JAEA-Review
2026-028
DOI:10.11484/jaea-review-2026-028

地質環境の長期安定性に関する研究 年度計画書（令和8年度）

Research Plan on Geosphere Stability for Long-term Isolation of Radioactive Waste
(Scientific Program for Fiscal Year 2026)

浅森 浩一　末岡 茂　小松 哲也　小形 学
内田 真緒　西山 成哲　田中 桐葉　秋山 玲奈
小林 智晴　三ツ口 丈裕　和田 純一　南 沙樹
梶田 侑弥　花室 孝広　渡邊 隆広　奈良 郁子
藤田 奈津子　横山 立憲　神野 智史　前田 祐輔
福田 将眞　鏡味 沙耶　齊藤 天晴　南谷 史菜
田村 達也　西尾 智博

Koichi ASAMORI, Shigeru SUEOKA, Tetsuya KOMATSU, Manabu OGATA
Mao UCHIDA, Nariaki NISHIYAMA, Kiriha TANAKA, Reina AKIYAMA
Tomoharu KOBAYASHI, Takehiro MITSUGUCHI, Jun-ichi WADA, Saki MINAMI
Yuya KAJITA, Takahiro HANAMURO, Takahiro WATANABE, Fumiko NARA
Natsuko FUJITA, Tatsunori YOKOYAMA, Satoshi JINNO, Yusuke MAETA
Shoma FUKUDA, Saya KAGAMI, Takaharu SAITO, Fumina MINAMITANI
Tatsuya TAMURA and Tomohiro NISHIO

東濃地科学センター
Tono Geoscience Center

September 2026
Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
原子力科学研究所　プロモーション・オフィス　科学技術情報課
〒 319-1195　茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
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
Library, Institutional Repository and INIS Section, Promotion Office,
Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2026

JAEA-Review 2026-028

地質環境の長期安定性に関する研究　年度計画書（令和 8 年度）

日本原子力研究開発機構
東濃地科学センター

浅森　浩一, 末岡　茂, 小松　哲也, 小形　学, 内田　真緒, 西山　成哲, 田中　桐葉, 秋山　玲奈,
小林　智晴※1, 三ツ口　丈裕※2, 和田　純一※2, 南　沙樹※2, 梶田　侑弥※2,
花室　孝広, 渡邊　隆広, 奈良　郁子, 藤田　奈津子, 横山　立憲, 神野　智史,
前田　祐輔, 福田　将眞, 鏡味　沙耶, 齊藤　天晴,
南谷　史菜※3, 田村　達也※2, 西尾　智博※1

（2026 年 6 月 24 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 8 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 技術開発協力員
※2 特定課題推進員
※3 博士研究員

JAEA-Review 2026-028

Research Plan on Geosphere Stability for Long-term Isolation of Radioactive Waste
(Scientific Program for Fiscal Year 2026)

Koichi ASAMORI, Shigeru SUEOKA, Tetsuya KOMATSU,
Manabu OGATA, Mao UCHIDA, Nariaki NISHIYAMA, Kiriha TANAKA, Reina AKIYAMA,
Tomoharu KOBAYASHI※1, Takehiro MITSUGUCHI※2,
Jun-ichi WADA※2, Saki MINAMI※2, Yuya KAJITA※2,
Takahiro HANAMURO, Takahiro WATANABE, Fumiko NARA,
Natsuko FUJITA, Tatsunori YOKOYAMA, Satoshi JINNO, Yusuke MAETA, Shoma FUKUDA,
Saya KAGAMI, Takaharu SAITO,
Fumina MINAMITANI※3, Tatsuya TAMURA※2 and Tomohiro NISHIO※1

Tono Geoscience Center
Japan Atomic Energy Agency
Izumi-cho, Toki-shi, Gifu-ken

(Received June 24, 2026)

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 2026. The objectives and contents of this research 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 Collaborating Engineer
※2 Special Topic Researcher
※3 Post-Doctoral Fellow

目次

1. はじめに …… 1

2. 令和 8 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 深部流体の分布に関する調査技術 …… 6
2.2 長期予測・影響評価モデルの開発 …… 8
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 捕獲電子を用いた年代測定技術 …… 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 …… 21

Contents

1. Introduction ····· 1

2. Plan of the research and development in fiscal year 2026 ····· 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 detection of geofluids ····· 6
2.2 Development of models for long-term estimation and effective assessment ····· 8
2.3 Development of dating techniques ····· 12
2.3.1 In situ analysis techniques and high-precision isotope analysis techniques ····· 12
2.3.2 Trapped-electron dating techniques ····· 14
2.3.3 Fission track dating method ····· 16
2.3.4 Accelerator mass spectrometry techniques ····· 18

References ····· 21

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震・断層活動や火山・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，1999[1]：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，1999[2]）。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，2000[4]；OECD/NEA, 1999[5]）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，2002[6]：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，2002[7]）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，2003[8]）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，2009[9]）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，2012[10]）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，2012[11]）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，2012[12]）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（現在は，特定放射性廃棄物小委員会の下に設置）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―地質環境特性およ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，2014[13]）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，2016 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，2016[14]）。

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，2018[15]），「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，2023[16]）（以下，「全体計画」）が提示されている。2017 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，2017[17]）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」が 2021 年 2 月に公表されている（原子力発電環境整備機構，2021[18]）。

一方，2020 年に文献調査が始まるなど，処分事業に進捗が見られる中で，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からは，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）が提示された（原子力規制委員会，2022[19]）。また，地層処分技術ワーキンググループでは，各専門分野の有識者を交えて文献調査段階の評価の考え方について議論が重ねられ，その結果を踏まえ，「文献調査段階の評価の考え方」が取りまとめられた（資源エネルギー庁，2023[20]）。

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，2014[13]）に基づき，研究計画を策定した（梅田ほか，2015[21]）。さらにその後，地層処分研究開発調整会議において策定された全体計画にも対応すべく，研究開発を進めてきた。研究開発にあたっては，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（スラブ起源水，化石海水，油田かん水といった非天水起源の地下水；特に，高温，低 pH，高塩濃度といった特徴を有し，地層処分システムに著しい影響を及ぼし得るもの）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。

前述のように，2020 年に文献調査が始まり，今後，文献調査地域の更なる拡充に加え，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現実的に考えられる状況となってきているが，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し的確に技術・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 5 年目にあたる令和 8 年度の研究開発計画を取りまとめた。計画策定にあたっては，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，地層処分技術ワーキンググループ等の国の審議会等の動向，大学等で進められている最新の研究開発の状況に加え，2023 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, 2023[16]）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 8 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の一環である概要調査や精密調査で行われるボーリングや坑道掘削では，未知の断層に遭遇する可能性がある。断層の活動性は，従来，断層の上に載った地層（上載層）の堆積・形成年代が既知であること及び上載層が断層運動による変位・変形などの影響を受けていないことに基づき評価されている（上載地層法）。しかし，自然・人工侵食により上載層が欠如していることも多いため，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てきた。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手法について，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，評価手法の信頼性向上を図る。また，現状では，それぞれの評価手法において，適用対象となる物質や年代に違いがあり，断層近傍での年代のリセット条件が不明瞭でもあることから，単一手法では信頼性の高い活動性評価を行うことは困難である。そのため，実際のサイト選定においては，上述した各種断層活動性評価手法の選択・組み合わせや解釈に関する考え方が体系的に整備されていることも必要である。そこで，近年活動したことが明確である断層を対象としたボーリング及びボーリングコア試料の分析・観察などを行うことで，ボーリングや坑道掘削で遭遇する断層に対する各種断層活動性評価手法の適用可能性・範囲などを検討する。

