

地質環境の長期安定性に関する研究 年度計画書 (令和5年度)

Research Plan on Geosphere Stability for Long-term Isolation of Radioactive Waste
(Scientific Program for Fiscal Year 2023)

丹羽 正和 島田 耕史 末岡 茂 藤田 奈津子
横山 立憲 小北 康弘 福田 将真 中嶋 徹
鏡味 沙耶 小形 学 安邊 啓明 村上 理
西山 成哲 田中 桐葉 箱岩 寛晶 長田 充弘
小川 大輝 石原 隆仙

Masakazu NIWA, Koji SHIMADA, Shigeru SUEOKA, Natsuko FUJITA
Tatsunori YOKOYAMA, Yasuhiro OGITA, Shoma FUKUDA, Toru NAKAJIMA
Saya KAGAMI, Manabu OGATA, Noriaki ABE, Osamu MURAKAMI
Nariaki NISHIYAMA, Kiriha TANAKA, Hiroaki HAKOIWA, Mitsuhiro NAGATA
Hiroki OGAWA and Takanori ISHIHARA

核燃料・バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター

Tono Geoscience Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

October 2023

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む)
は、下記までお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.
Availability and use of the results of this report, please contact
Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub,
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, 2023

地質環境の長期安定性に関する研究 年度計画書(令和 5 年度)

日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター

丹羽 正和, 島田 耕史, 末岡 茂, 藤田 奈津子, 横山 立憲,
小北 康弘, 福田 将真, 中嶋 徹, 鏡味 沙耶, 小形 学, 安邊 啓明^{※1}, 村上 理^{※2},
西山 成哲^{※2}, 田中 桐葉^{※2}, 箱岩 寛晶^{※2}, 長田 充弘^{※2}, 小川 大輝^{※3}, 石原 隆仙^{※3}

(2023 年 7 月 26 日受理)

本計画書では, 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発のうち, 深地層の科学的研究の一環として実施している地質環境の長期安定性に関する研究について, 第4期中長期目標期間(令和 4 年度~令和 10 年度)における令和 5 年度の研究開発計画を取りまとめた。本計画の策定にあたっては, これまでの研究開発成果や大学等で行われている最新の研究成果に加え, 地層処分事業実施主体や規制機関等の動向を考慮した。研究の実施にあたっては, 地層処分事業における概要・精密調査や国の安全規制に対し研究成果を適時反映できるよう, (1)調査技術の開発・体系化, (2)長期予測・影響評価モデルの開発, (3)年代測定技術の開発の三つの枠組みで研究開発を推進する。

東濃地科学センター: 〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

※1 博士研究員

※2 特定課題推進員

※3 技術開発協力員

**Research Plan on Geosphere Stability for Long-term Isolation of Radioactive Waste
(Scientific Program for Fiscal Year 2023)**

Masakazu NIWA, Koji SHIMADA, Shigeru SUEOKA, Natsuko FUJITA, Tatsunori YOKOYAMA,
Yasuhiro OGITA, Shoma FUKUDA, Toru NAKAJIMA, Saya KAGAMI, Manabu OGATA,
Noriaki ABE^{※1}, Osamu MURAKAMI^{※2}, Nariaki NISHIYAMA^{※2}, Kiriha TANAKA^{※2},
Hiroaki HAKOIWA^{※2}, Mitsuhiro NAGATA^{※2}, Hiroki OGAWA^{※3} and Takanori ISHIHARA^{※3}

Tono Geoscience Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development
Japan Atomic Energy Agency
Izumi-cho, Toki-shi, Gifu-ken

(Received July 26, 2023)

This report is a plan of research and development (R&D) on geosphere stability for long-term isolation of high-level radioactive waste (HLW) in Japan Atomic Energy Agency (JAEA), in fiscal year 2023. The objectives and contents in fiscal year 2023 are described in detail based on the JAEA 4th Medium- and Long-term Plan (fiscal years 2022-2028). In addition, the background of this research is described from the necessity and the significance for site investigation and safety assessment, and the past progress. The plan framework is structured into the following categories: (1) Development and systematization of investigation techniques, (2) Development of models for long-term estimation and effective assessment, (3) Development of dating techniques.

Keywords: Geosphere Stability, Investigation Technique, Development of Model, Dating Technique

※1 Post-Doctoral Fellow
※2 Special Topic Researcher
※3 Collaborating Engineer

目次

1. はじめに	1
2. 令和5年度の研究計画	4
2.1 調査技術の開発・体系化	4
2.1.1 断層の活動性に係る調査技術	4
2.1.2 地殻構造の高空間分解能イメージング技術	6
2.1.3 深部流体の分布に関する調査技術	8
2.2 長期予測・影響評価モデルの開発	10
2.3 年代測定技術の開発	12
2.3.1 局所領域及び高精度同位体分析技術	12
2.3.2 光ルミネッセンス(OSL)年代測定技術	14
2.3.3 フィッション・トラック(FT)年代測定技術	16
2.3.4 加速器質量分析技術	18
参考文献	20

Contents

1. Introduction	1
2. Plan of the research and development in fiscal year 2023	4
2.1 Development and systematization of investigation techniques	4
2.1.1 Investigation techniques for evaluation of fault activities	4
2.1.2 Investigation techniques for high-resolution imaging of crustal heterogeneity	6
2.1.3 Investigation techniques for detection of geofluids	8
2.2 Development of models for long-term estimation and effective assessment	10
2.3 Development of dating techniques	12
2.3.1 <i>In situ</i> analysis techniques and high-precision isotope analysis techniques	12
2.3.2 Optically stimulated luminescence dating techniques	14
2.3.3 Fission track dating method	16
2.3.4 Accelerator mass spectrometry techniques	18
References	20

1. はじめに

日本列島は、プレートの収束帯に位置しており、安定大陸に比べて地殻変動や火成活動が活発であることから、我が国における地層処分の概念は、「長期的な安定性を備えた幅広い地質環境」に「性能に余裕をもたせた人工バリア」を設置するという特徴を有する(核燃料サイクル開発機構, 1999¹⁾:以下, 「第2次取りまとめ」)。すなわち、まず自然現象によって地層処分システムに期待される物理的な隔離機能が損なわれる恐れがないようなサイトを選ぶことが前提となる。さらに、サイト固有の地質環境や想定されるそれらの長期的な変化を見込んだ上で、合理的な地層処分システムを構築し、長期的な安全性を確認することが必要となる。そのためには、サイトやその周辺においてマグマの貫入・噴火や断層運動に伴う岩盤の破壊等、地層処分システムに著しい影響を及ぼす現象が発生する可能性のほか、地殻変動等によって生じる地質環境(例えば、熱環境、力学場、水理場、化学場)の長期的な変化を予測・評価しておくことが重要となる。日本原子力研究開発機構(以下, 「原子力機構」)では、1988年より「深地層の科学的研究」の一環として、これらの調査・評価に係る研究開発である地質環境の長期安定性に関する研究を進めてきた。

このうち、1999年11月に報告した第2次取りまとめでは、関連する地球科学の分野に蓄積された情報や知見を分析するとともに、地層や岩石の年代測定等を補足的に実施し、過去から現在までの活動の中に認められる傾向や規則性に基づいて、自然現象の将来の活動の可能性や変動の規模等を検討した。その結果、地層処分に適した安定な地質環境が我が国にも広く存在し得るとの見通しが得られた。また、その科学的な根拠となる基盤情報として、活断層や第四紀火山、海成段丘の分布・形成年代等に関する全国レベルでのデータベースを整備してきた(核燃料サイクル開発機構, 1999²⁾)。第2次取りまとめ以降については、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」³⁾(以下, 「最終処分法」)の成立や地層処分事業の実施主体の設立等、我が国の地層処分計画が事業の段階に進展したことを踏まえ、最終処分法に定められた最終処分施設の建設スケジュールや段階的な選定要件等を念頭に置きつつ、特に第2次取りまとめやその評価(例えば、原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会, 2000⁴⁾; OECD/NEA, 1999⁵⁾)の過程で明らかにされた研究課題に焦点をあてて研究を進めてきた。さらに2002年には、当時の我が国の規制機関である原子力安全委員会から文献調査段階の予定地の選定に係る要件となる「高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について」(原子力安全委員会, 2002⁶⁾:以下, 「環境要件」)が示されたが、実施主体ではこれらを受けて「概要調査地区選定上の考慮事項」(原子力発電環境整備機構, 2002⁷⁾)を公表した。その一方で、「廃棄物安全小委員会報告書—高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて—」(総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会, 2003⁸⁾)や「放射性廃棄物処理・処分に係る規制支援研究について」(総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会, 2009⁹⁾)等により、安全規制にとって重要な研究分野や課題が示される等、研究開発を進めていく上での方向性や研究課題がさらに明確にされてきた。

しかしながら、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震及び東京電力福島第一原子力発電所事故に伴い、我が国の原子力政策や地層処分技術に関する研究開発を取り巻く状況が大きく変化した。「今後の高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る取組について(見解)」(原子力委員会, 2012¹⁰⁾)では、「高レベル放射性廃棄物の処分について(回答)」(日本学術会議, 2012¹¹⁾)を踏まえ、現段階での地球科学分野の最新の知見を考慮しつつ、地層処分の実現可能性について調査研究し、その成果を国民と共有すべきとの指摘がなされた。さらに、「今後の原子力研究開発の在り方について(見解)」(原子力委員会, 2012¹²⁾)では、処分施設立地地域の地質条件を保守的に予想した上で、十分に安全を確保し

ていくことができる処分技術の確立に向けて研究開発を推進していくべきとしている。このような背景のもと、総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会では、地層処分技術ワーキンググループを設置し、専門家による地層処分技術の再評価と今後の研究開発課題の検討が行われ、「最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価―地質環境特性及び地質環境の長期安定性について―」（総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループ, 2014¹³⁾）が取りまとめられた。その結果、地層処分にとって好ましい地質環境特性を有する地域が我が国にも存在することが改めて示された。しかしながら、地層処分の技術的信頼性を向上させるため、今後の地層処分事業の取り組みと並行した研究開発の必要性も併せて示された。さらに、平成 28 年 5 月に原子力委員会の下に設置された放射性廃棄物専門部会では、地層処分に関する研究開発について、関係機関間の一層の連携強化、計画策定における処分事業実施主体の一層のリーダーシップの発揮、継続的な人材確保・育成への取り組みの重要性、等が提言されている（原子力委員会放射性廃棄物専門部会, 2016¹⁴⁾）。

これらの背景を踏まえ、地層処分関係研究・行政機関、実施主体、外部有識者が参画する地層処分研究開発調整会議において、今後重点的に取り組むべき研究開発項目が議論され、5 年ごとに「地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～平成 34 年度）」（経済産業省資源エネルギー庁 地層処分研究開発調整会議, 2018¹⁵⁾）、「地層処分研究開発に関する全体計画（令和 5 年度～令和 9 年度）」（経済産業省資源エネルギー庁 地層処分研究開発調整会議, 2023¹⁶⁾）（以下、「全体計画」）が提示されている。さらに、平成 29 年 7 月には「科学的特性マップ」（経済産業省資源エネルギー庁, 2017¹⁷⁾）が公表されるとともに、実施主体からは、サイト調査から処分場の設計・建設・操業・閉鎖、さらには閉鎖後の長期間にわたる安全確保に関し、これまでに蓄積された科学的知見や技術を統合して包括的に説明した「包括的技術報告書」が 2021 年 2 月に公表されている（原子力発電環境整備機構, 2021¹⁸⁾）。一方、2012 年に発足した現在の我が国の規制機関である原子力規制委員会においても、地層処分において安全確保上少なくとも考慮されるべき事項（断層運動、火山現象、侵食等）が提示されている（原子力規制委員会, 2022¹⁹⁾）。

