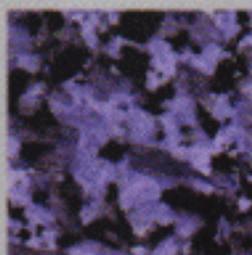
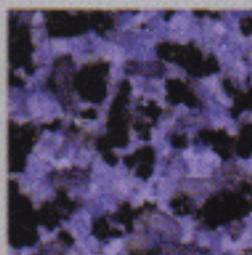
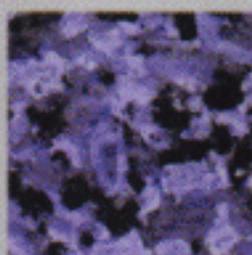
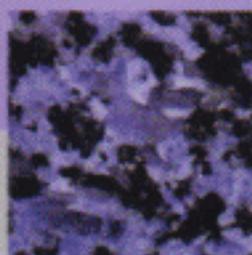




わが国における高レベル放射性廃棄物 地層処分の技術的信頼性

—地層処分研究開発第2次取りまとめ—

分冊1 わが国の地質環境



平成11年11月26日

まえがき

平成9年4月に公表された原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会報告書「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」（以下、「専門部会報告書」という）に従い、核燃料サイクル開発機構（以下、その前身である動力炉・核燃料開発事業団の双方を総称して「サイクル機構」という）は関連する研究機関等の協力を得て、地層処分研究開発の第2次取りまとめを進めてきた。

第2次取りまとめは、1992年に公表した第1次取りまとめの成果を受けて、わが国における地層処分の技術的信頼性を示すとともに、2000年を目安に設立される実施主体が処分事業を進めるうえでの処分予定地の選定、安全基準の策定の技術的拠り所を与えるものであり、国の評価を経て2000年以降の研究開発を具体化するうえで重要なものと位置づけられている。

わが国においては、1984年の原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会報告書によって、研究開発にあたり岩石の種類を特定することなく幅広い地質環境を対象とすることとされている。また地層処分に関する安全規制上の基準については現在準備段階にある。これらのことから第2次取りまとめは、専門部会報告書に示された技術的課題に対する科学的知見を積み重ねることによって、わが国の地層処分概念を一般的に検討しその成立性を概括的に論じたものであり、地層処分計画を研究開発の段階から実施段階に進めることについての技術的な判断材料となることを意図している。

取りまとめにあたっては、研究開発の成果を積極的に公開し、技術的内容について個々に評価を受けるとともに、取りまとめの過程においても種々の機会を利用して国内外から広く意見を求めてきた。平成9年9月には、第2次取りまとめに向け、関係研究機関等の協力を一層進めるため、日本原子力研究所、地質調査所、防災科学技術研究所、電力中央研究所、原子力環境整備センター、電気事業連合会、高レベル事業推進準備会、核燃料サイクル開発機構の各機関および大学の専門家による「地層処分研究開発協議会」が発足した。この協議会のもとに設けられた検討部会とタスクフォースにおいて、ほぼ毎月1回の頻度で詳細な技術的検討が進められ、その成果は適宜第2次取りまとめに反映されてきた。なお、地層処分研究開発の基盤となる深部地質環境の科学的研究については、地球科学分野の専門家による地層科学研究検討会および部会等の場において、最新の科学的・技術的な知見に基づく詳細な分析を行ったうえで、その成果を反映した。

第2次取りまとめの過程で、平成10年9月および平成11年4月の2度にわたり、研究開発の進捗をドラフトとして中間的に整理し、原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会に報告するとともに公表した。さらに、これにあわせて地層処分研究開

発報告会の開催、ホームページへの掲載を行い、関係する幅広い分野の専門家等の方々からご意見をいただきながら、取りまとめを進めてきた。また、専門部会報告書の指針に従い、ドラフトの段階で経済協力開発機構・原子力機関（OECD/NEA）による国際レビューを受けるとともに、ワークショップ等を通じて海外の専門家とも技術的な内容について意見交換を行った。

このように地層処分研究開発協議会をはじめとして、多くの方々のご意見、ご協力をいただき、これらを反映して、このたび第2次取りまとめの報告書「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－」（以下、報告書の呼称として「第2次取りまとめ」という）を作成した。第2次取りまとめは、全体の成果を取りまとめた総論レポートと、専門部会報告書に示された3つの主要な研究開発分野の各々に対応する分冊1「わが国の地質環境」、分冊2「地層処分の工学技術」および分冊3「地層処分システムの安全評価」から構成した。本報告書はこのうちの分冊1「わが国の地質環境」であり、わが国の地質環境に関する総論レポートでの記述内容を科学的・技術的に裏づける観点から、地質環境条件の調査研究ならびにその基盤となる深部地質環境の科学的研究として実施した内容と、得られた結果などの事実関係を示すことに重点を置いて取りまとめた。

