

「平成21年度 東濃地科学センター 地層科学研究
情報・意見交換会」資料集

Proceedings of Information and Opinion Exchange Conference
on Geoscientific Study, 2009

(編) 西尾 和久 弥富 洋介 島田 顕臣

(Eds.) Kazuhisa NISHIO, Yosuke IYATOMI and Akiomi SHIMADA

地層処分研究開発部門
東濃地科学研究所ユニット

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate

February 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, 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, 2010

「平成 21 年度 東濃地科学センター 地層科学研究 情報・意見交換会」
資料集

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 東濃地科学研究所ユニット

(編)西尾 和久^{*}, 弥富 洋介, 島田 顕臣

(2009 年 12 月 4 日受理)

独立行政法人日本原子力研究開発機構 東濃地科学センターにおいては、「地層処分技術に関する研究開発」のうち深地層の科学的研究(以下, 地層科学研究)を実施している。地層科学研究を適正かつ効率的に進めていくため, 研究開発の状況や成果, さらに今後の研究開発の方向性について, 大学, 研究機関, 企業の研究者・技術者等に広く紹介し, 情報・意見交換を行うことを目的とした「情報・意見交換会」を毎年開催している。本資料は, 平成 21 年 10 月 27 日に岐阜県瑞浪市で開催した「平成 21 年度 東濃地科学センター 地層科学研究 情報・意見交換会」にて用いた発表資料を取りまとめたものである。

Proceedings of Information and Opinion Exchange Conference on Geoscientific Study, 2009

(Eds.) Kazuhisa NISHIO✽, Yosuke IYATOMI and Akiomi SHIMADA

Tono Geoscientific Research Unit

Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency

Akeyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received December 4, 2009)

The Tono Geoscience Center (TGC) of Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has been conducting a geoscientific studies in order to establish a scientific and technological basis for the geological disposal of HLW. Information and Opinion Exchange Conference on Geoscientific Study has been held by TGC annually. The conference provides technical information and an opportunity for peer review and exchange of opinions on the geoscientific studies conducted at TGC. Research specialists and engineers from Japanese universities, research organizations and private companies usually participate the conference. This document compiles research presentations, posters of the conference on October 27th, 2009 at Mizunami.

Keywords: Mizunami Underground Research Laboratory, MIU Project, Information and Opinion Exchange Conference, Geoscientific Study, Geological Disposal of HLW

✽)Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに	1
2. 「情報・意見交換会」の概要.....	2
2.1 口頭発表の表題	2
2.2 ポスター発表の表題	2
3. 調査・研究発表資料.....	5
3.1 地層科学研究の現状	5
3.1.1 地層科学研究の役割と今後の予定および今年度の発表内容について.....	5
3.1.2 瑞浪超深地層研究所の建設状況	14
3.1.3 JAEA 知識マネジメントシステムと中期計画取りまとめ“CoolRep”の概要	24
3.2 知識ベースのソース/平成 17 年取りまとめ以降の進展と今後の挑戦	42
3.2.1 超深地層研究所計画	42
3.2.1.1 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備.....	42
3.2.1.2 深地層における工学技術の基礎の整備	73
3.2.2 地質環境の長期安定性に関する研究	86
4. ポスターセッション発表資料.....	108
5. おわりに.....	159
謝辞.....	159

Contents

1. Introductoin	1
2. Overview of the Information and Opinion Exchange Conference on Geoscientific Study ...	2
2.1 Presentation titles	2
2.2 Poster titles	2
3. Presentations on research and development	5
3.1 Current status of geoscientific research, R&D on HLW geological disposal.....	5
3.1.1 Role and plan of geoscientific research for R&D on HLW geological disposal and contents of Information and Opinion Exchange Conferenceon Geoscientific Study 2009	5
3.1.2 Current Status of the Construction Work of Mizunami Underground Research Laboratory	14
3.1.3 Introduction of JAEA Knowledge Management System and JAEA Mid-term Report on R&D for deep geological disposal – CoolRep(H22)	24
3.2 Source of knowledge base/Progress after FY2005 and future challenges.....	42
3.2.1 Mizunami Underground Research Laboratory Project	42
3.2.1.1 Methodology Development for characterization of geological environment	42
3.2.1.2 Research and Development of basis for engineering technologies in deep underground	73
3.2.2 Research on the long-term stability of geological environment.....	86
4. Posters	108
5. Concluding Remarks	159
Acknowledgements.....	159

1. はじめに

独立行政法人日本原子力研究開発機構(以下, 原子力機構)は, 原子力発電環境整備機構による高レベル放射性廃棄物の地層処分事業および国による安全規制の両面を支える技術基盤を継続的に強化していくため, 他の研究開発機関と連携して基盤的な研究開発を進めている¹⁾。東濃地科学センターでは, 「地層処分技術に関する研究開発」のうち「深地層の科学的研究(以下, 地層科学研究)」を進めている。

東濃地科学センターで実施している地層科学研究を適正かつ効率的に進めていくため, 研究開発の状況や成果, さらに今後の研究開発の方向性について, 大学, 研究機関, 企業の研究者・技術者等に広く紹介し, 情報・意見交換を行うことを目的とした「東濃地科学センター 地層科学研究 情報・意見交換会」(以下, 「情報・意見交換会」)を毎年 1 回開催している。今年度の「情報・意見交換会」(平成 21 年 10 月 27 日)では, 「地層処分技術に関する研究開発」の成果を地層処分の安全確保の考え方や評価の拠り所となる知識ベースとして取りまとめるために開発している次世代型の報告書“CoolRep”や知識ベースを適切に管理するための JAEA 知識マネジメントシステム(JAEA KMS)の開発状況および平成 17 年取りまとめ²⁾以降の地層科学研究の成果について発表し, 大学・研究機関・企業の技術者・研究者の方々などと意見交換を行った。また, 翌日の平成 21 年 10 月 28 日には瑞浪超深地層研究所の深度 300m 水平坑道の見学会を開催した。

本資料は, 平成 21 年 10 月 27 日に開催した「情報・意見交換会」の報告資料を取りまとめたものである。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁, (独)日本原子力研究開発機構(2009):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(2009年7月)平成20年度版
- 2) 核燃料サイクル開発機構(2005):高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—分冊1 深地層の科学的研究, JNC TN1400 2005-014

2. 「情報・意見交換会」の概要

平成 21 年 10 月 27 日に岐阜県瑞浪市の地域交流センター「ときわ」において、「平成 21 年度 東濃地科学センター 地層科学研究 情報・意見交換会」(以下、「情報・意見交換会」)を開催した。「情報・意見交換会」での報告内容は、1)「地層科学研究の現状」および 2)「知識ベースのソース/平成 17 年取りまとめ以降の進展と今後の挑戦」の 2 部構成とし、それぞれ以下の 2.1 に示す表題にて地層科学研究の現状や成果および今後の予定等を口頭発表の形式で報告した。更に、ポスター発表の形式で個別研究の成果を詳細に報告した。ポスター発表の表題を 2.2 に示す。また、翌日の 10 月 28 日には、瑞浪超深地層研究所の深度 300m 水平坑道見学会を開催した。今年度の「情報・意見交換会」のプログラムを表 2-1 に示す。

2.1 口頭発表の表題

1)地層科学研究の現状

①地層科学研究の役割と今後の予定および今年度の発表内容について

(発表者:結晶質岩工学技術開発グループ 伊藤洋昭)

②瑞浪超深地層研究所の建設状況

(発表者:施設建設課 見掛信一郎)

③JAEA 知識マネジメントシステムと中期計画取りまとめ“CoolRep”の概要

(発表者:知識化グループ 日置一雅)

2)知識ベースのソース/平成 17 年取りまとめ以降の進展と今後の挑戦

(1)超深地層研究所計画

①深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備

(発表者:結晶質岩地質環境研究グループ 濱 克宏)

②深地層における工学技術の基礎の整備

(発表者:結晶質岩工学技術開発グループ 松井裕哉)

(2)地質環境の長期安定性に関する研究

(発表者:自然事象研究グループ 石丸恒存)

2.2 ポスター発表の表題

1)地質環境の長期安定性に関する研究

①断層活動に関する調査技術の開発 —地球化学的データを用いた変動地形が不明瞭な断層の調査技術—

(発表者:自然事象研究グループ 黒澤英樹)

②火山活動に関する調査技術の開発 —地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術—

(発表者:自然事象研究グループ 浅森浩一)

③隆起・沈降/気候・海水準変動に関する調査技術の開発 —過去数十万年の古地形の推定手法—

(発表者:自然事象研究グループ 草野友宏)

- ④加速器質量分析計を用いた年代測定技術の開発 —放射性炭素測定の精度向上のための装置等の改善—

(発表者:自然事象研究グループ 鈴木元孝)

2)超深地層研究所計画

- ①地質・地質構造に関する調査研究

(発表者:結晶質岩地質環境研究グループ 栗原 新)

- ②岩盤水理に関する調査研究

(発表者:結晶質岩地質環境研究グループ 武田匡樹)

- ③地下水化学に関する調査研究

(発表者:結晶質岩地質環境研究グループ 萩原大樹)

- ④岩盤力学に関する調査研究

(発表者:結晶質岩地質環境研究グループ 丹野剛男)

- ⑤瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する研究

(発表者:結晶質岩工学技術開発グループ 松井裕哉)

3)共同研究等

- ①日本原子力研究開発機構—産業技術総合研究所 共同研究 —深部地質環境における水—岩石—微生物相互作用に関する調査技術開発—

(発表者:結晶質岩地質環境研究グループ 水野 崇)

- ②電力中央研究所—日本原子力研究開発機構 共同研究 —瑞浪超深地層研究所周辺の水理・物質移動特性評価に関する研究—

(発表者:結晶質岩地質環境研究グループ 濱 克弘)

- ③日本原子力研究開発機構—産業技術総合研究所 共同研究 —岩芯を用いた応力測定と掘削振動計測による掘削影響領域の評価に関する基礎的研究—

(発表者:結晶質岩地質環境研究グループ 平野 享)

- ④花崗岩体内で認められる Peraluminous/Metaluminous の累帯推移とチタン鉄鉱/磁鉄鉱系列の累帯推移 —土岐花崗岩体を例にして—

(発表者:結晶質岩地質環境研究グループ 湯口 貴史)

4)瑞浪超深地層研究所を利用した研究

- ①立坑掘削に伴う地球物理学的変動観測研究

(発表者:財団法人地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所 浅井康広)

表 2-1 「平成 21 年度 東濃地科学センター 地層科学研究 情報・意見交換会」プログラム

平成 21 年度 東濃地科学センター 地層科学研究 情報・意見交換会 — 地層処分技術の基盤整備の進展と今後の挑戦 —	
第 1 日目 ; 10 月 27 日(火)	
1. 開会挨拶	12:30～12:35
2. 地層科学研究の現状	
(1)地層科学研究の役割と今後の予定および今年度の発表内容について 結晶質岩工学技術開発グループ 伊藤洋昭	12:35～12:50
(2)瑞浪超深地層研究所の建設状況 施設建設課 見掛信一郎	12:50～13:10
(3)JAEA 知識マネジメントシステムと中期計画取りまとめ“CoolRep”の概要 知識化グループ 日置一雅	13:10～13:40
質疑	13:40～13:50
— 休憩 —	13:50～14:00
3. 知識ベースのソース/平成 17 年取りまとめ以降の進展と今後の挑戦	
(1)超深地層研究所計画	
①深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備 結晶質岩地質環境研究グループ 濱 克宏	14:00～14:40
②深地層における工学技術の基礎の整備 結晶質岩工学技術開発グループ 松井裕哉	14:40～15:00
質疑	15:00～15:10
(2)地質環境の長期安定性に関する研究 自然事象研究グループ 石丸恒存	15:10～15:40
質疑	15:40～15:45
— ポスターセッション(含:休憩) —	15:45～16:45
4. 全体質疑	16:45～16:55
5. 閉会挨拶	16:55～17:00
懇談会(会費制にて希望者のみ/場所;瑞浪国際地科学交流館)	17:30～19:30
第 2 日目 ; 10 月 28 日(水)	
瑞浪超深地層研究所 深度 300m 水平坑道見学会	10:00～12:00

3. 調査・研究発表資料

3.1 地層科学研究の現状

3.1.1 地層科学研究の役割と今後の予定および今年度の発表内容について

独立行政法人日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門

東濃地科学研究ユニット 結晶質岩工学技術開発グループ

伊藤 洋昭

(1)はじめに

独立行政法人日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)は、原子力発電環境整備機構による処分事業と国による安全規制の両面を支えるため、他の研究開発機関と連携して基盤的な研究開発を進めている¹⁾。東濃地科学センターでは、「地層処分技術に関する研究開発」のうち「深地層の科学的研究(地層科学研究)」を進めている。以下に、地層処分技術に関する研究開発における地層科学研究の役割、今後の予定、また今年度の「平成 21 年 東濃地科学センター 地層科学研究 情報・意見交換会」における発表内容について紹介する。

(2)「地層処分技術に関する研究開発」における地層科学研究の役割

わが国における高レベル放射性廃棄物の地層処分計画は、核燃料サイクル開発機構(以下、サイクル機構,現;原子力機構)が平成 11 年に公表した「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⁾(以下、「第2次取りまとめ」)を技術的な拠り所として、平成 12 年に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」が制定され事業段階へと移行した。事業段階における「地層処分技術に関する研究開発」の役割は、一言で言えば「第2次取りまとめ」が示した「わが国における地層処分の技術的信頼性」をさらに向上させ、国民的理解を促進するとともに、処分事業や安全規制の技術基盤を強化していくことにある。

原子力機構では、地層処分技術の信頼性をさらに高めていく観点から、「実際の地質環境への地層処分技術の適用性の確認」と「地層処分システムの長期挙動の理解」という二つの目標を掲げ、国が示した中期目標や関連する計画・方針に従って定めた原子力機構の中期計画に基づき、地層処分研究開発およびその基盤となる深地層の科学的研究(地層科学研究)を進めている。また、中期目標期間における研究開発の成果を、地層処分の安全確保の考え方や評価に係る様々な論拠を支える「知識ベース」として体系化し、包括的な報告書として取りまとめることとしている。

地層科学研究においては、①「地質環境特性の調査・解析・評価技術の基礎の開発」、②「深地層における工学技術の基礎の開発」、③「地質環境の長期安定性に関する研究」を研究開発課題として設定している³⁾。

①「地質環境特性の調査・解析・評価技術の基礎の開発」では、処分事業において予定されている地下施設の設置を前提として行われる地上からの精密調査の技術基盤を整備していく観点から、深地層の研究施設計画の第2段階で得られる地質環境データに基づき、第1段階に構築した地質環境モデルの妥当性を確認することなどを通じて、地表からの調査技術やモデル化手法の妥当性を評価し、その適用

性の確認を行う調査研究を進めている。

②「深地層における工学技術の基礎の開発」では、既存の技術により地下深部に研究坑道を建設し維持・管理できることを確認するため、研究坑道の掘削中に得られる各種計測データに基づき、第1段階で適用した詳細設計や施工計画策定などの手法ならびに適用した工学技術の有効性を評価するとともに、適用した技術の改良などを進めている。

③「地質環境の長期安定性に関する研究」については、精密調査地区の選定において重要となる地質環境条件に留意して、天然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価するための調査技術の体系化やモデル開発などを進めている。

これらの研究開発で得られる成果は、幌延深地層研究計画および東海研究開発センターの地層処分基盤研究施設や地層処分放射化学研究施設で実施している地層処分研究開発などの成果と合わせて、地層処分技術の技術的な基盤として整備していく。

(3)知識マネジメントシステムにおける地層科学研究の位置づけ

中期目標期間における研究開発成果の取りまとめにあたり、知識ベースとこれを適切に管理するための知識マネジメントシステム(JAEA KMS)の開発を進めるとともに、JAEA KMSとリンクした新たな方法論(次世代型の報告書“CoolRep”)の開発を行っている。

知識マネジメントシステムは、大きく知識ベースとマネジメント機能からなる。知識ベースでは、研究開発で得られた各種データ、ソフトウェア、情報、報告書などの既に形式化されている知識を構造化するのみならず、専門家の経験やノウハウなどのいわゆる暗黙知に依存する部分をできるだけ表出化し入力していく。マネジメント機能としては、知識ベースとして格納されている知識が地層処分の安全性を説明するという観点から、どのように利用されるのかを透明性をもって示すための論証支援機能などがある。

地層科学研究においては、研究開発で得られた成果を知識ベースとして活用するために、これらの成果を報告書類、論文などで示していくとともに、調査・解析実施時の専門家の経験やノウハウなどの暗黙知に類するものも知識ベースとしていかに活用できるようにするかが重要となる。そのために、地質環境の調査・解析時の判断やその根拠などのノウハウをできるだけ汎用性のある形に表出化したエキスパートシステムを構築していく。このような方法による得られた成果・経験・ノウハウなどを知識として体系化し整備していくことは、処分事業や安全規制に反映していく有効な方法であるとともに、次世代に知識として引き継いでいくことが可能であると考えられる。

(4)今後の予定

原子力機構では、平成21年度末を目途に、中期目標期間における研究開発成果を包括的な報告書(“CoolRep H22”)として取りまとめてWebサイト上に公開し、世界に先駆けて開発している知識マネジメントシステムを通じて各分野の最新の知識ベースにアクセスできるようにする計画である⁴⁾。プロトタイプのパブリック公開後も継続的に知識ベースを更新するとともにマネジメント機能の強化を進め、処分事業と安全規制の段階的な進展を支える知識基盤の維持・強化を図っていく予定である。東濃地科学センターにおいては、地層処分の安全確保の論拠を支える知識ベースへの入力情報となる研究開発を着実に進め、地層処分の技術基盤の継続的な強化に貢献していく。

(5)今年度の発表内容について

今年度の「情報・意見交換会」では，“CoolRep”およびJAEA KMSの開発の現状について紹介するとともに、知識ベースに取り込まれる地層科学研究で得られた研究開発成果や瑞浪超深地層研究所の建設状況を2章に述べた三つの課題①～③に沿って報告する。また、超深地層研究所計画および「地質環境の長期安定性に関する研究」の各個別分野の研究成果、他の研究開発機関との共同研究などで得られた研究成果については、ポスター形式にて詳しく紹介する。

参考文献

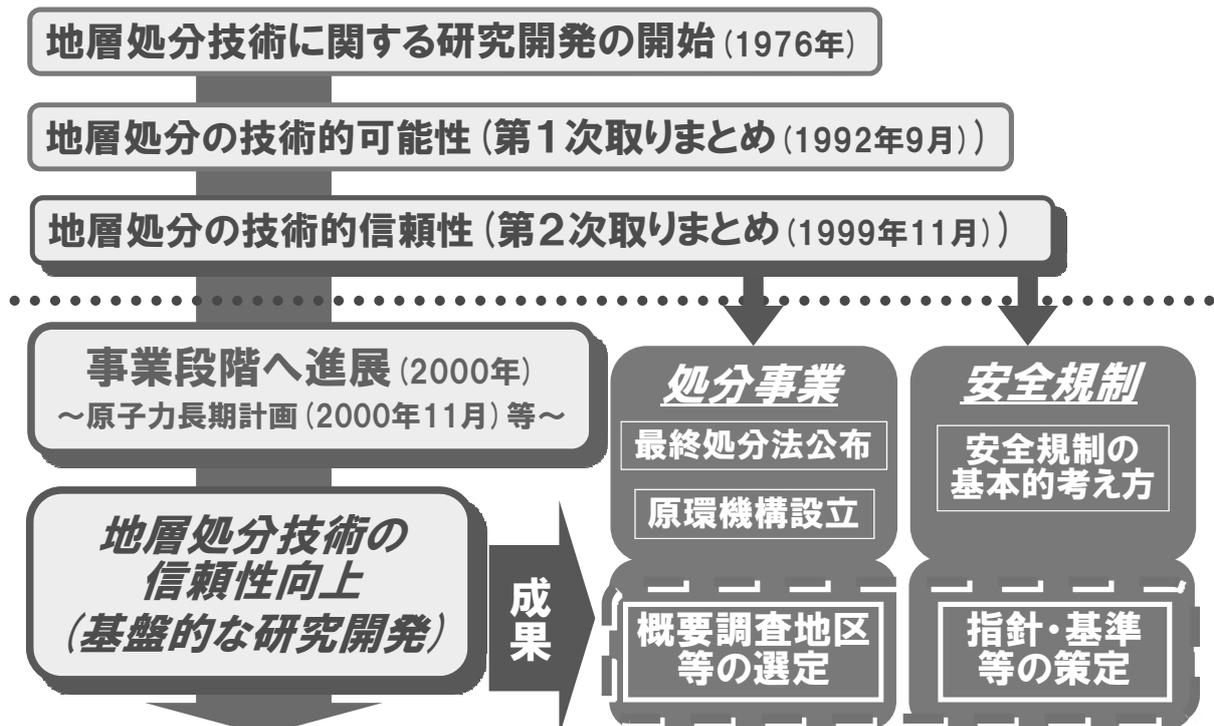
- 1) 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構(2006):“高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画”。
- 2) 核燃料サイクル開発機構(1999):“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-020～024.
- 3) 核燃料サイクル機構(2002):“超深地層研究所地層科学研究基本計画”, JNC TN7410 2001-018
- 4) 日本原子力研究開発機構(2009):地層処分研究開発部門意見交換会「知識マネジメントシステム開発の現状」, http://www.jaea.go.jp/04/tisou/houkokukai/ikenkoukankai_h21.html

地層科学研究の役割と今後の予定 および今年度の発表内容について

平成21年10月27日

東濃地科学研究ユニット
結晶質岩工学技術開発グループ
伊藤 洋昭

「地層処分技術に関する研究開発」の経緯・役割



第2次取りまとめ以降の研究開発

第2次取りまとめ：わが国における地層処分の成立性を提示

信頼性の向上

(技術的信頼性)

- ・地層処分に適した地質環境が存在する
- ・地質環境条件に応じて処分場を建設できる
- ・地層処分の長期的な安全性を確認できる

実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認

- ・これまでに整備してきた調査技術や評価手法を実際の地質環境へ適用し、その信頼性や実用性を確認

地層処分システムの長期挙動の理解

- ・処分システムに関連する様々な現象への理解をさらに深めながら、モデルやデータベースを改良し、評価の信頼性を高める

地層処分技術の研究開発に関する国の方針

原子力政策大綱（平成17年10月11日、抜粋）

- 深地層の研究施設等を活用して、深地層の科学的研究、地層処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化等に向けた基盤的な研究開発を引き続き着実に進める
- 研究開発成果については、地層処分に係る最新の知識基盤として整備・維持され、NUMOの最終処分事業や国の安全規制において有効に活用されることが重要

特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（平成20年3月14日改定、抜粋）

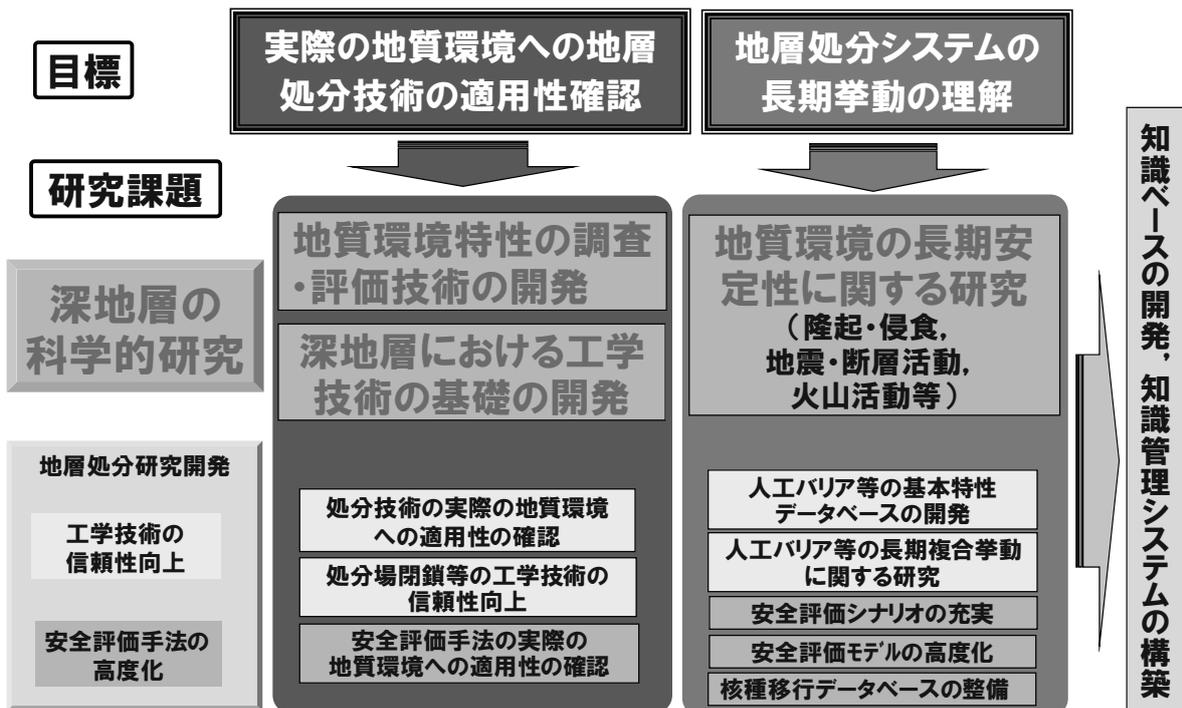
- 最終処分の安全評価のために必要な研究開発、深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発及び地層処分技術の信頼性の向上に関する技術開発等を積極的に進めていく
- 最終処分の安全性、信頼性について、わかりやすい情報発信に努めるとともに、深地層の研究施設等においては、当該研究機関や研究開発の内容の積極的な公開等を通じて、最終処分に関する国民との相互理解促進に貢献していくことが重要

原子力機構の現中期計画の概要

【高レベル放射性廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発】

- 処分実施主体である原子力発電環境整備機構による処分事業と、国による安全規制の両面を支える技術を知識基盤として整備。
- 「地層処分研究開発」と「深地層の科学的研究」の二つの領域を設け、他の研究開発機関と連携して研究開発を進め、その成果を地層処分の安全確保の考え方や評価に係る様々な論拠を支える「知識ベース」として体系化。
- 中期目標期間における研究開発成果を、国内外の専門家によるレビュー等を通じて技術的品質を確保した包括的な報告書と知識ベースとして取りまとめる。
- 高レベル放射性廃棄物の処理・処分技術の成果普及と国民の理解増進を進めるため、研究施設の一般公開や深地層研究の体験学習を実施。

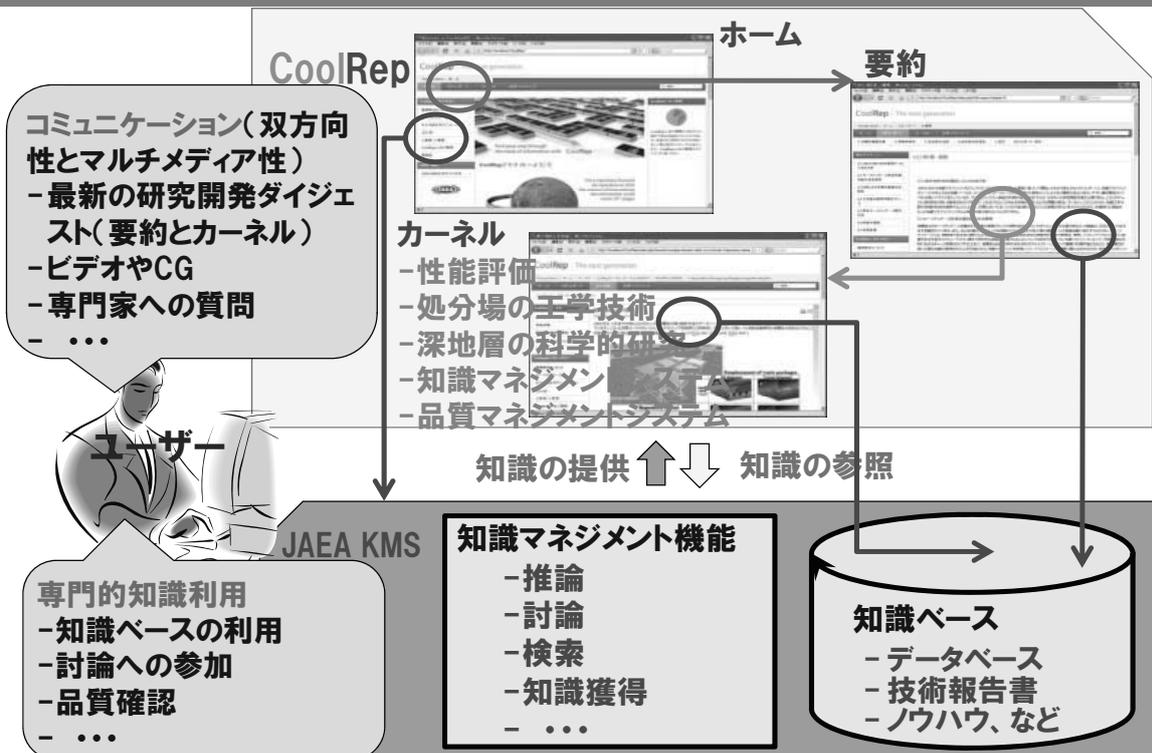
事業段階における地層科学研究



各研究開発施設における役割



知識マネジメントシステムと研究開発成果報告書(CoolRep)



今後の予定

- **中期目標期間における研究開発成果の取りまとめ**
 - ・知識マネジメントシステム(JAEA KMSプロトタイプ)とリンクした包括的な報告書“CoolRep H22”の公開(H.22年3月末予定)
 - ・継続的な知識ベースの拡充・更新、マネジメント機能の強化
- **東濃地科学センターにおける研究開発**
 - ・知識ベースへの入力情報となる研究開発の着実な実施、技術基盤の継続的強化への貢献



**処分事業と安全規制の段階的な進展を支える
知識基盤の維持・強化**

「H21年度 情報・意見交換会」発表内容

－ 地層処分技術の基盤整備の進展と今後の挑戦 －

地層科学研究の現状

- (1) 地層科学研究の役割と今後の予定および今年度の発表内容について
- (2) 瑞浪超深地層研究所の建設状況
- (3) 知識マネジメントシステム開発と中期計画期間の知識ベースの取りまとめ“CoolRep”の概要

知識ベースのソース/平成17年取りまとめ以降の進展と今後の挑戦

- (1) 超深地層研究所計画
 - 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礎の整備
- (2) 地質環境の長期安定性に関する研究

「H21年度 情報・意見交換会」ポスター発表

地質環境の長期安定性に関する研究

- ①断層活動に関する調査技術の開発
- ②火山活動に関する調査技術の開発
- ③隆起・沈降／気候・海水準変動に関する調査技術の開発
- ④加速器質量分析計を用いた年代測定技術の開発

超深地層研究所計画

- ①地質・地質構造に関する調査研究
- ②岩盤水理に関する調査研究
- ③地下水の地球化学に関する調査研究
- ④岩盤力学に関する調査研究
- ⑤瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する研究

共同研究等

- ①深部地質環境における水－岩石－微生物相互作用に関する調査技術開発
(独)産業技術総合研究所との共同研究)
- ②瑞浪超深地層研究所周辺の水理・物質移動特性評価に関する研究
(財)電力中央研究所との共同研究)
- ③岩芯を用いた応力測定と掘削振動計測による掘削影響領域の評価に関する基礎的研究
(独)産業技術総合研究所との共同研究)
- ④花崗岩体内で認められるPeraluminous/Metaluminousの累帯推移とチタン鉄鉱/磁鉄鉱系列の累帯推移－土岐花崗岩体を例にして－
- ⑤立坑掘削に伴う地球物理学的変動観測研究
(財)地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所)

3.1.2 瑞浪超深地層研究所の建設状況

独立行政法人日本原子力研究開発機構
東濃地科学センター 施設建設課
見掛 信一郎

(1)はじめに

日本原子力研究開発機構(原子力機構)は、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の基盤となる深地層の科学的研究を行う研究施設として、岐阜県瑞浪市と北海道幌延町において深地層の研究施設を建設中である。このうち、岐阜県瑞浪市で建設を進めている瑞浪超深地層研究所では、結晶質岩(花崗岩)を主な対象として研究を行っている¹⁾。

超深地層研究所計画では、「地表からの調査予測研究段階」、「研究坑道の掘削を伴う研究段階」、「研究坑道を利用した研究段階」の三つに分けて調査研究が実施される。調査研究は、①「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」および②「深地層における工学技術の基盤の整備」の二つを全体目標としている。その成果は、高レベル放射性廃棄物の処分事業や安全規制の基盤的な技術や情報として活用されることを念頭においている。本報告では、瑞浪超深地層研究所の建設状況について概要を述べる。

(2)瑞浪超深地層研究所の概要

瑞浪超深地層研究所では、2本の立坑(主立坑:内径6.5m, 換気立坑:内径4.5m)と複数の水平坑道からなる研究坑道の掘削工事を行っている。研究所用地周辺の地質は基盤岩として土岐花崗岩が分布し、その上位を堆積岩が覆っている。花崗岩と堆積岩の不整合面は研究坑道掘削地点で深度約170mである。

掘削は、2009年9月10日現在で、主立坑と換気立坑ともに深度400.2mまで到達している。深度100m, 200m, 300mには、主立坑と換気立坑を連絡する水平坑道(「予備ステージ」)を設置した。深度200mには、「予備ステージ」と反対側にボーリング調査を実施するための水平坑道(「ボーリング横坑」、主立坑側および換気立坑側各1箇所)を設置した。深度300mには、「ボーリング横坑」(換気立坑側1箇所)と、調査研究を行うための水平坑道(「研究アクセス坑道」、主立坑中心から北側に坑道延長約100m)を設置した。

(3)研究坑道掘削の進捗状況

研究坑道の掘削において、掘削に伴い発生する湧水については、地上からのボーリング調査や地下水流動解析により湧水量の予測を行い、さらに坑道掘削に先立ちボーリング調査を行うことにより、坑道掘削範囲の地質や地下水状況を把握したうえで坑道掘削を進めている。湧水の水質については、ふっ素およびほう素が環境基準を超える濃度で含まれていることから、岐阜県および瑞浪市と原子力機構の間で締結している「瑞浪超深地層研究所に係る環境保全協定」にもとづき放流先河川における環境基準に適合する濃度に低減させる処理を継続している。

こうした経験にもとづき、研究坑道の掘削を効率的に進め、湧水の合理的な処理を継続して行う観点

から、花崗岩部の掘削に先がけて「立坑設置地点」の地質構造や地下水状況に関する情報を取得し、より高い精度で湧水量や水質を予測することを目的として、両立坑の坑底(主立坑:深度 180m, 換気立坑:深度 191m)から深度 500m 程度まで到達するパイロットボーリング調査(掘削長:主立坑 348m(深度 528m), 換気立坑 335m(深度 526m))を実施した²⁾。

パイロットボーリング調査や地下水流動解析による湧水量予測を行った結果、湧水量に関しては、研究坑道の掘削に際して湧水をできるだけ抑制したうえで排水処理を行っていくことが効率的であると考え、予想される湧水状況に応じて対策を講じることとした。これまでに湧水抑制対策として、坑道掘削に先立ち坑道掘削範囲周辺を対象にグラウチング(プレグラウチング, 材料:普通ポルトランドセメント)を行っており³⁾, 地下深部の坑道掘削における湧水対策の技術開発の一環として適用性について確認している。プレグラウチングについては、換気立坑深度約 190~220m 付近を対象として実施した。深度 300m 研究アクセス坑道においても立坑掘削と同様に、坑道掘削に先がけて地質構造や地下水状況に関する情報を取得するために先行ボーリング調査(掘削長:62.5m)を実施し、坑道掘削領域の地質環境に関する情報を取得した。この結果にもとづき坑道掘削に先行してプレグラウチングを行い、坑道掘削時の湧水を抑制する対策を実施した後、深度 300m 研究アクセス坑道を掘削した。

一方、主立坑沿いには強変質を伴う花崗岩と貫入岩が分布し透水性は低く、湧水については主立坑掘削時に壁面からにじむ程度で顕著なものは認められず、主立坑掘削の進捗に伴う湧水量の増加はほとんど認められなかった。このため主立坑掘削においてはプレグラウチングなどの湧水抑制対策は講じなかったが、立坑掘削面の自立性が低い領域が存在したため、地山補強(シリカレジンを注入)を行うことにより安定性の向上を図りつつ掘削を行った⁴⁾。

(4)まとめ

研究坑道の掘削は、坑道掘削に先立ち実施したボーリング調査で得られた地質や地下水状況をもとに、湧水抑制対策として必要に応じてプレグラウチングを実施した。プレグラウチングの計画策定では、地質や地下水状況をもとに湧水量の抑制目標を設定し、この目標を達成できるプレグラウチングの仕様(坑道周辺の透水性を低下させる割合やセメントを注入する範囲など)について検討を行った。この計画にもとづきプレグラウチングを行った後坑道を掘削した結果、目標として設定した許容範囲内の湧水量で掘削することができ、湧水の抑制を達成することができた。

これらの技術の整備は地層処分への技術基盤の提供という観点において重要な課題であり、岩盤を対象としたプレグラウチング計画の策定手法の構築という観点でまとめている。今後も大量の湧水が予想される範囲ではプレグラウチングを適用することを基本とし、深部地質環境の調査研究と連携し、地下施設における湧水対策技術のひとつとして適用性を確認していく予定である。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター:超深地層研究所地層科学研究基本計画, JNC TN7410 2001-018(2002).
- 2) 鶴田忠彦, 竹内真司, 竹内竜史, 水野崇, 大山卓也:瑞浪超深地層研究所における立坑内からのパイロットボーリング調査報告書, JAEA-Research 2008-098(2009).
- 3) 見掛信一郎, 山本勝, 池田幸喜, 竹内真司, 原雅人:瑞浪超深地層研究所における研究坑道掘削の

現状, 土木学会岩盤力学委員会ニューズレター, 2008年1月発行, No.14(2008).

- 4) 秋好賢治, 見掛信一郎, 金田勉, 野田正利: 超大深度立坑における不良地山掘削時の坑壁崩落対策, トンネル工学報告集第17巻, pp.105-111(2007).

地層科学研究の現状

瑞浪超深地層研究所の建設状況

平成21年10月27日

東濃地科学センター
施設建設課
見掛 信一郎

瑞浪超深地層研究所 進捗とレイアウト

現在の進捗

- 2009(平成21)年10月17日作業終了時点
 - ・主立坑深度400.2m、換気立坑深度417.8m
 - ・水平坑道: 深度400m予備ステージ
- 10月17日の作業において貫通



2003(平成15)年7月
地上部
立坑坑口掘削工事着工

2009(平成21)年1月



深度300m予備ステージ貫通

2009(平成21)年3月

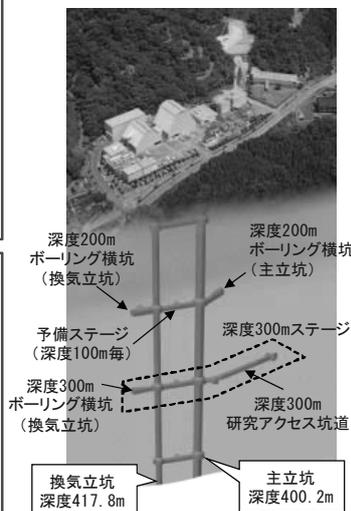


深度300m研究アクセス坑道
掘削完了

2009(平成21)年1月



深度300mボーリング横坑(換気立坑)
掘削完了



2009(平成21)年10月



深度400m予備ステージ貫通

主な地上施設



櫓設備(換気立坑)



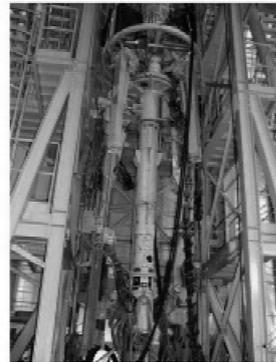
櫓設備(主立坑の
防音ハウス組立作業)



コンクリートプラント



スcaフォード(立坑内での
作業用吊り足場:換気立坑)

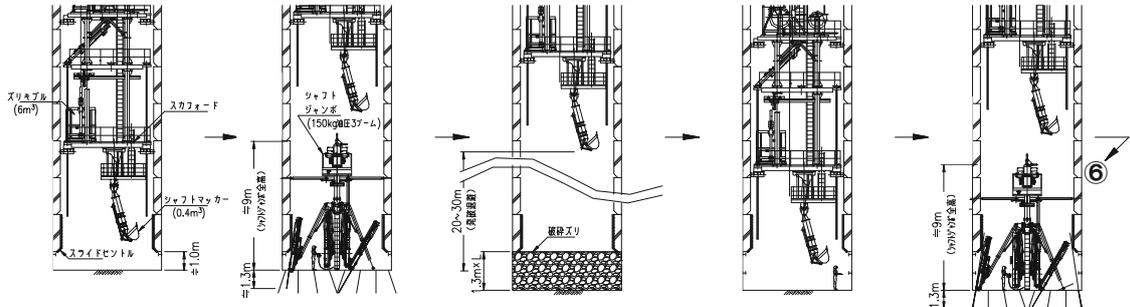


シャフトジャンボ(主立坑)



巻上設備(主立坑)

研究坑道掘削工事 —立坑発破掘削の標準サイクル—



① 削孔準備

② 削孔～装薬

③ 発破(1回目)

④ ずり出し

⑤ 削孔～装薬



削孔

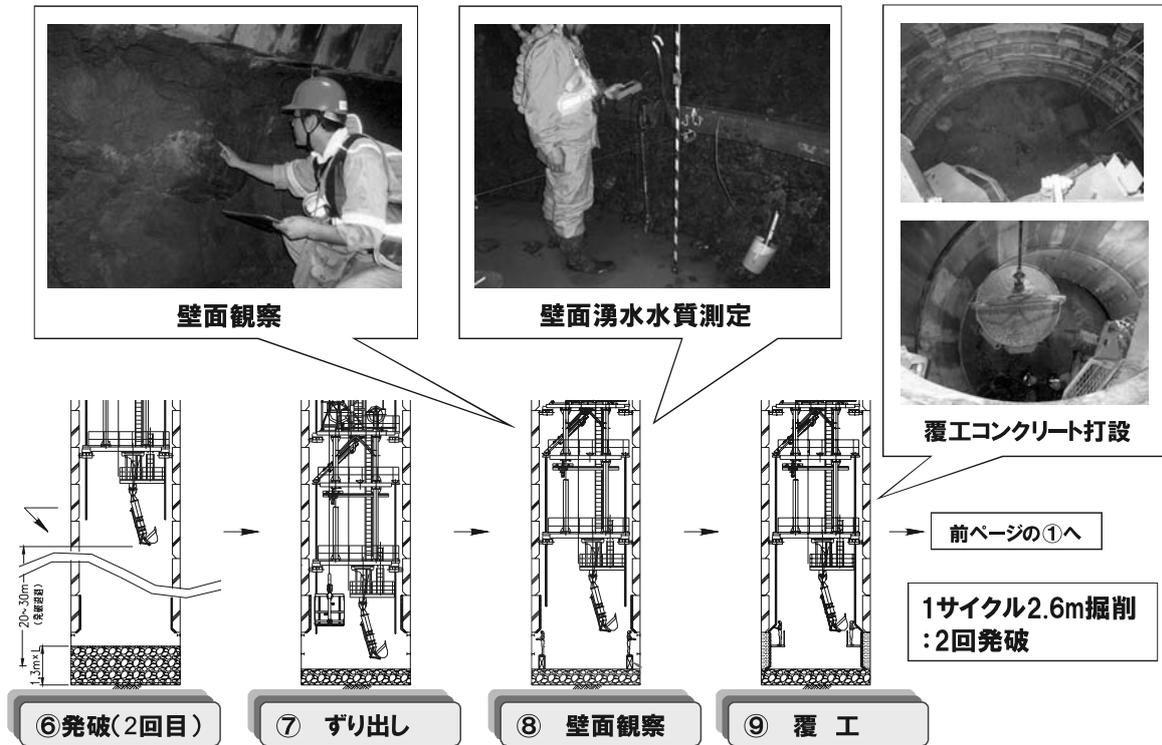


装薬



ずり出し

研究坑道掘削工事 — 立坑発破掘削の標準サイクル —



研究坑道掘削工事の施工概要

- 掘削、覆工、支保: 発破掘削、覆工コンクリート、鋼製支保、吹付けコンクリート、ロックボルト等の組合せ
⇒地質環境に応じて施工
- 補助的な対策: 坑道掘削面の自立性が低い領域に対しては安定性の向上を図る
⇒掘削サイクルの中でボルトによる補強と地山改良により安定性を向上
- 湧水への対応: 排水中の溶存成分濃度(ふっ素、ほう素など)の調整
(湧水中の濃度は放流先河川における環境基準に比べて高い)
坑道掘削に伴い大量の湧水が発生する可能性
⇒排水処理設備の処理方法の改良
湧水抑制対策(プレグラウチング)の適用



坑道掘削に先立ち地質環境情報を取得

坑道掘削領域の地質、地下水状況などを把握したうえで施工を進める

- ・深度500m付近までの立坑掘削領域の情報: パイロットボーリング調査
- ・深度300mにおける研究アクセス坑道掘削領域の情報: 先行ボーリング調査

排水処理設備と湧水抑制対策

排水処理設備



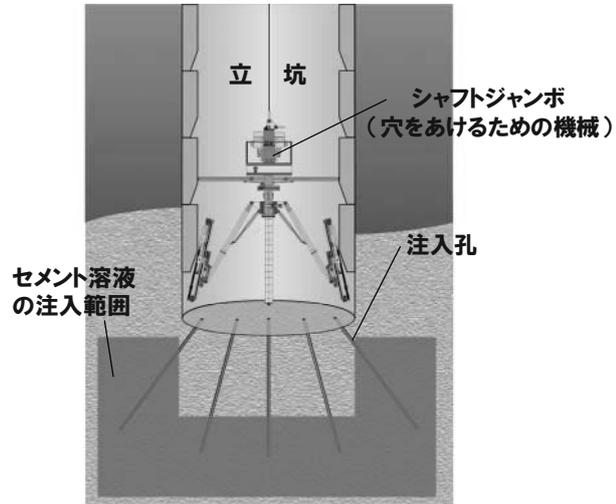
ふっ素・ほう素低減のための設備

「瑞浪超深地層研究所に係る環境保全協定」にもとづき放流先河川における環境基準に適合する濃度に低減させる処理を継続

- 「瑞浪超深地層研究所に係る環境保全協定」を締結（平成17年11月14日）（岐阜県・瑞浪市・原子力機構）
- 同協定に基づき、「環境保全に関する基準書」を関係自治体と協議の上、作成（平成17年11月16日）

プレグラウチング

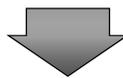
<シャフトジャンボを用いた例>



湧水量を低減させるため、岩盤の割れ目や隙間などにセメント溶液（材料：普通ポルトランドセメント）を注入

瑞浪超深地層研究所の安全・環境管理

岐阜県及び瑞浪市と「瑞浪超深地層研究所に係る環境保全協定」を締結



研究坑道の掘削工事等に伴い発生する地下水や掘削土については、「瑞浪超深地層研究所に係る環境保全協定」に基づき管理を行っており、測定の結果については毎月自治体へ報告するとともに、公表。

測定結果が参考値を超えている場合は、対象となる掘削土を専門の処理施設へ搬出し、適正に処理する



本協定を遵守し、研究所からの排水や周辺地域の水質測定、研究所内の掘削土の溶出量の測定等を行い、環境保全に努めています



試料採取の様子

坑道掘削領域の地質環境情報の取得

両立坑坑底からのパイロットボーリング調査(2006(平成18)年実施)

目的

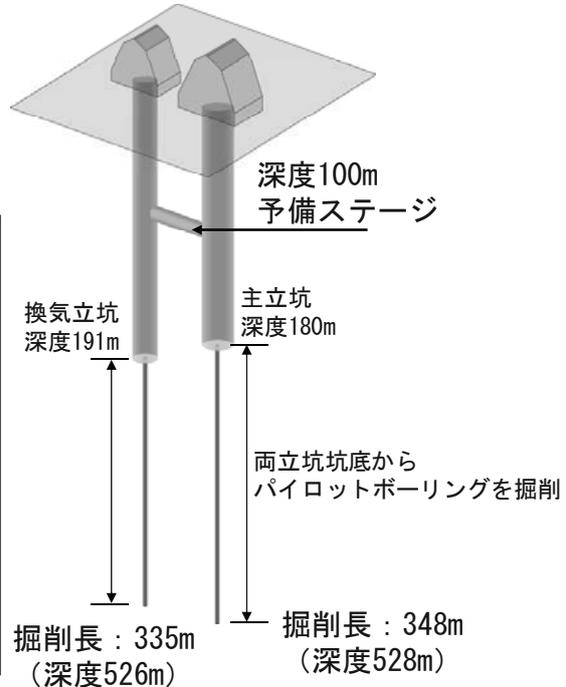
「立坑掘削領域」の情報として深度500mまでの地質・地下水状況を、立坑掘削に先立ち把握する

● 換気立坑

- ・硬質な花崗岩
- ・深度200m～250m付近に低角度傾斜を有する割れ目の集中帯が分布
- ・顕著な湧水の可能性(高透水性区間、湧水圧約1.0MPa)
⇒プレグラウチングの対象箇所として設定

● 主立坑

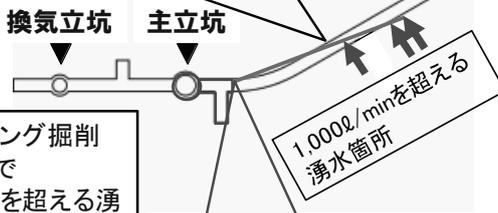
- ・粘土変質を伴った脆弱な花崗岩
- ・遮水性の機能を有する断層と推定
⇒部分的に補強対策を行い安定性を向上
ボルトによる補強と地山改良により掘削面の安定性を向上



坑道掘削領域の地質環境情報の取得

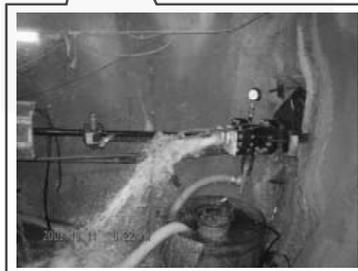
深度300m研究アクセス坑道の掘削に先立つボーリング(先行ボーリング)調査(2008(平成20)年実施)

先行ボーリング(掘削長62.5m)を実施し地質、地下水状況を把握

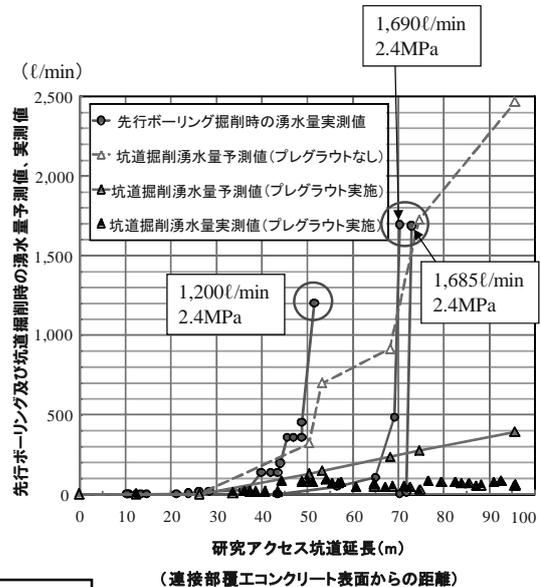


先行ボーリング掘削時に3箇所ですべて1,000ℓ/minを超える湧水が発生(最大1,690ℓ/min、湧水圧2.4MPa)

坑道掘削に先行してプレグラウチングを行い、掘削時の湧水を抑制する対策を実施した後、坑道を掘削

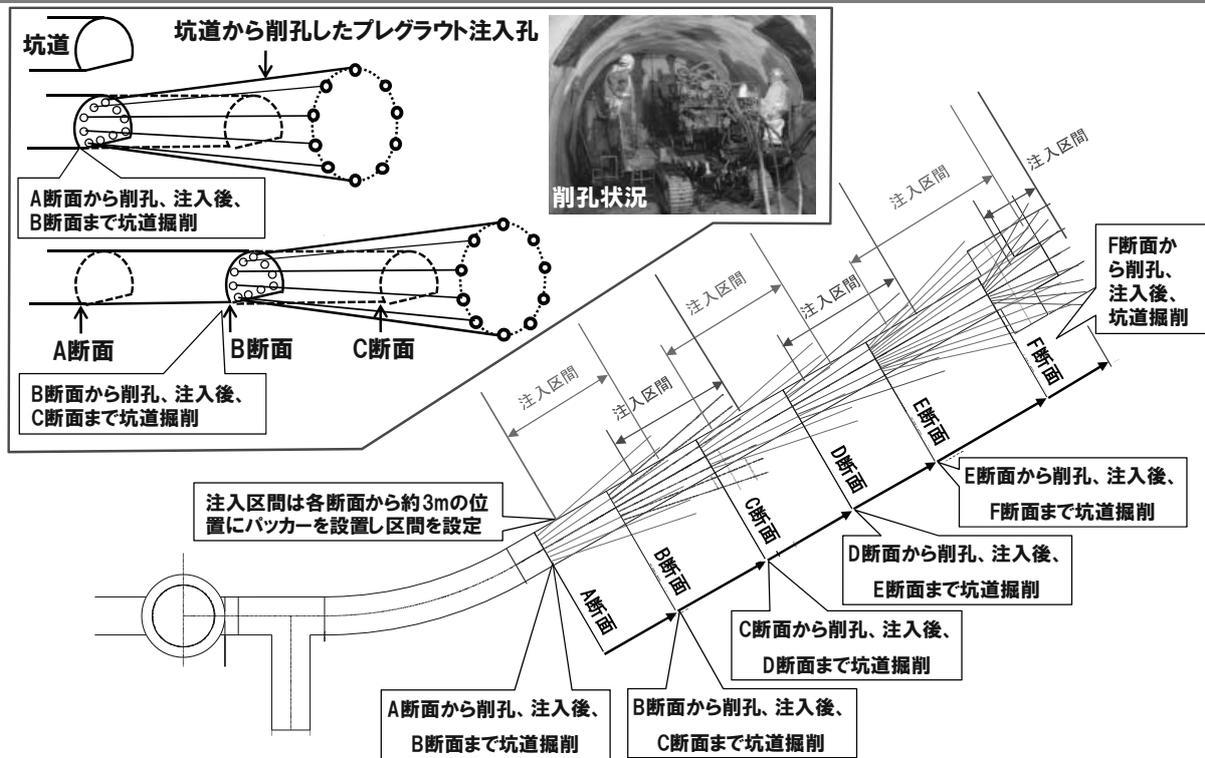


先行ボーリング掘削時(バッカー挿入作業)の湧水(湧水量:1,200ℓ/min)



(接続部覆工コンクリート表面からの距離)

深度300m研究アクセス坑道における プレグラウチングと坑道掘削の概要



プレグラウチングの実施位置

換気立坑深度約190~220m

- 低角度傾斜を有する割れ目の集中帯の掘削において、連続した透水経路から大量の湧水が発生することが想定された

⇒ プレグラウチングを実施
(換気立坑側の接続部、ボーリング横坑、深度約220mまでを対象)

プレグラウチングの成果

- 地質、地下水状況をもとに湧水量の抑制目標を定め、仕様(周辺の透水性を低下させる割合やグラウト材料を注入する範囲など)について検討

⇒ 目標範囲内の湧水量で坑道掘削を進めることができ、設定した仕様により湧水抑制を達成

- 地下施設における湧水対策技術の一つとして適用性を確認していく

深度300m研究アクセス坑道

- 先行ボーリング掘削時に3箇所1,000ℓ/minを超える湧水が発生

⇒ プレグラウチングを実施
(坑道延長約100mのうち、主立坑側から約40~100m区間を対象)

深度300m研究アクセス坑道(壁面観察)

地域交流と情報発信



2002(平成14)年
瑞浪超深地層研究所造成工事着工(7月)

