JAEA-Review
2012-024

地質環境の長期安定性に関する研究　年度計画書
（平成 24 年度）

Research Plan on Geosphere Stability for Long-Term Isolation of Radioactive Waste
(Scientific Programme for Fiscal Years 2012)

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
石丸 恒存　梅田 浩司

Koichi ASAMORI, Masakazu NIWA, Takahiro HANAMURO, Kunimi YAMADA
Tomohiro KUSANO, Ayumu MAKUUCHI, Ryoichi TAKATORI, Yoko SAITO-KOKUBU
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

July 2012
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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, 2012

JAEA-Review 2012-024

地質環境の長期安定性に関する研究　年度計画書（平成 24 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
浅森 浩一，丹羽 正和，花室 孝広，山田 国見[※1]，草野 友宏[※1]，
幕内 歩[※1]，高取 亮一[※1]，國分(齋藤) 陽子，石丸 恒存，梅田 浩司

（2012 年 5 月 15 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 24 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，2010[1)]）に基づき，第 1 期中期計画期間（平成 17 年度～平成 21 年度）における研究成果（草野ほか，2010[2)]），平成 22 年度及び平成 23 年度の研究成果，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成果，実施主体や規制機関から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

JAEA-Review 2012-024

Research Plan on Geosphere Stability for Long-Term Isolation of Radioactive Waste
(Scientific Programme for Fiscal Years 2012)

Koichi ASAMORI, Masakazu NIWA, Takahiro HANAMURO, Kunimi YAMADA※1,
Tomohiro KUSANO※1, Ayumu MAKUUCHI※1, Ryoichi TAKATORI※1, Yoko SAITO-KOKUBU,
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 15, 2012)

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 2012. The objectives and contents in fiscal year 2012 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

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 24 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 …… 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 地質断層の再活動性に関する評価技術 …… 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 …… 25
4.2.4 超長期における予測・評価手法に関する検討 …… 27
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 …… 30
4.3 年代測定技術の開発 …… 32
4.3.1 加速器質量分析装置を用いた ^{10}Be 年代測定法の実用化 …… 32
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 …… 34
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 …… 36
4.3.4 高分解能のテフラ同定手法の開発 …… 38

引用文献 …… 40

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 FY2012 ····· 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 ····· 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 Estimation techniques for reactivity of geological fault ····· 22
4.2.3 Models for formation of hydrothermal activity by crustal movement ····· 25
4.2.4 Estimation and evaluation techniques for natural phenomena of very long-term ····· 27
4.2.5 Development of estimation and evaluation techniques for geological environment by paleohydrogeological approach ····· 30
4.3 Development of dating techniques ····· 32
4.3.1 Practical use of ^{10}Be dating method with accelerator mass spectrometer ····· 32
4.3.2 Practical use of (U-Th)/He dating method with quadruple mass spectrometer ····· 34
4.3.3 Practical use of K-Ar dating method with noble gas mass spectrometer ····· 36
4.3.4 Development of high-resolution tephrochronology ····· 38

References ····· 40

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の概念は，「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, 1999a[3]：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）を選ぶことが前提となる。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, 1999b[4]）。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」[5]（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, 2000[6]；OECD/NEA, 1999[7]）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」[8]（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，2002[9]）（以下，「考慮事項」）を公表した。その一方で，「高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて」（総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会，2003[10]）や「放射性廃棄物処理・処分に係る規制支援研究について」（総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会, 2009[11]）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」[12]（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 [13), 14)]。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時期を念頭に，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 24 年度～平成 28 年度）では，平成 40 年前後を目途とするサイト選定に向けた，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，河成段丘の発達の乏し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（原子力発電環境整備機構，2010[15]）。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（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，2010[1]）。本報は，この基本計画に基づき，これまでの研究成果（例えば，草野ほか，2010[2]；安江ほか，2011[16]）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からの技術開発ニーズなど（例えば，原子力発電環境整備機構，2010[15]）を考慮しつつ策定した平成 24 年度の研究計画である。なお，昨年 3 月に発生した福島第一原子力発電所の事故を受けて，今夏に予定されている原子力政策及びエネルギー政策の見直しやそれに伴う資源エネルギー庁の全体計画の改定によっては，本研究計画についても一部変更・中止の可能性がある。

