



地質環境の長期安定性に関する研究 年度計画書 (平成25年度)

Research Plan on Geosphere Stability for Long-Term Isolation of Radioactive Waste
(Scientific Programme for Fiscal Year 2013)

安江 健一 浅森 浩一 丹羽 正和 花室 孝広
國分(齋藤)陽子 幕内 歩 生田 正文 松原 章浩
石丸 恒存 梅田 浩司

Ken-ichi YASUE, Koichi ASAMORI, Masakazu NIWA, Takahiro HANAMURO
Yoko SAITO-KOKUBU, Ayumu MAKUUCHI, Masafumi IKUTA, Akihiro MATSUBARA
Tsuneari ISHIMARU and Koji UMEDA

地層処分研究開発部門
東濃地科学研究ユニット

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate

October 2013

本レポートは独立行政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。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 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
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata Shirane, 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, 2013

地質環境の長期安定性に関する研究 年度計画書(平成 25 年度)

日本原子力研究開発機構

地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット

安江 健一, 浅森 浩一, 丹羽 正和, 花室 孝広, 國分(齋藤) 陽子,
幕内 歩^{*1}, 生田 正文^{*1}, 松原 章浩^{*2}, 石丸 恒存, 梅田 浩司

(2013 年 5 月 29 日受理)

本計画書は、高レベル放射性廃棄物の地層処分における地質環境の長期安定性に関する研究についての第 2 期中期計画期間(平成 22 年度～平成 26 年度)における平成 25 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 2 期中期計画に基づき、第 1 期中期計画期間(平成 17 年度～平成 21 年度)における研究開発の成果、平成 22 年度から平成 24 年度の研究開発の成果、関係研究機関の動向や大学など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などを考慮した。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などの検討・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(駐在): 〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

※1 技術開発協力員

※2 技術開発協力員, 東濃地科学センター 鉱山措置・施設管理課

Research Plan on Geosphere Stability for Long-Term Isolation of Radioactive Waste
(Scientific Programme for Fiscal Year 2013)

Ken-ichi YASUE, Koichi ASAMORI, Masakazu NIWA, Takahiro HANAMURO, Yoko SAITO-KOKUBU,
Ayumu MAKUUCHI^{※1}, Masafumi IKUTA^{※1}, Akihiro MATSUBARA^{※2}, Tsuneari ISHIMARU
and Koji UMEDA

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Izumi-cho, Toki-shi, Gifu-ken

(Received May 29, 2013)

The concept of geological disposal of HLW in Japan is based on a multi-barrier system which combines a stable geological environment with a robust barrier system. Potential geological host formations and their surroundings are chosen, in particular, for their long-term stability, taking into account the fact that Japan is located in a tectonically active zone. This report is a plan of research and development (R&D) on geosphere stability for long-term isolation of HLW in JAEA, in fiscal year 2013. The objectives and contents in fiscal year 2013 are described in detail based on the outline of 5 years plan (fiscal years 2010-2014). In addition, the planned 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: Geological Disposal of HLW, Geosphere Stability, Investigation Technique, Development of Model, Dating Technique

※1 Collaborating Engineer

※2 Collaborating Engineer, Tono Geoscience Center, Mine and Laboratories Section

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 地層処分における将来の地質環境の予測・評価の重要性	3
2.2 サイト選定における予測・評価の考え方	3
2.3 安全評価における予測・評価の考え方	4
3. 研究開発の方向性と達成目標	5
3.1 研究開発の方向性	5
3.2 当面の達成目標	6
3.2.1 調査技術の開発・体系化	6
3.2.2 長期予測・影響評価モデルの開発	7
3.2.3 年代測定技術の開発	8
4. 平成 25 年度の研究計画	9
4.1 調査技術の開発・体系化	9
4.1.1 変動地形が明瞭でない活断層などに係る調査技術	9
4.1.2 断層の発達段階の評価に係る調査技術	11
4.1.3 地下で遭遇した断層の活動性に係る調査技術	13
4.1.4 地殻内の震源断層などに係る調査技術	15
4.1.5 内陸部の隆起・侵食速度の算出に係る調査技術	17
4.2 長期予測・影響評価モデルの開発	19
4.2.1 地形変化シミュレーション技術の高度化	19
4.2.2 地質断層の再活動性に関する評価技術	21
4.2.3 断層運動に伴う地下水流動系の変化に関する評価技術	23
4.2.4 超長期における予測・評価手法に関する検討	24
4.2.5 古水理地質学的アプローチによる地質環境の変化の予測・評価手法の開発	27
4.3 年代測定技術の開発	29
4.3.1 加速器質量分析装置を用いた宇宙線生成核種年代測定法	29
4.3.2 四重極型質量分析計などを用いた(U-Th)/He 年代測定法	31
4.3.3 希ガス質量分析計などを用いた K-Ar 年代測定法	33
4.3.4 高分解能のテフラ同定手法	35
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 target of research and development	5
3.1 Direction of research and development	5
3.2 Target of research and development	6
3.2.1 Development and systematization of investigation techniques	6
3.2.2 Development of models for long-term estimation and effective assessment	7
3.2.3 Development of dating techniques	8
4. Plan of research and development in FY2013	9
4.1 Development and systematization of investigation techniques	9
4.1.1 Investigation techniques for active fault with unclear tectonic landform	9
4.1.2 Investigation techniques for evaluation of fault development stage	11
4.1.3 Investigation techniques for fault activity in basement rock	13
4.1.4 Investigation techniques for earthquake source fault in crust	15
4.1.5 Investigation techniques for estimation of uplift and erosion rates in inland	17
4.2 Development of models for long-term estimation and effective assessment	19
4.2.1 Simulation techniques for landform changes	19
4.2.2 Estimation techniques for reactivity of geological fault	21
4.2.3 Estimation techniques for hydrological change with faulting	23
4.2.4 Estimation and evaluation techniques for natural phenomena of very long-term	24
4.2.5 Development of estimation and evaluation techniques for geological environment by paleohydrogeological approach	27
4.3 Development of dating techniques	29
4.3.1 TCN dating method with accelerator mass spectrometer	29
4.3.2 (U-Th)/He dating method with quadruple mass spectrometer	31
4.3.3 K-Ar dating method with noble gas mass spectrometer	33
4.3.4 High-resolution tephrochronology	35
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。このため日本における地層処分概念は、「長期的な安定性を備えた地質環境」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, 1999a¹⁾:以下、「第2次取りまとめ」)。すなわち、地層処分システムに期待される物理的な隔離機能が自然現象によって損なわれないような最終処分施設建設地(サイト)を選ぶこととしている。さらに、サイトの地質環境やその長期的な変化を見込んで、合理的な地層処分システムを構築し、長期的な安全性を保証することが重要である。このためには、サイトやその周辺において、マグマの貫入・噴出や断層運動に伴う岩盤の破壊など、地層処分システムに急激で著しい影響を及ぼし得る現象が発生する可能性のほか、地殻変動などによって生じる地質環境(例えば、熱特性、水理特性、力学特性、地球化学特性)の長期的な変化を予測・評価しておくことが必要となる。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、これらの予測・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、地球科学の分野に蓄積された情報や知見を取りまとめるとともに、地層や岩石の年代測定などを補足的に実施し、活断層や第四紀火山、海成段丘の分布・形成年代など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, 1999b²⁾)。さらに、これらの情報に基づき、これまでの自然現象の傾向や規則性を地層処分の観点から明らかにするとともに、将来の活動の可能性や変動の規模などを検討した。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。第2次取りまとめ以降、「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」)の制定や実施主体として原子力発電環境整備機構が設立されるなど、我が国の地層処分計画が処分事業の開始段階に進展したことを踏まえ、最終処分法に定められた処分施設の建設スケジュールやサイトの選定に係る段階的な選定要件などを念頭に置きつつ、特に第2次取りまとめやその評価(例えば、原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会, 2000⁴⁾; OECD/NEA, 1999⁵⁾)の過程で明らかにされた課題に焦点を置いて研究を進めてきた。さらに、2002年には原子力安全委員会により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」⁶⁾(以下、「環境要件」)が示され、実施主体ではこれらを受けて「概要調査地区選定上の考慮事項」(原子力発電環境整備機構, 2002⁷⁾) (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, 2003⁸⁾)や「放射性廃棄物処理・処分に係る規制支援研究について」(総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会, 2009⁹⁾)などにより、安全規制にとって重要な研究分野や課題が示されるなど、研究開発を進めていく上での方向性や具体的な研究課題が明確にされてきた。

地層処分の研究開発を全体として計画的かつ効率的に進めるため、経済産業省 資源エネルギー庁は2005年7月に「地層処分基盤研究開発調整会議」(以下、「調整会議」)を設置し、中長期的かつ体系的な視点から研究開発計画の検討・調整を行ってきた。2006年12月には、「調整会議」により「高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画」¹⁰⁾(以下、「全体計画」)が策定され、関係研究機関は、この計画に基づき、それぞれの分野の研究開発を進めてきている。この全体計画については、研究開発の進捗状況などを踏まえた継続的な見直しに加え、国の最終処分計画の改定など研究開発を取り巻く最近の状況などにも対応した改訂が適宜加えられている^{11), 12)}。全体計画では、2000年以降の研究開発を三つのフェーズに区分し、それぞれの段階において反映先や段階目標を設定している。

このうち、フェーズ1(平成12年度～平成17年度)では、処分事業の概要調査への反映や安全審査基本指針などの検討・策定に資することを目標とし、「地上からの地質環境調査技術の体系的整備」と「幅広い地質環境を対象とした評価手法の整備」を、フェーズ2(平成18年度～平成26年度)では、平成20年代中頃を目途とする精密調査地区選定期を念頭に、精密調査前半への反映や安全審査指針・基準の検討に資することを目標とし、「地上からの調査に関わる技術基盤の確立」と「実際の地質環境へ適用可能な評価手法の整備と工学的実現性の提示」を行うこととしている。さらに、フェーズ3(平成24年度～平成28年度)では、平成40年前後を目途とする最終処分施設建設地の選定に向けた、精密調査後半への反映、安全規制のための指針・基準(例えば、安全審査指針や処分場の技術基準)の策定や安全審査などに資することを目標とし、「地下施設を活用した調査に関わる技術基盤の確立」と「実際の地質環境を対象とした体系的・合理的な評価手法と工学技術などの実証」を目指している。原子力機構においても全体計画との整合を図りつつ、第1期中期計画(平成17年度～平成21年度)では、「精密調査地区の選定において重要となる地質環境条件に留意して、自然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価するための調査技術の体系化やモデル開発などを進める」ことを目標に掲げ、これまでの5か年間に断層運動、火成活動、隆起・侵食/気候・海水準変動などの自然現象に焦点をあてて、概要調査に必要な調査技術の整備と自然現象に伴う地質環境の変化の程度を予測・評価するための手法の開発に取り組んできた。

その結果、地下深部に存在するマグマの検出技術や河成段丘の編年に基づく隆起量の算定手法、将来の地形を大局的に模擬する技術など、概要調査に必要な技術基盤の整備が進んだ。その中でも、東濃地域を例として実施した古気候・古環境の復元や非火山地帯における熱水活動のメカニズムの解明などといった研究では、過去約30万年までに及ぶ古気候・古環境について新たに内陸小盆地の堆積物を用いた解析手法を提示したこと、フィリピン海プレート起源の流体が関与する熱水活動が存在することを明らかにしたことなど、地層処分の分野を超える大きな成果を上げた。その一方で、変動地形の不明瞭な活断層の認定や活動性の評価、河成段丘の発達のない地域における隆起量の算定に係る調査技術など、研究開発の進展に応じて必要性が生じた技術については、今後も引き続き研究開発を継続し、概要調査などに向けての技術基盤を着実に整備していくこととなった。また、最近になって処分事業の実施主体からの技術開発ニーズとして、今後10万年を超える自然現象の評価の考え方や方法論の確立といった技術基盤の整備が求められている(原子力発電環境整備機構, 2010¹³)。これらの背景や状況、さらには関係研究機関や大学などで行われている最近の研究の動向なども踏まえて、当該研究に係る5か年(平成22年度～平成26年度:第2期中期計画期間)の基本計画を作成し、研究開発の方向性、研究課題、達成目標、推進方策などを示した(梅田ほか, 2010¹⁴)。本報は、この基本計画に基づき、これまでの研究成果(草野ほか, 2011¹⁵;安江ほか, 2011¹⁶;浅森ほか, 2012¹⁷)や関係研究機関や大学などの研究成果を踏まえた上で、実施主体や規制機関の技術開発ニーズなど(原子力発電環境整備機構, 2010¹⁵)を考慮しつつ、基本計画の構成を再編成して策定した平成25年度の研究計画である。なお、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震やそれに伴う原子力発電所での事故等によって現在の原子力政策の見直しが進められており(例えば、昨年9月の「革新的エネルギー・環境戦略」¹⁸)の閣議決定)、地層処分を巡る社会状況も変化している(例えば、日本学術会議による「高レベル放射性廃棄物の処分について」¹⁹の報告)。そのため、これらの状況を踏まえつつ基本計画の見直しを行った上で、本年度の研究計画の策定を行った。具体的には、海溝型巨大地震等の地震・断層活動に伴う地下水の流れや水質等の変化を予測・評価といった地層処分基盤研究開発調整会等からの研究開発のニーズを鑑みて、これまで進めてきた「地殻変動に伴う熱水活動の形成に係るモデルの開発」を見直し、「断層運動に伴う地下水流動系の変化に関する評価技術」として新たな研究課題を設定した。

