JAEA-Review
2017-022
DOI:10.11484/jaea-review-2017-022

JAEA-Review

地質環境の長期安定性に関する研究　年度計画書（平成 29 年度）

Research Plan on Geosphere Stability for Long-term Isolation of Radioactive Waste
(Scientific Programme for Fiscal Year 2017)

石丸 恒存　尾方 伸久　島田 顕臣　國分（齋藤）陽子
浅森 浩一　丹羽 正和　渡邊 隆広　雑賀 敦
末岡 茂　横山 立憲　藤田 奈津子　清水 麻由子

Tsuneari ISHIMARU, Nobuhisa OGATA, Akiomi SHIMADA, Yoko SAITO-KOKUBU
Koichi ASAMORI, Masakazu NIWA, Takahiro WATANABE, Atsushi SAIGA
Shigeru SUEOKA, Tatsunori YOKOYAMA, Natsuko FUJITA and Mayuko SHIMIZU

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 Decommissioning and Radioactive Waste Management

December 2017
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2017

JAEA-Review 2017-022

地質環境の長期安定性に関する研究　年度計画書（平成 29 年度）

日本原子力研究開発機構
バックエンド研究開発部門　東濃地科学センター

石丸　恒存，尾方　伸久，島田　顕臣，國分（齋藤）陽子，浅森　浩一，丹羽　正和，
渡邊　隆広，雑賀　敦，末岡　茂，横山　立憲，藤田　奈津子，清水　麻由子

（2017 年 9 月 26 日受理）

本計画書は，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～平成 33 年度）における平成 29 年度の研究開発計画である。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，第 2 期中期目標期間（平成 22 年度～平成 26 年度）における研究開発の成果，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していく。

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

JAEA-Review 2017-022

Research Plan on Geosphere Stability for Long-term Isolation of Radioactive Waste
(Scientific Programme for Fiscal Year 2017)

Tsuneari ISHIMARU, Nobuhisa OGATA, Akiomi SHIMADA, Yoko SAITO-KOKUBU,
Koichi ASAMORI, Masakazu NIWA, Takahiro WATANABE, Atsushi SAIGA, Shigeru SUEOKA,
Tatsunori YOKOYAMA, Natsuko FUJITA and Mayuko SHIMIZU

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

(Received September 26, 2017)

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, in fiscal year 2017. The objectives and contents in fiscal year 2017 are described in detail based on the outline of 7 years plan (fiscal years 2015-2021). Background of this research is clarified with the necessity and the significance for site investigation and safety assessment, and the past progress in this report. In addition, 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

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 期中長期計画における研究開発の方向性 …… 6
3.2 第 3 期中長期計画における達成目標 …… 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. 平成 29 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}Al）年代測定法，塩素-36（^{36}Cl）年代測定法の実用化 …… 29
4.3.4 希ガス同位体を用いた地下水年代測定法の実用化 …… 32
4.3.5 高分解能のテフラ同定手法の開発 …… 34
4.3.6 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 …… 36

参考文献 …… 38

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 target of research and development ····· 6
3.1 Direction of research and development in third period plan ····· 6
3.2 Target of research and development in third period 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 research and development in FY2017 ····· 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 Aluminium-26 and Chlorine-36 dating methods ····· 29
4.3.4 Development of groundwater dating method with noble gases ····· 32
4.3.5 Development of high-resolution tephrochronology ····· 34
4.3.6 Development of methods of dating and chemical analysis for geological samples ····· 36

References ····· 38

1. はじめに

日本列島は，プレートの収束帯に位置しており，安定大陸に比べて地殻変動や火成活動が活発であることから，我が国における地層処分の概念は，「長期的な安定性を備えた幅広い地質環境」に「性能に余裕をもたせた人工バリア」を設置するという特徴を有する（核燃料サイクル開発機構，1999[1]：以下，「第2 次取りまとめ」）。すなわち，第一に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・噴火や断層活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（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」[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]）（以下，「考慮事項」）を公表した。その一方で，「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福島第一原子力発電所の事故に伴い，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」（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平行した研究開発の必要性も併せて示された。

地質環境の長期安定性に関する研究では，第 2 期中期計画（平成 22 年度～平成 26 年度）において「精密調査において重要となる地質環境条件に留意して，天然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価する手法を整備する」ことを具体化した基本計画（梅田ほか，2010[14]）に基づき，研究開発を進めてきた。その結果，希ガス同位体等を用いた活断層の検出技術，地殻の不均質構造を把握するための三次元比抵抗構造解析手法，海溝型地震に伴う地下水位変化の予測手法等，サイト選定や安全評価に必要な技術基盤の整備が進んだ。その一方で，地下で遭遇した断層の活動性の評価や 10 万年を超える長期の地質環境の予測・評価等は，今後も引き続き研究開発を継続していくことが重要である。第 3 期中長期目標期間（平成 27 年度～平成 33 年度）の研究開発計画については，それまでの成果や，「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[13]）等の国の関係報告等を踏まえ，「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[15]）を策定した。本報は第 3 期中長期目標期間（平成 27 年度～平成 33 年度）における平成 29 年度の研究開発計画である。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[15]）に基づき，第 2 期中期目標期間における研究開発の成果，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といった仕組みである。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（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（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（これが第 3 期中長期計画で示されている「自然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価する技術」に相当する）。これらのうち前者は特にサイト選定に，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）に存在するのか否か，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う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も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[13]）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すで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[13]）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 300m 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（日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会編，2011[16]）等により，事前確認や文献調査の段階でその範囲をおおむね特定することは可能である。一方，断層活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下で，現在の活断層の伸展や破砕帯の拡大，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（米倉ほか編，2001[17]），100 万年オーダの時間スケールでの予測・評価を想定した場合では，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[13]）。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活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」，原子力安全委員会，2010[18]）。また，「放射性廃棄物処分の安全評価に係わる共通的な重要事項について」（原子力安全委員会，2004[19]）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（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，断層活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である（物理モデルによる数値解析による予測；演繹的アプローチ）。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である（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）。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[20]）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最近ではなされている。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実性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[21]）。

例えば，尾上ほか（2009）[22]では，木曽山地から濃尾平野に至る庄内川流域を対象に，1.5Ma 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，1.1Ma 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総体的な不確実性の一つと捉えることができる（梅田ほか，2014[21]）。このような不確実性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 万年以上の予測・評価には，地質環境がオーダで変化する不確実性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実性がオーダの範囲）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 期中長期計画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[23]; 梅田ほか, 2005[24], 2010[14]）。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。現時点において国による申し入れや応募等もなされておらず，特定の地質やサイト（テクトニックセッティング）が選定されていないことから，第 3 期中長期中長期目標期間においてもこの枠組みでの研究開発を引き続き推進していく。第 3 期中長期計画（平成 27 年度～平成 33 年度）では，地質環境の長期安定性に関する研究については，「自然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価する技術を，地球年代学に係る最先端の施設・設備も活用しつつ整備する」ことを目標に掲げている。また，地層処分基盤研究開発に関する全体計画のフェーズ 3（平成 25 年度～）では，当面の目標として「地質環境特性の時間的な変化や地質環境の超長期的な変化を評価するための体系的な研究開発を進める（地質環境長期変動モデルや革新的分析技術などの要素技術の開発等）」ことが挙げられている。なお，今後は地層処分事業における「科学的特性マップ」の提示や安全規制に係る安全審査指針・基準等も具体化していくことから，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なる。

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福島第一原子力発電所の事故に伴い，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）[12]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[13]）。これによると，今後の地層処分事業の取り組みと平行して進めるべき研究開発として，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

- 火山の分布およ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およびマント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およ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および検討。
- 深部流体および非火山性熱水の流出の評価に反映するための，深部流体および非火山性熱水に

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およ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，既存の活断層の破砕帯の分布等の調査事例の蓄積およ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（たとえば，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などの技術の確保や調査事例の蓄積。

