

処分場の安全機能と技術要件



(2010 年度)

2011 年 3 月
原子力発電環境整備機構

2011年3月 初版発行

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記へお問い合わせください。

〒108-0014 東京都港区芝4丁目1番地23号 三田NNビル2階
原子力発電環境整備機構 技術部
電話 03-6371-4004 (技術部) FAX 03-6371-4102

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Science and Technology Department
Nuclear Waste Management Organization of Japan
Mita NN Bldg. 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

©原子力発電環境整備機構

(Nuclear Waste Management Organization of Japan) 2011

処分場の安全機能と技術要件

(2010 年度)

2011 年 3 月
原子力発電環境整備機構

目次

| | | |
|---------|---------------------------|----|
| 1 | はじめに | 1 |
| 2 | 安全確保の基本概念と安全機能の考え方 | 3 |
| 2.1 | 安全確保の基本概念 | 3 |
| 2.2 | 安全機能の考え方 | 4 |
| 2.2.1 | 安全機能に関する国際的な動向 | 4 |
| 2.2.2 | わが国の既往の安全機能の考え方 | 4 |
| 2.2.3 | 本書での安全機能の考え方 | 5 |
| 3 | 閉鎖後長期の安全確保の安全機能と技術要件 | 7 |
| 3.1 | 閉鎖後長期の安全確保の基本概念 | 8 |
| 3.2 | 安全確保の基本概念と安全機能の関係 | 9 |
| 3.3 | 高レベル放射性廃棄物の安全機能と技術要件 | 10 |
| 3.3.1 | 地層処分システムの基本構成 | 10 |
| 3.3.2 | 高レベル放射性廃棄物の特性 | 11 |
| 3.3.3 | 多重バリアシステムの安全機能とバリア構成要素の関係 | 14 |
| 3.3.4 | 多重バリアシステムの構成要素の技術要件 | 16 |
| 3.3.4.1 | 技術要件の考え方 | 16 |
| 3.3.4.2 | 天然バリア | 17 |
| 3.3.4.3 | ガラス固化体 | 18 |
| 3.3.4.4 | オーバーパック | 18 |
| 3.3.4.5 | 緩衝材 | 22 |
| 3.3.4.6 | 閉鎖用埋め戻し材・プラグ類 | 25 |
| 3.4 | 地層処分低レベル放射性廃棄物処分場の安全機能 | 29 |
| 3.4.1 | 地層処分低レベル放射性廃棄物の特徴 | 29 |
| 3.4.2 | 多重バリアシステムの安全機能とバリア構成要素の関係 | 29 |
| 3.5 | 併置処分の考え方 | 32 |
| 4 | 事業期間中の安全確保の要件 | 33 |
| 4.1 | 放射線安全の安全対策の基本的考え方 | 33 |
| 4.1.1 | 操業期間中の放射線防護の基本的な考え方 | 33 |
| 4.1.2 | 操業期間中の放射線被ばく管理 | 33 |
| 4.1.3 | 操業期間中の放射線防護の安全対策の考え方 | 34 |
| 4.1.4 | 異常事象に対する安全対策の考え方 | 34 |
| 4.2 | 一般労働安全の安全対策の考え方 | 36 |
| 4.3 | 環境保全対策の考え方 | 37 |
| 4.4 | 事業期間中の安全確保の要件 | 39 |
| 4.4.1 | 安全確保の要件との処分施設の構成要素の関係 | 39 |
| 4.4.2 | 地上施設の技術要件 | 40 |
| 4.4.3 | 地下施設の技術要件 | 42 |

| | |
|-----------------------------|----|
| 4.4.3.1 地下施設レイアウトの技術要件..... | 42 |
| 4.4.3.2 坑道の技術要件..... | 43 |
| 5 まとめ..... | 44 |

付録

| | |
|------------------------------|-------|
| 付録-1 緩衝材設計の技術要件の試行的な評価例..... | 付 1-1 |
| 付録-2 異常事象に対する安全対策の検討例..... | 付 2-1 |

図目次

| | |
|--|----|
| 図 2-1 安全確保の基本概念と事業段階の関係 | 3 |
| 図 2-2 人工バリアの安全機能の設定例 (NUMO, 2004) | 5 |
| 図 3-1 閉鎖後長期の安全確保に関する要件の枠組み | 7 |
| 図 3-2 隔離と閉鎖後閉じ込めの概念図 | 8 |
| 図 3-3 地層処分システムの基本構成 | 11 |
| 図 3-4 第一種特定放射性廃棄物 (高レベル放射性廃棄物) | 12 |
| 図 3-5 ガラス固化体廃棄体特性 (ガラス固化体の放射能の経時変化) (JNC, 1999a) | 13 |
| 図 3-6 ガラス固化体廃棄体特性 (発熱量の経時変化) (JNC, 1999a) | 13 |
| 図 3-7 地質環境の分類の例 (NUMO, 2004) | 18 |
| 図 3-8 アクセス坑道坑口の処置の概念図 | 26 |
| 図 3-9 TRU 廃棄物の特徴 (総合資源エネルギー調査会, 2006) | 29 |
| 図 4-1 地層処分の放射線防護上の事故と異常事象の要因の関係 | 35 |

付録

| | |
|--|-------|
| 付図 1-1 緩衝材の設計フロー | 付 1-1 |
| 付図 1-2 ブロック方式を一例とした緩衝材仮仕様の確認 (JNC, 1999 に一部加筆) | 付 1-2 |
| 付図 1-3 透水係数と乾燥密度依存性と塩分濃度の関係 | 付 1-3 |
| 付図 1-5 体積膨潤比の乾燥密度依存性と塩分濃度の関係 (載荷圧 0.0098MPa) | 付 1-5 |
| 付図 1-6 塩分濃度をパラメータとした自己シール性を確保するために必要な有効粘土密度と緩衝材厚さの関係 | 付 1-6 |
| 付図 2-1 斜坑の安全設計例 | 付 2-2 |
| 付図 2-2 解析モデル | 付 2-3 |
| 付図 2-3 衝突方向 | 付 2-4 |
| 付図 2-4 相当塑性ひずみ分布図 (底面で衝突) | 付 2-4 |
| 付図 2-5 相当塑性ひずみ分布図 (側面で衝突) | 付 2-5 |

表目次

| | |
|---|----|
| 表 3-1 閉鎖後長期の安全確保の基本概念と安全機能 | 9 |
| 表 3-2 高レベルガラス固化体の標準的な諸元（日本原子力学会，2010） | 12 |
| 表 3-3 ガラス固化体の特性（日本原子力学会，2010） | 14 |
| 表 3-4 高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係 | 16 |
| 表 3-5 技術要件の設定の考え方 | 17 |
| 表 3-6 母岩の好ましい特性 | 18 |
| 表 3-7 オーバーパックの技術要件（基本的なバリア性能の確保） | 19 |
| 表 3-8 オーバーパックの長期健全性の維持に関する技術要件 | 20 |
| 表 3-9 オーバーパックの工学的な実現性の確保に関する技術要件 | 21 |
| 表 3-10 緩衝材の技術要件（基本的なバリア性能の確保） | 22 |
| 表 3-11 緩衝材の技術要件（長期健全性の維持） | 23 |
| 表 3-12 緩衝材の工学的な実現性の確保に関する技術要件 | 25 |
| 表 3-13 埋め戻し材・止水プラグの技術要件（基本的なバリア性能の確保） | 26 |
| 表 3-14 埋め戻し材，止水プラグの長期健全性の維持に関する技術要件 | 27 |
| 表 3-15 埋め戻し材・プラグの工学的な実現性の確保のための技術要件 | 27 |
| 表 3-16 地層処分低レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係 | 31 |
| 表 3-17 併置処分における相互影響因子の取り扱い（原子力委員会，2006） | 32 |
| 表 4-1 放射線防護に関する基本的な安全対策 | 34 |
| 表 4-2 一般労働安全に対する安全対策の考え方 | 36 |
| 表 4-3 環境保全対策の考え方 | 37 |
| 表 4-4 事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係 | 39 |
| 表 4-5 高レベル放射性廃棄物の地上施設の技術要件（NUMO，2004 に加筆） | 40 |
| 表 4-6 地下施設の技術要件（NUMO，2004 に一部加筆） | 42 |
| 表 4-7 地下施設における坑道の役割（JNC，1999b に基づいて作成） | 43 |

付録

| | |
|-----------------------------|-------|
| 付表 1-1 自己シール性を満足する有効粘土密度の範囲 | 付 1-6 |
| 付表 2-1 作業中に想定される異常事象と安全対策 | 付 2-1 |
| 付表 2-2 材料定数（炭素鋼鍛鋼品 SF340A） | 付 2-3 |

1 はじめに

地層処分の目標は、長期間にわたり放射性廃棄物を人間環境から隔離し、安全性を確保することである（以下、「閉鎖後長期の安全確保」という）。また、処分施設を建設し、廃棄物を地下に埋設する一連の作業においても、その作業に従事する者および処分場の立地点の周辺の公衆が放射性廃棄物の放射線から防護されなければならない。あわせて、一般産業と同様に、放射線安全の他に労働安全と環境保全にも取り組まなければならない（以下、放射線安全、労働安全の確保と環境保全を合わせて「事業期間中の安全確保」と呼ぶ）。本書では、地層処分の目標に基づいて、まず、安全確保の基本概念を示し、サイトの地質環境に依らず、普遍的に「閉鎖後長期の安全確保」を達成するために必要な処分場の設計、性能評価の基本となる考え方として安全機能を示す。また、事業期間中の安全確保についても、その考え方として基本的な安全対策を示す。

安全機能は、地層処分システムがどのように安全性を提供するかということを表示したものであり、主に閉鎖後長期の安全評価においてシナリオを構築する際にシステムの安全性を概念的に説明する目的で利用されてきた（JNC, 1999a）。その考え方は、近年、セーフティーケースを構築するための重要な要素であると認識されつつある（ONDRAF/NIRAS, 2001 ; Nagra, 2002 ; Andra, 2005 ; SKB, 2006 ; NEA, 2009）。また、IAEA は、「安全基準 No. WS-R-4 : 放射性廃棄物の地層処分」において、安全設計原則の中で多重の安全機能（multiple safety function）を要件として位置づけている（IAEA, 2006）。安全機能の考え方は、地層処分の閉鎖後長期間にわたる安全評価の方法論を検討する中で、試行錯誤的に見出されてきたものであるが、その位置付けは、セーフティーケースの考え方が浸透する中で、安全設計を含む全体的な安全確保の戦略を示すように位置づけられつつある。

そこで、この報告書では、第2次取りまとめ（JNC, 1999a, b）や第2次 TRU レポート（電事連・JNC, 2005）で示された地層処分の安全確保の考え方を出発点としつつ、2000年以降の海外の事業やセーフティーケースの議論の進展、さらには、規制機関による安全規制の考え方（総合資源エネルギー調査会, 2008）が整備されてきたことなどを踏まえて、地層処分システムの安全機能を体系的に整理して示す。以下に、安全機能を提示する目的をまとめて示す。

- ・ 段階的なサイト選定プロセスにおいて、閉鎖後長期の安全確保の考え方の基軸として地層処分システムの各要素が有すべき役割を安全機能として明確にする。これにより、地質環境の多様性や、種々の設計オプションに対して柔軟に対応し、段階的にサイト調査・評価、処分場の設計、安全評価を実施するための共通の考え方がより明確になり、安全性と実現性が両立する地層処分システムを効果的に開発することができる。
- ・ 2000年以降の放射性廃棄物の処分に関する国際的な安全要件の考え方の整備、わが国の炉規法の改正、第一種埋設規則の施行など、安全規制の考え方が整備されている。これらの考え方との整合を図ることで、国際的な基準やステークホルダーからの要件を事業に反映することができる。
- ・ セーフティーケースの構築において、安全機能を基軸として地層処分の安全確保の論拠を収集することで、地層処分の安全性の論証の体系を効率的に構築できる。
- ・ また、高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物は、廃棄体特性の違

