。よって不確実性を見るには最適の場所 である。②既存の研究がなされており、議論の材料がそろっているから。という答えを用意した。
- ・はじめに調査範囲の決定について、地質図や地形図ではなく、地形だけを考慮したモデルで地下 水流動解析を実施し、出てきた流速ベクトルの計算結果から範囲を決定した。
- ・既存データを整理し、一次データと二次データに分類し、ソフトをつかって一次データをマッピ ングした。
- ・今年度については、既存のデータから現在の地質モデルをどのように検討できるかを考える。時間的変遷については、次年度以降の課題とする。地質構造については、吉田先生から今後の修正の可能性も考慮して、文献調査段階での精緻なモデルの作成についてコメントが出されたが、本地域については、今後の連携のことも考慮し、ひとまず地層境界の不確実性と透水性に着目し、第四系と先第四系(堆積岩類と付加体)の3種類に地層区分を実施した。
- ・既存文献から広域と沿岸域の2つの概念モデルを作成し、透水係数などの水理特性を整理した。
- ・今後の解析の方針は全水頭(水理水頭)、滞留時間、地下水流動系の再現としている。
- ・解析結果の一例、広域地下水流動解析では、とりあえず、透水係数と間隙率を与えたモデルであっても、標高800m以下が湧出域になるという結果は再現できた。塩淡境界については、駿河湾が 急峻なため、標高-500mでも大きな淡水の張り出しは見られなかった。まとめとしては、浅い地 下水に関しては、およそ地形のみで流れが再現できることがわかった。

質疑と対応:地質モデルについて

- ・地質モデルについては、1次データを用いた精緻なモデルを構築したうえで、その後の用途に合わせて簡易化する。また、精緻なモデルを構築する場合にも、どの程度の不確実性があるかを明らかにする必要がある。
- ・SDMにはTの要素のみならず、すべての要素であるTHMCを入れるべきではないか。その際に、上記

と同様にそれぞれの要素における不確実性を明記する必要がある。

- ・地質図の作成には、ある程度、エキスパートジャッジが入る。一方、水理や地球化学の専門家が それぞれの場の解釈を考えていくときに、地質モデルと整合しないことがある。その際には、関 係者が集まり議論・検証することになるので、そのような環境が用意することが重要である。
- ・今回のモデルでは、調査範囲を従来の地形や地質から決めるのではなく、水理学的観点を入れて 決定するというのは、分野内連携の一つの形であると感じた。
- ・水理だけを考えるだけではなく、処分場候補となる可能性のある母岩があるかないかなど、広く 他の情報を入れこむべきだろう。
- ・どうやって調査範囲や方法、程度などを決定するかという問いに、論理や理想を突き詰めること、
 地史を考慮すること、時間軸を考慮することなどを含めてセットして、それを工学設計や安全評価に移すための方法を考えるという観点からまとめていってほしい。
- ・駿河湾で研究を実施する意義について、国としては、駿河湾を選んだ条件として幌延と対象的に、
 地下水の流れが速いので、両者を研究することで、地下水のエンドメンバーが明らかになるため
 と説明している。
- ・本プロジェクトにおいて駿河湾から先に検討を実施している理由は、地下水の流れ速い地域の方が、レスポンスが良く、早く評価結果が得られるからとしている。

質疑と対応:地下水モデルについて

- ・前提として、この調査は文献調査を想定しているものである。しかし過去に産総研が実施しているボーリングなどの調査は概要調査を想定したものである。これのデータは入力値に使うのではなく、解析結果との比較評価に使う。
- ・地質モデルで想定される地下水の流れを阻害する事象の可能性(貫入岩の存在など)を想定した 感度解析も実施して欲しい。これにより、三分野の連携のみならず、地質環境の中でもGTHMC間 の連携にも繋がるのではないか。
- ・本作業では文献調査段階のモデルを構築しているが、概要調査に向けて、なにを・どれくらい・ どのようにすべきか、という議論を地質環境・工学設計・安全評価で進めていく必要がある。そのような議論を次年度以降に進めていきたいので協力をお願いしたい。

(3) 代表的な地下水の水質および海水準変動に伴う地下水水質の変遷

前回のWGでのリクエストにこたえる形で現状で想定される国内の深部地下水の水質組成と将来的 な水質の変遷について紹介がなされた。

(要点)

- ・日本国内においては、塩分濃度が海水の数倍にもなるような化石海水(brine)が見つかる可能 性は非常に低い(茂原でも1.2倍程度)。
- ・将来的に水質変遷が予想されるのは、
 流動性の高い現降水に満たされている場所(海進時:淡水から塩水)
 現海水に満たれている場所(海退時:塩水から淡水)

(4) 分野間連携の最終目標とそれを踏まえた今後5年間のスケジュール

- ・現在の3者共研で実施している研究は全て概要調査を想定した要素研究である。よって、それを 使ったモデルは、概要調査におけるモデルとなってしまう。そうすると、今回の分野間連携の最 終目標は、概要調査におけるSDMを作る際の連携をいかにするかということをある程度体系的に 示すということになる。実際には、連携を意識して要素研究を実施しているわけではないため、 どのように連携に意識したものに微修正していくかが課題である。
- ・時間とともにSDMの中心軸は地質環境から工学設計、安全評価へと変化していく。よって、どの 時間であっても共通している連携と、今の段階で必要な連携とをカテゴリー分けと重み付をしな がらまとめていくことが必要である。
- ・関係各国では、地質環境の長期的変遷を考慮したSDMを構築し、設計や安全評価までを実施する 方向になっている。これに関連した実データを用いた取り組みは、日本においても内陸では検討 されているが、沿岸域では未実施である。実データを使って検討できるのは、幌延と駿河湾しか ない。時間軸を含めた沿岸部における地質環境の長期的変遷を考慮したSDMの構築、及び設計・

安全評価との連携というものをこの事業で実施してほしい。

・本来なら調査を絞り込みながら、あるポイントに対して精緻化していくというのが理想だが、現実として今は要素技術のかたまりなのでシステマティックな体系化した調査技術になっていない。
 それをなるべく体系化していく必要があるので全員の協力が必要である。

第6回 分野間連携WG 議事録

日時:2020年2月12日 (15:00~17:20) 場所:電力中央研究所(我孫子地区) 参加者:(敬称略、※1はオブザーバー) 産総研:木方、町田、井川、丸井^{*1} 電中研:幡谷、西本 RWMC:大和田、林、佐原^{*1}、徳島^{*1}

議題

- (1) 今年度の作業で分野間連携としての成果と課題
- 地質環境 (電中研)

<成果>

- ・駿河湾に関する地質モデルの構築と分野内連携(地質と地下水)の促進
- <課題>
- ・地質と地下水の連携のところで、まだ互いの分野に関する相互理解が十分ではない。

地質環境 (産総研)

<成果>

- ・SDMを通じた連携により、他分野との情報交換がスムーズに行えるようになってきたこと。
- <課題>
- ・まだ分野間あるいは分野内の連携やSDMに関する互いの認識における齟齬が残っていること。

工学技術 (電中研)

<成果と課題>

 ・今年度から参加しており、また研究内容も要素技術開発の側面が強いため、連携という意味では 貢献度が低いと考えているが、実際の地下水の水質データを使った実験については将来的に必要 になると考えている。

工学技術 (RWMC)

〈成果〉

- ・前フェーズに取得した沿岸部における深部地下水の水質データを工学技術分野における研究の検討や計画に反映できたこと。
- ・地質環境分野と工学技術分野の情報受け渡しに関する枠組みの設定と議論の開始

<課題>

- ・沿岸部の地下水組成における想定幅の確認(他の地下水組成が考えられるのか)
- ・地質環境から工学技術への情報の受け渡し内容を徐々に明確化すること。(工学技術側で必要となるデータについて整理しつつ、地質環境側の議論に工学技術の視点からもっと参加していく)

質疑と要望

- 駿河湾における地質モデルの構築は、大きな成果であるが、例えば、地下水流動を考慮したモデル作成範囲の決定など、もう少し個別の具体的な成果事例についてピックアップしてほしい。
- 地質環境と工学技術では適応できるフェーズが異なると捉えているが、工学技術では文献調査 の段階でなんらかの性能評価を行うのか?
- ⇒実際の地下水を使った評価は、概要調査にならないと実施できないが、結果予想のためのモデル 化まではできると考えている。
- ⇒ということは、地質環境側から、地史を考慮した地質や地下水の変遷情報などを提示すれば、文 献調査段階でも連携は可能ということか?
- ⇒可能だが、問題としては緩衝材の実験にかかる時間が上げられる。緩衝材を飽和させるだけで半 年ほどかかるので、地下水のデータを反映するのに1年程度の時間的なズレが生じてくる。
- TRU 廃棄物などに関連する緩衝材の実験データを HLW の研究で利用することは可能なのか?

⇒可能である。多くのデータは利用されている。ただし今まではCaとNaだけを考えていたが、近年になり、KとMgが影響することがわかってきたため、その対応が必要である。また、前フェーズのデータを共有してもらったことで、C1濃度については、高くても海水の1.2倍程度だと分かった。これまでは深部地下水の代わりに海水を使って実験していたので、今後、中程度のC1濃度の水に対する緩衝材の影響を把握していく必要がある。

(2) 来年度の研究計画について

来年度の研究計画について、今後エネ庁と調整する事項について分野ごとに整理した。

地質環境 (電中研)

今年度と同様に、複数の地質モデルを考察した際の不確実性と、その地質モデルの不確実性が地 下水モデルなどの他のモデルに与える影響の把握。中間とりまとめを目処にまとめる。

地質環境 (産総研)

次年度の全体計画については、前回の委員会で紹介したとおり(パワポ資料参照) 連携に強く関係するボーリングについて現在、内陸と沿岸の2箇所を候補地として考えている。

工学技術(電中研)

来年度に実施できるかどうかわからないが、地下水の実データを使ったCa型のベントナイトの検 証試験は必要と考えている。

工学技術(RWMC)

当初の予定どおり3つの実施項目を行っていく。

(3) 分野間連携を踏まえたうえでの来年度計画変更の可能性

分野間連携を踏まえたうえでの来年度計画変更の可能性について、今後エネ庁と調整する事項に ついて分野ごとに整理した。

地質環境 (電中研)

まずは、電中研内で地質と地下水の分野内連携をしっかりやっていく。可能であれば工学技術と の連携も進めていく。

地質環境 (産総研)

当初は、沿岸部でのボーリングを想定していたが、SDMを使った連携の観点から内陸でのボーリングも検討している。

もし地質・工学ともに、SDMや検証のために取得してほしいデータ(例えば、ボーリングのコア 試料、地下水サンプル、透水係数や岩盤強度などの物性値)があれば、ボーリングの計画について 再検討が必要となるので、町田・井川まで連絡してほしい。

工学技術 (電中研)

特になし。

工学技術 (RWMC)

現時点で大きな変更はないが、第3回評価委員会での委員のコメントについては反映する予定で ある。

質疑と要望(駿河湾のボーリングについて)

● 駿河湾でのボーリングに2年をかけることは幌延の状況等を加味して可能か?

⇒諸般の事情により、幌延での調査を延期していたが、来年度以降の計画に含めてもよくなってきた。したがって、当初計画を考慮すると、基本的には駿河湾は次年度で終了してほしいが、1年程度の延長なら幌延との同時遂行が認められる可能性がある。

- 仮想空間ではなく、実フィールドで、実データにもとづく SDM の検証作業を進めることについては NUMO からも支持されているが、一方で、駿河湾のように実際の処分地の条件からかけ離れている場所において、SDM のためとはいえ、精密なデータを取ることに理解は得られるのか?
- ⇒2017年に発表された科学的特性マップの中間報告(2015年)では、THMCを盛り込んだ科学的有望 地が検討されており、地下水流動が遅い場所というのも項目として入っていた。駿河湾はおそ らく国内でもっとも地下水の流れが速い地域であると想定される。ここで、実データを使って 検証を実施することは、仮に、後背地に高い山がある平野部や半島が文献調査の候補地として 選ばれた際に地下水からの適地判定に役立つ可能性もある。よって程度はあるが、適地の閾値 を検討するという観点からは理解が得られると思う。
- 地質環境としては、地質学、あるいは地下水学的観点から欲しいデータが決定してくると思う。 一方で、工学技術や安全評価については、取るべき物性値や地下水データは処分場の場所によってケースバイケースなので、逆に言えば場所が決まらないと取得すべきデータ項目を決まらないという側面もある。よって、今回のボーリングで得られた結果を全て、工学技術側で活かすというのは難しいと思う。ならば、工学側から必要と想定されるデータを全部リクエストし、それについて、金額的あるいは技術的側面から検討して整理もらう方が現実的ではないか。
- ⇒それならば、内陸か沿岸かわからないが、そこにサイトができると仮定して、欲しいデータを整 理してリクエストしてくれた方が連携や体系化の面からはスムーズだと思う。場所を評価する 必要はないので、ここに作るという仮定でどんなデータが必要かを考えてもらえばよい。もち ろん、これは概要調査の話なので、文献調査での連携作用とは区別する必要はある。
- ⇒順番としては、現在作っているモデルで地下水流動解析を実施してみて、サイトが作れそうな場 所に当たりをつけて、そこをターゲットにボーリングを実施し、得られた水理データを使って、 改めて解析を回して、処分場の設置が可能かどうかを判定するという流れになると考えてよい か。
- ⇒2km×2kmという処分場の大きさを考えた場合、駿河湾では沿岸部は難しいので、内陸になる可能 性が高いと思う。ただ、掘れる可能性がある場所が限られているので、本当に適切な場所で必 要なデータが取れるとは限らない。
- ⇒処分場が内陸に入るか入らないかに関係なく、駿河湾で実際の処分場を作ることを考えた時に、 工学技術が必要とするTHMCのデータがある程度わかるのであれば、産総研が掘る1本のボーリン グで全てのデータが取れるのか、あるいは複数本必要となるかなどそれが整理できるだけでも 十分だと思う。

まとめ

ボーリングの実施場所については、これから交渉に入るため、ここでは決めない。それより、今わかっているだけで、<u>各々の研究あるいは検証に必要となるデータについて整理して3月中を目処</u> に井川・町田に連絡する。産総研側で、優先度について予算、期間(1年)、場所を吟味して仮決めを行ない、その後改めて、WGメンバーと議論する。

(4) 今年度の報告書のとりまとめ方法と分担

分野間連携の成果について1枚程度でよいので、なるべく具体的に記載してほしい。電中研の地 質モデルへの貢献に限らず、連携したことで、課題が小さくなったなど、連携したことによるメリ ットでも構わない。

提出〆切:3月13日(木方まで提出)

<u>以上</u>

第7回 分野間連携WG 議事録

日時:2020年3月23日 15:00~16:30 場所:web会議 参加者:(敬称略、※1はオブザーバー、※2はパートナー)) 産総研:木方、町田、井川、丸井^{*1} 電中研:幡谷、長谷川、西本、楠原^{*1}、岡本^{*1} RWMC:大和田、林 JAEA:仙波^{*2}、水野^{*2}

議題

産総研が計画している駿河湾におけるボーリング調査への連携について議論した。

(1) 駿河湾地域の地質モデル(電中研)

電中研の楠原より2019年度の報告書(APPENDIX)を用いて、今年度、作成した地質モデルについての紹介がなされた。

説明と質疑(結論のみ)の概要は以下のとおり

- ・12種類の概念モデルを作成。
- ・貫入岩と断層の有無で概念モデルを整理。
- ・モデル領域は深度5kmまで。
- ・SKBやFGBの柱状図は考慮していない。
- ・富士川の東側は沈み込んでおり、深いボーリングデータもないので、不確実性が大きい。
- ・海岸部における第三紀層の堆積岩の上面までの深度は数百メートル程度。

(2) 沿岸域地下水流動研究としてのボーリングの位置づけ(産総研)

産総研の井川より次年度に駿河湾沿岸部で実施するボーリングの目的と測定予定項目などについ て説明がなされた。

説明と質疑(結論のみ)の概要は以下のとおり

・本ボーリング調査の位置づけは、連携によるSDMの検証や構築ではなく、沿岸部特有の地下水環境の把握とした(NUMOからも助言あり)。

・本掘削の目的は、塩淡境界の3次元的な広がり(東西方向)の確認と、海底湧水と陸域地下水の 連動性の把握

・現在、検討中のものを含めて物理探査、調査孔掘削(コア取り含む)、孔内検層、地下水採取を 予定(掘削期間は次年度のみ)。

・地下水については、SKB孔掘削の際に実施した、掘削しながらの採水を予定。

・掘削速度については、過去の実績からコアありだと1m/日、コアなしだと10m/日

⇒必要な部分(工学技術の研究に使えそうなもの)のみコアリングを実施(掘削深度を重要視)。 ・物理探査は空中電磁探査を予定。比抵抗測定が主体のため、塩淡境界の位置決めに特化しており、 地層や岩種の特定は行えない。

・現在の地質モデルからは、砂礫層の下位の固結度の高い岩盤までの深度を想定することは難しい (沈降速度と周囲の地質を用いれば、推定は可能かもしれないが、すぐには無理)

(3) ボーリング調査項目に対する工学特性からの要望(原環センター、電中研、JAEA)

・工学特性のための測定項目一覧には、サイトの設計と人工バリア材料の研究に必要なものが混在しているので、整理が必要。

⇒現段階では、設計できる人材がいないため、材料評価との連携を中心に考える。

⇒コア(鉱物組成)と地下水質との関係を見られればよい。

· 今後、設計の項目が入ってきた時のために初期応力は測定しておく方が良いと思う。

(コアがなくても岩種がわかれば、文献や類似した岩石サンプルを用いて推定できる項目もある)

