

# 安全研究成果報告

## S/NRA/R Research Report

### 廃棄物埋設における長期性能評価に関する 研究

Research on long-term performance assessment for radioactive waste disposal

大塚 楓 廣田 明成 市来 高彦 山田 憲和

OTSUKA Kaede, HIROTA Akinari, ICHIKI Takahiko, YAMADA Norikazu,

向井 広樹 鏡 健太 森田 彰伸 木嶋 達也

MUKAI Hiroki, KAGAMI Kenta, MORITA Akinobu, KIJIMA Tatsuya,

入江 正明 室田 健人

IRIE Masaaki, and MUROTA Kento,

放射線・廃棄物研究部門

Division of Research for Radiation Protection and Radioactive Waste Management

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department,

Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

令和7年6月

June 2025

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究プロジェクトの活動内容・成果をとりまとめたものです。

なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本報告の内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 放射線・廃棄物研究部門  
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル  
電 話：03-5114-2225  
ファックス：03-5114-2235

## 廃棄物埋設における長期性能評価に関する研究

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ  
放射線・廃棄物研究部門

大塚 楓 廣田 明成 市来 高彦 山田 憲和 向井 広樹  
鏡 健太 森田 彰伸 木嶋 達也 入江 正明 室田 健人

### 要 旨

放射性廃棄物の中深度処分においては、数万年を超える長期間にわたって炉内等廃棄物等を起因とする放射線による影響から公衆と環境を防護するための根幹的な対策として、廃棄物と公衆の離隔に有効と考えられる深度へ廃棄物を埋設し、自然現象に起因する事象及び人間活動に起因する事象による廃棄物への擾乱等を防ぐ必要がある。その上で、その周辺の岩盤等が有する物理的及び化学的な特性や、天然バリアへの放射性核種の漏出の防止及び低減の機能を有する人工構築物を活用することにより、埋設された廃棄物からの放射性核種の漏出や生活圏への移行を抑制する。このため、中深度処分の安全確保の観点からは、火山・火成活動、断層活動等の廃棄物埋設地を著しく擾乱して処分システムの安全機能を損なうような自然現象が起こらない場所であることの確認並びに天然バリア及び人工バリアが放射性物質の移行を抑制する性能を長期的に発揮する見通しがあることの確認が重要である。

そこで、第二種廃棄物埋設のうち主に中深度処分に係る事業許可申請の新規制基準適合性審査及び後続規制を適切に行うため、技術課題を(1)自然事象の長期評価、(2)廃棄物埋設における性能評価手法及び線量評価手法、(3)地質環境及び水理環境モニタリング及び(4)中深度処分及び浅地中処分に共通する課題、に分類し、それぞれについて研究を行い科学的・技術的知見を取得した。なお、研究の一部は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下「JAEA」という。）、国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下「AIST」という。）及びジーエルサイエンス株式会社への委託、並びに国立大学法人東京大学、国立大学法人埼玉大学、JAEA 及び AIST との共同研究により実施した。

本報告書は、令和3年度から6年度にかけて実施した研究の概要を取りまとめたものである。

Research on long-term performance assessment for radioactive waste disposal

OTSUKA Kaede, HIROTA Akinari, ICHIKI Takahiko, YAMADA Norikazu,  
MUKAI Hiroki, KAGAMI Kenta, MORITA Akinobu, KIJIMA Tatsuya,  
IRIE Masaaki, and MUROTA Kento

Division of Research for Radiation Protection and Radioactive Waste Management,  
Regulatory Standard and Research Department,  
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

Abstract

For intermediate depth disposal, protecting the public and the environment from the effects of radiation emitted by relatively high-level radioactive waste such as reactor internals, is essential. This involves placing the waste at depths considered effective for isolating it from the public and preventing disturbances caused by natural phenomena and human activities. In addition, controlling the migration of radionuclides into the biosphere is necessary. This is accomplished by leveraging the physical and chemical properties of the surrounding host rock, along with engineered barriers designed to prevent or reduce leakage of radionuclides from the disposal site. Therefore, research must be conducted to confirm that natural phenomena such as volcanic, igneous, and faulting activities will not significantly disturb the waste disposal site or impair the safety functions of the disposal system. Furthermore, verifying that both natural and engineered barriers have long-term effectiveness in controlling radionuclide migration is critical.

This study gathered the scientific and technical knowledge necessary for reviewing license application for intermediate depth disposal and subsequent regulation. The research topics were organized into four categories: (1) long-term assessment of natural phenomena, (2) performance and dose assessment methods for the disposal system, (3) monitoring methods for geological conditions and (4) common issues relevant to both intermediate depth and shallow land disposal. Some tasks were outsourced to the Japan Atomic Energy Agency (here in after referred to as “JAEA”), the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (here in after referred to as “AIST”), and GL Science Inc. Some tasks were carried out by joint study between The University of Tokyo, Saitama University, JAEA, AIST and NRA.

This report summarizes the outcomes of the research conducted from FY2021 to FY2024.

## 目次

1. 序論	1
1.1 背景	1
1.2 目的	1
1.3 全体行程	2
2. 本論	3
2.1 自然事象の長期評価に関する研究	3
2.1.1 中深度処分における断層等に関する評価手法の研究	3
2.1.2 中深度処分における涵養域から流出域までの地下水流動の評価手法の研究	13
2.1.3 中深度処分における岩盤の力学状態と水理特性等に関する研究	25
2.2 廃棄物埋設における性能評価及び線量評価手法に関する研究	38
2.2.1 ベントナイト系人工バリアの長期性能評価手法の研究	38
2.2.2 セメント系人工バリアの長期性能評価手法の研究	42
2.2.3 中深度処分における岩盤の収着・移行現象に関する研究	47
2.3 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究	52
2.4 中深度処分及び浅地中処分に共通する課題に関する研究	61
2.4.1 中深度処分及び浅地中処分における侵食に関する評価手法の研究	61
2.4.2 粘土系材料の透水特性、空隙構造等に関する研究	75
2.4.3 生活環境における放射性物質の移行及び代表的個人の設定	76
3. 結論	84
3.1 成果の要点	84
3.2 目的の達成状況	85
3.3 成果の公表等	85
3.3.1 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表	85
3.3.2 委託先による公表	86
3.4 成果の活用等	83
3.5 今後の課題等	83
参考文献一覧	90
執筆者一覧	100

## 表 目 次

表 2.1.1.1	ST 法における断層の活動性評価に必要なパラメータ、各パラメータの妥当性、パラメータ抽出の手法及び評価の留意点.....	9
表 2.1.2.1	上北平野ボーリング掘削における調査項目とその結果.....	18
表 2.1.2.2	広域地下水流動モデル構築と更新 .....	19
表 2.4.1.1	手法の適用範囲と実施する際の留意点 .....	75

## 目 次

図 1.3.1	研究の全体行程.....	3
図 2.1.1.1	断層等の調査における調査フロー例 .....	6
図 2.1.1.2	「秋田・男鹿」地域及び「盛岡」地域における地質断層の ST .....	8
図 2.1.1.3	(上) 八重山層群 (断層の下盤) での断層コアからの距離と亀裂密度、(下) 現在の応力に対する八重山層群での亀裂ごとの DT .....	11
図 2.1.1.4	簡易透水試験装置を用いた圧力変化過程の計測結果.....	11
図 2.1.1.5	クラックテンソルに基づく透水テンソル決定の流れ.....	12
図 2.1.2.1	仙台通商産業局 (1989)の水理水頭分布図 (左)、ArcGISPro による三沢層の水理水頭分布図 (中)、-500 m での地下水数値モデル (右) .....	15
図 2.1.2.2	ボーリング掘削前の地下水流動概念モデル .....	16
図 2.1.2.3	ボーリング掘削の位置図 .....	16
図 2.1.2.4	更新された地下水流動概念モデル .....	19
図 2.1.2.5	水理水頭分布について観測値 (黒短棒) と解析値 (色曲線) のモデルごとの比較 .....	21
図 2.1.2.6	非定常モデルによって得られた水理水頭分布と定常モデル (黒) と非定常モデル (白) における KMK 孔までの粒子追跡線 .....	22
図 2.1.2.7	コア試料を用いた鉱物分析に基づく調査フロー.....	23
図 2.1.2.8	沖積層及び洪積層の境界付近についての観察・分析結果 (KMK-3) .....	25
図 2.1.3.1	新規試験装置 (左: 全景、右: 供試体周辺) .....	27
図 2.1.3.2	ボーリング孔の BTV 観察結果と亀裂 (赤線) .....	29
図 2.1.3.3	コア試料の EDZ1 亀裂表面観察結果.....	31
図 2.1.3.4	EDZ1 亀裂の微小分光分析 .....	32
図 2.1.3.5	亀裂性媒体の空隙構造の概念 .....	34
図 2.1.3.6	亀裂性媒体中のマトリクス拡散の概念 .....	34
図 2.1.3.7	亀裂を含む多孔質媒体中の地下水流動モデル.....	35
図 2.1.3.8	100 リアライゼーションの地下水の移行時間の分布.....	35
図 2.1.3.9	流れの形態とデリバティブプロットの傾き .....	36
図 2.1.3.10	先新第三紀堆積岩類及び新第三紀堆積岩類の微細構造概念モデルの例 .....	37
図 2.1.3.11	非収着性核種がマトリクス拡散深さに到達する時間.....	37
図 2.2.1.1	モンモリロナイト粒子、スタック、層間間隙、粒子間間隙のイメージ図 ...	39
図 2.2.1.2	Na 型モンモリロナイトに対する推定した底面間隔と有効モンモリロナイト密度の関係.....	40
図 2.2.1.3	推定した粒子間間隙幅と有効モンモリロナイト密度の関係.....	41
図 2.2.1.4	透水係数と有効モンモリロナイト密度の関係.....	42

図 2.2.2.1	ひび割れの内部形状測定結果 .....	44
図 2.2.2.2	水銀圧入法（破線）と水蒸気吸着法（実線）に基づく細孔径分布の比較 ...	45
図 2.2.3.1	メソポーラスシリカ空隙内のイオン分布（上段）と電位分布（下段）の模式 図 .....	49
図 2.2.3.2	イオン強度が 1 mM（左）及び 50 mM（右）における径の異なるメソポーラ スシリカ空隙内の拡散層の電位分布 .....	50
図 2.2.3.3	空隙径 5 nm のメソポーラスシリカの異なる吸着平衡定数での Cs <sup>+</sup> の分配係数 （ <i>K<sub>d</sub></i> ）の表面錯体モデルによる計算値.....	50
図 2.2.3.4	空隙を持たないアモルファスシリカに吸着させた Eu <sup>3+</sup> の異なる pH での蛍光 スペクトル.....	51
図 2.3.1	不十分に閉塞されたボーリング孔及び周辺の地質媒体を通じた放射性物質の 移行経路.....	52
図 2.3.2	ボーリング孔閉塞を模擬した室内試験におけるベントナイトブロック内の空 隙 .....	53
図 2.3.3	閉塞されたボーリング孔及びその周辺の地下水の流れ.....	54
図 2.3.4	ボーリング孔の BDZ 及び周辺の亀裂を通じた放射性物質の移動 .....	54
図 2.3.5	有孔銅管を用いたボーリング孔の閉塞 .....	55
図 2.3.6	ボーリング孔を埋め戻す方法の例 .....	55
図 2.3.7	ボーリング孔影響確認解析に用いた地質水理条件.....	56
図 2.3.8	ボーリング孔周辺の粒子追跡線 .....	57
図 2.3.9	定流量注入における圧力応答 .....	58
図 2.3.10	定流量注入におけるデリバティブプロット .....	58
図 2.3.11	ボーリング孔の埋戻し、閉塞性確認試験の流れ.....	59
図 2.3.12	原位置における定流量注水試験の概念図 .....	59
図 2.3.13	注水区間の圧力の経時変化（イメージ） .....	59
図 2.3.14	室内試験概念図.....	60
図 2.4.1.1	覆土表面の侵食深さに関する解析結果 .....	63
図 2.4.1.2	MIS5e 段丘面の河川侵食による地形の段丘崖の修復 .....	65
図 2.4.1.3	段丘面上の等高線の修復 .....	65
図 2.4.1.4	古地形(12.5 万年前)から 5 万年後までの解析結果 .....	67
図 2.4.1.5	将来の地形変化評価の全体像 .....	69
図 2.4.1.6	現地形の再現結果.....	70
図 2.4.1.7	河床縦断形の再現結果.....	70
図 2.4.1.8	開析谷の模式断面図.....	72
図 2.4.3.1	生活環境における核種移行に関係する現象の概念図.....	77
図 2.4.3.2	懸濁粒子の粒径と沈降速度の関係 .....	79

図 2.4.3.3	土壌からの脱離試験の結果 .....	81
図 2.4.3.4	汽水湖におけるコンパートメントモデルの概念図 .....	82
図 2.4.3.5	トレンチ処分及びピット処分を重畳させた線量評価モデル例の概念図 .....	84

## 略 語 表

AIST	National Institute of Advanced Industrial and Science Technology (国立研究開発法人産業技術総合研究所)
BDZ	Borehole Damage Zone (ボーリング孔周辺のゆるみ域)
BTV	Borehole Television (ボアホールテレビ)
CT	Computed Tomography (コンピュータトモグラフィ)
CSH	Calcium Silicate Hydrates (カルシウムシリケート水和物)
DT	Dilation Tendency (ダイレーションテンデンシー)
EDZ	Excavation Disturbed Zone (掘削影響領域)
GBI	Geosphere-Biosphere Interface (地圏と生物圏のインターフェイス)
GIS	Geographic Information System (地理情報システム)
ICRP	International Commission on Radiological Protection (国際放射線防護委員会)
JAEA	Japan Atomic Energy Agency (国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
LEMs	Landscape Evolution Models (地形発達モデルに基づく数値シミュレーション)
MIS	Marine Isotope Stage (海洋酸素同位体ステージ)
NUMO	Nuclear Waste Management Organization (原子力発電環境整備機構)
SKB	Svensk Kärnbränslehanterin (スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社)
SSM	Stral Sakerhets Myndigheten (スウェーデン放射線安全庁)
ST	Slip Tendency (スリップテンデンシー)
TMS	Trimethylsilylation Method (トリメチルシリル誘導体化法)
WEPP	Water Erosion Prediction Project (水による侵食予測プロジェクト)
XRD	X-ray Diffraction (X線回折法)

## 用語の定義

中深度処分	核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則（昭和 63 年総理府令第 1 号）第一条の二第二項第三号に定める、地表から深さ 70 m 以上の地下に設置された廃棄物埋設地において放射性廃棄物を埋設の方法により最終的に処分すること。
人工バリア	廃棄物埋設地の構築物であって、廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出の防止及び低減のための機能を有するもの
天然バリア	人工バリアの周囲に存在する岩盤等であって、廃棄物埋設地から漏出した一部の放射性物質の地下水を介した生活環境への移動を抑制する機能を有するもの
海成段丘	海進期に海岸付近に形成される平坦面（海食台）が隆起することによって形成された階段状の地形。約 10 万年前の海進期に形成された段丘面を MIS5、約 24 万年前に形成された段丘面を MIS7、及び約 34 万年前に形成された段丘面 MIS9 と表記する。MIS5 の海進期をより詳細に区分する場合は 8.2 万年を MIS5a、9.6 万年前を MIS5c 及び 12.5 万年前を MIS5 と表記する。
開析、開析谷	海成段丘、河成段丘などの一定の連続性を有した地形平面が、時間経過とともに流水等によって侵食され、谷が形成される事象を「開析」といい、開析によってできた谷を開析谷という。
開析度	段丘面の面積に対する開析谷を上から見たときの面積比（開析度 = 開析谷面積/段丘面面積、単位は%）
開析谷侵食速度	開析谷内の侵食速度を評価する指標（開析谷侵食速度 = $2 \times$ 開析谷の体積 / 開析谷の上部投影面積 / 時間、単位は m/kyr）
最大侵食深	開析谷内の侵食深さの最大値（単位は m）
酸素同位体ステージ	天然に存在する酸素の同位体比による過去の気温に基づいたステージ区分のこと。海底に堆積した堆積物中の有孔虫の殻に含まれる酸素同位体比から、古海洋水温の変動を推定できる。
スリップテンデンシー	断層に作用する応力下において断層の姿勢に対する動きやすさについての指標のこと。せん断応力 ( $\tau$ ) と法線応力 ( $\sigma_n$ ) の比 ( $\tau/\sigma_n$ ) として定義
ダイレーションテンデンシー	断層周辺の亀裂に関して、その場の応力場が変化した時の流体の通しやすさについての指標。最大圧縮応力 ( $\sigma_1$ )、最小圧縮応力 ( $\sigma_3$ ) 及びクラックの面に対する法線方向応力 ( $\sigma_n$ ) によって、

	( $\sigma_1 - \sigma_n$ ) / ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) として定義
マトリクス	岩盤の亀裂以外の部分
原位置試験	実環境で行われる試験のこと。室内試験と対比して用いられる概念
リル	表流水の集中により地表面が溝状に侵食されて形成された小規模な地形。細溝、雨溝ともいう。
ガリ	表流水の集中により地表に掘り込まれた急な側壁を持つ溝状の水路地形。小規模のものをリル、大規模なものをガリという。

## 1. 序論

### 1.1 背景

中深度処分とは、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（昭和 32 年法律第 166 号。以下「原子炉等規制法」という。）に定める第二種廃棄物埋設に分類され、「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」（昭和 63 年総理府令第 1 号。以下「第二種埋設規則」という。）に定める 3 つの処分方法の 1 つである。この処分方法では、主に原子力発電所の廃止措置によって発生する比較的放射能濃度の高い放射性廃棄物（例えば、炉内構造物）を容器に固型化又は容器に封入した廃棄物を処分することが想定されている。

原子力規制委員会では、平成 27 年より中深度処分に係る規制の考え方の検討を進め、平成 28 年 8 月に「炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について」（平成 28 年 8 月 31 日、原子力規制委員会決定）を取りまとめ、平成 30 年 10 月に施行された改正原子炉等規制法において、廃棄物埋設地の掘削等の行為の制限、坑道の閉鎖に対する規制を導入した。その後、中深度処分の規制要求に係る技術的内容が検討され、令和 3 年 10 月には「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（平成 25 年原子力規制委員会規則第 30 号。以下「許可基準規則」という。）及び「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造、及び設備の基準に関する規則の解釈」（平成 25 年 11 月 27 日。原子力規制委員会決定。以下「許可基準規則解釈」という。）が改正され中深度処分に係る規制基準が整備された。

中深度処分では、数万年を超える長期間にわたって炉内等廃棄物等を起因とする放射線による影響から公衆と環境を防護するための根幹的な対策として、廃棄物と公衆の離隔に有効と考えられる深度へ廃棄物を埋設し、自然現象に起因する事象及び人間活動に起因する事象による廃棄物への擾乱等を防ぐ必要がある。その上で、その周辺の岩盤又は地盤等が有する物理的及び化学的な特性や、天然バリアへの放射性核種の漏出の防止及び低減の機能を有する人工構築物を活用することにより、埋設された廃棄物からの放射性核種の漏出や生活圏への移行を抑制するものである。このため、中深度処分の安全確保の観点からは、火山・火成活動、断層活動等の廃棄物埋設地を著しく擾乱して処分システムの安全機能を損なうような自然現象が起こらない場所であることの確認並びに天然バリア及び人工バリアが放射性物質の移行を抑制する性能を長期的に発揮する見通しがあることの確認が重要である。さらに、後続規制において、処分システムの性能が設計とおりに発揮するものであることを確認する必要がある。

### 1.2 目的

本研究では、中深度処分の事業許可申請に係る新規規制基準適合性審査において、適合性を具体的に判断するために必要となる科学的、技術的知見及び後続規制において処分システムの性能が設計とおりに発揮するものであることを確認するために必要となる科学的、

技術的知見の取得を目的とする。なお、得られた成果の一部は、中深度処分のみならず、浅地中処分に係る今後の新規規制基準適合性審査及び後続規制にも活用する。

### 1.3 全体行程

本研究は、研究課題を以下のとおり分類し令和3年度から令和6年度にかけて実施したものであり、得られた成果を本報告書にまとめる。全体行程を図1.3.1に示す。

- (1) 自然事象の長期評価に関する研究
  - ① 中深度処分における断層等に関する評価手法の研究
  - ② 中深度処分における涵養域から流出域までの地下水流動の評価手法の研究
  - ③ 中深度処分における岩盤の力学状態と水理特性に関する研究
- (2) 廃棄物埋設における性能評価手法及び線量評価手法に関する研究
  - ① ベントナイト系人工バリアの長期性能評価手法の研究
  - ② セメント系人工バリアの長期性能評価手法の研究
  - ③ 中深度処分における岩盤の収着・移行現象に関する研究
- (3) 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究
- (4) 中深度処分及び浅地中処分に共通する課題に関する研究
  - ① 中深度処分及び浅地中処分における侵食に関する評価手法の研究
  - ② 粘土系材料の透水特性、空隙構造等に関する研究
  - ③ 生活環境における放射性物質の移行及び代表的個人の設定

ここで、(1)①及び②並びに(4)①の一部は、国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下「AIST」という。）に委託、(2)②の一部はジーエルサイエンス株式会社に委託、並びに(3)、(4)①の一部及び③の一部は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下「JAEA」という。）に委託して実施したものである。また、(1)③の一部は国立大学法人埼玉大学（以下「埼玉大学」という。）及びAISTとの共同研究並びに、国立大学法人東京大学（以下「東京大学」という。）及びJAEAとの共同研究、(2)①は東京大学及びJAEAとの共同研究、(2)③は東京大学との共同研究により実施した。

実施項目		年度			
		R3	R4	R5	R6
(1) 自然事象の長期評価に関する研究	① 中深度処分における断層等に関する評価手法の研究				
	② 中深度処分における涵養域から流出域までの地下水流動場に関する評価手法の研究				
	③ 中深度処分における岩盤の力学状態と水理特性に関する研究				
(2) 廃棄物埋設における性能評価手法及び線量評価手法に関する研究	① ベントナイト系人工バリアの長期性能評価手法の研究				
	② セメント系人工バリアの長期性能評価手法の研究				
	③ 中深度処分における岩盤の収着・移行現象に関する研究				
(3) 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究					
(4) 中深度処分及び浅地中処分に共通する課題に関する研究	① 中深度処分及び浅地中処分における侵食に関する評価手法の研究				
	② 粘土系材料の透水特性、空隙構造等に関する研究				
	③ 生活環境における放射性物質の移行及び代表的個人の設定				

図 1.3.1 研究の全体行程

Figure 1.3.1 Overall schedule of the research

## 2. 本論

### 2.1 自然事象の長期評価に関する研究

#### 2.1.1 中深度処分における断層等に関する評価手法の研究

本項の検討は、AIST への委託により実施した。

##### (1) 物理探査等を用いた断層等の地下構造の探査・評価手法に関する検討

###### ① はじめに

令和 3 年 10 月に改正された許可基準規則では、中深度処分の対象廃棄物に含まれる放射性物質の放射能が十分減衰するまでに要する期間が長期にわたることから、断層運動に

関して、あらかじめ設計上の対策を求めることとしている。具体的には、許可基準規則第12条第1項第1号において、「断層運動、火山現象その他の自然現象により人工バリアの著しい損傷が生じるおそれがないものであること。」と記載されている。また、許可基準規則解釈において、人工バリアは断層を避けて設置されることを求めており、具体的には、下記のように記載されている。

一 人工バリアを、次に掲げる断層等を避けて設置すること。

- ① 後期更新世以降（約12～13万年前以降）の活動が否定できない断層等のうち震源として考慮する活断層
- ② 上記①の活断層の活動に伴い損傷を受けた領域
- ③ 後期更新世以降（約12～13万年前以降）の活動が否定できない断層等のうち地震活動に伴って永久変位が生じる断層及び変位を及ぼす地すべり面
- ④ 上記①及び③の断層等以外のものであって規模が大きい断層

一方、許可基準規則第12条第1項第2号及び同解釈において、中深度処分の廃棄物埋設地の位置は、10万年後において廃棄物埋設地を鉛直方向に投影した地表面のうち、最も高度の低い地点から廃棄物埋設地の頂部までの距離が70m以上であることが求められており、具体的には、下記のように記載されている。

2 第1項第2号の規定は、廃棄物埋設地の位置について、隆起・沈降及び気候変動による大陸氷床量の増減に起因する海水準変動を考慮した侵食（廃棄物埋設地の近くに、河川がある場合は下刻の進展に伴って谷幅が広がる側方の侵食も考慮し、海岸がある場合は海食による侵食も考慮する）による10万年間の深度の減少を考慮しても、10万年後において廃棄物埋設地を鉛直方向に投影した地表面のうち、最も高度の低い地点から廃棄物埋設地の頂部までの距離が70メートル以上であることを求めている。

以上の事から、審査においては、避けるべき断層の有無の評価の妥当性を確認する必要がある。しかしながら、廃棄物埋設地と地表面の距離が70m以上に設定される中深度処分においては、許可基準規則第12条第1項第1号の解釈で定められた避けるべき断層の調査が、地表から深度数メートル程度で行われるトレンチ調査による直接観察だけでは不十分な評価となる可能性が考えられる。

地下の断層を評価するためには、地表・空中からの物理探査、ボーリング孔からの物理検層（以下「物理探査等」という。）による評価を行うことが想定される。そこで、地下深部の断層調査に有効となり得る物理探査等について検討し、その物理探査手法において探

査精度に影響する可能性が高い測線計画について留意点を整理した。さらに、物理探査等を行う際の調査フロー案を作成した。

## ② 有効となる物理探査等の検討

中深度処分の廃棄物埋設地の断層調査を行うにあたり有効となり得る物理探査等について既存研究<sup>1,2</sup>を参考に検討した。

木方ほか<sup>2</sup>の報告書では、地層処分における活断層の評価に当たって、物理探査等の前段階に変動地形学的調査を行うことの重要性が示されている。また、三次元地震探査・三次元比抵抗探査・重力探査等と三次元電磁法探査（空中探査）を組み合わせることにより地質・地質構造の探査を行い、断層を把握することが有効であると考えられる<sup>1,3</sup>。

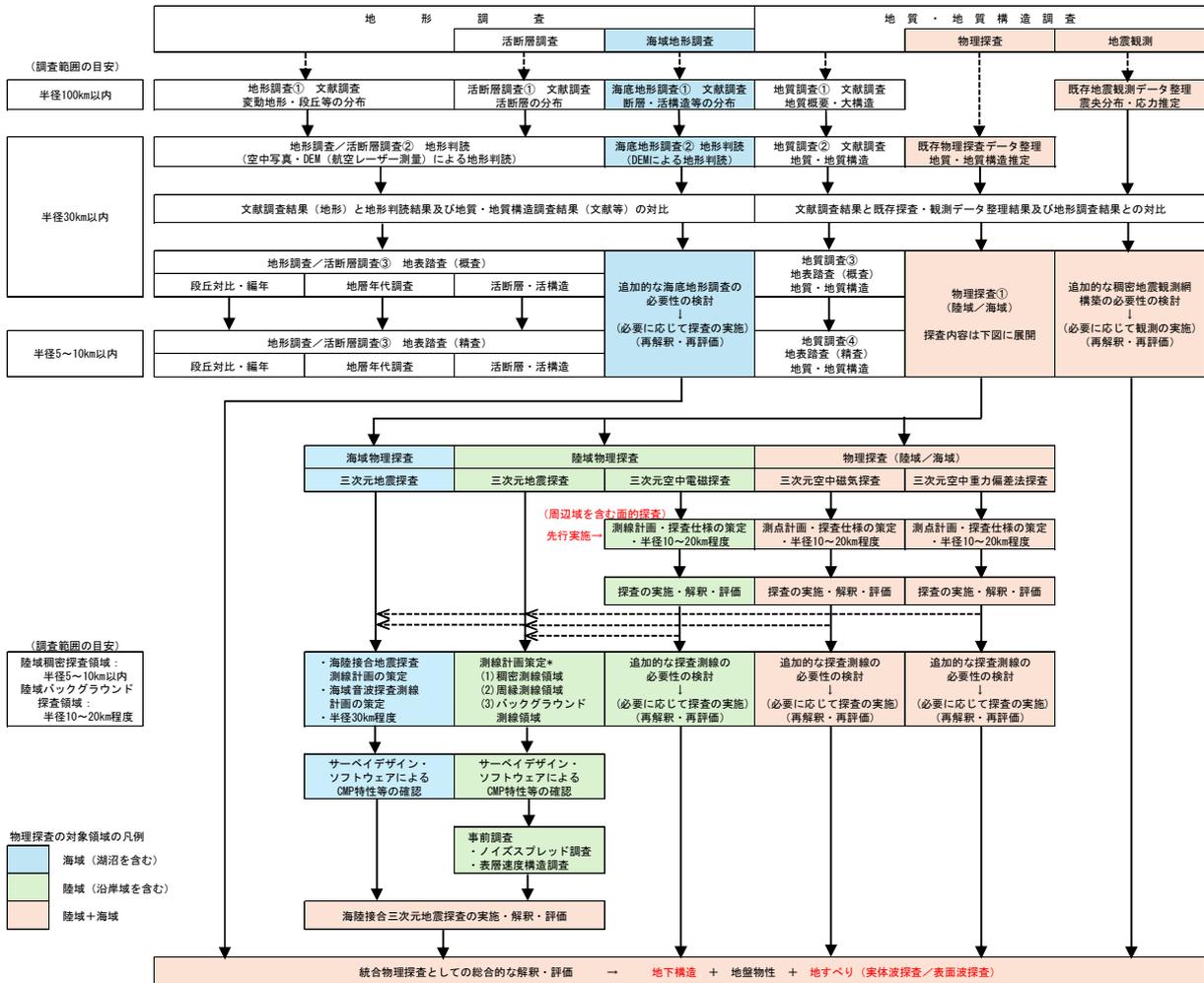
## ③ 物理探査等において留意すべき点について検討

物理探査等を行うに当たって留意すべき点について検討を行った。三次元地震探査、三次元比抵抗探査、重力探査等及び三次元電磁法探査（空中探査）を組み合わせた物理探査において、最も大きな制約となるのは三次元地震探査の測線の設定であることが分かった。これは、他の物理探査に用いる装置は、小型可搬型化が可能であるが、三次元地震探査の震源車両は小型化が困難であり、少なくとも、林道程度の車両通行可能道路がないと運用が不可能である。そのため、三次元地震探査に用いる震源車両が運用可能な範囲で発振点及び受振点の計画を立案しなければならない点が大きな制約条件となると考えられる。三次元地震探査においては、廃棄物埋設地周辺に設定する測点密度が高い領域と、その周辺部で測点密度が半分以下の領域に加えて、弾性波構造が解析可能な、調査深度の約8倍の長さの測線（測点が一定間隔で直線に配置された線）を設定する必要がある。これらの測線を設定することが大きな制約条件となることが想定された<sup>4</sup>。このことから、震源車両の運用が制限される地域に埋設地が設定された場合、地震探査の側線の設定が十分であるかについて留意する必要がある。

三次元地震探査に先立ち実施する事前調査において留意すべき点について検討した結果、ノイズスプレッド調査が重要であることが分かった。この調査は、調査対象地域のノイズの広がりや、地震波が減衰しやすい領域の地震探査データ特性を把握するための調査である。この調査結果を踏まえて適切な地震探査計画が立てられているかについて、留意する必要がある。また、調査地域の表層速度構造調査も重要であることが分かった。地震波の速度は場所によって異なるが、特に表層は下層に比べて速度が遅く、表層の低速度構造が数値解析結果に影響をおよぼす。そのため、表層補正の高精度化のため、表層速度構造調査を事前に実施し、その結果を踏まえた解析が行われているかについて留意する必要がある<sup>3</sup>。

④ フロー図の作成

これらの検討結果を踏まえ、物理探査等を用いた断層等の調査フローを作成した。なお、物理探査手法は、陸域と海域とで異なった手法が採られることがあるため、陸域と海陸/湖陸の接合域を対象とした調査フローとした（図 2.1.1.1）。



出典) AIST (2025) <sup>3</sup>

図 2.1.1.1 断層等の調査における調査フロー例

Figure 2.1.1.1 Example of survey flow in geophysical investigation of faults

(2) 断層の再活動性評価手法に関する検討

① はじめに

後期更新世以後に活動がない断層（以下「地質断層」という。）の再活動性の評価手法としてスリップテンデンス（Slip tendency : ST）法が提案されている<sup>5</sup>。STの値は、断層周囲の応力状態から断層面に作用するせん断応力 ( $\tau$ )、法線応力 ( $\sigma_n$ ) を算出し、3次元的なモールクローンの破壊基準に基づいてせん断応力と法線応力の比 ( $\tau/\sigma_n$ ) として定義されている<sup>6</sup>。

つまり ST の値が大きいことは断層がすべりやすいことを意味するため、この ST の値の大きさにより断層の再活動性の高さを評価することが可能となる。ただこの ST 法においては、間隙水圧が断層面に作用することによって法線応力を下げる効果があるように、その他にも摩擦係数や断層形状といった各要素について留意する必要がある。

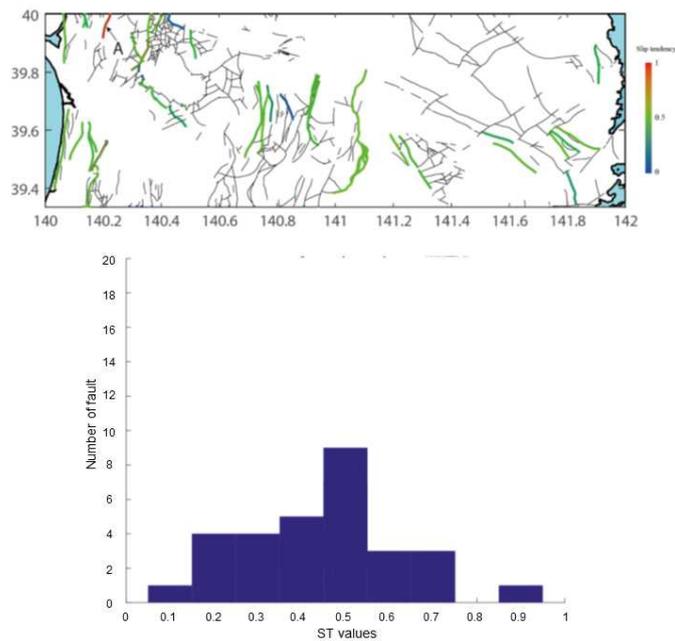
ここでは各断層に対して、主応力軸の断層に対する角度と応力比によって ST の値を計算し、Morris et al.<sup>6</sup> の式を摩擦係数で規格化した<sup>7</sup> (ST の値は  $0 \leq ST \leq 1$  となる)。そして ST 法による地質断層の活動性評価についての有効性を検討するとともに、応力、間隙水圧、摩擦係数、断層形状といった各要素についてパラメータの抽出法や評価における留意点を整理した。

## ② ST 法による東北地方の地質断層の活動性評価

東北地方における活断層の ST の値は 0.8 を超えるものが多く全体的に高い値を示し、多数の活断層が活動的と評価がなされている<sup>8</sup>。ここでは東北日本弧での後期更新世以後に活動がない「地質断層」について、ST 法によって活動性の評価を行いその有効性について検討した。

東北地方のうち、地質断層情報が十分ある「秋田・男鹿」及び「盛岡」の地域に ST 法を適用したところ、ほぼ全ての断層が 0.75 を下回る低い ST の値を示した (図 2.1.1.2)。一つだけ 0.9 程度の ST の値を示す断層が「秋田・男鹿」地域の北東部に存在するが、これは地質断層のデータ群に含まれる活断層を検知したものであると解釈された。また青森県東部の下北断層を対象として、応力状態について Maeda et al.<sup>10</sup> が求めた結果を用いて、2011 年東北地方太平洋沖地震 (以下「2011 年東北沖地震」という。) 前後における ST の値を計算した<sup>8</sup>。その結果 2011 年東北沖地震前後でのそれぞれの応力状態における下北断層に対する ST の値は 0.40-0.56 及び 0.42-0.59 となった。つまり、地震前後のいずれの場合でも ST の値は 0.6 以下と十分低く、地震の発生後でも活動性が顕著に上がることはなかったことをこの結果は示している。さらに、青森県から岩手県にまたがる折爪断層の地質断層区間に対しても 2011 年東北沖地震の発生前後で ST の値を評価したところ、それぞれ 0.35-0.41 及び 0.33-0.41 とやはり低いままほぼ変化していないことが示された<sup>4</sup>。このように東北地方の地質断層の活動性を評価したところ、後期更新世以降にこれらの断層に活動がない地質断層の ST の値は 0.6 を下回り、十分に非活動的とみなす値が得られることが確認された。

以上の結果から、ST 法による東北地方の地質断層の活動性評価の有効性が高いことが示された。



出典) AIST (2022) <sup>9</sup>

図 2.1.1.2 「秋田・男鹿」地域及び「盛岡」地域における地質断層（上：計算された ST の値によって着色した地質断層、下：ST の値のヒストグラム）

Figure 2.1.1.2 ST of geological faults in the Akita-Oga and Morioka areas (top: Geological faults colored by the calculated ST values, bottom: Histogram of ST values)

### ③ ST 法における断層の活動性評価の留意点

ST 法における断層の活動性評価は、応力、間隙水圧、摩擦係数、断層形状の 4 つの重要な要素からなる。これらの 4 つの要素について、上記の ST 法による評価を通じて整理された断層の活動性評価に必要なパラメータの妥当性、パラメータ抽出の手法、評価の留意点を表 2.1.1.1 に示す。応力に関しては、ST 法を考える上で最も重要な要素であり、東北地方では空間的な応力不均質や過去から現在にかけての応力場の時間変化が報告されていることから、これらの応力の時間的・空間的变化を踏まえる必要がある。間隙水圧については、間隙水圧が高いと断層面に働く法線応力が低下し、ST の値が高くなる。この間隙水圧においても、降水量の変化等の影響を受けるとともに地下水流動等の影響を受け局所的に大きな変動を示し、時間的・空間的变化を伴う。特に間隙水圧は局所的な変動が大きいと考えられるため、地域特有の水理学的環境における間隙水圧の変化が ST の値に与える影響を考慮する必要がある。摩擦係数に関しては、岩石の摩擦係数は断層のすべり易さを左右し、ST の値を計算する上で重要な係数となる。岩石の摩擦係数は岩種などの要因によって異なる可能性が高いため、岩石摩擦実験などのデータから断層を構成する岩種毎に摩擦係数を考慮する必要がある。ただし、地下の断層面を構成する断層岩の摩擦係数を特定