(2) 実施内容

第 3 期中長期目標期間では，断層破砕帯内物質に含まれる定性的指標（石英等の鉱物粒子の表面構造，Niwa *et al*., 2016[22]），または，定量的指標（鉱物・化学・同位体組成，Niwa *et al*., 2015[23], 2019[24]）を用いた断層活動性評価手法の適用性の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，2021[25]），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，2022[26], 2023[27]）。しかし，適用事例の拡充及び断層破砕帯内物質における元素移動のメカニズム解明が課題として残っている。また，上記以外として，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*., 2017[28]; 末岡ほか，2021[29]），ウラン・トリウム・ヘリウム（(U–Th)/He）年代（Yamada *et al*., 2012[30]），自生のイライトのカリウム・アルゴン（K–Ar）年代（Yamasaki *et al*., 2013[31]; Niwa *et al*., 2016[32]; Zwingmann *et al*., 2024[33]），炭酸塩鉱物のウラン・鉛（U–Pb）年代（Yokoyama *et al*., 2018[34]），石英の電子スピン共鳴（ESR: electron spin resonance）法（Ikeya *et al*., 1982[35]）や石英や長石のルミネッセンス法で検出される捕獲電子（原子力機構・電力中央研究所，2022[26]）等を用いた断層年代測定法が提唱されている。これらは，断層活動の絶対年代を与えることが期待できる評価手法として適用性の検討が進められている。ただし，いずれの手法についても，算出される断層活動年代の不確実性が依然として残っており，地震時の断層活動に伴う年代・信号のリセット条件の検討等といった基礎的な知見の拡充が求められる。

第 4 期中長期目標期間では，断層岩の化学組成を用いた機械学習に基づく断層活動性評価については，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，断層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。断層破砕帯内物質を用いた断層年代測定法については，

基礎的知見を拡充するための実験的検討に加え，従来の手法とは異なる新しい年代測定法の開発にも取り組む。さらに，ボーリング調査や坑道掘削で遭遇する上載地層法の適用が困難な断層の活動性評価技術の構築に向け，各評価技術の相互関係を考慮した最適な技術の選択・組み合わせに関する考え方とその具体的な事例の提示を目指す。

(3) 令和 8 年度の研究計画

① 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

過去に提唱され，現在は発展段階にある断層破砕帯内物質を用いた断層年代測定法については，昨年度実施した高速摩擦試験及び ESR 測定などの各種分析を継続するとともに，異なる地質学的特徴を持つ石英粒子に対しても同様の摩擦実験・分析を実施し，ESR 信号のリセット条件について，より詳細な検討を実施する。従来の手法とは異なる新しい年代測定法については，熱イオン化質量分析法（TIMS）によるイライトのカリウム–カルシウム（K–Ca）年代測定法の確立に向けた K–Ar 法により年代値の得られている年代参照イライト試料（Rochester Shale illite；421.4±8.4 Ma, Zwingmann *et al*., 2019[36)]）の分析を行っていく。また，断層面から離れた場所（Off-fault）で起こる粉砕（Pulverization）に伴う捕獲電子の挙動に着目した新しい断層活動性評価手法については，Pulverization を模擬した岩石衝突試験や天然断層試料の分析を継続して実施する。

② 体系的な調査・評価技術の整備

上載地層法の適用が困難な断層の活動性の評価については，断層の直接年代測定法に代表される単一の決定的な評価手法が開発途上にあるため，断層破砕物質から取得した観察・計測データ，化学データ，年代学的データの総合的な判断に基づいて行われるものと考えられる。こうした背景から，断層破砕物質を対象とした観察・計測，化学分析，年代測定における先進的な研究開発を進めていくことと，断層の活動性評価において有効な既存手法の順序・組み合わせを探求し，その考え方や具体的な事例を提示することの両方が課題になると考えられる。そこで，これら 2 つの課題に対応するため，最新活動時期が判明している活断層の断層コアを貫くボーリング調査を実施し，得られた試料を用いて各種分析を実施するとともに，断層活動と測地学的観測による地殻変動の関連性について検討する。

研究開発の事例対象とする活断層の条件については，断層の直接年代測定法である ESR 法と OSL 法の研究開発に適した条件を考慮し，具体的には以下とした。(1) ESR 法と OSL 法の対象鉱物である石英・長石を産出する地質であること，(2) 最新活動時期に関する情報が歴史記録とトレンチ調査から得られていること，(3) ボーリングコアでの最新活動面の認定を容易にさせるため，断層を介して異なる地質が分布していること，(4) そのような地質境界としての断層面が，石英 OSL の年代リセットが期待できる深さ（花崗岩起源の石英で 42 m 以上，Oohashi *et al*., 2020[37)]；堆積岩起源の石英で 116 m 以上，阿久津ほか，2021[38)]）において存在すること。全国の活断層を対象とした文献レビューに基づいて，条件を満たす活断層として，木津川断層帯の伊賀断層を選定した。

ボーリング調査では，地下数十 m までの浅部にある断層コアと地下百数十 m 以深の深部にある断層コアを採取することを計画している。これは，異なる深度にある断層コア中の断層破砕物質を分析することで，深度による影響が予想されるデータ，例えば，風化による断層破砕物質の変質度合いや摩擦熱による断層年代のリセット条件に関するデータが得られると期待できるためである。令和 7 年度までに 4 地点においてボーリング調査を実施し，地下約 11 m, 15 m，40 m，57~58 m に位置する断層コアを採取している。そのため令和 8 年度は，地下百数十 m 以深に位置する断層コアの採取を試みるとともに，これまでに採取したボーリングコアを用いた観察・計測，化学分析，年代測定を進めていく予定である。

2.1.2 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，高塩濃度，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，2014[13]）。本研究では，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，非火山性の深部流体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が（例えば，産業技術総合研究所地質調査総合センター編，2004[39]；産業技術総合研究所深部地質環境研究センター編，2007[40]；産業技術総合研究所深部地質環境研究コア編，2012[41]），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，2011[42]；風早ほか，2014[43]）。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, 1978[44]）のほか，スラブ起源流体（Peacock, 1990[45]）や続成脱水流体（Kyser and Hiatt, 2003[46]），変成脱水流体（Miyashiro, 1994[47]）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を用いた手法が提案されているほか（例えば，Umeda *et al*., 2012[48]；網田ほか，2014[49]），Li-Cl-Br 相対組成や Li/Cl 比，ヨウ素-129（^{129}I）/I 等による識別可能性も示されてきている（風早ほか，2014[43]；産業技術総合研究所，2016[50]；原子力機構・電力中央研究所，2021[51]，富岡ほか，2022[52]）。

