

## 地質環境の長期安定性に関する研究 年度計画書 (令和3年度)

Research Plan on Geosphere Stability for Long-term Isolation of Radioactive Waste  
(Scientific Program for Fiscal Year 2021)

石丸 恒存 國分(齋藤) 陽子 島田 耕史 島田 顕臣  
丹羽 正和 渡邊 隆広 末岡 茂 横山 立憲  
藤田 奈津子 小北 康弘 福田 将真 塚原 柚子  
中嶋 徹 尾方 伸久 鏡味 沙耶 長田 充弘  
小川 大輝 後藤 翠

Tsuneari ISHIMARU, Yoko SAITO-KOKUBU, Koji SHIMADA, Akiomi SHIMADA  
Masakazu NIWA, Takahiro WATANABE, Shigeru SUEOKA, Tatsunori YOKOYAMA  
Natsuko FUJITA, Yasuhiro OGITA, Shoma FUKUDA, Yuzuko TSUKAHARA  
Toru NAKAJIMA, Nobuhisa OGATA, Saya KAGAMI, Mitsuhiro NAGATA  
Hiroki OGAWA and Akira GOTO

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

August 2021

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 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.  
Availability and use of the results of this report, please contact  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2021

## 地質環境の長期安定性に関する研究 年度計画書(令和3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

石丸 恒存, 國分(齋藤) 陽子, 島田 耕史, 島田 顕臣, 丹羽 正和,  
渡邊 隆広, 末岡 茂, 横山 立憲, 藤田 奈津子, 小北 康弘, 福田 将真, 塚原 柚子,  
中嶋 徹, 尾方 伸久, 鏡味 沙耶<sup>※1</sup>, 長田 充弘<sup>※1</sup>, 小川 大輝<sup>※2</sup>, 後藤 翠<sup>※2</sup>

(2021年5月31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3期中長期目標期間(平成27年度~令和3年度)における令和3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, 「地質環境の長期安定性に関する研究」基本計画-第3期中長期計画に基づき, これまでの研究開発成果, 関係研究機関の動向や大学等で行われている最新の研究成果, 地層処分事業実施主体や規制機関のニーズ等を考慮した。研究の実施にあたっては, 最終処分事業の概要調査や安全審査基本指針等の検討・策定に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 技術開発協力員

**Research Plan on Geosphere Stability for Long-term Isolation of Radioactive Waste  
(Scientific Program for Fiscal Year 2021)**

Tsuneari ISHIMARU, Yoko SAITO-KOKUBU, Koji SHIMADA, Akiomi SHIMADA,  
Masakazu NIWA, Takahiro WATANABE, Shigeru SUEOKA, Tatsunori YOKOYAMA, Natsuko FUJITA,  
Yasuhiro OGITA, Shoma FUKUDA, Yuzuko TSUKAHARA, Toru NAKAJIMA, Nobuhisa OGATA,  
Saya KAGAMI<sup>※1</sup>, Mitsuhiro NAGATA<sup>※1</sup>, Hiroki OGAWA<sup>※2</sup> and Akira GOTO<sup>※2</sup>

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

(Received May 31, 2021)

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 2021. The objectives and contents in fiscal year 2021 are described in detail based on the JAEA 3rd Medium- and Long-term Plan (fiscal years 2015-2021). 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 Collaborating Engineer

目次

1. はじめに	1
2. 「地質環境の長期安定性に関する研究」の基本的考え方	3
2.1 自然現象に伴う地質環境の変化の予測・評価の重要性	3
2.2 サイト選定における地質環境の変化の予測・評価の考え方	3
2.3 安全評価における地質環境の変化の予測・評価の考え方	4
3. 研究開発の方向性と達成目標	6
3.1 第3期中長期目標期間における研究開発の方向性	6
3.2 第3期中長期目標期間における達成目標	7
3.2.1 調査技術の開発・体系化	7
3.2.2 長期予測・影響評価モデルの開発	8
3.2.3 年代測定技術の開発	9
4. 令和3年度の研究計画	11
4.1 調査技術の開発・体系化	11
4.1.1 断層の活動性に係る調査技術	11
4.1.2 地殻構造の高空間分解能イメージング技術	14
4.1.3 深部流体の分布に関する調査技術	17
4.2 長期予測・影響評価モデルの開発	20
4.2.1 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術	20
4.2.2 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術	22
4.3 年代測定技術の開発	25
4.3.1 ウラン系列放射年代測定法の実用化	25
4.3.2 光ルミネッセンス(OSL)年代測定法の実用化	27
4.3.3 アルミニウム-26( $^{26}\text{Al}$ )年代測定法, 塩素-36( $^{36}\text{Cl}$ )年代測定法, ヨウ素-129( $^{129}\text{I}$ ) 年代測定法の実用化	29
4.3.4 高分解能のテフラ同定手法の開発	32
4.3.5 地質試料を対象とした年代測定法及び化学分析手法の高度化	34
参考文献	37

Contents

1. Introduction .....	1
2. Concept of research on geosphere stability for long-term isolation of radioactive waste .....	3
2.1 Importance of estimation and evaluation of future geological environment on geological disposal .....	3
2.2 Concept of estimation and evaluation on site selection .....	3
2.3 Concept of estimation and evaluation on safety assessment .....	4
3. Direction and objective of research and development .....	6
3.1 Direction of research and development in the JAEA 3rd Medium- and Long-term Plan .....	6
3.2 Objective of research and development in the JAEA 3rd Medium- and Long-term Plan .....	7
3.2.1 Development and systematization of investigation techniques .....	7
3.2.2 Development of models for long-term estimation and effective assessment .....	8
3.2.3 Development of dating techniques .....	9
4. Plan of the research and development in fiscal year 2021 .....	11
4.1 Development and systematization of investigation techniques .....	11
4.1.1 Investigation techniques for evaluation of fault activities .....	11
4.1.2 Investigation techniques for high-resolution imaging of crustal heterogeneity .....	14
4.1.3 Investigation techniques for detection of geofluids .....	17
4.2 Development of models for long-term estimation and effective assessment .....	20
4.2.1 Models of geological environment for extremely low-frequency events .....	20
4.2.2 Development of estimation and evaluation techniques for natural phenomena of very long-term .....	22
4.3 Development of dating techniques .....	25
4.3.1 Practical use of Uranium-series dating method .....	25
4.3.2 Practical use of Optically Stimulated Luminescence dating method .....	27
4.3.3 Practical use of dating methods of Aluminium-26, Chlorine-36 and Iodine-129 .....	29
4.3.4 Development of high-resolution tephrochronology .....	32
4.3.5 Development of methods of dating and chemical analysis for geological samples .....	34
References .....	37

## 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<sup>1)</sup>: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<sup>2)</sup>)。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」<sup>3)</sup>(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<sup>4)</sup>; OECD/NEA, 1999<sup>5)</sup>)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<sup>6)</sup>: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<sup>7)</sup>)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<sup>8)</sup>)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<sup>9)</sup>)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<sup>10)</sup>)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<sup>11)</sup>)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<sup>12)</sup>)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<sup>13)</sup>）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。近年では、平成 29 年 7 月に「科学的特性マップ」（経済産業省資源エネルギー庁、2017<sup>14)</sup>）が公表されるとともに、平成 30 年 3 月にはその作成や提示の際の検討等を踏まえて整理された研究課題が「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<sup>15)</sup>）として示された。また、令和 2 年 3 月にはここで挙げられた課題に対する取り組みの状況やそれまでの研究成果を踏まえて改定がなされている（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、2020<sup>16)</sup>）。さらに、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、2021<sup>17)</sup>）。

本報では第 3 期中長期目標期間（平成 27 年度～令和 3 年度）における令和 3 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、「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（梅田ほか、2015<sup>18)</sup>）に基づき、これまでの研究開発成果、関係研究機関の動向や大学等で行われている最新の研究成果、実施主体や規制機関のニーズのほか、「地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～令和 4 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<sup>15)</sup>、2020<sup>16)</sup>）により示された研究開発課題等を考慮した。



## 2. 「地質環境の長期安定性に関する研究」の基本的考え方

### 2.1 自然現象に伴う地質環境の変化の予測・評価の重要性

高レベル放射性廃棄物の地層処分では地下深部に放射性廃棄物を埋設することにより、放射性物質を生活環境から隔離し、さらに長期にわたってその放出や分散を抑制する。この間に、放射性廃棄物の放射能の大部分が減衰することにより、人間と環境が放射性物質の影響から防護される。そのためには、地層処分の場となる深部の地質環境が天然バリアとして、放射性廃棄物を物理的に隔離するとともに、放射性物質の移行を抑制することに適した特性を有することが必要である。また、地質環境が、人工バリアであるガラス固化体、オーバーパックや緩衝材がそれぞれの性能を発揮できるような特性を維持することも重要となる。さらに、これらの地質環境特性が、数万年以上の長期にわたって、地層処分システムにおける安全機能の維持の観点から許容できる範囲であることが求められるが、地殻変動や火成活動等の影響要因によって大きな変動が生じる可能性も考えられる。そのため、我が国を含む諸外国では地層処分の長期的な安全性を担保するため、自然現象に伴う地質環境の大きな変化に係る様々なシナリオを想定し、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地域を選んだ上で（以下、「サイト選定」）、地質環境の変化によって生じる閉じ込め機能への影響を考慮しつつ、放射性物質の移行や人間環境への影響等が総合的に検討される（以下、「安全評価」）。そのためには、①それぞれのシナリオが生じる可能性のほか、②各シナリオにおいて生ずる地質環境特性の変動の大きさ（幅）を予測・評価するための手法を整備することが重要となる。これらのうち前者は特にサイト選定と、後者は変動シナリオ（自然現象や将来の人間活動によって処分システムの性能に有意な影響が及ぶことは考えにくいものの、それらをシナリオの不確実性として取り扱うためのシナリオ）を考慮した安全評価と密接に関係する。例えば、対象とする期間（ここでは将来 10 万年程度）において、マグマの貫入・噴火等といった地層処分システムの物理的な隔離機能が損なわれる恐れのある場所については、サイト選定によって回避することが前提となる。概要調査等においては、そのような場所が候補地（及びその周辺）に存在するの否か、存在するのであればどの範囲なのかを示すことが、サイト選定における予測・評価の基本的な役割である（将来において回避すべき地域の提示）。一方、将来 10 万年程度の期間であっても地殻変動や気候・海水準変動によって、地下水の流れや水質等に何らかの変化が生じることが想定される。そのため、これらの影響要因による地質環境特性（例えば、熱環境、力学場、水理場、化学場）の変動がどの程度の幅で起こり得るかを提示することが、変動シナリオを考慮した安全評価に対する役割となる（将来の地質環境特性の変動幅の提示）。なお、ここでいう将来の地質環境の予測・評価とは、いずれのケースにおいても、いつ、どこで、何が起こるのかを言い当てるような予知とは違い、対象とする期間において裕度を持った範囲と変化の幅を提示するものである。

### 2.2 サイト選定における地質環境の変化の予測・評価の考え方（回避すべき地域の提示）

サイト選定における地質環境の予測・評価は、対象とする期間において、マグマの処分場への直撃と地表への噴出、著しい隆起・侵食に伴う処分場の接近（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<sup>13)</sup>）によって地層処分システムの物理的な隔離機能が損なわれる可能性が大きい場所を予測することであり、これによって接近シナリオ（処分場に埋設された高レベル放射性廃棄物と人間との距離が接近し、影響が生物圏へ及ぶことを想定するシナリオ）による影響を排除できる。そのためには、サイト及びその周辺において、①多重バリアシステムの防護機能の喪失を引き起こす恐れがある潜在的な現象の存否をあらかじめ特定するとともに、②既に顕在化している現象についても過去から現在までの変動の傾向や規則性に基づく予測によって、それらの地

域を適切に排除していくことが重要となる。これらのうち、「地質環境の長期安定性への影響要因に関するサイト調査の方針」(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<sup>13</sup>)に述べられているように、例えば、過去 10 万年における最大侵食量が 300 m を超えたことが明らかな範囲については、最近約 10 万年間の隆起速度の分布図(地質環境の長期安定性研究委員会編, 2011<sup>19</sup>)等により、事前確認や文献調査の段階でその範囲を概ね特定することは可能である。一方、断層運動や火成活動については、概要調査等によって候補地やその周辺において地下深部の震源断層や高温流体等の存否を確認することが求められる。また、概要調査等で排除されるべき活断層については、地表からの調査段階で取得されたデータによってその存在が判断されるが、その上で、現在の地殻応力場が継続するとの仮定のもとで、現在の活断層の伸展や破碎帯の拡大、地質断層の再活動等が生じる可能性がある範囲を一定の裕度を見込んで示すことが必要となる。

一方、日本列島のネオテクトニクスの枠組みが成立したのは、鮮新世から中期更新世頃と考えられており(米倉ほか, 2001<sup>20</sup>)、100 万年オーダーの時間スケールでの予測・評価を想定した場合には、現在のテクトニクスそのものが転換する可能性を考慮する必要が生じる。こうした時間スケールでは、地殻応力場の変化に伴う新たな断層の形成や隆起・沈降のパターンの変化が生じることも想定されることから、サイト選定において物理的隔離機能が喪失する可能性が高い地域を厳密に特定することは困難となる。そのため、将来予測を行う上での前提となるプレートシステムの継続性を評価するため、プレートシステムの変遷と地質学的イベントの整理及び検討を行うことは、地層処分の技術的信頼性向上に向けた取り組みとして重要となる(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<sup>13</sup>)。一方で、このようなケースに関しては、候補地において断層運動や火成活動が仮に発生したと想定して(稀頻度事象シナリオ)、その影響を検討するといった評価方法を用いることが妥当であると考えられる(例えば、「余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方(案)」(原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会, 2010<sup>21</sup>))。また、「放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について」(原子力安全委員会, 2004<sup>22</sup>)では、超長期の評価期間に伴って派生する不確実性については、シナリオの発生の可能性を勘案し、その影響の大きさを評価する、いわゆるリスク論的な考え方に基づく安全評価手法が有効であることが指摘されている。そのため、超長期に想定されるシナリオが発生する可能性については、それらの対象となる期間と範囲に基づき、(例えば、時空間点過程モデル等によって)確率論的に提示すること等が考えられる。

### 2.3 安全評価における地質環境の変化の予測・評価の考え方(地質環境特性の変動幅の提示)

変動シナリオに基づく安全評価における地質環境の予測・評価は、自然現象に関する過去の記録や現在の状況を調査し、それらのデータや知見に基づき将来 10 万年程度の地質環境特性の変動の大きさ(変動の幅)を提示することである。特に、放射性物質の閉じ込め機能として重要な水理場や化学場の変動については、以下の二つの方法によって予測・評価がなされる。一つ目は、断層運動を含めた地殻変動に係る物理モデル(現象論的モデル)やモダンアナログ的なアプローチによって将来の地形や気候の状態を推定し、それらを場のモデルや境界条件として設定して、地下水の流れや水質等といった地質環境の変化の大きさを見積もる方法(物理モデルに基づいた数値解析による予測; 演繹的アプローチ)である。二つ目は、古水理地質学的なアプローチによって過去から現在までの地下水の流れや水質等を再現した上で、それらの変動傾向から将来の地質環境の変化の幅を外挿するといった手法(過去から現在までの変動傾向の外挿による予測; 帰納的アプローチ)である。前者について、例えば、地形発達シミュレーション(例えば、野上, 2005<sup>23</sup>)のように拡散現象を数式化し、数値解析によって将来の地形を予測し、それに基づき将来の地下水理を計算するといった試みもなされている。このように将来の地質や透水性、気候等を演繹的なアプローチによって予測し、それらから作成した数値モデルによって地下水流動解析