することは容易ではないことに留意する必要がある。そして断層形状については、断層形状が単純な矩形でなく非常に複雑な可能性があり、その形状や走向・傾斜が ST の値に大きな影響を与えることを考慮する必要がある。また、評価の全体的な留意点としては、ST の値に反映され得るデータの測定誤差や解釈についての不確かさ、地域特性の考慮、パラメータ間の相互作用の評価、モデルの適用範囲等が挙げられる。ST 法においては、こうした留意点を踏まえて、断層の活動性について評価を行う必要がある。

表 2.1.1.1 ST 法における断層の活動性評価に必要なパラメータ、各パラメータの妥当性、パラメータ抽出の手法及び評価の留意点

Table 2.1.1.1 The required parameters, validity of parameters, methods of parameter extraction, and points to note for evaluation of fault activity in ST

	パラメータ設定の妥当性	パラメータ抽出の手法例	留意点
1. 応力	<ul style="list-style-type: none"> <li>主応力軸の方向と応力比を入力。</li> <li>応力場の時間的空間的变化を捉えることで、断層の活動性の変化を評価することが可能。</li> <li>地殻内の応力場の変化(例えば、プレート運動の長期的な変化や大規模な地震に伴う短期的な応力変化)をパラメータとして組み込める。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震のメカニズム解および小断層などのデータを用いた応力逆解析</li> <li>原位置での地殻応力測定</li> <li>数値シミュレーション(地層の構造や岩石の物性値を基にしたモデルを用いて応力分布を予測)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造発達史やテクトニックセッティングによって応力場が異なるため、地域ごとの応力場の評価が必要。</li> <li>応力場は短期・長期で変化し得るため、変化の原因に基づく評価が必要。</li> <li>信頼性のあるデータを用いて、応力測定の不確かさを合わせて考慮することが重要。</li> </ul>
2. 間隙水圧	<ul style="list-style-type: none"> <li>断層面の有効応力に影響を与え、流体圧が高まることでスリップテンデンスの値が増加する。</li> <li>断層活動前に流体圧の変化が認められると言われている(断層バンプモデル)ため、間隙水圧は重要な要素。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>間隙水圧測定(ボーリングなど)</li> <li>露頭やコア試料での鉱物脈の幾何学情報からの逆解析による推定</li> <li>地震波トモグラフィーなど、地球物理的に観測による流体分布の推定</li> <li>間隙水圧のモデル化(地質構造や流体の動きを考慮したモデル)</li> <li>地表変位の観測(その場の流体圧の変化を逆解析)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>時間とともに変化するため、長期的な観測が必要。</li> <li>局所的な異常間隙水圧が断層活動を引き起こす可能性に留意し、評価には適切な空間解像度を設定する。</li> <li>地域特有の水理学的環境を考慮して、流体圧の変動要因を評価する。</li> <li>安全を考慮して、間隙水圧の値の取り得る範囲を設定して評価する。</li> </ul>
3. 摩擦係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>岩石の摩擦の性質は断層の滑りやすさを決定する要素。</li> <li>断層の物質特性や環境条件に影響される。</li> <li>0.6が一般的だが、0.1という小さい係数をもつ物質(粘土鉱物)もある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>摩擦試験(断層ガウジ試料の実験室での測定)</li> <li>既存データの解析(過去の地震データや地質調査結果から推定)</li> <li>シミュレーション(複数の摩擦条件下でのスリップ挙動を解析)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>摩擦係数は異常な環境条件や物質の変化によって変動するため、実際の地質条件に基づいた評価が重要。</li> <li>様々な摩擦条件を考慮したシナリオを設定して幅広い評価を行う必要がある。</li> </ul>
4. 断層形状	<ul style="list-style-type: none"> <li>断層の形状(面の傾斜、幅、曲率等)は、面に働く応力やスリップ様式に影響を与える。</li> <li>特に複雑な断層では局所的な応力集中が生じる可能性がある。</li> <li>断層の幾何学的特徴を考慮することで評価の精度が向上する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地質調査(地表踏査やボーリング)</li> <li>地球物理探査(反射法地震波探査、地震波トモグラフィーや重力測定による推定)</li> <li>3Dモデル作成(地質データを基に3Dモデルを作成して断層形状の可視化)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>断層の複雑さ(深度で傾斜が変化するリストリック断層)や不確かさを考慮し、特に異なる近接した断層間の相互作用を評価する必要がある。</li> <li>断層形状の評価には多くのデータが必要であるため、地球物理探査で十分な調査を行うことが求められる。</li> </ul>

出典) AIST (2025) <sup>3</sup>

### (3) 断層活動による力学的・水理学的影響範囲の調査・評価手法に関する研究

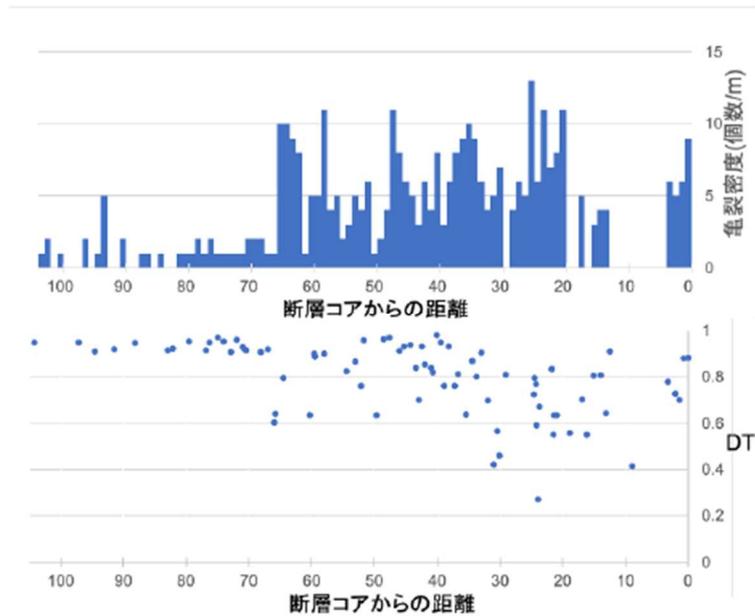
#### ① はじめに

申請者は許可基準規則において、中深度処分に係る処分システムに影響を及ぼす断層等を避けた場所に人工バリアを設置する設計となっていること、事業許可後の建設段階において断層等が確認された場合にはそれらを避けて人工バリアを設置する方針であること及びそれが技術的に可能と見込まれることを示すことが求められる。当該申請の妥当性を原子力規制委員会が判断するためには、断層の活動性の履歴や断層破碎帯及びその近傍の性

状等についての申請者の調査が適切になされていることを確認する必要がある。そこで、断層の力学的・水理学的影響範囲の評価手法について調査した。

## ② 野外調査による断層影響範囲の調査・評価手法

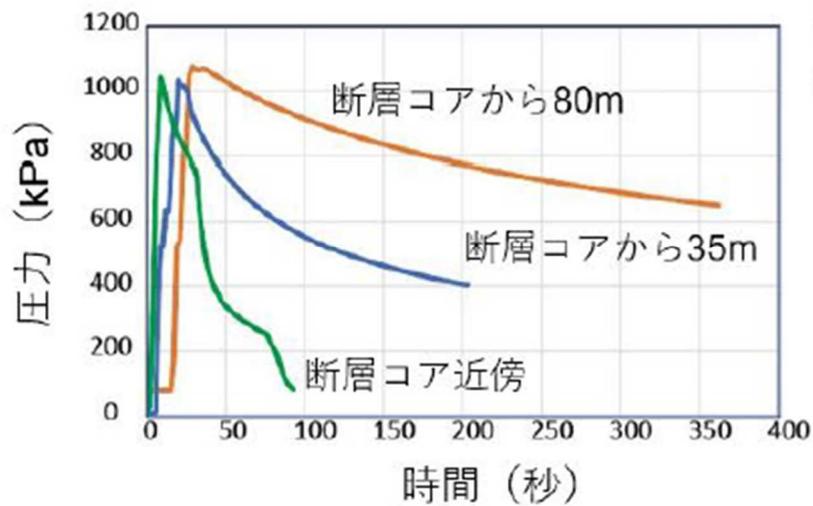
地震の前後で岩盤の透水性が変化すると想定される事例として 2011 年東北沖地震及び 2016 年熊本地震がある。また過去の地震の痕跡ではあるが九州東部四万十帯での石英脈群についても報告がされており、いずれも透水性の増加を予想させる開口性亀裂の形成の可能性を示す事例であるとされている<sup>11)</sup>。そこで応力場と断層近傍の透水性の具体的な関係について、沖縄県与那国島のサンニヌ台にある八重山層群砂岩と琉球層群石灰岩の間の正断層に伴う約 350 条の亀裂についてその分布密度と 80 条の姿勢（走向傾斜）を用いたダイレクションテンデンス（以下「DT」という。）と断層コアからの距離の関係について、特に傾斜が比較的緩やかで計測に適している南側の八重山層群側から調査した<sup>11)</sup>。図 2.1.1.3 に示すとおり、DT がおおむね 0.7 を超えて亀裂が調査時の応力下では流体を流しやすいポテンシャルを持つことを示している。DT は断層コアに近づくとばらつきが大きくなるが、これは断層運動で生じる応力擾乱によってさまざまな方向の亀裂が生じるためと考えられている。DT は応力場と亀裂の姿勢の位置関係から決まる 0 から 1 までの間をとる数であり、1 の場合はその場の応力場において亀裂が最も流体を通しやすく、0 の場合は最も通しにくいことを示す。応力場は沖縄トラフ及び琉球弧島嶼域の震源データより推定した。



出典) AIST (2023) <sup>11</sup>

図 2.1.1.3 (上) 八重山層群 (断層の下盤) での断層コアからの距離と亀裂密度、  
(下) 現在の応力に対する八重山層群での亀裂ごとの DT

Figure 2.1.1.3 Fracture density (top) and DT under the present stress field (bottom) vs. the distance from the fault core in the foot wall of the Yaeyama Group



出典) AIST (2024) <sup>4</sup>

図 2.1.1.4 簡易透水試験装置を用いた圧力変化過程の計測結果

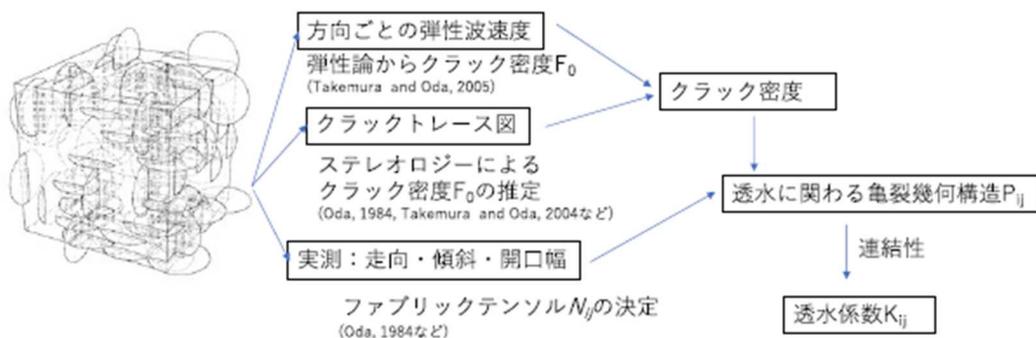
Figure 2.1.1.4 Pressure change from the start of water injection using simple permeability test apparatus

あわせて簡易透水試験装置<sup>11</sup>を用いた注水圧の減衰を断層コアからの距離ごとに測定した<sup>4</sup>。図 2.1.1.4 は断層コアに近づくほど圧力の減衰が速いことすなわち透水性の上昇傾向が示唆され、図 2.1.1.3 の断層コアに近づくほど亀裂密度が増加していることを示唆すると考えられる。断層コア近くの DT のばらつきは透水性の評価に影響しないように見えるが、応力場が転換するようなことがあれば、その後の評価に影響する可能性がある。

本研究は、前述のとおり、沖縄県与那国島の正断層を対象としている。正断層は、その引張性の応力場から亀裂の開口性が高く、厳しい評価となるため、研究対象としたが、圧縮応力場が多い我が国においては、正断層は比較的少ない。このため、今後、埋設地の立地が決定した場合、その場において、本研究成果がどこまで適用可能であるかについて、留意する必要がある。

### ③ 断層影響範囲の調査・評価手法へのクラックテンソル理論の適用

断層近傍の亀裂群を介した水理学的影響評価を目的にクラックテンソルを用いた評価手法について検討した<sup>9</sup>。この手法は亀裂の姿勢、大きさ、分布密度といったデータを基に基質部の透水性を仮定して等価透水係数（異方性も考慮）を理論的に推定するものである（図 2.1.1.5）。評価に必要なデータの取得には、弾性波速度測定や坑道での連続的露頭観察あるいは孔井でのボアホールテレビユーアなどを利用した亀裂の連続的観察<sup>4</sup>が可能であることからスポット的な透水係数測定を補完することが期待される。また、これを用いて透水係数の異方性や圧力依存性についてパラメータ解析した結果、透水係数の深度依存性は桁で大きく変化するが異方応力の影響は数倍程度で、急激な応力場の変化に対して透水場はその影響を受けてもその変化量は比較的小さいことが分かった<sup>4</sup>。



出典) AIST (2023)<sup>11</sup>

図 2.1.1.5 クラックテンソルに基づく透水テンソル決定の流れ

Figure 2.1.1.5 Workflow for getting hydraulic conductivity tensor based on the crack tensor theory

#### (4) まとめ

中深度処分における断層等に関する評価手法の研究を行った。中深度処分の廃棄物埋設地の断層調査においては、三次元地震探査、三次元比抵抗探査、重力探査等及び三次元電磁法探査（空中探査）を組み合わせた物理探査によって断層を把握することが有効であると考えられた。調査において、三次元地震探査に用いる震源車両は、小型可搬型化が難しく、その運用には林道程度の車両通行可能道路が不可欠であるため、その運用可能範囲が制約条件となることに留意すべきである。また、三次元地震探査において、調査深度の約8倍の長さの測線の設定が必要である点に留意すべきである。加えて、物理探査手法等を用いた断層調査のための調査フロー図の作成を行った。

断層の再活動性評価については、力学的な評価手法である ST 法を用いて東北地方の地質断層の活動性評価を行った。その結果、2011年東北沖地震前後も含めて、ST 値はおよそ非活動的と見なせる低い値が得られ、ST 法による東北地方の地質断層の活動性評価の有効性が高いことが示された。また表 2.1.1.1 のとおり、ST 法による断層の活動性評価において注意すべき、応力、間隙水圧、摩擦係数、断層形状といった各要素のパラメータの妥当性や抽出法、評価の留意点を整理した。

八重山層群についての断層活動による力学的・水理学的影響範囲の調査・評価においては、DT がおおむね 0.7 以上であり、調査時の応力下では亀裂が流体を流しやすいことが示されるとともに、簡易透水試験の結果からは、断層コア近傍ほど透水性が高い傾向が示唆された。また、クラックテンソルを用いて、水理学的影響評価を行ったところ、透水係数の深度依存性は大きいものの、応力場の変化に対して透水場はその影響を受けてもその変化量は深度依存性に対して比較的小さいことが分かった。

### 2.1.2 中深度処分における涵養域から流出域までの地下水流動の評価手法の研究

本項の検討は、AIST への委託にて実施した。

#### (1) 地下水流動概念モデルの作成及び涵養域から流出域におけるボーリング調査

##### ① はじめに

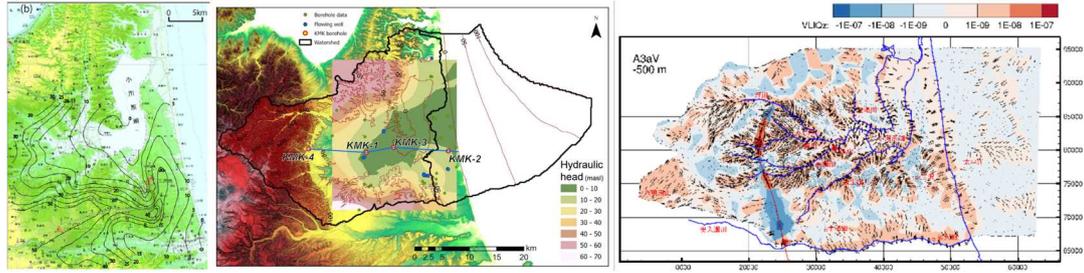
中深度処分における廃棄物はその放射線による潜在的な影響が低くなるまでに数万年を要することから、放射性核種の主たる移行経路は遅い地下水流動場であることが求められる。しかしながら、遅い地下水流動場で地下水の流速を直接観測することは困難である。そのため、流動場の評価のために、地質構造とこれに対応した透水係数を把握し、地形等による圧力ポテンシャルの境界条件を用いて解析的に地下水流動場を評価する方法、ボーリング孔等を用いた地下水圧の測定値と解析値を比較することによってこれを検証する方法、水質・地下水年代を測定しその空間的分布から地下水の起源や滞留性を検討する方法等を組み合わせた地下水流動モデルとして検討することが考えられる。ただし、これらの

技術についての研究は地質等の地域に固有な性質の多様性に対して十分とは言えない。一方で青森県上北平野については多くの水文地質学的資料が存在している。そこで、ここではこの上北平野をモデルフィールドとして断層等を含む地質構造、透水係数、地形等から水理地質モデルを構築し、数値解析により地下水流動と水質形成についてのモデル化を行った。同時に、当該地域の涵養域から湧出域までの間でボーリング調査、水文調査等を行い、地下水水質、地下水年代、地質ごとの透水係数等の分布を把握し、地下水の起源、滞留性等について検討するとともに、モデル解析と相互にフィードバックすることにより地下水流動場の評価手法に係る科学的・技術的知見を取得した。

## ② 文献調査による地下水流動概念モデルの作成

上北平野の地下構造は、下位から第三紀中新世～鮮新世の市ノ渡層、甲地層、第四紀更新世の三沢層が分布し、その上に不整合で段丘堆積物又は第四紀火砕流堆積物が載り、河川中下流部の谷底を沖積層が埋めている。深層ボーリングによって得られた地質柱状図<sup>12-14</sup>、及び反射法地震探査<sup>15</sup>により、当該地域の新第三紀系は平野全体として緩やかな盆状構造を呈していることが明らかとなっている。上北平野の西縁では、底田撓曲などを構成する野辺地断層帯がおおむね南北方向の走向で分布している。

地下水は水理ポテンシャル(以下「水理水頭」という。)の高い方から低い方へ流動する。水理水頭は位置ポテンシャルと圧力ポテンシャルの和であり、位置ポテンシャルは標高によって規定される。したがって、地形的分水界は水が地表から涵養し、地下水として流動する領域(地下水モデルの領域)を把握する基礎となる。既往井戸調査<sup>16</sup>による水理水頭を図 2.1.2.1 左に示す。新第三紀堆積軟岩地域の場合、地下水流動は帯水層の形状(傾斜)や構造(難透水層の分布、断層の有無、走向等)にも影響される。当該地域は水文地質に係る既存文献が豊富であることから、約 1,200 本の孔井から地質、水位等のデータを収集し、GIS ソフトウェア(ArcGIS Pro<sup>®</sup>)を用いて検討した。一例として三沢層の水頭分布<sup>4</sup>を図 2.1.2.1 中に、既存文献情報に基づく地下水流動解析結果<sup>17</sup>を図 2.1.2.1 右に示す。



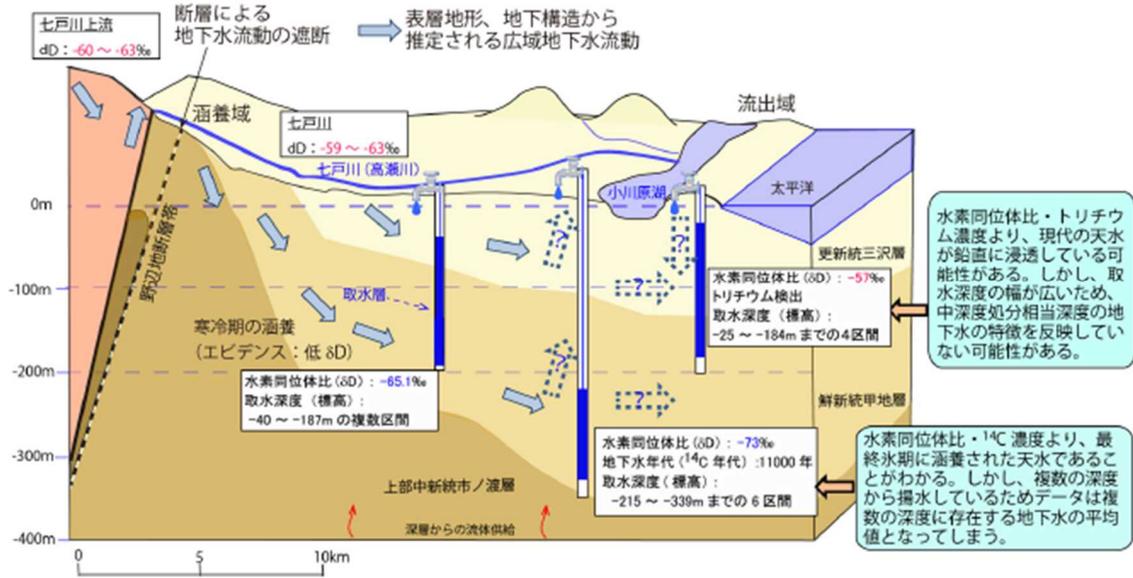
出典) AIST (2024、2021) 4, 17

図 2.1.2.1 仙台通商産業局 (1989) の水理水頭分布図 (左)、ArcGISPro による三沢層の水理水頭分布図 (中)、-500 m での地下水数値モデル (右)

矢印 : 水平流向、赤 : 上昇流、青 : 下降流

Figure 2.1.2.1 Hydrological head contour from MITI Sendai office (1989) (left), hydrological head contour of the Misawa F. from ArcGISPro in this study (mid), groundwater numerical model at -500 m(right), arrow: horizontal flow, red: up flow, blue: down flow

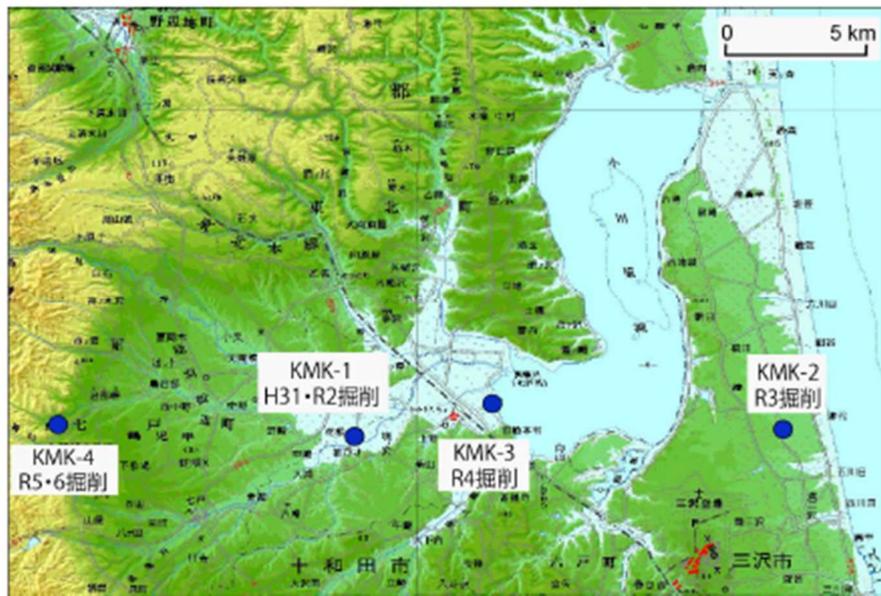
これらの図より、水理水頭分布が西から東に低下することが分かり、流向が大局的に東向きであることが予想できた。上北平野では平野西部より涵養され、東側の太平洋側に流れる地下水流動が卓越すると想定され、あわせて前安全研究プロジェクトまでの既存井戸からの地下水の地化学調査を踏まえてボーリング掘削前の地下水流動の概念モデルとして図 2.1.2.2 が考えられた。なお深度 400 m 程度の市ノ渡層中の既存井戸 (温泉井) では、水温が一般的な地温勾配 (約  $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ) よりも高いこと及びヘリウム同位体比から若干のマントル起源ヘリウムを含むことが分かり、そのことから深層からの流体の流入が考えられる<sup>18</sup> ことが概念モデルに反映されている。



出典) AIST (2024) <sup>4</sup>

図 2.1.2.2 ボーリング掘削前の地下水流動概念モデル

Figure 2.1.2.2 Conceptual model of the groundwater before the boring survey



出典) AIST (2024) <sup>4</sup>

図 2.1.2.3 ボーリング掘削の位置図

Figure 2.1.2.3 The locality of the boring sites

③ 上北平野におけるボーリング調査

上記の事前の概念モデルを基に広域地下水流動モデルの検証・更新を目的として、ボーリング掘削調査を中間流動域 (KMK-1 孔) に続いて東の流出域 (KMK-2 孔、太平洋沿岸

域)、流出域 (KMK-3 孔、小川原湖西側)、西の涵養域 (KMK-4 孔)にて順次実施した (図 2.1.2.3)。掘削深度は、それぞれ中深度処分相当深度である 70 m の約 2~3 倍程度である 180~200 m とした。調査項目は揚水試料及び掘削試料からの間隙水抽出より得られた地下水試料の水質、各種同位体及び地下水年代指標成分の測定、地層の透水性評価のための揚水試験、コア試料の透水試験、コア試料の岩相観察、温度検層、電気検層等である。また、KMK-1 孔、KMK-3 孔のコア試料については、鉱物観察・鉱物分析も行った。これらの結果から、以下の概念モデルの更新を行った。

KMK-1 孔：1 万数千年程度の  $^{14}\text{C}$  年代を示す氷期に涵養された地下水が深度 27 m 程度の浅層から深度 200 m まで存在することが分かった。これは、間隙水の結果とも整合的で、その結果を合わせると、表層からの地下水の浸透が深度 12 m 程度で既に遮断されていることが新たに示された。また、水位観測、コア試料の観察及び室内透水試験結果より、145 m 付近のコア試料において難透水層が確認され、この層の上下で水質パターン (Na/Ca- $\text{HCO}_3$  型から深層では Na- $\text{HCO}_3$  型) も若干異なることから、この層を境に地下水流動系が異なることが想定された。

KMK-2 孔：80 m 以深で地下水の  $^{14}\text{C}$  年代が約 1 万年である一方で、深度 74 m まではトリチウムの検出される若い地下水年代が示され、この深度までの鉛直方向の地下水の浸透が確認された。水質及び水の同位体の特徴も含め、本地域は小川原湖西側の地下水とは流動系の異なる鉛直浸透の地下水であることが判明した。

KMK-3 孔：KMK-1 孔と同様に深度 22 m 程度以深では、地下水の  $^{14}\text{C}$  年代が 1 万数千年~2 万年程度である水が深度 200 m まで存在することを把握し、ここでも表層からの地下水の浸透が遮断されていると判断した。

KMK-4 孔：当該地域に存在する断層帯及び撓曲が地下水の涵養、流出、遮断等の地下水流動に与える影響を評価することとした。令和 5 年度の底田撓曲上盤側の掘削により、現代の降水と同じ特徴を持つ地下水の涵養が確認された。ここでは、透水性箇所を検出のため、電気検層及び温度検層を行った。温度検層では 1 m 刻みの水温の深度分布により地下水流動に起因したと考えられる地温勾配の低い深度を検出した。ただし、電気検層の場合、亀裂の閉塞などで有意な結果が得られない可能性が指摘された。

これらの地下水年代の結果は、寒冷期と温暖期 (現代) の区分について考慮したとき、地下水涵養時の温度の指標となる水素及び酸素同位体や希ガス濃度の結果とも整合的であった。また、コア試料より抽出した間隙水の水素及び酸素同位体分析により測定個所の限られる揚水試験のデータを補完し詳細な深度プロファイルを得ることによって、現代の地下水と寒冷期の地下水の賦存する境界を把握することが可能となり地下水流動系の深度区分が明確化された。

そのほか、KMK-1 孔及び KMK-3 孔より揚水された地下水は北方に賦存する既存井戸の地下水とは明らかに水素及び酸素同位体比の特徴 ( $d$ -excess 値： $d = \delta\text{D} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$ ) が異

なり流動系が異なること、KMK-1 孔と KMK-3 孔から揚水された地下水では水素及び酸素同位体比の特徴（d-excess 値）が異なり、単純に KMK-1 方向から KMK-3 方向への流動ではないことが明らかとなった。KMK-2 孔は 74 m までの 3 深度において Cl 濃度が高く、水質は Na/Ca-Cl 型であるため海水の混入がみられると判断した。

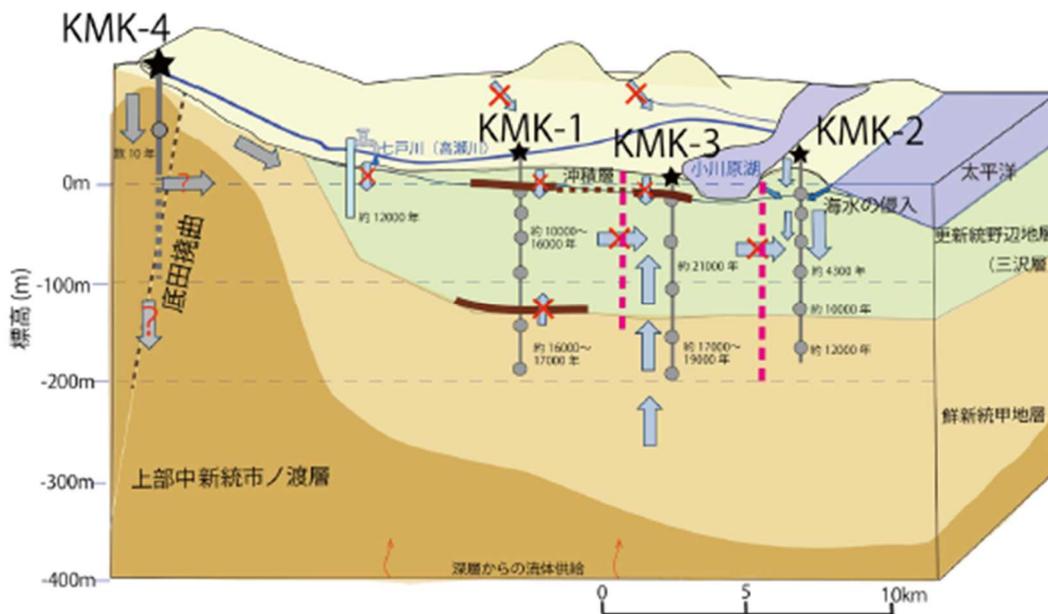
以上の掘削調査において行った調査項目と、新たに得られた結果を表 2.1.2.1 に、更新後の地下水流動概念モデルを図 2.1.2.4 に示す。

表 2.1.2.1 上北平野ボーリング掘削における調査項目とその結果

Table 2.1.2.1 Measurements and the results from the Kamikita site drilling survey

	KMK-1 孔 (中間域)	KMK-2 (流出域・小川原湖東側)	KMK-3 孔 (流出域・小川原湖西側)	KMK-4 (涵養域)
	27 m 以深で 1 万年程度の水期の涵養水が浅層から 200 m まで存在	鉛直方向の現代の地下水の浸透	1 万年程度程度の年代。KMK-1 と異なる流動系	鉛直方向の現代の地下水の浸透
地下水水質	浅層は CaNa-HCO <sub>3</sub> 型、難透水層より深層で Na-HCO <sub>3</sub> 型に変化	74 m まで NaCa-Cl 型。74 m 以深は Ca-HCO <sub>3</sub> 型	Na-HCO <sub>3</sub> 型	45 m 区間で Ca-HCO <sub>3</sub> 型
地下水年代 ( <sup>14</sup> C、トリチウム)	1 万年程度程度の水期の水が 27 m 程度から存在	深度 74 m までトリチウムが検出。若い年代の地下水の浸透。 <sup>14</sup> C も現代の水であることと整合的。80 m 以深では約 1 万年	1 万年程度～2 万年程度の水期の水が全揚水区間(深度 22～200 m) に存在	深度 45 m 区間でトリチウムが検出。 <sup>14</sup> C も現代の水であることと整合的
揚水試料、間隙水試料の水素・酸素同位体	寒冷期の地下水	80 m 程度まで現代の地下水と同等の値を示す若い地下水の浸透	寒冷期の地下水。KMK-1 孔とはやや異なる	75 m まで現代の地下水と同等の値を示す若い地下水の浸透
	深度 12 m 程度を境に現代の地下水と寒冷期の地下水が区分され、鉛直方向の浸透阻害	80 m 以深では、現代の地下水に比べて低い値であるが KMK-1、3 とは異なる	深度 20 m 程度を境に現代の地下水と寒冷期の地下水が区分され、鉛直方向の浸透阻害	
希ガス濃度	寒冷期の地下水	深度 74 m まで温暖期（現代）の涵養	寒冷期の地下水	温暖期（現代）の涵養
溶存酸素濃度	ほぼ 0	74 m 以浅は大気飽和、95 m 以深はほぼ 0	ほぼ 0	45 m 地点：大気飽和
水理水頭	被圧層	鉛直浸透と整合的	KMK-1 と同様の水理水頭分布	
温度検層	深度プロファイルと透水性の要区間との整合性鉛直方向の流動検討	90 m 以浅では、人為起源による地下水変化、90 m 以深は緩慢な地下水流動を反映したプロファイル	深度プロファイルと透水性の要区間との整合性鉛直方向の流動検討	透水性の要深度の推定。
電気検層	-	-	-	透水性箇所を検出。ただし、風化凝灰岩では課題あり。
コア試料の岩相。透水係数	難透水層の確認、帯水層区分		難透水層の確認、帯水層区分	
コア試料の鉱物分析	正確な地層境界判定や岩相変化の把握 鉱物の生成環境の推定		正確な地層境界判定や岩相変化の把握 鉱物の生成環境の推定	

出典) AIST (2024) 4



出典) AIST (2024) <sup>4</sup>

図 2.1.2.4 更新された地下水流動概念モデル

Figure 2.1.2.4 Updated conceptual model of the groundwater

④ 広域地下水流動モデルのキャリブレーション

当該地域の広域地下水流動モデルにおける水理地質構造及び水理パラメータを随時更新するとともに、ボーリング調査の進行に伴って新たに得られた観測データを用いたモデルのキャリブレーションを逐次実施した。表 2.1.2.2 に年度ごとの広域地下水流動モデル構築及び更新の進展を示す。

表 2.1.2.2 広域地下水流動モデル構築と更新

Table 2.1.2.2 Construction and update cycles of the regional ground water model

年度	目的	水理地質構造	水理パラメータ
令和3年度	KMK-1、2孔の水理水頭と地下水年代を用いたモデル更新	既往物理探査データ 既往地質構造データ KMK-1ボーリングデータ	主要帯水層の透水異方性を設定して水理水頭(計算値)及び地下水流動時間(計算値)の観測値の再現性を検討
令和4年度	KMK-1、2、3孔の水理水頭と地下水年代を用いたモデル更新	KMK-1、2及び既往文献に基づく水理地質構造の更新	甲地層内の難透水層及び三沢層の透水異方性の設定により水理水頭(計算値)及び地下水流動時間(計算値)の観測値の再現性を検討
令和5年度	GISを用いた水理地質パラメータの設定と難透水層分布によるモデル更新ならびに逆解析及び感度解析の評価	KMK-1、2、3及び既往文献に基づくGISを用いた水理地質構造の更新 甲地層中の難透水層の広がり	GISを用いた透水異方性を考慮した水理パラメータおよび難透水層の影響を考慮した水理水頭(計算値)及び地下水流動時間(計算値)の観測値の再現性を検討 KMK-1、2、3の水圧、既往孔井の水位を用いた逆解析
令和6年度	既往文献情報のみを用いたモデルとボーリング調査結果を用いたモデルの比較検証	KMK-1、2、3及び既往文献に基づくGIS解析による修正水理地質構造モデル	既往文献情報のGISによる分析から求められた透水異方性を初期値としたパラメータ解析

