

地質環境の長期安定性に関する研究 年度計画書 (平成 22 年度)

Research Plan on Geosphere Stability for Long-Term Isolation of Radioactive Waste
(Scientific Programme for Fiscal Years 2010)

安江 健一 浅森 浩一 山田 国見 國分(齋藤)陽子
山崎 誠子 黒澤 英樹 谷川 晋一 根木 健之
草野 友宏 花室 孝広 石丸 恒存 梅田 浩司

Ken-ichi YASUE, Koichi ASAMORI, Kunimi YAMADA, Yoko SAITO-KOKUBU
Seiko YAMASAKI, Hideki KUROSAWA, Shin-ichi TANIKAWA, Tateyuki NEGI
Tomohiro KUSANO, Takahiro HANAMURO, 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

September 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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, 2010

地質環境の長期安定性に関する研究 年度計画書(平成 22 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, 山田 国見^{※1}, 國分(齋藤) 陽子, 山崎 誠子^{※2}, 黒澤 英樹^{※1}
谷川 晋一^{※1}, 根木 健之^{※1}, 草野 友宏^{※1}, 花室 孝広, 石丸 恒存, 梅田 浩司

(2010 年 6 月 10 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 4 月～平成 27 年 3 月)の初年度である平成 22 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(梅田ほか, 2010¹⁾)をベースに、第 1 期中期計画期間(平成 17 年 4 月～平成 22 年 3 月)における研究成果、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、実施主体や規制機関からのニーズなどを考慮した上で策定した。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・策定に研究成果をタイムリーに反映できるよう、(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 3 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 博士研究員

Research Plan on Geosphere Stability for Long-Term Isolation of Radioactive Waste
(Scientific Programme for Fiscal Years 2010)

Ken-ichi YASUE, Koichi ASAMORI, Kunimi YAMADA^{※1}, Yoko SAITO-KOKUBU
Seiko YAMASAKI^{※2}, Hideki KUROSAWA^{※1}, Shin-ichi TANIKAWA^{※1}, Tateyuki NEGI^{※1}
Tomohiro KUSANO^{※1}, Takahiro HANAMURO, 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 June 10, 2010)

The concept of geological disposal of HLW in Japan is based on a multibarrier system which combines a stable geological environment with an engineered 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) for geosphere stability for long-term isolation of HLW in JAEA, in fiscal year 2010. The objectives and contents in fiscal year 2010 are described in detail based on the outline of 5 years plan (fiscal years 2010-2014). 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: Geological Disposal of HLW, Geosphere Stability, Investigation Technique, Development of Model, Dating Technique

※1 Collaborating Engineer

※2 Post-Doctoral Fellow

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	6
3.1 研究開発の方向性	6
3.2 当面の達成目標	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 22 年度の研究計画	10
4.1 調査技術の開発・体系化	10
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	10
4.1.2 断層の発達段階の評価に係る調査技術	12
4.1.3 地下で遭遇した断層の活動性に係る調査技術	14
4.1.4 地殻内の震源断層などに係る調査技術	16
4.1.5 内陸部の隆起・侵食速度の算出に係る調査技術	18
4.2 長期予測・影響評価モデルの開発	20
4.2.1 地形変化シミュレーション技術の高度化	20
4.2.2 地質断層の再活動などに係るシミュレーション技術	22
4.2.3 地殻変動に伴う熱水活動の形成に係るモデルの開発	24
4.2.4 超長期における予測・評価手法に関する検討	26
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	28
4.3 年代測定技術の開発	30
4.3.1 加速器質量分析計を用いた ^{10}Be 年代測定法の実用化	30
4.3.2 四重極型質量分析計などを用いた (U-Th)/He 年代測定法の実用化	32
4.3.3 希ガス質量分析計などを用いた K-Ar 年代測定法の実用化	34
4.3.4 高分解能のテフラ同定手法の開発	36
引用文献	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	6
3.2 Target of research and development	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 FY2010	10
4.1 Development and systematization of investigation techniques	10
4.1.1 Investigation techniques for active fault with unclear tectonic landform	10
4.1.2 Investigation techniques for evaluation of fault development stage.....	12
4.1.3 Investigation techniques for fault activity in basement rock	14
4.1.4 Investigation techniques for earthquake source fault in crust.....	16
4.1.5 Investigation techniques for estimation of uplift and erosion rates at inland.....	18
4.2 Development of models for long-term estimation and effective assessment.....	20
4.2.1 Simulation techniques for landform changes.....	20
4.2.2 Simulation techniques for reactivity of geological fault	22
4.2.3 Models for formation of hydrothermal activity by crustal movement.....	24
4.2.4 Estimation and evaluation techniques for natural phenomena of very long-term	26
4.2.5 Development of estimation and evaluation techniques for geological environment by paleohydrogeological approach	28
4.3 Development of dating techniques	30
4.3.1 Practical use of ^{10}Be dating method with accelerator mass spectrometer.....	30
4.3.2 Practical use of (U-Th)/He dating method with quadruple mass spectrometer.....	32
4.3.3 Practical use of K-Ar dating method with noble gas mass spectrometer.....	34
4.3.4 Development of high-resolution tephrochronology	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, 1999a²⁾: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で、合理的な地層処分システムを構築した上で、長期的な安全性を確認することが必要となる。そのためには、サイトやその周辺においてマグマの貫入・噴火や断層運動に伴う岩盤の破壊など、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などを補足的に実施し、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。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, 1999b³⁾)。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」⁴⁾(以下、「最終処分法」)の成立や実施主体の設立など、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, 2000⁵⁾; OECD/NEA, 1999⁶⁾)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」⁷⁾(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, 2002⁸⁾) (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, 2003⁹⁾)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, 2009¹⁰⁾)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さらに明確にされてきた。

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での研究開発計画の検討・調整を行ってきた。さらに、2006年12月には、「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」¹¹⁾(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いる。全体計画では、2000年以降の研究開発を3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17年頃まで)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 24 年頃まで)では、平成 20 年代中頃を目途とする精密調査地区選定期間を念頭に、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に、「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 20 年代後半まで)では、平成 40 年前後を目途とする最終処分施設建設地選定に向けた、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等の実証」を目指している。そのため、原子力機構においても全体計画との整合性を図りつつ、第 1 期中期計画(2005 年 10 月～2010 年 3 月)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等を進める」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、(精密調査地区の選定に際して実施される)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、地下深部のマグマなど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、将来の大局的な地形をシミュレートする技術など、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、スラブ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、地層処分技術の分野に限らず学術的にも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が重要となる。また、最近になってステークホルダーからの技術開発ニーズとして、十万年を超える自然現象の超長期評価の考え方及び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。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、当該研究に係る今後 5 か年(2010 年 4 月～2015 年 3 月: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, 2010¹⁾)。本報は、この基本計画をベースに、その 5 か年の初年度にあたる平成 22 年度に実施する、より具体的な研究計画である。