を行うことも考えられるが、それぞれの予測には個別に不確かさを伴うことから、全体としての予測の信頼性を定量化することは難しい。むしろ、後者のように過去から現在まで地下水理の変動方向と速度に着目し、それを外挿するといった帰納的なアプローチの方がそれぞれの不確かさを包含することから、地層処分のようにシステムとしての影響の観点から長期的かつトータルに安全性を評価する場合には扱いやすいと考えられる(梅田ほか, 2014<sup>24)</sup>。

例えば、尾上ほか(2009)<sup>25)</sup>では、木曾山地から濃尾平野に至る庄内川流域を対象に、1.5 Ma から現在までの地形・地質構造を復元し、それぞれの時間断面において地下水流動解析を行った。その結果、最近数十万年間では、著しい地形変化が生じていないため、ダルシー流速の変動も小さく、これを将来 10 万年程度まで外挿しても流速には大きな変化が認められない。しかしながら、将来 100 万年程度の時間スケールでの予測を考えた場合、1.1 Ma 頃に始まったような山地や平野の形成といったイベントによって生じるダルシー流速の大きな変化が生じる可能性も想定することが必要となる。長期に及ぶ安全評価における地質環境の予測・評価は、このような稀頻度のシナリオを想定した保守的な評価も併せて行うことが重要となる。現在のテクトニクスに転換が生じて隆起速度が大きくなり、新たな山地や平野が形成されるようなイベントが現時点で発生するシナリオを考えると、10 万年以内でもダルシー流速も急激に大きくなることが想定される。この場合、将来 10 万年の外挿値と将来 100 万年の外挿値の幅がシナリオによる相対的な不確かさの一つと捉えることができる(梅田ほか, 2014<sup>24)</sup>)。このような不確かさの大きさも当然のことながら、予測する時間スケールによって異なっていくと考えられ、上記の場合では、将来 10 万年程度と 100 万年程度ではダルシー流速に換算して 2 オーダ程度の幅を見込む必要がある。すなわち、将来 10 年以上の予測・評価には、地質環境がオーダで変化する不確かさが内在する可能性もある一方で、将来 10 万年程度の予測・評価は高い確度(予測結果に伴う不確かさがオーダの範囲)で行うことができることを示唆する。

### 3. 研究開発の方向性と達成目標

#### 3.1 第3期中長期目標期間における研究開発の方向性

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・情報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を継続する一方で、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重点をおいて研究を進めてきた(武田ほか, 2004<sup>26</sup>;梅田ほか, 2005<sup>27</sup>, 2010<sup>28</sup>)。具体的には、高レベル放射性廃棄物の地層処分事業における概要調査や国の安全規制における安全審査基本指針等の検討・策定に研究成果を反映できるよう、概要調査等に必要となる、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)、変動シナリオを考慮した安全評価の基盤となる、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期中長期目標期間開始時点においては、特定の地質やサイト(テクニクセッティング)が選定されていなかったことから、引き続きこの枠組みでの研究開発を推進していくこととした。また、その時点で、安全規制に係る安全審査指針・基準等も具体化していくとも見込まれたことから、当面は引き続き幅広い地質環境を対象としたジェネリックな視点を保ちつつも、サイトスペシフィックな条件への具体的な展開をも念頭に置いた研究開発を進めることが重要と考えた。

一方で、前述したように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。特に、原子力委員会(2012)<sup>12</sup>の指摘を受け、総合資源エネルギー調査会では、地層処分に関連する様々な分野の専門家からなる地層処分技術ワーキンググループを設置し、地層処分の技術的信頼性について取りまとめられた(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, 2014<sup>13</sup>)。これによると、今後の地層処分事業の取り組みと並行して進めるべき研究開発として、以下の課題が示された。

#### 広域的現象の理解に関する研究課題

- ・ 火山の分布及び地熱活動の評価に反映するための、マグマ成因論に関する知見の収集及びマンテル内の熱対流モデルの評価手法の整備。
- ・ 繰り返し活動し変位の規模が大きな断層の評価に反映するための、地形的に不明瞭な活断層の調査事例の蓄積及び調査や評価方法の整備。
- ・ 隆起量・侵食量の評価に反映するための、地形学的手法や堆積物の年代測定に基づく評価方法の整備。
- ・ 天然現象の将来予測を行う上での前提となるプレートシステムの継続性の評価のための、プレートシステムの変遷と地質学的イベントの関係の整理及び検討。
- ・ 深部流体及び非火山性熱水の流出の評価に反映するための、深部流体及び非火山性熱水に関する形成・移動メカニズム等の調査事例の蓄積。

#### 概要調査以降の調査・評価手法に関する研究課題

- ・ 断層の活動性の評価に反映するための、地質断層の再活動性に関する調査事例及び上載法の適用が困難な断層の活動性の評価方法(断層岩や充填鉱物の年代測定方法)の整備。



- ・断層活動による影響範囲の評価に反映するための、既存の活断層の破碎帯の分布等の調査事例の蓄積及び調査や評価方法の整備。
- ・表層付近の酸化帯分布の評価に反映するための、表層付近の酸化帯に関する調査事例の蓄積。
- ・地震活動の評価に反映するための、東北地方太平洋沖地震後に誘発された地震や湧水(例えば、2011年4月11日の福島県浜通り地震)に関する調査事例の蓄積。
- ・地下水の動きが緩慢であることを評価するための地下水年代測定等の技術の確保や調査事例の蓄積。

第3期中長期計画(平成27年度～令和3年度)では、地質環境の長期安定性に関する研究について「自然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価する技術を、地球年代学に係る最先端の施設・設備も活用しつつ整備する」ことを目標に掲げるとともに、上述の研究課題について、現状の科学的・技術的レベルや研究開発の進捗状況を考慮した上で、今後の検討に特に必要となる科学的知見を提供することを前提に以下の研究テーマの設定と個別研究課題の抽出を行った(「日本原子力研究開発機構の改革計画に基づく「地層処分技術に関する研究開発」報告書—今後の研究課題について—」(原子力機構, 2014<sup>29)</sup>)。

① 断層の活動性に係る評価技術

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

② 地殻構造の高精度・高分解能モニタリング技術

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

③ 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術

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

④ 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術

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

なお、平成29年7月に公表された「科学的特性マップ」(経済産業省資源エネルギー庁, 2017<sup>14)</sup>)の作成や提示の際の検討等を踏まえて整理された研究課題が「地層処分研究開発に関する全体計画(平成30年度～令和4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<sup>15)</sup>, 2020<sup>16)</sup>)として示されている。そのため、本年度計画の策定にあたっては、ここで示された研究開発課題についても考慮した。

### 3.2 第3期中長期目標期間における達成目標

#### 3.2.1 調査技術の開発・体系化

調査技術の開発・体系化は、候補地が有する地質環境が最終処分法による段階的な処分地の選定要件や原子力安全委員会による環境要件等に適合するか否かを判断するための情報(データ)を、概要調査等を通じて取得するための技術基盤を整備するものである。特に、候補地の選定に際しては、活断層や第四紀火山等の存否をあらかじめ確認することが求められており、そのための調査技術の開発は喫緊

の課題である。そのため、第 2 期中期目標期間においては、変動地形が明瞭でない活断層の検出 (Umeda and Ninomiya, 2009<sup>30)</sup>) や上載地層法の適用が困難な断層の活動性 (山田ほか, 2012<sup>31)</sup>; 石丸ほか, 2014<sup>32)</sup>) 等に係る調査技術の整備を進めてきた。さらに、地下深部の震源断層の存否を確認するため、地震波速度構造、比抵抗構造、地下水中の希ガス同位体等のデータを組み合わせた総合的な解析手法を提示した (Umeda *et al.*, 2014<sup>33)</sup>)。一方、活断層や第四紀火山の存在の有無のみならず、地層処分システムの性能に影響を及ぼすような著しい隆起・侵食が過去に生じていないことを確認することも求められている (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<sup>13)</sup>)。特に、内陸部では河成段丘の編年 (TT 法: Terrace to Terrace; 吉山・柳田, 1995<sup>34)</sup>) に基づく隆起量の算定 (田力ほか, 2011<sup>35)</sup>) が行えるが、西南日本のように河成段丘の発達が少ない地域を対象に、環流丘陵を伴う旧河谷を用いた侵食量の推定法も検討してきた (安江ほか, 2014<sup>36)</sup>)。

このような第 2 期中期目標期間における成果を踏まえると、自然現象が地層処分システムに及ぼす影響を把握するための地上からの調査に係る技術基盤の整備は既にかなり進められてきていると考えられる。ただし、断層運動に係る調査技術については、特に、変動地形が明瞭でない活断層の認定や地下深部の震源断層を確認するための技術のほか、上載地層法による断層の活動性の評価を補完するための技術等が課題として残っている。また、将来の火山・火成活動の評価等のため、地下深部の構造を高空間分解能でイメージングする技術についても、信頼性向上に向けた技術開発要素が見込まれる (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<sup>15)</sup>)。第 3 期中長期目標期間では、基盤的な研究を含めてこれらの調査技術の実用化を図っていく。また、「最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価」 (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<sup>13)</sup>) によると、非火山性熱水や深部流体等といった地下水流動や水質に影響を及ぼす恐れがある新たな現象が認識されており、これらの分布に関する調査技術の開発に取り組む。なお、高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る安全評価については、その評価指針や評価期間は定められていないが、10 万年を超えるようなさらに長期の予測・評価の必要性を検討するためにも、現状の調査技術のレベルで過去の地質イベントや変動のパターン・規模等を時間スケール (1,000 年～100 万年オーダー) に応じて、どの程度の分解能で識別できるかをそれぞれの現象ごとに認識しておくことが重要である。

### 3.2.2 長期予測・影響評価モデルの開発

長期予測・影響評価の基本的な考え方は、自然現象を発端とする様々な地質環境への影響に係るシナリオについて、そのシナリオの発生する可能性と地質環境の変動幅を予測結果に内在する不確実性を含めて示していくことである。これらは、変動シナリオを考慮した安全評価と密接に関連する。予測・評価についての方法論としては、過去から現在までの現象の変動傾向から将来を外挿する方法や現象の生起を統計的に求めて発生確率を計算する方法等が基本となる (例えば、地質環境の長期安定性研究委員会編, 2011<sup>19)</sup>; 梅田ほか, 2013<sup>37)</sup>)。さらに、経験則に加えて現象のメカニズムや地質環境の変化に至るプロセスを考慮した数値シミュレーションによる科学的信頼性の向上を図っていくことも重要となる (田中, 2011<sup>38)</sup>)。いずれにしてもモデル開発に際しては、取得したデータの品質 (例えば、物理探査等の分解能、分析方法に係る精度・確度やモデルの信頼性、検証方法やその方法の妥当性) を検討しつつ、予測・評価結果に係る不確実性を定量的に示していくことが重要である。第 2 期中期目標期間までの研究開発では、地殻変動に伴う地形変化のシミュレーション技術 (例えば、三箇・安江, 2008<sup>39)</sup>; Saegusa *et al.*, 2009<sup>40)</sup>) やマグマの貫入や地震に伴う地下水理の変化をシミュレートする技術 (坂川ほか, 2005<sup>41)</sup>; Niwa *et al.*, 2012<sup>42)</sup>) の整備を進めた。また、将来 10 万年程度にマグマの上昇・噴火が起こり得る可能性を確率的に評価するため、ベイズ法によってマグマの存在に関する地球化学データを考慮した確率モデルを開発し、

東北日本弧において適用した(Martin *et al.*, 2012<sup>43</sup>)。

サイト選定に係る予測・評価のうち、火成活動については、地下深部の潜在的なマグマ等の存否を確認するための調査技術が概ね整備されており、マグマの上昇・噴火により物理的隔離機能が喪失する可能性のある地域については、地上からの調査で取得されるデータによって、将来 10 万年程度であれば回避すべき地域を提示できると考えられる。また、これらの決定論的な判断を補完するため、新たな火山の発生の可能性を確率論的に示すモデルの開発も既に行われている(Martin *et al.*, 2012<sup>43</sup>)。一方、断層運動については、現在の地殻応力場の下で活断層は繰り返し活動するため、既存の断層の伸展や破砕帯の拡大、副断層の形成等が生じる可能性もある。また、活断層の多くは、現在のテクトニクス(ネオテクトニクス)が成立する以前に形成された断層が現在の地殻応力の配置等に応じて再活動したものと考えられている(例えば, Sato, 1994<sup>44</sup>); Fabbri *et al.*, 2004<sup>45</sup>)。これらの現象が生じる可能性のある範囲等を一定の裕度を見込んで予測するためにも、活断層ではない地質断層の再活動性を評価するための技術を整備していくことが重要である。

変動シナリオに基づく安全評価に係る予測・評価については、特に地殻変動によって生じる地形・地質構造の変化やそれに伴う地下水流動や水質の変動幅を検討していくことが不可欠である。第 3 期中長期目標期間では、100 万年ないしそれ以上の時間スケールにおける、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の構築や、その不確実性の評価を支援するための個別要素技術の開発を進めていく。例えば、100 万年を超えるような長期的な地下水流動に大きな影響を及ぼしうる山地の形成プロセスを把握するための、熱年代学的手法や後背地解析技術等の高度化を図る。さらに、数値モデルの科学的な妥当性を示すため、地下水の年代値や地下水の化石である炭酸塩鉱物の同位体組成等のデータを用いた解析技術の検討を進めていく。しかしながら、予測期間が 10 万年を超えるオーダーになると過去から現在までの地質環境の変動方向・速度に基づく単純な外挿による予測では、その信頼性も乏しくなると考えられる。その場合には、異なった時間スケールでの変動方向や速度を比較・検討することによって、予測結果に伴う不確実性を評価することが有効である。第 3 期中長期目標期間では、これまで大きく扱っていなかった測地学的アプローチも駆使して、数十年～数百年、数千年～数万年、数十万年～数百万年といった異なった時間スケールでの変動方向・速度の解析及びこれらを指標とした不確実性を考慮したモデリング技術の開発にも取り組む。

一方、地層処分技術ワーキンググループでは、稀頻度の自然現象が地質環境に及ぼす影響の評価に関する研究課題として、地震に伴う地下水の長期間にわたる異常湧出に係る研究事例の蓄積を挙げている(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<sup>13</sup>)。「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<sup>15</sup>)においても、本研究課題への対応の必要性が提示されている。この課題については、第 3 期中長期目標期間において、主に地震学的手法を用いた調査技術の開発や科学的知見の収集・整理として取り組んでいく。

