

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 ー日本列島のネオテクトニクスと地質環境の長期安定性ー

梅田浩司*¹ 大澤英昭*¹ 野原 壮*¹ 笹尾英嗣*¹ 藤原 治*¹ 浅森浩一*¹ 中司 昇*¹

地層処分 of 長期的な安全性を確保するためには、システム性能が著しく損なわれないよう長期にわたって安定な地質環境を選定すること、地層処分システムが備えるべき固有の性能を確保するため、想定される自然現象の変動を見込んで人工バリアや処分施設を適切に設計・施工すること、構築された地層処分システムの安全性を評価すること等が重要となる。そのためには、数万年以上の長期にわたって、評価の対象となる地域において、火成活動等のように地層処分システムの性能に著しい影響を及ぼす可能性、地殻変動等に伴う地質環境条件の変動幅等を示すための調査技術および評価手法等に係わる研究開発を進めていくことが必要である。本報では、わが国の地質学的な特徴を地質環境の長期安定性の観点から概観するとともに、当該分野における事業化段階での研究開発の展望とサイクル機構において現在取り組んでいる研究課題や最新の研究成果について報告する。

Key words : 地層処分, 地質環境の長期安定性, 調査技術/長期予測・影響評価モデル, 地殻変動, 火成活動, ナチュラル・アナログ

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. However, special consideration is given to the long-term stability of the geological environment, taking into account the fact that Japan is located in a tectonically active zone. Development of research/prediction technologies for geotectonic events has been carried out to evaluate the long-term stability of geological environment in any given site. This paper describes an overview of geotectonic events in Japan from the point of view of the long-term stability of geological environment. Moreover, the current status of research/prediction technologies developed by JNC is summarized.

Keywords : geological disposal, long-term stability of the geological environment, research/prediction technologies, diastrophism, magmatism, natural analogue

1 はじめに

わが国における地層処分の概念を考える場合、まず、日本列島がプレート収束帯に位置するという地質学的特徴を念頭に置く必要がある。わが国では、安定大陸に比べ地殻変動や火成活動等が活発であることから、このような現象が地層処分システムの長期的な安全性に及ぼす影響を考慮することが重要となる。そのため、わが国の地層処分の概念は、「長期的な安定性を備えた幅広い地質環境」に「性能に余裕をもたせた人工バリア」を設置することを特徴としている[1-3]。

これらの概念に基づき地層処分の安全性を確保するためには、地層処分システムの性能が著しく損なわれないよう、地質環境が長期にわたって安定なサイトを選定すること（サイト選定）、想定される自然現象の変動を見込んで人工バリアや処分施設を適切に設計・施工すること（工学的対策）により地層処分システムが備えるべき固有の性能を確保することとともに、構築された地層処分システムの安全性を評価すること（安全評価）が重要となる。そのためには、数万年以上の長期にわたって、評価の対象となる地域において①火成活動等のように地層処分システムの性能に著しい影響を及ぼす可能性、②地殻変動等に伴う地質環境条件（例えば、地下水理、水質、岩盤物性等）の変動幅を示すための調査技術および評価

手法等に係わる研究開発（地質環境の長期安定性に関する研究）を進めていくことが不可欠である[4]。

地層処分技術に関する研究開発は、核燃料サイクル開発機構（以下、「サイクル機構」）をはじめとする関係研究機関、大学等によって進められており、地質環境の長期安定性に関する研究もその一環として実施されている。これまでの研究開発では、わが国における地層処分概念の成立性や安全評価の信頼性の向上に主眼が置かれており、特に「地層処分システムの設置に適した地質環境がわが国にも存在し得ること」を示すための科学的な根拠となる知見やデータの蓄積が図られてきた。これらの成果は、「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—」[3]（以下、「第2次取りまとめ」）として国（原子力委員会）に報告された。これらの報告については、国は「地層処分の技術的信頼性が示されており、地層処分の事業化に向けての技術的拠り所となる」と評価した[5]。

これらを受けて、2000年6月には地層処分の実施の枠組みを定めた法律「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」[6]（以下、「最終処分法」）が制定され、さらに2000年10月には同法に基づき、最終処分事業の実施主体である原子力発電環境整備機構が設立された。一方、最終処分事業を行う際の安全の確保についても安全確保の原則や規制のあり方等の安全規制の骨格となる基本的な考え方が示されており[7]、わが国の地層処分計画は事業化の段階に進展した。したがって、事業化段階での研究開発では、概要調査地区等の選定や安全指針等の策定に必要な技術を最終処分事業や安全審査等のスケジュー

Current status of the geoscientific research for long-term stability of the geological environment in the JNC's R & D programme, by Koji Umeda (umeda@tono.jnc.go.jp), Hideaki Osawa, Tsuyoshi Nohara, Eiji Sasao, Osamu Fujiwara, Koichi Asamori, Noboru Nakatsuka

*1 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute
〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

ールに応じてタイムリーに提供していくことが求められている。

本報では、地質環境の長期安定性に関する研究によって、これまでに蓄積されてきたわが国の地殻変動、火成活動等に関する科学的知見やデータを紹介するとともに、これによって見出されたわが国の地質学的な特徴を地質環境の長期安定性の観点から概観する。また、当該分野における事業化段階での研究開発の展望とサイクル機構において現在取り組んでいる研究課題や最新の研究成果について報告する。なお、それぞれの分野における最新の成果については、本特集号の研究報告を参照されたい。

2 地層処分システムの安全評価に際して考慮すべき自然現象

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムの長期的な安全評価では、時間とともに変化するシステムの諸特性を考慮することが重要となる。そのため、安全評価は地層処分システムの将来のふるまいに関して種々の可能性を想定し、それによって及ぼされる人間環境への影響を論理的に記述した安全評価シナリオに基づき、安全性を解析評価するという方法論が国際的にも採用されている。自然現象は人間活動とならび、地層処分システムの重要な外的な変動要因であり、その具体的な現象については、国際的な議論を踏まえつつ、網羅的なリストが作成されている[8-9]。また、わが国ではプレート収束帯に位置するといった地質学的な特徴を考慮し、サイト選定や安全評価に際しては、汎地球規模の気候・海水準変動に加えて、地震・断層活動、火成活動、隆起・沈降・侵食の諸現象を考慮する必要性が示されている[7,10]。

一方、これらの現象が発生した場合には、地層処分システムにも何らかの影響が生じることが想定される[7]。例えば、地震・断層活動については、岩盤の破断・破砕に伴う廃棄物の破壊、施設の変形、地下水移行経路の形成、地震動による地下水理、水質の変化等が考えられる。火成活動については、マグマの貫入・噴出による廃棄物の破壊、地表への放出、マグマからの熱による地温上昇、熱対流の発生、地下水への熱水・火山ガスの混入による水質の変化等が考えられる。隆起・沈降・侵食の量によっては、廃棄物・処分場の露出の可能性のほか、処分場の深度の変化や地形、地質構造の変化による地下水の流動・水質、岩盤の地圧・地温の変化等が想定される。気候・海水準変動については、気温・降水量の変化による表層での水収支の変化、海水準変動に伴う地下水の流動の変化や塩淡境界の移動等に起因する水質の変化が考えられる。また、地域によっては、氷期に永久凍土による不透水層の形成、凍結割れ目による地下水の移行経路の形成等といった影響も考えられている。地層処分システムの安全性の評価に際しては、これら現象の発生から地質環境への影響までの一連のプロセスを記述した安全評

価シナリオが求められる。

以上のように、地質環境の長期安定性に関する研究は、地震・断層活動、火成活動、隆起・沈降・侵食、気候・海水準変動といった個別の現象論の探求ではなく、現象の発生から地質環境への影響までの一連のプロセスを理解する視点が重要となる。

3 日本列島のネオテクトニクスと地質環境

日本列島の原形は、日本海の拡大とともに、古第三紀漸新世から新第三紀中新世にかけて形成された。その後、千島弧、伊豆-小笠原弧の衝突やフィリピン海プレート運動方向の変化等が生じたが、日本列島周辺のプレートシステムの基本的な枠組みは、この時代に成立したと考えられている。日本列島の地殻変動や火成活動等は、太平洋プレートとフィリピン海プレートの沈み込みに関連すると考えられており、プレートシステムの枠組みやその運動に大きな変化が生じなければ、現在の地殻変動、火成活動等の分布・傾向等は、今後も維持されると考えられる[3]。さらに、圧縮応力場が支配的である現在のテクトニクス（ネオテクトニクス）に遷移した時期は、島弧ごとに異なるものの、概ね新第三紀鮮新世～第四紀更新世以降である。地層処分の安全性を評価すべき時間枠について、具体的な数字は設定されていないが[7]、地質環境の長期安定性の評価については、過去数十万年程度の地質学的なデータに基づいて将来十万年程度の変化を検討していくことが求められている[10]。地質環境の長期安定性に関する研究では、日本列島およびその周辺海域におけるネオテクトニクスの枠組みの中で、地殻変動、火成活動等の地域性や変動傾向等を総合的に理解するための基礎資料として、活断層、第四紀火山、海成段丘等の分布や形成年代等のデータのコンパイルを行った。また、上記の現象が地層処分システムにとって重要な地質環境条件（例えば、地下水理、水質、岩盤物性等）に及ぼす影響を概括的に把握するための一つの試みとして、第四紀火山周辺の地殻浅所の温度構造や温泉の化学組成等の空間的な変化について検討した。これらについては、「第2次取りまとめ」や関連する報告等において詳細に述べられているので、ここではその概要について紹介する。

3.1 最近約10万年間の隆起速度

日本列島の地殻変動を概括した第四紀の隆起・沈降量の分布図[11]が作られてから30年以上が経過し、この間に地形面や地層の年代や対比等の地殻変動に関する情報は飛躍的に増加した。こうした現状の知識に基づく海成段丘の分布や年代、ボーリングデータによる第四紀層の基底深度等の情報が「日本の海成段丘アトラス」[12]としてまとめられた結果、全国の海岸部について地殻変動の

