

最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価
—地質環境特性および地質環境の長期安定性について—

平成26年5月

総合資源エネルギー調査会

電力・ガス事業分科会 原子力小委員会

地層処分技術WG

目次

第1章 はじめに	1
第2章 地層処分の基本的考え方	3
2.1 地層処分の概念	3
2.2 地質環境に対する考え方	4
2.3 段階的なサイト選定と調査スケールについて	6
第3章 好ましい地質環境特性	8
3.1 閉じ込め機能の観点からの好ましい地質環境特性について	8
3.2 「好ましい地質環境特性」に関する評価	13
第4章 地質環境の長期安定性への影響要因と対応方針	15
4.1 閉じ込め機能への影響要因	15
4.2 物理的隔離機能への影響要因	26
4.3 著しい影響を与える影響要因と関連事象のまとめ	27
4.4 「地質環境の長期安定性への影響要因と対応方針」に関する評価	27
第5章 地質環境の長期安定性への影響要因に関するサイト調査の方針	30
5.1 段階的な調査と総合的評価の考え方	30
5.2 プレートシステムについて	31
5.3 天然現象の考え方と回避の方法	32
5.4 「地質環境の長期安定性への影響要因に関するサイト調査の方針」に関する評価 .	40
第6章 まとめと今後の取組に当たって	42
参考文献	44
添付資料	56
(添付資料－1) 地層処分技術WG委員名簿	57
(添付資料－2) 地層処分技術WG会合経緯	58

第1章 はじめに

わが国における高レベル放射性廃棄物の地層処分については、昭和51年以降、核燃料サイクル開発機構（現：日本原子力研究開発機構）を中心に当時の技術・知見に基づく検討が進められ、平成11年に「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、第2次取りまとめ）として成果が取りまとめられた。平成12年に原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会において、わが国においても地層処分が技術的に実現可能であるという評価がなされるとともに、技術的信頼性の向上に向け、研究開発を継続し、最新の科学的知見を反映していく必要性が示された。

その後、第2次取りまとめから10年以上が経過し、研究開発が進展するとともに、東北地方太平洋沖地震のような未曾有の天然現象が発生したことから、平成24年に出された日本学術会議や原子力委員会の提言でも地層処分の技術的信頼性について、改めて最新の科学的知見を反映した再評価を行い、今後の研究課題を明らかにすることが不可欠であるといった主旨の指摘がなされている。また、高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けた取組の見直しを目的とし、平成25年より開催された総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会放射性廃棄物WGにおいても、専門家による再評価を行う必要性が示された。

以上の背景から、地層処分の技術的信頼性について、最新の科学的知見を反映した現段階の評価や今後の研究開発課題を早急に示すことが必要との認識にたち、総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会原子力小委員会の下に「地層処分技術WG」が平成25年10月に設置された。

地層処分技術WGの審議は、放射性廃棄物WGの技術系専門家4人に加え、審議の中立性・公平性を確保する観点から、学会等からの推薦等からなる12名の専門家によってなされた。事務局側説明者としては、原子力発電環境整備機構（以下、NUMO）および日本原子力研究開発機構が参加し、審議はNUMOから提示された資料を基に行われた。

地層処分技術WGは、平成25年10月から平成26年5月までに、計8回開催した。この間、審議の中立性・独立性を高める観点から疑問や批判に対して開かれた場とするため、情報を公開し、審議内容について専門家への意見募集を計3回行った。

審議内容としては、地層処分の安全機能に著しい影響を与える天然現象を段階的なサイト選定により回避する必要があることに鑑み、まず、回避すべき天然現象を抽出するための前提として、放射性物質を長期に隔離し閉じ込めておくために好ましい地質環境特性について特性ごと（熱環境、力学場、水理場、化学場）に整理した。その後、それらに影響を与える天然現象について（地質環境の長期安定性）の議論を行った。次にこれに基づき、地層処分のサイト選定において、回避が必要な事象を抽出するとともに、それらの事象について、

段階的なサイト選定における回避の考え方についての議論を行った。

本報告書は、上記の審議結果をまとめたものである。報告書の構成は、第 2 章で審議の前提となる地層処分の基本的考え方を示し、第 3 章においては好ましい地質環境特性について、第 4 章では地質環境の長期安定性への影響要因と対応方針について、第 5 章では地質環境の長期安定性への影響要因に関するサイト調査の方針について示し、第 6 章にて全体の評価を取りまとめた。

なお、3.1、4.1 から 4.3、および 5.1 から 5.3 については、NUMO が示した資料に基づいて本WGが審議してとりまとめた考え方を記述しており、3.2、4.4、5.4、および第 6 章については、本WGとしての評価を記述したものである。

第2章 地層処分の基本的考え方

2.1 地層処分の概念

高レベル放射性廃棄物の最終処分においては、数万年以上の長期間にわたり人間とその生活環境に放射性廃棄物の影響がおよばないようにすることが求められる。そのため、地層処分では地下深部に放射性廃棄物を埋設することで、放射性物質が、生活環境から隔離され、さらに長期にわたってはその放出や分散が抑制され処分場周辺に閉じ込められるようにする。この間に、放射性廃棄物に含まれる放射能の大部分が減衰するため、人間と環境が放射性廃棄物に由来する放射線の影響から防護される。

これらの目的を達成するために、放射性廃棄物が埋設される地質環境が本来的に有する廃棄物の隔離機能および放射性物質の閉じ込め機能（天然の地質環境条件が本来的に有する、溶解度制限による溶出抑制と遅い地下水流速による移行抑制のバリア機能、以下、天然バリアという）にいくつかの工学的対策（工学的に性能を織り込んだ機能、以下、人工バリアという）を組み合わせ、それらの複合的および補完的特性によって放射性廃棄物が隔離され閉じ込められておかれるよう、多重バリアシステムにより受動的な安全機能が確実に働くようにする。

地層処分の考え方は、上記に記載した観点から、地下深部に埋設された放射性廃棄物が長期にわたり隔離されること、および母岩とその周囲の地質環境が地層処分に適した閉じ込め機能を有していることを確認し、その上で、地質環境に応じて、放射性物質を長期にわたり、より確実に地下深部に閉じ込められるように、適切に設計された人工バリアとともに放射性廃棄物を埋設することが基本となる。具体的には、現在の地層処分の考え方に基づくと、廃棄物であるガラス固化体を鋼製のオーバーパックに封入し、それを地下水および放射性物質の移行を抑制する効果のある粘土系材料（緩衝材）で取り囲み、長期にわたる物理的隔離が見込まれる地下深部の岩盤に埋設する。

その上で、このような多重バリアシステムにより、長期にわたり放射性廃棄物が隔離され閉じ込められることを、さまざまなシナリオに基づいた予測解析的な手法により総合的に評価し、確認する。

具体的には、オーバーパックが破損し、ガラスの溶解速度と放射性物質に固有の溶解度に制限されてガラス固化体から溶け出した放射性物質が、緩衝材を通過後、岩盤中の地下水の流れに沿って移動し、最終的に地表に至ることを想定した評価を行う（以下、地下水シナリオという）。このようなシナリオを踏まえて、多重バリアとしてのオーバーパックおよび緩衝材といった人工バリアに期待される閉じ込め機能が発揮されるよう、著しいオーバーパックの破損の進行、緩衝材の機能低下（層厚の減少や粘土鉱物の変質等）を生じさせない長期的に安定な地質環境が必要となる。

2.2 地質環境に対する考え方

2.1 に示したように、地層処分の場合となる深部の地質環境には、天然バリアとして、放射性廃棄物を物理的に隔離し、かつ放射性物質を閉じ込め、その移行を抑制することに適した特性であることが必要である。また、人工バリアであるガラス固化体、鋼製オーバーパック、および緩衝材が、合理的な設計の範囲で、それぞれの性能を発揮できる特性であることも必要である（以下、好ましい地質環境特性）。さらには、これらの地質環境特性が、長期間にわたる変遷の中で、ある一定の変動範囲内にあることが求められる（以下、地質環境の長期安定性）。

そこで、地質環境特性を大きく熱環境、力学場、水理場、化学場到大別して、その変動範囲を地質学的な調査や評価方法により確認する。その際の重要な考え方として、空間スケールと時間スケールの考え方を示す。

2.2.1 物理的隔離機能をもたらす地質環境特性に関する時間・空間スケール

図 1 に処分場とその周囲の空間スケールの概念図を示した。地下深部の好ましい地質環境特性やその長期安定性を確認する対象となる範囲として、放射性廃棄物を埋設した空間（処分場）とその近傍の岩盤を含む空間を、「処分場スケール」と定義する。また、処分場スケールの外側にあつて、地質環境特性である熱環境、力学場、水理場、化学場に対して、影響を与える要因となる事象が分布する領域を「広域スケール」と定義する。

放射性廃棄物が、長期にわたって地表の生活環境から物理的に隔離され続けるかどうかを考えるには、より長期で広域の時間と空間の枠内で運動しているプレートがあり、その一部として動いている広域スケールの地質環境が、どのような幅で変遷する可能性があるかを考える。厚い岩盤による物理的隔離機能を損なう自然過程としては、長期にわたり徐々に進行する侵食や急激に起こる火山活動等が考えられ、これらの将来の悪影響が十分な信頼性を持って回避できるならば、物理的隔離のための地質環境特性としては長期的に安定であるとみなす。

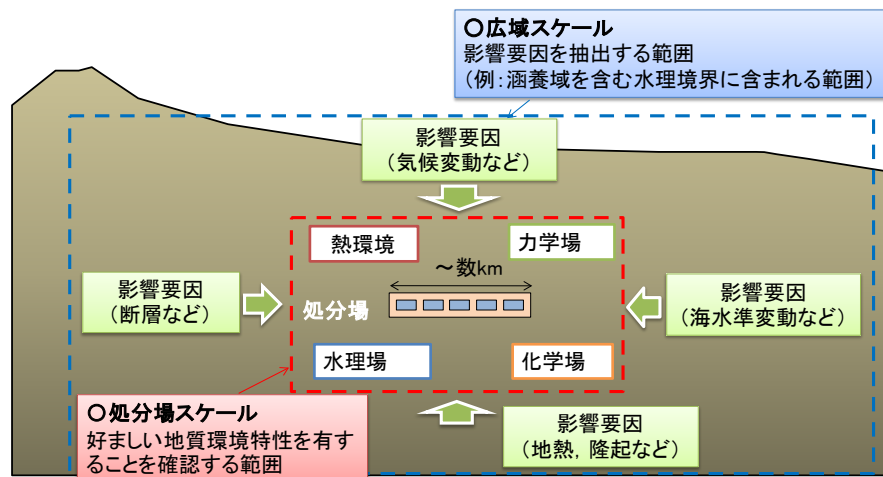


図 1 空間スケールの概念図

2.2.2 閉じ込め機能をもたらす地質環境特性に関する時間・空間スケール

放射性廃棄物が、地表の生活環境から物理的に隔離された処分場とその近傍に、放射能が減衰するまでの十分な長期にわたって閉じ込められるかどうかを考えるには、将来、地下水を介して放射性物質が移行することを想定したシナリオに基づいて、人工バリアと天然バリアの各構成要素それぞれの閉じ込め機能が時間とともにどのように変遷するかを考える。

廃棄物埋設後、数百年程度の期間は、主に初期の放射能の大部分を占めるセシウム-137（半減期 30 年）とストロンチウム-90（半減期 29 年）の崩壊に伴うガラス固化体の発熱が著しい。このため、廃棄物の周囲では、地下水の熱対流や放射線分解等が起こりやすい条件が想定される。

オーバーパックは、このような条件下において、放射性物質の移行が起こらないよう、少なくとも千年程度の期間、ガラス固化体と地下水との接触を防止することにより、放射性物質の地下水への浸出を抑制する。また、オーバーパックが徐々に腐食され、その機能を失うと、廃棄物であるガラス固化体と地下水が接触するが、ガラス固化体は水に溶けにくいいため、放射性物質の浸出が抑制される。ただし、非常にゆっくりとはあるが、ガラスが溶解する可能性があり、保守的な見積もりによれば 7 万年程度経過するとガラス固化体の全量が溶解すると考えられている。このため、この徐々に進行するガラス固化体の溶解にしたがって、溶解度の高い放射性物質は地下水中に浸出すると考えられる。初期の放射能の大部分を占めるセシウム-137 とストロンチウム-90 は地下水への溶解度が高いので、これらが減衰するまでの初期の数百年から千年の期間は、オーバーパックおよびガラス固化体の健全性の維持が望ましい。

オーバーパックの機能が失われて以降、ガラス固化体から浸出した、より長半減期の放射性物質は、放射性物質に固有の溶解度に制限され大部分が固体としてその場に閉じ込められたままとするが、溶解度に従い地下水中に溶出した部分が地下水の流れによって移行する。廃棄物を取り囲む地質環境には、放射

性物質の難溶解性を保証するための間隙水条件（低 pH、高 pH でないこと、酸化性雰囲気でないこと等）の成立が求められる。またその後の移行を遅延させるために、緩衝材には、移行抑制の機能として、低透水性、収着性等の機能が期待されている。この間、これらの緩衝材の機能が長期間維持されるよう、緩衝材の化学的な変質（変質、密度低下）が起こりにくいことが要求される。

処分場スケールの地質環境には、以上に示した人工バリアの機能が所定の期間維持されるのに適した設置環境としての特性を有し、さらに、天然バリアとして放射性物質の溶解、移行を抑制するのに適した特性を有することが求められる。さらに、その特性は、数万年以上の長期間にわたり変遷する中で、その変動範囲が、機能維持の観点から許容できる範囲であることが求められる。このような要求が満たされる場合、地質環境特性は長期的に安定であるとみなす。

2.3 段階的なサイト選定と調査スケールについて

ここでは処分場を建設する候補地とその調査地区、および処分場の建設地を包括して「サイト」と呼ぶこととする。地層処分事業では、サイト選定の過程の透明性・公平性を確保し、かつ、地層処分場受入地域の住民を含む多様な立場の人々の参加する形での合意形成のもとで事業を進め、必要であれば後戻りできるようにするために、段階的にサイトを選定することとしている。処分地選定の期間は、現時点での想定では、文献調査の開始から処分施設¹建設地の選定までだけで20年程度を要し、文献調査以前の段階も含めればさらに長期にわたる。最終処分法では、サイト選定を概要調査地区選定段階（文献調査の段階）、精密調査地区選定（概要調査の段階）、処分施設建設地選定（精密調査の段階）の三段階で実施することとしており、NUMOの事業もこれに基づいて進められる。

文献調査においては、概要調査地区として選定しようとする地区およびその周辺の地域について、文献その他の資料により、過去の地震等の履歴、活断層・火山の状態、地層の状態、および鉱物資源の有無等が調査される。

概要調査においては、概要調査地区内の処分を行おうとする地層およびその周辺の地層について、ボーリングやトレンチ調査等により、岩石の性質と状態、活断層の位置や性状、過去の地震等の履歴、および破碎帯や地下水の概要等が調査される。

精密調査においては、地下施設を建設することにより、岩石の強度・性質、地層の化学的性質、および地下水の流速や化学組成等の詳細等が調査される。

図2には、段階的な調査の対象範囲としての調査スケールと空間スケールの関係を示した。文献調査、概要調査、精密調査と段階が進むごとに、調査対象となる範囲を段階的に絞り込み、それに従い処分システムの置かれる地質環境に関する情報は詳細度を増してゆく。

最終処分法によれば、特に著しい影響を与える天然事象の起こる可能性を概

¹ 選定段階については法文に倣い「処分施設建設地（選定段階）」とする。

要調査の段階までに調査し、将来予測等も検討した上で、そのような影響を受ける可能性のある地域を処分地から回避することが求められている。

本WGでは、最終処分法に定められたこれらの段階に、文献調査に先立つ段階、すなわち全国規模の地域を特定しない一般的文献情報に基づく事前確認の段階を加えて、各段階それぞれの時点で、処分地としての適不適を判断する指標を考えた。

以上の考え方に従って、第3章では、処分場スケールにおいて閉じ込め機能の観点で好ましい地質環境特性とは何かを示す。また、第4章では、閉じ込め機能及び物理的隔離機能に関する地質環境特性の長期安定性を示すために、まず、広域スケールで生じる様々な天然現象を抽出し、それが処分場スケールの地質環境特性にどのような影響を与えるかを示す。第5章では、著しい影響を与える天然現象を回避するためのサイト調査方針を示す。

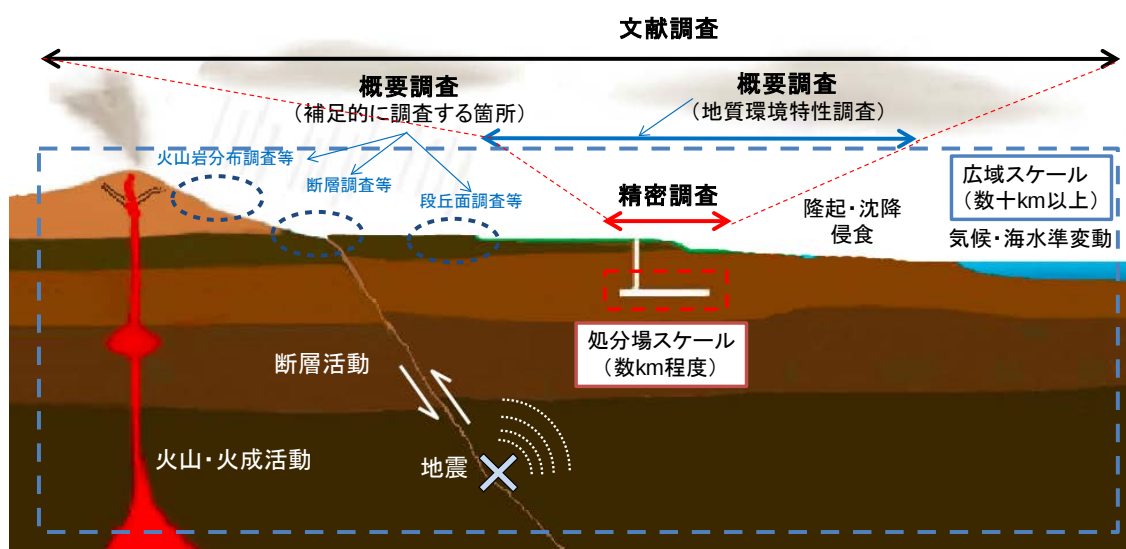


図 2 調査スケールと空間スケールのイメージ

第3章 好ましい地質環境特性

地質環境に期待される閉じ込め機能の観点からの好ましい地質環境特性、そして最新の科学的知見に基づいたわが国の好ましい地質環境特性を有する地域の存在について、3.1に示すNUMOの説明の概要を踏まえて、3.2において本WGにおける評価を示す。

