

地層処分に適した地質環境は存在するか<sup>†</sup>清水和彦<sup>††</sup>

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上で、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「その場所の岩盤と地下水が、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。

上記の観点から、東濃地域や釜石鉱山などでの事例研究の成果に基づき、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証する。なお、本稿で用いる情報は、地層処分研究開発第2次取りまとめ第2ドラフト[1]による。

**Keywords:** 高レベル放射性廃棄物, 地層処分, 地質環境, 天然バリア, 天然現象

The geological environment has two main functions in terms of ensuring the safety of geological disposal. One relates to the fundamental long-term stability of the site and the other to the properties of the host rock formations and groundwater, 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.

**Keywords:** high level radioactive waste (HLW), geological disposal, geological environment, natural barrier, natural phenomena

## 1 地層処分とわが国の地質環境

## 1.1 地層処分にとって重要な地質環境条件

わが国における地層処分のコンセプトは、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）が適切であることを期待している。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 100 m から 1,000 m 程度までの、
- 数 km 四方の水平的広がりを有する、

岩盤空間である。

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。処分予定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様々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（Fig.1a）。

その上で、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注目する必要がある。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

動や遅延が重要となる（Fig.1b）。地層処分の実施に際しては、このような地質環境の条件を十分に把握した上で、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。

## 1.2 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的確に理解

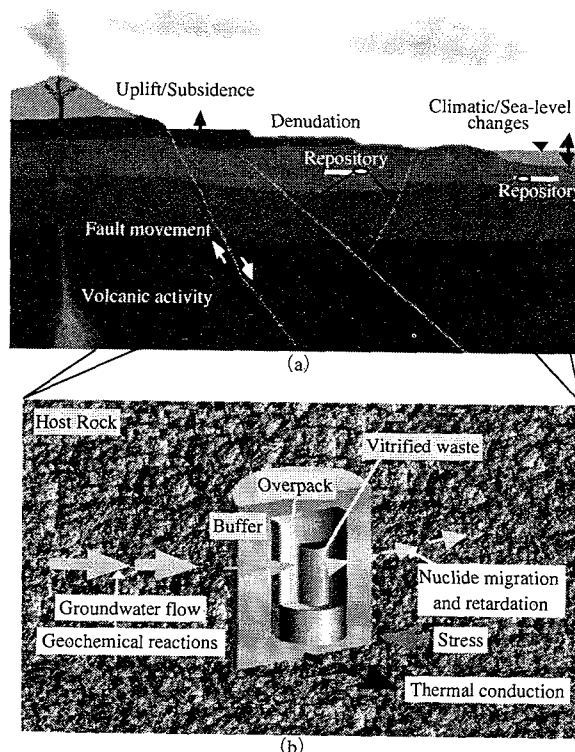


Fig.1 (a) Natural phenomena, (b) Reactions and processes in rocks and groundwater

<sup>†</sup> Feasibility of selecting suitable geological environments for high-level radioactive waste disposal, by Kazuhiko Shimizu (shimizu@hq.jnc.go.jp). 本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第15回夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

<sup>††</sup> 核燃料サイクル開発機構 2000 年レポートチーム Japan Nuclear Cycle Development Institute, Geological Isolation Research Project, 〒100-8245 千代田区丸の内 1-1-2

するためには、まず、日本列島の特徴を認識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伸びる弧状列島であり、太平洋側の海溝から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海溝と平行に帯状をなして分布し、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。

このようなテクトニクス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上で考慮すべき重要な特徴といえる。その他、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上で重要である。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、沿岸地域ないし海域の地下では、内陸側からもたらされた降水起源の水と海水とが接している (Fig.2)。

### 1.3 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[2,3]。

これを踏まえ、核燃料サイクル開発機構では、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く、地下深部の地質環境の特性、とくに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鉱山において、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。

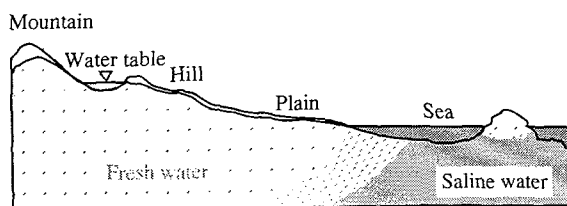


Fig.2 Schematic illustration of topography and groundwater in Japan

また、地層科学研究のもうひとつの柱である地質環境の長期安定性に関する研究として、わが国における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ため、野外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目標となる。