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

前述したように、我が国では地層処分の長期的な安全性を確保するため、自然現象に伴う地質環境への影響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)、地質環境の変化を見込んだ評価ケースを設定し、各ケースにおいて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(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(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)を考慮する際の安全評価に密接に関係する。例えば、対象とする期間(ここでは将来十万年程度)において、マグマの貫入・噴火などといった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。概要調査などにおいては、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範囲の提示)。一方、将来十万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などについては、何らかの変化が生じることが想定される。そのため、これらの外的要因による地質環境(例えば、熱特性、水理特性、力学特性、地球化学特性)の変化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(将来の地質環境の変化の幅の提示)。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予測・評価の考え方(回避すべき範囲の提示)

サイト選定における将来の地質環境の予測・評価は、対象とする期間において、極端な隆起・侵食、断層運動や火成活動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(火成活動や隆起・侵食などの自然現象や将来の人間活動を発端として、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存在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と規則性に基づく外挿によって、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、実施主体の考慮事項に述べられている将来十万年間で 300 m 以上の極端な隆起・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既に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、現在の活断層の進展や破砕帯の拡大や地質断層の再活動などが生じる可能性がある範囲を一定の裕度を見込んで提示することが必要となる。

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, 2001¹²⁾), 100 万年オーダーの時間スケールでの予測・評価を想定した場合では、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あるが生じる。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。このようなケースに関しては、候補地において断層運動や火成活動が仮に発生したと想定して(稀頻度事象シナリオ)、その影響を検討するといった評価方法を用いることが妥当であると考えられる(例えば、「余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方(案)」, 原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会, 2010¹³⁾)。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, 2004¹⁴⁾)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などによって)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(地質環境の変化の幅の提示)

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十万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: 演繹的アプローチ)。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流れ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)。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、日本列島では過去十万年程度の地形学的情報(沿岸域では MIS (Marine Isotope Stages: 海洋酸素同位体ステージ) 5e の海成段丘, 内陸では MIS2 及び MIS6 の河成段丘)が多くの地域で得られることから、将来十万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得ることが困難であることから、十万年を超えるような時間スケールについては、予測・評価に伴う不確かさ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流れや水質などの変動パターンを外挿から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、数十 km 規模での過去から現在までの地下水の流れや水質を再現する試みが行われている。この古水理地質学的アプローチによって、濃尾平野から木曽山脈、美濃・三河高原にかけての木曽川、土岐川(庄内川)の流域を対象に、1.5 Ma 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、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, 2009¹⁵⁾)。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、将来十萬年以上の予測・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、将来十萬年程度の予測・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, 2004¹⁶⁾; 梅田ほか, 2005¹⁷⁾)。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やサイト(テクニクセッティング)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引き続き推進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、今後5か年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な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に着手する。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、今後は課題全体について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候補地の選定や安全規制に係る安全審査指針・基準など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、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。

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3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。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のほか、最終処分施設建設地を選定する過程の各段階において重要な要件になると想定される断層運動に着目し、特に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、多くの科学的知見や調査技術の開発が進められている。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、数十年オーダの地震防災や原子力発電所など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いて研究開発を進めることが肝要である。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¹⁸⁾)に示されたような後期更新世以降に活動した断層に限定するものではない。この点については、木村(2002)¹⁹⁾においても、地層処分のような10万年オーダ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いる。そのため、本研究で取り扱う活断層は第四紀に活動した断層を対象としている。

また、これまでの研究開発では、将来十万年程度の将来の地質環境の予測・評価を念頭において研

究開発が進められてきたが、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トニックな環境の変動を考慮した物理モデル(現象論的モデル)の開発など、より長期の予測・評価に必要となる研究課題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などに適合するか否かを判断するための情報(データ)を概要調査など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、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の段階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、これらの存在を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 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, 2008²⁰⁾)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・壇原, 2008²¹⁾)に係る調査技術の整備を進めてきた。さらに、非火山地帯であっ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することが重要であることから、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., 2007²²⁾)。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)が過去に生じていないこと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, 1995²³⁾)に基づく内陸部の隆起量の算定(田力ほか, 2010²⁴⁾)や熱年代学的アプローチによる熱史の復元(花室ほか, 2008²⁵⁾)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ローカルな古気候・古環境の変遷を復元することも行われた(佐々木ほか, 2006²⁶⁾)。

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、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。断層運動に係る調査技術については、特に、変動地形が明瞭でない活断層の認定や地下深部の震源断層を確認するための技術のほか、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(断層の成熟度)を評価する技術などが課題であることから、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実用化を図っていく。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それらの技術の実用化の見通しを得る。

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、十万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・規模などを時間スケール(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、将来十万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するかを検討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などが基本となる(例えば、田中・千木良, 1997²⁷⁾)。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(梅田ほか, 2005¹⁷⁾)。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シミュレートするための技術(例えば、Saegusa et al., 2009²⁸⁾)やマグマの貫入に伴う熱・地下水理の時間変化をシミュレートする技術(坂川ほか, 2005²⁹⁾)の整備を進めた。また、将来十万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、時空間点過程による確率モデル(Martin et al., 2003³⁰⁾)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、東北日本弧において適用した(Martin et al., 2004³¹⁾)。

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、将来十万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既に行われている。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などに応じて再活動したものと考えられている(例えば、Sato, 1994³²⁾; Fabbri et al., 2004³³⁾)。これらの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、1万年オーダの大局的な地形の変化をシミュレート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示すため、河成段丘の高度・分布などに基づく地形学的知見に基づいて復元された古地形(十万年程度)から現在の地形をどの程度再現できるかについての数値実験を行うとともに、シミュレーション技術の問題点を明確にした上で、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地

下水の流れ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さを提示していくことになる。そのため、第 2 期中期計画では、古水理地質学的なアプローチによって過去の地下水の流れ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、過去の自然現象の活動した時期やその変動の傾向・速度を精度良く把握することである。そのため、放射年代測定法を含めた編年技術を整備していくことが特に重要となる。特に、火成活動の場合は、噴出物の年代測定によって活動履歴を把握することが可能であるが、断層運動や隆起・沈降・侵食については主に地形学的情報に基づき活動履歴を推定するため(その多くは 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)、約十万年以前の活動性を把握することが困難となる。そのため、これまで研究事例が少ない断層岩や割れ目充填鉱物の放射年代測定法を構築し、これらの年代が決定できれば、より古い時代の断層運動の生じた時期や隆起・沈降・侵食の活動の傾向を把握することができ、それらに伴う地下水の流れや水質の変化の予測・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するためにも、概要調査など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などの結果などについて、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, 1998³⁴⁾)、年代値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などに係る技術的能力)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、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、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極めて重要となる。

第 1 期中期計画では、東濃地科学センターで保有するタンデム型加速器質量分析計(ペル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)年代測定法について実用化を行った(國分ほか, 2010³⁵⁾)。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整法(年代測定試料の前処理などに係る技術)の開発や標準試料の測定などを行ってきた。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., 2008³⁶⁾; 山崎ほか, 2009³⁷⁾)。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整法を確立する。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, 2004³⁸⁾)。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を開発する。

4. 平成 22 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、すでに「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, 2000³⁹⁾)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、活動性が低い断層(<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, 2003⁴⁰⁾), 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、変動地形が明瞭でない断層や伏在断層などの活断層の存在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を行い、水素濃度や希ガス同位体組成が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(例えば, Shimada et al., 2008⁴¹⁾; Umeda et al, 2008⁴²⁾; Umeda and Ninomiya, 2009⁴³⁾)。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といった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), 発達段階(未成熟～成熟)のほか、断層が分布するテクトニックな環境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と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の比較・検討を行い、変動地形が明瞭でない断層の認定に有効な地球化学的指標を抽出し、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を提示する。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, 地球物理学, 地球化学データを含む総合的な解析手法を構築する。