3.1 閉じ込め機能の観点からの好ましい地質環境特性について

放射性物質の浸出抑制と移行抑制を確保する閉じ込め機能の観点からの、人工バリアの設置環境として適した地質環境特性と、天然バリア機能として適した地質環境特性について、熱環境、力学場、水理場、化学場毎に示す。さらに、わが国の地質環境特性に関する科学的知見に基づいた見解を示す。

3.1.1 熱環境

(1) 閉じ込め機能の観点からみた好ましい条件

熱環境に関する好ましい条件を閉じ込め機能の観点から示す。人工バリアのうち、ガラス固化体、鋼製オーバーパックは材料として高い耐熱性を有している。これに対し、緩衝材であるベントナイトについては、長期にわたり 100℃を大きく超えると鉱物学的に変化し（イライト化）、特にそれが著しい場合には、主要な機能の一部喪失につながる恐れがある。また、緩衝材内の温度上昇を抑制するために、施設規模を大きくしなければならない可能性もある。

したがって、熱環境としては「地温が低いこと」が好ましい条件であり、その条件について、緩衝材の主成分である膨潤性粘土鉱物の熱変質（モンモリロナイトのイライト化）に基づき検討する必要がある。

モンモリロナイトのイライト化については、温度およびカリウム濃度を主な変数として、関係式が提示されている（Karlund et al., 2000）。この関係式に基づいた解析結果によると、地温 90℃の条件では 10 万年以上の期間、熱変質は軽微で、機能の低下は起こらないが、地温が 130℃を超えると 10 万年程度の期間で、また、地温 170℃の条件では 1 万年程度の期間で、モンモリロナイトの熱変質が 50%程度進行すると予測される。

したがって、「地温が低いこと」に関する具体的な条件としては、緩衝材の熱変質を対象として、地温が 100℃を大きく超える期間が、長期に亘り継続しないことである。

(2) わが国の地質環境特性に関する科学的知見に基づいた見解

地下深部の地温の実測例は限られているが、地温勾配に関するデータベースの整備が進んでいる（田中ほか，2004）ことから、それに基づき地下深部の地温を推定した。例えば、地表温度が 15℃の場合、地下深部の地温が 100℃を超えるのは、処分深度が 1000 m の時を例とすると、8.5℃/100 m 以上の場合となる。また、処分深度が 500 m の場合、地温勾配が 17℃/100 m 以上の時に 100℃

を超える。そのため、地温勾配に関する知見に基づき、わが国の地質環境における地温の状況について検討する。

第2次取りまとめにおいては、全国的に示された地温勾配の分布図に基づき火山地域を除く大部分の地域で地温勾配はおおむね $5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 以下（平均的には $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ）であることが示されている。また、地温勾配が $10^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ を超える地域が「高温異常域」として示され、第四紀火山の分布と整合的である（第2次取りまとめ、分冊1²（JNC,1999）, 2.4.2）。その後の知見としては、非火山地域における地温勾配はおおむね $3\sim 5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 程度であることが改めて示されている（田中ほか、2004）。また、深地層の研究施設においては地温勾配に関する詳細なデータが取得され、瑞浪超深地層研究所で約 $2^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 、幌延深地層研究所で約 $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ の値が得られている（JNC, 2005a）。

以上の知見に基づく、火山地域等の高温異常域を除けば地温勾配はおおむね $3\sim 5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 程度であることは一般的知見とみなすことができ、地下深部の地温が低い環境³は広く存在していると考えられる。

3.1.2 力学場

（1）閉じ込め機能の観点からみた好ましい条件

力学場に関する好ましい条件を閉じ込め機能の観点から示す。地下深部では地下水の水圧や緩衝材の圧密変形に伴う反力などの外力がオーバパックに作用する。さらに、岩種、地形、断層や処分深度の条件によっては、岩盤中の断層変位やクリープ変形等が考えられる。これらに対して、岩盤の変形が著しいと考える場合には、オーバパックの破損を招かないように強度を上げる必要がある。この場合、オーバパックの厚さを増す等の対策も考えられるが、一方で、溶接等の施工の難易度も高くなることから、合理的ではないと考えられる。そのため、力学場として好ましい条件は、岩盤の変形量が小さいことである。

（2）わが国の地質環境特性に関する科学的知見に基づいた見解

第2次取りまとめでは、幅広い地質環境に対応するために硬岩系と軟岩系の岩盤特性を設定し、軟岩系では岩盤のクリープ変形を考慮したオーバパックの設計を示している。設計においては、最大・最小応力比を $1.1:1$ 程度の条件として岩盤を均一な連続体としてモデル化したクリープ解析を実施し、軟岩系岩盤の1000年後のクリープ変形量が廃棄体横置き型坑道天盤部で最大 15 mm 程度であることが示されている。この変形により、緩衝材が圧密され、それに伴い反力が発生するものの、オーバパック自体に作用する変形の影響は小さくなっており、合理的な範囲で設計により対応することが可能であることが示

² 以下、「第2次取りまとめ」を略し、単に「分冊1」等から始める。

³ 年平均地表面温度を 15°C とし、地温勾配 $3\sim 5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ とすると地温は深度 300 m では $24\sim 30^{\circ}\text{C}$ 、深度 500 m では $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 、深度 1000 m では $45\sim 65^{\circ}\text{C}$ と推定できる。

されている。

その後の知見としては、瑞浪および幌延の深地層の研究施設や他機関の応力測定などにおいて、地下深部の応力や岩盤の物性に関する知見の蓄積が進められている（JNC, 2005a；地盤工学会, 2009；近藤ほか, 2011 等）。これらの知見は、第2次とりまとめで示された岩盤の特性の範囲内であるが、一部側圧係数が深部で大きい場合（長ほか, 2009）もあり、実際の処分施設の設計・施工では留意する必要がある。

以上の知見に基づくと、地下深部の岩盤の長期的なクリープ変形量は設計で対応が可能な範囲と考えられることから、好ましい特性を有する地質環境は広く存在していると考えられる。

3.1.3 水理場

(1) 閉じ込め機能の観点からみた好ましい条件

地下深部の地下水の流速が緩慢である場合、放射性物質の移行にかかる時間が長くなり、その間に放射能が減衰する。そのため、水理場として好ましい条件は、岩盤の低い透水性と小さい動水勾配を以て、地下水流動が緩慢であることである。

(2) わが国の地質環境特性に関する科学的知見に基づいた見解

第2次取りまとめにおいては、動水勾配は地形に強く依存するが、地下深部の岩盤中では、局所的な地形の影響が少ないため、地表付近に比べて動水勾配は緩やかになることが示されている。また、全国各地の井戸データ等から地表付近の動水勾配（地下水面の勾配）は地形勾配に強く支配されており、低地（0.008）、台地（0.016）、丘陵地（0.035）、山地（0.061）の順に大きくなること等が示されている。実際の地下深部の平均的な動水勾配はこれらの値より小さくなると考えられるが、これらの値に基づいて、第2次取りまとめの安全評価においては、動水勾配を 0.001～0.1 の範囲（レファレンスケースは 0.01）に設定されている。

また、岩盤の透水性は岩石の種類や場所によって異なるが、断層破碎帯や割れ目集中帯を除くと、地下深部の岩盤としての平均的な透水係数は、概ね 10^{-10} ～ 10^{-7} m/s の範囲にあり、岩盤の透水係数は深度とともに減少する深度依存性を呈する。深さ 1000 m ボーリングの結果から、割れ目本数は、断層や割れ目帯の周辺でのばらつきが認められるものの、深度とともに減少するという傾向にある。また、割れ目の本数と透水係数には、正の相関が認められること等も示されている。

その後の知見としては、主に瑞浪および幌延の深地層の研究施設での成果により、次のことが示されている。地下水流動解析結果やボーリング調査等に基づき水頭分布の解析がなされ、地下深部の動水勾配として 0.01 オーダー（瑞浪）と 0.001 オーダー（幌延）となることが報告されており（JNC, 2005a）、この動水勾配は、上述の動水勾配の範囲内である。透水性については、透水係数と

して $10^{-12} \sim 10^{-6}$ m/s の値が取得されている (JNC, 2005a)。透水係数は深度ともに小さくなる傾向があり、それらは、割れ目の分布や空隙構造の変化等の地質構造に対応している (太田ほか, 2007)。また、地下水の流れにくさを表す目安として、堆積岩の地下水中の同位体組成等を用いて、地下水年代の推定が試みられている (電力中央研究所, 2008 ; 2009 ; 長谷川ほか, 2013 等)。幌延の深地層の研究施設の地下水を事例とした検討では、 ^4He 蓄積法により地下水の年代が求められており、深度約 250 m の声問層で 200 万年、深度約 700 m の稚内層で 1,000 万年であり、堆積岩の地質年代との比較から、地下水は堆積後からほぼ滞留していると解釈されている (電力中央研究所, 2008)。

以上の知見を踏まえると、動水勾配や透水性は地下ほど低いと考えられることから、地下深部の地下水流動は緩慢であると考えられる。また、地下水年代の検討からも、深部の地下水の流れが遅いことを示唆する結果が得られており、地下水の流れが緩慢な地質環境はわが国に存在することは十分に考えられる。

3.1.4 化学場

(1) 閉じ込め機能の観点からみた好ましい条件

ガラス固化体の溶解ならびにオーバーパックスの耐食性、緩衝材、天然バリアである岩盤の収着性、そして地下水中の放射性物質の難溶解性等の閉じ込め機能は、岩盤中の地下水の化学特性 (水素イオン指数 (pH)、酸化還元電位、炭酸化学種濃度等) の影響を受ける。考えられる具体的な影響を以下に示す。

・ 地下水の pH の影響

地下水が低 pH あるいは高 pH の場合は、ガラス固化体の溶解速度が速く、放射性物質の浸出率が増加する (Wicks et al., 1982 ; Inagaki et al., 2012 等)。また、高 pH の場合はオーバーパックが不動態化し、局部腐食や応力腐食を引き起こしやすくなるが、緩衝材による pH 緩衝作用により、地下水の pH が 12 程度までであれば、不動態化を防ぐことができることが報告されている (谷口ほか, 1999 ; JNC, 2005b)。

また、地下水が低 pH あるいは高 pH の場合は、緩衝材が変質しやすく (分冊 2, 4.1.2.1.11)、一部の放射性物質の溶解度が増加する (武田ほか, 1999 ; Lollar, 2005)。さらに、低 pH の場合は、緩衝材、および天然バリアともに収着能が低下することが報告されている (館ほか, 2008)。

・ 酸化還元電位の影響

酸化性条件では、オーバーパックの耐食性が低下し、また一部の放射性物質の溶解度が増加する (武田ほか, 1999)。さらに、緩衝材、および天然バリアともに収着能が低下することが報告されている (館ほか, 2008)。

・ 炭酸化学種濃度の影響

炭酸化学種濃度が 0.5 mol/dm^3 以上となる条件ではオーバーパックが不動態化、局部腐食を招きやすくなることが報告されている (谷口ほか, 1999 ; 分冊 2, 4.1.1.3)。

以上を踏まえて、化学場の好ましい条件としては、地下水が高 pH あるいは、低 pH ではないこと、酸化性雰囲気ではないこと、炭酸化学種濃度が 0.5 mol/dm^3 以上となる条件ではないことと考える。

(2) わが国の地質環境特性に関する科学的知見に基づいた見解

第2次取りまとめにおいて、降水を起源とする地下水の pH は、地表付近から地下深部にいくにしたがって酸性から弱アルカリ性に変化すること、堆積岩では深度数十 m、花崗岩では深度数百 m 程度で、還元性の地下水が形成されていること、海水も同様と考えられることが示されている。

その後の知見としては、幌延、瑞浪の深地層の研究施設において、事例的な研究が進捗し、また、全国の深層地下水の化学特性に関するデータベース（尾山ほか，2011）等が整備されており、次のことが示されている。

地下水の pH に関しては、概ね地下深部の地下水は、地下浅部の地下水と比較して中性から弱アルカリ性を示す（石井ほか，2007）。具体的には、北海道幌延地域のうち沿岸域の堆積岩を事例として、pH は深度約 500 m 以浅で 6～9 の範囲でばらつくものの、深度約 500～1,000 m では 8 前後であることが報告されている（太田ほか，2007；産業技術総合研究所，2011 等）。福島県および新潟県を事例として、地下水の pH は火山フロント西側で 6～7 が卓越、東側で 6～8 の範囲、太平洋沿岸部では 6～9 が卓越することが報告されている（尾山ほか，2011；産業技術総合研究所，2012）。また、中国・四国地域を事例として、既存データの詳細な分析を通じて、深層地下水の pH は、多くの観測点において 6～8 の範囲にあることが確認されている（尾山ほか，2011；産業技術総合研究所，2012）。以上のように pH が低 pH あるいは高 pH ではない地域が存在する可能性が示されている。

地下水の酸化還元電位に関しては、幌延の深地層研究所では、地下深部で還元性の値（深度約 140 m、171～237 m の声間層でそれぞれ約 -190～-230 mV、約 -220 mV、深度約 500～550 m、約 606～644 m の稚内層でそれぞれ約 -100 mV、約 -170 mV）である（太田ほか，2007 等）。また、瑞浪の深地層の研究施設では、地下水の酸化還元電位が地下深部で還元性の値（深度約 200～400 m で約 -100～-250 mV 等）を示し、含鉄鉱物、含硫黄鉱物、硫酸還元菌が関連した反応の関与が示されている（竹内ほか，2010 等）。以上の事例より地下深部において還元環境が維持されている地域が存在することが示唆されている。

地下水の炭酸化学種濃度に関しては、地質ごとに有意な差があり、付加コンプレックスでは濃度の平均値は 744 mg/dm^3 (0.012 mol/dm^3)、堆積岩類では 496 mg/dm^3 (0.008 mol/dm^3)、火山岩類では 341 mg/dm^3 (0.006 mol/dm^3)、深成岩類では 313 mg/dm^3 (0.005 mol/dm^3) とされている（カッコ内は文献の値を重炭酸イオンのモル濃度に換算した値）（尾山ほか，2011）。しかし、これらの値は先に示した 0.5 mol/dm^3 に比べかなり低い。

以上の知見に基づけば、地下深部の地下水は、高 pH あるいは低 pH ではな

いこと、酸化性雰囲気ではないこと、炭酸化学種濃度が高くないことは一般的な性質であるとみなすことができることから、好ましい特性を有する地質環境は広く存在していると考えられる。

3.1.5 好ましい地質環境特性のまとめ

閉じ込め機能の観点から人工バリアの設置環境と天然バリアとして地層処分に適した地質環境特性について表 1 に取りまとめた。最新の科学的知見を踏まえると、これらの個別の条件を満たす好ましい地質環境特性は、わが国にも広く存在すると考えられる。

表 1 好ましい地質環境特性のまとめ

	人工バリア設置環境として好ましい 主な地質環境特性	天然バリアとして好ましい 主な地質環境特性
熱環境	地温が低いこと	—
力学場	岩盤の変形が小さいこと	—
水理場	—	地下水流動が緩慢であること
化学場	・地下水の水素イオン指数 (pH) が高 pH あるいは低 pH ではないこと ・地下水が酸化性雰囲気でないこと ・地下水の炭酸化学種濃度が高くないこと	・地下水の水素イオン指数 (pH) が高 pH あるいは低 pH ではないこと ・地下水が酸化性雰囲気でないこと

3.2 「好ましい地質環境特性」に関する評価

本審議では、第 2 次取りまとめ以降の最新の科学的知見に基づき、高レベル放射性廃棄物の地層処分において地質環境に求められる、人間の生活環境からの隔離機能と廃棄物からの放射性核種の移行抑制等の閉じ込め機能のうち、後者の観点から人工バリア設置環境および天然バリアとして好ましい地質環境特性（熱環境、力学場、水理場、化学場）について整理した。その結果、熱環境については、人工バリアの温度制限に関連し「地温が低いこと」、力学場は、人工バリアの力学的安定性の観点から「岩盤の変形量が小さいこと」、水理場は、主に天然バリアの観点から「地下水流動が緩慢であること」、化学場はガラス固化体からの放射性核種の浸出や移行の抑制、オーバーパックの腐食等の観点から「地下水の水素イオン指数が高 pH あるいは低 pH ではないこと」、「地下水が酸化性雰囲気でないこと」、「地下水の炭酸化学種濃度が高くないこと」が挙げられた。

今までの地質環境特性評価が処分場の設計や安全評価の観点で体系的に十分整理されていなかったことに鑑み、今回の審議により、地層処分システムの機能の観点から好ましい地質環境特性が整理されたことは重要である。また、それらの特性が導かれた過程における現象の理解もおおむね妥当であり、抽

出された特性を満たすことにより、人工バリアおよび天然バリアの閉じ込め機能が十分に発揮され、地層処分の安全性が保たれると考えられる。

また、これらの好ましい地質環境特性を有する地質環境が、わが国に存在しているかについての審議も行った。熱環境、力学場、化学場については、精度の差や地域的偏在性はあるものの、比較的全国的にデータが取得されており、そのデータから、おのこの好ましい地質環境特性を有する地域はわが国にも広く存在していると考えられる。

一方、水理場における動水勾配や透水性は、岩種や割れ目の分布特性等に大きく影響され、場所によって異なる可能性があるが、瑞浪や幌延の深地層の研究施設等のデータからも示されるように、地下深部は地表付近に比べ動水勾配や透水性が小さく、地下水の流れが緩慢である場所がわが国においても十分存在すると考えられる。

