

## 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料

－長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方－

平成 19 年 3 月

独立行政法人 産業技術総合研究所  
深部地質環境研究センター





## まえがき

この技術資料は、地層処分の閉鎖後の安全確保のために必要な調査で、概要調査において実施可能な調査とその評価、及びそれらの基礎となる科学的知見と調査の品質保証について、安全規制の視点から述べたものである。

最終処分施設建設地の立地選定は、文献調査、概要調査、精密調査の3段階の調査を通して行なわれる。特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（特魔法）に従うと、はじめに行なわれる文献調査では、地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がなく、かつ、将来にわたってそれらが生じるおそれが少ないと認められること等が、既存の文献により確認され、それを受けて概要調査地区が選定される。この技術資料で取り扱う概要調査は、文献調査の次に行なわれる調査で、初めて現地からのデータが取得される調査である。概要調査では、ボーリング調査、地表踏査、物理探査等が実施され、最終処分を行おうとする地層およびその周辺の地層が安定していること、坑道の掘削に支障がないこと、地下水の水流等が精密調査段階で建設される地下施設に悪影響を及ぼすおそれが少ないこと等が確認され、それを受けて精密調査地区が選定される。概要調査に関して特魔法に書かれている地層の安定性の確認は、最終処分施設の閉鎖後の長期安全確保において最も重要な事項の一つである。また、概要調査におけるもう一方の課題である坑道掘削への支障の有無の確認と地下水流の影響評価は、施工の確保のために重要な事項である。

閉鎖後の安全確保と施工の確保は、最終処分施設建設地のサイト選定にあたりとも重要な課題であるが、この技術資料では安全規制の視点から重要な前者、すなわち閉鎖後の安全確保に関して、概要調査で実施可能な調査及び現在の科学的知見から合理的に判断できる評価基準等について述べる。地層処分における閉鎖後の安全評価事項は、経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA）により国際FEPとしてまとめられている。この技術資料ではこの国際文書に依拠するとともに、地殻変動の顕著なわが国の地質の状況を考慮して、特魔法との関連で概要調査において評価すべき長期変動にかかる事項について検討する。また、安全評価の対象となる最終処分施設の地質環境について、地下水シナリオによる安全評価を想定した場合に、概要調査において行なうことのできる調査及び解析について併せて検討する。

この技術資料は、産業技術総合研究所深部地質環境研究センターが、原子力安全・保安院から委託を受けた「地層処分にかかる地質情報データ整備」の研究（平成13 - 18年）の一環として作成したものである。地層処分の規制当局により今後策定されるであろう調査のガイドラインの検討に資することができるように、地層処分の安全規制に関する基本的事項が述べられている総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会の報告書と整合性を保つように編集を行なった。また、原子力安全・保安院からの委託研究は、原子力安全委員会の重点研究計画の中にも位置付けられていたので、この技術資料が原子力安全委員会による環境要件の策定にも資することができるように、これまでに公表されている原子力安全委員会の報告書を踏まえて、概要調査の調査及び評価についての検討を行なった。

この技術資料の作成にあたり、平成17 - 18年度に上記委託研究の評価委員会において、地層処分及び地質分野の専門家の方のご意見をお伺いした。委員の方には技術資料全体についてご審議をいただいたほか、特に第2章、第3章及び第5章については最終原稿のレビューをしていただいている。委員の方からのコメントは、それぞれの章の後にまとめて掲載した。

### 委託研究評価委員会委員（敬称略）

主査	鹿園直建	慶応義塾大学
委員	川上 泰	原子力安全研究協会
	河村秀紀	株式会社大林組
	竹村恵二	京都大学
	田中和広	山口大学
	中山真一	原子力研究開発機構
	山崎真一	原子力安全基盤機構
オブザーバー	齋藤茂幸	原子力安全基盤機構

この技術資料をまとめるにあたり、常日頃ご指導を賜っている原子力安全・保安院放射性廃棄物規制課の皆様、原子力安全基盤機構放射性廃棄物評価室の皆様、原子力研究開発機構安全研究センターの皆様及び上記委託研究評価委員会の委員の皆様に厚く御礼申し上げます。

平成 19 年 3 月 19 日  
産業技術総合研究所深部地質環境研究センター  
笹田政克

## 目次

### まえがき

#### 第1章 はじめに

1. 技術資料作成の目的 .....	1
2. 安全規制への対応 .....	1
3. 技術資料の構成 .....	2
4. 技術資料の編集方針 .....	3

#### 第2章 調査・評価項目の設定

1. はじめに .....	5
2. 要件のレビュー .....	5
2.1 第2次取りまとめのサイト選定要件 .....	5
2.2 特廃法の要件 .....	6
2.3 環境要件 .....	6
2.4 長期変動に関する要件設定に共通する基準 .....	7
3. 国際FEPと「地質及び気候関連事象」 .....	7
3.1 国際FEP .....	7
3.2 「地質及び気候関連事象」 .....	8
4. 長期変動に関する調査・評価項目、評価・考慮事項設定の考え方 .....	9
5. 長期変動に関する概要調査の調査・評価項目 .....	12
5.1 侵食・堆積及び海面変化 .....	12
5.2 地震活動 .....	14
5.3 火山・マグマ活動 .....	16
5.4 深部流体 .....	17
5.5 泥火山 .....	17
5.6 マス・ムーブメント .....	18
6. 地質環境に関する調査・評価項目 .....	18
6.1 調査・評価項目の設定の考え方 .....	18
6.2 地質環境 .....	19

#### 第3章 調査・評価項目に関する科学的知見

1. はじめに .....	25
2. 将来予測の手法 .....	26
3. 侵食・堆積及び海面変化 .....	27
4. 地震活動 .....	29
5. 火山・マグマ活動 .....	32
6. 深部流体 .....	35
7. 泥火山 .....	36
8. マス・ムーブメント .....	37
9. 人工バリアの設置環境 .....	39

#### 第4章 調査の進め方

1. はじめに .....	45
2. 長期変動（外的要因）の調査 .....	45
2.1 侵食・堆積及び海面変化 .....	45
2.2 地震活動 .....	50
2.3 火山・マグマ活動 .....	55
2.4 深部流体 .....	60
2.5 泥火山 .....	61
2.6 マス・ムーブメント .....	62
3. 地質環境の調査 .....	63
3.1 リモートセンシング .....	64
3.2 地形調査（地形測量含む） .....	65
3.3 地質調査（土壌調査・河川底質調査含む） .....	65
3.4 物理探査 .....	66
3.5 水文調査・気象観測 .....	68
3.6 地温調査 .....	70
3.7 掘削調査 .....	72
3.8 資源調査 .....	85

3.9	海域調査	86
3.10	モニタリング	86
3.11	室内試験・測定	87
4.	地下水システムの解析と概念モデルの構築	97
4.1	基本的な地質構造の枠組みのモデル化	98
4.2	浅層地下水系と涵養域・流出域	99
4.3	浅層地下水系－深層地下水系の関係およびその解析	100
4.4	地下水および溶存種の起源	101
4.5	地下水の年代測定	103
4.6	水質形成プロセスの解析	105
4.7	概念モデルの構築	107

## 第5章 品質保証

1.	はじめに	109
2.	米国、スウェーデンの地層処分事業における品質保証	109
3.	IAEA（国際原子力機関）の原子力施設に対する品質保証基準	109
4.	日本の地層処分事業に期待される品質保証	110
4.1	品質保証の基本概念	110
4.2	品質保証の実施・規制機関	110
4.3	概要調査における品質保証項目（案）	110
4.4	注意すべき事項	111

あとがき	113
------	-----

文献	115
----	-----

参考書籍	125
------	-----

付録 1 地質及び気候関連事象の特徴	127
--------------------	-----

付録 2 国際 FEP（仮訳）	139
-----------------	-----

## 第1章 はじめに

### 1. 技術資料作成の目的

この技術資料は原子力安全・保安院からの委託研究「地層処分にかかる地質情報データの整備」の一環として、立地段階における地層処分の安全規制に資するために、概要調査において実施可能な調査とその評価、及びそれらの基礎となる科学的知見及と調査の品質保証についての技術情報をとりまとめたものである。この技術資料を作成するにあたり、関連する分野の研究及び技術文書を広くレビューするとともに、産業技術総合研究所深部地質環境研究センターで行なってきた上記委託研究の最新の研究成果を取り入れた。

放射性廃棄物の地層処分の安全規制を規制当局がどのように行なうかについては、総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会において検討が進められてきている。平成18年に公表された報告書「放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制制度のあり方について」（総合資源エネルギー調査会、2006）では、概要調査を含む立地段階の安全規制のあり方について、「規制機関としては、立地段階においてもその役割を適切に果たしていくことが期待されているため、特魔法（特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律）の立地点に選定に係る手続きの中で、原子力発電環境整備機構（NUMO）の最終処分の実施計画、調査地区選定に係る報告書に関し、特魔法の要件への適合性等の調査結果の妥当性についてのレビューを行なうとともに、将来の安全規制を見通して、立地段階においても将来の安全評価に必要な調査のあり方や調査活動に係る品質保証を含むガイドラインを提示すること等の関与をしていくことが重要である」と、規制機関の関与を述べている。

この報告書を受けて今後廃棄物安全小委員会（地層処分技術ワーキンググループ）で行なわれるガイドライン等の規制政策にかかる審議において、必要な技術情報を提供することがこの技術資料の第一義的な目的である。

### 2. 安全規制への対応

わが国における地層処分の安全確保の考え方については、原子力安全委員会（2000）の「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」（第1次報告）の中で、地層処分の安全確保は「長期的安全確保対策」と「安全評価等による安全確認」により実現されると書かれている。「長期的安全確保対策」では、地層処分に適した地質環境を有する処分地の選定（サイト選定）と、そこに適切に設計・施工された人工バリア及び処分施設（工学的対策）が必要であり、また、「安全評価等による安全確認」では、安全評価は適切

なシナリオを仮定し、一般公衆が放射性物質から受けると想定される線量を評価し、定められた放射線防護レベルを超えることがないことが基本であるとしている。

特魔法では安全確保について別途法律を定めることとすると述べているものの、前述の原子力安全委員会のいう「長期的安全確保対策」のサイト選定にかかる部分に対応するかたちで、概要調査地区、精密調査地区、最終処分施設建設地の選定について述べている第6条から第8条において、各立地段階で満たさなければならない要件を記述している。特魔法が制定された後、原子力安全委員会（2002）は、「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ける環境要件について」を取りまとめた。ここで環境要件としては、（1）隆起・沈降・侵食、（2）地震・断層活動、（3）火山・火成活動、（4）鉱物資源の賦存、（5）岩盤の特性の5項目が設定され、これらは特魔法の第6条及び関連する施行規則で述べている概要調査地区の選定要件を、より具体的な形で記述している。なお、原子力安全委員会では、引き続き平成18年から精密調査地区選定において考慮すべき環境要件の設定に向けた審議にはいつている。

さて、立地段階における規制機関の関与の1つとして、「特魔法の要件への適合性等の調査結果の妥当性についてのレビュー」（総合資源エネルギー調査会、2006）がある。このようなレビューを行なうためには、特魔法の要件を具体的に評価できるものとして示すとともに、調査結果の要件への適合性が妥当であるかを判断するための論理が必要である。この点に関してこの技術資料では、概要調査を対象にして安全確保の視点から調査・評価が必要な項目を特定し、評価事項を具体的に書き下すとともに、その評価に必要なデータを取得するための調査、背景となる科学的知見、そして評価の論理についての記述を行なっている。なお、概要調査の調査結果をレビューする際に必要とされる精密調査地区の選定要件への適合性に係る論理は、文献調査の調査結果をレビューする場合の概要調査地区の選定要件に係る論理とも共通するので、この技術資料の内容は文献調査終了時に規制機関が関与することになった場合においても、活用できるものとなっている。

立地段階における規制機関の関与のもう1つの内容は、「将来の安全評価に必要な調査のあり方や調査活動に係る品質保証」（総合資源エネルギー調査会、2006）の提示である。これについて特魔法には記述はないが、上述の原子力安全委員会の第1次報告に、シナリオによる安全評価の枠組みが示されている。これについては、核燃料サイクル開発機構（1999）の「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」（第2次取りまとめ）及び海外の安全評価の

事例を参考にしつつ、産業技術総合研究所における研究成果を踏まえ、安全評価に必要な概要調査の調査項目および調査活動にかかる品質保証について記述する。なお、安全評価についての調査は概要調査で完結するものではなく、むしろ精密調査において多くのデータが取得されることが期待されているものであることを踏まえ、この技術資料では概要調査段階で行なう必要のある調査項目及びその関連事項について述べるに留めている。

### 3. 技術資料の構成

この技術資料では、特廃法及び国際 FEP (OECD/NEA, 2002) に基づいて設定した概要調査の調査・評価項目 (第2章)、それに関連する科学的知見 (第3章)、具体的な調査・解析の手法 (第4章)、調査活動にかかる品質保証 (第5章) について述べている。

第2章では概要調査の調査・評価項目の設定を、特廃法及び国際 FEP も基づいて行なっている。概要調査に関して特廃法第7条に書かれている地層の安定性の確認は、最終処分施設の閉鎖後の長期安全確保において最も重要な事項の一つである。この技術資料の第2章では、地層の安定性の確認が、実施可能な調査及び現在の科学的知見から合理的に判断できるように、概要調査の調査・評価項目の設定を行なうとともに、安全評価に必要な概要調査の調査項目の設定を行なっている。

地層の安定性に係る事項を含め閉鎖後の安全評価事項は、経済協力開発機構原子力機関 OECD/NEA (2002) により国際 FEP としてまとめられている。この技術資料では、廃棄物安全小委員会 (2003) で行なったように国際 FEP に基づいて「処分システム領域」に影響を与える「外的要因」となる長期変動を整理し、それにわが国の地質および水文地質を考慮にいれ、閉鎖後の安全確保に必要な概要調査の調査・評価項目として、「侵食・堆積及び海面変化」、「地震活動」、「火山・マグマ活動」、「深部流体」、「泥火山」、「マスマーブメント」の6項目を設定した。

これら調査・評価項目に含まれる事象の中で、地層処分システムの物理的隔離機能に大きな損傷を与える可能性のある事象で、かつ概要調査の結果から将来の活動の有無を判断できる事象を対象に、概要調査評価事項を設定した。例えば、「侵食・堆積及び海面変化」の評価事項は、「予測侵食量が埋設深度以上になり、廃棄体が地表に露出する可能性のある地域は避ける必要がある」と記述されている。また、長期変動にかかる調査・評価項目の中に含まれる事象で、評価事項の対象としている事象以外の処分システム領域に影響を与える事象を対象に、サイト影響評価事項を設定した。

例えば、「侵食・堆積及び海面変化」のサイト影響考慮事項の1つは、「隆起・沈降及び氷河性海面変化により、将来放射性物質を閉じ込めておく機能を著しく低下させるような地下水の流動あるいは水質の変化が予想される地域は、相対的海面変化の影響について考慮しなければならない」と記述されている。

一方、処分システム領域の場にあたる「地質環境」も、概要調査の対象となることから、「地震活動」「火山・マグマ活動」等の長期変動の個々の調査・評価項目と同様に、項目立てを行なっているが、長期変動の個々の調査・評価項目が処分システム領域に与える影響を調査・評価の対象にしていることに対して、調査・評価項目の「地質環境」は、処分システム領域の場の特性を調査・評価の対象にしている。

特廃法に従うと、概要調査において地質環境で評価すべき事項は、施工にかかる内容のもので、安全評価に関するものはない。さらに、地下水シナリオで安全評価する事項は、概要調査段階での個別の評価になじまないと考えられることから、この技術資料では地下水シナリオによる安全評価に向けて行なわれる地質環境の調査に関しては、とくに評価事項を設けていない。一方、「鉱物資源」については、人間侵入にかかる閉鎖後の安全評価事項であり、特廃法の施行規則に要件として書かれているので、評価事項に設定している。

以上を踏まえ、この技術資料では地質環境の調査内容を以下のように提案している。すなわち、概要調査段階での地下水シナリオによる安全評価に向けた地質環境に関する調査を、①地下水システムの解析と概念モデルの構築、②地質環境の初期状態であるベースラインの把握とする。また、人間侵入に関する安全評価に向けた地質環境に関する調査を、③鉱物資源がないことの確認 (評価事項) とする。

続く第3章においては、第2章で設定した調査・評価項目に関する科学的知見について述べている。処分システム領域に影響を与える外的要因である長期変動に関しては、特廃法との関連で設定した概要調査の評価事項及びサイト影響考慮事項の評価すべきあるいは考慮すべき内容を具体的に示すとともに、これらの評価・考慮事項を設定するに至った科学的背景について述べる。また、長期変動の将来予測の考え方について述べる。

概要調査の調査・評価項目となる長期変動のうち、侵食・堆積及び海面変化、地震活動、火山・マグマ活動、泥火山、マスマーブメントの5項目で、地層処分に適さない地域を排除するための基準を述べた評価事項を設定し、これまでに蓄積されている科学的知見のもとで、どのような調査を行なえば評価が可能であるかについて述べている。

また、処分システム領域に影響を与えるものの排除



要件とはならないサイト影響考慮事項は、第2章で設定した概要調査の調査・評価項目のすべてに含まれており、それぞれの項目ごとにサイトに影響与える事項を特定するとともに、安全評価に向けて取得すべきデータについて述べている。

一方、処分システム領域の場となる地質環境については、外的要因である長期変動による影響に対して、人工バリアで想定されている許容範囲について記述する。わが国の地層処分では、幅広い条件のもとでの地質環境を想定して、人工バリアの設計を行なっており、また外的要因の変化に対応した設計変更も行うという柔軟方針を実施者は取っているが、温度特性、化学特性、水理特性の3つの側面から見た場合、それぞれにたいして現状で想定している範囲がある。ここでは、これらの人工バリアの成立条件をレビューし、長期変動のサイト影響考慮事項で、本質的な影響を与える外的要因が何かを理解できるようにした。

地質現象の将来予測について具体的な評価を行なおうとする場合、評価期間の設定が必要となるが、わが国ではまだ高レベル放射性廃棄物に対して、放射線防護の基準値も評価期間も定められていない。このような状況の中で、この技術資料では現在の科学的知見に基づきできるだけ長い期間(10万年あるいは100万年)が評価できるように、地質学的手法を用いた将来予測の論理を示している。

第4章では概要調査の調査・評価項目にかかる調査の進め方について記述する。長期変動の評価事項について、評価に必要なデータの取得のために行なう調査と、評価における留意点について述べる。サイト影響考慮事項に関しては、将来の安全評価に向けて、必要なデータの取得と調査における留意点について述べる。

地質環境の調査については、概要調査で対応できる調査法を一覧できるようにし、それぞれの調査法について、ベースラインデータの取得という視点も交えてその概略を述べる。地質環境の調査の中には長期変動にかかる評価事項の確認のための調査法も含まれているが、主たる内容は地下水シナリオでの評価のために必要となるデータを取得するための調査法である。ここで取り上げている調査の中には地層処分に限らず広く実施されている調査も含まれており、すでにルーチンワークとなっている調査手法に関しては、ここでは簡略に記述するとどめた。

調査結果の解析については、地下水システム概念モデルの構築を柱にして記述した。安全評価に進むためにはモデルの数値化が必要であるが、この技術資料ではそこまで踏み込んでいない。精密調査の計画立案に活用できるような概念モデルを構築することに主眼をおいている。

第5章では品質保証について記述する。地層処分事業で先行しているスウェーデンと米国の例を学ぶとともに、IAEAの品質保証基準について参照し、品質保証の基本概念である、完全性、追跡性、再現性、説明可能性について述べる。それらを踏まえてわが国における概要調査段階における品質保証項目案の提案を行い、注意すべき事項として、品質保証の周知と、過度な品質保証の抑制について述べている。

#### 4. 技術資料の編集方針

この技術資料では、閉鎖後の安全確保の視点から概要調査の調査・評価項目を取り上げている。したがって、この技術資料は概要調査の調査・評価項目のすべてをカバーしているものではない。

閉鎖後の安全評価事項については、OECD/NEA(2002)の国際FEPにおいて体系的な整備がなされており、原子力安全・保安院が平成15年に報告書「高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保にむけて」(総合資源エネルギー調査会, 2003)を作成した際にも、この国際FEPに依拠している。この報告書では処分システム領域に影響を与える外的要因についてのFEP解析が行なわれ、わが国の地質の状況を考慮した55の事象が抽出されている。このような規制当局による検討の延長上で、概要調査の調査・評価項目を検討するため、この技術資料では安全評価事項の体系をOECD/NEAの国際FEPに置いている。

また、この技術資料の作成は原子力安全・保安院からの委託研究「地層処分にかかる地質情報データの整備」(平成13年度—18年度)の中で行なっているため、技術資料で取り上げる項目は、閉鎖後の安全評価の中でも、地質学及び水文地質学分野のものに限定した形になっている。長期予測にあたっては気候変動も大きな要因であるが、気候そのものについてはこの技術資料では取り上げていない。気候の変化が水文地質学的変化として現れる状況を調査及び評価の対象として取り上げている。また、閉鎖後の安全評価でも人間侵入の評価については、正面から取り上げていない。人間侵入については鉱物資源が特廃法関連の施行規則と原子力安全委員会(2002)の環境要件に取り上げられているので、この技術資料では、その部分のみ限定的に扱っている。その他、特廃法には施工上の要件が記述されているが、それらは閉鎖後の安全評価事項ではないので、この技術資料では取り上げていない。

最後に文献の引用について述べると、このような技術資料では、内容の客観性と透明性を保証する意味から、必要な文献が全て引用されていることとともに、引用する文献の質が確保されていることが求められる。この技術資料では引用する文献は原則として査読付きの学術雑誌の公表論文とし、これに国内及び国

## 第 7 章 はじめに

際機関の基本文書と、第 2 次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構，1999），平成 17 年とりまとめ（核燃料サイクル開発機構，2005）を加えたものとした。しかし，第 4 章の調査についての記述にあたっては，産業技術総合研究所において進行中である研究に中間段階の成果も一部取り入れている。これについては，原子力安全・保安院からの委託研究の各年度の事業報告書（深部地質環境研究センター，2002；2003；2004；2005；2006；2007）を参照していただきたい。

## 第2章 調査・評価項目の設定

### 1. はじめに

この章では閉鎖後の安全評価に必要な事項について、国際FEPに基づき概要調査の調査・評価項目の設定を行なう。また、調査・評価項目で対象にした自然事象で、特魔法に述べられている要件に対応した評価事項の設定を行なうとともに、評価事項の対象としている事象以外の処分システム領域に影響を与える事象を対象に、サイト影響評価事項を設定する。調査・評価項目は概要調査段階で野外調査を実施できるすべての安全評価事項を対象として設定しているが、評価事項については、サイト選定の視点から特魔法に規定されている内容に限定している。

概要調査は、地層処分事業の立地段階で実施される文献調査・概要調査・精密調査のうち2番目に行なわれる調査であるが、現地調査という意味では最初の調査である。地層処分の安全確保について、原子力安全委員会（2000）は第1次報告の中で、サイト選定と工学的対策からなる「長期的安全確保」と「安全評価等による安全確認」により実現されると述べており、概要調査でのサイト選定の係る要件は特魔法第7条に書かれている。第7条の要件の中で「長期的安全確保」に係る事項は、「地震等の自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないこと」と包括的に表現されている。ここで表現された内容を調査データに基づいて評価するには具体的な調査・評価項目が必要であり、この技術資料では国際FEPに準拠してこの調査・評価項目の設定を行なう。

処分地の地層に影響を与える自然現象は、国際FEP(OECD/NEA, 2002)では処分システム領域に影響を与える外的要因の中に整理されている。外的要因としての長期変動について、すでに廃棄物安全小委員会で検討が行なわれており、「地質及び気候関連事象」として55の事象が特定されている（総合資源エネルギー調査会, 2003）。この「地質及び気候関連事象」の中にわが国で地層処分を実施した場合の閉鎖後安全評価にかかる安全評価事項が網羅されているので、この技術資料では概要調査の調査・評価項目のうち長期変動に関するものについては、これに依拠して項目の設定を行なった。結果的にこの技術資料では、閉鎖後の安全確保に必要な概要調査の調査・評価項目として、「侵食・堆積及び海面変化」、「地震活動」、「火山・マグマ活動」、「深部流体」、「泥火山」、「マスマーブメント」の6項目を設定した。

地層処分の安全確保のためのもう一つの方策である安全評価については、特魔法に述べられていない。安全評価は、原子力安全委員会が将来策定する安全審査基本指針及び安全審査指針の中に記述され、安全審査の時に調査データを総合的に解析して地下水シナリオ

等に基づく安全評価が行なわれるものと考えられる。この技術資料では、閉鎖後の安全確保に必要な安全評価事項をカバーできるように、「地質環境」を概要調査における調査・評価項目とし、地質環境の特性を把握するための調査内容の検討を行なっているが、上記の状況を鑑みると、概要調査段階で個別の地質特性について評価を行なうことは適切でないため、地質環境の中で評価事項の設定は行なっていない。なお、「鉱物資源」については、地下水シナリオの安全評価とは別であるが、人間侵入にかかる閉鎖後の安全評価事項であるので、この技術資料では「地質環境」の中での評価事項にしている。

### 2. 要件のレビュー

国際FEPに基づき処分システム領域に影響を与える外的要因である「地質及び気候関連事象」から、概要調査の調査・評価項目を設定するにあたり、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（以下では「特魔法」と略記）がカバーしている範囲を理解することは勿論のこと、その背景となっている「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－」（以下では「第2次取りまとめ」と引用）（核燃料サイクル開発機構, 1999）の理解は重要であり、さらに原子力安全委員会（2002）の「概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件」（以下では「環境要件」と引用）との整合性を考慮する必要がある。以下にこれらの法律及び報告の関連する部分について概観する。

#### 2.1 第2次取りまとめのサイト選定要件

第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構, 1999）では「地層処分の場として不適切な地域を、選定の対象から除外するうえでの判断基準となる」として、「サイト選定の可否にかかわる地質環境の要件」を設定している。要件としては、「地質環境の長期安定性、処分地の建設可能性及び人間侵入に関連する項目」を提案しており、「これらの要件を満たさない地域は、可能な限り処分候補地の選定段階における文献調査によって除外しておくことが重要である」と述べ、さらに「これらの要件に関しては、処分予定地の選定段階において、現地調査による確認を行なう必要がある」と述べている。ここで第2次取りまとめで用いている処分予定地という用語は、特魔法の精密調査地区に対応しているので、「処分予定地の選定段階での現地調査」は概要調査を指す。

第2次取りまとめでは地質環境の長期安定性に関して、以下の3つの要件を挙げている。

- ①断層活動の影響（岩盤の破断・破碎、変位）によって、処分システムの所期の性能が損なわれるよう

な場所でないこと。

②火山活動の影響（マグマの貫入、地熱、熱水の侵入）によって、処分システムの所期の性能が損なわれるような場所でないこと。

隆起・侵食によって、地下深部に埋設した廃棄物が地表付近に接近するような場所ではないこと。

また、処分場の建設可能性と人間侵入に関する要件が設定されており、前者としては、「処分場を建設するうえで十分な規模の岩盤が、適切な深度に分布していること」が要件となり、明らかに適性に劣ると考えられる第四紀の未固結岩が地下深部まで分布しているような地域は除外されるとしている。また、後者については、処分場への人間侵入の可能性をできるだけ低減させる観点から「地下資源が存在する地域でないこと」が要件となるとしている。

## 2.2 特魔法の要件

特魔法では第6条から第8条にかけて立地段階の要件についての条文がある。まず、文献調査地区では、「地震、噴火、隆起、侵食その他の自然現象（以下「地震等の自然現象」という）による地層の著しい変動の記録がないこと」と「将来にわたって、地震等の自然現象による地層の著しい変動が生じるおそれが少ないと見込まれること」の2つの要件が設定されている。ここで、処分システム領域に影響を与える外的要因について、特魔法は「地震等の自然現象」と非限定的は表現を用いている。また、将来予測に加え、過去の変動の評価が重要であることを示している。このほか、特魔法の施行規則（経済産業省令）には、第6条に関連して、「採掘が経済的に価値が高い鉱物資源の存在に関する記録がないこと」と「第四紀の未固結堆積物であるとの記録がないこと」という要件に関する2つの条文がある。

概要調査に対応する第7条には、「地震等の自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないこと」と第6条と同様に自然現象について記述しており、実際の現地調査により「著しい変動が長期間生じていないこと」の確認が求められている。このほか第7条には「地層等が坑道の掘削に支障のないものであること」と「活断層、破碎帯又は地下水の水流があるときは、これらが坑道その他の地下の施設に悪影響を及ぼすおそれが少ないと見込まれること」と、主として施工の視点からの要件が述べられている。

さらに精密調査に対応する第8条では、「地下施設が当該対象地層内において異常な圧力を受けるおそれが少ないと見込まれることその他当該対象地層の物理的性質が最終処分施設の設置に適していること」、「地下施設が当該対象地層内において異常な腐食作用を受けることがないことその他当該対象地層の化学的性質が最終処分施設の設置に適し

ていると見込まれること」、「当該対象地層内にある地下水又はその水流が地下施設の機能に障害を及ぼすおそれが少ないと見込まれること」と、地質環境について物理学的、化学的、水理学的視点から、それぞれ要件が述べられている。

## 2.3 環境要件

原子力安全委員会（2000）は、「高レベル放射性廃棄物の安全性は、例えば長期的に安定な地質環境を選定するなど長期的安全確保対策を講じることと、安全評価による安全確認を行なうことにより確保される」という安全確保の原則のもとで、「地層処分においては、高レベル放射性廃棄物を長期に亘って人間の生活環境から隔離し、公衆の安全確保を図るため、その多重バリアシステムが長期に亘って所期の性能を発揮できるよう、適切な環境要件を満たす処分地が選定されることが重要である」と述べている。原子力安全委員会では、概要調査地区、精密調査地区、最終処分施設建設地のそれぞれの選定段階において考慮すべき環境要件を定めることとしており、これらのうち概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件が2002年に公表されている。

それらは次の5つの項目からなる。

- ① 隆起・沈降・侵食
- ② 地震・断層活動
- ③ 火山・火成活動
- ④ 鉱物資源の賦存
- ⑤ 岩盤の特性

これらうちはじめの3つが長期変動に係る環境要件であり、「処分地は、放射性核種の閉じ込めに好ましく、高レベル放射性廃棄物を物理的に生活環境から隔離でき、地表における自然環境の変化に伴う著しい影響を受けない地質環境を有していることが必要である」という視点から、特に配慮することが必要な事項となっている。

また、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の考え方を次のようにまとめている。「実際に概要調査を行なうまでもなく、明らかに処分地として不適切と考えられる環境要件を示す。その内容は、情報源が既存の文献などに限られたものであることを勘案し、国内の地質環境に対して一律に適用できると考えられる範囲に留める。また、概要調査あるいはそれ以降の調査の結果をもとに判断することが適当と考えられる事項や、処分施設の設計・施工との関連において検討されるべき事項は環境要件にしない。」

また、原子力安全委員会（2002）はこの報告書の中で、考慮すべき環境要件の考え方として「最終処分施設建設地選定後には、国による安全審査で、立地条件の妥当性が審査される」と述べている。高レベル放射性廃棄物の場合は、今後原子力安全委員会にて検討される安

全審査基本指針及び安全審査指針の中に、環境要件を含め立地条件の評価についての考え方が述べられるものと想定される。なお、高レベル放射性廃棄物の処分に先行して実施されている低レベル放射性廃棄物の処分地に立地に関しては、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」(炉規法)に関連して制定された「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の廃棄物埋設の事業に関する規則」(埋設規則)と、原子力安全委員会(1985)の「放射性廃棄物埋設施設の安全審査の基本的考え方」において、安全審査における立地条件の評価の考え方が示されている。

高レベル放射性廃棄物地層処分は、長期にわたる事業であるので、安全確保のためにすでに確立されている技術を適用時点での最新の内容もので見直す作業を行なう方策(Best Available Technology)をとる国が多い。立地条件の評価に際しても、そのときの最新の科学的知見に基づいて判断されるべきである。したがって、とくに将来予測の不確実性が大きい事項については、原子力安全委員会で概要調査地区選定段階でも考慮されたのと同様に、精密調査地区選定段階においても、過度の制約をあたえるような要件の設定は好ましくなく、将来の研究結果が反映される形で、より適切な判断がなされることが望ましいであろう。

## 2.4 長期変動に関する要件設定に共通する基準

第2次取りまとめのサイト選定要件(核燃料サイクル開発機構, 1999)、特魔法の第6条から第8条、原子力安全委員会(2002)の環境要件は、表現の仕方は異なるが、ともに立地選定において地層処分に適さない地域を除外するための基準が要件という形で述べられている。ここで、概要調査を対象にして、閉鎖後の安全評価について検討するこの技術資料では、精密調査について述べた特魔法の第8条及び、それぞれの中で施工にかかる要件を述べたものは検討の対象から外し、長期変動についての要件について検討する。

すなわち長期変動に関しては、立地選定では安全評価を行なうまでもなく、明らかに地層処分に適さない場所は避けるという選定基準が、特魔法では「地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がないこと」と表現されている。この「著しい変動」の内容を具体的に述べている環境要件および関連する第2次取りまとめの記述を、多重バリアの安全機能との関連でみると、これまでの要件とされてきたものは、いずれも物理的隔離機能にかかる事項であることがわかる。環境要件では、地震・断層活動と火山活動に対して共通して「処分施設及び廃棄物が直接破損する」という表現が用いられている。これに至る自然界の行為は、地震・断層活動では、「岩盤の破碎や破断」であり、火山・火成活動では「マグマの貫入あるいは噴出」

である。また、隆起・沈降・侵食では、「処分施設及び廃棄物が地表近くに接近すること」という表現が用いられているが、これは「高レベル放射性廃棄物処分にかかる安全規制の基本的考え方について(第1次報告)」の接近シナリオで述べられている「廃棄物、処分場の露出」とした方が、バリアの喪失という点で理解しやすい。いずれにしても、物理的な隔離機能が大きく損なわれないこと(処分施設・廃棄物の破損、岩盤の破碎・破壊、侵食によるバリアの喪失がないこと)が要件設定の基準となっている。

第2次取りまとめでは、「処分システムの所期の性能が損なわれる」事項として、これらのほかに、断層活動の影響では「変位」を、火山活動の影響では、「地熱」と「熱水の侵入」を取り上げている。これらは、「処分施設及び廃棄物が直接破損する」ことには該当せず、また文献のみから判断することが困難な場合もあることから、概要調査地区選定段階で考慮すべき環境要件とはなっていないが、概要調査を行ない、精密調査地区を選定する段階では、その評価のあり方を決めておかななくてはならない事項であろう。

なお、立地要件に関連して、これらのほかに原子力発電環境整備機構(NUMO)(2002)により、「概要調査地区選定上の考慮事項」が、また、土木学会(2001, 2006)により、「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」「精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方」が公表されている。これらについては、具体的に個々の評価項目を選定する際に参照していく。

## 3. 国際FEPと「地質及び気候関連事象」

### 3.1 国際FEP

この技術資料が依拠している国際FEPについて、以下にその概略を述べる。経済協力開発機構の原子力機関(OECD/NEA, 2002)では、放射性固体廃棄物埋設処分場の閉鎖後の安全に関する要因を、特徴(Feature)、出来事(Event)、プロセス(Process)から特定、分類し、要因の一覧を国際FEPリストとして文書に取りまとめている(本技術資料の巻末に付録として添付)。廃棄物安全小委員会報告書資料編では、この国際FEPの文書について以下のように紹介している。

国際FEPの位置付けについては、「処分場に関する安全解析の開発における主要な活動は、①関連する「特徴、出来事、プロセス(FEP)」と称される要因の包括的な特定と、②論理的な選別と、③性能評価に含まれるべき要因の選択である。このFEPの特定、分類及び選別のプロセスは、FEP解析と呼ばれている。この活動は、処分場の安全評価に関して選択すべき将来像の特定と選択という、シナリオ開発と呼ばれるも

の第1段階である」と説明している。また、国際FEPリストでは、使用済燃料を含む高レベル放射性廃棄物の地層処分から低レベル放射性廃棄物の浅地中処分まで幅広く適用できるように、包括的にFEPが特定、分類されており、個別具体的な安全評価のシナリオを検討する際に、国際FEPを参考にすることができるとされている。国際FEPは図2-1に示すように、4つの階層とその下位にいくつかのカテゴリーが設けられている。

この技術資料では階層1の外的要因のうち「F1.2地質学的プロセスとその影響」「F1.3気候プロセスとその影響」の2つのカテゴリーと、階層2の処分システム領域の「F2.2地質学的環境」を取り扱う。なお、今回とりあげたFEPの中には放射性核種の挙動にかかる階層3のFEPは含まれていない。地質学的環境における核種移行の評価においては、階層3の放射性核種/汚染物質に関する要因も含めて考察しなければならないが、この技術資料では核種移行評価にまでは言及せず、記述を核種移行の場としての地質環境の調査までに留めている。

### 3.2 「地質及び気候関連事象」

国際FEP階層1外的要因の「F1.2地質学的プロセスとその影響」「F1.3気候プロセスとその影響」に含まれるFEPから、わが国で地層処分において処分システム領域に影響を与える長期変動として55の「地質及び気候関連事象」が抽出されている（総合資源エネルギー調査会,2003）。これについて山元・小玉(2004)による解説があるので、以下に関連部分を要約する。

国際FEPでは考慮すべき要因の羅列に止まっていること、岩塩に関するFEPなど明らかにわが国には存在しないものが含まれていること、反対に変動帯で想定される要因が細分化されていないなど、日本列島にそのままあてはめることには少々無理もある。そのためFEPごとにそれが影響を及ぼすFEPを特定し、必要に応じて細分化を行いつつ、FEP相互の影響関係を相関関係図にとりまとめることにより、処分システム領域への影響を及ぼし得る事象を特定した（図2-2）。

FEP相関図から導き出した「地質及び気候関連事象」について、事象毎に「メカニズムと現象」「時間

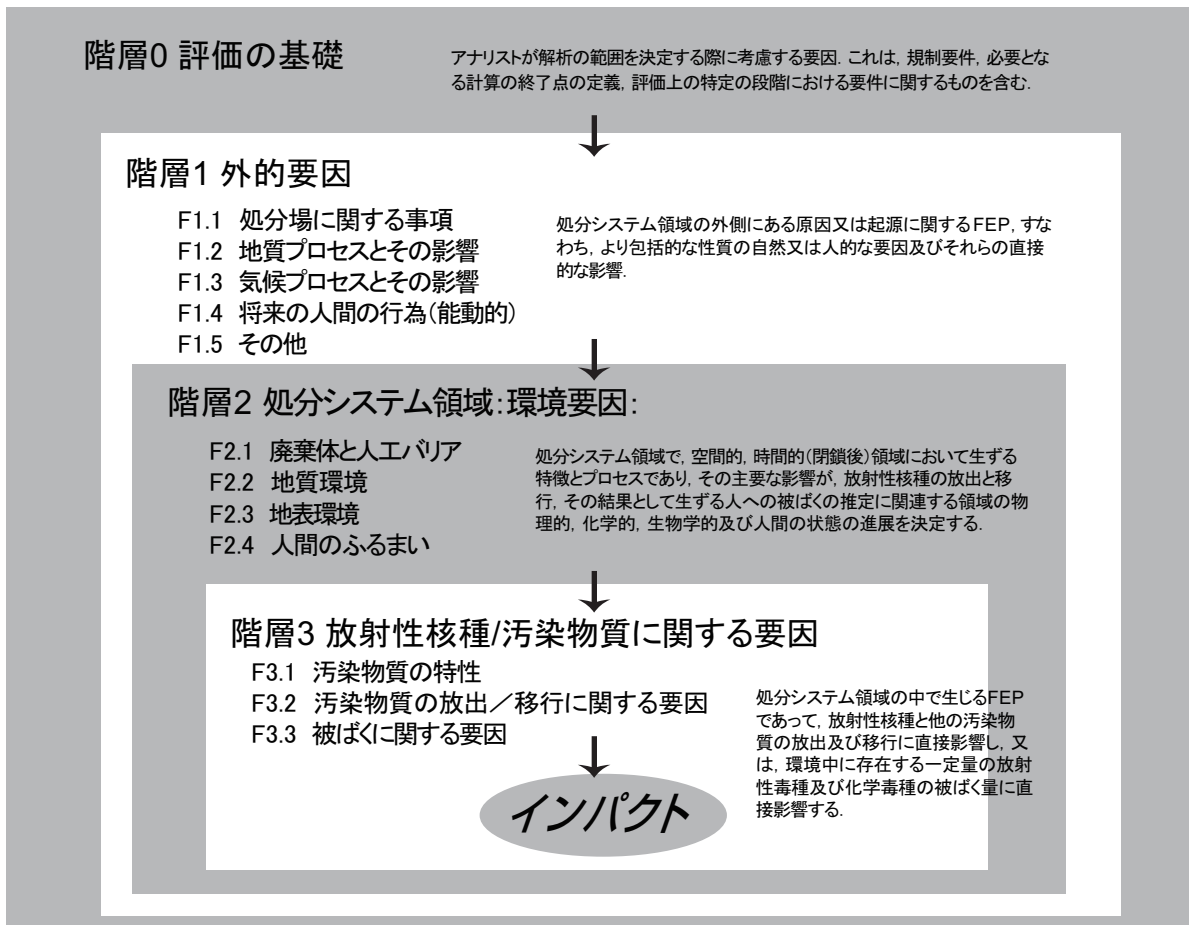


図 2-1 国際FEPの構造 (OECD/NEA, 2002)

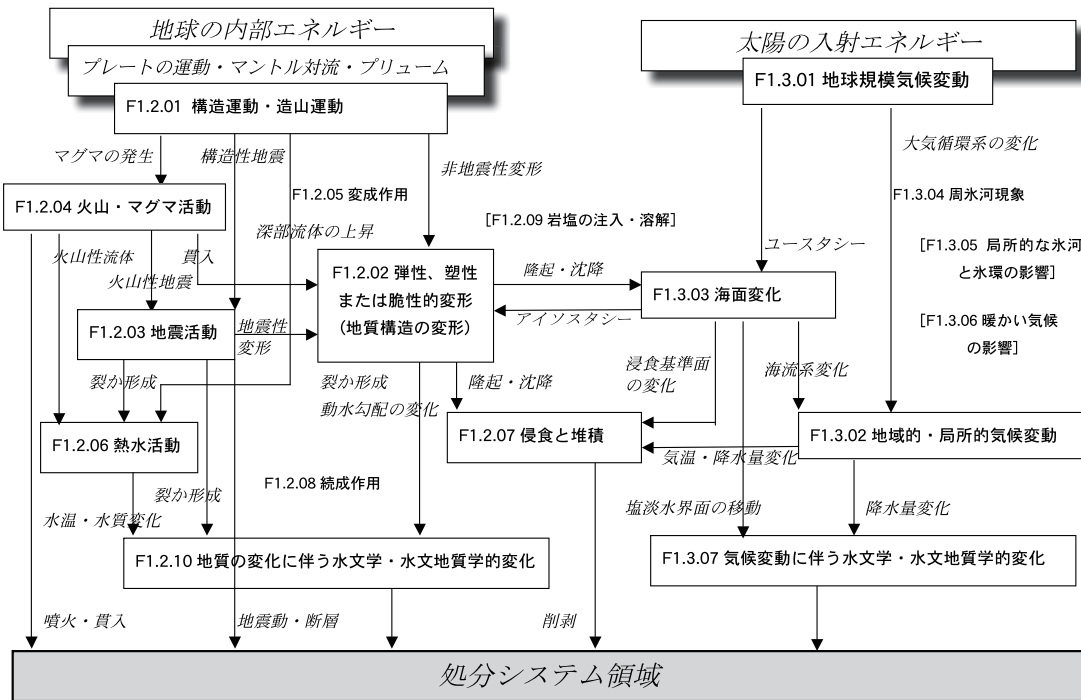


図 2-2 地質及び気候関連事象 (山元・小玉, 2004 を一部改変)

的特徴」「空間的特徴」「影響度」を検討している (これらについてはこの技術資料の巻末に付録として、「地質及び気候関連事象の一覧」を添付)。さらにその中で同じ事象であっても影響が異なるものについては、可能な限り細分化している。たとえば、「構造運動→地震活動」事象については、発生場所の違いから海側プレートの沈み込み境界付近で起きる大地震、陸側プレートの活断層沿いで起きる大地震、陸側プレートの活断層沿い以外で起きる大地震等に細分化している。活断層沿い以外としたものには、現在認定されていない未知の活断層も含め、既存地震断層の再活動や断層の新生も可能性として考えられる。さらに「構造運動→地震活動」事象を現象の違いから地震動が引き起こす諸現象 (泥火山や地すべりの発生) と地震断層の出現 (地震を発生させた断層のずれが地表付近に達すること) に分けている。同様に「構造運動→火山・マグマ活動」についても、既存の火山 (この場合は第四紀火山) の噴火と、第四紀火山以外の場所に新規に出現する火山の噴火に細分している。さらに大規模火砕流噴火のように極端に影響範囲が広いものについても区分している。その結果、検討された事象の数は 55 になっている。なお、今回この技術資料を作成するにあたり、「地質及び気候関連事象」の見直しを行い、周水河現象を追加したので、事象の数は 56 となっている (表 2-1)。

#### 4. 長期変動に関する調査・評価項目、評価・考慮事項設定の考え方

この技術資料では、閉鎖後の安全評価に必要な、長期変動に関する概要調査の調査・評価項目を、国際 FEP による安全評価事項に基づいて設定する。ここでの調査・評価項目の中の評価には、精密調査地区選定のために行なう評価と、安全審査時の安全評価において行なう評価が含まれる。前者はサイト選定の視点から特魔法の規定に依拠して行なう評価で、その対象となる事項を、この技術資料では概要調査評価事項とする。一方、サイト選定の視点からの評価事項とはならないが、サイトへの影響が想定され、安全審査時には評価が必要になる事項については、サイト影響考慮事項と区分する。なお、概要調査評価事項を用いて調査結果を評価することにより、地層処分に適さない地域は除外されるが、そのことをもって、その評価事項を安全審査時の安全評価において除外してもよいということにはならない。これらの関係についての概略を図 2-3 に示す。

さて、概要調査の調査・評価項目は、概要調査に先立って行なわれる文献調査の内容を踏まえて設定される必要がある。文献調査においては、特魔法第 6 条の要件及びそれを具体化した原子力安全委員会の環境要件に照らして、既存の文献が検討され、概要調査地区が選定されることになる。これを受けて行なわれる概

第2章 調査・評価項目の設定

表2-7 「地質及び気候関連事象」と調査・評価項目（評価・考慮事項）

地質及び気候関連事象の詳細については、巻末付録1を参照

地質及び気候関連事象				調査・評価項目（評価・考慮事項）	
G1	構造運動 → 地質構造の変形	→ 水文地質学的変化	→ サイト	侵食・堆積及び海面変化（考慮事項）	
G2		→ 侵食と堆積	→ サイト	侵食・堆積及び海面変化（評価事項）	
G3		→ 海面変化	×		
G4	→ 地震活動（海側プレートとの沈み込み境界付近の地震）	→ サイト		地震活動（評価事項）	
G5		→ 水文地質学的変化	→ サイト	地震活動（考慮事項）	
G6		→ 熱水活動	→ 水文地質学的変化 → サイト	地震活動（考慮事項）	
G7		→ 地質構造の変形	→ 水文地質学的変化 → サイト	地震活動及び海面変化（考慮事項）	
G8		→ 侵食と堆積	→ サイト	地震活動及び海面変化（評価事項）	
G9		→ 海面変化	×		
G10	→ 地震活動（プレートとの衝突に伴う地震）	→ サイト		地震活動（評価事項）	
G11		→ 水文地質学的変化	→ サイト	地震活動（考慮事項）	
G12		→ 熱水活動	→ 水文地質学的変化 → サイト	地震活動（考慮事項）	
G13		→ 地質構造の変形	→ 水文地質学的変化 → サイト	地震活動及び海面変化（考慮事項）	
G14		→ 侵食と堆積	→ サイト	地震活動及び海面変化（評価事項）	
G15		→ 海面変化	×		
G16	→ 地震活動（陸側プレート内の浅い地震〈活断層沿い〉）	→ サイト		地震活動（評価事項）	
G17		→ 水文地質学的変化	→ サイト	地震活動（考慮事項）	
G18		→ 熱水活動	→ 水文地質学的変化 → サイト	地震活動（考慮事項）	
G19		→ 地質構造の変形	→ 水文地質学的変化 → サイト	地震活動及び海面変化（考慮事項）	
G20		→ 侵食と堆積	→ サイト	地震活動及び海面変化（評価事項）	
G21		→ 海面変化	×		
G22		→ 地震活動（陸側プレート内の浅い地震〈活断層沿い以外〉）	→ サイト		地震活動（評価事項：未知の活断層） （考慮事項：既存断層再の活動性）
G23		→ 水文地質学的変化	→ サイト	地震活動（考慮事項）	
G24		→ 熱水活動	→ 水文地質学的変化 → サイト	地震活動（考慮事項）	
G25		→ 地質構造の変形	→ 水文地質学的変化 → サイト	地震活動及び海面変化（考慮事項）	
G26		→ 侵食と堆積	→ サイト	地震活動及び海面変化（評価事項）	
G27		→ 海面変化	×		
G28	→ 地震活動（海側プレートとの沈み込み境界付近の地震による液状化現象・泥火山・地すべり）	→ サイト		泥火山（評価事項） マスムーブメント（評価事項）	
G29	→ 地震活動（プレートとの衝突に伴う地震による液状化現象・泥火山・地すべり）	→ サイト		泥火山（評価事項） マスムーブメント（評価事項）	
G30	→ 地震活動（陸側プレート内の浅い地震〈活断層沿い〉による液状化現象・泥火山・地すべり）	→ サイト		泥火山（評価事項） マスムーブメント（評価事項）	
G31	→ 地震活動（陸側プレート内の浅い地震〈活断層沿い以外〉による液状化現象・泥火山・地すべり）	→ サイト		泥火山（評価事項） マスムーブメント（評価事項）	
G32	→ 地震活動（津波）	×	→ サイト		
G33	→ 火山・マグマ活動（既存火山の噴火）	→ サイト		火山・マグマ活動（評価事項）	
G34		→ 火山・マグマ活動（既存火山の貫入）	→ サイト		火山・マグマ活動（評価事項）
G35		→ 火山・マグマ活動（既存火山）	→ 地震活動 → サイト		火山・マグマ活動（評価事項）
G36		→ 地質構造の変形	→ 水文地質学的変化 → サイト		火山・マグマ活動（評価事項）
G37		→ 侵食と堆積	→ サイト		火山・マグマ活動（評価事項）
G38		→ 海面変化	×		
G39		→ 熱水活動	→ 水文地質学的変化 → サイト		火山・マグマ活動（考慮事項）
G40		→ 火山・マグマ活動（既存火山の巨大噴火）	→ サイト		火山・マグマ活動（考慮事項）
G41		→ 火山・マグマ活動（新規火山の噴火）	→ サイト		火山・マグマ活動（評価事項）
G42		→ 火山・マグマ活動（新規火山の貫入）	→ サイト		火山・マグマ活動（評価事項）
G43		→ 火山・マグマ活動（新規火山）	→ 地震活動 → サイト		火山・マグマ活動（評価事項）
G44		→ 地質構造の変形	→ 水文地質学的変化 → サイト		火山・マグマ活動
G45		→ 侵食と堆積	→ サイト		火山・マグマ活動
G46		→ 海面変化	×		
G47		→ 熱水活動	→ 水文地質学的変化 → サイト		火山・マグマ活動
G48		→ 火山・マグマ活動（新規火山の巨大噴火）	→ サイト		火山・マグマ活動
G49	→ 熱水活動	→ 水文地質学的変化 → サイト		深部流体（考慮事項）	
G50	地球規模 → 地域的・局地的気候変動 気候変動	×			
G51	→ 海面変化	→ 地質構造の変形	×		
G52		→ 水文地質学的変化	→ サイト	侵食・堆積及び海面変化（考慮事項）	
G53		→ 侵食と堆積	→ サイト	侵食・堆積及び海面変化（評価事項）	
G54		→ 地域的・局所的気候変動	→ 水文地質学的変化 → サイト	侵食・堆積及び海面変化（考慮事項）	
G55		→ 侵食と堆積	→ サイト	侵食・堆積及び海面変化（評価事項）	
G56		→ 周氷河現象	→ 水文地質学的変化 → サイト	侵食・堆積及び海面変化（考慮事項）	



要調査では、実際に野外調査により取得したデータを用いて、文献情報に基づいて選定された地区が地層処分に適さない地域ではないことを確認する必要があるものと考えられる。

上記の考えに従うと、特廃法第6条の2つの要件（「地震、噴火、隆起、侵食その他の自然現象（以下「地震等の自然現象」という）による地層の著しい変動の記録がないこと」及び「将来にわたって、地震等の自然現象による地層の著しい変動が生じるおそれが少ないと見込まれること」）と、施行規則にある2つの要件（「採掘が経済的に価値が高い鉱物資源の存在に関する記録がないこと」と「第四紀の未固結堆積物であるとの記録がないこと」）は、概要調査において現地調査により確認すべき事項となる。なお、最後の岩盤特性に関する要件は、閉鎖後の安全評価の視点からのものではないので、この技術資料ではこれを除く要件について、調査・評価項目として検討する（鉱物資源については、閉鎖後の安全評価事項ではあるが、長期変動ではないので、この章の6節「地質環境」で検討）。同様に、文献調査に適用される原子力安全委員会の5つの環境要件（隆起・沈降・侵食、地震・断層活動、火山・火成活動、鉱物資源の賦存、岩盤の特性）についても、ここでは、鉱物資源、岩盤の特性を除いた他の3項目について調査・評価項目として検討する。

次に、概要調査段階での要件については、特廃法では第7条に「地震等の自然現象による地層の著しい変

動が長期間生じていないこと」という形で述べられている。これについて具体的な調査・評価項目を提案することがこの章の課題である。特廃法は上記のような記述であり、具体的にどのような事項を評価すべきかについて書いていないが、文献調査段階での原子力安全委員会の環境要件の設定を参考にすると、概要調査段階でも近い将来、原子力安全委員会により具体的な環境要件が設定されるものと予想される。この技術資料を執筆している段階では、精密調査地区選定段階において考慮すべき環境要件は、特定放射性廃棄物処分安全調査会で審議中であり、具体案はまだ示されていないが、概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件を原子力安全委員会がまとめた際に、今後審議すべき検討事項が報告書に併記されているので、この技術資料で概要調査の調査・評価項目および概要調査評価事項、サイト影響考慮事項を設定するにあたり、この記述を随時参照することにした。

以上述べてきた考え方を整理すると、長期変動に関する概要調査の調査・評価項目、概要調査評価事項、サイト影響考慮事項は以下のように要約される。

長期変動に関する概要調査の調査・評価項目：概要調査段階で野外調査を実施できる、閉鎖後の安全評価に必要な調査・評価項目であり、国際FEPの処分システム領域に影響を与える外的要因のうち「地質及び気候関連事象」（56の事象）を対象にする。特廃法で

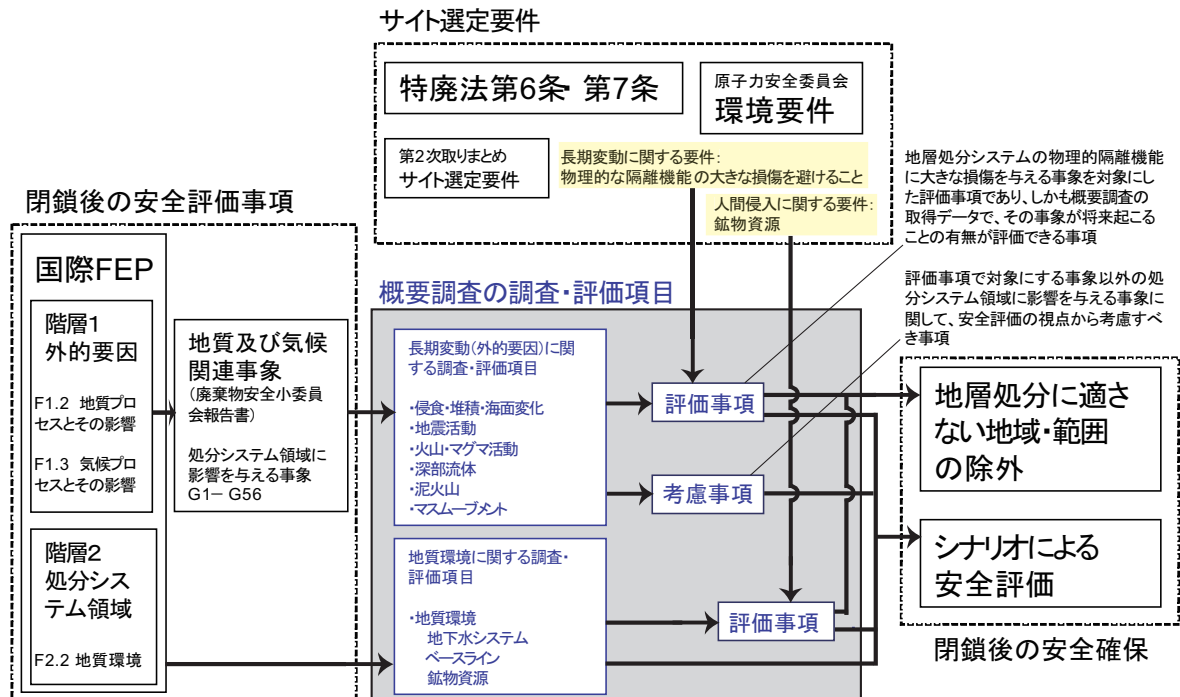


図 2-3 概要調査の調査評価項目と閉鎖後の安全確保との関係

は第6条及び第7条に書かれている「地震等の自然現象」が調査・評価の対象となる。概要調査の調査・評価項目の対象となる事象は、概要調査評価事項とサイト影響考慮事項の対象になる。

●概要調査評価事項： 地層処分システムの物理的隔離機能に大きな損傷を与える事象を対象にして、サイト選定の視点から評価すべき事項で、しかも概要調査の取得データで、その事象が将来起こることの有無が評価できる事項とする。概要調査評価事項は、地層処分に適さない地域あるいは地層処分に適さない範囲を除外する基準となる。

◎サイト影響考慮事項： 概要調査の調査・評価項目で対象とする事象のうち、評価事項で対象にする事象以外の処分システム領域に影響を与える事象を対象にして、安全評価の視点から考慮すべき事項とする。サイト影響考慮事項は、安全評価のほか人工バリアの設計において考慮すべき内容のものである。

なお、この技術資料では評価期間について、次のように扱っている。地質現象の将来予測についての評価を行う場合、評価期間の設定が必要となるが、わが国ではまだ高レベル放射性廃棄物に対して、放射線防護の基準値も評価期間も定められていない状況にある。このような中で、この技術資料では過去の変動履歴とテクトニクスを考慮に入れた外挿法により、できるだけ長い期間が評価できるようにしたいと考えている。過去の変動履歴をもとに将来の活動を予測する場合に、できるだけ長い過去の記録が必要であるが、一方で過去の遡るほど地質現象の記録が断片的になるというジレンマがある。このような観点から、次節で提示する評価事項の中で、火山と活断層については調査により変動履歴を得ることが可能な第四紀の活動を評価対象にしている。しかし、地域によっては十分な記録が取れない場合もあることは考慮しておく必要がある。将来予測の手法については第3章で述べる。

## 5. 長期変動に関する概要調査の調査・評価項目

前のセクションで述べた特魔法、環境要件の枠組みの中で、この技術資料では国際FEPに従って「地質及び気候関連事象」(56の事象)を用いて、処分システム領域に影響を与える長期変動に関する調査・評価項目を以下のように設定した。

まず、概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件を踏襲するものとして、「侵食・堆積及び海面変化」、「地震活動」、「火山・マグマ活動」(これらの用語は国際FEPに準拠しているため、特魔法、環境要件で用いられている用語と多少異なっているが、内容的にはほぼ対応している)を調査・評価項目とした。

これらの調査・評価項目では、文献調査の結果、地層処分に適さない地域が除外されていることの現地調査による確認と、文献調査では評価できなかった事項についての現地調査等による評価(精密調査地区選定のための評価)と、将来の安全審査に向けて必要なデータの取得および解析が求められる。

また、国際FEPに依拠してより幅広い視点から処分システム領域に大きな影響を与える事象について検討した結果、上記の3項目に加え、この技術資料では物理的隔離機能に大きな損傷を与える可能性のある泥火山、マスマーブメントと、プレートの沈込帯に位置するわが国特有な現象としての深部流体を調査・評価項目に追加する。これらの事象を調査・評価項目に加えた理由については、それぞれの調査・評価項目の記述の中及び第3章の関連する項目の中で述べる。

以上の長期変動を対象にした6つの調査・評価項目について、この節では個別の項目ごとに文献調査終了後の状況を想定し、原子力安全委員会でのこれまでの検討内容を踏まえ、評価事項及び考慮事項を設定し、閉鎖後の安全評価の視点から概要調査における現実的な調査及び評価が実施できるようにした。なお、これらの調査・評価項目に関する科学的知見については第3章に、また具体的な調査の進め方については第4章に記述する。

### 5.1 侵食・堆積及び海面変化

この技術資料では、国際FEP(OECD/NEA, 2002)の中で、F1.2.07 侵食と堆積、F1.3.03 海面変化を1つの項目にまとめ、「侵食・堆積及び海面変化」を調査・評価項目とした。ここで海面変化とは相対的海面変化(テクトニックな隆起・沈降と氷河性海面変化)のことであり、環境要件等で用いられている「隆起」はこの海面変化という用語に含まれる。

#### a) 文献調査結果のレビュー

概要調査の前に行なわれる文献調査の結果に基づき、原子力安全委員会(2002)の環境要件と原子力発電環境整備機構(2002)の考慮事項に照らして、地層処分に適さない地域が除外される。

隆起・侵食について原子力安全委員会(2002)では、概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件として、「対象地域の隆起・侵食量からみて、処分場及びその周辺の地質環境に対し著しい変動をもたらすおそれがあることが、文献調査で明らかな地域は、主に、処分施設及び廃棄物が地表近くに接近することを避ける観点から、これを概要調査地区には含めない」と述べている。

また、原子力発電環境整備機構(2002)は、「過去10万年間の隆起の総量が300mを超えていることが明らかな地域は含めないように、概要調査地区を選定しま

す」と述べている。

このような環境要件及び原子力発電環境整備機構の考慮事項に基づき調査結果がレビューされると、文献調査段階では300mを超える著しい隆起量のある地域が除外されることになる。文献調査では明らかに地層処分に適さない地域が除外されるが、侵食はどの地域がサイトになるにしても避けることができない事象であるので、除外されなかった地域でも将来の侵食量についての評価が必要であることはいうまでもない。

#### b) 原子力安全委員会による今後の検討

原子力安全委員会(2002)は、概要調査地区選定段階以降の段階での審議事項として、「隆起・沈降・侵食等により地下水の流動特性や水質が変化し、廃棄体中に含まれる放射性物質が漏出し、周辺の地質環境を移行しやすくなること等の影響」について審議するとしている。地下水との関係については、報告書の中では、今後審議すべき事項として、「隆起・沈降・侵食等により地下水の流動特性や水質が変化し、廃棄体中に含まれる放射性物質が漏出し、周辺の地質環境を移行しやすくなること等の影響」が挙げられている。

気候変動・海水準変動に関しては、概要調査地区選定段階での環境要件を審議した際に、「気候変動・海水準変動による影響については、当調査会において、概要調査地区選定段階以降の段階で考慮すべき環境要件の検討の際に、設計・施工での対応や処分システム全体の安全性能との関連も踏まえ、その取り扱いを審議する。なお、近年の人間活動に伴う地球温暖化については、当調査会において、国内外における研究の動向にも留意しつつ、必要に応じて審議する」と、この問題の重要性をするとともに、後日審議することとしている。

#### c) FEPによる安全評価事項

この項目に関連する国際FEP(OECD/NEA,2002)は、「F1.2.01 構造運動と造山運動」、「F1.2.02 弾性、塑性または脆性的変形(地質構造の変形)」、「F1.2.03 地震活動」、「F1.2.04 火山・マグマ活動」、「F1.2.07 浸食と堆積」、「F1.2.10 地質の変化に伴う水文学的/水文地質学的変化」、「F1.3.02 地域的で局所的気候変動」、「F1.3.03 海水準の変動」、「F1.3.07 気候変動に伴う水文学/水文地質学的変化」(それぞれにFEPの内容は巻末の資料を参照)と多数ある。この技術資料では国際FEPの番号にはFを頭に付け、国際FEPから導いた地質及び気候関連の56の事象にはGを番号の頭につけている。

侵食・堆積及び海面変化が処分システム領域に影響を与える事象には、テクトニックな隆起・沈降に起因して侵食・堆積が起こる事象(G2)、隆起・沈降が水文地質学的変化をもたらす事象(G1)と地震活

動に伴う隆起・沈降に起因した侵食・堆積が起こる事象(G8, G14, G20, G26)、同じく水文地質学的変化が起こる事象(G7, G13, G19, G25)に分けられる。また、氷河性海面変化(環境要件では海水準変動と記述)に伴う侵食・堆積を考慮する必要がある(G53, G55)、また、氷河性海面変化に伴う水文地質学的変化を考慮する必要がある(G52, G54)。さらに地域によっては周氷河現象を考慮する必要がある(G56)。

#### d) 概要調査の評価・考慮事項

原子力安全委員会及び廃棄物安全小委員会でのこれまでの検討を踏まえ、概要調査により取得されたデータおよび科学的知見に基づき論理の構築が可能な評価・考慮事項として、以下を提案する。侵食・堆積及び海面変化に関する調査・評価項目では、地層処分システムの物理的隔離機能に大きな損傷を与える事象としての侵食を評価事項の対象とし、また、処分システム領域に影響を与える事象として、相対的海面変化(テクトニックな隆起・沈降と氷河性海面変化)に伴う水文地質学的変化を考慮事項の対象とする。さらに長期的予測の不確実性にかかるテクトニクスの安定性を考慮事項の対象とする。

調査・評価項目：侵食・堆積及び海面変化

- (概要調査評価事項) 予測侵食量が埋設深度以上になり、廃棄体が地表に露出する可能性のある地域は、避ける必要がある。
- ◎ (サイト影響考慮事項) 隆起・沈降および氷河性海面変化による相対的海面変化により、将来放射性物質を閉じこめておく機能に影響を与える可能性のある地下水の流動あるいは水質の変化が予想される地域は、相対的海面変化の影響について考慮する必要がある。
- ◎ (サイト影響考慮事項) 隆起・沈降に影響を与えるテクトニクスについて、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。

これらを調査・評価項目に取り上げた妥当性については、第3章「調査・評価項目に関する科学的知見」その科学的根拠を述べるが、以下に上記の評価事項・考慮事項ごとに若干の補足的説明を加える。

廃棄体の地表への露出は避けなければならない。このような状態が現実とならないように、廃棄体の放射能の減衰と侵食予測を求めて埋設深度が決められる必要がある。但し、この評価を行ない地層処分に適さない地域を除外するには、高レベル放射性廃棄物に関して放射線防護の基準値、評価期間が示されている必要がある。

隆起・沈降及び氷河性海面変化による相対的海面変化の影響は避けて通れない現象であり、特に海岸沿い

の地域が調査地区になった場合には大きく考慮すべき事項である。地下水シナリオによる安全評価に必要な変動予測のデータの取得が必要である。なお、考慮事項の文章中にある「放射性物質を閉じこめておく機能」は、地層処分システムの多重バリアとしての放射性物質を閉じ込めておく安全機能を表現したものであり、物理的隔離機能だけでなく、遅延機能、拡散機能等を含むものである。以下の項目においても同様の文章表現を用いているが、意味する内容は上記の通りである。

テクトニクスの問題は「F1.2.01 構造運動と造山運動」に関係する部分で、「F1.3.01 地球規模気候変動」に起因する事象以外のすべての事象の起因事象である。ここでは現在のプレート運動の枠組みによるテクトニクスの場が、将来においても続いていくことを、安定性という言葉で表現している。

## 5.2 地震活動

### a) 文献調査結果のレビュー

原子力安全委員会(2002)による「概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件」には、「処分施設を合理的に配置することが困難となるような活断層の存在が、文献調査で明らかな地域は、主に、処分施設及び廃棄物が直接破損することを避ける観点から、これを概要調査地区には含めない」との記述がある。

一方、原子力発電環境整備機構(2002)は地震について以下のような評価事項を設けている。

「陸域では空中写真判読等、海域では海上音波探査等に基づいて全国的に調査された文献に示されている活断層がある場所は含めないように、概要調査地区を選定します。

くり返し活動し、変位の大きい活断層等について、次の事項に該当すると判断される場所、範囲は含めないように、概要調査地区を選定します。

- ①全国一律に評価する事項で用いた以外の文献よって認められる活断層がある場所
- ②活断層の幅(断層破砕帯)およびその外側の变形帯に含まれる範囲
- ③活断層の分岐等の発生する可能性の高い範囲
- ④顕著な活動をしている活褶曲や活撓曲

この環境要件及びNUMOの評価事項に基づき調査結果がレビューされると、文献調査段階では文献により存在が明らかな活断層は確実に除外される。しかし、未発見の活断層が存在している可能性は残されているので、文献調査の結果選定された概要調査地区において、すべての活断層が除外されているということとはできない。また、既存断層の将来における活動可能性についての検討も残されている。

### b) 特廃法による要件

活断層については特廃法で特記されている。精密調

査地区の選定要件として、特廃法では第7条に「当該対象地層等において、地震等の自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないこと」に加え、「当該対象地層等内に活断層、破砕帯又は地下水の水流があるときは、これらが坑道その他の地下の施設(次条第二項各号において「地下施設」という。)に悪影響を及ぼすおそれが少ないと見込まれること」という条文がある。この内容は直接的には閉鎖後の安全評価という視点からではないが、活断層が存在する場合には十分な調査が要求されている。

### c) 原子力安全委員会による今後の検討

原子力安全委員会(2002)では地震に関して今後審議すべき事項として、「岩盤に破断や破砕に伴って卓越した地下水移行経路が形成されることや、岩盤ひずみに起因して地下水圧が変化することなどの地下水流動特性や水質が変化すること等の影響」が取り上げられており、「地震・断層活動による地質環境への影響については、活断層の有無からだけでは十分に判断できない場合も想定される」との指摘がなされている。

### d) FEPによる安全評価事項

この技術資料で調査・評価項目にした地震活動が依拠する国際FEPは、「F1.2.03 地震活動」、「F1.2.04 火山・マグマ活動」、「F1.2.01 構造運動と造山運動」、「F1.2.02 弾性、塑性または脆性的変形」、「F1.2.06 熱水活動」、「F1.2.10 地質の変化に伴う水文学的/水文地質学的な変化」である。

これらのFEPにより処分システム領域に影響を与える事象で、地層処分システムの隔離機能を大きく損傷する事象には、地震断層の出現と、泥火山、大規模なマスマーブメントがある。「地質及び気候関連事象」(56の事象)でみると、地震断層の出現については、「海側プレートの沈み込み境界付近での地震」(G4)、「プレート衝突に伴う地震」(G10)、「陸側プレート内の浅い地震[活断層沿い]」(G16)、「陸側プレート内の浅い地震[活断層沿い以外]」(G22)に起因するものとして記述されている。これらのうち「陸側プレート内の浅い地震[活断層沿い以外]」(G22)には、存在しているのも関わらず調査により発見されていない未知の活断層と、将来再活動する可能性のある既存断層を含んでいる。

また地震が誘発する事象でサイトに影響のあるものとして、「液状化現象、泥火山の活動、地すべり(マスマーブメント)の発生」(G28, G29, G30, G31)の事象が識別される。ここで、泥火山および地すべり(マスマーブメント)については、「地質及び気候関連事象」(56の事象)の中では、地震活動との関連で整理しているが、地震が誘因とならない場合もあるので、この資料では別に項目を立てて記述する。また、液状

化については、通常は地表近くの部分で起こる現象であるので、埋設深度が300 mを超える高レベル放射性廃棄物では考慮する必要はない。たとえ深い場所でも起こることがあったとしても、未固結体積物の分布地域は環境要件で排除されるので、液状化現象については、閉鎖後の安全評価に向けて改めて項目立てをする必要はない。

一方、地震による地下水系の変化を通してサイトに与える影響については、地震で生じた地層内の圧力変化、裂か系の形成が地下水流動系に及ぼす現象（G5, G11, G17, G23）、地震により移動した熱水が地下水系に注入、混入する現象（G6, G12, G18, G24）、地震性の変形が累積することで、地下水系が変化する現象（G7, G13, G19, G25）等が想定される。これらのうち最後の累積的变化については、この技術資料では「侵食・堆積及び海面変化」に関連する水文地質学的変化の中で取り扱っている。

#### e) 概要調査の評価・考慮事項

原子力安全委員会及び廃棄物安全小委員会でのこれまでの検討を踏まえ、概要調査により取得されたデータ及び科学的知見に基づき論理の構築が可能な評価・考慮事項として、以下を提案する。地震活動に関する調査・評価項目では、地層処分システムの物理的隔離機能に大きな損傷を与える事象としての第四紀に活動した断層を評価事項の対象とする。既存断層の再活動性については、第四紀に活動した記録のない断層でも規模が大きい断層の場合、将来再活動した場合に地層処分システムの物理的隔離機能に大きな損傷を与える可能性があるが、かならずしも概要調査で再活動についての有無を判断できるとは限らないので、評価事項とはしない。断層が活動した場合の影響については、安全評価の一環として評価すべきであることから、既存断層の再活動性についてはサイト影響考慮事項の対象とする。

#### 調査・評価項目：地震活動

●（概要調査評価事項） 第四紀に活動した断層の存在が明らかとなった地域では、断層沿いのずれ破壊により廃棄物が直接破損する可能性があり、その断層の影響が及ぶ範囲は避ける必要がある。

◎（サイト影響考慮事項） 第四紀に活動したものでなくとも、地表やその地下に大規模な断層が存在する場合は、その断層の再活動や誘発変位の可能性が想定されるので、ずれ破壊の影響が及び得る範囲を考慮する必要がある。

◎（サイト影響考慮事項） 地震活動により、将来放射性物質を閉じ込めておく機能を著しく低下させるような地下水の流動あるいは水質の変化が予想される範囲では、地震活動の影響を考慮する必要がある。

◎（サイト影響考慮事項） 地震活動に影響を与えるテクトニクスについて、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。

これらを調査・評価項目に取り上げた妥当性については、第3章でその科学的根拠を述べるが、以下に上記の評価事項・考慮事項ごとに若干の補足的説明を加える。

第四紀に活動した断層で既知のものについては、文献調査において確認され、その分布範囲は概要調査地区の範囲から外されているが、2000年鳥取県西部地震でも明らかのように、わが国にはまだ確認されていない活断層が数多く存在している可能性が高い。これらの分布する領域は、精密調査地区選定にあたっては回避することが必要である。なお、この技術資料で用いている活断層の定義については第3章で説明する。

第四紀に活動した断層でなくとも、地表やその地下に規模の大きな断層が存在する場合は、ずれ破壊が及び得る範囲を考慮する必要がある。既存断層の再活動性については、サイト影響考慮事項にしているが、調査の結果、再活動の可能性があると判断された場合は、断層の影響の及ぶ範囲を避けることが必要である。プレート境界地震等の大地震で地下水系に変化が生じる場合は、地下水系の変動を十分に把握する必要がある。また、断層近傍において地下水系の変化が予想される地域も地震活動の影響についてのデータを十分取得する必要がある。

テクトニクスの安定性については、現在のプレート運動の枠組みが続くかぎり、現在活動している断層が引き続き活動するものと考えられるが、一方、プレート運動との関係で最近広域応力場が変化している場においては、長期的に見た断層運動の評価の確度が下がる。

### 5.3 火山・マグマ活動

#### a) 文献調査結果のレビュー

原子力安全委員会(2002)では、概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件として、火山・火成活動について「第四紀に活動したことがある火山の存在が、文献調査で明らかな地域は、主に、処分施設及び廃棄物が直接破損することを避ける観点から、これを概要調査地区には含めない」と述べている。

一方、原子力発電環境整備機構(2002)は、火山について、以下の評価事項を設定している。

「将来数万年にわたるマグマの活動範囲の拡がりを考慮し、第四紀火山に中心から半径15kmの円の範囲内にある地域は含めないように、概要調査地区を選定します。

第四紀火山に中心から半径15kmの円の外側の地域でも、将来数万年にわたるマグマの地殻への貫入や地表への噴出が明確に判断される地域は含めないように、概要調査地区を選定します。また、将来も含め、マグマによる著しい熱の影響、強酸性に熱水、あるいは著しい熱水対流が存在すると明確に判断される地域は含めないように、概要調査地区を選定します。」

文献調査結果がこのような評価事項に基づきレビューされると、文献により存在が明らかな第四紀火山は確実に調査地区から除外される。また、顕著な熱の影響がある地域及び火山性熱水の活動が著しい地域も除外される。しかし、将来出現する可能性のある新規火山については文献調査段階では未検討であり、また、火山性熱水の影響については文献での検討は限定された内容となっている可能性が高い。

#### b) 原子力安全委員会による今後の検討

原子力安全委員会(2002)では、火山・火成活動についての今後の審議事項として、「火山フロントよりも日本海側の地域や単成火山の周辺地域での新たな火山の発生の可能性など」と、「マグマの熱等による地温上昇や熱水対流の発生、また、熱水・火山ガスの混入による地下水の水質変化等の影響」を取り上げている。このうち後者については、場所によってその範囲が異なることがあるので、実際に調査を行わずに地層処分に適さない地域を排除することは困難であるので、火山によるその影響の程度や範囲に留意して、今後検討するとしている。

#### c) FEPによる安全評価事項

この技術資料で調査・評価項目にした火山・マグマ活動が依拠する国際FEPは、「F1.2.04 火山・マグマ活動」、「F1.2.03 地震活動」、「F1.2.06 熱水活動」、「F1.2.01 構造運動と造山運動」、「F1.2.02 弾性、塑性または脆性的変形」、「F1.2.10 地質の変化に伴う水文学的／水地質学的な変化」である。

これらのFEPにより処分システム領域に影響を与える事象で、地層処分システムの隔離機能を大きく損傷する事象は、噴火・貫入を伴うものである。これを「地質及び気候関連事象」(56の事象)でみると、「既存火山の噴火・貫入(巨大噴火を含む)」(G33, G34, G40)、「新規火山の噴火・貫入(巨大噴火を含む)」(G41, G42, G48)が、これに相当する。

火山・マグマ活動が熱水活動を通してサイトに水文地質学的変化を与える事象は、既存火山の噴火・貫入が熱水活動や地質構造の変形を通して地下水系に影響を与える事象(G36, G39)と新規火山の噴火・貫入に関連する同様の事象(G44, G47)がある。また、これらのほかにも、侵食や地震活動を通してサイトに影響を及ぼす事象(G35, G37, G43, G45)がある。

#### d) 概要調査の評価・考慮事項

原子力安全委員会及び廃棄物安全小委員会でのこれまでの検討を踏まえ、概要調査により取得されたデータおよび科学的知見に基づき論理の構築が可能な評価・考慮事項として、以下を提案する。火山・マグマ活動に関する調査・評価項目では、地層処分システムの物理的隔離機能に大きな損傷を与える事象としての噴火・貫入を評価事項の対象とする。噴火・貫入は第四紀火山のみでなく、将来出現する可能性のある新規火山についても評価の対象とする。また、カルデラを形成する巨大噴火も含め噴火・貫入に伴う水文地質学的変化とテクトニクスの安定性を考慮事項の対象とする。

#### 調査・評価項目：火山・マグマ活動

●(概要調査評価事項) 第四紀火山の存在が明らかとなった地域は、噴火により廃棄物が直接破損あるいは地表に放出される可能性があり、避ける必要がある。

●(概要調査評価事項) 第四紀火山が存在しなくとも新たに火山が出現し得る地域は、噴火により廃棄物が直接破損あるいは地表へ放出される可能性があり、避ける必要がある。

◎(サイト影響考慮事項) 第四紀火山の周辺あるいは巨大噴火の可能性のある範囲の周辺で、将来放射性物質を閉じ込めておく機能に影響を与える可能性のある地下水の流動、水質の変化あるいは地温の変化が予想される地域では、それらの火山・マグマ活動の影響を考慮する必要がある。

◎(サイト影響考慮事項) 火山・マグマ活動に影響を与えるテクトニクスについて、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。

これらを調査・評価項目に取り上げた妥当性について、第3章でその科学的根拠を述べるが、以下に上記の評価事項・考慮事項ごとに若干の補足的説明を加え

る。

既存の第四紀火山については、文献調査によりそれらの分布域が調査地区から排除されているはずであり、概要調査ではその確認を野外調査で行なうことになる。一方、新規に出現する可能性のある火山については文献調査では未検討であるので、これまでに蓄積されている科学的知見を概要調査において取得した調査データを用いて、将来噴火の可能性のある場所を除外することが必要である。概要調査段階では、地下深部の構造調査等の調査結果に基づき、将来の噴火の可能性が高いと評価される場合と、将来の噴火の可能性はない評価される場合のほか、不確実性が多く残る場合が想定される。火山・マグマ活動についての将来予測に不確実性が大きい場所については、次の精密調査における調査及び評価の課題を整理する必要があるであろう。なお、この項目を評価するには、事前に評価期間が定められている必要がある。

熱水活動についてはカルデラが形成される巨大噴火に伴う活動も含め、十分その影響を考慮する必要がある。熱水活動の処分システム領域への影響について、具体的には第3章で述べる人工バリア設置環境に影響を与える要因との関係で考慮する必要がある。

テクトニクスの安定性については、現在のプレート運動の枠組みが続くかぎり、現在の火山の分布パターンは大局的に見て変化しないものと考えられるが、プレート運動との関係で広域応力場が変化する場合には、個々の火山の活動範囲が変化すること等が予想される。

#### 5.4 深部流体

この技術資料では、非天水起源の地下水を深部流体と定義する。

##### a) 文献調査結果のレビュー

原子力安全委員会の環境要件にも、原子力発電環境整備機構の評価事項にも深部流体についての記述はないので、文献調査段階では深部流体について検討がなされない可能性がある。

##### b) 原子力安全委員会による今後の検討

原子力安全委員会ではこれまで深部流体についての検討はなされていない。今後の審議予定の中にも現時点では深部流体についての書き込みはない。

##### c) FEPによる安全評価事項

この技術資料で調査・評価項目にした深部流体が依拠する国際FEPは、「F1.2.03地震活動」、「F1.2.06熱水活動」、「F1.2.01構造運動と造山運動」、「F1.2.02弾性、塑性または脆性的変形」、「F1.2.10地質の変化に伴う水文学的／水文地質学的な変化」である。

わが国において深部流体が処分システム領域の地下水系に影響を与える事象は、「地質及び気候関連事象」(56の事象)でみると、構造運動が熱水活動を引き起こし地下水系に影響を与える事象(G6, G12, G18, G24, G49)であり、この影響としては、地下水の高塩濃度化とCO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>等のガス濃度の変化が想定されている。

##### d) 概要調査の考慮事項

廃棄物安全小委員会でのこれまでの検討を踏まえ、概要調査により取得されたデータおよび科学的知見に基づき論理の構築が可能なサイト影響考慮事項として、以下を提案する。

調査・評価項目：深部流体

◎(サイト影響考慮事項) 深部流体の活動により、将来放射性物質を閉じ込めておく機能に影響を与える可能性のある地下水の水質変化が予想される地域では、深部流体の影響を考慮する必要がある。

◎(サイト影響考慮事項) 深部流体に影響を与えるテクトニクスについて、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。

これらを調査・評価項目(考慮事項)に取り上げた妥当性については、第3章でその科学的根拠を述べる。火山のところで述べたことと同様に、深部流体の処分システム領域への影響については、第3章で述べる人工バリア設置環境との関係で考慮することが必要である。

#### 5.5 泥火山

泥火山とは、泥ダイアビルが地表に噴出して形成される火山に類似した地形のことである。

##### a) 文献調査結果のレビュー

原子力安全委員会の環境要件および原子力発電環境整備機構の評価事項の中に泥火山はない。したがって、泥火山については文献調査では検討が行なわれず、概要調査地区が選定される可能性が高い。

##### b) 原子力安全委員会による今後の検討

原子力安全委員会では、泥火山についての環境要件を設けていない。近い内容のものとして、異常間隙水圧が取り上げられており、今後必要に応じて審議することとなっている。一方、泥火山については土木学会では注目しており、「施設の破壊や核種の封じ込め機能を低下させるなどの影響」を理由に避けるべきとして、「考慮すべき要件」としている。

c) FEPによる安全評価事項

OECD/NEAの国際FEPには、泥火山についてのFEPはないが、「F1.2.09 岩塩のダイヤピル作用と溶解」で、岩塩以外のダイヤピルについても言及している。関連するFEPとしては、「F1.2.03 地震活動」、「F1.2.01 構造運動と造山運動」、「F1.2.06 熱水活動」がある。

廃棄物安全小委員会（総合資源エネルギー調査会、2003）においては、泥火山をわが国での地層処分においては評価すべき事象として捉え、「地質及び気候関連事象」の中では、地震活動の中に泥火山を位置づけている（G28, G29, G30, G31）。わが国では泥火山は北海道新冠と新潟県松代、紀伊半島沖（熊野泥火山）等に存在している。新冠泥火山が近年地震に伴って活動していることから、廃棄物安全小委員会報告書では地震活動の中に位置づけているが、世界的に見た場合は自発的に活動する例が多いので、この技術資料では地震活動から独立させて項目立てを行った。

d) 概要調査の評価事項

廃棄物安全小委員会でのこれまでの検討を踏まえ、概要調査により取得されたデータおよび科学的知見に基づき論理の構築が可能な評価事項として、以下を提案する。

調査・評価項目：泥火山

●（概要調査評価事項） 第四紀に活動した泥火山の存在が、概要調査で明らかとなった地域は、廃棄体が直接破損あるいは地表へ放出されることが懸念されるので、避ける必要がある。

泥火山を調査・評価項目に取り上げた妥当性については、第3章でその科学的根拠を述べるが、以下に評価事項について若干の説明を加える。

わが国で泥火山が分布している地域は限られているので、立地段階でこれらの区域を除外するのは、それほど困難なことではない。泥火山周辺の異常間隙水圧の分布域を避けることで、泥火山の影響は回避できる。

5.6 マスムーブメント

マスムーブメントとは地表の構成物質がそれ自体の重みで塊（マス）として動く現象で、地崩れ、地すべり、クリープからなる。

a) 文献調査結果のレビュー

マスムーブメントは原子力安全委員会による環境要件にもなく、また、文献調査段階のNUMOの評価事項にもないので、未検討の状況で概要調査にはいる。

b) 原子力安全委員会による今後の検討

原子力安全委員会の環境要件において、マスムーブメントは未検討であり、今後の審議予定の中にも現時点ではマスムーブメントについて書き込まれていない。

c) FEPによる安全評価事項

OECD/NEAの国際FEPにおいて、この項目に関連する国際FEPは、「F1.2.03 地震活動」、「F1.2.01 構造運動と造山運動」、「F1.2.02 弾性、塑性または脆性的変形」、である。廃棄物安全小委員会（総合資源エネルギー調査会、2003）においては、地すべり（マスムーブメント）をわが国での地層処分においては評価すべき事象として捉え、「地質及び気候関連事象」の中では、地震活動の中に地すべり（マスムーブメント）を位置づけている（G28, G29, G30, G31）。マスムーブメントは地震に誘発されて発生する場合もあるが、必ずしも全てがそうではないので、この技術資料では地震活動から独立させて項目立てを行った。

d) 概要調査の評価事項

廃棄物安全小委員会でのこれまでの検討を踏まえ、概要調査により取得されたデータおよび科学的知見に基づき論理の構築が可能な評価事項として、以下を提案する。

調査・評価項目：マスムーブメント

●（概要調査評価事項） 大規模なマスムーブメントの徴候が概要調査で明らかとなった地域では、斜面変動に伴うクリープやずれ破壊により廃棄体が直接破損することが懸念されるので、クリープやずれ破壊の影響が及ぶ範囲は避ける必要がある。

マスムーブメントを調査・評価項目に取り上げた妥当性については、第3章でその科学的根拠を述べるが、以下に若干の補足的説明を加える。

わが国では300 mを超える深度でも大規模クリープは発生するので、調査地区が山岳地域である場合にはマスムーブメントは評価しなければならない事項になる。一方、他の調査・評価項目と比較した場合に、現在の地表近傍の地質体を対象にした短期的な現象が評価の対象となっている。長期的には侵食の中で考慮すべき事項である。

6. 地質環境に関する調査・評価項目

この節では、「地質環境」という用語を、国際FEPの「F2.2 地質環境」に依拠して、地質環境の特徴（Features）及び地質環境におけるプロセス（Processes）を内容とする言葉として用いる。



### 6.1 調査・評価項目の設定の考え方

地質環境に関する調査・評価項目設定の考え方は、長期変動に関する調査・評価項目設定の考え方と多少異なる点がある。長期変動に関しては、特廃法に記述されている事項に関して概要調査の結果が評価され、地層処分に適さない地域が除外されることになるが、地下水シナリオでの安全評価のための調査の対象となる地質環境に関しては、概要調査段階では特廃法に安全評価の視点から指示されている評価事項はない。したがって、長期変動に関する調査・評価項目で設定したような調査・評価項目の細分化や評価・考慮事項の設定は、地下水シナリオによる安全評価の対象としての地質環境に対しては行なわず、ここでは将来の安全評価に向けて国際FEPに基づき、概要調査段階で必要な調査の内容について検討する。

なお、地質環境のFEPの中には「F2.2.13 地質資源」という項目があり、特廃法の施行規則に要件として書かれている鉱物資源がこれに該当する。鉱物資源は、国際FEPの体系の中で階層1の外的要因の人間侵入にも関連する項目であり、社会学的な分析等を含め多くの視点から検討すべき内容であるため、全体的な視点からの評価は地質を扱っているこの技術資料の範囲を超えているが、鉱物資源の存在の有無の確認は、概要調査段階での地質環境の調査の中で可能であるので、この事項のみをここで検討する地質環境の中での特廃法施行規則の要件に対応した概要調査評価事項とする。

特廃法及び関連する施行規則には、鉱物資源以外にも地質環境に関連して文献調査段階及び概要調査段階で評価すべき事項が書かれている。これらはいずれも施工上重要な事項であるが、閉鎖後の安全評価事項ではないので、この技術資料ではこれらについて評価・考慮事項とはしていない。

以上のことより、この技術資料では地質環境に関する概要調査の調査・評価項目および概要調査評価事項を、以下のように設定する。

地質環境に関する概要調査の調査・評価項目： 概要調査段階で野外調査を実施できる、閉鎖後の安全評価に必要な調査・評価項目であり、国際FEPの処分システム領域のうちF2.2 地質環境（地下水シナリオでの安全評価に関連するFEPと人間侵入に関連するFEPがある）を対象にする。特廃法には地下水シナリオによる安全評価に関して概要調査段階で評価が求められている事項はないので、これに関連した調査・評価項目の細分化は行なわず、また評価事項・考慮事項の設定は行なわない。一方、人間侵入に関連する「鉱物資源」は、文献調査段階での特廃法の施行規則で評価すべき項目を引き継ぐ形で評価事項とする。

概要調査評価事項： 人間侵入の可能性のある鉱物資源の確認を評価事項にする。特廃法との関係では、地層処分に適さない範囲を除外する基準となる評価事項である。

### 6.2 地質環境

概要調査の調査・評価項目である地質環境について、以下に文献調査終了後の状況を想定し、原子力安全委員会でのこれまでの検討内容を踏まえ、国際FEPから閉鎖後の安全評価事項を抽出し、概要調査において具体的な調査内容の策定に対応できるように以下の検討を行なう。なお、地質環境に関する具体的な調査の進め方については第4章に記述する。

#### a) 文献調査結果のレビュー

文献調査では、地質環境に関して鉱物資源と未固結堆積物が特廃法の施行規則の要件及び環境要件として評価され、それらが除外された地域として概要調査地区が設定される。その他、地質環境について文献調査では、付加的に評価する事項として、地層の物性・性状、地下水の特性等についての調査を行なうことが、NUMOにより検討されている（原子力発電環境整備機構, 2004）。

概要調査地区が設定にあたっては、上記のサイト選定の要件を満たしていることとともに地層処分の安全確保で重要な安全評価での視点、すなわち地下水シナリオでの安全評価を行なうという視点からの調査地区の設定を、あわせて考えていく必要がある。

#### b) 原子力安全委員会による今後の検討

原子力安全委員会（2002）では、概要調査地区選定にあたり考慮すべき環境要件の設定を行なった際に、概要調査以降において検討すべき内容を報告書で述べている。この中で、地下水シナリオによる安全評価に関連あるものとして、地下水の流動特性と地下水・岩石の地化学特性について、以下のように記述している。

「地下水の流動特性は、廃棄体中に含まれる放射性物質が漏出し周辺の地質環境へ移行するという、いわゆる安全評価上の地下水移行シナリオにとって重要な要件である。しかしながら、その点に関して概要調査地区選定段階において得られる情報は極めて不十分と考えられる。したがって、地下水の流動特性に関しては、概要調査あるいはそれ以降の調査において、十分に調査する必要がある。当調査会において、概要調査地区選定段階以降の段階で考慮すべき環境要件の検討の際に、設計・施工での対応や処分システム全体の安全性能との関連も踏まえ、その取り扱いを審議する。」

「例えば、酸化還元状態・pH等の地下水の化学特性や岩石の鉱物・化学組成などの地化学特性は、人工バリアの金属材料の腐食速度、放射性物質の地下水へ

の溶解性、放射性核種の地下水中存在形態や天然バリアへの取着による移行遅延などに影響する。これらの事項は、いずれも安全評価における地下水移行シナリオにとって重要な要件である。しかしながら、その点に関して概要調査地区選定段階において得られる情報は極めて不十分と考えられる。したがって、地下水・岩石の地化学特性に関しては、概要調査あるいはそれ以降の調査において、十分に調査する必要がある。当調査会において、概要調査地区選定段階以降の段階で考慮すべき環境要件の検討の際に、設計・施工での対応や処分システム全体の安全性能との関連も踏まえ、その取り扱いを審議する。また、コロイドなどの影響についても、同様に、当調査会においてその取り扱いを審議する。」

また、岩盤の特性については、以下の記述がある。

「第四紀の未固結堆積層を除く岩盤の特性の違いによる影響については、“実際に概要調査を行なうまでもなく、明らかに処分地として不適切と考えられる環境要件を示すこと”は困難なことから、概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件とはしないが、断層破砕帯の分布などに係る地質構造、岩盤の規模や形状、岩盤に熱や力学に関する特性、及び岩盤の付近質性などに留意し、当調査会において、同選定段階以降の段階で考慮すべき環境要件の検討の際に、設計・施工での対応や処分システム全体の安全性能との関連も踏まえ、その取り扱いを審議する。」

#### c) FEPによる安全評価事項

地質環境に係る安全評価事項については、処分システム領域に影響を与える外的要因のように、廃棄物安全小委員会においてスクリーニングや細分化などが検討されていないので、ここでは国際FEPをそのまま用いることにする。

地質環境に関する国際FEPは階層2の処分システム領域の中にまとまった形で記述されている（「F2.2地質環境」）。これらのうち地質環境の構造的側面に関連するものとしては、「F2.2.01掘削で影響を受けるゾーン・母岩」、「F2.2.02母岩」、「F2.2.03地質ユニット」、「F2.2.04不連続性・大スケール（地圏内）」、「F2.2.05汚染物質移行経路の特性（地圏内）」がある。一方、地質環境の動的側面に関連するものとしては、「F2.2.06力学プロセスとその状態（地圏内）」、「F2.2.07水理学／水文地質学的プロセスとその状態（地圏内）」、「F2.2.08化学／地球化学的プロセスとその状態（地圏内）」、「F2.2.09生物学／生化学的プロセスとその状態（地圏内）」、「F2.2.10熱的プロセスとその状態（地圏内）」が記述されている。また、これらのほかに「F2.2地質環境」の中には、「F2.2.11ガス源とその影響（地圏内）」、「F2.2.12検出できない特徴（地圏内）」、「F2.2.13地質資源」がある。ここで「地質資源」の中には、概

要調査地区選定時の環境要件である鉱物資源が含まれている。

#### d) 概要調査における地質環境の調査内容

特廃法および原子力安全委員会の環境要件にかかる検討事項を踏まえ、閉鎖後の安全評価に向けた、概要調査における地質環境の調査内容について国際FEPに依拠して記述する。

地下水シナリオによる安全評価に向けて、概要調査及び精密調査に必要なデータが取得されることになるが、概要調査段階でどこまでの調査を行なえばよいかについての規定はない。制約条件としてあるのは特廃法第7条の条文及び関連する施行令にある「概要調査の方法」である。これまでに述べてきたことを踏まえ、また概要調査が安全評価のための初期段階での調査であることを考慮し、この技術資料では概要調査の調査内容を以下のように提案したい。すなわち、概要調査段階での地下水シナリオによる安全評価に向けた地質環境に関する調査を、①地下水システムの解析と概念モデルの構築、②地質環境の初期状態であるベースラインの把握とする。また、人間侵入に関する安全評価に向けた地質環境に関する調査を、③鉱物資源がないことの確認とする。これらの調査内容は、国際FEPによる安全評価事項との関連で、以下のように整理される。

①地下水システムの解析と概念モデルの構築に関連する国際FEPは、F2.2地質環境のカテゴリーに含まれるすべてであるともいえるが、概要調査が調査の初期段階であることを考慮し、モデルに統合する。

データを地質および水文地質に絞り込むと、FEPとしては、「F2.2.01掘削で影響を受けるゾーン・母岩」、「F2.2.02母岩」、「F2.2.03地質ユニット」、「F2.2.04不連続性・大スケール（地圏内）」、「F2.2.05汚染物質移行経路の特性（地圏内）」及び「F2.2.07水理学／水文地質学的プロセスとその状態（地圏内）」が該当する。

地下水シナリオにより安全評価に向けて、調査の初めの段階で取り組む主要な課題の1つが、地下水システムの概要の把握であろう。地質調査、物理探査、地化学調査、水文調査等により対象となる地域のデータを取得し、次に行なわれる精密調査の計画立案に活用できる地下水システムの概念モデルを構築することが、少なくとも概要調査痛段階で行なわれなくてはならない事項であろう。地下水システムの解析と概念モデルの構築については、第4章で詳しく述べる。

②地質環境の初期状態であるベースラインの把握に関連する国際FEPは、「F2.2.06力学プロセスとその状態（地圏内）」、「F2.2.07水理学／水文地質

学的プロセスとその状態（地圏内）」、「F2.2.08 化学／地球

化学的プロセスとその状態（地圏内）」、「F2.2.09 生物学／生化学的プロセスとその状態（地圏内）」、「F2.2.10 熱的プロセスとその状態（地圏内）」である。これらのFEPに関連して取得されるデータは、必要に応じて上記の概念モデルに組み込まれていくものでもある。

概要調査における「プロセスとその状態」に関する調査では、坑道の掘削を伴う本格的調査（精密調査）開始前の地下の状態の把握が、優先度の高い課題である。ここで概要調査のデータは、まだ地下に大きな変化が加えられていない状態で取得されているので、ベースラインデータと呼ばれる。また、このベースラインは閉鎖後の核種移行を含めた地下で進行するプロセスのベースラインでもある。概要調査の次のステージでは坑道を掘削して地下施設が作られるが、ここで坑道掘削による影響として、水理プロセスでは水位の低下が想定され、力学プロセスでは掘削で影響を受けるゾーン（EDZ）の形成、

化学プロセスでは通気による酸化、生物化学プロセスでは、工事による微生物汚染、熱プロセスでは通気された坑道の配置による熱構造の変化等が生じることになる。ベースラインの把握に必要な調査の具体的な内容については、第4章に記述している。

- ③ 鉱物資源の有無の確認に関連する国際FEPは、「F2.2.13 地質資源」である。このFEPは地圏内の天然資源に関するもので、特に将来処分場の近くで、調査や掘削を行なわせる原因となるものである。これについては前述したように、特廃法施行規則の要件に対応した概要調査評価事項とする。具体的な調査については第4章に記述している。

調査・評価項目：地質環境

●（概要調査評価事項） 経済的価値のある鉱物資源の存在が概要調査で明らかになった範囲は、将来において人間侵入が懸念されるので避ける必要がある。

## 第2章へのコメント

### ● 評価期間について

#### (A 委員)

評価項目:評価期間に関する記述は必要と思います。まだ、決まっていなければ、「今後決定される評価期間において,,,」といったような記述がなければ、このままだと明らかに混乱を招くと思います。さらに、期間によっては、侵食量(最大として隆起量)を求める手法が整備されていない可能性があります。後述の活断層について第四紀とされているのと同様の問題があると思います。評価しなければならないことと調査できることが乖離してしまうと、評価項目に説得力がなくなると思います。

#### (編集委員会)

この技術資料で評価期間についてどのように扱っているかについては、ドラフトでは第3章の「はじめに」の中で述べていますが、第2章「調査・評価項目の設定」においても、評価期間についての考え方が示されていた方が、読者の理解を助けると考えましたので、第2章にも評価期間について述べた以下の文章を挿入します。

『なお、この技術資料では評価期間について、次のように扱っている。地質現象の将来予測についての評価を行う場合、評価期間の設定が必要となるが、わが国ではまだ高レベル放射性廃棄物に対して、放射線防護の基準値も評価期間も定められていない状況にある。このような中で、この技術資料では過去の変動履歴とテクトニクスを考慮に入れた外挿法により、できるだけ長い期間が評価できるようにしたいと考えている。過去の変動履歴をもとに将来の活動を予測する場合に、できるだけ長い過去の記録が必要であるが、一方で過去の遡るほど地質現象の記録が断片的になるというジレンマがある。このような観点から、次節で提示する評価事項の中で、火山と活断層については調査により変動履歴を得ることが可能な第四紀の活動を評価対象にしている。しかし、地域によっては十分な記録が取れない場合もあることは考慮しておく必要がある。将来予測の手法については第3章で詳しく述べる。』

侵食の将来予測についても、どの程度まで先の予測ができるかは火山や活断層と同様に変動履歴が取れる期間に依存します。この技術資料では第3章でも述べていますように、『10万年あるいは100万年という期間』が、地質学的手法の適用性から見て、わが国においては現実的に対応できる将来予測が可能な期間ではないかと考えています。

### ● テクトニクスの安定性について

#### (B 委員)

「サイト影響考慮事項」として「テクトニクスが安定していることは、将来予測の不確実性が少なくなるので好ましい」とあり、頻出します。これについて、(1) 専門外ですのでのめはすれかも知れませんが、テクトニクスはその他の地質関連活動の多くの原因であるので、そのことを隆起、火山活動、地震活動・・・などと同列に並べると異質な感じがしますが、いかがでしょうか。

(2) 将来予測の「予測」とは地質環境活動の安定性の予測でしょうか。テクトニクスの活動に基づくそのような予測が必要とされているのでしょうか。また、この予測が処分の安全性の予測、すなわちいわゆる安全評価のことであれば、議論が一足飛び過ぎる感があります。安全評価の分野で不確実性の扱いに関する議論が喧しい今、「将来予測の不確実性」という表現はやや注意して使った方がいいと思います。

#### (A 委員)

(侵食・堆積及び海面変化のサイト影響考慮事項となっている) テクトニクスの安定性に関する記述がわかりにくいと思います。特に安定ということはどういう意味でしょうか? 変化しないことが安定なのでしょう。どの程度の変動幅であれば安定といえるのでしょうか? 受け取るほうで様々な解釈をする可能性があります。もう少し、具体的に書けないでしょうか? 個人的には安定性というより変化は少ないというほうが納得できます。安定というのはある基準に対する変動幅で決まってくるわけであり、それは評価期間や影響の程度によって変わってくると思います。読者にはそこまではわからないのではないのでしょうか?

