

# 安全研究成果報告

S/NRA/R Research Report

## 廃棄物埋設に影響する長期自然事象の調査 方法及びバリア特性長期変遷の評価方法に 関する研究

Study on Survey Methods for Long-term Natural Phenomena Influencing  
Radioactive Waste Disposal and Assessment Methods for Long-term Evolution  
of Barrier Performance

山田 憲和 入江 正明 廣田 明成 河原木 千恵

YAMADA Norikazu, IRIE Masaaki, HIROTA Akinari, KAWARAGI Chie,

市末 高彦 伊藤 一充 鏡 健太 木嶋 達也

ICHIKI Takahiko, ITO Kazumi, KAGAMI Kenta, KIJIMA Tatsuya, and

室田 健人

MUROTA Kento

核燃料廃棄物研究部門

Division of Research for Nuclear Fuel Cycle and Radioactive Waste

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3年6月

June 2021

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 核燃料廃棄物研究部門  
〒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

## 廃棄物埋設に影響する長期自然事象の調査方法及び

## バリア特性長期変遷の評価方法に関する研究

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ  
核燃料廃棄物研究部門山田 憲和 入江 正明 廣田 明成 河原木 千恵 市来 高彦  
伊藤 一充 鏡 健太 木嶋 達也 室田 健人

## 要 旨

現在検討されている中深度処分の廃棄物埋設地の位置に係る要件では、火山活動及び断層活動が著しい影響を及ぼすおそれのない場所に設置すること、さらに、隆起・侵食の影響を考慮したとしても深度 70 m を確保することが求められる。また、廃棄物埋設地の設計に係る要件では、放射性物質の環境への漏えいをできる限り抑制する施設に埋設すること、及び対象となる廃棄物が 10 万年後の時点で仮に直接人と接触することがあっても大きな影響を与えない濃度まで放射性物質が減衰するものに制限することが求められる。これらを要件とした許可基準規則及びその解釈、位置に係る審査ガイドを整備し、さらに、審査に向けてそれらの判断基準の整備及びモニタリング等の基準整備が必要である。本安全研究では、これらの整備に反映する廃棄物埋設に係る自然事象の長期評価、廃棄物埋設における性能評価手法、地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究を行った。

廃棄物埋設に係る自然事象の長期評価に関する研究については、隆起及び侵食に関する評価手法、断層等に関する評価手法及び地下水流動に関する評価手法の開発を行った。さらに、岩盤の力学状態及び水理学的特性並びに岩盤の収着・移行現象について試験研究を行った。廃棄物埋設における性能評価手法に関する研究においては、人工バリアの長期性能評価手法、天然バリアの水理特性の評価手法についての開発を行った。また、地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究では、モニタリングを行う範囲を検討するために、仮想した廃棄物埋設地建設前後の地下水の流動状態についてのシミュレーションを行った。また、これらのモニタリング施設の閉鎖措置及びその確認に係る評価手法について検討及び試験を行った。これらの結果を用いて、自然事象の調査手法及び廃棄物埋設における性能評価について、一般的な状況に対する留意点を整理した。今後、中深度処分に必要とされることが予想される極めて遅い地下水流速、長期間の天然バリア及び人工バリア機能の安定性等の要件をより具体的に考慮して研究開発を行うことが必要である。

本研究では、廃棄物埋設に係る自然事象の長期評価に関する研究の一部で、サンプリング、ボーリング、試料分析、解析等を行うために、国立研究開発法人産業技術総合研究所に試験研究を委託した。また、廃棄物埋設における性能評価手法に関する研究並びに地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究の一部で、バリア材料の変質試験、数値解析、坑道を用いた試験、海外機関の情報調査等を行うために、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構及び公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターに試験及び調査を委託した。

また、廃棄物埋設に係る自然事象の長期評価の研究の一部は、国立大学法人埼玉大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構及び国立大学法人東京大学との共同研究として実施した。

Study on Survey Methods for Long-term Natural Phenomena Influencing Radioactive Waste  
Disposal and Assessment Methods for Long-term Evolution of Barrier Performance

YAMADA Norikazu, IRIE Masaaki, HIROTA Akinari, KAWARAGI Chie, ICHIKI Takahiko,  
ITO Kazumi, KAGAMI Kenta, KIJIMA Tatsuya, and MUROTA Kento

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

Abstract

Regulatory requirements for intermediate depth disposal, which are under consideration, require that the disposal facility should locate avoiding the place where volcanic and fault movement might have disruptive effects and maintain more than 70 m below the ground surface considering the uplift and erosion. Facility design is required to restrict the leakage of radioactive nuclides to the environment as low as reasonably achievable. Besides, the wastes must contain radioactive nuclides whose concentration will decay to a level that will not make a significant effect on human assuming direct contact with the wastes in 100 thousand years. The regulatory requirements for intermediate depth-disposal and their regulatory guides, safety review guides to the repository location, geology, design process, and safety assessment are necessary. Establishing regulation for the following stage to inspect and authorize the facility and monitoring activities is also necessary. This study conducts survey methods for the long-term natural phenomena influencing radioactive waste disposal, assessment methods for the long-term evolution of barrier performance, and monitoring methods for geological and hydrological environments.

Regarding the survey methods for the long-term natural phenomena influencing radioactive waste disposal, studies on assessment methods for uplift/erosion, fault, groundwater flow, rock mechanics/ hydrology, sorption / migration in rock have been conducted. Regarding the assessment methods for the long-term evolution of barrier performance, studies on performance assessment of engineering barrier and hydrological characteristics analysis of natural barrier have been conducted. Regarding the studies on monitoring of barrier performance and hydrology, groundwater flow analysis was performed to estimate the extent of the monitoring area. Closure methods of monitoring hole were also investigated. Important points for developing the survey methods and performance assessments in general were identified. Studies considering more specific

requirements for barrier performances such as very slow groundwater flow and very long-term sustainability which is suite for intermediate depth-disposal systems are necessary in the future.

In this study some parts of “survey methods for the long-term natural phenomena influencing radioactive waste disposal” were implemented by the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology to conduct sampling bowling and analysis. Some parts of “assessment methods for the long-term evolution of barrier performance” and “monitoring methods for the geological and hydrological environment” were implemented by the Japan Atomic Energy Agency and Radioactive Waste Management Funding and Research Center to conduct barrier degradation experiments, numerical analysis, in-situ test at an underground laboratory, and foreign intelligence collection.

Besides, some parts of the “survey methods for the long-term natural phenomena influencing radioactive waste disposal” were conducted as the joint study between Saitama University, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan Atomic Energy Agency, University of Tokyo and NRA.

## 目次

1.	序論 .....	1
1.1	背景 .....	1
1.2	目的 .....	2
1.3	全体行程.....	2
2.	本論 .....	6
2.1	廃棄物埋設に係る自然事象の長期評価に関する研究.....	6
2.1.1	中深度処分における隆起及び侵食に関する評価手法の研究.....	6
2.1.2	中深度処分における断層等に関する評価手法の研究.....	12
2.1.3	中深度処分における地下水流動に関する評価手法の研究.....	15
2.1.4	中深度処分における岩盤の力学的状態と水理学的特性に関する研究 .....	24
2.1.5	中深度処分における岩盤の収着・移行現象に関する研究.....	29
2.2	廃棄物埋設における性能評価手法に関する研究.....	30
2.2.1	人工バリアの長期性能評価手法の研究 .....	30
2.2.2	天然バリアの自然事象を考慮した水理特性の評価手法の研究.....	39
2.3	地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究.....	45
2.3.1	性能確認及び地下水モニタリングに関する諸外国の規制について .....	45
2.3.2	地下水モニタリングに関する研究 .....	45
2.3.3	閉鎖措置確認に関する研究 .....	49
3.	結論 .....	53
3.1	成果の要点.....	53
3.2	目的の達成状況.....	55
3.3	成果の公表等.....	56
3.3.1	原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表 .....	56
3.3.2	委託先による公表.....	56
3.4	成果の活用等.....	58
3.5	今後の課題等.....	58

## 表 目 次

表 2.1.1 隆起・削剥評価手法の手法・対象・時間スケール・適用性のまとめ .....	8
表 2.1.2 地表からの調査段階における各種物理探査手法の適用性のまとめ .....	13
表 2.2.1 Da データセット .....	32
表 2.2.2 液相固定境界の組成 .....	33
表 2.2.3 セメント系及びベントナイト系人工バリアの鉱物モデルで設定した鉱物 ...	34
表 2.2.4 地球化学計算のために選定した二次鉱物 .....	35

## 目 次

図 1.3.1 研究の全体行程(1).....	3
図 1.3.2 研究の全体行程(2).....	4
図 1.3.3 研究の全体行程(3).....	5
図 2.1.1 青森県上北平野・下北半島における委託事業に基づく隆起速度マップ .....	10
図 2.1.2 青森県上北平野・下北半島における先行研究並びに委託事業による隆起速度 .....	11
図 2.1.3 反射法地震探査による断層の長さの認定フロー.....	14
図 2.1.4 亀裂性媒体における地下水流動モデル構築フロー.....	16
図 2.1.5 多孔質媒体における地下水流動モデル構築フロー.....	17
図 2.1.6 浅層地下水と深層地下水の Cl 濃度と海岸からの距離.....	18
図 2.1.7 浅層地下水と深層地下水の水素安定同位体比と酸素安定同位体比 .....	19
図 2.1.8 水素安定同位体比と $^{14}\text{C}$ 年代値.....	20
図 2.1.9 ボーリング掘削地点と既存井戸から取られた浅層地下水の $^{14}\text{C}$ 年代値 .....	21
図 2.1.10 揚水試料、間隙水、小川原湖西側浅層地下水及び河川水の水素・酸素安定同 位体比 .....	22
図 2.1.11 ボーリング抗からの揚水試料及び浅層地下水の水素安定同位体比と希ガス 涵養温度の関係 <sup>10</sup> .....	23
図 2.1.12 300 m アクセス研究坑道における調査ポイント概略レイアウト .....	25
図 2.1.13 300 m アクセス研究坑道における調査ポイント状況写真.....	25
図 2.1.14 300 m アクセス研究坑道におけるボーリング孔のレイアウト.....	26
図 2.1.15 パッカー概念図.....	27
図 2.1.16 物理探査試験概念図.....	28
図 2.2.1 ベントナイト系人工バリアの劣化に係る評価モデルと解析コードの体系 ...	36
図 2.2.2 解析体系（セメント系人工バリアとベントナイト系人工バリアが接した系） .....	36
図 2.2.3 不確かさを考慮した過去～現在～将来の地形変化評価の流れ <sup>34</sup> .....	40
図 2.2.4 地下水流動評価結果の一例（各時刻の流速・塩分濃度分布） .....	42
図 2.2.5 埋設深度 100m における流速・塩分濃度の平均値及び標準偏差.....	43
図 2.3.1 広域モデル（灰色枠）及びサイト周辺モデル（赤枠）の解析領域.....	47
図 2.3.2 サイト周辺モデルでの施設建設前の地下水水位を基準とした場合の地下水水 位の差（上：操業時までの場合、下：閉鎖後までの場合） .....	48
図 2.3.3 室内試験の結果（上：粉末ベントナイト 100%の場合、中：粒状ベントナイト 50%+砂 50%の場合、下：粒状ベントナイト 15%+砂 85%の場合） .....	51
図 2.3.4 原位置透水試験の概略図.....	52

## 1. 序論

### 1.1 背景

原子力規制委員会は中深度処分について 2015 年から規制要求の考え方の検討を進め 2016 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」として取りまとめ、2018 年 10 月に施行した改正原子炉等規制法では廃棄物埋設地の掘削等の行為の制限及び坑道の閉鎖に対する規制を導入した。その後、引き続き技術的な検討を進めている。また、ピット処分及びトレンチ処分に関連する核燃料物質又は核燃料物質によつ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（以下、「第二種廃棄物埋設事業規則」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（以下、「第二種廃棄物埋設許可基準規則」という）とその解釈が 2019 年に改正され、廃棄体及び埋設施設に関する技術基準の性能規定化等が行われた。

上述の「炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について」においては、中深度処分の廃棄物埋設地の位置に係る要件として、10 万年間にわたり火山活動及び断層活動が著しい影響をおよぼすおそれのない区域に設置すること、さらに、隆起・侵食の影響を考慮したとしても深度 70 m を確保することとされている。また、廃棄物埋設地の設計に係る要件として、放射性物質の環境への漏えいをできる限り抑制する施設に埋設する概念とし、対象となる廃棄物は、10 万年後の時点で仮に直接人と接触することがあっても大きな影響を与えない濃度まで放射性物質が減衰するものに制限されるものとしている。これらを要件とした中深度処分の許可基準規則及び審査ガイド（以下「規制基準等」という。）を整備する必要がある。

第二種廃棄物埋設については、廃炉の計画が進むに従い、トレンチ処分及びピット処分の事業化が進み、さらに、炉心の解体が進むに従って中深度処分の事業化も具体化されることが予想される。また、研究施設等廃棄物の埋設については、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が実施主体となることが法律で定められており、その実施計画ではトレンチ処分及びピット処分から事業化するとされている。

平成 26 年度までに行われた福島第一原子力発電所事故による放射性廃棄物の取扱いに関する研究では、廃棄物埋設地の位置に関する基準の整備に活用可能な活断層、第四紀火山などの地質関連の各種データベース及び 10 万年程度の地質事象を対象とした、将来予測に活用可能な調査評価手法に関する知見の整理並びに審査に活用可能な安全評価手法の構築を行ってきた。また、中深度処分に関連して、諸外国の基準及び国際基準、地下利用状況等の調査を実施するとともに、安全に関連する重要事象として、基本的な地下水流動、核種移行評価技術に加えて、ガス発生の影響、地震影響等の検討を行ってきた。

これらを背景とし、中深度処分の廃棄物埋設地の位置に係る審査ガイドの策定においては、断層、侵食、火山活動に関する評価を整理した上で、取得可能な各種情報に基づいて、放射性廃棄物埋設の評価期間中における、これら活動の安定性を示すための科学的・技術

的知見の取得と考え方の整理が必要である。また、これら活動の長期の安全評価については、埋設施設のバリア材料の長期性能評価の妥当性評価への知見の反映も必要である。

## 1.2 目的

中深度処分の規制基準等の整備、適合性審査及び後続規制の確認の際の判断に必要な知見の収集・整備における廃棄物埋設における自然事象の長期評価、性能評価手法及びモニタリングに係る科学的・技術的知見の蓄積を行う。

## 1.3 全体行程

本プロジェクトにおいては、現在進められている中深度処分の規制基準等の整備に必要な科学的・技術的知見の整備を行う。また、審査の際の判断に必要な知見の収集・整備及び安全評価に使用する解析コードの整備を行う。具体的には、地質環境及び水理環境の評価手法に関する科学的・技術的知見を整理する。また、地質環境及び水理環境のモニタリング及び閉鎖措置又は廃止措置における性能等の確認及び地下水等モニタリング(以下「性能確認モニタリング」という。)について基本的考え方の整理及び具体的判断指標等について検討を行う。これらの科学的・技術的知見の抽出のために以下に示す項目について安全研究を行い、規制基準等の策定において反映すべき又はそれらを審査において適用する際に参照すべき判断指標等の整備を行う。

なお、廃棄物埋設に係る自然事象の長期評価に関する研究のうち、隆起及び侵食に関する評価手法、断層等に関する評価手法、地下水流動に関する評価手法の整備は、国立研究法人産業技術総合研究所に委託し実施したものである。廃棄物埋設における性能評価手法及び地質環境及び水理環境モニタリングの手法の整備は、国立研究法人日本原子力研究開発機構に委託し実施したものである。廃棄物埋設に係る自然事象の長期評価に関する研究のうち、岩盤の力学的状態と水理学的特性に関する研究のうち室内試験は、国立大学法人埼玉大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所と、原位置試験は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構と、岩盤の収着・移行現象に関する研究は、国立大学法人東京大学とそれぞれ共同研究を行ったものである。

研究項目	H29 年度	H30 年度	H31 年度	R2 年度
放射性廃棄物埋設の規制の考え方及び規制基準等の整備	○中深度処分 (H28 年度中に規制の考え方、放射線防護の考え方を整備)			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・許可基準規則及びその解釈の整備</li> <li>・事業規則（廃棄体、埋設施設の技術基準（性能規定化））の整備</li> <li>・位置に係る審査ガイド、設計プロセス・線量評価ガイド等の整備</li> </ul>			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地質地盤調査ガイド、性能確認モニタリングガイド等の整備</li> <li>・確認要領等後続規制に資する科学的・技術的知見の整備</li> </ul>			
	○トレンチ処分、ピット処分 (H28 年度中に廃棄体、埋設施設の技術基準の整備（性能規定化）)			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・許可基準規則及びその解釈の改訂</li> <li>・事業規則（廃棄体、埋設施設の技術基準（性能規定化））の整備</li> </ul>			
	○研究施設等廃棄物 (H28 年度中に廃棄物性状調査及び論点整理)			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・安全確保に係る技術的検討</li> <li>・許可基準規則及びその解釈の整備</li> </ul>			

図 1.3.1 研究の全体行程(1)

Figure 1.3.1 Overall schedule of this study (1)

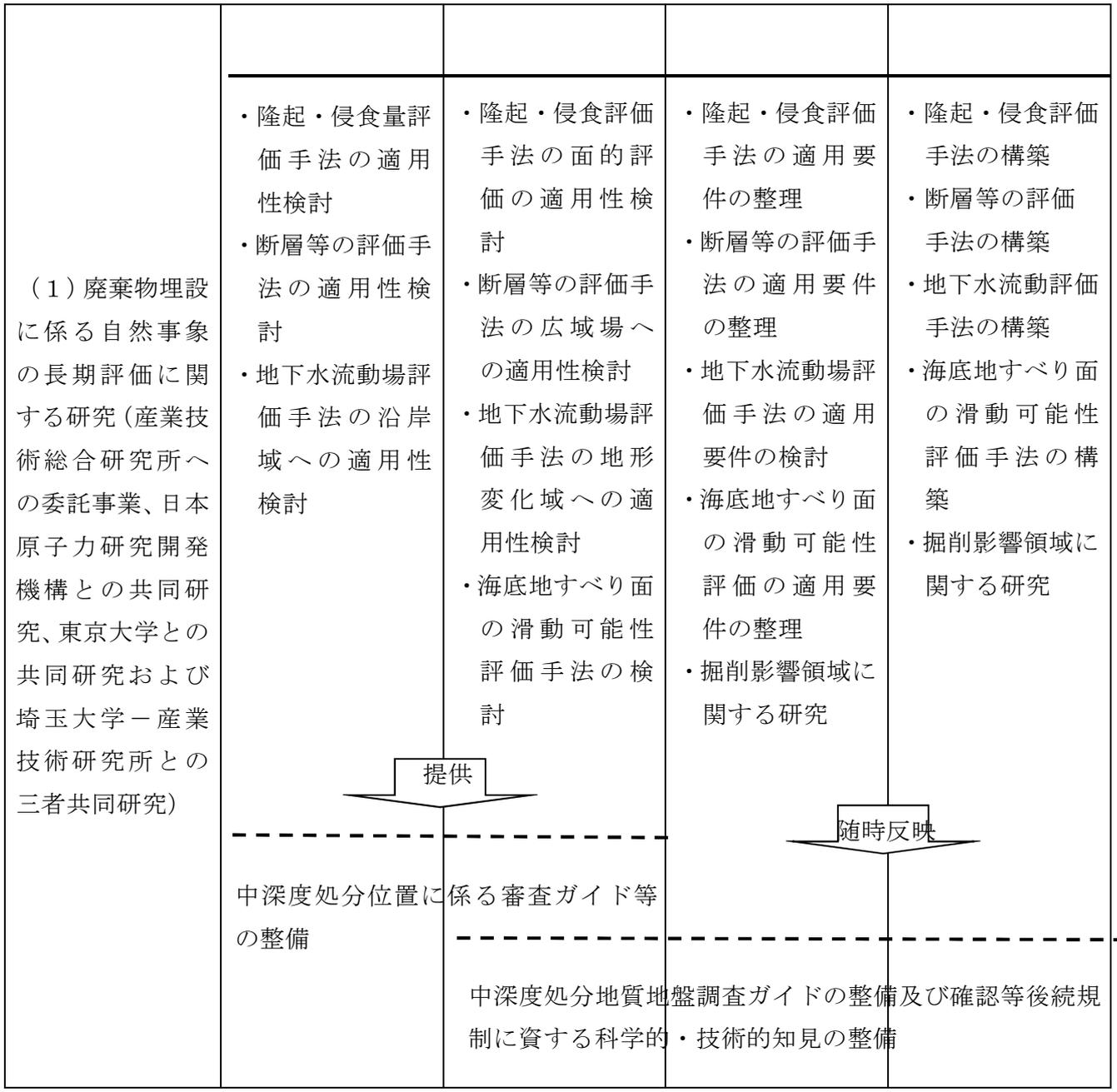


図 1.3.2 研究の全体行程(2)

Figure 1.3.2 Overall schedule of this study (2)

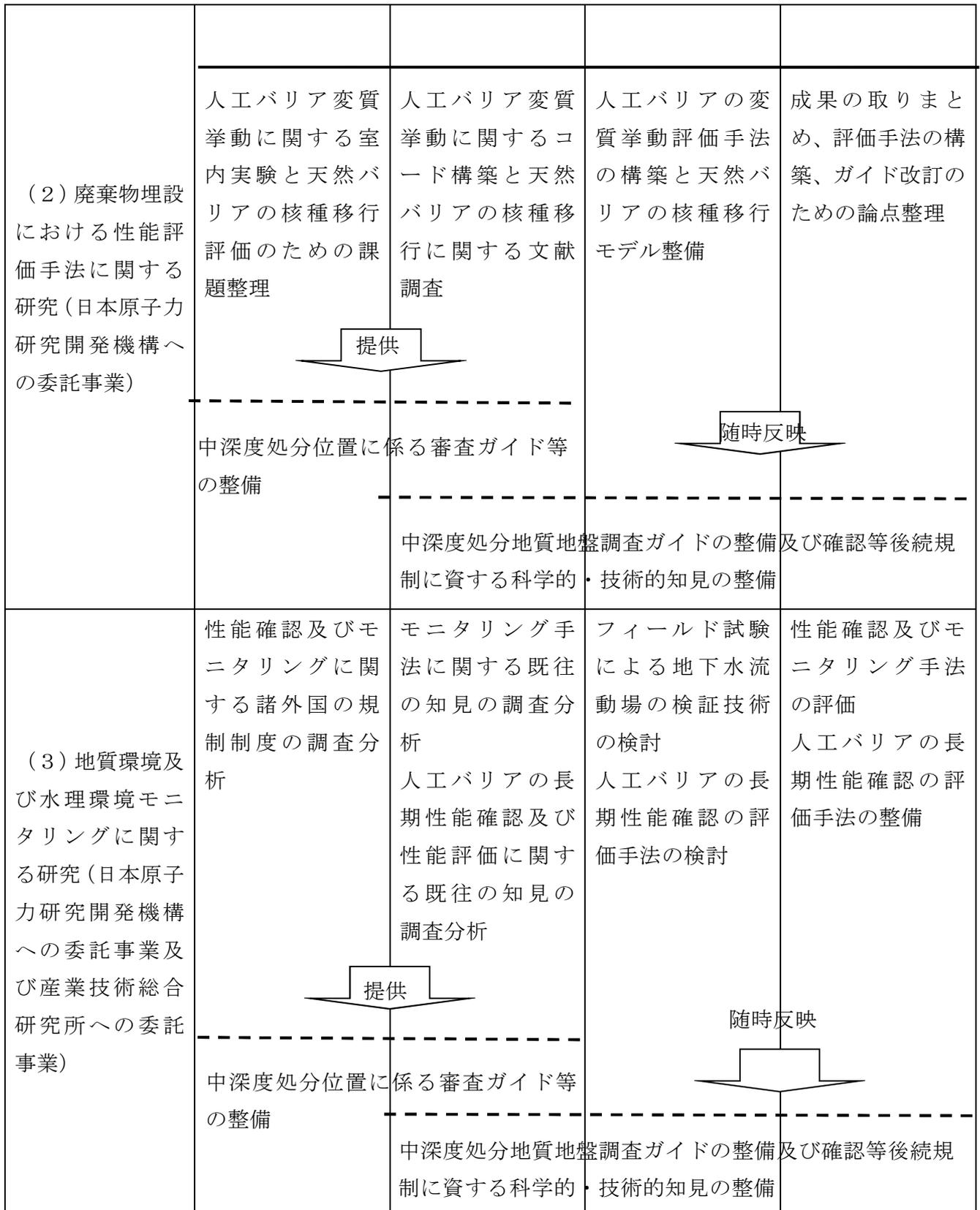


図 1.3.3 研究の全体行程(3)

