

超深地層研究所計画における調査研究計画

－第3期中長期計画における調査研究－

Investigation Plan for the Mizunami Underground Research Laboratory Project
-Investigation Plan for the Third Medium to Long-term Research Phase-

濱 克宏 岩月 輝希 松井 裕哉 見掛 信一郎
笹尾 英嗣 大澤 英昭

Katsuhiko HAMA, Teruki IWATSUKI, Hiroya MATSUI, Shinichiro MIKAKE
Eiji SASAO and Hideaki OSAWA

バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター
地層科学研究部

Geoscientific Research Department
Tono Geoscience Center
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

June 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2016

超深地層研究所計画における調査研究計画
—第3期中長期計画における調査研究—

日本原子力研究開発機構
バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部

濱 克宏, 岩月 輝希, 松井 裕哉, 見掛 信一郎, 笹尾 英嗣, 大澤 英昭

(2016年1月18日受理)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（原子力機構）バックエンド研究開発部門東濃地科学センターでは、「地層処分技術に関する研究開発」のうち深地層の科学的研究（地層科学研究）の一環として、結晶質岩（花崗岩）を主な対象とした超深地層研究所計画を進めている。超深地層研究所計画は、「第1段階；地表からの調査予測研究段階」、「第2段階；研究坑道の掘削を伴う研究段階」、「第3段階；研究坑道を利用した研究段階」の3段階からなる計画である。超深地層研究所計画では、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」及び「深地層における工学技術の基盤の整備」を第1段階から第3段階までを通した全体目標として定め、調査研究を進めている。

本稿では、第3期中長期計画期間のうち、平成27年度から平成31年度までの深度500mまでの研究坑道を利用して実施する調査研究の計画を取りまとめた。具体的には、原子力機構改革の中で必須の課題として抽出した①地下坑道における工学的対策技術の開発、②物質移動モデル化技術の開発、③坑道埋め戻し技術の開発、の3つの研究開発課題の設定の考え方、必須の課題の内容、課題解決のための調査研究計画などを取りまとめた。

Investigation Plan for the Mizunami Underground Research Laboratory Project
—Investigation Plan for the Third Medium to Long-term Research Phase—

Katsuhiro HAMA, Teruki IWATSUKI, Hiroya MATSUI, Shinichiro MIKAKE,
Eiji SASAO and Hideaki OSAWA

Geoscientific Research Department, Tono Geoscience Center
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management
Japan Atomic Energy Agency
Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received January 18, 2016)

The Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project is being pursued by the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) to enhance the reliability of relevant disposal technologies for geological disposal of High-level Radioactive Waste through investigations of the deep geological environment within the host crystalline rock at Mizunami City in Gifu Prefecture, central Japan. The project proceeds in three overlapping phases, “Phase I: Surface-based investigation Phase”, “Phase II: Construction Phase” and “Phase III: Operation Phase”. The MIU Project has been ongoing the Phase III, as the Phase II was concluded for a moment with the completion of the excavation of horizontal tunnels at GL-500m level in February 2014. The present report summarizes the research and development activities planned mainly in the GL-500m stage.

Keywords: Mizunami Underground Research Laboratory, MIU Project, Geological Disposal of HLW

目 次

はじめに	1
1 超深地層研究所計画の目標.....	2
2 超深地層研究所計画の必須の課題.....	3
2.1 必須の課題の設定の考え方.....	3
2.2 抽出した必須の課題.....	5
2.3 施設計画（坑道展開）	7
3 調査研究計画.....	9
3.1 地下坑道における工学的対策技術の開発.....	9
3.2 物質移動モデル化技術の開発.....	12
3.3 坑道埋め戻し技術の開発	19
4 試験等スケジュール	37
5 成果の取りまとめ.....	38
おわりに.....	38
参考文献.....	38

Contents

Introduction	1
1 Goals of the Mizunami underground research laboratory project.....	2
2 Important issues to be solved	3
2.1 Basic concept for setting important issues	3
2.2 Important issues extracted	5
2.3 Plan for the underground facility construction.....	7
3 Plan for the research and development	9
3.1 Engineering technology in the deep underground	9
3.2 Mass transport modeling methodology.....	12
3.3 Drift back-filling technology	19
4 Schedule of the research and development activity	37
5 Synthesis of the result	38
Conclusive remarks	38
References	38

図リスト

図 2.1-1	処分事業の進展段階と研究成果の要点と反映先.....	4
図 2.1-2	わが国の深地層の研究施設計画において解決すべき課題の確認 (瑞浪超深地層研究所の例)	4
図 2.1-3	「地層処分事業の技術開発計画」の課題と必須の課題との対比.....	5
図 2.2-1	地下坑道における工学的対策技術の開発.....	6
図 2.2-2	物質移動モデル化技術の開発.....	6
図 2.2-3	坑道埋め戻し技術の開発	7
図 2.2-4	超深地層研究所計画の必須の課題と研究実施場所	8
図 3.1-1	ポストグラウトによる湧水抑制評価の概念.....	10
図 3.2-1	DFN モデルに基づく地下水流動解析のアプローチ	13
図 3.2-2	深度 500m ステージにおけるボーリング調査予定位置	14
図 3.2-3	水理・物質移動特性評価のためのモデル構築の流れとそれに関わる課題の抽出	14
図 3.2-4	深度 300m ステージで観察された割れ目の特徴 (割れ目の透水性とその地質学的特徴 のまとめ)	15
図 3.2-5	透過拡散試験結果.....	15
図 3.2-6	地上からの調査により構築された地球化学モデル	18
図 3.3-1	再冠水試験の流れ.....	19
図 3.3-2	再冠水試験で実施する観測・技術開発内容.....	20
図 3.3-3	冠水坑道における割れ目分布と連結性	21
図 3.3-4	光ファイバ式岩盤変位計のシステム構成.....	23
図 3.3-5	冠水に伴う水圧回復予測解析の一例.....	24
図 3.3-6	冠水坑道周辺での水質観測結果.....	25
図 3.3-7	ボーリングピット埋め戻し試験.....	26
図 3.3-8	止水壁に関わる応力解析	28
図 3.3-9	孔壁の破壊状況 (東濃鉱山)	29
図 3.3-10	破壊限接近度と破壊までの寿命の関係	29
図 3.3-11	研究坑道の建設～閉鎖後の周辺の地質環境変化のイメージ.....	32
図 3.3-12	研究坑道における既存ボーリング孔.....	34
図 3.3-13	冠水坑道周辺における各種観測装置	35

表リスト

表 3.2-1	日本の地質環境の特徴.....	12
表 3.3-1	水圧・水質観測区間の概要.....	22
表 4-1	試験等スケジュール (案)	37

はじめに

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（原子力機構）は、原子力発電環境整備機構（NUMO）による高レベル放射性廃棄物の地層処分事業と国による安全規制の両面を支えるため、国が定めた「独立行政法人（当時）日本原子力研究開発機構が達成すべき業務運営に関する目標」（中期目標）¹⁾ 及び原子力機構が作成した「独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画」（中期計画）²⁾ に基づき、地層処分技術に関する研究開発を進めてきた。超深地層研究所計画では、地層処分技術に関する研究開発のうち深地層の科学的研究（地層科学研究）を進めてきている。

原子力機構では、文部科学省日本原子力研究開発機構改革本部が決定した「日本原子力研究開発機構の改革の基本的方向」（平成 25 年 8 月 8 日）³⁾ を受けて、改革計画⁴⁾ を策定し公表した（以下、機構改革）。その中の事業の見直しの一環として、瑞浪と幌延の 2 つの深地層の研究施設については、平成 27 年 3 月までに予定していた研究開発成果の取りまとめを前倒して平成 26 年 9 月末までに行うとともに、併せて深地層の研究施設で行うべき必須の課題を明確にすることとなった。研究開発成果については、成果報告書⁵⁾ などに取りまとめられ公開されている。

本計画書では、機構改革において抽出された第 3 期中長期計画期間における平成 27 年度から平成 31 年度までの超深地層研究所計画における必須の課題の設定の考え方、必須の課題の内容、課題解決のための調査研究計画などを取りまとめた。

1. 超深地層研究所計画の目標

原子力機構バックエンド研究部門東濃地科学センターでは、地層処分技術に関する研究開発のうち深地層の科学的研究（地層科学研究）の一環として、結晶質岩（花崗岩）を対象とした超深地層研究所計画を進めている。本計画は、「第1段階；地表からの調査予測研究段階」、「第2段階；研究坑道の掘削を伴う研究段階」、「第3段階；研究坑道を利用した研究段階」の3段階からなる。

超深地層研究所計画では、第1段階から第3段階までを通した全体目標および各段階での段階目標も設定している。なお、全体目標および段階目標の詳細については、日本原子力研究開発機構（2015）⁶⁾ほかを参照されたい。なお、本計画書で取り扱う必須の研究開発課題については、「研究坑道を利用した研究段階（第3段階）」として実施するものである。

【全体目標】

- ①深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備
- ②深地層における工学技術の基盤の整備

【段階目標】

(1) 地表からの調査予測研究段階（第1段階）の目標

- ①地表からの調査研究による地質環境モデルの構築および研究坑道掘削前の深部地質環境の状態の把握
- ②研究坑道の詳細設計および施工計画の策定
- ③研究坑道の掘削を伴う研究段階等の調査研究計画の策定

(2) 研究坑道の掘削を伴う研究段階（第2段階）の目標

- ①研究坑道の掘削を伴う調査研究による地質環境モデルの構築および研究坑道の掘削による深部地質環境の変化の把握
- ②研究坑道の施工・維持管理にかかわる工学技術の有効性の確認
- ③研究坑道を利用した研究段階の調査研究計画の策定

(3) 研究坑道を利用した研究段階（第3段階）の目標

- ①研究坑道を利用した調査研究による地質環境モデルの構築および研究坑道の掘削から維持管理・閉鎖に伴う深部地質環境の変化の把握
- ②深地層における工学技術の有効性の確認

2. 超深地層研究所計画の必須の課題

2.1 必須の課題の設定の考え方

改革計画において、深地層の研究施設計画については、平成 27 年 3 月に「精密調査前半」に資することを目的とした成果を取りまとめるとともに、必須の課題を明確にした今後の計画の策定を、平成 26 年 9 月末までに行うこととしていた。これに基づき、超深地層研究所計画（瑞浪）（結晶質岩）及び幌延深地層研究計画（堆積岩）の 2 つの深地層の研究施設計画において今後実施すべき必須の課題を検討した。これまで、瑞浪では深度 500m まで、幌延では深度 350m までの立坑掘削と水平坑道を展開しながら、地質環境を調査・評価する技術や深地層における工学技術の開発を着実に進めてきた。

今後とも、長期にわたる地層処分事業の過程で科学技術の進歩や事業の進展状況等によって発生する研究ニーズに継続的に取り組んでいく必要があり、計画の策定にあたっては、深地層の研究施設がこうした長期の取り組みに対応する重要なインフラであることを念頭に置くことが必要である。

深地層の研究施設計画に係る必須の課題の抽出は、以下の方法により進めた。

－今後の課題の網羅的抽出と必要性の確認

- ・ 当初の研究開発計画に対する第 2 期中期計画期間までの達成度を明らかにした上で、処分事業進展段階（図 2.1-1）に沿った必須の課題の抽出
- ・ 第 2 期中期計画期間までに「精密調査前半」までに適用する技術・手法の整備をほぼ終了したため、今後は「精密調査後半」以降に適用する技術・手法の研究開発に重点化－選定条件に基づく課題の必要性の確認
- ・ わが国は変動帯に位置するため安定大陸と比較して火山活動や地震活動などが活発であり、地質構造が複雑であること、降水量が多く地下水が豊富であることなどに留意
- ・ 設定した選定条件（諸外国での研究開発動向、国際的な課題、わが国固有の地質環境に係る課題、成果の汎用性、処分事業への貢献度等）（図 2.1-2）を踏まえた、課題の必要性の確認

－国における最新の議論の考慮

- ・ 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会「放射性廃棄物ワーキンググループ」及び「地層処分技術ワーキンググループ」における議論等を考慮

－地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 25 年度～平成 29 年度）⁷⁾に示された課題等との比較による確認

- ・ 原子力発電環境整備機構（NUMO）による課題（「地層処分事業の技術開発計画」⁸⁾）と比較（図 2.1-3）し、それら課題の整合性を確認
- ・ 関係研究開発機関及び NUMO からなる「地層処分基盤研究開発調整会議 運営会議・統合 WG」において紹介された「精密調査後半」以降に必要な NUMO の技術開発ニーズに対して、必須の課題の十分性を確認

