

**「平成 28 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, 2016

(編) 西尾 和久 弥富 洋介

(Eds.) Kazuhisa NISHIO and Yosuke IYATOMI

バックエンド研究開発部門

東濃地科学センター

地層科学研究部

Geoscientific Research Department

Tono Geoscience Center

Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

February 2017

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2017

「平成 28 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
バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部

(編)西尾 和久*, 弥富 洋介

(2016 年 12 月 12 日受理)

国立研究開発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。

本報告書は, 平成28年10月3日に岐阜県瑞浪市で開催した「平成28年度 東濃地科学センター 地層科学研究 情報・意見交換会」で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, 2016

(Eds.) Kazuhisa NISHIO* and Yosuke IYATOMI

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

(Received December 12, 2016)

The Tono Geoscience Center (TGC) of Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has been conducting geoscientific study in order to establish a scientific and technological basis for the geological disposal of HLW. Technical information of the result on the geoscientific study conducted at TGC is provided at the annual Information and Opinion Exchange Conference on Geoscientific Study of TGC for exchanging opinions among researchers and engineers from universities, research organizations and private companies.

This document compiles the research presentations and posters of the conference in Mizunami on October 3, 2016.

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

* PESCO Co., Ltd.

目 次

1. 「情報・意見交換会」の概要.....	1
2. 調査研究発表資料.....	3
2.1 超深地層研究所計画	3
2.1.1 再冠水試験の現状.....	3
2.1.2 結晶質岩における物質移動モデル化技術の新展開 ―花崗岩中の空隙構造の分布に関する研究―	11
2.2 瑞浪超深地層研究所を活用した共同研究・施設利用	18
2.2.1 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 ―電力中央研究所・日本原子力研究開発機構共同研究―	18
2.3 地質環境の長期安定性に関する研究	27
2.3.1 土岐地球年代学研究所の現状.....	27
2.3.2 年代測定手法の高度化への挑戦 ―加速器質量分析装置における新検出手法の開発―	35
3. ポスターセッション発表資料.....	43
4. おわりに.....	75

Contents

1. Overview of the Information and Opinion Exchange Conference on Geoscientific Research	1
2. Presentations on research and development.....	3
2.1 Mizunami Underground Research Laboratory Project.....	3
2.1.1 Present status of the groundwater recovery experiment.....	3
2.1.2 New prospects of modeling methodology for the mass transport in crystalline rock – a study on the distribution of micropores in granitic rocks –.....	11
2.2 Collaboration studies with research organizations utilizing the Mizunami Underground Research Laboratory	18
2.2.1 Hydrogeological and mass transport study in and around the Mizunami Underground Research Laboratory – CRIEPI/JAEA collaborative study –	18
2.3 Research on geosphere stability for long-term isolation of radioactive waste	27
2.3.1 Current status of the Toki Research Institute of Isotope Geology and Geochronology	27
2.3.2 Interference nuclide classification method by accelerator mass spectrometry.....	35
3. Posters.....	43
4. Concluding remarks	75

This is a blank page.

1. 「情報・意見交換会」の概要

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)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整備していくため、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。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。平成28年度は、10月3日に岐阜県瑞浪市の「瑞浪市地域交流センターときわ」において開催した。また、10月4日には、瑞浪超深地層研究所の地上施設の見学会を開催した。

平成28年度の「情報・意見交換会」では、東濃地科学センターが進める地層科学研究のうち「超深地層研究所計画」について、原子力機構の機構改革¹⁾により提示した深地層の研究施設で行う必須の課題²⁾の一つである「坑道埋め戻し技術の開発」の一環として実施している再冠水試験の現状、および「物質移動モデル化技術の開発」の一環として実施している花崗岩中での物質移動現象の理解に関する研究成果について報告した。また、「地質環境の長期安定性に関する研究」について、土岐地球年代学研究所の現状および年代測定技術の高度化に関する研究成果を報告した。各研究分野における個別研究の成果については、ポスターセッションにおいて報告した。さらに、平成28年度は、東濃地科学センターの前身である原子燃料公社が昭和40年に「東濃探鉱事務所」を開設して50周年、昭和61年に地層科学研究を開始して30周年、平成8年に超深地層研究所計画を開始して20周年となる節目の年であることから、東濃地科学センターの50年のあゆみを併せて紹介した。表1-1に、平成28年度の「情報・意見交換会」のプログラムを示す。

表 1-1 「平成 28 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 28 年度 東濃地科学センター 地層科学研究 情報・意見交換会」 ー地層処分事業と安全規制を支える技術基盤の整備状況ー	
第 1 日目：10 月 3 日(月)	
1. 開会挨拶	13:10～13:15
2. 東濃地科学センターにおける研究概要及び 50 年の歩み	13:15～13:40
3. 成果の報告と今後の計画	
(1)超深地層研究所計画	
①再冠水試験の現状 (質疑) (発表者：笹尾 英嗣)	13:40～13:55 (5 分)
②結晶質岩における物質移動モデル化技術の新展開 ー花崗岩中の空隙構造の分布に関する研究ー (質疑) (発表者：石橋 正祐紀)	14:00～14:15 (5 分)
(2)瑞浪超深地層研究所を活用した共同研究・施設利用 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 ー電力中央研究所・日本原子力研究開発機構共同研究ー (質疑) (発表者：電力中央研究所 田中 靖治)	14:20～14:40 (5 分)
休憩	(10 分)
(3)地質環境の長期安定性に関する研究	
①土岐地球年代学研究所の現状 (発表者：石丸 恒存)	14:55～15:05
②年代測定手法の高度化への挑戦 ー加速器質量分析装置における新検出手法の開発ー (質疑) (発表者：藤田 奈津子)	15:05～15:25 (5 分)
4. ポスターセッション ー個別分野の研究成果ー	15:30～16:30
5. 全体質疑	16:30～16:45
6. 閉会挨拶	16:45～16:50
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)	17:15～19:00
第 2 日目：10 月 4 日(火)	
瑞浪超深地層研究所見学会	9:15～12:00

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構：日本原子力研究開発機構の改革計画 自己改革 ー「新生」へのみちー，平成25年9月26日，2013.
- 2) 日本原子力研究開発機構：日本原子力研究開発機構の改革計画に基づく「地層処分技術に関する研究開発」報告書ー今後の研究課題についてー(平成26年9月30日)，2014.

2. 調査研究発表資料

2.1 超深地層研究所計画

2.1.1 再冠水試験の現状

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター 地層科学研究部 結晶質岩地質環境研究グループ
笹尾 英嗣

(1)はじめに

超深地層研究所計画では、「坑道埋め戻し技術の開発」を必須の研究課題の一つに掲げている。その一環として深度500m研究アクセス北坑道において、坑道埋め戻し試験に先立って、坑道の一部を閉鎖し地下水により冠水させる「再冠水試験」を実施している。この試験は、地下施設の建設・操業により乱された地質環境の回復能力の例示と関連する技術の開発を目的として、坑道の掘削・維持管理により乱された地質環境特性の回復・定常化過程の知見を蓄積し、坑道閉鎖時の坑道・施設スケールでの地質環境特性の変化(回復過程)の観測・解析技術の開発、ならびに施設閉鎖後の地質環境の長期的変遷を推定する解析手法の開発を行うこととしている。また、観測技術として、無線や光給電を活用した遠隔モニタリング技術の開発を進めることとしている。

本報告では再冠水試験について、これまでに得られている結果のトピックスを紹介する。

(2)再冠水試験のこれまでの概要

再冠水試験は坑道の一部(以下、冠水坑道:幅5m, 高さ4.5m, 長さ約45m, 容積約900m³)を止水壁により閉鎖し坑道周辺の地下水により冠水させ、止水壁を含む冠水坑道内外の力学－水理－化学特性の変化過程を観測するとともに、関連するシミュレーション技術、モニタリング技術を構築するものである。その実施項目と現在までの状況は以下のように整理される。

- ・冠水坑道の掘削(～2013年)
- ・周辺モニタリング孔掘削, 岩盤変位計や水圧・水質観測装置など観測系の構築(～2014年)
- ・止水壁の建設, 坑道閉鎖前の地質環境特性の観測(～2015年)
- ・止水壁閉鎖, 地質環境特性変化の観測(2016年1月～現在)
- ・一部排水・再冠水による水圧回復過程の再現性確認, 化学条件の定常化過程の確認(今後)
- ・止水壁マンホールの開放, 冠水坑道内部・観測装置の状態確認, 坑道内試料の採取(今後)
- ・坑道埋め戻し試験計画の立案(今後)

(3)止水壁閉鎖とそれに伴う地質環境特性変化の概要

止水壁については、2回の機能確認試験を行った。1回目は2015年8月26日から止水壁手前の排水ピットに集められた坑道への湧水を冠水坑道内に供給し、ほぼ満水に達した9月10日に止水壁のエア抜き管を閉栓して、冠水坑道への自然湧水によって満水状態にした。この作業により、冠水坑道内の水圧は1.7MPa(全水頭でE.L.-130m程度)と急激に上昇したが、9月14日に止水壁から漏水が発生し水圧が

低下したため、試験を中止した。漏水箇所へのモルタル注入や止水壁内側(冠水坑道側)への防水樹脂塗装などの修復を行った上で、2回目の試験を行った。

2回目の試験は、2016年1月8日に排水ピットから冠水坑道への注水を開始、1月25日にエア抜き管を閉栓した。これにより、冠水坑道内の水圧は急激に上昇し、2月12日に3.1MPa(全水頭でE.L.20m程度)に達した。その後、止水壁及びその周囲からわずかな漏水が確認されたものの極端な水圧低下はなく、一定の水圧保持機能が発揮されていたため2月末に機能確認を終了した。なお、冠水坑道の水圧は、最大水圧到達後はわずかずつ低下が続いており、止水壁内や岩盤との境界部及び、冠水坑道周辺の岩盤に漏水に関与する水みちが形成されている可能性がある。

以下では、第2回機能確認試験以降、現在まで得られた地質環境特性の変化に関する主な知見を紹介する。なお、各々の観測結果については、ポスター発表を参照されたい。

冠水坑道周囲の岩盤変位:冠水坑道の周囲約10mの範囲において、坑道閉鎖後の岩盤変位の観測を行った結果、冠水坑道内の地下水の水圧上昇時に、一部の観測区間で岩盤が縮む方向の変位を検出した。その大きさは、坑道周辺岩盤の剛性から推定される変位とオーダー的に一致するため、冠水坑道内の水圧上昇により坑道壁面が押されたことによる変位と推定される。

冠水坑道閉鎖後の水圧回復:坑道掘削前の冠水坑道周辺の水圧は3.8～4.0MPa(全水頭でE.L.90～110m)程度であったが、坑道の掘削によって冠水坑道周辺の水圧は1.5MPa(全水頭でE.L.-150m)程度にまで低下した。一方で、冠水坑道掘削後も高い全水頭を維持している区間もあり、冠水坑道周辺の全水頭は不均質な分布であった。坑道冠水後の冠水坑道周辺の水圧は、冠水坑道内の水圧とともに上昇し、10日後には3.1～3.8MPa(全水頭でE.L.20～90m)程度にまで回復した。

冠水坑道内外の化学特性の変化:冠水坑道内の地下水は当初、大気に晒されていたため、冠水直後の地下水には酸素が溶存していたが、冠水直後から酸素濃度が減少し始め、約4か月後に検出限界(<0.02mg/L)となった。それと呼応して、地下水の酸化還元電位も冠水坑道掘削前の値と同等の-180mVまで低下し、約4か月前後で還元環境が回復することが確認された。一方、pHは徐々に上昇し坑道閉鎖6か月後の時点で約10のアルカリ状態となっている。これは冠水坑道壁面の吹き付けコンクリートに含まれるセメント材料の影響と考えられる。

冠水坑道周辺の物質移動特性:冠水坑道及びその周辺の地下水やコロイドを対象として、放射性元素のアナログ元素となる希土類元素の分析と熱力学解析を行った。冠水坑道内の地下水は、坑道周辺の地下水に比べ希土類元素濃度が有意に低下しており、吹き付けコンクリート中のポルトランドイトがカルサイトに変質する過程で陽イオン態の溶存希土類元素を共沈させ、地下水から除去していると推察された。

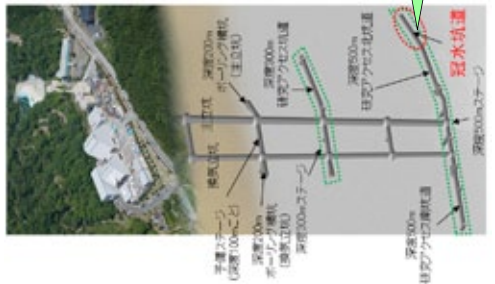
シミュレーション技術:冠水坑道閉鎖後、坑道内及び周辺岩盤内で観測された地下水の水圧及び水質の回復挙動に基づき、周辺岩盤の水理学的領域区分と地球化学的領域区分を推定した。それらに基づき岩盤中の水みちとなる割れ目分布を概念化した。今後、この割れ目分布の概念を基礎情報として冠水坑道周辺岩盤における割れ目の不均質性を考慮したモデル構築・解析を実施する。なお、シミュレーション技術については、国際的な専門家会議(DECOVALEX 2019)により評価・確認していく。

(4) 今後

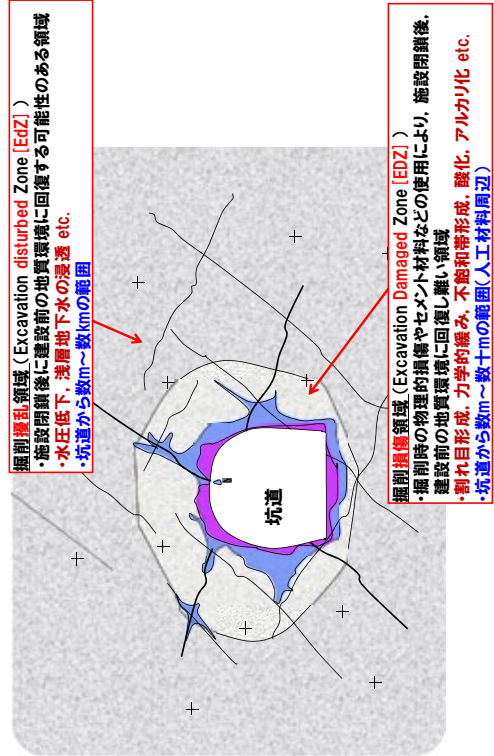
止水壁及びその周囲の漏水状態の観察を継続しつつ、冠水坑道の地下水の一部排水と再冠水を行い、水圧回復に関わる現象の再現性を確認する。また、セメント材料による地下水のアルカリ化、セメント沈着などによる割れ目の透水性変化について解析を行う。その後、止水壁のマンホールを開放し、冠水坑道内の吹き付けコンクリートの変質状況、観測装置類の状況確認を行う。加えて、今後の坑道埋め戻し試験の計画立案を行う予定である。

再冠水試験とは

- 地下施設の建設・操業により乱された地質環境の回復能力の例示と関連する技術の開発
 - ✓ 坑道の掘削・掘削管理により乱された地質環境特性の回復・定常化過程の知見を蓄積
 - ✓ 坑道閉鎖時の坑道・施設スケールでの地質環境特性の変化(回復過程)の観測・解析技術、施設閉鎖後の地質環境の長期的変遷を推定する解析手法の開発



才力閉鎖後の地域環境持続性のシナリオ



超深地層研究所計画

— 再冠水試験の現状 —

平成28年10月3日

東濃地科学センター
地層科学研究部 結晶質岩地質環境研究グループ
笹尾 英嗣

再冠水試験とは

再冠水試験に係るポスター発表のリスト

研究坑道の冠水に伴う岩盤変位

研究坑道の冠水に伴う地下水の水圧変化

研究坑道の冠水に伴う地下水の水質変化

研究坑道周辺岩盤における割れ目のモデル化

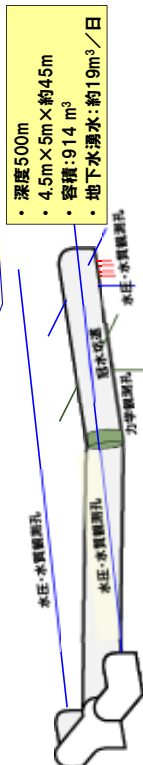
止水壁の機能確認について

閉鎖環境での試験研究

(冠水坑道における再冠水試験)

坑道閉鎖時、閉鎖後の地質環境変化の基礎的知見の取得

- ・冠水前後の岩盤変位、力学的損傷領域や非損傷領域の応力再配分
- ・坑道周辺(健康部・割れ目部)の水圧低下と回復、人工材料充填に伴う割れ目の透水性変化、閉鎖後の坑道を横切る地下水流束
- ・酸化環境から還元環境への回復(酸化還元緩衝能力)、地下水のアルカリ化
- ・坑道から岩盤への物質移動(水みちの分布、コロイド/有機物、微生物など)



施工・観測・解析技術の構築

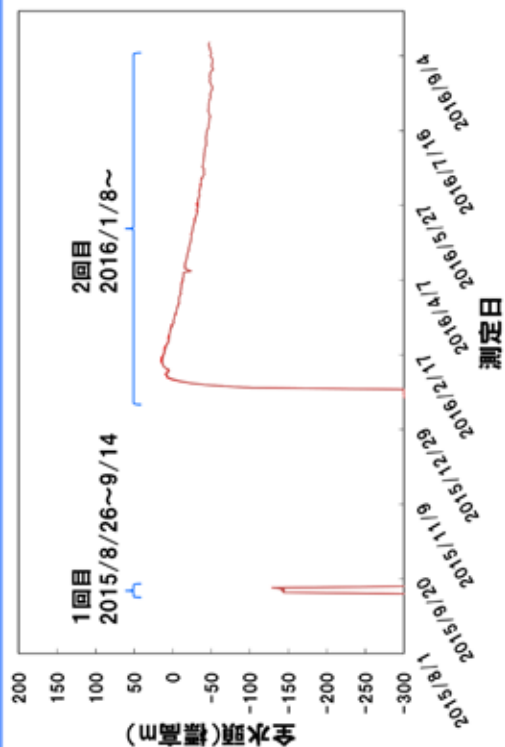
- ・閉鎖技術: 止水プラグによる岩盤損傷領域(EDZ)の止水技術
- ・埋め戻し技術: 埋め戻し材料の候補となるセメントや粘土材料の物性確認や施工技術
- ・シミュレーション技術: 力学・水理・化学・微生物・運成解析技術
- ・モニタリング技術: 無線式データ通信技術や光給電技術など

再冠水試験の流れ

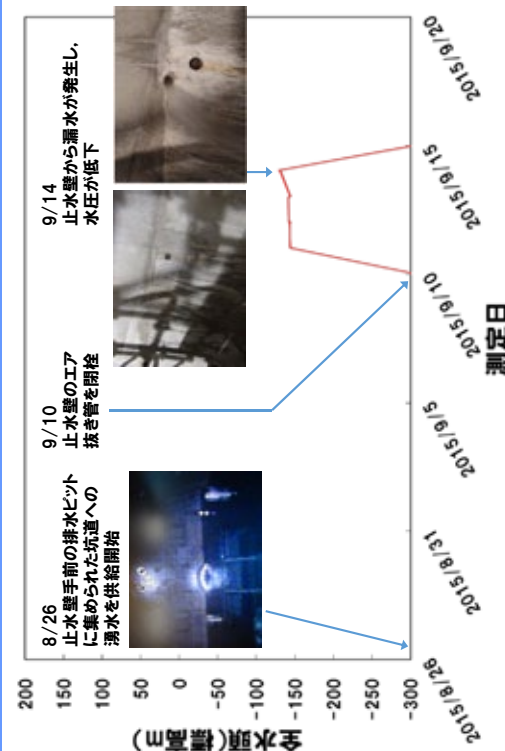


*黄色網掛けは終了した項目

再冠水試験の経緯(冠水坑道内の水圧変化)



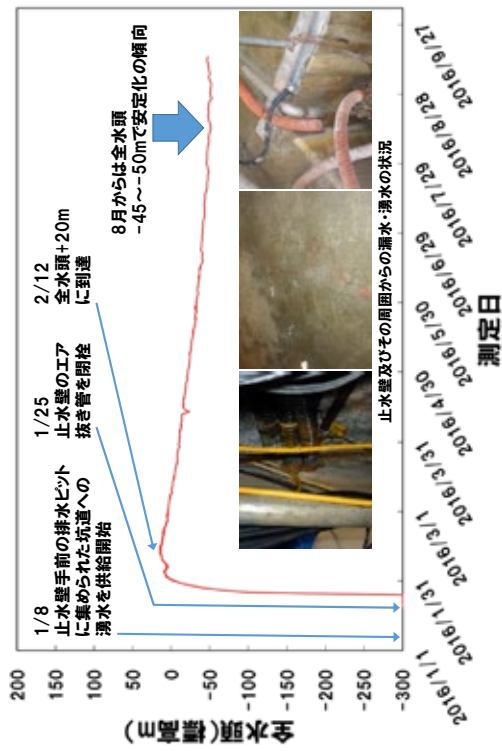
再冠水試験の経緯(1回目)



情報・意見交換会
2016

JAEA 9

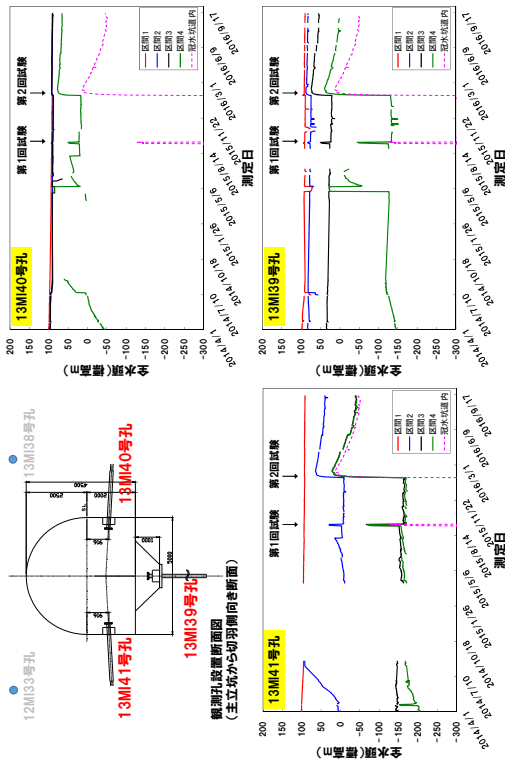
再冠水試験の経緯(2回目)



情報・意見交換会
2016

JAEA 10

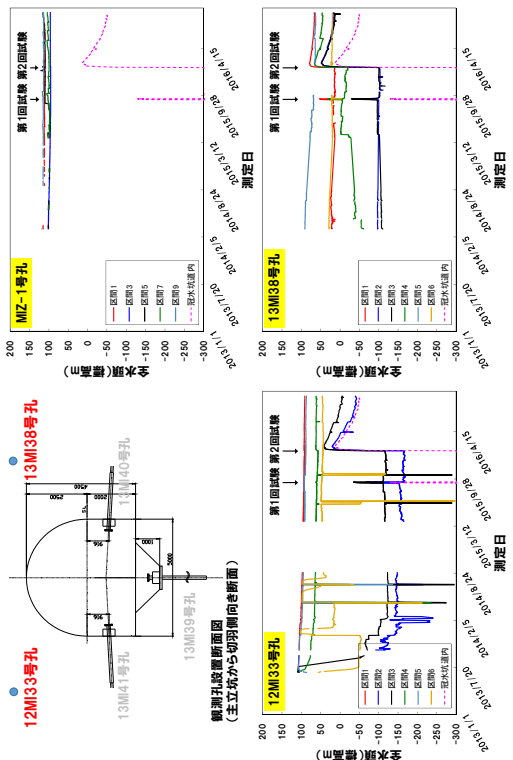
再冠水に伴う水圧の変化



情報・意見交換会
2016

JAEA 11

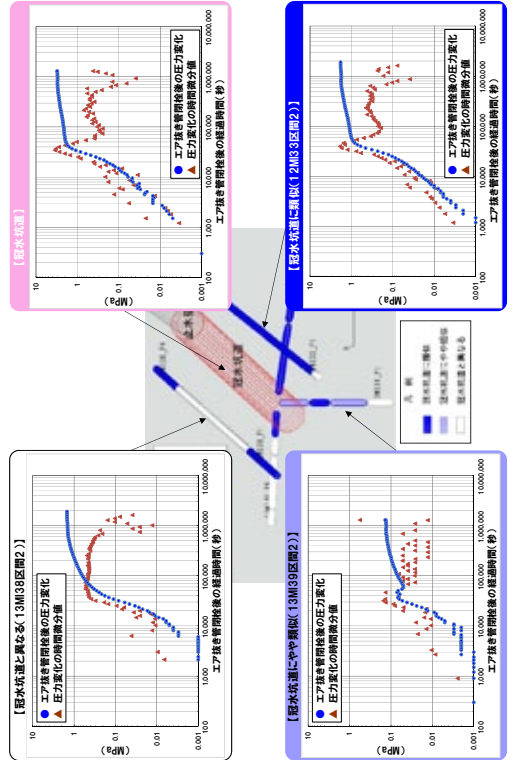
再冠水に伴う水圧の変化



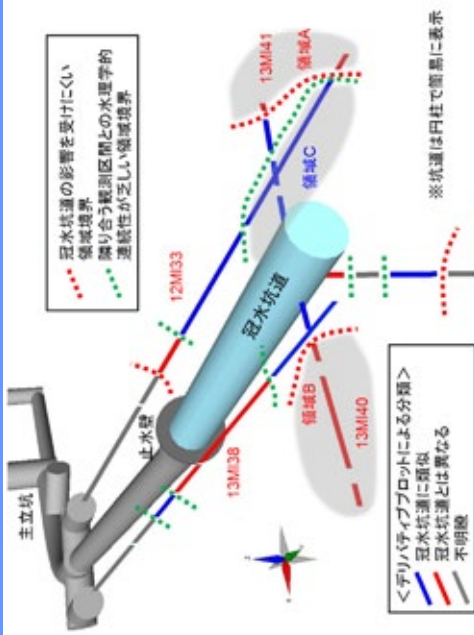
情報・意見交換会
2016

JAEA 12

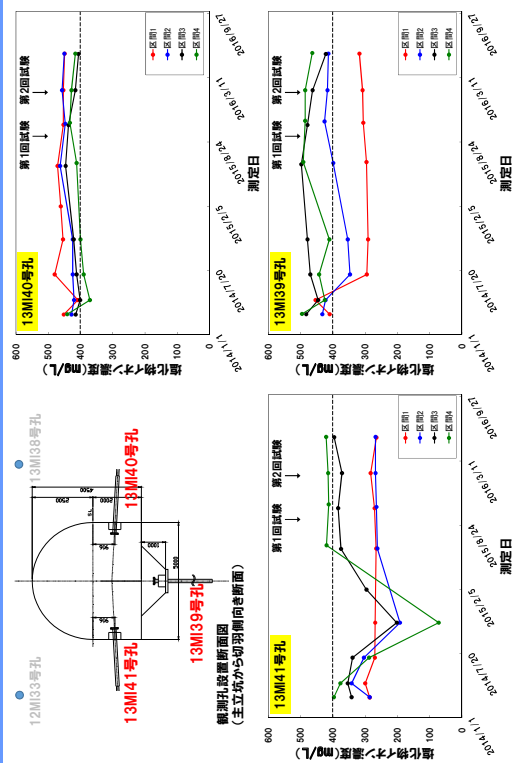
水圧の変化に基づくモデル化



水圧の変化に基づくモデル化

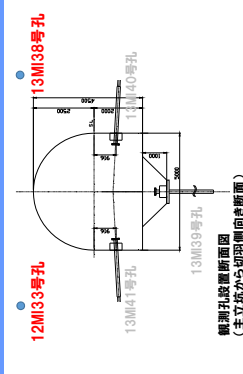


再冠水に伴う水質の変化

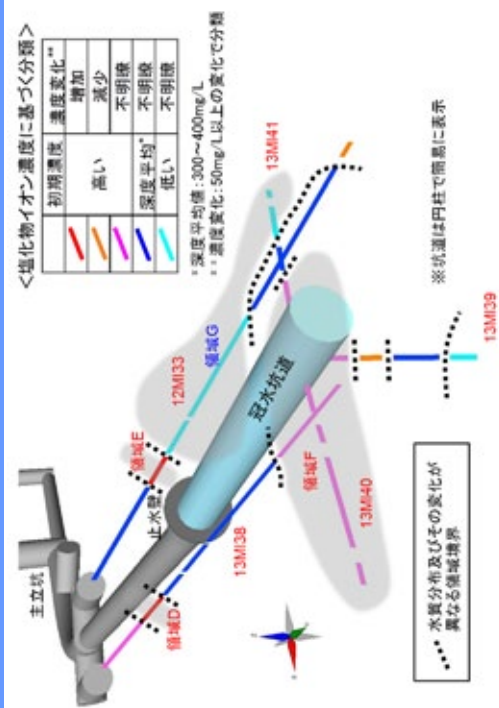


再冠水に伴う水質の変化

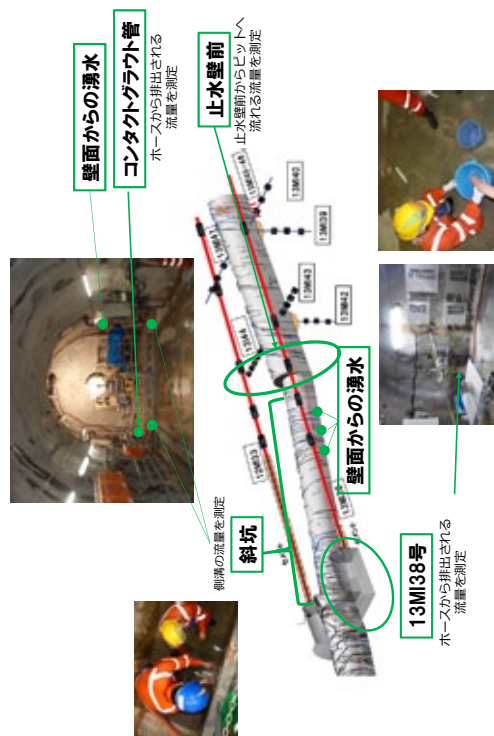
- ✓ 塩化物イオンの初期濃度は約400mg/Lであり、それより低い濃度は浅部地下水の混入を、高い濃度は深部地下水の混入を示す。