### 3.2.3 年代測定技術の開発

「地質環境の長期安定性に関する研究」の科学的な基盤は、過去の自然現象の活動した時期やその変動の方向・速度を精度良く把握することである。そのため、放射年代測定法を含めた編年技術を整備していくことが特に重要となる。特に、火成活動の場合は、噴出物の年代測定によって活動履歴を把握することが可能であるが、断層運動や隆起・沈降・侵食については主に地形学的情報に基づき活動履歴を推定するため(その多くは海洋酸素同位体ステージ(MIS: Marine Isotope Stage) 5e に形成された地形面に変位を及ぼしているか否かによって判断がなされる)、約 10 万年以前の活動性を把握することが困難



となる。そのため、これまで研究事例が少ない断層岩や割れ目充填鉱物の放射年代測定法を構築し、これらの年代が決定できれば、より古い時代の断層運動の生じた時期や隆起・沈降・侵食の活動の傾向を把握することができ、それらに伴う地下水流動や水質変化の予測・評価の信頼性も格段に向上すると考えられる。また、さらに長期間における予測・評価に係る不確実性を低減させるためにも、概要調査等の技術基盤となる編年技術を高度化することは不可欠である。なお、国は安全規制の立場から実施主体による概要調査等の結果等について、それらの妥当性や信頼性を含めた技術的な評価を行うこととなっているが、特に編年技術に関しては、放射年代測定で得られた測定値の精度 (precision) や確度 (accuracy) (例えば、兼岡, 1998<sup>46)</sup>), 年代値の地質学的な要件も含めた解釈等, 幅広くかつ専門的な判断能力が要求される。これらの技術的な支援 (特に、安全規制において求められる実施主体が提示したデータの品質や解釈の妥当性等に係る技術的能力) に貢献するためにも、原子力機構においてタンデム型加速器質量分析計や希ガス質量分析計等による放射年代測定技術の開発・改良といった技術基盤を整備していくことが、単に科学的知見のみならず、化学分析に係る経験、ノウハウの蓄積のほか、データの不確実性や品質の取り扱いとそれに基づく編年の判断根拠等の知見を蓄積していく上で極めて重要となる。

第 2 期中期目標期間においては、土岐地球年代学研究所で保有する加速器質量分析計を用いて鉱物中のベリリウム-10 ( $^{10}\text{Be}$ ) 年代測定法の実用化を行った (Saito-Kokubu *et al.*, 2013<sup>47)</sup>; Matsubara *et al.*, 2014<sup>48)</sup>)。一方、四重極型質量分析計 (QMS: Quadrupole Mass Spectrometer) と誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS: Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry) を用いたウラン・トリウム・ヘリウム ((U-Th)/He) 年代測定システム、希ガス質量分析計によるカリウム・アルゴン (K-Ar) 年代測定システムの開発を行い、年代標準試料等の測定を行ってきた (Yamasaki *et al.*, 2013<sup>49)</sup>; 山崎ほか, 2013<sup>50)</sup>; Yamada *et al.*, 2012<sup>51)</sup>)。特に、断層の活動性の評価のため、 $0.1\ \mu\text{m}$  以下の自生雲母粘土鉱物を抽出し、感度法によって K-Ar 年代測定を行うことを可能とした (Yamasaki *et al.*, 2013<sup>52)</sup>; 田村・佐藤, 2013<sup>53)</sup>)。第 3 期中長期目標期間においても、加速器質量分析計、ICP-MS、希ガス質量分析計等を用いた高精度の放射年代測定法の研究開発を引き続き進めていくとともに、さらに新たな年代測定法の開発にも取り組む。ジルコンや炭酸塩鉱物のウラン系列放射年代測定法、石英等の光ルミネッセンス (OSL: Optically Stimulated Luminescence) 年代測定法、珪酸塩鉱物のアルミニウム-26 ( $^{26}\text{Al}$ ) 年代測定法、地下水の塩素-36 ( $^{36}\text{Cl}$ ) やヨウ素-129 ( $^{129}\text{I}$ ) 年代測定法及びヘリウム-4 ( $^4\text{He}$ )、ネオン-21 ( $^{21}\text{Ne}$ )、アルゴン-40 ( $^{40}\text{Ar}$ ) 等の非放射性同位体を用いた地下水の年代測定法等の実用化を図る。また、放射年代測定法が利用できない場合を想定して、テフラ(火山灰)を年代指標とした編年技術の開発を進めているが、ここでは特に、第四紀前半の広域～ローカルテフラのカタログの整備を進めていく。



## 4. 令和3年度の研究計画

### 4.1 調査技術の開発・体系化

#### 4.1.1 断層の活動性に係る調査技術

##### (1) 目的

ボーリング孔や坑道等の掘削によって地下で遭遇した断層の活動性の評価には、活断層の調査で通常用いられる上載地層法を適用することが困難となる。このような断層の活動性の評価として考えられる手法としては主に、①断層を挟んだ両側の岩石の地質、鉱物学的特徴の差異に基づくもの、②断層岩の構造地質学、鉱物学、地球化学的解析によるもの、③年代既知の鉱物脈等の変位マーカーと断層との切断関係に基づくもの、が挙げられる。本研究では、地下施設を活用した調査段階において、地下で遭遇した断層の活動性を評価するため、断層岩や割れ目充填鉱物等の構造や化学組成、年代値等の物質科学的アプローチによって、当該手法の実用化を図る。また、地表からの調査段階における上載地層法の汎用性を高めるための編年手法の開発を併せて進める。

##### (2) 実施内容

第2期中期目標期間においては、前述の①に着目した研究として、断層の上盤と下盤の岩石に含まれる鉱物のうち閉鎖温度の低いジルコンやアパタイトのフィッション・トラック(FT:Fission Track)年代を測定し、岩体の上昇速度(削剥速度)の違いから垂直変位速度の算定を試みた(山田ほか, 2012<sup>31</sup>)。また、②に関しては、断層岩にしばしば含まれる自生のイライトの K-Ar 年代測定により、断層の活動時期を推定した。これは、断層運動に伴って熱水が上昇し、自生のイライトが晶出するという仮定に基づくものである(田村・佐藤, 2013<sup>53</sup>)。これまでの研究開発により、凍結/融解の繰り返しによる粉碎と高速遠心分離によって自生の極細粒(約 0.1 μm 以下)のイライトを分離する技術や、1 Ma よりも若い年代の測定に有利な感度法による K-Ar 年代測定システムを構築し、複数の地域の断層岩の年代測定に成功した(Yamasaki *et al.*, 2013<sup>52</sup>; 安江ほか, 2013<sup>54</sup>; Niwa *et al.*, 2016<sup>55</sup>)。しかし、第四紀以降といった最近の活動については、自生のイライトが晶出するような温度の熱水活動の及ぶ範囲(深度)の制約により、地下数百 m 以浅の断層岩ではイライトの K-Ar 年代によって最近の活動時期を決定することが困難であるケースが多いことも明らかになってきた。

第3期中長期目標期間においては、この課題を踏まえ、自生イライトの晶出よりも低温・短時間での反応に着目した研究を行う。活断層ではしばしば、イライトやスメクタイト等の粘土鉱物に富む断層岩が発達するが、そのような断層岩において、いくつかの元素が特徴的に濃集している事例が報告されている(Niwa *et al.*, 2015<sup>56</sup>, 2019<sup>57</sup>; 加藤ほか, 2015<sup>58</sup>)。これらは断層運動に伴う地下水理環境や酸化還元環境の変化を保存している可能性がある。そのため、このような酸化還元環境に着目した断層岩の鉱物学、地球化学的解析に基づく断層の活動性の評価手法の開発を行う。さらに、断層運動による摩擦発熱のような短時間の加熱を対象とした熱年代学的手法についても、OSL 等を利用した手法(鴈澤ほか, 2013<sup>59</sup>)が検討されており、第3期中長期目標期間においても技術開発を進める。なお、OSL 年代測定法等については、炭素-14(<sup>14</sup>C)年代やテフラが適用できない上載地層の編年手法の開発としても検討を行う。

また、前述した(1)の③に関しては、変位マーカーとなる鉱物脈や周辺岩盤の年代に加え、それらの鉱物・化学的特徴も断層の活動時期の推定において有用な情報となる。例えば、炭酸塩鉱物脈は大きく分けて、地下からの熱水を起源とする場合と、地表からの酸化的な地下水を起源とする場合とがあるが、両

者は安定同位体比、化学組成といったデータや、偏光顕微鏡、カソードルミネッセンス等の観察により区別できる場合が多い(石橋ほか, 2014<sup>60</sup>)。それらの区別により、鉱物脈の形成場(深度)が推定できれば、地質学的に最近の断層運動との関係を知る上でも重要な情報となりうる。第3期中長期目標期間では、以上のような化学分析、微細組織観察に加え、ウラン系列等を用いた放射年代測定等も活用することにより、断層破砕帯に発達する鉱物脈の形成プロセスの復元及び鉱物脈等を変位マーカーとした断層の活動性や破壊等の影響範囲に係る評価手法の開発を進めていく。

### (3) 令和3年度の研究計画(下記の番号は、(4)スケジュールの実施内容の番号に対応)

#### ① 断層岩の構造地質学、鉱物学、地球化学的解析による評価手法の開発

第3期中長期目標期間における断層岩を用いた研究開発については、これまでに、1) 断層岩の模擬試料や天然の断層岩に対する、せん断変形速度、温度、水分量、水質等の条件を変化させた高速摩擦試験及び試験前後の試料の微細構造観察や鉱物・元素分布の分析による、活断層起源かそれ以外(古い地質時代の熱水変質や風化によるもの等)の起源かを識別する上での判断指標の探索(清水ほか, 2018<sup>61</sup>)、2) 断層岩の鉱物・化学組成や地質記載データを材料とした、機械学習(多変量解析等)を用いた活断層の識別手法の開発(立石ほか, 2019<sup>62</sup>, 2020<sup>63</sup>)、3) 石英粒子を用いた断層の活動年代推定手法の開発に資するための、石英表面の微細構造の解析や(Niwa *et al.*, 2016<sup>64</sup>)、水和層の性状や厚さについての水熱実験・分析(丹羽・島田, 2017<sup>65</sup>, 2019<sup>66</sup>)を進めてきた。特に2)については、断層岩の化学組成を用いた多変量解析において判別係数や多重共線性を踏まえた検討を行うことにより、活断層/非活断層の判別に寄与する元素の絞り込みに成功した(原子力機構・電力中央研究所, 2021<sup>67</sup>)。令和3年度については、この2)について信頼性向上に向けたデータの拡充を進める。

さらに、断層運動に伴う摩擦発熱や熱水活動に着目した研究について、1) 熱年代学的手法により断層の活動時期を制約するための、地下深部の断層帯を模した水熱環境及び還元環境におけるジルコンの室内加熱実験(原子力機構・電力中央研究所, 2020<sup>68</sup>)、2) 赤外線励起による長石のルミネッセンス(IRSL: Infra-Red Stimulated Luminescence)法の断層ガウジに対する適用性の検討(原子力機構・電力中央研究所, 2020<sup>68</sup>, 2021<sup>67</sup>)、3) 粘土鉱物を対象としたK-Ar法の適用性の拡張に係る検討(宇波ほか, 2019<sup>69</sup>, 2019<sup>70</sup>; Zwingmann *et al.*, 2020<sup>71</sup>)を行ってきた。令和3年度も引き続き、これらの手法について、精度や適用限界を明らかにするための基礎実験及び適用事例の蓄積を進める。

#### ② 鉱物脈等の変位マーカーに基づく評価手法の開発

第3期中長期目標期間においてはこれまでに、地表地形から特定が困難な活構造を検出し、その活動性や破壊等の影響範囲を把握するための技術の高度化に資するため、鉱物脈等に発達する小断層を用いた応力逆解析的手法(Yamaji, 2000<sup>72</sup>; Tamura *et al.*, 2020<sup>73</sup>)と、地殻構造の高空間分解能イメージング技術の開発(4.1.2 項参照)として進めてきた測地学的手法とを組み合わせた調査・評価手法について検討を進めた(比嘉ほか, 2019<sup>74</sup>; Watanabe and Asamori, 2019<sup>75</sup>; 丹羽ほか, 2020<sup>76</sup>; 渡部ほか, 2020<sup>77</sup>; 原子力機構・電力中央研究所, 2021<sup>67</sup>)。また、可搬型高精度ガス観測装置を用いた地球化学的手法により、流体の移動経路を担う割れ目や伏在断層を検出する技術の開発も進めた(下茂ほか, 2019<sup>78</sup>; Shimo *et al.*, 2019<sup>79</sup>; Niwa *et al.*, 2021<sup>80</sup>)。令和3年度もこれらの手法について適用事例の蓄積を進め、概要調査等に反映できる調査技術として取りまとめる。

#### ③ 上載地層の編年手法の高度化

第3期中長期目標期間においては、これまでに数十万年前に形成された堆積物を用いた長石のIRSL

法による段丘等の堆積物の編年手法の有効性を提示することができた(原子力機構・電力中央研究所, 2020<sup>68)</sup>;小形ほか, 2021<sup>81)</sup>)。上載地層の編年手法としても適用できる OSL 法や IRSL 法等の研究開発については, 4.3 節の年代測定技術の開発の中で引き続き継続する。また, 前述した地表地形から特定が困難な活構造を検出する技術に係る事例研究の中で, 活断層とノンテクトニック断層とを識別する手法についても検討する。

(4) スケジュール(第3期中長期目標期間の計画)

実施内容	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3
① 断層岩の構造地質学, 鉱物学, 地球化学的解析による評価手法の開発							
・粘土鉱物等を用いた活断層識別手法の開発	→						
・石英粒子を用いた活動性の評価	→						
・石英粒子等を用いた年代測定手法の開発			→				
・熱年代学的手法に基づく評価手法の開発			→				
② 鉱物脈等の変位マーカーに基づく評価手法の開発							
・鉱物脈等を用いた評価手法の検討	→						
③ 上載地層の編年手法の高度化							
・OSL 等を組み合わせた編年手法の開発	→						
・ノンテクトニック断層の判定手法の検討						→	

ゴシック表記は令和3年度に実施する研究項目を示す。

#### 4.1.2 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、火成活動)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

一般に、断層の地下構造(地下の断層形状)を調査する際には、反射法地震探査をはじめとした物理探査法が主に用いられる。しかしながら、これにより検出される物性境界は、力学的な境界である活断層とは必ずしも合致しないとの指摘もなされている(中田, 2008<sup>82</sup>)。他方、地下の岩盤物性の空間分布を推定する地震波トモグラフィ法や地磁気・地電流(MT: Magnetotelluric)法を用いたこれまでの研究により、内陸大地震の震源域における流体の存在が見出された事例が多く報告されており、地震の発生や地殻構造の不均質性には、地殻流体の寄与が指摘されている(例えば, Unsworth *et al.*, 1997<sup>83</sup>; Iio *et al.*, 2002<sup>84</sup>)。このため、将来の断層運動や火成活動の潜在的なリスクを排除するためには、地殻深部の流体(溶融体や水)の分布やそれに伴う地殻構造の不均質性を精度良く把握することが重要となる。

第2期中期目標期間においては、地震波線追跡に地質構造の不均質を考慮した微小地震の震源再決定や、地震波トモグラフィ法、不均質平滑化拘束条件付き三次元 MT インバージョン法(Negi *et al.*, 2013<sup>85</sup>)及び MT 法観測データに対する重み付きスタッキング法(根木ほか, 2010<sup>86</sup>, 2011<sup>87</sup>)等の要素技術の高度化を進めた。さらに、これらの技術を用いて、未成熟な断層の活動による内陸地震の震源域等の地下構造を推定することで、広域的なせん断帯の形成に流体が関与することを示した(Umeda *et al.*, 2011<sup>88</sup>, 2014<sup>33</sup>)。しかしながら、これらの手法の適用性には、対象とする地域の環境(電磁気的な人工ノイズ、地震活動度等)に依存する等の課題が残されている。

