総説

高レベル放射性廃棄物の地層処分と 我が国の地質環境*

清水和彦¹ 瀬尾俊弘² 吉田英一³

Geological Disposal of High-level Radioactive Waste and Geological Environment in Japan

by Kazuhiko SHIMIZU^a, Toshihiro SEO^b and Hidekazu YOSHIDA^c

- a. General Manager, Neotectonics Research Group, Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute, 959-31, Jorinji, Izumi-cho, Toki-shi 509-5102, Japan
b. Nuclear Cycle Backend Division, Japan Nuclear Cycle Development Institute (now, Deputy Manager, Science and Technology Division, Nuclear Waste Management Organization of Japan)
c. Nuclear Cycle Backend Division, Japan Nuclear Cycle Development Institute (now, Associate Professor, Material Research Section, Nagoya University Museum)

The geological environment has two main functions in terms of ensuring the safety of geological disposal of high-level radioactive waste. One relates to the fundamental long-term stability of the site and the other to the properties of the host rock formations and groundwaters which facilitate the emplacement of the engineered barrier system and act as a natural barrier. In this connection, the feasibility of selecting a geological environment in Japan which is appropriate for geological disposal was discussed, based on findings obtained from case studies and field measurements.

Considering long-term stability of the site, it is important to understand the effects and spatial distributions of the natural phenomena such as fault movement, volcanic activity, uplift/denudation and climatic/sea-level changes. Fault movement and volcanic activity are relatively localized phenomena, and can be avoided by considering only areas that are sufficiently remote from existing volcanoes and major active faults for these phenomena to have a negligible probability of causing significant effects. Uplift/denudation and climatic/sea-level changes are gradual phenomena and are more ubiquitous. It is, nevertheless, possible to estimate future trends by extrapolating the past changes into the future, and then to identify areas that may not be affected significantly by such phenomena.

Considering the properties of the host rocks and groundwaters, it can be understood, from the presently available data, that deep groundwater in Japan generally flows slowly and its chemistry is in a reduced state. The data also suggest that deep rock masses, where the ground temperature is acceptably low and the rock pressure is almost homogeneous, are widely located throughout Japan.

Based on the examination of the geological environment in Japan, it is possible to discuss the requirements for the geological environment to be considered and the investigations to be performed during the site selection procedure.

KEY WORDS : Geological Disposal, Geological Environment, High-level Radioactive Waste

はじめに

原子力発電によって発生する使用済み燃料には、高いレベルの放射能が含まれている。これをいかに処分するかが、原子力の平和利用を推進するうえでの重要な課題となっている。過去には、宇宙処分や氷床下処分などを含むいくつかのオプションが検討されたが、現在では各国ともに、一定期間、貯蔵管理した後に最終的には地下の岩盤中に処分（地層処分）する方法を目指して研究開発を進めている。

我が国では、エネルギーセキュリティの観点から、使用済み

燃料を化学的に処理してプルトニウムやウランを回収（再処理）し、再び燃料として使用すること（核燃料のリサイクル）が原子力利用の基本方針となっている。また、再処理した後に残った廃液（高レベル放射性廃液）については、これを安定な状態にガラス固化し、30～50年の間冷却のために貯蔵した後に、地下300m以深に地層処分する方針である。

地層処分の概念は、地下深部の岩盤中に廃棄物を埋設することにより、長期にわたって人間の生活環境から隔離し、将来の世代にも廃棄物による影響が及ばないようにすることである。地層処分された廃棄物が人間やその生活環境（以下、人間環境）に影響を及ぼす可能性としては、大別して、2つの道筋（シナリオ）が想定される。

ひとつは、廃棄物と人間環境との物理的な距離が接近することによって、廃棄物の影響が人間に及ぶことを想定したもので、これに至る道筋を「接近シナリオ」と呼んでいる。このシナリオにおいては、火山の噴火による廃棄物の放出や地盤の急激な隆起・

* 2001年4月6日受付 6月26日受理

1. 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 地質環境長期予測研究グループリーダー
2. 核燃料サイクル開発機構 バックエンド推進部(現 原子力発電環境整備機構 技術部サイト調査・評価グループ 課長代理)
3. 核燃料サイクル開発機構 バックエンド推進部(現 名古屋大学助教授 博物館資料分析系)

[著者連絡先] FAX 0572-55-0180 (サイクル機構・東濃)

キーワード: 地層処分, 地質環境, 高レベル放射性廃棄物

侵食に伴う処分場の露出などが想定される。

もうひとつは、廃棄物から漏洩した放射性核種が地下水を介して人間環境へ運ばれることを想定したもので、これに至る道筋を「地下水シナリオ」と呼んでいる。このシナリオにおいては、核種の溶解などを支配する化学的な反応と地下水の動き、およびそれらに伴う核種の移行が重要なプロセスとなる。

このようなシナリオとして想定される廃棄物による影響が、長期にわたって人間環境に及ばないようにするため、地層処分においては、火山活動や地殻変動などの影響が小さい安定な地域や岩盤を選定したうえで、そこに適切な多重バリアシステム（人間が作り上げる「人工バリア」の安全防護機能と地質環境が本来的に備える「天然バリア」としての隔離性・包蔵性を最適に組み合わせた多層の防護システム）を構築するという対策がとられる。具体的には、ガラス固化した廃棄物（ガラス固化体）を金属製の容器（オーバーパック）に密封したうえで、岩盤の空洞内に粘土（緩衝材）で包み込んで埋設することが考えられている。

また、地層処分の長期的な安全性については、上記のシナリオをさらに具体化していくつかのケースを設定したうえで、各ケースにおいて想定される影響をモデルとデータを用いたシミュレーション解析によって評価する。すなわち、多重バリアシステムを構成する地質環境（岩盤と地下水）、人工材（ガラス、オーバーパック、緩衝材）および放射性核種（核分裂生成物や超ウラン元素）の性質や挙動を、フィールド調査や室内実験などに基づく適切なデータとモデルで表現し、これらを用いて長期間にわたる放射性核種の移行や人間環境への影響を数値解析によって評価する。

以下、このような地層処分における安全確保の仕組みと我が国の地質環境の特徴を対比させながら、地層処分に適した地質環境が我が国に存在する可能性を検証する。なお、本稿で紹介する情報は、地層処分研究開発第2次取りまとめ（サイクル機構、1999）による。

1. 地層処分と我が国の地質環境

1・1 地層処分にとって重要な地質環境条件

地層処分による安全確保の仕組みにおいて、地質環境には、ま

図1 地層処分において考慮すべき天然現象(a)と地下水および岩盤中の現象・作用(b)。処分場の位置・形状など、すべて概念的な例示（サイクル機構、1999より）

ず処分場として確保した場所が長期にわたって十分に安定であること（地質環境の長期安定性）、次いで人工バリアの設置環境および天然バリアとして、岩盤とそこに含まれる地下水の物理的・化学的性質（地質環境の特性）が適切であることが要求される。ここで、地層処分の場として具体的に着目しているのは、