Figure 1.3.3 Overall schedule of this study (3)

## 2. 本論

### 2.1 廃棄物埋設に係る自然事象の長期評価に関する研究

中深度処分における廃棄物埋設地では、対象となる廃棄物の特性にあった評価期間が設定され、それに基づいて埋設施設が設計される。現在検討されている中深度処分の廃棄物埋設地の位置に係る要件としては、隆起侵食、火山活動、断層活動の自然事象に関して少なくとも 10 万年にわたる評価が求められていることから、以下に示す項目についての知見を取得し、成果の内容を取りまとめた。この研究は産業技術総合研究所の委託事業において実施した<sup>1)</sup>。

#### 2.1.1 中深度処分における隆起及び侵食に関する評価手法の研究

##### (1) はじめに

中深度処分における隆起及び侵食量の評価については、侵食基準指標面の標高とその隆起・侵食開始からの現在までの期間（年代）に基づく手法により、過去数十万年前までカバーできるとされる。本課題では、その評価手法を確立するため、適用される時間スケールが異なる複数の評価手法を用いて適用性を確認した。また、加えて、時間スケールに適用可能性が高い隆起量評価手法の適用可能な空間スケールについても検討を行った。また、隆起速度を侵食速度の指標とする考え方は、廃棄物埋設分野において保守的な扱いとされ一般に用いられる一方で、現在までの地形変化が長期的に継続することを仮定しているため、その継続性を過去数十万年間の複数回の海水準変動サイクルの中で検証する必要がある。したがって、長期的な埋設深度の変動を評価するためには、過去長期間にわたる隆起速度と侵食速度の評価を複数手法により検討することが重要である。現在、侵食速度については地球化学指標として宇宙線生成核種を用いた評価手法の適用が進められているが、主としてボーリング孔を用いたものであるため、点での評価が中心であること、また、適用事例が十分得られていないという課題がある。そのため、面的な侵食を評価するために、同一地域における変動地形学的手法による隆起評価との比較検討を行い、深度の減少評価に用いられている隆起評価の適切性を判断し、廃棄物埋設地における深度変化の評価手法を構築した。

##### (2) 時間スケールの異なる隆起及び侵食量評価手法について

本事業では、時間スケールの異なる複数の隆起評価手法（測地、段丘面高度、侵食小起伏面）と侵食（削剥）評価手法（ダム堆砂量、堆積盆の堆積物量、宇宙線生成核種年代、熱年代）に関連して、各評価手法の基礎となる地形・地質・地質構造の情報をまとめた<sup>1)</sup>（表 2.1.1）。表 2.1.1 では地域的な適用性について 4 段階で評価している。隆起速度評価手法のうち測地学的手法としては GPS 測量（測位）と水準測量があり、それらの時間スケールは  $10^2$  年オーダー以下とされ、 $10^3 \sim 10^5$  年以上の長期間を対象とした他の手法とは整合的な値が得られていない。多くの場合、隆起速度は一定ではなく、通常の隆起速度とは異なる

隆起が大地震などのイベントによって引き起こされる例は、1946年の南海地震で観測されている<sup>2</sup>。段丘面高度に基づく手法の時間スケールは $10^3\sim 10^5$ 年オーダーであり放射性廃棄物の埋設処分の $10^5$ 年オーダーと合致しており、沿岸域においては過去約10万年ごとに形成された海成段丘の分布が小池・町田<sup>3</sup>にまとめられている。また近年では、隆起量の指標となる旧汀線付近で堆積した堆積物である前浜・後浜堆積物を堆積相解析により認定しない限り正確には隆起量を見積もることはできないことから、堆積相解析とルミネッセンス年代測定法を組み合わせた評価手法も用いられてきている<sup>1</sup>。この手法では、火山灰層序に依存しないことから適用性が高いことが推測される一方で、旧汀線から離れた露頭では隆起量を過小評価するといった課題があり注意が必要である。内陸部においては中部地方以北では河成段丘がよく発達することから $10^5$ 年オーダーでの評価が可能とされる。この手法では、特に、同一河成段丘面内の形成時期の差異や風成層の一部欠損の可能性を考慮した河成段丘面の対比、堆積段丘を削る同時代の侵食段丘の誤認による隆起量の過大・過小評価の可能性、隆起量と河川の下刻量との相対的關係を考慮した隆起量評価の考え方が田力<sup>4</sup>、幡谷<sup>5, 6, 7</sup>、吉山・柳田<sup>8</sup>等によって取りまとめられている。侵食小起伏面高度に基づく手法の時間スケールは $10^6$ 年オーダー以上の長期であり第四紀全体の平均的な隆起量は評価できるが、 $10^5$ 年オーダーの評価は、その適用性を別の手法で検証する必要がある。一方で、侵食速度評価手法の適用可能性に関して、ダム堆砂量を用いた手法では、時間スケールが $10^2$ 年オーダー以下と放射性廃棄物の埋設処分の評価に用いるのは適当ではない。堆積盆の堆積物量を用いた手法は、その物理量を正確に推定することや適当な火山灰層がある場合を除いては堆積年代を推定することが難しいことから、信頼度が高いデータを取得することが一般的には困難であるとされる。宇宙線生成核種を用いた手法は、原理的には、異なる2点以上の深度でその濃度を求めることによって適用することができるものの、5点以上の深度で濃度を求めることが望ましいとされるため、適切なサンプリングが必要である<sup>9</sup>。時間スケールは $10^2\sim 10^6$ 年オーダーであり、放射性廃棄物の埋設処分に対して用いることができる可能性がある。熱年代法は、時間スケールが $10^6$ 年オーダー以上の長期であり、また現状のアパタイトやジルコンを用いたフィッシュトラック法やウラン-トリウム法などでは、比較的険しい山岳地域のみが適用可能な地域となる。以上のことから、隆起速度評価手法においては適用性が高い手法も見られるものの、侵食速度評価手法では適用性があることにとどまり、今後も継続して研究する必要性が示された。

侵食過程の中でも沿岸域における河川下刻については、氷期における最大下刻量の見積もりに関して、従来の最大海水準低下量に基づく手法では過大評価されることについて、沖積層基底礫層（BG層）に基づく手法ではそれを避けられることが示された<sup>10, 11</sup>。また、完新世堆積物の記載が詳しく行われている八戸地域においては、その削剥耐性を検討し、海退に伴う侵食基準面の低下が起こった際には容易に削剥されるとした。海退により陸化する可能性がある埋没谷・海底谷に関しては、下北半島東部においてその表層地層や流路

位置を検討し、中山崎以北の北部地域と以南の南部地域では、沖積層や洪積層で構成される表層地質と追跡できる海底谷の連続性に、ともに大きな違いがあることが確認された。

隆起量評価手法及び侵食量評価手法において、それぞれ、中深度処分に適用可能性が高い手法が明らかになったことから、今後はこれらの手法に対して、審査に適用するときの課題について、検討・整理する必要がある。

表 2.1.1 隆起・削剥評価手法の手法・対象・時間スケール・適用性のまとめ

Table 2.1.1 The summary of target landscape, usable time-scale and applicability about each evaluation method of uplift and incision rates

手法・指標	対象	時間スケール*1	適用性*2						
			沿岸域				内陸部		
			低地	台地	丘陵	山地	盆地	山地	
隆起	測地 GPS測位 水準測量	標高	≤10 <sup>1</sup> 年	◎	◎	◎	◎	◎	◎
			≤10 <sup>2</sup> 年	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	段丘面高度	海成段丘	10 <sup>3</sup> ~10 <sup>5</sup> 年	◎	◎	◎	×	—	—
		河成段丘*3	10 <sup>3</sup> ~10 <sup>5</sup> 年	○	◎	◎	○	◎	○
	侵食小起伏面高度	侵食小起伏面	≥10 <sup>6</sup> 年	—	—	—	○	—	○
	堆積深度+年代	海成堆積物(露頭)	10 <sup>6</sup> ~10 <sup>8</sup> 年	△~○	○	○	○	○	○
	埋没深度+年代	海成堆積物(コア)	10 <sup>6</sup> ~10 <sup>8</sup> 年	○	○	○	×	○	×
固化深度+年代	火成岩(露頭)	10 <sup>6</sup> ~10 <sup>8</sup> 年	×	×	×	○	×	○	
削剥	ダム堆砂量	ダム集水域	10 <sup>1</sup> ~10 <sup>2</sup> 年	×	△	△	○	△	○
	堆積物量	扇状地	≥10 <sup>4</sup> 年	—	△	△~○	△~○	△~○	△~○
		三角洲	≥10 <sup>4</sup> 年	△~○	—	—	—	—	—
		堆積盆	≥10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup> 年	△~○	×	×	—	△~○	—
	宇宙線生成核種	集水域	10 <sup>2</sup> ~10 <sup>4</sup> 年	△~○	△~○	○	○	△~○	○
		侵食面	10 <sup>3</sup> ~10 <sup>6</sup> 年	△	△	○	○	△	○
熱年代	露頭orコアの削剥史	10 <sup>6</sup> ~10 <sup>8</sup> 年	×	×	×	○	×	○	

\*1 時間スケールは10<sup>x</sup>年オーダーで表示する。

\*2 適用性の区分 ◎=適用性高い, ○=適用性あり, △=適用性低いor一定条件下で適用可,

×=適用性極めて低いor適用不可, —=存在しない

\*3 河成段丘による隆起評価手法の適用地域は中部地方以北に限られる。

出典) 産業技術総合研究所 (2019) <sup>1</sup>

### (3) 隆起量の空間スケールについて

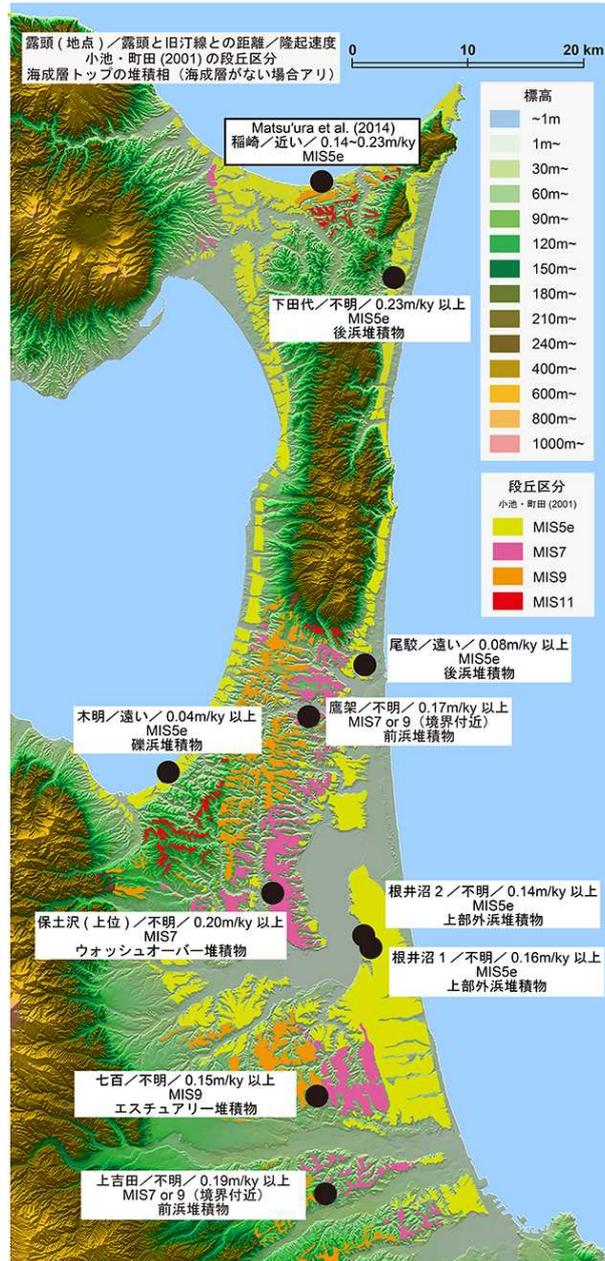
中深度処分の時間スケールに適用可能性が高い段丘面を使った隆起量評価手法の中でも、海成段丘を使った評価手法は沿岸域において適用性が高い。そこで、海成段丘に基づく評価手法を用いて、どの程度の範囲までを同じ隆起量として良いか、隆起量の空間スケールの検討を行った。

これまで、隆起量評価については、小池・町田<sup>3</sup>の研究成果が主に利用されてきた<sup>12</sup>。この研究において、堆積年代は主に火山灰層序に基づき決定され、隆起量に関しては、間氷期の海面高度の指標から評価している。しかし、適切な火山灰層がない場合は段丘面の形成順で堆積年代を推定するしかなく、また、陸成層の層厚を一定とすると段丘崖近傍で

は隆起量を過大評価するなどの問題点もあった。そこで、ルミネッセンス年代測定法による堆積年代の決定と、詳細な堆積相解析による海面指標の認定とを組み合わせる手法を確立し、広範囲に海成段丘が発達している青森県の太平洋側（上北平野・下北半島）をモデルフィールドとした隆起量評価を適用した（産業技術総合研究所<sup>1, 10, 13</sup>）。委託事業による露頭調査から得られた隆起速度と同地域における先行研究（宮内<sup>14</sup>；田中ほか<sup>15</sup>；小池・町田<sup>3</sup>；Matsu'ura et al.<sup>16</sup>；宮崎・石村<sup>17</sup>）を合わせてみると、地域によって隆起速度が異なる傾向が確認できた（図 2.1.1）。なお、委託事業では、旧汀線付近に限らず露頭のある位置での隆起量を示したため、どの場所でも隆起速度を過小評価しており（図 2.1.2）、一方で、先行研究間では上北平野南端の八戸から下北半島北部の稲崎までおおむね一致する傾向が確認できた（図中の本課題と書かれた点が委託事業による隆起速度。三角は推定される上限値で、丸点と星点が太平洋側と陸奥湾側の露頭で見積もられた値。）。

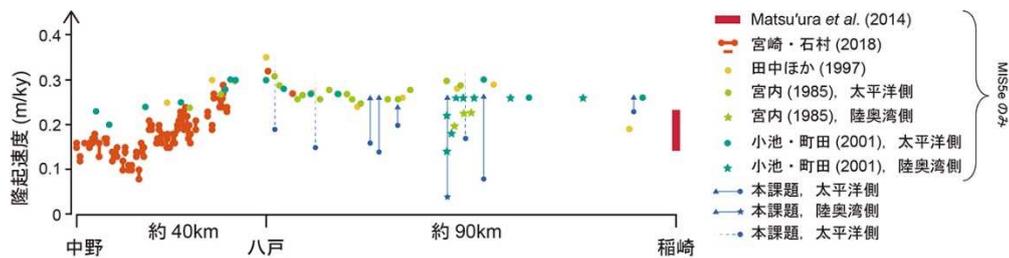
以上のことから、広範囲に連続的に段丘面が発達している地域においても、隆起量を正確に見積もると地域によって隆起量が異なる可能性があり、可能な限り埋設地とその近傍において隆起量进行评估することが望ましいと考えられる。

また、産業技術総合研究所<sup>1, 10, 13</sup>は、隆起速度評価手法の中でも、特に海成段丘の浅海堆積物へのルミネッセンス年代測定法の適用性についても検討を行った。異なる地質環境のカリ長石を用いてもモデルフィールドと同様にルミネッセンス年代測定法が適用可能かを信号の減衰特性を比較することで検討した結果、地域間では違いが見られなかったことから、いかなる地域でも手法が適用できる可能性が示唆された。また、単粒子法の適用により測定時間を短縮し、より多くのデータを得ることで年代の誤差を小さくできるか検討した結果、発光しない粒子が多く存在することで、測定時間の短縮効果が得られないことが分かった。確立した隆起速度評価手法の中でも個々の項目について改善を試み、より精度の高い手法にしていくことが重要である。



出典) 産業技術総合研究所 (2020) <sup>10</sup> (一部編集)

図 2.1.1 青森県上北平野・下北半島における委託事業に基づく隆起速度マップ  
Figure 2.1.1 Map of uplift rates based on contract research of Kamikita Coastal Plain and Shimokita Peninsula, Aomori Prefecture



出典) 産業技術総合研究所 (2020) <sup>10</sup> (一部編集)

図 2.1.2 青森県上北平野・下北半島における先行研究並びに委託事業による隆起速度  
 Figure 2.1.2 The uplift rates based on previous researches and contract research of Kamikita Coastal Plain and Shimokita Peninsula, Aomori Prefecture

(4) 宇宙線生成核種を用いた面的侵食速度の評価手法

本事業では、流域の面的侵食速度の評価手法について、松四ほか<sup>18</sup>などにに基づき、宇宙線生成核種を用いた手法を概説している<sup>13</sup>。流域内の斜面において、宇宙線が核種を顕著に生成させる深度（地表から 2 m 程度）までの斜面物質が削剥によって除去されるのに要する時間が、核種の平均寿命（<sup>10</sup>Be や <sup>26</sup>Al であれば~10<sup>6</sup>年）よりも大幅に短く、放射壊変が無視できるとき、流域斜面の空間平均的な削剥速度  $\bar{D}$  (g m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>) は、流域出口で採取した鉱物粒子中の宇宙線生成核種の平均濃度  $\bar{C}$  (atoms g<sup>-1</sup>) により以下の式で近似される。

$$\bar{D} = \frac{\bar{P} \times \Lambda}{\bar{C}} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (2.1.1)$$

ここで、 $\bar{P}$  (atoms g<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>) は流域内地表面の核種生成率の平均値、 $\Lambda$  (g m<sup>-2</sup>) は宇宙線の平均減衰長である。なお、ここでの削剥は、ソイルクリープやガリー侵食、表層崩壊といった地表面における宇宙線の平均減衰長の範囲内の削剥作用までであり、豪雨や地震によって発生する深層斜面崩壊は、より深い領域までの土砂を供給することになるため原理的に評価できない。得られた削剥速度は、流域出口に後氷期に形成された扇状地の体積から見積もられる流域の削剥速度と整合的であるとの報告がある<sup>19</sup>。産業技術総合研究所<sup>13</sup>では、上流域に小規模な表層崩壊しか存在しない花崗岩地域の土石流堆積物中の宇宙線生成核種濃度を測定した結果、花崗岩れき中に含まれる宇宙線生成核種量がれき以外のマトリックス（粗砂）よりも優位に多いことが分かり、その新鮮で堅硬な花崗岩が斜面上で長時間露光する間に宇宙線生成核種を多く蓄積した可能性が示唆された。また、山地斜面の原位置から低位段丘までの運搬過程において移動距離の短い運搬と停止（堆積）を繰り返し、その間に核種の蓄積量が増加した可能性も考慮する必要がある。従来、流域の平均削剥量の推定は、地表面付近での土砂移動を中心にモデル化されているため、比較的新鮮堅硬で宇宙線生成核種量の多い花崗岩れきの存在など、評価対象の流域の実態に即した削剥と土砂運搬のモデルを再構築することが必要と考えられる。

本事業において、日本のように侵食速度が速い地域では、測定に足る宇宙線生成核種濃度を得るためには 30~60 g 以上の大量の石英を必要とすることから、その抽出・純化するための前処理作業の検討も行った。特に石英と他の鉱物との物性の差を利用した物理的精製法（遠心バレル研削）について検討を行った結果、遠心バレル研削のみですべての残存鉱物を除去することは難しいものの、長時間処理することで石英表面の清浄度が上がる可能性が示唆され、その処理を含めた石英の純化方法が示された<sup>13</sup>。

以上の検討により、宇宙線生成核種による侵食速度評価手法は、分析対象となる石英の純化方法や、侵食耐性が異なる岩石に基づく一様でない削剥過程や削剥物の運搬過程を含めてどのようにモデル化するかなど、今後検討する必要がある項目はあるが、大規模な深層斜面崩壊が発生しない流域の侵食速度評価に有用な方法であると考えられる。

## 2.1.2 中深度処分における断層等に関する評価手法の研究

### (1) はじめに

中深度処分における廃棄物埋設地は、将来 10 万年間にわたって断層活動による断層の著しい変動が生ずるおそれのない区域に設置しなければならない。現行の浅地中処分の第二種廃棄物埋設許可基準規則では、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場合中期更新世以降（約 40 万年前以降）まで遡って地形、地質・地質構造、応力場等を総合的に検討した上で断層の評価を行うことが必要であるが、中深度処分施設は、地下 70 m を超える深部に設置されこの深度の断層について直接観察による評価ができないことから、特に物理探査による評価手法及びその妥当性について科学的・技術的知見の蓄積が必要である。この研究は産業技術総合研究所の委託事業において実施した<sup>1,10</sup>。

### (2) 物理探査を使った断層の長さの評価手法

本事業では、地表から断層を探査するために用いられる各種物理探査法の特徴や、広域空中探査・広域地表探査・精密地表探査の各探査段階別に適用可能な物理探査手法の有効度について取りまとめた（表 2.1.2）<sup>1</sup>。その中でも、反射法地震探査が断層や地下構造の評価に最も有効度が高く、これを主とした物理探査の実施が考えられる。また、廃棄物埋設候補地周辺に断層が存在する場合に、どのようにその長さを判定するかを認定フローにまとめた（図 2.1.3）。反射法地震探査を行う上で問題点となりうる受振点の設置に関しては、既存構造物の存在による制約があるが、地形的な要因は大きな問題にはならない。一方で、分解能は探査仕様や現地状況に依存し、その探査測線の設定と探査仕様の決定には極めて高度な専門的知識を要するため、その妥当性について判断指標という形で整理することは困難であると考えられる。そのため、断層の長さを判断するための反射法探査の探査測線・探査仕様の妥当性については、有識者や専門家による検討を含めた評価の在り方の検討が必要である。

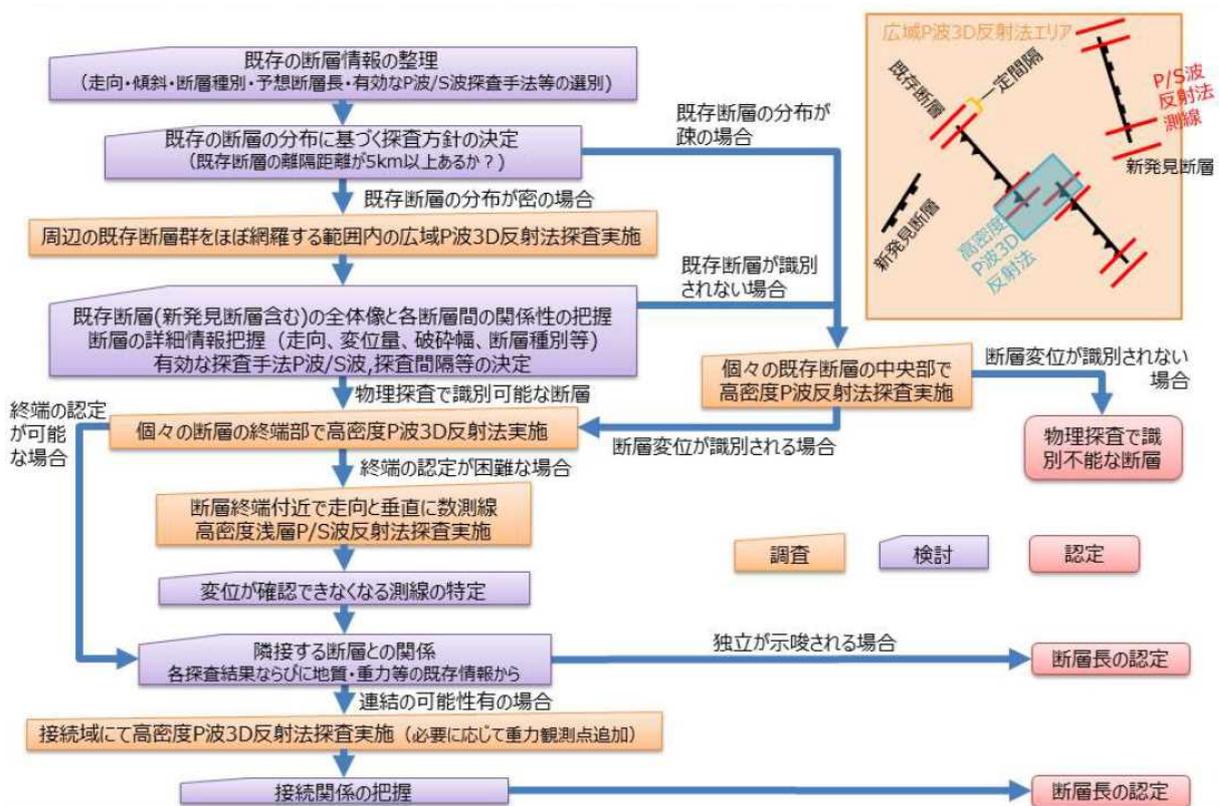
表 2.1.2 地表からの調査段階における各種物理探査手法の適用性のまとめ

Table 2.1.2 The summary of applicability of Geophysical exploration methods from the surface of land