#### (A 委員)

侵食と同様に(地震活動のところで述べられている) テクトニクスの安定性という記述がわかりにくいと思います。期間と変化の程度によって安定の意味も異なると思います。たとえば、新しいプレートシステムの九州では6Ma以降の反時計回りの回転やプレートの沈み込み方向の変化などがみられこれは未成熟な新しいプレート(熱い?)の持つ不安定さを示しているものと考えられます。一方、東北地域は成熟したプレートシステムが長期にわたり継続しており、様々なパラメータもそろっています。このような違いをもって安定性を議論されているのでしょうか? 読み手には判りにくい表現となっています。火山活動においても同様なことがいえると思います。

#### (編集委員会)

テクトニクスの安定性についてのサイト影響考慮事項は、『テクトニクスが安定していることは、将来予測の不確実性が小さくなるので好ましい』と記述して

おりましたが、これを以下のように書き換えました。『隆起・沈降、地震活動、火山・マグマ活動、深部流体の上昇に影響を与えるテクトニクスについて、将来におけるその安定性を考慮する必要がある』。委員の皆様は査読していただいたドラフトでの表現ですと、考慮事項でありながら、「・・・なので好ましい」という判断がはいっていましたが、シナリオでの評価を想定したときに、テクトニクスのみを単独で判断材料とはしないと考えられますので、他の考慮事項と同様の表現をとることにいたしました。ドラフトで用いた「不確実性」という用語は新しい表記では考慮事項の文章中には用いていませんが、この考慮事項が将来予測の不確実性に関することには変わりありません。ただ、ご指摘にもあるように、不確実性の検討はシナリオによる安全評価において、総合的に検討すべきことであると考えています。

また、地震、火山活動等の項目の立て方とテクトニクスとの関係については、テクトニクスは地震、火山等の起因事象ですので、同列にならべるのではなく、地震、火山等は地層処分システム領域に影響を与える外的要因として調査・評価項目に、テクトニクスは、その中の考慮事項に位置づけています。

テクトニクスの安定性についての具体的な内容の記述は、第4章の「侵食・堆積及び海面変化」の調査項目「テクトニクスの長期安定性評価」の中で行なっています。日本列島の応力場は、日本周辺のプレート運動の解析から第1次オーダーとしてみたとき、数百万年前から変わっていないと考えられています。現在日本列島下には、太平洋・フィリピン海両プレートが沈み込み、伊豆半島の付け根で本州弧と伊豆・マリアナ弧の衝突が起きている。このようなテクトニクスの枠組みは、日本海拡大直後の約1500万年前に出来たものです。仮に評価期間が将来100万年であるとしても、これら日本列島を取り巻くプレートの配置、相対運動に大きな変化が現れるとは考えにくい状況です。

一方、日本列島下の下部地殻やウェッジマントル内で起こる変動が、将来100万年を想定したときに、応力場配置に変化をもたらす可能性を検討しておく必要があります。具体的な内容は第4章の「テクトニクスの長期安定性評価」を参照してください。

#### ● 「第四紀に活動した断層」について (A 委員)

評価項目：「第四紀に活動した断層、」解説にも出てきますが、第四紀に何か意味があるのでしょうか？断層活動のメカニズムや背景を考慮してのものであればよろしいかと思いますが、第四紀以降、テクトニクスが一様（安定）という根拠はないようです。新しい原子力発電所の耐震設計基準において、最終間氷期の面（MIS5e）や堆積物に変形を与えているかどうかで

判断するという新しい基準は、基本的には過去5万年以降の活動を考慮するという考え方には変更がなく、その期間での活動性をもっと明確につかむ実精度を上げるために検討すべき期間を12万年前まで延長したとされています。同様の考え方であればよろしいかと思いますが、第四紀とすることには意義を感じません。

#### (編集委員会)

評価期間のところでも述べたように、将来どの程度の期間に起こる現象を安全評価の対象にするかにより、それぞれの変動履歴をどの程度の過去まで遡ればよいかが決まると考えています。現在は評価期間について決まっていますが、寿命の長い放射性核種を扱う地層処分で、例えば100万年程度の評価期間が設定されても対応ができるように、変動が読み取れる期間を考慮し、ここでは「第四紀に活動した断層」を評価対象にしています。テクトニクスの安定性は地域により異なりますし、また過去の活動を解析する精度は対象により異なりますので、将来予測に伴う不確実性を、常に考慮しなければならないものと考えています。

#### ● 既存断層の再活動性について

##### (A 委員)

将来応力場が変化する可能性を考慮し、大きな規模の断層については影響を考慮するように指摘されていますが、中国地方のたとえば、鳥取県西部地震や大原湖一弥畝山西断層系のように小さな断層（リニアメント）が活動し、今後、大規模な断層へと成熟する過程の断層が再活動の可能性を持っているのではないのでしょうか？大規模に限るのはかえって問題と思います。

#### (編集委員会)

将来地表に地震断層として出現する可能性のある断層が評価の対象になるので、一般に大規模な断層を再活動性の評価対象と考えています。ご指摘のような発達段階にあると考えられているものも、鳥取県西部地震の例をこの技術資料で取り上げているように、その重要性は十分認識していますので、将来の活動の可能性を考慮する対象となると考えます。

#### ● 火山の新規出現性について

##### (A 委員)

評価項目：「将来出現する可能性のある新規火山についての評価」について、いつまでの将来かを書かないときわめてわかりにくい文章となっているように思います。単成火山についてはある程度は理解できますが、100年以上のスパンで活動するような Kondo et.al.(2001) (The Island Arc) にあるような空間的に広がりを持つ火山活動について、将来が予測できるで

しょうか？ これも、やはりどこまでの将来を考えるかによるものと思います。数10万年の寿命を持つ単一の火山ではなく、火山群として数100万年の活動期間を持つものが、どこに出現するかといったことについて議論が可能でしょうか？これも、評価しなければならない事項と予測できる事項との乖離ではないかと思います。規制側であるから、実証できる、できないは関係ないという印象を持ってしまいます。

(編集委員会)

火山の新規出現性については、現在のテクトニクスが将来も続くと想定できる範囲でしか意味のある検討はできませんので、その範囲で「将来」という言葉が意味をもっています。概要調査段階では、現在の知見と地下の状態について得られる地球物理学的データかの予測により、将来の火山活動の可能性が指摘できる地点を、地層処分に適さない地域として除外するところまでが現実的に評価できる範囲であると考えています。

#### ● 深部流体について

(A 委員)

評価事項：深部流体は重要な項目と考えます。箱書きの中で、「地下水の水質変化が予想される」とありますが、深部から流体が上昇するのであれば処分場から漏洩した核種を地表へ一気にもたらす最悪のシナリオが考えられるのではないのでしょうか？ただし、そのような場所はかなり限定されると思います。

(編集委員会)

流体の上昇域は、地層処分にとって大きな問題がある場所です。地下水流については、人工バリア設置環境についての記述の中で、中で地下水流の速さ人工バリアの性能との関係を述べています(第3章9節)。水流の速い場所では工学的対策がまず考えられますが、長期的に見てそれでも困難な場合は、地層処分に適さない地域となると考えています。特魔法の第7条には、「当該対象地層等内に活断層、破碎帯又は地下水の水流があるときは、これらが坑道その他の地下に施設に悪影響を及ぼすおそれが少ないと見込まれること」という条文があり、調査において深部流体の上昇域に遭遇した場合には、施行上の理由からその地域を除外することも考えられます。

#### ● 泥火山について

(A 委員)

泥火山については新冠と新潟が上げられています。海底には多くの泥火山が知られており、海底下立地を考えると触れておいたほうが良いのではないのでしょうか？紀伊半島沖には熊野泥火山が知られていま

す。

(編集委員会)

沿岸域での地層処分を想定したとき、海域にある外的要因も考慮すべきと考えますので、熊野泥火山について本文中に記述することにいたします。

#### ● 処分システムの隔離機能について

(D 委員)

網羅的に良く纏められていると思います。些少な点ですが、「物理的隔離機能」という表現が使われていますが、全体を読むと天然バリアの核種移行抑制機能についても記述しており、「処分システムの隔離機能」を使った方が自然なように思えます。

(編集委員会)

地層処分で用いられている「隔離機能」という用語は、物質を遮蔽する「物理的隔離機能」のほかに遅延等の化学的プロセスを含んだ内容として使われていることがよくあります。一方、この技術資料での評価事項の設定にあたっては、隔離機能の不全の中でも最も影響の大きい物理的隔離機能の損傷に着目しています。環境要件の文章中にある「処分施設及び廃棄体が直接破損する」のような最悪の事態を、この技術資料では「物理的隔離機能が大きく損なわれる」という形で表現しています。なお、ご指摘のように広い意味合いで「天然バリアの核種移行抑制機能」を表現している箇所については、「処分システムの隔離機能」に置き換えることにいたします。

### 第3章 調査・評価項目に関する科学的知見

#### 1. はじめに

この章では概要調査の調査・評価項目のうち、特魔法に述べられている要件との関連で設定した評価事項及び考慮事項について、評価すべきあるいは考慮すべき内容を具体的に示すとともに、これらの評価事項・考慮事項を設定するに至った科学的背景について記述する。

前章で述べたように概要調査の調査・評価項目は、国際FEP (OECD/NEA, 2002) の処分システム領域に影響を与える外的要因の中から抽出された「地質及び気候関連事象」および処分システム領域の環境要因の中の地質環境のFEPに基づいて設定している。この章で述べる「地質及び気候関連事象」から設定された長期変動に関する調査・評価項目は、侵食・堆積及び海面変化、地震活動、火山・マグマ活動、深部流体、泥火山、マスマーブメントの6項目であり、さらに、これら調査・評価項目において、特魔法との関係で概要調査において評価すべき事項を、概要調査評価事項(「評価事項」と略記)とし、サイト選定にあたり不適切な地域や範囲を除外する基準とした。また、それ以外の処分システム領域に影響を与える事象については、サイト影響考慮事項(「考慮事項」と略記)としてまとめ、シナリオによる安全評価及び人工バリアの設計において考慮すべきものとしている。なお、侵食・

堆積及び海面変化をはじめとした6項目に共通する将来予測の考え方については、これらの調査・評価項目に関する科学的知見の記述に先立ち述べる。

長期変動に関する調査・評価項目のうち評価事項を含む項目は、侵食・堆積及び海面変化、地震活動、火山・マグマ活動、泥火山、マスマーブメントであり、評価事項は地層処分システムの物理的隔離機能に大きな損傷を与える事象を対象にしている。ここで評価事項に取り上げた事象には全国的に認められるものと、極めて限られて地域のみが発生しているものがあり、また、累積的な効果により影響の出る事象と1回の活動で大きな影響のある事象があるが、長期的に見た場合いずれも地層処分システムの隔離機能に大きな影響を及ぼすことが想定されるものである。特魔法では「地質の著しい変動が長期間生じていないこと」が精密調査地区選定の要件となっており、その具体的な内容がここでの評価事項となっている。評価事項に関してこの章では地層処分に適さない地域あるいは範囲を除外するための評価の論理と、その背景等の関連する科学的知見を提示する。

一方、考慮事項のいくつかは長期変動が地層処分システムの地下水に影響を与える事象を対象にしており、地下水シナリオでの安全評価において考慮しなければ事項であるとともに、人工バリアの設計(工学的対策)において考慮すべき事項でもある。この章では最後に、これに関連して人工バリアの設置環境にかかる科学的知見および工学的知見を取りまとめている。

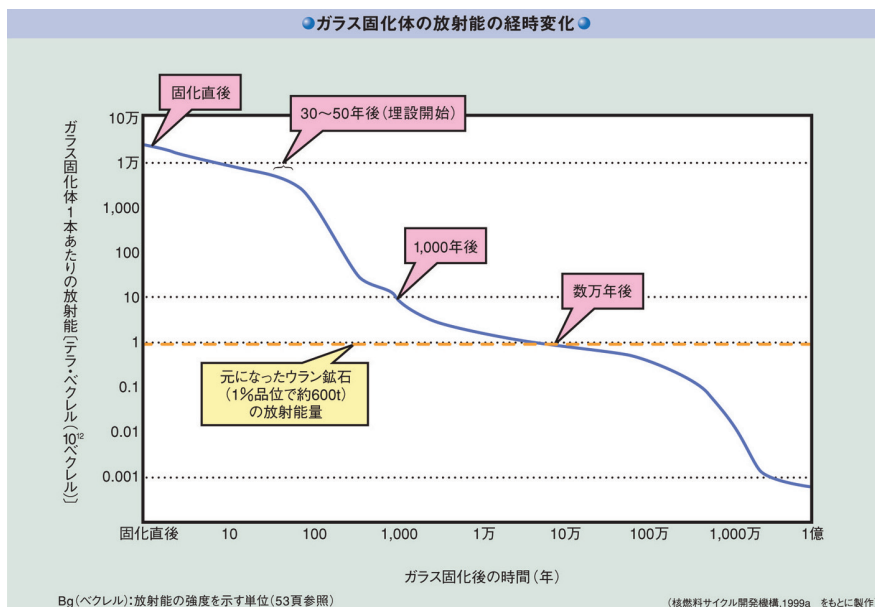


図 3-1 ガラス固化体の放射能の経時変化  
 経済産業省資源エネルギー庁 (2006)  
 「高レベル放射性廃棄物の処分の安全性について考えてみませんか」

この章において評価期間という用語が随所に出てくるが、第2章でも述べたように、この技術資料では評価期間について、次のように考えている。地質現象の将来予測について具体的な評価を行なおうとする場合、評価期間の設定が必要となるが、わが国ではまだ高レベル放射性廃棄物に対して、放射線防護の基準値も評価期間も定められていない。このような状況の中で、地下深部に処分される高レベル放射性廃棄物の残存放射能（図3-1）を考慮して、現在の科学的知見に基づきできるだけ長い期間が評価できるように、地質学的手法を用いた将来予測の論理を示している。10万年あるいは100万年という期間を想定しながら執筆しているが、本文中に出てくる10万年あるいは100万年という数字はあくまで例示であり、定められた評価期間を示すものではない。

## 2. 将来予測の手法

高レベル放射性廃棄物の地層処分にかかわる地質環境の安定性評価では、将来10万～100万年間を念頭に起こりえる地質及び気候関連事象を評価しなければならない。例えば地震予知では、問題とする時間スケールによって、短期（直前～1年）・中期（1～100年）・長期（100～1万年）予測と分類されることがあるが、地層処分で行うべき予測は超長期と呼ぶべきものである。予測の方法論は評価期間によって違いがあり、短期予測では地球物理学的・測地学的・地球化学的・水文科学的観測が主な手法である。これに対し、中～長期予測では、過去の歴史からの統計的推論が主な手法となってくる。日本では1996年の兵庫県南部地震以後の長期予測手法の進展により、プレート境界地震や主要活断層沿いの地震については発生確率で評価出来るようになってきた（地震調査研究推進本部；[http://www.jishin.go.jp/main/p\\_hyoka02.htm](http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02.htm)）。しかしながら、地震に限らず他の地質及び気候関連事象もふくめ、超長期予測が日本で実際に行われた事例はほとんどないのが現状である。長期予測をそのまま超長期に外挿しようにも、長期予測の元になる初期条件や再来間隔が超長期に一定であるかどうか不確実性が大きく、信頼性のある予測とはなり得ない。10万～100万年という超長期の時間を取り扱うには、地質学的な調査手法が不可欠である。

地質及び気候関連事象の超長期予測でも、評価対象地域で地質学的な過去に起きた事象の履歴を明らかにし、これを将来に外挿することが基本となる。将来10万～100万年間に外挿するのであれば、これと同じかこれ以上の過去にまで遡る必要がある。その上で統計的推論に十分な質・量の変動履歴が得られれば、地震の長期予測のように確率的な評価も可能になろう。しかしながら、全ての変動が地質学的に保存されてい

るわけではなく、十分な変動履歴が得られない地域のほうが圧倒的に多い。そのため、限られたデータから超長期予測を行わなければならない、必ずしも定量的な扱いが可能ではないことは考慮しておく必要がある。例えばプレート境界地震では、履歴は歴史記録に頼るしかなく、地質学的な痕跡が地表調査からは捉えることが困難である。また、活断層沿いの大地震も、断層と被覆層の関係によっては、1万年内程度の履歴しか得られず、評価期間に比べて情報量が不足するケースが多いと予想される。変動地形学的に侵食履歴を明らかにする場合も、評価期間に見合うだけの十分な指標地形面が、評価対象地域やその周辺に必ずしもあるとは限らない。水文地質学的変動に至っては、過去の変動が全て合算させた現在値のみが観測され、ここから個々の変動履歴を分離することが困難なケースがほとんどである。このように統計的推論によって変動履歴を超長期の将来に外挿することが困難な場合には、超長期にわたる評価対象地域の地質環境の安定性を担保する別の説明が必要になろう。例えば地震活動や侵食を加速させる隆起運動の状態を記述する評価対象地域の構造発達史を確立することで、定性的な将来予測像を示すことが求められる。また、水文地質学的変動では、年代軸の入った水質形成機構を確立することで、唯一定性的な将来予測が可能になる。具体的にどのような将来予測モデルが必要かは地域の地質特性によって異なるので、その場に対応した予測論理を地域毎に考える必要があろう。

統計的推論に十分な量の変動履歴が得られた場合にも、変動履歴のパターンは複雑で、単純な解釈では通用しないケースもあり得る。例えば、アメリカのYucca Mountain サイトは玄武岩マグマの単成火山群内にあるため、過去の噴火履歴から平均的な噴火再来間隔を求め、サイトでの噴火確率を求めている（US DOE, 2001）。しかし、単成火山群の噴火活動は、時間的にも空間的にも偏在しており、決して一様には起きていない。活動のピークや分布状況を考慮に入れるなら、DOEの示す確率は明らかに過小評価であるとの指摘もある（Smith, 2002）。すなわち、確率値の算定には時間尺度や空間尺度の取り方によって値が異なる任意性があり、活動頻度の偏在性を説明する科学的な根拠なしには、確率的な将来予測を行っても信頼性に乏しいと言わざるを得ない。地質学的・地球物理学的・地球化学的根拠からマグマ成因論を展開し、将来の発生頻度を考察するSmith (2002)の主張に一理あるのは当然のことである。火山活動に限らず、地質及び気候関連事象の超長期将来予測では、現象の成因にまで踏み込んだ評価が求められよう。



## 3. 侵食・堆積及び海面変化

<p>調査・評価項目：侵食・堆積及び海面変化</p> <p>●（概要調査評価事項） 予測侵食量が埋設深度以上になり、廃棄物が地表に露出する可能性のある地域は、避ける必要がある。</p> <p>◎（サイト影響考慮事項） 隆起・沈降および氷河性海面変化による相対的海面変化により、将来放射性物質を閉じこめておく機能に影響を与える可能性のある地下水の流動あるいは水質の変化が予想される地域は、相対的海面変化の影響について考慮する必要がある。</p> <p>◎（サイト影響考慮事項） 隆起・沈降に影響を与えるテクトニクスについては、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。</p>
--

河川・氷河・風・波浪・潮汐・海流・その他の可動的営力により地表の構成物質が削り取られる現象を侵食作用、可動的営力で運ばれた物質が沈積し地表に付加する現象を堆積作用と呼ぶ。侵食・堆積作用は地球上のあらゆる地点で起きている地質現象である。ただし、日本では氷河と風による侵食堆積作用は他の営力によるものに比べ無視出来るほど影響が小さい。また、波浪による侵食堆積作用は海面付近に限られ、波浪が海底を侵食する限界深度（波食基準面）は通常は水深10m以浅にすぎない。潮汐による侵食堆積作用も同様に海面付近に限られる。海流による侵食堆積作用については、海洋下での地層処分を行う際のみ考慮の必要が出てくる。従って、安全評価の上では、処分地周辺における河川・海面付近の侵食堆積作用を対象とすることになる。特に侵食作用は埋設物と地表との接近をもたらすため、その累積量の予測は重要である。特に、埋設物の放射性レベルが十分減少しないうちに埋設物の地表への露出が起こるケースは絶対に避ける必要がある。また、露出へと至らないまでも、埋設深度の著しい減少は、核種移行距離の減少、荷重除去による裂かの開口など地層処分の隔離性を阻害し得る。荷重除去で形成される地表面にほぼ平行な裂か（シーティング節理）の発達深度や密度は岩質や地形によって様々であるが、花崗岩の場合、地表から50～100mの深度まで発達する例が報告されている（例えば、加古・横田, 2002）。そのため、将来の予測侵食量は、できるだけ小さいことが望ましい。一方、堆積作用は埋設物と地表との距離を増大させるので、距離にのみ着目すれば予測堆積量が大きいほど隔離性能が増すことになる。ただし、堆積速度が大きい地域は未固結堆積物が厚く累積しているため、地層処分には適さない母岩環境であることが多い。

河川は、上流からの砂礫と水の入力と、河口における相対的な海面の高さを境界条件とする開放系で、こ

れらの境界条件が変化することで河川の縦断面が変化し、河川での侵食堆積が作用する（野上, 1981a;野上, 1981b; Nogami, 1990）。また、海面下での侵食堆積作用は、相対的海面の変化量と碎屑物の供給量のバランスで支配されている（酒井ほか, 1995）。従って気候変化による砂礫量／流量比の変化や、テクトニックな隆起沈降と氷河性海面変化による相対的海面の変化が、将来の侵食堆積量を予測する上で重要になってくる。気候・海面変化の履歴はEmiliani(1955)による有孔虫化石の酸素同位体変化で良く代表され、最近100万年間は約10万年間隔で氷期・間氷期サイクルが繰り返されてきた（Basinnot et al., 1994; 図3-2）。ただしその変化パターンは鋸の歯のように非対称で、ゆっくりとした寒冷化と急激な温暖化を示唆している。間氷期の高海面期に形成された侵食地形や堆積物は海成段丘として残ることが多く、日本列島の海成段丘にかんする知見は、小池・町田(2001)により網羅的にまとめられている。氷期の海面低下量については、様々な推定値が報告されているが、最終氷期の大陸氷床増加分による海面低下量は120m前後と推定されている（Nakada et al., 1991）。また、過去100万年での最大低下量は、対馬海峡の陸化が起きた約60万年前と約40万年前の氷期で（小西・吉川, 1999）、その量は140mに達する。テクトニックな隆起沈降の傾向については、海岸部での保存がよい最終間氷期の海成段丘の面高度分布から、その概略が明らかにされている（小池・町田, 2001）。これによると、日本列島では最近12万年間の垂直変動は圧縮応力を反映して広い範囲で隆起傾向にあること、しかし西南日本内帯には伸張応力場を反映するような安定ないし海進性の海岸がかなり広いことが分かっている。

評価期間内の侵食堆積量を予測するためには、過去の侵食・堆積量変化履歴を将来に外挿することが基本となる。そのためには、過去に形成された侵食堆積地形面と現在の地形面とのオフセット（食い違い）量の計測と、過去の地形面の編年を行う変動地形学的手法（太田, 1999; Burbank & Anderson, 2001）を用いなければならない。同時に、地形面構成堆積物の堆積相解析も行い、地形面の成因も明らかにしておく必要がある。特に海岸部ではシーケンス層序学に基づいた堆積学的解析（例えばPosamentier & Vail, 1988; 酒井ほか, 1995）が、当時の海面の位置を判断するために必要である。変動地形学的に計測されたオフセット量は、過去の局地的な気候変化・氷河性海面変化・テクトニックな隆起沈降の全ての影響が合算されたものであり、個々の現象の絶対量を分離するためには慎重な解析が必要となる。さらに、過去の侵食率を将来に外挿するためには、少なくとも1回以上の氷期・間氷期サイクル（約10万年）を経た指標地形面を用いることが必要である。なぜなら氷期・間氷期サイクル内で

は、海面の変化や降水量変化が一定でないことは明らかであるので、1サイクルに満たない侵食-堆積変化履歴を将来に外挿しても正しい長期予測値とはなり得ない。また、酸素同位体比変化曲線に見られる非線形性の変動は(図3-2)、次の氷期がいつ始まるのか、どのように変化して次の間氷期に至るのかの予測が困難なことを意味している。さらには、人為的なCO<sub>2</sub>の排出がもたらす気候の温暖化が、将来の気候変動に及ぼす影響も予測することが困難で、氷期-間氷期サイクルの周期自体が変化してしまうことも十分あり得よう。それゆえ将来10万年程度に限定した将来予測は、多くの不確実性をさけることができない。気候変動の影響を大きく受けるスウェーデンでは、このような背景から将来の気候を予測することは不可能であるとし、一方で100万年の評価期間の中では氷期-間氷期サイクルが繰り返すことは確実であるので、起こりえる最大リスクを評価することが重要とする立場を取っている(SKB, 2004)。この対応は現段階で最も現実的な戦略であり、これに従うなら気候変動の将来予測では将来の発生時期を特定することなく、氷期-間氷期サイクルにおける最大海面低下量(内陸では最大下刻量)を常に気候変動による最大侵食量として見込めばよいことになる。

ある地域で過去の侵食-堆積量変化履歴が定量化できたとしても、過去の計測値をそのまま一定値として将来に外挿するためには、その場のテクトニクスが将来においても十分安定であることも同時に示しておく必要がある。応力場の安定性は、地層処分のような長期の将来予測で必須の条件であり、評価期間以上の過去に遡ってその変化履歴を明らかにしておく必要があ

るものと考えられる。反対にテクトニクスが不安定で、応力場の変化が予想される地域では、確実な将来予測が難しく、処分地の安全評価における不確実性が大きくなる。例えば将来100万年を評価するのであれば、評価期間内に大きな地殻変動の傾向に変化が起きないであろうことが判断できるのに十分な過去(数100万年程度ないしはそれ以上)まで遡ると同時に、十分な時間分解能で地質構造発達過程を明らかにしておく必要がある。この調査は、例えば変動地形学的に遡れる侵食-堆積量変化履歴が評価期間に対して不十分なくらい短い場合、これを外挿することの妥当性を担保する目的を持っている。また、測地学的データから得られる数年から100年程度の短いスケールでの地殻変動像は、変動地形学的に検出される数1000年以上の長時間スケールの地殻変動像と一致しないことはしばしばある。例えば、東北地方や北海道の太平洋岸では、変動地形学的には隆起域と判断されるにもかかわらず、測地学的には沈降域となっている(加藤・津村, 1979)。これは、測地学的な観測期間よりも長い再来間隔で起きる巨大海溝型地震が変動地形学的に観測される隆起をもたらす、測地学的沈降は巨大地震時に全てキャンセルされてしまうためと解釈されている(池田, 1996)。重要なことは、活動的な島弧や造山帯における現在進行形のテクトニクスを明らかにするためには、測地学的データだけでは観測期間が短すぎるので、最近の地質時代の地質構造発達に関するデータが必要不可欠であるという点である。

海面変化は、侵食堆積作用に影響を与えるだけでなく、地下水環境にも大きな変化をもたらす。現在は後氷期の高海面期にあるものの、いずれは氷期へと

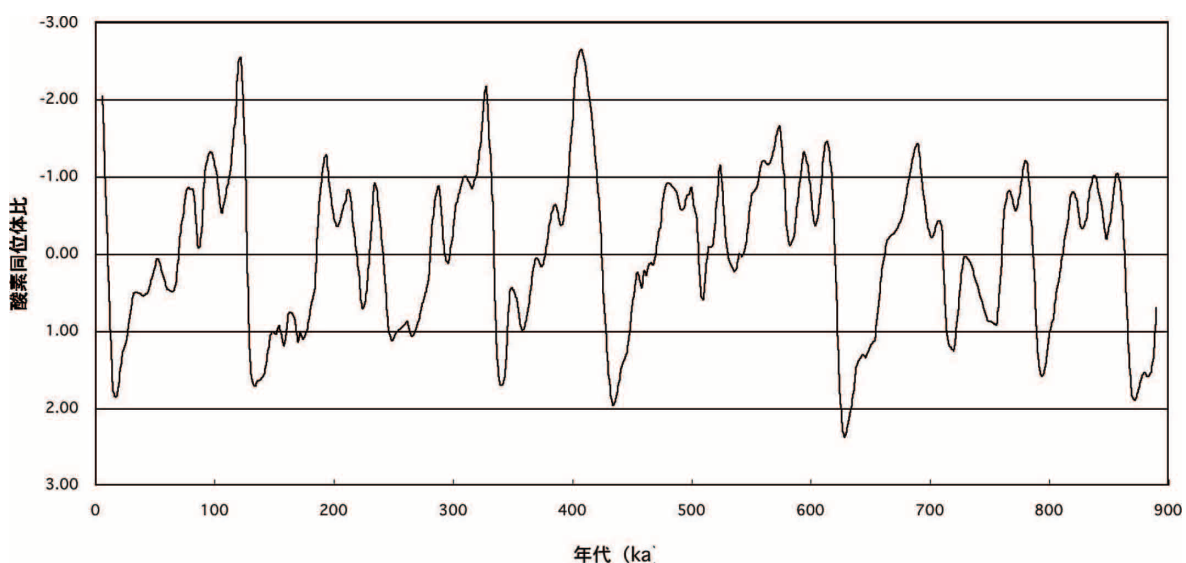


図3-2 深海底コアから得られた酸素同位体比の変動履歴。酸素同位体比は海水の温度の指標であるだけでなく、更に重要なことは、陸域に氷床や氷河として固定された水の量の指標でもある。Bassin ot et al. (1994)による

汎世界的な気候が変化することは確実である。ただし、その変化時期を予測することは前述のように困難である。そのため将来予測では、氷河性の最大海面低下量 140m と地殻変動による評価期間内の海面変化量の合計値（最大相対的海面変化量）で、評価地域で起こり得る地下水系の最大変化を予測しておかなければならない。海面低下が地下水系にもたらす変化としては、塩淡水境界の海側への移動、深層地下水流動の活発化、地下水圧の減少等があり、これらは処分施設周辺の地下水系が、相対的に浅所へ移動した場合と同等の変化を与え得るものと、予想される。評価対象地域は、当然過去の氷期・間氷期サイクル時にこれらの変化を被っており、地下水の年代マッピングによりその変化の程度が評価できるものと期待される。具体的には、地下水中に溶存しているヘリウムによる超長期年代測定手法 (Morikawa et al., 2005) を用い、評価対象地域の地下水年代により、海面変化による地下水流動変化の影響を調べる。たとえば、年代が 1～2 万年程度であれば、海面の低下時に流動し、上昇時に停滞する水系であり、10 万年程度の年代値が得られれば、少なくとも最終氷期の期間の海水面変化に対して当該地下水系は安定であったことが示される。海面の変化は内陸部においては、海岸部より影響が小さいものと考えられる。しかし、日本列島では構造線や断層等により透水性の裂か系が発達している場所が多いため、内陸部においても広域裂か系を通して海面変化が地下水流動に影響を与える可能性がある点に留意する必要がある。その結果、将来放射性物質を閉じこめておく機能を著しく低下させるような地下水系の変化が予想される地域は、避けることが好ましい。

#### 4. 地震活動

##### 調査・評価項目：地震活動

●（概要調査評価事項） 第四紀に活動した断層の存在が明らかとなった地域では、断層沿いのずれ破壊により廃棄体が直接破損する可能性があり、その断層の影響が及ぶ範囲は避ける必要がある。

◎（サイト影響考慮事項） 第四紀に活動したものでなくとも、地表やその地下に大規模な断層が存在する場合は、その断層の再活動や誘発変位の可能性が想定されるので、ずれ破壊の影響が及び得る範囲を考慮する必要がある。

◎（サイト影響考慮事項） 地震活動により、将来放射性物質を閉じ込めておく機能に影響を与える可能性のある地下水の流動あるいは水質の変化が予想される範囲では、地震活動の影響を考慮する必要がある。

◎（サイト影響考慮事項） 地震活動に影響を与えるテクトニクスについては、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。

地下の岩盤に強い力がかかると岩盤は次第に変形し、それとともに岩盤中には歪みという形でエネルギーが蓄積されていく。力を加え続けると、岩盤は耐えきれなくなって破壊を起こし、それまでに蓄えられていた歪みエネルギーを波（地震波）の形で急激に放出する。地震とは、このような現象が地下で起こることである。地震波によって大地が揺れる現象については地震動という用語を用いる。また、岩盤の破壊はある面を境に両側の岩盤が急速にずれ動く事で起き、この時のずれた面を震源断層と呼ぶ。すなわち、地震の発生場所は点ではなく、面的な広がりを持っており、地震の規模はずれ量と震源断層の広さによって表される。地震発生直後に発表される震源は、最初にずれが生じた破壊の開始点にすぎない。処分施設への地震活動の影響には、地震動による処分施設の破壊、地震時の地殻の伸縮や地震動による地下水環境変化、震源断層のずれによる処分施設の破壊があり、いずれも地下水水質の変化や移行経路の変化として処分地に影響を与えることになる。

日本列島とその周辺には、太平洋プレート、フィリピン海プレート、そして陸側のプレートと最低3つのプレートがある。前2者は後者に対して沈み込んでおり、これらプレート間の相互運動によって日本列島とその周辺の岩盤にかかる力が発生している。日本列島とその周辺で発生する地震を地質学的にタイプ分けすると、プレート境界付近で発生する地震、沈み込むプレート内の地震、陸域の震源の浅い地震の3つに分けられる（図 3-3；地震調査推進本部，1997）。プレート境界付近の地震は、沈み込む太平洋プレートやフィリピン海プレートに対し陸側のプレートが低角度でずれ

上がる逆断層型の地震が発生する。沈み込むプレート内でもしばしば岩盤の破壊が起きて大地震が発生するが、発震機構や震源の深さは様々である。日本列島の陸域で発生する地震は、その震源が20kmよりも浅いものがほとんどである。そのため地震の規模が大きい場合は、震源断層のずれが地表にまで達し、地表に変位を与えること（地震断層の出現）が多い。地形や地質の調査から、地表に変位を与えた断層では、少なくとも過去数10万年にわたって、そのようなずれが累積したこと、すなわち大地震が繰り返し発生したことが分かっている。このような過去に活動を繰り返し、今後もその可能性がある断層を活断層と呼ぶ（活断層研究会, 1991）。

処分地が受けるであろう将来の地震動については、「全国を概観した地震動予測地図」(地震調査推進本部, 2006) を基にすると、評価期間として10万年以上を念頭に置いた場合、日本列島のほとんど全ての地域で震度6以上の揺れを地表で避けることが出来ない。しかし、地震動の加速度は地下ほど小さくなるのがこれまで経験的に明らかにされており（日比野ほか, 1987）、地下施設での十分な岩盤の強度が確保されているなら、この程度の揺れは問題とはならない。また、地震動の影響が強く表れる未固結堆積物の厚い地域は、文献調査段階で排除されており、処分地に影響を及ぼすような軟弱地盤の液化の危険性はほとんどないものとみられる。一方、排除しきれていない地震動の影響としては、大規模な斜面崩壊による埋設物と地表との接近や新たな地下水移行経路の形成がある。そのような可能性のある急傾斜地形や、岩盤中の滑り面・破碎帯の存在は概要調査で確認し、処分地として避ける必要がある。また、そのような岩盤中の滑り面・破碎帯は、処分施設施工時にも工学的な問題を引き起こすことは言うまでもない（本技術資料の「マス・ムーブメント」のところで詳述）。

一方、地震時の地殻の伸縮や地震動による水理特性の変化によって地下水環境に変化が生じることが知られている。プレート境界で発生する巨大地震は、M8以上の規模であり広域に地震動や地殻の伸縮を与える。1946年南海地震では、震源域から約100km離れた愛媛県の道後温泉において10m以上の水位低下を生じた（力武, 1947；川辺, 1991）。これは、地殻の伸縮によるものと考えられており（小泉・他, 2005）、数ヶ月で回復した。地殻の伸縮によって地下水位が変化したケースではほとんどの場合、数日から数ヶ月の時間で水位は回復するようである。しかし、2003年の十勝沖地震では、北海道の複数の井戸において、1年程度経過しても水位が1～10m低下したまま回復していない事例がある（Matsumoto & Akita, 2004）。地下水の変動が大きい場合は井戸が自噴することもあ

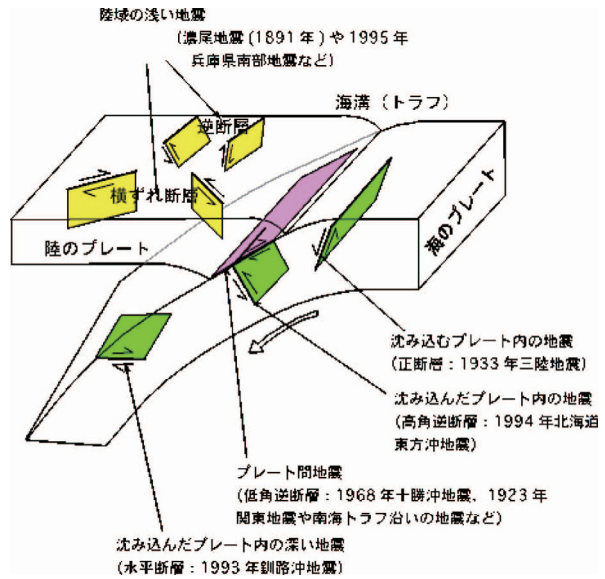


図 3-3 日本列島及びその周辺で発生する地震のタイプ  
(地震調査推進本部, 1997)

150年周期で地震が起きるため、長期にわたる評価期間においては、地下水系の安定性に大きな影響を与える。処分候補地においては、地震の影響を評価し、水文地質構造等を精査して地下水流動の変動特性について明らかにしておく必要がある。また、地震時に地下水の水質が変化する場合があることが知られている。地震に伴い、より深部の地下水が混入することにより起きると考えられるケースでは、地震後数十年経過しても水質が変化したままの例がある（大竹, 1976；Wakita et al., 1978, 奥澤・塚原, 2001）。水質の変動は核種移行に大きな影響を与えるため、起こりうる変動の質および幅について調査すべきである。その結果、将来放射性廃棄物を閉じこめておく機能を著しく低下させるような地下水系の変化が予想される領域（評価対象地域よりも狭い空間）は、処分地としては好ましくない。

陸域で震源の浅い大地震が発生し震源断層のずれが直撃した場合には、処分施設が破壊され、ずれに沿って地表まで最短の地下水移行経路が新たに形成されることになる。その典型例である1995年兵庫県南部地震においては、（震源断層直上の）淡路島において地下水が自噴する現象が起きた（Sato et al., 2000）。山側で水位低下を生じ、平野部で自噴している。これらの現象は、地震により断層周辺部が破壊されて地下水の水みちとして機能したため、結果的に大きな地下水理パラメータが変化したことによると考えられる。影響が生じた期間は数ヶ月～数年間であるが、数年以上経過しても回復していない例もある（Sato et al., 2000）。

Kitagawa & Koizumi, 2000). 従って、断層の近傍では、地震により地下水理が大きく変化する可能性があることを念頭に置かななくてはならない。そのため、将来も大地震を発生させ、ずれ変位を繰り返す可能性を持つ活断層のある領域は、処分地には適当でなく、避ける必要がある。これまでに明らかになった活断層の分布は、「日本の活断層」(活断層研究会, 1991) や産総研情報公開 DB「活断層データベース」(<http://www.aist.go.jp/RIODB/activefault/>) に詳しい。ただし、活断層の定義は研究者によって異なり、「活断層データベース」では約10万年前以降に繰り返し活動したものが扱われている。従って、将来10万年を越えるような長期に及ぶ期間での予測を行なう場合は、このような活断層の定義からはずれた断層も考慮する必要がある。将来100万年の期間を念頭に置いたら、本調査では第四紀に活動した断層(広い意味の活断層)を対象にする必要がある。また、従来の活断層の認定は、主に空中写真を用いた地形判読のみで行われているものが多いことにも注意しなければならない。そのため断層そのものの現地調査が不十分なものも多いのが現状である。従って、地形的に未成熟な活断層については見落とされているものがあり、2000年鳥取県西部地震はそのような未確認活断層沿いで発生したものである(松田, 2005)。しかし、このような低活動性の断層についても断層や断層岩を対象にした野外地質調査により事前の検出は可能であり(小林・杉山, 2004; 相沢ほか, 2005)、概要調査では調査対象地域で地質学的に認められる既存の断層を対象とした調査が必要となる。このほか、地図上では線として表現される活断層も、三次元的に時間発展してきた履歴を持ち、成長に伴い断層位置の移動が起きることが明らかにされている(Ikeda, 1983)。概要調査では、将来の活断層の位置移動も念頭に置いた調査が必要で、評価期間に外挿するのに十分な過去まで断層活動履歴を遡ると同時に、十分な時間分解能でこれを明らかにしておく必要がある。

日本の活断層の多くは、前期～中期中新世に形成された伸張性断層をもとにした反転テクトニクスに支配されている(佐藤, 1996; 図3-4)。従って、活断層としては地表に現れない既存の断層が再活動をする可能性は今後も十分にあり(例えば2003年宮城県北部地震)、評価対象地域やその地下に大規模な断層が存在する場合は、再活動の可能性を考慮し、ずれ破壊の影響が及び得る領域を避けることが望ましい。このほか、既存の断層が全く別の地震によって誘発され変位を起こすこともあり、誘発断層もしくは同情性断層と呼ばれている。その有名な事例としては1968年の米国ボレゴマウンテン地震(M6.4)があり、この時に震源から40～70km離れ、余震域でもないサンアンドレアス断層が地震動によってずれ変位を起こしている

(Allen et al., 1972)。また、1923年関東大地震の時に震源域から遠い三浦半島や房総半島に出現した地震断層群も、誘発断層の典型であろう。このような誘発ずれ変位を避けるためにも、評価対象地域に顕著な断層がないことが望ましい。

活動履歴から将来の地震活動を予測する際には、その場のテクトニクスが将来においても十分安定であることも同時に示しておく必要がある。反対にテクトニクスが不安定で、応力場の変化が予想される地域では、処分地の安全評価における不確実性が大きくなる。特に、テクトニクスの不安定で応力場の変化が起こる地域では、将来どのように断層の再活動が起きるのか予測することが困難になる。また、応力場が変化するとこれまで閉じていた裂かが開口することで透水係数の主軸が方向は大きく変化することも知られており(竹村ほか, 2006)、地下水系への影響も大きい。

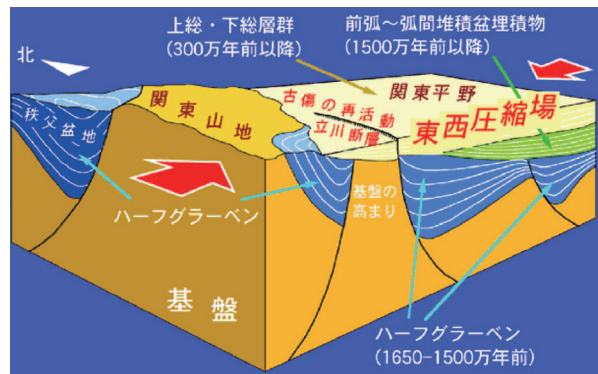


図3-4 関東地方の地下地質概念図  
中新世の伸張場で形成された巨大断層群が、現在の圧縮場で反転再活動している。(高橋ほか, 2006)

5. 火山・マグマ活動

調査・評価項目：火山・マグマ活動

- （概要調査評価事項） 第四紀火山の存在が明らかとなった地域は、噴火により廃棄物が直接破損あるいは地表に放出される可能性があり、避ける必要がある。
- （概要調査評価事項） 第四紀火山が存在しなくとも新たに火山が出現し得る地域は、噴火により廃棄物が直接破損あるいは地表へ放出される可能性があり、避ける必要がある。
- ◎（サイト影響考慮事項） 第四紀火山の周辺あるいは巨大噴火の可能性のある範囲の周辺で、将来放射性物質を閉じ込めておく機能に影響を与える可能性のある地下水の流動、水質の変化あるいは地温の変化が予想される地域では、それらの火山・マグマ活動の影響を考慮する必要がある。
- ◎（サイト影響考慮事項） 火山・マグマ活動に影響を与えるテクトニクスについては、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。

火山活動は、地下のマグマ（溶融した岩石）が地表またはその近くまで上昇して冷却固化するまでの間に引き起こすさまざまな作用で、貫入・噴火・噴気・熱水活動・火山性地震・火山性地殻変動などが含まれる。このうち噴火は、マグマやその急冷固結した破片、火山ガス、地下の岩石などが急速に地表に放出される現象である。処分地で噴火が起これば、地下施設の破壊と埋設物の地表への放出をもたらすので、将来噴火の起こる可能性のある場所は絶対に避ける必要がある。また、火山性の地殻変動による隆起は、これが甚だしい場合に埋設物と地表との接近をもたらす得るが、そのような場所は噴火の可能性がある場所とほとんど重複しており、噴火の範疇で考えることが出来る。また、火山ガスは地表に噴出するだけでなく、地下水系に溶解、あるいはガスに含まれる水蒸気が凝縮し、地下水移行シナリオにおいて水温・水質の変化や移行経路の変化として処分地に影響を与えることになる。すなわち、火山の周囲では100℃以上の高温の流体やpH4以下の強酸性の流体が普通に出現し、処分サイトへの侵入により、廃棄物を含め人工バリアを構成するオーバーバックや緩衝材の機能を著しく低下させる可能性がある。火山ガスには、塩酸・二酸化硫黄・硫化水素・二酸化炭素など強酸性の地下水を作る成分が常に含まれている。また、二酸化炭素を含む酸性の地下水が岩石と反応するとアルカリ性に変化し、炭酸イオンを生じる。この炭酸イオンはウランと錯体を作り、ウランの溶解度が高くなるため、地下水系を介して放射性核種の移行を促進させる。また、高温強酸性の地下水は、周囲の天然バリアを構成する地層に熱水変質を生じさせる点も考慮する必要がある。

火山は、噴火活動で形成された特徴的な形態をもつ地形もしくは構造である。従って、火山の分布は、過去に発生した噴火場所をそのまま表している。日本は火山活動の活発な地域にあり、活火山（過去およそ1万年以内に噴火した、あるいは噴気活動の活発な火山）が108個、第四紀（過去170万年前から現在まで）に噴火した火山が200個を越えている（産総研情報公開データベース「日本の第四紀火山」[http://www.aist.go.jp/RIODB/strata/VOL\\_JP/index.htm](http://www.aist.go.jp/RIODB/strata/VOL_JP/index.htm)）。ただし、火山は日本列島に一樣に分布するわけではなく、プレートの配置に支配され偏在する傾向が顕著である。すなわち、日本列島の第四紀火山は、プレートの沈み込み境界から陸側プレート内に200～300km離れた位置にある火山フロント上に最も密に分布し、火山フロントと沈み込み境界の間（前弧域）には火山が分布しない（Sugimura, 1960）。また、火山フロントから背弧域に離れるほどの火山の分布がまばらになる傾向も顕著である。火山フロント沿いには、同一火道からの噴火が繰り返された成層火山やカルデラ火山が主に分布している（守屋, 1983）。このような火山の分布には例外もあり、西南日本の山陰周辺では火山フロントが不明瞭になり、分布する火山も噴火の度に火道位置が移動する単成火山群が多い（守屋, 1983）。

既存の火山で起こる将来の噴火の直撃を避けるためには、火山からある程度の距離が必要である。ここで対象とする火山は、将来10万年や100万年の期間を念頭に置くと、噴火履歴の短さから活火山だけでは不十分で、第四紀火山を対象にする必要がある。火山の中心火道から地下でマグマが割れ目を作りながら側方に移動（貫入）し側噴火が起きた範囲は、側火口として地形的に認識できる。核燃料サイクル開発機構（1999）は、側火口分布から火山中心から概ね20km以内を噴火可能性範囲として示したが、これは陸域地表で認識出来たもののみを対象としていることに注意しなければならない。実際、三宅島2000年噴火では火山中心から40km以上もマグマが側方に貫入したことが地球物理学的に捉えられている（酒井ほか, 2001）。マグマの貫入事件は火山性の群発地震として観測可能であり、これまでに火山噴火予知連絡会報に掲載された全ての震源分図から地震発生範囲を読み取ったものが図3-5である。噴火可能性範囲である震源域は火山毎に大きく異なり、特に三宅島・伊豆大島・神津島・東伊豆単成火山群・八丈島のような伊豆弧の火山や雲仙火山で広がり大きい。これらと比べると他の火山での震源域の広がり小さく、火山中心から20km内に取まっている。この現象には貫入時の割れ目の形成と地殻応力場の関係が係わっており、地殻内の差応力が大きいほどマグマが移動しやすいことの表れと考えられる（高田, 1994）。従って、過去の事例から将来の噴火範囲を予測する際には、その場の

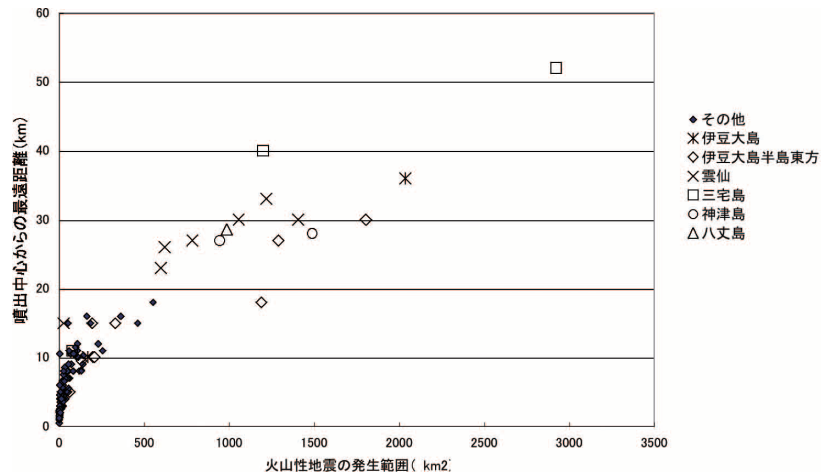


図 3-5 観測された火山性地震の発生範囲と噴出中心からの最遠距離の関係。  
伊豆諸島や雲仙地溝帯の火山では、中心からの最遠距離が 20km を越えることに注意。

テクトニクスが将来においても十分安定であることも同時に示しておく必要がある。反対にテクトニクスが不安定で、応力場の変化が予想される地域では、確実な将来予測が難しく、処分地の安全評価における不確実性が大きくなる。

火山活動が及ぼす地下水への影響範囲、たとえば、地温勾配の異常等は、火山の噴火中心からおおむね 10km 以内に集中する（小松・梅田，1999）。しかし、たとえば、那須火山周辺の湯元温泉のように第四紀火山から 10km 以上離れたところで熱水上昇を生じている場合（梅田ほか，1999）、あるいは、岩手県花巻温泉のように、火山から数 10km 離れた場所に火山性の可能性がある熱水の存在が推定される場合（高橋ほか，1996）等、例外も多々あることが知られている。したがって、火山活動に起因する熱水活動が周辺地下水系に与える影響について評価するには、たとえ評価対象の処分候補地が数 10km も火山から離れた場所であっても、調査が必要となる場合がある。火山性熱水の供給が将来生じる可能性の高い場所では、放射性物質を閉じ込めておく機能を著しく低下させるような地下水系の変化あるいは地温の変化が予想される。これらの地域では、熱水活動が及ぼす地下水系への影響度について評価しなければならない。その影響度は、火山からの距離、断層の存在、地質構造等により異なると考えられる。現在、地下水系への火山性熱水の流入については、マグマ起源物質の化学・同位体組成（Symonds et al., 1994；風早，1997）を利用した同位体地球化学的調査、およびその当該地下水系の滞留時間の長さ（Morikawa et al., 2005）を組み合わせることで、定量的に評価可能である。過去の火山活動の様式とその間に生じた地下水系への影響とその原因（断層によ

るのか、地質構造によるのか）がわかれば、将来の火山・マグマ活動の変化による地質構造の変化による熱水活動の変化の影響を推定することができると考えられる。

日本列島では、発生頻度は低いものの巨大噴火（噴出マグマ量が 100 立方 km を越えるような噴火）が繰り返し発生している。巨大噴火では最大で直径 20km を越える範囲が噴火により一度に破壊・放出され、地表は 1km 程度陥没してしまう。さらに噴出物は火砕流として 100km 以上流走し、広範囲に地表を破壊する。また、このような巨大噴火がもたらす地下水系への影響は、これまで研究事例がほとんど無い。阿蘇カルデラや始良カルデラの位置する九州中南部は最近 10 万年間に数回の頻度で巨大噴火が発生しており、その頻度は他地域よりも大きい（町田・新井，2003）。一方で、東北地方南部のように数 100 万年間隔で巨大噴火を繰り返す地域もあり（山元，1992）、日本列島における巨大噴火の発生頻度は地域毎に大きく異なっている。従って、100 万年前後の期間を念頭に置かなら、後者のような噴火再来間隔の長い事例も検討する必要が生じてこよう。その際には、調査対象を第四紀火山に限定するのは不十分で、更なる過去の地質時代（新第三紀後半：最近約 1000 万年前以降）の噴火履歴も考慮に入れる必要がある。

評価対象地域内には第四紀火山が存在しなくとも、対象地域内及びその周辺に新規に火山が出現する可能性については評価しておく必要がある。複成火山の寿命は数万年から数十万年であり（東宮，1991）、将来 10 万年の期間を考えれば現在活動中の火山のいくつか、また将来 100 万年の期間を考えれば現在活動中の火山のほとんどが活動を停止してしまう。従っ

て、評価期間が長期にわたるほど既存火山以外で新たに発生する火山活動の評価が重要になってくる。ただし、東日本では新第三紀後半以降の火山フロントの位置は現在の位置と大きくは変わらないので(大口ほか, 1989), 将来100万年を評価期間としてもその基本的な枠組みに変化が現れるとは考えにくい。それゆえ、東日本の火山の新規出現性評価では火山分布のまばらな火山フロントから離れた背弧域が調査対象となる(図3-6)。一方、火山フロントが不明瞭な西南日本の山陰から九州北部では前述したように単成火山群が卓越し、噴火の度に火山が新規出現している。西南日本の単成火山群の寿命は複成火山よりも長く、100万年に及んでいる(Suto et al., 1998)。火山の新規出現の可能性を評価して危険地域を立地選定で排除するためには、これらの地域に既に新規出現した火山噴出物を

検討し、どのような条件でマグマが発生したのか、その形成条件を理解しておく必要がある。その上で同様の条件が同じ背景の地域下に存在するのかどうかを地球物理学的なデータから見極めなければならない。具体的には、新第三紀後半まで遡った火山の時空分布解析(例えば宇都, 1995; Kondo et al., 1998; 図3-7)に、個々の火山岩の岩石学的検討(巽, 1995; Kimura & Yoshida, 2006)を加え、これと現在の島弧の地球物理学的観測結果(長谷川ほか, 1991)を関連づけながら整合性のあるマグマ形成モデルを検討することが望ましい。また、「将来予測の手法」の項で前述したように、統計的推論から火山の出現を評価する場合も、マグマの成因を背景にした考察なしにはより信頼性の高い将来予測は難しい(Smith, 2002)。

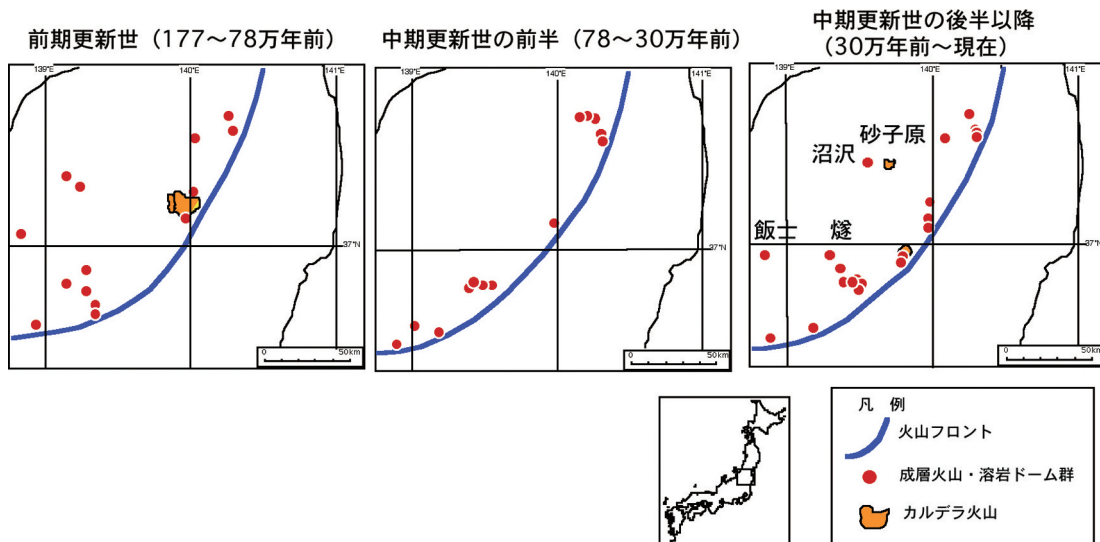


図3-6 東北日本南部における火山分布の変化。

第四紀期間中、火山フロントの位置は不変。一方、火山フロントの背弧域では火山活動域が大きく変動し、得に30万年前以降では背弧域で第四紀火山空白域でも火山が新規に出現した。



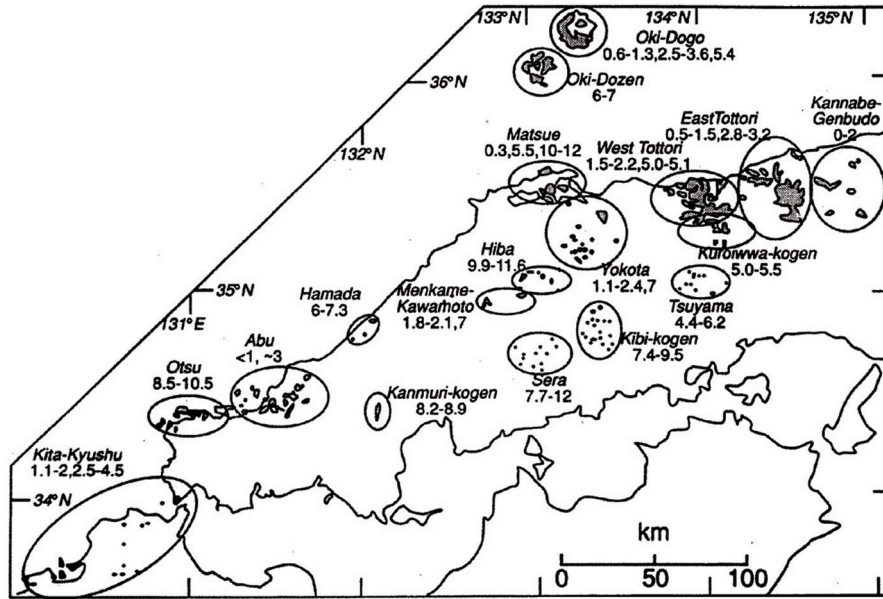


図 3-7 西南日本におけるアルカリ玄武岩単成火山群の時空分布。単成火山群は 100 ~ 200 万年の活動期間を持っている。火山活動域は時間と伴に背弧側に限定されるようになり、第四紀火山は山陰側のみ分布する。宇都 (1995) による。

## 6. 深部流体

調査・評価項目：深部流体

◎ (サイト影響考慮事項) 深部流体の活動により、将来放射性物質を閉じ込めておく機能に影響を与える可能性のある地下水の水質変化が予想される地域では、深部流体の影響を考慮する必要がある。

◎ (サイト影響考慮事項) 深部流体の上昇に影響を与えるテクトニクスについては、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。

プレートの沈み込み帯に位置する日本列島では、多くの構造線や断層の存在や新たな地殻変動による起源の異なる地下水・流体の上昇・混合などがあり、放射性廃棄物の処分地深度である 300 m 以深の地下水について未解明な部分が多い。この深度では、地下水流動系に天水起源でない流体成分が含まれていることがある。ここでは、この非天水起源の地下水を深部流体と呼ぶ。深部流体は、ガス成分を多く含み、高塩濃度であるものが多く、化石海水・油田鹹水と呼ばれている流動せずに地層中に長期的に停滞している水（長期停滞水）あるいは、近畿～中部地方に広域に存在している有馬型温泉水に代表される深部流体 (Kazahaya et al., 2003) 背弧域のグラーベンの断層系から検出される CO<sub>2</sub> を含む深部上昇流体などであることが考えられる (図 3-8)。

深部流体には、高温、高塩濃度、低 pH で多量の二

酸化炭素を含む流体（たとえば、有馬型温泉水：松葉谷ほか, 1974）があるため、地下水の反応性の変化に大きな影響を及ぼす可能性がある。有馬型熱水の典型例は、有馬温泉に代表される有馬－高槻構造線沿いに自然湧出しており、有馬温泉においては地表で沸騰温度である。それが深部帯水層に混入している事例が神戸において見られるが (Morikawa et al., 2005)、深さ 1600m では有馬型熱水を多量に含む塩水層をなし、1000m より浅い深度では炭酸成分の多い地下水層を形成している。これは、有馬型温泉水の元になる深部上昇水が多量に CO<sub>2</sub> を含んでいるため、1000m 以深において CO<sub>2</sub> が分離上昇し、より上位に存在する地下水を炭酸泉化していることによると考えられる。また、1000m 深度における CO<sub>2</sub> による飽和条件下では pH=3 の酸性を示すため、「地質環境」の項に後述されるように、100℃以上の温度および低い pH の特徴を持つ熱水は緩衝材やオーバパックの機能を著しく低下させる可能性がある。一方で、「火山活動」の項で述べたように、CO<sub>2</sub> を含む地下水は周囲の岩石と反応すれば、ウランの溶解度を増加させる炭酸を生じる。さらに、有馬型熱水は海水の 2 倍に相当する高 Cl 濃度の特徴を持っている点も考慮しなくてはならない。このほかにも日本列島には、非火山性の成因にもかかわらず、深部起源の遊離 CO<sub>2</sub> や重炭酸イオンを多く含む深層地下水が全国に広く分布している。近傍に、このような深層地下水が存在する場合は、その起源を明らかにし、停滞系であるのか供給があるのか

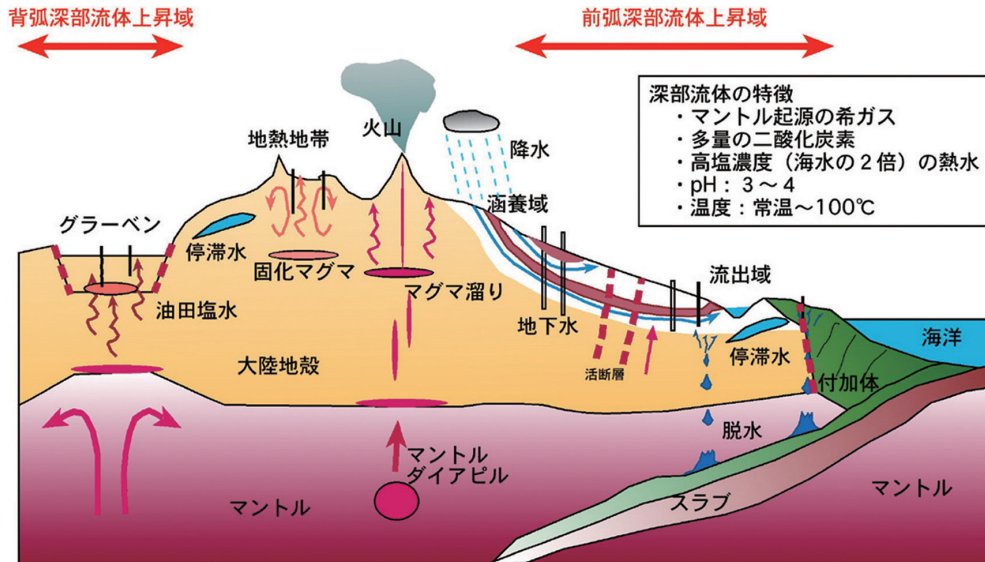


図 3-8 日本列島における地下における流体活動、深部流体の上昇域および特徴を示した模式図

について、調査する必要がある。また、CO<sub>2</sub>の供給がある場合には、その量についても調査を行う必要がある。

上述した特徴、つまり広域にわたり深部から熱水やCO<sub>2</sub>の供給があることは、安定大陸内に処分地の建設を検討している諸外国では見られない特徴であり、我が国ではその影響の評価を行う必要がある。この深部流体の起源が長期停滞水である場合、高塩濃度で腐食性はあるものの賦存量はおそらく一定である。深部上昇流体である場合、高塩濃度、低pH、高CO<sub>2</sub>(高温であることもあり得る)である上に、常に深部より供給されるため賦存量は無限で、地下水系への混入も定常的に続く(あるいは、増大することもあり得る)ことも考え得るため、安全性評価においては特に注意しなければならない。

従って、安全性評価のためには、処分地深度の深層地下水の現在の化学的特徴とともに、処分地深度及びその深層に存在し、上昇する可能性のある深層地下水に混入している深部流体の成分の起源、現在の化学組成・賦存量・混入量等の性状の変動予測を行う必要がある。最終的には精密調査段階において評価期間中における地下水の化学的特徴の変動とそれに伴う地下水の反応性(オーバーパックの腐食の促進・遅延の程度、核種移行の促進・遅延の程度)を評価するため、深部流体の影響の有無およびその程度を明らかにしておくことが重要である。

## 7. 泥火山

調査・評価項目：泥火山

● (概要調査評価事項) 第四紀に活動した泥火山の存在が、概要調査で明らかとなった地域は、廃棄体が直接破損あるいは地表へ放出されることが懸念されるので、避ける必要がある。

泥火山とは、異常に高い間隙水圧を持った泥が泥ダイアピルとして上昇し、地下水(温泉水)、ガス、時には石油とともに地表に噴出して、火山に類似した、高さ数百m、直径数kmもの堆積(凸型)地形や陥没(凹型)地形を生じたものである。泥ダイアピルの上昇は、地下数キロ(1-3km)から始まるが、その上昇過程でしばしば周辺の地層を破壊、ブロック化し泥中に取り込む。そのため泥ダイアピルや、泥火山は含礫の泥からなることが多い。泥ダイアピルは、プレート収束帯、堆積速度が大きい場所、流体の移動が妨げられやすい場所等、泥が多量に供給され、なおかつ異常に高い間隙水圧が形成されやすい場所であればどこにも出現する可能性を持つ(例えば山縣・小川, 1989)。また、油田地帯・天然ガス地帯(メタンハイドレート層も含まれる)に多くの泥火山が分布することから、これらの地域で生成する天然ガスが泥火山形成と大きく関わっていることも示唆されている(千木良・田中, 1997)。泥ダイアピルの「化石」は含角礫泥岩ダイアピル、泥岩岩脈、泥ダイアピルメランジ等と考えられており、各時代の多くの地層中から発見されている(例えばUjiié, 2000)。

一方、火山・温泉地帯の泥火山は、坊主地獄、湯沼、間欠泉等とセットになっている場合が多い(例えば秋

田県後生掛温泉)。このような場所では、泥、岩石等が、高温の温泉水、ガス等と一緒に爆発的に噴出する熱水性爆発という現象（例えば長野・中の湯温泉の爆発；三宅・小坂，1998）があることが知られている。熱水性爆発により形成された脈が鉱物で充填されている鉱床の存在も知られている（熱水性爆発の化石）。

わが国にある泥火山は、北海道・新冠泥火山（千木良・田中，1997）、および新潟・松代泥火山（新谷・田中，2005）の2例が報告されている。また高橋ほか（2006）は、北海道・歌越別メタン田（遠別旭温泉）が泥火山である可能性について述べた。

泥火山の活動には、

- ①地震により活動が誘発されたと考えられる場合、
- ②自発的な「噴火」活動、すなわちガス爆発および泥の噴出・堆積の場合

とがある。わが国では、北海道・新冠泥火山において周辺で起きた地震時にガス、地下水および泥の噴出があった（例えば千木良・田中，1997）、という前者の例が知られているのみである。ただし、わが国近傍の台湾、サハリン（樺太）を含め海外では多数の後者の例が知られている（例えば高橋ほか，2006）。また、新潟・松代泥火山の直下を貫通する北越急行ほくほく線鍋立山トンネル（長さ9.1km）では、高压の可燃性ガスが地層中に封入された、最高30kgf/cm<sup>2</sup>に達する高い地圧を持つ地層に遭遇し、建設に20年以上の歳月を要したことが報告されている（新谷・田中，2005）。

泥火山からの流体の噴出は地下に存在する異常間隙水圧が原動力となり発生すると考えられており、異常間隙水圧の直接的な発生原因は、急激な堆積作用による下位の未固結層の圧縮、地殻変動による構造的な圧縮、粘土鉱物の相転移による脱水及び、粘土堆積物中の有機物からのガスの発生の説が有力とされている（新谷・田中，2005）。

わが国で泥火山が分布している地域は、極めて限られており、上述した泥火山に特徴的な地表徴候から、それらの地域を避けることは十分に可能である。一方、将来にわたり泥火山の出現が予想される地域の確認は、直接的原因である異常に高い間隙水圧の検知により可能である。異常に高い間隙水圧が生じやすい場所としては、石油・天然ガス地帯、プレート収束域（境界の周辺）等、急激な堆積作用や、地殻変動による構造的な圧縮が発生しやすい場所（その結果として、鉱物の相転移による脱水や有機物の石油化・ガス化が発生する場所）が考えられるので、調査地域が将来的にそのような地質環境下に置かれる可能性があるのかを十分に検討する必要がある。



図 3-9 新冠泥火山（北海道）

人物がいるのが第8丘（長径200m、短径150m、高さ20m）。後背の草が刈られている丘が第7丘（直径200m、高さ20m）。新冠泥火山は12kmの範囲に9丘あることが確認されている（最大のもは長径750m、短径330m、高さ50m）。活動時期は最終間氷期以降、あるいは最終氷期以降の極めて新しい時期と推定されている。

## 8. マス・ムーブメント

調査・評価項目：マスマーブメント

●（概要調査評価事項）大規模なマスマーブメントの徴候が概要調査で明らかとなった地域では、斜面変動に伴うクリープやずれ破壊により廃棄物が直接破損することが懸念されるので、クリープやずれ破壊の影響が及ぶ範囲は避ける必要がある。

地表の構成物質が、水・氷・風などの可動的営力によって削り取られ個別的な粒子として移動する現象を侵食・運搬作用と呼ぶが、これに対し地表の構成物質に水が加わることにより、あるいは地震・火山活動などの外部から与えられた要因をきっかけとして、その物質自体の重みによってマス（塊）として動く現象をマス・ムーブメントと呼ぶ。マス・ムーブメントに関してはいくつかの定義や分類が行なわれているが、ここでは簡略に以下のように取り扱う。

- ・地崩れ：運動速度が比較的速く、運動領域と不動領域の境界が明確なもの。
- ・地すべり：運動速度が比較的遅いが、運動領域と不動領域の境界が明確なもの。
- ・クリープ：運動速度が極めて遅く、運動領域と不動領域の境界が不明確なもの。

マス・ムーブメントと地山の境界部ではクリープや地すべりによるずれ破壊により斜面構成物質の破壊が引き起こされ、また破壊された部分をクリープ面やす

べり面として斜面構成物質の移動（斜面変動）が引き起こされる。道路側壁の土砂の崩れや落石というような極小規模なマス・ムーブメントは日常的に発生しているが、人的・物的災害が生じない限り意識されることはなく、また極小規模なマス・ムーブメントと通常の侵食作用との境界は不明瞭である。しかしながら、まれではあるがマス・ムーブメントにより動いた斜面構成物質の量が100万m<sup>3</sup>を超えるような巨大規模のマス・ムーブメントが発生することが知られている。町田（1984）は、日本を含めた地球上の巨大規模のマス・ムーブメントについてまとめ、マス・ムーブメントにより動いた斜面構成物質の量が1000万m<sup>3</sup>を超えると崩壊地形や堆積地形に特有なものが生じるとして、それ以上の体積を持つ崩壊を巨大崩壊と呼んでいる。また、千木良（1995）は、おおよそ100万m<sup>3</sup>から1000万m<sup>3</sup>程度以上の体積を持つ崩壊を巨大崩壊としている。崩壊物質量が1000万m<sup>3</sup>を超える我が国の巨大崩壊は、主として火山体周辺と四万十帯\*の泥質堆積岩地域に発生しており、それ以外のものはわずか1例にすぎない（表3-1）。崩壊物質量が100万m<sup>3</sup>を超える（準）巨大崩壊は、我が国では多数存在するが、やはり火山体周辺と四万十帯の泥質堆積岩地域に多く、これら以外では付加体堆積物中の石灰岩体周辺、三波川帯の結晶片岩地域、またいわゆるグリーンタフ地域に比較的多く認められる。

火山体周辺に発生する巨大崩壊は、火山体の重力的に不安定な構造が地震をきっかけに崩壊したもの（島原眉山）、火山体の侵食・削剥により重力的に不安定な構造が形成され地震や降雨をきっかけに崩壊したもの（立山鳶・稗田山など）などがあるが、火山体周辺は地層処分の概要調査地域の対象外であることから、ここでは概論を述べるに留めるものとする。

四万十帯の泥質堆積岩地域に発生する巨大崩壊は、

断層運動などによる構造的破碎を受けた頁岩互層からなる山体の脚部の侵食・削剥により重力的に不安定な構造が形成され大規模なクリープ（岩盤クリープ）が発生し、その後の地震や降雨をきっかけに崩壊したものがほとんどである。南アルプスの七面山崩れや赤崩れ（図3-10）の規模を以下に示す（Chigira,1992; Chigira & Kiho, 1994; 千木良, 1995）。

- ①七面山崩れ：岩盤クリープ範囲4 km×3 km、深さ400 m
- ②赤崩れ：岩盤クリープ範囲3 km×1.5 km、深さ300 m

なお、四万十帯の泥質堆積岩地域に発生する（準）巨大崩壊も含めれば、岩盤クリープだけではなく流れ盤構造が素因となる崩壊事例も存在するが、巨大崩壊の素因に岩盤クリープが多く認められるのは我が国の地質環境の特性である。

付加体堆積物中の石灰岩体周辺に発生する（準）巨大崩壊は、侵食に強い石灰岩体からなる山体の脚部の侵食・削剥により重力的に不安定な構造が形成され、その後の地震や降雨をきっかけに崩壊したものである（小嶋ほか, 2006）。三波川帯の結晶片岩地域に発生する（準）巨大崩壊は、流れ盤構造によるものと岩盤クリープによるものが認められる。いわゆるグリーンタフ地域に発生する（準）巨大崩壊は、スメクタイトなどの粘土を含み固結度が低い軟岩が地すべりを起こしたものである。

四万十帯の七面山崩れ・赤崩れの規模・深さから明らかかなように大規模なマス・ムーブメントは処分深度まで重大な影響を及ぼしうる。大規模なマス・ムーブメント、特に巨大崩壊と呼ばれる規模のマス・ムーブメントの発生はその地点の地質・地質構造と密接に関連しており、概要調査地域とその周辺部に分布する類似の地層における巨大崩壊の有無を空中写真判読や現

表3-1 我が国における巨大崩壊（千木良, 1995を改変）

	崩壊の名称	発生年	体積	地質	素因	誘因	
			10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup>				
堆積岩	大谷崩れ	1702	12	四万十帯砂岩・頁岩互層	岩盤クリープ	地震	
	加奈木	1746	3	四万十帯砂岩・頁岩互層	岩盤クリープ	不明	
	七面山	1852	75	四万十帯砂岩・頁岩互層	岩盤クリープ	地震	
	赤崩れ	-	2.7	四万十帯砂岩・頁岩互層	岩盤クリープ	-	
	千枚岳	-	0.8	四万十帯頁岩層	岩盤クリープ	-	
	ボッチ薙	-	?	四万十帯砂岩・頁岩互層	岩盤クリープ+流れ盤	-	
火山	大月川	888?	35	八ヶ岳		水蒸気爆発?	
	大沢崩れ	1331	7.5?	富士山		地震?	
	眉山	1792	48			地震, 火山活動?	
	立山鳶	1858	27-41			地震	
	磐梯山	1888	150			地震, 水蒸気爆発?	
	稗田山	1911	15			豪雨?	
	御岳山	1984	36			地震	
	その他	帰雲山	1586	1	濃飛流紋岩類		地震

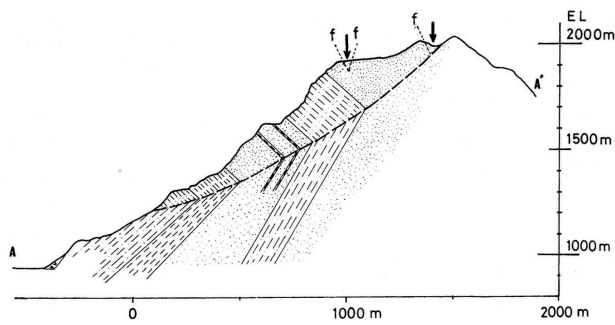


図 3-10 四万十層群瀬戸川層中の赤崩れの断面図  
(Chigira & Kiho, 1994)

地調査から予測しうる (千木良, 1998). また, 岩盤クリープの初期のものは地表調査で捕捉できない可能性があるが, ボーリング調査を併用した総合的な判断により捕捉可能と考えられる. 概要調査地域とその周辺部に大規模なマス・ムーブメントの徴候が明らかとなった地域では, マス・ムーブメントの周期性を評価した上でマス・ムーブメントに伴うクリープやずれ破壊の影響が及ぶ範囲を予測し, その範囲を避ける必要がある. また, マス・ムーブメントに伴うクリープやずれ破壊の影響が及ぶ範囲より地表側の範囲は斜面変動により崩壊する可能性が存在し, 廃棄体はその領域内に存在する場合は地表に放出される可能性があるために, その範囲を避ける必要がある.

## 9. 人工バリアの設置環境

長期変動に関するサイト影響考慮事項のうちのいくつかは, 地下水の流動, 水質の変化あるいは熱の変化が, 地層処分システムに与える影響の可能性について考慮すべきことを述べている. この節では, これらの変化が地層処分システムに与える影響を評価するのに必要な事項として, わが国における人工バリアの設置環境にかかる工学的知見および科学的知見について記述する.

### 【地下水流動】

火山活動や断層運動などの長期変動要因を排除できた場合, 人工バリアは長期間にわたって物理的に安定に保たれることが想定されている. この人工バリアの物理的安定性に影響を及ぼす事象として, 地下水流動に伴う人工バリアの流出挙動が挙げられる. 人工バリアのうちオーバーパック (内部に廃棄体含む) は比重が重く堅甲であり, 地下水流動場で想定される流速により流出することはないが, 緩衝材は比較的速い地下水流動場では地下水流により侵食されうる. 核燃料サイクル開発機構 (2005) では, 降水系地下水環境下 (蒸

留水) において平均流速  $2 \times 10^{-6} \text{m/s}$  においてベントナイト (ケイ砂混合率 0) が侵食 (侵食コロイドの生成) されることを確認しており, 降水系地下水条件下においてベントナイトの侵食現象が発生する臨界流速値はこれよりも小さい流れ場である可能性が示唆されたとしている. 一方, 海水系地下水環境下 ( $\text{NaCl}$   $0.2 \text{mol/l}$  &  $0.64 \text{mol/l}$ ) において平均流速  $8 \times 10^{-6} \text{m/s}$  においてベントナイトの侵食コロイドの生成が認められないことから, 海水系地下水条件下においてベントナイトの侵食現象が発生する臨界流速値はこれよりも大きい流れ場であることを概略的に把握したとしている.

処分深度と想定される地下 300 m 以深における地下水流速は一般に極めて遅いと考えられているが, 地熱地帯近傍などの地下水流速が著しく速い地点を除いて流速が測定された事例は極めて少ない. これは, ボーリング孔 1 孔で測定可能な単孔式流向・流速計の測定限界 ( $1 \times 10^{-7} \text{m/s}$  程度) が地下深部の流速に比べて速すぎるためであり, 地下深部の一般的な流速は  $1 \times 10^{-7} \text{m/s}$  程度以下と考えてよいだろう (坑道掘削などにより人為的な大きな動水勾配が導入された地質環境を除く). しかしながら, 将来の侵食作用や斜面変動, あるいは海水準変動などの影響により, 断層などの地下水の移行経路となりうる構造に沿って緩衝材の流出が起きうる流速環境になりうる可能性はあると考えられる. 従って, 緩衝材を流出させるような地下水の流速が概要調査で明らかとなった範囲および将来の地形変化あるいは海水準変動の影響により緩衝材を流出させるような地下水の流速の場となりうる範囲は, 放射性物質を閉じ込めておく機能が著しく低下することが懸念される.