2003(平成15)年
瑞浪超深地層研究所立坑掘削工事着工(7月)

2007(平成19)年
見学者数:2002.4~2007.10 累計10,000名到達

2008(平成20)年
見学者数:2008.4.1~2009.3.31 3,294名

2009(平成21)年
見学者数:2009.4.1~2009.10.20 1,794名



坑道内における見学者への説明

おわりに

- 環境保全に努め安全第一で工事を進めていく。
- 工事の安全性向上と、湧水抑制対策として予測した状況に応じグラウチングを行いつつ、掘削を進めていく。
(知見の集約、技術の蓄積により、的確な湧水抑制対策を確立していく。)
- 今年度の予定
 深度400m以深の主立坑、換気立坑掘削
 深度400m予備ステージの整備

3.1.3 JAEA 知識マネジメントシステムと中期計画取りまとめ“CoolRep”の概要

独立行政法人日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門
 研究開発統括ユニット 知識化グループ
 日置 一雅

(1)はじめに

独立行政法人日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)では、国が示した中期目標や関連する計画・方針に従って定めた原子力機構の中期計画(平成17年10月1日～平成22年3月31日)¹⁾に基づき、地層処分技術に関する研究開発として、地層処分研究開発およびその基盤となる深地層の科学的研究を進めている。中期計画では、研究開発成果を包括的な報告書と地層処分の安全確保の論拠を支える知識ベースとして取りまとめることとしている。

ここでは、知識ベースを適切に管理するための JAEA 知識マネジメントシステム²⁾の概要および知識マネジメントシステムを利用して研究開発成果を取りまとめる次世代型報告書“CoolRep”^{※1}の概要を紹介する³⁾。

※1:膨大な知識を従来のような大量の紙ベースの文書として取りまとめるのではなく、最新の知識工学や情報工学の技術を活用することで環境に優しい(紙資源を節約する)形態で展開することから、「クールビズ」をもじって命名したものの。

(2)背景

放射性廃棄物の地層処分の特徴は、将来数万年といった極めて長い時間を対象として安全性を確保しようとする点にある。こうした超長期にわたる地層処分の安全性は、実際に体験することができないため、地層処分の安全性と信頼性に関する議論と証拠の統合であるセーフティケースと呼ばれる考え方に基づく説明によって、安全に対する社会の理解を得ていく必要があることが広く認識されつつある⁴⁾。

地層処分の安全性を示すための論拠には、多くの学問分野の多量の知識が関わる。また、関連する知識は数十年以上にわたる処分事業期間を通して増加し続けると考えられる。こうした地層処分における知識を安全性の説明の枠組みの中で位置づけ、関係者間で共有することが重要であり、そのための新たな場(プラットフォーム)の構築が求められる⁵⁾。

原子力機構では、このような地層処分技術のカギとなる知識を適切に体系化して管理し、関係者や将来の世代に伝承・継承していくことを目的として、平成17年度より、最新の情報技術や知識工学技術を活用した知識マネジメントシステムの開発に取り組んできた。併せて、地層処分に関連するステークホルダーの要求に応じて知識や情報をスムーズに提供するための新しいアプローチとして、知識マネジメントシステムとリンクした“CoolRep”を開発してきた。

(3)知識マネジメントシステムの概要

知識マネジメントシステムは、地層処分技術の知識に関わる生産、利用、保存・更新、伝達といった種々の作業を支援するため、大きく知識ベースとマネジメント機能から構成している。

知識ベースでは、研究開発で得られたデータ、ソフトウェア、情報、報告書などのすでに形式化されて

いる知識(形式知)を構造化するのみならず、専門家の経験やノウハウなどのいわゆる暗黙知に依存する部分をできるだけ引き出して組み込んでいく。地質環境の調査・理解に関わる知識には、このような暗黙知に類するものが多々あり、深地層の研究施設計画で得られた研究開発成果などを如何に活用できるようにするかが重要である。こうした成果は、地層処分場の候補地点においてその地質環境を調査する際に最大限利用できるようにしておくため、国の調査事業を受託して進めている「地質環境総合評価システム(ISIS)の開発」にも活用している⁶⁷⁾。

マネジメント機能としては、知識ベースに格納されている知識が、安全性を説明するという観点からどのように利用されるのかを透明性をもって示すための論証支援機能などが中心となる。この機能を実現するため、「地層処分は長期的に安全である」という主張に関する説明を、主張の根拠となる種々の「論証」と、その論証に対して考えうる「反証」との連鎖で表現する討論モデルの考え方を利用している。また、地層処分実施主体や規制関係機関だけではなく、地層処分に関わる様々なステークホルダーにとって使いやすいシステムにするために、知識ベースに対して、最新の検索技術を最大限活用したパワフルで効率的な検索機能を備えるとともに、複数のホームページに対する同時検索を可能する機能(中間スキーマインターフェース)などを持たせるように設計している。

(4) CoolRep の概要

CoolRep は、ウェブサイト上のレポートであり、セーフティケースの作成に資する知識基盤を提供するという観点から研究開発の最新の状況や今後の研究開発の方向性などを提示して、地層処分に関連するステークホルダーの要求に応じた知識や情報をスムーズに提供することを指向したものである。この目的のため、CoolRep の構造を次のように考えている。

- セーフティケースを念頭において作成する「要約」(50 ページ程度)
- 階層化の手段として、「要約」と知識マネジメントシステムで管理される個々の研究開発成果とを結びつける「カーネル」^{※2}と名付けた中間層
- 「要約」から、ハイパーリンクあるいはカーネルを介して接続される個々の研究開発成果(例えば、より詳細な技術的情報を提供する報告書、ビデオやアニメーションなどの可視化支援資料、レビューや品質保証に関するすべての資料、関連するウェブサイトなど)

※2: 中期計画期間の成果を中心に研究開発の状況を簡潔に取りまとめるもの。「性能評価」、「処分場の工学技術」、「深地層の科学的研究」、「知識マネジメントシステム」、「品質マネジメントシステム」について作成することとしている。

このような構造と技術的深さに応じたハイパーリンクの階層化により、ステークホルダーがそれぞれの立場から必要とする情報の提供、要約の中の関連する場所(テキスト文書)から技術的な情報へのアクセスが可能となり、「見たいものがすぐに見られる」ことによる理解の効率化などが可能となる。

(5)まとめ

原子力機構では、平成 21 年度末を目途に、CoolRep と知識マネジメントシステム(プロトタイプ)を公開予定である。今後、CoolRep と知識マネジメントシステムの利用を通じて得られた要望を反映しながら引き続き方法論やツールの改良・高度化を図っていく予定である。

参考文献

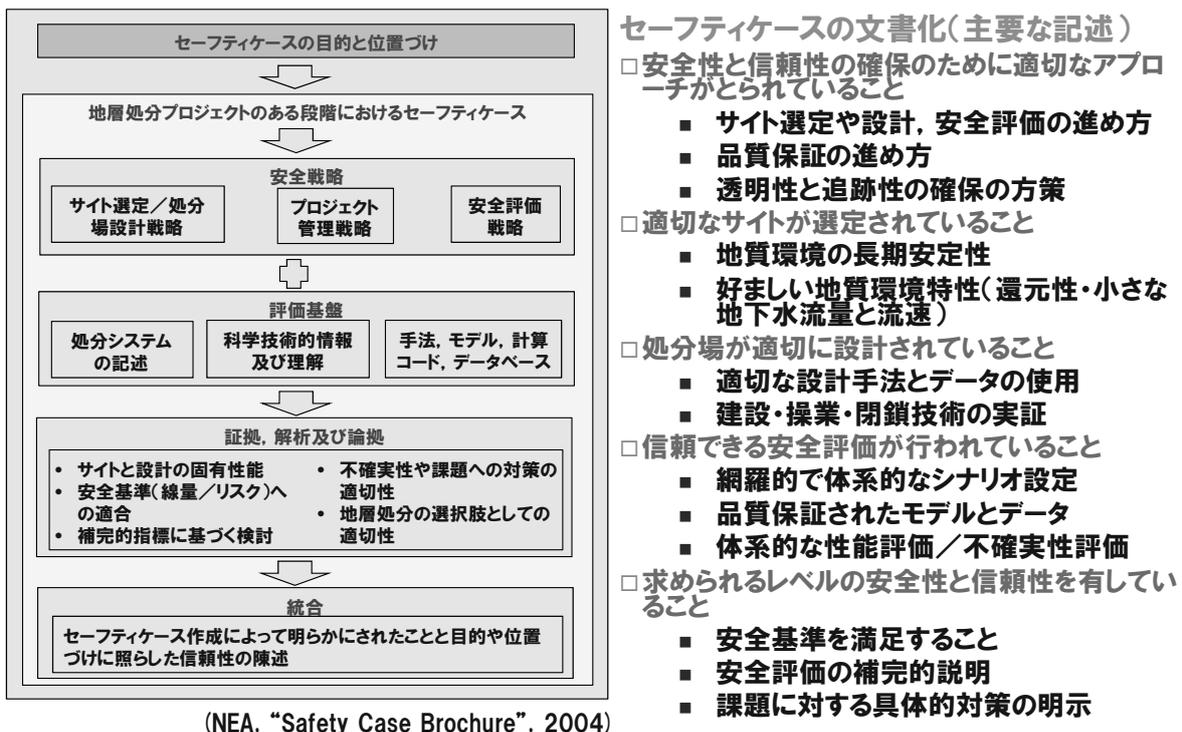
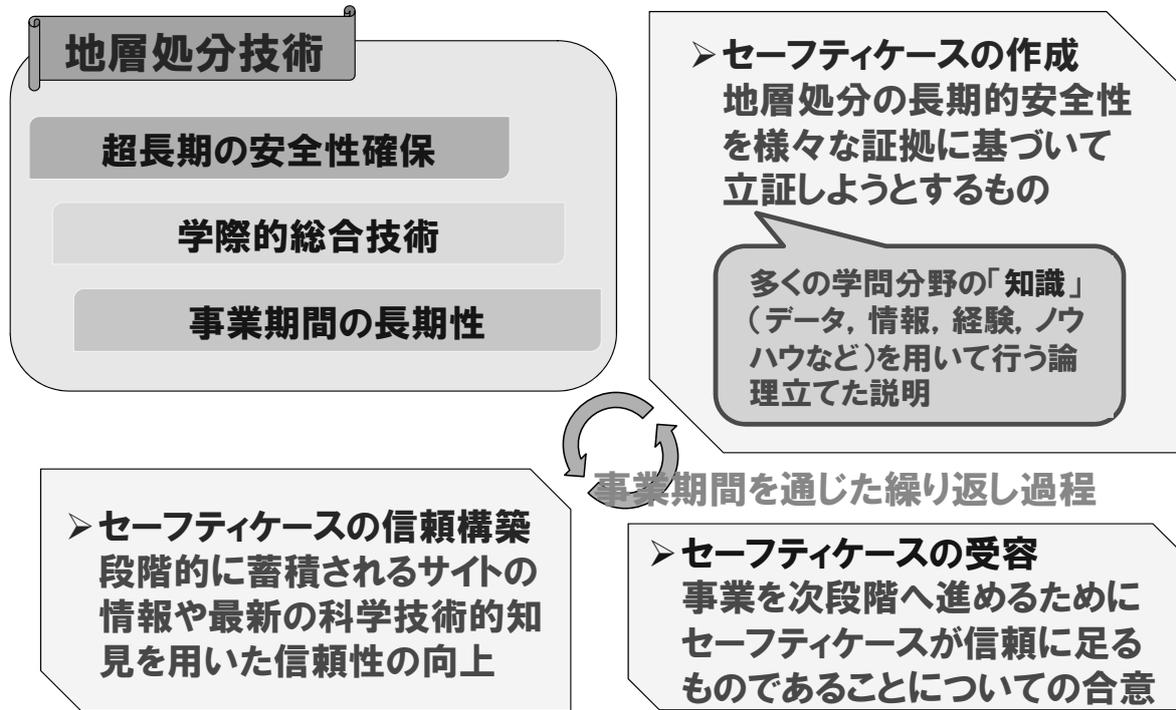
- 1) NEA(2008) : Safety Cases for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Where Do We Stand?, Symposium Proceedings, Paris, France, 23-25 January 2007, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, ISBN 978-92-64-99050-0.
- 2) 大澤英昭, 梅木博之, 牧野仁史, 高瀬博康, イアン・マッキンレー, 大久保博生“地層処分技術に関する知識マネジメントシステム的设计概念”, 火力原子力発電, Vol.59, No.6, pp.26-33, (2008).
- 3) <http://www.jaea.go.jp/01/pdf/keikaku18.pdf>
- 4) <http://www.jaea.go.jp/04/tisou/houkokukai/houkokukai.html>
- 5) 大澤英昭, 梅木博之, 牧野仁史, 日置一雅, 高瀬博康, “地層処分技術に関する知識マネジメントシステム的设计研究－安全性の論理構造を用いた共有プラットフォームの構築－”, 研究・技術計画学会第 23 回年次学術大会予稿集, 2E11, pp.872-875, (2008).
- 6) Osawa, H., Umeki, H., Ota, K., Hama, K., Sawada, A., Takeuchi, S., Semba, T., Takase, H., McKinley, I. G. “Development of Next-generation Technology of Integrated Site Characterization for Deep Geological Repositories”, Proceedings of WM2009 Conference, March 1-5, Phoenix, AZ, 9132 (2009).
- 7) 地質環境総合評価技術高度化開発(ISIS)－国内外の沿岸域における物理探査・ボーリング孔での検層技術を対象とした情報の抽出及び分析－, 宮本哲雄, 藪内聡, 松岡稔幸, 浅森浩一, 山中義彰, 仙波毅, 第 25 回バックエンド夏期セミナー, 2009 年 7 月

JAEA知識マネジメントシステムと 中期計画取りまとめ”CoolRep”の概要

平成21年10月27日

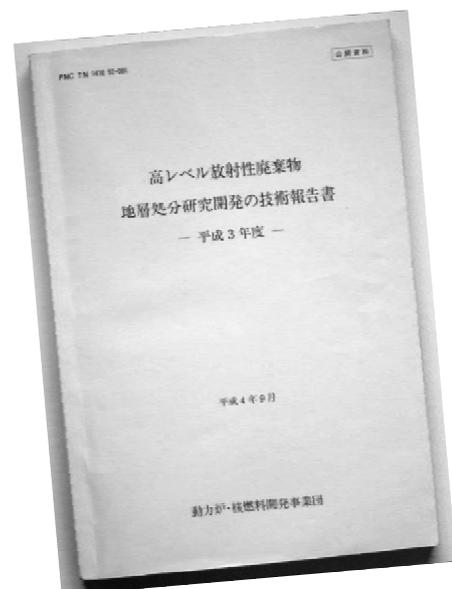
研究開発統括ユニット
知識化グループ
日置一雅

CoolRep(クールレポ)



- 研究開発はセーフティケース(SC)に役立つものであるべき
⇒地層処分のステークホルダーは何らかの形でSCに関連
 - SCは、知識を生産する研究機関の支援を得て実施主体により開発
 - 規制機関や特定のステークホルダーグループによりレビュー
 - ステークホルダーや意思決定者の議論の焦点
 - 専門家や非専門家, それぞれ必要とするレベルで関連情報を利用
- 研究開発への期待(原子力委員会:原子力政策大綱(2005年), 政策評価部会報告書(2008年), 原子力安全委員会:原子力の重点安全研究計画(2004年), 地層処分基盤研究開発調整会議:全体計画(2006年)など)
 - 研究開発や技術開発の全体像の提示
 - 国民の理解の促進(安全確保の考え方, 技術的課題に対する取り組みの進捗状況や将来の見通しに関する分かりやすい説明)
 - 技術移転や伝承のための適切な仕組み
 - 技術データに関する国際的な水準での品質保証
 - 将来の原子力計画を見通した研究
 - ……

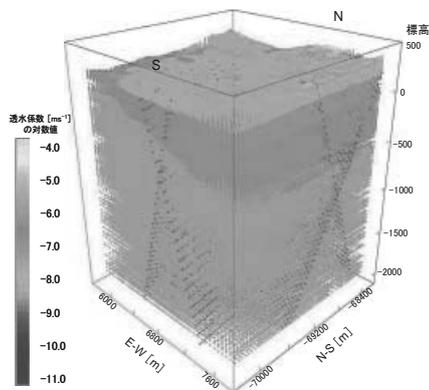
- 初期には,地層処分システムの統合的性能評価はすべてのプロジェクト要素を概観する少人数のチームによって実施
- 報告書類は, 単独の報告書(あるいは少数の報告書群)として伝統的な技術分野(地質環境, 工学技術及び安全評価)に沿って作成
- 内容の品質保証は, 内部レビューあるいは限られた範囲の外部レビューに基づく, 「定型化」されていない方法で実施



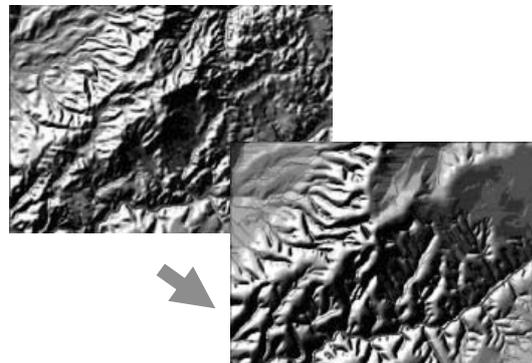
- 20世紀末までに、プロジェクトに関する文書化には多数の報告書をシリーズとして取りまとめる必要性が生じた
- 各報告書はそれぞれの内容に対応した専門家によるチームによって作成され、個々の分野においてさえ全体を概観することが次第に困難となった → 重複や全体としての整合性の確保に関する問題の発生
- 定型化された品質保証プロセスが導入されたが分量の多さから適用に限界



- 最初の統合性能評価(H3)報告書は約400ページ、9年後の第2次取りまとめ(H12)では約2000ページに増加
- 最も難しかった点の一つは、地質環境、工学技術、性能評価に関連する多量の情報／データを統合すること
- 将来的にはHLW/TRU廃棄物処分場全体を対象とした3次元、時間依存のより統合的なモデルの取り扱いによってさらにデータ量が増加



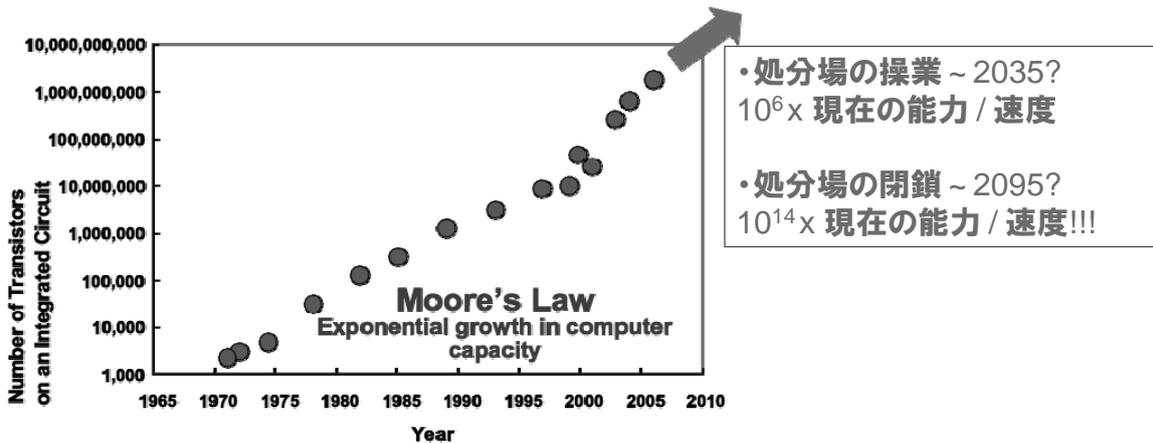
3次元水理地質モデルによる透水性係数の分布



東濃地域の3次元地形変化予測の例



- 情報爆発はコンピュータ能力の発展によって加速
 - 今後もこの傾向は持続 - 2002-2007年の間にさらに加速, 倍増する時間は3年から1.5年に短縮!
- 放射性廃棄物処分分野では特に問題: 研究開発計画の作成にあたって事業期間の長期性に留意することが必要
 - 従来型アプローチでは破綻する可能性大



- 報告書作成に関する息の長い新たなアプローチの開発
 - 世界的傾向にある情報爆発への対処
 - 平成17年報告書(H17)において指摘され, JAEAは新たなプロジェクトとして先進的な知識マネジメント技術の開発(JAEA KMS)を開始
 - 繰り返し作成されるセーフティケースを継続的に支援するための研究開発成果の提供という要求への対処
 - 技術移転を継続的/効率的に実施することが必要
 - 国民理解の促進のためには, 「様々な読者自身が知りたいと思う情報を欲しいときにすばやく引き出せる」ことが重要(情報の非対称性の解消→「道路地図」から「カーナビ」へ)

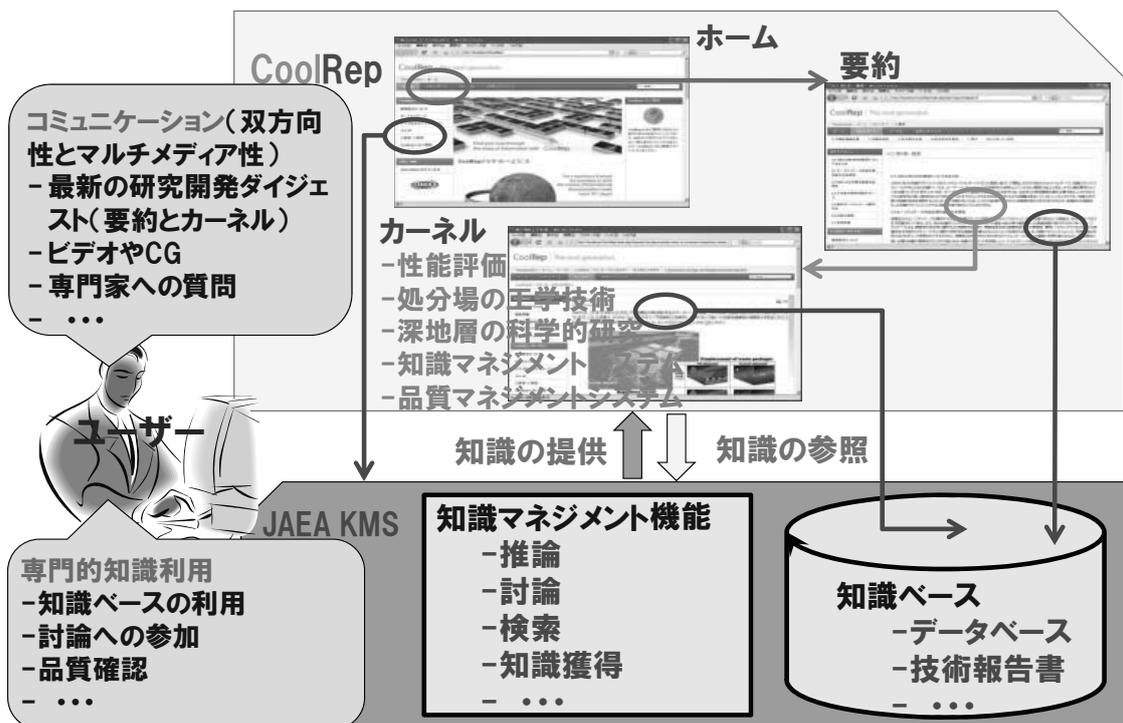
- 知識マネジメントシステムとリンクした“次世代型文書化-CoolRep”
 - 関連する多量の情報の取り扱い
 - 多数の関係者がアクセス可能なユーザーフレンドリーな方法を提供
 - より透明性の高い品質保証の実施
 - 必要な研究開発の特定と限られた資源の下での優先順位付けに関するプロセスの支援
 - ユーザーからのフィードバックによる情報の構造化のための方法論やプレゼンテーションのためのソフトウェアの改良(自律的進展機能:例えばサイト選定や許認可のためのセーフティケースの作成といった重要なマイルストーンにおける適用に向けた継続的改良)

● CoolRep(クールレポ)とは？

- ウェブサイト上のレポート, 「クールビズ」をもじって命名
- セーフティケースに資する知識基盤を提供
- 主要なマイルストーンにおける研究開発の位置づけや到達点に関するメッセージ
- ステークホルダーの要求に応じて知識や情報をスムーズに提供
- JAEA KMSの進展に応じて進化する「生きた文書」

● 構造

- セーフティケースを念頭に置いて作成する要約(50ページ程度)
 - 蓄積された研究開発成果のダイジェスト
 - 将来のセーフティケースに求められる知識の範囲や必要となるKMSのあり方を提示するとともに, これに基づいて開発されるKMS自体を取り込んだ報告書
- 階層的ハイパーリンクにより接続されるサポート情報, 例えば:
 - より詳細な技術的情報を提供する報告書や重要な参考文献
 - ビデオやアニメーションなどの可視化支援資料
 - レビューや品質保証に関するすべての資料
 - 関連するウェブサイト
- 要約とJAEA KMS内の個々の研究開発成果とを結びつける「カーネル」の導入



- 要約による研究開発の全体像の提示
 - セーフティケースにおける研究開発の意義や位置づけを明示
- 迅速な情報提供による研究開発に関する理解の効率化
- 技術的な深さに応じたハイパーリンク(ユーザーの要求に即した情報提供)
- ピアレビューを実施したテキストとのリンクによる品質保証の透明性と追跡性の確保
- 報告書作成過程の管理への効用
 - マスター文書による修正履歴管理
 - 報告書全体を通じた情報の一貫性の確保
- JAEA KMSのエキスパートシステムを稼働させた模擬体験による地層処分技術の理解促進, 専門的作業のトレーニング

- Websiteの基本構成と役割
- 様々なリンクのデモ
 - CoolRep → カーネル → KB(データベース, 文献, …)
 - 双方向, マルティメディアコミュニケーションツールの紹介

CoolRepのメッセージ(案)

- 第2次取りまとめ及びTRU2次レポートは、日本における高レベル放射性廃棄物／TRU廃棄物の安全な地層処分が基本的に実現可能であることについて確かな基盤を提供、その後の著しい科学技術の進歩に照らしても基本的な結論はなお有効
- この日本全体を視野に入れた一般的な技術基盤は、それ以降、実施主体、安全規制機関、JAEAを含む研究開発機関によって進められている事業段階の研究開発によって、特定の候補サイトが明らかとなった際に適用可能とするため、以下の観点から強化が図られてきた：
 - 候補サイトの地質学的、地理的、社会政治学的条件の考慮
 - 閉鎖後の長期安全性を念頭に置いた処分場の建設・操業期間の安全性確保のための要件や実際的な制約条件を包括的に考慮
 - 「情報の非対称性」の問題認識－ステークホルダーへの積極的な情報提供
 - 安全性の確保を必須条件としたうえで、科学技術の進展や社会的条件の変化に応じた計画の変更を可能とする技術的柔軟性の確保
 - 研究開発の進展や科学技術の進歩、候補サイトが決まった後に行なわれる地質環境調査などによって今後も予想される関連情報の爆発的増加は従来の情報管理の方法を超えたものになりつつあるという認識と、これに対応するための先進的な知識マネジメントシステムの導入

CoolRepのまとめ

- 地層処分の知識基盤を体系化し、これを事業期間を通じて継続的に提供するための新しいアプローチとして、JAEA KMSとリンクした研究開発成果の統合方法CoolRepを提案し、基本機能の設計や実証を進めている。
- その意義と妥当性について様々な機会(OECD/NEA, IAEAなどの国際会議における紹介、ワークショップの開催(http://www.jaea.go.jp/04/tisou/kms/kms_chishiki.html), 外部専門家による評価委員会(地層処分研究開発・評価委員会等)によるレビューなど)を通じて確認し支持を得た。
- CoolRepの方法論はなお開発途上であるが、最新のITや知識工学の技術の利用により実現可能との結論に至っている。
- 今後、CoolRepH22とJAEA KMS(プロトタイプ)の公開(平成22年3月予定)による幅広い利用を開始し、利用者の要望を反映しながら引き続き方法論やツールの改良・高度化を進めるとともに、研究開発による継続的な知識の創出、拡充、更新に資する計画である。

知識マネジメントシステム(KMS)

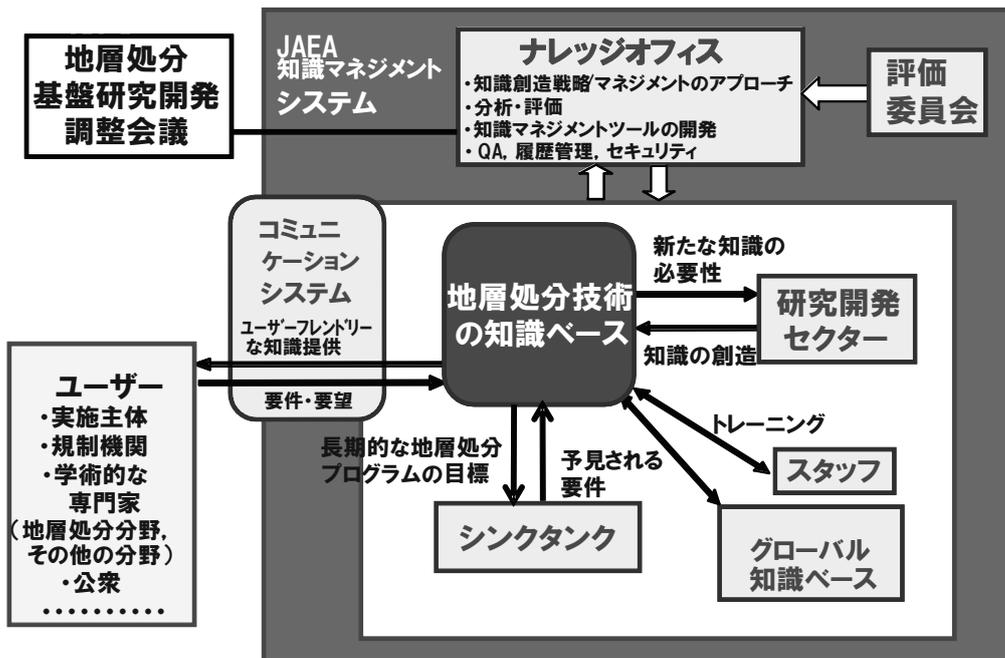
JAEA KMS とは？

- **知識**
 - 地層処分プロジェクトを支える全ての科学技術(社会科学, 経済学, 医学などを暗に内包)を示す広い意味で使用
- **知識ベース**
 - 種々の媒体(文書, 電子ファイルなど)によって体系的に保存し必要に応じて直ちに取りだせるようにされている様々な知識
- **知識マネジメント**
 - 知識ベースを構築, 保存, 更新, 伝達, 共有するとともに知識の作成と活用を支援するための行為
- **知識マネジメントシステム(KMS)**
 - 知識マネジメント機能 + 知識ベース

- 地層処分 — 極めて長い時間、安全性を確保
- 研究開発 — 多分野
- 数十年以上にわたる処分事業期間 — コミュニケーション、人材育成
- 「情報の爆発」
- 従来の方法では管理しきれない
- 必要な情報に容易に辿り着けない
- 指数関数的に成長する知識ベースに対応可能であることが必要
- データ生産者にフィードバックを行なうことができる機能が必要

- 暗黙知の文書化は、形式知の文書化より困難。
- 暗黙知の例
 - 実験手法のノウハウ、
 - システム性能評価における留意点、
 - 地質環境調査上のノウハウ など
- 暗黙知は、危機に瀕している
 - 技術伝承
 - 人材育成
 - 組織の財産の継承
- E-Learning などの新しい可能性

- ユーザーのニーズに対応できるシステム
- 先進的な知識工学的技術、エキスパートシステム、人工知能を利用
- 知識ベースの厳密な構造化を必要としない
- 機能
 - 知識ベースの維持、更新、アクセスの促進
 - 知識生産者とユーザー間の効果的インターフェース
 - 自動化することができないタスクを実行するための暗黙知の開発

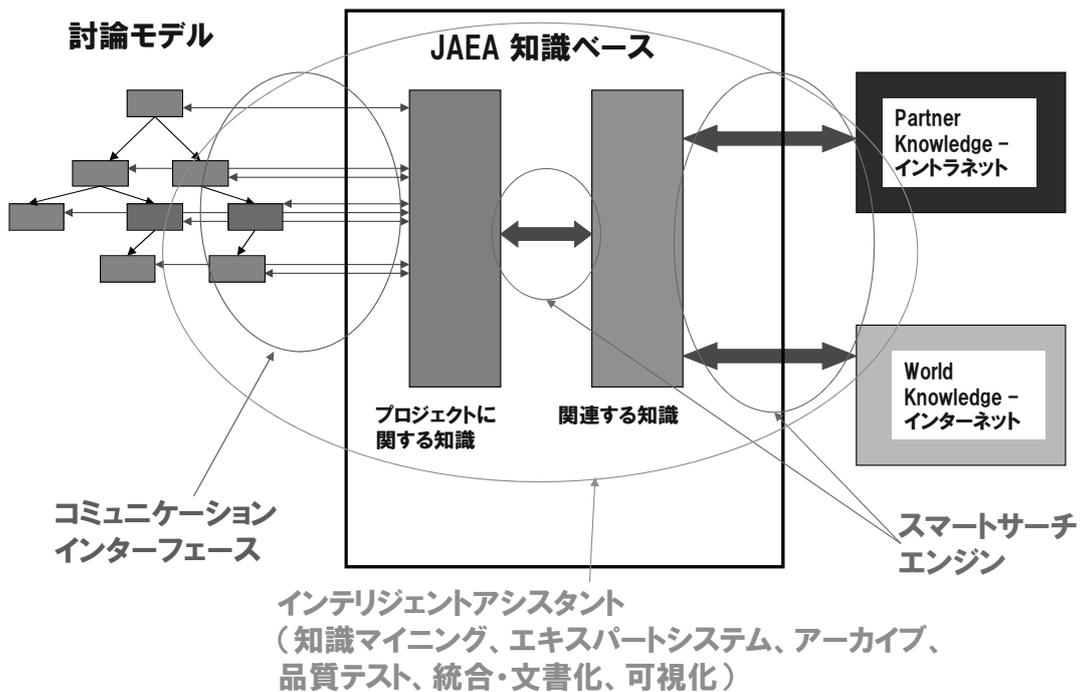


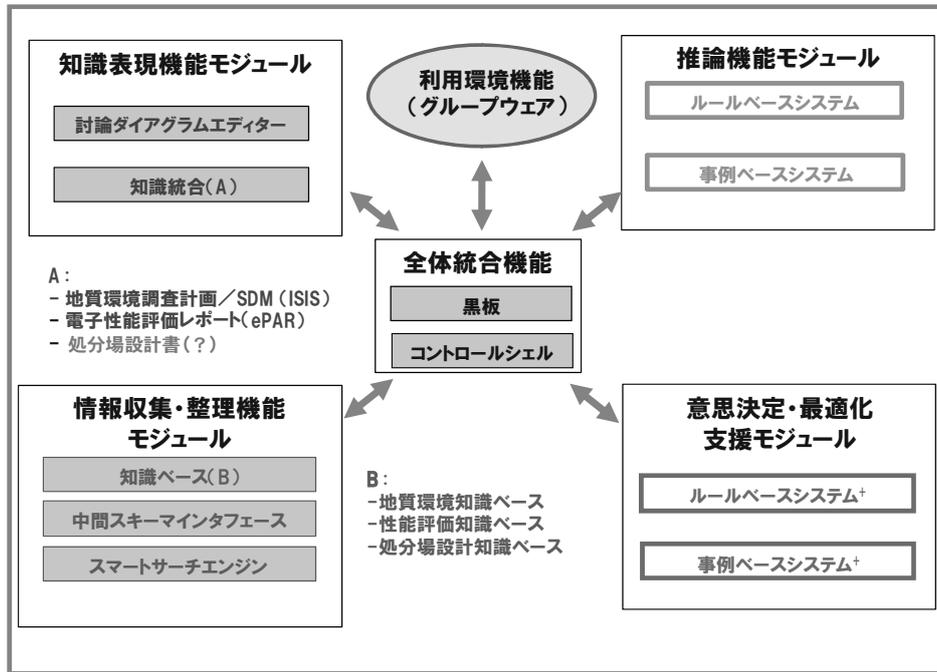
JAEA KMSの中身

知識形態	マネジメント機能	内容	必要な開発項目	コメント
データ	データマネジメント	- 生データ(内部) - 抽出データ(外部作業用) - 処理データ	- 自律的なQA - データマイニング - 自律的データ	- 国際協力が有効な分野
ドキュメント	ドキュメントマネジメント	- 作成文書 - 外部で作成された主要文書	- 頑健なアーカイブ - 自律的QA/カタログ化/相互参照	- 電子的なアーカイブが決定的な課題となる分野
ソフトウェア	ソフトウェアマネジメント	- 関連するすべてのコード/ データベースのアーカイブ - マニュアル&ハンドブックの アーカイブ - 関連する出力のアーカイブ	- 頑健なアーカイブ - 自律的変更管理 - 定式化されたQAアプローチ	- 電子的なアーカイブが決定的な課題となる分野
経験・ノウハウ (方法論)	リソースマネジメント	- 手順書 & ガイドブック - エキスパートシステム - トレーニング資料	- 経験保存のためのエキスパートシステムの利用 - 次世代専門家へのトレーニング	- 国内(あるいは地域的)トレーニングセンターからの強い要求が想定
統合化した知識	知識統合	- 経験をつんだ統合チーム - エキスパートシステム	- 主要な統合プロセスの明示 - QAアプローチの提示	- 自動化への強い潜在的ニーズ
ガイダンス	知識コーディネーション	- 経験をつんだ調整チーム	- 要件の予測(シンクタンク) - 知識における主要なギャップを解消するためのアプローチ	- 自動化は極めて困難
プレゼンテーション シヨン素材	ユーザー/生産者の対話	- ユーザーフレンドリ・インター フェイス(対話を可能とする インタラクティブな機能)	- 複雑な情報を提示するための高性能グラフィカルインターフェイス	- 様々なステークホルダーの要求への対応

朱書きは部分的ではあっても先進的なITの適用が可能と考えられる項目

JAEA KMSの主要要素間の関係





*: 既往のソフトウェアを利用
+: 推論機能モジュールを利用

- セーフティケースと意思決定の履歴管理
- 安全性に関する新たな論拠の作成
- 現状の知識におけるギャップの発見と解決策の提示
- ステークホルダー間のコミュニケーションの促進
- 理解促進のための知識の普及
- 概念や用語の統一化
- 分野間のインターフェースの明確化

2010年にプロトタイプを公開



探す

情報、データ、ソフトウェア

内容を理解する
手伝ってもらう

わからないことを調べる
仕事を支援してもらう

記録する

知識を加える、更新する

コミュニケーション

関係者への周知・連絡・意見交換

3.2 知識ベースのソース/平成 17 年取りまとめ以降の進展と今後の挑戦

3.2.1 超深地層研究所計画

3.2.1.1 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備

独立行政法人日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門

東濃地科学研究ユニット 結晶質岩地質環境研究グループ

濱 克宏

(1)はじめに

東濃地科学センターが実施してきている地層科学研究は、昭和 61 年に開始されて以来、広域地下水流動研究¹⁾(平成 4 年～)、超深地層研究所計画²⁾(平成 8 年～)などとして進められ、現在、超深地層研究所計画は第 2 段階(研究坑道の掘削を伴う研究段階)の調査研究を実施しているところである。これら研究の実施を通じて整備してきた地質環境特性の調査・解析・評価技術については、報告書類、論文、学会発表により公開してきた。これらの成果を知識ベースとして活用³⁾するためには、知識ベースを含む知識マネジメントシステムの利用者にとって、使いやすい形で示していくことが必要である。

上述の報告書や論文には、地質環境調査・解析・評価技術の内容や解析結果は詳細に記述されているものの、その使用方法や結果に至るまでの検討の流れや判断ポイントおよびその根拠などのノウハウは必ずしも明示的に示されていない。それらは、多くの場合、論文や報告書の執筆者の“ノウハウ”として蓄積されている。こうした、一般に暗黙知と呼ばれるノウハウをできるだけ汎用性のある形で整理し、表出化することは調査・評価技術の信頼性や適用性を高める上で、また技術移転や教育の観点から極めて有効であると考えられる。

専門家に内在する判断のノウハウや判断根拠を表出化する方法として、if-then 形式のルールとして整理することが挙げられる。これらのルールに基づくエキスパートシステムを構築すれば、当該分野の経験が必ずしも豊富ではない研究者でも、このシステムの支援を得てより容易に検討を行うことが可能となる。最近の知識工学技術の進展により、エキスパートシステムは、医療診断や化合物の化学構造式の決定など幅広い分野において再び活用されはじめており⁴⁾、日本原子力研究開発機構では世界に先駆けて放射性廃棄物の地層処分分野(例えば、地質環境調査や地質環境のモデル化)への適用を開始している。地質環境調査では、患者の診断や化合物の構造式の決定とは異なり、調査対象の不均質性や情報の量的な制約などに起因する不確実性が大きく、このようなルール化はチャレンジングな作業である。

本報では、地質環境調査・解析・評価技術のうち幾つかの例について、最近の成果を示すとともに知識ベースとして活用するための知識の整理およびエキスパートシステムの構築の結果を紹介する。

(2)平成 17 年取りまとめ以降の主な研究成果

研究開発成果を知識マネジメントの観点から体系化する方向性が打ち出された平成 17 年取りまとめ⁵⁾以降、地層科学研究は、超深地層研究所計画を中心に調査研究が進められてきた。

超深地層研究所計画の進め方の特徴は、安全評価や地下施設的设计・施工、環境影響評価の観点

から調査・評価すべき地質環境特性やプロセスを整理し、それらを把握することを個別目標と課題として整理していること、リージョナルスケールからブロックスケールまでの四つの空間スケールを設定していること、浅層ボーリング調査、深層ボーリング調査を順次実施するといった段階的な調査・解析を実施していることである。さらに、調査研究の個別目標と課題に対して、調査の種類と組み合わせ、取得するデータの種類、データの解釈および異なる分野で得られた情報の統合を示す統合化データフローダイアグラムを構築している。

第1段階調査研究では、以下のような研究成果が得られている⁶⁾。

- ・実際の地質環境を対象とした調査研究の計画立案、調査、データ解釈、解析・評価の各検討過程を通じて得られた技術的知見(ノウハウや失敗例)を基盤技術として整理。
- ・地質環境の理解度や不確実性の評価結果に基づき、対象項目の優先度を明確にした調査研究計画の策定が有効であることを確認。
- ・結晶質岩を対象とした主要な調査技術および解析技術に係る技術的知見(例えば、ボーリング調査における透水性構造を抽出するための流体検層手法や水理試験手順、物理探査データの解析手法などの有効性)および経験を蓄積。
- ・個別の調査研究における品質管理体系と実施体制作りが調査を適切に進める上で有効であることを確認。

第1段階で残された重要な課題として、「実際の地質環境に適用可能な体系的な技術の提示」に関する信頼性の向上が挙げられる。このために、第2段階以降の調査研究では、第1段階の課題の解決と調査研究成果(例えば、地質環境モデルや地質環境の変化の推定結果など)や設計・施工技術の妥当性の確認を行うとともに、繰り返しアプローチに基づく段階的な調査研究を継続することにより、地層処分にとって重要な地質環境特性に係る理解度を深めるための調査・解析・評価技術の体系化を図ることを念頭に、調査研究を進めてきている。

(3)知識ベースの構築

上述のように、地質環境を理解するための一連の方法論の検討過程で得られた経験やノウハウを知識化することが、第2段階における重要な課題の一つである。この課題を解決するために、地質環境調査や地質環境のモデル化などに関わる知識を抽出し、知識ベースとして整理を行った。

これまでに、統合化データフローダイアグラムに示された個々のボックス(データ、データセット、解析などのタスクなどを示す)について、そこに含まれるタスクなどを詳細に抽出し、知識を表出化させる作業を実施してきている。この際、地球化学分野を例にすると、熱力学計算のような汎用化されている知識とコア観察や鉱物の観察の結果の解釈といった専門家の暗黙知を区別することに留意した。また、こうした知識を、対象とする分野の専門家はもちろんのこと、当該分野の経験が豊富でない研究者にも活用できるように、判断の流れを“もし～であれば、～する。”の形式(if-then形式)のルールで整理し、これに基づきエキスパートシステム(ES: Expert System)を構築する方針としている。

これまでに、以下の8種類のESを構築している。

- ・孔壁画像調査方法選択支援 ES
- ・ボーリング掘削計画概要図作成支援 ES
- ・シーケンシャル水理試験実施支援 ES

- ・地下水流動場の理解支援ファジーES
- ・水質データの品質評価 ES
- ・水質形成プロセスモデル化支援 ES
- ・掘削水トレーサ選定支援 ES
- ・地下水滞留時間推定支援 ES

例えば、水質形成プロセスモデル化支援 ES は、使用者が所有する地下水水質および岩石・鉱物データセットを基にして、この ES に示される手順で解析を行うことにより、地下水の酸化還元条件を支配する主要な地下水－岩石反応の抽出を支援するものである。この ES では、主要な地下水－岩石反応抽出に関わる手順を以下のように整理し、これを if-then 形式のルールで表現している。

- ① 酸化還元電位を実測する。
- ② 一般的な相図上に実測値をプロットして反応に関わりそうな元素を推測する。
- ③ 詳細な相図に実測値をプロットし酸化還元反応を同定する。
- ④ 酸化還元反応式に実測された化学成分濃度を代入して、理論的酸化還元電位を計算し、実測値の誤差範囲内にあるか否か確認する。
- ⑤ 熱力学解析により酸化還元反応が平衡状態にあるか否か確認する。
- ⑥ 酸化還元反応式に関わる反応物質の産状を確認する。
- ⑦ 酸化還元反応に関わる溶存イオン、鉱物相の同位体を確認する。
- ⑧ 酸化還元反応に寄与する主要な地下水－岩石反応を特定する。

この ES は主要な地下水－岩石反応抽出の支援にあたり、関連する基礎知識や背景知識を提供する機能を有している。

(4)まとめと今後の挑戦

超深地層研究所計画の成果を示すとともに知識ベースとして活用する方法を検討した。これまでに実施した知識の整理およびそれに基づく ES システムの構築を通じて、地質環境調査のような専門的な判断が必要なタスクについても、知識工学的な手法を用いたルールベース化が可能な部分が多くあることがわかった。今後は、既存の解析コードへのデータの提供、計算結果のエキスパートシステムへの取り込みといった機能の拡張などの改良を行っていく。このような検討を継続して行っていくためにも、超深地層研究所計画の第 2 段階および第 3 段階の調査研究を着実に進め、地質環境調査や地質環境のモデル化などに関する経験、知識、ノウハウを蓄積していく。

なお、本報で述べた ES 構築に関わるツールの検討については、経済産業省からの受託研究「地質環境総合評価技術高度化開発」の成果⁷⁾の一部を活用した。

参考文献

- 1) 動力炉・核燃料開発事業団：“広域地下水流動研究基本計画書”，PNC TN7020 98-001 (1997).
- 2) 動力炉・核燃料開発事業団：“超深地層研究所 地層科学研究基本計画”，PNC TN7070 96-002 (1996).
- 3) 日本原子力研究開発機構：“「平成 21 年度 東濃地科学センター 地層科学研究 情報・意見交換会」資料集”，JAEA-Review 2009-049(2010).

- 4) 戸内 順一: 図解エキスパートシステム入門, 日本理工出版会(1997).
- 5) 核燃料サイクル開発機構: “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－”, JNC TN1400 2005-020 (2005).
- 6) 日本原子力研究開発機構: “超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第 1 段階)研究成果報告書”, JAEA-Research 2007-043 (2007).
- 7) 日本原子力研究開発機構: “地質環境総合評価技術高度化開発－次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発－”, JAEA-Research 2008-085 (2008).