- ・日本列島およびその周辺海域における、
- ・深度数百mから1,000m程度までの、
- ・数km四方の水平的広がりを持つ、

岩盤である。

地質環境の長期安定性に関しては、地下深部の地質環境に影響を及ぼす可能性のある天然現象に着目し、それらの特徴や影響の程度を把握することが重要である（図1(a)）。処分地の選定に際しては、地質環境に急激な変化や累積的な変化をもたらす天然現象によって、多重バリアシステムの性能が著しく損なわれることのないような場所を選ぶことが前提となる。そのうえで、人工バリアの設置環境として重要な岩盤の熱や力学に関する特性および地下水の動きや水質に着目する必要がある（図1(b)）。また、天然バリアの機能としては、これらに加えて、岩盤中での地下水を媒体とする物質の移動・遅延が重要となる。地層処分の実施に際しては、このような地質環境の特性を十分に把握したうえで、それに応じて人工バリアや処分施設を設計・施工することにより、多重バリアシステムとしての最適化が図られる。

1・2 日本列島の地質学的な特徴

地層処分の観点から我が国の地質環境を理解するうえで、まず日本列島の特徴を把握しておくことが重要である。

日本列島は、大陸から続くプレート（ユーラシアプレートと北米プレート）の縁辺部にある弧状列島であり、太平洋側から2つの海洋プレート（太平洋プレートとフィリピン海プレート）が、日本列島の下に沈み込んでいる（図2）。このような日本列島周辺におけるプレートの配置やその運動様式に支配されて、列島上には火山地域が帯状に分布し、また、活発な断層活動や隆起・沈降運動が認められる。これが、とくに安定大陸にある欧米諸国と比較した、日本列島の第一の特徴である。

このような天然現象の活動を背景とした日本列島の特徴は、これを構成する地形や地質にも現われている。山地が多く起伏に富む地形、数多くの火山とその噴出物の広い分布、様々な種類の地

図2 日本列島周辺のプレート配置と第四紀火山の分布。日本列島における第四紀火山は、太平洋プレートとフィリピン海プレートが沈み込むライン（海溝）と並行するように帯状に配列している。（サイクル機構、1999より）

図3 わが国の地形と地下水
(サイクル機構, 1999 より)

層や岩体が構成する複雑な地質は、我が国の地質環境を理解するうえで考慮すべき重要な特徴といえる。

そのほか、比較的温暖な気候や豊富な降水量、周囲を海に囲まれた島国であるといった地理的条件も、とくに地下水の動きやその化学的な性質をとらえるうえで重要である。我が国では一般に地下水の水位が高く、岩盤は地表付近まで地下水に満たされている。また、沿岸地域では、内陸から運ばれてきた降水を起源とする地下水が海に流出し、そこに淡水と塩水の境界領域ができる(図3)。

1・3 地質環境条件の調査研究

第2次取りまとめに向けた地層処分の研究開発においては、対象とする地域や岩石の種類を特定せずに幅広く進めることが、国の方針であった(原子力委員会, 1984, 1994)。

これを踏まえ、サイクル機構では、我が国の岩石および地下水の性質や主要な天然現象の特徴などを広く理解する観点から、地球科学の各分野に蓄積されている情報の収集と分析を進めてきた。ただし、既存の情報の多くは地層処分の観点から取得されたものではないため、地下深部における地下水の動きや水質、あるいは岩盤中での物質の移動に関する精度の高い情報は限られている。このため、深部地質環境に対する理解を深めていくことを目標に、地層処分研究開発の基盤となる科学的な研究(地層科学研究)として、岐阜県の東濃地域および岩手県の釜石・鉾山において、地下坑道やボーリングなどを利用した研究を実施してきた。

また、地層科学研究のもうひとつの柱として、地質環境の長期安定性にとって重要な天然現象の活動の特徴や地質環境への影響などを把握することを目指し、現地調査や年代測定を主体とした事例研究を進めてきた。

地層科学研究を基盤としつつ、我が国の地質環境を幅広くとらえて進めるべき、ジェネリックな研究開発においては、以下の2点が地質環境に関する研究の大きな課題となる。

①深部地質環境に影響を及ぼす可能性のある天然現象について、現在の地形や地質に残された記録などを整理・分析することにより、過去の活動にみられる傾向や地域性に基づいて将来の活動を類推し、地層処分にとって十分に安定な地質環境が我が国に存在する可能性を示す。

②我が国の地質環境を幅広くとらえたうえで、地球科学や土木工学などの分野に蓄積されている情報を整理・分析し、また、東濃地域や釜石・鉾山で得られる実測データとあわせて比較・検討することにより、地層処分にとって重要な岩盤および地下水の一般的な性質を示す。

2. 我が国における地質環境の長期安定性

2・1 地質環境の長期安定性と天然現象

処分システムが所期の安全性能を発揮するためには、地層処分の場となる地質環境が、期待される環境条件や機能を長期にわたって維持することが必要である。そのためには、地質環境に変化をもたらす様々な天然現象によって、処分システムの性能が著しく損なわれることのないよう、十分に安定な場所を選び、また

想定される変化を見込んで適切な工学的対策を施すことが重要である。前述したような我が国の地質学的な特徴を踏まえて、また諸外国の例を参考に検討した結果、我が国で考慮すべき重要な天然現象として、①断層活動、②火山活動、③隆起・侵食および④気候・海水準変動が抽出された。

2・2 将来予測の考え方

将来における天然現象の活動を評価するための基本的な手法は、過去を踏まえた外挿である。各天然現象の過去における活動パターンや変動サイクル、あるいはそれらの時間的・空間的な変化を理解することにより、過去から現在に継続する変化の延長として将来の姿が類推される。現在の地質や地形に残された過去の天然現象の活動履歴を追跡していけば、過去から現在までの変化の中に一定の傾向や規則性を見出すことができ、これに基づき将来における天然現象の活動の可能性や変動の規模などを推測することができる。

地層処分の安全性を評価すべき時間枠については、現在のところ具体的な数字は設定されていない(原子力安全委員会, 2000)。ただし、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記録を基に、将来数十万年程度の変化を検討することが期待されている(原子力委員会, 1997)。地球の歴史の中で最も新しい地質時代である第四紀(約170万年前～現在)、とくに最近の数十万年程度については、過去における天然現象の活動の痕跡が現在の地質や地形に比較的良好に保存されており、年代に関する情報も豊富である。したがって、過去数十万年程度については、その間の天然現象の活動履歴を、高い精度と分解能で議論することができる。また、プレートの配置やその相対運動が支配する日本列島のテクトニクス場において、地殻の応力状態などの変動は、数十万～数百万年という地質学的な時間の中で、一定の傾向を保ちつつ進行していく(十万年程度の間に、その傾向が急激に変化するようなものではない)。過去数十万年程度の記録をもとに、将来数十万年程度における天然現象の活動を検討することは、地球科学的に妥当なアプローチといえる。