### 【地温】

人工バリアの熱環境に関しては, ガラス固化体の発熱に伴うガラスの再結晶化を防止すること, また地下水に飽和した後の緩衝材の熱による変質を防止することが制約条件となる. このうちガラスの再結晶化防止に関しては, ガラス固化体の濃度調整やオーバーパック・緩衝材の機能設計により基本的に対処される. 核種移行に関連して個別に見た場合, 水とガラスとの反応により核種の移行が抑制される Cs のような例もあるが, ここではガラス固化体全体の品質の劣化を優先的に考えた. 核燃料サイクル開発機構 (2000) では緩衝材の熱による変質について,  $100^\circ\text{C}$  を超える温度を経験したベントナイト試料では, 顕微鏡レベルでのセメンテーションの観察や, 膨潤応力・透水係数・クリープ特性等の変化が報告されているとしている. 核燃料サイクル開発機構 (2005) では, さらに, 実験データが報告されている  $200^\circ\text{C}$  程度までを想定した熱的安定性を検討しており, 硬岩系岩盤では緩衝材最高温度

が100℃以上になる場合においてもイライト化の発生可能性は低い、シリカ・セメンテーションの発生可能性は高く、緩衝材の長期安定性に影響を及ぼすと予想している。また、軟岩系岩盤では緩衝材最高温度が100℃以上になる場合においてセメント溶液からのK<sup>+</sup>イオンの供給量によっては硬岩系岩盤のケースに比べてイライト化の発生可能性が増加し、またシリカ・セメンテーションについても発生可能性は高くなり、緩衝材の膨潤性の低下など長期安定性に影響を及ぼすと予想している。核燃料サイクル開発機構 C(2005)では、緩衝材最高到達温度が100℃を超える場合の緩衝材性能への長期的影響に関する知見が乏しく、定量的な予測は困難であるため、現状では核燃料サイクル開発機構(2000)と同様な熱的条件(緩衝材最高到達温度が100℃以下)が好ましいと考えられるとしている。

緩衝材最高到達温度は、処分坑道深度における地温・熱伝導率と処分場のレイアウト(廃棄体間隔・坑道間離間距離・緩衝材組成・緩衝材厚さなど)により規定される。また、緩衝材の熱的安定性には、処分深度の地質・地下水の組成や支保工の存否・材料組成にも影響される。このように不確定要素が極めて大きい、一般的な熱的条件としては人工バリアを構成する緩衝材の機能を低下させるような著しく高い地温(緩衝材最高到達温度が100℃以下)が概要調査で明らかとなった領域は避けることが好ましいと言う事ができる。

人工バリアに限らず一般的に熱環境に関しては、標準状態である298K以外の温度の熱力学データは不十分であり、より高温に外挿するほど信頼性が低くなるため(Kulik, 2002)、核種移行解析の不確実性を高くする要因となる。また、地温の高い領域に掘削されるボーリング孔では、物理検層に使用できる機器類にも制約が出るため、取得されるデータも制限されることになる。これらは安全評価の信頼性を低くする原因となる。

#### 【地化学特性】

人工バリアを構成するオーバーパック・緩衝材の長期的な安定性は、地下水の地化学特性、特にpH-Eh条件と溶存物質と密接に関連している。以下ではオーバーパックと緩衝材について、それぞれを別項で記述する。

##### a) オーバーパック

オーバーパックには、廃棄体を1000年程度の期間にわたって、地下水から完全に隔離する機能が求められている。オーバーパックの設計においては孔食やすきま腐食などの局部腐食の取り扱いが難しいが、地下環境下でこれらの局部腐食を全く起こさない貴金属をオーバーパックの素材として用いることは費用的に難しいため、局部腐食化の傾向が小さく、ある程度の速

度で全面腐食する準耐食性金属が素材として選択されることが多い。一方、高耐食性金属は金属表面に高い耐食性を持つ不動態被膜が形成されるため、不動態被膜が健全な限りほとんど腐食しないが、逆に不動態被膜が部分的であっても破壊された場合はその部分では局部腐食が選択的に進展するため、その取り扱いが難しいとされる。我が国ではオーバーパックの素材として、準耐食性金属として炭素鋼と純銅が、高耐食性金属としてはチタン系(純チタン・低合金チタン)素材が候補とされている。これら3種類の素材の特性は以下のようにまとめられる。なお、各素材の地化学的安定性についてはPourbaix(1966)などに体系的に記述されている。

- ・炭素鋼：使用実績に基づく設計データの充実、成形加工技術の確立、自らの腐食の進展により酸化剤を消費し還元性の環境をもたらず効果。
- ・純銅：還元的環境下における貴金属的性質、機械的性質は炭素鋼に劣る。
- ・チタン系：地下環境下において一般的に不動態被膜を形成する高い耐食性、不動態破壊型の陰イオンのうち最も一般的なCl<sup>-</sup>イオンに対する最も高い耐食性。

核燃料サイクル開発機構(2000 & 2005)は、これら3種類の素材と6種類のモデル地下水(降水系高pH型地下水、降水系低pH型地下水、海水系高pH型地下水、海水系低pH型地下水、混合系中性型地下水、セメントにより高pH化した地下水)と地化学反応について検討を行ない、以下のように総括している。

- ・炭素鋼：地下水のpHが5.7～13の範囲においては全面腐食が進展するが、地下水のpHが13程度を超える環境では、局部腐食が進展する可能性がある。また、一般的に廃棄体埋設直後の初期の不飽和期間に局部腐食が進展する可能性がある。[CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]イオンは炭素鋼の不動態化を促進し、不動態化臨界pHを低下させるため、[CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]イオン濃度が0.1mol/lを超える可能性のある環境では局部腐食が進展する可能性がある。[CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]イオン濃度が0.25～0.5mol/l以上の環境では応力腐食割れが起こる可能性がある。水素脆化については、炭素鋼に含まれる水素濃度にはpH依存性があり、pH4以上では水素濃度が急激に減少している。

- ・純銅：中性の地下水では、水や水素イオンは酸化剤として働かず熱力学的に安定しているため、廃棄体埋設直後の初期の酸化性の期間に局部腐食による貫通が起きなければ非常に長い腐食寿命が期待できる。硫化水素やS<sup>2-</sup>イオンが存在する環境では貴金属的性質が失われるため、高濃度のS<sup>2-</sup>イオンを含む環境(暫定的な目安として0.001mol/l以下)は好ましくない。同様に比較的高い濃度のNH<sub>4</sub><sup>+</sup>イオンを

含む環境（暫定的な目安として0.05mol/l以上）も好ましくない。HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>イオンは銅の不動態化を促進し、Cl<sup>-</sup>イオンやSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>イオンは活性溶解を促進するとされるが、地下水成分・濃度と孔食を生じる環境については今後の課題としている。

- ・チタン系：最高温度100℃以下では一般に孔食は発生せず、ASTM Grade-17やASTM Grade-7のチタンではすきま腐食は起こらない。[CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]イオン濃度が0.1mol/lを超える環境や地下水のpHが約13を超える可能性のある環境では、水素脆化が起こる可能性がある。

しかしながら、核燃料サイクル開発機構(2000 & 2005)が検討した6種類のモデル地下水うち、天然に存在する地下水を想定したモデル地下水のpH範囲はpH=5.7～8.5であり、またセメントにより高pH化したモデル地下水は前述した5種類の地下水がセメントとの反応によりpH=13.5程度まで強アルカリ性に傾いた条件を仮定した実験結果を検討したものであり、強酸性領域における実験結果が含まれていない点に留意する必要がある。

天然に存在する地下水のpHは、火山ガスなどの影響を強く受けた地下水でpH=0に近い強酸性～弱酸性の値を、またCO<sub>2</sub>を多量に含んだ深部流体の影響を強く受けた地下水で強酸性～弱酸性の値を示す。また、地表近くの酸化的環境下では黄鉄鉱の酸化により硫酸酸性となった地下水が存在する。核燃料サイクル開発機構(2005)は直接的な記述は行っていないが、一般的に強酸性環境下では炭素鋼や純銅などの素材は速やかに腐食される可能性が高いと考えられる。なお、強アルカリ性の地下水としては、超塩基性岩（およびその変質岩）と長期間反応した地下水が最高でpH=11程度の値を示すこと（金原，2005；一部未公開情報含む）が知られているが、核燃料サイクル開発機構(2005)に従えば炭素鋼やチタン系などの素材に対する化学的安定性に与える影響は小さいと考えられる。

炭素鋼やチタン系などの素材で問題となるような[CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]イオン濃度が0.1mol/lを超えるような環境は、CO<sub>2</sub>を多量に含んだ深部流体の影響を強く受けた地下水中に存在することがある。また、純銅素材で問題となるような高濃度のS<sup>2-</sup>イオンを含む環境（暫定的な目安として0.001mol/l以下）は、いわゆるグリーンタフ地域の新第三紀堆積岩中の地下水中に存在することがある。この他に、天然に存在する地下水の中には、火山ガスなどと反応し、特定の化学種が異常に多く含まれる場合がある。また、石灰岩や超塩基性岩（およびその変質岩）などの岩石と長期間反応した地下水も特定の化学種を異常に多く含む。油田かん水のように現在の海水よりも濃い塩濃度をもつ古海水起源の地下水も存在する。これらの異常に多く含まれ

る特定の化学種とオーバーパックとの反応特性については[CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]イオンとの反応特性を除き、一般に知見が乏しく、定量的な予測は困難であると考えられる。

#### b) 緩衝材

ベントナイトの主成分であるスメクタイトの変質には、温度依存性のみならずpH依存性が認められる。しかし、温度が100℃以下の条件ではpH=11の環境下においても溶解速度が遅く、2年までの変質試験において二次鉱物の生成も認められないとされており（核燃料サイクル開発機構，2000）、緩衝材最高到達温度が100℃以下という熱的条件下では緩衝材の特性に大きな影響を与える可能性は少ないと考えられる。なお、緩衝材間隙水のpHはベントナイト中に含まれる物質の反応により地下水のpHから若干変化することが知られている。例えば、廃棄体埋設直後の初期の酸化的環境の期間には、ベントナイト中に含まれる黄鉄鉱の酸化溶解反応が緩衝材間隙水のpHを低下させる。また、スメクタイト結晶端の酸-塩基解離反応は、等電荷点より高いpH条件では緩衝材間隙水のpHを低下させる。一方、地下水中に含まれるCa<sup>2+</sup>イオンによりベントナイト中に含まれる方解石が溶解され、緩衝材間隙水のpHを上昇させるとされる。

地下水中の溶存物質の在否・量は緩衝材の特性に大きな影響を及ぼす。例えば透水係数に関して、人工海水を用いて求めた固有透過度は蒸留水を用いて求めた固有透過度より1桁程度大きい値を示す（核燃料サイクル開発機構，2000）。従って、地下水中に溶存物質が多量に含まれる場合、緩衝材の特性に与える影響を考慮する必要があるが、一般にこの分野における知見は乏しく、定量的な予測は困難であると考えられる。

以上の地化学特性に係る既存の知見を概括すると、オーバーパック素材が3種類想定されているため地下水の地化学特性について確定的なことは言えないが、地下水のpHが4程度以下の環境や地下水の[CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]イオン濃度が0.1mol/lを超える可能性のある環境は、人工バリアを構成するオーバーパックや緩衝材の機能を著しく低下させる可能性がある。

### 第3章へのコメント

#### ● 将来予測について

(A 委員)

将来予測について、評価期間の設定により短期、長期、中期と区分されますが、それらは社会からの要求により設定されるものであり、底にはたとえば地震であれば、明日、明後日ということから避難場所や逃げ道の確認などを考え、数年ということから構造物の立地を考え、数万年ということから地層処分場の立地を考えるのだと思われます。逆に理学としての地球科学の立場からは、わが国のテクトニクスの歴史からどのような区分が可能かを探ることも重要かと思えます。評価期間の項で、現在の科学的知見でできる限り長い期間を、とあるのはまさにそのことを述べていると思います。社会からの要求に従うのであれば、評価期間はまだ決定されていないので、何か言おうとすると必ず疑問が出てきます。逆にわが国のテクトニクス(プレートシステムの変遷など)から時間の区切りを考えるとという発想はないのでしょうか?たとえば、六甲変動が活発化した50万年とか情報の密な最終間氷期であるといったような時間軸の設定はいかがでしょうか?何故第四紀なのか、地球科学的にはすぐには理解できません。

(編集委員会)

将来予測の信頼性を獲得するための方法論のご提案であり、地層処分を対象にした地質現象の将来予測研究の重要な課題であると受け止めています。なお、この技術資料で第四紀の変動履歴を対象にしていることについては、第2章の評価期間についてのコメントのところで説明したとおりで、100万年程度の将来予測をするには、少なくとも第四紀の変動履歴を把握しておく必要があるという考え方に基づいています。

#### ● 外挿法の適用と不確実性の問題

(A 委員)

「将来予測の手法」の第2パラグラフに記述されている、問題について、超長期だからデータの不確実性が大きくなるのか、データの粗密が問題なのか、その両方なのかがよくわかりません。データの粗密は本質的な問題であり、細かい議論はもともと無理といっているようなもので、求められる精度(空間的、時間的)にもよりますが、超長期では断片的なデータを繋いで議論を組み立てることに否定的で、地質構造発達史(地史のシナリオ)を考える(大家といわれる学者が考える?)ことが重要といっているように感じ取れます。あまりデータの粗密を強調しないほうがよろしいと思います。確かに第三紀といった時代までさかのぼれば、侵食などによるデータの欠如といった問題は確かにあると思いますが、過去のデータから将来を予測すると

いうスタンスは基本だと思います。そのようなつもりはないとは思いますが、少し気になります。Smithさんの議論を否定するものでは全くありません。外挿法において最も重要なのは外挿する根拠(何故外挿できるのか)が重要であり、そのためには現象の背景やメカニズムの理解が重要であることは間違いのないことだと思います。

(編集委員会)

不確実性は、評価すべき期間が長くなれば大きくなりますし、また、外挿に用いるデータが十分でなければ、将来予測は困難になります。このような状況の中で、将来予測をしなければならない場合に、地質現象に見られる法則性を用いるという考え方があり、そのために構造発達史の解明を行います。最後に述べられている外挿の根拠についてのお考えには全面的に賛同いたします。

#### ● 海面変化が地下水系に及ぼす影響

(A 委員)

海水準変動が地下水挙動(塩水淡水境界)に及ぼす影響について、現在太平洋炭鉱や池島炭鉱において現位置においてデータの蓄積がなされており、海水準変動と地下水水質の変化の議論がなされています。是非参考にされるといいと思います。

#### ● 火山・マグマ活動について

(A 委員)

火山・マグマ活動について:基本的な考え方は理解しました。ただし、評価項目に、「新たに火山が出現しうる地域」とありますが、そのような場所をどのようにして特定していくかに関する考え方について事例的に示すとわかりやすいと思います。Kondo et al.(1998)に示すような変動特性やKondo et al.(2001)(The Island Arc)に述べられているようなや百万年オーダーで火山群が生成、消滅するような傾向なども、今後の調査の中で明らかとしていくことが重要と考えます。

(編集委員会)

火山が新規に出現しうる地域をどのように特定するかについては、第4章の2.3火山マグマ活動「項目3:火山活動の時空分布調査と火山の新規出現性評価」のところで、具体的に記述しています。

#### ● 深部流体について

(A 委員)

深部流体について:基本的な考え方は理解しました。重要な項目と考えます。ただ、前に述べたように、地下水水質の変化というより地下水の上昇する動きその



ものが問題となると思います。そのために、どのような場所において流体が上昇するのかということをはっきりさせることが重要だと思います。どこでも湧出しているわけではないと思います。

(編集委員会)

深部流体の上昇場所における規則性については、これまでの研究で大きな構造線により流体の通路がコントロールされていることを突き止めています。有馬温泉は有馬一高槻構造線沿いであり、また、中央構造線に沿っていつかの箇所では深部流体の上昇が見られます。構造線のような地下深部にいたる大きな断層構造が、深部流体の通路となっていることは十分可能性が高いと考えていますが、深部流体の上昇地点で、そのような構造が見つからないところもあり、さらに研究が必要です。

(C 委員)

深部流体の挙動については、はっきりしていないと考えます。また、深部流体が放射性物質の閉じ込める機能についてもはっきりしていません。したがって、この(サイト影響考慮事項)についてはよく考えて表現する方がよいと思います。

深部流体と停滞水の違いをどこかで述べた方がよいと思います。停滞水は現在の温泉掘削からも明らかのように、かなり広範囲に分布しています。このようなものも考慮しなければいけないとなると、サイト選定が難しくなるからです。

(編集委員会)

本技術資料では、深部流体の定義に「深部上昇水」と「停滞水」の両方が含まれます。「停滞水」であるかどうかは、その年代を明らかにしておくことにより判定可能です。長期停滞水であれば、安全面で好ましい方向です。したがって、まず、対象地下水が「停滞水」であるのか「深部上昇水」であるのかの判定が重要であると考えます。影響の評価の上では、仮に「停滞水」であっても、「停滞水」に「深部上昇水」の成分がどの程度含まれ、どの程度供給があるのかを調査により明らかにすることが、重要であると考えます。詳しくは第4章「調査の進め方」に記述してあります。

### ● 泥火山について

(A 委員)

泥火山について：活動そのものに関する破壊的な活動は重要な評価項目と考えます。また、そのほかにも、地下深部から地下水を地表へもたらす(ピンポイントではなく広範囲に上昇をもたらす可能性がある)ことや、鍋立山トンネルのように膨潤性地山を形成し、空洞掘削時におけるトラブルの原因となる、また、建

設後の施設の破壊を招くといった「サイト影響考慮事項」としても考慮する必要があると考えます。

### ● 表現方法について

(C 委員)

“隔離性能に大きな影響・・・” どの程度を“大きな”とするのかははっきりしていないので、このような表現はしない方がよいと思います。他のところでもこのような主観的な判断がみられますので、注意して下さい。

(編集委員会のコメント)

定性的な表現で意味する程度が曖昧な表現については、基準がある場合は基準との関係がわかるように、また、およその目安がある場合はそれを表現に加える等、曖昧さを小さくする方向で修正しました。

### ● 確率論的研究の重要性について

(C 委員)

確率論的研究も重要であることをどこかで述べておく必要があるでしょう。

(編集委員会)

「将来予測の手法」のところでは、確率的な評価について触れ、統計的推論について述べています。確率論的評価は将来予測の評価において重要ですが、現実的に確率論的評価を行なおうとした場合、十分なデータが得られていないことや、データの取り扱い方に問題がある場合があるので、ここではそれらについて注意すべき点等について述べています。

### ● 放射性物質を閉じ込めておく機能

(C 委員)

“放射性物質を閉じ込めておく機能を著しく低下させる”

このような表現はあまりよくないと考えます。放射性物質を閉じ込めておく機能は安全性評価、ナチュラルアナログ研究などをしないといえないことであると思います。したがって、“将来放射性物質を閉じ込めておく機能を著しく低下させるような”を除き、“第四紀火山の周辺で、将来地下水系の変化あるいは・・・”としたらどうでしょうか。

(編集委員会)

「放射性物質を閉じ込めておく機能」の評価については、ご指摘のように安全評価で総合的に判断されるものと考えており、概要調査の結果からのみ判断すべきものではないと考えています。したがって、このようなことが懸念される事象は評価事項ではなく、サイト影響考慮事項の対象としています。なお、「放射

性物質を閉じ込めておく機能を著しく低下させるような」の文章中には、概要調査段階での判断が難しい「著しい」という表現がありましたので、文章を多少手直し、「機能を著しく低下させるような」を「機能に影響を与える可能性のある」に修正いたします。

## 第4章 調査の進め方

### 1. はじめに

概要調査での具体的な調査内容を記述したこの章では、まず、第2章で設定した長期変動（外的要因）に関する6つの調査・評価項目、侵食・堆積及び海面変化、地震活動、火山・マグマ活動、深部流体、泥火山、マスマーブメントに対応させて、調査の進め方を記述している。次に、地質環境の調査について網羅性を持たせつつも、地下水シナリオでの安全評価に必要なデータの取得を中心にして記述し、最後に、地下水システムの解析と概念モデルの構築について述べている。

長期変動に関する調査の節では、活動の将来予測及び影響評価について、具体的にどのような手法で予測を行なうのか、また影響範囲をどのように評価するのかについて、現実的に実施可能な方法を記述している。調査において取得する基本的なデータは過去の活動履歴に関するものであり、将来の予測は活動履歴をもとに外挿法で行なう。現象のメカニズムの解明も重要であり、それは将来予測をより信頼度の高いものとする。また、影響範囲の評価においても、現象のメカニズムを理解することは必要である。この節には、それぞれの項目ごとに将来予測及び影響評価についてのこのような論理展開が具体的に述べられている。

次に、地質環境の調査の節では、閉鎖後の安全確保に向けたサイト選定と安全評価に必要な調査は網羅するという視点から、調査事項の選択を行なっている。この節は概要調査で対応できる調査法を一覧できるような構成になっており、それぞれの調査法についてその概略が述べられている。調査事項に漏れがないようにする意味から、地質環境の調査の中には長期変動に関する評価事項・考慮事項に関連する調査法も含まれているが、主たる内容は地下水シナリオでの安全評価のために必要となるデータを取得するための各種の調査法である。また、概要調査は初めて現地からのデータを取得する調査であるとともに、坑道掘削により地下の状態に大きな変化が生じる前に行なわれる調査であるので、ここで述べた調査により、対象となる地域のベースラインに相当するデータが取得できる。なお、ここで取り上げた調査法の中で、地層処分に限らず広く実施されている調査手法に関しては、簡略な記述にとどめている。

最後に、調査結果の解析について、地下水システムの概念モデルの構築を柱にして記述した。安全評価に進むためにはモデルの数値化が必要であるが、この技術資料ではそこまで踏み込んでいない。精密調査の計画立案に活用できるような概念モデルを構築することに主眼をおいている。

### 2. 長期変動（外的要因）の調査

#### 2.1 侵食・堆積及び海面変化

調査・評価項目：侵食・堆積及び海面変化

●（概要調査評価事項） 予測侵食量が埋設深度以上になり、廃棄体が地表に露出する可能性のある地域は、避ける必要がある。→2.1（1）

◎（サイト影響考慮事項） 隆起・沈降および氷河性海面変化による相対的海面変化により、将来放射性物質を閉じこめておく機能に影響を与える可能性のある地下水の流動あるいは水質の変化が予想される地域は、相対的海面変化の影響について考慮する必要がある。→2.1（2）

◎（サイト影響考慮事項） 隆起・沈降に影響を与えるテクトニクスについては、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。→2.1（3）

将来にわたる侵食堆積活動及び海面変化の影響評価のために、以下の項目について科学的調査を行う必要がある。

- 1) 変動地形学的手法による過去の侵食・堆積量の定量化と将来予測
- 2) 海面変化による過去の地下水系変化の把握と将来予測
- 3) テクトニクスの長期安定性評価

（1）変動地形学的手法による過去の侵食・堆積量の定量化と将来予測

##### 【調査の目的】

本調査では、過去の侵食・堆積変化履歴から、将来の侵食量を予測することを目的としている。侵食・堆積作用は地球上のあらゆる地点で起きている地質現象である。緩慢な現象であるため短期的には問題とならないものの、数万年を越える長期の将来予測では地表に無視できない影響を及ぼし得る。特に埋設物と地表との接近をもたらす侵食作用は、その量が埋設深度に対して十分大きい場合には地層処分の隔離性を著しく阻害し得るし、極端な場合には埋設物が地表に露出してしまう。テクトニックな隆起運動や海面変化による侵食基準面の低下は陸域での侵食作用を加速させるので、両作用の大きな地域では将来の侵食量もこれらに合わせて大きくなる。10万～100万年先の将来の侵食量を予測するためには、変動地形学的手法によって対象地域における侵食—堆積量変化履歴を明らかにし、これを将来の評価期間に外挿することが基本となる。

##### 【調査の内容】

侵食—堆積量変化履歴を求めるためには、野外で過去に形成された指標地形面（ただし、風成被覆層を除

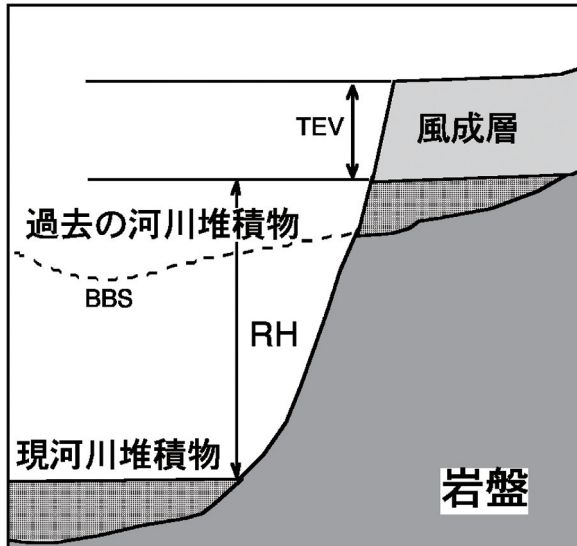


図 4-1 過去と現在の河川氾濫面の比高 (RH) と経過時間が決まれば、河川侵食・堆積履歴が復元できる。

いたもの)と現在の地形面とのオフセット量を計測すること、指標地形面を編年する変動地形学的手法(太田, 1999; Burbank & Anderson, 2001)が基本となる(図 4-1)。地形面には河成や海成の堆積面・侵食面以外にも、火山活動で形成された地形面や巨大マス・ムーブメントがつくる地形面など様々なものがあり、いずれも有効な変化履歴の指標となり得る。ただし、計測に用いる地形面がどのようにして形成されたかの成因を明らかにしておくことが、計測値を吟味する上で絶対必要である。侵食-堆積作用には、気候変化による碎屑物供給量の変化や、テクトニックな隆起沈降と氷河性海面変化による相対的海面の変化がすべて関与しているし、更には過去の地形面にはテクトニックな変形が累積している。侵食-堆積量変化履歴から将来を予測するためには、これらの外因を考慮に入れた解析を行わなければならない。特に河成や海成の堆積面・侵食面の場合には汎世界的な海面変化(ユースタシー)に重点を置いたシーケンス層序学に基づいた堆積学的解析(例えば Posamentier & Vail, 1988; 酒井ほか, 1995)が地形面形成過程の解釈に有効で、その結果、地形面オフセット量からテクトニックな隆起沈降量が分離出来る。指標地形面が侵食面である場合は、地下に埋没していることが多いので、反射法地震波探査による地下分布形態の把握やオールコアボーリングによる地形埋積堆積物の採取・解析が必要となってくる。さらに、過去の侵食-堆積変化履歴を将来に外挿するためには、少なくとも1回以上の氷期-間氷期サイクル(約10万年)を経た指標地形面を用いることが必要である。なぜなら氷期-間氷期サイクル内では、海面の変化や降水量変化が一定でないことは明らかで

あるので、1サイクルに満たない侵食-堆積変化履歴を将来に外挿しても正しい長期予測値とはなり得ない。また将来10万~100万年の期間を念頭に置けば、より多くの氷期-間氷期サイクルを経た侵食-堆積変化履歴が明らかにされていることが望ましいことは、当然である。

地形面の編年では、地形面形成層や被覆層から年代を直接示すデータを取得しなければならない。すなわち、既存文献での段丘面の対比では、段丘の標高分布から年代が推定され、比高と年代が独立の変数として与えられていないものが多い。このような段丘の比高を使って隆起・侵食速度を求めることは、循環論的矛盾を孕んでいることを注意しなければならない。地形面形成層や地形面埋没層が5万年前よりも若い場合には、堆積物中の炭質物や貝殻を使った放射性炭素年代測定が地形面の編年に有効である。また、地形面形成層や被覆風成層中にはテフラ(降下火砕堆積物やその再堆積物)が挟まれておることが多く、テフラ構成物の岩石学的特徴から広域テフラ(町田・新井, 1992)が同定できれば、その既知年代を使って地形面を編年できることがある。ただし、鍵層として特徴が記載されたテフラや各種手法により年代の決まっているテフラはそれほど多くはない。調査地域によっては、広範囲にわたるテフラ分布の追跡やテフラ中の微量構成物を使った放射年代測定が地形面の編年に必要となってくる。

【調査における留意点】

将来予測に必要な第四紀後半の侵食-堆積量データの分布は、地域毎のバラツキが大きく、データの空白域もなお多い。特に内陸部では基準となる指標地形面が保存されにくいこと、海岸部でも最終間氷期最盛期(12.5万年前)以前の地形面は信頼に足る編年データに乏しいことなど、解決すべき課題は多い。

- ・ 内陸の山間部では、谷沿いの斜面に明瞭な地形面を残さないまで開析された河川堆積物の残骸が見つかることがある。空中写真判読ではほとんど認識できないものであっても、現地の地表踏査で堆積物の存在は確認できる。すなわち、斜面に円磨された礫の転石がある場合は、斜面上方にそのような堆積物が存在しよう。断片化した河川堆積物の対比・編年には、被覆風成層中のテフラの同定がここでも有効である(例えば Yamamoto, 2005)。年代の異なる河川堆積物面の比高変化は、そのまま河川下刻速度に換算することができる。被覆風成層中に編年に有効なテフラがほとんど含まれない場合は、風成層堆積物の帯磁率垂直変化を気候変動曲線と対比することによって、氷期-間氷期サイクルを認識することも可能である(Kimura et al., 2001)。
- ・ 地域によっては地形面の編年に有効なテフラや被

覆風成層がほとんど見つからないこともあり得る。そのような場合でも堆積相解析によって相対的な海水準変動曲線が復元できたり、産出化石による古環境解析から氷期-間氷期サイクルが復元できるなら、これを酸素同位体比変化曲線（大陸氷床の消長による酸素同位体比 $\delta$  18Oの変化を示す）に対比して編年を行うことは可能である。ただし、その信頼性は独立に年代が決まっているケースよりも低くなる。

#### 【将来予測の手法と留意点】

評価対象地域で得られた過去の侵食—堆積量変化履歴は、氷期-間氷期気候変動と隆起・沈降作用の合わさった結果である。これを将来の評価期間に外挿するためには、以下のことに留意しておかなければならない。

- ・氷期-間氷期サイクルは、約100万年前に約4万年周期から約10万年周期へと変化した。4万年周期はミランコビッチサイクルのうち自転軸の傾き変化に対応するものであるが、現在の10万年サイクルはこの外力に対して非線形な応答になっている。酸素同位体比変化曲線に見られる鋸波状の変動は、この非線形性によるものであろう。このことは次の氷期がいつ始まるのか、どのように変化して次の間氷期に至るのかの予測が困難なことを意味している。さらには、人為的なCO<sub>2</sub>の排出がもたらす気候の温暖化が、将来の気候変動に及ぼす影響も予測することが困難で、氷期-間氷期サイクルの周期自体が変化してしまうことも十分あり得よう。しかしながら将来100万年の期間を念頭に置けば、人為的CO<sub>2</sub>排出の影響もいずれは吸収され、固有周期の氷期-間氷期サイクルが繰り返されるものと考えられる（SKB, 2004）。従って将来予測では、将来の発生時期を特定することなく、氷期-間氷期サイクルにおける最大海面低下量（内陸では最大下刻量）を常にユースタシーによる最大侵食量として見込んでおく必要がある。海面低下量をもっとも大きかったのは海洋酸素同位体ステージ12と16で、地殻変動が安定な地域では-140mまで低下したとされている（小西・吉川, 1999）。
- ・地域によっては指標地形面から遡れる侵食—堆積量変化履歴が、評価期間に対して不十分なくらい短い場合（例えば将来100万年の評価期間を考えた際に、得られた変化履歴が過去10万程度しかないケース）もありえる。短い侵食—堆積量変化履歴から求めた隆起・沈降速度を将来に外挿するためには、他の地質学的証拠に基づく隆起・沈降速度の見積もりや当該地域周辺の大局的な地殻変動の傾向との整合性を取らなければならない。特にこのようなケースでは次の調査項目であるテクトニクス長期安定性が同

時に示されている必要がある。

#### 【評価における留意点】

侵食速度の安全指標は、埋積深度と評価期間の長さ依存する。例えば将来100万年を評価期間、埋積深度を300mとすると、30m/10万年以上の侵食速度で評価期間末に地表に露出することになる。海洋酸素同位体ステージ5e（12.5万年前）の海成段丘高度から求められた最近の平均変位速度分布を参照すると、日本列島の多くの地点は30m/10万年以上の隆起速度を持つことが指摘できる（小池・町田, 2001）。また海岸部では氷期の海面低下がもたらす侵食量もこれに加算しなければならない。侵食速度の指標は埋積深度と評価期間次第であるが、日本列島のような変動帯では、安全評価において問題となりうる地域が多いことを念頭に置いておく必要がある。

#### (2) 海面変化による過去の地下水系変化の把握と将来予測

##### 【調査の目的】

海水面の変化は、主に氷期—間氷期の繰り返しによりもたらされ、その変動の幅は100m以上になる。海水面は、地下水流動の最終流出点のポテンシャルとなるため、その変化は流動そのものに大きな影響を与える。一般に海水面が低下すると深層地下水の流動系は活発化する。また、海水面の変化により陸地面積も大きく変わるため地下水流動系が変化することも重要である。したがって、長期の将来予測のために過去の地下水系変化を調査し、海面変化との関連を明らかにしておく必要がある。

##### 【調査の内容】

評価対象地域及びその周辺において、処分地に関係するあるいは影響を及ぼすと考えられる帯水層（もしくは亀裂性地下水）について、現地地下水調査を実施し、その地下水の起源、混合過程、年代等を明らかにする。一方で、掘削調査等により調査対象とする帯水層（もしくは亀裂性地下水）の水利特性についても、透水性、大きさ、広がり等に関する調査を行う。また、地球化学的に決定される地下水の起源、年代やそれらの特徴の空間分布が、帯水層の水利特性の分布と矛盾がないことを確認する。

##### 【調査における留意点】

氷期—間氷期サイクルによる海面変化は、約10万年間隔で繰り返される。そのような超長期の変動の影響を調べるためには地下水年代も相当に古い年代まで測定が行われる必要があるため、希ガスを用いた年代測定法等が有効である。地下水は絶えず流動しているため、過去の履歴が証拠として残りにくい。たとえば、

平均滞留時間 100 年の地下水からは 1000 年前の情報  
を抽出することはできない。評価対象期間が超長期に  
わたる場合は、この点が予測の不確実性になって現れ  
てくると考えられる。しかし、地下水年代は化学トレー  
サを用いて測定される場合には、平均滞留時間で表さ  
れるため、地下水流動に影響を与える事象（ここでは、  
海面変動）の繰り返しパターンが想定される場合には、  
その周期以上の年代測定値が得られれば、十分な時間  
軸の長さで流動に関する将来を予測することが可能で  
ある。その結果を将来予測に用いるためには、以下の  
点について注意あるいは調査する必要がある。

- ・ 最も新しい海面変化は約 18000 年前から約 6000 年  
前までの期間に急激に生じた 120m に達する海面上  
昇である (Bassinot et al., 1994; 米倉ほか, 2001)。  
それ以前では約 10 万年前から海面が徐々に低下し  
た。現在は海面が高いため、深層地下水流動は最も  
不活発な時期にあたる。この事実から、たとえば数  
千年の平均滞留時間を持つ地下水がたとえ見つか  
ったとしても、これは海面の高い流動の遅いときの地  
下水であって、それ以上の外挿はできないことに注  
意しなければならない。逆に、数万年の平均滞留時  
間を持つ地下水が見つかった場合は、海面が低下し  
ていた時期であっても地下水流動が比較的緩慢であ  
ったことを示す有力な証拠となる。
- ・ 海面変化の影響は、海岸部と内陸部で大きく異な  
ることに注意しなければならない。現在の海岸部は、  
陸域に存在する地下水流動系の流出域となっており、  
深い場所に存在する地下水は安定しているという考  
え方がある。しかしながら、将来、海面が再び低下  
したときには、流出域ははるか遠方の海岸になり、  
現在の海岸部は、浅深度においては不飽和化が進行  
し、深々度では活発に流動するようになる（北海道

を除く）。海面の変動の将来予測は正確に行うこと  
が不可能であるから、海面変動の影響も大きな不確  
実性を持つことが避けられないであろう。

- ・ 北海道においては、最終氷期に全域が周氷河とな  
り永久凍土化したと考えられている (図 4-2)。永久  
凍土は涵養を妨げるため、地下水流動は全く異な  
ったものになると予想される。すなわち、海への地下  
水流動は停止し、海岸部等の流出域においては、地  
下水系への海水の侵入が顕著になると考えられるの  
で留意する必要がある。
- ・ 内陸部においては、海岸部と比較して、海面変動  
の影響は少ないものと考えられる。影響の度合は、  
地質構造や帯水層の分布などの状況により大きく異  
なると考えられるので、必要であれば、広域にわたり  
地下水流動系を明らかにする調査を行った上で海面  
変動の影響の見積りを行う必要がある。
- ・ 海面の変動に伴う地下水流動系の変化により、地  
下水水質の変動も予測される。海面が低下し地下水  
流動が活発化すると、塩水であった海岸部の地下水  
の淡水への置き換わりが促進される。逆に海面が上  
昇した場合、淡水であった海岸部の地下水が海水の  
浸透により塩水化することが予測される。淡水-塩  
水の相互作用の予測は、地下水の流動速度・塩水の  
浸透速度（地下水の置き換わり速度）と海面変動周  
期の予測に依存する。上述のように海面変動の将来  
予測の不確実性に加え、地下水流動速度の見積り誤  
差が加わるため海水面の変動に伴う地下水水質変化  
の予測は大きな不確実性を持つ。なお、青函トン  
ネル掘削中に得られた海底下において、淡水と海水の  
様々な混合による地下水が実際に発見されている  
(Mizukami et al., 1977)。

【将来予測の手法と留意点】

海面変動の正確な将来予測が難しいため、過去 100  
万年間に存在した海面変動と類似したパターンが繰り  
かえされるものとして、影響を考えることになる。そ  
のためには、少なくとも最終間氷期から現在までの海  
面変動により生じた影響がわかっている必要がある。  
従って将来予測では、将来の発生時期を特定すること  
なく、氷期-間氷期サイクルにおける最大海面低下量  
を常にユースタシーによる最大値として見込み、これ  
に地殻変動による海面変化量を加えて、地下水系への  
影響評価を行うことになる。

【評価における留意点】

現在の海面の高い時期では、深層地下水の流動が遅  
い。したがって、現在の値をそのまま将来へ外挿する  
と問題を生じる。このきわめて重要な問題をクリアす  
る唯一の実証的手法は、地下水年代を求めて、超長期  
にわたる過去の地下水系の状態を明らかにすることで

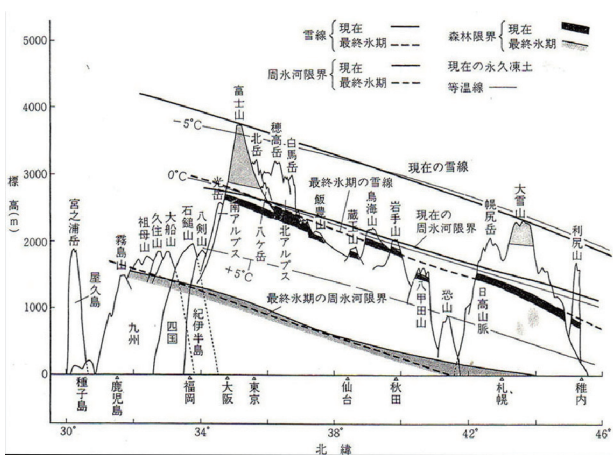


図 4-2 現在と最終氷期の雪線と周氷河限界の分布 (米倉  
ほか, 2001)

ある。数万年よりも古い地下水年代が得られる場所は、海面が最も下がった（流動の最も活発な）時期における地下水流動を反映していると考えられる。数千年程度の年代値しか得られない地域は、外挿はもとより、海面が下がったときの流動速度を直接推定できないため、予測不確実性の観点から望ましくない。地下水年代が古いほど、望ましいのは明らかである。

### (3) テクトニクス長期安定性評価

#### 【調査の目的】

ある地域で過去の侵食・堆積速度が定量化できたとしても、過去の計測値をそのまま一定値として将来に外挿するためには、評価期間内に一定の隆起沈降運動が仮定できるほどテクトニクスが十分安定であることも同時に示しておく必要がある。テクトニクスの安定性は、地層処分のような長期の将来予測において必須の条件である。そのためには、評価期間以上の過去に遡ってその変化履歴を明らかにしておく必要があるものと考えられる。

なお、地震活動、火山マグマ活動、深部流体の活動の評価にも、テクトニクスの安定性の評価を考慮しなければならないことは、すでに述べてきた通りである。そのために調査は以下に述べる内容と共通するものである。

#### 【調査の内容】

地層の長期安定性を評価できるようなテクトニックモデルを構築するには、現地調査によって評価対象地域及びその周辺で起きている傾動や曲動などの地殻変動が、合理的に説明できる地質構造発達史を復元する。具体的には、変動地形学的に決まる隆起・沈降の傾向や速度が、周辺の断層運動や地層分布から復元される地質構造発達史と矛盾なく整合すること示す必要がある。それとあわせて、対象地域におけるテクトニックモデルを構築しようとするとき、以下のことを明らかにしなければならない。

- ・ 対象地域のテクトニクスはどんな活動だったのか？（様式を知る）
- ・ 対象地域のテクトニクスによる地層の変形領域はどのくらいか？
- ・ 対象地域のテクトニクスによる地層の変形は、どのくらいの規模なのか？（cm オーダーなのか、それとも m オーダーなのか）
- ・ 対象地域の地層はどう変形したのか？（応力・歪みを知る）
- ・ 対象地域のテクトニクスの変化がいつ起きたのか？（何回起きたのか？どのくらいの時間間隔で起きたのか？）

これらの課題を解決するためには、長期的な地質学的時間スケールでの時間・変形モデル・力の情報

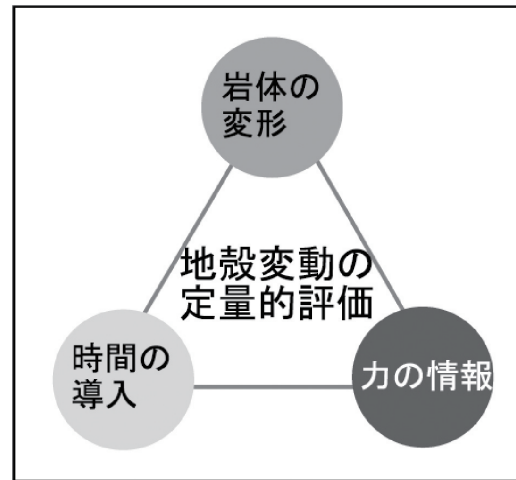


図 4-3 テクトニックモデルを構築するには、三つの要素が必要である。

が必要となる（図 4-3）。そのためのデータは、地表に露出する地層の中に記録されているメソ・ミクロスケールの変形構造を利用することで格段に向上する。これらの変形構造を用いることによって、マクロスケールの地殻変動をより詳細な空間分解能で把握することができる。その一つとして、露頭やボーリングコア規模で変位量がわかる小断層から地殻応力を推定する方法がある。小断層を用いた応力解析では、幾何学的インバージョンによって時代や原因となる応力場の異なる小断層群を分離することが可能であり（Yamaji, 2000; Otsubo & Yamaji, 2006; Otsubo et al., 2006）、上記の課題解決には不可欠の手法である。

#### 【調査における留意点】

- 地質構造発達史は、評価対象地域において総合的な地質調査が実施されれば、自ずと復元されるものである。しかしながら、必要とされる将来予測に答えるためには、以下のことについて考慮しなければならない。
- ・ 例えば将来 100 万年を評価するのであれば、評価期間内に大きな地殻変動の傾向に変化が起きないであろうことが判断できるのに十分な過去（数 100 万年程度ないしはそれ以上）まで遡ると同時に、十分な時間分解能で地質構造発達過程を明らかにしておく必要がある。この調査は、例えば指標地形面から遡れる侵食—堆積量変化履歴が評価期間に対して不十分なくらい短い場合、これを外挿することの妥当性を担保する目的を持っている。それゆえ、地層処分対象地域における地質構造発達史の復元は、評価期間の時間的長さ以上に遡っておく必要がある。
  - ・ 地質構造発達史を復元するためには、必要とされる時代に形成された地層を調べることが必要となる。そのため、評価対象地域内にこのような地層がない

場合には、地層が分布する範囲まで調査対象域を広げなければならない。

- ・ 応力場の変化年代は、例えば断層と地層との交差関係などから間接的にしか決まらない。また、隆起・沈降運動の変化年代なども、地層の堆積相変化などから間接的に求められる。地質構造発達史の時間分解能を上げるためには、これら層序関係の詳細な記載や鍵層の年代決定が不可欠である。
- ・ 断層活動様式の把握のために、断層亀裂のタイプを把握し、さらに断層間物質とその微細構造の詳細な記載も必要に応じて行う。

#### 【将来予測の手法と留意点】

現在の第1次オーダーの広域応力場は、プレート境界にかかる応力に規定されると考えられている(Zoback, 1992)。その成果は、World Stress Mapとしてまとめられている([http://www-wsm.physik.uni-karlsruhe.de/pub/home/index\\_noflash.html](http://www-wsm.physik.uni-karlsruhe.de/pub/home/index_noflash.html))。現在のプレート運動方向が海洋地殻の地磁気異常から決定される平均運動方向(Argus & Gordon, 1990)とほぼ一致することは、現在の第1次オーダーの応力場は数百万年前から変わらないことを示唆する。現在日本列島下には、太平洋・フィリピン海両プレートが沈み込み、伊豆半島の付け根で本州弧と伊豆・マリアナ弧の衝突が起きている。このようなテクトニクスの枠組みは、日本海拡大直後の約1500万年前に出来たものである。仮に評価期間が将来100万年であるとしても、これら日本列島を取り巻くプレートの配置、相対運動に大きな変化が現れるとは考えにくい。運動速度の大きな太平洋プレートでも、10cm/年の速度では、評価期間で水平100kmの移動を考えるだけで良く、日本列島の応力配置に重大な影響を与えるような新たな衝突テクトニクスも起こりえない。

一方、日本列島下の下部地殻やウェッジマントル内で起こる変動が、将来100万年で応力場配置に変化をもたらす可能性を検討しておく必要がある。例えば中部地方の飛騨高原から近畿三角帯下では、マントル最上部の高密度層が地殻から剥がれること(デラミネーション)により、鮮新世の初めから第四紀にかけて地殻変動の大きな変化が進行したと考えられている(池田, 1999)。また、ウェッジマントル内の対流による高温マントルの局所的な上昇が、地表の隆起運動にも影響を与えることが指摘されている(Tamura et al., 2002)。高温マントルの上昇が大規模に起きた場合には、背弧拡大へと至る可能性がある。日本周辺における現在拡大中の背弧海盆として、琉球弧と伊豆・マリアナ弧が存在する。琉球弧では、第四紀に広域応力場の大きな変化が起きている(Otsubo & Hayashi, 2003)。原因の一つとして、第四紀における背弧海盆(沖縄トラフ)の拡大が活発になったことが考えられる。

しかしながらこれらの現象も、前述のマントルの流動からして10万～100万年の期間に突然出現するとは考えにくく、現在の地球物理学的な観測でその傾向は捉えられよう。日本列島下の地殻-マントルの構造については、地震波トモグラフィーの進歩により詳細な解析結果が蓄積されつつあるので、これらの成果もテクトニクスの将来予測で考慮しておく必要がある。

#### 【評価における留意点】

テクトニクスが安定していても、地殻変動量が大きい地域は、侵食のところで述べた評価基準により排除されることは当然である。一方、将来の地殻変動に変化が予測される地域は、地質学的な外挿による将来予測の前提が崩れるので、評価は著しく困難になる。また、地殻変動履歴が複雑な地域では、将来の安定性が確実に予測できない場合がある。評価期間に対して十分な地殻変動履歴が復元できない地域においても、将来の安定性が確実に予測できない。これら将来予測に伴う不確実性の大きい地域では、安全評価において十分な考慮が必要である。

## 2.2 地震活動

#### 調査・評価項目：地震活動

- (概要調査評価事項) 第四紀に活動した断層の存在が明らかとなった地域では、断層沿いのずれ破壊により廃棄物が直接破損する可能性があり、その断層の影響が及び範囲は避ける必要がある。→2.2 (2)
- ◎ (サイト影響考慮事項) 第四紀に活動したものでなくとも、地表やその地下に大規模な断層が存在する場合は、その断層の再活動や誘発変位の可能性が想定されるので、ずれ破壊の影響が及び得る範囲を考慮する必要がある。→2.2 (2)
- ◎ (サイト影響考慮事項) 地震活動により、将来放射性物質を閉じ込めておく機能に影響を与える可能性のある地下水の流動あるいは水質の変化が予想される範囲では、地震活動の影響を考慮する必要がある。→2.2 (3)
- ◎ (サイト影響考慮事項) 地震活動に影響を与えるテクトニクスについては、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。→2.2 (1) 及び (2)

将来にわたる地震活動の影響評価のために、以下の項目について科学的調査を行う必要がある。地震活動の様式に変化を与え得るテクトニクスの変化についての調査は、2.1 項 (3) 「テクトニクスの長期安定性評価」で記述した内容を適用する。

- 1) プレート境界地震の影響評価
- 2) 活断層の活動履歴と影響範囲評価
- 3) 既存断層の再活動性評価



## (1) プレート境界地震の影響評価

## 【調査の目的】

プレートの沈み込み帯に位置する日本列島では、最近110年間でM7程度以上のプレート境界地震が100個以上発生している。その具体的な影響としては地震動による処分施設への影響や、地震時の地下水変化が考えられる。地震動については地下ほど最大加速度が小さくなる傾向が一般的に確認されており、適切な施工がなされれば地下施設に深刻な影響を及ぼさないものとみられる。ただし、地震動で発生する大規模な斜面崩壊については、処分施設の設置場所によっては埋設物と地表との接近や新たな地下水移動経路の形成をもたらすケースがあり、その評価は2.6項「マス・ムーブメント」で行う。一方、処分地深度では地下水は基本的に被圧地下水（難透水層に挟まれた対水層や岩盤の割れ目系に存在する地下水で自由表面をもたない地下水）であると考えられる。過去の地震後の地下水変化の調査においては、このような被圧地下水の変化と不圧地下水（自由水面を持ち、その水面上の圧力は気圧と等しい地下水）は必ずしも区別されておらず、地震前の長期にわたる精度良いデータの蓄積もないことが多かったため、その評価は十分なものではなかった。

大地震発生時には、陸域の地下水が大きく変化する場合が多い。これは、安定大陸内に処分地の建設を検討している諸外国では見られない特徴である。したがって、放射性廃棄物地層処分の日本における安全確保のためには、このような大地震に伴う地下水変化を適切に把握する必要がある。すなわち、地震が地下水流動系に与える影響の評価のために、地下数m～1000mの深度における地震時～地震後の地下水変化の適切な評価（将来予測とその限界の提示）が必要である。本調査では、プレート境界で生じる巨大地震による地震動が深層地下水系の水理環境に与える影響の評価のための観測調査を行い、影響の将来予測を行う。

## 【調査の内容】

上記の目的を達成するために、以下のa)～e)の項目の調査が必要となる。

## a) 定常的な地下水変化の正確な把握（地震以外の要因による地下水変化の適切な評価と除去）

地下水流動を支配するのは、動水勾配・透水性・比貯留率（地層や岩盤における地下水の貯留能力を示し、比貯留係数ともいう。）と境界条件である海や川・湖等の水位である（ドミニコ・シュワルツ, 1995）。境界条件と3次元的な動水勾配や透水性・比貯留率の分布が把握できれば地下水流動は予測できる。3次元的な動水勾配を把握するために、候補地において、深さ数m～1000mの範囲で深さの異なる地下水の水頭を、広く面的に連続観測する。他方、候補地周辺における

既存の地下水観測データや地下水変動に関する文献を収集し、地下水が長期にわたってどのように変動してきたかを把握する。一方、それらの観測点（観測井戸）で、適宜揚水試験を行って、その観測井戸周辺の帯水層における透水性や比貯留率を明らかにする。透水性や比貯留率は地質構造によって大きく変化するので、ボーリング調査も含めた地質構造調査を行って、3次元的な地質構造を明らかにする。ボーリング調査で得られたコアを試験することで帯水層以外の地層や岩盤での透水性や比貯留率のデータも得ることができる。表層部や深部からの水の出入りの評価に関しては、水温や水質（溶存ガス含む）の情報が重要である。水温は水位とともに連続観測を行う。また、水質に関しては、長期の安定な連続観測が一般に難しいので、上記地下水観測点において定期的な採水と分析を行って評価する。以上の結果をもとに3次元的な透水性・比貯留率の分布を明らかにする。

地震以外で地下水変化をもたらすのは、一般に降雨・気圧・（人工）揚水・地球潮汐や河川・湖水・海水の水面変動等である。降雨・気圧や河川・湖水・海水の水面についても連続観測を行う。大規模な地下水揚水が行われているような場所は、本来、候補地から除外されるべきであるが、必要に応じて揚水の情報も把握する。地球潮汐については詳細な理論値が得られるので特に観測の必要はない。

以上から、定常的な地下水変化をもたらす要因（入力）の情報と、それが入力されるシステムの情報および出力（地下水変動）の情報が得られるので、定常的な地下水変化の正確な把握・評価が可能となる。それに基づいて、定常的な地下水変化を除去することも可能となる。

なお、上記の調査内容については、3.5項「水文調査・気象観測」、3.7.2項「掘削調査関連技術」、3.11項「室内試験・測定」で詳細に述べられているので、それらの項目を参照されたい。

## b) 地震に伴う地下水変化の正確な把握

上記地下水観測網によって、地震時の地下水変化を観測する。また、既存の地下水観測データや地下水変動に関する文献からも、地震時の地下水変化について情報を得る。以上の結果とa)で得られた情報から、地震時の地下水変化に関して正確な定量的評価ができる。

## c) 地震によってもたらされる地下水変化のメカニズムの解明

一般に地震時の地下水変化の主な要因は、地震時の体積歪変化・高度変化（地盤の隆起や沈降）と地震動による透水性・比貯留率の変化や液状化と考えられる。液状化を地震動によるスケンプトン係数B（徳永、

2003) (ある場所における間隙水圧と平均応力の比、その場の弾性定数によって決まる) の変化と再定義すれば、液状化は、未固結堆積層だけではなくどこでも起こり得ることになる。地震時の体積歪変化や比貯留率の変化・液状化は、その場の間隙水圧の変化をもたらす。透水性の変化は動水勾配を変化させる。高度変化は、境界条件として位置づけられる河川・湖水・海水の水位が相対的に変化することを意味する。

地震時の地下水変化は、上記5つの要因が複雑にからみあって生じるが、以下のような方法でそれぞれの要因に分離して評価する。地震に伴う地下水変化の回復過程を考える場合、困難ではあってもそれぞれの要因に対して変化量を見積もっておくことは重要である。

地震時の体積歪変化(それに基づく間隙水圧変化)や高度変化は、地震の断層モデルからある程度理論的に求めることができる。日本においては、GPSの全国観測網があるので、高度変化の実測値を高精度で得ることができる。以上をもとに、地震時の体積歪変化や高度変化に基づく地下水変化については定量的な評価が比較的簡単にできる(Akita & Matsumoto, 2004; Sato et al., 2004; 小泉, 2004)。

透水性変化・比貯留率変化や液状化は、地震動の強さや地質構造に起因して局所的に生じるのでその評価が難しい(Wang et al., 2001; Lai et al., 2004)。地震後に観測点で揚水試験を再度行えば、その観測井戸に水を供給する帯水層に関しては透水性・比貯留率の変化を把握することができる。再度の揚水試験が困難な場合は、地震後の通常時の水位変化(降雨・気圧変化等による変化)を解析することで透水性・比貯留率の変化を把握することが可能である。難透水層や不透水層が一部破壊されてあらたな水みちができる(すなわち、帯水層以外の部分でも、3次元的に透水性・比貯留率の分布が変わる)こともある。これについては、上述の調査に加えて、温度や水質の時間的な変化を把握することである程度評価が可能である。液状化については、気圧変化に伴う地下水位変化の解析によってスケンプトン係数の把握が可能である。また、地震後の地表調査(液状化の調査)および地質構造や短周期地震動(地震加速度)の情報からも液状化の状況の把握ができる。

#### d) 地下水変化メカニズムに基づく地下水変化予測モデルの作成

地震時の体積歪変化、高度変化、透水性・比貯留率の変化、液状化のそれぞれの要因と、a) で得られた3次元的な動水勾配と透水性・比貯留率の分布をもとに、地下水変化予測モデルを作成する。

#### e) 予測モデルに基づく予測値と実測値の差の解析と

#### それに基づく誤差やモデルの限界の評価

c) で得られた入力値を d) の予測モデルに入れて予測値を出し、実測値との差を解析する。c) ~ e) で相互にフィードバックを行い、最適な予測モデルを作成した上で、誤差やモデルの限界を評価する。

#### 【調査における留意点】

数年間の調査期間内では、プレート境界地震が起こる可能性は高くない。しかし、より小さな地震においても、水位の変動が観測された場合は、そのメカニズム等が解明されれば、巨大地震時の影響を推定することが可能であると考えられる。一方で、地震に伴う地下水変化の場合、時には特異的に大きな変動を示す場合がある(Akita & Matsumoto, 2004; Sato et al., 2004; 小泉, 2004; Wang et al., 2001; Lai et al., 2004)。本調査では、平均的な地震時地下水変化を把握することに加えて、特異的に大きな変動を示す場合のメカニズム・理由についても、十分明らかにする必要がある。

#### 【将来予測の手法と留意点】

1回の地震に伴う地下水変化はある程度把握可能であるが、プレート境界地震で50~100年という時間間隔の中で、地下水位の変化の直接観測および水位が元に戻るのか、あるいは変化したままなのかについては、短い期間では正確な観測は難しい。観測の結果、地震に伴い水位が回復する場合は、長期的にみて大きな影響とはならない可能性が高い。しかし、水位が変動したまま回復しない場合については、将来にわたり影響が累積してゆく可能性を否定できないので、そのような地下水環境は注意を要する。

#### 【評価における留意点】

M8クラスの地震により引き起こされる地下水変化およびその累積性の有無を指標とすることができる。しかし、将来予測には大きな不確実性がみこまれるので、核種移行評価の場合には、最大の影響を評価に組み込むことが必要であろう。

### (2) 活断層の活動履歴と影響範囲評価

#### 【調査の目的】

陸域で起きる震源の浅い(20km以浅)大地震の多くは、震源断層のずれが地表にまで到達し、地震断層の出現や顕著な地形変化をもたらす。震源断層のずれの直撃は地下施設を破壊し、地震時の水文地質学的変化、断層変位の累積による隆起沈降がもたらす侵食堆積作用と水文地質学的変化も断層の近傍にまで影響を及ぼし得る。陸域での震源の浅い大地震の多くは活断層沿いで発生するため、調査対象地域及び周辺地域における活断層の存在を確認し、その影響を避けることが本調査の目的である。

1995年の兵庫県南部地震を契機に活断層調査が国主導で進められ、主要98活断層については既に調査が完了している。しかしながらそれ以外の活断層についての現地調査は不十分で、空中写真判読のみで活断層やその可能性が高いリニアメントが認定されているものも多い(活断層研究会, 1991)。地震断層を出現させた2000年鳥取県西部地震は既知の活断層空白域で発生したものであり、空中写真判読による活断層の検出・認定が必ずしも完全なものではなく、“未知の活断層”が日本には存在することを知らしめた(松田, 2005)。この例が示すように、既知の活断層以外で発生する内陸の震源の浅い大地震については、事前の文献調査で排除することが現在の知見では難しい。本調査では活断層として認知されていない断層についてもその活動性を評価しなければならない。

#### 【調査の内容】

評価対象地域及びその周辺地域を対象に、地形判読によるリニアメントの抽出と活断層地形の抽出(米倉ほか, 1990; 渡部・鈴木, 1999)、リニアメントを対象にした地表地質調査及びトレンチ掘削調査による断層の存在確認(杉山, 2001)、断層の形態確認(面構造・線構造の種類と姿勢、断層面の形状、変位のセンス)、断層岩の性状確認(幅、色調、粘土鉱物の同定)、断層変位履歴の確認(被覆層への変形の有無と活動時期の特定)、ボーリング掘削による断層累積変位量の確認、地震波探査・電磁気探査・精密重力探査などの地球物理学的手法による断層地下構造のイメージング(例えば物理探査学会, 1998; 池田ほか, 2000; 麻植ほか, 2004)、水文地質学的調査による断層周辺の水利構造の把握が必要である。活断層は、複数の断層からなる断層帯として活動している事例が多いので、成熟した活断層については断層帯全体の構造発達史、特に断層活動の移動(マイグレーション)履歴が、解明されることが望ましい。反対に、活断層地形が不明瞭で、被覆層との変位関係も不明瞭な未成熟の活断層については、断層岩の性状からその活動性を評価する必要がある。

#### 【調査における留意点】

将来にわたる活断層の影響評価には、安全評価期間の長さも大きく関係してくる。すなわち、最も信頼性の高い産業技術総合研究所の活断層データベース(<http://www.aist.go.jp/RIODB/activefault/>)でも活断層は約10万年前以降に繰り返し活動したものが扱われている。従って、評価すべき将来が10万年を越えるような長期に及ぶ場合は、このような活断層の定義からはずれた断層運動も考慮する必要がある。将来100万年の期間を念頭に置くなら、本調査では第四紀に活動した断層(広い意味の活断層)を対象

にする必要がある。既知の活断層については立地選定で調査対象地域から排除されるが、広い意味の活断層(活断層帯)すべてが排除の対象となっているわけではない。また、活断層の移動や断層運動による地下水変化の影響範囲など未解決の課題があるため、活断層からの安全距離の概念は確立しておらず、周辺地域にある活断層も全て調査対象とする必要がある。調査にあたっては、以下のことに留意しておく必要がある。

- ・例えば将来100万年を評価するのであれば、評価すべき将来に外挿するのに十分な過去(数100万年程度ないしはそれ以上)まで活動履歴を遡ると同時に、十分な時間分解能でこれを明らかにしておくことが望ましい。特に過去の断層変位速度の変化や断層マイグレーションがあれば、その詳細を検討することが必要である。
- ・活断層地形が不明瞭で、被覆層との変位関係も明らかでない未成熟の活断層については、断層岩の性状からその活動性を評価する必要がある(相沢ほか, 2005)。これまでの断層破碎帯の研究から、活断層のガウジは還元色(青、緑、灰、白)、古い断層のガウジは酸化色(ピンク、橙)であることが、経験的に分かっている。しかしながら、断層ガウジの色を決める要因は未だ解明されておらず、仮説の域を出ていない。断層と活動度と断層ガウジの色の相関関係の研究は現在進行中であり、その成果を随時取り込みながら断層活動度の評価を行う必要がある。
- ・水文地質学的調査では、断層そのものの水利特性の把握を行い、断層が水みちとしてなのか遮水として機能するのか明らかにする。また、周辺への影響評価のため、断層周辺の水収支の全体像を明らかにするとともに、断層近傍に存在する地下水の年代、深部流体起源のCO<sub>2</sub>フラックス、透水性亀裂の分布、および異常間隙圧の成因を明らかにしておく必要がある。

#### 【将来予測の手法と留意点】

調査結果で得られた過去の断層活動履歴を将来に外挿することが基本となるが、以下のことにも留意しておく必要がある。

- ・地域によっては被覆層との変位関係から時間的に十分な断層変位履歴が復元できないケースもあり得よう。そのような場合には、評価期間に対し短い履歴を将来に外挿しても妥当であることを地質学的に担保する調査が別に必要になる。例えば断層変位の累積による隆起運動の状態を記述する構造発達史を確立することで、定性的な将来予測像を示すことが求められる。具体的な方法は2.1項(3)の「テクニクスの長期安定性評価」と重複する。
- ・断層活動に起因する水文地質学的変化については、正確な予測が困難なため予測される最大値で評価す

る必要がある。

- ・断層変位の累積による地形変化がもたらす水文地質学的変化は、活動履歴を外挿した変位量を最大値として考慮する（従って、侵食による地形変化の軽減は考えない）。
- ・一方、断層変位の累積による地形変化がもたらす侵食作用は、断層変位の累積による隆起量を最大値として、直ちに河川の下刻が起こるものと仮定する。これは前項目の仮定と相矛盾するものであるが、安全サイドとして影響には最大値を採用するためである。

**【評価における留意点】**

評価対象地域内に広い意味の活断層が存在する場合は、その影響が及ぶ範囲を避けることは当然である。同様に、将来の断層活動のマイグレーションにより、活断層として変位する可能性があるような範囲も、不適切として排除する必要がある。

地震時の水文地質学的変化、断層変位の累積による地形変化がもたらす水文地質学的変化については予測される最大値をもって、核種移行評価に組み込まれる必要がある。

**(3) 既存断層の再活動性評価**

**【調査の目的】**

日本の活断層の多くは、前期～中期中新世に形成された伸張性断層をもとにした反転テクトニクスに支配されている（佐藤，1996）。従って、活断層としては地表に現れない既存の断層が再活動をする可能性は今後も十分にあり得よう（例えば2003年宮城県北部地震）。従って、評価対象地域やその地下に大規模な断層が存在する場合は、再活動の可能性を考慮し、ずれ破壊の影響が及び得る範囲を避けることを目的としている。また、既存の断層が全く別の地震によって誘発され変位を起こすこともあり、誘発断層もしくは同情性断層と呼ばれている。このような誘発ずれ変位を避けるためにも、評価対象地域の顕著な断層はすべて抽出し、その規模を評価して、誘発変位の影響が及び得る範囲を避けることを目的としている。

**【調査の内容】**

評価対象地域及びその周辺地域に存在する活断層ではないが顕著な断層の規模・構造地質学的な特徴と成因を明らかにし、その再活動性を評価しなければならない。具体的な調査内容は2.2項(2)の「活断層の活動履歴調査」とかなり重複する。すなわち地形判読によるリニアメントの抽出、リニアメントを対象にした地表地質調査及びトレンチ掘削調査による断層の存在確認、断層の形態確認（面構造・線構造の種類と姿勢、断層面の形状、変位のセンス）、断層岩の性状確認、地震波探査・精密重力探査などの地球物理学的手法に

よる断層地下構造のイメージングや伏在断層の検出を行わなければならない。

**【調査における留意点】**

評価対象地域及びその周辺には、地域によって存在頻度は異なるものの、必ず既存の断層が存在すると考えてほぼ間違いない。従って、確認された既存断層の再活動度の評価は、必ず求められることになろう。断層の規模については地表地質調査によってできる限り水平方向の広がり把握し、広域応力場や周辺の活断層とどのような幾何学的関係にあるのかを明らかにしておくことが必要があり、現在の応力配置でどのような変位が起こりえるのかを考察しなければならない。また、断層の地下構造については処分地深度よりもさらに深い構造、例えば数km以深まで地震波探査などの地球物理学的調査により明らかにしておくことが必要である。特に、中新世に形成された正断層群は、地下に伏在しているケースが多いので（高橋ほか，2006）、地表に顕著な断層がなくともこの種の探査は不可欠である。さらに、地表に活断層がなくとも評価対象地域が海溝よりの場合は、地下にプレート境界地震の震源域が予想されるので、巨大地震発生時に既存断層が誘発ずれ変位を起こす可能性が高く、より詳細な断層調査が必要となる。

**【将来予測の手法と留意点】**

断層の再活動性の評価では、現在の応力場が評価期間内も安定に継続することが前提となる。反対に、テクトニクスの不安定な地域では、将来どのように断層の再活動が起きるのか予測することが極めて困難になる。具体的な予測方法は2.1項(3)の「テクトニクスの長期安定性評価」と重複し、評価対象地域及び周辺地域の既存断層を対象とした小断層解析が不可欠となる。応力場の変化が検出できれば、どのような断層群に再活動が起きたのか、いつどのようなテクトニックイベントに対応して変化が起きたのかを考察し、将来予測に反映させる必要がある。

**【評価における留意点】**

既存断層の再活動性評価では、再活動の可能性がある、可能性がない、不明の3つの判断に基づくことになろう。再活動の影響を被る可能性がある部分は、不適切な領域として排除されることは当然である。特に注意しなければならないのは、処分施設よりも地下に伏在する断層の再活動によって、処分施設を横切るずれ破壊が新たに生じるケースで、これを絶対に避けなければならない。また、地下にプレート境界地震の震源域がある場合も、副次的なずれ変位を避けなければならない。一方、再活動の可能性がない場合、または再活動性が不明である場合でも、地表から処分地深度

まで連結した規模の大きな断層が存在する部分は、既に地下水系の移行最短経路となっている可能性があるため、安全評価において十分な考慮が必要である。

### 2.3 火山・マグマ活動

#### 調査・評価項目：火山・マグマ活動

- （概要調査評価事項） 第四紀火山の存在が明らかとなった地域は、噴火により廃棄物が直接破損あるいは地表に放出される可能性があり、避ける必要がある。
- （概要調査評価事項） 第四紀火山が存在しなくとも新たに火山が出現し得る地域は、噴火により廃棄物が直接破損あるいは地表へ放出される可能性があり、避ける必要がある。→2.3（1）
- ◎（サイト影響考慮事項） 第四紀火山の周辺あるいは巨大噴火の可能性のある範囲の周辺で、将来放射性物質を閉じ込めておく機能に影響を与える可能性のある地下水の流動、水質の変化あるいは地温の変化が予想される地域では、それらの火山・マグマ活動の影響を考慮する必要がある。→2.3（2）
- ◎（サイト影響考慮事項） 火山・マグマ活動に影響を与えるテクトニクスについては、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。→2.3（1）及び（3）

#### 【調査項目】

将来にわたる火山活動の影響評価のために、以下の項目について科学的調査を行う必要がある。火山活動の様式に変化を与え得るテクトニクスの変化についての調査は、2.1 項（3）の「テクトニクスの長期安定性評価」で記述した内容を適用する。

- 1) 第四紀火山の活動履歴の定量化と影響範囲評価
- 2) 火山活動の時空分布調査と火山の新規出現性評価
- 3) 巨大火山噴火の予測と影響評価

#### （1）第四紀火山の活動履歴の定量化と影響範囲評価

##### 【調査の目的】

評価対象地域内では、第四紀に噴火の実績がないことを確認することが、本調査の最初の目的である。既存の火山で起こる将来の噴火の直撃を避けるためには、将来10万年や100万年の期間を念頭に置くと、考慮対象を活火山だけに限定することはその噴火実績の短さ（過去1万年）では不十分で、第四紀火山を対象にする必要がある。

また、評価対象地域内には第四紀火山が存在しなくとも、周辺地域の既存火山で繰り返される火山活動の影響については評価しておく必要がある。特に火山活動が地下水系に与える影響、言い換えるとマグマの熱や火山性流体が地下水を介して周辺地質環境に与える影響については、マグマの貫入・噴出の及ぶ範囲よ

りさらに広域であると予想される。また、将来10～100万年に及ぶような期間を念頭に置くと、マグマ供給系の変化・停止・再開は頻繁に繰り返され、これに対応した噴出中心の移動も当然起こると予想される。評価対象地域に影響を及ぼす可能性のある既存火山についてはその発達史・マグマ供給系の変遷を、評価に必要な時間スケールで明らかにしておく必要がある。

#### 【調査の内容】

評価対象地域内及び周辺地域に分布する火山岩の年代を決定し、評価対象地域内に第四紀火山が存在しないことの確認をする。周辺地域の第四紀火山からの側噴火の影響が及ばないことも確認する必要がある。

火山活動が地下水系に与える影響の評価のため、評価対象地域に含まれる広域地下水流動系において、その上流側に新規火山出現の可能性を否定できるかどうかを確認する。上流側に既存火山が存在する場合は、その影響評価のための水理および地下水調査を実施する。影響の評価は水理学的影響と化学的影響に大別される。水理学的な影響として、火山・マグマ活動による地形や岩質の変化などが、地下水流動系の透水性変化を引き起こす可能性が考えられる。したがって、過去の地形変動や熱水による変質の有無を地質学的手法により確認する必要がある。化学的な影響としては、高温、低pH、高塩濃度、高CO<sub>2</sub>の特徴を持つ火山性熱水の混入による地下水の組成と反応性の変化の把握が重要である。そのために、評価対象地域に流入する広域地下水流動系の地下水について、その起源、マグマ発散物の濃度、化学特性、流量およびその変動特性について調査する。

#### 【調査における留意点】

火山活動が地下水系に与える影響は、マグマから放出された火山性熱水が地下水に溶解し、主に広域地下水流動系を介して処分地周辺に影響するものと考えられる。したがって、調査においては、場合によっては評価対象地域よりも広い範囲での調査が必要になる場合がある。

地下水系への影響は、火山からの距離のみにより規定されず（深部地質環境研究センター、2006; 2007）、断層や構造に規制され特定方向に集中する場合がある（Ohsawa et al., 2002 など）。そのため、地下水調査は、断層の存在や地質構造を考慮した上で、十分な範囲で水理および化学的影響に関する調査を行う必要がある。将来予測のためには、現在のマグマ活動の状態と地下水系へのマグマ起源物質の流出量の把握をしておくことが重要である（4.4 項参照）。マグマ起源物質の指標として、よくマントル起源物質である<sup>3</sup>He が用いられる。<sup>4</sup>He は、放射壊変によっても生成されるので、地下水の滞留時間が長いと高濃度になる特徴があ

る。地下水中のヘリウム同位体 ( $^3\text{He}$  および  $^4\text{He}$ ) の利用は、起源および地下水の年代決定に有効であるので、火山周囲の地下水について空間的なデータを取得することが望ましい。岩手山における調査事例を図44 ( $^3\text{He}$  濃度分布) および図45 ( $^4\text{He}$  濃度分布) に示す(深部地質環境研究センター, 2007)。図44より、マグマ起源物質の指標の濃度となる  $^3\text{He}$  濃度は、深層地下水において高濃度であり、噴火活動中心から25km 離れても高い濃度を示すことがわかる。図45より、深層地下水中では  $^4\text{He}$  濃度が高いことがわかる。すなわち、深層地下水はマグマ起源物質も多く含む傾向にあるが、地下水の年代も古いことを示している。このような調査を行うことにより、マグマ起源物質の深層地下水系への拡散の実態を明らかにすることができると考えられる。

また、調査地域内に温泉等が存在する場合は、その起源について詳細に調査を行う必要がある。もし、火山性熱水の成分を含む場合は、それが、どの火山から供給されたものであるのか、あるいは、地下に貫入したマグマによるものであるか等について、調査しておく必要がある。熱水変質の影響があるかどうかについても同時に調査を行うべきである。

【将来予測の手法と留意点】

現在の火山活動が持続すると考えられる時間範囲

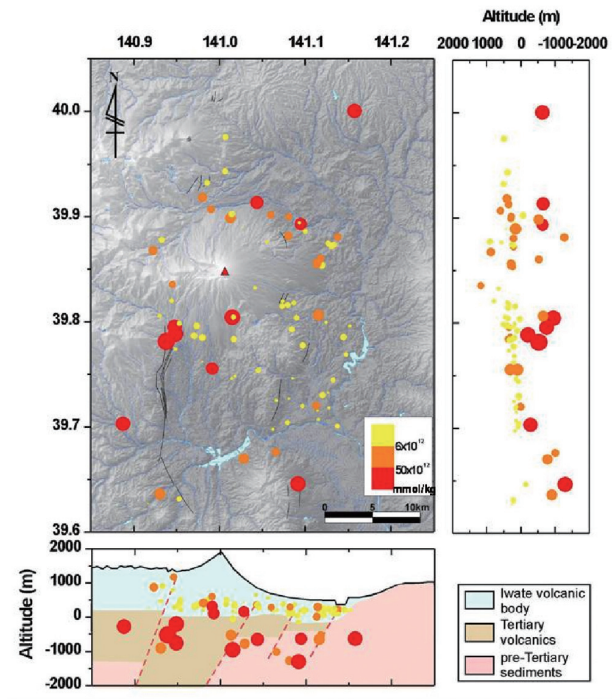


図 4-4 岩手山周辺の地下水中の  $^3\text{He}$  濃度の空間分布 (産総研, 2007)。

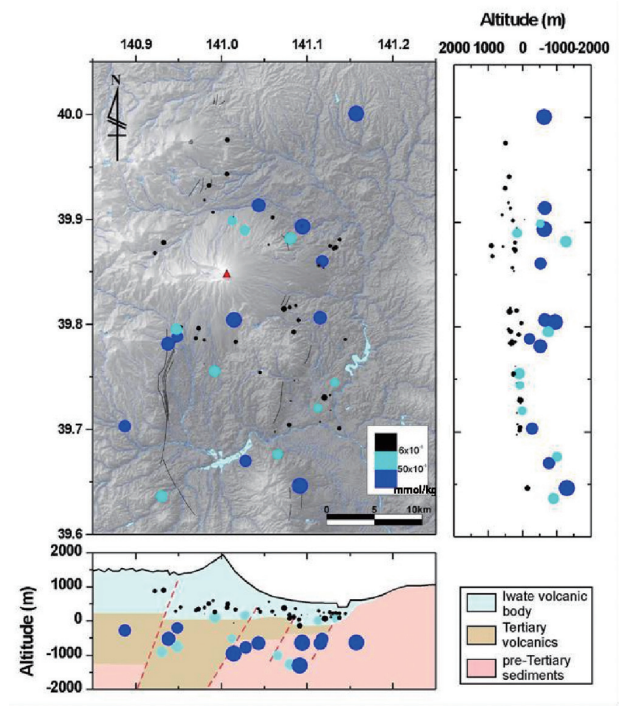


図 4-5 岩手山周辺の地下水中の  $^4\text{He}$  濃度の空間分布 (深部地質環境研究センター, 2007)。

(数百年～数千年程度) の予測として、調査結果を変動しないものとして外挿することが可能であると考えられる。また、地下水系の年代などがわかる場合には、火山性熱水の混入量と水系の規模から、その地下水年代に相当する時間における平均的な熱水のフラックスとして影響を見積ることが可能である。岩手山における事例として、現在の活動中心から10km 以上離れたところにおける地下数百 m の深度に存在する帯水層へのマグマ起源  $\text{CO}_2$  の平均フラックスは、表4-1 のようになる(深部地質環境研究センター, 2007)。フラックス値は地質および断層等の構造依存性が大きいことが示され、地下水の年代値に相当する期間における平均的フラックス値とみなすことができる。この事例では、数万年程度まで用いることができる場合があることを示している。しかし、実際の活動は、火山活動に

表 4-1 岩手山周辺の地下水へのマグマ起源  $\text{CO}_2$  のフラックスと地下水の年代 (深部地質環境研究センター, 2007)。

	地下水年代	$^3\text{He}$ flux	$\text{CO}_2$ flux
	year	mol/ka	$10^9$ mol/ka
岩手火山体	数十～数百	0.01 ~ 0.1	0.1 ~ 10
第三紀層	数千～	0.01 ~	0.1 ~
中生代層	数千～数万	0.001 ~ 0.01	0.01 ~ 1
断層帯	数十～数万	0.01 ~ 0.1	0.1 ~ 10

相応して間欠的であると考えられるので、フラックスの変動幅については、注意が必要である。

一方、10 万年以上の超長期の予測においては、火山活動の様式は多岐にわたり、現状では正確な予測を行うことは難しい。100 万年間は火山の一生にも相当する期間と考えられることから、火山活動の規模（マグマの規模）は、新規火山の出現も含めてある範囲内で定めることができると考えられる。地表調査により火山噴出物の量を見積もることができるが、その際、活動するマグマはすべて噴出するわけではないことに注意する。地下に貫入するだけで地表に噴出しないマグマは噴出する量の数倍（Francis et al., 1993）～数十倍（Kazahaya et al., 1994）の範囲と見積もられている。また、マグマ中に含まれる揮発物質の濃度は、斑晶中のガラス包有物分析で推定可能である（斎藤・日下部, 1989）。これらの情報を総合することにより、マグマから発散するマグマ起源物質量を総量として予測できる。その場合、超長期にわたる火山活動による最大の影響について見積もることにより、将来予測を行う手法が考えられる。ただし、地下水への供給総量を見積もるために必要な、マグマ発散物が地下水系に供給される量と大気中に火山ガスとして放出される量の比については、まだ、あまり研究例がない。今後、データの蓄積をはかる必要がある。

マグマから放出される熱水・ガスは、定常的に供給されているわけではなく、休止期にある火山からは、ほとんど放出されていない。逆に、活動期には、非常に多量のガスが一度に放出される特徴がある。2000 年の三宅島噴火では、一日に最大 10 万トン規模の SO<sub>2</sub> ガスが大気中に放出された（Kazahaya et al., 2004）。このようなガス放出活動は、山頂部のカルデラ形成に伴われており、三宅島では 2000～3000 年に一度生じ、ガス放出は少なくとも数年は続くと考えられる。このガスの一部でも地下水系に供給されれば、それは莫大な量の火山性熱水となる。将来予測においては、地下水系に供給される火山性熱水が、一度に多量になる可能性も考慮する必要がある。

#### 【評価における留意点】

火山の側噴火可能性範囲については、評価対象地域内を含む島弧での最大値で評価することが望ましい。第3章5節の「火山・マグマ活動」で述べたように可能性範囲は島弧の応力場の状況、すなわち水平差応力の大小で変化し、伊豆弧や雲仙地溝のような伸張応力場では大きくなることに注意しなければならない。

評価対象地域内に、熱水活動の痕跡がある場合は、その年代等を調べることにより、将来の再活動性の有無を評価する。次に評価対象地域を含む広域地下水流動系の上流域に既存火山が存在するか、あるいは、新規火山出現の可能性があるかという点の評価が重要で

ある。新規火山も含めて、将来、上流域に火山活動が予測される場合は、塩化物イオン、炭酸イオン、CO<sub>2</sub> など処分地の性能に影響を与える成分の流量およびその変動特性を定量的に評価しておくことが望ましい。

#### (2) 火山活動の時空分布調査と火山の新規出現性評価

##### 【調査の目的】

評価対象地域内には第四紀火山が存在しなくとも、対象地域内及びその周辺に新規に火山が出現する可能性については評価しておく必要がある。既存火山からの影響とは異なり、火山の新規出現ケースでは、マグマの新期発生・上昇に関する科学的理解を抜きにして、立地選定で排除することが出来ない。実験岩石学のこれまでの成果から、一般的に初生的なマグマの発生場は上部マントルと考えられており、上部マントルの岩石が熔融する条件（温度の上昇、圧力の低下、融点の減少）が満たされない限りは火山が出現しない。また、出現する火山の噴火規模・噴火様式の可能性についても検討しておく必要がある。これらの情報は、新規に出現する火山活動の影響範囲を考える上で必要である。日本列島下には冷たくて重い太平洋プレートやフィリピン海プレートが沈み込んでいるため、前弧域では火山・マグマ活動が起きていないが、その背後では火山・マグマ活動が活発で、地域的な片寄りが顕著である。火山分布の最も海溝側の位置は、沈み込み境界との平行性が良く、かつ火山分布密度も最大となるので、これを火山フロント呼んでいる。ただし、山陰から北部九州にかけての地域では、火山フロントの存在が不明瞭になり、火山も単成火山群（噴火の度に噴出地点が異なり、一輪廻の噴火活動で終わってしまう火山の集合）が卓越するなど、火山発生プロセスが他とは異なる地域も存在する。

##### 【調査の内容】

まず、評価対象地域の周辺地域での火山活動の時空分布及び噴火様式の特徴を、将来の評価期間に当てはめるのに十分な程度の過去に遡って明らかにしなければならない。仮に評価期間として 100 万年を念頭に置くと、数 100 万年程度の過去に遡る必要がある。同時に、火山噴出物の岩石学的特徴から、周辺地域でのマグマの発生にかかわる制約条件を明らかにしなければならない。また、地球物理学的観測から評価対象地域およびその周辺地域下の地殻・上部マントルの温度構造を明らかにしておく必要もあり、温度構造と現在の火山活動の成因関係を示せることが望ましい。このような成因関係が理解できれば、火山活動の時空分布変遷から地殻・上部マントル温度構造の変化履歴が復元でき、過去に新規出現した火山の発生プロセスが理解可能なものとなる。また、そのプロセスが理解でき

れば、逆に将来も火山活動が起こりえない地域の存在も科学的に説明できることになる。

【調査における留意点】

日本列島でのマグマの発生プロセス及び噴火様式は多様であり、地域毎に特色があるので、そのことを念頭に置いた、時空分布調査・火山地質学的調査・岩石学的解析が行わなければならない。また、地殻・上部マントルの温度構造についても、地域によっては技術的な問題により十分なデータが得られていない場合もある。

- ・火山活動の時空分布及び噴火様式の変化履歴については、火山地質学的調査や放射年代測定によってデータを増やすことにより、より詳細な解析が可能となる（例えば Kondo et al, 1998）。しかし、火山噴出物の岩石学的検討では、マグマの成因論自体にまだ未解決の課題も多く、簡単にマグマの発生条件を決められないことも事実である。不完全な概念モデルであっても、火山地質学的・岩石学的事実を説明できるような合理的なマグマ発生モデルを構築する努力は求められよう。
- ・東北地方における地殻・上部マントルの温度構造は、東北地方下に潜り込む太平洋プレートで発生し地殻・上部マントルを通過した多数の地震を地表の観測網で捉え、地震波トモグラフィーの手法により地震波速度異常として詳しく解析されている（長谷川ほか, 1991；Zhao et al, 1992）。しかしながら島弧下に潜り込むプレートが存在せず地震がほとんど発生しない地域、またはプレートが潜り込んでいてもほとんど地震が発生しない地域では、地震波トモグラフィーの手法がうまく使えない。このような地域では地球の裏側から来る遠地地震の波形データのインバージョンなど異なる手法で地下の構造を解析する必要がある（図 4-6；Murakoshi, 2003）。

【将来予測の手法と留意点】

火山活動の詳細な時空分布と噴火様式が明らかになり、何らかのパターンが見出せたとしても、これを將

来に外挿するためには、なぜそこに火山が出現したのか、もしくはなぜそこに火山が出現しないのかを説明する科学的理論が求められる。

- ・日本列島での火山フロントの位置は過去 1000 万年にわたって大きく変化しておらず、将来 100 万年に及ぶような期間を念頭に置いても日本列島周辺のプレート配置の変動が起きるとは考えにくい。この期間内に沈み込むプレートの速度・角度・温度に重大な変化が起こるような兆候は、今のところ考える必要はなからう。潜り込む冷えた海洋プレートによって前弧域下のウェッジマントルが冷却されるプロセスは、マグマ発生を阻害する方向に作用する。日本列島では過去 2000 万年前から 1400 万年前に、特異な前弧域火山活動が起きたが、これは日本海の背弧海盆拡大というメガテクトニクス事件でマントルウェッジ内に高温のアセノスフェアが貫入したため、さらに西南日本では拡大直後の高温の四国海盆に島弧が乗り上げたためと考えられている（巽, 1995；Kimura et al, 2005）。日本列島周辺で現在拡大中の背弧海盆は沖縄トラフと伊豆 - 小笠原弧のリフト帯のみであり、これを除くと前弧域での火山の新規出現は考えにくい。
- ・背弧域での火山活動の領域は、過去 100 万年の時間スケール内でも大きな変動が起きている。特に東北日本弧では、約 30 万年前以降に火山活動域の背弧側への拡大が始まり、火山の新規出現が起きている（山元, 1999）。このような火山活動の時空分布は、ウェッジマントル内の対流プロセスの反映であると考えられている（Tamura et al, 2002）。現在のウェッジマントルの温度異常は地震波観測等で明らかにすることが出来るが、火山時空分布の変化はこれに対応してウェッジマントル内の温度分布にも変化が起きていたことを示していよう。将来を予測するためには、ウェッジマントル内の温度分布変化パターンを外挿する必要がある。マントルの流動は 10cm / 年程度の速さが期待されるが、その移動距離は評価期間 100 万年では 100km 程度となる。また、西南日本では背弧域での単成火山群の活動が 100 万年ス

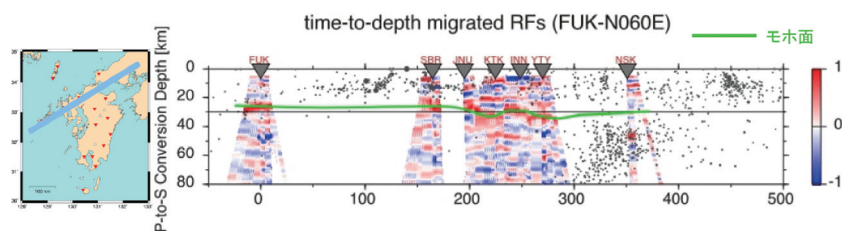


図 4-6 レシーバー関数による九州北部の地殻 - マントル速度構造解析結果。活火山のある福江島 (FUK) の地下のマントルに低速度異常が検出される。Murakoshi (2003) による。



ケールで継続しており火山群の周辺では火山の新規出現が繰り返されてきた(宇都, 1995; Sudo et al., 1998). 噴出するマグマはアルカリに富んだ玄武岩質マグマが卓越しており, マグマ発生のプロセスと噴火様式が東日本と西日本で全く異なっている.

#### 【評価における留意点】

新規に出現する火山の評価を定量的に行うことはかなり困難であり, 今のところ評価すべき将来にその影響の有る・無し・評価不能の3つの基準で判断せざるを得ない. これは, ある地域にいつでもどれくらいの規模の火山が出現するのかを, 定量的に予測することが不可能なためである. また, これまでの研究成果により, 火山の新規出現は時間的にも空間的にも偏在していたことは明らかである. したがって火山の発生をランダム事象として捉え, 発生回数と時間だけから確率を与えても, 評価期間や地域の与え方で値が変わってしまい, 確率的に意味をもたない. 評価としては, 火山地質学的・岩石学的事実や地球物理学的観測データを説明できるような合理的マグマ発生・噴火モデルが得られているか, モデルから導かれる将来の影響の有無が妥当なものであるかどうか, の妥当性の判断が重要になる.

### (3) 巨大火山噴火の予測と影響評価

#### 【調査の目的】

日本列島では, 発生頻度は低いものの巨大噴火(噴出マグマ量が $100\text{km}^3$ を越えるような噴火)が繰り返し発生している. 特に阿蘇カルデラや始良カルデラの位置する九州中南部は最近10万年間に数回の頻度で巨大噴火が発生しており, その頻度は他地域よりも大きい(町田・新井, 2003). 影響範囲が広大であるため, 立地選定で排除するためには, 評価対象地域から離れた遠方で起きる巨大噴火についても考慮する必要がある. また, 将来の発生を予測する為には, 過去の噴火履歴調査だけでなく巨大噴火をもたらすマグマ供給系への科学的理解も必要とされるであろう.

#### 【調査の内容】

評価対象地域から $100\text{km}$ 程度の範囲にあるカルデラ火山(火山群)を対象に巨大噴火を含む噴火履歴(年代・規模・噴出物の岩石学的特長)を明らかにしなければならない. また, 巨大噴火がもたらした種々の影響(侵食・堆積作用への影響, 応力場への影響, 地下水流動系への影響など)も評価しておく必要がある. 将来100万年の期間を念頭に置いても, 巨大噴火の再来間隔が数100万年に及ぶものもあるので, 再来間隔よりも十分に長い過去にまで遡って対象とするカルデラ火山(火山群)を選ぶ必要がある.

#### 【調査における留意点】

巨大噴火の影響評価の調査は, 調査地域が広範囲に及ぶため, 目的を絞った調査を行う必要がある. また, 調査で評価できない事項については, 室内実験や数値実験も合わせて行い, 評価に反映させる必要がある.

- ・カルデラ火山(火山群)や巨大噴火の産物はその規模の大きさのため, 地質学的に古いものであっても保存されやすく, 噴火履歴の解析自体はデータ量を増すことにより比較的容易に実施できる. しかしながら巨大噴火が周辺に及ぼす間接的な影響については直接現地調査で確認できないことが多い. 例えば,  $100\text{km}^3$ を越えるマグマが地表に噴出した結果, 噴出源には径 $10\text{km}$ 前後かそれ以上の陥没カルデラが形成されるが, この現象によって周辺の岩盤にどのような力学的影響が起きるのか明らかになっていない. そもそもこのクラスの噴火は, 現代的な観測体制下で起きたことがなく, 何が実際に起きるのか予測が難しい. 格子の粗い力学的数値計算は実施可能であるものの, 地層処分システムに影響を与えるような裂か形成の評価が出来るような解析はこれまで試みられたこともない. また, 地殻内に新たに $100\text{km}^3$ を越えるマグマが蓄積される過程で, 熱的影響や地下水系への影響がどのように現れるのかも検討しなければならない事項ではあるが, その解析も行われていない.
- ・巨大噴火をもたらすマグマ供給系を理解するためには, どのようにして大量のマグマが生産され, 地殻内に蓄積し, 噴火へと至ったのかを明らかにすることが望ましい. そのためには巨大噴火噴出物の岩石学的検討だけではなく, 巨大噴火以前の火山活動時系列を対象にした解明が必要になってくる. また, 地球物理学的探査により地殻内のマグマ溜まりの位置があきらかにできれば, 巨大噴火マグマ供給系への大きな制約条件となる.

#### 【将来予測の手法と留意点】

噴火履歴調査から明らかになった巨大噴火再来間隔を評価すべき将来に外挿することが基本となる. その信頼性を担保するためには, 噴火再来間隔が何によって支配されているのか明らかにされていることが望ましい. 将来100万年の期間を念頭に置くと, 地域によっては必ず巨大噴火の間接的な影響を被るはずである. 調査における留意点で記述したように力学的影響や地下水系への影響がどのように現れるのかは不明な点が多い. 評価対象地域の地質状況に合わせた何らかの考察によって影響の最大値を示すことが必要になるものと思われる.