速さやパターンが明確になった。内陸部についても、段丘の比高を指標とする TT 法等により、隆起速度が求められるようになった[13]。サイクル機構では、こうしたデータを整理し、過去約 10 万年間を対象とした全国の隆起速度の分布図を作成した (Fig. 1) [14]。これによると、日本列島の地殻変動には以下のような特徴が認められる。

北海道のオホーツク海沿岸で地殻変動が少なく安定しているが、日本海沿岸では隆起が活発である。日高沿岸では最近約 10 万年間の隆起速度は $0.3 \sim 0.5 \text{ mm/y}$ と推定される。この値はさらに古い時代の海成段丘群から推定される値とも調和的で、この地域については少なくとも過去 40 万年程度の隆起速度はほぼ一定と考えられる。東北地方については、三陸沿岸の緩やかな隆起と日本海沿岸の速い隆起が対称的である。また、日本海沿岸では南北性の褶曲が発達し、大局的には沈降部が平野（能代平野や庄内平野等）、隆起部が丘陵や山地（出羽山地等）とな

っている。こうした日本海沿岸の大きな変動速度は、北海道の日本海沿岸とともに、日本海東縁の変動[15]を反映していると考えられる。関東平野とその周辺では、プレート収束境界とほぼ平行している房総半島南部、三浦半島、大磯丘陵で隆起速度が大きい。関東平野の地下には厚い第四系が堆積しており、更新世中期までは沈降傾向にあったと考えられる。しかし、この地域には最終間氷期の海岸段丘が広く分布しており、更新世後期以降には隆起に転じたことがわかる。中部山岳地帯は、日本列島で最も隆起速度が大きい地域であり、 1 mm/y を越える地域も存在する。ここから濃尾平野西縁に向かって、大局的に傾き下がる変動が読み取れる。近畿三角地帯では濃尾平野、琵琶湖、京都盆地、大阪湾の沈降と養老山地、鈴鹿山地、生駒山地、比良山地、六甲山地等の隆起とのコントラストが明瞭である。これは活断層を境界にした地塊運動と考えられ、山地と沈降する平野や盆地と

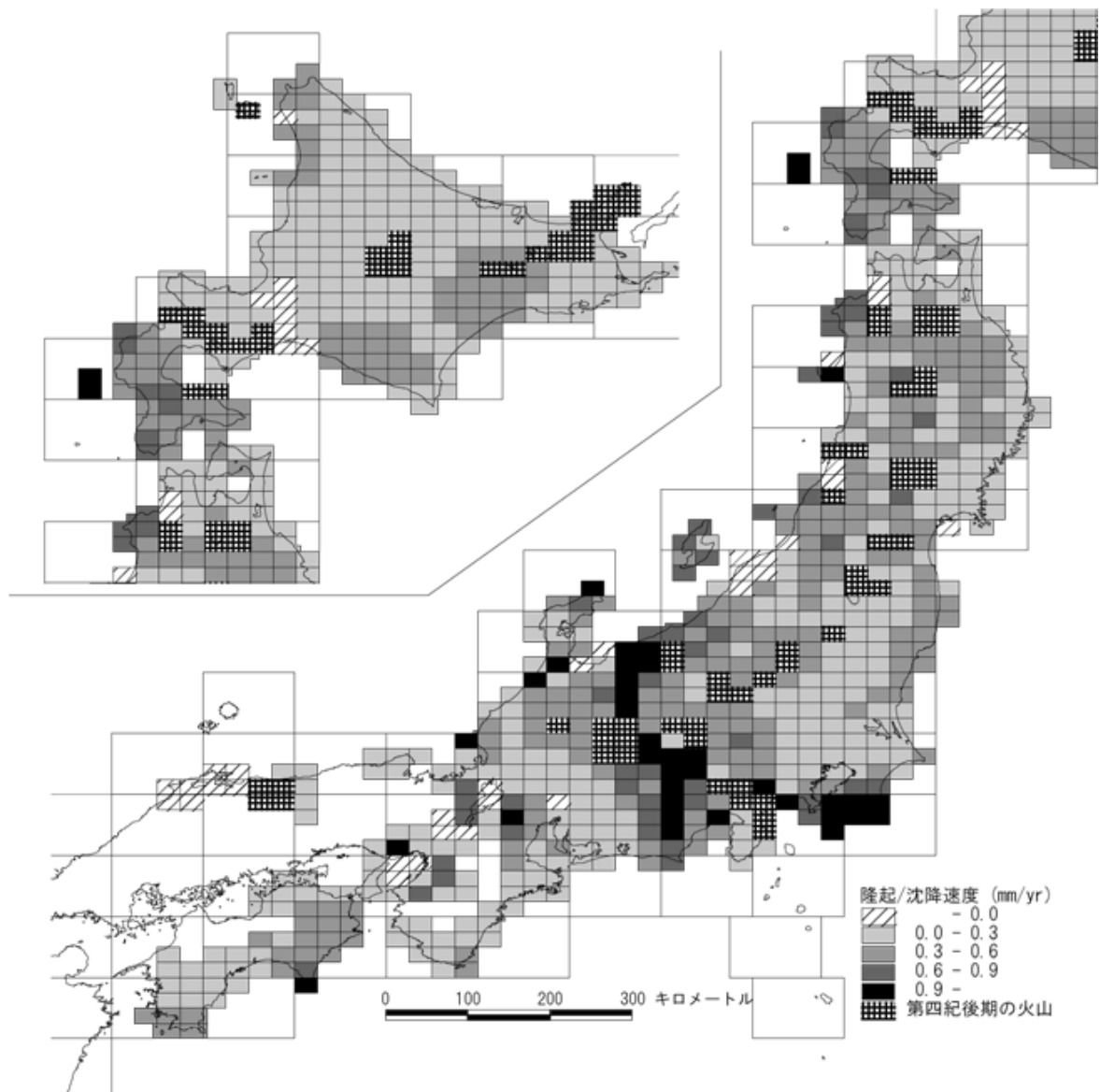


Fig. 1 Spatial distribution of uplift rates during the last 100,000 years in Japan (Fujiwara et al., 2004)

の間には活動性の高い活断層があることが多い[16]。

例えば、紀伊半島や四国では、地震性地殻変動のため南方に向かって隆起速度が大きくなる傾向がある。この変動のパターンは測量データから得られた海溝での巨大地震に伴う変動と地震間の変動の総和と良く似ており、地震性と非地震性の変動が周期的に長期にわたって累積していることを良く表している。中国地方は段丘地形の発達が乏しく、地形もなだらかなり、総じて変動が穏やかな地域と考えられる。

3.2 活断層の分布と水平歪速度

内陸地震の多くは、断層活動によって生じており、震源断層が地表付近まで到達し、地表付近の地形・地質に変形・変位を与えているものも存在する。このような地震や変形・変位を引き起こした断層は、最近の地質時代において間欠的に繰り返して活動しており、今後も活動すると考えられるため活断層と呼ばれている。全国を対象とした活断層の分布図として、「新編日本の活断層」[17]、「日本第四紀地図（Ⅰ地形・地質・活構造図）」[18]等が