・時間的制約を考えると、コアリングは必要最低限(最悪なし)

・広域の地質モデルの向上という観点からは、沿岸部の1点のボーリングデータはあまり意味を持たない。

・地下水流動解析を実施する上では、透水係数がわかるとよい。

・工学分野とは、ボーリングの体系化と取得精度の観点での連携が適当。

 ・大深度の掘削をおこなっても基盤岩となる第三系に到達するか分からない。基盤岩に到達すれば (その物性を調べることにより)処分場設計に関する検討という目的の連携ができるが、基盤岩が 出現しない場合は、ボーリング孔内の温度分布の取得といった、材料の耐久性に係るデータ提供と いう面で連携を考える。

・産総研(木方)で、測定項目一覧について、改めて整理し、プライオリティーを付ける。

(5) その他

・次回WGの議題と開催時期(次年度の契約決定、締結を想定)

4月中旬頃を目処に次回のWGを実施し、産総研側で付けたプライオリティーについて最終的な決定を行なう。

3. 分野間連携の成果と課題

本年度は本受託事業における分野間連携の初年度であり、その方向性や達成に向けての方法について緒に就いたばかりである。ここでは、現在参加している各分野の各機関での研究成果や課題な どについて報告する。

3.1 地質環境特性:地質(電中研)

(1) はじめに

なぜ、殊更に「連携」を叫ぶのか。理解し難い。「連携」が「協力」と置き換えられるならば、 これまでに、建設プロジェクト、防災プロジェクトなど、様々な分野で、異なる分野の専門家、異 なる組織の専門家が実際に協力しあい、目標を達成してきた。

では、過去において、「協力」とは何であったか。現在、多くの沿岸部処分研究参加者が言うよ うな、データの受け渡しだけではなかった。例えば、データを出す側のデータの背景、データの持 つ品質と不確実性、受け側のニーズ、双方向の解析用のモデル化に関わる議論等々があった。「そ んなのはわかっている」という方が多いと思うが、是非実践してから語ってほしい。一方で、既に 具体的なプロジェクトに参加した経験のある方は、この先読んでもくどいと思われるだけであろう。

換言すれば、これから分野間の「連携」を望む方々を前に議論と実践をしようとするならば、まずは、「連携」という行為に対する共通認識をもたねばなるまい。そこで、ここでは、連携/協力という視点から、本研究の主題である地質と地下水を例にとって、地質側の視点から、整理してみる。本文と重なる部分があるが、プロジェクトマネジメントの問題であり、ご容赦頂きたい。

(2) 連携/協力の例示

一般論で言えば、上記で例示したようなものである。なので、ここでは、上記4点について述べてみる。一般の論文や報告書では、さして触れられていないところに敢えて焦点を当てて、くどく ど書いてみたい。

地質調査は、一連の調査の中で、最上流にあるものの一つである。そして、他の調査に比べて、 不確実性が大きいという言い方がなされるが、地質の不確実性は、基本的には、下流側にあるそれ ぞれの主題図に引き継がれる。この点をきちんと説明しなかった、あるいは、その機会を見出せな かったことは、地質屋が、自分の仕事として理解しつつ、外に対して十分に説明できていなかった ことであり、本稿はその反省の弁でもある。

① データとその背景

ー言で言えば「場の理解」となるが、基本的には地形・地質調査のアウトプットとして提出され る地形学図や地質図である。アウトプットから読み取れる、あるいは、表現された地質構造発達史、 地形発達史などの作業仮説(解釈)もまた、重要な情報である。

デジタル化はテクニカルなものであるが、もはや必然であり、デジタルデータを、口を開けて待っている解析者がいるのもまた事実である。

② データの持つ品質と不確実性

これらを提示するためには、地形学図や地質図がどのようなプロセスを経てできてきたかを伝え る必要がある。本研究では、今回実施した作業とその背景となる考え方について、本文で詳述して いるので、ここでは割愛させて頂く。この項での重要なメッセージは、一般には解釈が入らない一 次データを積み上げても、その解釈の過程で様々な前提が入り、結果としてできる地質図は一意に は決まらないということである。つまり、本来であれば、作業仮説の数だけ地質図が並列しうるの である。これこそが地質の不確実性の本質である。

ただし、だからといって一つの地質図/地質モデルしか示さないことが悪いということではない。 考える切欠を与えてくれるものであり、その意義は小さくない。上記は、地質図を使う側に求めら れる意識である。

③ 受け側のニーズ

熱、水理、力学、化学、それぞれに関わるパラメータとその空間分布と言うことになろう。言う までもなく、ダム基礎や原子力発電所の建屋の基礎など、高密度で調査を実施するプロジェクトで も、調査・試験で取得したデータを広げるのは地形・地質という図式は変わらない。つまり、地 形・地質とパラメータを変換しているのである。

具体的に言えば、ある地層内で得られたデータをその地層内では均一と見做し、与えられた地質

分布(多くは岩相層序区分の分布)に対しパラメータを入れるという作業がこれに相当する。ここ で受け側のニーズに応えるためには、今回はほとんど議論していないが、ボーリング調査・試験実 施箇所の代表性を説明する必要がある。理想的には、一つの岩相層序区分内の層相の不均一性の議 論、複数の調査・試験のデータのばらつきを見るといったことの並走となる。なお、力学特性にお いて過去の試験データを活かし、パラメータを大掴みするテクニックとして、いわゆる岩盤分類が ある。

④ 解析用のモデル化

地質側から見ると、殆どの地下水流動解析では、解析用に単純化された地質区分・地質分布は一つ(一つの作業仮説)であり、そこに入れるパラメータの議論に終始しているように見える。

地下水流動に限らないが、解析上の制約(計算機など)により、単純化を望む声は非常に大きい。 一方、地質側から見れば、最初から単純化されたものを作ることは、本来、愚の骨頂である。デー タを供する分野ごとに単純化の仕方が異なるわけで、あるパラメータにとって必要がない区分も、 他のパラメータにとって必要なこともある(主題図の境界はそれぞれである)。したがって、基礎 となる地質図は、相応に詳細なものである必要がある。今年度の研究では、この部分の検討が全く 不十分であった(結果として括らざるを得なくても、そのための議論が乏しかった)。

調査を挟んで何回も繰り返しモデルを更新し、解析するのだから、最初のモデルは(とりあえず) 一つで良いというのが大方の考え方と思われるが、確かにそれはそれで一つの選択肢である。しか し、それはリソース(人・金・モノ)に余裕がある場合、時間に縛られない場合(研究がこれ)で ある。

地質側から見ると、地下水側には、どのようなモデルであれば、どのような答えが期待できるか、 避けるべきかなど、過去の経験を背景とした思考実験を以て議論に臨んでもらいたい。今年度の研 究では、最初に検討する地質要素として、地質側でしばしば痛い経験となる高透水性の貫入岩を取 り上げようとした。しかし、地下水側より、内陸に少々大きな高透水性の岩体があっても、広域地 下水流動への影響は小さく、むしろ、海岸に近い断層の方が大きく影響する可能性があるという意 見が出された。議論の結果、最初の検討モデルとして、断層を想定したものを選択した。地質側と しては、いい議論であったと考えている。このような議論は、次の調査の優先度を考える上でも、 採用すべきモデル=作業仮説≒シナリオの絞り込みを考える上でも大変有益である。

一方、今回は議論が不十分であったが、スケールの問題もある。地質に限らず、野外の露頭やトンネルなどで得られるデータと、(広域的な)開析で用いられる平均化されたデータとは、整合しないことがしばしばである。単純に地質をパラメータに読み替えるだけでは足らないこともあり、 それを補う手法として、岩盤分類・地山分類といったテクニックが必要となる。

(4) 関連事項

ここまで、どちらかと言えば、サイト調査・評価の視点から述べてきた。一方で、地質図/地質 モデルはサイティングにとって重要な情報であることは論を俟たない。複数のサイト間の技術的な 比較をする場合、各サイトの地質図/地質モデルの不確実性の議論がない場合には、技術的に不利 な、あるいは、致命的欠陥を有するサイトを選択してしまう可能性が高くなろう。本文でも取り上 げたが、特定の高透水性層、断層、貫入岩などである。これらの地質は、一般にはサイトが絞られ た段階に出てくると、設計・施工に与える影響が相対的に大きくなるので、可能であれば、できる だけは嫌い段階で排除しておきたい。しかし、全てを一葉の地質図に盛り込むことは困難である。 不確実性が読み取れる表現と不確実性を読み取るセンス、作る側と使う側のいずれにも力量が求め られる。

(4) まとめ

ここでは、地質分野から見た分野連携のあり方について考えることを述べてみた。しかし、これ は最初に述べたように、地層処分以外の分野でやってきたことの焼き直しに過ぎない。このことは、 分野連携として、何をやるかという問題だけではなく、どうやったらできるかという問題の所在を 示している。

その原因の一つは、沿岸部研究の参加者の中に何らかのプロジェクトに携わった経験がある方が 非常に少ない点であろう。単に、役割分担が為されただけではプロジェクトは成功に至らない。研 究者が100人集まって、個々に優れた研究を展開できたとしても、それで終わらない。プロジェク トマネジメントのあり方の議論、特に、全体戦略の共有が欠かせない。これを改めて確認できたことは、分野連携WGの成果と考える。

現状、各機関の研究課題は多様であり、組織間の連携をより密にしていく必要がある。本研究で は、これらの点に留意して、ここまで地質-地下水の連携のあり方を考えてきたが、ここまで述べ てきた通り、課題は少なくない。故に、これらの課題を克服し、一つの組織の中で連携のコアとな る仕組みを例示できるかどうか、来年度1年間、模索してみたい。

3.2 地質環境特性:地下水 (電中研)

高レベル放射性廃棄物の処分では、地下水シナリオの評価が重要であるとされている。このシナ リオでは、核種の地下水による輸送を評価する。沿岸部でこのシナリオを評価する際には、地下水 の流速だけでなく、地下水の水質も重要になる。これは、海水環境では、人工バリア材料のベント ナイトのバリア性能(透水性、力学特性)は、低下する可能性があり、吸着性も小さくなる可能性 があるためである。

昨年度までに沿岸部で想定される地下水流動を提示するために、現降水、氷期降水、現海水、化 石海水という4つに区分し評価してきた。沿岸部の地下水流動は、内陸部と異なり、海水準変動の 影響を受ける可能性がある。図 - 3に示すように、海水準は10万年で100 m以上低下し、その後2万 年で元に戻る周期を繰り返していることが知られている。このため、海水準の変動にともなって、 沿岸海底下の地下水は、淡水と塩水を変遷する可能性がある。ただし、滞留時間の遅い領域、たと えば、氷期降水や化石海水の領域であれば、海水から淡水への変遷がない可能性がある。一方で、 現降水や現海水の領域では、地下水の滞留時間が早いだけでなく、海水から淡水への変遷も海水準 変動に伴って変化する可能性が高い。



図-3 海水準変動と地下水区分の模式図

この4つの地下水区分で想定される滞留時間(流動性)と水質は表-3のようになる。このような シナリオを設定して検討することで、人工バリアや安全評価の想定を絞り込むことができると考え られる。地下水を評価する観点からみて、現降水や現海水が存在しているような地点に処分場を立 地する場合、地下水流速は非常に速く、しかも変化する可能性が高いことが想定される。このよう な場は、天然バリア性能が高いとはいいがたく、できるだけ避けた方が良いと考えられる。一方で、 化石海水が残留しているような領域は、ナチュラルアナログ的にも地下水の流れが小さく、数十万 年スケールで安定と考えられるため、天然バリア性能は高いと考えられる。

このように、沿岸域での滞留時間と水質を区分し、人工バリア、安全評価に情報として伝達したことが昨年度までの研究の主な成果である。

これを踏まえて、人工バリアの性能評価や線量評価をおこない、淡水環境に対してどのような影響があるかを検討する必要がある。海水環境では人工バリア材料の透水性や核種の吸着性が低下すると一般的に考えられる。このため、図-4に示すように簡単にでも評価を行い、どのシナリオではどの程度のバリア性能になるかということを示しておくことが精密調査地区選定という観点では重要であると考えられる。このような具体的な検討が行われていいないことが課題であると考えられる。

海水の種類	滞留時間(流動 性)	水質
現降水	2万年未満 (2.5 cm/y*以上)	降水(海進時に海 水になる可能性)
現海水	2万年未満 (2.5 cm/y*以上)	海水→降水に変遷
氷期降水	2万年以上 (2.5 cm/y以下)	降水(変遷なし)
化石海水	10万年以上 (0.5cm/y以下)	海水(変遷なし)
	•	安全評価 (線量評価) U=aC _s
地質 ^{厚み(±被り)} ^{隆起・浸食} →接近シナリオ 人工バリア <u>廃棄体</u> ・	Contraction of the second seco	αは摂取係数 Cslt地表濃度
	散 に=D/R _E ・C _E /L E E E A A A A A A A A A A A A A A A A	放射壊変

表-3 各地下水区分での地下水の流動性と水質

人工バリア側から、氷期降水や化石海水の代表的な水質について質問があったため、これについて回答した。一般的には代表的な水質は、地質環境や地下水環境によって定まるため、定量的な評価は困難であるが、定性的な結果として、昨年度までに収集した地下水の調査結果について、現降水、現海水、氷期降水、化石海水と区分したデータを提供した。

図-4 地下水シナリオ検討の概念図

化石海水の水質については、灌水のようなものも含まれ、塩分が現海水の数倍程度のものもある と考えられている。化石海水の組成の振れ幅が、前述の人工バリアの透水性や核種の吸着性に影響 を与える可能性が高いため、これについては成因を検討した。

この結果、一般に高塩水が発生するのは、①岩塩の溶解、②海水が凍結する際の脱塩、③イオンフィルトレーションが想定された。ここで、①岩塩の溶解は、岩塩層が溶解して高塩水が形成される場合であるが、国内では岩塩層は発見されていない。②海水が凍る際の脱塩については、極地(南極、北極)や北欧・北米など永久凍土が広く形成された地点では確認されているが、国内では、永久凍土が形成される地点は限定的であり、このような起源の高塩水は確認されていない。③イオンフィルトレーションは、地層が圧密する際に、半透膜作用で、水だけが流出し、塩分が残る現象である。このイオンフィルトレーションで、地層水の塩分が増加するが、圧密が進まなければ、塩分は上昇しない。また、塩分が全く排水されない完全な半透膜の場合でも、塩分がn倍になるためには、間隙率が1/nになる必要がある。ただし、完全な半透膜は天然の地層ではほとんど存在せず、海水の数十パーセントの上昇にとどまっている。このため、海水と同程度までの塩濃度の想定で十分と考えられる。

問題点としては、原因不明の高塩水が発見されていることである。国内でも一部の温泉などでは、 海水の数倍のような高塩水が確認されている。特に有馬温泉が有名である。これらは深部流体とい う扱いで検討が進められている。深部流体の影響が大きい場合には、断層や火山などと同様に除外 要因にすることもできると考えられる。このため、あまりにも過度な条件を考慮する必要はないと 考えられる。これよりも、一般的な海水環境でどの程度の影響があるかを明確にすることが、地下 水シナリオの評価に貢献できると考えられる。

地下水シナリオでは、図-4に示すように、人工バリア→天然バリア→安全評価とデータを受け 渡すことになる。しかしながら、実際には各分野で沿岸部での環境の変化がどのように変化した場 合に、どのような影響が考えられるかの検討にとどまっている。前述の現降水、氷期降水、現海水、 化石海水のように、それぞれの影響をつなげて検討することで、重要な検討項目や不要な検討項目 が明らかになる可能性があり、検討項目の選択や集中が進むと考えられる。このため、このような それぞれの影響をつなげた検討が今後の課題であると考えられる。

富士川河口周辺の地下水を評価するために、地質図を作成し、地下水流動解析を実施した。地質 図は、一次データに基づいて、可能な限り解釈を入れず、地質モデルを作成した。ただし、文献調 査における一次データだけでは一つの地質モデルへの絞り込みが困難なため、複数の地質モデルが 構築された。本地点は、第四紀の火山性噴出物で覆われており、これより深部の地層については、 不確実性が高い。

複数の地質モデルの内、地下水流動への影響の観点から地質モデルを絞り込み4つの地下水モデルで検討を実施した。このような異なるモデルでの検討を、地下水分野では代替モデルでの検討とよび、不確実性を低減する方法として推奨されている。

地質モデルでの地質区分についても、その広がりや水理特性の類似性などから、地質モデルを簡 略化したものを作成し、解析を実施した。地下水モデルでは、すべての事象を考慮して解析するこ とは困難なため、概念モデル化(簡略化)は、必要不可欠であるとされている。

上記のように今回の地下水モデルでは、地質と地下水分野が協同し、代替モデルでの検討し、不 確実性を共有できている部分が成果であると考えられる。

今後は、地質分野と地下水分野で地質モデルや地下水モデル作成前に議論し、簡略化する情報や、 不確実性を共有しておくことが必要であると考えられる。

このような概念モデルの作成は、THMCのすべての項目についても同じであり、それぞれ地質モデルとの関連性が異なるため、関連する情報をどのように概念化するかを協議し、共有していく必要がある。このような協議により、重要と考えられる要素が漏れなく考慮され、良い概念モデルが構築できると考えられる。

3.3 地質環境特性:地下水 (産総研)