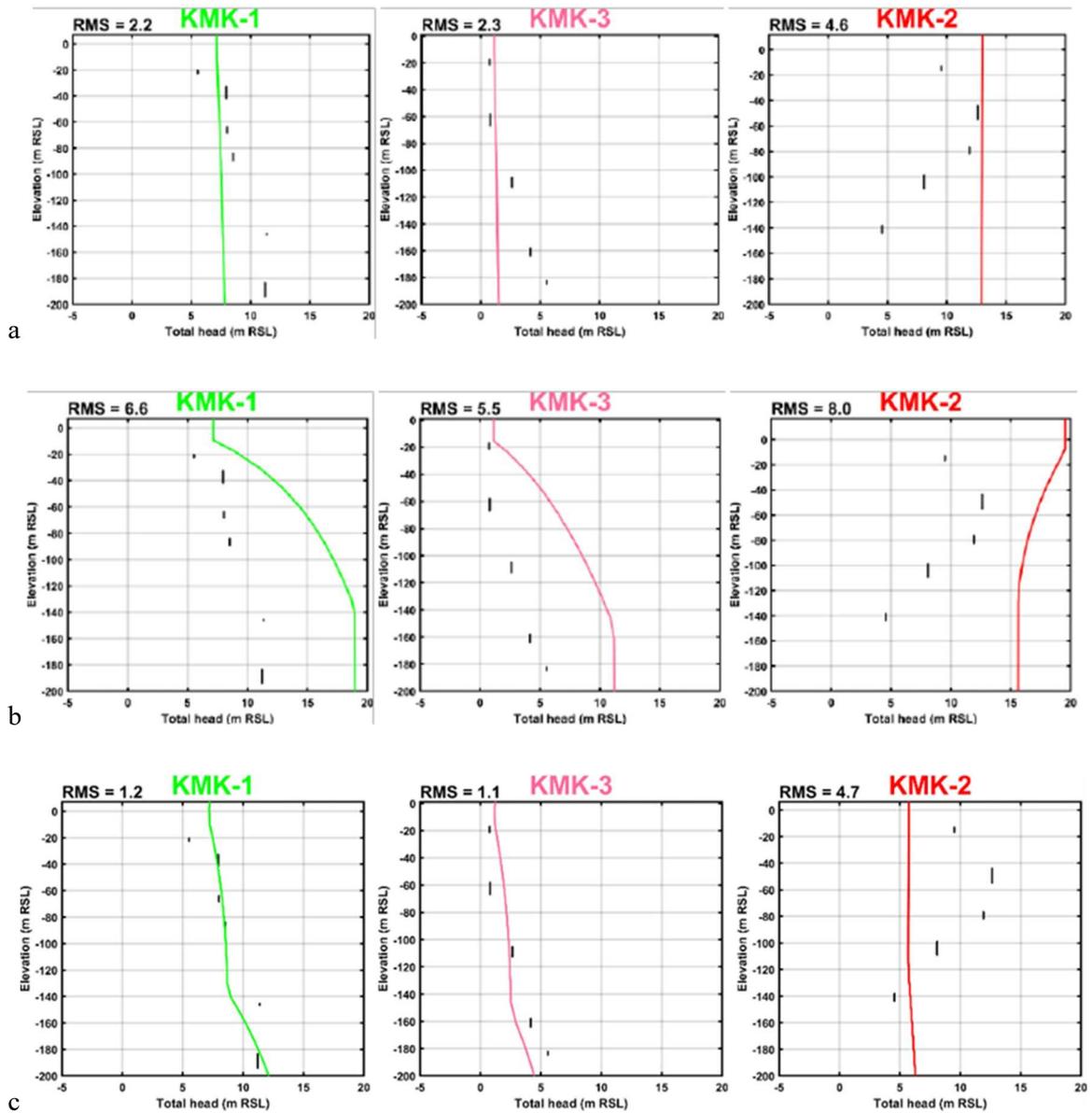
出典) AIST (2024) <sup>4</sup>を基に一部改変

また、この更新を踏まえてモデルを改善する手順を整理した。

第一段階として、既往文献データを中心にモデルのパラメータ設定をしたケースでの KMK ボーリング孔における鉛直方向水頭分布の実測と解析結果の比較を図 2.1.2.5a に示す。図 2.1.2.5a において明らかなように、既往文献データを用いたモデルにおいては実測と解析の水頭分布の傾向が大きく異なっている。また、KMK 孔に到達する粒子追跡線解析による地下水滞留時間の再現性も低い。

文献データを用いた初期のモデルでは、全ての帯水層は等方均質と仮定していたが、実際の帯水層は砂層と粘土及びシルト質の層が互層となっていることから、第二段階として主要な帯水層である三沢層のみ鉛直方向の透水係数を水平方向透水係数の 1/100 とした異方性モデルを採用して同様の解析を実施した。本モデルにおける KMK 孔における水理水頭の比較を図 2.1.2.5b に示す。水理水頭の値に関しては実測の再現性は低いが、等方性モデルと比較して鉛直方向の水理水頭分布の傾向に関する再現性が向上したことによって、異方性を考慮したモデルが有効であると考えられた。また、地下水年代に関しても等方性モデルと比較して再現性が向上した。

第三段階として、GIS の地質データを基に各帯水層の水平・鉛直透水係数を岩相の層厚分布から求め、これらの透水係数を平均値 $\pm 2\sigma$  の範囲で変動させ、パラメータ解析によって地下水流動解析を実施した。パラメータ解析において最も再現性が高いケースにおける海水準変動を考慮した非定常解析の水理水頭分布を図 2.1.2.5c に示す。この図から、KMK-2 孔を除いては水理水頭分布の再現性が高くなっていることが認められ、KMK-2 孔が KMK-1 孔及び KMK-3 孔とは異なる流動系の影響を受けていると考えられる。KMK-2 孔は掘削地点の地形的特徴が他と異なることから、水理水頭の再現性を高めるためには内陸とは異なる透水係数の設定が必要となる可能性がある。また、地下水流動時間は、KMK-1 孔で 13,000 年程度、KMK-2 孔で 3,000 年程度、KMK-3 孔で 10,000 年程度と、炭素同位体分析と比較して妥当な範囲の結果を示した。また、評価対象領域における、水理水頭を図 2.1.2.6 に示す。図には、KMK-1~4 孔までの地下水流動経路も示す。図 2.1.2.6 では、深部では涵養域における高い水理水頭が KMK-1 及び KMK-3 孔周囲まで影響を及ぼす結果となった。



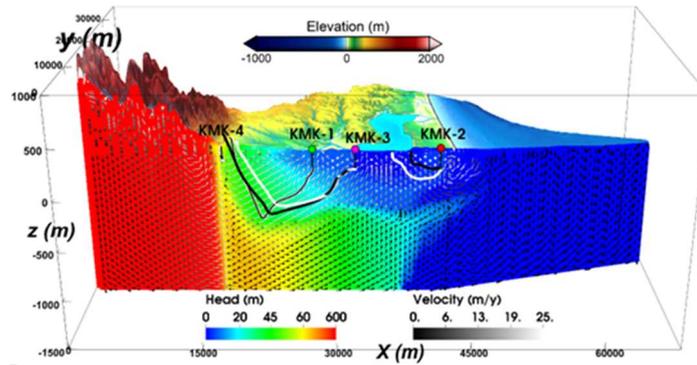
出典) AIST (2025) <sup>3</sup>

図 2.1.2.5 水理水頭分布について観測値（黒短棒）と解析値（色曲線）のモデルごとの比較

a: 第一段階、 b: 第二段階、 c: 第三段階

Figure 2.1.2.5 Comparison of observations and numerical results of hydrological head for three stepwise models

a: hydrological parameters from literature, b: hydrological anisotropy considered for the Misawa F. and impermeable thin layer in the Kachi F., c: hydrogeological parameters estimated using GIS



出典) AIST (2025) <sup>3</sup>

図 2.1.2.6 非定常モデルによって得られた水理水頭分布と定常モデル（黒）と非定常モデル（白）における KMK 孔までの粒子追跡線

Figure 2.1.2.6 Distribution of the hydrological head obtained by the non-stationary model and particle tracking lines to the KMK boreholes in the stationary (black) and non-stationary (white) models

## ⑤ まとめ

以上から、既往文献情報に基づくモデル及びボーリング調査結果との比較による異方性モデルから、より詳細な GIS 分析による異方性の設定を行うという手順を踏むことによって、実測値の再現性を向上させることが可能であることが示された。

## (2) ボーリングコア試料の鉍物分析等に基づく長期的な地下酸化還元環境の評価

### ① はじめに

沿岸陸域における地下水流動系は、海水準変動等に伴う影響を大きく受ける可能性がある。地下の地球化学的環境は一般に還元的であるが、地表面付近に存在する酸化的な降水及び地下水が氷期の海水準低下により地下深部まで浸透し、地下深部の地質環境を酸化的環境に変化させたと考えられる。こうした変化は、長期的には廃棄体から溶出する放射性核種の溶出率を変化させ、人工バリア材料や埋設した廃棄体中の金属の腐食などに影響を与える。そのため、化学的に長期安定な場であるかを評価するためには、地下の酸化還元環境の変遷について検討する必要がある。そこで、上北平野のボーリングコア試料の鉍物分析において、酸化還元環境の変遷を知るために必要な項目・手法の整理を行った。

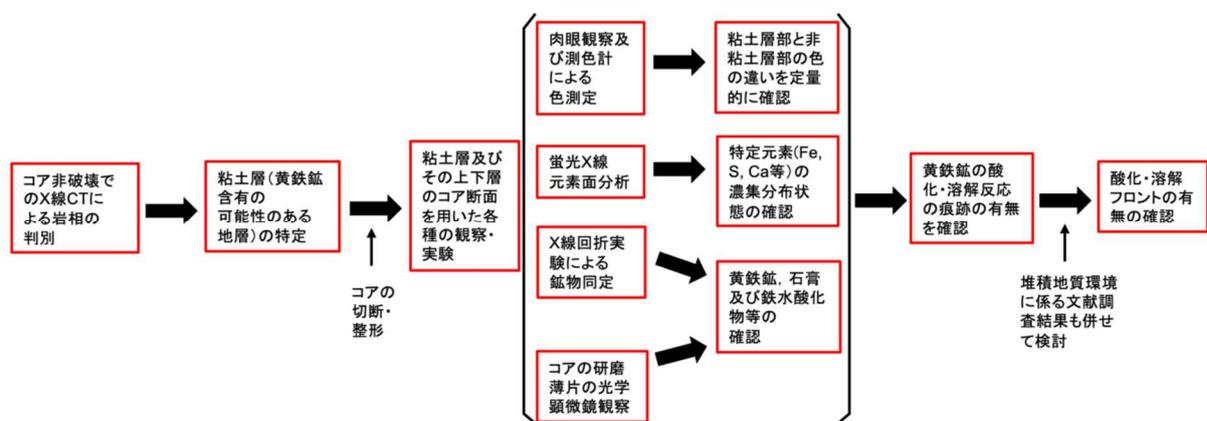
### ② 酸化還元環境の変遷を知るために必要な項目及び調査手法

コア試料の鉍物分析による酸化還元環境の変遷を知るために必要な調査項目及びその手法としては、まず X 線コンピュータトモグラフィ（以下「CT」という。）解析を用いた岩相変化についての調査があげられる。上北平野のボーリングコア試料は、岩相変化に富んだ堆積層（粘土、シルト、細～粗砂及び礫）から構成されており、その岩相変化は含

有鉱物の種類と変化が反映されると考えられる。また X 線回折法（以下「XRD」という。）による鉱物同定及び光学顕微鏡観察による鉱物の消長についての調査も必要とされる。地下水の酸化還元状態に応じて変化する鉱物種に着目することで、地下の酸化還元環境の変遷を推測することができる。その他、分光測色及び蛍光 X 線元素面分析による試料の色変化及び含有元素分布を調査することで、含有鉱物についての情報を得られると考えられる。

堆積層の酸化還元状態の変遷を推測するための鉱物指標としては、従来から黄鉄鉱が着目されてきた<sup>19, 20</sup>。地下では浸透した地表水によって酸化帯及び酸化フロント（酸化帯の下限）が形成される。黄鉄鉱は還元環境で安定であるが、酸化環境では不安定であり、分解されて生成された硫酸によって、石膏や水酸化鉄の形成を伴う溶解帯及び溶解フロント（溶解帯の下限）が生成される<sup>21</sup>。上北平野のシルト又は粘土層コア試料からも黄鉄鉱が検出される<sup>17</sup>ことを踏まえ、酸化還元状態の変遷推測の一環として、黄鉄鉱の産状観察に基づくこの酸化・溶解フロントの検出のための調査フローを図 2.1.2.7 に示す。

上北平野地下は未固結の堆積層からなり、そのボーリングコアは水分に富み酸化を受けやすい。掘削時の湧水によりコア採取率が低下するため、採取率向上の技術的な検討が今後必要である。また採取されたコア試料は酸化及び乾燥するため、冷蔵庫にて密封保存することでそれらを遅らせることができる。しかし、そのように保存した場合においても、次第に二次鉱物が生成し乾燥することで亀裂発生を伴って収縮することから、コア採取後できるだけすみやかに各種の観察・分析を行うことを検討する必要がある。



出典) AIST (2025)<sup>3</sup>

図 2.1.2.7 コア試料を用いた鉱物分析に基づく調査フロー

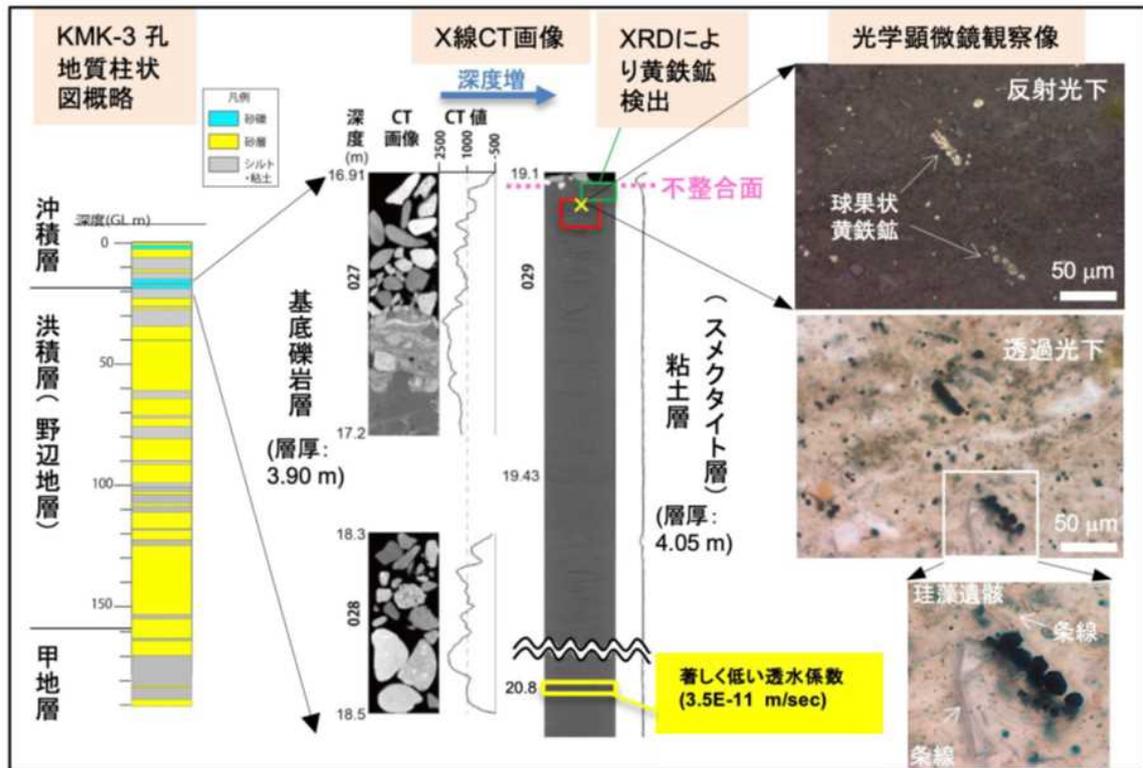
Figure 2.1.2.7 Survey flow of mineral analysis using borehole core samples

### ③ 酸化・溶解フロントの確認に向けた検討

図 2.1.2.7 の調査フローに従って、上北平野第三紀盆での酸化・溶解フロントの有無の確認を行った。ボーリング揚水の地化学分析（水素同位体比分析等）の結果より、洪積層最

上部に分布する粘土層は現在の酸化的地表水の浸透を遮断していることが示唆されている。そのため、沖積層及び洪積層の境界（不整合面）付近は、酸化・溶解フロントの確認に適していると考えられる。例えば、図 2.1.2.8 に示す KMK-3 コアでの境界付近についての観察及び分析結果では、X 線 CT 画像から、沖積層最下部及び洪積層最上部には、それぞれ基底礫岩層及び均一な粘土層が分布していることが分かる。XRD 及び顕微鏡観察の結果、本粘土層は主にスメクタイトからなり無数の未変質の球果状黄鉄鉱が点在し、生物遺骸を置き換えていた。スメクタイト層の色測定結果は比較的一定かつくすんだ色である低い a\*b\*表色系<sup>22</sup>を示し、スメクタイト層がおおむね還元的環境であることを表す<sup>21</sup>。蛍光 X 線元素面分析では、鉄及び硫黄の均一な分布が見られ、鏡下での黄鉄鉱の観察結果と調和的であった。またスメクタイト層は著しく低い透水係数 ( $3.5 \times 10^{-11}$  m/sec) を示した。

一般に、基底礫岩層は海退が終わり、海進が始まる時の堆積相で河川流域等の谷地形に形成されるため<sup>23</sup>、少なくとも基底礫岩形成時には、スメクタイト層上端部は酸化的な水に晒されていたと考えられる。またスメクタイト層に未変質の球果状黄鉄鉱が存在することは、スメクタイト層が難透水層を形成し酸化的な地下水浸透を遮断したことを意味しており、基底礫岩層の形成時に礫岩層下底が酸化フロントであったことを表す。



出典) AIST (2025) <sup>3</sup>

図 2.1.2.8 沖積層及び洪積層の境界付近についての観察及び分析結果 (KMK-3)

Figure 2.1.2.8 The results of observation and analysis for the boundary between the Alluvium and Pleistocene (KMK-3)

#### ④ まとめ

最終氷期最盛期 (約 2 万年前) の世界的な海水準は、現在よりも最大 120 m 程度低下していた<sup>24</sup>。しかし、コア試料の観察及び分析結果から、沖積世開始以降 (1.8 万年前以降)、酸化的な降水・地下水の浸透は浅部の洪積層最上部のスメクタイト層に遮断されており、最終氷期最盛期以降の海水準変動に伴う地下水流動変化の影響はスメクタイト層以深には及ばなかったと考えられる。この結果は、各種の地化学分析結果の解釈と一致し、球果状黄鉄鉱の存在もそれを裏付けており、上北平野洪積層のスメクタイト層は、天然バリアのナチュラルアナログとして利用可能であるといえる。また図 2.1.2.7 に示された調査フローに基づくコア試料の観察及び分析が、長期にわたる地下の酸化還元状態の変遷を知る上で有効であることが分かった。

#### 2.1.3 中深度処分における岩盤の力学状態と水理特性等に関する研究

本項のうち、(1)は埼玉大学及び AIST との共同研究、(2)は東京大学及び JAEA との共同研究により実施した。

## (1) 坑道掘削影響領域における岩盤の力学状態と水理特性に関する検討

### ① はじめに

放射性廃棄物を埋設する岩盤は、自然事象や人為事象によって損傷や破壊（以下「岩盤損傷等」という。）が生じ、その結果、地下水流動及び物質移行の経路となることが懸念される。これらの現象は廃棄物埋設地の性能を損なわせるものであるため、その性状の把握及びその影響が廃棄物埋設地の広範囲に及ばないようにするための対策が必要となる。

中深度処分において、放射性廃棄物を埋設するための坑道等の掘削によって岩盤応力が解放された場合、処分坑道の周辺には地下水流動及び物質移行の経路となり得る掘削影響領域が形成される。この領域における水理特性の変化に関しては、掘削に伴う坑道周辺の力学状態の変化と密接に関連した現象であるため、これらの関係性を適切に把握する必要があるが、生じる亀裂の程度や形態による水理特性への定量的な影響度については十分明らかになっていない。

そこで、本研究では、原位置から採取した岩盤サンプル及び人工的に製作した人工供試体を用い、岩盤損傷等の力学状態とそれに伴う岩盤の状態を把握するとともに水理特性との関係を明らかにするための実験を行い、地下水流動等が適切に評価されていることの妥当性確認のために必要な科学的・技術的知見を取得した。

### ② 新規試験装置の設計及び製作

坑道の掘削による岩盤損傷等の力学状態とそれに伴う水理学特性の関係を見出すため、変位制御による高剛性の三軸力学試験及び水理試験を同時に実施できることを基本とした新規の力学水理試験装置（以下「新規試験装置」という。）の設計及び製作を行った<sup>25, 26</sup>。製作した新規試験装置を図 2.1.3.1 に示す。

設計及び製作に当たっては、関連する既往の試験装置について文献調査を行い、それらの特徴及び問題点を抽出した結果を基に新規試験装置の要求仕様を策定し、実際の装置設計に反映した。具体的には、岩盤の損傷を圧縮場、引張場及びせん断場の内部応力状態とその組合せにより制御できることから、力学機構として掘削影響領域における力学状態を模擬できるものとした。ここでは、岩盤等サンプルのピーク強度以降の軟化領域や坑道掘削時に見られる二軸圧縮一軸解放状態においても安定的に変位制御ができる三軸力学試験を実施するために、非常に高い剛性を有するフレーム構造とした。また、岩盤の力学状態によってその開閉状態が決定される亀裂を含む岩盤の水理特性を評価することを念頭に、水理機構としては亀裂を含む矩形供試体の上流、下流をそれぞれ 9 区画に分割し、各区画の水理学特性を把握することができるように載荷盤を工夫し、水理試験に必要な注水・排水等が行えるものとした。さらに、一定の大きさの軽石等を有する岩盤等サンプルに対し

て試験を実施できることが重要であることから、一般的な力学試験装置や水理試験装置に比べて大きい、一辺が300 mmの矩形の岩盤等サンプルを供することができるものとした。



出典) 市来他 (2024) <sup>26</sup>

図 2.1.3.1 新規試験装置 (左: 全景、右: 供試体周辺)

Figure 2.1.3.1 New experimental setup (left: overall view, right: around the specimen)

#### ③ 坑道掘削を考慮した力学状態の変化と水理特性の変化に関する実験データの取得

新規試験装置を用い、坑道掘削時における岩盤の力学状態の変化を模擬するように応力履歴を岩盤サンプルに作用させた三軸力学試験を実施した上で、岩盤の水理特性を測定するための透水試験を実施した。これにより、三軸の応力状態が坑道掘削時の岩盤の変形、掘削影響領域の形成及び水理特性に与える影響等に関する実験データを取得し、当該試験を実施する上で重要となる事項や、応力状態の違いによる引張り強さ及び透水性の変化に関する知見等を得た。

実験の実施に当たっては、凝灰岩の岩盤サンプルを採取するとともに、これら岩盤サンプルに対して基礎特性を得るための各種基本特性試験を行った。特に、岩盤の引張特性を明確にするために、偏心及び傾きのない状態で供試体に引張力を作用させる治具を製作<sup>27</sup>して一軸引張試験を実施した<sup>28</sup>。また、内部損傷の状態を三次元で模擬できる人工供試体の造形装置の選定を行い人工供試体の製作を試みた。

#### ④ まとめ

掘削影響領域における岩盤の力学状態と水理特性の関係について、坑道掘削に伴う岩盤の応力解放によって生じる亀裂の程度や形態による水理特性への影響を明らかとするための実験を行いこれらの関係性を整理するためのデータを取得した。三軸力学試験と水理試験を同時に実施することのできる新規試験装置の設計及び製作を行い、当該試験装置を用いた三軸力学試験及び透水試験を行うことで、三軸の応力状態が坑道掘削時の岩盤の変形、

掘削影響領域の形成及び水理特性に与える影響等を整理するとともに、掘削影響領域のような亀裂等を含む岩盤の水理特性を評価する際の留意点等を整理した。

## (2) 地下研究施設を利用した掘削影響領域の水理特性及び化学特性調査に関する研究

### ① はじめに

前項「(1)坑道掘削影響領域における岩盤の力学状態と水理特性に関する検討」に述べたように、放射性廃棄物を埋設する岩盤は、自然事象や人為事象によって岩盤損傷等が生じ、その結果、卓越した地下水流動及び物質移行の経路が形成される懸念がある。前項においては、岩盤の掘削影響領域の状態と水理特性との関係を明らかにするため、室内試験を実施している。一方、実際の廃棄物埋設地は天然環境であり、天然環境で起きる全ての事象を実験室内で再現することは難しい。また、事業許可申請においては原位置調査（透水試験、物理探査試験、原位置採取試料分析等）で得られたデータが利用されることが想定される。しかしながら、現位置調査で取得可能なデータは離散的であり、離散的なデータから場の環境をどのように推定し、その妥当性を確認するかについては十分な知見がない。

そこで、本研究では、原位置における掘削影響領域がどのような状態になっているかを確認し、物質移行等に及ぼす影響を評価するために必要となる科学的・技術的知見を取得した。

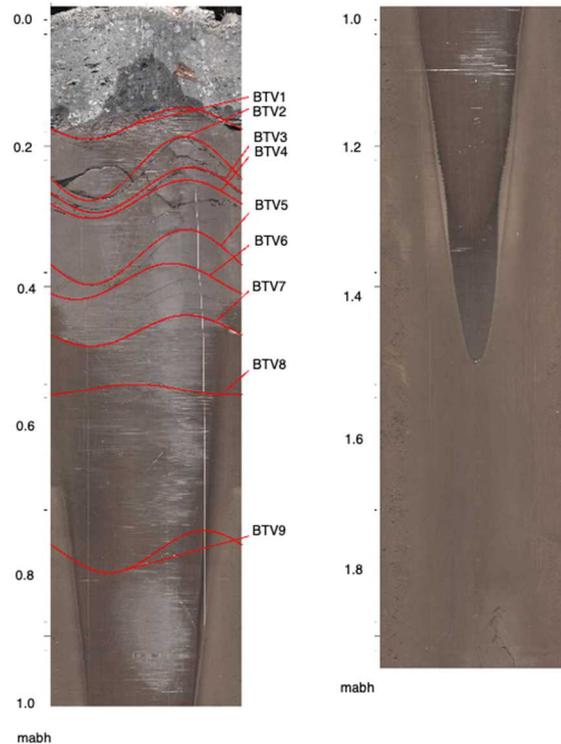
### ② 原位置試験と分析の実施

原位置での掘削影響領域の状態を確認するため、JAEA 幌延深地層研究センター350 m 坑道を利用して原位置試験を行った。具体的には、坑壁から長さ約 2 m のボーリング孔を掘削し、ボアホールテレビ（以下「BTV」という。）によるボーリング孔の孔壁観察を行い亀裂の密度を評価した。また、2 m のボーリング孔を使い、パッカーで区間を区切った複数区間における単孔式水理試験を実施し、透水性を評価するとともに、岩盤内の地下水流動を可視化するため、岩盤に塩水注入を行いながら比抵抗トモグラフィ試験を実施した。さらに、採取したコアの観察及び分析を行い、亀裂内の化学環境を推定した。

### ③ 結果と考察

#### a. BTV によるボーリング孔観察、コア観察及びコア分析結果

BTV を使ったボーリング孔表面の観察を行った結果、坑壁から 0.5 m 付近までは亀裂が密集していることが確認され、それより奥側では亀裂密度が低かった。これらの亀裂は、坑道掘削による力学的影響で形成された亀裂（以下、「EDZ 亀裂」とする。）と推定できる（図 2.1.3.2）。



出典) Hirota et. al., (2024) <sup>31</sup>

図 2.1.3.2 ボーリング孔の BTV 観察結果と亀裂 (赤線)

Figure 2.1.3.2 BTV images of the borehole with fractures indicated by red lines

#### b. 原位置比抵抗トモグラフィ試験

比抵抗トモグラフィ試験では、塩水注入によって坑壁付近において、比抵抗値が下がる傾向が確認できた。この結果は、EDZ 亀裂に塩水が注入される領域が存在する可能性を示唆している。

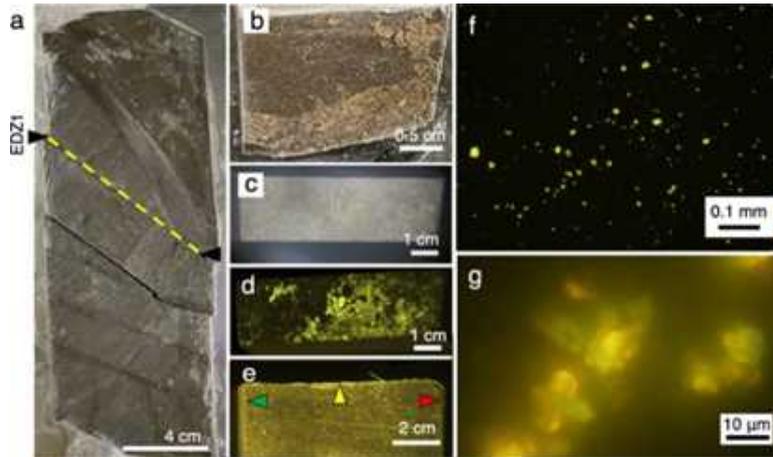
#### c. 原位置透水試験

ボーリング孔を使った単孔式透水試験を実施した結果、坑壁より 0.7 m 以上奥側においては、 $10^{-8} \text{ m/s}$  以下の健岩部に近い透水係数が得られた。しかし、それより坑壁側においては、最大で、 $1.5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  と高い透水係数となった。これは、坑壁付近は EDZ 亀裂の影響で透水係数が上がっていると考えられる。

#### d. コア観察及び分析

コア試料を観察したところ、BTV の結果と同様に坑壁付近に亀裂が密集していることが確認された。また、EDZ の亀裂表面を観察したところ、EDZ 亀裂の 1 つで淡褐色のフィルムが広範囲に覆っていることを確認した (図 2.1.3.3a 及び b)。このようなフィルムは EDZ

亀裂以外で確認されたことがなく、EDZ の評価を行うに当たって重要な情報が提供される可能性があるため、分析を行うこととした。蛍光色素 (SYBR<sup>TM</sup> Green I<sup>®</sup>) で染色し蛍光顕微鏡で観察したところ、緑がかったシグナルを確認した (図 2.1.3.3c 及び d)。サンプル処理時のコンタミネーションの可能性を排除するため、切断面を調べたが同様の信号は確認できなかった (図 2.1.3.3e)。亀裂から剥離させたフィルムを溶液中に分散させた後、懸濁液を蛍光色素で染色し、蛍光顕微鏡で観察したところ、棒状細胞のわずかな存在に関連する球菌細胞の凝集が明らかになった (図 2.1.3.3f 及び g)。亀裂に付着したフィルムを赤外 (以下「IR」という。) 分光法で直接分析した結果を、図 2.1.3.4 に示す。Ellerbrock et al., 2022<sup>29</sup> と Movasaghi et al., 2008<sup>30</sup> に基づいてピークの判断を行っており、バンドソーでカットした表面部分 (a の黄色い矢印) の分析結果をブランクピークとしている。 $\sim 1530\text{ cm}^{-1}$  と  $\sim 1640\text{ cm}^{-1}$  の 2 つのアミドピークを特徴とする IR スペクトルは、微生物から得られたものと非常に類似していた (図 2.1.3.4)。



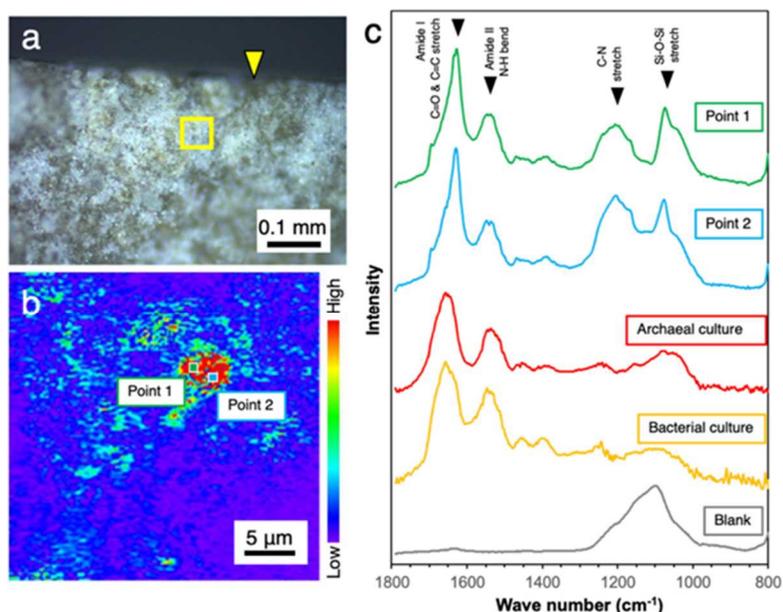
出典) Hirota et. al., (2024) <sup>31</sup>

図 2.1.3.3 コア試料の EDZ1 亀裂表面観察結果

半割したコアの深度 0.3～0.5 m 部分の断面図(a)、EDZ1 亀裂の下部ブロックの亀裂断面図 (b)、下部ブロックをバンドソーでカットした試料の亀裂表面図(c)、バンドソーでカットした試料を蛍光顕微鏡で観察した亀裂表面図(d)と横から見た図(d)、亀裂表面から剥離させた物質を懸濁させて蛍光顕微鏡傾向顕微鏡で観察した図(f, g)

Figure 2.1.3.3 Result of observation on EDZ1 surface in the core sample

Photographs of a half-split core sequence from ~0.3 to ~0.5 mab (a), the fracture surface at EDZ1 on the lower block (b), and the fracture surface at EDZ1 created on the lower block by cutting with a band saw (c). Fluorescence stereo microscopic images of the fracture surface at EDZ1 from the top (d) and the side (e). The yellow arrow and yellow dotted line indicate the fracture at EDZ1 (a, e). Green and red arrows indicate the surfaces created by cutting with a band saw and drilling, respectively (e). Fluorescence microscopic images of the material detached from the fracture surface (f, g)



出典) Hirota et. al., (2024) <sup>31</sup>

図 2.1.3.4 EDZ1 亀裂の微小分光分析結果

亀裂表面の画像(a)、黄色い四角形部分にて行った O-PTIR 分析の波数  $1530\text{ cm}^{-1}$  でのマッピング結果(b)、point1 と point2 の O-PTIR 分析スペクトル(c)

Figure 2.1.3.4 Result of submicron-scale spectroscopic analysis of an EDZ fracture (EDZ1) A photograph of the fracture surface (a), a counter map of the fracture surface highlighted with a yellow square based on the peak at  $1530\text{ cm}^{-1}$  in optical photothermal infrared (O-PTIR) spectra (b). O-PTIR spectra of points 1 and 2 (c). The peak assignment was based on Ellerbrock et al. and Movasaghi et al. [2, 3]. A blank spectrum was obtained from the surface created by cutting with a diamond band saw, especially where the cut surface intersected the EDZ fracture (indicated by the yellow arrow in (a))

フィルムを無菌的に採取し、微生物の同定に広く用いられている 16S rRNA 遺伝子解析を行ったところ、メチロフィル科とメチロモナダ科が含まれることが確認され、これらは好気性メタン栄養生物である <sup>32,33</sup>。好気性メタン栄養生物が生息していることは、EDZ 亀裂において好気性環境が確立していることを示している。

#### ④ まとめ

JAEA 幌延深地層研究センターの深度 350 m 坑道において、EDZ の調査を実施した。BTV の結果から、坑壁付近で亀裂密度が高いことが確認できた。また、岩盤内に塩水を注入し、比抵抗トモグラフィ試験を実施したところ坑壁付近に塩水が注入され、比抵抗値の低下が確認できたことから、坑壁付近に水みちとなり得る亀裂が存在していると予想できた。さ

らに、透水試験の結果、坑壁付近で高透水性の領域が確認できた。亀裂密度が高い区間と透水試験で高透水性が確認された区間、及び比抵抗値が低下した領域はどちらも坑壁付近であることから、これらは全て、坑壁付近に形成された EDZ 領域であると想定できる。加えて、コア試料の分析によって、EDZ 亀裂にバイオフィルムの形成が確認され、好気的な微生物の繁殖が確認できた。これらの結果から、坑壁付近の EDZ 領域は水みちとなり得る亀裂が発生しており、透水性が高く、EDZ 亀裂内には好気的な環境が形成されていることが分かった。JAEA 幌延深地層研究センターの深度 350 m 坑道は 2014 年に掘削されており、このときに EDZ 亀裂が発生し、透水性があがったと推定できる。また、本研究におけるコアの採取は 2022 年に実施されていることから、2014 年から 2022 年の間に、好気的環境の形成と好気的微生物の繁殖が起きていると予想できる。以上から、EDZ 亀裂の発生によって透水性が高く、好気的な環境が形成される可能性があり、これは核種移行を促進する要素であることから、審査の際に EDZ を評価する重要なポイントになると考えられる。

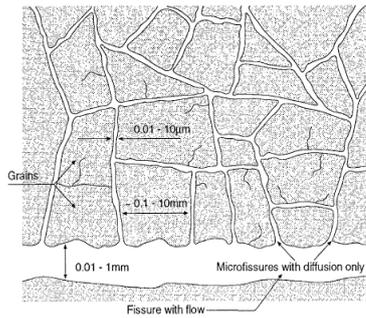
亀裂密度の確認、水理試験、コア試料の分析によって、その調査地点での有益な情報を得ることができるが、これらは局所的な情報であり、複数地点で調査を実施した場合においても離散的な結果しか得られない。一方、比抵抗トモグラフィ試験等の物理探査試験は一度の試験で面的な情報を得ることができる利点がある。面的な情報が得られる試験と水理試験等の離散的なデータの間で整合的な関係が確認できれば、離散的な結果が面的に広がっている可能性を想定でき、局所的な試験結果をより広範囲に適用できる可能性がある。

本研究の成果は JAEA 幌延深地層研究センターの深度 350 m 坑道をモデルフィールドとして得られた成果である。一方、我が国での中深度処分の埋設地の立地、深度等は決定しておらず、実際の埋設地と本研究の調査地点では環境条件が異なる可能性もあることから、本研究で明らかになった現象と同じことが起きるとは限らないので注意が必要である。しかし、本研究で使用した手法は、EDZ の評価をする上で参考になると考えられる。

### (3) 亀裂を含む堆積岩における核種移行現象に関する調査

#### ① はじめに

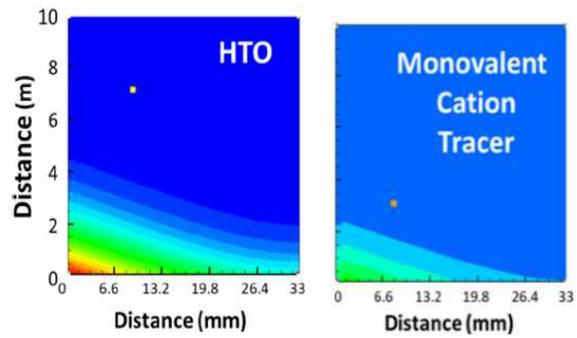
地質媒体の特性について、浅部に存在する地質媒体の多くが多孔質媒体的な性質を示す一方で、深部の地質媒体の多くは亀裂性媒体の性質を示す。前者が体積の数十%を占める間隙全体を地下水が流れるのに対して、後者では体積の極僅かを占める亀裂を選択的に流れるため、両者が仮に同じ透水係数を示した時には、同じ水理場の中での地下水実流速は後者の方が大きくなる<sup>34</sup> (図 2.1.3.5)。このとき、核種は、前者では地下水に流されつつ周囲の地質媒体に収着しながら移行するのに対して、後者では、亀裂内を流れつつ亀裂以外のマトリクス部へその一部が拡散し、このことが核種移行の遅延に寄与するとされている<sup>35</sup> 図 2.1.3.6 には、図中下辺の亀裂を左から右へトレーサが流れる間に、上方のマトリクス部へ拡散している様子が示されている。