なお、最終的な地層処分の安全性は、概要調査や精密調査においておのこの地質環境特性に関する様々なデータを収集した上で、最終的に設計・施工される地層処分システム全体での評価を行い示していく必要がある。それぞれの段階では、段階毎に増加する知見に基づき、次の段階に進むことが妥当かどうかを判断する。

第4章 地質環境の長期安定性への影響要因と対応方針

地質環境の長期安定性に関して、4.1 閉じ込め機能への影響要因、4.2 物理的隔離機能への影響要因、4.3 著しい影響を与える事象についてのNUMOの説明を踏まえて、4.4 において本WGにおける評価を示す。

4.1 閉じ込め機能への影響要因

3.1 に示した閉じ込め機能の観点で好ましい地質環境特性（熱環境、力学場、水理場、化学場）に対して、長期安定性に著しい影響を与える地質的な事象を特定する。

著しい影響を与える事象の特定においては、まず、将来、好ましい地質環境特性を変動させる可能性がある地質的な事象を影響の大小に関係なく抽出し、科学的知見に基づいてその変動範囲を推定した。その変動範囲が設計での対応可能な範囲を超えて天然バリアや人工バリアの機能喪失に至る条件にある場合に、著しい影響を与える事象として特定した。

4.1.1 熱環境

熱環境の好ましい地質環境特性である「地温が低いこと」に対する影響要因として、処分場の周辺における新たな「熱源の移動・発生」と「地表の温度の上昇」が考えられる。

「熱源の移動・発生」に関連する地質的な事象としては、マグマや熱水に代表される地熱活動および、断層活動の際、断層面において摩擦熱が発生することが考えられる。

「地表の温度の上昇」に関連する事象としては、地質的な事象ではないが気候変動による日射量等の変化に伴う気温変化が考えられる。また、火山活動に伴い発生した火砕流が地表に到達した場合にも、地温が変化することが考えられる。

なお、3.1.1(1)に示したように、地温の上昇が100℃を大きく超え、かつ長期間にわたり継続した場合に、緩衝材が熱変質（イライト化）する可能性があるため、地質環境の長期安定性に著しい影響があるとした。

(1) 熱源の移動・発生—地熱活動

マグマや熱水に代表される地熱活動による地下深部の地温の変動範囲を第2次取りまとめおよびその後の科学的知見に基づいて推定し、その影響について検討した。

3.1.1(2)に示したように、地温勾配は地下の地温分布を反映するので、ここでは地温勾配のデータに基づいて、高地温地域として地温勾配10℃/100 m以上を目安として、地熱活動の影響を評価した。

第2次取りまとめでは、日本列島の大局的な地下の温度構造を表わす情報として、坑井温度の実測データを収集し、地温勾配図を作成した。これによれば、

日本列島の広域的な地温勾配の値は $2\sim 5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ の範囲にある。これに対して、地温勾配が $10^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 以上の高温異常域は、一部の火山を除き、第四紀の火山の分布と整合的であることが示されている。また、地表に火山が存在していないにも関わらず、高温異常域である地域については、マグマが地下に存在するという考えや、地下深部から熱水が上昇しているという考え方が示されている。

その後の知見として、国内の地下調査施設において精密な地温勾配の測定が実施された事例や、地温勾配図に基づいた日本列島の熱構造に関する検討事例 (Tanaka et al., 2004 ; 梅田ほか, 2005 ; 日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会, 2011) が報告されているが、従来の知見と大きく異なる知見は報告されていない。

以上の知見に基づくと、高温異常域の発生の原因である火山や地下のマグマの存在、熱水の上昇等は、地温を著しく上昇させるため、地熱活動は著しい影響を与える事象であると考えられる。上述のように地熱活動には非火山性も含む。

(2) 熱源の移動・発生—断層面における摩擦熱

断層活動に伴う断層面における摩擦熱による地下深部の地温の変動範囲を第2次取りまとめおよびその後の科学的知見に基づいて推定し、その影響について検討した。

第2次取りまとめでは、断層が活動した結果として、断層面に沿って摩擦熱が発生する可能性があるが、熱の影響は一時的で、その範囲は破砕帯内にとどまることが示されている。

その後の知見として、既存の活断層を対象とした検討事例が報告されている。阿寺断層では、現在の破砕帯内で断層面に沿って過去に広い範囲で温度 200°C 未満の加熱があったこと (山田ほか, 2012)、野島断層の断層破砕帯には、形成初期の断層活動期に $150\sim 280^{\circ}\text{C}$ の熱水があったこと (Boullier et al., 2004)、台湾の集集 (チチ) 地震 (1999 年 9 月 21 日、マグニチュード 7.6) の破砕帯 (幅十数 cm) で、摩擦熱により 350°C 以上の高温流体が生成したが、その流体が破砕帯より外側には拡散しなかったこと (Ishikawa et al., 2008) が報告されている。

以上の知見に基づけば、断層活動に伴う摩擦熱により $150\sim 400^{\circ}\text{C}$ 程度の熱水が断層破砕帯内において形成される可能性がある。最も温度が上昇したと考えられる台湾集集地震を事例とし、幅 1 m の破砕帯の領域が 400°C まで上昇したと想定して、一次元熱伝導解析により、破砕帯内の温度が 100°C を下回るまでの期間を評価した。その結果、周辺岩盤温度が 45°C の時 (処分深度 1000 m 相当の岩盤温度)、 100°C を下回るのに 60 日程度かかったが、この程度の期間であればベントナイトの熱変質はわずかであり、緩衝材の機能の喪失には至らない。したがって、断層活動に伴う摩擦熱は著しい影響を与える事象とはならないと考えられる。

(3) 地表の温度の上昇－気候変動による気温変化

気候・海水準変動に伴う地表面の気温の変動範囲を、第2次取りまとめおよびその後の科学的知見に基づいて推定し、その影響について検討した。

第2次取りまとめでは、現在に比べ間氷期の最温暖期には2℃～3℃高かったと考えられることが示されている。

その後の知見として、氷床コアのデータによれば、最後の間氷期（約12.5万年前）における極域の平均気温は、現在より3～5℃高かったとされている（気象庁，2007）。

以上の知見に基づけば、長期的な平均気温の変動幅は数℃程度であり、地表付近の平均温度と地温勾配から見積もった地温の変動範囲も同程度と考えられる。また、地熱活動が盛んな地域を除けば、数℃程度の変動で地温が100℃を超えることはないと考えられる。したがって、気候変動による気温変化は、著しい影響を与える事象とはならないと考えられる。

(4) 地表の温度の上昇－火砕流による地表温度の上昇

第2次取りまとめにおいて、火砕流による地表温度の上昇の長期的な影響に関する検討は示されていない。

その後の知見として、大規模火砕流の熱的影響について、事例調査と熱解析を実施した報告がある（石丸・角田，2002；松崎ほか，2004）。それによれば、火砕流の堆積時の層厚さは最大で150 m、概して50 m未満で、火山から遠ざかるほど薄くなる傾向があり、堆積時の推定温度は450-600℃前後とされている。

以上の知見に基づいて、石丸・角田(2002)を参考に、火砕流の堆積厚さ(10-150 m)、火砕流堆積時の初期温度を保守的に900℃、地温勾配を3℃/100 m、地表温度を15℃として、深度毎の岩盤温度を一次元熱伝導解析により見積もった。その結果、大規模火砕流が長期間地表を覆った場合、地下300~1000 m程度までの範囲の岩盤温度は、深さ300 mでは25~70℃程度、500 mでは30~52℃、1000 mでは43~52℃となり、火砕流の堆積厚さ、深度にかかわらず100℃を下回ることで、火砕流の影響は深部ほど受けにくいことが分かる。以上のことから、火砕流による地表温度の上昇は著しい影響を与える事象とはならないと考えられる。なお、火砕流が到達する可能性がある地域の場合は、その影響を評価した上で処分深度をより深くする等の対策をとることが可能と考えられる。

(5) 熱環境に関する著しい影響を与える事象の特定

以上の検討に基づき、熱環境に対して著しい影響を与えられと考えられる事象は、「地熱活動」である。

4.1.2 力学場

力学場の好ましい地質環境特性である「岩盤の変形が小さいこと」に対する影響要因としては、地下深部の「岩盤の破断・破碎」、「岩盤の弾性変形」、「岩盤のクリープ変形量の増大」が考えられる。

「岩盤の破断・破碎」に関連する地質的な事象としては、地下深部から地上まで達する断層のずれが考えられる。

「岩盤の弾性変形」に関連する地質的な事象としては、地震動による岩盤のひずみが考えられる。

「岩盤のクリープ変形量の増大」に関連する地質的な事象としては、温度上昇に伴う岩盤のクリープ特性の変化があり、温度上昇の要因としては地熱活動が考えられる。

(1) 岩盤の破断・破碎—処分深度に達する断層のずれ

地下深部から処分深度に達する断層のずれに関する変動範囲を第2次取りまとめおよびその後の科学的知見に基づいて推定し、その影響について検討した。

過去に繰り返し活動し将来もその活動が継続する地下深部から地上まで達する断層は、将来、処分深度から地表にかけて岩盤の破断・破碎をさらに引き起こす可能性がある。このような性質を有する断層は、活断層と一般的に認識されている。

第2次取りまとめでは、わが国における主な地震・断層活動は、既存の活断層帯において、過去数十万年程度にわたり同様の活動形式で繰り返し起こっており、十万年程度の将来についても、現在の活動の場が継続するものと考えられることができるとされている。これらの活断層は、地下深部から処分深度を経て地表にまで達しており、その平均変位速度は0.01～10 m/1000年の範囲である。

第2次とりまとめ以降、地震防災の観点等から実施された調査の結果に基づき、各種の活断層図が拡充されているが、上記の範囲を超える事例の報告はない（中田・今泉，2002；産業技術総合研究所ホームページa等）。

以上の知見に基づくと、既存の活断層は今後も繰り返し活動することにより、オーバーパック等の人工バリア要素の破壊を招き、閉じ込め機能の喪失につながる可能性が高い。また、繰り返し活動することから、人工バリアの剛性を高める等の工学的対策を合理的な範囲で実施することは容易ではないと考えられる。以上のことから、既存の活断層のように地下深部から処分深度を経て地表まで達する断層のずれを引き起こす事象は、力学場の長期安定性に著しい影響を与える事象であると考えられる。

なお、上記の既存の活断層以外の、変位規模が小さい断層（既存割れ目等を含む）が単独で、または地質断層が、将来活動する可能性および著しい岩盤の変形を引き起こす可能性は必ずしも高くはないと考えられる。したがって、現地調査等詳細な調査結果に基づいて、処分場を断層から離す、断層上に廃棄物を埋設しない等、工学的対策を実施することが可能であると考えられる。また、科学的知見に不確実性があることを踏まえると、影響が顕在化したことを想定した安全性の評価を実施し、回避又は工学的対策を実施するかについて、総合的に判断する。

(2) 岩盤の弾性変形―地震動による岩盤のひずみ

地震動による岩盤のひずみに関する変動範囲を第2次取りまとめ、およびその後の科学的知見に基づいて推定し、その影響について検討した。

第2次取りまとめでは、閉鎖後における人工バリアを含む岩盤領域を対象として耐震安定性について検討し、地震が起こった際に人工バリアは岩盤と一体となって振動すること、緩衝材が地震によりせん断破壊することがないこと、および液状化することがないことから、地下深部において人工バリアは耐震安定性を有することが示されている。また、地下数百 m 以深では一般に地震動の構造物に対する影響は小さいと考えられることも示されている。

その後の知見として、東北地方太平洋沖地震を含めたマグニチュード7以上の地震において、深度250 m 以深(87地点)のKiK-net観測データから、深度250 m 以深における地震加速度は、深度に依存せず同一地点の地表での観測値に対して1/3~1/5程度であることが報告されている(藤川ほか, 2012)。なお、閉鎖後の人工バリアに対する耐震安定性解析の新たな事例は報告されていない。

以上の知見に基づけば、地震動により人工バリアの機能が喪失することは考えにくい。なお、地震動が繰り返し起こることによる長期的な影響については、今後も、再来性や人工バリア特性の変化等を考慮した解析等により確認し、必要に応じて人工バリア設計に反映することが可能であると考えられる。したがって、地震動による岩盤のひずみは、著しい影響とはならないと考えられる。

(3) 岩盤のクリープ変形量の増大―地温上昇に伴う岩盤クリープ変形量の増大

地温上昇に伴う岩盤クリープ変形量の変動範囲を第2次取りまとめおよびその後の科学的知見に基づいて推定し、その影響について検討した。

3.1.2(2)では、わが国で観測されている応力状態で、軟岩系岩盤においても岩盤の変形量が小さいことを示した。第2次取りまとめでは、硬岩系岩盤においても岩盤の変形量が小さいことが示されているが、地温上昇に伴う岩盤クリープ変形に関する検討結果は示されていない。

その後の知見として、クリープ変形特性の温度依存性の試験検討が実施されており、クリープ特性の温度依存性については、泥岩では認められないが、凝灰岩にはそれが認められることが報告されている(岡田, 2006)。また、凝灰岩では温度が80~95℃の条件下のクリープ速度が20-60℃に比べ増加することが報告されている(Shibata et al., 2007)。

以上の知見に基づけば、岩盤のクリープ特性について、温度依存性が認められ、それは岩種により異なると考えられる。しかし、わが国に分布する岩石・岩盤に関しては、温度上昇によりクリープ変形量が増加したとしても、変形量の変化は微小であることから、室内試験により物性を把握した上で定量的にオーバーパック等の人工バリアの設計に反映する等の工学的対策が可能であると考えられる。したがって、地温上昇によるクリープ変形量の増大は著しい影

響を与える事象とはならないと考えられる。

(4) 力学場に関する著しい影響を与える事象の特定

以上の検討に基づき、力学場に対して著しい影響を与えると考えられる事象は、「処分深度に達する断層のずれ」である。

4.1.3 水理場

水理場の好ましい地質環境特性である「地下水流動が緩慢であること」に対する影響要因としては、地下深部の「動水勾配の増加」、「地下水流動経路の変化」、「涵養量の変化」が考えられる。

「動水勾配の増加」に関連する地質的な事象としては、沿岸部においては、海水準変動により海側の水位が低下することや、侵食に伴う地形変化が考えられる。また、地震に伴う地下水位（または水圧）の変化も考えられる。

「地下水流動経路の変化」に関連する地質的な事象としては、海水準変動に伴う地下水の流出点の変化や、塩淡水境界の位置が変化することによる経路の変化が考えられる。また、対象地域にある断層がずれることにより、その透水性が変化した場合も、地下水流動経路に影響を与える可能性がある。

「涵養量の変化」に関連する地質的な事象としては、気候変動による涵養域の降水量の変化があげられる。

以上の地質的な事象が将来発生すると、地下流速が変わることや、地下水流動経路が変化する可能性がある。処分場スケールにおける地下深部の地下水の動きは、主に動水勾配と岩盤自体の透水性に支配されている。動水勾配は、地表付近では地形に強く依存するが、地下深部では地表に比べて局所的な地形の影響が少ないため、動水勾配は緩やかになると考えられる。3.1.3(2)で記述したように、地表付近の動水勾配（地下水面の勾配）は、低地（0.008）、台地（0.016）、丘陵地（0.035）、山地（0.061）の順に大きくなる。岩盤の透水性は、地下水の通り道となる割れ目や、岩石を構成する鉱物粒子間の間隙の構造に依存するため、割れ目の頻度等が変化すれば、透水性が変化し、地下水流動経路に影響を与える。

また、広域スケールの地下水の動きは、地域の地質構造や地理的条件にも依存する。地質構造としては、特に地下水の移行経路となり得る断層・破碎帯（透水性が高い場合）等が重要な要素となる。地理的条件としては、涵養量（地形の効果も含む）、さらには、沿岸部であれば、地下深部の塩水域と淡水域の分布も地下水流動に影響を与える。

なお、これらの影響は、サイトの地形や地質構造、断層の分布、気候・海水準変動等に強く依存して複合的に作用する。したがって、実際の影響についてはサイト毎に総合的に評価する必要がある。

(1) 動水勾配の増加－海水準変動および地形変化

第2次取りまとめにおいては、気候・海水準変動に伴い動水勾配が変化する

可能性があり、氷期には海水準の低下による侵食によって地形変化が生じ、それにより地下水の動水勾配が大きくなる可能性があるとしている。また、気候・海水準変動に関しては、過去数十万年における海水準が、氷期－間氷期の1サイクルにおいて、現在に比べて+5 m～-120 m 程度の範囲で変動してきたことが示されている。

その後の知見として、海水準変動に関しては、氷期には海水準が最大で 150 m 程度低下し、最終間氷期には、グリーンランド氷床の大幅な縮小が約 5 m におよぶ海水準の上昇をもたらしたと考えられることが報告されている（Cuffey and Marshall, 2000 等）。また、3.1.3(2)で示したように、幌延や瑞浪の深地層の研究成果に基づく地下の動水勾配は地下深部ほど低く、深度 300 m 以下の処分深度においては 0.01 オーダー（瑞浪）と 0.001 オーダー（幌延）程度であり、深度 150 m でも同オーダーである（JNC, 2005）。なお、長期的な地下水流動場の変遷については、北海道幌延地域を事例として、過去からの地下水流動場の長期変遷に関するモデル化と過去の地下水流動場の再現に基づいて、海水準変動と地形変化を考慮した地下水流動について、一連の解析手法の適用性の確認が進められている（石井ほか, 2006；太田ほか, 2007；操上ほか, 2008；舟木ほか, 2009；今井ほか, 2009；尾上ほか, 2009；Ishii et al., 2010；中山ほか, 2010；2012；Niizato et al., 2010；Amano et al., 2011）。