本分冊の取りまとめにおいては、総論レポートで記述した内容の根拠となる個々の研究成果の品質を示すとともに、総論レポートでは割愛した調査研究の手法などに関する情報を補完することに留意し、調査や試験の結果だけでなく実施内容にも透明性をもたせるように心がけた。ただし、すべての研究項目にわたって細部まで記述することは量的に困難であるため、適宜、個々の研究に関する公開文献を示した。また、研究開発全体としての統合化は総論レポートに委ね、本分冊では、追跡性を重視する観点から、わが国の地質環境に関する重要な研究領域を設定したうえで、各研究領域ごとに、課題、実施内容と結果ならびに成果を取りまとめた。

要 約

わが国における地層処分のコンセプトは、安定な場所を選んだうえで、そこに人工バリアと天然バリア（岩盤）からなる多重のバリアシステムを構築することにより、長期にわたる安全性を確保するものである。地層処分の安全確保にとって地質環境には、「長期にわたって安定な場所であること」と「その岩盤と地下水が、多重バリアシステムに適した性質であること」が求められる。本分冊では、このような地層処分にとって適切な地質環境が、わが国に存在する可能性を検討するための科学的・技術的な根拠となる情報や知見を整理した。

本分冊は、全5章から構成されている。この章構成は、総論レポートとの対応、専門部会報告書に示された第2次取りまとめの課題の構成、およびサイクル機構における従来からの調査研究の枠組みを勘案して設定した。

第1章では、地層処分における地質環境の役割、わが国の地質環境の特徴、地質環境条件の調査研究の進め方などを整理した。本章は、第2章以降で具体的な調査研究の成果を記述するのに先立ち、第2次取りまとめにおける地質環境条件の調査研究の課題を明確にしておくことを目的として、「地層処分の概念から議論を起し」「わが国の地質学的な特徴を概観し」「これまでの調査研究の進展や国による評価、指針の経緯をたどった」ものである。内容的には、総論レポート第III章の「3.1 地層処分にとって重要な地質環境条件」をより詳細化したものとなっている。個々の調査研究における実施内容や結果を参照する場合には、第2章以降の該当箇所直接アクセスしていただきたい。

第2章および第3章では、地質環境条件の調査研究における大きな研究課題である「地質環境の長期安定性に関する研究」と「地質環境の特性に関する研究」について記述した。各章は、それぞれ、総論レポート第III章の「3.2 わが国における地質環境の長期安定性」および「3.3 わが国における地質環境の特性」を技術的にサポートするとともに、各研究領域に対して専門部会報告書に示された第2次取りまとめへの個別課題に応える観点で取りまとめた。第2章では、「地層処分にとって安定な地質環境がわが国に存在し得ることを示す」ための科学的な根拠を整備する観点から、変動要因としての火山活動や断層活動などの天然現象の特徴や地質環境への影響に関して、現在までに得られた知見や情報を、調査研究の手法とともに取りまとめた。第3章では、「地層処分の観点から、わが国の深部地質環境の一般的な性質を把握する」ため、多重バリアシステムにとって重要な岩盤や地下水の特性を対象に実施した調査の内容と、それによって得られた知見や情報をまとめた。

第4章には、地質環境に関する調査の進め方や調査技術・機器の開発の現状など

を整理した。整理に際しては、総論レポート第 VI 章の「6.3 処分予定地選定に資するための技術的拠り所」の基盤となる現状の要素技術・機器のカタログおよびそれらを用いた標準的な調査手法としての活用を念頭に置いた。

第 V 章では、東濃ウラン鉱床などにおけるナチュラルアナログ研究について記述した。これは、専門部会報告書にも示されているように、ナチュラルアナログ研究には第 II 章～第 IV 章の各章にまたがる課題が含まれていることに対応して、別途、章を起こしたものである。本章では、総論レポート第 III 章の「3.4 地質環境に関するナチュラルアナログ研究の事例」を補完するための知見を整理した。

これら各章の検討を通じて、地層処分の場として適切な地質環境が、わが国においても選定し得るとの見通しを得た。各章の主要な内容を、以下にまとめる。

1. 第 I 章（地層処分とわが国の地質環境）

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、まず、処分場として確保した岩盤空間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地質環境は、

- －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もつ、
- 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。処分地の選定に際しては、地質環境に急激な変化、あるいは緩慢ではあるが累積的な変化をもたらすような天然現象によって、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。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、これらの地質環境の特性を十分に把握したうえで、こ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) 日本列島の地質学的な特徴

地層処分の観点からわ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、アジア大陸の東縁部に沿って細長く延びる弧状列島であり、太平洋側から2つの海洋プレートが日本列島の下に沈み込んでいる。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、さまざまな種類の地層や岩体が構成する地質などは、わ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に満たされている。また、沿岸地域では、内陸からもたらされた降水起源の水と海水とが接している。