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 地層処分における将来の地質環境の予測・評価の重要性

我が国では地層処分の長期的な安全性を確保するため、地層処分システム(以下、「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、自然現象の影響なども考慮しつつ放射性物質が人間環境に移行することを想定した様々なシナリオを設定し、それらのシナリオに応じた安全評価ケースごとに放射性物質の移行や人間環境への影響などが総合的に検討される。そのためには、①それぞれのシナリオが生じる可能性と、②シナリオにおいて想定される地質環境の変化の幅の二つを予測・評価する(以下、「将来の地質環境の予測・評価」)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に、後者は変動シナリオ(地質環境の変化を想定したシナリオ)を考慮する際の安全評価に密接に関係する。例えば、安全評価の対象とする期間(今後 10 万年程度)において、マグマの貫入・噴出などにより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としている。概要調査などにおいては、そのような場所がサイト(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。一方、今後 10 万年程度の期間において生じる地殻変動や気候・海水準変動により地下水の動きや水質に何らかの影響が及ぶと考えられることから、これらの影響の幅を提示することが、変動シナリオを考慮した安全評価において重要となる。なお、ここでいう将来の地質環境の予測・評価とは、いつ、どこで、何が起るのかを言い当てる予知ではなく、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予測・評価の考え方

サイト選定における将来の地質環境の予測・評価の目的は、対象とする期間において、隆起・侵食、断層運動や火成活動がシステムの物理的な隔離機能を損なう可能性の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(廃棄物と人間との物理的距離が接近することを想定したシナリオ)による影響を排除し、地層処分の長期的な安全性を示すものである。そのためには、①多重バリア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可能性をあらかじめ把握するとともに、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と規則性に基づく外挿により、不適切な地域を除外していくことが重要となる。これらのうち、実施主体の考慮事項に述べられている今後 10 万年間に 300m 以上の隆起・侵食が生じ得る地域については、第 2 次取りまとめにおいて全国の隆起量図が作成されており、文献調査の段階でその範囲を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、概要調査など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溶融体(マグマ)の存否を確認することが求められる。また、概要調査などで除外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、現在の活断層の進展や破碎帯の拡大、地質断層の再活動などが生じる可能性のある範囲を示すことが期待される。

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, 2001²⁰⁾、100 万年オーダの時間スケールでの予測・評価を想定する場合には、現在のテクトニクスが維持されない可能性を考慮する必要がある。このような時間スケールでは、地殻応力場の変化に伴う新たな断層の形成や隆起・沈降のパターンに変化が生じることも想定され、サイト選定においてシステムの物理的隔離機能が喪失する可能性の高い地域を特定することは困難となる。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、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, 2010²¹⁾)。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, 2004²²⁾)では、10 万年を超える評価期間に起因する不確実性については、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、確率論的に提示することなどが考えられる。

2.3 安全評価における予測・評価の考え方

変動シナリオに基づく安全評価における将来の地質環境の予測・評価の目的は、自然現象に関する過去の記録や現在の状況を調査し、今後 10 万年程度の地質環境の変化の幅を提示することである。これらの外的要因によって引き起こされる地質環境の変化は、以下の二つの方法によって予測・評価がなされる。一つめは、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、例えば、現在の植生と気候との対応関係を基に、地層中に含まれる過去の花粉の種類とその構成比を統計的に処理し、過去の気候を定量的に明らかにする手法といった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、地下水の動きや水質など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: 演繹的手法)。二つめは、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動きや水質などを再現した上で、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により推定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: 帰納的手法)。いずれのケースにおいても、過去から現在までの隆起・沈降水量や気候・海水準のサイクルなどを精度良く把握することが重要となる。

一般に、日本列島に関しては過去 10 万年程度の地形学的情報が多くの地域で得られることから、今後 10 万年程度の地質環境の変化については、一定の信頼性をもって予測・評価が可能となると考えられる。しかしながら、それ以前の地形学的情報は限られることから、10 万年を超えるような時間スケールについては、予測・評価に伴う不確実性が著しく増大すると考えられる。そのような場合には、過去数十万年以上のイベントの追跡が可能な地質学的情報に基づく古水理地質学的なアプローチによって、それぞれの時代で再現された地下水の動きや水質などの変動パターンを外挿することにより将来の変化の幅を推定することが可能であると思われる。これらについては、東濃及び幌延を事例に、過去の地形・地質、気候・海水準変動のデータに基づき過去から現在までの地下水の動きや水質を数十 km 規模で再現する試みが行われている。この古水理地質学的なアプローチによって、濃尾平野から木曾山脈、美濃・三河高原にかけての木曾川、土岐川(庄内川)の流域を対象に、1.5 Ma(150 万年前; Ma は百万年前)から現在までの地下水流動について地下 10 km までの解析を行った。これによると、流域の中流部の地下 1 km では、ダルシー流速の分布が 1.5 Ma から現在までに 10^{-10} m/sec から 10^{-8} m/sec に変化している。これは、主として阿寺断層や養老断層などの活断層による山地の隆起と平野の沈降による大局的な地形の変化に伴う動水勾配の増大に起因する。しかしながら、過去 10 万年オーダーでは、ダルシー流速はほとんど変化していないことがわかる(尾上ほか, 2009²³⁾)。このことは、過去の地質環境の変動傾向に基づく予測・評価では、対象とする時間スケールに応じて外挿に伴う不確実性が異なっていることを示唆する。すなわち、今後 10 年以上の予測・評価には、地質環境がオーダーで変化する不確実性が内在する可能性もある一方で、今後 10 万年程度の予測・評価はより高い確度(予測結果に伴う不確実性がオーダーの範囲)で行うことができると考えられる。

3. 研究開発の方向性と達成目標

3.1 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構築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の基盤となる調査技術や評価手法の整備も視野に入れて研究を進めてきた(武田ほか, 2004²⁴⁾; 梅田ほか, 2005²⁵⁾)。第1期中期計画では、最終処分事業の概要調査や安全審査基本指針などの検討・策定に研究成果を反映できるよう、概要調査などに必要となる、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)、特に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最先端の分析装置などを用いた放射年代測定や鍵層の高分解能同定法など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。現時点において特定の地質環境やサイトが選定されているわけではないことから、第2期中期計画でもこの枠組みでの研究開発を継続していくこととする。第2期中期計画(平成22年度～平成26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、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」ことを目標に掲げている。また、全体計画のフェーズ2では平成24年頃までに「精密調査の前半に相当する地上からの調査に関わる技術基盤の確立」を目標としていることから、第2期中期計画中の研究開発については、特に、概要調査と精密調査の前半に必要となる地上からの調査技術に重点を置いて進めていくことが肝要である。一方で、全体計画のフェーズ3では、平成20年代後半頃までを目途に、「精密調査の後半に相当する地下施設を活用した調査に関わる技術基盤の確立」を目標としている。そのため、第2期中期計画後半においては、地下施設を活用した調査に係る技術基盤の整備を進める。現時点において、坑道掘削時に遭遇した断層の活動性の評価や処分場閉鎖後の自然現象のモニタリング技術などの課題があり、今後はこれらの課題についても検討していくことが肝要である。なお、今後は最終処分事業におけるサイトの選定作業も進み、また安全規制に係る安全審査指針・基準なども具体化されると考えられることから、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、特定された地質環境に対するサイトスペシフィックな適用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。

第1期中期計画では、断層運動、火成活動、隆起・侵食／気候・海水準変動の三つの分野に係る研究開発について、網羅的に研究資源が投資されてきたが、その研究開発の進展は分野ごとに異なっている。特に断層運動に関する研究については、例えば、活断層の存否を確認するための調査技術や断層運動に伴う地質環境への影響の評価手法などの課題が多く残されている。そのため、第2期中期計画については、これまでの各分野における達成状況を踏まえて断層運動に着目し、後述するように、特に喫緊の課題であるサイト選定に係る技術基盤の整備を重点的に進めていく必要がある。地震や活断層に関する研究については、防災や原子力施設の耐震評価などに関連して、様々な研究機関が参画した重点的な研究により、多くの科学的知見が得られ、調査技術が開発されている。本研究においてもこれらの知見や技術を積極的に導入するが、これらの研究の目的は、数十年規模の地震防災や原子力発電所など核燃料サイクル施設の耐震評価であることから、数万年以上の期間の安全性の確保を念頭におくことが肝要である。そのため、評価の対象とされる活断層が必ずしも「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」(平成18年9月、原子力安全委員会決定²⁶⁾)に示される後期更新世以降に活動した断層に限定されるものではない。この点については、木村(2002)²⁷⁾においても、地層処分のように10万年オーダーといった長期の安全性を確保するためには、いわゆる“(狭義の)活断層”のみを避けることだけでは不十分であることが指摘されており、本研究では第四紀に活動した断層を対象としている。

また、第1期中期計画の研究開発は、今後10万年程度の地質環境の予測・評価を念頭において進められてきたが、今後、さらに長期の予測・評価が求められた場合、前述のように過去の記録が著しく乏しくなることによって、予測・評価に伴う不確実性が增大することが予想される。この場合には、想定されるシナリオによって生じる地質環境の変化の幅を提示するだけでなく、そのシナリオ自体が起こりうる可能性を併せて示すことが重要となる。そのためには、確率論的なアプローチによりシナリオが発生する可能性を定量化するといった試みやプレート運動の転換に伴うテクニクな変動を考慮した物理モデル(現象論的モデル)の開発などを検討していく必要がある。さらに、第2期中期計画では、将来の地質環境の予測・評価に係る信頼性の向上を図るためにも、放射年代測定法やテフクロロジーなどの編年技術の高度化を着実に進めていく。

3.2 当面の達成目標

3.2.1 調査技術の開発・体系化

調査技術の開発・体系化においては、候補地の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などに適合するか否かを判断するための情報を、概要調査などを通じて取得するための技術基盤の整備を目指す。特に、概要調査において、活断層や第四紀火山などの存在が文献調査で確認できない場合には、地表踏査、物理探査、トレンチ調査などによって、これらの存否を明らかにすることが求められており、こ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1期中期計画では、空中レーザー計測による微細な断層変位地形の検出(中田ほか, 2008²⁸)やテフクロロジーを用いた更新世中期の噴火史の復元(梅田・檀原, 2008²⁹)に係る調査技術を整備してきた。さらに、非火山地帯においても概要調査などによって地下深部のマグマなどの存否をあらかじめ確認しておくことが重要であるため、地震波速度構造、比抵抗構造、地下水中の希ガス同位体など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.*, 2007³⁰)。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自然現象による地層の著しい変動(例えば、著しい隆起・侵食、熱水活動)が過去に生じたか否かを確認することも求められている。これらについては、河成段丘の編年(TT法: Terrace to Terrace; 吉山・柳田, 1995³¹)に基づく内陸部の隆起量の算定(田力ほか, 2011³²)や熱年代学的アプローチによる熱履歴の復元(花室ほか, 2008³³)などの調査技術を整備してきた。さらに、内陸小盆地の堆積物のモダンアナログ解析によって過去数十万年間の地域的な古気候・古環境の復元も行われた(佐々木ほか, 2006³⁴)。

以上のように、第1期中期計画では、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用い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、西南日本のように河成段丘の発達が少ない地域での内陸部の隆起量の算定手法などについては、第2期中期計画においても研究開発を引き続き進めていくことが必要である。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や地下深部の震源断層を確認するための技術のほか、さらに長期の予測・評価の基盤情報となる断層の発達段階(成熟度)を評価する技術などの実用化が望まれることから、第2期中期計画では、基盤的な研究を含めてこれらの調査技術の開発を目指す。また、全体計画のフェーズ3で示された地下施設を活用した調査の技術基盤を整備していくため、ボーリング孔や坑道などが地下で遭遇した断層の活動性の評価に必要な断層岩の熱履歴解析や断層充填鉱物の年代測定などの技術開発を行い、第2期中期計画において実用化の見通しを得る。

なお、地層処分の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・規模などを時間枠(1000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事象ごとに取りまとめ、第 2 期中期計画の早い段階で提示することが必要である。また、これらの情報に基づき、今後 10 万年程度あるいはそれ以上の期間の予測・評価に、どの程度の不確実性が内在し得るかを検討しておくことも重要である。

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、自然現象に起因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し、そこに内在する不確実性を併せて示していくことにある。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外挿により将来の状態を推定する方法や現象が生起する可能性を統計学的に求めて発生確率を計算する方法などが基本となる(例えば、田中・千木良, 1997³⁵⁾)。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予測結果に対する科学的信頼性の向上を図っていくことも重要となる(梅田ほか, 2005²⁵⁾)。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、物理探査などの分解能、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 1 期中期計画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を予測するためのプログラムの開発(Saegusa *et al.*, 2009³⁶⁾)やマグマの貫入に伴う熱・地下水理の時間変化のシミュレーション技術(坂川ほか, 2005³⁷⁾)の整備を進めた。また、今後 10 万年程度の期間にマグマの貫入・噴出が起こりうる可能性を確率的に評価するため、時空間点過程による確率モデル(Martin *et al.*, 2003³⁸⁾)のほか、ベイズ法によって広域的な地震波速度構造や地温勾配を考慮した確率モデルを開発した(Martin *et al.*, 2004³⁹⁾)。

サイト選定に係る予測・評価項目のうち、火成活動については、地下深部のマグマなど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、マグマの貫入・噴出により物理的隔離機能が影響を受ける可能性のある地域については、地上からの調査によって、今後 10 万年程度であれば回避すべき範囲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進められている。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、既存の断層の進展や破碎帯の拡大、副断層の形成などの可能性もある。また、活断層の多くは、現在の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などに応じて再活動したものと考えられている(Sato, 1994⁴⁰⁾; Fabbri *et al.*, 2004⁴¹⁾)。このような現象が生じる可能性のある範囲などを一定の裕度を見込んで予測するためにも、数値解析による断層の形成・発達過程のシミュレーション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把握し検討していくことが不可欠である。第 1 期中期計画では、地質分布や活構造区ごとの隆起速度を考慮した従順化モデルを構築し、1 万年オーダーの大局的な地形の変化を模擬できる技術を開発し、所期の目標を達成した。第 2 期中期計画では、これらの技術の科学的な妥当性をより確かなものとするため、河成段丘の高度・分布などに基づいて復元された古地形(10 万年程度)を起点とする地形変化シミュレーションによって現在の地形をどの程度再現できるかについての評価を行うとともに、シミュレーション技術の問題点を明確にし、その改良を進めていく。また、地質環境の変化の予測・評価に際しては、数値解析のみならずモダンアナログに基づく環境データを活用していくことにより科学的な信頼性が高まるものと考えられる。しかしながら、予測期間が 10 万年オーダーになると、シミュレーションによって得られた予測結果の信頼性も相応に乏しくなると考えられる。その場合には、前述したように、地質学的情報に基づき、過去の地形・地質構造を大まかに復元した上で、それらを場のモデルとして地下水の動きや水質などを再現し、それらの変動傾向から将来の地質環