調査段階	手法	有効度	得られる情報	データ属性	活用場面	コメント
広域 空中 探査	電磁法探査	○	地下の比抵抗構造・状態	2D (3D)	地下の比抵抗構造の境界による断層の推定	ヘリコプターを用いた稠密な空中電磁探査が実用化されている
	磁気探査 (磁力探査)	○	地下の磁性体分布・構造	2D (3D)	地下の磁性体分布の境界による断層・岩相境界の推定	ドローンを用いた稠密な磁気探査が実用化されている
	重力探査	○	ブーゲー異常値(勾配)の平面分布	2D (3D)	断層・岩相境界の有無を推定するための事前検討	ヘリコプターを用いた稠密な空中重力偏差法探査が実用化されている
広域 地表 調査	反射法地震探査(2D)	◎	弾性速度境界(地層境界)の構造	2D	探査測線上の断層の存在の有無	陸上においてはP波およびS波地震探査の記録が良好な方を選択
	音波探査(2D)	◎	弾性速度境界(地層境界)の構造	2D	探査測線上の断層の存在の有無	海域におけるP波反射法地震探査
	三次元反射法地震探査	◎	弾性速度境界(地層境界)の構造	3D	広域(面的)の断層の存在の有無を調べる概査	P波反射法のみ適用可
	屈折法地震探査	△	地下の弾性波速度構造・分布	2D	弾性波速度の境界による断層存在の推定	探査深度の5~10倍の測線長が必要
	電気探査・電磁法探査	△	地下の比抵抗構造・状態	2D	地下の比抵抗構造の境界による断層の推定	比抵抗構造と断層位置が一致しない場合がある
	精密重力探査	○	ブーゲー異常値(勾配)の面的・線的分布	2D 1D	探査位置or探査測線上の断層存在の推定	重力値の異常から地下構造を推定する
精密 地表 探査	三次元反射法地震探査	◎	弾性速度境界(地層境界)の構造	3D	断層の有無・連続性を確認するための精査	・P波反射法のみ適用可 ・海域においては超高分解能3Dの手法あり
	地中レーダー	○	表層付近のレーダー波による反射構造	2D	地下の断層が表層まで達しているかどうかの判断	表層付近の情報に限られる
	三次元電気探査	○	地下の比抵抗構造・状態	3D	電磁気的特性の境界による断層存在の推定	比抵抗構造と断層位置が一致しない場合がある
	三次元電磁法探査	○	地下の比抵抗構造・状態	3D	地下の比抵抗構造の境界による断層の推定	ヘリコプターを用いた稠密な空中電磁探査が実用化されている
	磁気探査(磁力探査)	○	地下の磁性体分布・構造	2D (3D)	地下の磁性体分布の境界による断層・岩相境界の推定	ドローンを用いた稠密な磁気探査が実用化されている
	精密重力探査	○	ブーゲー異常値(勾配)の平面分布	2D 平面	探査位置or探査測線上の断層存在の推定	・重力値の異常から地下構造を推定する ・絶対重力計の使用を推奨

[注] ◎:重要な情報となる、○:補完的な情報となる、△=間接的な情報となる

出典) 産業技術総合研究所 (2019) <sup>1</sup>



出典) 産業技術総合研究所 (2019) <sup>1</sup>

図 2.1.3 反射法地震探査による断層の長さの認定フロー

Figure 2.1.3 The certification flow of the length of fault using seismic reflection survey

### (3) 海底地すべり面の再滑動性の評価について

本事業において、既存文献に基づき海底地すべりの発生要因や大規模化する要因について取りまとめたほか、陸上地すべりの分類や調査法を参考に過去の地層堆積時又は堆積後の未固結～半固結時に発生した海底地すべりに起因する地すべり面が再滑動する要因と中深度処分の埋設地に与える影響について検討した<sup>1</sup>。その結果、海底地すべり面が中深度処分の埋設地を直接的に破壊するような滑動を引き起こす可能性は低く、将来 10 万年にわたって保持しなければならない離隔距離 70 m を低減させるような可能性を検討すべきと結論付けた。一方で、海底地すべりブロックの再滑動性自体は、一般的な斜面の安定解析によって評価可能であり、すべり面そのものについてはすべり面の粘着力 (c) とせん断抵抗角 ( $\phi$ ) により評価されるため、海底地すべりの露頭から得た試料による一面せん断試験を実施する必要があることが示唆された。間隙水圧を制御した一面せん断試験の実施可能性の検討のため、既存の大型真三軸試験装置を用いた一面せん断試験用治具の設計を行った。また、千葉県房総半島の黄和田層中に存在する海底地すべり露頭から試料を採取し、基礎物性値の測定及び、力学-透水試験を行った結果、海底地すべり面の上位の火山灰層と下位のシルト岩層の間に、一軸圧縮強度と透水性において大きな差異があったことから、

海底地すべり面及びその近傍において力学的・水理学的に不連続性が存在し、斜面の安定性が損なわれれば再滑動しやすい状態にあると示唆された。

### 2.1.3 中深度処分における地下水流動に関する評価手法の研究

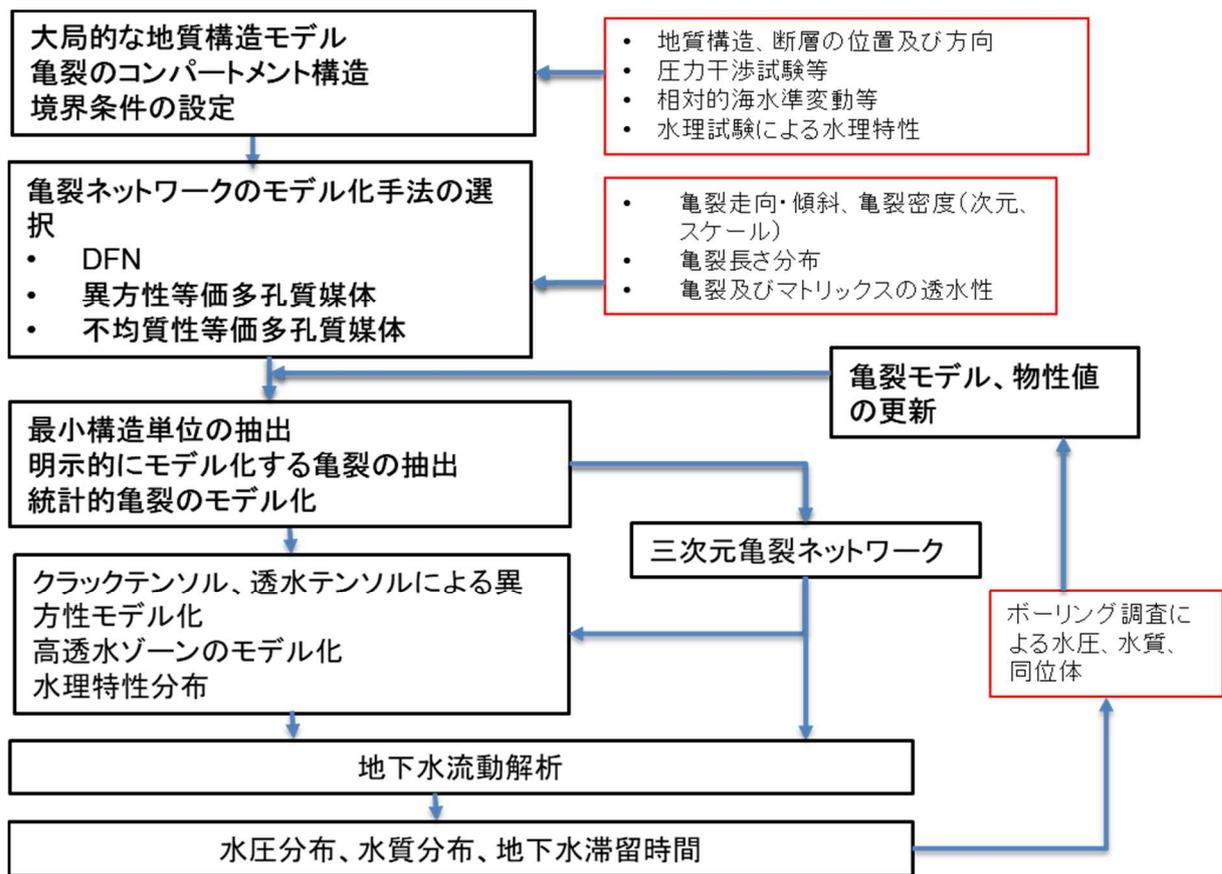
#### (1) はじめに

約 10 万年周期で起きる海水準変動は、淡水及び塩水が複雑な分布で存在する沿岸域において地下水流動系の変動に影響することから、地下水流動系の長期的な変動を評価するためには、過去の海水準変動等に伴う地下水流動と水質の変動等の評価手法の整備が必要である。そこで、淡水及び塩水の混合した状況での同位体水文学的評価手法の整備とそれらの結果からの地下水流動系変動の評価手法の整備、長期的な水質履歴の指標となる地球化学的評価手法の整備を行うとともに、塩水－淡水混合系において、海水準変動や隆起・侵食の影響による地下水流動系の評価を原位置ボーリング等のデータを含めて地下水流動の傾向を明らかにし、長期地下水流動系の評価手法に関する科学的・技術的知見を蓄積した。

#### (2) 地下水流動系の評価手法整備における考え方

地下水流動系の考え方の策定については、産業技術総合研究所への委託事業において実施した<sup>1,10</sup>。地下水流動を考える上で、その天然バリアの形態から主に花崗岩等の亀裂性媒体と堆積岩等の多孔質媒体との二種類に区分される。しかし、堆積岩においても、固結度が高い場合等では亀裂を水が流れる例もあり、例えば、日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センターでの研究成果によると、深度 200 m 程度の多孔質な岩盤において、亀裂が主要な透水経路であることが示されている<sup>20</sup>。

地下水流動モデルの構築のためのフロー図を亀裂性媒体の場合は図 2.1.4 に、多孔質媒体の場合は図 2.1.5 に示す<sup>10</sup>。

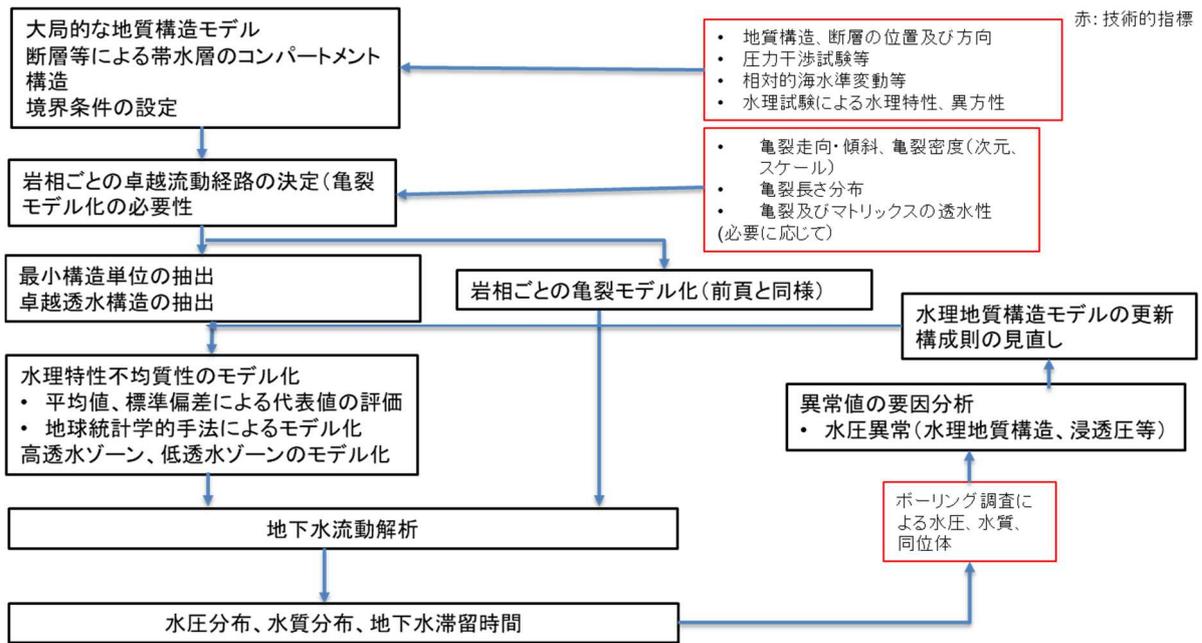


出典) 産業技術総合研究所 (2020) <sup>10</sup>

図 2.1.4 亀裂性媒体における地下水流動モデル構築フロー

Figure 2.1.4 The flowchart for under groundwater-flow conceptual model of fractured media

亀裂性媒体において、亀裂の連続性によって水理的に分離されたコンパートメント構造が存在することが、釜石鉱山における圧力干渉試験などで示されている<sup>21</sup>。亀裂ネットワークをモデル化するときには、亀裂の三次元ネットワークモデルを統計的に構築する手順が含まれるため、亀裂の幾何学情報（走向、傾斜、密度、長さ及びそれらの空間分布）が必要となる。またモデル化の手法としては、個別の亀裂を直接モデル化する方法、クラックテンソル等によって異方性等価多孔質媒体としてモデル化する方法等が考えられる。この中で、亀裂を直接モデル化する手法は計算負荷が大きいために、対象領域が広い場合は現実的な手法ではないと考えられることから、等価多孔質媒体モデルと組み合わせて用いることが適当と考えられる。等価多孔質媒体モデルを構築する際の留意点としては、一定の長さ以上の亀裂をモデルに組み込むための基準を設定すること等が必要となる。なお、等価多孔質媒体モデルにおいても、大規模な高透水ゾーンや断層コア等の低透水ゾーンは地下水流動に大きな影響を与えることから、個別にモデル化する必要がある<sup>10</sup>。



出典) 産業技術総合研究所 (2020) <sup>10</sup>

図 2.1.5 多孔質媒体における地下水流動モデル構築フロー

Figure 2.1.5 Flowchart for under groundwater-flow conceptual model of porous media

亀裂性媒体の支配的な流動経路は岩盤中の亀裂に限られるのに対し、多孔質媒体においては多くの場合、支配的な流動経路は岩盤中の空隙全体となる。しかし、岩相ごとに亀裂が卓越流動経路になっている可能性を検討した上で、亀裂が卓越流動経路となる場合においては、亀裂性媒体と同様のモデル化手順をとる必要がある。

空隙が卓越流動経路と判断される場合の注意点としては、原位置試験等において、透水係数等の水理特性のばらつきを把握し、同一岩相内において、水理特性のばらつきが均一なのか、それとも同一岩相内においても水理特性の異なる部分が存在するのかについて、判断する必要がある。

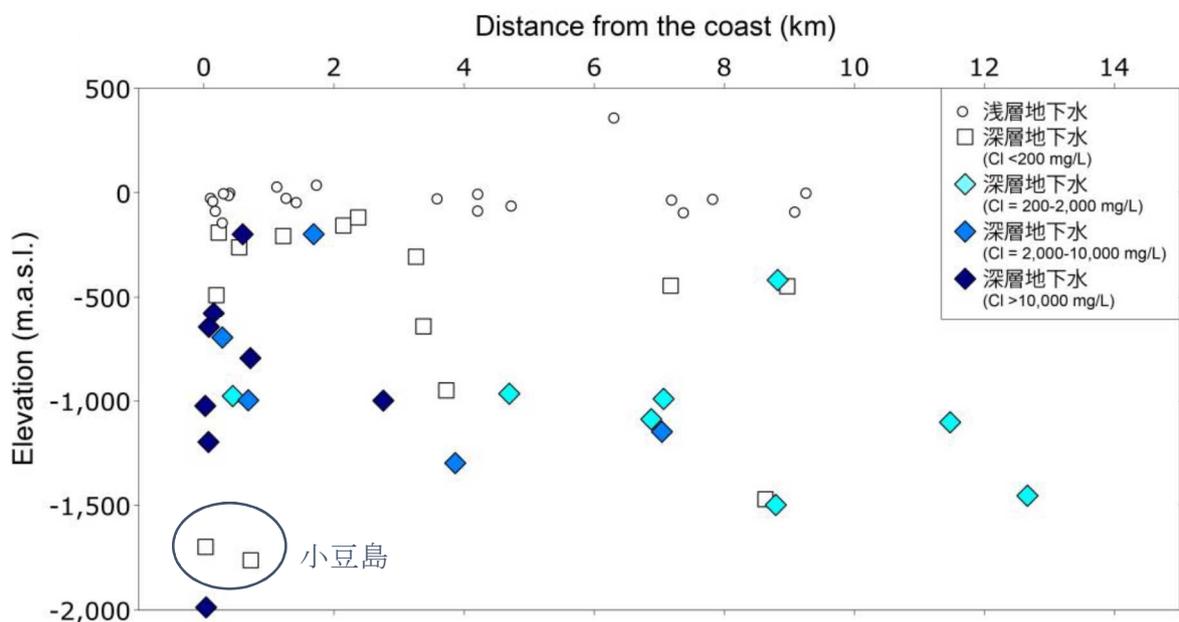
亀裂性媒体と多孔質媒体におけるフロー図を示したが、堆積岩においては、固結度によって多孔質媒体的な性格と亀裂性媒体的な性格を両方併せ持つケースも存在する。実際の天然バリアの考察においては、その岩盤の性質を把握した上で適切な手法を採用するよう十分注意する必要がある。

### (3) 地下水流動履歴の指標となる地球化学的評価手法の整備 (瀬戸内海沿岸地域)

廃棄物埋設地は周辺の地下水の流動が緩慢である、もしくは地下水が滞留している位置に設置することが、核種移行の観点から重要となってくる。亀裂性媒体である花崗岩が主である瀬戸内海沿岸地域において、既存坑井等の地下水を対象として、地球化学的データを指標として地下水の流動履歴を調査し、その滞留性等について研究を行った。この研究は産業技術総合研究所の委託事業において実施した業務内容である。

本調査で対象とした瀬戸内中部沿岸域において、既存井戸を使って、浅層地下水（井戸の孔底深度150 m以浅）と深層地下水（井戸の孔底深度150 m以深）の地球化学的調査を行った。地下水試料の深度、海岸からの距離及びCl濃度を図 2.1.6に示す。沿岸部に広くCl濃度の高い深層地下水（以下「塩水」という。Cl>200 mg/L）が分布しており、Cl濃度が10,000 mg/L以上の地点も少なくない。海岸から5 km以上の比較的内陸部まで塩水が確認できる。このエリアは縄文海進時の浸水域に相当することから、この時期に涵養した海水の可能性はある。

一方、沿岸部であっても、Cl濃度の低い深層地下水（以下「淡水」という。Cl<200 mg/L）が存在する地点もあり、特に1,000 m以深の深層でも小豆島では淡水が存在している<sup>22, 23</sup>。また、浅層地下水については、Cl濃度は最大でも60 mg/L以下であった。



出典) 産業技術総合研究所 (2020) <sup>10</sup>

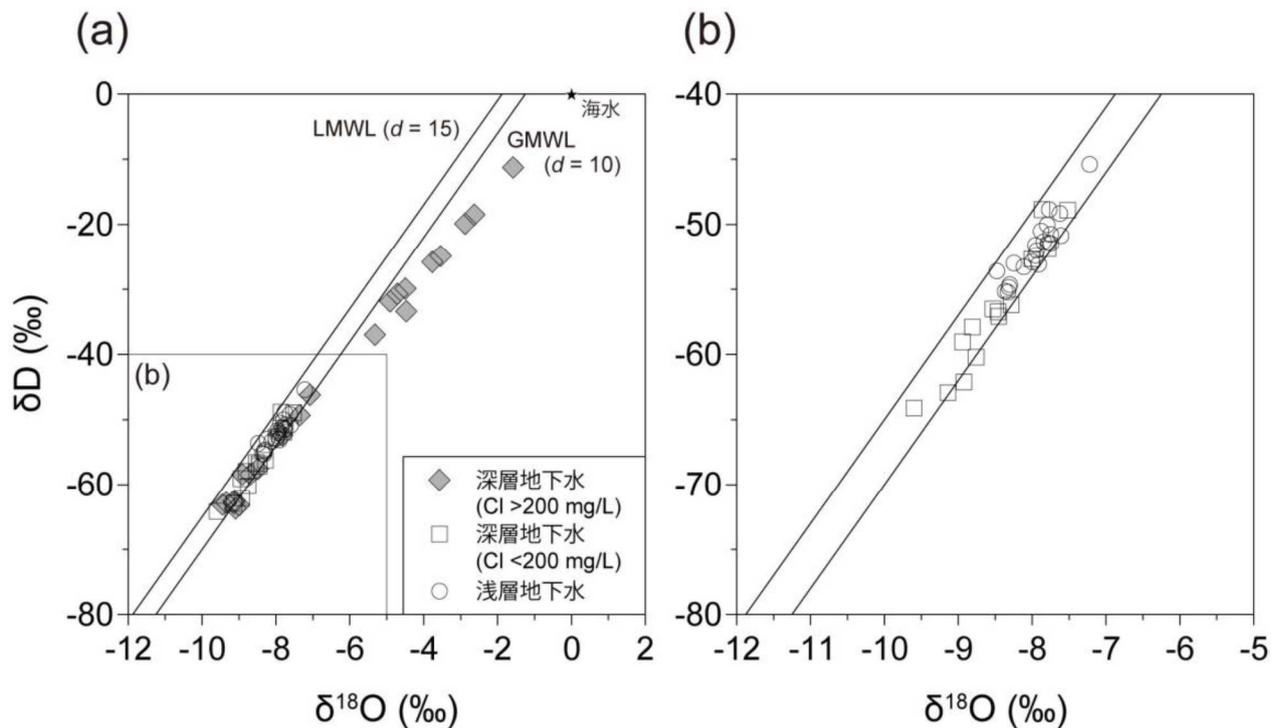
図 2.1.6 浅層地下水と深層地下水のCl濃度と海岸からの距離

Figure 2.1.6 Distance from the coast and Cl concentrations

瀬戸内海沿岸地下水の水素安定同位体比（以下「 $\delta D$ 」という。）及び酸素安定同位体比（以下「 $\delta O$ 」という。）を図 2.1.7 (a) に示す。深層地下水（塩水と淡水）と浅層地下水（淡水）をプロットした図 2.1.7(a)図は基本的に天水線に沿うようにデータがプロットされていることから、天水起源であることを示している。しかし、深層地下水の塩水は、同位体比が高くなるに従って、僅かに天水の範囲から海水の組成にそれていることが確認できた。このことから、起源として天水と海水の混合によって形成されていると判断できる。

深層の塩水を除いた拡大図（図 2.1.7 (b)）を使って淡水系の地下水について詳しく考察した。深層地下水は浅層地下水よりも低い同位体比を示す傾向があることが分かる。現在、広島県東部から岡山県の範囲において、瀬戸内海側へ流下する渓流水で最も低い $\delta D$ は-

56 ‰程度である<sup>24</sup>。図 2.1.7 (b) の浅層地下水の $\delta D$  は-55 ‰~-45 ‰の範囲にあり、現代の天水起源であると判断できる。一方、深層地下水の一部は浅層地下水の範囲に重なるが、大半の試料は $\delta D$  で-64 ‰~-56 ‰の範囲を示している。低い同位体比の天水が形成される原因としては、海から遠い内陸で降る天水（内陸効果）、標高の高い地域で降る天水（高度効果）、低い気温で形成される天水（気温効果）等が考えられており、本地域においては、高度効果及び内陸効果では説明できないことから低い気温で形成された天水と考えられ、現在よりも寒冷的な氷期に涵養された天水起源と解釈できる。