第3期中長期目標期間では、地殻構造を推定するための手法に関する汎用性の拡大及び高空間分解能化を目指して、地震波トモグラフィ法に加え、MT 法観測データの信号対雑音比(S/N 比: Signal-Noise ratio)向上に関する要素技術の開発を継続し、これらによって地震波と地磁気・地電流を組み合わせた地下深部構造イメージング技術を構築する。また、測地学的観測(全地球測位システム(GNSS: Global Navigation Satellite Systems)、合成開口レーダ(SAR: Synthetic Aperture Radar)解析)による微小な地殻変動から弾性・非弾性領域を抽出し、未成熟な断層の存否を明らかにするための技術開発を併せて行う。さらに、主に内陸部を事例とした検討により有効性の検証が進められてきたこれらの地下深部構造イメージング技術について、沿岸部における適用性の検討を行う。この沿岸部を対象とした検討については、これまでに、沿岸部の第四紀火山を事例として堆積層等の層厚分布を考慮した震源再決定及び地震波トモグラフィ法を適用し、これらの解析手法が有効であることを提示して取りまとめたところである(産業技術総合研究所ほか, 2019<sup>89</sup>)。



(3) 令和3年度の研究計画(下記の番号は、(4)スケジュールの実施内容の番号に対応)

① 地下深部構造イメージング技術の高度化

地殻構造を推定するための手法のうち地震学的手法については、浅発地震の震源分布や地殻・マントルの地震波速度構造を高い精度で推定するために必要な技術として、三次元波線追跡や理論走時計算の際に地表付近の堆積層等の低速度層の不均質分布を考慮した手法の構築を進めてきた。これまで、ここで構築した手法を地震波トモグラフィーに応用して、日本列島における地下深部の三次元地震波速度構造を推定し(Asamori and Zhao, 2015<sup>90</sup>)、MT法によって推定した比抵抗構造との比較により当該手法の妥当性を示した。また、地殻やマントル・ウェッジにおける流体分布・移動経路の推定に資するため、地殻深部～マントルを通過した膨大な地震データの収集・解析を行い、地震波トモグラフィーの空間分解能の向上を図った(原子力機構・電力中央研究所, 2020<sup>68</sup>)。さらに、個別火山体における第四紀の火山活動は、これらの手法によって推定された下部地殻～マントル最上部の部分熔融域の直上あるいは近傍に位置するとの事例を整理し、その概念モデルを構築した(原子力機構・電力中央研究所, 2020<sup>68</sup>)。令和3年度は、地震学的手法により、地下深部における流体移動経路の形成や地殻変動等といった現象の時間変化を検出する(顕著な変化がないことを示す)ためのモニタリング手法についての検討を継続するとともに、MT法観測データのS/N比を向上させるためのデータ処理手法の開発を引き続き進める。

② 測地学的手法を用いた震源断層の調査技術

近年、GNSSやSARによる観測データの解析により推定される地殻変動から、活断層における継続的な断層運動を捉えた事例が報告されている。このため、地表には活断層が分布しない地域でも、未成熟な断層に伴う深部すべりがある場合には、それに関連する微小な地殻変動が生じていると考えられる。平成27年度から令和2年度にかけて、1997年鹿児島県北西部地震の発生によって未成熟な断層の存在が示唆された九州南部のせん断帯を事例としてGNSS稠密観測網を展開し、微小な地殻変動の観測を進めてきた(Watanabe and Asamori, 2019<sup>75</sup>; 渡部ほか, 2020<sup>77</sup>; 原子力機構・電力中央研究所, 2021<sup>67</sup>)。令和3年度はこれらの成果について取りまとめを行い、せん断帯深部の未成熟な断層の運動に関連した深部すべりの存否や程度の推定事例を示す。



#### 4.1.3 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, 2014<sup>13)</sup>)。本研究では、近年、その存在が明らかになりつつある深部流体についての科学的知見をレビューするとともに、その形成・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。なお、研究を進めるにあたっては、「4.1.2 地殻構造の高空間分解能イメージング技術」の研究成果も活用する。

##### (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<sup>91)</sup>; 産業技術総合研究所, 2007<sup>92)</sup>, 2012<sup>93)</sup>)、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<sup>94)</sup>; 風早ほか, 2014<sup>95)</sup>)。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<sup>96)</sup>) のほか、スラブ起源流体 (Peacock, 1990<sup>97)</sup>) や続成脱水流体 (Kyser and Hiatt, 2003<sup>98)</sup>)、変成脱水流体 (Miyashiro, 1994<sup>99)</sup>) 等が知られている。これらの起源の推定については、従来の酸素・水素同位体やリチウム、ホウ素、塩素濃度による区分が試みられているが、上部マントルからもたらされたマグマ水やスラブ起源流体と地殻内で発生した続成、変成脱水流体の違いについては、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(例えば、Umeda *et al.*, 2012<sup>100)</sup>; 網田ほか, 2014<sup>101)</sup>)。さらに、スラブ起源流体等は、地表にまで上昇する際には、地殻下部にまで達するような構造線や大断層が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, 2007<sup>92)</sup>, 2012<sup>93)</sup>)。

第 2 期中期目標期間においては、変動地形が明瞭でない活断層の調査技術の一環として、断層周辺の地下水や遊離ガス等の主成分・同位体組成等の特徴について取りまとめた(例えば、Umeda *et al.*, 2011<sup>88)</sup>, 2012<sup>100)</sup>, 2013<sup>102)</sup>, 2013<sup>103)</sup>)。これらによると、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。

第 3 期中長期目標期間においては、深部流体についてこれまで行われてきた様々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る。さらに、深部流体が賦存すると考えられている代表的な地域における事例研究を通じて、その形成・移動メカニズムや熱的性状に関する科学的知見を蓄積するとともに、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進める。これまでに、深部流体の分布(流体賦存域の有無)に関しては、九州の前弧域などを事例対象として、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<sup>104)</sup>)。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に依存するパラメータである S 波偏向異方性に着目し、紀伊半島南部や有馬温泉を事例とした 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, 2020<sup>105)</sup>; 原子力機構・電力中央研究所, 2021<sup>67)</sup>)。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、令和 2 年度までに取りまとめ提示した。

(3) 令和 3 年度の研究計画(下記の番号は、(4)スケジュールの実施内容の番号に対応)

① 深部流体の性状に関する知見の蓄積

これまで原子力機構において整備してきた「ヘリウム同位体比データベース」(草野ほか, 2012<sup>106</sup>)を整理・更新するとともに、それをを用いた検討等により、深部流体の化学的特徴について整理した。しかしながら、深部流体の流入が地層処分システムへ与える影響を適切に評価するためには、その化学的性状に加えて、熱的活動についても知見を蓄積する必要がある。そのため、深部流体が賦存すると考えられている領域において地質学・熱年代学・地球化学的手法を適用し、流入する流体の温度や、それに伴う熱水活動の継続期間の推定を試みる。令和 2 年度までに、紀伊半島南部及び有馬温泉を事例として熱年代学的手法と地質温度計を用いた検討を行い、熱水脈を形成したかつての熱水活動の温度、活動継続期間等について検討した(原子力機構・電力中央研究所, 2020<sup>68</sup>), 2021<sup>67</sup>);末岡ほか, 2020<sup>107</sup>)。令和 3 年度も分析・解析を継続し、概要調査等に反映できる調査技術として取りまとめる。

② 深部流体の形成・移動メカニズムに関する知見の蓄積

第四紀火山が存在していない紀伊半島南部では高温の温泉が湧出するが、その原因の一つとして、地殻下部にまで達するような構造線や断層、断裂系等を経路としたスラブ起源の深部流体の上昇が指摘されている(Morikawa *et al.*, 2016<sup>108</sup>)。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・移動経路に関する情報を得ることも重要であると考えられる。令和 3 年度は、S 波スプリッティング解析を用いた深部流体の流入・移動経路に関する調査・評価手法の信頼性向上のため、既存の MT 探査結果等から地下深部における流体賦存域の分布が示唆される地域を事例対象とした解析を拡充し、概要調査等に反映できる調査技術として取りまとめる。



(4) スケジュール(第3期中長期目標期間の計画)

実施内容	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3
① 深部流体の性状に関する知見の蓄積 ・データの収集・編集 ・類型化に基づく成因を考慮した分類の検討 ・熱的影響に関する知見の蓄積		→	→				→
② 深部流体の形成・移動メカニズムに関する知見の蓄積 ・深部流体の流入経路に関する検討							→
③ 深部流体の分布に関する調査技術 ・地球化学的手法による検討 ・地球物理学的手法による検討 ・総合的なアプローチによる調査技術				→			→

ゴシック表記は令和3年度に実施する研究項目を示す。

## 4.2 長期予測・影響評価モデルの開発

### 4.2.1 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術

#### (1) 目的

2011年東北地方太平洋沖地震では、その発生に伴って内陸地震が活発化した地域や1 m以上の沈降を生じた地域も現れた。また、地下水位の低下や異常湧水といった水理場の変動も生じた。このうち、沿岸域で生じた数年間に及ぶ湧水の原因については不明な点が多い。このような稀頻度の自然現象が地質環境特性に及ぼす影響は、変動シナリオを考慮した安全評価にとって重要な課題となる。本研究では、稀頻度自然現象に伴う地質環境の変動スケールやそのレジリエンス(復元性)を把握するため、代表的なフィールドでの事例研究に基づく知見の蓄積のほか、必要に応じて、数値モデリングによる研究開発を進めていく。また、「地層処分研究開発に関する全体計画(平成30年度～令和4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, 2020<sup>16)</sup>)で示された研究課題を踏まえ、地震の発生に伴う長期間の湧水現象について重点的に研究開発を進める。

#### (2) 実施内容

1946年南海地震, 1995年兵庫県南部地震等, 規模の大きい地震が発生した際には、震源域周辺で異常湧水が認められることがあり、その水質から地下水理場の擾乱が生じている範囲は地殻浅所と考えられてきた(川辺, 1991<sup>109)</sup>;佐藤・高橋, 1997<sup>110)</sup>)。第2期中期目標期間においては、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地殻歪の変化と、これに伴う地下水の水位変化のシミュレーションを行うとともに、実際に観測された水位変化と整合することを示した(Niwa *et al.*, 2012<sup>42)</sup>)。しかしながら、2011年東北地方太平洋沖地震の1か月後に福島県浜通りで生じた正断層型の地震に伴う異常湧水の原因は、単なる地殻歪の変化では説明できず、地震発生から数年経過した時点でも湧水が継続している(佐藤, 2015<sup>111)</sup>; Sato *et al.*, 2020<sup>112)</sup>)。

第3期中長期目標期間においては、2011年東北地方太平洋沖地震等の巨大地震前後の地下水流動や水質に関する情報を収集・整理する。また、福島県浜通りで発生している異常湧水等を事例とした湧水発生メカニズムの検討のほか、このような現象が生じ得る地質環境の条件に着目し、その抽出を試みる。なお、これまで既に、地震に伴う多量の湧水の発生が継続した代表的な事例として、1965年から始まった長野県松代群発地震(例えば、大竹, 1976<sup>113)</sup>;奥澤・塚原, 2001<sup>114)</sup>)の活動域を対象とした検討結果(MT法電磁探査と地震波トモグラフィによる地下深部の流体賦存域の分布の推定、及びS波スプリッティング解析に基づく、クラックの交差部としての流体上昇経路の推定)を取りまとめている(原子力機構・電力中央研究所, 2020<sup>68)</sup>, 2021<sup>67)</sup>)。この松代群発地震の事例から、地下水理・水質は地震の際に変化した後、数十年単位で継続・維持される場合があり、その深部にはマンツルの深度に至る流体賦存域が長期にわたって存在している場合があるという知見が得られた。これらの成果を、「地下水理・水質等の変化に係る知見」として令和2年度までに整理した。

#### (3) 令和3年度の研究計画(下記の番号は、(4)スケジュールの実施内容の番号に対応)

##### ① 海溝型巨大地震の発生に伴う地質環境の影響評価

これまでに、海溝型巨大地震等に伴う地下水の水圧・水質変化に関する情報を収集し、整理した(後藤ほか, 2020<sup>115)</sup>)。また、2011年東北地方太平洋沖地震の後に生じた正断層型の群発地震の発生メカニ

ズムについて、地殻深部に見出された深部流体(Umeda *et al.*, 2015<sup>116</sup>)を考慮した数値シミュレーションにより検討した。さらに、この群発地震活動域を事例とした S 波スプリッティング解析を行い、異方性媒質中で分離した速度の異なる二つの地震波の時間差に着目することにより、異常湧水の発生ポテンシャルについて予察的な検討を行った。令和 3 年度は、地震データをさらに拡充した S 波スプリッティング解析を行い、海溝型巨大地震に伴う異常湧水の発生可能性やその規模を評価するための調査手法について提示する。

(4) スケジュール(第 3 期中長期目標期間の計画)

実施内容	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3
① 海溝型巨大地震の発生に伴う地質環境の影響評価 ・地下水理・水質等のデータ収集・編集 ・湧水と深部流体との関連性に関する検討							
② 内陸地震の発生に伴う地質環境の影響評価 ・地下水理・水質等の変化に係る知見の収集・整理							
③ 短時間の地形変化に伴う地質環境の影響評価 ・地下水理・水質等のデータ収集・編集							

ゴシック表記は令和 3 年度に実施する研究項目を示す。

## 4.2.2 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術

### (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。また、時間スケールごとの変動方向や速度が大きく異なる場合、その地域は変動の一樣継続性が成立しておらず、単純な外挿による予測には大きな不確実性を伴う。本研究では、地形・地質学的アプローチに加え、測地学等の地球物理学的アプローチも駆使して、数十年～数百年、数千年～数万年、数十万年～数百万年といった異なった時間スケールでの変動方向・速度の解析及びこれらを指標とした不確実性を考慮した地質環境のモデル化を支援する調査・評価技術の開発を行う。また、新規火山や断層の発生に係る確率論的な評価技術の開発も引き続き実施していく。

### (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)<sup>117)</sup>、松田(1988)<sup>118)</sup>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「一樣継続性」と呼んだ。このような変動の一樣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<sup>119)</sup>)、変動の方向や速度も将来予測の前提となる定常状態、すなわち一樣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樣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<sup>120)</sup>)。

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<sup>121)</sup>)。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<sup>120)</sup>;丹羽ほか、2018<sup>122)</sup>; Shimizu *et al.*, 2019<sup>123)</sup>;代永ほか、2021<sup>124)</sup>)。

一方、平成30年3月に提示された「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)」では、地層処分に適した地質環境の選定に係る自然現象の影響把握及びモデル化に関連した研究課題が整理されている(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<sup>15)</sup>)。このうちサイトによらず調査・評価が不可欠な自然現象である隆起・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ことも重要であると考えられる。そこで平成 30 年度以降は、特に隆起・侵食の予測・評価の信頼性向上に向けて、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る。また、火山・火成活動や地震活動・断層運動に係る 10 万年を超えるような超長期の予測については、引き続き確率論的なアプローチによる手法の開発を進める。