境の変化の大きさや内在する不確実性を類推していくことになる。そのため、第2期中期計画では、古水理地質学的手法によって過去の地下水の動きや水質などを推定するための一連の調査・解析・評価手法を整備していく。

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、過去の自然現象が発生した時期やその傾向及び速度を精度良く把握することであり、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。例えば、火成活動については、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、約10万年より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を推定し隆起・沈降・侵食の傾向を把握することができ、それらに伴う地下水の動きや水質の変化の予測・評価の信頼性も向上すると考えられる。さらに長期間における予測・評価に係る不確実性を低減するためにも、概要調査などの技術基盤となる編年技術の高度化が望まれる。なお、国は安全規制の立場から実施主体による概要調査などの結果について、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されているが、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や確度(兼岡, 1998⁴²⁾)、年代の地質学的な要件も含めた解釈など、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などに係る技術的能力に資するためにも、原子力機構において加速器質量分析装置や希ガス質量分析計など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、化学分析に係る経験、ノウハウ、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などを蓄積していく上でも極めて重要となる。

第1期中期計画では、原子力機構東濃地科学センターの保有するタンデム型加速器質量分析装置(ペレトロン年代測定装置)を用いて生物体試料や地下水中の二酸化炭素などの炭素-14(^{14}C)年代測定の品質向上に取り組んできた(國分ほか, 2010⁴³)。また、ベリリウム-10(^{10}Be)年代測定法の実用化に向けた試料調製法や測定法の開発などを行ってきた。一方、四重極型質量分析計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、年代標準試料の測定を行ってきた(Yamada *et al.*, 2008⁴⁴); 山崎ほか, 2009⁴⁵)。第2期中期計画では、 ^{10}Be 年代測定法、(U-Th)/He年代測定法及びK-Ar年代測定法の実用化を図るとともに、断層岩や割れ目充填鉱物の年代測定によって断層の活動年代を決定するための試料調製法の確立を目指す。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整備を進めている。第1期中期計画では、火山ガラスの屈折率の統計解析によって微量のテフラ起源粒子を同定する多量屈折率測定地質解析法(RIPL法)の実用化を図った(梅田・古澤, 2004⁴⁶)。しかしながら、鮮新世から前期更新世の堆積物中に含まれる比較的古い時代のテフラは、火山ガラスの変質や風化・消失などによって屈折率の測定が困難である。そのため、第2期中期計画では、残存鉱物である石英や斜長石中に含まれるメルトインクルージョンの化学組成を指標にテフラを同定する手法の開発を目指す。

4. 平成 25 年度の研究計画

4.1 調査技術の開発・体系化

4.1.1 変動地形が明瞭でない活断層などに係る調査技術

(1) 目的

日本列島の主要な活断層については、既に「200 万分の 1 日本列島活断層図」(200 万分の 1 活断層図編纂ワーキンググループ, 2000⁴⁷⁾)などによって、その分布が取りまとめられている。しかしながら、活動性の低い断層 (<0.1 mm/y) については、断層変位がその後の侵食によって不明瞭になり(地形学的検知限界; Kaneda, 2003⁴⁸⁾), 変動地形学的手法では活断層としての認定が困難となる。これらについては、空中レーザー計測による微地形や反射法地震探査などによって断層の推定が試みられているが、第四紀の被覆層が薄い結晶質岩の分布する地域への適用には限界がある。そのため、地表からの調査の段階において、低活動性の断層や伏在断層などの変動地形が明瞭でない活断層を確認するためには、変動地形学的手法や地球物理学的手法を補完する新たな調査技術の開発が必要となる。本研究では、断層から放出されるガスの主成分・同位体組成に着目し、これらの活断層を認定するための地球化学的な調査技術を提示する。

(2) 実施内容

第 1 期中期計画では、主要な断層周辺の土壌ガスや地下水・温泉ガスなどの地球化学的性状について検討し、水素濃度や希ガス同位体組成と断層の分布や活動性との間に相関が認められることを見出した(Shimada *et al.*, 2008⁴⁹⁾; Umeda *et al.*, 2008⁵⁰⁾; Umeda and Ninomiya, 2009⁵¹⁾)。そのため、第 2 期中期計画では、規模やタイプなどの異なるいくつかの活断層の事例研究を通じて、低活動性の断層や伏在断層などの変動地形が明瞭でない活断層を認定するための地球化学的手法の実用化を図る。そのため、変動地形の特徴が異なる活断層(活褶曲, 活撓曲を含む)や地質断層を含めた様々な断層を対象に、断層のタイプ(正断層, 逆断層, 横ずれ断層), 規模(長さ, 破碎帯の幅), 活動性(最新活動時期, 平均変位速度, 活動周期)のほか、断層が分布するテクトニックな環境(例えば, 応力場や地殻歪速度)の違いを考慮しつつ、断層周辺の土壌ガス, 温泉ガス, 地下水中の溶存ガスなどの断層ガスを採取し、ヘリウム(He), アルゴン(Ar), 二酸化炭素(CO₂), 水素(H₂)などの主成分・同位体組成の分析を行う。また、これらの断層ガスの地球化学的特徴を上記の地質学的データや地下構造に係る地球物理学的数据と比較・検討し、変動地形が明瞭でない活断層の認定に有効な地球化学的指標を明らかにし、断層タイプやテクトニックな環境の違いに応じた調査技術を開発する。さらに、「4.1.4 地殻内の震源断層などに係る調査技術」で得られた成果を踏まえ、地質学的, 地球物理学, 地球化学的数据を含む総合的な解析手法を構築する。

(3) 平成 25 年度の研究計画

① 断層ガスの化学組成と断層の規模・タイプなどとの比較・検討

活断層(活褶曲, 活撓曲を含む)及び地質断層の区分のみならず、断層のタイプ(正断層, 逆断層, 横ずれ断層)や規模(長さ, 破碎帯の幅), 活動性(最新活動時期, 平均変位速度, 活動周期), テクトニックな環境の違いなどの視点から断層から放出されるガスの主成分や同位体組成の特徴を取りまとめることを目標とする。これまでに、国内の代表的な横ずれ断層や逆断層の周辺において、地下水の溶存ガスや遊離ガスの採取を行うとともに、He, Ar, CO₂, H₂ などの主成分・同位体組成の化学分析を行った。

また、これまでのデータを用いて、断層からの距離によるガスの主成分・同位体組成の変化について検討した。その結果、横ずれ断層の近傍では高い He, H₂ 濃度や ³He/⁴He 比が観測された (Umeda *et al.*, 2011⁵²⁾)。さらに、断層運動に伴って放出される非定常放出ガスと静穏時に放出される定常放出ガスの主成分・同位体組成の違いを明らかにするため、2011 年東北地方太平洋沖地震で誘発された活断層 (湯ノ岳断層, 牛伏寺断層など) で観測を行った結果、非定常及び定常放出ガスの ³He/⁴He 比の顕著な変化は認められなかった。これにより、断層運動の発生前においても当該手法が有効であることが示された。平成 25 年度は、太平洋沿岸域等の代表的な活断層と地質断層の周辺地域や群発地震が発生している地域において、温泉ガス (遊離ガス) や地下水の採取、主成分・同位体組成の化学分析を行う。

③ 総合的な解析手法の構築

国内で既に取得されたデータを整理した上で、これらの地球化学的特性と断層周辺における地下構造に関する情報 (例えば、比抵抗構造) との関連性を検討し、変動地形が明瞭でない活断層の認定に有効な手法の体系化を目指す。これまでに、西南日本を事例に He 同位体のデータのコンパイルを行うとともに、地震波トモグラフィーの結果に基づく地殻・マントル構造との関連性について検討を行った (Umeda *et al.*, 2012⁵³⁾; 草野ほか, 2012⁵⁴⁾)。平成 25 年度は、明瞭な変動地形が認められない地域で生じた内陸地震の震源域を事例に、He 同位体比の空間分布の特徴を明らかにするとともに、地震波速度構造、比抵抗構造等による震源断層の分布・構造などとの関連性について検討を行う。

(4) スケジュール

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
① 断層ガスの化学組成と断層の規模・タイプなどとの比較・検討	<ul style="list-style-type: none"> ・規模やタイプなどの異なる断層を対象に断層ガスの主成分・同位体組成などのデータの取得 ・上記の結果と断層の規模やタイプなどの地質学的情報と地殻・マントル構造に関する地球物理学的情報などとの比較・検討 				
② 地球化学的指標による調査技術の提示	<ul style="list-style-type: none"> ・活断層を認定するために有効な地球化学的指標の抽出 ・断層のタイプやテクトニックな環境の違いに応じた調査技術の提示 				
③ 総合的な解析手法の構築	<ul style="list-style-type: none"> ・震源断層などの検出技術などの成果も踏まえ、地質学, 地球物理学, 地球化学などのデータを含めた総合的な解析手法の構築 				

4.1.2 断層の発達段階の評価に係る調査技術

(1) 目的

地層処分安全性の検討においては、断層運動に伴う地震動による影響よりも、むしろ既存の断層の再活動・成長やそれに伴って主断層から派生する副断層の形成、破碎帯の拡大などのような地質環境の不可逆的な変化に伴う影響を検討することが重要となる。特に、短い断層は、長大な断層に至る未成熟な段階の断層とも考えられている。内陸の活断層は、数千年～数万年に一回の割合で活動すると考えられていることから、今後数万年間に、数回～数十回活動することが想定され、地表における新たな変位の形成のほか、既存の断層の伸長や破碎帯の拡大などが生じる可能性がある。これらの影響範囲も地表からの調査の段階においてあらかじめ検討しておく必要がある。そのため、サイト選定に際して断層からの離間距離を適切に設定するための科学的な判断根拠として、地表からの調査の段階において、それぞれの断層の発達段階(未成熟～成熟)を明らかにするための調査・評価技術を提示する。

(2) 実施内容

第1期中期計画では、主要な活断層を対象に、地形・地質学的手法や断層岩の放射年代測定などにより、断層の活動履歴に関する調査技術の整備を進めてきた(Kagohara *et al.*, 2009⁵⁵); Niwa *et al.*, 2009⁵⁶)。第2期中期計画では、テクニクな環境ごとに、断層パラメータ(断層の走向、傾斜角、すべり角)のほか、破碎帯の幅、活動開始年代、変位速度、活動周期などの地形・地質情報に加えて、微小地震などの地球物理学的情報の統計的な解析を行い、それぞれの断層の特徴を明らかにする。その上で、既存の活断層の進化モデル(Stirling *et al.*, 1996⁵⁷); Wesnousky, 1999⁵⁸)を考慮しつつ、断層の発達過程に係る概念モデル(例えば、断層ストランドの中央部から端部までの累積変位量の大きさなどに基づく発達過程のモデル化)を構築し、主要な断層についての発達段階(未成熟～成熟)の分類を試みる。また、最近では未成熟な断層を断層ガウジの色調によって判断するといった地質学的な検討(間中ほか, 2012⁵⁹)も行われており、これらの成果も取り込んでいく。さらに、これまでの研究では、岩盤の破壊に伴う鉱物の破壊表面と水とのラジカル反応によって、水素が断層ガスとして地表に放出されているといった報告がある(Wakita *et al.*, 1980⁶⁰); Kita *et al.*, 1982⁶¹)。断層の発達段階とそれに伴う岩盤の破壊には、何らかの関係があると予想されることから、発達段階の異なる断層を対象に土壌ガスや遊離ガスに含まれる水素濃度を測定することによって、水素濃度が断層の発達段階を示す地球化学的指標として有効であるかについても併せて検討する。

(3) 平成25年度の研究計画

② 地球化学的指標の検討

これまでに、活断層や地質断層の周辺において簡易測定法で測定した土壌ガスの水素、二酸化炭素、メタン濃度データに加えて、温泉井や地下水井から採取した遊離ガスの水素、二酸化炭素、メタン濃度のデータを整理した。その結果、活断層近傍における土壌ガスの水素ガス濃度は地質断層に比べて高い傾向を示すことが明らかになった(黒澤ほか, 2010⁶²)。また、これまでに、産業技術総合研究所との共同研究の一環として、活断層を中心に断層岩の岩石・鉱物学的データ(例えば、色調、鉱物組み合わせ、全岩化学組成、断層岩間隙水の化学組成)を取得し、断層のタイプ、断層トレースの連続性・長さ、活動開始年代、平均変位速度、再来間隔、破碎帯の特徴などを考慮した断層の発達段階との関連について検討を進めてきた(伊藤ほか, 2011⁶³)。平成25年度は、これらのガス濃度や、断層ガウジの色調に影響を及ぼすと考えられる断層岩の鉱物・化学組成に着目した研究を進める。特に、花崗岩の分布する地域

の活断層などを事例に、断層岩の組織観察に加え、鉱物・化学分析(例えば、X線回折分析、粒度分析、全岩化学組成分析)を行い、断層のタイプ、断層トレースの連続性・長さ、活動開始年代、平均変位速度、再来間隔などを考慮した断層の発達段階との関連について検討を進める。さらに、断層の活動性や発達段階(成熟度)等を推定するための物質科学的な指標(Kanaori, 1983⁶⁴⁾; Billi, 2005⁶⁵⁾)を提示する。

(4) スケジュール

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
① 断層ごとの地形・地質学的データと地球物理学的データとの比較・検討	<ul style="list-style-type: none"> ・地形・地質学的データと地球物理学的データとの比較・検討 				
② 地球化学的指標の検討	<ul style="list-style-type: none"> ・断層ガス中の水素濃度の地球化学的指標としての検討 ・断層岩の岩石・鉱物学的データの地球化学的指標としての検討 				