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

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（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・噴火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，そのような場所がサイト（及びその周辺）に存在するのか否か，存在するのであればどの範囲なのかを示すことが，サイト選定における予測・評価の基本的な役割である。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，何が起こ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（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，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砕帯の拡大，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，2001[17]），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生じる。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，2010[18)]）。また，「放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について」（原子力安全委員会，2004[19)]）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（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，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，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，2009[20)]）。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 万年以上の予測・評価には，地質環境がオーダで変化する不確実性が内在する可能性もある一方で，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，2004[21]；梅田ほか，2005[22]）。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，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てくることから，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[23]）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）[24]においても，地層処分のように 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，これまでの研究開発は，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増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はなく，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ロクロノ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，2008[25]）やテフロクロノロジーを用いた更新世中期の噴火史の復元（梅田・檀原，2008[26]）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*., 2007[27]）。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，1995[28]）に基づく内陸部の隆起量の算定（田力ほか，2011[29]）や熱年代学的アプローチによる熱履歴の復元（花室ほか，2008[30]）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，2006[31]）。

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乏し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）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，1997[32]）。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，2005[22]）。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（例えば，Saegusa *et al*., 2009[33]）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，2005[34]）の整備を進めた。また，今後 10 万年程度の期間にマグマの上昇・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*., 2003[35]）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*., 2004[36]）。

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，マグマの上昇・噴火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砕帯の拡大，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（例えば，Sato, 1994[37]; Fabbri *et al*., 2004[38]）。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・分布などに基づく地形学的知見に基づいて復元された古地形（10 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，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，古水理地質学的な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にあり，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（例えば，兼岡，1998[39]），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）年代測定法を実用化した（國分ほか，2010[40]）。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*., 2008[41]；山崎ほか，2009[42]）。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，2004[43]）。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 24 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，2000[44]）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, 2003[45]），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（例えば，Shimada *et al*., 2008[46]; Umeda *et al*., 2008[47]; Umeda and Ninomiya, 2009[48]）。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，破砕帯の幅），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（CO_2），水素（H_2）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データと比較・検討し，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明らかにし，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，地球物理学的，地球化学的データを含む総合的な解析手法を構築する。

(3) 平成 24 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，破砕帯の幅），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化学組成の特徴を取りまとめることを目標とする。平成 22 年度は，横ずれ断層のうち 2004 年に活動した警固断層及び最近 1 万年以上活動の痕跡がない弥栄断層，低角の逆断層である伊那谷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，CO_2，H_2 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，H_2 濃度や $^3He/^4He$ 比が観測された。平成 23 年度は，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 $^3He/^4He$ 比同位体比の顕著な変化は認められず，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明らかになった。平成 24 年度は，線状の地震活動が認められているものの地表に地震断層が確認されていない地域や深部流体の上昇に伴って発生すると考えられている深部低周波イベントが観測される地域において，温泉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。

② 地球化学的指標による調査技術の提示

これまでのデータを含めて，これらの地球化学的特徴と地質学的データ（例えば，断層の規模・タイプ，変位速度など）や地球物理学的データ（例えば，地震活動度，地殻・マントル構造など）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			**・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

地層処分の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，破砕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砕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（例えば，Kagohara *et al*., 2009[49]; Niwa *et al*., 2009[50]）。第 2 期中期計画では，テクトニックな環境ごとに，断層パラメータ（断層の走向，傾斜角，すべり角）のほか，破砕帯の幅，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*., 1996[51]; Wesnousky, 1999[52]）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（例えば，小林・杉山，2004[53]）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*., 1980[54]; Kita *et al*., 1982[55]）。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，断層の発達段階を示す地球化学的指標としての水素濃度の有効性についても併せて検討する。

(3) 平成 24 年度の研究計画

③ 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。平成 24 年度も昨年度に引き続き，産業技術総合研究所との共同研究の一環として，岩国断層や鳥取県西部地震震源域等の花崗岩の分布する地域の活断層等を事例に簡易測定法によって測定した土壌ガス及び室内試験で測定した遊離ガスの水素濃度，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，破砕帯の特徴等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。