地質環境の長期安定性に関する研究では、最新の科学的知見を取り込んだ全国レベルでの自然現象に関するデータベースの更新や個別現象の理解といった基盤的な研究に加え、サイト選定や安全評価に必要となる調査技術や評価手法の整備にも重点をおいて研究を進めてきた。具体的には、地層処分事業における概要・精密調査や国の安全規制に対し研究成果を反映できるよう、(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整備（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整備（長期予測・影響評価モデルの開発）のほか、(3)最先端の分析装置等を用いた放射年代測定や鍵層の高分解能同定法等による編年技術の高度化（年代測定技術の開発）を進めてきた。

第 3 期中長期目標期間においては、第 2 期中期目標期間までに挙げた研究成果や、国の審議会において提示された研究課題（総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループ, 2014¹³⁾）に基づき、研究計画を策定した（梅田ほか, 2015²⁰⁾）。さらにその後、地層処分研究開発調整会議において整理された全体計画にも対応すべく、研究開発を進めてきた。研究開発に当たっては、原子力機構東濃地科学センター土岐地球年代学研究所において整備された施設・設備・機器を活用して効果的に成果を挙げることに留意した。

その結果、マグマの影響範囲を把握するための地磁気・地電流法等に基づく調査手法の整備、深部流体の移動・流入に係る地震・地質学的解析手法の整備、地形的に不明瞭な活断層の分布・活動性を把握するための測地・地形・地質学的解析手法の整備、熱年代法や宇宙線生成核種法等による内陸～

沿岸部における隆起・侵食の調査・評価技術の整備等を進めることができ、一部に発展的な課題を残しつつも、平成 30 年度～平成 34 年度の全体計画で提示された課題について概ね、成果を提示することができた。第 3 期中長期目標期間までに得られた成果については、原子力機構の地層処分技術に関する研究開発情報と成果を取りまとめた CoolRepR4 (<https://kms1.jaea.go.jp/CoolRep/index.html>) において公開されている。

一方、令和 2 年に文献調査が始まり、今後近いうちに、複数の地点で同時並行的に概要調査が行われる可能性が考えられる状況となってきたが、我が国の地質環境は火山や活断層の分布、隆起・侵食の特徴や地下地質等において地域ごとに大きな違いがある。そのため、地質環境の大きく異なる各サイトにおける自然現象の影響評価に的確に対応できるよう、最先端の科学的知見を常に取り入れながら、幅広い調査・評価技術を整備しておく必要がある。さらに、各自然現象間の相互関係を考慮した総合的な調査・評価としてパッケージで示すことも、個別技術の実用化の上で重要である。

そこで、第 4 期中長期目標期間においても、(1)調査技術の開発・体系化、(2)長期予測・影響評価モデルの開発、(3)年代測定技術の開発の三つの研究開発の柱に基づき、各個別技術の信頼性向上を図るとともに、複数の個別技術を適切に組み合わせたアプローチによる評価手法を提示することにより、実施主体や安全規制当局に対する確に技術・知見が提供できる状況を維持していく。これらの技術については、地層処分分野への反映のみならず、原子力を取り巻く課題解決や地域防災等の社会のニーズへの対応も考慮して整備を行う。ならびに、大学等研究機関との協働を進め、土岐地球年代学研究所に設置されている施設・設備・機器の更なる利用促進を図るとともに、地球科学分野の研究成果の創出に貢献する。

本報では第 4 期中長期目標期間(令和 4 年度～令和 10 年度)の 2 年目にあたる令和 5 年度の研究開発計画を取りまとめた。計画策定に当たっては、CoolRepR4 で示したこれまでの研究開発成果、実施主体や規制機関等の動向、大学等で進められている最新の研究開発の状況に加え、令和 5 年 3 月に策定された最新の全体計画(経済産業省資源エネルギー庁 地層処分研究開発調整会議, 2023¹⁶⁾)で示されている研究開発課題を踏まえて策定した。

2. 令和 5 年度の研究計画

2.1 調査技術の開発・体系化

2.1.1 断層の活動性に係る調査技術

(1) 目的

地層処分サイトの選定に際しては、活断層を避けることが基本となる。活断層の認定は、しばしば空中写真判読等による変動地形学的手法に基づいて行われる。しかし、断層運動により形成された地形がその後の侵食等によって不明瞭になっている場合や、沈降域等堆積速度が大きい場所で、活断層自体が沖積層に覆われてしまう場合（伏在活断層）、あるいは、地域全体として大きなひずみ速度を有しているにもかかわらず、変位が長大活断層として顕在化せず、無数の小断層に分散して解消されているような場合（例えば、Tamura *et al.*, 2020²¹）は、変動地形学的手法のみでは活断層の検出が困難となる。本研究では、このような地形的に不明瞭な活断層の分布や活動性を把握することを目的として、従来の地形・地質学的手法に加え、測地学・地球物理学・地球化学的手法も組み合わせたアプローチを採用し、事例研究の蓄積を通じて、調査・評価技術の体系的整備を図る。

また、概要調査や精密調査においては、ボーリングや坑道掘削中に新たに遭遇した断層の活動性の評価が求められることも考えられる。この場合、断層変位の有無の判定に係る年代既知の被覆層を伴わないことも多いため、断層破砕帯内物質を用いた鉱物学・地球化学・年代学的手法の適用がしばしば検討される。本研究では、このような破砕帯内物質を用いた断層活動性評価についても、従来手法の高度化や新しい手法の開発を通じ、適用性を拡充するとともに、評価手法の信頼性の向上を図る。

(2) 実施内容

地形的に不明瞭な活断層の分布や活動性を把握するための調査技術については、従来の変動地形学的手法を補完する調査技術として、断層沿いに放出されるガスの特徴を指標とした地球化学的手法（Umeda *et al.*, 2013²²；下茂ほか, 2019²³）や、全地球測位システム（GNSS: Global navigation satellite systems）観測等に基づいた地球物理学手法（例えば、Nishimura and Takada, 2017²⁴；原子力機構, 2018²⁵）による調査技術の開発が行われてきた。地形的に不明瞭な活断層の分布・活動性の調査・評価技術の体系的整備のためには、これら複数の手法を適切に組み合わせた調査・評価の進め方を提示することが重要である。

第 3 期中長期目標期間においては、活断層地形が不明瞭な地域において活構造を検出し、それらによる地殻の変形・破砕といった力学的影響範囲を把握するための技術開発として、GNSS 観測、地形解析及び地質調査を組み合わせたアプローチにより、活構造の分布や力学的影響範囲を把握する手法を提示した（原子力機構・電力中央研究所, 2021²⁶）。具体的には、南九州を事例として、GNSS 観測とリニアメント判読によりひずみ集中帯の分布を推定するとともに、ひずみ集中帯の中心部を対象とした現地踏査による小断層の運動方向データの取得と、震源メカニズム解析に基づく応力場の推定を行い、現応力場と調和的な運動センスが卓越する領域を抽出することにより、活構造に伴う力学的影響範囲として提示した。このアプローチについては、1984 年長野県西部地震の震源域を事例とした検討も進めているが（原子力機構・電力中央研究所, 2022²⁷, 2023²⁸）、第 4 期中長期目標期間においても、適用事例の拡充を進めることにより、調査・評価技術の信頼性の向上を図る。

破砕帯内物質を用いた断層活動性評価については、石英等の鉱物粒子の表面観察といった定性的

な指標に基づく評価(Niwa *et al.*, 2016²⁹)に加え、鉱物・化学・同位体組成といった定量的な指標に基づく評価(Niwa *et al.*, 2015³⁰, 2019³¹)についても検討が進められてきた。特に、化学組成に基づく評価については、機械学習を用いた新たな手法が提案され(立石ほか, 2021³²)、客観的かつ効率的な評価手法として有望であるとの見通しが得られている(原子力機構・電力中央研究所, 2022²⁷), 2023²⁸)。ただし、手法の確立のためには、適用事例の拡充に加え、破砕帯内物質における元素移動のメカニズムの解明が課題である。本研究では、これらの課題の解決のため、多様な岩体に対する破砕帯内物質の鉱物・化学・同位体組成データの拡充、破砕帯内物質中の詳細な元素分布を明らかにするための局所分析等による検討及び高速摩擦試験に供した試料の鉱物・化学分析等に基づく実験的検討を進める。

さらに、これまでに、ジルコンやアパタイトのフィッション・トラック(FT:Fission track)年代(Sueoka *et al.*, 2019³³)、ウラン・トリウム・ヘリウム((U-Th)/He)年代(Yamada *et al.*, 2012³⁴)、自生のイライトのカリウム・アルゴン(K-Ar)年代(Yamasaki *et al.*, 2013³⁵; Niwa *et al.*, 2016³⁶)、炭酸塩鉱物のウラン・鉛(U-Pb)年代(Yokoyama *et al.*, 2018³⁷)及び石英や長石のルミネッセンス年代(原子力機構・電力中央研究所, 2022²⁷)等といった、破砕帯内物質に対する年代測定に基づく検討も進めてきた。ただし、いずれの手法についても、断層の活動時期を議論する上では不確実性が依然として残っており、熱による年代リセット条件の検討等の基礎的な知見の拡充が求められる。本研究では、破砕帯内物質に適用するための各種年代測定手法の確立に向けた実験的検討に加え、破砕帯内物質に対する従来の手法とは異なる新しい年代測定法(例えば、カリウム・カルシウム(K-Ca)年代法)の開発にも取り組む。

(3) 令和5年度の研究計画

① 活断層地形が不明瞭なせん断帯における活構造の分布や力学的影響範囲を把握する手法の検討

地震や測地等のデータから推定された応力場と、小断層データとの比較に基づき、活構造に伴う力学的影響範囲を把握する手法について、1984年長野県西部地震や2016年鳥取県中部地震の震源域を事例としたデータの拡充を行い、手法の信頼性の向上を図る。小断層の解析については、条線が残っていても運動の向きが認定できない不完全データを利用可能な解析法(Hough法; Sato, 2006³⁸)を新たに適用する。合わせて、地殻の極浅部(上載圧4 MPa以下)を想定した条線形成の室内試験を実施し、試料の微小構造の解析を行うことにより、小断層の運動方向データを用いた解析の妥当性について検討する。

② 断層の活動性評価指標を提示するための分析・試験、年代測定による検討

断層破砕帯内物質の化学組成データを用いた機械学習による活断層／非活断層の識別について、分析データを拡充した検討により、様々な母岩に対する適用性の確認を行う。また、破砕帯内物質中の詳細な元素分布を明らかにするためのレーザーアブレーション装置と誘導結合プラズマ質量分析装置を組み合わせた元素イメージングや、同位体比を明らかにするための質量分析等について、手法の検討を行い、破砕帯内物質の地球化学データに基づく断層の活動性評価手法の研究に資する。