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*., 2013[53]，2013[54]）。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，2007[40]；産業技術総合研究所深部地質環境研究コア編，2012[41]）。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，2018[55]）。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，2022[56]；原子力機構・電力中央研究所，2021[51]；小川ほか，2024[57]）。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，AMT 法電磁探査等の物理探査の実施を検討する。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 8 年度の研究計画

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。これまで，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実施した。露頭の割れ目調査の結果，湧出しやすい箇所を特定する際の指標として割れ目間距離と，令和 7 年度から新たに取り入れた，割れ目の傾斜方向を加味した傾斜方向ベクトル累積プロットの有効性が高いことが示された。令和 8 年度は，解析手法の適用性の確認のため過年度までに取得した割れ目調査データを使用し，各解析手法による割れ目の異方性検出の適用性の検討，傾斜方向ベクトル累積プロットのより多くの地域や割れ目の形態に対する適用性の検討を行う。

また，深部流体の流入・移行経路に関する情報を得る上で，上に述べた調査手法で得られる情報や空間解像度にはギャップがあり，このギャップを埋めるための評価手法の整備が必要である。令和 7 年度には，深部流体の湧出が確認される地域において，地下 1,000 m 程度までを対象とした電磁探査（AMT 法）の実施に向けた探査計画を立案し，電力中央研究所と共同で合計 6 測点の探査を実施した。令和 8 年度は，湧出箇所及びその周辺を含めた広域的な比抵抗構造を得られるよう，引き続き流体湧出箇所周辺での AMT 法探査を実施する。また，同地域における重力探査も，電力中央研究所と共同で実施する。ここで得られた結果を基に，地下の地質構造及び深部流体の空間分布の推定を行う。

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・速度の検討事例を蓄積する。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）[58]及び松田（1988）[59]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, 2012[60]），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, 2018[61]）。

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, 2019[62]）。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, 2018[61]; 丹羽ほか, 2018[63]; Shimizu *et al*., 2019[64]; 代永ほか, 2021[65]）。

地層処分のサイト選定・地層処分場の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

み合わせて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，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, 2018[15]）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, 2019[66], 2020[67], 2021[51], 2022[26], 2023[27] 2024[68]）。一方，昨今行われてきた，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（資源エネルギー庁, 2023[20]）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, 2022[19]）に係る議論の中では，将来新たに火山が発生する可能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，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, 2023[16]）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 8 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

文献調査段階の評価の考え方（資源エネルギー庁, 2023[20]）に係る議論の過程で表出した火山・火成活動の判断方法に係る課題に取り組み，地球化学的・地質学的指標による火山の分類（火山のグルーピング）のための基盤的知見の収集や地形学的指標による火山中心に係る評価手法の提示を目的に客観的指標による検討を進めている。さらに，火山・火成活動の影響範囲の検討に重要な情報となる火山岩岩脈の分布範囲について，地質図幅からデータ収集を行っており，令和 7 年度までの検討において西南日本を対象として抽出された火成岩岩脈等の数は，全体で 1,665 個であった。また，36 個の古カルデラ・コールドロンの情報も既往研究の文献を収集し，整理した。その結果，我が国の中部地方から九州地方までの西南日本を対象とした検討では，第四紀よりも古い時代の火成岩岩脈は第四紀火山との関連性が低いことが示唆された。また，第四紀よりも古い時代の火成活動についても少数の例外を除き，大半が長径 30 km（半径 15 km）以内で生じていた傾向が認められた。以上のような岩脈情報の網羅的な収集と解析は，マグマの影響範囲を調査・評価する上での基礎情報としても有益であると考えられる。例えば，我が国における第四紀よりも前の活動を含む火山活動の範囲の把握，火成活動に伴う岩脈の分布範囲が古い火山活動においても第四紀火山と同様であったかどうかなどの検討，さらに，火山活動に関する将来の影響範囲の検討に寄与すると考えられる。令和 8 年度においても，特に九州の島嶼部について重点的に情報収集範囲を拡張するとともにデータベース化し，既存の火山の将来的な発達や，新規火山の発生に係る評価を行うための岩脈形成に関するモデルの構築等への貢献を目指す。

地形学的指標による火山中心に係る評価手法については，地形データを用いた火山の活動中心及び活動規模の評価方法の検討を進めている。令和 7 年度においては，第四紀火山の活動中心を推定するための手法として，等高線の重心を推定する手法及び山体の体積を算出する手法の 2 つについて，それぞれの手法の構築に向けた検討を実施した。等高線の重心について，火道の位置が明らかな愛鷹山において解析した結果，山体地形の侵食度合いが強い高標高部の等高線より，低標高部の等高線の重心が最も火道に近い位置にプロットされる結果となった。山体地形の侵食度合いは高度-面積曲線の傾斜により評価できる可能性があり，傾斜が急な部分ほど噴出当時の地形をよく残存していると考えられた。以上のことから，火山の山体の等高線の重心及び高度-面積曲線を用いることで火山の活動中心を推定することが可能であるとの見通しを得た。山体の体積の算出は，QGIS のツールを用いることで山体の基

底部からの地形的な高まりの部分のみを抽出し，その体積を計算する手法を構築した。ここで構築した手法による各火山の山体の体積は，先行研究で推定されている噴出量とオーダースケールで相関する結果を得た。この結果は，詳細な調査が行われていない火山に対しても噴出量を推定することができる可能性を示すものであり，複数の山体に分かれた火山の活動中心の推定に寄与することが期待される結果である。これらの結果を受け令和 8 年度においては，解析対象とする火山の拡充や比較対象となる各火山の既存の噴出量データの精査を通じて，手法の適用性に関する検討を進める。

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，非火山地域に潜在する火成活動の評価手法やその時空間的な安定性についても検討を進めている。令和 5 年度より，東北地方の非火山性山地を対象とした事例研究に着手し，第四紀の火山活動が認められていない太平山地の周辺において MT 法観測を行った。また，太平山地及び飯豊山地の既往試料の一部について低温領域の熱年代法の適用を試みた。令和 7 年度までに，太平山地における MT 法観測データの解析，太平山地・飯豊山地における熱年代分析を実施した。太平山地においては，地下に火山地域に見られるようなマントルから供給される高温流体の分布は認められなかった。一方で，既に高温流体の分布が認められている飯豊山地では，MT 法によって分布領域が推定されている地点を中心に熱年代値の有意な減少を検出できた。この結果は，高温流体の存在により直上の地殻強度が熱で弱化したことで山地全体がドーム状に隆起したことでもたらされたと解釈でき，山地縦断方向（北西-南東方向）については地下の高温流体と隆起形態の関連性が示唆される。令和 8 年度は，令和 7 年度に飯豊山地において採取した地質試料について熱年代データを拡充する。また，過年度に得られた知見も踏まえて，山地の隆起形態と地下の高温流体の時空間的安定性の関係に関する考え方を整理する。