#### 【評価における留意点】

将来の巨大噴火によるカルデラ陥没で, 評価対象地

域が直接的に破壊される可能性があれば直ちに立地選定で排除されるべきである。間接的な影響（力学的・水文地質学的）については、予測される最大値を持って評価地域毎の核種移行評価に組み入れることが必要になる。その予測最大値は現状ではわかっていないため、今後、明らかにするための手法開発の必要がある。

## 2.4 深部流体

調査・評価項目：深部流体

◎（サイト影響考慮事項） 深部流体の活動により、将来放射性物質を閉じ込めておく機能に影響を与える可能性のある地下水の水質変化が予想される地域では、深部流体の影響を考慮する必要がある。

◎（サイト影響考慮事項） 深部流体の上昇に影響を与えるテクトニクスについては、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。

深部流体の地下水系への流入の定量化と影響評価および将来予測について調査を行う。深部流体の上昇の様式に変化を与え得るテクトニクスの変化についての調査は、2.1 項 (3) の「テクトニクスの長期安定性評価」で記述した内容を適用する。

### 【調査の目的】

深部流体に含まれる廃棄体やオーバーパックに影響を与える成分（特に CO<sub>2</sub>、Cl 等）の流量および変動の可能性をまとめ、将来にわたり処分場に与える影響の評価を行うことが本調査の目的である。深部流体は熱水として上昇してくる場合があり、その場合は熱に関する情報も取得する必要がある。

### 【調査の内容】

評価対象地域内において、深層地下水調査を行い、その化学種の起源解析、水質形成機構解析および年代測定を実施し、深部流体起源の成分（特に CO<sub>2</sub>、Cl 等）について、その濃度および当該地下水層へのフラックスについての定量化を行う。評価対象地域に影響を与える深部流体が、停滞系（以下、停滞水とする）である場合と、深部から供給される流体（以下、深部上昇水とする）である場合とでは、周辺への影響が大きく異なるため、帯水層の構造や地下水年代を調査した上で判断する。調査は、新規あるいは既存の坑井や湧水などを対象とするが、場合によっては、河川の調査も行う。また、熱水として上昇している場合については、その温度観測のみならず、各種化学温度計（深部地質環境研究センター,2001）を用いて、深部における温度の推定もあわせて行うことが望ましい。

地下水調査手法、化学分析、起源解析、水質形成機構解析および地下水年代測定の手法に関しては、3.5

項「水文調査・気象観測」、3.7 項「掘削調査」、3.11 項「室内試験・測定」および4 節「地下水システムの解析と概念モデルの構築」を参照されたい。分析値と起源解析により、地下水に含まれる各種成分の深部流体起源の濃度がわかる。より正確を期するためには、水質形成機構解析を実施し、地殻中の岩石・鉱物との反応による物質収支を求めておくことが望ましい（深部地質環境研究センター、2005）。これらの結果から、当該地下水系に流入する深部流体起源成分の濃度を明らかにする。当該地下水層の地下水年代と深部流体起源成分の濃度から、各成分のフラックスを求めることができる。

評価対象地域に流入する上流側に深部上昇水の上昇域が存在すると考えられる場合は、その影響評価のための地下水調査を上流側においても実施する。評価対象地域に流入する広域地下水流動系の地下水について、深部流体起源成分の濃度、化学特性、流量およびその変動特性について調査する。

### 【調査における留意点】

結晶岩地域のように、地下水層が亀裂系の形態となっている場合については、上述のような手法を用いることが困難な場合がある。その場合では、表層へのフラックスとして、河川流量調査および河川に含まれる深部流体起源成分の濃度を用いることにより、深部流体起源成分のフラックスを求めることができる場合がある（深部地質環境研究センター、2003）。

深部から上昇してくる深部上昇水は、沈み込むスラブ、マントルから放出される流体を起源としていると考えられるため、その上昇通路は、構造線、断層等の地殻の割れ目が主経路であると考えられる。地下水系に CO<sub>2</sub> や Cl 等の深部起源成分の寄与があった場合は、正確な影響評価のため、深部上昇水の上昇域の特定が必要である。評価対象地域内において、断層、構造線が存在する場合は、その周辺部において重点的に調査を行う必要がある。

深部上昇水には、CO<sub>2</sub> が多く含まれるため、地表に自噴している場所では、遊離ガスとして観察される場合がある（図 4-7）。この場合は、遊離ガスの化学・同位体分析を行い、地下水と同様に起源を明らかにする。地下深部においては、遊離ガスは溶存していたと考えられるので、正確に地下深部における地下水中の深部流体成分濃度を求めるには、地下水と遊離ガスの量比を求めておく必要がある。量比の推定が困難な場合は、当該地域に供給される深部上昇水が、深部上昇水の典型的事例と考えられる有馬型熱水の深層における CO<sub>2</sub> 含有量（0.6mol/l；深部地質環境研究センター、2007）と同じと仮定して用いる等が考えられる。

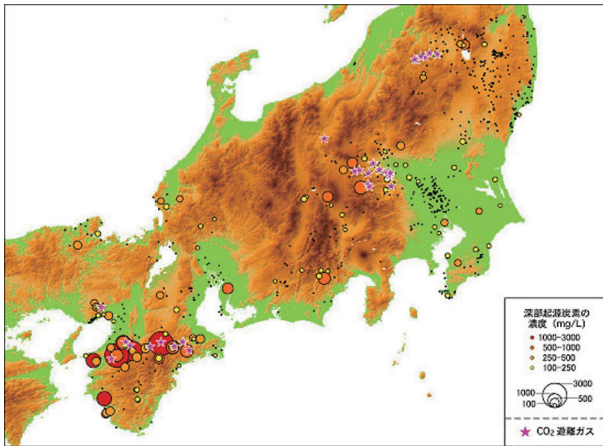


図 4-7 炭素同位体組成および無機全炭酸濃度から求められた地下水中の深部起源無機炭素濃度の分布。調査地点がプロットされており、点のない地域については調査結果がない。CO<sub>2</sub>遊離ガスを含む地点は☆で表した(産総研, 2007)。

#### 【将来予測の手法と留意点】

影響を与える深部流体が停滞水の場合は、現在観測される化学組成が将来にわたって一定であるかどうかの判定が重要になる。この場合は、停滞水の組成および年代について、3次元的な調査を行い、その分布の傾向から判断できる可能性がある。しかし、現状では十分な事例研究はなされていない。

一方、深部から上昇してくる深部上昇水のフラックスを求めるには、困難を伴うのが実際のところである。変動に関する正確な将来予測は、現状ではさらに難しい。しかし、このような深部流体は沈み込むスラブおよびマントルを起源にしていると考えられることから、テクトニクス環境が変わらないと考えられる時間範囲の中では、地表付近でもたらされる平均的なフラックスも変わらないと考えられる。評価対象地域という特定の場所におけるフラックスは、浅所における構造線や断層の水理特性の影響を大きく受けると考えられ、変動の原因はそれらの水理特性の変動の影響により決まるであろう。また、広域地下水系の水理特性の変動による影響を受けることも明らかであるため留意する。

考慮すべき地下水系について水理特性の変動が明らかでない場合については、変動幅として、深部流体の典型的な事例と考えられる有馬型熱水の Cl、CO<sub>2</sub> のフラックスの見積り値を最大値として用いて評価すべきであろう。

#### 【評価における留意点】

評価対象地域に影響する深部流体の存在が確認され

た場合、その起源が長期停滞水であるか深部から上昇する深部上昇水であるかの評価がまず重要である。停滞水である場合は、高塩濃度の特徴により腐食性的特性を持つため濃度値が重要である。深部から上昇してくる深部上昇水である場合、高塩濃度、低 pH、高 CO<sub>2</sub> (高温であることもあり得る) である上に、定常的に供給されていると考えられることから、Cl および CO<sub>2</sub> の濃度とフラックス値の両方の値が重要である。また、供給される上昇水が高温の場合は、深層における温度の目安になる化学的に推定可能な平衡温度(深部地質環境研究センター, 2001) についても指標とする。

## 2.5 泥火山

### 調査・評価項目：泥火山

● (概要調査評価事項) 第四紀に活動した泥火山の存在が、概要調査で明らかとなった地域は、廃棄体が直接破損あるいは地表へ放出されることが懸念されるので、避ける必要がある。

泥火山の活動の影響評価および将来予測について調査を行う。

#### 【調査の目的】

将来の泥火山の活動を評価するために必要なデータを取得し、適切な評価モデルを作成する。

#### 【調査内容および留意点】

わが国の陸域で泥火山が分布している地域は限られているので、立地段階でこれらの地域を除外するのは、それほど困難なことではない。泥火山は、異常間隙水圧(異常高圧)に起因する地表への高速流体移動が実際に地形に現れたものである(千木良・中田, 1994) と考えられているので、泥火山および異常間隙水圧の分布域を避けることで、泥火山の影響は回避できると考えられる。しかし、わが国では、泥火山は油田あるいはメタン田開発のための地表兆候としてのみ捉えられることが多かった(佐々, 1954) ため、泥火山の活動を明確に意識して調査を行っているのは、田中(2006)のみであるといっても過言ではない。このように、現在の泥火山の活動については研究が始まった段階であるので、以下にいくつかの事例を書き並べ、泥火山調査時の留意点に代えることとする。なお泥火山に関するレビューは、山縣・小川(1989)、千木良・中田(1994)、土木学会(2006)、高橋ほか(2006)等がある。将来の泥火山活動については、泥火山を生成する地質環境を抽出する方式をさらに研究する必要があると考えられる。

a) 泥火山の分布について

わが国の陸域には、新冠(北海道日高郡)、歌越別(北海道天塩郡)および松代(新潟県十日町市)の3つの泥火山がある。このうち、歌越別泥火山はメタン鉱山として稼行している。新冠泥火山もメタン鉱山として利用されていた(北海道開発庁,1958)。松代泥火山もメタン、石油の調査を行った伊木(1907)にはメタン孔と記述されている。実際、泥火山の小規模なものがメタン孔であると考えられている(佐々,1954)。また、わが国周辺海域にも、主に前弧域に多数の泥火山の存在が知られている(例えば千木良・中田,1994)。

b) 泥火山群の連続性について

新冠泥火山は、新冠背斜、節婦断層(北海道開発庁,1958)に沿う約12kmの範囲にある9つの泥火山からなる(千木良・中田,1997)。松代泥火山は蒲生向斜(竹内ほか,2000)に沿って蒲生、室野、2つの泥火山が並んでいる。相互間隔は2kmである(田中,2006)。400座以上の泥火山が分布するアゼルバイジャンでは、その分布範囲は100km以上にも及んでいる(高橋ほか,2006)。

c) 1つの泥火山の影響範囲について

北越急行ほくほく線鍋立山トンネル(全長9.1km)は松代(蒲生)泥火山の直下を掘削した。最高30kgf/cm<sup>2</sup>にも達する非常に高い土圧に遭遇した難工事区間は中工区(3327m)と、西工区(4039m)の東部(中工区の西1600m)である。儀明斜坑(出口は蒲生付近)では、発破時に可燃性ガスに起因すると考えられる爆燃が2回起きている。また崩壊事故等は、西側出口から2km程度から5.5km程度までの区間、すなわち蒲生泥火山とその西部において起きている。そのため、泥火山から3km程度までの範囲は特に注意を要する区間であることが考えられる。また、「ガス」と書かれた事故も存在することから、可燃性ガスの上昇経路(メタン孔)が、泥火山の周辺には多数存在している可能性も示唆している(例えば井上ほか,1978)。

d) 泥火山の作る陥没地形について

泥火山の活動には、大規模な陥没運動を伴った活動時期があると考えられている。実際、松代(蒲生)泥火山では直径600m、新冠泥火山では直径1000m、馬群潭泥火山(サハリン南部)では直径250m以上の陥没構造があることが推定されている(田中,2006)。

e) 泥火山の体系的な調査法について

田中(2006)は泥火山調査の体系として、以下の調査を提唱している。

- ① 地形調査(空中写真解析,レーザースキャナー探査)

- ② 地質調査(地質構造の調査,露頭観察)
- ③ 粘土・岩石の調査(X線分析,14C年代調査,ピトリナイト反射率)
- ④ 地下水・ガスの調査(地下水・ガスの化学・同位体組成分析)
- ⑤ 物理探査(高密度電気探査,CSAMT法調査)
- ⑥ 坑井調査
- ⑦ 室内実験,他の泥火山,マッドダイアピル地域の比較研究

【評価における留意点】

泥火山の影響の回避は、現在存在する泥火山の活動域から離れていること、および将来泥火山が活動する可能性のある地域から離れていること、により可能である(後者については、泥火山を生成する地質環境を抽出する方式についてさらに研究が必要であると考えられる)。

泥火山(メタン孔を含む)あるいは異常間隙水圧の分布域を含有あるいは近接する場合には、体系化された泥火山に対する調査を行わなければならない。

2.6 マス・ムーブメント

調査・評価項目：マスマーブメント

●(概要調査評価事項) 大規模なマスマーブメントの徴候が概要調査で明らかとなった地域では、斜面変動に伴うクリープやずれ破壊により廃棄物が直接破壊することが懸念されるので、クリープやずれ破壊の影響が及ぶ範囲は避ける必要がある。

将来の大規模なマス・ムーブメントの影響評価のために、大規模なマス・ムーブメントの存否や分布範囲・影響範囲について科学的調査を行う必要がある。なお、大規模なマス・ムーブメントとしては、崩壊物質質量が1000万m<sup>3</sup>を超える巨大崩壊(町田,1984)および100万m<sup>3</sup>から1000万m<sup>3</sup>程度の(準)巨大崩壊を調査の対象とする。

【調査の目的】

大規模なマス・ムーブメントは、例えば四万十帯の七面山崩れ(岩盤クリープ範囲4km×3km、深さ400m)・赤崩れ(岩盤クリープ範囲3km×1.5km、深さ300m)の規模・深さから明らかなように処分深度に重大な影響を及ぼしうる(Chigira,1992;Chigira & Kiho,1994;千木良,1995)。概要調査地域が山岳地域である場合や後背地に山岳地域をもつ地域の場合は、これらの山岳地域に大規模なマス・ムーブメントが存在するか否かを把握しなければならない。また、大規模なマス・ムーブメントが存在する場合は、その規模・深さや活動性に関する調査・観測を行い、大規模なマ

ス・ムーブメントの影響にかかる将来予測を行う。

#### 【調査の内容及び留意点】

崩壊物質量が1000万 $m^3$ を超える我が国の巨大崩壊は、主として火山体周辺と四万十帯の泥質堆積岩地域に発生しており、それ以外には濃飛流紋岩類中の帰雲山崩れがわずかに1例知られているにすぎない。崩壊物質量が100万 $m^3$ を超える（準）巨大崩壊は、我が国では多数存在するが、やはり火山体周辺と四万十帯の泥質堆積岩地域に多く、これら以外では付加体堆積物中の石灰岩体周辺、三波川帯の結晶片岩地域、またいわゆるグリーンタフ地域に比較的多く認められる。巨大崩壊の発生地点は地域的に偏在しており、周辺の地質・地質構造と密接に関係していることに留意する必要がある。なお、以下では、巨大崩壊や（準）巨大崩壊が多発する火山体周辺は概要調査地区の選定段階で排除されるため、調査の対象から除外し、調査内容についても記述しないこととする。

巨大崩壊の調査は、空中写真判読と現地調査による。空中写真判読では、地すべり・崩壊地・禿緒地などの変形地の特徴や多重山稜・線状凹地・山向き小崖などの重力性変形構造に特に注目して判読を行う。また、付加体堆積物中の石灰岩体周辺に発達する崖や壁岩などの変形地の特徴や傾斜変換線の分布なども将来の巨大崩壊の予測において重要である。

現地調査では、マス・ムーブメントによる変動の可能性のある地塊の地質・走向傾斜と地山の地質・走向傾斜との連続性・整合性が主たる調査・検討の対象となる。変動地塊と地山の地質に連続性がある場合においても、走向傾斜に差異があればクリープの可能性があり、大規模な岩盤クリープであるのか大きな褶曲構造の一部であるかの判別を行わなければならない。なお、岩盤クリープの初期のものは地表調査で判別できない可能性があるが、ボーリング調査を併用した総合的な検討により判別可能と考えられる。また、付加体堆積物中の石灰岩体周辺では、石灰岩体の三次元的な分布と山体の浸食特性などを総合的に検討し、巨大崩壊の発生する可能性を評価する必要がある。

マス・ムーブメントに関連する一般的な調査法については、例えば松村ほか編著「土砂災害調査マニュアル」(1988)などが、また大規模クリープに関する調査時の留意点については、千木良「災害地質学入門」(1998)などを参照されたい。

#### 【評価における留意点】

概要調査地域とその周辺部に大規模なマス・ムーブメントの徴候が明らかとなった地域では、マス・ムーブメントの周期性を評価した上でマス・ムーブメントに伴うクリープやずれ破壊の影響が及ぶ領域を予測し、その領域を避ける必要がある。また、マス・ムー

ブメントに伴うクリープやずれ破壊の影響が及ぶ領域より地表側の領域は斜面変動により崩壊する可能性が存在し、廃棄体はその領域内に存在する場合は地表に放出される可能性があるために、その領域を避ける必要がある。

### 3. 地質環境の調査

#### 【調査の目的】

概要調査地区における地質環境調査は、地質環境に関わる法定要件・環境要件への適合性を評価するために必要な地質・地下水などの基本的なデータを取得し、また地下水移行シナリオの解析に必要なデータを取得することを目的とする。なお、ここで述べる地質環境のデータとは、坑道掘削や操業の擾乱を受ける前の初期的な状態のデータ（ベースラインデータ）を意味し、地層処分関連施設による坑道掘削や操業による環境の変化を捉えるため、あるいは地層処分関連の閉鎖に伴う地質環境の回復過程を捉えるための重要な基準状態とみなされる(IAEA,1999; IAEA 2001)。

地質環境調査により取得をめざすデータには、次のようなものがある。

- ①地形
- ②地質体の分布（物性・化学特性などを含む）
- ③地質構造（断層などの構造の物性・化学特性などを含む）
- ④水文地質構造（深層地下水系の涵養域・流出域を含む移行経路の全容）
- ⑤熱構造

#### 【地質環境調査項目の設定と留意点】

##### a) 主な地質環境調査法

概要調査では、文献調査段階で得られた概要調査地区およびその周辺地域に関する既存資料の収集・分析により、概要調査地区の地質環境に関する一定のデータが得られており、その課題についても整理が終了していることが前提となる。概要調査では、多岐にわたる調査技術と解析・評価技術を組み合わせる必要があるが、具体的な調査方法には次のようなものがある。

- ①リモートセンシング：衛星画像・空中写真判読・解析など
- ②地形調査：現地地形調査（地形測量含む）
- ③地質調査：地表地質踏査（土壌調査含む）
- ④物理探査：重力探査・磁気探査・電磁気探査など
- ⑤水文調査・気象観測：天水・地表水・井戸水調査（水文・水質調査など）、気象観測など
- ⑥地温調査：熱兆候、温泉調査など
- ⑦掘削調査：ボーリングやトレンチなどの掘削による深度方向の総合的調査
- ⑧資源調査

- ⑨海域調査：沿岸域の調査に特有な事項
- ⑩モニタリング：長期間の連続的あるいは一定期間毎の調査が必要な事項
- ⑪室内試験・測定

これらの調査法については、3.1～3.11の各節で詳述する。

#### b) 地質環境調査と解析・モデル化の流れ

通常的地質環境調査では、以下のような調査の流れが取られることが多い。

- ①既存資料調査：文献調査に相当。
- ②地表調査：地表近傍のデータを取得するとともに、地下の主要な構造を推定する。また、室内試験・測定用試料を採取する。
- ③断面調査：物理探査により、地下の主要構造に関する断面構造のデータを取得する。
- ④掘削調査：ボーリング・トレンチ調査により、主要なコントロールポイントにおける深度方向の実データを取得する。
- ⑤解析・モデル化：各調査により取得されたデータを基に、三次元的な構造をモデル化する。

実際の調査にあたる上記①～④の調査の中で、最も調査期間を必要とするのは④の掘削調査のうち処分深度より深い大深度掘削と、①の地表調査のうちモニタリングが必要となるものである。モニタリングは、水調査のように平準値を取得するために少なくとも数年間程度の継続した観測値が必要となるものや、微小地震観測などのように地震活動の枠組みや局所的な応力分布等のデータを取得するために長期間の地震活動データの観測が必要となるものについて実施する必要があり、より長期間の連続的な観測により、より精度・確度の高いデータが得られるといった特徴がある。

概要調査では、調査期間に一定の制約があるため、地表調査→断面調査→掘削調査といった段階を追った調査計画の立案は恐らく困難となる。日本では100年以上にわたって蓄積された地質調査の成果を文献調査段階で利用できることから、概要調査地域の地質の大勢については文献調査終了時に把握できている可能性が高く、文献調査結果と地表調査の初期的な成果を基に大深度掘削調査地点やモニタリング項目・地点が選定され、その後の調査は全てが併行して進行することになる可能性が高いと考えられる。調査プログラムは、調査期間の制約を考慮したものである必要がある。

#### 【地質環境調査結果の評価・モデル化】

取得された地質環境のデータは、それを基に地層処分環境としての成立性に関する評価を行なうとともに、地質環境のモデル化を行うことになる。地質環境の安全評価における主要な評価項目には以下のようなものがある。

- ①概要調査地区の地質環境の法定要件・環境要件など（侵食堆積・断層・火山・泥火山・マスマーブメントなど）への適合性。
- ②概要調査地区内の処分候補地の処分深度における地温、地下水の流速・地化学特性などの地質環境の妥当性
- ③地質構造・水文地質構造のモデルの妥当性・信頼性

以下の節では地質環境の安全評価に必要な調査・評価項目を例示するが、これらは安全評価を行なう上で最低限必要な調査・評価項目であり、実施側がこれ以外の調査を行なうことを妨げるものではないことに留意されたい。

#### 3.1 リモートセンシング

日本では、表層に植生が発達していることが多く、また地質の概要について一定の知識が蓄積されている。従って、概要調査段階で行われるリモートセンシングの中心は航空空中写真の判読が中心となる。衛星画像解析では、広域のリニアメント解析や地表温度探査などが重要となる。なお、法定要件・環境要件などに関わるリモートセンシングに関しては、2.1項「侵食・堆積及び海面変化」、2.2項「地震活動」、2.6項「マスマーブメント」を参照されたい。

空中写真判読では、活断層の判定基準などが公表されているが、判読者の知識・力量・癖などにより判読結果が異なることが一般的である。そのため一つの判読の観点に対しても複数の判読者による判読を行ない、判読結果の照合を行なう必要がある。また、複数の観点から判読することも必要である。空中写真の判読結果はそれを単独で用いるのではなく、現地地形調査のデータをフィードバックすることにより、より精度・確度の高い判読が行なえることにも留意する必要がある。

リニアメント解析において、衛星画像を用いたコンピュータによる自動解析と空中写真を用いた目視判読では、次のような特徴がある。

- ①衛星画像を用いた自動解析は、連続性の高い大規模な構造を抽出するのに適している。一定の論理で自動解析するため、空中写真判読と異なり判読者の癖がでることはない。使用する衛星画像の撮影時期・光線の方向・撮影角などにより、一定方向の構造が強調される場合があることに留意する必要がある。
- ②空中写真判読では、既に述べたように判読者による癖があるが、複数の判読者の判読結果を突き合わせることで、個人の癖の部分のある程度うち消した判読結果が得られる。また、大縮尺の空中写真を基にした詳細な判読が可能である。

- ③人工的な地形改変の影響は近年ほど顕著であり、特に微地形については改変されている地域が多くなっている。近年の高解像度の衛星画像を用いても、自然地形が豊かに残っている地域を除いて、人工的な地形改変後の地形・表層環境しか把握できない。一方、空中写真はアメリカ合衆国空軍（1940年代）、日本地図センター（国土交通省国土地理院系）、日本森林技術協会（農林水産省系）が提供する異なった撮影年次・撮影範囲の空中写真が多数存在する。近年の人工的な地形改変の影響を排除するためには、より古い撮影年次（例えばアメリカ合衆国空軍撮影）の空中写真を利用する必要がある。また、異なった撮影範囲の空中写真を用いることで、大きな地形要素から比較的小さな地形要素までの判読が可能となる。
- ④処分深度を300m～500mと想定した場合に、処分深度に影響を及ぼすリニアメントを判読するためには、地表の連続長>処分深度×2程度のリニアメントの判読を行う必要があり、この規模のリニアメントの判読はコンピュータによる自動解析では（現状では）不可能である。従って、複数の判読者による空中写真判読が現状では唯一の方法となり、③で述べた事項を考慮すると空中写真判読の利点は極めて大きいと考えられる。

衛星画像を用いた地表温度探査は、地表面から放射される熱赤外領域の電磁波を、衛星に搭載された赤外線センサーで捕捉し、そのバンドデータを利用して地表温度を測定する方法である。広域の温度異常を検出するのに適しており、火山や噴気帯、自然湧出する温泉・鉱泉などの捕捉が可能である。

### 3.2 地形調査（地形測量含む）

地形調査では、リモートセンシングの結果（変位地形、線状地形、段丘面など）を参照にしながら、現地踏査により変位地形・線状地形（リニアメント）の成因（断層、地質境界など）や段丘の構成物・累重関係など地質・地形に関するデータを収集・解析し、特に第四紀の地形発達史を構築することが重要になるが、その詳細については2.1項「侵食・堆積及び海面変化」、2.2項「地震活動」を参照されたい。なお、現地踏査における主な調査対象には次のようなものがある。

- ・断層・線状地形（リニアメント）：分布・成因
- ・遷急線・遷緩線：分布・成因
- ・指標地形面（基準地形面）
  - ①段丘面：分布・比高、段丘構成層の形成年代・構成岩石種、被覆層の形成年代・構成鉱物種
  - ②侵食小起伏面：分布、侵食小起伏面残留堆積物の形成年代・構成岩石種、被覆層の形成年代・構成鉱物種

- ・地すべり、崩壊地形、岩屑なだれ堆積物：分布、形成年代・形成要因
- ・人工改変地形：分布、形成年代

現地踏査以外では、航空レーザー測量による詳細な地形測量や、GPS測地と光波測距等を組み合わせた地表面変動に関する詳細なデータも現在の地形変動を把握する上で重要なデータとなる。

航空レーザー測量は、GPSを搭載した小型飛行機・ヘリコプターによりレーザー測量を行なうものであり、従来に比べて遥かに高い高さ方向の精度を持つDEMの作製が可能である。人工的な地形改変を受けていない地域については、自然地形として存在する微地形を高精度に計測可能であり、地震活動やマスマーブメントの前後の地形変化を検出できる可能性がある。ただし、航空レーザー測量で得られる一次的な地物面から地形面を抽出するためには、自動解析結果と空中写真の突き合わせによる確認作業が必要である。

GPS測地点を高密度に配備した高精度測地と光波測距（将来的には光波距離計に置き換える）を組み合わせることにより、地表面の短期的な変動の傾向を捕捉することができる。海溝型巨大地震や内陸型地震に対する地盤の応答挙動を観測し、調査対象領域の応力場や応力集中域、地震応答特性に関するデータを取得することができるが、その詳細は3.10項「モニタリング」で記述する。

地形諸量は最終的にはDEM化され、GIS上で様々なモデルを作製・解析する際の基礎データとなる。DEMに基づく地形解析は、近年一定の成果を挙げているが、異なったアルゴリズム間の解析結果の差異や、空中写真判読・現地踏査との対比・検証が必要であることに留意すべきである。また、人工的な地形改変が進んだ地域では、自然地形が残っている時期の空中写真を用いた過去の自然地形に基づくDEMを作製した上で地形解析を行なうことが望ましい。

### 3.3 地質調査（土壌調査・河川底質調査含む）

概要調査地区における地質調査では、2段階の調査プログラムが必要とされる可能性が高い。概要調査期間に一定の制限があることから、三次元的な地質構造探査のコントロールポイントとなる大深度掘削調査地点の選定は概要調査の初期的な段階でなされると想定され、大深度掘削調査地点選定のための調査プログラムが初期には優先される。大深度掘削調査地点選定のための調査プログラムは、文献調査結果の確認と、文献調査により抽出された課題が大深度掘削調査地点選定に影響を及ぼす場合はその調査・評価を行なうことが主題となる。

大深度掘削調査地点選定後の地質調査は、地質モデルの作成に寄与する地質・地質構造に関するデータの

収集・解析や分析・試験用試料の採取，それらに基づく地質構造発達史，特に第四紀の地質構造発達史の構築（2.1項「侵食・堆積及び海面変化」を参照），また水文地質構造モデルの作成に必要な断裂系に関するデータの収集・解析が重要になる。

現地踏査においては，地質リモートセンシングの結果（変位地形，線状地形など）を参照しながら，現地踏査により地質・地質構造に関するデータを収集する。なお，現地踏査における主な調査対象には次のようなものがある。

- ・基本的な地質構成（結晶質岩石／被覆堆積岩／第四紀層）：形成年代／層序，構成鉱物・化学組成
- ・基本的な地質分布：異種岩石・被覆堆積層・第四紀層の三次元的境界，層理・流理・片理の走向傾斜
- ・基本的な地質構造（分布／規模／構造）
  - ①基盤構造
  - ②断層・破碎帯：分布／規模／連続性／走向傾斜，最終活動時期，古応力場，充填鉱物・変質鉱物
  - ③褶曲構造：形成時期，古応力場，充填鉱物・変質鉱物
  - ④節理：分布／密度／走向傾斜，古応力場，充填鉱物・変質鉱物
- ・活断層：分布／規模／連続性／走向傾斜，センス，変位速度，想定最大変位量，想定最大マグニチュード，活動履歴（活動時期・再来周期），充填鉱物・変質鉱物
- ・火山・マグマ貫入・岩脈：活動年代／活動履歴，火山噴出量，火山灰流／降灰の可能性（層厚／密度／温度）
- ・土壌（風成層／風化土壌）：分布／深度，構成鉱物
- ・河川底質（構成鉱物／化学組成）：分布，地球化学的ベースライン（地球化学図など）
- ・その他の地質特性
  - ①風化：分布／風化深度，風化性状（生成鉱物種／構成鉱物・化学組成に与える影響），成因（過去の気候／二酸化炭素を含む深部流体など）
  - ②変質：分布，性状（生成鉱物種／構成鉱物・化学組成に与える影響），成因（自変質／マグマ活動／火山性熱水／非火山性熱水／二酸化炭素を含む深部流体など）
  - ③有用資源：資源種／品位／量

概要調査における現地地質踏査において用いられる調査・解析手法はそのほとんどが一般的な地質調査法である。地層処分において固有な地質調査項目は，水文地質構造モデルや水理地質構造モデルの作成に必要な断層や節理などの断裂系の調査・解析である。これらの断裂系は，その性状によっては健岩部に対して透水性が高い水みちになる可能性があり，地下水流動の評価・解析に必要な要因となる。断裂系の水みち

としての評価・解析においては，次のようなことを考慮する必要がある。

- ・断層や節理などの多くは健岩部に対して特別に高い透水性を持つわけではなく，逆に断層の一部は健岩部に対して低い透水性を持つ場合がある。また，健岩部に対して高い透水性を持つ断層や節理などは水みちとして一括されるが，極めて高い透水性を持つ水みちと，透水性の低い水みちに2分される。水みちなどを取り扱った学術書などで紹介されている「トンネルなどの壁面から水が出ている」写真などのような水みちは，このうちの透水性の低い水みちである。トンネル工事などで極めて高い透水性を持つ水みちに遭遇した場合，水みちに沿って上みずの大出水や切刃崩壊などが発生するため，トンネル壁面の水みちを直接的に写真撮影することはできず，むしろ写真が存在しないような水みちこそが水文地質学的に重要である点に留意すべきである。地層処分に係る地下水の流動過程や移行現象を調査・解析する上では，数は少ないが地下水の流動過程に極めて大きな影響を与える極めて高い透水性を持つ水みちについて決定論的な取扱いが必要と考えられる。また，数が多い透水性の低い水みちについては統計的な取扱いで十分と考えられる。
- ・日本の比較的温暖・湿潤な気候下では，相対的な隆起量が大きい地域や侵食量が大きい地域を除いて大規模な断層・節理が露頭に露出することは少なく，小規模な断層・節理を露頭で観察することが中心となる。露頭の断層・節理の記載では開口度の記述が重要であるため，弛みなどが生じていない底面露頭やできるだけ新鮮な露頭を中心に記載を行うことが望ましい。また，断裂系に関するデータが十分に取得できない場合は，トレンチ掘削を行ないトレンチ底面や壁面に出現する断層・節理などの調査を行うことが望ましい。
- ・断裂系の解析にあたっては，地質体の年代別に解析を行ない，また断裂系の充填鉱物・変質鉱物の年代測定などにより，断裂系の生成・活動の履歴に関するデータを取得する。断裂系の解析法としては様々な手法が提案されており，断裂系相互の新旧関係や断裂系形成時の古応力場などが求められている。なお，クラックテンソル法では，断裂系が存在する場の透水性と関連づけた解析が可能である。

### 3.4 物理探査

概要調査における物理探査は，3段階の探査プログラムが必要とされる可能性が高い。概要調査期間に一定の制限があることから，三次元的な地質構造探査のコントロールポイントとなる大深度掘削調査地点の選定は概要調査の初期的な段階でなされると想定され，大深度掘削調査地点選定のための探査プログラムが初



期には優先される。大深度掘削調査地点選定のための探査プログラムは、文献調査結果の確認と、文献調査により抽出された課題が大深度掘削調査地点選定に影響を及ぼす場合はその調査・評価を行なうことが主題となる。

大深度掘削調査地点選定後の第2段階の探査プログラムは、概要調査地区を面的に探査し主要な大構造を抽出・確認し、あるいは探査測線に沿った断面構造の探査が主題となる。第3段階の探査プログラムは大深度掘削調査終了後にボーリング孔を用いて行なう物理探査であり、弾性波などを用いたジオトモグラフィー探査を行なう。なお、以下で例示する探査法は探査法自体の精度・確度あるいはその評価可能性の観点から信頼できる手法であることが確認されており、かつ安全評価を行なう上で必要な最小限のデータを取得するためのものである。

### 3.4.1 面的探査

広域的な地表面探査や空中探査により、概要調査地区の基盤構造、異種岩体・貫入岩体（潜頭性を含む）の境界、断層・破砕帯などに関するデータを取得する目的で行なう。

a) 精密重力探査：重力計 + GPS（干渉測位）の組み合わせによる重力探査を面的に行なうものである。概要調査地区の広さにもよるが、既存データを含めて緯度・経度1分四方あたり4地点以上の測点が存在するような重力探査（1mgal程度）は大規模構造（異種岩体や大規模な構造線・断層などの分布）を確認するため、また既存データを含めて緯度・経度1分四方あたり16地点以上の測点が存在するような重力探査（0.5mgal程度）は中規模構造（貫入岩体や処分深度に影響を及ぼすような断層など）を確認するための最も基礎的なデータとして必要である。なお、既存の重力データが存在する場合には、重力測定点の位置情報に関する信頼度の評価を行なう必要がある。位置情報の信頼度に関しては、GPS（干渉測位）のデータは利用可能なデータとして採用してよいが、GPS（単独測位）のデータはやや信頼度が落ちる。GPSを用いずに地形図などから位置情報が算出されているものは参考データ程度に取り扱い、再度重力探査を行なう必要がある。重力探査結果はブーゲ異常図もしくは残差重力図などのかたちでまとめ、重力コンターの疎密などの判読から地下構造を推定する。

b) 精密空中磁気探査：GPSを搭載した小型飛行機・ヘリコプター・飛行船などによる空中磁気探査を稠密な測線間隔（数100m程度）で面的に行なうものであり、迅速に広範囲のデータを取得できる点に特徴がある。概要調査地区に分布する各岩体を持つ帯磁率の

違いから異種岩体境界や貫入岩体などの分布を一定の精度で判別できるため、基礎的なデータとして必要である。

c) 精密空中電磁探査：GPSを搭載した小型飛行機・ヘリコプター・飛行船などを利用した空中電磁探査を稠密な測線間隔（数100m程度）で面的に行なうものであり、迅速に広範囲のデータを取得できる点に特徴がある。しかしながら、汎用生の高い重力探査や磁気探査とは異なり、電磁探査により有意なデータを取得できるのは特定の地質状況の場合に限定される。例えば、基盤をなす結晶質岩を被覆堆積岩層が覆っている場合は、その比抵抗特性の違いから被覆堆積岩層の境界深度の分布を概略的に判別できる可能性がある。

d) 精密自然放射能探査：GPSを搭載した小型飛行機・ヘリコプター・飛行船などを利用した自然放射能探査を稠密な測線間隔（数100m程度）で面的に行なうものであり、迅速に広範囲のデータを取得できる点に特徴がある。概要調査地区に分布する各岩体を持つ自然放射能強度の違いから異種岩石境界や断層・破砕帯の分布（またはその一部）を一定の精度で判別できるため、基礎的なデータとして必要である。

### 3.4.2 測線探査

特定の測線に沿った物理探査により、測線沿いの断面構造（異種岩体・貫入岩体の境界、断層・破砕帯など）に関するデータを取得する目的で行なう。

a) 精密弾性波探査：受・発振点間隔を稠密に設定した弾性波探査を測線上で展開するものであり、反射法と屈折法を組み合わせた解析が行なわれる。地下の構造断面を探索する測線探査において最も高い精度・確度をもつ探査法であり、その探査結果は安全評価において最も信頼性が高く、重要視される。しかしながら、概要調査地域を横断するような探査測線（数km以上）をカバーできる能力をもつ弾性波探査用の震源は限られ、特に詳細な精密弾性波探査を行ないうる震源は大型のバイプロサイズ車両にほぼ限定される。このため、大型車両が通行可能な規格を持つ道路沿いにしか探査測線を展開できない点に留意する必要がある。反射法弾性波探査では連続した比較的低角度の物性境界（第四紀層・被覆堆積岩層と結晶質岩／結晶質岩中の風化境界深度／結晶質岩中の異種岩体境界）とその不連続構造部（断層など）が探査可能であり、屈折法弾性波探査では比較的高角度の物性境界（結晶質岩中の断層・節理に沿った風化部など）が探査可能である。

弾性波探査では調査対象構造の規模・探査深度に応じて探査測線長や受・発振点間隔を設定する必要がある。探査測線長に関しては少なくとも（探査測線長）

> (探査深度) × 4 を満たす必要があり、構造線などの大規模構造では長大測線 (数 km ~ 数 10km 以上) ・受振点間隔 50m 以下の探査を、谷底平野などに推定されるリニアメントなどの小規模な構造を断層か否か判定するなどの小規模構造では谷底平野を横断する距離 (数 100m 以内) ・受振点間隔 2m 以下の探査を行なう必要がある。なお、谷底平野などでの弾性波探査では山地-低地 (谷底平野) 境界に地形的急変線が存在する場合は地形効果に関する補正が必要になるが、その補正は一般的には困難である。従って、山地を切り崩して造った道路などを適切に利用し、地形的急変線の地形効果を最小限に留めるように探査測線を設定することが重要である。

異なった方向の探査測線が交叉する場合は探査測線を十字型に交叉させることが望ましい。探査測線が T 字型に交叉する場合、T 字の縦方向は探査測線が交差する地点において信頼度の低い解析結果しか得られない。道路規格などから T 字の縦方向の延長部に適切な震源が入れない場合は、代替震源を用いるか、探査測線そのものを再設定する必要がある。探査結果に対しては解析測線の設定法・解析格子点の間隔・波線密度などを総合した解析結果の評価が必要であるが、その詳細については後述する参考書籍を参考にされたい。

b) 精密重力探査：重力計 + GPS (干渉測位) の組み合わせによる重力探査を測線上で展開するものであり、弾性波探査と異なり探査機器が小さいためほとんどの場所で測線を展開できる点に特徴がある。構造線などの大規模構造では測点間隔 50m 以下の探査を行い、重力測定値の標高補正值などによる直接的な比較やモデル計算による検討を行う。谷底平野などに推定されるリニアメントなどの小規模な構造を断層あるいは水みちとして判定するなどの  $10 \mu \text{ gal}$  オーダーの精度が必要とされる精密な重力探査では、田圃など標高差がほとんどない場所を測線に選定し、測点間隔 2m 以下の探査を行い、重力測定値の直接的な比較やモデル計算による検討を行う。(深部地質環境研究センター, 2007)

c) 精密磁気探査：磁気探査を測線上で展開するものであり、弾性波探査と異なり探査機器が小さいためほとんどの場所で測線を展開できる点に特徴がある。探査深度が浅く浅層に存在する構造のみが探査対象となり、異種岩体が接する断層の探査などに用いられる。測点間隔 2m 程度の探査を行い、磁気測定値の直接的な比較やモデル計算による検討を行う。

d) 精密比抵抗法電気探査：電極間隔を稠密に設定した比抵抗法電気探査を測線上 (あるいは面的) に展開

するものであり、弾性波探査と異なり探査機器が小さいためほとんどの場所で測線を展開できる点に特徴がある。しかしながら、比抵抗法電気探査では探査測線の設置場所の特性によっては偽像が出現しやすく、その解析結果の確度は弾性波探査や重力探査に比べて著しく低く、比抵抗法電気探査を行う必然性については慎重に検討を行う必要がある。また、汎用性の高い弾性波探査や重力探査とは異なり、比抵抗法電気探査により有意なデータを取得できるのは特定の地質状況の場合に限定されることに留意する必要がある。例えば概要調査地域内に基盤の結晶質岩を被覆する堆積岩層が存在した場合は、結晶質岩と被覆堆積岩層の境界深度あるいは被覆堆積岩層内の断層構造などが探査可能とされる。

比抵抗法電気探査では調査対象構造の規模・探査深度に応じて探査測線長や電極間隔を設定する必要がある。探査測線長に関しては少なくとも (探査測線長) > (探査深度) × 10 を満たす必要があり、調査対象領域内に存在する被覆堆積岩層の規模に応じて、被覆堆積岩層と結晶質岩との境界深度などの大規模構造では被覆堆積岩層を横断する方向に電極間隔 100 ~ 50m 以下の面的な探査を、被覆堆積岩層内に存在する断層などの小規模構造ではその構造を横断する方向に電極間隔 5m 以下の探査を線的に行う必要がある。

### 3.4.3 ジオトモグラフィー探査

大深度掘削調査終了後にボーリング孔と地表面に設置された受信点を用いて行なう物理探査であり、VSP 探査 (弾性波探査) などが行なわれる。

VSP 探査：受・発振点間隔を稠密に設定した弾性波探査をボーリング孔内と地表測線上で展開するものであり、一般にはボーリング孔の崩壊を防ぐためにボーリング孔内には発振点を設けず受振点のみを置き、地表測線には受・発振点を置くことが多い。地表震源とボーリング孔の間の弾性波伝達過程と受振点となるハイドロフォンの特性を考慮した場合、地表震源から発生した P 波初動の到達時間が最も明瞭に捕捉されるため、インパクトなどの P 波震源を地表震源に用いることが望ましい。地表測線の受・発振点間隔やボーリング孔内のハイドロフォン間隔は、地下構造探査に必要なとされる空間分解能から逆算して設定する。精密な VSP 探査では、ボーリング孔内の受振点となるハイドロフォン間隔を 1m に、地表測線の受振点間隔は 2m に設定し、結果として解析された空間セル分解能 4m 程度の探査を行なった例もある。VSP 探査における留意点は 3.4.2 項「測線探査」における「精密弾性波探査」と同様であるが、解析結果の解釈においては特に次のような点に留意する必要がある。

- ① 地下に顕著な断層などが存在する場合、その構造に引張られた解析結果 (偽像) がやすいこと。

②波線密度が低い解析領域に、①の影響もあるが、弾性波探査としては偽像がやすいこと。

### 3.5 水文調査・気象観測

この項では、天水・地表水・地下水などの水そのものと、水循環の要因としての気象を対象とした調査・観測を行なう。

#### 3.5.1 水文調査

以下に、降水（天水）、地表水・湧水、浅層地下水、深層地下水の4つの対象別に記述する。

a) 降水（天水）：対象地域の面積、比高、地形などを考慮した上で、代表的な場所に適切な密度で雨量計（雨水採取可能なもの）を設置し、降水量（気象庁、国土交通省、地方自治体などによるデータも活用）の空間分布を複数年にわたって測定する。得られた地点降水量を面積降水量へ換算する際には等降水量線法やティーセン法などを用いる。一方、月別あるいは季節毎の降水試料の採取を併せて行い、地下水流動系の解明（特に涵養域の同定）に資する目的で、降水の酸素・水素同位体比の高度効果や内陸効果を決定する。

なお、山岳部では、降水の量とその同位体組成ともに山陰効果が重要な影響を与えることがあるので、雨量計の設置に当たっては卓越風向に対する斜面の向きや微地形に十分留意する必要がある。また、長期間にわたって観測が継続されている気象庁、国土交通省、地方自治体など近隣の雨量観測地点の降水量データとクロスチェックを行い、計測値の精度ならびに年平均値として水収支計算に使用する際の値の代表性・確度について検討を行う必要がある。

b) 地表水・湧水：水収支の解明のため、流域外へと流亡する河川や湧水の流量を高精度で測定する。測定に当たっては、流量の規模や河床形状・安定性などを考慮して、総量（容積）法、トレーサー希釈法、三角堰（四角堰）法、流速・断面積法、水位・流量曲線法から適切な測定法を選択する。また、源流から下流に向かって流量測定を順次実施し、流量の増減から流路区間毎の河川水と地下水との交流関係を定量的に把握する。この際、水温、電気伝導度、pH、一般水質、酸素・水素同位体比などの測定を併せて行い、地下水流入の有無、流入がある場合には正確な場所の同定と流入する地下水の性状と起源を地球化学的側面からも検討する。地形的・地質学的に涵養域を正確に限定し得る源流部の河川水あるいは湧水の酸素・水素安定同位体比は、いわゆる"地下水涵養線"の構築に当たって極めて重要なデータとなり、正確な涵養域の推定にかかせない。

なお、降水量と同様に、流量にも年毎の変動が顕著

に見られる。水収支計算において年平均流量値として確度の高いデータを提供するためには、ポイントとなる地点での流量観測を可能な限り長期間にわたって継続する必要がある。

c) 浅層地下水：測水調査によって井戸の水位を測定し、地下水断面図を作成する。また、既存資料あるいは新規に実施する揚水試験から、帯水層の透水係数、間隙率、層厚などの水理パラメータに関する情報を得る。これらのデータに基づいて、浅層地下水の水平二次元的な流動方向、流動量、賦存量、河川水との交流関係、さらには（伏在）断層など地質学的要因に規制された流動系の不連続の有無を解明する。測水調査と並行して、地下水の水温、電気伝導度、pH、一般水質、微量成分、各種同位体組成についての測定を行う。これら地球化学的性状の地域分布（特に水温、塩化物イオン濃度、重炭酸イオン濃度、酸素・水素同位体比などに注目）から、浅層地下水系への深層地下水あるいは深部起源水の混入・拡散の検知や、場合によってはその絶対量を推定し得る場合がある。

なお、浅層地下水は地表からの汚染物質の直接的な影響を受けやすい。従って、地球化学的測定項目のデータ解釈に当たっては、なんらかの方法で人為汚染の影響を排除した上で検討を進める必要がある。

d) 深層地下水：深度が異なる多数の深井戸を対象とした測水調査によって水理水頭の等値線図を作成し、深層地下水の三次元的流動方向を明らかにするとともに、地下水流動系に対する（伏在）断層を始めとする地質構造の影響の有無とその程度を把握する。また、帯水層の水理定数に基づいて深層地下水の流動量や賦存量についての推定を行う。さらに、浅層地下水の場合と同様に、水質や各種同位体など地球化学的項目についての測定を通じて深層地下水の実態とその性状の空間分布に関する詳細なデータを取得し、地域の深層地下水の起源や深部帯水層中で生起する混合等の水文プロセスの定量的な解明を行なう。

なお、既存の水源井は通常マルチスクリーン構造を有しており、異なる深度の複数の帯水層からの地下水をあわせて採取している場合が多い。このため、水理水頭測定値や水試料の分析値の解釈に当たっては、それらがどの深度の帯水層を代表する値であるかを十分留意すべきである。パッカーを用いた深度別の水理水頭の測定ならびに地下水を採取することが望ましい。

#### 3.5.2 気象観測

気象観測の対象となる諸量については、気象庁・国土交通省・地方自治体などが長期にわたって観測を行っている。このうち気象庁のアメダス観測点が最も広汎・高密度に分布しており、およそ20km四方に1

点の観測点が存在する。これらのをアメダス観測網を補完・付加する形式で、概要調査地区内に自動気象観測点を高密度に配備し、長期的に気象観測を行なう。なお、既存の国土交通省・地方自治体の気象観測点の観測対象が十分でない場合は、それらの地点の欠測対象を自動観測するシステムを付加することが望ましい。概要調査地区周辺の気象に関する基礎的なデータとして、また水調査対象の降雨応答特性などを考慮するうえで極めて重要である。なお、主な気象観測の対象は以下の通りである。

・気圧／気温／湿度／風向・風速／降水量／日照／積雪深

### 3.6 地温調査

地温調査では、地温（地熱）特性および地熱資源（温泉を含む）を評価するために必要なデータを取得することを目的としている。地温調査では、リモートセンシングの結果（熱赤外領域のバンドパス画像など）を参照にしながら、現地踏査により熱兆候、温泉・鉱泉調査など地温・地熱に関するデータを収集・解析し、概要調査地区の熱構造モデルを構築する。熱構造モデルは他の地質環境モデル、例えば水文地質モデルなどとの整合性を確認する必要がある。

地温調査における主な調査対象には次のようなものがある。

・地熱兆候／温度分布／放熱量／熱物性値（熱伝導率 熱容量など）

各調査対象に関連して取得すべきデータは共通するものが多いので、系統的な調査を実施することが望ましい。また、地熱探査のように地熱資源の評価そのものが目的ではないので、他の地質環境調査プログラムの中に合理的に組み込んで実施することが望ましい。

文献調査あるいはリモートセンシングにより明らかにされた熱兆候の確認には次のデータを取得する。地表データの他に孔井や深井戸などのデータが利用できればそれらも利用する。

①熱兆候の性状

②熱兆候地の地形・地質（変質も含む）

熱兆候の性状とは、蒸気やガスの噴出、湧水（温泉）、あるいは高い地表面温度のうちいずれか（複数可能）である。次に熱兆候の性状に応じた詳細データを取得する。それら中でも重要なデータは温度、湧出量（蒸気やガスの場合は噴出量）、pH および化学組成である。これらのデータは一般に季節変動することが多いのでそれを考慮した調査を行なう必要がある。熱兆候地の地形は地下水の流動ポテンシャルに関する地形効果を把握するために必要であり、地質は空隙や亀裂の分布といった地下水の流動経路を把握するために必要である。変質は過去から現在までの水-岩石反応の積分情

報を与える。以上について、文献調査結果やリモートセンシング解析結果と異同を確認する。これらの調査は基本的に地熱調査のそれと変わるところはないのでその手法については既往の文献を参照されたい（例えば湯原編，1982）。

地温調査においても、試料採取やデータ測定のタイミングとポイントとに注意を払う必要がある。データ測定ポイントはモデル作成に合理的な配置であることが望ましく、タイミングとしては季節変動やより長期的な変動幅を把握できるように計画しておくことが重要である。わが国では、廃棄体は冷却してから埋設されることになっているが、その後も放射壊変が続く以上、発熱は避けられず、母岩領域の温度場へのなんらかの影響は免れない。坑道掘削以前の初期的な地温分布や熱物性は、廃棄体による壊変熱の影響を評価する上で基本的なデータであり、概要調査段階で取得する必要がある。

#### 3.6.1 地温調査各論

以下では個別的な調査対象・項目について、概要と留意事項について記す。

a) 温度分布 (Temperature) : 地下の温度分布は、基本的に地表環境での年平均気温と地下水による熱輸送、地下深部からの熱流量に規制されていると考えられる。温度分布で特に検討の対象となる点は、地下深部、特に処分施設深度での最大温度が 100℃程度を越えているかどうかである。これは間隙水等の沸騰を避けるためであるが、地下深部が静水圧条件下であることを想定すると、沸点は地表より上昇し 100℃以上となる。原位置における水質検層に関してセンサー等の精度を確保しようとする、地温・間隙水温は 80℃程度以下が好ましい。このような特に高温ではない条件においては、調査自体の影響を最小限に止める手だてを行った上で、岩盤温度と間隙水温度が平衡な条件での温度分布を取得し、地温勾配を算出する。母岩領域でのバリア性能を劣化させる地下水の熱対流の発生条件を検討するためには、十分に精密な地温測定と測定密度が必要となる。地形要因による地下水流動ポテンシャルを熱対流要因が上回らないことが好ましい。

b) 熱伝導率 (Thermal Conductivity) : 熱伝導率は、一定の温度勾配を物質に与えたときの単位面積当たり伝わる熱量を求めるもので、材質が不均一な地下の母岩領域では、測定対象の空間の大きさや方向に依存することが予想される。実際に計測する際の定義としては、熱の伝達が温度差だけによる仮定の下で、物質の厚さ  $L$  あたり温度差が  $\Delta T$  のもとで、対象物質の面積 ( $A$ ) あたり通過する熱量  $Q$  より、 $\lambda = Q \times L / (A \times \Delta T)$  で表される。計測する測定領域を括

大すると、不均一性だけでなく不連続面や物質境界面がより大きな影響を与えることになる。供試体の熱伝導率 (Intact rock thermal conductivity) は、水理学的なブロック境界となる水みちなどの構造を含まないような地層・岩体の平均的な有効熱伝導率 (Rock mass thermal conductivity) の推定には有効なパラメータとなる。なお、供試体の熱伝導率は相対的に小型 (例えば径 5cm 長さ 13cm 等) の実験室試料を亀裂等の少ない連続試料として整形し測定するものであり、母岩の構成要素であるマトリックスや鉱物物質自体のデータを把握することを目的とする。一方、地層・岩体の熱伝導率は、空隙・(透水性の低い) 亀裂、それに加えて岩相物質の不均一性や亀裂等の不連続面も含めた相対的な岩盤としての実効熱伝導率を、検体熱伝導率ないしマトリックスの熱伝導率と空隙率ならびにその流体飽和率等との関係から求めることを目指し、解析により求めるものである。

c) 地殻熱流量 (Heat Flow) : 地殻熱流量は岩石の熱伝導率と地温勾配とを測定することによって求められる計算値で、地球内部から固体熱伝導によって地表を通過する熱エネルギー量は  $k(\text{mWm}^{-1}\text{K}^{-1})$  を岩石の熱伝導率、 $\partial T / \partial z(\text{Km}^{-1})$  を地温勾配とすると  $Q=k \cdot \partial T / \partial z(\text{mWm}^{-2})$  で定義される。一方、空隙流体等の熱対流による熱エネルギーの運搬は、これとは別途求められるべきものであるが、直接これを計測することは非常に困難である。従って、通常は地表付近までの熱の伝達手段を区別せずに、地下の地温勾配が固体岩石と空隙流体が短期的には温度平衡にあるという前提で算出する場合が多い。これによれば、平均的な地殻熱流量は約  $69\text{mWm}^{-2}(1.65 \times 10^6 \text{cal cm}^{-2}\text{s}^{-1})$  とされ、地質との関連では地層の若い地域ほど高い値を示し、高熱流量地域は火山帯とよく一致している。なお、広域的なサイト初期調査の段階では、地殻熱流量図等として得られている地殻熱流量の分布情報を、地下の高温域 (熱源) の概要把握に利用できる。

d) 熱容量 (Heat Capacity) : 熱容量は、単位体積の物質の温度を摂氏  $1^{\circ}\text{C}$  上昇させるのに必要なエネルギー量であり、処分場も含めた熱供給の変化に対応した、地温勾配と地表での熱流量を決定する重要なパラメータの一つであるが、実際の供試体の実験室での測定例は多くない。通常の計算には、岩石熱容量 (熱容量と密度の積) が用いられ、若干の温度依存性があるとされている。また、熱容量も直接測定が可能な岩石粒子熱容量 (Rock Grain Heat Capacity) と、その値を元に算出する地層・岩体の平均的な熱容量 (Rock Mass Heat Capacity) に区分され、後者は空隙中の水や空気の効果も含めた実効値であるが、水の沸騰点温度以上の高温環境については、岩石粒子熱容量を採用

するべきとの見解もある。これら二つのパラメータにより、母岩領域内での熱の伝導状況が決定される。熱伝導率は主として母岩の構成物質と空隙率により規定される。鉱物による熱伝導率の差は非常に大きい。代表的な結晶質岩である花崗岩や堆積岩である砂岩・泥岩層のどちらにおいても、主要な造岩鉱物で最も熱伝導率の高い石英 ( $7.7\text{W/mK}$ ) の量比が大きい。また、わが国の地下深部の地質環境はほぼ飽和状態であるため、空隙率の影響は水による熱伝導として考慮することが妥当である。

e) 熱膨張率 (Thermal Expansion Coefficient) : 母岩領域での温度変化により、熱膨張率に応じた体積変化や熱応力が発生する。これにより、種々のスケールの亀裂・裂隙等の不連続面ないし水みちが生じる可能性があり、間接的に熱の伝導状況の変化に繋がる事が予想される。ただし、これらの不連続面の生成は、地下の圧力分布と亀裂分布に規制されている。また、地下深部の封圧下では開口部すなわちシャフトならびに地下施設内に向かった限定的な EDZ 領域が主要な生成域と考えられる場合もある。なお、母岩を構成する複数の岩石種において熱膨張率の大幅な差がある場合には、封圧下であっても不連続面の生成が集中する可能性が高まる。熱膨張率は温度に強く依存するため、小型の連続試料から求める供試体熱膨張率 (Intact Rock Thermal Expansion Coefficient) と、空隙・亀裂・飽和率・物質の非均一性などの効果を含めた実効的な地層・岩体の熱膨張率 (Rock Mass Thermal Expansion Coefficient) と比較すると、高温条件では後者が大きくなる場合が多い。それは、温度上昇により岩体中の空隙や亀裂が岩石変形により圧着することが原因と考えられている。従って供試体熱膨張率は保守的な値となり、施設の安全設計などの用途としては好ましい。

f) 空隙率 (Matrix Porosity) ならびに空隙流体の組成と熱伝導率、熱容量、飽和率 : これらのパラメータは、熱プロセスを間接的にコントロールする可能性があるものであり、物性・地化学特性のパラメータとして定常的に取得されるものでもある。熱プロセスに関連しては、空隙率が大きく不飽和な地質環境条件の場合にこれらのパラメータの取得に特に留意する必要がある。その理由は、温度分布と熱伝導特性の取得に際し、水で飽和した岩石の物性値と仮定することで有意な誤差が生じる主要な条件が、空隙流体としての水と熱特性が大きく異なる気体 (空気、水素ガスないし石油等) が存在する事であり、その程度は均一な物体としての熱特性計算に与える誤差の許容値により設定される。水に不飽和な空隙の発達は、一般的なわが国の地質条件では、石油・天然ガス・特殊な組成の地下

水等、炭化水素資源地域に想定される。未開発地域等でこれらが存在する可能性は否定できないため、母岩熱物性の正確な把握のためには、これら間隙流体の採取ならびに熱物性の測定手法の適用を準備する必要がある。

### 3.6.2 地熱資源としての評価

地温が著しく高いことが概要調査で明らかになった場合は地熱資源としての評価が必要となる。地熱資源について、どこまでを資源とし、どこからが資源に当たらないかの議論はこの技術資料の視野の外であるので、このような議論に資するための基本的データとなりうる資源量評価について記す。地熱のエネルギー資源としての評価については1920年から1980年代にかけて次に示すようないくつかの方法がすでに確立している（宮崎ほか，1991）。

- ・容積法
- ・マグマ溜りの残存熱量法
- ・自然放熱量法
- ・地熱地域面積法
- ・地下包蔵水量法

マグマ溜りの残存熱量法は新しい火山の周辺で適用される方法であるので、概要調査地域に適用される可能性は小さい。自然放熱量法は地表兆候の全くない地域に対しては過小評価される欠点が指摘されている（宮崎ほか，1991）ので、熱兆候が少ないと想定される概要調査地域に好適とは考えられない。地熱地域面積法は地熱の既開発地域の情報を利用するので、これも概要調査地域に適用される可能性は小さい。容積法はもっとも有用でオーソドックスな評価法とされ、必要とされるデータも多くなく、データの限られる地域にも適用されうる。そのため全国的な調査にも利用され、概要調査地域と他の地域の比較をするのにも好適と考えられる。地下包蔵水量法はより詳細なデータを必要とするが、地下水モデルが作成されて、それに熱データを組み込めれば概要調査でも利用することのできる評価法となりうる。

## 3.7 掘削調査

### 3.7.1 掘削調査概論

掘削調査は、ボーリングやトレンチなどの掘削による深度方向の総合的調査である。概要調査におけるボーリング調査の目的には次のようなものがある。

- ①コントロールポイントを対象とした大深度ボーリング（処分深度+ $a$ ）
- ②処分サイト候補を対象とした大深度ボーリング（処分深度+ $a$ ）
- ③主要な断層を対象とした中～大深度ボーリング（活断層調査あるいは水みち調査のために行なう）
- ④浅層帯水層を対象とした浅層ボーリング

- ⑤埋没地形面を対象とした浅層ボーリング（必要な場合）

地層処分におけるボーリング調査では、基本的にオールコア採取が前提とされ、また地下水の採取と水理試験が漸次行なわれる点に特徴がある。特に上記の目的①～③に該当するボーリング調査では、推定された地質・地質構造の深さ方向の分布の確認、各地質体の地球化学特性・力学特性・透水性などの把握、初期応力・地温など場の特性の把握、地下水の地球化学的特性、透水性割れ目（水みち）の空間的分布・水理特性の把握など、複合的な目的に対して順位付けがなされ、ボーリングプログラムが立案されることになる。なお、上記の目的④および⑤については一般的なボーリング調査として既に行なわれていることから、以下では特に言及しないこととする。また、トレンチ調査については活断層調査の一環として行なわれることが多く、その詳細については杉山（2001）などを参照されたい。

#### a) コア採取と地下水採取・水理試験の連携

地層処分におけるボーリング調査は、オールコア採取と多深度における地下水採取・水理試験が行なわれる点に特徴がある。特に地下水採取においては、原位置における地下水採取が重要であり、原位置における地下水採取が行ないえない場合はコア試料に含まれる自由水相当の間隙水の抽出が行なわれる。いずれの場合においても、地下水試料中に混入した掘削水を評価する必要がある。

ボーリング掘削では、摩擦熱による掘削ビット先端の加熱を冷却し、同時にスライム（掘削屑等からなるヘドロ状のもの）を排出するために掘削流体（結晶質岩の調査掘削では清水が多い）が使用される。掘削流体は、一般的にはボーリングマシンが設置されるボーリング槽の頂部にあるスイベルから注入されるため、ボーリング孔の孔底や孔壁には静水圧よりも高い圧力が孔壁側から掛かることになる。そのため掘削時は掘削流体が孔壁から周辺部へと浸入（スライムも同時浸入）し、亀裂性媒体の場合には開口割れ目を、多孔質媒体の場合には間隙を充填・閉塞させる現象が発生する。亀裂性媒体では孔井内の透水性割れ目に浸入した細粒スライムにより裂隙水の水質が変化したと考えられる事例が確認されている。また、掘削コア回収時のコアチューブの昇降に伴う孔井内水位の変化も孔内流体の孔壁周辺への浸透や排出を促進し、掘削流体による周辺地下水の汚染を拡大する。

地下水試料に対する掘削流体の混入評価は、掘削流体に混入するトレーサー濃度により評価することが一般的である。しかし、ボーリング孔内に湧水管所があれば、掘削流体に湧水が混入し水質・同位体組成が変化するため、コアチューブの昇降に伴う孔井内水位変

化などによる汚染の評価は厳密には行なえないことになる。また、細粒スライムの溶解による水質の変化についてはそもそも評価不能である。従って、全ての掘削が終了した後に掘削後長期間放置された区間から地下水の採取が行なわれる場合は、地下水の水質・同位体組成について本来の値を得られない（または得ていない）可能性を考慮しなければならない。また、水理試験についてもスライムによる間隙や開口割れ目の閉塞を考慮しなければならず、水理定数についても水質・同位体組成や掘削流体に混入するトレーサー濃度を全掘削期間を通して極めて安定に保ったとしても、ボーリング孔内に湧水箇所があれば、地下水の本来の値を得られない（または得ていない）可能性を考慮しなければならない。

掘削調査において、原位置地下水採取は地下水採取区間の掘削直後に行ない、また引き続き水理試験を行なうことが望ましい。亀裂性媒体の掘削調査では、コア回収毎もしくは一定区間の掘削終了後に、開口割れ目の存否・深度を確定させるための物理検層（ハイドロフォン VSP 検層または音波検層）を速やかに行い、開口割れ目が存在する場合は採水調査に移行することが望ましい。なお、開口割れ目は必ずしも透水性割れ目ではないため、採水調査の結果、その開口割れ目が透水性の低い不透水性割れ目であると判断された場合は採水調査を中止し掘削作業に戻り、その開口割れ目が透水性の高い透水性割れ目であった場合は水理試験を引き続き行なう。

#### b) 掘削地点の地質構造上の位置と地下水理特性

掘削地点の地下水・水理特性は、周辺部に存在する断層や大規模節理などに対する相対的な位置関係を考慮して、評価する必要がある。周辺部に存在する断層や大規模節理などは地下水の定常的な選択的移行経路（水みち）となっている可能性がある。また、断層・節理などは起震断層とはならなくとも海溝型の巨大地震や周辺の内陸型地震の発生時に地震動の揺れ境界となったり、断層部に蓄積した歪みを解消するために断層沿いに微小な変位が生じたりする可能性がある。このため断層や大規模節理などでは、地震時に非定常的な地下水の移行が起こる可能性もある。

阿武隈花崗岩体は準平原状の地形をなし、現在の地表面に存在する自然地形は長期に亘る侵食の結果形成された一種の構造地形と考えられる。阿武隈花崗岩体のボーリング掘削では、現地形と地下の水理特性との間で以下のような相関関係が明らかになっている。

- ①断層（リニアメント）の step 構造部に位置する掘削地点の孔壁に存在する割れ目には、低角の開口割れ目が数多く存在し、その多くは透水性が高く、地下水の移行経路としての寄与が大きい。また、非定常的な地下水の混合現象が発生していた。

- ②谷筋をつくるような断層（リニアメント）に連続する割れ目は透水性が高く、地下水の移行経路としての寄与が大きい。

- ③尾根筋の掘削地点の地下に存在する割れ目の多くは透水性が低く、通常の動水勾配下において地下水の移動にほとんど寄与しない。

掘削地点周辺の地表面に処分深度の地質体・岩体が露出せず、堆積岩類や堆積物（ローム・シラスなど含む）などの被覆層が厚く覆っている場合は、処分深度の地質体・岩体の上面に存在する（既に埋積された）地形の判読を行なうことができない。極めて稠密な反射法精密弾性波探査を行ったとしても、（埋積された）地形の判読精度は地表に露出している地形の判読精度に比べて著しく低く、結果として掘削地点が置かれた地質構造上の位置に関して十分な情報を得ることはできないと考えられる。従って、処分深度の地質体・岩体が地表に露出していない場合は、ボーリング調査結果の解釈において十分に注意する必要がある。

#### c) コントロールポイントの地点選定

大深度掘削調査を行なうコントロールポイントの選定にあたっては、以下の事項を考慮する必要がある。

- ①大深度掘削調査は深地層による廃棄体の隔離機能を損なう可能性があるため、その調査本数は必要最小限に限定される。そのため大深度掘削調査地点の分布は低密度で離散的とならざるをえない。
- ②大深度掘削調査は深度方向の実データと断面調査（物理探査）結果とを組み合わせることで地質学的解釈の信頼性を高める役割がある。また、掘削終了後にはボーリング孔を用いたジオトモグラフィー探査を行なうことにより、地質構造の解釈の信頼性をより高くすることができる。このため、物理探査測線に大深度掘削調査を設定することが望ましい。
- ③地下の断面構造探査（測線探査）において安全評価上必要とされる精度・確度をもつ探査法の主体は弾性波探査である。概要調査地域を横断するような長大規模の探査側線（数 km 以上）をカバーできる能力をもつ弾性波探査用の震源は限られ、特に詳細な精密弾性波探査を行ないうる震源は大型のバイプロサイズ車両にほぼ限定される。従って、大型車両が通行可能な規格を持つ主要道路沿いにしか長大規模の弾性波探査測線を展開できずコントロールポイントとしての大深度掘削調査地点は主要道路沿いに設定することが望ましい。
- ④大深度掘削調査はコア採取を行なうだけでなく地下水試料採取や水理試験などの複合的な目的を持つ掘削調査であり、地下の水文地質学的解釈の信頼性を高める役割がある。ボーリング掘削時には、掘削地点の水位と掘削槽上部のスイベルとの

水位差 +  $a$  が過剰水圧としてボーリング孔内の開口割れ目やコア試料にかかり、掘削水による地下水汚染が広がるため、掘削地点の水位が地表面より極めて低い地点は避けることが望ましい。

日本国内では、平野部など道路の発達に地形的制約が少ない地域を除き、主要道路は低地（山間部の谷底平野を含む）沿いに発達し、山地を横断するルートは狭隘であることが多い。従って、低地部の主要道路が、異なった方向に伸びる低地沿いの主要道路と交叉する地点や山地を横断する峠越えの主要道路と交叉する地点は、探査測線を異なった方向に展開することのできる重要なコントロールポイントとなる。また、平野部や山間部の低地は一般に水位が高く、掘削調査における地下水試料採取にも適している。このため処分サイト（候補）そのものを掘削する大深度掘削調査を除き、通常の大深度掘削調査は平野部を含む低地の異なった方向に伸びる主要道路沿いに掘削地点を設定し、その地点をコントロールポイントとすることが望ましいと考えられる。

### 3.7.2 掘削調査関連技術

以下では地層処分に係る掘削調査に特有な項目・技術について記述する。

#### 3.7.2.1 ボーリング掘削

掘削深度・掘削対象により、ボーリング工法・ボーリングマシンを選定する必要がある。鉛直掘りのほか傾斜掘り・コントロールボーリングも可能である。地層処分に係る掘削調査では、掘削流体について特に注意する必要がある。

掘削流体：基本的に清水による掘削が望ましいが、掘削対象によっては清水掘削が困難な場合があり、添加剤などを付加する必要がある。添加剤として用いられるのは、一般的にはベントナイト系（泥水）であるが、化学的に合成されたポリマーなどが用いられることもある。掘削流体については以下の事項に特に留意する必要がある。

- ①掘削流体には、水質・同位体組成が安定している周辺部の浅層地下水を原水として用い、脱酸素処理後に脱ガス処理を行ったものを掘削流体として用いることが望ましい。河川水は、降雨・降雪などに伴う水質・同位体組成変化が著しく、原位置採水試料に対する掘削流体の影響評価がやや不正確となる。
- ②掘削流体には岩石への吸着性の低い物質をトレーサーとして一定量混入し、原位置採水試料への混入率を算定できるようにする。陸上のボーリング掘削に用いるトレーサーとしては、ヨウ素（50～100ppm程度）や蛍光染料が候補となりえる。なお、海洋のボーリング掘削ではトレーサーとし

てヨウ素の代わりに臭素を用いることが多いが、臭素は燻蒸消毒剤として用いられる臭化メチルに関連して食品衛生法「食品に残留する農薬等に関するポジティブリスト制度」に記載されていること、また環境保健クライテリア No.166 の中で淡水性生物に関する毒性が記述されていることから、臭素を陸上のボーリング掘削のトレーサーとして用いることは避けるべきである。

- ③掘削流体に添加剤を用いた場合においては、添加剤による原水の水質・同位体組成の変化を考慮する必要がある。添加剤を加えた後の掘削流体を遠心分離し、さらにフィルター径を小さくしながら圧力濾過を行い、孔壁や割れ目などから浸透した流体成分の水質・同位体組成を分析する必要がある。

#### 3.7.2.2 コア観察・試料採取

コア観察・試料採取およびその後の分析・解析手法は、そのほとんどが一般的な掘削調査に用いられる手法である。地層処分において固有な地質調査項目は、コア観察における亀裂の開口度評価のみである。亀裂の開口度は水みちの評価において極めて重要であり、コア観察にあたっては孔壁の光学的観察結果（ボアホールカメラ）または超音波測距結果（ボアホールテレビュア）を参考にしながら、亀裂の開口度評価を行う必要がある。コア観察においては、掘削コアを観察・計測することが一般的であるが、コア欠損部については回収されたスライムからできる限りの調査を行う必要がある。具体的なコア観察項目としては次のようなものがある。

- ・岩石・堆積物の種別・鉱物組成・地球化学特性・力学特性／風化・変質／各種境界面の傾斜・性状・開口度・充填鉱物の有無／透水性

#### 3.7.2.3 採水法

##### (1) 原位置採水

原位置採水が行なわれる対象は、高い透水性を持つ多孔質媒体と‘水みち’である断層・節理などである。高い透水性を持つ多孔質媒体を対象とした原位置採水では採水区間を比較的長く設定することが多いが、‘水みち’である断層・節理を対象とした原位置採水では採水区間を短く設定し、採水対象外の断層・節理などをできるだけ含まないようにする。そのため‘水みち’を対象とした原位置採水においては採水対象となる断層・節理などによる割れ目を探査・決定する手法が重要となる。また、原位置採水で一般的に用いられる採水法についても記述する。

##### a) 原位置採水深度の探査・決定手法

断層や節理などを対象とした採水調査では、ボーリ



ング孔壁に存在する割れ目の中から水みちとなる透水性割れ目を検出し、その深度で採水を行なう必要がある。地層処分に係る掘削調査では、掘削流体による地下水の汚染の影響をできる限り低減させるために'水みち'(候補)と同定された透水性割れ目に対して掘削直後に速やかに原位置採水調査・水理試験を行う必要がある。採水深度の探査・決定手法は迅速・簡便に行える調査技術であることも重要である。電気伝導度検層法は原理的に最も優れた水みち調査法であるが、孔井内の水を脱イオン水に全て置換する必要があり、また採水試料に関して掘削水と脱イオン水の混入割合をそれぞれ独立に推定する必要があるなど、掘削調査における採水深度の探査・決定手法としては実用上の問題が多い。電気伝導度検層法はむしろ全掘削終了後に水みちとなる透水性割れ目の見落としの有無を判断する手法として、非常に有効な方法である。

現在のところ、処分対象となるような地下水流速の極めて遅い地層・岩体中の透水性割れ目を検出する手法は電気伝導度検層法以外に存在しない。しかし、透水性割れ目の候補となる開口割れ目を検出する手法は複数存在する。開口割れ目の検出法としては、孔壁の形状を観察・測定する光学的観察法・超音波測距法と開口割れ目の物理的特性を検出するVSP法を用いたチューブ波検層・音波検層などがある。なお、開口割れ目の開口度と透水性の間には一定の関係があるものの、開口幅0.5mm以下の開口割れ目が極めて透水性の高い透水性割れ目であった事例が存在することから、物理検層法を用いて開口割れ目の検出を行なうことが望ましい。

また、泥水を用いた掘削調査では孔壁に泥壁が形成されるため、大規模な湧水箇所などを除けば、前出の開口割れ目探査法のいずれも適用できず、採取されたコア試料のみを用いて採水箇所を決定する必要がある。

- ①電気伝導度検層：孔井内の孔内水を脱イオン水に全て置換し、水みちとなる透水性割れ目から孔内に流入した地下水により透水性割れ目周辺の孔内水の電気伝導度が上昇することを利用して、透水性割れ目を検出する検層法であり、原理的に最も優れた採水位置決定法である。
- ②光学的観察法：ボアホールカメラを用いた孔壁の光学的観察により開口割れ目を検出する手法である。ボアホールカメラの分解能は、孔周0.5度以内、深度方向分解能0.25mm以内と孔井検層法の中で最も高い分解能をもつ。孔壁崩壊部から得られる光学的データは単独では解析不能であり、超音波測距法などによる孔壁間距離のデータが必要である。また、孔壁が深く崩壊している場合は暗い光学像しか得られず、解析不能な場合がある。現在日本国内では2つの光学的観察法が存在する

が、両手法の解像度や割れ目の解析結果に大きな差異は存在しない。

- ③超音波測距法：ボアホールテレビユーアを用いた孔中心と孔壁間の超音波測距により開口割れ目を検出する手法である。孔壁崩壊部が単純な形状の場合は孔中心と孔壁間の超音波測距を得ることができるが、複雑な形状の場合は測定データの信頼性は低い点に留意する必要がある。現在使用されているボアホールテレビユーアは、孔壁崩壊部に対して十分な発信強度と空間分解能を有していない。
- ④VSP法を用いたチューブ波検層：地表発振源(固定)、孔井内ハイドロフォンレシーバを用いたVSP検層で捕捉されるチューブ波が、孔壁の開口割れ目から発生することを利用した開口割れ目検出法である。チューブ波検層法の探査精度は、深度方向精度10cm以内/300m、チューブ波発生深度分解能10cm以内である。
- ⑤音波検層：孔井内発振源、孔井内受振器を用いた音波検層では、孔井内発振源から発生したP波が孔壁の開口割れ目を通過する際に遅延され、P波到達時間が遅れることを利用した開口割れ目検出法である。音波検層法の探査精度は、深度方向精度5cm以内/600m、開口割れ目検出深度分解能5cm以内である。

#### b) 原位置採水法

掘削調査においてボーリング掘削と組み合わせて行なうことのできる原位置採水法は、基本的にパッカー採水法のみである。一般的にはダブルパッカー法による採水が行なわれるが、孔底に近い区間を採水対象とする場合はシングルパッカー法による採水が行なわれる場合もある。パッカー採水においては、パッカー区間に存在する孔内水を予備採水により排水し、原位置水試料に対する孔内流体の混入を低減させる必要がある。原位置水試料に対する孔内流体の混入は1%程度以下であることが望ましい。また、孔内流体の混入率が5%以上の場合、原位置水試料の水質・同位体組成などを適切に評価できない可能性が高い。予備採水はパッカー区間の容積の20倍程度以上を目安に行なうことが望ましい。

なお、地層・岩体の地下水流速が一定以上の速度を持つ場合は、掘削終了後に多段のパッカーを埋設し、掘削流体の影響がなくなるまで一定期間放置した後に採水を行なうマルチパッカー法による採水も可能である。

#### (2) コア採水

コア採水が行なわれる対象は、透水性が低く原位置採水が困難な多孔質媒体である。掘削コアに含まれる

間隙水を、遠心法もしくは圧密抽出法により抽出する。遠心法および圧密抽出法で間隙水を抽出する場合、抽出圧は自由水の抽出限界以下に設定しなければならない。圧密抽出法により間隙水を抽出した報告例の多くでは、自由水の抽出圧よりも高い結合水レベルの抽出圧で間隙水を抽出しており、それらの抽出水の水質・同位体組成をもとに地下水流動を論じることは原理的に誤っている。なお、原位置採水と同様にトレーサーにより掘削流体の混合量を評価する必要がある。

### 3.7.2.4 原位置における水理・物質移行特性調査

地下深部において物質は主に移流・拡散現象により移動するが、どちらの現象が支配的となるかは、その場における地下水流動の速度に依存する。従って、処分領域からの移行経路と移行プロセスで支配的な現象を予想するためには、地下水流動系の概略を把握することが必要となる。地下水流動系は、地形、地層や岩体あるいは断層などの分布に規制される地質構造、地層や岩体の透水性（透水層／不透水層）・地下水の水位ポテンシャル・地下水の涵養－流動－流出機構などの水文地質構造を基に、地下水系の流向・流速や間隙水圧・透水性などのデータに基づき概略的に評価される。概要調査段階では、概要調査地域全域の地下水流動場を詳細に特定することは不可能であるが、掘削調査に際してはボーリング孔が掘削される水理地質ユニット毎あるいは境界となる断層などの地下水の流向・流速や間隙水圧・透水性に係るデータを取得し、処分深度までの地下水流動を実データに基づき確認する必要がある。核種移行解析においては、水理地質ユニット毎の透水特性や拡散などの物質移行特性のデータが必要であり、原位置測定が可能な項目については原位置で、原位置測定が不可能な項目については室内試験により測定・試験を行なう必要がある。

物質移行解析では、複雑な地質体を連続体モデル／亀裂ネットワークモデル／連続体に亀裂を配したモデルなどを用いて取り扱う。処分領域に対する涵養域および処分領域からの流出域を含めた地下水の移行経路の全域に対して、単純な連続体モデルが適用できるような地質体はわが国にはほぼ存在しないと言える。わが国では（潜在的に）水みちとなりえる断層・節理などの構造が複雑に発達しており、水みちの異方性を考慮した移流・拡散現象の解析・評価が必要とされる。断層などが境界となっている単一の水理地質ユニットと扱える領域内では、原位置および室内試験より直接測定された透水特性と物理探査より得られる物理物性の関係性を評価し、物理探査により得られる各種物性値をそれぞれのモデルに対応したモデル定数に換算し、移流・拡散などの物質移行現象が解析・評価される。各種物性値は一般的に連続体モデルに基づく方法により整理されるが、亀裂を陽に捕らえるモデルが採用さ

れる場合にはこれに対応するモデル定数として整理される必要がある。以下、水理特性に係る調査項目を示す。

- ①地下水の流向・流速、間隙水圧：ボーリング孔が掘削された水理地質ユニットあるいは境界となる断層などの地下水流動に関する実データ
- ②水文地質ユニットおよび主要断層の物質移行特性の代表値：移流現象（透水係数、比貯留率、空隙率）、拡散現象（拡散係数、遅延係数）
- ③各水文地質ユニットの物質移行特性と物理物性の関係：物理探査結果に基づき解析モデル内に物質移行特性を割り付ける際の基準
- ④水文地質ユニット内の地質体の性状変化に対する物質移行特性の変化：基質部については応力場の変化に伴う物質移行特性の変化、水文地質ユニットの境界にならない断層および亀裂については開口・閉塞に伴う物質移行特性の変化
- ⑤断層および亀裂の密度、開口幅、連結性：亀裂モデルを用いる際に必要となる物質移行に関するモデル定数

### (1) 流向・流速および間隙水圧の原位置測定

地下水の流向・流速の測定方法はその測定原理や手法の違いにより、地球化学的手法・物理的手法・水理学的手法・トレーサー法などに分類される（張ほか、2001）。それぞれの手法の概念および利欠点を表4-2に、総合的考察を以下に示す。間隙水圧の測定方法については表4-2中の水理学的手法と同様である。

- ①トレーサー法を除いた全ての測定手法は基本的に地下水の流向・流速の評価に適用できる。
- ②地球化学的手法と水収支平衡法は地下水の垂直流速の評価に適用し、その他の全ての手法・方法は地下水の水平方向の流向・流速の評価に適用できる。
- ③試験孔や観測孔を利用した測定方法は地表測定に比べ比較的深部までの調査が可能である。
- ④他の手法に比べ、地球化学的手法は比較的長時間の流向・流速の評価が可能である。言い換えれば、地球化学的手法以外の方法は流速の遅い地層での測定評価が基本的に困難である。
- ⑤処分深度における極めて遅い流速・流向を高精度、定量的に測定できる手法はない。
- ⑥表4-2で明確に示されていないが、亀裂や不連続面における流向・流速の測定技術ははまだ確立されていない状況にあると考えられる。

### (2) 原位置透水試験

原位置透水試験は室内透水試験と比較し、地層・岩体や断層などの透水性をその場で測定できるメリットがあり、また決定論的な評価が必要な極めて透水性の

表 4-2 地下水流動の主な測定調査法

分類	方法	概念	利欠点
地球化学的手法	物質平衡 / 水質測定法	地下水の化学組成を測定することによって涵養源または地下滞留時間を特定し地下水の流動を推定する。よく用いられている方法として塩化物—質量平衡法がある(7,9)。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 広域、垂直流の評価ができる。</li> <li>・ 低コストで、利用しやすい。</li> <li>・ 比較的長期挙動の評価ができる。</li> <li>・ 採水による攪乱が発生しやすい。</li> </ul>
	放射性同位体測定法	50年代末60年代初の降雨に含まれる放射性環境同位体のトリチウムと <sup>36</sup> Clのピーク特性を利用し、地下におけるこれら両物質の濃度と浸透深度を測定し、地下水の流動を推定する(2,7)。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 広域、垂直流の評価ができる。</li> <li>・ 低コストで、利用しやすい。</li> <li>・ 40年以内の評価しかできない。</li> <li>・ サンプルングによる攪乱問題。</li> </ul>
	安定同位体測定法	地下水に含まれる安定同位体(例えば、Dor <sup>2</sup> H, <sup>18</sup> O)の濃度を測定することによって、地下水の涵養源および地下滞留時間を評価し、地下水の流動を測定する(1,3)。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 広域、垂直流の評価ができる。</li> <li>・ 蒸発速度の評価も可能。</li> <li>・ 他の物質の浸透侵入の評価が可能。</li> <li>・ 幅広く用いられている。</li> <li>・ サンプルングによる攪乱問題</li> </ul>
物理的手法	流動電位測定法	地下水に食塩水を投入し、地下水の流れにつれて発生する流動電位の変化を地表面から検出し、地下水の流速と流向を測定する(4)。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 広範囲、水平流の評価ができる。</li> <li>・ 低コストで、使用しやすい。</li> <li>・ 流速の遅い所では極めて長時間になる。</li> <li>・ 深地層、多層地盤での適用が困難。</li> </ul>
	水温測定法	地下水の流動に伴う熱移流が地下水の涵養域と流出域の温度分布に影響を与えるため、複数の地点で設置される井戸内の水温分布を測定することによって、地下水の動きを推定する(10)。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 広範囲、水平流の評価が可能。</li> <li>・ 深度に殆ど制限がない。</li> <li>・ コストが比較的高い。</li> </ul>
	地温測定法	地下水の流動に伴って地盤の熱量も移動するため、地中の温度を測定し地下水の動きを推定する。通常では、地下1mでの地温測定に限定し、浅層地下水の水脈を検出するために用いられている(8)。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 広範囲、水平流の評価が可能。</li> <li>・ コストが比較的低い。</li> <li>・ 流向の評価が可能、流速は不可。</li> <li>・ 深地層への適用が困難。</li> </ul>
水理学的手法	水位測定法	同一帯水槽に設置された複数の観測孔で測定した水位分布に基づいて流線網を作成し流向を求める(2)。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 広範囲、水平流の評価が可能。</li> <li>・ 多層、深部地層にも適用できる。</li> <li>・ 透水試験と組合せて流速の評価が可能。</li> <li>・ 比較的高いコスト。</li> </ul>
	水収支平衡法	地層に涵養する水の量は降雨、灌溉、地表と地下流入による総補給と蒸発、地表と地下流出および地中貯留量との差であることを前提にし、地下への涵養量の計算によって流速を評価する(2)。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 広域、垂直流の評価ができる。</li> <li>・ 関連測定項目が多い。</li> <li>・ 評価の誤差が極めて大きい。</li> </ul>
トレーサー法	多孔式トレーサー法	調査対象となる地層に投入孔および複数の観測孔を設置し、投入孔に投入されたトレーサーの地下水流による移動を検出し、地下水の流向および流速を評価する(5,6)。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 広範囲、水平流の評価に適用。</li> <li>・ コストが非常に高い。</li> <li>・ 水位変動の時の評価が困難。</li> <li>・ 成功率が比較的低い。</li> </ul>
	単孔式トレーサー法	試験井の中心部にトレーサーを投入し、その周囲に設置されるセンサーでトレーサーの移行方向および到達時間を特定し、地下水の流向および流速を評価する(5)。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 局所、水平流の評価に適用。</li> <li>・ 繰り返し測定が可能。</li> <li>・ 繰り返し測定が可能。</li> <li>・ 多孔式に比べ、コストが安い。</li> <li>・ 流速が遅い時の測定が困難。</li> </ul>

注：見方の違いによって異なった分類法が考えられる。また、コストの高低および調査範囲の広さについては他の手法との比較による定性的な表現である。

\* 既存の井戸またはボーリング孔を利用できる場合では、コストが低くなる。

1) Allison & Hughes(1983), 2) ASTM(2006), 3) Barnes & Allison(1984), 4) 伊藤ほか(1984), 5) 小松田(1990), 6) 西垣(1991), 7) Phikips et al.(1988), 8) 佐倉(1984), 9) Sharma & Hughes(1985), 10) 内田ほか(1993)

高い水みちとなる断層などを評価するための唯一の方法である。しかし、試験条件の制御がボーリング孔内の操作だけとなるため、境界条件の制御・特定や透水特性と直接関連する地圧・間隙水圧などの関係の評価することは困難である。一方、室内透水試験では試験体の代表性を吟味する必要があるが、採取されたコアの地層中での存在状態、即ち、地圧・間隙水圧・低い動水勾配などを再現した状態で試験が可能であり、これら存在状態の変化（応力場の変化や異常間隙水圧の発生など）に応じた物質移行特性の変化を測定できる。また、室内透水試験では弾性波試験等とのカップリングも可能であり、これにより評価される透水特性－物理物性の関連性は数多く存在する透水性の比較的

低い水みちによる地下水流動の寄与分を評価したり、物理探査・検層結果に基づく物理特性－透水特性の関連性を把握する上で重要なデータとなる。室内透水試験や原位置・室内における透水試験の各方法における試験・解析上の留意点については、3.11.3項の「水理特性」における(1)「室内透水試験」で詳述する。

原位置透水試験の代表的な試験法を測定孔数によって分類し、その概念と試験法の概略を表4-3に示す。各種原位置透水試験の概念図については関連文献を参照されたい（例えば地盤工学会，1980，1995；張ほか，2000，2001）

①ルジオン試験：ルジオン試験で求められる岩盤

表 4-3 原位置透水試験法

制御方法概念	水頭制御		流量制御		
	パルス	定圧	定流量		可変流量
			単一流量	多段流量	
制御方法概念					
制御区間における計測データ					
観測区間における計測データ					

表 4-4 ルジオン試験における有効注水圧力 ( $P_{eff}$ ) の計算

水位関係	地下水位が試験区間より上にある場合	地下水位が試験区間より下にある場合	地下水位が試験区間中にある場合
計算式	$P_{eff} = P_0 + \gamma_w (h_1 - h_2 - h_3)$	$P_{eff} = P_0 + \gamma_w (h_1 - h_3)$	$P_{eff} = P_0 + \gamma_w \left\{ \left( h_1 - h_2 - \frac{\alpha^2}{2L} \right) - h_3 \right\}$ $\alpha = \frac{L}{2} - h_2 \quad (0 \leq \alpha \leq L)$
備考	$P_0$ : 口元での注水圧力 (kgf/cm <sup>2</sup> ) ; $h_1$ : 圧力計と試験区間中央の高さ (cm) ; $h_2$ : 地下水位と試験区間中央の高さ (cm) ; $h_3$ : 管内抵抗による損失水頭で、試験または理論計算より求められる (cm) $\gamma_w$ : 水の単位体積重量 (kgf/cm <sup>2</sup> ). 尚、 $P_{eff}$ は試験区間の中央部に設置する圧力計の出力を直接に利用することが可能。		

の水理学的パラメータは、岩盤の透水係数ではなく、岩盤の透水性の指標となるルジオン値である。この値は、試験区間内に  $10\text{kgf/cm}^2$  ( $0.98\text{MN/m}^2$ ) の圧力で注水し、試験区間  $1\text{m}$  当たりの1分間の注水量と定義されている。そこで、有効注水圧力  $P_{\text{eff}}$  の計算は地下水位と試験区間との相対的な位置関係によって表4.4に示す3種類に分けられる（例えば地盤工学会, 1995）。

また、ルジオン値の決定方法は限界圧力の有無によって異なる。図4.8にルジオン試験結果からルジオン値の求め方の概略を示す。ここで、縦軸と横軸はそれぞれ有効注水圧力  $P_{\text{eff}}$  ( $\text{kgf/cm}^2$ ) と単位長さ（ $1\text{m}$ ）あたりの注水量  $q$  ( $\text{l/min/m}$ ) である。

ルジオン値 ( $L_u$ ) は、図4.8に示されているライン1のような  $P_{\text{eff}}-q$  曲線に線形関係があることを確認した後、有効注水圧力  $10\text{kgf/cm}^2$  時の注水量として求める。ルジオン値を透水係数に換算すると、1ルジオンは約  $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$  である。注水圧力を段階的に増加し試験を行う際、図4.8に示されているライン2のように、ある注水圧力以上になると注水量が急激に増大する場合は、この  $P_{\text{eff}}-q$  直線関係が変わる点における有効注水圧力を限界圧力  $P_{\text{cr}}$  と定義される。この際、初段階の  $P_{\text{eff}}-q$  曲線の限界圧力以下の直線を延長して有効注水圧力  $10\text{kgf/cm}^2$  に相当する単位長さあたりの注水量 ( $\text{l/min/m}$ ) を求めて換算ルジオン値 ( $L_{u'}$ ) とする（地盤工学会, 1995）。

- ② J.F.T. 法：図4.9に J.F.T. 法の実測結果から透水係数を求める手順を示す。図4.9 a) のような水位と時間の実測結果を図4.9 b) に示すように水位差と時間を片対数座標系に整理し、曲線の初期の直線部分の勾配 ( $m$ ) を求める。岩盤の平均透水係数  $K$  ( $\text{cm/s}$ ) はボシュレフ (Hvorslev, 1951) の理論式によって求められるが、岩盤自身の帯水状況及び試験区間の形状によって異なってくる。表4.5に J.F.T. 法における透水係数の算出方法をまとめる。
- ③ 定圧注水試験：岩盤の平均透水係数  $K$  ( $\text{cm/s}$ ) は基本的にボシュレフ (Hvorslev, 1951) の理論式によって求められるが、岩盤自身の帯水状況及び試験区間の形状によって異なってくる。表4.6に定圧注水試験法における透水係数の簡略算出方法をまとめる。
- ④ スラグテスト：スラグテスト自身は調査対象となる地層の帯水状況や瞬時的に変化させた水頭の減衰特性の違いによって、試験のやり方や解析手法なども異なってくる。本稿では、被圧帯水層で、水頭の過減衰 (Overdamped, 水頭が単調に低下し、慣性力による周期的な振動が発生しない) 状