第 3 期中長期計画では，これら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（「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[25]）。

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

3.2 第 3 期中長期計画における達成目標（今後 7 か年に何をどこまで実施するか）

3.2.1 調査技術の開発・体系化

調査技術の開発・体系化については，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予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[26]）や上載地層法の適用が困難な断層の活動性（山田ほか，2012[27]; 石丸ほか，2014[28]）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[29]）。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[13]）。特に，内陸部では河成段丘の編年（TT 法：Terrace to Terrace；吉山・柳田，1995[30]）に基づく隆起量の算定（田力ほか，2011[31]）が行えるが，西南日本のように河成段丘の発達が乏しい地域を対象に，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[32]）。

以上のように，第 2 期中期目標期間における成果を踏まえると，火成活動及び隆起・侵食／気候・海水準変動に関する地上からの調査に係る技術基盤はおおむね整備されていると考えられるが，例えば，100 万年を超えるような長期的な地下水流動を検討する際に基本的な情報となる山地の形成プロセスを把握するための後背地解析技術等については，第 3 期中長期目標期間においても研究開発を引き続き進めていく。断層活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であることから，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[13]）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，今後はこれらの分布に関する調査技術の開発に着手する。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（1000 年～100 万年オーダ）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，日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会編，2011[16]；梅田ほか，2013[33]）。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（田中ほか，2011[34]）。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 期中期目標期間を含めたこれ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[35]; Saegusa *et al*., 2009[36]）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[37]; Niwa *et al*., 2012[38]）の整備を進めた。また，将来 10 万年程度にマグマの上昇・噴火が起こりう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[39]）。

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おおむね整備されており，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[39]）。一方，断層活動については，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[40]; Fabbri *et al*., 2004[41]）。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2期中期目標期間においては，過去 100 万年程度の沿岸域や内陸部の大局的な地形・地質構造を復元するとともに，過去から現在までの地下水流動や水質の変化のシミュレーション技術を提示することにより，所期の目標を達成した。第 3 期中長期目標期間では，これらの技術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て解析結果の妥当性を検討するとともに，シミュレーション技術の問題点を明確にした上で，その改良を進めていく。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着手する。

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，断層活動や隆起・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 MIS5e 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活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[42]），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タンデム型加速器質量分析計（ペレトロン年代測定装置）を用いて鉱物中のベリリウム-10(^{10}Be)年代測定法の実用化を行った（Saito-Kokubu *et al*., 2013[43]; Matsubara *et al*., 2014[44]）。一方，四重極型質量分析計（QMS）と誘導結合プラズマ質量分析計(ICP-MS）を用いたウラン・トリウム・ヘリウム（(U-Th)/He）年代測定システム，希ガス質量分析計によるカリウム・アルゴン(K-Ar)年代測定システムの開発を行い，年代標準試料等の測定を行ってきた（Yamasaki *et al*., 2013[45]; 山崎ほか，2013[46]; Yamada *et al*., 2012[47]）。特に，断層の活動性の評価のため，0.1 μm 以下の自生雲母粘土鉱物を抽出し，感度法によって K-Ar 年代測定を行うことを可能とした（Yamasaki *et al*., 2013[48]; 田村・佐藤，2013[49]）。第 3 期中長期目標期間においても，土岐地球年代学研究所が保有する加速器質量分析計，誘導結合プラズマ質量分析計，希ガス質量分析装置等を用いた高精度の放射年代測定法の研究開発を引き続き進めていくとともに，さらに新たな年代測定法の開発にも取り組む。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）年代測定法，珪酸塩鉱物のアルミニウム-26（^{26}Al）年代測定法，地下水の塩素-36（^{36}Cl）やヨウ素-129（^{129}I）年代測定法及びヘリウム-4（^{4}He），ネオン-21（^{21}Ne），アルゴン-40（^{40}Ar）等の非放射性同位体を用いた地下水の年代測定法等の実用化を図る。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. 平成 29 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 期中期計画（梅田ほか, 2010[14]）では，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）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[27]）。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，断層の活動時期の推定を試みた。これは，断層活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[49]）。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砕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，1Ma 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てきた（Yamasaki *et al*., 2013[48]; 安江ほか, 2013[50]; Niwa *et al*., 2016[51]）。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 期中長期計画（梅田ほか, 2015[15]）では，この課題を踏まえ，イライトよりも低温で晶出・沈殿する鉱物（スメクタイト，鉄水酸化物等）にも着目した研究を行う。例えば，スメクタイトは層間の電気的な結合力がイライトと比べて弱いため，閉鎖系を前提とした放射年代測定の適用は一般的には難しい。しかし逆に，層間イオンの交換反応等を通じた化学組成の変化により，断層活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。実際の活断層においても，スメクタイトに富む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[52]; 加藤ほか, 2015[53]）。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，跡津川断層等での研究や，最近の原子力機構高速増殖原型炉「もんじゅ」敷地内破砕帯の評価に係る一連の調査・分析から，断層岩に含まれる石英粒子の表面構造の電子顕微鏡等を用いた観察によって，繰り返し活動している活断層と，そうでない断層とを識別できる見通しを得た（Kanaori *et al*.,

1985[54]; Niwa *et al*., 2016[55])。また，OSL や熱ルミネッセンス（TL）を利用した年代測定等（鴈澤ほか，2013[56]），石英粒子を用いて断層の活動年代を推定する手法も実用化の余地がある。第 3 期中長期計画（梅田ほか，2015[15]）では，土岐地球年代学研究所に新たに設置された分析機器・分析システム（電界放出型電子プローブマイクロアナライザ（FE-EPMA），OSL，電子スピン共鳴装置（ESR）等）を駆使して，断層岩中の石英粒子の構造解析による断層の活動性評価や石英粒子を用いた年代測定手法の開発も併せて実施する。なお，石英等の OSL/TL 年代は，炭素-14（^{14}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，前述の③に関しては，特に比較的低温で形成される鉱物脈を用いた観察・分析手法の開発を行う。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等の化学組成や，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[57]）。地質学的に最近の断層活動との関係に関しては，地表からの酸化的な地下水との反応によって形成される炭酸塩鉱物に着目することが重要である。第 3 期中長期計画（梅田ほか, 2015[15]）では，以上のような化学分析，微細組織観察と，ウラン系列等を用いた放射年代測定とを組み合わせることにより，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を変位マーカーとした断層の活動性の評価手法の開発を進めていく。

(3) 平成 29 年度の研究計画

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

平成 28 年度までは，スメクタイトの酸素同位体比に基づく断層岩の形成環境（地表付近でスメクタイトの形成が起こったかどうか）の推定（丹羽ほか，2016[58]），断層岩の粒子径や化学組成，石英粒子の表面構造及び ESR 信号強度に基づく活断層と非活断層との識別に係る研究開発を進めてきた（Niwa *et al*., 2016[55]; 植木ほか，2016[59]）。平成 29 年度は，既に露頭記載のデータが得られている天然の試料に加え，室内での変形実験によって得られた試料を対象に，断層岩の微細構造の観察や鉱物・元素分布の分析を行い，せん断変形速度，温度，水分量，水質等との関係について検討し，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基準を示すための基礎資料とする。また，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，石英表面の水和層の性状や厚さについての分析を行い，断層中の試料と母岩中の試料との比較を試みる。

② 鉱物脈等と断層との切断関係に基づく評価手法の開発

鉱物脈等と断層との切断関係に基づく評価手法に関しては，比較的低温で形成される鉱物脈に着目して，炭酸塩鉱物脈等のカソードルミネッセンスやＸ線分析顕微鏡（XGT），FE-EPMA 等による観察を行い，鉱物脈の形成プロセスについて引き続き検討する。