以上の知見に基づけば、過去の氷期には、海面は現在よりも最大 150 m 程度低くなった時期があることが分かっており、最大 150 m の侵食が生じる可能性はある。しかし、仮に 150 m 程度の侵食が生じた場合でも、幌延や瑞浪の研究事例から、オーダーが変わるほどの動水勾配の変化は生じる可能性は低いと考えられる。また、上述のような解析手法を適用し、将来の地下水の水頭分布から動水勾配を推定することは可能であると考えられ、その結果に基づいて、必要な場合には、地下水流動が緩慢と考えられる領域まで処分深度を深くする工学的対策を実施することも可能であると考えられる。

したがって、海水準変動および地形変化が引き起こす動水勾配の増加は、水理場に対して著しい影響を与える事象とはならないと考えられる。

（2）動水勾配の変化－地震に伴う地下水位（または水圧）の変化

第2次取りまとめにおいては、地震前後の地下水流動や水質の変化は、季節変化等の経時変化に比べて小さいこと、また仮に大きな地震があったとしても、その変化は一時的であり、数カ月後にはもとの水位に戻ることが示されている。

その後の知見として、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震およびその後の地震に関連して、全国的に地下水位の変位が観測されている。特に西日本では、地震予知を目的として設置された地下水位の観測網に、同地震後の地下水位の変化が記録されている（産業技術総合研究所ホームページb）。地下水位変化の情報によれば、同地震の直後から地下水位が多く の地点で数 m 程度の範囲で変動したが、ほとんどの観測地点において1年以内に地震発生前の状態に回復している。また、2地点で1年以上にわたり変化が継続しているが、その後回復

傾向にあると考えられている。また、2011 年 4 月 11 日の福島県浜通りの地震に伴っては、27℃の温泉が自噴し、地震の発生から 2 年以上にもわたり継続している（産業技術総合研究所ホームページ c）ことが報告されているが、地下水の起源等については現在も特定されていない。

以上の知見に基づけば、地震に伴う地下水位（または水圧）の変化は、広域スケールで発生し、サイトの地質構造（遮水性断層の有無等）に依存して、処分場スケールでも変化すると考えられる。影響の程度は、これまでの観測された数mの水位変化の範囲の変化であれば、新たな工学的対策を考慮する必要はないと考えられる。したがって、動水勾配の変化は著しい影響を与える事象とはならないと考えられる。

なお、福島県浜通り湧水の事例については、その原因として、表層付近の透水性や地下水圧の変化、地下深部の透水性や地下水圧の変化、過去の炭鉱開発による人為的な擾乱等が考えられるため、今後も引き続き情報の収集に努める。

(3) 地下水流動経路の変化－気候・海水準変動に伴う流出点の変化、塩水／淡水境界の位置の変化

第2次取りまとめにおいては、塩分濃度の違いによる密度差により塩水／淡水境界に沿って淡水が上昇する沿岸部の地下水流動状況が、気候・海水準変動による塩水／淡水境界の移動の影響を受けることが示されている。その後の知見として、上記と異なる知見の報告はない。

このような海水準変動に伴う地下水流動経路の変化については、4.1.3(1)に述べた地下水流動場の長期変遷に関する評価手法を適用して、地下水流動場の評価をした上で、その結果に基づいて処分場の設置位置や深度の設定等の工学的対策を実施することが可能である。したがって、地下水流動経路の変化は著しい影響を与える事象とはならないと考えられる。なお、流出点の変化については、安全評価において、生物圏の設定を行う際に反映する。

(4) 地下水流動経路の変化－断層のずれに伴う透水性の増加

ここでは、将来活動する可能性のある断層として、活断層を対象として、地下水流動経路の変化に対する影響を評価した。

第2次取りまとめにおいては、地震・断層活動が地層処分システムへ与える影響としては、岩盤の破断・破碎とこれに伴う地下水移行経路の形成、地震動による岩盤や地下水の性質の変化等が想定されることが示されている。

その後の知見としては、代表的な活断層を対象とした断層とその周辺の変形の影響について、事例的研究が進められており、跡津川断層および臼木谷断層では、断層長さに比例してプロセスゾーン（断層周辺の母岩内で断層形成にかかわった領域で、その外側の母岩に比べて節理や小断層、微小割れ目が数多く発達）の幅が増大していること（金折，2001）、阿寺断層では、断層活動に伴う物理的影響範囲は断層からおおよそ 200 m 程度、および断層運動による影響範囲と考えられるダメージゾーン（地下水流動や物質移動に寄与する断層近傍

の割れ目帯や変質部)は従来のプロセスゾーンの見積り範囲と整合すること(吉田ほか, 2009)の報告があり、活断層の周辺では、健岩部とは異なる透水性の場(割れ目の頻度等)が形成されていることが示されている。また、活断層の周辺の透水性の研究事例として野島断層(兵庫県南部地震において活動)が存在するが、活動直後に断層付近の透水性が増加したものの、8年以内に回復したと考えられることが報告されている(Tadokoro and Ando, 2002; 北川ほか, 2008)。

以上の知見に基づけば、活断層の活動に伴い、断層およびその周辺の影響範囲において、透水性が増加する可能性があり、これに伴い、活断層とその周辺が主要な地下水流動経路となる可能性がある。そのような変化は地層処分の時間スケールからみれば比較的短期間で収束することも期待されるが、これらの変化が一般性を有するものであることの論拠は十分とはいえない。したがって、ここでは断層活動による透水性の増加が長期間継続した場合を想定すると、放射性物質の移行経路が変わる可能性も考えられることから、保守的に著しい影響を与えると考えられる事象とした。今後の研究事例の蓄積により、断層活動と透水性の関係について、さらなる科学的知見が得られれば、その影響の程度を再度評価することが可能となると考えられる。

(5) 涵養量の変化—気候変動に伴う涵養域の降水量の変化

涵養量は雨水が地上から地下に浸透する量であり、主に降水量に影響されると考えられる。

第2次取りまとめにおいては、降水量の変動に関するデータは限られているが、氷期の日本列島では現在の7割から半分近くまで減少していた可能性が高いこと、十万年の氷期・間氷期の周期が卓越しているとともに、その中に更に短い周期が認められることが示されており、涵養量が気候変動により変化したことが示されている。

その後の知見としては、最終氷期極大期には、降水量が現在の5~7割に減少していたと推定されること(松末ほか, 2000)、また、わが国における約25万年前から現在までの気候変動が詳細に把握され、将来予測に必要な情報が蓄積されている(大場, 2006)こと等が報告されている。

以上の知見に基づけば、氷期の極大期には、現在と比較して、降水量は概して5~7割程度に減少する可能性がある。涵養量はサイトの地形や局所的な気候に依存するので、サイトごとに涵養量を評価し、処分場スケールに対する影響を評価する必要がある。このような変化については4.1.3(1)で述べた、地下水流動場の長期変遷の検討の際に合わせて評価することが可能である。

したがって、涵養量の変化は著しい影響を与える事象とはならないと考えられる。

(6) 水理場に関する著しい影響の特定

以上の検討に基づき、水理場に対する著しい影響を与えると考えられる事象

は、「断層のずれに伴う透水性の増加」である。

なお、ここで取り上げた地質学的な事象による水理場の長期変動の影響については、具体的な現地調査結果が必要となることから、実際のサイトを対象として今後確認する必要がある。

4.1.4 化学場

化学場の好ましい地質環境特性である「地下水が高 pH あるいは低 pH ではないこと」、「酸化性雰囲気でないこと」および「炭酸化学種濃度が低いこと」に対する影響要因として、地下深部への「低 pH 地下水の流入」、「高 pH 地下水の流入」、「酸化性地表水の流入」、「炭酸化学種濃度の上昇」が考えられる。

「低 pH 地下水の流入」および「炭酸化学種を含む地下水の流入」に関連する地質的な事象としては、火山性熱水や深部流体の移動・流入が考えられる。

「高 pH 地下水の流入」に関連する地質的な事象としては、超塩基性岩が地下水と反応することにより蛇紋岩化するとともに、強アルカリ性の地下水が生成することが考えられる。

「酸化性地表水の流入」に関連する地質的な事象としては、処分深度に到達している断層が活動した際に、断層の透水性が増加することにより、地表水が地下に向けて流入する可能性が考えられる。

3.1.4(1)に示した条件が変化する場合に、著しい影響となると考えられる。

(1) 低 pH 地下水の流入、炭酸化学種を含む地下水の流入－火山性熱水や深部流体の移動・流入

火山性熱水や深部流体の移動・流入に伴う地下水の pH と炭酸濃度の変動範囲を第 2 次取りまとめおよびその後の科学的知見に基づいて推定し、その影響について検討した。

火山性熱水については、第 2 次取りまとめでは、pH4.8 未満の地下水は主に第四紀火山およびその周辺地域に分布することが示されている。この理由は、マグマに含まれる揮発成分は火山ガスの組成等から、 H_2O 、 CO_2 、 SO_2 、 H_2S 、 HCl を主成分とし、これらがマグマの上昇に伴う圧力の低下によって放出され、地下水に溶解し、その pH を低下させるためであるとされている。

その後の知見としては、pH は火道近傍で 4.8 以下、それ以遠は中性～弱アルカリ性と考えられる（浅森ほか, 2002 ; 川村ほか, 2008）ことが示されている。また、水質に関して、火道ごく近傍で SO_4^{2-} が卓越、近傍では Cl^- が卓越、その周りで HCO_3^- が卓越する（川村ほか, 2008）ことが報告されている。

以上の知見に基づけば、火山性熱水については、酸性地下水や炭酸化学種濃度が高い地下水が地熱活動が活発な第四紀火山の近傍に分布するとともに、酸性地下水の影響は上部の地質構造の影響を受け、広範囲に及ぶ可能性がある。また、将来、地熱活動が活発化した際に、マグマに含まれる揮発成分の地下水への溶解により、pH の低下や炭酸富化する可能性もある。これらの事象は、

特に人工バリアの閉じ込め機能を著しく低下させうるため、化学場に対して著しい影響を与えると考えられる事象である。

深部流体は、沈み込むスラブやマントル起源の流体が断裂系等を通じて地表付近に上昇するものと考えられる（産業技術総合研究所，2012）。第2次取りまとめでは、深部流体についての記述は無い。その後の知見として、pH が酸性で炭酸化学種濃度が高いという特徴を持つこと（産業技術総合研究所，2012）が報告されている。わが国の深層地下水データベース（高橋ほか，2011）に基づく付加コンプレックスの地下水の炭酸化学種（重炭酸 HCO_3^- ）濃度は $184 \sim 4432 \text{ mg/dm}^3$ の範囲であり、平均値は 799 mg/dm^3 を示すことが示されており、これらが地下深部から上昇してくるマントル起源のガスに由来する可能性が示されている（尾山ほか，2011）。

以上の知見に基づけば、深部流体については、火山性熱水と同様に pH は酸性を示し、炭酸化学種濃度が高い場合には、化学場に対して著しい影響を与える事象となる。尾山ほか（2011）に示された炭酸化学種濃度をモル濃度に換算すると、 $0.003 \sim 0.07 \text{ mol/dm}^3$ に相当する。この程度の濃度であれば、著しい影響と考えられる 0.5 mol/dm^3 に比べ低い濃度である。ただし、採水したボーリング孔の深度が処分深度より浅い場合には深部流体と天水の混合により濃度が過小評価されている可能性があり、地下深部ではより高い濃度となる可能性があるため、保守的な観点から、化学場に対して著しい影響を与えると考えられる事象とする。

（2）高 pH 地下水の流入—超塩基性岩と反応した地下水の移動・流入

超塩基性岩と反応した地下水の移動・流入について変動範囲を第2次取りまとめおよびその後の科学的知見に基づいて推定し、その影響について検討した。

第2次取りまとめでは、この現象に関する記述はないが、火山の近傍等を除くわが国における地下水の pH の実測範囲は、 $6.29 \sim 10.27$ というデータが示されている。

その後の知見としては、フィリピン Manleluag - Saile 鉱山を事例として、アルカリ性地下水の湧出とその近くにあるベントナイト鉱床との反応について検討がなされている。アルカリ性地下水（おおむね pH11、最高 11.7）の発生原因として、一部が地表に露出したオフィオライト層に含まれる超塩基性岩の蛇紋岩化作用によること、アルカリ性地下水と火山ガラスの反応が非常に微小な領域に限られること、ベントナイト鉱床の粘土鉱物が X 線回折法に基づく鉱物学的に変質を受けた痕跡がないこと等が確認されている（原子力環境整備促進・資金管理センター，2013）。

以上の知見に基づけば、超塩基性岩は、地下水との反応により蛇紋岩化作用を生じ、アルカリ性地下水を生成するが、地下水の pH はおおむね 11 であり、この程度の pH であれば、緩衝材の化学的緩衝機能により、オーバーパックの耐食性および多くの放射性物質の溶解度に著しい影響を与えることはないと考えられる。また、緩衝材であるベントナイトの変質は著しくなく、その影響

範囲も限定的であると考えられることから、超塩基性岩と反応した高 pH 地下水の移動・流入は、著しい影響を与えないと考えられる事象である。

(3) 酸化性地表水の流入―断層のずれに伴う透水性の増加

断層のずれに伴う透水性の増加による酸化性地表水の流入について第2次取りまとめおよびその後の科学的知見に基づいて推定し、その影響について検討した。

第2次取りまとめでは、野島断層（阪神・淡路大震災で活動）の破碎帯の近傍で、酸化性の地表水を引きこんだ形跡がみられる場合があるが、野島断層の場合、このような形跡が見られている範囲は活断層破碎帯の近傍数十mと考えられることが示されている。

その後の知見では、4.1.3(4)で示したように、野島断層において、活動直後に断層付近の透水性が上昇したが、8年以内に回復したと考えられる（Tadokoro and Ando, 2002；北川ほか, 2008）ことが示されているが、第2次取りまとめに示された事例以外に酸化性の地表水を引き込んだという研究報告はない。

以上の知見を踏まえると、断層の透水性が変化することによる地表水の引き込みは、活断層のすべてに必ず発生するわけではなく、活断層が存在する場所の涵養量や地形に依存すると考えられる。したがって、酸化性の地表水の引き込みは、ある一定の条件下においてのみ検討すべき事象であると考えられるが、発生した場合には、著しい影響を与える可能性があるため、保守的な観点から、著しい影響を与えると考えられる事象とする。

(4) 化学場に対して著しい影響を与える事象の特定

以上の検討に基づく、化学場に対して著しい影響を与えると考えられる事象は、「火山性熱水や深部流体の移動・流入」と「断層のずれに伴う透水性の増加」である。

なお、「断層のずれに伴う透水性の増加」については、サイト毎にその影響の度合いを評価する必要がある。

4.2 物理的隔離機能への影響要因

地下深部に放射性廃棄物を埋設しても、天然事象によって廃棄物が地表に著しく接近し、物理的隔離機能が喪失する場合として、「マグマの処分場への直撃と地表への噴出」と「著しい隆起・侵食に伴う処分場の地表への著しい接近」が考えられる。

4.2.1 マグマの処分場への直撃と地表への噴出

万が一、地殻下部から上昇してきたマグマが処分場を直撃し、さらに地表にまで噴出することを想定した場合、処分場のかなりの範囲でマグマに取り込まれた廃棄物が地表にまで移動する可能性があり、人間の生活圏から隔離する機能を喪失すると考えられる。したがって、マグマの地表への噴出は、地層処分

システムの安全性に著しい影響を与える事象であると考えられ、サイト選定において回避する必要があると考えられる。

4.2.2 著しい隆起・侵食に伴う処分場の地表への著しい接近

著しい隆起と侵食作用が生じた場合、処分場の設置領域を含む相当の範囲の岩盤が地表に著しく接近する可能性が考えられ、この場合はすべての廃棄体を人間の生活環境から隔離する機能が喪失する。したがって、隆起・侵食が著しい地域は、サイト選定において回避する必要がある。なお、侵食については、海水準低下に伴う侵食も大きく影響することから、海水準低下に伴う侵食についても包含する必要がある。

4.3 著しい影響を与える影響要因と関連事象のまとめ

4.1および4.2で特定した好ましい地質環境特性に著しい影響を与える事象を表2にまとめる。これらの事象は、天然現象として、火山・火成活動等、断層活動、隆起・侵食に大きく分類することができる。なお、火山・火成活動等に分類した非火山性の地熱活動および深部流体は、現象の考え方が異なるため、次章では分けて取り扱う。

表 2 著しい影響を与える事象と天然現象の関係

		火山・火成活動等	断層活動	隆起・侵食	気候・海水準変動
閉じ込め機能の喪失	熱環境	地熱活動 (非火山性を含む)	—	—	侵食の要因として評価
	力学場	—	処分深度に達する断層のずれ	—	
	水理場	—	断層のずれに伴う透水性の増加	—	
	化学場	火山性熱水や深部流体の移動・流入	断層のずれに伴う透水性の増加 (条件による)	—	
物理的隔離機能の喪失		マグマの処分場への貫入と地表への噴出	—	著しい隆起・侵食に伴う処分場の地表への著しい接近	

4.4 「地質環境の長期安定性への影響要因と対応方針」に関する評価

好ましい地質環境特性についての議論の結果に基づき、第2次取りまとめ以降の最新の科学的知見を踏まえ、閉じ込め機能を長期的に確保する観点から、火山や地震等といった天然現象による影響を評価するとともに、物理的隔離機能に著しい影響を与える事象も抽出し、双方の観点から地層処分の機能に著し

い影響を与える事象を整理した。その結果、閉じ込め機能の喪失に関連する事象として、熱環境については「地熱活動」が、力学場に対しては「処分深度に達する断層のずれ」が、水理場に対しては「断層のずれに伴う透水性の増加」が、化学場に対しては「火山性熱水や深部流体の移動・流入」および「断層のずれに伴う透水性の増加」がそれぞれ挙げられた。一方、物理的隔離機能の喪失の観点からは、「マグマの処分場への貫入と地表への噴出」および「著しい隆起・侵食に伴う処分場の地表への著しい接近」が抽出された。

これらの事象のうち、確実に回避すべきことは人間の生活環境に廃棄体が露出することとなる物理的隔離機能の喪失であり、この観点からは、「マグマの処分場への貫入と地表への噴出」および「著しい隆起・侵食に伴う処分場の地表への接近」が抽出されており、これらについてはサイト選定により確実に回避することが必要である。