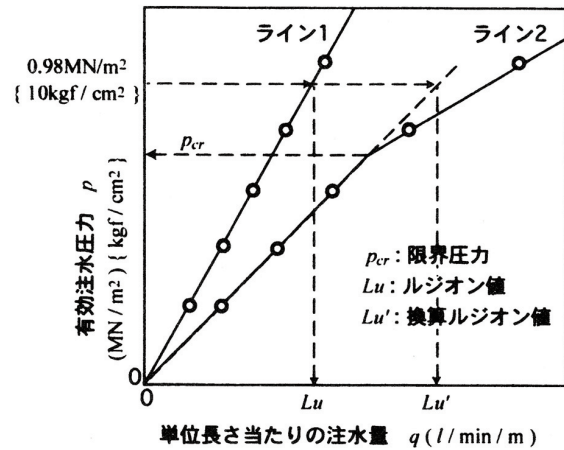


図4-8 ルジオン値の算出方法（地盤工学会, 1995）

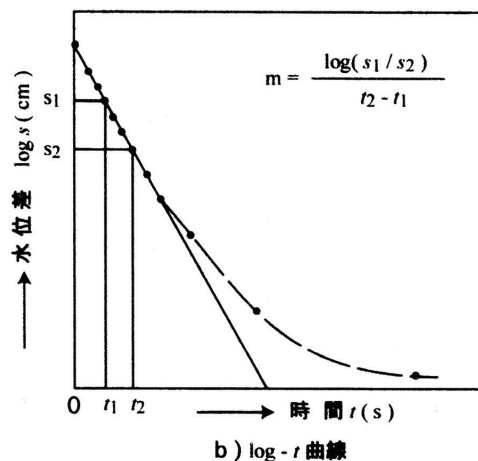
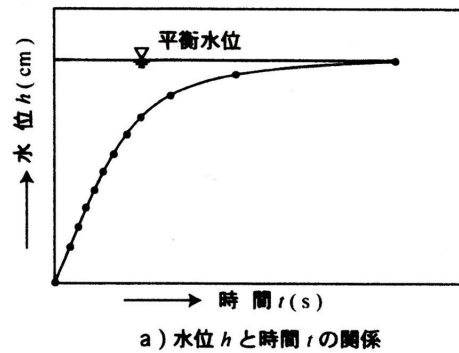


図4-9 J.F.T. 法における透水係数の算出方法（地盤工学会, 1995）

表 4-5 J.F.T. 法における岩盤透水係数の算出方法

帯水状態	計 算 式
不圧帯水	$K = \frac{d^2 \ln \left[ \frac{(\lambda L / D) + \sqrt{1 + (\lambda L / D)^2}}{8L(t_2 - t_1)} \right] \cdot \ln \left( \frac{s_1}{s_2} \right)}{\lambda} \quad \lambda = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ <p>岩盤が均質，等方と仮定し，<math>(2L/D) \geq 8</math> の場合 (JGS1321-1995)</p> $K = \frac{0.66d^2 \log(2L/D) \cdot m}{L}$
被圧帯水*	$K = \frac{d^2 \ln \left[ \frac{(2\lambda L / D) + \sqrt{1 + (2\lambda L / D)^2}}{8L(t_2 - t_1)} \right] \cdot \ln \left( \frac{s_1}{s_2} \right)}{\lambda} \quad \lambda = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$ <p>岩盤が均質，等方と仮定し，<math>(2L/D) \geq 8</math> の場合 (JGS1321-1995)</p> $K = \frac{0.66d^2 \log(4L/D) \cdot m}{L}$
備 考	<p>d : 水位測定管内の断面積と水位測定ケーブルの断面積との差より求める有効内径 (cm) ;                  D : 試験区間孔の直径 (cm) ; L : 試験区間の長さ (cm) ;                  K<sub>h</sub> : 水平方向の透水係数 ; K<sub>v</sub> : 鉛直方向の透水係数.</p>

\*被圧帯水層であっても，試験区間の上・下端と帯水層の境界面との距離が試験区間孔径の4倍以上である場合は不圧帯水層の計算式を用いる。

表 4-6 低圧注水試験における岩盤透水係数の簡略算出方法

帯水状態	計 算 式
不圧帯水	<p><math>\lambda L \geq 4D</math> の場合</p> $K = \frac{Q_0}{2\pi LH} \ln \left( \frac{2\lambda L}{D} \right)$ <p>岩盤が均質，等方と仮定する場合 (JGS1321-1995)</p> $K = \frac{1.15Q_0}{\pi LH} \log \left( \frac{2L}{D} \right)$ <p><math>\lambda L \geq 4D</math> の場合</p> $K = \frac{Q_0}{2\pi LH} \cdot \sinh^{-1} \left( \frac{\lambda L}{D} \right)$
被圧帯水*	<p><math>\lambda L \geq 2D</math> の場合</p> $K = \frac{Q_0}{2\pi LH} \ln \left( \frac{4\lambda L}{D} \right)$ <p>岩盤が均質，等方と仮定する場合 (JGS1321-1995)</p> $K = \frac{1.15Q_0}{\pi LH} \log \left( \frac{4L}{D} \right)$ <p><math>\lambda L &lt; 2D</math> の場合</p> $K = \frac{Q_0}{2\pi LH} \cdot \sinh^{-1} \left( \frac{2\lambda L}{D} \right)$
備 考	<p><math>\lambda = \sqrt{K_h / K_v}</math>                  Q<sub>0</sub> : 定常状態に測定された流量 (cm<sup>3</sup>/s) ;                  H : 試験区間中央の水圧水頭 (cm) と平衡地下水位水頭 (cm) との差 ;                  その他の記号の意味は表6と同じ。</p>

\*被圧帯水層であっても，試験区間の上・下端と帯水層の境界面との距離が試験区間孔径の4倍以上である場合は不圧帯水層の計算式を用いる。

表 4-7 スラグテストにおける Cooper et al. 法

関数および無次元パラメータを計算	$\frac{H}{H_0} = F(\alpha, \beta)$	$\alpha = \frac{r_w^2 S_s L}{r_c^2}$	$\beta = \frac{KLt}{r_c^2}$
解析手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>縦軸が <math>F(\alpha, \beta)</math>、横軸が <math>\beta</math> の標準曲線群を作成</li> <li>同スケールで縦軸に測定結果 <math>H/H_0</math> ; 対数の横軸に測定時間 <math>t</math> をプロット</li> <li>図解法によって <math>K, S_s</math> を特定</li> </ul>		
備考	<p><math>F(\alpha, \beta)</math> の定義は Cooper et al. (式8,9) を参照  <math>H</math> : 計測時間 <math>t</math> の時の水圧 ;  <math>H_0</math> : 瞬時的に変化させた水圧 ;  <math>r_w</math> : 試験区間のボーリング孔半径 ;  <math>S_s</math> : 比貯留率 ; <math>L</math> : 試験区間帯水層の厚さ ;  <math>r_c</math> : 観測管の内半径 ;  <math>K</math> : 透水係数 ; <math>t</math> : 試験開始からの時間</p>		

表 4-8 原位置パルス透水試験結果の整理手法

関数および無次元パラメータの計算	$\frac{H}{H_0} = F(\alpha, \beta)$	$\alpha = \frac{\pi r_w^2 S_s L}{V_w C_{ew} \rho_w g}$	$\beta = \frac{\pi KLt}{V_w C_{ew} \rho_w g}$
試験条件	$\alpha \leq 0.1$		$\alpha > 0.1$
解析手法	<p>Cooper et al. の手法</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>縦軸が <math>F(\alpha, \beta)</math>、横軸が <math>\beta</math> の標準曲線群を作成</li> <li>同スケールで縦軸に測定結果 <math>H/H_0</math> ; 対数の横軸に測定時間 <math>t</math> をプロット</li> <li>図解法によって <math>K, S_s</math> を特定</li> </ul>		<p>Bredehoeft and Papadopulos の手法</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>縦軸が <math>F(\alpha, \beta)</math>、横軸が <math>\alpha \beta</math> の標準曲線群を作成</li> <li>同スケールで縦軸に測定結果 <math>H/H_0</math> ; 対数の横軸に測定時間 <math>t</math> をプロット</li> <li>図解法によって <math>K, S_s</math> を特定</li> </ul>
備考	<p>関数 <math>F(\alpha, \beta)</math> の定義は Cooper et al. (式8,9) , または Bredehoeft and Papadopulos (式9,10) を参照  <math>H</math> : 計測時間 <math>t</math> の時の圧力 ; <math>H_0</math> : パルス圧 ; <math>r_w</math> : 試験区間のボーリング孔半径 ;  <math>S_s</math> : 比貯留率 ; <math>L</math> : 試験区間帯水層の厚さ ; <math>V_w</math> : パルス圧に負荷される水の体積 ;  <math>C_{ew}</math> : 装置の圧縮特性を考慮した水の圧縮率 ; <math>\rho_w</math> : 水の比重 ;  <math>g</math> : 重力加速度 ; <math>K</math> : 透水係数 ; <math>t</math> : パルス試験開始からの時間</p>		

表 4-9 揚水試験における Theis 法, Jacob 法および Thiem 法

	Theis法	Jacob法	Thiem法
主な 仮定	<ul style="list-style-type: none"> <li>井戸からの揚水量は一定</li> <li>井戸の直径は無限小</li> <li>井戸は帯水層に完全貫入</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>帯水層は均質, 等方, 半径方向に無限の広がり</li> <li>井戸からの揚水は帯水層の貯留によるもの</li> <li>上下不透水層からの漏水は無視できる</li> </ul>	
流れ	非平衡/非定常	非平衡/非定常	(準) 平衡/ (準) 定常
解析 手順	<ul style="list-style-type: none"> <li>揚水時間tにおけるsを計算</li> <li>Theisの標準曲線を作成</li> <li>同スケールで両対数の座標軸に <math>s-r^2/t</math> 曲線をプロット</li> <li>両曲線を重ね, 両者が一致するように移動させる</li> <li>任意の合致点の座標 <math>[(r^2/t)_m, s_m], [\lambda_m, W(\lambda)_m]</math> を読み取る</li> <li>次式より K, <math>S_s</math> を算出</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>揚水時間tにおけるsを計算</li> <li>縦軸および対数の横軸にそれぞれsと <math>r^2/t</math> をプロット</li> <li><math>s-\log(t/r^2)</math> 曲線の直線部分の勾配 <math>\Delta s</math> および軸切片 <math>(t/r^2)s=0</math> を読み取る</li> <li>次式より K, <math>S_s</math> を算出</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(準) 平衡状態における各観測井内の <math>s=h_0-h_c</math> を計算</li> <li>縦軸および対数の横軸にそれぞれsとrをプロット</li> <li><math>s-\log r</math> 曲線の直線部分の勾配 <math>\Delta s</math> を読み取る</li> <li>次式より K を算出</li> </ul>
計算 公式	$s = 4K \frac{\lambda_m}{(r^2/t)_m}$ $K = \frac{Q_p}{4\pi D s_m} W(\lambda_m)$	$K = \frac{2.3Q_p}{4\pi D \Delta s}$ $s_s = 2.25K(t/r^2)_{\lambda=0}$	$K = \frac{2.3Q_p}{2\pi D \Delta s}$ <p><math>S_s</math> は評価不可</p>
図解 法の概略			
備考	<p>t : 揚水試験の経過時間 ; s : 観測井内の水位低下量 ; <math>h_0</math> : 初期水位 ;  <math>h</math> : 観測井内の水位 ; r : 揚水井から観測井までの距離 ; <math>W(\lambda)-\lambda</math> : 井戸関数曲線 ;                  K : 透水係数 ; <math>S_s</math> : 比貯留率 ; D : 帯水層の厚さ ; <math>Q_p</math> : 揚水量 ;  <math>h_c</math> : 平衡状態における観測井内の水位 ; <math>(t/r^2)s=0</math> : <math>s-\log(t/r^2)</math> 曲線の直線部分の軸切片 ;  <math>\Delta s</math> : 横軸の1logサイクルに対応するsの差 (直線の勾配)</p>		



態の場合を例として簡単に紹介する。この場合、観測井に一定の水を急激に注入する。観測井に一定の水を急激に注入することによって、観測井内に  $H_0$  の水頭を瞬時的増加させ、この瞬時的に増加させた水頭の経時的な変化を測定し、表 4-7 に示す Cooper et al. (1967) の手法を用いて地層の透水係数および貯留係数を評価することができる。

- ⑤パルス透水試験：パルス試験結果の整理は比較的煩雑で、試験条件の違いによって異なってくる。表 4-8 にパルス試験結果の整理手法を示す。実際の整理にあたって、表 4-8 に定義されている無次元パラメーター  $a$  は事前に分からないため、計算はまず  $a \leq 0.1$  と仮定し、Cooper et al. (1967) の手法より試算を行ってみる。その結果、もし  $a > 0.1$  と判断された場合、改めて Papadopoulos et al. (1973) の手法より計算し直す必要がある。
- ⑥揚水試験：揚水試験の解析は帯水層の地質条件、境界条件、揚水井の貫入状況、井戸貯留の有無および流れの状態などによって異なる。これらのうち最も一般的に用いられているのは Theis 法、Cooper-Jacob 法 (Modified Theis Nonequilibrium Test Method と呼ばれる) および Thiem 法である (地盤工学会, 1995)。これら三つの解析法の主な仮定条件、解析手順および計算公式などの

概要を表 4-9 にまとめる。

- ⑦干渉試験：干渉試験はソース信号の違いによって、主に定流量揚水干渉試験 (注水の場合も類似)、パルス干渉試験および正弦波干渉試験などに分けられる。表 4-10 にそれぞれの試験法の原理および主な解析手法をまとめる。

### 3.7.2.5 初期応力

岩盤の長・短期的な力学・水理学的な安定性を考える際には初期応力や原位置での水頭に関するデータが必要となる。水頭分布等の水理特性の調査については 3.7.2.4 項の「原位置における水理・物質移行特性調査」で既に記述しており、本項では初期応力に関して記述する。

原位置岩盤初期応力測定評価技術のうち、現在最も一般的に用いられている測定法は、水圧破砕法と応力解放法である。このうち水圧破砕法は石油工学を基盤として発達してきた技術であり、原位置における深部の応力測定に適しており、一方、応力解放法は現在では主に土木工学の分野において利用されている。また、水圧破砕法がパッカーによる閉塞区間内に発生した 1 m 程度の比較的大きな亀裂面面積を持つ亀裂の力学的応答から応力を評価し、孔井周りの平均的な応力分布を調査するのに適しているのに対し、応力開放法では

表 4-10 原位置水理干渉試験の分類

試験法	定流量揚水干渉試験	パルス干渉試験	正弦波干渉試験
目的	井戸 (または試験孔) 間の水理的連結性およびその特性を評価する。		
原理	ソース井から一定の流量で水を汲み上げ、それに起因する観測井内の圧力変動を測定する。	ソース井に定流量揚水と井戸閉鎖の繰り返し刺激を与え、観測井内で発生する圧力の振幅および位相差を測定する。	ソース井内の流量また水圧変化を正弦的に制御し、観測井内で発生する圧力の振幅および位相差を測定する。
測定結果の概念図	省略		
主な解析手法	揚水試験と類似	Kamel-Brigham法	流量正弦波： Businov-Umrchin法 圧力正弦波： Black法
特徴	・比較的難透水性地層への適用が可能	・ノイズの除去が容易 ・平面的水理異方性の評価が可能	・ノイズの除去が容易 ・三次元的な水理特性の評価が可能

精密な応力評価が可能であるものの、10～数10mm前後の非常に小さな領域の岩体変形から応力を評価するため岩石の不均質性や微小な亀裂などの影響を受けやすくなっている。なお、掘削コアを用いた室内試験により初期応力を推定する手法(3.11.4項の「力学特性」で記述)も提案されている。

これらの手法のすべてが、それぞれの手法に対して特有な限られた領域の平均的な応力を測定の対象としている。この特有な領域よりも広い領域の平均的な応力を評価するためには、その都度場所を変えて測定を何度も行う必要があり、広域応力場を評価するためにはそれらの結果について、何らかの統計的な処理を施す必要があることに留意する必要がある。なお、核燃料サイクル開発機構(1999)によれば、最大主応力の方向はプレート運動・活断層分布・三角測量結果・浅発地震から推定される圧縮方向とは異なり、局所的な地形や断層の影響を受けて様ではないとされ、広域応力場など既存の構造地質学的知見から最大主応力の方向を予想することは困難と考えられる。

a) 水圧破碎法：水圧破碎法の原理は、ボーリング孔にパッカーを設置し閉塞区間を設け、その閉塞区間に水を圧入し、閉塞区間の孔壁表面に生じる接線応力が引張強度(St)に達すると、最大圧縮応力に平行な方向(最小圧縮応力方向)に引張破壊が生じ、亀裂が発生する。同時に、亀裂内へ圧入水が流入し、閉塞区間内の圧力が低下する。この破碎時のボアホール内部の最大水圧は破碎圧：ブレークダウンプレッシャー(Pb)と呼ぶ。閉塞区間への水の圧入を停止すると、水圧は亀裂の拡大にともない低下し、亀裂に垂直な応力値と等しくなると一定となる。この圧力は亀裂の閉口圧：シャットインプレッシャー(Ps)と呼ばれる。

これらの圧力値は弾性論に基づくと、以下のように整理される。

$$Pb=3Sh-SH-Pp+St$$

$$Ps=Sh$$

(SH：水平面内最大主応力, Sh：水平面内最小主応力, Pp：間隙水圧)

しかし、原位置におけるStの推定は、例えば掘削コアの引張強度の値をStとして用いる場合においてもボーリング掘削・コア回収時における原位置応力の開放により掘削コア内に微小亀裂が発生することなどから掘削コアの引張強度は原位置のStとは正確には一致しないとされる。そのため、破碎圧(Pb)の代わりに、亀裂の再開口圧：リオープンングプレッシャー(Pr)を用いる方法(Zoback et al.,1977; Bewdehoeft et al., 1986)が提案され、その場合前記の関係式はPbの代わりにPr(=Pb-St)を用いて

$$Pr=3Sh-SH-Pp$$

$$Ps=Sh$$

となる式が現在用いられている。

しかしながら、水圧破碎法に関する最近の研究(Ito et al., 1999)により、従来の水圧破碎法のシステム自体や亀裂再開口圧(Pr)を用いて初期応力を算出する課程に問題があることが指摘されている。従来の水圧破碎法の問題点は主に2点に集約される。

①水圧破碎区間のコンプライアンスに比べて、水圧破碎装置など水圧破碎システム全体のコンプライアンスが大きすぎ、亀裂再開口圧(Pr)を正確に計ることができない。

②水圧破碎によって生成した亀裂は水圧が低下しても亀裂面のかみ合わせなどの問題から完全には閉鎖せず微小な水みちが残存するため、亀裂が開く前から圧入水が浸入し、亀裂再開口圧(Pr)を用いて初期応力を算出する従来の式が成り立たない。

①の指摘に対しては、計測するボーリング孔の径を小さくし、水圧破碎装置の加圧系・計測系を上部パッカー直上に配置して水圧破碎システム全体のコンプライアンスを小さくする手法が提案されている。また、亀裂再開口圧(Pr)に関しては間隙水圧に拠らない新しい関係式が提案されている(Ito et al., 1999)。

$$Pr=(3Sh-SH)/2$$

また、室内試験により水圧破碎区間の掘削コアの引っ張り強度を求めれば、微小亀裂などの問題はあるもの、破碎圧(Pb)から亀裂再開口圧(Pr)を一定の精度で求めることが可能である。そのため、水圧破碎システム全体の見直しとともに、掘削コアの引っ張り強度試験を併用することにより初期応力の絶対値の精度・確度を向上させる試みが行なわれつつある。また、水を用いない乾式破碎法の開発も行われている。

従来の水圧破碎法の計測結果を評価するにあたっては、水圧破碎時の亀裂再開口圧の経時変化に留意する必要がある。すなわち、圧力-時間曲線が非線形性を示すと同時に急激に水圧が低下する場合と、非線形性を示した時点以降もゆっくりとしか水圧が低下しない場合の2つのケースがあるという事である。この2つのケースは、これまでは、主に応力条件が違うことから生じるものと考えられてきた。すなわち最大水平応力(SH)と最小水平応力(Sh)の比が重要であり、 $SH < 2Sh - Pp$ (間隙水圧)の場合は孔壁面に亀裂を発生させた水圧は亀裂全体を深くまで押し開くのに十分な圧力であるため、亀裂が開いた瞬間に亀裂内部まで圧入水が浸入し、急激な圧力の低下が生じたと解釈されている。一方、 $SH > 2Sh - Pp$ の場合は孔壁面に亀裂を発生させた水圧は亀裂を深部まで押し開くことが出来ないため、ゆっくりと水圧が低下し続ける解釈されている。このことから、水圧破碎による応力の算定は水圧破碎を行った原位置の応力状態(SHとShの比の状態)により大きく異なった値となる可能性が

あり、既存のデータを利活用する上で十分な注意が必要である。

なお、水圧破碎法は、元々インタクトな原位置の岩盤に亀裂を生じさせ、初期応力の大きさとその方向を算定する手法であるため、地層処分システムにおける地層の隔離性能を低下させる恐れがある。このため概要調査段階における応力測定手段として水圧破碎法を採用する場合は、他の方法による代替や地層処分システムに与える影響を含めて慎重に考慮する必要がある。

b) 応力解放法： 応力開放法の原理は、多素子歪みセンサーをボーリング孔の孔底に接着剤等により固定し、接着剤等の固化後に歪みセンサーの周りをオーバーコアリングし、岩盤応力から解放することにより、初期応力を計測する。応力開放法では、孔底掘削の方法（平面孔底掘削、球面孔底掘削、円錐孔底掘削等）、地下水面下の水没した孔底に正確かつ確実に多素子歪みセンサーを貼付あるいは埋設する方法（接着剤あるいは充填材の性質）、センサーの周りを正確にオーバーコアリングする手法、解放歪み量の確実な取得（センサーの絶縁低下防止策）等に留意して計測を実施する必要がある。また、特に大深度の計測では、想定される環境影響要因（間隙水圧の影響による有効応力の算定、掘削スライムのセンサー貼付に及ぼす影響、温度による歪み計測値のドリフト、地圧増大によるボアホール壁の崩壊による計測値の変化等）に十分配慮する必要がある。

応力解放法は、線形弾性が第一近似的に仮定できる岩盤で、理想的にはインタクトな岩盤に適用されるものであり、解析結果の信頼性は観測方程式における感度係数と計測位置の関係及び測定箇所岩盤の等方均質線形弾性体であるとの仮定がどの程度成り立つかに依存している。ボーリング孔を掘削する前に存在した微小亀裂や、ボーリング孔掘削あるいは孔底掘削により生成した微小亀裂が解析結果に与える影響は、大きな応力集中が予想される地下深部では多大なものとなると考えられ、計測の信頼性が低下する要因となることを充分考慮する必要がある。

応力解放法による深部岩盤応力測定の適用深度は1000m程度と考えられる。これは測定深度が1000mを越えると、孔内に挿入する測定機器の耐水圧不足による測定機器の絶縁低下や、ボアホールブレイクアウトのようなボーリング孔壁の破壊現象の発生などにより、応力解放法の適用が困難になることが予想されるからである。さらに深い深度で測定を行うためには、応力測定用歪み感知センサー部のみならず測定プローブ全体の耐圧性・絶縁性・耐熱性を高める必要がある。地下深部で岩盤温度が100℃を越えるような場所では、測定プローブの構成材料として樹脂等が使用して

ある場合に、材料変質により本来の測定機能が発揮できなくなる場合も予想される。測定プローブの構成素材選択も大深度での応力測定には重要な要素である。

### 3.7.2.6 検層

3.7.2.3項や3.7.2.4項で取り上げた検層項目を除き、地層処分に固有な検層項目は存在せず、掘削終了後に対象とする地層・岩体の特性に応じた一般的な検層がなされると想定されるが、ここでは詳述しない。物理探査ハンドブック（1998）の「第13章 物理検層」などの参考書を参照されたい。

## 3.8 資源調査

調査・評価項目：地質環境

●（概要調査評価事項） 経済的価値のある鉱物資源の存在が概要調査で明らかになった範囲は、将来において人間侵入が懸念されるので避ける必要がある。

原子力安全委員会の環境要件には「鉱物資源の賦存」が項目として挙げられており、概要調査地域に経済的に重要な鉱物資源（鉱業法第3条に規定された「鉱物」を対象とする）が存在するかを調査・評価する必要がある。なお、評価にあたっては、経済的な重要性のほかに希少性も考慮する必要がある。

鉱業法第3条に規定された「鉱物」には、固体の鉱物のほか、石炭・石油・天然ガスなどが含まれる。わが国に賦在する多くの鉱物資源、石炭・石油・天然ガス資源、粘土鉱床などについては、これまでに全国的に探査が行われており、分布・品質・量などについては概略的な整理がなされている。概要調査地域およびその周辺地域に経済的に重要な鉱物資源の存在が知られている場合は、それらの鉱物資源の分布・品質・量について調査を行う。なお、一部の鉱物資源（金、レアメタル）については現在も探査が継続されており、新たな鉱床が発見される可能性があることに留意する必要がある。

国際FEPでは、地質資源の中に水資源や地熱資源が含まれているが、地熱資源が賦存するような地質環境は高レベル放射性廃棄物処分には明らかに不適である（なお、地熱資源については3.6項「地温調査」を参照）。また、水資源については、飲用・農業用・工業用として利用される地下水は処分場レベルに比べ格段に浅い帯水層から揚水する場合が多く、そのような浅層地下水は普遍的に存在しているため、水資源として取り扱う必要性は低いと考えられる。一方、飲用・農業用・工業用として処分場レベルに近い深度の深い帯水層から揚水している場合、それらの帯水層は地下深部に存在する第四紀層の中にある。処分深度に第四紀層が存在する地域は概要調査地区の選定段階で排除されるため、深層の地下水資源についても水資源とし

て取り扱う必要性は低いと考えられる。温泉・鉱泉利用を目的とした深掘り井戸による地下水利用については、処分深度に近い深度の地下水を小規模に利用している例がしばしば存在するが、これらについてもある意味で普遍的に存在するため、水資源として取り扱う必要性は低いと考えられる。

資源調査では、概要調査地域およびその周辺地域に経済的に重要な鉱物資源の存在が知られている場合は、それらの鉱物資源の分布・品質・量について調査を行う。また、鉱物資源の存在が知られていない場合においても、地質環境の調査の一環として行われる現地踏査により採取された岩石・鉱物に経済的な重要な鉱物資源が含まれていないか検討を行う。それらの調査の結果として、概要調査地域に経済的に重要な鉱物資源が存在することが明らかになった場合、その鉱物資源の品質・量などを総合的に評価し、経済的な重要性あるいは希少性があるか否かを判断する。経済的な重要性あるいは希少性がある鉱物資源が存在すると判断された場合は、その地域を避ける必要がある。

### 3.9 海域調査

概要調査地区が沿岸部である場合は、海域の地質環境調査が必要とされる。この項では海域の調査に特有用な項目を取りまとめている。その他の一般的な調査項目に関しては他の項を参照されたい。

a) 海底地形調査：既存の海底地形図は測深データの集積により等深度線が粗く引かれているのみであり、概要調査における地形解析ではより高精度な海底地形の把握・解析が必要となる。精密な海底地形調査にはGPSを搭載した船舶のマルチビーム測深機あるいは曳航体のサイドスキャンソナーを用いて海底地形測量を行なう必要がある。これらの手法は従来に比べて遥かに高い深度方向の分解能を持ち、海底微地形の判読や高精度の海底地形DEMの作製が可能である。

b) 海域地質調査：海洋調査船により海底堆積物・岩石を直接的に採取する方法は次のようなものがある。なお、③は調査船航跡上に存在する岩石の分布を線的に捉えたものである。

- ① グラブによる採泥・採石
- ② コアラーによる採泥・採石
- ③ ドレッジの牽引による岩石採集
- ④ プラットフォームまたは掘削船によるボーリング
- ⑤ 有人潜水艇又は無人有索探査機による露頭観察とマニピレーターによる露岩採取

また、サイドスキャンソナーの反射強度を用いて、同質な堆積物・岩石の分布を推定することも可能である。

c) 海域物理探査：沿岸海域の地質構造探査の主体は海上音波探査である。海上音波探査の発振源は対象とする深度別に様々な種類ものが存在し、最適な発振源を用いることが重要である。また、稠密な測線間隔(数100 m～500m程度)で面的に行なうことにより、直接的な観察が困難な海域の地質構造に関するデータを取得できる。

d) 海底湧水調査：海底に露出した比較的透水性の高い多孔質媒体や‘水みち’となる構造沿いに淡水が湧出することがある。後背地の地形的なポテンシャルが高い場合に海底湧水が存在することが多く、日本各地で海底湧水が確認されている。海底湧水は、潜水調査により原位置採水を行ない、水調査と同様の手法を用いて分析を行なう。また、必要に応じてシーページメーターなどを用いて湧出量の定量化を試みる。なお、海底湧水の存否・分布については、海底湧水が栄養塩を多く含み、よい漁場となることから、漁業関係者への聞き取り調査などが有効な調査手法となる。

e) 海域掘削調査：プラットフォームまたは掘削船により、海域のボーリング掘削を行なう。掘削技術としては、浅海域では通常工法による掘削も行なわれるが、中～深海ではライザーレス掘削工法が、深海ではライザー掘削工法が選択される。また、掘削流体にトレーサーを混入する場合に、ヨウ素でなく臭素が用いられることが多い。

### 3.10 モニタリング

モニタリングは、長期連続観測することによるデータの蓄積により、長期変動に関わる事象の捕捉やその解析精度の向上が可能になるものや、水文調査や気象関連のデータのように平準値を得るために行なうものがある。長期変動関連事象として、現在の地殻変動、断層活動、地震・火山活動に関わるモニタリングについて記述する。また、水調査関連事象として、平準値の取得と地下施設の建設・閉鎖に関わる事象について記述する。

#### 3.10.1 長期変動関連事象

a) 地殻変動：GPS測地点を高密度に配備した高精度測地と光波測距(将来的には光波距離計に置き換える)を組み合わせることで、地表面の短期的な変動の傾向を捕捉することができる。国土交通省国土地理院の電子基準点(必要であればこれに付け加える形式でGPS基準点を設ける)を基点に、GPS測地点を高密度に配備し、長期的に地盤の変位量のモニタリングを行う。特に比較的長く連続する断層・リニアメントについては、その両側の近接地点にGPS測地点を4点以上配置し、GPS測地とともに光波測距を行ない、

相対的な変動量を正確に観測し、地表面の短期的な変動の傾向を捕捉する。また、海溝型巨大地震や内陸型地震に対する地盤の応答挙動を観測し、調査対象領域の応力場や応力集中域、地震応答特性に関するデータを取得することができる。なお、各測地・測距法の精度などは以下の通りである。

- ・GPS 精度：水平距離  $3\text{-}5\text{mm} \pm 1\text{ppm} \times \text{距離 (m)}$   
垂直距離 = 水平距離  $\times 2.4$  倍
- ・光波測距精度：水平距離  $0.8\text{mm} \pm 1\text{ppm} \times \text{距離 (m)}$
- ・光波距離計（フェムト秒光コム）精度：水平距離  $0.00\text{Xmm} \pm 1\text{ppm} \times \text{距離 (m)}$ 、距離 200m までのものを開発中

b) 断層活動：(独) 防災科学技術研究所の Hi-net 観測網を補完・付加する形で高感度地震計を高密度に配備し、概要調査地区周辺で発生する微小地震を長期間モニタリングすることにより、概要調査地区の地震活動の枠組みや応力集中域に関するデータを取得する。また、海溝型巨大地震や内陸型地震に対する応答挙動に関するデータも取得する。概要調査地区周辺の地震活動に関する基礎的なデータとしてとして最も重要なものである。

c) 地震・火山活動：(独) 防災科学技術研究所の F-net 観測網を補完・付加する形で広帯域地震計を配備し、世界的な地震活動を長期間モニタリングすることにより、概要調査地区周辺で発生する地震のメカニズムや概要調査地区の地下構造（弾性波速度構造）に関するデータを取得する。概要調査地区周辺の地震活動や地下の熱構造・火山活動に関する基礎的なデータとして必要なものであるが、概要調査期間内に必要なデータが取得できるとは限らない点に留意する必要がある。

### 3.10.2 水文調査関連事象

水文調査における平準値：水文調査の対象となる現象は季節変動や年変動などの影響を受けるため、少なくとも3年程度以上の連続的な観測を行なうことが望ましい。河川流量や地下水位などと気圧・降水量などとの応答特性、また地震などとの関連性は地下水の変動要因を解析する上で基本となるものである。また、降水（天水）・地表水・浅層地下水については一定期間毎に水試料を採水し、水質・同位体組成などの変動を把握し、その平準値を把握する必要がある。

a) 地下施設の建設・閉鎖に伴う地下水の変化：地下施設の掘削・建設に伴い、地下施設周辺の地下水位は低下し、周辺領域から地下水が流入する。また、地下施設の閉鎖に伴い、地下水位は長期的には地下施設建設前の自然状態に回復すると考えられる。このような

地下水の変化は、既存孔井の水位・水質を変化させるほか、重力・比抵抗・自然電位などの物理量を変化させる。物理探査手法を用いて地下水系の変動を捉える技術の原理・適用性については、竹野ほか（2006）を参照されたい。

b) 掘削による水位低下：地下施設の掘削に伴う地下水位の低下現象は、既存孔井における測水調査（連続モニタリング）により直接的に確認される。地下水位の低下現象は重力値などの地球物理学的諸量に影響を及ぼすが、地下水位の低下そのものから想定される重力値の変動幅は（縦孔などの近傍を除き）超伝導重力計などの高感度な重力計でなければ有意な測定は不可能なレベルである。また、地下水面以下の堆積物・岩石の層厚・間隙率などに関する詳細なデータがなければ、重力値の変動を地下水位へ換算することはできない。重力探査に一般的に用いられている可搬式重力計の測定精度は  $100 \mu \text{gal}$  オーダーであり、地下水位の低下そのものから想定される重力値の変動幅は測定精度以下かそれと同程度のレベルであり、重力値の変動から水位への変換は誤差が大きく意味をなさない。地下水位の低下による周辺領域からの地下水の流入現象は、縦孔近傍では浅層地下水系の流向・流速に影響を及ぼし直接的に検出できる可能性がある。また、沿岸域や火山などの近傍では溶存成分の大きく異なった地下水が存在するため、地下水位の低下に伴う周辺地下水の流入現象により比抵抗値や自然電位などの地球物理学的諸量が変動し、その影響範囲を一定の精度で検出できる可能性がある。

c) 閉鎖後の復水過程：地下施設の閉鎖に伴う地下水位の回復現象は、既存孔井における測水調査（連続モニタリング）により直接的に確認される。地下水位の回復現象は重力値などの地球物理学的諸量に影響を及ぼすが、想定される重力値の変動幅は（縦孔などの近傍を除き）超伝導重力計などの高感度な重力計でなければ有意な測定は不可能なレベルである。地下水位の回復過程における周辺領域への地下水の押し返し現象は、縦孔近傍では浅層地下水系の流向・流速に影響を及ぼし直接的に検出できる可能性がある。また、沿岸域や火山などの近傍で溶存成分の大きく異なった地下水が地下施設周辺の地下水系に侵入することが想定される地域では、地下水位の回復過程における周辺領域への地下水の押し返し現象により比抵抗値や自然電位などの地球物理学的諸量が変動し、その影響範囲を一定の精度で検出できる可能性がある。

### 3.11 室内試験・測定

#### 3.11.1 地化学特性

概要調査地域およびその周辺部に存在する岩石・堆

積物および天水・地表水・地下水などの地化学特性を明らかにし、処分場としての成立性（人工バリアの設置環境）や天然バリア機能に関わる地化学特性の評価を行なう。概要調査地域の現在の地化学特性を把握する上で重要なものには、処分領域に存在する岩石やそれらを被覆する堆積物・土壌などの鉱物・化学組成、地化学的ベースラインとしての河川堆積物などの鉱物・化学組成、水の物理・化学特性などがある。以下では、岩石・堆積物・土壌・河川底質などの固相と天水・地表水・地下水などの液相・ガス相の別に記述する。

岩石・堆積物の地化学特性を評価する上で、岩石種とその鉱物組成、風化・変質の程度などは特に重要であり、粘土鉱物や変質鉱物に注意する必要がある。

### 3.1.1.1.1 岩石・堆積物などの鉱物・化学組成

処分領域やその周辺部に存在する岩石・堆積物やそれを構成する鉱物、またその化学組成は、概要調査地域の地化学特性を把握するための基礎データであり、核種移行評価の重要な要因となる。岩石-水反応は地下水の水質形成に重要であり、水の地化学特性と岩石の地化学特性とは深い関係にあるため、岩石学的な記載と併せて鉱物学的記載やその化学的検討を行う必要がある。風化の程度や鉱物組成、特に粘土鉱物と変質鉱物に注目して行く。また、土壌・底質は、河川水の化学的負荷量調査などと併せて地域（流域）の地化学特性を把握するために調査される。環境動態調査における汚染発生源の探索等に活用され（関，2003；関ほか，2005）、濃度分布をみるだけでは知ることができない、流下に伴う沈積・剥離・沈澱・溶解などの物理的・化学的なプロセスを明らかにすることができる。河川底質調査は、流域の地化学環境の把握や水中成分を濃集する現象を捕らえることにより、水質調査だけでは得られない情報を得ることが期待され、鉱物資源探査分野（例えば山本，1999；山本ほか，2003）や地球化学基本図の分野（例えば田中ほか，1995；田中，2003）で多くの実績をあげている。河川底質調査に際しては、同一地点の試料であっても、採取法・粒度構成・流れとの関係等でその化学組成が大きく分散しうることから、同一地点で複数試料を採取・分析して分散の程度を確認し、地点間に有意の差があるか否かを判断する必要がある。河川底質や土壌は岩石・堆積物と同様な手法（例えば加藤・脇田編（2001）「地質学ハンドブック」の「2.2.2 陸水・温泉水・海水」など）で分析する。河川水質も地下水と同等な手法で分析を行う。

#### a) 岩石・堆積物の記載・分析

概要調査地域およびその周辺域に分布する岩石・堆積物の記載を行う。岩石記載（肉眼・鏡下）の要領は黒田・諏訪（1983）および荻木（1988）に準拠する。岩石・堆積物の風化・変質について、分布・深度や性状・

様式などに関する肉眼観察を行う。割れ目の産状（粘土で充填、開口裂かなど）や密度を露頭で記載する必要がある。割れ目に鉱物が沈殿している場合は、それらが地下水の状態を記録している可能性があることから、特に詳細に記載する。熱水性粘土脈（例えば北川，1999）が風化部に観察される場合は、その構造や密度などを露頭で記載する。

岩石・堆積物の全岩分析を必要に応じて実施する。全岩分析の目的は、岩石・堆積物の化学組成・性質を把握するためであるが、火成岩類の成因を解析するためにも有効であり、将来の火山活動の予測にも利用できることがある（第3章5節の「火山・マグマ活動」参照）。全岩分析の手法（蛍光X線分析、誘導結合プラズマ発光分析・質量分析など）は、必要とする元素や精度などによって選択する。

#### b) 岩石・堆積物を構成する鉱物の分析

記載した岩石（風化物を含む）やそれに含まれる鉱物、特に粘土鉱物について、必要に応じてX線回折、走査型電子顕微鏡、EPMA等を用いた各種観察・分析を実施し、肉眼・鏡下の記載では得られなかったより詳細な情報を得る。

スメクタイトは一般に続成作用または低温の熱水変質作用によって形成され、岩石が単純に地表部で風化したものか熱水変質作用を被ったものかを判断する指標となる（吉村，2001）ので、特にスメクタイトの有無に注意する。また、スメクタイトは陽イオン交換能が高く核種吸着能があるため、将来の安全評価の際に考慮する事項となりうる。シリカ鉱物では、特にOpal-A、Opal-CT、クリストバル石、石英の相転移（Williams et al., 1985）およびスメクタイトが徐々に消失して混合層粘土鉱物を経てイライトに移行する現象などの鉱物学的変化は、主に埋没変成時の温度条件に依存しており母岩が受けた熱履歴の指標となる（井上，1990；1991）ので注目する。ただし、碎屑性の鉱物が含まれる砂岩・礫岩などには一般に適用できない。また、非晶質物質はX線回折ピークがほとんど得られないので分析が困難である（月村，1995）。

カオリン鉱物など同質異像を持つ鉱物は形成条件により形態が異なり、一般に形成温度が高いほど強い自形性を示す（Bailey，1988）。従って、形態の差異は風化作用と熱水変質作用を区別する指標となる。また、鉱物の形態観察により地下における生物鉱化作用の痕跡を見出すことができる場合もある。

岩石・鉱物の局所・面分析では、裂か中に沈殿した鉱物の累帯構造・微細組織の解析および定量分析・年代測定などにより地下水や岩石中の化学的環境の履歴を解析する（Paces et al., 2004）。

## 3.11.1.2 水の物理・化学特性

概要調査地域およびその周辺部に存在する天水・地表水・地下水の水質・同位体組成などは、概要調査地域の地化学特性を把握するための基礎データであり、また地下水流動を解析・評価する上でも重要なデータとなる。水の地化学特性としては、水温・電気伝導度・水素イオン濃度 (pH)・溶存酸素濃度 (DO)・酸化還元電位 (Eh) 等の物理化学パラメータと溶存主要化学成分 (Na, K, Ca, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub>) やアンモニウムイオン, 硝酸イオン, 溶存微量成分, 特に Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup> や硫化物イオン (S<sup>2-</sup>), コロイド物質, TOC (全有機炭素量), ガス物質 (天然ガス, 二酸化炭素, 硫化水素, 希ガス) などの化学組成や同位体組成がある (表 4-11)。一部の有機物質についてはここで触れるが、微生物等に関しては、生物化学特性として別に述べる。

地下水の場合、地表の状態と温度・圧力・酸素の有無などが大きく異なるため、原位置におけるその場分析や原位置の環境を保った分析、あるいは空気に触れないようにするなど原位置の状態を変えないように努めることに注意が必要である。また、分析操作上の汚染・損失などにも留意する。なお、地下水の地化学特性データは年変動や季節変動が想定されるので、複数年にわたり繰り返し調査・分析を行なう必要がある。また、掘削調査で、掘削に伴う人為的汚染を考慮する必要がある。

表 4-11 調査すべき地下水試料の地化学特性一覧

項目	測定内容
計測	水温, 電気伝導度, 水素イオン濃度 (pH), 溶存酸素濃度 (DO), 酸化還元電位 (Eh)
化学組成 (主成分)	Na, K, Ca, Mg, NH <sub>4</sub> , Cl, SO <sub>4</sub> , HCO <sub>3</sub> , CO <sub>3</sub> , NO <sub>3</sub>
化学組成 (微量成分)	Si, Al, Fe, Mn, F, Li, B, Sr, Se, Zr, Nb, (Tc), Pd, Sn, Cs, Sm, Pb, Ra, Ac, Th, Pa, U, (Np, Pu, Am, Cm) 等
化学組成 (微量成分)	Fe <sup>2+</sup> /Fe <sup>3+</sup> や硫化物イオン (S <sup>2-</sup> )
コロイド物質	コロイド物質 (Si, Al, Fe, Mn 等, 有機物等)
TOC (全有機炭素量)	TOC (全有機炭素量), 微生物
同位体組成	水素同位体比, 酸素同位体比, イオウ・ストロンチウム同位体比, トリチウム濃度
ガス物質	天然ガス, 二酸化炭素, 硫化水素, 希ガス (He, Rn 等)

## (1) 物理化学パラメータ

水温, 電気伝導度, 水素イオン濃度 (pH), 溶存酸素濃度 (DO), 酸化還元電位 (Eh) 等の物理化学パラメータは、水の状態を把握するための必須なデータであるが、これらのパラメータは変化し易いため、「その場分析」「原位置測定」が最良である。「その場分析」を行うためには、状態を変えないように地下水中に計測機器を設置し、計器の読みが安定するのを待って記録する。原位置からの採水をフロー式にして検出器をフローセルの中にセットして大気非接触とする方法もある。いずれも「その場分析」に近い状態で計測する必要がある。

酸化還元電位は、化学種の状態を左右する重要なパラメータのひとつであるが、化学種の酸化形と還元形の比の対数であるため、低濃度であるとメーターの指示が不安定で一定になるまで長時間を要し、また、電極表面は劣化し易いので、常に新しい表面となるよう留意する必要がある。また、プローブによる原位置での Eh と、大気非接触によりくみ上げた地下水の Eh を比較して、「その場分析」の確認・評価を行う。

## (2) 一般水質化学組成データ

現位置測定ができない場合、試料の状態を出来るだけ変化の無いように、かつ汚染・損失の無いように細心の注意を払い (例えば陽イオンの場合には酸を加える)、試料水を採取して実験室に持ち帰って分析する。その場合、特に地下水の場合には地表の状態と温度、圧力、酸素の有無などが大きく異なることがあり、地下で直接容器に大気非接触・被圧下で採取する方法 (パッカーを利用する方法など) や地表にまでパイプでポンプアップする方法等が試みられているが、空気に触れないように装置を工夫したり、グローブボックスを利用したりすることも必要である。間隙水の場合、ボーリングコアから一軸圧縮試験器や遠心分離装置等を利用して抽出されるが、この場合も空気に触れないようにする必要がある。このような取り扱いのためには、ボーリング掘削の計画段階で無酸素環境の保持や試料を汚染させないような掘削手法を検討しておく必要がある。ボーリング掘削は他の目的にも使用されるため、地下水採取条件が優先されないこともあろうが、その場合には予備排水で地下水質が安定するまで、もしくは掘削に使用したトレーサーが減少するまで廃棄し、安定した状況で試料を採取することが必要である。しかし、地下水が定常的な状態に復帰するのに数年を要するケースもあることに留意する。

地下水のタイプを分けるために溶存主要化学成分である Na, K, Ca, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub> 等を通常の水質分析手法で分析する (例えば加藤・脇田編, 2001)。この中で、特にアルカリ度 (HCO<sub>3</sub>+CO<sub>3</sub>) は現場で測定する。純銅のオーバーパックに対してその

機能を低下させることが危惧されるアンモニウムイオンや TRU 廃棄物の併置処分がなされる場合には硝酸イオンも定量する。

溶存微量成分は、ベースライン特性としてバックグラウンド濃度を設定するのに有効であり、異常時には比較的早期に変化が現れるため、フレイムレス原子吸光法、誘導結合プラズマ発光法 (ICP-AES)、誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) などによって定量する。ベースラインとしては、核種移行のモニタリングを考慮すると、Si, Al, Fe, Mn, F, Li, B 等の他に、ガラス固化体の元素 (核燃料サイクル開発機構, 1999) から Se, Zr, Nb, (Tc), Pd, Sn, Cs, Sm, Pb, Ra, Ac, Th, Pa, U, (Np, Pu, Am, Cm) や Sr 等が分析元素として必要である (括弧書きの元素は人工放射性核種のためベースラインでは検出されないであろう)。

$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  や硫化物イオン ( $\text{S}^{2-}$ ) は、酸化還元指標として重要である。硫化物イオンはオーバーパックの安定性にも関係する。これらは酸化され易いため、試料水を実験室まで運搬するには保存に注意し、硫化物イオン ( $\text{S}^{2-}$ ) は硫化亜鉛として固定する必要がある。ここでも重要な点は、原位置の状態を如何に崩さずに試料を採取して情報を得るかである。特に地下と地表では大きく酸化還元電位が異なるため、酸化還元電位によって性質が大きく変わる Fe や S においては、取り扱い方によってはそれらの溶解・沈澱状態が大きく変化してしまうため注意が必要である。 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{S}^{2-}/\text{SO}_4^{2-}$  等の化学組成と pH, Eh から熱力学計算で得られた結果との対比によりデータの確認・評価をする。

### (3) コロイド物質

ベースライン特性の一つとして、コロイドの総量と種類を把握する必要がある。分析には種々の方法があるが、ろ過法では数 nm 以上で  $0.45 \mu\text{m}$  のメンブランフィルターを通過する微粒子をコロイド物質として、限外濾過膜を用いてサイズ分画ろ過を行い、ろ液もしくはフィルターに留まった化学種を化学分析する。従来用いられているシリカコロイドやラテックスではなくより天然の状況に近い粘土鉱物であるアルミニウムケイ酸塩系のナノ粒子を用い、アスペクト比も考慮したろ過における検証を、原子間力顕微鏡による観察や粒度分析装置等を併用して粒子サイズの比較評価を行う必要があるが、各装置のもつ長所・短所に留意する。分析元素は、Si, Al, Fe, Mn 等 及び関係する微量元素として、U, Th などがある。地下水ではコロイド濃度が低い場合、数百リットルの地下水からタンジェンシャルフロー、クロスフローなどと呼ばれる濃縮操作が行われることがあるが、フィルターからの汚染や損失に留意して、試料水による共洗いやマ

スバランスのチェック等の必要がある (Degueldre et al., 1989; Eyrolle & Chamasson, 2000)。ここで、コロイド生成および固相 (結晶および非晶質) の生成条件の把握のため、原位置地下水における鉱物の生成と各鉱物の飽和度 (Saturation Index)、核種の溶解度および存在形態の把握を行い、コロイド分析の妥当性を確認することが必要である。

### (4) TOC (全有機炭素量)

有機炭素は、金属イオンに対する反応性が高く、微生物の栄養源や代謝産物として二酸化炭素濃度に影響したり、酸化還元環境を支配する因子となるなど、環境への影響は大きいので、溶存する有機物量の総量として把握する (上田・坂本, 2006)。

### (5) 同位体組成

水素・酸素同位体組成やトリチウム濃度は、水そのものの起源・性質を示し、また地下水流動の指標となるため把握する必要がある。また、炭素やイオウ、ストロンチウム同位体比なども水塊のトレーサーとしての特性を有するため、把握する必要がある。

ガス物質 (天然ガス, 二酸化炭素, 硫化水素, 希ガス) のうち、特に二酸化炭素や硫化水素は酸性水を生成するため、腐食性の高い水を形成しやすい。また、天然ガスは、資源評価あるいは施工上の注意事項として評価する必要がある。ガス状物質は、地下水中に溶存していても気圧の変化で地上では気液分離してしまうため、サンプリングの段階で飛散しないように採取することに留意する。

希ガスの中で特に重要なものは、He と Rn と考えられる。He はマグマや深部流体からもたらされるほかに廃棄体の  $\alpha$  壊変によっても生じ、Rn も母岩の他にウラン廃棄物から生じる。従って、He や Rn に関する地化学的ベースライン特性の把握は、処分後のモニタリングにより廃棄体の状態や地下水流動が推測できる可能性を提供する。

### 3.1.1.2 生物化学特性

地層処分が想定される深度 300 ~ 1000m 程度の地下深部にも微生物が存在する (Whitman et al., 1998)。その規模や活動は地質や水文特性に応じて大きなばらつきがあるが (Chapelle, 2001)、処分場の安定性や核種移行に影響を及ぼす可能性が指摘される (Pedersen, 2005)。微生物は酸素を消費するだけでなく、岩石と反応性の低い硝酸塩を消費して、二価鉄を含む還元的な地下水の形成に重要な役割を果たす。地下深部で微生物は硫化水素やメタン等を生成する事も知られ (村上ほか, 1999; Shimizu et al, 2006; Maekawa et al., 2006)、処分施設周辺でどのような生物化学反応が起こっているか把握する事は、建設時から処分場閉鎖に



わたる安全確保においても重要である。核種移行に影響を及ぼす生化学反応として、酸化還元、揮発化、錯化剤生成、コロイド形成、微生物細胞への吸着および取り込みが挙げられる (Pedersen, 2005)。また地下水の pH、酸化還元状態および化学組成への微生物代謝産物による一次的影響と、一次的影響に伴う鉱物溶解沈殿や岩盤の透水性への二次的影響についても注意を払う必要がある (Hunter et al., 1998)。

概要調査のボーリングや精密調査の地下施設建設等で地下深部環境に生息する微生物が人為的に攪乱され、閉鎖後、掘削前の環境に修復されるまでに数十～数百年オーダーの時間を要すると推定される (Pedersen, 1996)。従って、概要調査段階の初期に生物化学特性を調査する事が望ましい。原位置の試験は Push-Pull 法と呼ばれる掘削孔や井戸を用いて、ある特定の生物化学反応速度を測定する手法は確立しているが (Isotok et al., 1997)、その工程でも微生物群集構造等に攪乱を生じる。そのため生物化学的特性のベースラインを取得するには、ボーリングコアを用いた室内でのデータ取得・解析が中心となる。

コア中の全菌数 (生死を問わない微生物細胞数)、遺伝子と脂質解析による微生物群集構造、および有機物分解や電子受容過程等の現場活性は取得しておくべき項目である。これら直接的な微生物調査に加え、コア中の間隙水を抽出し、微生物の代謝産物の有無を調べることも重要である。例えば、原位置での微生物活動の指標になる溶存有機物、水素、酸素、アンモニウムイオン、硝酸イオン、亜硝酸イオン、硫酸イオン、溶存二価鉄等の濃度は取得する必要がある。また、メタンや硫化水素に関しては、生物起源により発生したものが明らかにするため、安定同位体組成まで調べる事が望ましい。コア中の固相についても、微生物のエネルギー生産に用いられる固体状有機物、二価鉄もしくは三価鉄を含む鉱物、硫化物鉱物、硫酸塩鉱物等の含有量および種類を明らかにする必要がある。

孔壁が自立しない堆積岩を対象とした掘削調査では、一般的に泥水あるいはポリマーを混合した掘削流体が用いられ、孔壁を保護する役割を果たす。孔壁が自立する結晶岩では掘削流体として清水を用いることもできるが、いずれの掘削流体も微生物の汚染源になる事を留意しなければならない。コアを採集すると同時に、掘削流体も汚染微生物評価用に保存しなければならない。微生物調査における掘削では、オールラウンドのコアを採集直後、酸素にできるだけ触れさせず、かつ冷蔵状態を維持して処理設備のある実験室等に運搬しなければならない。

無菌無酸素状態において、掘削流体で汚染されているボーリングコアの外側部分を取り除き、汚染の少ない内側部を取り出す。この工程はサブコアリングと呼ばれ、グローブボックス等の中で行われる。さらに

岩芯を粉碎し掘削流体に混入したトレーサーの有無を確認し汚染評価を行う必要がある (Russell et al., 1992)。通常、微生物大の蛍光ビーズがトレーサーとして用いられるが、地層中で残存するため使用には注意を要する。臭素やヨウ素等の化学的トレーサーが用いられる場合、遠心法または圧縮法にて間隙水を抽出し、トレーサー濃度を測定して汚染を評価する。空隙率の高い地層・岩体や送水圧が高い場合は、掘削流体が岩芯まで浸透して、掘削流体を介して地上や他深度の微生物が岩芯まで到達しやすい。掘削流体を介した岩芯汚染がコア中に生息する微生物を上回る場合、トレーサーを用いた汚染評価がほとんど意味を成さなくなる。このような汚染を最小限にする為、濾過滅菌した清水を掘削流体として用いることが望まれるが、孔壁の崩落やビットのジャミングに十分注意する必要がある。

ベースラインの生物化学特性を評価するに当たり留意すべき点は、掘削後のポアホールに貯まる地下水は、岩盤中で固体表面に付着して活動する微生物より、地下水中に懸濁し活動する微生物が優占し、岩盤中と異なる生物化学特性を示す可能性がある。その結果、岩盤中とは異なる、明らかに過剰な微生物活動を検出する恐れがある。地下施設中の空間においても地下水が滲み出し、酸素と接触する事により巨視的な微生物集合体 (バイオフィルム) が形成される事例も知られる (Pedersen, 2005)。地下施設建設時にも地下水のくみ上げ等で微生物群集構造が攪乱される恐れがあるため、ボーリングコアを用いた概要調査初期の生物化学特性の把握は実施を検討すべき調査項目である。

ボーリング掘削に係る留意点：前述したように、孔壁が自立しない堆積岩を対象とした掘削調査では、一般的に粘土鉱物あるいはポリマーを混合した掘削流体が用いられ、孔壁を保護する役割を果たす。また、採取された堆積岩コアは半割して岩石観察・記載し、常温にて長期保存するのが慣例である。このような掘削法やコア処理・保存法では地表の微生物による擾乱を受けることは免れえない。従って、概要調査段階において堆積岩地域の地下微生物を評価するのであれば、従来の掘削法およびコア処理法を改良するか、もしくは独立して生物化学特性を把握する目的のボーリングを行なう必要がある。従来行なわれてきた生物化学特性を把握する為のボーリングでは、濾過滅菌した清水を掘削流体として用いることにより地表微生物の混入を低減させているが、コアチューブやボーリングロッドなどは滅菌処理などを行なわないまま使用しており、コアチューブやボーリングロッドなどに付着した地表微生物の混入を評価できるような掘削プログラムは実施されていない。大深度掘削などでは全てのボーリングシステムに対する滅菌処理が事実上難しく、生物化

学特性の把握に適した良質な試料の採取は難しいのが現状である。従って、精密調査段階の大口径縦孔掘削時に、孔底付近から全てのボーリングシステムを滅菌したショート・レンジの滅菌掘削を行ない、生物化学特性の把握に適した良質なコア試料を得ることも代替手段として考えられる。

また、掘削後のポアホールに貯まる孔内水における微生物の活動は、岩盤内の孔隙に制限されていた微生物の活動が自由な活動空間を得ることにより、岩盤中とは異なる、過剰な微生物活動を行なうことが想定される。同様に地下処分施設中の空間においても、地下水の湧き出しに伴い、巨視的な微生物集合体（バイオフィーム）が形成される事例が知られている（Pedersen, personal communication）。従って、掘削過程の全ての過程において地表微生物の混入を一定限度以下に制御したボーリングコアを利用した生物化学特性調査の必要性は高いと考えられる。

### 3.11.3 水理特性

処分領域における地下水流動や物質移行を規定する移流・拡散現象については3.7.2.4項で概略を既述した。本項では、室内透水試験や室内拡散試験、また原位置透水試験における試験・解析上の留意点について詳述する。

地層の物質移行特性を直接測定する方法は、移流現象に関しては透水試験、拡散現象に関しては拡散試験があり、室内ではボーリングにより採取されたコアを対象に試験を行なう。室内試験では試験体の代表性を吟味する必要があるが、採取されたコアの地層中での存在状態、即ち、地圧・間隙水圧・低い動水勾配などを再現した状態で試験が可能であり、これら存在状態の変化（応力場の変化・異常間隙水圧の発生など）に応じた物質移行特性の変化を測定できる。また、室内透水試験では弾性波試験等とのカップリングも可能であり、これにより評価される透水特性－物理特性の関連性は数多く存在する透水性の比較的低い水みちによる地下水流動の寄与分を評価したり、物理探査・検層結果に基づく物理特性－透水特性の関連性を把握する上で重要なデータとなる。

原位置・室内における透水・拡散試験の各方法には、それぞれの試験原理とそれを数学的にモデル化した試験理論が対であり、計測データは試験理論から導かれた解析解を用いて解析され、各種物質移行特性が評価される。従って、実際の実験においてその試験原理とかけ離れた状態で行われた実験計測データに対して試験原理を忠実に再現する解析解を適用しても、得られる物性値は真の値と大きくかけ離れた値となることがある。実際にある特定の地層やサンプルコアの物質移行特性の評価を試みる際には、おおよそ予想される物質移行特性に応じた試験方法を選択し、その試験原理

に忠実に試験を実施しなくてはならない。

各種室内または原位置試験の計測データから物質移行特性値を算出するための方法として主に解析法、図解法及び数値解析（逆解析）法等が挙げられる。また、定常状態の計測データから透水試験では透水係数、拡散試験では実効拡散係数、非定常状態の計測データから透水試験では透水係数及び比貯留率、拡散試験では実効拡散係数及び遅延係数が評価される。

- ・解析法は各種試験の解析解を適切に変換し、試験の計測データから直接透水係数あるいは実行拡散係数を算出する方法である。また、理論解の定常状態の部分に対して線形近似し、前述の方法により算出した透水係数あるいは実効拡散係数の値を用いて、比貯留率あるいは遅延係数を算出するタイムラグ法もある。この方法は基本的に定常状態の計測データにしか適用できない。
- ・図解法は各種試験の理論解を用い、必要な特性値を特定するための標準曲線を作成し、実測された計測データと標準曲線とを比較することによって各種特性値を決定する方法である。この方法は非定常状態の計測データに対して適用可能であるが、比貯留率あるいは遅延係数など非定常状態に関する物性値が小さい場合にはこれら物性値の評価結果にオーダーに及ぶ誤差を生じる可能性がある。
- ・数値解析に基づく逆解析法は各種試験の厳密解または数値解を用い、解析結果と実測結果で定義される目的関数を最小化する手法で「最適な」パラメータの値を決定する。試験法によってはその厳密解中の特定されるパラメータどうしに相関がある場合があるため、適用する際には事前にこれを把握しておく必要がある。

#### (1) 室内透水試験

室内透水試験では採取されたコアの地層中での存在状態、即ち、地圧・間隙水圧・低い動水勾配などを再現した状態で試験が行われることが望ましい。室内透水試験は基本的に、流量計測に基づいて透水係数を求める定水位法及び変水位法（地盤工学会、1980）、差圧力（水頭差）計測に基づいて透水係数を求めるフローポンプ法（定微流量法）（Olsen, 1965; Olsen et al., 1985; Song, 2004）及びトランジェントパルス法（Brace et al., 1968）、試験体の一端で間隙圧に一定周波数の振動を与え、他端の間隙圧の振幅の減衰率および遅れを計測し透水係数を求める間隙圧オシレーション法（Kranz, 1990）がある。これらの試験法のうちフローポンプ法を除く方法では試験開始直後に試験体上流端面付近に極めて大きな動水勾配（理論上無限大）が発生することが明らかとなっており（Zhang et al., 1998; 2000a; 2000b; 2002）、前述の低い動水勾配下での試験を行えるのはフローポンプ法だけである。

表 4-12 各種室内透水試験法の概念図および解析モデル

試験法	定水位法	変水位法	フローポンプ法	トランジェントパルス法
モデル				
初期条件	$H(z,0)=0 \quad \text{at } 0 < z \leq L$	$H(z,0)=0 \quad \text{at } 0 < z \leq L$	$H(z,0)=0 \quad \text{at } 0 < z \leq L$	$H(z,0)=0 \quad \text{at } 0 < z \leq L$
境界条件	$H = 0 \quad \text{at } z = 0$ $H = \Delta H \quad \text{at } z = L$	$H = 0 \quad \text{at } z = 0$ $\frac{a}{KA} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = L$	$H = 0 \quad \text{at } z = 0$ $\frac{\partial H}{\partial z} = \frac{1}{KA} \left( q - C_c \frac{\partial H}{\partial t} \right) \quad \text{at } z = L$	$\frac{S_d}{KA} \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial H}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = 0$ $\frac{S_u}{KA} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = L$

表 4-13 各種室内透水試験の厳密解

試験法	定常解	厳密解	動水勾配
定水位法	$K = -\frac{q}{A \cdot i} = -\frac{q \cdot l}{A \cdot \Delta H}$ 土質試験法	$H(z,t) = \Delta H \left\{ \frac{z}{L} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\pi)}{n} \cdot \sin \frac{n\pi z}{L} \cdot \exp \left( -\frac{K}{S_s} \cdot \frac{n^2 \pi^2}{L^2} t \right) \right\}$ Zhang et al. 1998, Geotechnical Testing J., 21(1), 52-57.	$i(z,t) = \frac{\Delta H}{L} \left\{ 1 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \cos(n\pi) \cdot \cos \left( \frac{n\pi z}{L} \right) \cdot \exp \left( -\frac{K}{S_s} \cdot \frac{n^2 \pi^2}{L^2} t \right) \right\}$
変水位法	$K = 2.30 \frac{aL}{A \cdot t} \log_{10} \left( \frac{h_1}{h_2} \right)$ 土質試験法	トランジェントパルス法の厳密解を利用することができる。 $S_u \Rightarrow a; S_d \Rightarrow \infty; H \Rightarrow h_1$ 張ら, 1998, Hokkaido Geotechnics, No.9, 15-20.	
フローポンプ法	$K = -\frac{q}{A \cdot i} = -\frac{q \cdot l}{A \cdot \Delta H}$ Olsen, 1996 Water Resources Research, 2(6), 287-295.	$H(z,t) = \frac{qL}{AK} \left\{ \frac{z}{L} - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp \left( -\frac{K}{S_s} \beta_n^2 t \right) \sin(\beta_n z)}{L \delta \beta_n \cos(\beta_n z) \left[ L \left( \beta_n^2 + \frac{1}{\delta^2} \right) + \frac{1}{\delta} \right]} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \delta = \frac{C_c}{A \cdot S_s} \\ \tan(\beta L) = \frac{1}{\beta \delta} \end{array} \right.$ Esaki et al. 1996, Geotechnical Testing J., 19(3), 241-246. Zhang et al. 1998, Geotechnical Testing J., 21(1), 52-57.	$i(z,t) = \frac{qL}{AK} \left\{ \frac{1}{L} - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp \left( -\frac{K}{S_s} \beta_n^2 t \right) \cos(\beta_n z)}{L \delta \cos(\beta_n z) \left[ L \left( \beta_n^2 + \frac{1}{\delta^2} \right) + \frac{1}{\delta} \right]} \right\}$
トランジェントパルス法	$h_u - h_f = \frac{V_d}{V_u + V_d} \cdot \exp(-\theta t)$ $K = \frac{\theta \rho \lambda V_u V_d}{A(V_u + V_d)}$ Brace et al. 1968, J. Geoph. Res., 73(6), 2225-2236.	$H(z,t) = \frac{1}{1 + \beta + \gamma} + 2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\exp \left( -\alpha \phi_m^2 \right) \left[ \cos(\phi_m \xi) - (\gamma \phi_m / \beta) \sin(\phi_m \xi) \right]}{\left[ (1 + \beta + \gamma - \gamma \phi_m^2 / \beta) \cos \phi_m - \phi_m (1 + \gamma + 2\gamma / \beta) \sin \phi_m \right]}$ $\xi = \frac{z}{L}, \quad \alpha = \frac{Kt}{L^2 S_s}, \quad \beta = \frac{S_s AL}{S_u}, \quad \gamma = \frac{S_d}{S_u}, \quad \tan \phi = \frac{(\gamma + 1)\beta}{\gamma \phi^2 / \beta - \beta}$ Hsieh, et al. 1981, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 18(3), 245-252.	$i(z,t) = 2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\phi_m}{L} \exp \left( -\frac{Kt}{L^2 S_s} \phi_m^2 \right) \left[ \sin \left( \phi_m \frac{z}{L} \right) - \left( \frac{\gamma \phi_m}{\beta} \right) \cos \left( \phi_m \frac{z}{L} \right) \right] \times \frac{1}{\left( 1 + \beta + \gamma - \frac{\gamma \phi_m^2}{\beta} \right) \cos \phi_m - \phi_m \left( 1 + \gamma + \frac{2\gamma}{\beta} \right) \sin \phi_m}$ Zhang et al. 2000, Geotechnical Testing J., 23(1), 83-99.

表4-12に各種室内透水試験法の概念図および解析モデル、試験の初期条件および境界条件を示す(張ほか, 1997; 高橋ほか, 1998)。それぞれの室内透水試験の初期条件、境界条件及び次式(1)で表される飽和浸透流の一次元基礎方程式を用いると、表4-13に示す各種室内透水試験の厳密解が導かれる(Zhang et al., 2002)。

$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} - \frac{S_s}{K} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad \text{式(1)}$$

ここで、H：供試体中の水圧(水頭)；Z：供試体の下流端面からの距離；K, S<sub>s</sub>：それぞれ供試体の透水係数及び比貯留率；t：実験開始後の経過時間である。

- ①定水位法：定常状態の流量測定結果を用い、表4-13に示す定水位法の定常解より供試体の透水係数を算出することができる。
- ②変水位法：準定常状態の水位変化測定結果を用い、表4-13に示す変水位法の定常解より供試体の透水係数を算出することができる。また、変水位透水試験をトランジェントパルス透水試験の特例として考えられるため、非定常状態の測定結果を用い、トランジェントパルス法の厳密解を利用すれば、供試体の透水係数及び比貯留率の両方を求めることも可能である(張ほか, 1998)。
- ③フローポンプ法：定常状態の測定結果を用い、表4-13に示すフローポンプ法の定常解より供試体の透水係数を算出することができる。また、非定常状態の測定結果を用い、同表に示されているフローポンプ法の厳密解を利用すれば、逆解析法より供試体の透水係数のみならず、比貯留率をも同時に求められる。更に、非定常解析を用いることにより、難透水性材料の透水試験に必要な時間を大幅に短縮することも可能である(Esaki et al. 1996; Zhang et al., 1997)。
- ④トランジェントパルス法：準定常状態の測定結果および表4-13に示すトランジェントパルス法の

定常解を用い、図解法より供試体の透水係数を算出することが可能である(brace et al., 1968)。また、非定常状態の測定結果を用い、同表に示されているトランジェントパルス法の厳密解を利用すれば、図解法(Hsieh et al., 1981; Neuzil et al., 1981)もしくは逆解析法(Zhang et al., 2000b)より供試体の透水係数のみならず、比貯留率をも同時に評価することが可能である。

- ⑤間隙圧オシレーション法：定常解により算出される振幅の減衰率と位相の遅れに関する標準曲線を透水係数および比貯留率に関する無次元パラメータについて作成し、図解法により試験評価を行う(Fischer, 1992)。また、定常解より導かれる減衰率と位相の遅れに関する2つの式にそれら実測値を代入し、透水係数および比貯留率を数値解析により特定することも可能である(高橋, 2003)。

(2) 室内拡散試験

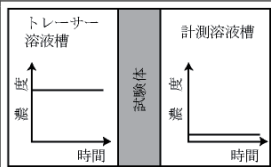
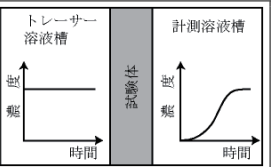
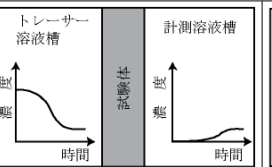
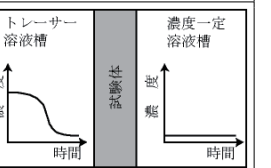
室内拡散試験法は多数存在するが、ここでは室内拡散試験を透過拡散法、浸入拡散法(in-diffusion)、浸出拡散法(out-diffusion)、コラム法に大別する(張ほか, 2004; Zhang et al., 2006a)。

a) 透過拡散法

透過拡散法の試験原理は試験体を2つの溶液槽で挟み、一方の溶液槽にトレーサーを投入し、片方あるいは両方の溶液槽のトレーサー濃度を経時的に計測し、実効拡散係数および遅延係数を測定するものである。透過拡散法は表4-14に示すようにさらに4つの方法に分類される。

- ①定濃度浸入-定濃度浸出法(constant inlet concentration-constant outlet concentration)：この方法では両方の溶液槽の濃度差を一定に保ち、定濃度溶液槽側に透過してくるトレーサーの総量を経時的に計測する方法である。計測データのうち時間-透過総量曲線の定常状態の傾きから実効

表4-14 透過型室内拡散試験の試験方法

	上流側濃度一定-下流側濃度一定	上流側濃度一定-下流側濃度上昇	上流側濃度低下-下流側濃度上昇	上流側濃度低下-下流側濃度一定
概念				
計測項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下流端面におけるトレーサー物質のフラックスの経時変化</li> <li>・下流側計測溶液槽に拡散したトレーサー物質の総量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下流側計測溶液槽におけるトレーサー物質濃度の経時変化(上昇)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上流側溶液槽におけるトレーサー物質濃度の低下</li> <li>・下流側溶液槽におけるトレーサー物質濃度の上昇</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上流側溶液槽におけるトレーサー物質濃度の低下</li> </ul>

拡散係数を算出し、遅延係数は透過総量に対する理論解の定常状態の部分の線形近似式を用いタイムラグ法により算出する。試験評価には定常状態の計測データを用いるため、試験体の物質移行特性によっては試験に長時間を要する。この方法は、ベントナイト、ベントナイト混合土、コンクリート、岩石等、地層処分に関連する人工材料、地質媒体に対する試験で広く利用されている(例えば、Skagius & Neretnieks, 1986; Rebour et al., 1997; Sato, 1997; Tits et al., 2003)。しかし、この方法から求められる遅延係数は、岩石パウダーを対象とするバッチ試験と比較し3オーダー程度小さな値として見積られることも珍しくなく、空隙率より小さな値で評価されることもある。この問題点は試験の解析理論と実際の実験での操作の矛盾点、タイムラグ法によるデータ解析段階での誤差の発生などに起因することが明らかとなっている(Zhang & Takeda, 2005)。また、多くの実施例では濃度計測の容易さからトレーサー濃度を異常に高く設定する傾向が見られ、定濃度側のトレーサーの透過総量を計測するために、濃度を限りなく0に保ち、濃度検出ができる程度の透過量で溶液全てを濃度0の水と置換する作業を継続して行わなくてはならない。

②定濃度浸入-浸出濃度増加法 (constant inlet concentration-increasing outlet concentration) : 一方の溶液槽を定濃度に保ち、トレーサーが透過してくる溶液槽の濃度増加を経時的に計測する方法である。Rebour et al. (1997)を除きこの方法により透過拡散試験が実施された例はないが、前述の定濃度浸入-定濃度浸出法と比べ、試験管理が容易であり、試験手順に起因する計測誤差が低減されると考えられる。試験評価は非定常状態の計測データに対して行わなくてはならないため、

Rebour et al. (1997)は数値解による試験評価を行っている。これに対し、Zhang & Takeda (2005)は試験評価の精度を向上させるために数値解にかわる解析解を導出している。しかしながら、この方法も定濃度浸入-定濃度浸出法と同様に、トレーサーが定濃度側に透過してくるまでに時間を要する。

③浸入濃度減少-浸出濃度増加法 (decreasing inlet concentration-increasing outlet concentration) : この方法では一方の溶液槽にトレーサーを投入し、両方のトレーサー濃度の経時変化を計測する。Garcia et al. (2004)はこの試験法の評価のために数値解を用いたが、Zhang et al. (2006b)は数値解による誤差を低減するために解析解を導出し、岩石コアを対象とした試験の評価にこの解析解を適用している。この試験法の利点は、溶液槽内の溶液を置換する必要がなく、適切に試験条件を設定するとトレーサー投入側の濃度低下が早くなり、また、解析解を用いることにより非定常状態の計測データに対しても試験評価が行え、試験時間を短くできる点にある。

④浸入濃度増加-定濃度浸出法 (decreasing inlet concentration-constant outlet concentration through-diffusion) : この試験法は一方の溶液槽に一定量のトレーサーを投入し、他方の溶液槽内の溶液を常に置換することにより定濃度に保つ方法である。計測はトレーサー投入側の溶液槽内の濃度の経時変化である。この手法はトレーサー投入槽側の濃度計測をするため、定濃度浸入-定濃度浸出法と定濃度浸入-浸出濃度増加法と比較し試験時間が早く、定濃度浸入-定濃度浸出法より試験管理が容易である。この方法に対する解析解はZhang & Takeda (2005)により導出されているが、未だ適用例はない。

表 4-15 浸入型室内拡散試験の試験方法

		濃度を一定と仮定		濃度低下	
		ハーフセル法		単一溶液槽法	
		両ハーフセル間濃度一定	片方のハーフセル内濃度一定		
観測					
	計測項目	・ 試験体軸方向における濃度分布	・ 試験体軸方向における濃度分布	・ 試験体軸方向における濃度分布	・ 溶液槽におけるトレーサー物質濃度の低下 ・ 試験体軸方向における濃度分布

b) 浸入拡散法 (In-diffusion method)

一般に、浸入拡散法により得られる試験結果は「みかけ」の拡散係数である。浸入拡散法はその試験原理により表4-15に示すようにさらに定量トレーサー法、濃度低下法の2つの方法に分類される。

- ① 定量トレーサー法：定量トレーサー法はさらにハーフセル法、インハーフセル法、単溶液槽法の3つに分類される。

ハーフセル法では、試験体を二つのセル内に充填もしくは装着し、両試験体の間に定量のトレーサー溶液を挟み、トレーサーを拡散させる (Cho et al., 1993; Kozaki et al., 1999; Idemitsu et al., 1990)。ある程度時間が経過した後、両試験体内のトレーサー分布を計測し、試験体を無限長と仮定する近似解により試験評価を行う。

インハーフセル法では、試験前に試験体を二つのセル内に充填もしくは装着し、片方の試験体に一定量のトレーサーを浸透させる (Gillham et al., 1984)。試験は二つの試験体を密着させることで始まり、得られる計測データは一定時間後における試験体内の濃度分布(スライスする必要ある)であり、試験体を半無限長と仮定する解析解を用い試験評価が行われる。

単溶液槽法は試験体の一端に定濃度溶液槽を設け、他端をゼロフラックスとし、一定時間が経過した後の試験体内の濃度分布を計測する方法である。この方法では、試験を開始し終了するまでに濃度計測を行わないため試験管理は容易である。トレーサーとして放射性物質を用い、ガイガーカウンターを使用すると試験体内の濃度分布を、試験体をスライスすることなく計測することが可能である。また、その簡易な試験手順から、ベントナイトやベントナイト混合土、粘土等、試験体を

容易にスライスできる地盤材料に主に適用されている。

- ② 濃度低下法：この試験法は前述の単溶液槽法と同様の手順で行われるが、溶液槽内の濃度の経時的な変化も計測することにより実効拡散係数と遅延係数の評価も可能となる。この場合の試験評価は数値解を用いて行われる (Rowe & Booker, 1988) が、Takeda et al. (2006) は数値解による試験評価の誤差を低減するために、解析解を導出している。この試験法の利点は実効拡散係数および「みかけ」の拡散係数が一回の実験により評価される点にある。しかしながら、この試験法の実施例は少ない (Van et al., 2005)。

c) 浸出拡散法 (Out-diffusion method)

浸出拡散法は試験前に試験体内にトレーサーを浸入させ、その後、試験体両端に溶液槽を設置しトレーサーを溶液槽側に浸出させる方法である。浸出拡散法は試験体内の初期濃度の分布により表4-16に示すように2つに分類される。

- ① 初期線形濃度分布法：この方法は透過拡散法の定濃度浸入-定濃度浸出法の後に、試験体内に線形分布した濃度を両端の溶液槽内の溶液を濃度0の溶液に置換し、両端の溶液槽に浸出するトレーサー濃度を経時的に計測する方法である。この方法は、定濃度浸入-定濃度浸出法とのクロスチェックのために実施される (Jakob et al., 1999; Tits et al., 2003)。
- ② 初期一様濃度分布法：この方法では試験前に試験体内に一様にトレーサーを分布させ、前述の方法と同様に試験体両端に溶液槽を設け、浸出するトレーサー濃度の変化を計測する (Lever, 1986)。この方法では試験前に一様にトレーサーを試験体

表4-16 浸出型室内拡散試験の試験方法

	試験体内の初期濃度は線形分布	試験体内の初期濃度は均一分布
概念		
計測項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>両溶液槽における濃度の経時変化 (上昇)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>両溶液槽における濃度の経時変化 (上昇)</li> </ul>

に分布させる必要があるため、準備に長時間を要するとともに、一様に分布したかの確認ができない。

#### 3.11.4 力学特性

概要調査地域およびその周辺部に存在する岩石・堆積物などの力学特性を明らかにし、処分場としての成立性（人工バリアの設置環境）や物理探査データから推定される平均的な透水性などとの関係を明らかにし、天然バリア機能に関わる力学特性の評価を行なう。概要調査地域の現在の力学特性を把握する上で重要なものには、処分領域に存在する岩石やそれらを被覆する堆積物・土壌などの弾性係数・せん断強度・引張強度・内部摩擦角・ポアソン比・応力分布などがあり、掘削調査で得られたコア試料を用いた室内試験により供試体の物性値として取得される。この供試体の物性値と原位置岩盤の物性値にはずれがあり、それらを補正・補完する各種の構成式が存在する。

岩盤応力に関しては、主応力分布を確認するための原位置試験が行なわれる。一方、掘削コアを用いて初期応力を推定する室内試験も実施されている。

初期応力（コア法）：岩盤の初期応力を定方位コアを用いて測定する方法であり、原位置試験と比較して安価に実施可能であり、また原位置試験と異なり測定深度に制限がない。コア法に用いられる各種試験法は単一の試験法としては信頼度がそれほど高くない場合があるため、複数の試験法を併用してその信頼度を高める手法が用いられている。代表的な併用試験法を以下に概説する。

##### ① ASR - DSCA 併用法

ASR法は、採取直後のボーリングコアの膨張ひずみを連続測定し、その経時曲線から非弾性回復ひずみを求め初期応力を推定する。DSCAは供試体と溶融石英との差ひずみから供試体に含まれる微小亀裂を方位別に推定し、微小亀裂の量比を主応力比として求める。なお、DSCAでは応力値そのものでなく主応力間比しか決まらないため、一定の仮定あるいは他の手法などを用いて主応力比を応力値に換算する必要がある。初期応力を求めるコア法の中で両法は最も実績がある手法とされる。

##### b) AE - DRA 併用法

AE法では、掘削コアが受けた過去の最大履歴応力以上の応力が作用した場合にAEが発生するというカイザー効果を利用して初期応力を求める。一方、DRAは最大履歴応力以上の応力が作用した場合に岩石の非弾性ひずみ量が増加する現象を利用して初期応力を推定する。これらの手法は単一の試験法としては信頼

度が低いですが、両者を併用することにより信頼度が高くなった好例とされる。両法とも、三次元主応力を決定するためには互いに異なる位置関係にある最低6つの供試体を用いた計測を行なう必要がある。なお、掘削コア採取から計測までの時間はできる限り短くすることが望ましい。

#### 4. 地下水システムの解析と概念モデルの構築

概要調査地域およびその周辺部の地下水流動および地下水の性状を解明するため、周辺部の涵養域～流出域を含めた地下水システムについて、地下水システムの存在範囲や地下水の起源・年代・水質などの調査・解析を行い、地下水システムに係る概念モデルを構築する。

##### 【解析の目的】

水文地質構造と地下水の起源・年代・水質などの調査・解析により、地下水の涵養域や流出域を明らかにし、また深層地下水系の非常に遅い流動やその長期安定性を把握することができる。地下水流動は核種移行の主プロセスであり、処分場としての成立性および施工性の観点から検討する必要があるため、周辺部の涵養域～流出域を含めた地下水システムの流量および年代を含む起源を把握し、水質形成機構を明らかにし、水理構造も含めて地下水システム全体の概念モデルを構築する。

##### 【解析・概念モデルの内容と留意点】

概要調査地域を内包する地下水システムを把握するためには、その地下水システムの存在する範囲と、その地下水システムを涵養する上流側の涵養域から下流側の流出域までの範囲を含む流動系を明らかにしなければならない。地下水システムの存在範囲は、地質構造に規制された水文地質構造で画されており、その境界となる構造の把握が重要である。境界となる構造は、粘土層などの透水性の低い地層や断層粘土などの透水性の低い遮水構造、あるいは花崗岩体中の断層などの透水異方性の高い構造などである。地下水流動という概念は、このような地層あるいは構造により規制された水理学的連続性が保障された範囲内でのみ成立する概念であり、その範囲を超えて適用することは基本的に誤りであることに留意する必要がある。広域地下水流動解析として報告された多数の研究事例においては、地下水の水理学的連続性を検証しないまま、単に位置ポテンシャルと（透水異方性を考慮しない）透水性のみに基づく地下水流動解析がなされている。これらの地下水流動解析事例は一定の有効性は認められるものの、水文地質学的構造や水理学的連続性を検証・評価しなければならないような地域においては水理学

的に無意味な単なる計算事例としか評価できないものが多い点に留意する必要がある。概要調査地域およびその周辺地域の地下水流動系をモデル化するには、第一にモデル化対象領域内の水理学的連続性が保障される範囲がどの部分であるか明らかにすることが重要であり、次にその範囲の地下水流動を支配する要因・流動の形態・駆動力などを把握・モデル化し、モデルの構築する。その次のステップとして具体的な境界条件、地盤の水理特性分布に関する情報等、実際に解析を行う上での物理的な条件の設定を行い、数値解析モデルを構築する。

選択される概念モデルによって、数値解析モデル作成に必要な水理特性の種類が異なる。ここで述べる概念モデルとは、例えば亀裂が存在する岩盤において、地下水流動を多孔質媒体内の流動、選択的な流路を持つ流動、あるいは選択的な流路と周辺の多孔質媒体の相互作用を含む流動としてモデル化するかという基本的流動形態の把握があげられる。一般的には花崗岩等の結晶質岩の場合は亀裂を選択的に流れるモデル、堆積岩では多孔質媒体モデルという判断を行うが、亀裂の空間的な密度や亀裂周辺の状況によって一義的には決定できない。

概要調査地域の深層地下水系の涵養から流出にいたる流動経路および流量の特定は概念モデル構築の基礎をなすものであり、概要調査段階で明らかにしておくことが望ましい。そのため、評価対象地域およびその周辺地域を含めた広域にわたる地下水流動系全体に係る地表および地下の地質・水調査の結果を用いて、各水系の構造・水収支・起源などを解明する。さらに、水質形成機構解析および年代測定を実施し、評価対象地域およびその周辺地域の地下水流動形態を把握し概念モデルを構築する。地層処分は第三系以前の堆積岩あるいは結晶質岩の場合において行われる。この場は一般的な地下水の利用の場では、水理学的基盤として考慮されていなかった領域を含む。したがって、深層地下水系の情報は浅層地下水系と異なり文献情報が不足することが考えられるので、深層地下水系の評価のための水文調査や掘削調査が非常に重要となる。また、地下水システムの解析・モデル化は、評価対象地域の深層地下水系が地震活動、火山活動や隆起・海面変化等による水文地質学的変化の影響評価のために必要な解析を同時に行うことになるので重要である。

なお、本稿で下記に述べる深層地下水は処分地深度に相当すると考えられる少なくとも300～500mの深度の地下水を対象とする。影響評価や流動について明らかにするため、1000m程度までの深層地下水系の情報があることが望ましい。浅層地下水は飲用あるいは農業、工業用水として非常に利用が多いため、既存文献での調査が可能な場合が多い。深層地下水の利用は、日本では主に温泉利用の目的で行われている。し

たがって、既存のデータ利用は温泉用の掘削井を中心に置くことになる。以下に、各調査手法と解析および概念モデル化の内容を具体的に記載する。

#### 4. 1 基本的な地質構造の枠組みのモデル化

水文地質構造は基本的に地質構造に規制されており、基本的な地質構造の枠組みを把握することは地下水システムの解析・モデル化において極めて重要である。地質環境調査では、地質体・岩体の種類と透水性、また水みちとなる構造の有無により調査手法が異なるとともに、基本的な地質構造の枠組みを構成するとき使用する（できる）データの種類が異なる。被覆堆積物・堆積岩層が処分深度に分布する基盤岩を厚く覆う場合には、より特殊な調査・解析を行う必要がある。また、作成される地質構造の枠組みは、水文地質構造のみならず地下水流動・核種移行などの各モデルの基礎として引き継がれるため、地下水の移行経路となる構造を表現できるものである必要がある。以下では代表的な地質環境別に、基本的な地質構造の枠組みをモデル化する際の留意点について記述する。

##### (1) 堆積岩類

層状構造を持つ堆積岩類の解析・モデル化においては、表層地質とコントロールポイントにおける掘削調査、反射法探査による断面構造を組み合わせることによって、地質構造を高い精度でモデル化することが可能となる。表層地質と合致しない重力異常や磁気異常などの構造は伏在する異種岩体（貫入岩体など）や伏在断層などを示唆する可能性がある。断層は、その連続性（総延長）と変位量あるいは透水（異方）性を基にモデル化の時点で取捨選択される。代表的な地質体におけるモデル化の際の留意事項は以下の通りである。

- ・付加体堆積岩類：各スラストシートを区切るスラストの規模・破碎程度・透水（異方）性
  - ・第三紀堆積岩類：正断層から逆断層への転換に伴う断層周辺の構造・透水（異方）性の変化
- 地質モデル構築時に用いる調査データの優先順位は次のように考えられる。

- ① 地表面における地質・地質構造の分布
- ② 掘削地点における深度方向の地質・地質構造の分布
- ③ コントロールポイントで修正された反射法探査断面
- ④ 重力・磁気異常から推定された異種岩体・断層の分布
- ⑤ 電磁探査・比抵抗探査の解析結果
- ⑥ 収集された既存文献およびボーリング・データ



## (2) 地表に露出した結晶質岩類

反射法探査が有効ではない結晶質岩類では、掘削調査による深度方向のデータと掘削孔周辺のジオトモグラフィ断面のみが岩体の深度方向分布に有効なデータとなる。また、健岩部の透水性が低く、断層・節理など構造が水みちとして機能するような高い透水性を示す場合は、水みちとなる構造のモデル化が必要とされる。水みちとなる構造には2種類が存在し、高透水性で貯留効果の認められない水みちと、低透水性で貯留効果の認められる水みちに分類される。高透水性で貯留効果の認められない水みちは例えばトンネル工事などで大出水や切羽の崩壊などを招くような構造であり、低透水性で貯留効果の認められる水みちは例えばトンネル壁面から水が滲み出しているような構造である。少数の高透水性で貯留効果の認められない水みちは個別的にモデル化する必要があるが、大多数の低透水性で貯留効果の認められる水みちについては統計的な評価を行えばよいと考えられる。なお、水みちとなる構造の透水性は、花崗岩類などでは地下水の流動経路となることにより透水性がさらに高くなるが、斑れい岩や流紋岩類などでは一旦は地下水の流動経路となるものの岩石が地下水と反応することにより粘土化し透水性が低くなるものが存在するため、岩体の種類や岩石-水反応の特性を踏まえた解析・モデル化が必要となる。

花崗岩体などに発達する断層・節理などの解析・モデル化においては、長期の侵食現象により形成された構造地形と考えられるリニアメントのモデル化が重要である。例えば、阿武隈花崗岩体では、リニアメントに連続するような高角の割れ目は透水性の極めてよい水みちとなることが知られており、断層などと同様に処分深度の地下水流動に十分に影響を及ぼしうると考えられる。なお、露頭規模で観察されるような小規模な断層・節理などは孔壁からの平均的な漏水量の算出などに有効なパラメータとなるが、基本的な地質構造のモデル化では考慮すべき対象とはならない。地質モデル構築時に用いる調査データの優先順位は次のように考えられる。

- ① 地表面における地質・地質構造（リニアメント含む）の分布
- ② 掘削地点における深度方向の地質・地質構造の分布
- ③ 掘削地点における VSP 探査断面
- ④ 屈折法探査断面
- ⑤ 重力・磁気異常から推定された異種岩体・断層の分布
- ⑥ 収集された既存文献およびボーリング・データ

## (3) 堆積物・堆積岩層に厚く覆われた結晶質岩類

処分対象深度に存在する結晶質岩類を堆積物・堆積

岩層が厚く覆っている場合、被覆堆積物・堆積岩層の地質・地質構造は本項の(1)「堆積岩類」で記述した方法で解析・モデル化を行うことができる。被覆堆積物・堆積岩層の最下部に基底礫岩が存在する場合や、基盤岩の最上部にチャンネル構造が存在しチャンネルを埋積した礫岩などが存在する場合は、それらの礫岩が透水性のよい水みちになっている可能性が高いので、その分布や構造をモデル化する必要がある。

また、結晶質岩類（基盤岩）の上面の古い地形面は構造地形の可能性があり、その古い地形面から基盤の結晶質岩類内に発達する構造を推定できる可能性がある。従って、結晶質岩類（基盤岩）の上面の埋積された地形面は稠密な反射法探査により捕捉し、古い地形面の解析および現地形面との関係を明らかにする必要がある。なお、地質モデル構築時に用いる調査データの優先順位は次のように考えられる。

- ① 地表面における地質・地質構造（リニアメント含む）の分布
- ② 掘削地点における深度方向の地質・地質構造の分布
- ③ コントロールポイントで修正された反射法探査断面
- ④ 掘削地点における VSP 探査断面
- ⑤ 重力・磁気異常から推定された異種岩体・断層の分布
- ⑥ 電磁探査・比抵抗探査の解析結果
- ⑦ 結晶質岩類（基盤岩）の上面の埋積された地形面から推定される地質構造
- ⑧ 収集された既存文献およびボーリング・データ