③ 上載地層の編年手法の高度化

数万年～十数万年前に堆積した段丘堆積物を用いて，その砂層中に含まれる石英等の OSL 年代測定を行い，同一層準から採取したテフラとの対比等に基づき，OSL 年代測定法による段丘堆積物の編年手法の有効性を検討するとともに問題点を抽出する。

(4) スケジュール（当面 7 年間の計画）

実施内容	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33
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動性の評価	→	→	→	→	→		
・石英粒子を用いた活動性の評価	→	→	→				
・石英粒子を用いた年代測定手法の開発			→	→	→	→	→
② 鉱物脈等と断層との切断関係に基づく評価手法の開発							
・鉱物脈の形成プロセスの検討	→	→	→	→			
・鉱物脈を用いた年代測定・評価手法の開発				→	→	→	→
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					→	→	→

ゴシック表記は平成 29 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，断層活動，マグマ活動）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[60]）。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ー法や地磁気・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[61]; Iio *et al.*，2002[62]）。このため，将来の断層活動やマグマ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 期中期計画では，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及び地震波トモグラフィー法，不均質平滑化拘束条件付き 3 次元 MT インバージョン法（Negi *et al.*，2013[63]），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[64]，2011[65]）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[66]，2014[29]）。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。また，2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う地殻応力場の変化によって流体が移動し，これに伴う地殻変動が観測されている（Takada and Fukushima，2013[67]）。このことから，地層処分の安全性の向上に対して，測地学的観測のみならず地震波や地磁気・地電流等による処分場の地殻活動モニタリングについて検討することも重要であると考えられる。

第 3 期中長期計画では，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，地震波後続波を用いた高分解能地震波トモグラフィー法，カルマンフィルタ等を用いた MT 法観測データの S/N 比向上に関する要素技術の開発を継続する。これらによって地震波と地磁気・地電流を組み合わせた高空間分解能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）観測，合成開口レーダ（SAR）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。モニタリングについては，地下深部の状態変化に対する観測データの応答性を検討するため，過去に発生した火山活動等の流体の移動を伴った現象を対象として，MT 法観測データから導出される種々のパラメータ（見掛比抵抗，phase tensor 等）や地震波走時の時間変化の抽出等を試みる。また，断層活動を含む地殻活動を仮定したモデル計算を行い，これらの結果を踏まえて，モニタリングに有効な観測手法を構築する。

(3) 平成 29 年度の研究計画

① 地殻構造イメージング手法の高度化

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，地表付近の堆積層等の低速度層の不均質分布を三次元波線追跡や理論走時計算に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[68]），地磁気・地電流観測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。平成 29 年度は，地殻内で発生した浅発地震等に伴う後続波の検出及び地震波トモグラフィーへの適用を試行する。また，MT 法については，観測データの S/N 比を向上させるための手法として，ウェーブレット解析等を用いた観測データ処理手法の開発を進める。

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 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ことも期待される。これまで，1997 年鹿児島県北西部地震の発生により未成熟な断層の存在が示唆される九州南部のせん断帯を事例とした GNSS 解析や SAR 解析に基づき，地表の変位速度やひずみ速度を推定した。平成 29 年度は，「4.2.2 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術」で実施する GNSS 稠密観測や地殻変動のシミュレーションのほか，「①地殻構造イメージング手法の高度化」に関する成果等に基づき，せん断帯の形成や運動に関与する深部すべりや非弾性変形の存否について引き続き検討する。

③ 沿岸部における地殻構造の調査技術

これまで，本研究における技術開発は，内陸部を事例とした検討を中心として進めてきた。一方で，「地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果」（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，2017[69]）では，廃棄体の輸送時の安全性の確保の観点から，沿岸部（島嶼部や海底下を含む）については，「好ましい範囲」の要件の一つと整理されている。このような背景から処分事業等に係る動向や研究開発課題の優先度を踏まえ，当面は沿岸部における地殻構造（特に，地下深部のマグマ・深部流体）の調査技術に関する検討を進め，平成29年度より検討開始を予定していた地殻活動のモニタリング技術の開発については第 3 期中長期目標期間の後半より開始することとした。平成 29 年度は，地下深部のマグマ・深部流体の分布推定に関する既存の調査・研究事例（地震学的手法，電磁気学的手法等）から沿岸部における適用性や課題を整理するとともに，陸域と比べて空間分解能や精度が劣ること等が想定される自然地震データを用いた地震学的手法（地震波トモグラフィ等）について，その改善に向けた手法の検討を実施する。

(4) スケジュール（当面 7 年間の計画）

実施内容	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33
① 地殻構造イメージング手法の高度化							
・地震波後続波等を用いた高分解能地震波トモグラフィーの開発	→	→	→	→	→		
・MT データの S/N 比向上に係る解析手法の開発	→	→	→	→	→		
・地殻活動のモニタリング技術の開発						→	→
② 測地学的手法を用いた震源断層の調査技術							
・GNSS，SAR 観測・シミュレーションによる弾性・非弾性変形領域の抽出	→	→	→	→	→	→	→
・未成熟な断層の調査技術の開発				→	→	→	→
③ 沿岸部における地殻構造の調査技術							
・沿岸部の調査手法に関する情報収集・整理		→	→				
・地震学的手法の適用性改善に関する検討			→	→	→	→	

ゴシック表記は平成 29 年度に実施する研究項目を示す。

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[13]）。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，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」の研究成果の活用を図る。

(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，田中ほか，2004[70]; 産業技術総合研究所，2007[71]，2012[72]），これらの分布には偏在性が認められる。深部流体は，pH 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[73]; 風早ほか，2014[74]）。深部流体の起源については，マグマが冷却・固結する際に放出されるマグマ水（Sparks，1978[75]）のほか，スラブ起源流体（Peacock，1990[76]）や続成脱水流体（Kyser and Hiatt，2003[77]），変成脱水流体（Miyashiro，1994[78]）等が知られている。これらの深部流体の起源については，従来の酸素・水素同位体やリチウム（Li），ホウ素（B），塩素（Cl）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[79]; 網田ほか，2014[80]）。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[71]，2012[72]）。

第 2 期中期計画では，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てきた（例えば， Umeda *et al*.，2011[66]; Umeda *et al*.，2012[79]; Umeda *et al*.，2013[81]; Umeda *et al.,* 2013[82]）。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 期中長期計画では，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，流体の化学的な分類のみならず，地質学，地球物理学的な側面を含めて類型化を行った上で，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，形成・移動メカニズムに関して得られた科学的知見をセーフティーケース（地層処分システムが長期間にわたって安全であることを主張する論拠）に反映する。また，深部流体が高温である場合には熱環境への著しい影響を回避する必要がある。さらに，pH が酸性あるいは炭酸化学種濃度が高い場合には，化学場への著しい影響を回避する必要があることから，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に着手する。

(3) 平成 29 年度の研究計画

① 深部流体の総合的分類

平成 28 年度までに，これまで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を整理・更新するとともに，既存の研究事例等から，深部流体の化学的特徴について整理した。平成 29 年度は，地下水・温泉ガスのヘリウム同位体比に加えて，地下水のリチウム，ホウ素，塩素や溶存全炭酸（DIC：dissolved inorganic carbon），酸素・水素・炭素同位体等の地球化学的指標や地質学的（深度，岩種，構造等），地球物理学的（震源分布，地震波構造，比抵抗構造等）情報を踏まえつつ，深部流体のタイプについて類型化を引き続き試みる。

② 形成・移動メカニズムに関する科学的知見の蓄積

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。平成 29 年度は，地殻深部あるいはマントル最上部に存在する深部流体が地表に流入する可能性やそれを評価するための手法について検討するため，既存の研究事例を収集し，深部流体の移動メカニズムやそれを示す観測可能なパラメータ等について整理する。