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

隆起速度の評価においては，従来，放射性炭素（^{14}C 法）年代測定法や火山灰（テフラ）編年学により離水時期が制約された海成・河成段丘の高度分布に基づいてきた。裏を返せば，段丘が存在しない地域や，存在しても上記の年代測定法が適用できない場合（有機物やテフラが含まれない，^{14}C 法の年代適用範囲を超える等）では，隆起速度の評価が困難になる。本課題においては，1）沿岸部の離水地形におけるマルチ年代測定法の整備と 2）沿岸部から内陸部にかけての隆起・侵食の変動傾向の評価手法の構築を行う。1）では，離水地形を対象とした光ルミネッセンス（OSL）法・宇宙線生成核種（TCN）法を含めた複数の年代測定結果を統合的に解釈する方法（マルチ年代測定法に基づく編年手法）の妥当性・不確実性の検証，及び地形・層序の定性的な情報のみに基づく編年しかされていない地域へのマルチ年代測定法の適用性の確認を行う。令和 7 年度までに，能登半島珠洲市の年代既知の MIS5c 海成段丘の OSL 年代測定及び TCN 測定を実施した。令和 8 年度は，同地域の年代既知の MIS5e 海成段丘の海成堆積物及びそれを被覆する堆積物を採取し，テフラ分析，OSL 測定，TCN 測定を実施する。2）では，旧流路堆積物に基づく下刻・隆起速度評価法（原子力機構・電力中央研究所，2023[27]）の信頼性向上及び隆起・侵食の三次元的変動傾向を把握する体系的手法の提示を目的として，大井川の上流域～下流域の河成地形を対象に事例研究を行う。令和 7 年度までに，大井川上流域～中流域の穿入蛇行の痕跡地形（環流旧河谷）で採取したボーリングコアの OSL 年代測定を実施し，その結果を基に下刻速度を推定した。令和 8 年度は，これらの下刻速度の時間・空間代表性を検討するために，これまでの調査地点よりも上流側，もしくは下流側において，OSL 年代測定法に適した砂質の旧流路堆積物，ないしは旧流路に近い場に堆積したと考えられる堆積物（例えば，細粒な洪水堆積物からなる淀み水堆積物）の探索を進め，それらの採取を試みる。

地質環境の長期安定性評価では，山地・丘陵における過去及び将来 10 万年間程度の削剥量の評価

が求められている（資源エネルギー庁, 2023[16]）。しかし，日本列島の大半の山地・丘陵における削剥速度は 0.1～数 mm/yr 程度であり（例えば，藤原ほか，1999[69]），この速度域において，10 万年間の削剥量を直接的に求める手法は確立されていない。そのため，日本列島における当該期間の削剥量については，複数の手法から求められた削剥速度（mm/yr）に 10 万年を乗じた値に基づいて評価されるものと考えられる。

山地・丘陵における削剥速度を求める方法の一つに，数値標高モデルから算出された斜面傾斜などの地形の形態要素の定量的特徴（以下，「地形量」）と削剥速度の関係式を利用するという方法がある。この方法は，地形量を削剥速度に読み替えるものなので，利便性とともに，全国を対象にできる点で空間網羅性においても優れている。しかし，現在，地層処分事業（例えば，原子力発電環境整備機構, 2024[70]，2024[71]）において用いられている地形量と削剥速度の関係式は，数十年前の研究成果（例えば，藤原ほか，1999[69]；長谷川ほか, 2005[72]）に基づいたものである。そのため，そのような地形量と削剥速度の関係式に対して，最近数十年間の科学・技術の進展をフォローした見直し，ないしは更新が必要であると考えられる。そして，最近数十年間の科学・技術の進展のうち，地形量に関するものの一つが，1 m メッシュの高解像度地形データを国内の半分弱の地域で利用できるようになったこと（国土地理院, 2025[73]）であり，削剥速度に関するものの一つが，TCN 法から数百年から数千年間程度の削剥速度を求められるようになったこと（例えば，Korup *et al*., 2014[74]；松四ほか, 2014[75]）である。このような背景から，高解像度地形データから算出した各種地形量と削剥速度との相関関係を調査するための基礎資料として，TCN 法に基づく削剥速度データの拡充を令和 7 年度より開始した。令和 7 年度の研究では，国内における既存のデータ 77 件に，新たに 26 件を追加した。令和 8 年度の研究においても引き続きデータの拡充を進める予定である。

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，地表の隆起・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異常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（LA）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），熱イオン化質量分析法（TIMS：Thermal ionization mass spectrometry）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粒子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，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*., 2018[34]），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*., 2020[76], 2022[77], 2023[78], 2024[79]）。加えて，1 台の LA 装置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（原田ほか，2023[80]）。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，2021[81]）。また，年代測定のために，親－子孫核種の存在量の二次元的な情報を事前に把握する際に有効な微量元素マッピング（イメージング）技術を整備し（Yokoyama *et al*., 2018[34]），この技術は岩石中での微量元素の移行を把握する際にも利用している。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，これらを適宜実施する。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 8 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

令和 5~7 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を，各種試料に適宜適用し，データの蓄積を図る。また，これまでエキシマレーザー（ナノ秒レーザー）を用いてきた各種元素・同位体分析手法については，令和 5 年度に導入したフェムト秒レーザーアブレーション装置を用いて分析手法の高度化を適宜図っていく。

② 既存技術の適用性拡大

これまでに既存技術の適用性拡大として進めてきたチタナイトの U–Pb 法による年代測定について適用事例の蓄積を図る。また，引き続きアパタイトやバデレアイト等の別の鉱物への適用も検討する。加えて，これまで火山ガラスやアパタイトを対象として整備した LA-ICP-MS による微量元素分析法についても，火成岩に含まれる他の鉱物（例えば，モナザイト）への適用を検討する。

③ 湿式分析による高精度同位体分析手法の確立

令和 7 年度までに検討した湿式法による各種同位体分析の前処理手法について整理し，適切な化学前処理を施した実試料について，ICP-MS や TIMS による同位体分析を実施していく。

④ U–Th 非平衡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として整備を進めている U–Th 非平衡年代測定について，令和 8 年度は，その高度化を進める。例えばジルコンに適用してきた本手法を，ジルコンを含有しない岩石に適用可能とするため，他の鉱物や全岩試料を対象として分析を試行する。また，ジルコンの U–Th 非平衡年代測定については，事例研究の蓄積を図る。

2.3.2 捕獲電子を用いた年代測定技術

(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では，将来の隆起・侵食の予測の信頼性向上のため，過去の隆起・侵食量の把握が求められる。これらを把握する年代測定技術として，自然放射線によって鉱物内に生じる捕獲電子を用いる光ルミネッセンス（optically stimulated luminescence：OSL）法と電子スピン共鳴（electron spin resonance：ESR）法が期待される。OSL 法の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～十数万年，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 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り，隆起量評価の指標となる海成段丘等に適用される。また，捕獲電子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（侵食史）の推定にも利用される。近年では，OSL 法の適用範囲の拡充を目的とし，礫を対象とした OSL 年代測定法の開発が進められている。他方，ESR 法は石英を測定対象とし，数千年～数百万年の年代適用範囲を持つ。ESR 信号は OSL 信号と比べて，光刺激に対する感度が低いため，完全に解放されることはないが，そのことを考慮した堆積年代測定法の開発がなされている。熱年代法としては，OSL 法と同程度の 100 °C 以下の閉鎖温度を持ちつつ，OSL 法を上回る過去数百万年までの熱史推定のポテンシャルを有しているため，地下約 1 km 以浅の侵食評価に活用可能な新たな手法として近年注目されている。本研究では，堆積物の編年に基づいた隆起評価及び地殻浅部の侵食評価に資するため，捕獲電子を用いた年代測定技術の高度化を目的とする。

(2) 実施内容

本研究では，OSL 法の適用範囲の拡充を目的に，①礫の OSL 年代測定法の整備・高度化を行う。また，新たな熱年代法の導入を目的に，②ESR 熱年代法の実用化・高度化についても検討する。

① 礫の OSL 年代測定法の整備・高度化

堆積物の埋没年代を目的とするルミネッセンス年代測定法は，埋没前の太陽光曝によって年代が初期化していることを前提とする。光曝による年代の初期化率（ルミネッセンス信号強度の減衰率）は，試料表層からの深度と露光時間に依存する（Sohbati *et al*., 2012[82]）。OSL 年代測定で一般的に利用される泥～砂サイズ（10^0～10^2 μm オーダー）の試料の場合，石英は数十秒，長石は数千秒の光曝で試料全体の年代がほぼ初期化されるため（Godfrey-Smith *et al*., 1988[83]; Tsukamoto *et al*., 2017[84]; 塚本, 2018[85]），埋没前の年代初期化の前提を満たしていることが多い。一方，試料径が数 cm を超えると，年単位の光曝時間が必要と推測されているため（Sohbati *et al*., 2012[82]），前提を満たす試料は限られる。これに対し，近年，礫試料のコアを表層から内部にかけて円盤状に切断し，それらを測定することで OSL 信号強度の深度プロファイルを求める方法が開発され，礫の OSL 年代測定が可能となった（Jenkins *et al*., 2018[86]; Rades *et al*., 2018[87]; 塚本, 2018[85]）。現在までに，本手法の適用事例数は国外では着実に増えてきているが，国内では数例に留まっている。本研究では，OSL 法の適用範囲の拡充を目的に，礫の OSL 年代測定の事例を蓄積し，信頼性の向上，及び適用条件の整理を行う。

② ESR 熱年代法の実用化・高度化

ESR 法は，捕獲電子が磁場中に置かれ，電磁波を照射されたときに電磁波を吸収する，電子スピン共鳴現象を利用した線量計測法である。ESR 熱年代法は，OSL 熱年代法と同程度の 100 °C 以下の閉鎖温度を持ちつつ，適用年代上限が数百万年以上と一桁以上長く，より多様な地域における侵食評価へ

の利用が期待できる。しかしながら，ESR 熱年代法は本格的な技術開発から数年しか経過しておらず，未だ開発段階の手法であり，近年の適用事例も日本アルプス（King *et al*., 2020 [88], 2023 [89]; Bartz *et al*., 2024[90]），オトウェイ盆地（オーストラリア；Fang and Grün, 2020 [91]），ローヌ渓谷（スイス；Wen *et al*., 2024 [92]）等の数例に留まる。本研究では，測定法の体系化及び信頼性向上を目的として，ESR 熱年代法の実験環境の整備及び適用事例の蓄積・拡充を行う。

(3) 令和 8 年度の研究計画

① 礫の OSL 年代測定法の整備・高度化

令和 7 年度までに，礫試料整形手順の整備，及び年代既知の MIS5e 海成段丘の砂岩礫を対象に礫の OSL 測定プロトコルの検討を行った。令和 8 年度は，礫の OSL 年代測定に向けて，スライス試料を対象とした ^{90}Sr β 線源の線量率校正法を検討する。また，試料採取位置の放射線量率が不均質な場における年間線量率の補正法を整備する。これらの後，年代既知・未知の試料を対象に，礫の OSL 年代測定の事例を蓄積する。

② ESR 熱年代法の実用化・高度化

令和 7 年度は，日本に分布する飛騨山脈や谷川岳の露頭，六甲山地のボーリングコア試料から採取された花崗岩に含まれる石英を対象とした ESR 熱年代法に必要な分析のうち，令和 6 年度に実施できなかった分析をライプニッツ応用地球物理学研究所（LIAG，ドイツ）にて実施した。また，東濃地科学センター（東濃）において取得した年間線量率も用いて熱史逆解析を試行し，上記 3 地域の熱史（岩石の冷却過程や隆起・侵食速度など）を予察的に復元し，議論を行った。令和 8 年度は，台湾に分布する雪山山脈の氷河地形から採取した変成砂岩と日本に分布する六甲山地及び信楽山地の露頭から採取する花崗岩から石英を抽出し，LIAG にて ESR 熱年代法に必要な分析を行う。また，東濃において，年間線量率の算出とドイツで取得するデータを用いた熱史逆解析を実施し，これらの地域の熱史を復元・議論する。

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き，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，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 等で U 濃度を測定することによって年代測定を行う。FT 法の閉鎖温度は，アパタイトで 100 ℃前後（例えば，Ketcham *et al*., 1999[93]），ジルコンで 300 ℃程度（Ketcham, 2019[94]）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 の長さが段階的に短縮・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, 2005[95]；QTQt：Gallagher, 2012[96]）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，土岐地球年代学研究所では，我が国で唯一となる 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 分析の更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，火山ガラスが測定対象として用いられてきた（Hurford, 2019[97]）。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, 2021[98]），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*., 2019[99], 2021[100]）において，FT 年代測定の適用範囲を拡大できる可能性がある。ただし，モナザイト FT 法（MFT 法）の閉鎖温度に関する基礎研究（Weise *et al*., 2009[101]; Jones *et al*., 2021[100]）では，Kr や Cf 核分裂片を用いた人工トラックを用いた短時間加熱実験の結果のみが報告されており，地質時間スケールにおける閉鎖温度の決定のためには熱履歴が既知の地質試料を用いた検討が必須である。

以上のような現状を受け，令和 8 年度においては，令和 7 年度に引き続き 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として，モナザイトにおける地質学的スケールの閉鎖温度の検証及び U 濃度測定用の標準試料の整備として，フラックス法における合成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を図る。

