

「深地層の研究施設計画に関する報告会 2020」
資料集

Proceedings of Debriefing Session on
JAEA's Underground Research Laboratory Projects, 2020

(編) 清水 麻由子 天野 健治 水野 崇 濱 克宏
(Eds.) Mayuko SHIMIZU, Kenji AMANO, Takashi MIZUNO and Katsuhiro HAMA

核燃料・バックエンド研究開発部門
地層処分研究開発推進部

Geological Disposal Research and Development Department
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

July 2021

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。
本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む)は、
下記まで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ウェブサイト (<https://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.
Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.
Availability and use of the results of this report, please contact
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, 2021

「深地層の研究施設計画に関する報告会 2020」
資料集

日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門 地層処分研究開発推進部

(編) 清水 麻由子, 天野 健治, 水野 崇, 濱 克宏

(2021年3月26日受理)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構においては、「地層処分技術に関する研究開発」を実施している。このうち、超深地層研究所計画（岐阜県瑞浪市）ならびに幌延深地層研究計画（北海道幌延町）について、平成27年度から令和元年度までに重点的に取り組んできた研究開発テーマ（必須の課題）に関する成果と令和2年度以降の計画を広く発信し、研究計画の更なる充実を図るため、「深地層の研究施設計画に関する報告会 2020」を令和2年12月1日に YouTube ライブ配信によりオンライン開催した。

本報告書は、この「深地層の研究施設計画に関する報告会 2020」の開催結果の概要および報告資料を取りまとめたものである。

JAEA-Review 2021-004

Proceedings of Debriefing Session on JAEA's Underground Research Laboratory Projects, 2020

(Eds.) Mayuko SHIMIZU, Kenji AMANO, Takashi MIZUNO and Katsuhiko HAMA

Geological Disposal Research and Development Department
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 26, 2021)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has been conducting research and development (R&D) on geological disposal technology in order to establish a scientific and technological basis for the geological disposal of HLW. “Debriefing Session on JAEA's Underground Research Laboratory Projects, 2020” was held online on December 1, 2020 by live stream on YouTube, in order to widely disseminate the results of R&D themes (“Important issues”) that we have been focusing on from fiscal year 2015 to 2019 and the plans for 2020 and beyond, and to further enhance the research plan.

This document summarizes the overview of the debriefing session and the presentation materials.

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

目 次

1. はじめに	1
2. 開催結果	2
2.1 開催概要	2
2.2 内容	2
3. 発表資料	5
3.1 研究開発の概況	5
3.2 超深地層研究所計画（瑞浪）	5
3.3 幌延深地層研究計画	5
4. まとめ	6
参考文献	6
付録 1 発表資料「研究開発の概況」	7
付録 2 発表資料「必須の課題成果取りまとめ報告書と令和 2 年度以降の計画」（瑞浪）	15
付録 3 発表資料「研究成果トピックス（亀裂性岩盤の水理学的な不均質性のモデル化技術）」	33
付録 4 発表資料「共同研究成果トピックス（電力中央研究所）」	45
付録 5 発表資料「必須の課題成果取りまとめ報告書と令和 2 年度以降の計画」（幌延）	54
付録 6 発表資料「研究成果トピックス（人工バリア性能確認試験に関する知見）」	69
付録 7 発表資料「共同研究成果トピックス（原子力環境整備促進・資金管理センター）」	81

Contents

1. Introduction.....	1
2. Summary	2
2.1 Overview	2
2.2 Contents.....	2
3. Presentation	5
3.1 Overview of R&D.....	5
3.2 Mizunami Underground Research Laboratory Project.....	5
3.3 Horonobe Underground Research Laboratory Project.....	5
4. Concluding remarks.....	6
References	6
Appendix 1 Overview of R&D.....	7
Appendix 2 Mizunami Underground Research Laboratory Project	
Synthesis report on the R&D concerning important issues, and plans from fiscal	
year 2020	15
Appendix 3 Mizunami Underground Research Laboratory Project Research Topics	
(Modeling technology for hydraulic heterogeneity of fractured rock)	33
Appendix 4 Mizunami Underground Research Laboratory Project	
Joint Research Topics (Central Research Institute of Electric Power Industry) ..	45
Appendix 5 Horonobe Underground Research Laboratory Project	
Synthesis report on the R&D concerning important issues, and plans from fiscal	
year 2020	54
Appendix 6 Horonobe Underground Research Laboratory Project Research Topics	
(Findings on the <i>in-situ</i> experiment for performance confirmation of engineered	
barrier system).....	69
Appendix 7 Horonobe Underground Research Laboratory Project	
Joint Research Topics (Radioactive Waste Management Funding and Research	
Center).....	81

1. はじめに

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）では、高レベル放射性廃棄物の地層処分の技術的信頼性の向上のため、第2次取りまとめ以降、信頼性向上に資する技術やデータ、知見などの整備を進め、平成27年度から開始した第3期中長期研究計画においては、地層処分に関わる国内外の動向や議論に基づき、研究課題を整理したうえで研究開発を着実かつ効果的に進めてきた。

このうち、深地層の研究施設計画（「超深地層研究所計画」（岐阜県瑞浪市）と「幌延深地層研究計画」（北海道幌延町））においては、必須の課題として研究課題を重点化するとともに、令和元年度末までの5か年で令和2年度以降の計画を決定することを掲げ、令和2年1月に令和2年度以降の計画^{1),2)}を、令和2年3月には平成27年から令和元年度末までの5か年間に実施した必須の課題成果取りまとめ報告書^{3),4)}を公表した。

原子力機構は、これら深地層の研究施設計画の最新の実施状況を広く内外に発信するとともに、様々な視点からのご意見を今後の研究開発に反映することを目的として、令和2年12月1日に「深地層の研究施設計画に関する報告会2020」を開催した。本報告書は、報告会の開催結果の概要および報告資料を取りまとめたものである。

2. 開催結果

2.1 開催概要

開催日時： 令和 2 年（2020 年）12 月 1 日（火） 13:00～16:00

開催方式： YouTube ライブ配信によるオンライン開催

申込者数： 290 名

平均同時視聴者数： 179 人

2.2 内容

原子力機構ならびに共同研究機関から、表 1 のプログラムに示す報告をするとともに、2 名の外部専門家（岡山大学 西垣 誠 名誉教授、国立研究開発法人産業技術総合研究所 丸井敦尚 博士）をモデレーターとしてお招きし、質疑応答を行った。各報告の概要は、下記のとおりである。

表 1 報告会プログラム

1. 開会挨拶	13:00～13:05
2. 研究開発の概況	13:05～13:20
3. 超深地層研究所計画（瑞浪）	
(1) 必須の課題成果取りまとめ報告書と令和 2 年度以降の計画	13:20～13:50
(2) 研究成果トピックス（亀裂性岩盤の水理学的な不均質性のモデル化技術）	13:50～14:10
(3) 共同研究成果トピックス（電力中央研究所）	14:10～14:30
4. 幌延深地層研究計画	
(1) 必須の課題成果取りまとめ報告書と令和 2 年度以降の計画	14:30～15:00
(2) 研究成果トピックス（人工バリア性能確認試験に関する知見）	15:00～15:20
(3) 共同研究成果トピックス（原子力環境整備促進・資金管理センター）	15:20～15:40
5. 全体質疑	15:40～15:55
6. 閉会挨拶	15:55～16:00

(1) 研究開発の概況

原子力機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 地層処分研究開発推進部より、地層処分技術に関する研究開発の背景や研究開発トピックス、今後の研究開発の取り組み等について報告した。

(2) 超深地層研究所計画（瑞浪）

原子力機構 東濃地科学センターから、超深地層研究所計画（岐阜県瑞浪市）の必須の課題成果取りまとめ報告書、令和 2 年度以降の計画の概要および研究成果トピックスとして亀裂性岩盤の水理学的な不均質性のモデル化技術に関する研究開発の成果の概要を報告した。また、共同研究先である一般財団法人電力中央研究所（以下、電力中央研究所）から、共同研究として実施している地下水年代測定技術および原位置トレーサー試験技術の開発の成果について報告して頂いた。

モデレーターからは、必須の課題の中で特に進展した研究開発成果や亀裂ネットワークモデルの構築に必要な亀裂長さデータの取得方法、化石海水など滞留時間の長い地下水に適した年代測定手法等に関する質問・意見があった。これに対して、原子力機構から、特に進展のあった成果として高水圧下における湧水抑制技術があげられること、亀裂長さデータは坑道壁面観察のほか、リニアメント調査など地表データも活用して推定可能なこと、また、電力中央研究所から、滞留時間の長い地下水に対しては、ヘリウムや塩素同位体等の年代測定手法の組み合わせが有効と考えられることを回答した。

(3) 幌延深地層研究計画

原子力機構 幌延深地層研究センターから、幌延深地層研究計画（北海道幌延町）の必須の課題成果取りまとめ報告書、令和 2 年度以降の計画の概要および研究成果トピックスとして人工バリア性能確認試験に関する最新の知見を報告した。また、共同研究先である公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、原子力環境整備促進・資金管理センター）から、共同研究として実施している人工バリア等の健全性評価および無線計測技術の適用性に関する研究、搬送定置・回収技術（操業技術）の実証的な研究の成果について報告して頂いた。

モデレーターからは、原位置オーバーパック腐食試験結果と既往の室内試験結果との相違や熱・水・応力・化学連成解析コードの開発状況、搬送定置・回収技術（操業技術）の遠隔化・自動化への見通し等の質問・意見があった。これに対して原子力機構から、原位置試験での腐食速度が室内試験の結果より若干遅いこと、信頼性向上の観点から熱・水・応力・化学連成解析コードの改良が継続的に進められていること、また、原子力環境整備促進・資金管理センターから、搬送定置・回収技術（操業技術）の遠隔化・自動化は今後の技術進展に応じて検討されることを回答した。

(4) 全体質疑

モデレーターから、報告会全体を通じて、一般の方々に地層処分の信頼性を理解して頂く上で特に重要な研究成果や意義に関する質問があり、原子力機構から、地表および地下を対象とした一連の地質環境特性を把握するための調査・解析技術を整備できたこと（瑞浪）、堆積岩中において地層処分の要件を満たす地質環境の存在や処分技術の実証性を提示できたこと（幌延）を回答した。また、共同研究機関からは、同じ質問に対し、天然バリアの機能評価に有用な手段として、地下水年代測定技術およびトレーサー試験技術を開発できたこと（電力中央研究所）、地下環境において施工技術を実証できたこと（原子力環境整備促進・資金管理センター）が回答された。さらに原子力機構から、研究開発全体としては、今後、①次世代への技術継承、②成果とプロセスの整理、③関係機関との連携強化・拡大、の 3 点の必要性和重要性が述べられた。

最後にモデレーターより、近年の地層処分をめぐる動向の変化や進捗に応じて、研究開発成果を一般の方々により分かりやすく伝えることに一層注力してほしいとの要望が伝えられた。

3. 発表資料

本章では、報告会で示された発表資料を掲載する。

3.1 研究開発の概況

付録 1 研究開発の概況

瀬尾 俊弘

(原子力機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 地層処分研究開発推進部 部長)

3.2 超深地層研究所計画 (瑞浪)

付録 2 必須の課題成果取りまとめ報告書と令和 2 年度以降の計画

笹尾 英嗣

(原子力機構 核燃料・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 部長)

付録 3 研究成果トピックス (亀裂性岩盤の水理学的な不均質性のモデル化技術)

尾上 博則

(原子力機構 核燃料・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)

付録 4 共同研究成果トピックス (電力中央研究所)

長谷川 琢磨

(電力中央研究所 地球工学研究所 バックエンド研究センター 上席研究員)

3.3 幌延深地層研究計画

付録 5 必須の課題成果取りまとめ報告書と令和 2 年度以降の計画

岩月 輝希

(原子力機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 幌延深地層研究センター 深地層研究部 部長)

付録 6 研究成果トピックス (人工バリア性能確認試験に関する知見)

大野 宏和

(原子力機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 幌延深地層研究センター 深地層研究部)

付録 7 共同研究成果トピックス (原子力環境整備促進・資金管理センター)

江守 稔

(原子力環境整備促進・資金管理センター 地層処分工学技術研究開発部 部長)

4. まとめ

原子力機構で進めている深地層の研究施設計画について、令和元年度末に公表した必須の課題成果取りまとめ報告書および令和 2 年度以降の計画に関する内容を広く内外に発信するとともに、様々な視点からのご意見を今後の研究開発へ反映するために、「深地層の研究施設計画に関する報告会 2020」をオンラインで開催した。その結果、平均視聴者数で 179 名の参加を頂いた。

本報告会后に実施したアンケートでは、「着実に研究が進展している状況を知ることができて大変有意義だった」、「専門的ではあるが要点を捉えた説明をしようとの意図は十分感じられた」など本報告会への理解を示すご意見を頂いたほか、「もう少し一般の人にわかりやすい説明が欲しい」、「一般の人が視聴していることを意識して資料に専門用語の解説があってもよいのではと感じた」など今後の改善のために参考となるご意見を頂いた。

今後も、深地層の研究施設計画をはじめ、原子力機構の地層処分技術に関する研究開発に関する成果や計画に関する内容について、より多くの方々にご理解を頂けるよう、更なる情報発信に向けた取り組みを進めていく。

参考文献

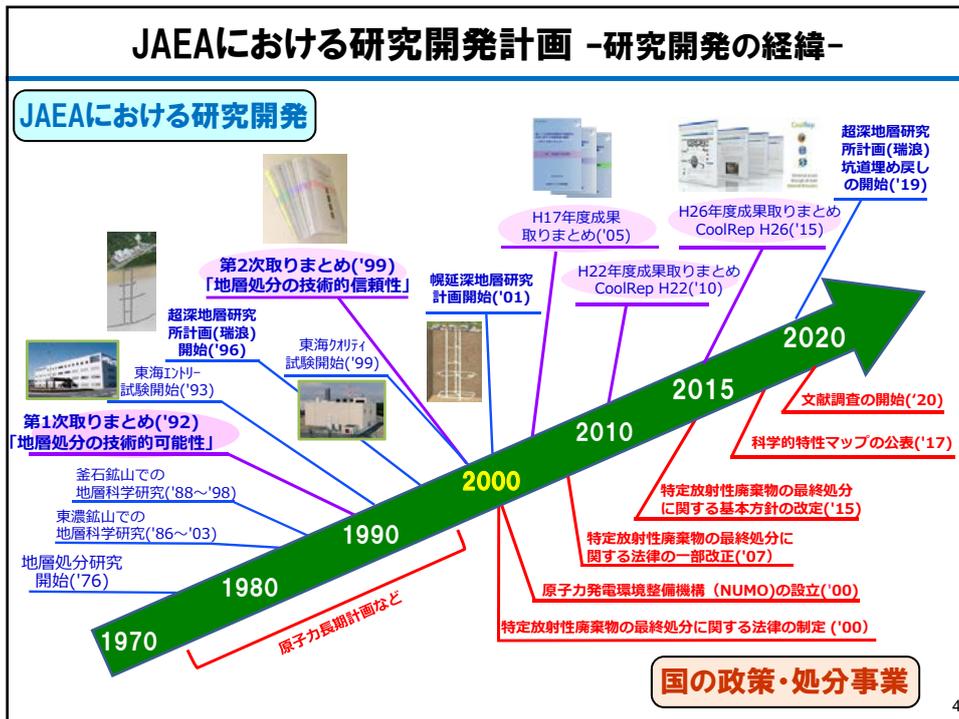
- 1) 東濃地科学センター，令和 2 年度以降の超深地層研究所計画，<https://www.jaea.go.jp/04/tono/miu/pdf/r020127koutei.pdf>（参照：2021 年 3 月 9 日）。
- 2) 幌延深地層研究センター，令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画，<https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/press/31/pdf/200129.pdf>（参照：2021 年 3 月 9 日）。
- 3) 松岡稔幸，濱 克宏，超深地層研究所計画における調査研究－必須の課題に関する研究成果報告書－，JAEA-Research 2019-012，2020，157p.
- 4) 中山 雅ほか，幌延深地層研究計画における地下施設での調査研究段階（第 3 段階：必須の課題 2015－2019 年度）研究成果報告書，JAEA-Research 2019-013，2020，276p.

付録1 発表資料「研究開発の概況」

	深地層の研究施設計画に関する報告会2020 資料1(2020.12.1)
深地層の研究施設計画に関する報告会2020	
2. 研究開発の概況	
(高レベル放射性廃棄物の処分技術等に関する研究開発)	
2020年12月1日	
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 地層処分研究開発推進部	
部長 瀬尾 俊弘	

報告の内容

- 研究開発の背景
- JAEAにおける研究開発計画
- 研究開発のトピックス
- 研究開発を取り巻く状況
- 今後の研究計画の取り組み



JAEAにおける研究開発計画 -研究開発成果の取りまとめと反映-

- 研究開発で得られた成果については、わが国の地層処分計画を支える技術基盤として反映するため、処分事業や安全規制のニーズ・進展を踏まえ、段階的・定期的に取りまとめを実施している。
- 「第2次取りまとめ」以降、これまでに平成17年取りまとめ「地層処分技術に関する知識基盤の構築」、第1期中期計画期間 (H17.10~H22.3) 成果取りまとめ「CoolRepH22」、第2期中期計画期間 (H22.4~H27.3) 成果取りまとめ「CoolRepH26」を実施・公表してきた。
- 取りまとめた成果の発信においては、構造的な文書化や成果の反映先を明示する等、ユーザーが活用しやすい形態での情報の提供を目指す。

CoolRep(クールレブ)

第2期中期計画期間成果取りまとめから新たに導入したウェブサイト上に研究開発成果に関する情報を発信・共有するレポートシステム

<https://kms1.jaea.go.jp/CoolRep/>

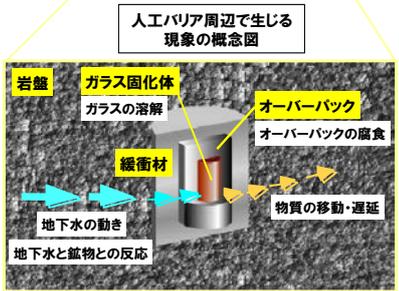
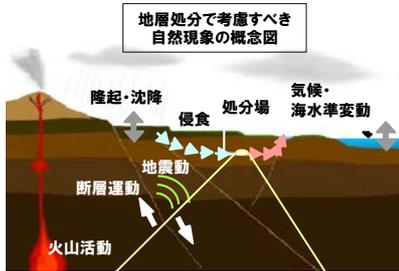
(深地層の研究施設計画に関する研究開発成果の反映先)

第1期 CoolRepH22 ⇒ 概要調査の段階を中心とした技術基盤

第2期 CoolRepH26 ⇒ 精密調査の段階(前半)を中心とした技術基盤

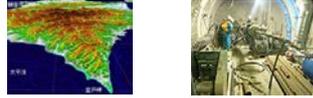
第3期 CoolRepR4 ⇒ 精密調査の段階(後半)を中心とした技術基盤(今期)

JAEAにおける研究開発計画 -地層処分技術に関する研究開発テーマ-



1. 深地層の科学的研究

- ✓ 地質環境の長期安定性に関する研究開発
- ✓ 地質環境特性の調査・評価技術の開発
- ✓ 深地層における工学技術の開発



コンピューターを用いた段丘分布図の例 坑道内におけるボーリング調査

2. 処分システムにおける工学技術の信頼性の向上

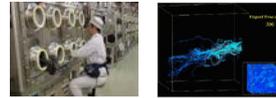
- ✓ 人工バリア等の基本特性データベースの拡充
- ✓ 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究



模擬オーバーバックの設置 模擬PEMの設置

3. 安全評価手法の高度化

- ✓ 安全評価に係るデータベースの拡充
- ✓ 放射性核種の移行に係る現象理解とそれに基づく評価モデルの高度化



室内試験の様子(クオリティ) 物質移行シミュレーションの例

JAEAにおける研究開発計画 -研究開発拠点-

核燃料サイクル工学研究所(東海)



地層処分基礎研究施設(コールド施設) 地層処分放射化学研究施設(ホト施設)

工学技術の信頼性向上 安全評価手法の高度化

東濃地科学センター



土岐地球年代学研究所 瑞浪超深地層研究所

深地層の科学的研究

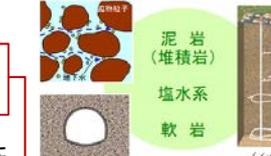


(イメージ図)

深地層の研究施設計画

- ・超深地層研究所計画(瑞浪)
 - ・幌延深地層研究計画
- (目的)
- ✓ 地層処分技術を実際の地質環境に適用して確認
 - ✓ わが国固有の地質環境の理解
 - ✓ 深地層を体験・理解する場

幌延深地層研究センター



(イメージ図)

※イメージ図は今後の調査研究により見直すことがあります。

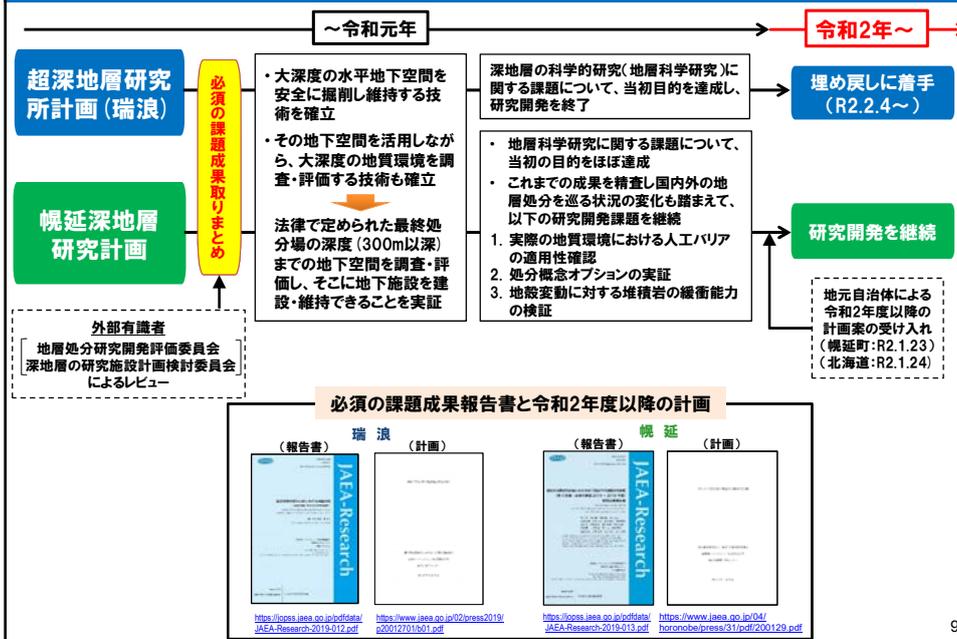
JAEAにおける研究開発計画 -第3期中長期計画等の工程-



※原子力機構 第3期中長期計画公表時における同計画の記載(抜粋)

超深地層研究所計画：(必須の課題)について平成31年度末までの5年間で成果を出すことを前提に取り組む。同年度末までに、土地買付期間の終了(平成34年1月)までに埋め戻しができるようにという前提で考え、坑道埋め戻しなどのその後の進め方について決定する。
機延深地層研究所計画：(必須の課題)に重点的に取り組む。また、平成31年度末までに研究終了までの工程やその後の埋め戻しについて決定する。

JAEAにおける研究開発計画 -深地層の研究施設計画の動向-



研究開発のトピックス -地質環境の長期安定性に関する研究-

日本各地における事例研究の蓄積および今期から本格的に導入した年代測定技術により、自然現象に伴う地質環境の長期変遷を予測・評価する技術に関して、従来より予測・評価に係る不確実性が低減

1. 調査技術の開発・体系化

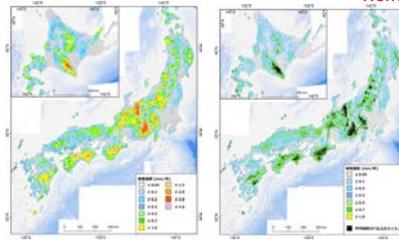
- 地震波のS波偏向異方性解析により、概要調査の段階で深部流体の移行経路となる地質環境の特徴を抽出できる可能性を例示 等

2. 長期予測・影響評価モデルの開発

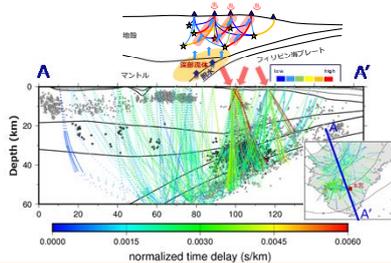
- 熱年代学的手法等、新たな年代測定手法の取入れにより、従来データが不足していた数百万年から1万年前までの侵食速度データを拡充し、長期の時間スケールを対象とする安全評価に有用なマップを作成 等

3. 年代測定技術の開発

- 岩石の形成年代や断層の活動年代等、様々な地質現象の把握に有効と考えられるウラン-鉛 (U-Pb) 年代測定に関して、レーザーアブレーション付き誘導結合プラズマ (LA-ICP) 質量分析装置を用いた示準化石試料の局所分析にわが国で初めて成功 等



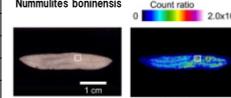
既存の数十年間の侵食速度マップ(左図:藤原ほか,1999)
新規に作成した数百万年~1万年間の侵食速度マップ(右図)



地震波の異方性を利用した深部流体の経路検出の概念図(上図)
紀伊半島を事例とした試行的解析結果(下図)

加速器質量分析装置	¹⁴ C法, ¹⁹ Be法, ²⁶ Al法 ³⁶ Cl法, ¹²⁹ I法
希ガス質量分析装置	K-Ar法
四重極型質量分析装置	(U-Th)/He法
光ルミネセンス測定装置	OSL法
電子スピン共振装置	ESR法
高精度希ガス質量分析装置	希ガス法
電子プロブマイクロアナライザ	CHIME法
FT自動計測装置	FT法
LA-ICP質量分析装置	U-Pb法, 火山灰年代

分析対象試料: 大型
有孔虫化石(貨幣石)
Nummulites boninensis



同位体イメージングの例
Count ratio 2.0x10⁴
U-Pb 年代: 39.7 ± 2.9 Ma
(推定生息年代: 44~40 Ma)

LA-ICP質量分析装置を用いた
ウラン-鉛年代測定結果の例

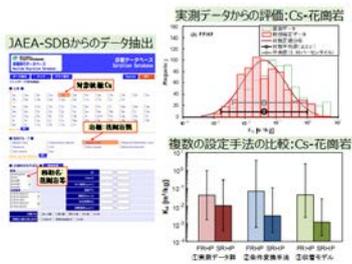
土岐地球年代学研究所における年代
測定技術(黒字:実用化済、青字:開発中)

研究開発のトピックス -地層処分研究開発(安全評価手法の高度化) -

深地層の研究施設計画で得られた原位置データや先進的な計測分析、数値解析技術を用いることにより、従来の比較的単純化した地層処分システムの評価技術をより現実的かつ複合的な評価を可能とする技術レベルへと高度化を図り、わが国の多様な地質環境条件に対応可能な技術基盤の整備が進展