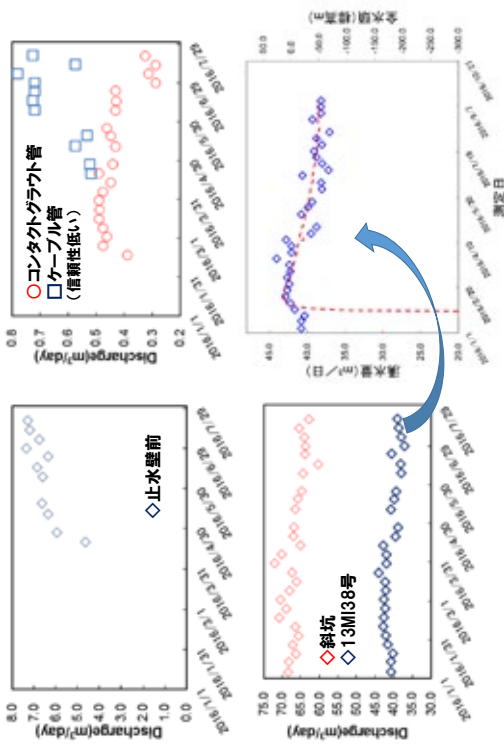
水質の変化に基づくモデル化



冠水坑道周辺での湧水量の測定



冠水坑道周辺での湧水量の測定



今後の予定

- 止水壁及びその周囲の漏水状態の観測を継続
- 冠水坑道の地下水の一部排水と再冠水を行い、水圧回復に関わる現象の再現性を確認
- セメント材料による地下水のアルカリ化、セメント流着などによる割れ目の透水性変化について解析
- その後、止水壁のマンホールを開放し、冠水坑道内の吹き付けコンクリートの変質状況、観測装置類の状況を確認
- シミュレーション技術については、国際的な専門家会議により評価・確認（ヨーロッパで実施されているDECOVALEXに課題として採択）

超深地層研究所計画に係るポスター発表のリスト（再冠水試験以外）

- 超深地層研究所計画：地質環境特性の長期変遷解析技術に関する研究
 ー地質構造モデルの構築と主立坑断層近傍の割れ目の特徴ー
- 超深地層研究所計画：地下坑道における工学的対策技術の開発ーボストグラウトの施工結果と評価ー
- 鹿島建設と原子力機構の共同研究ー地中レーダによる坑道周辺岩盤の物理特性評価に関する研究ー
- 清水建設と原子力機構の共同研究ー逆解析を用いた地下水流動のモデル化・解析に関する研究ー

2.1.2 結晶質岩における物質移動モデル化技術の新展開 ―花崗岩中の空隙構造の分布に関する研究―

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター 地層科学研究部 結晶質岩地質環境研究グループ
石橋 正祐紀

(1)はじめに

超深地層研究所計画では、「物質移動モデル化技術の開発」の一環として地下水中の溶存物質の地下での移動現象を調査・解析する技術の開発を進めている。地下水中の溶存物質は、割れ目や断層などのマクロスケールの構造を移行しつつ、割れ目周辺の母岩に対してマイクロクラックなどの顕微鏡等で確認できるマイクロスケールの空隙を介して拡散(マトリクス拡散)することが知られている¹⁾。これまでに、釜石鉱山での調査研究などにより、割れ目周辺が選択的に熱水変質を被った花崗岩では、熱水変質に伴い母岩中の空隙が発達しマトリクス拡散が生じやすいことが知られている^(例えば2)・4)。しかし、土岐花崗岩に着目すると、透水性割れ目の周辺は80%程度が健岩部(肉眼観察において変質が認められない岩盤)であり、健岩部における知見が重要と考えられる。そこで、健岩部を対象として岩石薄片の観察や拡散試験を行った結果、斜長石内部に選択的に空隙が発達しており、この空隙がマトリクス拡散に寄与している可能性の高いことが明らかになった。本報告では、空隙構造の分布に関する研究について、実施内容とこれまでに得られている成果を紹介する。

(2)実施内容

本研究では、2015年度までに実施したトレーサー(蛍光染料:ウラニン)を用いた拡散試験⁵⁾(200mm×300mm×300mmの岩石ブロックを用いた拡散試験(ブロック試験)および直径25mm、厚さ5mm程度の円盤型試料を用いた透過拡散試験)に加えて、深度300mおよび500mの研究坑道で採取した土岐花崗岩の健岩部の試料(以下、健岩試料;11試料)を対象として蛍光染料を含む接着剤を用いて岩石薄片を作製し、偏光顕微鏡および実体蛍光顕微鏡を用いた観察、走査型X線分析顕微鏡およびエネルギー分散型X線分光器付きの走査電子顕微鏡(SEM-EDS)を用いた分析を実施した。偏光顕微鏡観察および走査型X線分析顕微鏡を用いた分析は、鉱物の分布等を把握するために実施した。実体蛍光顕微鏡では、薄片作製で用いた蛍光染料を発光させることで、岩石薄片中の空隙の分布の把握および薄片全体に占める空隙の割合(P_{2D})の算出を行った。また、算出した P_{2D} と実効拡散係数(De)との関係性について検討した。SEM-EDSを用いた分析では、岩石薄片中に認められた空隙の表面構造観察および空隙周辺の元素分布を把握し、観察された空隙の成因について検討した。

(3)これまでの成果

健岩試料中には既存研究で指摘されているマイクロクラック(粒界亀裂, 粒内亀裂, 粒間亀裂)に加えて、選択的に斜長石内部に空隙が発達していることが認められた。この斜長石内部の空隙に接する斜長石の表面は溶解により形成されたような産状を示し、表面近傍の1mm未満の領域でAlやSiなどの濃度が低下している(溶脱している)。 P_{2D} は、薄片ごとにばらつきがあるが、約1.4～5.6%であり、斜長石中の

P_{2D}は約30～50%で他の鉱物に比較して最も空隙が発達していることが確認された。本研究で観察した11試料では、黒雲母の一部の緑泥石化および一部の斜長石のイライト化が認められている。この黒雲母の一部の緑泥石化は花崗岩マグマが固結した際の残液によって、既に固結した花崗岩が初生的に弱い変質を被った結果である⁶⁾。すなわち、斜長石中に発達する空隙は初生的な変質によって形成されたと考えられる。

ブロック試験に供した試料を切断し紫外光で観察した結果、トレーサー物質(ウラン)は主に斜長石中に分布しており、斜長石内部の空隙はマトリクス拡散経路の一部として機能している可能性が高い⁷⁾。また、P_{2D}とDeは、相関係数が約0.9で強い正の相関があることが明らかとなった。すなわち、観察された空隙の多くはマトリクス拡散経路として機能している可能性が高いと考えられる。

我が国の様々な花崗岩が初生的な変質を受けていることは以前から指摘されていた^{例えば8), 9)}。仮に、我が国の花崗岩で初生的な変質によって斜長石内部の空隙が形成されることが一般的な性質であれば、海外の花崗岩に比べてマトリクス拡散に伴う物質移動の遅延効果が大きい可能性があると考えられる。

(4) 今後の課題

本研究により、斜長石中の空隙が健岩部におけるマトリクス拡散経路として機能する可能性が示唆された。しかし、実際の拡散経路すべてを把握できていないことから、今後、収着性物質などを用いた透過拡散試験を行い、物質移動経路を把握する必要がある。また、我が国の他の花崗岩体における空隙の有無やその分布に関する検討、岩体中の空隙分布と断層などの地質構造との関係性に関する検討を進めることによって、我が国の花崗岩における物質移動現象に関する理解が深まるものと期待される。

参考文献

- 1) Neretnieks, I.: Diffusion in the rock matrix: An important factor in radionuclide retardation?, *Journal of Geophysical Research*, 85, pp. 4379-4397, 1982.
- 2) Japan Nuclear Cycle Development Institute: Proceedings of an international workshop for the Kamaishi in situ experiments, JNC TN7400 99-007, 1998, 142p.
- 3) 核燃料サイクル開発機構: 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次とりまとめ- 分冊1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021, 1999, 559p.
- 4) Yoshida, H. et al.: Retardation capacity of altered granitic rock distributed along fractured and faulted zones in the orogenic belt of Japan, *Engineering Geology*, 106, pp. 116-122, 2009.
- 5) 西尾和久, 弥富洋介: 「平成27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 2015-041, 2016, 71p.
- 6) Yuguchi, T. et al.: Hydrothermal chloritization processes from biotite in the Toki granite, Central Japan: Temporal variations of the compositions of hydrothermal fluids associated with chloritization, *American Mineralogist*, 100, 2015, pp.1134-1152.
- 7) 石橋正祐紀ほか: 深部結晶質岩マトリクス部における微小移行経路と元素拡散現象の特徴, 原子力バックエンド研究, Vol.23, No.2, 2016, pp.121-130.
- 8) 藤本光一郎: 鉱物粒界での水/岩石反応から見た深部地熱系, *地質ニュース*, 447, 1994,

pp. 21-25.

- 9) 吉田英一ほか: 地下花崗岩体の変質とその形態- 産総研岡山応力測定用深部花崗岩コア試料の変質を例に-, 応用地質, 49, 2008, pp.256-265.

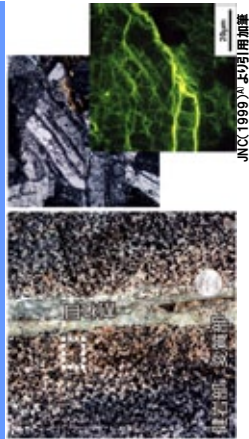
結晶質岩における物質移動モデル化技術の新展開 — 花崗岩中の空隙構造の分布に関する研究 —

平成28年10月3日

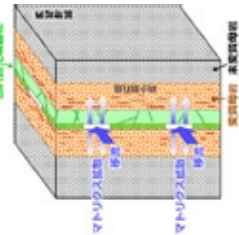
東濃地科学センター
地層科学研究部 結晶質岩地質環境研究グループ
石橋 正祐 氏

花崗岩中の空隙構造に関する既存研究

- マトリクス拡散は母岩中の空隙が多いと促進
- 釜石原位試験場で実施された調査研究の結果、熱水変質を被る割れ目は変質母岩中の空隙が発達し、マトリクス拡散が促進^{A)}



JNC(1999)^{A)}より引用加筆

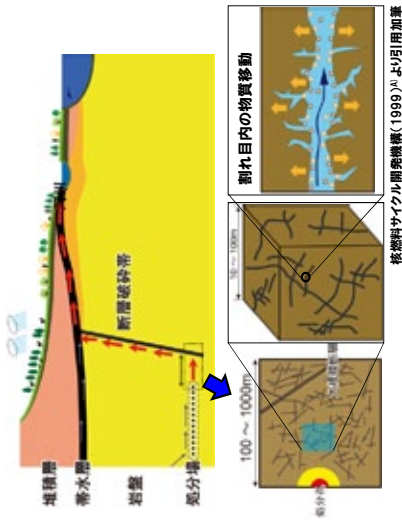


JNC(1999)^{A)}より引用加筆

A) JNC, JNC TN7400 99-007, pp.67-76, 1999.

地下環境中における物質移動

- 地下水中に溶けた物質は、割れ目を移行しながら、母岩中のマイクロスケールの空隙に拡散（マトリクス拡散）
⇒マトリクス拡散により物質の移動が遲延



核燃料サイクル開発機構(1999)^{A)}より引用加筆

A) 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-021, 1999.

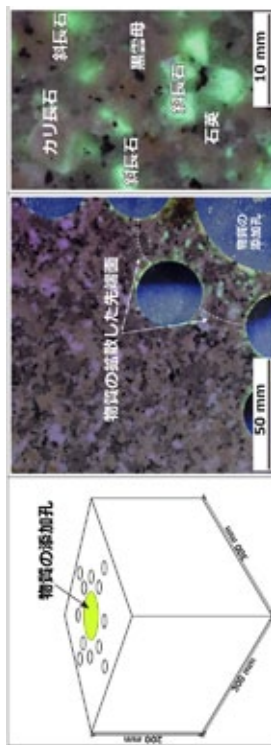
土岐花崗岩における湧水割れ目の周辺母岩

- 湧水割れ目のうち、周辺母岩が肉眼観察で変質を被る割れ目は、300mで約17%、500mで19%程度
⇒湧水割れ目の周辺母岩のうち約80%は変質を被らない**健全部**
⇒岩体内の多くを占める健全部の知見の拡充が重要



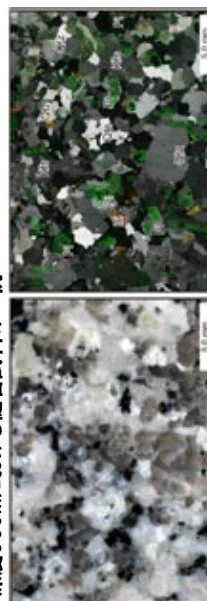
健岩部におけるマトリクス拡散の可能性

- 2015年度までに実施した、拡散試験(トレーサー物質:ウラン)に使用した岩石ブロックを切断し、紫外光で観察した結果
 - ・ 健岩においてもウランが拡散していることを確認
 - ・ ウランの蛍光は主に斜長石中で確認
- ⇒ **斜長石が主なマトリクス拡散経路**として機能している可能性有り

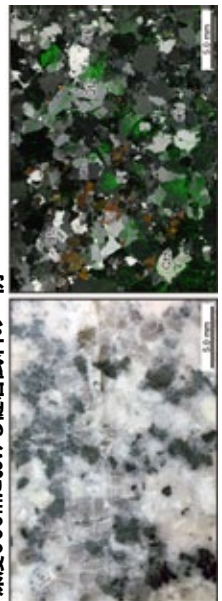


使用した健岩試料と空隙構造の観察結果

深度300mmにおける健岩試料の一例

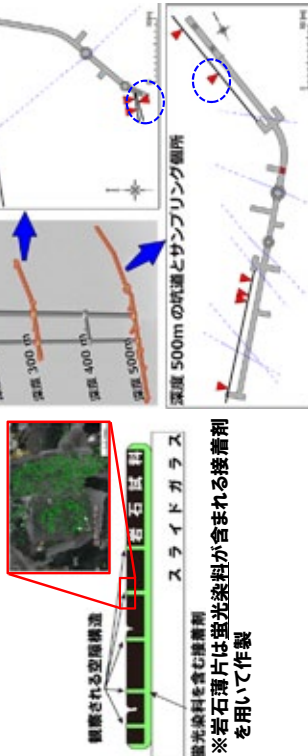


深度500mmにおける健岩試料の一例



健岩試料中の空隙分布を把握するための実施内容

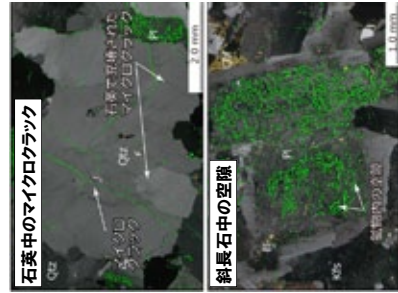
- 偏光顕微鏡観察
- 実体蛍光顕微鏡観察
- 走査型X線分析顕微鏡分析
- SEM-EDS観察・分析



観察された空隙とその割合

- 健岩中の空隙として、以下を確認
 - ・ マイクロクラック
 - ・ **斜長石中に発達する空隙**
- 薄片画像に基づく空隙の割合 (P_{2D})は1.4~5.6%

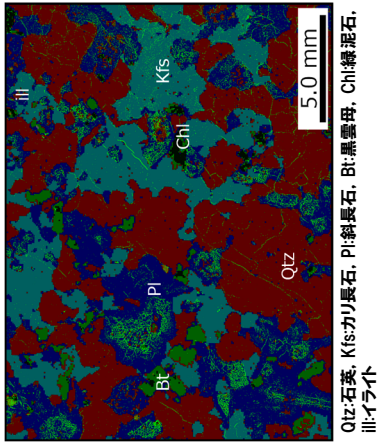
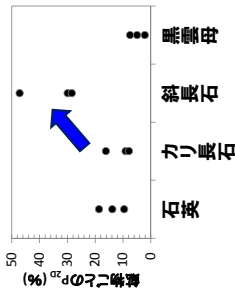
$$P_{2D} = \frac{\text{空隙(蛍光箇所)のピクセル数}}{\text{薄片全体のピクセル数}}$$



Qtz:石英, Kfs:カリ長石, Pl:斜長石,
Bt:黒雲母, Chl:緑泥石, Il:イライト

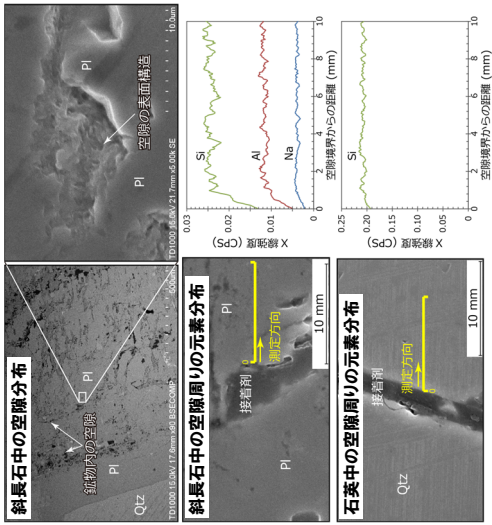
観察された空隙と鉱物種の関係

- 走査型X線分析顕微鏡で取得した元素分布図に基づき鉱物分布図を作成
- 主要鉱物に着目すると、 P_{2D} は斜長石で最も高い



斜長石中の空隙の特徴

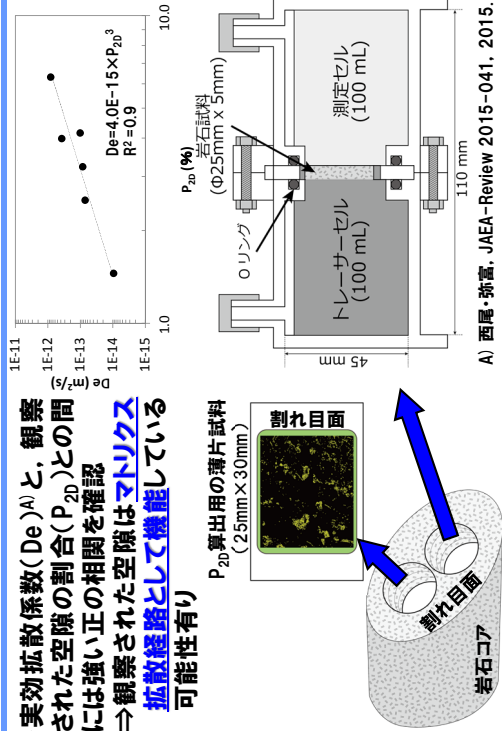
- 斜長石中の空隙の表面は、溶解したような産状
- 斜長石の空隙周りでは、元素が1mm以内の領域で低下(溶脱)



※ 石英中の空隙周りでは、元素の溶脱はない

観察された空隙と物質移動特性との関係

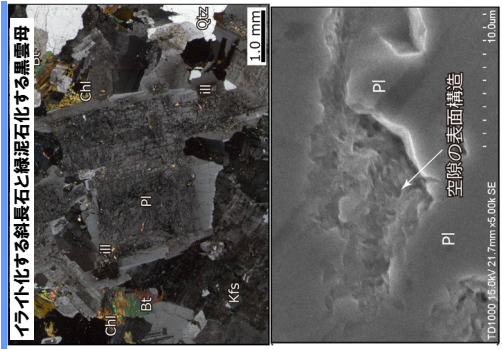
- 実効拡散係数(De)^{A)}と、観察された空隙の割合(P_{2D})との間には強い正の相関を確認
- ⇒ 観察された空隙はマトリクス拡散経路として機能している可能性有り



A) 西尾・弥富, JAEA-Review 2015-041, 2015.

考察:斜長石中の空隙の成因

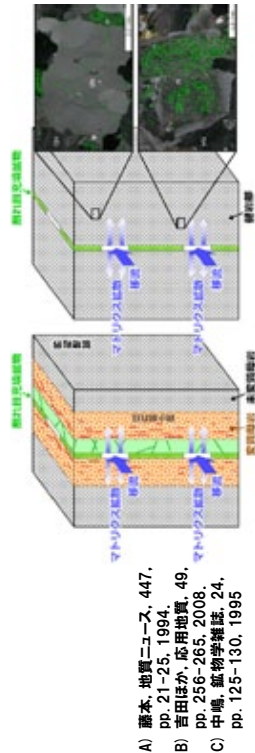
- 土岐花崗岩では、数m区間に割れ目が一本もない母岩中でも、黒雲母の一部の緑泥石化や斜長石の伊利石化が見られる
- ⇒ 花崗岩マグマが固化した際に生じる熱水に伴う熱水変質(初生的変質)で形成(A)~(C)など
- 斜長石内部の空隙の表面は、溶解で形成された産状を示し、空隙周辺では元素が溶脱
- ⇒ 斜長石内部の空隙は初生的変質で形成



- A) 西本ほか, 応用地質, 49, pp.94-104, 2008.
- B) 石橋ほか, 応用地質, 55, pp.156-165, 2014.
- C) Yuguchi et al., American Mineralogist, 100, pp. 1134-1152, 2015.
- D) 石橋ほか, 原子力バックエンド研究, vol.23, no.2, 2016, pp.121-130.

考察：他の岩体での斜長石中の空隙形成の可能性

- > 初生的変質は、茨城県の稲田花崗岩、岩手県の葛根田花崗岩や岡山県の方成花崗岩など国内の他の岩体でも報告A)～C)など
- ⇒ 国内の他の岩体でも健岩部で斜長石中の空隙が形成(マトリクス拡散経路が増加している可能性有り)
- ⇒ 我が国の花崗岩体は、初生変質の影響で健岩部でもマトリクス拡散による物質移動の遅延が期待できる可能性有り



- A) 藤本, 地質ニュース, 447, pp. 21～25, 1994.
B) 吉田ほか, 応用地質, 49, pp. 256～265, 2008.
C) 中嶋, 鉱物学雑誌, 24, pp. 125～130, 1995

JNC(1999)より引用加筆

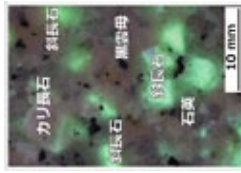
まとめと今後の課題

【まとめ】

- > 健岩部を対象として物質の移動経路について検討した結果,
 - ・初生的変質により斜長石中に空隙が発達
 - ・斜長石中の空隙はマトリクス拡散経路として機能する可能性有り
- > 初生的変質による斜長石中の空隙形成が一般的性質であれば, 我が国の花崗岩は健岩部でもマトリクス拡散に伴う物質移動の遅延効果が期待できる可能性が示唆。

【今後の課題】

- > 物質移動経路の把握
- > 我が国の花崗岩体中の空隙の分布の把握
- > 岩体中の空隙と地質構造との関係性の有無の把握
 - ⇒ 我が国の花崗岩中の物質移動現象の理解が深まると期待



2.2 瑞浪超深地層研究所を活用した共同研究・施設利用

2.2.1 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 ―電力中央研究所・日本原子力研究開発機構共同研究―

一般財団法人 電力中央研究所 地球工学研究所 バックエンド研究センター
田中 靖治

(1)はじめに

電力中央研究所(電中研)と日本原子力研究開発機構(原子力機構)は、以下の2つのテーマについて共同研究を実施してきている。

①地下水年代調査および評価技術の開発

②物質移動に関する調査および評価技術の開発

①については、瑞浪超深地層研究所用地およびその周辺において、地下水中の放射性同位体(^{14}C など)や安定同位体(^4He など)といった複数の指標を用いた年代測定を行い、それらの適用性を評価してきた。②については、瑞浪超深地層研究所研究坑道において、ボーリング孔を利用した原位置物質移動試験装置の適用性の確認などの物質移動特性の評価技術の構築を進めてきた。

本報告では、②物質移動に関する調査および評価技術の開発について、これまでの実施内容と主な成果について紹介する。

(2)目的

物質移動に関する調査および評価技術の開発の目的は、物質の移動に寄与する地質環境特性を対象として、そこで生じる物質移動に関する現象の把握と、物質移動解析に必要となる入力パラメータ(収着・拡散係数や間隙率など)を取得する体系的な調査技術を構築することである。本共同研究では、特に、数mスケールの岩盤規模を対象として物質移動に関する研究を実施する。

(3)実施内容

1) 試験場の地質環境調査

岩盤中の割れ目の分布や透水性などを把握するために、深度300mボーリング横坑および深度500m研究アクセス南坑道125m計測横坑においてボーリング調査を実施した。ボーリング調査においては、コア観察、ボアホールテレビ観察、フローメーター検層、透水試験、ポイント希釈試験¹⁾を実施した後に、間隙水圧計測装置を設置しモニタリングを実施している。ボーリング孔掘削中には、近接するボーリング孔において間隙水圧の応答をモニタリングし、割れ目の連続性の有無を把握した。

2) 原位置物質移動試験

上述の割れ目の連続性を確認した後に、単孔および孔間での物質移動試験を実施した。物質移動試験では、これまでに開発してきた試験装置の適用性を確認するとともに、注水・揚水流量などの条件を変え、試験結果への影響を評価した。また、試験結果から、物質移動解析に必要となる入力パラメータの推定を試みた。

(4) 主な成果

1) 試験場の地質環境調査

深度300mボーリング横坑においては5孔、深度500m研究アクセス南坑道では2孔のボーリングを掘削して地質環境調査を実施し、物質移動試験を実施する割れ目の分布などの地質学的特性および水理学的特性を把握した。

深度300mのボーリング孔では、割れ目頻度が1mあたり約7.4本で、NW走向の高傾斜の割れ目が卓越していた。透水量係数は $10^{-9} \sim 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ の範囲であり、毎分180L程度の湧水を伴う割れ目も確認された。割れ目の連続性については、ボーリング孔掘削中に近接するボーリング孔の複数の区間において水圧の応答が確認され、割れ目がネットワーク状に分布しているものと推定された。

深度500mのボーリング孔では、割れ目頻度は1mあたり約4.3本で、NW走向とNE走向の高傾斜の割れ目が卓越していたが、深度300mで多く見られた水平の割れ目が認められなかった。透水量係数は $10^{-9} \sim 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ の範囲であり、湧水量は、2孔とも孔全体で4～5リットル程度であった。ボーリング孔掘削中に隣接するボーリング孔では単一の区間で水圧の応答が計測されることが多かった。

2) 原位置物質移動試験

これまでに、深度300mのボーリング孔において試験を実施した。

① 試験装置の適用性確認

電中研が開発したトレーサー試験装置は、以下の特徴がある。

- ・パッカー部分に蛍光濃度センサーを組み込み、ボーリング孔内で蛍光染料の濃度が計測可能
- ・トレーサーの注入口をパッカーと一体化することにより、試験区間の体積を減らし、トレーサー濃度の偏りを防止

深度300mのボーリング孔で試験に適用した結果、蛍光濃度センサーの出力不足、試験孔に沿った地下水流れの発生などの不具合が確認されたものの、装置の改良を行った結果、原位置試験に適用できるようになった。

② トレーサー試験

非収着性トレーサーとして蛍光トレーサーのウラニン、アミノG酸、重水素、ヨウ素を、収着性トレーサーとしてルビジウムとバリウムを用いて、単孔と孔間でのトレーサー試験を実施した。単孔トレーサー試験²⁾では、一つのボーリング孔でトレーサー溶液の注入および回収を行うため、収着性トレーサーは非収着性トレーサーに比べて回収濃度は低いものの、回収の時間の遅れはあまり認められなかった。一方、孔間トレーサー試験では、収着性トレーサーの回収濃度は低く、顕著な時間遅れが確認された。また、試験結果から数値シミュレーションにより、試験対象割れ目の開口幅や分散長、収着係数など、物質移動解析に必要な入力パラメータを推定することができた。

(5) まとめと今後の予定

電中研・原子力機構共同研究として、物質移動に関する調査および評価技術の開発を実施した。今後、深度500mにおいてボーリング調査および原位置物質移動試験を実施し、その結果を取りまとめて調査および評価技術の信頼性を向上させていく。

本研究は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「岩盤中地下水移行評価確証技術開発」³⁾の一部として実施した。

参考文献

- 1) Halevy, E. et al.: Borehole dilution techniques – a critical review, *Isotopes in Hydrology, Proceedings of a Symposium on Isotopes in Hydrology*, IAEA, 1967, pp.531-564.
- 2) Nordqvist, R. et al.: Single-well injection-withdrawal tests (SWIW). Literature review and scoping calculations for homogeneous crystalline bedrock conditions, SKB R-02-34, 2002.
- 3) 電力中央研究所: 平成27年度地層処分技術調査等事業 (岩盤中地下水移行評価確証技術開発) – 岩盤中物質移行特性評価技術の確証 – 報告書, 2016.

瑞浪超深地層研究所を活用した共同研究・施設利用 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 - 電力中央研究所・日本原子力研究開発機構共同研究 -

平成28年10月3日

(一財) 電力中央研究所
地球工学研究所 バックエンド研究センター
田中 靖治

物質移動研究の目的

物質移動に関する調査および評価技術の開発の目的は、物質の移動に寄与する地質環境特性を対象として、そこで生じる物質移動に関する現象の把握と、物質移動解析に必要な入力パラメータ(収着・拡散係数や間隙率など)を取得する体系的な調査技術を構築することである。

本共同研究では、特に、数mスケールの岩盤規模を対象として物質移動に関する研究を実施する。

電力中央研究所と日本原子力研究開発機構の共同研究

電力中央研究所(電中研)と日本原子力研究開発機構(原子力機構)は、以下の2つのテーマについて共同研究を実施してきている。

①地下水年代調査および評価技術の開発

瑞浪超深地層研究所用地およびその周辺において、地下水中の放射性同位体(^{14}C など)や安定同位体(^4He など)といった種数の指標を用いた年代測定を行い、それらの適用性を評価してきた。

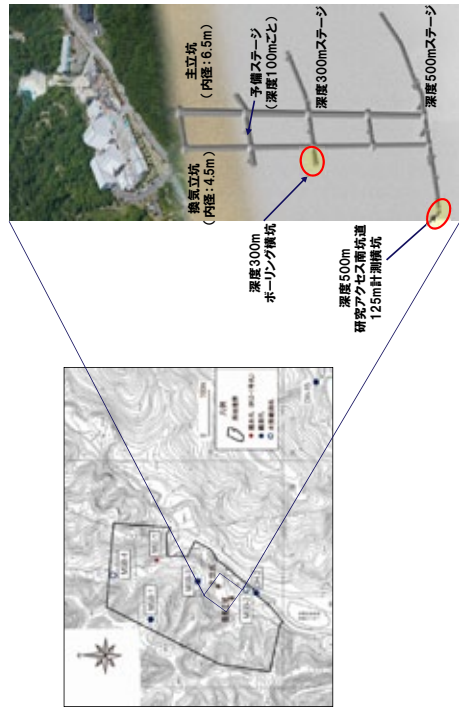
②物質移動に関する調査および評価技術の開発

瑞浪超深地層研究所研究坑道において、ボーリング孔を利用して、原位置物質移動試験装置の適用性の確認などの物質移動特性の評価技術の構築を進めてきた。

本報告では、②物質移動に関する調査および評価技術の開発について、これまでの実施内容と主な成果について紹介する。

なお、本研究は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業「岩盤中地下水移行評価確証技術開発」の一部として実施した。

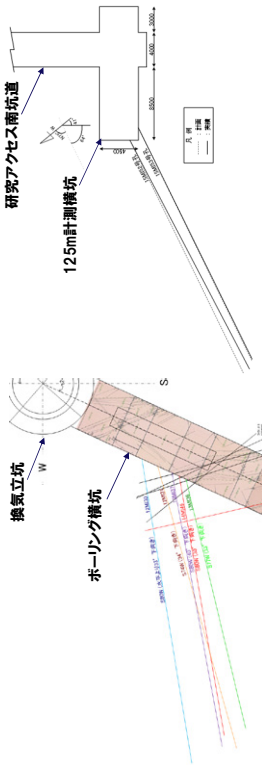
研究実施場所



地質環境調査

- 調査項目：① ボーリング掘削
② コア観察
③ キャリバー検層
④ 孔曲り検層
⑤ 高精度BTV検層

- ⑥ フローメーター検層
⑦ 透水試験
⑧ ポイント希釈試験
⑨ 間隙水圧モニタリング



深度300m

深度500m

ボーリングコアの割れ目の分布

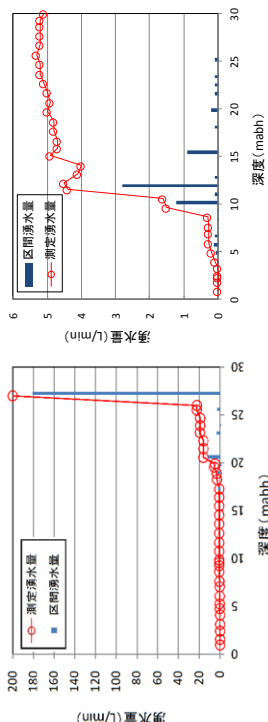
深度500m研究アクセス南坑道125m計測構坑周辺の岩盤は、
深度300mボーリング構坑と比較し、割れ目が少ない

割れ目の分布密度の比較

孔名	15MI52	15MI53	12MI30	12MI31	13MI37	13MI36	14MI49
平均密度 (本/m)	4.3	4.3	7.8	7.0	7.2	8.0	7.0
標準偏差	2.2	2.1	4.1	4.3	4.1	3.3	4.7

深度500m 深度300m

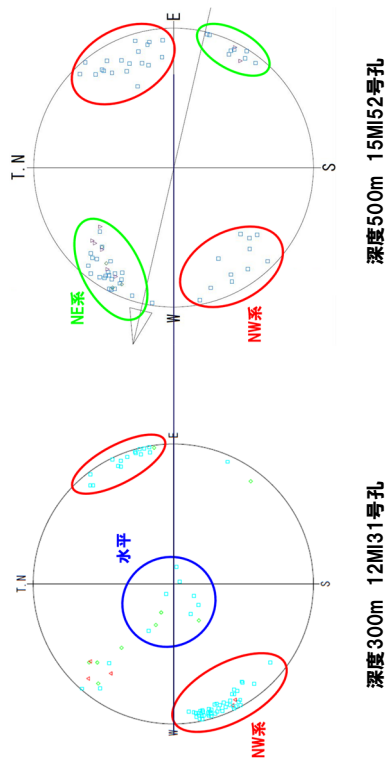
ボーリング孔掘削時の湧水



深度300m 13MI37号孔

深度500m 15MI53号孔

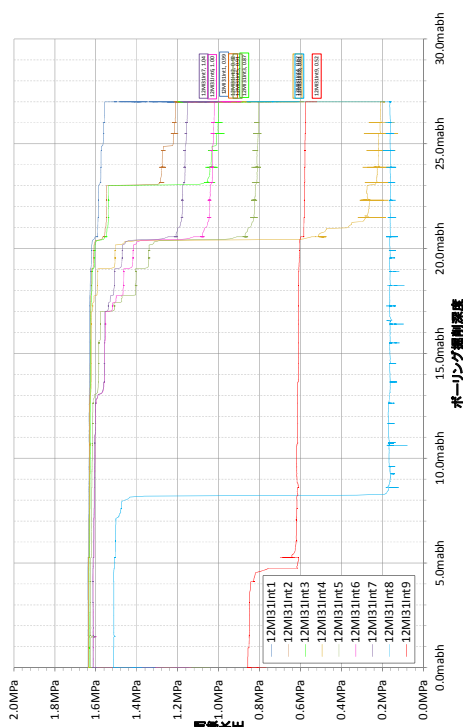
BTV観察による割れ目方向分布



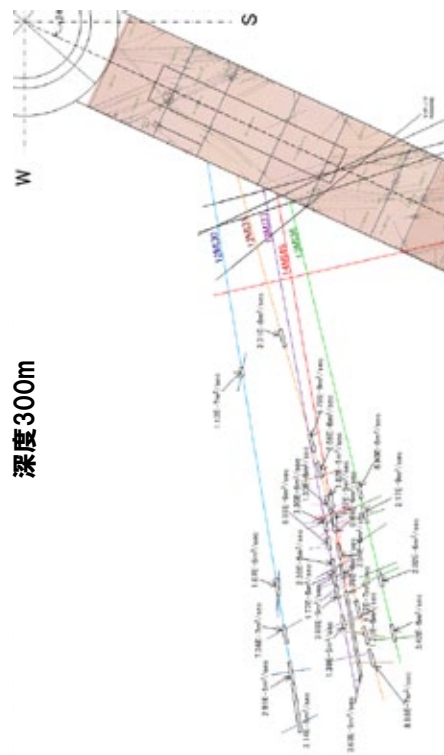
深度300m 12MI31号孔

深度500m 15MI52号孔

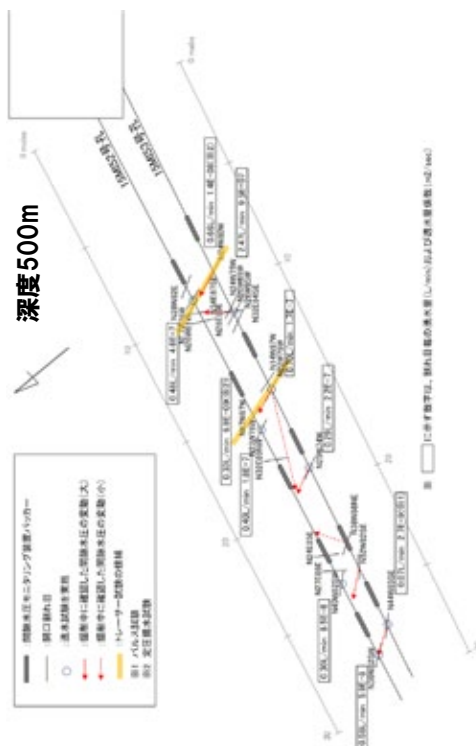
13MI37号孔掘削時の12MI31号孔の水圧応答



割れ目を対象とした透水試験の結果

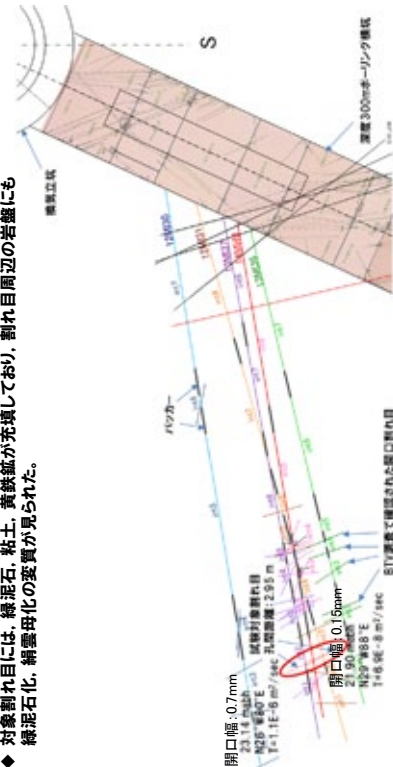


割れ目を対象とした透水試験の結果



物質移動試験の対象割れ目

- ポアホールTVを用いた孔壁観察、13M37号孔掘削時や透水試験時の12M31号孔の間隙水圧の応答などから、12M31号孔の21.90 mabthの割れ目と13M37号孔の23.14 mabthの割れ目は、同一の割れ目である可能性が高い。
- 対象割れ目には、緑泥石、粘土、黄鉄鉱が充填しており、割れ目周辺の岩盤にも緑泥石化、絹雲母化の変質が見られた。

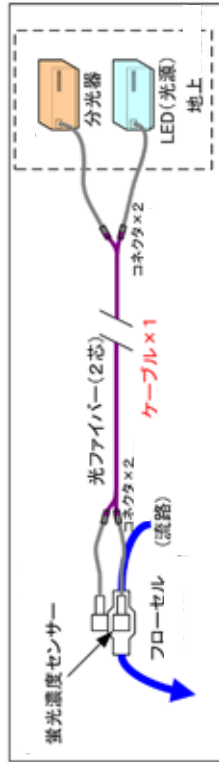


トレーサー試験装置_孔内蛍光濃度センサー

ボーリング孔内の装置と坑道内の装置は長さ約50 mの送水チューブで結ばれており、坑道内で計測するトレーサー濃度は孔内の濃度との間に時間差が生じるとともに、送水チューブ内での分散の影響により孔内濃度とは異なる。



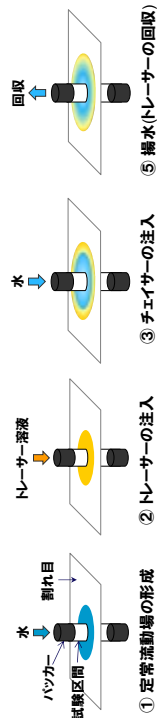
今回使用したトレーサー試験装置では、孔内装置に蛍光濃度センサーを組み込むことにより、蛍光トレーサーの濃度を孔内でオンラインで計測することが可能である。



単孔トレーサー試験の概要

単一の試験孔の同一区間でトレーサーの注入、回収を行う

- ① 定常流動場の形成
水をトレーサー注入流量と同じ流量で注入し、定常流動場を形成する。
- ② トレーサー注入
トレーサー溶液を一定流量で一定時間程度注入する。
- ③ チェイサー(水)の注入
チェイサーとして水をトレーサー注入流量と同じ流量で一定時間注入する。
- ④ 待機時間
注水後一定時間待機する。
- ⑤ 揚水(トレーサーの回収)
一定流量で揚水し、トレーサーを回収する。



トレーサー試験装置_パッカー一体型孔内注入装置

従来の2つのパッカーによりボーリング孔内で試験区間を構築する方式では、試験区間において孔内装置とボーリング孔壁との間に余分なスペースが生じ、単孔トレーサー試験の試験結果の評価を困難にするとともに、孔内スペースでトレーサー濃度に偏りが生じる。

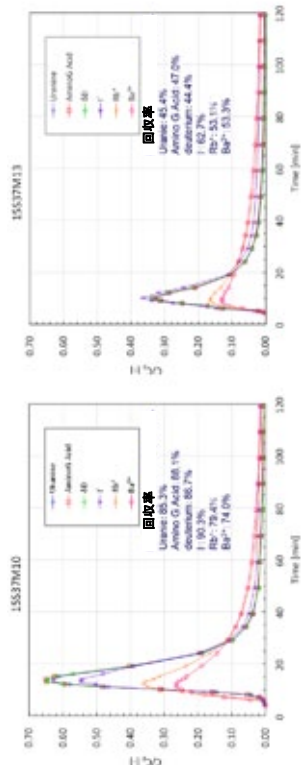


ボーリング孔内でトレーサーを注入するポートをパッカーと一体化することにより、試験区間の余分な孔内スペースを極限まで低減し、孔内スペースでのトレーサー濃度の偏りを防ぐ。



パッカーに取り付けけた注水ポート 室内での注入試験 (アクリル管内でウランミンを放出) 注水ポートの周囲に配したスペースをメッシュで固定して試験区間を構築

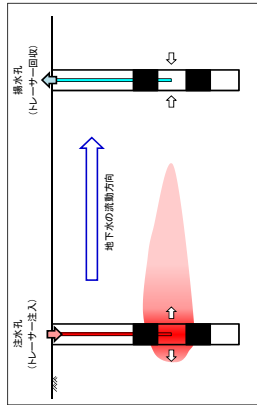
単孔トレーサー試験結果の例



- ✓ 注入流量約200mL/min、揚水流量約200mL/min
- ✓ トレーサー注入時間10分、チェイサー注入時間7.5分
- ✓ 15S37M10: 待機時間なし、15S37M13: 待機時間120分
- 非吸着性トレーサーの結果(ヨウ素以外)は概ね一致した。
- 吸着性トレーサーの場合、パッキング材の地下水流れにより回収率が低下した。
- 非吸着性トレーサーには比べ吸着性トレーサーでは濃度のピーク値が低下し、吸着性の強いBa²⁺では濃度ピークが最も低くなった。

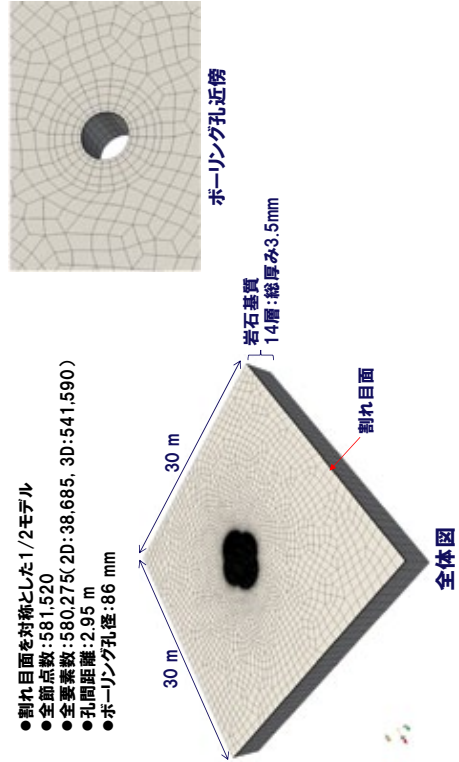
孔間トレーサー試験の概念

- ① 一つのボーリング孔において水を注入し、別のボーリング孔で揚水をを行う。
 - ② 地下水流動場が定常状態に達した後に、注水孔からトレーサーをパルス状またはステップ状に投入する。
- 揚水中的トレーサー濃度を計測する。

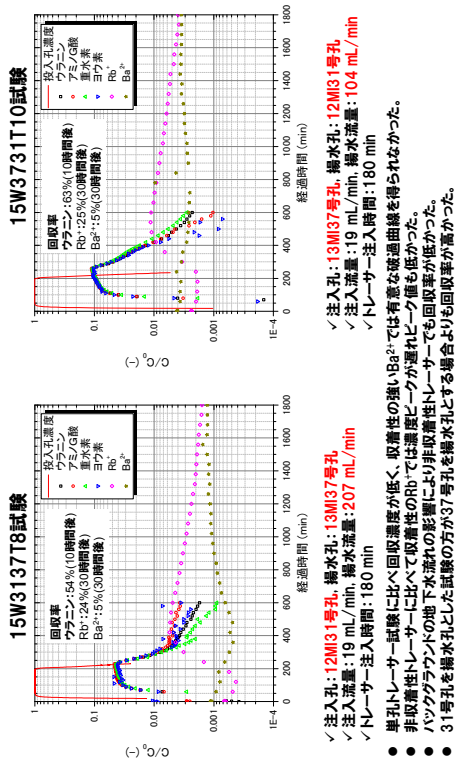


トレーサー試験の解析に使用した解析メッシュ

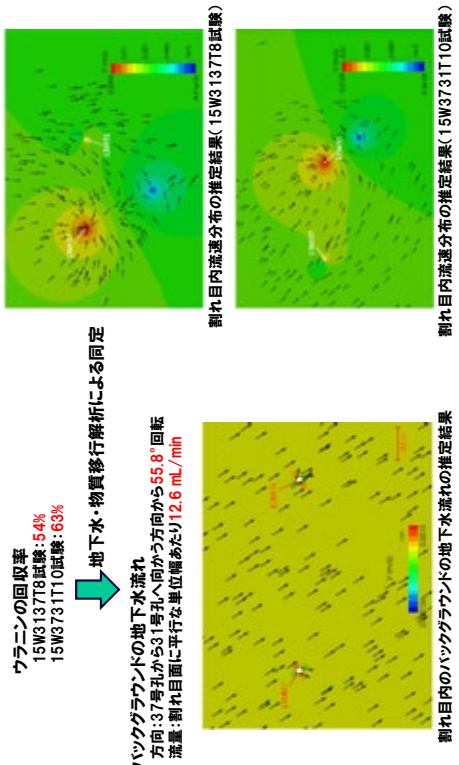
- 割れ目面を対称とした1/2モデル
- 全節点数: 581,520
- 全要素数: 580,275 (2D: 38,685, 3D: 541,590)
- 孔間距離: 2.95 m
- ボーリング孔径: 86 mm



孔間トレーサー試験の結果



バックグラウンドの地下水流れの推定



非吸着性トレーサー(ウラニン)の破過曲線の評価解析

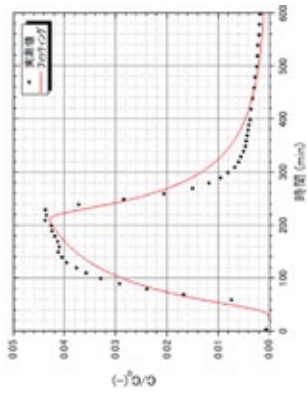
解析条件

- 岩石基質の実効拡散係数: $6.93 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ (国丸他 (2012) より)
- 割れ目内縦分岐長: 横分岐長 = 10:1
- バックグラウンドの地下水流れ: 前のスライドの推定結果を使用



物質移動パラメータ評価結果

- 割れ目開口幅: **0.3 mm**
- 割れ目内縦分岐長: **2.5 m**



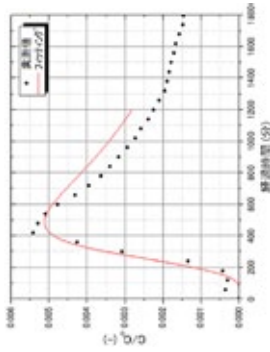
15W3137T8試験

まとめと今後の予定

- ◆ 今回の試験を通して、開発した装置が国内に分布する花崗岩に対しても適用できる見通しを得られた。
- ◆ 単孔試験では、非吸着性トレーサーに比べて吸着性トレーサーは濃度ピークは低い回収率は高くなった。注水・掃水の切替時までに吸着性トレーサーは試験孔近傍にとどまり、回収がしやすかったものと考ええる。
- ◆ 単孔トレーサー試験では待機時間を設けることにより回収率が下がりが、孔間トレーサー試験では注水孔と掃水孔を入れ替えることにより回収率がかわることなどから、バックグラウンドの地下水流れの影響が見られた。
- ◆ 孔間トレーサー試験では、非吸着性トレーサーの破過曲線から割れ目の開口幅や分岐長を同定することができた。また、吸着性トレーサー-Rb⁺の破過曲線から、割れ目表面や充填鉱物への吸着係数を評価することができた。ただし、より吸着性の強いBa²⁺については、回収濃度が低く有意な破過曲線を得ることができなかった。
- ◆ 今後は、深度500mにおいてボーリング調査および原位物質移動試験を実施し、その結果を取りまとめ評価技術の信頼性を向上させていく。なお、信頼性の高い分配係数値を取得するためには、試験時間を長時間確保することが望ましく、極力バックグラウンドの地下水流れの小さい割れ目を対象として試験を実施する必要がある。

吸着性トレーサー(Rb⁺)の破過曲線の評価解析

- 岩石基質の間隙率: 0.3 %
- 岩石基質の真密度: 2650 kg/m³
文献値を基に設定
- 岩石基質の実効拡散係数: $1.11 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
文献値を基に設定
- 岩石基質の分配係数: $1.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$
文献値を基に設定
- 割れ目幅: **0.3 mm**
- 縦分岐長: **2.5 m**
- バックグラウンドの地下水流れ: **推定結果を使用**



15W3137T8試験

↓
表面吸着係数をパラメータとした物質移行解析により破過曲線をフィッティング

- 表面吸着係数: $2.8 \times 10^{-3} \text{ m}$
この表面吸着係数の値は、割れ目表面への吸着だけでなく割れ目充填鉱物への吸着の効果も含んだものと考えられる。

2.3 地質環境の長期安定性に関する研究

2.3.1 土岐地球年代学研究所の現状

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター 地層科学研究部 ネオテクトニクス研究グループ
石丸 恒存

(1)はじめに

東濃地科学センター土岐地球年代学研究所においては、地層処分技術に関する研究開発の一環として実施している深地層の科学的研究(地層科学研究)のうち、「地質環境の長期安定性に関する研究」を進めている。

本研究では、最終処分事業における候補地の選定プロセスや安全評価、国の安全規制における安全審査基本指針等の検討・策定等に必要な科学的知見や調査・評価技術を提供するため、①自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開発(調査技術の開発・体系化)、②将来の自然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価するための手法の開発(長期予測・影響評価モデルの開発)、および③最先端の機器分析装置等を用いた放射年代測定や時間指標層(テフラ等)の高分解能同定法等による編年技術の開発・高度化(年代測定技術の開発)の3つのカテゴリーで引き続き研究開発を進めている¹⁾。

このうち、年代測定技術の開発においては、これまで、土岐地区の既存の加速器、分析室等の施設を活用し、炭素14やベリリウム10等の年代測定法の整備・実用化を進めてきたが、最先端の機器分析装置の導入を機に、平成26年11月に事務所の名称を「土岐地球年代学研究所」へ変更し、年代測定技術の高度化および年代測定手法の標準化を目指して研究開発を推進している。

(2)第3期中長期計画(平成27年度～平成33年度)

第3期中長期計画(平成27年度～平成33年度)では、地質環境の長期安定性に関する研究については、「自然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価する技術を、地球年代学に係る最先端の施設・設備も活用しつつ整備する」ことを目標に掲げている。

また、原子力委員会の見解²⁾を受け、総合資源エネルギー調査会では、地層処分に関連する様々な分野の専門家からなる地層処分技術ワーキンググループを設置し、地層処分の技術的信頼性について「最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価ー地質環境特性および地質環境の長期安定性についてー(平成26年5月)」³⁾として取りまとめがなされており、合わせて今後の地層処分事業の取り組みと平行して進めるべき研究開発の課題が示されている。

第3期中長期計画では、上記の目標と研究開発の課題を踏まえ、現状の科学的・技術的レベルや研究開発の進捗状況を考慮した上で、今後の最終処分事業や国の安全規制に必要な科学的知見を提供することを前提に以下の4つの研究テーマを抽出し⁴⁾、別途、基本計画として個別の実施内容の設定を行っている¹⁾。

① 断層の活動性に係る評価技術

ー坑道で遭遇した場合等の上載地層法が用いられない断層の活動性や地すべりに伴うノンテクトニック断層の判定の評価技術 等

② 地殻構造の高精度・高分解能モニタリング技術

ー鳥取県西部地震の震源断層のような未成熟な断層の検出技術や処分場閉鎖後の長期(～300年)のモニタリング技術 等

③ 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術

ー巨大海溝型地震による沿岸域での地質断層の再活動, 地下水の異常湧出による影響評価技術や断層の伸展に伴う地質環境の変化(深部流体(熱水)の上昇, 表層水の混入)の評価技術 等

④ 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術

ー測地学的スケールと地形・地質学的スケールの変動速度の矛盾の解明, 10万年を超えるような超長期の予測技術の整備, モデルの高度化(可視化・数値化)による予測に対する信頼性の向上 等

上記の研究テーマに沿って「地質環境の長期安定性に関する研究」を推進する上では, 特に「年代測定技術の開発」における技術の高度化・標準化は極めて重要かつ基盤的な要素技術となる。このため, 第3期中長期計画の目標にも掲げているように, 土岐地球年代学研究所では, 最先端の機器分析装置の導入を行い, 幅広い年代範囲を網羅できるように, 各種の年代測定手法の整備を進めている。

(3) 年代測定技術の開発状況

将来の地質環境の変化の予測・評価の信頼性向上のためには, 断層運動や火山活動, 隆起・侵食等の自然現象について, 過去の活動履歴や変動の方向・速度をできるだけ精度良く把握することが必要不可欠であり, 地質環境の長期的な変遷像を構築するための一連の総合的な手法を整備することが必要である。そのためには, 将来予測の対象期間に見合う過去数千年から数百万年といった期間の年代範囲を網羅することが必要であり, また, 様々な対象物質(岩石鉱物, 地下水, 有機物等)に対応できるように, 放射年代測定法の高度化, テフクロロジー等を含めた編年技術を整備していくことが極めて重要となる。

平成27年度までにおいて, タンデム型加速器質量分析計(ペレトロン年代測定装置)を用いて珪酸塩鉱物中のベリリウム-10(^{10}Be)およびアルミニウム-26(^{26}Al)年代測定法の実用化を行った⁵⁾⁶⁾。また, 四重極型質量分析計と誘導結合プラズマ質量分析計(ICP-MS)を用いたウラン・トリウム・ヘリウム((U-Th)/He)年代測定システム, 希ガス質量分析計によるカリウム・アルゴン(K-Ar)年代測定システムの開発を行い, 年代標準試料等の測定を行ってきた⁷⁾⁸⁾⁹⁾。特に, 断層の活動性の評価のため, 0.1 μm 以下の自生雲母粘土鉱物を抽出し, 感度法によってK-Ar年代測定を行うことを可能とした¹⁰⁾¹¹⁾。

平成28年度以降も, 土岐地球年代学研究所が保有する分析装置等を用いた高精度の放射年代測定法の研究開発を引き続き進めていくとともに, さらに新たな年代測定法の開発にも取り組む。当面は, レーザーアブレーションICP-MS等を活用したジルコンや炭酸塩鉱物のウラン系列放射年代測定法, 放射線損傷を利用した石英等の光ルミネッセンス(OSL)法や電子スピン共鳴(ESR)法, 地下水の塩素-36

(^{36}Cl)年代測定法及びヘリウム-4(^4He)、ネオン-21(^{21}Ne)、アルゴン-40(^{40}Ar)等の非放射性同位体を用いた地下水の年代測定法等の実用化を図る。合わせて、電子プローブマイクロアナライザ(EPMA)等を活用した年代測定に供する岩石試料の分析技術の高度化も進める。また、放射年代測定法等が利用できない場合を想定し、テフラ(火山灰)を年代指標とした編年技術の開発として、第四紀前半の広域～ローカルテフラのカatalog整備とともに、テフラに含まれる火山ガラスを高分解能で同定する分析手法の構築を進める。

(4)年代測定技術の開発の意義

年代測定手法に係わる総合的な技術基盤の整備を進める上では、試料のサンプリングから試料の分離・調製、各種の測定までを1つの施設で一貫して自らが実施できるようにすることが非常に重要である。それを可能とすることで、年代測定等で得られた分析値について、その分析条件や精度(precision)・確度(accuracy)を理解した上で、分析試料の持つ地質学的・地球化学的な要件も踏まえ、より踏み込んだ解釈や評価等が可能となる。また、単に年代に係る科学的知見の蓄積のみならず、年代測定技術に係る幅広い経験・ノウハウ、データの不確実性や品質の取り扱いとそれに基づく編年の判断根拠等を蓄積していくことにより、例えば、外部機関等が提示するデータの品質や解釈の妥当性評価等について、技術的な支援をすることも可能である。さらに、年代測定技術に係る幅広くかつ専門的な技術・判断能力を有する人材の育成にも繋がっていくと考える。

土岐地球年代学研究所が保有する施設・設備を有効に活用していくことは、地層処分技術等のバックエンド問題や原子力施設の安全性評価への対応のみならず、防災分野や地球科学分野において学術的にも貢献できるものとして極めて重要と考える。

(5)今後の展望など

「地質環境の長期安定性に関する研究」を推進するにあたっては、経済産業省資源エネルギー庁委託事業のうち地層処分技術調査等事業の地質環境長期変動モデルや革新的要素技術の開発、沿岸部の自然現象に関する研究等で得られた成果を反映していく。

土岐地球年代学研究所は、今後とも機構内関係部署はもとより、大学・研究機関等との連携・協力を進め、原子力の安全性の維持・強化を志向した地球科学に係る統合的な研究拠点、さらには世界最高水準の研究・教育・創造的人材育成拠点の形成(COE化)を目指す。また、地層処分をはじめとする原子力施設の安全対策のさらなる向上に貢献するため、その基盤となる地球科学に関する新たな知見の創出と、幅広い視点から自然現象を対象にした中～長期のリスクの予測・評価に係る研究開発を推進することを目指すしていく。

参考文献

- 1) 梅田浩司ほか:「地質環境の長期安定性に関する研究」基本計画―第3期中長期計画(平成27年度～平成33年度), JAEA-Review 2015-012, 2015, 43p.
- 2) 原子力委員会: 今後の原子力研究開発の在り方について(見解), 2012, 15p.
- 3) 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループ: 最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価―地質環境特性および地質環境の長

- 期安定性について－, 2014, 61p.
- 4) 日本原子力研究開発機構: 日本原子力研究開発機構の改革計画に基づく「地層処分技術に関する研究開発」報告書－今後の研究課題について－, 2014, 24p.
 - 5) Saito-Kokubu, Y. et al.: Current status of the AMS facility at the Tono Geoscience Center of the Japan Atomic Energy Agency, Nucl. Instrum.Methods Phys.Res., B, Beam Interact. Mater. Atoms., vol.294, 2013, pp.43-45.
 - 6) Matsubara, A. et al.: Quaternary Geochronology using Accelerator Mass Spectrometry (AMS): Current Status of the AMS System at the Tono Geoscience Center, In Geochronology - Methods and Case Studies, edited by J. van Mourik, ISBN 978-953-51-1643-1, InTech, 2014, pp. 3-30.
 - 7) Yamasaki, S. et al.: Intermethod Comparison for K-Ar Dating of Clay Gouge. Mineralogical Magazine, vol.77, no.5, 2013, p.2542.
 - 8) 山崎誠子ほか: 断層粘土のK-Ar年代測定～自生鉱物の高純度分離手法と研究例～フィッション・トラックニュースレター, vol.26, 2013, pp.6-8.
 - 9) Yamada, K. et al.: The first (U-Th)/He thermochronology of pseudotachylyte from the Median Tectonic Line, southwest Japan, J. Asian, Earth Sci., vol.45, 2012, pp.17-23.
 - 10) Yamasaki, S. et al.: Constraining the timing of brittle deformation and faulting in the Toki granite, central Japan, Chem. Geol., 351, 2013, pp.168-174.
 - 11) 田村 肇, 佐藤佳子: 断層のK-Ar年代学, 地質技術, vol.3, 2013, pp.21-25.

地質環境の長期安定性に関する研究

土岐地球年代学研究所の現状

平成28年10月3日

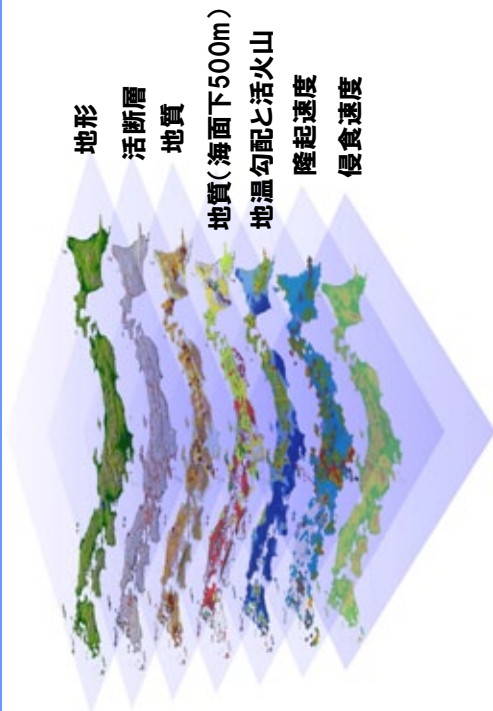
東濃地科学センター
地層科学研究部 ネオテクトニクス研究グループ
石丸 恒存

東濃地科学センター 沿革

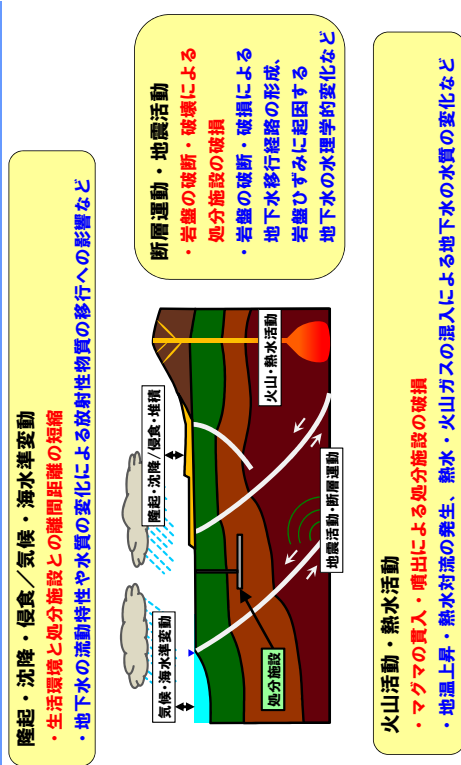


昭和37年	国道21号沿いでウラン鉱床調査を発見
昭和40年	原子燃料公社が東濃探鉱課事務所を開設
昭和42年	動力炉・核燃料開発事業団に改組
昭和48年	東濃鉱山調査坑竣工
昭和53年	土岐市定林寺(現所在地)に移転
平成 6年	中部事業所が東濃地科学センターに改称
平成 8年	超深地層研究所計画開始
平成 9年	ベトリロン年代測定装置導入
平成10年	核燃料サイクル開発機構に改組
平成17年	日本原子力研究開発機構が設立
平成18年	ベトリロン年代測定装置の施設供用を開始
平成26年	土岐地球年代学研究所組織分拆後が完成

地質環境の長期安定性に関する研究



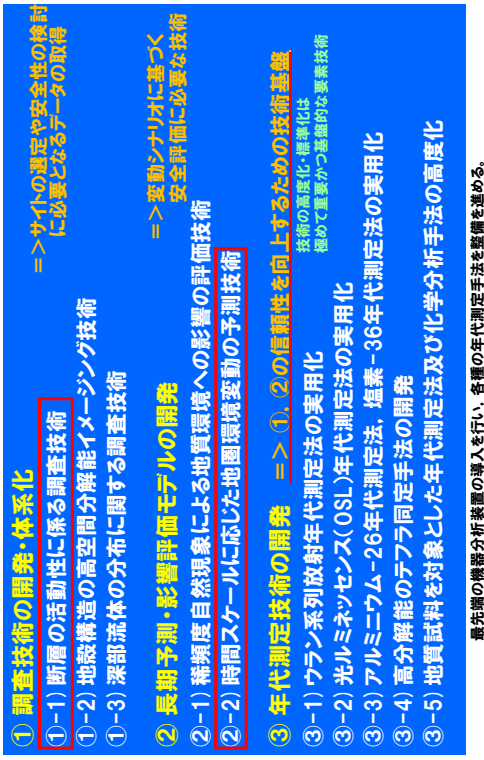
地層処分において考慮すべき自然現象



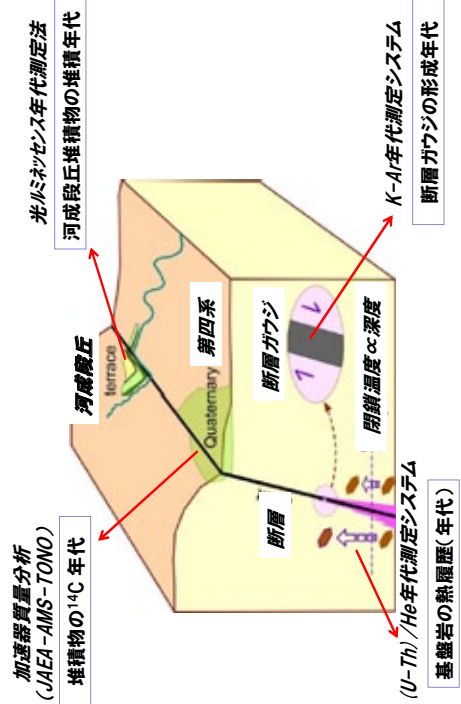
地層処分の安全確保の考え方と3つの研究カテゴリー



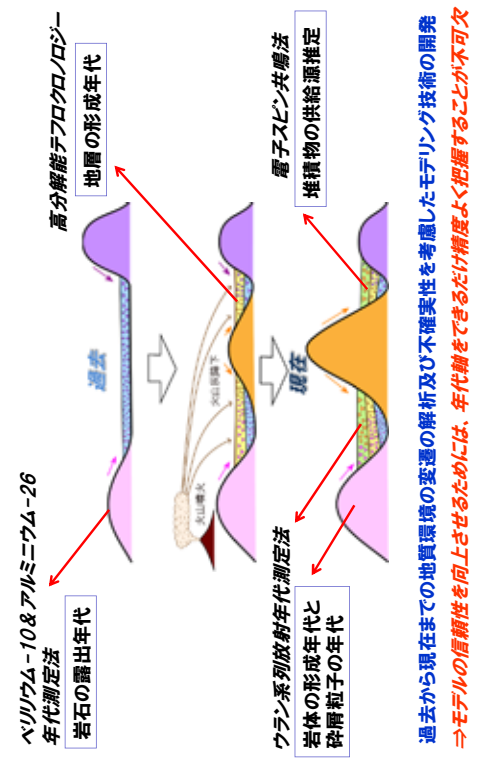
中長期計画(H27～H33)の研究課題



断層の活動性評価のための年代測定技術



時間スケールに応じた地質環境変動の予測技術



年代測定技術の開発状況

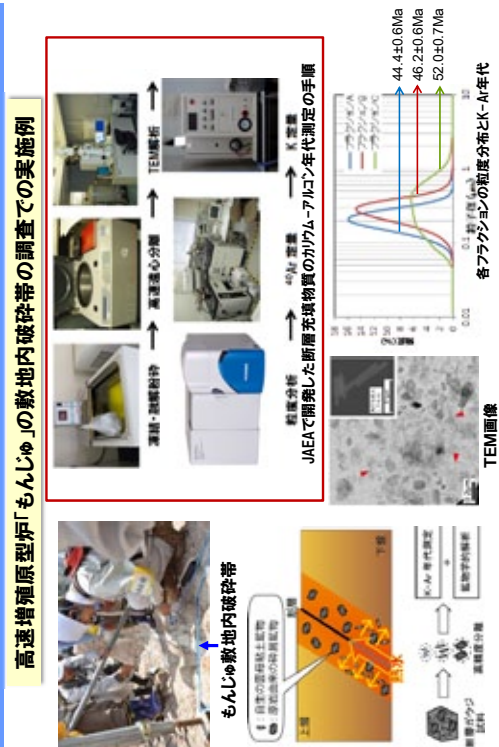
使用装置	年代測定法の対象年代範囲				年代測定法(年)	原素・先例	対象物質	実用化への ステップ
	10^3	10^4	10^5	10^6				
サンデリア型加速器 質量分析計 (ペルトロン)					$10^3 \sim 10^6$	断層活動	地下水、有機物	実用化済
						隆起速度	石英	実用化済
						隆起速度	石英	実用化済
						地下 waters 年代	地下水	実用化済
希ガス質量分析装置					$10^3 \sim 10^6$	断層活動	自生霞石粘土鉱物	実用化済
						隆起速度	アパタイト、シロコニ	実用化済
四重型質量分析装置					$10^3 \sim 10^6$	断層活動	石英、最石	実用化済
						隆起速度	石英、炭酸塩鉱物	実用化済
光トランスミット測定装置					$10^3 \sim 10^6$	隆起速度	石英、最石	実用化済
						隆起速度	石英、炭酸塩鉱物	実用化済
電子スピン共鳴装置					$10^3 \sim 10^6$	隆起速度	石英、炭酸塩鉱物	実用化済
						隆起速度	石英、炭酸塩鉱物	実用化済
高精確希ガス 質量分析装置					$10^3 \sim 10^6$	隆起速度	石英、炭酸塩鉱物	実用化済
						隆起速度	石英、炭酸塩鉱物	実用化済
レーザーアブレーション 質量分析装置					$10^3 \sim 10^6$	隆起速度	石英、炭酸塩鉱物	実用化済
						隆起速度	石英、炭酸塩鉱物	実用化済

地層処分技術では、過去の自然現象の活動した時期やその変動の方向・速度を精度良く把握することが重要
⇒幅広い年代(数千～数万～数百万年)、幅広い対象物質、自然現象に対応が必要

年代測定技術の開発



年代測定技術の開発
(断層ガウジのK-Ar年代測定)



研究開発の今後の展開



地質環境の長期安定性に関する研究 ＜本日、ご紹介する発表タイトル＞

＜口頭発表＞

- 年代測定手法の高度化への挑戦
－ 加速器質量分析装置における新検出手法の開発－
(発表者: 藤田奈津子)

＜ポスター発表＞

- ① 年代指標としての火山ガラスに対する高分解能の同定手法の構築
(発表者: 丹羽正和)
- ② 炭酸塩鉱物のU-Th-Pb年代測定技術の開発
(発表者: 横山立憲ほか)
- ③ 2016年熊本地震のひずみ解放と地質学的ひずみ速度との関係
(発表者: 渡部 豪ほか)

2.3.2 年代測定手法の高度化への挑戦 ―加速器質量分析装置における新検出手法の開発―

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門

東濃地科学センター 地層科学研究部 ネオテクトニクス研究グループ

藤田 奈津子, 國分(齋藤)陽子

株式会社 ペスコ

松原 章浩

(1)はじめに

地球科学分野等の年代測定で有用な宇宙線生成放射性核種(例えば ^{14}C , ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl)の超高感度分析である加速器質量分析(Accelerator Mass Spectrometry: AMS)では, 分析目的核種である放射性同位体と等しい質量電荷比を持つ同重体の分別(同重体分別)の精度の向上が望まれている。本発表では, イオンが結晶通過中に感受する周期場によって発生するコヒーレント共鳴励起(Resonant Coherent Excitation: RCE^{1),2)}を基にした新しい発想による同重体分別の検出手法について紹介する。

(2)加速器質量分析装置における新検出手法の開発

①加速器質量分析(AMS)について

東濃地科学センター 土岐地球年代学研究所では, 地質環境の長期安定性に関する研究を推進するため, 放射年代測定用のAMS装置(ペレトロン年代測定装置: JAEA-AMS-TONO)を平成9年に導入した。それ以来, 地球科学分野に係わる研究や施設供用制度による外部機関による利用のため, ^{14}C 年代測定を継続しつつ, 岩盤の隆起・侵食速度等の評価が可能な ^{10}Be 及び ^{26}Al の測定を実現し, AMSによる多核種測定を可能にしてきた^{3)~6)}。

AMSで測定したい目的核種と等しい比電荷を持つ同重体がある場合, 同重体は電磁界で分別されず検出器に到達し, 目的核種の計数が妨害される。例えば, 目的核種である ^{36}Cl に対しては, ^{36}S が同重体となる。両者の分別は, 多くの場合, ΔE 電離箱が利用され, それぞれの同位体の阻止能(単位長さあたりに失うエネルギー損失の違い)により分別が可能である。しかし, 当装置のような5 MV以下の小型の加速器では, エネルギー分解能が十分ではなく原子番号が大きく同重体を持つ核種に対して十分な分別性能は望めない。例えば ^{36}Cl の場合は, 地球・環境科学分野において地下水の滞留時間の評価等に利用されるが, 要求される同位体比 $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ の検出限界は 10^{-15} であり⁷⁾, 最低6MV程度の加速電圧が必要であると言われている。そのため, 小型の加速器で測定可能な同重体分別法の開発が望まれている。

②発案した新検出手法の開発

本研究では, イオンが結晶通過中に感受するコヒーレント場を基にした同重体分別技術を発案した⁸⁾。良く知られる結晶のコヒーレント場の効果にはRCEがある。イオンは結晶通過中に結晶原子近くを周期的に通るため周期的電場を感じるが, これを疑似光子と見ることができる。RCEは, 疑似光子のエネルギーが入射イオンの励起エネルギーに等しくなるときに発生する共鳴励起をいう。共鳴励起する際の核種に固有のエネルギーを基にすれば, 結晶を通過するイオンの選択的励起・電離が可能となり, 目的核種

と同重体の間に比電荷の差を作ることができ、電磁界で分別が容易となる。本手法は、RCEを応用した新発想の同重体分別であり、直接電離を利用している。RCEの場合、イオンの結晶通過中のランダム過程を通したエネルギーの低下により共鳴条件が崩れるため、直接電離を利用することで、そのランダム過程でエネルギーが低下しても、疑似光子エネルギーを電離電圧以上に保つことができれば、電離効率を維持することができる。さらに結晶に入射する目的核種と同重体の間で最外殻電子の主量子数が異なるように電離段階を選ぶことで、目的核種と同重体の比電荷を異ならせることができるというメリットがある。しかし、5MV以下の加速によるイオンエネルギーは、核子当たり1 MeV程度でしかなく、結晶内の電子とのランダムな衝突過程がRCEの発現を妨げる。このため、本手法開発の挑戦的内容は、入射イオンの電子配置を工夫することで小型の加速器でもRCEの効果を高めることである。本手法は大型のタンデム加速器でなくては困難だと考えられている比較的原子番号の大きい核種のAMSを可能にするだけでなく、従来のAMSの測定効率・精度を格段に向上させると期待される。本手法が実用化すれば、特に地質学、地球・環境科学分野の利用を促進すると考える。例えば、同位体比 $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ で 10^{-15} の検出限界が必要となる地下水の滞留時間の評価が汎用的な装置で実現できる。

現在は発案した手法の数年後の実用化を目指してRCEの観測及び同重体分別に寄与するRCEの効果の確認を目指した基礎研究を進めている。昨年度は共同研究を行っている奈良女子大学の加速器施設を用いて、RCE発現のための対策の効果を検証するため、 ^{26}Al と同重体である ^{26}Mg を200 nmの単結晶薄膜に通過させた後の電離段階を調べた。その結果、質的には期待通りAlで電離段階が高いことを確認した。しかし、ランダム過程がRCEを圧倒していると考えられるため、核子当たり0.1 MeV程度でRCEを発現するには、ランダム過程の影響をさらに弱めることが必要であることが分かった。

これを受けて今年度は、JAEA-AMS-TONOで単結晶薄膜を取り付けることができるチェンバーを設計及び設置し、本同重体分別法の実証実験を行っている。実証実験では、RCEの発現を助長するための対策として、ランダム過程を抑えるため、単結晶薄膜をより薄い50nmに変更した。これにより、結晶通過後の電離段階は、ランダム過程が抑えられ、結晶入射時のイオンの電子状態をより強く反映したものになると期待できる。入射イオンには ^{10}Be の同重体である ^{10}B を利用し、チェンバー内に設置した静電偏向器による電離段階分布を調べた。予想される結果として ^{10}B は単結晶薄膜を通した場合に2価から3価に電離すると考えた。実験の結果として、予想通り2価はほとんどなく、3価が圧倒的に多いことを確認できた。つまり、単結晶薄膜を通すことで同重体については期待した通り電離段階が一つ進んだ電荷分布が得られた。しかし、今回の実証実験では、 ^{10}B のみの観測となり、目的核種である ^{10}Be のスペクトルは確認できなかった。そのため今後、電離箱内のガス圧の最適化や、チャネリング条件探索の高度化を行い、目的核種の電荷分布を測定し、本同重体分別法の更なる実証実験を行っていく。

参考文献

- 1) 中野祐司, 東俊行: 周期場を使ったX線領域の原子状態制御, 日本物理学会誌, vol.65, no.7, 2010, pp.516-523.
- 2) 畠山温: 静周期場中を運動する原子の共鳴遷移, しょうとつ, vol.9, No.6, pp.8-16, 2012.
- 3) S. Xu, et al.: A new AMS facility at the JNC Tono Geoscience Center, Japan, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, vol.172, 2000, pp.8-12.
- 4) S. Itoh, et al.: Present status of the JNC Tono Geoscience Center AMS system, Nuclear

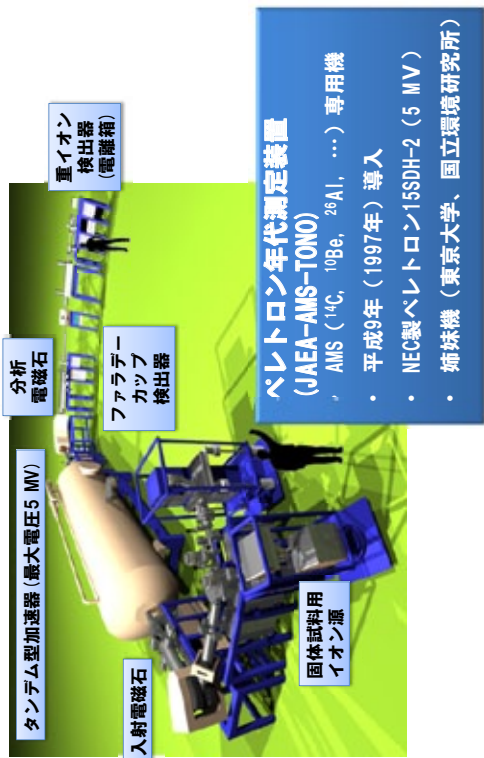
- Instruments and Methods in Physics Research Section B, vol.223-224, 2004, pp.100-103.
- 5) Y. Saito-Kokubu, et al.: Current status of the AMS facility at the Tono Geoscience Center of the Japan Atomic Energy Agency, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, vol.294, 2013, pp.43-45.
 - 6) A. Matsubara, et al.: Quaternary Geochronology Using Accelerator Mass Spectrometry (AMS) - Current Status of the AMS System at the TONO Geoscience Center, Geochronology - Methods and Case Studies, InTech, 2014, pp.3-30.
 - 7) 須甲武志ほか: 幌延深地層研究施設周辺の地質環境情報に基づく地下水流動評価手法の検証に関する研究, JNES-RE-2013-9032, 2014, p.159.
 - 8) 日本原子力研究開発機構, 松原章浩, 加速器質量分析による妨害核種分別方法およびその装置, 特開2014-150028, 2014.8.21.

年代測定手法の高度化への挑戦 — 加速器質量分析装置における新検出手法の開発 —

平成28年10月3日

東濃地科学センター
地層科学研究部 ネオテクトニクス研究グループ
藤田 奈津子、國分 (齋藤) 陽子
株式会社 ヘスコ
松原章浩

1. 加速器質量分析 (AMS) について



1. 加速器質量分析 (AMS) について

Accelerator Mass Spectrometry (AMS) : 長半減期 放射性同位体の同位体比を求める

AMSで代表的な分析核種と同質量電荷比 (m/q) 核子 [1]

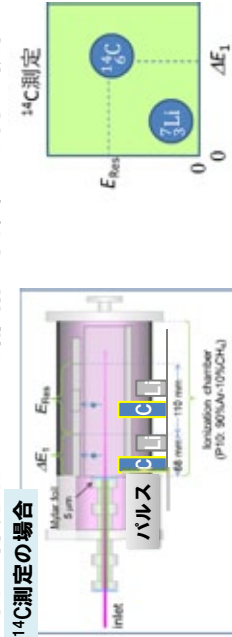
核種	用途	半減期	同 m/q 粒子
^{10}Be	地質学、地球・環境学	1.51 My	^{10}B
^{14}C	考古学、地球・環境学、医学	5.73 ky	^{14}N
^{26}Al	地質学、地球・環境学	720 ky	^{26}Mg
^{32}Si	地球・環境学	140 y	^{32}S
^{36}Cl	地質学、地球・環境学	301 ky	^{36}S
^{41}Ca	医学、地球・環境学	103 ky	^{41}K
^{53}Mn	地質学	3.7 My	^{53}Cr
^{129}I	地球・環境学	15.7 My	—

同じ質量電荷比の同重体は、存在比で測定核種に比べ3～9桁高い
このため、AMSでは同重体分別が必須

* ^{26}Mg が問題となるのは、イオン源から AlO^- を引き出した場合。
 AlO^- の電流量は Al^- の通常20倍程度。
[1] Accelerator Mass Spectrometry, C. Tuniz et al., CRC Press LLC. (1998).

2. AMSの基盤技術「同重体分別」の問題点

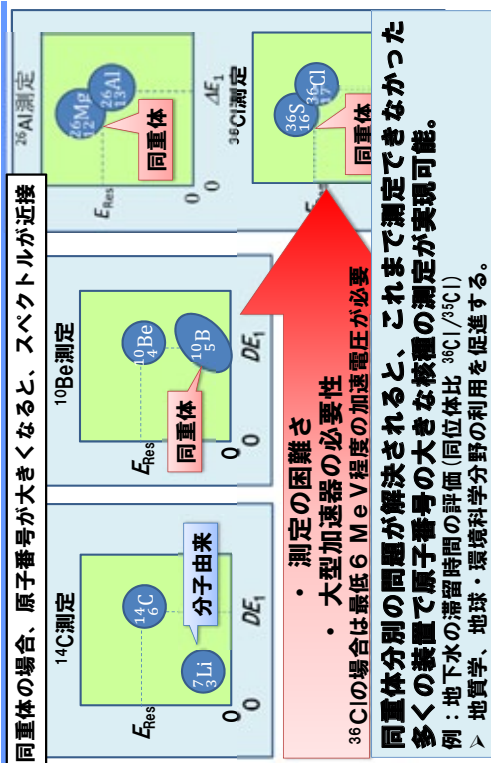
同重体分別 : ΔE 電離箱で同質量電荷比核種を分別



阻止能
(単位長さあたりに失うエネルギー損失)
原子番号と正の関係
パルス高 : $^{14}\text{C}^{4+} > ^{14}\text{N}^{3+}$

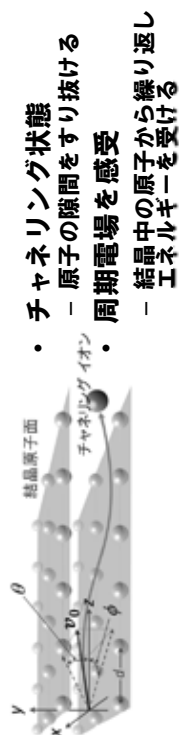
同質量電荷比核種が
分別可能

2. AMSの基盤技術「同重体分別」の問題点



3. 発案した同重体分別

コヒーレント共鳴励起 (Resonance Coherent Excitation : 以後RCE)
運動するイオンが静的周期場を感じ、イオンの内部励起が発生する現象



“結晶中の原子から受けるエネルギー” > “通ったイオンの電離エネルギー”
ならば

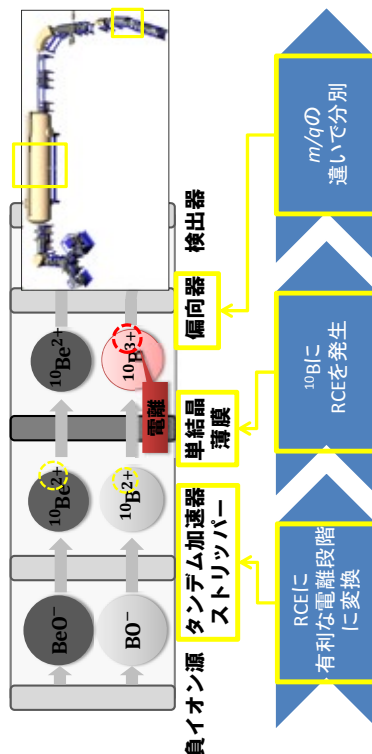
核種が精密な電離エネルギー (固有値) をもつ
➡ 着目した核種を選択的に電離可能

目的核種と妨害粒子との電荷の間に差を作ることができる

3. 発案した同重体分別

RCEによる同重体分別の概念

当分別方法のビームラインに沿った一次元模式図



4. 挑戦的内容と本研究開発の目的

挑戦的内容

- 5 MV以下の加速によるイオンエネルギー
: 核子当たり1 MeV程度
➢ RCEを起こすにはエネルギーが低い。
入射イオンの電子配置を工夫することで小型の加速器でもRCEの効果が高めることができる。

目的

- ベレtron年代測定装置 (JAEA-AMS-TONO) を用いて実証実験を進め本技術を実用化する。
➢ 実用化を目指してRCEの観測及び同重体分別に寄与するRCEの効果の確証を目指した基礎研究を進めている。

5. 予備実験 (平成27年度)

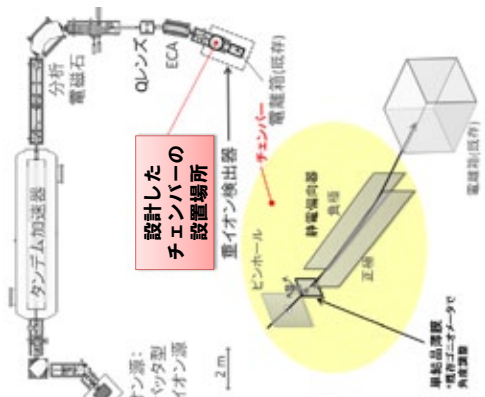
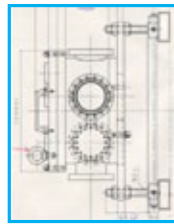


- ・奈良女子大学の加速器装置を使用して、厚さ250 nmのSi単結晶薄膜に $^{27}\text{Al}^{2+}$ と $^{24}\text{Mg}^{2+}$ を通して、チャネリングした後の電離段階分布を調べた。
- 予想した結果：Mgは2価のまま通過し、Alのほうが3価になりやすい。
- 実際の結果1：Alの方が、Mgよりも3価になりやすかった。
- 実際の結果2：薄膜内での入射イオンのランダムな動きを弱めるとさらに電離が進みやすいという情報が得られた。

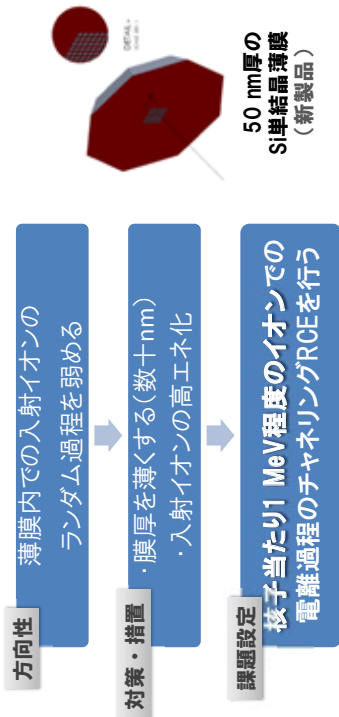
予想通り！

7. 実験方法、セットアップ

実験チェンバーの設置

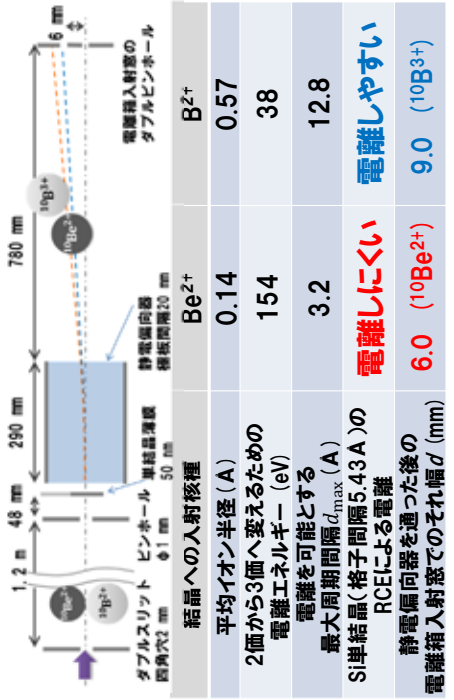


6. 検証実験 (平成28年度)



ペレトロン年代測定装置 (JAEA-AMS-TONO) を利用

7. 実験方法、セットアップ

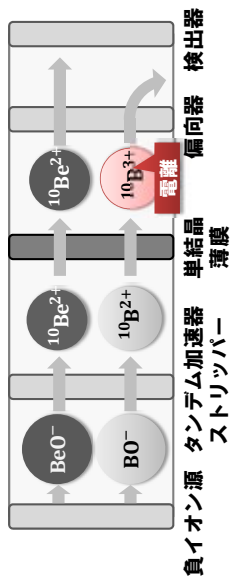


条件: ターミナル電圧3.0 MV、入射エネルギー7.15 MeV、静電偏向器電圧2.3 kV/cm

7. 実験方法、セットアップ

RCE検証実験 ^{10}Be と ^{10}B の分別で当方法の原理実証

* ^{10}Be と ^{10}B の分別は、実用上はガスセルを用いた方法で問題ない。



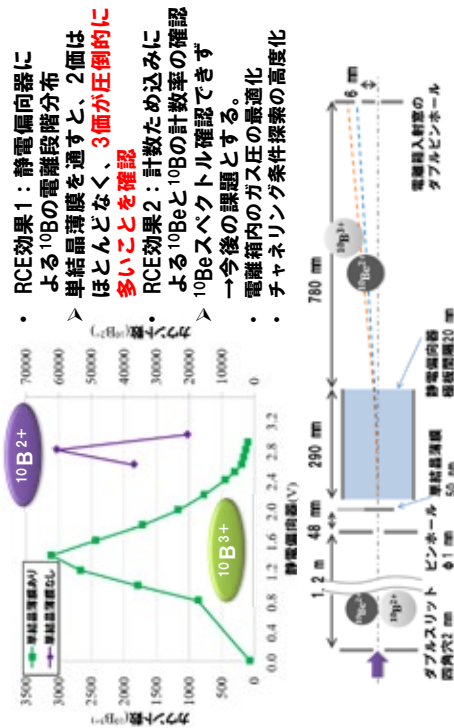
原理実証で ^{10}Be を用いる理由：

- 当AMS装置で実績ある測定核種のうち、比較的核子当たりのエネルギーが得やすいこと。
- 入射イオンの電離段階の工夫もしやすい
(最外殻電子の主量子数を異なるものができる)

9. まとめ

- AMSの革新的な同重体分別技術として、RCEの選択的な電離により目的核種と同重体の電荷を異ならせて検出する方法を提案した。
- 本方法を適用する際の障害“ランダム過程”への対策として入射イオンの電子配置に着目した。
- 平成27年度に実施した予備実験より“ランダム過程”への対策が必要であると分かったため、核子当たり1 MeV程度のイオンでの電離過程を利用したチャネリングRCEを行うこととした。
- 単結晶薄膜を通すことで、同重体については期待した通り、電離段階が一つ進んだ電荷分布が得られた。
- 今後測定目的核種の電荷分布も計測し、本同重体分別方法の原理実証を行う。

8. 結果



- RCE効果1：静電偏向器による ^{10}B の電離段階分布
- 単結晶薄膜を通すと、2価はほとんどなく、3価が圧倒的に多いことを確認
- RCE効果2：計数ため込みによる ^{10}Be と ^{10}B の計数率の確認
- ^{10}Be スペクトル確認できず → 今後の課題とする。
- 電離箱内のガス圧の最適化
- チャネリング条件探索の高度化

関連する取り組み

- (特許) 原子力機構、“加速器質量分析による妨害核種分別方法およびその装置”、特開2014-150028
- 奈良女子大学との共同研究 H26年度後半、H27～30年度「チャネリング コヒーレント電離による同重体分別の基礎研究
- 原子力機構 萌芽研究開発資金制度 H27～28年度
 - 課題名「チャネリング コヒーレント電離によるAMS の同重体分別法の開発」

謝辞

本研究はJAEA萌芽研究開発資金制度H27～28年度を受けて行いました。

奈良女子大学の小川英巳教授、石井邦和准教授、狩俣順也 専門職員には共同研究をはじめ、実験のご協力や有益な議論を行えたことに感謝いたします。RCEの学術的研究を先導されておられる理化学研究所 東俊行 主任研究員、中野祐司 研究員には有益な助言をいただきましたことを感謝いたします。

3. 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

- 年代指標としての火山ガラスに対する高分解能の同定手法の構築
- 炭酸塩鉱物のU-Th-Pb年代測定技術の開発
- 2016年熊本地震のひずみ解放と地質学的ひずみ速度との関係

2. 超深地層研究所計画

再冠水試験に係わる調査研究

- 研究坑道の冠水に伴う岩盤変位
- 研究坑道の冠水に伴う地下水の水圧変化
- 研究坑道の冠水に伴う地下水の水質変化
- 研究坑道周辺岩盤における割れ目のモデル化
- 止水壁の機能確認について

地質環境特性の長期変遷解析技術に関する研究

- 地質構造モデルの構築と主立坑断層近傍の割れ目の特徴

地下坑道における工学的対策技術の開発

- ポストグラウトの施工結果と評価

3. 共同研究

鹿島建設と原子力機構の共同研究

- 地中レーダによる坑道周辺岩盤の水理特性評価に関する研究

清水建設と原子力機構の共同研究

- 逆解析を用いた地下水流動のモデル化・解析に関する研究

4. 瑞浪超深地層研究所を利用した研究

地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所

- 立坑内地震計鉛直アレイ観測

This is a blank page.



地質環境の長期安定性に関する研究 ― 年代指標としての火山ガラスに対する高分解能の同定手法の構築 ―

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部 ネオテクニクス研究グループ

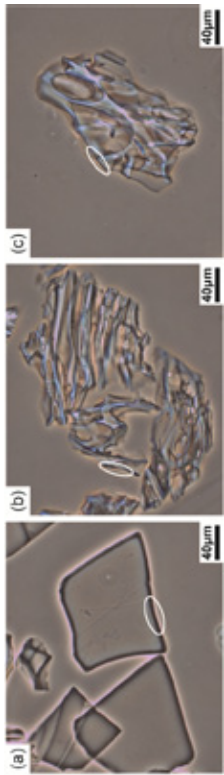
丹羽 正和

年代指標としてのテフラ同定の意義

- ・ テフラ(火山ガラスや鉱物、軽石などからなる火山性の堆積物)は、給源となる火山の違いや噴火時期の違いによって固有の特徴を持ち、かつ極めて短期間で広範囲に堆積するので、化石などとともに、**堆積物の有効な年代決定指標**となる。
- ・ 特に日本列島では、数十万年前以降については、主要な火山に対し、広範囲にテフラを堆積させた噴火が起きた時期についてかなり明らかにされている。
- ・ したがって、テフラの同定手法の開発は、放射年代測定手法の開発と同様、**地震・断層活動や津波の発生時期の特定、隆起・沈降・侵食速度の推定など、過去の自然現象の起こった時期やその変動の傾向を把握する上で重要な技術開発**である。
- ・ 本研究では、火山ガラスの屈折率測定および化学組成分析の手法を改良することにより、**従来では困難であった同じ火山で噴火時期だけが異なる複数のテフラを区別し、年代決定指標として用いることに成功した**。

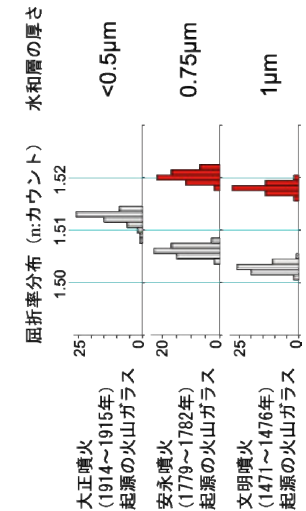
水和層を考慮した火山ガラスの屈折率測定

- ・ 火山ガラスの屈折率は火山や噴火時期によって固有の値の範囲を持つ ⇒ テフラを区別する根拠の一つ
- ・ ただし、ガラスの水和の有無によっても屈折率は変化 ⇒ ガラス片の周縁部の水和している部分と中央部の水和していない部分とを分けて屈折率を測定し、屈折率測定の精度向上を図った
- ・ 水和した部分の厚さと、堆積後の経過時間とは概ね正の相関関係がある ⇒ 水和部の厚さからも火山ガラスの堆積時期が推定可能



【火山ガラスの実体顕微鏡写真】 生田正文ほか, 2016, © 日本地質学会

7300年前の鬼界カルデラ噴火起源の火山ガラス(a)と比べ、1471～1476年の桜島文明噴火起源の火山ガラス(b)は水和部(例:白丸で示したガラス片の周縁部の濃灰色の部分)の厚さが非常に薄いことが分かる。また、宮崎平野の軽石層から得られた火山ガラス(c)は、その形態と水和部の厚さが桜島文明噴火起源の火山ガラスとほぼ一致する。



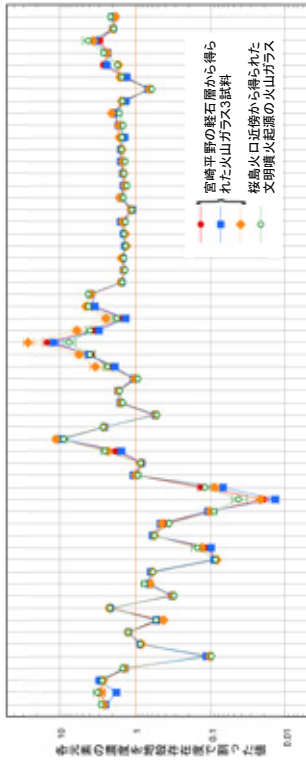
【桜島火山の火山ガラスの屈折率測定結果】
1試料あたり50個以上の火山ガラスを測定。**白のバーは未水和部、赤のバーは水和部の屈折率**。
大正噴火起源の火山ガラスは水和層が非常に薄いので水和部の屈折率は測定していない。
水和部と未水和部の識別ができていると、安永および文明噴火起源の火山ガラスの屈折率は1.51前後ではつった分布となり、大正、安永、文明の間で区別できなくなる。
水和部と未水和部とを識別した上で別々に屈折率を測定すると、屈折率分布のヒストグラムは、大正、安永、文明の間で明確に区別される。

LA-ICP-MSによる火山ガラスの同時多元素分析

レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析法(LA-ICP-MS)を用いて、一粒の火山ガラスから**多元素の組成を同時に分析**
⇒ **微量元素も含め、分析の迅速化、高精度化を実現**

火山ガラスの化学組成も火山や噴火時期によって固有の組成範囲を持つことから、LA-ICP-MS法で得られた**多数の化学組成データ**を**統計的に解析**することにより、テフラの給源の推定に活用できる。

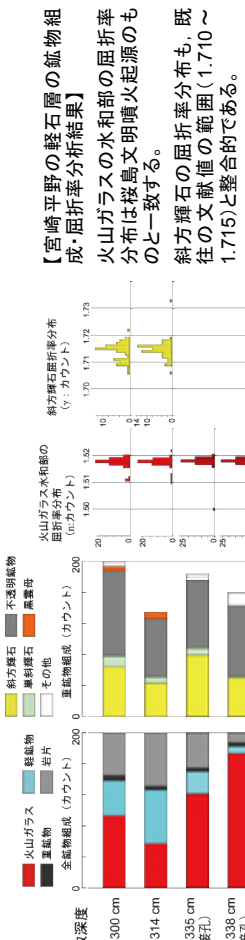
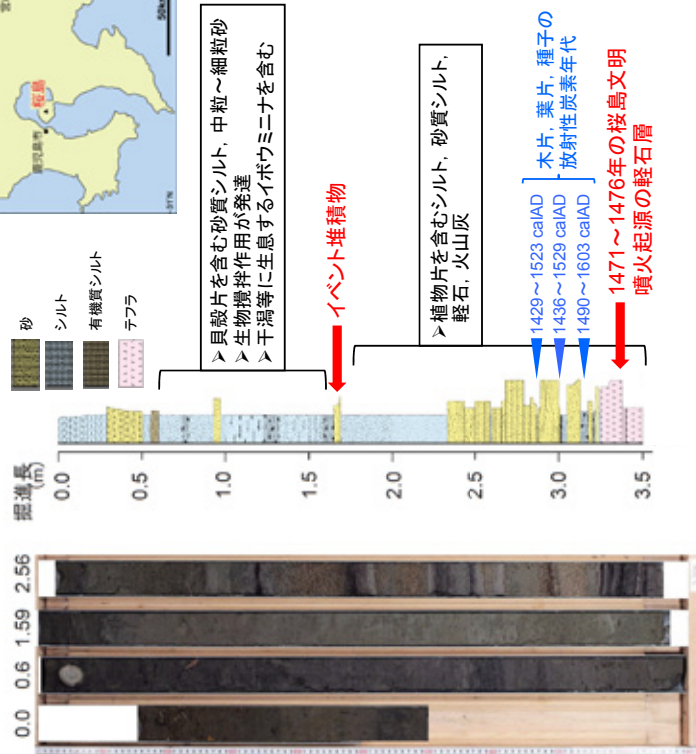
(本研究では、複数の粒子で10ポイント以上分析し、各元素組成の平均値について多重比較法を適用して有意差を検定)



【LA-ICP-MSによる火山ガラスの多元素分析の結果】

宮崎平野の堆積物における事例研究

事例研究として、宮崎平野南部の完新世堆積物(1662年寛文日向灘地震で地盤が沈降したとされる地域)中の軽石層を対象に、火山ガラスの屈折率測定および化学分析を実施
⇒ **軽石層が桜島火山の文明噴火起源であることを同定**



◆ 土岐地球年代学研究所のベレtron年代測定装置で測定した木片、葉片、種子の放射性炭素年代からは、軽石層の堆積は1430年ごろ以降、かつ1662年寛文日向灘地震より前となり、桜島文明噴火の時期と整合的である。

謝辞・文獻

本研究におけるテフラ分析では、株式会社京都フュージョン・トラックの榎原 徹様、山下 透様、丸山誠史様、東京大学の平田岳史教授にご指導いただいた。なお、本研究の成果は下記の論文により公表されています。

生田正文、丹羽正和、榎原 徹、山下 透、丸山誠史、鎌澤孝信、小林哲夫、黒澤英樹、國分(齋藤)陽子、平田岳史、歴史時代に噴出した同一火山由来の軽石層の同定: 宮崎平野で見出された桜島文明軽石の例, 地質学雑誌, vol.122, 2016, p.89-107.



地質環境の長期安定性に関する研究

一 炭酸塩鉱物のU-Th-Pb年代測定技術の開発一

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部 ネオテクトニクス研究グループ

横山 立憲・國分(斎藤) 陽子・※村上 裕晃・渡邊 隆広・三ツ口 丈裕

※結晶質岩地質環境研究グループ

地質環境の長期安定性の評価と年代測定

- ◆ 将来の地質環境の安定性を評価する上では、着目する地質環境の過去の変遷を解読し、変遷の傾向から将来を予測する必要がある。
- ◆ 過去の地質環境の変遷を解読するためには、隆起・侵食や断層活動及び火成活動等の自然事象に時間軸を与える、放射年代測定技術の整備が不可欠である。
- ◆ 地層処分事業に関して現時点では特定の地質やサイトが選定されていないことから、多様な地質環境を想定して普遍的に存在する試料に対応でき、かつ広範な年代範囲を測定可能な技術の整備が求められる。
- ◆ 炭酸塩鉱物は地質環境中に普遍的に存在していることから、汎用的な古環境指標として有効と考えられる。

東濃地科学センターでは、平成26年度よりレーザーアブレーション付き誘導結合プラズマ質量分析装置を導入し、炭酸塩鉱物のU-Th-Pb年代測定技術の開発を進めている。

なぜ炭酸塩鉱物を対象とするのか？

地質環境における炭酸塩鉱物

水一岩石反応により地下水の化学特性を反映しながら沈殿した(二次)鉱物

炭酸塩鉱物の特徴

- ✓ 岩盤の岩種(結晶質岩・堆積岩)を問わず普遍的に産出
- ✓ 低濃度領域を含めた広い濃度範囲で生成(地下水・熱水・海水から生成)
- ✓ 沈殿時の年代情報、地球化学的特徴(塩分濃度や酸化還元状態)を保存
- ✓ 成長果帯構造を呈することが多い

炭酸塩鉱物の分析のイメージ

炭酸塩鉱物のCL像とMn濃度分布(Milodowski et al., 2002)

炭酸塩鉱物の分析のイメージ(Milodowski et al., 2002)に加筆)

要求事項

- 地層処分において地質環境長期安定性を議論する上では、十万年程度(以上)の年代を測定する必要がある
- 炭酸塩鉱物の年代測定は全岩溶液試料について実施されてきたが、成長果帯構造を持つため“位置ごと”の年代測定が必要

アブローチ

- ✓ U-Th-Pb同位体系での年代測定の適用
- ✓ レーザーアブレーション試料導入法による分析技術の開発

これまでの技術開発

技術開発の流れ

方針の決定: 必要な技術の情報整理 H25～26年度

- U-Th-Pb年代測定はジルコン等の鉱物試料について広く実施され、若い(0.1 Ma)試料への応用も可能となってきた
- 局所領域を対象とする年代測定には、二次イオン質量分析(SIMS, SHRIMP)やレーザーアブレーション装置で試料導入するICP質量分析が主流となっている
- 局所領域分析では、分析点の選定が重要であり、その選定においてはCL観察や元素及び同位体分布を二次元的に可視化するイメージング技術の確立が必要不可欠

分析装置の整備 H26～27年度

- レーザーアブレーション装置(Analyte G2)及び二重収束型ICP質量分析計(Neptune-plus)を導入
- 四重極型ICP質量分析計(Agilent 7700x)を応用

分析装置の実用化 H27～28年度

- 年代既知ジルコンの測定により分析手法を確立
- イメージング技術の確立

“炭酸塩鉱物”の分析に必要な技術の開発 H26～29年度

- 観察手法の確立とCL像等で得られる情報の解釈
- 元素比、同位体比測定の補正に必要なマトリクスの一一致した標準試料の選定
- 年代既知炭酸塩鉱物の測定による分析手法の評価と確立

地下環境で生成された炭酸塩鉱物(実試料)の測定 H29年度

分析装置の整備

四重極型ICP質量分析計 (Agilent 7700x)

レーザーアブレーション装置 (Photon-machines Analyte G2)

微量元素定量分析 元素・同位体イメージング

二重収束型マルチコレクタICP質量分析計 (Thermo Scientific Neptune-plus)

東濃地科学センター 土岐地球年代学研究所 微小領域同位体分析室

分析装置の実用化 (イメージング)

Organic-rich Evaporite Castle Formations of Delaware Basin, New Mexico

※イメージングデータ解析にはソフトウェア/Quant2を使用

2 mm

238U 232Th 34S 66Zn 88Sr 208Pb

1 mm

まとめと今後の展望

- ◆ レーザーアブレーション装置及びICP質量分析計の導入やその実用化は概ね完了し、イメージングによる元素・同位体の二次元情報の取得が可能となっている。
- ◆ 現在は世界に先駆けて、分析に必要な不可欠な標準試料の選定や製作を実施している。
- ◆ 今後は年代既知の炭酸塩試料の測定を経て、地下環境で生成された割れ目充填の炭酸塩鉱物の年代測定へと展開する。

引用文献

共同研究者

平田 岳史(東京大学)・坂田 周平(学習院大学)・榎原 徹((株)京都FT)・岩野 英樹((株)京都FT)・丸山 誠史((株)京都FT)・常 青(JAMSTEC)・宮崎 隆(JAMSTEC)・仙田 量子(JAMSTEC)・木村 純一(JAMSTEC)

謝辞

本報告は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業(地質環境長期安定性評価確証技術開発)」の成果の一部である。

- 47 ~ 48 -

背景と目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、数万年以上に及ぶ長い時間スケールにおける地質環境の長期安定性の評価が重要。

日本列島における第四紀後期の地殻変動には、変位の方向の一様性や変位の等速性といった経験則（一様継続性）が見出されているものの（松田,1988）、測地・測速データに基づく測地学的ひずみ速度と活断層データ等から推定された地質学的ひずみ速度には、概ね一桁の違いがあることが指摘されている（池田,1996）。

本研究では、GNSS観測データから推定した2016年熊本地震に伴うひずみ解放量と、活断層データに基づくひずみ速度との比較によって、震源域周辺における測地学的・地質学的ひずみ速度の関係について検討した。

九州地方のテクトニクスと2016年熊本地震に伴う地殻変動

現在の地殻変動データ取得を目的とし、九州南部のせん断帯で平成28年2～3月よりGNSS観測を開始した。同年4月に熊本地震が発生し、国土地理院のGNSSデータ（GEONET F3解）と産業技術総合研究所の活断層データを用いて、Shen et al. (1996) の手法により、ひずみ解析を行った。

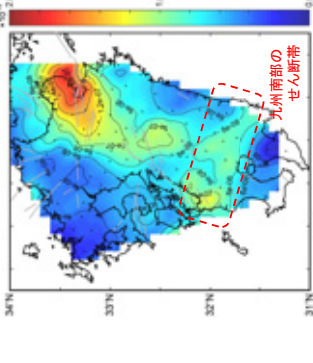


図2) GNSSデータより推定したせん断ひずみ速度
国土地理院のGEONET F3解（中川ほか、2009）より、2007.10.1～2009.3.1の期間のGNSSデータよりひずみ速度を推定。九州南部に、ひずみ速度の低い領域（九州南部のせん断帯）が存在。

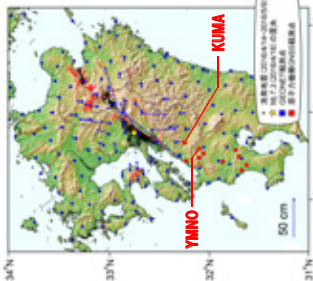


図3) 九州地方のテクトニックセッティング
島弧の南東側よりフィリピン海プレートが沈み込み、西側には北太平洋の沖縄トラフが位置する。灰色実線は活断層、赤色三角は第四紀火山。黄色の星印で2016年熊本地震の震央を示した。

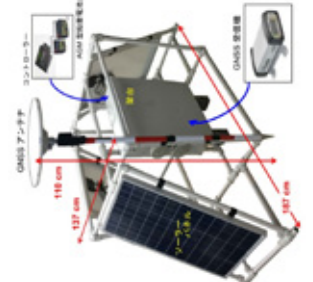


図4) 2016年熊本地震による地殻変動とGEONETおよび原子力機構GNSS観測点分布
2016年熊本地震時の原子力機構GNSS観測点で、合計10か所に設置した（図4参照）。電源供給にはソーラーパネルを利用。

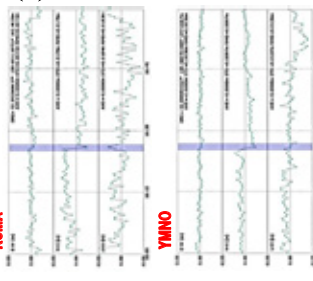


図5) 原子力機構GNSS観測装置
九州南部のせん断帯での地殻変動観測を目的とし、合計10か所に設置した（図4参照）。電源供給にはソーラーパネルを利用。

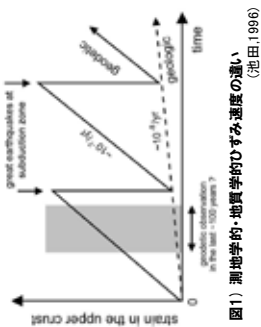


図6) 測地学的・地質学的ひずみ速度の違い（池田,1996）

2016年熊本地震によるひずみの解放と地質学的ひずみ速度

測地学的データに基づく推定

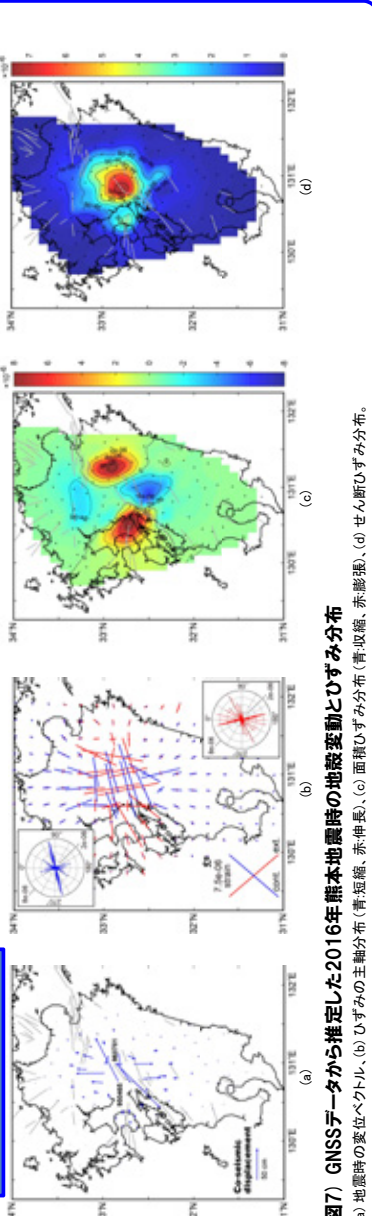


図7) GNSSデータから推定した2016年熊本地震時の地殻変動とひずみ分布

(a) 地震時の変位ベクトル、(b) ひずみの主軸分布（青短線、赤伸長）、(c) 面積ひずみ分布（青短線、赤伸長）、(d) せん断ひずみ分布。

地質学的データに基づく推定

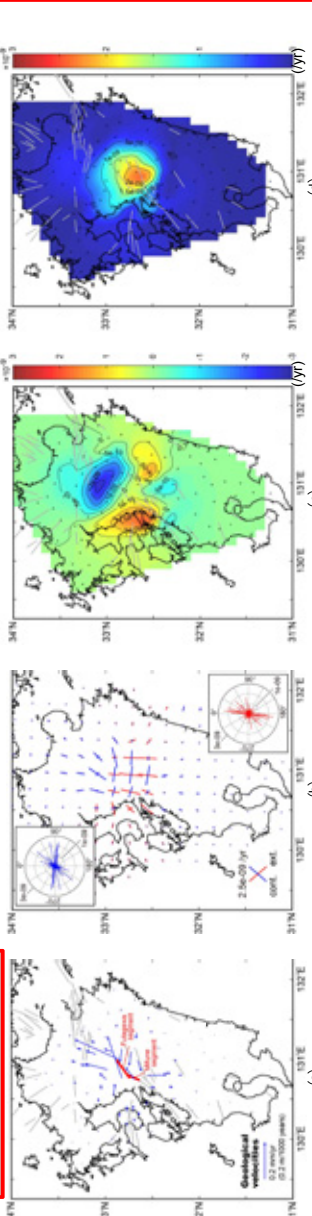


図8) 活断層データから推定した地質学的ひずみ速度分布

(a) 変位速度ベクトル（布田川・日奈久断層の一部が動いたと仮定した場合）、(b) ひずみ速度の主軸分布（青短線、赤伸長）、(c) 面積ひずみ速度分布（青短線、赤伸長）、(d) せん断ひずみ速度分布。活断層データ（産業技術総合研究所, 2015）に基づき、断層パラメータから地表面の変位速度を計算、その後、それらの変位速度を入力値として、ひずみ速度をShen et al. (1996) の手法にて推定。

主な成果と反映先、今後の課題

- 2016年熊本地震により最大で 7.1×10^{-6} のせん断ひずみが解放（図7d）
- 活断層データより、震源域では $2.3 \times 10^{-9}/\text{yr}$ のせん断ひずみ速度が推定される（図8d）
- せん断ひずみとせん断ひずみ速度の比を計算することで断層の活動間隔を推定
- 地質学的ひずみ速度から得られた断層の活動間隔（3,100年）は
- 活断層調査より得られた平均活動間隔（産業技術総合研究所, 2015）とほぼ一致

⇒ 熊本地震は過去10万年間続く断層運動と整合的であることを示唆

参考文献

松田 (1988): 地球, 10, 599-603. 池田 (1996): 活断層研究, 15, 93-99.
中川ほか (2009): 国土地理院時報, 118, 1-8. Shen et al. (1996): J. Geophys. Res., 101, 27957-27980.
産業技術総合研究所 (2015): 活断層データベース (https://dbank.gsj.jp/activefault/index_gmap.html)

謝辞

本報告は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業（地層環境長期安定性評価補証技術開発）」の成果の一部である。本報告には、国土地理院GEONET F3解、および、産業技術総合研究所の活断層データベースを使用して頂きました。記して感謝致します。

断層の活動間隔の推定

変位 → ひずみ（≡今回の地震で解放されたひずみ）
変位速度 → ひずみ速度（≡ひずみの蓄積速度）

ひずみ ÷ ひずみ速度 = 断層の活動間隔

地質学的ひずみ速度（活断層データ）を用いた場合：

図7dと図8dより… **3,100 (±1554) 年**
定常的な地殻変動から推定したひずみ速度を用いた場合：
図7dと図9より… **238 (±116) 年**

地質学的手法により推定された、布田川セグメント、および御船セグメント（日奈久断層）の平均活動間隔は、それぞれ、3,100年、4,100年である（産業技術総合研究所, 2015）。

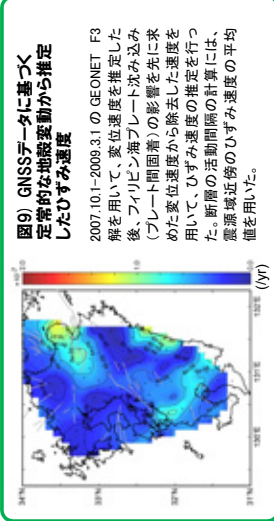


図9) GNSSデータに基づく定常的な地殻変動から推定したひずみ速度
2007.10.1～2009.3.1のGEONET F3解を用いて、変位速度を推定した後、フィリピン海プレート沈み込み（プレート間面滑）の影響を先に取り除いた変位速度から除去した速度を用いて、ひずみ速度の推定を行った。断層の活動間隔の計算には、震源域近傍のひずみ速度の平均値を用いた。

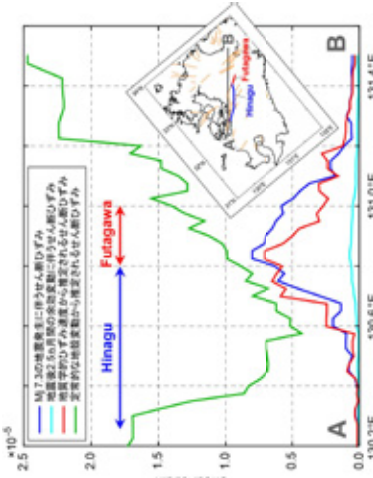


図10) 布田川・日奈久断層沿いのせん断ひずみ分布

推定した断層の活動間隔に、得られたひずみ速度を掛け、布田川・日奈久断層沿いの**ひずみ分布**を求めた。地震時に解放されたひずみと地質学的ひずみ速度より推定したひずみには良い一致が見られる（青色と赤色の曲線）。



超深地層研究所計画：再冠水試験に係わる調査研究

－研究坑道の冠水に伴う岩盤変位－

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部 結晶質岩地質環境研究グループ
桑原 和道 ・ 松井 裕哉 ・ 尾崎 裕介

再冠水試験の目的

坑道の掘削・維持管理により乱された地質環境特性の回復・定常化過程の知見の蓄積と、それらの調査・解析技術の構築

岩盤力学分野における実施内容

- ① 長期観測が可能な光ファイバ式変位計を開発
- ② 開発した岩盤変位計を用いた長期観測

◆光ファイバ式岩盤変位計を用いた長期モニタリング

計測概要

(1)測定精度
測定精度 0.01mm(ファブリペロ単体の分解能は0.001mm)

(2)測定範囲
最拡張状態にて0mmを、最収縮状態にて10mmを出力するが、本計測では岩盤の圧縮側および伸び側の両方の変位が測定できるように、ひずみ計の出力値が約5mmとなる位置で設置している。設置時を初期値(0mm)とし、縮む側が「プラス」、伸び側が「マイナス」で表現される。

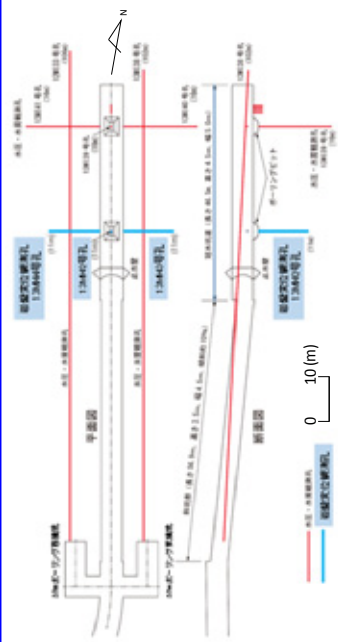


図1 岩盤変位計の実機と設置概要

図2 岩盤変位観測孔位置
(深度500m研究アクセス北坑道)

計測結果

□岩盤変位計の設置	2014年3月 6日～3月14日
□予備計測	2014年3月14日～3月27日
□本計測	2014年3月27日～計測中

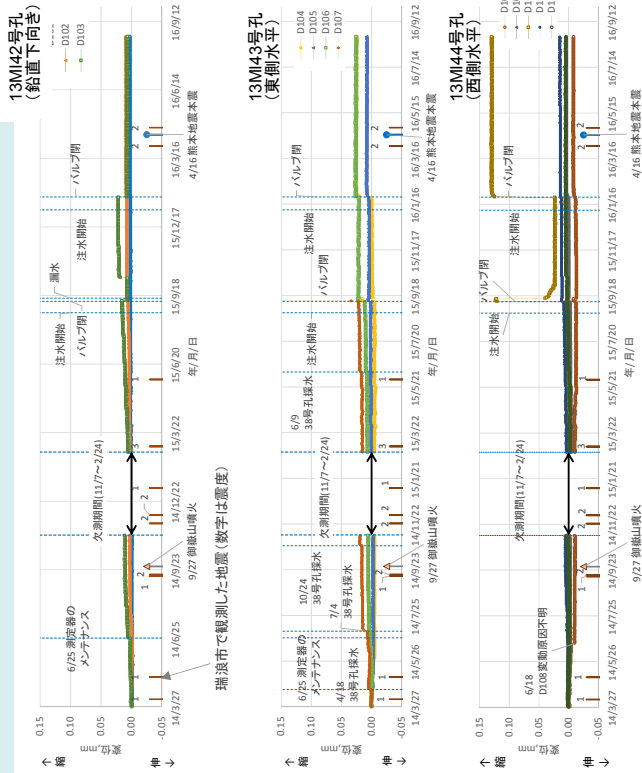


図3 測定開始から現在(8/23)までの経時変化

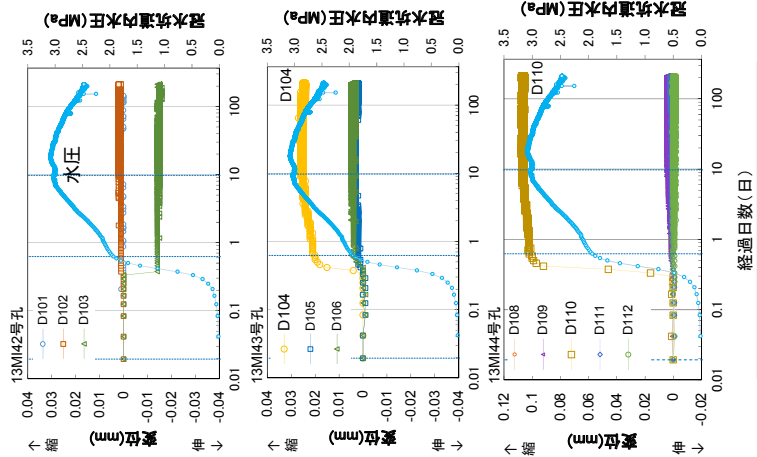


図4 冠水坑道内への注水開始(1/25)から現在(8/23)までの経時変化
(横軸は対数表示)

図5 観測孔の断面図

表1 冠水坑道内の水圧上昇が生じた場合に予測される岩盤変位量

固定した水圧上昇値 (MPa)		2	3	4	5
上記の水圧上昇と仮定したヤング率から計算された岩盤のひずみ量 (×10 ⁻³)		40	60	80	100
観測孔		変位量(mm)			
		変位計の長さ	40 MPa水圧上昇(80 MPa水圧上昇)100 MPa水圧上昇の長さ	変位計の長さ	変位計の長さ
13M42号孔	D101	9.15	0.03	0.04	0.05
	D102	14.15	0.06	0.08	0.11
	D103	14.15	0.06	0.08	0.11
	D104	14.15	0.02	0.02	0.03
13M43号孔	D105	4.15	0.02	0.02	0.03
	D106	14.15	0.06	0.08	0.11
	D107	24.15	0.02	0.02	0.03
	D108	4.15	0.02	0.02	0.03
13M44号孔	D109	14.15	0.06	0.08	0.11
	D110	19.15	0.06	0.11	0.15
	D111	19.15	0.08	0.11	0.15
	D112	19.15	0.08	0.11	0.15

成果

- ① 変位計システムの性能確認

計測開始から2年5ヵ月以上経過した。計測値には、顕著なドリフト傾向もなく安定して計測が継続できている。変位計D107の不具合が見られるものの、これ以外の変位計は欠測なく、計測システムは正常に動作している。

- ② 岩盤挙動について

冠水試験の水圧上昇時にD104およびD110で岩盤が縮む変位が捉えられた。従って、水圧変化により坑道周辺岩盤がわずかに変形したと推測される。

今後

引き続き計測を行い、長期的な岩盤挙動の把握に努めるとともに、継続して機器性能を確認する。

超深地層研究所計画：再冠水試験に係わる調査研究 ー 研究坑道の冠水に伴う地下水の水圧変化ー

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部 結晶質岩地質環境研究グループ
毛屋 博道・高安 健太郎・小橋 昭夫・尾上 博則・竹内 竜史

再冠水試験の目的

坑道の掘削・維持管理により乱された地質環境特性の
回復・定常化過程の知見の蓄積と、それらの
調査・解析技術の構築

水圧観測の実施内容

- ◇坑道閉鎖後の水圧回復プロセスに関する基礎データの取得を目的として、以下を実施した。
- ① 坑道の冠水に伴う坑道内および周辺岩盤中の地下水の水圧変化の観測
 - ② 水圧観測データに基づく周辺岩盤における水圧変化の傾向分析

水圧観測の概要

- 冠水坑道周辺の複数のボーリング孔に多段式パッカーシステムを設置し、水圧観測を実施(図-1)

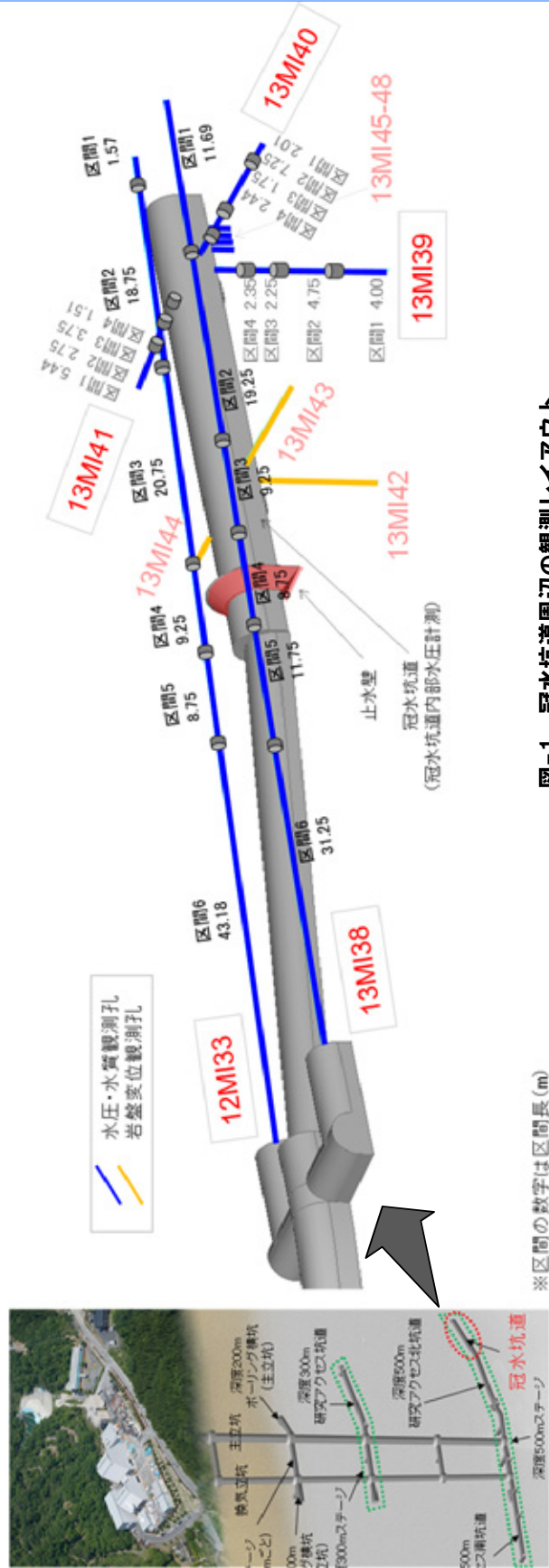


図-1 冠水坑道周辺の観測レイアウト

実施内容①：坑道の冠水に伴う坑道内および周辺岩盤中の地下水の水圧変化の観測

- 再冠水試験に伴う冠水坑道内部の水圧観測結果を整理(図-2)
 - 第2回止水壁性能確認試験／再冠水試験
全水頭でE.L.20m(3.1MPa)まで回復 ピークを示した後、低下傾向
- 坑道周辺の水圧変化から、各観測区間での水圧応答の違いを確認(図-3)
 - 応答有：12MI33号孔区間2, 3 13MI38号孔区間1～4
 - 応答無：12MI33号孔区間1, 5, 6 13MI38号孔区間5, 6
 - 12MI33号孔の水圧は、坑道掘削前
試験後(10日後)
E.L.90～110m(3.8～4.0MPa)
E.L.20～90m(3.1～3.8MPa)
- 坑道断面方向の水圧より、冠水坑道からの距離と水圧の関係、各観測区間の回復量を確認
 - 13MI39号孔～41号孔の観測区間の距離と水圧には相関性はない(図-4)
 - 各観測区間の回復量にはバラツキを確認

⇒ 坑道周辺の水圧応答の違いや冠水坑道からの距離と水圧の関係、各観測区間の回復量は、冠水坑道と各観測区間を連結する透水性割れ目の分布の影響を反映していると考え

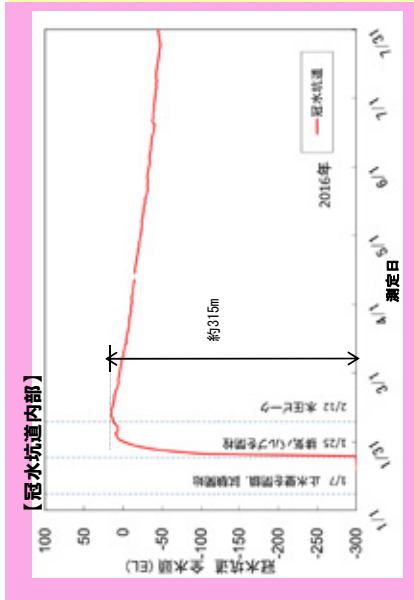


図-2 冠水坑道内部の水圧観測結果

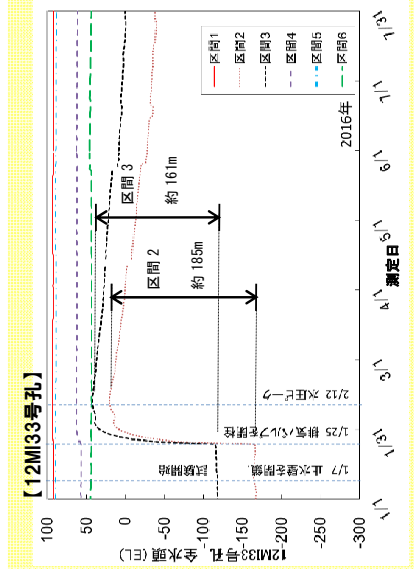


図-3 坑道周辺の水圧変化（坑道軸方向）

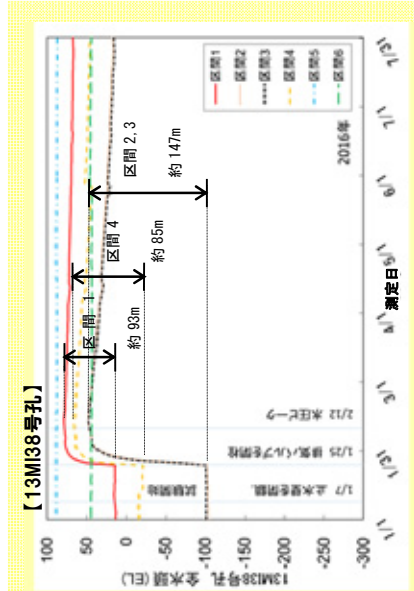


図-4 坑道周辺の水圧変化（坑道軸方向）

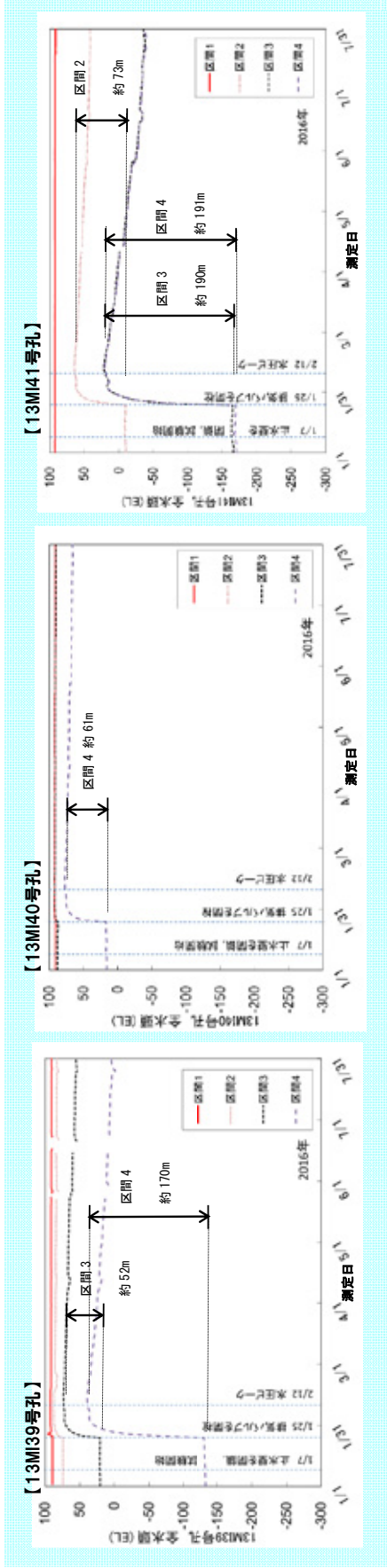


図-4 坑道周囲の水圧変化（坑道断面方向）

実施内容②：水圧観測データに基づく周辺岩盤における水圧変化の傾向分析

- 坑道周囲の岩盤の水理的特性を把握するため、再冠水試験に伴う坑道と各観測区間の水圧変化の傾向を整理
- 圧力変化の時間微分値(デリバティブプロット¹⁾)に着目した水圧変化の傾向整理方法
 - ・ 単孔式水理試験のデータ整理に用いられるデリバティブプロットは、微小な水圧変化を強調することが可能
 - ・ 観測区間と冠水坑道内部の水圧変化の傾向を、プロットの山状、谷状の特徴や全体の形状で定性的に3つに分類(「冠水坑道に類似」、「冠水坑道にやや類似」、「冠水坑道と異なる」)

整理結果の一例(デリバティブプロットによる分類)

- ・ デリバティブプロットの形状の類似性に着目し、坑道と各観測区間の水圧変化の傾向を整理(図-5の赤プロットの変化)
 - ・ 今回の比較・分類から、冠水坑道周辺の岩盤は水理的に複数の領域に区分できる可能性を示唆
- ⇒ デリバティブプロットの形状に着目した比較・分類は、水圧変化の傾向把握に有効

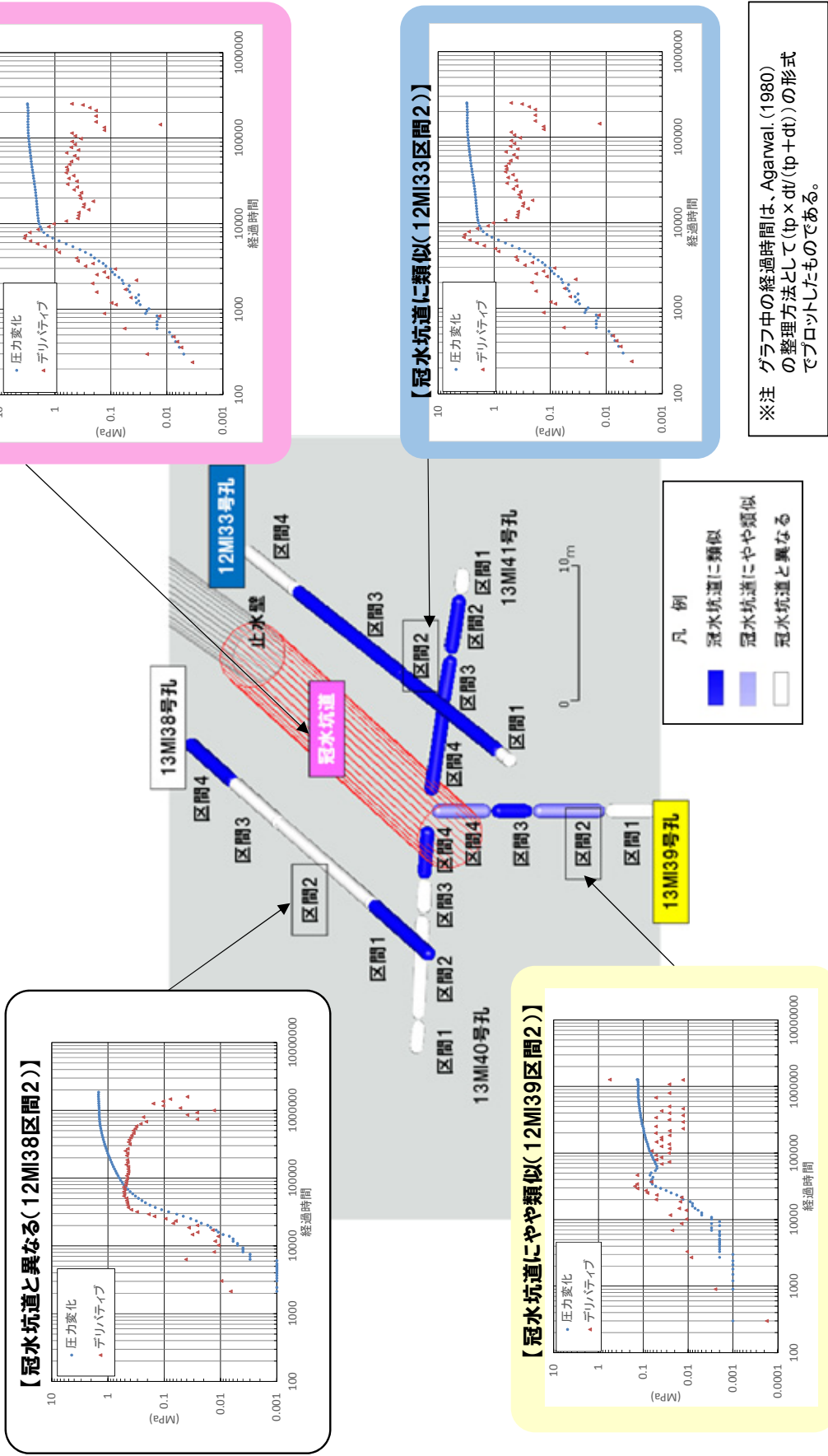


図-5 冠水坑道と各観測区間の水圧変化の傾向

成果

- ✓ 冠水坑道内及び周辺岩盤において水圧観測を実施し、坑道内の冠水に伴う地下水圧の変化を把握
- ✓ 坑道周辺岩盤における水圧変化の傾向を詳細に分析するにあたっては、デリバティブプロットの形状に着目した比較・分類が有効

今後

- ✓ 冠水坑道及び周辺岩盤での水圧観測を継続
- ✓ 再冠水試験の排水過程についてもデリバティブプロットでの整理を行い、回復時との比較を実施

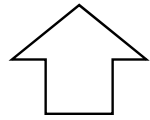
<参考文献> 1) Roland N. Horne (1996): Modern Well Test Analysis: A Computer-Aided Approach Second Edition, Petroway, Inc., p.67

超深地層研究所計画：再冠水試験に係わる調査研究 －研究坑道の冠水に伴う地下水の水質変化－

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部 結晶質岩地質環境研究グループ
久保田満・林田一貴・加藤利弘・岩月輝希

再冠水試験の目的

坑道の掘削・維持管理により乱された地質環境特性の回復・定常化過程の知見の蓄積と、それらの調査・解析技術の構築



地球化学分野における実施内容

冠水坑道および周辺ボーリング観測孔において、冠水に伴う地下水の水質変化の中から、以下の項目についてプロセスの解析を実施した。

- ① 主要成分・蛍光染料濃度の変化
- ② 酸化還元状態の変化
- ③ pH変化

これまでの成果

① 冠水坑道内への地下水流入を確認

- 冠水坑道および周囲の地下水の流れを確認する目的で、坑道内の地下水にウラニンを指標として加え観測した。結果として、周囲の地下水の流れ込みにより、約7ヶ月間で初期値の地下水が2割程度まで希釈されているのを確認した。(図1)

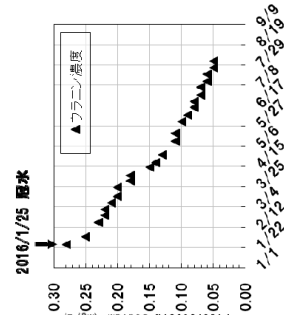


図1 ウラニ濃度の経時変化

冠水坑道内の地下水は、周囲からのウラニンを含まない地下水の流入により希釈された状態となる。
坑内の溶存成分濃度の経時変化について検討した結果、

- 1) 地下水の流入により変化する成分(図2)
- 2) 水-岩石反応により変化する成分(図3)

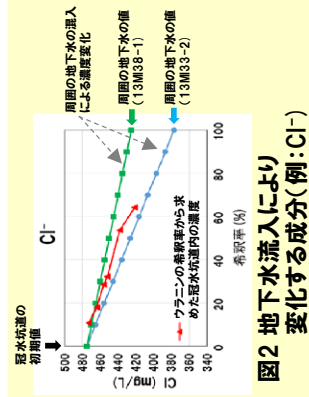


図2 地下水流入により変化する成分(例:Cl⁻)

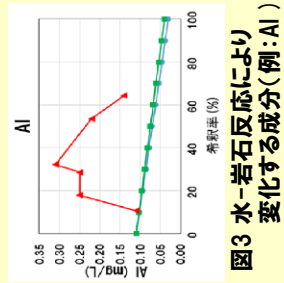


図3 水-岩石反応により変化する成分(例:Al)

② 冠水坑道内地下水の還元環境の回復を確認

- 地下水の溶存酸素濃度(DO)は、約4か月で検出限界以下(0.02mg/L)になることを確認した。(図4)
- 地下水の酸化還元電位(Eh)は、約4か月で坑道掘削前と同等の-180mVまで回復することを確認した。(図4)

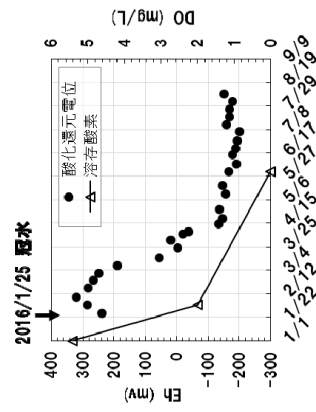


図4 冠水坑道内のDO, Ehの経時変化

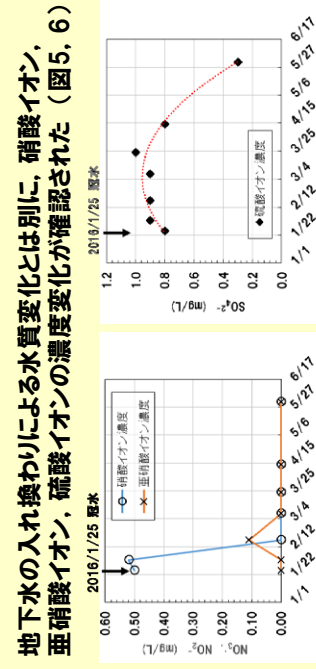


図5 冠水坑道内のNO₃⁻, NO₂⁻の経時変化

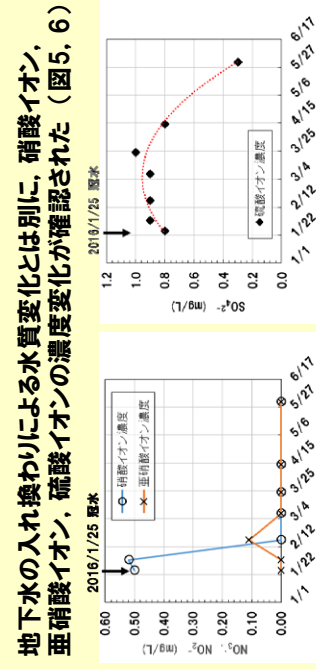
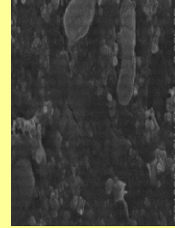


図6 冠水坑道内のSO₄²⁻の経時変化

一連の水質変化は、微生物による還元作用に特有の過程である。地下水中の微生物により、最初に溶存酸素が消費され、続いて硝酸イオン、硫酸イオンが還元され、還元環境が形成されたと考えられる。



冠水坑道内で確認された微生物

③ 地下水のアルカリ化を確認

- 坑道内の地下水のpHは、約6か月でpH10付近まで上昇していることを確認した。(図7)

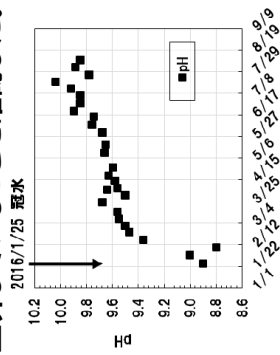


図7 冠水坑道内のpHの経時変化

pHの変化は、壁面のコンクリートに含まれるポルトランダイト(Ca(OH)₂)の溶解によると想定される。(図8)
溶解したCa²⁺は、カルサイト(CaCO₃)となり沈殿しているのを確認した。(図9)

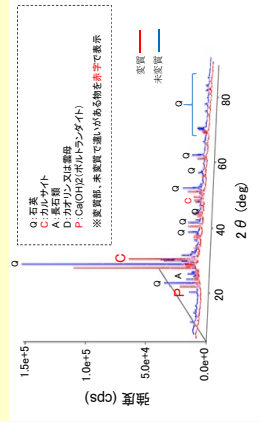


図8 冠水坑道壁面コンクリートのX線回折結果

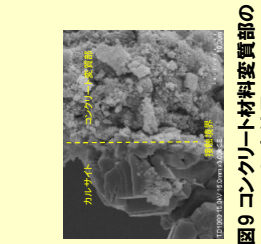
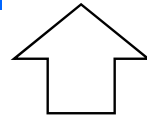


図9 コンクリート材料変質部のSEM観察結果

成果

- 地下坑道を閉鎖した場合の水質変化について、微生物の還元作用による地下水の還元環境の回復が確認された。
- コンクリート材料の溶け出しによりpHが上昇し、地下水のアルカリ化が進むことが確認された。



今後

定期的な観測を続けるとともに、冠水坑道内外の水質変化プロセスをモデル化し、坑道閉鎖後の長期的な水質の変遷の予測手法を構築する。

超深地層研究所計画：再冠水試験に係わる調査研究 － 研究坑道周辺岩盤における割れ目のモデル化－

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部 結晶質岩地質環境研究グループ
尾上 博則・高安 健太郎・林田 一貴・竹内 竜史・岩月 輝希

再冠水試験の目的

- 坑道の掘削・維持管理により乱された地質環境特性の回復・定常化過程の知見の蓄積と、それらの調査・解析技術の構築

モデル化における実施内容

- 冠水坑道周辺岩盤における割れ目のモデル構築に資するための基礎情報の整理を目的として、坑道の冠水に伴う地下水の水圧及び水質の回復挙動に基づき、以下を実施
 - ①坑道周辺岩盤の水理学的領域区分と地球化学的領域区分の推定
 - ②坑道周辺岩盤中の割れ目分布の概念化

実施内容①：坑道周辺岩盤の水理学的領域区分と地球化学的領域区分の推定

- 地下水の水圧変化に基づく水理学的領域区分の推定

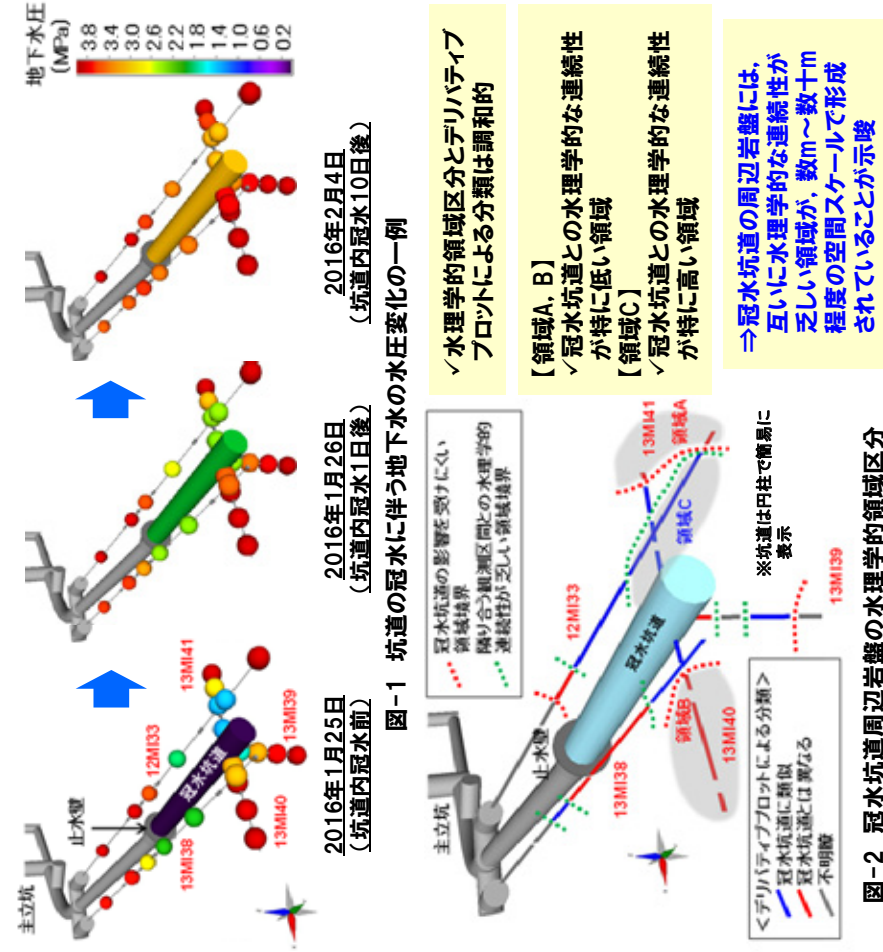


図-2 冠水坑道周辺岩盤の水理学的領域区分

実施内容②：坑道周辺岩盤中の割れ目分布の概念化

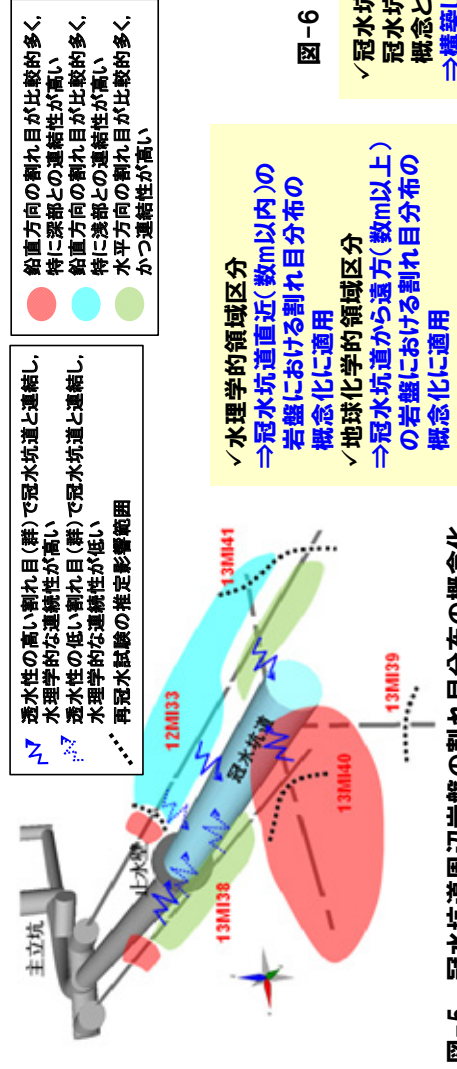


図-5 冠水坑道周辺岩盤の割れ目分布の概念化

成果

- 再冠水試験に伴う地下水の水圧及び水質の回復挙動に基づき、周辺岩盤中の不均質な割れ目分布を概念化
- 坑道壁面及び周辺ボーリング調査結果と比較し、構築した概念の妥当性を確認

今後

- 本研究で構築した割れ目分布の概念に基づき、冠水坑道周辺岩盤を対象とした割れ目ネットワークモデルなどの割れ目の不均質性を考慮したモデルの構築

- 地下水の水質変化に基づく地球化学的領域区分の推定

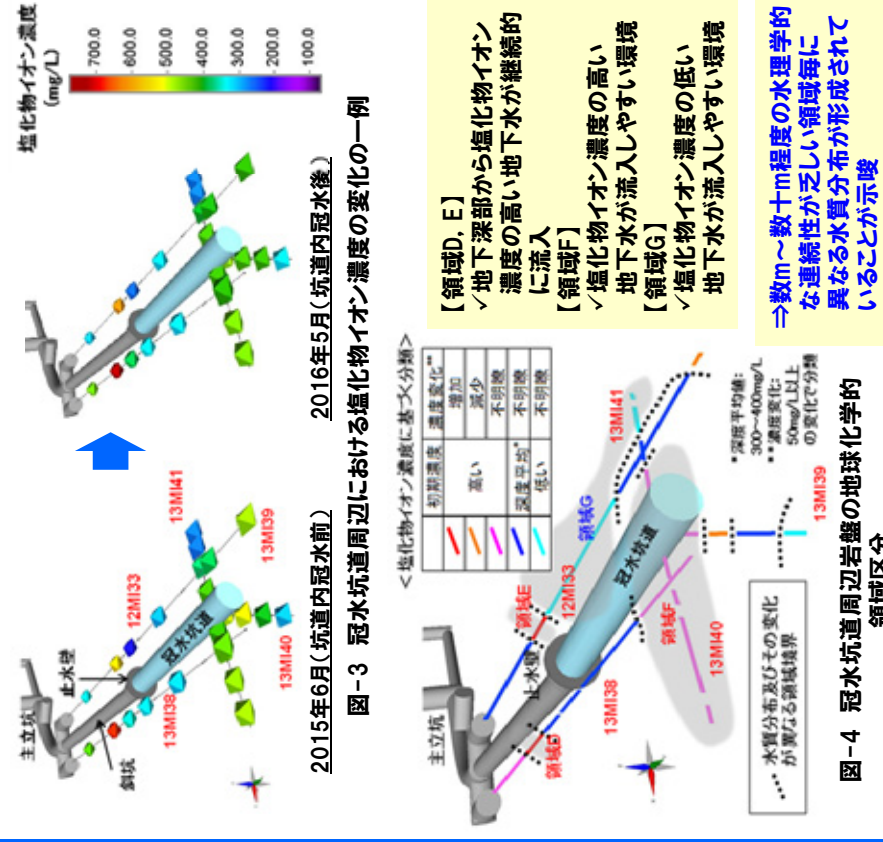


図-4 冠水坑道周辺岩盤の地球化学的領域区分

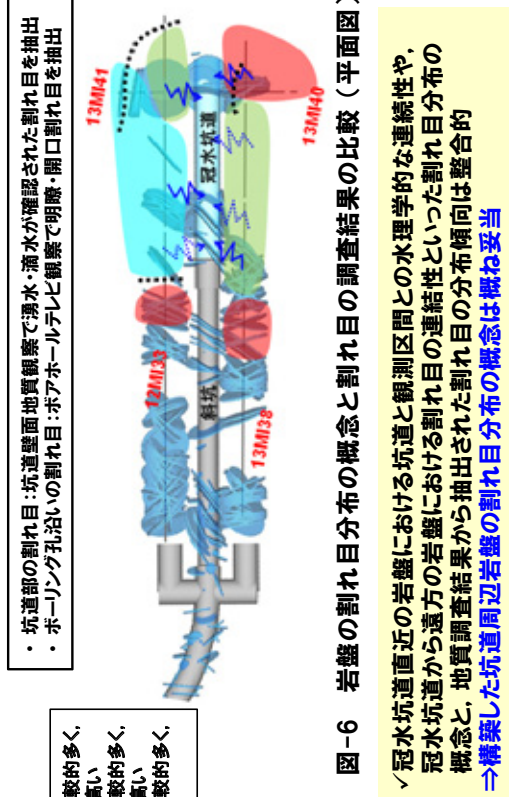


図-6 岩盤の割れ目分布の概念と割れ目の調査結果の比較 (平面図)

超深地層研究所計画：再冠水試験に係わる調査研究

—止水壁の機能確認について—

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東豊地科学センター 地層科学研究部 結晶質岩地質環境研究グループ

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東豊地科学センター 建設建設課

松井 裕哉・見掛信一郎
佐々木定雄 池田 幸喜

再冠水試験の目的

坑道の掘削・維持管理により乱された地質環境特性の回復・定常化過程の知見の蓄積と、それらの調査・解析技術の構築

能機求販の壁の止水壁に設計した

- ・岩盤との一体性を確保し、長期間の水密性及び栓材としての機能を発揮する。
- ・高水圧下(設計水圧 5MPa)でも十分な構造安定性、ひび割れ抵抗性を保有する。
- ・コンクリート打設量の制約を踏まえて、容量の少ない形状とする。

第 二 章 概 述

(1) 止水壁構築に使用した
コンクリートの配合仕様
(設計基準強度:50MPa(圧縮時))

水粉 体比 (%)	水結 材 率 (%)	水 量 W	セメン ト LPC	膨脹 材 量 Ex LSP	石灰 石 粉 量 LSP	細骨 材 積 S	粗骨 材 積 G	流動 化 SP P-SP	単位量(kg/m ³)
32.5	45.0	175	366	B	150	806	763	P×1% 程度	

計測項目	機器名称	製造元・形式	測定範囲	精度 (非線形性)	外観	操作性
湿度	ヒタメー シ温度計	東京測器 (KT110A)	-10～40℃	±0.3℃		↑ 上昇 ↓ 下降
表面変位	変位変換器	東京測器 (TFC-50A)	0～50mm	±0.5%RO (±0.3mm)		↑ 引張 ↓ 圧縮
境界層圧力	応力計	井谷電機 (BR100-KBT)	10MPa	±1%RO (±0.1MPa)		↑ 引張 ↓ 圧縮
コンクリート 応力	コンクリート 有効応力計	東横エルクス (GK-36N-605)	36N/mm ²	±1%RO (±0.4MPa)		↑ 引張 ↓ 圧縮
鉄筋応力	鉄筋応力計	東横エルクス (GR-N)	SD 345	±1%RO (±0.4MPa)		↑ 引張 ↓ 圧縮
境界変位	線目計	東京測器 (KJ35-10A)	10mm	±0.3%RO (±0.03mm)		↑ 開口 ↓ 閉塞

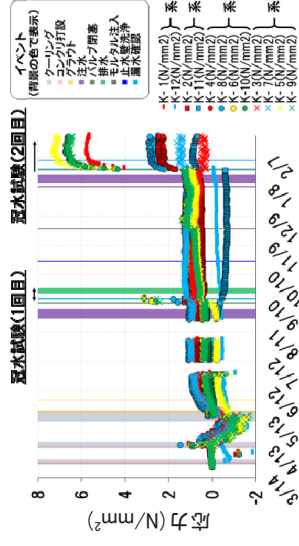
(2)使用した測定機器・精度等

(2)使用した測定機器・精度等

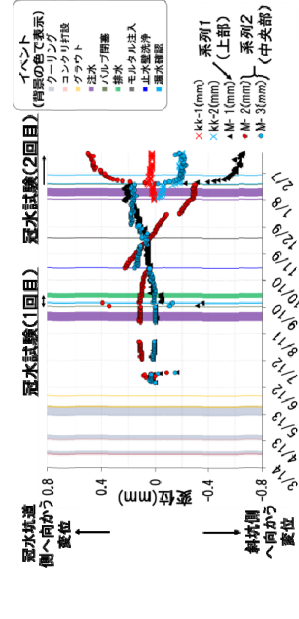
計測項目	機器名	測定元・形式	測定範囲	精度 (測定精度)	外観	十	一
温度	ヒヤメーター シロ温度計	東京測器 (KCT10A)	-10~80℃	±0.3℃		上昇	下降
表面電位	表面電位器	東京測器 (EP-90A)	0~50mm	±0.5%RO ($\approx \pm 0.3$ mm)			
境界層圧力	圧力計	共和計測 (BR100K&T)	10MPa	±1%RO ($\approx \pm 0.1$ MPa)		圧縮	引張
コンクリート 圧力	コンクリート 有効圧力計	東機工メス (CK-36N-505)	36N/mm ²	±1%RO ($\approx \pm 0.4$ MPa)		圧縮	引張
鉄筋圧力	鉄筋圧力計	東機工メス (GRN1)	SD 345	±1%RO ($\approx \pm 0.1$ MPa)		圧縮	引張
培養電位	銀電計	東京測器 (K-30-10A)	10mm	+0.3%RO ($\approx \pm 0.03$ mm)		開口	閉塞

主な計測結果について

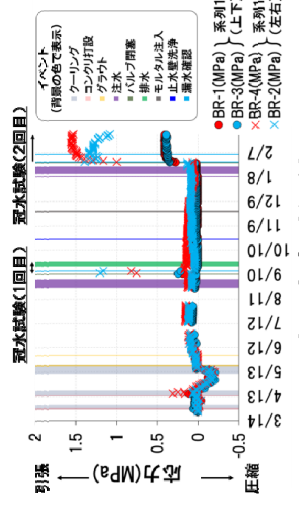
- ・止水壁内の応力(コンクリート、鉄筋)は、冠水坑道内からの水圧作用後は圧縮側に発生し、その増分値も設計基準強度より十分小さいため、止水壁自体の力学的構造安定性は確保されている(例えば下左図)。
- ・表面変位計測では、坑道の左右で止水壁の動きが逆向きになっているが、境界応力についても左右での応力値に大きな差がある。止水壁近傍で現在実施している湧水量計測結果でも止水壁の東西(左右)で湧水量やその変化の傾向が異なっており、これらの計測結果と調和的である(下中央及び下右図)。
- ・他の計測結果からも、補修後は止水壁は1枚の鉄筋コンクリート壁として動いており、設計時の解析で想定した状況と整合的に考えられる。すなわち止水壁が均質な連続体という想定を逸脱する状況にはない。



コンクリート有効応力計測結果 (止水壁施工後～機能確認試験終了)



表面変位計測結果
(止水壁施工後～機能確認試験終了)



境界応力計測結果 (止水壁施工後～機能確認試験終了)

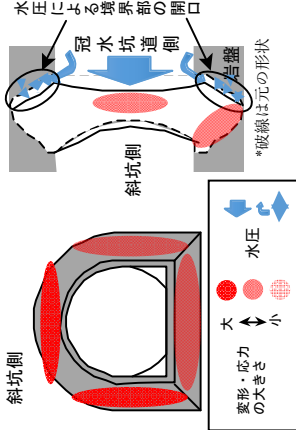
成果

◇止水壁の機能について

各種計測結果から、止水壁は、現状の冠水坑道内の水圧レベルにおいて試験必要期間内に応力的に破損する恐れはほとんどなく、再冠水試験中の地質環境の回復挙動の測定に大きな支障はないものと考えられる。

◇止水壁の状態について

各種の計測結果を総合的に解釈し、機能確認試験終了時の止水壁及びその周辺の状態を考察した(右図)。



斜坑側

微企

引き続き計測を行い、止水壁の
状態変化に関するデータの蓄積
を図りつつ、同種の構造物の構築
に当たつての留意点等について
検討する。

超深地層研究所計画：地質環境特性の長期変遷解析技術に関する研究 ー 地質構造モデルの構築と主立坑断層近傍の割れ目の特徴 ー

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部 結晶質岩地質環境研究グループ
野原 壮・酒井 利啓・村上 裕晃・石橋 正祐紀

目標・実施概要

地質・地質構造について、断層などの影響を含めた地質環境特性の長期変遷解析技術の開発を目的として、以下の課題を設定

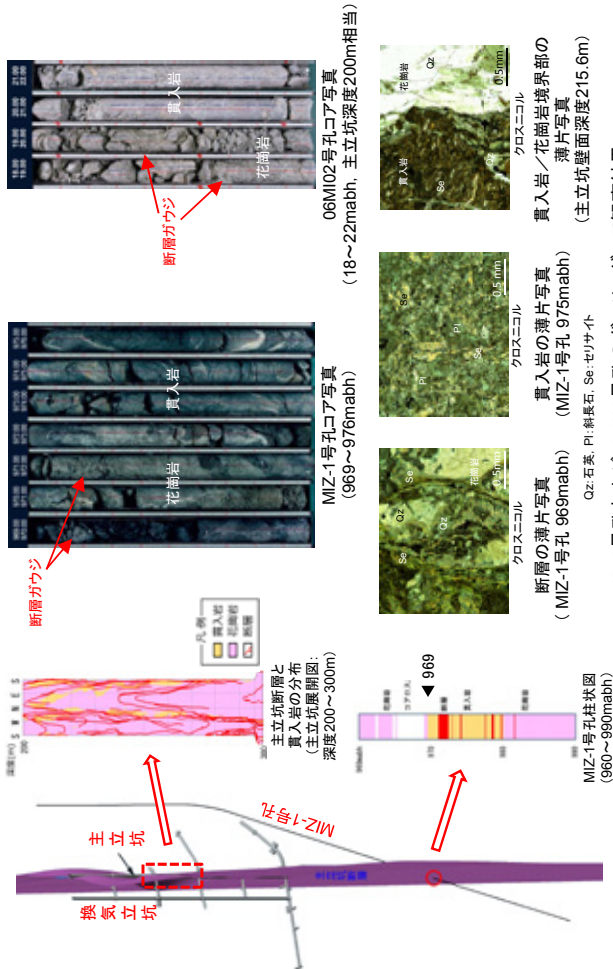
- ✓ 地質構造の分布を把握するため、サイトスケールの地質構造モデルの妥当性を確認
- ✓ 地質環境に対する自然現象の影響の範囲や大きさを推定する調査技術の検討
- ✓ 地質環境特性の長期変遷を理解するための調査手順の整備

<2015年度の実施概要>

- ✓ 深度500mまでの壁面地質調査およびボーリング調査のデータ解析とボーリングコアの観察に基づき、地質構造モデルを構築
- ✓ 断層の種類や性状について、06MI02号孔およびMIZ-1号孔のボーリングコアの観察と既存情報の解析を実施
- ✓ 主立坑断層近傍の高透水区間における割れ目の特徴に関して、先行ボーリング調査データと立坑の壁面地質データの解析を実施

【本ポスターでの報告内容】 ①地質構造モデルの構築 ②主立坑断層近傍の割れ目の特徴

①地質構造モデルの構築



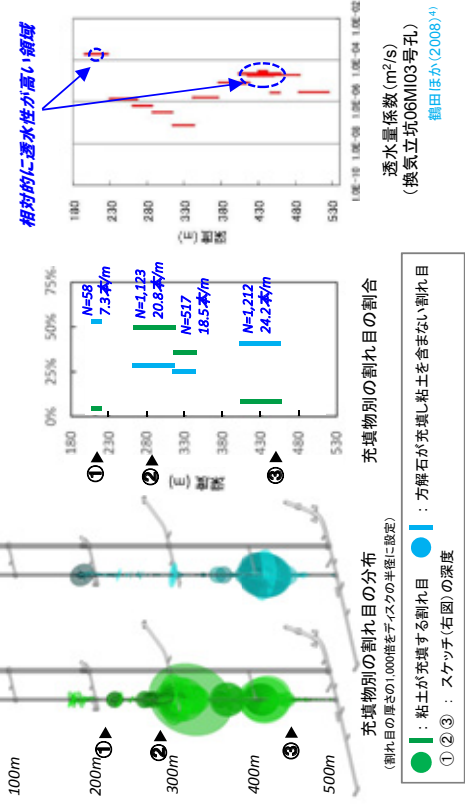
【主立坑断層の性状】

- ✓ 主立坑断層とMIZ-1号孔の969断層は、断層ガウジを主体とし、花崗岩と貫入岩の境界に発達する特徴を示す同一の断層であることを確認

【地質構造モデルの構築】

- ✓ 500m研究坑道の壁面観察結果の整理、ボーリングコアの再観察、既存情報の整理を実施
 - > 主立坑断層とMIZ-1号孔の断層は**同様の走向を示し、貫入岩を伴う**という特徴が一致
 - > 主立坑断層モデルの分布を見直し
- ✓ 岩相および割れ目帯の分布は、第1段階の地質構造モデルとおおむね一致

②主立坑断層近傍の割れ目の特徴



【割れ目充填鉱物と岩盤の透水性の関係】

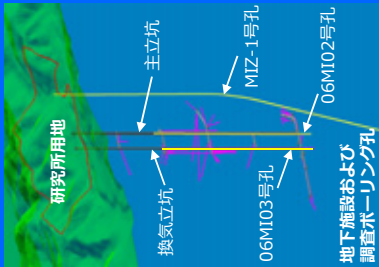
- ✓ 相対的に透水性が高い領域の割れ目：充填物に方解石が卓越
- ✓ 相対的に透水性が低い領域の割れ目：充填物に粘土が卓越
 - > 岩盤の透水性は、卓越する充填物の種類によって異なることを確認

まとめ

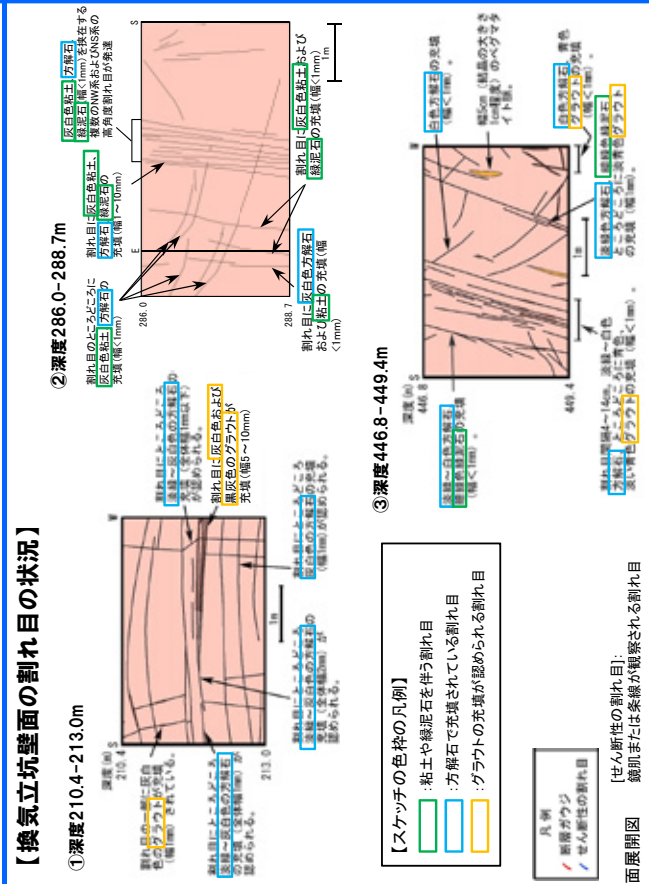
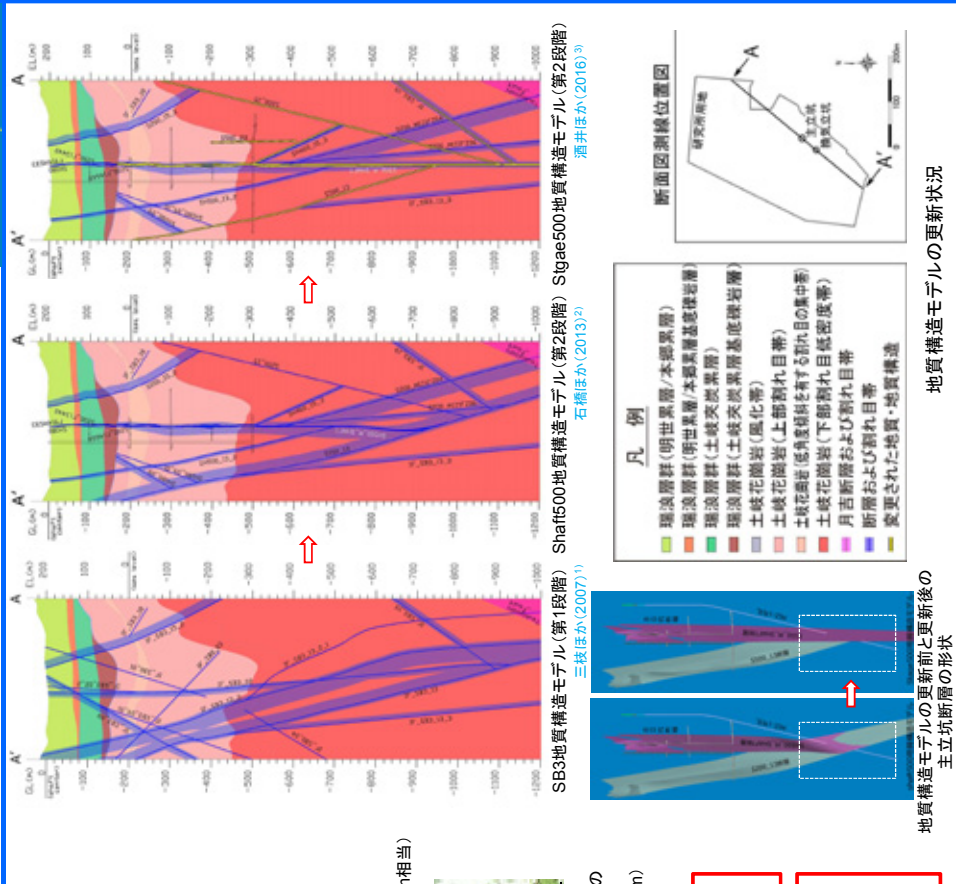
- ✓ 深度500mステージのデータを追加して地質構造モデルを更新し、第1段階の予測結果の妥当性を確認
- ✓ 岩盤の透水性は、卓越する割れ目充填物の種類によって異なることを確認

今後の課題

- ✓ 研究坑道の既存情報を活用した高透水性割れ目の分布と特徴の把握
- ✓ 天然現象による地質環境への影響の調査手法の検討
- ✓ 割れ目充填鉱物に着目した透水性割れ目形成過程の調査手順の検討



参考文献 1) 三橋ほか(2007): JAEA-Research 2007-043 3) 清井ほか(2016): JAEA-Research 2016-009
2) 石橋ほか(2013): JAEA-Research 2013-019 4) 鶴田ほか(2008): JAEA-Research 2008-098



超深地層研究所計画 地下坑道における工学的対策技術の開発 ーポストグラウトの施工結果と評価ー

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 施設建設課

見掛 信一郎・池田 幸喜・渡辺 和彦・芝 伸之・門口 義明

清水・鹿島・前田特定建設工事共同企業体

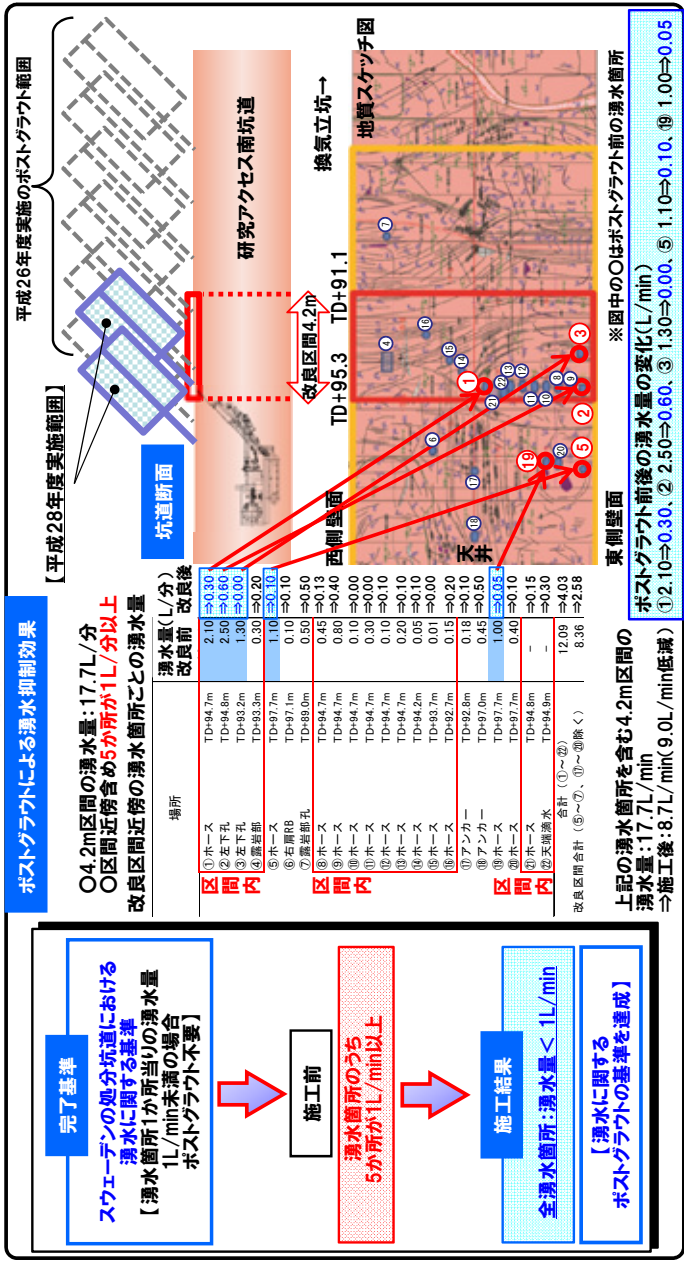
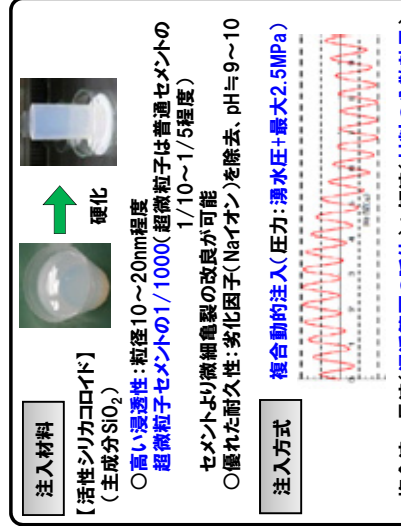
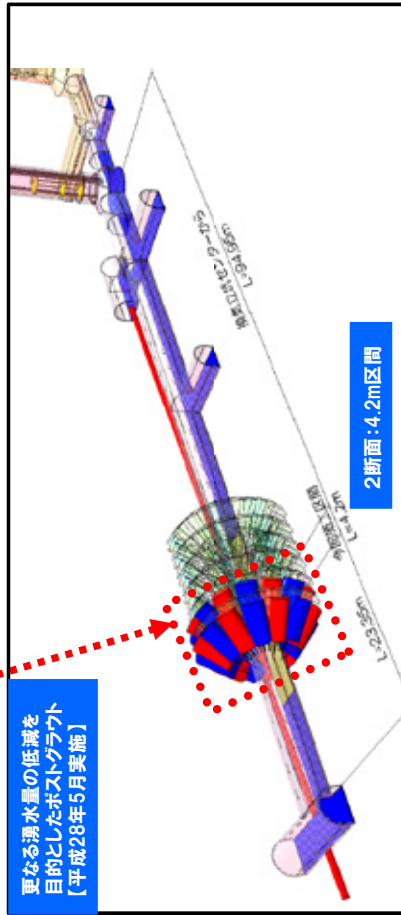
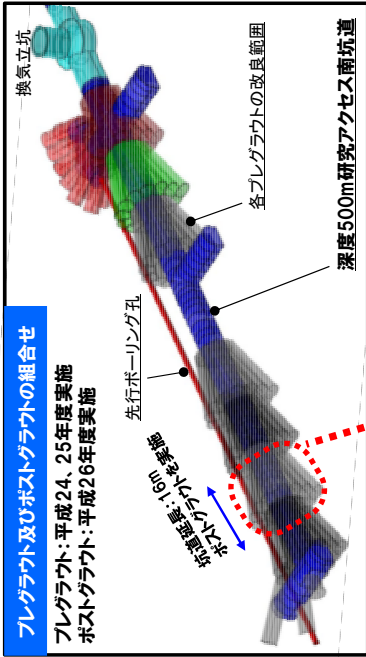
辻 正邦・草野 隆司・栗田 和昭

超深地層研究所計画の全体目標

- ① 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備
・地質、地質構造、地下水の動きや性質、岩盤の熱・力学特性、岩盤中の物質の挙動、坑道掘削が周辺の岩盤に与える影響などを明らかにしていく技術基盤の整備
- ② 深地層における工学技術の基盤の整備
・地下深部に研究坑道を安全かつ合理的に設計・施工・維持できることを確認

湧水抑制対策

実施内容 ○注入材料としてフレグラウトでは普通セメント及び超微粒子セメント、ポストグラウトでは超微粒子セメント及び溶解型グラウトを使用
○ウォータータイトグラウト技術の実証(フレグラウトとポストグラウトの組合せ)
○地下水浸透理論にもとづく解析による湧水抑制の評価手法の構築



成果の反映

【成果】 研究坑道の建設に係る工学技術のうち、湧水抑制対策(ウォータータイトグラウト技術:フレグラウト及びポストグラウトの組合せ)の有効性を確認

【反映】 ・地層処分場の設計、建設ならびに操業にかかわる湧水抑制対策の技術基盤を整備
・将来における大深度地下空間利用にかかわる湧水抑制対策の検討のための基礎的知見を提供

背景

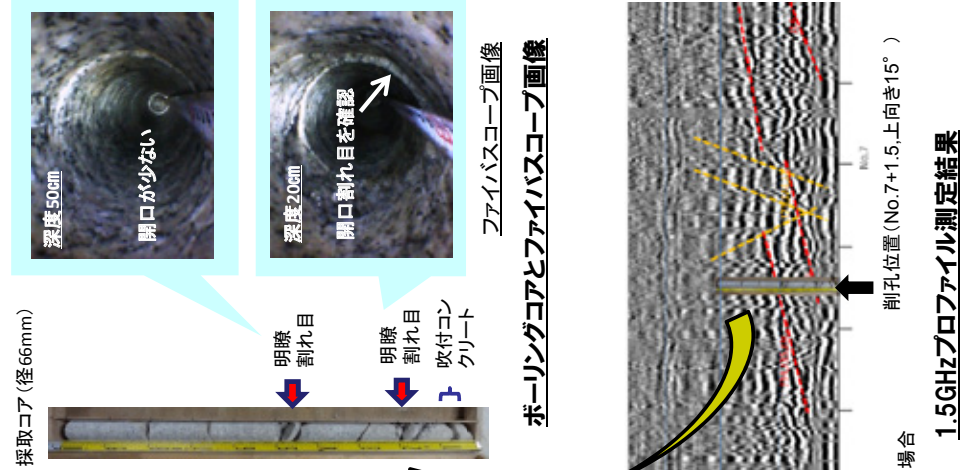
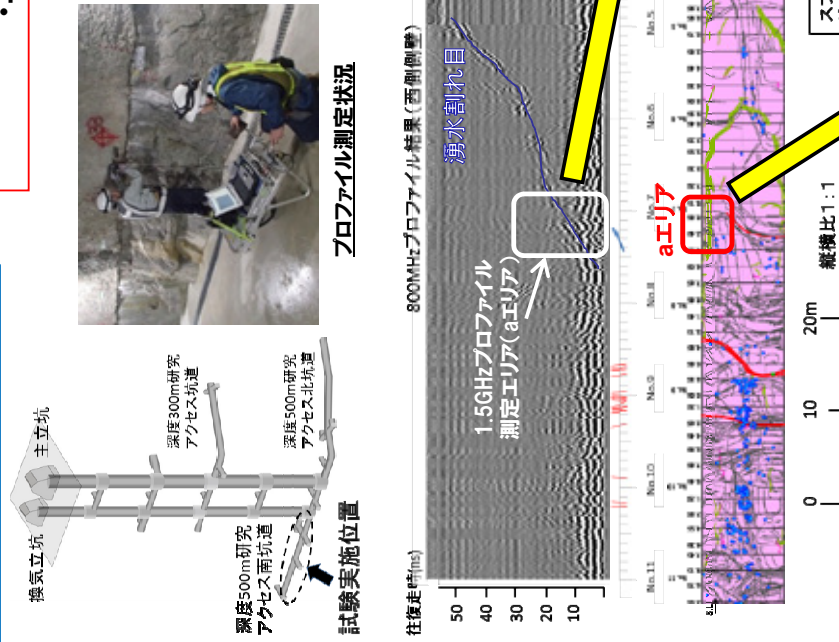
- 高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全性評価の観点から、地下坑道掘削に伴い、その周辺に発達する掘削影響領域の水利特性（透水性や連続性、飽和不飽和状態）の評価が重要
- 本共同研究では、掘削影響領域の水利特性を非破壊的に評価するための手法として、物理探査手法である地中レーダ調査に着目

目的・実施内容

- 【目的】
- 坑道近傍に分布する岩盤内割れ目の水利特性の評価に対する地中レーダ調査の有効性の検証
- 【実施内容】
- 瑞浪超深地層研究所の研究坑道近傍に発達する掘削影響領域の透水割れ目を対象に地中レーダ調査を実施し、調査手法としての適用性を確認

プロファイラ測定結果

- 【計測項目】・800MHz、1.5GHzレーダプロファイラ測定
・コア観察、ファイバースコープによる割れ目調査

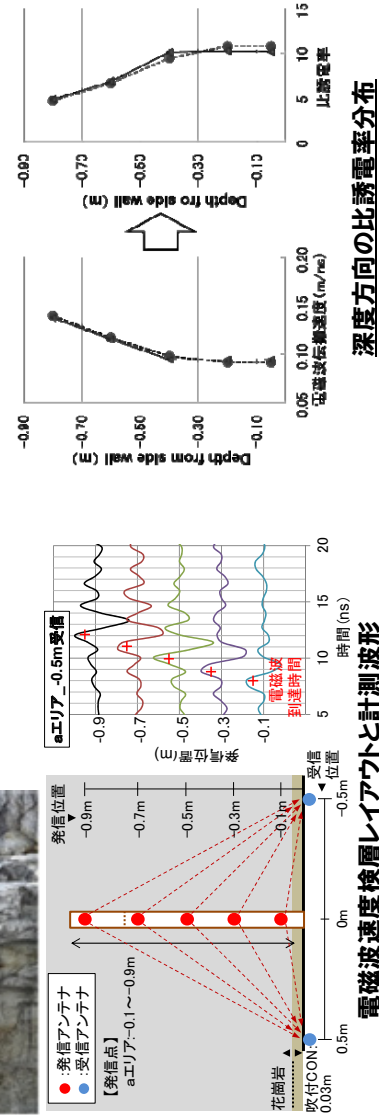


電磁波速度測定試験結果

- 【計測項目】
- 地中レーダタイプとポアホールタイプのミニレーダを用いて、電磁波の直達波の伝搬時間を測定
孔内発信⇒側壁面受信



- 電磁波速度は坑壁近傍で小さく、奥に行くほど大きい
- 坑壁近傍で比誘電率が大きいことを示しており、ゆるみで割れ目が開口し、その割れ目に地下水が浸透した可能性あり



試験のまとめ

- 地中レーダを用いることで、坑壁近傍の湧水割れ目やグラウト充填割れ目の分布の検出が可能
- 電磁波速度測定を行うことで、坑壁近傍における水みちとなる割れ目の存在を推定できる可能性あり

- 地中レーダを用いて、割れ目の水利特性の変化を評価するための基礎情報の取得を目的として、坑壁の割れ目を対象とした実証試験を実施予定

【その1】逆解析手法を用いた断層の物理特性推定に関する予察検討

目的・実施内容

背景

- ✓ 高レベル放射性廃棄物の地層処分安全評価においては、地下深部かつ広範囲の不均質な地下水流動特性を効率的に評価する調査・解析手法の整備が重要
- ✓ 原位置調査には、調査数量や工期など様々な制約条件があり、取得される調査データは限定的

目的

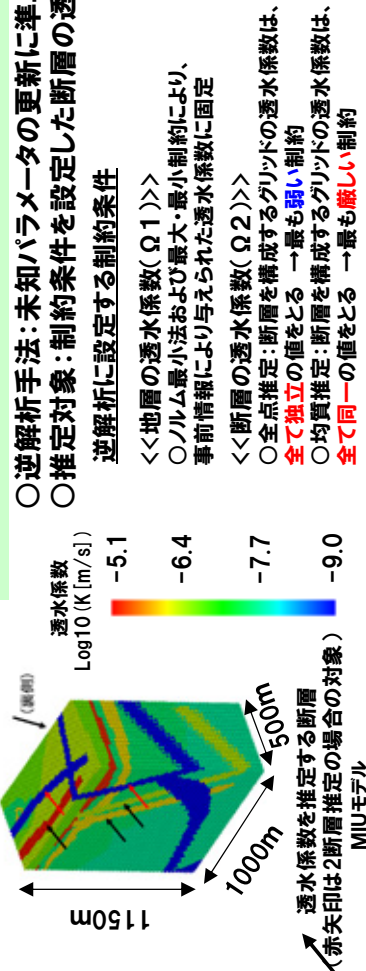
- ✓ 揚水試験などによる地下水圧の変化データを用いた水理地質構造の逆解析による推定手法の構築
- ✓ 逆解析を組み込んだ地下水流動特性の評価手法の整備

実施内容

- ✓ 揚水試験を模擬した数値実験に基づき、地下水流動特性評価における逆解析手法の適用方法に関する検討を実施

解析条件

- ✓ 実測データを用いた検討に先立ち、瑞浪超深地層研究所周辺の水理地質構造を模擬した数値モデル(以下、MIUモデル)を用いた逆解析を実施



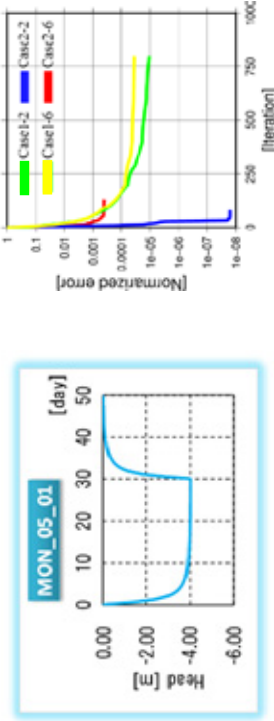
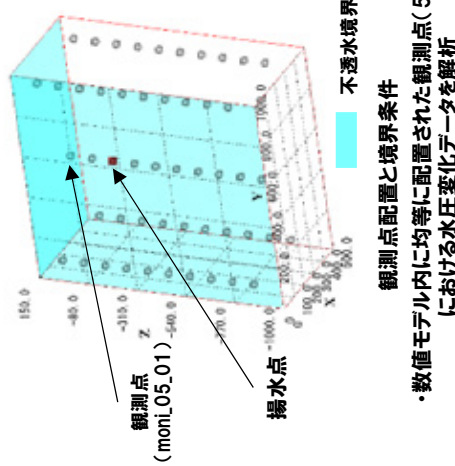
断層内部の制約	解析ケース			
	断層の数	6枚	2枚	2枚
全点推定	Case 1-6	Case 1-2		
均質推定	Case 2-6	Case 2-2		

→断層に与える制約条件および推定対象断層の枚数を変えた4ケースの解析を実施

✓ 揚水試験を模擬した数値実験

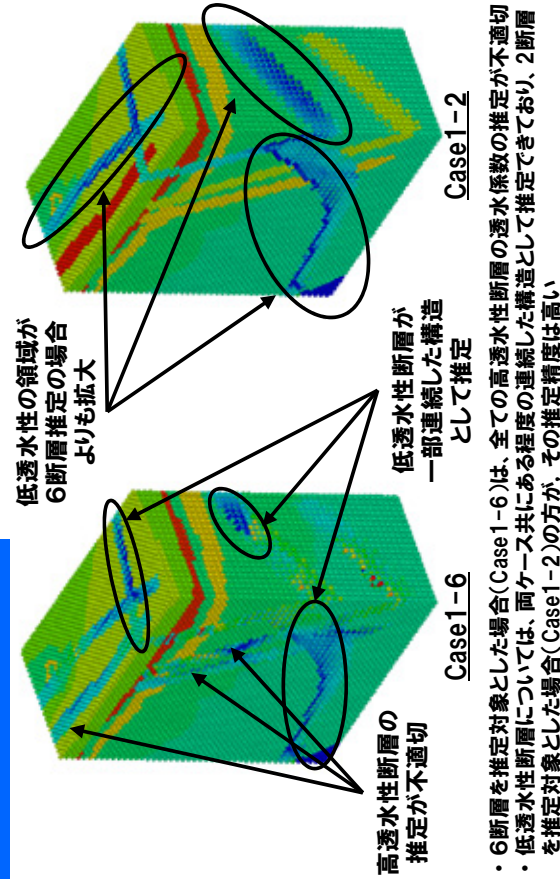
揚水試験条件	
揚水量	240L/min
揚水期間	30日間
観測期間	50日間

入力条件(逆解析)		
初期モデルの透水性係数	推定する断層部	
	真値	10^{-9}m/s
貯留係数		10^{-4} (推定しない)

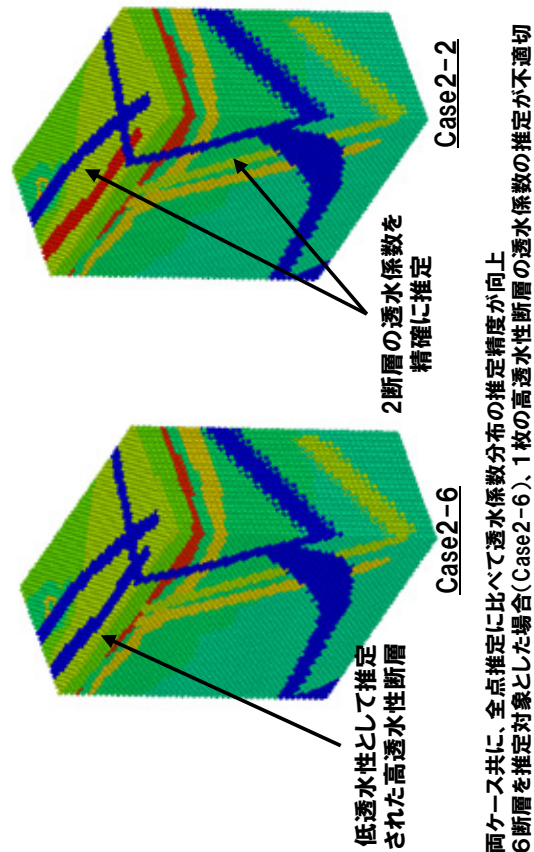


逆解析結果

<全点推定>



<均質推定>



全点推定の場合、推定する断層の枚数を減らすことで**断層内部の透水性係数分布の推定精度**が改善 (Case 1-2)

- ✓ 均質推定の場合、より**多くの枚数**の断層の透水性係数を推定可能 (Case 2-6) → 場合に応じて全点推定手法と均質推定手法の使い分けの必要有り
- ✓ 低透水性断層は高透水性断層と比較して推定精度が高い (Case 1-6) → 母岩に対して**低透水性を有する構造**の特定に有効な可能性有り

まとめ 今後の予定

まとめ

- ✓ 水圧変化データを用いた逆解析で、透水性係数分布の推定精度を向上させるためには、推定対象を絞り込むための事前情報が必要

今後

- ✓ 本研究で実施した逆解析に必要な事前情報を効率的に取得するための手法の検討
- ✓ 原位置試験で得られた水圧変化データをを用いた解析の実施

【その2】逆解析手法を利用した地下水観測位置の最適化検討

目的・実施内容

背景

- ✓ 原位置調査で取得できる情報は量的・空間的に限られるため、地下水流動解析に用いる地下水特性パラメータには不確かさが存在
- ✓ 逆解析は、地下水観測データから合理的に地下水特性パラメータのキャリブレーションが実行できることから、解析の信頼性確保に有効

目的

- ✓ 逆解析の結果は観測データの数量・取得位置により影響を受けることから、想定した水理場に応じて地下水観測位置を適切に選定する手法の開発

実施内容

- ✓ 模擬観測データを用いた逆解析の結果に基づいて有効な地下水観測位置を評価する方法について検討

解析条件

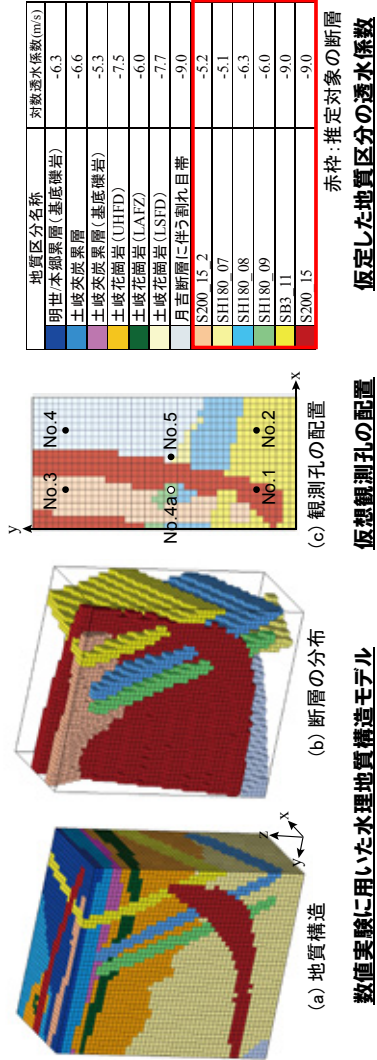
- ① 瑞浪超深地層研究所周辺を対象とした水理地質構造モデルを適用した数値実験
- ② 順解析により仮想的な揚水試験を実施した際の水圧応答を算出し、模擬観測データとして適用
- ③ 逆解析手法であるアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)により、モデルに考慮した断層の透水係数を推定
- ④ 逆解析に用いる観測情報が異なるケースを実施し、透水係数の推定精度から逆解析に有効な観測配置を評価

【観測・揚水条件】

- ・5本の観測孔を均等に配置
- ・各観測孔内で、EL25mから深度方向に100m間隔で計10点の観測点を設置
- ・中央観測孔のEL-125mにおいて、240 L / minの割合で揚水
- ・30日間の揚水後、停止してさらに20日間観測を継続

【逆解析条件】

- ・6本の断層の透水係数(等方)を推定
- ・比貯留係数は全地質区分で同様(10^{-6}m^{-1})に設定
- ・800分毎に取得された観測データを用いて、透水係数の修正を逐次更新
- ・EnKFのサンプル数は96に設定



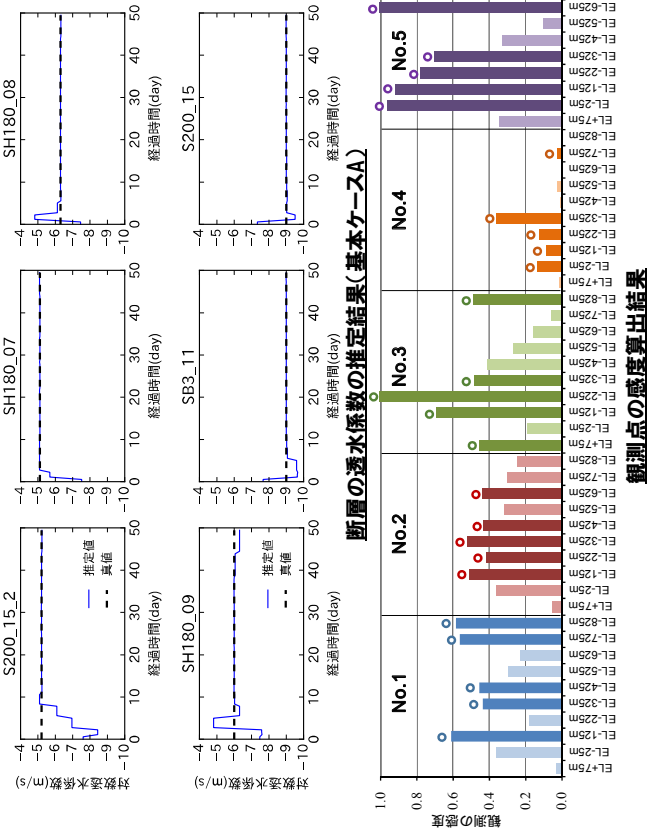
逆解析結果

解析ケース

	基本ケースA	ケースB	ケースC	ケースD
観測点数	50	25	25	25
孔配置	初期配置	初期配置	初期配置	1孔を移動
深度配置	100m間隔	200m間隔	感度から選定	200m間隔

基本ケースA: 全ての観測結果を逆解析に使用した場合

- ✓ 透水係数を精度良く推定できており、逆解析に用いた観測結果は十分な情報を有している。
- ✓ EnKFの結果から求めた観測感度は、孔位置・深度によって大きく異なる。
- ✓ 水圧の解析値のばらつき(不確かさ)が大きい領域が認められる。



感度は観測更新時の寄与を示す。No.4孔は近傍に断層がないため、低い感度を示す。⇒ ケースCでは感度に着目し、各観測孔の上位5点(上図○印)の観測点のみを使用して逆解析を実施

まとめ

今後の予定

- ✓ EnKFの解析結果を用いて観測位置を選定することで、限られた観測点数でも逆解析の精度の向上が可能であることを確認
- ✓ 本スキームにより、想定した水理地質構造モデルでの水理場を考慮して、合理的な観測配置や観測数の提案が可能

今後

- ✓ 瑞浪超深地層研究所で実施された揚水試験に伴う地下水観測データを用いた逆解析手法の有効性確認と活用方法の検討

東濃地震科学研究所では、主立坑と換気立坑との間の避難所に設置してある地震計（加速度計：JEP-6A3-10）を利用した、地震計鉛直アレイ観測を行っていた（大久保他，2012など）。この観測では、深度500mでの発破を利用して立坑近傍の地震波速度構造の推定などを行った。今回、自然地震や人工震源を利用した地殻構造やその変化の推定等を目的とし、2016年9月15日より観測を再開した。観測再開後、震源距離60km程度以内でM3クラスの地震が2回発生した。これらの地震による観測波形例を紹介する。深度100mでの直達P波の増幅や直達S波の散乱などが観測された。

表1: 2つのイベントの震源要素(気象庁による)

	発震時	緯度	経度	深さ	Mj	震源距離
EQ1	2016/09/19 21:10:31.14	35.4135° N	137.5707° E	7.3 km	3.0	31 km
EQ2	2016/09/20 10:45:33.50	34.9603° N	136.7643° E	14.9 km	2.8	63 km

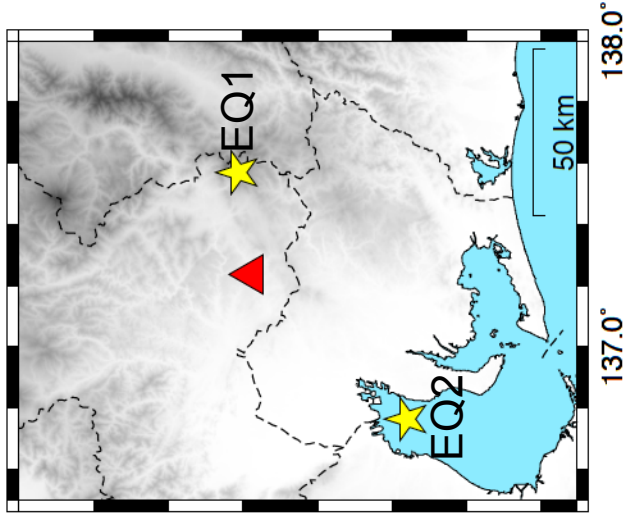


図1: 震源(★)と観測点(▲)の位置

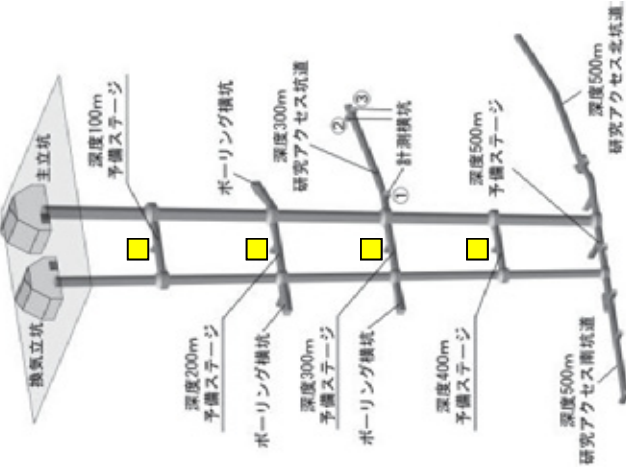


図2: 立坑内における地震計の設置

(https://www.jaea.go.jp/p/04/tono/syuhor/280910_280916.pdf より)

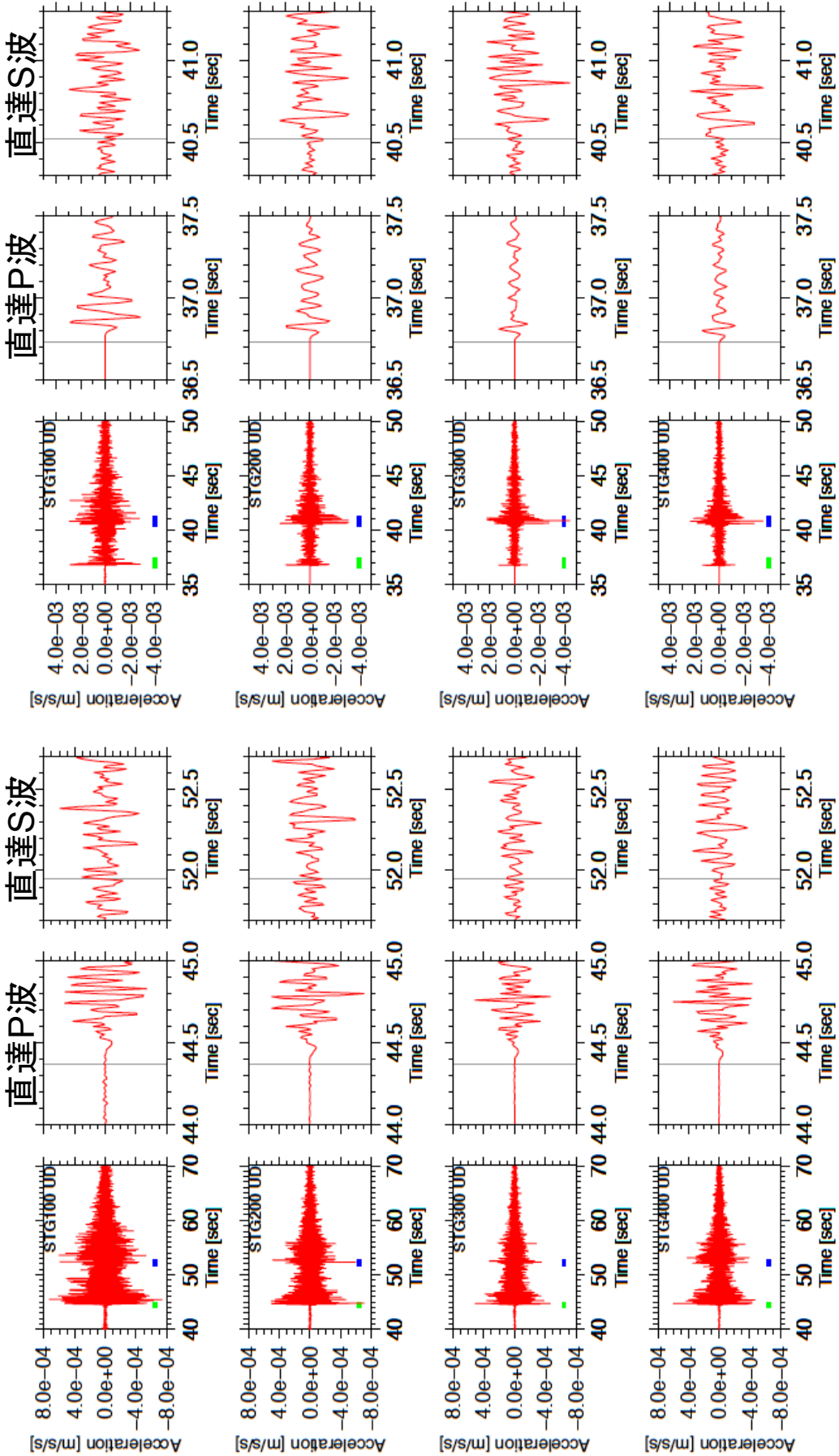


図3: EQ2の各ステージでの観測波形(上下動成分)。図中の緑線と青線はそれぞれP波・S波を示す。

図4: EQ1の各ステージでの観測波形(上下動成分)。図中の緑線と青線はそれぞれP波・S波を示す。

4. 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技術基盤の整備に資するため、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 28 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次回以降の「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。

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량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

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

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	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
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	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, 比エネルギー分与, 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	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてののみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(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
粘着力のモーメント	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
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎平方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ 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	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	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/10 800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

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

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

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 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。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エル	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
フオト	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 ^(a)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4 π) A m ⁻¹

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

表 10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=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 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15℃」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