③ 深部流体の分布に関する調査技術

平成 28 年度までに，西南日本を事例として，地下水・温泉ガスの希ガス同位体組成や地震波速度構造，比抵抗構造のほか，測地学的データや震源分布等の情報を収集し，スラブ起源流体の分布との関連性について検討した。平成 29 年度は，「①深部流体の総合的分類」や「4.1.2 地殻構造の高空間分解能イメージング技術」での成果を活用しつつ，地球化学的情報や地球物理学的情報と深部流体の分布域との対応性について整理する。

(4) スケジュール（当面 7 年間の計画）

実施内容	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33
① 深部流体の総合的分類							
・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	→	→	→	→	→		
② 形成・移動メカニズムに関する科学的知見の蓄積	→	→	→	→	→	→	→
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			→	→	→	→	→

ゴシック表記は平成 29 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は，1000 年に 1 回程度の頻度で発生する海溝型巨大地震であるが，これに伴い内陸地震が活発化した地域や 1m 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が発生した。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アンス（復元性）を把握するため，様々な現象を数学的なモデルで表現し，計算機を使って再現・予測する数値実験と，代表的なフィールドでの調査に基づくナチュラル・アナログ研究を併用して進めていく。なお，当面取り扱うシナリオとしては，海溝型巨大地震や内陸地震（断層活動）に伴う地下水理場の擾乱等であるが，研究ニーズによって必要とされるシナリオの検討を行うこととする。

(2) 実施内容

1946 年南海地震（川辺，1991[83]），1995 年兵庫県南部地震（佐藤・高橋，1997[84]）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の擾乱が生じている範囲は地殻浅所と考えられている。第 2 期中期計画では，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。しかしながら，いわき市で発生している異常湧水の原因は，単なる地殻歪の変化では説明できず，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 [85]）。

第 3 期中長期計画では，2011 年東北地方太平洋沖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，いわき市周辺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，断層変位に伴う断層岩の透水性の増加や深部流体の上昇等の様々なシナリオを想定しつつ，数値シミュレーションと実測値との比較・検討を行う。また，大規模珪長質火砕流や巨大火山体の形成によって短時間に地形・地下水理に変化が生じる可能性についての検討も行う。

(3) 平成 29 年度の研究計画

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，海溝型巨大地震に伴い国内で発生した内陸地震の震源域を対象として測定された地下水の水質変化に関するデータを収集し，その変化の特性について整理した。また，2011 年東北地方太平洋沖地震の発生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[86]）を考慮した数値シミュレーションにより検討した。平成 29 年度は，この群発地震活動に伴って生じた湧水と深部流体との関連性についての検討に着手し，群発地震活動域周辺における地震活動等の地震学的データを収集する。

② 内陸地震の発生に伴う地質環境の影響評価

多量の湧水等，地震活動に伴って顕著な地下水理場の変化が生じた国内での事象としては，2011 年東北地方太平洋沖地震の発生後にいわき市周辺で活発化した群発地震の活動域のほか，1965 年から

始まった松代群発地震の活動域での水質変化が挙げられる（例えば，大竹，1976[87]；奥澤・塚原，2001[88]）。平成29年度は，これらに類似した事象に関する既存情報を収集し，その変化の程度や範囲等について整理する。

③ 短期間の地形変化に伴う地質環境の影響評価

平成 29 年度は，巨大火山体の形成等によって比較的短時間に地形や地下水理場に変化を及ぼす可能性がある事象について，情報収集・整理を継続する。

(4) スケジュール（当面 7 年間の計画）

実施内容	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33
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			→	→	→	→	→
・数値シミュレーションと実測値の比較・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・水質等のデータ収集・編集			→	→	→	→	
・数値シミュレーションと実測値の比較・検討						→	→
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		→	→	→	→		
・数値シミュレーションと実測値の比較・検討						→	→

ゴシック表記は平成 29 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様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，これまで取り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）[89]，松田（1988）[90]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。第 2 期中期計画では，地形・地質学的情報のほか，山地発達モデルにより，山地スケールでネオテクトニクスの成立した時期の推定を行った。これによると日本列島を概観した場合，第四紀の始めから 100 万年前頃には，多くの地域において現在の地殻変動の傾向が始まったと考えられている（梅田ほか，2013[33]）。しかしながら，日本海東縁，伊豆半島周辺，沖縄トラフでは，比較的若い時代（第四紀後半）に変動が開始したと考えられており，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。これは測地学的な変動量と地形・地質情報から推定した変動量に大きなギャップが存在しているといった観測事実からもその可能性が示唆される。また，背弧海盆の拡大や海溝軸の移動等といったプレートシステムの転換に関する最近の研究（例えば，Strak and Schellart, 2014[91]）によれば，数十万年～数百万年の時間スケールにおけるこれらの現象は，沈み込むスラブの形状や到達深度等に応じたいくつかの段階で加速度的な変動を示すことも指摘されている。

第 3 期中長期計画では，測地学的観測が示す現行の地殻変動と，地形・地質学的手法に基づく過去の地殻変動の消長や方向性の比較により，地殻変動の一様継続性の成立性に関する検討を行う。また，時間スケールによる変動様式・速度の違いに応じた予測手法と不確実性の評価手法を検討するとともに，過去から現在までの地形・地質構造の復元及びそれに基づく地下水の流れや水質の変化を再現するための一連の調査・評価・解析手法（地質環境長期変動モデル）の構築を行う。さらに，10 万年を超えるような超長期の予測については，第 2 期中期計画に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) 平成 29 年度の研究計画

① 時間スケールに応じた地殻変動の一様継続性の評価

上述のように，特に第四紀後期における日本列島の地殻変動には一様継続性が見出されている。一

方で，この時代に変動が開始した地域も存在すると考えられている。このような地域では，活断層の変位等の地形・地質学的手法によって推定される地殻変動と，測地学的により推定される現行地殻変動の傾向にギャップが生じていると考えられる。平成 28 年度までに，地質学的手法によって推定された活断層の平均変位速度等をディスロケーションモデルに適用することで，過去から現在までの地殻変動傾向を数値解析によって推定した。平成 29 年度は，その結果から算出される変位速度やひずみ速度等について，測地学的観測に基づく現行の地殻変動との比較によって，一様継続性の成立性を評価するための指標を検討する。また，地形・地質学的データ（特に沿岸部の隆起量・侵食量）の精度・信頼性の向上に資するため，^{10}Be・^{26}Al 年代測定法等を用いた岩石侵食段丘の対比・編年手法の検討や，海底地形デジタルデータを用いた海底地形の判読及び地形計測を行う。

② 地質環境長期変動モデルの構築

一般に，地殻変動は空間的に一様ではなく，プレート間の相互作用のほか，地殻内の物性不均質にも支配されると考えられる。そのため，長期間のプレート間における力学的相互作用と地下構造の不均質を考慮した粘弾性シミュレーションによって地形・地質構造の時間発展を演繹的に予測する手法を開発する。平成 28 年度は，九州南部のせん断帯を事例とした GNSS 稠密観測を行うとともに，3 次元粘弾性シミュレーションを試行した。平成 29 年度は，GNSS 稠密観測を継続するとともに，地震学的手法による地殻応力場の推定を実施する。さらに，それらの結果とシミュレーション結果との比較によって，演繹的な予測手法の妥当性や課題について検討する。

また，時間スケールによる変動様式・速度の違いに応じた予測手法とその不確実性の評価について，過去から現在までの地形・地質の復元に有効な後背地解析技術を提示するとともに，それによる地形・地質モデルを用いた地下水流動の感度解析等に基づく検討を行う。平成 28 年度までは，風化に強い石英やジルコン等の鉱物・化学的特徴（ESR 信号特性や微量元素組成等）に基づく堆積物起源の推定，細粒堆積物の帯磁率異方性に基づく古流向の推定等の後背地解析技術の整備を進めてきた。平成 29 年度は，山間部や平野部を事例対象としてこれらの技術の適用性の確認を行うとともに，構築された地形・地質モデルの妥当性の確認・不確実性の評価を試みる。