核種移行データベースの拡充とパラメータ設定手法の開発

安全評価で必要となる岩石への取着分配係数の設定手法について、国内外の最新知見に基づき、複数の設定手法を整備し、地質環境等のサイトの条件やサイトの調査段階に応じて、適切な手法を選定し、パラメータを設定できる包括的な技術を構築(NUMOとの共同研究を通じて、NUMO包括的技術報告書のパラメータ設定において活用)

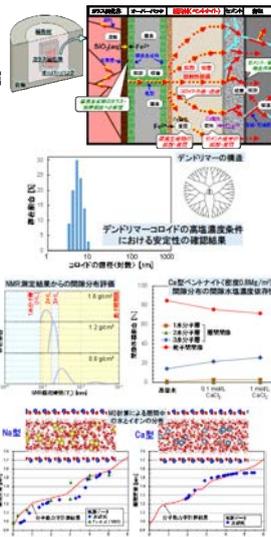


地質環境等の各種の条件に応じた
取着分配係数の設定

放射性核種の移行に係る現象理解とそれに基づく評価モデルの高度化

核種移行特性に影響を及ぼす、金属製オーバーバックやセメントとの接触に起因するベントナイトの変質に伴う間隙構造や核種移行特性の変化について以下の①~③の課題を解決

- ① デンドリマーコロイドによるベントナイトの間隙構造とコロイド移行特性の評価: 従来手法で困難であったナノサイズ間隙の連続性やコロイドの移行しやすさ(透過・ろ過率)の定量評価を実現
- ② 核磁気共鳴法によるベントナイト中の間隙構造評価: 層間イオンや密度・間隙水組成の変化と間隙割合との関係の定量評価を実現
- ③ 分子動力学法によるベントナイトの膨潤メカニズムの解明: 層間イオンと粘土の膨潤特性・層間距離との関係を理論的に把握し、多様な環境条件での膨潤挙動の予測評価を実現



研究開発を取り巻く状況 -地層処分にに関する最近のトピックス-

1. NUMO包括的技術報告書

- ✓ 原子力学会によるレビュー報告書の公表 (R1/12/20)

2. 地層処分研究開発調整会議

- ✓ 第5回会議 (R2/1/27)、第6回会議 (R2/3/9-13)
- ✓ 地層処分研究開発に関する全体計画改定版公表 (R2/3/31)

3. 最終処分国際ラウンドテーブル

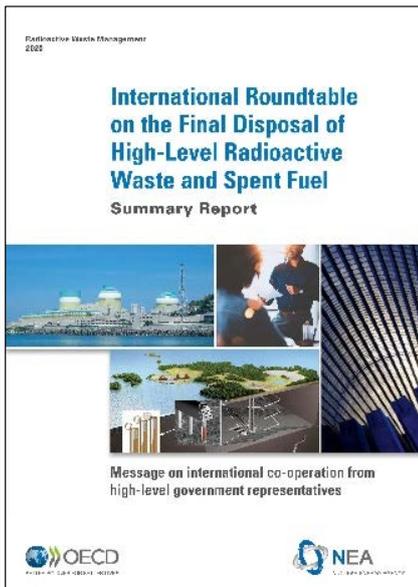
- ✓ G20軽井沢大臣会合 (R1/6/15-16) : 於 日本
- ✓ 第1回会合 (R1/10/14)、第2回会合 (R2/2/7) : 於 フランス
- ✓ 最終報告書の公表 (R2/8月)

4. 処分事業

- ✓ 北海道寿都町 文献調査の応募書をNUMOへ提出 (R2/10/9)
- ✓ 北海道神恵内村 国からの文献調査の申し入れの受諾を表明 (R2/10/9)
- ✓ NUMO 上記、両町村における文献調査を開始 (R2/11/17)

12

研究開発を取り巻く状況 -最終処分国際ラウンドテーブル-



計2回の会合での議論を踏まえ、OECD/NEA(経済協力開発機構/原子力機関)が最終処分における政府の役割、対話活動や意思決定プロセス、技術分野における国際協力等の観点から最終報告書を取りまとめ・公表 (R2/8)

技術分野における国際協力に関する主な報告・提案 (資源エネルギー庁、2020)

- ✓ 1980年代以降、NEA、欧州委員会、IAEAの枠組みを通じて、様々な国際協力が成功してきており、これらのプロジェクトへ、現世代および次世代の関係者の参加が推奨されること
- ✓ 研究開発において他の国の施設等を活用することによる国際協力を行うことは、財政面でも人的資源面でも有意義であること
- ✓ 他国の地下研究施設を利用することは、最終処分地の地質条件が特定されていない意思決定プロセスの初期段階である国にとって特に有効であること
- ✓ 国際連携強化を検討する分野として、ビッグデータを活用した長期的な安全評価モデルの開発・検証、処分場操業時の効率性、安全性を考慮したロボットや遠隔操作技術の実証、地質環境に応じた処分場設計の最適化手法等への関心が示されたこと等

https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_39718/international-roundtable-on-the-final-disposal-of-high-level-radioactive-waste-and-spent-fuel-summary-report

<https://www.meti.go.jp/press/2020/08/20200821003/20200821003-1.pdf>

13

今後の研究計画の取り組み

- ① 研究開発拠点における地元の皆様の一層のご理解とご協力が得られるように努めるとともに、第3期中長期計画における課題達成に向けて、安全確保を最優先とする研究開発を着実かつ効果的に推進する。
- ② 幌延深地層研究センター、土岐地球年代学研究所、核燃料サイクル工学研究所(エンリー・クオリティ)における研究資源を最大限に活用した国内・国外関係機関との連携協力や人材育成をより一層推進する。
- ③ ウェブベースのレポートシステムを用いた、第3期中長期計画(H27～R3)における研究成果の総括的取りまとめ(CoolRepR4)を着実に実施・公表する(R4.3末)。特に、アクセシビリティ(利用しやすさ)および地層処分の安全性に係る論拠として活用可能な「知識基盤」の観点から、環境・コンテンツを充実させていく。

14

参考資料 - 国外機関との研究協力 -



15

付録2 発表資料「必須の課題成果取りまとめ報告書と令和2年度以降の計画」(瑞浪)



深地層の研究施設計画に関する報告会2020
資料2-1(2020.12.1)

深地層の研究施設計画に関する報告会2020

3. 超深地層研究所計画(瑞浪)

1) 必須の課題成果取りまとめ報告書と令和2年度以降の計画

2020年12月1日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料・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

部長 笹尾 英嗣

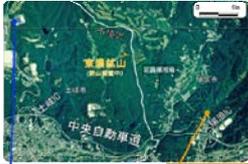
報告の内容

- 超深地層研究所計画の概要
- 必須の課題成果取りまとめ報告書の概要
- 研究所の活用と研究成果のアウトリーチ
- 令和2年度以降の計画について

超深地層研究所計画の概要

超深地層研究所計画の経緯

- 1995年8月 研究所計画の公表
- 1995年12月 **地層科学研究に係る協定**締結
- 1996年4月 正馬様用地において、研究所計画の開始
- 2002年1月 瑞浪市と**土地賃貸借契約及び協定**を締結
- 2002年4月 瑞浪超深地層研究所の開所(市有地における第1段階の調査研究開始)
- 2002年7月 用地造成工事着工
- 2003年7月 立坑掘削工事着工
- 2005年11月 岐阜県及び瑞浪市と**環境保全協定**を締結
- 2014年9月 機構改革計画に基づく「地層処分技術に関する研究開発報告書」-今後の研究課題について-の公表
- 2020年1月 令和2年度以降の超深地層研究計画を公表
- 2020年2月 坑道埋め戻しに着手




土岐地球年代学研究所



瑞浪超深地層研究所



研究坑道の埋め戻し作業を実施中

東濃地科学センターの施設

3

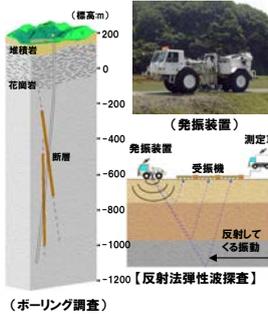
超深地層研究所計画の進め方

【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

【第1段階:H8-16】

地表からの調査予測研究段階



- (ボーリング調査)
- 地表からの調査研究による地質環境モデルの構築
 - 坑道建設前の深部地質環境の状態の把握

【第2段階:H16-25】

研究坑道の掘削に伴う研究段階



- 【壁面観察】
- 【研究坑道内での物理探査】
- 坑道掘削に伴う調査研究による地質環境モデルの構築
 - 坑道の施工・維持・管理に関わる工学技術の有効性の確認

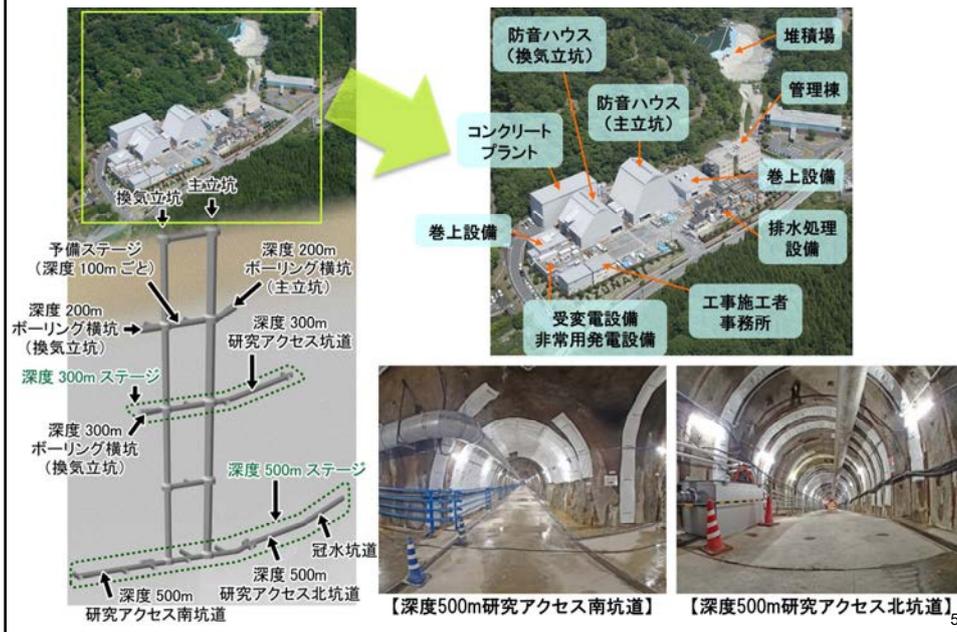
【第3段階:H22-R1】

研究坑道を利用した研究段階

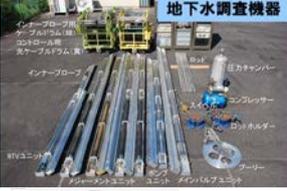
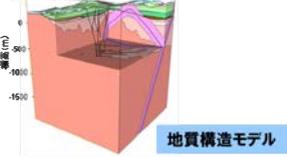


- 【岩盤中の物質の移動に関する調査研究】
- 坑道を利用した調査研究による地質環境モデルの構築
 - 深地層における工学技術の有効性の確認

瑞浪超深地層研究所の施設構成



第1段階・第2段階で得られた主な成果

地質環境の調査・モデル化手法の開発	坑道掘削に伴う地質環境の変化に関する調査・解析技術の開発	地下深部に安全に坑道を掘削する技術の確立
<p data-bbox="494 481 614 504">地下水調査機器</p>  <p data-bbox="702 481 933 504">地下水の水圧や水質モニタリング</p>  <p data-bbox="1037 481 1252 504">深度500m研究アクセス北坑道</p>  <p data-bbox="335 683 622 840">  地質構造モデル </p> <p data-bbox="327 840 630 974">◆ 地上から地下深部の地質環境特性を把握するための調査技術及び解析技術を整備</p> <p data-bbox="646 683 949 974"> ◆ 坑道掘削に伴う地下水の水圧・水質、岩盤の変位等を捉えるための観測技術及び予測解析技術を整備 ◆ 坑道掘削工事に伴う地質環境の変化に関する知見を蓄積 </p> <p data-bbox="965 683 1268 974">◆ 深度500mにおける高い水圧環境の中で安全に坑道を建設・維持する技術及び坑内湧水を抑制する技術などを実証</p>		

6

深地層の研究施設計画の「残された必須の課題」

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の中長期目標を達成するための計画（中長期計画）（平成27年4月1日～平成34年3月31日）

＜深地層の研究施設計画＞

- ◆ 超深地層研究所計画については、**地下坑道における工学的対策技術の開発、物質移動モデル化技術の開発及び坑道埋め戻し技術の開発**に重点的に取り組む。これらに関する研究については、**平成31年度末までの5年間で成果を出すことを前提に取り組む**。また、**同年度末までに、跡利用を検討するための委員会での議論も踏まえ、土地賃貸借期間の終了（平成34年1月）までに埋め戻しができるようにという前提で考え、坑道埋め戻しなどのその後の進め方について決定する。**（瑞浪超深地層研究所関連抜粋）

（以下、令和2年4月1日に変更認可された計画で追記）

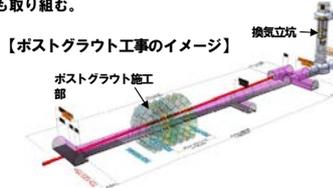
令和2年度以降においては、坑道埋め戻しなどのその後の進め方について定めた「令和2年度以降の超深地層研究所計画」に基づき、土地賃貸借期間の終了までに坑道の埋め戻し及び地上施設の撤去を行う。また、埋め戻し期間中は、埋め戻しに伴う地下水の回復状況を確認するために、実証研究を兼ねてモニタリングシステムの有効性を確認する。

7

必須の課題

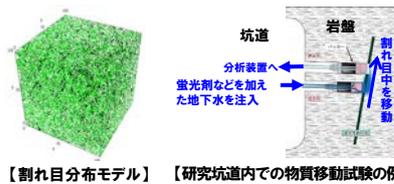
①地下坑道における工学的対策技術の開発

- ◆大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術
 - ◆地下水管理技術
- 【概要】
 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。



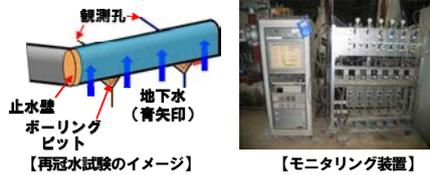
②物質移動モデル化技術の開発

- ◆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
- 【概要】
 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の流動・水質の長期的変化や地下水流動の緩慢性を明らかにするための調査を実施する。



③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
- 【概要】
 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共に、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。



必須の課題成果取りまとめ報告書の概要

必須の課題における研究項目

1. 地下坑道における工学的対策技術の開発

1.1 地下水抑制技術の開発

- 1.1.1 ウォータータイトグラウト施工技術の実証
- 1.1.2 施工対策影響評価技術の開発※※

1.2 地下水管理技術の開発

- 1.2.1 地下水排水処理技術の開発

2. 物質移動モデル化技術の開発

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

- 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
- 2.1.2 花崗岩中での物質移動現象の理解※※
- 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

2.2 地質環境の長期変遷に関する解析・評価技術の開発

- 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
- 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※※

3. 坑道埋め戻し技術の開発

3.1 坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術の開発

- 3.1.1 冠水坑道での再冠水試験
- 3.1.2 岩盤の破壊現象評価
- 3.1.3 500m坑道での埋め戻し試験※

※資源エネルギー庁受託事業を活用して実施

※※一部を資源エネルギー庁受託事業を活用して実施

3.2 モニタリング技術の開発

10

地下坑道における工学的対策技術の開発

1.1 地下水抑制技術開発

1.1.1 ウォータータイトグラウト施工技術の実証

(研究の背景・狙い・目標・意義)

- ✓ **地下深部における高い水圧の状態下で十分に湧水を抑制する技術の確立**は地層処分事業において重要な課題の一つ。
- 地下深部における高水圧の湧水を抑制することを目的として、**グラウチングの技術開発**を実施。

(実施内容)

- ✓ グ라우チング後の湧水抑制目標を達成するために必要な岩盤の透水性低下割合や注入範囲を設定するために、**グラウチング効果を考慮できる理論式を考案し適用**。
- ✓ **高水圧下においても湧水を抑制できるグラウチング技術を開発**。
- ✓ 深度500mにおいては坑道掘削後に**ポストグラウチング**を追加実施することにより、さらなる湧水抑制を実現。

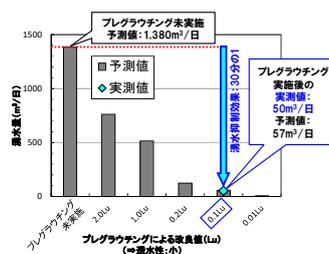
(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **地層処分場の維持コストの低減や人工バリアの施工精度の向上に寄与**

- ・プレグラウチングとポストグラウチングの併用により、**グラウチングを実施しない場合に対して約100分の1まで低減**。
- ・高水圧下での**一般建設工事への適用を期待**。



プレグラウチングとポストグラウチングの概念図



プレグラウチングの効果の評価結果

11

地下坑道における工学的対策技術の開発

1.1 地下水抑制技術開発

1.1.2 施工対策影響評価技術の開発

(研究の背景・狙い・目標・意義)

- ✓ セメントや鋼材等の人工材料は時間経過とともに劣化し、それにより空洞周辺の地質環境に変化が生じる可能性があるものの、人工材料が坑道周辺の地質環境に与える影響の定量的検討は未実施。
- 研究坑道周辺に注入したグラウト材(主にセメント)に着目し、それ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実施。

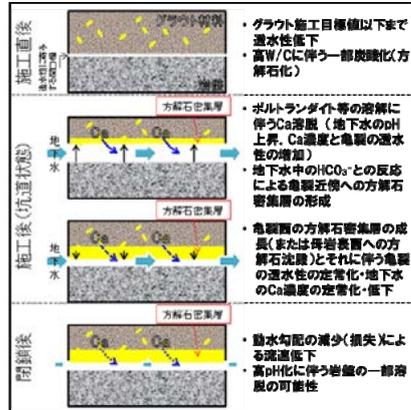
(実施内容)

- ✓ グラウティング実施時期が異なる施工場所で採取したボーリングコアを用いた各種の室内分析を実施。
- ✓ グラウト材が地質環境に及ぼす影響を把握・評価する調査手法、およびグラウト材の存在が及ぼす地質環境への影響に関する概念モデルを構築。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

➢ グラウト材の存在が及ぼす地質環境への影響を評価

- ・グラウト材の岩盤への影響の経時変化を把握するために必要な試料作製方法や分析方法を確立。
- ・グラウト材との接触による鉱物の形成や溶脱などの変化は認められず、グラウティング後、数年でグラウト材により岩盤に変質が生じる可能性はほとんどなくなることを確認。



グラウト材と岩盤の相互作用メカニズムの変遷に係る概念モデル

12

地下坑道における工学的対策技術の開発

1.2 地下水管理技術の開発

1.2.1 地下水排水処理技術の開発

(研究の背景・狙い・目標・意義)

- ✓ 研究坑道の湧水には、自然由来のふっ素とほう素が比較的高濃度で含まれているため、凝集沈殿処理及びイオン交換処理によってふっ素及びほう素を除去。
- ふっ素及びほう素の処理に関する最新の技術的知見を調査し、排水処理の効率化の可能性を検討。

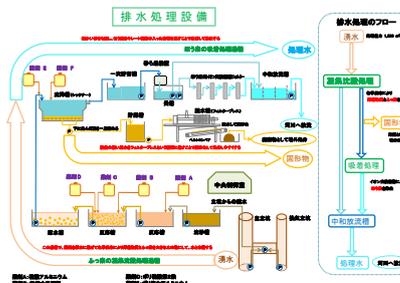
(実施内容)

- ✓ ふっ素及びほう素に関する排水処理技術に関する最新の技術的知見を文献により調査。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

➢ 大規模地下施設の建設・維持管理における環境負荷及びコスト低減に必要な知見を提供。

- ・瑞浪超深地層研究所のように、約90%の除去率が求められるふっ素処理や、低濃度から極低濃度までの除去が求められるほう素処理とともに処理量が大量である排水処理については、現行の処理方法が現時点で適切であることを確認。
- ・実証された排水処理技術は、日本全国に分布する鉱山跡地の汚染水処理にも応用可能。



現行の排水処理施設(写真)と処理フロー

13

物質移動モデル化技術の開発

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

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

(研究の背景・狙い・目標・意義)

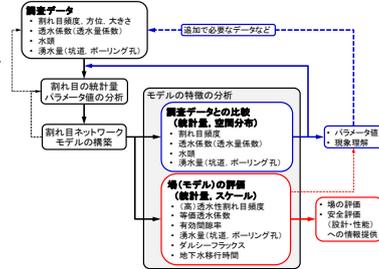
- ✓ 亀裂性岩盤では、放射性物質の主要な移行経路となる**割れ目の分布特性や水理学的特性の評価が重要**。
- 割れ目の分布や水理学的特性は不均質であるため、不均質性を表現可能な**割れ目ネットワーク(DFN)モデルの構築手順や妥当性確認に至る一連の方法論を提示**。

(実施内容)

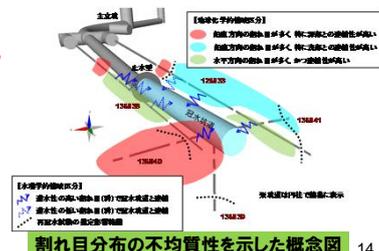
- ✓ 研究坑道の壁面調査やボーリング調査結果を用いてDFNモデルを構築し、DFNモデルの特徴の分析を通じてDFNモデル化手法の有効性と限界を整理。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **岩盤の水理特性を地下施設のレイアウト設計や建設、安全評価に反映**
 - ・割れ目の湧水の有無に着目したデータ解析や割れ目半径との相関性を考慮した透水性の設定が、**岩盤中の割れ目の分布特性や透水性を統計的に再現**の上で有効。
 - ・DFNモデルを用いた地下水流動解析や粒子追跡解析によって、**亀裂性岩盤の不均質性や湧水可能性を定量的に評価**。



モデルの構築と評価の流れ (概念図)



割れ目分布の不均質性を示した概念図

物質移動モデル化技術の開発

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

2.1.2 花崗岩中での物質移動現象の理解

(研究の背景・狙い・目標・意義)

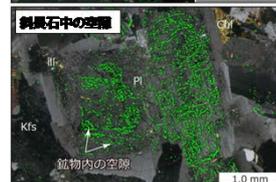
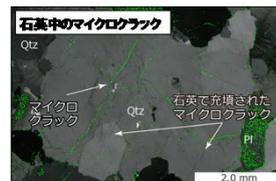
- ✓ 従来は主にトレーサー試験によって割れ目の開口幅や割れ目内分散長、分配係数等を推定。
- ✓ 日本のように**割れ目頻度が高く、割れ目には充填物が含まれていることが多い岩盤**を対象として、**物質移動特性を把握する手法の提示**を目標に技術開発を実施。

(実施内容)

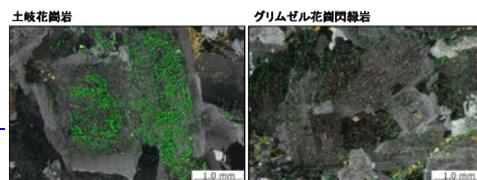
- ✓ 単孔式および孔間の物質移動試験、透水性割れ目およびその周辺の岩石の室内物質移動試験を実施し、物質移動に関するパラメータを取得。
- ✓ 長期の物質移動現象を把握するために、割れ目とその周辺岩盤、地下水を対象として、ウラン系列核種などの分布を把握。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **花崗岩中の物質移動特性を提示**
 - ・原位トレーサー試験および評価技術を整備。
 - ・花崗岩中の**微小空隙を把握する手法を整備し、健岩部における物質移動プロセスを明示**。
 - ・天然トレーサーを用いた長期にわたる物質移動現象を把握する手法を整備。



土岐花崗岩中の微小空隙(緑色の領域)



土岐花崗岩とグリムゼル花崗閃緑岩の微小空隙(緑色の領域)

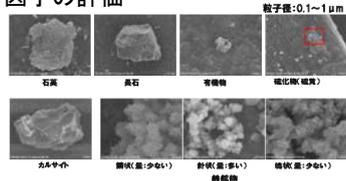
物質移動モデル化技術の開発

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

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

(研究の背景・狙い・目標・意義)

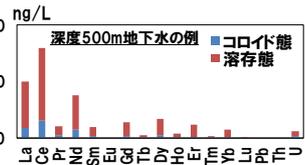
- ✓ 従来、コロイド、有機物、微生物とアナログ元素との相互作用の研究により、コロイドの核種移行への影響が例示。
- 地下深部における、コロイド、有機物、微生物の物質移動への影響に関する基本情報を取得し、元素の輸送・遅延量の評価手法の構築を目標とした研究開発を実施。



地下水中に認められるコロイド

(実施内容)

- ✓ 天然地下水および坑道の建設・閉鎖の影響を受けた地下水(深度500m冠水坑道)中のコロイド、有機物、微生物の存在量や各種元素との相関を解析。
- ✓ 放射性元素の移動プロセスに対する影響を考察するため、天然の希土類元素標(アナログ元素)を分析。



地下水中のコロイド分析結果

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **ボーリング孔を利用したコロイド調査技術を構築し、花崗岩中の地下水に含まれるコロイド粒子が元素の移動プロセスに与える影響を評価**
- ・坑道閉鎖環境では、吹付セメント等に溶存態希土類元素が付着し、方解石に過飽和な環境下で、希土類元素を担持した炭酸塩コロイドが凝集・沈殿することで移動が抑制されることを確認。
- ・花崗岩地下水中には、硫酸化学種やメタンを利用した代謝機能を有する微生物の生態系が存在し、地下水の水質形成(還元環境の形成など)に影響することを確認。

16

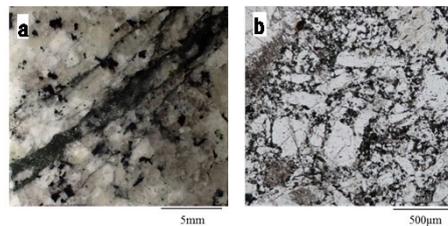
物質移動モデル化技術の開発

2.2 地質環境の長期変遷に関する解析・評価技術の開発

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

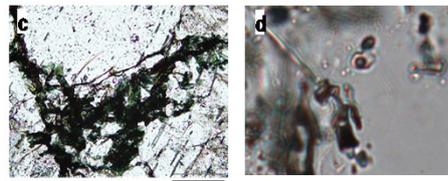
(研究の背景・狙い・目標・意義)

- ✓ 既往研究では、岩盤の透水性に関して、400°C~700°Cの高温流体による微細割れ目の形成や岩盤の透水性への影響が例示。
- 花崗岩の透水特性の形成過程に関わる基礎的知見を取得して、高温流体や断層の影響を評価する手法を構築することを目標。



(実施内容)

- ✓ 高温流体の痕跡である割れ目や充填鉱物の産状と形成温度に関わるコア観察、顕微鏡観察、化学組成分析・解析を実施。



高温流体の痕跡(Glassy vein:ホルンブレンドタイプ)