(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・地質学的データと地球物理学的データとの比較・検討	・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** **・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（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を通じて断層の活動性を検討するためには，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，地下で採取した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，2010[55]）。本研究においては，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，ジルコンであればジルコニウム，

アパタイトであればリン）の含有量や組み合わせから鉱物の含有量を見積もる手法を開発する。

(3) 平成 24 年度の研究計画

① 熱的イベントによる断層の活動性の評価

本年度を目途に，ボーリングコアや坑壁から採取した断層岩や周辺岩盤の試料の鉱物・化学分析や放射年代測定によって，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。これまで，中央構造線の断層露頭から得られたシュードタキライト及び周辺のマイロナイト中のジルコンの(U-Th)/He 年代測定のほか，土岐花崗岩中の断層周辺の熱水変質を伴う花崗岩と新鮮な花崗岩中のアパタイトについて FT 年代測定及び FT 長解析等を実施するとともに，既存の放射年代測定結果と比較しつつ，断層の活動年代の検討を行ってきた。平成24年度は，これらの結果を取りまとめるとともに，熱的イベントに基づく放射年代のリセットを利用した断層の活動性の評価手法についての有効性や問題点を提示する。

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，得られた年代について層序や切断関係から推定されてい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・高槻構造線等の活断層を事例に，断層岩の採取及び自生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。例えば，土岐花崗岩中の断層岩の自生粘土鉱物（細粒のフラクション）では，43～53 Ma の年代を得たが，この値は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も整合的である。このことから自生粘土鉱物の K-Ar 年代測定は，上載地層法が適用できない断層のうち，比較的古い断層の活動性の評価に有効であることが示唆された。平成 24 年度は，これらの結果を取りまとめるとともに，自生粘土鉱物の K-Ar 年代を利用した断層の活動性の評価手法についての有効性や問題点を提示する。

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。平成 23 年度は，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 年代測定を実施した。その結果，跡津川断層から採取した試料について，第四紀の活動を示唆する年代を得た。平成 24 年度は，^{234}U-^{230}Th 年代の妥当性を確認するため，炭素等の同位体に着目して評価を行う手法を検討するとともに，跡津川断層の露頭について，構造地質学的な観点からの精査を行い，活断層の最終活動と対応する試料の調査・採取を目指す。さらに，これを年代測定して活断層の最終活動との関係を明らかにすることを試みるほか，効率的な年代測定法についての検討を行う。

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

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してきた。これまでに，阿寺断層周辺に分布する岩石のジルコンやアパタイトの FT 年代測定を通じて，閉鎖温度と地温勾配を仮定することにより，数千万年程度の長期にわたる岩体の隆起速度や断層の垂直変位速度を概括的に見積もり得ることが示された。平成 24 年度は，より閉鎖温度の低い(U-Th)/He 年代を含めてこれまでの結果を取りまとめるとともに，断層の上盤及び下盤のジルコン，アパタ

イトのFT年代，(U-Th)/He年代を利用した長期の断層の活動性の評価手法についての有効性や問題点を提示する。

(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 ^{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	**・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（例えば，浅森・梅田, 2005[57]；Umeda, 2009[58]）。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増大するため，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 24 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ために必要な震源決定手法を構築することを目標とする。これまで，震源決定において無視できない地殻浅所の地質構造による地震波速度の不均質性を三次元波線追跡によって考慮した震源再決定法を構築し，観測データへの適用によって従来の手法では認識することができなかった震源の集中域を推定できたことから，当該震源再決定手法の有効性を示した。平成 24 年度は，

震源再決定により見出された震源の集中域における発震機構解を推定し，震源の配列と断層運動との関連性及びこれらの情報に基づいた震源断層抽出の可能性について検討する。

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 24 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となる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スタッキング方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い，それらの有効性を示す。平成 22 年度は，地下深部における比抵抗境界の検出が可能な三次元インバージョン法を開発し，モデル計算によりその有効性を確認した。平成 23 年度は，山陰地方において既に観測された実データへの適用によってその妥当性を示した。平成 24 年度は，ここで開発した解析手法を用いて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ーなどによって震源断層の存在により不均質構造が想定される地域の活断層を対象に地磁気・地電流観測を行うとともに，当該解析手法の有効性を検討する。