超深地層研究所計画

深部地質環境特性の調査・解析・評価技術の基礎の整備

—平成17年取りまとめ以降の進展と今後の挑戦—

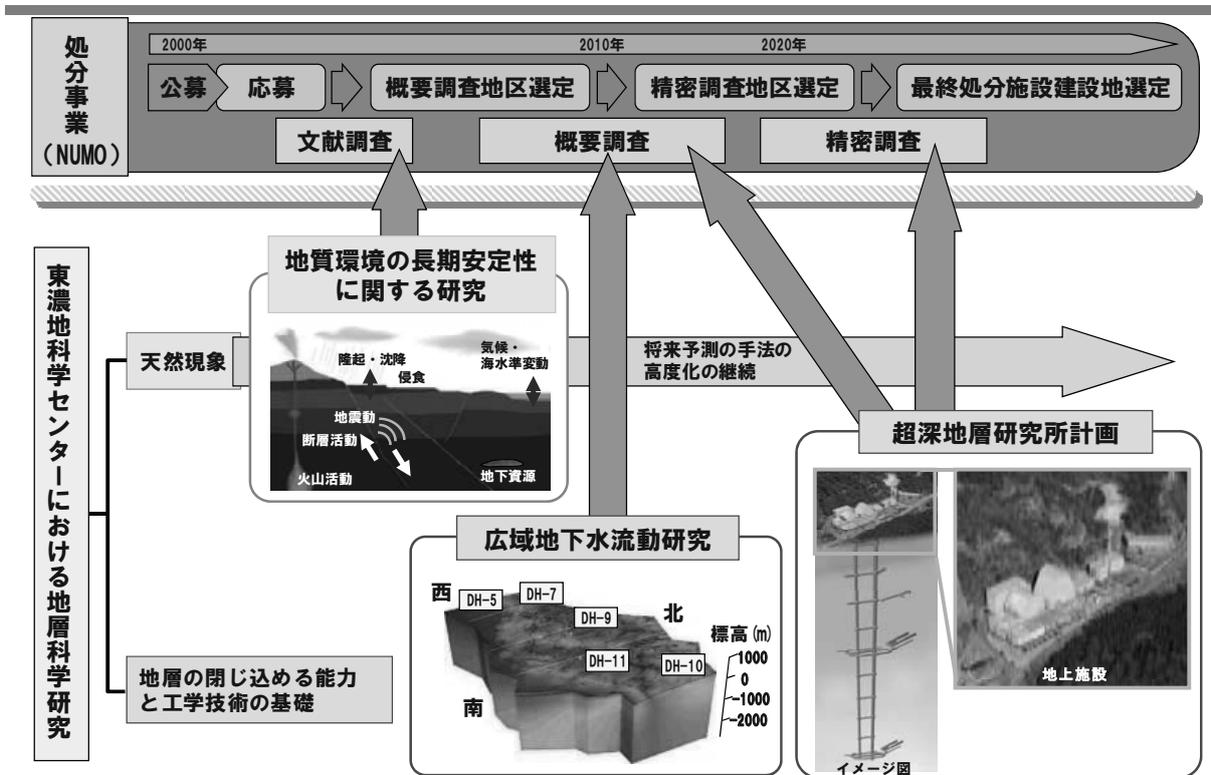
平成21年10月27日

東濃地科学研究ユニット
結晶質岩地質環境研究グループ
濱 克宏

本日の報告内容

1. 東濃地科学センターにおける地層科学研究
2. 知識ベースの構築方針
3. 地層科学研究成果の例
4. 知識ベースの構築
5. まとめ

東濃地科学センターにおける地層科学研究 JAEA



知識ベースの構築方針

- 超深地層研究所計画などの実施を通じて整備してきた地質環境特性の調査・解析・評価技術については、報告書類、論文、学会発表により公開
- これらの成果を知識ベースとして活用するためには、知識ベースを含む知識マネジメントシステムの利用者にとって、使いやすい形で示していくことが必要

知識ベースの構築方針

- 報告書や論文には、地質環境調査・解析・評価技術の内容や解析結果は詳細に記述されてはいるものの、使用方法や結果に至るまでの流れや判断ポイントおよびその根拠などのノウハウは必ずしも明示的に示されていない
- それらは、多くの場合、論文や報告書の執筆者の“ノウハウ”として蓄積
- 一般に暗黙知と呼ばれるノウハウをできるだけ汎用性のある形で整理し、表出化することは調査・解析・評価技術の信頼性や適用性を高める上で、また技術移転や教育の観点から有効

知識ベースの構築方針

- 専門家に内在する判断のノウハウや判断根拠を表出化する一つの方法がif-then形式のルール化
- これらのルールに基づくエキスパートシステムを構築すれば、当該分野の経験が少ない研究者でも、このシステムの支援を得て容易に検討を行うことが可能

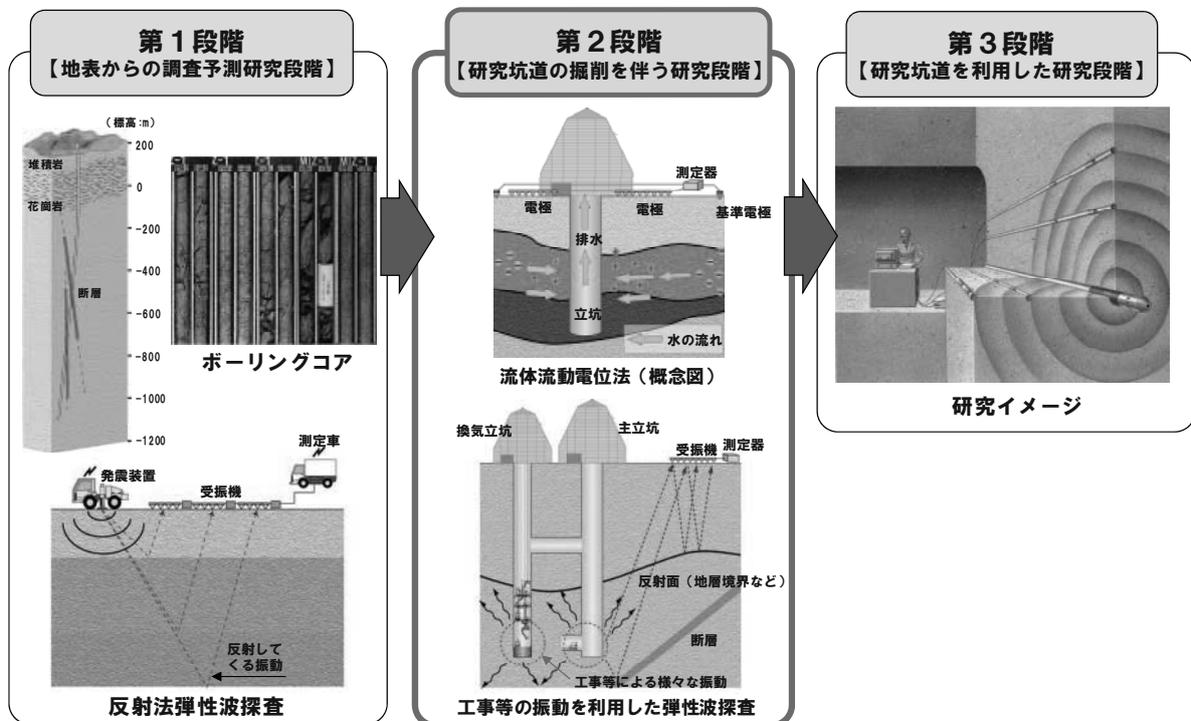
知識ベースの構築方針

- 最近の知識工学技術の進展により、エキスパートシステムは、医療診断や化合物の化学構造式の決定など幅広い分野において再び活用
- 日本原子力研究開発機構では世界に先駆けて放射性廃棄物の地層処分分野（例えば、地質環境調査や地質環境のモデル化）への適用を開始
- 地質環境調査では、患者の診断や化合物の構造式の決定とは異なり、調査対象の不均質性や情報の量的な制約などに起因する不確実性が大きく、このようなルール化はチャレンジング

本日の報告

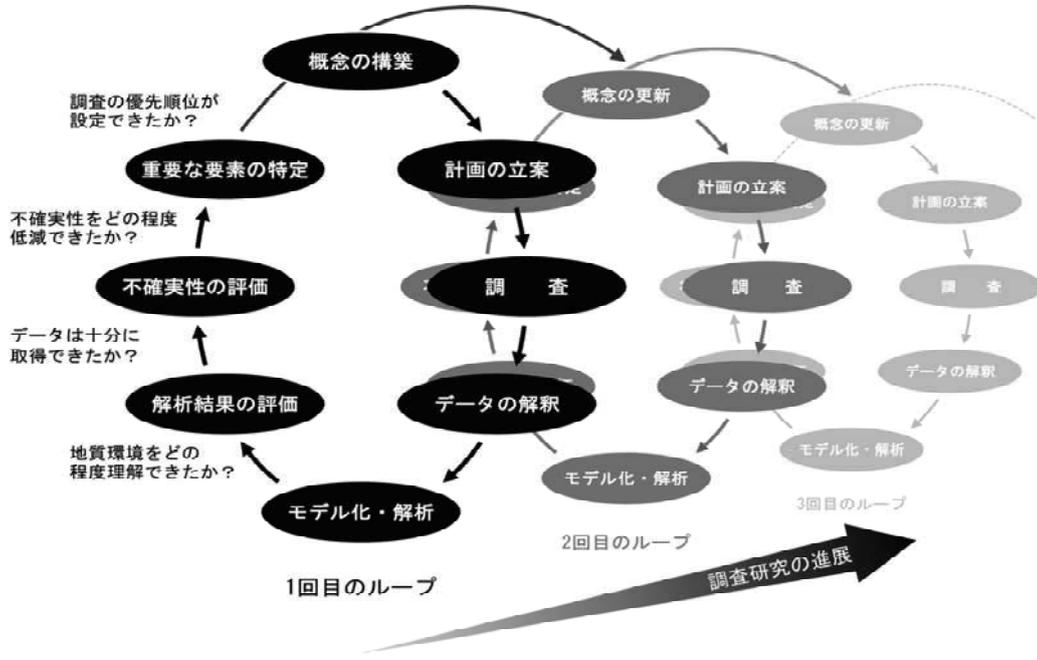
- 地質環境調査・解析・評価技術に関する最近の成果
- 研究成果を知識ベースとして活用するための知識の整理、エキスパートシステムの構築

1. 東濃地科学センターにおける地層科学研究
2. 知識ベースの構築方針
3. 地層科学研究成果の例
4. 知識ベースの構築
5. まとめ



超深地層研究所計画の進め方

繰り返しアプローチ



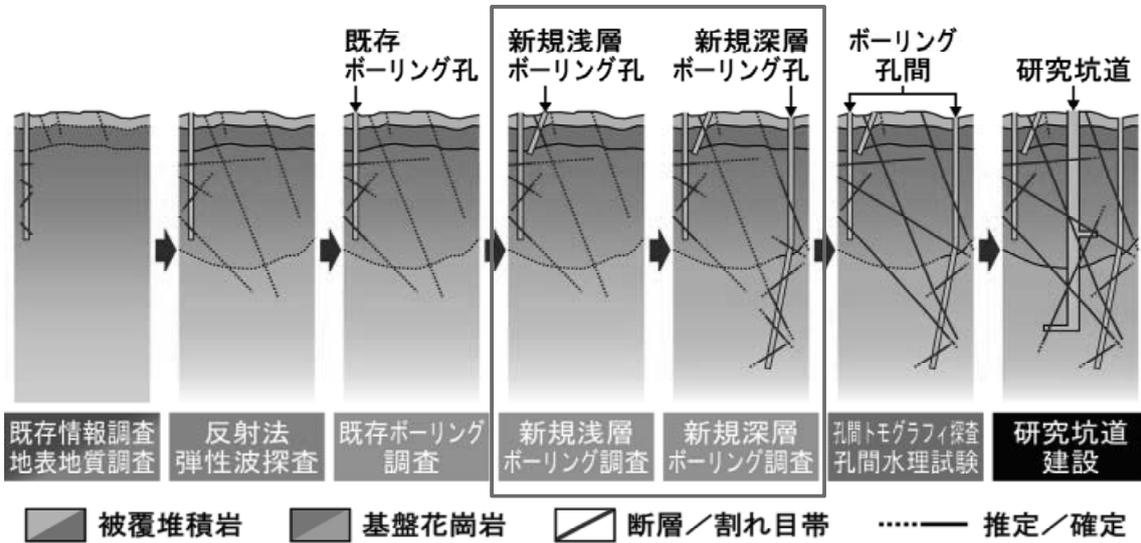
超深地層研究所計画の進め方

目標と課題の設定

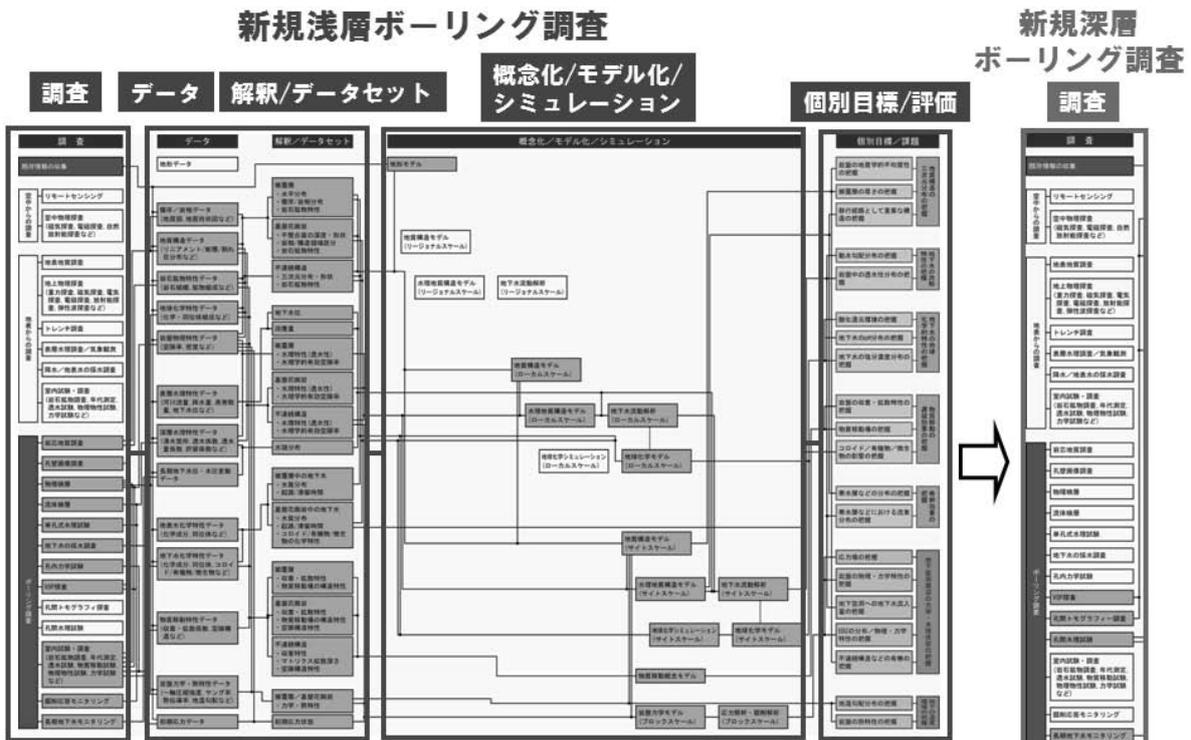
	安全評価					地下施設の設計・施工				環境影響評価	
個別目標	地質構造の三次元分布の把握	地下水の流動特性の把握	地下水の地球化学的特性の把握	物質移動の遅延効果の把握	希釈効果の把握	地下空洞周辺の力学・水理状態の把握		地下の温度環境の把握	地下施設建設が周辺環境へ与える影響の把握		
課題	岩盤の地質学的不均質性の把握 被覆層の厚さの把握 移行経路として重要な構造の把握	動水勾配分布の把握 岩盤中の透水性分布の把握	酸化還元環境の把握 地下水のpH分布の把握 地下水の塩分濃度分布の把握	岩盤の収着・拡散特性の把握 物質移動場の把握 コロイド/有機物/微生物の影響の把握	帯水層の分布の把握 帯水層中の流速分布の把握	応力場の把握 岩盤の物理・力学特性の把握 地下空洞への地下水流入量の把握 EDZの分布/物理・力学特性の把握	不連続構造などの有無の把握 地温勾配分布の把握 岩盤の熱特性の把握	地下水圧分布への影響の把握 地下水位分布への影響の把握 地下水の水質への影響の把握 振動・騒音の把握			

超深地層研究所計画の進め方

段階的な調査手順

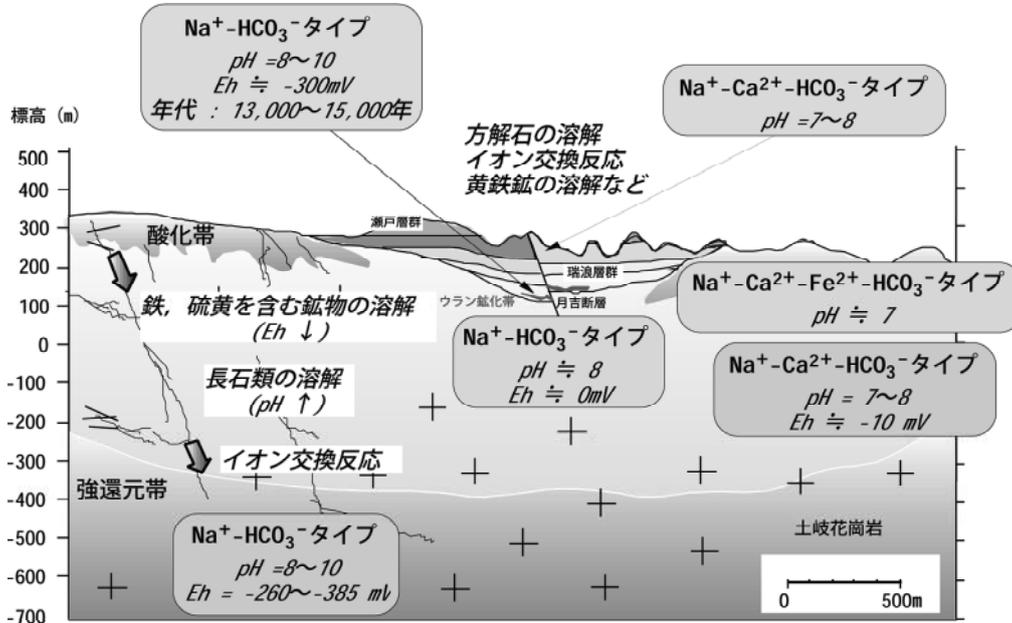


統合化データフローダイアグラム



地球化学概念モデル

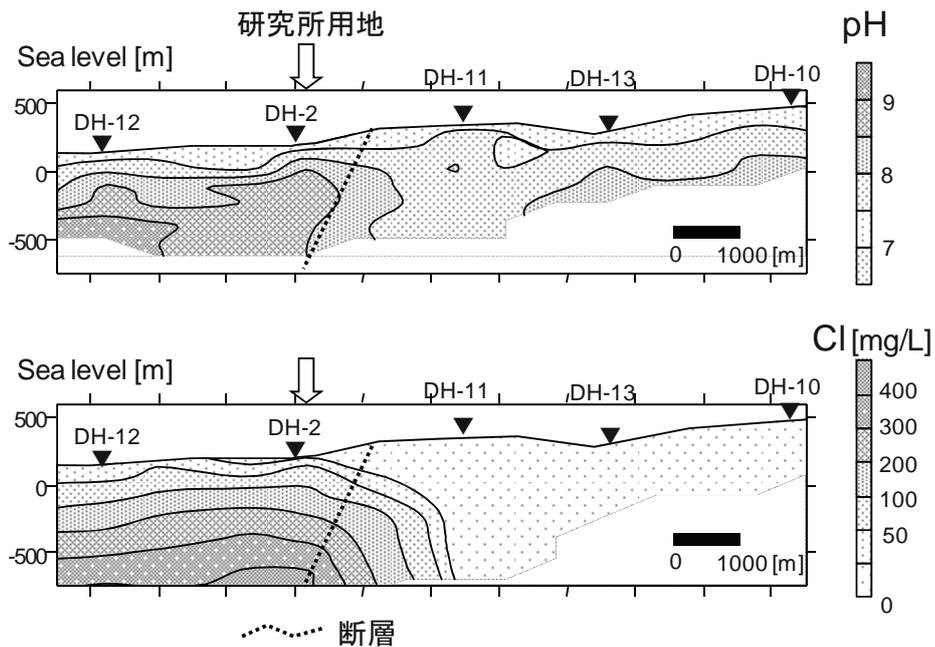
ローカルスケールにおける地下水の地球化学特性



(Iwatsuki and Yoshida, 1999を一部修正)

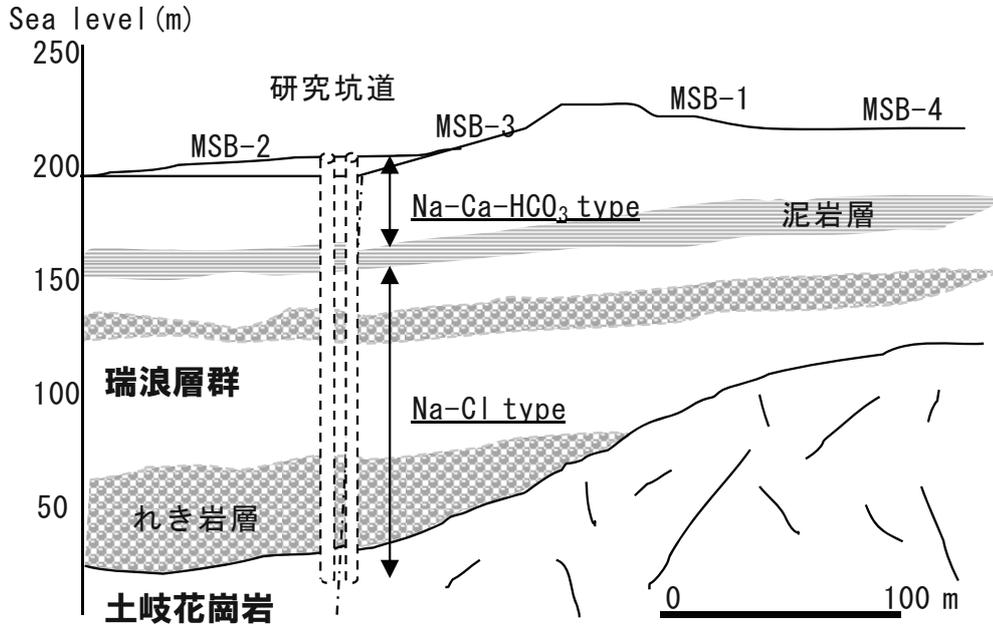
地球化学概念モデル

サイトスケールにおける地下水の地球化学特性 (既得情報を利用した調査段階)



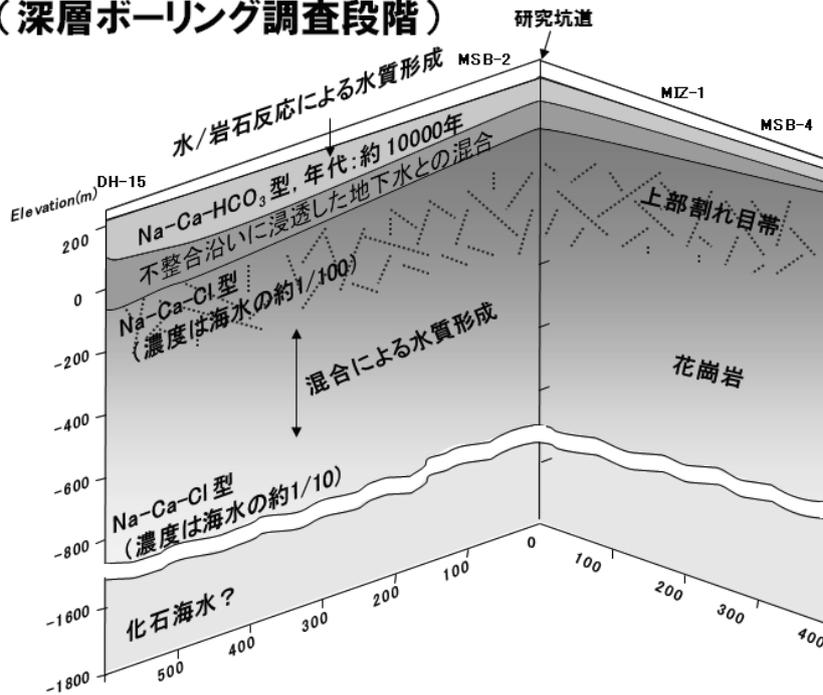
地球化学概念モデル

サイトスケールにおける地下水の地球化学特性 (浅層ボーリング調査段階)



地球化学概念モデル

サイトスケールにおける地下水の地球化学特性 (深層ボーリング調査段階)



第1段階調査研究の成果

- ① 実際の地質環境を対象とした調査研究の計画立案、調査、データ解釈、解析・評価の各検討過程を通じて得られた技術的知見（ノウハウや失敗例）を基盤技術として整理
- ② 地質環境の理解度や不確実性の評価結果に基づき、対象項目の優先度を明確にした調査研究計画の策定が有効
- ③ 結晶質岩を対象とした主要な調査・解析技術に係る技術的知見（例えば、ボーリング調査における透水性構造を抽出するための流体検層手法や水理試験手順、物理探査データの解析手法などの有効性）および経験を蓄積
- ④ 個別の調査研究における品質管理体系と実施体制作りが調査を適切に進める上で有効であることを確認

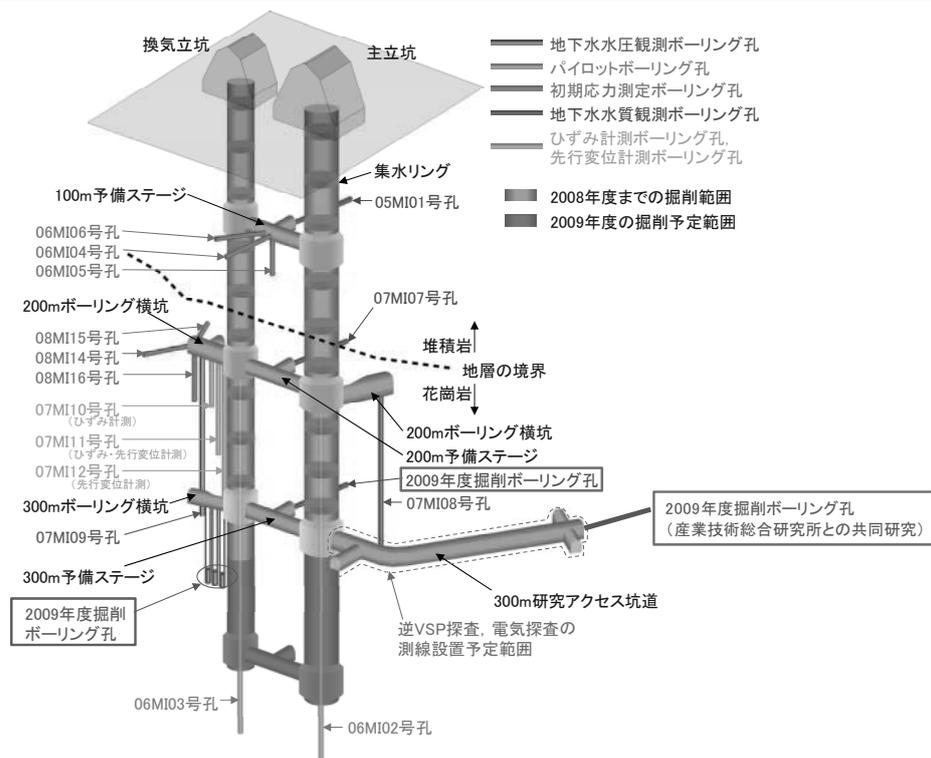
第2段階の目標

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

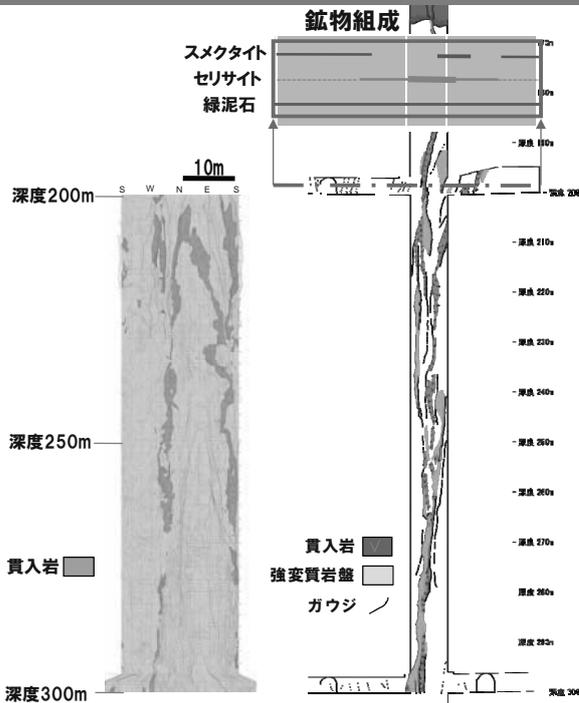
第2段階の調査研究項目の例

平成21年度の主な実施項目	
地質	<ul style="list-style-type: none"> ・物理探査(逆VSP探査, 流体流動電位法探査) ・研究坑道の壁面地質調査および壁面物性計測 ・地質構造モデルの構築・更新 ・物理探査手法・地質調査手法・地質構造モデル化手法の高度化
水理	<ul style="list-style-type: none"> ・立坑の集水リングを用いた湧水量計測 ・調査ボーリング孔を用いた間隙水圧測定(水理ボーリング調査) ・地表からのボーリング孔での間隙水圧モニタリングおよび表層水理観測 ・水理地質構造モデルの構築・更新 ・データベース・地質環境データ解析・可視化システムの構築
地球化学	<ul style="list-style-type: none"> ・立坑壁面および集水リングを用いた坑内湧水の採水・分析 ・研究坑道(予備ステージ、深度300m研究アクセス坑道)内のボーリング孔における地下水水質観測 ・既存ボーリング孔における地下水水質観測 ・地球化学モデルの構築・更新 ・溶存ガスの定量・定性分析のための技術開発
岩盤力学	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤力学モデルの構築・更新 ・岩盤の長期挙動評価手法の確立

研究坑道内のボーリング孔位置



研究坑道の壁面地質調査

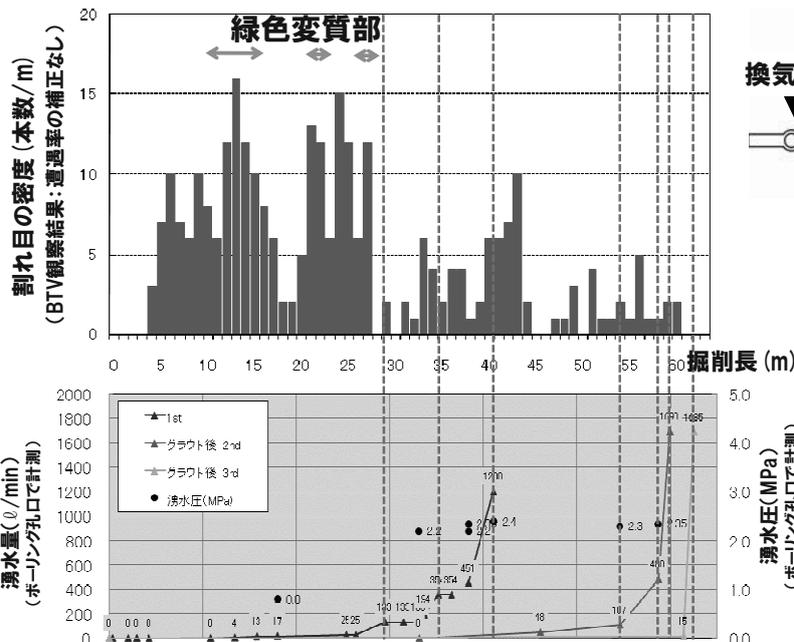


主な結果: 遮水性構造(主立坑)

- 遮水性断層の地質学的特徴を把握
 - 貫入岩を伴う断層変質帯が主立坑の全線に分布
 - 強変質帯(岩盤等級でD級岩盤に相当, セリサイト卓越)は貫入岩との境界付近に発達

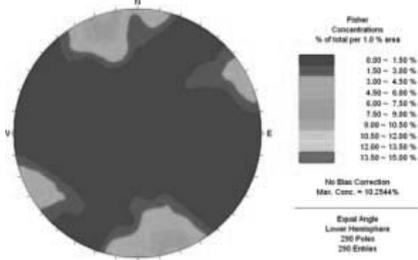
立坑壁面展開図 立坑壁面断面図(N41E方向)

先行ボーリングで確認された岩盤性状・湧水状況



- 岩盤性状
 - ・全孔を通じて硬質な岩盤(CM~CH級)
 - ・変質は掘削長約28m付近まで割れ目沿いの綠色粘土化が顕著。それ以深はほとんど認められない。
- 湧水状況
 - ・非変質岩盤(28m以深)
 - ・主に、割れ目密度の小さい箇所では湧水が認められる。
 - ・割れ目は介在鉱物を欠くとともに、割れ目面の接合状況が悪い場合が多い。

先行ボーリングで確認された岩盤性状



先行ボーリング全割れ目の方位傾斜のシュミットネット投影(下半球投影)

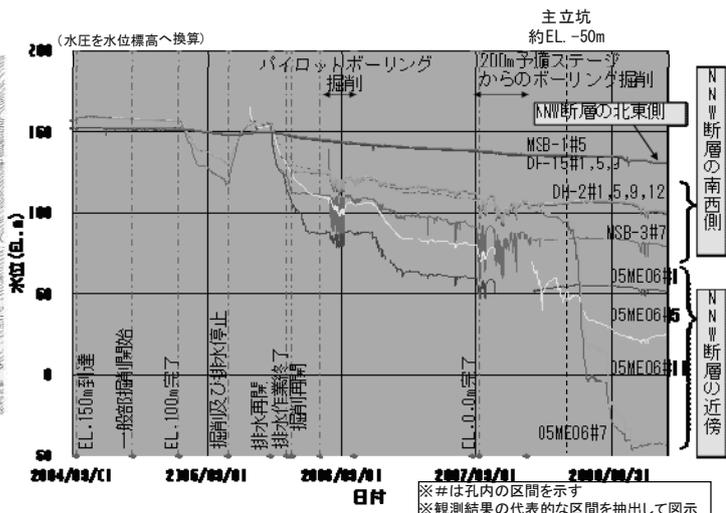
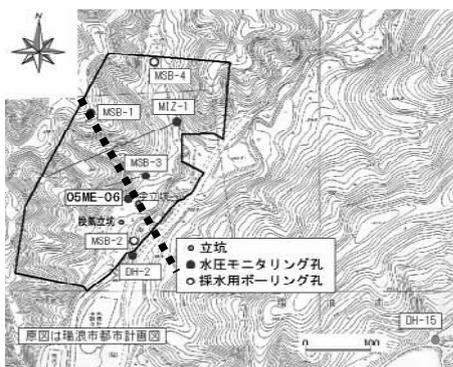


坑道掘削面におけるグラウトの付着(掘削長39m付近の鏡面)

●割れ目の方位

- ・北北西および東西(東北東)走向の高角度の割れ目が卓越
- ・湧水と関連する割れ目は東西走向の割れ目が主体(坑道掘削延長と概ね直交)

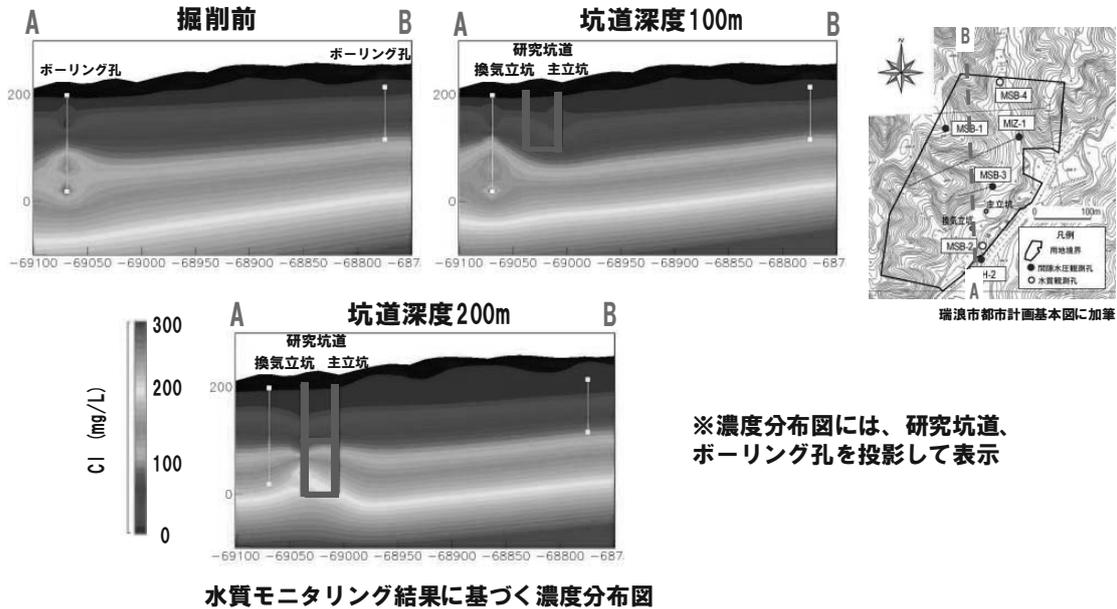
既存ボーリング孔での間隙水圧モニタリング



主な結果

- 水圧モニタリングによる水理地質構造モデルの妥当性確認の有効性を例示
 - ・ NNW断層の北東側では南西側より水位低下小さい → NNW断層の遮水効果
 - ・ NNW断層近傍では局所的な水位低下 → NNW断層が分岐して分布する可能性

既存ボーリング孔における地下水水質観測

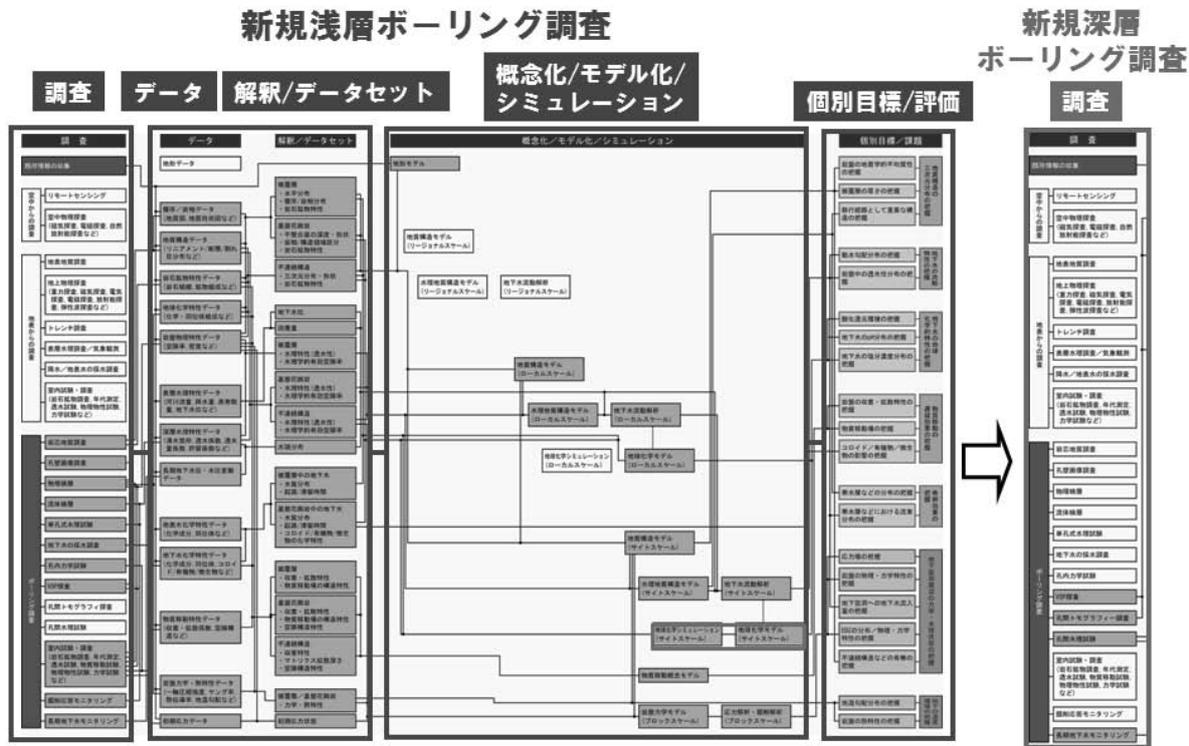


- ・研究坑道掘削に伴う深部地下水の上昇による水質分布の変化を把握
- ・水質分布の変化はNNW断層の南西側に位置する換気立坑周辺で顕著

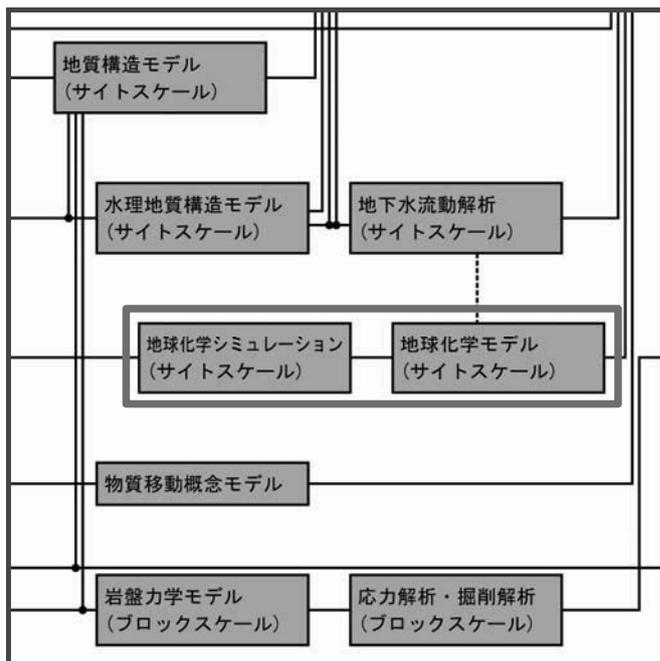
本日の報告内容

1. 東濃地科学センターにおける地層科学研究
2. 知識ベースの構築方針
3. 地層科学研究成果の例
4. 知識ベースの構築
5. まとめ

統合化データフローダイアグラム



タスクの分類・整理



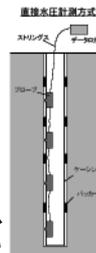
概念化/ モデル化/ シミュレーション	① 現在の鉱物特性(マトリクス)
	② 現在の鉱物特性(亀裂)
	③ 現在のpH空間分布
	④ 現在のEh空間分布
	⑤ 現在の主要成分空間分布
	⑥ 現在の同位体空間分布
	⑦ 起源
	⑧ 滞留時間
	⑨ 現在の水-岩石反応
	⑩ 端成分と現在の混合状況
	⑪ 過去および将来の状態

知識・経験の表出化の進め方

- ①知識の分類(例えば、浅い知識と深い知識)
- ②ルールベースと事例ベースの分類
- ③判断の流れを“もし～であれば、～する。”の形式
(if-then形式)のルールで整理
- ④ルールベースに基づくエキスパートシステム
(ES: Expert System)の構築

知識の分類

	形式知	暗黙知
浅い知識 (経験則)	<ul style="list-style-type: none"> ・調査の実施手順 ・解析の実施手順 ・手法の適用性(どのような条件ではどのような手法を用いるか) ・ワークフローなど 	<ul style="list-style-type: none"> ・実務上の経験 ・勘 ・熟練技能など
深い知識 (ルールの前提, 理論的根拠, 制約条件など)	<ul style="list-style-type: none"> ・現象モデル(場, プロセス) ・数学モデル ・理論(地質学, 地球化学など) ・調査技術・機器の原理 ・解析技術 ・手法に関する制約条件など 	<ul style="list-style-type: none"> ・画像情報の判読 ・試料の分類など



ルールベースと事例ベース

<p>ルールベース</p>	<p>当該分野の専門家の知識のうち、経験則や理論に基づく判断の結果などを“もし～であれば、～する”の形式（if-then形式）で表現したものの集合体</p>	<p>例）掘削水の逸水対策</p> <p>もし 水理試験を行う のであれば</p> <p>YES</p> <p>逸水防止材を使用 する</p> <p>NO</p> <p>セメントで保孔 する</p>
<p>事例ベース</p>	<p>ルールとして表現が難しいものの、問題解決に際し、現在の問題との類似性により活用できる過去の経験の事例の集合体</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・断層の識別(画像処理に頼る) ・掘削水逸水の対策

ルールベースに基づくエキスパートシステムの構築

身近にあるエキスパートシステム

経路、運賃探索
▶ 時刻表

出発地 瑞浪

目的地 東京

経由駅 名古屋

利用設定

新幹線を使う 入力補助 ON | OFF

有料列車を使う

空路を使う

高速バスを使う

路線バスを使う

フェリーを使う

日付 2009年10月 27日

時刻 18時 00分

探索方法

出発時刻設定

到着時刻設定

始発

終電

指定なし

歩く速度 普通に歩く

表示順序 到着が早い順

探索

経路の探索エキスパートシステム (<http://transit.yahoo.co.jp/>)

ルールベースに基づくエキスパートシステムの構築

身近にあるエキスパートシステム

経路1 18:00出発20:53到着時間: 2時間53分(乗車2時間29分、ほか24分) 距離: 416.1km
 運賃: 片道11,310円(乗車券6,620円 特別料金4,690円) 乗り換え: 2回

この経路をケータイに送る 経路をメールで送る カレンダーに追加 印刷

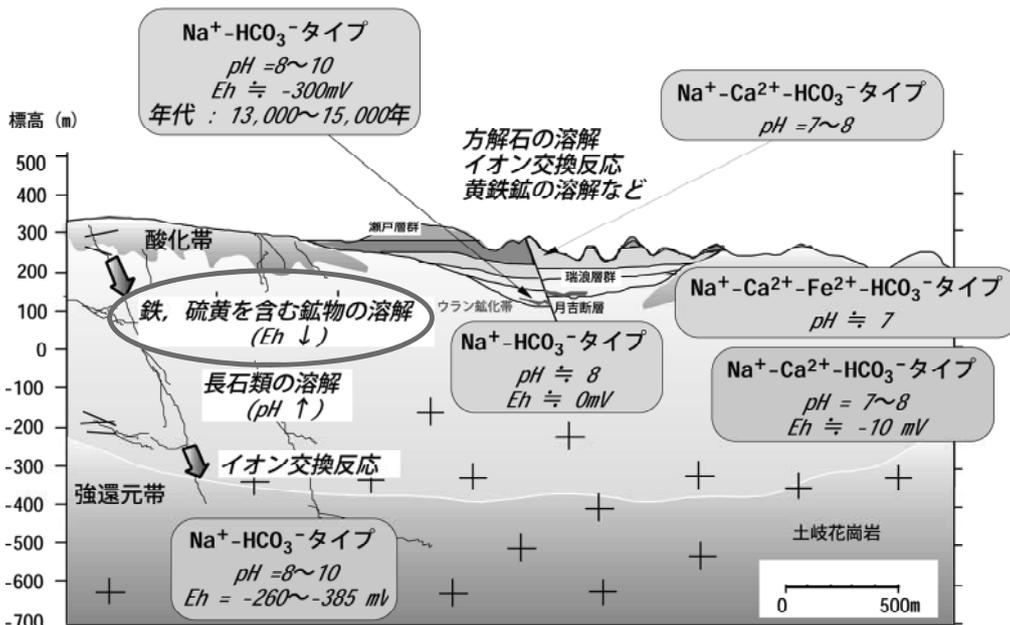
<input type="checkbox"/> 瑞浪 [駅情報]	2駅 JRセントラルライナー20号	6,620円
<input type="checkbox"/> 多治見 [駅情報]	8駅 JR中央本線快速	
<input checked="" type="checkbox"/> 名古屋 [出口案内] [駅情報]	3駅 JR新幹線のぞみ136号	
<input type="checkbox"/> 東京 [出口案内] [駅情報]		

鉄道路線、運賃、所要時間、乗り換え時間などの情報が基礎データとして登録されており、鉄道に関する知識が少ない使用者であっても、出発時刻などの条件を入力することにより、経路、運賃や所要時間が表示。

経路の探索エキスパートシステム (<http://transit.yahoo.co.jp/>)

ES構築の例

ローカルスケールにおける地下水の地球化学特性



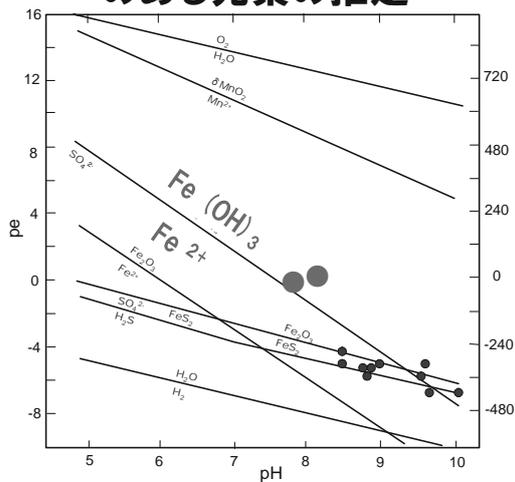
(Iwatsuki and Yoshida, 1999を一部修正)

主要な地下水－岩石反応の特定手順 JAEA 39

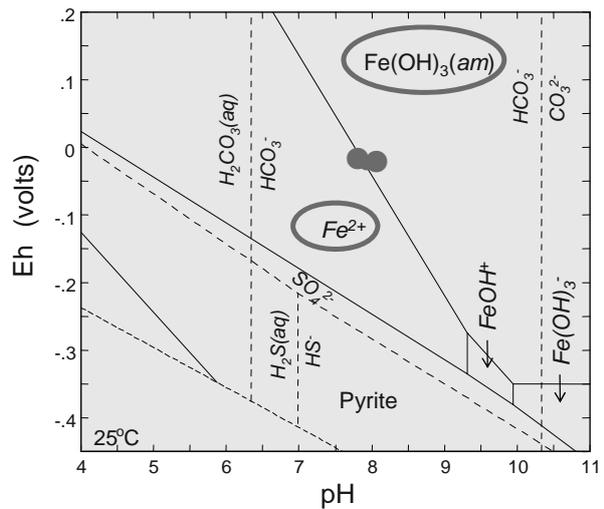
- ① 酸化還元電位を実測する。
- ② 一般的な相図上に実測値をプロットして反応に関わる可能性のある元素を推測する。
- ③ 詳細な相図に実測値をプロットし酸化還元反応を同定する。
- ④ 酸化還元反応式に実測された化学成分濃度を代入して、理論的酸化還元電位を計算し、実測値の誤差範囲内にあるか否か確認する。
- ⑤ 熱力学解析により酸化還元反応が平衡状態にあるか否か確認する。
- ⑥ 酸化還元反応式に関わる反応物質の産状を確認する。
- ⑦ 酸化還元反応に関わる溶存イオン、鉱物相の同位体を確認する。
- ⑧ 酸化還元反応に寄与する主要な地下水－岩石反応を特定する。

主要な地下水－岩石反応の特定手順 JAEA 40

手順②
反応に関わる可能性
のある元素の推定

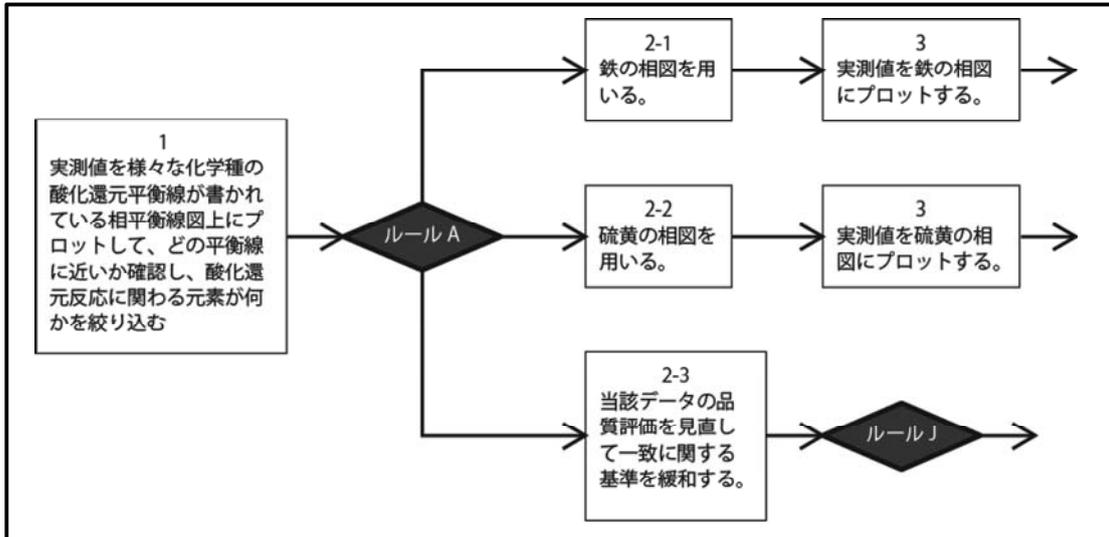


手順③
酸化還元反応の同定



Drever (1988) に加筆

ルール化の例



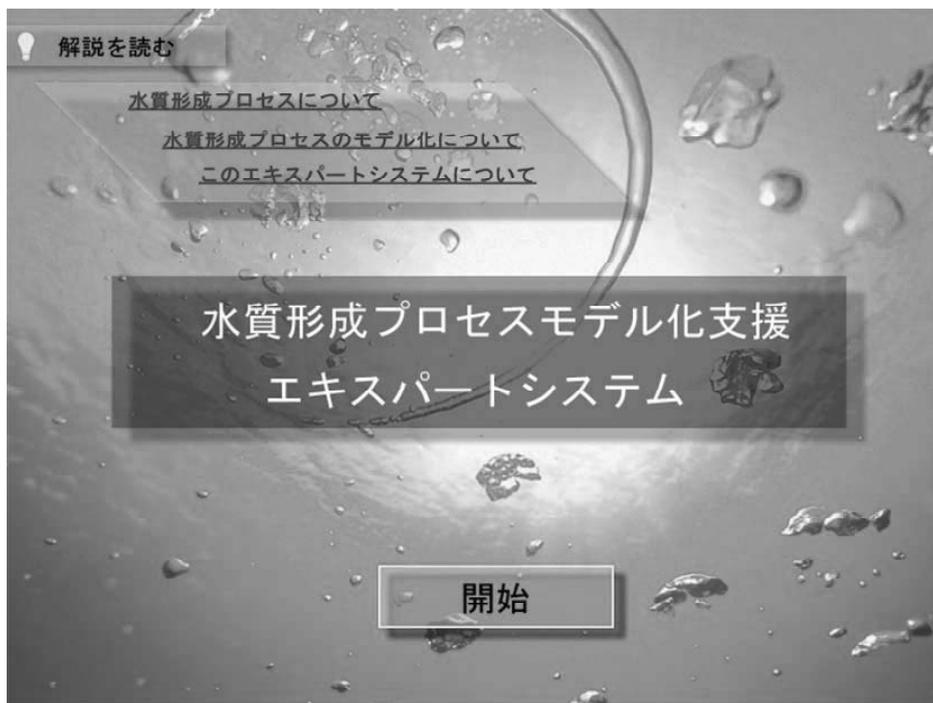
【ルールA】

ルールA1: 実測値が鉄の化学種の平衡線近傍（一般的な電極の測定精度±10mV以内）であれば(2-1)に進む。

ルールA2: 硫黄の化学種の平衡線近傍であれば(2-2)へ進む。

ルールA3: 平衡線近傍にプロットされなければ(2-3)へ進む。

構築したESの例



Cincom社 Knowledge Builderを使用

理論的酸化還元電位値の計算

計算結果

選択した酸化還元反応式

$$\text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}(\text{OH})_3(\text{am}) + 3\text{H}^+ + \text{e}^-$$

酸化還元電位の理論値は

$$\text{Eh} = \text{E}^0 - 0.059(3\text{pH} + \log[\text{Fe}^{2+}]) \quad (\text{E}^0: 1.065)$$

$$= 21 \text{ [mV]}$$

と計算されました

実測値

$$\text{Eh} = 0 \text{ [mV]}$$

理論値と実測値の許容誤差範囲は±25[mV]以内であり
 選択した酸化還元反応式が妥当であると考えられます。

理論値と実測値の差が±25[mV]を超えている場合はやり直してください。

次の画面に進みますか？

微生物の寄与の検討

写真判定

鉄の酸化還元には、微生物の存在が関っている事もあります。
 試験深度付近の写真データベースを参照し、鉄関連バクテリアの事例
 と比較して、微生物が反応に関っているかどうか判断して下さい。

鉄関連バクテリア

写真データベース参照

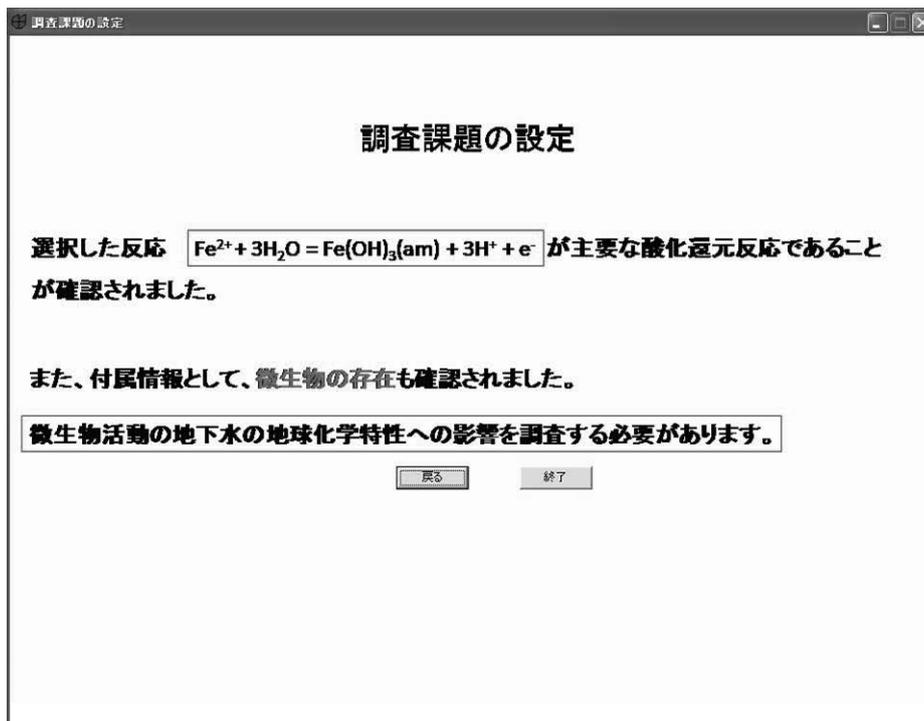
🔍 事例を見る
鉄関連バクテリアの事例

微生物の影響もあると考えられますか？

微生物の寄与の検討



主要な酸化還元反応の特定



本日の報告内容

1. 東濃地域における地層科学研究
2. 知識ベースの構築方針
3. 地層科学研究成果の例
4. 知識ベースの構築
5. まとめ

まとめ

- 超深地層研究所計画の成果を示すとともに知識ベースとして活用する方法を検討
- 地質環境調査のような専門的な判断が必要なタスクについても、知識工学的な手法を用いたルールベース化が可能
- 今後は、既存の解析コードへのデータの提供、計算結果のエキスパートシステムへの取り込みといった機能の拡張などの改良を実施
- このような検討を継続して行っていくためにも、超深地層研究所計画の第2段階および第3段階の調査研究を着実に進めることが必要

参考

3.2.1.2 深地層における工学技術の基礎の整備

独立行政法人日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門
東濃地科学研究ユニット 結晶質岩工学技術開発グループ
松井 裕哉

(1)はじめに

本研究では、超深地層研究所計画¹⁾の一環として、結晶質岩を対象とした深度 1000m 程度までの地下構造物の設計・建設・維持に対する既往の工学技術の有効性の確認と、必要と考えられる技術の開発を実施している。このような研究では実際の深地層の研究施設の建設経験²⁾を適宜有効に利用している。

(2)平成 17 年取りまとめ以降の研究成果の概要

①研究の進め方

研究にあたっては、地層処分に対する技術基盤の構築という側面も踏まえ、1)設計・施工計画技術の有効性の確認、2)建設技術の有効性の確認、3)施工対策技術の有効性の確認、4)安全を確保する技術の確認の四つの研究課題を設定している。1)は地上からの調査段階で必要となる技術基盤、2)、3)は地下構造物の建設段階で必要となる技術基盤、4)は地下構造物完成後の操業段階で必要な技術の基盤となる。

②各研究課題と研究成果の概要

①の個別研究課題に対応した形で、平成 17 年取りまとめ以降の研究内容と成果の概要を述べる。

1)設計・施工計画技術の有効性確認

平成 17 年取りまとめまでに実施した超深地層研究所の設計および施工計画の有効性を確認するため、坑道掘削中に実施している壁面観察で得られた地質情報等から評価した岩盤モデル(岩盤等級区分)と設計時のそれとの比較、支保工や岩盤の応力・変形計測結果と設計基準値などとの比較、地表および研究坑道に設置した地震計等の計測結果と設計時の解析結果等との比較、実際の掘削サイクルタイム分析結果と設計時の施工計画との比較などを実施している。

地上からの調査段階で適用した設計手法は、第2次取りまとめなどで示された一般的な地下構造物の設計手法と同等のものである³⁾。換気立坑部では、堆積岩層、土岐花崗岩部とも設計時に設定した岩盤モデルと、壁面観察から評価した岩盤モデルは同等なものとなっている。一方、主立坑では、設計時に想定していなかった断層部の出現により、設計時の岩盤モデル(岩盤等級区分で B-C 級の健全な土岐花崗岩を想定)とは異なる相対的に脆弱な岩盤状況(岩盤等級区分で D 級)となっている。しかし、設計時に設定した支保工の形態(覆工コンクリート、吹き付けコンクリートとロックボルトの組合せ)やそれらの仕様(1掘削長、使用材料、厚さ等)は変更を要することなく、その安定性を維持している⁴⁾。このことから、現在の坑道断面径(数m程度)では、既往の地下施設設計技術は地質環境に大きく依存しない柔軟性の高い技術と評価できる。また、現在までに換気立坑の地上および堆積岩部(深度 100m)、花崗岩部(深度 300m 地点)の覆工部で地震動観測を実施しているが、深度 100m 地点での最大加速度は地上の半分程度まで低下するという結果が得られている。掘削サイクルタイム分析では、実施工時に安全確保の観点か

ら追加した事項(キブル昇降速度の制限等)によるサイクルタイム増加が大きいものの、当初の施工計画自体に大きな問題は認められていない。

また、プロジェクト開始前にそこに内在するリスクを網羅的に抽出し、それぞれの影響度を把握・評価しておくことは、大規模地下構造物の建設プロジェクトを円滑かつ合理的に進めていく上では非常に重要との認識に立ち、地上からの調査予測段階においてそれを実施可能なリスクマネジメント手法の構築を進めている。

2)掘削技術の有効性確認

掘削工法として採用しているショートステップ発破工法や支保工形態(覆工コンクリートとロックボルトの組み合わせ)の有効性を確認するため、施工実績や3Dレーザースキャナーの計測に基づく実際の掘削断面と設計時の断面との差(余掘量)の分析を行うとともに、立坑掘削に対するスムーズブラスティング工法の適用性の検討、断層部が出現している主立坑部壁面の安定化対策として実施しているレジン注入工法の有効性を検討している。