## 4.2 浅層地下水系と涵養域・流出域

浅層地下水系の情報は、深層地下水系の涵養場所および流出場所の推定をするために重要である。したがって、評価対象域の上流および下流側についても必要な地下水情報を収集する必要がある。帯水層内の浅層地下水系は、水の調査の項で述べられたように、既存の手法で調べることができる。帯水層内の流動量に関しては、水頭の地域分布と揚水試験等から得られる水理パラメータでわかる。涵養量は、対象とする浅層地下水系の涵養場所の領域にもたらされる降水量から蒸発散量および河川等への表面流出が差し引かれたものである。扇状地などでは、地表水の伏流の影響が非常に大きくなるので河川流量の情報も必要である。比流量の分布により河川水系の水収支を求める。断層の存在などにより地下水系が分断されている地域も存在するため、浅層地下水系の調査を行う場合、さらに地下水の化学・同位体組成などのデータが用いられることになる。地下水の水質分布は地下水系の区分に用いられる。水質が異なる原因は、地下水系の上流側にいて、水質の異なる水の存在や水質形成に影響する原

因がある場合および地質の違いを反映している場合などが考えられる。

#### (1) 浅層地下水系の涵養域・流出域

涵養域については、一般に地形的集水域が用いられるが、平野部や内陸の盆地、火山などの存在する地域では地下の水利構造は複雑で地表地形とは異なる流動系が存在するため、地形情報からの推定だけでは不十分である。降水の安定同位体組成は、高度効果や内陸効果などにより、場所により異なることがわかっている。地下水の安定同位体組成を用いて涵養源の推定を行うことができる。地下水の安定同位体組成を用いて涵養源の推定を行うことができる（例えば風早・安原, 1994）。トリチウム濃度は、100年程度までの地下水年代測定に向いており浅層地下水系の流動に関する情報が得られる（例えば垣内・丸井, 1994）。

地下水の流出域は、河川、湧水および海洋への直接湧出である。評価対象域およびその下流側において、河川の比流量分布を明らかにするとともに、湧水（含む海底湧水）の調査を行い、地下水流出の場および量について明らかにする。流量は、水収支の差に過ぎないため、地表水と浅層地下水の水収支を地域および水系別に定量的に明らかにすることが望ましい。そのためには、化学・同位体組成などをトレーサとして用いた地下水流動に関する調査も行い、水収支を見積る。

これらの地下水情報を用いて、涵養域から評価対象域までの浅層地下水の流動と地表水との関係について、地下水系区分を行い、それぞれの地下水系について流量の把握、化学的性状の把握および地表水との水収支について明らかにする。しかし、このような手法を用いた調査事例は少ないのが現状である（核燃料サイクル開発機構, 2000）

#### (2) 留意点

- ①断層・構造線や地質境界は水理学的不連続となる場合があるため、点あるいは狭い領域の情報である透水試験データを用いたモデルの取り扱いには注意を要する。大きな水頭差があっても、水理的に接続されていなければ、流動は生じないため、各種物理探査手法の適用と同様に水質や同位体を用いた水系区分や流動経路の情報は非常に重要である。
- ②断層・構造線が深層地下水の涵養・流出の場になる可能性がある。特に評価対象地域内あるいは近傍にそのような場がある場合、処分地周囲の深層地下水の流動速度が速くなる影響や希釈される前の核種が地表に到達する‘水みち’になる可能性があるため、詳しい評価が必要である。
- ③浅層地下水の起源の解析時に、降水の同位体効果を用いる場合は、降水の浸透過程で蒸発の同位体

効果を受けるので注意を要する。地形的あるいは地質的に涵養高度のわかっている湧水データや河川源流水などを利用して、涵養地下水の同位体効果を用いる場合は問題ない。

- ④浅層地下水系と地表水の水収支を求める際、水の同位体トレーサを用いる場合は、河川や湖沼における蒸発による同位体効果の影響を考慮しなければならない。

#### 4.3 浅層地下水系-深層地下水系の関係およびその解析

調査対象となる深層地下水系は、浅層地下水系からみれば、水理学的基盤中に存在する地下水である。流動は非常に遅いと考えられ、通常的手法で流動速度の実測は困難である。数少ないデータから深層地下水の年代は数千年から数十万年オーダーになる (Morikawa et al., 2005; 馬原ほか, 2006; 深部地質環境研究センター, 2007) と考えられるが、年代値の示す流動速度は、あくまでその期間の平均値であり、ゆっくりと定常的に流動している結果であるとは言えない。日本は降水量が多く、浸食が著しいため、浅層地下水系は長期的には、激しく変貌する可能性がある。それに伴い、浅層地下水系と深層地下水系の関係の変化も考慮しなければならない。また、深層地下水系の連続性に関するデータを取得しなければ、水頭分布と水理パラメータから流動速度を求めることが可能であるかどうかを検証できない。そのような環境においては、地下水の分析およびそのデータ解析により地下水の起源、混合プロセス、年代や水質形成機構およびプロセスの解明が非常に有効な手段となる。これらの解析により、地下水の実態把握が可能になり、涵養域を考慮した火山や断層活動の影響評価、隆起や海面変化を考慮した長期変動の影響評価、さらに流出域を考慮した核種移行プロセスのモデル化などが可能になると考えられる。

##### (1) 深層地下水の流出域の推定

深層地下水の出口である浅層地下水および湧水の調査および解析について記述する。深層評価対象地域およびその下流側が調査対象域となる。地下水の化学・同位体的性状を明らかにした上で、有効なトレーサを選び浅層地下水系への混入示標とする。浅層地下水の流動は深層地下水のそれと比較して、非常に速い。一般に、地下水の主成分により深層地下水の成分を検出するのは困難であるため、各種同位体比や溶存ガスなどの微量成分をトレーサとして活用することが有効である。浅層地下水の流量と深層地下水のトレーサ濃度および混入率から、深層地下水の流入量を推定する (深部地質環境研究センター, 2004)。浅層地下水の水温異常なども、深層地下水の混入を示す兆候である可能性があるため、評価の上活用する。

## (2) 深層地下水の安定性

深層地下水は、浅層地下水とまったく異なる水質を持つ。その大きな原因は、岩石・鉱物との長期にわたる溶解・沈殿・反応、深層に存在する古海水の混入、より深部からもたらされる深部流体の侵入、さらにマグマ起源物質の混入などによるものである。滞留時間が長い場合、外界からの物質供給速度が非常に遅い場合でも水質に影響する。

評価対象地域の深層地下水の長期安定性および長期変動現象の影響を評価するためには、深層地下水が、周辺の地質や変動現象により、どのような影響を受けた上でいつからそこに存在していたのかを明らかにする必要がある。そのため、深層地下水試料の分析結果を用い、起源解析、年代測定、水質形成プロセス解析および概念モデルの作成を行う。

## (3) 留意点

- ①帯水層を形成しやすい堆積岩の地層と亀裂系の地下水を胚胎する結晶質岩では、深層地下水の存在形態がまったく異なるため浅層地下水との関係に関する評価時に注意を要する。
- ②海岸部の地下水には、ガイベン・ヘルツベルグの法則に従い、内陸側に向かって塩水—淡水境界面が形成されている。人為的あるいはなんらかの自然的要因によって地下水の動水勾配が大きいような地域では、この塩水—淡水境界面の形状は静力学的平衡を仮定した同法則から大きく変形することに留意が必要である。また、特に堆積岩地域では複数の帯水層が海底に露出することが予想されるが、この場合、塩水—淡水境界面の形状や位置は、地層の水理定数とそれぞれの帯水層中の地下水が有する水理ポテンシャルに支配されて深度毎に大きく異なるものと考えられる。広域地下水流動系における流出域として、海岸部の深層地下水のありかたの解明は概念モデル構築における水収支の推定、地下水流動の数値モデル化の境界条件設定において極めて重要な意味を有する。新規ボーリングの実施、さらには潜水調査、水中ロボット調査による地下水湧出ポイントの視認、試料採取、湧出量の計測などの積極的な手法により、海岸部においては詳細な水理地質学的・水文学的構造の把握が必要である (Zekster et al., 2007)。しかし、今のところ詳細な総合的調査事例はない。
- ③断層や構造線の水理地質学的なモデル化に際しては特に慎重な検討が必要である。水平二次元方向の地下水流動に対して遮水効果を持つ一方で、同じ断層が鉛直方向には水みちとして働き、深部起源塩水の地表への経路 (浅層地下水系への混入の発生) になっている事例が報告されている。さらに、水平方向の地下水流動に対する遮水能力が断

層の上部と下部で異なる場合もあり、断層とその周辺では複雑で局所的な流動場が形成されている可能性が高い。したがって、できる限り高密度の水理水頭、水質、同位体の調査を行い、それらの結果に基づいて断層の水理地質学的な役割に対して総合的な判断を下す必要があるが、このような調査事例はない。

- ④広域に及ぶ地質境界が地下水に及ぼす影響についても注意を払う必要がある。一例として、山地と平野あるいは盆地との境界部における顕著な地質境界の存在を挙げることができる。前者の結晶質岩中の亀裂系地下水と後者の堆積岩中の地下水が接触するような場を想定し得るが、このような地質境界が地域の地下水システムに及ぼす影響については調査・研究事例が極めて乏しい。したがって、処分場の周辺や上流域において広域に及ぶ地質境界が予想される場合には、ボーリング、物理探査、地球化学調査などに基づく詳細な水理地質学的・水文化学的構造の把握と地下水流動の連続性について事前に十分な検討が必要である。
- ⑤深層地下水の水の安定同位体比が現在の浅層地下水と比較して、低い値を持つ傾向がみられることがある。これは涵養源がさらに高い標高にあるか、寒冷期に涵養された地下水であることを示している。年代測定を実施し、原因を特定する必要がある。今後の重要課題である。

## 4.4 地下水および溶存種の起源

地下水は、帯水層ではよく混合し一定の水質を持つことが多いが、様々な起源の水の混合物である。地下水中に含まれる各種起源の水は、天水起源 (流動する) 水、マグマ起源水、下部地殻やスラブから供給される深部上昇水、超長期停滞水、海水 (含む古海水) などがある (高橋, 1997)。地下水への各種起源水の寄与の有無を明らかにすることは、対象とする地下水系の長期安定性の評価において非常に重要である。マグマ起源水は  $\text{CO}_2$  だけでなく  $\text{SO}_4^{2-}$  や  $\text{Cl}^-$  を高濃度で含み強酸性かつ非常に高温である。深部上昇水は、多量の  $\text{CO}_2$  と  $\text{Cl}^-$  をもたらす (深部地質環境研究センター, 2003)。一方で、長期停滞水は高塩濃度かつ高い全炭酸濃度を持つ場合があるが、その名のとおり停滞しているため、流動の点からみれば安定である。もし、天水起源以外の水が地下水に含まれている場合には、処分場へ与える影響評価のために、それらの各種起源水の流入に関して変動の長期予測を行う必要がでてくる。溶存成分は、各起源水からの寄与だけでなく、深部起源や生物起源の  $\text{CO}_2$  の溶解、鉱物との反応などにより変化するものである。したがって、溶存成分については、地下水系に付加されるものと沈殿や脱ガスにより除かれるものがあるが、それらは、水質形成機

構の項にて取り扱う。本項では、現在の地下水の起源とそれに含まれる成分の起源の解析手法について記述する。

起源は、同位体組成を用いて解析するのが一般的である。同位体は、起源物質に固有の値を持つものに適用可能である。同位体組成は、このほか反応や相変化のプロセスによっても変化するため、起源解析には、その同位体組成の変化の原因についての十分な検討がまず必要である。ここでは、地下水およびその溶存成分のうち、廃棄体そのものやオーバーバックなどの人工バリエーションに影響を与える  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  などの炭酸種および  $\text{Cl}^-$  イオンの起源に着目する。そして、これらの溶存化学種を地下水にもたらす深部流体、火山性流体、海水についてその起源解析手法について記述する。

(1) 水の起源

地下水に含まれる各種起源の水は、それぞれ固有の水素・酸素同位体比を持つことが知られている。図4-10に各種地下水の水素・酸素同位体組成を示した。図4-10に示すように、天水起源の水は、直線上にならぶ(酒井・松久, 1996)。マグマ起源水(火山ガス: 日下部・松葉谷, 1986)、下部地殻やスラブから供給される深部上昇水(有馬型熱水など: 風早ほか,

2004)、海水(含む古海水)などはそれぞれ特徴的な同位体組成を持っている。超長期停滞水(油田鹹水)に関しては、その起源は深部上昇水、海水および天水のいずれか、あるいは全部混合したものが変質した可能性があり、天水とは全く異なるものの非常に広い同位体組成の範囲を持つ(加藤ほか, 2000)。しかしながら、現状では正確な成因についてはわかっていない。図4-10より日本列島には天水起源以外の様々な起源の水が存在していることがわかる。地下水の長期安定性評価および処分場への影響評価の上で重要なのは、混入している水の起源の正確な評価である。マグマ起源水、深部上昇水や海水(含む古海水)は  $\text{Cl}^-$  を多く含み、前2者はさらに、 $\text{CO}_2$  も多量に含む。もし、混入している水がマグマ起源水あるいは深部上昇水の場合には、地下水系に供給されるわけであるから、将来にわたっての供給量やその変動の予測が重要になる。一方、混入している水が、海水(含む古海水)の場合は、そこに長期的に安定に存在していたのかどうか、存在理由を含めて明らかにすることが重要である。塩水の起源すなわち  $\text{Cl}^-$  等を含むハロゲン元素の起源の同定は、地下水の長期安定性評価の上で非常に重要である。最近、塩水に溶存している  $^{36}\text{Cl}$  (馬原ほか, 2006) や  $^{129}\text{I}$  (Muramatsu et al., 2001) を用いた手法が開発されつつある。

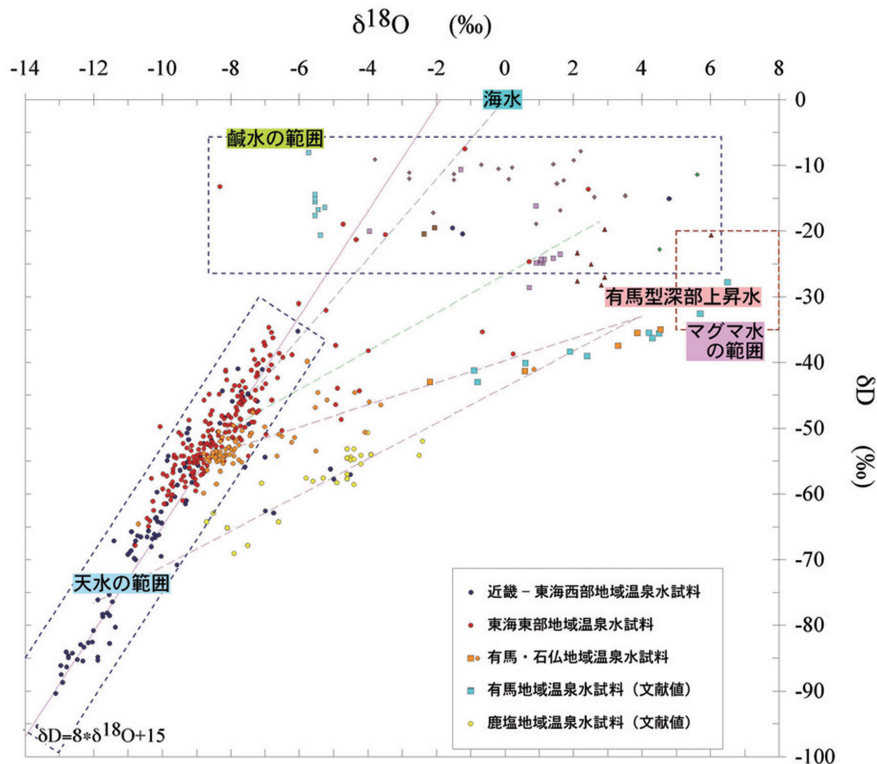


図4-10 近畿～関東～北陸地方で採取した温泉水の水素・酸素同位体組成の関係(深部地質環境研究センター, 2003; 2004; 2005)

(2) 溶存無機炭酸 (DIC) の起源

地下水中の  $\text{CO}_2$  は、岩石・鉱物と反応し、 $\text{HCO}_3^-$  や  $\text{CO}_3^{2-}$  を生成する。地下水の pH により、これら溶存炭酸種の量比が変化する。したがって、溶存炭酸種の総量である溶存無機炭酸 (DIC) として扱われることが多い。地下水中に含まれる DIC は、①有機物の分解により生成された  $\text{CO}_2$ 、②炭酸塩の溶解により生成された  $\text{HCO}_3^-$ 、③海水などに元々含まれている DIC や④マグマあるいはマントル等の深部から供給された  $\text{CO}_2$  などが起源として考えられる。このうち、④すなわちマグマあるいは深部起源の  $\text{CO}_2$  の存在が認められた場合は、深部から高濃度の  $\text{CO}_2$  の供給を将来にわたり受けうするため、その評価が必要となる。

起源の同定には通常炭素安定同位体比が用いられる (図 4-11)。上述のように pH により、炭酸種の量比が変化的ことから、全炭酸として扱う必要がある。しかし、炭素安定同位体比だけで上述の起源物質の同定をすべて行うことは原理的にできないため、対象とする地下水の賦存する地質、構造、水質特性や鉱物との反応などを考慮して、起源物質の可能性をしぼってゆく必要がある。放射性炭素濃度 ( $^{14}\text{C}$ ) の利用も有効である場合がある (深部地質環境研究センター, 2004; Takahashi et al., 2004)。

(3) 留意点

a) 水の起源解析における留意点

- ①一般に地下水の安定同位体比は、蒸発等のプロセスをのぞき変わらないものと考えられている。しかし、地下水の滞留時間が長期にわたる場合や水温が高い場合は、岩石・鉱物との同位体交換反応が生じている可能性があり考慮事項となる。考慮する反応は、炭酸塩鉱物等との酸素同位体交換反応や粘土鉱物等との水素・酸素同位体交換反応である。
- ②マグマおよび深部起源：日本列島では、どちらか

の影響を受けている深層地下水が多いことがわかっている。しかも、常時供給されうるものであるため、必ず評価しなければならない。どちらも同位体比は似た値を持つため (図 4-11)、区別するためには、他の溶存種の解析や地下水系と火山との関係など水文地質学的に決定する。

b) DIC の起源解析における留意点

- ①有機物の分解：土壌内の微生物活動による有機物の分解プロセスでは、 $\text{CO}_2$  のみが発生するため、同位体比も元々の有機物の値に近い。地下深部で有機物の分解を生じている場合は、 $\text{CO}_2$  だけでなく炭化水素種も発生するため、容易に区別できる。同位体比はしばしば高い値を持つ (中井ほか, 1974; 金子ほか, 2002)。ただし、高温の熱分解過程で生成した炭化水素種を伴う場合の  $\text{CO}_2$  の同位体比は、土壌内の分解で生成した  $\text{CO}_2$  と同様な値を示す (Aali et al., 2006)。
- ②炭酸塩鉱物の溶解：炭酸塩の溶解は酸性の環境で生じる。溶解するかどうかは、炭酸塩の SI (Saturation Index: 飽和指標) でチェックできる。深層地下水では、炭酸塩に飽和していることが多い。炭酸塩鉱物には、大規模な海成炭酸塩岩 (カルストなど)、熱水鉱床に見られる炭酸塩鉱物と通常の地層中の炭酸塩鉱物があり、それらは生成環境が異なるため、様々な同位体比を持つことに注意する (Hoefs, 2004)。
- ③海水：海水が混入していると考えられる場合のみ注意する必要がある。その際、現在の海水中の DIC はわかるが、古海水の場合は反応の進行なども考えられるので注意が必要である。
- ④マグマおよび深部起源：水の起源解析と同様に、DIC においても評価が必要である。どちらも同位体比は似た値を持つため (Hoefs, 2004)、区別するためには、他の溶存種の解析や地下水系と火山との関係など水文地質学的に決定する。

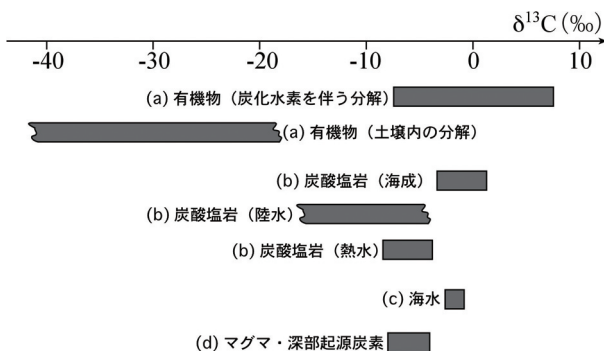


図 4-11 炭素の起源物質の炭素同位体比 (Hoefs, 2004; 中井ほか, 1974)。

4.5 地下水の年代測定

地下水は、様々な起源の水の混合物であり、もともと同一時期の同じ起源の水で地下水が構成されているわけではない。したがって、厳密には地下水において、年代という概念は定義できない。一般に地下水の年代は、ある体積の帯水層内を一定流量で流動する地下水が、帯水層をすべて置換する時間の長さで表現される。これを平均滞留時間という。一方で、あるときにその場に存在した地下水がある場所に閉じこめられ流動しなくなった場合には、その時間は地下水年代そのものである。本項では、平均滞留時間も広義の意味としては地下水年代であるので、以下、すべて地下水年代と呼ぶ。

地下水年代を測定する手法として、地下水中に溶存する放射性核種 (T,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  など) 濃度を用いる手法と、地下水流動中に蓄積される成分 (溶存イオン,  $^4\text{He}$ ,  $^{40}\text{Ar}$  など) の濃度を用いる手法があげられる (Kazemi et al., 2006). 前者は、各核種の半減期により適用できる年代範囲が限られる上、水-岩石反応による地層からの溶解成分の補正を行った上で年代値を評価する必要がある。 $^4\text{He}$  や  $^{36}\text{Cl}$  を用いた手法は、化学的に不活性な成分であるため水-岩石反応による影響を考慮する必要がないため、地層処分において対象となる数万年以上の地下水年代の測定手法としては有用である。

(1)  $^4\text{He}$  年代測定法

地下水中の  $^4\text{He}$  は、大気、マントルおよび地殻内での U, Th 等の放射壊変のそれぞれの起源の  $^4\text{He}$  の混合物である。He 同位体比および Ne 濃度の分析により、各起源物質の混合比を求めることができる。本手法で着目するのは、このうち放射壊変起源の  $^4\text{He}$  である。この  $^4\text{He}$  は、滞留する地下水に蓄積され続け、滞留時間が長くなるとともにその濃度は高くなる。 $^4\text{He}$  を用いた地下水年代は次式から計算される (Morikawa et al., 2005). 各記号は表 4-17 を参照。

$$Tr = C(^4\text{He})_o \left(1 - \frac{R_o}{R_a}\right) \frac{pp_w}{\left(P(^4\text{He}) + \frac{F(^4\text{He})}{h}\right)} \quad \text{---- (A)}$$

上式からわかるように、地下水年代を導き出すためには、①地下水溶存 He 濃度・同位体比に加えて、②帯水層中の岩石から発生する  $^4\text{He}$  の生成速度、地殻深部より供給される  $^4\text{He}$  フラックス、深部より上昇する流体の He 同位体比といった  $^4\text{He}$  の起源に関する項目、③岩石の空隙率、帯水層厚さ、深層地下水の密度といった水理地質情報が必要とされる。

(2)  $^{36}\text{Cl}$  年代測定法

もう一つの超長期の地下水年代測定法として  $^{36}\text{Cl}$  が挙げられる。本手法はあくまで Cl の年代であり、淡水と塩水が混合した場合については、淡水の情報を

得る事はできないので注意する。日本列島に多く存在する深層の塩水の単成分の起源や年代について適用が考えられる。 $^{36}\text{Cl}$  の起源は、宇宙線起源 (Cosmogenic  $^{36}\text{Cl}$ ) と岩盤内での熱中性子反応による原位置生成 (in situ  $^{36}\text{Cl}$ ) の2つが挙げられる。涵養直後の地下水は、宇宙線起源  $^{36}\text{Cl}$  を含み、これは T や  $^{14}\text{C}$  と同じく地下水滞留時間に比例して減衰する。 $^{36}\text{Cl}$  の半減期は 301,000 年であるので、適用可能な年代範囲は 10 万年前後～100 万年程度である。

一方、原位置生成の  $^{36}\text{Cl}$  を用いた超長期停滞水の存在を確認できる。一般に、200 万年以上同一環境下におかれていた場合、間隙水中の  $^{36}\text{Cl}$  は放射平衡に達し、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  比は Cl 濃度に依存せず一定の数値で安定する。間隙水中の  $^{36}\text{Cl}$  の起源が宇宙線起源を含まないと認められ、周囲の岩石の  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  放射平衡値と一致した場合、その間隙水は 200 万年以上そこに閉じこめられているということが推測される。この手法を用いた事例研究としては、国内では太平洋炭鉱 (釧路) 内の自噴地下水 (馬原ほか, 2006) において報告されている。

(3) 留意点

$^4\text{He}$  を用いた地下水年代測定は地下水中の He 濃度・同位体比のデータを取得するだけでなく、He の起源そのものに関する知識、帯水層に関する知識が必要である。これらはいずれも、対象とする地下水・地域ごとにデータを取得あるいは、十分な地質学・地球化学・水文/水理地質学的な解析を行う必要がある。これらがこの地下水年代測定の留意点であり、年代測定値の不確実性に直接大きく影響を与える点でもある。

a)  $^4\text{He}$  年代測定における留意点

- ①地下水溶存 He 濃度・同位体比：採取した試料に空気の混入がある場合、その濃度に大きな誤差を生じる。また、He は容易に脱ガスを起こす。したがって、He 分析用の試料採取に際しては細心の注意を払わねばならない。自噴井或いは、非自噴の掘削井においては原位置での試料採取が望ましい。空気の混入及び脱ガスの有無を見るために

表 4-17 深層地下水年代計算に必要なパラメータ

$R_o, R_a$ :	深層地下水、深部流体の He 同位体比 ( $^3\text{He}/^4\text{He}$ ).
$C(^4\text{He})_o$ :	深層地下水の $^4\text{He}$ 濃度 ( $\text{cm}^3\text{STP/g H}_2\text{O}$ )
$P(^4\text{He})$ :	帯水層内の岩石より放出される $^4\text{He}$ 生成速度 ( $\text{cm}^3\text{STP}/\text{cm}^3/\text{y}$ )
$F(^4\text{He})$ :	地殻深部より供給される $^4\text{He}$ フラックス ( $\text{cm}^3\text{STP}/\text{cm}^2/\text{y}$ )
$h$ :	帯水層厚さ (cm)
$p$ :	帯水層の空隙率
$\rho_w$ :	深層地下水の密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

- は He のみならず他の希ガス濃度，窒素・酸素などの気体成分のデータも必要となる。空気混入及び，脱ガスが認められた場合は，He 濃度を補正する必要がある。それに派生した年代値の誤差が生じる。機器分析誤差による年代値の誤差は，確立された手法を用いれば比較的小さい。
- ② <sup>4</sup>He の起源に関する項目：帯水層中の岩石から発生する He は，帯水層岩石の化学組成より理論的に計算可能である (Andrews, 1985)。地殻深部より供給される <sup>4</sup>He フラックスは，地球化学的にも水文学的にも世界各地で調査されている。しかし，表 4-18 に示したように <sup>4</sup>He フラックスは大きく異なる。岩石の化学組成がわかれば <sup>4</sup>He の生成速度はわかるが，<sup>4</sup>He フラックスが地殻全域の He を起源とする説もあるため，地殻の厚さ・深部に存在する岩種などの情報を考慮に入れる必要がある。日本列島においては，プレート場の違い，地殻構造・地質構造の違いなどにより地域ごとに大きな違いが予測される。また，同一地域においても，帯水層ごとに <sup>4</sup>He フラックス異なることが観測されており (表 4-18)，大阪平野深層地下水においてもこのことが示唆されている (産総研, 2007)。
- ③ 水理地質情報：式 (1) は神戸地域深層の堆積岩に賦存する地下水を対象に開発された。海外において類似した式が導き出されているが，これも帯水層は砂岩・礫岩より構成されている。He の情報以外に，これら水理地質情報の見積もり誤差も直

- 接年代値の誤差につながる。一方，結晶質岩地域は堆積岩地域とは異なり，亀裂に地下水が賦存するため，帯水層厚さ・空隙率をどのように定義するかが問題となる。今後の重要課題である。
- ④ He 地下水年代法を適用するにあたっては，地下水中での He の拡散を考慮する場合がある。
- ⑤ 地下水混合を起こした場合の解釈が問題となる。混合解析を行い，混合した地下水の端成分の年代を求める手法を開発する必要がある。
- b) <sup>36</sup>Cl 年代測定における留意点
- ① <sup>36</sup>Cl 年代測定では，<sup>36</sup>Cl の初期濃度の不確実性があるので注意する。<sup>36</sup>Cl の起源を正確に知る必要がある。また，<sup>14</sup>C と同様に岩石から溶解する成分の補正を行う必要がある。
- ② <sup>36</sup>Cl /Cl 放射平衡値は地層により異なる。原位生成 <sup>36</sup>Cl を用いた滞留時間の推定は，平衡に達しているかどうかの判断にかかっているため，十分な検討が必要である。
- ③ 地下水混合を起こした場合の解釈が問題となる。特に塩水の混合が歩こった場合，<sup>36</sup>Cl は最も影響があると思われる。天水起源の水が塩水と混合した場合，その混合した水の Cl の起源はほぼ塩水に由来するものになり，<sup>36</sup>Cl を用いた年代測定はその塩水の年代を意味するものになる。

#### 4.6 水質形成プロセスの解析

地下水の水質は，様々な起源の地下水の混合，地層

表 4-18 深層地下水への <sup>4</sup>He 蓄積フラックス値の一例

Site	<sup>4</sup> He フラックス ( $\times 10^{-6}$ cm <sup>3</sup> STP/cm /y)	Reference
日本		
深層地下水		
六カ所村	0.5	Mahara and Igarashi (2003)
※浅層地下水		
西条盆地 (広島)	>0.04	Takahata and Sano (2000)
※天然ガス井		
関東平野	1.1, 1.0	Sano(1986)
諸外国		
深層地下水		
Paris Basin (Dogger Aquifer, central part, 仏)	0.45	脚注参照
Paris Basin (central part, 仏)	4.5	同上
Paris Basin (Trias Aquifer eastern part, 仏)	11 ± 5	同上
Great Artesian Basin (豪州)	3.6	同上
同上	2.1	同上
Great Hungarian Plain (ハンガリー)	0.08 ~ 0.55	同上
その他多数		

\* mantle He, crustal He の区別はなし。諸外国の深層地下水のフラックスは，Takahata and Sano (2000), Ballentin e et al. (2002), Mahara and Igarashi (2003) にコンパイルされている。

中の岩石・鉱物との反応、ガスの付加による反応や人為汚染物質の混入等により形成される。水質が反応により決定されているのか、それとも別起源の地下水の混合により変化しているのか、あるいは、どちらも関係しているのか、について明らかにすることは、将来にわたる変動予測の上で必須の事項である。地下水の水質が将来にわたり安定であるかどうかの評価において、別項に記載したように起源の同定が、まず重要であるが、反応により濃度が変化する溶存炭酸種については、水質形成プロセスの解明により濃度変化の可能性および反応機構を明らかにしておく必要がある。これらの溶存種は、3.11.1.2項「水の物性・化学特性」において記載されているとおり、重要な評価項目である。

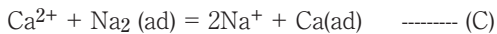
地下水中の炭酸種の反応は、CaCO<sub>3</sub> (Calcite) などの炭酸塩の溶出を伴うものから、CaCO<sub>3</sub> として沈殿するもの、あるいは風化反応など多くの反応プロセスが考えられる。ここでは、堆積岩の帯水層および岩石の風化等による一般的な反応を示すとともに、日本列島特有と考えられる深部起源 CO<sub>2</sub> の付加により生じた反応プロセスの事例を堆積岩および結晶質岩地域について示す。

(1) 一般的な反応

堆積岩中には、CaCO<sub>3</sub> (Calcite) あるいは CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (Dolomite) 等の炭酸塩鉱物が存在し、地下水中の CO<sub>2</sub> と反応する。Calcite の溶解反応は、

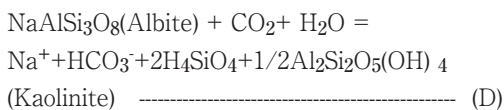


で表される。また、地層中に存在する粘土鉱物に含まれる陽イオン交換反応



により、地下水中の Ca<sup>2+</sup> が Na<sup>+</sup> に変化してゆくため、(B) の反応はさらに進行する。なお、(ad) は、イオン交換反応に関与する Smectite などの粘土鉱物を表す。反応の進行については、鉱物に関する飽和度の指標である SI (Saturation Index; 飽和指標) で予測できる。例えば (B) の反応では、SI-calcite < 1 のときにのみ進行する。

このほか、岩石の風化反応があげられる。典型的なものとして、Albite の反応は、



により、粘土鉱物の一種である Kaolinite を生成する。

以上の反応において、関与する CO<sub>2</sub> は有機物の分解により生じたり、深部から供給されたものが起源となるが、別項に示したように炭素同位体比分析等により起源を決めることができる。

(2) 第三紀堆積岩 (グリーンタフ) 地域の事例

グリーンタフは第三紀の海底火山活動により噴出した火山灰や火山砕屑物からなる層であり、層厚は 2 ~ 3km に達する。日本列島では、西南日本では日本海側に、関東以北の東北日本では半分以上面積を占める地域で存在している。このように広域に分布しているグリーンタフ層内における水質形成機構を解明することは、深層地下水や深部流体の長期的な水質組成の変化や安定性を理解する上で重要である。以下、北陸地方における研究事例 (深部地質環境研究センター, 2006) を簡単に紹介する。

グリーンタフ地域に存在する深層地下水は、水質およびガス組成などの特徴から典型的なグリーンタフ型の水質 (Na, Ca-Cl, SO<sub>4</sub> 型) が主で、CO<sub>2</sub> をほとんど含んでいないタイプと CO<sub>2</sub> を多量に含み水質 (Ca-HCO<sub>3</sub> 型) のタイプの 2 種類が存在する。後者は、断層近傍に位置し、ガスの同位体組成からマントル起源の He と CO<sub>2</sub> が浅層地下水中へ供給されて形成されたと考えられる。水の同位体組成は全ての地下水が天水起源であることを示す。本地域は周辺に火山は存在しないため、マントルから供給された深部流体の上昇の場であると考えられる。しかし、典型的なグリーンタフ型の深層地下水の DIC/<sup>3</sup>He 比は地球上でもっとも低い値を持つマントル値よりもさらに低い値を示した。これは He と CO<sub>2</sub> が深部流体として供給された後、DIC が減少するなんらかのプロセスを経て、低い DIC/<sup>3</sup>He 比を持つにいたったと考えるのが妥当である。SI-calcite > 1 と SI-gypsum < 1 の値から、グリーンタフ地層に多く含まれる Gypsum が溶出し、Calcite の沈殿が絶えず起こる環境にあると考えられる。すなわち、反応プロセスは、



で表され、グリーンタフに含まれる Chlorite 等がアルカリ性の pH buffer として機能した場合にこの反応が生じる。

地球化学計算コードである PHREEQC (Parkhurst & Appelo, 1999) を用いたシミュレーションによる評価を試みた結果、典型的なグリーンタフの深層地下水の水質は個別に非常によく再現され、さらに供給された CO<sub>2</sub> 量は 0.1 ~ 1.5mol/L に達し、供給された CO<sub>2</sub> の 98.0 ~ 99.8% が系から CaCO<sub>3</sub> として沈殿除去されたことがわかった。この事例はグリーンタフの地層が、非常によい pH buffer 機能を持つとともに、水質では

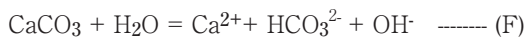


溶存炭酸種をほとんど含まないにもかかわらず、実際にはCO<sub>2</sub>が多量に供給されて水質形成されたことを示すものである。このような手法による水質形成プロセスの解析は、地下水系の長期安定性や変動を評価する上でなくてはならないものであり、地下水移行シナリオによる評価においても初期条件や素過程の設定の上で大変重要である。

### (3) 結晶質岩（花崗岩）地域の事例

評価対象とした地下水は、日本列島における代表的結晶質岩体である阿武隈地域の花崗岩中の地下水である。以下に、阿武隈地域において掘削調査により採取された亀裂に存在する地下水の分析値を用いた事例を示す（深部地質環境研究センター，2006）。

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>の生成は、Ca<sup>2+</sup>とNa<sup>+</sup>の粘土鉱物によるイオン交換反応の進行による Calcite の溶解反応



あるいは、CO<sub>2</sub>の付加によるCaCO<sub>3</sub>の溶解反応(B)のいずれかである。亀裂中の地下水はNa-HCO<sub>3</sub>型で、Na<sup>+</sup>とHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>の濃度の関係は1:1の非常に良い相関を示すため、イオン交換反応(C)を考慮すると、実際に生じた反応は(B)である必要がある。すなわち、水質形成にCO<sub>2</sub>の存在が不可欠である。このCO<sub>2</sub>の起源は、有機物の分解や深部流体等が考えられるが、炭素同位体組成などにより明らかにされるはずである。CO<sub>2</sub>の起源が、深部起源であれば地下深部からの上昇の‘水みち’と繋がっていることになるので、その流量や変動の可能性について評価する。

### (4) 留意点

水質の形成は、地下水の混合、ガス種の溶解、脱ガスおよび岩石・鉱物との反応により生じる。厳密に言えば、これらすべてのプロセスを明らかにした上で総合的に水質形成をモデル化すべきである。しかしながら、現状でこれは課題である。

## 4.7 概念モデルの構築

上記の4.1～4.6項に記載した解析手法を用いた結果を総合化することにより地下水システムの概念モデルの構築を行う。概念モデルには、評価対象地域だけでなく、上流側の涵養域から下流の流出域までが含まれる。

### (1) 概念モデルに含まれる項目（図4-12 & 13）

- ・涵養域を特定し、水収支および特徴をまとめる。
- ・流出域を特定し、水収支および特徴をまとめる。
- ・浅層地下水系を水系区分し、各水系の規模、広がり、流動速度、化学的特徴をまとめる。

- ・断層や地質境界、地下水系の不連続性などの情報および地下水解析結果を元に、浅層地下水系と深層地下水系の連絡の場（水みち）を推定し、水収支および特徴をまとめる。
- ・浅層地下水～深層地下水の化学的性状・特徴の鉛直分布を明らかにする。
- ・深層地下水の年代分布をまとめ、深層地下水の停滞・流動状況を把握する。
- ・深層地下水の化学的特徴をまとめ、マグマ起源物質、深部流体起源物質等の混入率を求め、深層地下水系へ流入量を明らかにする。
- ・深層地下水の流動状況、科学的特徴、地質状況から深層地下水の流動を支配する要因を抽出し、流動の概念モデルを構築する。

### (2) 留意点

地質状況から亀裂が存在している場合、特に堆積岩中に亀裂が存在している場合には、流動の概念モデル構築には、亀裂中の地下水と周辺岩盤（マトリックス）中の地下水の両者のサンプルの年代、化学的特徴を比較することで、より現実的な概念モデルを構築することが可能である。その際に、地下水サンプルを採取するボーリング孔の方向と亀裂の卓越方向の関係によるサンプリングのバイアスを考慮する必要がある。

また、概要調査段階ではデータの空間的な量の不足から決定的な概念モデル構築に十分なデータを得ることは困難と考えられるため、複数種類の概念モデルを想定し、次段階の数値解析モデルのモデル検証によって不確実性を低減させる必要がある。

多くのデータが収集できて、高精度の地下水モデルができあがっても、将来にわたりこのモデルが適用できるわけではないことに注意を要する。そのため、将来の地形変動について、隆起・侵食、周辺の火山噴火による堆積、熱的状況の変化、断層活動による変位などの将来予測に基づき、評価対象地域の地形変化が浅層地下水系および深層地下水系にあたる影響についても評価しておくべきであろう。

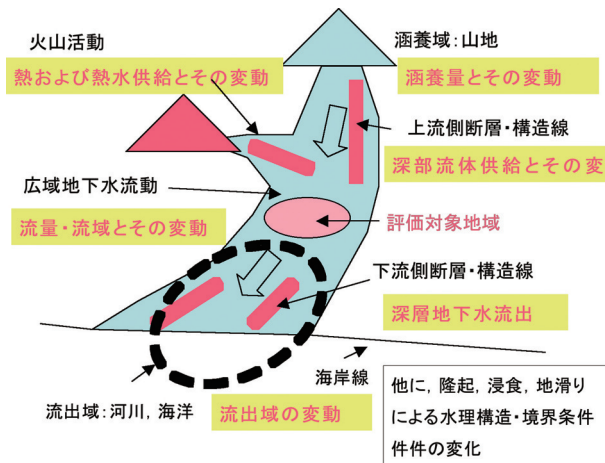
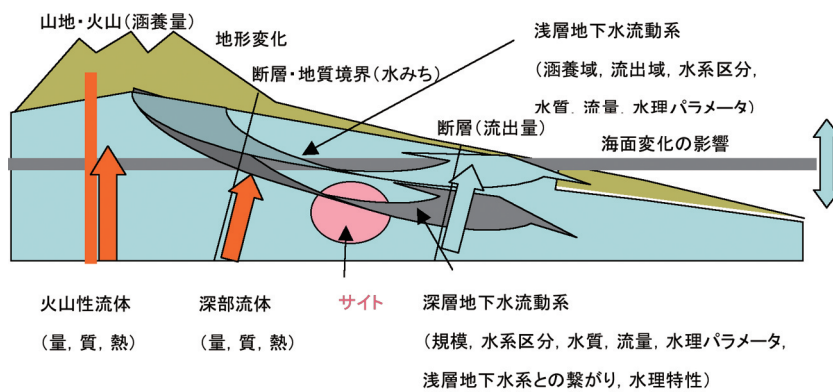


図 4-12 地下水システム概念モデル化にあたり考慮すべき事象と周辺環境



深層地下水：

- ・涵養・流出：流動の境界条件、浅層地下水系との関係、断層との関係
- ・地質境界、構造：水理構造、地下水系の区分
- ・起源（火山性、深部流体の混入、停滞塩水や地下水混合）
- ・水質形成：地層との反応プロセス
- ・年代：流動と停滞、海面変化の影響

図 4-13 地下水システム概念モデル化にあたり考慮すべき要因とパラメータ

## 第5章 品質保証

### 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業では、国民を放射線から防護するために、放射性廃棄物を数万年以上の超長期にわたって人間の生活圏から安定的に隔離しなければならない。そのため、地層処分事業の全ての構造、システム、構成要素が所期の性能を確実に保持するために、事業の全般に対し厳格な品質保証が求められる。品質保証は、地層処分本体およびその事業プロセスの安全性に対する国民の信用・信頼を築くためにも極めて重要である。

原子力事業の品質保証の対象には、機器、データ、試料、ソフトウェア、人員の能力・資格など事業の各構成要素の性能に直接関わる項目のみならず、組織、管理・責任体制、証拠資料の取扱い、会計検査など上記の性能に間接的に影響する項目も含まれる。各項目の品質保証基準に対する適格性・妥当性は、事業開始時および事業の間に、適宜定められた手順によって確認され、品質保証の基準を満たさない項目は法的に不適格と見なされる。不適格とされた項目から生成されたデータ・資料およびそれらに基づく解釈、理論、方針、決定などは、一般に、サイト特性評価、安全評価、建設・操業許可申請、公聴会など地層処分事業のいかなる公的なプロセスにも用いることができない。

### 2. 米国、スウェーデンの地層処分事業における品質保証

2006年現在、米国とスウェーデンでは地層処分施設の建設候補地が具体的に決定され、事業のプロセスが進捗している。そこで、両国の品質保証体制を概観する。

米国：地層処分を計画する国の中で最も厳格な品質保証の体制を構築している（高田，2005）。地層処分事業の品質保証を実施する責任は、実施主体である米国エネルギー省（DOE）にある。ヤッカマウンテン計画を統括する民間放射性廃棄物管理局には、局長直轄の品質保証部が設置され、その品質保証全般を管理している。品質保証の内容や手順を規定しているのは、DOEが米国原子力規制委員会（NRC）による規制法（10 CFR Part 60, 63）の要件に則って作成した品質保証の要件と解説（QARD: Quality Assurance Requirements and Description）である。地層処分事業を実施する各現場は、QARDに基づいて作成した実施文書に従って作業を進めている。ヤッカマウンテン地層処分施設の建設許可申請書がDOEからNRCに提出（2008年を予定）されると、NRCはヤッカマウンテン審査計画に則ってQARDの審査を実施し、建設許可証が発

行されることによりQARDは正式なものとして承認される。現在、QARDは第17版であり144頁に及ぶ。

スウェーデン：地層処分事業における品質保証の実施責任は、米国と同様、実施主体であるスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）にある。SKBでは各部門に品質保証コーディネータが設置されており、業務支援部門がその統括を行っている。また、組織管理システムとして品質評議会（Quality Council）が使用済み燃料処分プロジェクトに設置されている。文書化および文書管理については、独自のデータベース体系が構築され、その追跡性等を確保している。しかし、米国のQARDに相当する独自の品質保証規定はなく、今のところISO9001・14001による品質・環境管理基準を準用している。規制機関である原子力発電検査局（SKI）は、国内の原子力活動全体を監督する法的な責務があるため、地層処分事業の品質保証に関してもSKIが法的な拘束力を以て監督している。しかし、これまでのところSKIのSKBに対する品質保障面での要求は包括的な段階に留まっている。

### 3. IAEA（国際原子力機関）の原子力施設に対する品質保証基準

IAEAは、原子力発電所に対する品質保証基準を策定し（IAEA, 1988）、それに基づき地層処分施設に対する品質保証基準も公表した（IAEA, 1989）。その後、米国原子力規制委員会の品質保証活動やISO9001-1994の制定を受け、IAEAは地層処分施設に対する品質保証ガイドラインを公表し（IAEA, 1996a）、さらにISO9001-1994に沿って改訂した原子力関連施設に対する新たな品質保証基準を公表した（IAEA, 1996b）。この基準において、原子力施設に対する「規制機関および安全性」はISO9001の「顧客および顧客の満足度」の概念にそれぞれ対応する。しかし、IAEA(1996b)の具体的内容にはISO9001とは異なる部分があるため、両者を比較した詳細な解説が別途公表されている（IAEA, 2002）。IAEA(1996b)には記述されているがISO9001-2000（ISO9001-1994の改訂版）には含まれない内容は、主に①施設の安全性に対する重要度から、対象とする項目の品質保証基準を段階的に変化させること、②原子力施設の検査・テストを独立した人員・組織により確実に実施すること、の2点に集約される。さらにIAEAは、IAEA(1996b)を置換する形で、品質マネジメントシステムに関する安全基準を2006年に公表した（IAEA, 2006a,b）。品質マネジメントシステムとは品質保証を高度化した概念であり、安全の効率的・効果的確保のための組織的な運営管理体制・制度を意味する。これらIAEAの安全基準は、日本の原子力安全委員会でも逐次検討され、原子力発

電施設の運営に適用されている。

### 4. 日本の地層処分事業に期待される品質保証

品質保証には、事業の管理体制や証拠資料の取扱いなど施策や手順に関する普遍的な項目と共に、地質調査や性能評価に関するデータの品質や取扱いなど地層処分環境に依存する項目も含まれる。後者の場合、対象地域に発生しうる地質・水文事象や特徴が地層処分施設の安全性に与える影響が大きいほど、それら事象・特徴に関わる調査・安全評価の品質保証もより厳格な基準が求められる。

前章までに詳述したように、日本列島は、活発な変動帯に位置するなど、地層処分にとって欧米諸国より厳しい地質・水文環境にある。事業者は、地層処分サイトが日本列島のいずれの地域に選定されたとしても、その厳しい地質・水文環境に対するサイトの安全性を十分に考慮しなければならない。また、これまでの国内原子力施設の事故等から、日本国民の原子力に対する危険意識は非常に高い。これまで日本では、原子力発電所の立地・建設にあたって主に米国およびIAEAの品質保証基準を導入してきた（例えば、鈴木・石川、2001）。地層処分事業においても、普遍的な品質保証項目に関しては、米国またはIAEAの品質保証基準を準用することも選択肢の1つである。しかし、地質・水文環境に依存する項目については、より厳格な独自の品質保証基準を設けることも考えられる。

#### 4.1 品質保証の基本概念

品質保証において、最も基本的な概念は、「完全性」「追跡性」「再現性」「説明可能性」の4つに集約することができる。以下にこれらの概念について説明する。

**完全性：**地層処分事業に関連して実施される全ての調査・試験・設計・開発・審査の内容、得られた試料・データ、それらの実施体制は、完全性が確保されなければならない。すなわち、調査・試験・設計・開発・審査などは、事業実施時に得られる最高の科学技術水準を持って実施されなければならない。また試料・データは、可能な限り取得時の状態を維持し、取得可能な全ての記録が保持されなければならない。事業に関連する人員の資格・能力・経験などの実施体制は、必要に応じてこれを完全に確保しなければならない。

**追跡性：**地層処分事業に関連して実施される全ての調査・試験・設計・開発・審査の内容、得られた試料・データは、追跡性が確保されなければならない。すなわち、調査・試験・設計・開発・審査などの記録・データおよびそれら行動の企画・立案・実施・管理に関わる全ての記録は、完全に維持され利用可能な状態になければ

ならない。調査・試験・設計・開発・審査などに関係する全ての試料は、その現状（状態・場所・管理者など）が常に把握され、整理され、利用可能でなければならない。

**再現性：**地層処分事業に関連して実施される全ての調査・試験・審査の結果は、再現可能でなければならない。破壊実験などで試料が失われる場合は、同等な性質の試料を保持しなければならない。現地で実施される不可逆的な現象に関する試験では、その結果を検証するための可能な限りのデータおよび理論的根拠を示さなければならない。

**説明可能性：**地層処分事業に関連して実施される全ての調査・試験・設計・開発・審査および取得されたデータとその解釈は、論理的に説明可能でなければならない。すなわち、事業に関連する全ての行動の目的・手法・経緯・有効性・効率性が説明可能でなければならない。さらに、データの目的・取得法・誤差・有効性、データ解釈の理論的背景・研究の経緯・確かさなどが論理的に説明可能でなければならない。

#### 4.2 品質保証の実施・規制機関

日本においても、米国と同様、地層処分実施機関がその内部に独立した担当部署と管理責任者を置き、品質保証の要件・プログラムを策定し、審査を厳正に実施する体制が考えられる。米国の基準に準拠する場合、品質保証担当部署は、品質保証プログラムによる審査結果を全て公開とし、サイト特性評価、安全評価、建設・操業許可申請、公聴会などの公的プロセスにて品質保証の対象となった記録、データ、試料などを用いる際には、それらが全て法的に適格なものであることを明確に保証する責任を負う。

規制側機関は実施側機関に対し、事業の開始前に品質保証プログラムの文書による作成の義務付け、その内容に関するガイドラインをあらかじめ示すことが考えられる。また、地層処分実施機関の策定する品質保証基準・プログラムに対する審査を必要に応じて随時実施するために、実施側機関との協議のスキームを維持しておくことも考慮すべきである。

#### 4.3 概要調査における品質保証項目（案）

概要調査における品質保証の対象は、調査・試験・設計・開発・審査などのシステム、プロセス、構成要素うち、地下施設の建設と放射性廃棄物の取扱いを除く項目である。なお、地層処分施設の安全審査は概要調査段階では実施されないため、現段階では品質保証の対象から除外される。以下は項目の具体案の一例である。

## a) 概要調査前段階（含文献調査）

- ①概要調査の体制，責任の所在，情報伝達の経路
- ②概要調査の計画，立案，設計に利用・参照した文献・データ類

## b) 概要調査段階

- ①地表における地質調査データ，地質試料
- ②地表における水文学的測定データ，水文学的な試料・統計資料
- ③ボーリング調査の手法・技術・掘削記録
- ④ボーリング調査によって得られた各種データ，地質・水文学的試料
- ⑤地表および掘削調査で使用した各種機器
- ⑥直接・間接的に得られた気象のデータ・統計資料
- ⑦概要調査で得られた試資料を用いた室内実験データ，試資料（生成物含む）
- ⑧室内実験で使用した各種機器
- ⑨概要調査地域を対象に実施したコンピューターシミュレーションの内容と結果
- ⑩概要調査全体の結果・取りまとめ

## c) 調査に間接的に関わる項目

- ①ソフトウェア（汎用ビジネスソフトウェアを除く）
- ②上記各種調査・実験等を実施した団体，企業，個人の資格・能力
- ③調達・購入した物品等の管理体制
- ④取得されたデータ・試資料の管理・保管体制
- ⑤会計検査

これらの項目に関する具体的な要件，手法，遵守事項，閾値などは，今後地層処分の実施機関と規制機関の当該分野専門家がそれぞれ提案し，必要十分な内容を協議の上で決定していくことが期待される。それにあたっては，JIS（日本工業規格），ISO9001・14001などに既に定められている標準的内容を参照することも考えられる。

## 4.4 注意すべき事項

原子力事業の品質保証の周知：これまで地球科学等の研究者は，研究に直接関連する品質管理（例えば，分析機器の精度，データ管理など）については周知しているが，原子力事業の品質保証に関する内容の理解が高いとは言えない。米国ヤッカマウンテン計画では，1980年代に取得された多くの地球科学的データが原子力事業の品質保証基準に適合しないため，法的な有効性を失った経験がある。従って，日本の地層処分事業においては，概要調査開始前（すなわち文献調査段階）に，品質保証の枠組みと最低限の遵守事項の策定，およびそれらの内容の関係者への周知などの必要性が考えられる。

過度な品質保証の抑制：地層処分事業は，国の原子力政策（総合資源エネルギー調査会，2006）により，計画的かつ確実な推進が必要とされている。従って，過度に厳格な品質保証基準を設けて，事業の進捗に支障を来すことは避けなければならない。米国のQARDやIAEAの品質保証では，その段階的適用が規定されている。すなわち，結果の重大性，信頼性，証明できる度合いなどによって各品質保証項目を等級付けすることにより，必要以上の厳格さを回避している。日本の地層処分事業においても，同様な措置を導入することが期待される。

第5章へのコメント

(D 委員)

品質保証に関する記述ですが、最近、IAEA 等でも検討されている品質マネジメントシステムについても少し、記述したら如何でしょうか。これは廃棄物管理に特化した品質マネジメントシステムで、ISO9000 シリーズとは基本的には同じ考えですが、表現において廃棄物管理特有の要件を取り入れています。

(編集委員会)

IAEA の品質マネジメントシステムについての記述をいれて書き直しました。

## あとがき

この技術資料を作成する契機となったのは、原子力安全・保安院からの委託研究に関して平成16年に廃棄物安全小委員会が行なった研究計画の評価である。この時原子力安全・保安院からの委託研究を実施していた産業技術総合研究所深部地質環境研究センターでは、規制当局の行政ニーズである概要調査のガイドラインに向けて、概要調査の調査・評価項目を平成18年度にまとめるという研究計画を廃棄物安全小委員会に提出し、目標設定及び研究計画の妥当性、安全規制支援研究の独立性等についての評価を受けた。この研究計画に従い、深部地質環境研究センターでは概要調査の調査・評価項目についての研究を進め、とくに平成17年度と18年度の2年間は、この技術資料集を取りまとめる作業を行なった。原子力安全・保安院からの委託研究は、平成18年度をもって終了するが、この委託研究の開始は平成13年度に遡る。

平成13年に行政改革の一環として旧通商産業省工業技術院傘下の15研究機関が1つにまとまって独立行政法人産業技術総合研究所が発足したが、それに伴い旧工業技術院地質調査所は他の工業技術院傘下研究機関との協力体制の下で5つの研究ユニットに分かれた。そのユニットの1つが深部地質環境研究センターである。また、このとき中央省庁の改革では、経済産業省の中に新たに原子力安全・保安院が設立されている。この新しい枠組みの中で、産業技術総合研究所深部地質環境研究センターは、原子力安全・保安院からの委託を受けて、「地層処分にかかる地質情報データの整備」の研究を行なうことになった。

平成13年以来、深部地質環境研究センターは原子力安全・保安院が行なう地層処分の安全規制を技術面で支援することをミッションに据え、行政ニーズ対応型研究に取り組んできた。同研究センターは委託元である原子力安全・保安院放射性廃棄物規制課が事務局となっている総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会での審議に協力し、平成15年には同委員会によりまとめられた報告書「高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて」の作成にあたり、地質分野の技術情報の提供を行なった。この報告書では原子力安全・保安院による高レベル放射性廃棄物処分の安全規制についての基本的な考え方が整理されるとともに、研究課題の重要度が示されている。さらに翌16年に行なわれた廃棄物安全小委員会の研究計画の評価においては、冒頭で述べたような研究の方向付けが行なわれ、概要調査のガイドラインという次の行政ニーズに対応する形で、委託研究を進めることになった。

この技術資料は、原子力安全・保安院からの委託研究のアウトプットであり、行政ニーズに対応して作成されたものである。一方、委託研究のもう一つのアウトプットである学術的な研究成果は、この技術資料とは別に数多くの論文として学術雑誌に公表している。深部地質環境研究センターでは、この6年間に地質及び地下水の長期変動の研究および地質環境の諸特性に関する研究を行なってきており、地層処分システムに影響を与える事象に関する超長期の将来予測を課題とする研究に取り組み、変動の解析に必要な手法の開発を行なうとともに、難透水性の深部地質環境での地下水流動の予測や、地下深部での岩石・水・微生物の相互作用にかかる研究課題に取り組んできている。これらの研究成果のいくつかは、この技術資料に文献として引用されている。この技術資料は行政ニーズに対応して、知識の体系化を目的にして書かれているので、委託研究において6年間に出版された個々の研究成果の詳細については触れていない。ご関心のある方は、引用文献から原典を参照していただきたい。なお、まだ論文化されていないものについては、各年度の事業報告書を参照していただきたい。

さて、この技術資料の作成にあたっては、平成17年の7月に編集委員会を発足させ、委託研究を担当している研究者が、それぞれの専門分野で執筆を分担することになった。産業技術総合研究所は研究機関であるので、論文の執筆にはそれぞれの研究者は十分な経験を持っているが、行政ニーズに対応した形で技術資料を取りまとめた経験は皆無に等しく、この技術資料の編集は試行錯誤の連続であった。そのような中、産業技術総合研究所で「第2種の基礎研究」という新しい基礎研究の概念の提示があり、社会ニーズに応える形で、研究成果を取りまとめるにはどのようにすればよいか、方法論の検討が行なわれていたことは、この技術資料の作成にたいへん参考になった。産業技術総合研究所の「第2種の基礎研究」は次のように定義されている。『特定の経済的・社会的な必要性（ニーズ）のために、既に確立した複数の普遍的な知識（理論、法則、原理、定理など）を組み合わせ、観察、実験、理論計算を繰り返し、その手法と結果に規則性のある知見および目的を実現する具体的道筋を導き出す研究をいう』。この技術資料は第2種の基礎研究の考え方に沿った知識の体系化の試みであり、地層処分の安全規制という行政ニーズに対応して、地質学及び水文地質学の分野で、超長期の将来予測についての知識の体系化を試みたものである。

この技術資料は安全規制政策の立案に資することを第一義的な目的としているが、地層処分に取り組む地質学及び水文地質学の研究者にも役立つものであるこ

とを願っている。研究を始めるときにまず研究者が行なうことが、これまでの研究のレビューであり、その中から研究の第一線を切り拓いていく研究テーマが設定される。学術的な基礎研究では既存の学問体系の中でこのような作業が行なわれることが多いが、この技術資料を作るにあたって今回行なった作業は、地層処分という視点からの研究のレビューであり、地層処分の技術体系の一部を作り上げていく試みであるともいえる。このようにして書かれたものであるならば、地層処分において研究を必要としているプライオリティの高い課題がどこにあるか、この技術資料の中に見えてくるはずである。全体がそうなっていることを願っているが、まとめ方の不備等により、必ずしも全てのページで期待に応えられるようになっていないかもしれない。そのような場合は賢明な読者の眼力により内容を汲み取っていただき、洞察を加えていただけるようお願いしたい。

原子力安全・保安院から委託費は平成18年度で終了し、それに合わせた形で深部地質環境研究センターの活動も終了となるが、地層処分事業はまだ始まったばかりの段階にあるので、安全規制を支援する研究は今後とも継続する必要がある。産業技術総合研究所では平成19年度からは、地質調査総合センターの中の深部地質環境研究コアが中心となって、研究の主体を担うことになる。今後とも産業技術総合研究所の行なう地層処分の安全規制支援研究へのご支援をよろしくお願いしたい。

(笹田 政克 H19.3.19)

#### 執筆分担

第1章 はじめに：笹田政克

第2章 調査・評価項目の設定：笹田政克

第3章 調査・評価項目に関する科学的知見：山元孝広、風早康平、小泉尚嗣、高橋正明、塚本 斉、笹田政克

第4章 調査の進め方：山元孝広、風早康平、小泉尚嗣、竹野直人、渡部芳夫<sup>\*1</sup>、金井 豊、高橋正明、塚本 斉、高橋 学、鈴木庸平、笹田政克、石戸経士、板場智史、伊藤一誠、大坪 誠、大和田道子、上岡 晃、佐藤 努、杉原光彦、須甲武志、鈴木正哉、関 陽児、高倉伸一<sup>\*2</sup>、高橋浩、高橋 誠<sup>\*3</sup>、竹田幹郎、竹村貴人、張 銘、成田孝、西 祐司<sup>\*2</sup>、浜崎聡志<sup>\*3</sup>、松本則夫<sup>\*3</sup>、森川徳敏、安原正也、吉田崇宏<sup>(\*1 企画本部、\*2 地圏資源環境研究部門、\*3 地質情報研究部門)</sup>

第5章 品質保証：高木哲一

#### 技術資料編集委員会

編集委員長：笹田政克

事務局：月村勝宏、高木哲一、塚本 斉

編集委員：山元孝広、風早康平、渡部芳夫<sup>\*1</sup> (平成17年度)、竹野直人、金井 豊(平成18年度)  
(\*1 企画本部)



## 文献

- Aali J., Rahimpour-Bonab H. and Kamali M.R., (2006) Geochemistry and origin of the world's largest gas field from Persian Gulf, Iran. *Jour. Petroleum Sci. Engineer.*, 50, 161-175.
- 相沢泰隆・小林健太・梅津健吾・山本 亮 (2005) 2000年鳥取県西部地震の余震域およびその周辺に分布する断層岩類. *地質学雑誌*, 111, 737-750.
- Akita F. and Matsumoto N. (2004) Hydrological responses induced by the Tokachi-oki Earthquake in 2003 at hot spring wells in Hokkaido, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 31: L16603, doi:10.1029/2004GL020433.
- Allen, C.K., Wyss, M., Brune, J., Granz, A. and Wallace, R. (1972) Displacements on the Imperial, Superstition Hills, and San Andreas Faults triggered by the Borrego Mountain earthquake. *USGS Prof. Paper*, 787, 87-104.
- Allison, G.B. and Hughes, M.W. (1983) The use of natural tracers as indicators of soil-water movement in a temperate semi-arid region. *Jour. Hydrol.*, 60, 157-173.
- Andrews, J.N., (1985) The isotopic composition of radiogenic helium and its use study groundwater movement in confined aquifers *Chem. Geol.*, 49, 339-351.
- Argus, D.F., Gordon, R.G., (1990) Pacific-North American Plate motion from long baseline interferometry compared with motion inferred from magnetic anomalies, transform faults, and earthquake slip vectors. *Jour Geophys. Res.* 95, 17315-17324.
- ASTM (2006) Standard guide for comparison of techniques to quantify the soil-water (moisture) flux. ASTM D6642-01.
- 麻植久史・小池克明・高倉伸一・吉永 徹・大見美智人 (2004) MT法による活断層深部の破碎構造解析. *応用地質*, 45, 60-70.
- Bailey, S.W. Editor (1988) Hydrous phyllosilicates. *Rev. Mineral.*, 19. Mineral. Soc. Amer.
- Ballentine C.J., Burgess R. and Marty B. (2002) Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust. *Rev. Mineral. Geochem.*, 47, 539-614.
- Barnes, C.J. and Allison, G.B. (1984) The distribution of deuterium and  $^{18}\text{O}$  in dry soils: 3. Theory for non-isothermal water movement. *Jour. Hydrol.*, 74, 119-136.
- Bassinot, F.C., Labeyrie, L.D., Vincent, E., Quidelleur, X., Shackleton, N.J. and Lancelot, Y. (1994) The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 126, 91-108.
- Bethke, C.M. and Zhao, X. (1999) Groundwater flow and the  $^4\text{He}$  distribution in the Great Artesian Basin of Australia. *Jour. Geophys. Res.*, 104, 12999-13011.
- Bredehoeft, J.D., Wolff, R.G. and Keys, W.S. (1986) Hydraulic fracturing to determine the regional in situ stress field. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 87, 250-258.
- Brace, W.F., Walsh, J.B. and Frangos, W.F. (1968) Permeability of granite under high pressure. *Jour. Geophys. Res.*, 73, 2225-2236.
- Burbank D.W. and Anderson R.S., (2001) *Tectonic Geomorphology*. Blackwell Science Inc.
- 物理探査学会 (1998) *物理探査ハンドブック*. 物理探査学会.
- Chapelle, F.H., (2001) *Ground-water microbiology and geochemistry*, 2nd Ed. John Wiley & Sons, Inc.
- Chigira M. (1992) Long-term gravitational deformation of rocks by mass rock creep. *Engineer. Geol.*, 32, 157-184.
- 千木良雅弘 (1995) 風化と崩壊. 近未来社.
- 千木良雅弘 (1998) 大規模な岩盤クリープと崩壊. *地質学論集*, 50, 241-250.
- 千木良雅弘 (1998) 災害地質学入門. 近未来社.
- Chigira M. and Kiho, K. (1994) Deep-seated rockslide-avalanches preceded by mass rock creep of sedimentary rocks in the Akaiishi Mountains, central Japan. *Engineer. Geol.*, 38, 221-230.
- 千木良雅弘・中田英二 (1994) 堆積岩の続成作用 (その1) - 圧密・脱水と水理地質特性 - 電力中央研究所報告, U94026.
- 千木良雅弘・田中和広 (1997) 北海道南部の泥火山の構造的特徴と活動履歴. *地質学雑誌*, 103, 781-791.
- Cho, W.J., Oscarson, D.W. and Hahn, P.S. (1993) The measurement of apparent diffusion coefficients in compacted clays: An assessment of methods. *Appl. Clay Science*, 8, 283-294.
- Cooper, H.H., Bredehoeft, J.D. and Papadopoulos, I.S. (1967) Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resources Res.* 3, 263-269.
- Degeldre, C., Baeyens, B., Goerlich, W., Riga, J., Verbist, J. and Stadelmann, P. (1989) Colloids in water from a subsurface fracture in granitic rock,

- Grimsel Test Site, Switzerland. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 603-610.
- 土木学会 (2001) 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. 土木学会
- 土木学会 (2006) 精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方. 土木学会
- ドミニコ, P.A.・シュワルツ, F.W. (1995) 地下水の科学 I - 地下水の物理と化学 - 土木工学社.
- Emiliani, C. (1955) Pleistocene temperature. *Jour. Geomorph.* 4, 223-236.
- エネルギー総合工学研究所 (2005) 高レベル放射性廃棄物処分の国際安全基準等に係る背景情報の調査研究報告書, 56. IEA-C0435.
- Esaki T., Zhang, M., Takeshita A. and Mitani Y. (1996) Rigorous theoretical analysis of a flow pump permeability test. *Geotec. Test. Jour.*, 19, 241-246.
- Eyrolle, F. and Chamasson, S. (2000) Ultrafiltration large volumes for the determination of colloidal bound artificial radionuclides in natural waters. *Appl. Radiation Isotopes*, 52, 927-936.
- Fischer, G.J. (1992) The determination of permeability and storage capacity: pore pressure oscillation method, in "Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks", 187-211, eds Evans, B. and Wong, T.-F. Academic Press.
- Francis P., Oppenheimer C. and Stevenson D. (1993) Endogeneous growth of persistently active volcanoes. *Nature*, 366, 554-557.
- Garcia Gutierrez, M., Cormenzana, J.L., Missana, T. and Mingrarro, M., (2004) Diffusion coefficients and accessible property for HTO and  $^{36}\text{Cl}$  in Compacted FEBEX Bentonite. *Appl. Clay Sci.*, 26, 65-73.
- 原子力安全委員会 (1985) 放射性廃棄物埋設施設の安全審査の基本的考え方.
- 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)
- 原子力安全委員会 (2002) 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.
- 原子力発電環境整備機構 (2002) 概要調査地区選定上の考慮事項.
- 原子力発電環境整備機構 (2004) 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠 - 「概要調査地区選定上の考慮事項」の背景と技術的根拠 -
- Gillham, R.W., Robin, M.L.J., Dytynshyn, D.J. and Johnston, H.M., (1984) Diffusion of nonreactive and reactive solutes through fine-grained barrier materials. *Canadian Geotech. Jour.*, 21, 541-550.
- 長谷川昭・趙 大鵬・山本 昭・堀内茂木 (1991) 地震波からみた東北日本の火山の深部構造と内陸地震の発生機構. *火山*, 36, 197-210.
- 秦 光男 (1961) 5万分の1地質図幅「初浦」及び同説明書. 地質調査所.
- 日比野敏・駒田広也・本荘静光・金川 忠・伊藤 準・中川加明一郎・北野晃一・沢田美博・藤原義一・本島 睦・野崎隆司・石田 毅・上島照幸 (1987) 地下式原子力発電所の立地調査技術. 電力中央研究所報告, U01.
- Hoefs, J., (2004) *Stable Isotope Geochemistry*, 5th revised and updated ed. Springer Press.
- 北海道開発庁 (1958) 5万分の1地質図幅「静内」及び同説明書.
- Hsieh, P.A., Tracy, J.V., Neuzil, C.E., Bredehoeft, J.D., and Silliman, S.E., (1981) A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of "tight" rocks - I. Theory. *Inter. Jour. Rock Mech. Mining Sci. & Geomech. Abst.*, 18, 245-252.
- Hunter, K.S., Wang, Y.F. and Van Cappellen, P. (1998) Kinetic modeling of microbially-driven redox chemistry of subsurface environments: coupling transport, microbial metabolism and geochemistry. *Jour. Hydrol.*, 209, 53-80.
- Hvorslev, M.J. (1951) Time lag and soil permeability in ground-water observations. *USACE Waterways experiment station*, 36.
- IAEA (1988) Code on the safety of nuclear power plants. *Quality Assurance Safety Series*, 50-C-QA (Rev. 2) .
- IAEA (1989) Safety principles and technical criteria for the underground disposal of high level radioactive wastes. *Safety Series*. 99.
- IAEA (1996a) Application of quality assurance to radioactive waste disposal facilities. *IAEA-TECDOC-895*.
- IAEA (1996b) Quality assurance for safety in nuclear power plants and other nuclear installations. *Code and Safety Guide Q1-Q14*, *Safety Series*, 50-C/SG-Q.
- IAEA (1999) Hydrological investigation of sites for the geological disposal of radioactive waste. *Technical Reports Series*, 391.
- IAEA (2001) Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste. *IAEA-TECDOC-1208*.
- IAEA (2002) Quality standard comparison between

- IAEA 50-C/SG-Q and ISO 9001-2000. Safety Standard Series, 22.
- IAEA (2006a) The management system for facilities and activities. IAEA Safety Standard for protecting people and the environment. Safety Requirements, GS-R-3.
- IAEA (2006b) Application of the management system for facilities and activities. IAEA Safety Standard for protecting people and the environment. Safety Guide, GS-G-3.1.
- Idemitsu K. Ishiguro K. Yusa Y. Sasaki N. and Tsunoda N. (1990) Plutonium diffusion in compacted bentonite. *Engineer. Geol.*, 28, 455-462.
- 池田隆司・飯尾能久・小林健太郎・高橋直良・汐川雄一・松田陽一 (2000) CSAMT 法と流電位検層法による淡路島北部の活断層調査. *防災科研研報*, 60, 57-66.
- Ikeda Y. (1983) Thrust-front migration and its mechanism - evolution of intraplate thrust fault systems - *Bull. Dept Geography, Univ. Tokyo*, 15, 125-159.
- 池田安隆 (1996) 活断層と日本列島の現在のテクトニクス. *活断層研究*, 15, 93-99.
- 池田安隆 (1999) 飛騨高原と近畿三角帯の鮮新世以降のテクトニクスはマントルリッドのデラミネーションで説明できるのか? *月刊地球*, 21, 137-144.
- 伊木常誠 (1907) 大日本帝國油田第六區地質及び地形説明書. *地質調査所*.
- 井上厚行 (1990) スメクタイトからのイライトの生成機構. *鉱物学雑誌*, 19, Special Issue, 53-61.
- 井上厚行 (1991) 続成作用におけるスメクタイト-イライト変換反応に影響を及ぼす因子. *粘土科学*, 31, 14-22.
- 井上俊隆・川原敏明・宮林秀次 (1978) 膨大な地圧に挑む (1) 北越北線鍋立山トンネル. *トンネルと地下*, 9 (4), 7-14.
- Isotok, J.D., Humphrey, M.D., Schroth, M.H., Hyman, M. R. and O'Reilly, K.T. (1997) Single-well, "push-pull" test for in situ determination of microbial activities. *Ground Water*, 35, 619-631.
- Ito T. Evans, K., Kawai K. and Hayashi K. (1999) Hydraulic fracture reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress. *Inter. Jour. Rock Mech. & Min. Sci.*, 36, 811-826.
- 伊藤芳郎・斉藤輝夫・市川 浩・南雲政博・川口英雄・竹内篇雄 (1984) 地下水流速の新しい測定法の試み - 流動電位法 - *日本地下水学会誌*, 26 (4), 77-96.
- Jakob, A., Sarott, F.A., and Spieler, P. (1999) Diffusion and sorption on hardened cement pastes - Experiments and modelling results. *Waste Manage. Lab. PSI-Bericht.*, 95-05.
- 地盤工学会 (1980) 土質試験法. 地盤工学会.
- 地盤工学会 (1995) 地盤調査法. 地盤工学会
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (1997) 日本の地震活動 被害地震から見た地域別の特徴.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2006) 「全国を概観した地震動予測地図」報告書 (改訂版)
- 垣内正久・丸井敦尚 (1994) ハヶ岳の湧水および地下水のトリチウム濃度. *日本水文科学会誌 (ハイドロロジー)*, 24, 93-106.
- 加古満則・横田修一郎 (2002) 鳥取県日野川上流域における花崗岩斜面中のシーティング節理. *島根大学地球資源環境学研究報告*, 21, 49-58.
- 核燃料サイクル開発機構 (1999) わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次とりまとめ -
- 核燃料サイクル開発機構 (2005) 高レベル放射性廃棄物の知識基盤の構築 - 平成17年とりまとめ -
- 金子信行・前川竜男・猪狩俊一郎 (2002) アークアによるメタン生成と間隙水への濃集機構. *石油技術協会誌*, 67, 97-110.
- 加藤碩一・脇田浩二編 (2001) 地質学ハンドブック. 朝倉書店.
- 加藤 進・安田善雄・西田英毅 (2000) 秋田・山形地域油・ガス田の地層水の地球化学. *石油技術協会誌*, 65, 229-237.
- 加藤照之・津村建四郎 (1979) 潮位記録から推定される日本の垂直地殻変動 (1951 ~ 1978). *地震研報*, 54, 559-623.
- 活断層研究会編 (1991) [新編] 日本の活断層 - 分布図と資料 -. 東京大学出版会. 437.
- 川辺岩夫 (1991) 地震に伴う地下水・地球化学象. *地震*, 2, 44, 341-364.
- 風早康平 (1997) 島弧の活火山から放出される水 - その起源と量 - *日本水文学会誌*, 27, 105-116.
- Kazahaya K., Shinohara H. and Saito G., (1994) Excessive degassing of Izu-Oshima volcano: magma convection in a conduit. *Bull. Volcanol.*, 56, 207-216.
- Kazahaya K., Shinohara H., Uto K., Odai M., Nakahori Y., Mori H., Iino H., Miyashita M. and Hirabayashi J. (2004) Gigantic SO<sub>2</sub> emission from Miyakejima volcano, Japan, caused by caldera collapse. *Geology*, 32, 425-428.
- Kazahaya K., Yasuhara M. Sato T., Inamura A., Morikawa N., Takahashi, H., Takahashi, M., Ohwada, M. and Ritchie, B.E. (2003) Chemical and

- isotopic nature of very saline springs in central Japan: implication to their origin. 23rd General Assembly Int. Union Geodesy Geophys., A. 42.
- 風早康平・安原正也 (1994) 湧水の水素同位体比からみた八ヶ岳の地下水の涵養・流動過程. 日本水文科学会誌 (ハイドロロジー), 24, 107-119.
- 風早康平・安原正也・高橋正明 (2004) 熱水と地下水. 月刊地球, 26, 423-429.
- Kazemi, G.A., Lehr, J.H. and Perrochet, P. (2006) Groundwater Age. John Wiley & Sons, Inc.
- 経済産業省資源エネルギー庁 (2006) : 高レベル放射性廃棄物の処分の安全性について考えてみませんか. 経済産業省資源エネルギー庁放射性廃棄物等対策室.
- Kimura J., Okada Y., Nakayama K. and Okada S. (2001) Variations of magnetic susceptibility and fine quartz accumulation rate in Daisen loam over the past 200 000 years: interaction between winter and summer monsoons in south-west Japan. *Island Arc*, 10, 85-97.
- Kimura J., Stern, R.J. and Toshida T. (2005) Reinitiation of subduction and magmatic responses in SW Japan during Neogene time. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 117, 969-986.
- Kimura J. and Yoshida T. (2006) Contributions of slab fluid, wedge mantle, and crust to the origin of Quaternary lavas in the NE Japan arc. *Jour. Petrol.*, 47, 2185-2232.
- 金原啓司 (2005) 日本温泉・鉱泉分布図及び一覧 (第2版) (CD-ROM版). (独) 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 北川隆司 (1999) 花崗岩のマサ化のメカニズムと斜面崩壊. *粘土科学*, 39, 37-44.
- Kitagawa Y. and Koizumi N. (2000) A study on the mechanism of coseismic groundwater changes: Interpretation by a groundwater model composed of multiple aquifers with different strain responses. *Jour. Geophys. Res.*, 105 (B8), 19121-19134.
- 小林健太・杉山雄一 (2004) 2000年鳥取県西部地震の余震域とその周辺における断層と断層岩: "未知の活断層"の検出に向けて. *地質ニュース*, 602, 36-44.
- 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.
- 小泉尚嗣 (2004) 昭和南海地震: 次の南海地震の予知をめざして. 地質調査総合センター編「産総研シリーズ 地震と活断層」, 209-220. 丸善.
- 小泉尚嗣・高橋誠・松本則夫・佐藤努・大谷竜・北川有一 (2005) 水文学的手法による地震予知研究ー地下水変化から地震前の地殻変動を検知する試みー 地震2, 58, 247-258.
- 小嶋 智・西尾洋三・徐 勝・永澤智江・後藤紘亮・大谷具幸・矢入憲二 (2006) 滋賀県東部, 姉川流域に分布するせき止め湖堆積物の特徴と  $^{14}\text{C}$  年代. *応用地質*, 47, 196-207.
- 小松 亮・梅田浩司 (1999) 日本列島における温泉・熱水変質帯について. *サイクル機構技報*, 4, 121-128.
- 小松田精吉 (1990) 流速・流向の測り方. *地質と調査*, 3, 21-27.
- Kondo H., Kaneko K. and Tanaka K. (1998) Characterization of spatial and temporal distribution of volcanoes since 14 Ma in the Northeast Japan arc. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 43, 173-180.
- 小西省吾・吉川周作 (1999) トウヨウゾウ・ナウマンゾウの日本列島への移入時期と陸橋形成. *地球科学*, 53, 125-134.
- Kozaki T., Sato Y., Nakajima M., Kato H., Sato S. and Ohashi H. (1999) Effect of particle size on the diffusion behavior of some radionuclides in compacted bentonite. *Jour Nuclear Materials*, 270, 265-272.
- Kranz, R.L., Saltzman, J.S. and Blacic, J.D. (1990) Hydraulic diffusivity measurements on laboratory rock samples using an oscillating pore pressure method. *Jour. Rock Mech., Mining Sci. & Geomech. Abst.*, 27, 345-352.
- Kulik, D.A. (2002) Minimising uncertainty induced by temperature extrapolations of thermodynamic data: a pragmatic view on the integration of thermodynamic databases into geochemical computer codes. Proc. "The use of thermodynamic databases in performance assessment", OECD.
- 黒田吉益・諏訪兼位 (1983) 偏光顕微鏡と岩石鉱物 (第2版). 共立出版.
- 日下部実・松葉谷治 (1986) マグマ性揮発物質・火山ガス・地熱水. *火山*, 30, S267-S283.
- Lai, W.-C., Koizumi N., Matsumoto N., Kitagawa Y., Lin, C.-W., Shieh, C.-L. and Lee, Y.-P. (2004) The effect of the seismic ground motion and geological setting on the coseismic groundwater level changes caused by the 1999 Chi-Chi Earthquake, Taiwan. *Earth Planets Space*, 56, 873-880.
- Lever, D.A. (1986) Some notes on experiments measuring diffusion of sorbed nuclides through porous media. Harwell Report, AERE R12321.

- 町田 洋 (1984) 巨大崩壊, 岩屑流と河床変動. 地形, 5, 155-178.
- 町田 洋・新井房夫 (2003) 新編火山灰アトラス. 東京大学出版会.
- Maekawa T., Igari S. and Kaneko N. (2006) Chemical and isotopic compositions of brines from dissolved-in-water type natural gas fields in Chiba, Japan. *Geochem. Jour.* 40, 475-484.
- Mahara Y. and Igarashi T. (2003) Changes in isotope ratio and content of dissolved helium through groundwater evolution, *Appl. Geochem.*, 18, 719-738.
- 馬原保典・中田英二・大山隆弘・宮川公雄・五十嵐敏文・市原義久・松本裕之 (2006) 化石海水の同定法の提案 - 太平洋炭鉱における地下水水質・同位体分布と地下水評価 - 地下水学会誌, 48, 7-33.
- Matsumoto N. and Akita F. (2004) Hydrological changes induced by the 2003 Tokachi-oki earthquake at wells in Hokkaido, Japan. *Eos, Trans. AGU*, 85, Fall Meeting Suppl., Abst. G11A-0777.
- 松葉谷治・酒井均・鶴巻道二 (1974) 有馬地域の温泉, 鉱泉の水素と酸素の同位体比について, 岡山大学温泉研究所報告, 43, 15-28.
- 松田時彦 (2005) 鳥取県西部地震 (2000年10月) と山陰地方の地震活動: その特異性の検討. 活断層研究, 25, 109-116.
- 松村和樹・中筋章人・井上公夫 (1988) 土砂災害調査マニュアル. 鹿島出版会
- 三宅康幸・小坂丈予 (1998) 長野県安曇村中ノ湯における1995年2月11日の水蒸気爆発. 火山, 43, 113-121.
- 宮崎芳徳・津 宏治・浦井 稔・高倉伸一・大久保泰邦・小川克朗 (1991) 全国規模地熱資源評価の研究. 地質調査所報告, 275, 17-43.
- Mizukami M., Sakai H., and Matsubaya O. (1977) Na-Ca-Cl-SO<sub>4</sub>-type submarine formation waters at the Seikan Undersea Tunnel, Japan. Chemical and isotopic documentation and its interpretation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 41, 1201-1212.
- Moore, D.M. and Reynolds, Jr., R.C. (1997) X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals, Second Edition. Oxford Univeristy Press.
- Morikawa N., Kazahaya K., Yasuhara M., Inamura A., Nagao K., Sumino H. and Ohwada M. (2005) Estimation of groundwater residence time in a geologically active region by coupling <sup>4</sup>He concentration with helium isotopic ratios. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L02406, doi:10.1029/2004GL021501.
- 守屋以智雄 (1983) 日本の火山地形. 東京大学出版会.
- 村上由紀・長沼 毅・岩月輝希 (1999) 深部地質環境における微生物群集 - 東濃地域を例として - 原子力バックエンド研究, 5, 59-66.
- Murakoshi T. (2003) Seismic structure of the crust and uppermost mantle beneath Kyushu as inferred from receiver function analysis (レシーバ関数解析から推定した九州の地殻および最上部マントルの地震波速度構造), 九州大学博士論文.
- Muramatsu Y., Fehn, U. and Yoshida S. (2001) Recycling of iodine in fore-arc areas: evidence from the iodine brines in Chiba, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 192, 583-593.
- Nakada M., Yonekura N. and Lambeck, C. (1991) Late Pleistocene and Holocene sea-level changes in Japan: implications for tectonic histories and mantle rheology. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 85, 10-122.
- 中井信之・吉田 裕・安藤直行 (1974) 石油, 天然ガス鉱床の同位体地球化学. 地球化学, 8, 87-98.
- Neuzil, C.E., Cooley, C., Silliman, S.E., Bredehoeft, J.D. and Hsieh, P.A. (1981) A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of "tight" rocks - II. Application. *Inter. Jour. Rock Mech., Mining Sci. & Geomech. Abst.*, 18, 253-258.
- 西垣 誠 (1991) 地下水の流向・流速. 土と基礎, 39 (8), 56-58.
- 野上道男 (1981a) 斜面発達に関する拡散方程式型モデルの理論的検討と河川縦断面形への適用に関する若干の問題点. 地形, 2, 107-112.
- 野上道男 (1981b) 河川縦断面形発達過程に関する非定数係数拡散モデル. 地理学評論, 54, 364-368.
- Nogami M. (1990) Simulation of evolutionary process of longitudinal river profile using experimental flume and computer. *Geogr. Rep. Tokyo Metropol. Univ.*, 25, 195-211.
- OECD/NEA (2002) Features, events and processes (FEPs) for geological disposal of radioactive waste - An International Database -
- Ohsawa S., Kazahaya K., Yasuhara M., Kono T., Kitaoka K., Yusa Y. and Yamaguchi K. (2002) Escape of volcanic gas into shallow groundwater systems at Unzen volcano (Japan): evidence from chemical and stable carbon isotope compositions of dissolved inorganic carbon. *Limnology*, 3, 169-173.