(3) 令和 3 年度の研究計画(下記の番号は、(4)スケジュールの実施内容の番号に対応)

③ 超長期の変動に関する確率論的評価手法の開発

確率論的手法に基づく超長期の予測については、Nagra(スイス放射性廃棄物管理共同組合)との共同研究の一環として、地球物理学的データや地球化学的データをベイズ法によって組み込んだ **multiple inference** モデルを開発するとともに、主に新規の火山の発生を対象とした確率分布モデルの構築を行ってきた(Martin *et al.*, 2018<sup>125</sup>)。令和 3 年度も引き続き確率論的モデルの構築を継続し、成果について取りまとめていく。

④ 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

地形・地質学的調査・解析と年代測定に基づき、長期的な時間スケール(10<sup>3</sup>年～10<sup>6</sup>年程度)で生じる隆起・侵食の特徴・傾向・速度を把握する技術の整備を進める。これまでに、1) 熱年代学的手法を用いた隆起・侵食評価手法の整備、2) 環流旧河谷等の離水河成地形に着目した検討に基づく内陸部の隆起・侵食速度推定技術の拡充、3) 海成侵食段丘への宇宙線生成核種年代測定法の適用による沿岸部の隆起・侵食速度推定技術の開発、4) 大陸棚を対象とした地形解析と堆積構造解析に基づく沿岸部の隆起/侵食、沈降/堆積現象の把握、5) 沿岸堆積平野を対象とした隆起・沈降境界域における地殻変動評価技術の整備、6) 日本列島における長期的な侵食速度データのレビュー・コンパイル作業を通じた隆起・侵食データマップの整備をそれぞれ進めた(原子力機構・電力中央研究所, 2020<sup>68</sup>), 2021<sup>67</sup>)。1)については、OSL 熱年代の適用性の検討や Al-in-Hbl 地質温度・圧力計、Ti-in-zircon 温度計等と熱年代学的手法を組み合わせた検討を進めた(河上ほか, 2019<sup>126</sup>); Yuguchi *et al.*, 2020<sup>127</sup>); 小形・末岡, 2021<sup>128</sup>)。2)については、環流旧河谷に残された旧河床堆積物に対する IRSL 年代測定の適用により、隆起・侵食速度を推定する手法を提示した(小形ほか, 2021<sup>81</sup>)。3)については、四万十帯の堆積岩等を対象とした宇宙線生成核種年代測定を行い、MIS 5(約 12 万年前)よりも新しい時代の原面残存率の高い海成侵食段丘に対しては、本手法が適用可能な見通しを得た(末岡ほか, 2019<sup>129</sup>); 松四ほか, 2020<sup>130</sup>)。4)については、日本列島の大陸棚における 1 万年～数十万年間の隆起/侵食、沈降/堆積の傾向・速度の把握に必要となる手法を提示した。5)については、沿岸堆積平野における事例研究により、数十万年間における地殻変動の様式・速度の評価において、MIS 11(約 40 万年前)と MIS 5 のそれぞれの海成層の分布を比較することが有用な調査方針になるとの見通しを得た(宮本ほか, 2020<sup>131</sup>), 2021<sup>132</sup>)。6)については、日本列島全域を対象としたデータ・知見の収集・整理に加え、山地の地形量から侵食の履歴や将来の変化傾向を推定するための隆起・侵食速度と地形量との関係についての検討も実施した(小松ほか, 2019<sup>133</sup>); 日浦ほか, 2020<sup>134</sup>)。令和 3 年度も引き続き、特に 1)～3)及び 6)について適用事例やデータの拡充を行い(例えば、MIS 5 よりも古い時代の海成侵食段丘に対する宇宙線生成核種年代測定法の適用性の検討等)、概要調査等に反映できる調査・評価技術として取りまとめる。

(4) スケジュール(第3期中長期目標期間の計画)

実施内容	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3
① 時間スケールに応じた地殻変動の一樣継続性の評価 ・地形・地質学的データの収集・整理 ・時間スケールに応じた地殻変動の様式・速度等の解析							
	→						
	→						
② 地質環境長期変動モデルの構築 ・地形・地質学データと測地学データの収集、空間的な変動様式・速度の違いの検討 ・地殻構造の不均質性を考慮した数値モデルによるシミュレーション ・変動様式・速度の違いに応じた予測手法と不確実性の評価手法の開発 ・地質環境長期変動モデルの開発							
	→						
	→						
	→						
	→						
③ 超長期の変動に関する確率論的評価手法の開発 ・新規火山・断層の発生に係る確率論的モデルの構築							
							→
④ 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 ・熱年代学的手法による侵食速度評価手法の構築 ・河川と離水河成地形の変動地形学的解析 ・海成侵食段丘への宇宙線生成核種年代測定法の適用 ・海底地形を対象とした地形解析と堆積構造解析 ・隆起・沈降境界域における地殻変動評価技術の整備 ・日本列島における長期的な侵食速度データカタログの整備							
							→
							→
							→
							→
							→
							→
							→

ゴシック表記は令和3年度に実施する研究項目を示す。



## 4.3 年代測定技術の開発

### 4.3.1 ウラン系列放射年代測定法の実用化

#### (1) 目的

ウランは微量元素であるものの岩石中に一般的に存在する元素であり、年代測定に応用できる対象範囲が広く、ウラン系列の放射年代測定は地球惑星科学の分野において広く行われている。ウラン-238 ( $^{238}\text{U}$ , 半減期:約 44 億 6,800 万年)及びウラン-235 ( $^{235}\text{U}$ , 半減期:約 7 億 380 万年)の壊変を年代時計として利用する U-Pb 法は、数十万年から数十億年までの幅広い時間分解能を有する。また、ウラン-234 ( $^{234}\text{U}$ )とトリウム-230 ( $^{230}\text{Th}$ )の放射非平衡を利用したウラン・トリウム(U-Th)法では、数千年からおよそ 50 万年までの比較的若い年代に対応した年代学的な評価が可能である。第 3 期中長期目標期間においては「3.2.3 年代測定技術の開発」に示したように、10 万年前後の断層の活動性の評価を行うため(活断層の認定)、長い半減期を持つウラン系列の年代測定技術開発に着手する。分析対象試料としては、ジルコンをはじめ、断層岩の割れ目等といった地質環境に普遍的に存在する炭酸塩鉱物を想定し、第 2 期中期目標期間に新たに整備したレーザーアブレーション付き誘導結合プラズマ質量分析計(LA-ICP-MS: Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry)を用いて、鉱物中等の微小領域に対応した年代測定を行うとともに、測定結果の評価を適切に行うため、元素のマッピングや挙動を把握することにも重点を置く。なお、ウラン系列放射年代測定法の実用化に向けて、まず先行研究が行われているジルコン試料の U-Pb 法を中心に技術基盤の整備を進め、次に炭酸塩鉱物への応用を試みる。

#### (2) 実施内容

LA-ICP-MS を用いた U-Pb 年代測定については、ウラン(U)の含有量が高いジルコンを対象鉱物として行われてきた(例えば、Hirata and Nesbitt, 1995<sup>135</sup>);Iizuka and Hirata, 2004<sup>136</sup>);Orihashi *et al.*, 2008<sup>137</sup>);Gaboardi and Humayun, 2009<sup>138</sup>);Kimura and Chang, 2012<sup>139</sup>)。ジルコンの年代測定技術を応用し、炭酸塩鉱物のウラン系列放射年代測定法の実用化を進め、平成 30 年度までに、土岐地球年代学研究所が保有する LA-ICP-MS を用いた測定技術の整備を行った。炭酸塩鉱物の年代測定では、測定に必要な不可欠な標準試料の欠如が技術開発上の最大の問題である。人工的な標準試料の作製(合成)については、令和 2 年度までに「炭酸塩鉱物の標準試料の選定」として実施しとりまとめた。平成 27 年度から平成 30 年度に実施した炭酸塩鉱物の標準試料の選定では、Roberts *et al.* (2017)<sup>140</sup>)により提示された米国南西部の Delaware 盆地にある上部ペルム系炭酸塩岩中の岩脈から採取された方解石 WC-1(全岩 U-Pb 年代値:254.4±3.2 Ma)が、LA-ICP-MS を用いた局所領域 U-Pb 年代測定に有用な試料であることが確認された。また、平成 29 年度から平成 30 年度に実施していた標準試料の人工的な作製においては、非晶質なカルシウム炭酸塩(ACC: Amorphous Calcium Carbonate)から合成される方解石が有望と判断された。令和元年度からは、ACC から合成された方解石の均質性の評価を実施し、その有用性を検討し、令和 2 年度は合成標準試料の評価を引き続き実施した。令和 2 年度までに、非晶質カルシウム炭酸塩に任意量の U、トリウム(Th)、鉛(Pb)を含有させる手法によって作製された試料の有効性が確認された(Miyajima *et al.*, 2021<sup>141</sup>)。このような標準試料及び現時点では最も有用性の高い天然の炭酸塩岩(WC-1, Roberts *et al.*, 2017<sup>142</sup>)を用いて、示準化石試料の分析による分析技術の妥当性評価を引き続き実施するとともに、岩石の割れ目に発達する脈状炭酸塩の年代測定を試みる。元素マッピング手法をはじめ、炭酸塩鉱物をターゲットとして整備する分析手法は、他の鉱物種(特にジルコン・モナザイト・アパタイト等の重鉱物)に有効であり、「4.1.1 断層の活動性に係る調査技術」及び「4.3.4 高分解能のテフラ同定手法の開発」に係る分析にも応用する。

(3) 令和3年度の研究計画(下記の番号は、(4)スケジュールの実施内容の番号に対応)

③ 割れ目を充填する炭酸塩の分析

令和3年度は、WC-1 や非晶質カルシウム炭酸塩から作製した標準試料を用いて、これまでに整備した分析手法により、割れ目を充填する炭酸塩鉱物等の未知試料の測定を試みる。

(4) スケジュール(第3期中長期目標期間の計画)

実施内容	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3
① ジルコンの年代測定 ・年代測定技術の整備	→						
② 炭酸塩鉱物の標準試料の選定 ・標準試料候補の試料採取	→						
・標準試料の探索・作製	→	→	→	→	→	→	
・標準試料の測定及び均質性の評価	→	→	→	→	→	→	
・測定条件等の検討	→	→	→	→	→	→	
③ 割れ目を充填する炭酸塩の分析 ・試料の測定及び年代値の評価		→	→	→	→	→	→
・測定条件等の検討及び分析精度の向上		→	→	→	→	→	→

ゴシック表記は令和3年度に実施する研究項目を示す。



### 4.3.2 光ルミネッセンス(OSL)年代測定法の実用化

#### (1) 目的

OSL 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り、数十年前～数十万年前までの年代測定が可能と考えられている。すなわち、 $^{14}\text{C}$  法と K-Ar 法との間の数万～数十万年の期間を埋める方法として、考古学、第四紀学、自然地理学に加えて防災に関連する分野での適用が期待されている。また、堆積物中の石英や長石等の測定により、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も可能である。第3期中長期目標期間においては、段丘堆積物を利用した隆起速度の推定や上載地層法による断層の活動性の評価に資するための OSL 年代測定法の実用化を図る。

#### (2) 実施内容

石英の OSL 年代測定手順を決定する上で重要となる石英粒子の OSL 信号特性は、後背地の地質や岩石から削剥された時期を反映していると考えられるが(Tokuyasu *et al.*, 2010<sup>142</sup>); Moska and Murray, 2006<sup>143</sup>), それがどのような条件で決まるのかについては、完全に明らかになっていない。平成 29 年度までに、石英の加熱温度や原岩の違いに対する OSL 及び熱ルミネッセンス(TL: Thermo Luminescence) 信号特性の変化を比較した。その結果からは、石英の OSL 及び TL 信号特性だけでは、それらの要因に係る情報まで詳細に把握することは困難であるとの見通しが得られた。むしろ、石英内部に捕獲された不対電子についての情報等、石英の信号についてより詳細に情報を解析できる電子スピン共鳴(ESR: Electron Spin Resonance) 信号特性の方が検討に適していると考えられる(原子力機構, 2018<sup>120</sup>)。

OSL 年代測定法については、あらかじめ段丘の形成年代が検討されている段丘堆積物や蓄積線量既知の標準試料を対象に OSL 測定を実施し、手法の開発を行う。令和元年度までに、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である 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.*, 2008<sup>144</sup>)を用いて、開発を進めている。令和元年度までに、長石と石英で飽和線量やブリーチされるまでに要する時間が異なる(塚本, 2013<sup>145</sup>); Buylaert *et al.*, 2012<sup>146</sup>)ことを考慮し、長石の測定に合わせた測定手順を整備した。令和 2 年度は、離水地形を対象に、長石 OSL 年代測定法の適用事例の蓄積を行った。

また、近年では、OSL 法は極めて低い閉鎖温度を持つ熱年代計としても注目されている。閉鎖温度は試料や測定条件によっても異なるが、石英で約 30～50 °C (Herman *et al.*, 2010<sup>147</sup>); Li and Li, 2012<sup>148</sup>), 長石で 25～70 °C (Guralnik *et al.*, 2015<sup>149</sup>); King *et al.*, 2016<sup>150</sup>)という値が報告されている。OSL 法は数十万年前より若い試料を対象とすることから、地層処分でも重要な 10 万年スケールの数百 m オーダの削剥史の検討に資する可能性がある。ただし、OSL 信号は 10 万年オーダで飽和するため、信号が飽和する前に閉鎖温度の深度から地表に達するような削剥速度(数 mm/yr 以上)が要求される(King *et al.*, 2016<sup>150</sup>)。この問題を克服するため、1,000 m 級の大深度ボーリングコア試料を用いて、OSL 熱年代法の適用性を評価する。平成 30 年度は、OSL 熱年代に係る諸外国の有識者との情報交換等を通じて測定手法を習得した。また、大深度ボーリングコア試料を対象とした測定を行い、侵食速度の遅い地域(0.1 mm/year 前後)における本手法の適用性を確認することができた(小形ほか, 2019<sup>151</sup>)。令和元年度からは、先行研究でも例がない侵食速度が中程度(0.1～1.0 mm/year)の地域に対する本手法の適用性の評

価を進めている。

(3) 令和3年度の研究計画(下記の番号は、(4)スケジュールの実施内容の番号に対応)

② 段丘堆積物の OSL 年代測定

OSL 年代測定法による段丘堆積物の隆起速度の推定手法を構築する。令和3年度は、令和2年度に引き続き、段丘堆積物から抽出した長石粒子を対象に pIRIR 年代測定を実施する。得られた年代値を石英 OSL の年代値及び層位学的な年代と比較し、妥当性を評価することで、長石の OSL 年代測定法の整備を行う。

③ OSL 熱年代の適用性の検討

地表からの深度数百 m における 10 万年スケールの削剥史の検討に資するため、OSL 熱年代法の適用性の評価を行う。令和3年度は、令和2年度に引き続き、侵食速度が中程度(0.1~1.0 mm/year)の地域に対する本手法の適用性を評価する。OSL 熱年代測定を実施し、推定された熱履歴を既往研究で報告された地質や地形情報、侵食速度と比較することで、侵食速度が中程度の地域に対する本手法の有効性について確認する。