(3) 平成 22 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

平成 24 年度までを目途に、活断層(活褶曲, 活撓曲を含む)及び地質断層のほか、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(変位速度, 活動周期), 発達段階(未成熟～成熟), テクトニックな環境の違いなどによる断層から放出されるガスの主成分や同位体化学組成

の特徴を取りまとめることを目標とする。ここでは事例研究を通じ、そのために必要な断層周辺の温泉ガスや地下水の溶存・遊離ガスの採取を行い、He, Ar, CO₂, H₂などの主成分・同位体組成の化学分析を実施する。平成22年度は、典型的な横ずれ断層（例えば、中央構造線、警固断層）及び低角の逆断層（例えば、伊那谷断層）の周辺において試料の採取・分析を行う。また、これまで採取・分析したデータを含めて、これらの地球化学的特徴と地質学的データや地球物理学的データとの比較により、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の検討を行う。

(4) スケジュール(当面5年間の計画)

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	・規模やタイプなどの異なる代表的な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下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			・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				・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・成長や主断層から派生する副断層の形成、破碎帯の拡大など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。これらは、今後数万年間においては、数回～数十回の活動が生じることが想定され、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よってあらかじめ検討していく必要がある。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、主要な活断層を事例に、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(例えば、Kagohara et al., 2009⁴⁴⁾; Niwa et al., 2009⁴⁵⁾)。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、モーメントテンソル解、歪速度などの地球物理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., 1996⁴⁶⁾; Wesnousky, 1999⁴⁷⁾)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(成熟度)の分類を試みる。また、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アプローチ(例えば、小林・杉山, 2004⁴⁸⁾)も行われており、これらの最新の成果も必要に応じて取り込んでいく。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., 1980⁴⁹⁾; Kita et al., 1982⁵⁰⁾)。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壤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の有効性についても併せて検討する。

(3) 平成22年度の研究計画

① 断層ごとの地形・地質データと地球物理データとの比較・検討

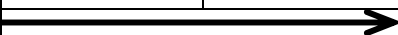
断層の成熟度を示す地質学的・地球物理学的指標を提示するため、平成23年度までを目途に国内で認定されている活断層近傍の地震学データ(例えば、震源分布、発震機構解)と地質学データ(例えば、断層のタイプ、断層トレースの連続性・長さ、活動開始年代、平均変位速度)の既存情報を統計的に整理し、それらの特徴のパターン化を試みる。このうち、平成22年度は糸魚川-静岡構造線以西の西南日本に分布する全ての横ずれ活断層を対象に上記の情報の整理・分析を実施する。

③ 地球化学的指標の検討

平成23年度までを目途に、断層近傍から採取した土壤ガス、遊離ガス中に含まれる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の有効性を確認する。平成22年度は、水素ガス濃度簡易測定法によって測定した土壤ガス及びボーリングから採取し、室内試験で測定された遊離ガスの水素濃度

のデータの整理を行うとともに、対象とする断層のタイプ、断層トレースの連続性・長さ、活動開始年代、平均変位速度、再来間隔などに関する既存情報の収集及び補足的な現地調査を通じて、それらと水素濃度との関連性を取りまとめる。また、遊離ガスについては、炭素の同位体組成などを考慮しつつ、水素ガスの起源についても併せて検討する。

(4) スケジュール(当面 5 年間の計画)

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
①断層ごとの地形・地質データと地球物理データとの比較・検討	 ・地形・地質データと地球物理データとの比較・検討 ・断層ガウジの色調など				
②断層の発達過程の概念モデルの提示			 ・断層の発達過程の概念モデルの提示 ・主要な断層の発達段階(成熟度)の分類の評価		
③地球化学的指標の検討	 ・断層ガス中の水素濃度の地球化学的指標としての検討(成果に応じてH24以降の継続・中止を決定)				

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上昇速度の違いなどを断層物質や周辺の岩盤の岩石・鉱物学的手法によって明らかにすることが有効な手法となる。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、断層岩や断層充填鉱物、割れ目充填鉱物(例えば、炭酸塩鉱物脈)の年代のほか、熱年代学のアプローチによる垂直変位速度の算定などの要素技術の開発を行い、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を通じて断層の活動性を検討するためには、以下の 3 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の生じた時期を明らかにする手法である。これについては、(U-Th)/He 年代測定法、フィッション・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が推定できる。本研究では、地下で採取した断層岩について熱年代学の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を推定する。

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孔や坑道から採取した断層岩から雲母粘土鉱物を分離し、粒子のサイズやイライトの結晶度の異なる試料の K-Ar 年代測定を行い、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と切断関係にある炭酸塩鉱物のウラン・トリウム(U-Th)放射非平衡年代(^{234}U - ^{230}Th 法:アイオニウム法)を決定し、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を断層が変位を与えていない場合には断層は少なくとも約 50 万年以上は活動していないという証拠となる)。

第三は、断層の上盤と下盤の岩石中に含まれる閉鎖温度が異なる鉱物の年代測定を行うことによって、それぞれの時間スケールでの垂直変位速度を算定することが可能である(梅田ほか, 2010⁵¹⁾)。本研究においても、野外やボーリング孔で採取された岩石からジルコン、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る。なお、アパタイトやジルコンは随伴鉱物であることから、原岩ごとに含まれる量が大きく異なる。そのため、それぞれについて測定に必要な量を確保するためにも、サンプリングに必要な岩石試料の量を効率的かつ簡便に見積もる手法が必要となる。そのため、ICP-MS による全岩化学組成分析や特性 X 線に基づく研磨切片の二次元自動分析などによって、それぞれの鉱物の存在を示す特徴的な元素(例えば、ジルコニウム)の含有量や組み合わせからアパタイトとジルコンの含有量を見積もる手法を開発する。

(3) 平成 22 年度の研究計画

① 熱的なイベントによる断層の活動性の評価

平成 24 年度までを目途に、実際のボーリング孔や坑道で採取した断層岩や周辺岩盤の試料の放射年代によって、断層運動に伴う熱的なイベントが生じた時期の推定を試みる。そのため平成 22 年度は、

瑞浪超深地層研究所用地の主立坑や 1000 m 級のボーリング孔で採取された断層岩やその周辺岩盤の試料の採取及び記載を行うとともに、予察的に FT 年代などの測定を実施する。

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、これらの年代値と層序や切断関係から推定されている断層運動の時期の比較・検討を通じて、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。平成 22 年度は、断層ガウジ中の極細粒な自生雲母粘土鉱物の K-Ar 年代及び割れ目充填鉱物としての炭酸塩鉱物の U-Th 放射非平衡年代に着目し、これらの試料の採取方法、前処理法、年代測定法、データの解釈などを含めた一連の調査技術の問題点の抽出や改善方策などを提示する。前者については、層序的に活動時期が推定されている断層のほか、瑞浪超深地層研究所用地の主立坑の断層破碎帯から採取した粘土鉱物の採取を行い、既存の遠心分離法によってフラクションごとに K-Ar 年代を決定する。後者については、石灰岩の鉱山や鐘乳洞の近傍の断層を事例に、断層と切断関係にある炭酸塩鉱物脈を探索し、アイオニウム年代測定を実施する。