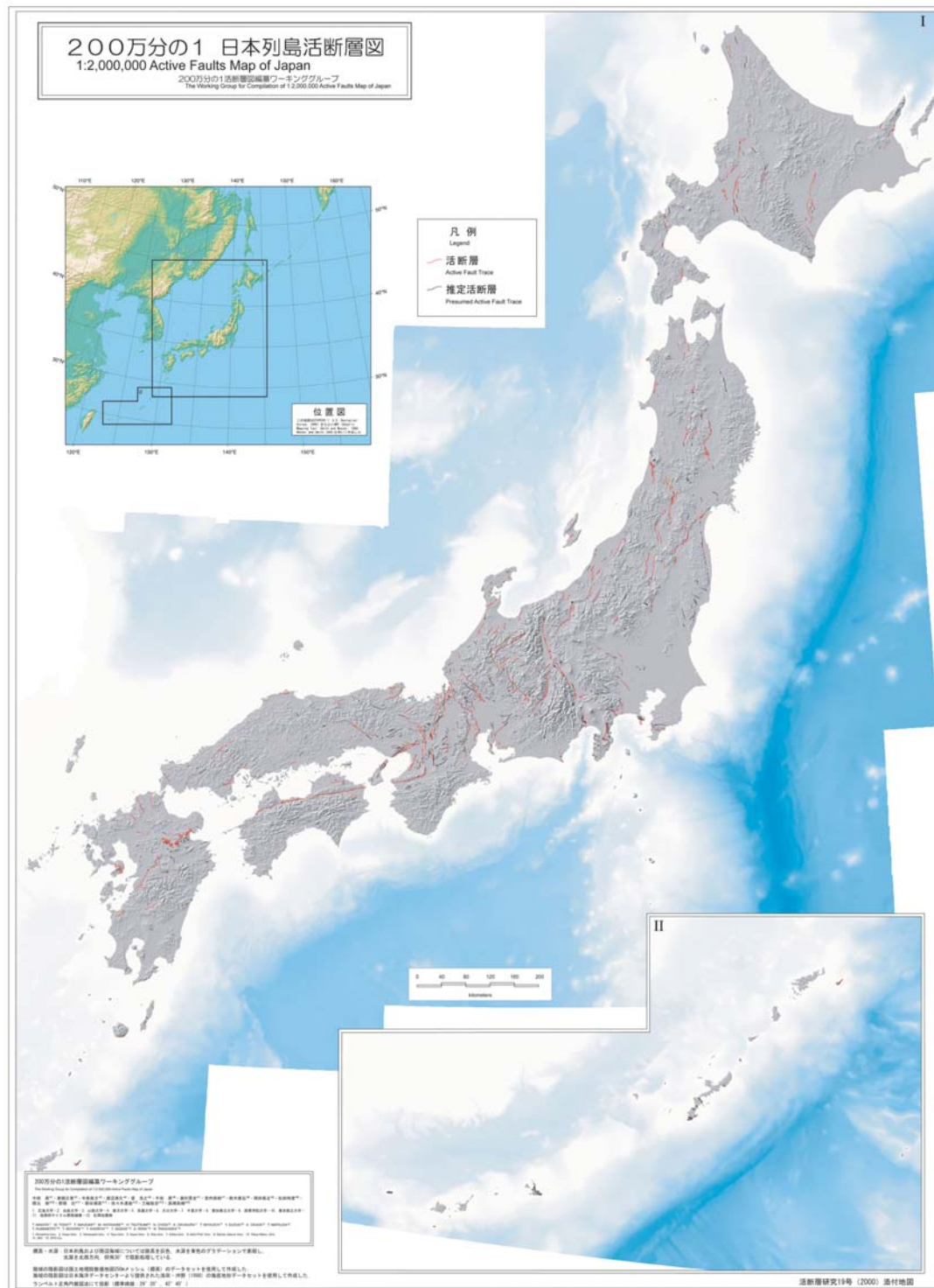


Fig. 2 Spatial distribution of active faults in Japan (Working group for compilation of 1:2,000,000 active faults map of Japan, 2000)

ある。サイクル機構では、活断層を過去数十万年間に繰り返し活動した痕跡が地形に現れ、将来活動する可能性がある断層と定義し、後期更新世以降の断層変位地形を重視する厳密な基準で、4 万分の 1 の空中写真を用いて活断層の判読作業を行い、詳細な活断層図を作成した (Fig. 2) [19]。さらに抽出された活断層については、2 万 5 千分の 1 あるいは縮尺のより大きな空中写真の判読や野外調査で得られた結果を基に、活断層の活動性を評価するための属性情報 (変位量、変位基準の年代等) を整備している [19-20]。

これらによると、日本列島には、後期更新世以降に活動している活断層が稠密に分布する地域と殆ど発達しない地域があり、活断層が偏在していること、また、東北日本では逆断層が、西南日本では横ずれ断層が、中部九州には正断層が卓越して分布することが確認された。また、第四紀前半に活動を停止し、その後活動していない断層があることも明らかにされた。活断層の分布密度とその活動性は、大局的には地殻変動の地域性に反映される。そのため、上記の活断層図を用いて、過去数十万年間の断層活動から推定される地殻の水平歪速度を計算した [21]。その結果、中部山岳地帯、近畿三角地帯 (敦賀ー鳴門海峡ー伊勢湾)、四国の中央構造線沿いでは東西ー西北西ー東南東方向の顕著な短縮が認められる。また、GPS 観測等による測地学的な歪との短縮方向はほぼ一致するが、歪速度は 1 桁以上小さく、地殻変動の時間スケールの違いを反映していると考えられる [22]。

一方、日本周辺海域の断層については、大陸棚石油・天然ガス資源基礎調査等で得られた音響地殻断面図に基づき、断面図上の地層あるいは基準地形面のズレから断層を識別している。この結果、日本周辺海域において第四紀以降活動したと考えられる 753 の断層を抽出した。また、これらの断層はその属性 (変位基準、活動時期、認定度等) から 43 の断層系に区分されている [23]。これらの断層系の分布は、日本周辺海域で現在進行中のテクトニクス、すなわち南海トラフでの斜め沈み込み、沖縄トラフでのリフティング、日本海東縁から山陰沖にかけての東西圧縮、オホーツク海ー千島弧西端ー日本海溝での東西圧縮、伊豆・小笠原弧のリフティング等を反映していると考えられる。

3.3 第四紀の火山活動の地理的変遷

第四紀火山の活動域の時間的・空間的变化を把握するためには、火山の分布、活動年代、噴火様式等の情報を収録したデータベースが必要である。日本列島の第四紀火山のデータベースとしては、気象庁が刊行した日本活火山総覧、地質調査所による「日本の火山第 2 版」等があるが、いずれも対象あるいは収録項目が限られていた。そのため、第四紀火山カタログ委員会は日本列島のすべ

ての第四紀火山を網羅し、各火山の特徴を簡潔に記載した「第四紀火山カタログ」を刊行した [24]。カタログの作成にあたっては、最新の研究報告のレビューのほか、活動年代が未詳の火山については、新たに岩石の放射年代測定を行い、これを補完している。その結果、わが国において第四紀火山として認定された火山は 348 となり、「日本の火山第 2 版」当時の 245 より増加した [25]。

日本列島の第四紀火山は、千島、北海道、東北本州を経て伊豆諸島からマリアナに至る東日本火山帯と、山陰から九州を経て南西諸島に至る西日本火山帯に区分されている。これらの火山帯スケール (数 100km 以上) での、第四紀火山活動の地理的変遷を把握するため、「第四紀火山カタログ」のデータに基づき、便宜的に 0~0.5Ma, 0.5~1.0Ma, 1.0~1.5Ma, 1.5~2.0Ma のそれぞれの期間に活動した火山の地理的分布を示す (Fig. 3)。これらによると第四紀火山は、東日本火山帯と西日本火山帯の中で活動を繰り返している。また、火山フロントが明瞭な東北日本では、フロントの 10~20km 程度の変化が認められるものの、新第三紀中新世にみられるような顕著な移動 [26] は認められない。

一方、火山帯の中の火山地域や火山列 (数 10km 程度) では、活動域が時間ごとに変化していく事例がいくつか認められる [27-28]。例えば、仙岩地域では南西に分布する火山に比べて北東に分布する火山の活動の開始時期が新しく、活動域が北東方向に拡大していく傾向がある [29]。以上のように、日本列島の第四紀火山の地理的変遷を見る限り、火山帯スケールでの活動の場には顕著な変化は認められないものの、火山地域・火山列スケールでは活動域の拡大・縮小あるいは移動等の変化が生じている。また、これらの変化にはある一定の傾向 (方向・速度等) が認められる場合がある。

3.4 現在の侵食速度と地すべり地形の分布

温暖多雨でかつ地形の起伏が大きい日本列島では、山地部での地すべりや斜面崩壊、および河食が侵食の主な要因であり、また、海岸での海食も広く見られる。氷河には、本州中部以北の高山のごく一部であるが、氷河による侵食も認められる。侵食作用には、ある広がりをもつ地域全体の平均的な削剥量 (面的侵食) と河川の下刻のように流路が選択的に削剥される場合 (線的侵食) がある。現在進行している面的侵食については、ダム の堆砂量のデータに基づき、理論的にはダムの集水域全体の平均的な侵食速度を求めることができる。これらは地質や気候条件等によりある程度の差異はあるものの、地形の起伏状態 (高度分散量で代表) と高い相関を持つことが経験的に知られている [30]。サイクル機構では、全国 82 箇所のダムについて、堆砂量、ダム建設からの経過年数、ダムの集水面積のデータから侵食速度を計算すると