3) 地質環境条件の調査研究

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、従来からの国の方針となっている。

これを踏まえ、サイクル機構では、わ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標に、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、わが国の地質環境を幅広くとらえて進めるべき当面の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、過去の活動に認め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わが国に存在する可能性を示す。
- ②わ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の研究によって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まとめる。

2. 第II章（わが国における地質環境の長期安定性）

1) 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

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さまざま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。この観点から、わが国で考慮すべき天然現象は、①地震・断層活動、②火山・火成活動、③隆起・沈降・侵食および④気候・海水準変動である。

2) 将来予測の考え方

将来における天然現象の活動を予測的に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様式や変動の規模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い出すことができ、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。ただし、地質環境の長期安定性の評価に関する時間スケールについては、「過去数十万年程度」の地質学的な記録をもとに、「将来十万年程度」の変化を検討することが期待されている。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。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の場合において、地殻の応力状態などの変動は、数十万年～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。したがって、将来十万年程度における天然現象の活動を評価する場合には、過去数十万

年程度における活動の様式や変動傾向が、同様に継続していくとみなすことが妥当と考えられる。

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、過去数百万年におけ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き、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（安定な地質環境）を見い出すことができる。

すなわち、火山活動や断層活動のように偏在性が強い現象や局所的な現象については、将来にわたって活動が起こりそうな場所を限定できることから、個々の地域において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把握し、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わが国にも広く存在しているといえる。

一方、隆起・侵食および気候・海水準変動については、将来における変動の速度や幅が推定できることから、一部の影響の著しい地域を避けたうえで、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応をとることができる。

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、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地震・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・破砕やこれにともな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周辺は、処分地の選定に際して避けるべきである。

わ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。わ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、数 m～数百 m である。ただし、大規模な断層では 2km 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。また、一部の逆断層帯では、断層面が数 km 程度にわたって移動したことも報告されている。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、地震動については、そもそも地下深部での影響は小さく、十分な設計対応が可能と考えられる。

②火山・火成活動

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。

わ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、限定された地域内において、新たな火山の形成を含む活動が繰り返されている。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、日本列島における大局的な火山活動の場は変わっていない。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い（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ない）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や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やいくつかの火山地域での事例研究によれば、そのような影響が及ぶ範囲は、火山の噴出中心から数 km～20km 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・沈降・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。これについては、隆起・侵食の規模や速度を地域ごとに把握し、処分地の選定に際しては、活断層や火山と同様に、変動の激しい地域を避けるべきである。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により限定できる。

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継続・累積している。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、今後も同様に継続すると考えられる。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、長期的な隆起の速度は50m/十万年以下である。

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。これらによれば、山地の中心部では侵食速度が年間1mmを越えるところも多いが、丘陵や平野の大部分では年間0.5mm以下である。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、次第に谷底が下刻されていく。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。

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、表層での水収支や海水準の変動にともな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、寒冷化にともな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~-120m 程度の範囲内にあったことが、酸素同位体比の変動や海岸段丘の高度などから解析されている。

日本列島周辺における年平均気温は、現在比-8℃から、現在比+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。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、今後十万年程度の間は、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を見込んで、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、より短期的な変動を包含した評価を行うことも可能である。

3. 第III章（わが国における地質環境の特性）

1) 多重バリアシステムにとって重要な地質環境の特性

多重バリアシステムを基本とする地層処分及安全確保において、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流動とその地球化学的な特性が重要である。オーバーバ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、地下水の性質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、場としての地温や地圧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、岩盤自体の熱伝導性や強度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した物質の移動・遅延に関与する間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。

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、わ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、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と考え得ることや、地温が十分に低く地圧も均質に近いような深部岩盤がわ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、動水勾配は地形に強く依存するが、地下深部の岩盤中では、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、深度が増加するにしたがって地圧が大きくなるため、一般に割れ目や鉱物粒子間の間隙が減少し、岩盤の透水性も地表付近に比べて小さくなると考えられる。

全国各地の井戸データ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では、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小さくなることが確認された。

岩盤の透水性については、土木工学などの分野に蓄積されている文献データと東濃地域および釜石鉱山で得られた地下深部についての実測データとの比較・検討がなされた。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、断層破碎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。わが国においては、海岸付近では海水起源の地下水、火山地域ではマグマ起源の地下水の存在が考えられる。ただし、火山やその周辺を除けば、マグマによる地下水への影響は排除できる。

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。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、地下深部にいくにしたがって 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ある。

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、場としての特性（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、地温勾配の全国分布図が作成されている。これによれば、火山地域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、鉛直応力と水平応力との比は地下浅部ではばらつくものの、深度が大きくなるにしたがって 1 前後に近づく。

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、わが国の多くの地域において、地下数百 m～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。