③ 断層の上盤と下盤の上昇速度の違いによる垂直変位速度の推定

平成 24 年度までを目途に、断層の上盤と下盤の岩体の冷却年代の違いに着目し、断層の垂直変位速度を算定する手法の確立を目指す。そのため、平成 22 年度は、変動地形調査などによって最近数十万年程度の変位速度が推定されている断層（例えば、阿寺断層）を事例に、断層の上盤と下盤から得られた岩石試料を対象にジルコンとアパタイトの FT 年代などの測定を行い、熱年代学的アプローチによって平均変位速度を算定するとともに、両者の比較・検討を通じてさらに長期の変位速度を推定する手法を提示する。また、東濃地科学センターで保有する 1000 m 級のボーリング孔による花崗岩のコア試料を用いて、ジルコンの(U-Th)/He 年代測定を行い、数百万年以上のオーダの土岐花崗岩体の上昇速度を算定する。

(4) スケジュール(当面 5 年間の計画)

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	・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			・熱的イベントと断層の活動性との関連性の検討	
②断層岩に生成した鉱物の年代測定と活動性の評価	・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 U-Th 年代測定法の適用 ・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上昇速度の違いによる垂直変位速度の推定	・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 ・原岩中のジルコン、アパタイトの含有量の推定手法の開発				

4.1.4 地殻内の震源断層などに係る調査技術

(1) 目的

将来の地層処分システムに重大な影響を及ぼす可能性がある現象(例えば、断層運動、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)など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など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進展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(例えば、浅森・梅田, 2005⁵²⁾; Umeda, 2009⁵³⁾)。しかしながら、地震波トモグラフィー法は地震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など、これらの物理探査技術は調査の対象とする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ための手法を構築する必要がある。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技術によって、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検出するための調査技術を提示する。

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提示する。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局所的な比抵抗異常に起因するスタティック・シフトの影響を考慮するとともに、解析結果の不確実性を評価できる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 22 年度の研究計画

① 微小地震の震源決定精度の高度化

高精度の微小地震震源分布から、地殻内において震源断層と考えられる線状あるいは面状に配列する震源の集中域を把握する技術を構築することを目標とし、そのために必要な、地殻浅所の地質構造に伴う三次元的な地震波速度不均質の存在を考慮した震源再決定による精密な震源分布を平成 23 年度までに得る。平成 22 年度は、震源再決定法に係る既存解析プログラムに地質構造に伴う地震波速度不均質を考慮した上で、複数のモデル計算に基づき当該解析の妥当性の確認を行い、震源決定精度の向上に対する効果を定量的に示す。

③ MT データの三次元比抵抗構造解析法

平成 24 年度までを目途に、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スタッキング方法及び解析結果の信頼性を評価することが可能な三次元インバージョン法の開発を行う。このうち、平成 22 年度は、これらに係る解析プログラムを作成するとともに、いくつかのモデル計算を通じた解析手法の妥当性及び有効性の検証を行う。

(4) スケジュール(当面 5 年間の計画)

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	・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		・発震機構解などを含めた震源断層の分布や構造を把握するための手法の提示		
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		・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	・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評価するための手法の提示				・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、氷期に形成される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顕著な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、隆起量の見積もりに適用することが困難であることが多い(例えば、田力ほか, 2005⁵⁴⁾)。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の開発が求められている。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、 ^{10}Be 、アルミニウム-26(^{26}Al))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 万年オーダー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)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、地質やテクトニックな環境の違いごとに GIS (Geographic Information System: 地理情報システム) でそれらの特徴の整理を行い、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、ボーリングや地中レーダー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正確に把握する。また、内陸の小盆地においても数十万年以前の堆積物が存在することも確認されており(例えば、佐々木ほか, 2006²⁶⁾)、これらの堆積物を変動基準面とした隆起速度の算出方法についての検討も併せて行う。

また、表層の岩石や土壌中に含まれる石英などに宇宙線が照射されることによって生成される ^{10}Be や ^{26}Al 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 万年オーダーで算定することが可能となる。また、広域かつ多くの河床礫などの ^{10}Be 、 ^{26}Al 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となる。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を算定することにより、上記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、10 万年オーダーの時間スケールで隆起・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 22 年度の研究計画

① 旧河谷、内陸小盆地堆積物の編年に基づく隆起量の算定

複数の環流丘陵を伴う旧河谷の高度と堆積年代によって内陸部の隆起速度を算定するための手法の開発を平成 25 年度までを目途に進めていく。平成 22 年度は、十津川流域においてこれまでに採取した旧河谷堆積物について、碎屑物の大きさ・形状・種類などから河床堆積物・フラッドローム(洪水堆積物)

層・崖錐堆積物を区分し、それらに含まれる試料を用いたテフラ・光ルミネッセンス(OSL)法・植物化石などの分析から堆積年代を推定する。さらにその結果を踏まえて、谷の下刻量とそれに基づく隆起傾向を明らかにする。また、日本列島における旧河谷の分布を把握するために、空中写真、地形図などを用いて旧河谷堆積物の分布を抽出し、GIS化を行う。

(4) スケジュール(当面5年間の計画)

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
①旧河谷、内陸小盆地堆積物の編年に基づく隆起量の算定	・日本列島の旧河谷・内陸小盆地の分布のGIS化及び地質・テクトニクス の解析 ・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		・調査技術の適用性の確認 ・上記の有効性・問題点の抽出, 改良		
②放射年代測定法による隆起・侵食速度の算定			・河床礫などの年代測定による侵食速度の空間分布の把握, 断層の活動開始年代の推定 ・FT年代, (U-Th)/He年代などによる上記の結果の妥当性の提示		

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、地下水の流動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って海面の上下変動を被る沿岸域では、長期的にはそれらの変化の程度を検討することが必要となる。十万年程度の将来の地形の起伏や気候・海水準は、過去数十万年の隆起・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・削剥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。これまでの研究開発では、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(例えば、三箇・安江, 2008⁵⁵⁾)。しかしながら、物理モデルによるシミュレーション結果の妥当性を検討する取り組み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河川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、東濃地方を事例に MIS6(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の起伏や形状がどの程度再現されているかを段丘の残存率、開析度、河床縦断形の形状、堆積物の層厚などを指標にシミュレーション技術の妥当性を評価する。また、シミュレーションの入力パラメータである岩盤物性(侵食抵抗性)については、同じ地質単位であっても風化、変質、破砕などによって異なっている。このパラメータは、これまで地表踏査によって対象となる岩盤から取得していたが、シミュレーションの効率化を図るためにも、DEM(Digital Elevation Model: 数値標高モデル)を用いた解析によって、地形の起伏などの地形学的特徴を抽出するとともに、これまでに得られた実測値などとの比較・検討から岩盤物性の空間的分布を明らかにするための技術を整備する。