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **長期的な透水特性の変遷を例示**
- ・高温流体による割れ目および充填鉱物の形成履歴調査手法を確立。
- ・断層と高温流体による充填鉱物の形成履歴と透水性との関係の把握と長期変遷解析技術(水理地質構造概念モデル(タイプ分類))を提案。

a: 研磨片接写。幅2~3mmの黒脈と平行マイクロフラクチャー、破砕した石英が認められる。b: 同薄片の顕微鏡写真(オープンニコル)。黒脈には石英、長石破片の隙間に充填した細粒ホルンブレンド。c: 同、マイクロフラクチャーの開口部に析出した自形ホルンブレンド。d: 同、石英結晶中の高塩濃度流体包有物(直径約10µm)。

17

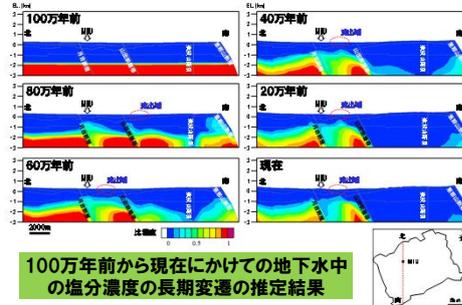
物質移動モデル化技術の開発

2.2 地質環境の長期変遷に関する解析・評価技術の開発

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

(研究の背景・狙い・目標・意義)

- ✓ 東濃地域に存在する深部塩水については、様々な検討がなされてきたが、**起源は未解明**。
- ✓ 日本では、研究事例が少なく花崗岩深部における塩水の存在は不明確であるものの、国外では、**ある程度の深度で深の花崗岩深部での塩水の存在は普遍性を有する可能性があるため、その存在要因を理解しておくことは非常に重要**。



100万年前から現在にかけての地下水中の塩分濃度の長期変遷の推定結果

(実施内容)

- ✓ これまでに得られた**地下水の起源、滞留時間に**関わる地球化学データを再整理。
- ✓ 地下坑道で得られた地下水の¹⁴C年代測定を行うとともに、地質環境の変遷を踏まえた地下水流動解析の結果などを参照しながら、解析的な検討を実施し得られた知見や課題を取りまとめ。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **深部塩水の起源と、塩水が地下水水質分布に与える影響を推定**
 - ・東濃地域では、**水-岩石相互作用や海水の浸透等が複合的に作用して形成されたと推定**。
 - ・**海水・古海水があり地下水流動の緩慢な環境では、³⁶Cl、⁴He、酸素同位体などが有効な指標**。
 - ・**地下水流動が長期的に緩慢な状態にある場所では、塩水が長期にわたり保存され、他の塩分濃度の異なる地下水との混合によって地下水水質分布が形成されると推定**。

18

坑道埋戻し技術の開発

3.1 坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術の開発

3.1.1 冠水坑道での再冠水試験

(研究の背景・狙い・目標・意義)

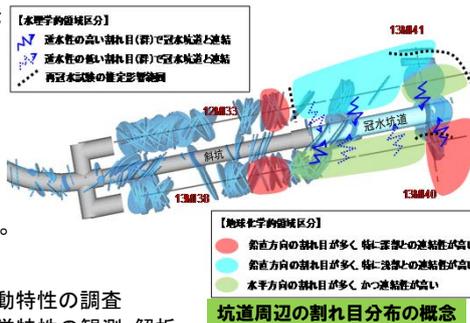
- ✓ 安全性評価にあたっては、**処分施設の建設・操業により乱された地下水環境の施設閉鎖後の状態を推定し、評価を行う必要性**。
- **地下水環境の回復過程や長期的な定常化過程を理解し、それらを調査・解析する技術を整備**。

(実施内容)

- ✓ 坑道周辺の水理地質構造の確認および物質移動特性の調査
- ✓ 止水技術の確認および冠水時の水理-力学-化学特性の観測・解析
- ✓ 予察的埋戻し試験
- ✓ モニタリング技術開発

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **坑道の冠水に伴う諸現象を確認するとともに、モデル化技術を構築**
 - ・地下水の水圧や水質分布の変化から坑道周辺岩盤の水みちとなる割れ目分布を概念化し、**坑道周辺岩盤は数m~数十m程度の空間スケールで水理学的な不連続性を確認**。
 - ・既往の連成解析ソフトウェアを、岩盤不均質性のモデル化、モデル大規模化、解析速度高速化の観点で改良し、**汎用性の高いツールとして整備**。
 - ・湧水環境の坑道でも原位置施工後には、 10^{-9} m/s程度の**均質な透水性が期待できることを提示**。



19

坑道埋戻し技術の開発

3.1 坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術の開発

3.1.2 岩盤の破壊現象評価

(研究の背景・狙い・目標・意義)

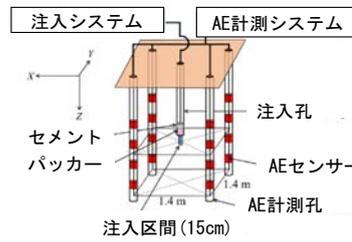
- ✓ 地下深部での空洞掘削により、周辺岩盤中に掘削影響領域が発生するが、掘削以外に坑道周辺に再配分された応力の集中による物理的損傷が発生。応力集中の範囲や物性変化のメカニズム・程度の把握は安全性評価の観点から重要。
- 深度500m研究坑道を利用して、岩盤の破壊現象の範囲や物性変化のメカニズム・程度の把握と評価手法の構築を目的とした検討を実施。

(実施内容)

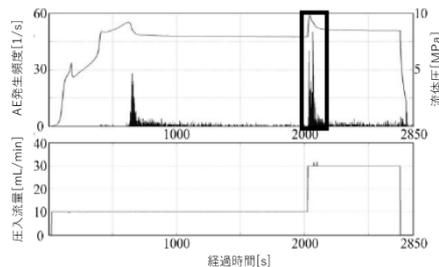
- ✓ 粘性流体注入による割れ目進展挙動の観察。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **坑道掘削に伴う岩盤破壊現象を理解**
 - ・圧力上昇による岩盤の破壊時のき裂造成メカニズムはせん断破壊型が支配的であるが、新たなき裂発生時には引張破壊が発生することを把握。
 - ・AEを利用しその破壊領域の範囲や前兆を把握することは、掘削損傷領域の物性の把握や施工の安全確保の観点から非常に有効であることを確認。



計測用ボーリング孔配置およびAEセンサーレイアウト



試験で得られた流体圧・AE発生頻度・圧入流量図

20

坑道埋戻し技術の開発

3.1 坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術の開発

3.1.3 500m坑道での埋め戻し試験

(研究の背景・狙い・目標・意義)

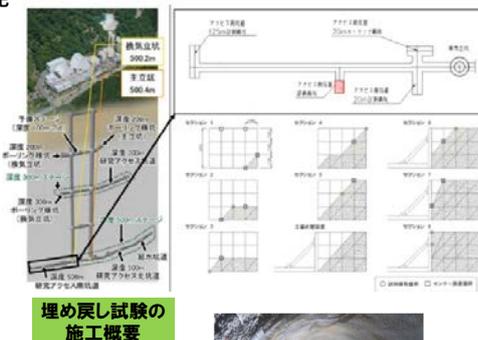
- ✓ 緩衝材や坑道の埋め戻し材は、放射性物質の選択的な移行経路となることの防止、廃棄体や坑道の力学的安定性の確保の観点から重要な役割。
- ✓ 緩衝材の設置に関する検討や原位置試験、坑道閉鎖に用いられるプラグの施工試験が行われてきたが、水平坑道埋戻しの原位置試験は、参照事例は少ない。
- 坑道埋め戻しに伴う地質環境の変化の把握に関連する基盤技術を整備することを目的として埋め戻し試験を実施。

(実施内容)

- ✓ 既設坑道を利用して、材料選定のための各種室内試験、坑道埋め戻し、埋め戻し後のボーリングによるサンプリングと室内試験を実施。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **坑道全断面を対象とした吹付け施工法の実用性を提示**
 - ・今回設定した埋め戻し材の品質(透水係数 10^{-8} m/s)を満たす埋め戻しが実施できることを確認。



埋め戻し試験の施工概要



吹付の状況(セクション4)



吹付後の状況(セクション4)

21

坑道埋戻し技術の開発

3.2 モニタリング技術の開発

3.2.1 長期モニタリング技術の開発

(研究の背景・狙い・目標・意義)

- ✓ 処分事業の安全性評価にあたっては、処分施設の建設・操業により乱された地下水環境の施設閉鎖後の状態を推定し、評価を行う必要性。
- 地下水環境の回復過程や長期的な定常化過程にかかわる現象を理解するとともに、それらを調査・解析するための技術を整備。

(実施内容)

- ✓ 長期的な環境条件の予測解析技術を構築するため、施設建設前～閉鎖後のモニタリング手法及び解析技術を開発。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **施設建設・操業・閉鎖時の汎用的モニタリング、解析手順を提示**
 - ・2003年から約15年間、地表(観測孔6本・50区間)、坑道(観測孔20本・73区間)において水圧・水質を観測、観測機器などの実用性の確認。
 - ・花崗岩中に地下施設を建設した場合に起こる環境変化の解析手法の構築。

① 水理地質構造を踏まえ施設設計

① 施設建設時の地下水湧水量・水質と周辺の水圧低下領域の終年変化の予備解析

② 解析上の水圧低下領域、坑道、地表に連続する水理地質構造に観測点を設置

③ 建設時に遭遇した想定外の水理地質構造、水圧応答が観察された観測点の観測強化

④ 観測データに基づき数十年スケール(操業中)の施設建設影響の予測解析

⑤ 予備的な坑道閉鎖により水圧・水質回復過程の観測

⑥ 水圧・水質回復データに基づき施設全体閉鎖後の予測解析

施設建設・操業・閉鎖時のモニタリング、解析手順

22

これまでの成果

	必須の課題	主な成果
① 地下坑道における工学的対策技術の開発	1) 地下水抑制技術の開発	プレグラウチングとポストグラウチングの併用により、高水圧環境下での湧水抑制技術を開発し、グラウチングを実施しない場合に対して約100分の1まで低減することができた。グラウチング後数年でグラウト材により岩盤に変質が生じる可能性はほとんどないことを確認した。
	2) 地下水管理技術の開発	現行の処理方法が現時点で適切であることを確認した。
② 物質移動モデル化技術の開発	1) 不均質な割れ目ネットワークのモデル化手法の開発	割れ目ネットワークモデルを用いた地下水流動解析や粒子追跡解析を実施することで、亀裂性岩盤の不均質性や湧水可能性を定量的に評価でき、地下施設のレイアウト設計や建設時、安全評価に有効に活用できる見通しを得た。
	2) 地質環境の長期変遷に関する解析・評価技術の開発	断層と高温流体による充填鉱物、微細割れ目の形成履歴と透水性との関係を把握し、長期的な透水特性の変遷を例示した。
坑道埋戻し技術の開発	1) 坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術の開発	今回設定した埋戻し材の品質を満たす埋戻しが実施できることを確認した。
	2) モニタリング技術の開発	施設建設・操業・閉鎖時の汎用的モニタリング、解析手順を提示した。

現中長期計画におけるこれまでの成果報告 研究開発報告書 80報、査読付き論文 52報

土木学会賞**技術賞**(平成27年度)、日本原子力学会バックエンド部会**奨励賞**(平成28年度)、土木学会土木情報学**論文賞**(平成28年度)、日本原子力学会バックエンド部会**論文賞**(令和元年度)、日本応用地質学会**論文賞**(令和2年度)

23

外部有識者による評価結果

第3期中長期計画におけるこれまでの研究開発成果について、大学等の外部有識者からなる「地層処分研究開発・評価委員会」および「深地層の研究施設計画検討委員会」において技術的な評価を受け、以下のような評価結果を得た。

- ◆ 全体として概ね適切に研究が遂行され、**所期の目標を達成できた**と評価します。
- ◆ 今後は、得られたデータや知見が地層処分研究開発全体の枠組みの中にフィードバック・継承されるとともに、**関連分野の研究開発・人材育成に最大限有効に活用されるよう、国内外に広く展開されることを期待**します。

24

研究成果の取りまとめ

- ◆ **超深地層研究所計画における研究開発は、令和元年度をもって終了**
- ◆ **広域地下水流動研究についても、超深地層研究所計画における研究開発の終了と合わせて、令和元年度をもって終了**
- ✓ **超深地層研究所計画の各段階および中期計画期間の成果は、報告書およびCoolRepとして公開済み**
 - ・第1段階報告書：JAEA-Research 2007-043
 - ・第2段階報告書：JAEA-Research 2015-026
 - ・必須の課題報告書(第3段階報告書)：JAEA-Research 2019-012
 - ・第1期中期計画期間(H17～H21年度)取りまとめ：JAEA-Review 2010-073
 - ・第2期中期計画期間(H22～H26年度)取りまとめ：JAEA-Research 2015-007
 - ・第3期中長期計画期間(H27～R3年度)取りまとめ：作成中
- ✓ **地層処分事業や安全規制、人材育成に活用していただけるような内容の報告(ホームページに掲載)を作成中**
- ✓ **令和3年度で埋め戻しも含めた現場作業が終了することから、超深地層研究所計画の集大成として、報告会を開催することを検討中**

25

研究所の活用と研究成果のアウトリーチ

26

共同研究と施設利用

共同研究 (H27～R1)

電力中央研究所	<ul style="list-style-type: none"> 地下水年代調査および評価技術の開発 物質移動特性調査および評価技術の開発
産業技術総合研究所	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の水理・化学・生物連成現象に関わる研究
原子力環境整備促進・資金管理センター	<ul style="list-style-type: none"> 地下環境モニタリング技術の適用性に関する研究 無線計測技術の適用性に関する研究
岡山大学	<ul style="list-style-type: none"> 結晶質岩を対象とした微視的構造変化が長期挙動におよぼす影響に関する研究
京都大学	<ul style="list-style-type: none"> 土岐花崗岩の浸透率空間分布の詳細把握と地下水流動系との関連性に関する研究
京都大学・大林組	<ul style="list-style-type: none"> 粘性流体注入に伴う周辺岩盤への影響に関する研究
静岡大学	<ul style="list-style-type: none"> 大深度地球化学モニタリング技術に関わる研究
東京大学	<ul style="list-style-type: none"> 地下環境の形成に関わる微生物プロセスの評価技術の研究 結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価手法に関する研究 深部地球化学環境の形成プロセスに関わる地下微生物と岩石・地下水相互作用の評価技術の構築
大林組	<ul style="list-style-type: none"> 亀裂性岩盤における透水不均質性のモデル化に関する研究
鹿島建設	<ul style="list-style-type: none"> 地中レーダによる坑道周辺岩盤における水理特性評価に関する研究
清水建設	<ul style="list-style-type: none"> 逆解析を用いた地下水流動のモデル化・解析に関する共同研究
清水建設ほか	<ul style="list-style-type: none"> 低アルカリ性珪酸塩吹付けコンクリートと岩盤との相互作用に関する研究
西松建設	<ul style="list-style-type: none"> 地質環境変化の把握を目的とした高精度男性は計測システムの適用性に関する研究
東京測器	<ul style="list-style-type: none"> 光ファイバひび割れ検知センサーの安全確保技術としての適用性に関する研究
DECOVALEX-2019	<ul style="list-style-type: none"> 連成解析に関わる国際共同研究

施設供用 (H27～R1)

東濃地農科学研究所	<ul style="list-style-type: none"> 坑内への地震計・歪計等の設置・観測 地上モニタリング化のための通信システムの整備
京都大学	<ul style="list-style-type: none"> 炭酸水注入による掘削影響領域の透水性変化計測
名古屋大学	<ul style="list-style-type: none"> ニュートリノ補足用原子核乾板の保管

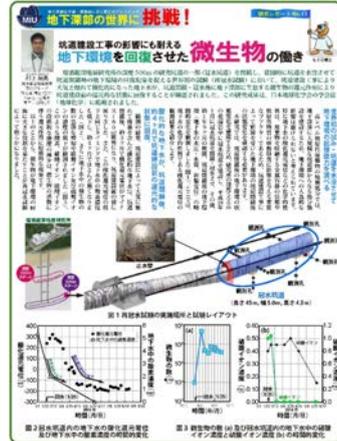
27

研究成果のプレス発表による理解醸成

プレス発表

- 2016:「断層運動で損傷した岩盤の自己修復機能を確認」
- 2016:「花崗岩の主要な構成鉱物中に物質を閉じ込める微小空隙の存在を確認」
- 2016:「亀裂から出る高水圧の湧水を抑制する技術を開発」[日経コンストラクション\(2017/1/13\)](#)
- 2017:「坑道閉鎖環境において物質の移動を抑制する現象を解明」
- 2017:「光合成由来のエネルギー源に依存しない地底生態系の解明に成功」[朝日新聞\(9/11\)](#)
- 2018:「結晶質岩(花崗岩)内の割れ目評価のための新知見」
- 2019:「花崗岩内の物質移動経路に関する新知見」[電気新聞\(4/18\)](#)、[科学新聞\(5/10\)](#)
- 2019:「マグマ由来の流体による微小な割れ目網が地下水の流路に」[電気新聞\(11/18\)](#)、[岐阜新聞\(11/21\)](#)、[科学新聞\(11/29\)](#)

地元で配布している「地層研ニュース」で研究トピックスを紹介



28

理解醸成・人材育成・国際協力に関する活動

理解醸成活動



サイエンス体験イベント



サイエンスカフェの開催

施設見学

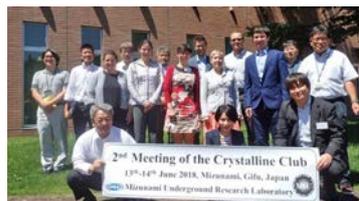
累計見学者数: 43,305人(入坑者数: 22,889人)



国際協力



(韓国KINGS:Technical Training)



(OECD/NEA:Crystalline Club)

人材育成



地元大学等への講師派遣

29

令和2年度以降の計画について

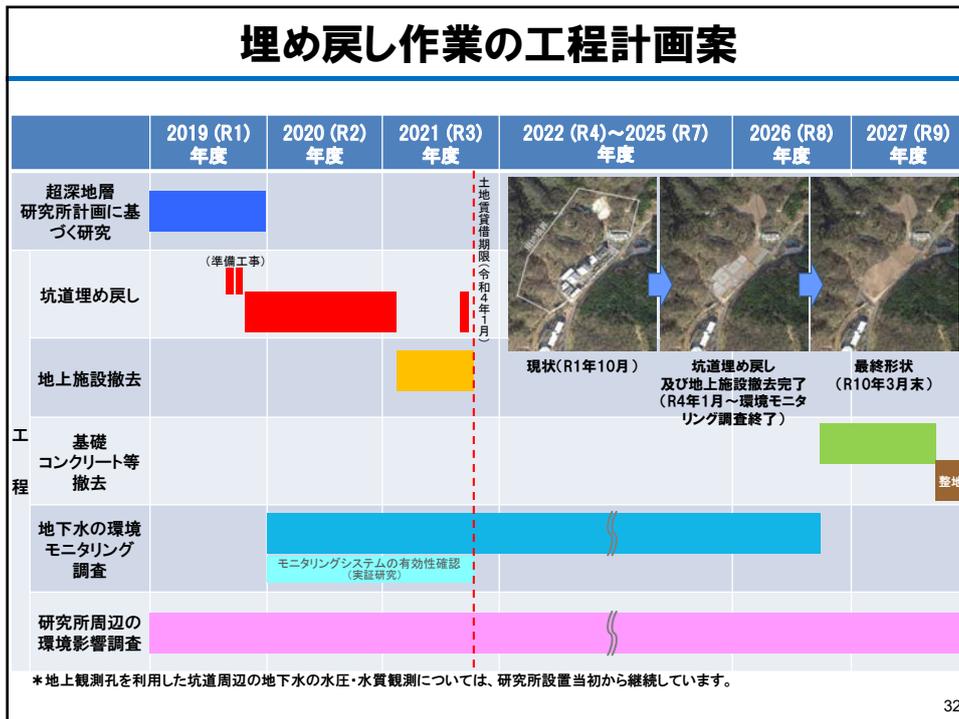
30

計画の要点

- ◆ 超深地層研究所計画における研究開発は、令和元年度をもって終了
- ◆ 土地賃貸借期間の終了(令和4年1月)までに坑道の埋め戻し及び地上施設の撤去を完了するため、坑道埋め戻し等の作業を実施(令和元年度下期に着手)
- ◆ 研究用地は、土地賃貸借期間終了時に一旦用地全体を返還した上で改めて下記作業に必要な部分を借用予定
- ◆ 坑道の埋め戻し期間中は、埋め戻しに伴う地下水の回復状況を確認するために整備するモニタリングシステムにより、坑道埋め戻し作業中の地下水の水圧・水質の変化を実際に観測し(地下水の環境モニタリング調査:既存の地上観測孔も使用)、実証研究を兼ねてモニタリングシステムの有効性を確認
- ◆ 坑道の埋め戻し後は、地下水の環境モニタリング調査を5年程度継続実施、また、作業期間を通して研究開始当初から実施している環境影響調査(河川水等の水質分析及び騒音・振動測定等)も継続実施
- ◆ 地下水の環境モニタリング調査終了後、地上施設の基礎コンクリート等の撤去及び地上観測孔の埋め戻し・閉塞、用地の整地を実施して全ての作業を完了

31

埋め戻し作業の工程計画案



埋め戻し作業の方法や工程など工事の進め方

- 瑞浪市との土地賃貸借契約に基づき、研究所用地を原状復帰する。
- 埋め戻し作業には、「①坑道の埋め戻し」と「②地上施設の撤去」の2つの工程がある。

①坑道の埋め戻し方法

- 坑道は、砂で埋め戻す。
なお、掘削工事において発生した天然のウランを含む掘削土は埋め戻し材として深度500m水平坑道の埋め戻しに使用する。

②地上施設の撤去方法

- 地上にある施設は、坑道の埋め戻しが終了した後に撤去する（～令和4年1月）。なお、管理棟等一部の施設は坑道の埋め戻し中に先行して撤去する。
- 基礎コンクリート、杭（地中深さ約10m）は、地下水の環境モニタリング調査の終了後に撤去する（～令和9年12月頃）。
- その後、用地の整地を行い、全ての作業を完了する（～令和10年3月）。



坑道埋め戻しのイメージ

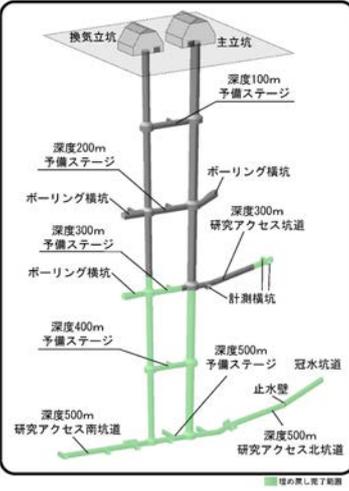
【参考】土地賃貸借契約の取扱い

- 期間終了時(令和4年1月16日)に一旦用地全体を返還する。
- 地下水の環境モニタリング調査に必要な部分を改めて借用する予定である。

坑道埋め戻し作業

埋め戻し進捗状況(2020.11.27現在)

- ・主立坑: 深度300mまで完了
- ・換気立坑: 深度275mまで完了
- ・深度400m水平坑道: 2020.10.6完了
- ・深度500m水平坑道: 2020.8.19完了



地上作業
 ・埋め戻し材をキブル(運搬容器)へ投入
 ・キブルを地上から立坑坑底へ橋、巻上機設備により運搬



坑道内作業
 ・立坑坑底でバックホウによりキャリアダンプ(埋め戻し材運搬車両)へ積込み、運搬



坑道内作業
 ・振動バケット装着バックホウにより埋め戻し、転圧

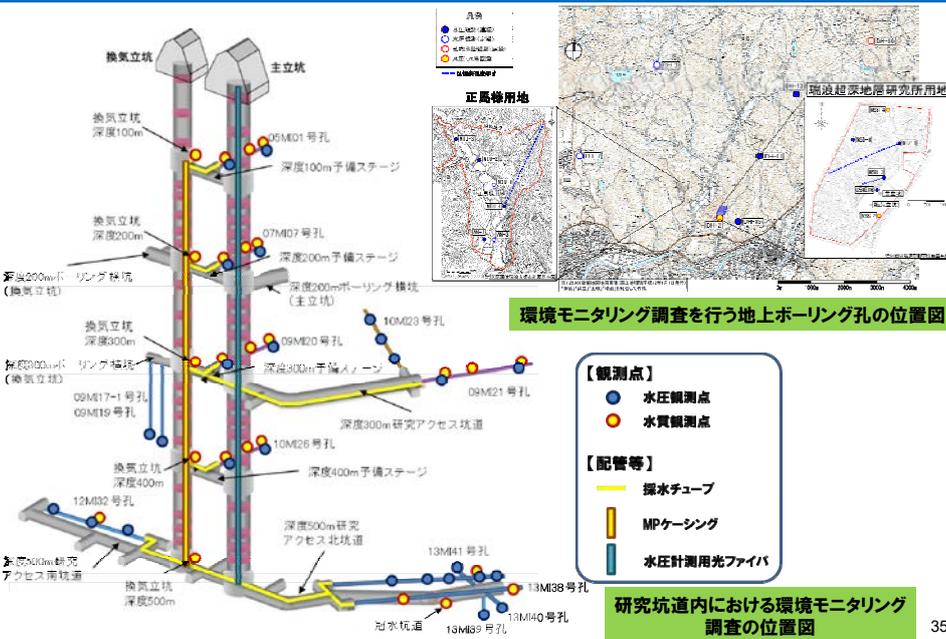


水平坑道の埋め戻し作業
 ・写真の坑道規模: 幅4m、高さ3.5m



主立坑の埋め戻し作業
 ・主立坑: 内径6.5m

地下水の環境モニタリング調査



付録3 発表資料「研究成果トピックス(亀裂性岩盤の水理学的な不均質性のモデル化技術)」

	深地層の研究施設計画に関する報告会2020 資料2-2(2020.12.1)
深地層の研究施設計画に関する報告会2020	
3. 超深地層研究所計画(瑞浪)	
2) 研究成果トピックス (亀裂性岩盤の水理学的な不均質性のモデル化技術)	
2020年12月1日	
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 核燃料・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	
尾上 博則	

報告の内容

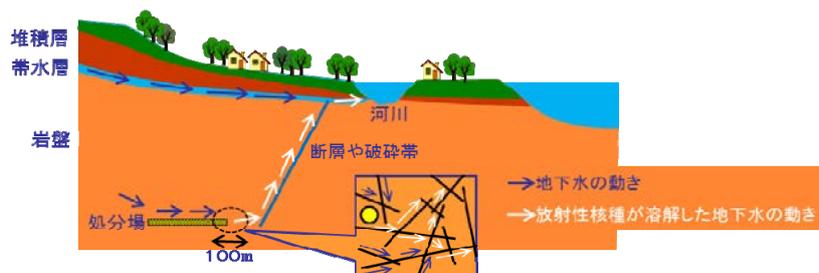
- 研究の背景・目標
- 実施内容
- 研究成果の概要
- 研究成果の活用と今後の展望