なお、東濃鉱山および釜石鉱山において、坑道掘削前後における岩盤物性の変化などを観測し、発破掘削によって周辺の岩盤の強度などが変化する範囲は、坑道壁面から 1m 程度までであることを確認した。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

地下水を媒体とした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盤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である。

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盤では、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、粒子間の間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。また、花崗岩においては、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。

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、長石類、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。なお、東濃ウラン鉱床を対象としたナチュラルアナログ研究では、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ことが観察された。

4. 第IV章（地質環境調査技術）

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。わが国の地質環境の特徴や諸外国の事例などにに基づき、サイト選定における技術的判断の拠り所とすべき地質環境上の要件として、以下の項目を整理した。

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。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おり、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確保することが可能である。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などを調べることにより、影響の有無や程度を実際に確認できる。

②隆起・侵食によって廃棄体が地表付近に接近しないこと

この要件は、廃棄体を埋設する深度との関係において、廃棄体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。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、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。

③岩盤の規模が充分であり、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十分に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。

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・性能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、岩盤や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。とくに、地下水の動きや酸化還元状態、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。

2) 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（1,000m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、①地質・地質構造、②地下水の流動特性、③地下水の地球化学特性、④岩盤の熱特性・力学特性、⑤岩盤中の物質移動特性など、多様な情報を取得することが要求される。

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製作と、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 1,000m 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する水理試験装置、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する装置、および地下水の pH や酸化還元電位を原位置で計測する装置などを開発した。また、坑道内で利用できる地下水調査機器として、ボーリング孔間での水理試験装置、坑道の近傍に適用できる水理試験装置、水質連続モニタリング装置などを開発した。これらにより、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の取得が可能である。

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適切な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、東濃地域での地質構造調査や断層活動に関する事例研究などを通じて、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を整備した。

5. 第V章（地質環境に関するナチュラルアナログ研究）

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ルアナログ研究のこれまでの成果をまとめた。

東濃ウラン鉱床は、約 1 千万年前に形成されて以来、地震・断層活動や隆起・沈

降、侵食・堆積，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きた。とくに，鉱床が断層で破断され上下に 30m 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。なお，ウランの高濃集部と低濃集部とを比較検討した結果によれば，ウランの濃集の度合いは，必ずしもウランを固定する能力の大小を表わすものではない。むしろ地下深部の地質環境は，ウラン鉱床の有無にかかわらず，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と考えられる。

目次

まえがき

要約

第1章 地層処分とわが国の地質環境	I-	1
1.1 地層処分における地質環境の役割	I-	1
1) 地層処分の概念と安全確保の仕組み	I-	1
2) 地質環境に期待される役割	I-	2
3) 地質環境の長期安定性	I-	3
4) 重要な地質環境の特性	I-	4
1.2 わが国の地質環境の特徴	I-	5
1) 地質学的な位置づけ	I-	5
2) 地質の分布	I-	6
3) 地理的な条件	I-	6
1.3 地質環境条件の調査研究	I-	7
1.3.1 調査研究の進め方	I-	7
1) 基本的な考え方	I-	7
2) 調査研究の方法	I-	8
1.3.2 国による評価と課題の設定	I-	9
1) 第1次取りまとめに対する国の評価	I-	9
2) 第1次取りまとめ以降の調査研究	I-	10
3) 第2次取りまとめの目標と課題	I-	11
参考文献	I-	13

第II章 わが国における地質環境の長期安定性	II-	1
2.1 地質環境の長期安定性に関する研究	II-	1
2.1.1 地質環境の長期安定性に影響を及ぼす天然現象	II-	1
2.1.2 将来における天然現象の予測的評価	II-	3
参考文献	II-	5
2.2 日本列島におけるテクトニクス	II-	6
2.2.1 日本列島および周辺海域のプレート運動	II-	6
2.2.2 プレートシステムの転換	II-	8
2.2.3 ネオテクトニクス	II-	10
1) 千島弧	II-	11