(4) スケジュール(第3期中長期目標期間の計画)

実施内容	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3
① OSL/TL 信号特性の決定条件に関する検討 ・熱等の処理に対する OSL 及び TL 信号特性の変化条件の検討							
② 段丘堆積物の OSL 年代測定 ・石英を用いた年代測定手法の開発 ・長石を用いた年代測定手法の開発							
③ OSL 熱年代の適用性の検討 ・OSL 熱年代を用いた隆起・侵食の評価手法の開発							

ゴシック表記は令和3年度に実施する研究項目を示す。

### 4.3.3 アルミニウム-26 ( $^{26}\text{Al}$ ) 年代測定法, 塩素-36 ( $^{36}\text{Cl}$ ) 年代測定法, ヨウ素-129 ( $^{129}\text{I}$ ) 年代測定法の実用化

#### (1) 目的

宇宙線は大気中の元素や地表物質と反応し、各種の放射性核種を生成する。宇宙線生成核種である  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  及び  $^{129}\text{I}$  を用いた年代測定法は、数千年～数千万年の年代測定が可能であり、岩石の露出年代や地下水年代の推定に有用な手法である。第 3 期中長期目標期間においては、土岐地球年代学研究所で保有しているタンデム型加速器質量分析計(ペレット年代測定装置)を用いて、 $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  及び  $^{129}\text{I}$  の定量法を確立し、それぞれの年代測定法を実用化する。さらに、加速器質量分析計で測定可能な他の宇宙線生成核種等を用いた年代測定法について検討するため、試料調製法や測定法等に係る文献調査を継続し、検出器の改良等に関する研究開発を行う。

#### (2) 実施内容

加速器質量分析計を用いたこれまでの研究開発では、生物体試料や地下水中の二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) 等の炭素同位体比を測定することによる  $^{14}\text{C}$  年代測定法及び石英中に生成したベリリウムを測定する  $^{10}\text{Be}$  年代測定法に係る技術開発を進めてきた(例えば, Matsubara *et al.*, 2014<sup>48)</sup>)。岩石の露出年代等を推定するためには、 $^{10}\text{Be}$  と同様に宇宙線によって表層の岩石や土壌に含まれる石英中に生成する  $^{26}\text{Al}$  の蓄積量も定量すれば、より精度の高い年代推定が可能となる。そのため第 2 期中期目標期間においては、 $^{26}\text{Al}$  年代測定法の実用化に向け、試料調製及び測定条件の検討、標準試料を用いた試験測定を行ってきた。第 3 期中長期目標期間においては、まず試料調製法及び測定条件の最適化を行うことで実用化を目指し、平成 28 年度より実用化を開始した(Saito-Kokubu *et al.*, 2019<sup>152)</sup>)。また、さらに精度を向上させるため、ビームの安定化に向けたイオン源等の装置改良、バックグラウンド低減のための試料調製法の検討を行っている。

一方、 $^{36}\text{Cl}$  年代測定法については、これまでに行ってきた  $^{14}\text{C}$  年代測定法と同様に地下水の滞留時間等の推定が可能であり、 $^{14}\text{C}$  年代測定法より古い年代を測定できる。これまで、試料調製法や装置構成等の情報収集及び仕様の検討を行ってきた。第 3 期中長期目標期間においては、標準試料を用いた測定条件の調整及び実試料の測定を含めた最適化に加え、令和 2 年度からは試験測定を開始した。その結果、高同位体比 ( $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} \sim 10^{-12}$  台まで) の測定は実施可能であることがわかった。引き続き低同位体測定の実現を目指した調整と地下水からの  $\text{Cl}$  抽出法の検討を含む試料調製法を確立することで、試料調製から質量分析計による定量までの一連の年代測定のルーチン化を達成する。また、 $^{129}\text{I}$  年代測定法についても  $^{36}\text{Cl}$  年代測定法と同様に、地下水の滞留時間等の推定が可能であり、 $^{14}\text{C}$  年代測定法より古い年代を測定できることから、平成 29 年度より  $^{129}\text{I}$  年代測定法の実用化に向けた整備を開始し、令和元年度に年代測定のルーチン化を開始した。さらに、他の宇宙線生成核種等を用いた年代測定法の実用化を目指し、研究所で保有している加速器質量分析計の性能で測定が可能な核種に対して、試料調製法や装置構成等の情報の収集と仕様の検討を進めていく。また、当施設の性能で測定可能なように検出器系に関する研究開発を進める。

#### (3) 令和 3 年度の研究計画(下記の番号は、(4)スケジュールの実施内容の番号に対応)

##### ① $^{26}\text{Al}$ 年代測定法の実用化

令和 2 年度より引き続き、より高精度な測定を行うため測定試料を増やし、試料調製法の改良及び測

定でのバックグラウンドの低減やビームの安定化を行っていく。また、高精度測定を目指した情報収集を引き続き行う。

②  $^{36}\text{Cl}$  年代測定法の実用化

$^{36}\text{Cl}$  年代測定法の整備に向け、低同位体比 ( $10^{-13}\sim 10^{-15}$ ) 測定の実現を目指して検出器の最適化、同重体の分離等の測定条件の調整を行う。また、令和 2 年度に引き続き、試料調製法や装置構成に関する情報収集を行いルーチン化を見据えた施設間比較試験等も検討していく。

③  $^{129}\text{I}$  年代測定法の実用化

令和 3 年度は、令和 2 年度から引き続きより高精度な測定を行うために、実試料を用いた測定を増やし、並行してバックグラウンドの低減及びビームの安定化を行っていく。また、地下水試料以外の地質試料に対して、試料調製法に関する情報収集及び整備を進める。

④ 他の宇宙線生成核種等を用いた年代測定法の実用化に向けた研究開発

令和 2 年度に引き続き、新たな核種の測定が当施設の性能で測定可能となるように、検出器系の情報収集及び測定核種の同重体の分別技術に関する研究開発を行う。

(4) スケジュール(第3期中長期目標期間の計画)

実施内容	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3
① $^{26}\text{Al}$ 年代測定法の実用化 ・実用化に向けた試料調製法及び測定条件の最適化 ・試料調製法の改良, バックグラウンドの低減及びビームの安定化	→						
② $^{36}\text{Cl}$ 年代測定法の実用化 ・試料調製法の開発及び測定条件の調整 ・実試料による試験測定及び実用化に向けた施設間比較試験 ・試料調製法の改良, バックグラウンドの低減及びビームの安定化							→
③ $^{129}\text{I}$ 年代測定法の実用化 ・試料調製法の開発及び測定条件の調整 ・実試料による試験測定及び実用化 ・施設間比較試験 ・試料調製法の改良, バックグラウンドの低減及びビームの安定化					→		
④ 他の宇宙線生成核種等を用いた年代測定法の実用化に向けた研究開発 ・試料調製法や装置構成等の情報収集及び仕様検討 ・検出器系に関する研究・開発							→

ゴシック表記は令和3年度に実施する研究項目を示す。

#### 4.3.4 高分解能のテフラ同定手法の開発

##### (1) 目的

放射年代測定に供する地質試料が得られない場合には、それを補完する方法として、テフラを年代指標とした編年技術(テフロクロロジー)が用いられる。テフロクロロジーは、火山の多い日本において有効な技術であり、新しいテフラの発見や対比の研究が進むことで、これまで年代決定が困難であり、かつ地層処分にとって重要となる第四紀の堆積物の詳細な年代決定を行えるといった利点を有している。第3期中長期目標期間においても、平成28年度までに、既往研究による情報が十分でなかった北海道～東北地方のテフラを中心に火山ガラスの形態、屈折率、化学組成等に係る観察・分析を行いデータを整備した(原子力機構, 2016<sup>153</sup>)。これまでの研究開発では、火山ガラスの屈折率の多量測定とその統計解析によって、肉眼で確認できないような微量のテフラ起源物質を同定する多量屈折率測定地質解析法(RIPL法:Refractive Index Physical Lobar Method)を提示した(例えば、梅田・古澤, 2004<sup>154</sup>)。また、新たな手法としてテフラ中の鉱物に含まれるメルトインクルージョン(結晶成長の過程で取り込まれたメルトの化石)の化学組成によってテフラを同定する手法を提示した(例えば、中村ほか, 2011<sup>155</sup>;古澤ほか, 2013<sup>156</sup>)。しかしながら、テフラ粒子中にメルトインクルージョンが存在する必要があること、メルトインクルージョンの化学組成の定量には高度な技術が必要であるといった問題がある。そこで第3期中長期目標期間においては、風化に強いジルコン等の化学組成や年代、あるいは火山ガラス等の微量成分によってテフラを同定する手法を開発する。

##### (2) 実施内容

これまでに、既往研究による情報が十分でなかった北海道～東北地方のテフラを中心に鉱物組成や火山ガラスの形態・屈折率・化学組成等の特徴を記載・分析し、テフラカタログの整備を行った(原子力機構, 2016<sup>153</sup>, 2017<sup>157</sup>)。また、テフラの同定や起源の推定手法として、風化に強い鉱物である石英のESR, TL, OSL信号特性の適用性を検討したが、石英のこれらの物理化学特性だけでは、起源の推定や異なる起源ごとの識別をするだけの十分な情報を得ることは困難であることが分かってきた(原子力機構, 2017<sup>157</sup>)。

一方、同じく風化に強い鉱物であるジルコンの化学組成やU-Pb, FT年代といった特徴は、テフラ同定の強力なツールとなりつつある(檀原・岩野, 2017<sup>158</sup>;植木ほか, 2019<sup>159</sup>)。そこで本研究では、ジルコンのU-Pb年代等によるテフラ粒子の直接年代測定を試みる。さらに、LA-ICP-MSを用いた火山ガラス等の主成分・微量元素同時分析によるテフラ同定手法の開発も進める。

##### (3) 令和3年度の研究計画(下記の番号は、(4)スケジュールの実施内容の番号に対応)

###### ① テフラカタログの整備

テフラ粒子の微量元素組成のデータベース化に向け、令和元年度、令和2年度に引き続き、既存研究の情報整理及び既存試料の分析とデータ整理を行う。



② テフラ同定手法の高度化

平成 29 年度までに、LA-ICP-MS を用いた火山ガラスの主成分・微量元素同時分析がテフラ対比においても有効となり得ることを示した(生田ほか, 2016<sup>160</sup>)。平成 30 年度は、テフラ粒子の希土類元素組成パターンの取得を目指し、Maruyama *et al.* (2016)<sup>161</sup>にならった LA-ICP-MS を用いた分析手法の整備を行った。令和元年度から令和 2 年度には、整備した手法の高度化(高精度化)を実施するとともに、既に微量元素組成の得られているテフラと分析で得られたデータとを比較し、手法の妥当性評価を行った。令和 3 年度は、令和 2 年度に引き続き事例研究を増やし、微量元素でのカタログ化の進んでいないテフラの微量元素定量分析を実施する。

③ テフラ粒子の直接年代測定の検討

テフラ粒子からジルコン等の U-Pb 法及び FT 年代測定法による直接年代測定が可能な鉱物が確認される場合、その分析を試みる。また、第四紀の試料等で年代が数 Ma 程度と地質学的に若く、鉛濃度の低い鉱物に対しても U-Pb 年代測定が適用できるよう、Sakata *et al.* (2017)<sup>162</sup>による U-Th-Pb 放射壊変系列の放射非平衡の補正についても検討する。

(4) スケジュール(第 3 期中長期目標期間の計画)

実施内容	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3
① テフラカタログの整備 ・鮮新-更新世テフラの情報整備 ・テフラ粒子の微量成分に関する情報整備		→				→	→
② テフラ同定手法の高度化 ・化学組成等を用いた同定手法の検討 ・テフラ粒子の希土類元素分析手法の整備及び高度化		→			→	→	→
③ テフラ粒子の直接年代測定の検討 ・ジルコンを用いた検討 ・その他の鉱物による検討			→	→	→	→	→

ゴシック表記は令和 3 年度に実施する研究項目を示す。

### 4.3.5 地質試料を対象とした年代測定法及び化学分析手法の高度化

#### (1) 目的

土岐地球年代学研究所では、既に  $^{14}\text{C}$ 、 $^{10}\text{Be}$ 、(U-Th)/He 及び K-Ar 等による年代測定が実用化されている。しかし、地質試料の生成プロセスは複雑であり、いわゆる地層累重の法則が適用できない層序や年代値の逆転に加え、前処理方法や測定手法の違いによる年代値の差異等、解決すべき課題がある。近年の年代測定技術の発展によって、データ取得については迅速・簡便化されつつあるが、現状では最終的に得られたデータの解釈が困難になるケースが多い。正確な年代軸を構築し、過去の環境を復元するためには、岩石、鉱物、土壌、堆積物、炭酸塩沈殿物、植物化石、地下水等、それぞれの試料の特性及び生成環境に適応した分析手法の開発が必要である。本研究では、種々の地質試料に適応可能なサンプリング手法、試料選別、前処理手法の改良や測定装置の最適化を実施する。

さらに、地質試料に正確な年代軸を与えることにより、無機化学組成、有機元素組成、同位体比組成、鉱物組成の長期的な変遷に基づく過去の環境復元が可能になる。効率的かつ必要な精度での分析を行うためには、当時の古環境またはその後が生じた地質イベントに関する情報を保持している試料の選別が必要である。しかし、採取した全サンプル中から得られる適切な測定対象物(植物化石、鉱物や化学成分)は限られている。したがって、地質試料の化学・鉱物組成分析においても微量測定を可能にする技術開発が求められる。

#### (2) 実施内容

第3期中長期目標期間においては、地質試料の年代測定及び化学分析における前処理法等の改良と測定の高精度化を行う。年代測定法の高度化のうち  $^{14}\text{C}$  年代測定については、前処理手法の改良及び加速器質量分析法の最適化を進める。 $^{14}\text{C}$  年代測定では有機物試料や無機炭素試料を精製し、汚染のない純粋な二酸化炭素を得ること及び効率的に測定用のグラフィットターゲットを作製する必要があるが、採取量の限られた天然試料から二酸化炭素を高収率で抽出可能とするため、元素分析装置やリン酸法による自動炭酸塩前処理装置の最適化と前処理のルーチン化を進める。さらに、自動グラフィット調製装置(IonPlus社製 AGE3)の適用、ガラス製真空ラインと電気炉の改良及び加速器質量分析計のバックグラウンド低減のため装置の最適化等を進め、微量測定に対応した技術の開発を目指す。また、 $^{10}\text{Be}$ 、(U-Th)/He 及び K-Ar 測定については、天然試料の測定事例を蓄積し、前処理手法の改良と装置最適化のための技術基盤を整備する。

化学分析手法の高度化では、LA-ICP-MS、誘導結合プラズマ発光分光分析(ICP-AES: Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry)測定で必要となる試料の溶液化について、キレート樹脂やイオン交換樹脂による目的成分の濃縮手法を改良し、ルーチン化させる。また、固体試料の化学・鉱物組成分析について、蛍光X線分析装置(XRF: X-Ray Fluorescence analysis)、X線分析顕微鏡(XGT: X-ray Guide Tube)、X線回折(XRD: X-Ray Diffraction)を用いた標準試料と天然試料の測定事例を蓄積することで、定量分析の実用化を目指す。さらに有機元素分析及び安定同位体比分析では、元素分析-同位体比質量分析装置(EA-IRMS: Elemental Analyzer-Isotope Ratio Mass Spectrometry)を用いて、多元素同時測定による作業時間の短縮化を試みる。