(3) 平成 22 年度の研究計画

① シミュレーション技術の妥当性の評価

地形変化シミュレーション技術の妥当性を評価するため、平成 22 年度は土岐川流域を対象に、既存の地形・地質調査データから MIS6, MIS2 のそれぞれの時代の接峰面を復元するとともに、これを起点としたシミュレーションによって現在の地形(接峰面)をどの程度再現しているかを定量的に示す。さらに、シミュレーション結果の妥当性については、段丘の残存率、段丘面の開析度、河床縦断面の形状、堆積物の層厚などの指標も考慮する。

(4) スケジュール(当面 5 年間の計画)

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	・地形学的手法による古地形の復元 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		・妥当性評価に基づくシミュレーション技術の改良 ・海域での堆積, 寒冷気候下での侵食・堆積などの現象のモデル化		
② 岩盤物性の設定の考え方			・DEM を用いた地形の起伏などの解析 ・岩盤物性の設定方法の提示		

4.2.2 地質断層の再活動などに係るシミュレーション技術

(1) 目的

地層処分は、地震防災や地上施設の耐震評価と異なり、評価期間が数万年以上にも及ぶことから、様々な時間的不確実性を包含した評価がなされるべきである。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)地質断層の分布とほぼ一致することから、活断層の多くは鮮新世～第四紀以降の応力場の下で既存の断裂が再活動したものと考えられる(梅田ほか, 2010⁵¹⁾)。そのため、現状の地殻応力場の下であっても、少なくとも現在の活断層と同じセンスの地質断層が再活動する可能性は否定できない。また、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シミュレート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、既存断層の再活動や新たな断裂の進展などに係る数値シミュレーション技術を整備する。

(2) 実施内容

有限要素法などによる連続体モデルや粒状体モデルに基づく三次元数値シミュレータ(例えば、FLAC3D, PFC3D)を用い、地殻や表層地盤を想定した仮想媒質に対して外力を作用させ媒質内に破壊が進展していく現象に基づいて、将来の断層形状や断層破碎帯が発達していく過程を模擬する。ここでは、仮定する断層の幾何形状や周辺の断層との相互作用についても着目し、複数の仮想的なモデル計算により断層の分岐や進展の範囲を感度解析的に示す。また、実在する主要な活断層を想定したシミュレーションと断層性状や年代値に係る地形・地質学データのほか、測地学や地震学で得られている地球物理学データとの比較により、シミュレーション結果の有効性や問題点を抽出する。

また、日本列島の山地の多くは第四紀(あるいは鮮新世以降)に活動した断層によって形成されたと考えられており、山地-平野境界には活断層が認定されていない場合であっても、サイトの選定に際しては、特に注意を有すると考えられる。このような地域においては、活断層が存在すると仮定し、将来の断層のマイグレーション、褶曲や撓曲の形成などを考慮しつつ、裕度をもって回避すべき範囲を設定することが重要である。本研究では、4.1.2における断層の発達段階に係る帰納的アプローチから得られた科学的知見を含めて、断層運動によって物理的隔離機能の喪失が生じる可能性がある地塊構造境界と、そこでの回避すべき範囲の設定方法を例示する。

(3) 平成 22 年度の研究計画

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

平成 23 年度までを目途に、数値シミュレーションに基づいた断層の再活動や分岐・進展などについての感度解析を実施し、断層の発達過程の概念モデルを構築するとともに、断層運動に伴う周辺岩盤の力学的影響が生じる範囲を示すための手法を整備する。そのため、平成 22 年度は連続体モデルに基づいた媒質変形にかかわる三次元数値シミュレータ(FLAC3D)を用いて、地殻や表層地盤を想定した仮想媒質に外力を作用させることによる、媒質内の破壊の進展(断層の発達)過程の数値シミュレーションを実施する。ここでは、仮定する断層の幾何形状や周辺の断層との相互作用について着目した複数のモデル計算に基づき断層の分岐や進展をシミュレートし、上記の条件に応じた断層の発達に関する特徴を既存の研究事例も踏まえて整理する。

(4) スケジュール(当面 5 年間の計画)

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	・連続体モデルによる数値シミュレーション ・粒状体モデルによる数値シミュレーション		・実在する活断層における数値シミュレーション ・上記の断層の地形・地質学データ, 地球物理学データの取得		・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 地塊構造境界の設定			・既存資料による山地-平野境界の地形・地質・地球物理データの収集・整理		・地塊構造境界の設定方法の例示

4.2.3 地殻変動に伴う熱水活動の形成に係るモデルの開発

(1) 目的

日本列島には非火山地帯であっても高温の温泉が分布している地域や高い地殻熱流量が観測されている地域がいくつか存在する。これまでの研究によって、これらの熱水活動のメカニズムの検討を行い、いくつかの熱源のタイプ(例えば、スラブ起源流体の上昇、潜在的マグマの存在、貯留層の放射壊変熱)があることが明らかにされた(例えば、Umeda et al., 2007²²⁾)。しかしながら、これらの熱源及びそれに関連する熱水系の将来の消長については、不明な点が多い。また、最近になって、断層運動に伴う破碎帯の透水性の変化に由来する局所的な熱水上昇域の形成の可能性も指摘されている(岡ほか, 2009⁵⁶⁾)。本研究では、変動シナリオを考慮した安全評価に反映するため、断層運動を含む地殻変動に起因する熱水活動の発達過程や周辺岩盤に及ぼす熱、水理、水質などの影響と範囲を把握するためのシミュレーション技術を開発する。

(2) 実施内容

これまでに開発した高温・高圧領域を対象とした熱・水連成シミュレータ magma2002(坂川ほか, 2005²⁹⁾)や熱水と岩石の化学反応なども取り扱える既存のシミュレータ(例えば、TOUGHREACT⁵⁷⁾, NUFT-C⁵⁸⁾, MIN3P⁵⁹⁾, PHAST⁶⁰⁾)を用いて仮想的な熱源を設定し、地質環境の変化の大きさやその範囲を把握するための感度解析を実施する。特に、断層運動による破碎帯の透水性の変化については、断層周辺の破碎帯の形状や透水性などのパラメトリック・サーベイを行う。さらに、熱水活動を伴っている実際の断層を事例に、熱水変質帯の広がり、温度構造、放射年代値、岩石-熱水の化学反応などに係るデータを取得し、シミュレーション結果の妥当性を評価する。また、4.1.4の物理探査技術の開発で得られた地殻中の震源断層周辺に賦存している高温流体の分布に係る科学的知見も併せた検討を進める。

(3) 平成 22 年度の研究計画

① 既存のシミュレータによる感度解析

平成 23 年度までを目途に、数値シミュレーションに基づいた熱水活動の形成に関する概念モデルを提示することを目標とする。そのため平成 22 年度は、既存の熱・水・化学連成シミュレータ(magma2002, TOUGH2/EOSN)を用いてこれまでに実施したシミュレーション結果の取りまとめを実施するとともに、断層運動に伴う熱水活動のシミュレーションを行う際の問題点や改善策などを提示する。

(4) スケジュール(当面 5 年間の計画)

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
① 既存のシミュレータによる感度解析	 ・magma2002 や既存のシミュレータによる熱水活動の生成過程及び熱、地下水流動、水質などの時間変化に係る感度解析				
② モデルの妥当性の評価			 ・実在する断層及びその周辺岩盤における数値シミュレーション ・熱水変質帯、温度構造、放射年代値、岩石-熱水の化学反応などに係るデータの取得 ・シミュレーション結果と観測データなどとの比較・検討による予測手法の妥当性の評価		