2) 東北日本弧	II-	11
3) 伊豆－小笠原弧	II-	11
4) 西南日本弧	II-	11
5) 琉球弧	II-	12
参考文献	II-	13
2.3 地震・断層活動	II-	16
2.3.1 わが国における断層活動の特徴	II-	16
1) 活断層の活動履歴	II-	16
(1) 活動の継続性	II-	16
(2) 活動期間	II-	19
2) 活断層の地域性	II-	19
(1) 活断層分布図	II-	19
(2) 活断層の分布とタイプ	II-	20
(3) 活断層区	II-	23
3) 活断層の活動場の拡大	II-	28
(1) 幅の拡大	II-	28
(2) 長さの伸長	II-	31
(3) 活断層帯の例	II-	31
4) 活断層以外の断層活動	II-	33
2.3.2 地震・断層活動が地質環境に及ぼす影響	II-	34
1) 断層活動が地質環境に及ぼす影響	II-	34
(1) 力学的影響	II-	34
(2) 熱的影響	II-	37
(3) 水理学的影響	II-	38
(4) 地球化学的影響	II-	40
2) わが国における地震活動による影響	II-	42
(1) わが国の地震活動	II-	42
(2) 地震が地質環境に及ぼす影響	II-	42
2.3.3 まとめ	II-	45
参考文献	II-	48
2.4 火山・火成活動	II-	54
2.4.1 わが国における火山活動の特徴	II-	54
1) 第四紀火山とテクトニックセッティング	II-	54
(1) 東日本火山帯	II-	54
(2) 西日本火山帯	II-	56
(3) 火山帯とプレートの配置	II-	57
2) 火山体の地下構造	II-	57
(1) 物理探査によるマグマ供給系の空間的構造	II-	58

(2) マグマ供給系の空間的構造とテクトニクス	II-	58
3) 第四紀火山活動の時間的・空間的変化	II-	60
(1) 第四紀火山カタログ	II-	60
(2) 日本列島における第四紀火山活動の時間的・空間的変化	II-	60
(3) 火山地域・火山列における第四紀火山活動の時間的・空間的変化	II-	66
4) 火山活動の規則性とその将来予測	II-	66
2.4.2 火山活動が地質環境に及ぼす影響	II-	70
1) 第四紀火山と地温勾配分布	II-	72
(1) 坑井温度データの収集と地温勾配図の作成	II-	72
(2) 日本列島における高温異常域	II-	73
(3) 火山およびその周辺地域の地温勾配	II-	75
2) 地下温度構造	II-	75
(1) 鉛直一次元熱伝導モデルによる地下温度の算定	II-	75
(2) 火山およびその周辺地域における地下温度構造	II-	76
3) 地下温度構造を支配する要因	II-	80
(1) 熱源（マグマ溜まり）のモデル	II-	80
(2) 熱源の寿命と地下温度構造	II-	82
4) 熱水対流系	II-	88
(1) 鉛直一次元浸透流モデルによる流体流動速度の算定	II-	88
(2) 流体流動速度による熱水対流系の大きさ	II-	91
5) 熱水の化学組成	II-	91
(1) 火山およびその周辺地域における温泉水の化学組成	II-	91
(2) 火山およびその周辺地域の熱流量と化学的な影響	II-	96
6) 貫入岩による熱的影響	II-	99
2.4.3 まとめ	II-	104
参考文献	II-	107
2.5 隆起・沈降・侵食	II-	113
2.5.1 わが国における隆起・沈降・侵食の特徴	II-	113
1) 隆起・沈降	II-	113
(1) 隆起・沈降運動の解析法	II-	113
(2) 山地の変動様式	II-	115
(3) 海岸の変動様式	II-	118
(4) 第四紀の沈降	II-	123
2) 隆起・沈降の将来予測	II-	131
(1) 東北日本弧の変動プロセス	II-	131
(2) 海岸の等速隆起	II-	137
3) 侵食	II-	139
(1) 侵食速度の分布	II-	139
(2) 侵食のプロセス	II-	148
2.5.2 隆起・沈降・侵食が地質環境に及ぼす影響	II-	155

1) 直接的影響	II- 155
2) 間接的影響	II- 156
(1) 水理学的な影響	II- 156
(2) 地球化学的な影響	II- 156
2.5.3 まとめ	II- 157
参考文献	II- 160
2.6 気候・海水準変動	II- 168
2.6.1 気候・海水準変動の特徴	II- 168
1) 気候・海水準変動の解析法	II- 168
2) 第四紀の気候・海水準変動	II- 171
3) 最終氷期以降の気候・海水準変動	II- 171
4) 気候・海水準変動のメカニズム	II- 175
5) 気候・海水準変動の将来予測	II- 175
2.6.2 気候・海水準変動が地質環境に及ぼす影響	II- 175
1) 永久凍土の影響	II- 178
(1) 最終氷期における永久凍土の分布	II- 178
(2) 永久凍土の形成深度	II- 178
(3) 永久凍土の成長にともなう水理条件の変化	II- 181
(4) 凍結による岩盤の劣化	II- 181
(5) 熱収縮による岩盤の劣化	II- 183
2) 侵食作用への影響	II- 184
3) 水理・水質への影響	II- 184
(1) 動水勾配への影響	II- 184
(2) 海・陸境界の移動	II- 185
(3) 流路の変化	II- 185
4) 地球温暖化の影響	II- 185
2.6.3 まとめ	II- 186
参考文献	II- 189
第III章 わが国における地質環境の特性	III- 1
3.1 地質環境の特性に関する研究	III- 1
3.1.1 地層処分にとって重要な地質環境の特性	III- 1
1) 地質構造	III- 3
2) 地下水の流動特性	III- 3
3) 地下水の地球化学特性	III- 4
4) 岩盤の熱特性・力学特性	III- 5
5) 岩盤中での物質移動特性	III- 5
3.1.2 地質環境の特性に関する情報の整理	III- 5