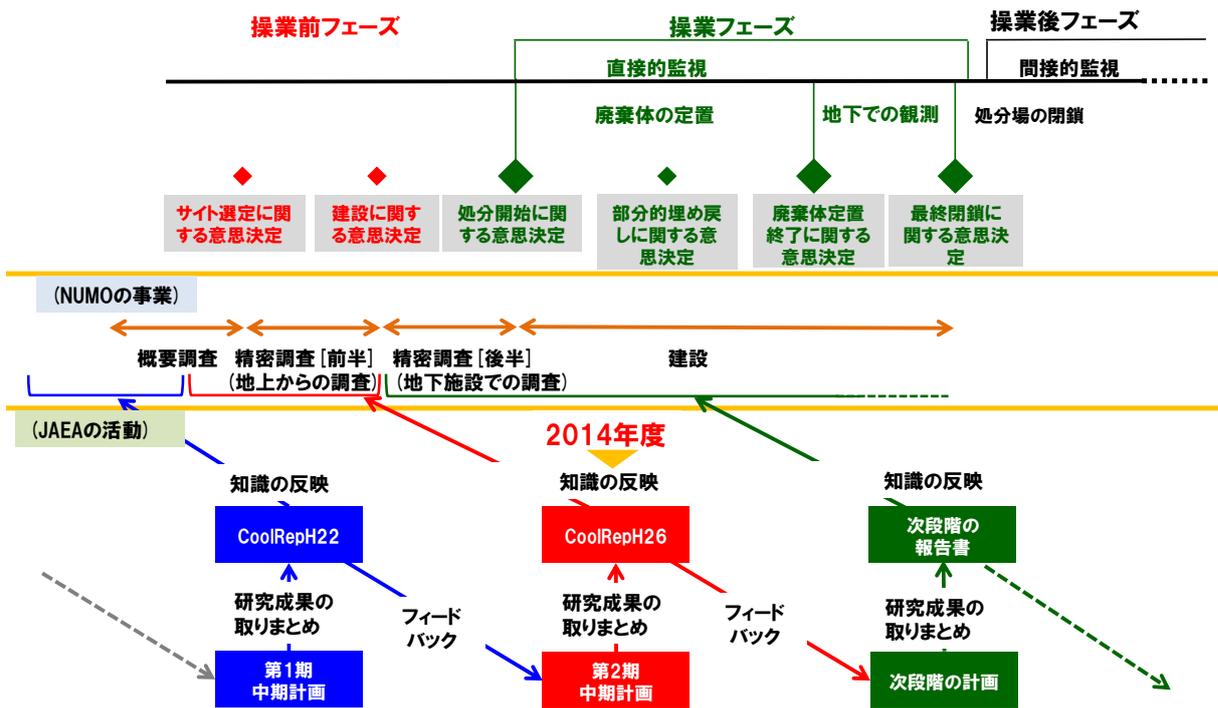


図 2.1-1 処分事業の進展段階と研究成果の要点と反映先

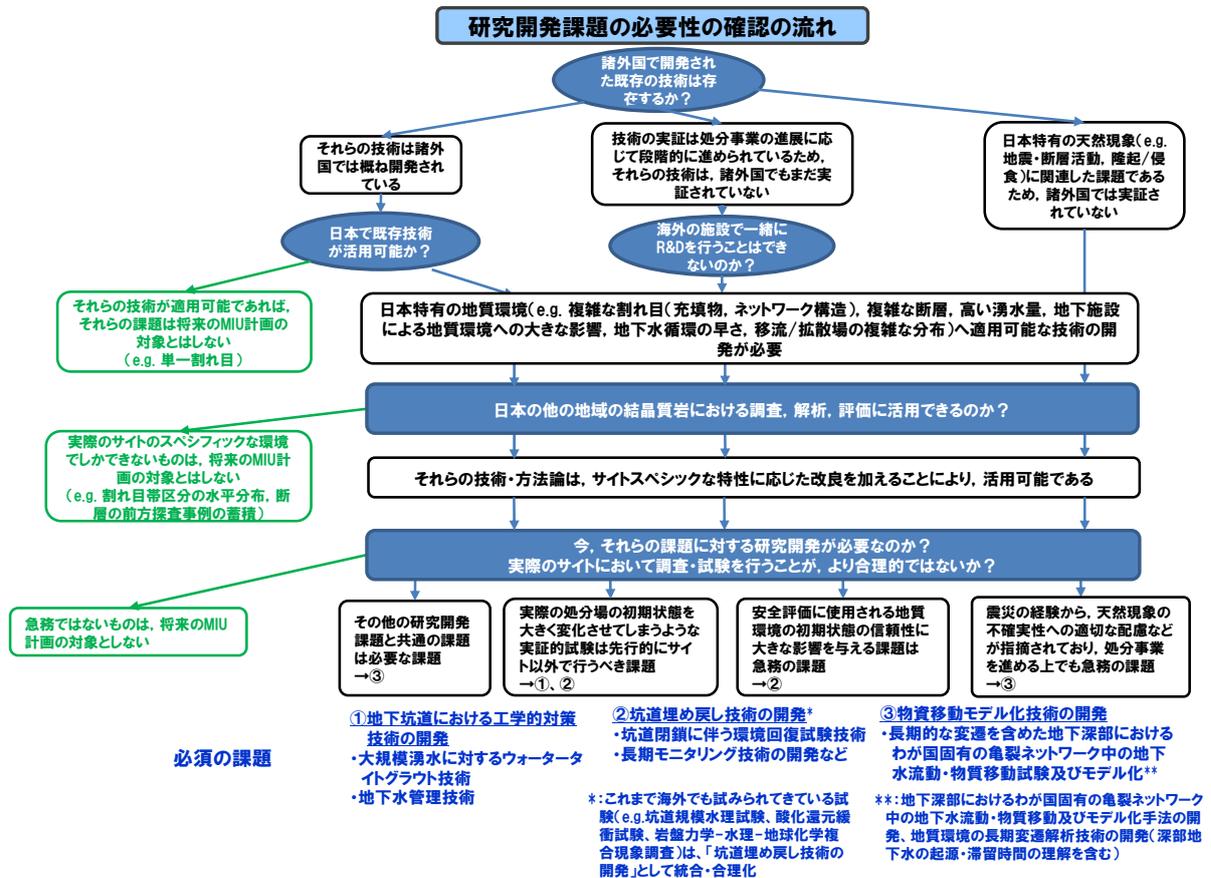


図 2.1-2 わが国の深地層の研究施設計画において解決すべき課題の確認 (瑞浪超深地層研究所の例)

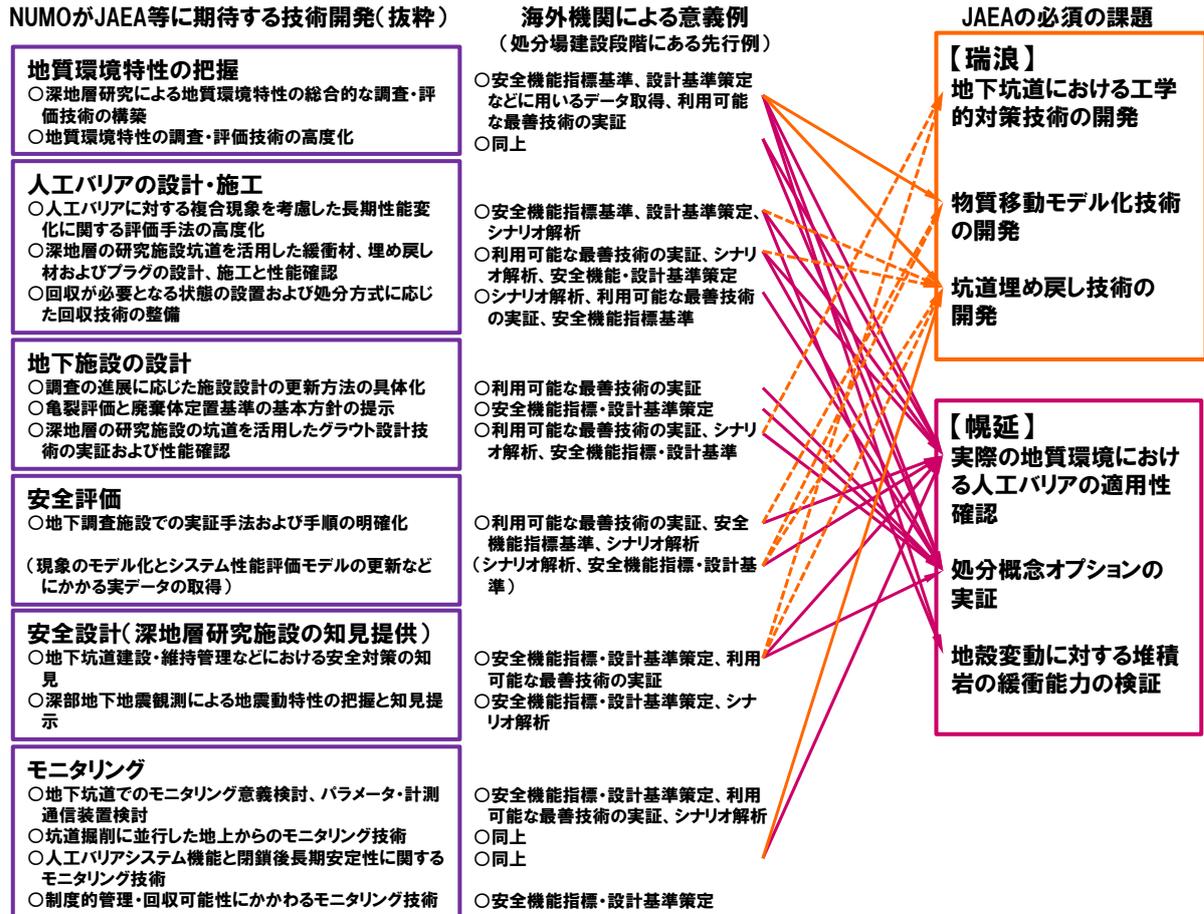


図 2.1-3 「地層処分事業の技術開発計画」⁸⁾の課題と必須の課題との対比

2.2 抽出した必須の課題

上述の考え方を踏まえて抽出した必須の課題を以下に示す。

- 地下坑道における工学的対策技術の開発(大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術, 地下水管理技術)
 - ・ 深度 500m の研究坑道において, 坑道への湧水量をプレグラウトとポストグラウト(図 2.2-1)の組合せによって制御可能とするウォータータイトグラウト施工技術を実証する。また, 地下水排水処理技術等の地下水管理技術の高度化にも取り組む。
- 物質移動モデル化技術の開発(長期的な変遷を含めた地下深部におけるわが国固有の亀裂ネットワーク中の地下水流動・物質移動に関する試験及びモデル化技術)
 - ・ 深度 500m の研究坑道において, 花崗岩中の割れ目での物質の移動現象を理解し, モデル化するための調査解析を実施する。また, 割れ目の透水性及び地下水流動・水質の長期的変化や地下水流動の緩慢さを明らかにするための調査を実施する(図 2.2-2)。

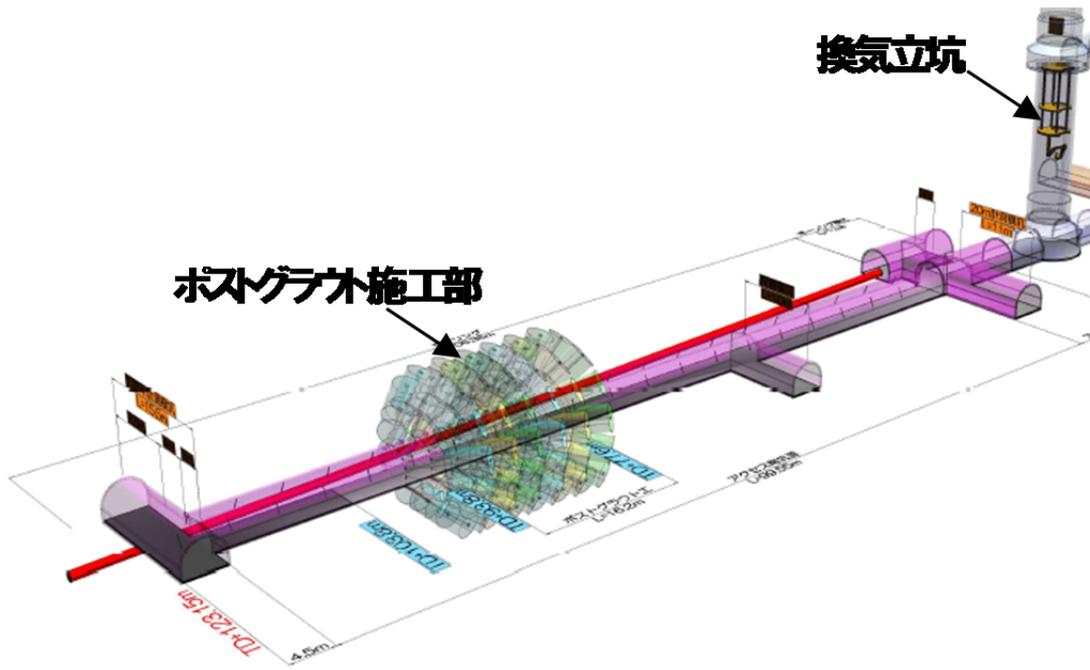


図 2.2-1 地下坑道における工学的対策技術の開発
 (「大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術」に関するポストグラウト工事のイメージ)



図 2.2-2 物質移動モデル化技術の開発
 (左図：割れ目分布モデルの例、右図：研究坑道内での物質移動試験の例)

ー坑道埋め戻し技術の開発（坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術、長期モニタリング技術など）

- ・ 深度 500m の研究坑道において、坑道の一部を埋め戻し、地下水を自然に冠水させることによって、地下水の水圧・水質及び坑道周辺岩盤の化学的・力学的変化を観察し、地質環境の回復能力等を評価するとともに、地質環境に応じた埋め戻し技術の構築を目指す。また、長期の観測に必要なモニタリング技術の開発も実施する（図 2.2-3）。

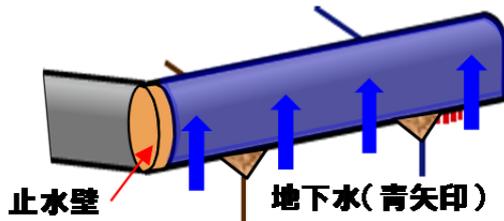


図 2.2-3 坑道埋め戻し技術の開発

(左図：再冠水試験のイメージ、右図：モニタリング装置の例)

2.3 施設計画（坑道展開）

これまでの成果から、地質環境の調査・モデル化技術は、ほぼ確立している。また、深度 500m まで展開した坑道に、大規模湧水箇所や、特性の異なる割れ目が分布する領域の存在を確認している。このため、深度 500m までで必須の課題に取り組む場が確保可能である。なお、深部塩水系地下水の起源・滞留時間を把握するための深度 500m 以深の深層ボーリングを実施する計画である（図 2.2-4）。

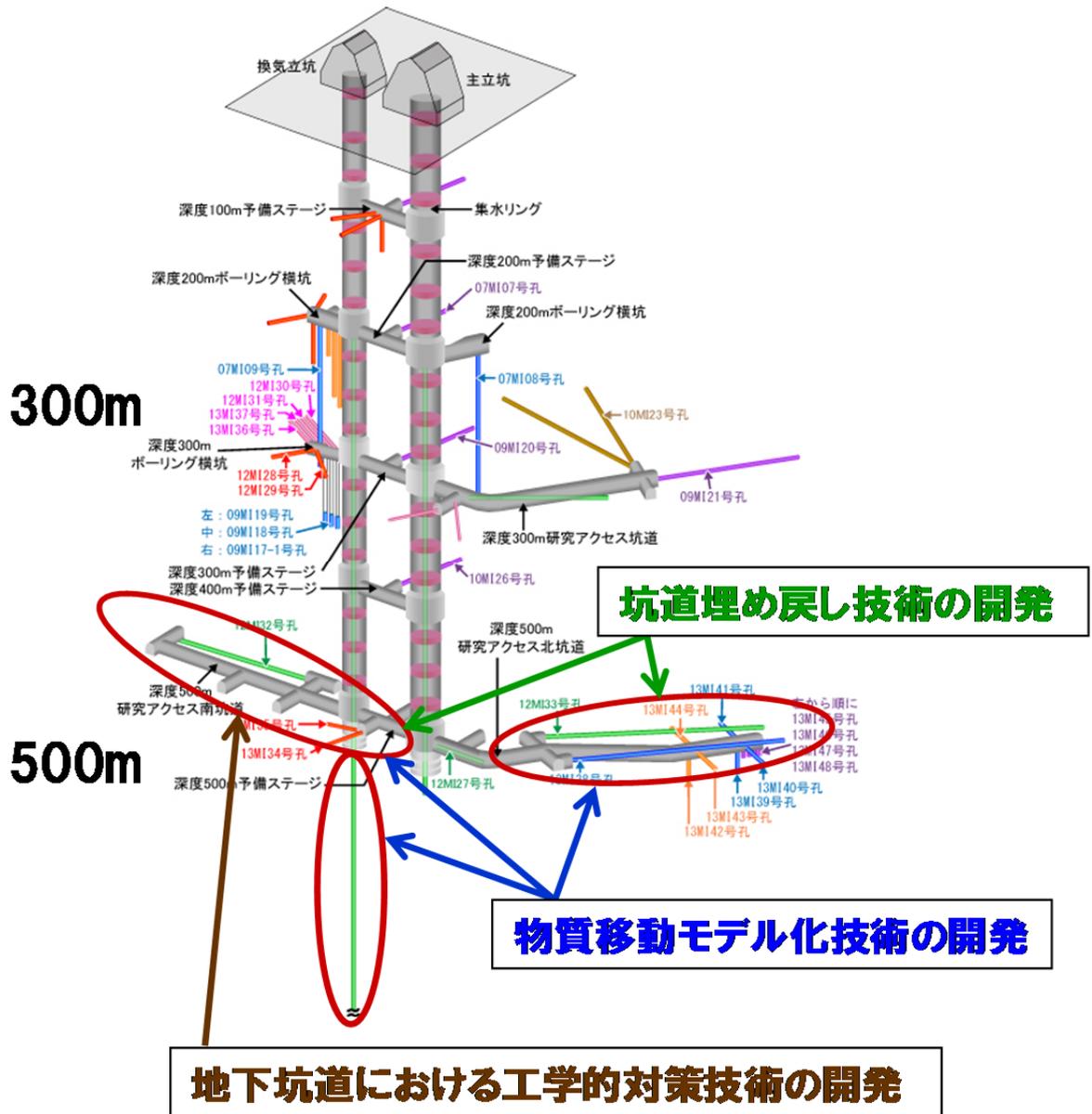


図 2.2-4 超深地層研究所計画の必須の課題と研究実施場所

3. 調査研究計画

3.1 地下坑道における工学的対策技術の開発

地下深部においては一般に地下水圧が高く、坑道への湧水量が多いため、これらを適切に制御することは地下施設の維持管理費用の削減のみならず、周辺環境への影響を低減するために重要な事項である。瑞浪超深地層研究所では、施工対策技術の一環としてグラウト技術を適用するとともに、地下水浸透理論にもとづく解析による湧水抑制の評価手法を構築してきた。また、プレグラウトを実施した領域から岩石試料を採取し、グラウトの充填状況や周辺岩盤に与える影響を各種分析により把握した。さらに、地下水に含まれるフッ素とホウ素を除去する方法について検討し、捕集材やイオン交換樹脂の適用性を評価した。今後は、坑道への湧水量をさらに低減する抑制技術の開発を行うとともに、排水処理技術の開発を行う。