4.1.3 地下で遭遇した断層の活動性に係る調査技術

(1) 目的

ボーリングや坑道などの掘削によって地下で新たに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。そのため、このような断層の活動性の評価を行うためには、断層運動に伴って生じる熱的なイベントや断層の上盤と下盤の岩体の隆起速度の違いなどを断層物質や周辺の岩盤の岩石・鉱物学的調査によって明らかにすることが有効となる。本研究では、地下施設を活用した調査の際に、地下で遭遇した断層の活動性を評価するため、断層岩や断層充填鉱物(例えば、雲母粘土鉱物)、割れ目充填鉱物(例えば、炭酸塩鉱物脈)の年代のほか、熱年代学的アプローチによる垂直変位速度の算定などの要素技術を開発し、当該手法の実用化の見通しを得る。

(2) 実施内容

断層岩などの年代測定による断層の活動性の検討には、以下の三つの方法論が考えられる。

第一は、断層運動によって生じた摩擦熱や地下深部から流入した熱水によって引き起こされる熱的なイベントとその発生時期を放射年代測定法により明らかにする方法(熱年代学的アプローチ)である。これについては、ウラン・トリウム・ヘリウム((U-Th)/He)年代測定法、フィッシュン・トラック(FT)年代測定法などの閉鎖温度の低い放射年代測定法を用いて、閉鎖温度のより高い熱的なイベントによる年代リセットが生じた最も新しい時期の推定が可能である。本研究では、断層岩について熱年代学的アプローチを適用することにより断層運動に伴う熱的なイベントの時期の推定を試みた(Yamada *et al.*, 2012⁶⁶)。

第二は、断層ガウジ中に含まれる熱水の流入によって生成された極細粒な自生雲母粘土鉱物の生成年代を直接的に推定する方法や周辺の割れ目充填鉱物(炭酸塩鉱物脈)と断層の切断関係から断層が変位した年代を間接的に推定する方法である。前者については、野外のみならずボーリングコアや坑壁から採取した断層岩試料から雲母粘土鉱物を分離するとともに、粒子のサイズや結晶構造(ポリタイプ)に基づき、自生雲母粘土鉱物を抽出し、これらのカリウム・アルゴン(K-Ar)年代測定を行うことで断層運動によって熱水が流入した時期を明らかにする。後者については、鍾乳洞などを事例に断層活動と脈、あるいは脈同士の生成の新旧関係(以下、「切断関係」)が明瞭である炭酸塩鉱物のウラン・トリウム放射非平衡年代(^{234}U - ^{230}Th 年代:アイオニウム年代)を測定し、当該技術の有効性を提示する(例えば、放射平衡に達している炭酸塩鉱物脈に断層が変位を与えていない場合には、その断層が少なくとも最近約50万年間以上は活動していないという証拠となる)。炭酸塩鉱物に対しては、(U-Th)/He年代測定法が有効な可能性も示唆されている。

第三は、断層の上盤と下盤の岩石中に含まれる閉鎖温度の異なる鉱物の年代測定を行うことにより、それぞれの時間スケールでの垂直変位速度を算定する方法である(梅田ほか, 2010⁶⁷)。本研究では、野外やボーリングコアから採取された岩石試料からジルコン、アパタイトを分離し、閉鎖温度の低いFT年代や(U-Th)/He年代から断層の垂直変位速度を算定することを試みた(山田ほか, 2012⁶⁸)。

(3) 平成25年度の研究計画

② 断層岩に生成した鉱物の年代測定と活動性の評価

第2期中期計画期間を目途に、断層岩に生成した鉱物の年代測定法の実用化を図るとともに、得られ

た年代について層序や切断関係から推定される断層運動の時期との比較・検討及び断層岩の組織や鉱物・化学的特徴との比較を通じて、断層の活動性を評価するための手法としての有効性を提示する。

K-Ar 年代測定法による断層岩中の自生雲母粘土鉱物の生成年代を利用した断層の活動性の評価については、昨年度までに土岐花崗岩中の地質断層や有馬・高槻構造線などの活断層を事例に、断層岩の採取及び自生雲母粘土鉱物の精細分離を行い、それぞれのサイズごとに K-Ar 年代測定を実施した。年代測定結果については、分離したフラクションの X 線回折 (XRD) 分析、粒度分析、電子顕微鏡観察などと併用して精細分離の有効性について確認するとともに、花崗岩中に含まれる角閃石と黒雲母の K-Ar 年代、ジルコンとアパタイトの FT 年代を用いた花崗岩体の冷却史の解析結果との比較を行った。平成 25 年度は、上載地層法によって活断層であることが指摘されている断層の周辺母岩に発達する活動履歴の不明な割れ目や断層に対して、雲母粘土鉱物の微細組織観察や K-Ar 年代測定を実施し、結果を比較することにより、断層活動の影響範囲などについて検討する。

炭酸塩鉱物の ^{234}U - ^{230}Th 年代測定については、断層と切断関係にある炭酸塩鉱物脈の年代測定を実施するため、これまでに小倉東断層、跡津川断層などの周辺において露頭の地質記載と試料の採取を実施した。採取した試料については、マルチコレクター型 ICP-MS を用いた同位体希釈法によって ^{234}U - ^{230}Th 年代を測定し、ウラン・トリウム濃度や年代測定結果についての検討を行った。その結果、跡津川断層から採取した試料については、年代測定に十分なウラン濃度を有する試料を見出し、第四紀の活動を示唆する年代を得たが、年代値の評価については、詳細な構造地質学的記載に基づく炭酸塩鉱物脈の産状との比較や ^{14}C 年代測定などでのクロスチェックなどの更なる精査が必要である。平成 25 年度は、鍾乳石などの年代既知の試料を用いた ^{234}U - ^{230}Th 年代測定を行い、試料採取法の検討と合わせて炭酸塩鉱物の ^{234}U - ^{230}Th 年代測定の高度化について検討する。

(4) スケジュール

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
①熱的イベントによる断層の活動性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ジルコン、アパタイトの FT, (U-Th)/He 年代測定法の適用 ・実際のボーリング孔や坑道で採取した試料を用いた熱的なイベントの検出 				
②断層岩に生成した鉱物の年代測定と活動性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・自生雲母粘土鉱物の K-Ar 年代測定法の適用 ・炭酸塩鉱物脈の ^{234}U-^{230}Th 年代測定法の適用・(U-Th)/He 年代測定法の検討 ・断層の活動性の評価手法としての有効性・問題点の抽出 				
③断層の上盤と下盤の隆起速度の違いによる垂直変位速度の推定	<ul style="list-style-type: none"> ・ジルコン、アパタイトの FT 年代, (U-Th)/He 年代などを組み合わせた断層の垂直変位速度の推定手法の提示 				

4.1.4 地殻内の震源断層などに係る調査技術

(1) 目的

地層処分システムの性能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、マグマ活動)の潜在的なリスクを排除するには、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)などの存否や構造をあらかじめ確認し、これらを回避する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などが存在するような領域の付近では、震源断層の活動によって、地殻浅所まで破断が進展(地震断層の形成)することやそれに伴って地下深部の高温流体などが流入する可能性も考えられるため、これらに関連する地下深部の不均質構造を把握するための技術基盤の整備を進める。

(2) 実施内容

第1期中期計画では、主に地震波トモグラフィー法及び地磁気・地電流法(MT法: Magnetotelluric Method)により、地殻中部～下部に存在する数十 km 以上の大きさの溶融体であれば、地上からの調査において、その存否をあらかじめ確認できることを示した(浅森・梅田, 2005⁶⁹⁾; Umeda, 2009⁷⁰⁾)。他方、地震波トモグラフィー法は観測網の端部や地震活動が低い領域において分解能が低下するほか、MT法は地下の三次元的な不均質や人工ノイズが卓越する領域において信頼性が低下するなど、これらの物理探査技術は対象領域の環境に依存して不確実性が增大するため、その低減や評価を行う必要がある。第2期中期計画では、①微小地震の震源決定精度の高度化、②地震波後続波データを用いた高分解能地震波トモグラフィー法、③MTデータの三次元比抵抗構造解析法などの要素技術の整備を進めるとともに、これらを組み合わせた物理探査によって、将来の活動により地表に変位をもたらす可能性を有する地下深部の不均質構造を把握するための調査技術を開発する。

微小地震の震源決定には、地表付近の地質構造が影響するため、これら三次元的な不均質構造の影響を考慮した震源決定を行い、精密な震源分布の決定などから地殻内の脆性領域に存在する微小地震の集中域を高精度で把握するための手法を開発する。さらに、地震波後続波データを用いた高分解能の地震波トモグラフィー法による数 km 程度の分解能での地震波速度構造の推定事例を提示する。比抵抗解析手法については、急峻な地形や地表付近の三次元的な不均質構造によって生じた電荷による電場への影響(スタティック・シフト)や比抵抗の不連続構造を考慮することが可能な三次元解析プログラムを開発する。また、ノイズの影響を低減するためのスタッキング法や人工ノイズの影響を評価するための手法を併せて整備する。これらの要素技術を組み合わせた物理探査技術を提示するとともに、例えば、微小地震の集中が認められる地域のうち明瞭な活断層が存在している領域や地表では活断層・地質断層が認められない領域に対してこれらの手法を適用し、当該技術の有効性や信頼性を検討する。

(3) 平成 25 年度の研究計画

② 地震波後続波データを用いた高分解能地震波トモグラフィー法

従来の実体波初動データのみを用いた地震波トモグラフィー法に比して数倍程度の空間分解能の向上が期待できる技術の開発を目指す。このためには地質構造に起因する地震波速度不均質を考慮した理論走時計算のほか、地殻内の地震波速度不連続面における反射波などの到達時刻データが多量に必要となる。そのため平成 25 年度は、地表付近の地質構造に起因する地震波速度不均質が地震波トモグラフィーの結果に与える影響をモデル計算や実際の観測データを用いた事例解析に基づいて定量的

に示すとともに、解析の高分解能化に必要な後続波到達時刻データを収集する。

③ MT データの三次元比抵抗構造解析法

地殻内の三次元比抵抗構造の不均質性から震源断層の存否を推定するための調査技術を確立する。そのため、地下深部における三次元的な不均質構造を推定するための有効な手法の一つである MT 法について、観測データに含まれるノイズを低減させるためのデータ処理法及び震源断層や高温流体などに起因した不均質構造の検出に適した三次元インバージョン法を開発し、代表的な震源断層を事例に比抵抗構造解析を行うことで、それらの有効性を示す。これまで、地下深部における比抵抗境界の検出に有効な三次元インバージョン法を開発し、モデル計算及び実データへの適用によってその妥当性を示した (Negi *et al.*, 2013⁷¹)。平成 25 年度は、震源断層に特有の比抵抗構造について検討するため、既往研究の地震波トモグラフィなどによって震源断層に関連した不均質構造が想定される地域の断層を対象に地磁気・地電流観測を行い、ここで開発した三次元インバージョン法に適用することによって、当該手法の有効性を検討する。また、時系列の観測データに混入する人工ノイズを除去する方法として、カルマンフィルタなどを用いたデータ処理法に関する検討を行う。

(4) スケジュール

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
①微小地震の震源決定精度の高度化	<ul style="list-style-type: none"> ・地表付近の三次元的な不均質構造を考慮した微小地震の震源決定 				
②地震波後続波データを用いた高分解能地震波トモグラフィ法			<ul style="list-style-type: none"> ・地震波後続波データを用いた高分解能の地震波トモグラフィ法による三次元地震波速度構造の推定 ・地震波速度構造から震源断層を検出するための技術の提示 		
③MT データの三次元比抵抗構造解析法	<ul style="list-style-type: none"> ・三次元比抵抗構造解析プログラムの開発 ・ノイズの影響を低減するためのスタッキング法や人工ノイズの影響を低減するための手法の提示 ・自然現象及び地質環境のモニタリング技術としての適用法の提示 				<ul style="list-style-type: none"> ・総合的な物理探査技術の提示

4.1.5 内陸部の隆起・侵食速度の算出に係る調査技術

(1) 目的

沿岸域については、間氷期に形成された海成段丘の分布高度によって数十万年程度の隆起量を推定することが可能である。内陸部については、氷期に形成された河成段丘を指標とした TT 法によって推定が行われているが、TT 法は河成段丘の発達が発達した東北日本や河川の中流域については適用できるものの、河成段丘の発達が乏しい西南日本や河川の上流域では、隆起量の見積りに適用することが困難であることが多い(田力, 2005⁷²⁾)。そのため、河成段丘の発達の乏しい地域やさらに長期の隆起・侵食速度を算出するための新たな調査技術が求められている。本研究では、河成段丘の発達が乏しい地域にも分布する旧河谷堆積物や内陸小盆地の堆積物の編年に基づく隆起量のほか、原位置宇宙線生成核種(例えば、ベリリウム-10(¹⁰Be)、アルミニウム-26(²⁶Al))を用いた年代測定法による岩体の露出年代や閉鎖温度の低い FT 年代測定法、(U-Th)/He 年代測定法による熱年代学的アプローチによって 10～100 万年オーダの侵食速度を地表からの調査の段階で明らかにするための調査技術を提示する。

(2) 実施内容

付加体が広く分布する西南日本では、河川争奪によって半環状の旧河谷(穿入蛇行跡)が形成されることが知られている。そのため、近接した地域において標高が異なるいくつかの旧河谷堆積物(離水堆積物)の形成時期が推定できれば、それらの地域の平均的な隆起速度の推定が可能となる。本研究では、空中写真、地形図などを用いて、日本全国の旧河谷堆積物の分布を抽出するとともに、地形、地質やテクニクな環境の違いごとに GIS (Geographic Information System: 地理情報システム)を用いてそれらの特徴を整理し、旧河谷堆積物の形成条件を検討する。また、堆積物の編年に関しては、河川堆積物、フラッド・ローム層、風成堆積物などの放射年代測定、古土壌の分析やテフクロノロジーなどによって離水年代を推定する。隆起速度の算出に際しては、旧河谷堆積物の分布している標高のみならず、ボーリングなどによって埋没谷底の形状・標高を決定し、対象とする旧河谷の高度の違いを把握する。