破砕帯内物質を用いた年代測定については、石英の電子スピン共鳴法や粘土鉱物のK-Ar法、アパタイト・ジルコンのFT法等の摩擦発熱によるリセット条件を検証するための短時間加熱実験や高速摩擦試験を進める。また、K-Ca法の適用性を評価するための予察的な検討に着手する。

2.1.2 地殻構造の高空間分解能イメージング技術

(1) 目的

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現象(例えば、断層運動、火山・火成活動、熱水活動)の潜在的なリスクを排除するためには、地表からの調査の段階において、地下深部における震源断層や高温流体(溶融体を含む)等の存否や構造をあらかじめ確認しておくための調査技術が必要となる。特に、地殻中部に存在する微小地震の集中域や地殻深部に流体等が存在するような領域の付近では、将来の活動によって、地殻浅所まで破断が伸展することやそれに伴って地下深部の高温流体等が流入する可能性も考えられるため、これらに関連する地下深部の不均質構造を把握するための技術基盤の整備を進める。

(2) 実施内容

第3期中長期目標期間においては、地下深部の不均質構造を把握するための技術開発として、特に地震波トモグラフィー法及び地磁気・地電流(MT:Magnetotelluric)法電磁探査に基づく検討を進めてきた。地震波トモグラフィー法については、地震のP波・S波到達時刻の検測データを拡充し、地殻深部のみならずマントル・ウェッジにおける解析の水平分解能を向上させることに成功した(原子力機構・電力中央研究所, 2021²⁶⁾)。また、震源決定精度の改善のため、地震波速度が極めて遅くなる堆積層等の層厚分布を考慮した震源再決定を行った上で、地震波トモグラフィー解析を実施し、沿岸部における解析精度を向上させた事例を提示した(産業技術総合研究所ほか, 2019³⁹⁾)。

MT法については、第3期中長期目標期間の中で、地下の流体賦存域の分布を把握するための手法の適用事例の蓄積として、地震に伴い長期間の湧水が継続した事例として知られる2011年の福島県浜通りの地震の震源域(Umeda, 2015⁴⁰⁾; Umeda *et al.*, 2015⁴¹⁾)や1965年～1968年の長野県松代群発地震の震源域(原子力機構・電力中央研究所, 2019⁴²⁾)、震源断層と流体との関係を検討する事例として2014年長野県北部地震の震源域(石丸ほか, 2019⁴³⁾)、マグマの活動範囲の評価に資するための中国地方の青野山単成火山群の分布域(原子力機構・電力中央研究所, 2020⁴⁴⁾)及び前弧域における深部流体の存否や分布を明らかにするための九州を東西に横断する測線(石丸ほか, 2018⁴⁵⁾)において、それぞれ観測及び二次元比抵抗解析を行い、適用事例を提示してきた。ただしMT法では、人工活動(電力系統等に代表される電氣的構造物)により発生する電磁ノイズの混入により、解析結果の信頼性が低下するといった技術的な問題点もある。こうした問題点の解決のため、第3期中長期目標期間以降も、連続ウェーブレット変換や独立成分分析を用いたMT法観測データの品質の改善等についても取り組んできた(Ogawa *et al.*, 2021⁴⁶⁾; 小川ほか, 2022⁴⁷⁾; Ogawa *et al.*, 2023⁴⁸⁾)。

地震波トモグラフィー法やMT法については、概要調査において火山・火成活動等の潜在的なリスクを評価するために適用すべき重要な技術であることから、第4期中長期目標期間においても引き続き、最新の科学的知見を取り入れた調査・評価技術の信頼性の向上を進める。

(3) 令和5年度の研究計画

① 地下構造イメージング技術の高度化

MT法については、地下に熱源を持つ非火山における火山活動への発展性の検討(2.2の(3)①を参照)において、地下のマグマ等の高温流体の存否を確認するための手法としての事例研究の蓄積を継続する。さらに、AMT(Audiomagnetotelluric)法について、深部流体の流入・移行経路の把握のための手

法として、地質、地下水調査及び室内比抵抗測定実験を組み合わせたハイブリッドな調査手法の確立を目指す。AMT 法により得られる比抵抗構造から、地質、地下水の分布に関する総合的な解釈を行うには、地表踏査等の他の調査結果に基づいた地下構造モデルに対してシミュレーションを行うことで求めた比抵抗モデルを、実際の探査結果と照らし合わせることでより信頼度の高い比抵抗構造の解釈が可能である(Nishiyama *et al.*, 2021⁴⁹⁾)。令和 5 年度は、湧水、温泉、熱水脈等の移行経路及び深部流体賦存域に関する先行研究のレビュー等を基に、地下における基盤の形状、破碎帯の幅、地下水の塩濃度の分布等を模式化した仮想的な地下構造モデルを構築し、そこから想定される探査結果のイメージを得るためのシミュレーションを実施する。このシミュレーションをとおして、AMT 法の適用可能性について検討を行う。

2.1.3 深部流体の分布に関する調査技術

(1) 目的

非天水起源の深部流体には、高温で低 pH、炭酸化学種濃度が高いものが存在する。そのため、これらが流入する範囲では地質環境として好ましくない熱環境や化学場が形成される可能性があり、概要調査等においてその影響を排除することが望ましい(総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループ, 2014¹³⁾)。本研究では、近年、その性状が明らかになりつつある深部流体の形成・移動メカニズムに関する事例研究を通じて、深部流体の分布に関する調査技術を提示する。

(2) 実施内容

第 2 次取りまとめでは、紀伊半島南部のように第四紀火山が存在していない地域においても高温異常域が認められることが指摘されており、地表に噴出していないマグマが地下に存在するという考え方や、地下深部まで発達した断裂系から熱水が上昇しているという可能性が示唆されている。その後、非火山性の熱水が分布する地域として常磐地域、能登半島、新潟平野、紀伊半島、有馬温泉等が報告されている(例えば、産業技術総合研究所地質調査総合センター編, 2004⁵⁰⁾; 産業技術総合研究所深部地質環境研究センター編, 2007⁵¹⁾; 産業技術総合研究所深部地質環境研究コア編, 2012⁵²⁾)、これらの分布には偏在性が認められる。深部流体は、酸性で炭酸化学種を多く含み、また一部は高温流体である(尾山ほか, 2011⁵³⁾; 風早ほか, 2014⁵⁴⁾)。その起源については、マグマが冷却・固結する際に放出されるマグマ水 (Sparks, 1978⁵⁵⁾) のほか、スラブ起源流体 (Peacock, 1990⁵⁶⁾) や続成脱水流体 (Kyser and Hiatt, 2003⁵⁷⁾)、変成脱水流体 (Miyashiro, 1994⁵⁸⁾) 等が知られている。これらの起源の推定については、流体に含まれるガスの希ガス同位体によって容易に識別できるほか(例えば、Umeda *et al.*, 2012⁵⁹⁾; 網田ほか, 2014⁶⁰⁾)、Li-Cl-Br 相対組成や Li/Cl 比、ヨウ素-129 (¹²⁹I)/I 等による識別可能性が示されてきている(風早ほか, 2014⁵⁴⁾; 産業技術総合研究所, 2016⁶¹⁾; 原子力機構・電力中央研究所, 2021²⁶⁾、富岡ほか, 2022⁶²⁾)。

第 3 期中長期目標期間においては、深部流体の多様な研究をレビューするとともに、流体の化学的な性状のみならず、分布や成因等に関する検討を進めてきた。活断層やその周辺のように地殻変動が活発な地域では、マントル物質の地下水への寄与が大きく、深部流体の上昇が示唆される(例えば、Umeda *et al.*, 2013²²⁾, 2013⁶³⁾)。また、スラブ起源流体については、地殻下部にまで達するような構造線や大断層が地表への主な経路であることが指摘されている(産業技術総合研究所深部地質環境研究センター編, 2007⁵¹⁾; 産業技術総合研究所深部地質環境研究コア編, 2012⁵²⁾)。これらを踏まえ、深部流体の形成・移動メカニズムや熱的性状に関する科学的知見の蓄積や、深部流体が流入する範囲を明らかにするための調査技術の開発を、深部流体が賦存すると考えられている代表的地域の事例研究により進めてきた。これまでに、九州の前弧域等を事例対象として、MT 法電磁探査と地震波トモグラフィーとの対比に基づき深部流体賦存域の分布を推定する技術を提示した(石丸ほか, 2018⁴⁵⁾)。さらに、流入経路に関する情報の一つとして、地下のクラック性状を反映する S 波偏向異方性に着目し、紀伊半島南部や有馬温泉等を事例とした S 波スプリッティング解析によって S 波偏向異方性の推定を進めてきた(平塚ほか, 2020⁶⁴⁾; 原子力機構・電力中央研究所, 2021²⁶⁾)。以上の手法を、深部流体の分布に関する「総合的なアプローチによる調査技術」として提示した。

第 4 期中長期目標期間においては、数 km 四方規模の現実的なサイト調査を念頭において、多分野の手法を組み合わせた技術の高度化・統合化を進める。具体的には、深部流体の地下での移行経路を

能動的に捉える観点から、S 波スプリッティング解析に加え、AMT 法電磁探査等の物理探査の実施を検討する。また、流体の起源及び経路に加え、熱水活動の時間変化及び影響範囲を捉える観点から、熱水脈や流体包有物等を用いた熱力学的計算や分析、多様な熱年代学的手法の適用及び湧水・ガス等の連続観測を進める。さらに、地表付近の移行経路分布に影響を与える地質的要因を、割れ目分布等の地質構造的透水好適性の観点から検討する。

(3) 令和 5 年度の研究計画

① 深部流体の形成・移動メカニズムに関する知見の蓄積

深部流体が流入する範囲を適切に評価するためには、地下深部における流体賦存域の有無のほか、地表付近への流入・移行経路に関する情報を得ることが重要であると考えられる。令和 5 年度は、昨年度までに引き続き、深部流体の湧出域が偏在する地質構造的要因を明らかにするための露頭の割れ目調査や、S 波スプリッティング等の地震波解析を、複数の事例研究地域において継続するとともに、流体賦存域を明らかにするための AMT 法電磁探査等の適用可能性についても検討する。特に地震波解析については、2020 年 12 月以降地震活動が活発化し、その要因として地下深部からの流体の上昇が指摘されている能登半島(例えば、Nakajima, 2022⁶⁵)を対象とした解析について取りまとめる。

② 微量元素、流体包有物解析による深部流体の化学的、熱的特性の制約

昨年度までに、深部流体の熱的特性(温度、活動時期、活動継続期間)を評価するための鉍物脈の流体包有物解析と周辺母岩の熱年代解析とを組み合わせ手法について提示した(原子力機構・電力中央研究所, 2022²⁷)。令和 5 年度は、当該手法の不確実性を低減させる目的で、鉍物脈に産する流体包有物のラマン分光分析、加熱冷却実験により鉍物脈形成時の深度を推定する手法や、特定の元素が鉍物脈から壁岩へ拡散する際に形成される濃度プロファイルの解析により流体の滞留時間を推定する手法について検討する。