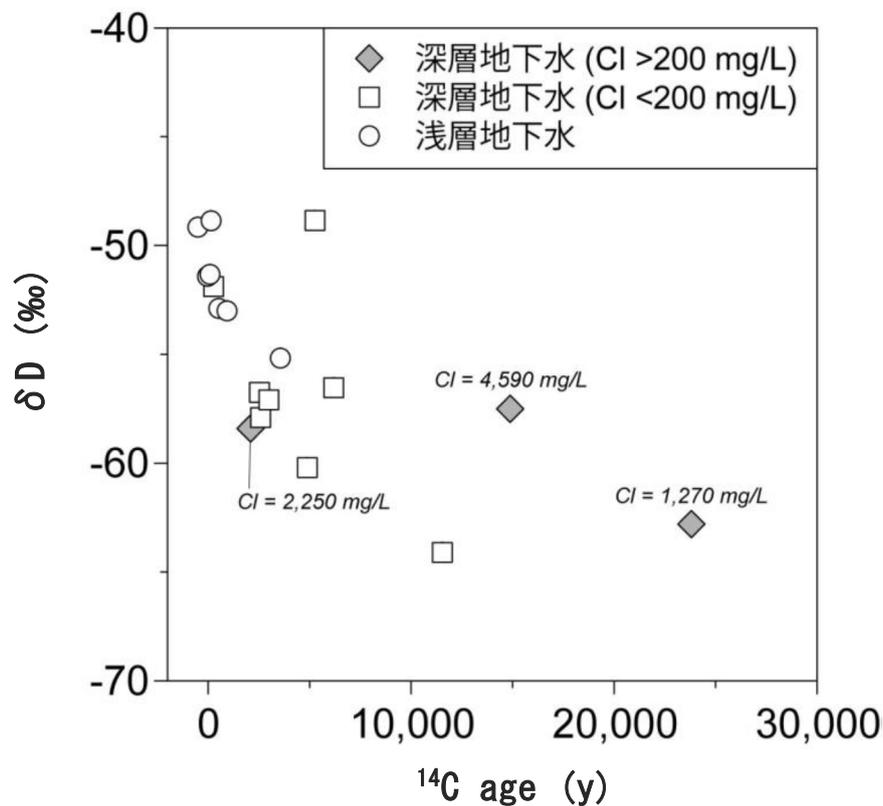


出典) 産業技術総合研究所 (2020) <sup>10</sup>

図 2.1.7 浅層地下水と深層地下水の水素安定同位体比と酸素安定同位体比

Figure 2.1.7 Stable isotopes of water molecule in shallow and deep groundwater

寒冷期に相当する可能性のある $\delta D$  が-56 ‰以下の地下水試料について、<sup>14</sup>C年代と $\delta D$  との関係を図 2.1.8 に示す。浅層地下水については、ほとんどが千年以下の若い年代を示している。深層地下水はそれよりも古い年代を示しており、全体として $\delta D$  が低いほど<sup>14</sup>C年代は古くなっていることが分かる。 $\delta D$  が-60 ‰~-56 ‰程度の試料の年代は数千~6 千年で氷期とはずれがある。しかしながら、 $\delta D$  が-60 ‰よりも低い深層地下水に関しては、縄文海進よりも古い、およそ1 万2 千年よりも前の最終氷期に相当する年代を示していることが確認できる。



出典) 産業技術総合研究所 (2020) <sup>10</sup>

図 2.1.8 水素安定同位体比と  $^{14}\text{C}$  年代値

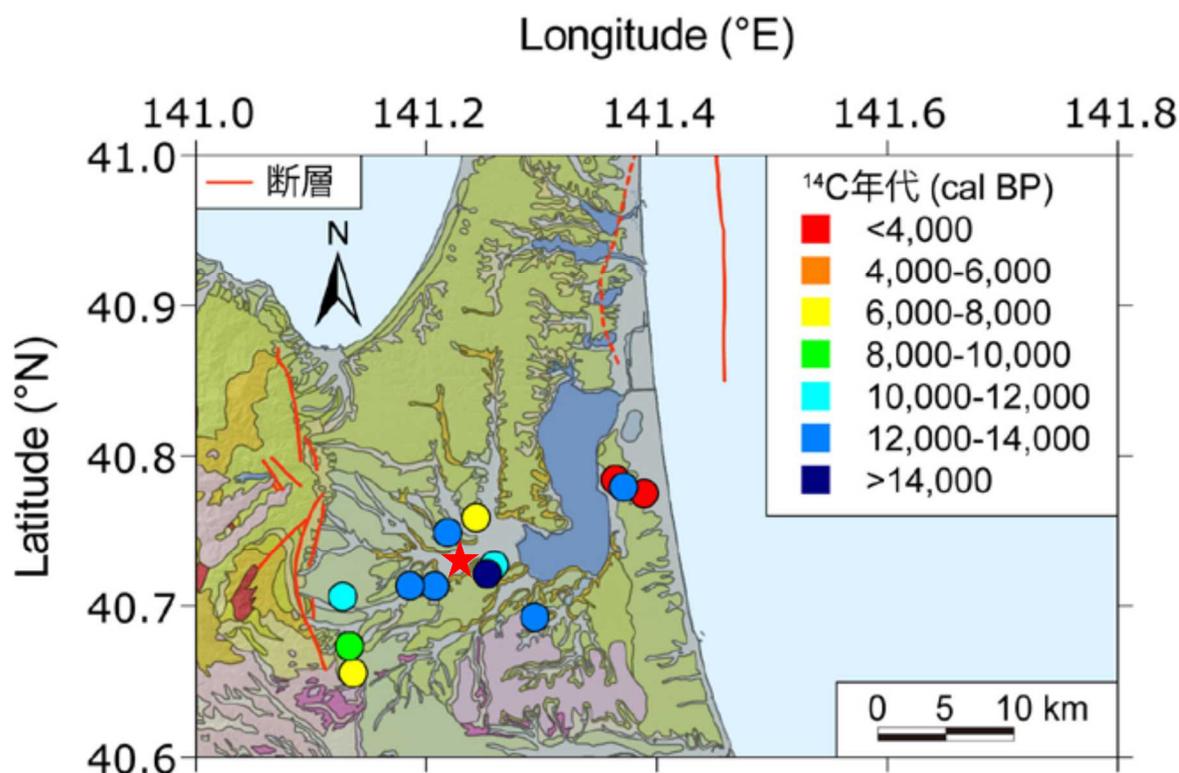
Figure 2.1.8 Stable isotope of water molecule and Carbon 14 age

以上のことから、同一地域においても、縄文海進時に涵養した塩水が賦存する場所や最終氷期以前に涵養した古い淡水が賦存する場所が存在することを示しており、地球化学的指標が、地下水の履歴、滞留性等の評価に有益であることを示している。

#### (4) 既存井戸及びボーリング坑調査を用いた地下水流動評価に関する研究

広域地下水流動の評価は一般的に既存孔井から採水された地下水試料のデータを基に行われる。既存孔井の採水深度は、浅層から深度1,000 m程度の深部まで孔井によって異なっており、基本的には多量の地下水が採取可能な帯水層から採水されている。したがって、その採水深度は広域の地下水流動の評価を行うのに適切な深度に設定されているわけではない。また、採水のために設定されたスクリーンは数百メートルに及ぶこともあり、採取される地下水はその長いスクリーンの全深度に賦存していた地下水の混合水となる。以上のことから、既存孔井から得られた地下水においては、広域の地下水流動を評価するに当たって、適切な深度及び採水方法であるとは必ずしもいえない。そこで、実際に地下水流動評価を目的としたボーリング調査を実施し、地下水流動評価を行うことで、既存孔井を使った評価手法との差異を比較した。

ボーリングは小河原湖西側で実施し、三種類の深度（27.3 - 30.1 m, 39.8 - 45.0 m, 71.0 - 75.9 m）から揚水試料を採取し、それとは別にコアの間隙水も各深度で採取した。既存井戸を使った調査においては、小河原湖周辺の複数の位置で実施した。掘削地点周辺の既存井戸から得られた水試料の放射性炭素同位体比( $^{14}\text{C}$ )の較正年代値(cal BP)は10,000 - 14,000 cal BPと氷期の値を示していた（図 2.1.9）。しかし、小河原湖東側の地下水の $^{14}\text{C}$ 年代値は約4,000 cal BPと、小河原湖西側とは異なる傾向を示したことから、同一の地下水流動系ではない可能性が考えられる。小河原湖西側のボーリングの揚水試料からは深度27.3 - 30.1 mにおいて9,900 - 10,200 cal BP、深度39.8 - 45.0 mにおいて16,100 - 16,400 cal BP、深度71.0 - 75.9 m において10,600 - 10,800 cal BPの年代値を示し、これは氷期に涵養した地下水であることを示している。このデータは周辺の既存井戸の多くのデータと整合的であった。



出典) 産業技術総合研究所 (2020) <sup>10</sup>

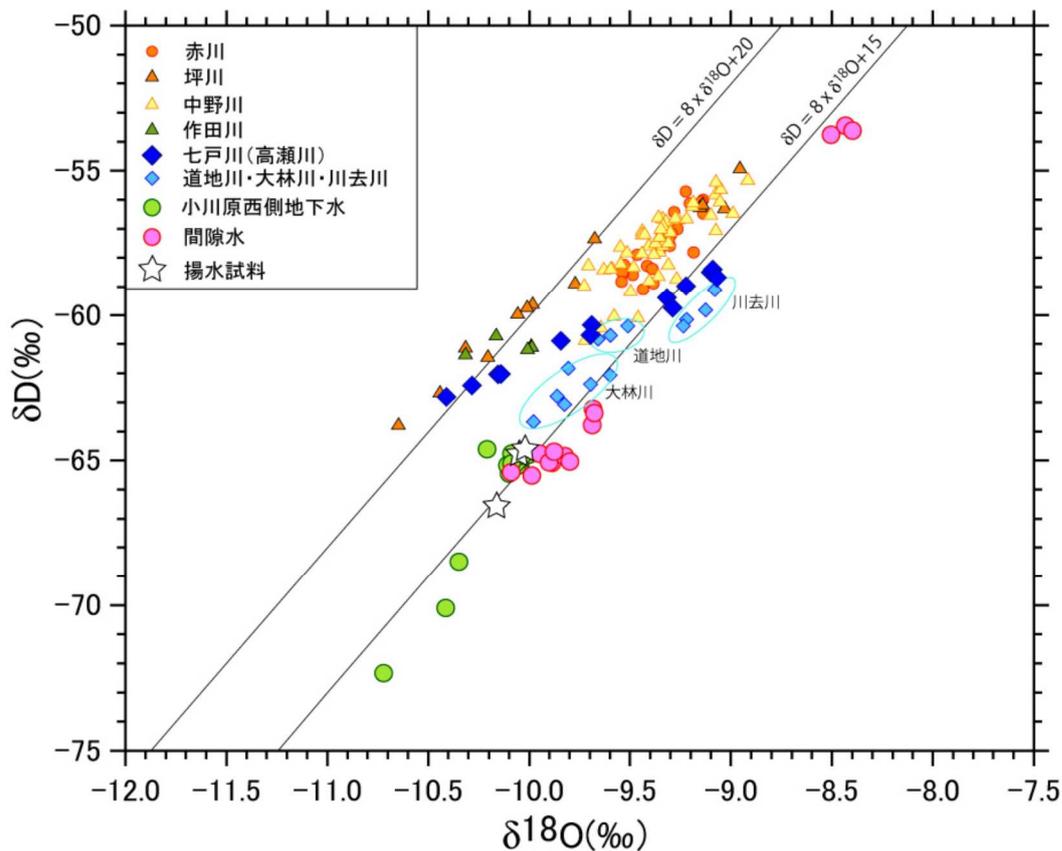
図 2.1.9 ボーリング掘削地点と既存井戸から取られた浅層地下水の  $^{14}\text{C}$  年代値

Figure 2.1.9 Map of borehole point and Carbon 14 groundwater age

水素安定同位体比に関して、ボーリング坑からの揚水試料の水素安定同位体比は最も浅い深度、27.3 - 30.1 m、において-64 %以下であり、周辺の河川 (-63 %以上) よりも低い値を示した。全ての深度の揚水試料及び間隙水試料の水素安定同位体比及び酸素安定同位

体比を図 2.1.10に示す。水の水素安定同位体比及び酸素安定同位体比は涵養時期の気候によって変化することが知られており、全ての揚水試料の水素安定同位体比が  $-64\text{‰}$ 以下の値であることから、現在よりも寒冷な時期に涵養した水であることを示している。ボーリングコア試料から抽出した間隙水試料の水素安定同位体比は、浅部では水素安定同位体比が  $-55\text{‰}$ 前後の高い値が得られたが、深度20 m 以深では安定同位体比は  $-65\text{‰}$ 前後でおおむね一定の分布を示し、河川水より低い値となった。上記の結果は、深度20 m以深においては、最終氷期よりも新しい水の影響が乏しいことを示しており、この結果は $^{14}\text{C}$ 年代の値とも整合的な結果である。

地下水中のトリチウム濃度を測定したが、いずれも検出限界以下であった。トリチウムは半減期が12.3年で、天水に一定濃度以上含まれているため、涵養時期が比較的新しい場合は検出され、年代を測定することができる。今回、未検出であったことは、ある程度古い地下水であることを示しており、 $^{14}\text{C}$ 年代値及び水素安定同位体比の結果と整合的である。

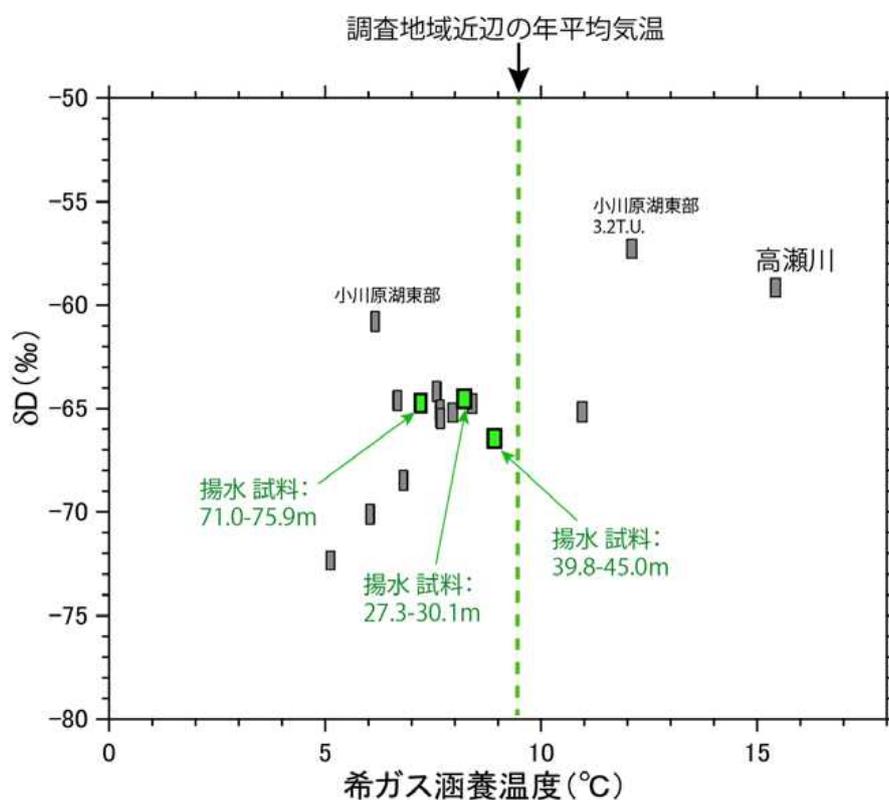


出典) 産業技術総合研究所 (2019, 2020) <sup>1, 10</sup>

図 2.1.10 揚水試料、間隙水、小川原湖西側浅層地下水及び河川水の水素・酸素安定同位体比

Figure 2.1.10 Stable isotope of water molecule, groundwater, pore-water, shallow groundwater and river water

加えて、既存井戸からの水試料、ボーリング抗からの揚水試料（緑プロット）、既存井戸からの水試料（灰色、小川原湖東部及び記載無しは小川原湖西部）、及び河川からの水試料（灰色、高瀬川）の希ガス濃度を分析し、涵養温度を計算し、 $\delta D$ と比較した（図 2.1.11）。希ガス涵養温度は、一般に涵養地点の年平均気温を反映しているといわれている<sup>25</sup>。希ガス涵養温度と水素安定同位体との関係性は、おおむね正の相関関係が確認できた。詳細を確認すると、水素安定同位体比が-65 ‰付近において、温度がばらついている。既存井戸のデータは井戸の幅広い深度から取られた地下水の混合水であるため、複数起源の水が混合していることによる影響の可能性がある。しかし、ボーリング抗からの揚水試料も若干ばらついていることから、希ガス濃度分析の精度の問題も懸念される。今後、ボーリング坑からの水試料の分析が進むことで詳細が判明する可能性がある。



出典) 産業技術総合研究所 (2020) <sup>10</sup>

図 2.1.11 ボーリング抗からの揚水試料及び浅層地下水の水素安定同位体比と希ガス涵養温度の関係 <sup>10</sup>

Figure 2.1.11 Stable isotope of water molecule, groundwater, pore-water, shallow groundwater and river water

ボーリングの揚水試料の<sup>14</sup>C年代、水素酸素安定同位体比、トリチウム濃度及び希ガス涵養温度がいずれも氷期に涵養した地下水であることを示していた。最も浅い揚水試料(27.3-30.1 m)においても間氷期に涵養した新しい地下水の影響が確認できなかったことから、

この地域においては地上水の地下水への影響が中深度処分の埋設地深度よりも十分浅いところまでとどまっていることが確認できた。また、間隙水試料は揚水試料よりも多くの深度で採取可能であり、その水素・酸素安定同位体比から、深度20 m以深では氷期に涵養した地下水に支配されているが、20 m以上では間氷期に涵養した地下水の影響が確認できた。間隙水のトリチウム濃度及び<sup>14</sup>C年代値はサンプル量が少ないため取得できていない。仮に、これらのデータが取得できるような大規模な調査が実施できれば、今回と整合的な結果が得られる可能性がある。ボーリングによって得られた揚水試料及び間隙水試料から、間氷期に涵養した新しい地下水の影響が浅いところまでとどまっていることが確認できた。

平成29年と30年に本プロジェクトによって調査してきた既存井戸の水試料は深度50 m以深でスクリーンの幅は100 m以上であった。そのため、その結果を踏まえた地下水流動概念モデルには深度100 m 程度以浅の情報はあまり反映できておらず、地形・地質構造からの想定のみであった。また、間氷期以後に涵養した地下水の影響が深度20 m程度までとどまっていることも分からなかった。平成31年度以後のボーリングを使った調査及び地下水の地球化学的指標の調査において、寒冷期の特徴を示す地下水の流動する領域は、予想以上に浅層まで及んでいることが明らかとなった。以上のことから、地下水流動の評価手法としてボーリングを使った調査と地球化学的指標を使った調査の有効性が高い事が示された。

#### 2.1.4 中深度処分における岩盤の力学的状態と水理学的特性に関する研究

放射性廃棄物を埋設する岩盤は、自然事象及び処分場の坑道掘削等の人為事象により様々な作用を受けている。この作用により岩盤が損傷又は破壊し、その結果、地下水の流動や放射性核種の移行（以下「物質移行」という。）経路となることが懸念される。特に、放射性廃棄物を処分するための掘削によって岩盤応力が解放された場合、物質移行経路となり得る掘削影響領域（Excavation disturbed zone; 以下「EDZ」という。）が形成されることが考えられる。こうした岩盤中における物質移行を評価し、また EDZ を含めて、坑道が適切に閉鎖されていることを確認するためには、岩盤の力学的状態とそれに伴う岩盤損傷等による水理学的特性の関係性を適切に把握することが必要である。そこで、岩盤の力学的状態とそれに伴う岩盤の状態を原位置試験により把握するとともに水理学的特性を実験的に取得して、放射性核種の移行挙動が適切に評価されていることの妥当性を確認するために必要な科学的・技術的知見を取得した。なお、この研究は日本原子力研究開発機構との共同研究において実施した<sup>26</sup>。また、岩盤の力学的状態とそれに伴う岩盤損傷等による水理学的特性の関係性を室内試験より明らかにするため、岩盤損傷を模擬した三軸の力学的試験及び水理学的式試験を同時に実施することのできる連成試験装置の設計・製作を行い、今後の実験の準備を開始した。なお、この研究は埼玉大学及び産業技術総合研究所との共同研究にて開始した。

(1) はじめに

岐阜県瑞浪市にある日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所の 300 m 坑道東側壁面において、花崗岩を対象として、ボーリング孔を用いた閉鎖確認の妥当性判断のための試験を行った。具体的には、300 m 研究アクセス坑道（以下「坑道」という。）東側壁面に水平から 10°下向きに深度約 2 m の試験孔 2 本をコアカッター(φ66 mm)により掘削し、原位置透水試験、ボアホールテレビ (BTV) による試験、屈折法弾性波探査による試験及び比抵抗二次元探査測定による試験を行った。

実際の試験位置として、瑞浪超深地層研究所研究坑道の壁面調査データ集<sup>27</sup>の亀裂マップを使って亀裂の少ない地点を選定した。二本のボーリング孔 (No.1 孔と No.2 孔) の間隔は 2 m とり、その左右に弾性波探査試験の受信・発信及び比抵抗二次元探査試験の電極を設置するために 10 m の幅で吹付コンクリートを除去し、岩盤を露出させた。イメージ図を図 2.1.12 に、吹付コンクリート除去後の写真を図 2.1.13 に示す。

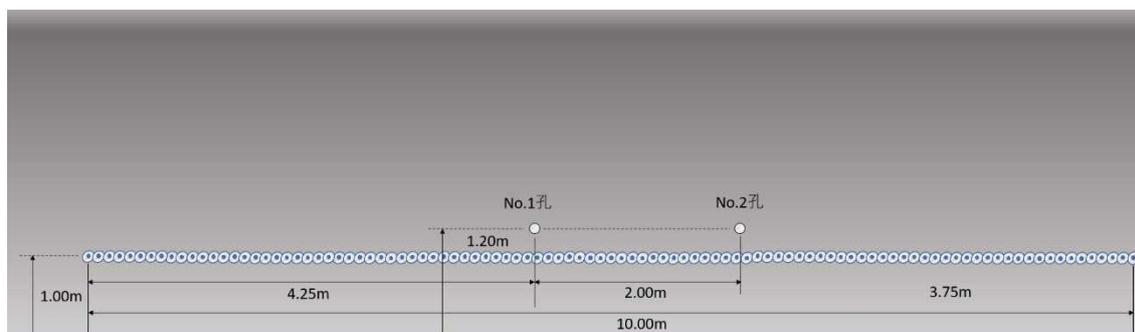


図 2.1.12 300 m アクセス研究坑道における調査ポイント概略レイアウト

Figure 2.1.12 Layout of survey point on 300 m A/R-Gallery



図 2.1.13 300 m アクセス研究坑道における調査ポイント状況写真

Figure 2.1.13 Picture of survey point on 300 m A/R-Gallery

吹付コンクリートを除去後に、水平から 10 度下向きに 2 m のボーリングコアを 2 本掘削した。坑道とボーリング孔の位置関係を図 2.1.14 に示す。ボーリングコアは可能な限り回収を行い観察した結果、岩相は黒雲母花崗岩で構成されていた。1 本目のコアの 0.9-1.35 m までの間は、暗色部が確認された。