(1) WGでの議論とその反映

本WGではSDMを通じた分野間連携の促進とそれに付随する課題の洗い出し(不確実性の低減や、 分野間でのニーズの把握や、データの円滑な受け渡し等)を目的としている。今年度については、 まず初めに、各自が考える連携の方向性の確認や、言葉の定義の確認など、分野が異なる研究者間 で、話し合いを行うための素地作りから始めた。そして、その議論をもとに、NUMOが考える地層処 分事業の進め方や課題に対し、必要な検討をおこなった。産総研における初年度の具体的な成果と 今後の課題については以下のとおりである。

(2) 具体的な成果

初年度は、SDMの基礎となる地質モデルの作成に必要な既存データの情報を電力中中央研究所に 対し提供した。また、原子力資金管理センターに対しても、前フェーズにおいてシステマティック 区分を作成するために整備した国内の沿岸部深部地下水の水質データを、電力中央研究所を通して 提供した。また本WGの基幹として、WG内の議論を整理し、円滑な進行に貢献した。

(3) 課題

初年度は主に、地質と地下水間の分野内連携が主体となったが、同じ地質環境分野といえども地 質と地下水を主体とする研究者間では考え方の土台が異なることに気づかされた。地層処分事業に おいて、サイトの地質を理解することは、学術的な場の理解のみならず地域住民の十分な理解を得 るためにも必要不可欠である。そのため地質分野研究に担う責任は非常に大きい。

限定的なデータから構築される地質モデルと地下水モデルには、不確実性が存在することが想像 できるが、その実態は良くわからない。そこで実際の流域において両モデルを構築し、その不確実 性を肌感覚として掴み、それを明示することが必要である。このときに重要となるのは地質分野が 地下水モデルを、そして地下水分野が地質モデルの不確実性を理解することだろう。このような経 験を蓄積することにより、事業の際に生じる葛藤を少しでも低減できると考える。さらに、第二段 階として、地質は地下水流動を決める一要素であるが、その全てではないこともまた、両分野の連 携において、大きな葛藤として持ち上がると推定される。

地層処分事業には文献調査・概要調査・精密調査のフェーズごとに時間的な制約も付いて回るこ とから、今後は必要とされる作業の取捨選択(優先順次付)や、一般性についても整理を進めてい きたい。最後に工学技術と、どのように連携を進めていくのかという点についても今後、SDMを介 して議論していく必要がある。

3.4 工学技術 (RWMC)

平成31年度からの本事業における地質環境分野と工学技術分野間の連携は、主には地質環境モデル(SDM)による連携及び地質環境データの工学技術分野の検討への反映の2つの取組みをした。この2点について、工学技術分野で期待できる効果、平成31年度の成果及び今後取り組むべき事項等をそれぞれ以下に示す。

(1) 地質環境モデルによる連携

SDM等を通して地質環境情報を工学技術分野へ受け渡す手法について、平成31年度より分野間連 携WGで検討を開始した。工学技術分野では、地質環境に関し3次元空間の情報で示したSDMを処分場 の性能評価のための地下水の流動解析や構成材料の機能の評価等に活用することができる。SDMで 受け渡す事項や方法を検討して明確にし、分野間で共有することで本事業における性能評価手法の 検討や概要調査に役立てることが可能と考えられる。平成31年度は、地質環境分野を中心に開始さ れた地質環境モデルの構築に関しての議論に、工学技術分野から参加して地質環境モデルの構築に 関する知識を深めた。地質環境モデルに関する工学技術分野の連携は、今後の地質環境モデルの構築 案の進展に伴い徐々に進めていく必要がある。具体的には、地質環境モデルにより分野間で受け渡 す情報の項目や精度に関して、工学技術分野の検討(性能評価と水理解析の手法構築や構成材料等 のデータ取得等)を通して抽出し、地質環境モデルの不確実性等を踏まえて分野間で協力し、整備 を進めていく必要があると考えられる。

(2) 地質環境データの工学技術分野の検討への反映

平成30年度までに地質環境分野で取得した地下水のシステマティック区分の検討に関する地下水 の分析データを分類整理し、セメント系材料等の構成材料の挙動データ取得試験の計画に活用した。 これまでのデータ取得では海水や海水を希釈した化学組成の地下水を対象として実施してきた。平 成31年度は、実際の地下水の化学組成を整理し材料挙動への影響を予測しつつ試験を計画進めた。 今後、地下水の組成の幅を特定しつつ、データ整備のための星取表を整備することで、沿岸部の処 分場建設に有益なデータが効率的に拡充されると考えられる。加えて、今後、ボーリングにより得 られる地質環境に関するデータについて、工学技術分野で必要となるデータの整理や、地下水や岩 石等の試料を工学技術での試験への活用などを行うことで、沿岸事業の検討や概要調査における連 携等の有益な知見の拡充に貢献するものと考えられる。

4. 次年度以降の方向性

これまでの事業の内容を考慮すると、今回の分野間連携は先に述べた4分野(地質環境の調査・ 評価、工学特性(処分場設計)、性能評価、安全評価)で実施すべきである。しかしながら、現状 では性能評価及び安全評価を負担できる担当者が不在である。現在、地質環境の調査・評価と工学 特性の間で連携を実施しているが、一連の連携がないと、この2つの分野の連携も中途半端になっ てしまう。これを解決するためにも、JAEAの両分野の担当者にオブザーバーとして参加してもらい、 SDMをインターフェースとして4分野間での連携を進めていく体制を整える必要がある。

上記のように体制を整えたうえで、人工及び天然バリアの長期的な変遷に基づき、長期的なバリアの封じ込め性能を評価することが必要となる。このために、SDMなどを用いて、長期変遷に関するシナリオ(ストーリーボード)を作成し、性能評価に供する。

分野間の連携により、不確実性を低減するための有効かつ効率的な調査の体系を構築するために、 来年度から開始する予定の現地調査においては、調査計画から調査結果の評価まで、できる限り情 報を共有して連携する。

参考文献

原子力発電環境整備機構(2018):わが国における安全な地層処分の実現-適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築-(レビュー版)、包括的技術報告、NUMO-TR-18-02.

Appendix XI

評価委員会の記録

平成 31 年度 沿岸部処分システム評価確証技術開発第 1回評価委員会 議事録

日時:令和元年8月29日(木)13:00~17:25

場所:〒108-0075 東京都港区港南2丁目15-4

品川インターシティ(第1、第2会議室)

次第

開会の辞:主催者

ご挨拶:資源エネルギー庁

委員等紹介

委員長選出

審議

その他

委員名簿

委員長

吉田 英一 名古屋大学博物館 資料基盤研究系

委員 (50 音順)

内田 滋夫 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 佐藤 努 北海道大学 大学院工学研究院 環境循環システム部門 佐藤 治夫 岡山大学 工学部 機械システム系学科 竹内 真司 日本大学 文理学部 地球科学科

資料

資料1 全体
資料2 地質環境(地質)
資料3地質環境(地下水)
資料4 工学技術
資料5 その他(組織図、分野間連携、人材育成など)

議事内容

- 主催者 挨拶 省略
- 資源エネルギー庁ご挨拶 省略
- 3.委員紹介ならびに委員長選出 吉田委員が委員長に選出された。
- 事業説明と質疑応答 配布資料の説明後に行われた議論を記す。
- (1) 地質環境(地質)
- ・宮崎地区での地形・地質学的研究は終了したのか(素晴らしい研究であったのでもったない)。
- ⇒別プロジェクトに引き継いでいる。
- ・段階的なサイトキャラクタリゼーションをきちんとすべきだし、その過程をしっかり見えるよう
 にするべきである(コメント)。
- ・前フェーズからの研究の流れや進歩がよりよく見えるようにしてほしい(コメント)。
- ・SDM を作る過程や SDM に THMC を組み込む手法、その成果を本研究で明らかにしてほしい。

・どこかで安全評価ができると好ましい(コメント)。

(2) 地質環境(地下水)

- ・地下水年代と地形や地質などの関係を示すことはできないか。
- ⇒すでに検討は進めている
- ・海底や地下でも分水嶺(流域界と言う地形学の用語)という言葉を使うか。
- ⇒検討する
- ・海底湧出地下水研究の成果がどのように処分研究に役立つか詳しく知りたい。
- ⇒海底湧出地下水の水質や流量、流出ポイントの持つ意味を説明した。
- ・プッシュプルテストの成果がどのように処分研究に役立つか詳しく知りたい。
 ⇒プッシュプルテストの目的や試験内容を詳しく説明した。
- ・同位体研究や地下水専門用語についての質問があり、定義や用法を説明した。
- ・ボーリングの位置や深度の決め方、分析手法の選び方などについて教えてほしい。
- ⇒研究で行う場合と事業としての調査で行う場合の違いも含めて説明した。

・今後のプログラムを作るにあたり、それぞれの調査(例えばボーリング)の代表性、例えば時空間 的な代表性を明らかにし、研究成果の確実性や不確実性を明確にしつつ、国民の理解を得られる結果 が出せるようにしてほしい (コメント)。

(3) 工学技術

・工学研究の位置づけや地質環境研究との関係がもっとわかるようにしてほしい(コメント)。

⇒性能評価の項目や他の課題との連携も視野に入れていきたい。

・JAEA、NUMO、メーカーなどの情報も取り入れて研究を多角的に進めてほしい(コメント)。

・塩分濃度や熱の影響についてのとりまとめ方について、将来的な展望を聞かれた。

⇒実験材料や手法、設備の組み立ても含めて、最終的な成果発表を検討しつつ実施している。ま た、性能評価手法なども含めて検討中である。

・沿岸海底下の地質環境の時間的な変化に対応できるような性能評価の確実性を考慮してほしい(コメント)。

・材料などに関する技術的な質問や海外事例との比較などが問われ、現状を回答した。

・斜孔掘削や物理探査との成果のやり取りや設計幅に対する工学技術の対応などを問われた。

・工学から地質環境へのリクワイヤメントや連携について問われ、現状を回答した。

(4) 分野間連携

・本番の事業では、効率化や適正化などをふまえて非常に重要な要素であるので、確実に成果を挙げて ほしい。その研究ができるのは、この研究しかない(コメント)。

・昨年までの研究の成果(失敗も含め)を受け継いで、発展させてほしい(コメント)。

・具体的な取り組みが聞かれ、新設した WG 体制などを説明した。

(5) 人材育成

・RWMC のプログラムに協力する体制や方法を示し、理解を得た。

(6) その他

・研究全体を通した目的と期待される成果を確実に設定すべきである。

・第2回の委員会は11月を目途に個別説明・討議とし、時間をかけて専門分野を確実に議論す

る。また、最終の第3回委員会は、令和2年1月31日の午後(都内開催)とする。

平成 31 年度 沿岸部処分システム評価確証技術開発第 2回 評価委員会(個別対応)議事録

吉田委員長

日 時:2019/12/20 10:00-12:00 場所:名古屋大学博物館 説明者:幡谷、長谷川、楠原

<議事内容>

○研究の背景・目的について

本事業自体の目的との関係で、なぜ駿河湾を事例研究地点として選んだのかという説明が必要で ある。例えば一案であるが、日本全国の中で沈降域である本地域において地下水年代等がどのよ うになっているのかを調査することによって、極端な隆起域との違いを比較・評価する、という のはどうであろうか。(吉田)

⇒その場合、駿河湾を選んだ理由として、地質や地下水に関して既存データが多いことからこの 位置付けは妥当と言えると思われる。(長谷川)

個人的には、本事業の目的は大きく2つあると考える。①変動が大きい地域における地下環境の 変化を知る②不確実性の可視化・低減。 個人的には前者を前面に押し出す方が、話が通りやすいの ではないかと思う。②は「不確実性」の定義(何に対する不確実性か) を明らかにしてから話す 必要がある。(吉田)

⇒その2つを明確に分類して位置づけることは理解する。さらにそれらに加えて、沿岸部だけに フォーカスした話ではないが、人材育成の視点から、地質モデルの作成事例・手順を具体的に残 し、地質分布・地質構造の不確実性が、地質環境特性(本研究では特に地下水)に与える影響を 示したい。(幡谷)

○地質モデルについて

普通の地質調査とは異なり、地層処分の地質調査では、水理地質学的な面から見た岩種区分が必要なのではないか。必ずしも岩相を細かく分ける必要はないであろう。またそのための指標のようなものとして、岩相ないし岩種ごとの、原位置で測定した透水係数のカタログは作れないだろうか。(吉田)

⇒JAEA が作成したものがそれなりに網羅的であるが、同じ岩種でも値が相当ばらつくというのが正 直なところである。また、透水係数はもちろんだが、核種移行を考えると間隙率のデータも重要と考える。 (長谷川)

実際の事業における調査開始段階を想定すると、基盤岩の上に堆積物が載っているという最もプ リミティブな2色の地質モデルから検討をスタートするのがよいのではないか。検討の進行具合 もよりはっきり分かるようになる。(吉田)

⇒基盤岩の上に堆積物が載っているという単純なモデルからスタートすることの意義は理解する。 これに加え、サイト選定の視点から、基盤岩の中に致命的となりうる高透水性箇所等がありうる かどうかという検討も早い段階で必要であると考える。(幡谷)

沿岸海域の地質を考える時に陸域の地質データがどれくらい必要になるのかという検討は、まだ 誰もやったことがないと思われるが、重要であろう。(吉田)

以前提案したことがあるが、変動地域における地質や地下環境の安定性を評価する観点から、伊 豆半島をナチュラルアナログとして研究するのはどうか。(吉田)

陸域に比べて沿岸海域のデータは圧倒的に不足しているということを示した上で、そのギャップ をどこまで埋めればよいのか、ゴールをどこに設定したらよいのかを検討することも重要と考え る。(吉田)

○地下水モデルについて 狭域と広域で流動解析を行った結果、小流域の範囲境界で分水嶺とみなすことができそうである という話は、説得力が高い。(吉田)

来年度予定しているボーリング調査に対して、今年度・来年度の検討結果を調査項目や調査数等 に反映できるか。(吉田)

⇒関係者で協議したい(長谷川)

海水準変動を加味した流動解析も、すぐにとは言わないがぜひやってもらいたい。(吉田) ⇒地質モデルについても、次年度以降になるが、時間変遷を考慮していくつもりである。(幡谷)

要素的な調査手法の検討について、今回のボーリング調査における位置づけを明確にした方が良い。(吉田)

○全体を通して

地下水モデルにしても地質モデルにしても、調査初期段階のモデルとして、やりすぎになってい ないかどうかに注意した方がよい。(吉田) 研究の導入部分をしっかりと説明することが重要である。(吉田)

内田委員

日時:2019/11/21 13:30-16:30 場所:量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所内田研究室説 明者:丸井、樽沢

プロジェクト5か年の全体計画、全体目標の説明今年度の計画、途中経過、年度目標の説明地 質環境、工学技術、分野間連携、人材育成への協力を個別に説明

<議事内容>

・今回のプロジェクトではタイトルが「沿岸部処分システム評価確証技術開発」となっており、 前回の「沿岸部処分システム高度化開発」と異なっている。地層処分事業としての進展があった のか?あるいは処分プログラムの進展に合わせてタイトルが変わったのか?

⇒地層処分の事業としては、科学的特性マップ公開の後、説明会や全国対話集会などを開催して 国民理解に努めている状況であり、大きな変化をしたものではない。しかしながら、

NUMO が包括的技術報告書を公表し、この研究課題もこれを受けて SDM やセーフティーケース を意識するものとなっている (SDM やセーフティーケースのことは別途説明) よって、タイトル にも変化が見られたと考えている。

・ステークホルダーの合意について、文献調査から概要調査へ行くときに必要なものは何か?概 念モデル、SDM を作ることに加えて、性能評価・安全評価も必要と考える、これらの評価は JAEA が中心にならなければならない。モデリングだけではなく、トータルで考える必要があろう。

⇒仰るとおりである。分野間の連携は重要だし、前回のフェーズでは課題として残ったところで もあるので、今回のプロジェクトではこれを克服するために分野間連携 WG を立ち上げた。この WG には JAEA と NUMO にも協力をしていただいている。

・NUMO の意向をしっかりと見極めてコンタクトを密にするべきである。NUMO との共同体 制を構築しなければならない。

⇒拝承

・高レベルの廃棄物処理の開始時期を見極めなければならない。こちら側の人員の体制も重要で あるし、社会の動き、人口動態も考える必要があろう。さらにこれらを踏まえて文献調査の在り 方を考えなければならない。

⇒仰る通りである。人材育成も含めて我々の課題は多々ある。人材育成については原環センター が昨年度よりセミナーを模索し、今年度から本格的に指導している。当該プロジェクトとしても これに全面的に協力している。 ・文献調査時に複数の候補地が挙がれば、①地点の順位付けできるのか、②人員は確保できている か?候補地で作られるモデルの精度はキープできるか(比較できるものとなるのか?)そのための基 本データは全国で揃えられるのか?物探データは全国あるのか?