また、閉じ込め機能を確保する上で好ましい地質環境特性に影響を与える事象として抽出している「地熱活動」「火山性熱水や深部流体の移動・流入」「断層のずれ」については、廃棄体そのものは地下深部に定置されている状況であり、その他の閉じ込め機能が維持されている場合には、必ずしも人間の生活環境に著しい影響を与えるとは限らないものの、閉じ込め機能の重要な一部を喪失させることとなる可能性がある。したがって、「地熱活動」、「火山性熱水や深部流体の移動・流入」や「断層のずれ」については、回避すべき事象であると考えられる。

「断層のずれ」については、地下深部から処分深度を経て地表・地表付近に達するような規模を有しその変位量が大きい断層の場合には、廃棄体が破壊される可能性があるとともに透水性が増加する可能性がある。特に、ガラス固化体中の初期の放射能の大部分を占め地下水への溶解度が高いセシウム-137 およびストロンチウム-90 が、十分減衰していない期間にこのようなことが起これば、地層処分システムに著しい影響を及ぼす可能性がある。そのため、規模が大きく将来活動する可能性がある断層については、地層処分システムに著しい影響を及ぼす蓋然性がより高いことから、回避すべきと考えられる。一方、規模の小さな断層等については、その影響の程度を適切に評価し、処分場のレイアウトを工夫する等の工学的対策を適切に講じることで、将来断層が活動したとしても、その影響を最小限に抑えることが可能である。

また、これらの事象ごとに見れば影響の程度が小さい場合でも、事象が複数同時に生じた場合、地層処分システムの安全性に著しい影響を与える可能性は否定できない。このような複合的な現象の発生は、実際にサイトが特定された後、概要調査までに十分な調査を経て起こりうるシナリオに基づいて将来予測を行わなければ、現実的な評価は困難である。それゆえ、サイトが特定された後に、それらの複合的な現象の発生を加味した地層処分システム全体の安全評価を行い、地層処分の安全性を示していく必要がある。

なお、上述した工学的対策や地層処分システム全体としての評価についても、第2次とりまとめ以降の技術の進展を踏まえつつ議論を進めていくことが、地

層処分の技術的信頼性向上の観点から必要不可欠であることも本審議で指摘されたところであり、今後継続的に行っていく必要がある。

第5章 地質環境の長期安定性への影響要因に関するサイト調査の方針

地質環境の長期安定性への影響要因に関するサイト調査の方針について、5.1 段階的な調査と総合的評価の考え方、5.2 の影響要因となる天然現象に関する考え方の前提となるプレートシステム、5.3 の火山・火成活動等、断層活動、隆起・侵食等の各現象の考え方と回避の方法、についてNUMOの説明を踏まえて、5.4 において本WGにおける評価を示す。

5.1 段階的な調査と総合的評価の考え方

段階的な調査は、文献調査の対象となることの事前確認、概要調査地区選定段階（文献調査の段階）、精密調査地区選定段階（概要調査の段階）、処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）という4つの段階で行われる。

事前確認および文献調査の段階では、文献情報に基づいて対象地域の地層処分に対する適性を評価する。既存の火山の分布や地表の活動痕跡が明確な活断層については、全国を対象としてその分布等が体系的に整理された文献があり、また、個別の地域においても、研究論文等が存在すると考えられることから、それらの情報に基づいて、既存の火山や活断層の存在が明らかな地域を特定することは可能と考えられる。

一方、300 m 以深の地下深部の地質環境特性の情報については、一部の地域（天然ガス等の地下資源の分布地域、原子力発電所の周辺等）を除けば、文献情報はほとんどないか、断片的であると考えられる。このため、文献情報で好ましい地質環境の把握が困難な場合は、地表調査や物理探査やボーリング調査による地下の現地調査が可能となる次段階（概要調査の段階）において、現地調査により情報を拡充した上で、回避の必要性を判断する。

これに対し、処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）においては、地下調査施設を建設し、地下深部の地質環境特性をさらに詳細に調査することが可能となる。

以上に示した段階的な調査方法の特徴を踏まえ、将来の影響が明らかな天然現象については、原則として事前確認、文献調査および概要調査の段階において、入念に調査を実施し、影響が著しいと想定される範囲を回避して、サイトを段階的に絞り込む。

なお、精密調査の段階以降に、地下調査施設や地表の追加調査で新たな情報が得られた場合には、改めて影響範囲等を評価し、必要に応じて著しい影響の範囲を回避する。

また、地下深部の地質環境特性の情報に基づいて、将来の影響について工学的対策⁴等も加えた総合的な評価が必要な場合については、概要調査および精密調査の段階において、調査対象地域の現地調査の結果に基づいて、工学的対

⁴ 工学的対策とは、処分場スケールにおいて、施設レイアウトにより天然現象の影響を低減する対策や、余裕をもたせた人工バリアの設計などのこと。

策や安全性に対する影響評価解析等を実施する。その際、地域の地質環境において、発生可能性を考慮して複合現象の影響評価を実施し、その結果を処分深度の設定、施設レイアウトや人工バリア設計等に反映する。

5.2 プレートシステムについて

天然現象による将来の著しい影響を検討する上で、日本列島を含む周辺のプレートシステムの理解が重要である。これは火山の分布や断層の活動性、隆起等の地殻変動の傾向が、プレート運動と密接に関係しているためである。

第2次取りまとめでは次のように示している。日本列島の現在のテクトニクスが成立した時期は、地域ごとに異なるものの、おおむね新第三紀鮮新世から第四紀更新世であり、地殻変動の傾向や火山活動の場は数十万年から数百万年にわたって、著しい変化が認められていない。したがって、今後もプレートシステムの転換が生じなければ、現在の地殻変動の傾向や火山活動の場が今後も維持されると考えられ、今後、プレートシステムに何らかの変化が生じた場合にも、システムの転換には、百万年以上の期間を要することから、将来十万年程度であれば、現在の地殻変動、火山活動等の傾向が著しく変化するとは考えにくいとされた。

その後の知見としては、現在に至る日本列島の原形の構成や過去の周辺のプレート運動の復元などについて、以下のように得られている。日本列島の原形は、日本海の拡大とともに古第三紀漸新世から新第三紀中新世にかけて形成され、日本列島周辺のプレートシステムの基本的な枠組みは、この時代に成立したと考えられている（梅田ほか，2005）。日本列島における地殻変動や火山活動等の傾向は、主に太平洋プレートとフィリピン海プレートの沈み込みに関連していると考えられている。このうち太平洋プレートの運動はハワイ―天皇海山列の年代値と屈曲などの検討に基づいて、4000～5000 万年前以降の方向は小規模な変化を伴うものの、ほぼ継続していると考えられている（Harada and Hamano, 2000 ; Tarduno et al., 2003 ; Sharp and Claug, 2006 ; Wessel and Kroenke, 2007 等）。一方、フィリピン海プレートについては、太平洋プレートのようにプレート上にホットスポットによる海山が存在していないため、日本列島内陸部の火山の位置や、堆積物の年代の検討（Seno and Maruyama, 1984; 高橋, 2006）や、日本列島の周辺だけでなく、マリアナ諸島を含むフィリピン海プレートの広い範囲の古地磁気データ、古地理図データ、GPS 観測などの検討（Seno and Maruyama, 1984 ; Hall et al., 1995 ; Hall, 2002 ; Miller et al., 2006）に基づいたプレート運動の復元結果が報告されている。以上の報告では、データや復元方法により差はあるが、フィリピン海プレートの運動方向やオイラー極の位置の変化、海溝の三重会合点の移動などが 300-500 万年前ごろまでにあり、その後は大きく変化していないと考えられている。

この他、千島弧、伊豆―小笠原弧の衝突など、海底の拡大、小陸塊の衝突とそれに伴うプレート境界の移動等の影響も受けて、現在も日本列島では地殻変動が継続している地域がある。例えば、六甲山地には約 120 万年前ごろに堆積

した大阪層の海成層の一部が見つかっており、最近の約 100 万年間に断層活動を伴う地殻変動（六甲変動）により隆起したことが知られている（太田ほか編，2005）。このようにプレート運動に起因して発生すると考えられる地殻変動に関して、圧縮応力場が支配的である現在のテクトニクス（ネオテクトニクス）に遷移した時期は、地域ごとに異なるものの、概ね鮮新世から更新世であること（梅田ほか，2005）等が示されている。

また、地殻変動としての活断層の活動開始年代は、古いものでおよそ 600 万年前からの年代が確認されているが、約 250 万年前ごろから活動を開始した断層の数が増加し、約 100 万年前までに約半数の活断層が活動を開始している（道家ほか，2012）。他にも、山地発達モデルに基づく、地殻変動の一樣継続性が成立した時期は、地域によってさまざまであるが、遅くとも数十万年から百万年前以降であると考えられている（梅田ほか，2013）。

一方、将来のプレート運動の継続性については、日本列島の地殻変動の痕跡などの論拠なども拡充し、さらに広域的なプレート運動の復元などの地球科学的な知見を蓄積する必要があると考えられる。ただし、以上の知見に基づけば、現在のテクトニクスに遷移した時期が鮮新世から更新世ごろと考えられることや、プレート運動の結果として発生していると考えられる断層活動や地殻変動が少なくとも過去数十万年から百万年のオーダーで継続していること、また、時系列解析モデルから導かれる継続可能性が高い期間の見積もりに基づけば、中期更新世以降に一定となった地殻変動の方向と速度は、将来十万年程度であれば継続する可能性が高いと考えられることも示されている（梅田ほか，2013）ことから、現時点では将来十万年程度であれば、地殻変動の傾向が継続する可能性は高いと考えられる。なお、このように継続する地殻変動の傾向が、地層処分システムに著しい影響を与えると判断される場合には、サイトから回避するなどの対処が可能と考えられる。

5.3 天然現象の考え方と回避の方法

5.2 のプレートシステムの将来の継続性に基づいて、地層処分に著しい影響を与える天然現象について、現象の考え方と回避の対象、および段階的なサイトの調査・評価に基づいた、影響回避の方法について天然現象ごとに示す。このうち火山・火成活動等については、現象の考え方が異なる非火山性の事象を「非火山性熱水および深部流体」として分けて説明する。

また、5.1 にも示したように、天然現象の著しい影響は、事前確認、文献調査および概要調査の段階に入念な調査を実施して、回避することが基本方針であることから、これらの段階を対象として示す。なお、精密調査段階において著しい影響を与える可能性のある事象について遭遇した場合には、その影響を評価し、回避するか工学的対策を行うかを判断する。

5.3.1 火山・火成活動

火山・火成活動のうち、地層処分に著しい影響を与える事象は、「マグマの

貫入・噴出」および「地熱活動」である。これらの影響は、現在および将来において火山・火成活動の可能性が高い範囲を回避することで、同時に回避することが可能である。

(1) 現象の考え方と回避の対象

1) マグマの貫入・噴出

マグマの貫入・噴出が生じた結果として、地表では火山が形成されることとなる。マグマの貫入・噴出は、地層の物理的な隔離の機能を広範囲にわたり喪失させる恐れがあるため、その影響範囲を回避してサイト選定する必要がある。

第2次取りまとめにおいては、中新世後期～鮮新世以降における日本列島の火山活動には偏在性が認められ、東日本火山帯と西日本火山帯の範囲のみに限って活動が生じており、過去数十万年における火山活動の変化は、島弧スケールでの火山フロントの顕著な移動としてではなく、むしろ火山地域や火山列スケールでの活動域の拡大・縮小、移動等の変化としてとらえることができる、とされている。

その後の知見においては、東北地方では、火山活動は火山フロントの背弧域に限定して繰り返し生じており（山元，2011 等）、火山が集中する火山活動域とそうではない火山空白域とに区分でき、火山活動域はホットフィンガーと呼ばれる熱構造の不均一性により制御され安定であると考えられ、それに対応して地下深部にマグマが存在していること（Tamura et al., 2001, 2002 等）が示されている。また、北海道にも火山フロントが形成されているが、西南日本においては火山フロントが不明瞭であるものの、火山活動は中国山地および日本海側の地域に限定されてきている（Kimura et al., 2003 等）こと等が示されている。また、第四紀火山の中心および個別火山体の分布（第四紀火山カタログ委員会，1999）に基づくと、個々の第四紀火山の位置（その火山を代表する位置）を中心として、多くの火山についてその個別火山体（側火山）が数 km の範囲内にあり、すべての火山についてその個別火山体が半径 15km の円の範囲に収まる（陥没カルデラを形成する第四紀火山や、単成火山群等 8 つの火山を除く）（NUMO, 2004）。

以上の知見に基づけば、火山・火成活動で回避が必要な影響範囲については、以下のように取りまとめられる。

- ・ 東北地方では、火山活動は火山フロントの背弧域に限定して繰り返し生じており、火山が分布する領域と、分布しない領域（空白域）が存在している。北海道に関しても、火山フロントが形成されている。一方、西南日本のうち山陰から九州地方北部に関しては、フロントが明確ではない。
- ・ 一部の火山を除いて、個々の第四紀火山の位置（その火山を代表する位置）を中心として、その個別火山体が半径 15 km の円の範囲に分布することから、これらを事前確認から文献調査の段階の、調査段階の初期において回避すべき範囲と考える。

- ・ なお、巨大カルデラ等の個別の火山におけるマグマ活動の範囲は、上記の範囲を超える可能性もあることから現地調査の結果に基づいて評価する。
- ・ また、第四紀火山が存在しない地域にあっても、現在、上部マントル内にマグマが発生・上昇する温度・圧力条件が存在し、将来の火山・火成活動が生じる可能性の高い地域は回避すべきである。さらに、将来において発生する可能性を、マントル物質の熱対流モデル等により評価する必要がある。

2) 地熱活動

地熱活動の領域は、火山の分布と密接な関係がある。地熱活動の影響としては、熱環境への影響と、化学場への影響が考えられ、これらの影響が著しい範囲は回避してサイトを選定する必要がある。

第2次取りまとめにおいては、火山・火成活動によって深部地質環境の熱的状态が大きく変化する範囲は、一般に火山の噴出中心から数 km～20 km 程度までとみなすことができること、また、pH4.8 未満の地下水は主に第四紀火山およびその周辺地域に分布することが示されている。

その後の知見としては、高温異常域 ($>10^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$) は活火山の分布と極めて整合的であり、個別の火山にもよるが 10km 程度の範囲で地温勾配が高い(日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会, 2011)。pH が 4 程度の酸性となるのは噴出中心から 15 km 程度である図が示されている(浅森ほか, 2002)。また、巨大カルデラ火山の地下水系への影響に関する事例研究では、地下水へのマグマ分離成分の影響が 50 km 遠方にまで及ぶとの報告(産業技術総合研究所, 2010)もある。

以上の知見に基づけば、地熱活動の影響の回避が必要な範囲は以下のように取りまとめられる。

- ・ 地温勾配が $10^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ を超える高温異常域の分布は、火山の分布と整合的であり、第四紀火山の中心から 10 km の範囲は影響が大きいと考えられる。
- ・ また、熱水の pH が 4 程度の酸性となる領域は、火山からおおむね 15 km 程度の範囲に分布している。
- ・ したがって、これらを事前確認から文献調査の段階の、調査段階の初期において回避が必要となる対象範囲と考える。
- ・ なお、巨大カルデラ等は、上記の範囲を超える可能性もあることから現地調査等に基づいて評価する。

(2) 回避の方法

現象の考え方に基づいて、マグマの貫入・噴出と地熱活動の可能性が高い範囲を段階的に回避する方法を示す。

1) 事前確認

全国規模で体系的に整備された文献に基づいて、最近の地質時代において活

動した火山がある場所から、15 km 程度の範囲を原則として文献調査の対象地域から除外する。

2) 文献調査の段階

事前確認の結果に加え、対象地域における、火山の有無、影響範囲、マグマの発生領域となる高温異常域、熱水やガス噴出の分布範囲について、文献情報に基づいて調査・評価し、影響が想定される範囲を回避する。

文献情報では将来の影響の評価が困難な場合は、次段階（概要調査の段階）において、現地調査により情報を拡充した上で、回避の必要性を判断する。

3) 概要調査の段階

概要調査地区における、火山の活動の痕跡の有無、マグマの発生領域となる高温異常域、熱水やガス噴出の分布範囲を現地調査（地表調査、ボーリング調査、物理探査等）に基づいて確認し、著しい影響が想定される範囲を回避する（Umeda, 2009）。将来の火山活動については、対象地域の火山活動の規則性や、マントル内の熱対流評価等に基づいて推定し、著しい影響が及ぶ可能性が高いと考えられる範囲を回避する。

5.3.2 非火山性熱水および深部流体

非火山性熱水は、地下に高温岩体が存在する場合に、涵養した地下水が熱せられ熱水となったもので、熱環境への影響が特徴である。一方、深部流体は、沈み込むスラブやマントル起源の流体が断裂系等を通じて地表付近に上昇する（産業技術総合研究所, 2012a）もので、pH が低く炭酸化学種が高濃度に含まれる等の特徴があり、化学場に影響を与える。また、温度が高い場合には熱環境への影響もある。このような特徴を踏まえると、これらの事象は処分場に著しい影響を与えると考えられるため、非火山性熱水または深部流体の流入の可能性が高い範囲を回避する必要がある。

(1) 現象の考え方と回避の対象

第2次取りまとめでは、紀伊半島南部のように第四紀火山が存在していない地域においても高温異常域が認められることについて述べ、その理由は明確にされていないが、地表に噴出していないマグマが地下に存在するという考え方や、地下深部まで発達した断裂系から熱水が上昇しているという指摘があることを示している。なお、後者は深部流体を示している可能性もあるが、深部流体に関する現象の記述はない。

その後の知見においては、非火山性熱水および深部流体について、常磐地域、能登半島、新潟平野、紀伊半島、有馬温泉等の地点で報告されており（田中ほか, 2004 ; 産業技術総合研究所, 2007ab ; 2012ab 等）、偏在性が認められる。深部流体は、pH は酸性で炭酸化学種を多く含み、また一部は高温流体である（産業技術総合研究所, 2007ab ; 2012ab ; 尾山ほか, 2011）。さらに深部流体は、沈み込むスラブやマントルから放出される流体を起源とすると考えられており、地表にまで上昇する際には、地殻下部にまで達するような構造線や大断層

