JAEA-Review
2017-042
DOI:10.11484/jaea-review-2017-042

「平成 29 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, 2017

（編）西尾 和久　弥富 洋介　濱 克宏

(Eds.) Kazuhisa NISHIO, Yosuke IYATOMI and Katsuhiro HAMA

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

March 2018

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, 2018

JAEA-Review 2017-042

「平成 29 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，濱　克宏

（2017 年 12 月 28 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29年10月31日に岐阜県瑞浪市で開催した「平成29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。

東濃地科学センター：〒509-6132　岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64
＊株式会社ペスコ

JAEA-Review 2017-042

Proceedings of Information and Opinion Exchange Conference on Geoscientific Study, 2017

(Eds.) Kazuhisa NISHIO*, Yosuke IYATOMI and Katsuhiro HAMA

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 28, 2017)

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 31, 2017.

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 再冠水試験による岩盤の水理特性評価手法の検討 3
2.1.2 地中レーダを用いた坑道近傍の水みち評価 10
2.2 地質環境の長期安定性に関する研究 19
2.2.1 調査技術の開発・体系化 －地球物理学的手法による地殻構造イメージング技術の高度化－ 19
2.2.2 年代測定技術の開発 －地下水の化石“炭酸塩鉱物”の年代測定に向けて－ 25
3. ポスターセッション発表資料 33
4. おわりに 61

Contents

1. Overview of the Information and Opinion Exchange Conference on Geoscientific Study . 1
2. Presentations on research and development 3
2.1 Mizunami Underground Research Laboratory Project 3
2.1.1 Hydrogeological study on groundwater recovery experiment 3
2.1.2 Evaluation of flow paths around tunnel using ground penetrating radar 10
2.2 Research on Geosphere Stability for Long-term Isolation of Radioactive Waste 19
2.2.1 Investigation techniques for high-resolution imaging of crustal heterogeneity 19
2.2.2 Technical developments of dating for carbonates 25
3. Posters 33
4. Concluding remarks 61

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）では，高レベル放射性廃棄物の地層処分の実現に必要な基盤的な研究開発を着実に進めるとともに，原子力発電環境整備機構が行う高レベル放射性廃棄物の地層処分事業における地質環境調査，処分システムの設計・安全評価，国による安全規制上の施策等のための技術基盤を整備し，提供するため，地層処分技術に関する研究開発を進めている。

このうち東濃地科学センターでは，地質環境特性を把握するための調査・評価技術の整備をめざした深地層の研究施設計画（「超深地層研究所計画」）と，地下深部の地質環境に影響を及ぼす可能性のある自然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価する手法の整備として「地質環境の長期安定性に関する研究」の二つの研究を進めている。超深地層研究所計画については，平成26年度に原子力機構改革[1)]の一環として抽出された深地層の研究施設で行うべき三つの必須の課題（「地下坑道における工学的対策技術の開発」，「物質移動モデル化技術の開発」，「坑道埋め戻し技術の開発」）[2)]を進めている。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」），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」）の三つのカテゴリーで研究開発を進めている。

当センターが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29年度は，10月31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，11月1日には，瑞浪超深地層研究所の深度500m研究坑道の見学会を開催した。

平成29年度の「情報・意見交換会」では，超深地層研究所計画については，深地層の研究施設で行う必須の課題の一つである「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における岩盤水理特性評価に関する現状，および鹿島建設株式会社と原子力機構の共同研究として実施した地中レーダによる坑道周辺岩盤における水理特性評価に関する研究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は，地球物理学的手法による地殻構造イメージング技術の高度化，および試料の導入にレーザーアブレーション装置を備えた誘導結合プラズマ質量分析装置を用いた分析法（LA-ICP質量分析法）による炭酸塩鉱物のウラン（U）–鉛（Pb）年代測定技術の開発についての研究成果について報告した。その他の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。表1-1に，平成29年度の「情報・意見交換会」のプログラムを示す。

表 1-1「平成 29 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 29 年度 東濃地科学センター 地層科学研究 情報・意見交換会」 ー第 3 期中長期計画における研究開発の進捗状況ー	
第 1 日 ; 10 月 31 日(火)	
1. 開会挨拶	13:30～13:35
2. 東濃地科学センターにおける研究概要	13:35～13:50
3. 成果の報告と今後の計画	
(1)超深地層研究所計画	
①再冠水試験による岩盤の水理特性評価手法の検討	13:50～14:05
(発表者：竹内　竜史)	
(質疑)	(5 分)
②地中レーダを用いた坑道近傍の水みち評価(共同研究成果)	14:10～14:30
(発表者：鹿島建設（株）升元　一彦)	
(質疑)	(5 分)
休憩	(15 分)
(2)地質環境の長期安定性に関する研究	
①調査技術の開発・体系化 ～地球物理学的手法による地殻構造イメージング技術の高度化～	14:50～15:05
(発表者：浅森　浩一)	
(質疑)	(5 分)
②年代測定技術の開発 ～地下水の化石“炭酸塩鉱物”の年代測定に向けて～	15:10～15:25
(発表者：横山　立憲)	
(質疑)	(5 分)
4. ポスターセッション　ー個別分野の研究成果ー	15:30～16:25
5. 全体質疑	16:25～16:40
6. 閉会挨拶	16:40～16:45
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 ; 11 月 1 日(水)	
瑞浪超深地層研究所 深度 500m 水平坑道見学会	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 再冠水試験による岩盤の水理特性評価手法の検討

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
竹内　竜史

(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(坑道閉鎖に伴う地質環境回復試験技術の開発, 長期モニタリング技術の開発を含む)」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, 坑道の掘削・維持管理により乱された地質環境特性(地下水位や化学特性, 岩盤の力学的安定性など)の回復・定常化過程の知見の蓄積と, それらの調査・解析技術を構築することを目的とした「再冠水試験」を実施している。本報告では再冠水試験において, これまでに得られている岩盤水理特性評価に関する現状を紹介する。

(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 900m^3)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～2017 年 9 月)
・一部排水・再冠水による水圧低下, 回復過程の再現性確認(2017 年 2 月～8 月)
・冠水坑道からの排水と, これに伴う地質環境特性変化の観測(2017 年 9 月～10 月)

(3)止水壁の閉鎖および一部排水試験に伴う冠水坑道の水圧変化

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 9 月 10 日に開始(止水壁のエア抜き管を閉栓)し, 冠水坑道内の水圧は 1.7MPa(全水頭で E.L.-130m 程度)と上昇したが, 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。漏水箇所の修復を行った後に, 2 回目の試験は, 2016 年 1 月 25 日に開始(エア抜き管を閉栓)した。これにより, 冠水坑道内の水圧は上昇し, 2 月 12 日に 3.1MPa(全水頭で E.L.20m 程度)に達した。その後, 止水壁およびその周囲からわずかな漏水が確認され, 冠水坑道の水圧は徐々に低下したものの, 2016 年 8 月以降は 2.4～2.5MPa(全水頭で E.L.-50m～-40m 程度)で安定した。

冠水坑道の一部排水試験は, 3回実施した。1回目は2017年2月27日～3月7日に実施し, 平均排水

量3.3m³/d，排水期間：2日，水圧低下量0.4MPa，2回目は3月7日～7月18日に実施し，平均排水量1.9m³/d，排水期間：6日，水圧低下量0.2MPa，3回目は7月18日～8月21日に実施し，平均排水量5.6m³/d，排水期間13日，水圧低下量0.7MPaであった。これら3回の試験は排水量，排水期間が異なるものの，いずれの試験も排水停止後の冠水坑道内の水圧は試験前の水圧（約2.5MPa）あるいは，試験前の水圧を若干上回る水圧に回復した。

(4) 冠水坑道周辺の水圧変化

2016年7月～2017年2月までの期間に冠水坑道周辺のボーリング孔で観測された水圧は2.5MPa～3.8MPaであり，水圧値のばらつきはあるものの，各観測区間の水圧は概ね安定した状態が継続した。冠水坑道からの排水に伴う水圧低下や排水停止による水圧回復については，変化量や変化の傾向は観測区間毎に異なり，①冠水坑道と同様の変化を示す領域，②冠水坑道と異なる変化を示す領域，③変化の無い領域，に大別された。この結果は，止水壁閉鎖後の水圧回復の変化および冠水坑道周辺の割れ目分布から推定された水理区分[1)]と概ね一致していた。一方で，3回の一部排水試験での排水に伴う各観測区間の水圧低下は，排水停止後には試験前の水圧まで回復することが再現，確認された。このことは，水理学的連続性や透水不均質性を有する岩盤であっても，坑道掘削に伴う水理学的な擾乱は，坑道閉鎖に伴い初期状態まで回復する可能性を示している。

(5) 今後の予定

冠水坑道周辺での水圧・水質変化のモニタリングを継続するとともに，再冠水試験における地下水流動状況の変化（排水・回復現象）に関わるモデル化・解析を継続する。また，これまでに得られた情報を基に，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・解析を実施し，国際的な専門家会議（DECOVALEX 2019）[2)]により評価・確認していく。

再冠水試験については，2017年9月5日から冠水坑道での全排水作業を実施している。今後，冠水坑道内での比抵抗探査により坑道近傍の含水状態の変化の確認や，岩石試料の採取・分析による冠水坑道内の吹き付けコンクリートの変質状況の確認などを行い，これまでに取得したデータを基礎情報として，地質環境特性の回復・定常化についての知見を蓄積する。

参考文献

1) 尾上ほか(2016)：瑞浪超深地層研究所の再冠水試験に関わる調査研究（3）地下坑道周辺岩盤における割れ目分布の概念化，2016年秋季講演会講演要旨，日本地下水学会，2016，pp.120-125.
2) DECOVALEX：http://decovalex.org/index.html（参照：2017年6月16日）.

情報・意見交換会 2017　JAEA

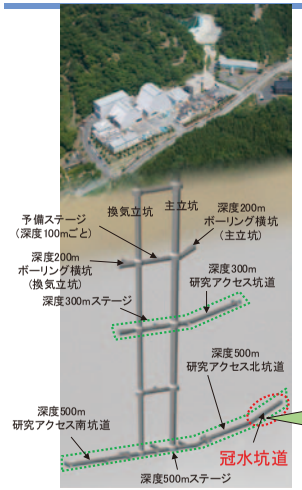
超深地層研究所計画
再冠水試験による岩盤の水理特性評価手法の検討

平成29年10月31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
竹内　竜史

情報・意見交換会 2017　JAEA 2

再冠水試験とは



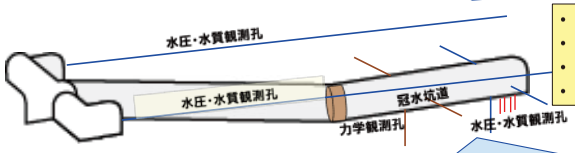
- 地下施設の建設・操業により乱された地質環境の回復能力の例示と関連する技術の開発
  - ✓ 坑道の掘削・維持管理により乱された地質環境特性の回復・定常化過程の知見を蓄積
  - ✓ 坑道閉鎖時の坑道・施設スケールでの地質環境特性の変化（回復過程）の観測・解析技術，施設閉鎖後の地質環境の長期的変遷を推定する解析手法の開発

情報・意見交換会 2017　JAEA 3

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（健岩部・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）

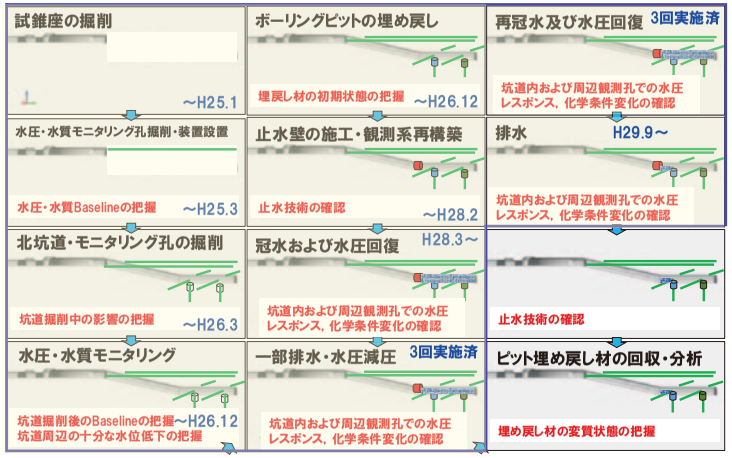


- 深度500m
- 4.5m×5m×約45m
- 容積：約900m^3
- 地下水湧水：約19m^3／d

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）連成解析技術
- 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

情報・意見交換会 2017　JAEA 4

再冠水試験の流れ



一部排水・水圧減圧／再冠水および水圧回復

－目的－
①冠水坑道および周辺の水圧低下／回復挙動の確認
②冠水坑道および周辺の水理学的連続性，不均質性の把握

試験	試験開始	排水期間(d)	平均排水量(m^3/d)
第1回	2017/2/27-	2	3.3
第2回	2017/3/7-	6	1.9
第3回	2017/7/18-	13	5.6

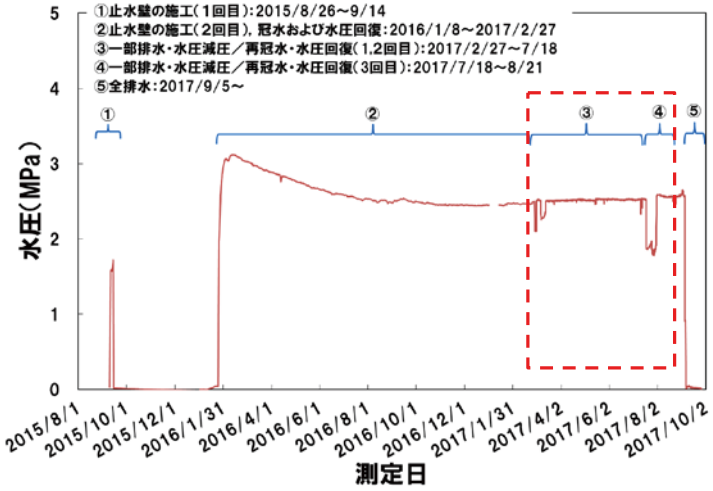
排水期間・排水流量が異なる条件の下で，一部排水・水圧減圧／水圧回復を3回実施

実施内容①

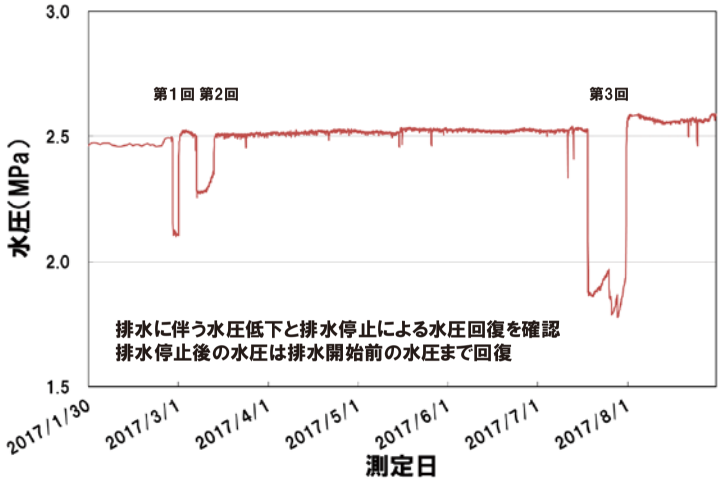
－目的－
①冠水坑道および周辺の水圧低下／回復挙動の確認
②冠水坑道および周辺の水理学的連続性，不均質性の把握

－実施内容①－
✓複数回の排水と排水停止に伴う水圧変化を観測

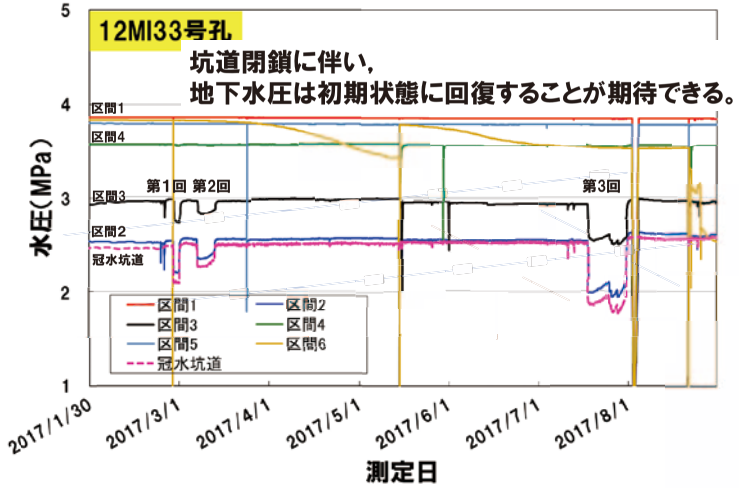
冠水坑道の水圧変化



冠水坑道の水圧低下／回復挙動の確認



冠水坑道周辺の水圧低下／回復挙動の確認



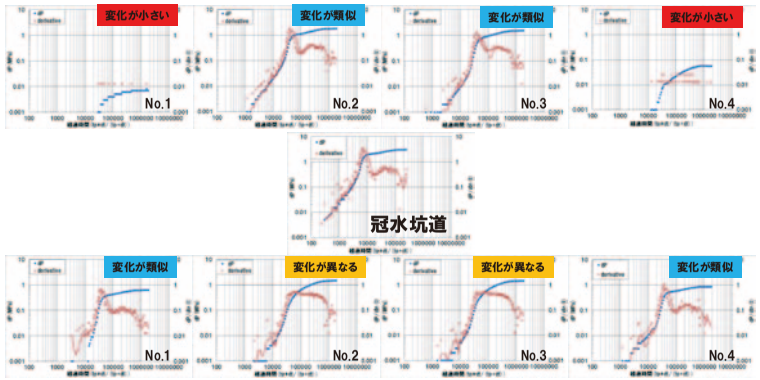
実施内容②

－目的－
①冠水坑道および周辺の水圧低下／回復挙動の確認
②冠水坑道および周辺の水理学的連続性，不均質性の把握

－実施内容②－
✓冠水坑道周辺の水圧変化から水理学的連続性を分析
✓冠水坑道周辺の水圧分布から水理学的な不均質性を分析
✓冠水坑道の水圧変化から巨視的な透水性を評価

坑道と各観測区間の水理学的連続性（冠水時）

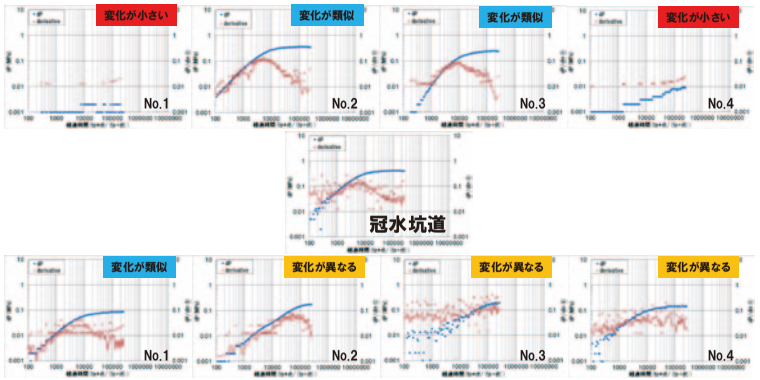
12MI33号孔



13MI38号孔

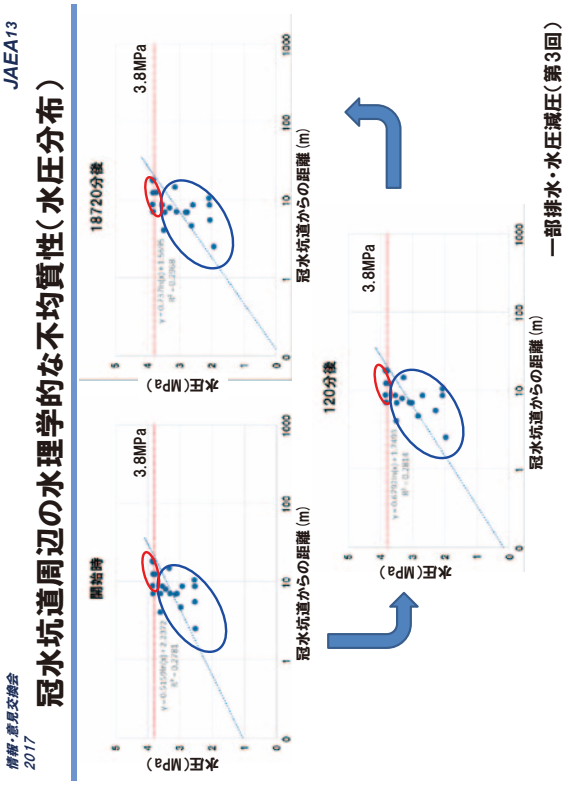
坑道と各観測区間の水理学的連続性（排水後の水圧回復（1回目））

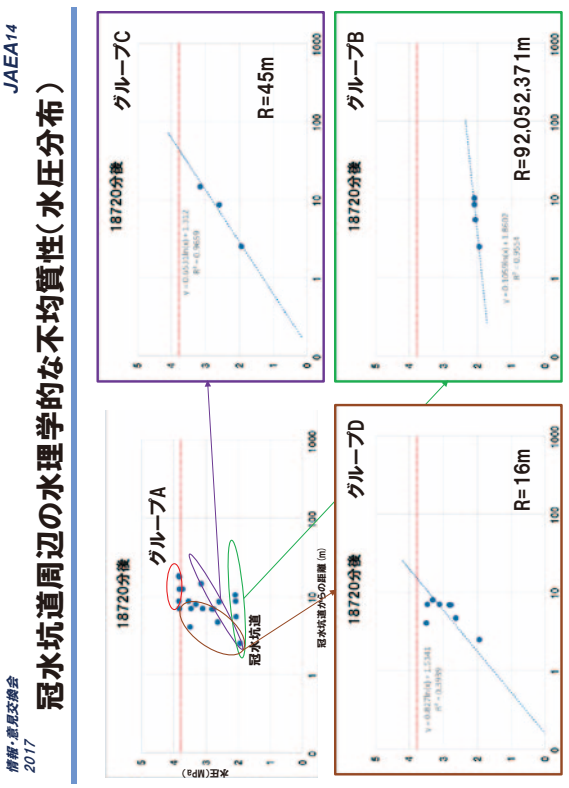
12MI33号孔

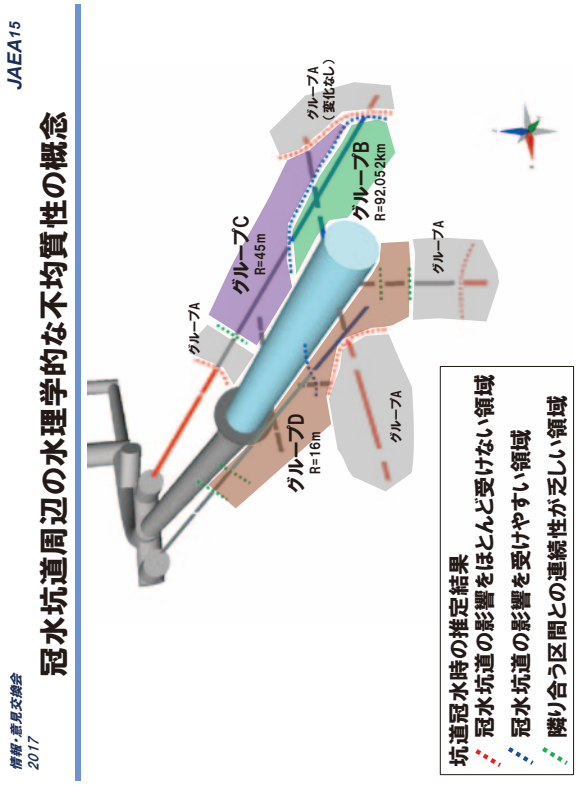


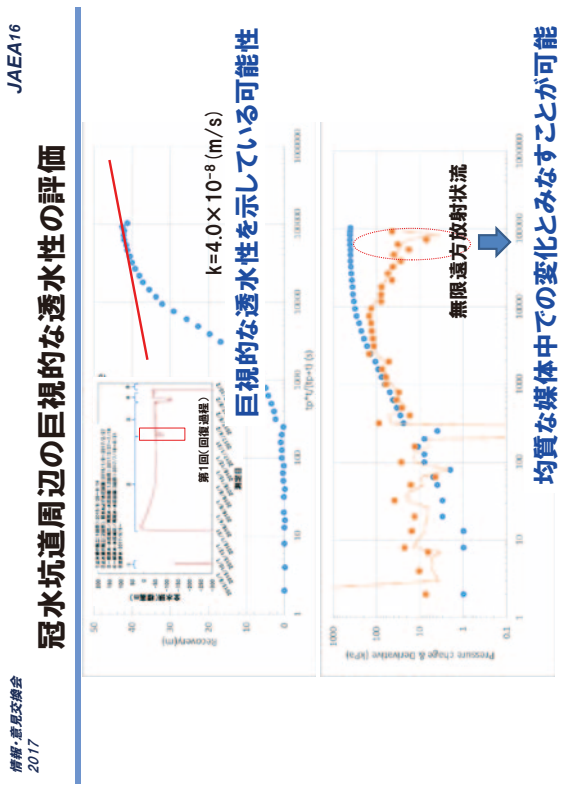
13MI38号孔

水圧変化の特徴から推定される水理学的連続性は，
冠水時の水圧変化から推定される結果と概ね一致


情報・意見交換会
2017
JAEA13
冠水坑道周辺の水理学的な不均質性（水圧分布）
開始時
18720分後
3.8MPa
水圧(MPa)
冠水坑道からの距離 (m)
120分後
一部排水・水圧減圧（第3回）