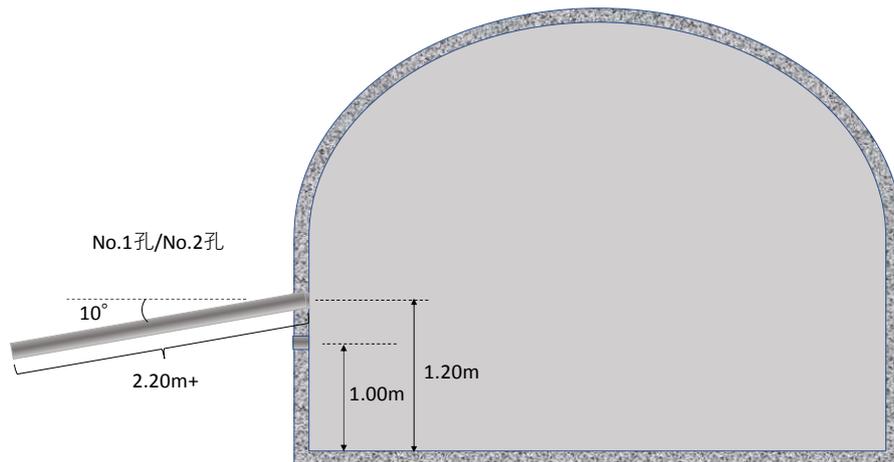


図 2.1.14 300 m アクセス研究坑道におけるボーリング孔のレイアウト  
Figure 2.1.14 Layout of borehole point on 300 m A/R-Gallery

### (2) ボアホールテレビによる孔観察

ボーリング孔表面観察のため、ボアホールテレビ（以下「BTV」という。）を使い孔表面の観察を行った。また、Borehole Image Processing System（ボーリング孔壁の360度全周画像を定方位かつ連続的にデジタル記録し、この画像データを元に地質情報を取得する一連のハードウェア及びソフトウェアのことをいう。以下「BIPシステム」という。）を使い、割れ目の走行、傾斜及び開口幅の解析を行った。No.1孔に関して、幅0.2 mm以上の開口割れ目は坑道壁面近傍に多く分布していた。コア観察で確認された暗色部はBTVでも確認できた。No.2孔に関しては、開口割れ目が坑道壁面から1 m以上の深部に2本確認できた。掘削影響によって形成される割れ目は坑道近くにできやすいことから、EDZの割れ目ではない可能性が高い。特に、1.75 m付近にある開口割れ目の周辺に赤い変色が確認できたことから、長期にわたって地下水が流れることで周辺岩盤が変質したと考えられ、掘削時にできた割れ目とは考えにくく、元々岩盤に存在した割れ目と考えられる。

### (3) 透水試験

シングルパッカーの透水試験装置を用いて透水試験を行った。装置の概念図を図 2.1.15 に示す。パッカーの拡張によって区切られたシングルエンドの区間が試験区間となる。透水試験はまず、注水パルス法で実施し透水係数が $1 \times 10^{-10}$  m/s 以下の場合はその値を採用した。岩盤の透水性が高く、 $1 \times 10^{-10}$  m/s 以上だった場合は定量注水法による透水試験を実施した。

No.1孔においては0.34 m（吹付コンクリート厚さ0.14 mを含む）より坑道側、No.2孔においては、0.27 m（吹付コンクリート厚さ0.23 mを含む）より坑道側では、水圧が上がらず水理試験が成立しなかった。坑道と直結した透水性の高い割れ目が存在していると考えられる。そのため、透水試験はそれらよりも岩盤側で実施した。試験はパッカーの位置をずらしながら、2 mのボーリング孔内の複数の位置で実施した。

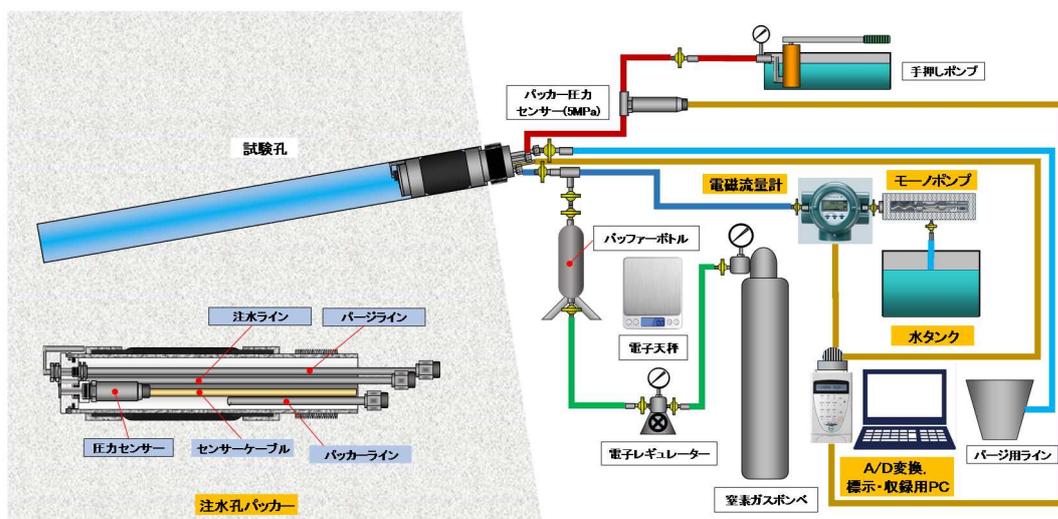


図 2.1.15 パッカー概念図

Figure 2.1.15 Conceptual diagram of packer system

No.1 孔については、透水試験が成立した坑壁から 0.34m より深い全ての深度において、おおむね  $10^{-19} \sim 10^{-11}$  m/s オーダー以下の透水係数が得られた。しかし、傾向として坑壁から 0.65m を境に、浅いところで高透水性、深いところで低透水の区間が確認できた。No.2 孔は深度 0.8 m (吹付コンクリート厚さ 0.23 m を含む) より浅部を含む試験では  $10^{-7}$  m/s オーダーと比較的高い透水係数を示した。0.8 m よりも深い区間では  $10^{-10}$  m/s オーダー以下の透水係数を示した。以上のことから、No.2 孔の BTV の試験で確認された深部の開口割れ目はあまり透水係数に影響を与えていない可能性がある。また、浅部においては、BTV の試験で開口割れ目が確認されていないにもかかわらず、高い透水係数を示したことから、BTV では確認できない割れ目が EDZ として形成され、透水係数に影響を与えている可能性が示唆された。

#### (4) 弾性波探査試験

屈折法弾性波探査は、一般的に、地表付近でハンマー等により人工的に弾性波を発生させ、屈折して戻ってくる屈折波を、地表に設置した測定装置で観測し、各速度層の層厚や地下の弾性波速度構造を求める探査法である。

屈折法弾性波探査は、坑道壁面発信 - 坑道壁面受信、ボーリング孔底発信 - 坑道壁面受信、坑道壁面発信 - ボーリング孔内受信、ボーリング孔内発信、ボーリング孔内発信で実施した。それぞれのイメージ図を図 2.1.16 (a 坑道壁面発信□坑道壁面受信、b ボーリング孔底発信□坑道壁面受信、c 坑道壁面発信□ボーリング孔内受信、d ボーリング孔内発信-ボーリング孔内受信) に示す。

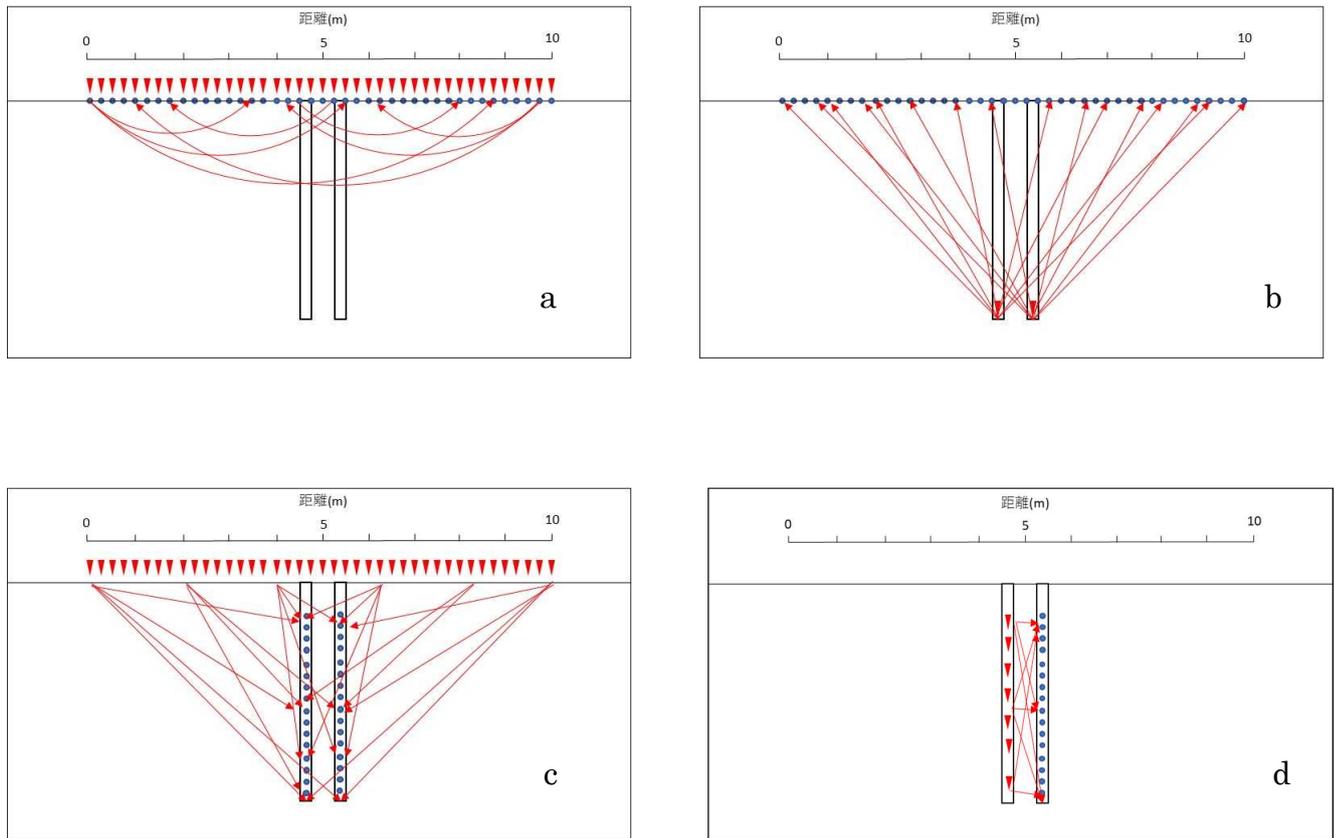


図 2.1.16 物理探査試験概念図

Figure 2.1.16 Conceptual diagram of geophysical survey

坑道壁面発振－坑道壁面受振の試験結果だけでは、探査深度が 1 m 以下となっていたが、発信及び受信にボーリング孔を使った試験を加えたことで、ボーリング孔底 2 m 付近までの探査を実施できた。試験結果を解析したところ、坑道壁面から 20~30 cm（吹きつけコンクリートを含まない）のところで弾性波速度が遅く、深部においては弾性波速度が速いことが確認できた。弾性波速度が遅い区間は空隙が多いことを示している可能性があり EDZ と関係している可能性がある。

#### (5) まとめ

瑞浪超深地層研究所の坑道を使って EDZ を調査するための試験を行った。BIP システムを用いて割れ目の走行、傾斜及び開口幅の解析を行い、開口割れ目を確認できた。また、透水試験を行ったところ、透水係数は坑道壁面に近いところで上がる傾向が確認できたが、これは BIP システムで確認できた開口割れ目の位置とは必ずしも整合的ではなかった。ボーリング孔を使った弾性波探査試験では、ボーリング孔底付近までの弾性波速度を確認することができた。坑道壁面に近いところで弾性波速度が低い区間を確認でき、これは透水

試験結果と整合的である。以上の結果は、中深度処分の埋設地を建設時に、EDZ の形成の有無を確認するための手法として活用できる可能性がある。

### 2.1.5 中深度処分における岩盤の収着・移行現象に関する研究

岩盤中の放射性核種の移行を考える際、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収着は移行を遅延させる重要な機構である。この機構評価では、分散系での核種の収着反応評価、金属酸化物の集合体の評価など水分子の移動や空隙内の分布、表面の凹凸、電気二重層の影響等様々な評価がされているが、微小空間での収着に寄与する特異的な現象を統一的に考慮することで、岩石中の微小な空隙での特異的な収着反応のメカニズムを明らかにし、そのような特異的な収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収着には、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、空隙のサイズを制御した試料を用いた試験を行った。

具体的には、数 nm 径の円筒状の空隙がハニカム状に並んだヘキサゴナル構造を持つメソポーラスシリカである MCM-41 や SBA-15 を対象としたバッチ吸着試験を行った。吸着イオンとして、吸着に与える価数及び水和エネルギーの影響を調べるため、主要核種であるセシウムとストロンチウムを用いた。また、水酸化ナトリウム及び硝酸ナトリウムの濃度を変化させることで pH 及びイオン強度依存性を調べた。さらに、空隙径の異なる SBA-15 を用いて吸着量の変化を調べた。得られた実験結果を吸着モデルと比較した。吸着モデルは、シリカを含む溶液に対する水酸化ナトリウム溶液の滴定試験によって得られたシリカの表面電荷量を用い、従来の表面錯体モデルに異なる仮定を置いた空隙中の電位分布を適用することで計算した。その結果、電荷が多く水和エネルギーの強いストロンチウムで吸着量が大きく、また、イオン強度が吸着量や吸着が増加する pH の値に大きく影響することが分かった。なお、この研究は東京大学との共同研究において実施した。

## 2.2 廃棄物埋設における性能評価手法に関する研究

廃棄物埋設地における多重バリアシステムとしての人工バリア及び天然バリアの長期性能を評価するための評価手法の妥当性について科学的・技術的知見の蓄積が必要である。そこで、以下に示す項目について知見を取得し、成果の内容を取りまとめた。

### 2.2.1 人工バリアの長期性能評価手法の研究

#### (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

ベントナイト系人工バリアの長期変質挙動に関しては、現在まで主に淡水系地下水環境下を想定した室内実験及び解析コードの整備が実施されている。しかしながら、淡水—塩水混合系地下水環境に廃棄物埋設地が位置することも想定されることから、これらの環境における評価手法の妥当性について科学的・技術的知見の蓄積が必要である。そこで、淡水—塩水混合系地下水環境下における室内実験とモデル解析を中心として、ベントナイト系人工バリアの変質挙動に関する評価手法の構築を行った(図 2.2.1)。具体的には、物質移行に関連する事項として、拡散現象の取扱いについて検討を行った。本検討は日本原子力研究開発機構の委託事業において実施した成果を取りまとめたものである<sup>32</sup>。拡散現象については、これまで有効拡散係数(De)の概念を用いた整理が既往の研究にて行われてきた<sup>28, 29, 30</sup>。この「有効拡散係数(De)」はベントナイト系人工バリア中のイオン強度によって変化することが知られている。一方、収着等を含めた様々な要因の影響を受ける拡散フラックスと単位体積当たりの収着を含めた濃度勾配との間の比例係数である「見かけの拡散係数(Da)」は、イオン強度によらず一定であった<sup>29, 30</sup>。このため、見かけの拡散係数(Da)をベースとしたシンプルで科学的に合理的なベントナイト系人工バリア中の拡散モデルを整備することを目的に調査を行った<sup>31</sup>。文献調査及び室内試験により、陽イオン種、陰イオン種及び中性種に対するベントナイト系人工バリア中の見かけの拡散係数(Da)を整理し、見かけの拡散係数(Da)データセットの作成を行った(表 2.2.1)。また、セメント系材料からの溶脱が想定され、ベントナイト系人工バリアとの反応として、陽イオン交換反応や二次鉱物の生成が生じることから重要と考えられるカリウムイオンについて、室内試験を行い、見かけの拡散係数(Da)を取得した<sup>31, 32</sup>。収着バッチ試験により、イオン強度の異なる溶液(NaClで調整)に分散した粉末モンモリロナイト(ベントナイトの主要鉱物)への分配係数を取得した。また、透過拡散試験及びIn-diffusion試験(飽和させた固相試料の中央断面に測定の対象のイオンを含む溶液を塗布し、所定時間静置後の固相試料内の濃度分布を測定する試験)により、見かけの拡散係数(Da)を取得した<sup>32</sup>。

得られた見かけの拡散係数(Da)のデータセットを用いた物質移行—変質連成解析の試算を実施した<sup>31, 32</sup>。試算は図 2.2.2 に示したセメント系人工バリアとベントナイト系人工バリアが接した状況を想定した一次元の体系とした。また、セメント系人工バリアの端部は液相との固定境界を想定し、その境界部の溶液組成を表 2.2.2 に示す。セメント系人工バリア及びベントナイト系人工バリアの初期鉱物及び反応により生成が想定される二

次鉱物を表 2.2.3 に示す。見かけの拡散係数 (Da) を用いた試計算では、元素それぞれについて見かけの拡散係数 (Da) 及び保持因子を設定しているが、物質移行後の溶液中の電荷バランスが崩れてしまい、計算が収束しない結果となった<sup>32</sup>。見かけの拡散係数

(Da) を用いた計算を収束させるためには、Appelo and Wersin (2007)<sup>33</sup>で取り入れられたネルンストープランク式を用いることにより、鉱物表面の電荷と液相中の電荷の合計がゼロになるような関係式を組み込む予定である。

地下水に溶存したアルカリ等によりベントナイト系人工バリアの溶解に伴い生成する二次的鉱物については、その生成により物質移行性能に影響を及ぼすことから、二次鉱物が生成することによる物質移行性能に対する科学的・技術的知見の取得のため、文献調査及び試計算を行った。本検討は日本原子力研究開発機構の委託事業において実施した成果を基に、原子力規制庁が考察を行ったものである<sup>34</sup>。文献調査では、国内外の研究機関等で整理されている粘土-セメント系材料の相互作用を対象とした地球化学計算において設定されている鉱物リストの調査、室内実験等を対象とし、ベントナイト系人工バリアの溶解に伴い生成する可能性のある二次鉱物の抽出を行った (表 2.2.4)<sup>35</sup>。調査によって抽出した二次鉱物は、室内試験及び天然事例での生成の有無や想定される中深度処分の温度条件を踏まえ、地球化学計算において「設定する鉱物」又は「設定しない鉱物」に分類した。ただし、「設定する鉱物」のうち、類似した構造や組成を持つ鉱物群である Mg ケイ酸塩、C-(A-)S-H 型鉱物及びゼオライトに分類した鉱物については、熱力学的に不安定な鉱物が短期間で安定な鉱物に変遷するのか、又は長期にわたって存在するかは不明なため、熱力学的な平衡計算のみによって一意に生成種を決定できないと考えられる。そこで、これらの鉱物設定の差異がベントナイト系人工バリアの透水性に及ぼす影響の程度を確認する必要があると判断し、当該鉱物群を「影響検討鉱物」に分類した。「影響検討鉱物」のうち、C-(A-)S-H 型鉱物については、熱力学的な安定性が大きい結晶性の鉱物であるトバモライトが生成する場合よりも、熱力学的に不安定であると考えられる C-A-S-H ゲルが生成する場合において、ベントナイト間隙水中の Si 濃度は高くなるものの、Al 濃度の低減と pH の上昇がみられ、ベントナイト間隙水のモンモリロナイトに対する不飽和度が大きくなったため、モンモリロナイトの溶解量が大きくなることが示された。また、ベントナイト系人工バリアとセメント系人工バリアの相互作用では、ゼオライトのヒューランダイトとチャバサイト及び C-(A-)S-H 型鉱物 (トバモライト又は C-A-S-H ゲル) の 3 鉱物がベントナイト中の間隙水組成をコントロールしていることが示唆された。

表 2.2.1 Da データセット

Table 2.2-1 Dataset of Da

元素	Da [m <sup>2</sup> /s]	イオン種	D <sub>0</sub> [m <sup>2</sup> /s]	分類
Cl	1.5×10 <sup>-10</sup>	Cl <sup>-</sup>	2.0×10 <sup>-9</sup>	依存性有
F	7.2×10 <sup>-11</sup>	F <sup>-</sup>	1.5×10 <sup>-9</sup>	
B	7.2×10 <sup>-11</sup> *	BO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	1.5×10 <sup>-9</sup>	
	—	HBO <sub>2</sub>	—	
S	4.0×10 <sup>-11</sup> *	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.3×10 <sup>-9</sup>	
	3.2×10 <sup>-11</sup>	HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	1.1×10 <sup>-9</sup>	
C	2.4×10 <sup>-11</sup> *	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	9.2×10 <sup>-10</sup>	
	4.0×10 <sup>-11</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.2×10 <sup>-9</sup>	
P	1.2×10 <sup>-11</sup> *	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7.7×10 <sup>-10</sup>	
	2.2×10 <sup>-11</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	9.6×10 <sup>-10</sup>	
Na	7.4×10 <sup>-11</sup>	Na <sup>+</sup>	1.3×10 <sup>-9</sup>	
Ca	1.7×10 <sup>-11</sup>	Ca <sup>2+</sup>	7.9×10 <sup>-10</sup>	
Mg	1.4×10 <sup>-11</sup>	Mg <sup>2+</sup>	7.1×10 <sup>-10</sup>	
K	3.0×10 <sup>-11</sup>	K <sup>+</sup>	2.0×10 <sup>-9</sup>	高収着性
N	3.0×10 <sup>-11</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	2.0×10 <sup>-9</sup>	
Si	6.0×10 <sup>-13</sup>	Si(OH) <sub>5</sub> <sup>-</sup>	—	OH <sup>-</sup> 錯体
		Si(OH) <sub>4</sub>	—	
Fe	2.0×10 <sup>-13</sup>	Fe(OH) <sub>3</sub> <sup>-</sup>	—	
		Fe(OH) <sub>2</sub>	—	
		FeOH <sup>+</sup>	—	
Al	2.0×10 <sup>-13</sup>	Al(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup>	1.1×10 <sup>-9</sup>	

※オキソ酸イオンについては、「※」のついた Da を当該元素の代表値とする。

出典) 日本原子力研究開発機構 (2019) <sup>32</sup>

表 2.2.2 液相固定境界の組成

Table 2.2-2 Water composition of fixed boundary condition

塩水系地下水			
pH	8.0		
元素	濃度	元素	濃度
	mol/L		mol/L
Na	$6.7 \times 10^{-1}$	S	$3.0 \times 10^{-2}$
K	$1.1 \times 10^{-2}$	Cl	$5.9 \times 10^{-1}$
Ca	$3.3 \times 10^{-4}$	Al	$3.2 \times 10^{-9}$
Mg	$2.5 \times 10^{-4}$	Si	$3.0 \times 10^{-4}$
C	$3.5 \times 10^{-2}$		

出典) 日本原子力研究開発機構 (2019) <sup>32</sup>

表 2.2.3 セメント系及びベントナイト系人工バリアの鉱物モデルで設定した鉱物

Table 2.2-3 Minerals setting of modeling for engineered cementitious and bentonite barrier

鉱物	初期 wt% (cement)	初期 wt% (bentonite)	鉱物	初期 wt% (cement)	初期 wt% (bentonite)
Ca(OH) <sub>2</sub>	15.33	0	CSH(1.5), CSH(1.3) CSH(1.1), CSH(0.9) CSH(0.833) CSH(0.6), CSH(0.4)	0	0
CSH(1.8)	60.30	0			
Monosulfate (AFm)	9.91	0			
Hydrogarnet (C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> )	12.45	0	Friedel Salt	0	0
Brucite	1.78	0	Gibbsite	0	0
K <sub>2</sub> O	0.16	0	Goerthite	0	0
Na <sub>2</sub> O	0.08	0	Greenalite	0	0
Na-Mont	0	49.0	Gypsum	0	0
Quartz	0	38.0	Hydrotalcite	0	0
Analcime	0	3.0	Kaolinite	0	0
Calcite	0	2.5	Lomontite	0	0
Ettringite (Aft)	0	0	Mangetite	0	0
AS <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0	0	Melanterite	0	0
AS <sub>4</sub> H	0	0	Sepiolite	0	0
Berthierine	0	0	Siderite	0	0
C <sub>3</sub> ASH <sub>4</sub>	0	0	SiO <sub>2</sub> (a)	0	0
Chukanovite	0	0			

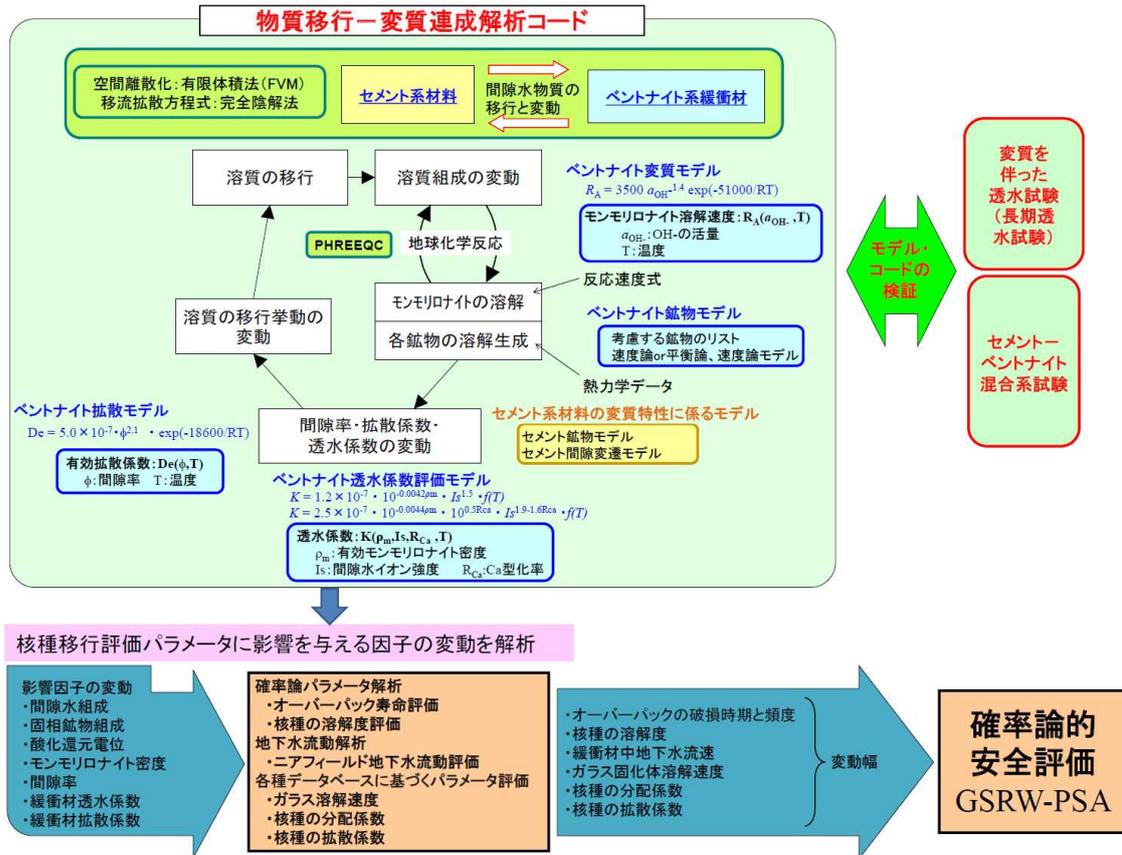
出典) 日本原子力研究開発機構 (2019) <sup>32</sup>

表 2.2.4 地球化学計算のために選定した二次鉱物  
 (青字：設定しない鉱物、赤字：設定する鉱物、緑字：影響検討鉱物)

Table 2.2-4 Selected secondary minerals for geochemical modeling  
 (blue: not set for modeling, red: set for modeling, green: examine the effect on setting)

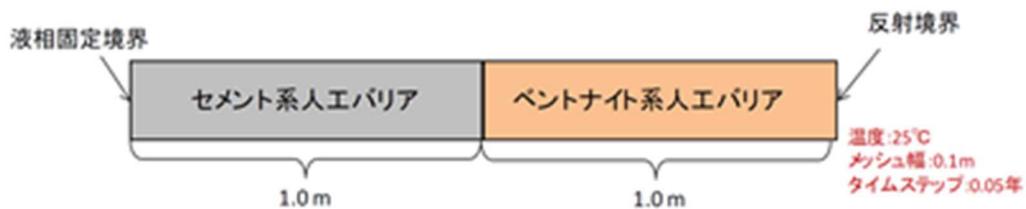
分類	鉱物名	分類	鉱物名	分類	鉱物名	分類	鉱物名
ケイ酸塩	Illite	C-A-S-H型	Katoite	ゼオライト	Phillipsite	水和物	C4AH13
	Kaolinite		Stratlingite		Heulandite		C4AH19
	Pyrophyllite		C-A-S-Hゲル		Clinoptilolite		Ettringite
長石	K-feldspar	C-S-Hゲル	Analcime		Hydrotalcite		
水酸化物	Brucite	C-S-H型	Tobermorite		Laumontite		Friedel's salt
	Gibbsite		Jennite		Chabazite		Monocarboaluminate
炭酸塩	Dolomite		Afwillite		Merlinoite		Hydrogarnet
Mgケイ酸塩	Clinochlore		Gyrolite	硫酸塩	Gypsum		Monosulfate
	Sepiolite						
	M-S-H						

出典) 笹川剛ら (2020) <sup>35</sup>



出典) 日本原子力研究開発機構 (2018) <sup>31</sup>

図 2.2.1 ベントナイト系人工バリアの劣化に係る評価モデルと解析コードの体系  
 Figure 2.2-1 Evaluation model for degradation of engineered bentonite barrier and system of analysis code



出典) 日本原子力研究開発機構 (2019) <sup>32</sup>

図 2.2.2 解析体系 (セメント系人工バリアとベントナイト系人工バリアが接した系)  
 Figure 2.2-2 Schematic diagram of simulation (system for contact between engineered cementitious and bentonite barriers)

## (2) セメント系人工バリアの長期性能評価手法の研究

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、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・技術的知見を整備することを目的とした研究を行った。具体的には、現在国内で広く使用されているセメント系材料を中心にセメント硬化体の長期安定性に関係する結晶構造や物質移行特性、さらに、これらに関係する鉱物組成を考慮した材料設計、養生方法及び維持管理方法並びに評価モデルに関連し既往の研究の調査及び試験を実施し、300年を超えるセメント硬化体の長期性能評価を行う上での課題の整理を行った。また、これらセメント硬化体の長期安定性に関する既往の研究成果等のコンクリートの長期性能評価への適用性について検討し、人工バリアとして使用することを想定した場合の長期性能に関する課題として整理した。さらに、セメント系人工バリアについて、体積変化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。なお、この研究は日本原子力研究開発機構の委託事業<sup>32,34</sup>において実施した。

中深度処分における工学バリアのうち、セメント系人工バリアは、主に放射性核種<sup>14</sup>C及び<sup>129</sup>I等を閉じ込める機能が求められ、セメント硬化体により構成されている<sup>36</sup>。

社会基盤におけるセメント硬化体は、基本的には体積の7~8割を占める天然の細骨材及び粗骨材を密実に配置し、骨材間の空間をセメントで充填し骨材を包むように結合接着させることで構造強度等の構造性能及び物質移行に伴う水密性（以下「物質遮断性能」という。）を確保する構造体である<sup>37</sup>。したがって、セメント硬化体の圧縮強度はおおむね骨材の強度等で決まり、引張強度はセメントマトリックスの接着力で決まる。一方、物質移行性能は水和反応により形成されたセメントマトリックスの緻密性により決まることが明らかとなっている<sup>37</sup>。こうした背景から、社会基盤分野におけるセメント研究は、国等の構造物設計基準による要求性能が構造性能であることを踏まえ構造性能に関する研究が主たる研究であり、物質移行性能に関する研究は、水密コンクリート等の特殊構造物の設計において拡散性等を実験等で計測して品質確認する程度で、詳細なメカニズムの解明には至っていないことが既往の研究調査から判明した。

こうした既往の研究の実態から廃棄物埋設におけるセメント系人工バリアの物質移行に関する研究においては、セメントマトリックス中の物質移行特性を評価することに主眼がおかれているが、セメントマトリックスは様々な細孔構造を有していることに加え、粉体を水和反応により硬化させる物質の特徴である収縮膨張等の体積変化による影響を加味した物質移行特性に関する研究が必要と考えられる。なお、実際のセメント硬化体は、一般には体積変化を少なくするために収縮に大きく寄与する単位セメント量及び水量を最低限にするとともに骨材の最大骨材寸法をできる限り大きくするなどの配合設計が行われている。さらに、収縮等の弱点である引張抵抗性向上のため鉄筋の配置又は長短繊維等を混入するなどコンクリート構造物の古典的基本理論が考慮されている。なお、コンクリート構造物は地震力及び土圧等が作用しせん断破壊等の損傷を受けた場合、物質遮断性が失わ

れることも考慮した対策が求められる。また、セメント硬化体の長期性能を評価するには、設置される環境として地下水中の湿潤環境や水質中の塩等の存在がある場合は、緻密性を構築しているセメントマトリックスの結晶形態や結晶重合度等の結合性（以下「結晶安定性」という。）が損傷されるため物質移行空間が拡大し核種移行性能の低下を生じることから、立地される環境雰囲気を考慮した結晶安定性等について評価することが求められる。廃棄物埋設におけるセメント系人工バリアには、こうしたセメント及びセメント硬化体の特性及び特徴を鑑みたセメント研究が必要である。

そこで、廃棄物埋設での安全研究では、①細孔構造の変遷と物質移行性、②セメント結晶（非晶質含む）の変遷による物質移行性、③体積変化による物質移行性、さらに、空隙や材料特性に寄与する④収着性と物質移行性、の四視点に着目して行うことが求められる。なお、これらの四視点での機構解明等のうち、平成 30-31 年度において①②について予備的研究を行ったので、以下に報告する。

#### ① 細孔構造の変遷と物質移行性

セメント硬化体中には、エントラップドエア及びエントレインドエアの独立空隙と毛細管空隙及び層間空隙(ゲル空隙含む)の連行空隙の四つに分類される空隙が存在する。これらの空隙の大きさ及び形状（以下「細孔構造」という。）のうち、物質移行に寄与する細孔構造は連行空隙である。この連行空隙は、水和前の材料の充実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に分けられ、特に化学的空隙の量及び形状等の形態が水和終了する約 100 年間に渡り継続的に変化し続くことはセメント工学分野では自明である。また、水和進行によるセメント結晶の生成とともに外部環境による劣化により空隙構造が変化することも自明である。つまり、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や混和材量並びに化学混和剤の添加等の調合、締固め及び養生によって形成され、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。）の生成に影響を与える 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。

そこで、材料に起因し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、セメントマトリックスの強度に依存することから、空隙を破壊することで空隙径を換算する手法であることがわかり、かつ、層間空隙等の微小な空隙は計測できないことが明らかとなった。一方、水蒸気吸着装置は、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と吸着特性も同時に計測できることから廃棄物処分での空隙等の計測に適していることが分かった。ただし、セメント硬化体に水蒸気を投入することから未水和鉱物等があると水和が進行することもあり、注意が必要である。

今後は、水蒸気吸着装置を基に、さまざまな調合による CSH ゲルの層間空隙及びゲル空隙について、形態及び変化等を加味した評価法の取得が必要である。

## ② セメント結晶（非晶質含む）の変遷による物質移行性

セメント硬化体における CSH ゲル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ことが懸念される。また、CSH ゲルは、カルシウムシリカモル比により結晶形態も異なる。

そこで、CSH ゲルの結晶安定性に関する機構解明を行うため、トリメチルシリル誘導体化法（以下「TMS 法」という。）によるケイ酸鎖長構造の測定及び核磁気共鳴装置（以下「NMR 法」という。）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、CSH ゲル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 ゲル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。今後は、引き続き、様々な材料調合に基づく計測を行って、結晶安定性の一般化評価手法の取得を行う。

### 2.2.2 天然バリアの自然事象を考慮した水理特性の評価手法の研究

#### (1) はじめに

天然バリアとして機能する低透水性岩盤の透水特性、拡散特性等の核種移行の遅延効果に関する評価は、海水準変動及び隆起・侵食によって地形及び動水勾配が大きく変化し得る地域においてはこれらを考慮する必要があるため、海水準変動や地形変化等の長期的な自然事象を考慮した天然バリアの性能評価に必要な科学的・技術的知見を取得した。

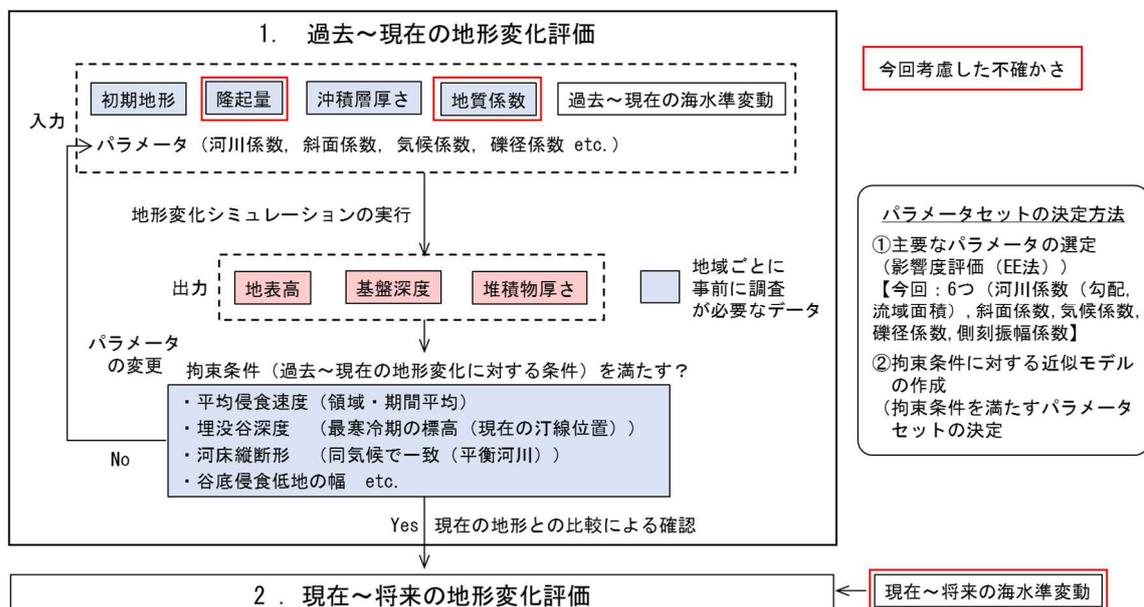
中深度処分の廃棄物埋設地に関しては、水理地質構造、地球化学環境等を踏まえて廃棄物埋設地から生活環境への主要な放射性物質の移行を抑制する性能について評価がなされる。中深度処分においては、我が国で想定される自然現象である隆起・侵食及び海水準変動による地形変化が、地下水流動・地下環境の変化や埋設深度の減少を引き起こし、処分システムにおける機能の喪失や核種移行抑制等の性能を低下させることが懸念されるため、隆起・侵食及び海水準変動に伴う将来の地形変化を適切に評価すること等が必要と考えられる。また、被ばく線量評価につながる地下水流動・核種移行評価を行うに当たっては、将来の地形変化の変動幅を評価することが重要であり、これら評価の妥当性判断における留意点を抽出・整理した。この研究は日本原子力研究開発機構の委託事業<sup>31, 28, 34</sup>において実施した。

#### (2) 地形変化評価

隆起・侵食及び海水準変動は緩慢かつ広域的な現象であり、過去におけるその変動を外挿することで、将来 10 万年程度の推論を行うことが可能であると考えられるが、隆起・侵食は時間的、空間的に様な変化ではなく種々のサイト特性に大きく依存する。したがって、これら長期的な自然事象を考慮した地形変化を評価するに当たっては、そのサイトの

特性に応じた評価を行うことが必要であり、地形変化の営力を数式化した地形変化シミュレーションが有効であると考えられる。一方、地形変化のプロセスとしては、侵食（河川域又は斜面域）、側刻・蛇行、洪水、気候変動、地殻変動、海域での変化等の複数の現象が考えられ、また、処分サイトが沿岸域周辺であれば海水準変動に伴う汀線の移動によって侵食の挙動が大きく変動することが考えられるため、地形変化シミュレーションの評価モデル及び各パラメータの適用性の検証が重要である。

このため、本研究では、まず変動が比較的小さく安定な地域を対象とし、過去から現在までの地形・地質のデータを活用して過去から現在の地形変化を説明しつつ、将来への外挿における不確かさ（将来の隆起量、海水準変動等）を考慮した地形変化評価の方法論を整理した(図 2.2.3)。



出典) 日本原子力研究開発機構 (2020) <sup>34</sup> (一部編集)

図 2.2.3 不確かさを考慮した過去～現在～将来の地形変化評価の流れ <sup>34</sup>

Figure 2.2.3 Flow of past-present-future topographical change evaluation considering uncertainties

また、整理した方法論に基づき、我が国の典型的な集水域を対象に不確かさを考慮した過去～現在～将来の地形変化の評価を行った。ここにおいて、対象地域では古地形・沖積層分布に対し取得可能な情報が不十分なため入力パラメータである隆起量及び地質係数の不確かさを考慮し、拘束条件においては、領域全体に影響を与える平均侵食速度に対して、不確かさを考慮した。また、将来の海水準変動についてもその不確かさを考慮し、複数のケースについて評価を実施した。

これらの評価結果の比較から、対象地域において隆起量、地質係数及び侵食速度並びに

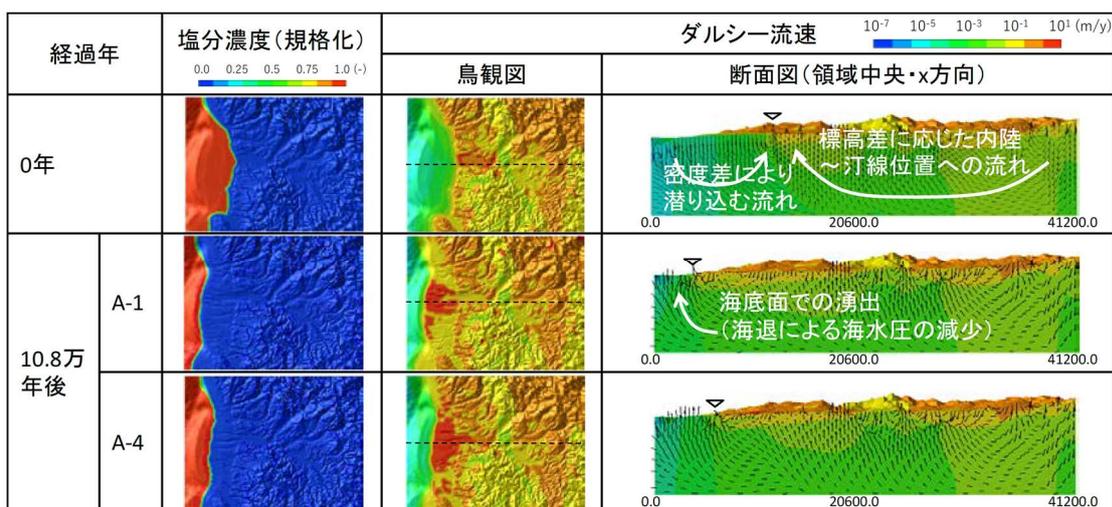
海水準変動の不確かさが将来の地形変化に与える影響を整理するとともに、対象地域に類似した山地・河川・平野・海域から構成される集水域を対象に、地形変化評価の妥当性判断における留意点を以下のように整理した。

- ・ 将来の地形変化を評価するためには、サイト固有の入力条件（古地形、隆起速度、沖積層厚さ及び地質係数）及び過去～現在の地形変化に対する拘束条件（平均侵食速度、埋没谷深度、河床縦断形及び谷底侵食低地の範囲）を調査し、過去～現在に至る解釈の整合性を確認する必要がある。
- ・ サイト特有の拘束条件を満足し、現在の地形の再現性を示すことは、地形変化評価における不確かさの低減、更に将来への外挿への信頼性を向上させるものであるため、信頼のある地形変化の評価のためには、この評価プロセスは重要である。
- ・ 海水準が変動すると海域・下流域では侵食基準面の低下により河川の下刻が進むため、現在埋没谷が形成されている海域・下流域周辺では、海水準の変動に伴い地形勾配が有意に変動する。このエリア周辺が埋設地の候補の場合、埋設深度の減少及び将来の地形変化が地下水流動に与える影響を確認する必要がある。
- ・ 気候が変動し寒冷化が進むと、斜面域では周水河作用（凍結・融解に伴う侵食）の影響が大きくなるため、海水準変動の不確かさに伴う影響は上流域でも見られるが、不確かさに伴う中・上流域での地形勾配の変動幅は海域・下流域に比べて小さい。
- ・ 今回の評価対象地域において想定した隆起速度、侵食速度、地質係数の不確かさが地形変化に与える影響は、海水準変動の不確かさよりも小さい傾向がみられた。ただし、中流域より標高の高い内陸での地形変化では、これらパラメータの影響はより顕著に現れる傾向があるため、埋設地の位置に応じて影響を見極める必要がある。

また、将来の地形変化の不確かさを考慮した評価結果を基に、離隔距離の空間的・時間的な変動量や汀線位置の変動範囲を統計的に分析することで、離隔距離の確保が難しい領域、汀線位置の変動による影響を受ける領域、地形変化の影響を受けにくい領域等を抽出することができ、これらの結果は埋設地の位置の選定の妥当性判断のための1つの技術情報として利用可能であることを確認した。

### (3) 地下水流動・核種移行評価

2.2.2(2)における現在～将来の地形変化の評価結果に基づき、地形変化・海水準変動の不確かさを考慮した非定常な三次元地下水流動評価を実施し、これらの解析結果を踏まえ、対象地域における不確実性が将来の地下水流動に与える影響について整理した。評価結果の一例として、現在（0年）及び海退時（10.8万年後（A-1：過去と同じ海水準変動ケース及びA-4：海水準変動小ケース））の評価結果を図 2.2.4 に示す。



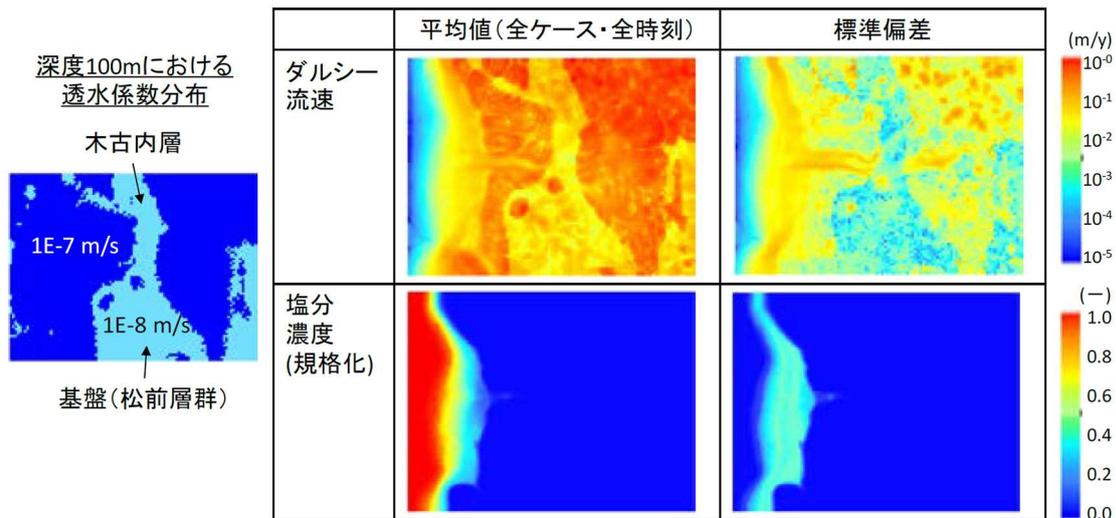
出典) 日本原子力研究開発機構 (2020) <sup>34</sup>

図 2.2.4 地下水流動評価結果の一例 (各時刻の流速・塩分濃度分布)

Figure 2.2.4 Example of groundwater flow evaluation results (flow velocity / salinity)

現在 (0 年) においては、陸域では標高差に応じた陸から海に向かう流れ、海域では密度差による潜り込む流れが生じ、流出点は汀線位置にほぼ一致する。海退時 (10.8 万年後) には海水圧の減少により海底面で湧出が生じている。A-4 のケースでは間氷期が継続し海水準変動が小さいため、河口付近に厚く沖積層が分布する影響で、10.8 万年後において河口付近の広範囲で流速が A-1 のケースより大きい。このような流れの変化は既往研究<sup>38</sup>でも指摘されているが、今回の設定では沖積層に対し一様に高い透水性を想定しており、海水準変動に伴う地下水流動の変化については、泥質の低透水性の堆積層の影響を考慮した上で、実際の状況に則した検証も進める必要があると考える。

また、処分場の配置を検討するに当たっては、将来にわたって地形変化・地下水流動による水理学的影響が小さい領域が望ましいと考えられ、このような範囲を抽出するため、上記の解析結果を用いて埋設深度 100 m における流速・塩分濃度を、1 万年ごとに各ケースに対し求めた (図 2.2.5)。これより、沿岸域、河川域及び勾配の大きな斜面域では、地形変化・海水準変動の不確かさによる変動が大きいこと、処分場の埋設位置における地質分布と流速の絶対値との相関性があること並びに河川域及び勾配が大きな斜面域を除く領域では流速の絶対値及び変化の両方が小さいことが確認された。



出典) 日本原子力研究開発機構 (2020) <sup>34</sup>

図 2.2.5 埋設深度 100m における流速・塩分濃度の平均値及び標準偏差

Figure 2.2.5 Mean and standard deviation of flow velocity and salinity at a disposal depth of 100 m

以上の結果から、対象地域に類似した山地・河川・平野・海域から構成される集水域を対象に、地下水流動評価の妥当性判断における留意点を以下のように整理した。

- ・ 沿岸域では、海水準変動の不確かさが地形勾配及び 100 m 程度の埋設深度における流速に大きく影響を与える。海域では海水準変動による汀線の移動に伴い流速が変化するが、陸域でも海水準変動による侵食基準面の移動に伴い地形勾配が変化する影響で流速が変化する領域が存在することが分かった。そのため、河口周辺の海域・下流域が廃棄物埋設地の候補である場合、将来の海水準変動の不確かさを考慮して地形変化が地下水流動に与える影響を確認する必要がある。
- ・ 沿岸域では、埋設深度における流速の変化は海水準変動及び地形勾配の変化と連動する傾向にあり、また、流速は海水準の低下の程度が大きいほど増加する傾向にあった。そのため、廃棄物埋設地が現在の汀線に近い場合、寒冷化が起こる時期や低下の程度を考慮し、早い段階で放出される核種に対し影響がないかを確認することは重要である。
- ・ 内陸部（中・上流域）では、地形変化評価のパラメータ及び拘束条件の不確かさに伴う地下水流動の変動は海域・下流域に比べて小さい傾向にあった。上流域における気候変動の不確かさに伴う地形勾配の違い（周水河作用）は、埋設深度の流速に対して影響は小さかった。
- ・ 流速と塩分濃度の絶対値とその変動性を指標にした解析結果の解釈から、埋設深度において将来長期にわたって水理学的影響の小さい領域を把握することは可能であり、流速の絶対値及び時間変化は透水性が低い地質の分布域のうち河川域及び勾配が大きな斜面域を除く領域で相対的に小さい傾向にあった。

また、同集水域を対象に核種移行評価を実施し、核種移行評価の妥当性判断における留意点を以下のように整理した。

- ・ 異なる岩種（地質係数が異なる岩）が近傍に存在する場合、地質係数が変動すると将来の地形勾配が変化し地下水流動が変化することによって、核種の移行経路が時間経過とともに移動する。
- ・ 核種の移行経路は複数の地質区分を通過することとなるが、移行経路が移動し通過する各地質区分の距離が変化すると、核種移行への影響が大きくなり得るため、地質の受食性とその不確かさの検討が十分になされているかを確認するとともに、それが地下水流動場、特に移行経路の時間変化に与える影響と被ばく線量への影響を地質の調査データとともに適切に評価されているかを確認する必要がある。

## 2.3 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究

中深度処分における安全確保のために、廃止措置期間中までにおいて放射性物質の異常な漏えいがないこと、及び規制期間終了以降の移行抑制機能に関する見通しを示すことが求められる。見通しを示すための手段としては、人工バリア及び天然バリアが設計通りの性能を発揮していることを確認する性能確認モニタリング及び地下水の状態等を把握するための地下水モニタリング（以下「地下水等モニタリング」という。）が有効と考えられている。また、閉鎖確認では、埋め戻し等において処分坑道、地質ボーリングサンプリング孔、地下水モニタリング孔等（以下「ボーリング孔等」という。）が地下水の短絡経路とならないこと等の施設確認も必要である。さらに、許可後に設定される掘削制限区域の範囲設定の妥当性の評価でも地下水モニタリングは有効な手段である。

そこで、こうした地質環境及び水理環境モニタリングに関する科学的・技術的知見を取得するために、以下に示す検討を行った。

### 2.3.1 性能確認及び地下水モニタリングに関する諸外国の規制について

国内における廃棄物埋設の安全確保のために、地下水等モニタリングが人工バリア・天然バリアの性能確認、水質確認や異常な漏えい等に有効とされている。そこで、諸外国における埋設施設の地下水等モニタリングに関する考え方や規制制度について、フィンランド、米国、仏国及び英国の規制機関及び国際機関について整理するとともに、併せて事業者の対応についても整理した。この調査は公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターの委託事業において実施した業務内容である<sup>39</sup>。

調査結果から、事業開始前の廃棄物埋設地のベースラインモニタリングや事業中の定期的なモニタリング計画の見直しを事業者に求めている国がほとんどである。なお、我が国でも既に定期的なモニタリング計画の見直しは第二種廃棄物埋設事業規則に盛り込まれている。

### 2.3.2 地下水モニタリングに関する研究

中深度処分においては、天然バリアの地下水流動等の評価及び埋設地設置後の状態変化等をモニタリングすることが有効である。特に、水理環境状態を建設前の段階から把握し、管理期間終了までの 300～400 年間にわたり地下水モニタリングにより評価する必要がある。

そこで、以下に示すモニタリングに関する科学的・技術的知見の取得を行った。なお、この研究は産業技術総合研究所<sup>10</sup>の委託事業において実施した。

#### (1) 地下水モニタリング技術に関する既往事例

天然バリアの地質構造を考慮した地下水流動や水質の変動を把握するための効率的なモニタリング装置及びその配置や必要とされるモニタリング項目・期間といった適切なモ

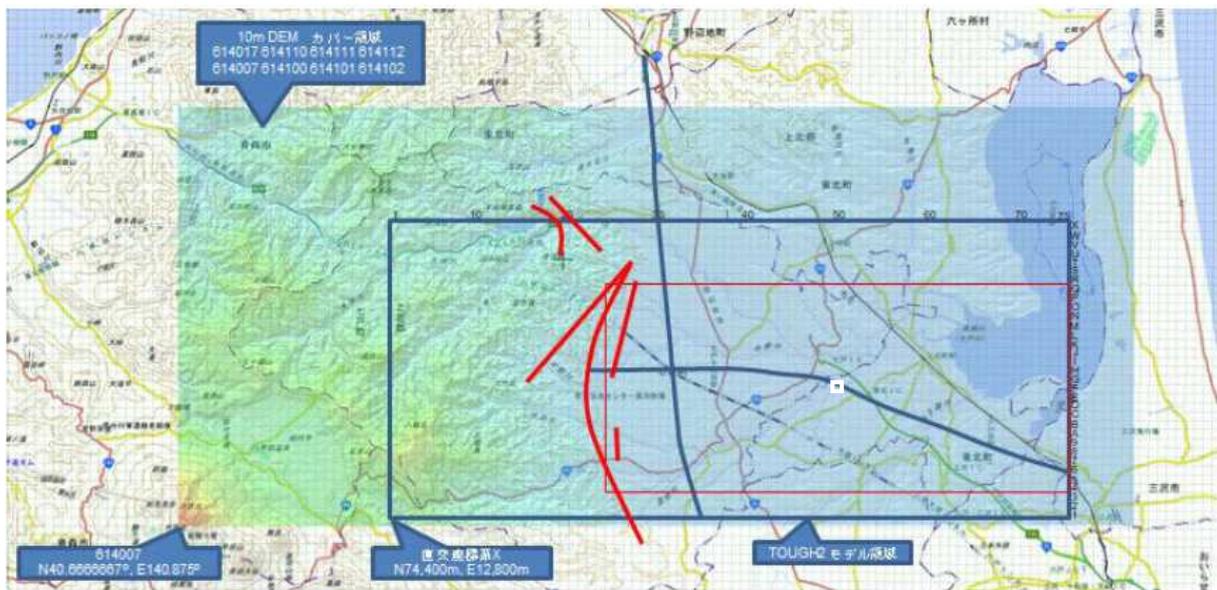
モニタリング計画を設定するための関連事項及び掘削制限範囲の設定のための知見の整理のため、既存の大規模地下空間利用の事例として、国家石油地下備蓄基地（久慈、菊間及び串木野）、国家石油ガス備蓄基地（波方及び倉敷）及び日本原子力研究開発機構地下実験施設（瑞浪及び幌延）に関して、既往公表文献から地下水モニタリングに関する情報を抽出し、以下のように取りまとめた<sup>35</sup>。

中深度処分等の放射性廃棄物処分の地下水モニタリングに関して、廃棄物埋設地周辺と地表との短絡を回避するために、廃棄物埋設地周辺を対象とした地表からのモニタリング孔掘削には制限が存在するため、廃棄物埋設地を含む地下構造物建設範囲の外側を中心とした地表からのモニタリングと地下構造物からの間隙水圧測定が必要である。ただし、想定されるモニタリング期間が長いため、モニタリング装置の選択等の課題があることが示唆された。

さらに、国内の大規模地下空間利用の実績は長くても 30 年程度であるため、300 年以上の期間が要求される中深度処分の地下水モニタリングに適用する際には、測定装置及びモニタリング孔そのものの耐久性や交換可能性を検討すべきこと、また、モニタリング孔の配置はサイト特性を考慮した計画が必要となるため、一般的に議論することは困難ではあるが、現在、水文学的調査によって地下水流動概念モデルを構築している地域を対象として、数値モデルを活用したモニタリング計画の策定や実際のボーリング調査や後続のモニタリング試験等を用いた検証を行うべきことが課題であることが分かった。

## (2) 掘削制限区域設定に関する地下水モニタリング

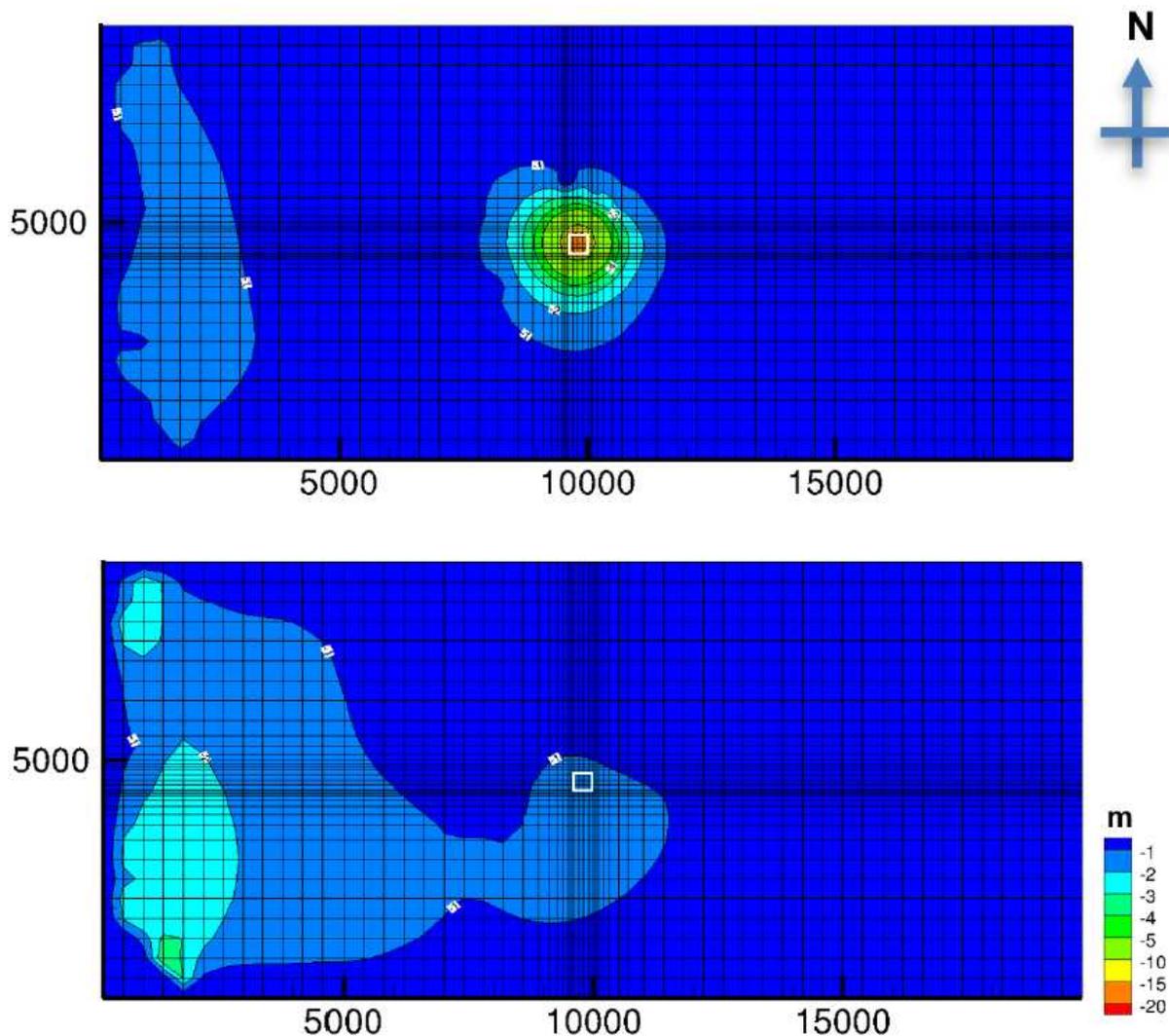
中深度処分の廃棄物埋設地において、掘削制限区域の設定に係る地下水モニタリングの評価を行うために、上北平野をモデル地区に選定し掘削調査及び既往調査で取得される水理特性を利用した広域の解析領域で地下水流動シミュレーション（以下「広域モデル」という。広域モデルは南北 13.2 km、東西 30 km の領域で、水平的に 400 m のメッシュで分割。図 2.3.1 の灰色枠部分。）を実施した。また、狭い領域で詳細な離散化したモデル（以下「サイト周辺モデル」という。サイト周辺モデルは南北 9 km、東西 19.8 km の領域。図 2.3.1 の赤枠部分。）を作成し、仮想した廃棄物埋設地（海拔-105 m に 500 m 四方高さ 10 m の領域を想定。図 2.3.1 の白枠。）の建設前と建設後の地下水の状態変化について比較検討した<sup>10</sup>。



出典) 産業技術総合研究所 (2020) <sup>10</sup>

図 2.3.1 広域モデル (灰色枠) 及びサイト周辺モデル (赤枠) の解析領域

Figure 2.3.1 Analysis field of regional scale model (gray frame) and site scale model (red frame)



出典) 産業技術総合研究所 (2020) <sup>10</sup>

図 2.3.2 サイト周辺モデルでの施設建設前の地下水水位を基準とした場合の地下水水位の差 (上: 操業時までの場合、下: 閉鎖後までの場合)

Figure 2.3.2 Difference in groundwater level based on groundwater level of a period from construction of site model (up: the case of operation, down: the case of closure)

解析結果より、地下水の水位の影響範囲は、仮想した廃棄物埋設地 (図 2.3.2 の白枠部分。) の直上を中心とする半径約 2 km の同心円状の領域で、埋設後は完全には元の水位に戻らず、幾分低め (-1 m から -2 m まで) の値で落ち着くことが分かった (図 2.3.2)。今回の地下水モデルでは、格子の切り方やパラメータの設定による擾乱の評価への影響が認められた。これは初期状態のモデル化が影響していると考えられた。このことは擾乱の場となり得る地下水系の初期状態の把握の重要性すなわちベースライン状態の把握という国際的な共通認識を踏まえたモニタリング計画の必要性を示唆するものと考えられる。

また、掘削制限区域の設定において、廃棄物埋設地周辺に掘削された井戸の汲み上げやトンネル等の地下空間建設が地下水流動に与える影響範囲を考慮した範囲を含め設定する

場合には、立地調査段階で把握された地下水流動場や水理地質構造に基づく周辺のモニタリング孔配置の設計、坑道掘削時の水位及び水圧への影響把握によるモニタリング孔の追加や掘削制限範囲設定へのフィードバック等が必要であることを示唆した。

### 2.3.3 閉鎖措置確認に関する研究

処分坑道、地質ボーリングサンプリング孔及び計測等モニタリング孔（以下「モニタリング孔」という。）は、適切に閉鎖により地下水の短絡経路等でないことを施設確認することが求められる。しかし、モニタリング孔の周辺岩盤、閉塞材及びストレーナー等の界面等が水みちとなり得ることが懸念されていることから、これらのモニタリング孔の閉鎖確認に資する科学的・技術的視点の取得が求められる。この研究は日本原子力研究開発機構の委託事業<sup>32</sup>において実施した。

#### (1) モニタリング孔の閉塞材に関する研究

ここでは、モニタリング孔の閉塞に係る閉塞材について、中深度処分で想定される深度におけるモニタリング技術やモニタリング機器の撤去及び観測孔の閉鎖方法に関する既往の技術的情報を取得した。それらを以下に示す。

調査ボーリング及びそれを利用したモニタリング孔の設置においては、ボーリング孔掘削時の掘削水の逸水に伴う水質汚染の管理が非常に重要であり、特に孔掘削時に水頭の異なる複数の地下水帯水層を孔が貫通した場合、高水頭の帯水層の地下水が低水頭の帯水層へ流入することにより、水質が乱されて長期にその影響が残留する場合がある。

また、複数の深度をモニタリング対象とする場合は、モニタリング区間が各帯水層を包含するように配置されていなければならない。また、複数の観測区間が割れ目などを介して岩盤中で連結しているとモニタリングのための採水によりお互いの区間の水圧・水質に影響を及ぼし得ることから、水圧応答データなどに基づきそれらの連結性の有無が確認されていることが必要である。

さらに、モニタリング設備の抜管・再設置に際しては、孔の安定性が問題となり、モニタリング孔の孔内の一部が崩れていた場合、モニタリングシステムの抜管は容易ではなくモニタリング孔より一回り大きい孔径でモニタリング孔をオーバーコアリングして、処分システムを損傷させながら回収することになることとなるため、それらに対する対策が採られていることが必要である。

#### (2) モニタリング孔等の閉鎖時に係る技術的知見の整理

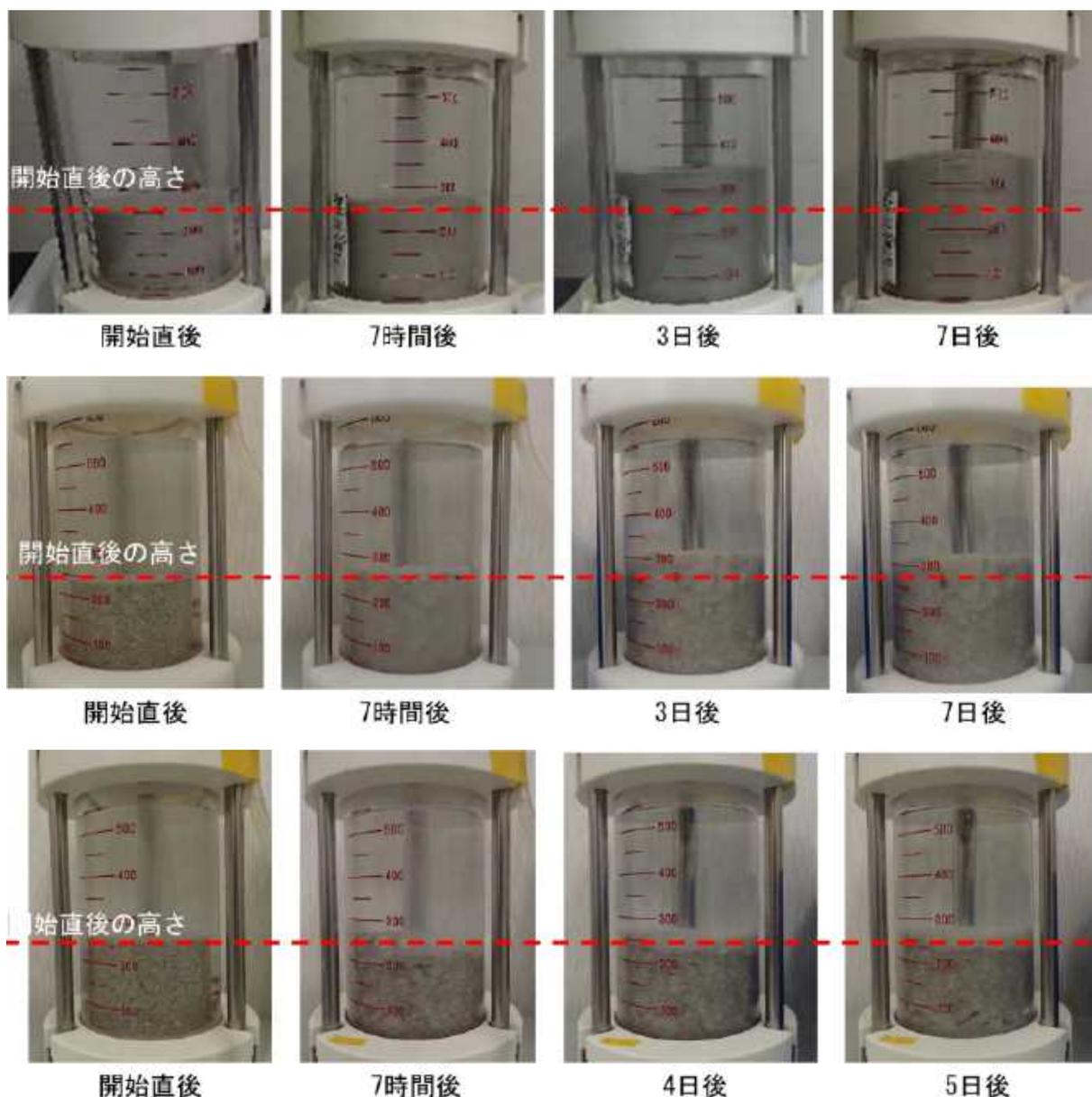
モニタリング孔等の閉塞・埋戻しの技術的成立性に係る妥当性判断に必要な知見及び閉鎖確認に係る技術的知見を整備する観点から、室内透水試験を実施し、水が移行しやすい経路が生じないようにモニタリング孔の埋戻しを行う際の閉塞材料の選定、止水性確認方法及び閉鎖方法の妥当性確認並びに次年度以降に計画する閉鎖確認の妥当性判断に資する試

験の実施に必要な知見を取得した。また、ボーリング孔を用いた閉鎖確認の妥当性判断に資する試験を行うための試験装置の設計を行い、閉塞・埋戻しの技術的成立性に係る妥当性判断に必要な知見及び閉鎖確認に係る技術的知見を整理した。(1)で収集した情報及び得られたデータを踏まえて、適切に閉鎖されたことを確認する際の判断指標を整理した。

#### ① ボーリング閉塞材に関する室内試験

閉塞材料の選定に関する知見を取得するため、室内試験を実施した。室内試験では、異なる材料で成形された閉塞材の膨潤過程の把握と閉塞材の選定を主な目的とした。試験手順としては、小型の亚克力セル内に円柱状に成形した閉塞材（以下「供試体」という。）を設置した後、セル内に注水し供試体の膨潤過程を目視観察した<sup>32</sup>。供試体は、a. 粉末ベントナイトのクニゲル V1（以下「粉末ベントナイト」という。）100%、b. 粒状ベントナイトのクニゲル GX（以下「粒状ベントナイト」という。）50%+珪砂 5号（以下「砂」という。）50%の混合土、c. 粒状ベントナイト 15%+砂 85%の混合土、d. 粉末ベントナイト 50%+砂 50%の混合土及び e. 粉末ベントナイト 15%+砂 85%の混合土を用いた。

目視観察の結果（図 2.3.3）から、試験開始直後に閉塞材とセルとの間にあった空間をベントナイトが膨潤することにより閉塞できることを確認した。



出典) 日本原子力研究開発機構 (2019) <sup>28</sup>

図 2.3.3 室内試験の結果 (上: 粉末ベントナイト 100 % の場合、中: 粒状ベントナイト 50 % + 砂 50 % の場合、下: 粒状ベントナイト 15 % + 砂 85 % の場合)

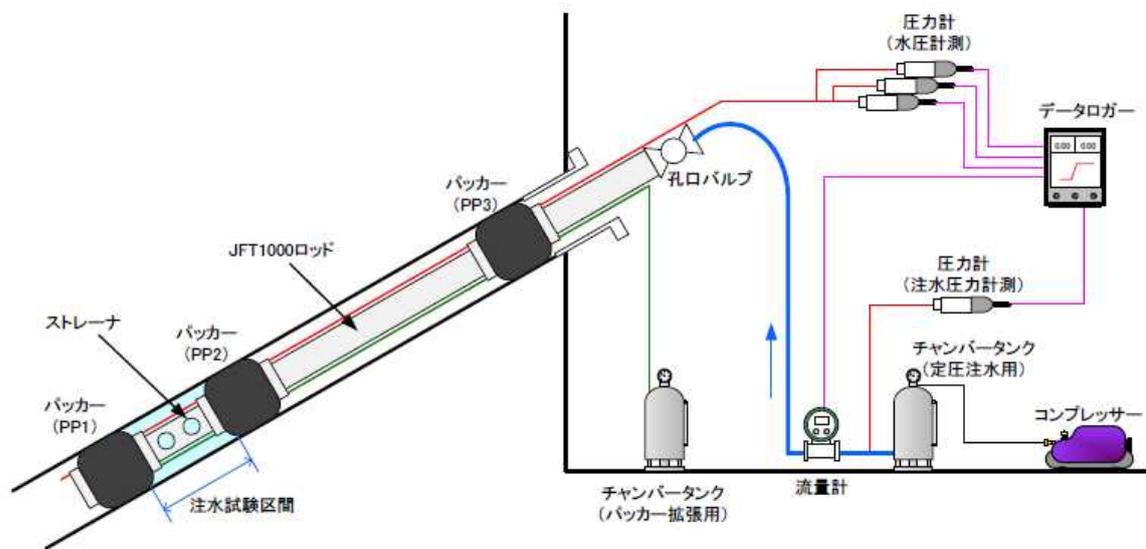
Figure 2.3.3 Results of laboratory test (up: sample case of 100 wt% bentonite, middle: sample case of bentonite:sand=1:1, down: sample case of bentonite:sand=0.15:0.85)

## ② ボーリング孔閉塞に関する原位置試験

ボーリング孔の経路閉鎖手法の妥当性確認に必要な科学的・技術的知見を取得するために、諸外国の先行事例及び①の室内試験による知見に基づき、ベントナイトと砂でボーリング孔を埋め戻す方法 (以下「サンドイッチ工法」という。) による原位置試験を行い、ボーリング孔の閉鎖前後での注水量、水圧等を計測した。なお、原位置試験は、瑞浪超深

地層研究所の深度 300 m 研究坑道内の 11 m 計測横坑内に掘削された 10MI25 号孔（掘削長：約 35 m、掘削角度：水平下向き約 30°、孔径：φ 86 mm）で行った（図 2.3.4）<sup>32</sup>。

原位置試験による閉鎖確認の結果から、サンドイッチ工法による閉塞法は周辺岩盤と同程度以下の透水性を発揮することが確認できた。しかし、堆積岩等の他の岩種における適用性等が課題として残っていることから、今後は、一般化に向けた検討が必要である。また、ボーリング孔空洞部以外の移行経路（孔周辺のゆるみ域等）に係る知見の整理も必要となる。



出典) 日本原子力研究開発機構 (2019) <sup>28</sup>

図 2.3.4 原位置透水試験の概略図

Figure 2.3.4 Layout of water injection permeability test in-situ

### 3. 結論

#### 3.1 成果の要点

本研究では、中深度処分の基準作りに活用する科学的・技術的知見のみならず、中深度処分、ピット処分及びトレンチ処分の許可申請の審査において妥当性を判断するための科学的・技術的知見を取得し、以下のような成果を得た。

##### ・3.1.1 廃棄物埋設地の位置に係る自然事象の長期評価に関する研究

隆起量及び侵食量に関して、時間スケールの異なる複数の隆起・侵食速度評価手法をまとめ、放射性廃棄物の埋設処分等の  $10^5$  年オーダーに適した手法として、隆起では段丘面高度に基づく手法、侵食では宇宙線生成核種を用いた手法などを示した<sup>1</sup>。過年度に確立したルミネッセンス年代測定法による堆積年代の決定と詳細な堆積相解析による海面指標の認定法を組み合わせた隆起速度評価手法や既存文献のデータを比較することで、どの程度の範囲までを同じ隆起量として良いかという隆起量の空間スケールについて検討し、可能な限り埋設地とその近傍において隆起量を評価することが望ましいことが示された<sup>10</sup>。

断層等の調査に関して、地表から断層を探查するための各種物理探査法の特徴をまとめ、反射法地震探査が断層や地下構造の評価に最も有効度が高いことを示した<sup>1</sup>。断層の長さの判定については認定フローにまとめた一方で、探查測線の設定等には極めて高度な専門的知識を要することから評価の在り方の検討が必要であるとした<sup>1</sup>。また、過去の海底地すべり面が中深度処分の埋設地に与える影響においては、地すべり面が中深度処分の埋設地を直接的に破壊するような滑動を引き起こす可能性がある場合はこのような場所は避けて埋設地が設置されることから、深度の確保に係わる離隔距離 70m を低減させるような可能性を検討すべきと整理された。

地下水流動に関して、青森県の上北地域において、既存井戸の水試料とボーリングから揚水試料と間隙水試料を分析し、放射性炭素年代、酸素水素同位体比、トリチウム濃度、希ガス涵養温度を計算し、氷期に涵養した地下水（おおむね 10,000 年以上前）が支配的であることが分かった<sup>10</sup>。既存井戸の水試料による調査では、深度 100 m 程度以浅の情報は不明確であったが、ボーリング調査によって寒冷期の特徴を示す地下水の流動する領域は想定以上に浅層まで及んでおり、その後の温暖期に地表から涵養した地下水の影響は限定的（深度 20 m 程度）であることが明らかとなった<sup>1,10</sup>。瀬戸内地方においては、水の水素安定同位体比、酸素安定同位体比及び  $^{14}\text{C}$  年代値等の地球化学的指標を使って、沿岸域での氷期の淡水の地下深部への涵養及び内陸部での海進時の海水の涵養が確認できた<sup>10</sup>。地下水分析によって、滞留している地下水の年代を把握する手法が複数あり、これらの地下水年代が放射性廃棄物埋設地の適地を評価する手法として有効であることが示唆された<sup>10</sup>。

岩盤の力学・水理特性に関して、瑞浪超深地層研究所の坑道を使って、結晶質岩のEDZを調査した。BIPシステムを使い、割れ目の走行、傾斜及び開口幅の解析を行い、開口割れ目の位置を確認した。また、パッカーを使った水理試験を行い、透水係数を計測した。し

かし、BIPシステムで確認できた開口割れ目の位置と、透水係数の高い区間は必ずしも一致しなかった。弾性波探査試験を実施したところ、坑道壁面に近いところで弾性波速度が低い区間を確認できた<sup>26</sup>。これは透水試験によって確認できた透水係数の高い場所と整合的である。以上の手法は、結晶質岩地域に中深度処分の埋設地を建設したときに、EDZの形成の有無を確認するための手法として活用できる可能性がある。

### ・3.1.2 廃棄物埋設における性能評価手法に関する研究

ベントナイト系人工バリアの長期性能評価に関して、ベントナイトに対するイオン種の見かけの拡散係数について調査及び取りまとめを行い、処分場環境で重要と考えられるカリウムに関するデータが不足していることから、室内試験により見かけの拡散係数を取得した<sup>32</sup>。また、ベントナイトとセメント系材料の相互作用により生成する二次鉱物の種類について調査を行い<sup>34</sup>、ヒューランダイト、チャバサイト及びC-(A-)S-H型鉱物（トバモライト及びC-(A-)S-Hゲル）の3鉱物がベントナイト中の間隙水組成をコントロールしていることが示唆された。これらの知見は、セメント系材料ーベントナイトの接触界面付近における物質移行ー変質連成解析に取り込むことが可能と考えられる。

セメント系人工バリアの長期性能評価に関しては、物質移行の評価の観点から①細孔構造の変遷と物質移行性、②セメント結晶（非晶質を含む）の変遷による物質移行性、③体積変化による物質移行性、さらに、空隙や材料特性に寄与する④収着性と物質移行性、の四視点に着目する必要と考えるが、本研究では①及び②について予備的研究を行った。その結果、①細孔構造の変遷と物質移行性については、細孔構造の特定について、従来土木建築分野で用いられている水銀圧入ポロシメーターは、セメントマトリックス中の空隙を破壊することに加え物質移行を評価すべき層間空隙及びゲル空隙の微小空隙は計測できないことが明らかとなった<sup>32,34</sup>。一方、水蒸気吸着装置は、層間空隙及びゲル空隙の測定に適していることに加え吸着特性も同時に計測できることから廃棄物処分での物質移行を評価する微小空隙等の計測に適していることが分かった<sup>32,34</sup>。一方、②セメント結晶（非晶質含む）の変遷による物質移行性については、CSHゲル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NMR法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）を同一試料による測定を行い、CSHゲルの結晶形態の評価を行った<sup>32,34</sup>。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ゲルの結晶変化を評価するに十分な情報が得られることが確認されたため<sup>32,34</sup>、今後は、様々な材料調査に基づく計測を行い、結晶安定性の一般化評価手法を取得する。

天然バリアの自然事象を考慮した水理特性の評価に関して、過去から現在までの地形・地質のデータを活用して過去から現在の地形変化を説明しつつ、将来への外挿における不確かさ（将来の隆起量、海水準変動等）を考慮した地形変化評価の方法論を整理した<sup>31,28,34</sup>。また、この方法論に基づき我が国の典型的な集水域を対象に不確かさを考慮した過去

～現在～将来の地形変化の評価を行った結果、現在埋没谷が形成されている海域・下流域周辺では海水準変動に伴い地形勾配が有意に変動するため、埋設地がこの周辺に計画されている場合、埋設深度の減少及び将来の地形変化が地下水流動に与える影響を確認することが重要となること等を確認し、地形変化評価の妥当性判断における留意点を抽出・整理した<sup>34</sup>。さらに、これら地形変化の評価結果に基づき、非定常の三次元地下水流動・核種移行評価を行った結果、海域では海水準変動による汀線の移動に伴い流速が変化するが、陸域でも海水準変動による侵食基準面の移動に伴い地形勾配が変化する影響により流速が変化する領域が存在すること等を確認し、地形変化を考慮した地下水流動・核種移行評価の妥当性判断における留意点を抽出・整理した<sup>34</sup>。

### ・3.1.3 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究

地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究は、中深度処分では廃止措置期間中までにおいて放射性物質の異常な漏えいがないこと、及び規制期間終了以降の移行抑制機能に関する見通しを示すこととして、地下水等モニタリングが必要である。また、閉鎖確認では埋め戻し等においてボーリング孔等が地下水の短絡経路とならないこと等の施設確認も必要である。さらに、許可後に設定される掘削制限区域の範囲設定の妥当性の評価でも地下水モニタリングが求められる。そこで、こうした地質環境及び水理環境モニタリングに関する科学的・技術的知見を取得した<sup>10,31,39</sup>。

## 3.2 目的の達成状況

廃棄物埋設地の位置に係る自然事象の長期評価に関する研究については、隆起及び侵食、断層、地下水流動、岩盤の力学・水理特性、岩盤の収着・移行現象における評価の視点に関する科学的・技術的知見を抽出し、当初の目的を達成した。

廃棄物埋設における性能評価手法に関する研究については、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は、長期変質挙動に関しては、淡水―塩水混合系地下水環境の廃棄物埋設地が位置する環境における評価手法の妥当性について科学的・技術的知見の取得を行い、当初の目的を達成した。また、セメント系人工バリアの長期性能評価手法の研究では、物質移行に寄与するセメント硬化体の特徴を4つの分類に整理し、なかでも長期性能評価に必要なCSHゲルに着目して細孔構造の計測法及び結晶安定性評価の手法に関する科学的・技術的妥当性を抽出し、当初の目的を達成した。

地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究では、諸外国の規制機関でのモニタリング手法及び制度について調査した。また、国内における地下水モニタリング技術の現状及び問題点を明確にした。一方、閉鎖確認に関する研究では、ボーリング孔について、原位置試験において漏えい確認試験、室内試験においてはベントナイト閉塞材における漏えい等の試験により漏えい等の確認における問題点の抽出を行い、当初の目的を達成した。

### 3.3 成果の公表等

#### 3.3.1 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

(1) NRA 技術報告

なし

(2) 論文（査読付）

なし

(3) 国際会議のプロシーディング（査読付）

なし

(4) 表彰・受賞

なし

#### 3.3.2 委託先による公表

(1) 論文（査読付）

- ① M. Takeda, M. Manaka, K. Ito, A Method for Estimating Geologic Pressure in Argillaceous Formations Based on the State of Dynamic Equilibrium between Chemical Osmosis and Advection, Journal of Hydrology, Vol. 579, (2019)
- ② 村上裕晃、岩月輝希、竹内竜史、西山成哲、放射性廃棄物の処分分野における地下水モニタリングの方法、原子力バックエンド研究、27、1、pp.22-33、令和2年

(2) 国際会議のプロシーディング（査読付）

なし

(3) その他

- ① 村上裕晃、岩月輝希、竹内竜史、前田敏克、放射性廃棄物の中深度処分におけるボーリング孔の閉鎖に関する現状と課題、日本原子力学会バックエンド部会夏期セミナー、平成30年8月
- ② 戸崎裕貴、森川徳敏、風早康平、塚本齊、佐藤努、高橋浩、高橋正明、稲村明彦、青森県上北平野における地下水の水質・同位体組成と地下水流動系、日本地球化学会第65回年会、平成30年9月
- ③ 島田太郎、打越絵美子、高井静霞、武田聖司、核種移行へ影響を及ぼす隆起・侵食・海水準変動による地形変化評価の検討、日本原子力学会バックエンド部会夏期セミナー、令和元年8月

- ④ 村上裕晃、西山成哲、岩月輝希、竹内竜史、ボーリング孔の閉塞材としてのベントナイトの膨潤挙動と透水性、日本地下水学会 2019 年秋季講演会、令和元年 10 月
- ⑤ 伊藤一充、田村亨、山口県宇部市周辺の段丘堆積物の pIRIR 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 2019 年度合同研究会、令和元年 11 月
- ⑥ K. Ito, Strategies and problems of groundwater monitoring in radioactive waste disposals, International Symposium on Earth Science and Technology 2019, 令和元年 12 月
- ⑦ S. Maeda, T. Matsuzawa, T. Okada, T. Yoshida, H. Kosuga, H. Katao, M. Otsubo, Stress field estimated from microseismicity in the northeastern edge of the Honshu around the junction between the northeastern Japan arc and the Kurile arc, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, 令和 2 年 5 月
- ⑧ 高井静霞、島田太郎、打越絵美子、武田聖司、将来の海水準変動の不確かさを考慮した長期的な地形変化評価、日本原子力学会 2020 秋の大会、令和 2 年 9 月
- ⑨ 笹川剛、木嶋達也、澤口拓磨、飯田芳久、ベントナイトーセメント界面で生成する二次鉱物の設定に係る検討(1)二次鉱物設定についての考え方の整理、日本原子力学会 2020 秋の大会、令和 2 年 9 月
- ⑩ 木嶋達也、笹川剛、澤口拓磨、飯田芳久、ベントナイトーセメント界面で生成する二次鉱物の設定に係る検討(2)ベントナイト透水性に対する二次鉱物設定の感度解析、日本原子力学会 2020 秋の大会、令和 2 年 9 月
- ⑪ 高井静霞、島田太郎、打越絵美子、武田聖司、将来長期の地形変化・海水準変動に伴う地下水流動への影響の解析的検討、日本地下水学会 2020 年秋季講演会、令和 2 年 11 月

### 3.4 成果の活用等

中深度処分に係る規則及びその解釈作成のための検討、並びに中深度処分、ピット処分及びトレンチ処分の許可申請の審査時に活用されることが想定される。

### 3.5 今後の課題等

本研究は、中深度処分の規制基準等の整備、適合性審査及び後続規制での確認の際の判断に必要な知見の収集・整備における人工バリアの長期性能評価手法及び天然バリアとなる地質環境の長期安定性評価手法の整備に係る科学的・技術的知見の蓄積を行うための研究を行った。中深度処分は、埋設される廃棄物の特性、廃棄物埋設地が設置される環境条件及び廃棄物埋設地の設計によるが、極めて地下水流速が小さく安定した地質水理環境条件の位置で廃棄物からの放射性物質の漏出及び移行を長期間抑制されるようことが求められる。今後、このような条件をより具体的に設定し、審査における判断に適用できる知見を得るための検討を進める必要がある。特に、極めて遅い地下水流動の場であることを証明する手法に関する検討は、引き続き重要である。また、高透水性の経路を形成してこうした処分システムの性能を低下させる可能性のある坑道のゆるみ域、ボーリング孔等についての特性把握、適切な閉鎖及びその確認に関する検討は重要であり、岩盤の力学的状態と水理学的特性に関する研究等を進める必要がある。

## 参考文献一覧

- 1 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、405p、2019 年
- 2 地震調査研究推進本部、南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）、2013 年
- 3 小池一之・町田 洋、日本の海成段丘アトラス。東京大学出版会、122p、2001 年
- 4 田力正好、河成段丘を用いて推定される内陸部の広域的な地殻変動－現状と課題。地理科学、60、143-148、2005 年
- 5 幡谷竜太、河成段丘を用いた第四紀後期の隆起量評価手法の検討 (1) 一段丘対比の考え方の提案と河成段丘の編年に関わるケーススタディー、電力中央研究所報告、N05005、28p、2005 年
- 6 幡谷竜太、河成段丘を用いた第四紀後期の隆起量評価手法の検討 (2) 一那珂川沿いに分布する河成段丘の層序－、電力中央研究所報告、N05016、29p、2006 年
- 7 幡谷竜太、河成段丘を用いた第四紀後期の隆起量評価手法の検討 (3) 一過去 10 万年間の隆起量分布により明らかにされた内陸部の地殻変動－、電力中央研究所報告、N05017、21p、2006 年
- 8 吉山 明・柳田 誠、河成地形面の比高分布からみた地殻変動、地学雑誌、104、809-826、1995 年
- 9 Siame, L., Bellier, O., Braucher, R., Sebrier, M., Cushing, M., Bourles, D., Hamelin, B., Baroux, E., de Voogd, B., Raisbeck, G., and Yiou, F., Local erosion rates versus active tectonics: cosmic ray exposure modelling in Provence (south-east France), Earth and Planetary Science Letters, v. 220, no. 3-4, p. 345-364, 2004
- 10 産業技術総合研究所、平成 31 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を考慮した地盤の性能評価に関する調査、2020 年
- 11 幡谷竜太・柳田 誠・鳥越祐司・佐藤 賢、後期更新世以降の現海岸線での下刻、応用地質、57、15-26、2016 年
- 12 日本原燃株式会社、日本原燃株式会社濃縮・埋設事業所における第二種廃棄物埋設事業許可申請書、2018 年
- 13 産業技術総合研究所、平成 29 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、231p、2018 年
- 14 宮内崇裕、上北平野の段丘と第四紀地殻変動。地理学評論、58、492-515、1985 年
- 15 田中和広・遠田晋次・上田圭一・千木良雅弘、わが国の地質環境の長期的変動特性評価(その 2) 一隆起・沈降特性評価手法の提案と適用性検討一、電力中央研究所報告、U96028、25p、1997 年
- 16 Matsu'ura T., Kimura H., Komatsubara J., Goto N., Yanagida M., Ichikawa K. and Furusawa A., Late Quaternary uplift rate inferred from marine terraces, Shimokita Peninsula,

- northeastern Japan: A preliminary investigation of the buried shoreline angle. *Geomorphology*, 209, 1-17, 2014
- 17 宮崎真由美・石村大輔、テフロクロロジーに基づく三陸海岸北部における最終間氷期海成段丘の形成年代と最終間氷期以降の地殻変動の再検討、*地学雑誌* 127、735-757、2018年
  - 18 松四雄騎・松崎浩之・千木良雅弘、宇宙線生成核種による山地流域からの長期的土砂生産量の推定、*応用地質*、54、272-280、2014年
  - 19 Granger,D.E., Kirchner,J.W. and Finkel,R., Spatially averaged long-term erosion rates measured from in situ-produced cosmogenic nuclides in alluvial sediment, *Journal of Geology*, 104, 249-25, 1996
  - 20 Ishii E, Funaki H, Tokiwa T, Ota K, Relationship between fault growth mechanism and permeability variations with depth of siliceous mudstones in northern Hokkaido, Japan. *Journal of Structural Geology*.32(11):1792-1805, 2010
  - 21 Sawada A, Uchida M, Shimo M, Yamamoto H, Takahara H, Doe TW, Non-sorbing tracer migration experiments in fractured rock at the Kamaishi Mine, Northeast Japan. *Eng Geol*.56(1-2):75-96, 2000
  - 22 産業技術総合研究所深部地質環境研究コア、地質処分に係る地質情報データの整備、平成22年度事業報告書、2011年
  - 23 産業技術総合研究所深部地質環境研究コア、地質処分に係る地質情報データの整備、平成23年度事業報告書、2012年
  - 24 Katsuyama, M., Yoshioka, T. and Konohira, E. , Spatial distribution of oxygen-18 and deuterium in stream waters across the Japanese archipelago, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 1577-1588, 2015
  - 25 Aeschbach-Hertig, W., Peeters, F., Beyerle, U., and Kipfer, R., Interpretation of dissolved noble gases in natural waters, *Water Resources Research*, 35, 2779-2792, 1999
  - 26 日本原子力研究開発機構・原子力規制庁、廃棄物埋設の坑道閉鎖措置確認に係る研究、2022年公表予定
  - 27 川本康司・村上裕晃・石橋正祐紀・笹尾英嗣・渡辺和彦・見掛信一郎・池田幸喜、超深地層研究所計画 瑞浪超深地層研究所 研究坑道の壁面調査一タ集、*JAEA-Data/Code* 2012-014, 2014年
  - 28 日本原子力研究開発機構、平成26年度地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備（核種移行データベースの整備）、2015年
  - 29 日本原子力研究開発機構、平成27年度燃料デブリの処理・処分に係る予察的調査、2016年
  - 30 日本原子力研究開発機構、平成28年度燃料デブリの処理・処分に係る予察的調査、2017年
  - 31 日本原子力研究開発機構、平成29年度原子力規制庁委託成果報告書 廃棄物埋設地の安全評価に関する調査、2018年

- 32 日本原子力研究開発機構、平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書 廃棄物埋設における性能評価手法に関する調査、2019 年
- 33 Appelo, C. A. J., Wersin, P., Multicomponent diffusion modeling in clay systems with application to the diffusion of tritium, iodide, and sodium in Opalinus clay: *Environmental Science and Technology*, v. 41, no. 14, p. 5002-5007, 2007
- 34 日本原子力研究開発機構、平成 31 年度原子力規制庁委託成果報告書 廃棄物埋設における核種移行に係る性能評価に関する研究、2020 年
- 35 笹川剛・木嶋達也・澤口拓磨・飯田芳久、ベントナイト-セメント界面で生成する二次鉱物の設定に係る検討 (1) 二次鉱物設定についての考え方の整理、2020 年
- 36 原子力規制委員会：廃炉等に伴う放射性廃棄物に関する検討チーム（第二回会合）、資料 2-1 頁 16
- 37 土木学会コンクリート（3種）委員会、混和材料を使用したコンクリートの物性評価技術と性能規定型材料設計に関する研究小委員会(353)報告書、2018 年 7 月
- 38 登坂博行 (2002) 地質時間にわたる淡塩漸移帯の形成過程と形態変化に関する数値解析的検討 (その 2) - 動的境界条件下における検討一、*応用地質* 43(5)、pp. 306-315、2002 年
- 39 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書 安全規制及び安全基準に係る内外の動向調査、2018 年

## 執筆者一覧

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 核燃料廃棄物研究部門  
山田 憲和 首席技術研究調査官  
入江 正明 技術研究調査官  
廣田 明成 技術研究調査官  
河原木千恵 技術研究調査官  
市来 高彦 技術研究調査官  
伊藤 一充 技術研究調査官  
鏡 健太 技術研究調査官  
木嶋 達也 技術研究調査官  
室田 健人 技術研究調査官