いや、人工バリアの構成などの違いはあるが、その基本となる安全確保の考え方は共通する部分が多い。それぞれの地層処分システムの安全機能を共通の枠組みで整備し、相互利用可能な知見や技術を明確にすることで、両事業の技術開発をより効率的に進めることができる。

本書では、第2章において、「隔離」と「閉じ込め」を基本とする地層処分の安全確保の考え方を示し、安全機能に関する国内外での検討状況について述べる。第3章では、閉鎖後長期の安全確保の安全機能と技術要件について、その設定根拠とともに示す。第4章では、事業期間中の安全確保の要件について、地上施設や地下施設、操業設備を対象として放射線安全、一般労働安全について述べ、また環境保全対策の考え方についても述べる。

2 安全確保の基本概念と安全機能の考え方

この章では、安全機能を整備する前提として、安全確保の基本概念と安全機能に関する国際的な動向と本書での安全機能の考え方を示す。

2.1 安全確保の基本概念

放射線防護を例として、安全確保の対象期間と安全確保の基本概念の関係を示す(図 2-1)。廃棄体受入から閉鎖までは、「作業時閉じ込め」、「放射線遮へい」、「放射線被ばく管理」を放射線防護の基本的な安全対策¹とする。一方、閉鎖後については、3.1 で後述するように「隔離」と「閉鎖後閉じ込め」をその基本概念としている (IAEA, 2006, 2011; 総合資源エネルギー調査会, 2008)。これらの概念は、高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の両方で共通的に適用する。

| | | 安全確保対策の対象期間 | |
|---------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| | | 廃棄体受入～閉鎖まで | 閉鎖後長期 |
| 安全確保の対象 | 事業期間中の安全確保 (放射線安全) | 作業時閉じ込め (廃棄体密閉, 施設閉じ込め) | |
| | | 放射線遮へい (遮へい体の設置) | |
| | | 放射線被ばく管理 (管理区域設定, 被ばく管理, モニタリング) | |
| | 閉鎖後長期の安全確保 | | 隔離 (自然現象の回避, 人間接近抑制) |
| | | | 閉鎖後閉じ込め (浸出抑制, 移行抑制, 移行経路形成抑制) |
| | | | |

図 2-1 安全確保の基本概念と事業段階の関係

¹ 廃棄物安全小委員会 (2008) では、廃棄体の受け入れから閉鎖までの期間の基本的な安全機能として、「閉じ込め機能」と「放射線遮へい機能」を要求している。また、廃棄物の発熱が有意となり、2つの安全機能が著しく影響を受ける場合には、必要に応じて冷却機能についても考慮すべきであるとしている。ここでは、冷却機能については、具体的な設計検討を進める際に、閉じ込め機能や放射線遮へい機能への影響を評価した上で、施設・設備毎にその必要性を検討することとし、放射線防護の基本概念としては明示的に示していない。一方、「放射線被ばく管理」については、周辺公衆や作業従事者への放射線の影響を適切に防止・低減するために必要な措置として、他の原子力施設に対する要求などを参考に設定した。

2.2 安全機能の考え方

安全機能の考え方は、2000年以降、国際的にセーフティーケースが安全性を提示するための重要な概念として認識される中で、その位置付けが重視されている（OECD/NEA, 2009）。そこで、ここでは国際的な議論、安全機能の定義とその適用方法に関する国際的な動向をまとめた（2.2.1）。また、これまでの我が国における安全機能の取り扱いを2.2.2で概括した。2.2.3では、これらを受けて、本書における安全機能の考え方を示した。

2.2.1 安全機能に関する国際的な動向

「安全機能」の考え方は、近年、セーフティーケースを構築するための重要な要素であると認識されつつある。セーフティーケースに関する国際プロジェクト（INTESC；OECD/NEA, 2009）では、セーフティーケースの作成に関連する戦略やアプローチ、方法論などについて分析している。この中で、地層処分システム、構成要素および安全機能に関する記述がセーフティーケースの構築において重要な役割を担っていることが指摘されている。一般に安全機能は「隔離」や「閉じ込め」といった国際的に長年にわたり認められた高位の概念（IAEA, 2006）と地層処分システムの特定の要素と関連付けた詳細な安全機能や要件で構成されている（OECD/NEA, 2009）。これらの安全機能に基づいて、安全評価シナリオの作成、不確実性の特定や設計へのフィードバックに利用される。

例えば、ANDRA（2005）やSKB（2006）では、安全評価シナリオの作成に利用されている他、ONDRAF/NIRAS（2001）では、安全機能を処分場の設計の方針として利用し、定性的あるいは定量的な設計要件を策定することが有用であるとしている。SKB（2006）では、定性的に記述した安全機能に安全機能指標（safety function indicator）とその数値基準（safety function indicator criteria）を設定し、これらを設計要件の設定に反映している。

以上のように、「安全機能」の考え方は、地層処分の安全評価の方法論を検討する中で、試行錯誤的に見出されてきたものであるが、その位置付けは、セーフティーケースの考え方が浸透する中で、安全設計を含む全体的な安全確保の戦略を示すように位置付けられつつある。各国により安全機能の考え方に相違はあるが「安全機能」は、安全設計や安全評価にすでに取り入れられている。一方で、その方法論はまだ開発段階にあることも指摘されている（OECD/NEA, 2009）。

2.2.2 わが国の既往の安全機能の考え方

わが国ではすでに第1次取りまとめ（PNC, 1992）において、安全機能という考え方をを用いて地層処分の安全がどう確保されるのかを概念的に説明している。その考え方は、第2次取りまとめにも継承され、「地層処分システムは、ガラス固化体、炭素鋼オーバーパック、ベントナイト緩衝材からなる人工バリアとそれが設置される安定な地質環境から構成され、それぞれのバリアが種々の安全機能を発揮することが期待されている」という考え方が、現在のわが国の高レベル放射性廃棄物の地層処分の多重バリアシステムの考え方となっている。第2次取りまとめにおいては、これらの安全機能が人工バリアの設計上の役割の設定の方針として適用され、その仕様例や科学的な知見とともに安全機能の成立性が示されている。また、安全評価における地層処分システムの設定と安全評価シナリオの構築に反映されている。

NUMO（2004）では、図 2-2 に示すように安全機能を設定し、地層処分システムの概念的な説明に利用している。



図 2-2 人工バリアの安全機能の設定例 (NUMO, 2004)

2.2.3 本書での安全機能の考え方

ここまで述べてきたように、当初は安全機能という用語は地層処分システム概念を分かりやすく説明するために利用されるとともに、設計や安全評価を進める上での共通的な考え方として利用されてきた。近年ではセーフティーケースを構築する枠組みの中で、地層処分システムの概念的な説明と、処分場の設計や安全評価などの実際的な業務を直接対応させるように、その位置づけが変化してきた。以上を踏まえ、本書における安全機能の考え方を以下に示す。

- ・ 多重バリアシステムを構成する各バリア（例えば、天然の岩盤、オーバーパック、緩衝材など）の安全確保上の役割を「安全機能」として記述する。
- ・ 安全機能に対して、各バリアの構成要素が有する能力を性能と呼ぶ。
- ・ 閉鎖後の長期間にわたっては、バリアの状態が変化し、結果として性能が変化する可能性がある。これに対し、「安全機能」は安全確保上の役割であるので、時間が経過しても安全機能が変化することはない。ただし、性能が著しく低下すると、安全機能を期待することができなくなる（役割を果たさなくなる）。
- ・ 設計では、人工バリアや天然バリアが所定の性能が確保されるように、技術要件を

設定し、さらにはその数値的な目標を設定することで、設計の基準とする。

- 安全評価では、サイトの地質環境や処分場の設計に基く多重バリアシステムが、長期的な変遷を考慮しても、技術的な要件を満足するだけの安全機能(隔離と閉じ込め)を発揮し得るか否かを分析する。

3 閉鎖後長期の安全確保の安全機能と技術要件

この章では、閉鎖後長期の安全確保について述べる。そのため、地層処分システム全体を表す概念的な安全機能から、その構成要素毎に設定する具体的な安全機能まで、システムの記述の詳細度に応じて階層的に設定する。そのため、図 3-1 に示すように、閉鎖後長期の安全確保の考え方を「安全確保の基本概念」、「安全機能」から「技術要件」の順に階層的に具体化して示す。

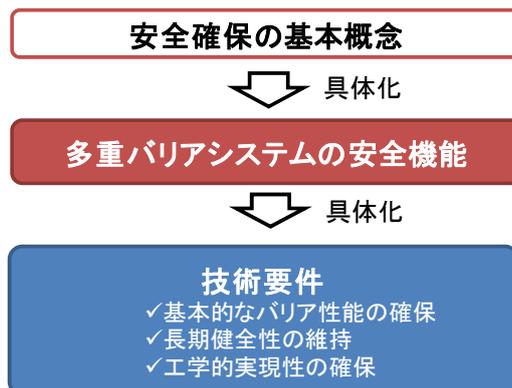


図 3-1 閉鎖後長期の安全確保に関する要件の枠組み

なお、安全機能の設定においては、第2次取りまとめ（JNC，1999a）や高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性（NUMO，2004）などに示された基本的な考え方に加えて、国際的な地層処分の安全要件を示した IAEA 安全基準（IAEA，2006，2011）や安全規制報告書（総合資源エネルギー調査会，2008）、「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」（原子力安全委員会，2010）などに基づいている。

技術要件は、多重バリアシステムの構成要素の安全機能に基づいて、その性能が確保されるように設定する要件である。技術要件は、高レベル放射性廃棄物については第2次取りまとめ、地層処分低レベル放射性廃棄物については第2次 TRU レポートに記載されている設計要件に基づいて設定した。ここで、「設計要件」の代わりに「技術要件」という言葉を用いているのは、安全機能に基づいて設定する要件は、必ずしも設計のための要件に限らず、例えば、施工時における品質管理の要件なども対象の範囲とするためである。この他にも、余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方（土木学会，2009）も参考にした。

3.1 閉鎖後長期の安全確保の基本概念

地層処分の目的は、高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物を長期間にわたり生活環境から十分に離された安定な地下深部に埋設し、また、廃棄物に含まれる放射性物質を閉鎖後の長期間にわたり閉じ込めることである。

「隔離」と「閉鎖後閉じ込め」のイメージを図 3-2 に示す。



図 3-2 隔離と閉鎖後閉じ込めの概念図

「隔離」とは、廃棄物を人間社会から十分に遠ざけ、地下深部に保持することである (IAEA, 2006, 2011)。すなわち、生活環境から十分離された安定な地下深部に廃棄物を埋設し、侵食のような地形変動から防護することおよび地層が障壁となって偶発的な人の接近の可能性を最小にし、人が特殊な技術を用いることなしには廃棄物に接近することが困難にすることである (総合資源エネルギー調査会, 2008)。

「閉鎖後閉じ込め」とは、廃棄物からの放射性物質の放出および分散を防止あるいは抑制し、地下深部にとどめることである (IAEA, 2006, 2011)。放射能の大部分、特に短寿命放射性物質の有する放射能の大部分が減衰するまで放射性物質の地下水中への浸出を抑制することと、ほとんどの長寿命の放射性物質の生活環境までの移行に非常に時間がかかり、その間に放射能の大部分が減衰することである (総合資源エネルギー調査会, 2008)。

これらの「隔離」、「閉鎖後閉じ込め」に関する措置が相補的に働き、その将来における放射線学的な影響の受入が可能なほど低くなるように工学的な対策をとる。その具体的な手段として、多重バリアシステムを構築する。

3.2 安全確保の基本概念と安全機能の関係

表 3-1 に閉鎖後長期の安全確保の基本概念とした「隔離」、「閉鎖後閉じ込め」の基本概念と「安全機能」の関係を示す。

「隔離」については、火山・火成活動、地震、断層活動、隆起・侵食などの自然現象の著しい影響による放射性物質の速やかな放出等の直接的な影響からの防護を目的として、「地質の長期的な変動からの防護」の安全機能を設定した。この安全機能は、生活環境から十分はなされた安定な地下深部に廃棄物を埋設することにより確保する。また、埋設した放射性廃棄物に、将来、偶発的に人が接近する可能性を低減するために、「人の接近の抑制」の安全機能を設定した。この安全機能は、地下深部に廃棄物を埋設すること、および、経済的に価値の高い鉱物資源が存在する地域を含めないようにすることにより確保する。これらの隔離に関する安全機能は、地質学的なさまざまな特性を、地層処分上の安全確保上の役割として利用するものであり、対象とする地域の地質環境の調査・評価を通じて、放射性廃棄物の隔離に有用な特性を有することを確認する。

一方で、「閉鎖後閉じ込め」に関しては、廃棄体からの放射性物質の浸出を抑制し、かつ、浸出した放射性物質の移行を抑制し、大部分の放射性物質を廃棄物とその周辺に閉じ込めるための対策を施す。このため人工バリアや天然バリアが有する特性も考慮して閉鎖後閉じ込めの機能を確保する。

表 3-1 閉鎖後長期の安全確保の基本概念と安全機能

| 基本概念 | 安全機能 | 安全機能の説明 |
|---------|----------------|--|
| 隔離 | 地質の長期的な変動からの防護 | 生活環境から十分離された安定な地下深部に廃棄物を埋設し、侵食のような地形変動から防護すること |
| | 人の接近の抑制 | 偶発的な人の接近の可能性を低減するため、人が特殊な技術を用いることなしには廃棄物に接近することが困難であること |
| 閉鎖後閉じ込め | 放射性物質の浸出抑制 | 廃棄体からの放射性物質の浸出を抑制し、地下水への放出率を低下させるとともに、放射性物質を廃棄体近傍に保持することで放射能を減衰させること |
| | 放射性物質の移行抑制 | 浸出した放射性物質の移行を抑制することにより、放射性物質移行率を低下させるとともに、遅延により放射能を減衰させること |

3.3 高レベル放射性廃棄物の安全機能と技術要件

3.2までに「隔離」、「閉鎖後閉じ込め」の基本概念から、地層処分の多重バリアシステムが全体として有すべき安全機能について述べた。この節では、これらの安全機能に基づいて各多重バリアシステムが有すべき安全機能について述べる。

3.3.1 地層処分システムの基本構成

地層処分システムは、閉鎖後の長期安全性を評価する上で対象となるシステム全体の総称である（図 3-3 ; NUMO, 2004）。地層処分システムは、天然バリアと人工バリアからなる多重バリアシステムと生物圏に加え、坑道支保やプラグ等の人工バリア以外の人工構造物や安全評価の対象となる断層などの要素を含む。

天然バリアは、放射性物質を閉じ込める機能を有し、安定で地層処分に好ましい条件を持つ地下深部の岩盤のことである。なお、ここでいう安定とは、廃棄物を埋設した場の地質環境が不変であることを意味しているわけではない。地下水や岩盤の性質がある程度変化することを考慮に入れたとしても、地質環境が所定の役割を果たすことができれば、その地質環境は十分に安定であるとみなすことができる（JNC, 1999 a）。

一方、人工バリアは、放射性物質の浸出と移行を抑制するために施工する人工的な障壁のことである。高レベル放射性廃棄物、地層処分低レベル放射性廃棄物のそれぞれの廃棄物の特性に応じて、適切な機能を有する人工バリアを設ける。

天然バリアと人工バリアにより構成した多層の防護系を多重バリアシステムという。表 3-1 に示した安全機能は多重バリアシステムに対して設定する。多重バリアシステムとする理由は、地層処分の全体の性能を単一のバリアあるいは安全機能に過度に依存させないことにより、一つのバリアが期待された通り十分に機能しないとしても、十分な安全裕度が残るといった保証を提供し、安全性とその安全に対する信頼性の双方を強化することができるからである（総合資源エネルギー調査会, 2008）。

生物圏は、地層処分の安全評価の一部において、人間の生活環境における核種移行プロセスとこれによる被ばくの形態（被ばく経路）についてモデルを構築し、人間への影響を推定する際に設定される（JNC, 1999a）。生物圏には、人工バリアや天然バリアのように安全機能としての安全確保上の役割を設定するものではない。

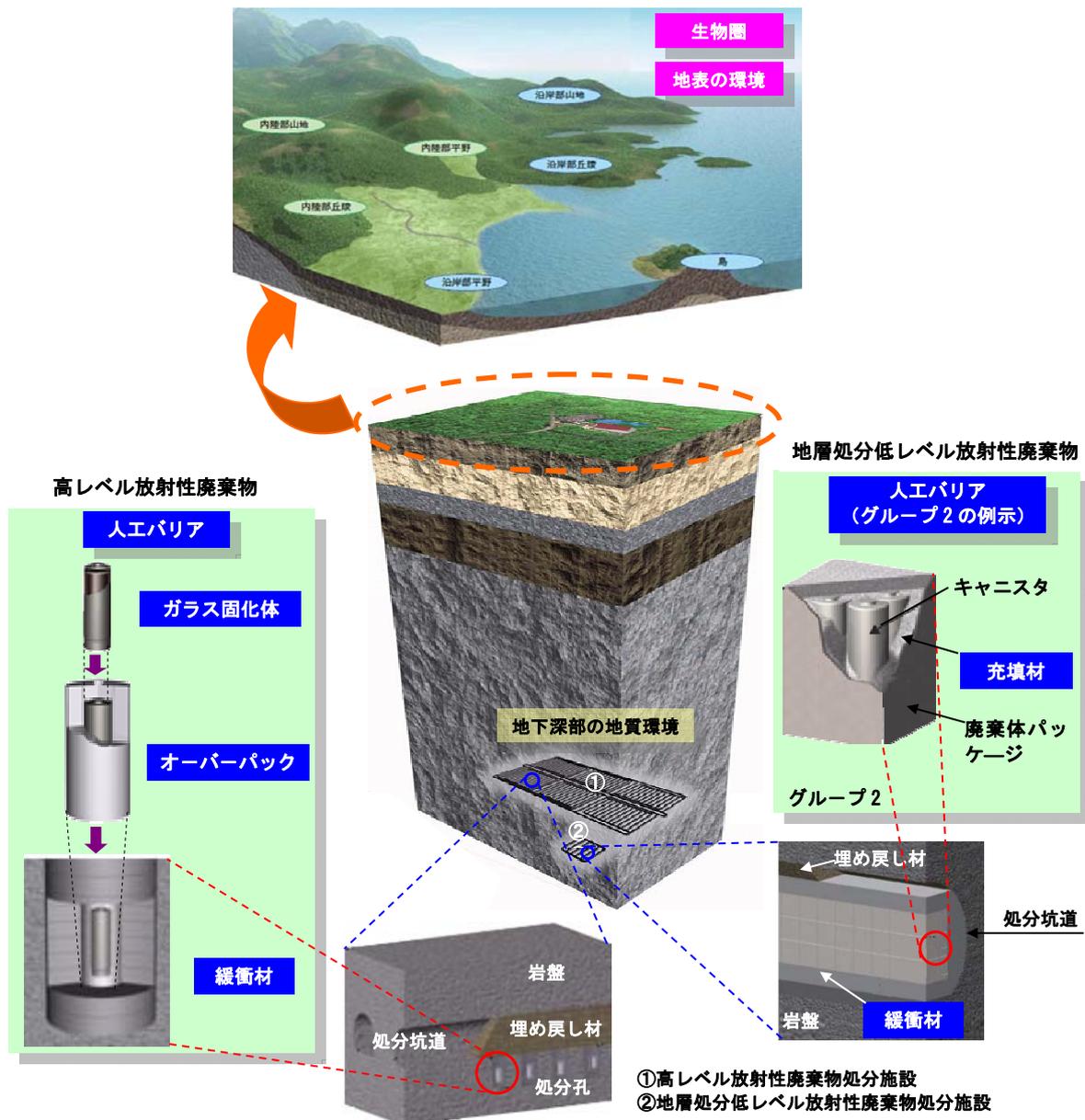


図 3-3 地層処分システムの基本構成

3.3.2 高レベル放射性廃棄物の特性

図 3-4 にガラス固化体の重量，寸法例を示した。また，国内で製造される高レベルガラス固化体は次の2種類である。

- ① JNFL 製造の高レベルガラス固化体
- ② JAEA 製造の高レベルガラス固化体

さらに，すでに製造が完了し我が国に返還されている AREVANC 社の高レベルガラス固化体がある。各高レベルガラス固化体の標準的な諸元を表 3-2 に示す。各高レベルガラス固化体はいずれも、ホウケイ酸ガラスにより固化しており、寸法（キャニスター高さ）は JAEA のものがやや小さく他の2種類は同じである。1本当たりの放射能レベルは全 β 、 γ 放射能濃度で 10^{16} Bqのオーダー、全 α 放射能濃度で 10^{14} Bqのオーダー以下で、発熱量は2.3kW/本以下、全体重量は300kg/本～500kg/本の範囲にある（日本原子力学会，2010）。



図 3-4 第一種特定放射性廃棄物（高レベル放射性廃棄物）

表 3-2 高レベルガラス固化体の標準的な諸元（日本原子力学会，2010）

| | JNFL | JAEA | AREVA NC |
|------------------|---|---|--|
| 全放射能濃度 (製造時) | $\beta, \gamma : \leq 2.17 \times 10^{16} \text{Bq}$ $\alpha : \leq 1.29 \times 10^{14} \text{Bq}$ | $\beta, \gamma : \leq 1.5 \times 10^{16} \text{Bq}$ $\alpha : \leq 2.6 \times 10^{14} \text{Bq}$ | (代表値) $\beta, \gamma : 2.8 \times 10^{16} \text{Bq}$ $\alpha : 1.4 \times 10^{14} \text{Bq}$ |
| 発熱量 | 2.3kW 以下 (製造時) | 1.4kW 以下 (製造時) | <2.0 kW (輸送時) |
| 高レベルガラス 固化体寸法 | 高さ 約 1,340 mm 外径 約 430 mm キャニスター肉厚 約 6 mm | 高さ 約 1,040 mm 外径 約 430 mm キャニスター肉厚 約 6 mm | 高さ 約 1,340 mm 外径 約 430 mm キャニスター肉厚 約 5 mm |
| 高レベルガラス 固化体重量 | 約 500kg | 約 380kg | 約 492kg |

廃棄体の発熱特性を図 3-5 と図 3-6 に示す。図は貯蔵期間 50 年の標準的なガラス固化体の発熱量と放射能の経時変化を示す。

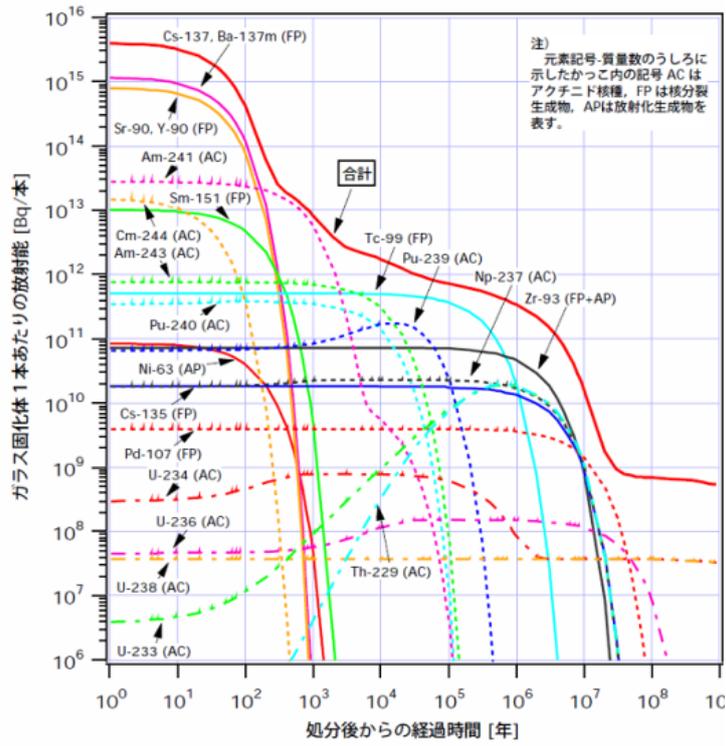


図 3-5 ガラス固化体廃棄体特性（ガラス固化体の放射能の経時変化）（JNC, 1999a）

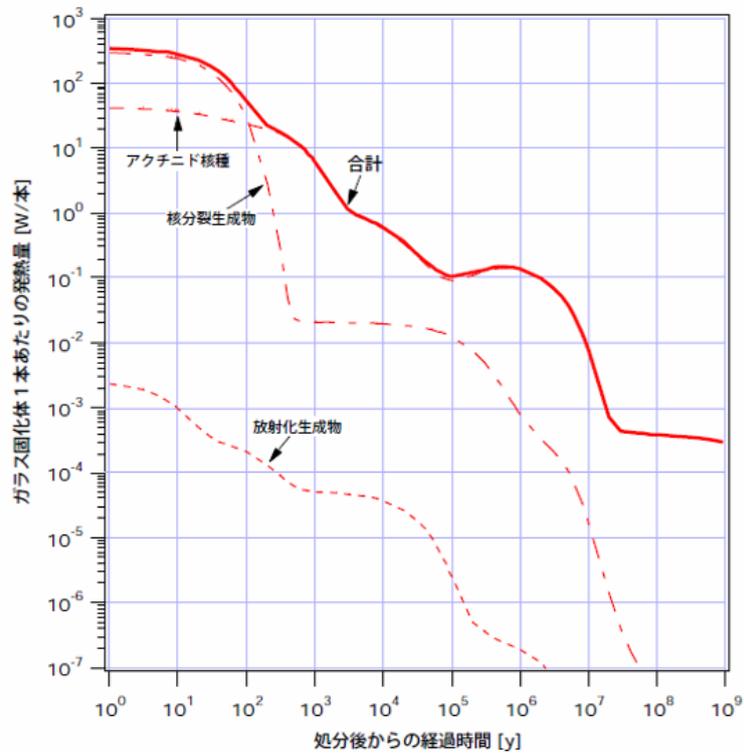


図 3-6 ガラス固化体廃棄体特性（発熱量の経時変化）（JNC, 1999a）

放射能の経時変化においては、処分後数百年までは、比較的半減期の短い核分裂生成物である Cs-137 (Ba-137m) や Sr-90 (Y-90) のような放射能が支配的であるが、数百年以降ではアクチノイド核種である Am-241 が支配的となる。さらに数千年以降では、より半減期の長い核分裂生成物である Tc-99 や Zr-93 およびアクチノイド核種の放射能が支配的となる。発熱量の経時変化においても、処分後百年程度までは、Cs-137 (Ba-137m) や Sr-90 (Y-90) の寄与が支配的であるが、数百年から数千年までは Am-241 が支配的に寄与する。

処分施設の設計および安全評価に必要なガラス固化体特性は、表 3-3 に示すとおりである (日本原子力学会, 2010)。廃棄体の仕様、製造は、発生者側 (電力会社, 原燃, JAEA) において実施されることから、NUMO が廃棄体を受け入れる際には、これら 25 項目のガラス固化体特性データが取得されていること、また、直接測定ではなく、運転管理や R&D 情報に基づき設定されたデータについては、その評価方法の妥当性についても確認を行う。

一方、メンテナンス時等に少数発生する非定常ガラス固化体や逸脱により発生する可能性がある固化体 (日本原子力学会, 2010) については、その特性を十分把握した上で、処分における対応を検討することとする。

表 3-3 ガラス固化体の特性 (日本原子力学会, 2010)

| | |
|------------------|----------------------|
| 放射性核種濃度 | 固化ガラス熱特性 (熱容量, 熱伝導度) |
| 高レベルガラス固化体表面線量率 | 固化ガラス密度 |
| 固化ガラス化学組成 | キャニスター材質 |
| 発熱量 (発熱核種インベントリ) | キャニスター寸法・形状 |
| 高レベルガラス固化体重量 | キャニスター溶接部の健全性 (胴部) |
| プレナム部容積 | キャニスター母材の健全性 |
| 表面汚染密度 | キャニスター強度 |
| 固化ガラス重量 | キャニスター熱特性 |
| 固化ガラス寸法 (外径・高さ) | キャニスター溶接部の健全性 (蓋部) |
| 固型化の状態 (均質性) | 破損・欠陥がないこと (外観) |
| 固化ガラス破碎係数 | 整理番号 |
| 固化ガラス浸出速度 (溶解速度) | 整理番号の表示方法・位置 |
| 最低結晶化温度 | — |

3.3.3 多重バリアシステムの安全機能とバリア構成要素の関係

高レベル放射性廃棄物地層処分の人工バリアは、ガラス固化体をオーバーパックに封入した後、地下深部の安定で好ましい条件を有する地質環境に設置され、その周囲に緩衝材を施工することによって形成する (NUMO, 2004)。なお、「隔離」については、適切なサイト選定により自然現象の著しい影響を回避した上で、処分深度を確保することで対処する。このため、以下では多重バリアシステムによる「閉鎖後閉じ込め」について技術要件を示す。表 3-4 には、安全機能とバリア構成要素との関係を示す。

「放射性物質の浸出抑制」においては、地下水との接触により廃棄体から放射性物質が浸出することを抑制することを目的として、安全機能を設定した。廃棄体であるガラス固化体

はガラスの性質により放射性物質を物理化学的に安定に保持し、地下水に溶けにくい性質を有する。また、IAEA（2006）では、発熱と放射能の減衰が十分でない期間は、放射性物質の浸出を抑制するように人工バリアを設計することを要求している。また、ガラス固化体の発熱が著しい期間は、地下水の熱対流や蒸発などの現象が生起し、複雑な挙動を示す可能性があり、この期間の安全評価上の取り扱いが煩雑になる。そのため、短半減期の放射性物質の壊変に伴う発熱が著しい期間は、廃棄体と地下水とが接触しないようにこの安全機能を設定し、その対策として金属製オーバーパックを設ける。

「放射性物質の移行抑制」に関しては、事象として廃棄体近傍に溶存する放射性物質の移流による移行、地下水流による移行、コロイド化した放射性物質の地下水中の移行などが考えられるため、それらを抑制するための安全機能を設定し、それらを緩衝材に期待している。また、天然バリアについては、収着により放射性物質の移行を遅延するとともに、分散による移行率の低減を安全機能としている。ただし、これらの機能は、設計で担保するものではなく、天然の岩盤が持つ特性の調査結果に基づき、適切なサイト選定により確保した上で、安全評価に反映する。また、廃棄体の埋設のために建設した坑道類が放射性物質の卓越した移行経路とならないよう、閉鎖用のプラグや埋め戻し材を施工する。

表 3-4 高レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係

| 基本概念 | 安全機能 | | 構成要素 |
|---------|------------------|--------------------------------|--------------|
| 隔離 | 地質の長期的な変動からの防護*1 | | 天然バリア |
| | 人の接近の抑制*1 | | |
| 閉鎖後閉じ込め | 放射性物質の浸出抑制 | ガラスマトリクスによる浸出抑制 | 廃棄体 |
| | | 発熱が著しい期間の地下水接触の防止 | オーバーパック |
| | 放射性物質の移行抑制 | 放射性物質の溶解度制限*2 | 天然バリア, 人工バリア |
| | | 移流による移行の抑制 | 緩衝材 |
| | | コロイド移行の防止・抑制 | |
| | | 収着による放射性物質の移行遅延 | |
| | | 遅い地下水流動 | 天然バリア |
| | | 分散による移行率の低減 | |
| | | アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制 | 閉鎖用埋め戻し等 |

*1 適切なサイトを選定することにより確保する機能

*2 還元環境を保つことなどにより確保する機能

3.3.4 多重バリアシステムの構成要素の技術要件

ここでは、上述の安全機能を主に設計に適用するために、安全機能に基づいて技術要件を設定する。また、安全機能の安全評価への適用については、NUMO (2011a) で述べている。

3.3.4.1 技術要件の考え方

技術要件は、多重バリアシステムの構成要素に対して、その性能が確保されるように設定する要件である。表 3-5 に技術要件の設定の考え方を示す。技術要件は、基本的なバリア性能の確保、バリアの長期健全性の維持および工学的実現性の確保の3つの観点から設定する。設計においては、まず、基本的なバリア性能を確保することを優先し、合わせて長期健全性の維持や工学的実現性の確保についても留意することで、閉鎖後長期の安全性と実現性を有する多重バリアシステムを構築する。

基本的なバリア性能の確保の技術要件とは、バリア要素の安全機能毎にバリア性能が確保できるように設定する要件である。バリアの長期健全性とは、長期間にわたりバリアの状態が変化しても、所定のバリア性能が維持できる状態と定義する。地質環境特性や廃棄体からの発熱などに起因する人工バリア材料の変質など、長期的な材料特性の変化により、安全確保に必要なバリア性能が損なわれないように技術要件を設定する。工学的実現性の確保の技術要件とは、基本的なバリア性能の確保と、長期健全性の維持の技術要件を満足する範囲において、バリアの製作性や施工性、品質管理、コストが過大とならないようなバリアの仕様を確保するための要件として設定する。

表 3-5 技術要件の設定の考え方

| 技術要件の分類 | 説明 |
|--------------|---|
| 基本的なバリア性能の確保 | 安全機能に直接的に関係するもので、安全確保の観点から設計において必ず確保する性能として、技術要件を設定する。 |
| バリア長期健全性の維持 | 閉鎖後長期間にわたり多重バリアシステムの性能が維持されるよう人工バリア材料の長期的な特性や、バリア材料間の相互作用の理解に基づいて、設計上の対策を検討し、技術要件を設定する。 |
| 工学的実現性の確保 | 実現性が見通しのある技術を用いて、サイトの地質環境特性において、安全機能を合理的に確保するように、設計上の対策を検討し、技術要件を設定する。 |

3.3.4.2 天然バリア

天然バリアは、放射性物質の移行を抑制する機能を有し、かつ、安定で地層処分に好ましい条件を有する地下深部の岩盤と定義する（NUMO, 2004）。図 3-7 には、地質環境の分類の例を示した。地理的には内陸部、沿岸部、島部、地形的には山地、丘陵、平野、地質学的には結晶質岩や堆積岩といった特徴に基づいて分類することができる。また地下水については、内陸部では多くの場合降水起源の地下水が、沿岸部では海水起源の地下水が想定される。これらの様々な組み合わせによって、地質環境が形成される（NUMO, 2004）。サイト選定においては、調査の対象となる地区の岩盤が天然バリアとして好ましい特性を有することを評価する。

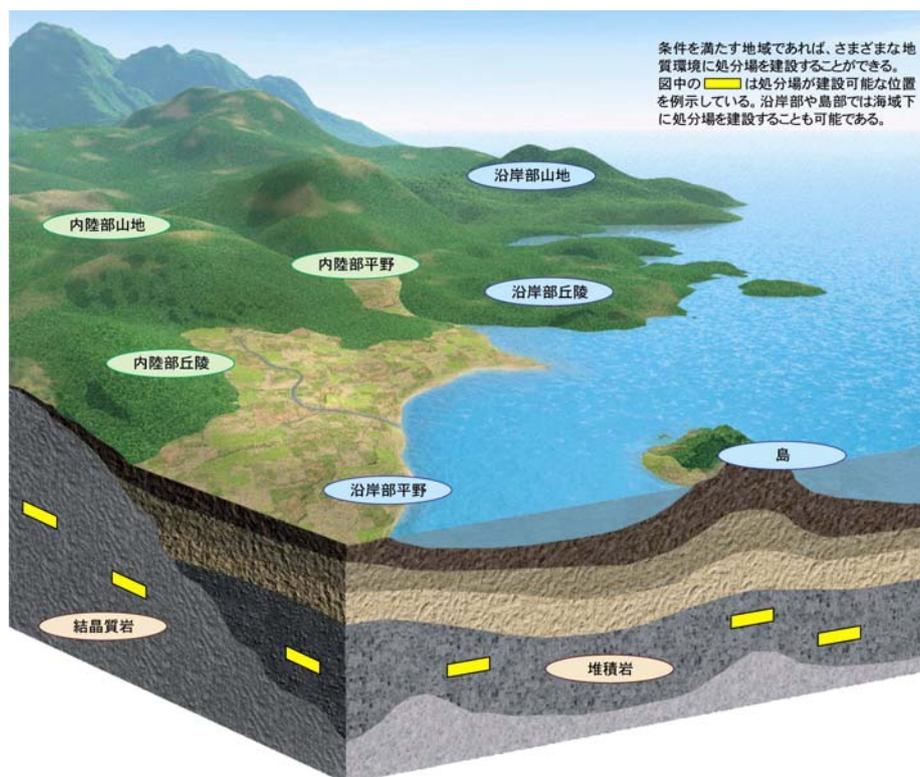


図 3-7 地質環境の分類の例 (NUMO, 2004)

また、放射性廃棄物を埋設しようとする岩盤を特に母岩と呼ぶ。母岩は天然バリアの一部であるが、特に処分場を設置する場として、表 3-6 に示すような好ましい特性を有することが必要である。

表 3-6 母岩の好ましい特性

| 分類 | 好ましい特性 |
|------|--|
| 熱環境 | 閉鎖後の処分場の温度が低いこと |
| 水理場 | 閉鎖後の処分場とその周辺の地下水流速が遅いこと |
| 力学場 | 閉鎖後の処分場とその周辺の変形が小さいこと |
| 化学環境 | 閉鎖後の処分場とその周辺の化学的な環境が放射性物質の難溶解性、収着遅延性とバリア材料の安定性に適していること |

3.3.4.3 ガラス固化体

ガラス固化体には、「ガラスマトリクスによる浸出抑制」の安全機能を期待している。ガラス固化体は、NUMO が実施する地層処分事業の設計項目には含まれない。

3.3.4.4 オーバーパック

オーバーパックには、「発熱が著しい期間の廃棄体と地下水の接触防止」の安全機能を設定

している。表 3-7 には、オーバーパックの基本的なバリア性能の確保に関する技術要件を示す。安全機能に影響を与える事象としては、オーバーパックの貫通孔の発生や力学的な変形、破壊による機能の喪失がある。これらの懸念事象による影響を防止あるいは低減するような対策として、バリア性能の確保のための技術要件を設定する。なお、ここで示した技術要件は、第2次取りまとめ (JNC, 1999b) で示されたオーバーパックの設計上考慮すべき項目 (設計要件) を基本とし、技術要件の考え方 (表 3-5) に基づいて、設定したものである。

基本的なバリア性能の確保の技術要件としては、「耐食性」、「構造健全性」、「溶接部耐食性・構造健全性」を設定した。これらの要件に基づいて、オーバーパックの材質選定、構造、溶接方法の選定などの設計を実施する。

- ・ 「耐食性」の技術要件については、オーバーパックの定置後の腐食により、安全機能が損なわれないように、適切な対策を設定する。例えば、建設、操業段階に地下に流入し、残存した酸素による腐食、酸素消費後の水による全面腐食などが腐食現象として考えられている (JNC, 1999b)。また、ガラス固化体からの放射線により、地下水が放射線分解し発生した酸化性化学種の影響による不動態化の可能性などについても、設計上の対応を講じる。
- ・ 「構造健全性」の技術要件については、地下環境において、埋設後に作用するさまざまな応力に対して、オーバーパックが機械的に破損しないように対策を講じる。オーバーパックに作用する応力の要因としては、水圧、地圧などの処分深度に依存する圧力や、岩盤のクリープ変形などに起因する応力、また腐食膨張に伴い緩衝材が圧密され、その反作用として現れる圧密反力、緩衝材の膨潤圧などが挙げられる。なお、緩衝材が変形することにより、これらの応力の要因を緩和できるため (JNC, 2005)、緩衝材の技術要件として、「オーバーパックの保護 (物理的緩衝性)」を設定した。
- ・ 「溶接部の耐食性、構造健全性」の技術要件については、オーバーパックの溶接部が物理的にも化学的にも弱部となって、上記のオーバーパックの安全機能が損なわれないように溶接方法を選定する。

表 3-7 オーバーパックの技術要件 (基本的なバリア性能の確保)

| 安全機能 | | 技術要件 | 技術要件の説明 | 設計項目 |
|------------|-------------------|--------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| 放射性物質の浸出抑制 | 発熱が著しい期間の地下水接触の防止 | 耐食性 | 所定の期間、腐食により安全機能が損なわれないこと | オーバーパックの設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) |
| | | 構造健全性 | 埋設後作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持すること | オーバーパックの設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) |
| | | 溶接部耐食性・構造健全性 | 溶接部の機械強度、耐食性が母材と比較して著しく劣らないこと | オーバーパックの溶接設計 (材料設計, 蓋構造設計, 溶接法, 溶接条件) |

オーバーパックの長期健全性の維持の技術要件を表 3-8 に示す。これらの要件は、表 3-7 に示した安全機能に対して、長期にわたって影響を与える可能性がある要因に対する要件（耐熱性、耐放射線性、残置物の相互作用の影響低減、バリア材料間の相互作用の影響の低減）、および他のバリアの保護の要件（ガラス固化体の過熱防止）として設定した。

表 3-8 オーバーパックの長期健全性の維持に関する技術要件

| 技術要件 | 技術要件の説明 | 設計項目 |
|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| 耐熱性 | 廃棄体からの発熱により耐食性や強度が著しく低下しないこと | オーバーパックの設計 (材料設計) |
| 耐放射線性 | 放射線脆化が著しくないこと | オーバーパックの設計 (材料設計) |
| 残置物との相互作用の影響の低減 | コンクリートなどの残置物との相互作用により安全機能が著しく低下しないこと | 坑道の設計 (支保工の材料設計) |
| バリア材料間の相互作用の影響の低減 | 人工バリア材料間の相互作用により安全機能が著しく低下しないこと | オーバーパックの設計 (材料設計) |
| ガラス固化体の過熱の防止 | 良好な熱伝導性を有すること | オーバーパックの設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) |

- ・ 「耐熱性」の技術要件は、廃棄体からの発熱によりオーバーパック材料の熱による変形や、熱応力によりオーバーパックが破損しないように設定した。ただし、現在は金属製オーバーパックの採用を基本としており、良好な耐熱性を有している。
- ・ 「耐放射線性」の技術要件は、長期にわたる放射線の照射によりオーバーパックが脆化し、構造健全性に影響を与えないために設定した。材料として放射線による照射脆化の感受性が低い材料を選定する。
- ・ 「残置物との相互作用の影響の低減」の技術要件は、コンクリート支保、グラウト、コンクリートプラグなどの残置物の長期的な劣化などに伴う、化学環境などの変化が、オーバーパックの安全機能を著しく低下させないことを目的として設定した。残置物が人工バリアの安全機能を著しく低下させると判断できる場合には、坑道の埋め戻し時に残置物を撤去するなどの対策をとるか、あるいは、より影響が低減できる材料、工法を採用するなどの対策を検討する。
- ・ 「バリア材料間の相互作用の影響の低減」の技術要件は、人工バリア材料間の相互作用により相互に安全機能が著しく低下しないように設定した。オーバーパックがガラス固化体および緩衝材の安全機能に有意な影響を与えないことを確認し、必要に応じて対策を講ずる。
- ・ 「ガラス固化体の過熱の防止」の技術要件は、ガラス固化体が自らの発熱し、安全機能を損なうことがないように設定した。金属製オーバーパックであれば、良好な熱伝導性を有する。

オーバーパックの工学的な実現性の確保に関する技術要件を表 3-9 にまとめ、概要を以下に示す。「製作性」、「遠隔封入性」、「遠隔定置性」、「品質確認性」を技術要件として設定し、具体的な材料設計、オーバーパックと溶接部の設計に反映させる。また、「工学的な実現性の確保」の設計要件では、オーバーパック単体の設計だけではなく、オーバーパック溶接装置、搬送・定置装置の設計も同時に考慮して検討を行う。

表 3-9 オーバーパックの工学的な実現性の確保に関する技術要件

| 技術要件 | 技術要件の説明 | 設計項目 |
|-------|---|--|
| 製作性 | 既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づいた構造であること | オーバーパックの設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) |
| 遠隔封入性 | ガラス固化体の遠隔操作による封入が、既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術により、ガラス固化体の安定な形態を損なうことなく可能な構造であること | オーバーパックの設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) 溶接装置の設計 |
| 遠隔定置性 | 廃棄体の遠隔操作による定置が、既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術により、ガラス固化体の安定な形態を損なうことなく可能な構造であること | オーバーパックの設計 (形状・厚さ・把持部の設計) 搬送・定置装置の設計 |
| 品質管理 | 遠隔封入時及び遠隔定置時に、所定の品質を確保すること | 溶接検査装置の設計 搬送・定置装置の設計 |

- ・ 「製作性」の技術要件は、オーバーパックの設計において、製作のやりやすさなども考慮するように設定した。既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づいた構造であることであり、一般工場において、オーバーパックの本体及び蓋部の各部材の製作が可能であることを意味し、圧力容器などの現状の製作技術レベルを十分オーバーパック材料の選定、構造に考慮する (JNC, 1999b)。
- ・ 「遠隔封入性」の技術要件は、オーバーパックの封入時には、ガラス固化体からの高い放射線下の環境が想定されるため、遠隔封入により実施するために設定した。放射線環境下での遠隔操作による溶接封入および検査技術を選定する。また、溶接方法の選定においては、溶接作業がガラス固化体に有意な熱影響を与えない配慮をする (JNC, 1999b)。
- ・ 「遠隔定置性」の技術要件は、地上から地下施設への搬送および処分坑道（または処分孔）への定置作業において、ガラス固化体からの放射線下の環境が想定されるため、遠隔操作を要件として設定した。そのため、遠隔操作であることを考慮して、

装置による把持が確実かつ容易となる方式を採用することや、地下坑道という狭い空間での作業となることを考慮して、オーバーパックの形状や把持部を設計する（JNC, 1999b）。また、この検討は緩衝材搬送・定置の方法とも合わせて実施する。

- ・ 「品質管理」の技術要件は、オーバーパックの遠隔封入および遠隔定置の際の品質管理を要件として設定した。品質管理では、オーバーパックが所定の安全機能を有するために必要な品質の範囲を設定する。品質管理の方法は、今後、遠隔封入技術、遠隔定置技術の開発および選定に合わせて具体的に検討する。

3.3.4.5 緩衝材

緩衝材の技術要件はベントナイトを主とする材料を圧縮成形したものを前提として設定する。緩衝材の安全機能としては、「移流による移行抑制」、「コロイド移行の防止・抑制」、「収着による放射性物質の移行遅延」を設定している（表 3-4）。これらに安全機能が確保されるように、緩衝材の基本的なバリア性能の確保として、低透水性、コロイドろ過能、収着性の技術要件を表 3-10 に示すように設定する。

なお、ここで示した技術要件は、第2次取りまとめで示された緩衝材の設計上考慮すべき項目（設計要件）を基本としており、技術要件の考え方（表 3-5）に基づいて、その後の知見の進展なども考慮して設定したものである。これらの要件に基づいて、緩衝材の材料設計、形状、厚さの設計を行う。

表 3-10 緩衝材の技術要件（基本的なバリア性能の確保）

| 安全機能 | | 技術要件 | 技術要件の説明 | 設計項目 |
|------------|-----------------|---------|---|-----------------------|
| 放射性物質移行の抑制 | 移流による移行抑制 | 低透水性 | 緩衝材中の地下水の動き（移流）を抑制し、結果的に放射性物質の移行を遅延すること | 緩衝材の設計（材料設計、形状・厚さの設計） |
| | コロイド移行の防止・抑制 | コロイドろ過能 | 放射性物質がコロイドとして移行することを防止または抑制すること | 緩衝材の設計（材料設計、形状・厚さの設計） |
| | 収着による放射性物質移行の遅延 | 収着性 | ガラス固化体から溶出した放射性物質を収着することにより遅延する | 緩衝材の設計（材料設計） |

- ・ 「低透水性」の技術要件については、緩衝材が有する低透水性を活かし、周囲の動水勾配がある程度大きくなっても、緩衝材中の物質移行が拡散により支配され、移行が抑制されるように対策を検討する。このため、材料組成や緩衝材の乾燥密度を高く設定するなどの対策を検討する。
- ・ 「コロイドろ過能」の技術要件については、廃棄体から浸出した放射性物質がコロイド化する場合に、コロイドの移行を物理的に防止または抑制するための対策を検討する。このため、コロイドのろ過能が確保されるように、緩衝材中の空隙がコロ

イドをろ過できる大きさ以下となるように乾燥密度を高く設定する。

- ・ 「収着性」の技術要件については、緩衝材の有する収着能力を活かし、放射性物質の拡散による移行を遅延するように材料を選定する。

緩衝材の長期健全性の維持の技術要件を表 3-11 に示す。これらの要件は、表 3-10 に示した基本的な技術要件に対して、長期にわたって影響を与える可能性がある要因に対する要件（自己修復性、耐熱性、耐放射線性、緩衝材流出の抑制、残置物との相互作用の影響の低減、バリア材料間の相互作用の影響の低減）、および他のバリアの保護（ガラス固化体の過熱防止、オーバーパックの保護、オーバーパックの沈下防止）を目的として設定した。なお、施工時の隙間の充填（自己シール性）の技術要件は、緩衝材の安全機能が実現するには、施工時の隙間が緩衝材により充填されることが前提となることから設定した。

表 3-11 緩衝材の技術要件（長期健全性の維持）

| 技術要件 | 技術要件の説明 | 設計項目 |
|------------------------|---|---|
| 自己修復性 | 施工後変形などにより隙間が生じたとしても、自己修復できること | 緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) |
| 耐熱性 | 廃棄体の発熱により緩衝材の機能が著しく低下しないこと | 地下施設の設計 (坑道離間距離, 廃棄体ピッチ) |
| 耐放射線性 | 廃棄体の放射線により緩衝材の機能が著しく低下しないこと | 緩衝材の設計 (材料設計) |
| 緩衝材流出の抑制 | 地下水流による緩衝材の流出が著しくないこと | 地下施設の設計 |
| 残置物との相互作用の影響の低減 | コンクリートなどの残置物との相互作用により安全機能が著しく低下しないこと | 坑道の支保設計 (材料設計) |
| バリア材料間の相互作用の影響の低減 | 人工バリア材料間の相互作用により安全機能が著しく低下しないこと | 緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) |
| ガラス固化体の過熱の防止 | 良好な熱伝導性を有すること | 緩衝材の設計 (材料設計) |
| オーバーパックの保護 (物理的緩衝性) | オーバーパックの腐食膨張, 岩盤の変形を緩和し, オーバーパックを機械的な破壊から保護するよう, 物理的緩衝性を有すること | 緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) |
| オーバーパックの沈下の防止 | 廃棄体オーバーパックを力学的に支持すること | 緩衝材の設計 (材料設計) |
| 施工時の隙間の充填(自己シール性) | 施工時の隙間を充填するよう, 膨潤性を有すること | 緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) 操業システムの設計 (施工技術) |

- ・ 「自己修復」の技術要件は、人工バリア施工後の周辺岩盤の変形やオーバーパックの腐食に伴い発生する水素ガスが破過する際に隙間が発生する可能性があるため、それらの隙間を自己修復するように設定した。緩衝材が有する膨潤能力を利用し、施工後に生じる隙間を充填できるよう、設計上の対策を検討する。
- ・ 「耐熱性」の技術要件は、廃棄体の発熱により緩衝材の機能が著しく低下しないように設定した。緩衝材の材料設計や坑道離間距離と廃棄体ピッチを適切に設定するなどの対策を検討する。
- ・ 「耐放射線性」の技術要件は、廃棄体の放射線により緩衝材の機能が著しく低下しないように設定した。なお、現状では、放射線により緩衝材の長期健全性が変化することは報告されていない。
- ・ 「緩衝材流出の抑制」の技術要件は、緩衝材が流出することにより安全機能が低下しないために設定した。緩衝材が亀裂に侵入し、さらにある程度地下水の流れが速い条件では、緩衝材が取り去られる現象が指摘されている。ただし、割れ目には充填物が介在していることなどから、どこまでも流出することは考えにくい(NUMO, 2004)。これまでの解析では、密度低下は100万年後でも20%であることなどが示されている。廃棄体定置箇所には岩盤に有意な亀裂がない場所を選択するなどの対策や亀裂をグラウトで充填するなどの対策を検討する。
- ・ 「残置物との相互作用の影響」の技術要件は、残置物と緩衝材との相互作用により、緩衝材の安全機能が著しく低下しないように設定した。影響があると想定される場合には、埋め戻し時に残置物が緩衝材に影響を与えない程度まで撤去することや、あるいはより影響の少ない材料として低pHセメントを利用するなどの対策を検討する。
- ・ 「バリア材料間の相互作用の影響の低減」の技術要件は、人工バリア材料間の相互作用により相互に安全機能が著しく低下しないように設定した。緩衝材がガラス固化体およびオーバーパックの緩衝材の安全機能に有意な影響を与えないことを確認し、必要に応じて対策を講ずる。
- ・ 「ガラス固化体の過熱の防止」の技術要件は、ガラス固化体が自らの発熱し、安全機能を損なうことがないように設定した。現状では、緩衝材の材料は十分な熱伝導性を有する(JNC, 1999b)。
- ・ 「オーバーパックの保護」の技術要件は、オーバーパックの腐食膨張による影響や、岩盤の変形によるオーバーパックへの影響を緩和しオーバーパックを機械的な破壊から保護するよう、物理的緩衝性を有するよう設定した。緩衝材の材料設計や厚さの設計において影響を検討する。
- ・ 「オーバーパックの沈下の防止」の技術要件は、廃棄体埋設後、オーバーパックの機能が維持される期間、オーバーパックを力学的に安定に支持することである。対策の例としては緩衝材の材料設計や密度設定などがある。
- ・ 「施工時の隙間の充てん(自己シール性)」の技術要件は、施工時の隙間を充てんするよう、膨潤性を有することである。対策の例としては緩衝材の材料設計、形状・厚さの設計などがある。また、緩衝材近傍のすき間の位置及び大きさは処分概念の

検討時に考慮する。付録-1 に、この技術要件に対して、最近の塩水環境下での膨潤性を考慮して、乾燥密度と厚さの下限について評価した事例を示す。

工学的な実現性の確保に関する要件を表 3-12 にまとめた。

表 3-12 緩衝材の工学的な実現性の確保に関する技術要件

| 技術要件 | 技術要件の説明 | 設計項目 |
|-------|--|--|
| 製作性 | 既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づき製作が可能であること | 緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) |
| 遠隔定置性 | 遠隔操作による搬送・定置が, 既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術により可能であること | 緩衝材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) 搬送・定置装置の設計 |
| 品質管理 | 緩衝材製作時及び遠隔定置時に, 所定の品質を確保すること | 製作検査装置の設計 搬送・定置装置の設計 |

- ・ 「製作性」の技術要件は、既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づき、想定する密度分布の範囲で緩衝材が製作できることであり、処分概念やオーバーパックの搬送・定置装置とともに検討し、緩衝材製作装置を製作する。
- ・ 「遠隔定置性」の技術要件は、搬送や定置に関する設備の機構として、緩衝材の確実な把持が可能な方式を採用する。また、地下坑道という狭い空間での作業となることより、処分概念とオーバーパック搬送・定置装置と同時に検討する。その際、事業スケジュールを考慮した確実な遠隔定置性を有する搬送定置設備と装置を製作する。
- ・ 「品質管理」の技術要件は、緩衝材の製造、遠隔定置の際の品質管理を要件として設定した。品質管理では、緩衝材が所定の安全機能を有するために必要な品質の範囲を設定する。品質管理の方法は、今後、緩衝材製造方法、遠隔定置技術の開発および選定に合わせて具体的に検討する。

3.3.4.6 閉鎖用埋め戻し材・プラグ類

閉鎖段階では、処分場を地上から隔離することを目的として、連絡坑道、アクセス坑道及びボーリング孔の埋め戻しを行う (NUMO, 2004)。この際、埋め戻されたアクセス坑道が卓越した移行経路とならないよう、アクセス坑道には埋め戻し材と止水プラグ (低透水性を期待するプラグ) および必要により力学プラグ (止水プラグを力学的に支持するプラグ) を設置する。また、坑口に対しては、坑道の埋め戻し材の密閉および不用意な人間の侵入の防止を目的として、コンクリートプラグなどをアクセス坑道の坑口に設置する。このプラグは、埋戻し材の膨潤応力や人間の不用意な侵入に対抗できるものである必要がある。

図 3-8 に坑口プラグの概念図を示す。

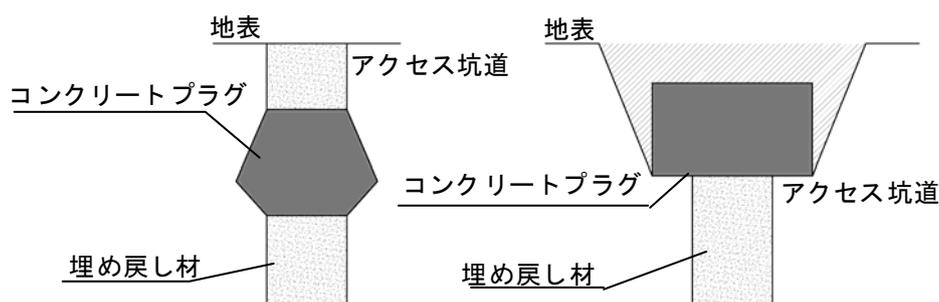


図 3-8 アクセス坑道坑口の処置の概念図
(JNC, 1999b を加筆)

また、処分場にはサイト調査段階に地表から掘削されたボーリング孔や、湧水を緩和するための水抜き孔など、様々な方向や径、長さのボーリング孔などが残存することになる。特に地表からのボーリング孔は地下施設と地表を短絡する水みちに、坑道内からのボーリング孔などは岩盤内での新たな水みちとなる可能性があるため、これらは適切に止水処置をしておく (NUMO, 2004)。

埋め戻し材とプラグの基本的な技術要件を表 3-13 に示す。

表 3-13 埋め戻し材・止水プラグの技術要件 (基本的なバリア性能の確保)

| 安全機能 | | 技術要件 | 技術要件の説明 | 設計項目 |
|------------|--------------------------------|------|---------------|--|
| 放射性物質の移行抑制 | アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制 | 低透水性 | 地下水の流れを抑制すること | 埋め戻し材の設計 (材料設計) 止水プラグの設計 (材料設計, 配置設計) |

埋め戻し材は、ベントナイトを主とする材料と現地で発生した掘削土を締め固めたものを前提とした。ただし、掘削土が埋め戻し材として適さない場合には、別途、搬入する材料の特性を考慮して、埋め戻し材の仕様を設定する。

埋め戻し材および止水プラグには低透水性の技術要件を設定した。設計においては、埋め戻し材と止水プラグを適切に配置することで、放射性物質の移行経路となるような地下水の流れを抑制する。

また、埋め戻し材に加え、アクセス坑道に沿った連続的な水みちの形成を抑制する目的で、止水プラグを設置することも有効な対策として考えている。止水プラグの材料はベントナイトを圧縮成型したものを基本としている。止水プラグにベントナイトを利用した場合には、膨潤変形を防止するために力学プラグを補助的に設置する。力学プラグとしては、コンクリートを検討している。

埋戻し材と止水プラグの長期健全性の維持を表 3-14 にまとめ、以下に概要を示す。

表 3-14 埋め戻し材、止水プラグの長期健全性の維持に関する技術要件

| 技術要件 | 技術要件の説明 | 設計項目 |
|------------------------|---|--|
| 施工時の隙間の充てん (自己シール性) | 施工時の隙間を充てんするよう、膨潤性を有すること | 埋戻し材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) 止水プラグの設計 (材料設計, 配置設計) |
| 残置物, 材料間の相互作用の影響の低減 | コンクリートなどの残置物や材料間の相互作用により安全機能が著しく低下しないこと | 埋戻し材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) 止水プラグ, 力学プラグの設計 (材料設計, 配置設計) |

「施工時の隙間の充てん (自己シール性)」の技術要件は、施工方法によっては埋め戻し材や止水プラグの施工時に坑道壁面との間に隙間が発生すると想定されるため、それらの隙間が膨潤により充填することを要件として設定した。そのため、埋め戻し材や止水プラグのベントナイト含有率や乾燥密度などの検討において対策を検討する。

「残置物, 材料間の相互作用の影響の低減」の技術要件は、残置物と埋め戻し材、止水プラグあるいは止水プラグと力学プラグ間の相互作用により、埋め戻し材や止水プラグの安全機能が著しく低下しないために設定した。影響があると想定される場合には、埋め戻し時に残置物が埋め戻し材に影響を与えない程度まで撤去することや、あるいはより影響の少ない材料としてコンクリート支保や力学プラグに低 pH セメントを利用するなどの対策を検討する。

工学的な実現性の確保に関する技術要件を表 3-15 に示す。

表 3-15 埋め戻し材・プラグの工学的な実現性の確保のための技術要件

| 技術要件 | 技術要件の説明 | 設計項目 |
|------|---|--|
| 製作性 | 既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づき製作が可能であること | 埋戻し材の設計 (材料設計, 形状・厚さの設計) 止水・力学プラグの設計 (材料設計, 配置設計) |
| 品質管理 | 埋め戻し材及びプラグ施工時に、所定の品質を確保すること | 施工方法の設計 |

- 「製作性」の技術要件は、既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づき、想定する密度と材質の埋め戻し材とプラグを施工できることである。設計の際には、処分概念やアクセス坑道の形状 (斜坑, 立て坑など) を考慮して対応

する。

- 「品質管理」の技術要件は、埋め戻し材、プラグの製作、施工時の品質管理を要件として設定した。品質管理では、埋め戻し材、プラグが所定の安全機能を有するために必要な品質の範囲を設定する。品質管理の方法は、今後、埋め戻し材やプラグの製造方法、施工方法の開発および選定に合わせて具体的に検討する。

3.4 地層処分低レベル放射性廃棄物処分場の安全機能

3.4.1 地層処分低レベル放射性廃棄物の特徴

地層処分低レベル放射性廃棄物は、性状の異なるさまざまな廃棄物で構成され、また、高レベル放射性廃棄物に比べて放射エネルギーや発熱量が低いといった特徴がある。地層処分低レベル放射性廃棄物は、第1次 TRU レポート（電事連・JNC，2000）および第2次 TRU レポートの評価において、その特性に応じたグループ分けが行われている。具体的には、廃銀吸着材を主要な廃棄物とするグループ1、ハル・エンドピースを主要な廃棄物とするグループ2、硝酸塩を含む廃棄物をまとめたグループ3、その他の廃棄物をまとめたグループ4の四つのグループに分類されている（総合資源エネルギー調査会，2006）（図3-9）。

- ・ グループ1：人工バリア，天然バリアへの収着性が低い I-129 を多く含む廃棄体
- ・ グループ2：人工バリア，天然バリアへの収着性が低い C-14 を多く含み，発熱量の比較的大きい廃棄体
- ・ グループ3：硝酸塩を多く含み核種の収着性・溶解度へ影響を及ぼす可能性のある廃棄体
- ・ グループ4：その他の廃棄体

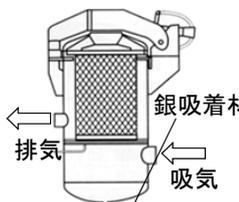
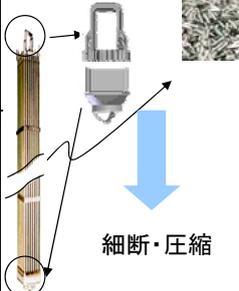
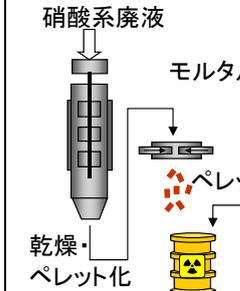
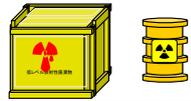
| 処分方法 | 地層処分を想定 | | 余裕深度処分・浅地中処分を想定 | |
|------------|---|--|--|---|
| | 廃銀吸着材 | エンドピース ハル | 濃縮廃液等 | 難燃性廃棄物 不燃性廃棄物 |
| 概要 |  放射性的ヨウ素を除去する吸着材料 |  細断・圧縮 |  乾燥・ペレット化 |  ゴム手袋（焼却・圧縮） 工具 金属配管 |
| 廃棄体イメージ（例） |  |  |  |  |
| 特徴 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 放射性ヨウ素 (I-129)を含む ・ セメント固化体 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 発熱量が比較的大 ・ 放射性炭素 (C-14)を含む | <ul style="list-style-type: none"> ・ 硝酸塩を含む ・ モルタル、アスファルトによる固化体等 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 焼却灰、不燃物 ・ セメント固化体等 |
| グループ | 1 | 2 | 3 | 4 |

図 3-9 TRU 廃棄物の特徴（総合資源エネルギー調査会，2006）

3.4.2 多重バリアシステムの安全機能とバリア構成要素の関係

地層処分の安全確保の考え方は、廃棄体特性や地質環境特性によらず地層処分低レベル放射性廃棄物においても共通である。ここでは、NUMO (2011b)で記述されている地層処分低レベル放射性廃棄物の地層処分の安全確保の考え方と幅広い地質環境に対応するための対策に

基づいて、高レベル放射性廃棄物の表 3-4 と同じ構成で、安全機能と構成要素の関係を示す。

地層処分低レベル放射性廃棄物の地層処分場は、高レベル放射性廃棄物の処分場と比べ、以下のような特徴を有している (NUMO, 2011b)。

- ・ 地層処分低レベル放射性廃棄物は、高レベル放射性廃棄物に比べて発生量が多いものの、比較的発熱量が小さいことから、廃棄体を大断面坑道内に集積して処分することが可能である。
- ・ 廃棄物の特性 (含まれる放射性物質インベントリ、固化形態、発熱特性など) が多様であることから、その特性に応じたグルーピングを行い、各々に適した人工バリア構成とすることが合理的である。

地層処分低レベル放射性廃棄物処分場は、廃棄体、充填材、構造躯体、緩衝材、埋め戻し材、支保工で構成されている。このうち、人工バリアとして、閉鎖後閉じ込めの機能を設定する構成要素は、充填材と緩衝材である (図 3-9)。ただし、廃棄体や構造躯体であっても、セメント系材料などを利用する場合には、収着による移行の遅延の安全機能を期待できる可能性があると考えている。表 3-16 には、グループごとの多重バリアシステムの安全機能とバリア構成要素の関係を示す。

現在基本としている地層処分低レベル放射性廃棄物の処分概念では、グループ 1 および 2 に対して緩衝材を設置し、「放射性物質の移行抑制」の安全機能のうち「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止・抑制」を設定している。これは、グループ 1 および 2 は、人工バリアや天然バリアへの収着性が低い放射性物質を多く含んでいるためである。また、セメント系材料中では、コロイドによる移行の可能性は低いと考えられているが、緩衝材の設置により、「コロイド移行の防止・抑制」の機能も期待している (NUMO, 2011b)。一方、天然バリアに対しては「収着による放射性物質移行の遅延」、「分散による移行率の低減」、「アクセス坑道に沿った移行経路の形成抑制」の安全機能を、すべてのグループに対して設定している。また、「卓越した移行経路の形成抑制」の安全機能についても、すべてのグループに対して設定している (表 3-16)。

以上の処分概念に加え、より幅広い地質環境に対応する代替的な処分概念について述べている。グループ 1 に対しては、現在のセメント固化体を、放射性物質の浸出率が低い代替的な廃棄体に変更することが検討されている。代替技術としては、現在、岩石固化技術、BPI ガラス固化技術、アルミナセメント固化技術の検討が進んでいる。グループ 2 に対しては、閉じ込め機能を有する容器を利用することで、放射性物質の浸出抑制の安全機能を設定する。容器としては高強度高緻密コンクリートまたはチタン合金を用いた容器が検討されている。グループ 3, 4 については、充填材に加えて、緩衝材を設置することによる放射性物質の移行抑制を例として挙げている。