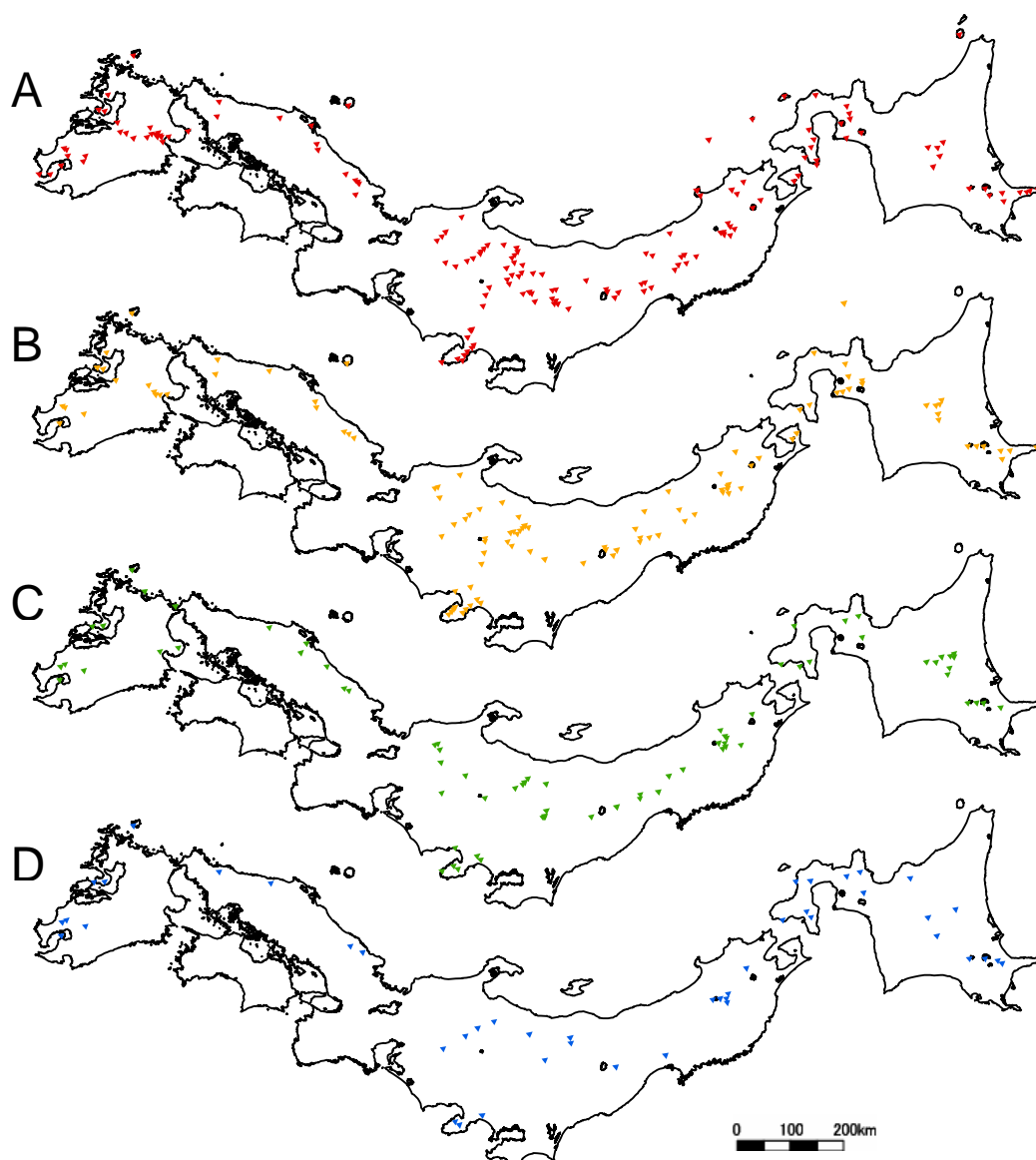


Fig. 3 Temporal and spatial distribution of volcanoes since 2.0 Ma in Japan (Umeda et al., 1998) A: Volcanoes active during the interval 0.5Ma to present; B: Volcanoes active during the interval 1.0-0.5 Ma; C: Volcanoes active during the interval 1.5-1.0 Ma; D: Volcanoes active during the interval 2.0-1.5 Ma.

ともに、集水域の高度分散量との関係式を導いた。そして、数値地図から計算した全国の高度分散量のデータに、この関係式を適用することで全国の侵食速度の分布を推定した[31]。

これによると、侵食速度は中部山岳地帯、日高山脈、東北地方の日本海側、関東山地、西南日本外帯の山地等が大きく、場所によっては 1 mm/y を越える。一方、北海道中央部から北部、東北日本の太平洋側、中国地方等の山地は侵食速度が小さく、一般に $0.3 \sim 0.5 \text{ mm/y}$ 未満である。また、丘陵部や平野はさらに小さな値となっている。

地すべりは、短時間に地形変化をもたらす侵食作用の一つである。サイクル機構では、将来にわたって地形変化の起こりやすい地域とその規模を推定するための基礎

資料として、地すべり地形の地理的な分布や地形・地質等に関する情報をデータベースとして取りまとめている[32]。地すべり地形の分布密度には、地域的な偏りが認められ、東北地方の日本海側、北信越、四国南部等の山地では分布密度が大きく、東北地方の太平洋側（北上山地、阿武隈山地）、中国地方等の山地では地すべり地形が少ない（Fig. 4）。また、地質区分と地すべり地形の分布との関連性では、新第三紀海成堆積岩、中新世火山岩類（グリーンタフ火山岩類）、古第三紀～新第三紀挟炭層に地すべり地形が多く、逆に後期中生代～古第三紀堆積岩類、中・古生代堆積岩、花崗岩、結晶片岩では地すべり地形が少ない。地形との関連性では、平均傾斜が $15 \sim 30^\circ$ の山地に地すべり地形が多い。

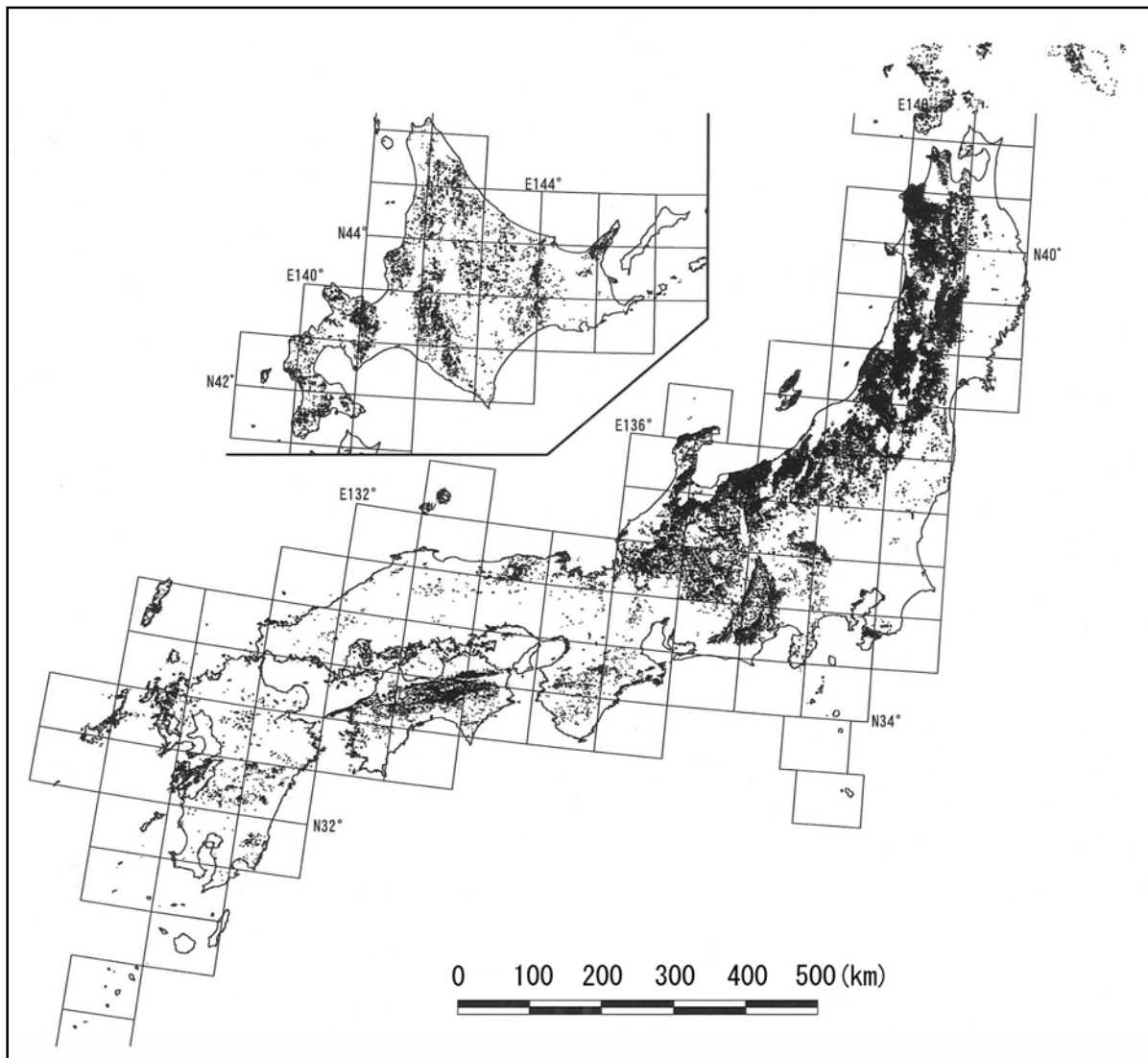


Fig. 4 Regional distribution of large landslide configurations in Japan (Fujiwara et al., 2002)

3.5 地温勾配

日本列島における大局的な地下の温度構造を把握するため、地殻浅所（～数 km）のボーリングから得られた坑井温度データのコンパイルが行われ、日本列島の地温勾配、地殻熱流量等の分布と地殻変動・火成活動等との関連性が議論されている。基盤情報としての坑井温度データは、1986年に「地熱坑井データベース（SIGMA）」[33]として刊行されたが、その後、非火山地帯の温泉開発等を含めデータが飛躍的に増加した。サイクル機構では、最新の坑井温度データの収集を行い、総計 1,936 点のデータをコンパイルした[34-35]。さらに、深度ごとの温度データ（いわゆる坑井温度プロファイル）のコンパイルを行い、1,215 本の坑井温度プロファイルを「日本の坑井温度プロファイルデータベース」として公開している[36]。

一般に地温勾配（ $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ）は、坑井温度プロファイルの傾きに基づいて算定されるが、ここではできる限り多くの坑井データを生かす意味で、坑底温度（あるいは最高温度）と基準温度（最寄りの気象官署における平年気温）の温度差から計算した。なお、掘削深度が 300m 以浅

のデータは、測定誤差が大きく影響すること、地下の熱水流動の影響が大きくなること等の理由から除外した。

Fig. 5 は 0.025 度間隔の格子点上での地温勾配値を、初期値として与え、坑井の深さで重みをつけ、地温勾配コンター図として描いたものである[34]。

地温勾配図から、高温異常の背景となるバックグラウンドの値（広域的な地温勾配値）を読み取ると、西南日本では $2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 程度であるのに対して、日高西部、三陸海岸周辺、関東平野を除いた東北日本では、 $3\sim 5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ とやや高い値を示す。地温勾配が $10^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以上の高温異常域は、北海道東部（知床、阿寒）、北海道中央部（大雪、十勝）、北海道南西部（定山溪、ニセコ、支笏洞爺、渡島半島）、東北脊梁山脈部（下北、八甲田、仙岩、栗駒、蔵王、吾妻、会津、肘折、那須、塩原、草津白根）、飛騨山脈周辺、伊豆半島東部、大島、八丈島、紀伊半島南部、山陰中部、九州中央部（別府～島原）、および九州南部（霧島、指宿）にそれぞれ分布しており、第四紀火山の分布と整合的である。しかしながら、富士山、鳥海山等の大型の活火山にも係わらず、その周辺に高温異常が認めら