3.1.1 地下水抑制技術の開発

プレグラウトとポストグラウトを併用することにより、グラウトによる改良範囲の拡大あるいは透水係数のさらなる低減により湧水を抑制する。深度 500m 研究アクセス南坑道を対象にポストグラウトを実施し、坑道湧水量の変化を把握することで抑制効果を評価する。岩盤の透水係数に応じた材料（超微粒子セメントや溶液型グラウト）の選定や注入方法、効果的な注入孔の配置、改良範囲外への湧水の回り込みを抑制する方策についての知見を得る（図 3.1-1）。

3.1.1.1 ウォータータイトグラウト施工技術の実証

①これまでの研究成果

ウォータータイト構造とは、空洞内に地下水等の湧水を抑制するための構造のことである。このような構造は、深度の浅い場所で地下水利用等の観点から、地下水面の低下などが問題となる場合に適用される事例があるが、地下坑道のような地下深部の構造物においても、長期間の排水により地表付近の環境が変化する場合にも、そのような構造が必要となる。

このような構造では、地下水圧が支保工に直接作用することになるため、その圧力も考慮した設計が必要であるものの、瑞浪超深地層研究所では設計時には通常のトンネル等と同様、地下空洞内への地下水の湧水を許容する設計となっていることから、この視点での技術開発は実施してきていない。このため、湧水量を可能な限り低減する手法としての検討を実施する。

②実施内容

- ・プレグラウト範囲を対象としたポストグラウトの実施
- ・坑道湧水量の変化の把握

グラウトによる湧水抑制効果は地下水の浸透問題として坑道への湧水量を算定する式に基づいて表現することが可能である。この際には注入範囲の広さとその透水係数を設定する必要がある。プレグラウトとポストグラウトの組み合わせの算定式を求めて、その妥当性をグラウト後の湧水量の実測値と対比することで算定式の有効性を評価する。

- ・グラウトによる湧水量の低減効果を表現することが可能な理論式の構築
- ・湧水量の実測値と解析結果の対比による理論式の妥当性の評価

3.1.1.2 施工対策影響評価技術の開発

①これまでの研究成果

わが国の地質環境は、諸外国と比べて割れ目が多く地下水が豊富であり、処分場建設時には、坑道の保坑や止水対策等で多量のセメント（支保、グラウト、インパルト）、鋼材（ロックボルト、鋼製支保）等の人工材料が使用される。人工材料の使用は、岩盤の長期的な劣化や地下水への化学的な影響が生じると考えられる。また、これまでに検討してきたニアフィールドコンセプトでは、坑道周辺に施工される人工材料の影響は未考慮であった。平成 24 年度までに、研究坑道の掘削時に使用されたグラウト材料（セメント）が、坑道周辺の地質環境に及ぼす影響を把握・評価するための技術開発を目的として、各種室内分析を実施してきた。

②実施内容

今後も引き続き、経年変化を把握するとともに、覆工や吹付けコンクリートの影響についても評価を行う。

- ・グラウト材料による周辺岩盤への影響調査
 - ✓ グラウト材料の充填状況や止水効果の経年変化の調査
 - ✓ グラウト材料接触部の岩盤の経年変化の調査
- ・覆工コンクリート・吹付けコンクリートによる周辺岩盤への影響調査
 - ✓ 覆工コンクリート・吹付けコンクリートの経年変化の調査
 - ✓ 接触部の岩盤の経年変化の調査
- ・施工対策影響を評価する調査手法、モデル化・解析技術の妥当性評価

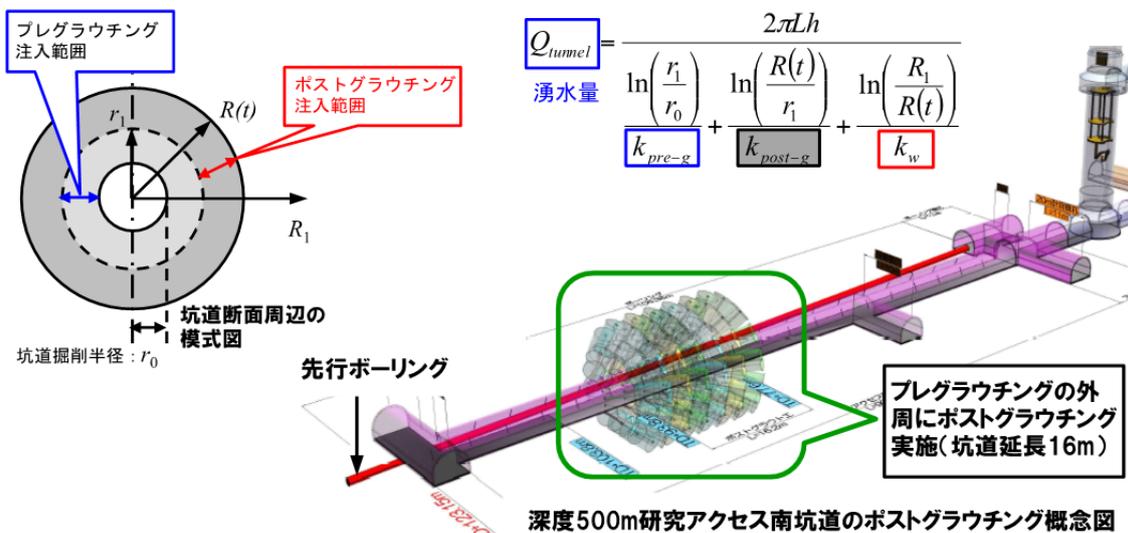


図 3.1-1 ポストグラウトによる湧水抑制評価の概念

3.1.2 地下水管理技術の開発

3.1.2.1 地下水排水処理技術の開発

現在、研究坑道への湧水には自然由来のフッ素、ホウ素が含まれており、凝集沈殿処理およびイオン交換処理によって環境基準値を下回る濃度として放流している。また、近年公共工事などで自然由来の重金属による地下水汚染や土壌汚染が確認され、その対策が求められている。そこで、下記内容について文献調査を行う。

- ・排水中のフッ素、ホウ素処理技術の現状の把握
- ・自然由来の重金属による汚染事例や対策技術の調査

なお、規制基準などは将来変わりうる可能性があることを念頭に置き、文献調査とそれに基づく研究課題の抽出を実施するとともに、必要に応じて室内試験などを実施する。

3.2 物質移動モデル化技術の開発

第2章で述べた必須の研究開発課題の抽出にあたって、日本の地質環境の特徴を地層処分事業や地層処分に係る研究開発を進めている諸外国（スウェーデンなど）の地質環境を比較しつつ整理した。日本列島は変動帯に位置し、岩盤の地質年代が若く、地温勾配が高いことが特徴であり、また、湿潤温暖な気候であるために、年間降雨量が多い。スウェーデンの Hard Rock Laboratory (HRL) 周辺でこれまでに得られている知見と比較した結果を表 3.2-1 にまとめた。

以後で述べる研究計画については、これらの特徴を考慮して立案した。

表 3.2-1 日本の地質環境の特徴

要素	日本:瑞浪URL	スウェーデン:HRL
岩体 隆起速度 地温勾配	<ul style="list-style-type: none"> ・7000万年前に形成 ・7000万年前から現在までの平均隆起速度は 約0.15mm/年 ・地温勾配: 1.7℃/100m (日本の平均地温勾配: 3℃/100m) 	<ul style="list-style-type: none"> ・18億年前に形成 ・2億年前から現在までの平均隆起速度は 約0.02mm/年 ・地温勾配: 1.5℃/100m
断層/割れ目頻度	約11本/m (深度300m坑道壁面)	2.5~6.5本/m
岩盤の透水係数	透水係数: 10^{-8} ~ 10^{-6} m/s	透水係数: 10^{-10} ~ 10^{-8} m/s
変質の程度	全体の約30%	約10%
割れ目充填物	約30%の割れ目に粘土充填物(未固結)がある。	粘土充填物はほとんど無い。
断層の認識性	<ul style="list-style-type: none"> ・100~200mの被覆層が存在 ・断層規模が被覆層と花崗岩で異なる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・被覆層は存在しない ・露頭調査、トレンチ調査などにより把握可能
地下水の流動 地下水の化学的特性	<ul style="list-style-type: none"> ・年間降雨量: 1500mm ・年間平均気温: 13℃ ・地下水の塩分濃度: 低 (200-400mg/L) 	<ul style="list-style-type: none"> ・年間降雨量: 675mm ・年間平均気温: 6.5℃ ・地下水の塩分濃度: 高 (800-14300mg/L)

本研究では、日本の結晶質岩の特徴である割れ目が不均質かつネットワーク状に分布にする岩盤について、地質環境の長期変化を考慮しつつ、岩盤中の物質移動を調査・評価するための手法を整備することを目標とする。この目標を達成するために、以下の2つの課題を設定し、それぞれの課題について、タスクに分けて調査研究を実施する。

○課題1：不均質な割れ目ネットワークのモデル化手法の開発

1-①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

1-②花崗岩中での物質移動現象の理解

1-③物質移動におけるコロイド、有機物、微生物の影響因子の評価

○課題2：地質環境の長期変遷に関する解析・評価技術の開発

2-①断層などの影響を含めた地質環境特性の長期変遷解析技術

2-②地下水の長期隔離に関する深部塩水地下水の起源・滞留時間の把握

3.2.1 不均質な割れ目ネットワークのモデル化手法の開発

3.2.1.1 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

①これまでの研究成果

これまでの研究では、主として深度 300m ステージの水平坑道掘削時に実施した坑道壁面観察の結果と研究坑道から掘削したボーリング孔のコア観察や物理検層の結果などを使用して地質構造モデルの更新を行ってきた。また、深度 500m ステージの水平坑道掘削時に実施した坑道壁面観察やパイロットボーリング孔のコア観察結果から、卓越する割れ目の方向の概略を把握した。

透水性割れ目の検出技術については、地上からのボーリング孔を利用した流体検層（電磁フローメータ検層、電気伝導度検層など）により、透水係数が $10^{-9} \sim 10^{-8}$ m/s よりも大きい割れ目の検出が可能となった。一方で、坑道から掘削した高湧水圧環境下のボーリング孔を利用した場合は、ボーリング孔からの湧水が多いため、地上からの場合と同様の精度で透水性割れ目を検出することが困難であった。

割れ目ネットワークのモデル化については、DFN (Discrete Fracture Network) モデルに基づく地下水流動解析を試行した。具体的には、物質移動経路沿いの実流速と移動距離から得られる地下水の移動時間を評価指標として、割れ目の地質学的特性や水理学的特性が、それに及ぼす影響について検討した (図 3.2-1)。地質学的パラメータや水理学的パラメータといった割れ目のパラメータ間の関連性の有無がモデル化や解析結果に与える影響を評価した結果、それらの関連性の有無が解析結果（移動時間）に影響を与えることを確認した。

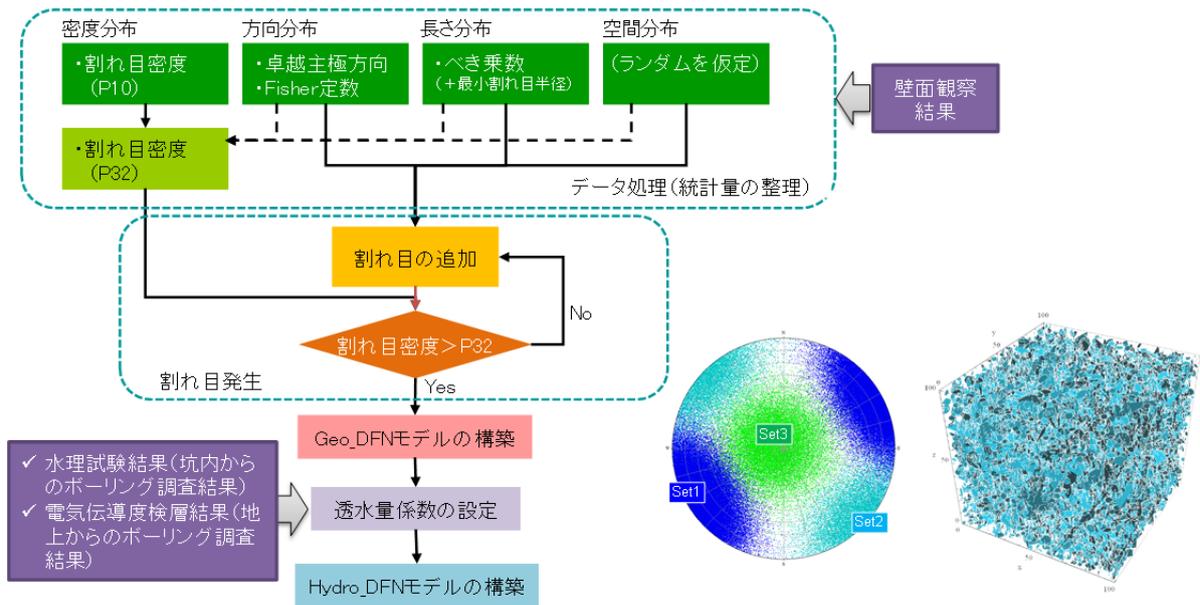


図 3.2-1 DFN モデルに基づく地下水流動解析のアプローチ

②実施内容

i)調査

深度 500m 研究アクセス南坑道では、割れ目分布や連続性などを把握するためのボーリング孔が少ないことから、ボーリング調査を複数孔実施する。ボーリング孔掘削長、本数については、坑道掘削前後のグラウトの実施範囲、想定される湧水圧・湧水量、借地境界などを考慮して決定するが、掘削長 30m 程度、

6 孔程度が必要と考えられる (図 3.2-2)。これらのボーリング孔については、割れ目の特性把握、物質移動試験、坑道埋め戻し試験のモニタリングを目的とする。

ii)解析

深度 500m 研究アクセス南坑道および北坑道の掘削時の壁面観察結果とパイロットボーリング孔のコア観察結果などを用いて、研究坑道周辺の割れ目分布のモデル化を実施する。モデル化には DFN モデルを用いることとし、パラメータ間の関連性を考慮した割れ目の統計量算出方法を検討するなどのモデル化手法の検討を実施する。

また、DFN モデルを用いた地下水流動解析や粒子追跡線解析によって、モデルに取り込む水理地質構造の違いが物質移動特性 (遅延性能) に与える影響を感度解析的に評価する (図 3.2-3)。

iii)技術開発

高透水性から核種の遅延効果が期待できる低透水性に至る幅広い透水性の割れ目を、坑道から掘削した高湧水圧環境下のボーリング孔を用いて連続的に調査可能な検層技術を開発する。