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、将来を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、さかのぼ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。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かさを、予測する時間のスケールに応じて提示する。また、将来十万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そのものが転換する可能性があることから、断層運動や火成活動などによって引き起こされる物理的隔離機能を損なう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に伴う精度・確度などを考慮しつつ、異なった時間スケール(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、予測する時間スケール(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(不確か性)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、これまでの研究によっ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によって、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空間モデル、時空間モデルのほか、地球物理データや地球化学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。

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するが、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頂高度も一定に保たれるため(Ohmori, 1987⁶¹⁾)、今後も地形の変化は小さく、地下水の流れや水質の変化もあまり生じないことが想定される。一方、おおむね最近百万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、将来も山地が上昇し、起伏も大きくなると考えられる。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。そのため、例えば、吉川(1985)⁶²⁾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する。また、これらの結果を地形区分図レベルで取りまとめる。

(3) 平成 22 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

これまでの活断層調査では、最近数十万年程度の断層の活動性に関する情報は得られているものの、さらに長期の予測・評価に際しては、断層運動の開始以降の活動性に関する情報が必要となる。平成 22 年度については、断層運動に着目し、日本列島における活断層の活動開始年代を推定するための調査手法(例えば、河川の屈曲や逆断層地塊の高度などから推定される総変位量と平均変位速度からの算出)を取りまとめるとともに、それぞれの調査によって推定された年代値に伴う不確実性(精度・確度)を提示する。また、全国の活断層を対象に、それらの活動開始年代を算定するために必要な個別情報を収集・整理するとともに、活動開始年代を示した断層分布図を作成する。なお、年代値の不確実性を反映するため、一定の基準に基づく確実度を併せて示す。

③ 日本列島の山地の地形発達段階の検討

日本列島に分布する代表的な山地や丘陵などを事例に、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)⁶³⁾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、帰納的なアプローチによって日本列島の山地地形の発達段階を示した概観図を作成する。

(4) スケジュール(当面 5 年間の計画)

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	・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		・異なった時間スケールでのデータに基づく外挿 ・予測期間に応じた不確実さの提示		
②超長期の確率モデルの開発				・空間モデル、時空間モデルの開発 ・地球物理・地球化学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	・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の収集・整理 ・山地成長曲線の推定 ・山地の地形発達段階の検討				

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

過去十万年程度においては地形学的情報が得られることが多いことから、将来十万年程度の地質環境の変化についてもある程度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得ることが困難であることから、十万年を超えるような時間スケールでは予測・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流れ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流れや水質などの変動パターンを外挿することによって、さらに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、瑞浪超深地層研究所用地を含む東濃地域を事例に、10 万年から 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

木曽山脈・三河高原から濃尾平野・伊勢湾にかけての木曽川・土岐川水系の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って推定する。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を提示するとともに、広域地下水流動研究や超深地層研究所計画のボーリング孔や坑道で得られた観測データ（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、U-Th 放射非平衡年代などとの比較・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流れ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 22 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、過去数百万年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提示することを目途とする。そのため、平成 24 年度までを目途に、木曽山脈から伊勢湾までの木曽川流域を事例に、鮮新世～第四紀の地形・地質構造の発達史を考慮しつつ、それぞれの時代について水理地質構造モデルのベースとなる地形・地質構造モデルの構築を目指す。平成 22 年度は、瀬戸層群に着目し、これらの形成年代や堆積環境などを既存文献やこれまでの地形・地質調査によって得られたデータから復元する。なお、瀬戸層群の形成年代については、不明な点が多いことから、テフクロロジーや古地磁気年代などによって補足的な現地調査を行い、年代値に関する情報を収集する。

(4) スケジュール(当面 5 年間の計画)

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
① 地形・地質構造の発達過程の解明	・活断層の変位方向・速度や濃尾平野の堆積速度の推定 ・河成段丘堆積物や瀬戸層群などの堆積環境の解明 ・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		・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			・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 加速器質量分析計を用いた ^{10}Be 年代測定法の実用化

(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」のうち、岩石の露出年代については、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した ^{10}Be や ^{26}Al の蓄積量を定量する必要がある。そのため、東濃地科学センター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、 ^{10}Be の定量法を確立し、 ^{10}Be 年代測定法を実用化する。また、現在、ルーチン化されている ^{14}C 年代測定法についても、バックグラウンドの低減やビームの安定化などを図ることにより、測定精度の向上を目指す。さらに、 ^{26}Al や塩素-36(^{36}Cl)法を用いた年代測定も行えるよう、試料調整法や測定法などに係る文献調査にも着手する。

(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 CO_2 などの炭素同位体を測定することによる ^{14}C 年代測定法に係る技術開発を進めてきた(例えば、國分ほか、2010³⁵⁾)。これらについては、すでにルーチン化しているものの、概要調査などに係る編年技術にとって重要な数万年程度の年代測定に係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などの装置改良やバックグラウンドを低減するための試料調整法の最適化によって測定精度の向上を目指す。 ^{10}Be 年代測定法については、これまで標準試料を用いて測定条件の調整を行ってきたが、今後は実試料の測定を含めてその最適化を試みる。また、「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、年代測定の対象とする試料が岩石であることから、岩石からのベリリウム(Be)抽出法の検討を含む試料調整法を確立するとともに、試料調整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今後5か年に達成する。さらに、 ^{26}Al は ^{10}Be と同様に石英中に生成することから、 ^{10}Be 年代と ^{26}Al 年代を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を向上することが可能となる。一方、 ^{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 年代測定法より古い年代を測定できる。これらの宇宙線生成核種は、東濃地科学センターで保有している加速器質量分析計の性能で測定が可能であるが、それぞれ異なった試料調整法や装置構成などが必要であるため、当面はこれらについての情報の収集と仕様の検討を進めていく。

(3) 平成22年度の研究計画

① ^{14}C 年代測定に係る測定精度の向上

^{14}C 年代測定の精度を向上させるために、イオン源などの装置改良によるイオンビームの安定化及び試料調製法の改善によるバックグラウンドの低減を行う。さらに、実試料の分析を実施することで、現在の分析法の問題点を抽出し、その改善を行う。

② ^{10}Be 年代測定法の実用化

^{10}Be 年代測定法の実用化に向けて、実試料を用いて加速器質量分析計の測定条件の最適化を試みる。特に加速器の荷電変換部及び検出器の調整を行うことで、ベリリウム同位体の測定で妨害となる同重体であるホウ素(^{10}B)の除去効率及びイオンビームの検出感度を向上させる。また、 ^{10}Be 年代値が得られている火成岩などを用いて試料調整法の確立に着手する。なお、火成岩の試料は必要に応じてサンプリングを行う。

(4) スケジュール(当面 5 年間の計画)

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 年代測定法の実用化	・実試料による試験測定 ・試料調製法の開発		・試料調整法の改良 ・バックグラウンドの低減やビームの安定化 ・岩石の露出年代について, 他の編年技術とのクロスチェック		
③ ²⁶ Al と ³⁶ Cl 年代測定法の事前調査				・試料調製法や装置構成などの情報収集及び仕様の検討	