研究の背景・目標

2

地層処分における安全評価

- ✓ 結晶質岩に代表される亀裂性岩盤を対象とした場合、地下水や放射性核種の移行経路となる割れ目の地質学的特性や水理学的特性の把握が重要
- ✓ 割れ目の特性は不均質であり、直接的に全ての割れ目の情報は取得できないため、割れ目の不均質性を確率論的に表現可能な亀裂ネットワークモデル(Discrete Fracture Network Model:DFN model)を用いたアプローチの適用が一般的

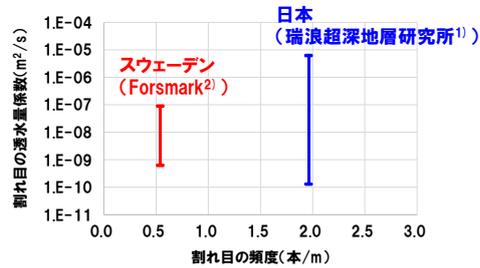


3

研究目標

- ✓ 諸外国と比較すると、日本の結晶質岩は、割れ目の密度が高くかつ、割れ目の透水性のばらつきが大きい

¹⁾ M. Ishibashi et al., 2016, ²⁾ SKB, 2008



深度500m付近の割れ目の特徴

- ✓ 既往研究では、割れ目特性に起因した岩盤の幅広い透水性の再現が困難
- ✓ 日本の岩盤を対象として、地下坑道での調査に基づくDFNモデルの構築やモデルの信頼性確認、さらには岩盤特性の評価に至る一連の方法論の体系化が課題



【研究目標】

- ✓ 岩盤内に分布する割れ目の密度や透水性のばらつきやそれらに起因した水圧分布などの不均質性を再現可能なDFNモデル化技術の構築

4

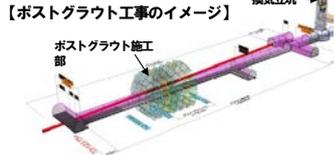
実施内容

5

中長期計画における超深地層研究所計画の研究課題

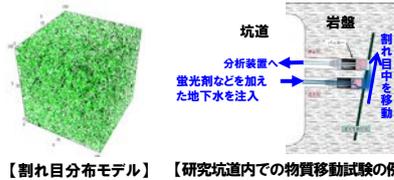
①地下坑道における工学的対策技術の開発

- ◆大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術
 - ◆地下水管理技術
- 【概要】
 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。



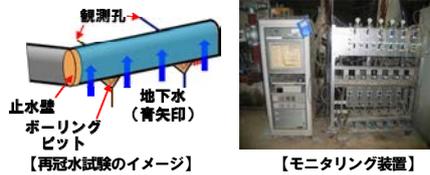
②物質移動モデル化技術の開発

- ◆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
- 【概要】
 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の流動・水質の長期的変化や地下水流動の緩慢性を明らかにするための調査を実施する。



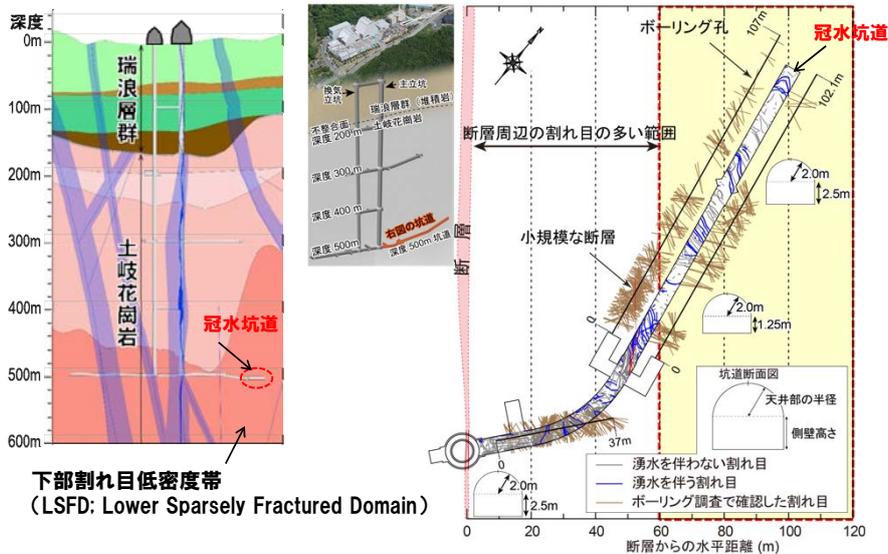
③坑道埋め戻し技術の開発

- ◆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
- 【概要】
 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共に、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。

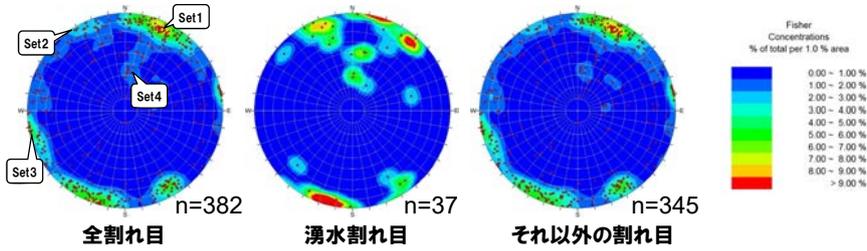


研究対象領域

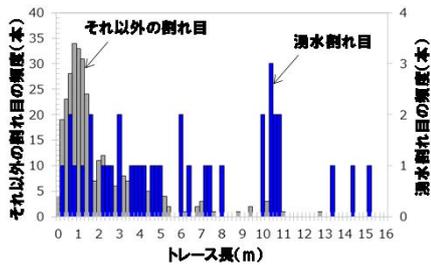
瑞浪超深地層研究所 深度500m冠水坑道周辺岩盤



不均質な岩盤特性の再現



坑道壁面における割れ目方位分布



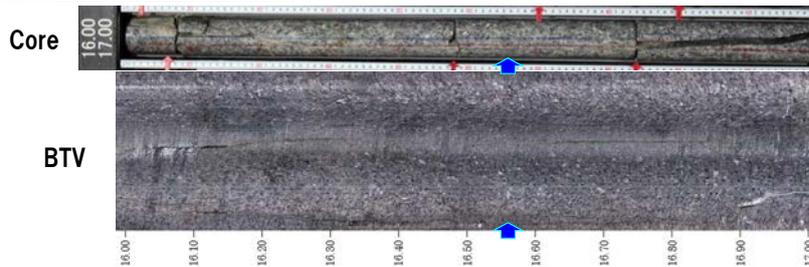
割れ目のトレス長ごとの頻度

- ✓ 湧水割れ目は、全体の約10%
- ✓ 湧水割れ目とそれ以外の割れ目の卓越方位は概ね整合
- ✓ 割れ目の大きさと頻度の関係から、大きな割れ目は湧水割れ目である可能性が高い
- ✓ 坑道への湧水量予測式(見掛ほか、2014)に基づき、湧水割れ目の透水量係数は $1E-9m^2/s$ 以上と推定

- 本研究では、湧水割れ目に着目
- 湧水割れ目とそれ以外の割れ目に区分したモデル化アプローチを採用

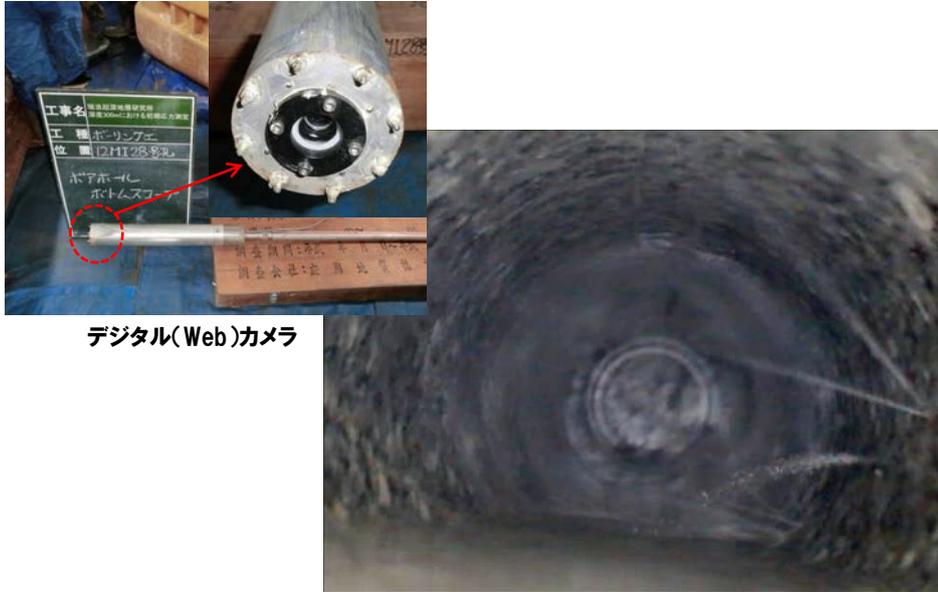
8

湧水割れ目の特徴



9

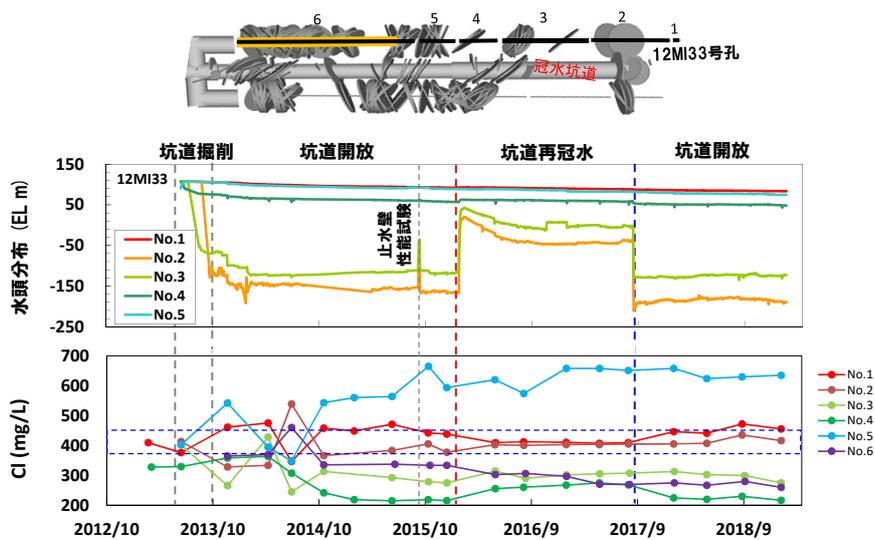
割れ目からの湧水状況 (動画)



デジタル(Web)カメラ

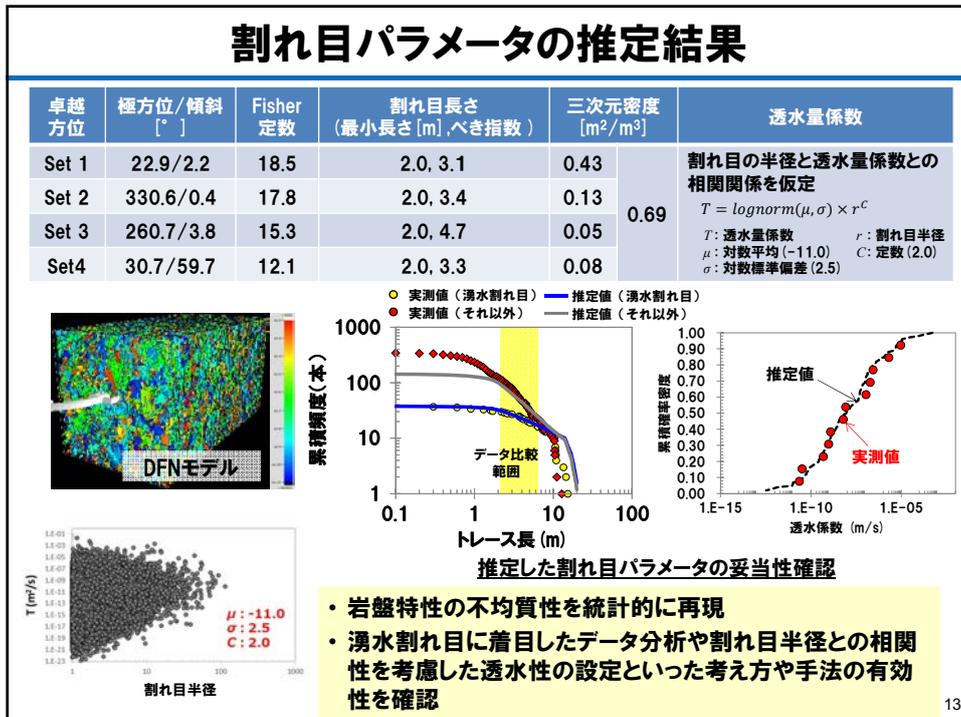
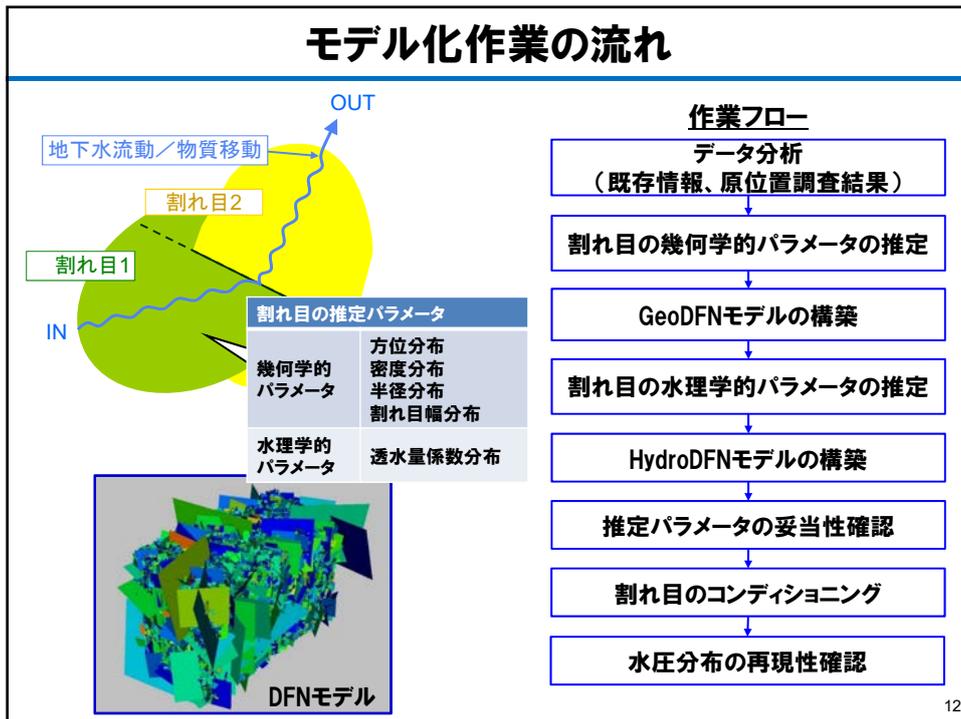
10

不均質な水圧・水質分布の再現



坑道周辺で観測された水圧・水質分布は、割れ目の影響を受けて不均質に変化

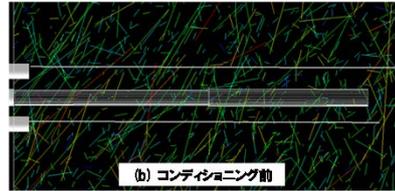
11



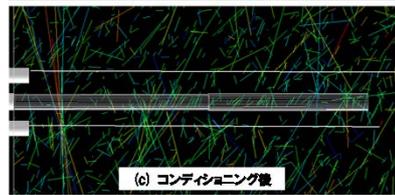
割れ目のコンディショニング結果



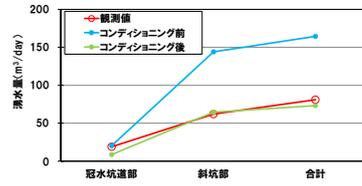
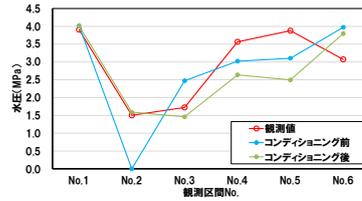
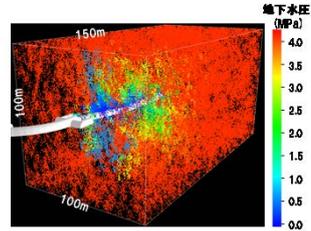
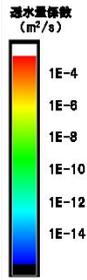
(a) 割れ目分布の観測結果



(b) コンディショニング前



(c) コンディショニング後

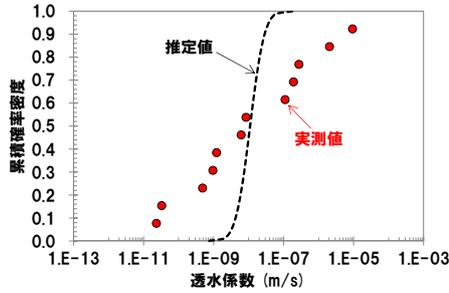


- 坑道掘削時の水圧分布や湧水量の再現性が向上
- 観測結果に基づく割れ目の分布位置や透水性のコンディショニングの有効性を確認

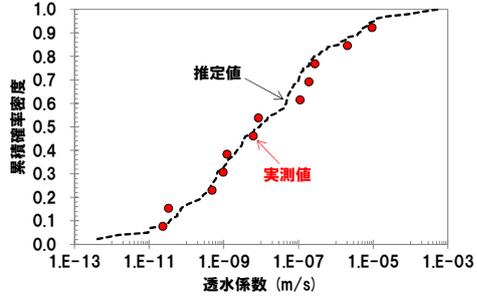
研究成果の概要

岩盤の透水性の再現

既往研究の推定結果
(渥美ほか、2015)

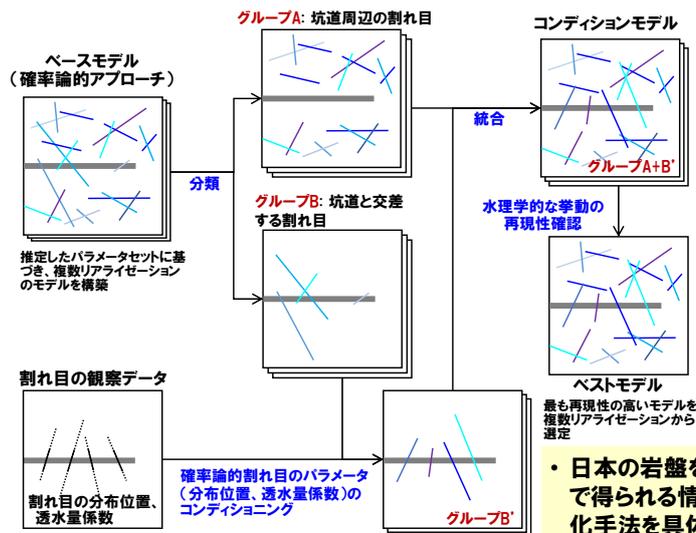


本研究の推定結果



・ 既往研究では再現できなかった6桁以上に及ぶ岩盤の透水性のばらつきを再現
⇒ 岩盤の水理学的な不均質性のモデル化技術を高度化

亀裂性岩盤を対象としたDFNモデル化手法



・ 日本の岩盤を対象として、地下坑道で得られる情報を用いたDFNモデル化手法を具体的に提示
⇒ 亀裂性岩盤の不均質性の評価や可視化技術として、処分事業の精密調査段階に適用可能

DFNモデル化に必要な調査とデータ

原位置調査の手法とデータ		DFNモデル化				
調査手法	取得データ	概念化	モデル構築	妥当性確認	モデルの校正	
ボーリング調査	コア観察	割れ目の密度 (P10 ^{*1})		X		
		割れ目の位置	X		X	
	BTV観察	割れ目の密度 (P10 ^{*1})			X	
		割れ目の走向傾斜	X		X	
	水理試験	岩盤の透水係数			X	X
水圧観測	地下水圧	X		X		
坑道壁面観察	割れ目のスケッチ	割れ目の密度 (P20 ^{*2})		X		
		割れ目の走向傾斜	X	X		
		割れ目のトレース長		X		
	湧水量計測	湧水割れ目からの湧水量	X			
		坑道全体の湧水量			X	
坑道内のスキャンライン調査	割れ目評価	割れ目の密度 (P10 ^{*1})		X		
		割れ目の走向傾斜			X	
		割れ目の位置				X

*1 P10: Linear fracture density (n/m)

*2 P20: Areal fracture density (n/m²)

- ・ 割れ目分布の概念化からモデル構築や妥当性確認、モデルの校正といった一連のモデル化作業に必要なデータとその調査手法を整理

⇒ 処分事業の精密調査段階以降の調査計画立案の基礎情報として有効な知見

18

成果の公開・発信

- ✓ DECOVALEX: 高レベル放射性廃棄物の地層処分に関わる熱-水-力学-化学 (T-H-M-C) 変化が関連する現象の連成解析技術の開発、高度化および実証を目的とした国際プロジェクト
- ✓ 本研究は、DECOVALEX2019のタスク(Task C: 瑞浪超深地層研究所の再冠水試験を対象とした連成解析)として実施し、本研究の成果は最終報告書として国内外に発信



<https://decovallex.org/>

【Task Cの参加国】

JAEA



SNL (U.S.)



Sandia National Laboratories

TUL (Czech)



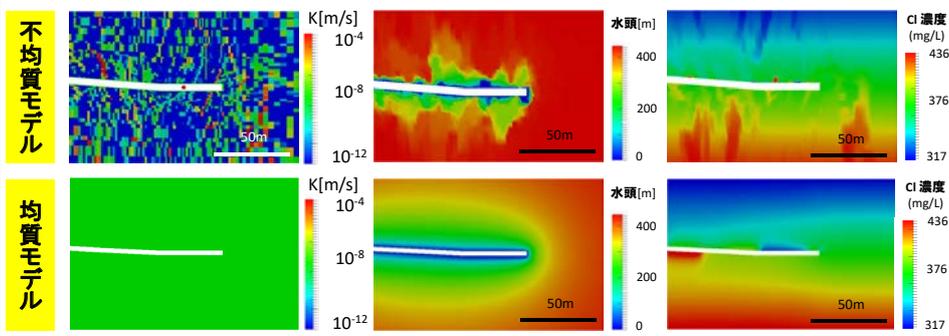
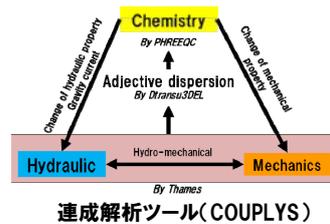
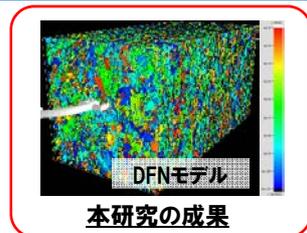
Technical University of Liberec

19

研究成果の活用と展望

20

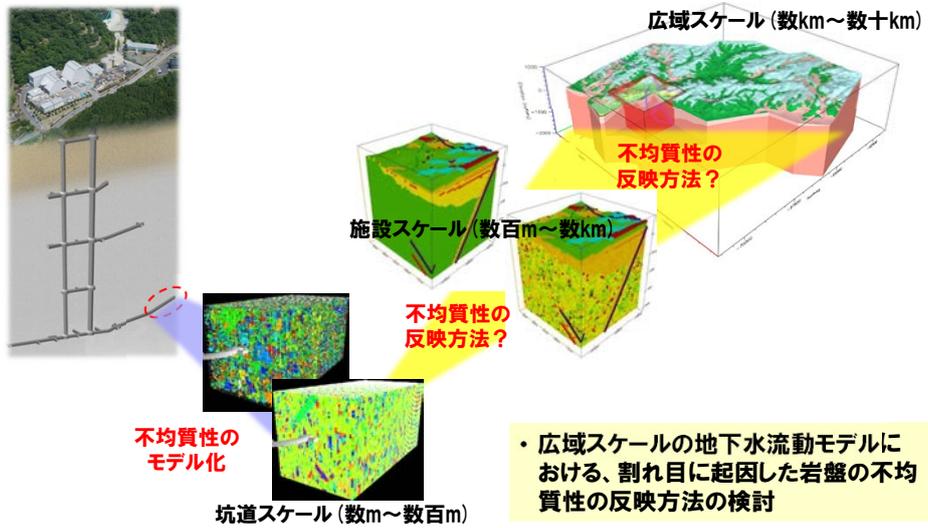
成果の活用事例：連成解析への適用



・ 本研究成果を用いた事例研究を通じて、COUPLYSをより汎用性の高いツールとして整備

21

今後の展望：広域スケールへの反映



資源エネルギー庁受託事業「令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(岩盤中地下水流動評価技術高度化開発)」で実施中

22



瑞浪超深地層研究所(岐阜県瑞浪市明世町)



主立坑(掘削深度:500.4m、内径6.5m)

ご清聴ありがとうございました。

23

付録4 発表資料「共同研究成果トピックス(電力中央研究所)」

深地層の研究施設計画に関する報告会2020
資料2-3(2020.12.1)

深地層の研究施設計画に関する報告会2020

3. 超深地層研究所計画(瑞浪)

3) 共同研究成果トピックス (電力中央研究所)