- 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、地質学的記録などの情報を整理・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上で、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、東濃地域や釜石鉱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 わ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に影響をおよ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。この観点からわが国で考慮すべき天然現象は、①断層活動、②火山活動、③隆起・侵食および④気候・海水準変動である。

なお、地質環境の長期安定性の検討は、処分場の閉鎖後(人間による管理を終了した以降)の段階を対象としており、処分場の建設・操業時には、上記以外の種々の自然災害に対しても、他の原子力施設と同様の対策が必要となる。

### 2.2 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だすことができ、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。その際、各天然現象の活動履歴や変動過程を、地層処分の観点から適切な時間スケールと空間スケールでとらえることが重要となる。より長期的な将来を評価の対象とする場合には、その拠り所とすべき過去の活動についても、より大きな時間・空間スケールでとらえる必要がある。ただし、時間スケールが長くなるにしたがって、評価に伴う不確実性は大きくなる。

地層処分の安全評価期間については、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[4]。

約 46 億年に及ぶ地球の歴史の中で、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比較的良好に現在の地質や地形に保存されており、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に際しては、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である。その際、地域によるテクトニクスの特徴を踏まえて、対象とする天然現象に応じて、また地域ごとに、評価の根拠となる具体的な情報や評価の結果に伴う不確実性を吟味していく必要がある。

### 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、概ね過去数十万年以上まで遡って、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所（安定な地質環境）を見出すことができる。

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、将来における活動の場が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、後述するような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を被らないような地域は、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、一部の変動の著しい地域を避けた上で、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) 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、すなわち大規模な活断層（過去数十万年間に繰り返し活動し、将来も活動する可能性のある断層）の周辺は、地層処分の実施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、地殻応力場は概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、現在までの活動の継続として、断層活動を評価することが妥当である。わが国における活断層の分布は概ね把握されているが、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 100 m（最大でも 500 m 程度）である。ただし、大規模な断層では 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[5,6]。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[7]。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。

断層活動による地下水への影響に関しては、上記のような力学的な影響範囲を越えて、著しい水理学的あるいは地球化学的な変化が生じるとは考え難い。また、断層活動に伴う地下水位の変化などは比較的短期間で回復することから、長期的には非活断層（活動を終了した断層）と同様の扱いが可能と思われる。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[8]、設計での対

応が十分に可能であろう。

(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、地層処分の実施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 (Fig.3)。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である。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。ただし一方で、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他の天然現象について、慎重な検討が必要となる。

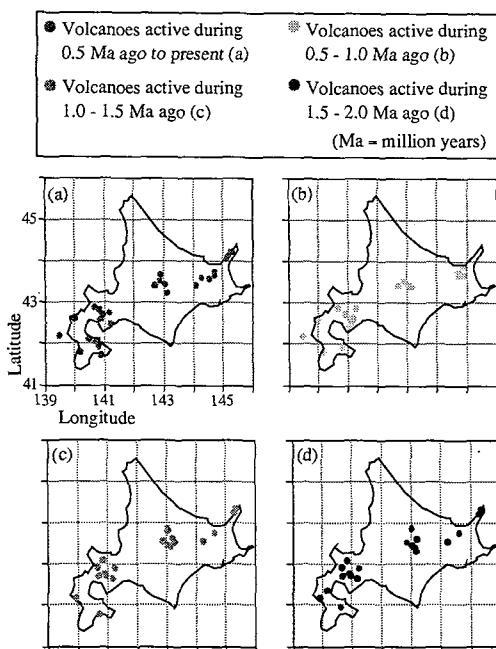


Fig.3 Distribution of active volcanoes during the last 2 million years (Example of Hokkaido) (based on [9])

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 [10] やいくつかの火山地域での事例研究 [11 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 km~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。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、地層処分の実施に際しては、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の特徴に対応した地域ごとに、一定の傾向に沿って継続・累積している [12,13]。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 (Fig.4)、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化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/10万年以下である [14]。

一方、侵食については、ダム の堆砂量や段丘などの地

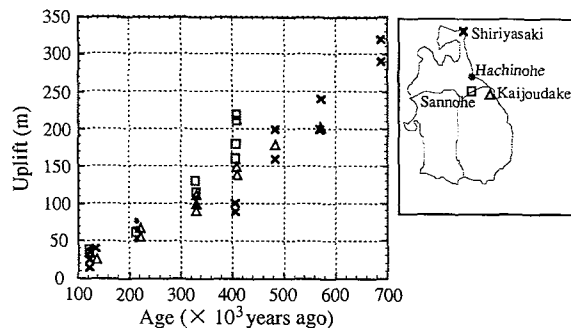


Fig.4 Relationship between the amount of uplift and the formation age of marine terraces (Example of Pacific side of Northeast Honshu) (based on [14])