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。平成 29 年度は，2000 年鳥取県西部地震（M 7.3）の震源域を事例として進めてきた新規の断層形成に関する確率論的モデルの構築を引き続き実施する。

(4) スケジュール（当面 7 年間の計画）

実施内容	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33
① 時間スケールに応じた地殻変動の一様継続性の評価							
・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	→	→	→	→			
・プレートシステムの転換等を考慮した multiple inference モデルの開発					→	→	→

ゴシック表記は平成 29 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}U，半減期：約 44 億 6800 万年）及びウラン-235（^{235}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ウラン・鉛（U-Pb）法は，数十万年から数十億年までの時間分解能を有する。また，ウラン-234（^{234}U）とトリウム-230（^{230}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 期中長期計画では「3.2.3 年代測定技術の開発」に示した通り，これまでの手法で補完できなかった 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，断層岩の割れ目を普遍的に充填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）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，当面はいくつかの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が対象鉱物として行われてきた（例えば，Hirata and Nesbitt; 1995[92]; Iizuka and Hirata, 2004[93]; Orihashi *et al*., 2008[94]; Gaboardi and Humayun, 2009[95]; Kimura and Chang, 2012[96]）。このため，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，土岐地球年代学研究所が所有する LA-ICP-MS を用いた測定技術の整備を行う。さらに，その技術を炭酸塩鉱物に適用するが，現在，手法の検討が可能な標準試料が存在しないことから，その選定も同時に進める。ウラン，鉛，トリウムの元素比を求めるために必要な「元素スタンダード」及び鉛同位体比の分析値を補正する「同位体比のスタンダード」が必要であり，種々の炭酸塩鉱物を検討する。選定した標準試料を用いて炭酸塩鉱物を対象とした測定法の最適化及び割れ目を充填する炭酸塩の分析への適用を図り，他の年代測定法で得られる年代値とのクロスチェックを行うことで，その妥当性を評価する。また，炭酸塩鉱物は段階的に成長することによって，累帯構造を形成することから，異なる時期に異なる化学組成をもつ地下水から沈殿して成長していった可能性がある。したがって，鉱物の生成プロセスを考慮しなければ，正確な年代値を評価することができない。そのため，局所領域の元素の移動・挙動を把握する目的で，分析試料の観察や試料の二次元での元素マッピング技術も検討する。また，年代測定の時間分解能を向上させるためには，より局所領域の測定が必要となり，親核種であるウランの存在度が低い場合が想定されることから，分析感度を上げる装置セッティングについても併せて検討する。

(3) 平成 29 年度の研究計画

② 炭酸塩鉱物の標準試料の選定

平成 28 年度に引き続き，炭酸塩鉱物の標準試料候補として入手した試料（天然の炭酸塩鉱物）について，元素組成分析及び同位体分析を行い，その均質性を評価する。均質性の担保された試料を標準試料として採用し，③に係る測定で使用する。均質性が担保されない場合は，改めて試料の入手を検討するほか，人工的な炭酸塩鉱物の精製も検討する。人工的な精製にあたっては，炭酸塩鉱物の微粒子に標準溶液を浸透させる方法と標準溶液から炭酸塩鉱物を直接沈殿させる手法を平成28年度までに試行し，沈殿による精製が有効であることが明らかになっている。そのため，平成 29 年度は，沈殿させる手法を主としてより有用な標準試料の精製を試みる。測定条件の検討では，ウラン濃度の低い炭酸塩試料に対し，ジルコンの同位体比測定と同程度の測定精度を確保するため，特に高感度に測定可能な条件を探求する。

③ 割れ目を充填する炭酸塩の分析

②で選定される標準試料を用いて，年代既知の炭酸塩鉱物の測定を実施する。この測定にあたっては，平成28年度に実施したカソードルミネッセンスや電子プローブマイクロアナライザでの分析結果に加え，四重極型 ICP 質量分析計とレーザーアブレーション装置で実施するイメージング分析の結果を基に，年代測定を実施する領域（数十～数百 μm 程度を想定）を事前に評価する。複数の年代既知の炭酸塩試料について年代測定を実施することにより，分析手法の妥当性と有効性を確認した後，未知試料の割れ目充填鉱物の分析を実施していく。

(4) スケジュール（当面 7 年間の計画）

実施内容	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33
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		→	→	→	→	→	→
・分析精度の向上		→	→	→	→	→	→

ゴシック表記は平成 29 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，数十年から数十万年までの年代推定が可能と考えられている。すなわち，^{14}C 法や 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，原岩の形成年代に依存しない，石英やカリ長石等の堆積物の埋没年代によって陸成堆積物の形成年代を推定することも可能である。第 3 期中長期計画（梅田ほか，2015[15)]）では，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活断層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

OSL 年代測定法については，予め段丘の形成年代が検討されている複数の地域で段丘堆積物を採取し，各段丘堆積物中の石英試料の OSL 信号特性を明らかにするとともに，Single aliquot regenerative dose（SAR）法や Single aliquot regeneration and added dose（SARA）法等の複数の測定手順を用いて OSL 年代測定を行う。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間を反映していると考えられるが（Tokuyasu *et al*., 2010[97)]; Moska and Murray, 2006[98)]），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。そこで，原岩の異なる試料を用いて，熱等の処理に対する OSL 信号特性及び OSL より多くの情報が得られる TL 信号特性の変化を調べるとともに，石英試料に含まれる不純物と信号特性との関係を明らかにし，石英の OSL 信号特性が決定される条件について検討する。以上の測定結果と堆積物の後背地の地質データとの関係に基づき，各石英試料に最適な測定フローの構築を行う。

(3) 平成 29 年度の研究計画

① 段丘堆積物の OSL 年代測定

段丘堆積物の OSL 年代測定による隆起速度の推定手法を構築するため，平成 28 年度に引き続き，段丘堆積物から抽出した石英粒子を用いて，OSL 信号から蓄積線量を測定する。また，ICP-MS 等の分析装置を用いて各試料の線量率を測定する手法を整備する。各測定で得られた結果を用いて算出された OSL 年代値と層位学的な年代とを比較し，最適な測定手順について検討する。

② OSL/TL 信号特性の決定条件に関する検討

OSL 信号特性が決定される条件の解明に向け，異なる種類の岩石を起源とする石英粒子に対して熱処理や光照射し，処理前後の Linear-modulated OSL 測定によって OSL 成分の変化特性を把握する。また，同様に熱・光処理した石英粒子の TL カラーを撮影し，TL 特性の変化に関するデータを取得する。

(4) スケジュール（当面 7 年間の計画）

実施内容	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33
① 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	→	→	→	→	→		
・他の堆積物への適用性の検討				→	→	→	→
② OSL/TL 信号特性の決定条件に関する検討							
・熱等の刺激に対する OSL 及び TL 信号特性の変化条件の検討		→	→	→	→		
・石英試料中の不純物に関する検討				→	→	→	→

ゴシック表記は平成 29 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}Al）年代測定法，塩素-36（^{36}Cl）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}Al 及び ^{36}Cl を用いた年代測定法は，各々数千～数千万年及び数千～200 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 期中長期計画では，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（ペレトロン年代測定装置）を用いて，^{26}Al 及び ^{36}Cl の定量法を確立し，^{26}Al 及び ^{36}Cl 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にも着手し，検出器の改良等に関する研究開発も行っていく。

(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（CO_2）等の炭素同位体を測定することによる ^{14}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}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 [44]）。岩石の露出年代等を推定するためには，^{10}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}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 期中期計画では，^{26}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 期中長期計画では，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す。また，更なる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等を行っていく。