出典) Miller et. al., (1994) <sup>34</sup>

図 2.1.3.5 亀裂性媒体の空隙構造の概念

Figure 2.1.3.5 Conceptual model of fracture and matrix of rock

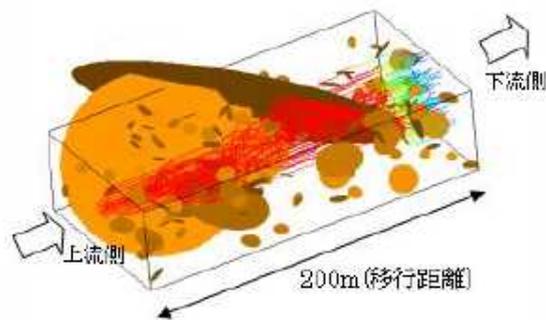


出典) Steefel et. al., (2021) <sup>35</sup>

図 2.1.3.6 亀裂性媒体中のマトリクス拡散の概念

Figure 2.1.3.6 Matrix diffusion of HTO and Cation tracer

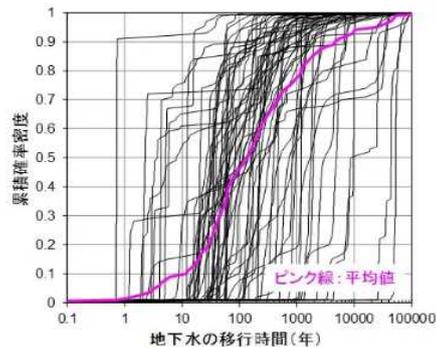
堆積岩においては、この両者の中間的な特性として多孔質媒体として岩全体を地下水が流れるが、その中に疎らに存在する亀裂がその流れの一部を担う場合がある。例えば、細谷らは、青森県六ヶ所村における低レベル放射性廃棄物埋設敷地の軽石凝灰岩について、連続性が乏しいが透水性が高い亀裂と多孔質のマトリクス部からなる複合モデルを構築して巨視的透水係数を算出し、実測値との比較を行っている<sup>36</sup> (図 2.1.3.7)。深度 70 m 以上に設置される中深度処分においては、このような地質媒体が対象となる可能性があるが、核種がどの領域を移行するのか、それは移流なのか拡散なのか、収着はどの領域で働くのかといったことについての検討例は少ない。そこで、これらの特性について研究例が多い亀裂性媒体に関する文献 (例えば参考文献 37 図 2.1.3.8) を中心として現在までの検討状況を調査し、これらの特性の調査方法について整理した。



出典) 細谷他 (2010) <sup>36</sup>

図 2.1.3.7 亀裂を含む多孔質媒体中の地下水流動モデル

Figure 2.1.3.7 Groundwater flow through fractured porous media



出典) JAEA (2018) <sup>37</sup>

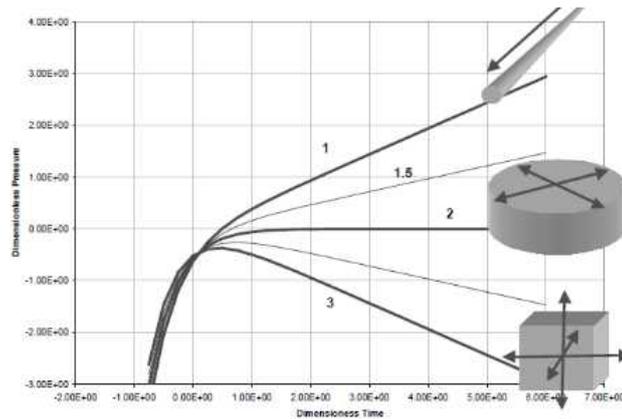
図 2.1.3.8 100 リアライゼーションの地下水の移行時間の分布

Figure 2.1.3.8 Distribution of groundwater travel time

## ② 亀裂性媒体中の地下水流動の概念

応力等によって発生する岩盤中の亀裂群は、比較的透水性が高いネットワークをその岩盤中に形成する。この亀裂ネットワークは、亀裂中心、亀裂の方向、亀裂半径及び透水量係数（亀裂幅と関連する）で特徴付けられる。地質媒体中の全ての亀裂を特定することはできないので、これらの統計値をボーリングコア観察、坑道壁面観察等を用いて取得し、統計値に基づいた亀裂ネットワークを構築し、その特性を評価に用いることになる。これらの特性値は幅広く分布することがあることと、透水性の亀裂と不透水性の亀裂があること<sup>38</sup>、及び取得が困難であるため、解析的に水理モデル上に多数の亀裂ネットワークを発生させてその分布を含めて評価されるが、亀裂ネットワークの特性値に大きな不確かさがあることに加えて、同じ特性値から発生された亀裂ネットワークが示す水理特性も多様なものとなるため、最も重要と考えられる地下水の移行時間に大きな幅がありうることが示されている<sup>37</sup>。

疎らに亀裂が存在する多孔質の特性で重要なのは、透水性亀裂の連結性である。これを調べる方法として、ボーリング孔を用いた定流量注水試験を行い、孔内圧力の対数時間に対する微分値を対数時間に対してプロットする方法（以下「デリバティブプロット」という。）がある。このプロットにおいて、圧力が周囲に伝搬するに従い時間に応じて孔内の応答、ボーリング孔近傍の1次元又は2次元の注水に対する応答、3次元状の亀裂ネットワークに対する応答及び離れたところにおける行き止まり又は高透水部の応答が、それぞれ傾き1、0.5、0、-0.5、1又は-1となって現れる<sup>39</sup>（図2.1.3.9）。また、亀裂内の流れに対して地質媒体中を流れる成分がどの程度あるかは、亀裂部とマトリクス部からなる二重間隙的特性によって表されるので、これについても水理試験から情報を得ることができる<sup>40</sup>。



出典) Doe T. (2002) <sup>39</sup>

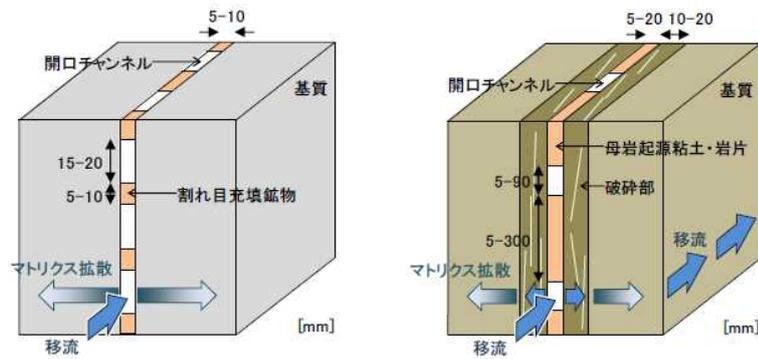
図 2.1.3.9 流れの形態とデリバティブプロットの傾き

Figure 2.1.3.9 Derivative plot and flow dimension

構築した水理モデルの妥当性を検証する方法として、観測された地下水年代と水理モデルを用いて解析的に得られた水の移行時間とを比較する方法がある<sup>41</sup>。こうした方法は有用であるが、同位体の濃度比等から地下水年代に換算する際の仮定及び地下水流量から実流速に換算する仮定が、対象とした亀裂を含む多孔質媒体のモデルの仮定と整合している必要がある。例えば、地下水年代を求める際には、地表から浸透した雨水が周りとは相互作用せずに地下を移行するという仮定が用いられることがある<sup>42</sup>。また、地下水年代は非収着性のトレーサとして H-3 を用いて検討されることもあるが、①で示したようにマトリクス拡散の効果は非収着性の核種に対しても移行の遅延として現れることにも注意が必要である<sup>35</sup>。

### ③ 亀裂性媒体中の核種移行モデルの概念

NUMO は、地層処分を対象に例えば先新第三紀堆積岩類のモデルとして亀裂の開口部、亀裂充填鉱物及びマトリクスからなり核種が亀裂内の移流とマトリクス部内の拡散によって移行するとしたモデルを構築し、新第三紀堆積岩類のモデルとして、亀裂の開口部、母岩起源粘土・岩片、破碎部及びマトリクスからなり核種が亀裂内の移流とマトリクス部内の遅い移流と拡散によって移行するとしたモデルを構築した<sup>1</sup> (図 2.1.3.10)。マトリクス内の移流の有無によって、特に収着性の核種において影響が大きいことが、二重間隙モデルと二重透水モデルの概念を述べた Ho によって示されている<sup>43</sup>。

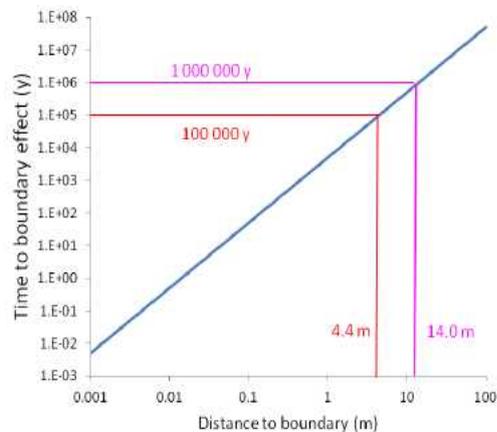


出典) NUMO (2021) <sup>1</sup>

図 2.1.3.10 先新第三紀堆積岩類及び新第三紀堆積岩類の微細構造概念モデルの例

Figure 2.1.3.10 Conceptual models of the water-conducting microstructure for Pre-Neogene sediments and Neogene sediments

また、マトリクス内の移流が小さい場合には、亀裂内の流速とマトリクス拡散係数の関係で流速が速ければ核種プルーム全体が速く移行し、流速が遅くなるとマトリクスでの収着によって遅く移行する<sup>44</sup>、マトリクス拡散が亀裂近傍に留まる場合に対して離れたところまで及ぶと核種プルームが遅く移行する<sup>45</sup> (図 2.1.3.11) ことからその範囲を特定することが重要であるとされている。



出典) SSM (2012) <sup>45</sup>

図 2.1.3.11 非収着性核種がマトリクス拡散深さに到達する時間

Figure 2.1.3.11 Time for non-sorbing solute to fully penetrate into matrix over given

④ 亀裂を含む多孔質媒体中の核種移行特性の調査方法

③で示したような概念モデルが提案されているが、対象とする地質媒体についてどのようなモデル化が適切であるかは、まず、亀裂及びマトリクスについて観察し、亀裂内及びその周辺の状況、浸出水の有無等を調べる事が重要である。具体的な核種の移行、拡散

挙動については、原位置で孔間トレーサ試験<sup>46</sup>、拡散試験を行う方法<sup>47</sup>、ボーリングコアを用いて室内試験を行う方法等がある。また、ボーリング孔にトレーサを注入し周囲の地質媒体へ浸透させた後に回収することによってマトリクス拡散深さ等を取得する試みも行われている<sup>48</sup>。

これらの方法では、試料の大きさと試験期間に対応した範囲までしか、マトリクス内の核種移行の状況を知ることができない。したがって、マトリクス内の全領域での核種移行が一つの拡散係数で表すことができるという仮定が確かであれば、これを取得することができるが、その仮定の検証には限界がある。これに対して、天然の核種の亀裂付近の分布を観察することによって、マトリクス拡散の深さを評価する試みも行われている<sup>49</sup>。

#### ⑤ 亀裂を含む多孔質媒体中の核種移行特性調査の考え方の整理

亀裂を含む多孔質媒体中の核種移行現象は、微小スケールからマクロスケールに至る地下水流動、物質移動、核種収着、等の種々の現象が合わさったものであり、その特性を把握するためには、亀裂分布の状況、地下水流動特性及び核種移行特性を知る必要がある。そのためには、ボーリング孔等を用いた亀裂特性の把握、水理試験、トレーサ試験、水質・同位体分析等と、地下水流動、核種移行等の解析を組み合わせ、それらについての妥当な理解を構築することが必要である。

なお、こうした調査によって知ることができるのは現在の状態であるが、亀裂の性状は、地下水と地質媒体の鉱物の反応等によって長期間に変化するため<sup>50, 51</sup>、長期の評価においてはその影響の程度についても検討することが必要である。

#### (4) ベントナイト系人工バリアの長期性能評価手法

本テーマは当安全研究プロジェクトの別テーマと合わせて実施したため、結果については、「2.2.1 ベントナイト系人工バリアの長期性能評価手法の研究」で記載する。

## 2.2 廃棄物埋設における性能評価及び線量評価手法に関する研究

### 2.2.1 ベントナイト系人工バリアの長期性能評価手法の研究

本項の検討は、東京大学及びJAEAとの共同研究により実施した。

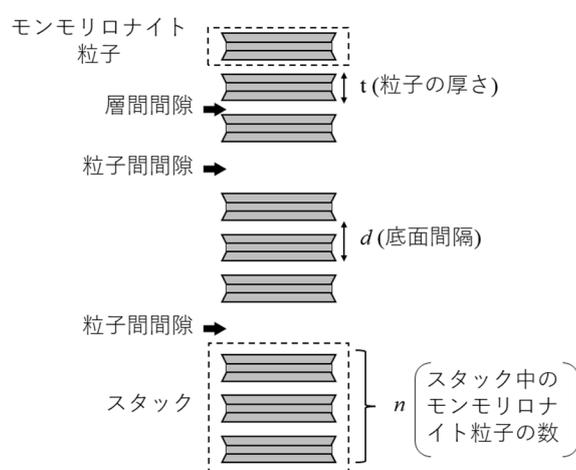
#### (1) はじめに

坑道の閉鎖においては、掘削影響領域の存在を考慮した上で、坑道及びその周辺が高透水性の地下水移行経路にならないよう、坑道自体の埋戻し及び坑道端部等に設置される水理プラグによって適切に対策が行われていることの確認が必要である。坑道等の埋戻しに用いられることが想定されているベントナイト系止水材については、初期のみならず長期的な変質とそれに伴う透水性の変化についての知見が必要である。本研究では変質に伴い

ベントナイトの含有量が変化した場合及び止水材として低混合率のベントナイトが使用される場合も念頭に置き、様々なベントナイト含有量に対して使用できる透水係数推定式の検討を行った。

## (2) 密度条件に応じた間隙幅の推定

ベントナイトの透水係数に関する先行研究においては、ベントナイト中の粒子間間隙と層間間隙（図 2.2.1.1）を区別していないこと<sup>52</sup>、適用条件がベントナイト高配合の高い密度条件であること<sup>53</sup>が不十分な点として考えられ、層間陽イオンの種類によって透水性が異なるが、ベントナイト中の流路の違いを考慮した透水係数の推定手法は確立していない。



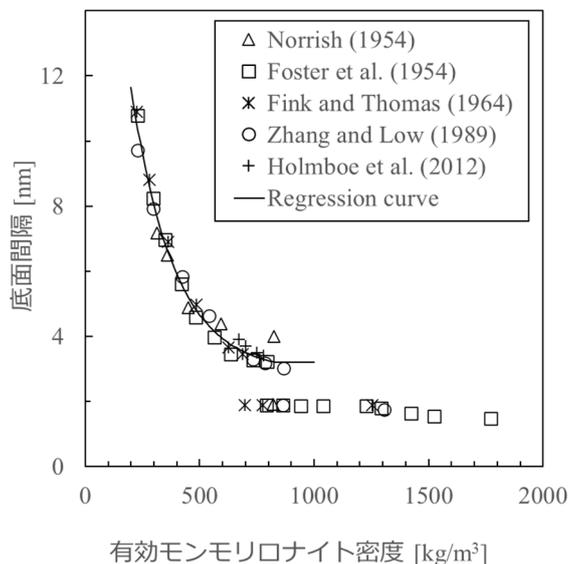
出典) Kijima et. al., (2022)<sup>54</sup>を一部修正

図 2.2.1.1 モンモリロナイト粒子、スタック、層間間隙、粒子間間隙のイメージ図

Figure 2.2.1.1 Schematic image of a montmorillonite particle, stack, interlayer pore, and external pore

そこで、ベントナイト中の流路の違いを考慮するため、ベントナイト中に含まれるモンモリロナイトの密度（有効モンモリロナイト密度  $\rho_{em}$ ）と層間間隙幅及び粒子間間隙幅の関係を整理した。Na 型モンモリロナイトにおける層間間隙幅と有効モンモリロナイト密度の関係について、先行研究では  $\rho_{em} \geq 800 \text{ kg/m}^3$  でのみ得られている<sup>55,56</sup>。 $\rho_{em} \leq 800 \text{ kg/m}^3$  の範囲については、先行研究<sup>57-61</sup>で得られているモンモリロナイトの含水比と底面間隔の関係より、 $\rho_{em} < 700 \text{ kg/m}^3$  では浸透性膨潤のみが起こり、 $700 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_{em} \leq 1000 \text{ kg/m}^3$  では浸透性膨潤と結晶性膨潤の混合状態となり、 $1000 \text{ kg/m}^3 < \rho_{em}$  では結晶性膨潤のみが起こるとした。また、浸透性膨潤の範囲については、底面間隔と有効モンモリロナイト密度の関係を指数関数の回帰曲線で推定した（図 2.2.1.2）。

Ca型モンモリロナイトについては、約 1.9 nm より大きな底面間隔にはならない<sup>62, 63</sup>ため、結晶性膨潤のみが起こるものと判断した。

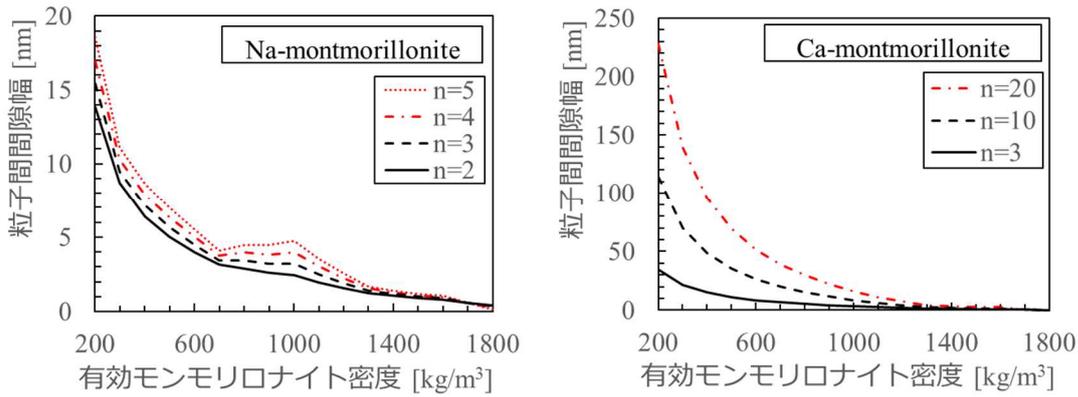


出典) Kijima et. al., (2022)<sup>54</sup>を一部修正

図 2.2.1.2 Na型モンモリロナイトに対する推定した底面間隔と有効モンモリロナイト密度の関係

Figure 2.2.1.2 Relation between the effective montmorillonite density and basal spacing for Na-montmorillonite

粒子間間隙幅については、スタックが互いに平行であるという仮定を置き、モンモリロナイト粒子の重量、スタックに含まれるモンモリロナイトの粒子数 (n)、スタックの比表面積、スタックの体積及びモンモリロナイト粒子の平均粒径から粒子間間隙幅の計算を行った。粒子間間隙幅と有効モンモリロナイト密度の関係を図 2.2.1.3 に示す。粒子間間隙幅は有効モンモリロナイト密度の増加に伴い単調減少することが妥当と考えられるが、Na型モンモリロナイトの場合、 $n \geq 4$  では有効モンモリロナイト密度が大きくなったときに粒子間間隙幅が大きくなる場合があるため不整合である。したがって、Na型モンモリロナイトについては  $n=2$  又は  $3$  を採用した。Ca型モンモリロナイトについては、いずれの  $n$  においても有効モンモリロナイト密度の増加に伴う粒子間間隙幅の単調減少が見られたことから、 $n$  は任意の数が想定可能とした。



出典) Kijima et. al., (2022) <sup>54</sup>を一部修正

図 2.2.1.3 推定した粒子間間隙幅と有効モンモリロナイト密度の関係

Figure 2.2.1.3 Relation between effective montmorillonite density and external pore width

### (3) 透水構造モデル及び透水係数推定式

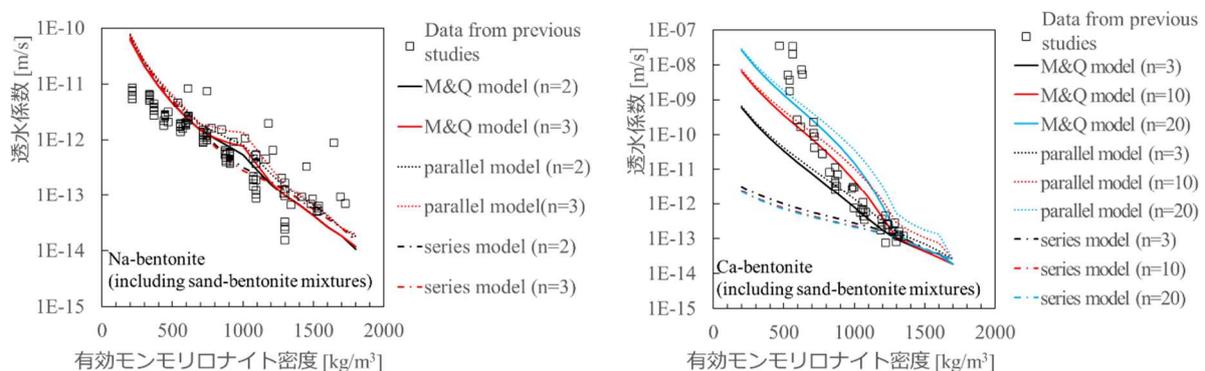
ベントナイト中の水はモンモリロナイトで充填された間隙中を流れるものとし、間隙は前述の層間間隙及び粒子間間隙の2種類を考慮して透水構造モデルを作成した。間隙同士の連結性(確率)は間隙の存在割合に応じて設定<sup>64</sup>し、水の粘性係数はモンモリロナイト粒子近傍で大きくなる効果を考慮した<sup>65</sup>。このような透水構造モデルを踏まえて透水係数推定式を作成した。

$$\begin{aligned}
 k_{M\&Q,app} &= \frac{\rho_w g}{12\mu} (\varepsilon_{total})^{\frac{4}{3}} \sum_j \sum_k X_{jk}^2 f(X_j) f(X_k) \cdot \sin\theta \\
 &= \frac{\rho_w g}{3\mu} (\varepsilon_{total})^{\frac{4}{3}} \left[ A_{2WH}^2 \left( \frac{\varepsilon_{2WH}}{\varepsilon_{total}} \right)^2 + A_{3WH}^2 \left( \frac{\varepsilon_{3WH}}{\varepsilon_{total}} \right)^2 + A_{osm}^2 \left( \frac{\varepsilon_{osm}}{\varepsilon_{total}} \right)^2 + A_{ext}^2 \left( \frac{\varepsilon_{ext}}{\varepsilon_{total}} \right)^2 + \right. \\
 &2 \left\{ A_{2WH}^2 \left( \frac{\varepsilon_{2WH}}{\varepsilon_{total}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{3WH}}{\varepsilon_{total}} \right) + X_{2WH,ext}^2 \left( \frac{\varepsilon_{2WH}}{\varepsilon_{total}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{ext}}{\varepsilon_{total}} \right) + A_{3WH}^2 \left( \frac{\varepsilon_{3WH}}{\varepsilon_{total}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{osm}}{\varepsilon_{total}} \right) + \right. \\
 &\left. \left. X_{3WH,ext}^2 \left( \frac{\varepsilon_{3WH}}{\varepsilon_{total}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{ext}}{\varepsilon_{total}} \right) + X_{osm,ext}^2 \left( \frac{\varepsilon_{osm}}{\varepsilon_{total}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{ext}}{\varepsilon_{total}} \right) \right\} \right] \cdot \sin\theta \quad \dots\dots\dots(2.2.1.1)
 \end{aligned}$$

ここで、 $\rho_w$ は水の密度、 $g$ は重力加速度、 $\mu$ は水の粘性係数、 $X_{j,k}$ は間隙 $X_j$ と間隙 $X_k$ のうち小さいほうの間隙幅の半分の距離、 $A_i$ は間隙幅の半分の距離、 $\varepsilon_{total}$ は全間隙率、 $\theta$ はモンモリロナイト粒子の平均積層角度を表す。添字 $j, k$ の2WH、3WH、osm、extはそれぞれ、2層水和膨潤の層間、3層水和膨潤の層間、浸透性膨潤の層間、粒子間を表す。

上記透水係数推定式より得られたNa型ベントナイト及びCa型ベントナイトの透水係数と有効モンモリロナイト密度の関係を図2.2.1.4に示す。なお、図中に示すM&Q model

は式 2.2.1.1 で計算した結果を表し、parallel model は層間間隙と粒子間間隙が互いに連結しないと仮定した場合の結果を表し、series model は層間間隙と粒子間間隙幅の連結が完全にランダムと仮定した場合の結果を表す。Na 型ベントナイトでは  $500 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_{em} \leq 1500 \text{ kg/m}^3$  で試験結果と整合し、Ca 型ベントナイトでは  $600 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_{em}$  で試験結果と整合した。Na 型ベントナイトは比較的良好に試験結果を再現できたものの、Ca 型ベントナイトは有効モンモリロナイト密度が小さくなると推定式で得られた結果と試験結果に著しく差が生じた。これは透水係数推定式が均一の透水構造モデルを仮定していることに対して、低密度の Ca 型ベントナイトではベントナイト中のモンモリロナイトの分布が不均一となることが原因と考えられる。



出典) Kijima et. al., (2022) <sup>54</sup> を一部修正

図 2.2.1.4 透水係数と有効モンモリロナイト密度の関係

Figure 2.2.1.4 Relation between the effective montmorillonite density and hydraulic conductivity

#### (4) まとめ

本研究では、坑道等の埋戻しに用いられることが想定されているベントナイト系止水材の長期的な変質とそれに伴う透水性の変化についての知見を得ることを目的として、空隙構造を考慮することによって幅広い範囲の有効モンモリロナイト密度におけるベントナイトの透水係数を理論的に導出する推定式を作成した。ベントナイトの透水係数と有効モンモリロナイト密度との関係は、従来、経験式として示されることがほとんどであったが、本推定式によって空隙構造との関係がより明確になった。このことは、変質に伴いベントナイトの含有量が変化した場合及び止水材として低混合率のベントナイトが使用される場合等の条件における、透水係数の変化の理解を進めるものになると考えられる。

### 2.2.2 セメント系人工バリアの長期性能評価手法の研究

本項のうち、(3)及び(4)はジーエルサイエンス株式会社への委託事業として実施した。

## (1) はじめに

緻密な空隙構造を持ち低拡散性を示すセメント系人工バリアは、廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を防止する機能が期待されている。一方で応力状態に応じてひび割れが生じると、その部分が際立って大きい透水係数と拡散係数を示す可能性がある。そのため、中深度処分の廃棄物埋設地の設計におけるセメント系人工バリアについて、骨材の影響によるひび割れ等の発生が物質移行特性へ及ぼす影響について科学的・技術的知見の取得を行った。

また、300年を超える長期の漏出抑制性能を評価するために必要な科学的・技術的知見として、セメント硬化体の長期安定性や物質移行特性に関係するカルシウムシリケート水和物（以下「CSH」という。）のナノ構造等の条件による違いについて、水蒸気吸着装置等の細孔を圧力で壊さない手法による層間空隙までの空隙構造の測定、閉塞した空隙やインクボトル形態などの評価、反応によって変化するCSHの結晶構造のトリメチルシリル誘導体化法（以下「TMS法」という。）による評価等を用いて明らかにした。

さらに、CSHの長期安定性を評価するため、第一原理等を用いた解析的手法の既往の知見を整理した。

## (2) ひび割れ等の発生が物質移行特性へ及ぼす影響

社会基盤（土木、建築）分野では水密性を有するコンクリート構造物にひび割れが発生した場合、コンクリート標準示方書設計編<sup>66</sup>においてひび割れ幅で限界値の目安が規定されている。これは、ひび割れの内部状態とコンクリート構造物の水密性能については外観からのひび割れ幅でしか評価できないためである。

中深度処分における埋施設で使用されると想定されるセメント系人工バリア（コンクリート構造物及び低拡散層）は、水和反応に伴う自己収縮を避けることは難しく、周囲の岩盤や低透水層などで周囲から外部拘束を受けている場合には、ひび割れが発生する可能性が非常に高いことが想定される。その際に、社会基盤（土木、建築）分野におけるコンクリート構造物よりも高い水密性を求められると考えられ、性能維持に必要なひび割れの幅の基準がもっと小さくなる可能性がある。

近年、X線CTスキャン機器の性能が向上していることで、測定可能な範囲も拡大しており、コンクリート内部の気泡やひび割れ形状を測定した既往の知見も確認されている<sup>67</sup>。

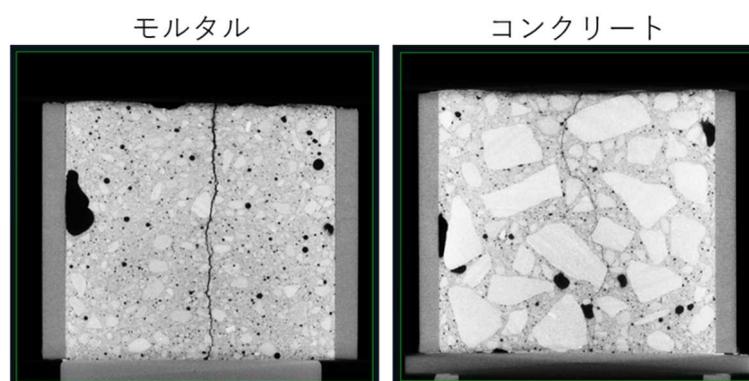
本研究では、コンクリート構造物のひび割れの発生状況を模擬する形で、意図的にコンクリート及びモルタルにひび割れを導入し、それらの内部形状についてX線CTスキャンにより測定を行うことで、ひび割れ幅、材料特性及び内部形状の関係を明らかにし、この内部形状等と透水性能の関係について整理した。

ひび割れ部の内部形状の一例を図2.2.2.1に示す。モルタルにおけるひび割れは、外観から目視できるひび割れの大きさが内部でも大きく変化せずに貫通していることが確認でき

た。しかし、コンクリートにおけるひび割れは外観のひび割れ幅とは異なり、内部において様々な方向にひび割れが進展していることが確認できた。このことから、ひび割れが発生した場合に粗骨材の有無によりひび割れ内部の形状は外観から確認できるひび割れ幅と大きく異なり、骨材によって多角的にひび割れ進展が起こる可能性があることが分かった。これにより、ひび割れ貫通方向に粗骨材がある場合に方向変化し、貫通するまでにモルタルよりもひび割れ奥行き長さが深くなることが分かった。

試験により求められたコンクリート試験片のひび割れの内部形状と透水性との関係を整理すると、外観から確認できる平均ひび割れ幅と透水量との関係に関係性が認められたが、ひび割れ幅 1.2 倍の増大量に対し透水量が 10 倍程度になるケースもあれば、ひび割れ幅 2.4 倍の増大量に対し透水量が 3 倍程度しか大きく増大しなかったケースも存在した。ひび割れの内部形状を精査すると、外観からの平均ひび割れ幅が大きい場合においても内部ひび割れで狭小な部分が存在し、内部ひび割れの最小幅で透水量が減少する関係が認められた。粗骨材の有無によって、内部ひび割れ形状が大きく異なり、粗骨材等が含まれることで材料の均一性が複雑になればなるほど、透水性能は低くなることが明らかとなった。

これは、ひび割れの透水性評価をする際に、ひび割れの幅で一義的に透水性を判断するのではなく、材質の均一性も確認項目となる可能性を示唆する。



出典) 日本仮設株式会社 (2025) <sup>68</sup>

図 2.2.2.1 ひび割れの内部形状測定結果

Figure 2.2.2.1 Measurement results of internal crack shape

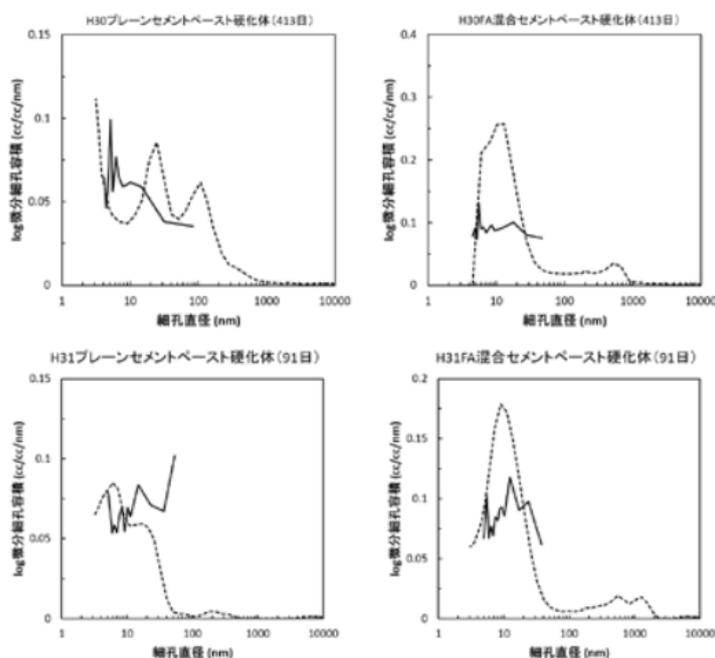
### (3) 測定方法が細孔構造の測定結果へ及ぼす影響

セメント硬化体中の物質移行に寄与する細孔構造は、水和前の材料密度による物理的空隙に加え、水和過程で形成される化学的空隙が存在する。セメント硬化体における形成時の細孔構造は単位セメント量、混和材量、化学混和剤の添加等の調合、締固め及び養生によって支配され、その後の細孔構造は、降雨等の自然環境における水分の存在により生成したセメント結晶（非晶質も含むセメント結晶を以下「CSH ゲル」という。）の成長に影響

を与える pH、温度、水質等の外部環境によって変化すると考えることができる。

本研究では、社会基盤分野ではほとんど研究が進んでいない CSH ゲルの層間空隙及びゲル空隙に着目した。計測方法としては、水銀圧入ポロシメーター及び水蒸気吸着装置の 2 つを選定し比較検討した。その結果、水銀圧入ポロシメーターは、層間空隙等の微小な空隙は計測できないことが改めて確認できた (図 2.2.2.2) <sup>69</sup>。一方、水蒸気吸着装置は、H<sub>2</sub>O 等の極性を持つ分子の場合は CSH 層の表面が負の電荷を持ち、層間に Ca<sup>2+</sup>イオンが存在することで、可逆的な化学反応により侵入できることから、層間空隙及びゲル空隙の測定には十分に適していること、放射性廃棄物処分での核種移行評価に必要な空隙等の計測に適していることが分かった。

しかし、試料の前処理により CSH の層間空隙の状態が変化してしまう可能性もあることから、前処理方法及び測定された空隙径分布の解釈については、今後の課題である。



出典) ジーエルサイエンス株式会社 (2022) <sup>69</sup>

図 2.2.2.2 水銀圧入法 (破線) と水蒸気吸着法 (実線) に基づく細孔径分布の比較  
Figure 2.2.2.2 Comparison of pore size distribution of mercury intrusion method (dashed line) and water vapor adsorption method (solid line)

また、セメント硬化体における CSH の層間空隙及びゲル空隙は、セメント結晶の形態によってその構造が異なることから、水和及び外部環境による結晶形態の変遷にしたがって、層間空隙及びゲル空隙の構造も変化する。そこで、CSH の結晶安定性に関する機構解明を行うため、TMS 法によるケイ酸鎖長構造の測定及び核磁気共鳴装置によるケイ素及びアルミニウム等の化学結合形態の変化 (化学シフト) を用いて同一試料による測定を行い <sup>69</sup>、

CSH の結晶形態の評価を行った。その結果、それぞれの手法は直接的に測定しているものが異なるものの、単独又は組み合わせることで CSH の結晶安定性を評価するに十分な情報が得られることが確認された。

#### (4) 第一原理計算等解析手法のセメント系材料への適用に関する調査

加速試験で評価ができない、放射性廃棄物の埋設施設のような反応のタイムスケールが非常に長い条件でのセメント系人工バリアの長期性能を評価するためには、熱力学平衡計算、第一原理計算等を用いた解析的手法による予測が唯一の手段であることから、セメント硬化体への適用事例について整理した。

熱力学平衡計算をセメント硬化体へ適用した際の課題については、熱力学量のデータベースが不足していることである。熱力学量のデータベースを構築する上で、実際には安定相として存在しない結晶構造に対してはギブスエネルギーを求めることはできない。また、CSH のような準安定相の相対的なギブスエネルギーは推定値であるため、大きな誤差が含まれている可能性があり、 $\text{Na}^+$ や $\text{Al}^{3+}$ などの陽イオンの存在、温度、相対湿度、生成速度などの様々なパラメータの影響の研究がこれまで不十分であることにより、変質する際には更に大きな誤差の発生が想定される。

この準安定相のデータベースを構築するために、原子構造シミュレーションの深化が必要であり、第一原理計算や分子動力学から得られた知見を活用することが重要である。

これまで、第一原理計算を用いた CSH の研究は、CSH の構造、特にシリケート鎖の構造と安定性に及ぼすアルミニウムやアルカリの影響についての検討がなされていた<sup>70, 71</sup>。その後、低カルシウム・シリカ比の CSH における Al の取り込み機構について大規模な第一原理計算が実施されている<sup>72</sup>。

Al はペアリング四面体での置換が幅広い条件下であまり起こらないことや、2 つの Al 原子が隣同士であることは相対エネルギーが高くなることから好ましくないことが明らかとなっている<sup>7</sup>。また、Na、K、Mg を置換した検討も実施されている<sup>73</sup>が、セメント水和物の変質に関する反応速度に適用した例はない。

さらに、反応速度の推定は、第一原理計算で考慮できる原子構造の大きさでは十分でない可能性もある。より大きな分子構造を対象とするには、分子動力学モデルと第一原理計算を融合させた第一原理分子動力学が必要となる。