⇒地質や地形データは全国レベルで確保できているが、鉛直方向のデータや物理探査データは、 まだまだ全国均一のレベルとは言い難い。現在はメタファイルを作り、欠落部分の洗い出しや過 去の文献リストからのデータ整備状況を探っている状態である。

・幌延の調査はどこまで進んでいるのか、本当に今の知見だけで処分できるか?
 ⇒幌延では沿岸部における調査を実施し、3次元的な地質や地下水のモデルを構築している。その成果として、長期間安定した地下水の領域を3次元的に示すこともできた。同様の調査を実施できれば、各地(例えば候補地)でのモデリングも可能と考える。

・慎重派の方々も含め、だれもが公開されたデータで議論できること、すなわちエクスパートジ ャッジによらないモデルの重要性はある。

⇒拝承

・幌延と駿河湾が調査地であるが、この両地を選定した理由は何か?両方の地点で、安定領域は見つけられたのか?駿河湾の浅いところは流速が遅いが、深部には安定域があるのか?
 ⇒地下水流動の遅い幌延と地下水流動の極端に速い駿河湾の試験地を設定したのは、地下水流動の観点から見て速い方と遅い方のエンドメンバーを選んだつもりである。幌延においては、深部500m以深で長期的に安定していると判明したが、駿河湾でも R2 年度以降に調査掘削を行い、深部地下水の動態を調査する予定である。

・再冠水に係る技術の評価、地下水の科学環境を想定した材料の性能評価(短期的な変質挙動)
 人工バリアとしての性能評価、実験の時間相似則などは大丈夫か?時間とサイズが絡まった時の
 評価はできているか、反応速度について同じ軸で実験できるか?
 ⇒非常に重要な問題である。持ち帰って次回の全体会議(なければ運営会議や分野間連携会議)
 にて議論したい。

・地下水年代のマップを工学技術に渡せないか?また、沿岸海底下のデータがどれだけあるのか、そ れで工学設計できるのかを知りたい。

⇒幌延や駿河湾程度の調査が可能であれば、成果を工学技術に渡すことはできる。ただ、現時点 のデータだけで、3 次元的な(工学設計に必要なレベルで)全国の任意のポイントでの年代デー タをそろえることは難しい。沿岸海底下のデータベースを構築するには時間が必要である。 ・海水に近い地下水がある場所は分かっているのか?

⇒ボーリング等の調査ができれば把握することはできるが、現時点でも海底湧出地下水調査や解 析等で概観をつかむことはできる。もちろん海底湧出地下水調査の方が精度が確保できると考え る。

・ナチュラルアナログは水質の3次元分布把握に使えないか?しかしながら、調査をするための 同意の取り方は難しいよね、市町村と都道府県では温度差があり、厳しい。県が認めないと市は 動けない。科学的な調査ができる場所は少なくなりつつある。

⇒仰る通りである、N/A 調査は大変重要であると考えている。

・分野間のデータ受け渡しにおいて、オーバースペックデータは不要であると言われ、効率等を 求めることもあるが、一方、同じ分野の人から信頼性を得ることにもなるので、調査精度の判断 が難しい。

⇒拝承

・ 今は年度計画の実験開始時になる、間に合うか?

⇒努力を継続する。

・連携と人材育成は大切である、前回のプロジェクトとの差は出せるのか(見られるか)?前フェーズより進化しているところが見たい。

⇒分野間連携 WG を組織し、前フェーズよりも確実に活動している。また、RWMC の人材育成セミ ナーにも積極的に参加していることを紹介した。

・QST に処分の人がいない (内田と補助員のみ)QST は調整会議からも抜けるかもしれない。QST の内部計画から廃棄物研究がなくなった、NUMO との共研がなくなったら、資金がなくなり、人員か確保できない。コンプライアンスや機密保持で民間との共同研究も困難になってきている。特に倫理審査上、研究の継続が困難になる可能性が高い。

⇒拝承

・瑞浪が閉まることに衝撃を受けている。

⇒拝承

佐藤努 委員

日時:2019/11/810:00-12:00

場 所:北海道大学工学研究院説

明者:大和田

配布資料:

(1)沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化

(2)緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充(要素試験担当分)

(3)緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充(模型試験担当分)

<質疑内容>

資料(1)及び(2)に基づいて、工学技術分野での実施状況を佐藤委員へ説明した。

○これまでの経緯及び5ヵ年の工学技術分野の目標について

・沿岸部での地層処分の成立性を示すためには、地質及び工学分野での成果を性能評価分野につ なぐツールの整備が必要である。その面で JAEA の関わりが必要ではないか?

⇒前フェーズにおいて JAEA は地質環境調査評価技術分野、工学技術分野(長期の性能評価)、ならび に安全評価技術分野を担当していた。今回の原環センターにおける性能評価の検討 では、操業・定置 ~再冠水に至るまでの比較的短期の期間を対象とした性能評価を扱って おり、そのアウトプットは 昨年まで JAEA が担当していた長期の性能評価の初期条件とし て受け渡すことで連携ができると 考えている。本年度から JAEA は不在であるが、現在分 野間連携 WG を設置して、各分野をどの ようにつないでいくか議論している。この WG に は JAEA にも参加している。

・昨年度までの検討では、グラウトを JAEA が扱っていた。グラウトは坑道周辺の水理条件を左右する重要な要素であり、EDZ の性質を左右するので、その短期・長期的な挙動について扱う必要はないのか?

⇒ご指摘の通り現在グラウトを扱う課題はこの案件には含まれていないが、別の課題(ニアフィ ールドシステム評価確証技術開発など)で扱っている。水理解析の観点では、グラウト注入箇所を解 析ドメインに設定して水理的プロパティ(透水係数等)を与えることで解析・評価は可能である。ど こかの事業でグラウトの変遷挙動の成果が得られれば、解析ツールに反映させることができると考えてい る。

・資料(1)の p.10 は概念図としては理解するが、各実施内容がこの概念図のどの部分にあたるのか、簡単な説明用の図があると良い

⇒拝承。

○工学技術分野の実施内容

再冠水に至る期間を対象とした性能評価手法に係る基盤整備

・再冠水に至る期間を対象とした性能評価手法に係る基盤整備において、調査対象としてフィン
 ランド・スウェーデン(沿岸域)及びスイス(内陸)を選択したのは妥当である。

沿岸部に特有な地下水化学環境に於けるセメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充

・セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充に関して、沿岸部で起きることのうち、飽和 過程以降では、坑道内は体積拘束された状態になる。そのような状態での二次鉱物の生成挙動は分か っているのか?

⇒かなり以前に実施した緻密なセメント系材料への人工海水の注水(10MPa)では、たとえば硫酸塩の浸透にともなうエトリンガイトの生成がほとんど起こらず、表面の剥離もごく僅かであるなど、体積拘束下では非拘束条件とは挙動が異なる可能性があるが、そのようなデータを体系的に取得した例は無いと思う。

沿岸部に特有な地下水化学環境に於ける緩衝材の機能変化に係るデータの拡充

・試験方法は、イオン型の変化にともなう物性値の変化を評価するために手法としてはオーソド ックスな手法であり、妥当と考える。

・緩衝材の型について、例えば月布鉱山のように Na ベントナイトは海水環境で生成するものも あるので、海水だからと言って Mg 型になるとは限らない。

⇒これも、スラリーや粉末での試験と、締め固めたバルクでの試験では結果が異なる可能がある ので、目的によって使い分けている。

・バルクと粉末の試験の違いについて理解を進めることは重要である。

⇒特にバルクの場合、反応が進まないことが多々あるが、これがクロッギングによるものである ということは、近年 GEO-PET を用いた観察などで微細領域の空隙測定が可能になったことで、 徐々に確認されてきている。一方で、空隙が「何で」埋まっているのかまでは解明されていない。

・やはり、クニゲル V1 のベントナイト鉱床の生成過程(海底で生成)から考えると、簡単にイオ ン型が変わるという説明は納得しがたい。Na 型の安定性についても説明が要るのでは無いか? ⇒バルクでの試験結果等によって、データを拡充していく必要があると考えている。

・酢酸アンモニア法の交換性陽イオン定量は Ca,Mg が高く出るので、別の方法(CRIEPI は BTM 溶液を使用した SFSA 法での分析)と組み合わせた方が良い ⇒持ち帰り検討する。 緩衝材 – オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充 [要素試験]

・圧縮条件での化学反応が、拘束がない場合と異なる可能性がある。

⇒交換性陽イオン組成が海水と見かけ上平衡となるように前処理した試料と、未処理で作成した 試料に海水を通水する試験を実施予定であるため、ご指摘の違い等も結果としてとらえられる可能 性はある。

・沿岸海洋底で、自己修復力はどのような場合に必要なのか?

⇒坑道内の密度を担保するという意味では、様々な現象全体で性能が担保されるという説明の一 部と考えるべきである。(自己修復しなくても、他の鉱物で埋まる現象でもかまわない)また、別の 事業の内容ではあるが、ガス移行の観点からは、ガスが透過する時期によっては、自己修復性の有無 が重要なパラメータと考えている。

・クニボンドで Ca 型を見るのは OK か?(産地が違う)

⇒イオン交換、凝集の効果に着目するので、有効モンモリロナイト密度を揃えることで進めてい る。

・Ca 化クニゲル V1 でもやってみては?

⇒試験数、期間の制約があるので、約束はできないが、考慮してみる。

[模型試験]

・模型試験後の測定、分析はどのようにして実施するのか?

⇒容器から模型を抜いて医療用 CT で撮影する。密度の分布を測定する。

・容器から抜いて除荷すると、密度分布が変わってしまう可能性があるので、注意が必要。
 ⇒拝承。

・化学データ取得のためのサンプリングも実施するのか?

⇒予定していなかったが、CT 終了後に模型をサンプリングし実施することにする。

・(上記2.3の議論の中でも述べたが)クニゲル V1 には XRD で検出できない Calcite、
 Doromite が存在するため、層間陽イオンの定量方法が大切である。
 ⇒ 拝承。

佐藤治夫 委員

日時:2019/11/22 10:00-14:20

場所:岡山大学工学部

説明者:電力中央研究所西本、渡邊、新橋原

環センター 大和田、林

配布資料:

(1)沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化

(2)緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充

<質疑内容>

○これまでの経緯及び5ヵ年の工学技術分野の目標について

・(これまでの工学技術分野の検討経緯について、第1回委員会で佐藤委員からコメントのあった、ここ 3年間の沿岸事業以外での工学技術の研究の進展の情報を加える点について、現状は学会の 大会での発表等はないことを報告した。)佐藤委員より、引き続き文献調査など継続的に実施し て研究に活かすようにコメントをいただいた。

⇒拝承

・分野間の連携では、地質環境分野から工学分野、安全評価分野へ情報を引き継いで、処分場が成 立しない場合は、地質環境分野へフィードバックも必要である。これまでの佐藤委員の地質環境調査の 研究に関する現場での経験では、工学技術や安全評価分野で欲しいとされたデータやデータの精度 がサイト調査で取得できないことがあったため、まずは地質環境分野から、工学技術、安全評価への データの受け渡しをしながら、改善点のフィードバックをしたり、地質環境調査で対応できることを すりあわせるのが良い。

⇒拝承。

○工学技術分野の実施内容

再冠水に至る期間を対象とした性能評価手法に係る基盤整備

・性能評価の判断材料などに使用する試験データの取得には、例えば緩衝材の流出挙動を評価する には、流出が止まる条件を明らかにするなど、現象把握のデータ(流出が止まる傾向であるなど)を 取得するだけでは不十分であり、処分場の成立性を判断できるデータの蓄積をする必要がある。 ⇒拝承。

○沿岸部に特有な地下水化学環境に於けるセメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充 ・セメント系材料に関する検討について課題のやり残しがないように、この事業で実施するかはと もかく全体枠を示しながら、本事業で実施する事項や場合によっては別の事業で実施しているか、
検討済み等、整理しながら進めて欲しい。 ⇒拝承。

・前フェーズで実施したコンクリート中の鉄筋の腐食の発生時期の予測において、コンクリートの空隙水中と固定される塩化物イオンの全ての濃度で腐食するかの判定をする方法は経験的で良いが、元来、空隙水中に塩化物イオンが存在し、それが鉄筋の表面に到達すれば、現象論的には腐食するはずであることから、ここで採用しているコンクリートの空隙水中の塩化物イオン濃度([Cl-]/[OH-])で判定する方法は原理的には望ましいと思われる。
 ⇒拝承。

沿岸部に特有な地下水化学環境に於ける緩衝材の機能変化に係るデータの拡充

・塩水のイオン強度が 0.3 程度以上になると、含水させてもベントナイトが膨潤しにくいという話 を JAEA 東海時代に相談されたことがあり、この場合、外から入ってくる水と、内部(層間)の 水との浸透圧のバランスを考える必要がある。濃い塩水で含水すると、層間外に水を排水しようとする 作用の方が卓越する場合があり、層間が開かなくなってしまい、水が浸透しない可能性がある。技術的に高 イオン強度の水を含水させたいのであれば、先ずは純水など、イオン強度の低い水で含水させ、その後、高 イオン強度の水で含水させて置き換えれば可能である。これは、Na モンモリロナイトの層間水の活量で 考えることができ、層間水を排水するのに必要なエネルギーと吸水(水和)のエネルギーとの差で決ま るので、そのような基礎データ(層間水の活量に関わるデータ)があれば解析できる(熱力学で処 理可能)

⇒拝承。

・ベントナイトにカリウムの影響が大きいことについて、H3レポート時にはイライト化の蓋然性についての議論があったが、NA的には起こりにくいということがあり、取り込んでいなかった。現実的に濃い濃度の水がずっと供給されるのかも考えておく必要がある。文献をもう一度調査してみることも必要(イライト化は起こりにくい領域(特に反応の活性化エネルギーが小さく、変質速度が極めて遅い温度領域になっている)になっていないか?など、時間軸に対して定量的に理解しておく必要がある)

⇒拝承。

・ベントナイトの Ca 型化は起こりやすいが(条件によるが)3層水和超の膨潤はしないので、水が多いとき(有効モンモリロナイト密度で約 1.4Mg/m³を下回るとき)は結果が Na 型と変わってくる可能性が高いので、条件を広く振る必要がある。

⇒拝承。

・ベントナイトの Mg 型化はブルーサイト(移動はイオン交換で起こり、その後、層間中で Mg(OH)2を形成する可能性あり)の生成等も考慮する必要がある。

⇒拝承。

 ・ベントナイトのイオン交換選択係数は平衡状態となった状態で取得されたものだが、実際には 液相の濃度(イオン強度)の影響があるので、その状態で成立するかを考慮する必要がある。選択係 数は過去にも測定されており、JAEA 柴田さんらがよく知っているので、そのときの経緯も把握して おいた方が良い(技術報告書で入手可能)

⇒拝承。

・p.49の試験で供給した溶液の濃度は?

⇒イオン強度 0.5 で実験した結果である。

・強制的に濃度の高い水を供給すると層間に入らないで外部水中にイオンとして存在している可能性も否定できないので、CEC とのバランスがとれているかの確認が必要。

・イオン強度0.5位では膨潤性が低いので要注意。

⇒拝承。

緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充

[要素試験]

・自己修復に関してはどのような損傷を想定するかが重要である。資料説明ではガス移行についても話されていたが、ガスの抜け方は境界条件による。せん断後の自己修復については、膨潤変形に関する既往の知見を用いて説明することもできるかもしれないので、レビューしながら進めると良い。
 ⇒拝承。

・海水平衡ベントナイトはどのように作製し、試験に用いるのか。
 ⇒粉末ベントナイトを人工海水に分散させることでイオン交換処理を行う。アルコール洗浄後、
 乾燥・粉砕し、それを締め固めて供試体とする。

・海水平衡ベントナイトの層間イオン組成はどのようになるのか。

⇒予備試験の結果を図示した通り、クニゲル V1 であればNa の割合は減り、Mg の割合が高まる。 これは使用した人工海水の Mg イオン濃度が比較的高いことと整合する。

・締め固めた状態で人工海水を通水した時に海水平衡ベントナイトと同じ層間イオン組成になる かどうかは意識して進めると良い。

⇒拝承。

[模型試験]

・今回の遠心模型試験は、どの様な現象を加速対象としているか。

⇒遠心場の相似則は、縮尺寸法(1/n)と遠心加速度(nG)を同一にすることで、幾何学的 相似の みならず、様々な現象における力学およびエネルギー的相似を満たすことが出来る。すなわち、小寸法の模型 において間隙水の移動(水の抜け方)を加速することで、水の移 動によって生じる様々な物理現象が 加速する。これにより見かけ上、数十年といった長期に相当する挙動が得られる。対象は、再冠水におけ る緩衝材とオーバーパックの力学的相 互作用であり、具体的なデータとして示すものは約 50 年相当のオ ーバーパックの鉛直方向 の移動量などであるが、浸潤にともなう緩衝材の変形の影響も評価対象 である。

・幌延深地層研究所の実物大試験である人工バリア性能確認試験のデータについて、模型試験結果との比較検討などに何らかの形でうまく活用することを検討してほしい。
 ⇒拝承。人工バリア性能確認試験の試験条件等を精査して、今フェーズ中に活用方法を検討する。

・今年度はオーバーパックの加熱を行わないとのことだが、発熱があると飽和に至る時間も変わってくるはずである。次年度以降、その点も評価対象としてもらいたい。
 ⇒拝承。

以上

竹内委員

日時:2019/11/5日13:30-15:30 場所:日本大学文理学部9号館(東京下高井戸) 説明者:長谷川(電中研)、町田(産総研・記録)

【長谷川より資料説明】(資料参照)

・本年度の調査地域は駿河湾

- ・繰り返しアプローチ(5ページ)を念頭に、まず地質・地下水モデルを作成する。
- ・地質モデルについては、2つくらい作成する(不確実性の低減が目標)。後進の育成も考慮し、 なるべく1次データからつくりたいと考えている。
- ・地下水モデルについては、今年は地形のみを考慮した地下水流動解析を実施して調査地域を絞 り込み、その後、絞り込んだ地域について文献を整理する。

・地質が地下水流動に及ぼす影響を考察するために、また、繰り返しアプローチにおけるボーリ ング掘削地点を考えるために、感度解析を実施する。

・調査研究による繰り返しアプローチを念頭においてモデルをつくるという考え方はわかるが、
 駿河湾周辺は、変形が激しいので地質モデルをつくるのが難しい。繰り返しアプローチで対応するのか。そもそも、このアプローチには合意しているか。(竹内)