情報・意見交換会
2017
JAEA14
冠水坑道周辺の水理学的な不均質性（水圧分布）
18720分後
グループA
グループB
グループC
グループD
R=45m
R=16m
R=92,052.371m
冠水坑道
水圧(MPa)
冠水坑道からの距離 (m)


情報・意見交換会
2017
JAEA15
冠水坑道周辺の水理学的な不均質性の概念
グループA
グループB
R=92.052km
グループC
R=45m
グループD
R=16m
坑道冠水時の推定結果
冠水坑道の影響をほとんど受けない領域
冠水坑道の影響を受けやすい領域
隣り合う区間との連続性が乏しい領域


情報・意見交換会
2017
JAEA16
冠水坑道周辺の巨視的な透水性の評価
k=4.0×10⁻⁸ (m/s)
巨視的な透水性を示している可能性
無限遠方放射状流
均質な媒体中での変化とみなすことが可能

まとめ

一部排水・水圧減圧／再冠水および水圧回復における知見

①冠水坑道および周辺の水圧低下／回復挙動の確認
✓ 坑道閉鎖後の地下水圧は，初期状態まで回復することが期待できることを確認

②冠水坑道および周辺の水理学的連続性，不均質性の把握
✓ 冠水坑道周辺の水理学的連続性や水圧分布の観点から坑道周辺の水理学的不均質性を概念化
✓ 冠水坑道の水圧変化から，局所的な水理学的不均質性を有する岩盤を，巨視的には均質な媒体として評価できる可能性を示唆

2.1.2 地中レーダを用いた坑道近傍の水みち評価 －鹿島建設株式会社・日本原子力研究開発機構共同研究－

鹿島建設株式会社 技術研究所 岩盤地下水グループ
升元 一彦

(1)はじめに

岩盤内の割れ目は地下水の流動経路として機能する可能性があるため，地下水流動を適切に評価するためには，割れ目の水みちとしての評価を行うことが重要である。このため，割れ目の幾何学的な分布情報だけでなく含水状態の評価方法として，地中レーダを用いた方法の適用性の評価を鹿島建設株式会社と原子力機構の共同研究として平成 27～28 年度に実施した。本報告では，これまでの実施内容と主な成果について報告する。

(2)目的

本共同研究の目的は以下の二つである。

- 地中レーダを用いた電磁波伝搬速度やプロファイルの変化に基づく，坑道近傍の含水状態の変化に関するモニタリングの可能性についての原位置での検証。
- 地中レーダの反射波形や卓越周波数の変化を測定することによる，透水経路としての割れ目の連続性や割れ目内の飽和・不飽和状態の面的な評価手法についての原位置での検証。

(3)実施内容

1)坑道近傍の割れ目内の地下水モニタリング試験

瑞浪超深地層研究所の深度 500m 研究アクセス南坑道西側側壁の同一箇所において，1 年の間隔をあけて 2 回の地中レーダ測定を行い，ボーリング孔を利用した電磁波伝搬速度測定およびプロファイル測定による坑道近傍の含水状態の変化の評価手法についての検証試験を行った。

2)坑道近傍の割れ目内の塩水浸透モニタリング試験

瑞浪超深地層研究所の深度 500m 研究アクセス南坑道西側側壁の実際の割れ目に水や塩水を投入した際に，パルスレーダやミニレーダシステム [1]による複数のレーダを用いた Time-Lapse 測定を実施し，その反射波形や卓越周波数の変化を計測することで，割れ目内の浸透過程や流動経路の評価可能性についての検証試験を行った。

(4)主な成果

1)坑道近傍の割れ目内の地下水モニタリング試験

①電磁波伝搬速度測定結果の変化

2 回の測定結果から得られた電磁波伝搬速度分布と比誘電率分布を比較すると，電磁波伝搬速度については，いずれの測定結果においても深くなるほど速くなる傾向がある。また 1 回目と 2 回目を比較すると，坑壁からの深度 0.3m 以深ではほぼ同じ電磁波伝搬速度であるのに対し，深度 0.3m 以浅では 2 回

目の方が遅く，比誘電率でみると，1 回目は 11.9 に対し，2 回目は 15.8 に増加している。これは間隙率では 8.6%に対し，13.8%であることに相当し，1 年経過後に間隙率が約 1.6 倍増加したことになる。この増加の一因として，湧水により吹付コンクリートと岩盤の隙間が増加し，緩みが進行することにより間隙率が増大し，それに伴い含水率が増加した可能性が考えられる。

②プロファイル測定結果の変化

①で得られた側壁近傍の比誘電率の増加を反映させる深度補正を行った 2 回のプロファイル測定結果から，ボーリング孔右側の反射面に関して 2 回の測定でほぼ一致した結果が得られた。この反射面の位置と傾きが一致したことは，側壁近傍の比誘電率の増加が，ボーリング孔周辺だけでなく，ボーリング孔右側の坑道沿いの側壁近傍でも生じていることを示している。一方でボーリング孔左側の反射面に関しては，反射面の傾きはほぼ等しいものの，2 回目の反射面がわずかに側壁側にずれた位置となった。反射面の傾きはほぼ等しいため，位置が側壁側にずれた原因は，ボーリング孔右側に対して，ボーリング孔左側の側壁近傍の比誘電率増加範囲の幅が薄かったか，あるいは側壁近傍の比誘電率が低かった可能性を示している。

2）坑道近傍の割れ目内の塩水浸透モニタリング試験

①定点 Time-Lapse 測定によるモニタリング結果

割れ目へ塩水の浸透に伴う経時的な反射波形の変化が確認でき，さらに反射波形の周波数特性の変化をスペクトル解析により評価した結果，塩水の浸透に伴い反射波形の高周波数成分が減少していることが捉えられた。このことから，実際の割れ目において地下水とは異なる高伝導率の媒体を浸透させ，地中レーダから得られる反射波形や卓越周波数の変化に着目することにより割れ目内の高伝導率媒体の浸透状況や濃度変化を非破壊的に把握できる可能性を示すことができた。

②多点 Time-Lapse 測定によるモニタリング結果

送受信アンテナのレイアウトにより，割れ目へ塩水や水の浸透に伴う反射波形の振幅の変化が明瞭に確認できるものと確認できないものが認められた。このことは割れ目内の浸透経路の不均質性を反映したものと考えられ，高伝導率媒体を割れ目内に浸透させ，複数のレーダによりその状況を測定することで，割れ目内の 2 次元的な浸透範囲を評価できる可能性を示すことができた。

(5)まとめと今後の課題

本共同研究により，坑道近傍の含水状態の経時変化や，塩水等電気特性の異なる流体の割れ目への浸透状態を，地中レーダにより非破壊的に捉えられる可能性があることがわかった。本評価手法は坑道近傍の再冠水過程のモニタリングや，トレーサ試験における 2 次元的破過過程のモニタリング，グラウト注入時のグラウト浸透範囲のモニタリングへの展開が可能であることを示している。今後，本評価手法の実用に向けた開発を進めて行く予定である。

参考文献

1） 升元一彦・栗原啓丞(2015)：ミニボアホールレーダを用いた多点計測による 3 次元水理挙動の評価，平成 27 年度応用地質研究発表会講演論文集，2015，pp.99-100.

情報・意見交換会
2017

JAEA

地中レーダを用いた坑道近傍の水みち評価
－鹿島建設株式会社・日本原子力研究開発機構共同研究－

平成29年10月31日

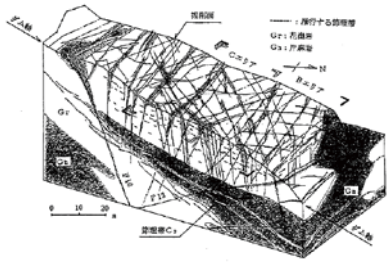
鹿島建設株式会社
技術研究所　岩盤地下水グループ
升元　一彦

情報・意見交換会
2017

JAEA 2

はじめに

割れ目を有する岩盤構造物において、
割れ目内の地下水特性を評価することは重要



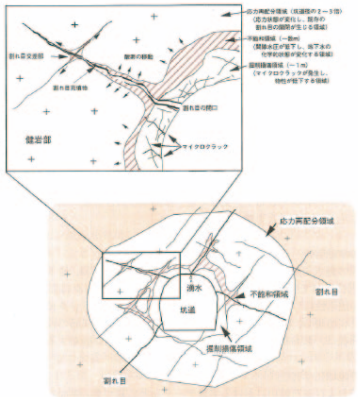
ダム基盤部の水理地質構造の例（杉村ほか，1997）

情報・意見交換会
2017

JAEA 3

はじめに

EDZ（掘削影響領域）：Excavation Damage Zone



坑道周辺のEDZ内の割れ目群

↓

地下水の透水経路としての問題

- トンネル湧水、支保の劣化
- 水封式岩盤貯蔵の水封システムの不具合
- 高レベル放射性廃棄物地層処分場の核種の移行経路、不飽和領域

坑道周辺の地質環境の概念図（割れ目系岩盤の例）（核燃料サイクル開発機構，1999）

情報・意見交換会
2017

JAEA 4

はじめに

「地中レーダ」により得られるデータに着目し、
坑道周辺の割れ目の幾何学的な分布情報だけでなく、
割れ目の含水状態の変化を評価する方法について、
実験的検討を実施

鹿島建設株式会社と日本原子力研究開発機構の共同研究

本日の発表内容

Ⅰ. 本研究の実施内容

Ⅱ. 坑道近傍の割れ目内の地下水モニタリング

Ⅲ. 坑道近傍の割れ目内の塩水浸透モニタリング

Ⅳ. まとめ

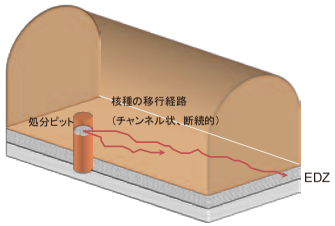
本研究の着眼点

＜評価の課題＞ ・坑道周辺の水みち・不飽和割れ目は、
3次元的にチャンネル状，断続的に分布
・ボーリング孔を利用した調査では水理場が乱れる点の情報になり面的な評価に限界

＜本研究の着眼点＞
3次元的な透水割れ目の特性を、非破壊的に調査する手法

↓

水分に敏感な地中レーダの適用可能性について検討



坑道底盤に発達するEDZ内の水みちの3次元イメージ図

本共同研究の目標

1）電磁波伝搬速度やプロファイル測定の変化
⇒ 坑道近傍の含水状態の変化に関するモニタリング

2）地中レーダの反射波形や卓越周波数の変化
⇒ 坑道近傍の割れ目への浸透過程のモニタリングや面的な透水経路の評価

↓

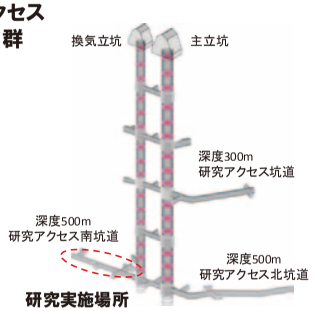
地中レーダによる評価可能性について
原位置での検証

本研究の実施内容

1）坑道近傍の割れ目内の地下水モニタリング試験

2）坑道近傍の割れ目内の塩水浸透モニタリング試験

瑞浪超深地層研究所の深度500m研究アクセス南坑道の側壁に、低角度で交差する割れ目群



研究実施場所
（赤点線内）

地中レーダによる地下水モニタリング試験

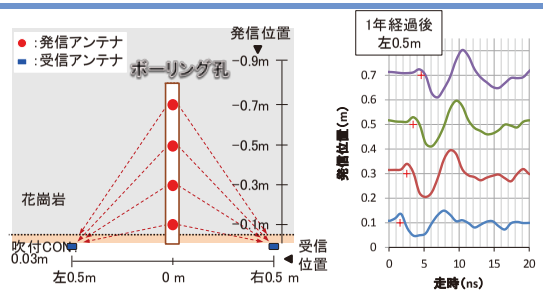
坑道近傍の含水状態変化を地中レーダでモニタリング
同一箇所で1年の間隔をあけて、以下の測定を実施

- 電磁波伝搬速度測定
- プロファイル測定

電磁波伝搬速度測定

プロファイル測定

電磁波伝搬速度測定

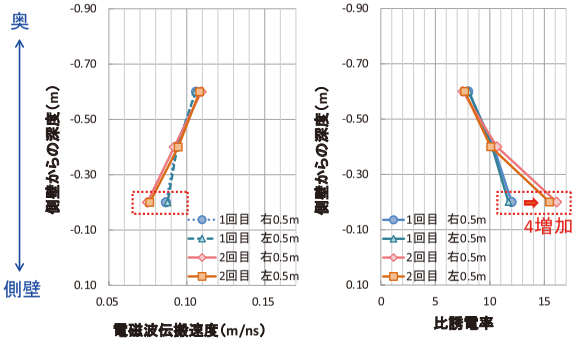


直達波の伝搬時間の読み取り(+)
↓
測定深度間の電磁波伝搬速度(V)の算出
↓
比誘電率(ε)の算定
$\varepsilon = (C_0/V)^2$

C_0: 真空中の電磁波伝搬速

- 周波数50～500MHzのミニレーダシステムを利用
- 側壁から80cm削孔したボーリング孔を用いて測定
- 孔内発信⇒側壁面受信
- 1回目と2回目(1年経過後)で結果を比較

電磁波伝搬速度測定結果



- 電磁波伝搬速度は、側壁付近で遅くなる傾向
- 深度0.3m以浅は2回目の方が遅い
- 比誘電率では、1回目は11.9、2回目は15.8で約4増加

電磁波伝搬速度測定の評価

1. 電磁波伝搬速度が側壁付近で遅くなるのは、坑壁近傍の方がEDZで割れ目が発達しており、**含水率が大きい**ためと考えられる。

2. 1回目と2回目の比較で、比誘電率が側壁近傍30cm区間のみ約4増加しているのは、1年経過の間にゆるみが進行し**間隙率が増加**したためと考えられる。

⇒ 電磁波伝搬速度の変化により、坑道近傍の含水状態の変化を評価

情報・意見交換会 2017

JAEA13

プロファイル測定

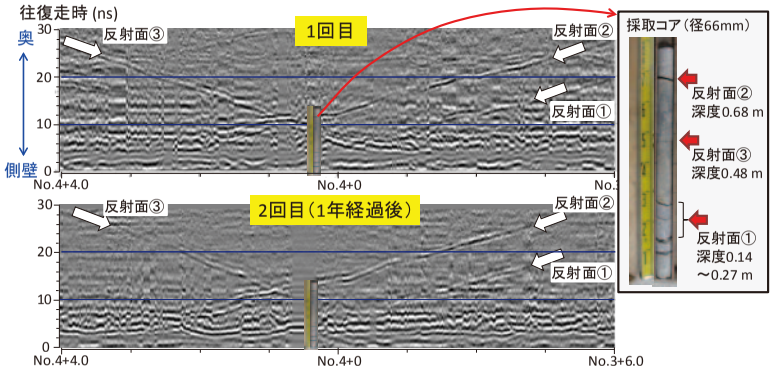
- 周波数1.5GHzパルスレーダを利用
- 吹付けコンクリート面から送受信
- 1回目と2回目（1年経過後）で結果を比較

1.5GHzパルスレーダ

情報・意見交換会 2017

JAEA14

プロファイル測定結果



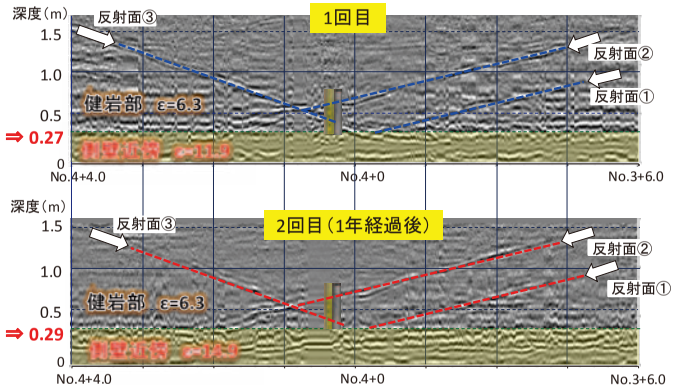
- 1回目、2回目ともに3つの反射面を確認
- これらの反射面はボーリングコアで確認された割れ目に相当
  ⇒1回目と2回目の反射面分布の往復走時に差

情報・意見交換会 2017

JAEA15

プロファイル測定結果（深度補正後）

電磁波伝搬速度測定結果を基に、反射面②の深度が0.68mとなるように、側壁近傍の比誘電率増加領域の深度を計算



情報・意見交換会 2017

JAEA16

プロファイル測定の評価

側壁近傍の比誘電率増加領域の厚さや速度を補正した結果、

1. ボーリング孔右側の反射面は、1回目と2回目でほぼ一致
   ⇒ 側壁近傍の比誘電率の増加が、右側の側壁沿いに一様に生じていると考えられる。

2. ボーリング孔左側の反射面は、2回目でやや側壁側にずれる
   ⇒ 左側の側壁近傍の比誘電率の増加が右側に比べ小さいか、幅が薄かった可能性がある。

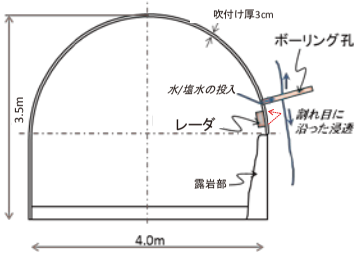
⇒ **プロファイル測定の反射面の比較により、坑道近傍の含水状態の面的な変化を評価**

情報・意見交換会 2017 JAEA17

地中レーダによる塩水浸透モニタリング試験

ボーリング孔から坑道近傍の割れ目に水や塩水を注入し、注入中の電磁波の反射波形変化を測定

- 1.5GHzパルスレーダによる定点Time-Lapse測定
- 複数ミニレーダシステムによる多点Time-Lapse測定



定点Time-Lapse測定

情報・意見交換会 2017 JAEA18

定点Time-Lapse測定

- 1.5GHzパルスレーダを利用

①注水前後で反射波形を測定

1分間**注水**（EC:110 mS/m）

一部は、注水後側壁の割れ目から湧出

②注水後、塩水に切り替え

直前から反射波形を測定

15分間**塩水注入**（EC:2.4 S/m）

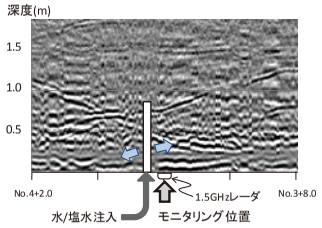
一部は、注水後側壁の割れ目から湧出

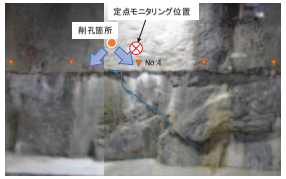
10分後EC:1.15 S/m

15分後EC:2.15 S/m

*メカニカルパッカー先端位置：深度20cm

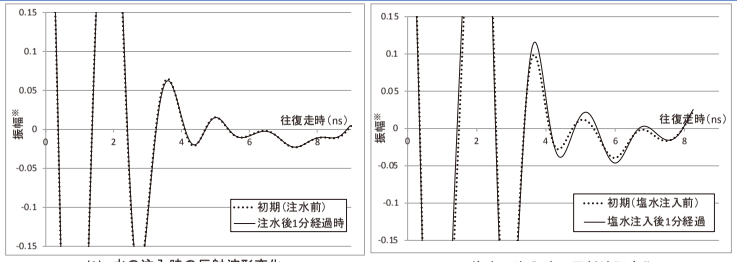
*坑道湧水の電気伝導度86 mS/m（25.5℃）





情報・意見交換会 2017 JAEA19

水/塩水注入前後の反射波形の変化



(1) 水の注入時の反射波形変化　(2) 塩水の注入時の反射波形変化

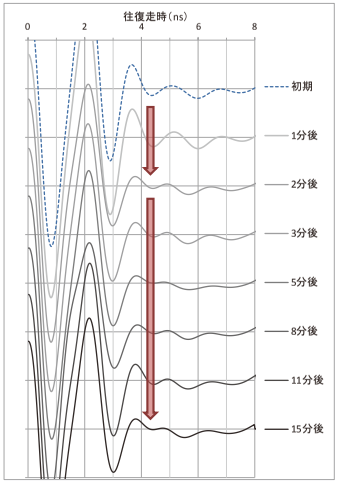
※ 振幅は直達波の振幅幅に正規化された値

- 水の注入前後で、反射波形にあまり変化はない。
- 塩水の注入前後で、往復走時3.0ns以降の波形に変化

⇒ 塩水が坑道近傍の割れ目への浸透することによる影響

情報・意見交換会 2017 JAEA20

塩水注入時の定点Time-Lapse測定結果



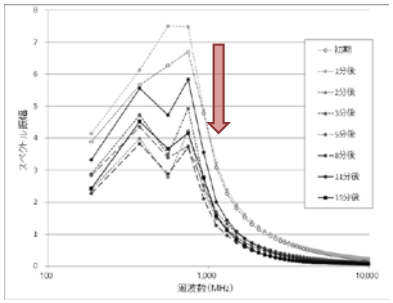
2分経過までは往復走時3.8ns付近の反射波形が大きく変化し、それ以降は定常状態

2分経過までは、
測定位置での割れ目内の
塩水濃度が増加する過程を、
2分経過以降は、
破過した状態を捉えている。

情報・意見交換会 2017 JAEA21

塩水注入に伴う反射波形の卓越周波数変化

反射波形に対し、往復走時2.7ns～6.2nsの範囲において
FFT（高速フーリエ変換）によりスペクトル解析を実施



・塩水注入前の初期波形においては卓越周波数は750MHz

・2分経過後から500MHz以上の高周波数のスペクトル振幅が減少

塩水の浸透により
反射面が高導電体となり、
高周波数成分が減少

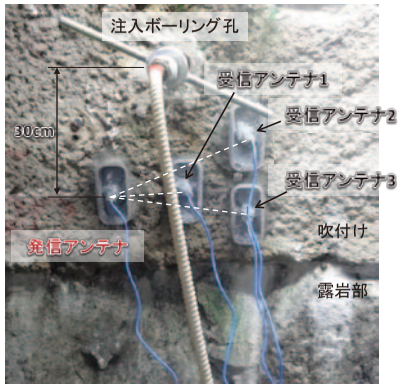
⇒ 割れ目への塩水の浸透状況を
坑道面からの測定により定量的に評価できる可能性

情報・意見交換会 2017 JAEA22

多点Time-Lapse測定

- 100MHz～1GHzのミニレーダシステムを利用
- 発信アンテナ1つに対し、受信アンテナ3つとして多点で反射波形を測定

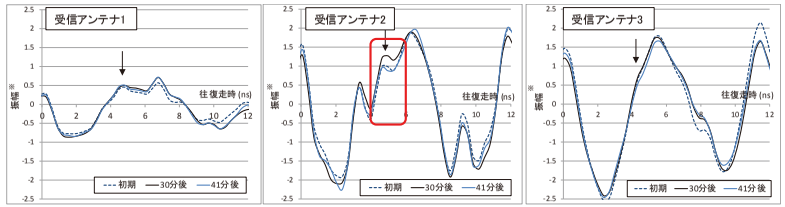
初期注水後、塩水に切り替え
32分間塩水注入
(EC：2.4 S/m)
その後、再度水に切り替え
9分間注水
(EC：110 mS/m)



一部は、側壁の割れ目から湧出

情報・意見交換会 2017 JAEA23

塩水/水注入時の複数アンテナでの反射波形



※ 振幅は直達波の振幅で正規化された値

割れ目からの反射と考えられる往復走時4.5～5.0 nsの反射波形に着目
・塩水注入後30分経過時に、初期に対し振幅が増加
・水に切り替えた41分経過時には、30分経過時に比べ振幅が減少

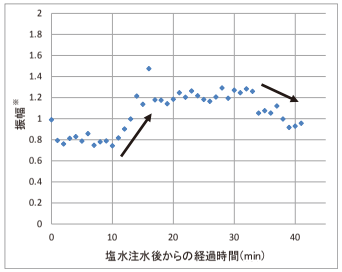
⇒ 受信アンテナ2では塩水や水の坑道近傍の割れ目への浸透を反射波形の変化で捉えられた。