(一財)電力中央研究所
上席研究員 長谷川 琢磨
2020年12月1日

RI 電力中央研究所

© CRIEPI

RI 電力中央研究所

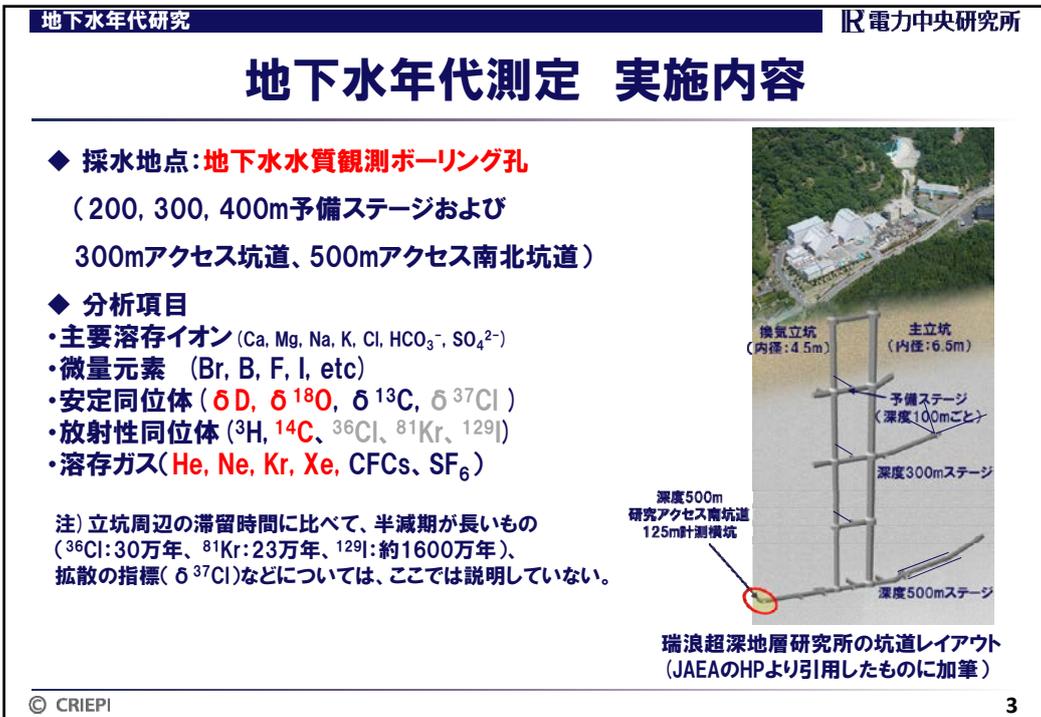
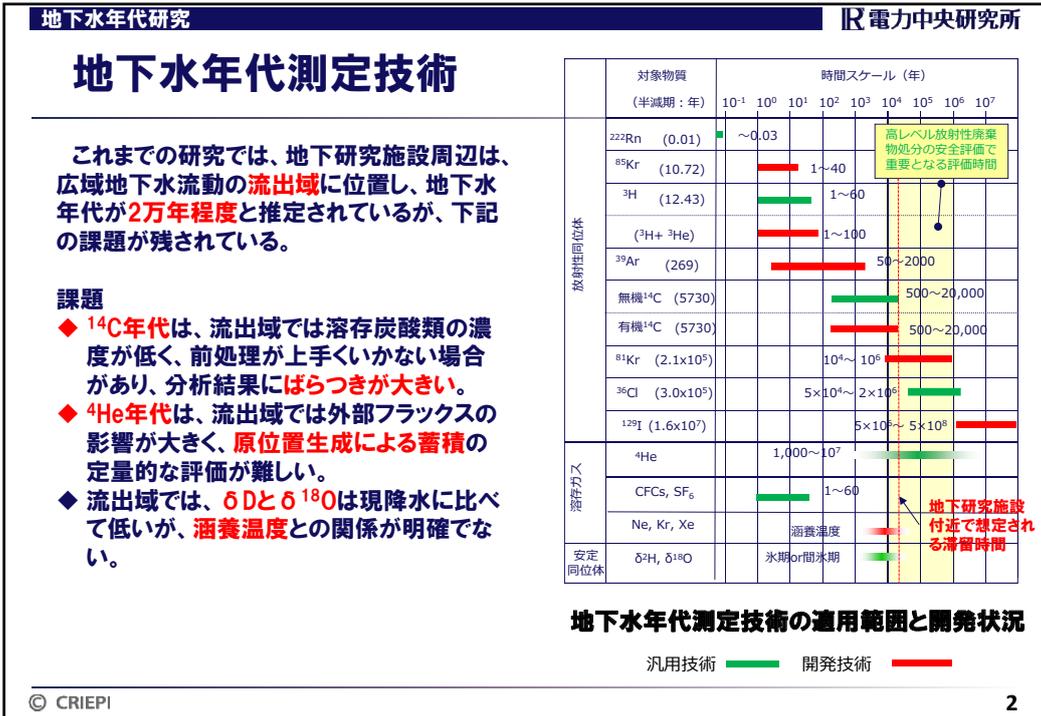
研究の背景・目標

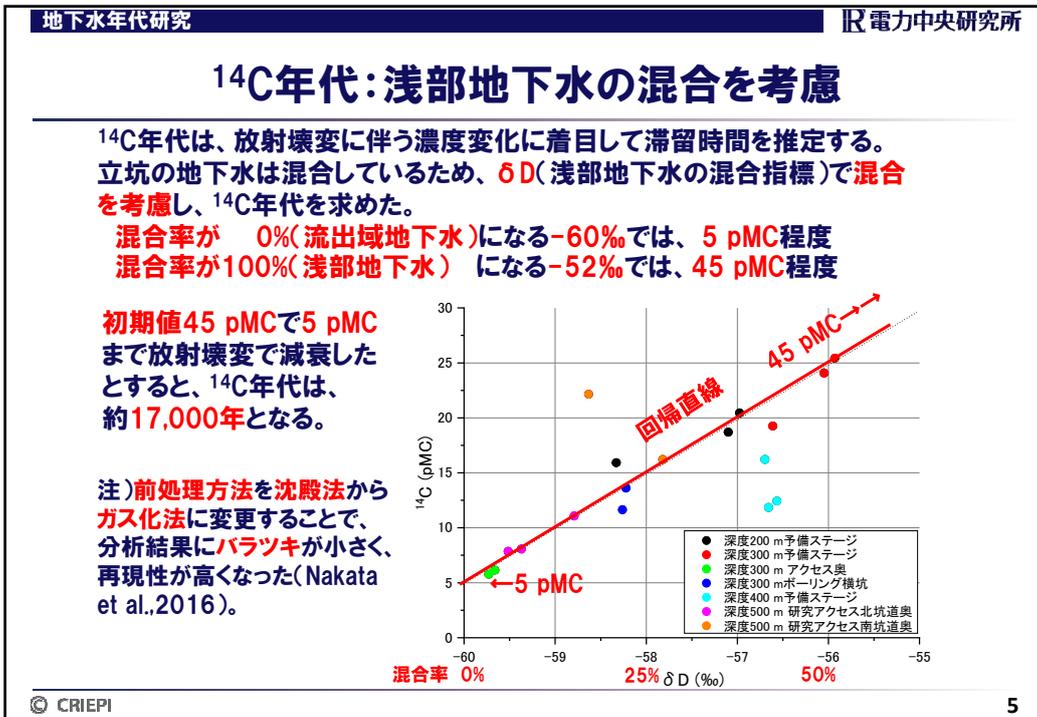
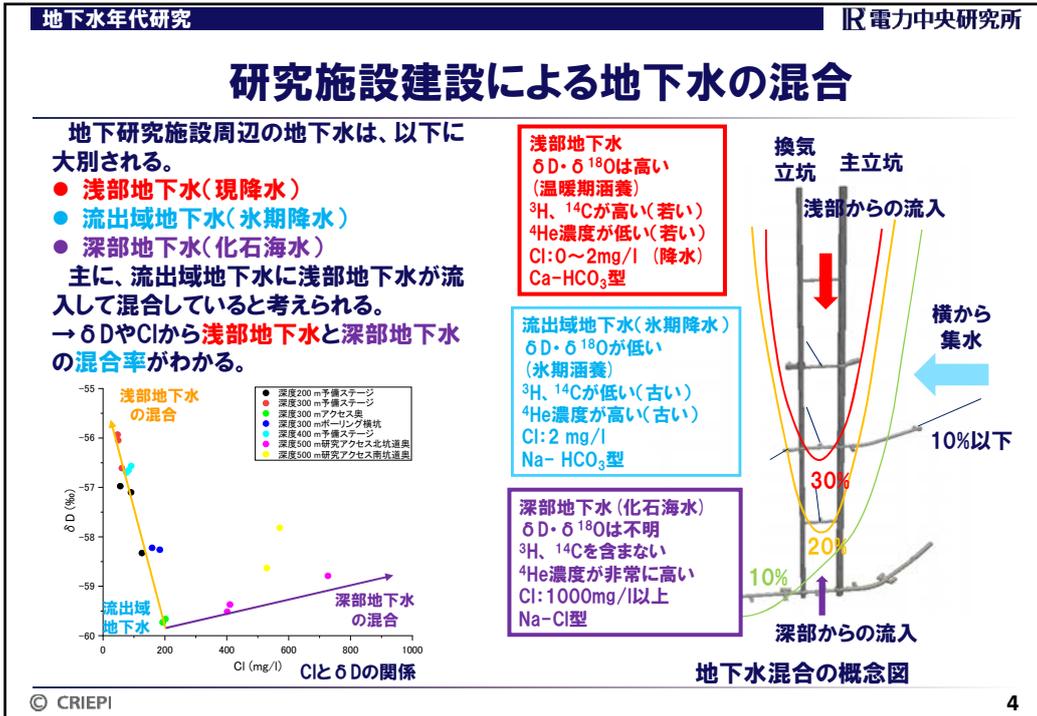
- ◆ 高レベル放射性廃棄物を地層処分する際の天然バリアの性能評価においては、処分施設周辺の**地下水流動・物質移行**を精度良く把握する必要がある。
- ◆ 電力中央研究所では、地下水の流動を**天然のトレーサー**を用いて評価する**地下水年代測定技術**や、岩盤中での物質の移行特性を**人工のトレーサー**を用いて評価する**トレーサー試験技術**の開発を進めてきた。
- ◆ 本報告では、地下水年代測定技術やトレーサー試験技術を花崗岩が分布する**瑞浪超深地層研究施設に適用**し、有効性を確認する。

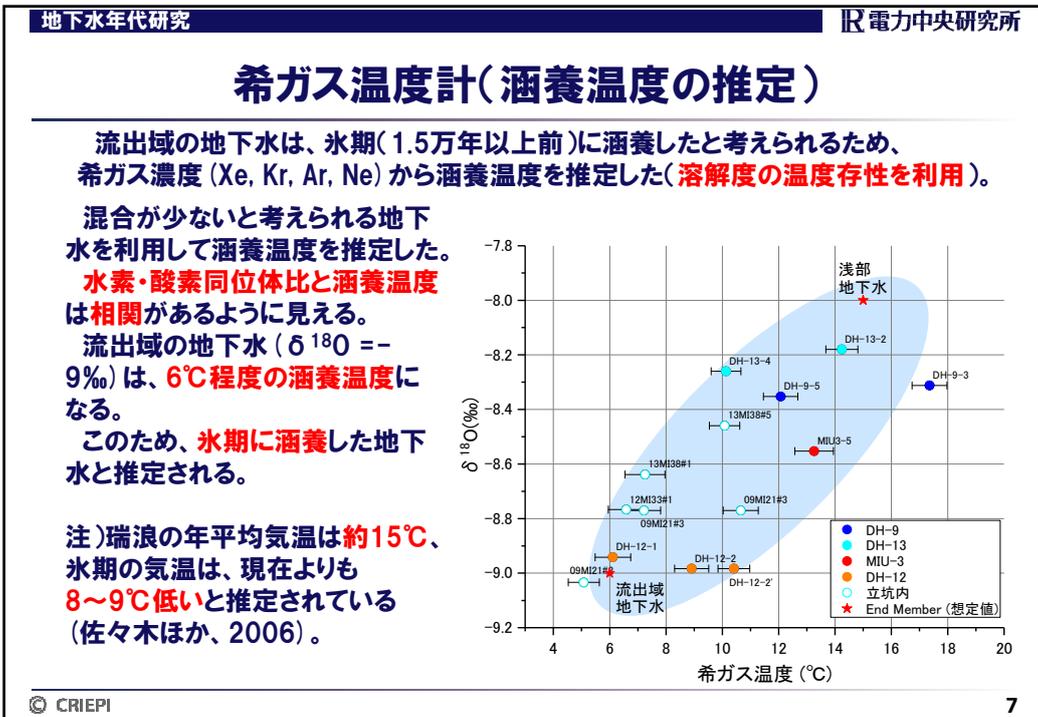
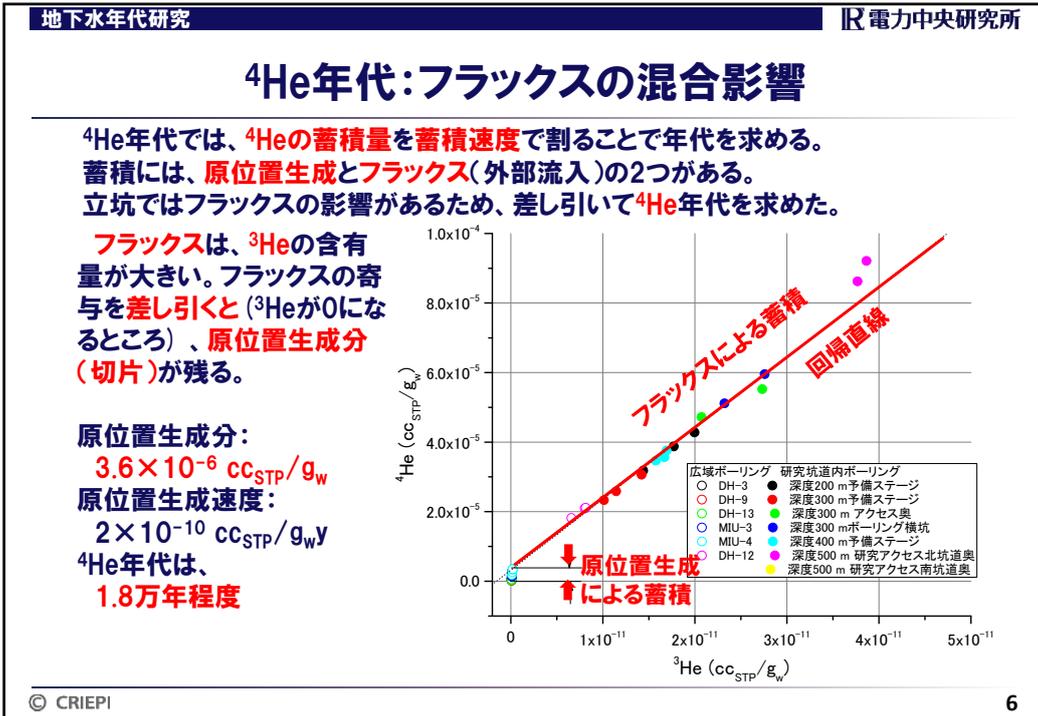
本研究は、**経済産業省資源エネルギー庁**より電力中央研究所が受託した「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(**岩盤中地下水移行評価確証技術開発**)」の成果の一部である。また、本研究は**日本原子力研究開発機構との共同研究**として実施した。

© CRIEPI

1

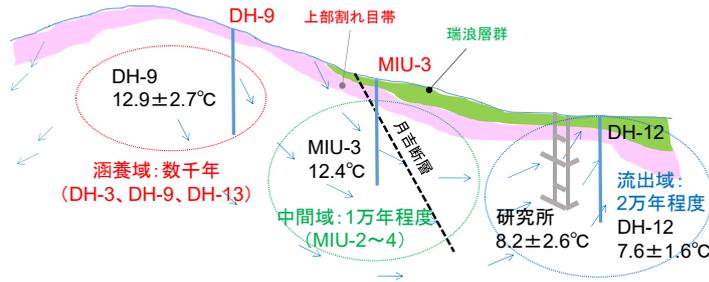






地下水年代測定 まとめ

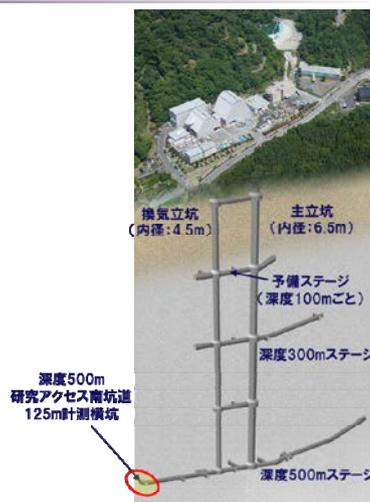
瑞浪超深地層研究所の研究坑道内に掘削されたボーリング孔から地下水を採取し、 ^{14}C 、 ^4He 、希ガス温度計などによる地下水年代測定を実施した。この結果、2万年程度の滞留時間を複数の方法で整合的に説明することができた。これらの方法は、花崗岩での地下水流動評価の有効な指標になると考えられる。



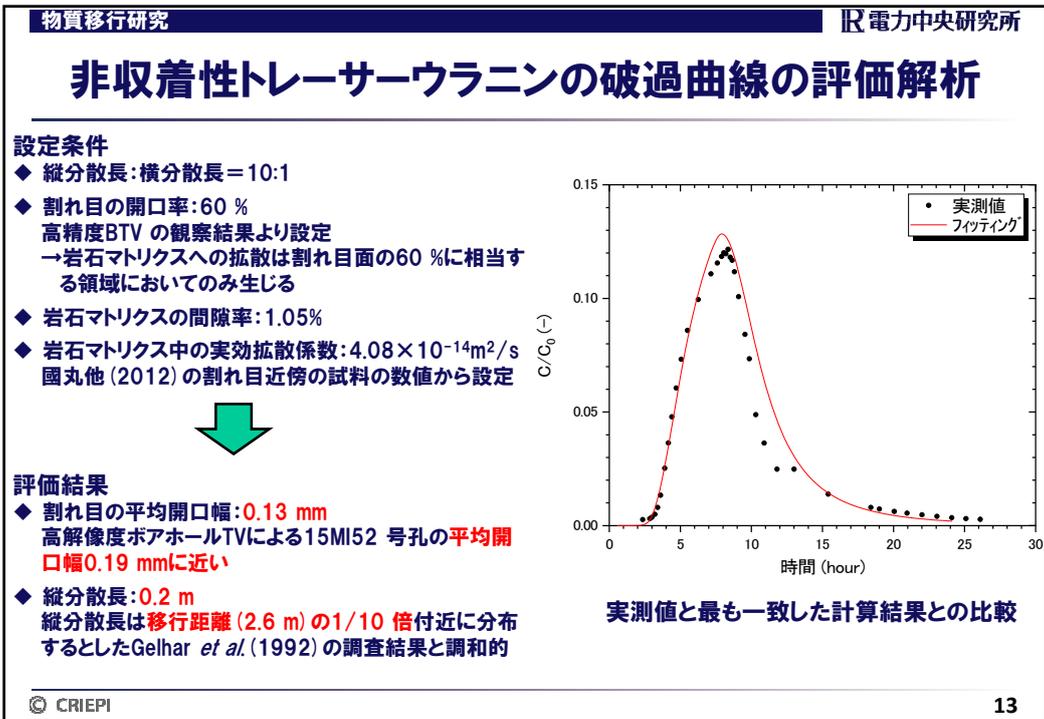
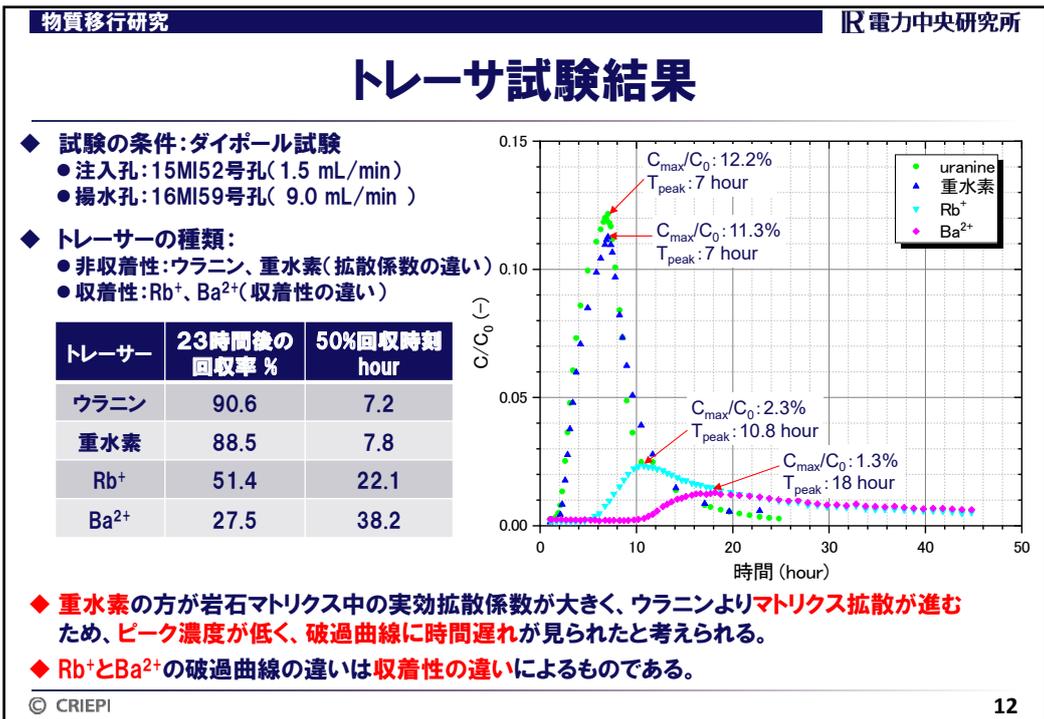
地下水流動と地下水年代の概念図

原位置トレーサー試験技術

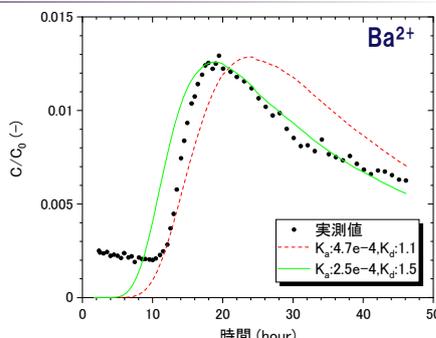
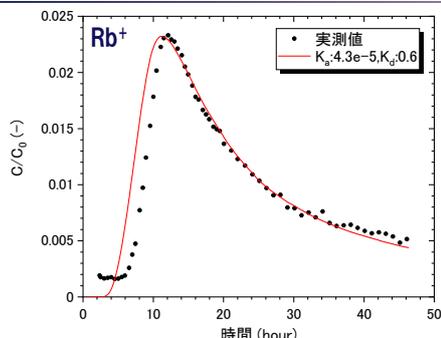
- ◆ 結晶質岩に対する原位置トレーサー試験研究は、スウェーデンSKBやスイスNagraにより地下研究施設で実施されてきた。
- ◆ 電力中央研究所では、欧米に比べ割れ目密度の高い我が国の岩盤に対応可能な**トレーサー試験装置**や、試験結果から物質移行パラメータを推定する**評価手法**の開発を進めてきた。
- ◆ 上記トレーサー試験装置や評価手法の我が国の結晶質岩盤への適用性を確認するため、**深度500m研究アクセス南坑道125m計測横坑**において、水理地質環境調査、**トレーサー試験を実施し**、その結果を基に対象岩盤の物質移行特性の評価を試みた。



瑞浪超深地層研究所の坑道レイアウト (JAEAのHPより引用したものに加筆)



収着性トレーサーRb⁺とBa²⁺の破過曲線の評価解析



割れ目開口幅と分散長にはウラニンによる推定結果を、表面吸着係数と分配係数には**室内バッチ試験の結果**を用いて破過曲線の**同定**を試みた。ただし、表面吸着やマトリクス拡散・吸着に寄与するのは、全割れ目面積の60%とした。



- Rb⁺では**室内バッチ試験**の表面吸着係数 4.3×10^{-5} m、室内バッチ試験に近い分配係数 0.62 mL/gで**実測値に良く一致した**。
- Ba²⁺では室内バッチ試験の表面吸着係数 4.7×10^{-4} mでは破過曲線は再現できず、**表面吸着係数を約1/2の 2.5×10^{-4} m**にすると、分配係数を1.48 mL/gとした場合に破過曲線は**実測値と良く一致した**。

トレーサー試験 まとめ

- ◆ 非収着性トレーサーの**重水素とウラニン**で破過曲線に差異が見られ、**マトリクス拡散の影響**が確認された。一方、収着性トレーサーの**Rb⁺やBa²⁺**では**収着**による移行の遅れやピーク濃度の減衰もみられた。
- ◆ 非収着性トレーサーのウラニンの破過曲線から対象割れ目の開口幅と分散長を同定した。
 - ✓ **開口幅**の同定値は、高解像度のポアホール**TVカメラ**による計測値と整合性がある。
 - ✓ **縦分散長**は、**移行距離の1/10程度**となり、Gelhar et al. (1992)の調査結果と整合性がある。
- ◆ 収着性トレーサーの**Rb⁺**の破過曲線の評価解析では、**室内での収着バッチ試験**で求めた表面吸着と分配係数とほぼ**同じ値**で、**破過曲線を再現**できた。Ba²⁺の破過曲線の評価解析では、室内での収着バッチ試験で求めた表面吸着と分配係数に**近い値**で、破過曲線を再現できた。
- ◆ 結晶質岩の物質移行速度**遅延機能**を支配する重要なパラメータである岩石マトリクスの**分配係数**の推定精度が高まることで、天然バリア性能評価における**信頼性の向上**への反映が期待される。

今後の展望

平成30年度からは日本原子力研究開発機構殿と当所とで、経産省から「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(岩盤中地下水流動評価技術高度化開発)」を共同受託している。

- ◆ 地下水年代測定については、これまでの調査結果を踏まえて、広域の**地下水モデルの妥当性**の検証を行っている。この中で、**地下水年代を用いたモデルの校正**や**パラメータの推定誤差**の評価に取り組んでいる。
- ◆ トレーサー試験については、瑞浪超深地層研究所地下において多数の岩盤割れ目のネットワークを対象とした**物質移行試験**を実施し、現在その結果に対する評価を行っている。さらに、その結果を基に**広域的な物質移行特性**の評価に取り組む予定である。

付録5 発表資料「必須の課題成果取りまとめ報告書と令和2年度以降の計画」(幌延)



深地層の研究施設計画に関する報告会2020
資料3-1(2020.12.1)

深地層の研究施設計画に関する報告会2020

4. 幌延深地層研究計画

1) 必須の課題成果取りまとめ報告書と令和2年度以降の計画

2020年12月1日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門
幌延深地層研究センター 深地層研究部