が主経路であると考えられている（産業技術総合研究所，2007ab；2012ab）。

これらの知見に基づけば、非火山性熱水に関しては熱環境への著しい影響を回避する必要がある。また、深部流体は高温である場合には熱環境への著しい影響を回避する必要がある、また、温度にかかわらず、pH が酸性あるいは炭酸化学種濃度が高い場合には、化学場への著しい影響を回避する必要がある。

なお、深部流体に関する研究は現在活発に行われていることから、今後もその動向を注視し、地層処分にかかわる観点からの整理・検討を継続して行うことが必要である。

（2）回避の方法

現象の考え方に基づいて、非火山性熱水または深部流体が流入する範囲を段階的に回避する方法を示す。

1) 事前確認

全国を対象として収集された情報（例えば、高橋ほか，2011）を目安として、非火山性熱水または深部流体が存在し、かつ熱環境または化学場に対する影響が明らかな場所を回避する。

2) 文献調査の段階

地域ごとに収集する文献情報に基づいて、非火山性熱水または深部流体の存在について確認し、それらが将来の地層処分システムの安全性に影響を及ぼすことが想定される場合は、その影響範囲を回避する。

文献情報で著しい影響が明確に判断できない場合は、次段階（概要調査の段階）において、現地調査により情報を拡充した上で、回避の必要性を判断する。

3) 概要調査の段階

概要調査地区における現地調査（地表調査、ボーリング調査、物理探査等）に基づいて、非火山性熱水または深部流体の分布を確認し、熱環境、化学場に対する影響を評価した上で、著しい影響が想定される範囲を回避する。

5.3.3 断層活動

断層活動により、地下深部から地表・地下浅部に達するような断層のずれが発生し、処分場が力学的に破壊される場合、および、断層のずれに伴い断層およびその周辺の岩盤の透水性が増加し、地下水の移行経路が変化した場合について、著しい影響があると考ええる。そのため、将来も活動する可能性が高く、繰り返し活動し、変位の規模が大きい断層は回避する必要がある。

（1）現象の考え方と回避の対象

1) 繰り返し活動し、変位の規模が大きい断層の分布

第2次取りまとめにおいては、わが国における既存の主な活断層はおおむね把握されているが、特に広い沖積平野等伏在断層の存在が考えられる地域や海域等については、ボーリングや物理探査等を用いた地下構造調査によって、既

存のもの以外の活断層の有無や分布を確認する必要があるとされている。

その後の知見としては、2000 年以降、全国規模で抽出された既知の活断層以外で、規模の大きな地震が発生し、活断層の存在が後に指摘された主な事例として、次のものがあげられる。2000 年鳥取県西部地震（当麻ほか，2000；井上ほか，2002；高田ほか，2003；草野ほか，2010 等）、2004 年新潟県中越地震（産業技術総合研究所，2005；加藤ほか，2006；Maruyama et al., 2007 等）、2005 年福岡県西方沖地震（岩淵ほか，1998；岡村ほか，2009 等）、2007 年能登半島地震（片川ほか，2005；佐藤ほか，2007；Yoshimura et al., 2008；草野ほか，2010 等）、2007 年新潟県中越沖地震（東京電力，2007，2008；杉山，2008；原子力安全・保安院，2008 等）、2008 年岩手・宮城内陸地震（鈴木ほか，2008；東京大学地震研究所ほか，2008；産業技術総合研究所，2009 等）。なお、このような地形的に未成熟な断層についても、現地調査により事前に検出は可能であり、概要調査では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（産業技術総合研究所，2007b）。

以上の知見に基づく、既存の活断層の存在は、全国規模のデータベースの情報だけでなく、より綿密な空中写真判読、地表調査、物理探査、ボーリング調査等の現地調査に基づいて、上述の 2000 年以降に発生した地震とその後の活断層調査の知見を踏まえて確認する必要がある。

2) 繰り返し活動し、変位の規模が大きい断層の影響範囲

第 2 次取りまとめにおいては、影響は主に活断層破砕帯とその周辺に限られ、その幅は数 m から最大でも数百 m 程度であること、断層活動に伴って周辺岩盤中に変位を生じさせる可能性のある小断層等の分布範囲は、大きな活断層でも数 km 程度以内と考えられることが示されている。また、規模の大きな活断層の場の変化を評価する際には、分岐断層や副断層を含めたいくつかの断層から構成される活断層帯としてその活動や変化を把握する必要があり、逆断層の場合、その活動が盆地側に向かって数 km 程度拡大する可能性がある、とされている。

その後の知見としては、断層の延長が長く累積変位量が大きいほど、破砕幅も大きい（Shipton et al., 2006）ことや、既往の断層の長さや破砕帯およびプロセスゾーンの幅の関係に関する知見（例えば、破砕帯幅は断層長さの 1/350～1/150 程度、プロセスゾーンの幅は断層長さの 1/100 程度）が示されている（緒方・本荘，1981；Scholz, 2002；Sibson, 2003；金折・遠田，2007；大橋・小林，2008；長友・吉田，2009；吉田ほか，2009；Niwa et al., 2009, 2011）。また、近い距離にほぼ平行や雁行、あるいは断続的に存在する活断層には含まれる区間を「活断層帯」として評価することが、将来の断層活動の影響を避ける上で重要（土木学会 原子力土木委員会 地下環境部会，2006 等）とされている。

以上の知見に基づく、断層活動の影響範囲は、目安となる破砕帯の幅として、保守的には断層長さの 100 分の 1 程度とすることが考えられる。また、サイト毎に個別に評価するが、将来の断層活動の範囲として、断層の進展や分岐

が発生する可能性がある領域（活断層帯）を回避する。さらに、変形帯や活褶曲・活撓曲についても、地層処分システム全体への影響が著しい場合には回避することを検討する。

(2) 回避の方法

現象の考え方に基づいて、繰り返し活動し、変位の規模が大きい断層の影響範囲を段階的に回避する方法を示す。

1) 事前確認

全国規模で体系的に整備された文献に基づいて、最近の地質時代において活動した既知の断層がある場所については、破碎帯の幅として、保守的には断層長さの 100 分の 1 程度の範囲を文献調査の対象地域から除外する。

2) 文献調査の段階

事前確認の結果に加え、対象地域における文献の詳細調査により、既知の断層の分布、破碎帯の幅等を把握し、その影響範囲を回避する。

変位規模が小さい断層、地表の痕跡が不明瞭である断層、地下に伏在している断層、地質断層など、文献情報では影響の評価が困難な場合は、次段階（概要調査の段階）において現地調査により情報を拡充した上で、回避の必要性を判断する。

3) 概要調査の段階

断層の分布については、概要調査地区における断層の活動の痕跡の有無を現地調査（地表調査、ボーリング調査、物理探査等）に基づいて確認し、その影響範囲を回避する。

断層の活動性の確認は、上載地層法を基本とする。上載地層法が適用できない場合には、破碎帯の組織構造等に基づいて、その断層の活動性を評価する。

変位規模が小さい断層、地表の痕跡が不明瞭である断層、地下に伏在している断層、地質断層などについては調査結果に基づき断層の影響を想定した安全性の評価を実施して、回避の必要性や工学的対策による対応の可否等について、総合的に判断する。

5.3.4 隆起・侵食

隆起・侵食により、処分場が地表に著しく接近する場合について、著しい影響があると考ええる。そのため、隆起や海水準変動等の影響も考慮して、侵食作用（マスムーブメントも含む）が著しいと考えられる地域を回避する必要がある。

(1) 現象の考え方と回避の対象

第 2 次取りまとめにおいては、まず侵食のプロセスを面的侵食と線的侵食に分け、面的侵食については海面上昇期における速度が比較的大きい海食について触れ、線的侵食についてはサイクリックな河床高度変動（下流域では氷期の

海面低下に伴い下刻し間氷期に堆積して沖積層形成等)を説明している。次に、侵食作用による地表面の低下は侵食基準面(内陸河川では合流する大きな河川の河床面等、沿岸では海面)に向かって進むこと、侵食速度は侵食基準面に対する比高に依ることを示し、具体的な侵食量として、隆起が激しい山地中心部や地震隆起海岸を除けば、十万年間に侵食される深さは数十 m~百 m 程度、海岸部の最大下刻量は、隆起と氷期の海面低下量を合計して評価する必要があるが、それでも多くの場合、十万年で 200 m 未満と考えられることが示されている。

その後の知見においては、次のことが報告されている。主に山地・丘陵等を対象として、侵食・削剥速度に関する情報が蓄積されており(太田ほか, 2007; 花谷ほか, 2010; Mahara et al., 2010)、侵食・削剥速度は、地殻変動の活発さに影響を受け、地殻変動が活発な地域あるいは期間では十万年あたり 50 m を超え、河川の下刻作用による侵食も著しい(若狭ほか, 2008; 末岡ほか, 2010)。とくに著しい隆起が生じている南アルプスでは、山脈が形成された後期鮮新世以降 km オーダーの著しい削剥が生じている(末岡ほか, 2011)。一般に、隆起が継続すると侵食の程度も増加し、山地・丘陵では、隆起速度および侵食速度は数十万年から百万年程度で平衡状態に達する(藤原ほか, 2005)。

隆起した量が全て面的に侵食されるわけではない(Sasaki et al., 2009)が、主要河川の中~上流域では、気候・海水準変動 1 サイクル(約十万年)の期間において、下刻量および隆起量がほぼつり合い、下流域・河口付近では下刻による侵食量が隆起量を上回ることが多い(高木ほか, 2000)。沿岸域については特に、侵食の要因となる海水準変動を考慮する必要があり、氷期には海水準が最大で 150m 程度低下したことが示されている(Clark et al., 2009)。主要河川の河口付近での海水準低下時の侵食深度の過去の履歴として、沖積層基底の埋没谷深度が参考になる(鳥越ほか, 2003)が、最大で 100 m 前後に達する可能性がある。

以上の知見に基づくと、隆起・侵食の現象の考え方は以下のように取りまとめられる。

- ・ 侵食のうち線的侵食である河川による下刻が最も厳しく、主要な検討対象とすべき形式である。また、波浪侵食による海食崖の後退にも留意する必要がある。
- ・ 内陸については、隆起があった場合は隆起した分だけ侵食する、隆起量の予測の不確実性が高い場合は保守的に侵食基準面まで侵食する、等と仮定する方法が考えられる。
- ・ 沿岸については、海水準変動を推定し、地形面と侵食基準面である海水面との比高から、侵食量の時間的な変化を積算して評価する方法等が考えられるが、不確実性が高い場合には、海面が最も低下した状態(現在より -150 m)を想定し、侵食量を保守的に評価することが考えられる。沖積層の基底深度の情報も、将来の侵食量を推定する際の目安となると

考えられる。

(2) 回避の方法

現象の考え方に基づいて、隆起・侵食が著しい地域を段階的に回避する方法を示す。

1) 事前確認

全国を対象として収集された情報を目安として、過去十万年における最大侵食量が 300 m を超えたことが明らかな範囲を回避する。

2) 文献調査の段階

文献情報に基づいて、将来の侵食の影響が明らかに想定される地域を回避して、概要調査を行う範囲を設定する。

処分場の地表への接近については、処分場の設置深度等も踏まえて評価すべきであるが、この段階は以下のような明らかに著しい侵食量が予想される場所を回避する。

- 内陸の隆起性山地（目安として今後十万年内に隆起量が 300 m を超えると考えられる地域）。
- 隆起が顕著な沿岸部。海面低下量と合わせた大きな侵食量が見込まれる地域（目安として、隆起と海面低下に伴う侵食量が、今後十万年内に 300 m を超えると考えられる地域）。

文献情報では、影響の評価が困難な場合は、次段階（概要調査の段階）において、現地調査により情報を拡充した上で、回避の必要性を判断する。

3) 概要調査の段階

基準地形面の調査や堆積物の調査等の現地調査に基づいて、隆起量进行评估し、さらに、海水準変動を考慮して、将来の侵食量进行评估する。

上記の評価結果に基づき、処分場の設置深度を設定し、工学的な実現可能性も評価した上で、著しい影響が想定される範囲は回避し、精密調査を行う範囲を設定する。

5.4「地質環境の長期安定性への影響要因に関するサイト調査の方針」に関する評価

第2次取りまとめ以降の最新の科学的知見に基づき、第4章の「地質環境の長期安定性への影響要因と対応方針」にて示した地層処分の機能に著しい影響を与える事象について、現象の考え方と回避の方法について審議した。まず、わが国における天然事象の発生要因と考えられるプレート運動については、第2次取りまとめおよびそれ以降の最新の知見に基づけば、プレート運動に係る断層活動や地殻変動は少なくとも数十万年から百万年のオーダーは同じ傾向で継続していることから、現時点では将来十万年程度であれば、現在の運動の傾向が継続する可能性は高いと考えられることを示した。その上で、わが国におけるそれらの事象の偏在性や、各事象により著しい影響を受ける範囲を

明示するとともに、事前確認、文献調査段階、および概要調査段階のそれぞれの段階において、それらの事象を回避するための基本的な考え方を具体的に示していることから、段階的なサイト選定により、好ましい地質環境に著しい影響を与える事象を回避することで、十万年程度の期間、おのおのの好ましい地質環境が大きく変化する可能性が低い地域を選定できるものと考えられる。実際に、このような地域が選定されれば、その地域を対象とした天然事象に関連する将来の変動予測が行われ、地質環境の変動幅が評価される。それを保守的にとらえた上でさらに、必要とされるバリア機能に対する影響が検討され、地層処分システム全体としての安全性が示される必要がある。

さらに、最新の科学的知見から、火山・火成活動における「マグマの発生領域となる高温異常域」や、隆起・侵食における「目安として、侵食量が今後十萬年内に 300 m を超えると考えられる地域」を文献調査段階で回避対象とする等、これまでに NUMO が公表している概要調査地区選定上の考慮事項（NUMO, 2004）に加える考え方が示されるとともに、これまで対象とされてこなかった深部流体についても、それらの偏在性や回避の方法を示しており、おのおのの好ましい地質環境特性が長期にわたり維持される地域の選定に関する信頼度が向上したと考えられる。

これらのことから、わが国において地層処分を行う上で重要となる、おのおのの好ましい地質環境特性が長期的に大きく変化しない可能性が高い地域を、段階的なサイト選定プロセスにより見出すことができる確度が高まったと評価できる。

第6章 まとめと今後の取組に当たって

本審議では、地層処分の技術的信頼性の再評価の一環として、第2次取りまとめ以降の最新の科学的知見を反映し、地質環境特性および地質環境の長期安定性について審議を行うとともに、今後の研究課題を明らかにした。

その結果、地質環境特性については、地層処分システムに必要とされる機能を発揮させる上で好ましい地質環境特性が熱環境、力学場、水理場、化学場の観点で整理されるとともに、おのおのの好ましい地質環境特性を有する地域がわが国に広く存在するであろうことが改めて示された。しかし、それらの地質環境特性は、場所により異なる可能性もあることから、地層処分システム全体としての安全性は、段階的サイト調査の進展により蓄積されるデータに基づく安全評価等により示していく必要がある。

長期安定性については、好ましい地質環境特性に影響を与える可能性の観点から天然事象に関する整理が行われた結果、地層処分システムの物理的隔離機能や閉じ込め機能に著しい影響を与え、サイト選定により最低限回避が必要な事象が明らかになった。さらに、これらの事象について、段階的なサイト調査、すなわち、事前確認、文献調査段階、および概要調査段階のそれぞれの段階において回避対象を特定しそれを回避するための基本的な考え方が具体的に示された。その上で、段階的なサイト調査を適切に行うことにより、全ての天然現象の長期的変動の影響を踏まえても尚、おのおのの好ましい地質環境とその地質環境の長期安定性を確保できる場所をわが国において選定できる見通しが得られたと判断できる。

なお、本審議の結果、地層処分の技術的信頼性向上に向けた取組として、以下に示す研究課題も明示され、今後の地層処分事業の取組と平行した技術開発の必要性もあわせて示された。

広域的現象の理解に関する研究課題

- ・ 火山の分布および地熱活動の評価に反映するための、マグマ成因論に関する知見の収集およびマントル内の熱対流モデルの評価手法の整備。
- ・ 繰り返し活動し変位の規模が大きな断層の評価に反映するための、地形的に不明瞭な活断層の調査事例の蓄積および調査や評価方法の整備。
- ・ 隆起量・侵食量の評価に反映するための、地形学的手法や堆積物の年代測定に基づく評価方法の整備。
- ・ 天然現象の将来予測を行う上での前提となるプレートシステムの継続性の評価のための、プレートシステムの変遷と地質学的イベントの関係の整理および検討。
- ・ 深部流体および非火山性熱水の流出の評価に反映するための、深部流体および非火山性熱水に関する形成・移動メカニズム等の調査事例の蓄積。

概要調査以降の調査・評価手法に関する研究課題

- ・ 断層の活動性の評価に反映するための、地質断層の再活動性に関する調査事例および上載法の適用が困難な断層の活動性の評価方法（断層岩や充填鉱物の年代測定方法）の整備。
- ・ 断層活動による影響範囲の評価に反映するための、既存の活断層の破碎帯の分布等の調査事例の蓄積および調査や評価方法の整備。
- ・ 表層付近の酸化帯分布の評価に反映するための、表層付近の酸化帯に関する調査事例の蓄積。
- ・ 地震活動の評価に反映するための、東北地方太平洋沖地震後に誘発された地震や湧水（たとえば、2011 年 4 月 11 日の福島県浜通り地震）に関する調査事例の蓄積。
- ・ 地下水の動きが緩慢であることを評価するための地下水年代測定などの技術の確保や調査事例の蓄積。

参考文献

第3章の参考文献

- 長 秋雄, 国松 直, 金川 忠, 藤井真希, 横山幸也, 小川浩司, 田仲正弘 (2009) : 我が国における地下岩盤内の初期地圧状態－応力解放法による実測データに基づく. 地質調査所研究報告, 60, 413-447.
- 電力中央研究所 (2008) : 地層処分共通技術調査：岩盤中地下水移行評価技術高度化開発)－地下水年代測定技術調査－.
- 電力中央研究所 (2009) : 地層処分共通技術調査：岩盤中地下水移行評価技術高度化開発)－地下水年代測定技術調査－.
- 長谷川琢磨, 中田弘太郎, 近藤浩文, 五嶋慶一郎, 村元茂則, 富岡祐一, 後藤和幸, 柏谷公希 (2013) : 沿岸域における地下水の流動性の年代測定による評価－三浦半島西部沿岸域でのボーリング調査. 地学雑誌, 122, 116-138.
- Inagaki, Y., Makigaki, H., Idemitsu, K., Arima, T., Mitsui, S. and Noshita, K. (2012) : Initial dissolution rate of a Japanese simulated high-level waste glass P0798 as a function of pH and temperature measured by using micro-channel flow-through test method, J. Nuclear Science and Technology 49, 438-449.
- 石井英一, 濱 克宏, 國丸貴紀, 佐藤治夫 (2007) : 海成堆積物の地下浅部における天水の浸透に伴う地下水の pH 変化. 地質学雑誌, 113, 41-52.
- 地盤工学会 (2009) : 原位置岩盤試験データベース (2008 年度版). 丸善.
- JNC (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の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－分冊2 地層処分の工学技術. JNC TN1400 99-022.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005a) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成17年取りまとめ－ 分冊1 深地層の科学的研究. JNC TN1400 2005-014.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005b) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成17年取りまとめ－ 分冊2 工学技術の開発. JNC TN1400 2005-015.
- Karland, O., Sandén, T., Johannesson, L.E., Eriksen, T.E., Jansson, M., Wold, S., Pedersen, K., Motamedi, M. and Rosborg, B. (2000) : Long term test of buffer material Final report on the pilot parcels, SKB TR-00-22.
- 近藤浩文, 木方建造, 五嶋慶一郎, 長谷川琢磨, 濱田崇臣, 大山隆弘, 鈴木浩一, 後藤和幸, 末永弘, 中田弘太郎, 田中姿郎, 長岡 亨, 窪田健二, 土 宏之, 三和 公, 村元茂則, 河野一輝, 伊藤久敏 (2011) : 高レベル放射性廃棄物等の処分地選定のための概要調査技術に係わる実証研究－

地質環境条件に応じた掘削・孔内調査・試験手法の適用性と課題．電力中央研究所報告，N15.