4.3.2 四重極型質量分析計などを用いた(U-Th)/He 年代測定法の実用化

(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、上記を応用して、地下の断層の上盤と下盤の上昇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、東濃地科学センターで保有している四重極型質量分析計によりヘリウム-4(^4He)の定量を、ICP-MS によりウラン(U)、トリウム(Th)を定量する技術を整備し、(U-Th)/He 年代測定法を実用化する。

(2) 実施内容

(U-Th)/He 法については、これまで希ガス質量分析計によって ^4He 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た(例えば、Yamada et al., 2008³⁶⁾)。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、東濃地科学センターで保有する希ガス質量分析計では ^4He の定量が困難である。そのため、ヘリウム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 年代測定法を実用化していく。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整法によって最適な測定条件を提示する。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を導入し、最適な測定条件を提示する。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 境界や石英・イライト結晶度)との検討を行い、双方の妥当性についても評価を行う。

(3) 平成 22 年度の研究計画

① 四重極型質量分析計を用いた ^4He の定量

平成 23 年度までを目途に、四重極型質量分析計を用いた ^4He 定量法を確立する。そのため平成 22 年度は、アパタイトを対象とする定量法に関する技術開発を行う。ここでは、同位体希釈法による分析操作法や、アパタイトからの脱ガス条件を検討し、未知試料からの定量を行う。

② ICP-MS を用いた U, Th の定量

平成 22 年度中にアパタイトからの U, Th 定量法に関する技術開発を完了する。そのため、濃度・温度・時間といった酸分解の際の条件、マトリクス濃度も考慮した ICP-MS 用の試料調製法などを検討し、①と併せて未知試料の年代測定を行う。

(4) スケジュール(当面 5 年間の計画)

実施内容	H22	H23	H24	H25	H26
①四重極型質量分析計を用いた ^4He の定量	・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	・アパタイトの試料の調製法・定量法の最適化	・ジルコンの U, Th 定量のバックグラウンドの低減 ・高周波分解装置などを用いた試料調整法の最適化			
③(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 年代測定法の実用化

(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、断層運動に伴う地下深部から流入した熱水によって生成された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、その他の調査技術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、極細粒な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る点から、火成活動や地殻変動の編年に係る研究に広く有用である。東濃地科学センターで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最適化する。なお、数万年までの若い年代をより正確に測定するため、アルゴンの定量は感度法を用いる。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、純水及び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し、高純度の自生雲母粘土鉱物を分離して 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微量の雲母粘土鉱物のカリウム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 22 年度の研究計画

① 感度法によるアルゴン定量システムの開発

K-Ar 年代測定法の実用化に向けて、平成 23 年度までに希ガス質量分析計を用いた感度法によるアルゴン定量システムを構築する。平成 22 年度は、超高真空の分析ラインの構築と標準大気試料の調製、アルゴン同位体分析に特化した希ガス質量分析計の調整を実施し、標準試料を用いた分析手順の最適化と感度決定を行う。また、標準試料などの測定により測定値の精度・確度を評価し、年代測定限界を明らかにする。

② 自生雲母粘土鉱物の分離法の開発

断層ガウジから極細粒の自生雲母粘土鉱物を、純水及び重液を用いた高精度の遠心分離により高純度で分離する手法を平成 24 年度までに開発する。平成 22 年度は理論的計算に基づき断層粘土を分級し、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により、分離試料の純度を評価することで、最適な分離法を検討する。また、分級した試料の K-Ar 年代測定を試験的に実施し、前処理や測定に係る問題点を明らかにする。

(4) スケジュール(当面 5 年間の計画)

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		・他の火成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。また、テフロクロノロジーは、放射年代測定のように誤差を伴わないため、地層処分にとって重要となる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(例えば、梅田・古澤, 2004³⁸⁾)。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、風化・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を開発する。また、新第三紀と第四紀の境界付近の代表的なテフラのメルトインクルージョンの化学組成を測定し、カタログとして整備していく。

(2) 実施内容

保存状況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東濃地科学センターで保有するEPMA(Electron Probe Microanalyzer:電子プローブ・マイクロアナライザー)を用いて精度良く、かつ、効率的に測定するため、試料の調整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・問題点を抽出した上で、手法の最適化を図っていく。また、鮮新世と更新世の境界(P-P境界)付近に降灰したと考えられる代表的な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の測定を行い、それらをデータベースとして整備していく。

(3) 平成 22 年度の研究計画

① メルトインクルージョンの測定手法の確立

東濃地科学センターで保有するEPMAを用いてテフラに含まれる造岩鉱物中のメルトインクルージョンの化学組成の測定を可能にすることを目標とし、試料調製法及び測定手法を平成 23 年度までに確立する。平成 22 年度は、供給源が特定され、化学組成が既知の広域テフラを用いて試料調製及び測定に着手する。

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

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・問題点を抽出し、平成 24 年度までに当該手法の最適化を行う。平成 22 年度は、瀬戸層群に挟まれるテフラ起源物質を採取し、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の特徴から、鮮新世から第四紀前半の広域テフラを同定するとともに、当該手法の妥当性を提示する。

(4) スケジュール(5 年間の計画)

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	・試料調整法, 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	・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・問題点の抽出, 手法の最適化				
③P-P 境界のテフラカタログの整備			・メルトインクルージョンの化学組成の測定及びカタログの整備		

引用文献

- 1) 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(2010):「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.
- 2) 核燃料サイクル開発機構(1999a):“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.
- 3) 核燃料サイクル開発機構(1999b):“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.
- 4) “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).
- 5) 原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会(2000):“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”.
- 6) OECD/NEA (1999): “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.
- 7) 原子力安全委員会(2002):“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”, 21p.
- 8) 原子力発電環境整備機構(2002):“概要調査地区選定上の考慮事項”.
- 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(2003):“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”, 108p.
- 10) 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):“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”.
- 11) 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構(2006):“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”, 110p.
- 12) 米倉伸之, 野上道男, 貝塚爽平, 鎮西清高(編)(2001):“日本の地形 1 総説”, 東京大学出版会, 349p.
- 13) 原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会(2010):“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)”, 80p.
- 14) 原子力安全委員会(2004):“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”.
- 15) 尾上博則, 笹尾英嗣, 三枝博光, 小坂 寛(2009):“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), pp.40–53.
- 16) 武田精悦・中司 昇・梅田浩司(2004):“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, pp.332–338.

- 17) 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(2005):“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), pp.97–111.
- 18) 原子力安全委員会(2008):“発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針”, 14p.
- 19) 木村敏雄(2002):“日本列島の地殻変動—新しい見方から—”, 愛智出版, 470p.
- 20) 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(2008):“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, pp.1–13.
- 21) 梅田浩司, 檀原 徹(2008):“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, pp.131–136.
- 22) Umeda, K., Asamori, K., Ninomiya, A., Kanazawa, S. and Oikawa, T. (2007) : “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.
- 23) 吉山 昭, 柳田 誠(1995):“河成地形面の比高分布からみた地殻変動”, 地学雑誌, 104(6), pp.809–826.
- 24) 田力正好, 安江健一, 柳田 誠, 須貝俊彦, 守田益宗, 古澤 暁(2010):“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(投稿中).
- 25) 花室孝広, 梅田浩司, 高島 勲, 根岸義光(2008a):“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, pp.27–38.
- 26) 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(2006):“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, pp.275–286.
- 27) 田中和広, 千木良雅弘(1997):“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.
- 28) Saegusa, H., Yasue, K., Onoe, H., Moriya, T. and Nakano, K. (2009) : “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, pp.269–276.
- 29) 坂川幸洋, 梅田浩司, 浅森浩一(2005):“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, pp.157–166.
- 30) Martin, A. J., Takahashi, M., Umeda, K. and Yusa, Y. (2003): “Probabilistic methods for estimating the long-term spatial characteristics of monogenic volcanoes in Japan”, *Acta Geophysica Polonica*, 51(3), pp.271–289.