また、表層の岩石や土壌中に含まれる石英などが宇宙線に照射されることによって生成される ¹⁰Be や ²⁶Al の蓄積量を測定することにより、それらの岩石が露出していた期間を 10 万年オーダで算定することが可能である。また、広域かつ多くの河床礫などの ¹⁰Be、²⁶Al 年代測定を通じて空間的な隆起・侵食量を見積もることにより、例えば、断層の活動開始年代の推定に応用することも可能である。さらに、複数の岩石・鉱物の放射年代測定を通じて年代と閉鎖温度の違いから岩体の侵食速度の長期的な傾向を算定するとともに、隆起・侵食量の見積りの妥当性を検討していく。第2期中期計画では、これらの放射年代測定法によって、十万年オーダの隆起・侵食速度を算定するための技術基盤を整備していく。なお、本研究に必要な各種年代測定技術は、「4.3 年代測定技術の開発」において進めていく。

(3) 平成 25 年度の研究計画

② 放射年代測定法による隆起・侵食速度の算定

熱年代学的アプローチによって隆起・侵食速度を推定する調査技術を構築するため、平成 24 年度から赤石山脈などを事例に各種鉱物の FT 年代、(U-Th)/He 年代とそれらの閉鎖温度を用いた岩体の冷却史や削剥速度の解析を行っている。平成 25 年度は、さらに西南日本の花崗岩体等を事例に U-Pb 年代、K-Ar 年代、Rb-Sr 年代などを用いた検討を行う。宇宙線生成核種(Terrestrial in situ Cosmogenic Nuclide; TCN)である ¹⁰Be を用いた岩体の露出年代については、御池山隕石クレーター(2～3 万年前)

に伴って生じた面状変形組織(planar deformation features)を有する石英粒子などといった年代が既知の鉱物試料を用いることにより、測定手法の適用性を確認する。さらに、岩石中に生成される¹⁰Beや²⁶Al等の深度プロファイルを用いた花崗岩の風化地表面の真砂土の長期的な侵食速度の定量を試みる。

(4) スケジュール

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
①内陸部における堆積物、地形的指標に基づく隆起量の算定	<ul style="list-style-type: none"> ・日本列島の旧河谷の分布の GIS 化及び地形・地質・テクトニクスの解析 ・旧河谷堆積物の編年及び埋没谷底の形状・標高などに係る調査技術の提示 				
②放射年代測定法による隆起・侵食速度の算定		<ul style="list-style-type: none"> ・宇宙線生成核種(TCN)を用いた岩体の露出年代・侵食速度の検討 ・FT 年代, (U-Th)/He 年代などを組合せた内陸部の隆起・侵食速度の推定 			

4.2 長期予測・影響評価モデルの開発

4.2.1 地形変化シミュレーション技術の高度化

(1) 目的

地殻変動に伴う地形変化や気候・海水準変動は、地下水の動きや水質に変化を及ぼすことが想定される。特に、隆起量が大きい内陸部や海水準変動による海面の上下動の影響を被る沿岸域では、それらの変化の程度を長期的に検討することが必要となる。今後 10 万年程度の地形の変化や気候・海水準の変動は、過去数十万年間の隆起・侵食や気候サイクルから外挿・類推することが基本となる。一方で、物理モデル(隆起・侵食などといった現象を再現するための数値モデル)によって将来の地形の起伏をシミュレートし、双方の結果を比較・検討することによって、予測結果の信頼性の向上を図ることが重要となる。これまでは、拡散モデルに基づく地形変化シミュレーション・プログラムの開発を進めてきた(三箇・安江, 2008⁷³)。現時点では、物理モデルによるシミュレーション結果の妥当性の検討が課題となっている。そのため、本研究では、過去の地形(古地形)を復元し、そこを起点として現在の地形の起伏がシミュレーションによって再現できるか否かを一つの目安として、シミュレーション技術の妥当性の評価を行う。

(2) 実施内容

古地形の復元に際しては、空中写真判読や地形・地質調査によって得られた各時代の段丘面の分布とそれぞれの段丘面に近接する河川の縦断形との関係などから、各時代の地形面(接峰面図)を復元する。その結果に基づき、例えば、東濃地域を事例に MIS (Marine Isotope Stages: 海洋酸素同位体ステージ)6(約 14 万年前)及び MIS2(約 2 万年前)を起点とする地形変化シミュレーションによって現在の地形がどの程度再現できているかについて、段丘の残存率、開析度、河床縦断形の形状、堆積物の層厚などを指標に評価する。また、小流域で形成される扇状地や斜面堆積物などの形成プロセスや流域の削剥速度を把握するためのシミュレーション技術の整備とその技術の妥当性を実データに基づき評価する。

(3) 平成 25 年度の研究計画

② 小流域における土砂の削剥・移動・堆積シミュレーション

小流域に形成される小規模な扇状地や斜面の基部に形成される崖錐などの形成プロセスや形成年代を検討するため、本シミュレーション技術を応用して土砂の削剥・移動・堆積プロセスについて数百～数万年のシミュレーションを試行する。シミュレーションに際しては、気候や植生などの変化を考慮してパラメータを設定することも念頭において進める。また、平成 25 年度は花崗岩地域などを事例に、気候や植生などの変化を考慮した斜面堆積物などの形成プロセスのシミュレーションを行うとともに、実際の堆積物の構造、層相、岩石・鉱物学的特徴、年代などとの比較・検討を通じて、当該手法の妥当性を検討する。

(4) スケジュール

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
① シミュレーション技術の妥当性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・地形学的手法により推定した古地形を起点としたシミュレーションによる現地形の再現 ・段丘の残存率, 河床縦断形などに基づく妥当性の評価 ・シミュレーション結果に基づく地下水の解析と解析結果の検証 				
② 小流域における土砂の削剥・移動・堆積シミュレーション			<ul style="list-style-type: none"> ・土砂の削剥・移動・堆積プロセスのシミュレーション ・斜面堆積物の構造, 層相, 岩石・鉱物学的特徴, 年代, 気候や植生変化のデータの取得 ・実際のデータとシミュレーション結果の比較による検証 		

4.2.2 地質断層の再活動性に関する評価技術

(1) 目的

地層処分安全性については、評価期間が数万年以上にも及ぶことから、地震防災や地上施設の耐震評価とは異なり、様々な時間的不確実性が含まれることを考慮した上で評価せざるを得ない。いわゆる活断層の分布は、第四紀の活動性が認められない(あるいは不明な)地質断層の分布と調和的であることから、活断層の多くは鮮新世～第四紀以降の応力場で既存の断層が再活動したものと考えられる(梅田ほか, 2010⁶⁷⁾)。そのため、現状の地殻応力場にあっても、少なくとも現在の活断層と同様の走向や傾斜を有する地質断層が再活動する可能性は否定できない。また、2011年東北地方太平洋沖地震の際には、それまで地質断層であると考えられてきた湯ノ岳断層や井戸沢断層が活動したように、海溝型地震に伴う沿岸域の地殻応力場の変化が断層の活動性に及ぼす影響を評価することも重要な課題として挙げられる。さらに、すでに認識されている活断層についても断層の伸長や新たな副断層の形成、破碎帯の拡大などについては、これらの範囲を推定するための地殻浅所の破壊過程を模擬する技術を整備していくことが重要となる。本研究では、サイト選定の際に、断層運動による物理的な影響に対して裕度をもって回避すべき範囲を予測するため、地質断層の再活動性や新たな断層の生成・進展などに係る評価技術の整備を図る。

(2) 実施内容

2011年東北地方太平洋沖地震では、巨大海溝型地震によって沿岸域で応力・歪場が変化し、それに伴って活断層のみならず地質断層と考えられていた断層の再活動や地下水の大量湧水などの現象が実際に生じた。海溝型地震の震源や規模などに応じて誘発される内陸部の地震活動の頻度が異なるものの、特に沿岸域における断層の再活動については、地層処分システムの安全性に影響を及ぼす可能性が考えられる。これらの現象については、基本的には食い違い理論に基づく数値シミュレーションによってクーロン破壊応力の変化を推定し、それに基づき既存の断層の活動可能性を評価することになるが、これまでに現象論的な観測事例もないことから、まずは同様なテクトニックセッティングの地域を対象に、海溝型地震と沿岸域の断層運動との発生時期や活動規模などの相関に関する基礎データを取得することが必要となる。本研究では、海溝型地震の震源地に面した沿岸域において主に地形・地質学的アプローチによってデータを取得するとともに、海溝型地震の発生時期、規模などと平野部の隆起・沈降運動、平野－山地境界の断層の活動性などとの関連性について検討を行う。

(3) 平成25年度の研究計画

②海溝型地震に伴う沿岸域の断層運動を含む地殻変動の検討

海溝型地震による断層運動やその影響を評価するための技術開発の一環として、沿岸域の活断層・地質断層を対象に地形・地質学データ及び地球物理学的データを収集・整理するとともに、歴史時代を含めて海溝型巨大地震と沿岸域の断層運動との時空間的な関連性について検討する。さらに、海溝型地震によって引き起こされた可能性がある沿岸域の断層の周辺を事例に活動時期や変位量などの地質学的データを取得する。また、海溝型地震の発生との関係を検討するため、古文書による情報に基づく古津波痕跡調査、及び更新～完新統の隆起・沈降イベントを把握するための地形・地質調査を実施する。なお、本研究を通じ、沿岸域の正断層のように活動性の不明瞭な活断層による影響範囲を把握するための物理探査・ボーリング調査などの技術の最適化を図る。さらに、国内外において過去に発生した海溝型地震や津波の事例及びそれらが地質環境に及ぼす影響などの情報の収集・整理を行う。

平成 24 年度は、特に南海トラフ巨大地震が想定されている太平洋沿岸域において過去に発生した海溝型地震や津波の事例について整理した上で、津波に関する研究事例のほとんど無い宮崎平野を対象に古津波痕跡調査を行った。その結果、古文書の記録により 1662 年の地震によって沈降したとされる地域の採土器試料の記載及び分析から、急激な沈降の可能性を示唆するイベントを見出した。平成 25 年度は、試料の更なる分析(例えば、微化石分析, テフラ分析, 水質分析, ^{14}C 年代測定)により、イベントの時期や成因について考察を進めるとともに、現地調査対象を時空間的に拡張し、更新～完新統の隆起・沈降の履歴(特に、地震性の急激な隆起・沈降の有無)を明らかにしていく。沿岸域の断層に関しては、平成 24 年度は宮崎平野北縁部に分布する正断層(川南断層及び征矢原断層)を事例対象とした地形・地質調査を行い、段丘面の変位に係るデータを取得した。平成 25 年度は、テフラなどをマーカーとした変位地形を跨ぐ表層地質データなどによって変形量・変形範囲を把握し、沿岸域の断層活動の影響について評価を行う。以上の成果に基づき、海溝型巨大地震と沿岸域の断層運動との時空間的な関連性について検討するとともに、長期にわたる局所的な応力場の変化や隆起・侵食速度の定速性についての評価を行う。

(4) スケジュール

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
① 数値シミュレーションによる断層の再活動や分岐・進展などの範囲の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・数値解析手法などによる研究事例の収集・整理 ・シミュレーション結果と観測データとの比較・検討による予測手法の妥当性の評価 				
② 海溝型地震に伴う沿岸域の断層運動を含む地殻変動の検討				<ul style="list-style-type: none"> ・海溝型地震に伴う隆起・沈降及び沿岸域の断層の活動性・影響に関する情報収集とそれらに関する調査・評価技術の高度化 ・海溝型地震に伴う応力・歪の変化及び沿岸域の断層運動の相関性に関する評価手法の提示 	

4.2.3 断層運動に伴う地下水流動系の変化に関する評価技術

(1) 目的

2011年東北地方太平洋沖地震の発生を契機に、巨大海溝型地震によって沿岸域では応力・歪場が変化し、それに伴って活断層のみならず地質断層の再活動や地下水の大量湧水などの現象が生じ得ることが強く認識されるようになった。断層運動に伴う地下水流動系の変化については、断層運動に伴って広域的な地殻応力・歪が変化し、それに伴って地下水圧の変化や割れ目の開閉が生じることが考えられる(Wang, 1997⁷⁴)。また、東北地方太平洋沖地震の1ヶ月後の福島県浜通りの地震(M7.0)では、強い揺れによって地下水流路の詰まりが一時的に取れて地下水の流れが良くなり、上流側では水位の低下が、下流側では水位の上昇が起きた可能性が考えられている(佐藤, 2012⁷⁵)。これらのことから、地層処分の安全性を確保するためには、サイトの近傍の断層運動や沿岸域では海溝型地震の発生を考慮するとともに、これらによって生じる地下水流動系の変化の幅を予め予測・評価しておくことが重要となる。

(2) 実施内容


大地震の発生に伴う地下水流動変化の特性は、その震源特性や評価の対象とする地点において異なるほか、断層運動に伴う地殻の体積歪変化との関連性も指摘されている(Wang, 1997⁷⁴)。そのため、過去に発生した大地震に伴う地下水流動変化に関する観測データを収集・整理するとともに、食い違い理論に基づく数値シミュレーション(Toda *et al.*, 2005⁷⁶)などを用いて地震発生に伴う地殻変動を推定し、地下水観測データとの比較を行うことで数値シミュレーションによる評価の妥当性を検討する。

(3) 平成 25 年度の研究計画

① 数値シミュレーションによる地震時の地殻応力・歪, 地下水圧の変化などの評価

数値シミュレーションに基づいた断層運動に伴う周辺岩盤の応力・歪, 地下水圧の変化などについての感度解析や、過去に発生した地震に伴う体積歪及びクーロン応力変化(ΔCFF)の解析を行うとともに、断層運動の特性や観測地点の違いによる歪, 地下水圧の変化を予測・評価するための手法を整備する。平成 24 年度までに 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う地殻応力・歪, 地下水圧のシミュレーションを実施するとともに、日本全国で観測された地殻歪や地下水圧のデータとの比較・検討を行い、当該解析手法の有効性を確認した(Niwa *et al.*, 2012⁷⁷)。平成 25 年度は、国内外の海溝型地震及び内陸地震に伴う地下水圧や水質などの変化に関するデータの収集・整理を引き続き実施する。