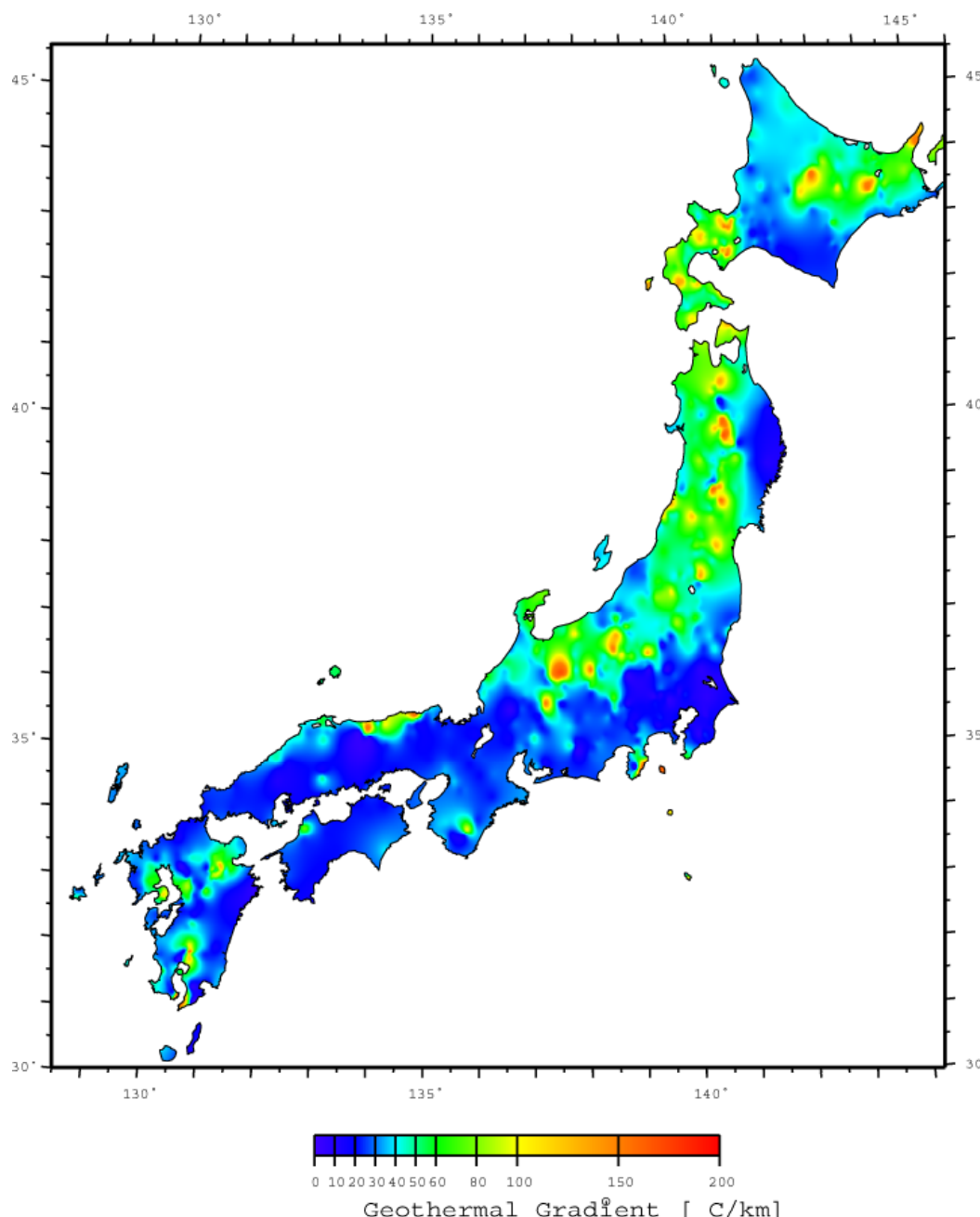


Fig. 5 Geothermal gradient map of Japan (Yano et al., 1999)

れない場合や紀伊半島南部、高縄半島南部のように非火山地帯にも係わらず高い地温勾配を示す坑井が存在する地域もある。

3.6 温泉・鉱泉の化学組成

地下水は天水起源であっても岩盤中を浸透していく過程で岩石との反応や他の地下水系との混合等によって水質が徐々に変化していく。さらに、地熱地帯ではマグマ起源の揮発性物質の混入や水・岩石反応の促進等が生じているように、日本列島における地下水の水質は様々である。サイクル機構では地殻変動、火成活動等が水質に及ぼす影響を定量的に把握するといった観点から、その基盤情報として全国の温泉・鉱泉等の地下水の化学分析

値を都道府県の衛生研究所報告、大学・研究機関等の紀要等から収集し、「温泉地化学データベース」として編集した[37]。

地殻変動、火成活動等による地質環境条件の変化を検討するためには、対象とする現象のプロセスを考慮しつつ、評価の指標となる成分に着目した解析を行うことが重要である。例えば、マグマに含まれる揮発性物質(H_2O , CO_2 , SO_2 , H_2S , HCl 等)は、マグマの上昇に伴い温度・圧力が低下することによってマグマから放出され、地下水中に溶解する。マグマ性の揮発成分が地下水中に混入すると、 Cl^- や SO_4^{2-} を主成分とする酸性の地下水が形成される。そのため、火成活動等の影響を評価する際には、 pH を一つの指標として検討を行うことが重要である。

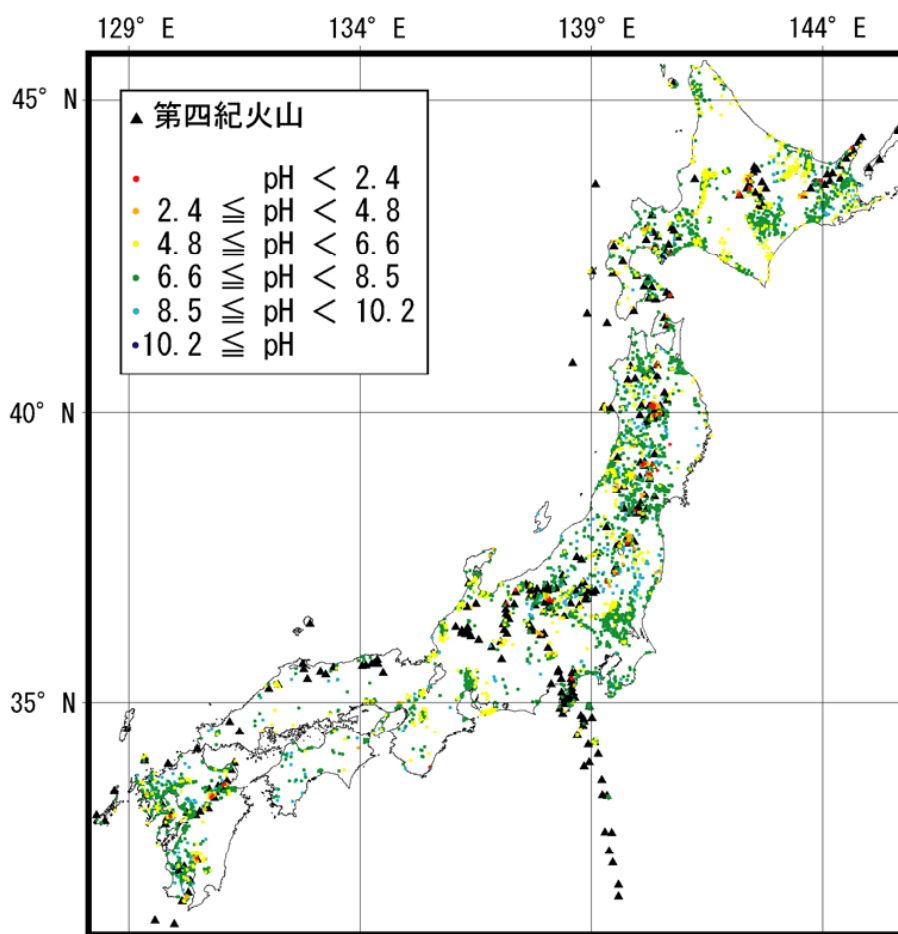


Fig. 6 Distribution map showing variations in pH value of groundwater in Japan (Asamori et al., 2002)

Fig. 6 は日本列島の温泉・鉱泉の pH を示したものである[38]。一般に、 HCO_3^- が溶液中に存在する pH 領域は 4.8 以上であり、これより低い値は自然界における実質的な酸性領域であると考えられる[39]。したがって、pH の分布について 4.8 未満の温泉・鉱泉が分布している地域に着目すると、3.5 で示した地温勾配が $10^\circ\text{C}/100\text{m}$ 以上の高温異常域と整合的であることがわかる。また、富士山、鳥海山等の大型の活火山の周辺に pH4.8 未満の温泉・鉱泉が存在していないことも興味深い。

4 最終処分事業の進展:概要調査地区等の選定と安全規制に係わる要件

最終処分事業の進め方については、最終処分法のほか、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」(平成 12 年 9 月、閣議決定)等により、実施主体が最終処分施設を立地する場所の選定に至るまでに、概要調査地区の選定、精密調査地区の選定、最終処分施設建設地の選定といった 3 段階のプロセスを経ることになっている。一方で、安全審査基本指針、安全審査指針、処分場の技術基準と

いった国の安全規制に関連する指針・基準の策定がこれらに平行して進められる[7]。

概要調査地区の選定は、地震、噴火、隆起、侵食やその他の自然現象や活断層等、法令に定められている事項について文献調査を行い、「地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がないこと」、「将来にわたって、地震等の自然現象による地層の著しい変動が生ずるおそれが少ないと見込まれること」等を確認することになっている。これらを受けて、原子力発電環境整備機構は、概要調査地区を市町村からの公募によるものとした上で、応募があった地区およびその周辺の地域について文献その他の資料による調査を行い、「概要調査地区選定上の考慮事項」[40]に沿って、平成 10 年代後半を目途に選定することとした。なお、「概要調査地区選定上の考慮事項」のうち、全国を一律の基準により概要調査地区選定に関する法定要件への適格性が明確に判断される事項(全国一律に評価する事項)については、3 章で紹介した図幅等[20,23,24]が選定基準に活用されている。