⇒ 受信アンテナ2に比べ1や3で振幅の変化が明瞭でないことは塩水や水の浸透経路の不均質性を反映

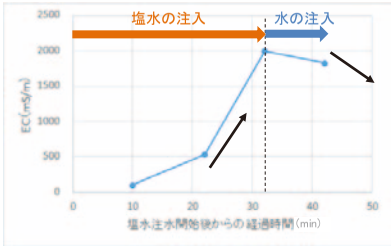
情報・意見交換会 2017 JAEA24

塩水/水注入時の反射波形の振幅変化

受信アンテナ2の反射波形の振幅



側壁割れ目からの湧出水の電気伝導度



ボーリング孔に注入した塩水が
10分後に受信アンテナ2と送信アンテナを結ぶラインに到達
20分後に側壁の割れ目に到達するという浸透経路

⇒ 割れ目内の2次元的な浸透経路を
坑道面からの測定により評価できる可能性

研究結果のまとめ

地中レーダによる割れ目の含水状態変化の評価可能性について
原位置での検証を行うため、
瑞浪超深地層研究所の深度500m研究アクセス南坑道において、
坑道近傍の割れ目内の地下水モニタリング試験、および
坑道近傍の割れ目内の塩水浸透モニタリング試験を実施。

1）電磁波伝搬速度やプロファイル測定の変化
⇒ 坑道近傍の**含水状態**の変化を評価

2）地中レーダの反射波形や卓越周波数の変化
⇒ 坑道近傍の割れ目への塩水の**浸透過程**や
2次元的な**透水経路**を評価

今後の展開

- 本手法の坑道近傍の水理環境のモニタリング手法としての確立

- 電気特性の異なる流体の割れ目への浸透状態が非破壊で把握可能
  ⇒ トレーサ試験時の面的な破過過程のモニタリング
  グラウト注入時のグラウト浸透範囲のモニタリング

2.2　地質環境の長期安定性に関する研究

2.2.1　調査技術の開発・体系化－地球物理学的手法による地殻構造イメージング技術の高度化－

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
浅森　浩一

(1) はじめに

地質環境の長期安定性に関する研究では，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・策定等に必要となる科学的知見や調査・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）の三つのカテゴリーで研究開発を進めている。

このうち，調査技術の開発・体系化においては，将来の地層処分システムに重大な影響を及ぼす可能性がある自然現象（例えば，断層活動，火山活動等）に着目して，断層の活動性に係る調査技術，地殻構造の高空間分解能イメージング技術，深部流体の分布に関する調査技術について技術基盤の整備を進めている。

(2) 地球物理学的手法による地殻構造イメージング技術の高度化

1)既存技術の現状と課題

地殻やマントル最上部にマグマや深部流体が存在する領域の付近では，将来の活動によって，地殻浅所への高温流体の流入や火山活動を引き起こす可能性が考えられる。このような地層処分にとっての潜在的なリスクを回避するためには，地表からの調査の段階において，その存否や分布等をあらかじめ確認しておくことが重要であり，地殻の不均質構造を高い空間分解能で精度良く推定する手法を整備する必要がある。

これまでに行われてきた学術研究では，地殻内の電磁気学的特徴（比抵抗構造）や地震学的特徴（地震波速度構造，地震波減衰構造，S波反射面の分布等）のほか，地球化学的特徴（地下水の希ガス同位体比等）に関する複数の情報を相補的に取得することによって，解析が進められてきた。また，ここで主要な情報となる地殻内の2次元あるいは3次元的な物性分布については，地殻深部までの探査が可能な地震波トモグラフィ法およびMT法（地磁気・地電流法）を用いて推定されている。

このうち地震波トモグラフィ法は，人工地震や自然地震の発生に伴って震源から地表の地震観測点に伝播する地震波の観測データを多量に用い，多数の3次元ブロックまたは格子点によって表現された解析対象領域内の地震波速度構造をインバージョンによって推定する手法である。しかし，この技術の汎用性や適用性といった観点でみた場合は，主に二つの課題が挙げられる。

一つ目の課題は，解析精度の向上（不確実性の低減）である。日本列島には，地震波速度が極めて遅い堆積層等が場所によって大きく異なる厚さ（地表～数千m）をもって分布しているが，従来の方法では

これが考慮されていない。この場合，波線追跡と呼ばれる数値解析によって計算する地殻内の地震波伝播経路（理論波線）や伝播に要した時間（理論走時）が実際と大きくずれてしまい，結果として地殻構造のイメージには偽像が生じてしまう。

二つ目の課題は，空間分解能の向上である。従来の地震波トモグラフィ法では，地表における地震観測点の間隔よりも高い空間分解能で地殻構造を推定することができない。特に，定常的な地震観測点が展開されていない海域の付近においては，この課題の解決が重要となる。

2)課題の解決に向けた取り組み

地震波トモグラフィ法を適用する際，解析の入力データとして用いる地震の震源パラメータ（震源位置および発震時刻）が正確に決定されていない場合は，精度良く地震波速度構造を推定することができない。また，震源パラメータの決定には，地震波速度が極めて遅い堆積層等の層厚が大きく影響する。このため本研究では，場所により異なる層厚を波線追跡の計算に組み込んだ震源再決定解析を行い，震源パラメータの決定精度向上に対する効果を確認した。さらに，これを地震波トモグラフィ法に応用することで，日本列島下の 3 次元地震波速度構造を推定した。

その結果，層厚の違いを考慮していない場合に比べて，推定された地震波速度のバラつきが少なく，西南日本に沈み込むフィリピン海プレートに対応した地震波高速度体が鮮明にイメージされた。また，九州東部の下部地殻からマントル最上部では，手法改良の前後で地震波低速度体の分布に相違が認められたが，同領域で実施した地磁気・地電流観測（MT 法）によって，手法改良後の地震波低速度体の分布域と整合的な低比抵抗（高電気伝導度）体が確認された。

一般に，地殻内の流体分布域は地震波低速度かつ低比抵抗を示すことから，ここで検出された地震波低速度・低比抵抗体は，マントル起源の流体の存在を示唆すると考えられる。これらの結果は，手法の改良前において認められていた地震波低速度体の一部が，堆積層等の層厚を考慮しなかったことに起因する偽像であったことを示唆していると考えられる。

（3）おわりに

以上のように，地震波トモグラフィ法による地殻構造のイメージングに関する課題の一つ（解析精度の向上）については，解析手法の改良によって改善が図られていると考えられる。今後は，定常的な地震観測網の外側に位置する地域への汎用性拡大や空間分解能の向上を目指して，これらの技術をさらに応用した研究開発を進めていく予定である。

情報・意見交換会 2017　JAEA

地質環境の長期安定性に関する研究
調査技術の開発・体系化
地球物理学的手法による地殻構造イメージング技術の高度化

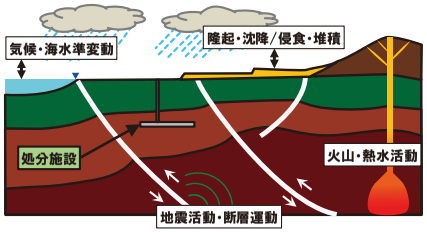
平成29年10月31日

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
浅森　浩一

情報・意見交換会 2017　JAEA 2

地層処分において考慮すべき自然現象

隆起・沈降・侵食／気候・海水準変動
- 生活環境と処分施設との離間距離の短縮
- 地下水の流動特性や水質の変化による放射性物質の移行への影響など



断層運動・地震活動
- 岩盤の破断・破壊による処分施設の破損
- 岩盤の破断・破損による地下水移行経路の形成、岩盤ひずみに起因する地下水の水理学的変化など

火山活動・熱水活動
- マグマの貫入・噴出による処分施設の破損
- 地温上昇・熱水対流の発生、熱水・火山ガスの混入による地下水の水質の変化など

情報・意見交換会 2017　JAEA 3

地質環境の長期安定性に関する研究
中長期計画（平成27～平成33）の研究課題

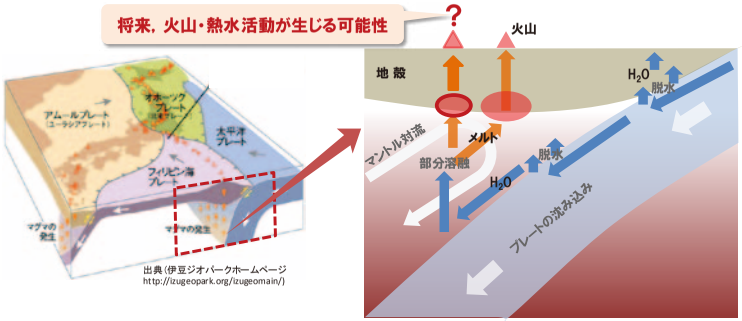
① 調査技術の開発・体系化　＝＞サイトの選定や安全性の検討に必要となるデータの取得
- ①-1) 断層の活動性に係る調査技術
- ①-2) 地殻構造の高空間分解能イメージング技術
- ①-3) 深部流体の分布に関する調査技術

② 長期予測・影響評価モデルの開発　＝＞変動シナリオに基づく安全評価に必要な技術
- ②-1) 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術
- ②-2) 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術

③ 年代測定技術の開発　＝＞①，②の信頼性を向上するための技術基盤
- ③-1) ウラン系列放射年代測定法の実用化
- ③-2) 光ルミネッセンス（OSL）年代測定法の実用化
- ③-3) アルミニウム-26年代測定法，塩素-36年代測定法の実用化
- ③-4) 高分解能のテフラ同定手法の開発
- ③-5) 地質試料を対象とした年代測定法及び化学分析手法の高度化

情報・意見交換会 2017　JAEA 4

なぜ地殻構造を調べることが重要なのか？

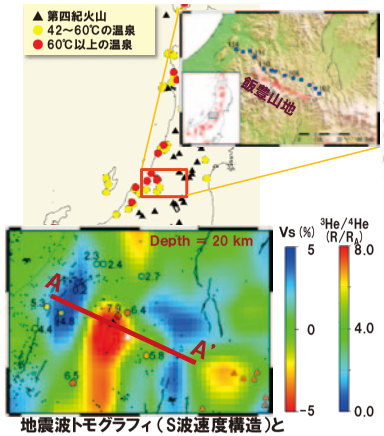


沈み込み帯における火成活動のメカニズム

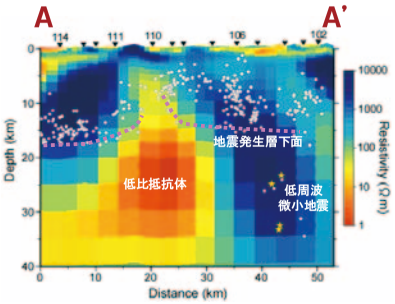
- 第四紀火山が存在しない地域にあっても，現地調査の結果に基づいて評価した結果，将来新たな火山・火成活動が生じる可能性の高い地域は回避すべき（総合資源エネルギー調査会地層処分技術WG，2017）
- 潜在的なリスクを回避するためには，その有無や分布（地殻構造）をあらかじめ確認しておくことが重要

非火山地域におけるマグマ検出の事例

■ 飯豊山地



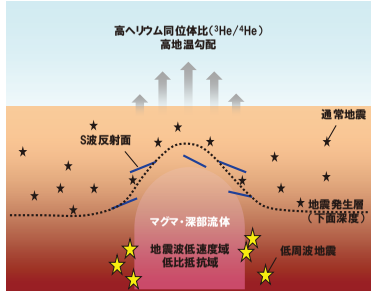
地震波トモグラフィ（S波速度構造）と
ヘリウム同位体比（Umeda et al., 2007）

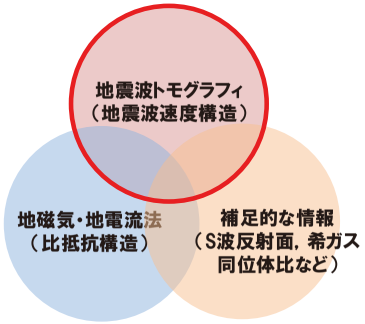


MT法（比抵抗構造）
（Umeda et al., 2007）

⇒ 非火山地域にも部分溶融域が存在することを示唆

マグマ・深部流体の把握に向けたアプローチ



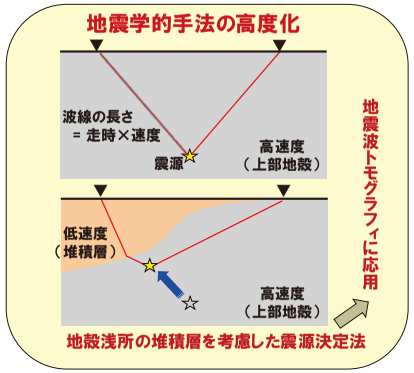


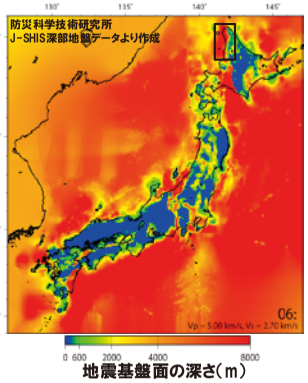
- 複数の手法を組み合わせによって総合的に調査することが重要
- それぞれの手法には，適用する場所によって，精度や分解能の低下などの課題がある。

地震波トモグラフィの課題と高度化

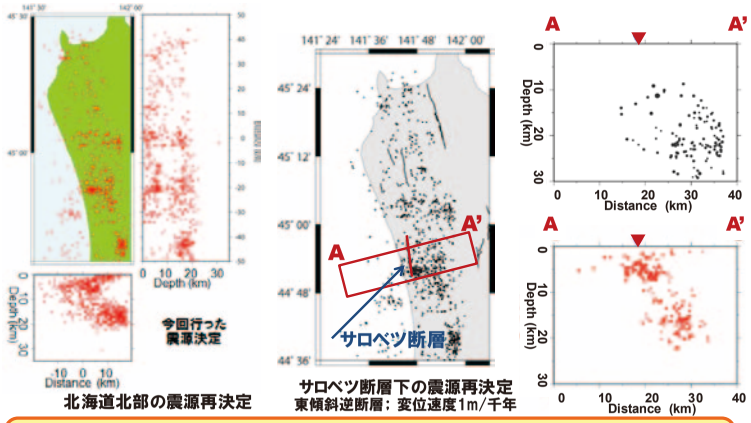
地震波トモグラフィとは・・・
多量の地震観測データを使って，①震源決定，②伝播経路上の速度を推定

⇒ 地下浅所の地震波速度構造が複雑な場合（堆積層が厚く分布する地域やその周辺）は，精度が低下





震源決定解析への適用



北海道北部の震源再決定

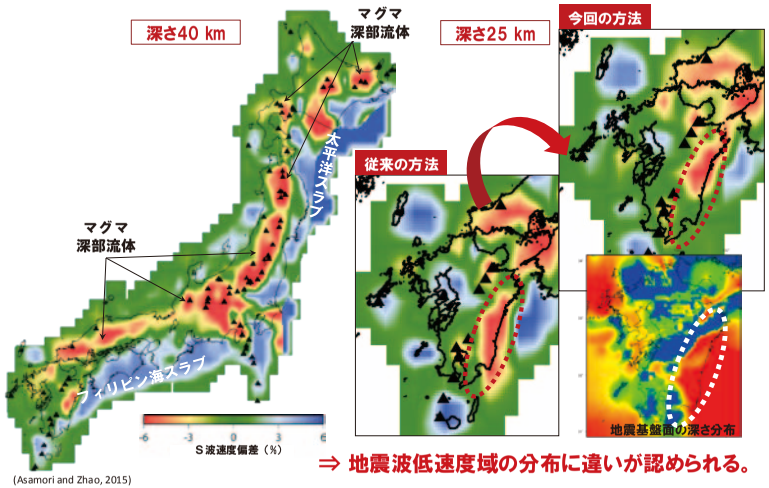
サロベツ断層下の震源再決定
東傾斜逆断層；変位速度1m/千年

- 地殻浅所の地震波低速度層（堆積層）を考慮することで，震源決定精度が向上
（震源深さ誤差の平均：1.08 km ⇒ 0.67 km）

情報・意見交換会
2017

JAEA 9

地震波トモグラフィへの応用



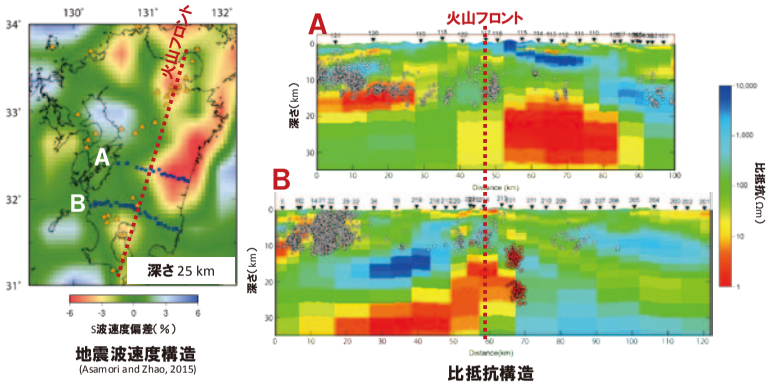
(Asamori and Zhao, 2015)

⇒ 地震波低速度域の分布に違いが認められる。

情報・意見交換会
2017

JAEA10

MT法による検証



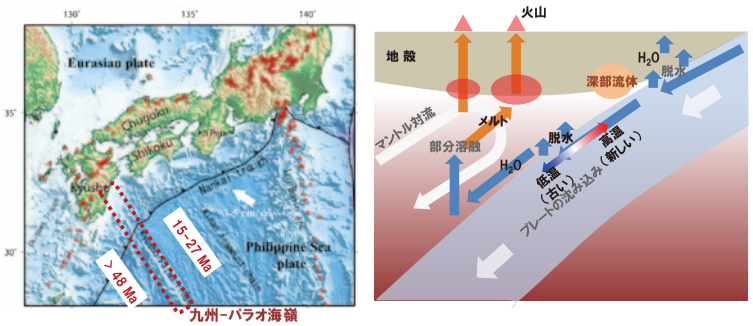
- 前弧域の地震波低速度体の分布と整合的な低比抵抗体を検出

⇒ マントルウェッジを起源とする深部流体の存在を示唆

情報・意見交換会
2017

JAEA11

深部流体の発生に関する新たな知見



- 九州-パラオ海嶺より北のフィリピン海プレートは，南部に比べて新しく高温
- 海洋地殻の脱水が生じる位置は，スラブが高温になるほど前弧側へシフトする。
- 九州地方前弧域において，北部のみに深部流体が検出されたことと調和的

⇒ 深部流体の分布域に沈み込むプレートの年代が関与していることを示唆

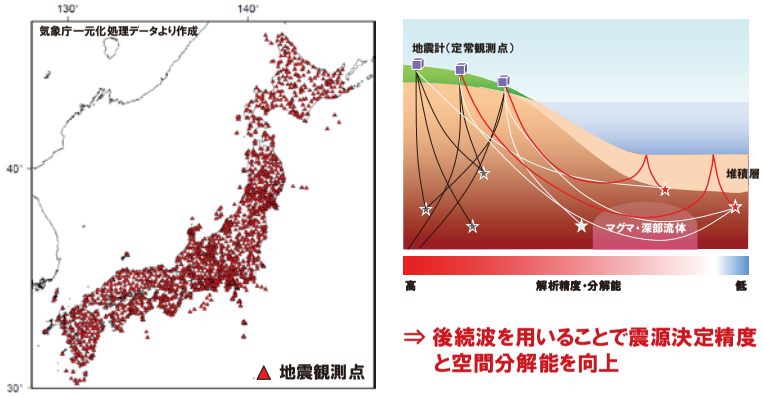
情報・意見交換会
2017

JAEA12

今後の課題：観測網の外側への適用

地震波トモグラフィとは・・・
多量の地震観測データを使って，①震源決定，②伝播経路上の速度を推定

⇒ 地震観測網の外側では，精度や空間分解能が低下



⇒ 後続波を用いることで震源決定精度と空間分解能を向上

今後の課題と現在の到達点

【技術の高度化に向けたアプローチ】

技術を応用

【今後の課題】

- ◆ 地震観測網の外側での精度・空間分解能低下の改善
- ◆ 更に高い空間分解能を目指した解析手法の高度化

2.2.2 年代測定技術の開発 －地下水の化石“炭酸塩鉱物”の年代測定に向けて－

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 年代測定技術開発グループ
横山 立憲

(1)はじめに

将来の地質環境の安定性を評価するために，着目する地質環境の過去の変遷を解読し，変遷の傾向を外挿する手法がある。過去の地質環境の変遷を解読するためには，隆起・侵食や断層運動および火山活動などの自然現象に時間軸を与えるための放射年代測定技術の整備が不可欠である。また，地層処分事業において特定の地質やサイトが選定されていない現時点において，概要調査や精密調査の段階でこの技術を適用するには，我が国のあらゆる地質の年代測定に対応でき，かつ広範な年代を測定可能な技術の整備が求められる。炭酸塩鉱物は岩盤中に普遍的に産出し，その地球化学的情報，特に年代学的情報は地質環境の変遷を解読する上で有用な制約因子となる。そのため，炭酸塩鉱物の年代測定技術は，我が国の高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する要素技術開発の重要課題の一つとされており，長期的な地質環境変動モデルの構築に大きな貢献が期待されている。

炭酸塩鉱物で一般的な鉱物種は，方解石，アラレ石，ドロマイトであり，これら 3 種で天然に存在する炭酸塩鉱物の大部分を占める。本研究では，特に断りのない限り常温常圧条件で最も安定な相である方解石を炭酸塩鉱物と呼ぶ。炭酸塩鉱物は，主として水－岩石との相互作用により炭酸イオンとカルシウムイオンが結合して生成され，地下環境において生成される炭酸塩鉱物はいわば“地下水の化石”とも呼べる。これらは結晶成長を反映した微細な累帯構造を持つことがある。累帯ごとの元素・同位体組成をマイクロスケールの高空間分解能かつ高精度で分析することができれば，その炭酸塩鉱物を沈殿させた水の種類（熱水，海水，淡水など）や生成年代の範囲を明らかにできる。炭酸塩鉱物のウラン（U）–鉛（Pb）年代測定は，これまでに湿式分析法による石筍 [1]や蒸発岩 [2]の年代測定が実施されているが，局所分析法による年代測定技術の開発は進んでいない。局所分析法の一つとして，試料の導入にレーザーアブレーション装置を備えた誘導結合プラズマ質量分析装置を用いた分析法（LA-ICP 質量分析法）がある。本研究では，炭酸塩鉱物の高空間分解能な年代測定を目指し，LA-ICP 質量分析法による炭酸塩鉱物の U–Pb 年代測定技術の開発を進めている。炭酸塩鉱物の U–Pb 年代測定では，①試料の元素濃度に起因した U–Pb 系への適応性の低さと②同位体分析に必須な標準試料が未選定であるという，大別して二つの課題がある。本発表では，東濃地科学センター土岐地球年代学研究所においてこれらの課題解決に向けて実施した，イメージング分析技術の整備および標準試料の選定・開発について報告する。

(2)実施内容

1)イメージング分析技術の整備

放射年代測定はその基礎原理として，放射性の親核種（ここでは U）が子孫核種（ここでは Pb）に一定の割合で壊変することを利用するため，親核種に乏しい，もしくは親核種に比べて子孫核種が多い試料は親核種の壊変寄与の検出が困難となり，必然的に年代測定が不可能となる。一般に炭酸塩鉱物は，U–Pb 年代測定の実施されている他の鉱物（例えばジルコン，アパタイトなど）と比較して U 濃度が低いため，高精度な年代測定を実施するためには，U 濃度の高い試料もしくは分析領域を選ぶ必要がある。炭

酸塩鉱物の U および Pb 濃度を 2 次元分布として取得することを目的として，レーザーアブレーション装置と四重極型 ICP 質量分析計を連結し，データの取得および解析するイメージング分析技術を整備した。この分析技術は，局所領域の U–Pb 年代測定を実施する上で，分析点の U および Pb の濃度を事前に把握することができるため，高精度な年代測定を実施できる分析領域を評価できる強力なツールである。

2）標準試料の選定・開発

LA-ICP 質量分析法では，質量分析装置の計数率に影響する経時的なドリフトや，試料のマトリクスの違いに起因する元素分別効果を補正する必要があり，一般的には未知試料と未知試料と同一マトリクスの標準試料を交互に測定する手法が用いられる。しかし，炭酸塩鉱物の LA-ICP 質量分析で用いる標準試料の選定および人工的な作製などの開発は十分に進んでいない。本研究では，既往研究において湿式法による U–Pb 年代測定が実施されている蒸発岩 Castile Formation 中の炭酸塩鉱物（CFC: 251.5±2.8 Ma[2)]）について，LA-ICP 質量分析法による U–Pb 同位体分析を実施し，標準試料としての有用性を評価した。また，天然試料の測定および評価に加えて，U および Pb の濃度・同位体組成について均質な炭酸塩標準試料の人工作製を試みた。その結果，CFC 試料は $^{238}U/^{206}Pb$ 比の均一性が比較的高く，U–Pb 年代測定に対して適度な U，Pb 濃度を有していることが判明した。また，人工的な標準試料の作製においては，U と Pb を含む標準溶液を添加した溶液から方解石粉末を沈殿させる作製法により，U/Pb 比の異なる 3 種の粉末試料を作製することに成功した。CFC 試料および人工的に作製した試料は，炭酸塩鉱物の年代測定を実施する上で，LA-ICP 質量分析における標準試料として利用できることが示唆された。

(3) 今後の展望

イメージング分析技術の整備により， U に乏しい炭酸塩鉱物に対しても精度よく U–Pb 年代測定を実施するための分析領域の選定が可能となった。一方で， U および Pb 濃度は炭酸塩鉱物の生成した環境に大きく支配され，U をほとんど含まないような炭酸塩鉱物も存在するため，この技術を整備することが全ての炭酸塩鉱物の U–Pb 年代測定を可能とするわけではない。今後の年代未知試料の測定では，炭酸塩鉱物の生成環境を十分に考察したうえで，年代測定を実施する必要がある。標準試料の選定・開発においては，米国ニューメキシコ州 Whites City で採取された WC-1（254.4±6.4 Ma）が炭酸塩鉱物の U–Pb 年代測定における標準試料として提唱された[3)]。これまでに我々が評価した CFC と WC-1 の双方を分析して比較し，標準試料としての適用性を評価したうえで，年代値が未知の試料の測定へ臨む。

(4) 謝辞

本報告は経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業である「平成26-28年度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。また，本報告の成果の一部は本事業の中で東京大学－株式会社京都フィッション・トラック－学習院大学－海洋研究開発機構を締結先として実施している共同研究で得られた成果である。

参考文献

1）Pickering et al., Quaternary Geochronology, vol.5, pp.544-558.
2）Becker et al., Earth and Planetary Science Letters, vol.203, 2002, pp.681-689.
3）Roberts et al., Geochemistry, Geophysics, Geosystems, vol.18, Issue 7, 2017, pp.2807-2814.