Lollar, B.S. (2005) : Environmental Geochemistry. TREATISE ON GEOCHEMISTRY 9, Elsevier.

太田久仁雄, 安部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗 (2007) : 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階 (第 1 段階)研究成果報告書, 分冊「深地層の科学的研究」, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-044.

尾山洋一, 高橋正明, 塚本 齊, 風早康平, 安原正也, 高橋 浩, 森川徳敏, 大和田道子, 芝原暁彦, 稲村明彦 (2011) : 日本列島の非火山地域における深層地下水水質と地質との関係について．原子力バックエンド研究, 18, 25-34.

産業技術総合研究所 (2011) : 沿岸域塩淡協会・断層評価技術高度化開発 成果報告書 (平成 23 年 3 月).

産業技術総合研究所 (2012) : 沿岸域塩淡協会・断層評価技術高度化開発 成果報告書 (平成 24 年 3 月).

館 幸男, 栃木善克, 陶山忠宏, 齋藤好彦, Ochs M. , 油井三和 (2008) : 地層処分安全評価のための核種の収着・拡散データベースシステムの開発, JAEA-Data/Code 2008-034.

武田聖司 (1999) : 地下水中における Am, Pu, Tc の溶解度の解析, JAEA-Research 99-047.

竹内真司, 國丸貴紀, 見掛信一郎, 西尾和久, 鶴田忠彦, 松岡稔幸, 早野 明, 竹内竜史, 三枝博光, 大山卓也, 水野 崇, 平野 享, 尾方伸久, 濱 克宏, 池田幸喜, 山本 勝, 弥富洋介, 島田顕臣, 松井裕哉, 伊藤洋昭, 杉原弘造 (2010) : 超深地層研究所計画 年度報告書 (2008 年度) . JAEA-Review 2010-014.

田中明子, 山野 誠, 矢野雄策, 笹田政克 (2004) : 日本列島及びその周辺地域の地温勾配及び地殻熱流量データベース. 数値地質図 P-5, 産業技術総合研究所 地質調査総合センター.

谷口直樹, 森本昌孝, 本田明 (1999) : ベントナイト中における炭素鋼の不動態化条件の検討, サイクル機構技報, No. 4, 87-91.

Wicks, G.G., O'Rourke, P.E. and Whitkop, P.G. (1982) : The Chemical Durability of Savannah River Plant Waste Glass as a Function of Groundwater pH, DP-MS-81-104. J. American Ceramic Society.

第4章の参考文献

- Amano, K., Niizato, T., Yokota, H., Ota, K., Lanyon, B., Alexander, W.R. (2011) : Development of comprehensive techniques for coastal site characterisation: integrated palaeohydrogeological approach for development of site evolution models. Proc. ASME 14th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM2011-59259.
- 浅森浩一, 石丸恒存, 岩月輝希 (2002) : 研究報告 日本列島における火山周辺の酸性地下水分布. サイクル機構技報, No.15, 103-111.
- Boullier, A.M., Fujimoto, K., Ohtani, T., Roman-Ross, G., Lewin, É., Ito, H., Pezard, P., Ildefonse, B. (2004) : Textural evidence for recent co-seismic circulation of fluids in the Nojima fault zone, Awaji island, Japan. Tectonophysics, 378, 165-181.
- Cuffey, K.M., Marshall, S.J. (2000) : Substantial contribution to sea-level rise during the last interglacial from the Greenland ice sheet. Nature, 404, 591-594.
- 藤川 智, 奥村俊彦, 岡田康男, 窪田 茂, 末広俊夫, 玉田潤一郎, 藤崎 淳 (2012) : 地下深部の地震動特性に関する基礎的検討. 土木学会第 67 年次学術講演会講演概要集, 1081-1082.
- 舟木泰智, 石井英一, 常盤哲也 (2009) : 新第三紀堆積岩中の割れ目は主要な水みちとなり得るか? 応用地質, 50, 238-247.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター (2013) : 平成 24 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 多重バリアの長期安定性に関する基礎情報の収集及び整備. 平成 19 年度～平成 24 年度とりまとめ報告書.
- 今井 久, 山下 亮, 塩崎 功, 浦野和彦, 笠 博義, 丸山能生, 新里忠史, 前川恵輔 (2009) : 地下水流動に対する地質環境の長期変遷の影響に関する研究. JAEA-Research 2009-001.
- 石井英一, 福島龍朗 (2006) : 新第三紀珪質岩における断層の解析事例. 応用地質, 47, 280-291.
- Ishii, E., Funaki, H., Tokiwa, T., Ota, K. (2010) : Relationship between fault growth mechanism and permeability variations with depth of siliceous mudstones in northern Hokkaido, Japan. J. Struct. Geol., 32, 1792-1805.
- Ishikawa, T., Tanimizu, M., Nagaishi, K., Matsuoka, J., Tadai, O., Sakaguchi, M., Hirono, T., Mishima, T., Tanikawa, W., Lin, W., Kikuta, H., Soh, W., Song, S.-R. (2008) : Coseismic fluid-rock interactions at high temperatures in the Chelungpu fault. Nat. Geosci., 1, 679-683.

- 石丸恒存, 角田地文 (2002) : 研究報告 日本列島における大規模火砕流の特徴と熱的影響解析. サイクル機構技報, No.14, 161-170.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005) : (第3章で既出, JNC (2005a))
- 金折裕司 (2001) : 断層の影響はどこまで及んでいるか. 応用地質, 41, 323-332.
- 川村淳, 大井貴夫, 新里忠史, 安江健一, 常盤哲也, 丹羽正和, 島田耕史, 黒澤英樹, 浅森浩一, 河内進, 江橋健, 北村暁, 石丸恒存, 牧野仁史, 梅田浩司, 瀬尾俊弘 (2008) : 高レベル放射性廃棄物地層処分における天然現象影響評価に関する研究. JAEA-Research 2008-018.
- 気象庁 (2007) : IPCC 第4次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約. 気象庁 HP (PDF 版) , 24.
- 北川有一, 藤森邦夫, 向井厚志, 加納靖之, 小泉尚嗣 (2008) : 断層の修復過程を透水性の時間変化によってモニターする. 地質調査総合センター第11回シンポジウム「地下水のさらなる理解に向けて～産総研のチャレンジ～」, 地質調査総合センター研究資料集, No.473, 61-62.
- 操上広志, 竹内竜史, 藪内 聡, 瀬尾昭治, 戸村豪治, 柴野一則, 原 稔, 國丸貴紀 (2008) : 幌延深地層計画の地上からの調査研究段階における地下水流動に関する調査研究. 土木学会論文集 C, 64, 680-695.
- 松末和之, 藤原 治, 末吉哲雄 (2000) : 日本列島における最終氷期最寒冷期の気候. サイクル機構技報, No.6, 93-103.
- 松崎達二, 角田地文, 石丸恒存, 鎌田浩毅, 檀原 徹, 岩野英樹, 吉岡 哲 (2004) : 大規模火砕流による基盤岩への熱的影響の検討ーフィッシュン トラック法による熱履歴解析, 応用地質, 45, 238-248.
- 中田 高, 今泉俊文 (編) (2002) : 「活断層詳細デジタルマップ」付図 200 万分の 1 日本列島活断層図. 東京大学出版会.
- 中山 雅, 佐野満昭, 真田祐幸, 杉田 裕 (編) (2010) : 幌延深地層研究計画 平成 21 年度調査研究成果報告. JAEA-Review 2010-039.
- 中山 雅, 天野健治, 常盤哲也, 山本陽一, 大山卓也, 天野由記, 村上裕晃, 稲垣大介, 津坂仁和, 近藤桂二, 横田秀晴, 南條 功, 新里忠史, 田中真悟, 大原正嗣, 神 和美 (2012) : 幌延深地層研究計画 平成 23 年度調査研究成果報告. JAEA-Review 2012-035.
- 日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会 (編) (2011) : 日本列島と地質環境の長期安定性. 地質リーフレット 4.
- Niizato, T., Amano, K., Ota, K., Kunimaru, T., Lanyon, B., Alexander, W.R. (2010) : Development of comprehensive techniques for coastal site characterisation: (3)

conceptualisation of long-term geosphere evolution. Proc. ASME 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM2010-40052.

大場忠道（2006）：有孔虫の殻の酸素・炭素同位体比に基づく過去 15 万年間の日本海と鹿島沖の環境変化. 地学雑誌, 115, 652-660.

岡田哲実（2006）：高温環境下における堆積軟岩の力学特性（その 2）——軸圧縮試験によるクリープ特性の温度依存性の評価. 電力中央研究所報告, N05057.

尾上博則, 笹尾英嗣, 三枝博光, 小坂 寛（2009）：過去から現在までの長期的な地形変化が地下水流動特性に与える影響の解析的評価の試み. 日本原子力学会和文論文誌, 8, 40-53.

太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱 克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗（2007）：（第 3 章で既出）

尾山洋一, 高橋正明, 塚本 斉, 風早康平, 安原正也, 高橋 浩, 森川徳敏, 大和田道子, 芝原暁彦, 稲村明彦（2011）：（第 3 章で既出）

産業技術総合研究所ホームページ a：活断層データベース.
<<http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/index.html>>（参照 2012 年 12 月 1 日）.

産業技術総合研究所ホームページ b：地震に関連する地下水観測データベース “Well Web”. <<http://riodb02.ibase.aist.go.jp/gxwell/GSJ/index.shtml>>（参照 2012 年 12 月 1 日）.

産業技術総合研究所ホームページ c:2011 年 4 月 11 日福島県浜通りの地震(M7.0)に伴う温泉の変化. <<http://unit.aist.go.jp/igg/crufluid-rg/iwaki/onsen.html>>（参照 2012 年 12 月 1 日）.

産業技術総合研究所（2012）：概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—立地要件への適合性とその根拠となる調査結果の妥当性. 産業技術総合研究所 地質調査総合センター研究資料集, No.560.

Shibata, K., Tani, K., Okada, T. （2007）：Creep behavior of tuffaceous rock at high temperature observed in unconfined compression test, *Soils and Foundations*, 47, 1-10.

Tadokoro, K., Ando, M. (2002) : Evidence for rapid fault healing derived from temporal changes in S wave splitting. *Geophys. Res. Lett.*, 29, doi:10.1029/2001GL013644.

高橋正明, 風早康平, 安原正也, 塚本齊, 佐藤努, 高橋浩, 森川徳敏, 大和田道子, 尾山洋一, 芝原暁彦, 稲村明彦, 鈴木秀和, 半田宙子, 仲間純子, 松尾京子, 竹内久子, 切田司, 大丸純 (2011) : 深層地下水データベース, 地質調査総合センター研究資料集, No.532.

Tanaka, A., Yamano, M., Yano, Y., Sasada, M. (2004) : Geothermal gradient and heat flow data in and around Japan (I): appraisal of heat flow from geothermal gradient data. *Earth Planet. Space*, 56, 1191-1194.

梅田浩司, 大澤英昭, 野原 壮, 笹尾英嗣, 藤原 治, 浅森浩一, 中司 昇 (2005) : サイクル機構における「地質環境の長期安定性に関する研究」の概要ー日本列島のネオテクトニクスと地質環境の長期安定性ー, 原子力バックエンド研究, 11 , 97-112.

山田国見, 安江健一, 岩野英樹, 山田隆二, 梅田浩司, 小林健太朗 (2012) : 阿寺断層の垂直変位量と活動開始時期に関する熱年代学的研究. 地質学雑誌, 118, 437-448.

吉田英一, 大嶋章浩, 吉村久美子, 長友晃夫, 西本昌司 (2009) : 断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴ー阿寺断層における‘ダメージゾーン’解析の試み. 応用地質, 50, 16-28.

第5章の参考文献

浅森浩一, 石丸恒存, 岩月輝希 (2002) : (第4章で既出)

Clark, P.U., Dyke, A.S., Shakun, J.D., Carlson, A.E., Clark, J., Wohlfarth, B., Mitrovica, J.X., Hostetler, S.W., McCabe, A.M. (2009) : The Last Glacial Maximum. *Science*, 325, 710-714.

第四紀火山カタログ委員会 (1999) : 日本の第四紀火山カタログ v.1.0 (CD-ROM版), 日本火山学会.

土木学会 原子力土木委員会 地下環境部会 (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.

道家涼介, 谷川晋一, 安江健一, 中安昭夫, 新里忠史, 梅田浩司, 田中竹延 (2012) : 日本列島における活断層の活動開始時期の空間的特徴, 活断層研究, 37, 1-15.

藤原 治, 柳田 誠, 三箇智二, 守屋俊文 (2005) : 地層処分から見た侵食作用の重要性ー海成段丘を対象とした侵食速度の推定を例に. 原子力バックエンド研究, 11, 139-146.

原子力安全・保安院 (2008) : 新潟県中越沖における海上音波探査について (中間報告), 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造

設計小委員会地震・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ（第 12 回）
-配付資料 合同 W12-1, 平成 20 年 6 月 27 日.

Hall, R. (2002): Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations, *J. Asian Earth Sci.*, 20, 353-431.

Hall, R., Fuller, M., Ali, J. R. & Anderson, C. D. (1995) : Active Margins and Marginal Basins of the Western Pacific, *Geophys. Monogr.* 88, 371-404

花谷育雄, 宗像雅広, 木村英雄, 三箇智二 (2010) : 幌延地域における周氷河地形の解析的研究. *原子力バックエンド研究*, 17, 55-70.

Harada, Y. and Hamano, Y. (2000) : Recent progress on the plate motion relative to hotspots, *Geophys. Monogr.*, 121, 327-338.

井上大榮, 宮腰勝義, 上田圭一, 宮脇明子, 松浦一樹 (2002) : 2000 年鳥取県西部地震震源域の活断層調査. *地震*, 54, 557-573.

岩淵 洋, 西川 公, 田賀 傑, 宮寄 進 (1998) : 福岡湾付近の断層分布. *水路部技報*, No.16, 95-99.

金折裕司, 遠田晋次 (2007) : 中国地方西部に認められるプレート内山ロー出雲地震帯の成因と地震活動. *自然災害科学*, 25, 507-523.

片川秀基, 浜田昌明, 吉田進, 廉澤宏, 三橋明, 河野芳輝, 衣笠善博 (2005) : 能登半島西方海域の新第三紀～第四紀地質構造形成, *地学雑誌*, 114, 791-810.

加藤直子, 越後智雄, 佐藤比呂志 (2006) : 浅層反射法地震探査から見た 2004 年新潟県中越地震の断層モデル. *月刊地球号外*, 53, 103-109.

Kimura, J., Kunikiyo, T., Osaka, I., Nagao, T., Yamauchi, S., Kakubuchi, S., Okada, S., Fujibayashi, N., Okada, R., Murakami, H., Kusano, T., Umeda, K., Hayashi, S., Ishimaru, T., Ninomiya, A., Tanase, A. (2003) : Late Cenozoic volcanic activity in the Chugoku area, southwest Japan arc during back-arc basin opening and reinitiation of subduction. *Island Arc*, 12, 22-45.

草野友宏, 浅森浩一, 黒澤英樹, 國分（齋藤）陽子, 谷川晋一, 根本健之, 花室孝広, 安江健一, 山崎誠子, 山田国見, 石丸恒存, 梅田浩司 (2010) : 「地質環境の長期安定性に関する研究」第 1 期中期計画期間（平成 17 年度～平成 21 年度）報告書（H22 レポート）. JAEA-Research 2010-044.

Maruyama, T., Iemura, K., Azuma, T., Yoshioka, T., Sato, M., Miyawaki, R. (2007) : Paleoseismological evidence for non-characteristic behavior of surface rupture associated with the 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake, central Japan.