- 奥澤 保・塚原弘明 (2001) 松代群発地震地域に湧出する深層地下水. 地震 2, 53, 241-253.
- Olsen, H.W. (1965) Deviation from Darcy's Law in saturated clays. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 29, 135-140.
- Olsen, H.W., Morin, R.H. and Nichols, R.W. (1985) Flow pump applications in triaxial testing, advanced triaxial testing of soil and rock. *ASTM-STP*, 977, 68-81.
- 大口健志・吉田武義・大上和良 (1989) 東北本州弧における新生代火山活動域の変遷. 地質学論集, 431-455.
- 太田陽子 (1999) 変動地形を探る I. 古今書院.
- 大竹政和 (1976) 松代地震から 10 年. 科学, 46, 306-313.
- Otsubo M. and Hayashi D. (2003) Neotectonics in southern Ryukyu arc by means of paleostress analysis. *Bull. Fac. Sci. Univ. Ryukyus*, 76, 1-73.
- Otsubo M. and Yamaji A. (2006) Improved resolution of the multiple inverse method by eliminating erroneous solutions. *Comp. & Geosci.*, 32, 1221-1227.
- Otsubo M., Sato K. and Yamaji A. (2006) Computerized identification of stress tensors determined from heterogeneous fault-slip data by combining the multiple inverse method and k-means clustering. *Jour. Struct. Geol.*, 28, 991-997.
- Paces, J.B., Neymark, L.A., Wooden, J.L. and Persing, H.M. (2004) Improved spatial resolution for U-series dating of opal at Yucca Mountain, Nevada, USA, using ion-microprobe and microdigestion methods. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 66, 1591-1606.
- Papadopoulos, S.S., Bredehoeft, J.D. and Cooper, H.H. (1973) On the analysis of 'slug test' data. *Water Resources Res.*, 9, 1087-1089.
- Parkhurst D.L. and Appelo C.A.J. (1999) User's guide to PHREEQC (ver. 2) - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. USGS Water-Resources Invest. Rept., 99-4259
- Pedersen, K. (1996) Investigations of subterranean bacteria in deep crystalline bedrock and their importance for the disposal of nuclear waste. *Canadian Jour. Microbiol.* 42, 382-391.
- Pedersen, K. (2005) Microorganisms and their influence on radionuclide migration in igneous rock environment. *Jour. Nuclear & Radiochem. Sci.*, 6, 11-15.
- Phillips, F.M., Mattick, J.L. and Duval, T.A. (1988) Chlorine-36 and tritium from nuclear-weapons fallout as tracers for long-term liquid and vapor movement in desert soils. *Water Resources Res.*, 24, 1877-1891.
- Posamentier, H.W. and Vail, P.R. (1988) Eustatic controls on clastic deposition: II - Sequence and systems tract models. *Spec. Pub. SEPM*, 42, 125-154.
- Pourbaix, M. (1966) Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions (English edition) Pergamon press.
- Rebour, V., Billiotte, J., Deveughele, M., Jambon, A. and Guen, C.L. (1997) Molecular diffusion in water-saturated rocks: A new experimental method. *Jour. Contaminant Hydrol.*, 28, 71-93.
- 力武常次 (1947) 南海地震に伴う道後温泉の変化, 東大地震研究所速報, 5, 189-194.
- Rowe, R.K. and Booker, J.R. (1984) The analysis of pollutant migration in a non-homogeneous soil. *Geotechnique*, 34, 601-612.
- Russell, B.F., Phelps, T.J., Griffin, W.T. and Sargent, K.A. (1992) Procedures for sampling deep subsurface microbial communities in unconsolidated sediments. *Groundwater Monitor. Rev.*, 12, 96-104.
- 斎藤元治・日下部実 (1989) 火山噴火におけるマグマ中の揮発性成分の挙動 - 斑晶中のガラス包有物分析に基づくアプローチ. 火山, 34, 275-293.
- 酒井 均・松久幸敬 (1996) 安定同位体地球化学. 東京大学出版会.
- 酒井慎一・山田知朗・井出 哲・望月雅志・塩原 肇・ト部 卓・平田 直・篠原雅尚・金沢敏彦・西沢あずさ・藤江 剛・三ヶ田均 (2001) 地震活動から見た三宅島 2000 年噴火時のマグマの移動. 地学雑誌, 110, 145-155.
- 酒井哲弥・斎藤文紀・増田富士夫 (1995) シーケンス層序学入門. 地質学論集, 45, 1-14.
- 佐倉保夫 (1984) 温度による地下水調査法. 日本地下水学会誌, 26 (4), 193-197.
- Sano Y. (1986) He flux from the solid earth. *Geochem. Jour.* 20, 227-232.
- 佐々保雄 (1954) 新冠泥火山とその十勝沖地震による変動. 十勝沖地震調査報告 - 1952 年 3 月 4 日 - 十勝沖地震調査委員会, 243-259.
- 佐藤比呂志 (1996) 日本列島のインバージョンテクトニクス. 活断層研究, 15, 128-132.
- Sato H., Shibutani T. and Yui M. (1997) Experimental and modeling studies on diffusion

- of Cs, Ni and Sm in granodiorite, basalt and mudstone. *Jour. Contaminant Hydrol.*, 26, 119-133.
- Sato T., Sakai R., Furuya K. and Kodama T. (2000) Coseismic spring flow changes associated with the 1995 Kobe earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1219-1222.
- Sato T., Matsumoto N., Kitagawa Y., Koizumi N., Takahashi M., Kuwahara Y., Ito H., Cho A., Satoh T., Ozawa K. and Tasaka S. (2004) Changes in groundwater level and flow rate associated with the 2003 Tokachi-oki earthquake. *Earth Planet. Space*, 56, 395-400.
- 関 陽児 (2003) 鉍床周辺の水系調査－資源探査から環境修復まで－ 資源地質, 53, 183-192
- 関 陽児・上岡 晃・金井 豊・鈴木正哉・間中光雄・内藤一樹・亀井淳志・奥沢康一・竹田幹夫・渡部芳夫 (2005) 金丸ウラン鉍微地周辺の渓流水中でのウラン負荷量の流下変化. 資源地質学会講演会講演要旨集, 55, 72-72.
- Sharma, M.L. and Hughes, M.W. (1985) Groundwater recharge estimation using chloride, deuterium and oxygen-18 profiles in the deep coastal sands of western Australia. *Jour. Hydrol.*, 81, 93-109.
- Shimizu S., Akiyama, M., Ishijima Y., Hama, K., Kunimaru T. and Naganuma T. (2006) Molecular characterization of microbial communities in fault-bordered aquifers in the Miocene formation of northernmost Japan. *Geobiology*, 4, 203-213.
- 深部地質環境研究センター (2002) 地層処分にかかる地質情報データの整備 平成 13 年度事業報告書. 産業技術総合研究所.
- 深部地質環境研究センター (2003) 地層処分にかかる地質情報データの整備 平成 14 年度事業報告書. 産業技術総合研究所.
- 深部地質環境研究センター (2004) 地層処分にかかる地質情報データの整備 平成 15 年度事業報告書. 産業技術総合研究所.
- 深部地質環境研究センター (2005) 地層処分にかかる地質情報データの整備 平成 16 年度事業報告書. 産業技術総合研究所.
- 深部地質環境研究センター (2006) 地層処分にかかる地質情報データの整備 平成 17 年度事業報告書. 産業技術総合研究所.
- 深部地質環境研究センター (2007) 地層処分にかかる地質情報データの整備 平成 18 年度事業報告書. 産業技術総合研究所.
- 新谷俊一・田中和広 (2005) 新潟県十日町市松代に分布する泥火山の地質. *自然災害科学*, 24-1, 49-58.
- Skagius K. and Neretnieks I. (1986) Porosities and diffusivities of some nonsorbing species in crystalline rocks. *Water Resources Res.*, 22, 389-398.
- SKB (2000) Geoscientific Programme for investigation and evaluation of the sites for deep repository. Technical Report, TR-00-20.
- SKB (2004) Interim main report of the safety assessment SR-Can. Technical Report. TR-04-11.
- Smith, I.S. (2002) Episodic volcanism and hot mantle: implications for volcanic hazard studies at the proposed nuclear waste repository at Yucca Mountain, Nevada. *GSA Today*, April 2002, 4-10.
- Song, I., Elphick, S.C., Main, I.G., Ngwenya, B.T., Odling, N.W. and Smyth, N.F. (2004) One-dimensional fluid diffusion induced by constant-rate flow injection: Theoretical analysis and application to the determination of fluid permeability and specific storage of a cored rock sample. *Jour. Geophys. Res.*, 109, B05207.
- 総合資源エネルギー調査会 (2003) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会報告書－高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて－
- 総合資源エネルギー調査会 (2006) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会報告書－放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制制度のあり方について－
- 総合資源エネルギー調査会・電気事業分科会原子力部会 (2006) 原子力立国計画報告書 (案).
- Stoessel R.K. and Prochaska, L. (2005) Chemical evidence for migration of deep formation fluids into shallow aquifers in South Louisiana. *Trans. Gulf Coast Geol. Soc.*, 55, 794-808.
- Sudo M., Uto K., Tatsumi Y. and Matsui K. (1998) K-Ar geochronology of a Quaternary monogenetic volcano group in Ojika Jima district, Southwest Japan. *Bull. Volcanol.*, 60, 171-186.
- 菅木浅彦編 (1988) 鉍石顕微鏡と鉍石組織. テラ学術図書出版.
- Sugimura A. (1960) Zonal arrangement of some geophysical and petrological features in environments. *Jour. Fac. Soc. Univ. Tokyo, Sec. II*, 12, 133-153.
- 杉山雄一 (2001) 活断層調査法. 加藤碩一・脇田浩二編「地質学ハンドブック」, 330-402, 朝倉書店.
- 鈴木美寿・石川博久 (2001) 原子力の研究開発におけ

- る品質保証活動の取り組み. サイクル機構技報, 10, 1-4.
- Symonds,R.B., Rose,W.I., Bluth,G.J.S. and Gerlach T.M. (1994) Volcanic-gas studies: methods, results, and applications. *Rev. Mineral.*, 30, 1-66.
- 高田 亮 (1994) クラックの相互作用からみた玄武岩質火山. *火山*, 39, 155-168.
- 高田 進 (2005) 高レベル放射性廃棄物処分事業における品質保証に関する調査検討－米国ユッカマウンテンのサイト調査段階に係る品質保証要求事項と我が国への適用について－ 電力中央研究所報告, N04022.
- Takahashi H.A., Kazahaya K., Shinohara H. and Nakamura T. (2004) Application of radiocarbon to detect a deep source CO<sub>2</sub> in soil air. *Nucl. Instr. & Meth.*, B223, 483-488.
- 高橋 学・張 銘・江崎哲郎・坂井健太郎 (1998) 室内透水試験法について. *応用地質*, 39, 315-321.
- 高橋正明(1997)深部熱水系にはどんな水があるのか?－熱水系の熱的・化学的分類について－ 日本水文科学会誌, 27, 95-103.
- 高橋正明・駒澤正夫・村田泰章・玉生史郎 (1996) 50 万分の1 秋田地熱資源図及び同説明書. 特殊地質図, 31-2, 地質調査所.
- 高橋正明・森川徳敏・戸丸 仁・高橋 浩・大和田道子・竹野直人・風早康平 (2006) 遠別旭温泉・歌越別泥火山について. *地質ニュース*, 627, 48-53.
- 高橋雅紀・林 広樹・笠原敬司・木村尚紀 (2006) 関東平野西縁の反射法地震波探査記録の地質学的解釈. *地質学雑誌*, 112, 33-52.
- 高橋美紀・金子貴信・里 優 (2003) 間隙圧オシレーション法による浸透率測定と測定プログラム. 石油開発技術センター研究報告, 大型研究「トラップの形成・シール能力評価技術」特集号, 121-132.
- Takahata N. and Sano Y. (2000) Helium flux from a sedimentary basin. *Appl. Radiat. Isotopes*, 52, 985-992.
- Takeda M., Zhang, M. and Nakajima H. (2006) Strategies for solving potential problems associated with laboratory diffusion and batch experiments – Part 2 : Future improvements. *Proc. Waste Manag. Symp. 2006*, CD-ROM.
- 竹村貴人・高橋 学・塚本 齊・鈴木健一郎・中岡健一 (2006) 応力場の回転による岩盤の透水挙動の変化. 日本応用地質学平成 18 年度研究発表会講演論文集, 517-518.
- 竹野直人・高倉伸一・杉原光彦・西 祐司・石戸経士 (2006) 地下水系の物理探査的モニタリングにつ
- いて－地層処分の視点で－ 資源地質, 56, 145-154.
- 竹内圭史・吉川敏之・釜井俊孝 (2000) 松之山温泉地域の地質. *地域地質研究 (5 万分の1 地質図幅)*, 地質調査所.
- Tamura Y., Tatsumi Y., Dapeng, Z., Kido Y. and Shukuno H. (2002) Hot fingers in the mantle wedge: new insights into magma genesis in subduction zones. *Earth. Planet. Sci. Lett.* 197, 105-116.
- 田中和広 (2006) 泥火山・マッドダイアブルが引き起こす地盤災害のメカニズムと対策 (課題番号 14580505) 平成 14 年度～平成 16 年度科学研究費助金 [ 基盤研究 (C) ] 研究成果報告書.
- 田中 剛 (2003) 天然資源と人為汚染を見分ける地球化学図. 資源地質学会編「資源環境地質学－地球史と環境汚染を読む－」, 373-378, 資源地質学会.
- 田中 剛・川辺岩夫・山本鋼志・岩森 光・平原靖大・三村耕一・浅原良浩・伊藤貴盛・米沢千夏・ドラグシャヌ クリスチャン・神田 聡・清水乙彦・林 正人・三浦典子・青木 浩・太田充恒・戸上薫・鳥海貴弘・松村陽子・榊原智康・谷水雅治・水谷嘉一・宮永直澄・村山正樹・大森扶美子 (1995) 愛知県瀬戸市周辺における河川堆積物中の元素分布と地圏環境評価の試み. *地球化学*, 29, 113-125.
- 巽 好幸 (1995) 沈み込み帯のマグマ学. 東京大学出版会.
- Tits,J., Jakob,A., Wieland,E. and Spieler,P. (2003) Diffusion of tritiated water and <sup>22</sup>Na<sup>+</sup> through non-degraded hardened cement pastes. *Jour. Contaminant Hydrol.*, 61, 45-62.
- 徳永朋祥 (2003) 地殻浅部での水の移動. 笠原順三・鳥海光弘・河村雅行編「地震発生と水－地球と水のダイナミクス－」, 135-154, 東京大学出版会.
- 東宮明彦 (1991) 島弧火山の寿命に対応するマントルダイアピールの大きさ. *火山*, 36, 221-221.
- 月村勝宏 (1995) 非晶質からの X 線散乱. *地質ニュース*, 496, 19-25.
- 内田洋平・佐倉保夫・荒川隆付 (1993) 温度をトレーサーとした山形盆地における地下水流動の研究. 日本地下水学会 1993 年春季講演会講演要旨, 90-95.
- U.S. DOE (2001) Yucca Mountain preliminary site suitability evaluation. DOE/RW-0540.
- U.S. DOE-OCRWM (2006) Quality assurance requirements and description. DOE/RW-0333P Rev. 17.
- 上田正人・坂本義昭 (2006) 合成吸着樹脂を用いた地下水腐植物質の採取と特性分析. 原子力バックエ



- ンド研究, 12, 31-39.
- Ujiie, Y. (2000) Mud diapirs observed in two piston cores from the landward slope of the northern Ryukyu Trench, northwestern Pacific Ocean. *Marine Geol.*, 163, 149-167.
- 梅田浩司・小松 亮・江原幸雄 (1999) 坑井温度データから算定した地熱地帯における熱水流体の流動速度と熱流量. *地熱*, 36, 219-237.
- 宇都浩三 (1995) 火山と年代測定: K-Ar,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代測定法の現状と将来. *火山*, 40, S27-S46.
- Van Loon, L.R., Baeyens, B. and Bradbury, M.H. (2005) Diffusion and retention of sodium and strontium in Opalinus Clay: Comparison of sorption data from diffusion and batch sorption measurements, and geochemical calculations. *Appl. Geochem.*, 20, 2351-2363.
- Wakita H., Fujii N., Matsuo S., Notsu K., Nagao K. and Takaoka N. (1978) "Helium spots": caused by a diapiric magma from the upper mantle. *Science*, 200, 430-432.
- Wang, C.Y., Cheng, L.H., Chin, C.V. and Yu, S.B. (2001) Coseismic hydrologic response of an alluvial fan to the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Geology*, 29, 831-834.
- 渡部満久・鈴木康弘 (1999) 活断層地形判読. 古今書院.
- Whitman, W.B., Coleman, D.C. and Wiebe, W.J. (1998) Prokaryotes: the unseen majority. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 95, 6578-6583.
- Williams, L.A., Parks, G.A. and Crerar, D.A. (1985) Silica diagenesis, I. Solubility Controls. *Jour. Sediment. Petrol.*, 55, 301-311.
- 山縣 毅・小川勇二郎 (1989) 混在岩の形成における泥ダイアピリズムの役割. *地質学雑誌*, 95, 297-310.
- Yamaji A. (2000) The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *Jour. Struct. Geol.*, 22, 441-452.
- 山本耕次 (1999) 北海道北部地域枝幸地区の沢砂地化学探査. *資源地質*, 49, 109-116
- 山本耕次・鈴木哲夫・三宅一弘 (2003) 熱帯地域における沢砂地化学探査の手法と解析—インドネシア共和国東ジャワ地域の例— *資源地質*, 53, 19-28.
- 山元孝広 (1992) 会津地域の後期中新世～更新世カルデラ火山群. *地質学雑誌*, 98, 21-38.
- 山元孝広 (1999) 福島—栃木地域に分布する30-10万年前のプリニー式降下火砕物: 沼沢・燧ヶ岳・鬼怒沼・砂子原火山を給源とするテフラ群の層序. *地質調査所月報*, 50, 743-767.
- Yamamoto T. (2005) The rate of fluvial incision during the Late Quaternary period in the Abukuma Mountains, northeast Japan, deduced from tephrochronology. *Island Arc*, 14, 199-212.
- 山元孝広・小玉喜三郎 (2004) 日本の地層処分を考慮すべき地質及び気候関連事象について. *月刊地球*, 26, 452-456.
- 米倉伸之・貝塚爽平・野上道男・鎮西清高編 (2001) 日本の地形I 総説. 東京大学出版会.
- 米倉伸之・岡田篤正・森山昭雄編 (1990) 変動地形とテクトニクス. 古今書院.
- 吉村尚久編 (2001) 粘土鉱物と変質作用. *地学双書*, 32, 地学団体研究会.
- 湯原浩三編 (1982) 地熱開発総合ハンドブック. 朝倉書店.
- Zekster, I.S., Lorne, G. and Everett, R.G. (2007) Submarine groundwater. CRC Press.
- 張 銘・遠藤秀典・高橋 学 (2001) 原位置浸透流測定法について (その2). *応用地質*, 42, 52-59.
- Zhang, M., Esaki T., Olsen, H.W. and Mitani Y. (1997) Integrated shear and flow parameter measurement. *Geotech. Test. Jour.*, 20, 296-303.
- 張 銘・高橋 学・遠藤秀典 (2000) 原位置浸透流測定法について (その1). *応用地質*, 41, 293-303.
- 張 銘・高橋 学・江崎哲郎 (1997) 室内透水試験における動水勾配の定量的評価について. *資源・素材 '97 (秋季大会) 論文集*, 69-72.
- 張 銘・高橋 学・江崎哲郎・坂井健太郎 (1998) 室内変水位透水試験法に関する理論的評価. *北海道応用地学合同研究会論文集*, 9, 15-20.
- Zhang, M., Takahashi M., Morin, R.H. and Esaki T. (1998) Theoretical evaluation of the transient response of constant head and constant flow rate permeability tests. *Geotech. Test. Jour.*, 21, 52-57.
- Zhang, M., Takahashi M., Morin, R.H. and Esaki T. (2000a) : Evaluation and application of the transient-pulse technique for determining the hydraulic properties of low-permeability rocks-part 1: Theoretical evaluation. *Geotech. Test. Jour.*, 23, 83-90.
- Zhang, M., Takahashi M., Morin, R.H. and Esaki T. (2000b) Evaluation and application of the transient-pulse technique for determining the hydraulic properties of low-permeability rocks-part 2: Experimental application. *Geotech. Test. Jour.*, 23, 91-99.
- Zhang, M., Takahashi M., Morin, R.H., Endo H. and Esaki T. (2002) Determining the hydraulic

- properties of saturated, low-permeability geological materials in the laboratory: Advances in theory and practice, evaluation and remediation of low permeability and dual porosity environments. ASTM STP 1415, 83-98.
- 張 銘・竹田幹郎 (2004) 地質媒体における物質移行特性の評価手法について. 地質ニュース, 602, 25-35.
- Zhang, M. and Takeda M. (2005) Theoretical evaluation of the through diffusion test for determining the transport properties of geological materials. Proc. Waste Management 2005, CD-ROM.
- Zhang, M., Takeda M. and Nakajima H. (2006a) Strategies for solving potential problems associated with laboratory diffusion and batch experiments-Part 1: An overview of conventional test methods. Proc. Waste Management Symp. 2006, CD-ROM.
- Zhang, M., Takeda M. and Nakajima H. (2006b) Determining the transport properties of rock specimens using an improved laboratory through diffusion technique. proc. 29th Inter. Symp. Scientific Basis for Nuclear Waste Management (In press) .
- Zhao, D., Hasegawa, A. and Horiuchi S. (1992) Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath Northeastern Japan. Jour. Geophys. Res., 97, 19909-19928.
- Zoback, M.D., Healy, J.H. and Roller, J.C. (1977) Preliminary stress measurements in central California using the hydraulic fracturing technique. Pure & Appl. Geophys., 115, 135-152.
- Zoback, M.L. (1992) First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the World Stress Map Project. Jour. Geophys. Res., 97, 11703-11728.

## 参考書籍

第4章3節「地質環境の調査」に関連した参考書籍を以下に記す。

リモートセンシング：リモートセンシングに関する既存の知見および関連する地形調査法に関しては以下にまとめられているので参照されたい。

貝塚爽平・太田陽子・小疇 尚・小池一之・野上道男・町田 洋・米倉伸之編（1985）写真と図でみる地形学。東京大学出版会。

加藤碩一・脇田浩二編（2001）地質学ハンドブック。朝倉書店。

国土地理院地理調査部編（1974）空中写真判読基準カード集。日本地図センター。

地形調査：日本の地形に関する既存の知見および一般的な地形調査法に関しては以下にまとめられているので参照されたい。

貝塚爽平・太田陽子・小疇 尚・小池一之・鎮西清高・野上道男・町田 洋・米倉伸之編（2000～2006）日本の地形1～7。東京大学出版会。

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。

町田 洋・大場忠道・小野 昭・山崎晴雄・河村善也・百原 新編著（2003）第四紀学。朝倉書店

守屋以智雄（1983）日本の火山地形。東京大学出版会。

成瀬 洋（1982）第四紀。岩波書店。

日本応用地質学会編（2000）山地の地形工学。古今書院。

太田陽子（1999）変動地形を探るⅠ。古今書院。日本

応用地質学会編（2000）山地の地形工学。古今書院。

鈴木隆介（1997～2004）建設技術者のための地形図読図入門 1～4。古今書院。

渡部満久・鈴木康弘（1999）活断層地形判読。古今書院。

米倉伸之・岡田篤正・森山昭雄編（1990）変動地形とテクトニクス。古今書院。

吉川虎雄・杉村 新・貝塚爽平・太田陽子・阪口 豊（1973）新編 日本地形論。東京大学出版会。

地質調査：日本の地質に関する既存の知見および一般的な地質調査法に関しては以下にまとめられているので参照されたい。

加藤碩一・脇田浩二編（2001）地質学ハンドブック。朝倉書店。

日本地質学会地質基準委員会編著（2001）地質基準。共立出版。

日本地質学会地質基準委員会編著（2003）地質学調査の基本。共立出版。

日本第四紀学会編（1993）第四紀試料分析法。東京大学出版会。

「日本の地質」刊行委員会企画（1986～1992）日本の地質1～9。共立出版。

全国地質調査業協会連合会（2003）地質調査要項。経済調査会。

物理探査：一般的な物理探査法に関しては以下にまとめられているので参照されたい。

物理探査学会編（1998）物理探査ハンドブック1～7。物理探査学会。

加藤碩一・脇田浩二編（2001）地質学ハンドブック。朝倉書店。

水文調査：一般的な水文調査法に関しては以下にまとめられているので参照されたい。

新井 正（2003）水環境調査の基礎（改訂版）。古今書院。

山本莊毅（1983）新版地下水調査法。古今書院。

Mazor, E. (2004) Chemical and isotopic groundwater hydrology (3rd edition). Marcel Dekker.

地温調査：一般的な地温・地熱調査法に関しては以下にまとめられているので参照されたい。

加藤碩一・脇田浩二編（2001）地質学ハンドブック。朝倉書店。

宮崎芳徳・津宏治・浦井稔・高倉伸一・大久保泰邦・小川克郎（1991）全国規模地熱資源評価の研究。地質調査書報告, 275, 17-43.

新エネルギー・産業技術総合開発機構（1989）地熱資源量の評価に関する調査。NEDO-P-8822.

湯原浩三編（1982）地熱開発総合ハンドブック。フジテクノシステム。

資源調査：一般的な資源調査法に関しては以下にまとめられているので参照されたい。

加藤碩一・脇田浩二編（2001）地質学ハンドブック。朝倉書店。

室内試験・測定：水の物理・化学特性に関しては以下にまとめられているので参照されたい。

半谷高久・小倉紀雄（1995）水質調査法（第3版）。丸善。

JIS K 0101（1998）工業用水試験法。日本規格協会。

環境省自然保護局（2002）鉱泉分析法指針（改訂）。建設産業調査会（1998）改訂地下水ハンドブック。設産業調査会。

本島公司・益子 安（1973）地下水・温泉の分析。講談社。

日本分析化学会北海道支部（2005）水の分析（第5版）。

## 参考書籍

化学同人.

室内試験・測定：力学特性に関しては以下にまとめられているので参照されたい.

土木学会編（1979）土木技術者のための岩盤力学－昭和54年版－土木学会.

土質工学会編（1974）岩の工学的性質と設計・施工への応用. 土質工学会.

地盤工学会編（2006）岩の試験・調査方法の基準・解説書－平成18年度版－地盤工学会.

M.S パターソン（1986）実験岩石力学－脆性領域の岩石の変形および破壊. 古今書院.

日本材料学会編（1966）岩石力学とその応用. 丸善.

鈴木 光（1973）岩盤力学と計測. 内田老鶴圃新社.

山口梅太郎・西松裕一（1991）岩石力学入門（第3版）東京大学出版会.

# 地質及び気候関連事象の特徴

## 資料



地質及び気候関連事象の特徴

事象の関連	メカニズムと現象				特徴			影響度	番号
	メカニズム	現象	時間的特徴	空間的特徴	発生時期	持続時間	発生場所		
構造運動・造山活動	<ul style="list-style-type: none"> <li>地球内部の熱エネルギーが拡散する過程で地球内部のマントルが自発的に流動すること（マントル対流）により生ずる現象</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>プレート移動、衝突、沈み込み</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>連続的 [長期]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>切れ目なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>発生場所</li> <li>○地域性なし</li> <li>・日本列島はプレート沈み込み部に位置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>広がり</li> <li>○広域</li> <li>・日本列島全体に及ぶ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○「地質構造の変形」「地震活動」「火山・マグマ活動」「熱水活動」に影響あり</li> <li>・日本周辺の海側プレートと陸側プレートの相対移動速度は、年間数cm～10cm程度</li> <li>・伊豆半島は本州弧に対して衝突中、今後1000万年オーダーで太平洋上の島が新たに日本列島に衝突することはない</li> <li>○影響なし</li> <li>・1000万年オーダーで本事象が発生することはない</li> </ul>		
構造運動・造山活動 ↓ 地質構造の変形	<ul style="list-style-type: none"> <li>プレート運動による非地震性の地質構造の変化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・アルームの上昇</li> <li>・アルーム：下部マントルから上昇する高温マントルの流れ</li> <li>・大陸の拡大、分裂（日本海の形成）</li> <li>・非地震性の隆起沈降、水平変位、褶曲の形成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○確率的 [1/10<sup>6</sup>年]</li> <li>・億年オーダー(アルームの成長)</li> <li>・1500万年前(前回アルームの上昇に伴う日本列島の再配置)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○長期</li> <li>・100万年オーダー(日本列島の再配置期間)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○地域性なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○狭域</li> <li>・日本列島全体に及ぶ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○「水文学・地質学的変化」「侵食と堆積」「海面変化」に影響あり</li> <li>・活褶曲の変形量は、最大で年間1mm程度</li> <li>・最近100年程度の測地学的観測による非地震性の変形パターンは、ここ10万年程度の地質学的変形と一致、ただし地質学的変形では、地震性と非地震性の変形が区別できない</li> <li>・日本では非地震性よりも地震性の変形の方が大きい、水平変位の影響は褶曲の形成・断層の発生で考慮</li> </ul>		
構造運動・造山活動 ↓ 地質構造の変形 ↓ 水文学・水文地質学的変化	<ul style="list-style-type: none"> <li>非地震性の変形が進行することによって生じた隆起や沈降の結果、地下水帯水層が変形するほか、地下水混合系が変形する現象</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地下水涵養域を含めた帯水層規模の変化</li> <li>・地下水帯水層の縮小化、孤立化(隆起域)</li> <li>・停滞水化(沈降域)</li> <li>・地下水混合系の変化による水質変化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○連続的 [中期～長期]</li> <li>・短期的影響無視できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○切れ目なし [緩慢]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○特定場所で発生</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○狭域～広域</li> <li>・地下水流動系への影響範囲は、地質構造の変形範囲によりさらに広域</li> <li>・具体的な影響範囲は研究途上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○「サイト」に影響あり</li> <li>・地質構造の変形量に応じて程度は様々</li> </ul>	G1	
構造運動・造山活動 ↓ 地質構造の変形 ↓ 侵食と堆積	<ul style="list-style-type: none"> <li>非地震性の変形が進行することによって生じた隆起や沈降が、侵食堆積作用に変化を与える</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・河川侵食、運搬作用の増加(地形勾配の増加)</li> <li>・河川堆積作用の増加(地形勾配の増加)</li> <li>・岩盤クリップや地すべり等のマスマスマーブメントの活発化(地形勾配の増加)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○連続的 [中期～長期]</li> <li>・短期的影響無視できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○切れ目なし [緩慢]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○特定場所で発生</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○狭域～広域</li> <li>・地質構造の変形の範囲に依存</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○「サイト」に影響あり</li> <li>・地質構造の変形量に応じてその範囲内での影響あり</li> <li>○「水文学的・水文地質学的変化」への影響は無視できる程度</li> <li>・侵食と堆積は地質構造変形による地形変化を緩和する方向に作用、ただし、変化量は地質構造変形によるものの方が大きい</li> </ul>	G2	

事象の関連	メカニズムと現象			時間的特徴		空間的特徴		影響度	番号
	メカニズム	現象	発生時期	持続時間	発生場所	広がり			
構造運動・造山活動 ↓ 地質構造の変形 ↓ 海面変化	・陸が隆起沈降することにより相対的に海面が変化すること ・プレートの運動により岩盤に蓄積された弾性歪みエネルギーが、岩石の弾性限界を超えた時点で岩石が破壊(断層)のすれすれによって一気に開放される現象又はこれにより生ずる現象	・海面の上昇又は低下 ・プレート境界付近の地震：沈み込む海のプレートと陸のプレートの境界部や沈み込む海のプレート内で起きる地震	○周期的【短期】 ・最近 110 年間で M7 程度以上の大地震が 100 個以上発生(繰り返し地震域毎) ・平均変位速度 10mm/千年程度 ・大地震の再来間隔 100 年程度	○切れ目なし【緩慢】 ○瞬時【急激】	○特定の場所で発生 ・プレート境界に沿って発生 ・プレート境界には繰り返し地震を発生させる領域が存在 ・地下浅部から数 100km の深さで発生	○狭域～広域 ・地質構造の変形の範囲に依存	○「水文学的・水文地質学的変化」「侵食と堆積」「地域的・局所的気候変動」への影響は無視できない程度 ・特定の海岸地域でも今後 10 万年のユースタス変動量と同程度で、他の大部分はこれより小さい ・ただし 10 万年を越えれば地質構造の変形の累積が徐々に増す	G3	
構造運動・造山活動 ↓ 地震活動	・陸域の浅い地震：陸のプレート内で起きる地震	・プレート境界付近の地震：沈み込む海のプレートと陸のプレートの境界部や沈み込む海のプレート内で起きる地震	○確率的 ・最近 110 年間で M7 程度以上の大地震が約 20 個発生(活断層毎；中期～長期の周期) ・活断層の平均変位速度 ・A 級：10～100mm/千年 ・B 級：1～10mm/千年 ・C 級：0.1～1mm/千年 ・大地震の再来間隔 ・A 級活断層：数千年 ・B 級活断層：数万年 ・C 級活断層：数十万年	○瞬時【急激】	○地域性あり ・大地震の約 80% は既知の活断層帯から 5km 以内で発生(残り約 20% は既存の活断層帯に沿って発生したか不明) ・地下 15～20km より深い深さで発生 (活断層の分布状態) ・密度大 一積算断層長 100km/10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> 以上 一東北の日本海側、中部、近畿北部、九州中部 一A 級活断層卓越 ・密度中 一積算断層長 100～500km/10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> 一東北内陸部 一B 級活断層卓越 ・密度小 一積算断層長 50～100km/10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> 一北海道主部、中国、九州北部 一C 級活断層卓越 ・微小 一積算断層長 10～0km/10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> 一東北、近畿、四国、九州の太平洋岸 ・前弧域(アサイミスミックベルト)で地震発生数が少ない ・C 級活断層の認定に見落とされており(2000 年鳥取県西部地震)	○局所的～狭域(地震断層の出現) ・地震断層の長さは地震規模に依存 ・M6.5 以上で地震断層が地表に出現する可能性あり ・M8 の巨大地震による地震断層の長さ 100km 程度 ・M7 の大地震による地震断層の長さは 10km 程度 ○広域(地震動) ・地震動の広がり ・1891 年濃尾地震 M8.0 の震度 V 域の長径は約 400km	○「サイト」「木文・水文地質学的変化」「熱水活動」「地質構造の発生」に影響あり(地震断層の発生) ・プレート境界の繰り返し地震域毎に、地震規模と再来間隔の規則性あり ○「サイト」に影響なし(地震動) ・地震動自体の影響は無視できる	G4	
								○「サイト」「木文・水文地質学的変化」「熱水活動」「地質構造の発生」に影響あり(地震断層の発生) ・発生する地震規模と活断層の長さ ・発生場所の特定ができない大地震も発生する ○「サイト」に影響なし(地震動) ・地震動自体の影響は無視できる	G16



事象の関連	メカニズムと現象		時間的特徴		特徴		影響度	番号
	メカニズム	現象	発生時期	持続時間	発生場所	空間的特徴		
構造運動・造山活動 ↓ 地質活動 ↓ 水文学・水文地質学的 変化	地震で生じた地層内の 圧力変化、裂か形成が 地下水流動系に及ぼす 影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震動による液状化現象</li> <li>地震動による泥火山の活動</li> <li>泥火山はメタンガス混じりの泥水噴出孔</li> <li>地震動による地すべり</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>断続的・周期的 [短期]</li> <li>発生可能性のある地域に地震動の影響が及んだ場合に限られる</li> </ul>	瞬時 [急激]	<ul style="list-style-type: none"> <li>特定の場所で発生</li> <li>水を含んだ固結度の低い堆積物のある平野部で震度V以上の揺れがあった場合に起きやすい(液状化現象)</li> <li>既存の断層や背斜曲に沿って配列し地震の度に再活動する(泥火山)</li> <li>地質的不安定な急斜面で発生(地すべり)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>局所的～狭域</li> <li>震度V以上の範囲は、経度式からM8程度、M7で6000km<sup>2</sup>程度</li> <li>泥火山の直径は数km以下</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>「サイト」に影響あり</li> <li>発生地の事前予測は可能</li> </ul>	G28 G29 G30 G31
構造運動・造山活動 ↓ 地質活動 ↓ 熱水活動	<ul style="list-style-type: none"> <li>深さ数10kmの地下で地震により発生した熱水や、深さ数kmの地下に存在する既存の深層熱水貯留層内の熱水が生じた又は再び開口した断層等の裂か系を介して上昇する現象</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>深層熱水の発生</li> <li>深層熱水の発生時に必ず熱水上昇を伴うことはない</li> <li>震源域周辺に熱水貯留層がある場合のみ、既存熱水の上昇が起きる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>断続的</li> <li>海底下の浅いところで地震が発生した場合に起きやすい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>数年程度～長期</li> <li>顕著な規則性はない</li> <li>比較的短期で元に戻る場合もある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地域性あり</li> <li>地震断層の発生場所に依存</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>局所的～狭域</li> <li>地震断層周辺の地下水流動系の広がりによる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>「サイト」への影響あり</li> <li>地下水流動量が増える場合と減る場合がある(地震によって裂かが開口する場合と閉じる場合あり)</li> <li>変動規模は地下水流動系の規模に応じて様々</li> <li>1995年兵庫県南部地震では、神戸市内で水位上昇・自噴、六甲山地で水位低下</li> </ul>	G5 G11 G17 G23
構造運動・造山活動 ↓ 地質活動 ↓ 熱水活動 ↓ 水文学・水文地質学的 変化	<ul style="list-style-type: none"> <li>深さ数10kmの地下で地震により発生した熱水や、深さ数kmの地下に存在する既存の深層熱水貯留層内の熱水が生じた又は再び開口した断層等の裂か系を介して上昇する現象</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>深層熱水の発生</li> <li>深層熱水の発生時に必ず熱水上昇を伴うことはない</li> <li>震源域周辺に熱水貯留層がある場合のみ、既存熱水の上昇が起きる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>断続的</li> <li>海底下の浅いところで地震が発生した場合に起きやすい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>短期～長期</li> <li>熱水上昇の地質学的証拠はあるが観測実例はない</li> <li>地質の変質は復元しない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地域性あり</li> <li>地震断層の発生場所に依存</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>局所的</li> <li>影響範囲は地震断層周辺の熱水貯留層の広がりや注入される熱水の量に依存</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>「水文・水文地質学的変化」に影響あり</li> <li>水文学、水文地質学的変化に有意な影響あり</li> </ul>	G6 G12 G18 G24
構造運動・造山活動 ↓ 地質活動	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震を発生させた断層周辺の地質構造が弾性反発で変形する現象</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震性の隆起沈降と水平変位</li> <li>地震性の断層褶曲の形成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>断続的・周期的 [短期～長期]</li> <li>地震活動の発生時期に依存</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>短期～長期</li> <li>熱水上昇の地質学的証拠はあるが観測実例はない</li> <li>地質の変質は復元しない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地域性あり</li> <li>地震断層の発生場所に依存</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>局所的～狭域</li> <li>影響範囲は地震断層周辺の熱水貯留層の広がりや注入される熱水の量に依存</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>「水文・水文地質学的変化」に影響あり</li> <li>熱水系の温度は数10℃から数100℃</li> <li>地下水のアルカリ性化</li> </ul>	
構造運動・造山活動 ↓ 地質活動	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震を発生させた断層周辺の地質構造が弾性反発で変形する現象</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震性の隆起沈降と水平変位</li> <li>地震性の断層褶曲の形成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>断続的・周期的 [短期～長期]</li> <li>地震活動の発生時期に依存</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>短期～長期</li> <li>熱水上昇の地質学的証拠はあるが観測実例はない</li> <li>地質の変質は復元しない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地域性あり</li> <li>地震断層の発生場所に依存</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>局所的～狭域</li> <li>影響範囲は地震断層周辺の熱水貯留層の広がりや注入される熱水の量に依存</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>「水文・水文地質学的変化」に影響あり</li> <li>熱水系の温度は数10℃から数100℃</li> <li>地下水のアルカリ性化</li> </ul>	

事象の関連	メカニズムと現象		時間的特徴		空間的特徴		影響度	番号
	メカニズム	現象	発生時期	持続時間	発生場所	広がり		
地質構造の変形		・ 裂かの形成				プレート境界から200kmは離れた瀬戸内海でも10cm程度の垂直変位が発生。裂かの形成範囲は、地質構造の変形範囲の内	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地質構造の変形による地質構造の歪み</li> <li>・ プレート境界又は活断層との位置関係で影響の程度が異なる</li> <li>・ 年間数mm程度の隆起(東海地震や南海地震のようなプレート境界巨大地震では震源域上にある) 沖先端部で数m程度の隆起(中部や近畿内陸部での断層地塊の平均的な隆起量)</li> </ul>	C17 C13 C19 C25
構造運動・造山活動 ↓ 地震活動 ↓ 地質構造の変形 ↓ 水文学・水文地質学的変化	・ 地震性の変形が累積することによって生ずる隆起や沈降の結果、地下水帯水層が変形するほか、地下水混合系が変形する現象	・ 地下水涵養域を含めた帯水層規模の変化 - 地下水帯水層の縮小化、孤立化(隆起場) - 停滞水化(沈降場) ・ 地下水混合系の変化による水質変化	○ 確率的・周期的 [短期～長期] ・ 地震性・地質構造の変形発生時期に依存	○ 瞬時 [累積]	○ 地域性あり ・ 地質構造の変形発生場所に依存	○ 狭域～広域 ・ 地下水流動系への影響範囲は、地質構造によりさらに広域 ・ 具体的な影響範囲は研究途上	○ 「サイト」に影響あり ・ 地質構造の変形量に応じて程度は様々	C17 C13 C19 C25
構造運動・造山活動 ↓ 地震活動 ↓ 地質構造の変形 ↓ 侵食と堆積	・ 地震性の変形が累積する際、侵食堆積作用に变化を与える	・ 河川侵食、運搬作用の増加(地形勾配の増加) ・ 河川堆積作用の増加(地形勾配の増加) ・ 岩盤クリープや地すべり等のマスマムブームエントの活発化(地形勾配の増加)	○ 確率的・周期的 [短期～長期] ・ 地質構造の変形発生時期に依存	○ 長期 [緩慢]	○ 地域性あり ・ 地質構造の変形発生場所に依存 ・ 時に、地震断層の近傍は岩盤が破砕されており(幅数m～数100m)、侵食を受けやすい	○ 狭域～広域 ・ 地質構造の変形範囲に依存	○ 「サイト」に影響あり ・ 地質構造の変形量に応じてその範囲内での影響あり ○ 「水文学的・水文地質学的変化」への影響は無視できる程度 ・ 侵食と堆積は地質構造変形による地形変化を緩和する方向に作用。ただし、変化量は地質構造変形によるものの方が大きい	C18 G14 G20 G26
構造運動・造山活動 ↓ 地震活動 ↓ 地質構造の変形 ↓ 海面変化	・ 隆起沈降することにより相対的に海面が変化すること	・ 海面の上昇又は低下	○ 確率的・周期的 [短期～長期] ・ 地質構造の変形発生時期に依存	○ 長期 [累積]	○ 地域性あり ・ 東日本火山帯及び九州中部以南の西日本火山帯 - 火山フロントが顕著で、100万年間におわって火山活動が繰り返りフロントの移動がない。 - 背弧域には火山がまばらに分布し活動の時空変化が大きく、新規火山出現の可能性あり。 - 前弧域では火山の発生がない。 ・ 山陰～北九州地域では火山フロントが不明瞭で、車成火山群活動が卓越	○ 狭域～広域 ・ 地質構造の変形範囲に依存	○ 「水文学的・水文地質学的変化」「侵食と堆積」「地塊的・局所的気候変動」への影響は無視できる程度 ・ 特定の海岸地域でも今後10万年のユースタティクス変動量と同程度で、他の大部分はこれよりも小さい ・ ただし10万年を越えれば地質構造の変形の累積が徐々に増す	C19 G15 G21 G27
構造運動・造山活動 ↓ 火山・マグマ活動	・ 深部で発生したマグマが浮力の上昇した後、深さ数km～10km前後の地下に一旦滞留し、マグマ溜まりをつくる。噴火現象はマグマ溜まりに蓄えられたマグマが火道を通じて地表に噴出する現象	・ 火山の出現	○ 確率的 ・ 火山の出現には、顕著な周期性は認められない ・ 新泉火山の発生頻度は地域によるもの、具体的数字は不明	○ 長期 [急激] ・ 複成火山における個々のマグマ供給系の寿命は数万年～数10万年 ・ 単成火山群のマグマ供給系の寿命は更に長く、100万年程度に及ぶ	○ 地域性あり ・ 東日本火山帯及び九州中部以南の西日本火山帯 - 火山フロントが顕著で、100万年間におわって火山活動が繰り返りフロントの移動がない。 - 背弧域には火山がまばらに分布し活動の時空変化が大きく、新規火山出現の可能性あり。 - 前弧域では火山の発生がない。 ・ 山陰～北九州地域では火山フロントが不明瞭で、車成火山群活動が卓越	○ 局所的 ・ 火山体の規模はマグマ量による ・ 噴出量が10 <sup>3</sup> 立方km程度の巨大噴火では直径20km程度の大型カルデラ火山が形成される	○ 「サイト」に影響あり ・ 「地震活動」「地質構造の変形」「熱水活動」に影響あり ・ 地層の物理的破壊 ・ 高温化(マグマの温度は900～1200度)	C33 G41

事象の関連	メカニズムと現象		時間的特徴		空間的特徴		影響度	番号
	メカニズム	現象	発生時期	持続時間	発生場所	広がり		
構造運動・造山活動 ↓ 火山・マグマ活動 ↓ 地震活動			発生時期 合は、確率的 ・既存のマグマ帯系での噴火再来間隔は数10年～数万年 ・単成火山群の噴火再来間隔は数千～数万年以上 ・噴出量 10 <sup>2</sup> 立方 km 以上の巨大噴火の発生頻度は、九州南部で1カルデラ火山群当たり10万年に1回程度(5カルデラ火山群が存在)で、地球上最も活発なクラス		発生場所 異なる	空間的特徴 ・巨大噴火の影響範囲は列島規模 ・溶岩流の最大到達距離は、約1万年前の新富士火山旧期溶岩で火口から約35km ・巨大噴火では大規模火砕流が発生し、火口から数百kmの地表範囲が破壊・埋没する ・九州南部で巨大噴火が起きた場合は、日本列島全体が数cm以上の降下火山灰に覆われる	「地震活動」「地質構造の変形」「地質構造の変形」への影響は無視できる程度 ・地表を埋積する噴出物はこれらに直接的な影響を及ぼさない	G34 G42
	・貫入	・火山性地震及び微動	○確率的・周期的【短期～長期】 ・新規火山の出現による場合は、確率的 ・既存火山の活動による場合は、周期的 ・噴火現象よりも頻度が高い。 ・マグマ噴火は必ず貫入を伴うが、噴火に至らないまま貫入のみで終わる事例もある	○短期【急激】	○地域性あり ・火山の直下及びその周辺 ・マグマの上昇率は、地域毎に異なる	○局所的～帯域 ・貫入するマグマの量による ・マグマの側方貫入のし易さや貫入方向は、地質的な応力分布の影響を受け、水平最大圧縮軸方向に伸びる。また、張力場ほど伸びやすい ・マグマの側方への移動(貫入)範囲は、噴出中心から300km程度に及んだ事例あり(2000年三宅島噴火)	○「サイト」「地震構造の変形」「熱水活動」に影響あり ・地層の物理的破壊 ・地層の物理的破壊 ・高温化	G35 G43
	・マグマ溜まりから地表付近へのマグマの上昇や側方への移動に伴う周辺地盤の破壊現象		○確率的・周期的【短期～長期】 ・新規火山の出現による場合は、確率的 ・既存火山の活動による場合は、周期的 ・発生頻度は、噴火現象よりも著しく高い(群発)	○短期【急激】	○地域性あり ・火山直下及びその周辺 ・震源の深さは構造性地震よりも浅く、深さ15～0km	○局所的～帯域 ・火山直下及びその周辺 ・1914年桜島噴火での震度V以上範囲の直径は60km程度 ・震源の分布は、火山の中心から50km程度四方に及んだ例あり(2000年三宅島噴火)	○「サイト」に影響あり(地震断層の発生) ・火山性地震の最大規模はM7.1(1914年桜島噴火) ・構造性地震と同様の影響あり。ただし、その範囲は狭い ○「地質構造の変形」への影響無視し得る程度 ・火山性地震は火山性の変形範囲の中で起き、個々の地震による変形量は火山性の変形量全体よりもはるかに小さい ○「熱水活動」への影響は無視し得る程度 ・個々の火山性地震がもたらす熱水活動の影響範囲よりも火山性の熱水活動全体の方がはるかに大きい ○「水文・水文学的変化」への影響は無視できる程度 ・個々の火山性地震がもたらす水文・水文地質学的変化よりも火山性熱水活動による水文・水文地質学的変化の方がはるかに大きい	G35 G43

事象の関連	特徴				番号
	メカニズム	現象	時間的特徴	空間的特徴	
構造運動・造山活動 ↓ 火山・マグマ活動 ↓ 地質構造の変形	マグマ溜まりでの圧力の増減や地表付近へのマグマの上昇による周辺地質構造の変形	火山性の隆起沈降と水平変位 ・ 裂かの形成	○ 離散的・周期的 [短期～長期] ・ 新規火山の出現に依存する場合 ・ 既存のマグマ供給系では噴火や貫入の発生時期に依存	○ 局所的～狭域 ・ 影響範囲は関与したマグマの圧力変化量、形状、深さに依存 ・ 半径 10km のマグマ溜まりは中心から水平 30km 以上に及ぶ ・ マグマの側方貫入による地層の変形は、火山の中心から 50km 程度遠方に及んだ例あり (2000 年三宅島噴火)	G36 G44
構造運動・造山活動 ↓ 火山・マグマ活動 ↓ 地質構造の変形 ↓ 水文学・水文地質学的変化	火山性変形が累積することによって生じた隆起・沈降による地下水帯水層の変形とこれによる地下水混合系の変化	・ 地下水涵養域を含めた帯水層規模の変化 ・ 地下水帯水層の縮小化、孤立化(隆起場) ・ 停滞水化(沈降場) ・ 地下水混合系の変化による水質変化 ・ 地下水流動量の変化	○ 離散的・周期的 [短期～長期] ・ 火山性・地質構造の変形の発生時期に依存	○ 局所的～狭域 ・ 地下水流動系への影響範囲は火山性・地質構造の変形範囲によりさらに広域 ・ 具体的な影響範囲は研究途上	G37 G45
構造運動・造山活動 ↓ 火山・マグマ活動 ↓ 地質構造の変形 ↓ 海面変化	火山性の隆起・沈降が侵食・堆積作用に変化する ・ 短期的 (数年～数 100 年) には、噴火・山体崩壊による地形変化、碎屑物供給量の増加がもたらす堆積作用の変化的な方が大きい ・ 隆が隆起沈降することにより相対的に海面が変化すること	・ 地形勾配の増加による河川侵食及び運搬作用の増加 ・ 地形勾配の減少による河川堆積作用の増加 ・ 地形勾配の増加による岩盤クリップや地すべり等のマスマスムーブメントの活発化 ・ 海面の上昇又は低下	○ 離散的・周期的 [短期～長期] ・ 火山性・地質構造の変形の発生時期に依存	○ 局所的～狭域 ・ 火山性・地質構造の変形範囲に依存	G38 G46
構造運動・造山活動 ↓ 火山・マグマ活動 ↓ 熱水活動	地下マagmaからの火山性流体・火山性ガスの供給 ・ マグマの熱による対流系の形成	・ 火山性の熱水系の形成	○ 離散的 ・ 火山の出現時期に依存	○ 局所的～狭域 ・ 強酸性熱水は火道や噴気孔周辺の極狭い範囲にのみ分布する。一方、アルカリ性熱水は火山周辺のより広い範囲に分布する	G39 G47
構造運動・造山活動 ↓ 火山・マグマ活動 ↓ 熱水活動 ↓ 水文学・水文地質学的変化	地下水帯水層や裂か系、地下水中滞留層へ、火山活動で生じた熱水が注入、混入することにより起こる	・ 地下水の熱水化 ・ 岩石-熱水反応による周辺地質の変質	○ 離散的 ・ 熱水系の発生時期に依存	○ 局所的～狭域 ・ 熱水系範囲は火山から 20-50km 以内 ・ 熱水変質地帯として広がる場合には、累積的に影響域が拡大する	G39 G47

事象の関連	メカニズムと現象				特徴			影響度	番号
	メカニズム	現象	発生時期	持続時間	空間的特徴				
					発生場所	広がり			
構造運動・造山活動 ↓ 熱水活動	・プレート運動で沈み込むプレートの内において、圧密による間隙水の絞り出し、変成作用による含水鉱物の脱水が起き、火山フロントよりも前弧側の非火山山性地域でも熱水が発生・上昇する	・深部流体由来の熱水系の形成	○連続的 [中期～長期]	○長期 [緩慢]	○地域性あり ・地下深部に沈み込んだプレート内部で普遍的に発生していると考えられるが、流体上昇経路が必要。ただしその分布は未特定	○不明 ・広域的な調査が必要	○「水文学・水文学的変化」に影響あり ・近畿地方の大規模断層系沿いで深部熱水の上昇を確認。ただし、同地方では大規模断層の遡方でも上昇を確認、他の地域では不明	G49	
構造運動・造山活動 ↓ 熱水活動 ↓ 水文学・水文学的変化	・地下水帯水層や裂か系地下水滞留層へ、深部流体が注入・混入することにより起こる	・地下水の熱水化 ・岩石-熱水反応による周辺地質の変質 ・地下水の高塩濃度化 (CO <sub>2</sub> や CH <sub>4</sub> を多量に含むようになる) ・水期/間水期サイクル	○連続的 [中期～長期]	○長期 [緩慢]	○地域性あり ・神戸市内では、浅層地下水に深部由来の有馬型熱水が混入している	○不明	○「サイト」 [「侵食と堆積」] による ・地下水帯水層の広がりによる ・注入される深部流体の量が不明	G49	
地球規模気候変動	・太陽の放射エネルギーの規則的な変動(ミランコビッチサイクル)がもたらす地球規模での気温の変化	・水期/間水期サイクル	○周期的 [中期～長期] ・水期/間水期サイクルは約 10 万年周期 ・現在は約 5000 年前の後氷期ピークを過ぎたところ、今後は次の氷期に向かって徐々に気温が低下する	○長期 [緩慢] ・現在の周期は過去 100 万年以上継続	○地域性なし ・地球全域	○広域 ・地球全域 ・変動の状況は、地域によって異なる	○「地域的・局地的気候変動」 [海面変化] に影響あり		
地球規模気候変動 ↓ 地域的・局所的気候変動	・地球規模の気候変動は、アジアモンスーン等の大陸地域やエルニーニョ現象などの太平洋地域の大気循環系の変化を介して、日本の気候に影響を与える	・気候変動 ・降水量の減少 ・蒸発散量の変化	○周期的 [中期～長期] ・水期/間水期サイクルに依存	○長期 [緩慢]	○地域性なし ・日本全体	○広域 ・日本全体	○「サイト」 [「侵食と堆積」] 水文学的・水文学的変化への影響は無視出来る程度 ・日本の平均気温は、現在比で-8度から+2~3度の範囲で変動 ・この程度の気温変化は地下地質環境に大きな影響なし ・この程度の気温変化に伴う降水量変化では洪水発生に大きな影響なし	G50	
地球規模気候変動 ↓ 海面変化	・大陸氷河の消長による海水量の増減と荷重変化による海底の隆起・沈降で汎世界的海面変化 (ユースタシー) が生じる。海面変化は、ユースタシーに局地的な構造性の隆起・沈降 (地層の変形) が加わったもの	・海面の上昇と低下	○周期的 [中期～長期] ・ユースタシーは約 10 万年周期 ・現在は約 5000 年前の後氷期高海面ピークを過ぎたところ、今後は次の氷期に向かって徐々に海面が低下していく	○長期 [緩慢] ・現在の周期は過去 100 万年以上継続	○地域性あり ・海岸部周辺 ・変動量は、地域によって異なる	○広域 ・変動の影響範囲は、地域毎の変動量と海岸部周辺の地形によって異なる	○「地質構造の変形」 [水文学・水文学的変化] 「侵食と堆積」 [地域的・局地的気候変動] に影響 ・ユースタシーの変動量は、日本周辺で 100m 前後 ・ユースタシーの昇降曲線は非対称で、後氷期の海面上昇速度は最大 1cm/年 に及ぶ、これに対し氷期の海面低下速度は一桁小さい ・海面低下期には対馬海峡が閉塞し、日本海の流れ系が激変する		
地球規模気候変動 ↓ 海面変化 ↓ 地質構造の変形	・海面の上昇・低下による荷重変化で地層が変形する	・後氷期の海面上昇で起きるハイドロアインソズ起沈降	○周期的 [中期～長期] に依存 ・ユースタシーに依存	○長期 [緩慢]	○地域性なし ・日本全体 ・内陸山間部への影響は、沿岸部よりも小さい	○広域 ・日本全体	○「水文学・水文学的変化」 「侵食と堆積」 への影響は無視出来る程度 ・海面上昇期の隆起量は数mで、ユースタシー変化量よりもはるかに少ない。	G51	

事象の関連	メカニズムと現象				特徴			番号
	メカニズム	現象	時間的特徴		空間的特徴		影響度	
			発生時期	持続時間	発生場所	広がり		
地球規模気候変動 ↓ 海面変化 ↓ 水文学・水文学・水文学的変化	海面変化による大規模かつ広域的な地下水流動系の再配置	<ul style="list-style-type: none"> <li>動水勾配の変化</li> <li>塩淡水界面の移動</li> <li>地下水系の規模の変化</li> <li>水質変化</li> <li>地下水流動量の変化</li> <li>地下水位の変化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>周期的 [中期～長期]</li> <li>ユースタタシーに依存</li> </ul>	長期 [緩慢]	<ul style="list-style-type: none"> <li>地域性なし</li> <li>日本全体</li> <li>内陸山間部への影響は、沿岸部よりも小さい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>広域</li> <li>具体的な影響範囲は研究途上</li> </ul>	G52	
地球規模気候変動 ↓ 海面変化 ↓ 侵食と堆積	陸地の侵食基面は海面を基準としており、海面の変動は基面の上下昇・低下に直結する。また、海面の変動は海面と海底の間である堆積可能空間の増減に直結する	<ul style="list-style-type: none"> <li>侵食基面の低下による侵食作用の進行と上昇による作用の鈍化</li> <li>侵食基面の低下による岩盤クラッシュや地すべり等のマスマムブメントの活発化</li> <li>堆積可能空間の増減による堆積場の移動</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>周期的 [中期～長期]</li> <li>ユースタタシーに依存</li> </ul>	長期 [緩慢]	<ul style="list-style-type: none"> <li>地域性なし</li> <li>日本全体</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>広域</li> <li>侵食作用の影響自体は、局所的な地質的影響、構造運動による地形変化や降水量変化の影響も受ける</li> </ul>	G53	
地球規模気候変動 ↓ 海面変化 ↓ 地表的・局所的気候変動	海面変化による水深変化は海水循環系を大きく変える場合があり（日本海海流系の激変）、その結果、地表的・局所的な気候に影響が表れる	<ul style="list-style-type: none"> <li>気温変動</li> <li>降水量の減少</li> <li>蒸発散量の変化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>周期的 [中期～長期]</li> <li>ユースタタシーに依存</li> </ul>	長期 [緩慢]	<ul style="list-style-type: none"> <li>地域性なし</li> <li>日本全体</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>広域</li> <li>日本全体</li> </ul>	G54	
地球規模気候変動 ↓ 海面変化 ↓ 地表的・局所的気候変動 ↓ 侵食と堆積	水期/間水期の気温・降水量の変化が河川に影響する	<ul style="list-style-type: none"> <li>河川の堆積と下刻（気候段丘の形成）</li> <li>河川の下刻による岩盤クラッシュや地すべり等のマスマムブメントの活発化</li> <li>侵食による荷重減少による裂かの形成</li> <li>堆積による荷重増加がもたらす脱成作用の進行</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>周期的 [中期～長期]</li> <li>ユースタタシーに依存</li> </ul>	長期 [緩慢]	<ul style="list-style-type: none"> <li>地域性なし</li> <li>日本全体</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>広域</li> <li>日本全体</li> <li>侵食及び堆積作用の進行程度は、局所的な地質、構造運動による地形変化や侵食基準面変化の影響も受ける</li> </ul>	G55	
地球規模気候変動 ↓ 海面変化 ↓ 地表的・局所的気候変動 ↓ 水文学・水文学・水文学的変化	地表的・局所的気候変動により降水量・蒸発散量が増減し、地下水流動量がかわり動水勾配変化が起きる	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水流動量の変化</li> <li>地下水系の規模の変化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>周期的 [中期～長期]</li> <li>ユースタタシーに依存</li> </ul>	長期 [緩慢]	<ul style="list-style-type: none"> <li>地域性なし</li> <li>日本全体</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>広域</li> <li>日本全体</li> </ul>	G54	
地球規模気候変動 ↓ 周水期現象による凍土の形成により地下水涵養が停止し地下水流動系への多様な影響が現れる	周水期現象による凍土の形成により地下水涵養が停止し地下水流動系への多様な影響が現れる	<ul style="list-style-type: none"> <li>動水勾配の変化</li> <li>海水の内陸部への侵入</li> <li>水質変化</li> <li>地下水流動量の変化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>周期的 [中期～長期]</li> <li>ユースタタシーに依存</li> </ul>	長期 [緩慢]	<ul style="list-style-type: none"> <li>地域性なし</li> <li>日本全体</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>広域</li> <li>北海道は全域</li> </ul>	G56	

事象の関連	メカニズムと現象		特徴				番号
	メカニズム	現象	時間的特徴		空間的特徴		
			発生時期	持続時間	発生場所	広がり	
構造運動・造山活動 ↓ 続成作用	地下にある未固結の堆積物が、圧密、膠着、結果化を経て固化した岩石になるまでの物理的・化学的变化過程で、変成作用との間に厳密に区別することは出来ない	・	○		○		○影響なし ・堆積作用に伴って地下で必ず起こる現象ではあるが、固化したものは地下数 100m よりも更に深い場所でも起こり、かつ堆積物の遮蔽性を高める方向に作用するので考慮の必要性は低い。また、既に固結した岩石では、問題にはならない
構造運動・造山活動 ↓ 変成作用	続成作用が起こるよりも更に地下深部の場で生じる岩石の組織構造上および鉱物組成上の変化	・	○		○		○影響なし ・地球表面部では起きないので、考慮の必要性は低い
構造運動・造山活動 ↓ 岩塩の注入褶曲作用と溶解	周囲の岩石よりも密度の低い岩塩層が、地殻内で浮力を得て上位の地層を変形・破壊させながら上昇する過程である。一方、岩塩の溶解は、塩に飽和していない地下水と岩塩の接触で起きる	・	○		○		○影響なし ・日本に岩塩層は分布しないので、考慮の必要性はない
地球規模気候変動 ↓ 局所的な氷河と氷冠の影響	氷河や氷冠の消長による荷重変化は、地殻の昇降に大きな影響を与える。また、氷河や氷冠の流動による侵食作用は、地形を大きく変更する	・	○		○		○影響なし ・日本では氷期にも一部の山岳を除いて氷河や氷冠の発達はなく、考慮の必要性はない
地球規模気候変動 ↓ 暖かい気候の影響	熱帯気候や砂漠の地域では、極端な気象パターンがあり、侵食・堆積作用や地下水流動系への多様な影響を及ぼす	・	○		○		○影響なし ・日本では、間氷期の高温期にも熱帯化や砂漠化を被っていないので、考慮の必要性はない





Radioactive Waste Management  
**Features, Events and  
Processes (FEPs) for Geologic  
Disposal of Radioactive Waste**  
An International Database  
NUCLEAR ENERGY AGENCY  
ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT

放射性廃棄物の取扱い  
放射性廃棄物の地層処分についての特徴、出来事とプロセス  
国際データベース  
OECD / NEA

**APPENDIX C**  
**GLOSSARY DEFINITIONS AND COMMENTS ATTACHED  
TO THE INTERNATIONAL FEP LIST**

付属書C  
国際FEPリストに付属する用語集、定義とコメント  
(仮訳)

The following pages are extracted from Version 1.0 of the International FEP Database.  
The FEP records are printed in classification scheme order, see Table B.2 in Appendix B. International FEP names and scheme numbers are in bold, definitions are in normal type, and comments in italics.

次からのページは、国際 FEP データベースのバージョン 1.0 から抽出されたものである。  
FEP の記録は、階層構造で記述されている (付属書 B 表 B. 2 参照)。国際 FEP 名や構成番号は太字、定義は普通字、コメントはイタリックで記述している。

## ASSESSMENT BASIS 0

Factors that the analyst will consider in determining the scope of the analysis. These may include factors related to regulatory requirements, definition of desired calculation end-points and requirements in a particular phase of assessment. Decisions at this point will affect the phenomenological scope of a particular phase of assessment, i.e. what “Physical FEPs” will be included.

“Assessment Basis” is a category in the International FEP List and is subdivided into individual FEPs.

### Impacts of concern 0.01

The long-term human health and environmental effects or risks that may arise from the disposed wastes and repository. These FEPs include health or environmental effects of concern in an assessment (what effect and to whom/what), and health or environmental effects ruled to be of no concern.

*The impact most frequently considered is the radiation dose or risk to man, often represented by the annual dose rate or risk to a member of a “critical group” of potentially most exposed individuals (see FEP 0.06).*

*Examples of other impacts that have been considered in safety assessments are increases in radiation levels in the environment, and release or concentrations of non-radiological toxic contaminants.*

### Timescales of concern 0.02

The time periods over which the disposed wastes and repository may present some significant human health or environmental hazard.

*These may correspond to the timescale over which the safety of the disposed wastes and repository is estimated or discussed. In some countries national regulations set a limit up to which quantitative assessment is required, with more qualitative arguments to demonstrate safety being sufficient at later times.*

### Spatial domain of concern 0.03

The domain over which the disposed wastes and repository may present some significant human health or environmental hazard.

*This may correspond to the spatial domain over which the safety of the disposed wastes and repository is estimated, or the domain which it is necessary to model in order to develop an understanding of the movement of contaminants and exposures.*

### Repository assumptions 0.04

The assumptions that are made in the assessment about the construction, operation, closure and administration of the repository.

*For example, most post-closure assessments make the assumption that a repository has been successfully closed, although, in practice such decisions may be delayed or the subject of uncertainty.*

### Future human action assumptions 0.05

The assumptions made in the assessment concerning general boundary conditions for assessing future human action.

*For example, it can be expected that human technology and society will develop over the timescales of relevance for repository safety assessment, however, this development is unpredictable. Therefore, it is usual to make some assumptions in order to constrain the range of future human activities that are considered. A common assumption is that only present-day technologies, or technologies practised in the past will be considered.*

## 0 評価の基礎

アナリストが解析の範囲を決定する際に考慮する要因。これは、規制要件、必要となる計算の終了点の定義、評価上の特定の段階における要件に関するものを含む。この点での決定は、評価上の特定の段階における現象論的な範囲、すなわち「物理的 FEP」に含まれる範囲に影響を及ぼす。

「評価の基礎」とは、国際 FEP リストのカテゴリーの1つであり、個別の FEP に細分化される。

### 0.01 考慮する影響

処分された廃棄体や処分場から生じ得る、長期にわたる人の健康と環境に対する影響、またはリスク。これらの FEP は、評価上重要と考えられる健康または環境に関する影響（誰に対する、または何に対する何の影響）と、重要性が指摘されない健康または環境の影響を含む。

最もしばしば考慮される影響は、人に対する放射線被ばく又はリスクである。それは、潜在的に最も被ばくした個人の「決定グループ」のメンバーに対する年被ばく線量又は年リスクにより表されることが多い。(FEP0.06 参照) 安全評価上考慮されてきた他の影響の例は、環境における放射線レベルの増加と非放射性有毒物の漏洩と濃縮である。

### 0.02 考慮する時間スケール

処分された廃棄体と処分場が人の健康と環境に対して重大な危険をもたらす可能性がある期間。

これらは、処分された廃棄体と処分場の安全性が評価され、議論される時間尺度に対応するかもしれない。いくつかの国において、国の規制は、後に十分安全が確保されることを実証するための質的な議論と共に、定量的な評価が要求される場所までの制限を設けている。

### 0.03 考慮する空間領域

処分された廃棄体と処分場が人の健康と環境に対して重大な危険をもたらす可能性がある領域。

これは、処分された廃棄体と処分場の安全性の評価において対象とする空間領域、又は汚染物質の移行と被ばくに関する知識を明確にするためにモデル化が必要な領域に対応するかもしれない。

### 0.04 処分場に関する仮定

建設、操業、閉鎖及び処分場の管理に関する評価上の仮定。

例えば、たいていの閉鎖後の評価では、実際は決定行為が延期され、また不確実なものであるにも関わらず、処分場が計画通りに閉鎖されたという仮定を設定する。

### 0.05 将来の人間の行為に関する仮定

将来の人の行為を評価するために必要と考えられる一般的な境界条件に関する評価上の仮定。

例えば、処分場の安全評価に関連した時間尺度にわたって人の技術と社会が発展することを期待することができる。しかしながら、このような発展は、予測不可能である。従って、考えられる将来の人間活動の幅を制限するために、いくらかの仮定を置くことが一般的である。一般的な仮定とは、現代の技術、または過去に行われた技術だけが考慮されることである。

## Future human behaviour (target group) assumptions 0.06

The assumptions made concerning potentially exposed individuals or population groups that are considered in the assessment.

*Doses or risks are usually estimated for individuals or groups (critical groups) thought to be representative of the individuals or population groups that may be at highest risk or receive the highest doses as a result of the disposed wastes and repository. This is the accepted approach for assessing radiological risk or dose to members of the public resulting from a source of radioactive release to the environment. To assess the doses or risks at times in the far future, when the characteristics of potentially exposed populations are unknown a hypothetical critical group, or groups, is/are usually defined.*

## Dose response assumptions 0.07

Those assumptions made in an assessment in order to convert received dose to a measure of risk to an individual or population.

*Usually this will refer to individual human dose response, e.g. by a dose-risk conversion factor where the factor is the probability of a specified health effect per unit of radiation exposure. If other organisms are considered then a risk to individual organisms or a species might be considered.*

*The variation of a given response or human health effect (e.g. cancer incidence, cancer mortality) with the amount of radiation dose an individual or a group of individuals received is referred to as the dose-response relation. It is not possible to determine the shape of the dose response curve at low doses with any precision, because the incidence of health effects is very low. A linear dose-response relation with no dose threshold is generally assumed to be cautious.*

## Aims of the assessment 0.08

The purpose for which the assessment is being undertaken.

*For example, it may be to demonstrate the feasibility of a disposal concept (concept assessment), or for the purposes of site selection, or for the demonstration of regulatory compliance. The aim of the assessment is likely to depend on the stage in the repository development project at which the assessment is carried out and may also affect the scope of assessment.*

## Regulatory requirements and exclusions 0.09

The specific terms or conditions in the national regulations or guidance relating to repository post closure safety assessment.

*Regulatory requirements and exclusions may be expressed in terms of release, dose or risk limits or targets to individuals or populations effective over a specified timescale; they may also make demands about procedures following closure of the repository. In some regulations, the long-term scenarios to be assessed are specified, or some scenarios or events are specifically ruled out of consideration.*

## Model and data issues 0.10

General (i.e. methodological) issues affecting the assessment modelling process and use of data.

*Examples of general model and data issues are:*

- treatment of uncertainty (see below);*
- method of handling site data;*
- model and data reduction/simplification.*

### 0.06 将来の人間のふるまい(対象グループ)に関する仮定

評価対象と考えられる潜在的に被ばくする個人又は特定のグループに関して置かれる仮定。

被ばく線量やリスクは、通常、処分された廃棄体や処分場からもたらされる最も高いリスクや被ばくを被る個人や特定のグループに代表されるとして、その個人やグループ(決定グループ)に対して評価される。これは、環境中に漏洩した放射線源に由来する、公衆のメンバーに対する放射線リスクや被ばく線量を評価するために、受け入れられたアプローチである。将来における被ばく線量やリスクを評価するため、潜在的に被ばくする人口の特性が知られていなくとも、通常、仮定された決定グループが定義される。

### 0.07 被ばく線量に関する仮定

個人や集団に対する被ばく線量をリスクに換算するために評価上置かれる仮定。

通常、これは、例えば、単位放射線被ばく当たりの特定された健康影響の確率である線量-リスク換算係数による、個人線量の生体反応を指している。もし、その場合人体組織への影響が考慮されるなら、個々の組織又は種に対するリスクが考慮されるかもしれない。

個人又はグループに対する被ばく線量の累計によって、発生する生体反応又は人の健康への影響(例えば、ガン発生率、ガン死亡率)は変化し、その変化は、被ばく線量と生体反応の関係により説明される。低線量下の線量と生体反応との関係を示すカーブを精度よく決定することは可能ではない。これは、低線量の条件で健康への影響が現れる発生率が極めて低いからである。一般には、保守性を考慮して、しきい値のない直線関係が仮定される。

### 0.08 評価の目的

評価がなされる目的。

例えば、それは、処分概念の可能性を実証するため(概念評価)、サイト選定の目的のため、又は規制への適合性を実証するためかもしれない。評価の目的は、評価が実施される処分場の開発プロジェクトの段階に最も依存し、また評価の範囲によって異なる。

### 0.09 規制の要件と除外

処分場閉鎖後の安全評価に関連する国の規制又は指針における特定の用語又は条件。

規制要件と除外は、核種の漏洩、線量限度又はリスク限度、又は特定の時間スケールに亘り個人又はグループに対して有効な指標によって表現される；また、これらは、処分場閉鎖後の手続きを必要としてもよい。規制において、評価すべき長期シナリオは特定され、又は、いくつかのシナリオ又は事象は特別に検討から除外される。

### 0.10 モデルとデータに関する事項

評価のモデル化及びデータの使用に関する一般的(すなわち方法論的)事項。

一般的なモデルとデータに関する事項の例；

- ・不確実性の処理(以下を参照)
- ・サイトデータの取扱方法
- ・モデル、データの整理、簡易化

## EXTERNAL FACTORS 1

FEPs with causes or origin outside the disposal system domain, i.e. natural or human factors of a more global nature and their immediate effects. Included in this category are decisions related to repository design, operation and closure since these are outside the temporal boundary of the disposal system domain for post-closure assessment.

“External Factors” is a category in the International FEP List and is divided into sub-categories.

### REPOSITORY ISSUES 1.1

Decisions on designs and waste allocation, and also events related to site investigation, operations and closure.

“Repository Issues” is a sub-category in the International FEP List and is divided into individual FEPs.

#### Site investigation 1.1.01

FEPs related to the investigations that are carried out at a potential repository site in order to characterise the site both prior to repository excavation and during construction and operation.

*Site investigation activities provide detailed site-specific data that characterise the site, provide performance assessment data and establish baseline conditions.*

#### Excavation/construction 1.1.02

FEPs related to the excavation of shafts, tunnels, disposal galleries, silos etc. of a repository, the stabilisation of these openings and installation/assembly of structural elements.

*This includes rock bolting, shotcrete, grouting construction of tunnel/shaft linings, drain layers and installation of services and waste handling components.*

#### Emplacement of wastes and backfilling 1.1.03

FEPs related to the placing of wastes (usually in containers) at their final position within the repository and placing of buffer and/of backfill materials.

*This includes methods and schedule of emplacement.*

#### Closure and repository sealing 1.1.04

FEPs related to the cessation of waste disposal operations at a site and the backfilling and sealing of access tunnels and shafts.

*The intention of repository sealing is to prevent human access to the wastes. Sealing should also promote a return to pre-excavation hydrogeological conditions. Individual sections of a repository may be closed in sequence, but closure usually refers to final closure of the whole repository, and will probably include removal of surface installations. The schedule and procedure for sealing and closure may need to be considered in the assessment.*

#### Records and markers, repository 1.1.05

FEPs related to the retention of records of the content and nature of a repository after closure and also the placing of permanent markers at or near the site.

*It is expected that records will be kept to allow future generations to recall the existence and nature of the repository following closure. In some countries, the use of site markers has been proposed where the intention is that the location and nature of the repository might be recalled even in the event of a lapse of present-day administrative controls.*



## 1 外的要因

処分システム領域の外側にある原因又は起源に関する FEP, すなわち, より包括的な性質の自然又は人的な要因及びそれらの直接的な影響. 処分場の設計, 操業, 閉鎖に関連する決定は, 閉鎖後評価のための処分システム領域の時間的境界の外側にあるため, このカテゴリーに含まれる.

「外的要因」は, 国際 FEP リストのカテゴリーの1つであり, サブカテゴリーに細分化される.

### 1.1 処分場に関する事項

設計及び廃棄体配置の決定や, サイト調査, 操業及び閉鎖に関連する事象.

「処分場に関する事項」は, 国際 FEP リストのサブカテゴリーの1つであり, 個別の FEP に細分化される.

#### 1.1.01 サイト調査

処分場の掘削前や, 建設及び操業の間中に, サイトを特性付けるために, 可能性のある処分場のサイトで実施される調査に関する FEP である.

サイト調査活動は, サイトを特性付ける詳細なサイト固有のデータを提供し, 性能評価用のデータを提供し, ベースライン状態を設定する.

#### 1.1.02 掘削/建設

処分場の立坑, トンネル, 処分坑道, サイロ等の掘削, それらの穴あけと構造体の取り付け・組み立ての安定性に関する FEP である.

これには, 岩のボルト締め付け, 吹付けコンクリート, グラウティング (割れ目へのモルタルの塗り込み), トンネル/立坑の建設, 排水層, 廃棄体の搬入及び取扱施設の定置を含む.

#### 1.1.03 廃棄体の定置と埋め戻し

廃棄体 (通例, コンテナ内) の処分場内の最終位置への定置と, 緩衝材埋め戻し材の定置に関する FEP である.

これには, 定置の方法とスケジュールを含む.

#### 1.1.04 処分場の閉鎖と封入

サイトにおける廃棄物処分の操業の終了と, アクセストンネル及び立坑の埋め戻し及び封入に関する FEP である.

処分場の封入の目的は, 人の廃棄体に対する接近を防止することである. また, 封入により, サイトの水理学的条件が掘削する前の状態へより早く回復する. 処分場の個々の区域は, 次々に閉鎖されるかもしれないが, 通例すべての処分場の最終閉鎖を閉鎖と呼び, おそらく地上設備の撤去が含まれる. 封入と閉鎖のスケジュールと手段は, 評価において考慮される必要がある.

#### 1.1.05 記録と目印, 処分場

閉鎖後の処分場の内容物と特性に関する記録保持と, サイト又はサイト近傍に置かれた永久的な目印の記録保持に関する FEP である.

将来世代に閉鎖後の処分場の存在と特性を認識させるため, それらに関する記録が維持されることが期待されている. いくつかの国では, サイト目印の使用は, 現行の規制管理が維持されなくとも, 処分場の位置と特性が認識できることを目的に提案されている.

### Waste allocation 1.1.06

FEPs related to the choices on allocation of wastes to the repository, including waste type(s) and amount(s).

*The waste type and waste allocation is established in a general way in the repository disposal concept. There may, however, be a number of options concerning these factors. Final decisions may not be made until the repository is operating and will be subject to regulation. In safety assessments, assumptions may need to be made about future waste arisings and future waste allocation strategies.*

### Repository design 1.1.07

FEPs related to the design of the repository including both the safety concept, i.e. the general features of design and how they are expected to lead to a satisfactory performance, and the more detailed engineering specification for excavation, construction and operation.

*The repository design and construction is established in a general way in the disposal concept for the repository which is based on expected host rock characteristics, waste and backfill characteristics, construction technology, and economics. There may, nevertheless, be a range of engineering design and construction options still open. As the repository project proceeds, and more detailed site-specific information becomes available, the range of options may be constrained and decisions will be made. At any stage, repository safety assessments may only analyse a subset of the total range of options.*

### Quality control 1.1.08

FEPs related to quality assurance and control procedures and tests during the design, construction and operation of the repository, as well as the manufacture of the waste forms, containers and engineered features.

*It can be expected that a range of quality control measures will be applied during construction and operation of the repository, as well as to the manufacture of the waste forms, containers etc. In an assessment these may be invoked to avoid analysis of situations which, it is expected, can be prevented by quality control. There may be specific regulations governing quality control procedures, objectives and criteria.*

### Schedule and planning 1.1.09

FEPs related to the sequence of events and activities occurring during repository excavation, construction, waste emplacement and sealing.

*Relevant events may include phased excavation of caverns and emplacement of wastes, backfilling, sealing and closure of sections of the repository after wastes are emplaced, and monitoring activities to provide data on the transient behaviour of the system or to provide input to the final assessment. The sequence of events and time between events may have implications for long term performance, e.g. decline of activity and heat production from the wastes, material degradation, chemical and hydraulic changes during a prolonged "open" phase.*

### Administrative control, repository site 1.1.10

FEPs related to measures to control events at or around the repository site both during the operational period and after closure.

*The responsibility for administrative control of the site before closure of the repository during the construction and operational phases, and subsequently following closure of the repository may not be the same.*

*Furthermore, the type of administrative control may vary depending on the stage in the repository lifetime.*

### 1.1.06 廃棄体の配置

廃棄体の種類と総量を含む、処分場への廃棄体の配置の選択に関する FEP である。

廃棄体の種類と配置は、埋設処分概念での一般的な方法で決定される。しかしながら、これらの要因に関係するいくつかの選択肢が存在する。最終決定は、処分場が操業されるまでなされず、これは規制の対象となるだろう。安全評価では、将来の廃棄体発生量と廃棄体配置の設計についての仮定が必要とされるかもしれない。

### 1.1.07 処分場の設計

安全性の概念、すなわち設計の一般的特徴及びそれらが十分な性能であることを予測する方法と、掘削、建設や操業に対するより詳細な技術的な指針を含む、処分場の設計に関する FEP である。

処分場の設計と建設は、期待される母岩の特性、廃棄体と埋め戻し材の特性、建設技術と経済性を基本とした処分概念における一般的な方法で決定される。それにも係わらず、工学的な設計と建設の選択肢の範囲は、まだ未定であるかもしれない。処分場プロジェクトが進捗し、より詳細なサイト固有の情報が入手できるようになるにつれ、選択肢の範囲が限定され、決定がなされる。いずれの段階においても、処分場の安全評価は、選択肢のすべての範囲における部分集合に対する解析のみである。

### 1.1.08 品質管理

廃棄体、コンテナ及び人工バリアの製造だけでなく、処分場の設計、建設、操業中における、品質保証と管理のための手段と試験に関する FEP である。

廃棄体、コンテナ等の製造の他に、処分場の建設と操業の期間中に、ある種の品質管理が適用されることが期待できる。また、こうして実施される品質管理は、品質管理によって防止できる状態の解析を回避することが期待できる。品質管理に関する手段、対象、基準を決定する特別の規制があるかもしれない。

### 1.1.09 スケジュールと計画

処分場の掘削、建設、廃棄体の定置と封入の期間中に起こる事象と活動のシーケンスに関する FEP である。

関連する事象には、段階分けされた空洞の掘削、廃棄体の定置、埋め戻し、封入、廃棄体定置後の処分場の各区域の閉鎖、システム性能の経時的変化に関する情報を提供し又は最終的な評価の入力情報を提供するためのモニタリング活動が含まれる。事象のシーケンス及び事象間の時間は、例えば、廃棄体からのアクティビティーと発熱の減衰、材料の変質、長期的な開放の間の化学的及び水理学的変化といった長期的な性能と密接な関係があるだろう。

### 1.1.10 処分場の管理

操業期間及び閉鎖後において、処分場及びその周辺における事象を管理するための手段に関する FEP である。

建設及び操業段階の処分場閉鎖前サイトの行政上の管理の責任は、その後の処分場の閉鎖後とでは、同様ではない。さらに、行政上の管理の形態は、処分場の存在期間における段階に依存して変化する。

### Monitoring of repository 1.1.11

FEPs related to any monitoring that is carried out during operations or following closure of sections of, or the total, repository. This includes monitoring for operational safety and also monitoring of parameters related to the long-term safety and performance.

*The extent and requirement for such monitoring activities may be determined by repository design and geological setting, regulations and public pressure.*

### Accidents and unplanned events 1.1.12

FEPs related to accidents and unplanned events during excavation, construction, waste emplacement and closure which might have an impact on long-term performance or safety.

*Accidents are events that are outside the range of normal operations although the possibility that certain types of accident may occur should be anticipated in repository operational planning. Unplanned events include accidents but could also include deliberate deviations from operational plans, e.g. in response to an accident, unexpected geological event or unexpected waste arising during operations.*

### Retrievability 1.1.13

FEPs related to any special design, emplacement, operational or administrative measures that might be applied or considered in order to enable or ease retrieval of wastes.

*Designs may specifically allow for retrieval or rule it out. In some cases, an interim period might be planned, between waste emplacement and final repository sealing, during which time retrieval is possible.*

## GEOLOGICAL PROCESSES AND EFFECTS 1.2

Processes arising from the wider geological setting and long-term processes.

“Geological Processes and Effects” is a sub-category in the International FEP List and is divided into individual FEPs.

### Tectonic movements and orogeny 1.2.01

Tectonic movements are movements of rock masses as a result of movements of the Earth's crustal plates; regionally the surface rocks respond to the underlying movements of plates. Orogeny is the process or period of mountain-building, often occurring over periods of hundreds of millions of years.

*Orogenies may be associated with metamorphism, plutonism, and plastic deformation in deeper layers as well as thrusting, faulting and folding in the lithosphere which is the name given to the rigid, outermost layer of the earth, made up predominantly of solid rocks.*

### Deformation, elastic, plastic or brittle 1.2.02

FEPs related to the physical deformation of geological structures in response to geological forces. This includes faulting, fracturing, extrusion and compression of rocks.

*A fault is a fracture in the Earth's crust accompanied by displacement of one side of the fracture relative to the other. Fractures may be caused by compressional or tensional forces in the Earth's crust. Such forces may result in the activation of existing faults and, less likely, the generation of new faults.*

#### 1.1.11 処分場のモニタリング

操業又は処分場の各区域又は全域の閉鎖の期間中に実施されるモニタリングに関する FEP である。これは、操業の安全のためのモニタリング及び長期的な安全性と性能に関するパラメータのモニタリングを含む。そのようなモニタリング活動の範囲と要件は、処分場の設計と地質学的条件、規制と国民の要請によって決定される。

#### 1.1.12 事故と予期しえない出来事

長期間の性能及び安全に影響を及ぼすかもしれない掘削、建設、廃棄体の定置及び閉鎖の期間中の事故と予期しえない出来事に関する FEP である。

事故は、定常操業の範囲外にある出来事であるが、起こるかもしれないあるタイプの事故の可能性は、処分場の操業計画において想定されるべきである。予期しえない出来事は、事故及び操業計画からの故意の逸脱（例えば、事故、予期しない地質学的出来事、予期しない操業中の廃棄物の発生）を含む。

#### 1.1.13 回収可能性

廃棄体の回収を可能にし又は容易にするために、適用される又は考慮されるであろう、いくつかの特別な設計、定置、運転上の又は行政上の手段に関する FEP。

設計は、回収を可能にする又はそれを除外することを特別に可能にする。いくつかのケースでは、廃棄体定置と処分場の最終封入の間に、回収が可能な期間として、暫定的な期間が計画されるであろう。

### 1.2 地質プロセスとその影響

広範な地質環境から生じる長期的プロセス。

「地質プロセスとその影響」は、国際 FEP リストの 1 つのサブカテゴリーであり、個別の FEP に細分化される。

#### 1.2.01 構造運動と造山運動

構造運動とは、地球表層のプレートが動く結果として、岩石の塊が動くことである。局地的に言えば、地下のプレートの動きに連動して地表の岩石が動くことである。造山運動は、山脈ができるプロセスまたは期間のことであり、造山運動は数億年以上にわたって起こることも珍しくない。

造山運動は、深い地層中で変成作用・火成作用・塑性変形作用を伴ったり、リソスフェア中での衝上・断層・褶曲を伴ったりする。リソスフェアは、ほとんどが固体の岩石から出来ている、地球の硬い最外層の名称である。

#### 1.2.02 弾性、塑性または脆性的変形

地球の営力による地質構造の物理的変形に関する FEP である。これは、岩石の断層変位、割れ、引張り、圧縮を含む。

断層とは、両側の岩盤においてずれ変位を伴う地殻中の割れ目のことである。割れ目は、地殻中の圧縮や引張りが原因で発生する。そのような力は、既存の断層を動かしたり、まれではあるが新たな断層を作ったりする。

### Seismicity 1.2.03

FEPs related to seismic events and also the potential for seismic events. A seismic event is caused by rapid relative movements within the Earth's crust usually along existing faults or geological interfaces. The accompanying release of energy may result in ground movement and/or rupture, e.g. earthquakes.

*Seismic events may result in changes in the physical properties of rocks due to stress changes and induced hydrological changes. Seismic events are most common in tectonically active or volcanically active regions at crustal plate margins. The seismic waves that are generated by a tectonic or volcanic disturbance of the ocean floor may result in a giant sea wave, known as a tsunami.*

### Volcanic and magmatic activity 1.2.04

Magma is molten, mobile rock material, generated below the Earth's crust, which gives rise to igneous rocks when solidified. Magmatic activity occurs when there is intrusion of magma into the crust. A volcano is a vent or fissure in the Earth's surface through which molten or part-molten materials (lava) may flow, and ash and hot gases be expelled.

*The high temperatures and pressures associated with volcanic and magmatic activity may result in permanent changes in the surrounding rocks; this process is referred to as metamorphism but is not confined to volcanic and magmatic activity (see FEP 1.2.05).*

### Metamorphism 1.2.05

The processes by which rocks are changed by the action of heat ( $T > 200$  C) and pressure at great depths (usually several kilometers) beneath the Earth's surface or in the vicinity of magmatic activity.

*Metamorphic processes are unlikely to be important at typical mined repository depths, but past metamorphic history of a host rock may be very important to understanding its present-day characteristics.*

### Hydrothermal activity 1.2.06

FEPs associated with high temperature groundwaters, including processes such as density-driven groundwater flow and hydrothermal alteration of minerals in the rocks through which the high temperature groundwater flows.

*Groundwater temperature is determined by the large-scale geological and petrophysical properties of the rock formations (e.g. radiogenic heat formation, thermal conductivity), as well as the hydrogeological characteristics (e.g. hydraulic conductivity) of the rock.*

### Erosion and sedimentation 1.2.07

FEPs related the large scale (geological) removal and accumulation of rocks and sediments, with associated changes in topography and geological/hydrogeological conditions of the repository host rock.

*Compare FEP 2.3.12 which is concerned with more local processes over shorter periods of time.*

### Diagenesis 1.2.08

The processes by which deposited sediments at or near the Earth's surface are formed into rocks by compaction, cementation and crystallisation, i.e. under conditions of temperature and pressure normal to the upper few kilometres of the earth's crust.

### 1.2.03 地震活動

地震活動あるいは地震活動の可能性に関する FEP である。地震活動は、地球表層での急激で相対的な動きが原因で発生し、この動きは、通常、既存の断層や地質境界に沿って発生する。これに伴って開放されるエネルギーは、地面の動きや時には地表のずれ破壊として現れる。例えば地震である。

地震活動は、岩石の物理的性質を変化させる。これは応力や地下水の状態が変化するからである。地震活動がもっとも頻繁に発生するのは、プレート境界の構造運動や火山活動が活発な地域である。構造運動や火山活動が海底に影響を与えて発生する地震波は、巨大な波（津波）を海にもたらす。

### 1.2.04 火山・マグマ活動

マグマとは、地球表層下で発生する溶けた流動性のある岩石物質である。このマグマが固まると火成岩になる。マグマ活動が起こるのは、マグマが地球表層部に貫入してきたときである。溶融あるいは部分的に溶融した物質（溶岩）が通る火道あるいは割れ目が地表に現れたものが火山であり、火山からは火山灰や熱いガスが放出される。

火山・マグマ活動に伴う高温高圧は、周囲の岩石に永久に残る変化をもたらす。この過程を変成作用と言うが、変成作用は火山・マグマ活動だけに伴うとは限らない。（FEP1.2.05 参照）

### 1.2.05 変成作用

地下深い場所（通常数 km）またはマグマ活動の近くにおいて、熱（ $T > 200^{\circ}\text{C}$ ）や圧力により岩石が変化するプロセスである。

変成作用が、典型的な処分場の深さで重要になることは考えにくいだが、母岩の過去の変成作用の歴史は、現在の母岩の特性を理解する上で大変重要であろう。

### 1.2.06 熱水活動

高温の地下水に関する FEP であり、地下水の密度差によって起こる地下水流動、あるいは高温の地下水が岩石中を流れることによって起こる鉱物の熱水変質などのプロセスを含む。

地下水の温度は、岩石の水文地質学的特性（例えば、透水性）だけでなく、岩層の広域的な地質学的・岩石物理学的性質（例えば、放射能による熱の発生、熱伝導）によって決まる。

### 1.2.07 侵食と堆積

大規模な（地質学的）スケールでの岩石や堆積物の除去や集積に関する FEP であり、地形の変化や処分場の母岩の地質学的・水文地質学的条件の変化に関する。

FEP2.3.12 と比較せよ。その FEP はもっと短期的・局地的なプロセスに関する。

### 1.2.08 続成作用

地表あるいは地表近くにある堆積物が、圧密・セメント作用・結晶化により岩石に変化するプロセスであり、それは、地下 2-3km までに普通にある温度・圧力下で起こる。

### Salt diapirism and dissolution 1.2.09

The large scale evolution of salt formations. Diapirism is the lateral or vertical intrusion or upwelling of either buoyant or non-buoyant rock, into overlying strata (the overburden) from a source layer. Dissolution of the salt may occur where the evolving salt formation is in contact with groundwaters with salt content below saturation.

*Diapirism is most commonly associated with salt formations where a salt diapir comprises a mass of salt that has flowed in a ductile manner from a source layer and pierces or intrudes into the over-lying rocks. The term can also be applied to magmatic or migmatic intrusion.*

### Hydrological/hydrogeological response to geological changes 1.2.10

FEPs arising from large-scale geological changes. These could include changes of hydrological boundary conditions due to effects of erosion on topography, and changes of hydraulic properties of geological units due to changes in rock stress or fault movements.

*In and below low-permeability geological formations, hydrogeological conditions may evolve very slowly and often reflect past geological conditions, i.e. be in a state of disequilibrium.*

## CLIMATIC PROCESSES AND EFFECTS 1.3

Processes related to global climate change and consequent regional effects.

“Climatic Processes and Effects” is a sub-category in the International FEP List and is divided into individual FEPs.

### Climate change, global 1.3.01

FEPs related to the possible future, and evidence for past, long term change of global climate. This is distinct from resulting changes that may occur at specific locations according to their regional setting and also climate fluctuations, c.f. FEP 1.3.02.

The last two million years of the Quaternary have been characterised by glacial/interglacial cycling.

*According to the Milankovitch Theory, the Quaternary glacial/interglacial cycles are caused by long term changes in seasonal and latitudinal distribution of incoming solar radiation which are due to the periodic variations of the Earth's orbit about the Sun (Milankovitch cycles). The direct effects are magnified by factors such as changes in ice, vegetation and cloud cover, and atmospheric composition.*

### Climate change, regional and local 1.3.02

FEPs related to the possible future changes, and evidence for past changes, of climate at a repository site. This is likely to occur in response to global climate change, but the changes will be specific to situation, and may include shorter term fluctuations, c.f. FEP 1.3.01.

*Climate is characterised by a range of factors including temperature, precipitation and pressure as well as other components of the climate system such as oceans, ice and snow, biota and the land surface. The Earth's climate varies by location and for convenience broad climate types have been distinguished in assessments, e.g. tropical, savannah, mediterranean, temperate, boreal and tundra. Climatic changes lasting only a few decades are referred to as climatic fluctuations. These are unpredictable at the current state of knowledge although historical evidence indicates the degree of past fluctuations.*

### Sea level change 1.3.03

FEPs related to changes in sea level which may occur as a result of global (eustatic) change and regional geological change, e.g. isostatic movements.

*The component of sea-level change involving the interchange of water between land ice and the sea is referred to as eustatic change. As ice sheets melt so the ocean volume increases and sea levels rise. Sea level at a given location will also be affected by vertical movement of the land mass, e.g. depression and rebound due to glacial loading and unloading, referred to as isostatic change.*



### 1.2.09 岩塩のダイアピル作用と溶解

岩塩層の大規模な発達過程。ダイアピル作用とは、浮力をもつまたは浮力をもたない岩石が、元の位置から上の岩層中に、水平あるいは垂直に貫入したり上昇したりする作用である。岩塩の溶解が起こるのは、塩に飽和していない地下水と流動する岩塩が接する場所である。

ダイアピル作用がもっともよく見られるのは岩塩層であり、そこでは、塩塊がダイアピルを形成しており、この塩塊は、元の層から形状を変えて流動し、上にある岩層に貫入する。ダイアピルは、マグマやミグマタイトの貫入にも使う用語である。

### 1.2.10 地質の変化に伴う水文学的／水文地質学的変化

広域的な地質変化が引き起こした現象に関する FEP である。これらは、地形学的な侵食による水文学的な境界条件の変化や、岩石の応力や断層の動きの変化による地質単元の水理学的性質の変化を含む。

低透水性の地層の中あるいはその下の地層では、水文地質学的条件が非常にゆっくり変化しており、しばしば過去の地質条件を反映している。例えば、非平衡状態にあることである。

## 1.3 気候プロセスとその影響

大規模な気候変動に関連するプロセスとその結果として生ずる影響。

「気候プロセスとその影響」は、国際 FEP リストの 1 つのサブカテゴリーであり、個別の FEP に細分化される。

### 1.3.01 地球規模の気候変動

地球規模の長期的な気候変動の、起こりえる将来の状態又は過去の証拠に関する FEP である。地域的な状況により特定地域で起こった、気候のゆらぎや短期的な気象変化は含まない。

第四紀の過去 200 万年間は、氷河期と間氷期を繰り返すサイクルとして特徴づけられる。ミランコビッチ理論によると、第四紀の氷河期・間氷期のサイクルは、入射太陽光の季節的・緯度的な分布の中で起こる長期的な変動が原因とされており、これらの変動の原因は、太陽を回る地球の軌道が周期的に変動するためだとされている(ミランコビッチサイクル)。この影響は、氷・植物・雲の面積や大気の組成のような要因によって増幅される。

### 1.3.02 地域的及び局所的な気候変動

処分場における、将来あり得る気候変動および過去の変動の証拠に関する FEP である。これは地球規模の気候変動に伴っても起こると考えられるが、処分場における気候変動はその場所特有のものであり、この FEP には短期的変動も含む。FEP1.3.01 を参照。

気候は、温度・降水量・気圧など様々な要素で特徴づけられる。また、大洋・雪氷・生物相・地表のような、気候システムの構成物によっても特徴づけられる。地球の気候は、場所によって異なり、評価において便宜的に大まかな気候のタイプに分類されている。例えば、熱帯、サバンナ、地中海性、温帯、寒帯、ツンドラなどである。20～30 年しか続かない気候変動は、気候のゆらぎと言う。これらは現在の科学では予測できないが、歴史的な証拠から過去のゆらぎの程度はわかる。

### 1.3.03 海面変化

海面の変化に関する FEP であり、地球規模の(ユースタティック)変動と、局地的な地質変動によるアイソスタティックなものがある。

陸の氷と海との間での水の移動による海面変化は、ユースタティックと言う。氷床が溶けると、海水量が増えて海面が上昇する。特定地域の海面は、陸の垂直方向の動きの影響も受ける。例えば、氷河の荷重の付加や除去に伴う陸地の下降や上昇は、アイソスタティックな変化である。

### Periglacial effects 1.3.04

FEPs related to the physical processes and associated landforms in cold but ice-sheet-free environments.