3.2 地質構造	III- 8
3.2.1 わが国における地質構造の特徴	III- 8
3.2.2 移行経路として重要な地質構造要素	III- 9
1) 初生的構造要因による移行経路	III- 9
2) 二次的構造要因における移行経路	III- 12
3.2.3 割れ目に関する実測データ	III- 15
1) 割れ目のスケールと方向分布	III- 15
2) 割れ目形状	III- 15
3) 割れ目半径分布	III- 16
4) 割れ目頻度分布	III- 16
5) 割れ目の空間分布	III- 18
6) 割れ目の透水量係数分布	III- 18
参考文献	III- 21
3.3 地下水の流動特性	III- 26
3.3.1 わが国における地下深部の地下水流動特性	III- 26
1) 地下深部の動水勾配	III- 27
2) 地下深部の岩盤における透水性	III- 30
3) 塩水／淡水境界	III- 35
3.3.2 地下深部の地下水流動特性に関する調査・解析事例	III- 39
1) 東濃地域における広域地下水流動研究	III- 40
(1) 調査・解析領域の設定	III- 40
(2) 地下水流動特性の評価手法の概要	III- 40
(3) 水理特性データの取得	III- 42
(4) 水理地質構造モデルの構築	III- 44
(5) 地下水流動解析とその検証	III- 45
2) 東濃地域における立坑掘削にともなう地下水流動影響調査	III- 45
(1) 調査・解析領域の設定	III- 45
(2) 地下水流動特性の評価手法の概要	III- 45
(3) 水理特性データの取得	III- 47
(4) 水理地質構造モデルの構築	III- 47
(5) 地下水流動解析とその検証	III- 50
3) 釜石鉱山における坑道周辺の地下水流動調査	III- 50
(1) 亀裂性岩盤における坑道周辺の水理学的特性	III- 54
(2) 亀裂性岩盤におけるモデル化手法の適用性の検証	III- 54
(3) 亀裂性岩盤中の地下水流動特性の調査・解析手法	III- 56
3.3.3 まとめ	III- 58
参考文献	III- 60
3.4 地下水の地球化学特性	III- 66
3.4.1 わが国における地下水の地球化学特性	III- 66

1) 降水起源の地下水の地球化学特性	III- 67
2) 海水起源の地下水の地球化学特性	III- 67
3.4.2 深部地下水の地球化学特性に関する調査・解析事例	III- 72
1) 東濃地域	III- 75
(1) 堆積岩中の地下水の地球化学特性とその形成プロセス	III- 75
(2) 花崗岩中の地下水の地球化学特性とその形成プロセス	III- 79
2) 釜石鉾山	III- 83
(1) 花崗岩中の地下水の地球化学特性	III- 83
(2) 地下水の水質形成プロセス	III- 83
3.4.3 深部地下水中のコロイド・有機物・微生物に関する研究事例	III- 87
1) コロイド	III- 88
2) 有機物	III- 88
3) 微生物	III- 89
3.4.4 まとめ	III- 92
参考文献	III- 96
3.5 岩盤の熱・力学的な特性	III- 100
3.5.1 地下深部における岩盤の熱的特性	III- 100
1) 岩盤の熱物性	III- 100
(1) 熱伝導率	III- 101
(2) 比熱	III- 101
(3) 線膨張係数	III- 101
(4) 熱物性の深度依存性	III- 101
2) 地温勾配	III- 101
3.5.2 地下深部における岩盤の力学特性	III- 107
1) 岩盤の力学物性	III- 107
(1) 物性値の統計学的検討	III- 108
(2) 物性値の相関	III- 115
(3) 物性値の深度依存性	III- 118
2) 岩盤の初期応力	III- 121
3) 岩盤の時間依存挙動	III- 123
3.5.3 坑道掘削による影響の調査・解析事例	III- 126
1) 東濃鉾山における掘削影響試験	III- 127
(1) 立坑における掘削影響試験	III- 127
(2) 水平坑道における掘削影響試験	III- 129
2) 釜石鉾山における掘削影響試験	III- 132
(1) 地下 260m における掘削影響試験	III- 135
(2) 地下 730m における掘削影響試験	III- 135
3.5.4 まとめ	III- 139
参考文献	III- 143