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[15,16]。これらによれば、山地の中心部では侵食速度が1 mm/年を越えるところも多いが、丘陵や平野の大部分は0.5 mm/年以下である。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(数10 m/10万年)、その地域の隆起速度を反映している[17]。なお、隆起の激しい一部の山岳地帯では、下刻が200 m/10万年に達する例も報告されている[18]。

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概ね推定できるため、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上で、予想される影響(深度や傾斜の変化など)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凍結・凍土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10万年周期の氷期・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~-130m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[19,20など]。

日本列島周辺においても、最終氷期のピーク時(約2万年前)には海面が現在より120m程度低く、その後、急激に上昇して、約6千年前に現在比0~+5mに達した[21]。この間、年平均気温は、約2万年前の現在比-8℃から、約6千年前の現在比+2~+3℃まで上昇した[22]。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[22]。現在は間氷期のピークを少し過ぎた時期にあり、氷期・間氷期サイクルにしたがえば、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ろう。

### 3 わが国における地質環境の特性

#### 3.1 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期待される。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や遅延に関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、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。もちろん、これまでの研究によって、わが国の岩盤や地下水の性質を、具体的なデータをもって網羅的に把握できたわけではない。ただし、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、などについては確信がもてた。

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、深度が深くな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空隙が減少し、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[23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ポ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 (約 1/2) ことが確認されている.

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, 概ね  $10^{-10} \sim 10^{-7}$  m/s の範囲にある.

ここで, 例えば, 地下深部における動水勾配を 0.01, 岩盤の平均的な透水係数を  $10^{-9}$  m/s とすると, 地下水の平均流速は年間 0.3 mm となる. また, 単純に動水勾配または透水係数のいずれか一方を 1 桁大きくすると年間 3 mm, 両方を 1 桁づつ大きくすると年間 3 cm となる. いずれにしても, 地表部の水に比べて, 地下深部での地下水の動きは非常に遅い.

(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. これらは, 降水起源の地下水に比べて一般に溶存成分の濃度が高い. なお, 前述したように, 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が検討されている (Fig.5).

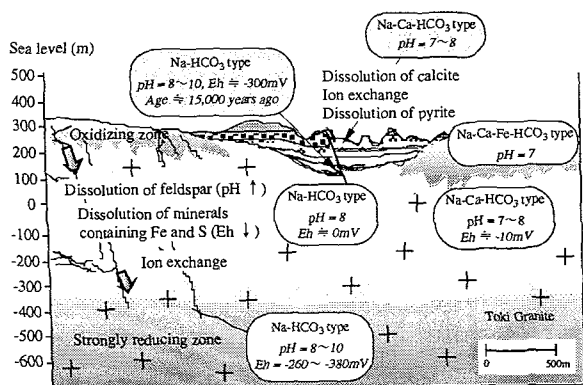


Fig.5 Geochemical evolution of deep groundwater in the Tono area (based on [24])

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  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  および  $\text{HCO}_3^-$  に富み, 地下深部に行くにしたがって  $\text{Ca}^{2+}$  が減少して  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$  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, 強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[24 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[25,26] から, 地下深部での水質は  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  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

岩盤の熱や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, 地温勾配の全国分布図が作成されている[10]. これによれば, 火山地域を除く大部分の地域で, 地温勾配は概ね  $5 \text{ }^\circ\text{C}/100\text{m}$  以下であり, 多くは  $3 \text{ }^\circ\text{C}/100\text{m}$  前後である.

初期応力に関しては, 文献データならびに東濃地域および釜石鉱山での実測例との比較・検討がなされた. 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の比は地下浅部ではばらつくものの, 深度が深くなるにしたがって 1 に近づくと[27].

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が, 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, 岩種ごとに整理されている. 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が最適化される. いずれにしても, わが国の多くの地域において, 地下数 100~1,000 m の深度に処分場を建設することは, 工学的に十分可能であろう.

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が観測されており, 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 1 m 程度までであることが確認されている[28 など]. 処分システムの性能評価においては, このような掘削影響領域を, 周辺岩盤と区別して取扱う必要がある.