今後は、第一原理計算や第一原理分子動力学に基づく CSH などのセメント水和物の変質に関する反応速度モデルが構築されることが望まれる。

#### (5) まとめ

中深度処分の廃棄物埋設地の設計におけるセメント系人工バリアについて、骨材の影響によるひび割れ等の発生が物質移行特性へ及ぼす影響について基礎的な検討を行い、粗骨

材の有無によって、内部ひび割れ形状が大きく異なり、粗骨材等が含まれることで材料の均一性が複雑になればなるほど、透水性能は低くなることが今回明らかとなった。

セメント硬化体の細孔構造を把握するための試験方法の選択として水銀圧入法と水蒸気吸着法の比較、CSHの構造を把握するための試験方法の選択としてTMS法と核磁気共鳴装置による測定の比較を行った。その結果、細孔構造を把握するための試験方法とCSHの構造を把握するための試験方法ともに、それぞれの手法は、直接的に測定しているものが異なるものの、組み合わせることで十分な情報が得られることが確認された。

また、カルシウムシリケート水和物の長期安定性を評価するため、第一原理計算等を用いた解析的手法の既往の知見を整理し、熱力学平衡計算をセメント硬化体へ適用した際には熱力学量のデータベースが不足していること、原子構造シミュレーションの深化が必要であり第一原理計算や分子動力学から得られた知見を活用することが重要であることが明確となった。

### 2.2.3 中深度処分における岩盤の収着・移行現象に関する研究

本項の検討は、東京大学との共同研究にて実施した。

#### (1) はじめに

微小な空隙中での放射性核種の物質輸送とその過程での鉱物への吸着は、天然バリアの安全機能である移行抑制機能において重要な機構である。例えば、粘土中の拡散においては、ナノメートルオーダーの微小な空隙の形状が物質移行に影響を与えていることが報告されている<sup>74</sup>。岩石への放射性核種の吸着反応は、分散系での吸着試験の結果に基づき表面錯体モデルなどのモデルによって説明されている。従来これらの試験やモデルにおいて、反応が生じる空隙のサイズは考慮されていないが、微小な空隙表面での化学反応がより大きな系でのそれと異なることも報告されており、その影響を適切に評価する必要がある。微小な空間での反応については、水分子の移動や空隙内の分布が制限される影響、表面の凹凸の影響、複数の面の電気二重層が重畳する影響等が個々の研究で検討されている<sup>75,76</sup>。しかし、岩石中の微小な空隙において、放射性核種の吸着反応に対してそれらの異なる影響がどのように作用するのかは明らかでない。また、そのような微小な空隙中での吸着反応の変化が放射性核種の移行に与える影響を明確にし、移行評価に組み込んだ例はない。

そこで本研究では、岩石中の微小な空隙での特異的な吸着反応に関する知見を得ると共に、そのような特異的な吸着反応が放射性核種の移行に与える影響を検討した。岩石中の放射性核種の拡散及び吸着には、岩石の固相及び液相の様々な条件が影響を与えるため、各試験の目的に合わせて空隙中の液相の化学状態、空隙のサイズ等を制御した試料を用いた。

## (2) 微小空隙の影響に関する実験と結果

吸着反応については、微小空隙を有する岩石の模擬物質としてメソポーラスシリカを対象に、セシウムイオン ( $\text{Cs}^+$ )、ストロンチウムイオン ( $\text{Sr}^{2+}$ ) 及びユウロピウムイオン ( $\text{Eu}^{3+}$ ) を対象とした吸着実験、表面錯体モデルの適用及びイオンの吸着状態の分析を行った。その結果、ナノメートルオーダーの空隙内部において、主に、水が構造化し比誘電率が低下することと、電気二重層が重なることが、金属イオンの吸着に伴う静電エネルギー変化量と水和エネルギー変化量の両方に影響すること、特に後者についてはイオンの種類によってその影響が大きく異なることを明らかにした<sup>77-79</sup>。

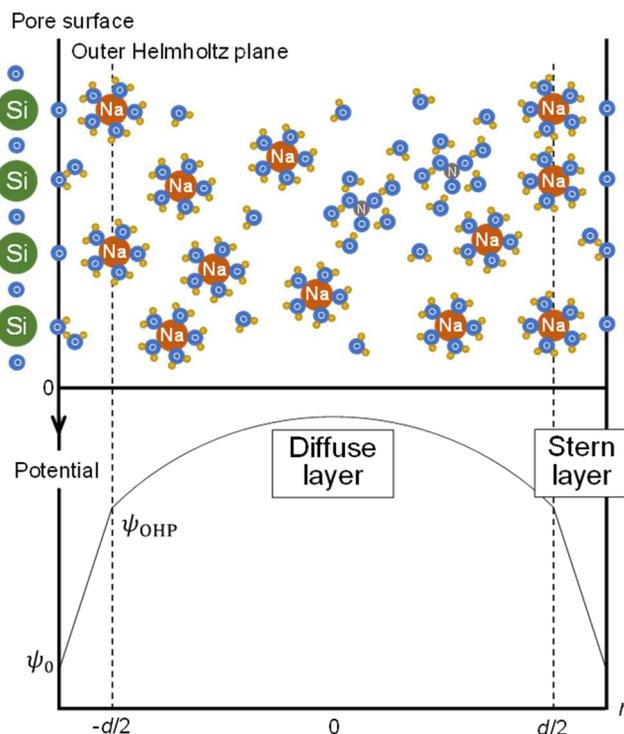
異なるイオン強度及び pH におけるメソポーラスシリカの表面電荷密度をバッチ滴定実験から求め、円筒一次元 Poisson-Boltzmann 式で表現される拡散層と Stern 層からなる電気二重層を仮定した表面錯体モデル (図 2.2.3.1) を用いて分析した<sup>77</sup>。その結果、空隙表面に形成した電気二重層同士が重なり合い、空隙内の電位が低下すること、及び、表面近傍の水が構造化し、比誘電率が減少することが、表面電荷密度の絶対値の減少を引き起こすことを明らかにした (図 2.2.3.2)。空隙サイズに応じた表面電荷密度の変化は、いずれの金属イオンの金属酸化物表面への静電的な吸着に対しても影響を与えるものである。微小な空間において、表面電荷密度の絶対値が減少することによって、金属イオンの静電吸着が抑制されるが、同時に電気二重層の重なりによって空隙内部の金属イオン濃度は増加するため、金属イオンの静電吸着の分配係数に対する空隙サイズの影響はイオンの価数や pH によって変化する。そのため、静電吸着に対する閉じ込め効果を移行評価に反映するためには、本研究で使用したような表面錯体モデルを用いる必要がある。

メソポーラスシリカに対する  $\text{Cs}^+$  及び  $\text{Sr}^{2+}$  の単位表面積当たり収着量を求め、表面錯体モデルを用いて分析した結果、 $\text{Cs}^+$  の吸着反応の平衡定数が空隙サイズの減少と共に増加するのに対し、 $\text{Sr}^{2+}$  の吸着反応の平衡定数は空隙サイズに依存しないことが示された<sup>78</sup>。この違いは、両者のイオンの水和エネルギーの強さの差によるものと考えられる。モデルを用いた分析結果は、空隙径が 12.4 nm から 1.36 nm に減少すると  $\text{Cs}^+$  の吸着平衡定数は一桁増加することを示しており、これは一桁程度の分配係数の違いに相当し、移行評価に与える影響は大きい (図 2.2.3.3)。

時間分解型レーザー蛍光分光法を用いて、メソポーラスシリカ及び空隙を持たないアモルファスシリカに収着した  $\text{Eu}^{3+}$  の化学種やそれに対する空隙サイズの影響を分析した (図 2.2.3.4)<sup>6</sup>。いずれのシリカに収着した  $\text{Eu}^{3+}$  についても、pH に応じて水和数や錯体の非対称性が変化した。また、微小な空隙内では脱水和が生じやすいことが示唆された。

微小な空隙における放射性核種の移行について調べるため、均一な円筒形の空隙を持つ陽極酸化アルミナ膜を用いた透過拡散試験を行った。断面径 20 nm 程度、厚さ 0.1 mm の試料について、重水及びイオンは 2 週間以上透過しなかった。連続性があり屈曲していな

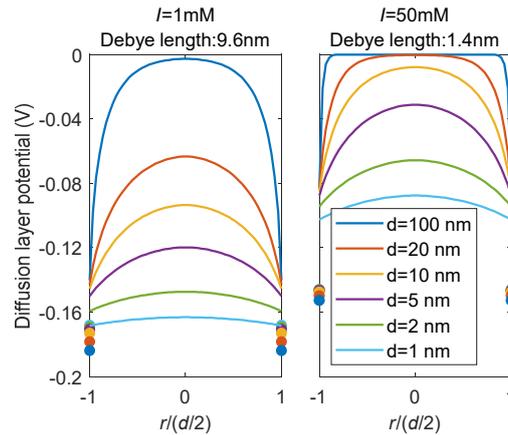
いと想定される空隙においてこのような遅い拡散が見られたことから、微小な空隙において水の粘度が増加し、それが水及びイオンの移行に影響を与えていることが示唆された。拡散速度は大きい順に水、陰イオンであるヨウ素イオン、陽イオンである  $\text{Cs}^+$  であった。試験中の液相 pH は 5-6 程度であり、アルミナ表面は正に帯電していることから、表面に生じる電気二重層の重なりによって陽イオンの拡散が阻害されたと考えられる。このことは、液相中のイオン強度を低下させることで、 $\text{Cs}^+$  の拡散速度が低下したと整合する。



出典) Murota and Saito, (2022) <sup>77</sup>

図 2.2.3.1 メソポーラスシリカ空隙内のイオン分布（上段）と電位分布（下段）の模式図

Figure 2.2.3.1 Schematic diagram of the distribution of ions (upper part) and the potential profile (lower part) inside a pore of mesoporous silica



出典) Murota and Saito, (2022) <sup>77</sup>

図 2.2.3.2 イオン強度が 1 mM (左) 及び 50 mM (右) における径の異なるメソポーラスシリカ空隙内の拡散層の電位分布

Figure 2.2.3.2 Potential distributions of the diffuse layer in pores of mesoporous silicas with different diameters at ionic strengths of 1 mM (left) and 50 mM (right)

注) 円筒一次元 Poisson-Boltzmann 式に基づいて計算した。横軸は各空隙の半径で規格化した半径方向の位置を示す。縦軸の点は各空隙の表面における電位を表す。

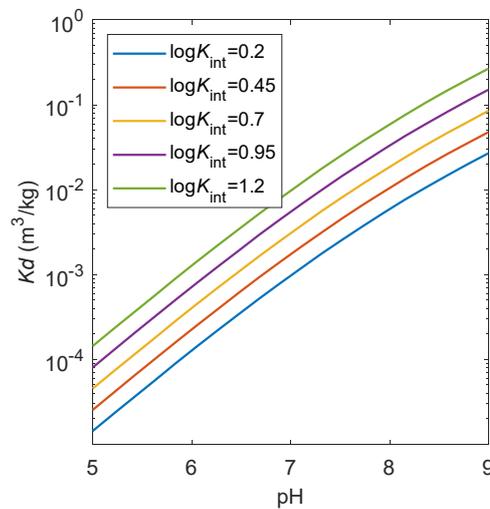
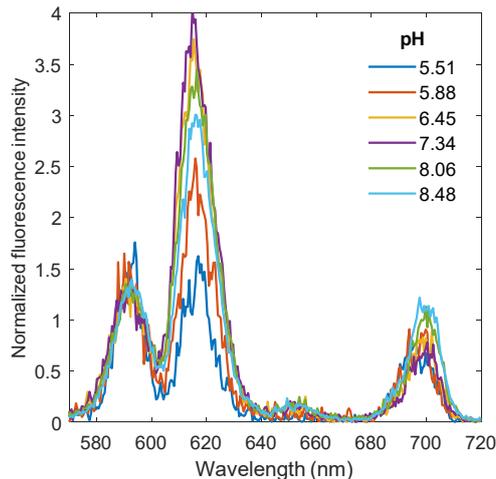


図 2.2.3.3 空隙径 5 nm のメソポーラスシリカの異なる吸着平衡定数での Cs<sup>+</sup>の分配係数 (Kd) の表面錯体モデルによる計算値

Figure 2.2.3.3 Distribution coefficients of Cs<sup>+</sup> at different intrinsic equilibrium constants for mesoporous silicas with a diameter of 5 nm, calculated by the surface complexation model

注) 吸着平衡定数の対数值 ( $\log K_{\text{int}}$ ) の上限 (1.2) と下限 (0.2) はそれぞれ、表面錯体モデルを用いて吸着実験結果を分析した結果得られた空隙径 1.36 nm と 12.4 nm のメソポーラスシリカにおける値。



出典) Murota et al., (2023) <sup>79</sup>

図 2.2.3.4 空隙を持たないアモルファスシリカに吸着させた  $\text{Eu}^{3+}$  の異なる pH での蛍光スペクトル

Figure 2.2.3.4 Fluorescence spectra of  $\text{Eu}^{3+}$  adsorbed on amorphous silica without pores at different pH

注) 394 nm の単波長レーザーを照射した際の遅延時間 20  $\mu\text{s}$  での結果で、スペクトルは波長 592 nm 付近のピーク面積で規格化している。 $\text{Eu}^{3+}$  の配位環境の対称性の変化によって波長 615 nm 付近のピークの大きさが変化している。

### (3) まとめ

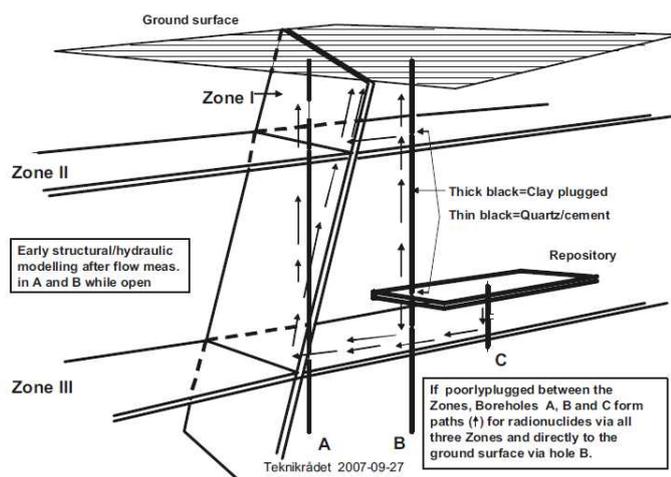
本研究では、岩石中の微小な空隙での特異的な吸着反応が放射性核種の移行に与える影響を検討した。ナノメートルオーダーの空隙内部では、水が構造化し、比誘電率が低下すること、電気二重層が重なることが、金属イオンの吸着に伴う静電エネルギー変化量と水和エネルギー変化量の両方に影響することが確認された。また、メソポーラスシリカに対する  $\text{Cs}^+$  の吸着平衡定数は空隙サイズの減少と共に増加したが、 $\text{Sr}^{2+}$  の吸着平衡定数は空隙サイズに依存しないことが示された。これは、イオンの水和エネルギーの違いによるものと考えられる。さらに、均一な円筒形の空隙を持つ陽極酸化アルミナ膜を用いた透過拡散試験では、重水及びイオンの透過が遅く、特に陽イオンの拡散が阻害されることが確認された。

これらの知見は、天然バリアの移行抑制機能の評価において重要な特性である物質移動及び吸着の特性の理解に情報を提供するものである。本知見は、評価期間が長期にわたる中深度処分において、状態設定期間における分配係数の妥当性の確認に活用される。

## 2.3 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究

### (1) はじめに

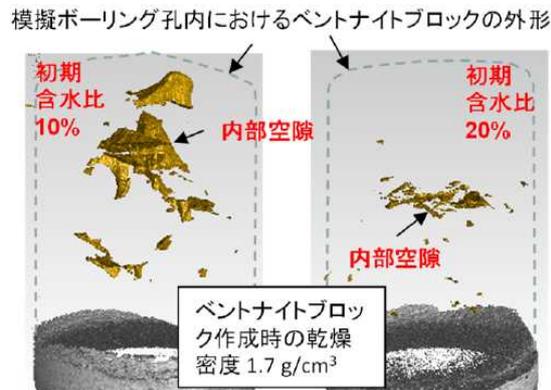
中深度処分に係る廃棄物埋設施設においてモニタリング等の目的で設置されたボーリング孔は、運用期間が終わると内部の機器を撤去した上で閉塞されると考えられる。この際、閉塞が不十分であると地下水及び放射性核種が天然バリアをバイパスして選択的に生活圏に移行する短絡経路となることが懸念される<sup>80</sup> (図 2.3.1)。このため、ボーリング孔が適切に閉塞されていることを確認する必要がある。閉塞の際には、ケーシング及びアニユラスの充填材の劣化、並びにボーリング孔周辺のゆるみ域 (BDZ) 等も閉塞性能に影響することがあるため、これらへの対処も適切に行われなければならない<sup>81</sup>。閉塞を確認する方法としては、モックアップ試験等により性能が発揮される閉塞方法を確立し、実施工ではそれが適切に実施されたことを施工状況の確認や品質管理によって行う方法と、閉塞作業を行った後のボーリング孔で水理試験等行って直接確認する方法が考えられる<sup>82</sup>。前者については、JAEA が予備的に行った室内試験結果<sup>83</sup> (図 2.3.2)、SKB の検討等のように<sup>84</sup>、狭いボーリング孔においては部分的な閉塞不良が起こり得るが、そのことを検知することは困難である。後者については、石油掘削井の一時的閉塞等において行われており、その方法は閉塞部の先を加圧してその位置における圧力変動を測定するなどのものであるが、長期の閉塞を確保する必要がある中深度処分施設においては加圧や圧力測定のための閉塞部を貫通するパイプ等を残置することができないことからこの方法は適切ではなく、閉塞部より手前における圧力応答を用いる方法を考える必要がある<sup>85</sup>。そこで本研究においては、文献調査、試解析及び一部は JAEA による委託研究によって、ボーリング孔閉塞の技術、ボーリング孔の影響及びボーリング孔閉塞確認の方法について検討した。



出典) Push R. et. al., (2011) <sup>80</sup>

図 2.3.1 不十分に閉塞されたボーリング孔及び周辺の地質媒体を通じた放射性物質の移行経路

Figure 2.3.1 Flow path of fracture zones and inadequately sealed boreholes



出典) 澤口他 (2018) <sup>83</sup>

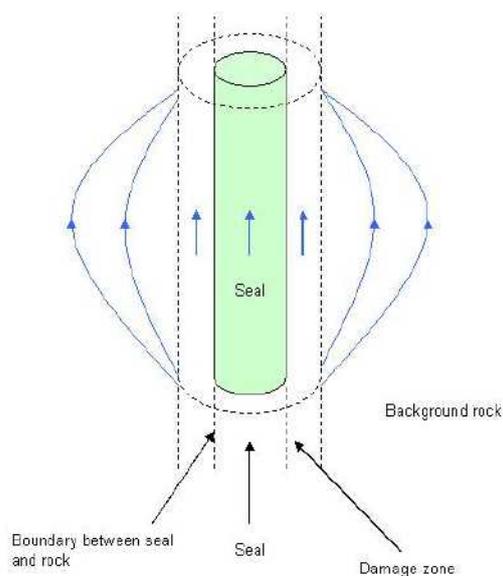
図 2.3.2 ボーリング孔閉塞を模擬した室内試験におけるベントナイトブロック内の空隙 (膨潤開始から 15 日後- マイクロ X 線 CT 観察結果-)

Figure 2.3.2 Micro X-ray images of bentonite brocks and internal pore spaces

## (2) 諸外国におけるボーリング孔の閉塞に関する検討

廃棄物埋設施設には、放射性廃棄物を地表の環境から隔離し、閉じ込めるという主要な安全機能がある。ボーリング孔埋戻しシステムの安全機能は、必要とされる期間にわたって処分場から地表環境までの地下水の短絡経路とならないようにそれを閉塞することである。これに加えて、処分場の閉鎖までの安全機能として、処分施設にボーリング孔を通じた水の流入が生じないようにすることや、関連する環境保護期間の規制要求として地下水資源を塩水の地下水から保護することなどもある<sup>85</sup>。典型的なボーリング孔閉塞の設計は、亀裂等の比較的高透水の領域を砂等で閉塞し、亀裂等がない領域を低透水性の粘土（ベントナイト等）で埋め戻すとするものである。亀裂等の領域については、周辺が高透水性であるのでボーリング孔の当該部分の低透水性に対する要求が低い一方で、地下水の流れによる侵食作用にさらされるために、粘土材料よりも耐侵食性の高い材料を用いようとするものと解される。

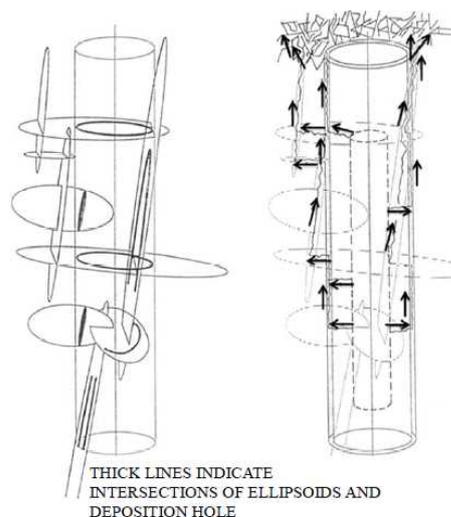
閉塞されたボーリング孔周辺の地下水の流れについては、閉塞材を通じた流れ、BDZを通じた流れ及び周辺の岩盤を通じた流れ、の3つを考える必要がある<sup>85</sup> (図 2.3.3)。特に、亀裂ネットワークが発達している場合や BDZ が高透水性である場合には、それらを通じた流れが卓越してボーリング孔内の閉塞措置が効果を発揮しない可能性がある<sup>86</sup> (図 2.3.4)。この対策として、ボーリング孔閉塞時に BDZ を止水する目的でボーリング孔の一部を拡幅して小規模なプラグを設置する概念もある。しかしながら、プラグを回り込む流れを考慮するとその効果は限定的であることから、ボーリング孔を掘削する時点で BDZ をできるだけ発生させない考慮が重要であると考えられる。



出典) Radioactive Waste Management (2018) <sup>85</sup>

図 2.3.3 閉塞されたボーリング孔及びその周辺の地下水の流れ

Figure 2.3.3 Potential flow paths for a section of sealed borehole



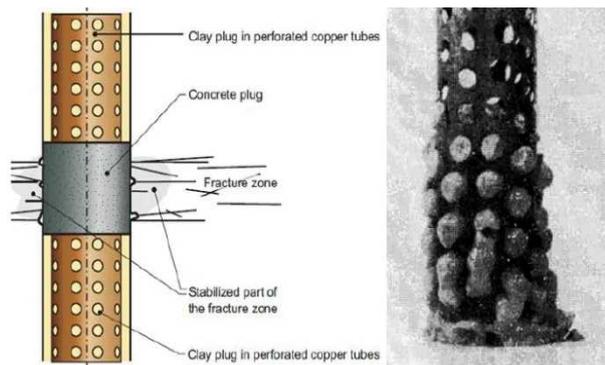
出典) Pusch R. et. al., (2012) <sup>86</sup>

図 2.3.4 ボーリング孔の BDZ 及び周辺の亀裂を通じた放射性物質の移動

Figure 2.3.4 Radionuclides flow paths along BDZ and natural fracture

ケーシングやアニュラスの充填材について、その施工方法や材料が長期間の安定性を十分示すことができない場合には、ボーリング孔の閉塞前にそれらの撤去が必要となるかもしれない。一方で、それらの撤去は、ボーリング孔の崩壊を招いて BDZ の範囲や透水性を増加させる可能性があることから、慎重な扱いが必要となる <sup>87</sup>。

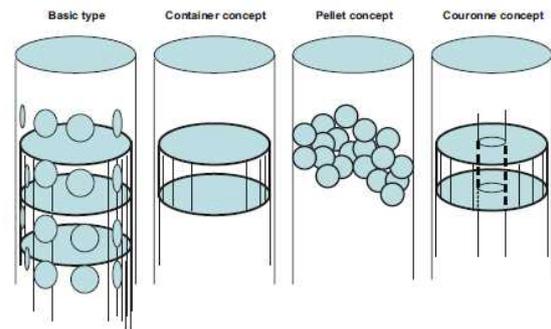
水で満たされたボーリング孔の閉塞対象部位にベントナイトを配置する方法としては、有孔銅管に充填してボーリング孔に挿入する方法、コンテナ等の筒状の容器に入れて搬送する方法、粒状に圧縮成型したベントナイトをボーリング孔内へ落下させる方法、銅の心棒にドーナツ状に成型した圧縮ベントナイトブロックをはめ込んで設置する方法などがある <sup>88, 89</sup> (図 2.3.5、図 2.3.6)。



出典) Pusch R. et. al., (1981) <sup>88</sup>

図 2.3.5 有孔銅管とベントナイトを用いたボーリング孔の閉塞

Figure 2.3.5 Sealing of borehole with perforated copper tube and bentonite



出典) Pusch R. et. al., (2020) <sup>89</sup>

図 2.3.6 ボーリング孔を埋め戻す方法の例  
左から、有孔銅管、コンテナ、ペレット及び  
びリング状を示す

Figure 2.3.6 Examples of sealing boreholes with copper tube, container, pellet and couronne

### (3) ボーリング孔閉塞の影響に関する検討

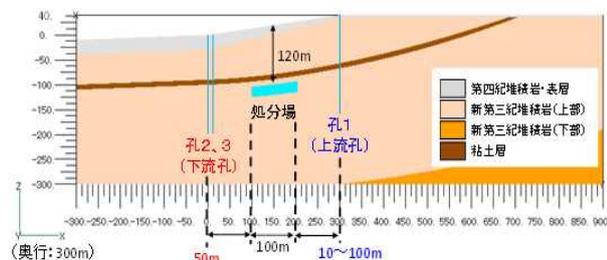
ボーリング孔閉塞にどの程度の性能が必要となるかは、処分施設周辺の地質水理環境によって異なる。例えば、AMEC Foster Wheeler は、岩の水理特性とモデルの規模を変えて検討した結果、ボーリング孔周辺の地下水流れがボーリング孔にひき寄せられることが確認された一方で、不十分に埋め戻されたボーリング孔によっても、全体の透水量に大きく影響することはなかったとしている<sup>90</sup>。閉塞が不十分なボーリング孔は、その内部が高透水性である一方で断面積は小さいという特徴を持つことから、周辺岩盤中の透水係数が大きい場合には、地下水流動全体に与える影響は限定的であると解される。ただし、孔内を選択的に流れる流速とそれによる一部の核種の移動には注意が必要である。これに対して、例えば低透水性の粘土層で被圧された地層に廃棄物処分施設が配置され、この層を貫通したボーリング孔の閉塞が不十分であると、地下水の流れと放射性核種の移動を変える可能性がある。

JAEA による委託研究<sup>91</sup>により、種々の水理場において不十分に閉塞されたボーリング孔が、地下水流動と核種移行に与える影響について解析的に検討した。広域の地質水理条件としてボーリング孔が地形的に浸出域となる条件と粘土層で被圧される条件を設定し(図 2.3.7)、ボーリング孔周辺の条件として亀裂系、断層及び粘土層の条件及び BDZ の有無を設定し、地下水流動解析及び粒子追跡線解析を実施した。ボーリング孔周辺の粒子追跡線を図 2.3.8 に示す。

解析結果から、地下水流動の観点からはボーリング孔内や BDZ 内に有意な水みちが形

成されなかった。また、孔内の流量が孔なしの場合に比べ大きくならないようにするための埋戻し材設計条件として、ベントナイト埋戻し材の透水係数を母岩の透水係数以下に設計すること、BDZ をグラウトで充填することが示唆された。また、粘土層や断層の存在を考慮した場合にこれらの水理地質構造の直上にある健岩部と同じ深度のボーリング孔内にある程度の厚さ（例えば 1 m 以上）の透水性の低い材料（ベントナイト等）で埋戻すことの必要性が示唆された。

また、核種移行の観点からは、加圧層（粘土層）を貫通する孔によって下部の被圧帯水層の流動場が大きく変化するような場合、ボーリング孔の適切な埋戻し材設計条件は「粘土層を透水性の低い材料で埋戻すこと」であることが示唆された。一方、帯水層が被圧を受けていない地質構造においては、処分場近傍の下流側に数本の孔がある場合は、地下水流動が上向きの流出状態、かつ透水性が大きな砂等のみで孔を埋戻したとしても、孔内に地下水が引き込まれる割合は僅かであったとしている。



粘土層(10m)で隔離	断層が存在(断層幅は20cm)	
<p>・ベントナイト厚さは粘土層と同じ厚さにする</p>	<p>・ベントナイト厚さは1mとする</p>	<p>・砂の厚さは1mとする                      ・砂上下のセメント厚さ0.5m                      ・ベントナイト厚さ1m</p>

出典) JAEA (2023) <sup>91</sup>

図 2.3.7 ボーリング孔影響確認解析に用いた地質水理条件

Figure 2.3.7 Settings of the ground water flow conditions along the boreholes for the analysis

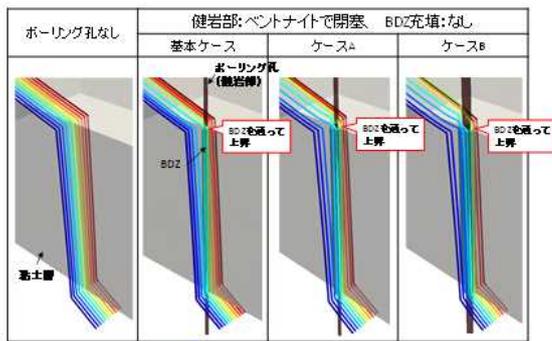
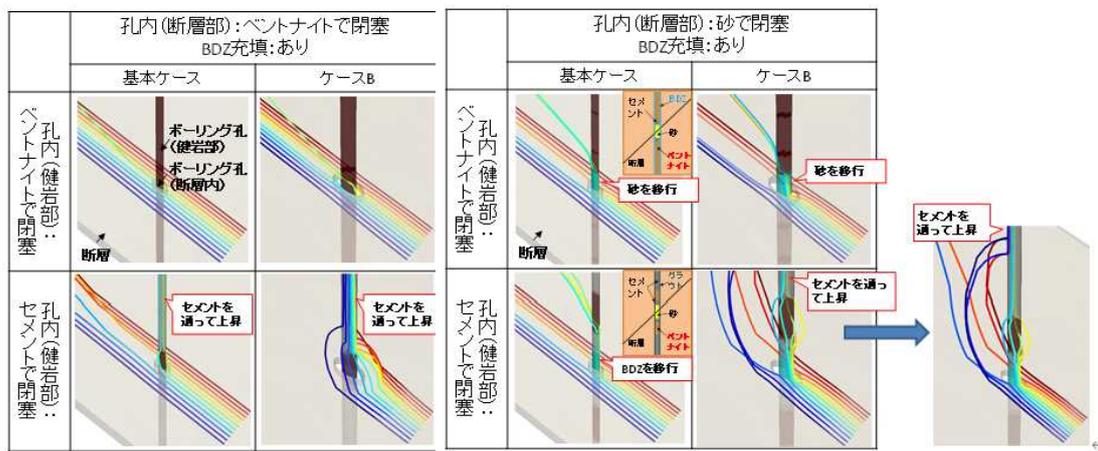


図 4.2-23 孔周辺の粒子追跡線

(粘土層、健康部閉塞:ベントナイト、BDZ 充填なし)



出典) JAEA (2023) <sup>91</sup>

図 2.3.8 ボーリング孔周辺の粒子追跡線

Figure 2.3.8 Particle trackings along the boreholes

#### (4) 水理試験によるボーリング孔閉塞確認の検討

水理試験等によって閉塞を確認する方法については、周辺岩盤の透水特性、亀裂の配置、BDZ 等の状態、閉塞材料の特性等によって、応答と観測可能な条件の範囲が異なる。これらのことから、処分施設周辺の地質水理環境等に応じてボーリング孔閉塞に求められる要件を定め、これを周辺岩盤等の特性に応じた方法によって確認することが必要であると考えられる。このため、まず、ボーリング孔周辺の地質水理条件、特に、BDZ の状況、亀裂の有無、亀裂の連結性、二重間隙的特性等を確認することが重要である。ボーリング孔の坑壁近傍は、ボーリングの際に用いた泥水の作用によって透水係数が小さくなっていることがありスキン効果と呼ばれている。これに対して BDZ はこの領域の透水係数が大きくなっている状況であり負のスキン効果と呼ばれている<sup>40</sup>。この効果は、ドローダウン試験の解析や、定流量注入試験においてデリバティブ（注水区間の圧力を対数の時間で微分したもの）で解析することによって得ることができる<sup>92</sup>。時間の対数に対するデリバティブのプロットでは、注入水が周囲に 1 次元状に広がるのか、2 次元又は 3 次元状に広がるの

か、また、境界となる水理条件が閉鎖条件なのか高透水性構造なのかなどの情報も与えることができる。したがって、この手法を、閉塞が適切に行われたかを確認する手法として用いることもできる可能性がある（閉塞が不十分であれば1次元的な応答が見られる可能性がある）。ただし、このような情報が得られるのは注水による圧力伝搬がされる範囲に限られ、特に透水係数が小さい地質媒体においては、その範囲が狭いことに注意が必要である<sup>93</sup>。

ボーリング孔閉塞の確認として、周辺地質媒体の透水係数に対して閉塞部の透水係数を変え、閉鎖領域の手前側で定流量注入試験を行った場合の圧力応答を試算した（図 2.3.9-10）。周辺地質媒体より閉塞部の透水係数が著しく大きい場合には、圧力応答でもその差異が明瞭に見ることができる。したがって、低透水性媒体においては、圧力自体でも閉塞の適切性を判断できると考えられる。しかしながら、100 倍程度ではその差異は明瞭でなくなる。このような条件でデリバティブプロットの情報が効果を持つことを期待したが、この体系では、閉塞が不十分な場合に見えるはずの1次元的な応答はほとんどの条件で識別することが困難であった。これは、ボーリングの注水区間から岩側に流入する成分が多いためであると考えられるので、孔壁からの漏れを少なくするなど、測定体系の改良が必要であると考えられる。

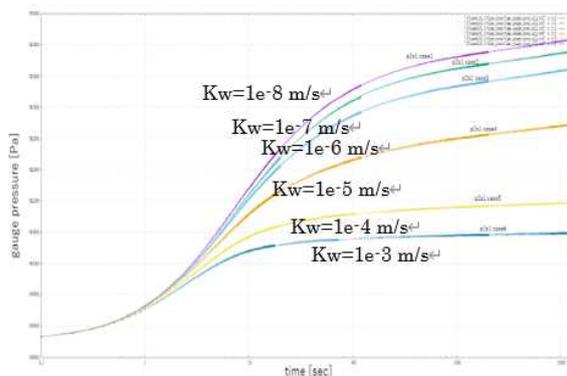


図 2.3.9 定流量試験における圧力応答  
Figure 2.3.9 Pressure curves of constant rate test

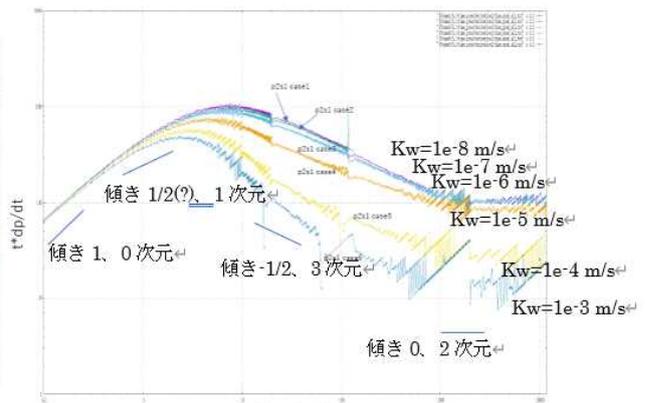
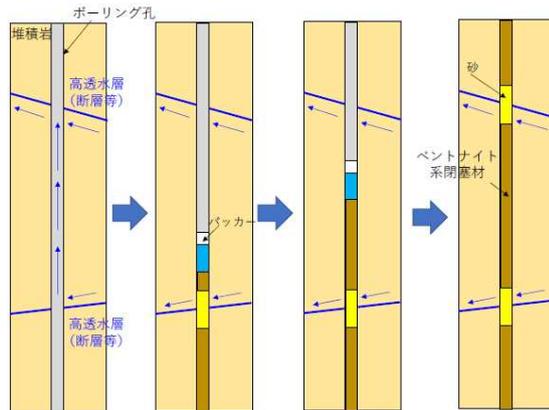


図 2.3.10 定流量試験におけるデリバティブプロット  
Figure 2.3.10 Derivative plot of constant rate test

JAEA による委託研究<sup>94</sup>において、水理試験によるボーリング孔閉塞の性能を確認する手法について、室内試験を用いて検討した。想定したボーリング孔の閉塞作業及び閉塞確認試験の流れを図 2.3.11 に示す。また、閉塞確認のための水理試験の概念と対応する圧力応答の概念を、それぞれ図 2.3.12、2.3.13 に示す。

この状況を模擬した室内試験の概念を図 2.3.14 に示す。粘土層上部における定流量注水試験を模擬した室内試験を実施し、閉塞材設置前後の試験で得られた圧力変化データの比

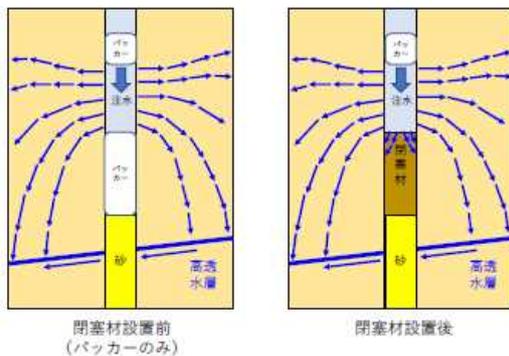
較から孔の閉塞性を判断できるかの見込みを提示した。具体的には、パッカー試験、及び透水係数を変えたベントナイト試料を用いた試験を行い、(1)で記した解析結果と同様の方法で比較を行い、当該注水試験方法によって孔の閉塞性を確認できるかを検討した。また、実際にベントナイトを使用した試験では、解析とは異なり、試験中に注水区間に浮遊したベントナイト粒子が孔壁を塞ぐことで孔壁の透水係数を小さくする可能性も考えられたため、室内試験体系を模擬した解析結果との比較を通じて、実際の試験結果との差異を生じた要因についても分析し、当該注水試験による閉塞性の判断への影響についても検討した。