3.6 岩盤中での物質移動特性	III- 147
3.6.1 岩盤中での物質移動に関する調査・解析事例	III- 147
1) 東濃地域における物質移動調査・解析	III- 147
(1) 岩盤中の微視的移行経路	III- 147
(2) 化学的遅延（収着／鉱物化）	III- 149
(3) 化学的遅延（共沈）	III- 153
(4) コロイドによる核種の移行	III- 154
2) 釜石鉱山における物質移動調査・解析	III- 154
(1) 岩盤中の微視的移行経路	III- 154
(2) 物理的遅延（マトリクス拡散）	III- 158
(3) 化学的遅延（収着）	III- 158
3.6.2 まとめ	III- 161
参考文献	III- 164

第IV章 地質環境調査技術	IV- 1
4.1 処分地の選定と地質環境調査	IV- 1
4.1.1 サイト選定のプロセス	IV- 2
1) 処分候補地の選定	IV- 2
2) 処分予定地の選定	IV- 3
3) 処分地の選定	IV- 3
4.1.2 サイト選定の要件	IV- 3
1) 要件の抽出	IV- 3
2) サイト選定の可否にかかわる地質環境の要件	IV- 4
(1) 地質環境の長期安定性に関する要件	IV- 4
(2) 処分場の建設可能性に関する要件	IV- 5
(3) 人間侵入に関する要件	IV- 6
3) サイト選定において考慮すべき地質環境条件	IV- 6
(1) 人工バリアの設置環境として考慮すべき地質環境条件	IV- 6
(2) 天然バリアとして重要な地質環境条件	IV- 8
4.1.3 地質環境の調査	IV- 9
1) 調査の進め方	IV- 9
(1) 文献調査	IV- 9
(2) 地上からの調査	IV- 13
(3) 地下施設を利用した調査	IV- 15
2) 調査技術の開発	IV- 16
参考文献	IV- 18
4.2 重要な地質環境特性に関する調査手法	IV- 20
4.2.1 地質・地質構造に関する調査	IV- 20
4.2.2 地下水の流動特性に関する調査	IV- 22

4.2.3 地下水の地球化学特性に関する調査	IV- 23
4.2.4 岩盤の熱特性・力学特性に関する調査	IV- 24
4.2.5 岩盤中での物質移動特性に関する調査	IV- 25
4.2.6 研究サイトにおける地質環境調査の事例	IV- 26
1) ボーリング孔を利用した地質環境調査	IV- 26
(1) 調査のアプローチ	IV- 26
(2) ボーリング地点の選定	IV- 27
(3) ボーリング孔を利用した調査の手順	IV- 28
(4) ボーリング孔の掘削に求められる条件	IV- 29
(5) 岩芯の採取	IV- 31
(6) 水理試験	IV- 31
(7) 地下水の採水	IV- 34
2) 地下坑道での地質環境調査	IV- 35
(1) 地質構造調査	IV- 35
(2) 物埋探査	IV- 36
(3) 水理特性調査	IV- 36
(4) 岩盤力学特性調査	IV- 38
(5) 物質移動特性調査	IV- 39
3) 結晶質岩と堆積岩に対する地質環境調査技術	IV- 41
(1) 結晶質岩に対する調査	IV- 41
(2) 堆積岩に対する調査	IV- 41
参考文献	IV- 47
4.3 主要な地質環境調査技術	IV- 48
4.3.1 地質・地質構造に関する調査技術	IV- 48
1) 空中からの概査	IV- 48
(1) リモートセンシング	IV- 48
(2) 空中電磁探査	IV- 49
(3) 空中磁気探査	IV- 51
(4) 空中放射能(γ線)探査	IV- 52
2) 地上からの調査	IV- 53
(1) 地質調査	IV- 54
(2) 重力探査	IV- 55
(3) 反射法地震探査	IV- 55
(4) 海上音波探査	IV- 56
(5) 地上電磁探査	IV- 58
(6) 比抵抗法電気探査	IV- 60
(7) 屈折法地震探査	IV- 61
3) ボーリング孔を利用した調査	IV- 61
(1) 物理検層	IV- 61
(2) ポアホールテレビ(BTV)調査	IV- 63
(3) ポアホールレーダー調査	IV- 63