(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

クス中へ拡散する現象や、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の両面から調査す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[29]。また、割れ目表面から数 cm 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ている[30]。

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、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によれば、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 [31]。

#### 4 地層処分にとって適切な地質環境の存在

地層処分の場として長期にわたって十分に安定であり、人工バリアの設置環境および天然バリアとしても適切な地質環境が、わが国にも広く存在し得るとの結論を得た。地層処分にとって重要な地質環境上の要件とそれを満たす地質環境の存在について、以下に考察する。目的は、「理屈ではなく現実問題として存在するか?」の疑問に答えることである。

##### (1) 断層活動や火山活動の影響を被らない場所を選ぶ

そのような場所は、現在の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。わが国における主要な活断層や火山の分布は既に把握されており、それらの影響範囲（および活動の場の移動範囲）を見込んで距離を離すことが可能である。また、現地調査を行う段階には、ボーリングや物理探査などの手法を用いて、岩盤の状態や地下水の水質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。

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。ここでは、影響を排除できる最小限の領域を考えてみる。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10 kmの範囲や火山の中心から半径30 kmの範囲を除く領域では、断層活動および火山活動の影響を考慮する必要はないといえる。そして、その様な場所は実際に存在している (Figs.6, 7)。なお、対象とする地域が決まれば、これらの数字はもっと小さくなるはずである。

##### (2) 著しい隆起・侵食が起こらない場所を選ぶ

隆起・侵食によって、地下深部に埋設した廃棄体が地表付近に接近するような場所であってはならない。換言すれば、廃棄体を隔離すべき期間に予想される侵食の規模を見込んで、十分な深度に廃棄体を埋設すれば良い。わが国における隆起・侵食の地域的な傾向は概ね把握されているため、サイトを選ぶ際に、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、現地調査を行う段階には、個々の地域の情報に基づいて、より詳細な評価が可能となる。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。

具体的にどの程度の隆起・侵食であれば許容できるか

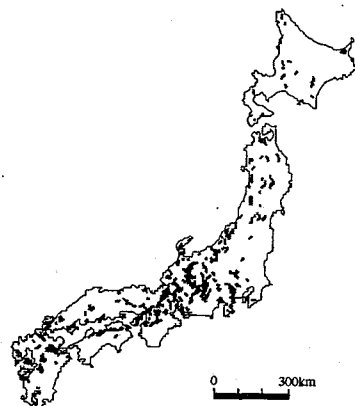


Fig.6 Major active faults in Japan (Width of each line is approximately 10 km) (based on [1])

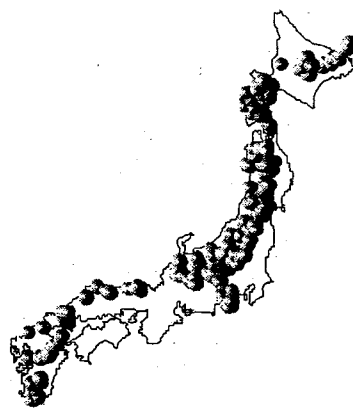


Fig.7 Quaternary volcanoes in Japan (Radius of each circle is approximately 30 km) (based on [1])

は、隔離すべき期間と廃棄体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、隔離すべき期間を10万年とすれば、侵食速度が0.5 mm/年(または1.0 mm/年)の場合の累積侵食量は50 m(同100 m)となる。このような地域であれば、数百mの深度に埋設すれば十分といえる。また、そのような地域はわが国に広く存在している (Fig.8)。

### (3) 岩盤と地下水の性質が適切である

サイトの岩盤や地下水の条件(地下水の流動特性、地下水の地球化学特性、岩盤の熱特性・力学特性、岩盤中での物質移動特性)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的设计・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現地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だろう。前述したように、一般論として、わが国の深部地下水は、動きが遅く還元的な状態にある。また、地温が十分に低く地圧も均質に近いような深部岩盤が広く存在している。これらは、いずれも、重要な地質環境上の要件であるため、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、許容できる地温をあらかじめ設定した上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程度以下であれば、設計上、問題なく許容できる。また、そのような地域は、わが国に広く存在している (Fig.9)。

なお、3℃/100mを超えるような地温勾配に対して、



Fig.8 Areas where denudation rate is more than 0.5 mm/year (based on [1])

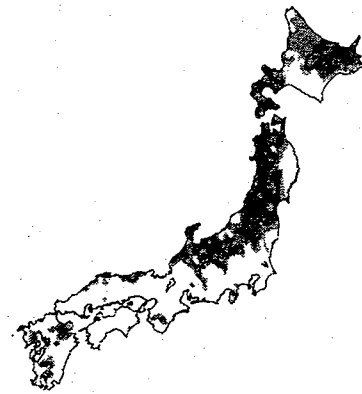


Fig.9 Areas where geothermal gradient is more than 3℃/100m (based on [1])