これまでの分析結果では、換気立坑側では覆工には非常に微小な変形・応力しか生じていないこと、断層部が出現している主立坑側でも支保工が変状を生じるような変位・応力が発生していないこと⁴⁾から、ショートステップの発破工法や現行の支保工形態は、結晶質岩のような多数の不連続面が分布する岩盤において、空洞安定性に影響をおよぼす岩盤ブロックの移動を抑制しつつ突発的事象への迅速な対応を可能とする極めて安全性の高い掘削方法と言える。スムーズブラスティング工法は、周辺岩盤への損傷を最小限とする発破工法であるが、立坑内の空間的な制約から実務的にその効果を発揮できるような穿孔作業が行えないため立坑掘削での適用は現状難しいと考えられる。レジン注入工法の有効性については、余掘量の減少といった効果が認められている⁴⁾が、最終的な評価にはいたっていない。

3)施工対策技術の有効性確認

施工対策が必要な事象として、空洞の力学的安定性にかかわる突発的事象(高抜けなどの岩盤ブロックの滑動、山はね)、地下水にかかわる突発的事象(突発湧水、坑道壁面近傍における高差圧の発生)などを抽出し、それらの対策技術の検討とその有効性の確認を行っている。

湧水抑制対策では、主立坑・換気立坑におけるパイロットボーリング調査結果⁵⁾を踏まえ、外部専門家のレビュー結果などを取り込みつつ、既往のグラウチング技術を換気立坑200m地点⁶⁾、300m研究アクセス坑道掘削時に適用し、現在の技術により毎分1000ℓを超えるような湧水部のグラウチングが可能であることを実証するとともに、合理的・経済的なグラウチング技術の確立に向けた改良を行っている⁷⁾。高抜け、山はねや高差圧などの事象については、数値解析的な検討を行うとともに、その結果に基づく対策工の検討を実施している⁸⁾。

4)安全性を確保する技術の有効性確認

安全性を確保する技術については、人間が坑道内で長時間作業等を行うことを念頭に置いた安全に影響をおよぼす事象の抽出や実際の適用を通じた坑内入坑者管理システムの有効性の検討を行っている。

本研究課題については、主として空洞安定性確保の観点から、現在設置している支保工の長期的な変化を把握・評価可能な調査技術などについて検討を開始した。

(3)今後の挑戦

本研究においては、これまでに結晶質岩盤のような割れ目が多数存在する硬岩を対象として、設計・施工計画技術の有効性の確認、建設技術の有効性の確認、施工対策技術の有効性の確認、安全を確保する技術の確認という四つの研究課題を設定した研究開発を進めてきた。その結果、小断面径の坑道掘削を想定した場合の、地上からの調査研究段階で実施した設計・施工計画技術の汎用性の高さ、ショットステップ発破工法や現行の支保工の安全性、施工対策技術としての既往のグラウチング技術の有効性などが確認されている。今後、こうした有効性を確保する上で必要な知識(設計手法自体や設計にあたって注意すべき情報の種類や質、取得にあたっての留意点など)を整理し、知識ベース⁹⁾の内容として提供する。

今後は、より深部の研究坑道掘削時に対して同様の計測・解析評価を実施し、有効性の確認を進めるとともに、想定される突発事象(山はね、高抜け、高差圧など)への対策について原位置計測などを含む対策工の技術について検討を行っていく。また、地下構造物の建設コストの低減という視点からの情報化施工を含む合理的な設計・施工技術の構築を行う予定である。これらの成果についても同様に知識ベースとして提供していく。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構:超深地層研究所地層科学研究基本計画 JNC TN7410 2001-018(2002)。
- 2) 見掛信一郎:瑞浪超深地層研究所の建設状況,「平成 21 年度 東濃地科学センター 地層科学研究 情報・意見交換会」資料集, JAEA-Review 2009-049(2010)。
- 3) 三枝他:超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第 1 段階)研究成果報告書, JAEA-Research 2007-043(2007)。
- 4) 納多他:瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討(平成 19 年度), JAEA-Technology 2009-009(2009)。
- 5) 鶴田他:瑞浪超深地層研究所における立坑内からのパイロットボーリング調査報告書, JAEA-Research 2008-098(2009)。
- 6) 久慈他:瑞浪超深地層研究所・換気立坑における堆積岩部を対象としたポストグラウチング試験施工とその評価, JAEA-Research 2008-095(2009)。
- 7) 見掛他:結晶質岩を対象とした湧水抑制対策総括報告書(仮称)(作成中)
- 8) 黒崎他:超大深度立坑における高抜け崩落機構に関する調査・解析(委託研究), JAEA-Research 2008-066(2008)。
- 9) 日置一雅:JAEA 知識マネジメントシステムと中期計画取りまとめ“CoolRep”の概要,「平成 21 年度 東濃地科学センター 地層科学研究 情報・意見交換会」資料集”, JAEA-Review 2009-049(2010)。

超深地層研究所計画
深地層の工学技術の基礎の整備
—平成17年とりまとめ以降の進展と今後の挑戦—

平成21年10月27日

東濃地科学研究ユニット
結晶質岩工学技術開発グループ
松井 裕哉

今回の報告内容

本研究の位置づけ

進め方

研究内容と成果の概要

- **設計・施工計画技術の有効性確認**
- **建設技術の有効性確認**
- **施工対策技術の有効性確認**
- **安全を確保する技術の有効性確認**

まとめ

今後の予定

本研究の位置づけ

・既往の土木・資源分野で培われた技術を適用することにより、結晶質岩では深度1000m程度までの範囲で、地下施設の設計・施工および操業が実現可能であることを提示(第2次とりまとめ)



・国内では、深度1000m程度までの範囲で展開された地下施設はほとんどない
・国内に分布する結晶質岩は、割れ目が多く地下水も豊富に存在する



本研究の目標

結晶質岩を対象とした地下深部までの施設の設計・建設および操業に対する技術の有効性の検討(第2次とりまとめで示された課題)

進め方

以下の4つの研究課題を設定し、研究坑道の設計・掘削および掘削に伴って実施する計測から得られるデータの分析・評価による実証的な研究を行う。

- ①設計・施工計画技術の有効性確認
- ②建設技術の有効性の確認
- ③施工対策技術の有効性の確認
- ④安全を確保する技術の確認

地層処分に対する技術基盤構築との関係

- ①: 地上からの調査段階で必要となる技術基盤
- ②、③: 地下施設の建設段階で必要となる技術基盤
- ④: 地下施設完成後の操業段階で必要となる技術基盤

今回の報告内容

本研究の位置づけ

進め方

研究内容と成果の概要

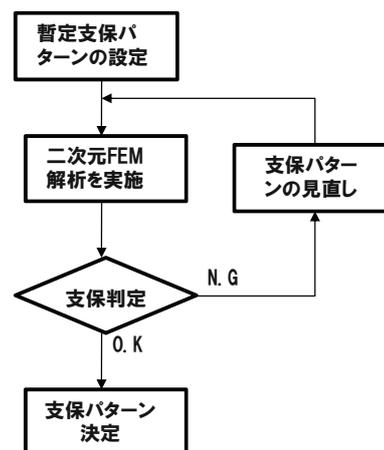
- ・設計・施工計画技術の有効性確認
- ・建設技術の有効性確認
- ・施工対策技術の有効性確認
- ・安全を確保する技術の有効性確認

まとめ

今後の予定

研究内容(設計・施工計画技術の有効性確認)

- ・坑道掘削中に実施している壁面観察で得られた地質情報等から評価した岩盤モデル(岩盤等級区分)と設計時のそれとの比較
- ・支保工や岩盤の応力・変形計測結果と設計基準値などとの比較
- ・地表および研究坑道に設置した地震計等の計測結果と設計時の解析結果等との比較
- ・実際の掘削サイクルタイム分析結果と設計時の施工計画との比較
- ・地上からの調査結果に基づく、地下施設建設プロジェクトを対象としたリスクマネジメント手法の構築



地上からの調査予測研究段階(第1段階)における立坑一般部の基本的な設計の流れ

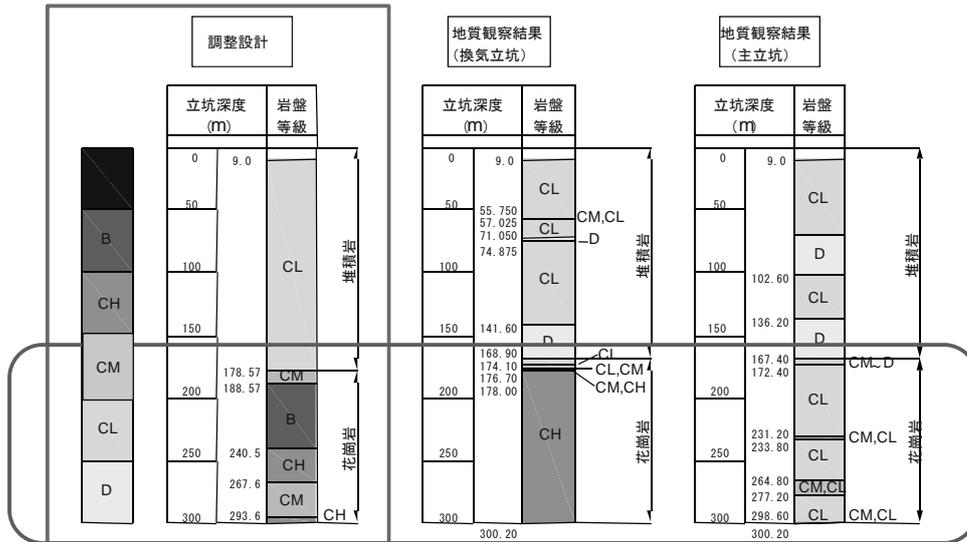
研究成果の概要(設計・施工計画技術の有効性確認)

換気立坑部

堆積岩層、土岐花崗岩部とも設計時に設定した岩盤モデルと同等

主立坑部

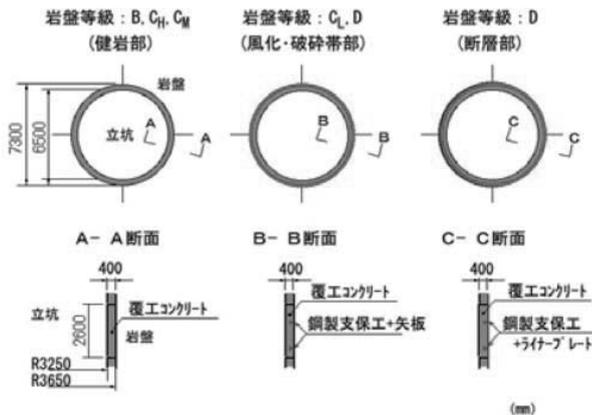
設計時の岩盤モデルとは異なる相対的に脆弱な岩盤状況



坑道壁面地質観察結果に基づく岩盤等級区分と設計時に設定したそれとの比較

研究成果の概要(設計・施工計画技術の有効性確認)

設計時に設定した支保工の形態（覆工コンクリート、吹き付けコンクリートとロックボルトの組合せ）や、それらの仕様（掘削長、使用材料、厚さ等）は大きな変更を要することなく、その安定性を維持



設計時に設定した岩盤等級毎の支保工(立坑部)

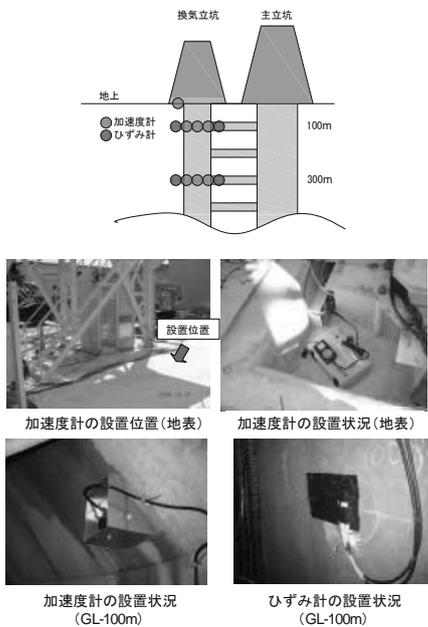


現在の坑道断面径（数m程度）では、既往の地下施設設計技術は、地質環境に大きく依存しない柔軟性の高い技術と評価

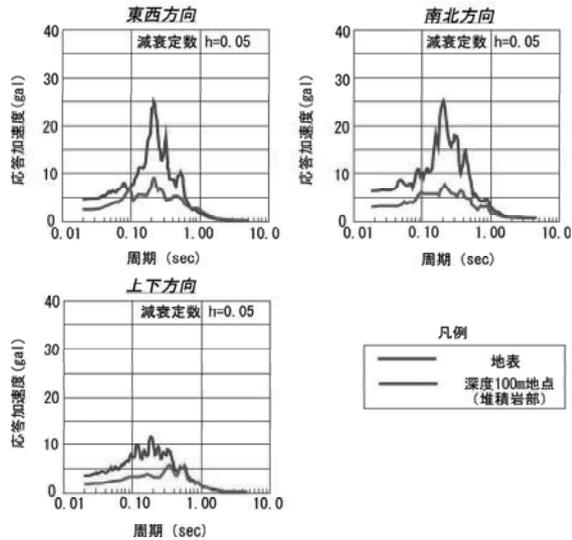
研究成果の概要(設計・施工計画技術の有効性確認)

深度100m地点(堆積岩部)での最大加速度が、地上の半分程度まで低下

地下では地震動が小さくなることを確認



2007年4月15日に発生した地震時の測定結果



換気立坑内での地震時の覆工挙動計測例

研究内容(建設技術の有効性確認)

- ・現在適用している掘削工法(ショートステップによる発破掘削)の適用性の検討
- ・施工実績や3Dレーザースキャナーの計測などに基づく、実際の掘削断面と設計時の断面との差(余掘量)の分析
- ・立坑掘削に対するスムーズプラスティング工法の適用性の検討
- ・断層部が出現している主立坑部壁面の安定化対策として実施しているレジン注入工法の有効性の検討

研究成果の概要(建設技術の有効性確認)

換気立坑側

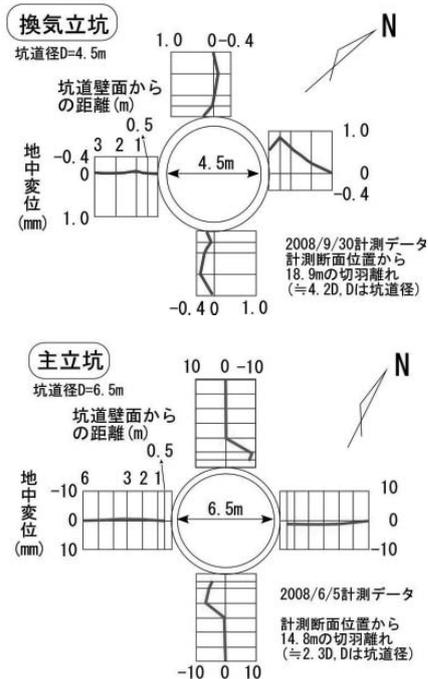
岩盤の変形が小さく、覆工にも非常に微小な変形・応力しか生じていない。

主立坑側

断層部が出現しているため岩盤の変形は相対的に大きい、支保工には変状を生じるような変位・応力が発生していない



ショートステップ発破工法や現行の支保工形態：
結晶質岩のような多数の不連続面が分布する岩盤において、空洞安定性を保持しつつ突発的事象への迅速な対応を可能とする極めて安全性の高い掘削方法と評価



両立坑一般部における
周辺岩盤の変形計測結果例(深度250m地点)

研究内容(施工対策技術の有効性確認)

空洞の力学的安定性にかかわる突発的事象

- ・高抜けなどの岩盤ブロックの滑動
- ・山はね

地下水にかかわる突発的事象

- ・突発湧水
- ・坑道壁面近傍における高差圧の発生

などに対する対策技術の検討とその有効性の確認

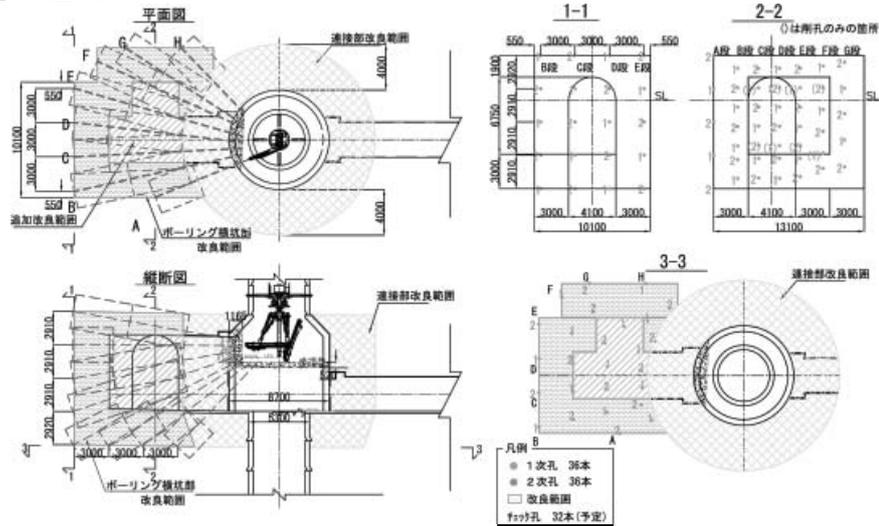
研究成果の概要(施工対策技術の有効性確認)

湧水への対策

主立坑・換気立坑でのパイロットボーリング調査結果を踏まえ、外部専門家のレビューを受けつつ、既往のグラウチング技術を換気立坑200m地点、300m研究アクセス坑道掘削時に適用

施工の考え方

- ・改良範囲:
壁面から3m
- ・グラウト材:
水セメント比を1:8~
1:1の数種類を作成
- ・注入孔配置:
中央内挿法
(1次孔、2次孔)
- ・注入方法:
段階注入、
薄いグラウト材から注入



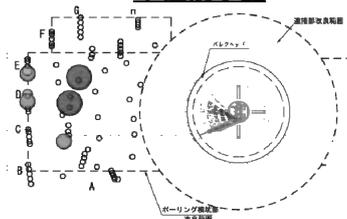
換気立坑200mボーリング横坑掘削時のプレグラウチング施工計画

研究成果の概要(施工対策技術の有効性確認)

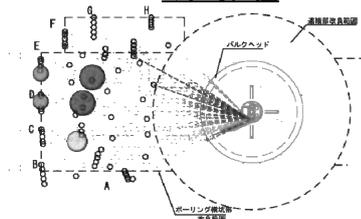
- ・現在のグラウチング技術により、大量湧水(換気立坑深度200m付近:500ℓ/分、300m研究アクセス坑道:1000ℓ/分超)を抑制可能であることを実証
- ・合理的・経済的なグラウチング技術の確立に向けた改良を実施(注入孔配置、配合仕様など)

プレグラウト時(注入孔掘削時の測定結果)

単位湧水量

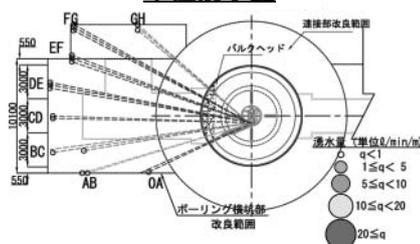


ルジオン値

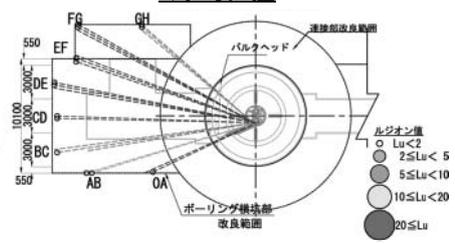


プレグラウト後(チェック孔における測定結果)

単位湧水量



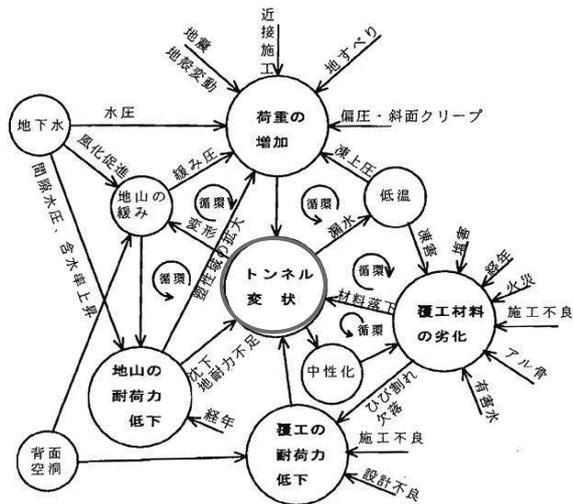
ルジオン値



プレグラウチング前後の湧水量およびルジオン値の比較

研究内容(安全を確保する技術の有効性確認)

- 人間が坑道内で長時間作業等を行うことを念頭に置いた、安全に影響をおよぼす事象の抽出と調査技術の有効性検討
- 実際の適用を通じた坑内入坑者管理システムの有効性の検討



トンネル変状原因の関連図の例*

* 土木学会:山岳トンネルの覆工の現状と対策、トンネルライブラリー第12号(2002)

研究成果の概要(安全を確保する技術の有効性確認)

都市トンネルにおける変状原因の分類例*

現在設置している支保工の長期的な変化を把握・評価可能な調査技術などについて検討を開始

外因と内因の別	分類	主な変状	変状の要因												
			かぶりコンクリートの浮き	面欠損	鉄筋露出・鉄筋腐食	ひび割れ	遊離石灰	エフロレッセンス	漏水	材料分離(シヤンカ等)	トンネル内空変形	ボルト腐食	継手自開き	継手段差	
外因	外力	近接施工													
		地震		○		○									
	環境	周辺地山圧密沈下													
		荷重の増減				○									
内因	材料	列車振動	○			○									
		地下水の変動								○		○			
		有害な成分を含む地下水	○		○		○	○					○		
		坑内温度変化			○	○									
	設計	坑内湿度変化			○	○									
		骨材中の泥分	○	○		○					○	○			
		中性化	○		○										
		アルカリ骨材反応	○		○	○	○	○							
	設計・施工	コンクリート硬化時の温度応力				○									
		乾燥収縮				○									
		部材厚不足				○					○				
		開口補強不足			○	○									
	施工	鉄筋かぶり不足	○	○	○	○									
		防水工不良									○				
		締固め不足										○			
		養生不良			○	○									
運搬	早期脱型			○	○							○			
	コールドジョイント									○					
	ストック時欠け		○												
	裏込め注入不足									○					
設計	裏込め注入による偏圧														
	ジャッキ押し			○	○									○	
	Kセグメントの無理な挿入			○	○									○	
	スール材欠損									○					
設計	真円度不足												○		
	不適切なセグメント分割												○		
	不適切な防食方法												○		
	不適切な継手選択												○		

* 土木学会:トンネルの維持管理、トンネルライブラリー第14号(2005)

今回の報告内容

本研究の位置づけ

進め方

研究内容と成果の概要

- ・設計・施工計画技術の有効性確認
- ・建設技術の有効性確認
- ・施工対策技術の有効性確認
- ・安全を確保する技術の有効性確認

まとめ

今後の予定

まとめ

結晶質岩のような割れ目が多数存在する硬岩を対象として、

- ・設計・施工計画技術の有効性の確認
- ・建設技術の有効性の確認
- ・施工対策技術の有効性の確認
- ・安全を確保する技術の確認

という4つの研究課題を設定した研究開発を実施

その結果、深度300mまでの研究坑道掘削の中で

- ・小断面径の坑道掘削を想定した場合の地上からの調査研究段階で実施した設計・施工計画技術の汎用性の高さ
- ・ショートステップ発破工法や現行の支保工の安全性
- ・施工対策技術としての既往のグラウチング技術の有効性などを確認。



今後、知識ベースの内容として提供

今後の予定

より深部の研究坑道掘削に対して、同様の計測・解析評価を実施し、4つの研究課題に対応する有効性の確認を進める。特に下記の項目に着目した研究開発を行う。

- ・想定される突発事象(山はね、高抜け、高差圧など)への対策工に関する原位置計測などを含む有効性の検討
- ・地下施設の建設コストの低減という視点からの情報化施工を含む合理的な設計・施工技術の構築

これらの成果についても同様に知識ベースとして提供していく。

3.2.2 地質環境の長期安定性に関する研究

独立行政法人日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門
 東濃地科学研究ユニット 自然事象研究グループ
 石丸 恒存

(1)はじめに

安定大陸に比べて地殻変動や火成活動などが活発であるわが国において、地層処分の安全性を確保するためには、地層処分システムの性能が著しく損なわれないよう、地質環境が長期にわたって安定なサイトを選定することが前提となる。このため「地質環境の長期安定性に関する研究」では、地下深部の地質環境に影響を及ぼす可能性のある地震・断層活動、火山活動、隆起・侵食、気候・海水準変動などの天然現象を対象にこれまで研究を進めてきた。

平成 17 年取りまとめ¹⁾以降は、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(2006)²⁾に基づいて、地層処分の事業や安全規制などに必要となる調査技術や評価手法の整備に重点をおいて研究を進めており、現在の「地質環境の長期安定性に関する研究」では、①調査技術の開発・体系化、②長期予測・影響評価モデルの開発、③年代測定技術開発の三つの目標を設定し、上記の天然現象に関連する各研究課題に取り組んでいる。

(2)平成 17 年取りまとめ以降の研究成果の概要

平成 17 年取りまとめ以降は、特に地上からの調査段階に必要とされる調査・解析技術に対して研究成果をタイムリーに反映していくことを念頭に、各目標に対して幾つかの研究課題を設定して研究開発を進めている。

「調査技術の開発・体系化」では、天然現象に関する過去の記録や現在の状況を調査するための体系的な技術の整備を目指して、主に個別の要素技術の開発や既存の調査技術の適用性の確認などを進めている(精密調査地区などの選定や安全性の検討に必要な調査技術への反映)。「長期予測・影響評価モデルの開発」では、将来の天然現象に伴う地質環境条件の変化を予測・評価するための手法の整備を目指して、現象のプロセスを考慮した数値モデル解析技術や現象を確率論的に取り扱う方法などの開発を進めている(天然現象による影響を考慮した安全評価への反映)。「年代測定技術開発」では、天然現象の活動履歴や変動の傾向・速度を精度良く把握する上で必要となる放射年代データを得るため、加速器質量分析装置、希ガス質量分析装置などを用いた最新の年代測定技術の開発・整備をしている。

以下に具体的な研究課題とこれまでの研究成果の概要を紹介する。

①調査技術の開発・体系化

○断層の発達履歴・活動性に関する調査技術

・断層からの離間距離等を合理的に設定するための調査技術として、逆断層帯における分岐断層(前縁断層)や撓曲構造の発達プロセスおよび横ずれ断層帯における断層破碎帯や変形帯の分布やその発達履歴を把握するための調査手法について、反射法地震探査や地形・地質調査等に基づく一連の調

査手法と解析手法の適用事例を示した(事例対象:逆断層帯;横手盆地東縁断層帯,横ずれ断層帯;跡津川断層帯,阿寺断層帯)^{例えは3)}。

- ・地下深部での岩石破壊により発生すると考えられる水素ガスを地表部(断層露頭等)で簡便に測定できる手法を考案するとともに⁴⁾,水素ガスやマントル起源の希ガス等の観測・解析といった地球化学的手法が,従来の地形・地質学的,地球物理学的な手法に基づく活断層の認定やその活動性の評価を補完する技術として有効であるといった見通しを得た。^{5)など}

○地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術

- ・地下深部のマグマ・高温流体等の存在の有無を確認するための調査技術として,地震波トモグラフィー,地磁気・地電流法(MT法)などの地球物理学的手法に加えて,希ガス同位体などを指標とした地球化学的手法を組み合わせた体系的な調査手法を示した(事例対象:鳴子火山,飯豊山地,能登半島等)^{例えは6)}。
- ・比抵抗構造解析技術として観測データの自動スタッキング法を開発し,観測データの不確実性評価手法を示した。さらに,これまで海域の影響により正しい比抵抗構造の推定が困難であった沿岸域を対象にした解析技術として,三次元比抵抗構造解析手法の適用性を確認した(事例対象;三瓶山)⁷⁾。

○火山・熱水活動履歴の調査技術

- ・熱水等による影響の有無を確認するための調査技術として,熱水活動の開始時期の把握について,K-Ar年代,FT年代,TL年代等を組み合わせた一連の調査手法の適用事例を示した(事例対象;紀伊半島)⁸⁾。
- ・更新世中期までの火山を対象に多量屈折率地質解析法(RIPL法)による火山活動史の編年を事例的に行うことにより,RIPL法がテフラを用いた鮮新統～第四系の編年に適用可能な手法であることを示した(事例対象;むつ燧岳)。

○古地形・古気候の復元調査技術

- ・地下水流動等の変遷を推定する上で必要な古地形と古気候の情報を取得する調査技術として,地形・地質調査とボーリングコアを用いた堆積相解析,植物片等を用いた古気候調査等を組み合わせた一連の調査手法の有効性を示した(事例対象:東濃地域)。
- ・内陸部の隆起速度を把握する調査手法として,河成段丘発達モデルに基づく段丘面の比高から隆起速度を推定する方法(テラス-テラス法;TT法)の適用性と有効性を確認した。(事例対象:土岐川流域,鏑川流域等)⁹⁾。

②長期予測・影響評価モデルの開発

○断層活動の影響評価モデル

- ・断層周辺の岩盤の変形領域や地形変化の範囲を推定する手法として,既存の地殻変動等の数値解析プログラムを用いて断層変位が生じた際の断層周辺の地殻の上下変動量等の解析を行い現地データと比較することにより,数値解析手法の適用性を確認した(事例対象;中央構造線)。

○火山活動等の長期予測モデル

- ・新たに火山の発生する可能性を確率論的アプローチによって評価する手法として,火山分布,活動開始年代に基づく空間統計学的手法による確率分布モデルに地球物理データ(地震波速度構造,地殻熱流量)をベイズ法で結合したmultiple inference モデルを構築し,火山地域を事例にモデルの妥当性

を確認した(事例対象;東北地方,伊豆地方)。

○熱水活動等の影響評価モデル

・地下深部からの熱の影響を評価する手法として,マグマ溜り周辺岩盤の熱や地下水理などの変化を計算するための解析コード(Magma2002)を開発し, Magma2002 を用いた火山性の地熱地帯での解析結果と地質,地球物理データとの比較・検討を行い,シミュレーションの妥当性を確認した(事例対象:雲仙火山,鳴子火山)。

○地形変化モデル

・将来の地形変化を推定する手法として,斜面で生産された土砂が河川により運搬・堆積する現象に基づいて万年オーダーの地形変化を大局的に表現できる基本プログラムを開発し,地質分布,堆積速度,隆起速度,礫径等の現地データを考慮した地形変化シミュレーション・プログラムを整備中である¹⁰⁾。
 ・地形変化や気候変動などの天然現象が地下水理などの地質環境に与える影響を把握するための地下水流動解析手法について,その適用事例を示した(事例対象:東濃地域)¹¹⁾など。

③年代測定技術の開発

○加速器質量分析装置(AMS)を用いた年代測定技術

・ペレット年代測定装置について,放射性炭素の安定的な測定を継続し,装置改善により測定精度の向上を図るとともに,ベリリウム同位体の試験測定を行い,ベリリウム同位体測定の実用化に向けての見通しを得た。

○希ガス用質量分析装置を用いたK-Ar法に係わる年代測定技術

・断層の充填物から成因ごとに分離した粘土鉱物の年代測定を行うために必要なK-Ar法による年代測定技術を導入するため,アルゴンについては希ガス用質量分析装置によって,カリウムについてはフレーム光度法によって定量が可能なシステムを構築した。

○四重極型質量分析計を用いた(U-Th)/He法に係わる年代測定技術

・低温の熱履歴把握を可能とするため,閉鎖温度の低い年代測定手法である(U-Th)/He法による年代測定システムを構築し,本手法によるジルコンを用いた単粒子年代測定を実用化した。また,四重極型質量分析計を用いることでより分析精度を向上させ,ジルコンに比べてヘリウム含有量の低いアパタイトを用いた単粒子年代測定の実用化に着手した。

(3)今後の挑戦

わが国において地層処分計画を着実に進める上では,「地質環境の長期安定性に関する研究」の研究開発成果はその基礎・基盤をなすものである。今後も外部ニーズを踏まえた国の基盤研究開発の全体目標の達成に向け,研究機関相互の連携や役割分担のもとに,地層処分技術のさらなる信頼性の向上を目指して,研究テーマの重点化を図りつつ,研究開発成果を処分事業と安全規制の双方に反映できるように着実に進めていく。

具体的には,今後とも地層処分計画の進展を踏まえつつ,基本的にはこれまでの枠組みでの研究開発を継続して推進していくが,「調査技術の開発・体系化」については,最終処分施設建設地の選定過程の各段階において引き続き重要課題となると考えられる断層活動に係わる研究開発を重点的に推進していく。特に,変動地形が明瞭でない断層および伏在断層,地下深部の震源断層の確認等に係わる調

査技術のほか、例えば、坑道掘削時に遭遇した断層の活動性の評価や処分場閉鎖後の天然現象のモニタリング技術等、いくつかの課題が残されており、これらの課題への対応が必要となる。

また、「長期予測・影響評価モデルの開発」については、天然現象に伴う将来の地質環境条件の変化を、それぞれのシナリオに応じて、その発生の可能性と変動幅や変動範囲を示すとともに、予測に伴う不確実性(あるいは確度)を併せて示すことを目指す。これらについては、将来 10 万年程度の評価を念頭において研究開発を進めているが、10 年以上の超長期の評価が求められた場合には、過去数十万年から数百万年の履歴に基づく外挿が基本になると考えられる。ただし、現状の編年精度に鑑みると、過去数十万年を超える履歴に基づいた場合、予測結果の不確実性は著しく増大することが想定されるため、「年代測定技術の開発」を推進し、編年技術の高度化を進める必要がある。さらに、例えば百万年オーダーでの地殻変動の開始時期や変動傾向の概括的な評価技術や、プレート運動の変化に伴うテクトニックな環境の変動を考慮した地質環境条件の変動幅の推定手法の開発等、超長期の予測に必要な研究課題の検討を進め、サイト選定や安全評価に係わる信頼性を向上させることが重要と考える。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構(2005):高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－, 分冊 1 深地層の科学的研究(2005 年 9 月), JNC TN1400 2005-014
- 2) 資源エネルギー庁, (独)日本原子力研究開発機構(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(2006 年 12 月)
- 3) Kagohara et al. (2009)Subsurface geometry and structural evolution of the eastern margin fault zone of the Yokote basin based on seismic reflection data, northeast Japan, Tectonophysics., doi:10.1016/j.tecto. 2009.02.007.
- 4) Shimada et al. (2008) : Rapid and Simple Measurement of H₂ Emission from Active Faults Using Compact Sampling Equipments, Resource Geology,58,2,196-202.
- 5) Umeda, K., and A. Ninomiya (2009), Helium isotopes as a tool for detecting concealed active faults, Geochem. Geophys. Geosyst., 10,Q08010, doi:10.1029/2009GC002501.
- 6) Umeda, et al.(2007):Multiple lines of evidence for crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline lide Mountains, northeast Japan, J. Geophys. Res., 112, B05207, doi:10.1029/2006JB004590.
- 7) 根木他(2009):沿岸域における三次元比抵抗構造解析, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 120, 169-172.
- 8) 花室他(2008):紀伊半島南部, 本宮及び十津川地域の温泉周辺の熱水活動史. 岩石鉱物科学, 37, 27-38.
- 9) 田力他(2009)土岐川(庄内川)流域の河成段丘と更新世中期以降の地形発達. 第四紀研究, (投稿中)
- 10) 三箇・安江(2008):河床縦断形のシミュレーション, 地形, 29, 27-49.
- 11) 尾上他(2009)過去から現在までの長期的な地形変化が地下水流動特性に与える影響の解析的評価の試み. 日本原子力学会和文論文誌, 8, 40-53.

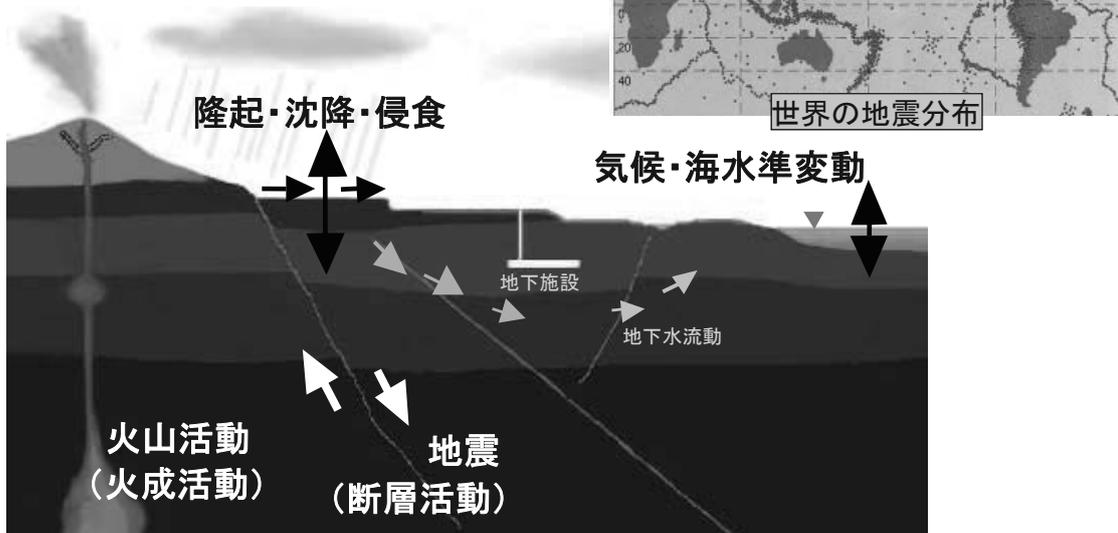
地質環境の長期安定性に関する研究 —平成17年取りまとめ以降の進展と今後の挑戦—

平成21年10月27日

東濃地科学研究ユニット
自然事象研究グループ
石丸 恒存

長期安定性の観点から考慮すべき天然現象

日本列島は、太平洋を取り囲む地殻変動の活発な地域に位置している。



概要調査地区選定上の考慮事項 (原子力発電環境整備機構, 2002)

法定要件に関する事項①
地震

全国一律に評価する事項

陸域では空中写真判読(注8)等、海域では海上音波探査(注9) 査された文献に示されている活断層がある場所は含めない 定します。

評価の考え方に

は海底の堆積層 づき行われれば 全国規模で体系 具体的には、 (2002)(文献(2)) 上ボーリング等、 断層、逆断層、 以上の文献の 性が否定できな 査地区を選定し

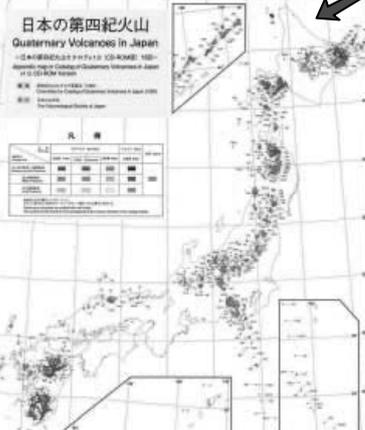


全国一律に評価する事項

将来数万年にわたるマグマの活動範囲の拡がりの可能性を考慮し、第四紀火山(注6) の中心から半径15kmの円の範囲内にある地域は含めないように、概要調査地区 を選定します。

評価の考え方について

については、最終 あります。このため る地域は含めない、 日本の第四紀火山 間、その傾向に大 で活動するものと がる可能性がある。 の中心を仮定する。 (199)(文献(2))に示 用を想定すると、多 用内であり、一部の 殊な事例を除けば



への貫入や地表への噴 からは、これを避ける必要 噴出が生じる可能性の 一般には過去200万年 ぶこれまでと同様の地域 どマグマの活動範囲が ても最大30km程度(火 の第四紀火山カタログ) 現在までのマグマの活動 中心として数km程度の (注8)を有する火山等の

第2次取りまとめにおいては、地質環境の長期安定性に関する研究の成果として、主に全国規模での基盤情報を整備

「地質環境の長期安定性研究」の基本課題

第2次取りまとめ(H11年11月)：地層処分の技術的信頼性

・わが国にも地層処分に適した地質環境が存在する

実現の見通し



基盤的な研究開発 → 地層処分技術の信頼性向上

「第2次取りまとめ」以降(事業段階)の基本課題

- ・具体的な場所での地層の安定性を評価できる
- ⇒未確認の活断層があるのでは？
- ⇒非火山地域でも、将来、火山活動が起きるのでは？
- ⇒地殻変動によって地質環境が大きく変化するのでは？

調査手法等
の整備

地層処分における重要な地質環境条件

最終処分法(H12)での要件

【概要調査地区の選定】

当該文献調査対象地区；

- 地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がない、将来にわたって生ずるおそれが少ないと見込まれる（地震，噴火，隆起，侵食その他）
- 第四紀未固結堆積物／鉱物資源

【精密調査地区の選定】

当該対象地層等；

- 自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていない
- 坑道掘削に支障がない
- 活断層・破碎帯・水流が地下施設への悪影響を及ぼすおそれが少ないと見込まれる
- その他

原子力安全委(H14)での環境要件

【概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件】

- 地震・断層活動（活断層の存在）
- 火山・火成活動（第四紀火山の存在）
- 隆起・沈降・侵食（著しい変動のおそれ）
- 第四紀未固結堆積層の存在
- 鉱物資源の鉱床等の存在

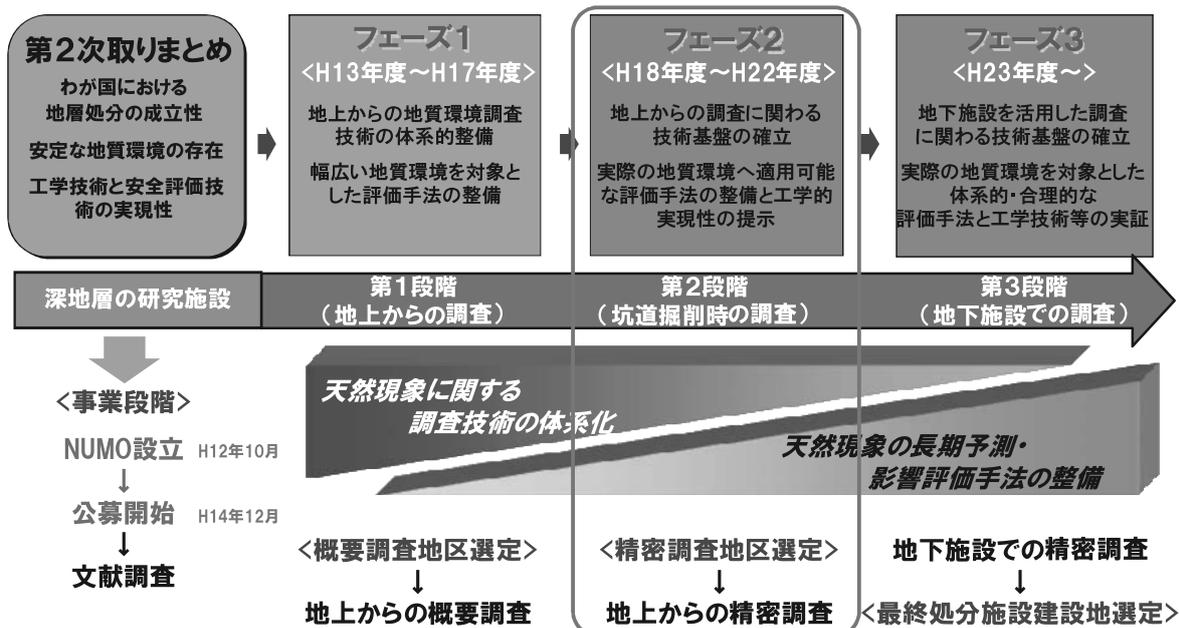
<概要調査以降の検討項目>

- 気候変動・海水準変動
- 地下水の流動特性
- 地下水・岩石の地化学特性
- その他（山はね等の主に建設及び操業時の安全性に係わるもの）

基盤研究開発の全体計画における段階目標

「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」(2006)

全体目標：地層処分の技術基盤の継続的な強化



地質環境の長期安定性研究の課題(H17以降)

① 調査技術の開発・体系化

天然現象に関する過去の記録や現在の状況を調査するための体系的な技術の整備

- 断層の発達履歴・活動性に関する調査技術
- 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術
- 第四紀の火山・熱水活動履歴に関する調査技術
- 古地形・古気候の復元調査技術 等

② 長期予測・影響評価モデルの開発

将来の天然現象に伴う地質環境条件(熱, 水理, 力学, 地球化学等)の変化を予測・評価するための手法の整備

- 断層活動の影響評価モデルの開発
- 火山活動等の長期予測(確率)モデルの開発
- 熱水活動等の影響評価モデルの開発
- 地形変化モデルの開発 等

十年代測定技術開発
(共通基盤技術の整備)

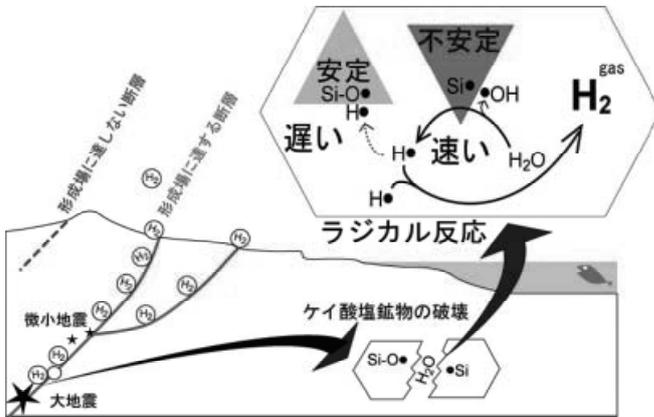
サイトの選定や安全規制に必要な調査技術や評価手法の整備
[実施側および規制側への研究成果の反映]

「調査技術の開発・体系化」に関する研究項目

- 断層の発達履歴・活動性に関する調査技術
 - 断層の発達履歴に関する調査技術の適用性の確認
(横手盆地東縁断層帯, 跡津川断層帯, 阿寺断層帯の事例)
 - 断層水素ガスを利用した断層の活動性に関する調査技術の検討
- 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術
 - 総合的なマグマ検出手法の適用性の確認(飯豊・朝日山地の事例)
 - 比抵抗構造解析技術(信頼性指標, JAEAスタッキング)の開発
 - 三次元比抵抗構造解析手法の適用性の確認(三瓶山の事例)
- 火山・熱水活動履歴の調査技術
 - 熱年代学的手法による古地熱活動履歴の把握(紀伊半島の事例)
 - 多量屈折率地質解析法(RIPL法)による編年(むつ燧岳の事例)
- 古地形・古気候の復元調査技術
 - 古地形と古気候の情報を取得する調査技術(東濃地域の事例)
 - 内陸部の隆起速度を把握するためのテラスーテラス法(TT法)の適用性の確認(土岐川流域, 鎚川流域の事例)

断層の活動性に関する調査技術

断層水素ガスを利用した調査技術の適用性の検討



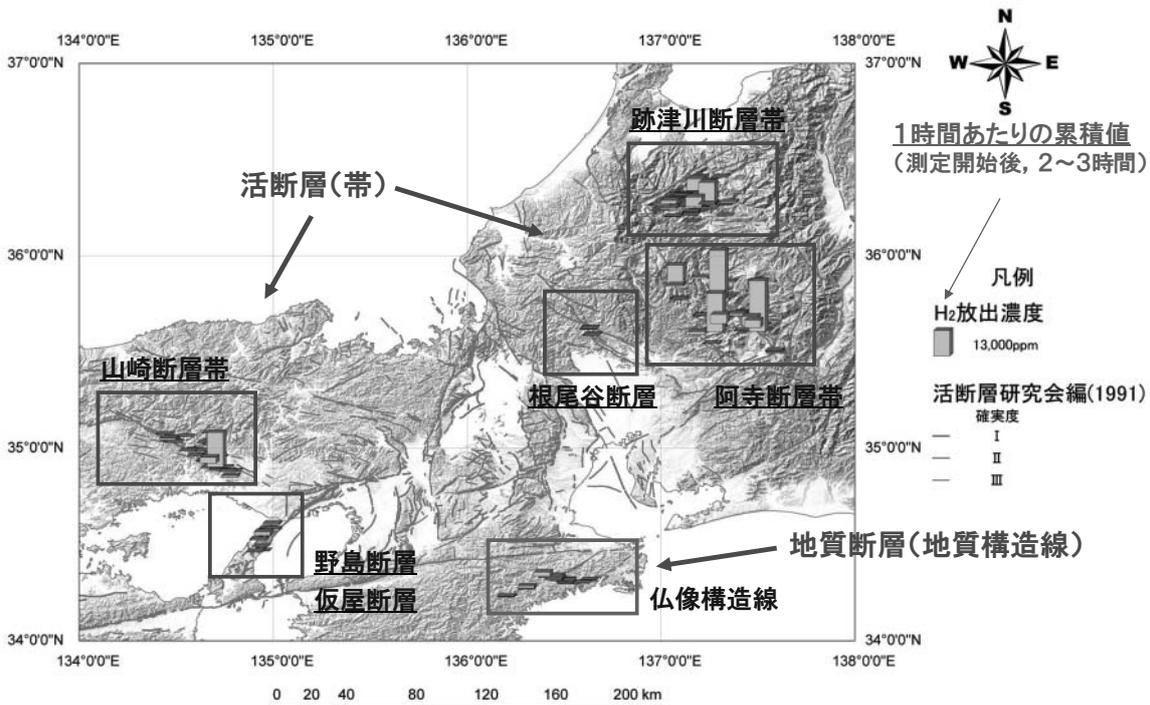
⇒現地において断層水素ガスを簡便に測定する手法を考案 (Shimada et al., 2008)

岩石の破壊実験から、鉱物破壊表面と水とのラジカル反応で水素が発生 (Kameda et al., 2003, GRLなど)

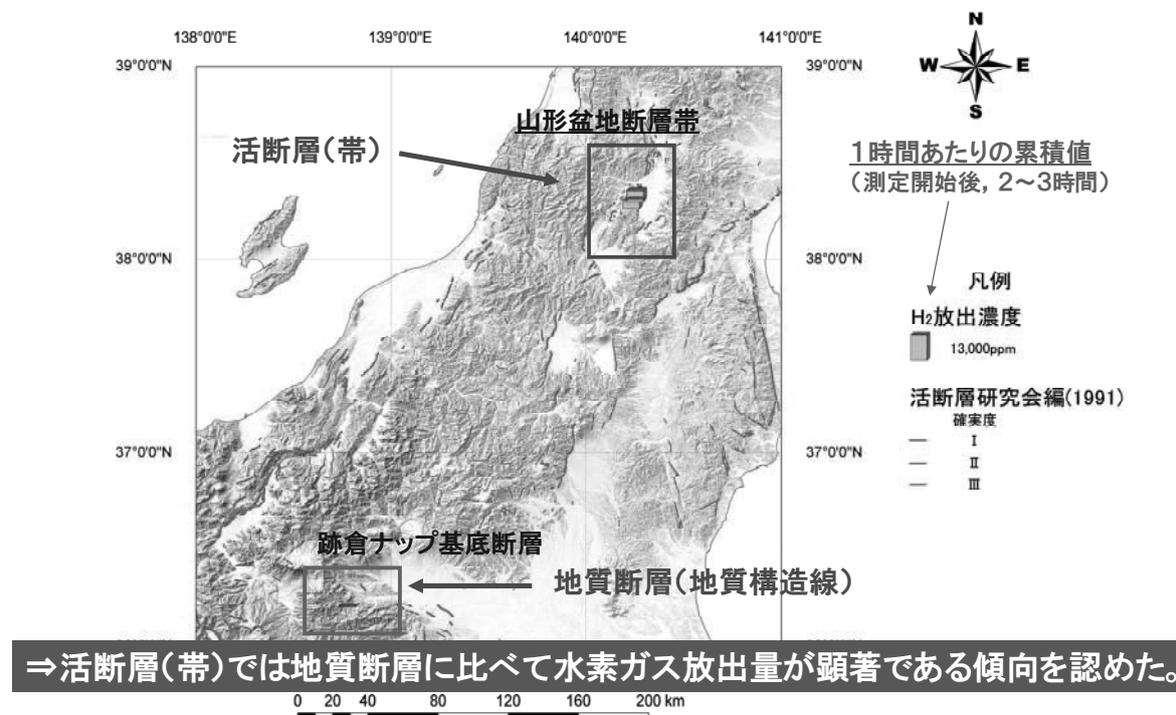
活断層帯の直上では、大気中の水素ガス濃度の数十～数万倍以上の水素ガスが放出 (Wakita et al., 1980, Scienceなど)

水素ガスの起源は、水素の安定同位体比により、地震震源に達する深度付近 (Kita et al., 1980, Geochemical Journal)

活断層(帯), 地質断層を対象とした 断層水素ガス濃度分布の事例研究(1)



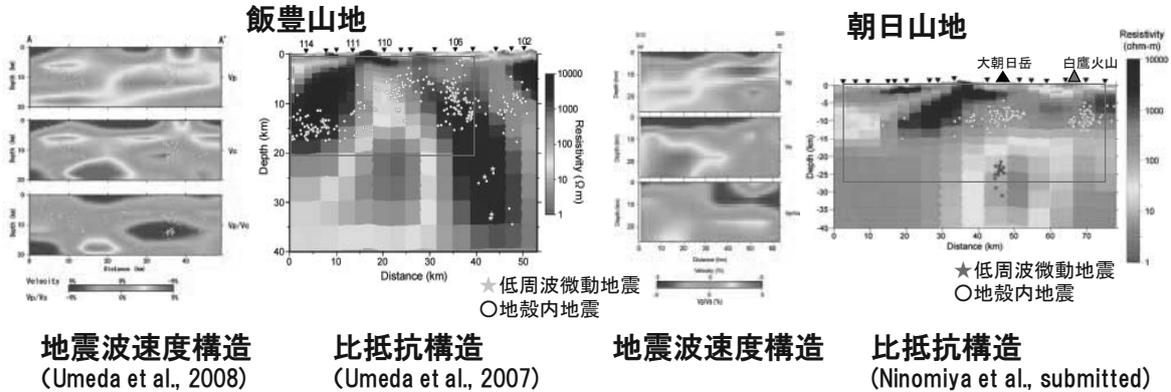
活断層(帯), 地質断層を対象とした 断層水素ガス濃度分布の事例研究(2)



「調査技術の開発・体系化」に関する研究項目

- **断層の発達履歴・活動性に関する調査技術**
 - 断層の発達履歴に関する調査技術の適用性の確認
(横手盆地東縁断層帯, 跡津川断層帯, 阿寺断層帯の事例)
 - 断層水素ガスを利用した断層の活動性に関する調査技術の検討
- **地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術**
 - 総合的なマグマ検出手法の適用性の確認(飯豊・朝日山地の事例)
 - 比抵抗構造解析技術(信頼性指標, JAEAスタッキング)の開発
 - 三次元比抵抗構造解析手法の適用性の確認(三瓶山の事例)
- **火山・熱水活動履歴の調査技術**
 - 熱年代学的手法による古地熱活動履歴の把握(紀伊半島の事例)
 - 多量屈折率地質解析法(RIPL法)による編年(むつ燧岳の事例)
- **古地形・古気候の復元調査技術**
 - 古地形と古気候の情報を取得する調査技術(東濃地域の事例)
 - 内陸部の隆起速度を把握するためのテラス-テラス法(TT法)の適用性の確認(土岐川流域, 鎗川流域の事例)

総合的なマグマ検出手法の適用性の確認(1)