情報・意見交換会 2017　JAEA

地質環境の長期安定性に関する研究
年代測定技術の開発
～地下水の化石“炭酸塩鉱物”の年代測定に向けて～

平成29年10月31日

東濃地科学センター
地層科学研究部　年代測定技術開発グループ
横山　立憲

情報・意見交換会 2017　JAEA 2

地質環境の長期安定性に関する研究
中長期計画（平成27～平成33）の研究課題

① 調査技術の開発・体系化　＝＞サイトの選定や安全性の検討に必要となるデータの取得
- ①-1）断層の活動性に係る調査技術
- ①-2）地殻構造の高空間分解能イメージング技術
- ①-3）深部流体の分布に関する調査技術

② 長期予測・影響評価モデルの開発　＝＞変動シナリオに基づく安全評価に必要な技術
- ②-1）稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術
- ②-2）時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術

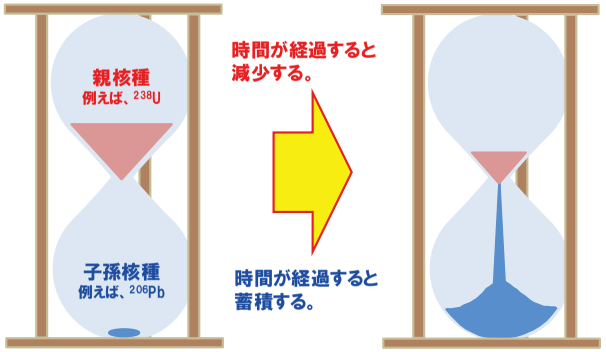
③ 年代測定技術の開発　＝＞①，②の信頼性を向上するための技術基盤
- ③-1）ウラン系列放射年代測定法の実用化
- ③-2）光ルミネッセンス（OSL）年代測定法の実用化
- ③-3）アルミニウム-26年代測定法，塩素-36年代測定法の実用化
- ③-4）高分解能のテフラ同定手法の開発
- ③-5）地質試料を対象とした年代測定法及び化学分析手法の高度化

情報・意見交換会 2017　JAEA 3

放射年代測定の基礎原理

放射年代測定とは

放射性核種（親核種）が不変の半減期に基づいて異なる核種（子孫核種）へ壊変することを利用して、岩石や化石の年代（形成以降の経過年数）を測定すること。



情報・意見交換会 2017　JAEA 4

様々なものを対象とする年代測定

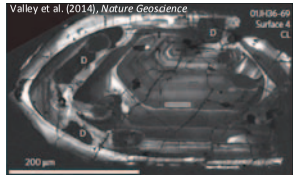
地球最古の鉱物

オーストラリア西部のジャックヒルズで発見された岩屑性ジルコン：44 億年

Valley et al.（2014），*Nature Geoscience*

U-Pb年代測定

意義:地球の冷却期（地殻形成の始まり）



地球最古の岩石

カナダ、スレーブ地塊アキャスタ片麻岩帯：40.3億年

Bowring and Williams,（1999），*Contrib. Mineral. Petrol.*

カナダ、ノール・デュ・ケベック地域ヌブアギトゥク緑色岩帯の偽角閃岩：42.8 億年

O' Neil et al.（2008），*Science*

U-Pb, Sm-Nd年代測定

意義：安定した大陸地殻形成の始まり？

本研究の目的

地質環境の長期安定性に関する研究

将来の地質環境の安定性を評価する手法の一つとして、地質環境の過去の変遷を解読し、変遷の傾向を外挿する手法がある。

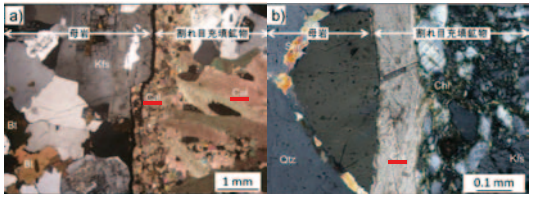
炭酸塩鉱物（カルシウム炭酸塩）

➢ 岩石種を問わず透水性の割れ目に充填鉱物として普遍的に存在する。

（岩石層から供給されるカルシウムイオンと地下水や海水に存在する炭酸イオンの化合物）

炭酸塩鉱物≒“地下水の化石”

◆ 炭酸塩鉱物の形成年代や化学組成を知ることで、地下水の変化（過去の水質や地下水流動経路の変化）を読み解くことができる。



Qtz: 石英
Kfs: カリ長石
Bt : 黒雲母
Chl: 緑泥石
Ser: 絹雲母
Cal: 方解石

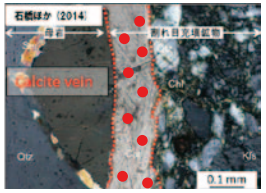
（石橋ほか, 2014）

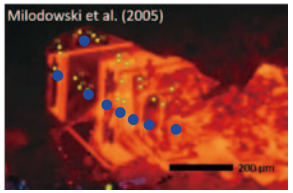
炭酸塩鉱物の年代測定のアプローチ
ー分析手法の選択ー

炭酸塩鉱物の分析から過去の水質や地下水流動経路の変化を把握するためには、鉱物粒子あるいは微細な組織・構造ごとの化学組成と形成年代の情報が必要

このためには、局所領域について化学組成や年代値を取得する技術（局所分析法）の確立が必須

局所分析法	湿式分析法
◎簡便な前処理	△熟練度を要する分析前処理
◎高い空間分解能	△空間分解能が比較的低い
△測定精度が比較的低い	◎高精度分析





炭酸塩鉱物の年代測定のアプローチ
ー同位体系の選択ー

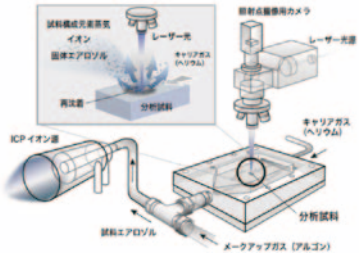
局所分析法

◆レーザーアブレーションICP質量分析法

◆二次イオン質量分析法（SIMS, SHRIMP）

➢これらの分析技術を用いたジルコンなど鉱物粒子のU-Pb年代測定が広く実施されている。

⇒確立された技術を炭酸塩鉱物へ応用すれば年代測定が可能？



レーザー試料導入法の概念図（東大、平田教授より提供）

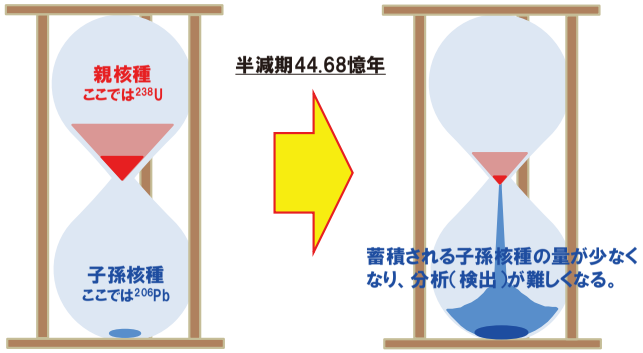
炭酸塩鉱物のU-Pb年代測定における課題

✓親核種であるUの含有量が比較的少ない（課題①）

✓標準試料が未選定（課題②）

炭酸塩鉱物のU-Pb年代測定における課題①

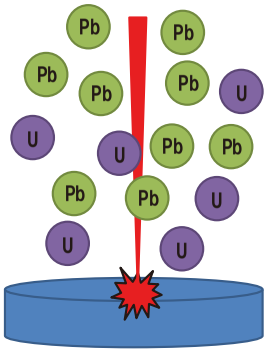
親核種であるUの含有量が比較的少ない（課題①）



➢ 親核種に富む試料、もしくは同一試料内でも親核種に富む領域を選ぶ技術が必要

炭酸塩鉱物のU-Pb年代測定における課題②

標準試料が未選定（課題②）



レーザーアブレーションによる元素分別の概念図

LA-ICP質量分析中にLAサイトで生じる元素分別

- 元素の揮発性・質量数に起因した分別
- 試料の掘削深度が上がると、アブレートされる元素がより選択的になる（ダウンホール分別）。
- マトリクスの違いに起因した分別（マトリクス効果）

元素分別の影響を補正する手法として、標準試料と未知試料を交互に分析する挟み込み法が用いられる。

- マトリクスの一致した（炭酸塩鉱物の）標準試料の選定・開発が必要

実施内容

LA-ICP質量分析法による炭酸塩鉱物のU-Pb年代測定技術の開発として

① 親核種に富む領域を選ぶ技術（イメージング技術）の整備

② 標準試料の選定・開発

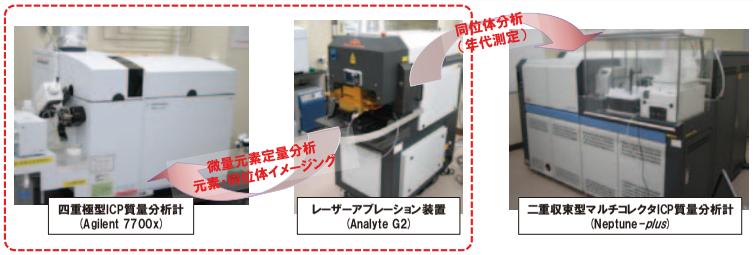
イメージング技術の整備
－低いU濃度を持つ炭酸塩鉱物への対応－

イメージング分析技術の整備

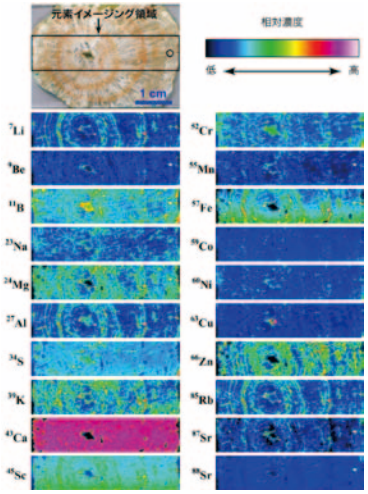
炭酸塩鉱物のU-Pb年代測定を実施する分析点の選定と評価を実施するため、東濃地科学センターにイメージング分析の技術を整備

イメージング分析

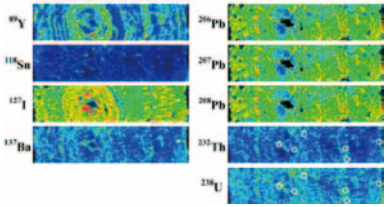
レーザーを水平方向に走査し、四重極型ICP質量分析装置で元素イオンを検出
得られたデータをつなぎ合わせ、2次元元素（同位体）分布を得る分析手法
※EPMAなど一般的な元素マッピングとの違い
（利点）希土類元素などを含む微量元素について相対的な濃度分布を得ることができる。
（欠点）試料表面数～数十μmの破壊分析



イメージング分析技術の整備



イメージング分析例
鍾乳石（山口県秋吉台）



秋吉台鍾乳石試料AK-1の元素イメージングの結果。試料写真中の小円で囲んだ部位においてBe、B、Mg、Mn、Fe、Sr、Ba等が顕著に濃集している。レーザーの形状及び走査速度はそれぞれ150 μm四方及び300 μm s^{-1}。イメージング所要時間は158分。

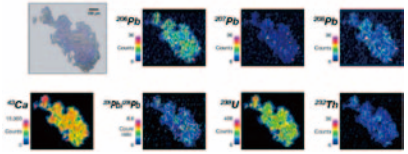
✓ 試料のどの部位がU-Pb年代測定に適しているか把握することが可能となった。

標準試料の選定・開発

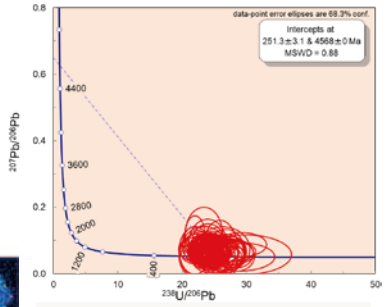
標準試料の選定

✓ 蒸発岩中の方解石（Castile Formation Calcite; CFC; Becker et al. (2002)）の有用性（元素比、同位体組成の均質性）を評価

方解石と石膏の互層からなる蒸発岩試料
（Becker et al., 2002著者より提供）



蒸発岩中の方解石のイメージング分析結果



蒸発岩中の方解石のU-Pb同位体分析結果

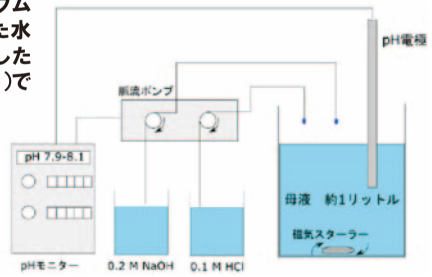
➢ CFCのイメージング分析及びU-Pb同位体分析の結果、U-Pb系について比較的均質な組成を持つことが確認された。

標準試料の開発

✓ 天然試料からの選定が困難な場合を想定して、人工的に標準試料を作製（沈殿法よる方解石の生成）

➢ 炭酸水素ナトリウム、塩化カルシウム及び塩化ストロンチウムが溶解した水溶液にUとPbの標準溶液を添加した母液から沈殿させる手法（沈殿法）で方解石の粉末を作製

沈殿法の手順（学習院大、坂田助教より提供）



分析への実用性（分析試料のU, Pb濃度の多様性）を考慮し、U, Pb濃度の異なる母液からU/Pb比の異なる4種類の粉末試料の作製に成功

実施内容のまとめと今後の展望

まとめ

- イメージング分析技術の整備
  - Uに乏しい炭酸塩鉱物に対しても精度よくU-Pb年代測定を実施するための分析領域の選定が可能となった。
- 標準試料の選定・開発
  - CFCのU-Pb年代測定における標準試料としての有用性が確認された。
  - 沈殿法によりU, Pbを異なる割合で含有する方解石の粉末を作製した。

今後の展望

- 人工作製試料の均質性評価及び他の作製手法の検討を実施中
- 米国ニューメキシコ州Whites Cityで採取されたWC-1(254.4±6.4 Ma)が炭酸塩鉱物のU-Pb年代測定における標準試料として提唱された(Roberts et al., 2017)。

⇒これまでに我々が評価したCFC、人工作製試料とWC-1を分析して比較し、標準試料としての適用性の高さを評価して、年代値が未知の試料の測定へ臨む。

謝辞

◆本報告は経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業である「平成26-28年度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。

◆本報告の成果の一部は本事業の中で東京大学、株式会社京都フィッション・トラック、学習院大学、海洋研究開発機構との共同研究で得られた成果である。

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

- チャネリングコヒーレント電離による加速器質量分析における同重体分別法の開発
- 複数同位体の同時測定による高精度希ガス同位体分析－地下水年代測定法の実用化に向けて－
- 後背地解析技術の開発その1　帯磁率異方性を利用した古流向の推定
- 後背地解析技術の開発その2　岩石・鉱物学に基づく後背地解析指標の検討

2. 超深地層研究所計画

- 再冠水試験に係わる調査研究　－一部排水・水圧減圧試験に伴う水理学的調査・解析－
- 地質環境特性の長期変遷解析技術に関する研究　－割れ目の形成と充填の履歴－
- 物質移動モデル化技術の開発　－花崗岩中での物質移動現象の理解－
- 物質移動モデル化技術の開発　－実際の割れ目の性状を考慮した割れ目ネットワークモデルのモデル化手法の整備－

3. 共同研究

- 東京大学と日本原子力研究開発機構の共同研究
  結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価手法に関する研究
- 東京大学と日本原子力研究開発機構の共同研究
  地下環境の形成に関わる微生物プロセスの評価技術の研究
- 電力中央研究所と日本原子力研究開発機構の共同研究
  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　－地下水年代調査および評価技術の開発－

4. 瑞浪超深地層研究所を利用した研究

- 公益財団法人地震予知総合研究振興会　東濃地震科学研究所
  瑞浪超深地層研究所坑内における地球物理学的諸観測

This is a blank page.

地質環境の長期安定性に関する研究
チャネリングコヒーレント電離による 加速器質量分析における 同重体分別法の開発

藤田　奈津子・松原　章浩・國分（齋藤）陽子
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　年代測定技術開発グループ

1. 加速器質量分析（AMS）とは

ごく微量の同位体を超高感度で検出し定量する方法。
東濃地科学センターでは、地質環境の長期安定性に関する研究で断層活動など自然事象の年代測定に利用。
分析目的核種に対し、同じ質量電荷比の同重体は、存在比で3～9桁高いため、**AMSでは同重体分別が必須。**

表1. AMSで代表的な測定核種と同質量電荷比(m/q)粒子[1]。○は同重体を表す。

核種	用　途	半減期	同m/q粒子
^{10}Be	地形学, 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	^{7}Li$_2$
^{26}Al	地形学, 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	地形学	3.7 My	^{53}Cr
^{129}I	地球・環境学	15.7 My	—

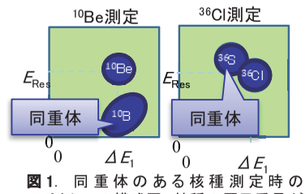


図1. 同重体のある核種測定時のスペクトルの模式図。核種の原子番号が大きくなるとスペクトルが近接するため、大型の加速器が必要。

2. コヒーレント共鳴励起（RCE）による同重体分別の概念

イオンが結晶通過中に感受する周期場によるイオン励起**"コヒーレント共鳴励起(RCE[2,3])"**を基にした選択的な電離により、分析目的核種と同重体の電荷に差を作り偏向器で分別。**特許第6086587取得済**

負イオン源から目的核種と妨害核種である同重体を入射
↓
ストリッパーでRCEに有利な電離段階に変換
↓
単結晶薄膜でRCEを発生
↓
目的核種と同重体で電荷に差を作り偏向器で分別

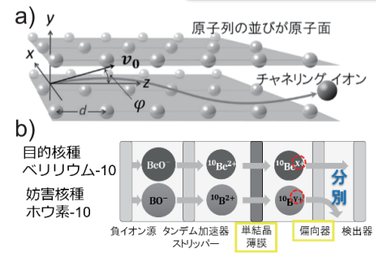


図2. a）結晶内でのチャネリングイオンの模式図。
b）本同重体分別の模式図。

3. 本研究の成果

✓ **実験で用いたチェンバーの製作、設置**

✓ **単結晶薄膜の膜厚の検討**
- 膜厚が厚くなるとランダム過程によりRCEが不鮮明になる。
- 膜厚が薄いと5 MVでもRCEを発生可能
  - ➢ 30 nm（世界最薄：図3,(c)）の薄膜使用予定

✓ **既存の厚い(200 nm) 単結晶薄膜を使用した技術基盤の整備**
- ➢ チャネリング技術の構築
- ➢ 荷電分布取得技術の構築

◆ 整備を行う中で新しいアイデアの発見！

- 電場を変化させることで荷電分布が取得可能
- ^{10}Beと^{10}Bの分布の違いは平衡電荷の違いを反映し、3価では^{10}Beのみピークを持つ。

➢ +3価のイオンを取出す電場で^{10}Beと^{10}Bを分別可能！

「チャネリング状態は　分別能力が高い」
ことを世界に先駆けて実証
➢ 平成29年3月 国内特許出願　　特願2017-55416

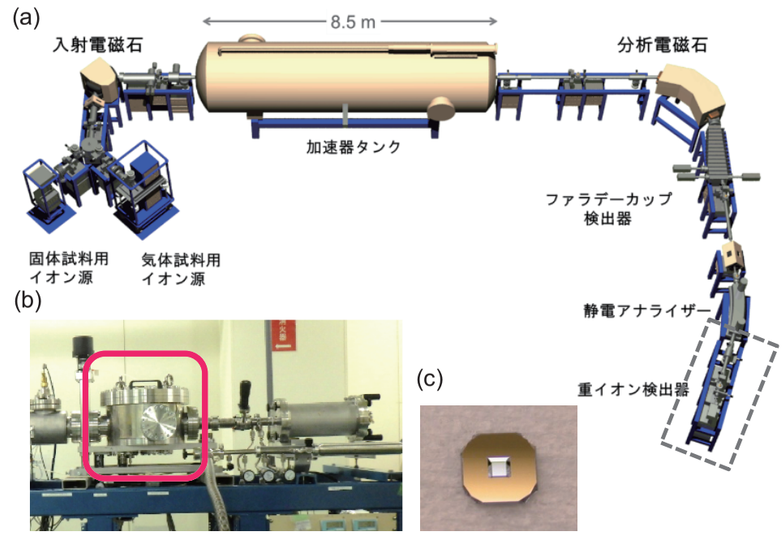
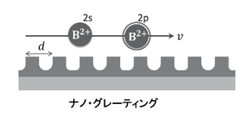


図3. a）東濃地科学センターにあるタンデム型加速器質量分析装置（最大電圧5 MV）。
b）本実験のために新しく設計し設置した実験チェンバー。 a)図内黒点線で囲んだ検出部に接続した。 c）30 nmの薄膜予定図。

4. まとめと展望

- **RCEによるAMSの同重体分別を考案**
  特許第6086587
  「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」
- **実証のための技術基盤を整備**
  - チェンバーの製作
  - 200 nm薄膜を用いた技術基盤の整備
  - 30 nm薄膜を用いた実証試験（平成29年10月以降）
- **新たな特許出願**
  特願2017-55416
  「イオンビーム透過膜の透過率改善方法及びその装置」
  - 外国出願に向けて準備中

□ **新規発案の研究も並行して実施**
➢ ナノ周期構造体の上空にイオンを飛行させRCEでイオンを励起・電離する。



□ **高精度化、装置の小型化（世界最小）への実現に向けて実証試験中**

➢ **今後も競争資金の獲得に努力**

参考文献

[1] Accelerator Mass Spectrometry, C. Tuniz et al., CRC Press LLC, (1998).
[2]中野裕司, 東俊行, 日本物理学会誌65, 516 (2010).
[3] 畠山温, しょうとつ 9 (6), 8 (2012).