(3) 令和 8 年度の研究計画

F T 法の新たな対象鉱物であるモナザイトを対象として年代測定に向けた技術開発を行う。令和 5 年度は既往研究では扱われてこなかった若いモナザイト試料のエッチング実験を行い，サンプルの年代とエッチングに要する時間の逆相関関係を指摘（Nakajima *et al*., 2024[102]）するとともに，段階エッチングの必要性と適性エッチングの判断基準の議論を行った。令和 6 年度は加速器によるイオン照射後のバデレアイトにおけるエッチングを実施したが，イオントラックの観察には至らなかったため，エッチング条件は不明

なままとなった。モナザイトの U 濃度測定に向けた標準試料の入手においては，不純物が少ない均質なモナザイト結晶をフラックス法により人工合成することに成功した。令和 7 年度は，熱史が既知の大深度ボーリングコア（KTB コア）を用いた FT 長測定を実施した。その結果，MFT 法は，地質学的時間スケールで 30~80℃の領域における熱史の推定に応用できる可能性が示された。また，フラックス法によるモナザイト合成については，合成したモナザイトの主要・微量元素の化学組成マップの評価を行ったところ，主要組成は概ね均質だった一方で，微量元素は一部の元素に不均質性が観察された。これを受けて，令和 8 年度は，KTB コアを用いた MFT 年代測定を行い，より詳細なアニーリング挙動の推定を試みる。結晶合成については，新たな合成レシピを検討し，主要・微量元素ともに均質な鉱物の合成と評価を試みる。

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，地層処分事業・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），ヨウ素-129（^{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 及び小型の 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，前処理の簡便化に重きを置いたイオン源の技術開発，^{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，保存状態の良い地質試料の確保と様々な地質試料に適用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，土岐地球年代学研究所で取り組んでいる様々な分析・年代測定手法に対する試料前処理技術等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，千年から百万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・侵食等の，地表面の物質移動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*., 2023[103]）。^{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}Cl/Cl～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の適用を進め，ルーチン測定を実施している（Mitsuguchi *et al*., 2021[104]）。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*., 2021[105]）。また，約 2 m×2 m 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*., 2020[106] , Fujita *et al*., 2022[107], Jinno *et al*., 2024[108]）。以上のように，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。

第 4 期中長期目標期間では，継続して AMS 装置を小型化するための様々な研究開発を実施する。超小型 AMS の実用化に向けた技術開発では，^{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における荷電変換効率と妨害分子除去率向上に向けた試験を着実に進める。また，前処理を不要とし得るようなイオン源の開発（Minamitani *et al*., 2024[109]）にも着手する。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，^{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。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。

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 50 μg 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。さらに炭素量 100 μg のセメンタイトの形状での測定は 50 μg 炭素量のグラファイトよりも比較的高精度・低バックグラウンド測定を実現しやすいことから並行して開発を進める。また，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 8 年度の研究計画

① AMS 装置の小型化に向けた技術開発

令和 8 年度も引き続き，超小型 AMS 装置の表面ストリッパーの異なる結晶に対して，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 前処理簡便化に向けたイオン源の開発

前処理を簡略化するレーザーアブレーション装置により生成した CO_2 ガス試料を直接 AMS で測定する迅速分析を実現するため，令和 8 年度は木材，炭酸塩，鉄，コンクリートなどさまざまな試料に対して最適なレーザーアブレーションの条件（出力，周波数，パルス幅など）を検討する。発生する CO_2 量と同位体分別，バックグラウンドの評価を実施するため，まずは固体試料（グラファイトもしくは微量セメンタイト）での AMS 測定を行い，並行して JAEA-AMS-TONO-300kV のガスイオン源化も進める。

③ ^{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進める。装置開発のためにイオン源の改良を行い，テストベンチの動作の検証を行う。

④ ^{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。

⑤ 試料前処理技術等の高度化

令和 8 年度も少量試料での試験測定を行い，セメンタイトによる炭素量 100 μg での年代測定法の実用化を進める。令和 7 年度に得られた品質（測定誤差 約 0.4%，バックグラウンド 42,000 BP）を年間を通して安定して維持するため，継続的に微量測定を実施する。並行して，洪水堆積物など天然物質の微量分析を実施し，実用化を着実に進める。

また，年代測定用の試料の特性を評価するため，令和 7 年度までに XRF での測定条件の最適化及び適用範囲の拡大を進め，取得したデータを公表するとともにマニュアル整備を進めた（木田ほか，2025[110]，渡邊ほか，2025a [111]，渡邊ほか，2025b[112]）。令和 8 年度は継続して EA，IRMS，pXRF 等による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:2024 年 6 月 7 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:2024 年 6 月 7 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:2024 年 6 月 7 日）.

20) 資源エネルギー庁, 文献調査段階の評価の考え方, 2023, 36p.

21) 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.

22) Niwa, M., Shimada, K., Aoki, K., 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.

23) Niwa, M., Mizuochi, Y., 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.

24) Niwa, M., Shimada, K., Ishimaru, T., 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, 2019, pp.105235_1-105235_15, doi:10.1016/j.enggeo.2019.105235.

25) 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.

26) 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.

27) 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.

28) Sueoka, S., Shimada, K., Ishimaru, T., Niwa, M., Yasue, K., Umeda, K., Danhara, T., Iwano, H., Fission track dating of faulting events accommodating plastic deformation of biotites, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol.122, no.3, 2017, pp.1848-1859, doi:10.1002/2016JB013522.

29) 末岡茂, 島田耕史, 照沢秀司, 岩野英樹, 檀原徹, 小北康弘, 平田岳史, フィッション・トラック熱年代解析および U–Pb 年代測定に基づいた南九州せん断帯に分布する破砕帯の活動時期, 地質学雑誌, vol.127, no.1, 2021, pp.25-39, doi:10.5575/geosoc.2020.0052.

30) Yamada, K., Hanamuro, T., Tagami, T., Shimada, K., Takagi, H., Yamada, R., 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.

31) Yamasaki, S., Zwingmann, H., Yamada, K., Tagami, T., Umeda, K., Constraining the timing of brittle deformation and faulting in the Toki granite, central Japan, Chemical Geology, vol.351, 2013, pp.168-174.

32) Niwa, M., Shimada, K., Tamura, H., Shibata, K., Sueoka, S., Yasue, K., Ishimaru, T., 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.

33) Zwingmann, H., Niwa, M., Todd, A., Saunders, M., Reconstruction of the deformation history of an active fault: implications from the Atera Fault, Central Japan, Earth, Planets and Space, vol.76, 2024, doi:10.1186/s40623-024-01973-1.

34) Yokoyama, T., Kimura, J.-I., Mitsuguchi, T., Danhara, T., Hirata, T., Sakata, S., Iwano, H., Maruyama, S., Chang, Q., Miyazaki, T., Murakami, H., 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.

35) Ikeya, M., Miki, T., Tanaka, K., Dating of a fault by electron spin resonance on intrafault materials, Science, vol.215, no.4538, 1982, pp.1392-1393, doi:10.1126/science.215.4538.1392.

36) Zwingmann, H., den Hartog., S. A., Todd, A., The effect of sub-seismic fault slip processes on the isotopic signature of clay minerals–Implications for K-Ar dating of fault zones, Chemical Geology, vol.514, 2019, pp.112–121, doi:10.1016/j.chemgeo.2019.03.034.

37) Oohashi, K., Minomo, Y., Akasegawa, K., Hasebe, N., Miura, K., Optically stimulated luminescence signal resetting of quartz gouge during subseismic to seismic frictional sliding: A case study using granite‐derived quartz, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol.125, no.10, 2020, e2020JB019900, doi:10.1029/2020JB019900.

38) 阿久津彩香，大橋聖和，長谷部徳子，三浦知督，堆積物中石英の摩擦実験における光刺激ルミネッセンス（OSL）信号変化，日本地質学会第 128 学術大会（2021 名古屋オンライン）講演要旨，R14-P-7, 2021, doi: 10.14863/geosocabst.2021.0_295.

39) 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.

40) 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.

41) 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.

42) 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.

43) 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.

44) 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.

45) Peacock, S.A., Fluid processes in subduction zones, Science, vol.248, no.4953, 1990, pp.329-337.

46) Kyser, T.K., Hiatt, E.E., Fluids in sedimentary basins: an introduction, Journal of Geochemical Exploration, vol.80, no.2-3, 2003, pp.139-149.

47) Miyashiro, A., Metamorphic Petrology, UCL Press, London, 1994, 404p.

48) Umeda, K., Kusano, T., Asamori, K., McCrank, G.F., Relationship between $^{3}He/^{4}He$ 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.

49) 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.

50) 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.

51) 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.

52) 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.

53) Umeda, K., Kusano, T., Ninomiya, A., Asamori, K., Nakajima, J., Spatial variations in $^{3}He/^{4}He$ ratios along a high strain rate zone, central Japan, Journal of Asian Earth Sciences, vol.73, 2013, pp.95-102.

54) Umeda, K., Asamori, K., Kusano, T., Release of mantle and crustal helium from a fault following an inland earthquake, Applied Geochemistry, vol.37, 2013, pp.134-141.

55) 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.

56) 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, JAEA-Research 2022-002, 2022, 38p.

57) 小川大輝，平塚晋也，浅森浩一，島田耕史，丹羽正和，九州前弧域における S 波偏向異方性の推定，物理探査, vol.77, 2024, pp.15-23.

58) 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.

59) 松田時彦, 地殻運動からみた第三紀／第四紀―第四紀地殻運動の一様観の検討―, 月刊地球, vol.10, no.10, 1988, pp.599-603.

60) 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.

61) 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.

62) 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.

63) 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.

64) Shimizu, M., Sano, N., Ueki, T., Komatsu, T., Yasue, K., 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.

65) 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.

66) 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.

67) 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.

68) 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所, 令和 5 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, 2024, 262p.

69) 藤原治, 三箇智二, 大森博雄, 日本列島における侵食速度の分布, サイクル機構技報, vol.5, 1999, pp.85-93.

70) 原子力発電環境整備機構, 北海道寿都郡寿都町文献調査報告書. 隆起・侵食に関する説明書, 2024, https://www.numo.or.jp/chisoushobun/survey_status/suttu/pdf/04_suttu_ryuukishinshoku.pdf (参照:2025 年 5 月 7 日).

71) 原子力発電環境整備機構, 北海道古宇郡神恵内村文献調査報告書. 隆起・侵食に関する説明書, 2024, https://www.numo.or.jp/chisoushobun/survey_status/kamoenai/pdf/04_kamoenai_ryuukishinshoku.pdf (参照:2025 年 5 月 7 日).

72) 長谷川浩一, 若松加寿江, 松岡昌志, ダム堆砂データに基づく日本全国の潜在的侵食速度分布, 自然災害科学, vol.24-3, 2005, pp.287-301.

73) 国土地理院, https://www.gsi.go.jp/gazochosa/gazochosa61005.html（参照:2025 年 4 月 28 日）.

74) Korup, O., Hayakawa, Y., Codilean, A. T., Matsushi, Y., Saito, H., Oguchi, T., Matsuzaki, H., Japan's sediment flux to the Pacific Ocean revisited, Earth-Science Reviews, vol.135, 2014, pp.1-16.

75) 松四雄騎，松崎浩之，千木良雅弘，宇宙線生成核種による山地流域からの長期的土砂生産量の推定，応用地質, 54-6, 2014, pp.272‐280.

76) Yuguchi, T., Ishibashi, K., Sakata, S., Yokoyama, T., Itoh, D., Ogita, Y., Yagi, K., Ohno, T., Simultaneous determination of zircon U–Pb age and titanium concentration using LA-ICP-MS for crystallization age and temperature, Lithos, vol.372-373, 2020, 105682, doi:10.1016/j.lithos.2020.105682.

77) Yuguchi, T., Yamazaki, H., Ishibashi, K., Sakata, S., Yokoyama, T., Suzuki, S., Ogita, Y., Sando, K., Imura, T., 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, 2022, 105075, doi: 10.1016/j.jseaes.2021.105075.

78) Yuguchi, T., Ito, D., Yokoyama, T., Sakata, S., Suzuki, S., Ogita, Y., Yagi, K., Imura, T., Motai, S., Ohno, T., Outlining zircon growth in a granitic pluton using 3D cathodoluminescence patterns, U–Pb age, titanium concentration, and Th/U: Implications for the magma chamber process of Okueyama granite, Kyushu, Japan, Lithos, vol.440-441, 2023, 107026, doi:10.1016/j.lithos.2023.107026.

79) Yuguchi, T., Kato, T., Ogita, Y., Watanabe, M., Yamazaki, H., Kato, A., Itoh, D., Yokoyama, T., Sakata, S., Ohno, T., Crystallization processes of quartz in a granitic magma: Implications for the magma chamber processes of Okueyama granite, Kyushu, Japan, Journal of Asian Earth Sciences, vol.265, 2024, 106091, doi:10.1016/j.jseaes.2024.106091.

80) 原田拓也，長田充弘，小北康弘，鏡味沙耶，横山立憲，北部北上山地，下部白亜系原地山層の流紋岩および凝灰岩のジルコン U–Pb–Hf 同位体と全岩化学組成，地学雑誌, vol.132, 2023, pp.57-65, doi:10.5026/jgeography.132.57.

81) 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.

82) Sohbati, R., Murray, A.S., Chapot, M.S., Jain, M., Pederson, J., Optically stimulated luminescence (OSL) as a chronometer for surface exposure dating, Journal of Geophysical Research, vol.117, 2012, B09202, doi:10.1029/2012JB009383.