2.2 長期予測・影響評価モデルの開発

(1) 目的

地層処分における将来の地質環境の予測・評価は、過去の自然現象の偏在性や変動傾向に基づき、将来へ外挿することが基本となる。しかしながら、過去のイベントや変動パターン・規模に係る記録は、遡る年代や地域によって識別できる分解能が異なることから、予測結果に伴う不確かさも様々である。外挿法の信頼性向上のためには、多様な時空間スケールにおける調査事例の蓄積を通じ、時間スケールごとの変動方向や速度に及ぼす影響を評価するとともに、将来予測に用いられる変動データの時空間代表性が吟味されることが望まれる。本研究では、主に地形・地質学的アプローチに基づき、過去数百年～数十万年の期間を中心に、異なった時間スケールでの変動方向・速度の解析事例を蓄積する。また、多様な地形・地質学的環境における検討を可能にするための地質年代学に関する技術基盤の強化及び地形発達シミュレーションの整備による将来予測モデルの高度化に加え、これらの個別技術の適用から地質環境のモデル化に至るまでの総合的な調査・評価事例の実証を行う。

(2) 実施内容

過去の地質学的現象の因果関係や連続性について、笠原・杉村(1978)⁶⁶⁾及び松田(1988)⁶⁷⁾は第四紀後期の地殻変動には、①変位の向きの一様性、②変位の等速性といった経験則を見出し、これらを「一様継続性」と呼んだ。このような変動の一様継続性という概念は、数年～数十年の測地学的な観測によって認められる短期的な変動傾向ではなく、地形学・地質学的な調査から得られる数千年以上の時間間隔でとらえたときに得られる運動像である。しかしながら、伊豆半島周辺等では、比較的若い時代(第四紀後半)に現行の変動が開始したと考えられており(例えば、道家ほか, 2012⁶⁸⁾)、変動の方向や速度も将来予測の前提となる定常状態、すなわち一様継続に至っていないことが考えられる。このため第3期中長期目標期間ではこれまでディスロケーションモデルに基づいた地質学的ひずみ速度の推定手法を提案するとともに、日本列島全域及び九州地方を事例とした地質学的ひずみ速度と測地学的ひずみ速度との比較によって、異なる時間スケールにおける地殻変動特性の差に着目した一様継続性の成立性に関する検討事例を示した(原子力機構, 2018²⁵⁾)。

また、地層処分におけるサイト選定や安全評価において重要となる地質環境の長期的な変化を評価する上では、将来の自然現象に伴う長期の地質環境の変動スケールを把握するために必要な100万年ないしそれ以上の時間スケールで、過去から現在までの地質環境の変化を三次元的に表現できる数値モデル(地質環境長期変動モデル)を構築して検討することが有効である(尾上ほか, 2019⁶⁹⁾)。こうした数値モデルの構築にあたっては、地形・地質、水理、地球化学及び地表環境といった個別のモデルを構築する技術開発に加え、それらを統合化して分かりやすく可視化する手法、さらにはモデルの妥当性や不確実性を評価する手法の開発も重要である。このため第3期中長期目標期間では、数値モデルの構築及びその不確実性の評価を支援する個別要素技術の開発として、地下構造の不均質性を考慮したシミュレーション技術の構築、測地・地震/地形・地質データに基づくシミュレーション結果の検証及び過去から現在までの山地発達に関わる隆起速度や侵食量分布を明らかにするための後背地解析技術の高度化を、平成29年度までに実施した(原子力機構, 2018²⁵⁾;丹羽ほか, 2018⁷⁰⁾; Shimizu *et al.*, 2019⁷¹⁾;代永ほか, 2021⁷²⁾)。

地層処分のサイト選定・設計や安全評価において考慮すべき自然現象のうち、サイトによらず調査・評価が不可欠な隆起・侵食については、異なる時間スケールの変動を対象とする手法を組み合わせる評価

することが重要であると考えられる。そこで平成 30 年度から令和 4 年度においては、「地層処分研究開発に関する全体計画(平成 30 年度～平成 34 年度)」(経済産業省資源エネルギー庁 地層処分研究開発調整会議, 2018¹⁵⁾)に基づき、地形学的手法や年代測定等を用いた過去 100 万年～数十万年前以前からの隆起・侵食を精度よく把握するための技術の整備を重点的に進めてきた(原子力機構・電力中央研究所, 2019⁴²⁾, 2020⁴⁴⁾, 2021²⁶⁾, 2022²⁷⁾, 2023²⁸⁾)。一方、昨今行われてきた、総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会地層処分技術ワーキンググループにおける文献調査段階の評価の考え方に係る議論や、原子力規制委員会における、地層処分において安全確保上少なくとも考慮されるべき事項(原子力規制委員会, 2022¹⁹⁾)に係る議論の中では、将来新たに火山が発生する蓋然性の評価に関しては、現時点で確立された手法があるという共通認識には至っておらず、新しい手法も含めた更なる検討の必要性が大きな課題として浮き彫りとなっている。そこで第 4 期中長期目標期間の令和 5 年度からは、隆起・侵食に加え、火山・火成活動についても、「地層処分研究開発に関する全体計画(令和 5 年度～令和 9 年度)」(経済産業省資源エネルギー庁 地層処分研究開発調整会議, 2023¹⁶⁾)に基づき、長期予測・影響評価モデルの信頼性向上に資するための最先端の科学的知見を取り入れた各種調査・評価技術の開発を進める。

(3) 令和 5 年度の研究計画

① 火山・火成活動の発生及び影響の調査・評価技術の高度化

従来より、将来の火山活動の発生に係る評価技術や、マグマ・熱水活動の影響範囲を把握するための技術として、電磁探査、地震波解析(地震波トモグラフィ等)、地下水・温泉水やガスの化学・同位体分析、岩脈や火山灰の年代測定・解析等に基づく検討がなされている。一方、マグマ溜りの熱的寿命は数十万年程度という考え方もあり(東宮, 1991⁷³⁾)、最新活動時期の古い第四紀火山は、現在は既に活動を終えている可能性もある。そこで、第四紀の古い時期に活動したとされている火山の活動性に関する評価基盤の提示を目的として、そのような火山を事例対象とした上述の既存の各種調査データを精査することにより、評価手法の信頼性の向上を図る。併せて、火山活動時期に関する編年技術の高精度化を目的として、火成岩や火山灰中の鉱物を対象とした U-Th 非平衡年代測定法の開発に着手する。

さらに、地下のマグマ等の高温流体の存否を把握するための電磁探査と、(U-Th)/He 法等の低温領域の熱年代法を山地横断方向に適用して隆起形態を明らかにする手法とを組み合わせることにより、地下に熱源を持つ非火山の将来の火山活動への発展性について評価する手法について検討する。令和 5 年度より、東北地方の飯豊山地及び太平山地を対象とした事例研究に着手する。

② 地形・地質学的情報に基づく隆起・侵食の調査・評価技術の高度化

隆起・侵食のうち、侵食の調査・評価技術としては、従来、鉱物の放射年代のリセットに基づいた熱年代学的手法を用いた侵食評価がなされている。本課題においては、特に低温領域を対象とした熱年代手法の適用事例を拡充するとともに、さらなる調査・評価技術の開発に着手する。具体的には、地質温度圧力計を用いた侵食履歴の検討と、ヒールドマイクロクラックを用いた古応力解析を実施する。地質温度圧力計による侵食評価は、熱年代手法の適用が困難な熱史・熱構造が複雑な地域にも適用可能であり、鉱物の包有物残存圧力計、温度計、U-Pb 年代測定を組み合わせた検討や、ジルコン・チタン石を対象とした手法構築(Ti-in-Zircon 地質温度計, Zr-in-Titanite 地質温度計等)を試みる。また、ヒールドマイクロクラックを用いた古応力解析の結果を組み合わせることで、隆起・侵食速度の変化と応力の変遷を対応付けることが可能となり、地史の観点から隆起・侵食評価の信頼性を検証できると期待できる。

2.3 年代測定技術の開発

2.3.1 局所領域及び高精度同位体分析技術

(1) 目的

地質環境の長期安定性に関する研究を進める上で、過去の自然現象の復元のためには岩石や鉱物の形成年代やその後の変質・変成を受けた年代の決定が必要不可欠である。一般に、岩石や鉱物の年代測定では、放射性核種の壊変を利用する放射年代測定が用いられる。火山・火成活動におけるマグマの定置・貫入プロセスや、山地の隆起・沈降、侵食・堆積のプロセス及び断層運動の履歴等を理解するためには、複数の同位体系による年代測定が必要となる。また、地質試料から火成活動における鉱物の結晶化プロセスや堆積層の後背地の解析、断層運動等による熱変成あるいは水質変質の履歴を復元するには、放射年代測定のみではなく、鉱物組成や元素・同位体組成を取得することが重要となる。本研究では、誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS: Inductively coupled plasma mass spectrometry)及びレーザーアブレーション装置と ICP 質量分析装置を連結して利用するレーザーアブレーション ICP 質量分析法(LA-ICP-MS: Laser ablation-ICP-MS)を用いた各種年代測定に必要な微量元素の定量分析や同位体分析のための技術開発及び既存技術の高度化を進める。

(2) 実施内容

LA-ICP-MS を用いることで、簡便な試料前処理でマイクロメートルスケールの局所領域から化学情報を得ることが可能となり、岩石を構成する鉱物ごとの年代値等を取得することが可能である。LA-ICP-MS による同位体分析技術の開発として、令和 3 年度までの第 3 期中長期目標期間までに炭酸塩鉱物やジルコン等を対象とした U-Pb 年代測定技術を確立し(例えば, Yokoyama *et al.*, 2018³⁷⁾), 各種試料の年代測定を実施してきた。また、ジルコンについては U-Pb 年代測定に加えて同時に同領域からチタン(Ti)濃度を分析し、結晶化年代と結晶化温度を同時に推定する手法を確立した(Yuguchi *et al.*, 2020⁷⁴⁾, 2022⁷⁵⁾)。加えて、1 台の LA を複数台の誘導結合プラズマ ICP 質量分析装置に接続し、LA サイトで得られた試料を各質量分析装置に分配して分析する手法(LASS (Sprit Stream)-ICPMS)の開発を行った。さらに、例えばジルコンのハフニウム(Hf)同位体組成及びアパタイトのストロンチウム(Sr)同位体組成からは、起源マグマの化学組成を制約することができるため、これらの同位体分析技術の整備を進めてきた。元素の定量分析技術の開発では、微量元素組成から火山砕屑物(テフラ)を特徴付けるアプローチに必要な技術として、LA-ICP-MS による火山ガラスの微量元素分析技術を確立した(鏡味ほか, 2021⁷⁶⁾)。また、岩石中での微量元素の移行や年代測定の測定点を定める上で親-子孫核種の存在量を事前に把握できる微量元素マッピング(イメージング)技術を整備した。第 4 期中長期目標期間では、このような分析技術について、精度向上等の高度化を図るとともに、適用性の拡大や適用範囲の確認、また必要に応じて新たな分析技術の確立を行う。また、令和 3 年度に導入したクリーンブース内での化学分離操作の設備や手法を整備し、湿式での ICP-MS による高精度同位体分析技術を確立する。このような局所分析及び湿式分析による同位体分析の実施のほか、主要元素組成の分析では、電子プローブマイクロアナライザ(EPMA: Electron probe micro analyzer)や X 線分析顕微鏡(X-ray analytical microscope)、鉱物組成の分析では X 線回折分析(XRD: X-ray diffraction analysis)が必要であるため、これらは適宜実施する。複数の同位体系による年代学的議論を必要とする場合には、ICP-MS での同位体分析技術を新たに検討するとともに、希ガス質量分析法(Noble gas mass spectrometry)等他の手法の導入も検討する。