(4) ハイドロフォンVSP調査	IV- 64
(5) 岩芯を利用した地質・鉱物学的調査	IV- 66
4) 地下施設を利用した調査	IV- 66
(1) 坑道における割れ目調査	IV- 66
(2) ジオトモグラフィー調査	IV- 67
(3) ポアホールレーダー調査	IV- 68
4.3.2 地下水の流動特性に関する調査技術	IV- 73
1) 地上からの調査	IV- 73
(1) 表層水理観測システム	IV- 73
2) ボーリング孔を利用した調査	IV- 73
(1) 1,000m 対応水理試験装置	IV- 73
(2) 1,000m 対応揚水試験装置	IV- 75
(3) 地下水流向流速計	IV- 77
(4) フローメーター検層	IV- 77
(5) MPシステム、1,000m 対応地下水の長期モニタリング装置	IV- 78
(6) 岩芯を用いた透水試験	IV- 80
3) 地下施設を利用した調査	IV- 81
(1) 水理的ゆるみ領域計測装置	IV- 81
(2) 孔間水理試験装置	IV- 82
(3) 動燃式JFT試験装置	IV- 83
(4) 低圧ルジオン水理試験装置	IV- 84
(5) 間隙水圧測定装置	IV- 84
(6) 蒸発量測定装置	IV- 86
4.3.3 地下水の地球化学特性に関する調査技術	IV- 87
1) 地上からの調査	IV- 87
(1) 表層水の採水・分析	IV- 87
2) ボーリング孔を利用した調査	IV- 87
(1) バッカー式地下水サンプラー	IV- 87
(2) MPシステム	IV- 88
(3) 1,000m 対応地下水の地球化学調査機器	IV- 89
(4) 地球化学検層ユニット	IV- 90
3) 地下施設を利用した調査	IV- 91
(1) 坑道内採水装置	IV- 91
(2) 水質連続モニタリング装置	IV- 92
4.3.4 岩盤の熱特性・力学特性に関する調査技術	IV- 93
1) ボーリング孔を利用した調査	IV- 93
(1) 原位置初期応力測定	IV- 93
(2) 孔内載荷試験	IV- 94
(3) 温度検層	IV- 95
(4) 岩芯を用いた応力測定	IV- 95
(5) 岩芯を用いた力学特性測定	IV- 96
2) 地下施設を利用した調査（掘削影響試験）	IV- 97
(1) 岩盤変位測定	IV- 97

(2) A E計測	IV- 99
(3) 振動計測	IV- 100
4.3.5 岩盤中の物質移動に関する調査技術	IV- 102
1) 原位置トレーサー試験	IV- 102
2) 原位置レジン注入試験	IV- 103
3) 拡散/収着試験	IV- 104
4.3.6 ボーリング技術	IV- 105
1) ボーリング技術の現状	IV- 105
2) 掘削工法	IV- 106
(1) ワイヤーライン工法	IV- 106
(2) 先端駆動式	IV- 107
(3) 逆循環工法	IV- 107
(4) 三重管掘削工法（逆循環三重管ワイヤーライン工法）	IV- 107
3) 保孔技術	IV- 108
(1) ケーシング	IV- 108
(2) セメンティング	IV- 108
(3) 部分保孔	IV- 108
4.3.7 分析技術	IV- 110
1) 地下水試料の分析手法	IV- 110
(1) 主要溶存化学成分（陽イオン）	IV- 111
(2) 主要溶存化学成分（陰イオン）	IV- 111
(3) 微量元素	IV- 111
(4) 溶存ガス	IV- 111
(5) 同位体分析	IV- 111
(6) 地下水の酸化還元電位	IV- 112
(7) コロイド	IV- 112
(8) 有機物	IV- 112
(9) 微生物	IV- 112
2) 岩石・地下水試料の年代測定法	IV- 112
(1) カリウム-アルゴン法とアルゴン-アルゴン法	IV- 112
(2) ルビジウム-ストロンチウム法	IV- 113
(3) （ウラン+トリウム）-ヘリウム法	IV- 113
(4) トリチウム法	IV- 113
(5) ^{14}C 法	IV- 113
(6) ^{36}Cl 法	IV- 114
(7) 非放射平衡法	IV- 114
(8) フィッション・トラック (FT) 法	IV- 114
(9) 熱ルミネッセンス (TL) 法	IV- 114
(10) 電子スピン共鳴 (ESR) 法	IV- 114
参考文献	IV- 116
4.4 まとめ	IV- 124
参考文献	IV- 127

第 V 章 地質環境に関するナチュラルアナログ研究	V-	1
5.1 ナチュラルアナログ研究の概要	V-	1
5.2 ナチュラルアナログ研究の事例	V-	2
5.2.1 天然ウラン系列核種の移行・遅延に関する研究	V-	2
1) 東濃ウラン鉱床	V-	2
2) オクロウラン鉱床	V-	4
3) クンガラウラン鉱床	V-	5
5.2.2 マトリクス拡散に関する研究	V-	5
5.3 まとめ	V-	6
参考文献	V-	8

あとがき

今回の会議にて配布した資料は多量な資料の為、入手を希望される方は下記3機関において閲覧・複写（有料）に応じております。

●原子力公開資料センター（東京都文京区白山5-1-3-101）

TEL 03（5804）8484 東京富山会館ビル6F

土・日・祝日、10/1日は休館

●未来科学技術情報館（東京都新宿区西新宿）

TEL 03（3340）1821 新宿三井ビル1F

第2・第4火曜日は休館

●サイエンス・サテライト（大阪府大阪市北区扇町）

TEL 06（6316）8110 扇町キッズパーク3F

月曜日、祝祭日の翌日は休館