精密調査地区の選定は、概要調査地区およびその周辺の地域において、地表踏査、物理探査、ボーリング等の調査(概要調査)によって行われ、法定要件として「対

象地層等において自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないこと」,「対象地層等内に活断層, 破砕帯または地下水の水流があるときは, これらが坑道その他の地下の施設に悪影響が少ないと見込まれること」等が示されている。さらに, 最終処分施設建設地は, 地下の調査施設での測定・試験等(精密調査)を実施し,「対象地層の物理的・化学的性質等が最終処分施設の設置に適していることと見込まれること」,「地下水またはその水流が地下施設の機能に支障を及ぼすおそれがないと見込まれること」等を確認した上で, 精密調査地区内から選定されることになっている。

概要調査地区等の選定に係わる安全規制からの要件(環境要件)については, 原子力安全委員会によって検討が行われており, 概要調査地区選定段階における隆起・沈降・侵食, 地震・断層活動, 火山・火成活動等に係わる環境要件および概要調査あるいはそれ以降の調査において検討すべき内容が示された[41]。一方, 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では, 高レベル放射性廃棄物処分の安全規制の基盤確保に関する審議を行い, 安全評価に係る検討課題, 安全規制のために必要な研究課題, 安全規制の支援体制等を提起している[42]。

法定要件や安全規制に係る環境要件等は, 今後の研究開発の方向性や達成目標を設定する上での基本となるものであり, 研究計画の策定にあたっては, これらを十分に考慮しつつ, 重点化すべき研究課題と達成時期等を検討することが重要となる。

5 サイクル機構における事業化段階の研究開発の方向性

サイクル機構をはじめとする関係研究機関は, 事業と規制の段階的な進展に先行して, それらの技術基盤を整備していくための研究開発を進めている。現段階では, 概要調査(精密調査地区の選定)に用いられる調査技術や安全審査基本指針の策定に必要な科学的知見や評価の方法論等の提示が求められている。そのため, サイクル機構では, 特に概要調査地区等の選定や安全評価に必要なデータを取得するための体系化された技術を整備することのほか, 地層処分システムの安全評価に資するため, 将来の自然現象を考慮した地質環境を予測・評価するための手法を整備すること等を当面の目標として研究開発に取り組んでいる。

環境要件に示されているように, 概要調査地区及びその周辺地域における活断層, 第四紀火山等の存在やその影響等を確認することが不可欠であり, そのための要素技術の開発・改良のほか, それぞれの地質環境に応じた最適な調査技術を示すことが重要である。また, 地層処分システムに重大な影響を及ぼすと想定される現象の潜在的なリスクを排除するため, 地下深部の震源断層, マ

グマ・高温流体等の存在を予め確認しておく必要がある。これらは地球物理学的データの観測・解析等が主体となるが, 地球化学的データによる解釈を併せて行うことにより, 評価結果の信頼性の向上を目指すべきである。

さらに, 過去から現在にわたって概要調査地区及びその周辺地域において地層処分システムの性能に著しい影響を及ぼすような現象が発生した痕跡がないことを確認することが必要となる。これらについては, 地殻変動, 火成活動等の履歴のみならず, 過去から現在までの地質環境が有する地下水理, 水質, 岩盤物性等の性質が大きく変化していないことを直接的(例えば, 断層破砕帯・プロセスゾーンの岩盤物性, 熱水変質帯の熱史等), あるいは間接的(例えば, 地下水理の変化を推定するための古地形・水系等)に示すデータを取得するための調査技術を整備していく必要がある。

一方, 処分施設的设计・施工等の工学的対策, 地層処分システムの安全評価に際しては, これらで考慮すべき一連のプロセス(シナリオ)が, 対象とすべき期間(将来)において発生する可能性のほか, その際に生じる地質環境条件の変動幅を科学的な根拠に基づき示すことが必要となる。予測についての方法論としては, 過去から現在までの変動の傾向・速度から将来を外挿する方法, 現象の生起を統計的に求めて発生確率を予測する方法等が良く用いられる[43-44]。しかしながら, 自然現象の予測に関する科学的信頼性の向上を図るためには, 今後は経験則に加えて現象のプロセスを考慮した数値シミュレーションモデルの研究開発を進めていくことが重要である。具体的には次のアプローチをとる。

a) 現象を理解するための, 過去から現在までの地質・地球物理・地球化学的データの取得

b) データに基づく現象の理解と概念モデル(conceptual model)の構築

c) 現象の発生から地質環境への影響までの一連のプロセスおよび地質環境条件の変動幅を把握するための長期予測・影響評価モデル(predictive model)の開発

また, 構築されたモデルの信頼性や妥当性を確認するために, これらのモデルによる予測・評価結果と過去の類似した現象の痕跡(ナチュラル・アナログ)を調査することによって得られたデータとの比較・検証を行うことが必要である(Fig. 7)。これらの結果は, 核種移行解析等に用いるシナリオ, 概念モデル, 解析条件等の設定根拠となるが, その際には, それぞれのシナリオの発生する可能性や予測・評価結果に対する不確実性等を可能な限り定量的に示すことが重要である。さらに, 自然環境で生じた現象やその現象に伴う地質環境の変化を可能な限り定量的に示すことによって, それぞれのモデルをより現実に即したものにし, モデルそのものの信頼性を向上させることが重要である。

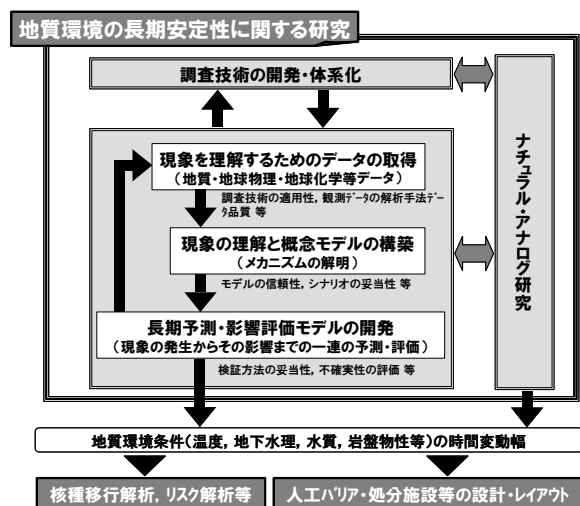


Fig. 7 Outline of the geoscientific research for long-term stability of the geological environment in the JNC's R & D programme

6 サイクル機構における研究開発の現状

サイクル機構では、事業化段階の研究開発の方向性を鑑み、「調査技術の開発・体系化」、「長期予測・影響評価モデルの開発」、「ナチュラル・アナログ研究」等の枠組みにおいて、Table 1 に示した研究課題に取り組んでいる。

6.1 調査技術の開発・体系化

概要調査地区等の選定や安全評価に必要となるデータを取得するため、地下深部の震源断層、マグマ・高温流体等の調査技術、古地形・水系等の復元技術、第四紀火成活動等の復元技術等の開発を進めている。震源断層の調査技術については、中国地方を事例として、「200 万分の 1 日本列島活断層図」[19]では活断層としては認定されていないものの、断層活動によって生じた可能性が考えられる、系統的でない河川の屈曲や山地高度の有意な不連続等を空中写真判読によって抽出するとともに、地質構造のほか、震源分布、重力異常等の地球物理データとの比較・検討を行っている[45-46]。マグマ・高温流体等の調査技術については、地震波トモグラフィーや MT 法等の物理探査技術の適用性の検討を行うとともに[47]、温泉ガス等の希ガス同位体等といった地球化学的手法を組合せた総合的な調査技術[48]の構築を目指している（浅森ほか、本特集号）。古地形・水系等の復元技術については、堆積相解析や放射年代測定等に基づく沖積平野の形成過程や海岸線の移動速度の推定のほか[49]、海岸段丘を用いた沿岸域の侵食速度の調査技術の高度化を進めている（藤原ほか、本号特集）。第四紀火成活動等の復元技術については、露頭で肉眼では識別できないテフラ降灰層準を識別する手法（RIPL 法；Refractive Index Physical Labor Method）を利用した第四紀火山の同定技術[50-51]に取り

組んでいるほか、地質環境の熱史の復元技術に向けた熱年代学的手法の適用性の検討を進めている[52]。今後は、これらの要素技術の開発・改良のほか、それぞれの地質環境に応じた体系的な調査技術の構築を目指していく。

6.2 長期予測・影響評価モデルの開発

長期予測・影響評価モデルの開発では、地殻変動、火成活動等に伴う地質環境条件の変動幅等を現象の発生の可能性を含めて予測するための評価手法の確立を目指している。サイクル機構では、地形変化モデル、火山活動の長期予測モデル、断層周辺の力学・水理モデル、地熱活動の熱・水理モデル等の開発を進めている。地形変化モデルについては、隆起、侵食のほか気候・海水準変動を考慮した地形変化を予測するため、従順化モデル等による三次元のシミュレーション技術の開発を進めている[53]。さらに、地形変化に伴う将来の地下水理の変化を予測するためのモデル開発にも着手している。火山活動の長期予測については、過去の火山の時空分布から将来の活動の場の変遷を予測する取り組み[3]のほか、確率論的アプローチによる独立単成火山群を対象とした時空間モデルの開発[54]、さらに、ベイズ法によって地震波速度や地温勾配等の地球物理データを結合したモデルの高度化を併せて進めている[55]。断層周辺の力学・水理モデルについては、兵庫県南部地震、鳥取県西部地震等に際して得られた地下水の変化に関するデータを取りまとめるとともに、断層周辺の水理モデルを構築し、断層活動が地質環境に及ぼす水理学的影響の検討を行なっている。地熱活動の熱・水理モデルは、火成活動等による熱的ポテンシャルや熱水対流系の規模を定量的に評価するため、坑井温度プロファイルから一次元熱輸送モデルによる熱流束、流体流動速度の評価方法を検討するとともに、マグマ周辺の熱・地下水理の変化を予測するため、既存のモデルの改良（例えば、超臨界点付近での計算安定性の向上）やその適用性の検討等を進めている（坂川ほか、本特集号）。