(3) 令和5年度の研究計画

① 既存分析技術及び開発中の技術の実試料への適用と各手法の高度化

前年度に引き続き、ジルコンや炭酸塩鉱物の U-Pb 年代測定、ジルコンの Hf 同位体分析、アパタイトの Sr 同位体分析、火山ガラスの微量元素分析等、既に確立している分析技術は、各種試料に適用し、データの蓄積を図る。また、適宜分析条件等の最適化を行い、高精度化を図る。局所分析による Sr 同位体分析技術は、これまでアパタイト等鉱物の分析を試験的に実施してきたが、「2.1.1 断層の活動性に係る調査技術」として断層ガウジ試料にも適用し、断層運動に伴うの同位体分別(の程度)を評価できるか検討する。

② 既存技術の適用性拡大

例えば、U-Pb 年代測定等の既存技術は、ジルコンや炭酸塩鉱物だけでなく、チタナイトやアパタイト等の別の鉱物へ適用できる可能性がある。適用性の拡大は、解釈できる地質現象の拡大につながり、また、これまで決定できなかった年代を決めるブレイクスルーにもなり得る。前年度に引き続き、U-Pb 年代測定をチタナイトやアパタイト及びバデレアイトへ適用するために、それぞれの標準試料の入手、年代既知の試験試料の分析から適用性の検証を行う。

③ 湿式分析による高精度同位体分析手法の確立

クリーンブースでの岩石試料の溶解手法や、元素分離手法等の化学分離操作に係る手法の整備を行い、ICP-MS による高精度同位体分析手法の確立を図る。また、難溶解性の花崗岩質な試料の微量元素分析に必要な分解法等の前処理手法の確立を行う。また、LA-ICP-MS による局所同位体分析等では、精確さを評価することが重要となるため、局所分析を実施した試料を湿式分析し、その結果を比較することで独自に評価する。

④ U-Th 年代測定技術の整備

第四紀の火山・火成活動について、放射年代測定で直接年代測定をする手法は限定的(テフラ含有層の有機物に対する炭素-14(^{14}C)法による年代測定等)であったが、昨今は LA を用いた局所分析法による ^{238}U - ^{230}Th 非平衡年代測定手法等の開発・高度化が進みつつある(Ito, 2014⁷⁷); Guillong *et al.*, 2015⁷⁸); Niki *et al.*, 2022⁷⁹)。「2.2 長期予測・影響評価モデルの開発」に記述のうち「①火山・火成活動の発生及び影響の調査・評価技術の高度化」に係る、第四紀火山の将来活動性評価に資するため、U-Th 年代測定手法の開発に着手する。令和5年度は、これに必要なフェムト秒レーザーアブレーション装置の導入を検討する。

2.3.2 光ルミネッセンス(OSL)年代測定技術

(1) 目的

地層処分における地質環境の長期安定性に関する研究においては、将来の隆起・侵食の予測の信頼性向上に向け、過去数十万年以前からの隆起・侵食量の把握が求められる。光ルミネッセンス(OSL: **Optically stimulated luminescence**)年代測定法は、微弱な自然放射線を浴びることによって鉱物結晶内に捕獲された不対電子が、光刺激を受けたときに正孔と再結合することで放出されるルミネッセンス(蛍光)を利用する手法である。適用年代範囲は測定鉱物の種類に依存しており、石英は数十年～数十万年前、長石は数千年～数十万年前までの年代決定を得意とする。蓄積された捕獲電子(OSL年代)は光刺激によって解放(初期化)されるため、OSL年代測定法は原岩の形成年代に依存しない堆積物の埋没年代を推定することが可能である。近年では、捕獲電子(OSL信号)の蓄積速度が周囲の温度に依存することを利用し、閉鎖温度にして数十度以下の超低温領域の熱史の推定も行われている。堆積物の編年に基づいた隆起速度の推定や地殻浅部の熱史・侵食史の評価に資するため、OSL年代測定法及びOSL熱年代法の高度化を図る。

(2) 実施内容

OSL年代測定法については、あらかじめ堆積年代が検討されている堆積物もしくは隆起速度が制約されている地域の堆積物を対象に、OSL年代測定を実施し、手法の信頼性及び適用性を検証する。第3期中長期目標期間においては、石英OSL信号特性の解析法及びその特性に合わせた測定・解析手順を検討することで、石英OSL年代測定法の開発を完了した。長石のOSL年代測定法については、長石の測定で問題となる変則的な信号消失(anomalous fading)を抑制できる新たな測定法(pIRIR法: **post-infrared infrared stimulated luminescence**法; Thomsen *et al.*, 2008⁸⁰⁾)を用いて、海成・河成堆積物を対象に適用事例の蓄積を行った。紀伊半島の海成段丘の事例では、段丘対比による離水年代と長石のOSL年代が良い一致を示し、この手法の有用性を提示した。また、紀伊半島の河成堆積物の事例では、堆積過程での年代の初期化が不十分でOSL年代から堆積年代を決定することができない場合でも、OSL年代の上限値から堆積年代の上限を制約可能であることを提示した(小形ほか, 2021⁸¹⁾)。第4期中長期目標期間においても、適用事例の拡充を進めることにより、OSL年代測定法の信頼性の向上を図る。

OSL熱年代法は、閉鎖温度にして数十度以下の超低温領域の熱史を推定できる手法である(Herman *et al.*, 2010⁸²⁾; King *et al.*, 2016⁸³⁾; Herman and King, 2018⁸⁴⁾)。OSL信号は数十万年で飽和するため、OSL熱年代法による侵食速度の定量化は、試料が閉鎖温度以下に冷却されてから数十万年以内に地表に到達するような侵食速度の速い地域(数mm/yr以上)に限られる(Herman and King, 2018⁸⁴⁾)。一方、Guralnik *et al.* (2015)⁸⁵⁾は過去約2500年間熱的に安定している地域で掘削された大深度ボーリングコア(ドイツ; KTB borehole)を用いて、地下の不飽和な試料を対象に、OSL熱年代法を用いた侵食評価を試みた。すなわち、ナトリウム長石にOSL熱年代法を適用し、OSL信号から復元した古地温構造とボーリング孔温度が整合的であることを報告した。これにより、侵食速度が遅い地域であっても、ボーリング試料を用いて古地温構造を復元することで、熱安定性、すなわち侵食が緩慢であることを評価できることが示された。第3期中長期目標期間においては、侵食速度が遅い地域に対するカリ長石のOSL熱年代法の適用性を検証するために、東濃地域と六甲山地で掘削されたボーリングコア(魚住ほか, 2005⁸⁶⁾; 山田ほか, 2012⁸⁷⁾)を対象に解析を行った。その結果、カリ長石の赤外光ルミネッセンス(IRSL: **Infrared stimulated luminescence**)信号から復元した古地温と現在温度を比較することで、侵食が緩慢であることを評価できることが示された。50℃で測定したIRSL(IR₅₀)信号の適用温度は約40℃以上、IR₁₀₀, IR₁₅₀,

IR₂₂₅ 信号の適用温度はそれ以上(少なくとも約 44 °C 以上)と考えられる(Ogata *et al.*, 2022⁸⁸)。第 4 期中長期目標期間においては、様々な地形・地質・テクトニクス条件の地域を対象とした OSL 熱年代法の適用事例の蓄積を進め、本手法の高度化、体系化及び信頼性の向上を図る。

(3) 令和 5 年度の研究計画

① 堆積物の OSL 年代測定

前年度に引き続き、海成・河成堆積物に対する OSL 年代測定法の適用性を検討する。事例対象地域としては、複数段の海成段丘が発達する能登半島、海成・河成堆積物の堆積物が保存されている牧ノ原台地、穿入蛇行の痕跡地形となる環流旧河谷が多く残されている大井川を予定している。

② OSL 熱年代法の適用性の検討

OSL 熱年代法の適用温度、適用年代範囲、侵食速度条件を検討するため、本手法の適用事例を蓄積する。事例対象としては、釜石(北上山地)で掘削されたボーリングコアを予定している。また、OSL 熱年代法の適用例がない地形・地質・テクトニクス条件を調べ、次期対象地域の選定を行う。

2.3.3 フィッション・トラック (FT) 年代測定技術

(1) 目的

地層処分における地質環境の長期安定性に関して、地質学的時間スケールにおける隆起・侵食評価や、断層の活動性評価、熱水活動の制約等に寄与する手法開発や応用研究の蓄積は重要である。FT 年代測定に代表される熱年代解析は、年代測定法によって得られた年代値と、測定法・鉱物の組み合わせに固有な閉鎖温度に基づいて、岩石や鉱物の温度－時間履歴(熱履歴)を推定する手法である。したがって、高精度な熱履歴の復元や適用範囲の拡大、分析の効率化を目指すことで、ひいては地質環境の長期安定性評価に貢献できると期待される。FT 法は、絶縁性固体におけるウラン-238 (^{238}U) の自発核分裂現象によって結晶格子に形成される線状損傷を計数し、ICP-MS 等による U 濃度の測定によって年代測定が可能である。FT 法において、世界で広く実用化されている対象鉱物の閉鎖温度は、アパタイトで $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 前後(例えば、Ketcham *et al.*, 1999⁸⁹⁾)、ジルコンで $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度(Ketcham, 2019⁹⁰⁾)である。また、他の熱年代法にない特長として、加熱によって FT の長さが短縮・消滅するアニーリングと呼ばれる現象を利用し、年代測定と FT の長さ分布の測定を併用して専用のソフトウェア(HeFTy: Ketcham, 2005⁹¹⁾; QTQt: Gallagher, 2012⁹²⁾)で計算することにより、高精度に熱史を制約できる。効率的な FT 年代測定及び FT 長計測のために、土岐地球年代学研究所では、本邦唯一となる FT 自動計測装置(Autoscan System 社製 TrackScan)を所有し、FT 分析の運用に活用している。地質試料に対する継続的な応用研究の蓄積のみならず、新たな対象鉱物の検討、分析装置の高度化、現行の前処理方法の改良等を進めることにより、FT 分析のさらなる効率化及び応用可能性の拡大が期待できる。

(2) 実施内容

本研究では、新たな鉱物における FT 法の適用可能性の確認を目的とした基礎研究や TrackScan に搭載している画像処理技術及び前処理技術の高度化を中心に行う。FT 法では、主にアパタイトやジルコン、チタナイト、火山ガラスを対象としており(Hurford, 2019⁹³⁾)、これらに基づく応用研究は世界的にも盛んである。一方で、新たな鉱物についての基礎研究についても進められており(末岡ほか, 2021⁹⁴⁾)、より閉鎖温度が低温であると期待されるモナザイト(Jones *et al.*, 2019⁹⁵⁾, 2021⁹⁶⁾)や、苦鉄質岩中のバデレアイト等 FT 年代測定の適用範囲を拡大できる可能性がある。