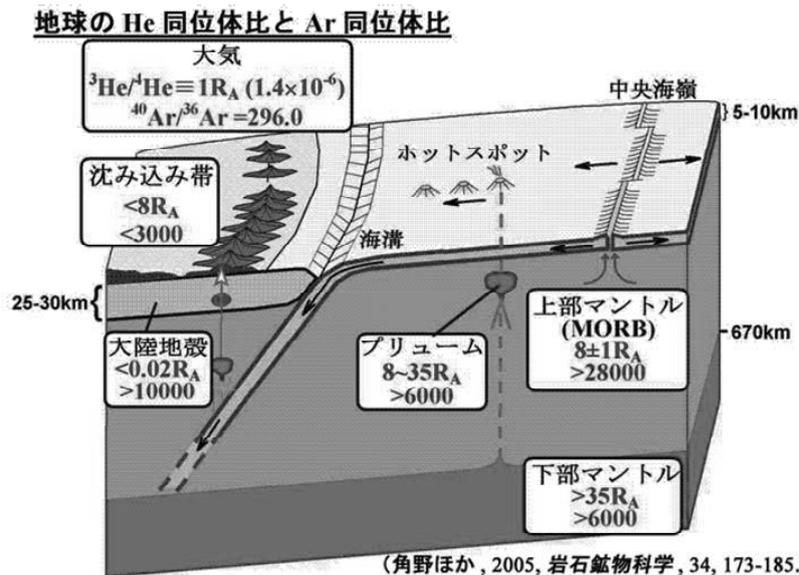
- 飯豊山地と朝日山地の地殻中部には地震波低速度域と低比抵抗体が存在
- これらの異常体の上面は地殻内地震のcut-off depthと調和的

飯豊山地と朝日山地の地下には400℃以上の高温の物質が存在することが示唆される。これらは、

- ① (地表に噴出せず)地下に伏在しているマグマ
- ② 中新世の火成活動に由来する高温岩体に伴う熱水 の可能性が考えられる。

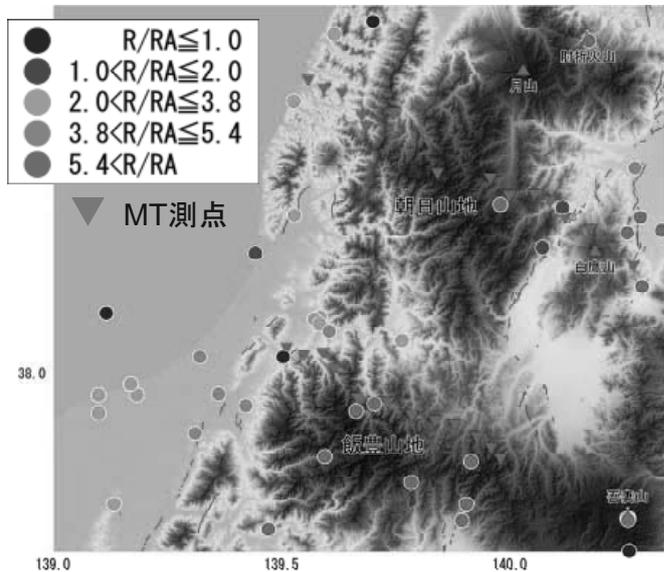
総合的なマグマ検出手法の適用性の確認(2)

地球化学的アプローチの例:ヘリウム同位体比を利用した研究

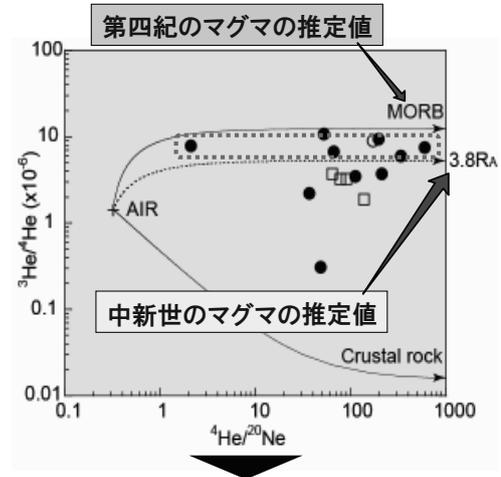


$^3\text{He}/^4\text{He}$ 比により、地下深部(マグマ・マントル)からの寄与を推定することができる。

総合的なマグマ検出手法の適用性の確認(3)



飯豊・朝日山地周辺の温泉ガスのヘリウム同位体比の分布

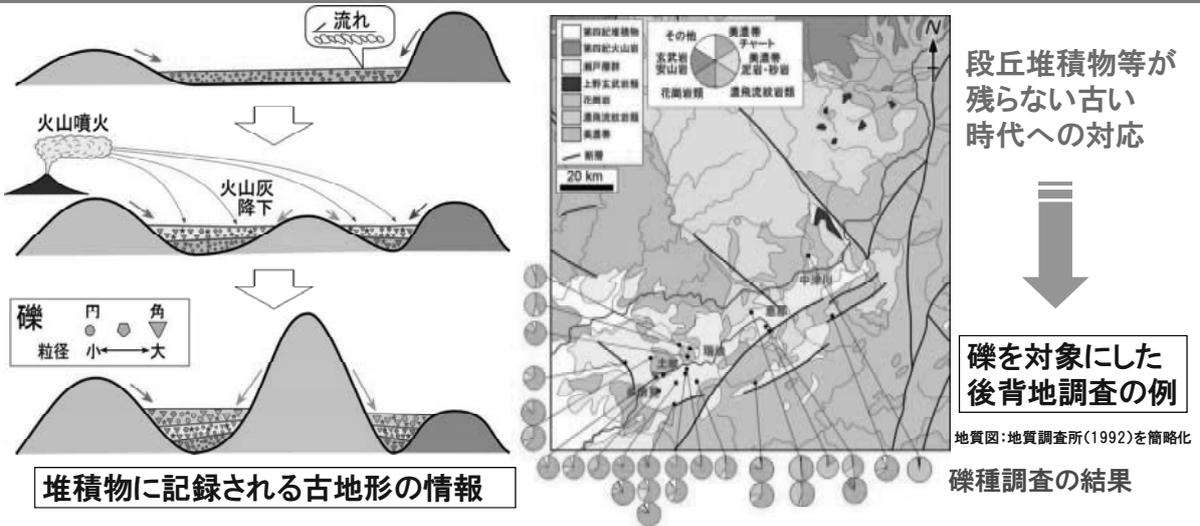


地球化学的手法により、飯豊山地と朝日山地下の高温領域は、(噴出せずに)伏在しているマグマであることが推定できる。

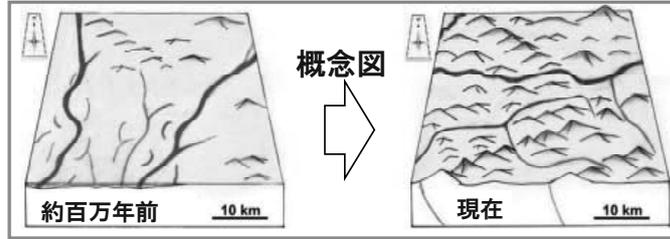
「調査技術の開発・体系化」に関する研究項目

- 断層の発達履歴・活動性に関する調査技術
 - 断層の発達履歴に関する調査技術の適用性の確認
(横手盆地東縁断層帯, 跡津川断層帯, 阿寺断層帯の事例)
 - 断層水素ガスを利用した断層の活動性に関する調査技術の検討
- 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術
 - 総合的なマグマ検出手法の適用性の確認(飯豊・朝日山地の事例)
 - 比抵抗構造解析技術(信頼性指標, JAEAスタッキング)の開発
 - 三次元比抵抗構造解析手法の適用性の確認(三瓶山の事例)
- 火山・熱水活動履歴の調査技術
 - 熱年代学的手法による古地熱活動履歴の把握(紀伊半島の事例)
 - 多量屈折率地質解析法(RIPL法)による編年(むつ燧岳の事例)
- 古地形・古気候の復元調査技術
 - 古地形と古気候の情報を取得する調査技術(東濃地域の事例)
 - 内陸部の隆起速度を把握するためのテラス-テラス法(TT法)の適用性の確認(土岐川流域, 鍋川流域の事例)

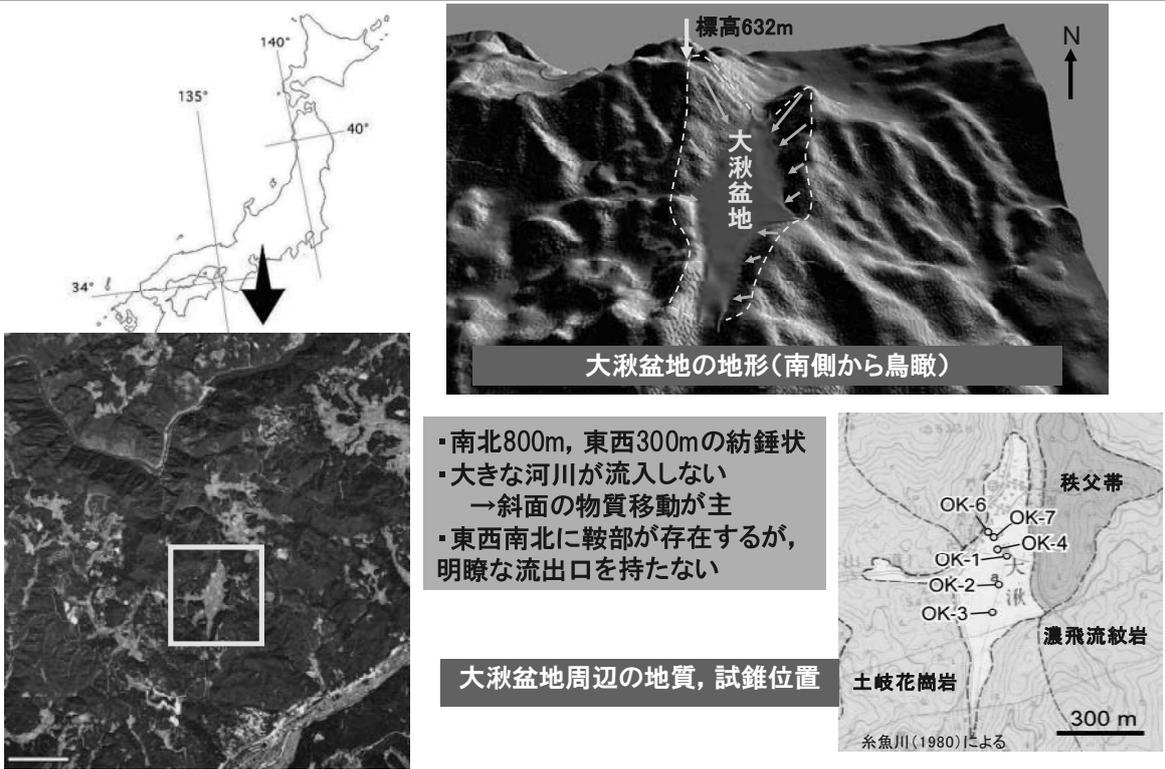
古地形を復元する調査技術の整備



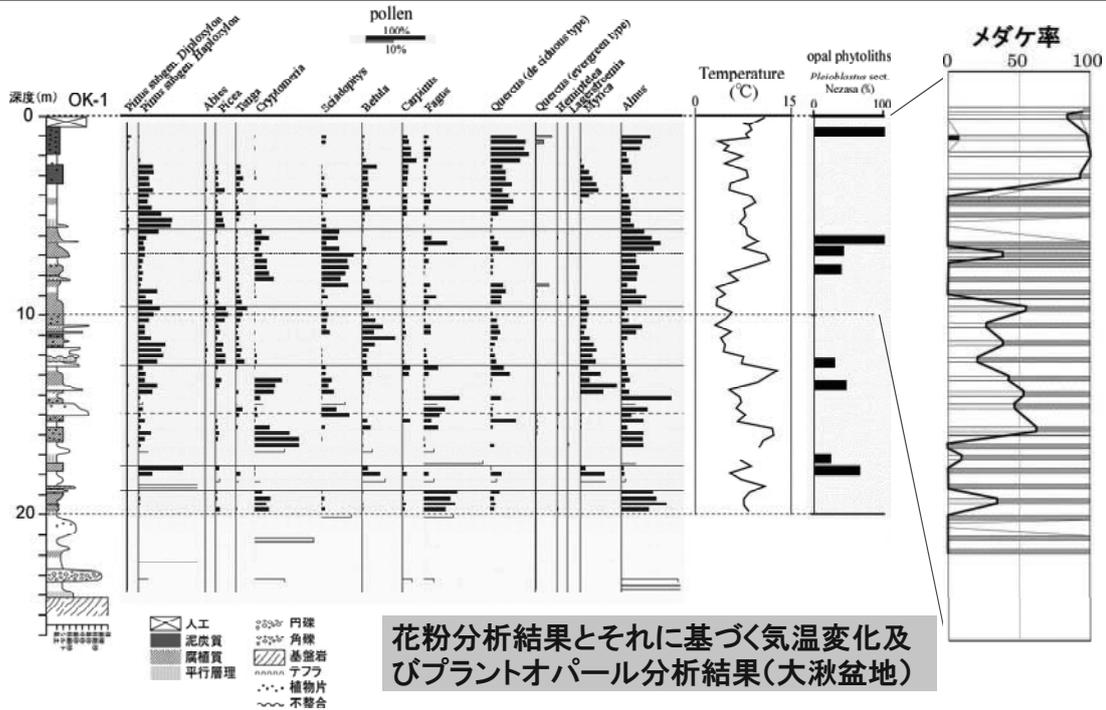
砂礫層の調査
(堆積構造, 礫種, 礫径, 古流向, 砂粒種類等)
火山灰分析, 化石分析,
古地磁気分析
各種年代測定 等



古気候の情報取得に関する調査技術 (東濃地域 大湫盆地の事例)



古気候の情報取得に関する調査技術 (東濃地域 大湫盆地の事例)



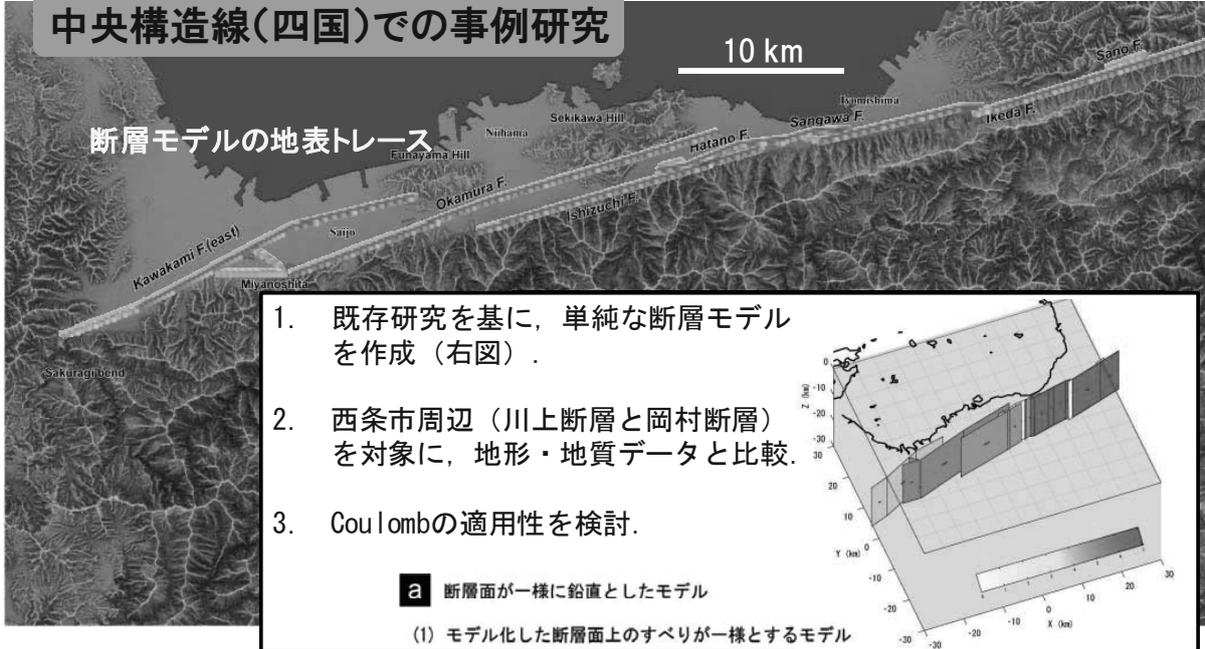
花粉分析から古気候変化を推定でき、プラントオパール分析結果も概ね同傾向を示す。

「長期予測・影響評価モデルの開発」に関する研究項目

- 断層活動の影響評価モデル
→断層活動に伴う地形変化の解析(中央構造線の事例)
- 火山活動等の長期予測モデル
→地球物理データを考慮した火山の発生確率モデル
(東北日本, 伊豆半島の事例)
- 熱水活動等の影響評価モデル
→Magma2002による熱影響解析(雲仙火山, 鳴子火山の事例)
- 地形変化モデル
→地形変化シミュレーション・プログラムの開発
→天然現象を考慮した地下水流動解析手法の検討(東濃地域の事例)

断層活動に伴う地形変化の解析(1)

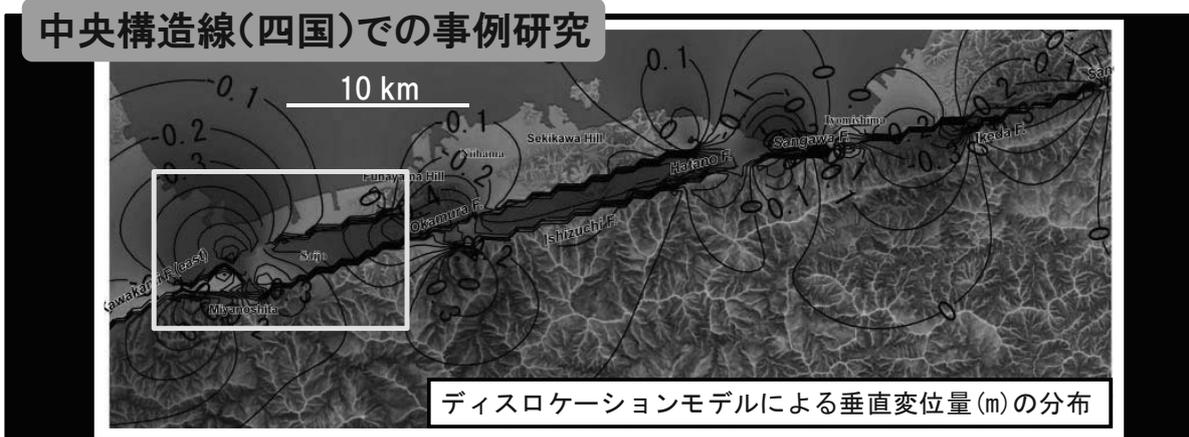
中央構造線(四国)での事例研究



基図は国土地理院発行の50mメッシュ数値地図により作成した赤色立体地図(赤色立体地図はアジア航測㈱の特許技術[特許第3670274号]を使用した。)

断層活動に伴う地形変化の解析(2)

中央構造線(四国)での事例研究



解析の設定は、

解析領域:東西 60km×南北60km

格子間隔:水平 0.2km, 鉛直 1km

弾性係数:ヤング率 $8.0 \times 10^5 \text{ bar}$, ポアソン比 0.25

断層面:断層面の地表位置 後藤・中田(2000)

断層面上限は 標高0m均一, 下限深度は15km

変位量は各断層毎に設定 2.5m~7.0mの範囲

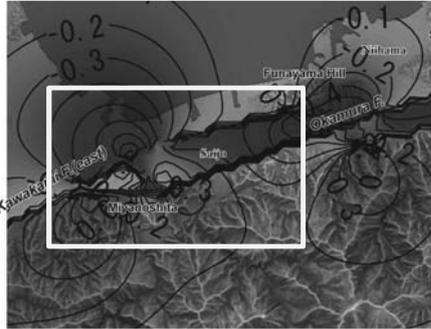
摩擦係数 一律 0.4 (典型的な横ずれ断層で得られた値; Harris and Simpson, 1998)

断層面傾斜角 a: 断層面が一様に鉛直

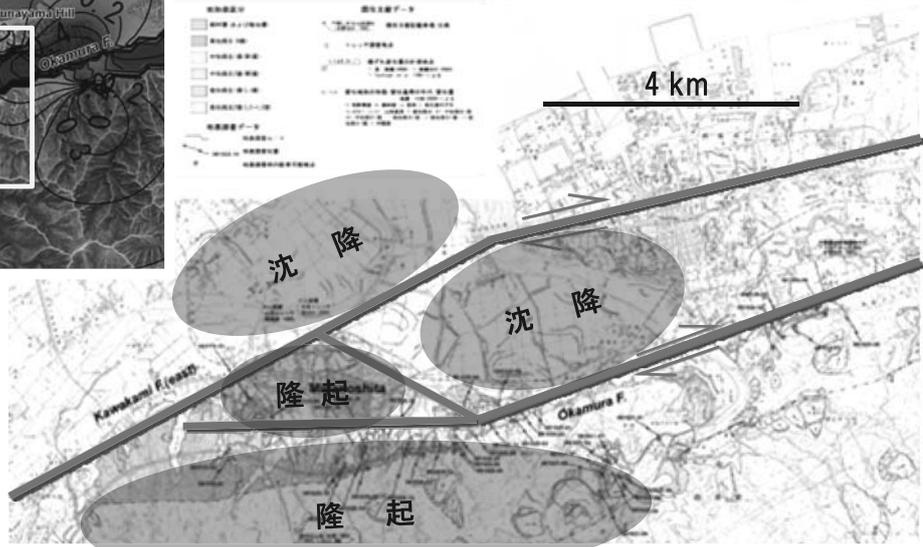
b: 地表変位の相対的隆起側に70~85° 傾斜

c: 地下2km以深を傾斜40° (表層2kmは85°)

断層活動に伴う地形変化の解析(3)



空中写真判読および野外調査に基づいた地形分類図



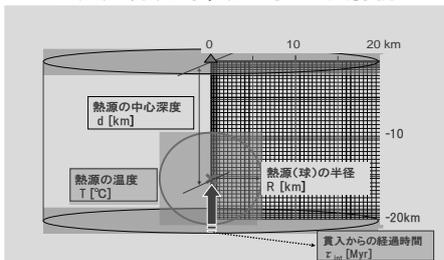
基図は、国土地理院発行
25,000分の1地形図
「壬生川」、「伊予小松」、「西
条北部」、「新居浜」、「西条」、
「別子銅山」

▶単純化させた断層モデルではあるが、地表の累積的な変形と整合的な変位分布が算定された。

➡地形変形における数値解析の有効性を示唆

Magma2002による熱影響解析 (鳴子火山の事例)

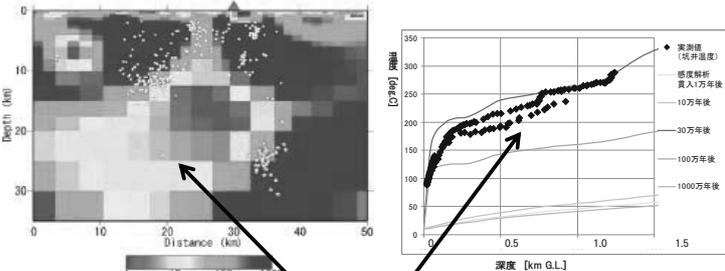
三次元非定常、熱・水連成解析



仮想モデル

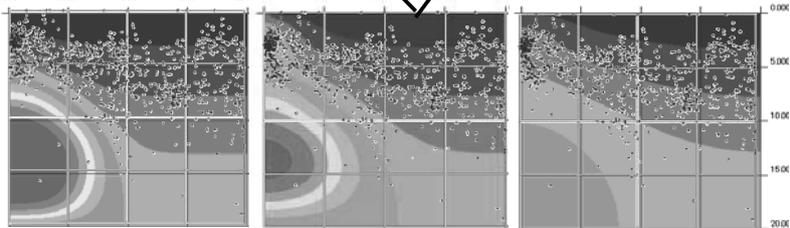
パラメータ	計算範囲
熱源の半径 R	2-7 km
熱源の深度 d	10-16 km (G.L.-)
熱源の温度 T	800-1000 °C

感度解析の条件



鳴子火山下の比抵抗構造

温度構造(シミュレーションvs実測値)



(齋藤・梅田, 2008)

10万年後 → 30万年後(現在) → 100万年後

30万年前に活動を開始した鳴子火山を事例に、100ケースの感度解析を実施した結果、1000°Cの熱源を地下15kmに設定した場合の30万年後の温度構造が、観測される地球物理量を反映している。

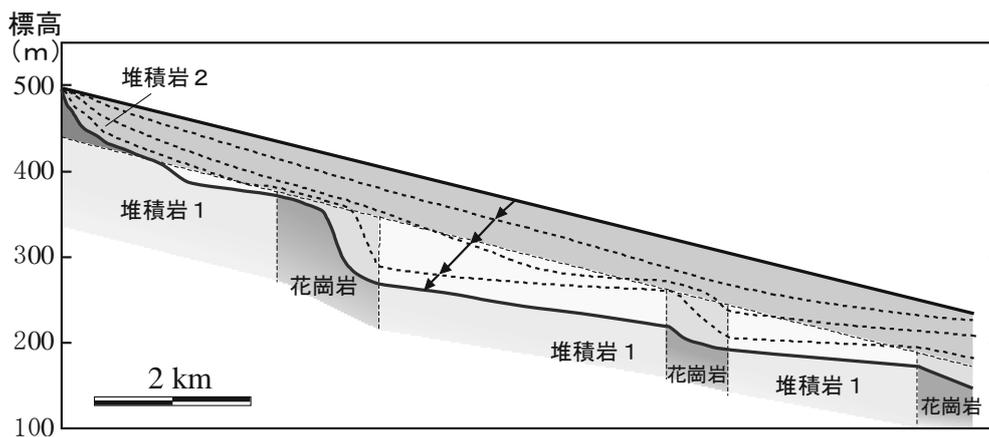
「地形変化モデル」について

■ 古地形・古気候の復元調査技術

■ 地形変化シミュレーション・プログラムの開発

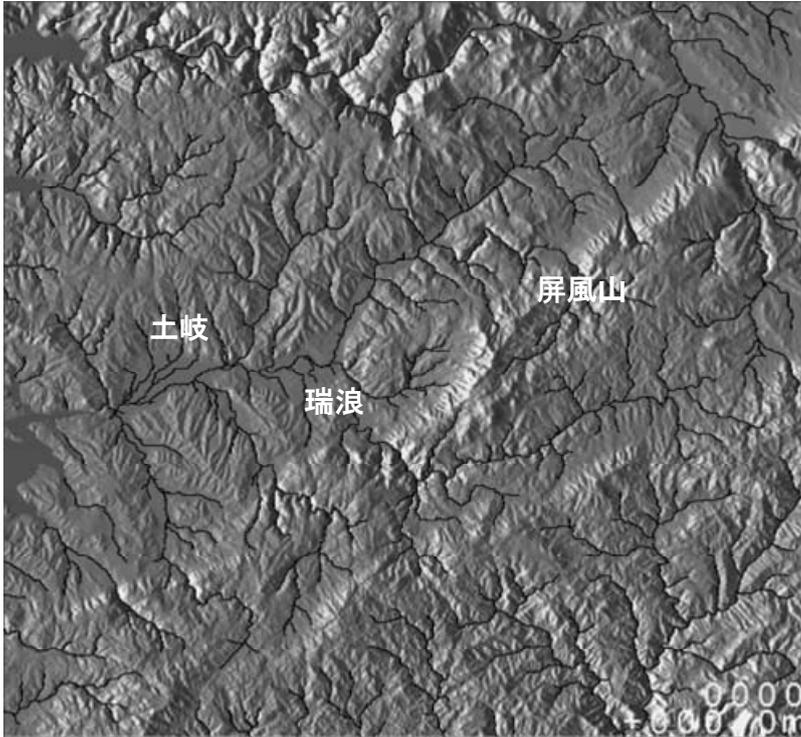
■ 天然現象を考慮した地下水流動解析手法の検討

現地調査データを考慮した地形変化シミュレーション技術



➤ 従来からの拡散係数に加えて、地質の違いによる侵食され易さの違いを「地質係数」として、新たにプログラムに組み込んだ。

⇒ 現実に近い地形変化を表現することができた。



過去～将来の地形モデルを作成する上で
の解析支援ツールとして活用

土岐川流域の例
(現在から約12万年
後までの変化)

古地形復元結果(鳥瞰図) ※地表面の高さは3倍に誇張



高位段丘面形成時
(約45万年前頃)

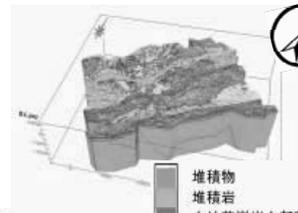
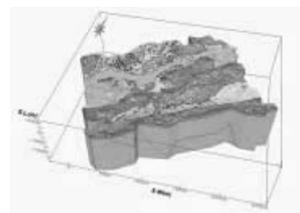
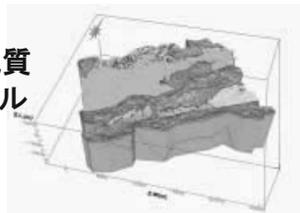


中位段丘面形成時
(約14万年前頃)



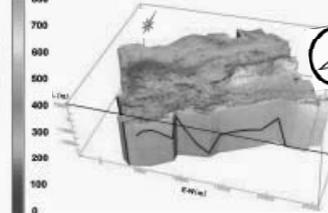
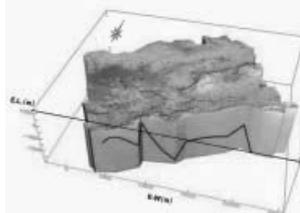
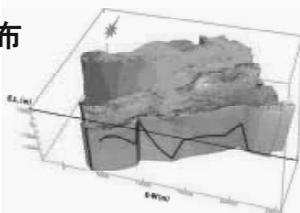
低位段丘面形成時
(約2万年前頃)

三次元地質
構造モデル



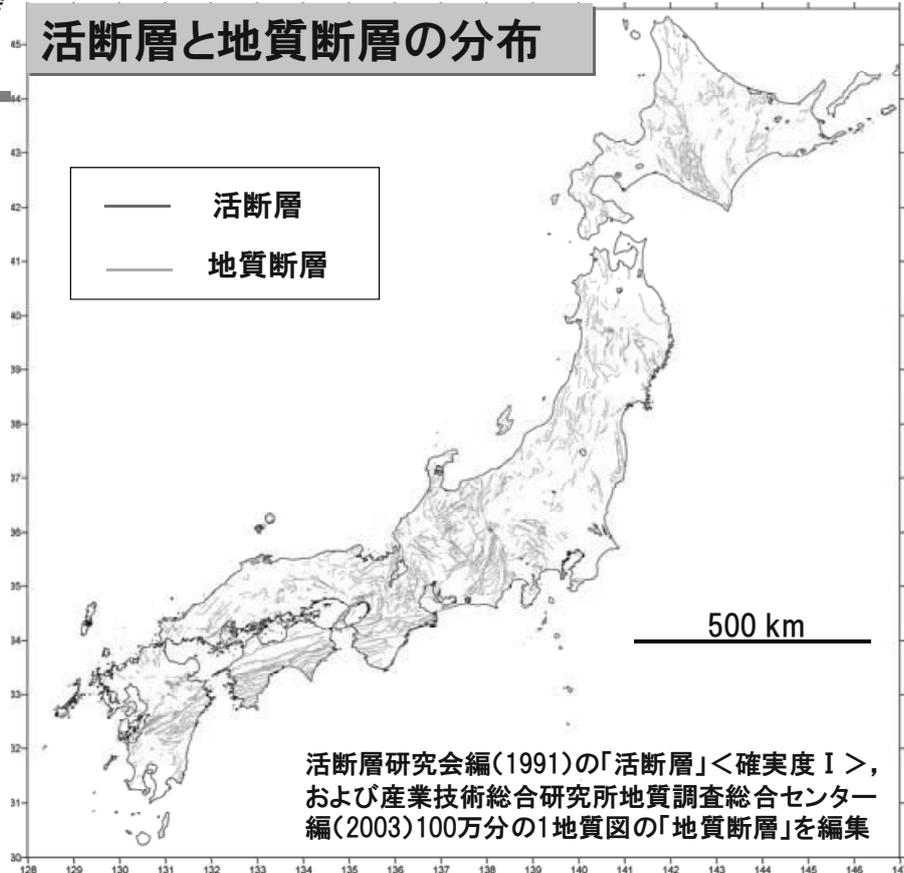
堆積物
堆積岩
土岐花崗岩上部割れ目帯
土岐花崗岩下部割れ目低密度帯

水頭分布

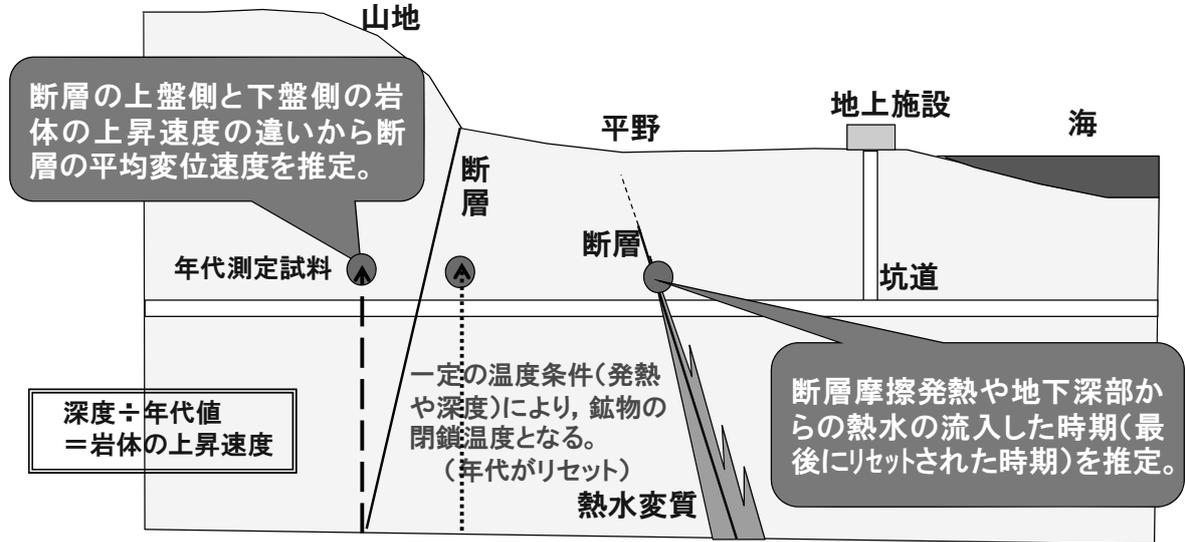


今後の研究開発の方向性

活断層と地質断層の分布

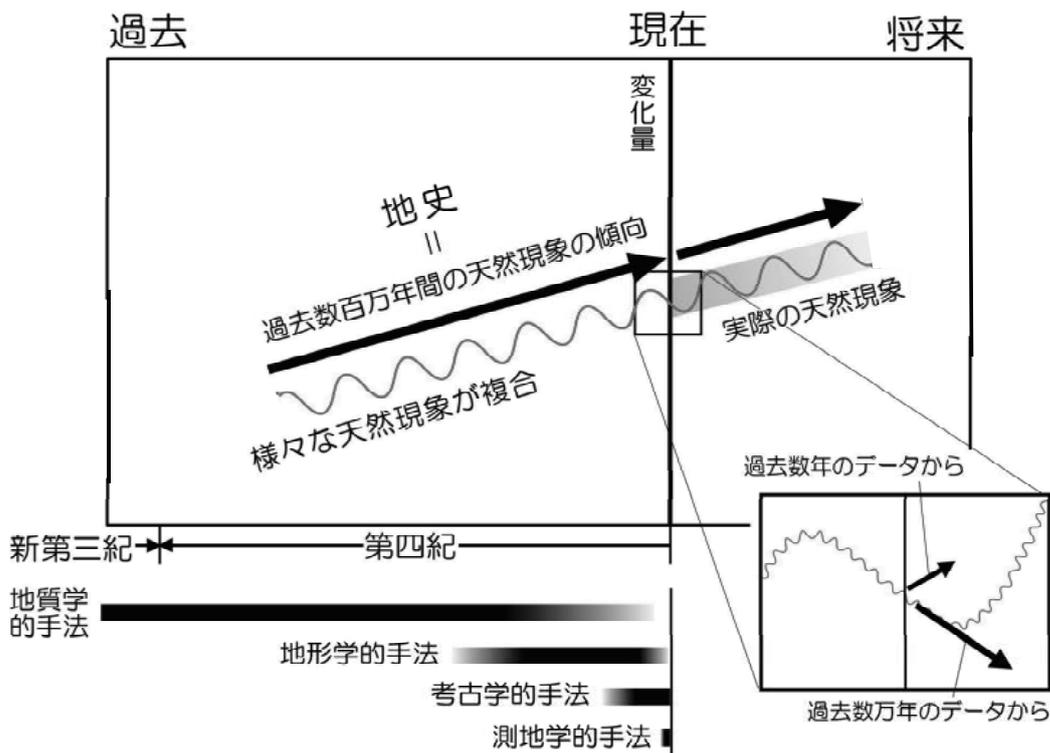


地下施設を活用した精密調査に向けて



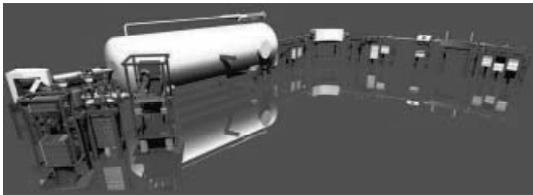
今後は、精密調査によるボーリングや坑道で遭遇した断層や変質帯の活動性をどのように評価するかが課題となると考える。これらについては、断層岩やその周辺岩盤の岩石・鉱物学的アプローチによる体系的な調査技術の整備が求められる。

外挿法による天然現象の将来予測(概念)

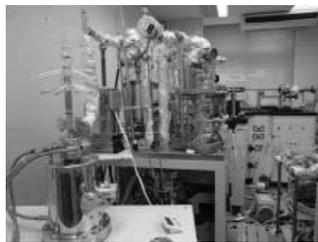


年代測定技術の開発(共通基盤技術の整備)

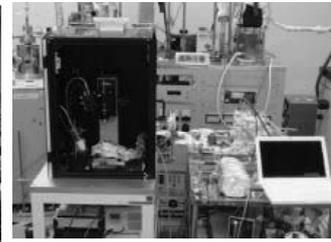
- 加速器質量分析装置(AMS)を用いた年代測定技術
 - ・装置改善等による放射性炭素の測定精度の向上
 - ・ベリリウム同位体測定に向けた試験測定の実施
- 希ガス用質量分析装置を用いたK-Ar法に係わる年代測定技術
 - ・断層粘土の年代測定を行うためのK-Ar法年代測定システムの構築
- 四重極型質量分析計を用いた(U-Th)/He法に係わる年代測定技術
 - ・ジルコンを用いた単粒子年代測定の実用化
 - ・アパタイトを用いた単粒子年代測定に向けた装置の改良



加速器質量分析装置
(ペレットロン)



K-Ar年代測定システム



(U-Th)/He年代測定システム

→引き続き、外挿に基づく将来予測の不確実性を低減する上で重要な編年技術の高度化を着実に進める。

地質環境の長期安定性に関する研究 ＜今後の挑戦＞

■ 調査技術の開発・体系化

地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術については、一連の調査技術を整備できた。

→ 今後は、以下のような断層活動に係わる研究開発を重点的に推進していく。

- 変動地形が明瞭でない活断層の把握
- 坑道掘削時に遭遇した断層の活動性評価 等

■ 長期予測・影響評価モデルの開発

断層活動、火山活動、熱水活動については、幾つかの数値解析技術の適用性を検討した。地形変化シミュレーション・プログラムについては、より実際の現象を再現できるように高度化を進めた。

→ 今後は、天然現象に伴う将来の地質環境条件(熱, 水理, 力学, 地球化学等)の変化をそれぞれのシナリオに応じて、発生可能性, 変動幅, 変動範囲を適切に示す手法・技術の整備を進める(安全評価へのデータ提供)。

地質環境の長期安定性に関する研究 ＜本日のポスター発表＞

- 断層活動に関する調査技術の開発(二ノ宮・黒澤・瓜生)
－地球化学的データを用いた変動地形が不明瞭な断層の調査技術－
- 火山活動に関する調査技術の開発(浅森・根木)
－地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術－
- 隆起・侵食／気候・海水準変動に関する調査技術の開発(草野・安江)
－過去数十万年の古地形の推定手法－
- 加速器質量分析計を用いた年代測定技術の開発(鈴木・國分)
－放射性炭素測定の精度向上のための装置等の改善－

ご清聴ありがとうございました。

4. ポスターセッション発表資料

1) 地質環境の長期安定性に関する研究

- ①断層活動に関する調査技術の開発 —地球化学的データを用いた変動地形が不明瞭な断層の調査技術—
- ②火山活動に関する調査技術の開発 —地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術—
- ③隆起・沈降／気候・海水準変動に関する調査技術の開発 —過去数十万年の古地形の推定手法—
- ④加速器質量分析計を用いた年代測定技術の開発 —放射性炭素測定の精度向上のための装置等の改善—

2) 超深地層研究所計画

- ①地質・地質構造に関する調査研究
- ②岩盤水理に関する調査研究
- ③地下水化学に関する調査研究
- ④岩盤力学に関する調査研究
- ⑤瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する研究

3) 共同研究等

- ①日本原子力研究開発機構—産業技術総合研究所 共同研究 —深部地質環境における水—岩石—微生物相互作用に関する調査技術開発—
- ②電力中央研究所—日本原子力研究開発機構 共同研究 —瑞浪超深地層研究所周辺の水理・物質移動特性評価に関する研究—
- ③日本原子力研究開発機構—産業技術総合研究所 共同研究 —岩芯を用いた応力測定と掘削振動計測による掘削影響領域の評価に関する基礎的研究—
- ④花崗岩体内で認められる Peraluminous/Metaluminous の累帯推移とチタン鉄鉱/磁鉄鉱系列の累帯推移 —土岐花崗岩体を例にして—

4) 瑞浪超深地層研究所を利用した研究

- ①立坑掘削に伴う地球物理学的変動観測研究

目標・実施概要

伏在活断層や低活動性で変動地形の明瞭でない活断層、未成熟な活断層等、いわゆる未知の活断層と呼ばれる断層を概要調査等によって確認することは、地層処分の安全性を確保する点から重要な課題である。これらの断層は、近年の変動地形学や地球物理学の進歩によって高い確度で識別されることが予想されるが、調査技術のさらなる信頼性の向上を図るため、これまで研究事例が少なかった地球化学的アプローチによる活断層の調査手法について、検討を行った(図1)。

結果として、活断層(帯)では、いわゆる地質断層に比べて、全体的には水素ガス放出量が多い傾向が認められた。また、明瞭な地震断層を伴わない内陸地震の震源域近傍の温泉ガス、地下水の溶存ガスが高いヘリウム同位体比を示し、地球化学的アプローチによる調査手法により、未知の活断層を確認できる可能性があることが分かった。

主な調査研究結果

ガス濃度分布調査 H₂, CH₄, CO₂



図2 水素ガスの測定手法¹⁾

水素ガスの測定
断層破砕帯露頭において、割れ目を対象に直径9mmの孔を差し、10分間放置してから、テフロンチューブを差し込んで、タッパ容器内に収納した携帯型水素ガス検知器を繋ぐ。その後、約3時間以上放置して、テータロガーで連続的に記録した測定値をパソコンにダウンロードする。



二酸化炭素濃度計とメタンガス検知器

二酸化炭素・メタンガスの測定
・水素ガス測定と連続する同一な断層面を対象に数cm〜数10cm離れた場所へ水素ガス測定孔と同様の孔を開削。
・この掘削孔に差し込んだチューブに三方コックをつなぎ、コックの一方に二酸化炭素ガス、もう一方にメタンガス検知器をつなぎ、それぞれのガス濃度を測定(3時間以上)。

図3 二酸化炭素およびメタンガスの測定器と測定手法



図4 国内各地の水素ガス測定結果

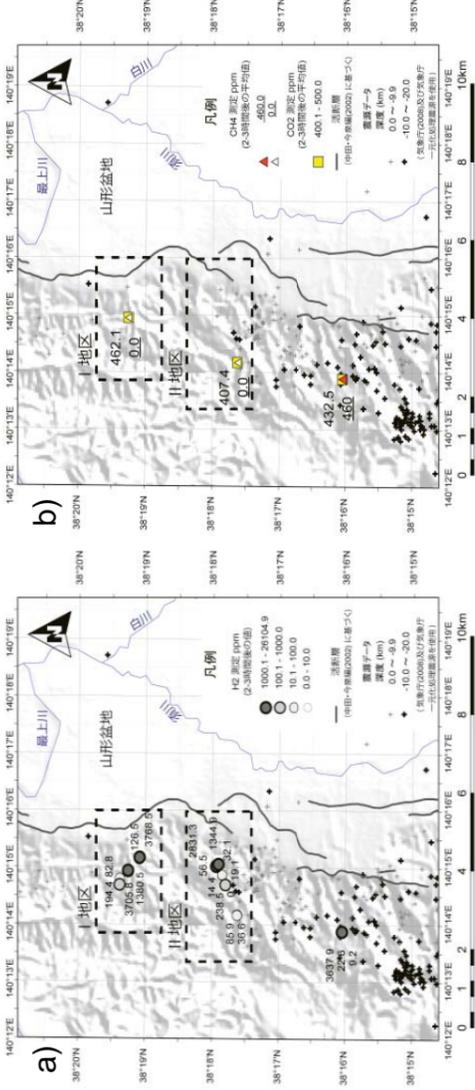


図5 断層ガス(H₂, CH₄, CO₂)測定結果

山形盆地断層帯を事例対象とした断層ガス濃度測定
今回は、逆断層の地球化学的、地質学的な特徴について、地震活動が活発な地域とそうでない地域、活断層に近い地域と離れている地域の断層ガス放出率の違いから比較、検討した。

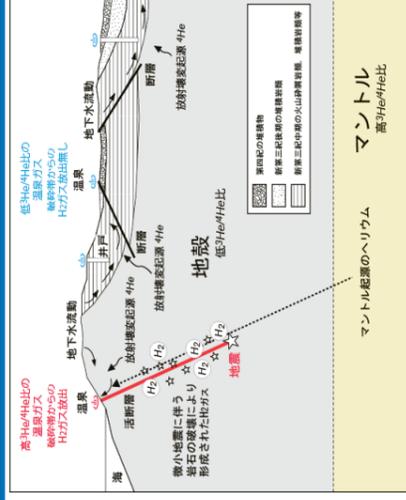


図1 揮発性物質の移行経路の概念図

得られた技術的知見

活断層(帯)と地質断層における水素ガス放出量の測定

- 断層破砕帯露頭において、割れ目を対象に断層から放出される水素ガス濃度を簡便に測定する手法が考案されている¹⁾(図2)。また、同様な手法を用いて、二酸化炭素およびメタンガスの測定を行った(図3)。
- 活断層(帯)では、水素ガス放出量に不均質性(同じ活断層沿いでも大量に放出されている場所もある)もある。また、微小地震の多い場所(同様に活断層に比べて、全体的には水素ガス放出量が多い傾向が認められた。特に、阿寺断層帯では顕著な放出が認められた(図4))。
- 山形盆地断層帯では、水素ガス放出量のほかメタンガス、二酸化炭素ガス放出量を調べた。
- 活断層の地表トレース²⁾に近づくほど、水素ガス放出率は高くなる傾向が認められた(図5a; I, II地区)。また、微小地震の多いところで、高濃度の水素ガス放出が確認された(図5a)。
- メタンガス放出は、微小地震の多いところで大気濃度(2007年現在:約1.8ppm³⁾)よりも高濃度で460ppmの放出が確認された(図5b)。
- 二酸化炭素ガス放出は、各測定地点で大気濃度(2007年現在:約380ppm⁴⁾)と比べ、20〜80ppm程度高く、活断層の地表トレース付近の地点が最も高濃度の462.1ppm、次いで微小地震の多いところで432.5ppmの放出が確認された(図5b)。

活断層(帯)及び地質断層と断層ガス濃度との関連

- 逆断層帯周辺における水素ガス、メタンガス、二酸化炭素ガス放出の傾向を把握することができた。
- 携帯型ガス濃度検知器を利用した測定手法が、地中から放出される断層ガス濃度の原位位置測定に有効な手法であることが確認された。
- しかしながら、断層の活動性や地震との関係について検討を行うためには、長期的な変動傾向を把握するとともに、微小地震や地質構造、地殻歪などとの比較が必要であり、このためのデータの蓄積が重要である。

主な調査研究結果

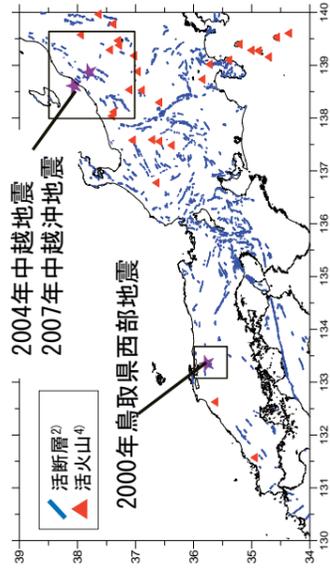


図6 調査地域位置図

- 研究地域：2000年鳥取県西部地震震源域、2004年中越・2007年中越沖地震震源域
- 地下水の溶存ガスや温泉水の遊離ガス中のヘリウム同位体比を測定した。

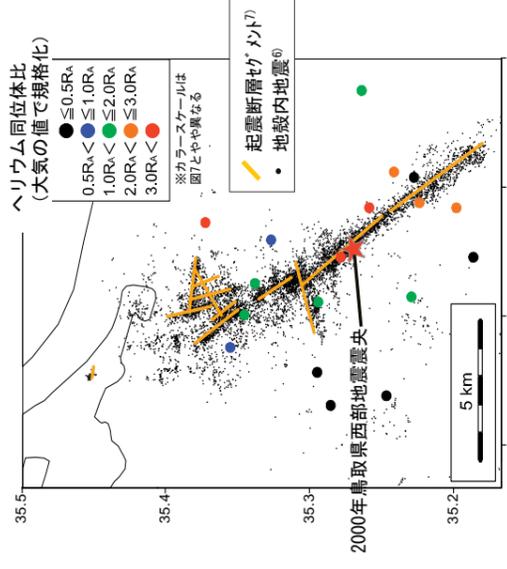


図8 2000年鳥取県西部地震震源域ヘリウム同位体比分布¹²⁾

- 震央近傍で最もヘリウム同位体比が高い

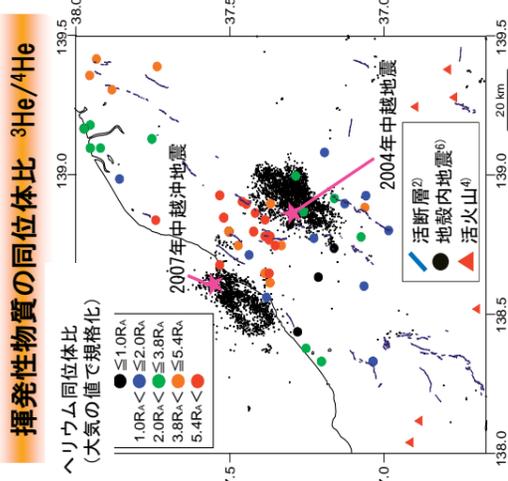


図7 中越地震・中越沖地震震源域ヘリウム同位体比分布¹¹⁾

- 余震分布域で高いヘリウム同位体比(大気の4倍以上)が観測されている

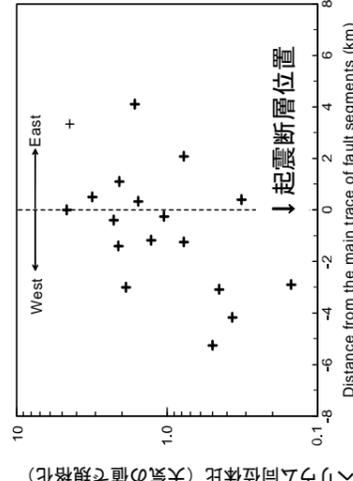


図9 鳥取県西部地震起震断層を横切るヘリウム同位体比分布¹²⁾

- 起震断層セグメントから試料採取位置までの距離とヘリウム同位体比には明瞭な相関が見られる

得られた技術的知見

震源域周辺のヘリウム同位体比分布

- ・2004年中越地震、2007年中越沖地震、2000年鳥取県西部地震の震源域周辺で温泉ガスや地下水の溶存ガスのヘリウム同位体比を分析した(図6)。
- ・いずれの地域でも余震分布域で高いヘリウム同位体比が認められた(図7、8)。
- ・中越・中越沖地震震源域では、大気の4倍以上の値を示すが、余震域から離れるとその値が減少する(図7)。
- ・鳥取県西部地震震源域では、震央近傍で最もヘリウム同位体比が高い(図8)。また、セグメント⁷⁾から試料採取位置までの距離とヘリウム同位体比には明瞭な相関が見られた(図9)。

ヘリウム同位体比分布と断層活動との関連

- ・2004年中越地震、2000年鳥取県西部地震は、共に地表には明瞭な地震断層は出現しなかった。
- ・発震機構から、前者は高角逆断層、後者は鉛直横ずれ断層によって引き起こされたことが明らかになっている^{8,9)}。
- ・断層が再活動した際には、アスペリティ(固着面)を挟んだ上位と下位との間隙水圧の差によってそこが流体の通路になることが予想されている(例えば、Sibson, 1992¹⁰⁾)。
- ・高角度で活動性が高い断層ほど、マントル起源ヘリウムがより多く地表にもたらされている可能性があることが分かった。

地層処分技術の基盤整備：地層処分の安全確保・評価に係る論拠を支える知識

- 活断層(帯)では、いわゆる地質断層に比べて、全体的には水素ガス放出量が多い傾向が認められた。
- 地震断層を伴わない内陸地震の震源域では、その周辺に比べ、温泉ガスや地下水の溶存ガスのヘリウム同位体比が高いことが認められた。
- 以上のことから、これまで研究事例が少なかった地球化学的アプローチを用いた調査手法により、断層の活動性の評価や未知の活断層と呼ばれる断層を検出できる可能性があることが分かった。

今後の挑戦

- 変動地形等の既往研究、画像データやDEMデータなどに基づく断層分布を参考に、断層から放出されるガスの化学組成や放出量・パターンと断層の活動性(地質学、地震学、測地学データ)との比較・検討を行う。
- 温泉ガスの希ガス同位体組成等が、伏在断層や変動地形が明瞭でない断層等の調査技術として有効であることを明らかにするため、活断層及び地質断層のほか、断層の性状(正断層、逆断層、横ずれ断層)や規模(成熟から未成熟、活動開始年代)、テクトニクな環境の違いによる同位体組成の特徴を取りまとめる。
- 内陸地震の発生に地殻から上部マントルに分布する流体が関連していることから、震源断層を検出するため、地震波速度構造、比抵抗構造などの地球物理学的データをあわせた総合的な調査・解析手法の構築を目指す。

参考文献

- 1) Shimada et al. (2008) Resource Geology
- 2) 中田 高, 今泉俊文編(2002) "活断層詳細デジタルマップDVD", 東京大学出版会。
- 3) 気象庁(2009) <http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/21co2.html>
- 4) 気象庁(2009) <http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/22ch4.html>
- 5) 宇井ほか(2003)地球惑星科学連合2003年大会
- 6) 気象庁(2007)地震年報CD-ROM
- 7) Fukuyama et al. (2003) Bull. Seismol. Soc. Am.
- 8) 気象庁(2004)地震・火山月報(防災編)平成16年10月
- 9) 気象庁(2000)地震・火山月報(防災編)平成12年10月
- 10) Sibson (1992) Tectonophysics
- 11) Umeda et al. (2008) Geochim. Geophys. Geosys.
- 12) Umeda and Ninomiya (2009) Geochim. Geophys. Geosys.