(4) スケジュール

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
① 数値シミュレーションによる地震時の地殻応力・歪, 地下水圧の変化などの評価					
			 <ul style="list-style-type: none"> ・過去に発生した地震に伴う周辺岩盤の応力・歪, 地下水圧の変化に関する数値解析 ・断層運動に伴う地下水の変化に関する観測データの収集・整理 		

4.2.4 超長期における予測・評価手法に関する検討

(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を基本とする。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り、予測結果に伴う不確実性も様々である。そのため、本研究では断層運動、火山活動、隆起・侵食、気候・海水準変動について、既存の調査技術によって得られる編年の精度を取りまとめるとともに、外挿法による予測結果の不確実性を、予測する時間のスケールに応じて提示する。また、今後 10 万年を超えるような時間スケールにおいては、現在のテクトニクスが転換する可能性があり、断層運動や火成活動などによって地層処分システムの物理的隔離機能が損なわれる恐れのある地域を外挿法によって提示することは困難となる。そのため、本研究では超長期において新たな断層や火山が発生する可能性についても確率論的アプローチによって検討する。

(2) 実施内容

断層運動、火山活動、隆起・侵食、気候・海水準変動について、これまでの研究事例のレビューを行い、それぞれの編年手法の精度・確度などを考慮しつつ、異なった時間枠(1000 年～100 万年オーダー)で地域別に整理を行う。また、これらのデータに基づく外挿によって、予測する時間枠(例えば、1 万年オーダー、10 万年オーダー)に応じてどの程度の予測の幅(不確実性)が生じるかを定量的に示していく。また、確率論的アプローチについては、これまでの研究において新たな火山が発生する可能性について、カーネル関数を用いた空間モデルや最近隣法による時空間モデルを用いて、地域ごとの確率分布を求めた。本研究では、10 万年オーダー以上の期間において新たな断層が発生する可能性を時空間モデルで示すとともに、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** モデルを開発し、これらの現象の発生する確率を求める手法を提示する。

隆起・侵食については、GPS や水準測量などの測地学的情報から得られる隆起速度と、段丘の編年などの地形・地質学的情報から得られる隆起速度とが大幅に異なる事例があることが知られている。これは、観察・観測している時間スケールの違い(測地学的情報から得られる隆起速度は長くても 100 年程度の時間スケールであるのに対し、地形・地質学的情報から得られる隆起速度は、数万年オーダーの時間スケールを包含)に起因していると考えられる。この場合、隆起速度を求める拠り所とした地形・地質学的情報において、数万年の間に起った大きな隆起・沈降のイベントの情報が欠落している可能性がある。本研究では、地形・地質学的情報から得られる隆起・沈降の情報を精査し、超長期の隆起・侵食の予測・評価において妥当な不確実性の設定について検討する。

前述したように、日本列島の現在のテクトニクスの枠組みが成立したのは、鮮新世から第四紀の前半と考えられている。そのため、現在の山地や平野の形成が始まったのもこの頃と考えられるが、隆起速度と侵食速度が共に大きい日本の山地では山地の成長とともに起伏が増大し、山地の平均高度の増加につれて侵食速度も大きくなる。両者が動的平衡に達すると山地の平均高度も一定に保たれるため(Ohmori, 1987⁷⁸⁾)、このような地域では今後も地形の変化は小さく、地下水の動きや水質の変化もあまり生じないことが想定される。一方、おおむね最近 100 万年以内に隆起が開始した地域では、隆起速度と侵食速度が平衡に達していないため、将来も山地が隆起し、起伏も大きくなると考えられる。そのため、10 万年オーダー以上の期間の予測・評価に際しては、それぞれの山地の地形発達段階を把握しておくことが重要である。これらの点から、例えば、吉川(1985)⁷⁹⁾による 1) 隆起によって山地の平均高度と起伏がともに増加する時期(成長期)、2) 一定の高度と起伏を保持する時期(極相期)、3) 平均高度と起伏が減少す

る時期(減衰期)などの区分を参考に、山地周辺の河成段丘や砂礫層、小起伏面の傾動、関連する断層運動などの情報から山地成長曲線を推定し、日本列島のそれぞれの山地の発達段階を検討し取りまとめる。

(3) 平成 25 年度の研究計画

① 外挿法による予測に伴う不確実性の評価

平成 25 年度までを目途に、断層運動、火山活動、隆起・侵食、気候・海水準変動の編年精度について、研究事例のレビューに基づいて時間別・地域別に明らかにするとともに、それぞれの編年手法の適用条件、限界、留意点などを整理する。これまでに、断層運動に関して、断層のタイプ、総変位量、平均変位速度、確実度などの断層パラメータを収集するとともに、主に総変位量と平均変位速度から日本列島における活断層の活動開始時期の傾向を示した。また、火山活動については、東北日本を事例に、過去 300 万年間のマグマ噴出量の時空分布を明らかにするとともに、テクトニクスとの関連性について検討した(Umeda *et al.*, 2013⁸⁰)。平成 25 年度は、地形・地質学的データ及び山地発達モデルの両面から地域ごとの地殻変動の連続性の成立時期を明らかにするとともに、外挿法によって予測が可能な期間について検討する。

② 超長期の確率モデルの開発

これまでに空間モデル、時空間モデルのほか、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** モデルを開発してきた。平成 24 年度は、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、新規の火山の発生に係る確率分布を火山の分布、活動開始年代のほか、東北日本の希ガス同位体組成の空間的分布のデータを考慮した計算を実施した。平成 25 年度は、新規の断層の形成について、地震波速度構造、希ガス同位体等のデータを組み込んだモデルを構築し、中国地方の断層を事例に確率論的な評価を実施する。

③ 日本列島の山地の地形発達段階の検討

平成 25 年度を目途に、日本列島に分布する代表的な山地などを事例に、DEM を用いたモデル計算を通じて、隆起速度と侵食速度の動的な平衡状態を定量的に示すための手法を整備する。また、Sugai and Ohmori(1999)⁸¹などの先行研究を参考に、日本列島を対象に山地や丘陵の形状や谷底・斜面の勾配などの地形学的特徴を解析し、動的な平衡状態の程度との関連性に基づき日本列島の山地の発達段階を示した概観図を作成する。平成 22 年度は、日本列島に分布する 107 箇所の山地を対象に、過去 10 万年間程度の隆起速度と高度分散量に基づいて侵食速度を算定するとともに、それぞれの山地について山地成長曲線に基づいて動的な平衡状態の評価を行った。また、現在の山地の平均高度から発達段階及び隆起の開始時期についての推定を行った。さらに、平成 23 年度は、隆起・侵食のバランスに基づく山地の発達段階が同程度であるにもかかわらず隆起速度が大きく異なる複数の山地を対象に、山稜(小起伏面)及び斜面の特徴について空中写真判読と DEM データによる解析を行い、異なる隆起速度に応じた山地の発達段階のモデルを提示した。平成 24 年度は、山地内の各地点の海までの流下距離を考慮した高度分散量と平均標高の関係から侵食速度の算定を行い、山地成長曲線に基づく動的平衡状態の評価手法の高度化を図った。平成 25 年度は、それぞれの山地に分布する地質の違いを考慮した高度分散量と平均標高の関係から侵食速度の算定を行い、動的平衡状態の評価手法の高度化を図る。また、これまでの成果を取りまとめ、日本列島の山地の形成開始年代や現在の発達段階を明らかにする。

(4) スケジュール

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
①外挿法による予測に伴う不確実性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・研究事例のレビュー ・それぞれの編年手法の適用条件, 限界, 留意点などの整理 ・予測期間に応じた不確実性の提示 				
②超長期の確率モデルの開発		<ul style="list-style-type: none"> ・空間モデル, 時空間モデルの開発 ・地球物理学的・地球化学的データの収集及びベイズ法による multiple inference モデルの開発 			
③日本列島の山地の地形発達段階の検討	<ul style="list-style-type: none"> ・小起伏面の形状などを指標とした山地の発達段階の推定 ・山地成長曲線の推定 ・山地発達モデルの高度化 				

4.2.5 古水理地質学的アプローチによる地質環境の変化の予測・評価手法の開発

(1) 目的

過去 10 万年間程度については地形学的情報が得られることが多いことから、今後 10 万年間程度の地質環境の変化についても一定の信頼性をもって予測・評価が可能となると考えられる。しかしながら、過去 10 万年以前については地形学的情報を得ることが困難になるため、今後 10 万年を超えるような時間スケールについては予測・評価に伴う不確実性も増大すると考えられる。そのような場合には、地質学的情報に基づき過去の地形・地質構造を復元した上で、それらを場のモデルとして地下水の動きや水質を再現するといった古水理地質学的なアプローチが有効である。さらに、それぞれの時代で再現された地下水の動きや水質などの変動パターンを将来へ外挿することによって、より長期の時間スケールでの地質環境の変化の幅や予測の不確実性を示すことが可能となる。本研究では、東濃地域を事例に、10 年から 100 万年オーダの時間スケールで過去から現在までの地質環境を再現するための一連の調査・解析・評価手法の技術基盤を構築する。

(2) 実施内容

木曾山脈・三河高原から濃尾平野・伊勢湾にかけての木曾川・土岐川水系を含む領域を対象に鮮新世から現在までの地形・地質構造の発達過程の解明を目指す。これらについては、領域内の活断層の変位方向・速度や濃尾平野の堆積速度などのほか、特に河成段丘堆積物や瀬戸層群などの堆積機構や堆積環境に着目しつつ、それぞれの時代での地下水流動解析の場のモデルに相当する地形・地質構造モデルを作成していく。地下水流動解析の境界条件となる気温や涵養量などについては、これまで採取した東濃地域の内陸小盆地や濃尾平野などの堆積物に含まれる花粉やプラントオパール分析などにより推定する。これらに基づき、それぞれの時代での地下水流動特性などを数値シミュレーションによって復元していく。さらに、岩石-水反応や化石海水の混入なども考慮しつつ、鮮新世から現在に至る地下水の地球化学的な進化のプロセスの解明を目指すとともに、東濃地域のボーリング孔などで得られた地下での観測データ(例えば、地下水の主成分・微量成分、同位体組成)や割れ目を充填している鉱物の化学組成・同位体組成、 ^{234}U - ^{230}Th 年代などとの比較・検討により、一連の調査・解析・評価手法の妥当性を評価する。また、これらの研究によって得られた地下水の動きや水質などの地質環境の変化の傾向を外挿することにより、その変動幅と外挿に伴う不確実性を予測に係る時間スケールごとに提示していく。

(3) 平成 25 年度の研究計画

① 地形・地質構造の発達過程の解明

第 2 期中期計画では、数百万年前から現在までの広域的な地下水流動の変化の幅を提示するための一連の手法を構築することを目指す。そのため、平成 26 年度までを目途に、木曾山脈から伊勢湾までの木曾川・土岐川流域を事例に、水理地質構造モデルの構築の基礎となる鮮新世～第四紀の地形・地質構造の発達過程の解明を目指す。これまでに、屏風山断層周辺の木曾川水系に発達する河成段丘堆積物やその下位の瀬戸層群の堆積時期をテフクロノロジーから決定するとともに、屏風山の隆起開始時期を推定した(現在までに得られている知見によると屏風山は少なくとも 1.3 Ma 頃には隆起を開始していたと考えられる)。また、過去から現在までの広域的な地下水の流動を検討するためには、解析領域に分布するそれぞれの山地の隆起開始時期や隆起速度などの時間的・空間的分布を把握することが重要となる。今後は木曾山地や美濃・三河高原におけるそれぞれの山地の形成過程を明らかにす

るため、山地から供給された土砂による堆積物を対象としたいいわゆる後背地解析を実施する。この後背地解析は従来行われてきた単純な礫種ではなく、記載岩石学的特徴や地球化学的特徴に基づき、それぞれの堆積物を供給した山地を特定することを目指す。平成 25 年度も引き続き木曾川・土岐川流域の山地に分布する花崗岩体から岩石を採取し、モード組成、全岩主成分・微量成分及び希土類の分析などを行い、岩体を識別するための基礎情報としてのデータベースや図幅として取りまとめる。また、下流域の濃尾平野のボーリングや物理探査などの情報をもとに、後背地解析を行うことが可能な堆積域の情報を整理する。

② 過去から現在までの地質環境の復元

文献調査及び現地調査によって過去(研究対象の地質体の形成時期)から現在までの地史を復元するとともに、将来予測の期間を考慮して数百万年前以降の地形・地質モデルの作成を行う。

(4) スケジュール

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
① 地形・地質構造の発達過程の解明	<ul style="list-style-type: none"> ・活断層の変位方向・速度や濃尾平野の堆積速度の推定 ・段丘堆積物や瀬戸層群などの堆積時期・堆積機構・堆積環境の解明 ・更新世中期の内陸小盆地堆積物の採取及び花粉分析などによる古気候・古環境の復元 				
② 過去から現在までの地質環境の復元				<ul style="list-style-type: none"> ・地形・地質構造モデルの構築, 地下水理の数値解析 ・地下水の地球化学的な進化プロセスの解明 	
③ 調査・解析・評価手法の妥当性の評価					<ul style="list-style-type: none"> ・観測データ, 割れ目充填鉱物の地質学的データとの比較・検討, 一連の調査・解析・評価手法の妥当性の評価 ・時間スケールごとの外挿による変化の幅, 不確実性の提示

4.3 年代測定技術の開発

4.3.1 加速器質量分析装置を用いた宇宙線生成核種年代測定法

(1) 目的

加速器質量分析装置を用いた年代測定では、原子力機構東濃地科学センターの所掌するタンデム型加速器質量分析装置(ペレトロン年代測定装置)を利用している。これまで炭素-14(^{14}C)年代測定をルーチン化させ、測定結果の品質改善に向けた取り組みとともに、約5万年前までの堆積物の年代推定に用いてきた(Kokubu *et al.*, 2013⁸²)。さらに、「4.1.5 内陸部の隆起・侵食速度の算出に係る調査技術」では岩石の露出年代などの推定のために、宇宙線によって表層の岩石や土壤に含まれる石英中に生成する宇宙線生成核種の ^{10}Be や ^{26}Al の蓄積量を定量する。そのため、 ^{10}Be 年代測定技術を整備し、測定のルーチン化を行う。続けて、 ^{26}Al 年代測定法については、測定技術の整備及び試料調製法の検討を行う。他方、地下水の年代推定に利用可能な塩素-36(^{36}Cl)年代測定法について、測定技術や試料調製法などの検討を進める。