TrackScan では、ソフトウェアによる顕微鏡の制御と画像処理技術により、観察領域の自動的な疑似三次元像の撮影と、FT 構造の自動認識が可能となっている(Gleadow *et al.*, 2019⁹⁷⁾)。ただし、ジルコンについては、結晶の透過率と撮影した FT の明度の関係で、FT とバックグラウンドのコントラスト比がアパタイト等の鉱物よりも小さくなり、FT 構造の自動認識は実用化されていない。現状では、粒子画像の自動撮影までを他の鉱物同様に実施し、あとは手動で FT の識別・計数を実施しているが、ジルコンについても自動認識の高精度化が可能になれば、分析時間の圧倒的な効率化を図ることが可能となる。また、分析の効率化を検討可能な余地として、FT 年代測定の前処理作業が挙げられる。FT 年代測定では、対象鉱物の高精度な鉱物分離や、樹脂・テフロン材への包埋、一定深度までの研磨等を経て、酸やアルカリ等の化学処理(エッチング)を行う必要がある。これらの分析手順は既に確立している(Kohn *et al.*, 2019⁹⁸⁾) が、効率化を目指すためには重鉱物の精選方法や新たな包埋材の検討、研磨作業の改良等が挙げられる。

以上のような現状を受け、第 4 期中長期目標期間においては、FT 法における新たな対象鉱物についての技術開発の試みや、未だ実用化が進んでいないモナザイトやバデレアイトにおける自動測定装置の画像処理技術の実用化について検討を進める。これにより、FT 法の測定対象の拡大や分析の効率化を図る。

(3) 令和 5 年度の研究計画

① 新たな対象鉱物についての技術開発

モナザイト及びバデレイト等の FT 法の新たな対象鉱物についての年代測定に向けた技術開発を行う。まずは含モナザイトの地質試料を収集し、幅広い岩石の年代や化学組成等に応じたモナザイトの特性の把握及び評価を行う。まずは、鉱物分離後のフラクションについて、特定鉱物の同定が高速で可能な元素分析ヘッド付き電子顕微鏡を導入し、効率的な鉱物の抽出条件や形態的特徴の把握を検討する。次に、新たな鉱物におけるエッチング法の確立や、最適な包埋材の選定及び研磨作業の効率化等の前処理法の高度化を試みる。モナザイトの前処理における現時点の課題として、若い試料の場合は高温の塩酸で長時間の加熱を行うため、従来使用している樹脂よりも耐薬品性の高い包埋材の選定を検討する。加えて、令和 4 年度に導入した複数の粒度のダイヤモンドラッピングフィルムを用いて、効率的な研磨作業のルーチン化も検討する。また、U 濃度測定に向けた標準試料を入手し、未知試料の年代測定に向けた化学分析法の整備を試みる。これらのモナザイト FT 年代測定法の整備や実用化に基づき、熱史が既知の天然試料を用いた基礎・応用研究を通して地質時間スケールにおける閉鎖温度の検証を新たに実施する。これにより、これらの鉱物における FT 年代測定の適用性を検討する。

② ジルコンやモナザイトにおける FT 自動計測についての実用化

TrackScan にインストールされているソフトウェアについて、すでに FT 自動計測が実用化されているアパタイトを除く鉱物(ジルコン、モナザイト等)についても自動測定を実施可能とするため、画像処理技術の高度化を新たに検討する。具体的には、透過度や反射率の異なる包埋材の比較や、鉱物粒子の撮影時の光源・フィルター等の最適な観察環境や設定の検討、深層学習を用いた高精度な自動計測ソフトウェアの構築等を検討する。これにより、FT 自動計測の適用可能な対象鉱物の拡大を試みる。

2.3.4 加速器質量分析技術

(1) 目的

地質環境の長期安定性に関する研究の着実な実施と、処分事業・安全規制への成果の反映を進めるため、土岐地球年代学研究所で実用化した最先端の年代測定技術等をさらに高度化し、適用範囲を拡大していくことが重要である。加速器質量分析法(AMS: Accelerator mass spectrometry system)では天然に存在する炭素-14(^{14}C)、ベリリウム-10(^{10}Be)、アルミニウム-26(^{26}Al)、塩素-36(^{36}Cl)、 ^{129}I 等の極微量の放射性同位体を計測することが可能である。AMSは地質試料の年代測定や地下水の供給源推定等に有効な手法の一つである。既設のAMS装置であるJAEA-AMS-TONO-5MV及びJAEA-AMS-TONO-300kVによる年代測定法の高度化を継続するとともに、地下水の滞留時間の推定を目的とした ^{36}Cl 年代測定法の実用化を進めることが重要である。さらに、AMS装置を小型化することを目標に研究を進めており、これまでにない超小型AMS装置の実用化に向けた技術開発や、 ^{36}Cl -AMSを小型のAMS装置で精度よく測定するための技術開発を継続して進めることで、年代測定技術に関する新たな知見の蓄積が期待される。また、年代測定結果の精度を維持するためには、装置の改良に加えて、保存状態の良い地質試料の確保と様々な地質試料に適応可能な試料の前処理手法の改良が求められる。本研究では、試料の選定に必要な化学分析手法の高度化も同時に進める。

(2) 実施内容

AMSの発展により複数核種の測定が実現し、千年から100万年スケールでの地質試料等の年代測定が可能になる。特に、宇宙線生成核種である ^{10}Be 及び ^{26}Al による表面照射年代測定により、隆起・侵食等地表面の物質移動のプロセスに関する情報が得られると期待される。第3期中長期目標期間では試料調製法及び測定条件の最適化を進め、土岐地球年代学研究所のJAEA-AMS-TONO-5MVによる石英試料中の ^{10}Be 及び ^{26}Al 測定を実用化させた(Saito-Kokubu *et al.*, 2023⁹⁹)。 ^{36}Cl 測定法の実用化に向けた試験では、装置の最適化等を行い高同位体比($^{36}\text{Cl}/\text{Cl}\sim 10^{-12}$ 台まで)の測定ができる段階まで進めた。 ^{129}I 測定についても天然試料へ適用させルーチン測定を実施している(Mitsuguchi *et al.*, 2021¹⁰⁰)。さらに、少量試料(従来法の1/20の試料量)での ^{14}C 測定についても検討を行った(Watanabe *et al.*, 2021¹⁰¹)。また、約2m×2mの超小型AMS装置の実用化に向けた技術開発を進めた(Matsubara *et al.*, 2020¹⁰², Fujita *et al.*, 2022¹⁰³)。AMS技術開発は装置設置以降、着実に進展を続けてきた。一方、これまでに土岐地球年代学研究所で開発した個々の年代測定技術を最適化し、様々な特性を持つ天然試料へ適用させ着実に実装を進めることが重要である。そのためには、各種の年代測定装置や研究目的に合わせた試料前処理手法の確立が有効である。したがって、種々の地質試料に適応可能な前処理手法の改良や測定装置の最適化を継続して実施する。

第4期中長期目標期間では、継続して超小型AMS装置の実用化に向けた技術開発を実施する。具体的には、 ^{14}C 測定の原理実証をはじめ、超小型AMS装置を構成する表面ストリッパーの耐久性向上に向けた試験を着実に進める。開発中の ^{36}Cl 測定法については、前処理法を最適化し、妨害元素である硫黄の除去方法の検討、また、JAEA-AMS-TONO-5MVによる硫黄-36(^{36}S)分別技術の向上を継続して進める。実用化済みの ^{14}C 、 ^{10}Be 、 ^{26}Al 、 ^{129}I 測定法では前処理手法の最適化も含め、天然試料への適用実績を着実に蓄積する。

また、試料前処理技術の高度化のうち ^{14}C 年代測定については、これまでに実現している炭素量0.05mgでの試料前処理手法をさらに改良する。前処理用装置である元素分析装置(Elementar社製EA(Elemental analyzer))、自動グラファイト調製装置(IonPlus社製AGE3(Automated graphitization

equipment 3))の最適化, 装置への試料導入系の改良, 加速器質量分析計での測定条件の最適化により, 少量試料での測定時の炭素汚染の評価と低減, ブランク補正, 測定結果の安定化等を目指す。EA, 安定同位体比質量分析装置(IRMS:Isotope ratio mass spectrometry system), 可搬型蛍光エックス線分析装置(pXRF:portable X-ray fluorescence spectrometry system)等については, 試料導入系や前処理装置間の接続方法の検討, 対象試料の拡大(固体, 液体, 気体試料への適用)及び天然試料への適用実績の蓄積を着実に進める。

(3) 令和5年度の研究計画

① AMS装置の小型化に向けた技術開発

超小型 AMS 装置の表面ストリッパーによる荷電変換効率, 検出器までの輸送効率, 妨害分子の解離効率, これら検出限界に関わる効率を実験的に確かめる。実験を通じて結晶の種類や結晶角度の依存性等, 最適な測定条件を探索するとともに, 表面散乱過程のモデル構築を進める。

② ^{36}Cl 年代測定法の実用化及び先進技術の開発

調製した標準試料等を用いて JAEA-AMS-TONO-5MV による試験測定を継続し, 同重体である ^{36}S を分別するため検出器の最適化を進める。また, 並行して同重体分別の高度化として前処理方法の検討や, ^{36}S をイオン分子反応を利用して選択的に抑制する装置の開発をすすめる。そのためにビーム軌道シミュレーションを行い, テストベンチを組上げて動作の検証を行う。

③ ^{14}C , ^{10}Be , ^{26}Al , ^{129}I 年代測定法の高度化

JAEA-AMS-TONO-5MV の測定データの精度改善に向けたイオンビーム生成の安定化, 検出限界の改善に向けたイオン光学の検討及び機器設定の最適化を継続して行う。天然試料の測定実績を蓄積し, 様々な特性を持つ地質試料への適用性を拡大する。特に, 適用例の少ない地下水や炭酸塩試料の ^{129}I 測定等を継続して進める。

④ 試料前処理技術等の高度化

令和4年度は, AMS 装置による炭素量約 $50\ \mu\text{g}$ 以下での ^{14}C 年代測定を目指し, 元素分析装置に自動グラファイト調製装置を接続した EA-AGE3 を用いて少量試料の試料前処理を実施した。令和5年度は少量試料での試験測定を継続して行い, 前処理時における炭素汚染の影響評価を実施する。また, 年代測定用の試料の特性を評価するため, EA, IRMS, pXRF 装置等の最適化及び測定手法の改良を継続して進めるとともに天然試料への適用実績を蓄積する。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—総論レポート, JNC TN1400 99-020, 1999, 634p.
- 2) 核燃料サイクル開発機構, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊1 わが国の地質環境—, JNC TN1400 99-021, 1999, 559p.
- 3) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律(平成12年法律第117号), 2000.
- 4) 原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会, 我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価, 2000, 32p.
- 5) OECD/NEA, International Peer Review of the Main Report of JNC's H12 Project to Establish the Technical Basis for HLW Disposal in Japan, NEA/RWM/PEER(99)2, 1999.
- 6) 原子力安全委員会, 高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について, 2002, 21p.
- 7) 原子力発電環境整備機構, 概要調査地区選定上の考慮事項, 2002, 27p.
- 8) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会, 廃棄物安全小委員会報告書—高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて—, 2003, 108p.
- 9) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会, 放射性廃棄物処理・処分に係る規制支援研究(平成22年度～平成26年度)について, 2009, 40p.
- 10) 原子力委員会, 今後の高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る取組について(見解), 2012, 9p.
- 11) 日本学術会議, 高レベル放射性廃棄物の処分について(回答), 2012, 36p.
- 12) 原子力委員会, 今後の原子力研究開発の在り方について(見解), 2012, 15p.
- 13) 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループ, 最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価—地質環境特性および地質環境の長期安定性について—, 2014, 61p.
- 14) 原子力委員会放射性廃棄物専門部会, 最終処分関係行政機関等の活動状況に関する評価報告書, 2016, 43p.
- 15) 経済産業省資源エネルギー庁 地層処分研究開発調整会議, 地層処分研究開発に関する全体計画(平成30年度～平成34年度), 2018, 44p.
- 16) 経済産業省資源エネルギー庁 地層処分研究開発調整会議, 地層処分研究開発に関する全体計画(令和5年度～令和9年度), 2023, 73p.
- 17) 経済産業省資源エネルギー庁, 科学的特性マップ, 2017,
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/map

s/kagakutekitokuseimap.pdf (参照:2023年6月8日)。

- 18) 原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告:わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—本編および付属書, NUMO-TR-20-03, 2021, https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/tr180203.html (参照:2023年5月29日)。
- 19) 原子力規制委員会, 特定放射性廃棄物の最終処分における概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮されるべき事項, 2022, <https://www.nra.go.jp/data/000402076.pdf> (参照:2023年6月8日)。
- 20) 梅田浩司, 安江健一, 國分(齋藤)陽子, 丹羽正和, 浅森浩一, 藤田奈津子, 清水麻由子, 島田顕臣, 松原章浩, 田村 肇, 横山立憲, 渡邊隆広, 徳安佳代子, 濱 友紀, 「地質環境の長期安定性に関する研究」基本計画—第 3 期中長期計画(平成 27 年度~平成 33 年度), JAEA-Review 2015-012, 2015, 43p.
- 21) Tamura, T., Oohashi, K., Otsubo, M., Miyakawa, A. and Niwa, M., Contribution to crustal strain accumulation of minor faults: a case study across the Niigata-Kobe Tectonic Zone, Japan, Earth, Planets and Space, vol.72, no.7, 2020, doi:10.1186/s40623-020-1132-5.
- 22) Umeda, K., Kusano, T., Ninomiya, A., Asamori, K. and Nakajima, J., Spatial variations in $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios along a high strain rate zone, central Japan, Journal of Asian Earth Sciences, vol.73, 2013, pp.95-102.
- 23) 下茂道人, 丹羽正和, 天野健治, 徳永朋祥, 戸野倉賢一, 松岡俊文, セバスチャン ビロード, キャビティールンダウ分光法を用いた大気中微量メタンガス測定による活断層調査, 深田地質研究所年報, no.20, 2019, pp.45-54.
- 24) Nishimura, T. and Takada, Y., San-in shear zone in southwest Japan, revealed by GNSS observations, Earth, Planets and Space, vol.69, no.85, 2017, doi:10.1186/s40623-017-0673-8.
- 25) 日本原子力研究開発機構, 平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発 報告書, 2018, 206p.
- 26) 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所, 令和 2 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 地質環境長期安定性評価技術高度化開発 報告書, 2021, 317p.
- 27) 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所, 令和 3 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 地質環境長期安定性評価技術高度化開発 報告書, 2022, 311p.
- 28) 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所, 令和 4 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 地質環境長期安定性評価技術高度化開発 報告書, 2023, 312p.
- 29) Niwa, M., Shimada, K., Aoki, K. and Ishimaru, T., Microscopic features of quartz and clay particles from fault gouges and infilled fractures in granite: Discriminating between active and inactive faulting, Engineering Geology, vol.210, 2016, pp.180-196.
- 30) Niwa, M., Mizuochi, Y. and Tanase, A., Changes in chemical composition caused by water-rock interactions across a strike-slip fault zone: case study of the Atera Fault, Central Japan, Geofluids, vol.15, no.3, 2015, pp.387-409.

- 31) Niwa, M., Shimada, K., Ishimaru, T. and Tanaka, Y., Identification of capable faults using fault rock geochemical signatures: A case study from offset granitic bedrock on the Tsuruga Peninsula, central Japan, *Engineering Geology*, vol.260, 105235, 2019, doi:10.1016/j.enggeo.2019.105235.
- 32) 立石 良, 島田耕史, 清水麻由子, 植木忠正, 丹羽正和, 末岡 茂, 石丸恒存, 断層ガウジの化学組成に基づく活断層と非活断層の判別—線形判別分析による試み, *応用地質*, vol.62, no.2, 2021, pp.104-112.
- 33) Sueoka, S., Ikuho, Z., Hasebe, N., Murakami, M., Yamada, R., Tamura, A., Arai, S. and Tagami, T., Thermal fluid activities along the Mozumi-Sukenobu fault, central Japan, identified via zircon fission-track thermochronometry, *Journal of Asian Earth Sciences: X*, vol.2, 100011, 2019, doi:10.1016/j.jaesx.2019.100011.
- 34) Yamada, K., Hanamuro, T., Tagami, T., Shimada, K., Takagi, H., Yamada, R. and Umeda, K., The first (U-Th)/He thermochronology of pseudotachylyte from the Median Tectonic Line, southwest Japan, *Journal of Asian Earth Sciences*, vol.45, 2012, pp.17-23.
- 35) Yamasaki, S., Zwingmann, H., Yamada, K., Tagami, T. and Umeda, K., Constraining the timing of brittle deformation and faulting in the Toki granite, central Japan, *Chemical Geology*, vol.351, 2013, pp.168-174.
- 36) Niwa, M., Shimada, K., Tamura, H., Shibata, K., Sueoka, S., Yasue, K., Ishimaru, T. and Umeda, K., Thermal constraints on clay growth in fault gouge and their relationship with fault-zone evolution and hydrothermal alteration: Case study of gouges in the Kojaku Granite, Central Japan, *Clays and Clay Minerals*, vol.64, no.2, 2016, pp.86-107.
- 37) Yokoyama, T., Kimura, J.-I., Mitsuguchi, T., Danhara, T., Hirata, T., Sakata, S., Iwano, H., Maruyama, S., Chang, Q., Miyazaki, T., Murakami, H. and Saito-Kokubu, Y., U-Pb dating of calcite using LA-ICP-MS: Instrumental setup for non-matrix-matched age dating and determination of analytical areas using elemental imaging, *Geochemical Journal*, vol.52, no.6, 2018, pp.531-540.
- 38) Sato, K., Incorporation of incomplete fault-slip data into stress tensor inversion, *Tectonophysics*, vol.421, no.3-4, 2006, pp.319-330.
- 39) 産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 沿岸部処分システム高度化開発 平成 27 年度～平成 30 年度取りまとめ報告書, 2019, 288p.
- 40) Umeda, K., Localized extensional tectonics in an overall reverse-faulting regime, Northeast Japan, *Geoscience Letters*, vol.2, no.12, 2015, doi: 10.1186/s40562-015-0030-3.
- 41) Umeda, K., Asamori, K., Makuuchi, A., Kobori, K. and Hama, Y., Triggering of earthquake swarms following the 2011 Tohoku megathrust earthquake, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.120, no.4, 2015, pp.2279-2291.
- 42) 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所, 平成 30 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 地質環境長期安定性評価技術高度化開発 報告書, 2019, 200p.
- 43) 石丸恒存, 尾方伸久, 島田顕臣, 浅森浩一, 國分(齋藤)陽子, 丹羽正和, 渡邊隆広, 雑賀 敦,

- 末岡 茂, 小松哲也, 横山立憲, 藤田奈津子, 清水麻由子, 小川大輝, 植木忠正, 雨宮浩樹, 地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書(平成 29 年度), JAEA-Research 2018-015, 2019, 89p.
- 44) 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所, 平成 31 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 地質環境長期安定性評価技術高度化開発 報告書, 2020, 251p.
- 45) 石丸恒存, 安江健一, 浅森浩一, 國分(齋藤)陽子, 丹羽正和, 渡邊隆広, 横山立憲, 藤田奈津子, 雑賀 敦, 清水麻由子, 小川大輝, 地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書(平成 28 年度), JAEA-Research 2018-008, 2018, 83p.
- 46) Ogawa, H., Asamori, K. and Ueda, T., Numerical experiment for processing noisy magnetotelluric data based on independence of signal sources and continuity of response functions, Proceedings of the 14th SEGJ International Symposium, 2021, pp.51-54.
- 47) 小川大輝, 濱 友紀, 浅森浩一, 上田 匠, MT 法時系列データ処理における連続ウェーブレット変換の最適な計算設定の提案, 物理探査, vol.75, 2022, pp.38-55.
- 48) Ogawa, H., Asamori, K., Negi, T. and Ueda, T., A novel method for processing noisy magnetotelluric data based on independence of signal sources and continuity of response functions, Journal of Applied Geophysics, vol.213, 105012, 2023, doi:10.1016/j.jappgeo.2023.105012.
- 49) Nishiyama, N., Suzuki, K., Tanaka, K., Chigira, M., Proposed a survey system to clarify the distribution and flow model of high-salinity groundwater by resistivity exploration and geological survey, Proceedings of the 14th SEGJ International Symposium, 2021, pp.182-185.
- 50) 産業技術総合研究所地質調査総合センター編, 日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース, 数値地質図 P-5, 2004.
- 51) 産業技術総合研究所深部地質環境研究センター編, 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方—, 産業技術総合研究所地質調査総合センター研究資料集, no.459, 2007, 191p.
- 52) 産業技術総合研究所深部地質環境研究コア編, 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—立地要件への適合性とその根拠となる調査結果の妥当性—, 産業技術総合研究所地質調査総合センター研究資料集, no.560, 2012, 112p.
- 53) 尾山洋一, 高橋正明, 塚本 斉, 風早康平, 安原正也, 高橋 浩, 森川徳敏, 大和田道子, 芝原暁彦, 稲村明彦, 日本列島の非火山地域における深層地下水水質と地質との関係について, 原子力バックエンド研究, vol.18, no.1, 2011, pp.25-34.
- 54) 風早康平, 高橋正明, 安原正也, 西尾嘉朗, 稲村明彦, 森川徳敏, 佐藤 努, 高橋 浩, 北岡豪一, 大沢信二, 尾山洋一, 大和田道子, 塚本 斉, 堀口桂香, 戸崎裕貴, 切田 司, 西南日本におけるスラブ起源深部流体の分布と特徴, 日本水文科学会誌, vol.44, no.1, 2014, pp.3-16.
- 55) Sparks, R.S.J., The dynamics of bubble formation and growth in magmas: A review and analysis, Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol.3, no.1-2, 1978, pp.1-37.
- 56) Peacock, S.A., Fluid processes in subduction zones, Science, vol.248, no.4953, 1990, pp.329-337.