6.3 ナチュラル・アナログ研究

ナチュラル・アナログ研究では、主に東濃ウラン鉱床を事例研究の場として、地殻変動等によって生じる地質環境の変化がウラン鉱床の長期にわたる保存に及ぼした影響の評価とそのモデル化、および有機物や微生物等がウラン系列核種の移行・遅延に及ぼす影響の評価を行っている（笹尾ほか、本特集号）。ウラン鉱床の保存に及ぼした影響評価では、ウランを保持する堆積岩における酸化還元反応とその緩衝能力の評価を進めている[56]。また、ウラン系列核種の移行・遅延の評価では、ウランの溶解度を規制する環境要因の抽出や有機物がウランの移行挙動に与える影響についての解析を進めている[57-58]。さ

Table 1 Main issues related to the JNC's R & D programme

調査技術の開発・体系化	実施内容
古地形・水系等の復元技術	河岸段丘、海成段丘等の地形や堆積相解析等により、対象地域およびその周辺地域における局所的な隆起・侵食・堆積量を推定するとともに、古地形・水系等を高精度で復元するための調査技術を整備する。
震源断層等の抽出技術	地下深部の震源断層や活動性が低い活断層等を抽出するため、詳細な地質調査・地形判読に加えて、微小地震観測・重力構造等の地球物理学的データ等による総合的な調査技術を整備する。
活断層の影響調査技術	活断層の分岐、変形帯、活褶曲・とう曲等の範囲やその力学・水理学的影響を把握するための地質調査、物理探査、ボーリング・トレンチ等による総合的な調査技術を整備する。また、活断層帯の活動履歴を精度良く推定する手法を整備する。
マグマ・高温岩体等の探査技術	地下深部のマグマや高温岩体等を把握するため、地震波トモグラフィ、深部比抵抗構造等の地球物理学的手法のほか、希ガス同位体等を指標とした地球化学的手法に係る調査技術を整備する。
第四紀火成活動等の復元技術	主に熱年代学的手法による過去から現在までの古地温・熱水系等を推定するための調査技術を整備する。また、第四紀火山活動の履歴を把握するための調査技術を整備する。
長期予測・影響評価モデル	実施内容
三次元地形変化モデル	対象地域およびその周辺地域における隆起・侵食量、地形変化等を予測するため、従順化モデル等による三次元のシミュレーション技術を開発する。また、地下水理等への影響を把握するため、地下水モデルとの結合を行う。
火山活動域の長期予測モデル	火山フロントの背弧側や単成火山群の周辺地域における新たな火山の形成の可能性を評価するため、過去の噴出中心の時空分布から将来の活動域を推定する外挿法によるモデル、空間統計学的手法を用いた確率モデル等の開発を行う。
活断層の力学・水理モデル	断層活動に伴う岩盤の変形や破断の影響を予測・評価するためのモデルの開発を行う。活断層周辺の水理地質構造を調査し、水理モデルを開発する。さらに、断層活動に伴う岩盤の変形や破断に伴う地下水理等への影響を予測・評価するため、断層活動に伴う地下水理変化の長期予測モデルの開発を行う。
地熱活動の熱・水理・水質モデル	マグマ・高温岩体等による周辺岩盤の影響を評価するための、熱・地下水理・水質等の連成モデルの開発を進める。また、非火山地帯の地熱活動の性状や熱源等に係わる概念モデルを構築する。
ナチュラル・アナログ研究	実施内容
ウラン鉱床周辺の酸化還元緩衝能力の評価	ウラン鉱床における地質学的変遷とそれに伴う水理学的・地球化学的環境の変化を解明するため、ウラン鉱床の地史やウラン鉱床周辺の酸化還元緩衝能力の把握を進める。
ウラン系列核種の移行・遅延特性の評価	地質環境の化学的条件や有機物、微生物等がウランの移行・遅延に及ぼす影響を評価する。
研究手法の体系化	異なる地質環境にも適用できる、ウランの移動・保持に関わる体系的なナチュラル・アナログ研究手法を整備するため、性能評価研究に適用されるシステム解析手法に則って、ウラン鉱床等を事例とした評価を実施する。
研究情報基盤	実施内容
安全評価に係る知的基盤の整備	安全評価シナリオ(接近シナリオ、変動シナリオ)や概念モデルの基盤となる個々の現象のメカニズムや複数の現象の相互作用等に関する最新の科学的知見を整備する。特に、発生しにくいシナリオを排除する根拠を明確化するための科学的根拠の蓄積を進める。
安全評価に係る地質環境データベース	安全評価に係る入力条件となる地質環境(力学的、熱的、水理学的、地球化学的データ)の変動幅を提示するため、文献調査や事例研究によって得られたデータの収集・整備、データベースの作成を行う。
次世代の高精度探査技術・モニタリング技術に係わる基盤研究	地震波、電磁波等による微小な地殻内変動をモニタリングするための、精密制御定常信号システム(アクロス)に関する基盤研究を進める。

らに、安全評価の信頼性向上に資するため、性能評価で用いられるシステム解析手法を活用し、ウラン鉱床等で取得したデータを用いた解析を実施している[59-60]。

6.4 研究情報基盤の整備

研究情報基盤の整備については、地殻変動や火成活動等に係る最新の学術的知見やそのベースとなる観測・分析技術(例えば、物理探査技術、年代測定法等)等に関する基盤情報の収集・整備を進めている。特に、安全評

価シナリオ(接近シナリオ・地下水シナリオ)、概念モデルの構築に必要となる一般的かつ現実的な現象のプロセスに関する情報や安全評価に用いる力学、熱、地下水理、水質等のパラメータ(観測データ)に関する情報の整備を進めている。なお、情報の整備にあたっては、データに関する品質やトレーサビリティ等を担保するとともに、これらに適合するデータベースの開発を進めている[61]。

また、地層処分技術の信頼性を向上させていくためには、次世代の工学技術を目指した基盤的な研究を着実

に進めていくことも必要となる。特に、地下深部の高精度の探査技術やモニタリング技術は、地層処分技術にとって重要な課題の一つである。そのため、サイクル機構においても地下深部の微小な地殻内変動を地震波や電磁波によってモニタリングするための精密制御定常信号システム（アクロス）に関する研究を進めている[62]。

7 おわりに

本報では、わが国の地殻変動、火成活動等の特徴を地質環境の長期安定性の観点から概観するとともに、サイクル機構における事業化段階の研究開発の方向性や現在取り組んでいる研究課題等を示した。地層処分技術は、地質学、地球物理学、地球化学、岩盤力学、土木工学等、極めて広範な分野にまたがり、研究課題も基盤研究から応用・実用化研究にまで及ぶ。しかし、これらは、必ずしも全地球を対象とするものではなく、地球科学の全分野を必要とするものではない。研究開発の対象を地層処分技術に必要とされるテーマに絞り、それらの内容をさらに深めていくことが、地層処分の技術的信頼性を向上させていく上で重要なことと考える。今後も大学をはじめ国・民間の研究機関の適切な役割分担と産学官の連携した一層の取り組みが期待される。

謝辞

二名の匿名査読者および編集委員の窪田 茂氏には、原稿の不備等についてご指摘いただくとともに、建設的なご意見を賜った。以上の方々に、厚く謝意を表する。

参考文献

- [1] OECD/NEA : The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety. *Lessons Learnt from the April 2002 Workshop in Paris, France* 45p. (2004).
- [2] 梅木博之, 清水和彦, 内藤守正 : 地層処分の技術的信頼性ー地層処分研究開発 2000 年レポート. 資源と素材 **117**, 768-774 (2001).
- [3] 核燃料サイクル開発機構 : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性ー地層処分研究開発第 2 次取りまとめー (総論). 核燃料サイクル開発機構, TN1400 99-020 (1999).
- [4] 武田精悦, 中司 昇, 梅田浩司 : 地質環境の長期安定性と地層処分ー今後の研究開発に向けた視点ー. 月刊地球 **26**, 332-338 (2004).
- [5] 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会 : 我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価. (2000).
- [6] 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律. 法律第 117 号 (2000).
- [7] 原子力安全委員会 : 高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第 1 次報告書). (2000).
- [8] IAEA : Procedures and Data, Performance Assessment for Underground Radioactive Waste Disposal Systems. *IAEA Safety Series* 68 (1985).
- [9] IAEA : Siting of Geological Disposal Facilities, A Safety Guide, A Publication within the RADWASS Programme. *IAEA Safety Series* 111 (1994).
- [10] 原子力安全委員会原子力バックエンド対策専門部会 : 高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について. (1997).
- [11] 第四紀地殻変動研究グループ : 第四紀地殻変動図. 国立防災科学技術センター (1969).
- [12] 小池一之, 町田 洋 : 日本の海成段丘アトラス. 東京大学出版会 (2001).
- [13] 高木俊男, 柳田 誠, 藤原 治, 小沢昭男 : 海岸段丘から推定した河床高度変化の歴史. 地学雑誌 **109**, 366-382 (2000).
- [14] 藤原 治・柳田 誠・三箇智二 : 日本列島の最近約 10 万年間の隆起速度の分布. 月刊地球 **26**, 442-447 (2004).
- [15] 大竹政和, 平 朝彦 : 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス. 東京大学出版会 (2002).
- [16] 藤田和夫 : 日本の山地形成論. 今西錦司博士古稀記念論文集 I, 中央公論社 pp.85-140 (1976).
- [17] 活断層研究会 : 新編日本の活断層ー分布図と資料ー. 東京大学出版会 (1991).
- [18] 日本第四紀学会編 : 日本第四紀地図 I, 地形・地質・活構造図(1/100 万). 東京大学出版会 (1987).
- [19] 200 万分の 1 活断層図編纂ワーキンググループ : 「200 万分の 1 日本列島活断層図」ー過去数十万年間の断層活動の特徴ー. 活断層研究, **19** 3-12 (2000).
- [20] 中田 高, 今泉俊文 : 活断層詳細デジタルマップ (CD-ROM 版). 東京大学出版会 (2002).
- [21] 野原 壯, 郡谷順英, 今泉俊文 : 活断層 GIS データベースを用いた地殻の歪速度の推定. 活断層研究 **19**, 23-32 (2000).
- [22] 鷺谷 威 : GPS データを用いた地殻変動解析手法に関する研究. 核燃料サイクル開発機構, TJ7400 2004-010 (2004).
- [23] 徳山英一, 本座栄一, 木村政昭, 倉本真一, 芦寿一郎, 岡村行信, 荒戸裕之, 伊藤康人, 徐 垣, 日野亮太, 野原 壯, 阿部寛信, 坂井真一, 向山建二郎 : 日本周辺海域中新世最末期以降の構造発達史. 海洋調査技術 **13**, 27-53 (2001).
- [24] 第四紀火山カタログ委員会編 : 日本の第四紀火山カ