出典) JAEA (2025) <sup>94</sup>

図 2.3.11 ボーリング孔の埋戻し、閉塞性確認試験の流れ

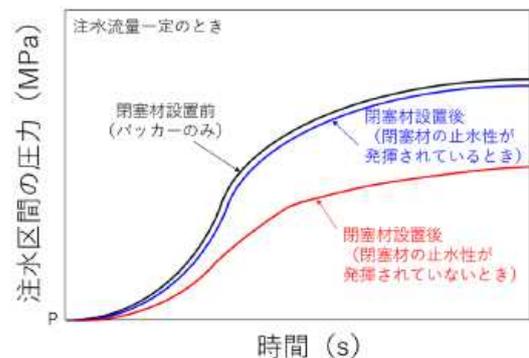
Figure 2.3.11 Steps of sealing borehole and pressurize tests



出典) JAEA (2025) <sup>94</sup>

図 2.3.12 原位置試験における定流量試験の概念図

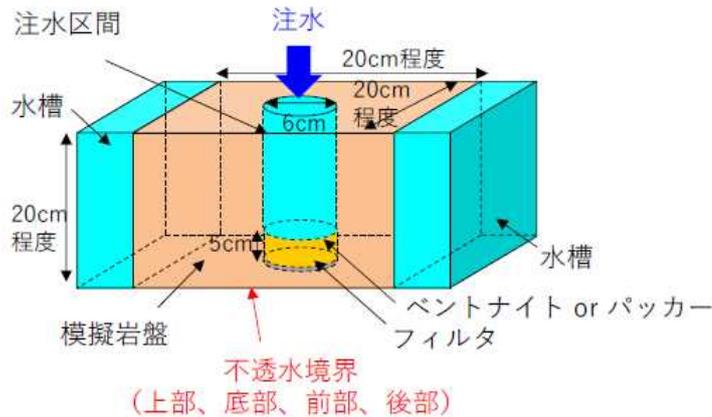
Figure 2.3.12 In-situ constant rate test at the sealed borehole



出典) JAEA (2025) <sup>94</sup>

図 2.3.13 定流量試験の圧力の経時変化

Figure 2.3.13 Conceptual pressure curves of In-situ constant rate test at the sealed borehole



出典) JAEA (2025) <sup>94</sup>

図 2.3.14 室内試験概念図

Figure 2.3.14 Schematics of laboratory test of sealed borehole

#### (5) ボーリング孔閉塞確認方法の考え方の整理

閉塞に求められる性能や、適切に閉塞されたことを確認する方法は、ボーリング孔が設置された岩盤の水理特性に対応したものである必要があるため、ボーリング孔周辺の水理地質構造の把握、閉塞に関する要件の設定、閉塞方法の選択と設計、施工管理を含めた品質保証及びボーリング孔閉塞の確認を状態に応じて一貫して行うことが重要となる。ボーリング孔閉塞確認の段階と必要な確認項目及びその手法について以下に整理した。

##### ① 廃棄物埋設施設周辺地質水理環境の把握

- ・ 対象とするボーリング孔閉塞区間周辺の地質水理環境（透水係数、亀裂ネットワーク、BDZ 等）を把握
  - ・ 対象とする閉塞区間における水理試験、亀裂分布の観測、等
- ・ 廃棄物埋設施設周辺地質水理環境（地質構造、透水係数、不透水層／高透水層の存在等）を把握
  - ・ 地質調査、物理探査、原位置透水試験、等

##### ② ボーリング孔閉塞の要件の設定

- ・ BDZ については、水理試験で BDZ の存在が把握された際には、適切にシーリングしなければその影響は不可避であるため、以下は、BDZ については対処されたことを前提として整理
- ・ 地質水理環境に対応した以下の特性を考慮してボーリング孔閉塞の要件を設定
  - ・ 岩盤の透水性の観点：
    - ・ 低透水層内／高透水層内／亀裂ネットワークの存在／中透水性層内又は閉塞対象区間が低透水層内から高透水性層に繋がっている、等

- ・ 周辺の水理地質構造の観点から注意が必要な状況：
- ・ 上載低透水層等によって被圧／地形的条件等によって上昇流が存在する等

### ③ ボーリング孔閉塞の確認方法の考え方

- ・ 高透水性層内／亀裂ネットワークの存在：施工の品質保証で確認
- ・ 低透水層内：閉塞不十分の場合に水理試験における圧力応答が顕著であるので、水理試験で判定
- ・ 中透水性層内／閉塞区間が低透水層内から高透水層に繋がっている等：水理試験を行い、ボーリング孔内を流れるときの 1 次元的な透水の影響の判定を含めて、種々の手法を組み合わせ

### ④ その他の考慮事項

- ・ 上記の検討は、ボーリング孔の閉塞を実施した時点の性能についてである。閉塞の材料や構造の特性は、応力、地下水との反応等によって変化するため、必要な期間にわたって性能が発揮される材料等を選んで設計することが必要

## 2.4 中深度処分及び浅地中処分に共通する課題に関する研究

### 2.4.1 中深度処分及び浅地中処分における侵食に関する評価手法の研究

本項のうち、(1)から(3)は JAEA への委託、(4)及び(5)は AIST への委託により実施した。

#### (1) 浅地中処分における覆土の侵食に関する解析評価

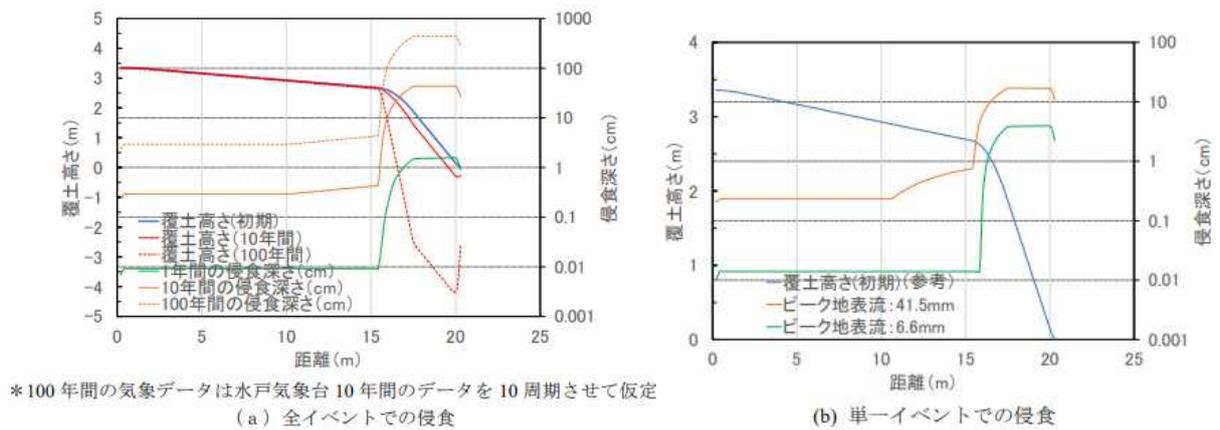
許可基準規則において、廃棄物埋設地への雨水等の浸入抑制及び廃棄物埋設地からの放射性物質の漏出の防止及び漏出の低減をする機能を要求しており、これらの対策の一つとして廃棄物埋設地の表面を土砂等で覆う方法（以下「覆土」という。）が挙げられている。そのため、新規制基準適合性審査においては、覆土が長期間にわたり安定的に維持されることを確認する必要がある。

そこで本研究では、覆土の安定性に影響を及ぼす因子の一つとして流水による覆土表面の侵食に着目し、国内で想定されているトレンチ処分場の覆土構造を例として侵食評価を行い覆土の健全性について検討した。

覆土の侵食評価は、一般的な斜面や水路等の土壌侵食解析において用いられている WEPP コード<sup>95</sup>を使用した。WEPP コードを用いた侵食解析において、覆土の幾何形状と構成要素の物性値は現在国内で想定されているトレンチ処分施設の覆土構造<sup>96</sup>を仮定して設定した。気象データは、気象庁が公表している想定地域の 10 年間における日別の降水

量、気温、日射量等のデータ<sup>97</sup>を使用した。覆土表面の保護工については、植生がある場合とない場合の2ケースを想定し、植生の有無による侵食への影響について分析した。

WEPP コードを用いて降水による覆土の侵食を評価したところ、年平均の地表流量（降雨量のうち、浸透能を超えて地表流として覆土表面を流れる水量）は、植生ありの場合には植生なしの場合に比べて1/4程度になるという結果が得られ、この差は植生ありの場合には土壌の浸透能及び蒸発散量が植生なしの場合に比べて大幅に増加することによると考えられる。また、年平均の土壌損失量については、植生なしの場合では $9.3 \text{ kg/m}^2$ となった一方で、植生ありの場合には地表流量の大幅な低下に伴い覆土表層の有意な侵食が発生しなくなる結果となった。実際の条件によってこの結果は変動する可能性があるが、植生が覆土の侵食を防止する効果を有する可能性が示唆された。また、侵食が生じた植生なしのケースについて、覆土中央からの流下距離に応じた覆土高さや侵食深さを図2.4.1.1に示す。覆土中央の傾斜が緩やかな箇所での侵食は極めて小さくなる一方で、傾斜勾配が大きくなる法面においては、最初の1年間では数cm程度の侵食が進む結果が得られ、さらに10年～100年が経過すると侵食が数十～数百cmまで急激に進む結果となった。なお、豪雨等を想定したイベント的に大きな地表流量を考慮すると、傾斜が緩やかな箇所でもイベント的に侵食が進む結果が得られた。このように、地表流発生イベントと侵食イベントには相関があり、覆土の浸透能を超える降水時には地表流が発生し、この地表流が一定時間以上継続する場合に侵食が生じる結果となった。本検討を通じて、覆土の表面を保護するための対策を施さない場合には、長期的な降水の影響により覆土の大幅な侵食が生じることにより、トレンチ処分を行った廃棄物への影響が無視できなくなる可能性が示唆された。一方で、覆土表面に植生を設置することにより覆土の侵食を大幅に低減する可能性も併せて示唆された。本解析においては、植生の条件はWEPPの組み込みモデルを用いているため、実際に使用される植生工の種類によって侵食への影響度合いは異なることに注意が必要である。また、植生の種類や植生の根による覆土への悪影響及び侵食による覆土端部の傾斜の変化による斜面の崩壊についても考慮していないため、実際の覆土の厚さや構造を踏まえて総合的に影響を判断する必要があると考えられる。



出典) JAEA (2023) <sup>91</sup>

図 2.4.1.1 覆土表面の侵食深さに関する解析結果

Figure 2.4.1.1 Analysis results for ablation depth of the surface cover on trench disposal

## (2) 埋設地近傍の斜面崩壊に関する解析的検討

### ① はじめに

中深度処分の廃棄物埋設地への長期にわたる侵食の影響を考える上では、広域の地下水流動場の変遷を検討するための大局的な侵食を評価することとともに、廃棄物埋設施設近傍における浸出点等を検討するために地下数十 m 程度の範囲についてより具体的な侵食を評価することが必要になる場合がある。この範囲においては、面状侵食から、細溝（リル）、大きな溝（ガリ）、開析谷、沢等への発達とともに、急勾配の谷壁や海成段丘崖の発生が考えられる。そこで、海成段丘を例として、これらの侵食の長期的な進展の評価方法について検討した。この検討は、中深度処分より浅い範囲に廃棄物埋設施設が設置されるピット処分における長期の地下水流動場の変遷の検討にも活用できると考えられる。

長期の侵食に関する評価手法には、河川縦断面解析と側方侵食を用いる経験的な方法があり、これまでに多くの研究例がある <sup>98</sup>。しかしながら、これらの方法は種々の現象が合わさった結果としての地形変化を経験的なパラメータも用いて解釈するものであって、個々の現象を物理モデルで定量的に検討したものではない。そのため、対象とする地域での適用性等は必ずしも明らかではない。特に、地下数十 m 程度で限られた範囲の侵食には個々の条件がより強く影響する可能性がある。そこで、本研究においては、経験的な方法を補足することを目的として、長期的な緩慢な開析谷の発達とイベント的に発生する深層崩壊による侵食の両方を物理モデルにより評価することができる地形発達評価コード Landlab <sup>99,100</sup> を用いて、このような領域についての侵食に関する検討を行った。Landlab はこれまで山地を対象として検証が行われてきたものであり <sup>101</sup>、本研究において海成段丘 <sup>102</sup> に対する長期間の評価への適用性を検討したものである。

## ② 検討の手法

海成段丘の侵食に関して、一軸圧縮強度が低くスメクタイトを含む岩盤においては地すべりによる開析が主要な侵食形態であり、また、開析谷の発達や段丘崖の崩壊が海成段丘の主要な侵食現象であることから、緩慢な侵食よりもイベント性の深層崩壊等の現象が重要となる。Landlab は、豪雨によって湿潤密度が最大となった状態における重力を起因とした確率的な深層崩壊による斜面からの物質移動現象<sup>103, 104</sup>、リルやガリの形成から二次谷の形成を含めた開析谷の発達を斜面、河川侵食及び側方侵食が発生する現象を評価することが可能な解析コードである。

まず、Landlab の深層崩壊への適用性を確認するために、深層崩壊発生の可能性が高い領域を Landlab を用いて抽出すると共に、国土地理院<sup>105</sup>及び土木研究所<sup>106</sup>の評価方法に従って傾斜量、凹凸度等の地形的な特徴から抽出した結果と比較した。Landlab による抽出地点は、それぞれの方法によって抽出された領域の中にほぼ入っていることが確認された。このことから、Landlab の物理モデルは、深層崩壊が発生する可能性が高い場所を判定する上では、適用性があるものと考えられる。

次に、緩慢な侵食が長期間継続すると仮定した条件で深層崩壊がイベント的に発生する現象を評価できるようにするために、種々のパラメータセットを用いて過去 12.5 万年前から現在までの評価を行い、開析谷の侵食程度や深層崩壊の位置及び規模を比較して、適切な解析条件について検討した。この条件を用いて、現在の地形を出発点とした将来 1 万年程度の評価を実施した。

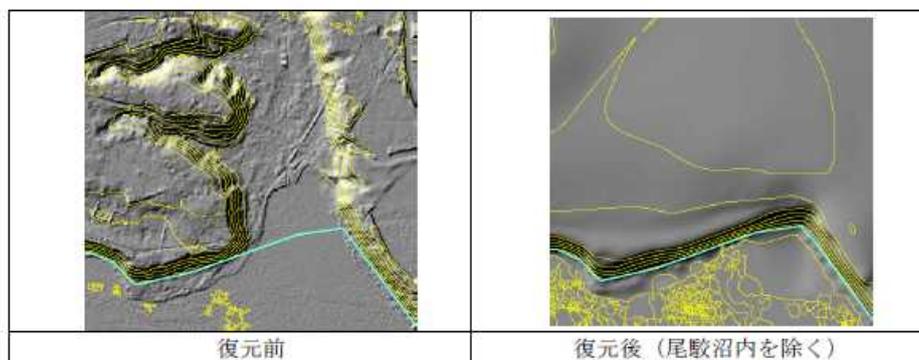
## ③ Landlab を用いた侵食評価

### a. 12.5 万年前の古地形の復元

過去から現在までの評価に用いる古地形の復元に関して、段丘崖については、MIS5e (約 12.5 万年前) の段丘面の (海食) 崖の崩壊地形 (地すべり等) を対象として、侵食・崩壊地形の外側に位置する等間隔に近い等高線を連結することによって復元した (図 2.4.1.2、図 2.4.1.3)。また、段丘面については、MIS5e 面内及びその近傍に谷頭を持つ河川によって侵食を受けた地形を、出入りのある等高線の先端を包絡させた形で下方の河川、谷を埋めて平坦化した。この際、平坦な段丘面から侵食を開始させる条件で地形変化を評価すると、沢の位置などが現在とは大きく異なる状況となる可能性があることから、復元後の地形から現在の地形との標高差分の 5% を差し引いた地形を初期の古地形として用いることとした。

古地形は直接観測することができないため、このように復元した古地形は、上述の仮定に依存したものである。したがって、その適切性については、次項で示す現在までの侵食評価と現地形との比較及び現在の知見に照らして用いた仮定の適切性の検討を通じて行わ

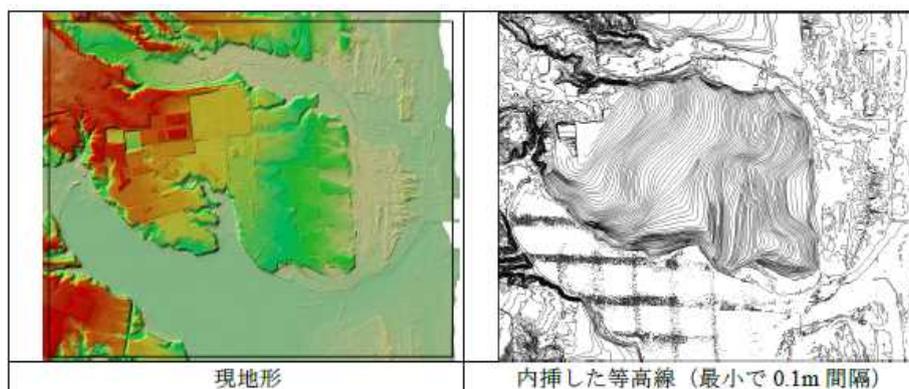
れるべきであり、不可避と思われる大きな不確かさの存在を認識してその結果を評価すべきであると考えられる。



出典) JAEA (2025) <sup>94</sup>

図 2.4.1.2 MIS5e 段丘面の河川侵食による地形の段丘崖の修復

Figure 2.4.1.2 Reconstruction of fluvially eroded cliff at the MIS5e terrace



出典) JAEA (2025) <sup>94</sup>

図 2.4.1.3 段丘面上の等高線の修復

Figure 2.4.1.3 Reconstruction of contour of terrace

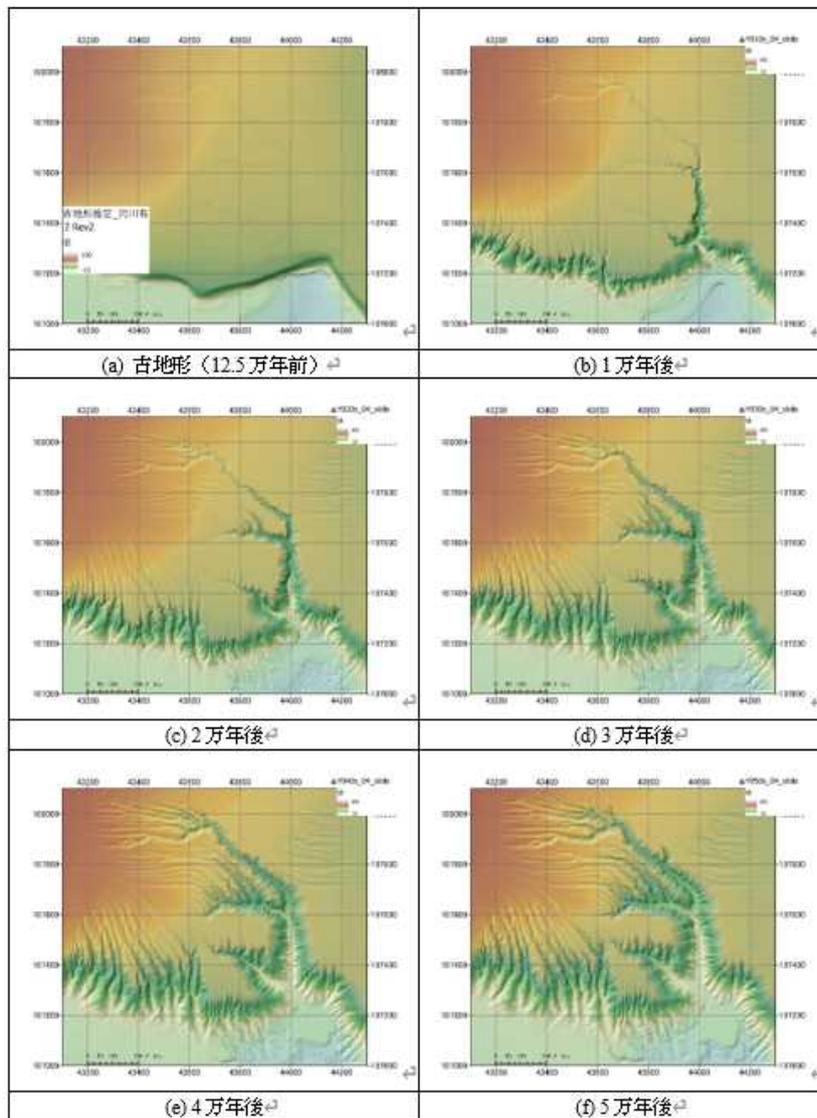
深層崩壊の評価に用いる地質分布、内部摩擦角、実効凝集力及び湿潤密度は既往文献 <sup>104</sup> に基づいて設定した。

#### b. 古地形を起点とした現在までの侵食評価

再現した古地形を起点として現在までの侵食を評価した結果の一部を図 2.4.1.4 に示す。緩慢に起こる沢の線的侵食や斜面の面的侵食に加え、それらによって不安定化した斜面の深層崩壊が合わさることによって、小規模な凹部が徐々に沢として成長し、上流側へ開析

谷が進展すると同時に沢の幅が広がる様相を確認することができ、その規模は現在の地形に類似していることを確認した。なお、中央沢以外の谷密度が実際よりも大きくなる箇所が確認されており、この原因としては、今回の検討では中央沢の河床縦断形及び横断形を再現することを目標として主に侵食に影響するパラメータを調整したが、実際には中央沢が MIS5e 以前に形成された可能性や尾駁沼の埋没谷深度に不確かさがある事など今回想定していない条件が影響していることが考えられ、これらの影響を考慮する必要性が課題である。

今回の解析で推定した古地形から現在までの途中段階における地形については、観測と比較することができず、解析に用いた仮定とパラメータに依存したものであるため、この手法の適切性の判断にはこれらの条件と限界を考慮する必要がある。



出典) JAEA (2025) <sup>94</sup>

図 2.4.1.4 古地形(12.5 万年前)から 5 万年後までの解析結果

Figure 2.4.1.4 Estimated topographical evolution of reconstructed terrace at 125thousands of years ago

c. 現地形を起点とした将来 1 万年までの侵食評価

前項において古地形から現地形までの変遷を検討したモデルとパラメータセットを用いて、現地形から将来 1 万年までについて侵食評価を行った。

④ 侵食評価の考え方の整理

委託事業において、JAEA は、海成段丘の侵食評価手法について、作成した古地形から河川侵食、斜面侵食及び深層崩壊による侵食過程が生じた場合の現在の地形を再現する方法を構築することによって、将来の長期における侵食に伴う地形変化の評価に繋げる方法

を検討した。その結果、緩慢な侵食に伴って海成段丘の段丘崖、段丘面上に形成される開析谷の発達に伴ってイベント的な深層崩壊が誘発されることにより、侵食が進展する結果が得られたとしている。このように、長期間における侵食メカニズムの理解とそれを用いた将来の地形変化を定量的に予測する方法の一例が検討された。

しかしながら、古地形の推定に困難があること、MIS5e 以前に離水した時点での侵食が考慮できていないこと等から、この方法の検証に課題がある。また、侵食評価の結果として得られた地形と実際の現地地形の形状等に相違があること等から、主要な侵食メカニズムの理解又は用いたパラメータの設定についても検討の余地がある。このことから、将来の評価に用いる場合には、これらの課題について、更なる検討が必要であると考えられる。

### (3) 長期的な地形の侵食に関する解析的検討

#### ① はじめに

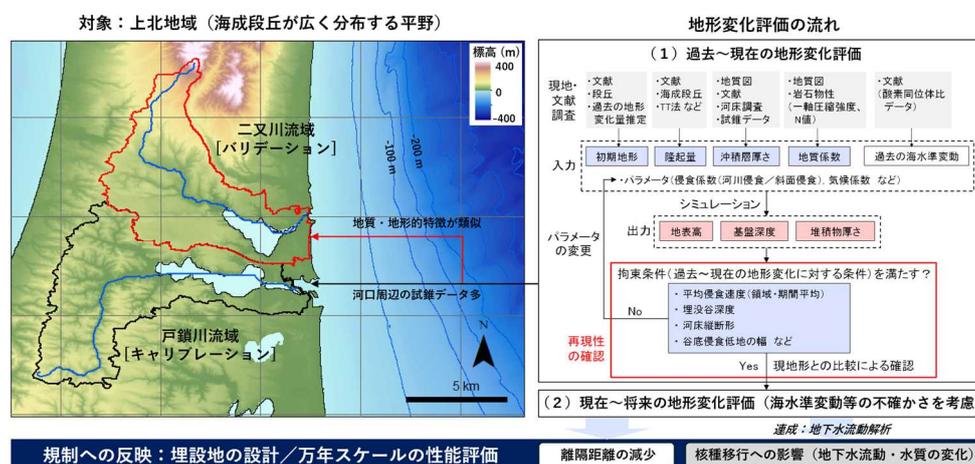
地下 70m 以深に設置される中深度処分の廃棄物埋設地には、地表における地形変化による影響が及ぶ可能性は低い。しかしながら、許可基準規則解釈第 12 条において、中深度処分の「廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通し」を示す評価期間は、「廃止措置の開始後から公衆が受ける線量として評価した値の最大値が出現するまで又は 10 万年が経過するまでのうちいずれか短い期間」とされており、10 万年程度の長期にわたって核種の移行抑制等の機能を維持する必要があることから、氷期-間氷期サイクルのような極めて長期間の気候変動とそれに伴う海水準変動、侵食及び隆起等に起因する長期間の広域的な地形変化の影響を受ける可能性がある。地形変化の影響としては、動水勾配、移行経路の変化、浸出点の変化等が考えられ、特に沿岸域でその影響が大きいことが想定される。そこで、沿岸域の長期間の広域的な地形変化に関する解析的な検討として、沿岸域における万年スケールの地形変化評価手法（地形発達モデルに基づく数値シミュレーション（Landscape Evolution Models: LEMs）及びパラメータの推定手法）を整備した。整備した手法を国内の実地域（青森県上北地域：海成段丘が広がる平野）に適用し、過去～現在の再現解析（最終氷期-間氷期サイクル：12.5 万年間）によって手法の妥当性を検討した。

#### ② 検討の手法

本研究では 2 つのステップで将来の地形変化とその不確かさを解析的に評価した（図 2.4.1.5）。地形変化評価モデルとして地形変化シミュレーションコード（JAEAsmtpt）を用い、過去から現在の地形変化を再現可能な地形変化評価モデル及びパラメータを求めた。評価期間は 10 万年程度の評価期間と同程度の過去 12.5 万年間（最終氷期-間氷期サイクル）とし、復元した古地形を起点とした再現解析を行った。入力パラメータはサイト固有のデータから推定するが、侵食及び堆積に関するパラメータの多くは測定から直接値を推

定するのが困難である。そこで、これらのパラメータは、過去から現在の地形変化の条件（拘束条件）を満たす値をシミュレーションによってキャリブレーションした。本研究では対象地域の一流域である、戸鎖川流域でキャリブレーションを行い、その妥当性を現地形の再現性によって確認した。さらにキャリブレーション結果を地形及び地質学的特徴が類似する別地域（二又川流域）に適用し、更なる妥当性を確認した。

対象地域は海成段丘（MIS5e、MIS7 及び MIS9）が広く分布する、青森県上北地域の一流域とした（250 km<sup>2</sup>）。過去 12.5 万年間（MIS5e～現在）の再現解析は、MIS5e の古地形（海成段丘に基づく復元面から推定）を起点とし、30 m の空間分解能、タイムステップ 10 年で実施した。将来の海水準変動は、長期的な将来の海水準変動に関する文献調査に基づき、将来の海水準変動の不確かさを 3 パターン設定し、対象地域において万年スケールで想定される最大侵食量を評価した。



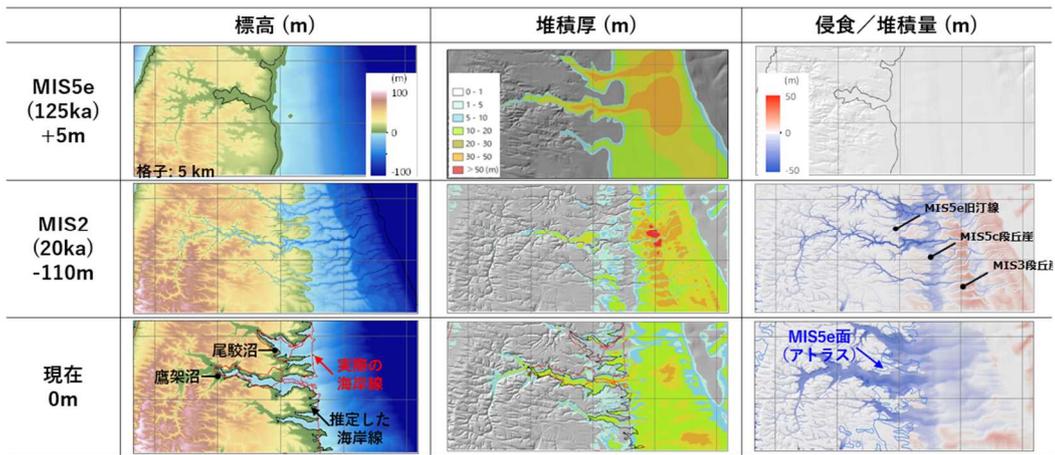
出典) JAEA (2025) <sup>94</sup>

図 2.4.1.5 将来の地形変化評価の全体像

Figure 2.4.1.5 Overview of future terrain change assessment

### ③ 評価結果

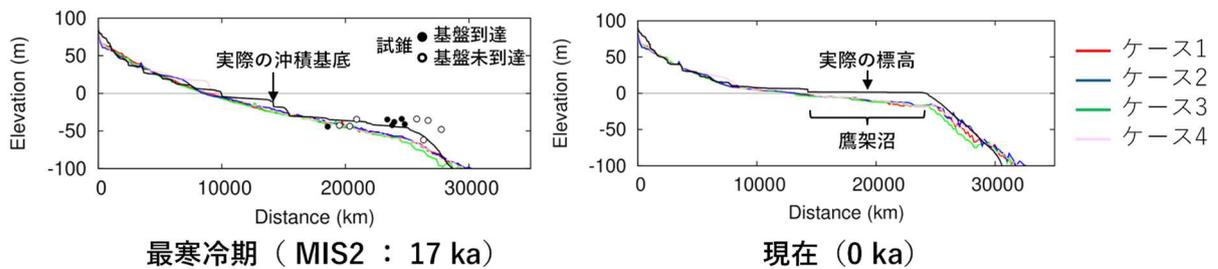
現地形の再現解析の結果（標高）を図 2.4.1.6 に示す。推定した現在の汀線は実際の汀線に類似し、実地形との標高差は領域の約 8 割で ±15 m 以内に収まった。また沿岸に形成された平坦面は、海成段丘アトラス <sup>107</sup> の MIS5e 面の位置に類似した。ただしこの LEMs では砂州の形成を考慮していないため、実地形に見られる河口部の閉塞は再現できていない。主要河川の河床縦断形の経時変化を図 2.4.1.7 に示す。海水準上昇・低下時の堆積構造の違いは明瞭に見られないものの、実地形と同程度の埋没谷（河口での堆積厚：約 40 m）が形成した。



出典) JAEA (2025) <sup>94</sup>

図 2.4.1.6 現地形の再現結果

Figure 2.4.1.6 Reproduction results of the current terrain



出典) JAEA (2025) <sup>94</sup>

図 2.4.1.7 河床縦断形の再現結果

Figure 2.4.1.7 Reproduction results of the riverbed longitudinal profile

#### ④ まとめ

本研究では海成段丘が広がる平野を対象に、沿岸域における万年スケールの地形変化の評価手法を整備した。これらの手法を用いて、青森県上北地域における過去 12.5 万年間（最終氷期－間氷期サイクル）の地形変化を評価し、侵食及び堆積による地形変化（埋没谷及び段丘面の形成）の再現性を確認した。さらに、再現した現地形の標高は領域の約 8 割で誤差が ±15 m となったことから、本手法の適用性を確認できた。

整備したパラメータの推定方法（影響度評価と近似モデルに基づくキャリブレーション）は、全てのケースで拘束条件を決定係数 0.8 以上で近似でき、求めたパラメータセットの変化の傾向も妥当であることから、長期スケールの地形変化評価に広く適用できると考えられる。

#### (4) 海成段丘の長期的な侵食耐性に関する評価

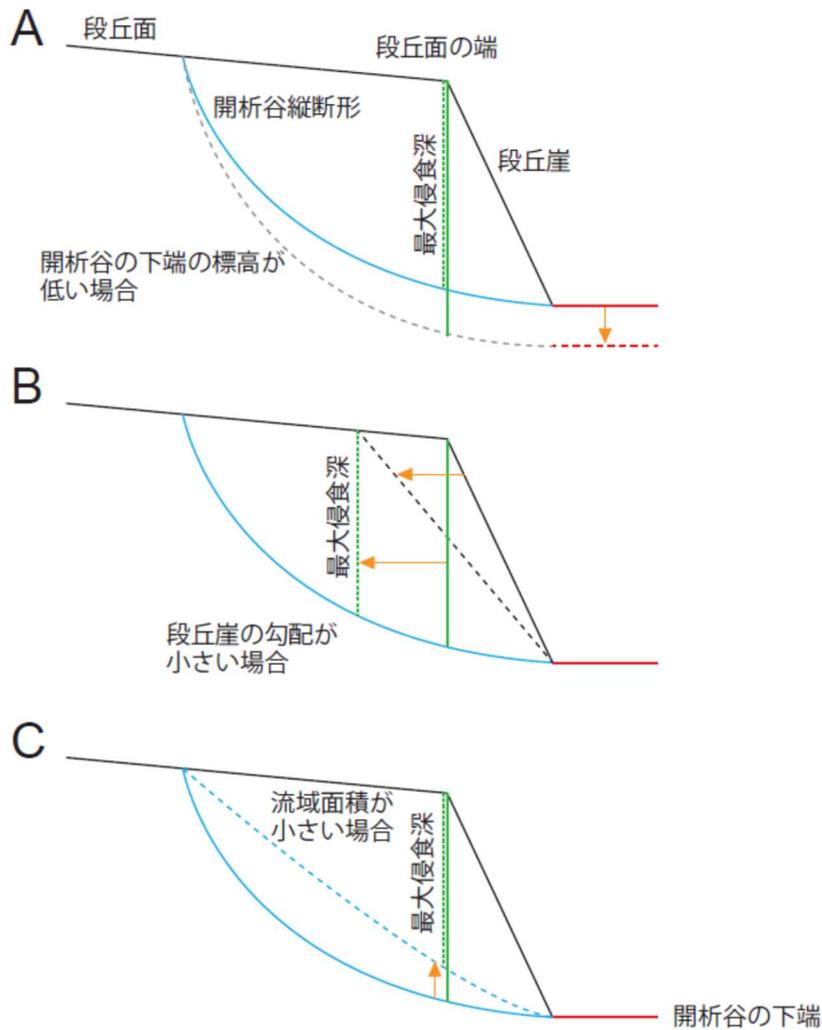
##### ① はじめに

海成段丘、河成段丘等に形成される開析谷は、その地形面における最大侵食深を形成することが多く、現在確認できる地形から解析的手法で過去の侵食速度を推定することは、将来の最大侵食深を予測するために重要な役割を果し得ると考えられる。そのため、これまでに放射性廃棄物処分の研究の一つとして、開析谷侵食速度の評価が行われてきた。例えば藤原他<sup>110</sup>は、約12万年前の時期に形成されたMIS5の段丘面を対象に、地形解析的手法を使って、開析谷侵食速度の推定を行っている。この研究では、海成段丘形成時の段丘原面を復元し現在の地形と比較することで、段丘面内に端を発する河川によって形成された開析谷の侵食速度等を推定している。

本研究では、藤原他<sup>108</sup>と同様の手法、すなわちGISによる地形解析的手法を使ってMIS5、MIS7及びMIS9の海成段丘面における開析谷侵食速度等の推定を行い、この手法の適用性及び侵食速度評価時に留意すべき点について検討した。

##### ② 段丘面の長期的侵食速度の評価の考え方

開析谷侵食速度は、それぞれの開析谷の体積、開析谷の上面投影面積及び時間に基づいて求められる。段丘原面及び開析谷の形状を2次元で表し単純化すると、段丘原面上の開析谷部分を底辺、及び谷の下流端における段丘面との比高（以下「最大侵食深」という。）を高さとする三角形の部分が侵食されていることとなる。すなわち、この解析手法では原理的に、個々の開析谷の最大侵食深が大きいほど、そして開析谷の流下方向への長さが長いほど、侵食量が大きくなる（図2.4.1.8）。ここで、開析谷の最大侵食深は段丘面と開析谷の下流端との比高、段丘面の端と開析谷の端の相対的な位置、開析谷の縦断形によって決まる（図2.4.1.8）。図2.4.1.8より、段丘面と開析谷の下流端との比高が大きいほど開析谷の最大侵食深は大きい（図2.4.1.8A）。最大侵食深は段丘面の端で評価されるために、段丘崖が緩勾配の場合は急勾配の場合よりも最大侵食深が小さく評価される（図2.4.1.8B）。さらに、流域面積が小さい場合の河床勾配は、流域面積が大きい場合と比較して下に凸ではないために最大侵食深が小さくなる（図2.4.1.8C）。



出典) AIST (2023) <sup>11</sup>

図 2.4.1.8 開析谷の模式断面図

Figure 2.4.1.8 Schematic Cross Section of dissected valley

本件研究では、既存研究から段丘形成年代値が判明しており複数年代の段丘面が存在する十勝、上北、日高、網走、抜海、遠別及び枝幸の各地域（以下「評価対象地域」という。）を対象に、侵食速度等の長期的な評価を行った。

### ③ 侵食速度の評価

評価対象地域で、MIS5、MIS7 及び、MIS9 に形成された段丘面の侵食速度等の長期的な評価を行った。その結果、開析度は時間経過と共に増大する傾向があり、開析度と隆起速度には比例関係が確認できた。また、開析谷侵食速度と最大侵食深には相関関係があることが確認できた。隆起速度と開析谷侵食速度の比例関係は、MIS5 の段丘面の侵食に係る研究である藤原他 <sup>110</sup> に示された成果と整合する。また、評価対象地域の MIS5 の段丘面、