Tectonophysics, 429, 45-60.

Mahara, Y., Hohjo, K., Kubota, T., Ohta, T., Mizuochi, Y., Tashiro, T., Sekimoto, S., Takamiya, K., Shibata, S., Tanaka, K. (2010) : Vertical distribution of ^{10}Be , ^{26}Al , and ^{36}Cl in the surface soil layer of weathered granite at Abukuma, Japan. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 268, 1197-1200.

Miller, M. S., Kennett, B.L.N., and Toy, V.G. (2006) : Spatial and temporal evolution of the subducting Pacific plate structure along the western Pacific margin, J. Geophys. Res., 111, B02401, doi:10.1029/2005JB003705.

長友晃夫, 吉田英一 (2009) : 断層と割れ目系及びその充填鉱物を用いた阿寺断層の地質的履歴解析. 地質学雑誌, 115, 512-527.

日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会 (編) (2011) : (第3章で既出)

Niwa, M., Mizuochi, Y., Tanase, A. (2009) : Reconstructing the evolution of fault zone architecture: field-based study of the core region of the Atera Fault, central Japan. Island Arc, 18, 577-598.

Niwa, M., Kurosawa, H., Ishimaru, T. (2011) : Spatial distribution and characteristics of fracture zones near a long-lived active fault: a field-based study for understanding changes in underground environment caused by long-term fault activities. Eng. Geol., 119, 31-50.

NUMO (2004) : 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠, NUMO-TR-04-02.

緒方正虔, 本荘静光 (1981) : 電力施設の耐震施設における断層活動性の評価, 応用地質, 22, pp.67-87.

大橋聖和, 小林健太 (2008) : 中部地方北部, 牛首断層中央部における断層幾何学と過去の運動像. 地質学雑誌, 114, 16-30.

岡村 眞, 松岡裕美, 中島徹也, 中田 高, 千田 昇, 平田和彦, 島崎邦彦 (2009) : 博多湾における警固断層の活動履歴. 地震第2輯, 61, 175-190.

太田陽子, 成瀬敏郎, 田中眞吾, 岡田篤正 (2006) : 日本の地形 6 近畿・中国・四国, 第2版, 東京大学出版会, 92-101.

太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱 克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗 (2007) : (第3章で既出)

- 尾山洋一，高橋正明，塚本 齊，風早康平，安原正也，高橋 浩，森川徳敏，大和田道子，芝原暁彦，稲村明彦（2011）：（第3章で既出）
- 産業技術総合研究所（2005）：新潟県中越地震震源域の地質構造．地震予知連絡会会報，73，403-405．
- 産業技術総合研究所（2007a）：第5回深部地質環境研究センター研究発表会資料集．
- 産業技術総合研究所（2007b）：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－．産業技術総合研究所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（2009）：2008年岩手・宮城内陸地震に伴う地震断層および地表変状．地震予知連絡会会報，81，274-277．
- 産業技術総合研究所（2010）：平成21年度核燃料サイクル施設安全対策技術調査（放射性廃棄物処分安全技術調査等のうち地層処分に係る地質情報データの整備）事業報告書．
- 産業技術総合研究所（2012a）：（第4章で既出）
- 産業技術総合研究所（2012b）：平成23年度核燃料サイクル施設安全対策技術調査（放射性廃棄物処分安全技術調査等のうち地層処分に係る地質評価手法等の整備）．平成23年度事業報告書．
- Sasaki, T., Morimoto, T., Ikeda, H., Shiraishi, T., Sugi, S. (2009) : Groundwater flow prediction method in consideration of long-term topographic changes of uplift and erosion, Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock, Workshop Proc. Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2007, OECD/NEA No.6362, 277-288.
- 佐藤比呂志，岩崎貴哉，金沢敏彦，宮崎真一，加藤直子，酒井慎一，山田知朗，宮内崇裕，伊藤谷生，平田 直（2007）：反射法地震探査・余震観測・地殻変動から見た2007年能登半島地震の特徴について．東京大学地震研究所彙報，82，369-379．
- Scholz, C.H. (2002) : The Mechanics of Earthquakes and Faulting, 2nd Edition. Cambridge Univ. Press.
- Seno, T., Maruyama, S. (1984) : Paleogeographic reconstruction and origin of the Philippine Sea. Tectonophysics, 102(1), 53-84.
- Sharp, W.D. and Claug, D.A. (2006): 50-Ma initiation of Hawaiian-Emperor bend records major change in Pacific plate motion, Science, 313, 1281-1284.

- Shipton, Z.K., Soden, A.M., Kirkpatrick, J.D., Bright, A.M., Lunn, R.J. (2006): How thick is a fault? Fault displacement-thickness scaling revisited. *Am. Geophys. Union Monogr.*, 170, 193-198.
- Sibson, R.H. (2003) : Thickness of the seismic slip zone. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93, 1169-1178.
- 末岡 茂, 田上高広, 堤 浩之, 長谷部徳子, 田村明弘, 荒井章司, 山田隆二, 松田達生, 小村健太朗 (2010) : フィッション・トラック熱年代に基づいた六甲地域の冷却・削剥史. *地学雑誌*, 119, 84-101.
- 末岡 茂, Kohn, B.P, 池田安隆, 狩野謙一, 堤 浩之, 田上高広 (2011) : 低温領域の熱年大学的手法に基づいた赤石山脈の隆起・削剥史の解明. *地学雑誌*, 120, 1003-1012.
- 杉山雄一 (2008) : 科学技術振興調整費「新潟県中越沖地震に関する緊急調査研究」の成果 (中間報告), 原子力安全委員会 耐震安全性評価特別委員会 第1回 地震・地震動評価委員会-配付資料 震動委第 1-3 号, 平成 20 年 1 月 23 日.
- 鈴木康弘, 渡辺満久, 中田 高, 小岩直人, 杉戸信彦, 熊原康博, 廣内大助, 澤 祥, 中村優太, 丸島直史, 島崎邦彦 (2008) : 2008 年岩手・宮城内陸地震に関わる活断層とその意義——関市巖美町付近の調査速報. *活断層研究*, 29, 25-34.
- 高田圭太, 中田 高, 野原 壯, 原口 強, 池田安隆, 伊藤 潔, 今泉俊文, 大槻憲四郎, 鷺谷 威, 堤 浩之 (2003) : 震源断層となりうる活断層とリニアメントの検討—中国地方を事例として. *活断層研究*, 23, 77-91.
- 高木俊男, 柳田 誠, 藤原 治, 小澤昭男 (2000) : 河岸段丘から推定した河床高度変化の歴史. *地学雑誌*, 109, 366-382.
- 高橋正明, 風早康平, 安原正也, 塚本斉, 佐藤努, 高橋浩, 森川徳敏, 大和田道子, 尾山洋一, 芝原暁彦, 稲村明彦, 鈴木秀和, 半田宙子, 仲間純子, 松尾京子, 竹内久子, 切田司, 大丸純 (2011) : (第4章で既出)
- 高橋雅紀 (2006) : フィリピン海プレートが支配する日本列島のテクトニクス. *地学雑誌*, 115, 116-123.
- Tamura, Y., Tatsumi, Y., Zhao, D., Kido, Y., Shukuno, H. (2001) : Distribution of Quaternary volcanoes in the Northeast Japan arc: geologic and geophysical evidence of hot fingers in the mantle wedge. *Proc. Japan Acad., Ser. B*, 77, 135-139.
- Tamura, Y., Tatsumi, Y., Zhao, D., Kido, Y., Shukuno, H. (2002) : Hot fingers in the

mantle wedge: new insights into magma genesis in subduction zones. *Earth Planet. Sci. Lett.* **197**, 105 -116.

Tarduno, J.A., Duncan, R.A., Scholl, D.W., Cottrell, R.D., Steinberger, B., Thordarson, T., Kerr, B.C., Neal, C.R., Frey, F.A., Torii, M., Carvallo, C., (2003): The emperor seamounts: southward motion of the Hawaiian hotspot plume in Earth's mantle, *Science*, **301**, 1064-1069.

田中明子, 山野 誠, 矢野雄策, 笹田政克 (2004) : (第 3 章で既出)

東京大学地震研究所, 地球科学総合研究所, 岩手大学工学部 (2008) : 2008 年岩手宮城内陸地震震源域北部の稠密アレイ観測による余震分布と地殻構造. 第 191 回地震調査委員会資料, 1-4.

東京電力 (2007) : 新潟県中越沖地震に対する柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性の検討状況について, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波 地質・地盤合同ワーキンググループ (第 2 回) 配付資料 合同 W2-1-2, 平成 19 年 12 月 5 日.

東京電力 (2008) : 東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所敷地周辺海域の地質・地質構造, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ (第 6 回) -配付資料 合同 W6-1, 平成 20 年 4 月 18 日.

当麻純一, 佐藤清隆, 矢島 浩, 東 貞成, 芝 良昭, 佐藤浩章, 栃木 均, 河井 正, 金澤健司, 岡田哲実, 豊田幸宏, 宮腰勝義, 上田圭一, 幡谷竜太, 阿部信太郎, 濱田崇臣, 青柳恭平 (2000) : 平成 12 年鳥取県西部地震調査速報, 電力中央研究所報告, U00019.

鳥越祐司, 幡谷竜太, 柳田 誠, 佐藤 賢 (2003) : 海水準変動 1 サイクルの沿岸域における最大侵食評価. 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会予稿集, Q042-P007.

梅田浩司, 大澤英昭, 野原 壮, 笹尾英嗣, 藤原 治, 浅森浩一, 中司 昇 (2005) : (第 4 章で既出)

Umeda, K. (2009) : An integrated approach for detecting latent magmatic activity beneath non-volcanic regions: an example from the crystalline Iide Mountains, Northeast Japan, in *Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock*, NEA, Workshop Proc. Manchester, United Kingdom 13-15 November 2007, OECD, 289-301, Paris.

梅田浩司, 谷川晋一, 安江健一 (2013) : 地殻変動の一樣継続性と将来予測ー地層処分の安全評価の視点からー, *地学雑誌*, **122**, 385-397.

若狭 幸, 森口有里, 松崎浩之, 松倉公憲 (2008) : 宇宙線核種濃度から推定される木曽川上流寢覚ノ床における下刻速度. 季刊地理学, 60, 69-76.

Wessel P., and Kroenke, L.W. (2007): Reconciling late Neogene Pacific absolute and relative plate motion changes, *Geochem. Geophys. Geosys.*, 8, Q08001, doi:10.1029/2007GC001636.

山元孝広 (2011) : 地質学から見た高レベル放射性廃棄物処分の安全評価—事象のシナリオに基づく長期予測の方法論. シンセオロジー, 4, 200-208.

吉田英一, 大嶋章浩, 吉村久美子, 長友晃夫, 西本昌司 (2009) : (第 4 章で既出)

Yoshimura, R., Oshiman, N., Uyeshima, M., Ogawa, Y., Mishina, M., Toh, H., Sakanaka, S., Ichigara, H., Ogawa, T., Miura, T., Koyama, S., Fujita, Y., Nishimura, K., Takagi, Y., Imai, M., Honda, R., Yabe, S., Nagaoka, S., Tada, M., Mogi, T. (2008) : Magnetotelluric observations around the focal region of the 2007 Noto Hanto Earthquake (Mj 6.9), central Japan. *Earth Planet. Space*, 60, 117-122.

添付資料

(添付資料－１) 地層処分技術WG委員名簿

委員長

◇朽山 修 原子力安全研究協会処分システム安全研究所所長（放射性廃棄物WG委員）

委員

◇宇都 浩三 産業技術総合研究所企画本部企画副本部長（日本火山学会推薦）

◇遠藤 邦彦 日本大学名誉教授（日本第四紀学会推薦）

◇長田 昌彦 埼玉大学地圏科学研究センター准教授（日本応用地質学会推薦）

◇小峯 秀雄 早稲田大学理工学術院創造理工学部教授（土木学会推薦）

◇田所 敬一 名古屋大学大学院環境学研究科地震火山研究センター准教授（放射性廃棄物WG委員推薦）

◇遠田 晋次 東北大学災害科学国際研究所教授（日本活断層学会紹介）

◇徳永 朋祥 東京大学大学院新領域創成科学研究科教授（放射性廃棄物WG委員）

◇丸井 敦尚 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門総括研究主幹（日本地下水学会推薦）

◇山崎 晴雄 首都大学東京大学院都市環境科学研究科教授（放射性廃棄物WG委員）

◇吉田 英一 名古屋大学博物館教授（館長）（放射性廃棄物WG委員）

◇渡部 芳夫 産業技術総合研究所地質調査情報センター長/深部地質環境研究コア代表（日本地質学会推薦）

（計 12名）

（添付資料－２）地層処分技術WG会合経緯

○第１回（平成２５年１０月２８日）

（議題）

1. 地層処分技術WGの設置について
2. 「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」（平成１１年１１月 核燃料サイクル開発機構）と最新知見を踏まえた再評価の概要
3. 審議の進め方について

（配付資料）

資料１．地層処分技術WGの設置について（事務局）

資料２．総合資源エネルギー調査会第３回基本政策分科会（９月４日）における放射性廃棄物WGの報告について（事務局）

資料３．会議の公開について（事務局）

資料４．第２次取りまとめに示された地質環境の長期安定性と地質環境特性に関する見解についての検討（NUMO）

資料５．審議の進め方について（案）（事務局）

参考資料１．総合資源エネルギー調査会臨時委員の推薦について（依頼）（事務局）

参考資料２．第２次取りまとめに示された地質環境の長期安定性と地質環境特性に関する見解についての検討（NUMO）

○第２回（平成２５年１１月２７日）

（議題）

1. 地質環境の長期安定性に関する検討（その１）－安全評価における天然現象による影響の扱い－
2. 地質環境の長期安定性に関する検討（その２）－各天然現象への対処の考え方－

（配付資料）

資料１．地質環境の長期安定性に関する検討（その１）－安全評価における天然現象による影響の扱い－（NUMO）

資料２．地質環境の長期安定性に関する検討（その２）－各天然現象への対処の考え方－（NUMO）

資料３．第１回地層処分技術WG議事録（事務局）

参考資料．放射性廃棄物WGの現状について（事務局）

委員からの提出意見．放射性廃棄物WG第２回会合資料へのコメント（田所委員）

○第３回（平成２５年１２月１８日）

（議題）

1. 地質環境特性に関する検討（その１）—安全機能等と好ましい地質環境特性—
2. 地質環境特性に関する検討（その２）—好ましい地質環境特性に対する考え方—
（配付資料）
資料１．地質環境特性に関する検討（その１）—安全機能等と好ましい地質環境特性—（NUMO）
資料２．地質環境特性に関する検討（その２）—好ましい地質環境特性に対する考え方—（NUMO）

○第４回（平成２６年１月２０日）

（議題）

1. 地質環境特性に関する確認事項
2. 地質環境の長期安定性への影響要因と対応方針
3. その他

（配付資料）

- 資料１．地質環境特性に関する確認事項（NUMO）
資料２．地質環境の長期安定性への影響要因と対応方針（NUMO）
資料３－１．科学的知見に基づく地層処分の技術的信頼性についての専門家からの御意見（事務局）
資料３－２．御意見に対する回答（NUMO）
資料４．第２回地層処分技術WG議事録（事務局）
資料５．第３回地層処分技術WG議事録（事務局）

○第５回（平成２６年２月１０日）

（議題）

1. 地質環境の長期安定性への影響要因に対する工学的対策などの技術的根拠
2. 地質環境の長期安定性への影響要因に関するサイト調査の方針

（配付資料）

- 資料１．地質環境の長期安定性への影響要因に対する工学的対策などの技術的根拠（NUMO）
資料２．地質環境の長期安定性への影響要因に関するサイト調査の方針（NUMO）
参考資料１．影響要因への対応に関する補足資料（NUMO）

○第６回（平成２６年２月２４日）

（議題）

1. 地質環境の長期安定性の確認事項

（配付資料）

- 資料１．地質環境の長期安定性の確認事項（NUMO）

参考資料 1. 地質環境の長期安定性に関する補足資料 (NUMO)

○第 7 回 (平成 26 年 3 月 20 日)

1. 地質環境の長期安定性の確認事項
2. 最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価－地質環境特性および地質環境の長期安定性について－

(配付資料)

資料 1. 地質環境の長期安定性の確認事項 (NUMO)

資料 2. 最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価－地質環境特性および地質環境の長期安定性について－ (案) (事務局)

資料 3. 第 4 回地層処分技術WG 議事録 (事務局)

資料 4. 第 5 回地層処分技術WG 議事録 (事務局)

参考資料 1. 地質環境の長期安定性に関する補足資料 (NUMO)

○第 8 回 (平成 26 年 5 月 9 日)

1. 放射性廃棄物WG の取りまとめについて (報告)
2. 「最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価－地質環境特性および地質環境の長期安定性について－ (案)」について (専門家からの御意見とパブリックコメントを踏まえ)

(配付資料)

資料 1－1. 放射性廃棄物WG 中間とりまとめ (案) (事務局)

資料 2－1. 専門家およびパブリックコメントの主な御意見の概要について (事務局)

資料 2－2. 科学的知見に基づく地層処分における好ましい地質環境特性について専門家からの御意見に対する回答 (NUMO)

資料 2－3. 科学的知見に基づく地層処分における地質環境の長期安定性について専門家からの御意見に対する回答 (NUMO)

資料 2－4. パブリックコメントに対する回答

資料 2－5. 最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価－地質環境特性および地質環境の長期安定性について－ (案) (委員長)

資料 3. 第 6 回地層処分技術WG 議事録 (事務局)

資料 4. 第 7 回地層処分技術WG 議事録 (事務局)

参考資料 1. 科学的知見に基づく地層処分における好ましい地質環境特性について専門家からの御意見について (事務局)

参考資料 2. 科学的知見に基づく地層処分における地質環境の長期安定性について専門家からの御意見について (事務局)

参考資料 3. パブリックコメントでお寄せいただいた国民の皆様からの御意見について (事務局)

参考資料 4. 最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価－地質環境特性お

よび地質環境の長期安定性について－（案）の修正一覧表（委員長）