謝辞

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等にて実験へのご協力やご議論をいただけまし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、立教大学　中野祐司准教授には有益なご助言をいただきましたことを感謝いたします。

地質環境の長期安定性に関する研究
複数同位体の同時測定による高精度希ガス同位体分析
-地下水年代測定法の実用化に向けて-

日本原子力研究開発機構　バックエンド研究開発部門　東濃地科学センター　地層科学研究部
年代測定技術開発グループ、ネオテクトニクス研究グループ*　國分（齋藤）　陽子・田村　肇*・横山　立憲

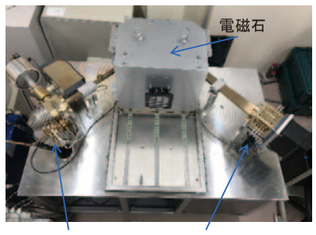
背景・目的

地下水中に溶存する希ガス元素（ヘリウム、ネオン、アルゴン）の高精度同位体分析は、その地下水の滞留時間の情報を得るために有効な手法である（Hama and Metcalfe, 2014）。これまでの希ガス質量分析装置は、ひとつの検出器を使用するため（例えば、森川, 2001）、十分な測定精度が得られなかった。本研究では、複数の検出器をもつマルチコレクター型希ガス質量分析装置を整備し、複数の同位体の同時測定による高精度の同位体分析を試みた。また、希ガスの同位体分析の際必要となる試料採取器具や自動希ガス精製装置を整備した。

希ガス質量分析装置の整備

各種希ガスの同位体比を精度良く測定するため、マルチコレクター型希ガス質量分析装置を整備した。また、希ガスを測定する場合、希ガスを質量分析装置に導入する前に精製及び希ガスの元素間の分離を行うが、これまでの装置では手動であり、熟練した技術者により時間を要する作業であった。本装置では、自動化システムを組み込み、簡便に操作ができるようにした。

● マルチコレクター型希ガス質量分析装置（ISOTOPX製NGX）



精製部で分離精製した希ガスの同位体比を測定

特徴

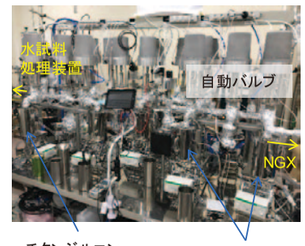
✓ 6個の検出器

L3	L2	L1	Ax	H1	H2
SEM	Faraday (10^{11} Ω)	SEM	SEM	Faraday (10^{11} Ω)	Faraday (10^{12} Ω)

✓ 感度はアルゴンで10^{-3} A/Torrを確保

✓ 従来機に比べ分析管容積を縮小（従来機: 2000 cc → 本機: 1300 cc）

● 希ガス精製装置（堀口鉄工所製PEG-035）



水試料処理装置で試料より抽出した希ガスを分離精製

特徴

✓ 自動バルブのコンピュータ制御により希ガスの分離精製の自動化が可能

✓ チタンゲッター等により高い活性ガス（酸素等）除去能力あり。

✓ 極低温トラップ（4 Kまで設定可能）を備え、ヘリウムとネオンの分離が可能

✓ 最終精製段の容積を小さくすることで（約200 cc）、試料ガスの質量分析装置への効率的な導入が可能

測定結果

マルチコレクター型希ガス質量分析装置及び前処理装置（水試料処理装置及び希ガス精製装置）の性能を確認するため、大気を希釈精製して作製した試料を用いて、ネオン及びヘリウム同位体比測定を行った。

● ネオン

- 前処理装置を含めた感度
  Ne: 1.2×10^{-8} cm^3STP/V ⇔ 飽和水中のNe濃度: 1.78×10^{-7} cm^3STP/g
  →1 g程度の水で充分な測定可能

- ネオン同位体比の測定結果

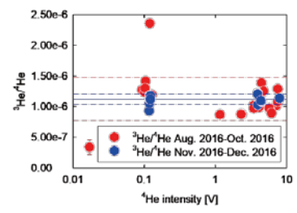
	$^{20}Ne/^{22}Ne$	$^{21}Ne/^{22}Ne$
(n=20)	10.0840±0.0022	0.025986±0.000045

→ひとつの検出器を有する質量分析装置で測定した既報（森川, 2001）より1桁高い精度であることを確認

地下水中のネオン同位体分析に十分な能力を持つことを確認

● ヘリウム

- ヘリウム同位体比の測定結果



$^3He/^4He$

●: (1.12±0.35) × 10^{-6}

↓イオン源の調整

●: (1.12±0.08) × 10^{-6}

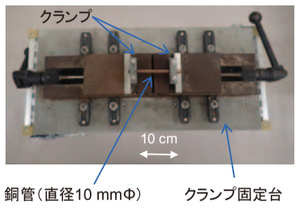
→装置の調整により、測定精度が向上

地下水中のヘリウム同位体分析に十分な能力を持つことを確認

試料採取器具の整備

試料となる地下水は湧水やボーリング坑内から採取するため、採取場所で扱える器具の大きさや形状の制約を考慮し、2種類の採取器具を整備した。

● 湧水からの採取



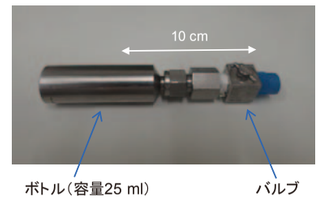
湧水ないしは井戸からくみ上げた水を銅管に通し、銅管の両端をクランプで封止して採取

特徴

✓ 安価

✓ 銅管の延伸圧着により、他の手法より脱ガスしにくい。

● ボーリング孔内（高水圧下）での採取



真空状態のボトルをボーリング孔に投入し、目標深度でバルブを開閉し水を採取

特徴

✓ 小スペースで採取可能

✓ 操作はバルブの開閉のみのため、銅管より操作が容易

✓ 深度500 m程度での採水可能

まとめ

- 希ガス質量分析装置及び試料採取器具を整備
- マルチコレクター型希ガス質量分析装置により高精度にネオン及びヘリウム同位体分析が可能であることを確認

今後は、本装置を用いた複数の希ガス同位体分析による地下水の年代測定法の構築を進めていく。

本報告は経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業である「平成26～28年度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。

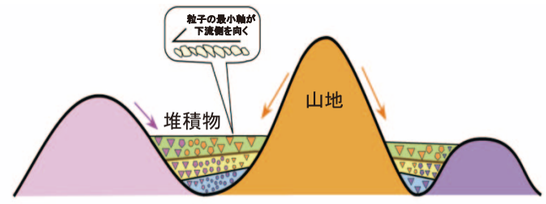
＜参考文献＞
- Hama and Metcalfe, J. Japan. Assoc. Hydrol. Sci., 44, 39-64 (2014).
- 森川, JNC TN7400 2001-03 (2001).

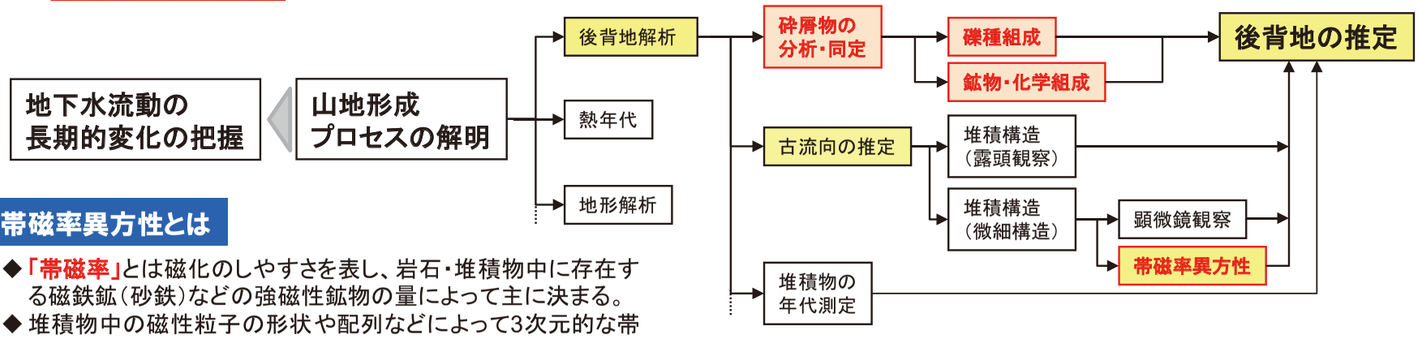
地質環境の長期安定性に関する研究
－後背地解析技術の開発その1　帯磁率異方性を利用した古流向の推定－

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
雨宮　浩樹・丹羽　正和

後背地解析技術の開発

◆ 百万年以上に及ぶ時間スケールでは山地の発達により動水勾配などが大きく変化する可能性があるため、山地の形成過程を把握する技術の整備が重要。
◆ 山地の形成過程を把握する手法の一つとして、堆積物を用いた後背地解析技術が有効。
◆ 東濃地科学センターでは、従来の後背地解析手法に加え、山地・丘陵から供給された砕屑粒子の物理・化学特性などを指標とした解析手法を導入することにより、山地・丘陵の隆起開始時期と形成過程の推定や古地形の復元に係る精度・分解能を向上させるための**後背地解析技術の開発**を進めている。

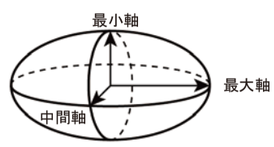




帯磁率異方性とは

◆ **「帯磁率」**とは磁化のしやすさを表し、岩石・堆積物中に存在する磁鉄鉱（砂鉄）などの強磁性鉱物の量によって主に決まる。
◆ 堆積物中の磁性粒子の形状や配列などによって3次元的な帯磁率強度分布が異なる。この帯磁率の偏りを**「帯磁率異方性」**と呼び、最大軸・中間軸・最小軸の3成分を持つ異方性楕円として表すことができる。
◆ 帯磁率異方性の測定の利点
　①砂やシルトなど細粒な堆積物で測定可能
　②少量の堆積物（2 cm^3程度）で測定可能
　③1試料につき数分で測定可能
◆ 東濃地科学センターでは平成26年度に導入した帯磁率異方性測定装置AGICO社製MFK1-FAを用いて帯磁率異方性の**古流向解析への適用性の検討**を実施。

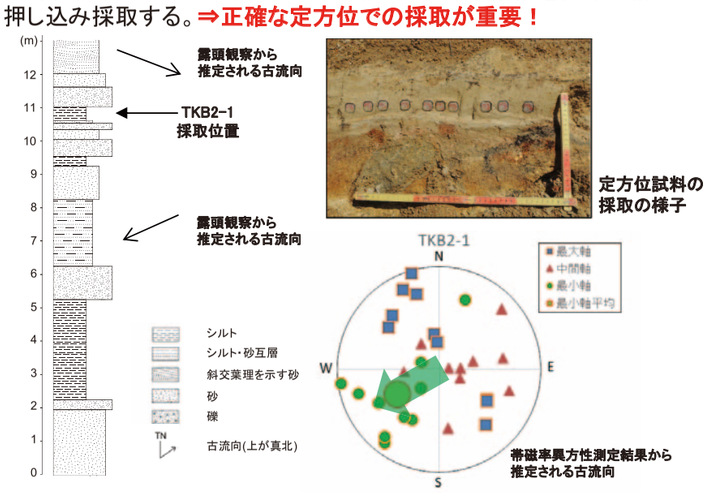
帯磁率異方性測定装置の構成



帯磁率異方性の近似楕円体イメージ

帯磁率異方性を利用した古流向の推定

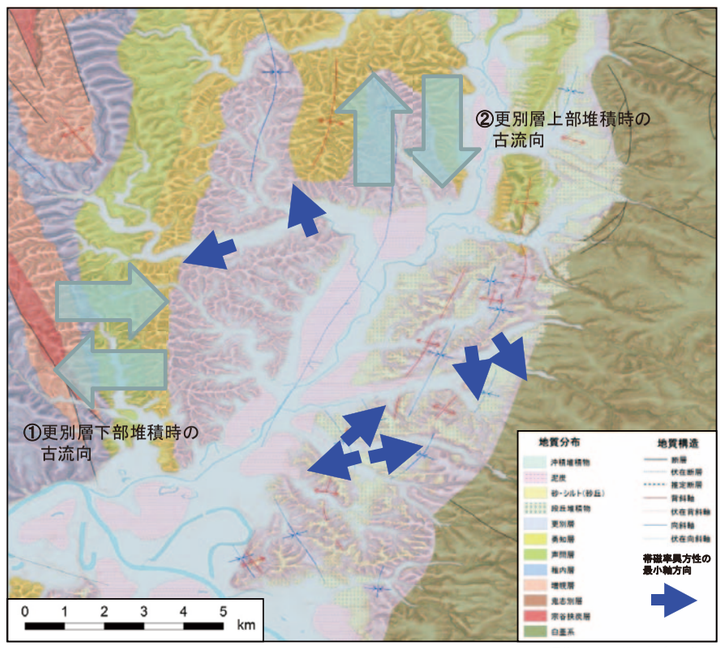
◆ 定方位で採取した試料の強磁性鉱物の配列を把握できれば、肉眼や鏡下では観察できない岩石や堆積物の粒子配列が推定でき、古流向解析に適用できる可能性がある。
◆ 定方位試料はプラスチックキューブ（2 cm^3の立方体）を露頭に静かに押し込み採取する。**⇒正確な定方位での採取が重要！**



定方位試料の採取の様子

露頭観察から推定される古流向と帯磁率異方性測定結果との比較の例
海浜の堆積物のため、古流向は東西方向の波の押し引きを反映していると考えられる。

◆ 露頭観察と帯磁率異方性測定から推定される古流向は調和的であり、**古流向解析手法の一つとして帯磁率異方性の適用が期待**できる。



酒井ほか(2014)※に基づいて作成

北海道幌延町問寒別地域の下部更新統・更別層での帯磁率異方性を利用した古流向の推定例
①更別層下部では東西性の方向を示すのに対し、②上部では南北性の方向を示す傾向があり、更別層堆積期間中の問寒別地域西部の山地の発達に伴う地形の変化を反映している可能性がある。

引用文献　※）酒井 利啓, 松岡 稔幸, 天野 健治, 幌延地域を対象とした10mグリッド数値標高モデルを用いた精密地形解析図の作成, *JAEA-Data/Code 2014-005*, 2014, 43p.

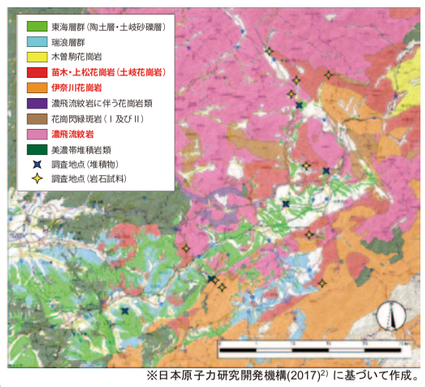
本報告は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確証技術開発）」の成果の一部である。

地質環境の長期安定性に関する研究
－後背地解析技術の開発その2　岩石・鉱物学に基づく後背地解析指標の検討－

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
植木　忠正・清水　麻由子・佐野　直美・代永　祐輔

後背地解析指標の検討

◆ 後背地解析では、堆積物とその供給源と考えられる地質体を比較する指標が不可欠であるが、供給源に類似した種類の岩石が分布する地域では後背地の特定が容易ではない。
◆ 東濃地科学センターでは、既存研究[1)]で礫層の観察から検討が行われている**東濃地域**を事例対象として、岩石を構成する鉱物種、鉱物の化学組成などに着目し、堆積物（**東海層群土岐砂礫層**）と後背地の岩石の検討を行っている。



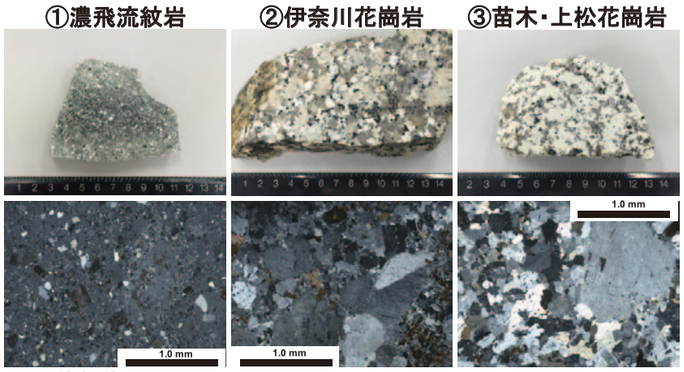
※日本原子力研究開発機構(2017)[2)] に基づいて作成。

研究目的：岩石固有の特徴(＝後背地の指標)を検討する手法の開発

岩石を用いた検討

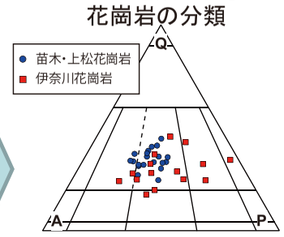
◆ 既存研究では礫の観察から、東濃地域に分布する東海層群土岐砂礫層の後背地として、主に3種類の岩石が検討されている。

①濃飛流紋岩　②伊奈川花崗岩　③苗木・上松花崗岩



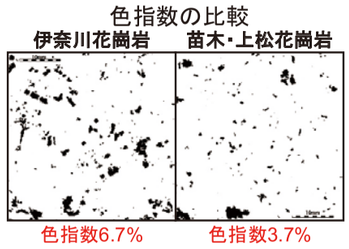
斑状組織のため、**肉眼で識別可能**　　**花崗岩類は肉眼での判別が困難**

モード組成による花崗岩の分類



石英(Q)・アルカリ長石(A)・斜長石(P)比から岩石を識別

色指数の比較



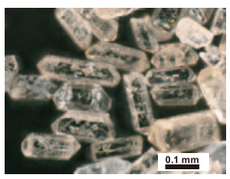
岩石の色指数(有色鉱物の量)を画像解析によって求めて識別

＜岩石の識別指標＞
伊奈川花崗岩：アダメロ岩～花崗閃緑岩、色指数5%以上
苗木・上松花崗岩：花崗岩～アダメロ岩、色指数5%未満

岩石が礫として存在する場合は、岩石の肉眼～顕微鏡観察によって得られる特徴を指標とすることが可能

重鉱物を用いた検討

◆ 花崗岩は風化しやすく、礫として存在するとは限らない。砂のような堆積物から後背地解析を行う場合は、風化に強い重鉱物が指標として有効な可能性がある。
◆ 本研究ではジルコンを対象として検討した。



伊奈川花崗岩から抽出したジルコン

＜ジルコンの特徴＞
・多くの火成岩に含まれる。
・比重が高い(4.7)。
・ウランを含み、年代測定も可能。
・風化に非常に強い。
・岩石が高温で変成しても残る。

ジルコンの化学組成による識別

・各岩石中からジルコン粒子を抽出し、化学組成を測定。
・微量に含まれるY_2O_3含有量を比較。

各岩石中のジルコンのY_2O_3含有量

	～1 wt.%	1～3 wt.%	3 wt.%～	n数
濃飛流紋岩	102	1	0	103
伊奈川花崗岩	459	16	3	475
苗木・上松花崗岩	214	18	6	232

濃飛流紋岩はY_2O_3含有量が低いものが大半。
花崗岩では低いものから高いものまである。

ジルコン中の包有物による識別

・ジルコン中には微細な鉱物やマグマの泡沫などが取り込まれている。
・岩石は異なるマグマからできているため、ジルコン中の包有物も岩石によって異なると考えられる。

ジルコン中の微細なメルト包有物・燐灰石を分析

	濃飛流紋岩 melt (n=6)	濃飛流紋岩 apatite (n=22)	伊奈川花崗岩 melt (n=11)	伊奈川花崗岩 apatite (n=31)	苗木・上松花崗岩 melt (n=8)	苗木・上松花崗岩 apatite (n=10)
SiO_2	75.6	0.0	78.1	0.0	80.2	0.0
TiO_2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Al_2O_3	13.8	0.0	10.4	0.0	10.3	0.0
FeO	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
MnO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MgO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CaO	1.2	53.2	0.1	51.9	0.0	52.1
Na_2O	2.8	0.0	1.7	0.0	3.2	0.0
K_2O	3.4	0.0	6.1	0.0	4.0	0.0
P_2O_5	0.0	40.6	0.0	39.8	0.0	39.1
F	0.1	5.0	0.1	5.2	0.4	4.9
Y_2O_3	0.0	0.5	0.0	0.4	0.0	1.2
(wt.%)	97.0	99.3	96.6	97.3	98.2	97.3

＜岩石の識別指標＞
濃飛流紋岩
ジルコンのY_2O_3<1.0 wt.%
メルト包有物中のCaO＝1.0-2.0 wt.%
伊奈川花崗岩
メルト包有物中のK_2O＝5.0-10.0 wt.%
苗木・上松花崗岩
燐灰石のY_2O_3＝1.0-2.0 wt.%

重鉱物の化学組成やジルコン中の包有物が指標として活用可能

引用文献　1) 貝塚爽平(1998)：発達史地形学, 東京大学出版会, 286p.　2) 日本原子力研究開発機構(2017), 平成28年度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報告書, 経済産業省資源エネルギー庁, 265p.

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。

超深地層研究所計画：再冠水試験に係わる調査研究
ー　一部排水・水圧減圧試験に伴う水理学的調査・解析　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
尾崎　裕介・小橋　昭夫・毛屋　博道・尾上　博則・竹内　竜史

目的・報告内容

【再冠水試験】

目的：
- 坑道の掘削・維持管理により乱された地質環境の回復・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

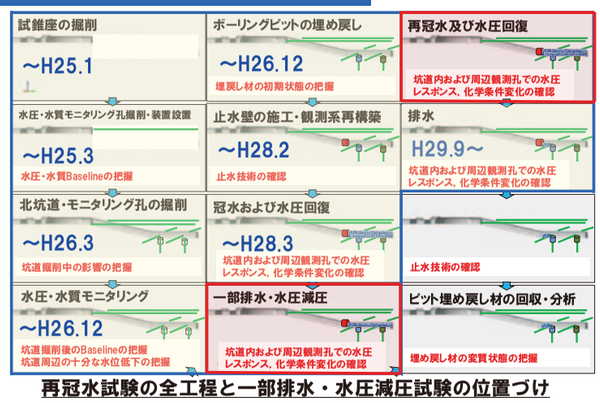
これまでの主な成果：
- 冠水坑道内及び周辺岩盤において，坑道内の冠水に伴う地下水圧の変化を把握
- 上記に基づき周辺岩盤中の不均質な割れ目分布を概念化

【一部排水・水圧減圧試験】

目的：
- 冠水坑道から地下水の一部排水と排水停止を複数回行い，水圧回復に関する現象の再現性を確認

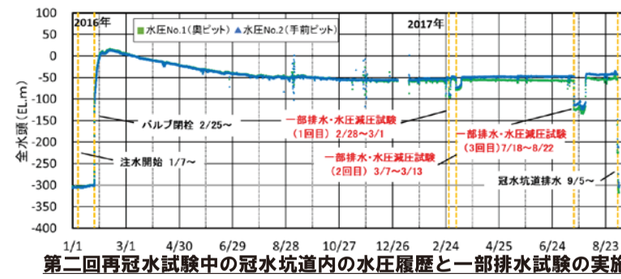
報告内容：
- 一部排水・水圧減圧試験に伴い実施した水理学的調査・解析の実施概要と得られた成果

一部排水・水圧減圧試験の概要



再冠水試験の全工程と一部排水・水圧減圧試験の位置づけ

＊本ポスターでは、“一部排水・水圧減圧”と“再冠水と及び水圧回復”をまとめて一部排水・水圧減圧試験と記載する。



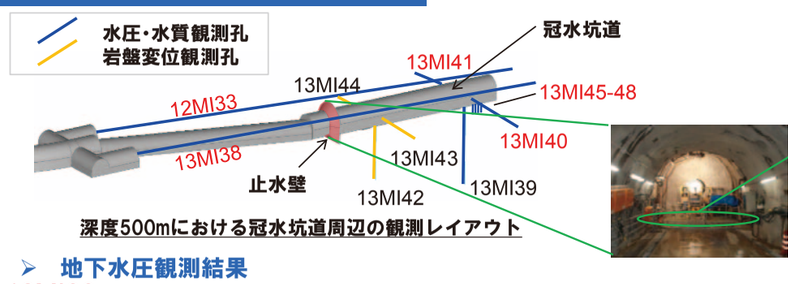
第二回再冠水試験中の冠水坑道内の水圧履歴と一部排水試験の実施時期

一部排水・水圧減圧試験条件

試験	排水開始日時	排水停止日時	排水期間	排水量
第1回	2017/2/27 15:00	2017/3/1 15:00	2日	平均3.3m³/d
第2回	2017/3/7 16:40	2017/3/13 14:30	6日	平均1.9m³/d
第3回	2017/7/18 9:45	2017/7/31 10:25	13日	平均5.6m³/d