火山活動に関する調査技術の開発 — 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術 —

地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット 自然事象研究グループ
浅森 浩一・根木 健之・梅田 浩司・二ノ宮 淳

目標・実施概要

地質環境の長期安定性に関する検討に際しては、地層処分システムの物理的隔離機能に重大な影響を及ぼすと想定される現象(断層活動、火成活動など)による潜在的なリスクを排除するため、地下深部のマグマ・高温流体などの存在の有無を予め確認することが重要である。これまで日本原子力研究開発機構では、地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術開発の一環として、火山性高温異常域(鳴子火山、三瓶火山)及び非火山性高温異常域(飯豊・朝日山地、能登半島など)を事例対象として、以下の調査技術開発を行った。

- 地下深部のマグマ或いは高温流体の存在を確認することに対する地球物理学的調査技術(2次元地磁気地電流(MT)法および地震波トモグラフィ法)の適用性確認。
- 沿岸域における海水の存在や地下の3次元的な不均質構造に起因した比抵抗の偽像出現を抑制することに対する3次元MT法の適用性確認。
- 従来の手法では除去が困難であったコヒーレントなノイズに対して精度の高いMTデータを得るための加重スタッキング法の開発。
- 地球物理学的手法によって確認された地下深部異常体の成因を評価するための、地球化学的調査手法の検討。

主な調査研究結果

● 地球物理学的調査技術

● 鳴子火山地域(2次元MT法, 地震波トモグラフィ法)

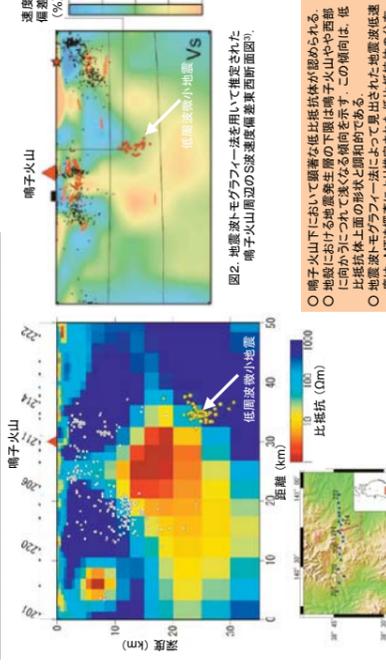


図1. MT法測定点位置図(下図)および2次元MT法を用いて推定された鳴子火山周辺の比抵抗断面図(上図)。○は微小地震の震源を示す。

● 飯豊山地(2次元MT法, 地震波トモグラフィ法)

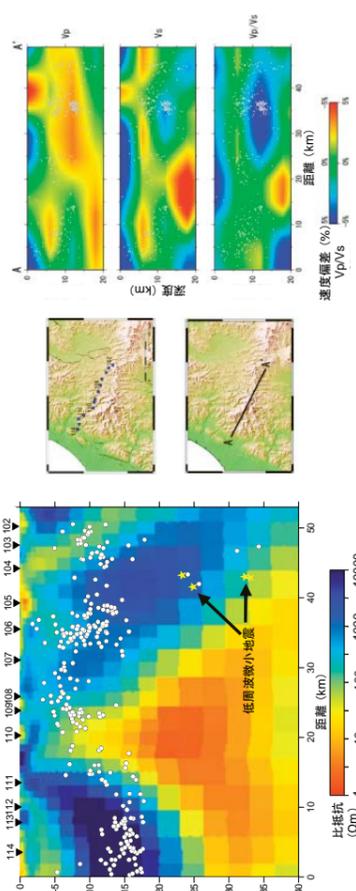


図2. 地震波トモグラフィ法を用いて推定された鳴子火山周辺のS波速度構造(東西断面図)。○は微小地震の震源を示す。

図3. 2次元MT法を用いて推定された比抵抗断面図。○は微小地震の震源を示す。
○ 飯豊山下に顕著な低比抵抗体が認められる。
○ 地層生層の下層深部は、飯豊山に向かって傾斜を示す。この傾向は、低比抵抗体上面の形状と類似的である。
○ 飯豊山下において顕著な低速度、高Vp/Vs比異常帯が認められる。
○ この異常帯は、MT法探査により見出された低比抵抗体の分布域と類似的である。

● 三瓶火山地域(3次元MT法, 地震波トモグラフィ法)

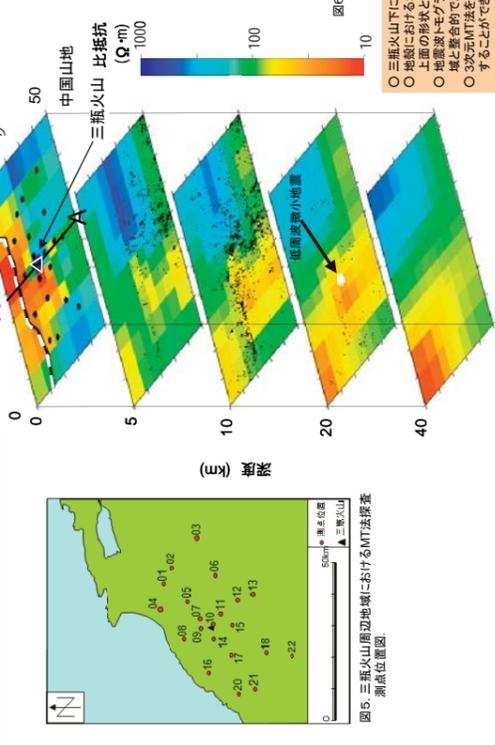


図4. 三瓶火山周辺地域におけるMT法探査測定点位置図。

得られた技術的知見

- 2次元MT法および地震波トモグラフィ法の適用性確認
- 鳴子火山および飯豊山地下における比抵抗構造、地震波速度構造、地震波速度構造、地震発生層の下限深度分布および低周波微小地震の分布は、ともに整合的な特徴を示す。また、これらの特徴は、地殻およびマントル最上部における部分溶融域またはそれに伴う水等の高温流体の存在を示唆する。
- 3次元MT法の適用性確認
- 三瓶火山下における比抵抗構造、地震波速度構造、地震発生層の下限深度分布および低周波微小地震の分布は、他の火山地域と同様の特徴を示し、火山下の地殻およびマントル最上部における部分溶融域またはそれに伴う水等の高温流体の存在を示唆する。
- 日本海沿岸部に位置する三瓶火山周辺地域を対象に3次元MT法を適用することで、他地球物理学的情報と整合的な上記の結果が得られたほか、実際に海水が存在する領域において、それに伴う低比抵抗層を再現することができた。これらのことは、3次元MT法が沿岸域における比抵抗構造調査において従来より課題とされていた地下の3次元的な不均質や海水の存在に伴う偽像の出現に対し、それを抑制するための有効な手段であることを示唆する。

主な調査研究結果

● 地球物理学的調査技術

能登半島 (MTデータ加重スタッキング法, 3次元MT法)

加重スタッキング法の基本原理

一般に、測定点において観測されたMTデータにローカルノイズが混入している場合は、測定点と参照点の相互相関スペクトルをスタッキングすることにより、測定点におけるローカルノイズを低減することができる。ここで、ローカルノイズはデータ数の平方根に比例して小さくなるが、ノイズの混入に対して良質なデータを得るためには、長時間の観測による多量のMTデータが必要となる。ここで開発した加重スタッキング法では、従来のMTデータの時重みとして用いていた、従来の比較に比べて少ないデータ数によって効率的に良質なMTデータを導くことができる。

(測定点と参照点の相互相関スペクトル総和平均) / (測定点の自己相関スペクトル総和平均)

なお上式は、これまで評価が困難であった直流電流等による、電場および磁場に相関を持つコヒーレントなノイズに対しては有効である⁶⁾。

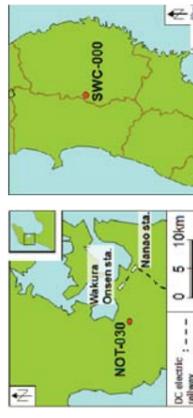


図8. 加重スタッキング法を用いた測定点(左図:石川県七尾市 直流ノイズ源から約5km)および利用した参照点(右図:大手集落石町 測定点から約45km北東)。

○能登半島中部では、直流電流の漏洩電流によるコヒーレントなノイズが卓越している。
 ○図9は電流が止まるため、比較的ノイズは軽減される。
 ○本加重スタッキング法を能登半島を対象としたMT法による比抵抗構造調査に適用した結果、従来の手法では除去が困難であったコヒーレントなノイズを有意に低減することができた。

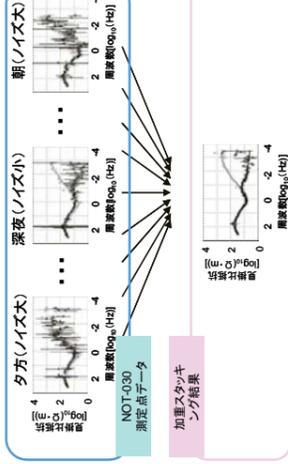


図9. NOT-030におけるMTデータ(上図)および参照点SWC-000におけるMTデータを用いて加重スタッキング法を適用した結果得られた重畳比抵抗(下図)⁶⁾。

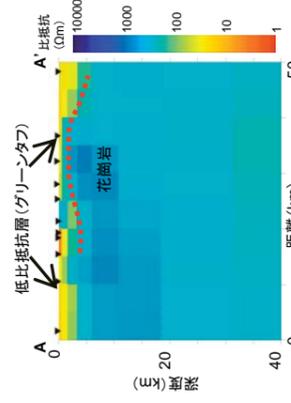


図10. 加重スタッキング法および3次元MT法⁶⁾を用いて推定された比抵抗分布。各深層における平面図(右図)および断面図(左図)⁶⁾。

○中央部の高比抵抗層(地層付近まで分布)は基礎花崗岩の分布と整合する。
 ○地下深層にはマグマや高温流体を示すような低比抵抗層の存在は認められない。

● 地球化学的調査技術

飯豊山地(温泉ガス・水のヘリウム同位体比測定)

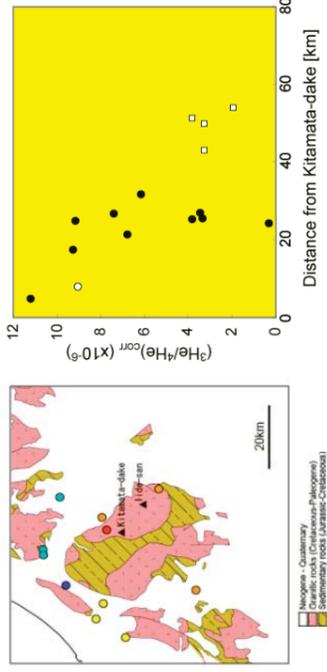


図11. 飯豊山地周辺地域における温泉ガス・水のヘリウム同位体 ($^3\text{He}/^4\text{He}$) 比分布(左図)および北陸近海からの距離との相関図(右図)¹⁾。

○飯豊山地周辺において高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の温泉ガスが認められる。
 ○北陸近海から運ばれるにつれて $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が低下する傾向が認められる。

能登半島(温泉ガス・水のヘリウム同位体比測定)

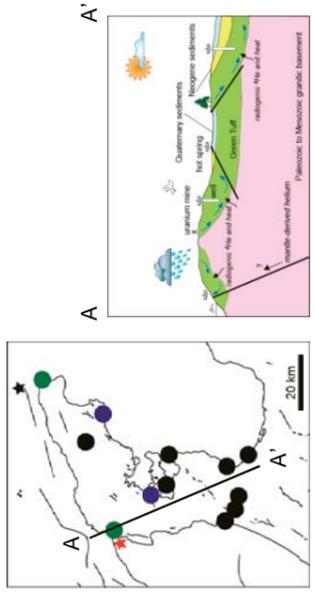


図12. 能登半島における温泉ガス・水の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比分布⁶⁾。
 R/Ra (obs)
 ● $R/Ra \le 1.0$
 ○ $1.0 < R/Ra \le 2.0$
 ● $2.0 < R/Ra \le 3.8$

図13. 能登半島における熱、地下水、マントル起源Heの移動に関する概念図⁶⁾。

○ $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は概ね $1.0R_a$ (大気の数)以下であり、地殻起源のHeの寄与が大きいことを示す。
 ○U, Th, Kの放射壊変によって生じた熱と ^4He (α 粒子)によって、高温の熱源の存在と温泉ガスに含まれる低いヘリウム同位体比が説明できる。

得られた技術的知見

● MTデータ加重スタッキング法の開発

・測定点と参照点における相互相関スペクトルと、測定点の自己相関スペクトルの比を基に重み付けする加重スタッキング法を開発し、能登半島を対象とした3次元MT法による地下比抵抗構造調査に適用した結果、特に直流電流に起因するコヒーレントなノイズの除去に効果的であることが確認された。

● 地球化学的調査技術の検討

・地球物理学的調査により地下深部に異常体(低比抵抗、低地震波速度)が認められた飯豊山地周辺における温泉ガス・水のヘリウム同位体比は、他の火山地域と同様の特徴を示すことから、地下深部における部分溶融域の存在を示唆する。一方で、地下深部に異常体と認められない能登半島におけるヘリウム同位体比は低いことから、本地域の高温泉の熱源は部分溶融域に伴うものではなく、地殻内のU, Th, Kの放射壊変に起因すると考えられる。

地層処分技術の基盤整備: 地層処分の安全確保・評価に係る論拠を支える知見

・地下深部のマグマ・高温流体等の存在を確認するためには、地球物理学的調査手法(MT法、地震波トモグラフィ法)や地球化学的調査手法(温泉ガス・水のヘリウム同位体比測定)を組み合わせたことが有効である。これらの調査手法を組み合わせることによって、地殻・マントル最上部に存在する数十km以上の溶融体であれば、地上からの調査段階においてその存在を確認することができる。

・MT法による比抵抗構造調査においては、地下の3次元的不均質を考慮することが可能で3次元MT法を適用することが望ましい。本手法は、海水の存在を考慮する必要がある沿岸域における調査において特に有効である。また、MTデータの処理においては、測定点と参照点の相互相関スペクトルと、測定点の自己相関スペクトルの比を基に重み付けする加重スタッキング法がノイズの低減に有効である。

今後の挑戦

地殻中部に存在し、地表において明瞭に確認できない震源断層については、将来の活動によって地表付近まで破断が進展する可能性があることから、震源断層の分布や形状等を把握することが重要となる。今後は、これまで地下深部におけるマグマ・高温流体の存在を確認するために用いていた地球物理学的および地球化学的調査技術を応用し、微小地震活動に関連する震源断層の分布や形状の把握、断層活動に関連すると考えられている地殻流体の分布を推定するための技術の確立を目指す。

参考文献

- 1) Ogawa, Y., and Uchida, T. (1996) A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift. Geophysics, J. Int., 126, 69-76.
- 2) 浅森浩一, 梅田浩司 (2005) 地下深部のマグマ・高温流体等の地球物理学的調査技術-見方-鳴子火山地域および伊予半島南側地域への適用-1, 原子力ハザード研究, 11, 2, 147-155.
- 3) Nakajima, J., and Hasegawa, A. (2003) Tomographic imaging of seismic velocity structure in and around the Onikobe volcanic area, northeastern Japan: implications for fluid distribution. J. Volcan. Geotherm. Res., 127, 1-18.
- 4) 浅森浩一, 梅田浩司, 根木健之, 小川康雄 (2006) 飯豊山地下の地震波速度及び比抵抗構造. 日本地球惑星科学連合2006年大会予稿集, S118-007.
- 5) Sasaki, Y. (2004) Three-dimensional inversion of static-shifted magnetotelluric data. Earth Planets Space, 56, 239-248.
- 6) 根木健之, 二ノ宮 淳, 花室孝広, 梅田浩司 (2009) 沿岸域における三次元比抵抗構造解析. 物理探査学会学術講演要録集, 120, 169-172.
- 7) Nakajima, J., and Hasegawa, A. (2007) Tomographic evidence for the mantle upwelling beneath southwestern Japan and its implications for arc magmatism. Earth Planet. Sci. Lett., 254, 90-105.
- 8) 根木健之, 梅田浩司, 松尾公一, 浅森浩一, 大塚英史 (2009) MT法スペクトル・データの効率的且つ効果的な集約方法-コヒーレントノイズに対する有効性- 物理探査(投稿中).
- 9) 根木健之, 梅田浩司, 浅森浩一 (2008) MT法による深部比抵抗構造解析とその信頼性評価法について日本地球惑星科学連合大会予稿集, G121-012.
- 10) Umeda, K., Nironiya, A., and Negi, T. (2009) Heat source for an magmatic hydrothermal system, Noto Peninsula, Central Japan. J. Geophys. Res., 114, B01202. doi:10.1029/2008JB005812.
- 11) Umeda, K., Asamori, K., Nironiya, A., Kanazawa, S., and Okawa, T. (2007) Multiple lines of evidence for crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline Iida Mountains, northeast Japan. J. Geophys. Res., 112, B05207. doi:10.1029/2006JB004890.

隆起・沈降/気候・海水準変動に関する調査技術の開発 — 一過去数十万年の古地形の推定手法—

地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット 自然事象研究グループ
草野 友宏・安江 健一

目標・実施概要

日本列島の特徴

- ・変動帯に位置する → 地殻変動や火成活動が安定大陸に比べて活発
- ・降雨に恵まれている → 侵食作用が活発

地形変化

地層処分の長期的な安全性の評価において地形変化やそれに伴う地質環境条件の変動幅の把握が重要¹⁾

本研究

- 着目点：地殻変動や侵食・堆積などに起因する長期的な地形変化
- 目 標：数十万年前から現在までの古地形変化を概念的に把握し、数値化する手法の提示

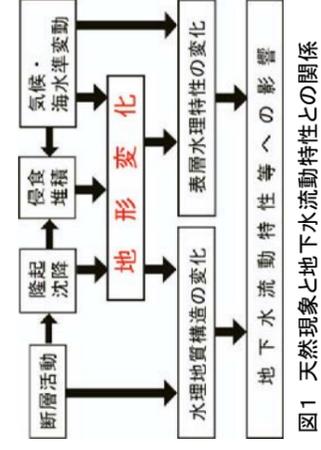


図1 天然現象と地下水流動特性との関係

主な調査研究結果

各時期の段丘面標高を基に谷埋めに伴う古地形を推定

段丘分布：空中写真判読と野外調査から把握(図2)

段丘形成時期：¹⁴C年代測定、花粉分析、火山灰分析の結果(図3, 4)に基づいて把握

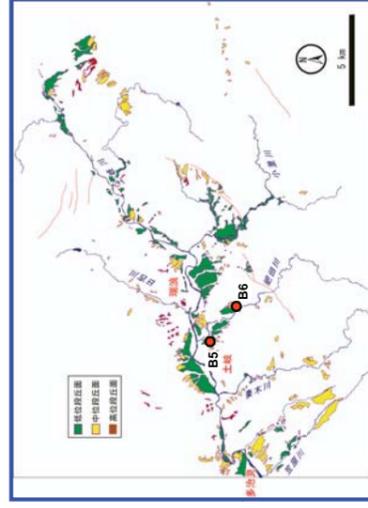


図2 土岐川中～上流域の河成段丘分布

赤色化した段丘面構成層の花粉分析結果

- ・Cryptomeria (スギ属)が卓越し、Pinus (マツ属)とLepidobalanus (コナラ亜属)の花粉を高率に産出
- ・Carpinus-Ostrya (クマシデ属 - アサダ属), Fagus (ブナ属), Alnus (ハンノキ属), Cyclobalanopsis (アカガシ亜属)などの花粉を低率に産出
- ・産出特徴は、大阪湾のMa11層(高位段丘相当層)と類似



図3 花粉化石の写真

- ・¹⁴C年代が2万数千年前である
- ・始良Tn火山灰(AT)を産出
- 低位段丘と判断

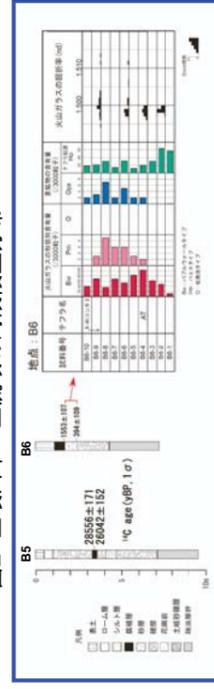


図4 掘削コアから採取した試料の¹⁴C年代測定と火山灰分析の結果

本流及び支流の河床とそれらの流域に分布する段丘面の断面図を作成

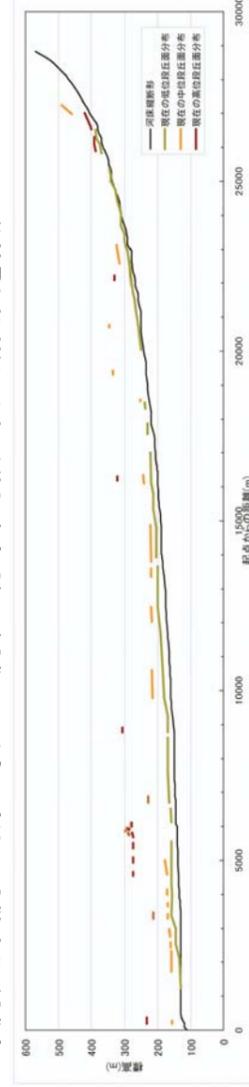


図5 土岐川本流域の河床縦断面形とその流域の段丘面の分布

段丘面標高の推定

段丘面が分布しない区間の補間

- 各段丘面の分布標高を用いた多項式近似曲線によって推定

不自然な標高の段丘面

- 除外

段丘面が現存しない支流

- 隣接する支流で認められる段丘面の比高差や本流との合流点での段丘面の比高差を用いて推定

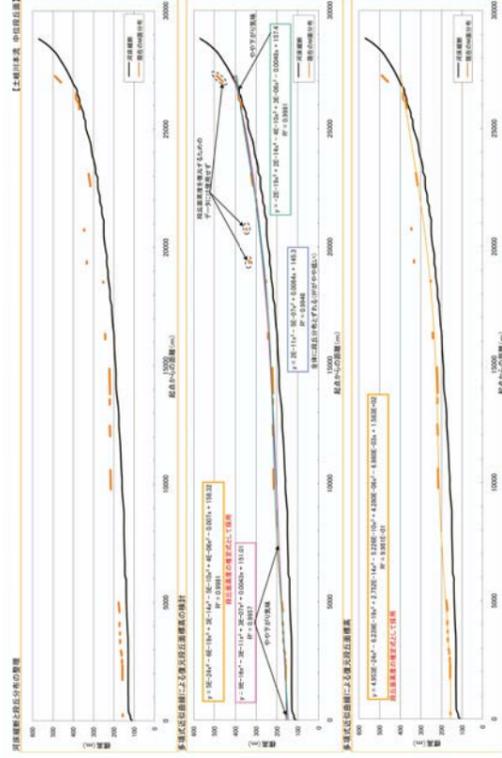
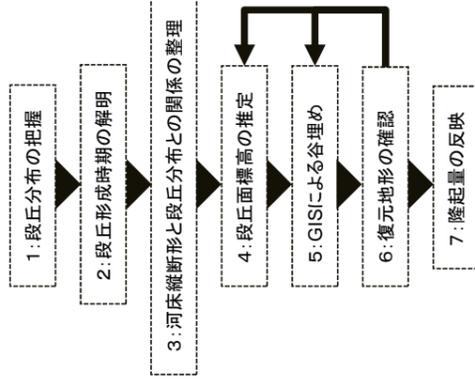


図6 河床縦断面上での段丘面の復元

得られた技術的知見

過去数十万年間の概括的な古地形の推定手法

過去数十万年間の概括的な地形の分布を推定して数値化する手法を考案
以下に作業の流れを示し、その後各作業におけるノウハウを示す。



1: 段丘分布の把握

低位段丘と中位段丘

- 主に空中写真判読から分布を把握(図2)

高位段丘

- 平坦面が不明瞭なため尾根の定高性とその地点に分布する堆積物の特徴(縮まり具合や赤色風化)から判断(図2)

2: 段丘形成時期の解明

複数の手法や情報を組み合わせて解明

- ¹⁴C年代測定、火山灰分析、花粉分析、樹種同定、標高分布、開析の程度など(図3, 4)
- 花粉・樹種 → 寒暖の情報や形成時期の推定
- 矛盾するデータ・周辺の地形的特徴や形成過程などを考慮して判断

3: 河床縦断面形と段丘面との関係の整理

河床標高及び段丘面高度の取得

- マッシュ間隔10mのDEM(Digital Elevation Model: 数値標高モデル)を利用
- 段丘面は山際付近(最も標高の高いところ)の標高を取得

河川ごとに河床縦断面形と段丘面の関係を整理

河床縦断面図の作成(図5)

主な調査研究結果

GISを用いた古地形復元

- GIS (Geographic Information System : 地理情報システム)
- I. GISを用いて、各河川の縦断側線上で50m間隔のポイントデータを作成
 - II. ポイントデータに起点からの距離に応じて推定した段丘面標高を属性として付加
 - III. ポイントデータと既存の10mメッシュDEMを重ね合わせて、メッシュの全点について、最も近い位置にあるポイントデータを検索させ、その標高値を属性として付加
 - IV. 既存の10mメッシュDEMが持つ現在の標高と付加した復元段丘面標高を比較して図7の操作を行いDEMデータを作成

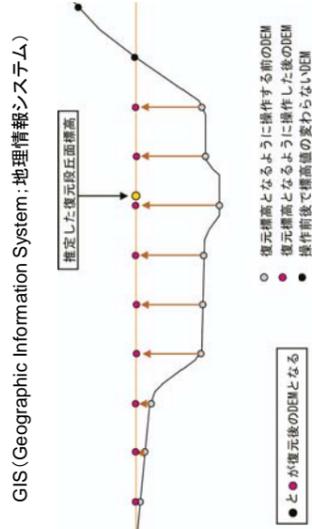


図7 GISによる谷埋め方法の概念図 (河床横断面)

復元地形の確認

谷埋めの操作は機械的に行うため、部分的に異常値が現れたり、地形的に不自然な地形になることがある。→ダミーポイントの設定や接合部の距離の調整などを施し、段丘面標高を修正

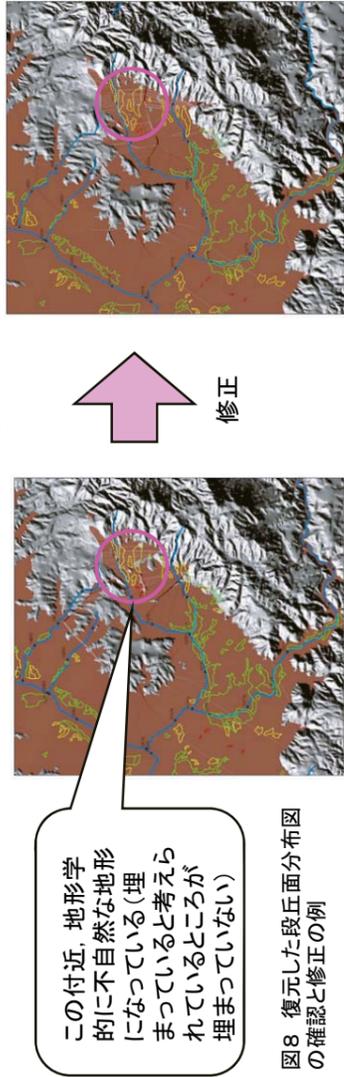


図8 復元した段丘面分布図の確認と修正の例

操作したDEMデータに対して、地殻変動による広域的な隆起量を反映 → 鳥瞰図 (図9)

- ・河成段丘発達モデルに基づく段丘面の比高から10万年程度の隆起速度を推定(0.2 mm/yr)
- ・各段丘面の形成時から現在までの隆起量(一様隆起, 0.2 mm/yr)を与えて標高値を算出
- ・各時期の大局的な高さの分布や流れの方向、高度差の時間変化を表現
- ・考慮していない点：①復元した段丘面より標高が高い部分の侵食
②河川の蛇行による山地斜面の削剥
③活断層による変位

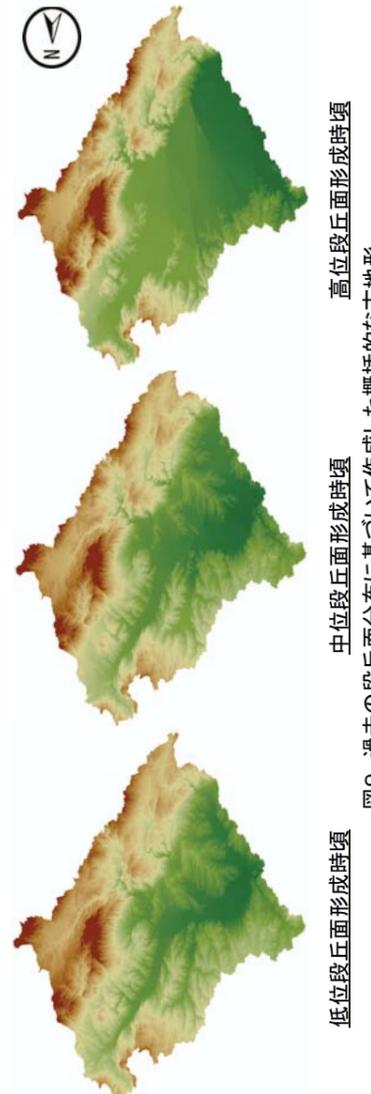


図9 過去の段丘面分布に基づいて作成した概念的な古地形

地層処分技術の基盤整備：地層処分の安全確保・評価に係る論拠を支える知識

数十万年前～現在の概括的な古地形を実際のデータに基づいて定量的に推定する手法の一つを提示

- ・東濃地域を流れる土岐川流域を事例
- ・地形判読、野外調査、試料採取・分析の実際データを使用 → 段丘の分布と形成時期及び広域的な隆起速度の把握
- ・DEMとGISを用いて各時期の河床分布を推定したDEMデータを作成(ローカルな隆起や山地部の侵食などは現段階では表現されていない)
- ・各時期の大局的な高さの分布や流れの方向、そして、それらの長期的な変化の傾向などを表現しているDEMデータ

⇨ 地質環境条件の長期的な変動幅を把握する際に必要となるデータである

今後の挑戦

- ・推定した古地形の確度の確認：推定した古地形を出発点とした地形変化シミュレーションを行い、段丘面の残存率、河床縦断形などで確認
- ・本研究では考慮しなかった断層活動や谷埋め部より高標高部における侵食の影響を反映させる方法の検討
- ・復元した古地形を上部境界面として地下水流動解析に活用し、10万年オーダーの地形変化と地下水流動特性との関係を把握する手法の提示

謝辞・参考文献

本研究を進めるにあたり、地震予知総合研究振興会の田力正好氏、(株)ニュージェックの尾上博則氏と塩見哲也氏にご協力いただいた。なお、本報告は、尾上ほか(2009)²⁾に一部データを加えた内容である。

- 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技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—”, JNC TN1400 99-020 ~024.
- 2) 尾上博則, 塩見哲也, 草野友宏, 安江健一, 小坂 寛, 三枝博光, 竹内竜史, 田力正好(2009)：“東濃地域を事例とした地形変化および気候変動による地下水流動特性の長期的変化の推定に関する方法論の構築(その1)—調査データに基づく過去数万年の古地形・古気候の推定および地質構造のモデル化—”, 日本地下水学会2009年秋季講演会講演要旨.

得られた技術的知見

4: 段丘面標高の推定

多項式近似曲線を用いて段丘面が分布していない区間の標高を補間(図6)

段丘面が現存しない流域は、隣接する支流で認められる段丘面の比高差や本流との合流点での段丘面の比高差を用いて段丘分布を推定

5: GISによる谷埋め

GISを用いた古地形の復元 → DEMデータ作成

- 現地形の10mメッシュDEMを基に復元した段丘面標高より低い部分を埋める(図7)
- 復元段丘面標高より高い部分：現地形を使用(侵食の影響を考慮していないことになる)

6: 復元地形の確認

作成された地形を地形的な観点で確認
不自然な地形面が推定されている場合

- ダミーポイントの設定
- 接合部の距離の調整

↓
GISを用いて再度谷埋め作業を実施(図8)

7: 隆起量の反映

操作したDEMデータに対して、各形成時期に応じた隆起量を反映させ、標高値を算出

- 河成段丘発達モデルに基づく段丘面の比高から隆起量を推定

加速器質量分析計を用いた年代測定技術開発 — 放射性炭素測定の精度向上のための装置等の改善 —

地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット 自然事象研究グループ
鈴木 元孝^{1*}・國分 陽子¹・西澤 章光²・大脇 好夫²・西尾 智博²・石丸 恒存¹
(1)日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門、(2)株式会社 ペスコ

はじめに

地質環境の長期安定性に関する研究では編年技術が求められるため、放射性炭素年代測定法等が可能な加速器質量分析計(ペレトロン年代測定装置)を整備し、測定技術の開発等を進めてきた。本研究では、放射性炭素測定のための装置の改善を行った。

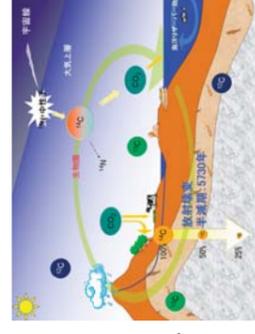
前処理: バックグラウンド低減のため前処理ガラスラインの洗浄等

装置: 加速電圧制御用コロナプローブの長寿命化、イオンビームの安定化のためイオン源主軸の交換及びセシウムオーブン温度システムの改良

年代測定の原理

放射性炭素年代測定とは試料中に含まれる放射性炭素(¹⁴C)の量を測定し、その半減期から、試料の年代を決定する方法

- ・¹⁴Cは大気中の窒素(N)と宇宙線起源の中性子の衝突によって大気層で生成。
- ・地球表面の炭素循環によって混合拡散し、大気圏、生物圏、水圏では、¹²C(99%)、¹³C(1%)、¹⁴C(1兆分の1)の割合で存在。
- ・動植物の生存時は炭素交換を行っているが、生命活動停止後は炭素交換が行われなくなるため、生体内の¹⁴Cは放射壊変し、半減期の5730年が経過するとその量は50%に減少し、やがて5~6万年程度で消滅。
- ・¹⁴Cのみ時間とともに減少し、試料中の¹⁴Cと安定同位体である¹²C、¹³Cとの比率を求めることにより年代の推定が可能。



分析の流れ

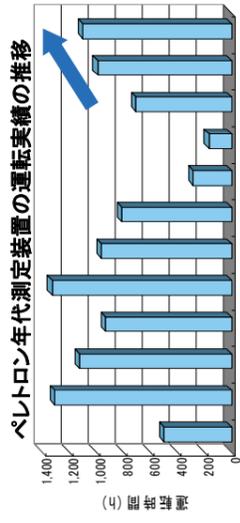
前処理

試料の洗浄 → CO₂抽出 → グラファイト化 → カソード充填

測定と解析

装置に装填 → 同位体比測定 → 解析

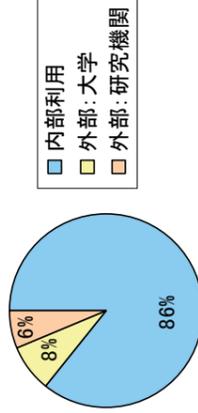
分析の実績



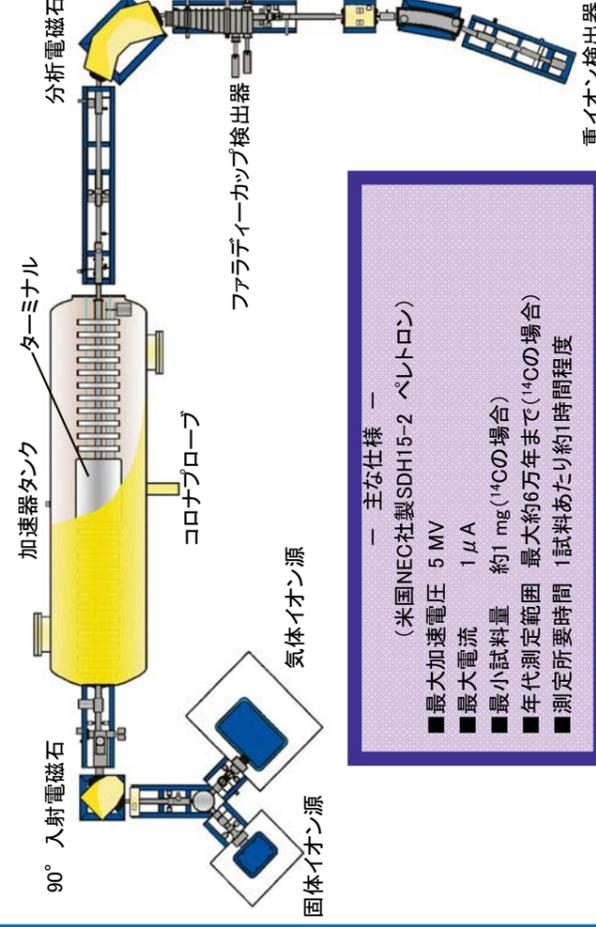
平成16年、17年度は施設や装置の老朽化による部品の不具合が続いたがそれらの修復後、近年では順調に稼働している。

分析試料数(平成20年度)

879件(未知試料430件、標準試料449件)



ペレトロン年代測定装置の仕様



前処理工程によるバックグラウンド低減

平成15年度後半から前処理工程で混入する現在炭素量(バックグラウンド)が上昇する傾向が見られた。¹⁾

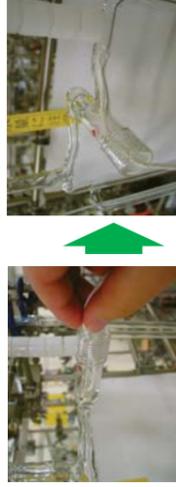
前処理工程で用いられるガラスラインの汚れが原因

2種類の改善方法について検討

改善方法

- ・コールトラップ部位を含むガラスライン内の拭き取り洗浄(改善1)
 - ・コールトラップ部位の切断分離による新規交換(改善2)
- ※ガラスラインA、Bに実施

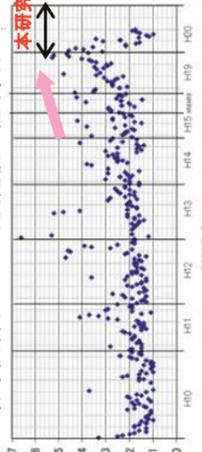
ガラスライン洗浄手順



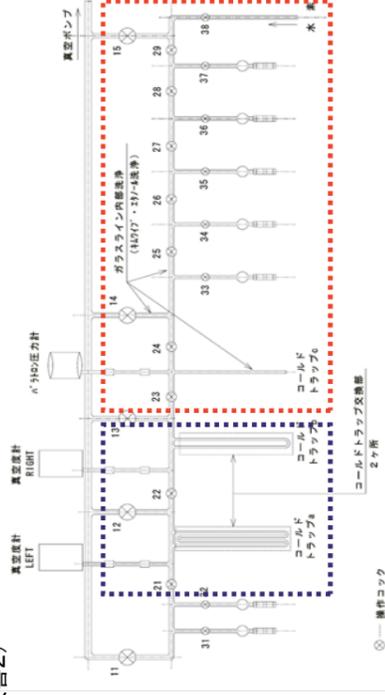
① エタノールを染み込ませたキムワイプにコック部分から入れる。

② キムワイプを回転させながら入れ、ライン内部を清掃する。

標準試料(IAEA-C1)測定値の経年変化



ガラスライン洗浄・コールトラップ交換部



測定結果

試料(IAEA-C1)	ガラスライン	¹⁴ Cカウント(カウント/分)	pMC(%) (1.0)
改善前	A	13	0.27 ± 0.05
	B	16	0.36 ± 0.09
	平均	28	0.56 ± 0.08
改善1	A	21	0.47 ± 0.08
	B	20	0.42 ± 0.07
	平均	9	0.17 ± 0.05
改善2	A	6	0.10 ± 0.03
	B	6	0.16 ± 0.06
	平均	8	0.18 ± 0.04
WAKO		7	0.14 ± 0.04
WAKO		2.9	0.08 ± 0.03

WAKO: 和光純薬製グラファイト(装置のバックグラウンドを示す)

改善前: pMCは0.3%以上の試料が多い

改善後1、2: 最終的にpMCは0.14%程度に低減された

ガラスライン内の拭き取り洗浄及び部位の交換が有効!

今回の改善により、前処理工程によるバックグラウンドを低減することができた。

主な装置改善

同位体測定の実験精度を向上させる

■ コロナプローブ針の長寿命化

加速電圧の制御には3本のコロナプローブ針を使用し、従来、鋼針(縫い針)を使用したが、消耗してしまい長期の使用に耐えられなかった。

鋼針より硬く融点の高いタンゲステン針の使用を検討
針の形状: テーパー型とストレート型について比較²⁾

コロナプローブ針の形状



	テーパー型	ストレート型
グリッド電圧の減衰率(V/h)	0.01	0.002
使用時間	約300時間	> 1500時間 (現在も使用中)

※コロナプローブ針の消耗度の指標

ストレート型のメリット: 安価(加工費なし)、5倍以上長持ち

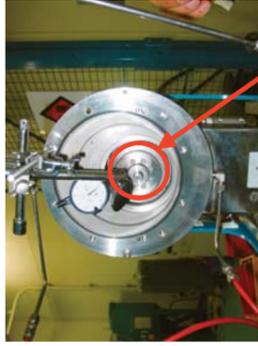
ストレート型のタンゲステン針は長期間交換することなく使用可能であることがわかった。

■ イオン源主軸の交換

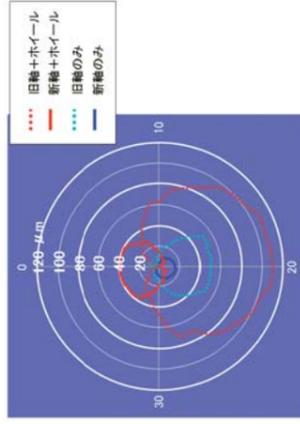
試料を詰めたカソードのホイール充填位置によって同一試料でも異なる同位体比を示す位置依存性が見られた。

ホイールの傾きを調整したが改善が見られなかった
ホイールを回転させる主軸のブレの計測により、ブレが大きいことが判明したため回転主軸を交換

ブレ測定の様子



回転主軸によるブレの計測結果

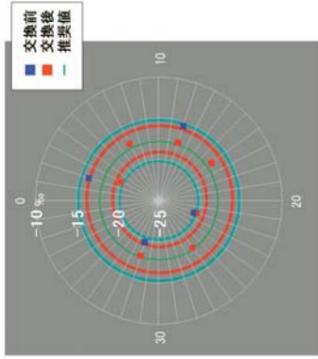


交換した回転主軸



回転主軸 + ホイールのブレの変動量は交換前で最大で110 μm、交換後で40 μmであり、ブレの変動量は小さくなった。

試料充填位置によるδ¹³Cの違い



※ δ¹³C: 国際標準物質の植物化石との¹³C/¹²C比

同一の標準試料(NIST製シュウ酸:HOxII) 数個をホイールの各位置に装着して測定。

交換後のδ¹³Cの最大値と最小値の差は3.1%、標準偏差は1.3%であった。改善前の5.0%、2.7%に比べ標準偏差は半分以下に改善された。

回転主軸の交換により、ホイールの充填位置による位置依存性は改善された。

地層処分技術の基礎整備: 地層処分地の安全確保・評価に係る論拠を支える知識

地質環境の長期安定性研究を進める上で必要になる放射年代データを提供する放射性炭素年代測定を精度向上を目指して、装置等の改善に取り組んだ。

前処理: ガラスラインの洗浄や器具の交換を行い、バックグラウンドを低減させることができた。

装置改善: 加速電圧制御用コロナプローブ針としてストレート型のタンゲステン針を用いることにより長寿命化に成功した。

イオン源の回転主軸の交換及びセシウムオープン温度の自動温度制御システムの追加を行ったことでイオンビームの安定性が改善された。

測定精度を向上させることができた。

今後の挑戦

今後は、¹⁴C 測定における測定精度のさらなる改善、微量試料での測定方法の検討を行うとともに、¹⁰Be、³⁶Cl の測定技術の開発を進め、年代測定や過去の地質イベントを明らかにする研究などに役立てていく予定である。

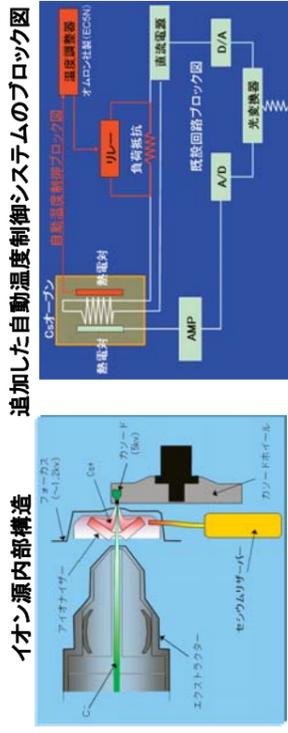
参考文献

- 鈴木元孝、大脇好夫、西尾智博、西澤章光、齋藤龍郎、石丸恒存、「¹⁴C年代測定用標準試料前処理におけるバックグラウンド値の改善」、第11回AMSシンポジウム報告集(in press).
- 鈴木元孝、齋藤龍郎、西澤章光、大脇好夫、西尾智博、石丸恒存、第21回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」報告集 (JAEA-Conf 2008-012), p.19 - 22 (2009).

■ イオン源セシウムオープン温度制御の改善

¹⁴Cのイオンビーム量は少ないため、精度のよいデータを得るには安定したビームが必要

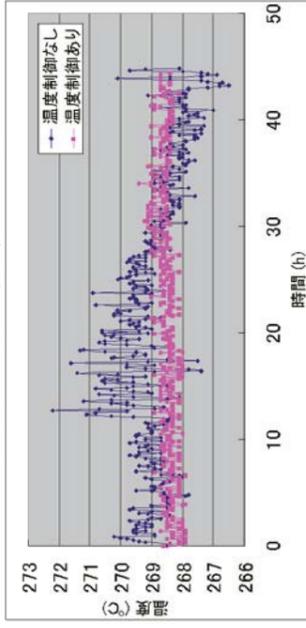
イオンビームの発生量の安定性に影響を与えているセシウムの温度に注目
温度制御システムの改良



＜改良したシステム＞

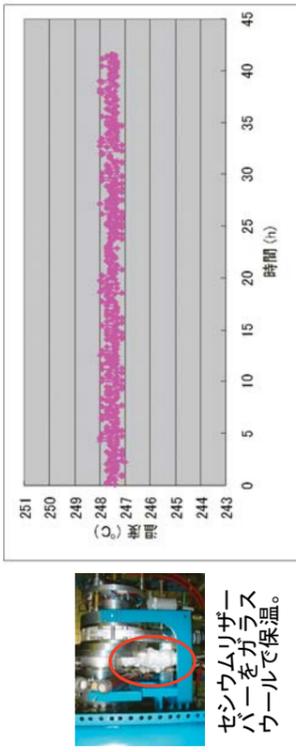
オープン温度の設定範囲を超えると、自動温度調整器が直流電源回路のオンオフを制御。オンオフによる急激な温度変動を避けるためリレーに負荷抵抗をバイパスさせて、オン時の電流がオン時の2/3に減少するようにオフセットを設定。

測定中のオープン温度の変化(40時間)



自動温度制御システムを追加したことにより、温度変化は小さくなりほぼ一定になった。しかし、温度のドリフトが僅かに見られたため、温度測定部と調整部のセンサーがあるセシウムリザーバーを保温することとした。

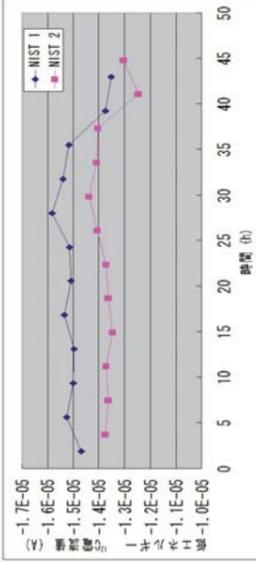
保温改善後のオープン温度の変化(約40時間)



セシウムリザーバーをガラスワールで保温。

温度変化は1°C以内で制御できるようになった。

保温後に測定した標準試料HOxIIの低エネルギー側¹²C電流値の変化



低エネルギー側¹²C電流値は、ほぼ一定になった。測定後半に見られた低下は、試料の消費に伴うものと考えられる。

自動温度調整システムの付加により、オープン温度を1°Cの範囲で制御できるようになり、イオンビームの安定性を向上させることができた。

超深地層研究所計画 — 地質・地質構造に関する調査研究 —

地層処分研究開発部門 東濃地科学研究所ユニット 結晶質岩地質環境研究グループ
栗原 新・鶴田 忠彦・松岡 稔幸・早野 明・早川 正史・田上 雅彦・程塚 保行・湯口 貴史・越智 稔・徳安 真吾

目標・実施概要

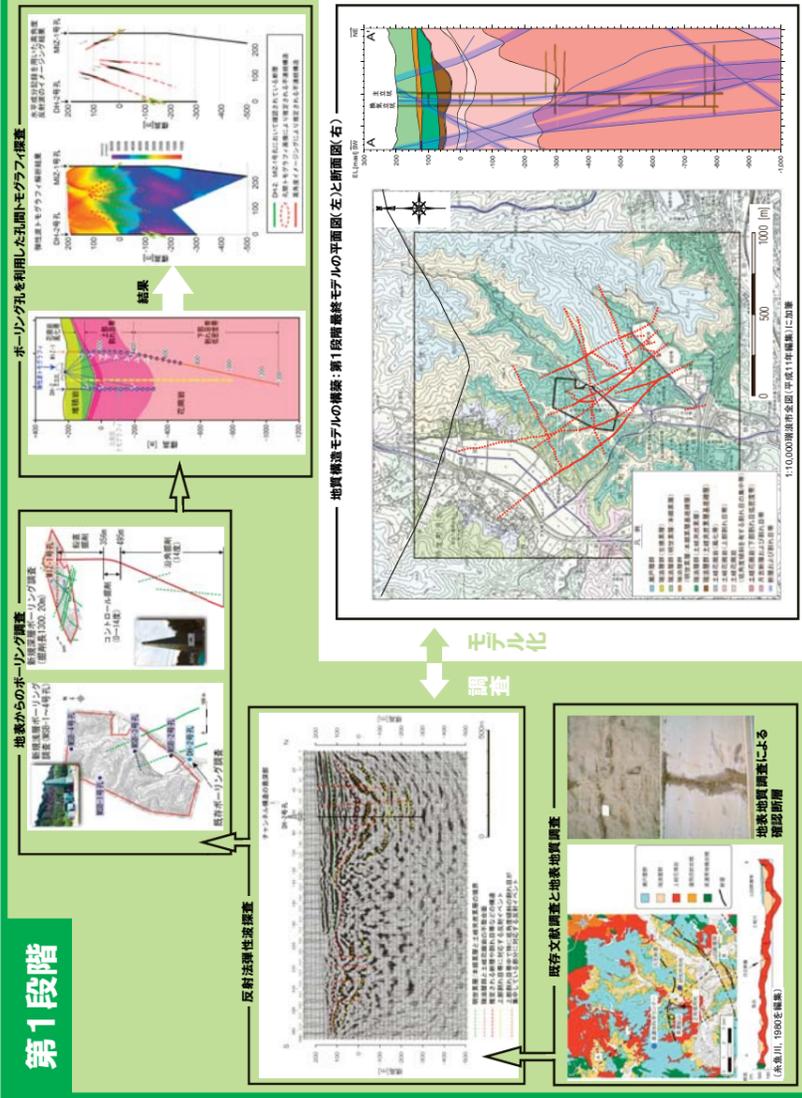
超深地層研究所計画の全体目標を受けて設定した地質・地質構造に関する調査研究における個別目標と課題

- > 地質構造(岩盤の地質学的不均質性, 被覆層の厚さ, 移行経路として重要な構造)の三次元分布の把握
⇒ 地下水の流動や水質を規制する断層・割れ目・岩相分布等の地質・地質構造の特性の理解
- > 地下空洞周辺の力学・水理状態の把握に必要な不連続構造などの有無の把握
⇒ 岩盤の力学特性や地下水の流入量などに影響を及ぼす不連続構造の分布の把握

個別目標	課題
地質構造の三次元分布の把握	移行経路として重要な構造の把握 被覆層の厚さの把握 岩盤の地質学的不均質性の把握
地下空洞周辺の力学・水理状態の把握	岩盤中の差水性分布の把握 動水頭分布の把握
地下水の地球化学的性質の把握	酸化還元環境の把握
地質移動の把握	コロイド・有機物・微生物の把握 物質移動の把握
希釈効果の把握	帯水層中の差水性分布の把握 帯水層の分布の把握
地下空間周辺の力学・水理状態の把握	不連続構造などの有無の把握 E D Z の分布/物理・力学特性の把握 地下空洞の地下水流入量の把握 岩盤の弾性・力学特性の把握 応力場の把握
地下の温度環境の把握	岩盤の熱特性の把握 地温の分布の把握
環境影響評価	振動・騒音の把握 地下水の劣化への影響の把握 地下水分布への影響の把握 地下水劣化への影響の把握

主な調査研究結果

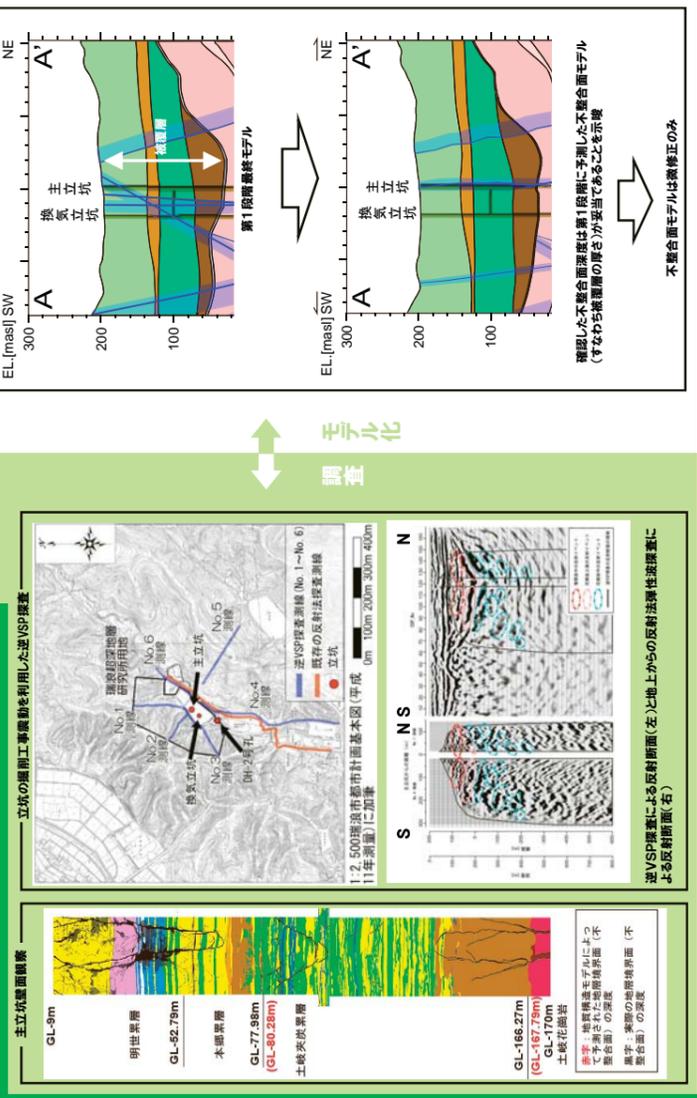
第1段階



得られた技術的知見

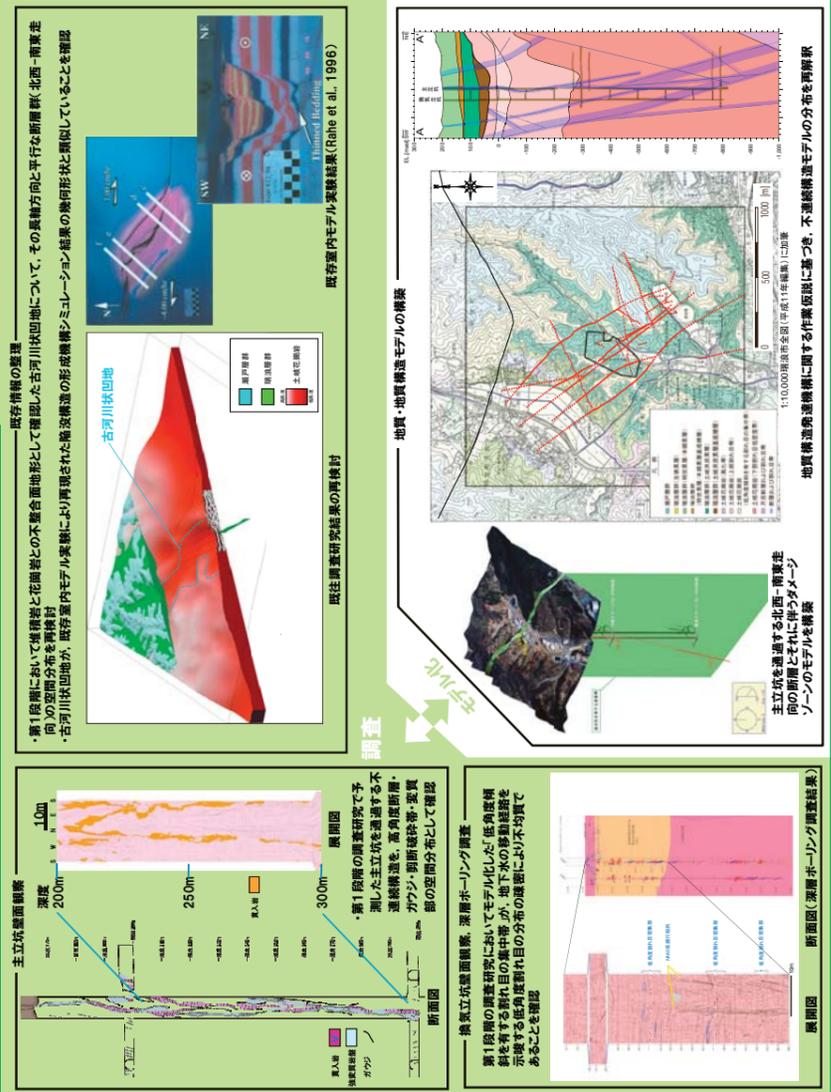
- 【層処分事業の技術基盤としての知見】
- > 調査・解析・評価を概略および詳細領域ごとに実施することにより, 地質・地質構造要素の空間分布に関する推定精度の段階的向上が可能
 - (1) 地表からの地質調査・反射法弾性波探査等の面的調査手法を適用し, 広い領域を概略的に調査
 - (2) 地表からのボーリング調査・VSP探査・孔間トモグラフィ探査等の調査手法を適用
 - > 調査優先度を検討するために, 移行経路として重要な不連続構造の抽出, 理解度・不確実性の評価が不可欠
→ これらの抽出・評価を行うために整備した一連の調査・モデル化技術と水理学的調査・解析との連携は, 取得情報を統合し, 解釈する際に有効
- 【課題】
- (1) 研究坑道を利用した調査研究による実際の地質・地質構造の分布の確認
 - (2) 第1段階で適用した調査手法とモデルの精度に関する評価, およびモデルの更新
 - (3) 研究坑道周辺の不連続構造の分布, 幾何形状, 構造形態, 岩石・鉱物特性等の把握, およびブロックスケール(坑道周辺スケール)モデルの構築