一方，^{36}Cl 年代測定法については，これまでに行ってきた ^{14}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}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 期中長期計画では，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，地下水からの Cl 抽出法の検討を含む試料調製法を確立するとともに，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}I 年代測定法についても ^{36}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}C 年代測定法より古い年代を測定できることから，^{129}I 年代測定法の実用化を平成 28 年度より検討を開始し，実用化の目処を得た。このため，平成 29 年度より実用化に向けた本格的な整備を行い，年代測定のルーチン化を達成する。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行っていく。

(3) 平成 29 年度の研究計画

① ^{26}Al 年代測定法の実用化

昨年度より引き続き，より高精度な測定を行うため，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。

② ^{36}Cl 年代測定法の実用化

^{36}Cl 年代測定法の整備に向け，平成 28 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及び仕様の検討等を行いながら，試料調製法の開発及び測定条件の調整を行う。

③ ^{129}I 年代測定法の実用化

新たな宇宙線生成核種等を用いた年代測定法として，平成 28 年度から ^{129}I の適用を検討し，実用化の目処を得たため，本格的な ^{129}I 年代測定法の整備に向け，平成 29 年度は試料調製法や装置構成に関する情報収集及び仕様の検討等を行いながら，試料調製法の開発及び測定条件の調整を行う。測定技術では，標準試料等を用いた試験測定を積み重ね，ビームライン各機器の設定や測定条件の最適化を進める。

④ 他の宇宙線生成核種等を用いた年代測定法実用化に向けた研究開発

引き続き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て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うとともに，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，特に検出器系の情報収集及び研究開発を行っていく。

(4) スケジュール（当面 7 年間の計画）

実施内容	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33
① ^{26}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	→						
・試料調製法の改良及びバックグラウンドの低減やビームの安定化		→	→	→	→	→	→
② ^{36}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							→
・試料調製法の改良及びバックグラウンドの低減やビームの安定化							→
③ ^{129}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に向けた施設間比較試験					→	→	→
・試料調製法の改良及びバックグラウンドの低減やビームの安定化							→
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の検討	→	→	→	→	→	→	→
・検出器系に関する研究・開発	→	→	→	→	→	→	→

ゴシック表記は平成 29 年度に実施する研究項目を示す。

4.3.4 希ガス同位体を用いた地下水年代測定法の実用化

(1) 目的

「3.2.2 長期予測・影響評価モデルの開発」で述べたように，過去から現在までの地下水流動や水質変化のシミュレーション結果等によるモデルの妥当性を示すためには，地下水の年代値等のデータを得ることが重要である。このため，地下水中に溶存する ^{4}He や ^{21}Ne, ^{40}Ar を用いた年代測定技術を開発する。第 3 期中長期計画では，これらの地下水に溶存する希ガス元素を用いた年代測定を行うために，地下水からの希ガス元素の回収技術の開発，及びこれらの核種の定量とその際に必要になる同位体分析の高度化を行うとともに，経年的な変化量を算定する際に問題となる，時間変化に比例しない成分の影響を評価する。

(2) 実施内容

花崗岩やこれに由来する堆積岩は微量成分としてウランやトリウムを含むが，これらは主としてアルファ崩壊によって ^{4}He を放出する。放出された ^{4}He は通常鉱物中に蓄積されるが，一部は周囲に放出され，周囲に地下水が浸透している場合はその溶存成分となる。このようにして地下水中に蓄積される ^{4}He を用いることにより，地下水の涵養年代を測定することができる（例えば，Torgersen, 1980[99]; 電力中央研究所, 2012[100]）。土岐地球年代学研究所では，第 2 期中期目標期間中にマルチコレクター希ガス質量分析計 NGX（Isotopx 社製）を導入している。第 3 期中長期計画では，これを用いたヘリウム定量方法を確立するとともに，開発した手法の妥当性の検討のため，複数の系を用いた年代値の検定を行っていく。例えば，ペレトロン年代測定装置により測定が可能な ^{14}C 法との比較を行う。また，ケイ酸塩鉱物中に放出されたアルファ粒子は酸素-18（^{18}O）と反応して ^{21}Ne を生じ，微量であるが周囲の地下水に溶出する（例えば，Lippmann *et al.,* 2003[101]）。地下水に溶解している希ガスの組成としては放射起源 ^{40}Ar や ^{238}U の自発核分裂起源キセノン同位体による変動も報告されており（Lippmann *et al.,* 2003[101]; Castro and Jambon, 1998[102]），これらも年代測定に利用できる可能性があることから，それらの年代測定技術の開発を行う。

(3) 平成 29 年度の研究計画

① 地下水からの希ガス元素の回収技術の開発

平成 28 年度は，バルブ付金属容器や銅管を用いた手法によって採取した地下水中の溶解希ガスの抽出手順及び溶解希ガス標準試料の作製の手順を整備した。平成 29 年度は引き続き溶解希ガス標準試料作製法の整備を行うとともに，実際に標準試料を作製し，平成 28 年度に確立した手法を用いて抽出を行い，希ガスの濃度・同位体比測定法を整備する。

② 各希ガス元素の定量法の開発

マルチコレクター希ガス質量分析計の性能評価を行いつつ，ヘリウム，ネオン，アルゴンの同位体測定及び希ガス元素存在度測定の手順の最適化及びクリプトン，キセノンを含めた測定の手順の検討を行う。

③ 地下水の年代測定法の実用化

これまでにマルチコレクター希ガス質量分析計を用いて，ヘリウムによる地下水年代測定開発の基礎となる，水に溶解しているヘリウムによる年代測定技術を確立した。平成 29 年度は，確立したヘリウム年代測定法の地下水試料等への適用を検討する。さらに，ネオン及びアルゴンによる年代測定技術の検

討を進める。

(4) スケジュール（当面 7 年間の計画）

実施内容	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33
① 地下水からの希ガス元素の回収技術の開発							
・試料採取法の整備	→						
・溶解希ガス抽出手法の確立		→	→	→	→		
・溶解希ガス標準試料作製法の整備		→	→				
② 各希ガス元素の定量法の開発							
・マルチコレクター希ガス質量分析計の性能評価	→	→	→	→	→		
・ヘリウム，ネオン，アルゴン同位体測定法及び希ガス元素存在度測定手順の確立	→	→	→	→	→		
③ 地下水の年代測定法の実用化							
・^{4}He による年代測定法の開発	→	→	→				
・^{21}Ne,^{40}Ar による年代測定法の検討		→	→	→	→	→	→
・^{14}C 法とのクロスチェック				→	→	→	→

ゴシック表記は平成 29 年度に実施する研究項目を示す。

4.3.5 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（テフロクロノロジー）が用いられる。テフロクロノロジーは，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 期中長期計画（梅田ほか，2015[15)]）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[103)]）。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）を提示した（例えば，梅田・古澤，2004[104)]）。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[105)]；古澤ほか，2013[106)]）。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 期中長期計画では，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

風化に強いジルコンの化学組成や石英の ESR 信号，TLCIs（Thermoluminescence Color Images）等の特徴は，堆積物の供給源の推定の指標として用いられている（例えば，中間ほか，2010[107)]；Shimada *et al.*，2013[108)]）ことから，それらの指標はテフラの同定にも適用できる可能性がある。また，島田（2013）[109)]は神津島の流紋岩中の石英を用いた ESR 測定から複数の活動を識別できることを示している。本研究では，ジルコンの化学組成や石英等の ESR，TL，OSL 信号特性を利用したテフラの同定手法の有効性・問題点を抽出し，手法の最適化を図っていく。また，ジルコンの FT 年代，U-Pb 年代や石英・長石類の OSL 年代等，他の年代測定技術開発の成果を活用しつつ，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) 平成 29 年度の研究計画

① ジルコン，石英等を用いたテフラ同定手法の開発

風化に強いジルコンの微量元素組成や石英・長石類の ESR，TL，OSL 信号等に着目し，それらの相関によってテフラを同定する手法を検討する。平成 28 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[110)]）。平成 29 年度は，広域テフラからジルコンを抽出し，ジルコンの主成分・微量成分の定量分析データを用いたテフラの同定手法の有効性・問題点を抽出する。