MIS7 の段丘面、及び MIS9 の段丘面において、後述する例外を除いて、隆起速度と開析谷侵食速度の比例関係が確認できた。このことから、本研究の手法は MIS5 だけでなく MIS7 及び MIS9 の段丘面に対しても適用可能と推定できる。

例外として、開析度 50%以上の段丘面をもつ地域では、上記の傾向が確認できなかった。それらは、隆起速度の速い遠別（10 万年あたり 52～75 m）と抜海（10 万年あたり 43～51 m）であった。速い隆起速度によって開析度が上がり、開析度が 50%を超えると段丘面の尾根化が進行し、侵食速度を正確に見積もれなくなっていると考えられる。廃棄物埋設地は隆起速度が遅い地域に設置されることが好ましいとされていることから、隆起速度が速い地域が選定されることはない想定されるが、仮に、隆起速度が速く開析度が大きい地域に設置された場合、本手法の適用可能性について留意する必要がある。また、上記以外で侵食速度を評価するときに留意すべき点として、開析谷の最大侵食深は、開析谷の下流端の比高に依存するため、開析谷の下流端で合流する河川が、海水準低下に伴い侵食すると考えられる場合、河川の河床変動を考慮する必要がある。加えて、古い段丘面ほど、段丘崖が後退して段丘面の面積を過少評価する可能性があるため、開析度、侵食速度等を過少評価する可能性があることにも留意が必要である。

#### ④ まとめ

MIS7 及び MIS9 の段丘面に対しても、GIS による地形解析的手法を使って、開析谷侵食速度等を見積もることが可能となった。また、その際の留意点等についても整理した。隆起速度が速い地域においては、上記手法では開析谷侵食速度を正確に見積もれない可能性があることに留意が必要である。

#### (5) 光ルミネッセンス年代測定法を使った丘面の年代値測定と隆起量評価手法

##### ① はじめに

ある地域の地盤の隆起速度を見積もるためには、ある段丘面（平坦になっている地面、海成段丘面、河成段丘面等）とそれに隣接する別の基準面との形成年代とその高度差を計測する必要がある。基準面となり得る海成段丘面及び河成段丘面の形成年代は、約 10 万年スケールで発生している気候変動に対応し、形成年代の異なる二つの基準面高度の差から隆起量及び隆起速度を見積もることが可能となる。海成段丘の形成年代は高海水準期（温暖期）とされるため、高度の異なる二つの段丘面の形成年代がどの高海水準期に相当するかを決定し、二つの段丘面の高度差を確認することで、隆起速度が得られる。例えば、MIS5e（約 12.3 万年前）の段丘面と MIS7（約 24 万年前）の段丘面を特定し、両者の高度差を比較することで、この期間の隆起速度を推定することが可能となる。なお、河成段丘は低海水準期（寒冷期）に形成されるので、海成段丘とは形成されるステージが異なる。

段丘面の形成時期は、従来火山灰層序に基づいて決定されることが多かった。これは、火山灰が噴出した年代を明らかにし、その火山灰の位置と段丘面との関係から、段丘面形成年代を推定するものであるが、日本の海成段丘アトラス<sup>107</sup>も基本的にこの手法が適用されていて、適切な火山灰がある地域では有効である。一方、適切な火山灰がないケースでは複数の手法に基づき総合的に判断する必要があるが、場合によっては形成年代を正確に見積もることができない事もある。光ルミネッセンス年代測定法は、堆積物中に普遍的に存在する石英及び長石を用い、現在から過去数十万年前までの堆積物の堆積年代を決定できる手法として知られており、適用例も多い<sup>109-112</sup>。一方で、本手法は堆積物の性状や年代幅によって適切な測定方法及び測定条件が変わることが知られる。そこで、本研究では、我が国の段丘面に光ルミネッセンス年代測定法の条件による適切な測定方法、適用範囲について調査、検討を行い、留意点について整理した。

## ② 光ルミネッセンス年代測定法の適用範囲と留意点の検討

光ルミネッセンス年代測定法は、長石等の鉱物が地下において周辺岩石から放出される放射線を浴びることで鉱物内に励起した電子が生じ、この電子の蓄積量をルミネッセンス測定によって定量する方法である。光ルミネッセンス年代測定法を実施する前に、対象となる地層に対して、堆積相解析を実施し、堆積物が堆積した当時の堆積環境、堆積プロセス、測定対象鉱物の起源等を推定することにより、この測定を実施するにあたり適切な堆積物であるかを確認する必要がある。また、鉱物が堆積する前に露光されることで、励起電子が十分リセットされ、その後、堆積によって遮光された場合、堆積期間に励起電子が蓄積されるため、その蓄積量を測定することで堆積年代を求めることができる。そのため、光ルミネッセンス年代測定を行う際には、測定前に試料が露光しないことが重要であり、試料の変質の有無（光を受けていないか等）、年代測定可能な試料であるか（堆積時にルミネッセンス信号がリセットされているか）、試料の均一性等を確認して、信頼できる年代値を得られるかを確認する必要がある。

以上のことを踏まえて、海成段丘及び河成段丘に対して光ルミネッセンス年代測定法の適応範囲及び測定における留意点について、主に十勝平野における評価例を基に表 2.4.1.1 のとおり整理した。

表 2.4.1.1 手法の適用範囲と実施する際の留意点

Table 2.4.1.1 Scope of application of the method and points to consider when implementing the method

	適用範囲	実施する際の留意点
海成段丘	約 10 万年周期の海水準変動に対応して形成された MIS5、MIS7、MIS9 の段丘面に適応可能	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ MIS5 には適用できるが、MIS5a(約 8.2 万年)、5c(約 9.6 万年)、5e のサブステージを区別できる精度はない。</li> <li>・ MIS9 以前の試料分析では、検量線が飽和に近づき、年代のばらつきが大きくなる。複数の試料を測定して誤差を減らす等の対策が必要となる。</li> </ul>
河成段丘	約 10 万年周期の海水準変動に対応して形成された MIS6、MIS8 の段丘面に適応可能	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 粗粒な粒子の方が精度がよい (180–250 μm 程度が推奨)。</li> <li>・ 隆起速度が速い場合には、同じ氷期中に複数の段丘面が形成される可能性があるため、年代測定に基づいて形成年代を明確にする必要がある。</li> <li>・ 河成堆積物が運搬される際、ルミネッセンス信号のリセットが不十分である可能性があるため、信号リセットの検証(同じ段丘から採取した試料の単一粒子に対する測定を複数実施し、ばらつきを評価することで検証する。)が必要となる。</li> </ul>
共通	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 試料の含水率が 1%増加すると、年代値も 1%古い値になってしまう。段丘編年を決定する際に留意する必要がある。</li> </ul>

出典) AIST (2025) <sup>3</sup>

### ③ まとめ

以上の結果から、海成段丘、河成段丘ともに、MIS9 までこの手法が適用可能であること、MIS9 等の古い段丘面においては、励起電子の蓄積量が飽和している可能性に注意すること、堆積時に励起電子がリセットされていることを確認する必要性があること等が明らかとなった。

## 2.4.2 粘土系材料の透水特性、空隙構造等に関する研究

覆土を構成するベントナイトは、含有されるモンモリロナイトの特性により廃棄物埋設施設の長期的な低透水性能を確保する部材として評価されてきた。しかし、ベントナイトに礫や砂等を混合した場合は、覆土材料中のモンモリロナイト量が相対的に少なくなり、

20%程度以下となった場合において、十分な初期低透水性能を確保できるかが懸念事項である。

これまでに行った文献調査により、礫-砂-ベントナイト混合土（以下「礫砂混合ベントナイト」という。）の透水特性と透水係数の評価方法として、例えば低配合の礫砂混合ベントナイトで、 $10^{-10}$ ～ $10^{-11}$  m/s オーダーの透水係数が確保できるとする報告<sup>113</sup>もあるが、事例が少なく、また、小規模な室内試験による結果であることを踏まえると、実際の覆土施工において必要とされる透水係数が確保されるか懸念が残る。また、仮に初期透水係数が確保されたとしても、礫間を埋めるモンモリロナイト量が相対的に少ない条件においても、廃棄物埋設施設の安全確保上重要な長期の透水性能が確実に確保されるかについての懸念も残る。例えば、令和6年7月3日の「日本原燃（株）廃棄物埋設施設覆土の確認に係る面談（第5回）」の資料2に示されているCa型ベントナイト30 wt%配合のベントナイト混合土とNa型ベントナイト20 wt%配合のベントナイト混合土の等価透水係数の時間変化によると、Na型ベントナイト20 wt%配合のベントナイト混合土は初期の等価透水係数が $10^{-11}$  m/s オーダーであり、Ca型ベントナイト30 wt%配合のベントナイト混合土の等価透水係数 $10^{-10}$  m/s オーダーと比べて約1桁小さな値を示す。しかし、10000年後には、Na型ベントナイト20 wt%配合のベントナイト混合土の等価透水係数が、Ca型ベントナイト30 wt%配合のベントナイト混合土の等価透水係数より、約1～2桁透水係数が大きくなっている。これは、Na型ベントナイトがセメント間隙水との接触によるイオン交換によってより透水係数が大きいCa型ベントナイトに変化すること及びベントナイト配合率が小さくモンモリロナイト量が少ないことにより二次鉱物に変質する等の影響が大きいことが原因であると考えられる。このことから、礫砂混合ベントナイトで、さらにベントナイト配合率を20 wt%以下に下げた場合には、長期的に礫間を埋めるモンモリロナイト量が減少することで等価透水係数が大きく増加する可能性があり、礫砂混合ベントナイトで覆土を構成する場合には長期的な性能への影響を詳細に確認する必要があると考えられる。

#### 2.4.3 生活環境における放射性物質の移行及び代表的個人の設定

本項のうち、(1)はJAEAへの委託により実施した。

##### (1) 汽水域における核種移行に関する検討

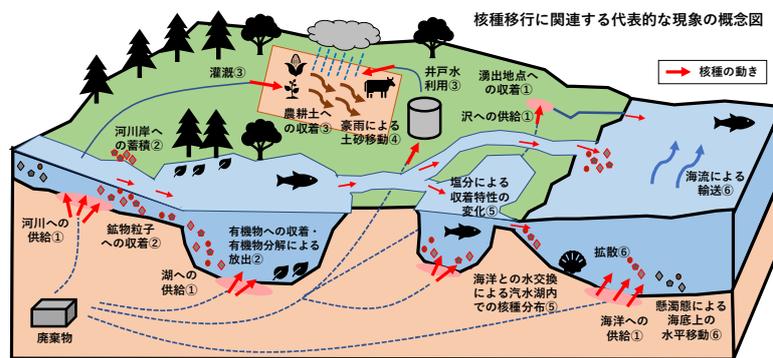
###### ① はじめに

中深度処分及び浅地中処分に共通する被ばく線量評価における共通の課題として、放射性廃棄物埋設地から漏出した核種が地下水を經由して河川や海洋、湖沼、陸域等の生活環境へ到達する際の放射性物質の移行挙動を適切に考慮することが重要である。従来の線量評価においては、生活環境を類似した領域毎に分割して物質移動を移行係数や濃縮係数を用いて簡易的に表現するコンパートメントモデルが用いられてきたが<sup>114</sup>、これらの評価に

においてはモデルやパラメータに対して多く仮定が含まれていることから、その時々最新の知見を反映して常に最適な評価に繋げていくことが重要である。東京電力福島第一原子力発電所事故（以下「1F事故」という。）以降、生活環境中における核種移行に関する多くの知見が蓄積されてきたことから、これらの最新知見を踏まえてより現実的な核種移行評価に繋げていくための検討を行った。

生活環境における核種移行に関する知見の全体像の現象を把握するために、図 2.4.3.1 に示すような陸域、河川、湖沼、海洋における核種移行等に関連して文献調査を行い、核種移行評価において課題となり得る現象についての整理を行った。その際、核種移行に係る現象について整理すると共に、従来の線量評価における代表的個人に係る考え方や設定方法と照らし合わせながら、課題として抽出した現象を線量評価において考慮する必要性について検討した。その結果、懸濁粒子を介した水域での移行や土壌や懸濁粒子への放射性核種の収着、脱離（以下「収脱着」という。）等の現象が、陸域から水域へ続く多くの領域において重要な現象であると考えられ、特に、懸濁粒子の凝集及び沈殿が生じやすいと考えられる河口などの汽水領域において、堆積土中の放射性核種濃度の増大により被ばく線量へ影響を及ぼす可能性が示唆された。また、土壌や懸濁粒子への収脱着は、環境の鉱物組成、粒径、塩分濃度等の環境因子と密接に関係しており、これら環境因子が核種の収脱着に及ぼす影響の理解が線量評価を行う上で重要であると考えられる。

そこで、汽水域における懸濁粒子の凝集・沈降挙動並びに懸濁粒子への核種の収脱着挙動に係る室内試験を実施し、被ばく線量評価においてこれらの現象を考慮するためのモデルについて検討した。また、懸濁粒子の凝集・沈降、核種の収脱着等の現象が汽水湖内の核種濃度へ及ぼす影響について解析的検討を実施し、汽水域における懸濁粒子や核種の挙動についての特徴を整理するとともに、汽水域を対象としたコンパートメントモデルを用いた線量評価に関する考え方を整理した。



出典) JAEA (2022) <sup>115</sup>

図 2.4.3.1 生活環境における核種移行に関係する現象の概念図

Figure 2.4.3.1 Conceptual image related to radionuclide migration in biosphere

## ② 懸濁粒子の凝集及び沈降に関する検討

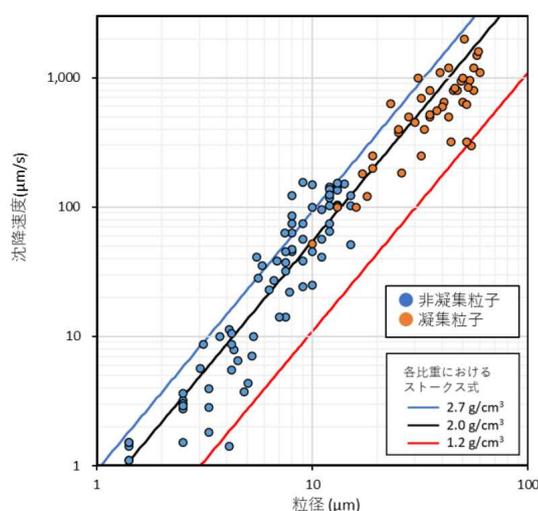
本項目は河川から汽水湖へ移行する過程で河床へ堆積する懸濁粒子の沈降挙動の評価手法を検討することを目的として実施した。水中における懸濁粒子の沈降は、一般的に粒子を球形と仮定してストークスの式<sup>116</sup>に従う沈降速度を用いて評価されるが、懸濁粒子は幅広い粒径を持ち、密度は懸濁粒子を構成する鉱物や有機物の組成に依存するため、対象水域の懸濁粒子の粒径や組成を把握することが重要である。また、汽水域では懸濁粒子が高塩分濃度に曝されることによって凝集する可能性があり、懸濁粒子の見かけの粒径が淡水条件下よりも大きくなることにより沈降速度が大きくなることが考えられる<sup>117</sup>。また、粒径が大きくなる一方で、凝集を形成した粒子の密度は低下する可能性もあり<sup>118</sup>、懸濁粒子の沈降挙動の評価を正しく評価するためには凝集現象における粒径と密度の変化を同時に把握する必要がある。

そこで、河川及び汽水域における懸濁粒子の凝集状態や特性について現地調査で採取した試料のデジタルマイクロスコープや電子顕微鏡による観察及び XRD を通じて確認するとともに懸濁粒子の凝集及び沈降速度との関係についての室内試験により粒子の凝集と沈降速度の関係について検討した。

福島県の松川浦とその流入河川である宇田川において水試料及び懸濁粒子試料の採取を行い、水試料中に含まれる懸濁粒子の顕微鏡観察による粒径分析を行うと共に、粒子沈降試験を実施し、淡水域と汽水域における懸濁粒子の凝集挙動と水質等との関係について評価した。また、宇田川上流部で採取した懸濁粒子試料を用いて塩分濃度を調整した凝集試験を行い、懸濁粒子の凝集と沈降速度に対する塩分濃度の影響について検討した。

宇田川河口域において塩分濃度が異なる3地点（上流、汽水域及び河口）で採取した水及び懸濁粒子試料の顕微鏡観察の結果、上流の淡水領域では分散状態の非凝集体が多く存在していたが、一方で河口付近では凝集体が多く確認され、この凝集状態の違いは河川水の塩分濃度や粒子の表面電位の違いが要因であることが示唆された。各試料に含まれる鉱物については、試料間に明瞭な違いは確認されなかったことから、表面電位の違いは塩分濃度の変化によって生じたものと考えられ、塩分濃度が上昇する汽水域では懸濁粒子が凝集しやすい状態であることが示唆された。室内試験により得られた粒子の粒径と沈降速度の関係を図 2.4.3.2 に示す。懸濁粒子の沈降速度は、粒径の増加と共に沈降速度も大きくなる傾向が確認され、図中に示した各比重（ $1.2 \text{ g/cm}^3$ 、 $2.0 \text{ g/cm}^3$ 、 $2.7 \text{ g/cm}^3$ ）を用いてストークス式<sup>116</sup>より計算した結果に従うことを確認した。非凝集体と凝集体の傾向を比較すると、非凝集体では比較的高密度のストークス式に従う一方で、凝集体は粒径が大きくなるに従い低密度のストークス式に近づく傾向が確認され、粒子の凝集に伴う沈降速度の変化には見かけの粒子密度の変化も考慮する必要性が示唆された。また、宇田川上流部の試料を用いた塩分濃度変化に伴う凝集試験では、設定した塩分濃度の増大に伴って平均粒径が増加する傾向が確認され、試料中で凝集体が成長したことが示唆された。この粒径の変化

傾向は宇田川の汽水や河口の地点で観察された粒子の平均粒径と一致しており、実際の汽水域において発生した塩分濃度に応じた凝集体の生成を模擬できていることが示唆された。試験で得られた沈降速度及び粒径の関係とストークス式から計算した粒子密度を整理し、凝集体の粒径から見かけの密度を計算する経験式を作成すると共に、粒径と塩分濃度の関係から塩分濃度に応じて懸濁粒子の見かけの粒径を設定するための経験式を作成した。懸濁粒子の粒径に対する密度や塩分濃度の経験式をストークス式と組み合わせて用いることにより、汽水域における塩分濃度に応じた凝集粒子の沈降を考慮した評価に繋がる可能性が示された。



出典) JAEA (2024) <sup>119</sup> に一部加筆

図 2.4.3.2 懸濁粒子の粒径と沈降速度の関係

Figure 2.4.3.2 Relationship between particle size and settling rate of suspended particles

### ③ 懸濁粒子に対する粒子の収着・脱離に関する検討

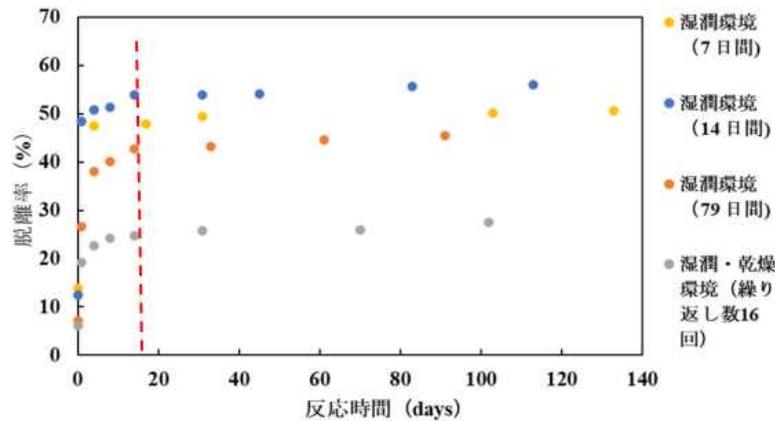
淡水域や汽水域における核種移行について、懸濁粒子への収脱着による移行形態の変化に関する知見の拡充を目的として実施した。環境中において懸濁粒子への収着による核種移行への影響について、溶存態の他に懸濁粒子等へ収着した懸濁態としても移行する特徴を持つ核種を既存の文献等により抽出し <sup>120, 1210</sup>、中でも Cs 等の懸濁粒子への収着能の高い核種は、汽水域などの高塩分領域において懸濁粒子から核種が脱離しやすくなるといった影響を受ける可能性が指摘されている <sup>122</sup>。汽水域を含めた核種移行を評価する上で、このように収着・脱離特性に対する環境条件への依存性を持つ核種については、懸濁粒子への収着・脱離特性に影響を及ぼす要因を特定し、その影響度を把握しておくことが必要であると考えられる。そこで、河川中に懸濁している懸濁粒子への収脱着評価において考慮すべき事項及び評価手法について整理するために、懸濁粒子への収着能の高い核種の化学

的類似体として Cs に着目して、懸濁粒子への核種の収着・脱離に係る室内試験及びモデル化についての検討を行った。

福島県松川浦流入河川で採取した河川堆積土を用いて収着試験を実施するとともに、収着試験後の試料を用いた脱離試験を行った。収着試験では、懸濁粒子が存在する水中における環境条件の影響に着目して塩分濃度、固液比及び初期核種濃度をパラメータとして変化させた条件での試験を実施すると共に、懸濁粒子の鉱物組成や有機物含有量の違いについても着目し異なる組成の粒子を用いた試験を行った。収着・脱離試験で得られた知見に基づき、塩分濃度に応じた懸濁粒子への収脱着を評価するための収着・脱離モデルについて検討した。

まず、収着試験において反応時間を変化させた条件で脱離試験を行った結果(図 2.4.3.3)、反応時間が長くなるにつれて核種の脱離率が低下する傾向が確認され、これは収着反応時間経過により粘土鉱物の層間へと固定されて脱離しにくくなるエイジングの効果である可能性が一因として示唆された。また、環境条件による収着・脱離への影響を確認するため、固液比、初期塩濃度及び初期 Cs 濃度をパラメータとして条件を変化させた収着実験後の試料からの脱離率をそれぞれ比較した結果、固液比が大きくなると脱離率が減少する傾向が確認された。一方、初期塩分濃度及び初期 Cs 濃度が大きくなると脱離率も増加する傾向が確認された。固液比の増加に伴う脱離率の減少は、Cs を強固に収着する収着サイトの数が増加したことが考えられる。初期塩濃度や初期 Cs 量の増加に伴う脱離率の増加は、収着サイトの競合が生じることが要因として考えられる。

以上の結果から、懸濁粒子に対する核種の収着・脱離を評価する上で、収着サイト数や塩による収着サイトの競合を考慮することの必要性が示唆された。以上の実験で得られた知見に基づき、懸濁粒子の収着サイトに対する塩との競合を踏まえて塩分濃度と核種濃度を考慮した分配係数を導出する手法を整備した。



出典) JAEA (2024) <sup>119</sup>

図 2.4.3.3 土壌からの脱離試験の結果

Figure 2.4.3.3 Results of desorption tests of radionuclides from soil

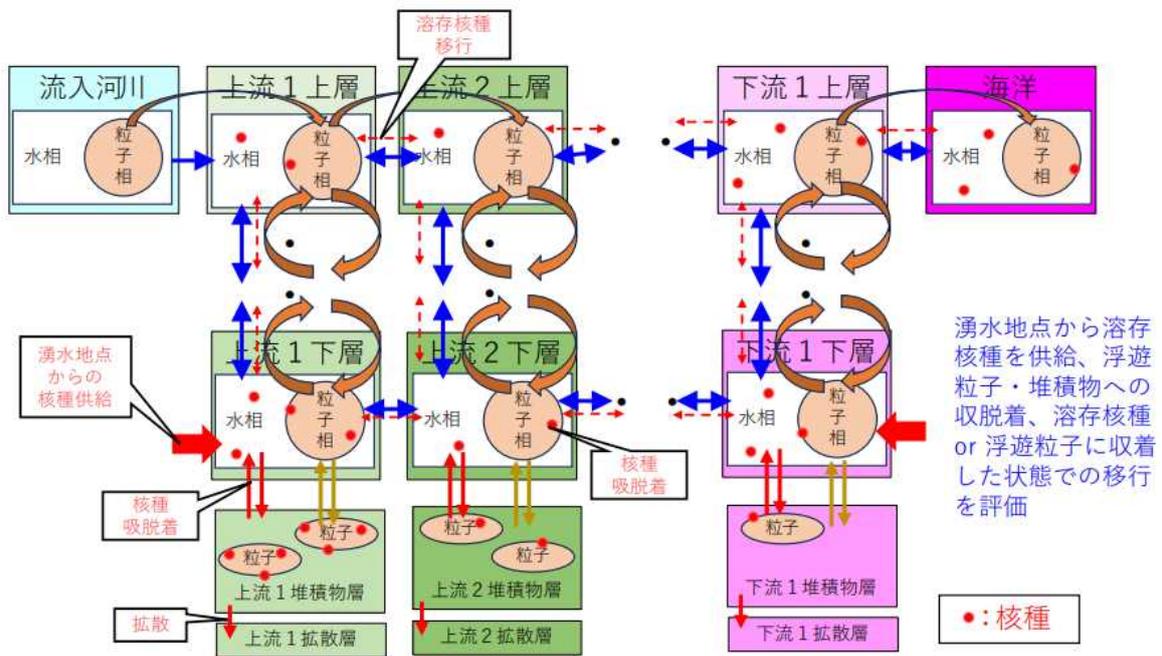
#### ④ 汽水湖における核種移行解析手法に係る検討

前述の②及び③において整理した汽水湖における核種移行挙動に影響を及ぼすと想定される現象に関する知見を踏まえて、汽水湖における核種移行へ及ぼす影響についての解析的検討を実施した。また、実験及び解析検討を通じて得られた知見に基づき、長期の被ばく線量評価の観点から汽水湖を対象としたコンパートメントモデルを用いた評価において考慮すべき現象や適用の考え方等について整理した。

汽水湖における核種移行に関する解析評価は、JAEA が開発した水域における流体及び核種移行に係る解析評価コード 3D-Sea-SPEC<sup>123</sup> を用いて行った。解析における汽水湖の形状は、湖内の流動や核種移行に影響を及ぼす複雑な地形や非定常的な環境の変化等の因子を排除し、懸濁粒子に係る凝集・沈降及び核種の収脱着に作用する塩分濃度の影響に着目した分析を行うために単純化した体系で実施した。河川流入量や潮汐等の汽水湖内の諸条件については、前述の実験条件との関係を踏まえて、観測データに基づき設定した。また、懸濁粒子に対する凝集率、沈降速度及び各種分配係数については、②及び③において得られた実験データ及び評価式を考慮して設定した。

評価の結果、汽水湖内において想定される塩淡境界の形成を表現することができており、塩分濃度分布を踏まえて懸濁粒子と核種の挙動を分析することが可能な条件が設定できていることを確認した。汽水湖中の核種や粒子濃度の分布に影響を与える汽水湖内における塩分濃度は、上流側<下流側かつ表層<底層となる傾向が確認され、下流や底層に形成される高塩分濃度領域において浮遊粒子の凝集・沈降が促進されることにより、湖底において粒子の蓄積が生じる結果が得られた。また、この傾向は水中の粒子濃度にも依存することが示された。解析的検討を通じて、汽水湖内の核種濃度の分布に対して、塩分濃度、粒子濃度、分配係数等による影響についての知見が得られた。

以上を踏まえて、コンパートメントモデルの概念設計を図 2.4.3.4 のように整理した。



出典) JAEA (2024) <sup>119</sup>

図 2.4.3.4 汽水湖におけるコンパートメントモデルの概念図

Figure 2.4.3.4 Concept image of compartment model in blackish lake

### ⑤ まとめ

本研究を通じて、汽水湖における核種移行への影響が懸念される懸濁粒子を考慮した核種の挙動について、塩分濃度等の環境条件による現象の特徴について実験及び解析を通じて知見を得ることができた。また、従来想定されている代表的個人や被ばく経路の設定に関する考え方では、今回得られた懸濁粒子を考慮した核種移行現象による線量への影響を十分に反映できない可能性が示唆された。

今回得られた成果を踏まえると、例えば汽水湖の湖底堆積物に放射性物質濃度の高い領域が形成されるといった場合、これらの領域に関連する水や土地の利用に係る生活様式に対して線量が従来の評価に比べて高くなることが懸念される。このため、線量評価においてこれらの現象を考慮する必要性の有無が示されているか、又は、これらの現象を考慮した代表的個人の生活様式や被ばく経路が適切に設定されているかといった点を審査においても確認することが必要となると考えられる。

### (2) 複数の廃棄物埋設地を考慮した線量評価に関する検討

放射性物質の移行及び線量評価に関する検討として、許可基準規則解釈において要求されている、複数の廃棄物埋設地を考慮した線量評価に関する解析評価について検討を行う

た。当該規則解釈において、自然事象シナリオに対する線量評価に関する要求事項の中で“同一の事業所内に複数の廃棄物埋設地の設置が予定される場合は、これらいずれの廃棄物埋設地においても、埋設した放射性廃棄物に含まれる主要な放射性物質が廃棄物埋設地の外へ移動するものとして、線量の評価を行う。”として線量を重畳させた評価についても要求している。評価においては、許可基準規則解釈における「同一の事業所」に対する範囲や考え方が線量の重畳において重要となるが、ICRPによる個人への線量拘束値及び線量限度の考え方<sup>124</sup>を踏まえると、廃棄物埋設の廃止措置終了後の安全性を確保する上では、事業主体によらず複数の廃棄物埋設施設に含まれる放射性物質が与える影響の範囲を考慮する必要性も考えられる。複数の廃棄物埋設地が極めて近接して設置される場合には、それぞれの廃棄物埋設地から漏出した放射性核種の影響を同時に受ける個人が存在することが予想されるが、公衆の安全を確保する上でこのような状況を想定した線量の重畳について検討した報告はなされていない。

そこで本検討では、複数の廃棄物埋設地からの線量を重畳させた評価手法を整備することと目的として評価モデルの作成を行った。核種移行シミュレーションソフト GoldSim<sup>®</sup>を用いて、トレンチ処分、ピット処分及び中深度処分に関する解析モデルを作成した。各処分形態のモデルは原子力学会標準<sup>125, 126</sup>において例示された地下水移行モデルをベースとして作成し、複数の廃棄物埋設地からの線量の重畳が考慮できるようにモデルを構築した。作成した評価モデルを用いた試解析として、放射性廃棄物埋設地と生活環境の境界 (Geosphere-Biosphere Interface。以下「GBI」という。)を同一領域と仮定した条件(図 2.4.3.5)で重畳評価を行った。

本検討により、それぞれ個別に評価されていた複数の廃棄物処分形態のモデルを1つの包括的な核種移行モデルとして取り扱いながら検討することが可能となった。作成したモデルを用いた線量の重畳に関する試解析として、GBIが同一であると仮定した条件でトレンチ処分及びピット処分による線量の重畳評価を行った結果、試解析の条件においてはトレンチとピットにおいてそれぞれの GBI から生活環境への放出時期に大きな差があることから、線量ピークへの重畳の影響は軽微な結果となった。しかし、今回実施した試解析ではあくまで原子力学会標準の線量評価例に準拠した条件で行ったものであり、実際にはサイト固有の条件に応じた評価が必要となることに注意が必要である。また、今回の試解析では各処分場からの核種の放出が同時期に発生し、また GBI が同一であると仮定した条件を用いたが、実際には埋設や漏洩に関する時期のずれや各処分場に対する GBI となる領域が異なる場合も想定される。各処分場からの GBI が異なる場合にはサイト固有の地表環境を簡略化した核種移行プロセスを考慮した形で検討する<sup>127, 128</sup> 必要性も考えられるが、これらは各 GBI の位置関係を考慮した生活環境中での核種の合流位置と代表的個人への被ばく経路の関係や、地下環境中と生活環境中での核種移行のタイムスケールの違い等も含めて、実際のサイトの状況に応じて適切に判断することが必要であると考えられる。

本検討を通じて、許可基準規則解釈において要求される線量の重畳について、複数の処分形態を考慮した線量の重畳について評価することが可能となった。

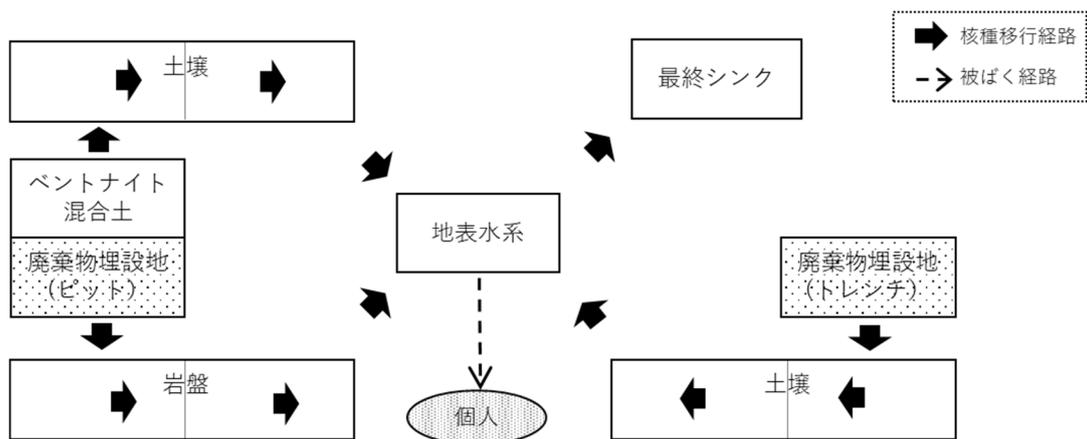


図 2.4.3.5 トレンチ処分及びピット処分を重畳させた線量評価モデル例の概念図

Figure 2.4.3.5 Conceptual image of dose assessment model with superimposed trench and pit disposal

### 3. 結論

#### 3.1 成果の要点

第二種廃棄物埋設のうち、主に中深度処分の事業許可申請に係る新規制基準適合性審査において技術的論点になると想定される、自然事象の長期評価、廃棄物埋設の性能評価、地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究、並びに中深度処分及び浅地中処分に共通する課題に関する研究を実施した。

自然事象の長期評価に関しては、申請者が提示する許可基準規則に定める断層等の影響がないことの評価、広域地下水流動評価及び EDZ の影響評価の妥当性の確認に必要な知見を取得した。

廃棄物埋設の性能評価に関しては、申請者が提示するベントナイト系及びセメント系人工バリアの長期的な透水性能の評価並びに岩盤の分配係数の設定の妥当性の確認に必要な知見を取得した。

地質環境及び水理環境モニタリングに関しては、モニタリング等のために設置されたボーリング孔が適切に埋め戻されていることを確認するために、ボーリング孔周囲で想定される地下水の流れを整理するとともに、現時点で使われる可能性のある閉塞技術を整理し、ボーリング孔が閉塞されていることの確認において考慮すべき点を整理した。

中深度処分と浅地中処分に共通の課題では、申請者が提示する地形変化評価の妥当性確認に係る知見として、覆土の侵食、廃棄物埋設地近傍の斜面崩壊及び数万年スケールの長期にわたる地形変化の評価手法を整備した。また 1F 事故後の最新知見を踏まえた生物圏中での核種移行評価モデルを検討し、従来のコンパートメントモデルでの評価では非保守

的になる可能性のある事象を抽出した。さらに、一つの事業所に複数の廃棄物埋設地が立地される場合の線量の重畳の評価ができるように、評価モデルを整備した。

### 3.2 目的の達成状況

安全研究計画で定めた4つの分類ごとに、新規規制基準適合性審査等において技術的論点となり得る課題に対する科学的・技術的知見を取得しており、当初の目的を達成した。

### 3.3 成果の公表等

#### 3.3.1 原子力規制庁職員が著者に含まれる公表

(1) NRA 技術報告

なし

(2) NRA 技術ノート

なし

(3) 論文 (査読付)

- ① Murota, K., Saito, T., “Pore size effects on surface charges and interfacial electrostatics of mesoporous silicas”, *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 24, pp. 18073–18082, 2022. doi:10.1039/D2CP02520E
- ② 廣田明成、伊藤一充、「中深度処分における隆起と侵食の考え方」、原子力バックエンド研究、29巻、2号、pp.119-129、令和4年、doi:10.3327/jnuce.29.2\_119
- ③ Kijima, T., Sasagawa, T., Sawaguchi, T., Yamada, N., “A model for estimating the hydraulic conductivity of bentonite under various density conditions”, *Hydrology Research*, Vol. 53(10), pp. 1256-1270, 2022. doi:10.2166/nh.2022.021
- ④ Murota, K., Aoyagi, N., Mei, H., Saito, T., “Hydration states of europium(III) adsorbed on silicas with nano-sized pores”, *Applied Geochemistry*, Vol. 152, No. 105620, 2023. doi:10.1016/j.apgeochem.2023.105620.
- ⑤ Murota, K., Takahashi, Y., Saito, T., “Adsorption of cesium and strontium on mesoporous silicas”, *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 25, pp. 16135-16147, 2023. doi:10.1039/D3CP01442H.
- ⑥ Hirota, A., Kouduka, M., Fukuda, A., Miyakawa, K., Sakuma, K., Ozaki, Y., Ishii, E., Suzuki, Y., “Biofilm Formation on Excavation Damaged Zone Fractures in Deep Neogene Sedimentary Rock”, *Microbial Ecology*, Vol. 87, No. 132, 2024. doi:10.1007/s00248-024-02451-7.