2・3 安定な地質環境の存在

地質環境の長期安定性に影響を及ぼす可能性のある天然現象については、現象の種類や地域によって得られる情報の量や精度に違いはあるものの、おおむね過去数十万年まで遡って、活動の場所や変動の規模を追跡することができた。また、天然現象によっては、過去数百万年にわたる活動の特徴や傾向を推定することができた。これらの結果に基づけば、十万年程度の将来にわたって、天然現象の活動やその影響が十分に小さいと期待できる場所(安定な地質環境)を見い出していくことは可能である。

すなわち、火山活動や断層活動は、過去数十万年以上の間、限られた地域内で繰り返し起こっており、将来にわたって活動が起こりそうな場所やその影響範囲を限定することができる。したがって、主要な影響範囲から十分に離れて、あるいは軽微な影響であれば、それを考慮して処分場を設計することが可能である。また、日本列島における火山や活断層の分布およびそれらの影響に関する現状の知見によれば、火山活動および断層活動による影響が十分に小さいとみなせる地域は、我が国の広い範囲にわたって存在している(4・1の(1)参照)。

一方、隆起・侵食や気候・海水準変動については、過去の変動に規則性が認められることから、これを外挿することにより、将来における変動の速度や幅が推定できる。したがって、一部の変動の著しい地域を避けたうえで、個々の地域で想定される変動の程度を考慮して、処分場の深度などを設計することが可能である。

安定な地質環境の存在やその選定の方法を検討する観点から、

図4 逆断層の地下構造(千屋断層の例)。反射法地震探査の結果に基づいて推定された地質断面図(佐藤ほか, 1998を一部改変)

各天然現象について得られた主な知見を以下にまとめる。

(1) 断層活動 断層活動による処分システムへの影響としては、岩盤の破断・破砕やこれに伴う地下水移行経路の形成などが想定される。このうち、岩盤が広範囲にわたって破断・破砕されるような場所、すなわち主要な活断層の近傍は、処分地の選定に際して避けるべきである。

我が国における主な断層活動は、過去数十万年程度にわたり、既存の活断層帯(近接あるいは断続する複数の活断層によって構成される一連の活断層系からなるゾーン)において同様の活動様式で繰り返し起こっており、この間、地殻応力場はおおむね安定して持続してきたとみなすことができる。このことから、十万年程度の将来については、現在までと同様の活動が継続するものとして、断層活動を評価することが妥当と考えられる。我が国における主な活断層の分布はおおむね把握されているが、とくに広い沖積平野など伏在活断層の存在が考えられる地域や海域などについては、ボーリングや物理探査などを用いた地下構造調査によって、活断層の有無や分布を確認する必要がある。

断層活動によって岩盤が破断・破砕された領域(断層破砕帯)の幅は一般に数〜数十 m で、最大でも 500 m 程度である。ただし、大規模な断層では両側 2 km 程度にわたって、断層の生成過程で生じたと思われる変位や小断層が認められる例もある(恒石, 1984; 高木ほか, 1989)。また、一部の逆断層帯では、断層面が数 km にわたって移動したことも報告されている(図4)。地層処分の実施に際しては、個々の活断層について、このような影響の程度と範囲を人工バリアの変形性能や処分施設の設計との関係で評価し、処分場の位置やレイアウトを検討する必要がある。なお、断層活動に伴う地震動については、そもそも地下深部での影響は小さく(Shimizu et al., 1996)、十分な設計対応が可能である。

(2) 火山活動 火山活動による処分システムへの影響としては、マグマの貫入・噴出による廃棄体の破壊や地表への放出、マグマからの放熱や地下水への熱水・火山ガスの混入などが想定される。これらの現象、とくにマグマの貫入・噴出などが起こりそうな地域は、処分地の選定に際して避けるべきである。

我が国における火山活動は、プレートの配置やその沈み込み角度などに支配された顕著な偏在性を有する。とくに、第四紀においては、火山活動の場に大きな変化は認められず、新たな火山の形成や活動の休止・再開、あるいは噴出位置の移動を伴いながらも、限定された地域内において活動が繰り返されている(図5)。したがって、十万年程度の将来については、このような過去百万年以上にわたって継続している活動の延長として、火山活動の場を評価することが妥当と考えられる。なお、第四紀よりも古い時代の火山噴出物の分布によれば、過去数百万年以上にわたって、日本列島における火山活動の場は大局的に変わっていない。このことは、数百万年の時間スケールにおいても、日本列島のテクトニクスは大きくは変わらなかった(プレート沈み込みの方向や速度などが多少変化しても、火山活動の場を大きく変えるほどでは

図5 第四紀火山の時空分布(北海道の例)。過去200万年間にわたって、我が国における火山活動は、新たな火山の形成や活動の休止・再開を伴いながら、同じ地域内で繰り返し起こっている。(サイクル機構, 1999より)

なかった)ことを意味している。その一方で、現在も海底の拡大や新たなプレートの沈み込みなどが生じている地域もある。そのような地域では、将来における火山活動やそのほかの天然現象について、慎重な検討が必要となる。

火山の周辺では、地下に存在するマグマや高温岩体からの熱による地温の上昇、あるいは揮発成分の混入による地下水の水質変化などが起こっている。全国規模の地温勾配図(矢野ほか, 1999)やいくつかの火山地域での事例研究(梅田ほか, 1999など)によれば、そのような影響が及ぶ範囲は、火山の噴出中心から数〜20 km 程度までである。個々の地域においては、このような火山活動による影響の程度と範囲を人工バリアの熱特性や処分施設の設計との関係で評価し、適切な距離を確保することが重要である。

(3) 隆起・侵食 隆起・侵食による処分システムへの影響としては、処分場の露出が、まず心配される。処分地の選定に際しては、隆起・侵食の規模や速度を地域ごとに評価したうえで、変動の激しい地域については、活断層や火山と同様に、避けるべきである。露出には至らなくても、時間の経過とともに処分場の深度や地表部の状況は変化する。このような影響に対処するには、予想される隆起・侵食の程度を考慮して、十分な深度に廃棄体を埋設することが重要である。

隆起(沈降)運動は、時間の経過とともに累積していく現象であり、日本列島における山地や平野の形成は、広域的な隆起や沈降が長期にわたって継続した結果とみなすことができる。日本列島における隆起(沈降)は、主にプレート運動に起因する地殻応力場に対応して、地域ごとに一定の傾向に沿って累積している(貝塚ほか, 1995; 太田ほか, 1996)。このような変動の傾向は、地域差はあるものの、少なくとも過去数十万年を通じて継続しており、今後も同様に継続していくと考えられる(図6)。したがって、十万年程度の将来については、地域ごとの特徴を踏まえて過去の変動を外挿することにより、想定すべき変動量を設定することができる。過去の変動量は段丘面の高度変化などから推定されており、一部の山岳地帯や半島先端部を除く多くの地域で、長期