・このアプローチで良いと思う。実際のところ、本プロジェクトでは、繰り返しアプローチといっても、せいぜい1周かあるいは2周目の途中くらいまでになると思われる。しかし、たとえ1 周であっても、地質や地下水でのモデルをつくることにより、人工バリアや安全評価に渡すべき 情報が明確になるので、他の分野からもリクエストが出やすくなる。(長谷川)

・地質モデルの作成に関して、異なる専門家が別々に実施できると良いと思う。(竹内)

・産総研がすでにモデルを作成しているので、それとの違いはみられると思う。(長谷川)

・繰り返しアプローチを1周回したときに、次のボーリングを掘削する位置を決めたりすること ができれば良いと思う。もしくは本研究でも本番でも、掘削地点は Given になる可能性があるの で、与えられた地点の中でどこで掘るのが一番よいのか、という議論までもっていければ良いと 思う。(竹内)

【丸井より資料説明】

・物理探査を陸域から海域にかけて広範囲で効率的に行うことは、概要調査にとって重要なポイントである。先ずは、幌延と駿河湾を対象に実験を行いたい。

・実際の物理探査では、弾性波探査と電磁探査などの組み合わせが考えられるが、効率的に短期 間で行う必要がある。

・ J O G M E C が 既に日本列島の沿岸域でデータを取得しているので、これを活用できるか検討 したい。この時、調査地域や精度の検討が必要である。 ・最近の電磁探査は進歩が著しいので、ベイケーブルを使った効率的な最新技術を取り入れるこ とができないか検討中である。

・NUMO が概要調査を実施しようと思った時に、例えば物理探査の測線などを自由に選択すること はできそうか。(竹内)

・決めることはできるが、調査の際には地元漁協や市町村、資エ庁などの承認を得る必要が出て くる。(丸井)

【町田より資料説明】(資料説明)

・プッシュプルテストでの流速推定法は、精度は低いものの、実際に概要調査で用いられるであ ろう、単孔ボーリングを用いたスラグテストとの道具立てが同じなので経済的である。

・今年度は DD-2 孔と DD-4 孔でプッシュプルテストを実施する計画であった。2012 年と 2017 年の DD-2 孔での試験内容および結果の説明。

・DD-4 での試験を試みたが、ツールスがスクリーン上部から下に入っていかない。井戸スクリ ーンが破損している可能性があり、現状では大掛かりな洗浄が必要になる。よって、今年度のDD-3 孔でのプッシュプルテストは中止し、DD-2 孔でのテストに切り替える。

・海底湧出地下水および海底地形の調査方法について説明。

・DD-4 孔の現状はどうなっているか。(竹内)

・本資料が最新の情報である。10/31 にツールスがスクリーン内を降下できず、その後、ボアホ ールテレビで内部を確認したところである。ツールスにキズがついているところをみると、横ス リットを設けているスクリーン(SUS)の一部分が壊れて、ケーシングの内側に飛び出している 可能性がある。(町田)

・スクリーンの状態はカメラで見られないのか。(竹内)

・泥材のような物質がケーシング内部をスクリーン上部まで埋めている。この物質は綿のようなフワフワとしたものであるので、ボアホールカメラはこの物質内を下がっていくことができるが、カメラに映るのは、この物質だけであり、スクリーンの様子は確認できない。(町田)

・なぜこのような状況になったのか。(竹内)

・掘削業者から話を聞く予定になっている。(町田)

・プッシュプルテストではチェイサーを使用した方が良いのか。(竹内)

・トレーサーが高価な場合は、トレーサーを地層の奥まで押し込むためにチェイサーが必要とな るが、今回は安定同位体をトレーサーにしているので実際には必要ない。(町田)

・トレーサーが帯水層内を同心円状に広がる場合は、チェイサーは意味があると思う。しかし実際には、トレーサーは理論通り均質には帯水層内を広がっていかないだろう。その場合、チェイ サーを入れることで BTC が解析しにくくなるかもしれない。(竹内)

・DD-2 孔における 2017 年のテストに関して、プッシュ後、1ヵ月待機後に、プルした場合、な

ぜ BTC のピークが下がるのか。(竹内)

・潮汐かもしれないが良くわからない。この帯水層の地下水年代は氷期降水なので、地下水はほ とんど停滞していると思われるが、ピークは下がっている。これは地下水が動いていることを示 唆しており、矛盾がある。(町田)

・このテストで投入したトレーサーは、理論上帯水層内を(同心円上に)30cm 程度進むことにな る。この程度の量だと拡散の影響によって薄まる可能性がある。もう少し沢山トレーサーを入れ た方が良いだろう。なお、蛍光染料と水素・酸素安定同位体では拡散係数で違うので、BTC に差が 出てくる。ウラニンについては pH 調整をした上で測定したらどうか。これらのことを考慮する と、より解析の精度が上がるかもしれない。(長谷川)

・承知した。(町田)

・何かキーとなる現象を現地ではなく、室内実験で抑えられないか。今年、待機時間を変えた試験を実施するのは良いが、それだけではプロセスの解明に関して決め手にならないかもしれない。

(竹内)

・注入量依存性はどうか(竹内)

・今までトレーサー水を 1000L 入れているが、3000L 入れるような試験も考えている。前者は注 水井から約 30cm の距離に、後者は 50cm 程度までトレーサーのフロントが移動する。(町田)

・注水速度依存性はあるか。(竹内)

・2012 年の試験で注揚水速度を 5L/min と 10L/min で確認したが同じであった。

・フローメーターで水みちの不均一を調べているか。(竹内)

・実施していないが、興味深い結果が得られるかもしれない。(町田)

(竹内)本プロジェクトの目的は、『地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータの取得手法の 高度化』となっているが、現状を考えると目的を達成できるか不安である。見極めが大事な時期 である。まず、次年度も原位置でプッシュプルテストを実施するべきかどうかを考えるべきであ る。もし、現象が理解できないのであれば室内試験も検討されたい。そして、もし実験条件が悪 いということになれば、DD-2 孔にこだわらずに別の場所で試験を実施した方が良いかもしれな い。スクリーンの長さが 10m というのも少し長い気がする。また、何度も同じ井戸で実験をする とスクリーン外の地盤孔壁が崩れてしまうこともありうる。個々の要素技術については、5 年計 画を考えるのは大変だが、実用化に向けた計画も検討されたい。(竹内)

・ご指摘の課題の一部を解決するために DD-4 孔のプッシュプルテストを計画したのだが、今年 はテストを実施できなかった。今後、室内実験、野外実験、実用化に向けた今後の計画について 検討する。(町田)

・海底湧出地下水の話になるが、海底湧出地下水は地下水の流速が速い領域から流出すると考えて良いのか。(竹内)

・そのように思われる。駿河湾の場合、溶岩層のようにみえる海底地形の湧出している。(町田)
 ・駿河湾右岸では扇状地堆積物が卓越していたことを考えると、溶岩層の分布が海底湧出地下水の存在にも関係しているのかもしれない。そういった意味でも、内陸および海底の地質構造を知

ることは大切である。(竹内)

最後に竹内委員から、この専門分野における技術の継承が益々重要であると考えている。さらに、現 場調査については、資源がある時に可能な限りやっておくことが必要ではないか、というご意 見があった。

以上

平成 31 年度 沿岸部処分システム評価確証技術開発第 3回評価委員会 議事録

日時: 令和2年1月31日(金)13:00~17:30

場所:〒108-0075 東京都港区港南2丁目15-4

品川インターシティ(第1、第2会議室)

委員名簿

委員長

吉田 英一 名古屋大学博物館 資料基盤研究系

委員(50音順)

内田 滋夫 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 佐藤 努 北海道大学 大学院工学研究院 環境循環システム部門佐 藤 治夫 岡山大学 工学部 機械システム系学科 竹内 真司 日本大学 文理学部 地球科学科

資料

資料1全体
資料2地質環境(地質)
資料3地質環境(地下水)
資料4工学技術
資料5その他(組織図、分野間連携、人材育成など)

議事内容

1. 主催者挨拶

省略

2. 委員長挨拶

省略

3. 地質環境その1に対する議論

・広域水理モデルは地形だけを考慮して作られ、その後対象地域の詳細モデル構築と地下水流動 解析につながっている。先ず、地形だけでいいのか?また、時間軸の考慮などはしていないのか?

⇒拝承、今後の課題として検討する。

・繰り返しアプローチにトライしている。その目的と評価手法が知りたい。また、一巡目よりも 2 巡目の方が不確実さを低減できるのか?

⇒現在試行中である。結果が出たら報告する。

・地質モデルを作るときの不確実さは評価できているのか?地質モデルがしっかりできていない と地下水流動解析にも不確実さが残ったままである。

⇒地質解釈の違いを含めて解析を行っているので、その結果を見る必要がある。

・繰り返しアプローチはどこまでやるのか、何回解析すれば信頼できる結果が出てくるのか?

⇒現時点では確実なことが言えない、ご意見を踏まえて検討する。

 ・不整合や不確実性を低減するためのルールが必要である。数値的な評価をきちんとしなければ 納得できない場合もある。

⇒拝承

・初期の広域モデルは、ただ大きくすればいいというものではない。NUMOの調査を考慮すれば 小さい方がいいに決まっている。最適な大きさとか科学的に必要な大きさなどはどう考えるか? ⇒先ほどと同様に検討の余地がある。今後のルール作りに反映したい。

・この問題は重要であるので、十分に検討してほしい。

4. 地質環境その2に対する議論

・今、機関ごとのプレゼンをしているが、産総研の実施したデータベースや全国でのモデリングの話は一番先に来るべきでないか?

⇒拝承

・海底湧出地下水を検知する最新技術(例えば音響カメラ)は NUMO が持たなくてはならないのか?

⇒NUMO 自身が持つ必要はない、この技術があることを知っているだけで十分である。

・この技術に限らず、NUMO には高いレベルですべての技術を知っておいてほしいので、心得て いてほしい。

⇒拝承

・海底湧出地下水調査の持つ意味(処分事業における効果)とプッシュプル試験の意義を知りたい。

⇒海底湧出地下水は地下水流動のエビデンスになることや事業終了後のモニタリングに使えること、プッシュプルテストは単孔試験であることの再確認を繰り返し説明した。

・プッシュプルテストについての技術的な質問が続く

⇒各々に回答

・海底湧出地下水調査も含めて、今回の成果を学会などで発表すべきである。

⇒拝承

5. 工学技術に対する議論

・今回のプロジェクトにおける工学技術①~④で、地層処分研究における工学技術のどれくらい をカバーできているのか?地質環境分野からデータを受け取る技術はカバーしたのか?

⇒連携は強く意識して計画を立案したが、不十分なところは改善して進める。

・既に解決されている部分と高度化しなければならない部分がわかりづらい(見えない)ので、
 工学技術の側の人も地質環境分野が取るデータを精査すべきでないか?

⇒ 拝承。さらに連携を強めて我が国の状況に合わせた処分システムが作れるように性能評価手法 を整備したい。

・日本列島の全体像を把握しての工学設計は大事であるし、処分事業のステージ進行に合わせた 性能評価も必要となるので、十分に考慮してほしい。

⇒拝承

・分野連携が効果的であったという証拠となるデータが見えない、今できていることと課題であることの区別(星取表)ができていない、また NUMOの包括的技術報告書がどこに反映されているのか、しっかりと分かるようにしてほしい。

⇒拝承

・塩水の処分場への影響は再冠水過程や閉鎖後長期の各タイミングで異なるので、これらを考慮 して性能評価の評価項目を整理してほしい。

⇒拝承。

・ベントナイト等の材料と塩水に関する技術的な質問があった。

⇒各々回答した。

・これらを通して、沿岸部特有の工学設計技術とは何かを明確にするよう求められた。

⇒拝承

・分野連携はもちろん NUMO との連携にも力を入れてほしい。

⇒拝承

・実験の方法(化学実験の手法やセンサーの置き方など)についての確認やコメントが寄せられ た。

⇒詳細な説明とコメントの拝承。

6. 分野間連携、人材育成についての説明と議論

・分野間連携の課題は何か?

⇒分野ごとのステージと文化(事業で受け持つ出番や事業に対する認識)の違い。また、共用で きるフィールドがないことから、実質的な問題解決の場がないこと。

・原資は十分なのか?人材は確保されているのか?

⇒十分とは言い難いが、資エ庁は配慮してくれていて、AI ソフトの導入も追加で行うことができた。また、原研センターの人材育成セミナーへの協力もできているので、今後さらに充実させたい。

7. その他

- ・評価票の書き方、報告書への掲載方法の説明
- ・最終審査書類、議事録等の確認方法の説明
- ・長時間にわたる審議の御礼

以上

平成31年度 沿岸部処分システム評価確証技術開発 委員会 総括

委員長 吉田英一

平成31年度沿岸部処分システム評価確証技術開発委員会は、昨年度までの沿岸部処分システム高度 化開発委員会を受け、本年度新たに開始されたものである。今年度は、委員全員が集まる委員会としては2回 開催され、その間、個別のテーマに関する技術検討会も進められてきた。本年度の委員会では、第1回に本委 員会としての趣旨説明が行われ、参画研究機関からの本年度における研究内容の紹介が行われた。また第2回 は各委員のもとで、途中経過の個別説明が実施され、第3回の委員会では、本年度における研究開発状況の報 告と質疑応答が行われ、活発な議論が交わされた。

平成31年度の委員会を終えての総括は以下の通り。

-海陸連続3次元地質環境モデルの構築手法と高度化(地質・地下水)

海陸連続3次元地質環境モデルの構築と高度化においては、事例研究地域として静岡県富士川河口付 近の富士山を含む広域領域での既存文献情報などを基本とした解析の紹介があり、将来の沿岸底領域 における海陸連続3次元地質環境モデル構築と関連技術の高度化に向けた検討がなされている。一方 で、未だ、これらの地域の地質情報と地下水流動解析とのリンクあるいは整合性については、不十分な部分 も散見され、次年度に向けて検討が必要と思われた。また、次年度は、当該地域でのボーリング掘削も予 定されており、将来想定される沿岸域でのサイト特性調査のあり方を念頭に、どのような課題が現状とし てあるのかも含め、ボーリング掘削および取得データ等との関連性をさらに明確にすることが必要と思わ れる。

-海陸連続3次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得手法の高度化

本テーマには、「陸域から海域にかけての地質環境特性の把握技術の高度化」「地下水の流出場および海底地 形把握技術の高度化」そして「物理探査技術の高度化」の3つが含まれるが、それぞれにおいて情報の整理状況、技術 高度化に向けた検討が提示され、個別技術としての高度化に向けた進展が判断される一方で、沿岸地域における サイト特性調査としてのどの段階での必要技術なのか、またどの程度の高度化を現状として認識し、準備をして おくべきかなどの観点が若干不明瞭であり、次年度での検討も含め、これらの観点での整理を期待する。また これらの整理については、本研究委員会の参画機関のみならず実施主体などとの議論も積極的に実施し、双方で の本研究の重要性、意義をさらに高めることが望まれる。

-沿岸底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化

本検討では、工学的側面から処分に用いられるバリア材の長期耐久性や変質などの検討が詳細に行わ れている。しかしながら、基本的な現象や用いられる素材に関しての網羅的検討は行われていると判 断する一方で、果たして、これらの現象類が、沿岸低下での優先的検討事項であるのかどうかの検討 が若干不明瞭であり、その必要性や重要性が未だ見えにくい。また、これらの現象は、沿岸低下地下処分 場での、例えば post-closure からのどの時系列段階で生じるものと考えているのかなど、時空間での 重要性の検討も次年度に向け必要に思われる。さらには、地質環境や地下水流動など、先に示した検討事 項との連携なども必要であり、これらの検討/連携も次年度に期待したい。

-情報収集及び委員会の設置・運営

本委員会では、分野間の連携および人材育成も含め、意見交換などの情報交換をこれまでに以上に密 に行ってきており評価できる点である。しかし、未だ必ずしもそれらの実行と目標とする技術検討で の連携やサイト特性調査としての過不足の検討など、実施主体との連携も含め未だ不十分さは否めな い。本研究は、日本における唯一のプロジェクトであり、今後の展開においてよりこれらの連携を効率的に 実施し、沿岸低下処分における技術の雛形を目指していただきたい。

評価コメント票

 事業名
 平成31年度沿岸部処分システム評価確証技術開発

 委員名

 評価コメント票のご提出。

 提出期限:令和2年2月10日(月)必着

 事務局

 三井共同建設コンサルタント株式会社

 岩崎貴志

 〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目11番1号

 ゲートシティ大崎ウェストタワー15階

 電 話 03-6417-3264

 E - m a i l iwasaki-takashi@mccnet.co.jp

コメントしていただく際の留意事項

- 1. 「評価項目・評価基準」の各項目について、評価委員会での説明及び配布資料に基づき、 評価コメントの作成及び評価をお願いいたします。
- 2. コメントの記入に際しまして、単に「妥当である。評価できる。」ではなく、妥当である理由、評価できる理由等について、具体的な記述をお願い致します。
- 3. 評価につきましては、<u>各項目ごとに4段階(A(想定以上の成果を挙げた)、B(期</u> りの成果であった)、C(努力すべき課題が残った)、D(事業として認められない)

<u><a, b, c, dも同様>)で評価して下さい。</u>

<u>なお、4段階はそれぞれ、(A(a)=3点、B(b)=2点、C(c)=1点、D(d)</u> <u>=0点に該当します。</u>

- ①評価シートの記入に際しては、評価シートの《判定基準》に示された基準を参照し、該 当と思われる段階に〇を付けて下さい。
- ②<u>大項目(A, B, C, D)及び小項目(a, b, c, d)は、それぞれ別に評点を</u>付 <u>けて下さい。</u>
- ③総合評価は、各項目の評点とは別に、プロジェクト全体に総合点を付けて下さい。
- 4. 研究課題ごとの評価で、評価不能の場合は表の空欄に斜線(/)を入れて下さい。

事業に対する評価票及び評点シート

1. 事業の目的・位置づけの妥当性

【項目・基準】 (この項目に関しては記述回答のみです)

- (1) 国プロジェクトとして適当であるか、国の関与が必要とされる事業か。
 - ・国民や社会のニーズに合っているか。
 - ・NUMO の包括的技術報告書との整合性は満たされているか。
- (2) 事業目的、位置づけは明確か。
 - ・事業の社会的・経済的意義(上位の施策との関連付け、実用性等)。
 - ・事業の科学的・技術的意義(新規性・先進性・独創性・革新性・先導性等)。

【評価委員コメント欄】

【肯定的意見】

【問題点・改善すべき点】

2. 各課題や事業者が行う研究開発等の目標設定の妥当性

【評価項目・評価基準】

- (1) 研究開発等の目標設定は適切かつ妥当か、それぞれの課題について評価してください
 - ・目的達成のために具体的かつ明確な研究開発等の目標及び目標水準を設定しているか
 - ・目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか
- *必要に応じて AIST, CRIEPI, RWMC などの略称をお使いください。

【評価委員コメント欄】

【肯定的意見】

【問題点・改善すべき点】

【評点】

2.