- 57) Kyser, T.K. and Hiatt, E.E., Fluids in sedimentary basins: an introduction, *Journal of Geochemical Exploration*, vol.80, no.2-3, 2003, pp.139-149.
- 58) Miyashiro, A., *Metamorphic Petrology*, UCL Press, London, 1994, 404p.
- 59) Umeda, K., Kusano, T., Asamori, K. and McCrank, G.F., Relationship between $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios and subduction of the Philippine Sea plate beneath southwest Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.117, no.B10, 2012, doi:10.1029/2012JB009409.
- 60) 網田和宏, 風早康平, 森川徳敏, 大沢信二, 西村光史, 山田 誠, 三島壮智, 平島崇男, 中央構造線沿いに湧出する高塩分泉の起源—プレート脱水流体起源の可能性についての水文化学的検討—, *日本水文科学会誌*, vol.44, no.1, 2014, pp.17-38.
- 61) 産業技術総合研究所, 平成 27 年度原子力発電施設等安全技術対策委託費(自然事象等の長期予測に関する予察的調査)事業 平成 27 年度事業報告, 2016, 296p.
- 62) 富岡祐一, 近藤浩文, 楠原文武, 長谷川琢磨, 太田朋子, 地下水溶存物質に着目した深部流体の起源と影響領域の評価手法の検討, *原子力バックエンド研究*, vol.29, no.2, 2022, pp.82-100.
- 63) Umeda, K., Asamori, K. and Kusano, T., Release of mantle and crustal helium from a fault following an inland earthquake, *Applied Geochemistry*, vol.37, 2013, pp.134-141.
- 64) 平塚晋也, 浅森浩一, 雑賀 敦, S 波スプリッティング解析を用いたスラブ起源流体の移行経路推定の試み, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, 2020, SSS11-P02.
- 65) Nakajima, J., Crustal structure beneath earthquake swarm in the Noto peninsula, Japan, *Earth, Planets and Space*, vol.74, no.160, 2022, doi:10.1186/s40623-022-01719-x.
- 66) 笠原慶一, 杉村 新編, 現在および第四紀, 変動する地球 I, 岩波書店, 1978, 296p.
- 67) 松田時彦, 地殻運動からみた第三紀/第四紀—第四紀地殻運動の様観の検討—, *月刊地球*, vol.10, no.10, 1988, pp.599-603.
- 68) 道家涼介, 谷川晋一, 安江健一, 中安昭夫, 新里忠史, 梅田浩司, 田中竹延, 日本列島における活断層の活動開始時期の空間的特徴, *活断層研究*, vol.37, 2012, pp.1-15.
- 69) 尾上博則, 小坂 寛, 松岡稔幸, 小松哲也, 竹内竜史, 岩月輝希, 安江健一, 長期的な地形変化と気候変動による地下水流動状態の変動性評価手法の構築, *原子力バックエンド研究*, vol.26, 2019, pp.3-14.
- 70) 丹羽正和, 三箇智二, 小松哲也, 尾上博則, 松岡稔幸, 復元古地形の妥当性確認としての地形変化シミュレーションの適用性, *日本応用地質学会平成 30 年度研究発表会*, 2018, P49.
- 71) Shimizu, M., Sano, N., Ueki, T., Komatsu, T., Yasue, K. and Niwa, M., Provenance identification based on EPMA analyses of heavy minerals: Case study of the Toki Sand and Gravel Formation, central Japan, *Island Arc*, vol.28, no.2, 2019, doi:10.1111/iar.12295.
- 72) 代永佑輔, 佐野直美, 雨宮浩樹, 小北康弘, 丹羽正和, 安江健一, EPMA による重鉱物の迅速な定量分析を用いた後背地解析: 北海道幌延地域の事例, *応用地質*, vol.62, no.1, 2021, pp.2-12.
- 73) 東宮昭彦, 島弧火山の寿命に対応するマントルダイアピールの大きさ, *火山*, vol.36, no.2, 1991,

pp.211-221.

- 74) Yuguchi, T., Ishibashi, K., Sakata, S., Yokoyama, T., Itoh, D., Ogita, Y., Yagi, K. and Ohno, T., Simultaneous determination of zircon U-Pb age and titanium concentration using LA-ICP-MS for crystallization age and temperature, *Lithos*, vols.372-373, 105682, 2020, doi:10.1016/j.lithos.2020.105682.
- 75) Yuguchi, T., Yamazaki, H., Ishibashi, K., Sakata, S., Yokoyama, T., Suzuki, S., Ogita, Y., Sando, K., Imura, T. and Ohno, T., Simultaneous determination of zircon crystallisation age and temperature: Common thermal evolution of mafic magmatic enclaves and host granites in the Kurobegawa granite, central Japan, *Journal of Asian Earth Sciences*, vol.226, 105075, 2022, doi: 10.1016/j.jseaes.2021.105075.
- 76) 鏡味沙耶, 横山立憲, 梅田浩司, 東濃地科学センターにおける火山ガラスの化学組成分析手法; EPMAを用いた主要元素分析及びLA-ICP-MSによる微量元素分析, *JAEA-Testing 2021-001*, 2021, 49p.
- 77) Ito, H., Zircon U-Th-Pb dating using LA-ICP-MS: Simultaneous U-Pb and U-Th dating on the 0.1 Ma Toya Tephra, Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol.289, 2014, pp.210-223.
- 78) Guillong, M., Schmitt, A.K. and Bachmann, O., Comment on “Zircon U-Th-Pb dating using LA-ICP-MS: Simultaneous U-Pb and U-Th dating on 0.1 Ma Toya Tephra, Japan” by Hisatoshi Ito, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol.296, 2015, pp.101-103.
- 79) Niki, S., Kosugi, S., Iwano H., Danhara, T. and Hirata, T., Development of an *In Situ* U-Th disequilibrium dating method utilising multiple-spot femtosecond laser Ablation-CRC-ICP-MS, *Geostandards and Geoanalytical Research*, vol.46, no.4, 2022, pp.589-602.
- 80) Thomsen, K.J., Murray, A.S., Jain, M. and Bøtter-Jensen, L., Laboratory fading rates of various luminescence signals from feldspar-rich sediment extracts, *Radiation Measurements*, vol.43, no.9-10, 2008, pp.1474-1486.
- 81) 小形 学, 小松哲也, 中西利典, 長石光ルミネッセンス(OSL)年代測定法を用いた穿入蛇行河川堆積物の年代推定: 紀伊山地十津川の事例, *第四紀研究*, vol.60, no.2, 2021, pp.27-41.
- 82) Herman, F., Rhodes, E.J., Braun, J. and Heiniger, L., Uniform erosion rates and relief amplitude during glacial cycles in the Southern Alps of New Zealand, as revealed from OSL-thermochronology, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.297, no.1-2, 2010, pp.183-189.
- 83) King, G.E., Herman, F., Lambert, R., Valla, P.G. and Guralnik, B., Multi-OSL-thermochronometry of feldspar, *Quaternary Geochronology*, vol.33, 2016, pp.76-87.
- 84) Herman, F. and King, G.E., Luminescence thermochronometry: Investigating the link between mountain erosion, tectonics and climate, *Elements*, vol.14, no.1, 2018, pp.33-38.
- 85) Guralnik, B., Jain, M., Herman, F., Ankjærgaard, C., Murray, A.S., Valla, P.G., Preusser, F., King, G.E., Chen, R., Lowick, S.E., Kook, M. and Rhodes, E.J., OSL-thermochronometry of feldspar from the KTB borehole, Germany, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.423, 2015, pp.232-243.

- 86) 魚住直己, 村上真也, 大石保政, 河村秀紀, 超深地層研究所計画における試錐調査(MIZ-1 号孔), JNC TJ7440 2005-091, 2005, 1833p.
- 87) 山田隆二, 小村健太朗, 池田隆司, 野島断層における深層掘削調査の概要と岩石物性試験結果(平林・岩尾・甲山), 防災科学技術研究所研究資料, no.371, 2012, 27p.
- 88) Ogata, M., King, G. E., Herman, F. and Sueoka, S., Reconstructing the thermal structure of shallow crust in the Tono region using multi-OSL-thermometry of K-feldspar from deep borehole core, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.591, 117607, 2022, doi: 10.1016/j.epsl.2022.117607.
- 89) Ketcham, R.A., Donelick, R.A. and Carlson, W.D., Variability of apatite fission-track annealing kinetics: III. Extrapolation to geological time scales, *American Mineralogist*, vol.84, no.9, 1999, pp.1235-1255.
- 90) Ketcham, R.A., *Fission-track annealing: From geologic observations to thermal history modeling, Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*, 2019, pp.49-75.
- 91) Ketcham, R.A., Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data, *Review in Mineralogy and Geochemistry*, vol.58, no.1, 2005, pp.275-314.
- 92) Gallagher, K., Transdimensional inverse thermal history modeling for quantitative thermochronology, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.117, no.B2, B02408, 2012, doi: 10.1029/2011JB008825.
- 93) Hurford, A.J., An historical perspective on fission-track thermochronology, *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*, 2019, pp.3-23.
- 94) 末岡 茂, 島田耕史, 長谷部徳子, 田上高広, フィッション・トラック法における近年の新たな展開—測定技術の高度化, アニール特性の理解, 新手法の開発—, *RADIOISOTOPES*, vol.70, no.3, 2021, pp.189-207.
- 95) Jones, S., Gleadow, A., Kohn, B. and Reddy, S.M., Etching of fission tracks in monazite: An experimental study, *Terra Nova*, vol.31, no.3, 2019, pp.179-188.
- 96) Jones, S., Gleadow, A. and Kohn, B., Thermal annealing of implanted ^{252}Cf fission tracks in monazite, *Geochronology*, vol.3, no.1, 2021, pp.89-102.
- 97) Gleadow, A., Kohn, B. and Seiler, C., The future of fission-track thermochronology, *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*, 2019, pp.77-92.
- 98) Kohn, B., Chung, L. and Gleadow, A., Fission-track analysis: field collection, sample preparation and data acquisition, *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*, 2019, pp.25-48.
- 99) Saito-Kokubu, Y., Fujita, N., Watanabe, T., Matsubara, A., Ishizaka, C., Miyake, M., Nishio, T., Kato, M., Ogawa, Y., Ishii, M., Kimura, K., Shimada, A. and Ogata, N., Status report of JAEA-AMS-TONO: Research and technical development in the last four years, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol.539, 2023, pp.68-72.
- 100) Mitsuguchi, T., Okabe, N., Yokoyama, Y., Yoneda, M., Shibata, Y., Fujita, N., Watanabe, T. and Saito-

- Kokubu, Y., $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ and $\Delta^{14}\text{C}$ records in a modern coral from Rowley Shoals off northwestern Australia reflect the 20th-century human nuclear activities and ocean/atmosphere circulations, *Journal of Environmental Radioactivity*, vols.235-236, 106593, 2021, doi: 10.1016/j.jenvrad.2021.106593.
- 101) Watanabe, T., Fujita, N., Matsubara, A., Miyake, M., Nishio, T., Ishizaka, C. and Saito-Kokubu, Y., Preliminary report on small-mass graphitization for radiocarbon dating using EA-AGE3 at JAEA-AMS-TONO, *Geochemical Journal*, vol.55, no.4, 2021, pp.277-281.
- 102) Matsubara, A., Fujita, N. and Kimura, K., A study of surface stripper for the AMS system with a footprint below 2 m × 2 m, *Proceedings of the 8th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium and the 22nd Japan Accelerator Mass Spectrometry symposium*, 2020, pp.57-59.
- 103) Fujita, N., Matsubara, A., Kimura, K., Jinno, S. and Saito-Kokubu, Y., Project for development of a downsized AMS system based on the surface stripper technique, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol.532, 2022, pp.13-18.

This is a blank page.