(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ー法		**・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ー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 ・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				・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，2005[59]）。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（^{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 10-100 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。また，山地・丘陵の形状や谷底・斜面の勾配などの地形学的特徴の解析から，山地の隆起・侵食速度を概括的に把握する手法の開発も併せて行う。

(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）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ロ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が確認されており（例えば，佐々木ほか，2006[31]），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。これらの旧河谷堆積物や内陸小盆地の堆積物などの形成条件は，地質学的特徴に加え，山地の形状などの地形学的特徴に大きく依存することが考えられる。そこで，山地・丘陵の形状や谷底・斜面の勾配の DEM データ（数値標高モデル：Digital Elevation Model）などを用いた解析に基づき，山地の隆起・侵食速度を概括的に把握する手法についても併せて検討する。

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 ^{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 ^{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・侵食量の見積も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，数万年オーダ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 24 年度の研究計画

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

平成 23 年度までに，日本列島における環流丘陵を伴う旧河谷の分布を 25,000 分の 1 の地形図から判読して GIS 化を行うとともに，地質やテクトニックな環境の違い，地形面の開析状態の違いなどに基づき旧河谷の特徴を整理した。また，十津川流域の環流丘陵を伴う旧河谷を事例に，旧河谷周辺の地形・地質の発達過程を考慮した試料採取地点の選定により，隆起速度の指標となる旧河床堆積物を効率的に採取できることを示した。さらに，環流丘陵を伴う旧河谷と河成段丘の堆積物を用いて，火山灰分析，堆積物の粒度分析，土色分析などの結果から暫定的に離水時期を推定し，隆起速度の傾向を把握した。これらの結果からは，地質に加え山地の形状が旧河谷堆積物の形成条件に大きく影響していることが分かっている。一方，「4.2.4 超長期における予測・評価手法に関する検討」における日本列島の山地の地形発達段階の検討結果から，山地・丘陵の形状や谷底・斜面の勾配などの地形学的特徴が山地の隆起速度と密接に関連していることが示唆されている。以上の知見を踏まえて，平成 24 年度は，DEM データなどを用いた山地や河谷の解析結果に基づき，地形学的特徴の異なる山地ごとに最適な隆起・侵食速度の調査・評価手法を検討する。

② 放射年代測定法による隆起・侵食速度の算定

平成 26 年度までを目途に，原位置宇宙線生成核種を用いた年代測定法による岩体の露出年代を推定する調査技術及び閉鎖温度の低い FT 年代測定法と(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隆起・侵食速度を推定する調査技術を提示する。平成 24 年度は，^{10}Be 年代測定について，2 万 4 千年前の浅間山山体崩壊によって生じた岩屑ブロックや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。また，FT 年代測定法及び(U-Th)/He 年代測定法による熱年代学的アプローチについて，代表的な山地を対象とし，新生代の侵食速度推定やその変動の時間スケールの検討を行う。

(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	・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		・旧河谷・内陸小盆地堆積物を用いた調査技術の有効性・問題点の抽出，改良 **・山地の地形解析に基づく隆起・侵食速度の推定**		
②放射年代測定法による隆起・侵食速度の算定		**・^{10}Be 年代測定法を用いた岩体の露出年代の検討** ・斜面の露出岩，河床礫などの年代測定による削剥速度の推定 **・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模擬し，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（例えば，三箇・安江，2008[60]）。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。

(3) 平成 24 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

これまでに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性からシミュレーション技術の妥当性の評価を行ってきた。具体的には，土岐川流域を事例に MIS6 の段丘分布から推定した 14 万年前の地形を初期状態とした現在までのシミュレーションの結果が，現地形との差分，段丘の残存率，河床縦断面の形状，堆積物の層厚などにおいて大きな矛盾がないことを定量的に確認した。また，シミュレーション結果に基づく地形のモデル化を行い，最終氷期（約 2 万年前）から現在までの地下水流動解析を実施した。平成 24 年度はこれまでの結果を取りまとめるとともに，数万年オーダでの大局的な地形変化を予測するための手法としての有効性や問題点を提示する。