*An important characteristic of periglacial environments is the seasonal change from winter freezing to summer thaw with large water movements and potential for erosion. The frozen subsoils are referred to as permafrost.*

*Meltwater of the seasonal thaw is unable to percolate downwards due to permafrost and saturates the surface materials, this can result in a mass movement called solifluction (literally soil-flow). Permafrost layers may isolate the deep hydrological regime from surface hydrology, or flow may be focused at tliks (localised unfrozen zones, e.g. under lakes, large rivers or at regions of groundwater discharge).*

### Glacial and ice sheet effects, local 1.3.05

FEPs related to the effects of glaciers and ice sheets within the region of a repository, e.g. changes in the geomorphology, erosion, meltwater and hydraulic effects. This is distinct from the effect of large ice masses on global and regional climate, c.f. FEPs 1.3.01, 1.3.02.

*Erosional processes (abrasion, overdeepening) associated with glacial action, especially advancing glaciers and ice sheets, and with glacial meltwaters beneath the ice mass and at the margins, can lead to morphological changes in the environment e.g. U-shaped valleys, hanging valleys, fjords and drumlins. Depositional features associated with glaciers and ice sheets include moraines and eskers. The pressure of the ice mass on the landscape may result in significant hydrogeological effects and even depression of the regional crustal plate.*

### Warm climate effects (tropical and desert) 1.3.06

FEPs related to warm tropical and desert climates, including seasonal effects, and meteorological and geomorphological effects special to these climates.

*Regions with a tropical climate may experience extreme weather patterns (monsoons, hurricanes), that could result in flooding, storm surges, high winds etc. with implications for erosion and hydrology. The high temperatures and humidity associated with tropical climates result in rapid biological degradation and soils are generally thin. In arid climates, total rainfall, erosion and recharge may be dominated by infrequent storm events.*

### Hydrological/hydrogeological response to climate changes 1.3.07

FEPs related to changes in hydrology and hydrogeology, e.g. recharge, sediment load and seasonality, in response to climate change in a region.

*The hydrology and hydrogeology of a region is closely coupled to climate. Climate controls the amount of precipitation and evaporation, seasonal ice cover, and thus the soil water balance, extent of soil saturation, surface runoff and groundwater recharge. Vegetation and human actions may modify these responses.*

### Ecological response to climate changes 1.3.08

FEPs related to changes in ecology, e.g. vegetation, plant and animal populations, in response to climate change in a region.

*The ecology of an environment is linked to climate. Ecological adaptation has allowed flora and fauna to survive and exploit even the most hostile of environments. For example, cacti have evolved to survive extreme heat and desiccation of the desert environment, and certain plant species complete their entire lifecycle over very short time periods following rare rain events in the desert. Some tree and plant species have evolved to survive natural events such as forest fires, and may require them to complete their lifecycle.*

#### 1.3.04 周氷河現象の影響

寒冷であるが氷床のない環境における物理的プロセスやそれに付随する地形に関する FEP である。

周氷河現象の重要な特性は、冬期の氷結から夏期の融解に至る季節変動であり、大量の水の移動や侵食が起こる可能性を伴うことである。氷結した下層土は永久凍土層と呼ばれる。季節の変わり目に氷が溶けてできた水は、永久凍土層があるために下部に浸透せずに、表層の土壌は水で飽和状態になる。この結果、ソリフラクション（流土）と呼ばれるマスマーブメントが発生する。永久凍土層があると、深部の水理領域は表面の水理領域から切り離される、深部の地下水は流れてタリクへ集中する。（タリクとは、局地的に凍っていない場所を言う。例えば、湖や大きな川の下、あるいは地下水が湧き出ている場所である）

#### 1.3.05 局所的な氷河と氷床の影響

処分場が存在する地域における氷河や氷床からの影響に関する FEP であり、例えば、地形学上の変動、侵食、溶けた水の影響、水力学的な影響である。大きな氷塊が地球規模の気候や局地的な気候に与える影響は含まない。氷河の活動、特に氷河や氷床の前進や、氷塊の下あるいはへりにある溶けた氷河水に伴う侵食プロセス（削磨作用、過下刻作用）は、環境中の地形を大きく変化させる。例えば、U字谷、渓谷、フィヨルド、ドラムリンなどがある。氷河や氷床に付随する堆積の特徴としては、モレーンとエスカーを含む。氷の重量が地形に与える圧力は、重要な水文地質学上の影響を与えると同時に、その地域の地殻プレートをへこませることもある。

#### 1.3.06 暖かい気候の影響（熱帯と砂漠）

暖かい熱帯および砂漠の気候に関する FEP であり、季節の影響や、これらの気候に特有な気象および地形の影響が含まれる。

熱帯気候の地域は、極端な気象のパターン（モンスーン・ハリケーン）があり、この気候パターンは、洪水、高潮、強風などをもたらす、さらに侵食や水文にも関係する。熱帯気候に関する高温高湿は、急速な生命の衰退や、一般的に薄い土壌をもたらす。砂漠の気候では、全雨量・侵食量・地下水の供給量は、まれに起こる豪雨に左右される。

#### 1.3.07 気候変動に伴う水文学／水文地質学的な変化

水文学及び水文地質学的な変化に関する FEP である。例えば、ある地域の気候変化に伴う、水の供給量・掃流土砂量・季節性変化がある。

ある地域の水文および水文地質は、気候と密接に関係する。気候により支配されるのは降雨量や蒸発量、地面をおおう季節的な氷の量、土壌水の収支バランス、土壌の飽和度、表面流出、地下水供給量である。植生や人間行為もこれらに影響を与える。

#### 1.3.08 気候変動に伴う生態学的な変化

生態学的変化に関する FEP である。例えば、ある地域の気候変化に伴う植生の種類および植物や動物の個体数の変化である。

環境の生態系は気候に関係する。植物や動物は生態学的適応によって、最も過酷な環境においても生き残ることができる。例えば、サボテンは、砂漠環境の過酷な高熱や乾燥に生き残るよう進化した。ある植物は、砂漠において、数少ない降雨に続く短い期間中に全生涯を終える。ある種の木や植物は、山火事のような天然事象にも生き残るよう進化した。全生涯を全うしようとする。

### Human response to climate changes 1.3.09

FEPs related to changes in human behaviour, e.g. habits, diet, size of communities, in response to climate change in a region.

*Human response is closely linked to climate. Climate affects the abundance and availability of natural resources such as water, as well as the types of crops that can be grown. The more extreme a climate, the greater the extent of human control over these resources is necessary to maintain agricultural productivity, e.g. through the use of dams, irrigation systems, controlled agricultural environments (greenhouses).*

### FUTURE HUMAN ACTIONS (ACTIVE) 1.4

Human actions and regional practices, in the post-closure period, that can potentially affect the performance of the engineered and/or geological barriers, e.g. intrusive actions, but not the passive behaviour and habits of the local population, c.f. 2.4.

“Human Actions (Active)” is a sub-category in the International FEP List and is divided into individual FEPs.

#### Human influences on climate 1.4.01

FEPs related to human activities that could affect the change of climate either globally or in a region.

For example, man-made emissions of “greenhouse” gases such as CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> have been implicated as a factor in global warming. Regionally, climate can be modified by de-forestation.

#### Motivation and knowledge issues (inadvertent/deliberate human actions) 1.4.02

FEPs related to the degree of knowledge of the existence, location and/or nature of the repository. Also, reasons for deliberate interference with, or intrusion into, a repository after closure with complete or incomplete knowledge.

*Some future human actions, e.g. see FEPs 1.4.04, 1.4.05, could directly impact upon the repository performance. Many assessments distinguish between:*

- *inadvertent actions, which are actions taken without knowledge or awareness of the repository, and*
  - *deliberate actions, which are actions that are taken with knowledge of the repository's existence and location, e.g. deliberate attempts to retrieve the waste, malicious intrusion and sabotage.*
- Intermediate cases, of intrusion with incomplete knowledge, could also occur.*

#### Un-intrusive site investigation 1.4.03

FEPs related to airborne, geophysical or other surface-based investigation of a repository site after repository closure.

*Such investigation, e.g. prospecting for geological resources, might occur after information of the location of a repository had been lost. The evidence of the repository itself, e.g. discovery of an old shaft, might itself prompt investigation, including research of historical archives.*

#### Drilling activities (human intrusion) 1.4.04

FEPs related to any type of drilling activity in the vicinity of the repository. These may be taken with or without knowledge of the repository (see FEP 1.4.02).

*Drilling activities include:*

- *exploratory and/or exploitation drilling for natural resources;*
- *water well drilling;*
- *drilling for research or site characterisation studies;*
- *drilling for waste injection;*
- *drilling for hydrothermal resources.*

### 1.3.09 気候変動に伴う人間の対応

特定地域の気候変動に伴う人間のふるまいの変化に関する FEP であり、例えば、習慣、食べ物、共同社会の大きさの変化である。

人間の対応は、気候に密接に関係する。気候は、水や栽培できる穀物の種類のような天然資源の豊富さや手に入れやすさに影響を与える。気候が過酷であればある程、農産物の生産を維持するために人間が天然資源を制御する必要性は高くなる。例えば、ダム、灌漑システム、制御された農業環境（グリーンハウス）の利用がある。

## 1.4 将来の人間の行為（能動的）

閉鎖後の期間において、人工バリア及び（又は）天然バリアの性能に影響を及ぼすことができる可能性のある人の行為と地域的な慣行である。例えば、侵入行為であり、部分的な人々の受動的ふるまいや習慣ではない。（24 参照）。

「人間の行為（能動的）」は、国際 FEP リストの 1 つのサブカテゴリーであり、個別の FEP に分割される。

### 1.4.01 気候への人間活動の影響

地球規模又は地域的に気候の変化に影響を及ぼしえる人間の活動に関する FEP である。

例えば、地球温暖化の要因として関係があるとされている CO<sub>2</sub> 及び CH<sub>4</sub> のような「温室効果」ガスの人為的排出。地域的には、気候は、森林破壊によって変化しえる。

### 1.4.02 動機と処分場の認識に関する事項（意図しない／故意の人間の行為）

処分場の存在、位置及び（又は）性質の認識の度合いに関する FEP である。また、完全又は不完全な認識をもって閉鎖後の処分場への意図的な干渉又は侵入の動機も含む。

いくつかの将来の人の行為、例えば FEPs 1.4.01, 1.4.05, は、処分場の性能に直接影響を及ぼす。多くの評価によって、下記のとおり区別されている；

- ・ 処分場の認識又は意識なしにとられる偶発的な行為
- ・ 処分場の存在と位置を知りながらの行為である意図的行為、例えば、廃棄体を回収するための意図的試み、悪意がある侵入及び破壊活動である。
- 不完全な認識を持った侵入である中間のケースも起こり得る。

### 1.4.03 侵入行為のないサイト調査

処分場閉鎖後の処分場サイトの上空、地質学的又は他の地表に基づく調査に関する FEP である。

例えば、地質学的資源のための検層といった調査は、処分場の位置の情報が失われた後に生ずるだろう。例えば、古い立坑の発見といった処分場そのものの証拠は、それ自身が歴史的記録の研究を含む調査を促すだろう。

### 1.4.04 掘削活動（人間侵入）

処分場周辺での掘削活動の種類に関する FEP である。これらは、処分場の認識の有無に係わらず、用いられる（FEP 1.4.02 参照）。

掘削活動に含まれるもの；

- ・ 天然資源のための調査及び（又は）開発ボーリング；
- ・ 用水用ボーリング；
- ・ 調査又はサイト特性研究のためのボーリング；
- ・ 廃棄体注入のためのボーリング；
- ・ 熱水資源のためのボーリング

## Mining and other underground activities (human intrusion) 1.4.05

FEPs related to any type of mining or excavation activity carried out in the vicinity of the repository. These may be taken with or without knowledge of the repository (see FEP 1.4.02).

*Mining and other excavation activities include:*

- *resource mining;*
- *excavation for industry;*
- *excavation for storage or disposal;*
- *excavation for military purposes;*
- *geothermal energy production;*
- *injection of liquid wastes and other fluids;*
- *scientific or archaeological investigation;*
- *shaft construction, underground construction and tunnelling;*
- *underground nuclear testing;*
- *malicious intrusion, sabotage or war;*
- *recovery of repository materials.*

## Surface environment, human activities 1.4.06

FEPs related to any type of human activities that may be carried out in the surface environment that can potentially affect the performance of the engineered and/or geological barriers, or the exposure pathways, excepting those FEPs related to water management which are at FEP 1.4.07.

*Examples include:*

- *quarrying, trenching;*
- *excavation for construction;*
- *residential, industrial, transport and road construction;*
- *pollution of surface environment and groundwater.*

*Quarrying, excavation and shallow site investigation may lead to direct human intrusion in the case of a near-surface repository.*

## Water management (wells, reservoirs, dams) 1.4.07

FEPs related to groundwater and surface water management including water extraction, reservoirs, dams, and river management.

*Water is a valuable resource and water extraction and management schemes provide increased control over its distribution and availability through construction of dams, barrages, canals, pumping stations and pipelines.*

*Groundwater and surface water may be extracted for human domestic use (e.g. drinking water, washing), agricultural uses (e.g. irrigation, animal consumption) and industrial uses. Extraction and management of water may affect the movement of radionuclides to and in the surface environment.*

## Social and institutional developments 1.4.08

FEPs related to changes in social patterns and degree of local government, planning and regulation.

*Potentially significant social and institutional developments include:*

- *changes in planning controls and environmental legislation;*
- *demographic change and urban development;*
- *changes in land use;*
- *loss of archives/records, loss/degradation of societal memory.*

#### 1.4.05 採鉱その他の地下での活動 (人間侵入)

処分場周辺で実施される採鉱又は掘削活動の種類に関する FEP である。これらは、処分場の認識の有無に係わらず生ずるだろう (FEP1.4.02 参照)。

採鉱及び他の掘削活動に含まれるもの：

- ・ 資源採鉱
- ・ 工業のための掘削
- ・ 貯蔵又は処分のための掘削
- ・ 軍事目的の採鉱
- ・ 地熱エネルギーの生産
- ・ 液状廃棄物及び他の流体の注入
- ・ 科学的又は考古学上の調査
- ・ 立坑建設、地下建設及びトンネル建設
- ・ 地下核実験
- ・ 悪意のある侵入、破壊活動又は戦争
- ・ 処分場材料の回収

#### 1.4.06 地表環境、人間の活動

FEP1.4.07 にある水資源の取扱いに関する FEP を除いた、人工及び天然バリアの性能又は被ばく経路影響を与える可能性のある地表環境において実施される人間の活動の種類に関する FEP である。

例が含むもの：

- ・ 採石、トレンチ掘削
- ・ 建設のための掘削
- ・ 住居、工業、輸送及び道路の建設
- ・ 地表環境及び地下水の汚染

採石、掘削及び浅い遺跡調査は、地表近傍の処分場の場合、直接的な人間侵入をもたらさだろう。

#### 1.4.07 水資源の取扱い (井戸、貯水池、ダム)

取水、貯水池、ダム及び河川管理を含む地下水及び表層水の取扱いに関する FEP である。

水は貴重な資源であり、取水及び利水計画は、ダム、堰、運河、ポンプ場及びパイプラインの建設を通じた水の配給及びその可能性についてますます支配することになる。地下水と表層水は、人の生活での使用 (例えば、飲料水、洗濯)、農業での使用 (例えば、灌漑、動物消費) 及び産業での使用のために取水されるであろう。取水と利水は、地表環境への放射性核種の移行と地表環境に影響を及ぼすであろう。

#### 1.4.08 社会的・制度的な進展

社会様式や、地方自治体の計画及び規制の程度の変化に関する FEP である。

重要な社会的及び制度的な進展を潜在的に含む可能性のあるもの：

- ・ 計画された管理及び環境法令の変化
- ・ 人口統計学的変化及び市街地開発
- ・ 土地使用の変化
- ・ 公文書／記録の喪失、社会的記憶の喪失／衰退

## Technological developments 1.4.09

FEPs related to future developments in human technology and changes in the capacity and motivation to implement technologies. This may include retrograde developments, e.g. loss of capacity to implement a technology.

*Of interest are those technologies that might change the capacity of man to intrude deliberately or otherwise into a repository, to cause changes that would affect the movement of contaminants, to affect the exposure or its health implications. Technological developments are likely but may not be predictable especially at longer times into the future. In most assessments assumptions are made to limit the scope of consideration.*

## Remedial actions 1.4.10

FEPs related to actions that might be taken following repository closure to remedy problems with a waste repository that, either, was not performing to the standards required, had been disrupted by some natural event or process, or had been inadvertently or deliberately damaged by human actions.

## Explosions and crashes 1.4.11

FEPs related to deliberate or accidental explosions and crashes such as might have some impact on a closed repository, e.g. underground nuclear testing, aircraft crash on the site, acts of war.

## OTHER 1.5

A “Catch-all” for any external factor not accommodated in 1.1 to 1.4, e.g. meteorite impact.

“Other” is a sub-category in the International FEP List and is divided into individual FEPs.

## Meteorite impact 1.5.01

The possibility of a large meteorite impact occurring at or close to the repository site and related consequences.

*The probability of impact of a meteorite sufficiently large and close to a repository to cause damage to the repository can be estimated based on the estimated frequency of large meteorite impacts in the past, and taking account of the repository depth.*

## Species evolution 1.5.02

FEPs related to the biological evolution of humans, other animal or plant species, by both natural selection and selective breeding/culturing.

*Animal (including man) and plant species have evolved with time. Over the timescales considered in some repository safety assessments natural evolution of plants and animal species is possible. Forced evolution of plant and animal species by selective breeding, especially species used for human foods, has occurred over very recent timescales and presumably will continue. In safety assessments, assumptions are usually made to avoid consideration of new species whose characteristics would be speculative.*

## Miscellaneous and FEPs of uncertain relevance 1.5.03

FEPs that cannot be mapped anywhere else on the International FEP List also FEPs which have been identified, but no connection made to possible effects on repository performance.

*There are a number of phenomena that have been suggested (i.e. added to FEP lists) during project scenario and FEP identification studies, for which no mechanism leading to any significant effect has been identified, e.g. changes in the Earth’s magnetic field. For completeness, such phenomena of uncertain relevance or effect are retained by mapping to this FEP in the International List.*



#### 1.4.09 技術的な進展

人間の科学技術の将来の進展、及びその能力や動機の変化に関する FEP である。これは、例えばある技術を使用する能力の喪失といった、退化の方向も含むだろう。

興味深い点は、これらの技術であり、これらは、処分場に故意に又は他の目的で侵入し、汚染物の移動に影響を及ぼすこととなる変化を引き起こし、被ばく又は健康関連に影響を及ぼす、人間の能力を変化させる。技術的な進展は、ありそうであるが、しかしとりわけ長期の将来に対して予測できない、ほとんどの評価では、考慮する範囲を制限して仮定されている。

#### 1.4.10 環境修復行為

廃棄物処分場の問題を改善するため、処分場閉鎖に続いて行われる行為に関する FEP であり、問題としては、要求される標準を満たしていなかったり、いくつかの自然事象又はプロセスによって崩壊したり、人間の行為による不注意又は故意的な損傷を受けることである。

#### 1.4.11 爆発と衝突

例えば、地下核実験、サイトにおける航空機事故、戦争行為といった、閉鎖された処分場に衝撃をもたらすような故意又は事後的な爆発及び衝突に関する FEP である。

### 1.5 その他

1.1 から 1.4 に適応しない全ての外的要因のための「受け皿」、例えば隕石による衝撃。「その他」は、国際 FEP リストの 1 つのサブカテゴリーであり、個別の FEP に細分化される。

#### 1.5.01 隕石による衝撃

処分場又はごく近くで起こる大型隕石による衝撃の可能性及び関連する影響。十分に大きく、処分場にごく近くで、処分場に大きな損害を与える隕石による衝撃の確率は、過去の大きな隕石による衝撃の推定頻度、及び処分場深度に基づき推定することができる。

#### 1.5.02 種の進化

自然の淘汰及び淘汰された繁殖／培養による、人間、他の動物又は植物の種の生物学上の進化に関する FEP である。

動物（人間を含む）及び植物の種は、時間とともに進化してきた。いくつかの処分場の安全評価において、考慮された時間スケールを超える植物と動物種の進化は、起こり得る。淘汰された繁殖による植物及び動物種、特に人間の食料に使用する種の、強制的な進化は、ごく最近の時間スケールで起こっており、おそらく継続するだろう。安全評価では、通常、特性が推論的になる新種の考慮は避けて仮定される。

#### 1.5.03 雑件及び関連が不確実な FEP

国際 FEP リストのいずれにも展開できない FEP、または、特定されるが、処分場の性能に影響を及ぼす要因との関係を示すことのできない FEP である。

例えば、地球磁場の変化のように、影響の重要性を特定するためのメカニズムが不明であることから、シナリオ及び FEP 特定のための研究プロジェクトを通じて提案された（すなわち FEP リストに加えられた）いくつかの現象がある。完璧を期するため、妥当性又は影響のはっきりしないそのような現象も、国際リストの FEP への展開においては保持されている。

## DISPOSAL SYSTEM DOMAIN: ENVIRONMENTAL FACTORS 2

Features and processes occurring within that spatial and temporal (postclosure) domain whose principal effect is to determine the evolution of the physical, chemical, biological and human conditions of the domain that are relevant to estimating the release and migration of radionuclides and consequent exposure to man.

“Disposal System Domain: Environmental Factors” is a category in the International FEP List and is divided into sub-categories.

### WASTES AND ENGINEERED FEATURES 2.1

Features and processes within the waste and engineered components of the disposal system.

“Wastes and Engineered Features” is a sub-category in the International FEP List and is divided into individual FEPs.

#### Inventory, radionuclide and other material 2.1.01

FEPs related to the total content of the repository of a given type of material, substance, element, individual radionuclides, total radioactivity or inventory of toxic substances.

*The FEP often refers to content of radionuclides but the content of other materials, e.g. steels, other metals, concrete or organic materials, could be of interest.*

#### Waste form materials and characteristics 2.1.02

FEPs related to the physical, chemical, biological characteristics of the waste form at the time of disposal and also as they may evolve in the repository, including FEPs which are relevant specifically as waste degradation processes.

*The waste form will usually be conditioned prior to disposal, e.g. by solidification and inclusion of grout materials. The waste characteristics will evolve due to various processes that will be affected by the physical and chemical conditions of the repository environment. Processes that are relevant specifically as waste degradation processes, as compared to general evolution of the near field, are included in this FEP.*

#### Container materials and characteristics 2.1.03

FEPs related to the physical, chemical, biological characteristics of the container at the time of disposal and also as they may evolve in the repository, including FEPs which are relevant specifically as container degradation/failure processes.

*The container characteristics will evolve due to various processes that will be affected by the physical and chemical conditions of the repository environment. Processes which are relevant specifically as container degradation/failure processes, as compared to general evolution of the near field, are included in this FEP.*

#### Buffer/backfill materials and characteristics 2.1.04

FEPs related to the physical, chemical, biological characteristics of the buffer and/or backfill at the time of disposal and also as they may evolve in the repository, including FEPs which are relevant specifically as buffer/backfill degradation processes.

*Buffer and backfill are sometimes used synonymously. In some HLW/spent fuel concepts, the term buffer is used to mean material immediately surrounding a waste container and having some chemical and/or mechanical buffering role whereas backfill is used to mean material used to fill other underground openings.*

*However, in ILW/LLW concepts the term backfill is used to describe the material placed between waste containers which may have a chemical role. Buffer/backfill materials may include clays, cement and mixtures of cement with aggregates, e.g. of crushed rock.*

*The buffer/backfill characteristics will evolve due to various processes that will be affected by the physical and chemical conditions of the repository environment. Processes which are relevant specifically as buffer/backfill degradation processes, as compared to general evolution of the near field, are included in this FEP.*

## 2 処分システム領域：環境要因

処分システム領域で、空間的、時間的（閉鎖後）領域において生ずる特徴とプロセスであり、その主要な影響が、放射性核種の放出と移行、その結果として生ずる人への被ばくの推定に関連する領域の物理的、化学的、生物学的及び人間の状態の進展を決定する。

「処分システム領域：環境要因」は、国際 FEP リストの 1 つのカテゴリーであり、サブカテゴリーに細分化される。

### 2.1 廃棄体と人工バリア

廃棄体及び処分システムの人工バリア構成要素における特徴とプロセス。

「廃棄体と人工バリア」は、国際 FEP リストの 1 つのサブカテゴリーであり、個別の FEP に細分化される。

#### 2.1.01 インベントリ、核種と他の材料

材料、物質、要素、個々の核種、全放射能もしくは有毒物質のインベントリが与えられたタイプの処分場のすべての内容に関連する FEP。

FEP は放射性核種の内容に関連するが、たとえば他の材料、炭素鋼、金属やコンクリートや有機材料の内容にも関連する。

#### 2.1.02 廃棄体の材料とその特性

処分時点での廃棄体の物理的、化学的、生物学的特性に関する FEP。および処分場で放出する際に廃棄体の劣化プロセスに特に関連する FEP を含む。

廃棄体の形状は例えば固化やグラウト材の混入のように、常に処分の前に調整される。廃棄体の特性は処分環境の物理的、化学的状态に影響を受ける多くのプロセスによって変化する。廃棄体の劣化プロセスに特に関連するプロセスは、ニアフィールドの一般的な変化と比較して、この FEP に含まれる。

#### 2.1.03 容器の材料とその特性

処分時点での容器の物理的、化学的、生物学的特性に関する FEP。しかも処分場で進展する際に容器の劣化・欠陥プロセスに特に関連する FEP を含む。

容器の特性は処分環境の物理的、化学的状态に影響を受ける多くのプロセスによって変化する。容器の劣化・破損プロセスに特に関連するプロセスは、ニアフィールドの一般的な変化と比較してこの FEP に含まれる。

#### 2.1.04 緩衝材／埋戻し材とその特性

処分時点での緩衝材／埋戻し材の物理的、化学的、生物学的特性に関する FEP。しかも処分場で変化するにつれて緩衝材／埋戻し材の劣化プロセスに特に関連する FEP を含む。

緩衝材と埋戻し材は時に同意語として用いられる。高レベル放射性廃棄物や使用済み燃料の概念では、緩衝材と言う用語は廃棄体容器を直に取り巻き、化学的かつ／もしくは機械的な緩衝の役割を持つものを意味する。それに対して埋戻し材はその他の地下の空洞部を埋める材料のことを意味する。

しかしながら、低中レベルの廃棄体コンセプトでは埋め戻し材は化学的役割を持つ、廃棄体容器間に置かれる材料を説明するのに使われる。緩衝材／埋戻し材には粘土、セメント、セメントと例えば碎石骨材の混合物も含まれる。

緩衝材／埋戻し材の特性は処分環境の物理的、化学的状态に影響を受ける多くのプロセスによって進展する。緩衝材／埋戻し材の劣化プロセスに特に関連するプロセスは、ニアフィールドの一般的な変化と比較してこの FEP に含まれる。

### Seals, cavern/tunnel/shaft 2.1.05

FEPs related to the design, physical, chemical, hydraulic etc. characteristics of the cavern/tunnel/shaft seals at the time of sealing and also as they may evolve in the repository, including FEPs which are relevant specifically as cavern/tunnel/shaft seal degradation processes.

*Cavern/tunnel/shaft seal failure may result from gradual degradation processes, or may be the result of a sudden event. The importance is that alternative routes for groundwater flow and radionuclide transport may be created along the tunnels and/or shafts and associated EDZ (see FEP 2.2.01).*

### Other engineered features materials and characteristics 2.1.06

FEPs related to the physical, chemical, biological characteristics of the engineered features (other than containers, buffer/backfill, and seals) at the time of disposal and also as they may evolve in the repository, including FEPs which are relevant specifically as degradation processes acting on the engineered features.

Examples of other engineered features are rock bolts, shotcrete, tunnel liners, silo walls, any services and equipment not removed before closure. The engineered features, materials and characteristics will evolve due to various processes that will be affected by the physical and chemical conditions of the repository environment. Processes which are relevant specifically as degradation processes acting on the features, as compared to general evolution of the near field, are included in this FEP.

### Mechanical processes and conditions (in wastes and EBS) 2.1.07

FEPs related to the mechanical processes that affect the wastes, containers, seals and other engineered features, and the overall mechanical evolution of near field with time. This includes the effects of hydraulic and mechanical loads imposed on wastes, containers and repository components by the surrounding geology.

*Examples of relevant processes are:*

- container collapse,*
- buffer swelling pressure,*
- material volume changes,*
- tunnel roof or lining collapse.*

### Hydraulic/hydrogeological processes and conditions (in wastes and EBS) 2.1.08

FEPs related to the hydraulic/hydrogeological processes that affect the wastes, containers, seals and other engineered features, and the overall hydraulic/hydrogeological evolution of near field with time. This includes the effects of hydraulic/hydrogeological influences on wastes, containers and repository components by the surrounding geology.

*Examples of relevant processes are:*

- infiltration and movement of fluids in the repository environment;*
- resaturation/desaturation of the repository or its components;*
- water flow and contaminant transport paths within the repository.*

### Chemical/geochemical processes and conditions (in wastes and EBS) 2.1.09

FEPs related to the chemical/geochemical processes that affect the wastes, containers, seals and other engineered features, and the overall chemical/geochemical evolution of near field with time. This includes the effects of chemical/geochemical influences on wastes, containers and repository components by the surrounding geology.

Examples of relevant processes are:

- general corrosion processes;
- chemical conditioning and buffering processes;
- electrochemical processes;
- precipitation/dissolution reactions.
- evolution of redox (Eh) and acidity/alkalinity (pH) etc.

### 2.1.05 サイロ、坑道、立坑のシール

シール時点での空洞、坑道、立坑の設計、物理的、化学的、水理学的特性に関する FEP。処分期間中は空洞、坑道、立坑、シールの工学的特性に影響を与える劣化プロセスに特に関連する FEP を含む。

サイロ、坑道、立坑のシールは緩やかな劣化の結果、もしくは突然の事象により損傷するかも知れない。重要なことは坑道や立坑、関連する EDZ (掘削影響領域) に沿って新たな地下水の流れや核種の移行ルートが作られる可能性があることである。

### 2.1.06 他の人工バリアの材料と特性

処分時点での人工バリア (収納容器、緩衝材/埋戻し材、シール以外のもの) の物理的、化学的、生物学的特性に関する FEP。処分期間中に人工バリアに影響を与える劣化プロセスに特に関連する FEP を含む。

他の人工バリアの例として、ロックボルト、吹き付けコンクリート、坑道のライナー、サイロ壁、閉鎖前に固定される全ての機材・機器などが挙げられる。人工バリア、材料の特性は、処分環境の物理的、化学的状态に影響を受ける多くのプロセスによって変動する。ニアフィールドの一般的な変動と比較して、より明瞭な劣化プロセスとして作用する特徴はこの FEP に含まれる。

### 2.1.07 力学的プロセスとその状態 (廃棄体と工学バリアシステム内)

廃棄体、容器、シール、その他の人工バリアに影響するような、力学的プロセス及び、時間に伴うニアフィールドのすべての力学的変動に関連する FEP。

これには、廃棄体、容器、処分場の構成材に係る周辺地質による水理的、力学的影響も含まれる。

関連するプロセスの例は次のとおり。

- ・ 容器の破壊
- ・ 緩衝材の膨潤圧
- ・ 材質の体積変化
- ・ 坑道の天井、ライナーの崩壊

### 2.1.08 水理学/水文地質学的プロセスとその状態 (廃棄体と工学バリアシステム内)

廃棄体、容器、シール材、その他の人工バリアに影響を与える水理学および水文地質学的プロセスに関する FEP である。また、時間に伴って変化するニアフィールドの水理学/水文地質学的現象も含む。さらに、廃棄体、容器、処分場の構成要素に対する周囲の地質による水理学/水文地質学的影響の効果も含む。

関連するプロセスの例

- ・ 処分場環境での流体の流入や移動
- ・ 処分場およびその構成物への水の再飽和化と不飽和化
- ・ 処分場内の水の流動と汚染物質の移動

### 2.1.09 化学/地球化学的プロセスとその状態 (廃棄体と工学バリアシステム内)

廃棄体、容器、シール材、その他の人工バリアに影響を与える化学/地球化学的プロセスに関する FEP である。また、時間に伴って変化するニアフィールドの化学/地球化学的現象も含む。さらに、廃棄体、容器、処分場の構成要素に対する周囲の地質による化学/地球化学的影響の効果も含む。

関連するプロセスの例

- ・ 一般的腐食プロセス
- ・ 化学的状态および緩衝プロセス
- ・ 電気化学的プロセス
- ・ 沈殿/溶解反応
- ・ 酸化還元電位 (Eh) と酸性度/アルカリ度 (pH) の変化

### Biological/biochemical processes and conditions (in wastes and EBS) 2.1.10

FEPs related to the biological/biochemical processes that affect the wastes, containers, seals and other engineered features, and the overall biological/biochemical evolution of near field with time. This includes the effects of biological/biochemical influences on wastes, containers and repository components by the surrounding geology.

Examples of relevant processes are:

- microbial growth and poisoning;
- microbially/biologically mediated processes;
- microbial/biological effects of evolution of redox (Eh) and acidity/alkalinity (pH), etc.

### Thermal processes and conditions (in wastes and EBS) 2.1.11

FEPs related to the thermal processes that affect the wastes, containers, seals and other engineered features, and the overall thermal evolution of the near field with time. This includes the effects of heat on wastes, containers and repository components from the surrounding geology.

*Examples of relevant processes are:*

- radiogenic, chemical and biological heat production from the wastes;*
- chemical heat production from engineered features, e.g. concrete hydration;*
- temperature evolution;*
- temperature dependence of physical/chemical/biological/hydraulic processes, e.g. corrosion and resaturation.*

### Gas sources and effects (in wastes and EBS) 2.1.12

FEPs within and around the wastes, containers and engineered features resulting in the generation of gases and their subsequent effects on the repository system.

*Gas production may result from degradation and corrosion of various waste, container and engineered feature materials, as well as radiation effects. The effects of gas production may change local chemical and hydraulic conditions, and the mechanisms for radionuclide transport, i.e. gas-induced and gas-mediated transport.*

### Radiation effects (in wastes and EBS) 2.1.13

FEPs related to the effects that result from the radiation emitted from the wastes that affect the wastes, containers, seals and other engineered features, and the overall radiogenic evolution of the near field with time.

*Examples of relevant effects are ionisation, radiolytic decomposition of water (radiolysis), radiation damage to waste matrix or container materials, helium gas production due to alpha decay.*

### Nuclear criticality 2.1.14

FEPs related to the possibility and effects of spontaneous nuclear fission chain reactions within the repository.

*A chain reaction is the self-sustaining process of nuclear fission in which each neutron released from a fission triggers, on average, at least one other nuclear fission. Nuclear criticality requires a sufficient concentration and localised mass (critical mass) of fissile isotopes (e.g. U-235, Pu-239) and also presence of neutron moderating materials in a suitable geometry; a chain reaction is liable to be damped by the presence of neutron absorbing isotopes (e.g. Pu-240).*

## GEOLOGICAL ENVIRONMENT 2.2

The features and processes within this environment including, for example, the hydrogeological, geomechanical and geochemical features and processes, both in pre-placement state and as modified by the presence of the repository and other long-term changes.

*“Geological Environment” is a sub-category in the International FEP List and is divided into individual FEPs.*

### 2.1.10 生物学／生化学的プロセスとその状態（廃棄体と工学バリアシステム内）

廃棄体、容器、シール材、その他の人工バリアに影響を与える生物学／生化学的プロセスに関する FEP である。また、時間に伴って変化するニアフィールドの生物学／生化学的現象も含む。さらに、廃棄体、容器、処分場の構成要素に対する周囲の地質による生物学／生化学的影響の効果も含む。

関連するプロセスの例

- ・微生物の成長と毒性
- ・微生物／生物が媒介するプロセス
- ・Eh や pH の変化に対する微生物／生物効果

### 2.1.11 熱的プロセスとその状態（廃棄体と工学バリアシステム内）

廃棄体、容器、シール材、その他の人工バリアに影響を与える熱的プロセスに関する FEP である。また、時間に伴って変化するニアフィールドの熱現象も含む。さらに、廃棄体、容器、処分場の構成要素に対する周囲の地質による熱的影響の効果も含む。

関連するプロセスの例

- ・廃棄体からの放射能、化学反応、生物反応による熱の発生
- ・人工バリアからの化学的熱の発生
- ・温度の変化
- ・物理／化学／生物／水理学的プロセスの温度依存性、例えば腐食や水の再飽和

### 2.1.12 ガス源とその影響（廃棄体と工学バリアシステム内）

廃棄体や容器、人工バリアの内外でガスが発生し、そのガスが処分場システムに与える影響に関する FEP である。

廃棄体・容器・人工バリアの劣化や腐食によりガスは発生するが、放射線効果によってもガスが発生する。ガス発生の影響によって、化学的・水理学的状態は局所的に変化する。また、ガス誘発移動やガス媒介移動が起こると、放射性核種の移動のメカニズムも変化する。

### 2.1.13 放射線影響（廃棄体と工学バリアシステム内）

廃棄体、容器、シール材、その他の人工バリアに影響する、廃棄体からの放射線による影響および、時間に伴うニアフィールドのすべての放射線学的変動に関連する FEP。

関連する影響の例としては、イオン化、水の放射線による分解（放射線分解）、廃棄体マトリックスや容器材料の放射線による損傷、 $\alpha$ 崩壊によるヘリウムガスの発生がある。

### 2.1.14 臨界

処分場内で核分裂・連鎖反応が自然発生する可能性と影響に関連する FEP。

連鎖反応は、発生源 Fission triggers からの個々の中性子が、平均して、少なくとも1つの他の核分裂から起こる自己持続性プロセスである。

臨界は、核分裂性同位体（U-235, Pu-239 など）の局所的な量（臨界量）の十分な濃度、しかもその中に最適な中性子減速材（連鎖反応は [Pu-240 のような中性子吸収同位体が存在することによって減衰する傾向がある）が存在することが必要である。

## 2.2 地質環境

例えば、水文地質学、岩石力学、地球化学的特徴とプロセス、処分場設置前の状況と処分場建設による変化、その後の長期的変化を含む環境における特徴とプロセス。

「地質環境」は、国際 FEP リストの1つのサブカテゴリーであり、個別の FEP に細分化される。

### Excavation disturbed zone, host rock 2.2.01

FEPs related to the zone of rock around caverns, tunnels, shafts or other underground openings that may be mechanically disturbed during excavation, and the properties and characteristics as they may evolve both before and after repository closure.

*The excavation damaged zone may have different properties to the undisturbed host rock, e.g. opening of fractures or change of hydraulic properties due to stress relief. This zone may become desaturated to some degree during the period in which the tunnels are open and also subject to chemical changes both in the “open” period and after closure.*

### Host rock 2.2.02

FEPs related to the properties and characteristics of the rock in which the repository is sited (excluding the rock that may be mechanically disturbed by the excavation) as they may evolve both before and after repository closure.

*Relevant properties include thermal and hydraulic conductivity, compressive and shear strength, porosity etc.*

### Geological units, other 2.2.03

FEPs related to the properties and characteristics of rocks other than the host rock as they may evolve both before and after repository closure.

*Geological units are the separate rock structures and types that make up the region in which the repository is located. These units are identified in the geological investigations of the region. Each geological unit is characterised according to its geometry and its general physical properties and characteristics. A unit may be comprised of more than one rock formation, e.g. Quaternary sediments. Details concerning inhomogeneity and uncertainty associated with each unit are included in the characterisation.*

### Discontinuities, large scale (in geosphere) 2.2.04

FEPs related to the properties and characteristics of discontinuities in and between the host rock and geological units, including faults, shear zones, intrusive dykes and interfaces between different rock types.

### Contaminant transport path characteristics (in geosphere) 2.2.05

FEPs related to the properties and characteristics of smaller discontinuities and features within the host rock and other geological units that are expected to be the main paths for contaminant transport through the geosphere, as they may evolve both before and after repository closure.

*Groundwater flow and contaminant transport through rocks may occur in a variety of systems depending on the rock characteristics. Porous flow is predominantly through pores in the medium or through the interstitial spaces between small grains of materials. Fracture flow is predominantly along fractures in the rock which represent the only connected open spaces. Changes in the contaminant transport path characteristics due to the repository construction or its chemical influence etc. are included.*

### Mechanical processes and conditions (in geosphere) 2.2.06

FEPs related to the mechanical processes that affect the host rock and other rock units, and the overall evolution of conditions with time. This includes the effects of changes in condition, e.g. rock stress, due to the excavation, construction and long-term presence of the repository.



### 2.2.01 掘削で影響を受けるゾーン、母岩

空洞・トンネル・立坑・その他の地下空間の周囲にある、掘削により力学的な影響を受ける可能性のある岩盤ゾーンに関する FEP である。さらに、処分場の閉鎖の前後に関与する岩盤の性質や特性に関する事項も含む。

掘削により影響を受けたゾーンは影響を受けていない母岩とは異なる性質を持つ。例えば、圧力開放によって、割れ目が開いたり、水理学的性質が変化したりする。これらのゾーンは、トンネルが存在すれば、ある程度水に不飽和になるだろうし、トンネルの閉鎖の前後を通じて化学的変化を受けるであろう。

### 2.2.02 母岩

処分場の閉鎖の前あるいは後における処分場周囲の岩石(母岩)の性質や特性に関する FEP である。(ただし、掘削による力学的影響は含まない)。

関係する性質としては、熱伝導率や透水係数、圧縮強度や剪断強度、空隙率などがある。

### 2.2.03 その他の地質ユニット

処分場の閉鎖の前後にかかわらず変動する、母岩以外の岩石に関する性質あるいは特性に関する FEP である。

地質ユニットとは、処分場が存在する地域を構成している個々の岩石及びその構造のことである。地質ユニットはその地域の地質調査によって定義される。それぞれの地質ユニットは、分布形状と一般物性によって特徴づけられる。地質ユニットは一つ以上の岩層から成っている場合もあり、例えば、第四紀堆積物の例がそうである。それぞれユニットの不均質性や不確実性に関する詳細については、地質ユニットの特性解明で明らかになる。

### 2.2.04 大規模な不連続性(地圏内)

母岩や地質ユニットあるいはそれらの境界に存在する不連続面の性質や特性に関する FEP である。断層、破碎帯、貫入岩脈、種類が異なる岩石間の境界などを含む。

### 2.2.05 汚染物質移行経路の特性(地圏内)

母岩あるいは他の地質ユニットの中にある、より小規模な不連続部や形状についての性質や特徴に関する FEP である。これらの不連続部は、処分場閉鎖の前後を通じて、地圏内の汚染物質移動の主要な経路となるだろう。

岩石中における地下水流動や汚染物質の移動は、岩石の特性により異なる。空隙内流動は、媒体の空隙や微粒物質の粒間を通じて行われるものである。亀裂内流動は、岩石中の唯一の連続空間が割れ目である場合、割れ目に沿って行われるものである。処分場建設やそれによる化学反応の影響などにより汚染物質の移動経路が変化することも含む。

### 2.2.06 力学的プロセスとその状態(地圏内)

母岩や他の岩石ユニットに影響を与える力学プロセス、ならびに時間とともに変化する力学条件の全てに関する FEP である。例えば、処分場の掘削、建設、長期間の存続によって影響を受ける岩盤の応力変化がある。

### Hydraulic/hydrogeological processes and conditions (in geosphere) 2.2.07

FEPs related to the hydraulic and hydrogeological processes that affect the host rock and other rock units, and the overall evolution of conditions with time. This includes the effects of changes in condition, e.g. hydraulic head, due to the excavation, construction and long-term presence of the repository.

*The hydrogeological regime is the characterisation of the composition and movement of water through the relevant geological formations in the repository region and the factors that control this. This requires knowledge of the recharge and discharge zones, the groundwater flow systems, saturation, and other factors that may drive the hydrogeology, such as density effects due to salinity gradients or temperature gradients.*

*Changes of the hydrogeological regime due to the construction and/or presence of the repository are included.*

### Chemical/geochemical processes and conditions (in geosphere) 2.2.08

FEPs related to the chemical and geochemical processes that affect the host rock and other rock units, and the overall evolution of conditions with time. This includes the effects of changes in condition, e.g. Eh, pH, due to the excavation, construction and long-term presence of the repository.

*The hydrochemical regime refers to the groundwater chemistry in the geological formations in the repository region, and the factors that control this. This requires knowledge of the groundwater chemistry including speciation, solubility, complexants, redox (reduction/oxidation) conditions, rock mineral composition and weathering processes, salinity and chemical gradients. Changes of the hydrochemical regime due to the construction and/or presence of the repository are included.*

### Biological/biochemical processes and conditions (in geosphere) 2.2.09

FEPs related to the biological and biochemical processes that affect the host rock and other rock units, and the overall evolution of conditions with time. This includes the effects of changes in condition, e.g. microbe populations, due to the excavation, construction and long-term presence of the repository.

### Thermal processes and conditions (in geosphere) 2.2.10

FEPs related to the thermal processes that affect the host rock and other rock units, and the overall evolution of conditions with time. This includes the effects of changes in condition, e.g. temperature, due to the excavation, construction and long-term presence of the repository.

*Geothermal regime refers to sources of geological heat, the distribution of heat by conduction and transport(convection) in fluids, and the resulting thermal field or gradient. Changes of the geothermal regime due to the construction and/or presence of the repository are included.*

### Gas sources and effects (in geosphere) 2.2.11

FEPs related to natural gas sources and production of gas within the geosphere and also the effect of natural and repository produced gas on the geosphere, including the transport of bulk gases and the overall evolution of conditions with time.

Gas movement in the geosphere will be determined by many factors including the rate of production, gas permeability and solubility, and the hydrostatic pressure regime.

### Undetected features (in geosphere) 2.2.12

FEPs related to natural or man-made features within the geology that may not be detected during the site investigation.

*Examples of possible undetected features are fracture zones, brine pockets or old mine workings. Some physical features of the repository environment may remain undetected during site surveys and even during pilot tunnel excavations. The nature of the geological environment will indicate the likelihood that certain types of undetected features may be present and the site investigation may be able to place bounds on the maximum size or minimum proximity to such features.*

### 2.2.07 水理学／水文地質学的プロセスとその状態（地圏内）

母岩および他の岩石単元に影響を与える水理学／水文地質学的プロセス，および時間とともに変化するそれらの状態全般に関する FEP である。状態の変化による影響も含む。例えば，処分場の掘削，建設，長期間の存続による水頭変化を含む。

水文地質学は，処分場周辺の地層中の地下水の化学組成や移動，そしてそれに影響を与える要因を明らかにする。そのためには，地下水の流入・流出ゾーンと，地下水流動システムの知識が必要である。さらに，塩濃度勾配または温度勾配による濃度効果のように，水文地質に影響を与える要素の知識も必要である。処分場の建設や長期存続による水文地質学的状態の変化も含む。

### 2.2.08 化学／地球化学的プロセスとその状態（地圏内）

母岩あるいは他の岩石単元に影響を与える化学的／地球化学的プロセス，および時間とともに変化するそれらの状態全般に関する FEP である。処分場の掘削・建設・長期存続による状態（例えば，Eh や pH）変化の影響も含む。

水文化学では，処分場周辺の地層中を流れる地下水の化学組成，およびこれに影響を与える要因を明らかにする。この状況を把握するには地下水化学の知識が必要である。すなわち，溶存化学種の識別，溶解度，錯体，酸化還元状態，造岩鉱物の組成と風化プロセス，塩濃度と化学組成の勾配に関する知識が必要である。処分場の建設や存続に伴う水文化学的状態の変化も含む。

### 2.2.09 生物学／生物化学的プロセスとその状態（地圏内）

母岩およびその他の岩石単元に影響を与える生物学的・生物化学的プロセスとそれらの生物学的・生物化学的状態の時間変化に関する FEP である。条件の変化による影響，例えば，処分場の掘削・建設・長期存続による微生物数の変化による影響などを含む。

### 2.2.10 熱的プロセスとその状態（地圏内）

母岩およびその他の岩石単元に影響を与える熱的プロセスとそれらの条件の時間変化に関する FEP である。条件の変化による影響も含む。例えば，処分場の掘削・建設・長期存続による温度変化の影響などを含む。

地熱系には，天然の熱源，伝導や流体の流動による地熱の伝達，その結果として生じる熱の場と勾配が含まれる。処分場の建設や存続により生じる地熱系の変化も含む。

### 2.2.11 ガスの起源とその影響（地圏内）

地圏内での天然ガスの起源と生成，ならびに地圏内で生成される天然ガスと施設内で生成するガスの流動やそれらの条件の時間変化の影響に関する FEP である。

地圏でのガスの移動は，ガス生産速度，ガスの透過速度と溶解度，そして静水圧分布など，多くの要因により影響される。

### 2.2.12 検出されない特性（地圏内）

処分地の調査時に検出されない可能性のある，天然および人工改変による地質特性に関する FEP である。

検出されない可能性のある特性の例としては，破碎帯，かん水塊，鉱山跡がある。処分場周辺の物理的特性のいくつかは，処分地の調査やパイロットトンネルの掘削時でさえ検出されないかもしれない。地質環境の性質として言えることは，ある種の検出されない特性が存在する可能性のあること，そして処分地の調査により，それらの特性の影響の最大値ないし最小の近似値が得られる可能性はある。

### Geological resources 2.2.13

FEPs related to natural resources within the geosphere, particularly those that might encourage investigation or excavation at or near the repository site.

*Geological resources could include oil and gas, solid minerals, water, and geothermal resources. For a near-surface repository, quarrying of near-surface deposits, e.g. sand, gravel or clay, may be of interest.*

## SURFACE ENVIRONMENT 2.3

The features and processes within the surface environment, including near-surface aquifers and unconsolidated sediments but excluding human activities and behaviour, see 1.4 and 2.4.

“Surface Environment” is a sub-category in the International FEP List and is divided into individual FEPs.

### Topography and morphology 2.3.01

FEPs related to the relief and shape of the surface environment and its evolution.

*This FEP refers to local land form and land form changes with implications for the surface environment, e.g. plains, hills, valleys, and effects of river and glacial erosion thereon. In the long term, such changes may occur as a response to geological changes, see 1.3.*

### Soil and sediment 2.3.02

FEPs related to the characteristics of the soils and sediments and their evolution.

*Different soil and sediment types, e.g. characterised by particle-size distribution and organic content, will have different properties with respect erosion/deposition and contaminant sorption etc.*

### Aquifers and water-bearing features, near surface 2.3.03

FEPs related to the characteristics of aquifers and water-bearing features within a few metres of the land surface and their evolution.

*Aquifers are water-bearing features geological units or near-surface deposits that yield significant amounts of water to wells or springs. The presence of aquifers and other water-bearing features will be determined by the geological, hydrological and climatic factors.*

### Lakes, rivers, streams and springs 2.3.04

FEPs related to the characteristics of terrestrial surface water bodies and their evolution.

*Streams, rivers and lakes often act as boundaries on the hydrogeological system. They usually represent a significant source of dilution for materials (including) radionuclides entering these systems, but in hot dry environments, where evaporation dominates, concentration is possible.*

### Coastal features 2.3.05

FEPs related to the characteristics of coasts and the near shore, and their evolution. Coastal features include headlands, bays, beaches, spits, cliffs and estuaries.

*The processes operating on these features, e.g. active erosion, deposition, longshore transport, determine the development of the system and may represent a significant mechanism for dilution or accumulation of materials (including radionuclides) entering the system.*

### 2.2.13 地質資源

地圏内の天然資源に関する FEP である。特に、将来、処分場およびその近くで、調査や掘削を行わせる原因となる事項である。

地質資源には、石油天然ガス、鉱物、水、地熱などがある。地表近くの処分場に関しては、地表近くにある鉱床の露天掘りもある。例えば、砂、砂利、粘土がその対象となり得る。

## 2.3 地表の環境

地表環境における特徴とプロセス。地表近傍の帯水層及び未固結の堆積物を含むが、人の活動とふるまいは含まない。1.4 及び 2.4 参照。

「地表の環境」は、国際 FEP リストの 1 つのサブカテゴリーであり、個別の FEP に細分化される。

### 2.3.01 地形と形態

地表環境の起伏や形状およびその変化に関する FEP である。

この FEP は、地表環境に関連した地域地形やその変化に関するものである。地表環境の例には、平野や丘や谷の他に、川や氷河による侵食の影響がある。長期的に見ると、そのような変化には地質学的変化に伴って起こるものもある。1.3 を参照。

### 2.3.02 土壌と堆積土砂

土壌、堆積物、その特性変化に関する FEP である。

異なる種類の土壌や堆積物（例えば、粒径分布や有機物含有量によって特性づけられている土壌や堆積物の種類）は、侵食・堆積作用や汚染物質の吸着について、異なる性質をもつに至る。

### 2.3.03 帯水層と含水特性、地表近傍

地表から数 m 以内の帯水層と含水特性についての状態、およびその変化に関する FEP である。

帯水層とは、地質ユニットまたは浅層堆積層で、井戸や泉に十分な水を供給できるだけの含水特性をもつものをいう。帯水層や含水性のある層が存在しうるかは、地質学的要因、水文学的要因、気候的要因によって決まる。

### 2.3.04 湖、川、小川と泉

地表水の形態の特性およびその変化に関する FEP である。

小川、河川、湖は水理地質学的システムの境界として働く。これらは、多くの場合このシステムに入ってきた核種物質に対して重要な希釈材となるが、熱い乾いた環境下では、蒸発量が多く、濃縮されることもある。

### 2.3.05 海岸の特性

海岸や沿岸の特性とそれらの変化に関する FEP である。海岸の特性には、岬、入り江、浜、洲、崖、河口などがある。

これらの特性を持つプロセス（例えば、侵食、堆積、沿岸での運搬）は、これらのシステムの発達を決定し、このシステムに流入する放射性核種を含む物質の希釈や濃集に関して重要なメカニズムとなる場合もある。

### Marine features 2.3.06

FEPs related to the characteristics of seas and oceans, including the sea bed, and their evolution. Marine features include oceans, ocean trenches, shallow seas, and inland seas.

*Processes operating on these features such as erosion, deposition, thermal stratification and salinity gradients, determine the development of the system and may represent a significant mechanism for dilution or accumulation of materials (including radionuclides) entering the system.*

### Atmosphere 2.3.07

FEPs related to the characteristics of the atmosphere, including capacity for transport, and their evolution.

*Relevant processes include physical transport of gases, aerosols and dust in the atmosphere and chemical and photochemical reactions.*

### Vegetation 2.3.08

FEPs related to the characteristics of terrestrial and aquatic vegetation both as individual plants and in mass, and their evolution.

### Animal populations 2.3.09

FEPs related to the characteristics of the terrestrial and aquatic animals both as individual animals and as populations, and their evolution.

### Meteorology 2.3.10

FEPs related to the characteristics of weather and climate, and their evolution.

*Meteorology is characterised by precipitation, temperature, pressure and wind speed and direction. The variability in meteorology should be included so that extremes such as drought, flooding, storms and snow melt are identified.*

### Hydrological regime and water balance (near-surface) 2.3.11

FEPs related to near-surface hydrology at a catchment scale and also soil water balance, and their evolution.

*The hydrological regime is a description of the movement of water through the surface and near-surface environment. It includes the movement of materials associated with the water such as sediments and particulates. Extremes such as drought, flooding, storms and snow melt may be relevant.*

### Erosion and deposition 2.3.12

FEPs related to all the erosional and depositional processes that operate in the surface environment, and their evolution.

*Relevant processes may include, fluvial and glacial erosion and deposition, denudation, eolian erosion and deposition. These processes will be controlled by factors such as the climate, vegetation, topography and geomorphology.*

### Ecological/biological/microbial systems 2.3.13

FEPs related to living organisms and relations between populations of animals, plants and their evolution.

*Characteristics of the ecological system include the vegetation regime, and natural cycles such as forest fires or flash floods that influence the development of the ecology. The plant and animal populations occupying the surface environment are an intrinsic component of its ecology. Their behaviour and population dynamics are regulated by the wide range of processes that define the ecological system. Human activities have significantly altered the natural ecology of most environments.*

### 2.3.06 海洋の特性

海底を含めた海洋の特性、およびその変化に関するFEPである。海に関する特性には、外洋、海溝、浅海、内海などがある。

海に関する特性を持つ侵食、堆積、温度成層、塩濃度勾配は、海洋特性の発達を決定し、このシステムに侵入する放射性物質を含む物質の希釈や堆積に関して重要なメカニズムとなる場合もある。

### 2.3.07 大気

物質運搬能力を含めた大気の特徴およびその変化に関するFEPである。

関連するプロセスには、大気中のガス・エアロゾル・塵の物理的運搬、および化学・光化学反応がある。

### 2.3.08 植生

陸生および水生植物の、個体ならびに群としての特性、およびその変化に関するFEPである。

### 2.3.09 動物の生息

陸および水中の動物の個体あるいは群としての特性、およびその変化に関するFEPである。

### 2.3.10 気象学

気象および気候の特性、およびその変化に関するFEPである。

気象学は、降雨・気温・気圧・風速・風向によって特性づけられる。気象の変わりやすさも含めることにより、渇水、洪水、嵐、雪溶けなどの極端な現象を認識することができる。

### 2.3.11 水文学的体系と水収支（地表近傍）

集水域での地表近くの地下水と土壌水の収支、およびその変化に関するFEPである。

水文学では、地表あるいは地表近くの水の移動が定義される。堆積物や微粒子など地下水に伴う物質の移動も含まれる。渇水、洪水、嵐、雪溶けなどの極端な現象も関係するだろう。

### 2.3.12 侵食と堆積

地表環境における全ての侵食と堆積プロセス、およびその変化に関するFEPである。

関連するプロセスとしては、河川や氷河による侵食や堆積、裸地化、風による侵食や堆積などがある。これらのプロセスは、気候、植生、地形などの要因に影響される。

### 2.3.13 生態学／生物学／微生物学的システム

有機生命体、動物や植物の群の相互の関係、およびその変化に関するFEPである。

生態学的システムの特徴には、植生の状況や、生態環境に影響を与える山火事や洪水などの自然サイクルがある。地表環境に生息している動植物群は、生態環境の欠かせない構成要素である。それらの行動や群の均衡は、生態系を決定する様々なプロセスによって制御されている。人間活動は、様々な環境において自然の生態系に重大な影響を与えている。

## HUMAN BEHAVIOUR 2.4

The habits and characteristics of the individuals or populations, e.g. critical groups, to whom exposures are calculated, not including intrusive or other activities which will have an impact on the performance of the engineered or geological barriers, see 1.4.

*“Human Behaviour (passive)” is a sub-category in the International FEP List and is divided into individual FEPs.*

### Human characteristics (physiology, metabolism) 2.4.01

FEPs related to characteristics, e.g. physiology, metabolism, of individual humans.

*Physiology refers to body and organ form and function. Metabolism refers to the chemical and biochemical reactions which occur within an organism, or part of an organism, in connection with the production and use of energy.*

### Adults, children, infants and other variations 2.4.02

FEPs related to considerations of variability, in individual humans, of physiology, metabolism and habits.

*Children and infants, although similar to adults, often have characteristic differences, e.g. metabolism, respiratory rates, habits (e.g. pica, ingestion of soil) which may lead to different exposure characteristics.*

### Diet and fluid intake 2.4.03

FEPs related to intake of food and water by individual humans and the compositions and origin of intake.

*The human diet refers to the range of food products consumed by humans.*

### Habits (non-diet-related behaviour) 2.4.04

FEPs related to non-diet related behaviour of individual humans, including time spent in various environments, pursuit of activities and uses of materials.

*The human habits refers to the time spent in different environments in pursuit of different activities and other uses of materials. The diet and habits will be influenced by agricultural practices and human factors such as culture, religion, economics and technology. Smoking, ploughing, fishing, and swimming are examples of behaviour that might give rise to particular modes of exposure to environmental contaminants.*

### Community characteristics 2.4.05

FEPs related to characteristics, behaviour and lifestyle of groups of humans that might be considered as target groups in an assessment.

*Relevant characteristics might be the size of a group and degree of self-sufficiency in food stuffs/diet. For example, hunter/gathering describes a subsistence lifestyle employed by nomadic or semi-nomadic groups who roam relatively large areas of land hunting wild game and/or fish, and gathering native fruits, berries, roots and nuts, to obtain their dietary requirements.*

### Food and water processing and preparation 2.4.06

FEPs related to treatment of food stuffs and water between raw origin and consumption.

*Once a crop is harvested or an animal slaughtered it may be subject to a variety of storage, processing and preparational activities prior to human or livestock consumption. These may change the radionuclide distribution and/or content of the product. For example, radioactive decay during storage, chemical processing, washing losses and cooking losses during food preparation. Water sources may be treated prior to human or livestock consumption, e.g. chemical treatment and/or filtration.*



## 2.4 人間のふるまい

個人又は集団の習慣と特性。例えば、その被ばくが計算される決定グループを含むが、人工バリアや天然バリアの性能に影響を及ぼし得る侵入その他の活動を含まない。1.4 参照。

「人のふるまい (受動的)」は、国際 FEP リストの1つのサブカテゴリーであり、個別の FEP に細分化される。

### 2.4.01 人間の特性 (生理学, 代謝)

個々の人間の生理や代謝などの特性に関する FEP である。

生理は、体や発声体の形態や機能に関係する。代謝は、エネルギー生産と使用との関係で、有機体や、有機体の一部に起こる化学的、生化学的な反応と関係する。

### 2.4.02 成人, 子, 幼児など

個々の人間での多様性、生理、代謝、習慣の考察に関する FEP である。

大人と同様に、子供や幼児は、しばしば特性的な違いを持っている。例えば、代謝、呼吸数、習慣 (例えば、異食、土の摂取) であり、異なる被ばく特性をもたらすかもしれない。

### 2.4.03 食物と水分の摂取

個々の人間の食物や水の摂取および摂取の内容構成とその始まりについての FEP である。

人間の食事は、人間によって消費される食物の生産品の範囲に関係する。

### 2.4.04 習慣 (食習慣以外)

種々の環境で費やされた時間や活動と材料の使用を含んで、個々の人間の食事に関連しないふるまいに関する FEP である。

人の習慣は、異なった活動と材料の使用を目指して、違った環境で費やした時間に関係する。食事と習慣は、農業の活動と、文化、宗教、経済や技術のような人間の要因に影響を受ける。喫煙、耕作、釣りや水泳は、環境汚染に曝される特別な形態を示すふるまいの例である。

### 2.4.05 地域社会の特性

評価の対象のグループとして考えられる人間のグループの特性、ふるまい、生活体系に関する FEP である。

関係する特性は、グループの大きさや食物の材料、食事における自己充足度の度合いである。例えば、猟師・群衆は、彼らの食料を手に入れるため、野生の獲物と (又は) 魚を狩猟したり、生の果物・果実・種・木の実の収穫のため比較的広範囲を歩き回る放牧や半放牧のグループによって採用された生存の生活体系を述べている。

### 2.4.06 食物や水の処理と加工

食物と水の処理に関する元々の発生から消費までの間の FEP である。

穀物の収穫や動物の殺りくにより一旦収穫すると、種々の貯蔵、処理、人間や牧畜が消費する前の準備活動の影響を受けるだろう。これらは、放射性核種の分配と (又は)、生産の内容を変化させる。例えば、貯蔵している間の放射性崩壊、化学的処理、洗濯による流出や、料理の準備での消費。水源は、例えば、化学的処理や (又は) ろ過などにより、人間や家畜の消費の前に処理されるだろう。

#### Dwellings 2.4.07

FEPs related to houses or other structures or shelter in which humans spend time.

*Dwellings are the structures which humans live in. The materials used in their construction and their location may be significant factors for determining potential radionuclide exposure pathways.*

#### Wild and natural land and water use 2.4.08

FEPs related to use of natural or semi-natural tracts of land and water such as forest, bush and lakes.

*Special foodstuffs and resources may be gathered from natural land and water which may lead to significant modes of exposure.*

#### Rural and agricultural land and water use (incl. fisheries) 2.4.09

FEPs related to use of permanently or sporadically agriculturally managed land and managed fisheries.

*An important set of processes are those related to agricultural practices, their effects on land form, hydrology and natural ecology, and also their impact in determining uptake through food chains and other exposure paths.*

#### Urban and industrial land and water use 2.4.10

FEPs related to urban and industrial developments, including transport, and their effects on hydrology and potential contaminant pathways.

*Human populations are concentrated in urban areas in modern societies. Significant areas of land may be devoted to industrial activities. Water resources may be diverted over considerable distances to serve urban and/or industrial requirements.*

#### Leisure and other uses of environment 2.4.11

FEPs related to leisure activities, the effects on the surface environment and implications for contaminant exposure pathways.

*Significant areas of land, water, and coastal areas may be devoted to leisure activities. e.g. water bodies for recreational uses, mountains/wilderness areas for hiking and camping activities.*

#### 2.4.07 住居

人が時を過ごす家や他の構築物や避難施設に関する FEP である。

住まいは、人が住む建物である。それらの建設材料とその場所は、放射性核種の露出経路の可能性を決定する重要な要因であろう。

#### 2.4.08 野生の土地と天然水の利用

森、茂みや湖のような土地や水の、自然や半自然の地域の使用に関する FEP である。

特別な食物と資源は、環境に曝されている自然の陸地と水から主に集められる。

#### 2.4.09 田園と農地と水の利用 (漁業を含む)

恒久的な又は突発的な農業を営む土地の使用や漁業活動に関する FEP である。

重要なプロセスのまともりは、農作業、陸の形態への影響、水理や自然環境に関係し、食物連鎖や他の露出経路による摂取を決定することにも影響を与える。

#### 2.4.10 都市と工業用地と水の利用

移行や、水理や汚染経路に与える影響の可能性を含めて、都市化や工業の発展に関する FEP である。

人口は現代社会では都心地域に集まっている。陸の重要な地域は、工業活動に用いられる。水資源は、都心と(又は)工業の要求に役立てるため、かなりの距離を引き回される事になる。

#### 2.4.11 レジャーなどのための環境利用

レジャーの活動、表面の環境への影響や汚染の露出経路の関係に関する FEP である。

陸地や水辺や海岸沿岸の重要な地域は、レジャー活動にゆだねられる。例えば、リクリエーションのための水域や、ハイキングやキャンプ活動のための山・野生の地域である。

## RADIONUCLIDE/CONTAMINANT FACTORS 3

FEPs that take place in the disposal system domain that directly affect the release and migration of radionuclides and other contaminants, or directly affect the dose to members of a critical group from given concentrations of radiotoxic and chemotoxic species in environmental media.

*“Disposal System Domain: Radionuclide Factors” is a category in the International FEP List and is divided into sub-categories.*

### CONTAMINANT CHARACTERISTICS 3.1

The characteristics of the radiotoxic and chemotoxic species that might be considered in a postclosure safety assessment.

*“Contaminant Characteristics” is a sub-category in the International FEP List and is divided into individual FEPs.*

#### Radioactive decay and in-growth 3.1.01

Radioactivity is the spontaneous disintegration of an unstable atomic nucleus resulting in the emission of sub-atomic particles. Radioactive isotopes are known as radionuclides. Where a parent radionuclide decays to a daughter nuclide so that the population of the daughter nuclide increases this is known as in-growth.

*In post-closure assessment models, radioactive decay chains are often simplified, e.g. by neglecting the shorter-lived nuclides in transport calculations, or adding dose contributions from shorter-lived nuclides to dose factors for the longer-lived parent in dose calculations.*

#### Chemical/organic toxin stability 3.1.02

FEPs related to chemical stability of chemotoxic species.

#### Inorganic solids/solutes 3.1.03

FEPs related to the characteristics of inorganic solids/solutes that may be considered.

#### Volatiles and potential for volatility 3.1.04

FEPs related to the characteristics of radiotoxic and chemotoxic species that are volatile or have the potential for volatility in repository or environmental conditions.

*Some radionuclides may be isotopes of gaseous elements (e.g. Kr isotopes) or may form volatile compounds. Gaseous radionuclides or species may arise from chemical or biochemical reactions, e.g. metal corrosion to yield hydrogen gas and microbial degradation of organic material to yield methane and carbon dioxide.*

#### Organics and potential for organic forms 3.1.05

FEPs related to the characteristics of radiotoxic and chemotoxic species that are organic or have the potential to form organics in repository or environmental conditions.

#### Noble gases 3.1.06

FEPs related to the characteristics of noble gases.

*Radon and thoron are special cases, see FEP 3.3.08.*

### CONTAMINANT RELEASE/MIGRATION FACTORS 3.2

The processes that directly affect the release and/or migration of radionuclides in the disposal system domain.

*“Release/Migration Factors” is a sub-category in the International FEP List and is divided into individual FEPs.*

### 3. 放射性核種／汚染物質に関する要因

処分システム領域の中で生じる FEP であって、放射性核種と他の汚染物質の放出及び移行に直接影響し、又は、環境中に存在する一定量の放射性毒種及び化学毒種の被ばく量に直接影響する。

「処分システム領域：放射性核種に関する要因」は、国際 FEP リストの 1 つのカテゴリーであり、サブカテゴリーに細分化される。

#### 3.1 汚染物質の特性

処分場閉鎖後の安全評価において考慮されるであろう放射能毒性及び化学毒性の特性。

「汚染物質の特性」は、国際 FEP リストの 1 つのサブカテゴリーであり、個別の FEP に細分化される。

##### 3.1.01 放射性核種の崩壊と連鎖生成

放射能とは、不安定な原子核の自発核分裂による粒子（中性子など）の放射である。放射性同位元素は、放射性核種として知られている。親核種は崩壊によって娘核種を生成し、この時、娘核種の固体数が増加することから、この現象は増殖として知られている。

閉鎖後の評価モデルでは、放射壊変系列は、しばしば単純化される。例えば、核種移行計算において短半減期核種を無視することや、線量計算において長半減期親核種の線量係数に短半減期核種の線量係数を加えることによって、その寄与を考慮することである。

##### 3.1.02 化学／有機毒性の安定性

化学毒性種の化学的安定性に関する FEP である。

##### 3.1.03 無機固相／溶質

考慮される可能性のある無機固体／溶質の特性に関する FEP である。

##### 3.1.04 揮発性物質と揮発の可能性

処分場もしくは環境条件において、揮発性もしくは潜在的な揮発性を有する放射性毒性種と化学毒性種の特性に関する FEP である。

いくつかの放射性核種は、ガス状の放射性同位体（例：Kr 同位体）もしくは、揮発性の化合物を作る場合がある。ガス状の放射性核種や化学種は、例えば、水素ガスの発生を伴う金属の腐食や、メタンや炭酸ガスの発生を伴う有機物質の微生物分解など、化学的もしくは生化学的な反応から生じることがある。

##### 3.1.05 有機物と有機形態をとる可能性

処分場もしくは環境条件において有機物もしくは有機化合物となる可能性を有する放射性毒性種や化学的毒性種の特性に関する FEP である。

##### 3.1.06 希ガス

希ガスの特性に関する FEP である。

ラドンやトロンは、特別なケース。FEP3.3.08 参照

### 3.2 汚染物質の放出／移行に関する要因

処分システム領域における放射性核種の流出ないし移行に直接影響を及ぼすプロセス。

「汚染物質の流出／移行要因」は、国際 FEP リストの 1 つのサブカテゴリーであり、個別の FEP に細分化される。

### Dissolution, precipitation and crystallisation, contaminant 3.2.01

FEPs related to the dissolution, precipitation and crystallisation of radiotoxic and chemotoxic species under repository or environmental conditions.

*Dissolution is the process by which constituents of a solid dissolve into solution. Precipitation and crystallisation are processes by which solids are formed out of liquids. Precipitation occurs when chemical species in solution react to produce a solid that does not remain in solution. Crystallisation is the process of producing pure crystals of an element, molecule or mineral from a fluid or solution undergoing a cooling process.*

### Speciation and solubility, contaminant 3.2.02

FEPs related to the chemical speciation and solubility of radiotoxic and chemotoxic species in repository or environmental conditions.

*The solubility of a substance in aqueous solution is an expression of the degree to which it dissolves. Factors such as temperature and pressure affect solubility, as do the pH and redox conditions. These factors affect the chemical form and speciation of the substance. Thus different species of the same element may have different solubilities in a particular solution. Porewater and groundwater speciation and solubility are very important factors affecting the behaviour and transport of radionuclides.*

### Sorption/desorption processes, contaminant 3.2.03

FEPs related to sorption/desorption of radiotoxic and chemotoxic species in repository or environmental conditions.

*Sorption describes the physico-chemical interaction of dissolved species with a solid phase. Desorption is the opposite effect. Sorption processes are very important for determining the transport of radionuclides in groundwater. Sorption is often described by a simple partition constant ( $K_d$ ) which is the ratio of solid phase radionuclide concentration to that in solution. This assumes that sorption is reversible, reaches equilibrium rapidly, is independent of variations in water chemistry or mineralogy along the flow path, the solid-water ratio, or concentrations of other species. More sophisticated approaches involve the use of sorption isotherms.*

### Colloids, contaminant interactions and transport with 3.2.04

FEPs related to the transport of colloids and interaction of radiotoxic and chemotoxic species with colloids in repository or environmental conditions.

*Colloids are particles in the nanometre to micrometre size range which can form stable suspensions in a liquid phase. Metastable solid phases are unstable thermodynamically but exist due to the very slow kinetics of their alteration into more stable products. Colloids are present in groundwaters and may also be produced during degradation of the wastes or engineered barrier materials. Colloids may influence radionuclide transport in a variety of ways: retarding transport by sorption of aqueous radionuclide species and subsequent filtration; or, enhancing transport by sorption and transport with flowing groundwater.*

### Chemical/complexing agents, effects on contaminant speciation/transport 3.2.05

FEPs related to the modification of speciation or transport of radiotoxic and chemotoxic species in repository or environmental conditions due to association with chemical and complexing agents.

*This FEP refers to any chemical agents that are present in the repository system and the effects that they may have on the release and migration of radionuclides from the repository environment. Chemical agents may be present in the wastes or in repository materials or introduced, e.g. from spillage during repository construction and operation, e.g. oil, hydraulic fluids, organic solvents. Chemical agents may be used during construction and operation, e.g. in drilling fluids, as additives to cements and grouts etc.*

### 3.2.01 溶解、沈殿と結晶化、汚染物質

処分場もしくは環境下における、放射性毒性種及び化学的毒性種の溶解、沈殿及び結晶化に関する FEP である。

溶解とは、固体の構成成分が溶液に溶ける過程である。沈殿及び結晶化は、固体が液体から形成される過程である。沈殿は、溶液中の化学的種が、溶液中にはない固体を生成する反応をするときに起こる。結晶化とは、冷却過程を経て、流体もしくは溶液から、元素、分子もしくは鉱物の純粋な結晶を生成する過程である。

### 3.2.02 化学種と溶解度、汚染物質

処分場もしくは自然環境条件における、放射能毒性種及び化学的毒性種の化学分種化と溶解度に関する FEP である。

水溶液中における物質の溶解度は、その物質の溶解の程度を表したものである。pH や酸化還元条件と同じように、温度や圧力のような要因は溶解度に影響を与える。

これらの要因は化学形態や物質の種形成に影響を与える。したがって、同じ元素の異なる化学種が、特定の溶液の中で、異なる溶解度を有する可能性がある。間隙水や地下水中の種形成や溶解度は、放射性核種のふるまいや移行に影響を与えるととも重要な要因である。

### 3.2.03 吸着／脱着プロセス、汚染物質

処分場もしくは環境条件における、放射能毒性種と化学毒性種の吸着・脱着に関する FEP である。

吸着とは、溶解した化学種と固相との物理化学的な相互作用を言う。脱着とは、この逆の効果である。吸着過程は、地下水での放射性核種の移行を決定するのにとても重要である。吸着は、放射性核種の溶液中及び固相中における濃度の比である分配係数 ( $K_d$ ) としてしばしば表される。これは、吸着が可逆的であり、瞬時に平衡に達することを仮定しており、流路における水溶液組成もしくは鉱物種、固液比、他の化学種の濃度の変化には依存しない。より高度に複雑なアプローチは、吸着等温線の使用を含むものである。

### 3.2.04 コロイドと汚染物質の相互作用と移行

処分場もしくは自然環境条件における、コロイドの移行や、放射性毒性種や化学的毒性種のコロイドとの相互作用に関する FEP である。

コロイドは、液相中において安定な懸濁態となりうるナノメートルからマイクロメートルの大きさの粒子である。準安定の固相は、熱力学的に不安定であるが、より安定な生成物への変質の非常にゆっくりとした反応速度論的過程として存在する。コロイドは地下水中に存在しており、廃棄体もしくは人工バリア材料の劣化に際して生成されるかもしれない。コロイドは、様々な方法で放射性核種の移行に影響を与えるであろう。例えば、水性の放射性核種がコロイドに吸着・ろ過されることにより移行が遅延されること、もしくは、コロイドに吸着した放射性核種が地下水流によって移行し、放射性核種自身の移行が促進されることなどである。

### 3.2.05 化学薬剤／錯化剤による汚染物質の化学種／移行への影響

処分場もしくは自然環境条件中に、化学薬剤及び錯化剤が共存することによる、放射性毒性種や化学的毒性種のもしくは移行の変更に関する FEP である。

この FEPs は、処分場システムに存在する何等かの化学薬剤が、処分場環境からの放射性核種の流出もしくは移行に与える可能性のある影響について言及している。化学薬剤は、廃棄体中もしくは処分場材料中に存在するか持ち込まれることによって処分場環境に存在する可能性がある。例えば、処分場建設時や運転時において、オイル、油圧油、有機溶剤が流出することなどである。また、化学薬剤は、例えば、掘削泥水やセメントやグラウト等の添加剤のように、処分場の建設及び運転の期間に使用される可能性がある。

### Microbial/biological/plant-mediated processes, contaminant 3.2.06

FEPs related to the modification of speciation or phase change due to microbial/biological/plant activity.

*Microbial activity may facilitate chemical transformations of various kinds.*

### Water-mediated transport of contaminants 3.2.07

FEPs related to transport of radiotoxic and chemotoxic species in groundwater and surface water in aqueous phase and as sediments in surface water bodies.

*Water-mediated transport of radionuclides includes all processes leading to transport of radionuclides in water. Radionuclides may travel in water as aqueous solutes (including dissolved gases), associated with colloids (see FEP 3.2.04) or, if flow conditions permit, with larger particulates/sediments. Relevant processes include:*

- *advection, i.e. movement with the bulk movement of the fluid;*
- *molecular diffusion, i.e. random movement of individual atoms or molecules within the fluid;*
- *dispersion, i.e. the spread of spatial distribution with time due to differential advection;*
- *matrix diffusion, i.e. the diffusion or micro-advection of solute/colloids etc. into non-flowing pores;*
- *percolation, i.e. movement of the fluid under gravity;*
- *multiphase transport processes.*

### Solid-mediated transport of contaminants 3.2.08

FEPs related to transport of radiotoxic and chemotoxic species in solid phase, for example large-scale movements of sediments, landslide, solifluction and volcanic activity.

*Relevant processes include transport by suspended sediments and erosion.*

### Gas-mediated transport of contaminants 3.2.09

FEPs related to transport of radiotoxic and chemotoxic species in gas or vapour phase or as fine particulate or aerosol in gas or vapour.

*Radioactive gases may be generated from the wastes, e.g. C-14-labelled carbon dioxide or methane. Radioactive aerosols or particulates may be transported along with non-radioactive gases, or gases may expel contaminated groundwater ahead of them.*

### Atmospheric transport of contaminants 3.2.10

FEPs related to transport of radiotoxic and chemotoxic species in the air as gas, vapour, fine particulate or aerosol.

*Radionuclides may enter the atmosphere from the surface environment as a result of a variety of processes including transpiration, suspension of radioactive dusts and particulates or as aerosols. The atmospheric system may represent a significant source of dilution for these radionuclides. It may also provide exposure pathways e.g. inhalation, immersion.*

### Animal, plant and microbe mediated transport of contaminants 3.2.11

FEPs related to transport of radiotoxic and chemotoxic species as a result of animal, plant and microbial activity.

*Burrowing animals, deep rooting species and movement of contaminated microbes are included.*



### 3.2.06 微生物学的／生物学的／植物が媒介するプロセス, 汚染物質

微生物／生物／植物の活動による, 分種化や相変化の変更に関する FEP である.

微生物の活動は, 様々な種類の化学的変質を促進するかもしれない.

### 3.2.07 水を媒介する汚染物質の移行

地下水中, 表層水及び表層水域中の堆積物における, 放射性毒性種や化学的毒性種の移行に関する FEP である.

水を介した放射性核種の移行は, 水中での放射性核種の移行の全ての過程に通じる. 放射性核種は, 水溶液の溶質として(溶解したガスを含む), あるいはコロイドに収着して(FEP3.2.04 参照) 水中を移動する. さらに, 流動条件によっては, より大きい微粒子・沈澱物としても移動する. 関連過程を以下に示す:

- ・ 移流, すなわち, 流体の全体的な動きによる移動
- ・ 分子拡散, すなわち, 流体中での個々の原子や分子のランダムな動き
- ・ 分散, すなわち, 差動的な移流により時間とともに散らばること
- ・ マトリックス拡散, すなわち, 流れの無い間隙等への溶質・コロイドなどの拡散や小さい移流
- ・ 浸透, すなわち, 重力の下での流体の移動
- ・ 多相流過程

### 3.2.08 固相を媒介する汚染物質の移行

例えば, 地滑り, ソリフラクション, 火山活動などの大規模な堆積物の移動による, 放射性毒性種や化学的毒性種の固相での移行に関する FEP である.

関連過程は, 堆積物の空気中への浮遊や侵食による移行を含む.

### 3.2.09 ガスを媒介する汚染物質の移行

放射能毒性種や化学的毒性種の気相もしくは蒸気相としての移行, もしくは気体もしくは蒸気中での微粒子やエアロゾルとしての移行に関する FEP である.

例えば C-14 を含む炭酸ガスもしくはメタンのような放射性気体が, 廃棄体から発生するかもしれない. 放射性エアロゾルや微粒子は, 非放射性的の気体とともに輸送されるであろう.

### 3.2.10 大気中での汚染物質の移行

放射能毒性種や化学的毒性種の空気中における, 気体, 蒸気, 微粒子, エアロゾルとしての移行に関する FEP である.

放射性核種は, 蒸発, 放射性のダストや微粒子の浮遊, エアロゾルなどの様々な過程によって, 地表の環境から大気圏に移行するであろう. 大気システムは, これらの放射性核種の希釈の重要な要因となるであろう. その結果として, 例えば, 吸入や浸漬などの被ばく経路が生じることになる.

### 3.2.11 動植物と微生物を媒介する汚染物質の移行

動物, 植物, 微生物の活動による, 放射能毒性種や化学的毒性種の移行に関する FEP である.

底生動物, 深く根づいている植物種や(放射能毒性種や化学的毒性種に)汚染された微生物の動きが, 含まれる.

## Human-action-mediated transport of contaminants 3.2.12

FEPs related to transport of radiotoxic and chemotoxic species as a direct result of human actions.

*Human-action-mediated transport of contaminants includes processes such as drilling into or excavation of the repository, the dredging of contaminated sediments from lakes, rivers and estuaries and placing them on land.*

*Earthworks and dam construction may result in the significant movement of solid material from one part of the biosphere to another. Ploughing results in the mixing of the top layer of agricultural soil, usually on an annual basis.*

## Foodchains, uptake of contaminants in 3.2.13

FEPs related to incorporation of radiotoxic and chemotoxic species into plant or animal species that are part of the possible eventual food chain to humans.

*Plants may become contaminated either as a result of direct deposition of radionuclides onto their surfaces or indirectly as a result of uptake from contaminated soils or water via the roots. Animals may become contaminated with radionuclides as a result of ingesting contaminated plants, or directly as a result of ingesting contaminated soils, sediments and water sources, or via inhalation of contaminated particulates, aerosols or gases.*

## EXPOSURE FACTORS 3.3

Processes and conditions that directly affect the dose to members of the critical group, from given concentrations of radionuclides in environmental media.

“Exposure Factors” is a sub-category in the International FEP List and is divided into individual FEPs.

## Drinking water, foodstuffs and drugs, contaminant concentrations in 3.3.01

FEPs related to the presence of radiotoxic and chemotoxic species in drinking water, foodstuffs or drugs that may be consumed by human.

## Environmental media, contaminant concentrations in 3.3.02

FEPs related to the presence of radiotoxic and chemotoxic species in environmental media other than drinking water, foodstuffs or drugs.

*The comparison of calculated contaminant concentrations in environmental media with naturally-occurring concentrations of similar species or species of similar toxic potential, may provide alternative or additional criteria for assessment less dependent on assumptions of human behaviour.*

## Non-food products, contaminant concentrations in 3.3.03

FEPs related to the presence of radiotoxic and chemotoxic species in human manufactured materials or environmental materials that have special uses, e.g. clothing, building materials, peat.

*Contaminants may be concentrated in non-food products to which humans are exposed. For example, building materials, natural fibres or animal skins used in clothing, and the use of peat for fuel.*

## Exposure modes 3.3.04

FEPs related to the exposure of man (or other organisms) to radiotoxic and chemotoxic species.

*The most important modes of exposure to radionuclides are generally:*

- *ingestion (internal exposure) from drinking or eating contaminated water or foodstuffs;*
- *inhalation (internal exposure) from inhaling gaseous or particulate radioactive materials;*
- *external exposure as a result of direct irradiation from radionuclides deposited on, or present on, the ground, buildings or other objects.*

*Exposure can also come from immersion in contaminated water bodies, direct radiation from airborne plumes of radioactive materials, injection through wounds, and cutaneous absorption of some species.*

### 3.2.12 人間の行為に起因する汚染物質の移行

人間の行為に伴う、放射能毒性種や化学的毒性種の移行に関する FEP である。

汚染物質の人間行為を介した移行は、処分場の穿孔（ボーリング）や掘削、湖、川や河口からの汚染堆積物の浚渫、及びそれら堆積物の陸地への定置のような過程を含む。土木工事やダム建設により、生物圏の一部から他の場所にかなりの固体物質が移動するであろう。農耕は、通常、年周期で、土壌の上部層を混合させる。

### 3.2.13 食物連鎖への汚染物質の取込み

人間への食物連鎖が考えられる植物種や動物種への放射能毒性種及び化学的毒性種の移行に関する FEP である。

植物汚染は、表面への放射性核種の直接的な付着、もしくは汚染した土や水の根からの吸収によって起こる。動物は、汚染された植物の摂取、汚染された土、堆積物、水の直接的な摂取、もしくは汚染された微粒子、エアロゾルや気体の吸入によって、放射性核種により汚染される。

## 3.3 被ばくに関する要因

与えられた環境媒体中における放射性核種の濃集による、決定グループメンバーの被ばく線量に直接影響を及ぼすプロセスと条件。

「被ばく要因」は、国際 FEP リストの 1 つのサブカテゴリーであり、個別の FEP に細分化される。

### 3.3.01 飲料水、食料品、薬品中の汚染物質の濃度

人間によって消費されるであろう飲料水、食物や薬の中に混入している放射性毒性種や化学的毒性種に関する FEP である。

### 3.3.02 環境中での汚染物質の濃度

飲料水、食物や薬以外の環境媒体中の放射能毒性種や化学的毒性種の存在に関する FEP である。

環境媒体中で算出された汚染濃度と、自然界における（汚染物質と）類似の化学種もしくは類似の有毒の潜在性を持つ化学種の濃度との比較は、人のふるまいの仮定によらない評価のための新しい、もしくは付加的な基準を与えるであろう。

### 3.3.03 食料品以外の生産物中の汚染物質の濃度

例えば、衣類、ビルの材料、でい炭等、特別に使用される人工材料や環境材料中の放射能毒性種や化学的毒性種の存在に関する FEP である。

汚染物質は、人が被ばくした非食品製品に濃縮するであろう。例えば、ビルの材料、衣服に使用されている自然繊維又は動物の皮、燃料のための泥炭の使用である。

### 3.3.04 被ばくの様式

放射能毒性種や化学的毒性種による、人（又は他の有機体）の被ばくに関する FEP である。

放射性核種による被ばくの最も重要な様式は、一般的には以下のとおり。

- ・ 汚染された水や食べ物の摂取（内部被ばく）
  - ・ ガス状や粒子状の放射性物質の吸入（内部被ばく）
  - ・ 地上やビルやその他のものに堆積又は存在する放射性物質からの直接的な放射線の照射による外部被ばく
- 被ばくは、汚染した水の中への浸漬や、空中浮揚の放射性物質のブリュームからの直接放射線や、傷口からの注入や、いくつかの化学種の皮膚吸収からも発生する。

### Dosimetry 3.3.05

FEPs related to the dependence between radiation or chemotoxic effect and amount and distribution of radiation or chemical agent in organs of the body.

*Dosimetry involves the estimation of radiation dose to individual organs, tissues, or the whole body, as a result of exposure to radionuclides. The radiation dose will depend on: the form of exposure, e.g. ingestion or inhalation of radionuclides leading to internal exposure or proximity to concentrations of radionuclides leading to external exposure; the metabolism of the radioelement and physico-chemical form if inhaled or ingested, which will determine the extent to which the radionuclide may be taken up and retained in body tissues; and the energy and type of radioactive emissions of the radionuclide which will affect the distribution of energy within tissues of the body.*

### Radiological toxicity/effects 3.3.06

FEPs related to the effect of radiation on man or other organisms.

*Radiation effects are classified as somatic (occurring in the exposed individual), genetic (occurring in the offspring of the exposed individual), stochastic (the probability of the effect is a function of dose received), non-stochastic (the severity of the effect is a function of dose received and no effect may be observed below some threshold).*

### Non-radiological toxicity/effects 3.3.07

FEPs related to the effects of chemotoxic species on man or other organisms.

### Radon and radon daughter exposure 3.3.08

FEPs related to exposure to radon and radon daughters.

*Radon and radon daughter exposure is considered separately to exposure to other radionuclides because the behaviour of radon and its daughter, and the modes of exposure, are different to other radionuclides. Radon (Rn 222) is the immediate daughter of radium (Ra-226). It is a noble gas with a half-life of about 4 days and decays through a series of very short-lived radionuclides (radon daughters), with half-lives of 27 minutes or less, to a lead isotope (Pb-210) with a half-life of 21 years. The principal mode of exposure is through the inhalation of radon daughters attached to dust particles which may deposit in the respiratory system.*

### 3.3.05 線量と放射線の関係

体の臓器への、放射線や化学毒性の影響や量と、放射線や化学薬剤の分布の依存に関する FEP である。線量測定は、放射性核種による被ばくに伴う、個々の臓器、組織や全身への放射線量の見積りを必要とする。放射線量は、「例えば、放射性核種の吸入や摂取に伴う内部被ばく、もしくは放射性核種への接近による外部被ばくなどの被ばく形態」、「放射性元素を吸入や摂取したときに、それらの体内組織への残留の程度を決定するであろう放射性元素の代謝や物理化学的形態」、「体内組織へのエネルギーの分配に影響するであろう、放射性核種の放射線のエネルギーや崩壊の種類」などに依存するであろう。

### 3.3.06 放射線学的毒性/影響

人や他の生物（有機体）への放射線の影響に関する FEP である。

放射線の影響は、身体個人の被ばくで発生、遺伝的（被ばくした個人の子孫に発生）、確率的（影響の確率は、受けた線量の関数）、非確率的（影響の厳格性は、受けた線量の関数であり、影響がないものは、いくつかのしきい値を下回るであろう）に分別される。

### 3.3.07 放射線以外の毒性/影響

人や他の生物に対する化学的毒性種の影響に関する FEP である。

### 3.3.08 ラドンとラドン娘核種による被ばく

ラドン及びラドンの娘核種による被ばくに関する FEP である。

ラドン及びラドンの娘核種による被ばくは、これらの挙動や被ばく形態が他の放射性核種と異なることから、個別に考えられている。ラドン (Rn-222) は、ラジウム (Ra-226) の直接の娘核種である。ラドンは、半減期が約 4 日の希ガスであり、短半減期 (27 分もしくはそれ未満) の放射性核種系列 (ラドン娘核種) を経て、半減期が 21 年の鉛 (Pb-210) へと崩壊する。主要な被ばく形態は、ラドン娘核種が付着したダスト微粒子を吸入することによる、これらの呼吸器系への沈着である。



---

引用例：

深部地質環境研究センター編（2007）概要調査の調査・評価項目に関する技術資料－長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方－. 地質調査総合センター研究資料集, no.459, 産業技術総合研究所地質調査総合センター

**Bibliographic Reference:**

Research Center for Deep Geological Environments, editor (2007) Technical Report on the Features for Preliminary Field Investigations of HLW Geological Disposals, Geological Survey of Japan Open File Report, no.459, Geological Survey of Japan, AIST.

---