設計上の対応をはかることも十分に可能であろう。

### (4) 岩盤の規模と地下資源の有無

本稿では議論を割愛したが、対象とすべき岩盤が、必要な規模の処分施設を建設する上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地域であることも、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直接的に確認できる。

### 参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構：地層処分研究開発第2次取りまとめ 第2ドラフト，総論レポート，わが国における地層処分の技術的信頼性，JNC TN1400 99-006 (1999)。
- [2] 原子力委員会：放射性廃棄物処理処分方策について(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 (1984)。
- [3] 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，平成6年6月24日，原子力委員会 (1994)。
- [4] 原子力委員会：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 (1997)。
- [5] 恒石幸正：断層，地質構造の科学(木村敏雄編)，朝倉書店，67-120 (1984)。
- [6] 高木秀雄，柴田賢，杉山雄一，内海茂，松本哲一：三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 84, 75-88 (1989)。
- [7] Sato, H., Ikeda, Y., Imaizumi, T., Ikawa, T.: Evolution of



- the active Senya thrust fault, northern Honshu, Japan, *Geoph. Research Letter* (in preparation).
- [8] Shimizu, I., Osawa, H., Seo, T., Yasuike, S., Sasaki, S.: Earthquake-related ground motion and groundwater pressure change at the Kamaishi Mine, *Eng. Geol.*, **43**, 107-118 (1996).
- [9] 第四紀火山カタログ委員会 (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 (1999).
- [10] 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, 地質調査所 (1999).
- [11] 梅田浩司, 林信太郎, 伴雅雄, 佐々木実, 大場司, 赤石和幸: 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*, **44** (印刷中).
- [12] 貝塚爽平, 鎮西清高, 小疇尚, 五百沢智也, 松田時彦, 藤田和夫: 新版日本の自然 2 日本の山, 岩波書店 (1995).
- [13] 太田陽子: 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, pp.69-99 (1996).
- [14] 小池一之, 町田洋編: 日本の海成段丘アトラス, 東大出版会 (印刷中).
- [15] 藤原治, 三箇智二, 大森博雄: 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, pp.228 (1998).
- [16] 宮脇昌弘, 藤原治: 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 (1997).
- [17] 高木俊男, 藤原治, 小沢昭男: 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, pp.230 (1998).
- [18] 吉山昭, 柳田誠: 河成地形面の比高分布からみた地殻変動量. *地学雑誌*, **104** (6), 809-826 (1995).
- [19] Shackleton N. J.: Oxygen isotope, ice volume and sea level, *Quaternary Science Reviews* **6**, 183-190 (1987).
- [20] Chappell, J.: Upper quaternary sea levels, coral terraces, oxygen isotopes and deep-sea temperatures, *J. Geogr.*, **103**(7), 828-840 (1994).
- [21] Umitsu, H.: Holocene sea-level changes and coastal evolution in Japan, *The Quaternary Research*, **30**(2), 187-196 (1991).
- [22] 動力炉・核燃料開発事業団: 地層処分研究開発の現状 (平成8年度). PNC TN1410, 96-071 (1996).
- [23] 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: 我が国の地下水流動特性に関する研究. JNC TN7400 99-004 (1999).
- [24] Iwatsuki, T., Yoshida, H.: 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, *Geochemical Journal* **33**(1), 19-32 (1999).
- [25] Ii, H., Horie, Y., Ishii, T., Shimada, J.: Development of an apparatus to measure groundwater qualities in situ and to sample groundwater using boreholes, *Environmental Geology*. **32** (1), 17-22 (1997).
- [26] 亀井玄人: ベントナイトに包まれた廃棄物ガラスのナチュラルアナログ. PNC TN 8410, 97-035 (1997).
- [27] Matsui, H., Sato, T., Sugihara, K., Nakamura, N.: Comparison of the results of stress measurements determined by various methods at the Kamaishi mine, *Proc. 2nd Inter. Symp. Rock Stress*, 95-100 (1997).
- [28] 杉原弘造, 亀村勝美, 二宮康郎: 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, 239-251 (1998).
- [29] Yoshida, H.: Relation between U-series nuclide migration and microstructural properties of sedimentary rocks, *Appl. Geochem.*, **9**, 479-490 (1994).
- [30] Ota, K., Amano, K., Sato, H., Shibutani, T., Tachi, Y.: In situ matrix diffusion in fractured crystalline rock, Kamaishi in-situ test site, North-east Japan. *Proc. Migration 97*, 98-99 (1997).
- [31] Yoshida, H., Kodama, K., Ota, K.: 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**, 505-511 (1994).