② テフラ粒子の直接年代測定の検討

平成 29 年度は，①で抽出したジルコンを対象とした FT 年代または U-Pb 年代による，テフラ粒子の直接年代測定を試みる。

(4) スケジュール（当面 7 年間の計画）

実施内容	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33
① ジルコン，石英等を用いたテフラ同定手法の開発							
・化学組成を用いた同定手法の整備	→	→	→	→	→	→	→
・ルミネッセンス信号特性を利用した同定手法の開発				→	→	→	→
② 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					→	→	→
③ テフラデータベースの整備							
・鮮新ー更新世テフラのデータベース化	→	→					
・テフラ粒子の微量成分のデータベース化	→	→					

ゴシック表記は平成 29 年度に実施する研究項目を示す。

4.3.6 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}C，^{10}Be，K-Ar 及び(U-Th)/He 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もと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に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少量測定を可能にする技術開発が求められる。

(2) 実施内容

^{14}C 年代測定では前処理手法の改良及び加速器質量分析計の最適化を進める。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ァイトターゲットを作製することが重要である。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するために，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測定のルーチン化を進める。さらに，自動グラファイト調整装置の適用，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，微少量測定に対応した技術開発を目指す。^{10}Be，(U-Th)/He 及び K-Ar 測定では，天然試料の測定を継続し，前処理手法の改良と装置最適化のための技術基盤を蓄積する。

化学分析手法の高度化として，ICP-MS，誘導結合プラズマ発光分光分析（ICP-AES）測定で必要となる試料の溶液化と，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。固体試料の化学・鉱物組成分析では蛍光Ｘ線分析（XRF），XGT，XRD 装置での標準試料と天然試料の測定を継続し，定量分析の実用化を目指す。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（EA-IRMS）装置を用いて，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と，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。採取した微少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) 平成 29 年度の研究計画

① 年代測定法の高度化

^{14}C 年代測定については前処理手法の改良を継続し，自動グラファイト調製装置による各種試料の調製条件の最適化を引き続き進める。また，^{10}Be や K-Ar 測定等については，測定法の最適化や各試料の分析を行い，測定精度の改善を継続して進める。

② 化学分析手法の高度化

平成 29 年度は，各分析装置を用いた試料の測定を継続し，測定条件の再検討及び測定精度の改善を進める。 ICP-MS では装置の最適化や前処理手法を検討し，ヒ素や重金属の測定に影響を与える妨害元素を低減させる。また，XRF では，標準試料を用いて試験測定を実施し，簡易かつ少量での分析を目指す。

③ 微小領域の年代測定と化学分析手法の構築

平成 29 年度も，カソードルミネッセンス装置とマイクロミル装置の最適化を継続して実施し，天然試料の微小領域についてサンプリング手法の改善を進める。採取した微小領域試料の化学分析を実施し，天然試料中の微量元素等の単離濃縮技術の改良と分析装置の高感度化を進める。

(4) スケジュール（当面 7 年間の計画）

実施内容	H27	H28	**H29**	H30	H31	H32	H33
① 年代測定法の高度化							
・^{14}C 年代測定の前処理手法の改良	→	→	→	→	→	→	→
・^{10}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	→	→	→	→	→	→	→

ゴシック表記は平成 29 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.

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.

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, 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.

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) 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.

15) 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.

16) 地質環境の長期安定性研究委員会編（吉田英一, 梅田浩司, 楮原京子, 高橋正樹, 田中和広,

谷川晋一, 内藤一樹, 中田 高, 藤原 治, 渡部芳夫), 地質リーフレット4, 日本列島と地質環境の長期安定性, ISSN 2185-8543, 日本地質学会, 2011.

17) 米倉伸之, 野上道男, 貝塚爽平, 鎮西清高(編), 日本の地形 1 総説, 東京大学出版会, 2001, 349p.

18) 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), 2010, 80p.

19) 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.

20) 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.

21) 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, 2014, pp.43-47.

22) 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, 2009, pp.40-53.

23) 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, 2004, pp.332–338.

24) 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.

25) 日本原子力研究開発機構, 日本原子力研究開発機構の改革計画に基づく「地層処分技術に関する研究開発」報告書ー今後の研究課題についてー, 2014, 24p.

26) Umeda, K., Ninomiya, A., Helium isotopes as a tool for detecting concealed active faults, Geochemistry Geophysics Geosystems, vol.10, no.Q08010, doi:10.1029/2009GC002501, 2009.

27) 山田国見, 安江健一, 岩野英樹, 山田隆二, 梅田浩司, 小村健太朗, 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, 2012, pp.437-448.

28) 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砕帯の調査結果, 日本地質学会第 121 年学術大会講演要旨, 2014, p.179.

29) Umeda, K., Asamori, K., Makuuchi, A., Kobori, K., Earthquake doublet in an active shear zone, southwest Japan: constraints from geophysical and geochemical findings, Tectonophys., vol.634, doi: 10.1016/j.tecto.2014.07.025, 2014, pp.116-126.

30) 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.

31) 田力正好, 安江健一, 柳田 誠, 須貝俊彦, 守田益宗, 古澤 明, 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, 2011, pp.118-130.

32) 安江健一, 高取亮一, 谷川晋一, 二ノ宮 淳, 棚瀬充史, 古澤 明, 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.120，2014, pp.435-445.

33) 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, 2013, pp.385-397.

34) 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.

35) 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, 2008, pp.27-49.

36) 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", edited by Nuclear Energy Agency, Workshop Proceedings Manchester, United Kingdom 13–15 November 2007, Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), ISBN 978-9-26406-057-9, Paris, 2009, pp.269–276.

37) 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, 2005, pp.157-166.

38) 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, Geochem. Geophys. Geosyst., vol.13, no.Q05020, doi:10.1029/2012GC004052, 2012.

39) Martin, A. J., Umeda, K. and Ishimaru, T., Application of the Bayesian approach to incorporate helium isotopes ratios in long-term probabilistic volcanic hazard assessments in Tohoku, Japan, Updates in Volcanology - New Advances in Understanding Volcanic Systems, edited by K. Nemeth, ISBN 980-953-307-547-6, InTech, 2012, pp. 117-146.

40) 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.

41) 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.

42) 兼岡一郎，年代測定概論，東京大学出版会, 1998, 315p.

43) 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, Nucl. Instrum.Methods Phys.Res., B, Beam Interact. Mater. Atoms., vol.294, http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2012.01.050, 2013, pp.43-45.

44) 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, In Geochronology - Methods and Case Studies, edited by J. van Mourik, ISBN 978-953-51-1643-1, InTech, 2014, pp. 3-30.

45) 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.

46) 山崎誠子, 山田国, 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.

47) 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, J. Asian, Earth Sci., vol.45, doi:10.1016/j.jseaes.2011.08.009, 2012, pp.17-23.

48) 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, Chem. Geol., 351, http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.05.005, 2013, pp.168-174.

49) 田村 肇, 佐藤佳子, 断層の K-Ar 年代学, 地質技術, vol.3, 2013, pp.21-25.

50) 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.

51) 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 Clay Min.,vol.64, 2016, pp.86-107.

52) 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, doi: 10.1111/gfl.12096, 2015, pp.387-409.

53) 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.

54) Kanaori, Y., Tanaka, K., Miyakoshi, K., Further studies on the use of quartz grains from fault gouges to establish the age of faulting. Eng. Geol., vol.21, 1985, pp.175-194.

55) Niwa, M., Shimada, 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.

56) 鴈澤好博, 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砕帯の年代測定法, 地質学雑誌, vol.119, 2013, pp.714-726.

57) 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, 2014, pp.156-165.

58) 丹羽正和, 石丸恒存, 島田耕史, 地球科学の原子力安全への貢献（その 2）破砕物質の鉱物・化学分析と断層の活動性評価, 日本原子力学会誌, vol.58, 2016, pp.167-171.