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

一方，原子力機構においては，現在，福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置に係る研究開発並びに周辺環境の修復に向けた課題解決に優先的に取り組んでいる。そのため，本シミュレーション技術を応用して，数百 m～数 km 程度の小流域における土砂の削剥・移動・堆積プロセスについて数カ月～数年オーダで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，気候や植生等を考慮できるようなパラメータを設定できるよう現地において必要なデータを取得することも念頭において進める。これ

らの結果は，機構の平成 24 年度計画にも示されている環境中での放射性物質の移行挙動予測手法及び環境における被ばく線量の評価手法の開発に資することが期待される。

(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			**・気候や植生を考慮した土砂の削剥・移動・堆積プログラムへの改良** **・シミュレーションに必要なパラメータを設定するためのデータの現地での取得** ・セディメントトラップ等で測定した堆砂速度との比較によるシミュレーション技術の検証		

4.2.2 地質断層の再活動性に関する評価技術

(1) 目的

地層処分の安全性については，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で既存の断裂が再活動したものと考えられる（梅田ほか，2010[56]）。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，破砕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，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砕帯の発達過程を模擬する。ここでは，仮定する断層の幾何学的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・地質学的データのほか，測地学や地震学の分野で得られている地球物理学的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，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等の現象が生じることが 2011 東北地方太平洋沖地震の発生によって明らかになった。海溝型地震の震源や規模等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（正）断層の再活動や新生については，地層処分システムに著しい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等の相関に関する基礎データを取得する必要がある。

一般に，日本列島の山地の多くは第四紀（あるいは鮮新世以降）に活動した断層の運動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や地質断層が存在している可能性が高い。そのため，活断層が認定されていない場合であっても，このような地域においては，将来の断層の進展，褶曲や撓曲の形成などが想定され得る。本研究では，「4.1.2 断層の発達段階に係る調査技術」における帰納的アプローチから得られた科学的知見を含めて，断層運動によって地層処分システムの物理的隔離機能が影響を受け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 24 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 26 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や実在する活断層を対象とした解析を実施し，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。これまで，連続体モデルや粒状体モデルに基づいた媒質変形にかかわる数値解析手法を用いて断層の発達過程など地殻や表層地盤の破壊・変形過程を模擬した研究事例のほか，実在する断層を対象とした岩盤変形にかかわる地質学的な研究事例を整理してきた。平成 24 年度は，2011 年東北地方太平洋沖地震の発生に伴って活動したと考えられる断層（例えば，井戸沢断層など）を模擬した三次元数値シミュレーションを実施し，断層の再活動や成長を評価する上での課題を検討する。

② 海溝型地震に伴う沿岸域の断層運動やその影響に関する評価

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，歴史時代を含めて巨大海溝型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（例えば，湯ノ岳断層，二ッ箭断層，川南－征矢原断層等）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，海溝型地震の発生については，古文書による情報に加えて，津波堆積物を用いた解析を実施する。なお，本研究を通じて微動アレー探査等の事前調査を含めた正断層を対象としたボーリング・トレンチに関する調査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等の情報の収集・整理を行う。

(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	・数値解析手法などによる研究事例の収集・整理		**・実在する活断層・地質断層における数値シミュレーション** **・上記の断層の地形・地質学的データ，地球物理学的データの取得**		・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海溝型地震に伴う沿岸域の断層運動やその影響に関する評価			**・海溝型地震及び沿岸域の断層の活動性・規模に関する情報収集** **・ボーリング・トレンチに関する調査技術の高度化** ・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		
③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・地質学的，地球物理学的データの収集・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には，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*., 2007[27]）。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，断層運動に伴う破砕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，2009[61]）。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・高圧領域を対象とする熱・水連成シミュレータ magma2002（坂川ほか，2005[34]）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，TOUGHREACT[62]，NUFT-C[63]，MIN3P[64]，PHAST[65]）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，断層運動による破砕帯の透水性の変化については，断層周辺の破砕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，熱水活動を伴う断層を事例として，熱水変質帯の広がり，温度構造，放射年代，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 地殻内の震源断層などに係る調査技術」の開発で得られた地殻中の震源断層周辺に賦存す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 24 年度の研究計画