(4) 学術会議のプロシーディングス (査読付)

- ① 東原知広、市来高彦、入江正明、長田昌彦、「廃棄物埋設における掘削に伴う岩盤の力学状態と水理特性を踏まえた地下水流動評価の考え方」、公益社団法人土木学会第49回

岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp.247-252、令和 5 年

- ② 市来高彦、東原知広、入江正明、長田昌彦、「廃棄物埋設における岩盤の力学水理連成試験機の製作と動作確認試験」、公益社団法人土木学会第 49 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp.253-258、令和 5 年
- ③ 朝比奈大輔、市来高彦、青地優、竹村貴人、入江正明、「直接引張り試験治具による岩石の引張り挙動に関する研究」、公益社団法人土木学会第 50 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp.153-157、令和 6 年
- ④ 市来高彦、朝比奈大輔、東原知広、入江正明、「掘削影響領域の評価における引張り特性に関する研究」、公益社団法人土木学会第 50 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp.158-162、令和 6 年

(5) 表彰・受賞

なし

(6) その他

- ① 室田健人、青柳登、Huiyang Mei、斉藤拓巳、「微小な空隙内に吸着した Eu の水和状態に関する研究」、日本原子力学会 2022 年秋の大会、令和 4 年
- ② Murota, K., Saito, T., “Unique sorption of Cs and Sr onto mesoporous silicas”, IAP (Interfaces Against Pollution: Chemical and Biological Perspectives) 2022, 2022.
- ③ Murota, K., “Pore size effects on adsorption of metal ions”, ETSON News, 2023.
- ④ Hirota, A., “Biofilm Formation and the Establishment of Anaerobic Environment on Excavation Damaged Zone Fractures in Deep Neogene Sedimentary Rock”, ETSON News, 2025.

### 3.3.2 委託先による公表

(1) 論文（査読付）

- ① Ishii, Y., Ito, K., “Luminescence dating of sand matrices within gravelly fluvial deposits: Assessing the plausibility of beta dose rate calculation”, Quaternary Science Advances, Vol. 13, No. 100160, 2024. doi:10.1016/j.qsa.2023.100160
- ② Ishii, Y., “IRSL and post-IR IRSL dating of multi grains, single grains, and cobble surfaces to constrain fluvial responses to climate changes during the last glacial period in the Tokachi Plain, northern Japan”, Quaternary Geochronology, Vol. 79, No. 101486, 2024. doi:10.1016/j.quageo.2023.101486

(2) 学術会議のプロシーディングス（査読付）

- ① Hosono, H., Asahina, D., “Effects of fracture damage level of granite on the hydraulic

conductivity - an experimental study using fault damaged analogue sample”. ISRM International Symposium 2024 & 13th Asian Rock Mechanics Symposium, 2024.

- ② Asahina, D., Hosono, H., Otsubo, M., Takeda, M., “Development of a portable permeability testing device for rock permeability measurements”, The EUROCK2024, 2024.
- ③ 朝比奈大輔、竹田幹郎、「岩石を対象とした簡易な透水試験方法の検討」、日本応用地質学会研究発表会における講演論文、令和 6 年
- ④ Sawaguchi, T., Takai, S., Sasagawa, T., Uchikoshi, E., Shima, Y., Takeda, S., “Study on Borehole Sealing Corresponding to Hydrogeological Structures by Groundwater Flow Analysis”, 2022MRS FALL MEETING&EXHIBIT, 2023.

### (3) その他

- ① Sawaguchi, T., Takai, S., Sasagawa, T., Uchikoshi, E., Shima, Y., Takeda, S., “Study on Borehole Sealing Corresponding to Hydrogeological Structures by Groundwater Flow Analysis”, 2022MRA Fall Meeting & Exhibit, 2022.
- ② 澤口拓磨、村上裕晃、竹内竜史、高井静霞、笹川剛、武田聖司、「放射性廃棄物の中深度処分におけるボーリング孔閉鎖確認に係る研究」、日本原子力学会 2022 秋の大会、令和 4 年
- ③ Shimada, T., Sasaki, T., Takai, S., Takeda, S., “Evaluation of the deep-seated landslides to affect the shallow land disposal site in marine terraces”, SBNWM 2023, 2023.
- ④ Sawaguchi, T., Miwa, K., Shimada, T., Takeda, S., “Estimation of radionuclide migration considering sorption to suspended particles and soil near spring water points in a coastal zone”, SBNWM 2023, 2023.
- ⑤ Takai, S., Sanga, T., Shimada, T., Takeda, S., “Modeling of coastal landscape evolution during the last glacial-interglacial cycle - a case study on the Kamikita coastal plain, NE Japan”, AGU Fall meeting2023, 2023.
- ⑥ 高井静霞、三箇智二、島田太郎、武田聖司、「上北平野での河床縦断形解析による河川侵食モデルの推定」、2023 年日本地理学会秋季学術学会、令和 5 年
- ⑦ 澤口拓磨、高井静霞、打越絵美子、武田聖司、「ボーリング孔が核種移行に及ぼす影響に係る解析的研究」、日本原子力学会 2023 秋の大会、令和 5 年
- ⑧ 大平早希、澤口拓磨、島田太郎、武田聖司、「湿潤および湿潤・乾燥環境における河川堆積土に対する Cs の収着・脱離」、日本原子力学会 2024 年秋の大会、令和 6 年
- ⑨ 高井静霞、三箇智二、島田太郎、武田聖司、「上北沿岸地域を事例とした最終氷期一週氷期サイクルの地形変化評価モデル構築」、2024 年日本地理学会秋季学術学会、令和 6 年
- ⑩ Watanabe, Y., “Study on a method for measuring the settling velocity of small particles in water

and its application to flocculated suspended particles in brackish water”, ICRER 2024, 2024.

- ⑪ 戸崎裕貴、Marceau GRESSE、塚本斉、森川徳敏、佐藤努、高橋浩、竹田幹郎、「水文地質情報と地球化学データの GIS 解析による上北平野の広域地下水流動評価」、日本地球惑星科学連合 2024 年大会、令和 6 年
- ⑫ 戸崎裕貴、森川徳敏、風早康平、塚本斉、佐藤努、高橋浩、高橋正明、稲村明彦、「Long-term changes in deep groundwater flow in the Kamikita Plain as inferred from chemical and isotopic tracers」、日本地球惑星科学連合 2024 年大会、令和 6 年
- ⑬ Gresse, M., Miyakoshi, A., Komori, S., Hosono, H., Tosaki, Y., Sato, T., Asahina, D., Tsukamoto, H., Otsubo, M., Takeda, M., “Coupled multiphysics approach to characterize groundwater flow system around a near-surface fault zone”, EGU2024, 2024.
- ⑭ 石井祐次、「十勝平野にみられる最終氷期の河成段丘堆積物のルミネッセンス年代測定」、日本第四紀学会 2023 年大会、令和 5 年
- ⑮ Otsubo, M., Oohashi, K., Miyakawa, A., “Relationship between fracture dilation and distribution of fractures around faults in sedimentary rocks: Example from Yonaguni Island, Okinawa, SW Japan”, AGU Fall Meeting 2023, 2023.
- ⑯ Tosaki, Y., Gresse, M., Tsukamoto, H., Morikawa, M., Sato, T., Takahashi, H. A., Takeda, M., “Regional groundwater flow in the Kamikita coastal plain, Japan – Part 1: GIS-based modeling of groundwater chemistry, isotopes and hydrogeological data”, AGU Fall Meeting 2023, 2023.
- ⑰ Gresse, M., Tosaki, Y., Tsukamoto, H., Ito, K., Takeda, M., “Regional groundwater flow in the Kamikita coastal plain, Japan – Part 2: flowpath and residence time estimated using MODFLOW SEAWAT”, AGU Fall Meeting 2023, 2023.
- ⑱ Gresse, M., Ito, K., Takeda, M., “Flow path and residence time in coastal aquifer under cyclic sea-level change: the past and future evolutions in Kamikita plain, Japan”, LBNL’s 10th TOUGH Symposium 2023, 2023
- ⑲ Gresse, M., 伊藤一誠、塚本斉、竹田幹郎、「Preliminary 3D groundwater flow modelling of Kamikita plain (Japan): long-term simulation of seawater intrusion」、日本地球惑星科学連合 2023 年大会、令和 5 年
- ⑳ 石井祐次、「河成段丘の砂礫層中の砂を用いたルミネッセンス年代測定」、ESR 応用計測研究会・ルミネッセンス年代測定研究会・フィッシュン・トラック研究会 2022 年度合同研究会、令和 4 年
- ㉑ 伊藤一充、石井祐次、「中期-後期更新世海成段丘堆積物へのルミネッセンス年代測定の適用－北海道南部の例」、ESR 応用計測研究会・ルミネッセンス年代測定研究会・フィッシュン・トラック研究会 2022 年度合同研究会、令和 4 年
- ㉒ 戸崎裕貴、森川徳敏、塚本斉、宮越昭暢、佐藤努、竹田幹郎、「地下水流動系の検証のためのボーリング調査」、日本水文科学会誌、52 巻、2 号、pp. 61-64、令和 4 年

- ②③ 戸崎裕貴、森川徳敏、塚本斉、佐藤努、高橋浩、高橋正明、稲村明彦、「ボーリング調査による小川原湖南～東側地域における地下水流動評価」、水文・水資源学会 日本水文科学会 2022 年度研究発表会、令和 4 年

### 3.4 成果の活用等

本研究で得た知見は、主に中深度処分の事業許可申請に係る新規制基準適合性審査及び後続規制において活用される見込みである。

### 3.5 今後の課題等

本研究では主に中深度処分の事業許可申請に係る新規制基準適合性審査及び後続規制において技術的論点となり得る課題について検討した。

今後は、本研究の成果を踏まえ、内部検討にて新規制基準適合性審査及び後続規制において、申請内容の妥当性を具体的に判断するための評価の視点と判断基準を整理し、NRA 技術報告等にまとめる予定である。

### 謝辞

本報告書の作成にあたり、原子力規制委員会原子力規制庁技術基盤グループ放射線・廃棄物研究部門の竹野直人技術参与に貴重な技術的助言をいただきました。ここに深謝申し上げます。

## 参考文献一覧

- 1 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－」 NUMO-TR-20-03、令和3年
- 2 木方建造、新孝一、近藤浩文、田中靖治、幡谷竜太、上田圭一、長谷川琢磨、「高レベル放射性廃棄物処分に係る概要調査の体系化研究－調査・評価フローの構築と要素技術開発－」、電力中央研究所報告、N11号、平成23年
- 3 国立研究開発法人産業技術総合研究所、「令和6年度原子力規制庁委託成果報告書 廃棄物埋設における自然事象等の評価に関する研究」、令和7年（公開準備中）
- 4 国立研究開発法人産業技術総合研究所、「令和5年度原子力規制庁委託成果報告書 廃棄物埋設における自然事象等の評価に関する研究」、令和6年（公開準備中）
- 5 Miyakawa, A., Otsubo, M., “Evolution of crustal deformation in the northeast-central Japanese island arc: Insights from fault activity”, *Island Arc*, 26, e12179, 2017. doi:10.1111/iar.12179
- 6 Morris, A., Ferril, D. A., Henderson, D. B., “Slip-tendency analysis and fault reactivation” *Geology*, Vol. 24, No. 3, pp. 275–278, 1996. doi:10.1130/0091-7613(1996)024<0275:STAAFR>2.3.CO;2
- 7 Lisle, R. J., Srivastava, D. C., “Test of the frictional reactivation theory for faults and validity of fault-slip analysis”, *Geology*, Vol. 32, No. 7, pp. 569-572, 2004. doi:10.1130/G20408.1
- 8 Miyakawa, A., Otsubo, M., “Applicability of slip tendency for understanding long-term fault activity: a case study of active faults in northeastern Japan”, *Journal of JSCE*, Vol. 3, No. 1, pp. 105-114, 2015. doi:10.2208/journalofjsce.3.1\_105
- 9 国立研究開発法人産業技術総合研究所、「令和3年度原子力規制庁委託成果報告書 廃棄物埋設における自然事象等の評価に関する研究」、令和4年（公開準備中）
- 10 Maeda, S., Matsuzawa, T., Okada, T., Katao, H., Yoshida, T., Kosuge, M., Otsubo, M., “Spatiotemporal variations in the stress field in the northeasternmost part of the NE Japan arc: constraints from microearthquakes”, *Earth, Planets and Space*, Vol. 72, No. 117, pp. 1-7, 2020. doi:10.1186/s40623-020-01245-8
- 11 国立研究開発法人産業技術総合研究所、「令和4年度原子力規制庁委託成果報告書 廃棄物埋設における自然事象等の評価に関する研究」、令和5年（公開準備中）
- 12 岩井武彦、「青森県小川原湖畔地域における温泉群の研究」、青森県三沢市・上北町・東北町、p. 26、昭和50年
- 13 青森県環境保健部、「温泉ゆう出地基礎調査報告書（野辺地町・東北町・天間林

- 村・七戸町)」、青森県環境保健部、p. 49、昭和 63 年
- 14 青森県環境保健部、「温泉ゆう出地基礎調査報告書（三沢市・下田町・百石町・八戸市)」、青森県環境保健部、p. 65、平成 4 年
- 15 石油公団、「平成 6 年度国内石油・天然ガス基礎調査 陸上基礎物理探査「七戸地域」調査報告書」、石油公団、p. 35、平成 7 年
- 16 仙台通商産業局、「上北地域地下水利用適正化調査報告書」、仙台通商産業局、p. 149、昭和 64 年
- 17 国立研究開発法人産業技術総合研究所、「令和 2 年度原子力規制庁委託成果報告書 自然事象等の評価に関する研究」、令和 3 年
- 18 国立研究開発法人産業技術総合研究所、「平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書 自然事象等の評価手法に関する調査」、平成 31 年
- 19 千木良雅弘、「建設工事における風化・変質作用の取扱い方 4. 軟岩の風化作用. 土と基礎」、40(8)、pp. 71-79、平成 4 年
- 20 大山隆弘、猪原芳樹、「地下岩盤の地化学環境調査・評価技術の開発（その 5）－六ヶ所サイト地下空洞周辺の酸化還元境界のドリル孔を使った原位置調査－」、電力中央研究所報告、N16011、p. 12、平成 29 年
- 21 大山隆弘、千木良雅弘、大村直也、渡部良朋、「泥岩の化学的風化による住宅基礎の盤膨れ」、応用地質、39、pp. 261-272、平成 10 年
- 22 山中俊夫、「色差表示の最近の動向 -CIE 色差表示-」、照明学会雑誌、62(12)、pp. 28-32、昭和 53 年
- 23 川路芳弘、「不整合面上位の堆積物について -天草上島の姫浦層群と赤崎層との境界を中心として-」、御所浦白亜紀試料館報、2、pp. 7-12、平成 13 年
- 24 Waelbroeck, C., Labeyrie, L., Michel, E., Duplessy, J.C., McManus, J.F., Lambeck, K., Balbon, E., Labracherie M. “Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records”. *Quaternary Science Reviews*, 21, pp. 295–305, 2002. doi:10.1016/S0277-3791(01)00101-9
- 25 東原知広、市来高彦、入江正明、長田昌彦、「廃棄物埋設における掘削に伴う岩盤の力学状態と水理特性を踏まえた地下水流動評価の考え方」、公益社団法人土木学会第 49 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp. 247-252、令和 5 年
- 26 市来高彦、東原知広、入江正明、長田昌彦、「廃棄物埋設における岩盤の力学水理連成試験機の製作と動作確認試験」、公益社団法人土木学会第 49 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp. 253-258、令和 5 年
- 27 朝比奈大輔、市来高彦、青地優、竹村貴人、入江正明、「直接引張り試験治具による岩石の引張り挙動に関する研究」、公益社団法人土木学会第 50 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp. 153-157、令和 6 年

- 28 市来高彦、朝比奈大輔、東原知広、入江正明、「掘削影響領域の評価における引張り特性に関する研究」、公益社団法人土木学会第 50 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp. 158-162、令和 6 年
- 29 Ellerbrock, R., Stein, M., Schaller, J., “Comparing amorphous silica, short-range-ordered silicates and silicic acid species by FTIR” *Sci Rep* Vol. 12, No. 1, 11708, 2022. doi:10.1038/s41598-022-15882-4
- 30 Movasaghi, Z., Rehman, S., Rehman, U., I., “Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of biological tissues” *Appl Spectrosc Rev* Vol. 43, No. 2, pp. 134–179, 2008. doi:10.1080/05704920701829043
- 31 Hirota, A., Kouduka, M., Fukuda, A., Miyakawa, K., Sakuma, K., Ozaki, Y., Ishii, E., Suzuki, Y., “Biofilm Formation on Excavation Damaged Zone Fractures in Deep Neogene Sedimentary Rock” *Microbial Ecology* Vol. 87, No. 132, 2024. doi:10.1007/s00248-024-02451-7
- 32 Chistoserdova, L., Kalyuzhnaya, M., G., Lidstrom, M., E., “The expanding world of methylotrophic metabolism” *Annu Rev Microbiol* Vol. 63, pp. 477–499, 2009. doi:10.1146/annurev.micro.091208.073600
- 33 Kalyuzhnaya, M., G., Gomez, O., A., Murrell, J., C., “The methane-oxidizing bacteria (methanotrophs). In: McGinity T (ed) *Taxonomy, Genomics and Ecophysiology of Hydrocarbon-Degrading Microbes. Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*” Springer, Cham, pp. 1–34, 2019.
- 34 Miller W., Alexander R., Chapman N., McKinley I., Smellie J., “Natural Analogue Studies in the Geological Disposal of Radioactive Waste”, NAGRA TR 93-03, 1994.
- 35 Steefel C. I., Tournassat C., “A Model for Discrete Fracture-Clay Rock Interaction Incorporating Electrostatic Effects on Transport”, *Computational Geosciences* No. 25, pp. 395-410, 2021. doi:10.1007/s10596-020-10012-3
- 36 細谷真一、並木正、森川誠司、岩野圭太、佐々木泰、蒲池孝夫、渡辺邦夫、「割れ目を含む堆積軟岩の巨視的な透水係数の算出方法の提案」、日本地下水学会 2010 年秋季講演会、講演要旨、pp. 18-23、平成 22 年
- 37 日本原子力研究開発機構、CoolRepR4 カーネル 3.2.1「実際の割れ目の性状を考慮した割れ目ネットワークのモデル化手法の整備」、令和 4 年、<https://kms1.jaea.go.jp/CoolRep/r4-kernels/r4-k1/r4-k1-3/r4-k1-32/r4-k1-321/index.html> (2025 年 3 月 24 日確認)
- 38 Ishii E., “Assessment of Hydraulic Connectivity of Fractures in Mudstones by Single-Borehole Investigations”, *Water Resources Research*, 2018. doi:10.1029/2018WR022556

- 39 Doe T., “TRUE Block Scale Project, Generalized dimension analysis of build-up and pressure interference tests”, SKB IPR-02-70, 2002.
- 40 Horne R. N., “Modern Well Test Analysis -A Computer-Aided Approach”, 1990.
- 41 杉俊二、矢島一昭、大野真知子、佐々木泰、白石知成、「地下水水質分布に基づく新第三紀堆積岩中の地下水流動の検討」、日本地下水学会 2013 年秋季講演会、講演要旨、pp. 1-6、平成 25 年
- 42 馬原保典、「ワンポイント誌面講座：地下水年代の測定」、地下水学会誌、51 巻、1 号、pp. 55-59、平成 21 年
- 43 Ho C. K., “Dual Porosity vs. Dual Permeability Models of Matrix Diffusion in Fractured Rock”, SAND 2000-2336C, 2001.
- 44 Meng S., Longcheng L., “Solute Transport in Fractured Porous Media”, Journal of Hydrology, No. 618, 2023.
- 45 Stral Sakerhets Myndigheten, “Review of Matrix Diffusion and Related Properties of Intact Rock in SKB’s Licence Application for a Spent Nuclear Fuel Repository in Forsmark, Sweden” SSM-2012-44, 2012.
- 46 井尻裕二、畑明仁、細野賢一、澤田淳、「原位置トレーサ試験により得られる核種移行パラメータの不確実性について」、土木学会論文集、No.778/III-69、pp. 85-97、平成 16 年
- 47 深津勇太、伊藤剛志、舘幸男、石田圭輔、Martin A.、「グリムゼル花崗閃緑岩マトリクス中の原位置長期拡散試験の結果と解析」、原子力学会 2018 年秋の大会、予稿集 2F21、平成 30 年
- 48 横田秀晴、天野健治、前川恵輔、國丸貴紀、苗村由美、井尻裕二、本島貴之、鈴木俊一、手島和文、「幌延深地層研究計画における原位置トレーサ試験結果の評価手法に関する検討」、JAEA-Research 2013-002、平成 25 年
- 49 石橋正祐紀、笹尾英嗣、濱克宏、「深部結晶質岩マトリクス部における微小移行経路と元素拡散現象の特徴」、原子力バックエンド研究、23 巻、2 号、pp. 121-129、平成 28 年
- 50 吉田英一、「岩盤中の透水性亀裂とその長期的挙動－現状と今後の課題－」、地学雑誌、121 巻、1 号、pp. 68-95、平成 24 年
- 51 Chagneau A., Claret F, Enzmann F, Kersten M., Heck S., Made B., Schafer T., “Mineral Precipitation-induced Porosity Reduction and its Effect on Transport Parameters in Diffusion-controlled Porous Media”, Geochem Transaction, 2015. doi:10.1186/s12932-015-0027-z
- 52 Komine, H., “Theoretical Equations on Hydraulic Conductivities of Bentonite-Based Buffer and Backfill for Underground Disposal of Radioactive Wastes”, Journal of

- Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 134 (4), pp. 497-508, 2008. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:4(497)
- 53 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 65(1)、pp. 66-84、平成 21 年
- 54 Kijima, T., Sasagawa, T., Sawaguchi, T., Yamada, N., “A model for estimating the hydraulic conductivity of bentonite under various density conditions”, Hydrology Research, Vol. 53(10), pp. 1256-1270, 2022. doi:10.2166/nh.2022.021
- 55 Kozaki, T., Fujishima, A., Sato, S., Ohashi, H., “Self-Diffusion of Sodium Ions in Compacted Sodium Montmorillonite”, Nuclear Technology, Vol. 121(1), pp. 63-69, 1998. doi:10.13182/NT98-A2819
- 56 鈴木覚、藤島敦、上野健一、市川康明、河村雄行、藤井直樹、柴田雅博、佐藤治夫、北山一美、「圧縮ベントナイトの微細構造のモデル化と MD-HA 結合解析法の拡散問題への適用」、粘土科学 41 巻 2 号、pp. 43-57、平成 13 年
- 57 Norrish, K., Quirk, J.P., “Crystalline Swelling of Montmorillonite: Use of Electrolytes to Control Swelling”, Nature, Vol. 173, pp. 256-257, 1954.
- 58 Foster, W.R., Savins, J.G., Waite, J.M., “Lattice Expansion and Rheological Behavior Relationships in Water-Montmorillonite Systems”, Clays and Clay Minerals, Vol. 3(1), pp. 296-316, 1954.
- 59 Fink, D.H., Thomas, G.W., “X-Ray Studies of Crystalline Swelling in Montmorillonites”, Soil Science Society American Proceedings Vol. 28(6), pp. 747-750, 1964. doi:10.2136/sssaj1964.03615995002800060021x
- 60 Zhang, Z.Z., Low, P.F., “Relation between the heat of immersion and the initial water content of Li-, Na-, and K-montmorillonite”, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 133(2), pp. 461-472, 1989. doi:10.1016/S0021-9797(89)80057-8
- 61 Holmboe, M., Wold, S., Jonsson, M., “Porosity investigation of compacted bentonite using XRD profile modeling”, Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 128(1-4), pp. 19-32, 2012. doi:10.1016/j.jconhyd.2011.10.005
- 62 Fukushima, Y., “X-Ray Diffraction Study of Aqueous Montmorillonite Emulsions”, Clays and Clay Minerals, Vol. 32(4), pp. 320-326, 1984. doi:10.1346/CCMN.1984.0320410
- 63 Matusiewicz, M., Pirkkalainen, K., Liljeström, V., Suuronen, J.P., Root, A., Muurinen, A., Serimaa, R., Olin, M., “Microstructural investigation of calcium montmorillonite”, Clay Minerals, Vol. 48(2), pp. 267-276, 2013. doi:10.1180/claymin.2013.048.2.08
- 64 Millington, R.J., Quirk, J.P., “Permeability of porous solids”, Transactions of the Faraday Society, Vol. 57, pp. 1200-1207, 1961. doi:10.1039/TF9615701200

- 65 Andrade, E.N.D.C., Dodd, C., “The effect of an electric field on the viscosity of liquids”, *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, Vol. 187(1010), pp. 296-337, 1946. doi:10.1098/rspa.1946.0079
- 66 土木学会、「コンクリート標準示方書 [設計編]」、土木学会、令和 5 年
- 67 Sugiyama, T., Promentilla, M.A.B., “Advancing Concrete Durability Research through X-ray Computed Tomography”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 19, pp. 730-755, 2021. doi:10.3151/jact.19.730
- 68 日本仮設株式会社、「令和 6 年度セメント硬化体のひび割れ発生に伴う透水性能の評価報告書」、令和 7 年
- 69 ジーエルサイエンス株式会社、「令和 3 年度原子力発電施設等安全技術対策委託費（廃棄物埋設におけるセメント硬化体の長期物質移行評価に関する調査）事業報告書」、令和 4 年（公開準備中）
- 70 Rejmak, P., Dolado, J.S., Stott, M.J., Ayuela, A., “<sup>29</sup>Si NMR in cement: a theoretical study on calcium silicate hydrates”, *The Journal of Physical Chemistry, C* 116 (17), pp. 9755–9761, 2012. doi:10.1021/jp302218j
- 71 Manzano, H., Dolado, J.S., Ayuela, A., “Aluminum Incorporation to Dreierketten Silicate Chains”, *Journal of Physical Chemistry, B* 113(9), pp. 2832-2839, 2009. doi:10.1021/jp804867u
- 72 Pegado, L., Labbez, C., Churakov, S.V., “Mechanism of Aluminium Incorporation into C-S-H from Ab Initio Calculations”, *Journal of Materials Chemistry, A* 2 (10), pp. 3477-3483, 2014. doi:10.1039/C3TA14597B
- 73 Özçelik, V.O., White, C.E., “Nanoscale Charge-Balancing Mechanism in Alkali-Substituted Calcium–Silicate–Hydrate Gels”, *Journal of Physical Chemistry Letters*, Vol. 7 (24), pp. 5266-5272, 2016. doi:10.1021/acs.jpcclett.6b02233
- 74 Takahashi, H., Tachi, Y., “3D-microstructure analysis of compacted Na- and Cs-montmorillonites with nanofocus X-ray computed tomography and correlation with macroscopic transport properties”, *Applied Clay Science*, Vol. 168, pp. 211-222, 2019. doi:10.1016/j.clay.2018.11.008
- 75 Wang, Y., “Nanogeochemistry: Nanostructures, emergent properties and their control on geochemical reactions and mass transfers”, *Chemical Geology*, Vol. 378-379, pp. 1-23, 2014. doi:10.1016/j.chemgeo.2014.04.007
- 76 Zachara, J., Brantley, S., Chorover, J., Ewing, R., Kerisit, S., Liu, C. X., Perfect, E., Rother, G., Stack, A. G., “Internal Domains of Natural Porous Media Revealed: Critical Locations for Transport, Storage, and Chemical Reaction”, *Environmental Science Technology*, Vol. 50, pp. 2811-2829, 2016. doi:10.1021/acs.est.5b05015

- 77 Murota, K., Saito, T., “Pore size effects on surface charges and interfacial electrostatics of mesoporous silicas”, *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 24, pp. 18073–18082, 2022. doi:10.1039/D2CP02520E
- 78 Murota, K., Takahashi, Y., Saito, T., “Adsorption of cesium and strontium on mesoporous silicas”, *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 25, pp. 16135–16147, 2023. doi:10.1039/D3CP01442H
- 79 Murota, K., Aoyagi, N., Mei, H., Saito, T., “Hydration states of europium(III) adsorbed on silicas with nano-sized pores”, *Applied Geochemistry*, Vol. 152, p. 105620, 2023. 10.1016/j.apgeochem.2023.105620
- 80 Pusch R., Ramqvist G., Bockgard N, Ekman L. “Sealing of Investigation Boreholes, Phase 4, Final Report”, SKB R-11-20, 2011.
- 81 Petrowiki.spe.org ホームページ、[https://petrowiki.spe.org/Cement\\_bond\\_logs](https://petrowiki.spe.org/Cement_bond_logs) (2025 年 1 月 23 日確認)
- 82 NAGRA, “BohrlochversiegelungKonzept und Machbarkeitsnachweis”, NAGRA NTB, pp. 89-26, 1989.
- 83 澤口拓磨、村上裕晃、竹内竜史、高井静霞、笹川剛、武田聖司、「放射性廃棄物の中深度処分におけるボーリング孔閉鎖確認に係る研究」、原子力学会 2022 年秋の大会予稿集 3C08、平成 30 年
- 84 Pusch R., Ramqvist G., Knutsson S., “Modern Method for Sealing Deep Boreholes”, *Engineering Geology*, No. 202, pp. 132-142, 2016.
- 85 Radioactive Waste Management, “Sealing Deep Site Investigation Boreholes: Phase 2. Final Report”, 2018.
- 86 Pusch R., Knutsson S., Ramqvist G., Mohammed M. H., Pourbakhtiar A., “Can Sealing of Rock Hosting a Repository for Highly Radioactive Waste be Relied on?”, *Natural Science*, vol. 4, pp. 895-905, 2012. doi:10.4236/ns.2012.431117.
- 87 Radioactive Waste Management, “Sealing Site Investigation Boreholes: Phase 2. Task 9: Development of a QA/QC methodology for borehole sealing”, 2018.
- 88 Pusch R., “Borehole Sealing with Highly Compacted Na Bentonite”, SKBF/KBS TR 81-09, 1981.
- 89 Pusch R., Ramqvist G., “Borehole project – Final report of Phase 3”, SKB R-07-58, 2007
- 90 Tsitsopoulos V., Joyce S., Jefferies N.L., “Sealing Site Investigation Boreholes: Phase2. Tsk 2b: Modelling the Effects of Site Investigation Boreholes on Groundwater Flow”, RWM/03/046, 2015.
- 91 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、「令和 4 年度原子力規制庁委託成果報告書 廃棄物埋設における環境条件の評価に関する研究」、令和 5 年（公開準

- 備中)
- 92 Beauheim R. L., Robert R. M. Avis J. D., “Well Testing in Fractured Media: Flow dimensions and Diagnostic Plots”, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42, pp. 69-76, 2004. doi:10.1080/00221680409500049
- 93 Alcolea A., Kuhlmann U., Lanyon G.W., Marschall P., “Hydraulic Conductance of the EDZ around Underground Structures of a Geological Repository for Radioactive Waste”, NAGRA, NAB 13-94, 2014.
- 94 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、「令和 6 年度原子力規制庁委託成果報告書 廃棄物埋設における環境条件の評価に関する研究」、令和 7 年（公開準備中）
- 95 USDA, “Water Erosion Prediction Project (WEPP), Hillslope Profile and Watershed Model Documentation”, NSERL Report No. 10, 1995.
- 96 日本原子力発電株式会社、「東海低レベル放射性廃棄物埋設事業所 第二種廃棄物埋設 施設事業許可申請 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第十三条（ピット処分又はトレンチ処分に係る廃棄物埋設地）第 1 項 第二号及び第四号への適合性について」、第 461 回核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合、資料 2-2、令和 4 年
- 97 気象庁 HP、過去の気象データ  
[https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec\\_no=40&block\\_no=47629&year=&month=&day=&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=40&block_no=47629&year=&month=&day=&view=)（2025 年 1 月 24 日確認）
- 98 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、「第 2 期中期計画期間における研究成果取りまとめ報告書－深地層の研究施設計画および地質環境の長期安定性に関する研究－」、JAEA-Research 2015-007、平成 27 年
- 99 Hogley D. E., Adams J. M., “Creative Computing with Landlab: an Open-Source Toolkit for Building, Coupling, and Exploring Two-Dimensional Numerical Models of Earth-Surface Dynamics”, *Earth Surface Dynamics*, vol. 5, No. 1, pp. 21-46, 2017.
- 100 Barnhart K.R., Hutton E. W. H., “Short communication: Landlab v2.0: a software package for Earth surface dynamics”, *Earth Surface Dynamics*, vol. 8, No. 2, pp. 379-397, 2020. doi:10.5194/esurf-8-379-2020.
- 101 Barnhart K. R., Tucker G.E., Doty S. G., Shobe C. M., Glade R. C., Rossi M. W., Hill M. C., “Inventing Topography for Landscape Evolution Model Process Representation:2. Calibration and Validation”, *Earth Surface*, 2020. doi:10.1029/2019JF005287
- 102 日本原燃株式会社、「廃棄物埋設施設における許可基準規則への適合性について」、平成 29 年 12 月 27 日資料 1-1、第三条廃棄物埋設地の地盤より抜粋
- 103 Campforts B., Shobe C.M., Steer P., Vanmaercke M., Lague D., Braun J., “HyLands 1.0:

- A Hybrid Landscape Evolution Model to Simulate the Impact of Landslides and Landslide-Derived Sediment on Landscape Evolution”, *Geoscientific Model Development*, vol. 13, No. 9, pp. 3863-86, 2020. doi:10.5194/gmd-13-3863-2020
- 104 Campforts, B., Shobe, C. M., Overeem, I., Tucker, G. E., “The Art of Landslides: How Stochastic Mass Wasting Shapes Topography and Influences Landscape Dynamics”, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, vol. 127, No. 8, 2022. doi:10.1029/2022JF006745
- 105 国土地理院、「高密度地形データを用いた斜面崩壊予測のための大縮尺地形分類手法マニュアル」、平成 30 年
- 106 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム、「深層崩壊の発生する恐れのある斜面抽出技術手法およびリスク評価手法に関する研究」、土木研究所資料、第 4333 号、平成 28 年
- 107 小池一之・町田洋編、「日本の海成段丘アトラス」、東京大学出版会、平成 13 年
- 108 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 巻 pp. 139-146、平成 17 年
- 109 田村亨、「光ルミネッセンス (OSL) 年代測定法」、*Radioisotopes* 70、pp. 107-116、令和 3 年
- 110 伊藤一充、「光ルミネッセンス (OSL) 法を用いた堆積物の年代決定」、*Radioisotopes* 70、pp. 47-157、令和 3 年
- 111 Thiel, C., Tsukamoto, S., Tokuyasu, K., Buylaert, J. P., Murray, S. A., Tanaka, K., Shirai, M., “Testing the application of quartz and feldspar luminescence dating to MIS 5 Japanese marine deposits” *Quaternary Geochronology*, Vol. 29, pp. 16-29, 2015.
- 112 Ito, K., Tamura, T., Tsukamoto, S., “Post-IR IRSL dating of K-feldspar from last interglacial marine terrace deposits on the Kamikita coastal plain, northeastern Japan” *Geochronometria* Vol. 44, pp. 352-365, 2017.
- 113 田中俊行、戸井田克、「礫-砂-ベントナイト混合土の透水特性と透水係数の評価方法」、*土木学会論文集 C*、Vol.64 No.1、pp.101-110、平成 20 年
- 114 武田聖司、澤口拓磨、佐々木利久、木村英雄、「低レベル放射性廃棄物処分に対する濃度上限値評価コード GSA-GCL 第 2 版の開発」、*JAEA-Data/Code* 2011-008、平成 23 年
- 115 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、「令和 3 年度原子力規制庁委託成果報告書 廃棄物埋設における環境条件の評価に関する研究」、令和 4 年（公開準備中）
- 116 Stokes, G.G., “On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums”,

- Trans. Cambridge Phil. Soc., Vol. 9, pp. 8-106, 1851.
- 117 Soulsby, R.L., Manning, A.J., Spearman, J., Whitehouse, R.J.S., “Settling velocity and mass settling flux of flocculated estuarine sediments”, *Marine Geology*, Vol. 339, pp. 1-12, 2013.
- 118 小田一紀、宋元平、芝村圭、農本充、「塩水中における微細土粒子の凝集・沈降過程に関する研究—ベントナイトをモデルとして—」、*海岸工学論文集*、46、pp. 981-985、平成 11 年
- 119 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、「令和 5 年度原子力規制庁委託成果報告書 廃棄物埋設における環境条件の評価に関する研究」、令和 6 年（公開準備中）
- 120 Zhang, L., Chen, M., Yang W., Xing N., Li, Y., Qiu, Y., Huang, Y., “Size-fractionated thorium isotopes (228Th, 230Th, 232Th) in surface waters in the Jiulong River estuary, China”, *J. Environ. Radioactivity*, Vol. 78, pp. 199-216, 2005.
- 121 Matsunaga, T., Ueno, T., Amano, H., Tkatchenko, Y., Kovalyov, A., Watanabe, M., Onuma, Y., “Characteristics of Chernobyl-derived radionuclides in particulate form in surface waters in the exclusion zone around the Chernobyl Nuclear Power Plant”, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 35, pp. 101-113, 1998.
- 122 Takata, H., Wakiyama, Y., Niida, T., Igarashi, Y., Konoplev, A., Inatomi N. “Importance of desorption process from Abukuma River’s suspended particles in increasing dissolved 137Cs in coastal water during river-flood caused by typhoons”, *Chemosphere*, 281, 130751, 2021.
- 123 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、「令和 2 年度原子力規制庁委託成果報告書 廃棄物埋設における環境条件の評価に関する研究」、令和 3 年
- 124 International Commission on Radiation Protection, “Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure”, ICRP Publication 82, 2000.
- 125 日本原子力学会、「日本原子力学会学会標準 浅地中処分の安全評価手法：2016」、AESJ-SC-F026:2016、平成 28 年
- 126 日本原子力学会、「低レベル放射性廃棄物処分施設の安全評価の実施方法—中深度処分編：2023」、AESJ-SC-F012:2023、令和 5 年
- 127 操上広志、新里忠史、鶴田忠彦、加藤智子、北村哲浩、菅野光大、黒澤 直弘、「放射性物質の環境動態に伴う被ばく経路を考慮したコンパートメントモデルの構築」、*JAEA-Research2016-020*、平成 28 年
- 128 SKB, “The Biosphere model for radionuclide transport and dose assessment in SR-PSU”, SKB R-13-46, 2013.

## 執筆者一覧

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 放射線・廃棄物研究部門

大塚 楓 上席技術研究調査官

廣田 明成 主任技術研究調査官

市未 高彦 主任技術研究調査官

山田 憲和 副主任技術研究調査官

向井 広樹 副主任技術研究調査官

鏡 健太 副主任技術研究調査官

木嶋 達也 副主任技術研究調査官

森田 彰伸 副主任技術研究調査官

入江 正明 技術研究調査官

室田 健人 技術研究調査官