部長 岩月 輝希

報告の内容

- 幌延深地層研究計画の概要
- 必須の課題成果取りまとめ報告書の概要
- 研究所の活用と研究成果のアウトリーチ
- 令和2年度以降の計画について

1

幌延深地層研究計画の概要

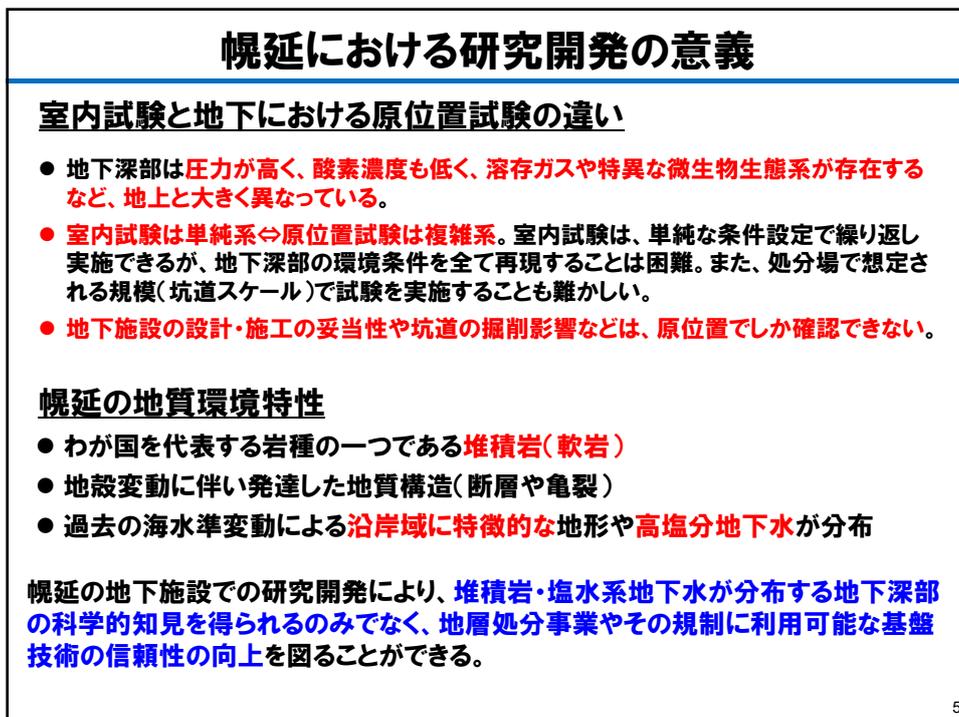
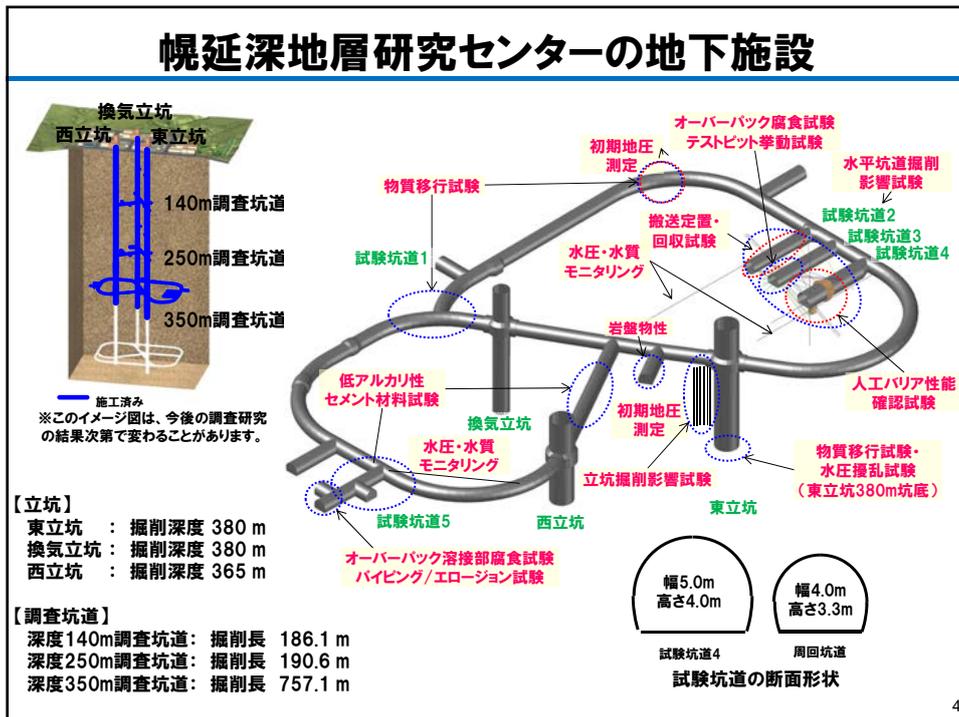


2

幌延深地層研究計画の経緯

- 1998年12月：サイクル機構より北海道知事及び幌延町長に対し「幌延町における深地層の研究について」申し入れ
- 2000年5月：「深地層の研究の推進に関する条例」を制定（幌延町）
- 2000年10月：「北海道における特定放射性廃棄物に関する条例」を可決
- 2000年11月：「**幌延町における深地層の研究に関する三者協定**」を締結（サイクル機構・北海道・幌延町）
- 2001年4月：幌延深地層研究センター開所
- **2002年7月：研究所設置地区に北進地区を選定**
- 2003年7月：地下研究施設用地造成工事着工
- **2005年11月：地下施設建設に着手**
- **2012年10月：地下施設（研究坑道）深度350m調査坑道周回坑道全域が貫通**
- 2014年9月：機構改革計画に基づく「地層処分技術に関する研究開発報告書」－今後の研究課題について－の公表
- 2019年8月：道及び幌延町に対し「令和2年度以降の幌延深地層研究計画（案）」について申し入れ
- 2019年9月～11月：幌延深地層研究の「確認会議」で必要性、妥当性、三者協定との整合などを確認
- 2020年4月～：「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」に関わる研究開発

3



深地層の研究施設計画の「残された必須の課題」

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の中長期目標を達成するための計画(中長期計画)(平成27年4月1日～平成34年3月31日)

《深地層の研究施設計画》

- ◆ 幌延深地層研究計画については、実際の地質環境における人工バリアの適用性確認、処分概念オプションの実証及び地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証に重点的に取り組む。また、平成31年度末までに研究終了までの工程やその後の埋め戻しについて決定する。

(平成27年度4月に公開された資料より幌延深地層研究計画関連抜粋)

(以下、令和2年4月1日に変更認可された計画で追記)
令和2年度以降においては、研究終了までの工程やその後の埋め戻しについて定めた「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」に基づき、**実際の地質環境における人工バリアの適用性確認、処分概念オプションの実証及び地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証を進める。**

6

必須の課題成果取りまとめ報告書の概要

<https://doi.org/10.11484/jaea-research-2019-013>

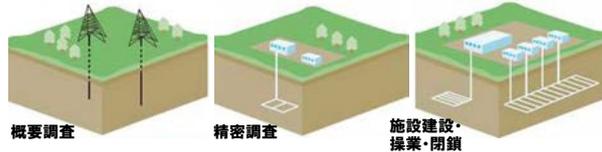
7

幌延深地層研究計画 必須の課題

①実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

平成26年度から深度350m調査坑道で実施している人工バリア性能確認試験、オーバーバック腐食試験、物質移行試験を通して、人工バリアや周辺岩盤中の熱-水-応力-化学連成挙動や物質移行現象を評価する技術の適用性を確認し、「精密調査の段階(後半)」に必要となる技術基盤を確立する。

- 1) 人工バリア性能確認試験
- 2) オーバーバック腐食試験
- 3) 物質移行試験



②処分概念オプションの実証

人工バリア設置環境の深度依存性を考慮し、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証し、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計・施工を行うことを支援する技術オプションを提供する。

- 1) 処分孔などの湧水対策・支保技術などの実証試験
- 2) 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験
- 3) 高温(100℃以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験

③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

地震・断層活動などの地殻変動に対する力学的・水理学的な緩衝能力を定量的に把握し、堆積岩地域における処分場の設計を、より科学的・合理的に行うことができる技術と知見を整備する。

- 1) 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化
- 2) 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

8

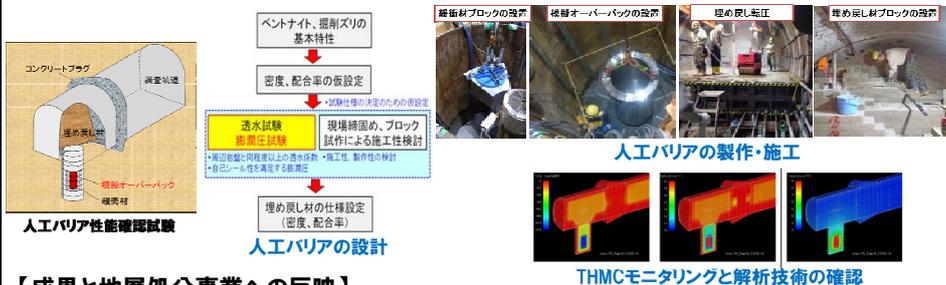
①実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

1) 人工バリア性能確認試験

【研究の背景と目標】

口安全評価上の初期状態設定やオーバーバックの寿命評価に必要なニアフィールドの環境条件(THMC: 温度・水理・力学・化学)やそれらの相関に関する評価手法の確認が必要

- 原位置で実規模の人工バリアの設計・製作・施工、品質管理技術を確認する。
- 坑道閉鎖後のニアフィールドの再冠水～飽和過程を再現し、THMC連成現象のモニタリングデータに基づいて解析評価手法の適用性を確認する。



【成果と地層処分事業への反映】

人工バリア(堅置)の設計、製作、定置に必要な以下の技術を実証

- ・緩衝材、オーバーバック、埋め戻し材の設計・製作方法
- ・真空把持装置を用いた緩衝材ブロックの定置、品質管理手法
- ・転圧締固め及び埋め戻し材ブロックによる原位置施工や品質管理手法
- ・低アルカリ性セメント(HFSC)を用いたコンクリートプラグの設計・施工及び品質管理手法
- ・THM/THMC連成評価手法及びモニタリング手法

9

①実際の地質環境における人工バリアの適用性確認
2) オーバーパック腐食試験

【研究の背景と目標】

口処分直後の酸化的環境でのオーバーパック腐食は、室内試験の不均一な腐食に基づき評価されていることから、原位置の環境条件での腐食挙動について確認が必要
 ▶ 原位置環境で緩衝材の再冠水～飽和の過程を再現し、オーバーパックの腐食量と不均一性のデータを取得し、既往の腐食量評価手法の妥当性、適用性を確認する。



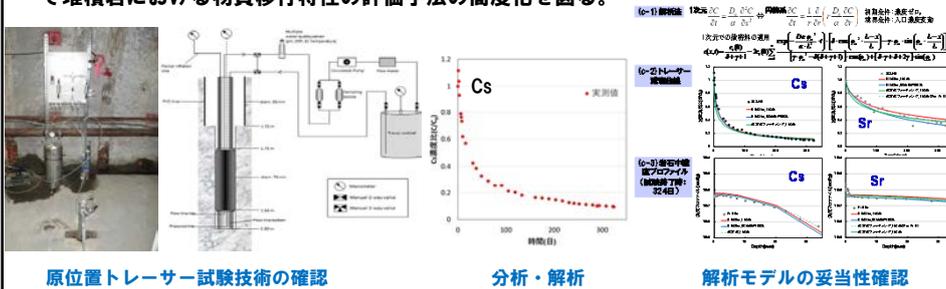
【成果と地層処分事業への反映】

実際の地下環境におけるオーバーパックの腐食速度の評価方法を確認
 ・腐食生成物の分析結果に基づく腐食状態の評価手法
 ・室内試験結果による腐食量評価式と原位置試験に基づく腐食速度評価手法
 ・原位置における腐食量モニタリング技術

①実際の地質環境における人工バリアの適用性確認
3) 物質移行試験

【研究の背景と目標】

口堆積岩では基質部や断層中の割れ目、坑道掘削損傷領域などが主要な核種移行経路となり得るが、泥岩中の割れ目に関しては物質移行挙動の評価例が少ないため、原位置試験技術の整備を含めて評価手法の整備が必要
 ▶ 幌延の泥岩を事例として原位置トレーサー試験手法を構築するとともに、室内試験手法と併せて堆積岩における物質移行特性の評価手法の高度化を図る。



【成果と地層処分事業への反映】

堆積岩における基質・割れ目部での物質移行特性とトレーサー試験技術の信頼性を向上
 ・ガスが溶存する地下水環境下における安定同位体、各種トレーサーを用いた物質移行試験技術
 ・堆積岩中の基質部・割れ目部における物質移行特性の評価技術

②処分概念オプションの実証

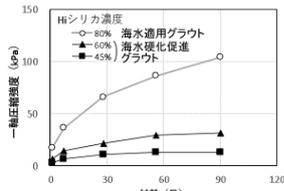
1) 湧水抑制対策・支保技術などの実証試験

【研究の背景と目標】

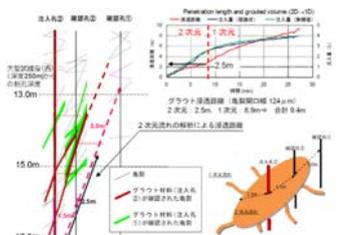
- 割れ目や地下水が多い地質環境では湧水抑制対策技術が不可欠であり、地層処分想定される地下深部の高水圧環境に対応した技術の整備が必要
- ▶ 湧水地点を事前予測するための調査方法を構築するとともに、塩水条件下で微小亀裂にも利用可能なグラウト技術、グラウト浸透評価方法、長期岩盤変位モニタリング技術を構築する。



鉱物学的手法による湧水箇所予測手法の高度化



塩水環境での溶液型グラウトの適用性確認



グラウトが確認された割れ目位置と解析で評価された浸透距離を比較

【成果と地層処分事業への反映】

坑道掘削時の湧水箇所の予測技術、塩水・堆積岩環境でのグラウト技術を実証

- ・ 鉱物組成などに基づく突発湧水が起こり得る箇所の事前調査技術
- ・ 塩水条件の深部地質環境において適用可能な溶液型グラウト配合
- ・ グラウトの施工と多孔質媒体モデルを適用したグラウト浸透領域の浸透解析手法
- ・ 長期的に岩盤と支保工の安定性をモニタリングするための吹付コンクリート・鋼製支保工応力計測手法、弾性波トモグラフィ手法

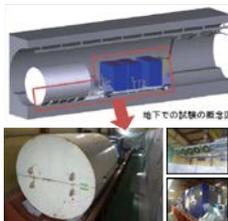
②処分概念オプションの実証

2) 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験

【研究の背景と目標】

- 地層処分に関する基本方針では、「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」とされており、人工バリア定置時に何らかの不具合が発生した場合の廃棄体回収技術の整備が必要
- ▶ 原位置におけるPEMを用いた処分坑道横置き定置方式を対象とした搬送定置・回収技術、PEMと坑道の隙間の充填方法及び回収時の除去技術を実証する。

PEM: Prefabricated Engineered Barrier System Module



搬送・定置装置の設計・製作 (原環センターにて実施)



狭隙部の隙間充填技術の確認 (地上)



原位置での模擬PEM設置技術の確認



原位置での隙間充填・除去技術の確認

【成果と地層処分事業への反映】

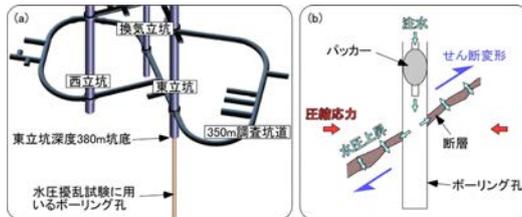
PEM(横置)の搬送・定置・回収に必要な以下の技術を実証

- ・ 処分坑道横置きPEMのエアベアリング方式を用いた搬送定置・回収技術
- ・ 原位置におけるPEMと坑道との隙間充填・除去技術(ウォータージェット、オーガ掘削)および品質管理手法

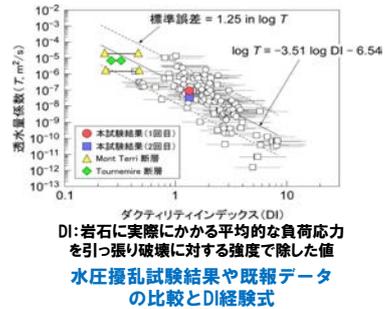
③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証
 1) 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

【研究の背景と目標】

口処分場閉鎖後の母岩の長期的な安定性について、地層中の断層・割れ目の長期的な透水性（地震・断層活動や隆起・侵食に伴う変化の有無）を適切に考慮することが重要
 > 断層・割れ目の変形様式（脆性的または延性的）について岩石の強度・応力状態を指標化し、透水性との関係性を整理することで、長期的な断層・割れ目の透水性の推測手法を整備する。



断層・割れ目を対象とした水圧擾乱試験による割れ目の変化時の透水性変化量の計測



DI: 岩石に実際にかかる平均的な負荷応力を引く張力破壊に対する強度で除した値
 水圧擾乱試験結果や既報データの比較とDI経験式

【成果と地層処分事業への反映】

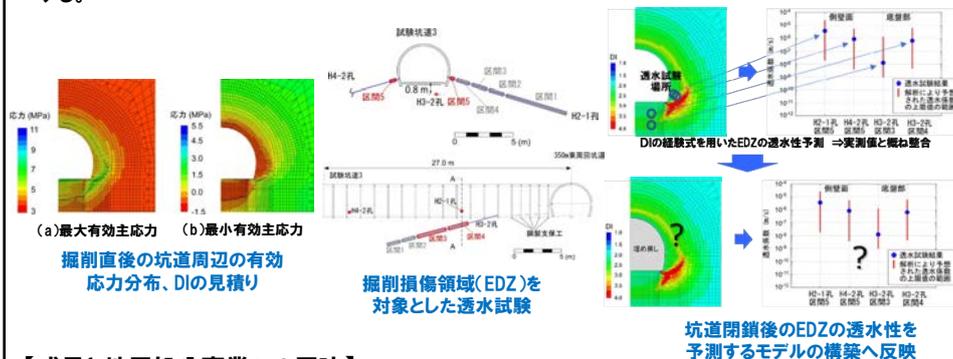
堆積岩中の断層・割れ目部の長期的な透水性の推測手法を構築

- ・隆起・侵食によって断層・割れ目の深度が浅化した状態を模擬するための水圧擾乱試験技術
- ・断層運動や隆起・侵食を考慮した断層の保守的な透水性の設定手法

③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証
 2) 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

【研究の背景と目標】

口堆積岩での立地選定や処分場の設計をより科学的・合理的に行うために、長期的な地殻変動に対する力学的・水理学的な緩衝能力を踏まえて、人工バリアの長期挙動を推測する技術が必要
 > 人工バリアの緩衝材や坑道の埋め戻し材による掘削影響領域(EDZ)の物性変化を評価する手法を整備する。



(a)最大有効主応力 (b)最小有効主応力
 掘削直後の坑道周辺の有効応力分布、DIの見積り

掘削影響領域(EDZ)を対象とした透水試験

坑道閉鎖後のEDZの透水性を予測するモデルの構築へ反映

【成果と地層処分事業への反映】

有効応力分布などに基つき坑道掘削影響領域の透水性を推定する手法を構築

- ・掘削影響領域(EDZ)の透水性解析手法
- ・坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築手法

これまでの成果と残された課題		
必須の課題	主な成果(～令和元年度末)	残された研究課題
① 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認	1) 人工バリア性能確認試験	地下環境で人工バリアの施工実証。加熱時の緩衝材挙動データ取得。連成解析で現象再現 減熱時の緩衝材挙動データの取得、人工バリアの解体と緩衝材飽和度の確認
	2) オーバーバック腐食試験	地下環境でのオーバーバック腐食試験に基づき、腐食速度推定手法の妥当性を確認 (令和元年度で研究を終了)
	3) 物質移行試験	堆積岩の健岩部・割れ目・断層を対象とした物質移行試験の手法を確立 掘削影響領域、有機物、微生物に着目した物質移行試験
② 処分概念オプションの実証	1) 処分孔などの湧水対策・支保技術などの実証試験	堆積岩に対して、処分孔掘削技術、湧水抑制技術、支保技術などの有効性を確認 (令和元年度で研究を終了)
	2) 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験	処分坑道横置き定置方式について、エアベアリングを用いた搬送定置・回収技術などの要素技術を実証 施工方法、プラグの有無、回収方法に応じた埋戻し材の特性把握
	3) 高温度(100℃超)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験	100℃超の高温度環境下における人工バリアの閉じ込め機能を確認する研究に関する机上検討 廃棄体の設置方法などの処分技術の概念オプションの検討 緩衝材が100℃超になった状態を想定した解析手法の開発
③ 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証	1) 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化	地殻変動が小規模な割れ目の透水性に与える影響を確認 より大きな割れ目において、地殻変動の影響などを把握 地下水が動いていない領域を調査する技術の実証
	2) 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験	人工バリアの自己治癒能力(ひび割れの修復)を確認する研究の机上の検討 人工バリアのひび割れに対する自己治癒能力を解析する手法の開発
<p>現中長期計画におけるこれまでの成果報告 研究開発報告書 53報、査読付き論文 46報 日本原子力学会バックエンド部会 論文賞(H27)、土木学会 論文奨励賞(H27、28)、土木学会 土木情報学論文賞(H28)、資源・素材学会 第43回奨励賞(H29)、エルゼビア学術誌 Outstanding Reviewer賞(H29、30)、土木学会 技術賞(H30)、Waste Management 2019 Superior Paper Award, Paper of note (R1)</p>		

16

外部有識者による評価結果
<p>第3期中長期計画におけるこれまでの研究開発成果について、大学等の外部有識者からなる「地層処分研究開発・評価委員会」及び「深地層の研究施設計画検討委員会」において技術的な評価を受け、以下のような評価結果を頂きました。</p>
<p>◆ 全体として概ね適切に研究が遂行され、当期5カ年の目標を達成できたと評価します。</p>
<p>◆ 今後は、技術の確立が可能な水準に達するまで、人工バリア性能確認試験および処分概念オプションの実証に関する試験を継続するとともに、本地下研究施設を最先端の地層処分技術を実証するプラットフォーム(共通基盤)として国内外の関係者に広く活用されることを期待します。</p>

17

研究所の活用と研究成果のアウトリーチ

18

国内外の大学・研究機関との研究協力

国内の研究機関

信州大学、室蘭工業大学、北海道大学、京都大学、東京大学、東北大学、名古屋大学

- 坑道周辺岩盤に生じる掘削損傷に関する研究
- 三次元レーザースキャナを用いた壁面地質観察手法の開発
- 坑道掘削に伴う周辺岩盤に生じる割れ目の連結性の評価や三次元分布の可視化
- 地下水中の微量元素と微小な物質(コロイド・有機物・微生物)との相互作用の評価
- 地下深部に生息するメタン酸化機能を有する微生物生態系が地下水や岩石などの性質に与える影響を評価する手法の開発 など

原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所、産業技術総合研究所、
幌延地圏環境研究所、国立環境研究所

- 地層処分実規模試験施設を利用した研究開発
- 搬送定置・回収技術の実証的検討に関する研究
- 人工バリアの健全性評価及び無線計測技術の適用性に関する研究開発
- 地質・地下水環境特性評価に関する研究
- 過去の地下水の化学的環境の推定に関する研究
- 岩石・地下水中の微生物特性・化学特性の評価
- 地下施設建設時の坑道掘削影響領域の調査技術の高度化 など

株式会社大林組

- マルチ光計測プローブによる岩盤挙動モニタリング

国外機関との研究協力

モンテリプロジェクト、Clay Club、DECOVALEX-2015、DECOVALEX-2023

- 鉄材料の腐食に関する原位置試験
- 粘土の摩擦特性に関する室内試験
- 連成解析技術開発 など

19

研究成果のプレス発表による社会の理解醸成

プレス発表

- 2017:「湧水対策が困難な地質構造を地上から把握する方法を開発」 **日刊工業新聞(10/18)**、**電気新聞(10/19)**、**NHK「ほっとニュース北海道」(10/24)**、**NHK「ニュース北海道645」**、**「北海道NEWS1」(11/5)**
- 2018:「地下深くの亀裂の連結性を地上から評価する方法を開発」 **電気新聞(5/25)**、**北海道新聞(6/20)**
- 2020:「地下水から遊離したメタンガスが大気への侵入を抑制」 **電気新聞(3/30)**
- 2020:「汎用的な装置で地下の岩石の割れ目をずらすことに世界で初めて成功」 **電気新聞**、**日刊工業新聞(9/16)**

地元幌延町の広報誌「ほろのべの窓」に毎月、研究トピックスを紹介

幌延町 広報誌「ほろのべの窓」

「地下の研究現場から」第1回「幌延深地層研究センター」

私たちが行っている研究について、広く理解いただくために幌延町広報誌「ほろのべの窓」の紙面をお借りして定期的な掲載をはじめ、ご寄稿者様に研究内容についてご紹介させていただきます。

幌延町トナカイ観光牧場の隣にある幌延深地層研究センターの所長の山口です。今回、「ほろのべの窓」に私たちが行っている様々な研究を紹介させて頂くことになりました。第1回目は、当センターの研究を紹介いたします。

当センターでは、平成13年から原子力発電で発生する放射性廃棄物を処分するために利用する技術の研究開発を行っています。当センターの敷地内に、高さタワー（約74m）と高さ333mのトンネルが並び入り込む地下350mまでの空間を掘って、地下深くにトンネルを掘り進める方法や地下の岩石や地下水を調べ、放射性廃棄物を埋め込む方法などの研究を行っています。

当センターには、今年から若手技術者の採用が開始されました。元副、副所長や若手技術者の多くが社会や世帯で生活していますので、若い行事や方法なども、お気軽にお問い合せいただけます。ご質問「ほろのべの窓」から、当センターの研究について「掘削」が中心となります。

当センターは、地下深くまで入ることのできる日本では珍しい貴重な施設です。新報コソワイムス対策（新北海道スタイル）に紹介した内容を基に、皆様のお越しをお待ちしています。

幌延深地層研究センターの地下施設

幌延深地層研究センターの所在地は、ゆめ地創館のタワーが目印になります。

ゆめ地創館のタワー（高さ約74m）からは、地下施設の地上部分を一望できます。

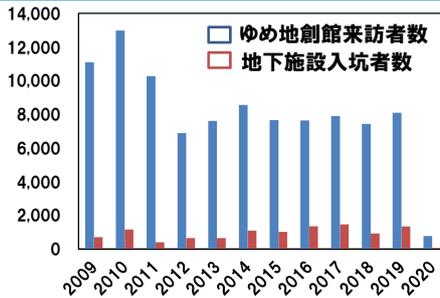
タワーの建設現場から見た研究員

毎年、国際会議で行っている地層の掘削が、長年の研究員が日々には、多くの掘削士の活躍を見ることが出来ます。

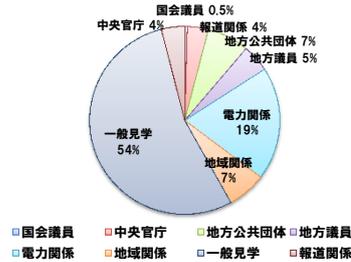
お問い合わせ先：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター
電話：0137-23-2222 <http://www.jaea.go.jp/04/hornobetsu/>
ゆめ地創館：電話：0137-23-2772 <http://www.jaea.go.jp/04/hornobetsu/yumechokukan/index.html>
広報課等交流事業課

ほろのべの窓 2020.7月号 8

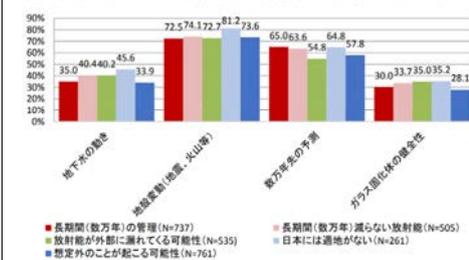
施設見学による社会の理解醸成



地下施設入坑見学者の内訳



地層処分を行う上での技術的な課題は何だと思いますか？（複数回答） （地層処分の安全性について「不安」「多少、不安」「わからない」と回答した方）



2020年7月時点の累計の見学者数は、約11万9千人。うち、地下施設入坑者は、約1万2千人。見学者は、一般見学者、電力業界関係者、地域関係、地方公共団体、地方・国会議員ほか。見学者の感想などは、コミュニケーションシートで集約し、質問の内容と回答をゆめ地創館に掲示。毎年、ウェブ上に公開：「幌延深地層研究センターゆめ地創館を活用したリスク・コミュニケーションについて」。