① 地殻変動に伴う熱水活動の数値シミュレーションに関する検討

地熱資源開発などで用いられている熱・水連成シミュレータや地球化学シミュレータなどの研究事例を整理するとともに，モデルの限界や適用範囲などについて整理する。また，断層運動に伴う地下水理や水質などの変化に関する観測データを収集・整理するとともに，断層運動に伴う熱水対流系の数値シミュレーションの研究事例についても情報の収集を進める。

(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地殻変動に伴う熱水活動の数値シミュレーションに関する検討	**・数値解析手法などによる研究事例の収集・整理**				
②地殻変動に伴う熱水活動の評価手法の開発				・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 ・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，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）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，10 万年オーダ）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頂高度も一定に保たれるため（Ohmori, 1987[66]），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。10 万年オーダ以上の期間の予測・評価に際しては，それぞれの山地の地形発達の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）[67]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 24 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 24 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。平成 23 年度までに，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，断層の活動開始時期に関する編年手法について整理した。また，主に総変位量と平均変位速度から日本列島における活動開始時期の傾向を概括的に示した。平成24年度は，隆起・侵食と気候・海水準変動に係る編年手法について，確度と精度を考慮して時間別・空間別に整理する。特に，測地学的情報と地形・地質学的情報の双方から得られる隆起速度の違いに着目し，地形・地質学的情報から得られる隆起・侵食速度の編年の精度について検証する。

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て計算する。また，新規の断層の形成についても，例えば，鳥取県西部や新潟平野周辺の活断層の分布と希ガス同位体組成のデータを用いた確率論的な評価を検討する。

③ 日本列島の山地の地形発達段階の検討

本年度を目途に，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)[68]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及び 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，それぞれの山地に高度分散量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る。また，山地の地形学的特徴の解析をさらに多くの地域に拡張し，地形量に係る各パラメータと隆起・侵食速度との関連について比較・検討し，地域ごとに最適な山地の発達段階モデルを取りまとめる。

(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** **・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		**・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	**・山地周辺の河成段丘や砂礫層，小起伏面の形状，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，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の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，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，^{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 24 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標とする。そのため，平成 25 年度までを目途に，木曽山脈から伊勢湾までの木曽川・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曽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ロ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。今後は木曽山地や美濃・三河高原におけるそれぞれの山地の形成時期を復元するた

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。今年度も平成 23 年度に引き続き木曽川・土岐川流域の山地に分布する岩石を採取し，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，データベースや図幅として取りまとめる。また，下流域の濃尾平野ではこれまでに国の研究機関などにより大深度掘削が数多く行われていることから，これらのボーリングについての情報やコア試料の入手の可否などについての調査を実施し，下流域における研究計画を検討する。

(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 **・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				・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 加速器質量分析装置を用いた ^{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，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 ^{10}Be 年代測定法を実用化する。また，^{26}Al や塩素-36（^{36}Cl）法を用いた年代測定も行えるよう，試料調製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

加速器質量分析装置を用いたこれまでの研究開発では，生物体試料や地下水中の二酸化炭素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，2010[40]）。これまで地質環境の長期安定性に関する研究の現地調査などに関わる実試料の測定を行いながら装置の改良や試料調製方法の改善を進め，^{14}C 年代測定の精度の向上を実現させた。^{10}Be 年代測定法については，^{10}Be 測定の実用化に向け，標準試料などを用いた測定条件の最適化を行い，測定技術の基盤をほぼ確立した。今後は実試料の測定を含めてさらなる最適化を図るとともに，バックグラウンドの低減やビームの安定化など測定精度の向上を試みる。また，より迅速な試料調製法などを検討する。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の向上が期待できる。他方，^{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 年代測定法と比較して古い年代の測定に適用できる。当加速器質量分析装置は，それらの核種の測定ができるように設計されているが，その実施においては，今後目標として定める測定精度・確度に応じて検出器の変更や，分別機器の追加等，装置構成の一部変更が望まれる場合も予想される。したがってその準備作業として，利用研究のニーズなどを調査し，それらの結果を踏まえて装置構成の仕様を定めるとともに，それぞれの核種に応じた試料調製法や装置設定の最適化法などを検討する。