59) 植木忠正, 田辺裕明, 丹羽正和, 石丸恒存, 島田耕史, 花崗岩中に発達する粘土脈の観察・分

析データ， JAEA-Data/Code 2016-010, 2016, 292p.

60) 中田 高, 活断層研究の将来について, 活断層研究, vol.28, 2008, pp.23-29.

61) Unsworth, M., Malin, P., Egbert, G. and Booker, J., Internal structure of the San Andreas fault at Parkfield, CA, Geology, vol.25, 1997, pp.359-362.

62) 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 Planet. Sci. Lett, vol.203, 2002, pp.245-253.

63) Negi, T., Mizunaga, H., Asamori, K. and Umeda, K., Three-dimensional magnetotelluric inversion using a heterogeneous smoothness-constrained least-square method, Explor. Geophys., vol.44, http://dx.doi.org/10.1071/EG13026, 2013, pp.145-155.

64) 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, 2010, pp.398-408.

65) 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, 2011, pp.153-165.

66) Umeda, K., Asamori, K., Negi, T. and Kusano, T., A large intraplate earthquake triggered by latent magmatism, J. Geophys. Res., vol.116, no.B01207, doi:10.1029/2010JB007963, 2011.

67) Takada, Y. and Fukushima, Y., Volcanic subsidence triggered by the 2011 Tohoku earthquake in Japan, Nature Geoscience, vol.6, doi:10.1038/ngeo1857, 2013, pp.637-641.

68) Asamori, K. and Zhao, D., Teleseismic shear wave tomography of the Japan subduction zone, Geopys. J. Int., vol.203, doi:10.1093/gji/ggv334, 2015, pp.1752-1772.

69) 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, 地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果, 2017.

70) 田中明子, 山野 誠, 矢野雄策, 笹田政克, 日本列島及びその周辺地域の地温勾配及び地殻熱流量データベー, 数値地質図 P-5, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2004.

71) 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, 2007, No.459.

72) 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, 2012, No.560.

73) 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, 2011, pp.25-34.

74) 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, 2014, pp.3-16.

75) Sparks, R.S.J., The dynamics of bubble formation and growth in magmas: a review and analysis, J. Volcan. Geotherm. Res., vol.3, 1978, pp.1-37.

76) Peacock, S.M., Fluid processes in subduction zones, Science, vol.248, 1990, pp.329-337.

77) Kyser, T.K., and Hiatt, E.E., Fluids in sedimentary basins: An introduction: Journal of Geochemical Exploration, vol.80, doi:10.1016/S0375-6742(03)00188-2, 2003, pp.139-149.

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

79) Umeda, K., T. Kusano, K. Asamori, and G. F. McCrank, Relationship between $^{3}He/^{4}He$ ratios and subduction of the Philippine Sea plate beneath southwest Japan, J. Geophys. Res., vol.117, no.B10204, doi:10.1029/2012JB009409, 2012.

80) 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, 2014, pp.17-38.

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

82) Umeda, K., Asamori, K. and Kusano, T., Release of mantle and crustal helium from a source fault following an inland earthquake, Appl. Geochem., vol.37, http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.07.018, 2013, pp.131-141.

83) 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, 1991, pp.341-364.

84) 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.

85) 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.

86) Umeda, K., Asamori, K., Makuuchi, A., Kobori, K. and Hama, Y., Triggering of earthquake swarms following the 2011 Tohoku megathrust earthquake, J. Geophys. Res., vol.120, doi:10.1002/2014JB011598, 2015, pp.2279-2291.

87) 大竹政和, 松代地震から 10 年, 科学, vol.46, 1976, pp.306-313.

88) 奥澤 保, 塚原弘昭, 松代群発地震域に湧出する深層地下水, 地震 第 2 輯, vol.53, 2001, pp.241-253.

89) 笠原慶一, 杉村 新, 変動する地球 I , 岩波書店, 1978.

90) 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, 1988, pp.599-603.

91) Strak, V. and Schellart, W.P., Evolution of 3-D subduction-induced mantle flow around lateral slab

edges in analogue models of free subduction analysed by stereoscopic particle image velocimetry technique, Earth Planet. Sci. Lett., vol.403, 2014, pp.368-379.

92) Hirata, T., 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, 1995, pp.2491-2500.

93) Iizuka, T. Hirata, T., Simultaneous determinations of U-Pb age and REE abundances for zircons using ArF excimer laser ablation-ICPMS, Geochemical Journal, vol.38, 2004, pp.229-241.

94) Orihashi, Y., Nakai, S., Hirata, T., U-Pb Age Determination for Seven Standard Zircons using Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry Coupled with Frequency Quintupled Nd-YAG (λ = 213 nm) Laser Ablation System: Comparison with LA-ICP-MS Zircon Analyses with a NIST Glass Reference Material, Resource Geology, vol.58, 2008, pp.101-123.

95) Gaboardi, M., Humayun, M, Elemental fractionation during LA-ICP-MS analysis of silicate glasses : implications for matrix-independent standardization, Journal of Analytical Atomic Spectrometry, vol.24, 2009, pp.1188-1197.

96) Kimura, J., Chang, W., 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, 2012, pp.1549-1559.

97) Tokuyasu, K., Tanaka, K., Tsukamoto, S., Murray, A.S, The characteristics of OSL signal from quartz grains extracted from modern sediments in Japan, Geochronometria, vol.37, 2010, pp. 13-19.

98) Moska, P. and Murray, A.S., Stability of the quartz fast-component in insensitive samples, Radiation Measurements, vol.41, 2006, pp. 878-885.

99) Torgersen, T., Controls on pore-fluid concentration of ^{4}He and ^{222}Rn and the calculation of ^{4}He/^{222}Rn ages, Journal of Geochemical Exploration, vol.13, 1980, pp. 57-75.

100) 電力中央研究所, 地層処分技術調査等事業（地層処分共通技術調査:岩盤中地下水移行評価技術高度化開発）-地下水年代測定技術調査- 報告書, 2012, p.388.

101) Lippmann, J., Stute, M., Torgersen, T., Moser, D.P., Hall, J.A., Lin, L., Borcsik, M., Bellamy, R.E.S. and Onstott, T.C., Dating ultra-deep mine waters with noble gases and ^{36}Cl, Witwatersrand Basin, South Africa, Geochimica et Cosmochimica Acta, vol.67, 2003, pp.4597-4619.

102) Castro, M. C. and Jambon, A., Noble gases as natural tracers of water circulation in the Paris Basin 1. Measurements and discussion of their origin and mechanisms of vertical transport in the basin, Water Resource Research, vol.34, 1998, pp. 2443-2466.

103) 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.

104) 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.

105) 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, 2011, pp.495-507.

106) 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, 2013, pp.25-38.

107) 中間隆晃, 平田岳史, 大藤茂, 青木一勝, 柳井修一, 丸山茂徳, 日本列島の古地理学―砕屑性ジルコン年代頻度分布と造山帯後背地の変遷―, 地学雑誌, vol.119, 2010, pp.1161-1172.

108) Shimada, A., Takada, M. and Toyoda, S., Characteristics of ESR signals and TLCIs of quartz included in various source rocks and sediments in Japan: a clue to sediment provenance, Geochronometria, vol.40, 2013, pp.334-340.

109) 島田愛子, 火山噴出物の ESR 年代測定と応用, 月刊地球 号外, vol.62, 2013, pp.85-92.

110) 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スラの例, 地質学会誌, vol.122, No.3, 2016, pp.89-107.

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

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

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

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

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ s\ A$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X 線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ s\ A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 $hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	1 L=1 l=1 $dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	1 t=10^3 kg

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

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

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

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

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

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

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

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10^{-9}T
フェルミ		1 フェルミ=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー），4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年）