図6 海岸段丘の形成年代と隆起量（四国南部の例）。隆起量は、現在の高度から形成当時の海面高度を差し引くことにより求めた。各地の海岸段丘は、過去数十万年にわたって、ほぼ一定の速度で隆起している。このような傾向は、ほかの多くの地域でも認められる。四国南部で同時期に形成された段丘の隆起量（現在の高度）が異なるのは、地震に伴う隆起によって、海から陸側への傾動が生じているためである。（サイクル機構，1999より）

的な隆起の速度は50 m/十万年以下である（小池・町田編，2001）。

一方、侵食については、ダムの堆砂量や段丘などの地形面を刻む谷の容積などから、その速度が推定されている（藤原ほか，1998；宮脇・藤原，1997）。これらによれば、山地の中心部では侵食速度が年間1 mmを超えるところも多いが、丘陵や平野の大部分では年間0.5 mm以下であり、沈降している地域もある。なお、河川においては、後述する氷期－間氷期の気候変動サイクルに対応して、河床の侵食と埋積を繰り返しつつ、次第に河床が下刻されていく。過去数十万年間の平均的な下刻の速度は河川ごとにほぼ一定で、その地域の隆起速度を反映している（高木ほか，1998）。十万年当たりの平均的な下刻量は、一般に数十mであるが、中部山岳地帯では200 mに達する例も報告されている（吉山・柳田，1995）。

以上のように、隆起・侵食については、個々の地域における変動量がおおむね推定できるため、一部の山岳地帯や半島先端部などの変動の著しい地域を避けたうえで、予想される影響を考慮して処分場を設計し、その妥当性を性能評価により確認することができる。

(4) 気候・海水準変動 気候・海水準変動による処分システムへの影響としては、表層での水収支の変化や海水準の変動に伴う地下水の流動と水質の変化、および侵食速度の変化が想定される。また、寒冷化に伴う山岳氷河の発達や岩盤の凍結などの影響が考えられる。

地球規模での気候・海水準変動については、過去数十万年以上にわたる、約十万年周期の氷期－間氷期サイクルが確認されており、その間、海水準は現在に比べて+数m～-120 m程度の範囲内にあったことが、海底堆積物中の酸素同位体比の変化や海岸段丘の高度などから解析されている（Shackleton, 1987; Chappell, 1994; Uemitsu, 1991）。

日本列島周辺における年平均気温は、現在比にして、-8℃から+2～3℃の範囲で変動し、また、氷期における年降水量は、現在の5～7割程度であったと推定される（動燃事業団，1996）。現在は間氷期のピークを少し過ぎた時期にあり、氷期－間氷期サイクルに従えば、今後7～8万年程度の間は、地球全体が次第に寒冷化し、海水準は低下していくと予想される。

以上のように、気候・海水準変動については、将来に想定される変化の幅が見込めるので、その影響を解析的に評価することができる。その際、地球温暖化などの二次的、短期的な変動を、感度解析などにより包含して評価することも可能である。

3. 我が国における地質環境の特性

3・1 多重バリアシステムと地質環境の特性

多重バリアシステムを基本とする地層処分の安全確保において、地質環境には、人工バリアにとって適切な設置環境を提供するとともに、それ自体が天然バリアとして機能することが求められる。このうち、人工バリアの性能にとっては、地質環境中での物質の溶解や運搬を支配する地下水の動きとその地球化学的な特性が重要である。オーバーパックの腐食やガラスおよび核種の溶解を抑制する観点からは、地下水が還元的でその動きが遅いことが好ましい条件となる。また、人工バリアの設計・施工にとっては、岩盤の熱および力学に関する特性が重要であり、地下空洞の安定性や温度環境を維持する観点から、地圧および地温が低く異方性が少ないことが好ましい条件となる。これらは、岩盤自体の強度や熱伝導性などの物性とあわせて評価する必要がある。一方、天然バリアの機能にとっては、岩盤中における地下水を媒体とする物質の移動・遅延に關与する空隙の構造や化学的な性質が重要である。

以上のように、多重バリアシステムにとって重要な地質環境の特性は、①地下水の流動特性、②地下水の地球化学特性、③岩盤の熱特性・力学特性、④岩盤中での物質移動特性として、とらえることができる。

3・2 深部地質環境の一般的な特性

多重バリアシステムにとって重要な地質環境特性については、これまでの調査研究により、我が国における一般的な傾向を概略的に把握するとともに、それらに基づき、人工バリアの設置環境や天然バリアとしての機能を検討し得るとの見通しを得た。すなわち、我が国の深部地下水は一般に動きが遅く還元的な状態にあると考え得ることや、地温が十分に低く地圧も均等に近ような深部岩盤が我が国にも広く存在し得ることなどが確認できた。

地下深部の地質環境の特性について、これまでに得られた主な知見を以下にまとめる。

(1) 地下水の流動特性 岩盤中に含まれる地下水の動きは、主に動水勾配と岩盤自体の透水性に支配されている。このうち、動水勾配は地形に依存するが、地下深部ほど局所的な地形の影響が少ないため、地表付近に比べて動水勾配は緩やかになる。また、地下深部の岩盤は、一般に地表付近に比べて新鮮で（風化・変質が少ない）、また封圧が大きいので、割れ目などの空隙が少なく水を通しにくいと考えられる。

全国各地の井戸データ（日比谷ほか，1999など）から地表付近の動水勾配（地下水面の勾配）を求めた結果によれば、地表付近の動水勾配は地形勾配に強く支配されており、低地（0.008）、台地（0.016）、丘陵地（0.035）、山地（0.061）の順に大きくなる（カッコ内の数字は、各地形ごとの平均値）。一方、東濃地域における深層ボーリングでの実測結果によれば、地下深部の動水勾配は、地表付近の地下水面の勾配に比べて明らかに小さい（図7）。

岩盤の透水性については、土木工学などの分野で蓄積されている文献データと東濃地域および釜石・釜山で得られた地下深部についての実測データとの比較・検討を行った。その結果によれば、岩盤の透水性は岩石の種類や場所によって異なるが、断層破砕帯や割れ目集中帯を除くと、地下深部の岩盤としての平均的な透水係数は、おおむね $10^{-10} \sim 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ の範囲にある。

(2) 地下水の地球化学特性 地下水の水質は、起源となった

図7 動水勾配と深度の関係。東濃地域における2本のボーリング孔間で計測した結果。地下深部の動水勾配は地表付近に比べて緩やかになっている。
(サイクル機構, 1999より)

水の性質とその水と岩石との化学反応（溶解・沈殿やイオン交換など）によって形成される。我が国においては、海岸付近では海水起源の地下水、火山地域ではマグマの影響を受けた地下水の存在が考えられる。

降水を起源とする地下水については、東濃地域や釜石鉱山で得られた実測データに基づき、その地球化学特性を把握するとともに、水-岩石反応試験や化学平衡論による理論計算とあわせて、水質形成機構を検討した（図8）。降水を起源とする地下水の水質形成に寄与する主要な反応は、長石類や方解石の溶解、粘土鉱物と地下水とのイオン交換反応などである。これらの反応により地下水の水質は、地表付近で Na^+ 、 Ca^{2+} および HCO_3^- に富み、地下深部にいくに従って Ca^{2+} が減少して Na^+ 、 HCO_3^- が増加する。同時に、pHは酸性から弱アルカリ性に変化する。また、堆積岩では深度数十m、花崗岩では深度数百m程度で、還元性の地下水が形成されている。地下水の還元に寄与する反応としては、硫黄や鉄を含む鉱物との酸化還元反応および微生物による有機物の分解反応などが重要である（Iwatsuki and Yoshida, 1999など）。

一方、海水を起源とする地下水については、情報が限られているものの、沿岸地域での研究事例（Ii et al., 1997；亀井, 1997）から、地下深部での水質は Na^+ 、 Cl^- に富み、降水を起源とする地下水と同様の反応により還元状態にあると考え得る。

(3) 岩盤の熱特性・力学特性 岩盤の熱および力学に関する特性は、場としての条件（地温や応力の状態）と岩石自体の物性（熱伝導率や強度など）に分けられる。

地温については、深層ボーリングデータに基づく地温勾配の全国分布図が作成されている（矢野ほか, 1999）。これによれば、火山の周辺を除く大部分の地域で、地温勾配はおおむね $5^\circ\text{C}/100\text{m}$ 以下、平均的には $3^\circ\text{C}/100\text{m}$ 前後である。

初期応力に関しては、文献データと東濃地域および釜石鉱山での実測例との比較・検討を行った。その結果によれば、地下深部での鉛直応力は、ほぼ土かぶり圧に等しく、鉛直応力と水平面内の平均応力との比は地下浅部ではばらつくものの、深度が増すにしたがって1前後に近づく（Matsui et al., 1997）。

一方、岩石の主要な物性についても、土木工学などの分野に蓄積されている文献データを、東濃地域および釜石鉱山で得られた実測データとあわせて、岩種ごとに整理した。処分場を建設する際には、対象となる岩盤の物性やその場の応力状態などに応じて、レイアウトや施工方法の最適化が図られる。いずれにしても、我が国の多くの地域において、地下数百～1,000mの深度に処分場を建設することは、工学的に十分可能と考えられる。

図8 東濃地域における地下水の地球化学的变化。地下水の水質は、深度とともに Na-Ca-HCO_3 タイプから Na-HCO_3 タイプに変化する。この傾向は、堆積岩中の地下水および花崗岩中の地下水の各々で認められる。
(Iwatsuki and Yoshida, 1999より)

なお、東濃鉱山（新第三紀堆積岩）および釜石鉱山（白亜紀花崗岩）において、坑道掘削前後における岩盤物性の変化などを観測した結果、発破掘削によって周辺の岩盤の強度や透水性などが変化する範囲は、坑道壁面から1m程度までであった（杉原ほか, 1998など）。処分システムの設計・施工や性能評価においては、このような掘削影響領域に対して十分な注意が必要となる。

(4) 岩盤中での物質移動特性 地下水を媒体とする物質の移動については、地下水の動きだけでなく、濃度勾配によって物質が岩石のマトリクス中を拡散する現象や、鉱物の表面に吸着するような現象にも注目する必要がある。すなわち、岩盤中での物質移動特性を理解するためには、主要な移行経路となる地質構造要素に着目して、その物理的な構造と化学的な性質をとらえることが重要となる。

物理的な構造に関しては、従来より、多くの鉱山やトンネルでの経験から、花崗岩などの緻密な岩石では、岩盤中に発達した割れ目のネットワーク構造が支配的な移行経路となり、一方、大きな割れ目が発達しにくい新しい堆積岩では、粒子間の空隙が主要な移行経路となると考えられてきた。東濃鉱山および釜石鉱山での詳細な観察や試験では、これらに加えて、鉱物のへき開や鉱物中の微小割れ目などが、移行経路として重要な役割を果たすことが確認された（Yoshida, 1994）。また、花崗岩中に存在する透水性の割れ目表面から数十mm程度まで、マトリクス拡散が生じていることが実際に観察された（Ota et al., 1997）。

一方、化学的な性質としては、移行経路に存在する粘土鉱物および雲母や黄鉄鉱などの鉄含有鉱物は、石英、長石、方解石などに比べて、一般に物質を吸着する能力が高いことがわかっている。東濃ウラン鉱床でも、天然ウランは、黄鉄鉱などの鉱物粒子中の微小割れ目、雲母鉱物のへき開、炭質物の表面や粘土鉱物が充填したマトリクス中に濃集している（Yoshida et al., 1994）。

4. サイト選定と地質環境調査技術

4・1 サイト選定の要件

地層処分のためのサイトの選定は、2000年を目処に設立される処分事業の実施主体が行うこととされている。また、その選定プロセスについては、①処分候補地の選定、②処分予定地の選定および③処分地の選定の3つの段階が想定されており、処分予定地の選定段階には予備的調査が、また、処分地の選定段階には地下施設を利用したサイト特性調査が行われることとされている（原子力委員会, 1994）。一方、処分候補地の選定段階においては、文献による調査が主体となると考えられる。

なお、2000年5月に成立した「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」では、①概要調査地区の選定、②精密調査地区の選定および③最終処分施設建設地の選定の3つの段階が定められており、概要調査地区の選定段階には文献などによる調査が、精密調査地区の選定段階にはボーリングなどによる地上からの調査が、さらに、最終処分施設建設地を選定する段階には地下施設を利用した調査が行われることとされている。また、2000年10月には、この法律に基づき、実施主体である原子力発電環境整備機構が設立された。ただし、本稿に示す内容は、それ以前の検討に基づくものであるため、誤解を避ける意味で、ここでは「処分候補地の選定」、「処分予定地の選定」および「処分地の選定」という用語を使用する。

我が国の地質環境の特徴や諸外国の事例などに基づき、サイトを選定する際に考慮すべき地質環境上の要件として、以下の事項を整理した。

(1) 断層活動および火山活動によって処分システムの性能が損なわれないこと この要件を満たす場所は、活断層や火山が分布する地域から十分に離すことにより確保できる。我が国では、主要な活断層や第四紀の火山の分布が把握されており、処分候補地を選定する段階に、それらの影響範囲を見込んで距離を離すことが可能である。また、予定地選定の段階には、ボーリングや物理探査あるいは年代測定などの手法を用いて、活動の履歴や岩盤および地下水の性状を調べることで、影響の有無や程度を実際に確認できる。

具体的にどの程度の距離を離すかは、個々の活断層や火山によって、あるいは処分施設のレイアウトとの関係で、違ってくる。前述したような知見によれば、例えば少なくとも活断層周辺の幅10kmの範囲や火山の中心から半径30kmの範囲を除く領域では、断層活動および火山活動による影響は十分に小さいといえる(図9)。実際には、個々の活断層や火山の影響範囲は、概して、これらの数字よりも小さいと考えられる。

(2) 隆起・侵食によって廃棄物が地表付近に接近しないこと

この要件は、廃棄物を埋設する深度との関係において、廃棄物を隔離すべき期間に予想される隆起・侵食の規模が十分に小さい場所を選ぶことによって満足される。我が国では、隆起・侵食の地域的な傾向が把握されているため、処分候補地を選定する段階に、隆起・侵食が著しい地域をあらかじめ避けることができる。また、予定地選定の段階には、個々の地域の情報に基づいて、より詳細な分析が可能となる。その際には、気候・海水準変動の影響を加味することも必要である。

図9 主要な活断層の分布(線の幅は約10km)と第四紀火山の分布(円の半径は約30km)
(清水, 1999より)

図10 侵食速度が年間0.5mm以上の地域
(サイクル機構, 1999をもとに編集)

響を加味することも必要である。

どの程度の隆起・侵食であれば許容できるかは、隔離すべき期間と廃棄物の埋設深度および最終的に維持されるべき最小深度との関係で決まる。例えば、平野や丘陵の大部分では、侵食速度は0.5mm/年以下であるので、隔離すべき期間を10万年とすると、その間の累積侵食量は50m以下となる。このような場合には、数百mの深度に埋設すれば十分といえる(図10)。

(3) 岩盤の規模が十分で、地下資源が存在しないこと 対象とすべき岩盤が、必要な規模の処分施設を建設するうえで十分な空間的な広がりを持つことや、将来における人間侵入の動機となるような地下資源が存在しない場所であることも、重要な地質環境上の要件となる。これらの要件についても、地質図や鉱床分布図などの既存の情報に基づいて検討することが可能であり、現地調査の段階には実際に確認できる。

(4) 岩盤と地下水の性質が適切であること サイトの岩盤や地下水の特性は、地下施設を利用したサイト特性調査と、そこで得られるデータを用いた処分システムの設計や安全評価によって最終的に確認される。ただし、このようなサイトでの具体的なデータの取得に先立って、その地域の地質・地形的な特徴に基づき、岩盤と地下水の性質をある程度予測しておくことは可能である。また、サイト特性調査に入る前の予備的な調査として、ボーリングなどが実施できれば、サイトの岩盤と地下水の適性について相当の見通しを得ることができる。地下水の流量や酸化還元状態、地温、応力状態などは、人工バリアの設置環境として重要な地質環境条件であるため、サイト選定のできるだけ早い段階で確認しておくことが望まれる。

とくに設計上のクリティカルな要件となり得る地温については、深度を深くすることによって条件が厳しくなるため、許容できる地温を設定したうえでサイトを選ぶことが重要である。例えば、地温勾配が3℃/100m程度であれば、地下1,000m程度でも問題なく設計できることが確認済みである(サイクル機構, 1999)。また、そのような地域は、我が国に広く存在している(図11)。なお、3℃/100mを超えるような地温勾配に対して、設計上の対応をはかることも十分に可能であろう。

4・2 地質環境の調査

地質環境を対象とした調査は、処分候補地の選定から、処分予定地の選定、そして処分地の選定へと、段階的に進められていく。各段階での調査の内容や前後の段階との関係などについては、今後、安全規制の枠組みが整備されるにしたがって、具体的な検討がなされていくことになる。一般的には、概略的な調査から詳細な調査(すなわち、文献調査から始まって、地表踏査や地上での

図 11 地温勾配が 3℃/100m 以上の地域
(矢野ほか, 1999 をもとに編集)

物理探査, ボーリングによる調査, 地下施設を利用した調査)へと進展していくのが合理的である。ただし, 実際に現地での調査を進める際には, 文献調査で得られた情報に基づき, 具体的な調査計画が策定され, また, 調査計画の各段階ごとに, 事前解析などを通じて手法の最適化が図られる。その際には, たとえば, 一部のボーリングを地表踏査や物理探査に先行させるなど, 既存情報の充実度やサイトの特徴, あるいは社会的な制約などに応じた柔軟な対応が必要となる。

以下, 地質環境の調査を, 文献調査, 地上からの調査および地下施設を利用した調査に分けて, その内容について検討する(図 12)。文献調査は主に処分候補地の選定段階において, 地上からの調査は処分予定地の選定段階から処分地の選定段階(サイト特性調査)にわたって, また, 地下施設を利用した調査は, サイト特性調査の一環として実施される。

(1) 文献調査 文献調査では, 地層処分場として不適切な地域をあらかじめ除外しておく観点から, 以下のような項目について検討がなされる。

- ・断層活動: 活断層の分布・活動履歴・影響の程度と範囲, 地震活動など
- ・火山活動: 活動域の分布・活動履歴・影響の程度と範囲, 地熱の分布など
- ・隆起・侵食: 変動様式・速度, 気温・降水量・海水準の変化, 氷期の影響など
- ・岩盤の広がり: 地層や岩体の規模・深度, 大規模な構造線の分布など
- ・地下資源: 鉱物資源・エネルギー資源の分布など

我が国においては, 全国規模で詳細な地質図や各種の分布図が整備されているが, サイトによっては, 既存の情報だけでは十分な検討を行うことが困難な場合も予想される。文献調査の段階では, その時点で得られる情報の限りにおいて, 明らかに適性が劣ると判断されるサイトを除外することが重要である。

(2) 地上からの調査 地下施設を建設する前のサイトでの調査として, 空中および地表または海上からの物理探査, 地表踏査, ボーリング調査およびトレンチ調査などが実施される。これらの調査によって得られるサイトでの実際のデータに基づき, 文献調査によって検討した項目について再度, 吟味がなされる。とくに, 地層処分システムの機能を損なう可能性のある天然現象について, 最近の地質時代に活動または影響の痕跡がないこと, および将来, 活動するような徴候のないことなどを確認しておくことが重要となる。

図 12 地質環境調査フローの例
(サイクル機構, 1999 を一部改変)

また, この段階には, 地下深部の岩盤や地下水についての実測データが取得され, 多重バリアシステムの性能の観点から, サイトの適性が具体的に検討され始めることになる。すなわち, ボーリング調査などによって取得される実測データに基づき, サイトの地質構造, 地下水の流動特性と地球化学特性, 岩盤の熱特性・力学特性および物質移動特性が, 人工バリアの設置環境および天

然バリアとして適切な状態にあるかどうかを検討される。

空中からの調査には、人工衛星を利用したリモートセンシングや航空機を用いた空中物理探査がある。これらは、大規模な断層破碎帯や地質の分布などを大局的に把握するための手法として有効である。

地表からの調査では、まず地表踏査や地上物理探査が行われる。これらにより、空中からの調査では把握しにくい比較的小規模な断層や割れ目帯および地層や岩体の分布・性状などが把握される。また、地表水の分析や表層での水収支の観測などが実施される。

空中および地表からの調査では、比較的広域を対象とした概査から、対象領域をより限定した精査へと移行しつつ、得られる情報の分解能が高められていく。また、これらの調査によって得られた情報を基に、地下深部の情報を直接的に取得するためのボーリング調査が実施され、地表から地下深部までの地質構造などが総合的に解析されていく。

ボーリング調査では、地下深部の岩石や地下水が採取されるとともに、ボーリング孔を利用した地下水調査や物理探査、力学試験などが実施され、以下のような項目についての情報が取得される。

- ・地質構造：断層・割れ目帯の分布、岩質など
- ・地下水の流動特性：透水性、間隙水圧・動水勾配など
- ・地下水の地球化学特性：水質・pH・酸化還元電位、主要な水-岩石反応など
- ・岩盤の熱特性・力学特性：初期応力、地温、岩盤の諸物性
- ・物質の移行経路として重要な地質構造要素の物理的・化学的性質

得られた情報は、地下施設の設計や安全評価などにも活用可能な定量的な情報として、広域地下水流動、地球化学、岩盤力学などに関するモデルの作成に反映される。

(3) 地下施設を利用した調査 地下施設の建設を伴う調査段階においては、処分システムの設計および安全評価に必要なデータが包括的に整備される。とくに、坑道周辺の岩盤における人工バリアの設置環境および天然バリアとしての機能に着目して、以下のような項目についての情報が取得される。

- ・物質の移行経路となる地質構造要素の詳細な分布・性状
- ・岩盤中での物質の移動・遅延特性（間隙率、収着係数、拡散係数、マトリクス拡散幅など）
- ・地下水の流動特性（坑道周辺の地下水の流動状態）
- ・地下水の地球化学特性（坑道周辺の地下水の酸化還元状態など）
- ・岩盤の熱特性・力学特性、坑道掘削による影響

4・3 地質環境調査技術の開発

地質環境の調査は、土木工学や資源探査などで実用化されている技術の適用が可能な反面、従来の地下調査に比べて、①より大きな深度（1,000 m 程度）までの岩盤とそこに含まれる地下水を対象としている、②長期の評価に反映するため、より精度の高い情報が必要となる、などの特徴を有する。また、地質・地質構造、地下水の流動特性と地球化学特性、岩盤の熱特性・力学特性および岩盤中での物質移動特性など、多様な情報を取得することや、限られた情報から一定の範囲の状況を適切に推測することが求められる。

サイクル機構においては、既存技術の動向や地層処分の観点から必要となる地質環境データの質や精度を吟味したうえで、①広域にわたる深部地下水の流動特性や地球化学特性に関するデータを取得するための地下水調査機器の開発と、②地下坑道周辺の詳細な地質構造や掘削影響領域の性状などを計測するための物理探査技術の高度化、に重点を置いて技術開発を進めてきた。また、これらの技術を東濃地域や釜石鉱山での研究に活用することを通

じて、適用性の確認や複数の手法の比較検討などを行ってきた。その結果、地下深部の地下水流動や物質移動の評価に必要な地質環境データを取得するための機器や手法など、サイトでの地質環境調査の基盤となる要素技術については、おおむね整備することができた。主な点を以下にまとめる。

(1) 地下水調査機器の開発 深度 1,000 m までのボーリング孔を利用して、岩盤の透水係数などを原位置で精度良く計測できる 1,000 m 対応水理試験装置、深部の還元的な雰囲気や被圧状態を維持したまま地下水を採取できる 1,000 m 対応地下水の地球化学調査機器、これに装着して地下水の pH や酸化還元電位などを原位置で計測する地球化学検層ユニットなどを開発した。また、坑道内で利用できる地下水調査機器として、一定の広がりをもつ岩盤の水理学的な特性を把握できる孔間水理試験装置、坑道周辺の不飽和領域に適用できる水理学的ゆるみ領域計測装置、坑道内のボーリング孔などを利用して pH や酸化還元電位などを観測できる水質連続モニタリング装置などを開発した。これらを活用することにより、広域かつ長期にわたる地下水の動きやこれを媒体とする核種の移行、あるいは、オーバーパックの腐食速度や核種の溶解速度などを評価するために必要な地質環境データが取得できる（小出ほか、1998；岩月ほか、1998）。

(2) 物理探査技術の高度化 地層・岩体の境界や断層・割れ目帯の分布など、地層処分にとって重要な地質構造を、調査の進展に応じた精度で効率的に把握する観点から、物理探査技術の整備を図った。とくに、地下水の移行経路として重要な断層・割れ目帯の分布や坑道周辺の岩盤の物性などを効率良く把握するため、東濃鉱山や釜石鉱山の地下坑道内での試験を通じて、高精度の物理探査手法（トモグラフィー技術など）の有効性の確認や解析手法の高度化を行った。また、活断層での事例研究や東濃地域での地質構造調査などを通じて、広域を対象とした空中からの調査、より精密な地表での調査、ボーリング孔を利用した調査などに活用可能な各種物理探査手法の適用性を検討した。

そのほか、地下水調査に用いるためのボーリングの掘削技術やボーリング孔を利用した力学試験技術、坑道掘削による周辺岩盤への影響の程度や範囲を評価するための掘削影響評価手法、坑道周辺岩盤中での物質の移動を評価するためのトレーサー試験技術などの整備を進めた（佐藤ほか、1998 など）。

5. 地質環境に関するナチュラアナログ研究

地質環境が長期にわたって安定してきた実例を示す観点から、東濃ウラン鉱床におけるナチュラアナログ研究のこれまでの成果を整理した。

東濃ウラン鉱床は、約 1 千万年前に形成されて以来、断層活動や隆起・侵食、気候・海水準変動などを被ってきたにもかかわらず、現在まで保存されている。とくに、鉱床が断層で破断され上下に 30 m ずれている部分においても、ウランが移動した形跡は認められない。このことは、鉱床周辺の地質環境が長期にわたって地球化学的に安定な状態を維持し、その結果、ウランが地下水中に溶け出ししてしまうような状況に至らなかったためと解釈される。

実際に、鉱床内のウランとその娘核種はほぼ放射平衡状態にあることから、少なくとも過去数十万～百万年間にわたって、それらの核種が同じ場所に固定されてきたといえる（Yoshida et al., 1994a）。なお、ウランの高濃集部と低濃集部とを比較した結果によれば、高濃集部の方が低濃集部よりも透水性が高く、一方、低濃集部は高濃集部に比べて吸着能力に、より多くの余裕が残っている（Yoshida et al., 1994b）。すなわち、ウランの濃集度の違いは、岩石の吸着能力ではなく、ウランを含む地下水が通過したかどうか

かに依存している。このことは、ウラン鉱床の有無にかかわらず、地下深部の地質環境は、本来的にウランなどの核種を固定する潜在的な能力を持ち合わせていることを示唆している。

おわりに

地層処分に適した地質環境が我が国に広く存在し、また、それを選定することができるとの見通しを得た。これが、2000年までのジェネリックな研究開発の成果である。そして、実施主体がサイトの選定に着手し、国がその基準の策定を進めるうえでの技術的な拠り所である。

今後は、ここに示したような我が国の地質環境に関する知見やそれを得るために用いた手法などを、サイト選定に向けた現実的で透明性のある手続きとして、具体化していく必要がある。具体化に際しては、これまでの研究開発によって得られた知見と情報の限界を認識し、また、今後の進展を予見しつつ、科学的な妥当性と事業としての合理性の両立を図ることが重要である。

引用文献

- Chappell, J.(1994) : Upper Quaternary Sea Levels, Coral Terraces, Oxygen Isotopes and Deep-sea Temperatures, Jour. Geogr., Vol. 103, p. 828-840
- 第四紀火山カタログ委員会 (1999)(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)編：日本の第四紀火山カタログ(CD-ROM版)，日本火山学会
- 動燃事業団 (1996)：地層処分研究開発の現状(平成8年度)，PNC TN1410, p. 96-071
- 藤原 治・三箇智二・大森博雄 (1998)：地形の起伏状況から推定した日本列島における侵食速度の分布，地球惑星科学関連学会，1998年合同大会予稿集，p. 228
- 藤原 治・三箇智二・大森博雄 (1999)：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, p. 85-93
- 原子力安全委員会 (2000)：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)，平成12年11月6日，原子力安全委員会
- 原子力委員会 (1984)：放射性廃棄物処理処分策について(中間報告)，昭和59年8月7日，原子力委員会 放射性廃棄物対策専門部会
- 原子力委員会 (1994)：原子力の研究，開発および利用に関する長期計画，平成6年6月24日，原子力委員会
- 原子力委員会 (1997)：高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発などの今後の進め方について，平成9年4月15日，原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会
- 日比谷啓介・稲葉武史・塩釜幸弘・山本拓治・升元一彦・古市光昭 (1999)：我が国の地下水流動特性に関する研究，JNC TN7400 99-004
- Ii, H., Horie, Y., Ishii, T. and Shimada, J.(1997) : Development of an Apparatus to Measure Groundwater Qualities in Situ and to Sample Groundwater Using Boreholes, Environmental Geology, Vol. 32, p. 17-22
- 岩月輝希・豊嶋賢治・吉田英一 (1998)：深地層を対象とした地下水の地球化学調査の現状，原子力バックエンド研究，Vol. 4, p. 73-82
- Iwatsuki, T. and Yoshida, H.(1999) : Groundwater Chemistry and Fracture Mineralogy in the Basement Granitic Rock in the Tono Uranium Mine Area, Gifu Prefecture, Japan-Groundwater Composition, Eh Evolution Analysis by Fracture Filling Minerals-, Geochem. Jour., Vol. 33, p. 19-32

- 貝塚泰平・鎮西清高・小崎 尚・五百沢智也・松田時彦・藤田和夫 (1995)：新版日本の自然2 日本の山，岩波書店
- 亀井玄人 (1997)：ペントナイトに包まれた廃棄物ガラスのナチュララアナログ，PNC TN 8410, 97-035
- 小出 馨・中野勝志・尾方伸久 (1998)：地層科学研究における地下水調査・解析技術開発の現状，原子力バックエンド研究，Vol. 4, p. 59-72
- 小池一之・町田 洋編 (2001)：日本の海成段丘アトラス，東京大学出版会
- Matsui, H., Sato, T., Sugihara, K. and Nakamura, N.(1997) : Comparizon of the Results of Stress Measurements Determined by Various Methods at the Kamaishi Mine, Proc. 2nd Inter. Symp. Rock Stress, p. 95-100
- 宮脇昌弘・藤原 治 (1997)：段丘や台地の開析度からみた第四紀の侵食速度，地球惑星科学関連学会，1997年合同学会予稿集，p. 600
- 太田陽子 (1996)：最終間氷期の海岸線に関する諸問題，変化する日本の海岸(小池・太田編)，古今書院，p. 69-99
- Ota, K., Amano, K., Sato, H., Shibutani, T. and Tachi, Y.(1997) : Insitu Matrix Diffusion in Fractured Crystalline Rock, Kamaishi In-situ Test Site, North-east Japan, Proc. Migration 97, p. 98-99
- サイクル機構 (1999)：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，JNC TN1400 99-020-023
- 佐藤比呂志・平田 直 (1998)：活断層の深部構造と日本列島の成立，科学，Vol. 68, p. 63-71
- 佐藤絵紀・松井裕哉・杉原弘造 (1998)：深地層を対象とした力学的調査の現状—複数の手法を用いた初期応力測定について—，原子力バックエンド研究，Vol. 4, p. 83-90
- Shackleton, N. J.(1987) : Oxygen Isotope, Ice Volume and Sea Level, Quaternary Science Reviews, Vol. 6, p. 183-190
- Shimizu, I., Osawa, H., Seo, T., Yasuike, S. and Sasaki, S. (1996) : Earthquake-related ground motion and groundwater pressur change at the Kamaishi Mine, Eng.Geol., Vol. 43, p. 107-118
- 清水和彦 (1999)：地層処分に適した地質環境は存在するか，原子力バックエンド研究，Vol. 6, p. 27-35
- 杉原弘造・亀村勝美・二宮康郎 (1998)：堆積軟岩での発破による掘削影響の現場計測に基づく検討，土木学会論文集，No. 589/III-42, p. 239-251
- 高木秀雄・柴田 賢・杉山雄一・内海 茂・松本哲一 (1989)：三重県粥見地域の中央構造線沿いに分布する諸岩石の同位体年代，岩鉱，Vol. 84, p. 75-88
- 高木俊男・藤原 治・小沢昭男 (1998)：Ma-p001河成地形の高度分布から推定した氷期・間氷期を通じた下刻速度の変遷，地球惑星科学関連学会，1998年合同大会予稿集，p. 230
- 恒石幸正 (1984)：断層，地質構造の科学(木村敏雄編)，朝倉書店，p. 67-120
- 梅田浩司・林信太郎・伴 雅雄・佐々木実・大場 司・赤石和幸 (1999)：東北日本，火山フロント付近の2.0 Ma以降の火山活動とテクトニクスの推移，火山，Vol. 44, p. 233-249
- Umitsu, H.(1991) : Holocene Sea-level Changes and Coastal Evolution in Japan, The Quaternary Research, Vol. 30, p. 187-196
- 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 (1999)：日本列島地温勾配図，地質調査所
- Yoshida, H.(1994) : Relation between U-series Nuclide Migration and Microstructural properties of Sedimentary Rocks, Vol. 9, p. 479-490
- Yoshida, H., Kodama, K. and Ota, K.(1994a) : Role of Microscopic Flow-paths on Nuclide Migration in Sedimentary rocks, A Case Study from the Tono Uranium Deposit, Central Japan, Radiochimica Acta, 66/67, p. 505-511
- Yoshida, H., Yui, M. and Shibutani, T.(1994b) : Flow-path Structure in Relation to Nuclide Migration in Sedimentary Rocks, An Approach with Field Investigations and Experiments for Uranium Deposit, Central Japan, Jour. Nucl. Sci. Tech., Vol. 31, p. 803-812
- 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量，地学雑誌，Vol. 104, p. 809-826