また、微小領域の年代測定と化学分析手法を構築するため、試料の成長構造を可視化させるカソードルミネッセンス測定を応用した、固体試料の一部のみを採取可能なマイクロサンプリングシステムを実用化させる。さらに、採取した微量試料の特性に対応した単離濃縮技術の改良と各種分析装置の高感



度化を進め、個々の分析技術のみではなく一連のフローとして環境解析手法の構築を試みる。

(3) 令和 3 年度の研究計画(下記の番号は、(4)スケジュールの実施内容の番号に対応)

① 年代測定法の高度化

令和 2 年度は、少量試料での  $^{14}\text{C}$  年代測定を実用化するため、継続して EA-AGE3 の適用範囲を検討した。結果として従来法の 1/20 となる炭素量約 0.05 mg でのグラファイト調整に成功した。令和 3 年度は、少量試料での  $^{14}\text{C}$  年代測定の精度改善とバックグラウンド評価を継続して進める。また、炭素量 0.05 mg 以下でのグラファイト調整と  $^{14}\text{C}$  年代測定の検討を行う。AGE3 用のガス試料導入装置の最適化を行い、炭素収率の安定化と  $^{14}\text{C}$  測定のバックグラウンドを低減させるための検討を継続して進める。

② 化学分析手法の高度化

令和 2 年度は、XGT と波長分散型の XRF に加え、エネルギー分散型蛍光 X 線分析法により化学分析が可能な携帯型成分分析計(ポータブル XRF)の最適化、測定精度評価及び定量分析に必要な標準試料の選定を進めた。令和 3 年度は標準試料の選定を継続して進め、XRF 等による定量分析の高精度化を実施する。また、ポータブル XRF を用いたスモールスポット分析の最適化を行い、少量試料(従来法の 1/10 程度)への適用を進める。さらに、岩石や堆積物試料の化学分析を継続して実施し、定量分析に与える共存元素のマトリックスの影響等を低減させるためのデータを蓄積する。

③ 微小領域の年代測定と化学分析手法の構築

令和 2 年度は、炭酸塩等の微小領域試料の炭素・酸素の安定同位体比分析について前処理手法の効率化と測定精度の向上を検討した。令和 3 年度は EA-IRMS 等の分析装置の最適化と高感度化を継続して進め、固体及び気体試料の炭素、酸素、水素、窒素、硫黄等の多元素同位体比分析の実用化を進める。

(4) スケジュール(第3期中長期目標期間の計画)

実施内容	H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3
① 年代測定法の高度化							
・ <sup>14</sup> C年代測定の前処理手法の改良	→						
・ <sup>10</sup> Be, (U-Th)/He, K-Ar 測定の高精度化	→						
② 化学分析手法の高度化							
・IRMS 測定の前処理手法の改良	→						
・ICP-MS 測定の前処理手法の改良	→						
・XRF, XGT, XRD 測定等の高精度化	→						
③ 微小領域の年代測定と化学分析手法の構築							
・マイクロサンプリングシステムの実用化	→						
・単離濃縮技術の改良と分析装置の高感度化	→						

ゴシック表記は令和3年度に実施する研究項目を示す。

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) 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/maps/kagakutekitokuseimap.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/maps/kagakutekitokuseimap.pdf) (参照:2021年4月13日).
- 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(平成30年度～令和4年度), 2020, 71p.
- 17) 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://scct.numo.or.jp/GeoCom2/faces/project/view.xhtml> (参照:2021年4月28日).

- 18) 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.
- 19) 地質環境の長期安定性研究委員会編, 日本列島と地質環境の長期安定性, 日本地質学会, 2011, 地質リーフレット 4, ISSN 2185-8543.
- 20) 米倉伸之, 貝塚爽平, 野上道男, 鎮西清高編, 日本の地形 1 総説, 東京大学出版会, 2001, 349p, ISBN978-4-13-064711-3.
- 21) 原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会, 余裕深度処分管理期間終了以後における安全評価に関する考え方(案), 2010, 80p.
- 22) 原子力安全委員会, 放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について, 2004, 37p.
- 23) 野上道男, 地理学におけるシミュレーション, 地理学評論, vol.78, no.3, 2005, pp.133-146.
- 24) 梅田浩司, 安江健一, 石丸恒存, 地層処分と地質環境の長期安定性:地質環境の長期予測と不確実性についての検討例, 原子力バックエンド研究, vol.21, no.1, 2014, pp.43-48.
- 25) 尾上博則, 笹尾英嗣, 三枝博光, 小坂 寛, 過去から現在までの長期的な地形変化が地下水流動特性に与える影響の解析的評価の試み, 日本原子力学会和文論文誌, vol.8, no.1, 2009, pp.40-53.
- 26) 武田精悦, 中司 昇, 梅田浩司, 地質環境の長期安定性と地層処分—今後の研究開発に向けた視点—, 月刊地球, vol.26, no.6, 2004, pp.332-338.
- 27) 梅田浩司, 大澤英昭, 野原 壯, 笹尾英嗣, 藤原 治, 浅森浩一, 中司 昇, サイクル機構における「地質環境の長期安定性に関する研究」の概要—日本列島のネオテクトニクスと地質環境の長期安定性—, 原子力バックエンド研究, vol.11, no.2, 2005, pp.97-111.
- 28) 梅田浩司, 石丸恒存, 安江健一, 浅森浩一, 山田国見, 國分(齋藤)陽子, 花室孝広, 谷川晋一, 草野友宏, 「地質環境の長期安定性に関する研究」基本計画—第 2 期中期計画(平成 22 年度～平成 26 年度), JAEA-Review 2010-030, 2010, 48p.
- 29) 日本原子力研究開発機構, 日本原子力研究開発機構の改革計画に基づく「地層処分技術に関する研究開発」報告書—今後の研究課題について—, 2014, 24p.
- 30) Umeda, K. and Ninomiya, A., Helium isotopes as a tool for detecting concealed active faults, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, vol.10, no.8, 2009, doi:10.1029/2009GC002501.
- 31) 山田国見, 安江健一, 岩野英樹, 山田隆二, 梅田浩司, 小村健太郎, 阿寺断層の垂直変位量と活動開始時期に関する熱年代学的研究, 地質学雑誌, vol.118, no.7, 2012, pp.437-448.
- 32) 石丸恒存, 島田耕史, 末岡 茂, 安江健一, 丹羽正和, 梅田浩司, 高速増殖原型炉もんじゅ敷地内破碎帯の調査結果, 日本地質学会第 121 年学術大会講演要旨, 2014, p.179.

- 33) Umeda, K., Asamori, K., Makuuchi, A. and Kobori, K., Earthquake doublet in an active shear zone, southwest Japan: Constraints from geophysical and geochemical findings, *Tectonophysics*, vol.634, 2014, pp.116-126.
- 34) 吉山 昭, 柳田 誠, 河成地形面の比高分布からみた地殻変動, *地学雑誌*, vol.104, no.6, 1995, pp.809-826.
- 35) 田力正好, 安江健一, 柳田 誠, 古澤 明, 田中義文, 守田益宗, 須貝俊彦, 土岐川(庄内川)流域の河成段丘と更新世中期以降の地形発達, *地理学評論*, vol.84, no.2, 2011, pp.118-130.
- 36) 安江健一, 高取亮一, 谷川晋一, 二ノ宮 淳, 棚瀬充史, 古澤 明, 田力正好, 内陸部における侵食速度の指標に関する検討:環流丘陵を伴う旧河谷を用いた研究, *地質学雑誌*, vol.120, no.12, 2014, pp.435-445.
- 37) 梅田浩司, 谷川晋一, 安江健一, 地殻変動の一様継続性と将来予測:地層処分の安全評価の視点から, *地学雑誌*, vol.122, no.3, 2013, pp.385-397.
- 38) 田中和広, 地質環境の将来予測は可能か?—重要構造物の立地選定や安全な設計に向けて—, *電力土木*, no.351, 別冊, 2011, pp.8-13.
- 39) 三箇智二, 安江健一, 河床縦断形のシミュレーション, *地形*, vol.29, no.1, 2008, pp.27-49.
- 40) Saegusa, H., Yasue, K., Onoe, H., Moriya, T. and Nakano, K., Numerical assessment of the influence of topographic and climatic perturbations on groundwater flow conditions, *Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock*, Organization for Economic Co-operation and Development, 2009, pp.257-267, ISBN 978-9-26406-057-9.
- 41) 坂川幸洋, 梅田浩司, 浅森浩一, 熱移流を考慮した日本列島の熱流束分布と雲仙火山を対象とした熱・水連成シミュレーション, *原子力バックエンド研究*, vol.11, no.2, 2005, pp.157-166.
- 42) Niwa, M., Takeuchi, R., Onoe, H., Tsuyuguchi, K., Asamori, K., Umeda, K. and Sugihara, K., Groundwater pressure changes in Central Japan induced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol.13, no.5, 2012, doi:10.1029/2012GC004052.
- 43) Martin, A.J., Umeda, K. and Ishimaru, T., Application of the Bayesian approach to incorporate helium isotope ratios in long-term probabilistic volcanic hazard assessments in Tohoku, Japan, *Updates in Volcanology - New Advances in Understanding Volcanic Systems*, InTech, 2012, pp.117-146, ISBN 980-953-307-547-6.
- 44) Sato, H., The relationship between late Cenozoic tectonic events and stress field and basin development in northeast Japan, *Journal of Geophysical Research*, vol.99, no.B11, 1994, pp.22261-22274.
- 45) Fabbri, O., Iwamura, K., Matsunaga, S., Coromina, G. and Kanaori, Y., Distributed strike-slip faulting, block rotation and possible intracrustal vertical decoupling in the convergent zone of SW Japan, *Geological Society, London, Special Publications*, vol.227, 2004, pp.141-165.



- 46) 兼岡一郎, 年代測定概論, 東京大学出版会, 1998, 315p.
- 47) Saito-Kokubu, Y., Nishizawa, A., Suzuki, M., Ohwaki, Y., Nishio T., Matsubara, A., Saito, T., Ishimaru, T., Umeda, K. and Hanaki, T., Current status of the AMS facility at the Tono Geoscience Center of the Japan Atomic Energy Agency, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms, vol.294, 2013, pp.43-45.
- 48) Matsubara, A., Saito-Kokubu, Y., Nishizawa, A., Miyake, M., Ishimaru, T. and Umeda, K., Quaternary geochronology using Accelerator Mass Spectrometry(AMS)—Current status of the AMS system at the Tono Geoscience Center, Geochronology - Methods and Case Studies, InTech, 2014, pp.3-30, ISBN 978-953-51-1643-1.
- 49) Yamasaki, S., Zwingmann, H. and Tagami, T., Intermethod comparison for K-Ar dating of clay gouge, Mineralogical Magazine, vol.77, no.5, 2013, p.2542.
- 50) 山崎誠子, 山田国見, 田上高広, Zwingmann, H., 断層粘土の K-Ar 年代測定—自生鉱物の高純度分離手法と研究例—, フィッション・トラック ニュースレター, vol.26, 2013, pp.6-8.
- 51) 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.
- 52) 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.
- 53) 田村 肇, 佐藤佳子, 断層の K-Ar 年代学, 地質技術, no.3, 2013, pp.21-25.
- 54) 安江健一, 浅森浩一, 丹羽正和, 花室孝広, 國分(齋藤)陽子, 末岡 茂, 幕内 歩, 生田正文, 松原章浩, 田村 肇, 小堀和雄, 石丸恒存, 梅田浩司, 地質環境の長期安定性に関する研究年度報告書(平成 24 年度), JAEA-Research 2013-047, 2013, 109p.
- 55) 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.
- 56) 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.
- 57) 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, 105235, 2019, doi:10.1016/j.enggeo.2019.105235.
- 58) 加藤尚希, 廣野哲朗, 石川剛志, 大谷具幸, 阿寺断層田瀬露頭における断層ガウジの鉱物学的・地球化学的特徴, 活断層研究, no.43, 2015, pp.1-16.
- 59) 鷹澤好博, 高橋智佳史, 三浦知督, 清水 聡, 光ルミネッセンスと熱ルミネッセンスを利用した活

断層破碎帯の年代測定法, 地質学雑誌, vol.119, no.11, 2013, pp.714-726.

- 60) 石橋正祐紀, 安藤友美, 笹尾英嗣, 湯口貴史, 西本昌司, 吉田英一, 深部結晶質岩における割れ目の形成・充填過程と透水性割れ目の地質学的特徴—土岐花崗岩を例として—, 応用地質, vol.55, no.4, 2014, pp.156-165.
- 61) 清水麻由子, 大橋聖和, 丹羽正和, 高速摩擦試験により断層ガウジ模擬物質中に形成された CCA の特徴, 日本地質学会第 125 年学術大会講演要旨, 2018, R13-P-4.
- 62) 立石 良, 島田耕史, 植木忠正, 清水麻由子, 小松哲也, 末岡 茂, 丹羽正和, 安江健一, 石丸恒存, 断層ガウジの化学組成を用いた多変量解析による断層活動の有無の推定, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, 2019, SSS15-P27.
- 63) 立石 良, 島田耕史, 清水麻由子, 末岡 茂, 丹羽正和, 石丸恒存, 断層ガウジの化学組成を用いた線形判別分析による断層の活動性の推定, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, 2020, SSS16-P14.
- 64) 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.
- 65) 丹羽正和, 島田耕史, 断層運動が石英の水和層厚さに及ぼす影響: SIMS による分析, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 2017, SGL35-P01.
- 66) 丹羽正和, 島田耕史, 石英の水和反応に関する水熱実験: 自然現象に対する新たな年代測定手法の開発に向けて, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, 2019, HCG31-P03.
- 67) 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.
- 68) 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.
- 69) 宇波謙介, 福士圭介, 高橋嘉夫, 板谷徹丸, 丹羽正和, 能登半島西岸域の中新世安山岩中に認められる変質鉱物中のカリウムの存在状態と K-Ar 年代の意義, 日本地球化学会第 66 回年会要旨集, 2019, 3P19.
- 70) 宇波謙介, 福士圭介, 高橋嘉夫, 丹羽正和, 能登半島西岸域の中新世安山岩中に認められる粘土鉱物中のカリウムの存在状態, 令和元年度第 63 回粘土科学討論会講演要旨集, 2019, P11.
- 71) Zwingmann, H., Niwa, M., Yamaguchi, A. and Fujimoto, K., Constraining timing of thrust activity within the Nobeoka Thrust, SW Japan, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, 2020, SGL34-P10.
- 72) Yamaji, A., The multiple inverse method applied to meso-scale faults in mid-Quaternary fore-arc sediments near the triple trench junction off central Japan, *Journal of Structural Geology*, vol.22, no.4, 2000, pp.429-440.
- 73) 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.