第2段階: 被覆層の厚さの把握



主な調査研究結果

第2段階: 岩盤の地質学的不均質性の把握



得られた技術的知見

【主立坑壁面観察】

- …岩相と不連続構造分布を目視確認するために実施
- 第1段階で予測した断層が、高角度傾斜を有する1~2条の板状を呈し、貫入岩と粘土化した強変質岩盤を伴うことを確認
- ➔ 第1段階では、上記の断層予測に対し、発達過程における岩石-(熱)水反応による変質帯生成の概念を設定しておらず、変質帯に着目した調査(電気比抵抗調査等)による断層の抽出ができていなかった。

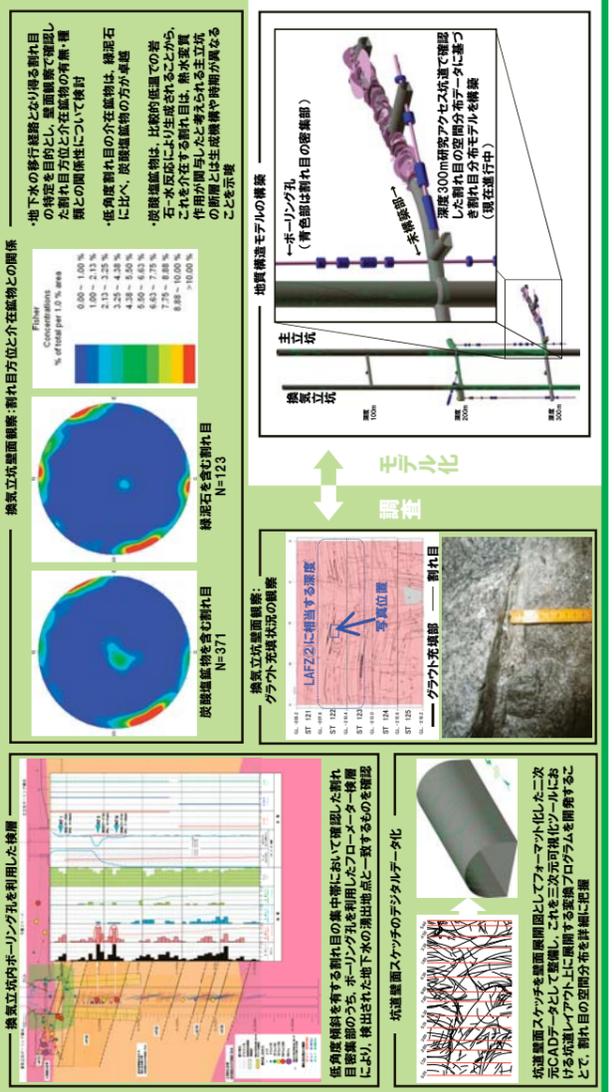
【換気立坑壁面観察、深層ボーリング調査】

- …岩相と不連続構造分布を目視確認するために実施
- 壁面観察で確認した低角度傾斜を有する割れ目の集中帯の分布(厚さ約47.7m)が、第1段階で予測した分布(厚さ約26.5m)に比べて厚いことを確認
- 一つの地質構造区分と予測していた低角度傾斜を有する割れ目の集中帯が、複数の低角度割れ目の密集層からなることを確認

【未調査領域における地質構造分布の推定】

- …地質現象として理解可能なモデル構築のために実施
- 主立坑を通過する断層の性状と不整合面上に確認されていた古河川状凹地との分布位置関係が明らかになったことにより、類似した地質構造の発達過程に関する情報収集が進展
- ➔ 凹地を「正断層群に伴う陥没構造」とする作業仮説に基づき不連続構造分布を推定することで、再度構築したモデルを地質構造発達過程を考慮して解釈

第2段階: 移行経路として重要な構造の把握



【換気立坑内ボーリング孔を利用した検層】

- …割れ目密集部と湧水箇所を比較するために実施
- 低角度割れ目の分布とボーリング孔内のフローメーター検層結果を組み合わせて評価し、地下水の移行経路となり得る透水性割れ目の分布と方位の傾向を把握

【換気立坑壁面観察】

- …移行経路となる割れ目を特定するために実施
- 卓越割れ目方位と介在鉱物種との関係に着目した検討を実施することで、割れ目の移行経路としての形成過程のモデル化に資する情報を取得可能
- クラフト充填状況の観察結果から、以下2点を把握
 - ・低角度割れ目の密集部が選択的に地下水の移行経路であることを示唆
 - ・地下水の移行経路としての高角度割れ目の役割が、極めて限定的であることを示唆

【坑道壁面スケッチのデジタルデータ化】

- …割れ目の決定論的モデルの構築のために実施
- 壁面観察による割れ目の分布や特性をモデル化するために有効な三次元可視化手法を整備(適宜、更新中)

地層処分技術の基盤整備: 地層処分安全確保・評価に係る論拠を支える知識

地質構造の三次元分布を把握するために、

◆被覆層の厚さの把握
被覆層の厚さの把握にかかわる不整合面の空間分布を推定するにあたり、第2段階で適用した逆VSP探査が、第1段階で適用した反射法弾性波探査結果と整合的かつ未調査領域の空間補間に有効であることから、これらを組み合わせ調査研究手法・実施項目・実施手順について体系的に整理した。

◆岩盤の地質学的不均質性の把握
以下の2点を考慮した調査研究手法・実施項目・実施手順について体系的に整理した。
➢ 坑道壁面観察は、地表からの調査による不連続構造分布の予測結果に対して、(1)高角度の不連続構造の分布と特性、および(2)不連続構造の交差状況を把握するうえで有効である。
➢ 地上からの調査における断層性状や地質構造分布の予測に関しては、それらの発達過程を考慮した幅広い仮説(概念)を設定し、さらに、研究坑道において取得した詳細地質情報に通じた仮説(概念)として抽出・更新する解析プロセスが有効である。

◆移行経路として重要な構造の把握
以下の2点を考慮した調査研究手法・実施項目・実施手順について体系的に整理した。
➢ 多方位を示す割れ目の交差状況の把握や透水性割れ目の特定にあたっては、封圧下の岩盤中の地下水の挙動を観察できる研究坑道において、ボーリング孔を利用したフローメーター検層、割れ目の介在鉱物やクラフト充填状況の観察等が有効である。
➢ 岩盤中の割れ目の空間分布や個別特性を理解するためには、坑道周辺の割れ目分布モデルを構築することが有効である。

今後の挑戦

第3段階(研究坑道を利用した調査研究)に向け、研究坑道周辺の取得データに基づくブロックスケールモデル(割れ目の空間分布を主体とした決定論的あるいは確率論的モデル)を構築し、以下の検討を実施する。
(1) 地質構造発達過程のシミュレーションやマルチスケールモデリングの技術開発による未調査領域の補完手法の確立、およびモデルの信頼性の向上
(2) 水平坑道掘削に伴う調査研究による高角度傾斜の不連続構造の把握、およびモデル更新結果に基づく第1段階調査の信頼性限界の評価
(3) 坑道周辺の不連続構造の解析・評価手法の整備(既存手法の導入・評価・改良)

参考文献

1. (独)日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門・平成19年度 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発報告会 瑞浪、幅延における地上からの調査研究の成果報告—地層処分の技術と信頼を支える研究開発 概要調査への技術基盤の確立—(要旨・スライド・ポスター)、平成19年9月18日、JAホール
2. 糸魚川淳二: 瑞浪市化石博物館専報、第1号(1980)、pp.1-50
3. B. Rahe, D. A. Ferrill and A. P. Morris: Tectonophysics, 285 (1998)、pp.21-40

超深地層研究所計画 — 岩盤水理に関する調査研究 —

地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット 結晶質岩地質環境研究グループ
竹内 竜史・三枝 博光・大山 卓也・小坂 寛・佐藤 敦也・毛屋 博道・大丸 修二・武田 匡樹

目標・実施概要

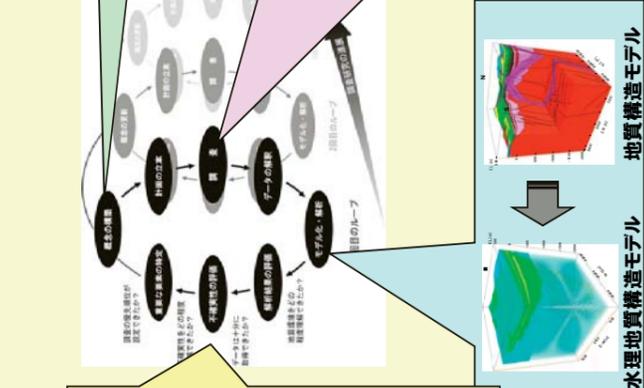
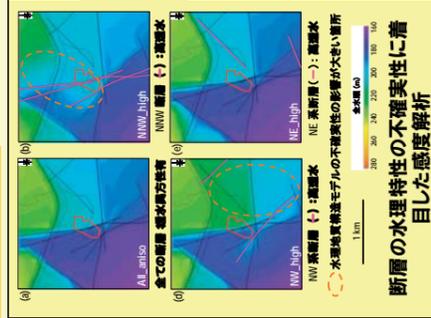
超深地層研究所計画の全体目標を受けて設定した岩盤水理に関する調査研究における個別目標と課題

- ▶ 地下水の流動特性の把握
- ▶ 地下空洞周辺の水理状態の把握
- ▶ 地下施設建設が周辺環境へ与える影響の把握
⇒ 研究坑道掘削に伴う地下水位・水圧の変化および研究坑道への湧水量に関するデータの取得
- ⇒ 地下水位・水圧変化、湧水量データを用いた地下水流動解析を通じた水理地質構造モデルの妥当性確認・更新



主な調査研究結果

第1段階



得られた技術的知見

【第1段階で得られた知見】

- ▶ 繰り返しアプローチに基づき、水理学的調査、水理地質構造モデルの構築、地下水流動解析を繰り返し実施
- ⇒ 調査の進展に伴い段階的に動水勾配分布並びに岩盤中の巨視的な透水性分布に関する理解度が向上
- ▶ 水理地質構造モデルは、地質分野との連携が不可欠
- ▶ 地球化学的特性（水質分布や地下水年代など）の観点から水理地質構造モデルや地下水流動解析結果の信頼性や妥当性を確認しながら調査を行っていくことが望ましい
- ⇒ 地質、地球化学分野などの他分野との連携を深めた繰り返しアプローチの実施が有効

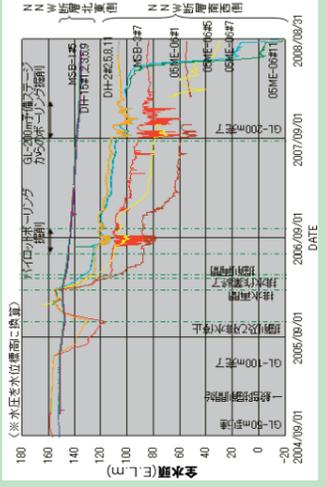
【第2段階の課題】

- ▶ 研究坑道掘削に伴う地下水流動場の変化の把握
- ▶ 不連続構造の分布に起因した岩盤の水理特性の不均質性の把握
- ▶ 第1段階で構築した水理地質構造モデルの妥当性確認・更新

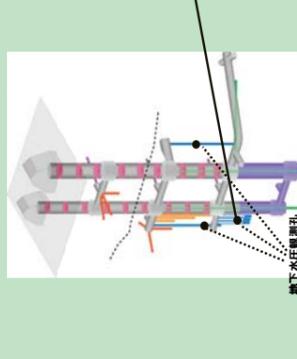
第2段階：調査



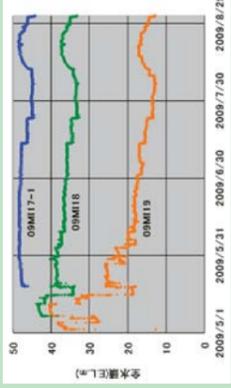
研究所用地内での水圧モニタリング



水圧モニタリング結果（研究所用地内）



研究坑道内での水圧モニタリング



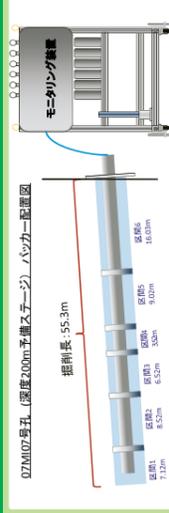
スキニング効果を把握するための水圧モニタリング結果（深度300mボーリング横坑）

【水圧モニタリング】

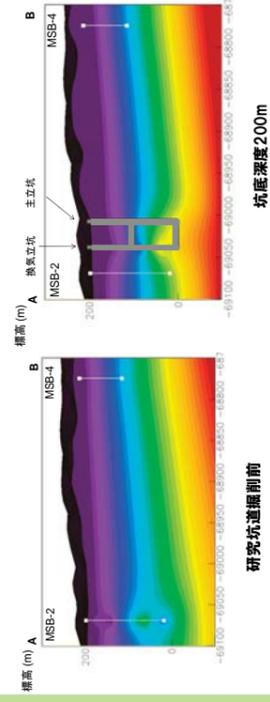
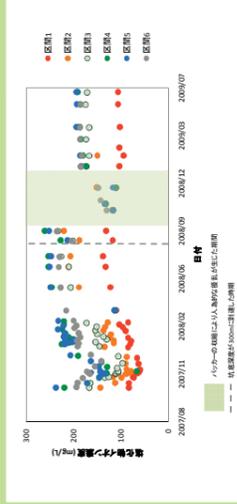
- ▶ 研究坑道掘削に伴う地下水圧の変化を把握するとともに、岩盤中の透水性分布を把握するために実施
- ▶ 地表からのボーリング孔を利用した水圧モニタリングによって、研究坑道掘削による水圧の低下を確認
- ⇒ 第1段階におけるNNW断層の水理特性（断層面に直交する方向に低透水性を有する）を確認
- ▶ 研究坑道掘削は、ボーリング孔を利用した孔間水理試験と比べて地下水流動に与える影響が大きい
- ⇒ 水圧応答をモニタリングにより観測することで、広範囲の地下水流動の非定常変化を把握することが可能
- ▶ 坑道近傍での水圧モニタリングによって、立坑壁面近傍の水圧分布を把握し、人工構造部等の影響によるスキニング効果が存在することを確認

主な調査研究結果

第2段階：研究坑道内のボーリング孔を利用した水質モニタリング



MSB2.4号孔(坑底深200m)を構築する際は、換気立坑の壁面湧水、07MI07号孔の水質モニタリング結果に基づき換気立坑の地下水が上昇していることを示唆した。MSB2.4号孔の坑底深200mに到達するまでは、換気立坑の壁面湧水が上昇していることが確認された。その後は各区分ともほぼ一定の値を示すものの、濃度は低下した。ただし、区分1以外は第1段階での同深度における分析結果(約100mg/L)より高濃度を保持している。

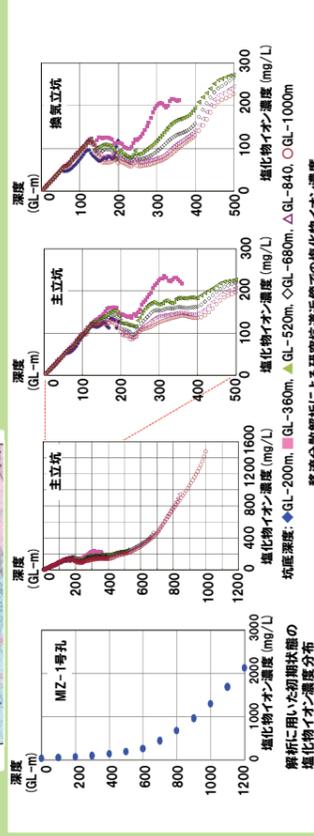


MSB2.4号孔、集水リング、壁面湧水、07MI07号孔の水質モニタリング結果に基づき換気立坑の地下水が上昇していることを示唆した。MSB2.4号孔の坑底深200mに到達するまでは、換気立坑の壁面湧水が上昇していることが確認された。その後は各区分ともほぼ一定の値を示すものの、濃度は低下した。ただし、区分1以外は第1段階での同深度における分析結果(約100mg/L)より高濃度を保持している。

第2段階：地下水流動状態の変化を考慮した移流分散解析



Dtransu-3D・ELを利用して三次元非定常移流分散解析を実施。水理地質構造モデルでは、主要な構造として日吉川沿いのリニアメント、月吉断層および主立坑沿いのNNW断層を低透水性の地質構造として設定。また、堆積岩中の泥岩層を不透水層として設定。解析領域は第1段階で得られた水質分布および境界条件を考慮し、月吉断層と土岐川に囲まれた東西約6km、南北約4km、深度方向は約2kmの領域を設定。換気立坑の初期状態は、研究坑道掘削前を初期状態として設定。



得られた技術的知見

【研究坑道内からのボーリング孔を利用した水質モニタリング】
 …… 各深度での地下水水質の把握および研究坑道掘削による攪乱の範囲を把握するために実施

- 予備ステージ内からボーリング孔を掘削し、地下水水質をモニタリングすることで、研究坑道掘削による攪乱が及ぶ時間的・空間的範囲を把握することができた。
- 酸化還元電位およびpHの測定については、掘削水の湿入が少ない湧水状態のボーリング孔において、被圧蒸気条件下で物理化学パラメータをモニタリングすることにより、地表から掘削したボーリング孔を利用した場合よりも短時間で精度よく測定することができた。
- 集水リングでの水質モニタリング結果と研究坑道内のボーリング孔を利用した水質モニタリング結果を合わせて、水質分布のコンター図を作成することにより、研究坑道掘削に伴う水質分布の変化を把握することができた。

【地下水流動状態の変化を考慮した移流分散解析】

- …… 研究坑道掘削に伴う水質分布の変化を定量的に把握するために実施
- 解析の結果、研究坑道掘削に伴う地下水流動および地下水水質の変化を定量的に表現することができた。また、大局的には研究坑道掘削による水質の変化傾向を解析的に再現することが可能であることを示した。
- 今後は、水理地質構造、解析方法、水理学的なパラメータ、水質分布の入力値等の解析条件の見直しを行い、研究坑道内での水質モニタリング結果との比較を行っていく。

地層処分技術の基盤整備：地層処分の安全確保・評価に係る論拠を支える知見

◆ 酸化還元環境の把握
 ● 被圧蒸気条件下で酸化還元電位の測定を行うことで、より原位置に近い値を把握することが可能であることを示した。また、掘削水の湿入が少ない湧水状態のボーリング孔を利用して観測を行うことで、より短時間で精度よい測定値が得られることがわかった。

◆ 地下水のpH分布の把握
 ● 地下水のpH分布については、研究坑道建設に使用される人工材料等との接触により変化の可能性がある。そのため、各モニタリング地点で定期的に測定することで、人工材料による影響を把握し、実際の地下水中のpHを推定できることがわかった。

◆ 地下水の塩分濃度分布の把握
 ● 地下水の塩分濃度分布の把握においては、pHと同様にモニタリング地点での定期的な測定が有効である。その上で、研究坑道掘削の進捗や地質構造分布を合わせて水質の変化を考察することで、第1段階の結果の妥当性を評価し、研究坑道掘削の影響を評価するためのデータとして利用することができることを示した。

◆ 地下水の水質への影響の把握
 ● 研究坑道掘削が水質へ与える影響を把握するためには、各モニタリング地点でのデータを合わせてコンターマップ等を作成することで、影響範囲やその変化を把握できることを示した。
 ● 研究坑道掘削による影響を定量的に評価するためには、第1段階での調査結果に基づいた三次元移流分散解析が有効であることを示した。ただし、境界条件の設定方法や実測値を利用したキャリブレーションの方法については、更に検討する必要がある。

今後の挑戦

- 水質モニタリングを継続的に実施することで研究坑道掘削過程における水質分布の変化を把握し、地球化学概念モデルを構築する。
- 地下水中のコロイド/有機物/微生物/微生物の特性を把握するための調査手法を確立する。
- 原位置における酸化還元環境をより高精度に把握するための評価手法を開発する。

参考文献

- lwatsuki, T., Furue, R., Mie, H., Ioka, S., Mizuno, T., Hydrochemical baseline condition of groundwater at the Mizunami Underground research laboratory (MIU). Applied Geochemistry 20 (2005)
- 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ— 一分冊1 深地層の科学的知見”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 2005-014 (2005)
- 電源開発株式会社：“超深地層研究所周辺の地下水水質変化に関する多変量解析” JNC-TJ7400 2005-001 (2005)。

目標・実施概要

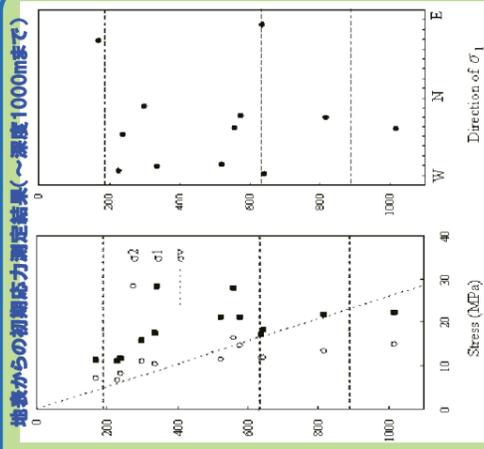
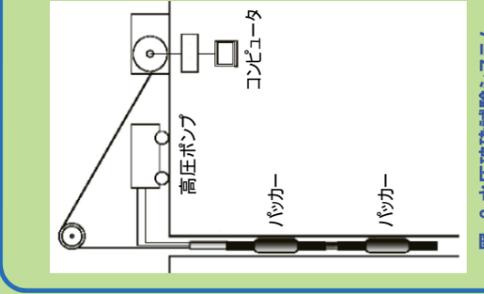
超深地層研究所計画の全体目標を受けて設定した地下空洞周辺の岩石の物性および岩盤応力に関する調査研究における個別目標と課題

- 地下空洞周辺の岩石の物理・力学特性の把握
⇒ 地下空洞の周辺岩盤の挙動解析の基礎となる物性値の把握
- 地下空洞周辺の岩盤の応力場の把握
⇒ 地下空洞の周辺岩盤に変形を与える応力場の把握



主な調査研究結果

第1段階



得られた技術的知見

【第1段階で得られた知見】

地表からの調査により、地下1000mまでの岩石の物理・力学特性および岩盤の初期応力分布を明らかにした(図-3)。

【第2段階での課題】

- 地下坑道レベルにおける原位置での調査による岩盤の物性・応力の評価
- 地表からの調査の有効性の評価

【第2段階での課題解決に向けた調査の実施内容】

まずはじめに深度200mの研究坑道を対象として実施する。

- ① 深度200mにおける空洞周辺の応力状態、岩石の物理・力学特性を把握する。
- ② 上記①の結果と地表からの調査結果とを比較し、深度200mでの地表からの調査の有効性を評価する。
- ③ 初期応力測定結果を広域な観点から評価する。
- ④ コアを用いた初期応力測定結果と原位置応力測定の結果とを比較し、コアを用いた初期応力測定法の有効性を評価する。

第2段階

岩石物性測定(室内物理・力学試験)

空洞周辺の岩石の物理・力学特性を把握する。ボーリング孔より採取したコアを用いて供試体を作成し、作成した供試体に密度測定等の物理試験と、強度測定等の力学試験を実施した。

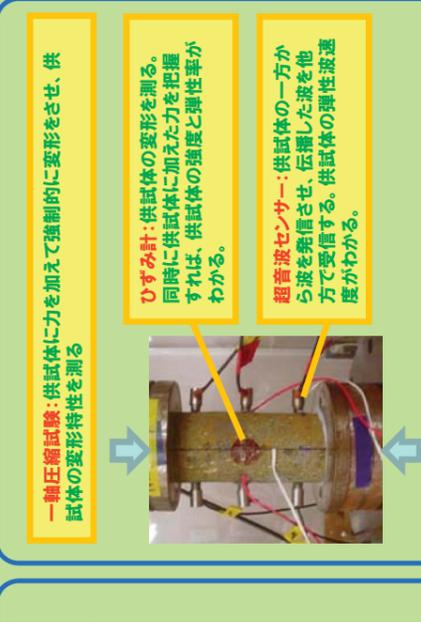
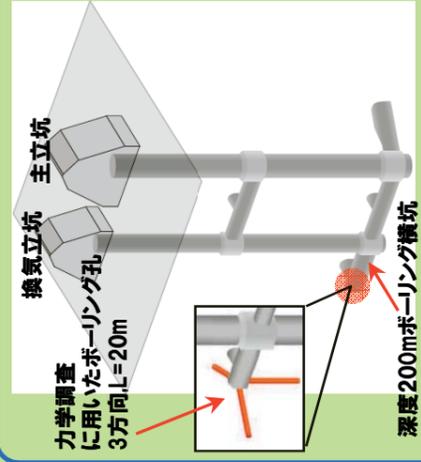
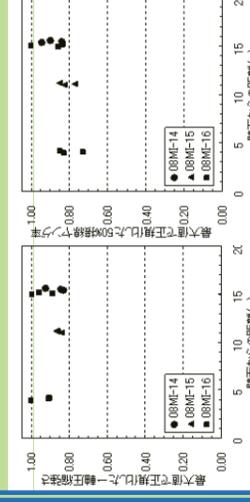


表-1 室内物理・力学試験結果(深度200m調査)
(括弧内の数値は地表からの調査結果(MIZ-1)の測定結果の平均値)

比重 (水を1とした時の供試体の重さ)	2.65±0.00 (2.62)	一軸圧縮強度 (MPa) (強い、もろい)	143.2±9.4 (173)
有効空隙率(%) (空隙の割合)	1.05±0.09 (1.12)	ヤング率 (50%接線)(GPa) (硬い、軟らかい)	51.9±4.3 (53.9)
P波速度(km/s) (縦揺れの波の速さ)	5.42±0.20 (5.45)	ポアソン比 (縦を縮めた時の横の伸び)	0.34±0.07 (0.265)
S波速度(km/s) (横揺れの波の速さ)	3.44±0.19 (2.91)	圧裂引張強度 (MPa) (引っぱり強さ)	6.32±0.71 (6.48)



当該深度において地表からの調査は有効であった。調査で実施した試験の考え方(試験手法・試験数量等)は概ね妥当であると考えられる。

主な調査研究結果

第2段階

初期応力測定（円錐孔底法・DSCA法）

空洞掘削位置およびその周辺の岩盤に、どの程度の力がどの方向に作用しているか把握する。初期応力測定として応力解放法とコアを用いた応力測定法を実施した。

円錐孔底法（応力解放法の一手法）

ボーリング孔内にひずみ計を設置し、設置したひずみ計ごと岩盤をくり抜いて応力解放によるひずみ量を測定し、これに基づき初期応力を算定する方法。原位置（空洞内）での測定で、ボーリングマシンを用いた大がかりな測定法。

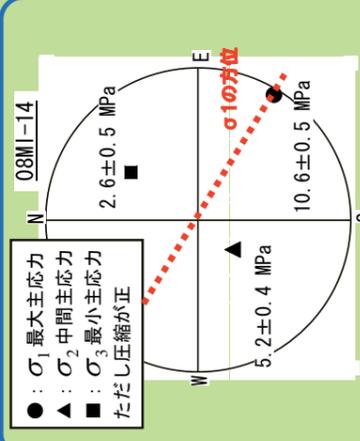


図-7 深度200m初期応力状態（等角・下半球投影ステレオ図）
原位置での初期応力測定（円錐孔底法）

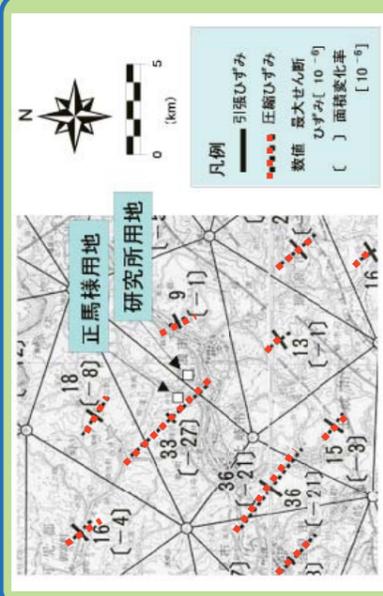


図-8 関東地域の三角測量結果
正馬様用地：機構が過去に調査等を実施した場所
研究所在地：瑞浪超深地層研究所の位置

図中、SH, Shはそれぞれ面内主応力の最大、最小、θはSHの方位、Svは鉛直応力を表す。黒印は地表からの調査結果、赤印は地下坑道での調査結果を表す。また、鉛直応力は土被り厚から算定したものである。

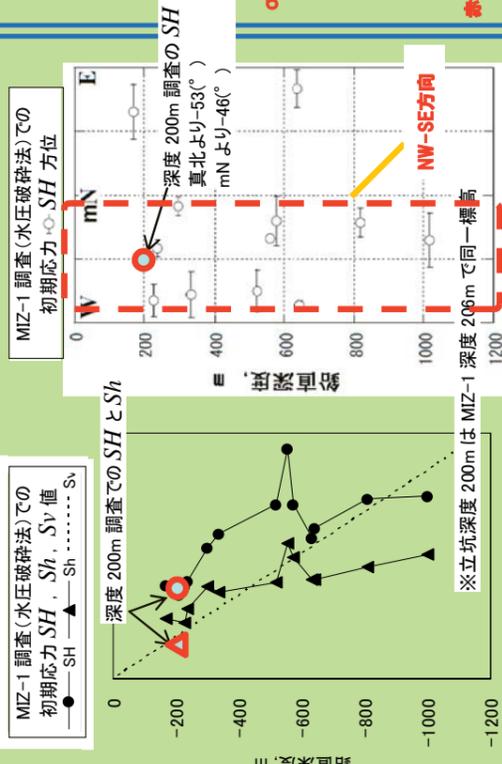


図-9 深度200m調査結果（円錐孔底法）と地表からの調査結果（MIZ-1）との比較
SHの方位、θ°

得られた技術的知見

【深度200m坑道における初期応力測定結果より得られた知見】

深度200m程度の花崗岩岩体において以下の評価を行った。

1. 広域的応力場の評価（実施内容③）
円錐孔底法で算出された応力場は測定点のごく近傍の応力場に限定されるため、周辺地域の地形や土被り圧の情報をもとに広域的な応力場の評価を行った（①～③）。
① 深度200m坑道で行った円錐孔底法で評価した最大主応力（ σ_1 ）の方向（図-7）は、測地結果（図-8）と調和する。
② 深度200m程度の花崗岩岩体においては、測地的な手法によっても地下の応力状態を推定できる可能性を示した。
③ 深度200m坑道で行った円錐孔底法で評価した鉛直応力は、深度200mの土被り圧とよく整合する。
④ 深度200m坑道付近における鉛直応力は、深度と岩石の密度から算定可能であることが分かった。
⑤ 深度200mにおける最大側圧比は2程度である。

2. 地表からの調査の有効性の評価（実施内容②）

地表からの調査結果は深度200mで実施した原位置での調査結果と概ね整合していることが確認された（図-9）。

深度200m程度の花崗岩岩体においては、地表からの調査で実施した応力測定（水圧破砕法）は有効である。

ただし、水圧破砕法による応力測定は、一測定深度については面内応力の算定のみで、3次元応力を算定できないことに留意する必要がある。

3. DSCA法（コアを用いた応力測定法）の有効性の評価（実施内容④）
深度200m坑道では坑壁から2D（D：坑道径6m）以上で、DSCA法により算定されたクラックテンソルの主値の方向は円錐孔底法の示す初期応力方向と良く似ている（図-10の赤印）。

原位置測定法の実施が困難である場合の代替的な手法として、DSCA法が適用可能な手法である可能性を示すことができた。

地層処分技術の基盤整備：地層処分安全確保・評価に係る論拠を支える知識

深度200m坑道での調査結果を基に以下の知識を得た。

- ◆ 岩盤の物理・力学特性の把握
 - ・試験の考え方（試験手法・試験数量）の妥当性
 - ・今回の調査結果により、研究所付近の花崗岩岩体を対象とした物理・力学特性試験の考え方（試験手法・試験数量）が概ね妥当であることが確認できた。
 - ・地表からの調査の有効性
 - ・深度200m程度の花崗岩岩体においては、地表からの調査が有効であることが確認できた。今後、深度200mよりもさらに深い深度でも地表からの調査が有効であるか検討する。
- ◆ 応力場の把握
 - ・地表からの地圧測定の有効性
 - ・今回の調査結果により、地表からのボーリング孔における応力測定により深度200m坑道での周辺領域の面内主応力を示すことが可能であることが分かった。ただし3次元主応力を算定するには原位置において測定することが不可欠である。また、さらに深い深度でも地表からのボーリング孔における応力測定が有効であるか検討する。
 - ・コアを用いた初期応力測定法の有効性
 - ・深度200m程度の花崗岩岩体においては、コアを用いた初期応力測定法の可能性を示すことができた。今後より深い深度での適用性を検討する。
 - ・測地的手法による初期応力測定の評価
 - ・深度200m程度の花崗岩岩体においては、測地的手法により地下の応力状態を推定できる可能性を示すことができた。今後より深い深度での適用性を検討する。

今後の挑戦

◆ コアを用いた応力測定法の信頼性の向上

応力測定法のうちコアを用いた応力測定法は安価かつ簡便な測定方法であるが実績が十分でない。そこで、さらに測定実績を積み上げ、多くの実績を有する原位置法との比較を行い、コアを用いた応力測定法の有効性を検討する必要がある。コアを用いた応力測定法の有効性が示されれば、原位置測定の実施が困難な場合の代替的な手法として、また、多点での測定により測定領域の応力場をさらに詳細に示すことが可能である。

参考文献

1. (社)資源・素材学会 平成21年資源・素材学会秋季大会、瑞浪超深地層研究所-深度200mボーリング横孔における初期地圧測定-、平成21年9月8日～10日、北海道大学
2. 超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第1段階）研究成果報告書（JAEA-Research 2007-043）日本原子力研究開発機構

超深地層研究所計画 — 瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する研究 —

地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット 結晶質岩工学技術開発グループ
松井 裕哉・浅井 秀明・堀内 泰治

目標・実施概要

- 本研究は、超深地層研究所計画¹⁾の一環として、結晶質岩における深度1000m程度までの地下構造物の設計・建設・維持に対する既往の工学技術の有効性の確認と、必要と考えられる技術の開発を実施
- 地層処分技術の構築という側面も踏まえ4つの研究課題を設定
- ①設計・施工計画技術の有効性の確認
 - ②建設技術の有効性の確認
 - ③施工対策技術の有効性の確認
 - ④安全を確保する技術の確認
- ①は地上からの調査段階で必要となる技術基盤、②と③は地下構造物の建設段階で必要となる技術基盤、④は地下構造物完成後の操業段階で必要な技術の基盤である

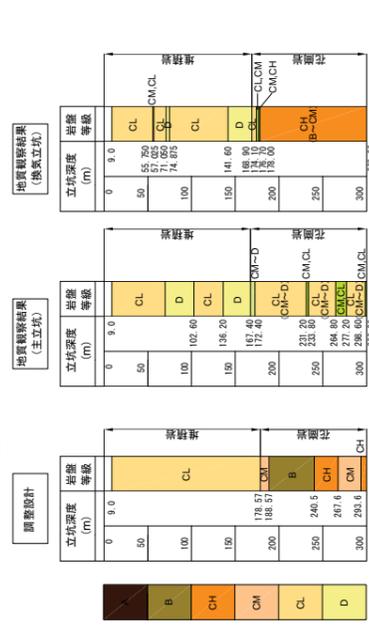
主な調査研究結果

2008年度までの検討対象範囲：地表から深度300m

①設計・施工計画技術の有効性の確認

- 第1段階の設計時に設定した岩盤等級区分は、堆積岩部および健全な土岐花崗岩部に関しては概ね妥当だが、主立坑部に関しては大きく異なる
- 断層沿いに掘削している主立坑部では周辺岩盤の変形および覆工に作用する応力は、健全な土岐花崗岩部を掘削している換気立坑部に比べ大きい
- これまで取得した情報に基づき、第1段階で得られる情報に基づくリスクマネジメント手法のプロタイプを構築
- 計測地点に切羽が到達する前の状態から、切羽が到達した通過後の全期間の立坑周辺岩盤の変位を随時的に観測した結果、設計時に設定した応力解放率が安全側であることを確認
- 「岩盤の工学的分類法JGS 3811-2004」をベースとした新しい定量的岩盤分類法の適用を試みた結果、堆積岩部では電中研式岩盤分類と良好な対応関係を得つつ、より高所的な岩盤性状の変化をトレースできることが判明
- 地震時における周辺岩盤のゆれは、地表部に比べ大きく減衰すること、地震時に覆工に生じる動的応力は問題ないレベルであることを確認

岩盤分類に関する検討結果例

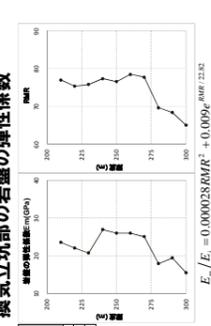


設計時に設定した岩盤等級のパラメータ

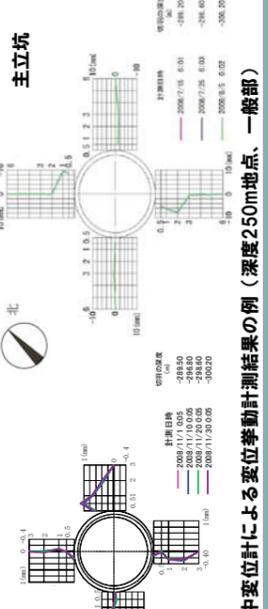
岩盤等級	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	せん断強度 (MPa)		
B	35.0	0.35	110.4	1.82	53.9	0.33	0.14
CH	30.1	0.35	89.7	1.46	53.9	0.30	0.14
CM	21.5	0.35	65.1	1.03	53.9	0.26	0.15

岩盤等級	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	せん断強度 (MPa)
D	2.05	0.02	2.42	0.22	0.12
CH	13.3	0.12	17.4	0.12	0.12
CM	8.1	0.12	9.7	0.12	0.12
CH	5.18	0.12	6.72	0.12	0.12

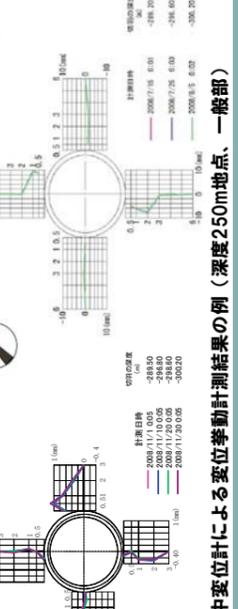
換気立坑部の岩盤の弾性係数



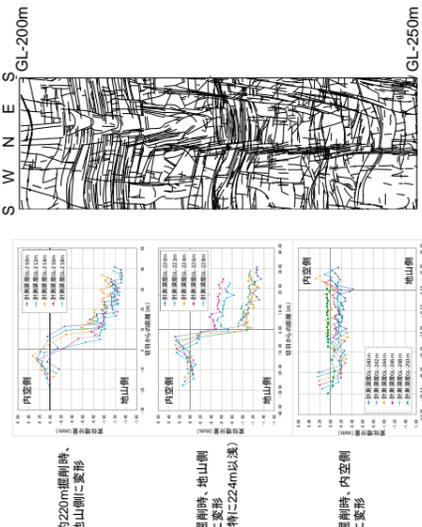
換気立坑



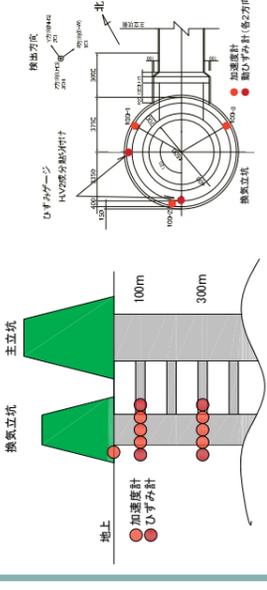
主立坑



地中変位計による変位挙動計測結果の例 (深度250m地点、一般部)



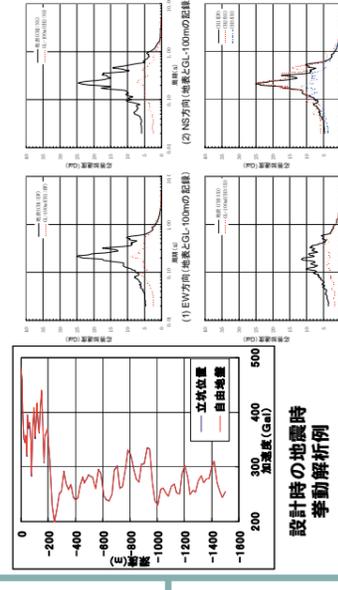
傾斜計による換気立坑掘削中の変位挙動計測結果の例 (一般部)



加速度計と動ひずみ計の配置 (GL-100m)



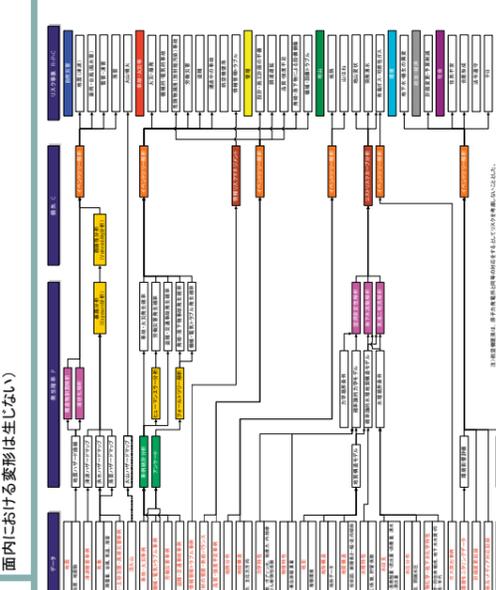
加速度計、ひずみ計の設置状況



設計時の地震時挙動解析例

立坑 (覆工コンクリート) と自由地盤における応答加速度及び変位に有意な違いが見られず、立坑は周辺岩盤と一体となって振動 (立坑の平面断面内) における変形は生じない

換気立坑内での地震時の覆工挙動計測例



地上からの調査結果を利用したリスク評価フローの例

得られた技術的知見

適用した設計手法

- 岩盤分類に基づく物性値設定
- 標準支保パターン設定
- 数値解析により力学的安定性の確認

- 岩盤分類については、第1段階で想定した堆積岩および健全な花崗岩部に対する予測精度が概ね妥当であることを確認

- 標準支保パターンの設定と数値解析により力学的安定性の確認については、入力物性の根拠となっていない岩石物性が設計値とほぼ一致すること、応力解放率も大きく異なる可能性が高い (掘削後に設置する覆工に作用する応力は設計よりも小さい) ため、設計として安全側になっていることを確認

- 岩盤および覆工の挙動計測結果では、地質の状況の違いに依存して主立坑側に相対的に大きな変形や覆工応力が作用しているが、大きな変形は認められていない。また、設計時に設定した支保工形態も地質の違いに依存した変更はない
- 地震時には、地表に比べ地下の振動が減衰することを確認



当初設計は、施設の目的 (研究エリアへのアクセスや作業および見学などの安全確保) の観点からは、高い安全裕度を有する適切なものと判断

●リスクマネジメント手法の検討過程において、定量化可能なリスクの評価はそのほとんどが地上からの調査や既存情報に基づき行えることが判明し、統合化プロセスに類する形でそれを整理し得る

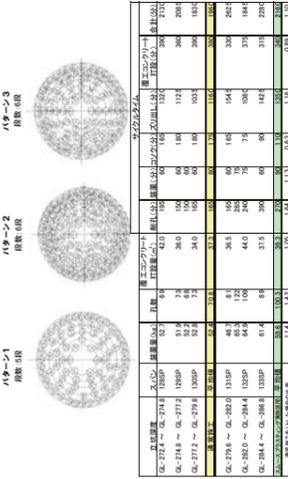
更なる設計の精度向上や支保工の合理化の観点では、以下の課題があると考えられる

- 結晶質岩盤の物性や挙動評価で重要となる割れ目の幾何学的特性やその分布に関する予測精度の向上
- 施工時に得られる情報をフィードバックし再設計が短時間でできるようなシステムの構築

主な調査研究結果

②掘削技術の有効性の確認

- 掘削に適用しているショットステープ工法は、主立坑・換気立坑とも共通であり、地質の違いに依存せず計画通り安全に施工ができることを実証
- サイクルタイムなどの分析により、工程に大きな影響を及ぼす要因を抽出するとともに、深度が工程に与える影響は相対的に小さいことが判明
- 立坑掘削を対象としたスームースプラスティング工法の適用性を検討した結果、現行の掘削設備ではシャフトジャンボのドリフタとセンターの設計手な割孔を行うことができ、効果に期待できないことが判明
- 主立坑掘削に適用している地山安定化対策（レジン注入）については、余掘量の過度の増加を防止する効果などが認められる

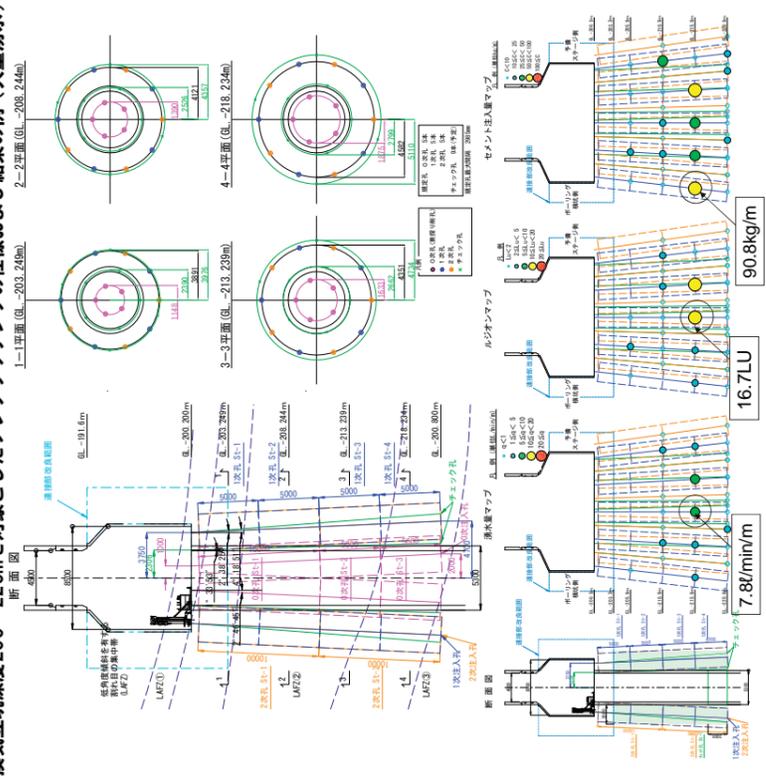


主立坑掘削時に適用したスームースプラスティングの緒元

③施工対策技術の有効性の確認

- 湧水抑制対策に関しては、普通ポルトランドセメントによる既存のグラウチング技術（プレグラウチング）を換気立坑（深度200m地点でボーリング掘削時の湧水量最大500ℓ/min程度）および300m研究アクセス坑道（ボーリング掘削時の湧水量最大1000ℓ/min程度）に適用し、十分な湧水抑制効果を得られることを実証（掘削後の立坑部で数ℓ/min、研究アクセス坑道全体で100ℓ/min程度）。さらに、数回のプレグラウチングの経験などに基づき、施工法の合理化・最適化（注入仕様、注入孔配置など）を実施
- ボストグラウチングについては、堆積岩部で一部施工試験を実施し、その湧水抑制効果を検討
- より地下深部まで研究坑道掘削が進んだ場合に問題となる可能性のある山はね、高抜け、高差圧といった現象に対して数値解析などに基づく検討を実施し、それらの施工対策も合わせて提案

換気立坑深度200～220mを対象としたプレグラウチングの仕様および結果の例（大量湧水）



④安全性を確保する技術の有効性の確認

- 現在導入している出入坑管理システムは、数か年の運用の結果その有効性が実証された
- 施設の長期使用を念頭に置いた、研究坑道の力学的安定性に着目した支保工の長期健全性評価手法の検討を開始

地層処分技術の基礎整備：地層処分への安全確保・評価に係る論拠を支える知識

- 研究坑道掘削において、設計²⁾時に想定しなかった断層が主立坑沿いに確認されたものの、設計時に設定した支保部材が変状を生じるような事象が確認されないことから、H12取りまとめ³⁾で示した既往の地下構造物の設計手法が幅広い地質に対応可能な安全裕度を有する方法であることを確認。加えて、個々の設計・施工技術の有効性を評価⁴⁾
- 両立坑の深度180m付近からのパイルボートリング調査結果⁵⁾に基づき、ボストグラウチング試験（堆積岩部）⁶⁾、プレグラウチング（堆積岩部）⁷⁾、ボーリング掘削時1,000ℓ/minを超える大量湧水を合理的・経済的に抑制可能なグラウチング技術をほぼ確立⁸⁾。パイルボートリング調査が建設地点での事前調査において各種のリスクの最小化の観点から非常に効果的であることを改めて確認⁹⁾
- リスクの評価の流れや判断基準、リスクの各要因の関係などの知識を抽出・整備し、地上からの調査結果に基づき地下施設建設プロジェクトに内包されるリスクを網羅的に抽出しその影響度を評価して判断の支援を行うリスクマネジメントのフローを構築⁹⁾

今後の挑戦

- より深部の研究坑道掘削時に対して同様の計測・解析評価を実施し、有効性の確認を進める
- 想定される突発事象（山はね、高抜け、高差圧など）⁹⁾への対策について原位置計測などを含む対策工の技術を確認
- 地下構造物の建設コストの低減という視点からの情報化施工を含む合理的な設計・施工技術の構築
- 地質環境に関する研究とも連携し、地下構造物建設に使われる材料が周辺地質環境に及ぼす影響を把握・評価する手法開発を目的とした試験研究（施工対策影響評価試験）を行う予定

参考文献

- 1) 超深地層研究所地層科学基本計画 JNC TN7410 2001-018
- 2) 三枝他：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第1段階）研究成果報告書、JAEA-Research 2007-043
- 3) 第2次とりまとめ 一分冊2地層処分地の工学技術
- 4) 納多他：瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討（平成19年）（委託研究）、JAEA-Technology 2009-009
- 5) 鶴田他：瑞浪超深地層研究所における立坑内からのパイルボートリング調査報告書、JAEA-Research 2008-098
- 6) 久慈他：瑞浪超深地層研究所・換気立坑におけるボストグラウチング試験施工とその評価、JAEA-Research 2008-095
- 7) 見掛他：結晶質岩を対象とした湧水抑制対策報告書（仮称）（作成中）
- 8) 井原他：瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討（平成20年）（委託研究）（作成中）
- 9) 黒崎他：超大深度立坑における高抜け崩落機構に関する調査・解析（委託研究）、JAEA-Research 2008-066

得られた技術的知見

- ショットステープ工法は極めて高い空洞安定性を保持しつつ掘削を進める手法であるため、地山安定化対策など既往の設計手法との組み合わせで幅広い岩盤状況に対応しうる手法であることが実証されつつある

- スームースプラスティング工法を立坑掘削に適用するためには、シャフトジャンボのドリフタとセンターが干渉しないよう、現行の掘削設備の改良が必要

- 既存のグラウチング技術は、特に大量湧水を伴う結晶質岩盤の湧水抑制対策に効果的であることを実証。ただし、施工はプレグラウチングで行うことが前提

- 大量湧水抑制のためには、濃度の濃いグラウト材の注入が効果的。
- グラウトの注入状況やそのメカニズムの検討に際し、グラウト材に着色する方法は、単純であるが非常に効果的

- 地下深部に向かうにあたり、異なる水圧の上昇と透水性の低い岩盤を対象とした湧水抑制が必要となることから、これらの対策工の検討が必要（高水圧環境下で使用可能な注入システムの開発、超微粒子セメントや溶液型グラウト材といった低透水性岩盤対応の材料の適用性、ボストグラウチングによる湧水抑制対策工の適用性も含む）

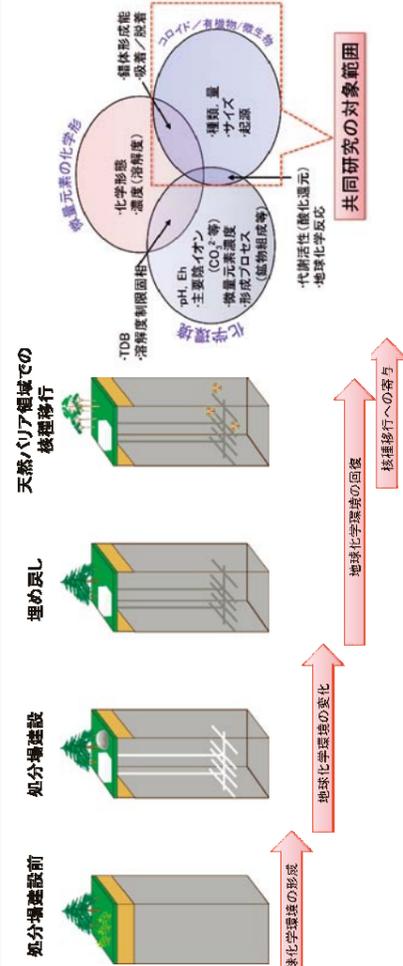
- 地下深部に向かうにあたり想定される山はね、高抜け、高差圧といった事象への対策工の有効性の検討が必要