YouTubeで地下施設を視聴できます！（「深地層研究の現状 幌延深地層研究センター」、[「地下350mの世界を体験！幌延深地層研究センターVRツアー」](#)）

令和2年度以降の計画について

22

計画の要点

- ◆ 外部有識者の評価結果を踏まえ、実際の地質環境における人工バリアの適用性確認、処分概念オプションの実証に関する試験及び地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証を継続します。
- ◆ これらの研究課題については、令和2年度以降、第3期及び第4期中長期目標期間を目途に取り組みます。その上で、国内外の技術動向を踏まえて、地層処分の技術基盤の整備の完了が確認できれば、埋め戻しを行うことを具体的工程として示します。
- ◆ 本地下研究施設を、最先端の地層処分技術を実証するプラットフォーム(共通基盤)として、国内外の関係者で広く活用します。

23

令和2年度以降の研究開発

②処分概念オプションの実証

[概要] 定置・回収技術、閉鎖技術に関わる種々の処分概念オプションの工学的実現性を検討し、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計を支援する技術オプションを提示する。廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報を整理する。

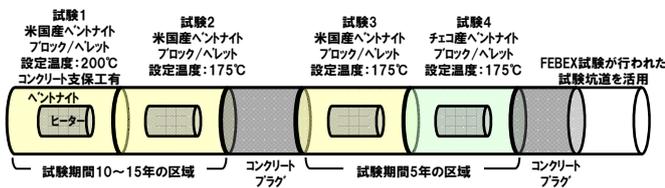
人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験

- 操業・回収技術などの技術オプションの実証、閉鎖技術の実証
- 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

緩衝材や埋め戻し材に応じた除去技術の技術オプションの整理、回収容易性を考慮した概念オプション提示、閉鎖技術(プラグなど)の実証を行う。先行ボーリングによる地質環境調査、工学的対策技術を考慮し、地下施設・人工バリアの設計評価技術を体系化する。



高温(100℃以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験



スイスGrimsetestサイトにおける国際プロジェクトHotBENT試験の情報収集を行い、確認された現象などについて整理する。

26

令和2年度以降の研究開発

③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

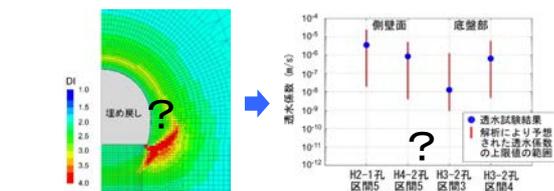
[概要] 地震・断層活動などの地殻変動に対する堆積岩の力学的・水理学的な緩衝能力を把握する。地下水の流れが非常に遅い領域の三次元分布の調査・評価手法の高度化を図り、立地選定や処分場設計を、より科学的・合理的に行うことができる技術を整備する。

水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

- 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握
- 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

水圧擾乱試験により、長期的な断層・割れ目の透水性を評価する手法を確認する。物理探査、ボーリング孔を利用した調査、解析により、地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化を図る。

地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験



緩衝材膨潤や埋め戻しに伴う掘削影響領域(EDZ)の力学・水理特性に基づき、坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測する手法を構築する。

27



付録6 発表資料「研究成果トピックス(人工バリア性能確認試験に関する知見)」



深地層の研究施設計画に関する報告会2020
資料3-2(2020.12.1)

深地層の研究施設計画に関する報告会2020

4. 幌延深地層研究計画

**2) 研究成果トピックス
(人工バリア性能確認試験に関する知見)**

2020年12月1日

**国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門
幌延深地層研究センター 深地層研究部**

大野 宏和

報告の内容

- 研究の背景・目標
- 実施内容及び研究成果の概要
 1. 実施内容(全体)
 2. 設計手法の適用性確認
 3. 製作・施工
 4. データ計測、連成解析
- 研究成果の活用と今後の課題

研究の背景・目標

研究の背景・目標

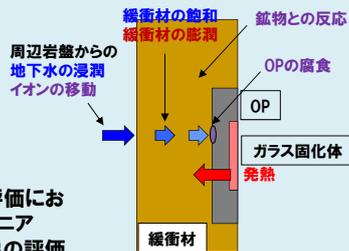
背景

➢ 地層処分における人工バリア定置後に想定される主な現象

- ・ガラス固化体からの発熱、周辺岩盤からの地下水の浸潤
- ・地下水浸潤による緩衝材の飽和と膨潤応力の発生
- ・地下水浸潤によるオーバーバック(OP)の腐食
- ・緩衝材間隙水と鉱物との反応など

➢ これらの現象は相互に影響し合う複合的な連成現象となる
(THMC連成現象:熱-水-力学-化学連成現象)

- このようなニアフィールドの過渡期状態変遷の評価は、安全評価における初期状態設定やオーバーバックの寿命評価に必要となるニアフィールドの環境条件の設定上重要となり、それらの連成現象の評価手法の整備(解析ツールの整備)が必要



THMC連成現象の一例

- これまでに人工バリア等の設計要件、設計上考慮すべき特性やパラメータ、考え方などは整理されているものの、深地層の研究施設で得られた地質環境データに基づく設計手法の適用性を確認することが課題

目標

- ⇒実規模、地下環境下で計測したデータを用いたTHMC連成現象の評価手法の整備
 - ⇒人工バリアや閉鎖技術の設計手法、製作・施工性の適用性確認
- 人工バリア性能確認試験で確認**

実施内容及び研究成果の概要

1. 実施内容(全体)

4

実施内容

実施内容

【設計】

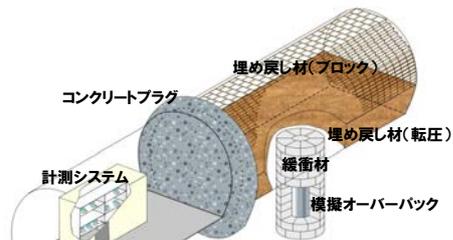
- 幌延を事例とした**設計手法の提示**
 - ✓人工バリア(緩衝材、オーバーバック)の設計手法の適用性の確認
 - ✓閉鎖技術(埋め戻し材、力学プラグ)に関する設計手法の適用性確認

【製作・施工】

- 「第2次取りまとめ」で示した処分概念が**実際の地下環境で構築できることの実証**
 - ✓処分孔(模擬)の掘削方法の例示
 - ✓緩衝材ブロックの定置方法の例示
 - ✓埋め戻し材施工方法の例示
 - ✓プラグ施工方法の例示、など

【データ計測と連成解析】

- THMC連成現象を評価するための**検証データの取得**
 - ✓人工バリア、埋め戻し材中に設置したセンサーによるデータ計測
 - ✓計測データを用いた連成解析手法の整備
 - ✓モニタリング手法の適用性確認



人工バリア性能確認試験イメージ図

人工バリア性能確認試験は、第2次取りまとめに示された軟岩系岩盤における処分孔設置方式を対象として、実物大の模擬人工バリアを設置した上で、試験坑道の一部を埋め戻し、THMC連成現象に関する計測データを取得する試験

5

実施内容及び研究成果の概要

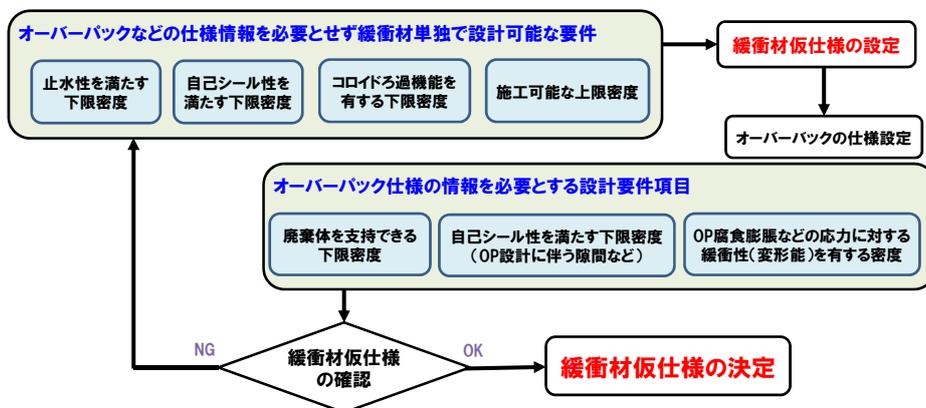
2. 設計手法の適用性確認

- ・ 人工バリア(緩衝材、オーバーバック)
- ・ 閉鎖技術(埋め戻し材、力学プラグ)

6

設計：緩衝材の設計手法の適用性の確認

- ・ これまでに構築された緩衝材の設計フローをもとに、人工バリア性能確認試験を実施する深度350mの地質環境条件に基づいて試設計を行い、設計事例の妥当性の再検証を実施

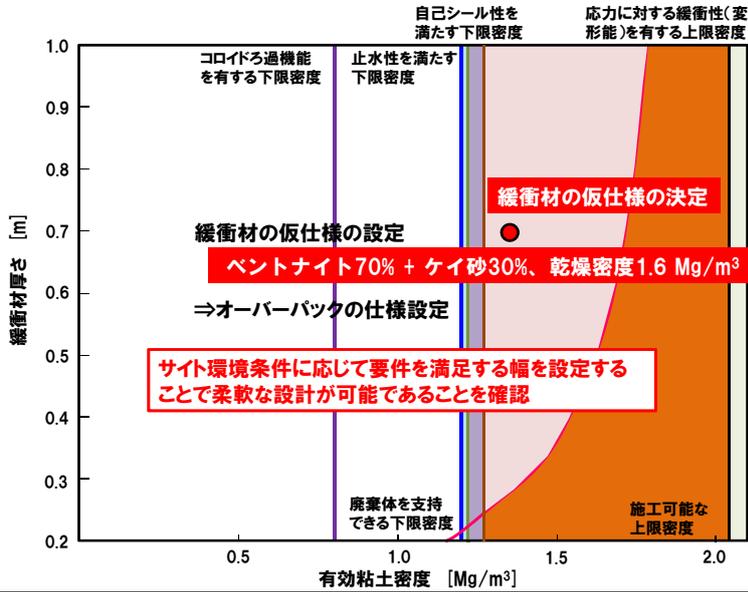


緩衝材の設計フロー図

7

設計：緩衝材の設計手法の適用性の確認

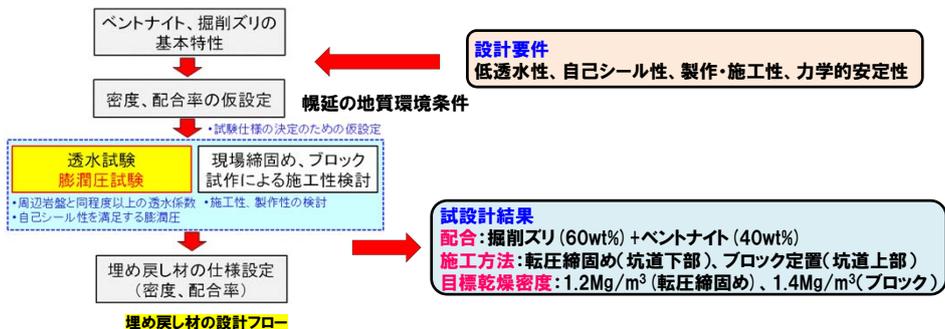
深度350mの地質環境条件に基づく緩衝材(ブロック方式)の試設計結果



設計：埋め戻し材の設計手法の適用性確認

埋め戻し材仕様の検討

- 地下施設の処分概念に影響を与えないように坑道を処置しておくことが必要
- 掘削スリは材料調達のしやすさや経済性の観点から埋め戻し材として利用することが有効的
- 幌延の掘削スリにペントナイトを混合した材料について、設計要件を満たすように埋め戻し材の試設計を実施



埋め戻し材の具体的な設計フローを構築し、幌延の地質環境条件を一例とした試設計を行うことにより、設計フローの適用性を確認

実施内容及び研究成果の概要

3. 製作・施工

- 処分孔(模擬)の掘削方法の例示
- 緩衝材ブロックの定置方法の例示
- 埋め戻し材施工方法の例示
- プラグ施工方法の例示

10

施工: 処分孔(模擬)の掘削方法の例示

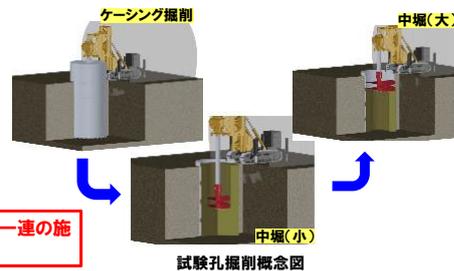
処分孔(模擬)の掘削方法の例示

- 竖置き方式を想定した直径2.4m、深さ4.2mの大口径の処分孔を掘削するために、外掘りケーシング工法と中掘りオーガー工法を同一のマシンで施工可能な専用の掘削機械(大口径掘削機)を開発

開発のコンセプト

- ✓ 狭隘な地下空間において一貫施工が可能な機械設備
- ✓ 多数の処分孔掘削の連続施工が可能な高い掘削能率と機動性
- ✓ より安全でシンプルな施工が可能

処分孔の掘削からオーバーバック設置前の段階まで、一連の施工を当該機械のみで適用できることを確認



大口径掘削機



外堀ケーシング掘削状況



中堀オーガー掘削状況

11

試験孔掘削の様子（動画）



12

製作・施工：緩衝材ブロックの製作と定置方法の例示

緩衝材ブロックの製作

- 製作は施工時の隙間を考慮し、試設計結果(膨潤時乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$)を満たすように乾燥密度 $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$ のブロックを製作
- 緩衝材ブロックは混合土を金型に投入し圧縮成型機械により静的に圧縮成型



①材料投入



②圧縮成型

緩衝材の定置

- 原子力環境整備促進・資金管理センター(原環センター)により開発された緩衝材定置技術である真空把持装置について地下での適用性を確認

緩衝材の定置
(真空把持)



原位置においても真空把持装置が適用可能であることを確認

品質管理

- ブロックごとのばらつきを少なくし、設計仕様を満足するか確認するために成型前、成型時、成型後の各々の段階における管理項目に対して管理基準を設定

設定した
管理項目

成型前	成型時	成型後
含水比、メチレンブルー吸着量	材料投入量、成型圧力、圧縮保持時間	寸法、質量、外観

成型品ごとのばらつきが少なく、設計仕様を満たす緩衝材ブロックが製作可能なことを確認

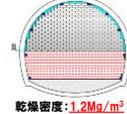
13

製作・施工:埋め戻し材の製作と施工方法の例示

埋め戻し材混合土とブロックの製作

- 混合土(粒径20mm以下の掘削スリ:ベントナイト=60:40wt%)を製作
- 転圧締固め部は事前確認試験結果より目標乾燥密度を $1.2\text{Mg}/\text{m}^3$ に設定
- 埋め戻し材ブロックは混合土を金型に投入し圧縮成型機械により静的に圧縮成型
- 埋め戻し材ブロックは施工時の隙間や剛性を考慮し乾燥密度は $1.4\text{Mg}/\text{m}^3$ で製作

乾燥密度: $1.4\text{Mg}/\text{m}^3$



乾燥密度: $1.2\text{Mg}/\text{m}^3$
埋め戻しイメージ図

埋め戻し材の施工

- 埋め戻し材下部はハンドガイドローラーにより、設定した目標乾燥密度をクリアするように転圧締固め施工
- 埋め戻し材上部は目標乾燥密度をクリアするように製作したブロックを設置



品質管理

- 埋め戻し材ブロックは緩衝材ブロックと同様、成型前、成型時、成型後の各々の段階における管理項目に対して管理基準を設定
- 転圧締固め部は転圧時に巻き出し厚さと仕上がり厚さの測定を行い、転圧後に原位置密度測定(砂置換法、RI法、熱伝導率法、レベル測量)を実施



いずれの方法においても、乾燥密度測定を実施した層において、転圧締固めの目標乾燥密度 $1.2\text{Mg}/\text{m}^3$ 以上を満たしていることを確認、RI法が比較的簡便かつ適用性の高い方法であることを確認

14

実施内容及び研究成果の概要

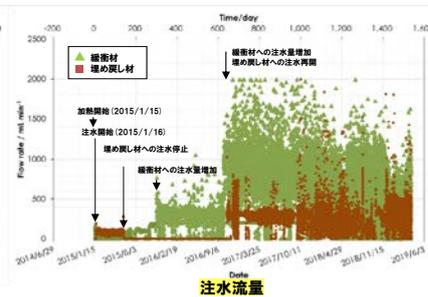
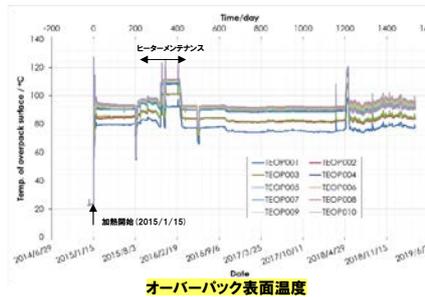
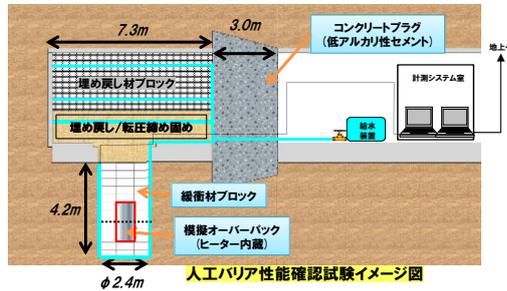
4. データ計測、連成解析

15

データ計測: 試験条件と計測項目

試験条件

- 廃棄体からの発熱を模擬するために模擬OP内部に設置したヒータにより加熱(基本表面温度: 約90℃)
- 再冠水後の地下水の浸潤を模擬するために緩衝材と埋め戻し材外周部から人工注水
- 境界条件となる加熱温度と注水流量を変化させ、各種連成データを取得

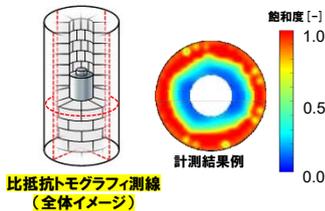


16

データ計測: モニタリング手法の適用性確認

人工バリア性能確認試験

- センサーの選定に際しては国内外の事例を参考に基本的に5年以上の使用実績があるものを選定、一部のセンサーは原位置における適用性を確認するために新規にセンサーを開発
- 原位置における無線伝送技術の適用性を確認するために、緩衝材および埋め戻し材中に無線センサーを設置(原環センターとの共同研究)
- 計測データを分析し、不良と判断される計測データを抽出
 - ①故障やケーブルの断線等の物理的要因で不良と判断されるデータ
 - ②センサーの仕様や特徴を考慮したうえで不良と判断されるデータ
 - ③加熱、注水などの外的要因に対する応答を勘案して、同種のセンサー間の比較等により不良と判断されるデータ



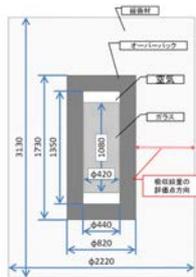
計測データ分析の結果、既存センサーについては約8割のセンサーが稼働していることを確認
 新規に開発した光学式pH計や温度補償型のFDR-V(水分計)については、センサーの材質や設置方法に改良が必要であることを確認
 比抵抗トモグラフィによる水分量測定については、原位置においても概ね緩衝材中の水分量計測が可能であることを確認
 計測データの品質向上や測定不可となった要因やその対策については、解体調査時にセンサーの詳細確認や校正作業を実施することが必要

17

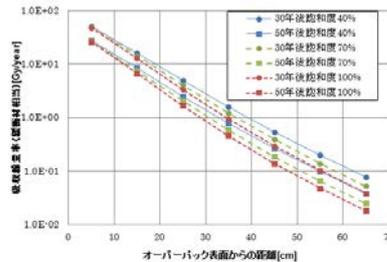
データ計測：モニタリング手法の適用性確認

モニタリング機器の放射線影響

- ・ ガラス固化体の貯蔵期間および緩衝材の飽和度の変化を考慮した解析により緩衝材中の吸収線量を算出
- ・ モニタリング機器で使用されている材料の耐放射線性に関する文献調査の結果をもとに、解析により求めた吸収線量との比較からその影響を定性的に検討



解析モデル



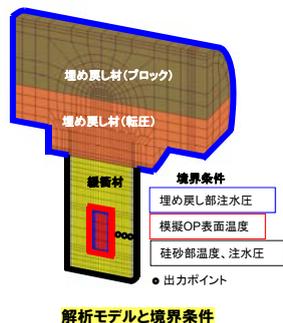
解析により求めた吸収線量

吸収線量解析と耐放射線性調査の結果から、一般的なモニタリング機器の使用寿命に影響を及ぼす線量ではないことを確認
電子部品を内蔵する機器については、信頼できるデータ取得の可否について検証するため、照射条件下での作動試験を行い、計測データの妥当性について評価することが必要

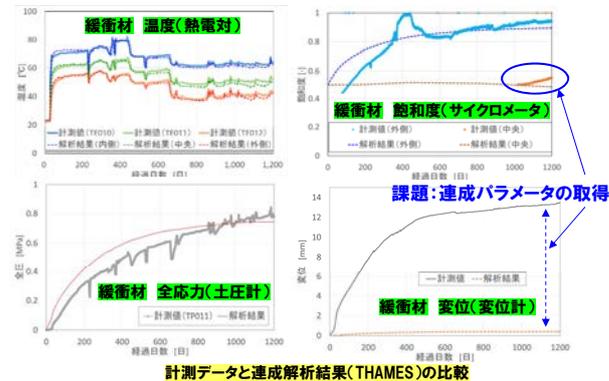
18

連成解析：解析モデルと計測データとの比較

- ・ THM連成解析コードTHAMESを用いて人工バリア性能確認試験の再現解析を実施
- ・ THMC連成解析コードCouplysを用いて、化学的な環境の変化を定量的に示す事例解析を実施
- ・ 緩衝材中の空気の動きに着目し、気液二相流THM連成解析を実施(Code-Bright)
- ・ 検討結果から課題の抽出を行い、連成パラメータの取得や解析コードの改良を実施



解析モデルと境界条件



計測データと連成解析結果(THAMES)の比較

THAMESの化学モデルの改良や連成パラメータの取得により再現性の向上を確認
気液二相流THM連成解析により緩衝材中の気相が水分移動だけではなく化学現象(応力や変位)にも影響を及ぼす可能性があることを確認
連成評価手法のさらなる高度化のためには、減熱時のデータ取得、計測データとの比較検証により抽出された課題(連成パラメータや気相の影響)の継続検討、他解析コードとの比較検証が必要

19

研究成果の活用と今後の課題

研究成果の活用(設計・製作・施工)

研究成果の概要



人工バリア、閉鎖技術の設計・製作・品質管理



閉鎖技術の施工
コンクリートプラグ 埋め戻し材(ブロック)



閉鎖技術の施工と品質管理
埋め戻し材(転圧)
縦衝材
模擬オーバーバック



処分孔掘削技術



人工バリアの定置技術

研究成果の活用

設計手法の適用性確認

- これまでに構築した人工バリアの設計フローに加え、新たに埋め戻し材に関する個別設計フローを構築し、その適用性を確認、人工バリア等の合理化設計技術に寄与

製作・施工及び品質管理手法の適用性確認

- 新たに処分孔掘削技術の開発を含め、製作・施工技術や品質管理方法の適用性を例示、精密調査の段階(地下調査施設での調査)における安全性・合理性などを考慮した手順や工法の選定に寄与

今後の課題(データ計測・連成解析)

今後の課題

連成解析手法の高度化

- ガラス固化体からの発熱量の低下を模擬した原位置試験や解体調査による検証データの拡充、抽出された課題(連成パラメータの取得、気相の影響など)の継続検討、国際プロジェクトを通じた他解析コードとの比較検討を行うことで連成解析コードのさらなる高度化を目指す

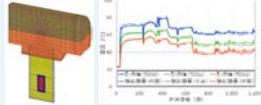
モニタリング手法の適用性確認

- 計測データの妥当性やセンサー長期耐用性等については、解体調査時に詳細を検証することで計測データの品質向上やモニタリング手法の高度化に資する情報の整理を目指す

今後の予定

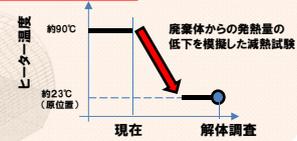
連成解析手法の高度化

- ・ 連成パラメータの取得、気相の影響を確認するための室内、原位置試験
- ・ 国際プロジェクトによる他解析コードとの比較検討
DECOVALEX2023 (2020~2023) Task D
「Full-scale Engineered Barrier System Experiment at Horonobe URL」



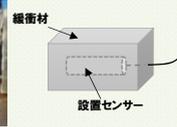
計測システム

減熱試験の実施



解体調査(サンプリング)

- ・ 計測データの校正、センサーの詳細確認
- ・ 人工バリア、埋め戻し材、岩盤、コンクリートやそれらの界面の詳細確認



ご清聴ありがとうございました。

付録7 発表資料「共同研究成果トピックス(原子力環境整備促進・資金管理センター)」

深地層の研究施設計画に関する報告会2020
資料3-3(2020.12.1)

深地層の研究施設計画に関する報告会 2020

4. 幌延深地層研究計画における
必須の課題成果取りまとめと今後の計画

3) 共同研究 成果トピックス (原環センター)

2020年12月1日

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター(原環センター)
地層処分工学技術研究開発部
部長 江守 稔

RWMC

ご報告内容

1. はじめに (地層処分事業における工学技術の段階的な開発・整備)
2. 工学技術に関する資源エネルギー庁委託事業としての課題設定 (マイルストーン)
3. 幌延深地層研究計画を踏まえた原環センターの取組の概要
4. 幌延深地層研究センターにおける原環センターの取組の成果
5. 地下研究施設を活用することで得られる成果と効果
6. 地層処分事業における地下研究施設の役割と期待
7. まとめ
8. おわりに

RWMC

1

1. はじめに（地層処分手業における工学技術の段階的な開発・整備）

①人工バリア等の地下構造物の品質・性能の評価

- 【安全機能】⇒【要件】⇒【仕様】へと展開
- 人工バリアのみならず、他の地下構成要素にも要件や仕様を設定

⇒ 個々の構造物が、「期待する時間スケール」において「期待する性能」が発揮されることを評価

②建設・操業（施工）技術の開発

- 設計された処分場を構築（建設・操業・閉鎖）するための技術の開発・整備
- 候補サイトの多様な地下環境への柔軟性、仕様を満たすための技術・装置に応じた製造・施工プロセス管理や品質保証などへの留意