- 74) 比嘉咲希, 照沢秀司, 丹羽正和, 島田耕史, 小松哲也, 活断層が不明瞭なせん断帯における力学的影響範囲の検討:南九州せん断帯の例, 日本地質学会第 126 年学術大会講演要旨, R15-P-18, 2019.
- 75) Watanabe, T. and Asamori, K., Dense GNSS observation at an active shear zone in southern Kyushu, southwest Japan, AGU Fall Meeting 2019, 2019, T13H-0324.
- 76) 丹羽正和, 島田耕史, 後藤 翠, 照沢秀司, 地形的に不明瞭な活構造帯を把握するための地質学的手法の検討:南九州せん断帯における事例, 令和 2 年度日本応用地質学会研究発表会, 2020, 17.
- 77) 渡部 豪, 浅森浩一, 島田顕臣, 小川大輝, 雑賀 敦, 梅田浩司, 南九州せん断帯における GNSS 観測(第 4 報), JpGU-AGU Joint Meeting 2020, 2020, SSS14-P23.
- 78) 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, Sebastien Biraud, 可搬型キャビティーリングダウン分光装置を用いた地表付近の極微量メタンガス濃度測定による活断層位置の特定:阿寺断層での測定事例, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, 2019, SSS15-P11.
- 79) Shimo, M., Niwa, M., Amano, K., Tokunaga, T., Tonokura, K., Matsuoka T. and Bitaud, S., Using precise trace gas measurements to investigate active fault, AGU Fall Meeting 2019, 2019, A21L-2801.
- 80) Niwa, M., Amano, K., Takeuchi, R. and Shimada, K., Rapid identification of water-conducting fractures using a trace methane gas measurement, Groundwater Monitoring and Remediation, 2021, doi:10.1111/gwmmr.12428.
- 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, 2021, doi:10.4116/jaqua.2007.
- 82) 中田 高, 活断層研究の将来について, 活断層研究, vol.2008, no.28, 2008, pp.23-29.
- 83) Unsworth, M., Malin, P., Egbert, G. and Booker, J., Internal structure of the San Andreas fault at Parkfield, California, Geology, vol.25, no.4, 1997, pp.359-362.
- 84) Iio, Y., Sagiya, T., Kobayashi, Y. and Shiozaki, I., Water-weakened lower crust and its role in the concentrated deformation in the Japanese Islands, Earth and Planetary Science Letters, vol.203, no.1, 2002, pp.245-253.
- 85) Negi, T., Mizunaga, H., Asamori, K. and Umeda, K., Three-dimensional magnetotelluric inversion using a heterogeneous smoothness-constrained least-squares method, Exploration Geophysics, vol.44, no.3, 2013, pp.145-155.
- 86) 根木健之, 梅田浩司, 松尾公一, 浅森浩一, 横井浩一, 大原英史, MT 法スペクトルデータの効率的且つ効果的な編集方法—コヒーレントノイズに対する有効性—, 物理探査, vol.63, no.5, 2010, pp.395-408.
- 87) 根木健之, 梅田浩司, 松尾公一, 浅森浩一, 横井浩一, 大原英史, MT 法スペクトルデータの効率的且つ効果的な編集方法—実データによる検証—, 物理探査, vol.64, no.2, 2011, pp.153-165.
- 88) Umeda, K., Asamori, K., Negi, T. and Kusano, T., A large intraplate earthquake triggered by latent magmatism, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol.116, no.B1, 2011,

doi:10.1029/2010JB007963.

- 89) 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.
- 90) Asamori, K. and Zhao, D., Teleseismic shear wave tomography of the Japan subduction zone, *Geophysical Journal International*, vol.203, no.3, 2015, pp.1752-1772.
- 91) 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.
- 92) 産業技術総合研究所, 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.
- 93) 産業技術総合研究所, 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其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.
- 94) 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.
- 95) 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.
- 96) 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.
- 97) Peacock, S.A., Fluid processes in subduction zones, *Science*, vol.248, no.4953, 1990, pp.329-337.
- 98) 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.
- 99) Miyashiro, A., *Metamorphic Petrology*, UCL Press, London, 1994, 404p.
- 100) 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.
- 101) 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.
- 102) 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.

- 103) 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.
- 104) 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.
- 105) 平塚晋也, 浅森浩一, 雑賀 敦, S 波スプリット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.
- 106) 草野友宏, 浅森浩一, 梅田浩司, 日本列島における地下水・温泉ガスのヘリウム同位体比データベースの作成, JAEA-Data/Code 2012-017, 2012, 19p.
- 107) 末岡 茂, 菅野瑞穂, 川村 淳, 丹羽正和, 岩野英樹, 檀原 徹, 熱年代解析と流体包有物分析に基づいた和歌山県本宮地域のスラブ起源熱水活動の熱的特徴, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, 2020, SCG59-03.
- 108) Morikawa, N., Kazahaya, K., Takahashi, M., Inamura, A., Takahashi, H.A., Yasuhara, M., Ohwada, M., Sato, T., Nakama, A., Handa, H., Sumino, H. and Nagao, K., Widespread distribution of ascending fluids transporting mantle helium in the fore-arc region and their upwelling processes: Noble gas and major element composition of deep groundwater in the Kii Peninsula, southwest Japan, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.182, 2016, pp.173-196.
- 109) 川辺岩夫, 地震に伴う地下水・地球化学現象, 地震 第 2 輯, vol.44, Supplement, 1991, pp.341-364.
- 110) 佐藤 努, 高橋 誠, 淡路島の異常湧水の化学組成変化—1995 年兵庫県南部地震による影響—, 地球化学, vol.31, no.2, 1997, pp.89-98.
- 111) 佐藤 努, [特集] 地震に伴って発生し四年以上も継続する温泉湧出, 産業技術総合研究所 IEVG ニュースレター, vol.2, no.3, 2015, pp.1-4.
- 112) Sato, T., Kazahaya, K., Matsumoto, N. and Takahashi, M., Deep groundwater discharge after the 2011 Mw 6.6 Iwaki earthquake, Japan, *Earth, Planets and Space*, vol.72, no.54, 2020, doi:10.1186/s40623-020-01181-7.
- 113) 大竹政和, 松代地震から 10 年, 科学, vol.46, no.5, 1976, pp.306-313.
- 114) 奥澤 保, 塚原弘昭, 松代群発地震地域に湧出する深層地下水, 地震 第 2 輯, vol.53, no.3, 2001, pp.241-253.
- 115) 後藤 翠, 村上雅紀, 酒井隆太郎, 照沢秀司, 末岡 茂, 地震及び断層活動による二次的影響に関する知見の整理(受託研究), JAEA-Review 2020-003, 2020, 60p.
- 116) 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.
- 117) 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.



- 118) 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.
- 119) 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.
- 120) 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.
- 121) 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.
- 122) 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.
- 123) 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.
- 124) 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.
- 125) Martin, A.J., 浅森浩一, 石丸恒存, Probabilistic based models used for assessing new volcano formation and the existence of concealed active faults—The main challenges and outlook, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018, HCG27-01.
- 126) 河上哲生, 末岡 茂, 田上高広, 飛騨山脈黒部地域に産する花崗岩類の固結圧力の推定, 日本地質学会第 126 年学術大会講演要旨, 2019, R1-P-2.
- 127) 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.
- 128) 小形 学, 末岡 茂, 光ルミネッセンス(OSL)を用いた超低温領域の熱年代学, RADIOISOTOPES, vol.70, no.3, 2021, pp.159-172.
- 129) 末岡 茂, 小松哲也, 松四雄騎, 代永佑輔, 佐野直美, 平尾宣暁, 植木忠正, 藤田奈津子, 國分陽子, 丹羽正和, 宇宙線生成核種法を用いた海成侵食段丘の離水年代の推定: 宮崎県日向市の事例(速報), 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, 2019, SGL27-02.
- 130) 松四雄騎, 小松哲也, 末岡 茂, 代永佑輔, 小川由美, 藤田奈津子, 國分(齋藤)陽子, 宇宙線生成核種を用いた海成段丘の離水年代測定: その適用性と限界, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, 2020, SCG59-P06.
- 131) 宮本 樹, 須貝俊彦, 木森大我, 小松哲也, 中西利典, 鬼怒川低地帯南部で掘削された複数のボーリングコアに基づく堆積相解析と第四紀後期の古地理変遷, 2020 年度日本地理学会春季学術大会, 日本地理学会発表要旨集, 2020, doi: [https://doi.org/10.14866/ajg.2020s.0\\_112](https://doi.org/10.14866/ajg.2020s.0_112).

- 132) 宮本 樹, 須貝俊彦, 丹羽雄一, 中西利典, 小松哲也, 日浦祐樹, 関東平野中央部における最終間氷期海成層の高度分布, 2021 年度日本地理学会春季学術大会, 日本地理学会発表要旨集, 2021, doi: [https://doi.org/10.14866/ajg.2021s.0\\_86](https://doi.org/10.14866/ajg.2021s.0_86).
- 133) 小松哲也, 末岡 茂, 日浦祐樹, 喜多村陽, 三箇智二, 日本列島における削剥速度データの編集, 日本地質学会第 126 年学術大会講演要旨, 2019, R15-P-2.
- 134) 日浦祐樹, 小松哲也, 末岡 茂, 喜多村陽, 三箇智二, 日本列島における数百～数千年スケールの侵食速度分布図, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, 2020, HCG28-P04.
- 135) Hirata, T. and Nesbitt R.W., U-Pb isotope geochronology of zircon: Evaluation of the laser probe-inductively coupled plasma mass spectrometry technique, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.59, no.12, 1995, pp.2491-2500.
- 136) Iizuka, T. and Hirata, T., Simultaneous determinations of U-Pb age and REE abundances for zircons using ArF excimer laser ablation-ICPMS, *Geochemical Journal*, vol.38, no.3, 2004, pp.229-241.
- 137) Orihashi, Y., Nakai, S. and Hirata, T., U-Pb age determination for seven standard zircons using inductively coupled plasma-mass spectrometry coupled with frequency quintupled Nd-YAG ( $\lambda = 213$  nm) laser ablation system: Comparison with LA-ICP-MS zircon analyses with a NIST glass reference material, *Resource Geology*, vol.58, no.2, 2008, pp.101-123.
- 138) Gaboardi, M. and Humayun, M., Elemental fractionation during LA-ICP-MS analysis of silicate glasses: implications for matrix-independent standardization, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol.24, no.9, 2009, pp.1188-1197.
- 139) Kimura, J. and Chang, Q., Origin of the suppressed matrix effect for improved analytical performance in determination of major and trace elements in anhydrous silicate samples using 200 nm femtosecond laser ablation sector-field inductively coupled plasma mass spectrometry, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol.27, no.9, 2012, pp.1549-1559.
- 140) Roberts, N.M.W., Rasbury, E.T., Parrish, R.R., Smith, C.J., Horstwood, M.S.A. and Condon, D.J., A calcite reference material for LA-ICP-MS U-Pb geochronology, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol.18, no.7, 2017, pp.2807-2814.
- 141) Miyajima, Y., Saito, A., Kagi, H., Yokoyama, T., Takahashi, Y. and Hirata, T., Incorporation of U, Pb and rare earth elements in calcite through crystallisation from amorphous calcium carbonate: Simple preparation of reference materials for microanalysis, *Geostandards and Geoanalytical Research*, vol.45, no.1, 2021, pp.189-205.
- 142) Tokuyasu, K., Tanaka, K., Tsukamoto, S. and Murray, A.S., The characteristics of OSL signal from quartz grains extracted from modern sediments in Japan, *Geochronometria*, vol.37, no.1, 2010, pp.13-19.
- 143) Moska, P. and Murray, A.S., Stability of the quartz fast-component in insensitive samples, *Radiation Measurements*, vol.41, no.7-8, 2006, pp.878-885.
- 144) 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.
- 145) 塚本すみ子, 長石の発光メカニズムに基づいた新しいルミネッセンス年代測定法, 月刊地球 号外, vol.62, 2013, pp.10-17.
- 146) Buylaert, J.P., Jain, M., Murray, A.S., Thomsen, K.J., Thiel, C. and Sohbati, R., A robust feldspar luminescence dating method for Middle and Late Pleistocene sediments, *Boreas*, vol.41, no.3, 2012, pp.435-451.
- 147) 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.
- 148) Li, B. and Li, S.H., Determining the cooling age using luminescence-thermochronology, *Tectonophysics*, vol.580, 2012, pp.242-248.
- 149) 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.
- 150) 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.
- 151) 小形 学, King, G., Herman, F., 末岡 茂, Multi-OSL 熱年代法による土岐花崗岩体の 10 万年スケールの熱履歴推定, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, 2019, SGL27-03.
- 152) Saito-Kokubu, Y., Fujita, N., Miyake, M., Watanabe, T., Ishizaka, C., Okabe, N., Ishimaru, T., Matsubara, A., Nishizawa, A., Nishio T., Kato, M., Torazawa, H. and Isozaki, N., Current status of JAEA-AMS-TONO in the 20th year, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol.456, 2019, pp.271-275.
- 153) 日本原子力研究開発機構, 平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発 報告書, 2016, 265p.
- 154) 梅田浩司, 古澤 明, RIPL 法によるテフラ降灰層準の認定と最新の噴火活動の推定, 月刊地球, vol.26, 2004, pp.395-400.
- 155) 中村千怜, 安江健一, 石丸恒存, 梅田浩司, 古澤 明, 緑色普通角閃石中のガラス包有物の主成分化学組成を用いた広域テフラの対比: 阪手テフラを例として, *地質学雑誌*, vol.117, no.9, 2011, pp.495-507.
- 156) 古澤 明, 安江健一, 中村千怜, 梅田浩司, 根ノ上高原に分布する土岐砂礫層のテフラ層序—石英中のガラス包有物の主成分化学組成を用いた広域テフラの対比—, *応用地質*, vol.54, no.1, 2013, pp.25-38.
- 157) 日本原子力研究開発機構, 平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発 報告書, 2017, 230p.
- 158) 檀原 徹, 岩野英樹, FT および U-Pb ダブル年代測定の応用と解釈, 日本第四紀学会 2017 年大会講演要旨, 2017, P-10.

- 159) 植木忠正, 丹羽正和, 岩野英樹, 檀原 徹, 平田岳史, 中部日本, 鮮新世東海層群中の大田テフラのジルコン U-Pb およびフィッション・トラック年代, 地質学雑誌, vol.125, no.3, 2019, pp.227-236.
- 160) 生田正文, 丹羽正和, 檀原 徹, 山下 透, 丸山誠史, 鎌滝孝信, 小林哲夫, 黒澤英樹, 國分(齋藤)陽子, 平田岳史, 歴史時代に噴出した同一火山由来の軽石層の同定: 宮崎平野で見出された桜島文明テフラの例, 地質学会誌, vol.122, no.3, 2016, pp.89-107.
- 161) Maruyama, S., Hattori, K., Hirata, T. and Danhara, T., A proposed methodology for analyses of wide-ranged elements in volcanic glass shards in widespread Quaternary tephtras, *Quaternary International*, vol.397, 2016, pp.267-280.
- 162) Sakata, S., Hirakawa, S., Iwano, H., Danhara, T., Guillong, M. and Hirata, T., A new approach for constraining the magnitude of initial disequilibrium in Quaternary zircons by coupled uranium and thorium decay series dating, *Quaternary Geochronology*, vol.38, 2017, pp.1-12.