- トンネルなどの地下構造物の長期健全性評価手法はまだ定まったものがないことから、手法の開発が必要

産業技術総合研究所 伊藤一誠・鈴木庸平・福田朱里・幸塚麻理子
 原子力機構 東濃地科学ユニット 結晶質岩地質環境研究グループ 水野 崇・萩原大樹

1. はじめに

- 高レベル放射性廃棄物の地層処分安全評価では、地下施設建設前の地球化学環境と、その後の擾乱・回復過程における変遷を把握することが重要
- 地下微生物は、地球化学環境の形成に関与すると共に、地下施設建設による擾乱からの回復過程で重要な役割を果たす
- ⇒ 地下深部における微生物の生物化学的特性を明らかにするための調査手法が必要



2. 目的と実施内容

目的
 地下微生物を対象とした調査手法について、これまでの開発された手法や新たな知見をとりまとめ、天然の地質環境に適切可能な調査手法を体系的に構築する。

実施内容

これまでに以下の内容を実施した。

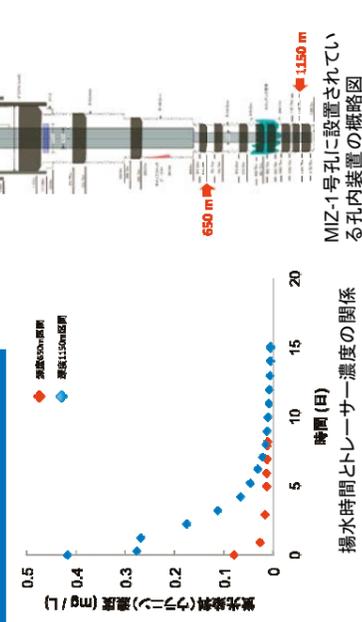
- 地下水の化学分析
- 地下微生物の群集組成解析
- 地球化学環境の擾乱を想定した微生物の培養試験

3. 背景情報

- 瑞浪超深地層研究所用地周辺の地下水は以下の特徴を示す¹⁾。
- 瑞浪層群中に存在する低透水層を境に、浅部ではNa-(Ca)-HCO₃型地下水、深部ではNa-(Ca)-Cl型地下水が分布
- Na-(Ca)-HCO₃型地下水は天水起源の地下水が岩石と反応することにより水質を形成
- Na-(Ca)-Cl型地下水はより深部に分布する高濃度のNa-(Ca)-Cl型地下水と浅部の低濃度のNa-(Ca)-Cl型地下水が混合することにより水質を形成

¹⁾ Iwatsuki et al., (2005)

4. 試料の採取方法



- 地表から掘削したボーリング孔(MIZ-1号孔:傾斜孔、掘削長1300m)の2区間(深部約650mおよび約1150m)において、ポンプ揚水を実施
- 揚水中は地上にフローセルを設置し、嫌気状態で物理化学的パラメーターを測定
- 対象区間に注水した水に添加したトレーサーのウランの残留率が1%以下になるまで排水を行った後、試料を採取

5. 化学分析結果

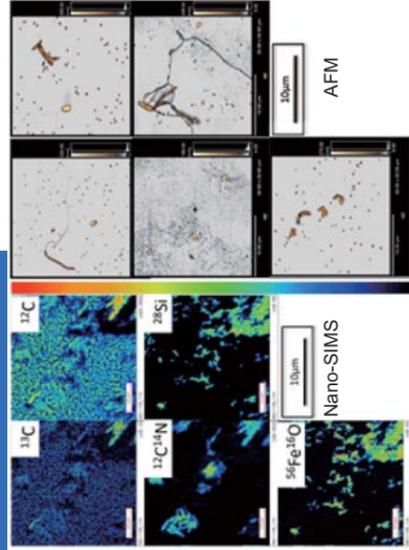
深部	採取日	温度	pH	Et	アルカリ度	DO	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
MIZ-1 650 m	2008.07.25	22.9	9.21	-	0.085	-	211.3	<0.2	2.5	188.2	<0.1
MIZ-1 1150 m	2008.07.15	26.6	8.96	-	0.048	-	490.4	<0.2	14.8	696.7	1.3

SO ₄ ²⁻	S ²⁻	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Br ⁻	Si	Total Fe	Fe ²⁺	Total Mn	B
(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
MIZ-1 650 m	<0.4	0.06	3.9	667.4	<0.2	<0.3	6.2	0.017	<0.05	0.001	2.2
MIZ-1 1150 m	<0.4	<0.1	<0.1	1856.0	<0.2	<0.3	9.3	0.01	0.14	<0.05	0.032

TIC	δ ¹³ C (‰)	CH ₄	H ₂	TOC	δ ¹³ C (‰)	リン酸	クエン酸	ピルピル酸	リンゴ酸	コハク酸	乳酸	酢酸	プロピオン酸
(mg/L)	(‰V-PDB)	(μM)	(μM)	(mg/L)	(‰V-PDB)	(mg/L)							
MIZ-1 650 m	2.7	-8.2	0.8	<1	807	<0.4	<0.2	<0.3	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
MIZ-1 1150 m	2.2	-9.3	1.2	33.00	985	-25.9	<0.4	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2

- 主要化学成分などに加えて、溶解ガスと有機酸について測定を実施
- ⇒ 両深度において、全有機炭素量は約1mg/L検出されたが、有機酸は未検出
- ⇒ H₂は1150mの試料からのみ検出
- ⇒ CH₄は約1mM検出され、その炭素同位体組成は熱分解起源であることを示唆
- ⇒ ただし、熱分解起源のCH₄に伴うC₂H₆(エタン)等のC2炭化水素は未検出

6. 微視的観察



地下水をろ過したろ過膜の観察結果

- 1150mから採取した地下水を1,000MWCOのろ過膜で限外ろ過し、ろ過膜を原子力顕微鏡(AFM)および二次イオン質量分析計(nano-SIMS)で観察
- ⇒ AFMでは微生物細胞様の粒子からは鞭毛に似た付属体を確認
- ⇒ nano-SIMSではSiとFeを含むコロイド粒子を確認

7. 群集組成解析

群集組成解析結果

16S rRNA Run number	クローン数	相対性 (%)	分類	近縁種
MIZ08_02	28	25	Betaproteobacteria	<i>Thaueria mechernichensis</i> (Y17590)
MIZ08_06	8	2	Betaproteobacteria	<i>Aquabacterium hongkongensis</i> (DQ489306)
MIZ08_11	7	0	Betaproteobacteria	<i>Carboxydothermus hydrogenotermans</i> (CP000141)
MIZ08_07	4	1	Betaproteobacteria	<i>Acidovorax delafieldii</i> (EU730925)
MIZ08_14	2	3	Firmicutes	<i>Cryptanaerobacter phenolicus</i> (AY327251)
MIZ08_17	4	0	Dehaloproteobacteria	<i>Geopsychrobacter electrophilus</i> (AY187304)
MIZ08_18	0	4	Betaproteobacteria	<i>Siderocitidans paludicola</i> (DQ386858)
総種数	89	59		

- 地下水中に優占する微生物種を同定するため、2深度から採取した地下水を対象にDNAを用いた遺伝子解析を実施
- ⇒ 両深度において*Thaueria mechernichensis*に近縁な種(99%相同)が優占
- ⇒ *Thaueria*属は芳香族などの難分解性有機物を含むさまざまな基質を利用可能で好気から嫌気条件で生存可能
- ⇒ 地下水の化学分析結果からH₂およびCH₄を地下深部でのエネルギー源として想定

8. 微生物の培養試験

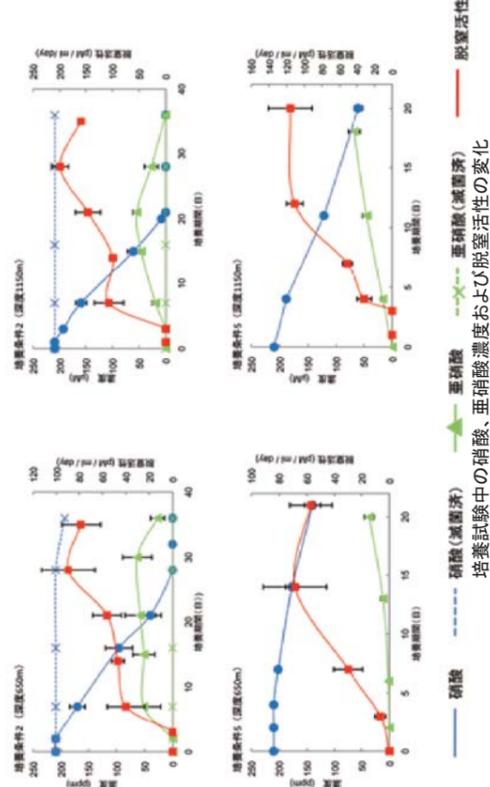
- 地下施設建設の際の擾乱過程において浸透することが想定される酸化剤(酸素または硝酸)とエネルギー源として原位置に存在するH₂およびCH₄に加えて有機酸混合物(酢酸、こばく酸、ピルビン酸の混合物)を下表に示した5通りの条件で、2深度から採取した各地下水に添加して25℃で3~5週間培養を実施
- 培養期間中、液相の硝酸および亜硝酸濃度変化に基づき、脱窒活性を測定

培養試験の試験条件

培養条件	1	2	3	4	5
酸化剤	O ₂	NO ₃ ⁻	None	O ₂	NO ₃ ⁻
栄養源	500 ppm 有機酸混合物*	0.2 mM 有機酸混合物*	500 ppm 有機酸混合物*	H ₂ 500 ppm CH ₄ 1%	H ₂ 100 ppm CH ₄ 1%

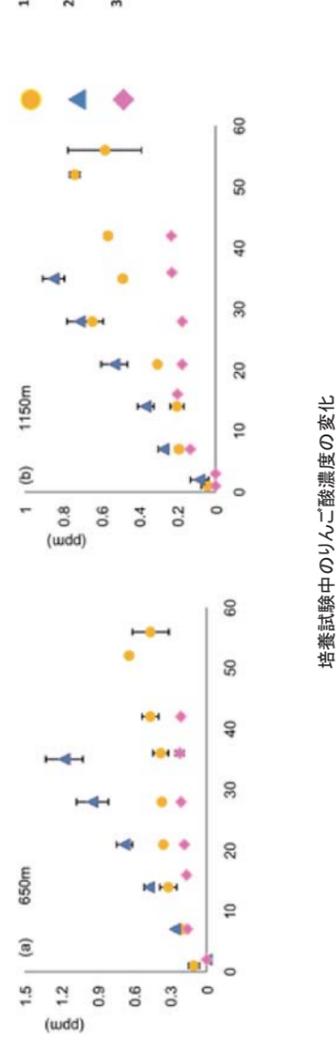
*有機酸混合物にはピルビン酸、コハク酸および酢酸を混合

- ⇒ NO₃⁻とエネルギー源(有機酸またはH₂・CH₄)を与えた条件において、NO₃⁻・NO₂⁻濃度の測定とアセチレン阻害法によるN₂O生成量から脱窒活性の解析を実施
- ⇒ 培養開始から3日間後に降に硝酸還元によるNO₂⁻の生成を確認
- ⇒ 各試料において同じエネルギー源を添加した場合の脱窒活性は類似した傾向を示し、2深度から採取したそれぞれの地下水中の群集組成が類似した組成を示すことと整合的
- ⇒ これらの結果は今回の試験方法が地下施設建設時の変化に応じた地下微生物の代謝活性の変化を把握する上で有効であることを示唆



9. 有機酸生成活性

- 有機酸を与えて培養した実験では、りんご酸の生成を確認
- りんご酸はピルビン酸より核種との錯体形成能が高い
- ⇒ 添加した酸化剤やエネルギー源の濃度を測定するだけでなく、代謝産物の濃度を測定するとともに、それらが配位子となり得るか否かの調査が重要



10. まとめと今後の挑戦

- MIZ-1号孔において採水された地下水試料を用いて、地球化学的特性と生物学的特性について統合した調査を行った。
- 群集組成解析を実施することで地下水で優占する微生物種が特定でき、地下水の化学分析結果を参照することで、原位置で利用しているエネルギー源(H₂やCH₄)を特定した。
- 地下水の化学分析により特定した原位置でのエネルギー源(H₂やCH₄)を利用した培養試験を実施することで、より原位置に近い環境での微生物の代謝活性実験ができることを示した。
- 今後は地球化学環境の異なる各深度でのDNA解析や代謝活性実験を行い、地球化学環境の異なる各深度での微生物の生物化学的な特性を把握するための手法を検討していく。

※本共同研究において産業技術総合研究所が使用した予算は、原子力安全・保安院から受託した「平成20年度地層処分に係る地質情報データベースの整備」の一部を用いた。

1. 背景

地下深部における地下水の流速は、高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全評価において重要な項目の一つである。一般に地下深部での地下水流速は非常に遅く、直接計測が困難である。このため、地下水中に溶存した放射性物質などに着目した地下水年代測定法(図-1)が有効である。

地下水年代測定法を天然の環境において適用するにはいくつかの課題がある。例えば、¹⁴C年代測定では、炭酸塩鉱物の溶解、有機物の分解などにより同位体比が変化するため、これを補正する手法の構築が必要となる。

電力中央研究所では、地下水年代測定法の適用性向上を図るために、前述の課題解決や複数の方法を組み合わせた地下水年代測定法について、日本原子力研究開発機構との共同研究として検討を行っている。

2. 目的

⁴Heおよび¹⁴Cなどによる地下水年代測定を瑞浪超深地層研究所周辺で実施し、両者の結果の相互比較などを行い、その適用性向上を図る。

3. 実施内容

既存の調査結果から想定される地下水流動方向に沿ったボーリング孔(DH-3, DH-9, MIU-2, MIU-3, DH-12号孔：図2)を対象として、土岐花崗岩中の地下水採水を行い、主要溶存イオン、水素・酸素同位体比、炭素同位体(¹⁴C, ^{δ13}C)、希ガス(⁴He, ³He/⁴He, Ne)などの分析を実施した。

これらのボーリング孔には、地下水長期観測装置(MPシステム)が設置されており、ボーリング孔内の原位置の環境(被圧、不活性雰囲気)を保持した採水が可能である。

4. 結果

¹⁴C年代は涵養域から流出域に向けて増加している。ただし、DH-3については流動経路が異なると推測される。また、DH-12については溶存炭酸量が少ないため測定結果にバラツキが大きい。

⁴He年代は涵養域から流出域に向けて増加している。DH-3については、¹⁴C年代と同様に、流動経路が異なると推測される。

⁴He年代と¹⁴C年代には相関があり、年代の増加率は一致している。このため、岩石のU・Th量、間隙率から求めたHe発生速度は妥当と考えられる。⁴He年代と¹⁴C年代のズレ(切片)は、涵養時に¹⁴Cの希釈が炭酸塩の溶解などによって起きていることを示していると考えられる。また、炭酸塩と溶解平衡に達した花崗岩内では放射壊変で濃度が増加するため、He年代と増加率が一致すると考えられる¹⁾。

5. 今後の予定

⁴He年代と¹⁴C年代の相関データの蓄積を図るとともに、別指標(水素・酸素同位体比、希ガス温度計、地下水流動解析結果)との比較を行い、地下水年代測定手法の信頼性向上を図る。

謝辞

本研究は経済産業省からの委託研究「地下水年代測定技術調査」の成果の一部である。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Iwatsuki, T., Xu, S., Mizutani, Y., Hama, K., Saegusa, H., Nakano, K.(2001): Carbon-14 study of ground water in the sedimentary rocks at the Tono study site, central Japan, Applied Geochemistry, Vol.16, pp.849-859.

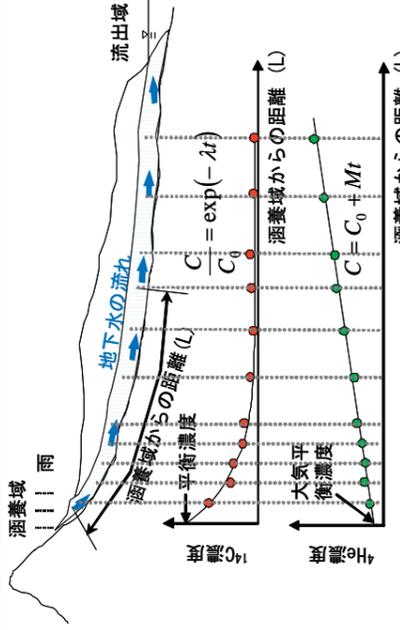


図1 地下水年代測定法の原理

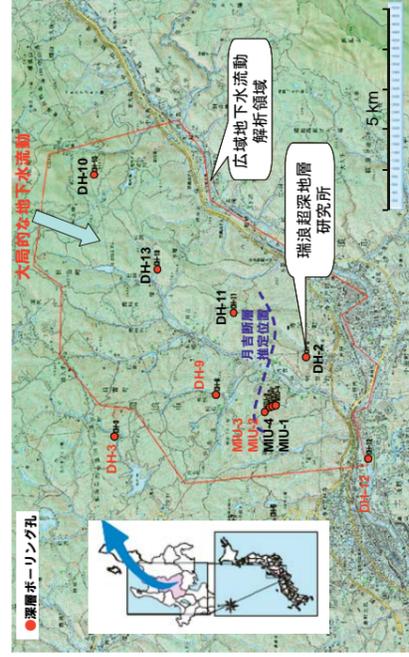


図2 調査対象ボーリング孔(国土地理院50mDEM、描画はカシミール3D)

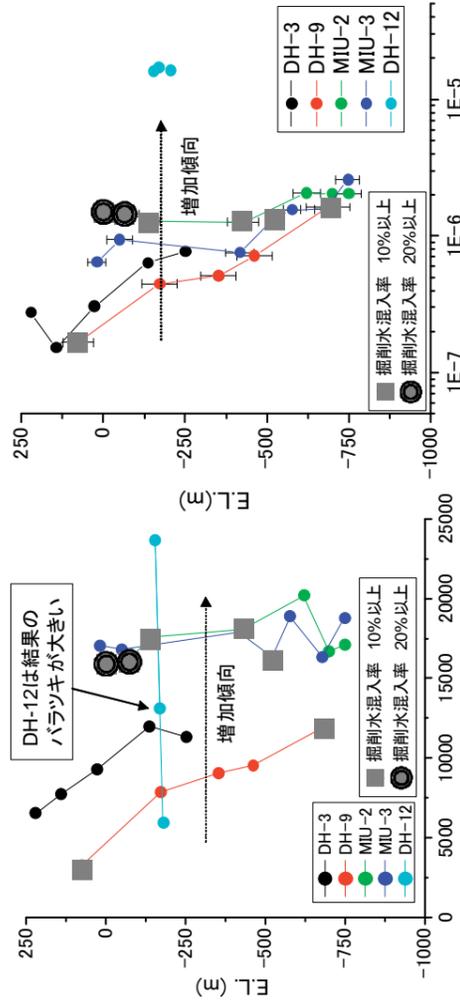


図3 ¹⁴C年代の調査結果

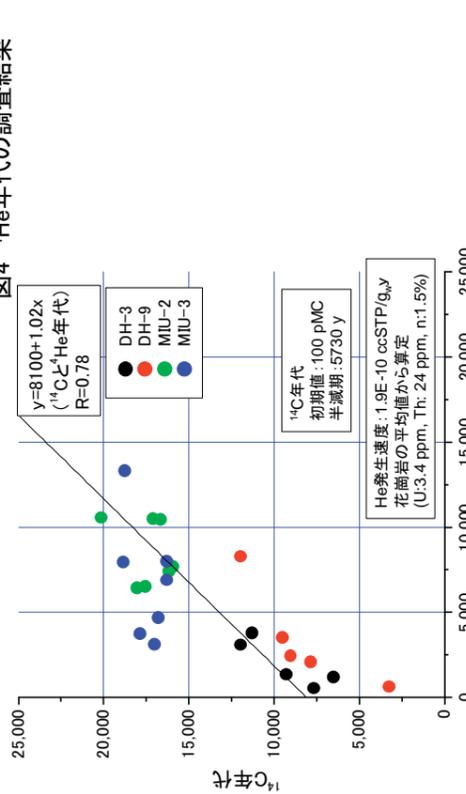


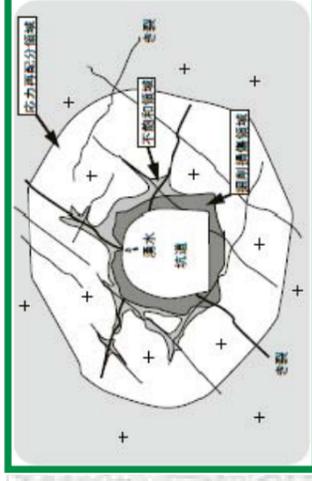
図4 ⁴He年代の調査結果

図5 ⁴He年代と¹⁴C年代との相関

1) 目標・課題 掘削影響領域の調査手法の開発

掘削影響領域の発生 (概念は右図)

- ・ 地層処分行なう地下水流動解析や地下施設設計で考慮すべき重要な現象
 - ・ 発生場所やその程度は坑道形状/掘削方法/岩盤性状の影響を大きく受ける
 - ・ 坑道周辺に局在し、発生後の経時変化を考慮すべき場合が一般的
 - ・ 本現象の把握に多地点で継続した坑内調査が必要 (調査効率性向上が課題)
- 本研究の目標は、掘削影響として認められる力学的な現象をできるだけ効率よく観測する手法の開発

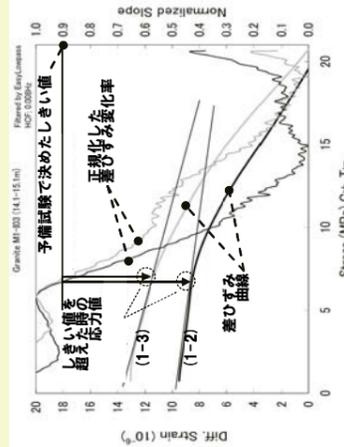
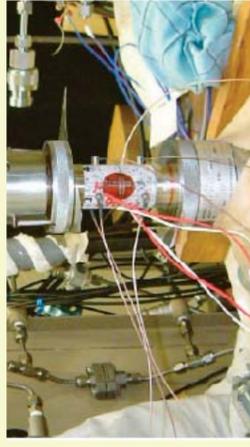


2) 実施内容

期間：平成20年度～21年度 内容：試験的な現場調査とデータ解析

▼ 掘削影響として認められる現象 (力学的なもの)

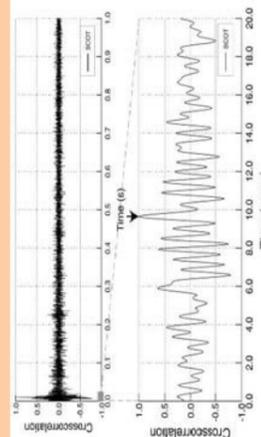
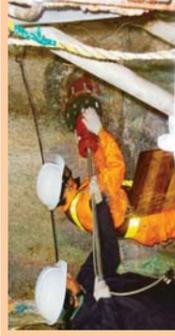
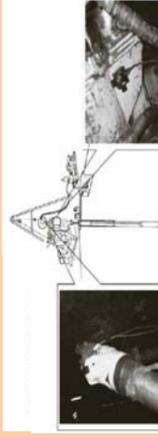
岩盤応力の変化 (坑道・岩盤損傷による応力解放など)
 調査方法 岩芯を用いた応力の測定 (AE/DRA法)



- ① 換気立坑の深度200mボーリング掘削 (L=20m) で岩芯採取・試料作成
- ② 試料の加圧で発生する音波と変形を測定
- ③ 岩芯の地中での応力状態を分析

【測定原理】 試料に加える圧力を徐々に高めると岩芯が受けていた応力に等しい点で試料の発する音波の量や変形の仕方が変化する。

岩盤の損傷 (塑性化・き裂発生など)
 調査方法 岩盤の弾性波速度の測定 (SWD法)



振動の伝わる所要時間の分析例

- ① 換気立坑の深度200mボーリング掘削 (同左) で坑道周辺の岩盤を小さく加振
- ② 加振による振動を坑内で測定
- ③ 坑道周辺岩盤の弾性波速度を分析

【測定原理】 弾性波速度が遅い領域=塑性化・き裂発生などの岩盤の損傷が大きい領域である。

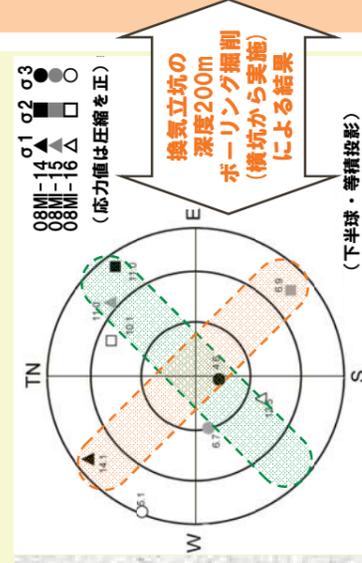
- ① 現データで可能な掘削振動の反射面を抽出
- ② BTV観察のき裂系と整合する反射を確認
- ③ 岩盤の弾性波速度分布を得るにはさらに詳細な分析が必要

【成果】 測定手法の成立性、再現性を確認
 【今後の課題】 掘削影響を強く受けると考えられる壁面に近い位置での応力変化の確認

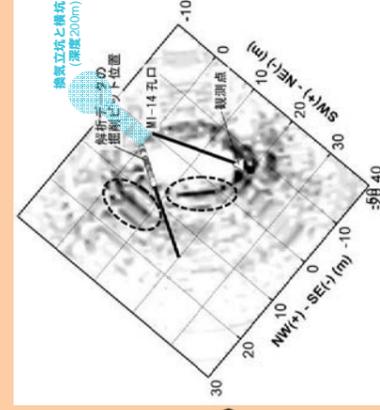
3) 実施結果 (平成20年度までの中間成果)

- ① 調査位置により値のばらつきあり
- ② 主応力は鉛直方向と水平面内NW-SEおよびNE-SWの互いに直交する方向にある

【成果】 測定手法の成立性、再現性を確認
 【今後の課題】 掘削影響を強く受けると考えられる壁面に近い位置での応力変化の確認



坑道径 (6m) の2倍以上壁面から離れた位置の応力状態



坑道周辺岩盤でボーリング掘削の振動が反射を起している部分 (き裂面や岩相の変化が反射をもたらす)

4) まとめと今後の挑戦

■ 掘削影響として認められる力学的な現象を効率よく観測する測定手法 (以下二つ) の成立性を確認

- ・ 岩芯を用いた応力の測定 : AE/DRA法
 - ・ 岩盤の弾性波速度の測定による掘削影響領域を評価する手法 : SWD法
- 今後の挑戦
- ・ 平成21年度までの最終成果とりまとめ
 - ・ 深度200m力学調査 (初期応力測定等) など、その他坑内調査の結果との比較で本手法の実用性の検証
- 本手法とそこから得られる成果は将来の掘削影響評価に応用

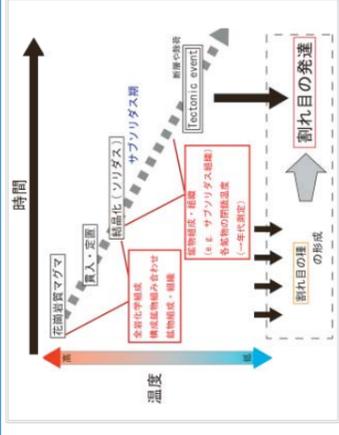
1.はじめに

花崗岩などの亀裂性岩盤の物質移動経路として重要である割れ目の分布と特性(開口幅, 介在鉱物)については, 岩体を被覆していた堆積岩の削剥による除荷や, 断層活動など, 岩体が固結した後に被った地質イベントにその原因を求めることが一般的であった。

本研究では, これまでとは異なる手法として
花崗岩体の岩相モデルの解明に着目した。
(岩相分布と化学組成分布)

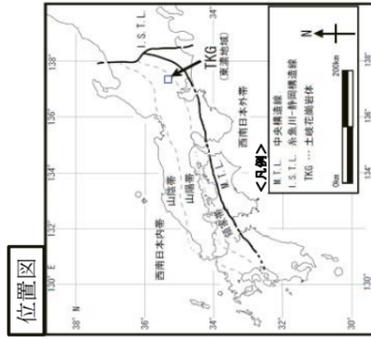
これらの解明は, 割れ目の分布特性を理解する上で重要な視点であるとともに,
地殻の形成進化過程を理解する上でも重要である。

そこで **土岐花崗岩体を対象とし, 割れ目の分布と岩石学的特徴の相関性の把握の第1段階として**
岩相モデルを構築し, 特に花崗岩マグマの真入量プロセスについて報告を行う。

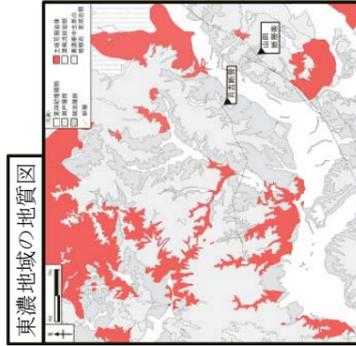


岩石学的アプローチに基づき割れ目の理解

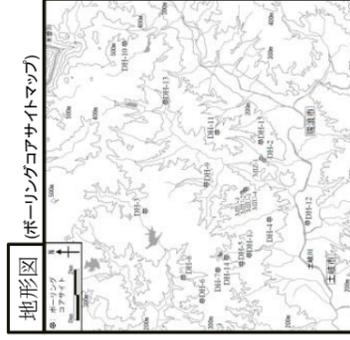
2.土岐花崗岩体



土岐花崗岩体は, 岐阜県の東濃地域に露出する
白亜紀後期の深成岩体である。
(68.3 ± 1.8Ma monazite CHIME; Suzuki and Adachi, 1998)



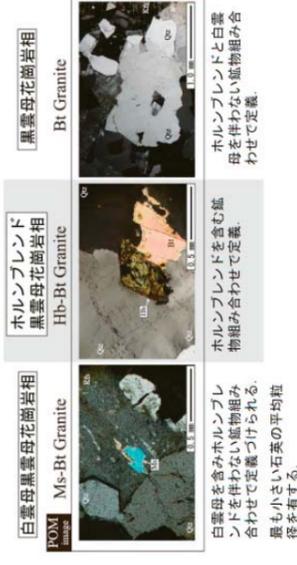
土岐花崗岩体は美濃帯の堆積岩類および濃飛流紋岩
に貫入した花崗岩体。
・第三紀の瑞浪層群と瀬戸層群が土岐花崗岩を不整合
に覆う(Itoigawa, 1980)。



土岐花崗岩体は, 岩体の広域に渡って19本の
試錐調査が行われている。
これらで採取されたコア試料を用いることで,
花崗岩体の3次元の岩石学的情報
を得ることが可能である。

3.岩相区分

(A) 鉱物組み合わせ

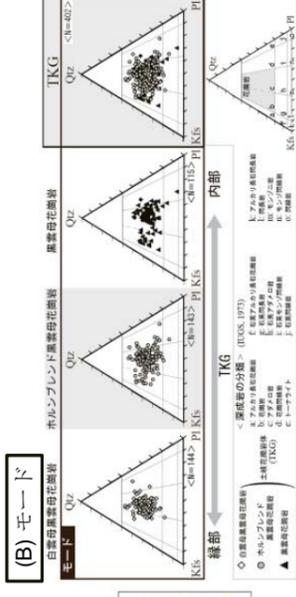


白雲母を含みホルンブレンドを伴わない鉱物組み合わせで定義される。最も小さい石英の平均粒径を有する。

ホルンブレンドと白雲母を伴わない鉱物組み合わせで定義。

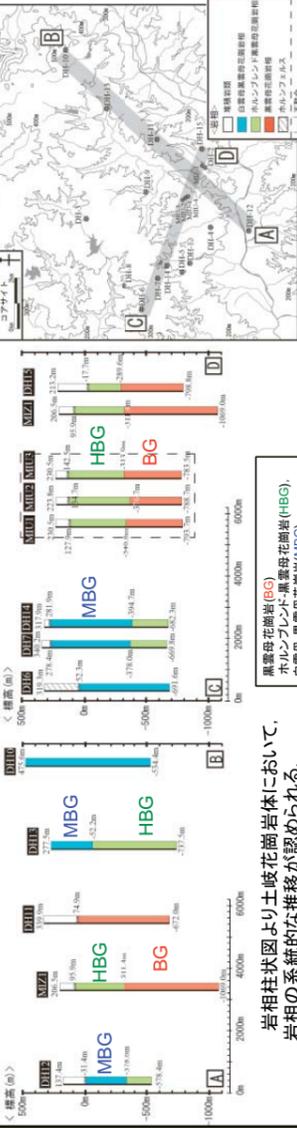
ホルンブレンドと白雲母を伴わない鉱物組み合わせで定義。

コア試料を用いて, 土岐花崗岩体は, 鉱物組み合わせ(A)とモード組成(B)から, 3つの岩相に分類することが可能である。



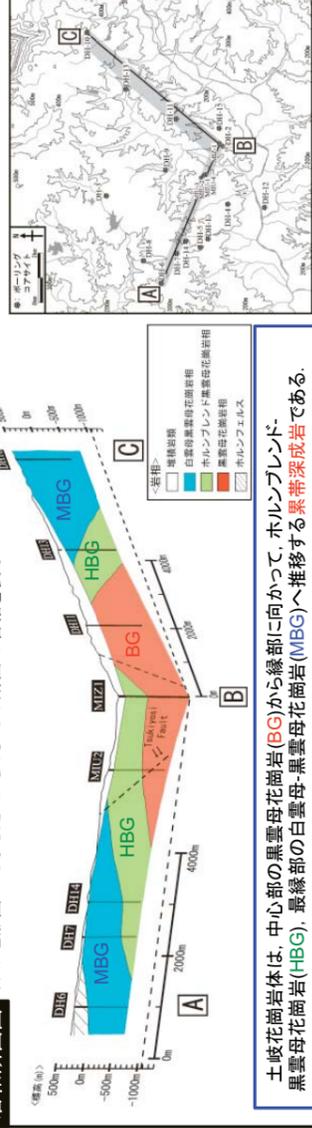
岩相区分を行うと

岩相柱状図 右の地形図上で示したA-BからC-Dまでの断面に位置するボーリングコアの岩相柱状図を表示。



岩相柱状図より土岐花崗岩体において,
岩相の系統的な推移が認められる。

岩相断面図 右の地形図上で示したAからCまでの断面の岩相を表示。



土岐花崗岩体は, 中心部の黒雲母花崗岩(BG)から縁部に向かって, ホルンブレンド・黒雲母花崗岩(HBG), 最縁部の白雲母・黒雲母花崗岩(MBG)へ推移する**累帯深成岩**である。

4.岩石記載

1. 白雲母花崗岩において認められる白雲母, ホルンブレンド黒雲母花崗岩において認められるホルンブレンドの他に, 3つの岩相に共通する鉱物組み合わせ:

- 構成鉱物: 石英 + 斜長石 + カリ長石 + 黒雲母 + チタン鉄鉱
- 副成分鉱物: 褐鐵石 + ジルコン + アバタイト
- 二次鉱物: セリサイト + 緑泥石 + 綠簾石

2. 黒雲母花崗岩においてのみチタン鉄鉱だけでなく磁鉄鉱が観察される。

3. 周縁相である白雲母黒雲母花崗岩において, 他の2つの岩相に比べ, 石英長石の平均粒径が最も小さい。

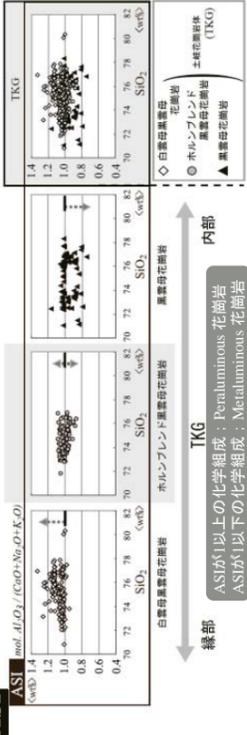


各岩相の電子顕微鏡写真(組成像)

5. 全岩化学組成

3つの岩相区分に基づいて全岩化学組成の
変化の検討を行う。

ASI < ハーカー図 >



ハーカー図より
Ms-Bt graniteで1.0前後、Hb-Bt graniteで1.0前後、Bt graniteで1.0以下。

この結果は周縁部の白雲母-黒雲母花崗岩相から中心部の黒雲母花崗岩相へ向かってPeraluminousからmetaluuminousへ推移する化学組成の変化を示す。

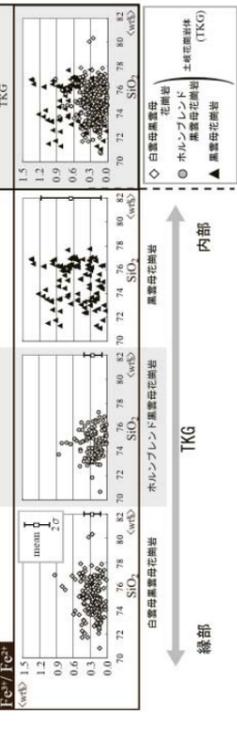
< 土岐花崗岩体内の3D分布 >



これらの図からも、周縁上部から中央下部へ向かってPeraluminousからmetaluuminousへ推移する化学組成の変化を示す。

ASIとは → S-type / I-type花崗岩の判別の指標の一つとなる。
S-type: 地殻の岩石を取り込んだ花崗岩であり、AlやKに富む(ASIに富む)。
I-type: マグマに由来し、AlやKに乏しい(ASIに乏しい)。

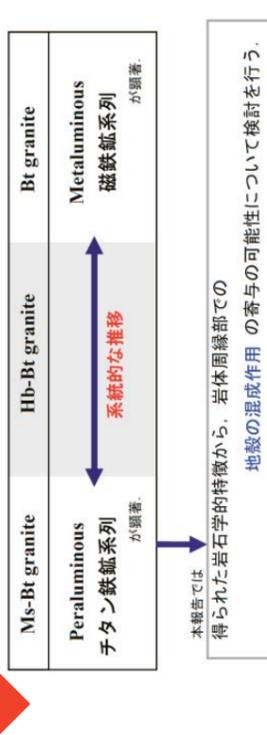
Fe³⁺/Fe²⁺ < ハーカー図 >



この結果は白雲母-黒雲母花崗岩相でチタン鉄鉱系列の傾向が強く、黒雲母花崗岩相において磁鉄鉱系列の傾向が強いことを示す。

Fe³⁺/Fe²⁺は → チタン鉄鉱、磁鉄鉱系列の判別の指標となる。
チタン鉄鉱系列: マグマに地球物質が大量に混入し、還元条件下で固化(Fe³⁺/Fe²⁺ < 0.5)。
磁鉄鉱系列: マグマが地球物質と混成せず酸化的な環境のもと上昇固化(Fe³⁺/Fe²⁺ > 0.5)。

岩相区分に基づいた全岩化学組成の検討より



本報告では
得られた岩石学的特徴から、岩体周縁部での
地殻の混成作用の寄与の可能性について検討を行う。

7. 結論

土岐花崗岩体とホルンフェルスの岩石学的検討に基づき
土岐花崗岩体の岩相モデルと貫入定置プロセスについての知見を得た。

- 土岐花崗岩体は、周縁部から内部に向かって白雲母-黒雲母花崗岩相、ホルンブレンド黒雲母花崗岩相、黒雲母花崗岩相へと推移する3つの岩相を有する。
- 白雲母-黒雲母花崗岩相から黒雲母花崗岩相へ、**PeraluminousからMetaluminousへの系統的な推移**、**チタン鉄鉱/磁鉄鉱系列の系統的な推移**を持つ。
- 土岐花崗岩体の貫入定置の際に、マグマの結晶分別の作用でのみ形成されたのではなく、周縁相は、地殻の混成作用の寄与により形成された可能性が大きい。

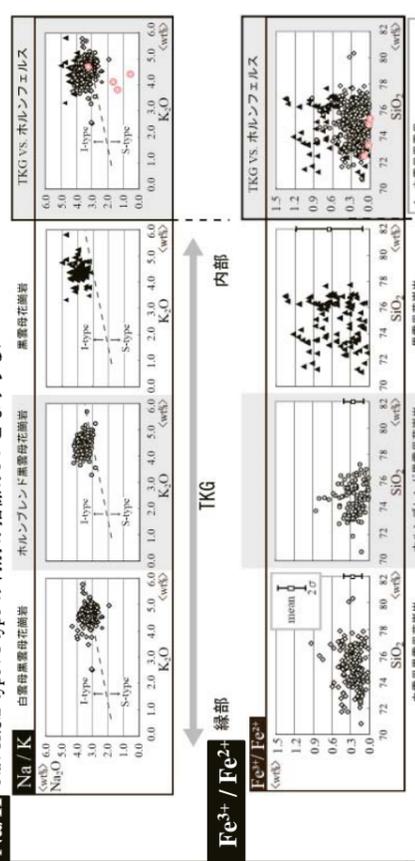
引用文献

Suzuki, K. and Adachi, M. (1989): Denudation history of the high T/P Ryoko metamorphic belt, southwest Japan: constraints from CHIME monazite ages of gneisses and granulites. Journal of Metamorphic Geology, 16, 27-37.
糸魚川淳二(1980): 尾羽地域の地質、尾羽市化石博物館専報, 1, 1-50.
溝口貴史、鶴田忠彦、西山正男(2009): 単一の花崗岩体内で認められるI-type / S-type 系列と磁鉄鉱/チタン鉄鉱系列の異常構造-中部日本の土岐花崗岩体を例にして、日本地質科学会2009年年会講演より引用。

6. 美濃帯ホルンフェルスとの比較

この混成作用の寄与(母岩の取り込み)を裏付けるために、美濃帯中世層起源のホルンフェルスに注目する。
土岐花崗岩体は、美濃帯中世層の堆積岩類に対して貫入し、これらに接触変成作用(ホルンフェルス化)をもたらす。

このホルンフェルス(DH-6上部)と土岐花崗岩体の全岩化学組成との比較検討を行う。

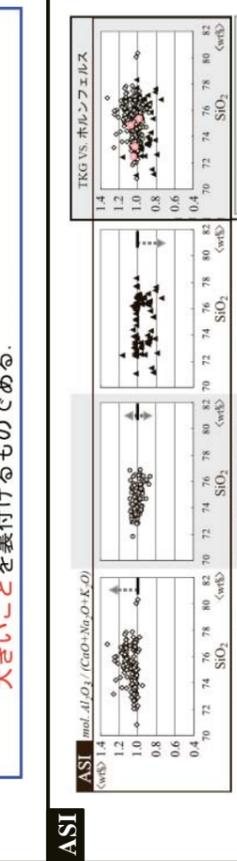


Na₂O / K₂O比は、Bt graniteからHb-Bt granite, Ms-Bt graniteを経てホルンフェルスへ向かって、Na₂Oの系統的な減少が認められる。

ホルンフェルスのFe³⁺/Fe²⁺比は、0に近い値を有し、Bt graniteからHb-Bt granite, Ms-Bt graniteを経てホルンフェルスへ向かって減少傾向が認められる。

このことは、土岐花崗岩体形成の際、**地殻の混成作用の寄与が大きいこと**を裏付けるものである。

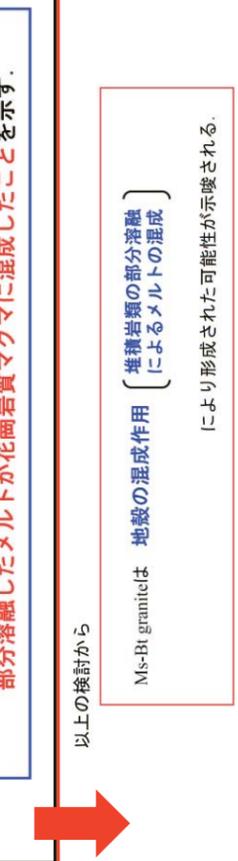
ASI



ASIは上記のNa/K, Fe³⁺/Fe²⁺とは異なる傾向を示す。
ホルンフェルスのASIは、Bt graniteより高いものの、**Ms-Bt graniteのASIは、ホルンフェルス(母岩)のASIと同等あるいは高い場合が認められる。**

このことは、**単純なホルンフェルス(母岩)の全溶融ではなく、部分溶融したメルトが花崗岩質マグマに混成したことを示す。**

以上の検討から



8. 今後の課題

- 本研究で得られた知見 × 割れ目の分布と特性データとの照合(着目点) ・各岩相間や岩相境界において割れ目特性に変化が生じているか。(特に混成作用により形成された)と結論づけられた白雲母黒雲母花崗岩相と、他の2つの岩相の間に相違が認められるのかを確認)
 - ・**鉱物の構成比** (e.g. 石英/長石比)
 - ・**鉱物の形状** (e.g. 石英の粒径変化)
- 本岩相モデルの信頼性の向上のための、微量元素および同位体などのデータ取得・評価。
- サブソリダス反応組織および放射年代測定を利用した花崗岩体の冷却過程の検討。
- 本岩相モデルと冷却過程の関連性の検討。
- 上記の岩石学的データ(本岩相モデルと冷却過程)と割れ目分布特性の関連性の検討。

立坑掘削に伴う地球物理学の変動観測研究

財団法人地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所 浅井 康広・石井 紘

東濃地震科学研究所 (TRIES) は、瑞浪超深地層研究所 (日本原子力研究開発機構; JAEA; 図2・図3) の主立坑 (φ 6.5m) と換気立坑 (φ 4.5m) の掘削によって生じる地下水変動を能動的地下水制御と見なし、地下水位変動と地殻歪・傾斜変化の関連性を調査・研究している。この一環として、2007年2月、瑞浪超深地層研究所の主立坑・換気立坑を繋ぐ深度100m予備ステージにある深度23.3mの既存孔整備を行い、2007年3月9日に深度20.0mの位置 (第三紀瑞浪層群中) にボアホール傾斜計を設置し (図4)、傾斜変動の連続観測を開始した (観測点名: STG100)。

- ① 2007年3月9日から2009年4月30日までのデータ (図5) の解析結果を示す。これまでの観測記録から次の結果が得られている。
 - 2007年3月から4月1日頃まで約 1.5×10^{-5} radian 南側へ下降、4月1日以降は変化の傾向が変わり、約 3.0×10^{-5} radian 南南西へ下降している (おおむね換気立坑の方向; 図6)。
 - 2008年11月1日~12月20日の期間に、深度200m ボーリング横坑 (換気立坑側) に掘削されていた調査孔 (後のSTG2000の掘削を含む) での約100リットル/分以上の湧水に伴う 10^{-6} radian オーダー傾斜変化が観測された (図7)。

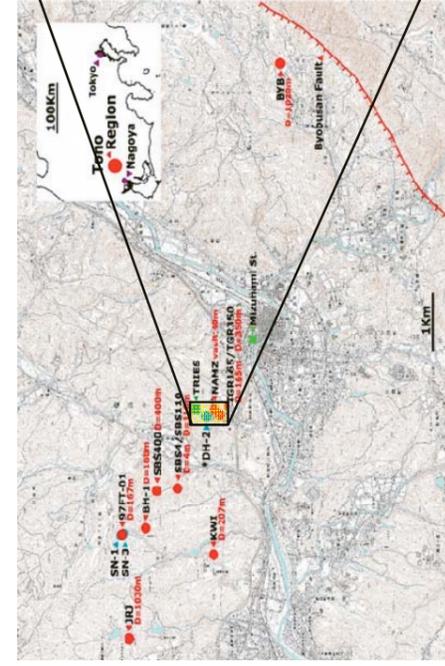


図1 TRIESのボアホール地殻活動群列観測網

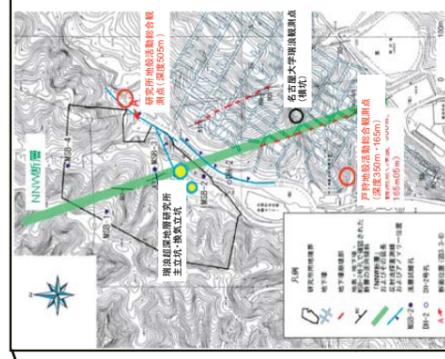


図2 瑞浪超深地層研究所周辺のTRIES観測網 (図1中の黄色の範囲; JAEA資料に加工)

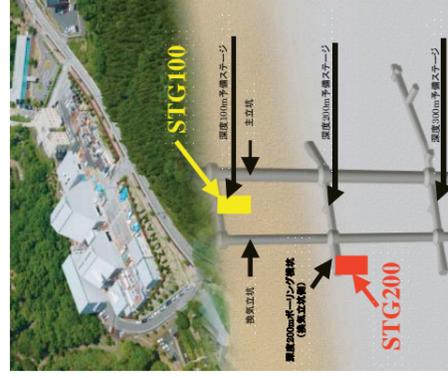


図3 瑞浪超深地層研究所内のTRIES観測点位置図 (JAEA資料に加工)

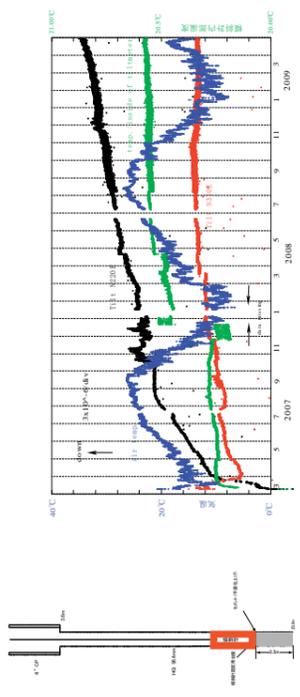


図4 STG100のボアホールフロアワイヤールと傾斜計設置位置

図5 STG100傾斜計データ 期間2007年3月9日~2009年4月30日

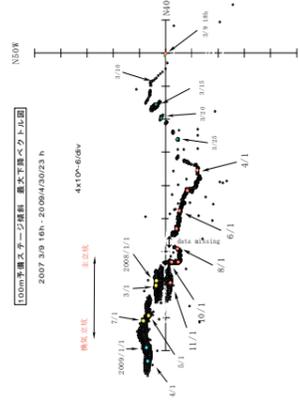


図6 STG100傾斜計最大下降ベクトル図。期間は図5と同じ。横軸を深度100mステージの走向 (N220° E)、縦軸を縦軸の所奥への方向 (N50° W = N310° E) とした。

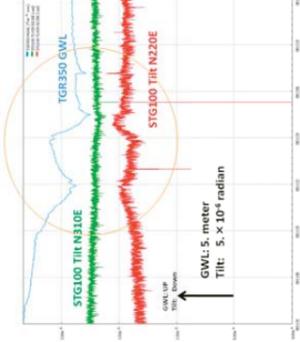


図7 STG100傾斜計データとTGR350の水位記録。期間2008年11月1日~12月20日

2008年12月より、深度200m ボーリング横坑 (換気立坑側) にある既存孔 (φ98mm, 深度19.53m; 土岐花崗岩中) を深度19mまでφ150mmに拡孔、深度19m~21.5m区間で掘削整備した (図8左図)。計器先端の深度を21.35mとして、新規開発した応力計 (図8右図) を同深度に埋設設置した。続いて、深度13.8mを計器先端となるよう傾斜計を設置し、平成21年3月19日より連続観測を開始した (観測点名: STG200)。また、孔口には深度10.5m付近からの約2リットル/分; 圧力約0.8MPaの湧水があるため、横坑内に流出しないよう密閉式孔口装置および高精度圧力計を設置し、間隙水圧 (深度0.0~14.0m区間) の連続観測を行っている。

2009年8月11日に発生した駿河湾の地震 (M6.5; 震央距離約110km) 前後の応力計データを図9に示す。明瞭な地球潮汐変化が観測出来ているとともに、地震時に水平応力計各成分が約2kPaの応力低下、垂直応力計が約4kPaの応力増加、その後、指数関数的な余効変化が観測されている。この余効変化は間隙水圧変化に一致しており、地震前8月11日5:04から地震後8月13日0:00までの主応力変化 (図10) は、北西 - 南東方向に最大主応力軸 (約9kPaの圧縮)、北東 - 南西方向に最小主応力軸 (約4kPaの圧縮)、最大せん断応力は北北西 - 南南東方向 (NNW断層; 図2の走行に一致) に約3kPa (左横ずれ) である。これらの変化は、揚水実験 (浅井・他, 2001; 石井, 2009) 時の戸狩地殻活動総合観測点350m孔で観測された主歪および最大せん断歪変化の方向と一致している。



図8 STG200のボアホールフロアワイヤール (11m以深) と応力計・傾斜計設置位置 (左図) と応力計 (右図)

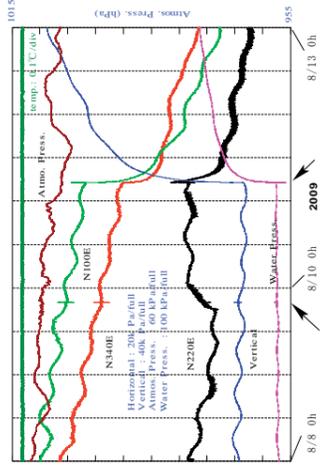


図9 STG200応力計 (N100E, N220E, N340E, Vertical) と間隙水圧 (Water Press)、気圧 (Atmo.Press) およびボアホール内温度 (temp) の各データ。2009年8月11日5:07に発生した駿河湾の地震 (M6.5; 図下の右矢印) に伴って変化が生じている。

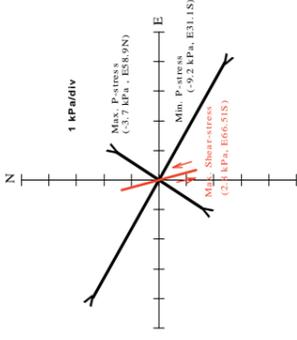


図10 期間2009年8月11日05:04から8月13日00:00間の主応力変化 (Max./Min P-stress) および最大せん断応力 (Max. Shear-stress)。

5. おわりに

地層科学研究における研究開発の成果については、処分事業と国による安全規制の両面を支えるわが国全体としての技術基盤の構築に資するため、学会誌等での論文発表や研究開発報告書の作成・公開、「情報・意見交換会」の開催等により、処分事業の各段階に先行してタイムリーに広く公開していく。平成 21 年度の「情報・意見交換会」には、大学、研究機関、企業をはじめ多くの方々に参加いただき、貴重なご意見等をいただいた。いただいたご意見等は、今後、研究開発計画の策定や「情報・意見交換会」を開催する際の参考にしたいと考えている。また、関係各位のさらなるご理解とご協力をお願いしたい。

謝辞

「平成 21 年度 東濃地科学センター 地層科学研究 情報・意見交換会」において、財団法人地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所の浅井康広様、石井紘様にポスター発表をお願いし、貴重な研究成果を報告いただいた。また、大学、研究機関、企業をはじめ多くの方々にご参加いただき、貴重なご意見等をいただいた。これらの全ての方々に深く感謝する次第である。

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
	アンペア毎メートル	A/m
濃度 ^(a)	モル毎立法メートル	mol/m ³
	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
	屈折率 ^(b)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

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

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, ビエネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化カタル	kat			s ⁻¹ mol

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

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘りのモーメント	パスカル秒	Pa s	m ¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角加速	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
角加速	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立法メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立法メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ¹ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
酵素活性化濃度	カタル毎立法メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

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

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min = 60 s
時	h	1 h = 60 min = 3600 s
日	d	1 d = 24 h = 86 400 s
度	°	1° = (π/180) rad
分	'	1' = (1/60)° = (π/10800) rad
秒	"	1" = (1/60)' = (π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L = 1 l = 1 dm ³ = 10 ³ cm ³ = 10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t = 10 ³ kg

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

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

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

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

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

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

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci = 3.7 × 10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58 × 10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad = 1 cGy = 10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem = 1 cSv = 10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ = 1 nT = 10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 f = 1 fm = 10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2 × 10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal = 4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ = 1 μm = 10 ⁻⁶ m