(2) 実施内容

^{10}Be 年代測定法については、 ^{10}Be 測定のルーチン化に向け、標準試料や ^{10}Be 量が既知の実試料を用いた試験測定を行いつつ、ビームライン各機器及び検出器などの調整による測定品質の向上、バックグラウンドの低減を図った(國分ほか, 2010⁴³)。その結果、所期の測定品質が定常的に得られることが確認できたため、平成25年度よりルーチン測定を開始するに至った。今後は「4.1.5 内陸部の隆起・侵食速度の算出に係る調査技術」などの調査に係る実試料測定を行いながら、測定品質のさらなる向上、測定の効率化を目指した試料調製法及び機器設定値の変更に関する調査・検討などを行う。

また、 ^{26}Al 年代は、 ^{10}Be 年代と組み合わせた評価を行うことで、岩石の露出年代の信頼性の向上が期待できることから、 ^{26}Al 年代測定法のルーチン化に向けた取り組みを進める。測定技術の整備として、標準試料などを用いた測定を行い、ビームライン各機器の調整をさらに進める。また、試料調製法も並行して検討する。

^{36}Cl 年代測定法は ^{14}C 年代測定法と同様に地下水の滞留時間などの推定が可能であり、 ^{14}C 年代測定法と比較して古い年代(0.1~3Ma)の測定に適用できる。原子力機構東濃地科学センターの所掌するタンデム型加速器質量分析装置は、 ^{36}Cl の測定ができる設計とされている。しかし ^{36}Cl 測定では重要な測定妨害核種として ^{36}S が知られており、当装置の ^{36}Cl と ^{36}S の分別性能とニーズを照らし合わせ、装置構成や測定技術、試料調製法などの情報収集及び検討を進める。

(3) 平成25年度の研究計画

② ^{10}Be 年代測定法の整備

測定のルーチン化に向けた装置及び試料調製法の整備が完了したことから、「4.1.5 内陸部の隆起・侵食速度の算出に係る調査技術」などの調査に係る実試料測定を行う。また、実試料測定に即したビームライン各機器や測定条件の最適化を進めるとともに、測定精度の向上及び測定の効率化を目指した測定法の改善を行う。加速器コンディショニング時間の短縮に向けた加速電圧の低下に関する技術開発、測定時間短縮に向けたイオン電流の増大に関する技術開発を実施することによって検討する。また、長期的な測定性能を把握するため、定期的に標準試料などの試験測定も引き続き行う。さらに試料調製

法については、石英の分離やベリリウム抽出などに関し現行の手法より迅速な処理法を検討する。

③ ²⁶Al 年代測定法の整備

²⁶Al 年代測定法については、計画を前倒して平成 24 年度に装置調整及び試験測定に着手できたことから、²⁶Al 測定のルーチン化に向けその整備をさらに進める。測定技術では、標準試料など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。並行して、²⁶Al 測定試料の調製法に関する情報収集を行う。

④ ³⁶Cl 年代測定法の事前調査

³⁶Cl 年代測定法の整備に向け、利用研究のニーズ調査、試料調製法や装置構成などの情報収集及び仕様の検討なども引き続き行う。

(4) スケジュール

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
① ¹⁴ C 年代測定に係る測定精度の向上	・バックグラウンドの低減やビームの安定化				
② ¹⁰ Be 年代測定法の整備	・実試料・標準試料による試験測定 ・試料調製法の開発		・試料調製法の改良 ・測定精度・確度の更なる向上、バックグラウンドの低減や測定効率向上に向けた調査・検討		
③ ²⁶ Al 年代測定法の整備			・試料調製法や装置構成などの情報収集及び仕様の検討	・測定技術の整備及び ²⁶Al 測定試料の調製法に関する情報収集	
④ ³⁶ Cl 年代測定法の事前調査			・装置構成や測定技術、試料調製法などの情報収集及び検討		

4.3.2 四重極型質量分析計などを用いた(U-Th)/He 年代測定法

(1) 目的

「4.1.5 内陸部の隆起・侵食速度の算出に係る調査技術」では、閉鎖温度の低い放射年代測定法に基づいて岩体の隆起・侵食速度を算定することとしている。また、「4.1.3 地下で遭遇した断層の活動性に係る調査技術」では、上記手法を応用して、地下の断層の上盤と下盤の隆起速度の違いからその垂直変位速度を推定することを目指している。そのため、原子力機構東濃地科学センターの保有する四重極型質量分析計によりヘリウム(He)の定量を、誘導結合プラズマ質量分析計(ICP-MS)によりウラン(U)、トリウム(Th)の定量を行う技術を整備し、(U-Th)/He 年代測定法を実用化する。

(2) 実施内容

(U-Th)/He 年代測定法については、これまで希ガス質量分析計によって He の定量を行っており、U、Th 含有量の高いジルコンについては、年代測定技術の実用化を図ってきた(Yamada *et al.*, 2008⁴⁴)。今後は、ジルコンより閉鎖温度の低いアパタイトの年代測定によって、さらに若い時代の岩体の隆起・侵食速度や断層の変位速度を見積もることが可能となる。しかしながら、アパタイトのU含有量はジルコンに比べて低いため、原子力機構東濃地科学センターの保有する希ガス質量分析計では He の定量が困難であった。そのため、Heのバックグラウンドが低い四重極型質量分析計と専用測定ラインを用いて定量を行うことにより、アパタイト単粒子の(U-Th)/He 年代測定法の実用化を目指していく。さらに、ジルコンの(U-Th)/He 年代測定法については、年代の評価で重要となる α 放出補正法を最適化する。

前述したように、アパタイトは U 含有量に乏しいものの、超高純度の酸を用いて結晶を溶液化することが容易であり、ICP-MS を用いた U、Th の定量に際しては低いバックグラウンドでの測定が可能である。そのため、アパタイトについては通常の酸分解法による試料調製法によって最適な測定条件を明らかにする。一方、ジルコンは U に富むものの、アルカリ溶融法による溶液化は酸分解に比べるとややバックグラウンドが高くなるため、高周波分解装置を用いた酸分解法やアルカリ溶融後の U、Th の固相抽出法を検討し、最適な測定条件を明らかにする。なお、それぞれの鉱物における(U-Th)/He 年代測定法の閉鎖温度については、他の地質温度計(例えば、オパール A/CT 境界やイライト結晶度)との比較・検討を行い、双方の妥当性についても評価を行う。

(3) 平成 25 年度の研究計画

② ICP-MS を用いた U、Th の定量

平成 24 年度は、アルカリ溶融後に固相抽出法を用いた試料調製法を検討し、濃度既知の試料を用いて手法の妥当性を評価した。平成 25 年度は、これらの手法を最適化し、ジルコンの U、Th 定量のバックグラウンドを低減する手法を確立する。

③(U-Th)/He 年代測定法の実用化

平成 25 年度までを目途とした (U-Th)/He 年代測定法の実用化に向けて、平成 24 年度に引き続き、FT 年代測定法、K-Ar 年代測定法などにより熱履歴を推定した試料を用いて、アパタイトとジルコンの(U-Th)/He 年代測定を実施し、その結果の妥当性評価を行う。また、炭酸塩(U-Th)/He 年代測定法の実用化に向けて、平成 24 年度より、希ガス質量分析装置を用いた炭酸塩中の He の検出法、ICP-MS を用いた U、Th の検出法について検討を着手した。He については、アパタイトやジルコンと異なり、抽出の際に大量の二酸化炭素などが生じることから、希ガス精製ラインのプロセスガスモニタを利用して主に抽出

ガスの精製法について検討する。U, Thについては、固相抽出法による試料調整法を検討する。平成25年度は引き続きこれらの検討を継続し、実試料を用いた年代測定を試行する。

(4) スケジュール

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
①四重極型質量分析計を用いた He の定量	<ul style="list-style-type: none"> ・バックグラウンドの低減 ・同位体希釈定量法の最適化 				
②ICP-MS を用いた U, Th の定量	<ul style="list-style-type: none"> ・アパタイトの試料の調製法・定量法の最適化 	<ul style="list-style-type: none"> ・高周波分解装置などを用いた試料調製法の最適化 ・ジルコンの U, Th 定量のバックグラウンドの低減 			
③(U-Th)/He 年代測定法の実用化		<ul style="list-style-type: none"> ・炭酸塩(U-Th)/He 年代測定法の実用化 ・ジルコンの α 放出補正法の最適化 ・他の地質温度計による閉鎖温度の妥当性の評価 			

4.3.3 希ガス質量分析計などを用いた K-Ar 年代測定法

(1) 目的

「4.1.3 地下で遭遇した断層の活動性に係る調査技術」では、断層運動に伴って地下深部から流入する熱水によって生成される断層ガウジに含まれる自生雲母粘土鉱物の K-Ar 年代から断層の活動した時期や活動性の推定を目指している。また、数万年から数億年のオーダーで岩石の年代を測定できる K-Ar 年代測定法は、地形や地質構造の発達過程などの解明にとっても極めて有効である。そのため、本研究では、数万年前までの若い年代をより正確に測定することが可能な感度法による K-Ar 年代測定法を実用化するとともに、極細粒の自生雲母粘土鉱物を効率的に分離する技術を整備する。

(2) 実施内容

K-Ar 年代測定法は多くの岩石・鉱物に適用でき、数万年から数億年という広範囲の年代測定が可能であり、火成活動や地殻変動の編年に係る研究に広く有効である。原子力機構東濃地科学センターの保有する希ガス質量分析計によるアルゴン定量法、炎光光度計によるカリウム定量法を確立するとともに、標準試料測定により定量法の最適化を図る。なお、数万年前までの若い年代をより正確に測定するため、アルゴンの定量には通常用いられる同位体希釈法ではなく、感度法を用いることとしている。断層ガウジの K-Ar 年代に基づく断層の活動時期の推定については、これまで自生雲母粘土鉱物のみを高純度で分離することが難しく、意味のある年代を得ることは困難とされてきた。そこで、純水や重液を用いた高精度の遠心分離により粘土鉱物を 0.1 μm 以下のサイズまで選別することで、高純度の自生雲母粘土鉱物を分離し K-Ar 年代測定法を適用する。さらに、粘土鉱物の分離法の最適化を図るため、X 線回折による鉱物組成分析、電子顕微鏡などを用いた鉱物の表面構造や形態観察も併せて行う。また、断層ガウジから分離された少量の雲母粘土鉱物のアルゴン定量に適したガスの抽出条件を決定し、雲母粘土鉱物を含む岩石・鉱物についての K-Ar 年代測定法を実用化する。

(3) 平成 25 年度の研究計画

③ 雲母粘土鉱物を含めた岩石・鉱物の K-Ar 年代測定法の実用化

平成 24 年度までに、複数地域の断層ガウジを対象に、原子力機構東濃地科学センターで構築した K-Ar 年代測定システムにより雲母粘土鉱物を分離して年代測定を行ってきた。平成 25 年度はこれらの K-Ar 年代と、断層岩周辺岩盤中のアパタイトやジルコンを対象とした FT 年代、(U-Th)/He 年代などとのクロスチェックに基づき、本年代測定法の適用限界を明らかにする。また、100 万年より若い年代の火山岩の年代測定を通じて、100 万年より若い年代を対象とした場合の感度法による測定値の精度・確度について評価する。

(4) スケジュール

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
①感度法によるアルゴン定量システムの開発	・感度法による定量法の確立・最適化				
②自生雲母粘土鉱物の分離法の開発	・高精度の遠心分離法の開発 ・X線回折, 電子顕微鏡観察などによる分離法の最適化				
③雲母粘土鉱物を含めた岩石・鉱物のK-Ar年代測定法の実用化		<ul style="list-style-type: none"> ・他の火山岩試料による年代測定法の妥当性の評価 ・断層岩及び周辺岩盤のジルコン, アパタイトなどのFT年代, (U-Th)/He年代などとのクロスチェック ・炎光光度計による精度の高いカリウムの定量法の確立 			

4.3.4 高分解能のテフラ同定手法

(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。また、テフロクロロジーは、放射年代測定のような測定に伴う誤差がないことから、地層処分の観点から重要な新第三紀と第四紀の年代区分を一義的に行えるといった利点を有している。これまでの研究開発によって、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(梅田・古澤, 2004⁴⁶)。しかしながら、鮮新世～中期更新世のテフラでは、火山ガラスの保存状況が悪いため、屈折率の測定ができないことが多い。そのため、本研究では火山ガラスが変質や消失したテフラを同定する技術として、残存鉱物である石英や斜長石中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の開発を目指す。

(2) 実施内容

保存状態の悪いテフラに含まれる造岩鉱物(特に、斜長石、石英)中のメルトインクルージョンの化学組成を精度良く、かつ、効率的に測定するため、試料の調製法も含めた測定手法を確立する。また、いくつかの地点で採取された代表的な広域テフラについて測定を行い、化学組成の比較・検討を通じて、当該手法の妥当性を評価する。さらに、より古い時代のテフラやローカルテフラにも適用し、当該手法の有効性を確認し、問題点を抽出した上で、広域テフラのメルトインクルージョンの化学組成データについて取りまとめる。