- 31) Martin, A. J., Umeda, K., Connor, C. B., Weller, J. N., Zhao, D., Takahashi, M. (2004) : “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.
- 32) Sato, H. (1994) : “The relationship between late Cenozoic tectonic events and stress field and basin development in northeast Japan”, *Journal of Geophysical Research*, 99(B11), pp.22261–22274.
- 33) Fabbri, O., Iwamura, K., Masunaga, S., Coromina, G. and Kanaori, Y. (2004) : “Distributed strike-slip faulting, block rotation and possible intracrustal vertical decoupling in the convergent zone of SW Japan”, *Geological Society, London, Special Publications*, 227, pp.141–165.
- 34) 兼岡一郎(1998):“年代測定概論”, 東京大学出版会, 315p.
- 35) 國分陽子, 鈴木元孝, 石丸恒存, 西澤章光, 大脇好夫, 西尾智博(2010):“JAEA-AMS-TONO による ^{14}C 測定と施設共用利用の現状”, 第 2 回 JAEA タンデトロシ 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, pp.84–86.
- 36) Yamada, K., Hanamuro, T., Tagami, T., Yamada, R., Umeda, K., Takagi, H., Iwano, H. and Danhara, T. (2008) : “New (U-Th)/He Dating Systems and Ages in Japan Atomic Energy Agency”, in *Proceedings of Goldschmidt Conference 2008*, A1050.
- 37) 山崎誠子, 山田国見, 花室孝広, 梅田浩司, 田上高広(2009):“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, P-26.
- 38) 梅田浩司, 古澤 明(2004):“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, pp.395–400.
- 39) 200 万分の 1 活断層図編纂ワーキンググループ(2000):“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, pp.3–12.
- 40) Kaneda, H. (2003) : “Threshold of geomorphic detectability estimated from geologic observations of active low slip-rate strike-slip faults”, *Geophysical Research Letters*, 30(5), 1238, doi:10.1029/2002 GL016280.
- 41) Shimada, K., Tanaka, H. and Saito, T. (2008) : “Rapid and Simple Measurement of H_2 Emission from Active Faults Using Compact Sampling Equipments”, *Resource Geology*, 58, pp.196–202.
- 42) Umeda, K., McCrank, G. F., and Ninomiya, A. (2008) : “High ^3He emanations from the source regions of recent large earthquakes, Central Japan”, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9, Q12003, doi:10.1029/2008GC002272.
- 43) Umeda, K. and Ninomiya, A. (2009) : “Helium isotopes as a tool for detecting concealed active faults”, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 10, Q08010, doi:10.1029/2009GC002501.
- 44) Kagohara, K., Ishiyama, T., Imaizumi, T., Miyauchi, T., Sato, H., Matsuta, N., Miwa, A. and Ikawa, T. (2009) : “Subsurface geometry and structural evolution of the eastern margin fault zone of the Yokote basin based on seismic reflection data, northeast Japan”, *Tectonophysics*, 470, pp.319–328.

- 45) Niwa, M., Mizuochi, Y., and Tanase, A. (2009) : “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.
- 46) Stirling, M. W., Wesnousky, S. G. and Shimazaki, K. (1996) : “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), pp.833–868.
- 47) Wesnousky, S. G. (1999) : “Crustal deformation processes and the stability of the Gutenberg-Richter relationship”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(4), pp.1131–1137.
- 48) 小林健太, 杉山雄一(2004): “2000 年鳥取県西部地震の余震域とその周辺における断層と断層岩—未知の活断層”の検出に向けて—”, *地質ニュース*, 602, pp.36–44.
- 49) Wakita, H., Nakamura, Y., Kita, I., Fujii, N. and Notsu, K. (1980) : “Hydrogen release: new indicator of fault activity”, *Science*, 210(4466), pp.188–190.
- 50) Kita, I., Matsuo, S., Wakita, H. (1982) : “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, pp.10789–10795.
- 51) 梅田浩司, 安江健一, 浅森浩一(2010): “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, pp.52–63.
- 52) 浅森浩一, 梅田浩司(2005): “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), pp.147–156.
- 53) Umeda, K. (2009) : “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, pp.289–301.
- 54) 田力正好(2005): “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), pp.143–148.
- 55) 三箇智二, 安江健一(2008): “河床縦断形のシミュレーション”, *地形*, 29, pp.27–49.
- 56) 岡 大輔, 江原幸雄, 藤光康宏, 小野 暁(2009): “高透水性破碎部の形成による非火山性熱水系の発達”, *日本地球惑星科学連合 2009 年大会予稿集*, G122-010.
- 57) Xu, T., J. Apps and K. Pruess. (2000) : “Analysis of mineral trapping for CO₂ disposal in deep aquifers”, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-46992, Berkeley, California.

- 58) Glassley, W. E., A. M. Simmons and J. R. Kercher (2002) : “Mineralogical heterogeneity in fractured, porous media and its representation in reactive transport models”, *Applied Geochemistry*, 17(6), pp.699–708.
- 59) Mayer, K. U., E. O. Frind and D. W. Blowes (2002) : “Multicomponent reactive transport modeling in variably saturated porous media using a generalized formulation for kinetically controlled reactions”, *Water Resources Research*, 38(9), 1174, doi:10.1029/2001WR000862.
- 60) Parkhurst, D. L., K. L. Kipp, P. Engesgaard and S. R. Charlton (2004) : “PHAST—A program for simulating ground-water flow, solute transport, and multicomponent geochemical reactions”, U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A8, 154p.
- 61) Ohmori, H. (1987) : “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, pp.29–36.
- 62) 吉川虎雄(1985) : “湿润変動帯の地形学”, 東京大学出版会, 132p.
- 63) Sugai, T. and Ohmori, H. (1999) : “A model of relief forming by tectonic uplift and valley incision in orogenesis”, *Basin Research*, 11(1), pp.43–57.

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
物質モル	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 基本単位	
	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
比透磁率 ^(b)	(数字の)	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	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	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
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光強度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
吸収線量, ビエエネルギー分与, カーマ	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
	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付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 sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
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 sA
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 ³ 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	接頭語	記号	乗数	接頭語	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/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm 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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm 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。
ベベル	B	
デジベル	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
ボアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトル	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 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=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フエルミ	f	1 フエルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 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	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリー), 4.1868 J (「IT」カロリー) 4.184 J (「熱化学」カロリー)
ミクロン	μ	1 μ = 1 μm=10 ⁻⁶ m