(3) 平成 24 年度の研究計画

② ^{10}Be 年代測定法の実用化

^{10}Be 定量法の確立に向け，^{10}Be 量が既知の実試料などの試験測定などを行い，測定条件の最適化を進めるとともに，イオン源や検出器などの調整によるバックグラウンドの低減やビームの安定性などの向上を図る。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」などの調査において，測定試料数が多くなることが予想されることから，現行の試料調製法より迅速な処理法を検討する。

③ ^{26}Al と ^{36}Cl 年代測定法の事前調査

^{26}Al の測定に向け，加速器や検出器などの装置条件や測定条件の検討を行う。また，^{26}Al 年代測定法は ^{10}Be 年代測定法と組み合わせて評価することから，^{26}Al 測定試料は ^{10}Be 測定試料と同試料から調製する必要がある。「② ^{10}Be 年代測定法の実用化」で確立した ^{10}Be 測定試料調製法をもとに，^{26}Al 測定試料も同時に調製可能な方法に関する情報収集を行う。

(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		**・試料調製法の改良** **・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，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 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（例えば，Yamada *et al*., 2008[41]）。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 24 年度の研究計画

② ICP-MS を用いた U，Th の定量

平成 23 年度は，これまでに導入した高温型高周波分解装置によるジルコンの溶液化を試行した。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の最適化を行うとともに，濃度既知の試料を用いて手法の妥当性を評価する。

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 年度は，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 年度は，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する。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等が生じることから，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。

(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 He 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	**・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		**・方解石（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微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 24 年度の研究計画

② 自生雲母粘土鉱物の分離法の開発

平成 24 年度までを目途に，断層ガウジから極細粒の自生雲母粘土鉱物を，純水や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開発する。平成 23 年度は，これまでに整備した装置を用いて，理論計算に基づき断層ガウジを分級し，レーザー粒度分布測定装置により分離精度を確認することにより，分離手順の最適化を実施した。また，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，断層ガウジの最適な分離条件を検討した。平成 24 年度は分離した自生雲母粘土鉱物について，XRD（X 線粉末回折装置）によるポリタイプの同定手法を構築する。

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 年度までを目途に，K-Ar 年代測定法の実用化に向けて，原子力機構東濃地科学センターにおける K-Ar 年代測定システムの評価を実施する。平成 23 年度は，100 万年より若い年代既知の火成岩試料に対して年代測定を実施し，100 万年より若い年代を対象とした場合の測定値の精度・確度について検討した。平成 24 年度は，この結果と，「4.1.3 地下で遭遇した断層の活動性に係る調査技術」で実施した，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，東濃地科学センターにおける本年代測定法の適用限界を明らかにする。

(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（例えば，梅田・古澤，2004[43)]）。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原子力機構東濃地科学センターの保有する EPMA（Electron Probe Microanalyzer：電子プローブ・マイクロアナライザー）や SEM-EDS（Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive Spectroscopy：走査型電子顕微鏡／エネルギー分散型X線分析装置）を用いて精度良く，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・問題点を抽出した上で，手法の最適化を図る。

(3) 平成 24 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

原子力機構東濃地科学センターの保有する EPMA 及び SEM-EDS 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とする試料調製法及び測定手法の確立を目指す。これまで，代表的なテフラ（姶良 Tn テフラ，洞爺テフラ）を用いた試料調製及び測定により，東濃地科学センターの保有する EPMA による分析においても，十分な測定精度が得られることを確認した。平成 24 年度は，東濃地科学センターの SEM-EDS を用いた試料調製法及び測定手法について検討するとともに，未知試料を用いてこれらの手法の適用事例を示す。