研究開発等の目標設定の妥当性

総合 A B C D

(1) 研究開発等の目標設定は適切かつ妥当か。

1.	地質環境調査技術	
2.	工学技術	
З.	分野間連携	

《判定基準》

・具体的かつ明確に目標が設定されており、大きな成果が期待できる。	→a
・具体的かつ明確に目標が設定されており、成果を挙げるには一層の努力を要する。	\rightarrow b
・具体的かつ明確に目標が設定されており、成果を達成するには課題が残る。	\rightarrow c
・具体的かつ明確な目的が設定されておらず、指標設定もない。	\rightarrow d

3. 事業化への貢献、成果発表についての妥当性

【評価項目・評価基準】

- (1) 事業化や橋渡しへの貢献については妥当か
 - ・事業化や橋渡しの見通し(事業化に向けてのシナリオ、事業化に関する問題点及び解決方 策の明確化等)は立っているか、これに貢献しているか

【評価委員コメント欄】

【肯定的意見】

【問題点・改善すべき点】

3. 事業化、橋渡しについての妥当性

総合 A B C D

(1) 事業化や橋渡しへの貢献については妥当か。

1.	地質環境調査技術	
2.	工学技術	
З.	分野間連携	

《判定基準》

・事業化までの極めて明確な見通しがある。	→a
・実用化に成功した。需要があれば事業化できる。	→b
・実用化の見通しがある。	\rightarrow c
・実用化にも問題が残されている。	\rightarrow d

4. 研究開発マネジメント・体制等の妥当性

【評価項目・評価基準】

- (1) 研究開発計画は適切かつ妥当か
 - ・事業の目標を達成するための計画は適切であったか
 - ・研究スケジュール等は妥当であったか
 - ・課題ごとの連携は妥当であったか
- (2) 研究開発実施者の事業体制・運営は適切かつ妥当か
 - ・適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか
 - ・実施者間の連携が取れ、環境が整備されているか
- (3) 変化への対応は妥当か
 - ・社会経済情勢等周辺の状況変化に柔軟に対応しているか
 - ・代替手段との比較を適切に行ったか
- (4) 研究の基盤整備は妥当か
 - ・研究に関する人材の育成・確保の状況はどのようになっているか
 - ・研究支援体制や知的基盤の整備等はどのようになっているか

【評価委員コメント欄】

【肯定的意見】

【問題点・改善すべき点】

- 4. 研究開発マネジメント・体制等の妥当性(全体を評価してください) 《判定基準》
 - (1) 研究開発計画は適切かつ妥当か。

«	判定基準》		а
	・研究開発は、	極めて適切である。	
	・研究開発は、	適切である。	
	・研究開発は、	概ね適切である。	
	・研究開発は、	不適切である。	

(2) 研究開発の体制は適切かつ妥当か。

《判定基準》	а	b	с	d
・事業体制・運営は極めて適切である。			→a	
・事業体制・運営は適切である。			→b	
・事業体制・運営は概ね適切である。			→c	
・事業体制・運営は不適切である。			\rightarrow d	

b c d

 \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d

(3) 変化への対応は妥当か。

《判定基準》	abco	ł
・変化を的確に把握し、計画を適切に見直している。	→a	
・変化を把握し、計画を見直している。	\rightarrow b	
・変化を概ね把握し、計画を見直している。	\rightarrow c	
・変化を把握せず、計画を見直しを行っていない。	\rightarrow d	

(4) 研究の基盤整備は妥当か。

《判定基準》			с	d
・人材の育成・知的基盤・連携等は極めて適正である。			→a	
・人材の育成・知的基盤・連携等は適正である。			→b	
・人材の育成・知的基盤・連携等は概ね適正である。			\rightarrow c	
・人材の育成・知的基盤・連携等は不適切である。			\rightarrow d	

6. 総合評価(平成31年度)

【評価項目・評価基準】

・本事業は研究として有用であり、地層処分技術の開発に貢献しているか

【評価委員コメント欄】

【肯定的意見】

【問題点・改善すべき点】

【評点】

- 総合評価

A B C D

《判定基準》

・事業は優れており、より積極的に推進すべきである。	→A
・事業は良好であり、継続すべきである。	→B
・事業は継続してよいが、大幅に見直す必要がある。	→C
・事業を中止することが望ましい。	\rightarrow D

以上です、ありがとうございました。

平成 31 年度 沿岸部処分システム評価確証技術開発 評価結果

	委員A	委員B	委員C	委員D	委員E
1. 事業の目的・位置づけ の妥当性					
2.研究開発等の目標設定 の妥当性	С	A	В	В	В
(1)研究開発等の目標設 定は適切かつ妥当か。					
1. 地質環境調査技術	b	а	b	а	а
2. 工学技術	b	b	b	b	b
3. 分野間連携	b	b	b	b	b
3.事業化、橋渡しについ ての妥当性	С	В	С	С	В
(1) 事業化や橋渡しへの 貢献については妥当か。					
1. 地質環境調査技術	С	b	С	С	а
2. 工学技術	С	b	С	С	b
3. 分野間連携	С		С	С	b
4.研究開発マネジメン ト・体制等の妥当性					
(1)研究開発計画は適切 かつ妥当か。	С	а	b	b	b
(2)研究開発の体制は適 切かつ妥当か。	b	а	b	b	b
(3)変化への対応は妥当 か。	b	b	b	С	
(4)研究の基盤整備は妥 当か。	С	b	b	b	b
5.総合評価	В	A	В	В	A

大項目	【肯定的意見】	【問題点・改善すべき点】
	・日本の沿岸域における地下環境情報、データの集積は、日本の地層処 分事業の推進においても不可欠であり、早急に進めるべき事業/ブロジ ェクトであると認識している。その観点でも、本事業の目的や位置づけは 妥当(国や社会のニーズに合致)であり、それぞれの研究機関等におい て、それぞれの立場やスキルの観点で、効率的な連携フレームを構築 し、かつその連携を保ちつつ、本事業が進められることを期待する。	・上記、理解の上で、改善すべきは、NUMOとの連携不足と、地層処分事業への 反映の具体的観点の欠落である。 ・沿岸地域での、サイト選定やサイト特性調査、そのあとに続く工学的安全評価 へのデータの受け渡しの観点からの、高度化すべき技術課題や整備すべきデー タの優先順位の洗い出しなどがあった上での本事業の展開だと考える。その観 点が、実施されてはいるのかもしれないが、プレゼンにおいては未だ不明瞭との 認識が拭えない。 ・本年度は、初年度であることも考慮はするものの、次年度以降の実施において は上記観点の検討を要望する。
	・本件は高レベル放射性廃棄物の地層処分に関するプロジェクトであ り、民間主導では実施が困難な案件であることから、国の関与が必要な 事業である。すでに発生している放射性廃棄物は地上に長期間保管し ておくことは、近年多発している放射性廃棄物は地上に長期間保管し ておくことは、近年多発している想定を超えるような被害をもたらす自然 災害や将来的な情勢不安などのリスクを考慮すれば、地下処分がより良 い解決方法であり、国民や社会のニーズにマッチしていると判断される。 また、本件は、NUMOの包括的技術報告書の課題である沿岸海底下処分 に主腹を当てたプロジェクトとなっており、適切なテーマ設定である。 ・上述したように沿岸海底下処分をターゲットとしており、事業の目的、 位置づけは明確となっている。これまで陸上部での地層処分を念頭に調 査、モデル化、解析などが実施されてきたが、本事業では沿岸海底下に 焦点をあてたものであり、従来の施策を踏まえたものとなっている。沿岸 海底下における処分のサイト調査手法は基本的には陸上部と大きくは 変わらないと想定されるものの、今回提示された繰り返しアプローチを実 施する中で沿岸海底下に特有の技術開発の必要性なども明らかとなっ てきており、本事業を実施する科学技術的な意義は大きい。	・3つの組織が実施するプロジェクトであり、かつ地質環境(地質、地下水)と工学 技術、安全評価の分野を対象としていることから、連携とピアレビューが重要であ る。適切に実施していただきたい
1. 事業の目 的・位置づけの 妥当性	・2015年5月の「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」の基本 方針の改定の中でも示されているように、国が前面に立って地域住民と コミュニケーションを取ることが明示され、国の役割も重要となった。 特に沿岸部処分については、2017年7月に国が「科学的特性マップ」を 公表したことにより、国民的関心はもとより、沿岸部の住民にとっては現実 的なこととして関心が高まっており、社会的意義もインパクトも大きい。この ことから、国の関与は重要であり、ニーズに合致していると判断する。 ・この事業は、地層処分技術の中でも、沿岸海底下で処分する場合に特 化して、必要な地質環境の調査・評価技術、工学技術、安全評価技術に ついて、これまでの技術や情報を整理し、従来技術の適用性や適用限 界、データの充実度などを含めて、新たな技術を開発し、総合技術として 構築することを目指しているが、陸域の処分に対しても個別の要素技術 を始め、高度化した技術として適用可能である点で期待できる。	・分野間連携について、現状では、地質環境調査・評価技術、工学技術、安全評価技術の各分野は個別の技術などの要素技術が主になっており、実際に地質調査から安全評価までを実施する場合を想定し、各調査段階で得られる情報やモデル、精度などを踏まえながら、分野間の不整合について、実施体制を含めて議論し、抽出・整理しておくべきではないか。その際には、実施主体の意見も聞きながら進める方が良い。 この事業の最後(5年後)には一定の整理した成果を示すことができるよう、今から検討すべきである。
	・廃棄物の輸送の観点から、沿岸地域での処分における課題解決の重要性が高まっている中で、沿岸地域での処分にフォーカスして、現在までの研究で十分ではないことの有無を洗い出す研究の重要性、社会的・技術的意義は高い。本研究の主な目的は、処分事業における検討の網羅性であると思われるので、事業の科学的・技術的意義(新規性・先進性・独創性・革新性・先導性等)を横に置いておいても、検討の抜けがなことのチェックが優先されるべき事業と考える。	・評価項目に「NUMOの包括的技術報告書との整合性は満たされているか。」とあるが、評価委員会でそのような説明は特になかったと思われるので、その観点での評価は困難である。 実施されている検討の中で、沿岸地域での検討としての位置づけが不明確なもの、検討内容や方法そのものが、処分事業としてふさわしいかどうか疑問に思うものがいくつか散見されていたので、評価委員の本コメント票や評価委員会当日のコメントに従って、再検討いただきたい。
	・(1)国プロジェクトとして適当であるか、国の関与が必要とされる事業か。 国は高レベル放射性廃棄物の最終処分において、沿岸20kmの範囲を好ましい範囲としている。しかし、沿岸陸域から海底下においては、沿岸部固有の環境を考慮した地質環境の高度な調査技術や高度な工学技術が必要である。このような高度の技術開発は、国のプロジェクトとして進めるのが妥当である。また、高レベル放射性廃棄物の最終処分に関わる技術の信頼性および安全性の向上を図ることは国民や社会のニーズに合っている。	・高レベル放射性廃棄物等の地層処分は非常に長期間にわたるため、開発された技術の維持・管理・改良などをどうするか、議論と対策が必要である。
	NUMO の包括的技術報告書を十分に検討して、最終処分に必要な技術開 発やデータの拡充等を事業目的としており、整合性は満たされている。	
	ヘビン争来日的、10回 ンパショルを引起かったり、 高レベル放射性廃棄かの最終処分は着実に進める必要がある。上述したように本事業は沿岸域における処分の信頼性および安全性の向上を 図るものであり、事業の社会的・経済的意義は高い。また、各分野において新しい技術開発が進められており(例えば、より進んだ日本列島の 一般的な地下水流動モデルや地下水流出場及び海底地形把握技術の 高度化等)、それらの新しい技術の他分野への展開も期待されるので、 事業の科学的・技術的意義も十分に認められる。	
	・各機関が行う研究開発等の目的は、それぞれの研究機関の役割分担の上で、地質環境、地下水解析、工学的評価の分野において、限られた試験環境などを駆使しつつ、その具体性および目標の設定において、概ね適切、妥当と判断する。	・一方、なぜ、そのような研究開発を行うべきなのか、沿岸地域の地層処分技術の観点を念頭に常に自己チェックを行っていただきたい。現状は、各機関が、自分たちの関連分野のみでの内容にフォーカスしすぎた感が強く、沿岸底下処分とのリンクが見えにくい。
2. 各課題や事 業者が行う研 究開発等の目 標設定の妥当 性	返しアプローチに則った最初のイタレーションが実施され、大局的な地下 水流動状態や複数の考えられる地質モデルが構築された。さらにこれら の地質モデルに基づいて構築された水理地質構造モデルを用いて地下 水流動解析が実施され、異なるモデル間の違いについて考察がなされ た。研究目的は明確に設定されている。 ・地下水調査(AIST)については、プッシュ・プル試験の実施と地下水の 海水銃花(たらす)、「地場ナストムの調査エトロのので、	とから、現状では地層処分の対象岩壁では適用が容易ではないものと思われ る。さらに試験方法については孔周辺の動水勾配分布の把握が重要と考えら れ、注水流量、揚水流量などについて十分な留意が必要と思われる。本試験手 法については過去の研究事例も多いことから、適用範囲、新規性に関して十分な 検討をお願いしたい。 ・工学技術(RPMMC)については、最初に沿岸域に特有な地下水化学環境とは何
		かに ンいく 国际石 ビエガな議論をし、日標 設定をされることを期待したい。フレゼ ンテーション資料 やプレゼンテーションの方法を工夫されることをお願いしたい。 情報量が多く、重要なポイントが分かりにくくなっていると思われる。

大項目	【肯定的意見】	【問題点・改善すべき点】
	化の目途が立っていると評価される。 ・工学技術(CRIEPD)については、目的は適切に設定され、評価方法のイ メージも構築されており、今後の成果に期待したい。 もう一方の工学技術(RWMG)については、沿岸域を想定し、多岐に渡る データ取得を目指している。 ・分野間の連携については、本プロジェクトの肝でもあり、設定された目 標を達成するために NUMO、JAEA も含めた関係者による WG が編成さ れたことは評価に値する。	・分野間連携によりどのような不確実性を低減していくのかについては WG にお ける十分な議論を期待したい。 なお、各分野とも得られた成果の評価指標について関係者との十分な議論の 上、明確にされたい。
	・地質環境(地質、地下水)モデルについて、常に不確実性は存在しており、調査段階ごとにも程度は異なる。不確実性が地下水流動に及ぼす影響は、不確実性の低減策につながるものと思われる。 ・地下水の水理構造モデルについて、文献データに基づくデータベース化は常に進めるべきであり、また、これらのデータに基づく地下水流動モデルの提示は大事である。この手法の構築・高度化は、文献調査段階での水理構造モデル作成の基礎となり、有用となり得る。 ・工学技術について、これまでのフェーズや全体的な状況などを示しつつ、今年度の目標を示しており、全体の位置づけは分かりやすい。	・地質環境(地質・地下水)について、概要調査以降は、ボーリング調査などが行われるが、その際に重要なことの一つは、ボーリングの本数である。地質モデルの不確実性は、ボーリング本数はついても検討事項とすべきである。 ・地質環境モデルは、人工パリア及び安全評価との分野間をつなぐインターフェイスになるが、この間のリンクの考え方やモデル、データなどについて具体化することが大事である(分野間連携)。 ・緩衝材中のオーバーパックの変位挙動については、過去にも類似加速試験があるはずであり、過去の情報も整理した上で改善点や目標を示すべきである。 ・地質環境の地下水流動と工学技術での水理解析のリンクと違いが分かりづらい。 ・分野間連携について、この機を利用して、地質調査から安全評価までを行うに当たって、各調査段階での分野間連携の在り方についても検索すべきである。
	・以下に示す改善すべき点以外はおおむね適切に目的達成のための具体的かつ明確な研究開発等の目標が設定されていると考える。	・目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか?について 評価を求めるのであれば、各項目で星取表とその評価基準が示されるべき。例 えば、この事業の期間内で終了を考えているものと、事業期間では終わりそうも ないが、沿岸地域での処分を実現させるために、概要調査開始までに終了すべ さものなど、目標達成にもいくつかのレベルがあると思うが、それらが混在してい るように感じる。
	 ・<1. 地質環境調査技術・2. 工学技術> 高レベル放射性廃棄物等の地層処分において沿岸部固有の環境を考 慮して、実際に概要調査段階から精密調査段階で必要となる高度な調 査技術開発を目標として設定しており妥当である。 各課題ごとに、平成 28-30 年度までの成果を基に目標を具体的におよ び明確に設定している。 ・<3. 分野間連携> WGを設置して、分野間の情報交換を進めた点は評価できる。 	・課題:「緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材使用に関わるデータの拡 充」に関しては、今年度の成果において少し不十分な内容(環境整備や予備試験 がメイン)ではあるが、新規課題ということなのではやむを得ない面も理解でき る。今後の展開を期待したい。 ・非常に高度な技術開発であるので、その適応に当たってはケースパイケースで 決めていかなければならない点が多いのは理解できる。しかし、実際にその技術 を適応する場所は現状では予測できないため、本事業で開発や検証した環境と は異なる所でも適応できるためには、極力「ケースパイケースで決める」項目を減 らず必要があると考える。 例えば、第3回評価委員会での資料2-1(CRIEPI)12pで説明された地下水モデ ルの「解析領域」の決定は重要であるが、他の地域に適応するまでは展開できて いないようである。最終的には、本事業で得られたノウハウが他の地域でどこまで 応用が可能であるのか、という事も議論する必要があるのではないか。 ・分野連携は、本事業だけでする問題ではなく、性能評価も含めた連携を構築す る必要がある。そのため、現時点での評価は難しいがWGには将来を見据えた 総合的な観点からの活動を期待する。
	・事業化の橋渡しへの貢献について、事業化に向けてのシナリオ、事業 化に関する問題点及び解決方策など、認識していることは判断でき、ま たその方向性も妥当と判断する。	・しかしながら、今後の富士山麓での掘削なども含めて、なぜ、そこでの掘削が必要なのか、沿岸底下処分の観点から、どういう技術の高度化をどこまで、なぜ行うのか、などの根拠と展開性に関する検討部分が未だ希薄であり、今後、こういった観点をぜひ詰めて頂ければ、と考える。 ・また、そういう観点からの NUMO との議論の結果なども、今回はほとんど示されなかったので、これらの次回(次年度)以降、改善をお願いしたい。
	・本事業は平成28年8月に経済産業省が策定した「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」の報告書にある課題を解決することを目指しており、地層処分のサイト選定のオブションの一つである、沿岸海底下処分に貢献するものである。得られた成果は学会発表等を通して適時適切に公開されていると評価できる。 ・各テーマに対して課題設定やその解決方策については概ね明確化されているものと思われる。	・成果の橋渡し方法や、検討途中での実施主体の意見の取り込み方策などにつ いては緊密なコミュニケーションにより最善の方法をとっていただくことを期待した い。
 事業化への 貢献、成果発 表についての 妥当性 	 ・地質環境モデルの構築に関する繰り返しアプローチについて、調査段階の進展を考慮した手法は現実の事業の手順と合致しており、有益になると思われる。 ・地質モデルから地下水流動モデルへの引き渡しに関する議論は重要であり、現実的な落しどころの整理は、分野間連携にもつながる。 ・地下水の水理構造モデルについて、文献データの調査・収集とデータベース化は、実際の事業における文献調査では、全て公開情報に基づいていることから、有益な情報と成り得る。 ・工学技術について、「性能評価手順書素業」の作成に向けた性能評価項目の整理は、事業実施における緩衝材の設計に対しては有用であると期待される。 ・分野間連携について、分野間連携を目指す場合、何が問題なのか、課題が具体化し、今後の議論に有効である。 	・地質概念モデル作成における文献データについて、一次データと二次データの 決め方、ルールが曖昧であることから、仕分け方法を明示すべきである。 ・水理構造モデルについて、データベースは非常に有益な情報であるものの、併 せてデータに基づくモデルの構築手法も明確にすべきである。 また、地質モデルとの関連や整合性が不明である。 ・緩衝材中のオーバーパックの変位挙動に関する加速試験について、今回の加 速試験の相似の考え方について、緩衝材の再冠水ブロセスとのリンクが不明確 である。今一度説明が必要である。 ・工学技術における「性能評価手順書素案」の項目は、フィンランドの性能評価の 流れに基づいており、我が国の処分に対応させるべく議論が必要である。
	・事業者間連携で事業を推進していくやり方が開始されたころに比べる と、NUMOの事業を意識した貢献が考えられた事業展開になってるように 感じる。	・上述のように、改善は認められるものの、NUMO との連携や事業者間・分野間 の連携が不十分のように感じる。おそらくそのような連携のための機会はつくられ ているように推察するが、もっとミーティングやミーティングのやり方に工夫がいる のかもしれない。
	(1)事業化や橋渡しへの貢献については妥当か 各課題において、目標の中に事業化や橋渡しを想定している。また需要 という点からも地質分野・工学分野、共に詳しく書き込んでおり、十分貢献していると考えられる。 成果発表に関しては、事業初年度ではあるが積極的に発表しており、十 分な成果が出ている。	(1)事業化や橋渡しへの貢献については妥当か 実用化については、各分野で十分検討しているが、やはり問題は事業化であろう。その意味では、初年度でこの点に関して詳価するのは難しい。 事業化に関しては、地層処分関連分野だけを目標とするのではなく、様々な方面 への応用を視野に入れて進めるべきである。 実用化が具体的に進んでいる分野は問題がないが、進んでいない分野(技術)に 関しては、NUMO がこれらの事業で開発された技術をいつ実際に用いるか不明で あるが、実際に使用するまでの期間、開発された技術の維持・管理(更新も必 要か?)をどの機関が行ない、その費用はどうするのか、というような具体的な事

大項目	【肯定的意見】	【問題点・改善すべき点】
		項に対しても検討する必要がある。 分野間連携については、これまでにも問題点は指摘した(2. 各課題や事業者が 行う研究開発等の目標設定の妥当性)が、少なくとも事業化や構成しに関して は、それが大きな目的の一つである(分野間連携がうまく進めば、事業化が大きく 前進する可能性が生じる)ため、大きく貢献していると思われる。しかし、「事業化 までの極めて明確な見通しがある。」という点からは、現時点では判断は難しい。 (評価不能)
	 (1)研究開発計画について ・事業の目標を達成するための計画/研究スケジュール等については、 実施内容などの成果から概ね妥当と判断する。 (2)研究開発実施者の事業体制・運営について ・適切な研究開発ナーム構成での実施体制で行われていると判断する。 (3)変化への対応について ・社会経済情勢等周辺の状況変化に柔軟に対応する努力を行っており、 また代替手段との比較も検討を行っていると判断する。 (4)研究の基盤登備について ・研究に関する人材の育成・確保の状況ならびに研究支援体制や知的 基盤の整備等については、どの機関においても難しいなか努力している と判断する。 	(1)研究開発計画について ・課題ごとの連携については、NUMOとの連携も含め改善の余地がある。 (2)研究開発実施者の事業体制・運営について ・必ずしも実施者間の連携が取れている、あるいは未だそのような環境が十分に 整備されているとは言えない状況にある。
	 (1)地質環境分野、工学技術分野、連携分野とも仕様書に基づいて目 標を設定し、それを解決する方策を検討している。 (2)実施体制については、各機関からそれぞれの分野の専門家が対応 をしており評価できる。 (3)社会経済情勢への対応や代替手段との比較についてはこれまで のところは不明である。 (4)人材育成や人材の確保状況については、各機関とも若手が入り 徐々に良い方向に向かっているように感じる。また RWMC の人材育成プ ログラムを活用した若手の育成プログラムを実施するとのことであり、期待 したい。 	(1)地質環境分野、工学技術分野、連携分野とも仕様書に基づいて目標を設定し、それを解決する方策を検討しているものの、一部については、地層処分で求められる技術としては必ずしも十分でないもの、あるいは、沿岸域特有の地質環境を考慮した課題抽出の議論が十分とは言えないと思われるものがある。また工学技術以外の分野においては5か年のスケジュールが提示されていないため、早急に策定されることを期待したい。 (2)研究実施体制は整っているものの、連携については、分野内、分野間で今後十分に実施されることを期待したい。連携WGあるいはサブWGのような会議体を組織して、ピアレビューを十分に実施していただきたい。 (3)現状のところ、代替手段との比較に関しては明確にされていないことから、今後研究を進める上で、トラブルシューティングも含めて代替手段を検討しておくことが望ましい。
4. 研究開発マ ネジメント・体制 等の妥当性	・3 機関は、それぞれの分野での専門集団であり、これまでも地層処分 技術の各分野について研究しており、多くの知識と経験を有している。 今年度はこの事業の初年度であるが、従来の知見などを整理したとこ ろから始まっているせいか、計画は比較的見体的である。 ・地質調査、工学技術、安全評価について進めるに当たり、従来よりも分 野間連携を意識し、各分野間での橋渡しについて議論をしながら進める 土壌が備わりつつあることは良い。 ・事業のマネジメントについて、全体を統括するリーダーが選任されてお り、適切に調整しながら運営されていると評価する。	・分野間連携については、地質調査、工学技術、安全評価の分野が連携して進めることに意義があり、これまでは、それらを意識してはいたものの、その場しのぎの対応がとられてきたが、このフェーズにおいては、従来よりも各分野間での構造しについて議論をしながら進める土壌が備わりつつあることは良いが、これらを進めるための技術的な体制や具体的な橋渡しの内容、項目、進め方が議論・整理されることが重要である。 ・地質調査、工学技術について、分野間の連携を意識しながら進める土壌が備わりつつあることは良いが、現状では、未だ個別の技術の高度化に志向している傾向がある。 これらは、一夜にして構築できるものではないが、今年度を含めて5年の中で、技術的な成果を含めて、どこまで具体的な見通しを得るかが重要であると認識する。
	 (1)研究開発計画は適切かつ妥当か ・事業の目標を達成するための計画は適切であったか 目標の設定と計画はおおおね適切と考える。 (2)研究開発実施者の事業体制・運営は適切かつ妥当か ・適切な研究開発ナーム構成での実施体制になっているか JAEA さんが実施者になっていないこと以外は、しっかりオールジャパン体制になっていると思われる。 (3)変化への対応は妥当か ・社会経済情勢等周辺の状況変化に柔軟に対応しているか ・代替手段との比較を適切に行ったか 上記、困難な事業を対象にしているが、十分考慮に入れられているように感じる。 (4)研究の基盤整備は妥当か ・研究に関する人材の育成・確保の状況はどのようになっているか 人材育成・確保が念頭に置かれた事業で今後の進展に期待したい 	 (1)研究開発計画は適切かつ妥当か ・研究スケジュール等は妥当であったか 設定された目標達成のためのスケジュールはおおむね適切と考えるが、本事業内で完全に終えるものと、そうでないものを明確にしていただきたい。 ・課題ごとの連携は妥当であったか 課題ごとの連携を意識された事業計画になっていると思われるが、まだ妥当と言えるほどの連携になっていないように感じる。 (2)研究開発実施者の事業体制・運営は適切かつ妥当か ・実施者間の連携が取れ、環境が整備されているか 実施者間の連携が取れ、環境が整備されているか 実施者間の連携が取れ、環境が整備されているか 実施者間の連携が取れ、環境が整備されていると思われるが、まだその環境が整備されていると言えるほどではない。特に NUMO さんとの連携とその方策を考えてほしい。 (4)研究の基盤整備は妥当か ・研究支援体制や知的基盤の整備等はどのようになっているか これらに関しては、事業が開始されたばかりなので評価する段階にない。今後の 推移を見守りたい。
	 (1)研究開発計画は適切かつ妥当か 昨年度までの事業の成果をベースに目標が設定されており、また研究スケジュールも詳細に検討されており、妥当である。 研究機関、さらに分野間の連携は大きな課題であるが、本事業において、その重要性を認識しており、ケーススタディーとして分野間の情報共有等に取り組んでいる。大きな課題であり、直ぐに結果は出てこないが、WG内で情報交換を重ねて、一段毎に着実に進んでいる。 (2)研究開発実施者の事業体制・運営は適切かつ妥当か 昨年度までの事業の成果をベースに研究開発体制が構築されており、 適切な実施体制である。分野内での連係は十分に図られている。 (3)変化への対応は妥当か 調査地点の選択など、周辺の状況に柔軟に対応している。 (4)研究の基盤整備は妥当か 人材育成に関しては、困難な状況ではあるが、それぞれの研究機関間で協力しながら進めており、受けている。 	 (1)研究開発計画は適切かつ妥当か 地質環境モデルの構築に関わる検討 地質環境(CRIEPI)が「静岡県富士川河 ロ付近」を事例研究地域として設定したことは、その理由が明確に書いてあり(地 下水流速が速い、既存データが多い等)問題はない。ただ、現実には、調査地域 として既存データがあまりない箇所もあると思われる。そのような地域のケースス タディーも必要では無いか。 (3)変化への対応は妥当か 研究機関、さらに分野間の連携は大きな課題である。十分に対応できていると思 われるが、さらに欲を言えば、各研究分野の5年間の研究計画にWGの議論や 活動の結果を反映し、計画変更を実施するような勢いが必要である。また、本事業 の5ヶ年だけでなく、さらに先の事業も含めた最終的な目標を持って進めてゆく必 要がある。
6. 総合評価 (平成31年度)	 ・総合的に、本事業は、日本の沿岸域地下環境の情報、データ整備の唯 ーのプロジェクトであり、将来サイトとして選定されるかもしれない沿岸域 の地層処分技術開発に貢献していると判断する。 ・本事業は、国の策定した沿岸海底下処分の課題を解決すべくテーマを 	 ・すでに述べたように、一方で、実施機関における実施項目、内容について、日本の沿岸低下処分のあり方とのリンク、検討、必要性の検討が未だ不明瞭(脆弱)であり、改善を要する。 ・工学技術など一部技術および課題の抽出については、実施主体も含めた関係
	設定し、各機関が分担、協力をしながら研究開発が実施されようとしてお り、地層処分の技術開発に貢献していると評価できる。	者間で十分な議論が必要と思われるものが存在していると考えられる。また分野 内、分野間の連携についてはトップダウン、ボトムアップの双方の流れの中で十 分に実施され、相乗効果が生まれることを期待したい

大項目	【肯定的意見】	【問題点・改善すべき点】				
	 ・事業体制は、それぞれの機関の強みを生かし、適切な役割分担がなされていると評価する。 また、安全評価については、直接、研究開発に加わっていないものの、パートナーとして、必要に応じて参加しており、適切な体制がとられているものと評価する。 ・基盤情報について、地質環境に関する基盤データは、データベースなどを構築するなど、着実に整備されつつある。 ・地層処分のような問題の解決には、よく「オールジャパンで取り組むように」と言われるが、今まではそれができていなかった。本事業は、それに挑戦する重要なものと意義づけられる。概要調査が始まる前に解決しておかなければならない課題が多く含まれていると思われるので、もっとスピード感をもって積極的に進めていただきたいと考える。 	【問題点・改善すべき点】 ・各分野間の連携については、土壌が備わりつつあるものの、具体的な体制や方 法などは模素の段階であり、今後も、議論を積み重ねて具体的な体制、進め方、 方法などについてを備することを期待する。 ・工学技術について、現状では、データ取得が中心になっており、その整理の方 向性が見えにくい。 例えば、データペース化や既存のデータペースの更新など、データが逸散しな い方策も重要である。 ・人材育成や技術の継承について、具体的な内容や成果が見えにくい。 ・多くの評価委員が指摘されているように、本事業の目標を達成するためには、 実施者間、分野間、NUMO と本事業実施者間の連携が必須と考えられる。それら が十分意識された内容になってると思われるが、成果をお聞きすると、不十分さ が否めない。意識されているのに不十分であることの解析を行って改善を図って いただきたい。 地層処分事業では、その事業期間の長さと取り扱い範囲の広さから、特に様々 な分野での人材の育成・確保が必要となる。講座や見学などの開催だけでなく、 成熟した研究者と若手が現場でコラボしたり、研究立案する場を設けて、リアルな 技術と意識の伝承ができるような工夫もしていただきたい。再委託先から成果だ けを求めるのではなく、可能であれば一緒に進めていくような「共同研究」に立ち 返っていただといて、多くの若者が処分事業に意義を感じてこの分野に残るような				
	・H28-H30 の事業および NUMO の包括的技術報告書に対して総括を行 い、残された重要課題を絞り込んでいるため、地層処分技術の開発に大 いに貢献するものである。また、他分野への実用化も視野に入れてお り、研究としても有用である。	・NUMOへの技術移転に関しては、十分検討する必要がある。開発された技術 (調査技術を含む)を NUMO が全て受け取り、維持・管理・改良をするとは思えな い。例えば、外注でその技術を利用する場合があると思うが、その場合、その技 術の維持・管理・改良はどうするのか、明確にしておく必要があるのではないか。				

Appendix XII

知財運営委員会の記録

沿岸部処分システム評価確証技術開発 知財運営委員会記録

委員名簿

- 委員長 丸井敦尚
- 委 員 井川怜欧(産総研)
 - 林 大介 (原環センター)
 - 幡谷竜太 (電中研)
 - 宮下東久 (産総研)

年度とりまとめ会合

日時:2020年3月24日(10:00~10:40)

場所:産総研第七事業所810室(茨城県つくば市東1-1-1)