83) Godfrey-Smith, D.I., Huntley, D.J., Chen, W.H., Optical dating studies of quartz and feldspar sediment extracts, Quaternary Science Reviews, vol.7, 1988, pp.373-380.

84) Tsukamoto, S., Kondo, R., Lauer, T., Jain, M., Pulsed IRSL: A stable and fast bleaching luminescence signal from feldspar for dating Quaternary sediments, Quaternary Geochronology, vol.41, 2017, pp.26-36.

85) 塚本すみ子，光ルミネッセンス（OSL）年代測定法の最近の発展と日本の堆積物への更なる応用の可能性，第四紀研究, vol.57, no.5, 2018, pp.157-167.

86) Jenkins, G.T.H., Duller, G.A.T., Roberts, H.M., Chiverrell, R.C., Glasser, N.F., A new approach for luminescence dating glaciofluvial deposits – High precision optical dating of cobbles, Quaternary Science Reviews, vol.192, 2018, pp.263-273.

87) Rades, E.F., Sohbati, R., Lüthgens, C., Jain, M., Murray, A.S., First luminescence-depth profiles from boulders from moraine deposits: Insights into glaciation chronology and transport dynamics in Malta valley, Austria, Radiation Measurements, vol.120, 2018, pp.281-289.

88) King, G.E., Tsukamoto, S., Herman, F., Biswas, R.H., Sueoka, S., Tagami, T., Electron spin resonance (ESR) thermochronometry of the Hida range of the Japanese Alps: validation and future potential, Geochronology, vol.2, 2020, pp.1-15, doi:10.5194/gchron-2-1-2020.

89) King, G.E., Ahadi, F., Sueoka, S., Herman, F., Anderson, L., Gautheron, C., Tsukamoto, S., Stalder, N., Biswas, R., Fox, M., Delpech, G., Schwartz, S., Tagami, T., Eustatic change modulates exhumation in the Japanese Alps, Geology, vol.51, 2023, pp.131-135.

90) Bartz, M., King, G.E., Bernard, M., Herman, F., Wen, X., Sueoka, S., Tsukamoto, S., Braun, J., Tagami, T., The impact of climate on relief in the northern Japanese Alps within the past 1 Myr - The case of the Tateyama mountains, Earth and Planetary Science Letters, vol.644, 2024, 118830, doi:10.1016/j.epsl.2024.118830.

91) Fang, F., Grün, R., ESR thermochronometry of Al and Ti centres in quartz: A case study of the Fergusons Hill-1 borehole from the Otway Basin, Australia, Radiation Measurements, vol.139, 2020, 106447, doi:10.1016/j.radmeas.2020.106447.

92) Wen, X., Bartz, M., Schmidt, C., King, G.E., ESR and luminescence thermochronometry of the Rhône valley, Switzerland, Quaternary Geochronology, Vol.80, 2024, 101496, doi:10.1016/j.quageo.2023.101496.

93) Ketcham, R.A., Donelick, R.A., 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.

94) Ketcham, R.A., Fission-track annealing: From geologic observations to thermal history modeling, In: Malusà, M.G. and Fitzgerald, P.F. eds., Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology, Springer, 2019, pp.49-75.

95) 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.

96) Gallagher, K., Transdimensional inverse thermal history modeling for quantitative thermochronology, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol.117, no.B2, 2012, B02408, doi: 10.1029/2011JB008825.

97) Hurford, A.J., An historical perspective on fission-track thermochronology, In: Malusà, M.G. and Fitzgerald, P.F. eds., Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology, Springer, 2019, pp.3-23.

98) 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，アニーリング特性の理解，新手法の開発—, RADIOISOTOPES, vol.70,

no.3, 2021, pp.189-207.

99) Jones, S., Gleadow, A., Kohn, B., Reddy, S.M., Etching of fission tracks in monazite: An experimental study, Terra Nova, vol.31, no.3, 2019, pp.179-188.

100) Jones, S., Gleadow, A., Kohn, B., Thermal annealing of implanted ^{252}Cf fission tracks in monazite, Geochronology, vol.3, no.1, 2021, pp.89-102.

101) Weise, C., van den Boogaart, K. G., Jonckheere, R., Ratschbacher, L., Annealing kinetics of Kr-tracks in monazite: Implications for fission-track modelling, Chemical Geology, vol.260, no.1-2, 2009, pp.129-137.

102) Nakajima, T., Fukuda, S., Sueoka, S., Niki, S., Kawakami, T., Danhara, T., Tagami, T., Short communication: Inverse correlation between radiation damage and fission-track etching time on monazite, Geochronology, vol.6, 2024, pp.313-323, doi:10.5194/gchron-6-313-323-2024.

103) 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., 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.

104) Mitsuguchi, T., Okabe, N., Yokoyama, Y., Yoneda, M., Shibata, Y., Fujita, N., Watanabe, T., Saito-Kokubu, Y., ^{129}I/^{127}I and Δ^{14}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, vol.235-236, 2021, 106593, doi: 10.1016/j.jenvrad.2021.106593.

105) Watanabe, T., Fujita, N., Matsubara, A., Miyake, M., Nishio, T., Ishizaka, C., 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.

106) Matsubara, A., Fujita, N., 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.

107) Fujita, N., Matsubara, A., Kimura, K., Jinno, S., 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.

108) Jinno, S., Matsubara, A., Fujita, N., Kimura, K., Validation of crystal surface scattering method for downsizing accelerator mass spectrometry, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, vol.557, 2024. 165545, doi:10.1016/j.nimb.2024.165545.

109) Minamitani, F., Omori, T., Yamazaki, K. Ozaki, H., Hakozaki, M., Yoneda, M., Laser ablation system with a diode laser for AMS ^{14}C measurement of organic materials, Radiocarbon, vol.66, Nr5, 2024 pp.1238-1247, doi:10.1017/RDC.2023.71.

110) 木田福香，渡邊隆広，奈良郁子，ガラスビードを用いた波長分散型蛍光 X 線分析装置による地

質試料の全岩化学組成分析, JAEA-Testing 2025-002, 2025, 62p., doi:10.11484/jaea-testing-2025-002.

111) 渡邊隆広, 木田福香, 山崎慎一, 山岸裕幸, 落合伸也, 松中哲也, 奈良郁子, 土屋範芳, 波長分散型蛍光エックス線分析法による地質試料中の臭素及びヨウ素濃度の測定, 分析化学, vol.74, 2025, pp.611–619, doi:10.2116/bunsekikagaku.74.611.

112) 渡邊隆広, 木田福香, 奈良郁子, 山崎慎一, 土屋範芳, 東濃地科学センターにおける走査型波長分散蛍光エックス線分析装置を用いた粉末ペレット試料中のハロゲン元素(臭素及びヨウ素)の分析手順, JAEA-Testing 2025-006, 2025, 52p., doi:10.11484/jaea-testing-2025-006.

This is a blank page.