⇒ 多様な技術オプションを整備し、将来の実施主体による技術選択の柔軟性を確保

↓

段階的な処分場開発のプロセスにおいて、精緻化する地質環境情報や安全評価との連携・相互フィードバックを、**反復的かつ段階的に進める**

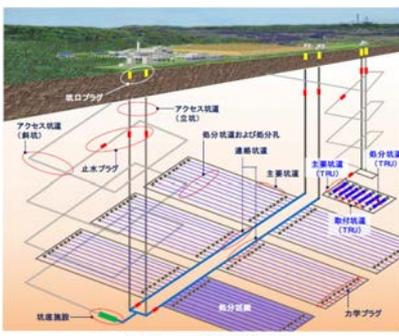


図 4.2-4 地下施設のイメージ

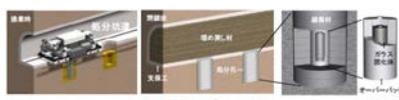
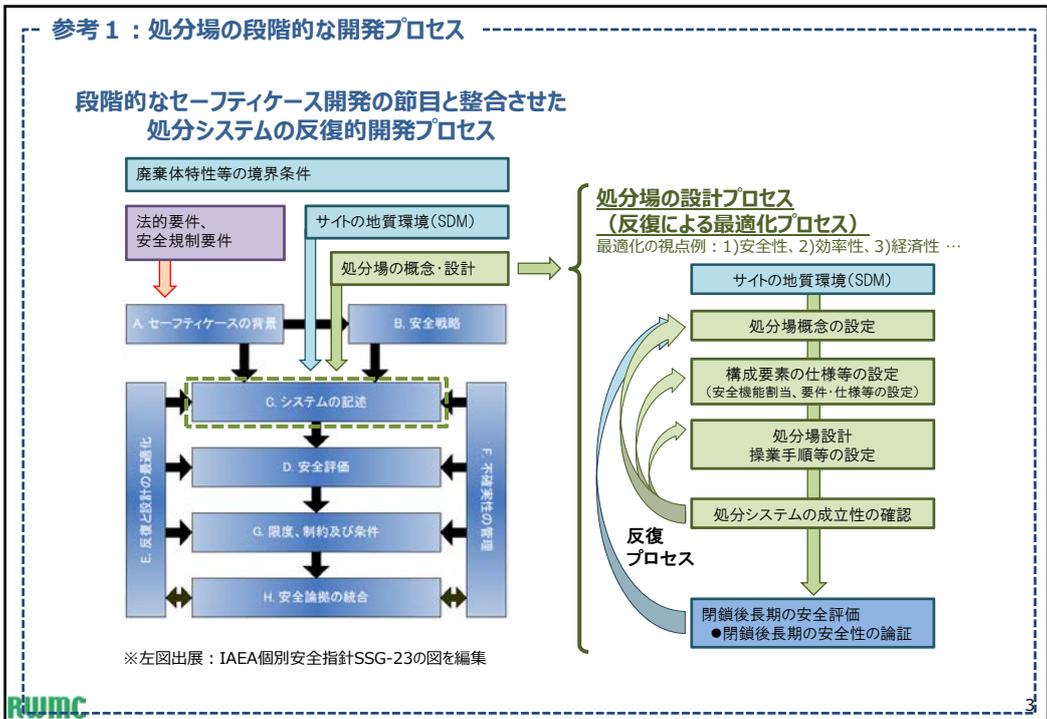


図 4.2-2 高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリア

【図出典】 NUMO「包括的技術報告書（レビュー版）」（2018）より

RWMC 2



参考 2 : 段階的な開発整備の具体例 ① -----

製造・施工品質の観点からみた地下構造物（人工バリア）の品質・性能の評価

ステップ 1 : 人工バリアの仕様設定

- オーバーバック
⇒ 炭素鋼、板厚190mm（母材の腐食速度、遮へい、構造強度）
- 緩衝材
⇒ ベントナイト70%/ケイ砂30%（乾燥重量比）、厚さ70cm、乾燥密度1.6Mg/m³（低透水性、力学特性、製作性、など）

ステップ 2 : 適用する製造・施工技術の選定（見直し）

ステップ 3 : 実際の製造・施工に伴う品質や性能への影響の把握

- オーバーバック
⇒ 溶接部は母材と同等の性能を有しているか？
- 緩衝材
⇒ 初期の密度分布、膨潤挙動や密度差の解消は？
残存するすき間の影響、湧水による流出の可能性は？

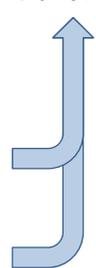
ステップ 2 或いはステップ 1 へ
フィードバック

ステップ3-1 : 実験室レベルでの試験

- 個別の現象論に展開 ⇒ 試験系に落として評価
- 単純化した試験環境、精緻で定量的な試験、試験点数多

ステップ3-2 : 実際の地下環境での試験

- 実環境での現象把握、室内試験の妥当性検証



4

参考 2 : 段階的な開発整備の具体例 ② -----

建設・操業（施工）技術の開発 ～処分孔竖置き方式に対する回収技術（緩衝材除去技術）の開発例～

ステップ 1 : 作業概念の検討 ⇒ 個別の要素技術の抽出

- 必要となる要素技術の検討・抽出：塩水噴射、スラリー吸引、塩水リユース…
- 回収作業ステップの検討：回収・搬出（オーバーバック把持・引上げ・走行）…
- 付帯技術：遠隔監視・遠隔操作…



ステップ 2 : 要素技術ごとの検討・開発



塩水の適用性確認試験



塩水濃度噴射方法の検討



小規模の試験様々な条件で試行



実規模大の試験妥当性検証

ステップ 3 : 要素技術の結合、システム化



噴射・吸引設備



塩水リユース設備



遠隔操作設備

ステップ 4 : 技術実証

ステップ4-1 : 地上での実証試験（総合動作確認）



模擬坑道



模擬処分孔



緩衝材の除去試験

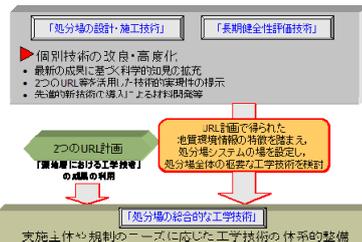
➡ ステップ4-2 : 地下での実証試験

5

2. 工学技術に関する資源エネルギー庁委託事業としての課題設定（マイルストーン）

- **第2次取りまとめ（1999年）において地層処分の工学技術として以下を取りまとめ**※1
 - 人工バリアおよび処分施設の基本概念・設計
 - 人工バリアの長期健全性評価
 - 処分場の建設・操業・閉鎖に関する作業概要（作業内容・手順、工法・装置などの概要）
- **上記を踏まえ平成17年に設置した地層処分基盤研究開発調整会議（平成30年より「地層処分研究開発調整会議」）において、基盤研究開発に関する全体計画を取りまとめ**※2
 - 2000年以降の段階的な研究開発目標を設定（概ね5か年を1フェーズとする3段階）
 - 段階的な取組のなかで**実際の地下環境への適用性確認も視野**
 - 工学技術分野に関して、3つの大分類の中で細目課題を設定して、開発目標や開発計画を展開（細目課題として「回収技術」や「モニタリング技術」にも言及）
 - 処分場の総合的な工学技術
 - 処分場の設計・施工技術
 - 長期健全性評価技術

分類		分類目標	
フェーズ1	フェーズ2以降	フェーズ2	フェーズ3
-	(1) 処分場の総合的な工学技術	実際の地質環境への適用性を考慮した柔軟性のある工学技術の体系化	実際の地質環境への適用性が確認された工学技術全体の体系化
(1) 工学技術	(2) 処分場の設計・施工技術	設計・建設技術の実際の地質環境への適用性確認と操業・閉鎖技術の整備	処分場の設計・施工技術の実際の地質環境への総合的な適用性確認
(2) 長期健全性	(3) 長期健全性評価技術	実際の地質環境へ適用可能な長期健全性評価モデルの整備	実際の地質環境に対する長期健全性評価モデルの総合的な適用性確認



※1：核燃料サイクル開発機構(1999)、“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ -”
 ※2：資源エネルギー庁ほか(2006)、“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画”



○ **資源エネルギー庁では、上記計画に沿って個別課題に関する基盤研究を委託事業として展開**



原環センターでは、特に『製造・施工技術オプションの整備』および『人工バリアの健全性評価技術の整備』の観点から、以下の課題に対応

- **操業技術オプションの整備・技術的信頼性の向上に向けた、**
 - **製造・施工技術オプションの整備**
 - 搬送・定置などの施工関連技術（遠隔操作技術を含む）
 - 緩衝材の製造・施工関連技術
 - オーバーバック溶接・検査技術（溶接部の長期健全性評価を含む）
 - プレハブ式人工バリアモジュール（PEM）の製作技術、など
 - **上記に係る品質管理技術の開発**
- **回収技術やモニタリング技術の実証的研究、 など**

※資源エネルギー庁委託事業としての具体的な研究内容や成果については、本資料の最後「おわりに」に整理している各事業の成果報告書を参照されたい。



3. 幌延深地層研究計画を踏まえた原環センターの取組の概要

- 日本原子力研究開発機構（JAEA）と原環センターは、「放射性廃棄物の処理、処分等の研究開発に関する協力協定」を2005年（平成17年）に締結
- 原環センターはJAEAとの協力協定のもと、以下の整合性に留意しつつ、資源エネルギー庁委託事業として幌延深地層研究センターで工学技術分野の研究開発を展開
 - 日本原子力研究開発機構（JAEA）の改革計画に基づく「地層処分技術に関する研究開発」報告書（平成26年）に示された**必須の課題**（下ボックス参照）
 - 資源エネルギー庁委託事業として展開される工学技術分野の基盤研究開発
 - ・地層処分基盤研究開発調整会議全体計画（平成25～29年度）
 - ・地層処分研究開発に関する全体計画（平成30～令和4年度）

参考：幌延深地層研究計画として示された必須の課題のうち、工学技術に関連する2つの課題

- 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認（人工バリア性能確認試験、オーバーバック腐食試験、物質移行試験）
 - 平成26年度から深度350m調査坑道で実施している人工バリア性能確認試験、オーバーバック腐食試験、物質移行試験を通して、実際の地質環境において、人工バリアや周辺岩盤中での熱-水-応力-化学連成挙動や物質移行現象などを計測・評価する技術の適用性を確認し、「精密調査後半」に必要な実証試験の技術基盤を確立する。
- 処分概念オプションの実証（処分孔等の湧水対策・支保技術などの実証試験、人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験、高温（100℃以上）などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験）
 - 人工バリア設置環境の深度依存性を考慮し、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証し、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計を行うことを支援する技術オプションを提供する。

RWMC

幌延深地層研究センター350m調査坑道における原環センターの取組概況

- JAEAと以下の協力の枠組みを活用して研究開発を展開
- 両機関で締結している協力協定（JAEA幌延深地層研究センターとの共同研究契約）
 - 資源エネルギー庁委託事業の共同受注

主な研究テーマ

- (1) 人工バリア等の健全性評価および無線計測技術の適用性に関する研究
- (2) 搬送定置・回収技術（操業技術）の実証的な研究

試験坑道 5

試験坑道 2

試験坑道 4

換気立坑

東立坑

西立坑

幌延URL地下350m坑道レイアウト

オーバーバック溶接部の腐食試験(2013～2017)

地下環境で回収技術の実証試験：横置き・PEM方式（2015～）

小型伝送装置 人工バリア性能確認試験への適用：7体設置（2014～）

緩衝材の流出試験(2014～)

RWMC

4. 幌延深地層研究センターにおける原環センターの取組の成果

(1) 人工バリア等の健全性評価および無線計測技術の適用性に関する研究の成果

⇒ 室内試験で得られた知見等の妥当性の検証、実環境で実際に起こる挙動の把握

オーバーバック溶接部の腐食試験

試験坑道 5、2015~2017



室内： ガラスセル
単純化した溶液 (SSW、SFW)
数センチ四方の小型試験片
試験片点数・条件は多
地下： 岩盤に掘削した試験孔
孔壁からの湧水
実物のオーバーバックの長さ
試験点数 1

得られた成果

- 多重バリア（オーバーバック-緩衝材-岩盤）を再現した環境での腐食現象は、室内試験で対象とした現象で網羅されることを把握。
- 試験体の大きさ、埋設初期の不均一な環境の影響を把握。

⇒ 室内の精緻な試験でデータ拡充



緩衝材の流出試験

試験坑道 5、2014~



室内： アクリルセル
単純化した溶液 (NaCl、など)
十センチ程度の小型容器
装置底部から上への水の流れ
試験点数・条件は多
地下： 岩盤に掘削した試験孔
原位置地下水 / 孔壁からの湧水
試験点数 少

得られた成果

- 設置き方式における緩衝材と周辺境界面で、孔壁からの湧水環境によって流出現象が発生することを確認。
- 上記懸念への工学的対策の有効性の見通しが得られたつある。

⇒ 流出防止の工学的対策の効果の確認に向けた原位置試験を継続中

無線伝送技術

試験坑道 4、2015~

- 既存の多チャンネル送信アンテナ設置例
データ送信器 直径27cm×40cm



出典：坂田電機Wirelessカタログ

- 人工バリア内に設置のため小型化

直径60cm×24cm
設計電池寿命10年



得られた成果

- 土木分野で利用されている無線伝送技術を高度化(小型化) ⇒ 実用化レベル。
- JAEAで実施中に人工バリア性能確認試験に適用中。

⇒ ケーブルレスでの計測を継続中

(2) 搬送定置・回収技術（操業技術）の実証的な研究の成果

① 研究課題としての位置付け

○ 資源エネルギー庁委託事業としての位置付け

- 回収技術の実証的整備（改定された特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針への対応）
- 要求された実証対象概念：処分坑道横置き・PEM方式



※PEM: Prefabricated Engineered barrier system Module (プレハブ式人工バリアモジュール)

○ 回収作業ステップの予備検討

⇒ 通常の操業作業手順（PEMの搬送・定置）の『逆手順』による回収作業を想定



○ 操業技術（搬送・定置）を包含した回収技術の実証的整備に向けて研究計画を策定

⇒ 処分技術の信頼性向上 廃棄体定置工程における施工品質の確認も計画
※そもそも回収技術は、通常操業時における異常時の復旧作業（PEMの定置し直しなど）等にも利用される技術



○ 幌延深地層研究計画として示された必須の課題と整合

⇒ 幌延深地層研究センターを原位置技術実証の場として提案



②技術課題の設定

1) 現時点で有望とされる2つの定置概念に対する操業技術・回収技術の実証的整備

⇒ 処分坑道横置き・PEM方式を対象※として適用技術を実証する

※ 縦置き方式に対応した回収技術（緩衝材除去技術）は実規模スケールでの地上での実証試験を平成26年度に完了済み。

2) 地下環境での操業技術の実証的整備

⇒ 実際の地下環境で地層処分に係る操業・回収が実現可能であることを示す

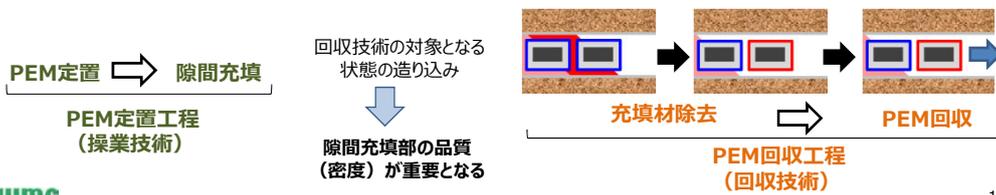
3) 操業・回収技術の適用性評価に資するデータの取得

⇒ 現段階での歩掛りや効率、技術の選定や適用性の更なる向上に資する試験データを取得・整理し、技術選択の根拠情報として整備する



処分坑道横置き・PEM方式の回収作業ステップの検討を経て、本試験の範囲・対象技術を設定

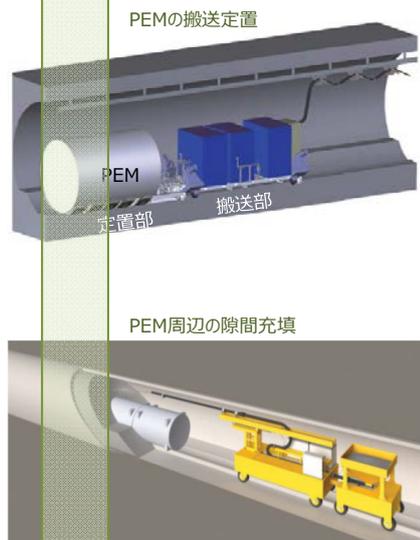
- PEMは健全で把持することが可能⇒PEMごと回収
- 坑口側から1つずつ、定置作業の逆手順で回収



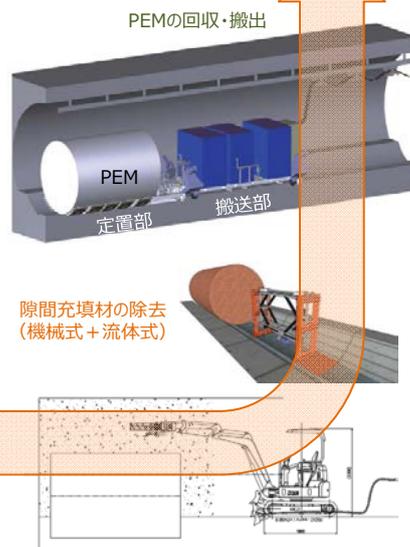
RWMC

想定した通常の操業作業手順と回収作業手順および中核技術

通常の操業作業手順



回収作業手順



回収実施判断

RWMC

③地下での技術実証に向けた研究開発ステップ

～隙間充填材の除去技術（ウォータージェット）の例～

事前の技術検討

- ①粘土系材料除去技術の調査
⇒技術選定 ⇒ 本事業での除去対象への適用性検討
- ②充填材除去工程の検討
⇒装置の概念設計 ⇒ 必要な装置、技術、能力の整理
- ③中核技術の抽出
⇒ウォータージェットの選択、切削物の吸引方法の検討

地上での要素試験（品質や施工条件の確認・設定）

- ④要素技術開発（新規製作／汎用機の導入など）
- ⑤汎用機での要素試験（切削性の確認、ノズル形状の選択など）
- ⑥地下実証試験用装置の検討

地下での実証試験（地下実環境での技術実証）

- ⑦実証試験用装置の搬入・セッティング
- ⑧地下での実証試験の実施
- ⑨結果の評価（作業性や歩掛り等に関する情報の取得）



- 更なる技術の高度化開発へのフィードバック
- 実施主体による概念設計・技術選択への反映



④得られた成果の抜粋要約

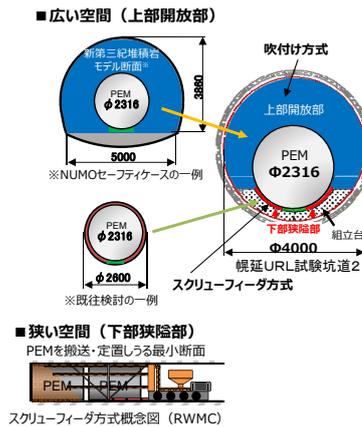
	隙間充填技術	充填材除去技術	搬送・定置／回収技術
地上施設での試験	<p>スクレー方式（純ベントナイトベレット充填） 吹付け方式（ベントナイト混合土）</p> <p>例）スクレーコンベア方式の充填技術 ・充填材の検討、充填技術の要素試験 ・充填装置の設計・製作、地上での確認試験</p>  <p>充填条件と充填部の密度、密度のバラつきの関係 ⇒地下での試験時の充填条件の設定</p>	<p>PEM近傍 流体的除去（ウォータージェット） 坑道周辺 機械的除去（オーガー）</p> <p>例）流体的除去（ウォータージェット：WJ） ・充填材に対する高圧水流の効果の調査 ・WJノズルの種類と除去の状況の確認 ・除去装置の設計・製作、地上での確認試験</p>  <p>⇒除去に使用するノズルの選定方法 除去箇所に応じたWJによる除去条件の設定</p>	<p>エアベアリング方式の定置装置</p> <p>・PEM搬送・定置装置の設計・製作 ・重量、走行路面性状がエアベアリングの動作 及ぼす影響の確認試験、など</p>  <p>⇒充填材除去後のコンクリート走行面向けの エアベアリングの運転パラメータの設定</p>
地下施設での試験	<p>・地上で設定した条件での充填試験</p> <p>充填材重量と充填部の体積より、所定の密度 1.37Mg/m³を達成したことを確認</p>  <p>⇒充填材、充填装置、充填プロセスで充填部の品質を管理する技術を整備</p>	<p>・地上で設定した条件での除去試験</p> <p>WJによる隙間充填の除去より、PEM - 坑道間の縁切り、回収装置の動作環境の構築を確認</p>  <p>⇒回収の要であるPEMを損傷させずに充填材を除去する技術を整備</p>	<p>・実打設面での回収・定置試験</p> <p>原位置打設コンクリート面における回収工程へのエアベアリングの適用性を確認</p>  <p>⇒狭隘空間でも大重量廃棄体を搬送定置・回収が可能な技術オプション</p>



動画：幌延深地層研究センター350m調査坑道（試験坑道2）における搬送定置・回収技術（操業技術）の実証的研究の成果



★地下研での研究ならではの工夫のポイントも



RWMC

16

5. 地下研究施設を活用することで得られる成果と効果

(1) 工学技術の成立性に関する技術的根拠の整備

○段階的な工学技術の開発・整備プロセス

- 実環境での現象理解、室内試験の妥当性検証
- 実環境での操業技術の適用性確認

○地上での試験／地下での試験、それぞれの特徴を生かした試験の組み合わせ

- 地上：試験環境を把握・制御し易い一方で、完全なる地下環境の再現は困難
- 地下：全ての環境条件の把握は困難だが、環境の不確実性を含めた評価は可能

○ジェネリックな地下研究施設での試験

幌延深地層研究センターでの試験で取得した知見、整備した技術

⇒ 今後の更なる信頼性向上に向けて更新・改良される処分概念・設計、ならびに候補サイトの地質環境条件に対して、柔軟な対応に資するように成果を取りまとめて提示することが重要

RWMC

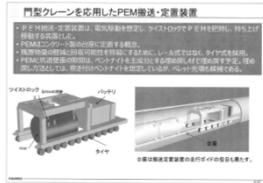
17

(2) 説明性の向上

- 地層処分事業の技術開発状況の説明において、ファクトとして情報提供することが可能。
⇒ 細かな前提条件説明の省略、説明資料の充実、など

机上検討やシミュレーション

- Q. 本当に出来るの？
- A. 実現可能性が評価されています (多くの課題が残されている…)



実規模スケールでの実施

- Q. 本当に出来るの？
- A. 実際にやった例があります。
- Q. 地下ではどうなの？
- A. (色々な説明を交えて) 実現可能性が評価されています。



地下での試験

- Q. 本当に地下で出来るの？
- A. 実際にやった例があります。

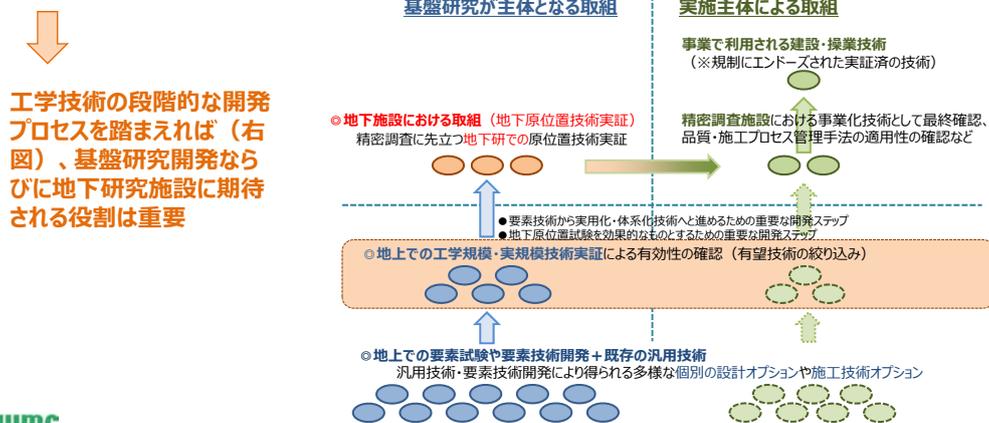


文章 ⇒ 模式図 (CG) ⇒ 試験写真 ⇒ 現場写真 ⇒ 動画

6. 地層処分事業における地下研究施設の役割と期待

(1) 地下研究施設の役割

- 実施主体による3段階の調査への反映 (精密調査に先立つ事前の体系技術の整備・実証)
⇒ 実施主体による精密調査施設での限られた活動期間/限られた地下空間
精密調査施設での重要な工学的活動 (品質管理を含む建設・操業技術の適用性の提示)
- 多様な評価項目で合理的に進める『設計および建設・施工技術の最適化』への寄与
⇒ 柔軟かつ効果的・合理的な最適化 (適切な設計・技術オプションの選択) の実施は、多様な設計オプションおよび多様な建設・操業技術オプションを持つことに他ならない



7. まとめ

- 地下研究施設を活用した工学技術の調査研究・開発は、地上施設とともに双方の特徴を活かした計画を策定、段階的な技術開発における重要なステップの一つであり、**地層処分事業の工学技術の成立性に対する技術的根拠の整備に大きく寄与**する。
- 地下研究施設を活用した試験の実施および得られた成果は、地層処分事業の工学技術の整備状況を広く一般に伝える場面において、内容だけではなく**地下で実現可能な技術が存在するというファクトを示すことによって、より信頼性の高い説明に貢献**すると考えられる。
- 地下研究施設を活用した試験を地層処分事業に先駆けて実施し得られた成果は、精密調査段階後半に計画される地下調査施設での原位置試験・実証試験で取り扱う課題を明確にし、**スムーズな精密調査施設の整備計画、試験の遂行に貢献**すると考えられる。

★地下研究施設への期待

- 地下研究施設を活用した地層処分事業の工学技術の整備は、上記のような大きな効果を得ることが出来る。
- また、前述したように地層処分事業を進めるうえで重要な役割を担う。



今後も開かれた地下研究施設として、多くの技術開発の機会提供、多くの機関・技術者の交流の場となることを期待

8. おわりに

本報告は公益財団法人原子力環境整備・資金管理センターが、経済産業省資源エネルギー庁から受託して実施した以下の委託事業の成果の一部をまとめたものです。

- 平成12～18年度 地層処分技術調査等 遠隔操作技術高度化調査
- 平成12～18年度 地層処分技術調査等 モニタリング機器技術高度化調査
- 平成16～18年度 地層処分技術調査等 バリア機能総合調査-人工バリア特性体系化調査-
- 平成19～24年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学要素技術高度化開発
- 平成20～21年度 核燃料サイクル関係推進調整等委託費 地層処分実規模設備整備事業
- 平成22～23年度 原子力施設立地推進調整委託費 地層処分実規模設備整備事業
- 平成23～26年度 地層処分技術調査等事業 (地層処分回収技術高度化開発)
- 平成24～25年度 原子力発電設備公聴・広報等事業 地層処分実規模設備整備事業
- 平成25～29年度 地層処分技術調査等事業 (処分システム工学確証技術開発)
- 平成26年度 原子力発電設備公聴・広報等事業 地層処分実規模設備運営等事業
- 平成27～28年度 地層処分技術調査等事業 (高レベル放射性廃棄物処分関連：可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発)
- 平成29～31年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 (可逆性・回収可能性評価・技術高度化開発)

上記のうち、幌延深地層研究センターで実施した工学技術分野の研究開発成果については、年度毎の幌延深地層研究計画に対応する調査研究成果報告書に整理しています。

(下記のURLから閲覧可能)

https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/disclosure/archive_seika.html

ご清聴ありがとうございました