資料1:納品物(報告書等)の作成について一式

資料2:受託研究開発におけるデータマネジメントに関する運用ガイドライン一式

議事および申し合わせ内容

資料1と2に基づき、委員長から本会議の趣旨と本受託研究におけるデータマネジメントの位置づけならびに報告書の引用について説明がなされた。

1) 自主管理データのレベルについて

原則レベル2とすることが確認された。

- 2)報告書の引用について
- ・本文:適切に引用すれば誰でも引用可。
- ・図表:引用可能だが、転載許可が必要
- ・エクセルデータ:原則、自主管理データ扱い

3) その他

- ・安全保障貿易管理の対応について資エ庁に確認する。(後日確認済み)
- ・各機関における安全保障貿易管理やコンプライアンスに関する情報の共有
- ・社会状況を踏まえた上で、契約締結後すみやかに共同研究会議を実施予定
- (その場で、自主管理データの取り扱いについて参加者全員に再周知を実施)

以上

二次利用未承諾リスト

報告書の題名:沿岸部処分システム評価確証技術開発成果報告書 委託事業名:平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 受託事業者名:国立研究開発法人 産業技術総合研究所 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

本編

ページ	図表番号	タイトル	転載不可	二次利用不可
16	表2-1-2	タイルデータ容量概算		0
23	表2-1-5	幌延モデル、各地質の物性値		0
24	表2-1-6	幌延モデル、各年代の仮定降雨浸透量		0
24	表2-1-7	幌延モデル、各年代の仮定海水温と仮定外気温		0
19	図2-1-10	データベースに取り込んだ情報で作成した幌延地区の概念モデル		0
22	図2-1-11	地質を考慮した幌延概念モデル		0
25	図2-1-14	幌延モデル、CASE1、全水頭コンター図		0
26	図2-1-15	幌延モデル、CASE1、濃度コンター図		0
26	図2-1-16	幌延モデル、CASE1、温度コンター図		0
60	表2-2-6	河川流量観測地点の諸元		0
60	表2-2-7	気象観測地点の諸元		0
64	表2-2-8	代表地点における可能蒸発散量と可能涵養量		0
64	表2-2-9	対象領域に分布する地層の透水係数		0
65	表2-2-10	周辺地域に分布する地層の透水係数		0
66	表2-2-11	地下水位等から算出した透水係数		0
68	表2-2-12	対象領域周辺に分布する岩石の物理特性		0
68	表2-2-13	地下水流動系に関わる水質・同位体		0
74	表2-2-14	富士山の水収支の概要		0
76	表2-2-15	水理地質特性一覧		0
79	表2-2-16	水理地質構造区分		0
82	表2-2-17	地下水流動解析・解析条件		0
110	表3-1-2	同一仕様のプッシュプル試験の比較	0	0
112	表3-1-3	長期プッシュプル試験の結果一覧	0	0
109	図3-1-7	4回のプッシュプル試験の破過曲線	0	0
112	図3-1-8	長期プッシュプル試験で得られたδ180の破過曲線	0	0
122	表3-2-1	採水したサンプルの水質測定結果	0	0
122	表3-2-2	地点2における水質分析結果と陸域地下水との混合率の計算結果	0	0
116	図3-2-1	実験の模式図(左図)と海底に設置した模擬水源の様子(右図)	0	0
116	図3-2-2	高精度音響カメラを装着したROVの様子	0	0
118	図3-2-3	周波数3.0 MHzおよび1.8 MHzで得られた音響画像	0	0
118	図3-2-4	海底からの高度を変化させた場合の音響画像	0	0
119	図3-2-5	実海域における探査地点	0	0
121	図3-2-6	地点2における音響画像(左図)と底層の状況(右図)	0	0
121	図3-2-7	地点3における音響画像(左図)と底層の状況(右図)	0	0
121	図3-2-8	地点4における音響画像(左図)と底層の状況(右図)	0	0
159	図4-1-13	洗い出し解析におけるcase001とcase013cの比濃度分布		0
161	図4-1-14	比濃度コンター図(9サイクル目の最大海進時、108万年後、拡大図)		0
161	図4-1-15	比濃度コンター図(9サイクル目の最大海進時、108万年後)		0
163	図4-1-16	処分施設湧水量の経時変化(上:5年間、下100年間)		0
163	図4-1-17	比濃度分布の経時変化(処分施設中央位置、汀線から10km)		0
164		流跡線図(case002、case004、case006、緑:施設上面に到達する流跡線、		0
104	四4-1-10	青:施設底面に到達する流跡線、case006の赤い層は薄層)		U
165	₩4_1.10	流跡線図(case008、case014、case017、緑:施設上面に到達する流跡線、		0
105	ising the second secon	青:施設底面に到達する流跡線)		\cup
166		実流速コンター及びベクトル図		0
100	<u>⊢</u> , +-1-70	(case008、薄層なし、断層あり、密度流あり100年後)		\cup
166	図4-1-21	比濃度分布図(case008、薄層なし、断層あり、密度流あり100年後)		0

180	図4-2-2	現海水と化石海水のヘキサダイヤグラムの整理結果		0
180	図4-2-3	現降水のヘキサダイヤグラムの整理結果		0
181	図4-2-4	氷期降水のヘキサダイヤグラムの整理結果		0
221	表4-3-3	通水試験に用いた溶液の化学組成と通水体積		0
222	表4-3-4	カラム通水試験における通過流量及び透水係数の変化		0
230	表4-3-6	陽イオン交換選択係数(LogKd Cat/Na)の比較		0
230	表4-3-7	純水飽和カラムにおける陽イオン選択係数		0
213	図4-3-2	液種ごとの膨潤量・膨潤率の経時変化(32日目まで)		0
213	図4-3-3	密度ごとの膨潤率の経時変化		0
214	図4-3-4	イオン交換水の浸潤による膨潤量・膨潤率の経時変化		0
214	図4-3-5	液交換したNaCl水溶液とKCl水溶液の膨潤量・膨潤率の経時変化		0
216	図4-3-6	初期乾燥密度と最大膨潤率の関係		0
216	図4-3-7	初期乾燥密度と最大膨潤率の関係		0
221	図4-3-9	純水飽和カラムへの希釈海水から海水の連続通水		0
222	図4-3-10	未飽和カラムへの通水(a:累積通過流量;b:通過流量と透水係数)		0
224	図4-3-11	純水飽和カラムの通水溶液の化学組成変化(陽イオン)		0
224	図4-3-12	純水飽和カラムの通水溶液の化学組成変化(陰イオン)		0
		Naイオンに対する交換性陽イオンの固液間分配係数		
229	幽4-3-13	(ICP-AES分析による)		0
	図4-3-14	Naイオンに対する交換性陽イオンの固液間分配係数		0
229		(FESEM-EDS分析による)		
	図4-3-15	カラム通水試験における流出液のpH実測値とシミュレーションによる		0
236		計算値との比較		
0.07	図4-3-16	カラム通水試験における流出液のNa濃度、Ca濃度、K濃度、Mg濃度の		0
237		実測値とシミュレーションによる計算値との比較		
		カラム通水試験のシミュレーションにおけるカラム下流端の		
238	赵4-3-17	イオン交換サイトのイオン種の割合		0
249	表4-4-2	人工海水(マリンアートSF-1)の成分表		0
249	表4-4-3	要素試験における供試体条件		0
250	表4-4-4	要素試験における供試体条件(予備的検討)		0
252	表4-4-5	本研究で使用したベントナイトの基礎物性		0
262	表4-4-6	静的場における遠心場の相似測		0
252	図4-4-3	透水係数とポアボリューム比の関係		0
253	図4-4-4	透水-膨潤圧試験前後の試料の抽出陽イオン量		0
254	図4-4-5	圧密非排水三軸圧縮試験の結果		0
255	図4-4-6	三軸圧縮試験前後の試料の抽出陽イオン量		0
274	図4-4-13	水分量センサーおよび水位センサーの経時変化		0
275	図4-4-14	緩衝材応力変化の経時変化		0
277	図4-4-15	オーバーパック変位量の経時変化		0
280	図4-4-17	Na型ベントナイト-純水条件、試験後各地点のCT値		0
281	図4-4-18	Na型ベントナイト-人工海水条件、試験後各地点のCT値		0
282	図4-4-19	Ca型ベントナイト-純水条件、試験後各地点のCT値		0
283	図4-4-20	Ca型ベントナイト-人工海水条件、試験後各地点のCT値		0
284	図4-4-21	□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□		0
201				

Appendix

ページ	図表番号	タイトル	転載不可	二次利用不可
5	表1	幌延モデル、各地質の物性値(浸透流)		0
5	図 7	幌延モデル、不飽和特性		0
6	表 2	幌延モデル、各地質の物性値(塩分濃度密度流)		0
6	表 3	幌延モデル、各地質の物性値(温度密度流)		0
7	図 8	幌延モデル、CASE1、全水頭コンター図		0
8	図 9	幌延モデル、CASE1、濃度コンター図		0
8	図 10	幌延モデル、CASE1、温度コンター図		0
9	図 11	幌延モデル、CASE2、全水頭コンター図		0
9	図 12	幌延モデル、CASE2、濃度コンター図		0

r		-		1	r
	10	図 13	幌延モデル、CASE2、温度コンター図		0
	10	図 14	幌延モデル、CASE3、全水頭コンター図		0
	11	図 15	幌延モデル、CASE3、濃度コンター図		0
	11	図 16	幌延モデル、CASE3、温度コンター図		0
	12	表 5	駿河モデル、各地質の物性値		0
	13	表 6	駿河モデル、各地質の物性値(塩分濃度密度流)		0
	13	表 7	駿河モデル、各地質の物性値(温度密度流)		0
	14	図 18	駿河モデル、CASE1、全水頭コンター図		0
	15	図 19	駿河モデル、CASE1、濃度コンター図		0
	15	図 20	駿河モデル、CASE1、温度コンター図		0
	16	図 21	駿河モデル、CASE2、全水頭コンター図		0
	16	図 22	駿河モデル、CASE2、濃度コンター図		0
	17	図 23	駿河モデル、CASE2、温度コンター図		0
	17	図 24	駿河モデル、CASE3、全水頭コンター図		0
	18	図 25	駿河モデル、CASE3、濃度コンター図		0
	18	図 26	駿河モデル、CASE3、温度コンター図		0
	22	図 28	モデル別塩分濃度コンター図		0
	31	図 2-2	地質概念モデル①		0
ļ	33	図 2-3	地質概念モデル②		0
	35	図 2-4	地質概念モデル③		0
	37	図 2-5	地質概念モデル④		0
	39	図 2-6	地質概念モデル⑤		0
	41	図 2-7	地質概念モデル⑥		0
	43	図 2-8	地質概念モデル⑦		0
	45	図 2-9	地質概念モデル⑧		0
	47	図 2-10	地質概念モデル⑨		0
	49	図 2-11	地質概念モデル⑩		0
	51	図 2-12	地質概念モデル①		0
	53	図 2-13	地質概念モデル②		0
	59	表 2	水準測量で測定した観測孔の標高		0
	62	表 6	モニタリング機器設置時の孔内水位		0
	63	写真 3	DD-2 孔での水位測定	0	0
	63	写真 4	DD-3 孔での水位測定	0	0
	63	写真 5	DD-4 孔	0	0
	71	図 5	揚水試験の結果 		0
	72	写真 1	試験装置の降下作業の様子	0	0
	86	凶 6	高精度音響力メラを俯角30°にした場合の音響画像		0
-	87	図 /	高精度音響カメフを附角90°にした場合の音響画像		0
-	88	図 8	首 響 間 修 の 反 射 団 ת む の 関 係		0
-	89	図 9			0
-	89	図 10			0
ŀ	91	表 ↓ ま 0			0
	91	表∠ ⊠ 2 2	地点4 にわりる分析結果と座域地下水の混合率推定		0
ŀ	218	図 3-3	所 所 祈 府 代 新 代 田 は 、 「 旅 い し 、 「 旅 い し 、 「 旅 い し 、 し 、		0
	219	凶 3-4 図 2 E	所 所 術 和 来 (Case0003、 海 信 ・ 安 糸 で て) ル 1、 別 雷 な し、) 「 禄 い し ・ こ し ・ こ し ・ こ し ・ こ 1 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)		0
ŀ	219	図 0 C	昨111和木(LaseUU/、海信なし、) 信のり、) 禄江直・EL・+ 210m) 叙伝は甲(assa000		0
ŀ	220	図 3-0 図 2 7	所 / 和木(Case005、 浮層・透小共力圧、		0
ŀ	220	⊠ 3-1 ⊠ 3-8	ロボリーローへ(CaseOli, 存信・安衆、阿信のウ、川林世県・LL・T21000/ 	}	0
ŀ	221	⊠ 3-0 ⊠ 3-0	http://max (USSE013、 海信なし、 町信なし、 区20/0所切、 川原以上・EL 「21000) 昭析結果 (case013c 蒲届か) 新届か! 移忘公勘韶析 江鎮伝罢・EL 1016m)		0
-	221	云 J-J 図 3-10	17:1/11/14/17、(00300130、 得合なし、 円信なし、 12/10/17 RAFF(1)、 11/18/1/単・LL. + 21011) 超析結果(case()15 蓮層なし、 断層なし、 海水準密動なし 江線位置・FL + 216m)		0
ŀ	223	⊠ 3-11	比濃度コンター図 (case001、1~4 サイクル日の最大海進時)		0
ŀ	223	図 3-12	比濃度コンター図 (case001, 5~9 サイクル日の最大海進時)		0
ŀ	225	⊠ 3-13	実流速コンター図及びベクトル図(case001、1~4 サイクル日の最大海進時)	1	0
ŀ	226	⊠ 3-14	実流速コンター図及びベクトル図(case001、5~9 サイクル目の最大海進時)		0
ŀ	227	⊠ 3-15	比濃度コンター図(case001、9サイクル目)		0
L		1		i	I

228	🗵 3-16	実流速コンター図及びベクトル図(case001、9 サイクル目)		0
229	図 3-17	比濃度コンター図(9 サイクル目の最大海進時、108 万年後)		0
230	図 3-18	比濃度コンター図(9 サイクル目の最大海進時、108 万年後)		0
231	図 3-19	比濃度コンター図(9 サイクル目の最大海進時、108 万年後、拡大図)		0
232	図 3-20	比濃度コンター図(9 サイクル目の最大海進時、108 万年後、拡大図)		0
233	図 3-21	比濃度コンター図(9 サイクル目の最大海進時、108 万年後、拡大図)		0
234	図 3-22	比濃度コンター図(9 サイクル目の最大海進時、108 万年後、拡大図)		0
235	図 3-23	比濃度コンター図(9 サイクル目の最大海進時、108 万年後、拡大図)		0
236	図 3-24	実流速コンター図及びベクトル図(9 サイクル目の最大海進時、108 万年後)		0
237	図 3-25	実流速コンター図及びベクトル図(9 サイクル目の最大海進時、108 万年後)		0
238	図 3-26	実流速コンター図及びベクトル図		0
239	図 3-27	実流速コンター図及びベクトル図		0
240	⊠ 3-28	実流速コンター図及びベクトル図		0
241	図 3-29	実流速コンター及びベクトル図		0
242	図 3-30	実流速コンター図及びベクトル図		0
243	⊠ 3-31	濃度差コンター図		0
245	⊠ 3-32	比濃度分布図		0
245	⊠ 3-33	実流速コンター図及びベクトル図		0
246	図 3-34	比濃度分布図		0
246	⊠ 3-35	実流速コンター図及びベクトル図		0
247	⊠ 3-36	と濃度分布図		0
247	⊠ 3-37	宇流速コンター図及びベクトル図		0
248	⊠ 3-38			0
248	図 3-39	実流速コンター図及びベクトル図		0
249	図 3-40			0
249	⊠ 3-41 ⊠ 3-41	実流速コンター図及びベクトル図		0
250	⊠ 3-42			0
250	⊠ 3-43	定徳使フンター図及びベクトル図		0
251	⊠ 3-44	実流速コンター図及びベクトル図		0
252	⊠ 3-45			0
252	図 3-46	実流速コンター図及びベクトル図		0
252	図 3-47			0
253	⊠ 3-48	実流速コンター図及びベクトル図		0
254	図 3-49	机分施設通水量の経時変化		0
254	⊠ 3-50	比濃度分布の経時変化		0
255	⊠ 3-51			0
255	⊠ 3_52			0
257	⊠ 3-53			0
258	⊠ 3-5/			0
250	⊠ 3-55			0
260	⊠ 3-56			0
261	図 3-57			0
266	点 3 37 ま 2_1	近期内心 A 11/3m 水質公析結果		0
200	₄ ∠-1	浜主DD-1 1,145111 小貝方別 紀末 近田DD 1 月 の地下水の公析結果		0
268		62 地方の水塔(小の)が売れ来		
200	図 2-2	02 地点の小貝方が柏木 込出或での地下水公本の輝今回		0
203	凶 Z-J 主 2 2	山戸中での地下小江市の気込め		0
203	1x 2-2			0
270	⊠ 2-4	で、小ビルビビンNA 「ハン 版及 地下水区分ごとのCa イオン連度		0
271	⊠ 2_6			0
211	凶 Z-0 図 9 7	で「 小 C J C C V W B 1 3 7 歳反 基本		0
212	凶 <u>८-</u> 1 図 2 9	で、シーントンシーン、原々		0
272	区 2 0	きょうりょうにのころ キャン値母		0
200	凶 Z-3 図 0 0	ビーハビル ここのJOF イムン 辰反 H_KF モンモリロナイト B パネのイオン 広徳 谷の その根 VDD ムギ		0
227	凶 <u>८</u> -८ 主 0 0			0
324	衣 2-2	「N レイモソロノイトのイオイズ探仮の恰丁ル奴とモル体偵		U