- タログ (CD-ROM ver.1.0). 日本火山学会 (1999).
- [25] 宇井忠英, 荒牧重雄, 梅田浩司, 河内晋平, 小林哲夫, 小山真人, 佐藤博明, 高橋正樹, 千葉達朗, 津久井雅志, 林信太郎, 湯佐泰久: 日本の第四紀火山カタログ. 火山 **44**, 285-289 (1999).
- [26] 大口健志, 吉田武義, 大上和良: 東北本州弧における新生代火山活動域の変遷, 地質学論集 **32**, 431-455 (1989).
- [27] 横瀬久芳, 菊池 航, 長尾敬介, 小玉一人: 九州南部矢筈岳火山岩類の K-Ar 年代. 岩鉱 **93**, 151-161 (1998).
- [28] 大場 司, 梅田浩司: 八幡平火山群の地質とマグマ組成の時間-空間変化. 岩鉱 **94**, 187-202 (1999).
- [29] 梅田浩司, 中司 昇, 湯佐泰久: 地質環境の長期安定性: 火山活動について. 日本原子力学会 1998 年秋の大会, p.829 (1998).
- [30] Ohmori, H.: Relief structure of the Japanese mountains and their stages in geomorphic development. *Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo* **10**, 31-85 (1978).
- [31] 藤原 治, 三箇智二, 大森博雄: 日本列島における侵食速度の分布. サイクル機構技報 no.5, 85-93 (1999).
- [32] 藤原 治, 柳田 誠, 佐々木俊法, 三箇智二: 日本列島の地滑り地形分布図-地形・地質との関連-. 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 Y028-P001 (2002).
- [33] 矢野雄策, 村岡洋文: 坑井データベースシステム. 地質調査所報告 no.265, 169-190 (1986).
- [34] 矢野雄策, 田中明子, 高橋正明, 大久保泰邦, 笹田政克, 梅田浩司, 中司 昇: 日本列島地温勾配図(1: 3,000,000). 地質調査所 (1999).
- [35] 田中明子, 矢野雄策, 笹田政克, 大久保泰邦, 梅田浩司, 中司 昇, 秋田藤夫: 坑井の温度データによる日本の地温勾配値のコンパイル. 地質調査所月報 **50**, 457-487 (1999).
- [36] 坂川幸洋, 梅田浩司, 鈴木元孝, 梶原竜哉, 内田洋平: 日本の坑井温度プロファイルデータベース. 地震第2輯 **57**, 63-67 (2004).
- [37] 浅森浩一, 梅田浩司, 石丸恒存, 小松 亮: 温泉地化学データベースの作成. 核燃料サイクル開発機構 TN7450 2002-003 (2003).
- [38] 浅森浩一, 石丸恒存, 岩月輝希: 日本列島における火山周辺の酸性地下水分布. サイクル機構技報 no.15, 103-117 (2002).
- [39] 野田徹郎, 高橋正明: 地熱系に関与する起源水の地球化学的分類とその意義. 地球化学 **26**, 63-82 (1992).
- [40] 原子力発電環境整備機構: 概要調査地区選定上の考慮事項. 高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募関係資料-3 (2002).
- [41] 原子力安全委員会: 高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について. (2002).
- [42] 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会: 高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて. (2003).
- [43] 小出 仁: 放射性廃棄物地層処分と地質長期未来予測. 地質ニュース no.449, 51-54 (1992).
- [44] 田中和広・千木良雅弘: 我が国の地質環境の長期的変動特性評価(その1)-将来予測の基本的考え方と課題-. 電力中央研究所報告 U96027 (1997).
- [45] 高田圭太, 中田 高, 野原 壯, 原口 強, 池田安隆, 伊藤 潔, 今泉俊文, 大槻憲四郎, 鷺谷 威, 堤 浩之: 震源断層となりうる活断層とリニアメントの検討-中国地方を事例として-. 活断層研究 **23**, 77-91 (2003).
- [46] 野原 壯, 木下博久: 鳥取県西部地震と地質環境の長期安定性. 月刊地球 **26**, 372-377 (2004).
- [47] 梅田浩司・上原大二郎・小川康雄・工藤 健・角田地文: 広帯域MT法による紀伊半島の中新世珪長質火成岩体の深部構造. 火山 **48**, 461-470 (2003).
- [48] 梅田浩司, 浅森浩一, 及川輝樹, 角田地文, 趙 大鵬, 鎌谷紀子: 前弧域の非火山地帯における高温異常域について-紀伊半島中〜南部の地殻・マントル構造と温泉ガスのヘリウム同位体比-. 月刊地球 **26**, 407-413 (2004).
- [49] 山口正秋, 須貝俊彦, 藤原 治, 大森博雄, 鎌滝孝信, 杉山雄一: 濃尾平野ボーリングコア解析にもとづく完新統の堆積過程. 第四紀研究 **42**, 335-346 (2003).
- [50] 古澤 明: RIPL 法により由布岳火山周辺のテフリックレスから見いだした火山活動. 地質雑 **110**, 19-37 (2004).
- [51] 梅田浩司, 古澤 明: RIPL 法によるテフラ降灰層準の認定と最新の噴火活動の推定. 月刊地球 **26**, 395-400 (2004).
- [52] 梅田浩司, 小松 亮, 棚瀬充史, 湯佐泰久: 西南日本領家帯(四国), 高浜花崗岩類の冷却史-特に新第三紀貫入岩類による熱的影響-. 岩石鉱物科学 **30**, 17-27 (2001).
- [53] Nogami, M., Fujiwara, O. and Sanga, T.: Simulation of a small drainage basin during the future of 120,000 yrs. *Trans. Jap. Geomorph. Union* **24**, pp.105-106 (2002).
- [54] Martin, A. J., Takahashi, M., Umeda, K. and Yusa, Y.: Probabilistic methods for estimating the long-term spatial characteristics of monogenic volcanoes in Japan. *Act. Geophysica. Polonica*. **51**, 271-289 (2003).
- [55] Martin, A. J., Umeda, K., Connor, C. B., Weller, J.N., Zhao, D., Takahashi, M.: Modeling long-term volcanic hazards through Bayesian inference: An example from the Tohoku volcanic arc, Japan. *J. Geophys. Res.* **109**, B10208, doi: 10.1029/2004JB003201 (2004).
- [56] 岩月輝希, 村上由記, 長沼 毅, 濱 克宏: ウラン鉱床の長期保存に関わる岩盤の酸化還元緩衝能力-東濃地域における天然環境の水-鉱物-微生物システ

ムの研究例ー. 地球化学 **37**, 71-82 (2003).

- [57] Iwatsuki, T., Arthur, R. C. Ota, K. and Metcalfe, R. : Solubility constraints on uranium concentrations in groundwaters of the Tono uranium deposit, Japan. *Radiochimica et Cosmochimica* (2005, in press).
- [58] Arthur, R.C. Iwatsuki, T., Sasao, E., Metcalfe, R., Amano, K., & Ota, K. : Geochemical constraints on the long-term stability of the Tono uranium deposit, Japan. *Geochemistry: exploration, environment, analysis* (2005, in press).
- [59] Sasao, E., Ota, K., Iwatsuki, T., Niizato, T., Arthur, R.A., Stenhouse, M.J., Zhou, W., Metcalfe, R., Takase, H., & Mackenzie, A.B. : An overview of natural analogue study in the Tono uranium deposit, Japan. *Geochemistry: exploration, environment, analysis* (2005, in press).
- [60] Metcalfe, M., Takase, H., Sasao, E., Ota, K., Iwatsuki, T., Arthur, R. A., Stenhouse, M. J., Zhou, W., & Mackenzie, A. B. : A System model for the origin and evolution of the Tono uranium deposit, Japan. *Geochemistry: exploration, environment, analysis* (2005, in press).
- [61] 伊藤貴司, 牧野仁史, 若杉圭一郎, 内田雅大, 石原義尚, 辻本恵一 : 地層処分研究の技術情報統合システムの構築(その1)ー研究開発の連携支援への取り組みー. 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集 p.878 (2003).
- [62] 熊澤峰夫, 國友孝洋, 横山由紀子, 中島崇裕, 鶴我佳代子 : アクロス : 理論と技術開発及び将来展望. サイクル機構技報 no.9, 115-129 (2000).