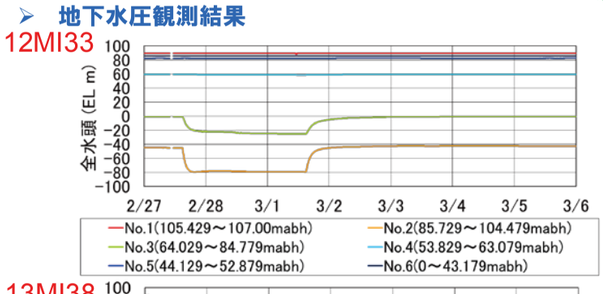
✓　冠水坑道内からの排水量が異なる一部排水・水圧減圧試験を3回実施

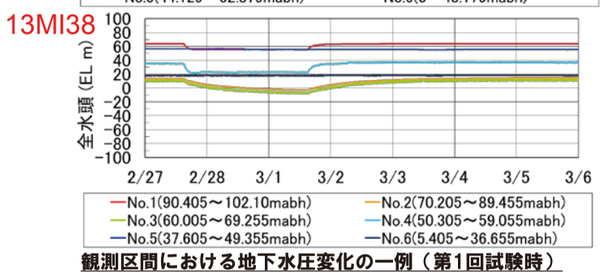
水理学的調査の実施結果



深度500mにおける冠水坑道周辺の観測レイアウト

➢ 地下水圧観測結果

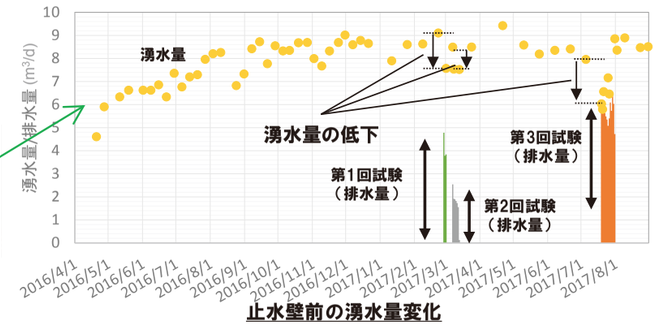




観測区間における地下水圧変化の一例（第1回試験時）

⇒観測区間毎に異なる水圧応答を観測
⇒一部の観測区間では，排水と排水停止に伴う明瞭な水圧応答を確認

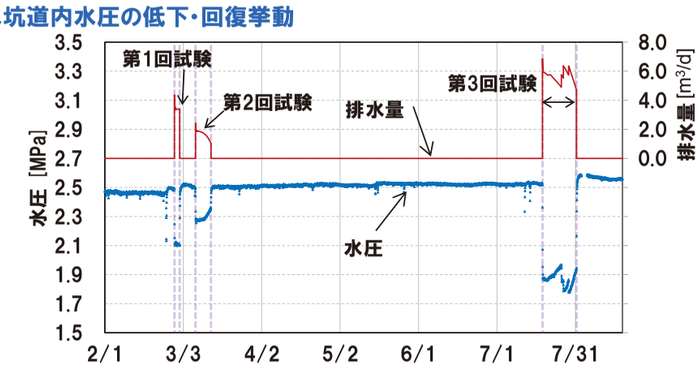
➢ 坑道の湧水量測定結果



止水壁前の湧水量変化

⇒止水壁前の湧水量の長期的な傾向と，排水と排水停止に伴う変化を確認

➢ 冠水坑道内水圧の低下・回復挙動



試験に伴う冠水坑道内の水圧変化

⇒排水に伴う水圧低下は，排水停止後に排水開始前の水圧に回復
⇒冠水坑道からの直接の排水，排水停止に伴う水圧変化の再現性を確認

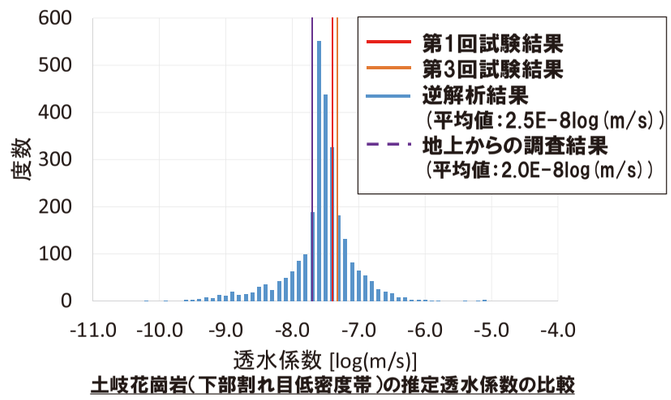
調査データに基づく解釈・解析結果

➢ 冠水坑道周辺岩盤の巨視的透水性

一部排水・水圧減圧試験	解析法	透水量係数 (m^2/s)	透水係数 (m/s)
第1回試験（回復過程）	Agarwal	1.9E-6	4.0E-8
第3回試験（回復過程）	Agarwal	2.2E-6	4.8E-8

＊第2回試験は、得られたデータが低品質なため未実施

⇒坑道規模の単孔式水理試験とみなし，冠水坑道の水圧変化から坑道スケール（数十mスケール）の平均的な透水性を10^{-8}m/sオーダーと推定

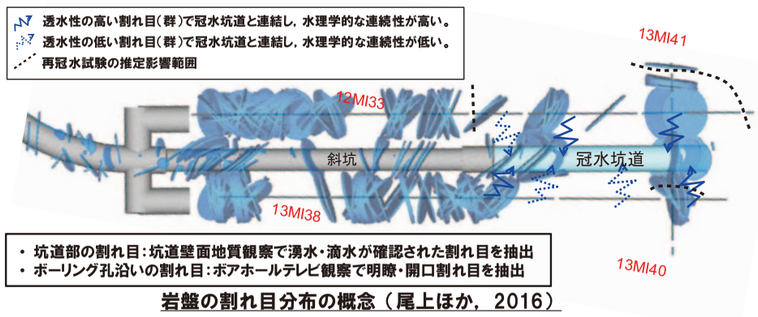


土岐花崗岩（下部割れ目低密度帯）の推定透水係数の比較

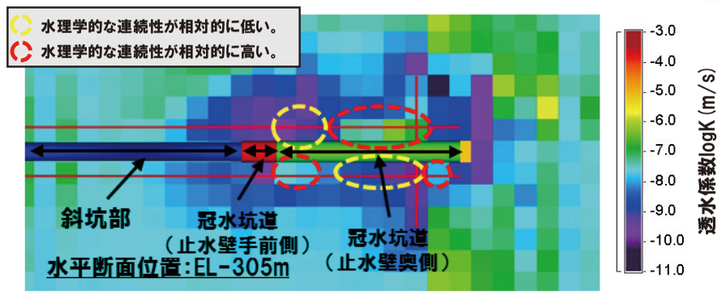
＊第2回試験は、得られたデータが低品質なため未実施

⇒冠水坑道の水圧変化から推定した透水係数は，逆解析の推定結果及び地上からの調査結果（尾上ほか，2015）と概ね整合

➢ 冠水坑道周辺岩盤の透水不均質性



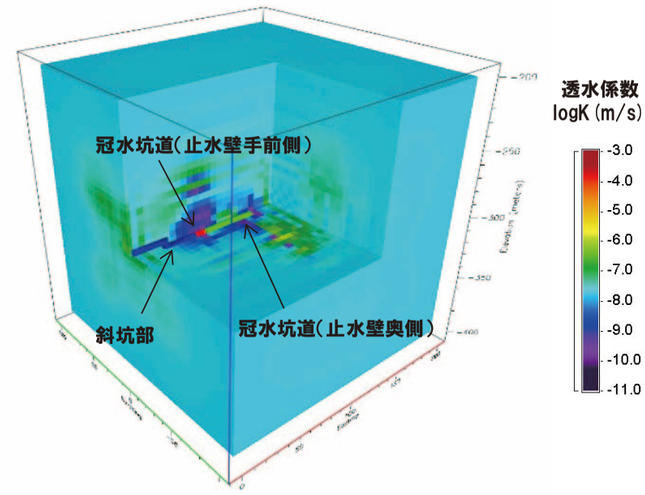
岩盤の割れ目分布の概念（尾上ほか，2016）



逆解析で推定した透水係数分布

⇒逆解析で推定した透水係数に基づく冠水坑道周辺の水理学的な連続性の傾向は，既往研究成果と概ね整合的

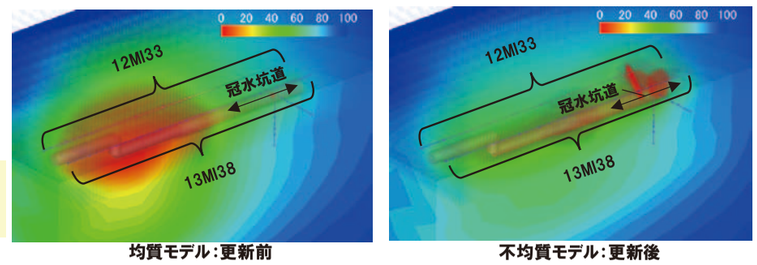
➢ 地下水流動のモデル化・解析



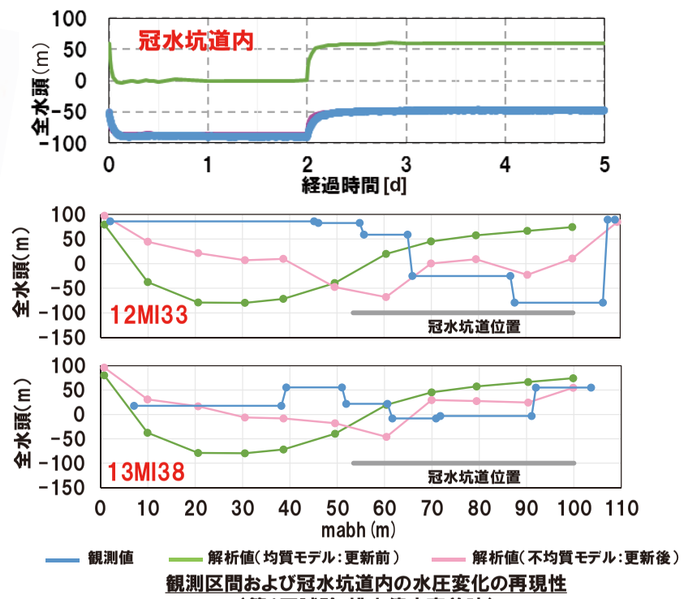
逆解析で推定した透水係数の空間分布

⇒試験に伴う周辺岩盤中の水圧変化を用いた逆解析を実施し，坑道周辺岩盤における透水不均質性の三次元分布を推定

➢ 冠水坑道周辺岩盤の水理特性の理解度



一時排水・水圧減圧試験時に予測される水圧の空間分布



観測区間および冠水坑道内の水圧変化の再現性
（第1回試験：排水停止直前時）

⇒岩盤の透水不均質性を解析モデルに考慮することで，冠水坑道内及び周辺岩盤における水圧変化の推定精度が向上

まとめ

- ✓ 複数回の一部排水・水圧減圧試験の実施により，坑道周辺岩盤の水圧変化の再現性を確認
- ✓ 冠水坑道周辺岩盤の数十mスケールの平均的な透水性及び透水不均質性の三次元分布を定量的に推定
- ✓ 一連の試験・解析によって，冠水坑道周辺岩盤の水理特性の理解度が向上

今後の予定

- ✓ 再冠水試験に伴う地下水の水圧及び水質の変化の統合的な評価に基づく，坑道閉鎖後の岩盤中の地下水環境回復に関わる現象の理解
- ✓ 坑道閉鎖後の地下水環境回復の予測に必要な情報の整理及びそれらを用いた予測手法の最適化検討

【参考文献】尾上ほか，2016：日本地下水学会2016年秋季講演会講演要旨，120-125，
尾上ほか，2015：JAEA-Research 2015-008.

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
－割れ目の形成と充填の履歴－

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

目標・実施概要

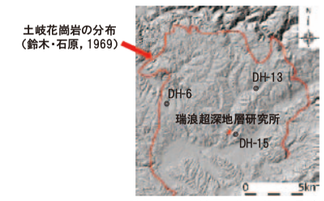
地下水の流動や水質等の地質環境の長期変化を推定するため，花崗岩中の地下水の流動経路となる割れ目の形成と充填の履歴を検討する。

- ✓ 割れ目充填鉱物の種類と充填状態の検討
- ✓ 割れ目充填鉱物の形成順序の検討
- ✓ 割れ目の形成と充填に関する長期変遷を理解するための調査技術の整備

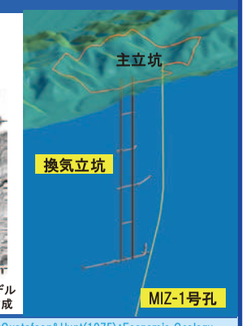
＜実施概要＞

- ✓ 高温流体に伴う割れ目の特徴の検討（割れ目の発達のイメージと充填物の形成条件に関する文献調査）
- ✓ 土岐花崗岩の既存データの解析と既存ボーリングコアの観察（岩相と高温流体に伴う充填鉱物の調査）
- ✓ 充填物の形成条件と形成順序の推定

【本ポスターでの報告内容】　①高温流体に伴う割れ目の特徴
②換気立坑の充填物の分布および形成履歴と高透水区間の特徴



背景は、『基盤地図情報数値標高モデル（5mメッシュ）』（国土地理院）より作成

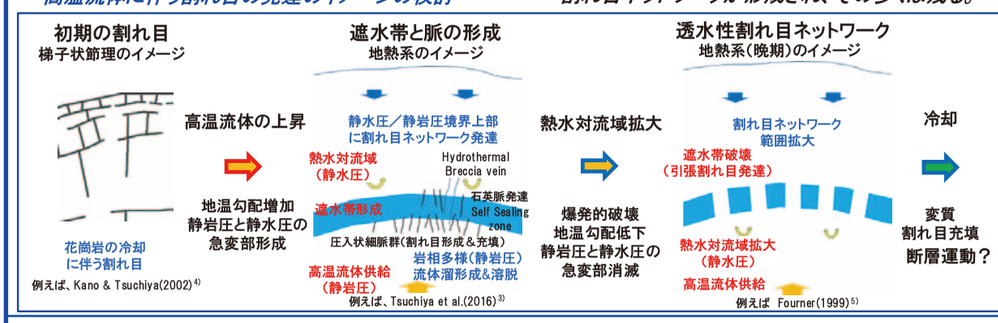


①高温流体に伴う割れ目の特徴　文献調査

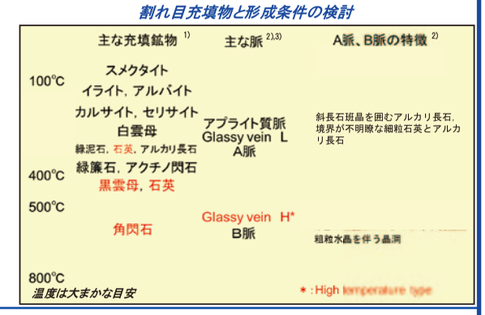
一般に、高温流体に伴う割れ目が初期に生じると割れ目ネットワークが形成され、その多くは残る。

参考文献　1)都城（1965）:変成岩と変成帯　など，2)Gustafson&Hunt(1975):Economic Geology p.857-912，3)Tsuchiya et al.(2016):Geothermics p.182-194，4)Kano&Tsuchiya(2002):JVGR p.465-477，5)Fournier(1999):Economic Geology p.1193-1211，6)湯口ほか(2011):JAEA-Data/Code 2011-009，7)尾上&竹内(2016): JAEA-Data/Code 2016-012.

高温流体に伴う割れ目の発達のイメージの検討



割れ目充填物と形成条件の検討



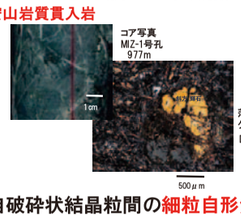
土岐花崗岩の調査結果

最新の地熱地帯における知見を踏まえ、土岐花崗岩のボーリングコアと岩石薄片の観察を実施、以下のa～dの特徴を確認。

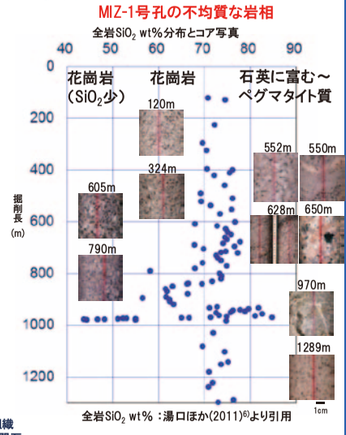
土岐花崗岩における高温流体に伴う痕跡の検討

a. 不均質な岩相（流体の上昇、沈殿の痕跡）

安山岩質貫入岩



MIZ-1号孔の不均質な岩相

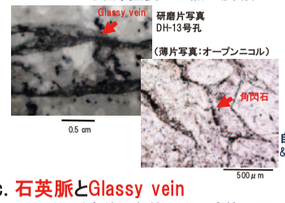


全岩SiO_2 wt%：湯口ほか(2011)6)より引用

b. 自破砕状結晶粒間の細粒自形角閃石

細粒自形角閃石（Glassy vein H）

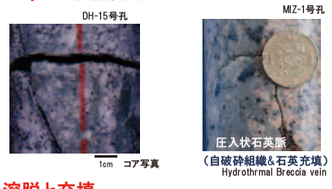
（破砕直後の加熱の痕跡）



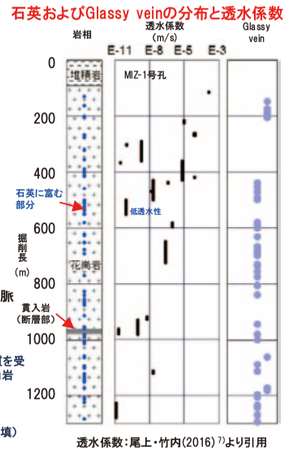
c. 石英脈とGlassy vein

（高差圧条件下での流体の圧入の痕跡）

Glassy vein（低温型変位あり）　変質花崗岩中の石英脈

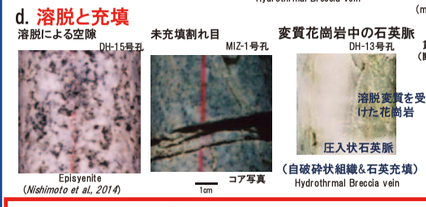


石英およびGlassy veinの分布と透水係数



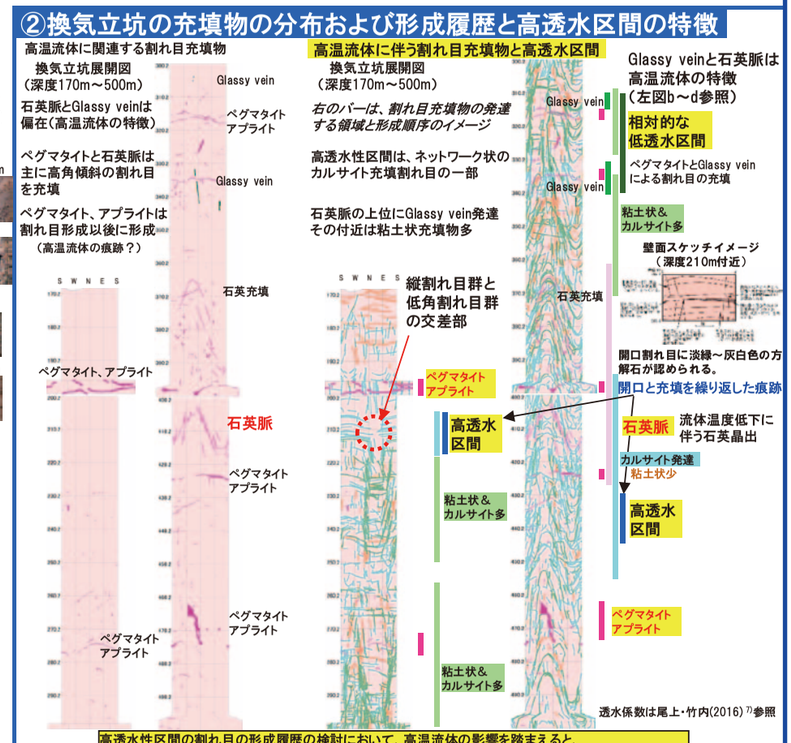
透水係数：尾上・竹内(2016)7)より引用

d. 溶脱と充填



【土岐花崗岩の割れ目の形成と充填】
✓高温流体に伴う割れ目の痕跡として、細粒自形角閃石や、変質花崗岩の自破砕状割れ目を充填する石英が認められる。
✓一部の割れ目は圧入状の熱水性鉱物により充填、しばしば未充填割れ目や空隙がみられる。

②換気立坑の充填物の分布および形成履歴と高透水区間の特徴



高透水性区間の割れ目の形成履歴の検討において、高温流体の影響を踏まえると、割れ目と粘土状充填物の分布に加えて、ペグマタイト、石英脈およびGlassy veinの分布の把握が重要

まとめ

- ✓ 土岐花崗岩における高温流体の痕跡として、自破砕状鉱物粒間の自形角閃石と、変質花崗岩中の自破砕状割れ目を充填した石英脈を確認
- ✓ ペグマタイトやGlassy veinは割れ目の一部を充填、透水性を相対的に低下させている。

今後の課題

- ✓ 顕微鏡観察、EPMA分析等による高透水割れ目の特徴の詳細な把握
- ✓ 割れ目充填鉱物に着目した透水性割れ目の形成履歴に関する調査事例の提示
- ✓ 断層に伴う割れ目の特徴との相違点および共通点の検討（開口割れ目の形成原因推定）

超深地層研究所計画：物質移動モデル化技術の開発
－花崗岩中での物質移動現象の理解－

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
研究計画調整グループ　濱　克宏

目的・報告内容

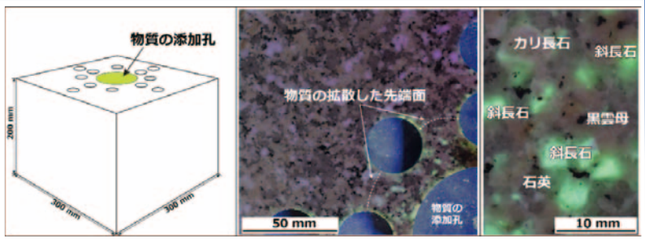
- 日本の結晶質岩の特徴である割れ目が不均質かつネットワーク状に分布する岩盤について，地質環境の長期変化を考慮しつつ，岩盤中の物質移動を調査・評価するための手法の整備が目標
- 目標を達成するために，以下の2つの課題を設定し，それぞれの課題についてタスクに分けて調査研究を実施

○課題1：不均質な割れ目ネットワークモデルのモデル化手法の開発
- 1-①　実際の割れ目の性状を考慮した割れ目ネットワークモデルのモデル化手法の整備
- 1-②　花崗岩中での物質移動現象の理解
- 1-③　物質移動におけるコロイド，有機物，微生物の影響因子の評価

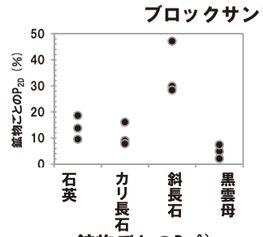
○課題2：地質環境の長期変遷に関する解析・評価技術の開発
- 2-①　断層などの影響を含めた地質環境特性の長期変遷解析技術
- 2-②　地下水の長期隔離に関する深部塩水地下水の起源・滞留時間の把握

【報告内容】
1. 花崗岩中の空隙の分布の把握と拡散試験結果
2. 断層と空隙の関係に関する検討
3. 天然のU系列・Th系列核種を用いた長期的な物質移動評価

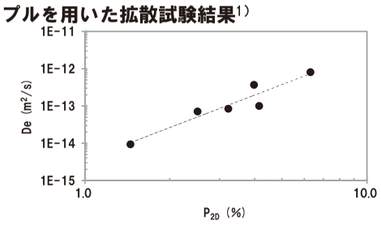
1.花崗岩中の空隙の分布の把握と拡散試験結果



ブロックサンプルを用いた拡散試験結果[1]



鉱物ごとのP_{2D}[2]



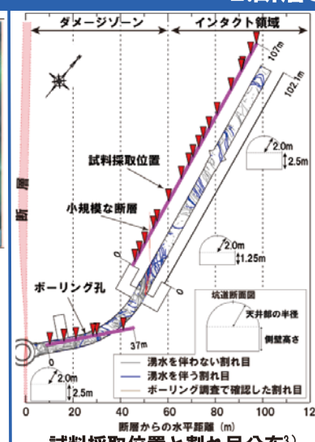
実効拡散係数とP_{2D}[2]

P_{2D}：画像解析によって算出した二次元の空隙率[1]

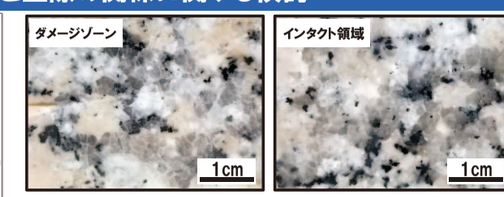
- 変質の影響が小さい割れ目周辺岩盤や基質部を対象に空隙分布とマトリクス拡散への影響を検討
- ブロックサンプルを用いた拡散試験を実施した結果，斜長石中にトレーサー物質の分布を確認[1]
- 斜長石中の空隙率が高い傾向を確認[2]
- 実効拡散係数（De）とP_{2D}は線形関係[2]
- 斜長石中の空隙は，花崗岩形成初期の熱水の影響（初生変質）で形成された可能性[1]

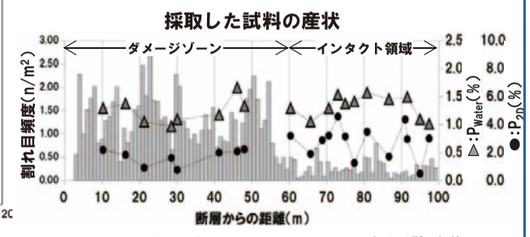
⇒初生変質は国内の他の岩体でも認められることから，斜長石中の空隙を介したマトリクス拡散による遅延効果が期待できる可能性を示唆

2.断層と空隙の関係に関する検討

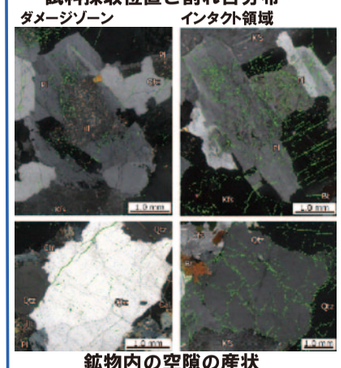


試料採取位置と割れ目分布[3]





空隙率と割れ目頻度分布[3] より引用加筆

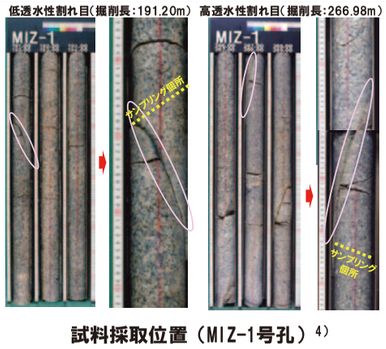


鉱物内の空隙の産状
（クロスニコル）

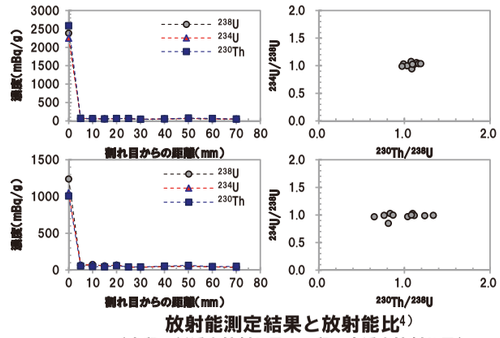
- 断層の分布と空隙分布の関係性を検討
- 水飽和法および画像解析による推定法[1]により空隙率（それぞれ，P_{water}，P_{2D}）を把握
- 断層形成に伴うダメージゾーンでは，空隙率が全体的に低い傾向
- 空隙の分布をみると，ダメージゾーン内の試料では，石英，イライト，方解石などの二次的な鉱物で充填される傾向

⇒ダメージゾーン内の空隙率の低下は，二次的な鉱物の形成により空隙が閉塞された可能性
⇒空隙減少で実効拡散係数が低下した可能性はあるが，二次鉱物による遅延性能の増加の可能性もあり，総合的に物質移動現象への影響を評価する必要性あり。

3.天然のU系列・Th系列核種を用いた長期的な物質移動評価



試料採取位置（MIZ-1号孔）[4]



放射能測定結果と放射能比[4]
（上段：低透水性割れ目，下段：高透水性割れ目）

- 低透水割れ目および高透水割れ目周辺を対象に天然のU系列・Th系列核種の分布を把握
- 何れの核種も割れ目充填鉱物で高い濃度（基質部に比較して2桁程度高い濃度）
- 花崗岩基質中のウランなどの濃度は試料ごとにばらつく
- 放射能比は，何れも約１（放射平衡）

⇒現在の地下水の移動経路であっても，過去100万年程度の間割れ目に沿った核種の移動が生じていないことを示唆

引用文献

1) 石橋，笹尾，濱：深部結晶質岩の割れ目周辺健岩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，23，pp.121-130，2016．
2) 西尾・弥富：「平成28年度 東濃地科学センター情報・意見交換会」資料集，JAEA-Review 2016-031，pp.11-18，2016．
3) Ishibashi et al.：Long term behavior of hydrogeological structures associated with faulting: an example from the deep crystalline rock in the Mizunami URL, Central Japan, Engineering Geology, 208, pp.114-127, 2016.
4) 濱：ウラン系列・トリウム系列核種を利用した土岐花崗岩中における物質移動評価-既存データの収集・整理-，JAEA-Data/Code 2016-006，23p.，2016.

JAEA-Review 2017-042

超深地層研究所計画：物質移動モデル化技術の開発

－実際の割れ目の性状を考慮した割れ目ネットワークモデルのモデル化手法の整備－

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・尾上　博則
環境技術開発センター　基盤技術研究開発部　システム性能研究グループ　澤田　淳
株式会社大林組　原子力環境技術部　田中　達也

目的・報告内容

- 日本の結晶質岩の特徴である割れ目が不均質かつネットワーク状に分布する岩盤について，地質環境の長期変化を考慮しつつ，岩盤中の物質移動を調査・評価するための手法の整備が目標
- 目標を達成するために，以下の2つの課題を設定し，それぞれの課題についてタスクに分けて調査研究を実施

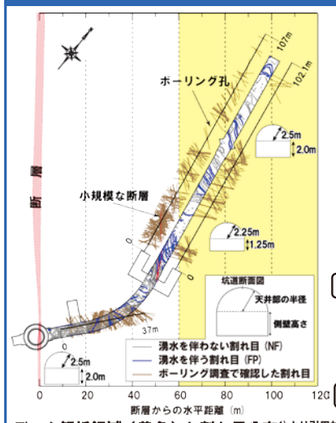
○課題1：不均質な割れ目ネットワークモデルのモデル化手法の開発
- 1-① 実際の割れ目の性状を考慮した割れ目ネットワークモデルのモデル化手法の整備
- 1-② 花崗岩中での物質移動現象の理解
- 1-③ 物質移動におけるコロイド，有機物，微生物の影響因子の評価

○課題2：地質環境の長期変遷に関する解析・評価技術の開発
- 2-① 断層などの影響を含めた地質環境特性の長期変遷解析技術
- 2-② 地下水の長期隔離に関する深部塩水地下水の起源・滞留時間の把握

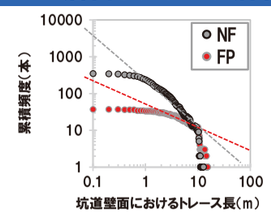
【報告内容】 湧水を伴う割れ目(FP)に着目した割れ目ネットワーク(DFN)モデル構築手法に関する検討結果

1. FPに着目したデータ解析
2. 地質学的な割れ目ネットワーク(GeoDFN)モデルの構築
3. FP情報を用いた水理学的な割れ目ネットワーク(HydroDFN)モデルの構築と妥当性の確認

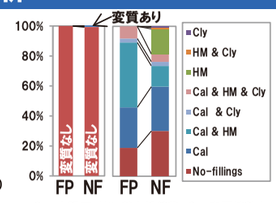
1. FPに着目したデータ解析



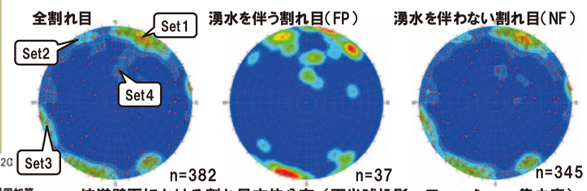
データ解析領域（黄色）と割れ目分布[1]より引用加筆



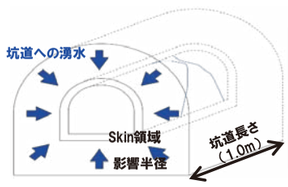
坑道壁面におけるトレース長分布



Cal:方解石，HM:熱水性鉱物，Cly:未固結粘土
割れ目周辺岩盤の変質の有無(左)と充填鉱物種(右)



坑道壁面における割れ目方位分布（下半球投影；フィッシャー集中度）



割れ目からの湧水量より式①を用いて坑道周辺の単位長さ辺りの平均的な透水係数を算出

⇩

割れ目頻度で除して割れ目の透水量係数を推定

$$k_w = \frac{\ln\left(r_w/r_1\right)}{\frac{2\pi L\cdot\Delta h}{Q} - \frac{\ln\left(r_1/r_0\right)}{k_{skin}}} \quad \cdots 式①^{2)}$$

Q ：湧水量(0.003～0.1 l/min)　Δh：水頭差(2.77MPa)
k_w ：母岩の透水係数　r_w ：影響半径(16.95 m)
k_{skin} ：Skin領域の透水係数(1.4E-09m/s)　r_1 ：Skin領域の半径(1.92 m)
L ：長さ(1.0 m)　r_0 ：坑道半径(1.42)

FPの透水性の推定フロー・概念および使用した関数

- 深度500mにおける断層の影響範囲を越えた領域を対象に検討(黄色)
- FPは全体の約10%(37本/382本)ただし，トレース長2m以上では約20%
- トレース長はFPで長い割れ目が多い。
- 地質学的特徴(割れ目充填鉱物や変質の有無)と卓越方位分布は，FPと湧水を伴わない割れ目(NF)で統計的分布を差別化できるほどの差はなし。

- FPのうち最も湧水量が少ない“滲出”と記載した割れ目(湧水量：約0.05l/min)の透水量係数は，10^{-9}m²/sオーダーと推定

⇒以下を仮定しDFNモデルを構築
- FP群はNF群より大きな半径の割れ目が多い。
- FP群はNF群に比較して透水性が高い。
（透水量係数で10^{-9}m²/sオーダー以上）

2. GeoDFNモデルの構築

割れ目方位分布の推定
(FracMan®のISIS機能を用いて推定)

⇩

割れ目の半径分布の推定

DFNモデル構築
P_{32}：固定(10 m²/m³)
べき乗数(b)：2.0-5.0
r_{min}：1.0m

⇩

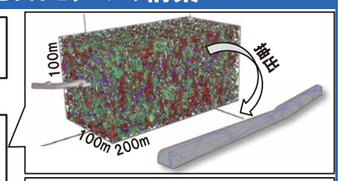
仮想坑道と交差する割れ目のトレース長を抽出

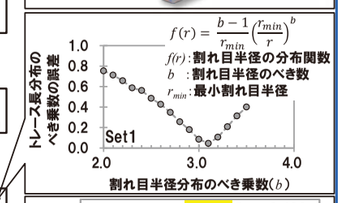
⇩

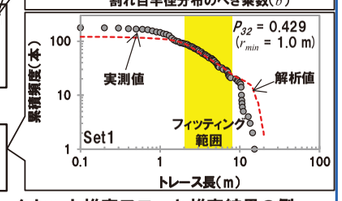
仮想坑道のトレース長分布のべき乗数と実測値が整合する割れ目半径のべき乗数(b)を推定

⇩

仮想坑道と実測値のトレース長分布(割れ目数)が整合するP_{32}を推定







GeoDFNモデルのパラメータセット推定フローと推定結果の例

パラメータセットの推定結果

	割れ目方位分布			割れ目半径分布		三次元割れ目密度(P_{32}:m²/m³)
	極の方位(°)	極の傾斜(°)	フィッシャー定数	べき乗数	最小割れ目半径(m)	
Set1	22.9	2.2	18.5	3.1	1.00	0.429
Set2	330.6	0.4	17.8	3.4	1.00	0.129
Set3	260.7	3.8	15.3	4.7	1.00	0.045
Set4	30.7	59.7	12.1	3.3	1.00	0.082

- 坑道壁面で取得したスケッチ情報に基づきパラメータセットを構築
- 100リアライゼーションを構築

3. FP情報を用いたHydroDFNモデルの構築と妥当性の確認

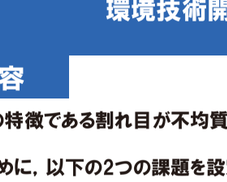
GeoDFNに透水性を設定

⇩

透水量係数で10^{-9}m²/sオーダー以上をFPと仮定し，仮想坑道でのFPのトレース長分布と実測値とを比較

⇩

誤差が最も小さいパラメータセットを採用

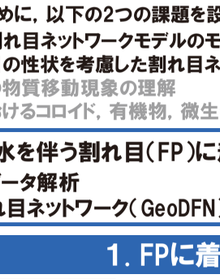


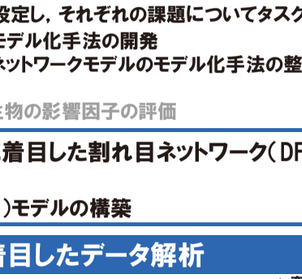
透水量係数の設定に用いた関数

$$T = lognorm(\mu,\sigma)\times r^C$$

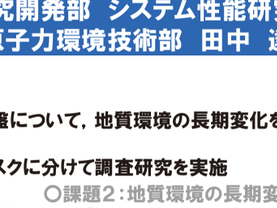
T ：透水量係数　r ：割れ目半径
μ ：対数平均　C ：定数
σ ：対数標準偏差

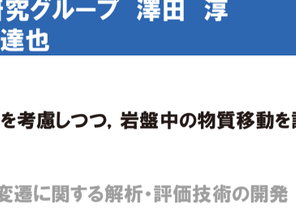
- 割れ目の半径と透水量係数の間にはバラつきを有しつつ相関関係があると仮定





HydroDFNモデルのパラメータセットの推定フローとその結果





妥当性の確認結果(左：仮想水理試験解析の結果と実測値の比較結果，右：DFNモデル中の割れ目の透水量係数分布)

- FPの実測のトレース長分布を再現可能な割れ目の透水量係数分布を推定
- 推定結果を用いた仮想水理試験解析を実施した結果，周辺ボーリング孔で取得した透水係数分布と整合
- モデル中のFPの割合は，約25%を示し実測値（トレース長で2m以上；r_{min}=1.0mのため）のFPの割合と整合

⇒本手法の推定結果は，再現対象以外の情報とも整合的（再現可能）であることを確認

まとめ

- 瑞浪超深地層研究所の深度500mで取得した情報に基づき，
  - FPに着目した検討
  - 割れ目半径との相関性を考慮した透水性の設定

  を行うことでFPの方位，頻度(割合)，トレース長および水理試験結果を再現できることを確認
- 今後は，坑道周辺の水圧分布や湧水量の再現に向けた手法について検討予定

引用文献

1) Ishibashi et al. : Long term behavior of hydrogeological structures associated with faulting: an example from the deep crystalline rock in the Mizunami URL, Central Japan, Engineering Geology, 208, pp.114-127, 2016.
2) 見掛・西垣・佐藤：グラウチングの注入範囲設定に関する浸透力を考慮した評価理論の構築，土木学会論文集C(地圏工学)，70，pp.33-43，2014.

JAEA-Review 2017-042

東京大学と日本原子力研究開発機構の共同研究
－結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価手法に関する研究 －

東京大学　工学系研究科　羽柴　公博・福井　勝則
日本原子力研究開発機構　松井　裕哉

【概要】

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、処分坑道周辺岩盤は、建設・操業時はもとより、埋め戻し部分の状態変化を可能な限り小さくするため、閉鎖後もその力学的健全性が維持されることが重要と考えられる。本共同研究では、そのような観点で岩盤の長期挙動を把握・評価できる技術の確立に資するため、年単位を超える岩石の長期クリープ試験や、地層処分において想定される様々な地質環境条件下での岩石の長期挙動を把握するための実験的評価を行なっている。

【平成28年度の研究内容と成果】

岩盤に空洞を掘削すると、空洞壁面と垂直な地殻応力は掘削にともない減少し、支保を設けなければ最終的には一軸圧縮状態に近くなる。また、岩盤中の水分が空洞壁面から徐々に排出されるようになるため、岩盤の含水状態は、掘削過程とともに変化すると同時に、空洞壁面からの距離によっても異なる可能性がある。したがって、岩盤構造物の建設や安定性の評価において、一軸圧縮状態あるいはクリープ、応力緩和などの時間依存性挙動における、種々の含水状態での岩石や岩盤の強度・変形特性を把握することは重要である。平成28年度は、このような観点から主に以下に示す検討を実施した。

（1）岩石の時間依存挙動に及ぼす水分の影響

東京大学では、載荷速度、クリープ、応力緩和などの時間依存性挙動を実験的に検討し、岩石の時間依存性挙動を統一的に説明する理論や構成方程式についての研究を行ってきた。この知見を踏まえ、従来の研究で用いてきた速度過程論や確率過程論にもとづく理論を、水分の影響を扱えるよう修正した（表1）。次いで、三城目安山岩の気乾状態と湿潤状態における強度試験とクリープ試験結果に、修正した理論を適用し、気乾状態と湿潤状態の挙動を統一的に説明できることを確認した（図1）。

表1　従来の研究と本研究での理論的検討の比較

		従来の研究	本研究
破壊基準	速度 $\frac{d\lambda}{dt}$	$\frac{d\lambda}{dt}=m\sigma^n$	$\frac{d\lambda}{dt}=a\exp(b\sigma)$
	破壊規準 Λ	$\Lambda=\int_0^t\frac{d\lambda}{dt}dt$	
	累積分布関数 $F(\Lambda)$	$1-F(\Lambda)=\exp\left\{-\left(\frac{\Lambda}{\hat{\Lambda}}\right)^{\beta}\right\}$	
定応力速度試験 $\sigma=\dot{\sigma}t$	強度 σ_f	$\sigma_f=\left(\frac{n+1}{m}\Lambda\dot{\sigma}\right)^{\frac{1}{n+1}}$	$\sigma_f=\frac{1}{b}\ln\frac{Ab\dot{\sigma}}{a}$
	累積分布関数 $F(\sigma_f)$	$1-F(\sigma_f)=\exp\left\{-\left(\frac{\sigma_f}{\Lambda_1}\right)^{B_1}\right\}$ $\Lambda_1=\left(\frac{n+1}{m}\Lambda\dot{\sigma}\right)^{\frac{1}{n+1}}$ $B_1=(n+1)\beta$	$1-F(\sigma_f)=\exp\left\{-\exp\left(\frac{\sigma_f-\Lambda_2}{B_3}\right)\right\}$ $\Lambda_2=\frac{1}{b}\ln\frac{Ab\dot{\sigma}}{a}$ $B_3=\frac{1}{\beta b}$
クリープ試験 $\sigma=\sigma_{cr}$	寿命 t_{cr}	$t_{cr}=\frac{\Lambda}{m\sigma_{cr}{}^n}$	$t_{cr}=\frac{\Lambda}{a\exp(b\sigma_{cr})}$
	累積分布関数 $F(t_{cr})$	$1-F(t_{cr})=\exp\left\{-\left(\frac{t_{cr}}{\Lambda_3}\right)^{B_5}\right\}$ $\Lambda_3=\frac{\Lambda}{m\sigma_{cr}{}^n}$ $B_5=\beta$	$1-F(t_{cr})=\exp\left\{-\left(\frac{t_{cr}}{\Lambda_4}\right)^{B_6}\right\}$ $\Lambda_4=\frac{\Lambda}{a\exp(b\sigma_{cr})}$ $B_6=\beta$

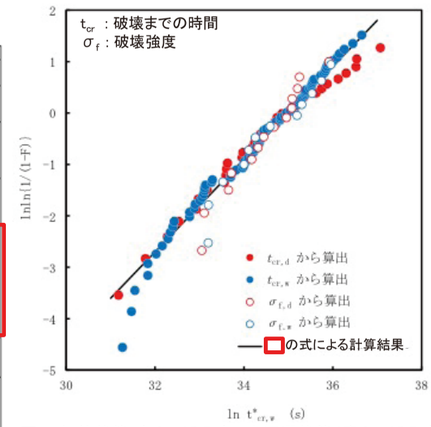


図1　気乾状態(赤印、添え字d)と湿潤状態（青印、添え字w）における三城目安山岩の$t^*_{cr,w}$のワイブルプロット

（2）水分が岩石の応力ー歪み曲線に与える影響

力学物性値のみならず、岩石の応力—歪曲線自体におよぼす水分の影響について検討した。具体的には、6つの含水状態（作成方法：図2）で、種々の岩石の一軸圧縮試験を実施し、各種の物性値や応力ー歪曲線を取得した（表2）。これらの試験の結果、三城目安山岩、田下凝灰岩、来待砂岩および稲田花崗岩では、含水状態によりピーク強度や応力—歪曲線が変化したが、秋芳大理石では、同一含水状態でのピーク強度や応力—歪曲線のばらつきが大きく、これらに与える水分の影響は明瞭に確認できなかった（図3）。

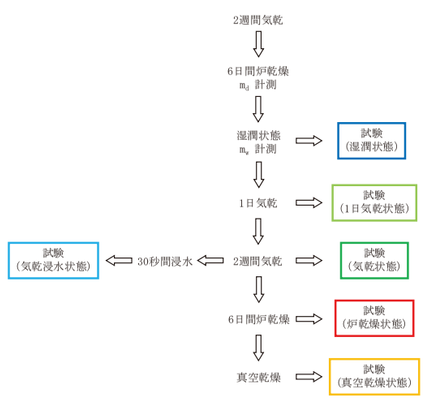


図2　水分量の異なる供試体の作成方法

表2　計測した種々の岩石の物性値と一軸圧縮試験結果

岩種	n_0 (%)	含水状態	w_0 (%)	σ_f (MPa)	$\Delta\sigma_{f,w}$ (MPa)
三城目安山岩	19.7	炉乾燥状態	0.10	89.8	23.4
		真空乾燥状態	1.38	83.1	16.8
		気乾状態	3.16	79.3	13.0
		1日気乾状態	20.4	68.9	2.5
		気乾浸水状態	29.2	69.9	3.6
		湿潤状態	100	66.3	0.0
田下凝灰岩	31.3	炉乾燥状態	0.11	33.9	25.5
		真空乾燥状態	4.98	29.4	21.0
		気乾状態	9.30	23.5	15.0
		気乾浸水状態	21.6	16.2	7.8
		1日気乾状態	32.8	12.4	4.0
		湿潤状態	100	8.4	0.0
来待砂岩	23.9	炉乾燥状態	0.76	54.5	37.0
		真空乾燥状態	17.4	39.7	22.2
		気乾状態	25.9	36.4	18.9
		気乾浸水状態	41.3	29.6	12.1
		1日気乾状態	47.0	24.9	7.4
		湿潤状態	100	17.5	0.0
秋芳大理石	0.45	炉乾燥状態	3.13	98.1	8.7
		気乾状態	1.89	94.8	5.4
		1日気乾状態	8.33	97.2	7.8
		気乾浸水状態	14.6	99.6	10.2
		湿潤状態	100	89.4	0.0
稲田花崗岩	0.88	炉乾燥状態	1.26	244.4	52.8
		真空乾燥状態	4.87	230.0	38.5
		気乾状態	6.95	221.8	30.2
		1日気乾状態	23.7	201.1	9.5
		気乾浸水状態	32.0	199.7	8.1
		湿潤状態	100	191.6	0.0

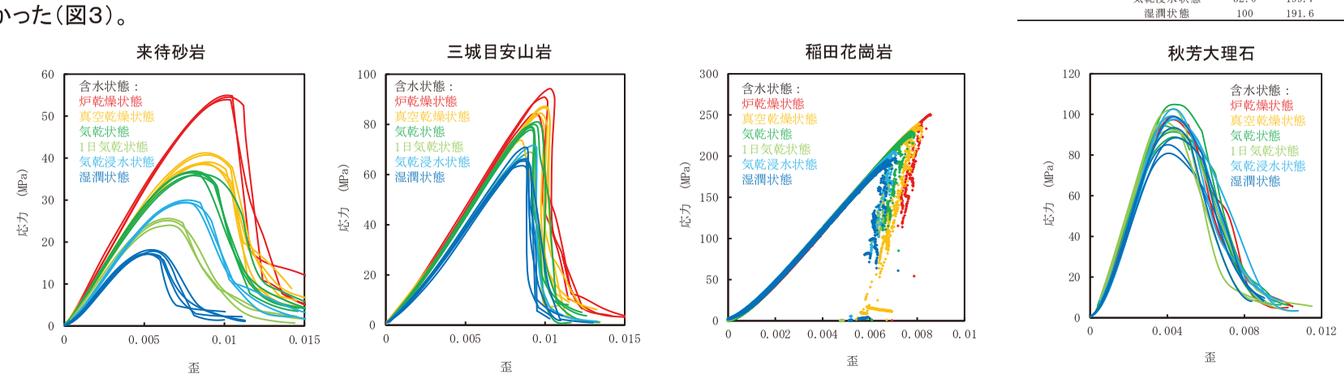


図3　水分量の異なる一軸圧縮試験時の応力ー歪曲線

【今後の予定】

今後も、様々な含水状態での岩石の応力—歪曲線について、水分が岩石の力学的挙動に与える影響を調べるとともに、修正した理論の検証を進める。また、従来より継続している堆積岩の長期クリープ試験を継続する。

【参考文献】
福井　勝則、羽柴　公博、松井　裕哉(2017)：結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価手法に関する研究（共同研究）, JAEA Research 2017-010, 61p.

東京大学と日本原子力研究開発機構の共同研究
－地下環境の形成に関わる微生物プロセスの評価技術の研究－

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
渡辺　勇輔・林田　一貴・岩月　輝希
東京大学大学院　理学系研究科　地球惑星科学専攻
鈴木　庸平

研究概要

地下に生息する微生物の代謝活動は、地下水の酸化還元状態の形成と維持に大きな影響を与えている可能性がある。特に、硫酸還元菌は酸化的物質である硫酸イオンを利用して還元的物質である硫化水素を放出するため、地下の還元環境の形成に大きな役割を担っている可能性がある。しかし、これまで原位置での培養実験を行う手段が無かったため、原位置において地下環境中で硫酸還元菌の活性を直接観察した事例は無い。
本研究では、深度300 mの花崗岩中に掘削されたボーリング孔(09MI21号孔)において、生息する硫酸還元菌の原位置培養実験を行い、地下水の酸化還元状態と微生物活動の関係について考察を行った。

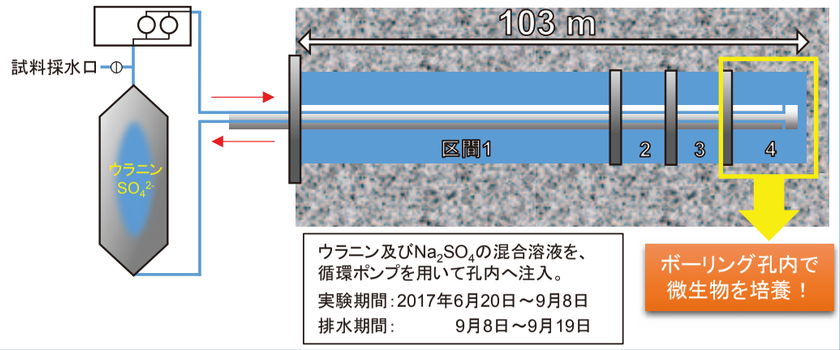
研究手法

- **原位置微生物培養実験**

・・・硫酸イオン(SO_4^{2-})の乏しい地下水中にSO_4^{2-}を添加し、生息する硫酸還元菌を培養

① ボーリング孔**09MI21号孔区間4**にトレーサー（ウラニン）及びSO_4^{2-}を注入。
② ウラニン、SO_4^{2-}、硫化水素(H_2S)の濃度、酸化還元電位及びpHを定期的に観測。
③ 0.2 μmフィルターを用いて地下水中の微生物を回収、分析。
④ 培養実験後、区間内地下水を排水し、水質が実験開始以前の状態に回復するか確認。

地下水の酸化還元状態と微生物活動の関係を考察。



ウラニン及びNa_2SO_4の混合溶液を、循環ポンプを用いて孔内へ注入。
実験期間：2017年6月20日～9月8日
排水期間：　9月8日～9月19日

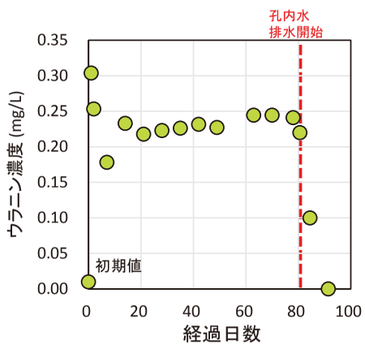
結果

- **試験区間内の地下水の動き**

✓ ウラニン濃度は試験開始から2週間ほどはばらつくものの、その後は一定。

試験区間は、周囲との水の入れ替りの無い閉鎖系であると推測される。

※排水開始後、2週間程度でウラニン濃度は初期値まで減少した。



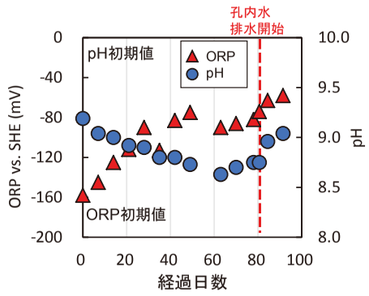
ウラニン濃度の経時変化

- **試験区間内の酸化還元状態**

✓ 実験開始後ORPは上昇、pHは低下。排水後、ORP、pHともに上昇。

✓ 酸化還元電位の実測値は、鉄の2価イオン（Fe^{2+}）と3価の水酸化鉄（$Fe(OH)_3$）間の酸化還元平衡電位の直線上を推移。

地下水の酸化還元状態を支配する化学反応は、実験の前後共に鉄の酸化還元反応であると推測される。

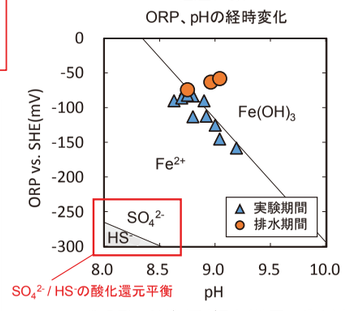


ORP、pHの経時変化

◆ SO_4^{2-}、微生物活動の影響は？

H_2Sの発生量が多い場合、酸化還元状態は硫黄の酸化還元平衡電位付近にシフトすると予想される（右図）。

本実験では、孔内の微生物量、注入したSO_4^{2-}濃度が少なかったため、発生したH_2Sが少なかったと推測される。



鉄のEh-pHダイアグラム（地下水条件）と孔内の酸化還元状態の関係

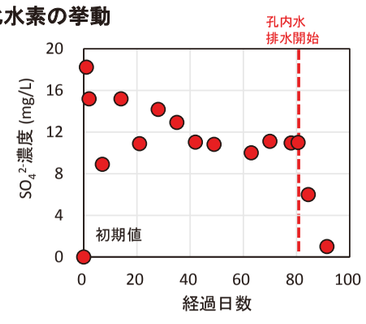
- **培養実験による硫酸イオン及び硫化水素の挙動**

✓ SO_4^{2-}濃度の変化はウラニン濃度の変化と概ね同様に推移。

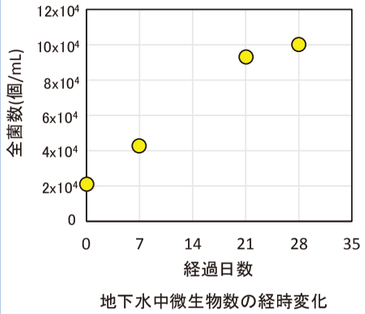
✓ H_2Sは試験開始直後に増加。

✓ 地下水中の微生物数は、試験開始後約1ケ月で4～5倍程度に増加。

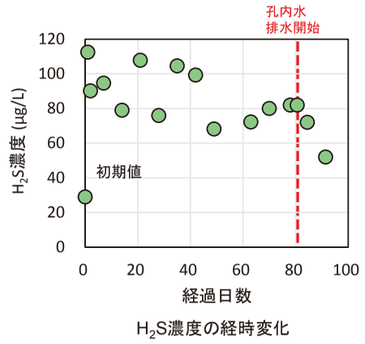
微生物が寄与する硫酸還元反応によりH_2Sが生成された。



SO_4^{2-}濃度の経時変化



地下水中微生物数の経時変化



H_2S濃度の経時変化

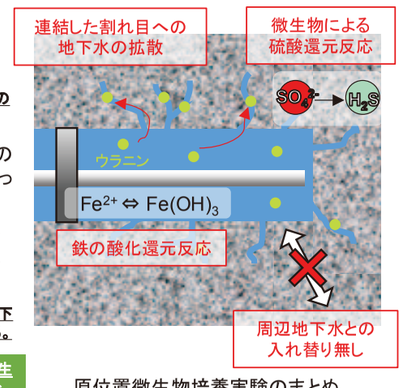
まとめ

✓ 09MI21号孔の区間4は、一定領域で閉鎖的な系であると推測される。
→微生物培養試験や水-鉱物反応試験等の研究利用に有利な水理地質特性。

✓ 地下水の酸化還元状態は、実験の前後共に鉄の酸化還元反応によって制御されていると推測される。

✓ SO_4^{2-}の注入によって硫酸還元菌の活性が上がり、H_2Sが増加した可能性がある。
→本実験ではH_2Sの発生量が少なく、地下水の還元化に寄与しなかったと推察される。

孔内の微生物量を増やす等によりH_2Sの発生量が多くなった場合の酸化還元状態の変化を今後確認していく。



原位置微生物培養実験のまとめ

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
－地下水年代調査および評価技術の開発－

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　長谷川　琢磨・中田　弘太郎・富岡　祐一・太田　朋子
日本原子力研究開発機構　東濃地科学センター　濱　克宏・岩月　輝希・加藤　利弘・林田　一貴

1.背景および目的

◎地下水年代評価の有用性
高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する安全評価では，地下水流動の評価が重要
⇒地下水年代は、広域的な地下水流動・流速の推定に有用
◎これまでの成果（図1）
瑞浪周辺の地下水年代は、^{14}Cや^{4}Heから、涵養域で数千年、中間域で1万年、流出域で1万年以上（Hasegawa et al., 2016）
⇒地下水年代は、推定される広域的な地下水流動と整合
◎問題点
流出域での地下水年代データの不足
・^{14}C年代は、炭酸濃度が低く、沈殿法による前処理が困難
・^{4}He年代は、原位置生成だけでなく外部からの流入（フラックス）があり、フラックスによる蓄積の評価が必要
・水素・酸素同位体比（δD・δ^{18}O）と氷期との関連が不明確
◎目的
⇒上記の問題点の解決し、流出域の地下水年代を明らかにする。

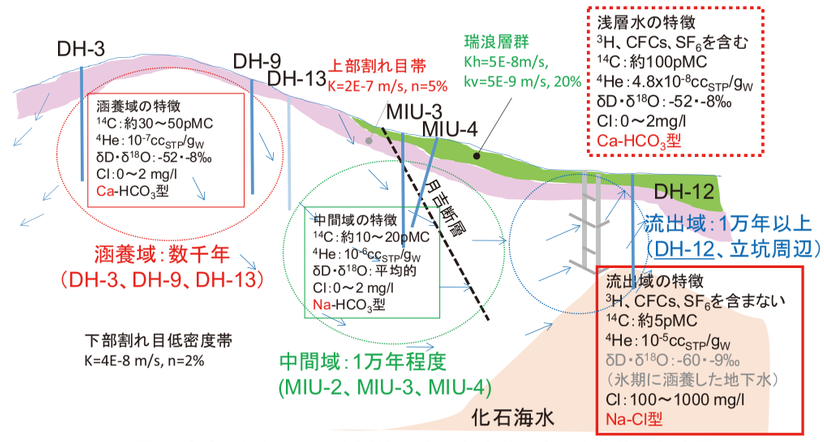


図1　瑞浪周辺における広域的な地下水流動と地下水年代の概念図

2.地下水の混合指標

研究坑道周辺では、坑道掘削により浅部地下水と流出域地下水が混合している。水素・酸素同位体比は、流出域地下水で低く、浅部地下水で高いことから、水素・酸素同位体比が混合の指標となるものと推定された（図2）。

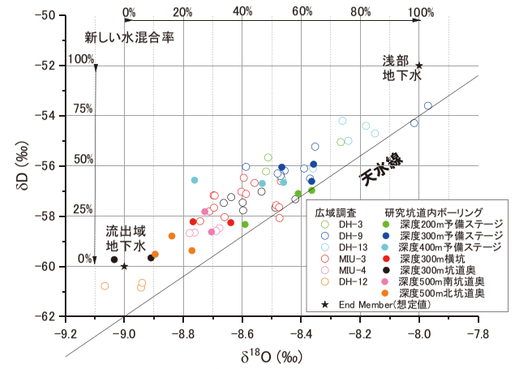


図2　地下水中の水素・酸素同位体比の分布

3.^{14}C年代測定

^{14}C年代測定の前処理方法を沈殿法からガス化法に変更した結果、測定値のバラツキが小さくなった。沈殿法では、大気由来の^{14}Cが混合しており、地下水中のHCO$_3$濃度が低いほど、^{14}C濃度が高く評価されている（Nakata et al., 2016）。^{14}C濃度とδD（混合指標）には相関があり、浅部地下水の混合の影響を排除すると、流出域地下水の^{14}C濃度は5 pMC程度となる。初期値を40 pMCと仮定すると、年代値は1.6～1.9万年となる（図3）。

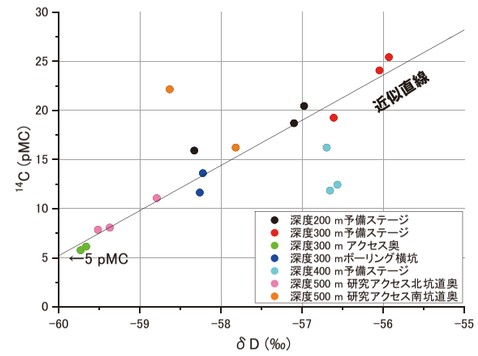


図3　^{14}C濃度とδDとの関係

4.^{4}He年代測定

流出域では、外部からの流入（フラックス）による蓄積が顕著になるが、研究坑道周辺では地下水の混合の影響で、フラックスの寄与が異なる。この寄与の違いから、フラックスの影響を排除すると、^{4}Heの原位置生成での蓄積は、3.8×10^{-6} cc$_{STP}$/g$_w$程度、原位置生成速度は、花崗岩のウラン、トリウム濃度と間隙率から2×10^{-10} cc$_{STP}$/g$_w$y と仮定すると、^{4}Heから推定される年代は1.4～2.4万年となる（図4）。

5.希ガス温度計

流出域と涵養域の地下水の涵養温度を希ガス温度計（温度による希ガスの溶解度の違い）で推定した。推定結果はバラツキが大きいが、酸素同位体比が低いほど、涵養温度が低い傾向にある（図5）。涵養温度は、涵養域では14℃程度、流出域では6℃程度となった。この値は、瑞浪の平均気温（約15℃）、最大氷期の気温低下（約9-10℃：佐々木ほか、2006）とほぼ整合しており、流出域の地下水は氷期に涵養したと推定された。

6.まとめ

^{14}C、^{4}He、希ガス温度計を適用し、流出域の地下水年代と涵養温度を求めた。この結果、流出域の地下水年代は約2万年で、氷期に涵養した地下水であることを複数の方法で確認することができた。

謝辞
本研究は経済産業省からの委託研究「岩盤中物質移行特性評価技術高度化調査」における成果の一部である。

参考文献
Hasegawa et al.(2016) GCA, 192, 166-185.
Nakata et al(2016) Radiocarbon, 58, 491-503.
佐々木ほか(2006) 第四紀研究, 45(4), 275-286.

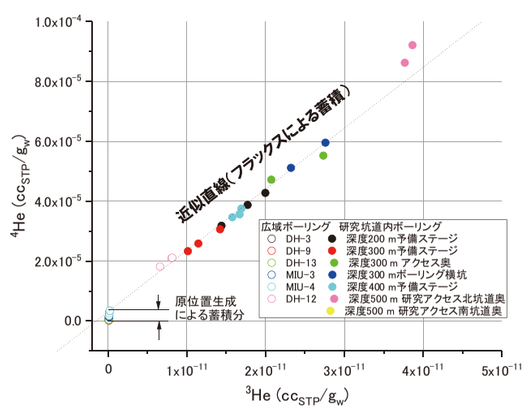


図4　^{4}Heと^{3}He濃度に基づく原位置生成量の推定

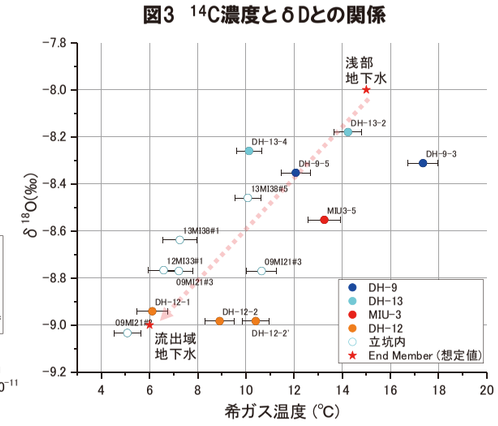
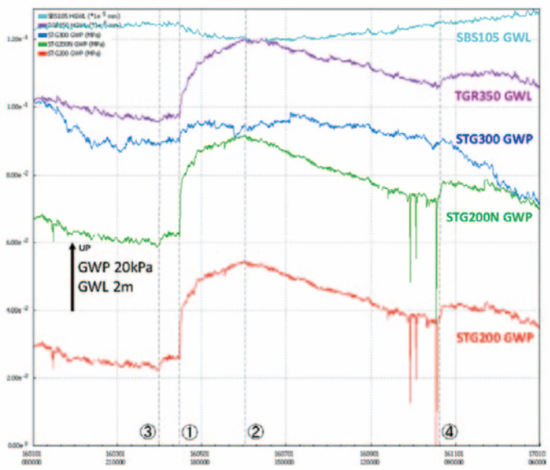


図5　希ガス温度と酸素同位体比の関係

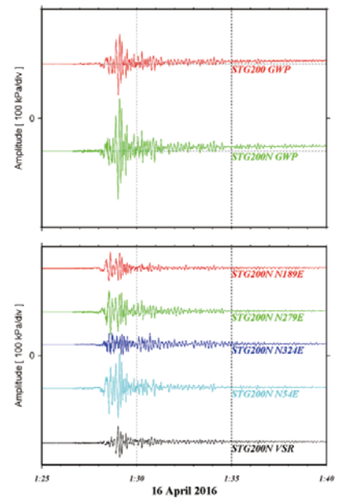
瑞浪超深地層研究所坑内における地球物理学的諸観測

公益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・田中　俊行・村上　理・國友　孝洋・石井　紘

歪・応力・地下水観測

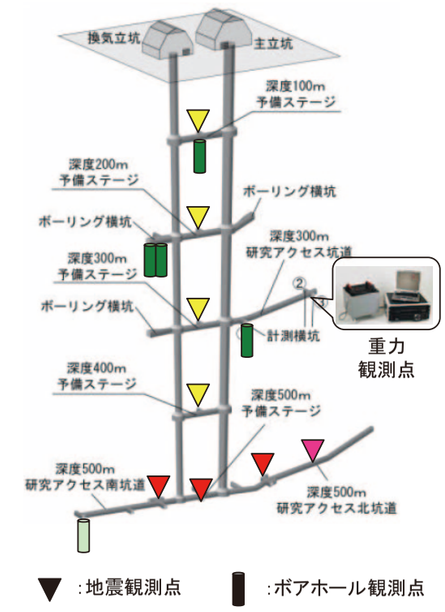


立坑内観測点において，2016年4月16日に発生した平成28年（2016年）熊本地震（Mj7.3）の地震動に伴う指数関数的な間隙水圧（水圧の地震応答）が観測された（①，震源距離665km）．水圧の地震応答は2016年6月5日（②）にピークに達し，その変化量はSTG200Nでは30 kPa（水位3mに相当），STG200では28kPaであった。他，2016年1月～10月に三重県南東沖の地震（Mj6.5, 243km；③），鳥取県中部の地震（Mj6.6, 399km；④）の地震動に伴う変化も観測されている。他観測点STG300（水圧），TGR350（水位），SBS105（水位）においても同様に地震動に伴う変化が観測されている。



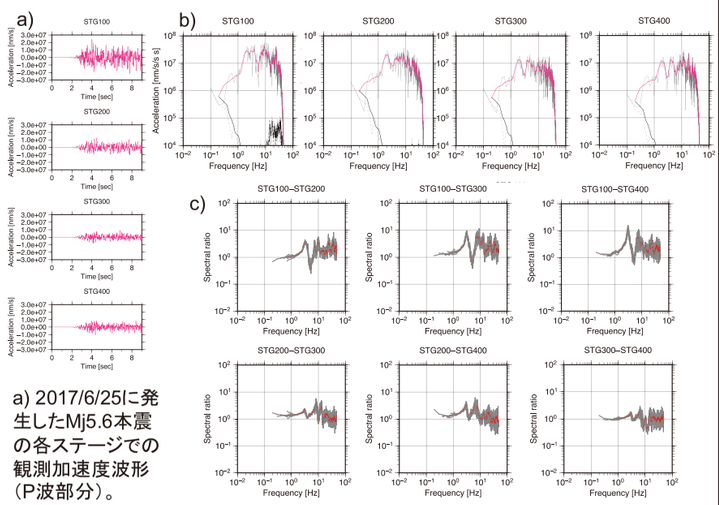
STG200Nでは，TRIESが開発したボアホール応力計（Ishii and Asai, 2015; EPS）が孔底に埋設・設置されている。
水圧（上図・上）と応力（上図・下）の地震動記録（20Hzサンプリング）の関連性を調査したところ，間隙水圧の上昇（水圧の地震応答）は応力地震動の最大振幅の到達時に生じていることが明らかとなった。

東濃地震科学研究所による坑内観測点分布



地震観測

一般に観測される地震波は，1) 震源の影響，2) 伝播経路の影響，3) サイトの影響の3つの要素のconvolutionで（時間領域の場合）表わされる。このうち，サイトの影響については，強震動による時間変化が観測されている。このようなサイトの影響の深さ依存性を調べるための第一段階として，各ステージ間のスペクトル比を求めることで，各ステージにおけるサイトの影響の比較を行った。解析には，2017年長野県南部の地震（Mj5.6）とその余震10個を用いた。これは，これらのイベントの伝播経路は，ほぼ同一とみなせるためである。

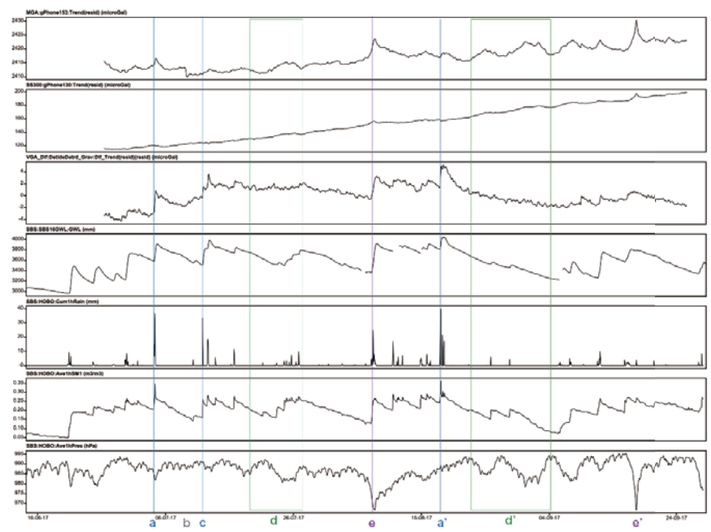


a) 2017/6/25に発生したMj5.6本震の各ステージでの観測加速度波形（P波部分）。
b) a)のフーリエスペクトル．c) b)のスペクトルの各ステージ間の比。

STG100と他のステージとのスペクトル比には，3Hz付近にピークがある一方で，他のステージでは，3Hz付近のピークは，明瞭でない。このことから，この3hz付近のピークは，瑞浪層群の堆積層の影響であると考えられる。

重力観測

瑞浪超深地層研究所を活用した「重力計鉛直アレイ（VGA）観測」は，信号のスタッキングや共通ノイズ低減などにより，地震・火山現象のみならず水理学への活用が期待できる。ここでは，上下の重力観測の差（以下，減算処理）により，浅部地下水量の評価を試みた．結果，VGA観測の減算処理は，大気補正を経なくても，MIU用地周辺の浅部地下水量をよく反映している事がわかった。ここには示していないが上下の重力計が原位置で観測する気圧変動（振幅及び位相）は異なるので，sub-μGalの議論には大気補正は必要である。



VGA 減算処理（③ = ① − ② − リニアトレンド），水文学データ（不圧地下水位④，降水量⑤，土壌水分⑥），気圧⑦の比較．
縦軸はオートスケール（単位はそれぞれ左上括弧外の括弧内），横軸ラベルは DD-MM-YY（日−月−年）（UT）である。

［横軸 a, a'］降雨により，地下水位④が増え，①は重力増加，②は重力減少を示す．減算処理は，①と②の降雨応答が足し合わされている．
［横軸 b］降雨はなく，①のみにステップが生じている．潮汐解析でノイズが大きい時に対応し人工擾乱と判断．③においてはこのステップを除去した．
［横軸 c］降水量も地下水位も振幅は a の時と同等であるが，減算処理は半分程度．水文学データが「点」の観測であるのに対し，重力は広範囲の質量密化の積分値であるためと考えられる．
［横軸 d, d'］降雨が比較的少なくかつ気圧変動が大きいので，①と②には明瞭な気圧応答が見えるのに対し，③は減算処理のキャンセル効果で気圧応答が充分低減されている事がわかる．
［横軸 e, e'］降雨あっても（あまり無くても），強い低気圧のために大気引力効果が減少して，地下でも重力増加．

謝辞：原子力機構 東濃地科学センター 西尾氏をはじめ，東濃地科学センターの皆様には，観測の便宜をはかって頂きました。本研究は資源エネルギー庁の「深地層の研究施設を使用した試験研究成果に基づく当該施設の理解促進事業費補助金」により行われています。

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29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，今後の調査研究や次回以降の「情報・意見交換会」の開催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 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
速さ，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	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	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]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	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	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

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

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	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	ジュール毎立方メートル	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	クーロン毎立方メートル	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	$kg^{-1}\ s\ A$
吸収線量率	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	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	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 $hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	1 L=1 l=1 $dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	1 t=10^3 kg

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

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

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

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

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10^{-7} J
ダイン	dyn	1 dyn=10^{-5}N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm^{-2}=0.1Pa s
ストークス	St	1 St =$1cm^2\ s^{-1}$=$10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm^{-2}=10^4cd m^{-2}
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm^{-2} =10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s^{-2}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウエル	Mx	1 Mx = 1G cm^2=10^{-8}Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm^{-2} =10^{-4}T
エルステッド[a]	Oe	1 Oe ≙ $(10^3/4\pi)$A m^{-1}

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

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10^{-9}T
フェルミ		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
カロリー	cal	1 cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー），4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年）