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・問題点を抽出し，手法の最適化を行う。平成 22 年度までに，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，そのほかの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ことを確認した。平成 23 年度は，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た。同時に，房総半島の上総層群の火山灰の詳細な分析を実施し，その結果との対比から，東濃地域の時代未詳のテフラの堆積年代を推定した。平成24年度は，他の手法による年代決定の困難な場合の多い内陸部の河成段丘などの堆積物を対象に，メルトインクルージョンによるテフラの同定手法の適用性の検討を継続して行う。また，当該手法の有効性・問題点を抽出する。

(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	**・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**				

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) 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, 石丸恒在, 梅田浩司(2010):“「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 年度ー平成 21 年度)報告書(H22 レポート)”, JAEA-Research 2010-044.

3) 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.

4) 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.

5) “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).

6) 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”.

7) 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.

8) 原子力安全委員会(2002):“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”, 21p.

9) 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”.

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(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.

11) 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”.

12) 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.

13) 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構(2009):“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”, 114p.

14) 資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構(2010):“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”, 139p.

15) 原子力発電環境整備機構(2010):“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, 58p.

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, 石丸恒在, 梅田浩司(2011):“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.

17) 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.

18) 原子力安全委員会(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”, 80p.

19) 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”, 42p.

20) 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.

21) 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.

22) 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.

23) 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.

24) 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.

25) 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):“空中レーザー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.

26) 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.

27) 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.

28) 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.

29) 田力正好, 安江健一, 柳田　誠, 須貝俊彦, 守田益宗, 古澤　暁(2011):“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, pp.118–130.

30) 花室孝広, 梅田浩司, 高島　勲, 根岸義光(2008):“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.

31) 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.

32) 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.

33) 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.

34) 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(2), pp.157–166.

35) 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.

36) Martin, A. J., Umeda, K., Connor, C. B., Weller, J. N., Zhao, D. and 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.

37) 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.

38) 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.

39) 兼岡一郎(1998):“年代測定概論”, 東京大学出版会, 315p.

40) 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, pp.84–86.

41) 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.

42) 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.

43) 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.

44) 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.

45) 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.

46) Shimada, K., Tanaka, H. and Saito, T. (2008) : “Rapid and Simple Measurement of H2 Emission from Active Faults Using Compact Sampling Equipments”, Resource Geology, 58, pp.196–202.

47) Umeda, K., McCrank, G. F., and Ninomiya, A. (2008) : “High ^{3}He emanations from the source regions of recent large earthquakes, Central Japan”, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9, Q12003, doi:10.1029/2008GC002272.

48) 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.

49) 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”, *Tectonophys*, 470, pp.319–328.

50) 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.

51) 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.

52) 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.

53) 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.

54) 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.

55) Kita, I., Matsuo, S. and 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.

56) 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.

57) 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.

58) 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.

59) 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.

60) 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.

61) 岡　大輔, 江原幸雄, 藤光康宏, 小野　暁（2009）:“高透水性破砕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.

62) Xu, T., Apps, J. A. and Pruess, K. (2000) : “Analysis of mineral trapping for CO2 disposal in deep aquifers”, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-46992, Berkeley, California.

63) Glassley, W. E., Simmons, A. M. and Kercher, J. R. (2002) : “Mineralogical heterogeneity in fractured, porous media and its representation in reactive transport models”, *Applied Geochemistry*, 17(6), pp.699–708.

64) Mayer, K. U., Frind, E. O. and Blowes, D. W. (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.

65) Parkhurst, D. L., Kipp, K. L., Engesgaard, P. and Charlton, S. R. (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.

66) 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.

67) 吉川虎雄（1985）:“湿潤変動帯の地形学”, 東京大学出版会, 132p.

68) 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
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	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	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の） 1	1
比透磁率[b]	（数字の） 1	1

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

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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

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

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ sA$
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	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	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=60s
時	h	1h =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	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L，l	$1L=1=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3\ kg$

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	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	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	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St=1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb=1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal=1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G =1Mx\ cm^{-2} =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(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	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	$1\ \mu =1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています