研究展望

高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の展開

PROGRESS OF RESEARCH AND DEVELOPMENT ON HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE GEOLOGIC DISPOSAL IN JAPAN

清水和彦¹・石丸恒存¹・前川恵輔¹

Kazuhiko SHIMIZU, Tsuneari ISHIMARU and Keisuke MAEKAWA

¹核燃料サイクル開発機構 バックエンド推進部

(〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4-49)

E-mail: shimizu@tono.jnc.go.jp, ishmaru@tono.jnc.go.jp, kmaekawa@hq.jnc.go.jp

Key Words: high-level radioactive waste, geologic disposal, underground research laboratory

原子力発電に伴って発生する高レベル放射性廃棄物は、地下深部の岩盤中に埋設処分（地層処分）される。わが国では、1999年に核燃料サイクル開発機構が行った研究開発の「第2次取りまとめ」によって地層処分の技術的信頼性が示され、2000年以降、法令の整備、実施主体の設立、安全規制の枠組み作りが進むなど、わが国の地層処分計画は事業段階に踏み出した。事業に先行して、信頼性のさらなる向上を目指した研究開発が着実に進展している。

1. 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、最終的に処分するかが、原子力の平和利用を進めていくうえでの重要な課題となっている。すなわち、放射能が十分に減衰するまでの万年オーダーの長期にわたって、どのようにして人間の生活環境から隔離しておくかである。過去には、海洋底下処分や南極の水床下処分、宇宙処分といった方策も検討されたが、現在では各国ともに、地下深部の岩盤中への埋設処分（地層処分）を目指した研究開発を進めている。

わが国では、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ウランやプルトニウムを回収し、再び燃料として使用することが原子力利用の基本方針となっている。また、その過程で発生する高レベルの放射性廃液は、ガラス原料に混ぜて溶融・固化し、30～50年間冷却のために貯蔵した後、地層処分する方針である¹⁾。処分の対象となるガラス固化体は、直径約40cm、高さ約130cm、重さ約500kgである。わが国において高レベル放射性廃棄物といえば、このガラス固化体をさす。現在、わが国にガラス固化体として存在する量は890本（2003年11月現在）であるが、すでに発生している使用済み燃料と今後の原子力発電電力量をまかなうために必要な燃料分を換算して加えると、2020年頃には約4万本となる見込みである²⁾。この約4万本のガラス固化体を埋設するためには、2～数km四方の広さの処分場が必要となる（図-1）。

図-1 わが国の地層処分システム（文献²⁾ほかを編集）

わが国における地層処分の研究開発は、1970年代後半から、動力炉・核燃料開発事業団およびこれを引き継いだ核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）などを中心に進められてきた。サイクル機構は、1999年11月に、それまでの研究開発成果を取りまとめ、「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—」²⁾（以下、「第2次取りまとめ」）として国に報告した。「第2次取りまとめ」は、①地層処分に適した地質環境がわが国に広く存在すること、②現状あるいはその延長上にある工学技術によって、人工バリアや処分施設を適切に設計・施工できること、および③地層処分の長期にわたる安全性を予測的に評価、確認できることを示した。また、その内容について、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⁴⁾。これらを受けて、2000年5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」⁵⁾（以下、最終処分法）が成立し（6月7日公布）、さらに同年10月にはこの法律に基づき、地層処分事業の実施主体である原子力発電環境整備機構（以下、原環機構）が設立された。一方で、安全規制の立場から「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）」⁶⁾が公表されるなど、処分事業や安全規制の大枠が整備され、わが国の地層処分計画は事業化段階へと踏み出した。この状況を受け、原子力委員会は、「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」⁷⁾（以下、原子力長期計画）において、最終処分の実施に向けて必要な取り組みと役割分担を示した。すなわち、実施主体である原環機構は「最終処分事業の安全な実施、経済性及び効率性の向上等を目的とする技術開発」を、また国及び関係機関は「最終処分の安全規制、安全評価のために必要な研究開発や深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発及び地層処分技術の信頼性の向上に関する技術開発等」を進めることとした。とくに、サイクル機構には「これまでの研究開発成果を踏まえ、今後とも深地層の研究施設、地層処分放射化学研究施設等を活用し、地層処分技術の信頼性の確認や安全評価手法の確立に向けて研究開発を着実に推進すること」が求められた。

今後は最終処分法に基づき、原環機構を実施主体とする処分事業が段階的に進められ、その進展にあわせて、安全規制に関連する指針・基準が国により策定されていく。その大きな一歩として、2002年12月に原環機構により、概要調査地区の選定に向けた公募が開始された⁸⁾。

本稿では、サイクル機構の「第2次取りまとめ」で示した「わが国における地層処分の技術的信頼性」を地質環境の視点から俯瞰したうえで（第2章）、今後の地層処分計画における喫緊の課題である処分地の選定にかかわる要件や調査について検討し（第3章）、また、深地層の研究施設計画を中心とした事業化段階における研究開発の展開を紹介する（第4章）。

2. わが国における地層処分の技術的信頼性

（1）安全確保の仕組みと重要な地質環境条件

a) 地層処分の概念

地層処分の概念は、地下深部の岩盤中に高レベル放射性廃棄物（わが国ではガラス固化体）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。その背景には、高レベル放射性廃棄物の問題は原子力発電の恩恵を享受している我々の世代が解決すべきであり、後世に「つけ」を残すべきでないとの国際的なコンセンサスがある。また、地層処分という発想は、地下深部の地質環境が地表に比べて安定であり、本来的に物質を長期にわたって隔離・保存する能力が高いことに、その根拠を置いている。これは、古代の遺跡が良好な保存状態で発掘されたり、地質時代に形成されたウラン鉱床などが長期にわたって保存されているという経験的な事実に裏打ちされている。逆に、地表付近が地下深部に比べて相対的に不安定である要因としては、洪水、震災などの自然災害のほか、テロ行為などの人間活動が挙げられる。

b) 地層処分における安全確保の仕組み

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）が考えられる。

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、資源開発などを目的とした地下への「人間侵入」のほか、火山の噴火による廃棄物の放出や地盤の隆起・侵食にともなう処分場の露出が想定される。

もうひとつは、廃棄物から溶け出した放射性物質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、物質の溶解などを支配する化学的な反応と地下水の物理的な動き、およびそれらにともなう物質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、まず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んだうえで、そこに人工バリアと天然バリア（岩盤）からなる多重バリアシステムを構築するという対策がとられる。わが国では、ガラス固化体を金属製の容器（オーバーパック）に封入したうえで、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（図-1）。なお、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た様々な評価ケースを設定したうえで、各ケースにおいて想定される放射性物質の移行や人間環境への影響などを、モデルとデータを用いた数値シミュレーションによって解析することにより、総合的に評価される。

c) 地層処分にとって重要な地質環境条件

このような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、人工バリアの設置環境および天然バリアとして適切であることが求められる。

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・範囲を把握することが重要となる。処分地の選定に際しては、火山活動や隆起・侵食といった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を総合的に評価する必要がある。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介した物質の移行が重要となる。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。

（２） 地層処分に適した地質環境の存在

「第２次取りまとめ」に向けた研究開発は、対象とする地域や岩石の種類を特定せずに進めることが、国の方針であった^{1),9),10)}。これを受け、「第２次取りまとめ」では、わが国の地質環境を幅広くとらえて検討したうえで、適切な場所を選べば、基本的に現状あるいはその延長上にある土木・工学技術や安全評価技術に基づき、わが国における地層処分の安全確保が十分に可能であることを示した。

以下に、わが国の地質環境という視点から、「第２次取りまとめ」の主要なメッセージをまとめる。

ａ） 日本列島の地質学的な特徴

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。このような活断層や自然現象を背景とした日本列島の特徴は、山地が多く起伏に富む地形、あるいは様々な種類の地層や岩体が構成する複雑な地質となって現れている。

そのほか、比較的温暖な気候や豊富な降水量、周囲

図-2 火山の分布とプレートの配置（文献¹¹⁾を編集）

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。わ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で飽和している。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。

ｂ） 天然現象と地質環境の長期安定性

地層処分においては、安定な地質環境を選ぶことが前提となるが、その際、考慮すべき時間・空間スケールや安定の程度といったものを認識しておく必要がある。まず時間スケールについて、わが国ではまだ規制上の評価期間は設定されていないが、研究開発の目標として「将来十万年程度まで」を目安にしている。空間スケールとしては、「深度数百 m から 1,000 m, 広さ数 km 四方」を想定してきたが、深度については、最終処分法により「地下 300 m 以上」と定められた。一方、安定の程度について認識すべきは、地層処分にとって安定な地質環境とは、決して不変を意味するものではないということである。地質環境を構成している岩盤や地下水の性質が多少変化しようとも、多重バリアからなる地層処分システムとしての機能が維持されるならば、その環境は十分に安定といえる。

そのような「安定な地質環境」を見出すためのアプローチとして、「第２次取りまとめ」では地質環境に大きな変動を及ぼす要因となり得る天然現象に着目した。すなわち、①地震・断層活動、②火山活動、③隆起・侵食および④気候・海水準変動である。これらの

図-3 処分システムにおける断層への工学的対策

天然現象については、そ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、わが国では、おおむね過去数十万年程度まで遡って、活動の場所や変動の規模などを追跡することができる。「第2次取りまとめ」では、年代測定などを主体とした全国各地での事例研究の結果や関連する文献情報を分析することにより、過去から現在までの活動の中に一定の傾向や規則性を見出し、これに基づいて、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検討した。その結果、地層処分に際して、天然現象による重大な影響が及ばないような地域を選定し、あるいは想定される変化を見込んで必要な対策を講じることができるとの見通しを得た。

まず、地質環境に破壊的な影響をもたらす火山活動や断層活動については、将来にわたって活動が起りそうな場所や影響の範囲を限定することができる。たとえば、日本列島に分布する火山噴出物の年代を丹念に調べていくと、過去数百万年にわたって火山活動が起こった場所は現在の火山地域と大きく違っていないことがわかる。したがって、将来のたとえば十万年程度についても、火山活動が起こる地域は現在までとそ

れほど変わらないと考えることができる。また、マグマからの熱や揮発成分の混入により地温が上昇したり地下水の水質が変わる範囲は、個々の火山によって異なるが、おおむね火山の中心から数km～20km程度までである。断層活動についても、主な活動は過去数十万年にわたって現在の活断層帯で繰り返し起こっており、断層活動によって岩盤が破断・破砕されるような影響範囲は、大きなものでも幅数百m程度である。個々の地域においては、現地での詳細な調査によって得られる情報に基づき、想定される影響の程度や範囲を人工バリアの性能との関係で評価し、そこから十分に離す、あるいは、それを考慮して処分施設や人工バリアを設計することが重要である(図-3)。

一方、隆起・侵食および気候・海水準変動のように広域にわたる変動が徐々に進展していく現象については、将来における変動の速度や幅が推定できることから、一部の変動の著しい地域を避けたいうえで、個々の地域において想定される変動の規模を考慮して、処分場の深度を設定するなどの対策をとることができる。日本列島の多くの地域で十万年当たり数十mの割合で隆起・侵食が進行しているが、山岳地域や半島の先

端部では十万年当たりの隆起・侵食量が百 m を越える地域もあり、逆に平野部では沈降しているところもある。また、約十万年周期の地球規模での気候変動サイクルに従えば、わが国の気温および海水準は、それぞれ現在比にして $+3^{\circ}\text{C}\sim-8^{\circ}\text{C}$ および $+5\text{ m}\sim-120\text{ m}$ 程度の範囲内で変動しており、今後7~8 万年の間は次の氷期のピークに向かって気候は寒冷化し、海面は低下していくと考えられる。

c) 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移行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。とくに、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、人工バリアや処分施設の設計・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、地下空洞の力学的な安定性や人工バリアの品質にとって好ましい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小さ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率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介した物質の移行に関与する空隙の構造や化学的な性質が重要となる。

「第2次取りまとめ」では、このような地層処分にとって重要な地質環境特性に着目して、東濃地域や釜石鉱山での調査研究の成果や文献調査に基づき情報を整理した。その結果、わ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ため、物質を溶解・運搬する能力が低く、また、処分場を建設するうえで、地温が十分に低く地圧も均等に近いような深部岩盤がわが国にも広く存在し得るとの見通しを得た。

たとえば、地下水の動きは、その地域の動水勾配と岩盤の透水性に支配されるが、低地での動水勾配は地表付近でも平均0.01 程度である。さらに地下深部では局所的な地形の影響がなくなるため、地表付近よりも小さくなると考えられる。また、岩盤の透水性は岩種や地域によって異なるが、東濃地域や釜石鉱山での計測結果などによれば、広がりをもった（割れ目などを含む）岩盤としての平均的な透水係数は、おおむね $10^{-10}\sim 10^{-7}\text{ m/s}$ のオーダーの範囲に分布する。ここで、たとえば地下深部における動水勾配を0.01 とすると、岩盤の平均的な透水係数が $10^{-10}\sim 10^{-7}\text{ m/s}$ の場合の地下水の平均流速は、年間0.03~30 mm とな

る。いずれにしても、地表部の水に比べて、地下深部の水の動きは非常に遅いといえる。また、地下水の地球化学特性に関して、わが国では降水起源の地下水と海水起源の地下水を考慮する必要があるが（火山地域を避けることにより、マグマ起源の地下水の影響は無視できる）、いずれも岩石中に普通に含まれる鉱物や有機物との反応あるいは微生物の活動によって、地下深部では一般に弱アルカリ性で還元状態にあると考えられる。「第2次取りまとめ」では、このようなわが国の地下水に関する特徴やその多様性などを踏まえて評価し、それらの条件が多少異なっても処分システムには十分なバリア機能が見込めることを示した。図-4 は、様々なケースを想定して行われた安全評価の結果をプロットしたものであるが、その中で地下水の条件として、動水勾配については、0.001, 0.01, 0.1 の3 ケース、水質については、降水系と海水系の双方のケースを想定して評価している。この図からわかるように、求められた放射線の影響は、全体として低いレベルにおさまっている。

一方、処分場の工学的な設計条件として重要な岩盤の熱特性・力学特性に関しては、場としての条件（温度、圧力）と岩盤としての物性の双方に着目した。全国の深層ボーリングデータによれば、火山の周辺を除く地域における地温勾配（地下での温度上昇率）はおおむね $2\sim 3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 前後である。また、文献データや東濃地域・釜石鉱山での計測結果によれば、一般に深度が増すにしたがって、鉛直応力と水平応力の比は1 前後に近づく傾向がみられる。実際に処分場を建設する際には、その場所の温度・圧力条件と対象となる岩盤の物性に応じて処分場のレイアウトや施工方法の最適化が図られる。「第2次取りまとめ」では、花崗岩のような硬岩について1,000 m、新第三紀堆積岩のような軟岩については500 m の深度を想定して、処分場の設計・建設が工学的に十分可能であることを示した。表-1 は、それぞれのケースで用いられた岩盤の主な物性値と、設計解析の結果を踏まえて検討された処分場の仕様例である。

なお、天然バリアの機能として重要な物質の移行特性に関しては、ウラン鉱床や花崗岩中の割れ目周辺における天然ウランの微視的な観察などにより、地下水を介して物質が移行する過程で、造岩鉱物や割れ目充填鉱物の表面に物質が吸着したり、割れ目から岩石のマトリクス中に物質が拡散していることが実際に確認された。このような現象の効果により、処分場から人間環境に向かう放射性物質の移行は、地下水の動きよりもさらに遅くなる。「第2次取りまとめ」では、このような岩盤中における放射性物質の挙動を地下水の動きとあわせて評価し、100 m 程度の厚さの岩盤でも

ケース No.	地下水	動水勾配	岩 種	GBI*	
1	降水系 地下水	0.01	結晶質岩(酸性)	河川水	
2			結晶質岩(塩基性)		
3			先新第三紀砂質岩		
4			先新第三紀泥質・凝灰質岩		
5			新第三紀砂質岩		
6			新第三紀泥質岩・凝灰質岩		
7		0.1	結晶質岩(酸性)		
8			結晶質岩(塩基性)		
9			先新第三紀砂質岩		
10			先新第三紀泥質・凝灰質岩		
11			新第三紀砂質岩		
12			新第三紀泥質岩・凝灰質岩		
13		0.001	結晶質岩(酸性)		
14			結晶質岩(塩基性)		
15			先新第三紀砂質岩		
16			先新第三紀泥質・凝灰質岩		
17	新第三紀砂質岩				
18	新第三紀泥質岩・凝灰質岩				
19	0.01	結晶質岩(酸性)			
20		結晶質岩(塩基性)			
21		先新第三紀砂質岩			
22		先新第三紀泥質・凝灰質岩			
23		新第三紀砂質岩			
24		新第三紀泥質岩・凝灰質岩			
25	海水系 地下水	0.001	結晶質岩(酸性)		沿岸海域 堆積層
26			結晶質岩(塩基性)		
27			先新第三紀砂質岩		
28			先新第三紀泥質・凝灰質岩		
29			新第三紀砂質岩		
30			新第三紀泥質岩・凝灰質岩		
31	緩衝材厚さの変更(0.4 m)を考慮			河川水	
32	GBIを深井戸に変更			深井戸	
33	ガラス溶解速度、岩盤中分散係数、透水量係数の不確実性を同時に考慮			河川水	
34	コロイドによる核種移行を考慮				
35	隆起・侵食(隆起侵食速度=1.0mm/年)				
36	埋め戻し・プラグの施工不良				
37	人工バリアから核種が直接生物圏に移行すると仮定				

*GBI: 地質環境と生物圏とのインターフェイス

図-4 処分システムの全体性能の解析²⁾
地下水シナリオに対する最大線量の分布

十分な天然バリア機能が見込めることを示した。すなわち、「第2次取りまとめ」では、4万本の廃棄体全てが選択的な移行経路となる断層破碎帯から100 mの距離にあると仮定して(厚さ100 m分の岩盤による遅延効果を見込んで)安全評価を行った。その結果は、図-4に示したとおりである。

3. 地層処分事業の展開と処分地の選定

「第2次取りまとめ」などを技術的な拠り所として、最終処分法が成立し、実施主体である原環機構が設立された。最終処分法では、高レベル放射性廃棄物の地層処分事業を透明性をもって、計画的かつ確実に実施するため、処分実施主体の設立、処分費用の確保方策、段階的な処分地選定のプロセスなど、処分事業の実施に必要な枠組みが定められた。今後は最終処分法に基づき、原環機構を実施主体とする処分事業が、「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」、さらには「最終処分施設の設置」「最終処分の実施」「最終処分施設の閉鎖」と段階的に進められる。一方で、事業の進展にあわせて、「安全審査基本指針」「安全審査指針」「処分場の技術基準」といった安全規制に関連する指針・基準の策定が進められることになる⁹⁾。また、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が、サイクル機構をはじめとする関係研究機関により進められていく(図-5)。現在の国の計画では、精密調査地区の選定が平成20年代前半、最終処分施設建設地の選定が平成30年代後半、そして最終処分の開始は平成40年代後半を目途としている⁹⁾(概要調査地区の選定期間については、国の計画に言及されていないが、原環機構は平成10年代後半ごろとしている⁹⁾)。すなわち、実際に最終処分が開始されるのは今から30年以上先のことであり、当面は研究開発と並行して、処分地の選定に向けた様々な活動が段階的に展開されていくことになる。その一步として、2002年12月に原環機構により「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」の公募が開始され、「応募要領」「処分場の概要」「概要調査地区選定上の考慮事項」「地域共生の取組み」といった資料が公開された⁹⁾。

処分地の選定は、最終処分法にも謳われているとおり、国民とりわけ地域住民の理解を前提としている。原環機構が公募に際して「地域共生の取組み」を示しているのも、この点への強い意識の現れである。一方、本章では主に技術的な視点から、処分地の選定に向けて考慮すべき地質環境上の要件や調査の内容につ

表-1 設計用岩盤データセットと坑道の基本仕様
(文献²⁾を編集)

		硬岩系岩盤 データセット	軟岩系岩盤 データセット
		2.67	2.20
物理特性	飽和密度 ρ [Mgm ⁻³]		
	真密度 ρ_g [Mgm ⁻³]	2.7	
	有効間隙率 n_e [%]	2	30
力学特性	一軸圧縮強度 q_u [MPa]	115	15
	弾性係数 E [MPa]	37,000	3,500
	ポアソン比 ν	0.25	0.30
	粘着性 c [MPa]	15	3.0
	内部摩擦角 ϕ [°]	45	28
	引張強度 σ_t [MPa]	8	2.1
	側圧係数 K_0	164 / $h+0.74$ (h : 深度[m])	
	初期鉛直応力 σ_v [MPa]	$\rho \cdot h / 100$ ($\approx \rho \cdot gh / 1,000$)	
	初期水平応力 σ_h [MPa]	$K_0 \sigma_v$	
	弾性波(P波)速度 v_p [km s ⁻¹]	$2.1+2.9(1-e^{-0.00792\rho h})$	$1.8+1.4(1-e^{-0.00067\rho h})$
熱特性	弾性波(S波)速度 v_s [km s ⁻¹]	$0.2+2.4(1-e^{-0.00786\rho h})$	$0.6+1.0(1-e^{-0.00066\rho h})$
	熱伝導率 λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	2.8	2.2
	比熱 C [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	1.0	1.4
	地温勾配 [°C/100m]	3	
水理特性	地表面における地温 [°C]	15	
	透水係数 k [m s ⁻¹]	$10^{-10} \sim 10^{-8}$ (硬岩部), $10^{-6} \sim 10^{-5}$ (割れ目帯)	
坑道の基本仕様	透水係数 i	0.008~0.067	
	アクセス坑道断面	円形 (直径6.5m)	
	主要坑道, 連絡坑道断面	幌形 (幅・高さ5.0m, 天端部曲率半径2.5m)	馬蹄形 (曲率半径 2.5, 4.5, 5.0mの組合せ)
	処分坑道断面	縦置き方式	横置き方式
	処分孔断面(深さ4.13m)	円形 (直径2.22m)	

いて検討する。なお、ここでは全段階を通じた一般的な用語として、選定の行為を「処分地の選定」、検討の対象となる地区を「サイト」と呼んでいる。

(1) 処分地の選定要件

処分地の選定要件については、「第2次取りまとめ」で示したようなわが国の地質環境の特徴や処分システムの設計・安全評価上重要な条件などを踏まえて、最終処分法が各調査段階の判断基準などを定めている。また、2001年8月には、土木学会から「概要調査地区選定時に考慮すべき地質環境に関する基本的考え方」¹²⁾が、さらに2002年9月には、原子力安全委員会から「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」¹³⁾が、それぞれの立場や観点で取りまとめられ公表されている。

それらを踏まえ、原環機構は2002年12月の公募開始に当たり、「概要調査地区選定上の考慮事項」を明らかにした。以下では、これらの技術的な背景となっている「第2次取りまとめ」の内容に沿って、処分地の選定において重要となる地質環境上の要件を整理する。

図-5 関係機関の役割²⁸⁾

a) 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。わが国では、主要な活断層や第四紀の火山の分布が把握されているため、文献調査によって概要調査地区を選定する段階から、あらかじめそれらの影響範囲を見込んで距離を離しておくことが可能である。そのうえで、最終的にはボーリング調査や物理探査あるいは最新の年代測定技術を活用して、活動の履歴や周辺の地質環境への影響を確認することが必要である。

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。原環機構が示した「概要調査地区選定上の考慮事項」では、火山については、全国一律で第四紀火山の中心から半径15km内の地域を除外したうえで、その外側の地域については個別地区ごとに火山活動の痕跡や熱・熱水の影響などを評価して選定するとしている。また、活断層については、全国一律の活断層マップ（陸域¹⁴⁾、海域¹⁵⁾）に示された活断層を除外したうえで、個別地区ごとに活断層の存在や破碎帯の幅などを評価して選定するとしている。

b) 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、廃棄物を隔離しておくべき期間に予想される隆起・侵食の規模が、廃棄物を埋設する深度に比べて十分に小さい場所を選ぶことによって満足される。わが国では、隆起・侵食の地域的な傾向が把握されているため、文献調査の段階で、これらの変動が著しい地域をあらかじめ除外することができる。そのうえで、個々の地域での調査に基づいて、隆起・侵食の規模や速度をより詳細に分析することが重要である。その際には、気候・海水準変動の影響（海面の低下や気温・降水量の変化にともなう侵食速度の変化など）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。原環機構が示した「概要調査地区選定上の考慮事項」では、個別地区ごとに評価し、過去 10 万年間の隆起量が 300 m を超えていることが明らかな地域は含めないとしている。

c) 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である。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直接確認できる。合理的な深度に十分な規模の岩盤を確保する観点からは、明らかに適性が劣るような第四紀の砂礫層などが地下深部まで厚く分布しているような地域は不適切といえる。原環機構が示した「概要調査地区選定上の考慮事項」では、最終処分を行おうとする地層が第四紀の未固結堆積物である地域や経済的に価値が高い鉱物資源が存在する地域は含めないとしている。

d) 岩盤と地下水の性質が適切であること

岩盤や地下水の性質は、地上からの調査と地下施設を利用した調査によって包括的に整備される地質環境情報に基づき、処分システムの設計や安全評価を行うことにより総合的に評価される。ただし、地下施設を建設する前の段階でも、地表からのボーリング調査などによって、岩盤や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。また、このような現地での具体的なデータの取得に先立って、その地域の地形・地質学的な特徴に基づき、岩盤や地下水の性質をある程度予測しておくことも可能である。とくに、地下水の動きや酸化還元状態、地温、地圧などは、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、処分地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。原環機構が示した「概要調査地区選定上の考慮事項」では、付加的に評価する事項として、地層の物性・性状、地下水の特性などを、調査規模・費用、建設・操業時の自然災害、土地確保や輸送の容易性などの立地条件とあわせて、総合的に評価としている。

(2) 処分地選定のための調査

処分地選定のための調査は、最終処分法に基づき、①概要調査地区選定のための調査（文献調査）、②精密調査地区選定のための調査（概要調査）および③最

終処分施設建設地選定のための調査（精密調査）と段階的に進められる。概要調査では物理探査やボーリング調査などの地上からの調査が、また、精密調査では地上からの調査に加えて地下の施設を利用した調査が行われる。このうち、最初の文献調査には自ずと限界があり、逆に最後の精密調査では安全審査等で求められる情報を包括的に整備する必要があるが、それらの中間段階である概要調査において、地上からの調査をどの程度の規模で行い、どの程度までの評価を行うかについては、今後の検討が必要である。

以下では、文献調査、地上からの調査（概要調査および精密調査の前半）および地下施設を利用した調査（精密調査の後半）としての一般的な内容を検討する（図-6）。実際の調査では、必ずしも一般的なアプローチにとらわれず、既存情報の充実度やサイトの地形・地質学的な特徴、あるいは社会的な条件などに応じて、柔軟かつ個別具体的に対応することが重要である。

a) 文献調査

文献調査では、地層処分の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：鉱物資源の分布など

わが国においては、全国規模で詳細な地質図や各種分布図が作成されているが、場所によっては、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地域を除外することが重要である。

b) 地上からの調査

地下施設を建設する前の地上からの調査として、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の実際のデータに基づき、文献調査によって判断した項目についての再確認や補完的な検討がなされる。とくに、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-6 地質環境調査フローの例
(文献²⁾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、ボーリング調査によって取得される実測値や物理探査によって推定される地下構造に関する情報などに基づき、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・力学特性などが、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検討される。

空中からの調査としては、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（電磁探査、磁気探査、放射能探査など）がある。これらの手法は、大規模な断層破碎帯や地質の分布など、広域にわたる大局的な地質構造を効率的に把握できる利点がある。一方、地表からの調査では、地表踏査や地上物理探査（地震探査、電磁探査、電気探査、重力探査など）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などが調べられる。また、この段階には地表水の分析や表層での水収支の観測なども開始される。これらの調査によって得られた結果をもとに、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や地質環境の各特性が総合的に解析されていく。なお、このような地下を調べるための地上からの調査は、比較的広域を対象とした概査から対象領域を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のが一般的であるが、公募を前提とした処分地の選定においては、必ずしも対象領域を任意に設定できないことに留意して、最適な調査プロセスを検討することが重要である。

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、ボーリング孔やボーリングコアを利用した地下水調査、物理探査（各種物理検層、トモグラフィ調査など）および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

このような地上からの調査によって得られる情報に基づいて、サイトの地下水流動、地球化学、岩盤力学などに関するモデルが作成され、処分システムの概念的な設計や予備的な安全評価などが実施される。これらの検討を通じて、地上からの調査段階として十分な情報が取得できたと判断できれば、次の地下施設を利用した調査に進むことになる。

c) 地下施設を利用した調査

地下施設の建設をとまな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。地下坑道を利用することにより、坑道の壁面観察（割れ目の分布特性など）や坑道内での高精度の物理探査（各種トモグラフィー調査など）、トレーサーを用いた物質移行試験、岩盤の変位・変形や地下水の水質・水圧の長期観測などを実施することが可能となる。この段階には、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行・遅延特性（間隙率、収着係数、拡散係数、マトリクス拡散など）
- ・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

なお、地下施設においては、このような地質環境の特性に関する調査のほか、人工バリアの性能確認や処分施設的设计・施工のための実証的な試験などが行われる。

（3）安定な地質環境を選ぶための天然現象の調査

（1）で述べたように、処分地を選定する際の要件として、火山活動や断層活動あるいは隆起・侵食による重大な影響を被らないような場所であることがまず重要である。以下では、主に地上からの調査によって、これらの天然現象を評価する際の留意点などを検討する。

a) 断層活動に関する調査

わが国では、主要な活断層の分布はすでに把握されているが、活動度の低い活断層など、地域によっては、いまだ発見されていないものも少なくないとされている。したがって、処分地を選ぶ際にはいわゆる「未知の活断層」が存在する可能性を前提に調査を行う必要がある。地表部の調査を注意深く行うことは言うまでもないが、これには限界があるため、地表での特徴が不明瞭な活断層あるいは地下に伏在する活断層の検出を目的とした地下構造調査が重要となる。地下構造調査では、様々な物理探査を駆使し、必要に応じてボーリング調査が併用される。天然バリアとしての岩盤への影響（擾乱）を軽減する観点から、また調査を合理化する意味でも、ボーリングは最小限にとどめることが望ましい。そのためには、2～3 km 程度の可探深度を有し、かつ主要な不連続面（断層破碎帯、割れ目集中帯）の分布を感知できるような物理探査技術を、サイトの地形・地質条件に応じて改良・最適化

し、また、複数の手法を組み合わせるなどの工夫が必要である。

わが国では、1995 年兵庫県南部地震を契機に全国規模での活断層調査が展開されており、とくに近年は、大都市圏などの平野部を中心に地下構造調査が精力的に進められている¹⁶⁾。それらの調査では主に反射法地震探査が用いられており、この手法により断層の地下構造や伏在断層の分布を推定した多くの事例が報告されている。サイクル機構でも、活断層の3次元地下構造を把握するための手法や地表部に明瞭な変位地形を現さない活断層の抽出手法の開発を進めている¹⁷⁾。

b) 火山活動に関する調査

わが国における火山の分布はすでに把握されているので、その影響範囲を検討することが課題となる。これは、ボーリングデータなどに基き温度や水質の空間的な変化を調べることによって推定できる。火山の近くでは、地下の温度上昇率（地温勾配）が高く、また、地下水は酸性であるが、火山の中心から数 km ～20 km 程度離れると、温度、水質（pH など）ともにバックグラウンドレベルとなる。サイトの周辺に火山がある場合には、既存の情報を分析し、また必要に応じて現地調査を行って、その影響範囲を把握する必要がある。地下の温度や水質を実測するにはボーリング孔を利用した調査が必要となるが、その際には、温泉探査や地熱調査などを通じて蓄積された情報が大いに活用できる。

なお、将来の火山活動域も現在と大きく変わることはないと考えられるが、これを実証する意味で、地下のマグマの存在に関する情報が有効である（地下にマグマがなければ、そこで火山が噴火することはない）。最近では、弾性波速度や比抵抗の違いを利用して地下のマグマの分布を把握する試みがなされており、地震波トモグラフィーや MT 法電磁探査によりマグマの空間的な構造を推定した事例が報告されている^{18),19),20)}。サイクル機構でも、非火山地域における地温異常の原因を究明するための事例研究において、MT 法電磁探査を活用している²¹⁾。

c) 隆起・侵食に関する調査

地層処分に直接重要なのは、処分場の露出をもたらし得る侵食であるが、過去の変化を推定できるような地形・地質学的な証拠は、侵食に比べて隆起に関するものが豊富であるため、概略的には隆起量をもって侵食を評価することが実用的といえる。処分深度に大きな余裕がある場合にはこのような概略的な評価で十分であり、また、隆起した分が全て侵食されるとみなすことは、地層処分の時間スケールでみれば必ずしも過度に保守的とは言えない。

わが国における隆起運動については、主に海成段丘の分布を指標に平野部や海岸部における過去数十万年間の変動の傾向が比較的精度よく把握されているが、内陸部については長期の変動傾向が定量的に把握されていない地域が多い。将来の隆起量を評価する際は、海成段丘や河成段丘などを指標とした地形学的な手法で得られる過去数十万年の情報を基本としつつ、GPS（汎地球測位システム）などによる測地学的な手法で得られる短期的な情報にも留意する必要がある。また、とくに変動の指標となる地形面が海岸部に比べて不明瞭な内陸部については、地層の堆積構造や変形構造などに着目した地質学的手法を組み合わせることも有効である。

より詳細に、たとえば隆起と侵食による将来的な地形変化を推定して、動水勾配の変化など地下水流動への影響を評価する場合には、侵食速度の見積もりが必要になる。その際には、地域的（面的）な侵食と河川などによる選択的（線的）な侵食の双方に着目することが重要である。地域的な侵食速度については、河川が運搬する土砂の量と地形との関係式などから推定されおり²²⁾、気候、植生、地質などとの関係を一般化する試みもなされている。一方、河川による侵食については、河成段丘の調査に基づき、隆起や気候変動と関連づけた河床の下刻―埋積のサイクルが提示されている²³⁾。

なお、隆起あるいはその逆の現象である沈降は、プレート運動などに起因したいわゆる地殻変動であるのに対して、侵食は降水などの外的営力が引き起こす物理的（化学的）作用である。すなわち、後者は数学的に取り扱える現象といえる。サイクル機構でも、侵食を物理的な作用とみなして、様々な要素を取り込んだ方程式で表現することにより、将来の地形変化をシミュレーションする手法の開発を進めている²⁴⁾。

（４） 地質環境特性の調査と地質環境モデルの構築

岩盤や地下水の調査は段階的に進められるが、その方法はサイトの条件（地形・地質条件や社会的な制約）によって異なる。また、適宜、得られた結果をフィードバックして調査計画を見直したり、最適な調査体系（各種調査手法の組み合わせ）を検討するための試行錯誤も必要になってくる。たとえば、サイトの地形・地質学的な複雑さと、これに対応して物理探査や地表踏査で得られる情報の精度によって必要なボーリングの本数が左右され、それらを通じた地質環境の理解の程度に応じて地質環境のモデル化や設計解析、安全評価解析の手法および解析結果に見込むべき安全裕度の取り方が左右されることになる。換言すれば、処分システムの設計・安全性に関する検討を地質環境の

調査と並行して行うことにより、調査の精度と安全裕度との関係が最適化され、全体が収束していくことになる。

以下では、ボーリング調査によって得られる定量的な情報と物理探査などから推定される構造情報を組み合わせ、広域スケールや坑道スケールでの地質環境モデルを構築する際の留意点などを検討する。

a) 水理地質構造モデルの構築

これは、人工バリア内に流入、あるいは人工バリアから人間環境に流出する地下水の量や速度を評価するために不可欠なモデルである。大きく、連続体モデルと亀裂ネットワークモデルに分類される。前者にとってはボーリング調査によって得られる透水係数データを、また後者にとっては割れ目の特性（頻度、規模、方向性、透水性など）に関する情報を、いかに空間的に把握しモデルに展開するかが鍵となる。これらの作業の精緻度は、透水性や割れ目の特性、すなわち岩盤の水理特性に関する定量的な情報をどれだけ密に取得できるかによるが、それ以前に、構造をどの程度まで理解できたかに大きく依存する。たとえば、岩盤の水理特性の違いやその空間的な分布を物理探査で検出可能な物性の変化としてとらえることができれば、ボーリング調査などへの負担を大幅に低減することができる。これは、地下構造を推定するという点において従来の物理探査の役割と同じであるが、水理特性を区分するものが、必ずしも地質境界と必要十分の関係にないことに注意が必要である。

いずれのモデルにおいても、とくに断層破碎帯や割れ目集中帯など、広域スケールにおける選択的な地下水移行経路となる大構造をどの程度の精度・分解能で検出できるかが重要となる。そのためにも、(3)a)で述べた地下構造調査の役割が大きい。

一方、処分システムにおける天然バリア機能を定量的に評価するうえでは、坑道周辺岩盤の水理特性を詳細に把握することも重要となる。そのためには、坑道壁面の割れ目調査や壁面からのボーリングによる水理試験などと、坑道内での高精度物理探査（坑道壁面やボーリング孔を利用した各種トモグラフィ調査など）との組み合わせを、いかに最適化するかが鍵となる。

b) 地下水地球化学モデルの構築

これは前項 a) の人工バリア内に流入、あるいは人工バリアから流出していく地下水の水質（溶存成分、酸化還元電位、pH など）を推定するために必要なモデルである。処分場周辺の地下水の水質は実測できるが、その変化（人工バリアとの反応、坑道の掘削や埋め戻し、隆起・侵食にともなう変化など）を評価するためには、地球化学モデルを用いた解析が必要とな

る。

地下水の水質は、起源となった水（降水、海水など）と、滞留中における土壌や岩石との反応、あるいは異なる地下水の混合によって形成される。岩石との反応の度合いは、一般に深度と相関があるので、何本かのボーリングデータ（水質データ、岩石鉱物学データ）があれば、前項 a) から推定される地下水流動と対比しつつ、熱力学的な理論に基づいて概略的な地下水地球化学モデルをつくることができる。

なお、沿岸地域では、広域スケールのモデルとして、塩水－淡水境界の把握が重要となる。これにはボーリング調査が必須となるが、空間的な分布を推定するには、塩分濃度と比抵抗との関係に着目した物理探査が有効である。実際に、比抵抗トモグラフィー調査や電磁探査によって、塩分濃度の高い地下水の分布域を示すと考えられる低比抵抗帯が検出された例が報告されている^{25), 26)}。

c) 岩盤（熱）力学モデルの構築

これは、処分場の設計に必要なモデルで、主に地下空洞の安定性評価や人工バリアの温度、圧力条件の設定に用いられる。まず、場の条件である地温や地圧については、ボーリング孔などを利用して実測により求められる。これを境界条件として空洞や人工バリアの力学解析や温度解析を行うためには、岩盤自体の物性（強度や熱伝導率など）の空間的な分布を推定する必要がある。一般的には、ボーリングコアを用いて測定した物性値を、ボーリング調査や物理探査などによって得られる地質構造情報に基づいて、空間的に展開することになる。さらに、坑道スケールでは、坑道の掘削にともなう影響（損傷や応力再配分）をとらえることが重要となる。影響の程度、すなわち物性の変化の度合いとその範囲を把握するためには、分解能の高い物理探査情報が必要である。東濃鉱山における掘削影響試験では、屈折法地震探査や地震波トモグラフィーにより、坑道壁面から約 1 m の範囲内で、坑道の掘削にともなう弾性波速度の低下が観測された²⁾。

なお、坑道を掘削する作業自体の安全性については、別途の検討が必要であるが、その際にも、岩盤モデルや掘削影響評価の結果が活用できる。とくに掘削作業にとっては、山はねや突発湧水などの即時的な掘削影響が重大となるが、これを未然に検知する手段のひとつとして、破壊の兆候を察知できるようなモニタリング手法（AE 計測など）が効果的である。

4. 今後の研究開発の展開

(1) 地層処分技術の信頼性向上に向けた研究開発

「第 2 次取りまとめ」までの研究開発により、わが国における地層処分の技術的信頼性が示され、これを抛り所に、わが国の地層処分計画は事業化の段階へ踏み出した。「第 2 次取りまとめ」は、具体的な地質環境を特定することなく、わが国における地層処分概念の成立性を、様々な科学的根拠を組み合わせることにより理論的に示したものである。これを受けて、今後の研究開発が目指すべき課題は、「第 2 次取りまとめ」で示した「わが国における地層処分技術の信頼性」をさらに向上し、もって処分事業を進めていくうえでの技術基盤をより堅固なものとして、社会の不安や疑問を払拭していくことである。そのため、サイクル機構では、「第 2 次取りまとめ」を礎（いしずえ）として、2 つの深地層の研究施設計画および地層処分基盤研究施設（エントリー）や地層処分放射化学研究施設（クオリティ）などを活用して、地層処分の実施に向けた基盤技術や情報の整備を進めているところである（図-7）。

とくに、今後の研究開発の中核となる深地層の研究施設については、わが国の地質の特性や分布を考慮して、結晶質岩を対象とした「超深地層研究所計画」（岐阜県瑞浪市）と堆積岩を対象とした「幌延深地層研究計画」（北海道幌延町）の 2 つの計画を進めており、それらの計画を通じて、「第 2 次取りまとめ」で示したような地層処分に関連する技術の信頼性を実際の地質環境で確認していく。

(2) 研究開発の目標と課題

わが国における地層処分技術の信頼性向上が今後の研究開発における大目標である。「第 2 次取りまとめ」では、文献情報や東濃地域・釜石鉱山での調査試験、全国規模での事例研究などで得られた地質環境情報や、人工バリアの基本特性、核種の溶解・移行特性などに関する試験データに基づき、また保守的で単純なモデルを仮想して、わが国における地層処分概念の成立性を示した。今後は、「第 2 次取りまとめ」で示したような技術や知見が現実の地質環境で機能し成立することを、より実証的に示していくことが重要である。

そのためには、これまで整備してきた地質環境の調査・評価技術、地下施設や人工バリアに関する工学技術、安全評価のためのツールや手法など、地層処分に関する様々な技術を、深地層の研究施設等において実際の地質環境へ適用することを通じて、その信頼性や

図-7 サイクル機構の研究開発施設

実用性を確認していくことが、まず重要である（目標1：実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認）。また、地下深部の地質環境条件やその長期的な変化に対する理解を深めながら、エントリー、クオリティ等での試験研究を通じて人工バリアの長期挙動や核種の溶解・移行等に関する現象をより現実的なデータとモデルで再現するなど、評価の信頼性や裕度を高めていくことも必要である（目標2：地層処分システムの長期挙動の理解）。

これら2つの目標を達成するため、サイクル機構では「深地層の科学研究」「処分技術の信頼性向上」「安全評価手法の高度化」の3つの研究分野を設けて、各分野ごとに課題を設定し、また分野間で連携しながら研究開発を進めている。

a) 深地層の科学的研究

まず、深地層の研究施設計画を段階的に進めていく中で、これまで整備してきた地質環境の調査・評価技術を適用することにより、体系的な技術としての信頼性を確認していく。あわせて、地下施設の設計・施工を通じて、坑道の掘削・維持などに関する工学技術の基盤を整備する。これら深地層の研究施設計画については、次節(3)で詳しく述べる。

また、地質環境の長期安定性に関する研究として、天然現象の評価方法の信頼性をさらに高める観点から、天然現象が起こるメカニズムやその地域性を規制する要因に着目して、また、地質環境の安定性を評価するうえで必須となるような技術に焦点を当てて、事

例研究や調査・解析技術の開発を進める。とくに、「第2次取りまとめ」やその評価を通じて確認された、非火山地域における地熱メカニズムの解明、西南日本における単成火山活動の将来予測、伏在活断層などの評価手法、隆起・侵食や海水準変動の複合による地形変化の将来予測などが優先課題である。

b) 処分技術の信頼性向上

エントリーでの工学試験や幌延深地層研究計画での原位置試験により、人工バリアの基本特性や長期挙動に関するデータの蓄積とモデルの高度化を進めるとともに、工学技術や設計手法の適用性確認を行う。また、人工バリアと近傍の岩盤を含むニアフィールド環境における長期挙動や連成現象を把握することにより、処分システムの長期挙動に関する評価の信頼性向上を図る。主な課題は以下のとおり。

- ・人工バリアの基本特性に関するデータベースの整備
- ・人工バリア等の長期複合挙動の理解
- ・人工バリア等の工学技術の検証
- ・設計手法の適用性確認

c) 安全評価手法の高度化

エントリーでの工学試験やクオリティでの実核種を用いた試験により、また、深地層の科学研究の成果を取り込みつつ、安全評価に必要な基礎データの蓄積とモデルの高度化を進める。また、実際の地質環境が有する不均質性や理解の不確実性を考慮しつつモデルや評価手法を改良することにより、処分システムの長期挙動に関する評価の信頼性向上を図る。主な課題は

		超深地層研究所計画* (岐阜県瑞浪市) (結晶質岩／淡水系地下水)	幌延深地層研究計画 (北海道幌延町) (堆積岩／塩水系地下水)
深地層の科学的 研究	地質環境 特 性	<p>結晶質岩：主に亀裂を地下水が移動 →亀裂性媒体として評価</p> <p>淡水系地下水の水質形成メカニズム 解明</p> <p>地質環境特性の調査/評価 ・坑道掘削影響の予測/評価 ・調査・解析・評価手法の検証・体系化 ・モニタリング技術開発 等 ⇒ 既存技術の応用・改良 適用性確認</p>	<p>堆積岩：主に鉱物粒子間を地下水が移動 →多孔質媒体として評価</p> <p>塩水系地下水の水質形成メカニズム 解明</p>
	地質環境の 長期安定性	<p>内陸部の隆起・沈降・侵食、結晶質岩/淡水系地下水での地震・断層の影響評価</p> <p>・地域の特徴を活かした事例研究 ⇒ 具体的な地質環境における調査・観測・評価手法整備</p>	<p>沿岸部の隆起・沈降・侵食、堆積岩/塩水系地下水での地震・断層の影響評価</p>
	深地層の 工学技術の基 礎	<p>硬岩系岩盤は強度が高いため、無支保(部分的にコンクリート吹付け)での坑道を想定</p> <p>・地下施設の設計/建設/施工技術 ・安全確保/環境維持技術の検証 ・岩盤領域の長期挙動評価 等 ⇒ 工学技術の適用性確認</p>	<p>軟岩系岩盤は強度が低いので、支保を入れた坑道を想定</p>
地層処分研究 開発	処分技術	<p>・ホワイトシェル(カナダ)： 実規模トンネルシーリング技術の実証</p> <p>・エスボ地下研究所(スウェーデン)： 実規模処分技術の実証試験</p>	<p>・オーバーバックの搬送・定置技術の開発 ・セメント系材料の人工バリアに対する影響試験 等</p> <p>・地層処分研究開発は、海外の地下研究施設での共同研究事例が少ない堆積岩を対象に幌延にて実施予定。</p> <p>・地層処分システム(人工バリア+天然バリア)における物質移行試験等</p>
	安全評価 手 法	<p>・グリムゼル岩盤研究所(スイス)： 亀裂中での核種移行に対する粘土コロイド影響評価試験 等</p>	<p>・搬送定置試験(イメージ図)</p>

* 超深地層研究所計画では「地層処分研究開発」は実施しない。また、東濃地科学センターで進める「地質環境の長期安定性に関する研究」は、超深地層研究所計画とは別のプロジェクトとして、全国規模で実施している。

図-8 2つの深地層の研究施設における研究内容(文献²⁶⁾を編集)

以下のとおり。

- ・核種移行データベースの整備
- ・安全評価モデルの高度化
- ・安全評価手法の整備・高度化
- ・安全評価手法の適用性確認

上記のうち、処分技術や安全評価に関する研究開発については、「第2次取りまとめ」以降も幅広い地質環境条件を念頭に、とくに塩水系の環境下におけるデータの拡充や人工バリアの長期挙動の理解に重点をおきつつ基礎的な研究開発を進めてきたが、今後は深地層の研究施設計画の進展にあわせて具体的な地質環境を対象とした研究に重点化していく。その際、深地層の研究施設計画等の成果を活用した設計・安全評価手法に関する検討は、調査の進展に応じて、すなわち得られる地質環境情報が詳細化されるのに応じて、繰り返し進めることが重要である。これにより、地層処分技術全体としての適用性を確認することができ、また検討結果を調査側へフィードバックすることにより、地質環境の理解度と安全評価上の感度や必要な調査量との関係などを検討することができる。このような過程を通じて、地質環境を合理的に調査・評価する技術や、限られた地質環境情報あるいは段階的に得られる情報に基づいて、効率的に処分システムの設計や安全性の検討を進める手法などを整備していく。

なお、各研究分野、研究課題における「第2次取りまとめ」以降の成果や進捗については、平成13年度年報²⁷⁾および平成14年度年報²⁸⁾として公開してい

る。とくに事業化段階においては、関係する機関や国民各層からの意見を取り入れつつ研究開発を進めることが重要であるため、年報のほか、サイクル機構の報告会・ワークショップや個別の技術報告書として、また関連する学会などを通じて情報発信に努めているところである²⁹⁾。また、処分事業や安全規制の進展に先行して、基盤となる技術や情報をパッケージとして提供していく観点から、研究開発全体の成果を段階的に取りまとめていく予定である。当面は、平成10年代後半ごろとされている概要調査地区の選定期間にあわせて、研究開発成果の取りまとめを行う。その内容については、(4)で議論する。

(3) 深地層の研究施設計画

a) 2つの深地層の研究施設

サイクル機構では、地層処分技術に関する研究開発を進めるための中核的な研究施設として、2つの深地層の研究施設計画を進めている。東濃地科学センターが岐阜県瑞浪市で進めている結晶質岩(花崗岩)を対象とした「超深地層研究所計画」と、幌延深地層研究センターが北海道幌延町で進めている堆積岩(泥岩)を対象とした「幌延深地層研究計画」である。わが国で地層処分の対象となる岩盤は大きく結晶質岩と堆積岩に分けることができ、両者は地層処分にとって重要な地質環境の特性が明瞭に異なる。たとえば、「超深地層研究所計画」が対象としている結晶質岩は緻密で硬く、地下水は主に割れ目を通して動くが、「幌延深

図-9 実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認

地層研究計画」が対象としているような堆積岩は結晶質岩に比べて軟らかく、粒子の隙間を通して地下水が動く。そのため、深地層の研究施設については、従来より「我が国の地質の特性等を考慮して複数の設置が望まれる¹⁾」とされてきた。なお、「超深地層研究所計画」が対象としている領域は内陸にあって、地下水は淡水であるのに対し、「幌延深地層研究計画」の領域は海岸に近く、深部の地下水には相当の塩分が含まれることなども、それぞれの計画における重要な特徴である(図-8)。

b) わが国における深地層の研究施設の役割

わが国における地層処分技術の信頼性の向上が、「第2次取りまとめ」以降の研究開発の大目標であり、その研究開発の中核となるのが、深地層の研究施設である。「第2次取りまとめ」では、釜石鉱山(花崗岩)や東濃鉱山(堆積岩)の既存坑道を活用した調査研究、あるいは海外の地下研究施設での共同研究の成果などにに基づき、地質環境を調査・評価するための要素技術や基盤的な手法を整備した。また、これらの研究で得られた情報や文献情報を比較検討したうえで、現状あるいはその延長上にある工学技術により処分場を合理的に設計・施工し、地層処分の長期的な安全性を解析的に評価できる見通しなどを示した。「第2次取りまとめ」は、質・量の異なる様々な分野の情報を解析・評価することにより、「理論的」に地層処分の成立性を示したといえる。これを受け、深地層の研究施設では、「第2次取りまとめ」で示したような地層処分に関連する様々な技術を実際の地質環境に適用していくことにより、地質環境への理解を進めながら、

『実証的』に地層処分技術としての信頼性を確認していく。

一方で、深地層の研究施設は、「学術研究の場合であるとともに、国民の地層処分に関する研究開発の理解を深める場としての意義を有し、その計画は、処分施設の計画と明確に区分して進めることが必要¹⁾」とされている。このため、深地層の研究施設については、国民各層が地下深部の環境を実際に体験・学習し、また研究者との対話を通じて、地層処分やその研究開発に対する理解を深める場としても整備していく。また、計画の内容や得られた成果についても広く公開し、透明性の確保に努める。なお、深地層の研究施設計画を進めるに当たっては、放射性廃棄物を持ち込まないことや将来にわたって処分場としないことなどを、関係自治体との協定により約束している。

c) 深地層の研究施設計画と課題

深地層の研究施設計画は大きく3段階からなる。全体で約20年の計画である。まず第1段階として、地上からの調査によって、地下の状況や坑道を掘削した際の変化を予測する(地上からの調査研究段階)。第2段階は、坑道を掘削しながら、第1段階の予測結果を確かめるとともに、坑道周辺の状況などを予測していく(坑道掘削時の調査研究段階)。第3段階には、第2段階の予測結果を確かめながら、坑道を利用して様々な試験を行う(地下施設での調査研究段階)。このように、調査研究を段階的に進めることにより、地下深部の地質環境についての理解を深めながら、これを体系的に調査・解析・評価するための技術基盤を整備していく(図-9)。また、得られた地質環境情報に

図-10 超深地層研究所計画（瑞浪）における地上からの調査研究計画（文献^{28）}を編集）

に基づき、地下の研究坑道を設計・施工していくことを通じて、地層処分特有の『情報の取得や技術の実証を目的とした地下施設』を設置するための工学技術の基盤を整備していく。これら、「地質環境の調査・解析・評価技術」と「深地層における工学技術」の基盤を整備していくことが、「深地層の科学研究」としての重要な技術課題である。また、得られた情報については、東海事業所が「地層処分研究開発」として進めている処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化に関する研究開発の基盤情報として活用する。なお、「幌延深地層研究計画」においては、深地層の科学研究に加えて、堆積岩における人工バリアの施工・定置技術の開発や性能試験など、研究坑道を利用した地層処分研究開発をあわせて実施する。結晶質岩における地層処分研究開発については、海外の地下研究施設を活用した共同研究として先行的に進めている（図-8）。

なお、深地層の研究施設計画が目指す地層処分技術の信頼性向上は、端的に言えば『技術が現場で体系的に機能することの確認』である。この確認は、技術の適用性評価やデータ取得を指向しつつ、その結果として、技術の最適化や改良・高度化、そして技術の精度や限界に対する理解と経験をもたらす。また、そのプロセスは、「調査-予測-検証」を基本とした繰り返しと、試行錯誤、フィードバックの積み重ねである。

サイクル機構が進める2つの深地層の研究施設計画については、地元の理解と協力のもと、2001年度以降、着実に進展している。以下、それぞれの計画の現状を紹介する。

d) 超深地層研究所計画（瑞浪）の現状

東濃地科学センターが進めている結晶質岩（白亜紀

の花崗岩）を対象とした「超深地層研究所計画」については、2002年1月に瑞浪市との間で市有地（研究用地）の土地賃貸借契約を締結し、研究坑道などの設置場所をこの研究用地に変更した。新たな研究用地は、当初予定の場所（正馬様用地）から1 km 余り離れているが、土岐花崗岩という同一の花崗岩体にあるため、継続性をもって調査を実施することができる。現在、これまでの成果や経験を踏まえて、研究用地における物理探査やボーリング調査などの地上からの調査を進めているところである。これまで、花崗岩を覆っている上部の堆積岩を対象に深度200 m 程度までの浅層ボーリング調査（4 孔）を行い、2003 年から花崗岩を対象とした深層ボーリング調査（予定掘削長1,350 m、途中12°に傾斜）を実施中である。今後は、この深層ボーリング孔を用いた各種試験により岩盤や地下水の特性に関するデータを取得するとともに、既存ボーリング孔と組み合わせて、孔間水理試験や孔間トモグラフィー調査を行い、地上からの調査段階における地質環境モデルを完成させていく（図-10）。すでに実施済みの反射法地震探査では、堆積岩と花崗岩の境界や花崗岩中の上部割れ目帯の分布などをとらえることができた（図-11）。また、地質環境への理解の程度と評価結果に伴う不確実性との関係を認識しつつ調査・解析を効率的に進めるため、解析コードや境界条件の設定などを変えた複数の手法を用いて地下水流動解析を行った。その結果、水理学的な不連続面となる断層の形状や水理特性（透水性、異方性）などが、解析結果を左右する重要な要因となることが確認された²⁸⁾。

また、調査研究と並行して2002年度に用地の造成工事を行い、2003年7月より、研究坑道（立坑2本）

図-11 超深地層研究所計画（瑞浪）での調査事例²⁸⁾
反射法地震探査による不連続構造の推定

の掘削工事を開始した。今後、坑道を掘削しながら調査研究を進め、2010年代初頭には、深度1,000 m程度に至る地下施設を完成する計画である。なお、研究坑道は、2本の立坑（主立坑、換気立坑）と、これらを結んで展開する試験用の水平坑道群からなる。

e) 幌延深地層研究計画の現状

幌延深地層研究センターが進めている堆積岩（新第三紀の泥岩）を対象とした「幌延深地層研究計画」においては、2001年3月より地上からの調査を開始した。まず、幌延町の広い範囲を対象とした空中からの物理探査や代表地点でのボーリング調査などを行い、その結果を踏まえて2002年7月に、調査研究を中心に行う範囲として3 km四方程度の区域を、幌延町北部の北進地区に選定した。現在、この区域を中心に地表での物理探査やボーリング調査など、詳細な調査を実施しながら、地質環境モデルの作成を進めているところである。これまでの調査により、割れ目の分布や岩盤の透水性が場所によって大きく違うことや、同一深度でも地下水が淡水の場合と塩水の場合があるなど、地質環境が不均質であることを示す結果が得られている（図-12）。今後は、ボーリング調査を主体とした地上からの調査を継続し、その進展に応じて地質環境モデルを更新していく。

また、2003年3月には研究所を建設する用地を幌

延町などから取得し、同年7月に用地の造成工事に着手した。2004年度は、造成工事と並行して、地上施設（研究管理棟、ワークショップ・コア倉庫）の建設を開始し、2005年度には研究坑道の掘削を開始する。その後、坑道を掘削しながら調査研究を進め、2010年代初頭には深度500 m程度に至る地下施設を完成する計画である。なお、研究坑道は、3本の立坑（換気立坑および2本のアクセス立坑）と、これらを結んで展開する試験用の水平坑道群からなる。

(4) 地層処分技術の信頼性向上の戦略

地層処分技術の信頼性向上という大目標を達成するため、「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」（目標1）と「地層処分システムの長期挙動の理解」（目標2）という2つの目標を掲げて、研究開発を進めている。まず目標1に向けては、前項(3)で示した深地層の研究施設計画を着実に進めることを通じて、地層処分技術の適用性や実用性を確認していく。地質環境の調査から、処分システムの設計や安全評価までの一連の技術が体系的に機能することの確認—いわば「第2次取りまとめ」という理論の実証—である。目標2としては、人工バリアの基本性能や核種の溶解、移行・遅延に関するモデルの改良やデータベースの拡充、地質環境条件の不均質性や変動を現実的に

図-12 幌延深地層研究計画での調査事例 (文献²⁸⁾を編集)
地下水地球化学特性 (HDB-1, 3, 4, 5 はボーリング孔名)

考慮した安全評価手法の高度化などが課題である。これらは、「第2次取りまとめ」以前から継続している基礎的な研究開発の延長であり、わが国における地層処分概念の成立性をより堅固なものとする一いわば「第2次取りまとめ」という基礎の堅牢化である。目標1の「理論の実証」を、処分事業や安全規制の進展に先行して段階的に進めていくことにより、また、あわせて目標2の「基礎の堅牢化」を着実に図っていくことにより、地層処分技術の信頼性向上という研究開発の大目標を達成していく。

最初の段階は「地上からのアプローチ」である。現在の予定では、深地層の研究施設計画における地上からのアプローチ（地上からの調査研究段階）は2004～2005年度に終了し、その後数年以内に原燃機構による地上からのアプローチ（概要調査）が開始される見込みである。このため、最初のマイルストーンを2005～2006年頃に置いて、地層処分技術の信頼性向上に向けた研究開発成果を取りまとめる。2つの深地層の研究施設計画における地上からの調査研究段階で得られた成果と、これを踏まえた設計・安全評価手法に関する検討結果などを総括して、「地上からアプローチする段階における地層処分技術」の適用事例として示しつつ、その中で、瑞浪・幌延の地質学的な特徴に照らして、一般化・汎用化に向けた検討を行う。あわせて、人工バリアの長期挙動や安全評価に関するモデルやデータベースの改良・拡充の進展などを示す。

詳細は、今後、各方面の意見を聴きながら検討していくことになるが、位置づけとして留意しておくべき点を以下に述べる。

深地層の研究施設は将来にわたって処分場になることはない。その点において、瑞浪や幌延で取得した地質環境データの「値」自体に意味はない。ましてや、そのデータを使って、処分システムの設計や安全評価に関する検討を行ったとしても、それは結果を求めるものではない。大事なことは、今の技術（既存の技術やその延長上にある技術）で必要な地質環境データが取得できること、そして、そのデータを活用して、今の技術で処分システムの設計や安全評価に関する検討ができることである。それを、瑞浪・幌延という対照的な2つの事例を通じて実践していくことが、地層処分技術の信頼性向上という目標に向けた幹の道すじとなる。もちろん、いかなる調査を行っても地下の地質環境を理解し尽くすことはできないし、そもそも地層処分という概念は、それを要求してはいない。地層処分が求めることは、『理解の不確かさを考慮しても、安全性に十分な余裕が見込めるとの確信』である。深地層の研究施設は、その確信を深める場とならなければならない。深地層の研究施設で経験と実績を積むことにより、たとえば、各段階の調査で達成すべき地質環境の理解の程度と、そのために必要な調査の質・量、あるいは、それに基づいて実施できる設計・安全評価に関する検討の程度などについて、実際の議論

を行うことができる。処分事業に必要な技術の基盤となるツールやノウハウを提示し、また、安全規制を含む社会の意思決定プロセスに様々な示唆を与えることができる。そして何より、深地層の研究施設では、現実の地下の姿を実感しながら、また現場の研究者との対話を通じて、地下深部の環境や研究開発への理解、信頼を深めることができる。

5. おわりに

わが国における地層処分計画は、四半世紀に及ぶ研究段階を経て、事業段階に踏み出した。研究開発だけの段階から、研究開発と並行して処分地の選定や資金の積立てなどを進めていく段階への移行である。この処分事業は百年に及ぶ国家的な大事業であり、処分場の操業期間中における安全性は、他の原子力施設や地下構造物の取り扱いに準じた方法によって確保されなければならない。しかしながら、地層処分に固有の問題は、むしろ事業を終了した後にある。処分場を閉鎖した後の何万年という超長期にわたる安全性である。そして、この超長期の議論には常に『不確実性』が伴う。地層処分は本来的に、様々な不確実性を包含して成り立つシステムであるが、個人が抱く不確実性には、知識と経験、あるいは価値観に応じた大きな幅が生じる。細かなデータの解釈に関する議論から、「何万年先には日本という国家はないのでは？　そもそも人類が存続するのか？」といった意見まであり得る。不確実性を包含しつつも、地層処分に携わる研究者や専門家たちが超長期の安全性を実感できるのは、専門家としての、あるいは経験に培われた、いわば『不確実性に対する相場感』の裏打ちがあるからだと思う。そして、それを如何に整理してわかりやすく示せるか、ここにこそ地層処分の最も重要な課題があると思う。この課題にまず答えたのが、「第2次取りまとめ」である。「第2次取りまとめ」は、わが国で地層処分が成立することを理論的に示し、その基礎となる技術を示した。その際、不確実性に対しては、天然バリア機能を考慮しないケースまでを含む様々なケースについての評価結果や、人間侵入あるいは、火山や断層の直撃などを想定した仮想的シナリオについての評価事例を示すことなどにより対応を試みた。今後は、「第2次取りまとめ」で示した理論や基礎に基づき、不確実性を包含した地層処分の安全性を、より具体的、実証的に示していくことが重要となる。

実証と言っても、実験的な処分場をつくって何万年後の姿を確認することはできない。それに代わる方法が安全評価である。何万年先の将来に予想され、ある

いは心配される状況をシナリオとして描き、これをモデルとデータを用いてシミュレーションする方法である。ただし、このシミュレーションは、将来の真実の姿を言い当てることはできない。それが目的でもない。言うなれば、将来に対する様々な不確実性を考慮して、また、その不確実性の幅を妥当な範囲に限定することによって導かれる結果を示すものである。予想される事象の種類や、それに伴う不確実性の扱い方などに応じて、示される結果は複数であり、幅が生じる。それらの結果は将来の真実の姿ではないから、結果だけを見て判断すべきではない。結果を導くに至った考え方、用いた情報や知識、それら全てを総合的に見て判断することが必要である。

最終的な判断を下すのはもちろん社会である。社会の判断を求めるプロセスの大枠は最終処分法や国の報告書に示されており、これらに基づき、今後具体的な仕組みが構築されていく。その際、前提となるのが『透明性』である。透明性が社会を利して円滑に機能していくためには、説明する力と理解する力が必要となる。立場で論争するのではなく、社会として論究していく姿勢が重要となる。これらが叶えば、地層処分の安全性に対する研究者の実感と確信は、社会の客観的な判断として受容されるはずである。

参考文献

- 1) 原子力委員会：原子力の研究、開発および利用に関する長期計画、原子力委員会、1994。
- 2) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性―地層処分研究開発第2次取りまとめ―、サイクル機構技術資料、JNC TN 1410 99-020-024、1999。
- 3) 通商産業省告示第592号：特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画、2000。
- 4) 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会：我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価、2000。
- 5) 法律第117号：特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律、2000。
- 6) 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）、2000。
- 7) 原子力委員会：原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画、2000。
- 8) 原子力発電環境整備機構：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、2002。
- 9) 原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会：放射性廃棄物処理処分方策について（中間報告）、1984。
- 10) 原子力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) 第四紀火山カタログ委員会編：日本の第四紀火山カタログ

- グ, 1999.
- 12) 土木学会原子力土木委員会地下環境部会：概要調査地区選定時に考慮すべき地質環境に関する基本的考え方, 2001.
 - 13) 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.
 - 14) 中田高・今泉俊文編：活断層詳細デジタルマップ付図, 200 万分の 1 日本列島活断層図, 東京大学出版会, 2002.
 - 15) 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, 野原壮, 阿部寛信, 坂井眞一, 向山健二郎：日本周辺海域の中新世最末期以降の構造発達史付図, 日本周辺海域の第四紀地質構造図, 海洋調査技術, 第 13 巻第 1 号, 海洋調査技術学会, 2001.
 - 16) たとえば, 文部科学省：2003 年活断層調査成果および堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集, 2003.
 - 17) 高田圭太, 中田高, 野原壮, 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, pp. 77-91, 2003.
 - 18) Ogawa, Y., Takakura, S. and Honkura, Y.: Resistivity structure across Itoigawa-Shizuoka tectonic line and its implications for concentrated deformation, *Earth Planets Space*, 54, pp. 1115-1120, 2002.
 - 19) 弘瀬冬樹, 中村綾子, 中島淳一, 長谷川昭：東北日本弧下のマグマ供給源の分布— b 値と S 波速度構造から推定される島弧走向方向の変化—, 火山, 47, 5, pp. 475-480, 2002.
 - 20) Nakajima, J., Hasegawa, A.: Tomographic imaging of seismic velocity structure in and around the Onikobe volcanic area, northeastern Japan: implications for fluid distribution, *J. Vol. Geotherm. Res.*, 127, pp. 1-18, 2003.
 - 21) 上原大二郎, 石丸恒存, 棚瀬充史, 小川康雄, 鍵山恒臣：MT 法におけるファーリモートリファレンス処理の効果と紀伊半島南部地域の深部比抵抗構造, *応用地質*, 44, pp. 164-172, 2003.
 - 22) たとえば, 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, pp. 85-93, 1999.
 - 23) 高木俊男・柳田誠・藤原治・小澤昭男：河岸段丘から推定した河床高度変化の歴史, *地学雑誌*, 109, 3, pp. 366-382, 2000.
 - 24) 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.
 - 25) 宮川公雄, 田中和広, 馬原保典, 鈴木浩一, 河野愛, 千葉昭彦, 水落幸広：塩淡水を考慮した割れ目系岩盤の水理地質構造調査, 日本応用地質学会平成 10 年度研究発表会, pp. 37-40, 1998.
 - 26) 高山純一・岸本宗丸・横井浩一：時系列を取得する AMT システムとフィールド適用試験結果, *物理探査学会第 106 回学術講演会論文集*, pp. 217-220, 2002.
 - 27) 核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成 13 年度報告—, *サイクル機構技術資料*, JNC TN 1400 2002-003, 2002.
 - 28) 核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成 14 年度報告—, *サイクル機構技術資料*, JNC TN 1400 2003-004, 2003.
 - 29) 前川恵輔：地層処分技術に関する研究開発報告会—実施段階を迎えた研究開発の新たな展開—(会議報告), *サイクル機構技報*, No. 15, pp. 131-134, 2002.

(2003.12.24 受付)

High-level radioactive waste from nuclear power generation will be disposed in a stable geological environment with a depth of more than 300 m. JNC has been consistently assigned to lead R & D on geologic disposal in Japan and compiled the achievement into H 12 report in 1999. H 12 gave a comprehensive assessment of the technical feasibility and reliability of the disposal concept in Japan with a generic manner, which provided the technical basis for Japanese HLW disposal program to move from the phase of generic R & D into the implementation phase. In the stage of implementation, JNC, with other relevant research organizations, is assigned to continue basic R & D for further improving the technical reliabilities of geological disposal in Japan.