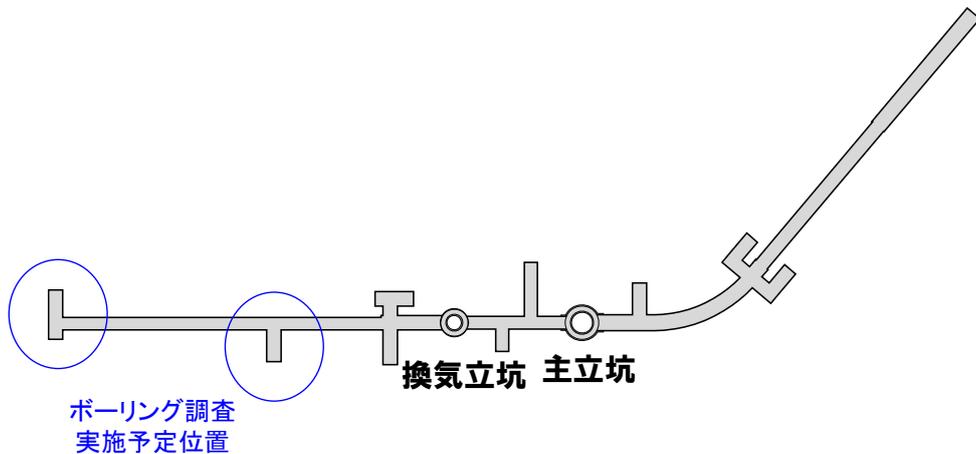


図 3.2-2 深度 500m ステージにおけるボーリング調査予定位置

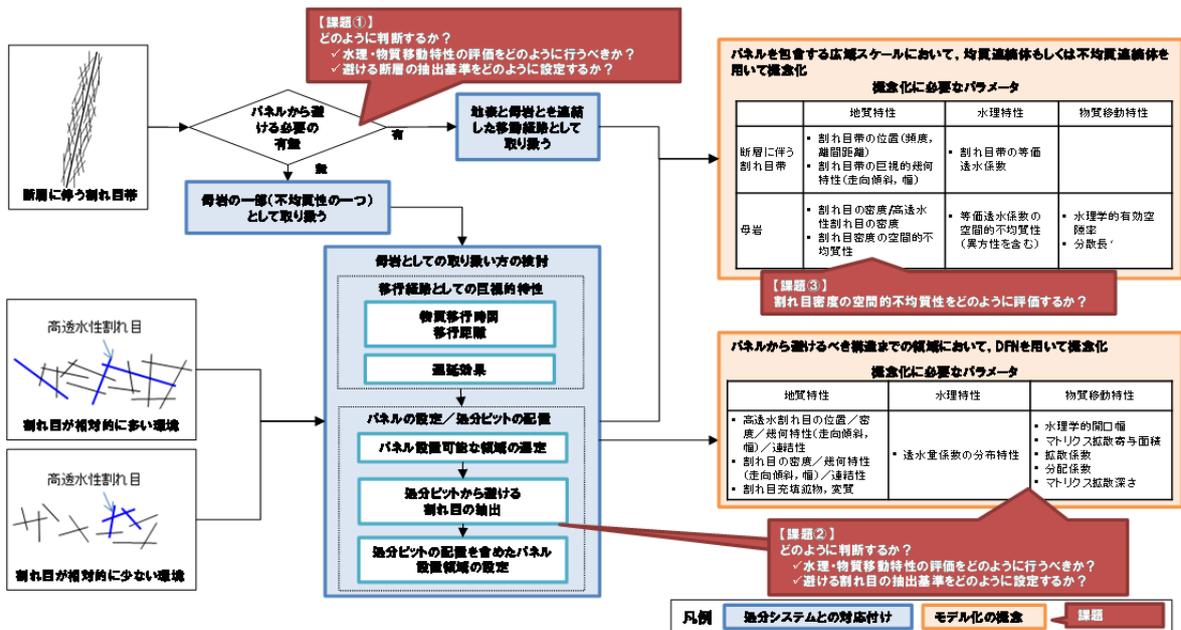


図 3.2-3 水理・物質移動特性評価のためのモデル構築の流れとそれに関わる課題の抽出

3.2.1.2 花崗岩中での物質移動現象の理解

①これまでの研究成果

地上からのボーリング調査、坑道壁面観察、研究坑道からのボーリング調査などの結果から、物質の移動経路となり得る断層や割れ目を抽出した。これらの断層や割れ目を、主に地質学的な観点から充填鉱物の種類・有無、割れ目近傍の母岩の変質の程度・色調、透水性、断層・割れ目の形成時期などに着目してタイプを分類した（図 3.2-4）。

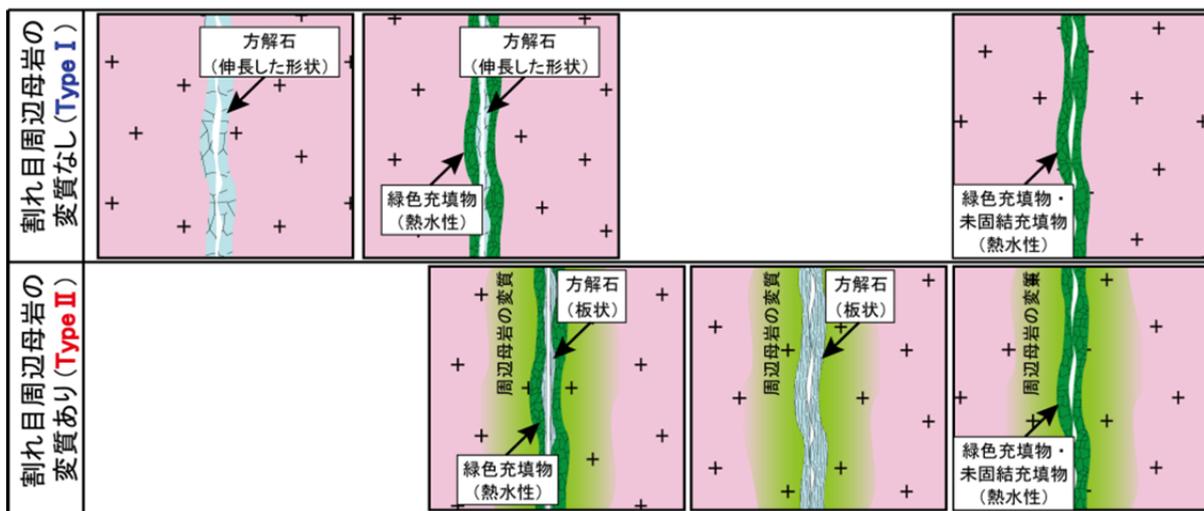


図 3.2-4 深度 300m ステージで観察された割れ目の特徴
(割れ目の透水性とその地質学的特徴のまとめ)

これらのタイプの割れ目のうち、一部について室内において透過拡散試験を実施した（図 3.2-5）。その結果、変質試料においては未変質試料より相対的に大きい実効拡散係数値が得られている。

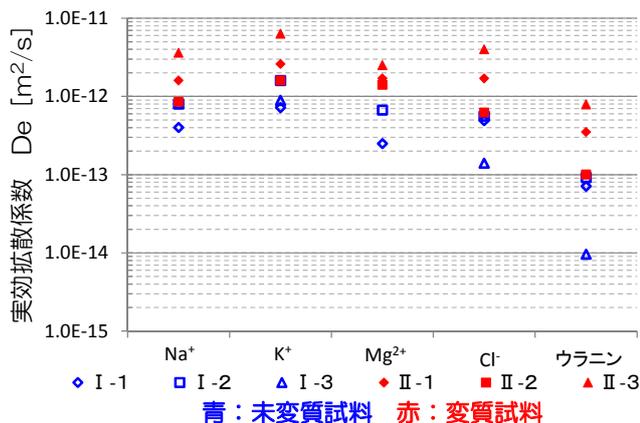
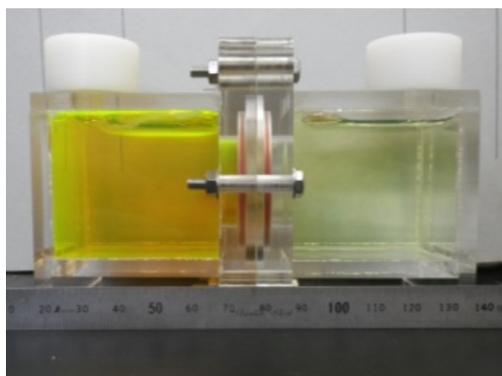


図 3.2-5 透過拡散試験結果

原位置試験については、深度 300m ボーリング横坑において、ボーリング調査およびボーリング孔を利用した単孔式および孔間の物質移動試験を実施した。

②実施内容

深度 300m ボーリング横坑において実施した物質移動試験結果の解析を進め、花崗岩中での物質移動に関するパラメータ値を取得する。また、深度 500m 研究アクセス南坑道において掘削するボーリング孔を利用して、単孔式および孔間の物質移動試験を実施し、物質移動に関するパラメータを取得する。これらの試験については、国内の研究機関との共同研究などを活用して実施する。

花崗岩中でのミクロスケールでの物質移動現象を解明するために、透水性割れ目およびその周辺の岩石を採取し、室内における物質移動試験を実施する。また、長期にわたる物質移動現象を把握するために、透水性割れ目と、その周辺岩盤および地下水を対象として、割れ目に沿った天然トレーサー物質（ウラン系列核種、トリウム系列核種、希土類元素など）の分布を把握する。

これらの結果については、日本国内の花崗岩や海外の花崗岩類について取得されたデータと比較検討しつつ、土岐花崗岩中での物質移動現象の評価を進める。また、上述の地下水流動解析や物質移動解析の入力パラメータとして整備する。

3.2.1.3 物質移動におけるコロイド、有機物、微生物の影響因子の評価

①これまでの研究成果

地上から掘削したボーリング孔から採取した地下水を利用して、地下水中の微生物の存在の有無の確認、硫酸還元菌および鉄関連細菌についての生細菌数の測定が行われた。その結果、 10^6 cells/ml 程度の全菌数であり、これは海洋細菌の現存量に匹敵するものであった。また、特定の深度においてのみ硫酸還元菌が検出されることから、地球化学的な条件を反映して微生物の群集構造が形成されていることが示唆された。

物質移動に対する地下水中的コロイドの影響を把握するための原位置調査技術を開発するために、研究坑道から掘削したボーリング孔において、湧水圧を利用した限外ろ過法により地下水中的コロイドを捕集するシステムを構築し、原位置調査への適用性を確認した。このシステムでは、地下水と装置が接触する部分を不動態化処理することにより、部材からの鉄の溶出を低減している。地下水中的有機物の影響に関する調査では、放射性核種のアナログ元素として有効な希土類元素に着目した調査を実施した。地下水中的コロイドを限外ろ過法によりサイズ分画した上で、サイズ分画ごとの希土類元素濃度の分析を行った。その結果、希土類元素は有機物（フミン酸）と錯体を形成し、かつコロイド態で地下水中に存在することが示された。地下水中の微生物の影響に関しては、その調査時のボーリング掘削水による地下水の汚染が調査結果に影響を与えるため、ボーリング掘削水を紫外線で滅菌してから使用するシステムを構築し、現場調査に適用した。ここで構築したシステムの適用により、掘削水中の生菌数をシステム適用前の $1/4 \sim 1/5$ に低減することが可能となった。また、地下水中の微生物の活性を評価することを目的に、地下水に種々の電子供与体を添加して微生物の遺伝子解析を実施した。その結果、添加する電子供与体の種類により優勢となる微生物種が異なることが明らかとなった。

②実施内容

主に研究坑道内において、これまでに掘削したボーリング孔および新規ボーリング孔を利用して地下水の採取・分析を行い、地下水中的コロイド、有機物、微生物の濃度や元素濃度との相関や、コロイドなどが物質移動に果たす役割を評価する。

3.2.2 地質環境の長期変遷に関する解析・評価技術の開発

3.2.2.1 断層などの影響を含めた地質環境特性の長期変遷解析技術

①これまでの研究成果

地質環境の長期変遷に影響を及ぼす可能性が高いと考えられる、隆起・沈降・侵食、地形変化、割れ目や断層などの地質構造の形成発達史および過去の応力変化に関する研究を進めてきた。この研究を通じて、過去から現在までの地形、地質構造の長期変遷を推定するための技術的知見を蓄積してきた。

結晶質岩においては、割れ目は地下水の主な流動経路と考えられる。そこで、東濃地域において事例研究として、割れ目の形成や発達に影響を及ぼすと推定される、過去から現在までの隆起・沈降・侵食の履歴とそれに関連する地形変化、過去から現在までの応力変化に関する検討結果を統合し、地質事象の変遷を取りまとめた。

地球化学環境の長期変遷のうち酸化還元状態の長期変動については、酸化還元状態に応じて溶解・沈殿する水酸化鉄や黄鉄鉱などの含鉄・含硫黄鉱物が指標になる。これらの鉱物が地下水に対して未飽和の場合は、それぞれの溶解速度で長期的に溶解、消失してしまうため、存在が確認できた場合には、その沈殿年代以降、地下水が、これらの鉱物に対して飽和もしくは平衡状態にあったことを示唆する。したがって、それらの鉱物の分布状態を把握した上で、各鉱物が飽和・平衡状態となる酸化還元電位を見積もることで変動可能性範囲を推測できる。

東濃地域における含鉄・含硫黄鉱物の分布については、花崗岩を覆う堆積岩において地表から深度約30m付近まで酸化鉄が観察され、深度約60m以深では硫化物が観察されている。花崗岩においては、深度百数十mまで酸化鉄が観察される割れ目が存在する一方で、酸化鉄が分布しない割れ目では、深度に依存せず黄鉄鉱が普遍的に割れ目表面に観察される。そのため、表層から深度百数十mまで、割れ目の連続性や連結性に応じて不均質に酸化的な地下水が浸透していると推測される。

②実施内容

地上からの調査および研究坑道での調査によって取得された情報を活用して、地質環境特性の長期挙動を理解するための一連の調査・解析手法の検討を行う。主に研究坑道の壁面観察および研究坑道から実施したボーリング調査の情報を用いて、断層運動や熱水活動などの天然現象の履歴と、それらが地質環境に及ぼす影響を推定する調査技術について検討する。天然現象の履歴については、坑道壁面の観察情報を踏まえて、割れ目と貫入岩の分布の関係や、割れ目充填鉱物の種類や形成年代に関する情報の取得・解析を行い、主にボーリング調査によって地質環境特性の長期挙動を理解するための調査手順を整備する。天然現象が地質環境に及ぼす影響については、花崗岩中の割れ目と割れ目充填鉱物、周辺岩盤の変質鉱物の分布や種類に関する情報の解析を行い、鉱物の形成年代や剪断性構造に関する情報を用いて、断層運動が地質環境に及ぼす影響に関する基礎的な情報を整備する。

また、断層運動などの天然現象が地質環境に及ぼす影響の程度や範囲に関する履歴を推定する技術の整備を目的として、深度300mステージおよび深度500mステージで実施されたボーリング調査や研究坑道の壁面観察で取得されたデータとボーリングコアなどを利用して、断層運動に伴う割れ目の特徴の変化に関する検討を実施する。

さらに、地上から掘削されたボーリング孔や研究坑道で得られた情報を活用し、天然現象が地質環境に及ぼす影響に関する情報の蓄積と、深度方向の割れ目分布および割れ目充填鉱物の形成履歴の把握に向けた調査の手順と適用範囲の検討を実施する。そのため、深度方向の割れ目の充填鉱物の組み合わせや分布などの特徴を整理・解析する。この結果に基づき、隆起・沈降・侵食といった天然現象に伴う割れ目の特徴の変遷およびサイトスケール（数km×数km）における割れ目の区分について検討する。

上述の検討結果と過去の地質学的変遷に関する情報を組み合わせて、断層および割れ目の形成過程のモデル化を行うとともに、地質環境特性の長期挙動を理解するための一連の調査・解析手法を検討する。

3.2.2.2 地下水の長期隔離に関する深部塩水地下水の起源・滞留時間の把握

①これまでの研究成果

これまでに広域地下水流動研究や超深地層研究所計画で実施した深層ボーリング調査により、地下水水質の深度分布を把握し、その他の解析結果と合わせて地球化学モデルを構築した（図 3.2-6）。

②実施内容

地下水流動の緩慢さを明らかにすることを目的として、深部花崗岩（地表からの深度 1,500m 以深）の地下水の水質や起源などの地球化学特性および水質形成機構を明らかにするために、研究坑道などからボーリング調査を実施し、ボーリング孔からの地下水の採取、地下水の各種分析を実施する。また、大深度のボーリング孔を利用して、水理試験や地下水採水調査を実施するための機器開発を実施する。

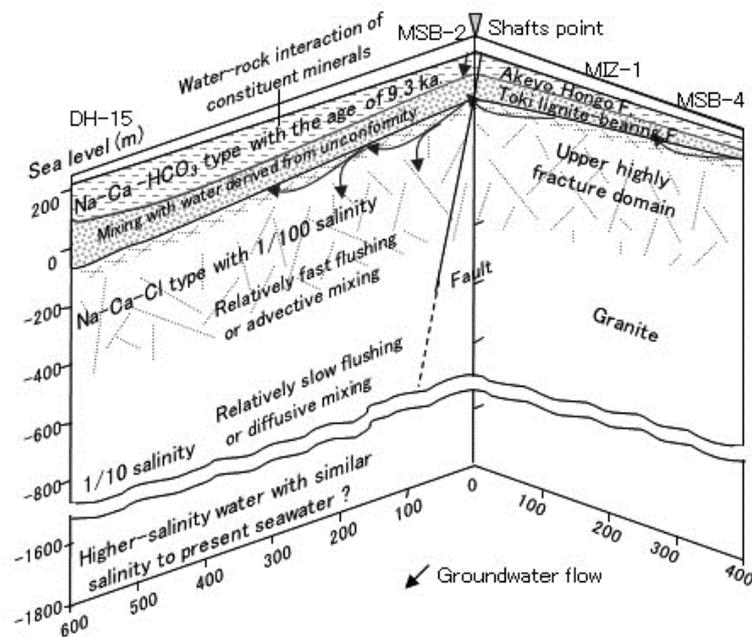


図 3.2-6 地上からの調査により構築された地球化学モデル

3.3 坑道埋め戻し技術の開発

3.3.1 坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術の開発

3.3.1.1 冠水坑道での再冠水試験

本研究の目的は以下のとおりである。

- ①地下施設の建設・操業により乱された地質環境の回復能力の例示と関連する技術の開発
 - ・坑道閉鎖時の坑道・施設スケールでの力学, 水理, 化学条件の変化 (回復過程) の観測技術と解析技術 (ハードウェアとソフトウェア) の開発
 - ・先進的遠隔モニタリング技術 (無線, 光給電など) の開発
 - ・施設閉鎖後の地質環境の長期的変遷を推定する解析手法の開発
- ②坑道閉鎖技術の提示
 - ・止水技術の実証
 - ・研究坑道埋め戻しに利用可能な埋め戻し材の選定

これらの目的を達成するために、深度 500m 研究アクセス北坑道の先端約 40m の冠水坑道において、止水壁を介して地下水による坑道冠水と排水を繰り返し行い、坑道周辺の力学・水理・化学変化を観測する (再現性の確認も含む)。観測データに基づき、坑道閉鎖後の水圧回復プロセス、坑道周辺の応力状態、化学状態について基礎データを取得し、坑道閉鎖時の環境回復に関わる具体的な観測技術、解析技術 (割れ目や断層の多い日本の結晶質岩を念頭においた調査・解析技術) を提案する。再冠水試験は以下の手順で実施する (図 3.3-1)。

すなわち、①坑道掘削前の水圧分布の確認, ②坑道掘削, ③冠水坑道でのモニタリング装置設置, ④ボーリングピットの埋め戻し, ⑤止水壁の施工, ⑥冠水および水圧回復 (繰り返し), ⑦ピット埋め戻し材の回収・分析・評価, ⑧坑道埋め戻し試験計画への反映, の手順で実施する。

再冠水試験では、坑道閉鎖時・後の地質環境の変化を理解するための観測や技術開発について、坑道埋め戻しに先立って実施し、効率的な現象の観察, 技術 (図 3.3-2) の整備を行う。なお、坑道埋め戻しに付随する現象については、別途、坑道埋め戻し試験において検討を行う。



図 3.3-1 再冠水試験の流れ

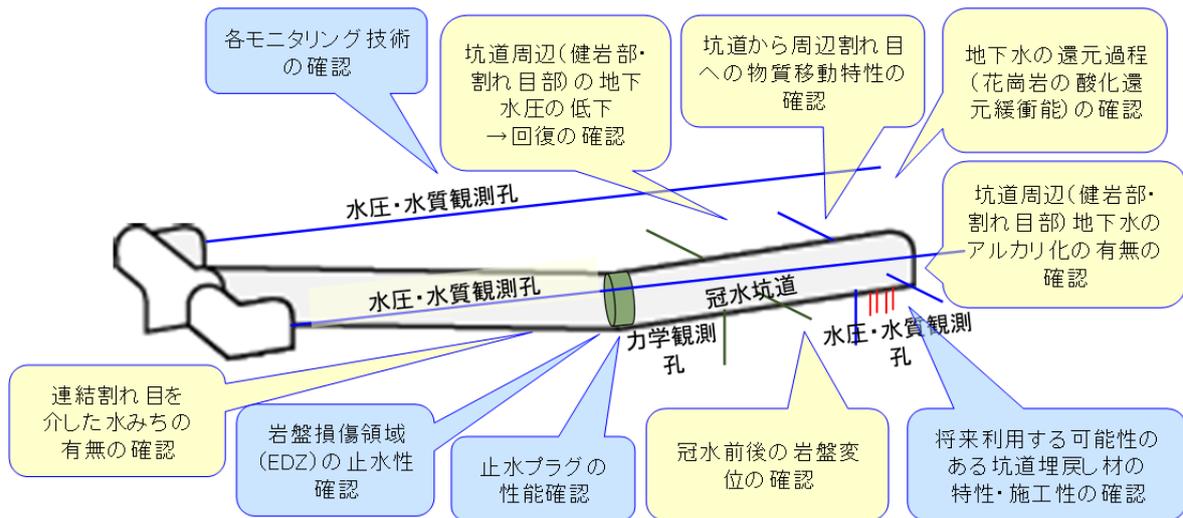


図 3.3-2 再冠水試験で実施する観測・技術開発内容

(1)冠水坑道周辺の水理地質構造の確認

冠水坑道周辺の地質構造、水理地質構造は、再冠水試験に関わる各種観測・解析を実施するための基本情報として必要不可欠な情報である。また、下部割れ目低密度帯に相当する花崗岩を対象とした物質移動特性評価のための基礎データでもある。

①これまでの研究成果

冠水に先立ち、坑道壁面観察および坑道周辺に掘削したボーリング孔のコア観察、冠水坑道底盤および側壁面に沿った電磁レーダー探査、ボーリング掘削時や単孔式水理試験時の水圧応答などの測定結果に基づき、冠水坑道周辺の割れ目分布・連結性を推定し、割れ目の分布をモデル化した(図 3.3-3)。また、岩盤損傷領域(EDZ)に関わる知見を得るため、屈折法弾性波探査および電気探査(比抵抗探査)を行った。

その結果、冠水坑道壁面における湧水割れ目を同定するとともに、下部割れ目低密度帯に位置する冠水坑道周辺の地質学的特徴として、深度 300m 研究アクセス坑道周辺(上部割れ目帯に位置)と比較して、割れ目密度が低く、湧水割れ目が少ないことが明らかになった。また、坑道壁面から 1m 未満の範囲に、充填鉱物がなく、割れ目面に凹凸が認められる割れ目が坑道に沿って観察され、坑道壁面から 1m 未満の範囲に坑道掘削に伴う EDZ が存在する可能性が示唆された。また、EDZ の透水性の変化については、釜石鉱山や東濃鉱山など多くのサイトにおいて様々な調査が実施されているものの、試験区間近傍に空洞があることの影響(境界条件の影響)、短い試験区間設定の困難さ、試験点数が限定されることなどの理由から、定量的な評価は困難であるのが現状である。一方、解析的な評価としては、クラックテンソルモデルを用いた評価が挙げられる。瑞浪超深地層研究所におけるこれまでのクラックテンソルモデルによる推定結果では、掘削に伴って坑道壁面に平行な割れ目が発生するとの仮定を設けた場合、最大で 2 オーダー程度、透水係数が増加する結果が得られている。

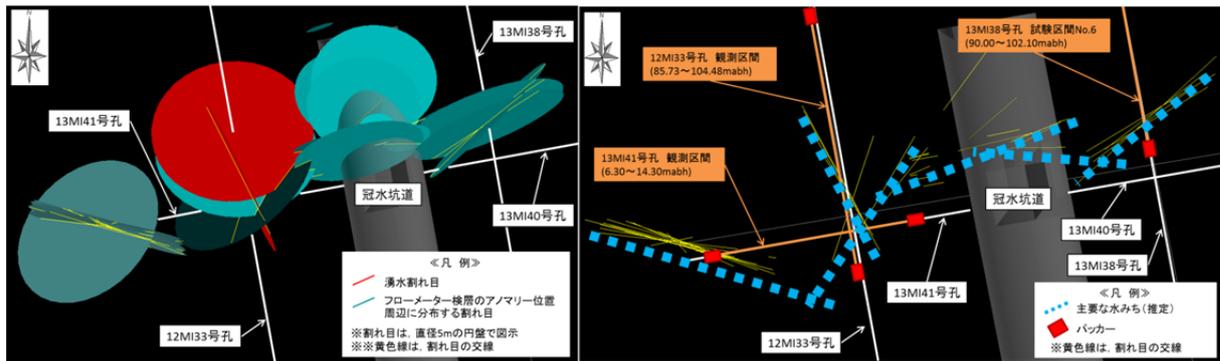


図 3.3-3 冠水坑道における割れ目分布と連結性

②実施内容

冠水時の水圧変化（水圧回復）のモニタリング結果や物質移動試験結果に基づき、再冠水試験の事前調査結果に基づき構築した地質構造／水理地質構造モデルの妥当性確認および更新を行うとともに、3.2 節で示した「物質移動モデル化技術の開発」での成果と併せ、日本特有の地質環境に応じた割れ目の調査・モデル化手法の体系化に反映する。

また、冠水させた坑道から地下水を排水した後に、物理探査（地中レーダー探査、弾性波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィ）を再度実施し、再冠水後の周辺岩盤の物性変化について確認を行う。ただし、地下水排水後の冠水坑道壁面の状況を確認の上、実施の可否を検討する。

冠水～一部排水～冠水時の斜坑側での湧水量の変化の観測を行い、EDZ やより広範囲の割れ目ネットワークを介した水みちの状態について推測する。その結果に基づき、地質環境条件に応じた止水プラグの考え方などを整理する。

(2)冠水時の周辺岩盤の水理－力学－化学特性の観測と解析

地層処分事業では複数の坑道ごとに掘削、維持管理、閉鎖が並行して行われると考えられるが、再冠水試験は、このような非定常の状況下（それぞれの場所で地下水の排水と冠水が行われる場合）の地質環境変化に関わる貴重な研究事例となる。坑道閉鎖後の周辺の地質環境特性の長期変遷を推測するための概念モデル、数値解析モデルを構築する上で考慮すべき現象（結晶質岩における坑道周辺の FEP, e.g.アルカリブルームなど）を例示するとともに閉鎖坑道におけるモニタリング技術を実証する。

①これまでの研究成果

冠水坑道周辺の水圧・水質・岩盤変位を観測するための観測系を構築し、観測を開始した（表 3.3-1）。これらの観測により、冠水前の水圧・水質・岩盤変位に関わる初期状態を把握した。また、冠水後のそれらの変化に関して予備解析を実施した。

- 水圧・水質モニタリング装置設置用ボーリング孔

13MI33 号孔：掘削長	107.0 mabh	13MI38 号孔：掘削長	102.1 mabh
13MI39 号孔：掘削長	16.5 mabh	13MI40 号孔：掘削長	16.6 mabh
13MI41 号孔：掘削長	16.6 mabh		
13MI45 号孔：掘削長	2.3 mabh	13MI46 号孔：掘削長	2.3 mabh
13MI47 号孔：掘削長	2.3 mabh	13MI48 号孔：掘削長	2.3 mabh

mabh : meter along borehole axis

- 冠水坑道内の観測地点
坑道壁面のセメント吹付部, 13MI39号孔のボーリングピット出口, 冠水坑道手前側13MI42号孔付近(底盤から約1mの高さ), 冠水坑道奥側13MI39号孔付近(底盤から約1mの高さ)
- 岩盤変位計設置用ボーリング孔
13MI42号孔:掘削長 11.6 mabh
13MI43号孔:掘削長 11.6 mabh
13MI44号孔:掘削長 11.7 mabh

表 3.3-1 水圧・水質観測区間の概要

孔名	区間名	区間長	区間体積 (L)	孔名	区間名	区間長	区間体積 (L)
13MI33	区間1	105.4~107.0	4	13MI40	区間1	14.3~16.3	4
	区間2	85.7~104.4	23		区間2	6.1~13.3	9
	区間3	64.0~84.8	26		区間3	3.4~5.1	2
	区間4	53.8~63.1	12		区間4	0.0~2.4	3
	区間5	44.1~52.9	11	13MI41	区間1	14.8~16.3	4
	区間6	0~43.2	54		区間2	10.1~13.8	5
13MI38	区間1	90.4~102.1	16	区間3	6.4~9.1	3	
	区間2	70.2~89.5	24	区間4	0.0~5.4	7	
	区間3	60.0~69.3	11	13MI45	区間1	0.9~2.3	5
	区間4	50.3~59.1	11	13MI46	区間1	0.7~2.3	5
	区間5	37.6~49.4	15	13MI47	区間1	0.7~2.3	5
	区間6	6.9~36.7	39	13MI48	区間1	0.9~2.3	5
13MI39	区間1	12.2~16.2	7	冠水坑道内	①	セメント吹付部	-
	区間2	6.5~11.3	6		②	埋戻しピット出口	-
	区間3	3.3~5.6	3		③	冠水坑道手前側	-
	区間4	0.0~2.3	3		④	冠水坑道奥側	-

※冠水坑道内の観測区間①~④は図 3.3-13 に示す①~④の観測区間に対応

冠水時の周辺岩盤の力学的挙動を把握するために、光ファイバ式岩盤変位計を開発した(図 3.3-4)。計測期間が少なくとも数年間にわたることと、計測される変位は mm オーダー以下が想定されたため、光ファイバを利用したセンサーのうち、精度が高いファブリペロー方式を採用した岩盤変位計を開発した。ファブリペロー方式とは、入射した光が2つのミラーで反射干渉し、これにより生じた干渉縞の変化でひずみや変位などを検出するものである。1ラインでの多点計測はできないものの、精度が良く比較的安価であることが特徴である。ボーリング孔内に設置するために、ばね式アンカーを備えた躯体にファブリペロー式変位計を収納して 5MPa の耐圧性を確保するとともに、計測区間を任意に設定できるように製作し設置した。

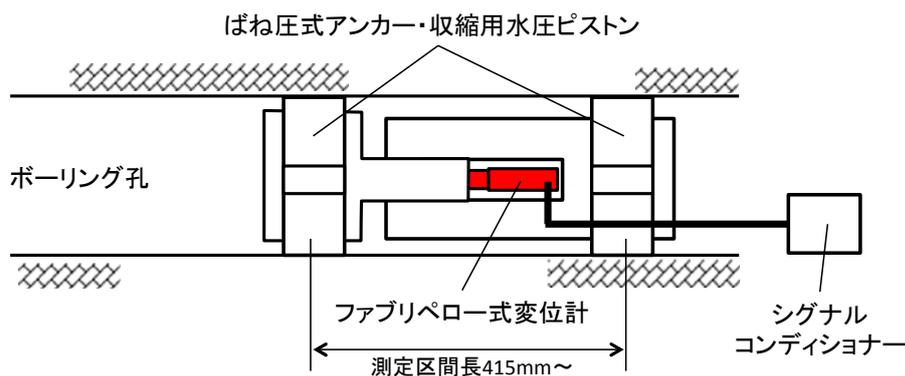


図 3.3-4 光ファイバ式岩盤変位計のシステム構成

②実施内容

岩盤変位の観測・解析：坑道近傍の観測孔において、冠水・排水時の岩盤変位を連続観測する。冠水状態を年オーダーで継続し、長期的な岩盤変位の有無を確認する。観測結果に基づき、力学解析手法の妥当性を確認する。

透水性変化の観測・解析：冠水坑道近傍の観測孔における定期的な地下水採水作業時の水圧応答を継続的に観測する。観測結果に基づき、冠水坑道と観測孔を連結する割れ目の透水性の変化（セメント材料による割れ目の充填に伴う透水性変化など）の有無や程度を確認するとともに、割れ目の透水性の変化が坑道閉鎖後の地下水流動解析結果に与える影響の確認を行う。

水圧・水質変化の観測・解析：冠水坑道周辺および研究所用地周辺の観測孔において、冠水時の水圧変化（水圧回復）を連続観測する。観測結果に基づき、事前に実施した冠水坑道周辺の水理地質構造のモデル化手法や水理解析手法の妥当性を確認し、必要に応じてモデルの更新および手法の改良を実施する。また、冠水坑道の地下水排水時に減圧することや、必要に応じて冠水時に冠水坑道内の地下水を加圧することによる周辺地下水の水圧応答を基に、坑道スケールの岩盤の透水係数の設定の考え方について検討する。これらに基づき、坑道掘削前～閉鎖後に至る坑道スケール、施設スケールでの水圧回復を推定するためのモデル化・解析手法として整備するとともに、坑道閉鎖後の長期的な水圧変化の予測解析技術を構築する（図 3.3-5）。

水質変化については、坑道近傍の観測孔において、冠水時の水質変化（酸化還元状態の変化）を連続観測する。冠水状態を年オーダーで継続し、周辺地下水のアルカリ化状態について観測する。観測結果に基づき、化学解析手法の妥当性を確認する。さらに、坑道掘削前～閉鎖後に至る水質変化を推定するためのモデル化・解析手法として整備するとともに、坑道閉鎖に伴う長期的な水質回復過程を予測する。

再冠水試験に伴う水圧応答の予測

✓非定常の三次元飽和・不飽和地下水流動解析により、再冠水に伴う坑道周辺の水圧応答の分布や程度を予測

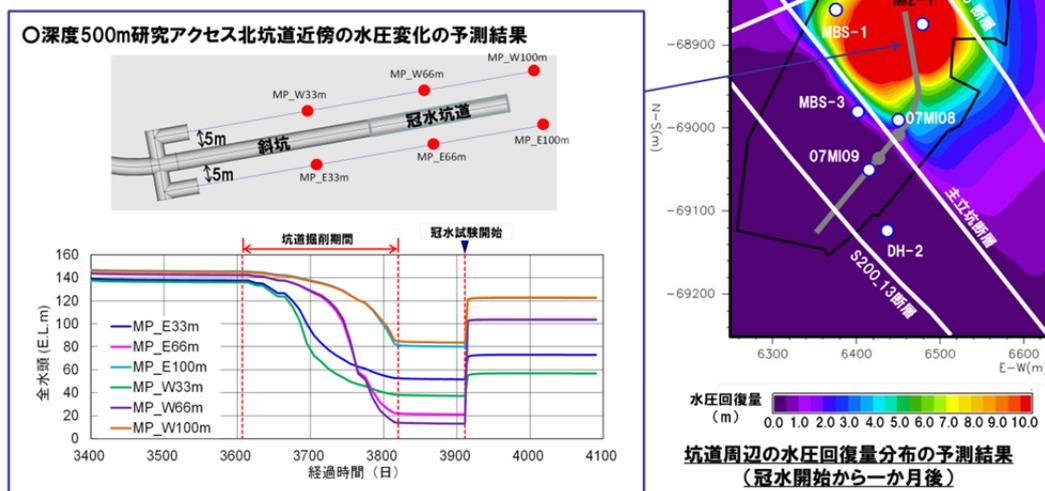


図 3.3-5 冠水に伴う水圧回復予測解析の一例

(3)冠水坑道周辺の物質移動特性の調査

日本国内に分布する花崗岩では、ヨーロッパに分布する花崗岩に比べて岩盤中の割れ目本数および湧水を伴う割れ目からの湧水量も多い傾向があり、湧水量に関わるヨーロッパの関連基準（例えば、フィンランド Posiva における処分坑道の“Target property”：地下水湧水量<0.1 L/min⁹⁾ など）を適用できず、日本独自の基準が必要になる可能性がある。その判断基準を検討する上で、割れ目の連結性や処分場閉鎖後の地下水流動が定常化した状態において、物質移動速度が遅いことなどを例示しておくことが重要と考えられる。

①これまでの研究成果

冠水坑道と冠水坑道周辺のモニタリング孔にまたがる割れ目の分布および水理特性、地下水の化学特性を把握した（図 3.3-6）。

②実施内容

坑道冠水時には、坑道を埋め戻した場合と同様に、地下水流動が最も滞留した状態となる（厳密には斜坑側への動水勾配はあるが、構築可能な試験環境としては最良の条件）。このような冠水状態を継続する間、冠水坑道内に注入する地下水にトレーサー（非収着性）を添加しておき、周辺観測孔の湧水割れ目を含む観測区間で定期的にトレーサー濃度を観測することで、物質移動に寄与する割れ目の分布やそれらの連結性を評価するとともに、動水勾配の低い環境では湧水割れ目においても坑道から岩盤への物質移動速度が非常に遅いことを例示する（このトレーサー試験では、観測区間の容積が大きいことから、地下水の実流速の把握、割れ目開口幅や有効空隙率の評価のためのデータ取得は実施しない）。なお、このモニタリングについては、施設閉鎖後のモニタリングと併せて計画を検討する。

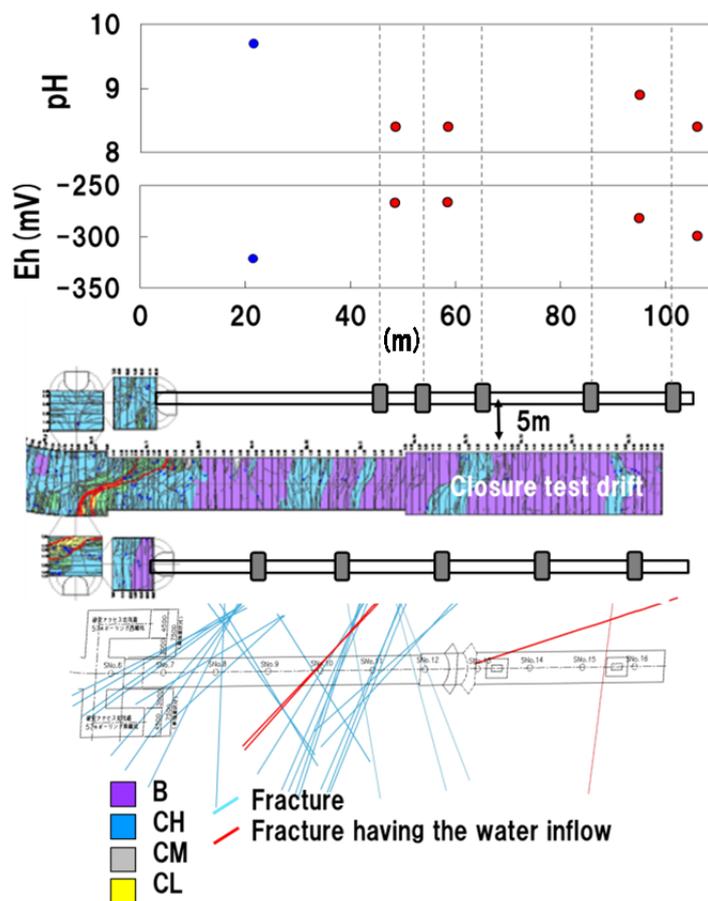


図 3.3-6 冠水坑道周辺での水質観測結果

(4) 予察的埋め戻し試験

この試験では、坑道埋め戻し試験、施設全体埋め戻しの事前検討のための基礎情報（主に化学影響や施工性）を提供する。合わせて、セメント材料や埋め戻し材が周辺岩盤に与える影響および埋め戻し材の水理・化学的プロセスに関わる基礎的な知見を提供する。これらの情報・知見は、ベントナイトに含まれる有機物や微生物が引き起こす水-鉱物-微生物相互作用と化学影響に関わるシミュレーションコードの検証に利用する。

① これまでの研究成果

水圧・水質観測孔、岩盤変位観測孔のうち下向きに掘削したボーリングピット（2か所）を、坑道埋め戻しに使用する可能性のある埋め戻し材として、①ベントナイト 15%+砂 35%+砕石 50%、②ベントナイト 15%+砂 85%で埋め戻し、膨潤によるベントナイトの逸散を防ぐためピット上部にコンクリートで蓋を施工した。埋め戻し材内部の物性変化について事前解析を行ったうえで、埋め戻し材内部に土圧計、水圧計、水分計を設置した後に観測を開始し、埋め戻し材内部の飽和挙動を計測するとともに、冠水前の土圧、水圧、水分の分布を把握した。冠水前に実施した岩盤からの湧水量計測結果の空間分布およびピット内壁面の割れ目分布と計測した埋め戻し材の飽和挙動との関係を確認した。上記の不均一な湧水下での埋め戻し材の飽和挙動や周辺岩盤への影響を評価するための解析手法の整備に資するための予察解析を実施し、埋め戻し材の膨潤過程などのモデル化・解析に関する今後の検討の方向性を整理した。原位置での締固め試験を実施し、埋め戻し材ごとの施工性の違いを確認するとともに、ボーリングピットへの施工

を通じて実際の坑道内での施工条件に関する知見を得た。埋め戻し材の室内試験（密度試験，締固め試験，透水係数，圧密試験，膨潤圧試験，三軸非排水せん断試験）を実施し，埋め戻し材の材料特性を把握した。ボーリングピット（1ヵ所）の近傍に水質観測孔（約2m×4本）を掘削し，水圧・水質モニタリング装置を設置し観測を実施した（図3.3-7）。

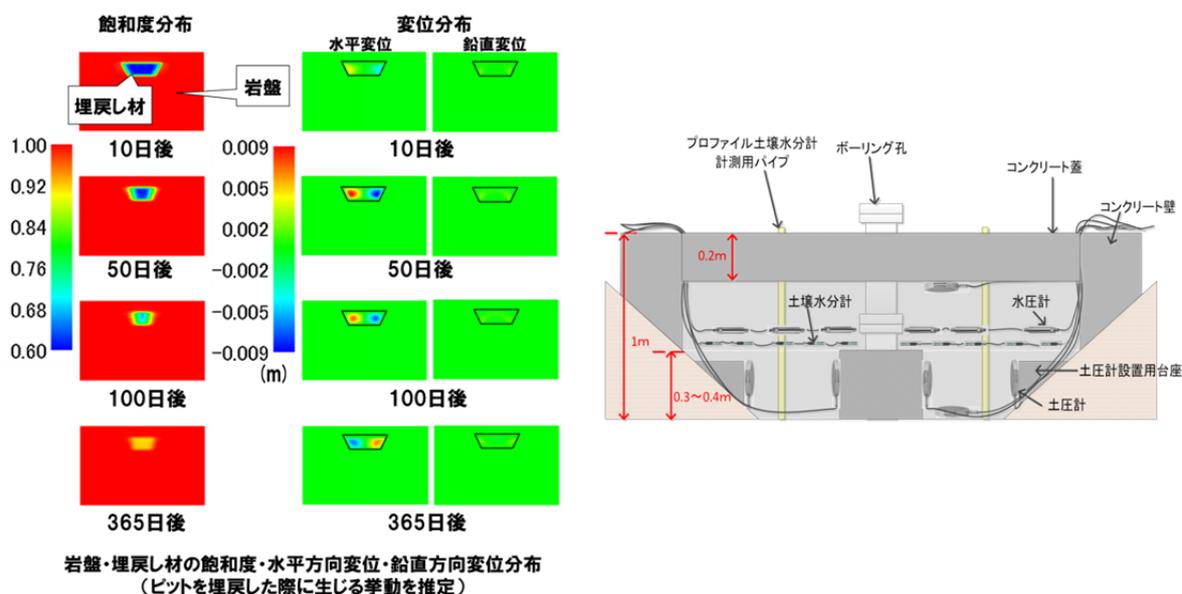


図 3.3-7 ボーリングピット埋め戻し試験

②実施内容

坑道冠水に伴う水圧上昇による，各種センサーの耐久性の確認を行い，埋め戻し時の観測技術の整備を進める。坑道冠水に伴う土圧と水圧の変化の計測結果に基づき，室内試験で得られた膨潤圧と，実際にコンクリートや岩盤に作用する土圧の関係性を把握し，今後の坑道埋め戻し試験および施設全体埋め戻しの際の埋め戻し材の選定や止水壁の設計に反映する。再冠水試験後の埋め戻し材を用いた透水試験や圧密試験を実施し，冠水に伴う埋め戻し材の材料特性の変化を把握し，今後の坑道埋め戻し試験および施設全体埋め戻しの際の埋め戻し材の選定に反映する。計測結果，室内試験，予察解析の結果を踏まえ，不均一な湧水下での埋め戻し材の飽和挙動や周辺岩盤への影響を評価するための解析手法（パラメータの選定や初期条件・境界条件の設定方法なども含む）を整備し，今後の坑道埋め戻し試験および施設全体埋め戻しの予測解析を実施する。冠水前～冠水後の埋め戻しピット周辺の水質観測を行うとともに，セメント材料，埋め戻し材を含む周辺の岩石・地下水試料を採取し，それらが割れ目表面の鉱物，微生物特性に与える影響（もともと存在しなかった二次鉱物やバイオマットなど）を把握する。

(5)モニタリング技術開発

坑道埋め戻し試験，施設全体の埋め戻しに活用可能な先進的モニタリング技術を活用した測定を試行し，坑道閉鎖時のモニタリングに関わる要素技術開発を実施する。

①これまでの研究成果

地中無線通信技術については，（公財）原子力環境整備促進・資金管理センター（以下，原環センター）との共同研究により，冠水坑道周辺の通信状況に関わる事前確認を行った。また，地中無線水圧センサーを冠水坑道内に設置し，観測を実施した。

光給電システムでは、(株)レーザックが開発した光ファイバを利用した光給電システムについて、既往の水温／湿度計測技術について、深度 300m 研究アクセス坑道において適用性確認を行った。

チップ式化学電極については、静岡大学が開発した電気伝導度 (EC) チップセンサーの耐圧試験を行い、深度 500m の水圧条件下において使用可能なことを確認した。

埋め戻し材の密度計測技術においては、予察的埋め戻し試験におけるピット埋め戻し施工中の埋め戻し材の水分量変化を計測し、埋め戻し材の密度変化と水分量変化の関係を整理した。この結果を基に、埋め戻し施工中の土壌水分変化を利用した埋め戻し材密度の原位置計測技術の適用性確認を行った。

坑道内水圧・水質モニタリング装置の地上化については、水圧・水質観測装置の電設系のみを地上に移設し、観測を行うためのシステムを設計・製作するために、坑道内に設置してある観測装置の数量・仕様を整理するとともに、地上化に関わる概念設計と経費の検討を行った。

②実施内容

地中無線通信技術については、冠水坑道において地中無線水圧センサーによる観測を継続し、無線通信技術を用いた長期観測について、花崗岩中での適用性を確認する。その後、冠水坑道で使用したセンサー類、送信機、受信機を回収し、予察的埋め戻し試験において埋め戻し材の中に設置し、その適用性を確認する。並行して、無線中継器を介した通信テストを深度 500m－深度 300m－地上間で行い、使用可能距離、期間などの確認を行うとともに、必要な機器の改良を実施する。なお、本技術開発については、国内の研究機関（原環センターなど）との共同研究として実施する計画である。

光給電システム・チップ式化学電極の開発については、複数のチップ式 EC センサーを光給電技術により計測利用するための技術開発を行う。また、EC 以外のチップ式 pH、ORP センサーの要素技術開発を行うとともに、チップ式 EC センサーの実用化試験を行う。本研究は、静岡大学・(スイス Nagra) と共同研究で実施する。

(6)止水技術の確認

止水壁の設計・施工など坑道の止水技術は、研究坑道全体の埋め戻しにおいて、段階的に坑道を閉鎖するために不可欠な要素技術であり、岩盤特性を踏まえた現実的な予算、工程、技術仕様を最適化するための基本情報となる。また、深部の高圧環境下での施工実現性を例示するものとなる。

① これまでの研究成果

耐差圧 5 MPa の鉄筋コンクリートの止水壁を斜坑最下部と冠水坑道の間を設置するために、止水壁にかかる応力解析を行い（図 3.3-8）、その仕様（厚さ、周辺へのグラウトなど）の詳細設計と止水壁内に設置する計測工の検討を行った。

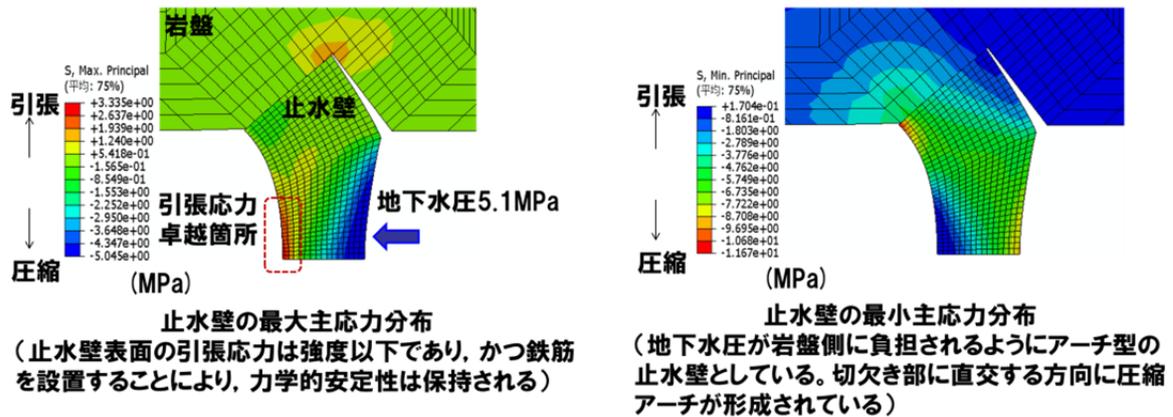


図 3.3-8 止水壁に関わる応力解析

②実施内容

止水壁内に設置した各種センサー（温度・変位・土圧・応力・鉄筋・継目）を利用して、再冠水試験時の計測を行い止水壁の性能を確認する。また、その健全性をモニタリングする。これらの結果は、埋め戻し試験時の止水壁の施工検討に反映する。

3.3.1.2 岩盤の破壊現象評価

地下深部に空洞を掘削すると、空洞の規模の大小によらず周辺岩盤に掘削影響領域が発生する(図 3.3-9, 3.3-10)。掘削影響領域では、既存割れ目の開閉あるいは空洞周辺の応力集中により新たな割れ目が発生し、それらが物質の選択的な移動経路になる可能性がある。また、施工対策の一つであるグラウト工事においてもセメントミルクの注入圧力が過大であれば岩盤に新たな割れ目を生成する可能性がある。このような岩盤のダメージの範囲や程度は環境回復評価の上でも重要なパラメータとなる。

(1)これまでの研究成果

釜石鉱山における原位置試験研究で実施した掘削影響試験では、発破などの掘削行為以外に坑道周辺に再配分された応力の集中による物理的損傷(破壊現象)も生じていた。このような現象は、岩盤への損傷を最小にする掘削工法を用いたとしても生じることから、その範囲や物性変化のメカニズム・程度を把握することが重要である。このため、比較的細粒の大島花崗岩を用いた空洞を有する岩石試料の載荷試験などを実施し、損傷範囲や物性変化の程度および破壊のメカニズムやそのモデル化手法に関する検討を実施してきている。

(2)実施内容

上記の背景を踏まえて、主に空洞周辺に生じる可能性のある破壊現象を対象に、本研究では、以下の 2 項目を実施する。

①近接大口径ボーリング孔の掘削による孔壁破壊現象の観察

大口径ボーリング孔を近接させて掘削することにより、通常よりも大きな応力集中を発生させてそれによる破壊現象の程度や範囲を把握・評価する技術を構築する。

i)大口径ボーリング孔の掘削・計測

- ・ボーリング孔の掘削 (φ98~254mm, 掘削長 3m 程度のボーリング孔, 数本)
- ・コア観察, BTV 観察
- ・改良型キャリパー検層による孔径計測

ii)加速試験

- ・近接孔の掘削・計測 (必要に応じ加熱することによる破壊領域の生成を試みる)

iii)粘性流体注入による割れ目進展挙動の観察

粘性の異なる流体注入により人為的に割れ目を生成させ、その範囲や破壊の程度を把握・評価する技術を構築する。

②岩盤の破壊現象を含む長期岩盤挙動の評価手法の開発

コンプライアンス可変方程式¹⁰⁾を用いた数値解析による、坑道周辺岩盤の時間依存的挙動を予測する。



図 3.3-9 孔壁の破壊状況(東濃鉱山)

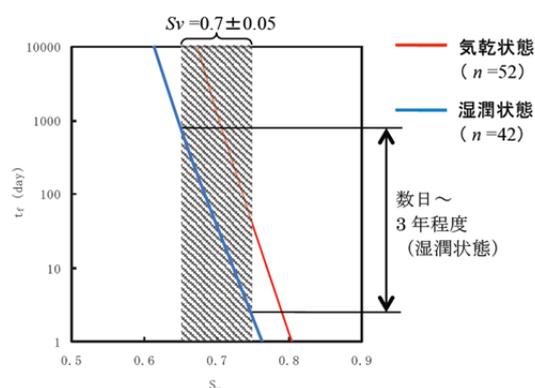


図 3.3-10 破壊限接近度と破壊までの寿命の関係

3.3.1.3 500m 坑道での埋め戻し試験

①これまでの研究成果

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、人工バリアの構成要素のひとつである緩衝材や坑道の埋め戻し材は、坑道などが放射性核種の選択的な移行経路となることを防ぐことや、廃棄体や坑道の力学的安定性を確保するために重要な役割を担う。このため、諸外国において、緩衝材の設置に関する検討や原位置試験、坑道閉鎖に用いられるプラグの施工試験が精力的に行われてきた(カナダ URL:Tunnel Sealing Experiment, Enhanced Sealing Project, スウェーデン Äspö HRL : Backfill and Plug Test, Prototype Repository, スイス : DOPAS プロジェクト, など多数)が、水平坑道の埋戻しについての原位置試験は、スウェーデン Äspö HRL における Backfill and Plug Test に見られる程度であり、参照事例は多くはない。

このため、坑道の埋め戻しにより、乱された地質環境が回復する過程で生じる様々な現象や、それによる多重バリアシステムへの影響については不確実な部分が残されているのが現状である。加えて、直近に改訂された高レベル放射性廃棄物最終処分の基本方針¹¹⁾では、「基本的に最終処分に関する政策や最終処分事業の可逆性を担保することとし、今後より良い処分方法が実用化された場合等に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする。このため、機構は、特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性(回収可能性)を確保するものとする」とされており、回収可能性の維持のために、長期間坑道を維持した後の埋め戻し後から徐々に地質環境が回復する過渡期の現象理解も、安全評価などの初期条件の設定において重要な課題の一つと認識されている。この現象理解は、具体的には以下のような課題解決のために寄与するものと考えられる。

- ・長期的な通気や地下水の排水による天然バリアの不飽和化とそれらが埋め戻し後に回復するまでの間の人工バリアシステム(ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、埋め戻し材、プラグ)の長期健全性に及ぼす影響の評価
- ・天然バリア中の地下水面低下による水質の異なる地下水(地表付近の酸化水を含む)の流入などの化学的変化とそれが人工バリアや天然バリアの性能(例えば割れ目表面の核種移行特性など)に及ぼす影響の評価
- ・長期的な坑道の維持に伴う支保材料(コンクリート支保工やロックボルト)の劣化とそれに伴う空洞安定性維持への影響および埋め戻し時の支保材料の取扱い(支保の劣化の程度によっては地上まで直結する水みちにならないよう撤去する可能性もあり)

②実施内容

上記の背景を踏まえて、坑道埋め戻しに伴う地質環境の変化の把握に関連する基盤技術を整備することと、瑞浪超深地層研究所における埋戻しの計画策定に反映するため、以下の目的で埋戻し試験を実施する。

- i) 瑞浪超深地層研究所を利用した地下施設の埋戻しの技術開発
- ii) 地下施設埋め戻し後の埋め戻し部分の地質環境の変化に関する知見の整備と調査技術開発

a)坑道埋め戻し試験

既設の水平坑道を利用して、研究坑道埋め戻し計画案の詳細設計を行うための埋め戻し試験を行う。

概略的な試験内容は以下の通り

- ・埋め戻し材料選定のための各種室内試験
- ・坑道埋め戻し
- ・埋め戻し後仕様を満たしているかどうかの確認(ボーリングによるサンプリングと室内試験)

b) 坑道埋め戻し試験結果に基づく研究坑道埋め戻し計画の概念設計

a)の結果と上述の基本的考え方を考慮し、研究坑道全体の埋め戻し計画案の概念設計を行う。また、立坑部プラグ（立坑地表部に設置することになると想定されるコンクリート製の蓋）の代替技術の選定やその施工試験計画の検討も併せて実施する。

c) 研究坑道埋め戻し計画の詳細設計と埋め戻し後の環境回復などに関する事前予測

b)で実施した概念設計に基づき、研究坑道埋め戻し計画の詳細設計を行うとともに、その結果を踏まえた環境回復に関する事前予測（水圧、水質分布）を行う。

坑道埋め戻し試験の実施場所については、深度 500m 研究アクセス北坑道または同南坑道の水平坑道などが考えられる。

3.3.2 モニタリング技術の開発

3.3.2.1 目的

坑道埋め戻しについては、海外において小規模の実施例があるものの、施設全体の埋め戻しを伴う研究は世界初の事例となる。実際の処分場では、物質移動経路となり得るモニタリング孔を数多くは掘削できないため、施設埋め戻し後の環境条件が安全評価上問題のない範囲に収束すること、その範囲を確認するためにはどのようなモニタリングが必要になるかを、処分場と同様の地下施設で例示しておくことが必要である。

ヨーロッパの地層処分関連機関や MoDeRn プロジェクトなどでは、処分場の一角にモニタリングサイトを設けて中長期的なモニタリングを行う考え方が提起されており、MIU で例示されるモニタリング技術、経験的ノウハウは、世界的にも研究開発ニーズに応える重要なものとなる。また、このような観測は、垂炭廃坑の地盤沈下事例（例えば、岐阜県御嵩町周辺）のような事後環境アセスメントの不備による社会問題の発生に備えるものとしても貴重である。研究所用地周辺における現在の花崗岩中の地下水位は、研究坑道掘削前に比べて約 150m 低下しており、研究坑道埋め戻し後は地下水位が掘削前の状態と同様になるかどうか、重要な課題である。

大規模地下施設の建設から閉鎖後までの周辺地質環境の変化は、瑞浪超深地層研究所の研究坑道を事例とすると、図 3.3-11 のように想定される。これらの変化のモニタリングに関わる研究開発の計画立案においては、以下を検討の前提とする。

- ・埋め戻し開始は平成 32 年 4 月、終了は平成 34 年 1 月。
- ・国内外専門家（原環センター、ヨーロッパの関連機関から構成される MoDeRn など）のレビューを受けるとともに、坑道の埋め戻し試験などの結果に基づいて柔軟に計画を見直す。
- ・可能な限り外部ニーズを反映する（例えば、研究用途以外の地中熱関連モニタリングなど）。それらに応じて、埋め戻し後のモニタリング期間は、5 年間程度は必要と考えられるが、環境回復の予測や観測の結果などを踏まえて検討する。モニタリング孔は最終的に埋め戻す。

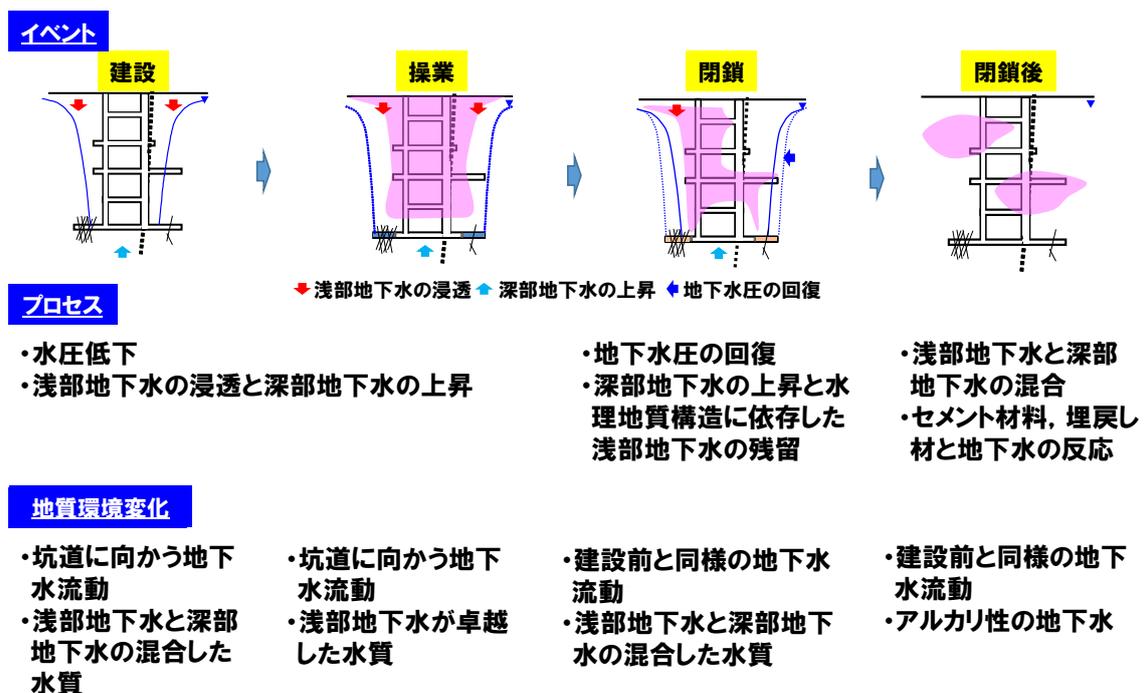


図 3.3-11 研究坑道の建設～閉鎖後の周辺の地質環境変化のイメージ

3.3.2.2 実施内容

モニタリングは、実施時期ごとに以下のように分類される。

①H27～31 年度のモニタリング

- i. 研究所周辺の地上観測孔における水圧・水質モニタリング
- ii. 坑道周辺の地下観測孔における水圧・水質・岩盤変位モニタリング
- iii. 坑道での埋め戻し試験における埋め戻し材・岩盤の土圧・水圧・水分・透水性・密度モニタリング

②研究坑道全体の埋め戻し時のモニタリング

i. 埋め戻し材および既存吹付・立坑背面の止水性モニタリング（実施場所は埋め戻し材の種類、配置に依存。なお、坑道の一部埋め戻し試験において、止水性などの達成目標を保証できる施工方法が確立できた場合は、埋め戻し材のモニタリングは不要。）

- ii. 坑道周辺の岩盤変位（堆積岩部で膨張性粘土材料を使用した場合）

③研究坑道全体の埋め戻し時・後のモニタリング

- i. 研究所周辺の地上観測孔における水圧・水質モニタリング
- ii. 坑道周辺の地下観測孔（観測の地上化が必要）における水圧・水質・岩盤変位モニタリング
- iii. 地震動のモニタリング

①H27～31 年度のモニタリング

i) 研究所周辺の地上観測孔における水圧・水質モニタリング

地上から掘削された観測孔（MSB1～4 号孔，MIZ-1 号孔，MIU1～4 号孔，AN-1,3 号孔）において、水圧（一部の観測孔では水質も含む）の定期観測を行い、平成 31 年度までの研究坑道維持管理期間における周辺地下水の変化を把握する。それらのデータを取りまとめ、平成 31 年度以降の研究坑道全体の埋め戻しに先立つ初期状態を理解する。なお、広域地下水流動研究により掘削された DH-2，DH-15 号孔のデータも参照する。

ii) 坑道周辺の地下観測孔における水圧・水質・岩盤変位モニタリング

深度 200～500m に設けられた既存の水圧・水質観測孔（図 3.3-12）において、水圧・水質の定期観測を行い、平成 31 年度までの研究坑道維持管理期間における周辺地下水の変化を把握するこれらのデータを取りまとめ、平成 32 年度以降の研究坑道全体の埋め戻しに先立つ初期状態を理解する。主に冠水坑道（図 3.3-13）において、冠水・減圧・冠水により水圧回復過程の観察を行うとともに、周辺観測孔での定期的な透水試験により割れ目の透水性変化を観察する。また、花崗岩による地下水の還元緩衝能力および吹付セメントによる地下水のアルカリ化プロセスを評価するため、冠水坑道内の地下水を対象として、定期的に物理化学パラメータの測定と地下水の水質分析を行う。加えて、坑道冠水時の岩盤変位の長期観測を行う。なお、水圧の観測には、原子力機構が開発した水圧・水質モニタリング装置に加えて、原環センサーにより開発された地中無線式のモニタリング装置による観測を行う。

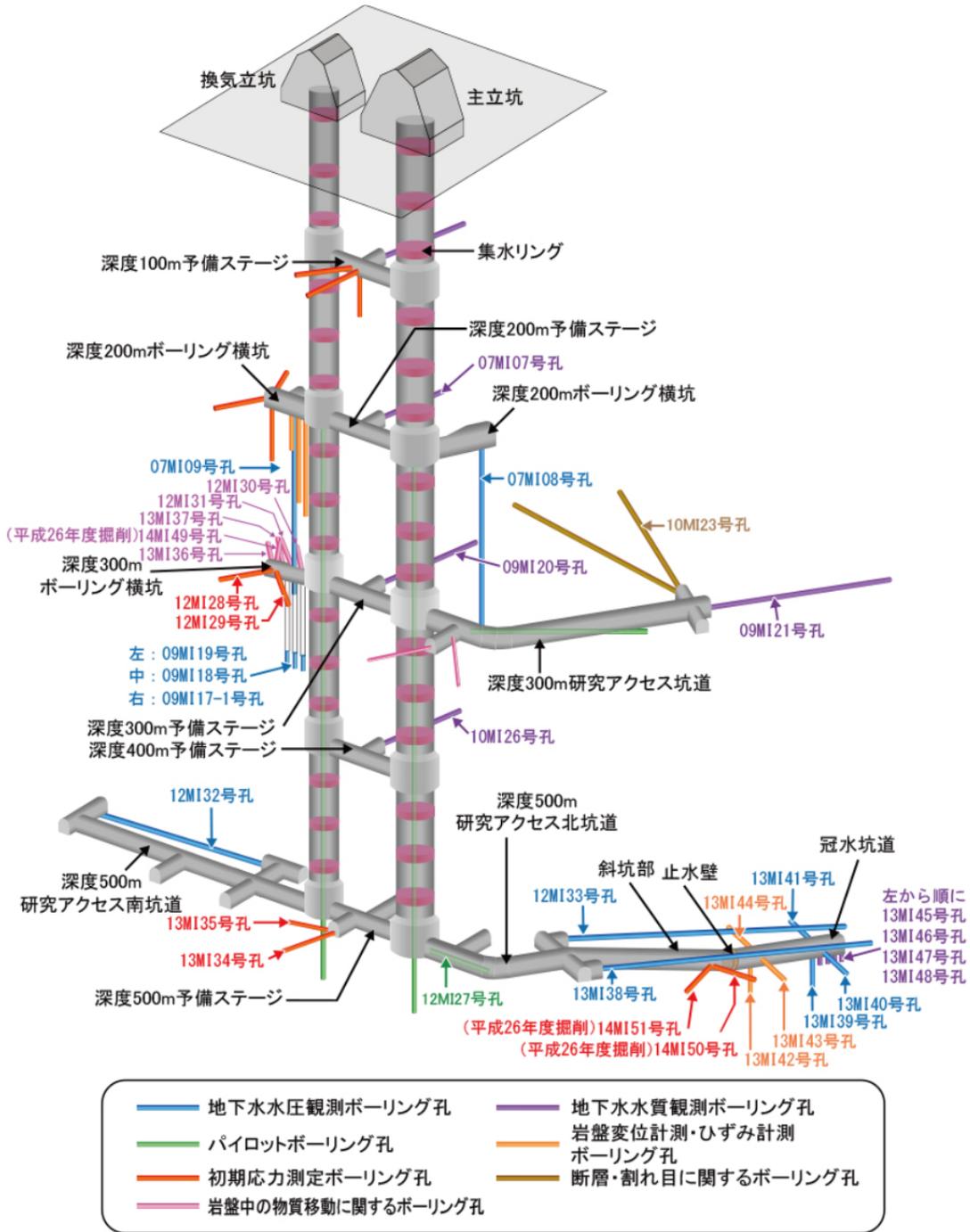


図 3.3-12 研究坑道における既存ボーリング孔

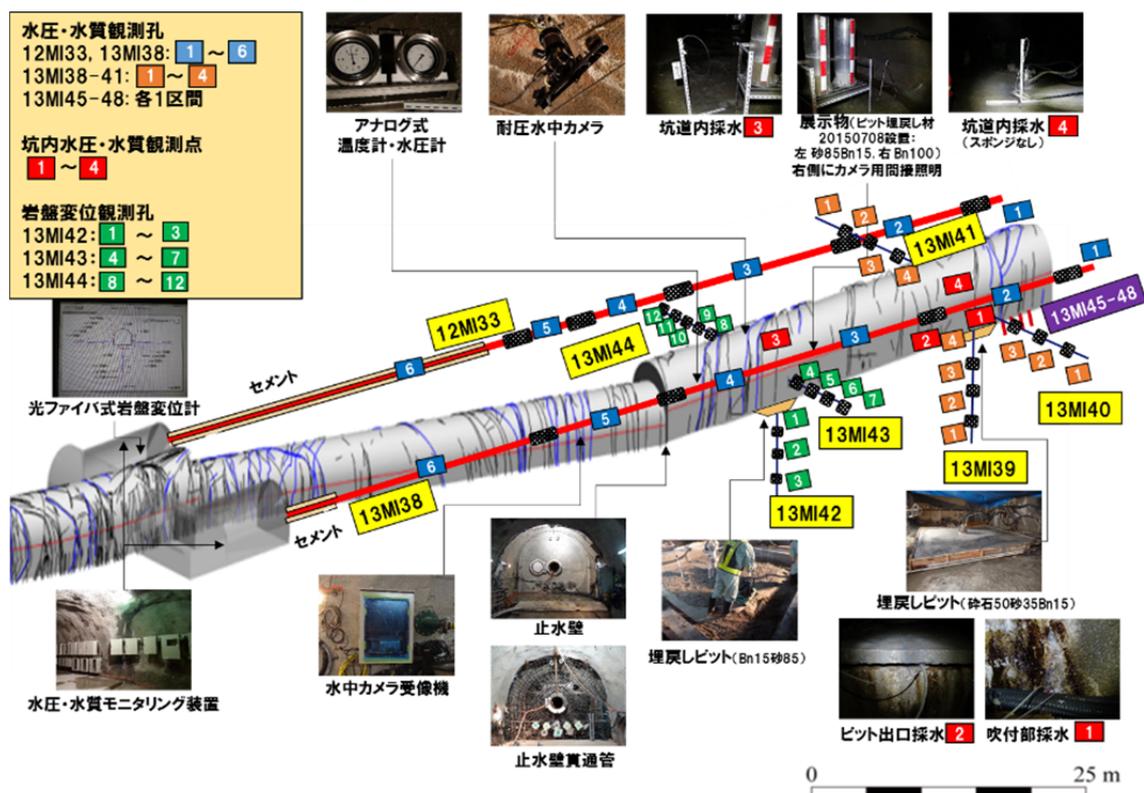


図 3.3-13 冠水坑道周辺における各種観測装置

iii) 坑道埋め戻し試験における埋め戻し材・岩盤の土圧・水圧・水分・透水性・密度モニタリング

冠水坑道の観測孔埋め戻しピットにおいて、埋め戻し材中の土圧・水圧・水分のモニタリングを継続して行い、モニタリングに関わる観測機材の長期適用性を確認する。

坑道埋め戻し試験において、埋め戻し材および周辺岩盤の物性（密度や透水性，化学特性など）のモニタリングを行い、坑道埋め戻し時に担保すべき物性条件を満たしているか確認する。なお、坑道のコンクリート吹付背面（EDZを含む）の水みちとしての機能について確認するため、埋め戻し試験を実施している坑道周辺の吹付を対象として、定期的に地中レーダーによる空間の有無，形状の調査を行う。モニタリングによりコンクリート吹付背面に水みちの形成が確認された場合は、水みちを遮断するためのセメント，樹脂充填やプラグ施工方法について検討し、坑道全体埋め戻しの施工計画に反映する。

②研究坑道の全体埋め戻し時のモニタリング

坑道埋め戻し時のモニタリングに関わる研究開発計画の立案においては、研究坑道の全体埋め戻し工事の工期や埋め戻し方法などを検討の前提とする必要がある。例えば、細谷ほか（2015）¹²⁾では、埋め戻し方法の一例として埋め戻し設計案や工期を例示している。しかしながら、現段階では埋め戻し方法は確定しておらず、今後、坑道の埋め戻し試験の結果や埋め戻し工期，予算，地域との約束など様々な社会的，経済的制約条件を踏まえながら、埋め戻し方法の詳細が具体化されていくことになる。そのため、施工管理に関わるもの，処分事業や安全規制への成果の反映を念頭において例示しておくべき必須の項目として、埋め戻し材の特性評価，吹付・立坑背面のEDZの止水性確認のためのモニタリングに関わる研究開発計画について立案し、その他の今後，課題が明確になってくる項目については、その都度，研究開発計画に反映することとする。

③研究坑道の全体埋め戻し時・後のモニタリング

i) 研究所周辺の地上観測孔における水圧・水質モニタリング

地上から掘削された観測孔（MSB1~4号孔，MIZ-1号孔，MIU1~4号孔，AN-1,3号孔）において，水圧（一部の観測孔では水質も含む）の定期観測を行い，研究坑道全体埋め戻し後の地質環境（水圧・水質など）の変化，定常化過程のモニタリングを行う。平成34年度以降の環境回復のモニタリング期間は第3期中長期計画末までの環境回復の予測や観測の結果など踏まえて確定する。モニタリング終了後は，観測孔については，原則閉塞することとし，その方法は石油井で一般的に行われている方法を基本とする。なお，広域地下水流動研究により掘削されたDH-2，DH-15号孔のデータも参照する。

ii) 坑道周辺の地下観測孔における水圧・水質・岩盤変位モニタリング

ii-1) 既存モニタリング装置の地上化

研究坑道全体埋め戻し後の事後環境アセスおよび地質環境回復過程を確認するため，研究坑道に設置された既存のモニタリング装置を活用して，坑道埋め戻し後も，地上から各深度の水圧・水質・岩盤変位を観測可能な観測設備の設計・製作・設置を行う。

ii-2) モニタリング項目・区間の選定

坑道内モニタリング装置の地上化設計・製作，埋め戻し設計，予察的な地下水流動解析の結果に基づきモニタリングを実施する項目・区間を選定する。

④深層ボーリング孔の閉塞技術開発

平成34年度までに，広域地下水流動研究の観測孔および坑道内の観測孔に設置されている地上化を行わないモニタリング装置を順次，撤去し，ボーリング孔を閉塞する。なお，撤去・ボーリング孔閉塞は，石油井で一般的に行われている方法で行うことを基本とする。

平成34年度以降もモニタリングを継続するボーリング孔については，モニタリングが終了した段階で，それまでに整理されたボーリング孔閉塞技術により，モニタリング孔を閉塞する。

4. 試験等スケジュール

各課題に対する試験などのスケジュール（案）を表 4-1 に示す。本スケジュールについては、研究の進捗状況などに基づき適宜見直していく。

表 4-1 試験等スケジュール（案）

必須の課題		平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度	平成31年度	
地下坑道における工学的対策技術の開発	地下水抑制技術の開発			ポストグラウト 施工試験			
		周辺岩盤への影響把握のための観測					
	地下水管理技術の開発	現状技術の調査・検討					
				室内試験			原位実証試験
物質移動モデル化技術の開発	不均質な割れ目ネットワークのモデル化手法の開発	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	ボーリング調査(深度500m研究アクセス南坑道) 物質移動試験(深度500m研究アクセス北坑道(冠水前)および南坑道)				
					モデル化・解析		取りまとめ
		花崗岩中での物質移動現象の理解	ボーリング調査(深度500m研究アクセス南坑道) 物質移動試験(深度500m研究アクセス北坑道(冠水前)および南坑道)				
				物質移動試験(深度500m研究アクセス北坑道(冠水中・冠水後)および南坑道)			
				モデル化・解析		取りまとめ	
		物質移動におけるコロイド、有機物、微生物の影響因子の評価					取りまとめ
	地質環境の長期変遷に関する解析・評価技術の開発	断層などの影響を含めた地質環境特性の長期変遷解析技術	既存ボーリングコア解析 モニタリングデータの収集				
					モニタリングデータの解析		
					モデル化の試行		モデルの構築
		地下水の長期隔離に関する深部塩水地下水の起源・滞留時間の把握	採水装置などの機器開発				
			ボーリング掘削			モニタリング機器設置・観測	
坑道理戻し技術の開発	坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術	予備的冠水と排水 観測機器確認/止水壁の確認・改修					
			観測機器の改良と再設置				
			冠水坑道周辺の水・セメント材料等の採取・分析				
			再冠水と水圧・水質観測、理戻しに関わる予備試験				
	岩盤の破壊現象評価	ボーリング調査	ボーリング孔壁の破壊現象の観測				
			ボーリング孔壁の破壊現象の加速試験				
	500m坑道での埋め戻し試験	試験計画の策定・試験の実施					
長期モニタリング技術の開発	長期モニタリング(モニタリングおよび装置の改良・更新を含む)						
研究成果の総合的な取りまとめ						取りまとめ	

5. 成果の取りまとめ

必須の研究開発課題に関する研究成果については、学会発表、研究開発報告書により積極的に公開するとともに、学会誌への論文投稿を積極的に進める。あわせて、ホームページを活用したリアルタイムでの成果の公表を進める。また、国内外の大学や研究機関との研究協力、共同研究を積極的に進めるとともに、共同研究などの枠組みを活用した研究成果のレビューを受け、研究成果の品質向上に努める。

研究成果については、第2期中期計画期間中の成果と同様に成果報告書として取りまとめる。

おわりに

超深地層研究所計画について、機構改革の中で抽出された必須の課題に関する調査研究計画を策定した。本計画書において示した試験内容については、地層処分計画の国による見直し、放射性廃棄物WGおよび地層処分技術WGの取りまとめなど地層処分事業の進捗を踏まえて、適宜見直しを行う予定である。

参考文献

- 1) 文部科学省，経済産業省：“独立行政法人日本原子力研究開発機構が達成すべき業務運営に関する目標”，(2012).
- 2) 日本原子力研究開発機構：“独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画（平成22年4月1日～平成27年3月31日）”，(2012).
- 3) 文部科学省：“日本原子力研究開発機構の改革の基本的方向”，平成25年8月8日，(2013).
- 4) 日本原子力研究開発機構：“日本原子力研究開発機構の改革計画 自己改革 - 「新生」へのみち-”，平成25年9月26日，(2013).
- 5) 濱 克宏，水野 崇，笹尾英嗣，岩月輝希，三枝博光，佐藤稔紀，藤田朝雄，笹本 広，松岡稔幸，横田秀晴，石井英一，津坂仁和，青柳和平，中山 雅，大山卓也，梅田浩司，安江健一，浅森浩一，大澤英昭，小出馨，伊藤洋昭，長江衣佐子，夏山諒子 仙波 毅，天野健治：“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，(2015)，269p.
- 6) 日本原子力研究開発機構：“超深地層研究所 地層科学研究基本計画”，JAEA-Review 2015-015，(2015)，39p.
- 7) 地層処分基盤研究開発調整会議：地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成25年度～平成29年度），(2013).
- 8) 原子力発電環境整備機構：“地層処分事業の技術開発計画－概要調査段階および精密調査段階に向けた技術開発－，原子力発電環境整備機構，NUMO-TR-13-02，(2013).
- 9) Posiva：“Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto – Design Basis 2012”，Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2012-03，(2013).
- 10) 大久保誠介，福井勝則：“田下凝灰岩の長期クリープ試験と構成方程式”，資源と素材，Vol.118，pp.36-42，(2002).
- 11) 経済産業省：“第三回最終処分関係閣僚会議，平成27年5月22日，資料2”，(2015).
- 12) 細谷真一，山下正，岩月輝希，三枝博光，尾上博則，石橋正祐紀：“結晶質岩における坑道閉鎖時の地質環境モニタリング技術に関わる情報収集”，JAEA-Technology 2015-027，(2015)，128p.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr ^(e)
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg
酸素活性化	カタール	kat	s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s
表面張力	ニュートンメートル	N m
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m
角速度	ラジアン毎秒	rad/s
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³
電表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²
誘電率	ファラド毎メートル	F/m
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
放射線輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクタ	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