(3) 平成 25 年度の研究計画

② メルトインクルージョンによるテフラの同定手法の確立

平成 25 年度までを目途に、実際のテフラを用いて、メルトインクルージョンによるテフラの同定手法の有効性を確認し、問題点を抽出して手法の最適化を行う。これまでに、広域テフラの一つである阪手テフラを対象に、岩石記載と火山ガラスの主成分組成から対比される 3 地点のテフラに含まれる普通角閃石中のメルトインクルージョンの主成分組成がよく一致することを確認した。また、ローカルテフラを同定するため、東濃地域の時代未詳の堆積物に挟まれるテフラ起源物質を事例に、石英や長石に含まれるメルトインクルージョンの化学組成を測定し、時代未詳のテフラの堆積年代を推定した。さらに、主に第四紀の代表的な複数の広域テフラについて分析を実施し、メルトインクルージョンの化学組成からテフラ同定が可能であるテフラが多く存在する可能性があることを確認した。平成 25 年度は、当該手法の有効性・問題点を抽出するとともに、第四紀全般の代表的な複数の広域テフラの斜長石や石英に含まれるメルトインクルージョンの化学組成データについて取りまとめる。

(4) スケジュール

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
①メルトインクルージョンの測定手法の確立	<ul style="list-style-type: none"> ・試料調製法, 測定手法などの確立 				
②メルトインクルージョンによるテフラの同定手法の確立	<ul style="list-style-type: none"> ・広域テフラへの適用性の評価 ・より古いテフラ, ローカルテフラへの適用性の評価 ・有効性の確認・問題点の抽出及び化学組成データの整備 				

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, 1999a.
- 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, 1999b.
- 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.
- 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, 36p.
- 10) 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構, 高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画, 2006, 110p.
- 11) 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構, 高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画, 2009, 114p.
- 12) 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構, 高レベル放射性廃棄物及び TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画, 2010, 139p.
- 13) 原子力発電環境整備機構, 地層処分技術開発ニーズの整理～精密調査地区選定に向けて～, NUMO-TR-10-02, 2010, 58p.
- 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) 草野友宏, 浅森浩一, 黒澤英樹, 國分(齋藤)陽子, 谷川晋一, 根木健之, 花室孝広, 安江健一, 山崎誠子, 山田国見, 石丸恒存, 梅田浩司, 「地質環境の長期安定性に関する研究」第1期中期計画期間(平成17年度～平成21年度)報告書(H22レポート), JAEA-Research 2010-044, 2011, 153p.
- 16) 安江健一, 浅森浩一, 谷川晋一, 山田国見, 山崎誠子, 國分(齋藤)陽子, 丹羽正和, 道家涼介, 草野友宏, 花室孝広, 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22年度), JAEA-Research 2011-023, 2011, 113p.

- 17) 浅森浩一, 丹羽正和, 花室孝広, 山田国見, 草野友宏, 幕内 歩, 高取亮一, 國分(齋藤)陽子, 松原章浩, 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 23 年度), JAEA-Research 2012-024, 2012, 132p.
- 18) エネルギー・環境会議, 革新的エネルギー・環境戦略, 2012, 20p.
- 19) 日本学術会議, 回答 高レベル放射性廃棄物の処分について, 2012, 36p.
- 20) 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.
- 21) 原子力安全委員会, 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, 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, 42p.
- 23) 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, 8(1), 2009, pp.40-53.
- 24) 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, 26, 2004, pp.332-338.
- 25) 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, 11(2), 2005, pp.97-111.
- 26) 原子力安全委員会, 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針, 2006, 14p.
- 27) 木村敏雄, 日本列島の地殻変動—新しい見方から—, 愛智出版, 2002, 470p.
- 28) 中田 高, 隈元 崇, 奥村晃史, 後藤秀昭, 熊原康博, 野原 壯, 里 優, 岩永昇二, 空中レーザ計測による活断層変位地形の把握と変位量復元の試み, 活断層研究, 29, 2008, pp.1-13.
- 29) 梅田浩司, 檀原 徹, フィッション・トラック年代によるむつ燧岳の活動年代の再検討, 岩石鉱物科学, 37, 2008, pp.131-136.
- 30) Umeda, K., Asamori, K., Ninomiya, A., Kanazawa, S. and Oikawa, T., Multiple lines of evidence for crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline Iide Mountains, northeast Japan, *Journal of Geophysical Research*, 112, B05207, doi:10.1029/2006JB004590, 2007.
- 31) 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, 104(6), 1995, pp.809-826.
- 32) 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, 84, 2011, pp.118-130.
- 33) 花室孝広, 梅田浩司, 高島 勲, 根岸義光, 紀伊半島南部, 本宮および十津川地域の温泉周辺の熱水活動史, 岩石鉱物科学, 37, 2008, pp.27-38.

- 34) 佐々木俊法, 須貝俊彦, 柳田 誠, 守田益宗, 古澤 明, 藤原 治, 守屋俊文, 中川 毅, 宮城豊彦, 東濃地方内陸小盆地埋積物の分析による過去 30 万年間の古気候変動, *第四紀研究*, 45, 2006, pp.275–286.
- 35) 田中和広, 千木良雅弘, 我が国の地質環境の長期的変動特性評価(その 1)—将来予測の基本的考え方と課題—, 財団法人電力中央研究所, U96027, 1997, 22p.
- 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, In *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*, 11(2), 2005, pp.157–166.
- 38) Martin, A. J., Takahashi, M., Umeda, K. and Yusa, Y., Probabilistic methods for estimating the long-term spatial characteristics of monogenic volcanoes in Japan, *Acta Geophysica Polonica*, 51(3), 2003, pp.271–289.
- 39) Martin, A. J., Umeda, K., Connor, C. B., Weller, J. N., Zhao, D. and Takahashi, M., Modeling long-term volcanic hazards through Bayesian inference: An example from the Tohoku volcanic arc, Japan”, *Journal of Geophysical Research*, 109, B10208, doi: 10.1029/2004JB003201, 2004.
- 40) Sato, H., The relationship between late Cenozoic tectonic events and stress field and basin development in northeast Japan, *Journal of Geophysical Research*, 99(B11), 1994, pp.22261–22274.
- 41) Fabbri, O., Iwamura, K., Masunaga, 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*, 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) 國分(齋藤)陽子, 鈴木元孝, 石丸恒存, 西澤章光, 大脇好夫, 西尾智博, JAEA-AMS-TONO による ^{14}C 測定と施設共用利用の現状, 第 2 回 JAEA タンデトロン AMS 利用報告会論文集 2009 年 11 月 12 日–13 日 青森県むつ市 (AMS 管理課編), JAEA-Conf 2010-001, 2010, pp.84–86.
- 44) Yamada, K., Hanamuro, T., Tagami, T., Yamada, R., Umeda, K., Takagi, H., Iwano, H. and Danhara, T., New (U-Th)/He Dating Systems and Ages in Japan Atomic Energy Agency, in *Proceedings of Goldschmidt Conference 2008*, 2008, A1050.
- 45) 山崎誠子, 山田国見, 花室孝広, 梅田浩司, 田上高広, 東濃地科学センターにおける K-Ar 年代測定システムの現状, 2009 年質量分析学会同位体比部会, 2009, P-26.
- 46) 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*, 26, 2004, pp.395–400.

- 47) 200 万分の 1 活断層図編纂ワーキンググループ, 200 万分の 1 日本列島活断層図—過去数十万年間の断層活動の特徴—, 活断層研究, 19, 2000, pp.3–12.
- 48) Kaneda, H., Threshold of geomorphic detectability estimated from geologic observations of active low slip-rate strike-slip faults, *Geophysical Research Letters*, 30(5), 1238, doi:10.1029/2002GL016280, 2003.
- 49) Shimada, K., Tanaka, H. and Saito, T., Rapid and Simple Measurement of H₂ Emission from Active Faults Using Compact Sampling Equipments, *Resource Geology*, 58, 2008, pp.196–202.
- 50) Umeda, K., McCrank, G. F., and Ninomiya, A., High ³He emanations from the source regions of recent large earthquakes, Central Japan, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9, Q12003, doi:10.1029/2008GC002272, 2008.
- 51) Umeda, K. and Ninomiya, A., Helium isotopes as a tool for detecting concealed active faults, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 10, Q08010, doi:10.1029/2009GC002501, 2009.
- 52) Umeda, K., Ninomiya, A., and Asamori, K., Release of mantle helium and its tectonic implications, in *Helium: Characteristics, Compounds, and Applications*, edited by L. A. Becker, pp. 81-101, ISBN 978-1-61761-213-8, Nova Science Publishers Inc, Yew York, 2011.
- 53) Umeda, K., Kusano, T., Asamori, K. and McCrank, G. F., Relationship between 3He/4He ratios and subduction of the Philippine Sea plate beneath Southwest Japan, *Journal of Geophysical Research*, 117, B10204, doi:10.1029/ 2012JB009409, 2012.
- 54) 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.
- 55) Kagohara, K., Ishiyama, T., Imaizumi, T., Miyauchi, T., Sato, H., Matsuta, N., Miwa, A. and Ikawa, T., Subsurface geometry and structural evolution of the eastern margin fault zone of the Yokote basin based on seismic reflection data, northeast Japan, *Tectonophysics*, 470, 2009, pp.319–328.
- 56) Niwa, M., Mizuochi, Y., and Tanase, A., Reconstructing the evolution of fault zone architecture: A field-based study of the core region of the Atera Fault, Central Japan, *Island Arc*, 18, doi:10.1111/j.1440-1738.2009.00674.x, 2009.
- 57) Stirling, M. W., Wesnousky, S. G. and Shimazaki, K., Fault trace complexity, cumulative slip, and the shape of the magnitude-frequency distribution for strike-slip faults: a global survey, *Geophysical Journal International*, 124(3), 1996, pp.833–868.
- 58) Wesnousky, S. G., Crustal deformation processes and the stability of the Gutenberg -Richter relationship, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(4), 1999, pp.1131–1137.
- 59) 間中光雄, 福士圭介, 宮下由香里, 伊藤順一, 渡部芳夫, 小林健太, 亀井淳志, 2000 年鳥取県西部地震余震域と非余震域に分布する断層ガウジの比較, 地質学雑誌, 118, 2012, pp.459–475.
- 60) Wakita, H., Nakamura, Y., Kita, I., Fujii, N. and Notsu, K., Hydrogen release: new indicator of fault activity, *Science*, 210(4466), 1980, pp.188–190.

- 61) Kita, I., Matsuo, S. and Wakita, H., H₂ generation by reaction between H₂O and crushed rock: an experimental study on H₂ degassing from the active fault zone, *Journal of Geophysical Research*, 87, 1982, pp.10789–10795.
- 62) 黒澤英樹, 石丸恒存, 島田耕史, 丹羽正和, 小坂英輝, 齊藤 聡, 二ノ宮淳, 水素ガス原位置測定による断層破碎帯調査手法の検討, *JAEA-Research 2009-043*, 2010, 35p.
- 63) 伊藤順一, 梅田浩司, 渡部芳夫, 宮下由香里, 間中光雄, 牧野雅彦, 住田達哉, 堀川晴央, 木村治夫, 森川徳敏, 石丸恒存, 安江健一, 丹羽正和, 小林健太, 亀井淳志, 福士圭介, 物質科学的手法による低活動性断層の活動度評価手法の開発, 日本地質学会第 118 年学術大会・日本鉱物科学会 2011 年年会合同学術大会講演要旨集(セクション B), 2011, p.167.
- 64) Kanaori, Y., Fracturing mode analysis and relative age dating of faults by surface textures of quartz grains from fault gouges, *Engineering Geology*, 19(4), 1983, pp. 261–281.
- 65) Billi, A., Grain size distribution and thickness of breccia and gouge zones from thin(<1m) strike-slip fault cores in limestone, *J. Struct. Geol.*, 27, 2005, pp.1823- 1837.
- 66) 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.*, 45, 2012, pp.17-23, doi:10.1016/j.jseas.2011.08.009.
- 67) 梅田浩司, 安江健一, 浅森浩一, 高レベル放射性廃棄物の地層処分における断層研究の現状と今後の展望, *月刊地球*, 32, 2010, pp.52–63.
- 68) 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*, 118, 2012, pp.437-448.
- 69) 浅森浩一, 梅田浩司, 地下深部のマグマ・高温流体等の地球物理科学的調査技術—鬼首・鳴子火山地域および紀伊半島南部地域への適用—, *原子力バックエンド研究*, 11(2), 2005, pp.147–156.
- 70) Umeda, K., An integrated approach for detecting latent magmatic activity beneath non-volcanic regions: an example from the crystalline Iide Mountains, Northeast Japan, In *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.289–301.
- 71) Negi, T., Mizunaga, H., Asamori, K. and Umeda, K., Three-dimensional magnetotelluric inversion using a heterogeneous smoothness-constrained least-squares method, *Explor. Geophys.*, 44(3), 2013, pp.145-155.
- 72) 田力正好, 河成段丘を用いて推定される内陸部の広域的地殻変動—現状と課題, *地理科学*, 60(3), 2005, pp.143–148.
- 73) 三箇智二, 安江健一, 河床縦断形のシミュレーション, *地形*, 29, 2008, pp.27–49.

- 74) Wang, H. F., Effects of deviatoric stress on undrained pore pressure response to fault slip, *Journal of Geophysical Research*, 102, 1997, pp.17943-17950.
- 75) 佐藤 努, 地震後いわき市で湧き出した温泉とその意味, 地質調査総合センター研究資料集, no.572, 2012, pp.13-15.
- 76) Toda, S., Stein, R. S., Richards-Dinger, K. and Bozkurt, S., Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer, *Journal of Geophysical Research*, 110, doi:10.1029/2004JB003415, 2005.
- 77) 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.*, 13, Q05020, doi:10.1029/2012GC004052, 2012.
- 78) Ohmori, H., Mean Quaternary uplift rates in the central Japanese mountains estimated by means of geomorphological analysis, *Bulletin of the Department of Geography University of Tokyo*, 19, 1987, pp.29-36.
- 79) 吉川虎雄, 湿润変動帯の地形学, 東京大学出版会, 1985, 132p.
- 80) Umeda, K., Ban, M., Hayashi, S. and Kusano, T., Tectonic shortening and coeval volcanism during the Quaternary, Northeast Japan arc, *J. Earth Syst. Sci.*, 122, 2013, pp. 137-147.
- 81) Sugai, T. and Ohmori, H., A model of relief forming by tectonic uplift and valley incision in orogenesis, *Basin Research*, 11(1), 1999, pp.43-57.
- 82) 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., Sect. B*, 294, 2013, pp.43-45.