なお、地層処分低レベル放射性廃棄物の構成要素に対する技術要件については、NUMO (2011b) の各構成要素の設計の項に示した。

表 3-16 地層処分低レベル放射性廃棄物の安全機能と構成要素の関係

| 基本 概念 | 安全機能 | | 廃棄体グループ | | | | 構成要素 |
|----------|------------------|-------------------------|---------|-----|-----|-----|--------------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 隔 離 | 地質の長期的な変動からの防護*1 | | ● | ● | ● | ● | 天然バリア |
| | 人の接近の抑制*1 | | ● | ● | ● | ● | |
| 閉鎖後閉じ込め | 放射性物質の 浸出抑制 | 固化マトリクスによる 浸出抑制 | ●*3 | | | | 廃棄体 |
| | | 所定期間の廃棄物と地 下水の接触の防止 | | ●*3 | | | 廃棄体パッケージ |
| | | 放射性物質漏えい開始 の遅延 | | | ●*3 | ●*3 | |
| | 放射性物質の 移行抑制 | 放射性物質の溶解度制 限*2 | | ● | ● | ● | 天然バリア, 人工バリア |
| | | 移流による移行の抑制 | ● | ● | ●*3 | ●*3 | 緩衝材 |
| | | コロイド移行の防止・ 抑制 | ● | ● | ●*3 | ●*3 | |
| | | 収着による放射性物質 移行の遅延 | ● | ● | ● | ● | 充填材 |
| | | 分散による移行率の低 減 | ● | ● | ● | ● | 天然バリア |
| | | 遅い地下水流動 | ● | ● | ● | ● | |
| | | アクセス坑道に沿った 移行経路の形成抑制 | ● | ● | ● | ● | 閉鎖用埋め戻し等 |

● : 安全機能に対応する構成要素を設定することを意味する

*1 適切なサイトを選定することにより確保する機能

*2 還元環境を保つことなどにより確保する機能

*3 代替概念を採用した場合に設定できる機能

3.5 併置処分の考え方

高レベル放射性廃棄物処分場と地層処分低レベル放射性廃棄物処分場を併置する場合には、併置によって双方の処分場の閉鎖後長期の安全性が損なわれないことが要件である。現状では、高レベル放射性廃棄物処分場と地層処分低レベル放射性廃棄物処分場の廃棄体と人工バリアの仕様および地下施設形状の違いなどから建設・操業・閉鎖をそれぞれ独立したエリアで行うこととしている。このため、併置処分による閉鎖後長期の安全性が損なわれないという要件に対しては、両処分場が互いに影響を及ぼす可能性が小さいと考えられる十分な距離を確保することにより対応する。影響を及ぼす因子としては、熱、化学（有機物、硝酸塩、高アルカリ性地下水）などを考慮する（原子力委員会、2006）。

高レベル放射性廃棄物処分場と地層処分低レベル放射性廃棄物処分場の併置において考慮する「熱」、「有機物」、「硝酸塩」および「高 pH」それぞれの相互影響因子（原子力委員会、2006）の概要を表 3-17 に示す。その際、他の施設に対して影響を与える施設の配置について考慮する（NUMO、2011）。

表 3-17 併置処分における相互影響因子の取り扱い（原子力委員会、2006）

| 影響因子 | 方向 | 影響の可能性 | 発生源側の施設での取扱い | 併置の際の相手側の相互影響への拡張 | 併置処分相互影響評価での取扱い | |
|-------|---------------|-------------------------------|--|--|---------------------------------------|---------|
| T:熱 | 熱 | TRU→HLW | 発熱による温度上昇で人工バリアの変質が促進される可能性がある。 | 発熱するグループ2のHLW・エンドピースについて最大80℃以下になるよう廃棄体定置密度及び坑道離間距離を確保。その他廃棄体は温度の考慮不要 | 【限定的】 グループ2坑道の温度が上昇する可能性がある | → 温度を評価 |
| | 熱 | HLW→TRU | 同上 | 同上（ペントナイト100℃）。 | | |
| H:水理 | 地下水流動（核種移行経路） | TRU⇔HLW | ・核種移行挙動は水理場に依存・元の母岩とは水理特性が異なる領域（処分場）が形成されることによって、広域の水理場が乱れる可能性がある。 | ・リファレンス及び変動幅の水理条件下で地層処分が成立する見通し。 ・埋戻し等によって元の母岩と同等以上の水理特性を有するように設計することで擾乱による影響を排除。 | 【実サイトでの考慮】 それぞれの施設で考慮するもの | |
| M:応力 | 岩盤応力 | TRU⇔HLW | 坑道が近接しすぎると崩落する可能性がある。 | 坑道（坑道径D）の安定性から坑道離間距離を確保（大断面坑道TRUでも3～4D） | 【限定的】 各処分施設で設計されており、応力の影響範囲は限定される。 | |
| C:化学 | 7メタフルト | TRU→HLW | 分解生成物が核種の溶解度及び分配収着性能に影響する可能性がある。 | 還元性で7メタフルトでは劣化が生じにくく、分解生成物の錯体形成能は低い。 | 【起こりにくい】 | → 濃度を評価 |
| | セルロース | TRU→HLW | 同上 | 7メタフルト環境下での錯体形成による収着分配係数の低下を考慮 | 核種移行に影響する可能性がある | |
| | 溶媒（TBP等） | TRU→HLW | 同上 | 7メタフルト環境下での溶解度計算により有意な影響は与えない | 【起こりにくい】 | |
| | 硝酸塩 | TRU→HLW | ・高pH強度及び酸性条件下によりバリア材の収着分配現象に影響する可能性がある。 ・酸化還元雰囲気及び金属腐食等に影響する可能性がある。 | 硝酸イオンによる収着分配係数の変化を考慮 | 核種移行及びオーバーバックの寿命に影響する可能性がある | → 濃度を評価 |
| | セメント高pH | TRU→HLW | 高pHにより、ガラスの溶解、オーバーバックの腐食、ペントナイトの変質、核種の溶解・沈殿及び収着に影響する可能性がある。 | 高pHによる収着分配係数の変化を考慮 | 核種移行及び人工バリア材の安定性に影響する可能性がある。 | |
| | コロイド（セメント起源） | TRU→HLW | セメントコロイドとの相互作用により、核種の移行挙動（移行速度、収着性等）が変化する可能性がある。 | ペントナイト層による過効果や高イオン強度環境によるコロイド不安定化によりコロイド濃度増加は限定的 | 【限定的】 | → pHを評価 |
| ガス | TRU→HLW | ガスにより、処分施設周辺の水理条件が変化する可能性がある。 | 圧力は上昇するが、透気することからバリアの破損にまでは至らない。処分施設内の間隙水が押し出される。 | 【実サイトでの考慮】 それぞれの施設の状態に応じて考慮するもの | | |
| R:放射線 | | TRU⇔HLW | 放射線による人工バリア損傷及び酸化還元雰囲気に影響する可能性がある。 | 廃棄体直近の現象のみを考慮 | 【限定的】 地中遠方への影響は考えにくい | |

4 事業期間中の安全確保の要件

前章に述べたように、閉鎖までの事業期間においては、処分施設の建設や操業などに従事する作業者はもとより、周辺地域の一般公衆の安全を確保する。この期間の安全確保の対象を「放射線安全」、「一般労働安全」、「環境保全」に分類し、その要件について述べる。

4.1 放射線安全の安全対策の基本的考え方

4.1.1 操業期間中の放射線防護の基本的な考え方

操業期間中は、輸送されてきた廃棄体の受入・検査の工程、容器封入・検査の工程、廃棄体の搬送定置作業の工程などにおいて、放射線安全上の対策を措置する。潜在的な危険性としては、廃棄物からの外部放射線および廃棄物から漏えいした放射性物質の摂取による地域住民および作業従事者の被ばくであり、そのための安全対策を措置する。放射線防護の考え方は、「操業時閉じ込め」と「放射線遮へい」を基本的な考え方とする（総合資源エネルギー調査会、2008）。

「操業時閉じ込め」とは、閉鎖までの操業期間中において放射性物質を限定された区域に閉じ込め、施設外への放出を防止することを目標とする。「放射線遮へい」とは、廃棄物からの放射線による地域住民および作業従事者の被ばくを合理的に十分低減する措置をいう。廃棄体からの放射能レベルに応じて適切な遮へい体を設置することで、空間線量率を低減することを目標とする。これらの基本的な概念に基づいた安全対策が確実に機能することで、操業期間中に地域住民および作業従事者が受ける影響を合理的に達成可能な範囲で低くするよう遮へい設備、放射線管理設備など必要な対策を実施する。また、これらの放射線安全の対策に加え、「放射線被ばく管理」を実施することにより、操業期間中の放射線安全を確保する。

4.1.2 操業期間中の放射線被ばく管理

「放射線被ばく管理」の目的は、操業時閉じ込めや放射線遮へいの安全対策に加え、運用面から放射線被ばくの可能性を低減することが目的である。「放射線被ばく管理」の考え方は、原子力施設のそれと同様であり、管理区画設定、放射線モニタリング、人の出入り管理、物品の搬出入管理などを実施する。「実用発電用原子炉の設置、運転などに関する規則の規定に基づく線量限度などを定める告示」（経済産業省、2001）では、下記条件を超える恐れのある区域に対して放射線管理区域（以下、「管理区域」という）とし、放射線業務従事者に対する適正な放射線防護を目的とした放射線被ばく管理を義務づけている。

- ・ 外部放射線の線量 : 1.3mSv/3ヶ月→2.6μSv/h（500時間/3ヶ月）
- ・ 空気中の放射性同位元素濃度 : 3ヶ月の平均濃度が告示別表の1/10
- ・ 表面汚染密度 : 表面汚染密度限度の1/10

地層処分対象の廃棄物は、廃棄体受入時に表面汚染の有無などを確認し、廃棄体容器の密閉性が確認されたものだけを受入る。そのため、通常時には放射性物質の経口摂取のリスクを排除することができる。一方で、高い放射能を有していることから、適切な遮へい対策を施し、管理区域を設定し、遠隔操作などにより放射線取り扱い作業時間を短縮し、作業従事者の被ばくのリスクを低減する。また、操業期間中は、作業従事者の被ばく管理を実施し、施設内はもちろんのこと、敷地の境界などの野外において放射線モニタリングを実施する。

4.1.3 操業期間中の放射線防護の安全対策の考え方

放射線防護の概念に基づき、処分場が有すべき安全確保上の役割を「安全対策」として示す（表 4-1）。「廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止」に関しては、廃棄体自身に放射性物質を封じ込めることを期待するが、廃棄体を容器などに封入することによる漏えいの防止も含意する。「施設外への放射性物質の過大な放出の防止」に関しては、先の廃棄体からの漏えいの防止の機能が失われた場合の機能であり、漏えいの可能性とその影響の程度を評価し、施設ごとに対策を講じる。「放射線の遮へい」については、廃棄体の外側に適切な遮へい体を設置することによる。「放射線管理区域の設定」は、放射線管理を適切に実施するための措置として、設計時に考慮することとする。また、「モニタリング及び被ばく管理」は、管理区域において放射線モニタリングを実施し、作業従事者の被ばく管理を実施し、作業従事者の被ばくが過度にならないように管理する。

表 4-1 放射線防護に関する基本的な安全対策

| 安全対策 | | 説明 |
|--------------|---------------------|---|
| 操業時 閉じ込め | 廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止 | 操業期間中において廃棄体からの放射性核種の漏えいを防止すること |
| | 施設外への放射性物質の過大な放出の防止 | 操業期間中において放射性物質取扱施設からの放射性核種の過大な放出を防止すること（廃棄体受入時） |
| 放射線 遮へい | 放射線の遮へい | 廃棄体からの外部放射線による空間線量率を遮へいにより低減すること |
| 放射線 被ばく管理 | 放射線管理区域の設定 | 放射線管理区域を設定すること |
| | モニタリング及び被ばく管理 | 作業従事者の被ばく管理、管理区域および敷地周辺において放射線モニタリングを実施すること |

4.1.4 異常事象に対する安全対策の考え方

「異常事象」とは、通常運転を逸脱させるような何らかの要因が施設もしくは廃棄体に加えられた事象と定義する。地下施設では廃棄体の落下・転倒や衝突などが挙げられる。「事故」とは、異常が拡大して施設から外に放射性物質が放出される事象とする。図 4-1 には、異常事象の要因から事故に発展するまでの経過を模式的に示す。

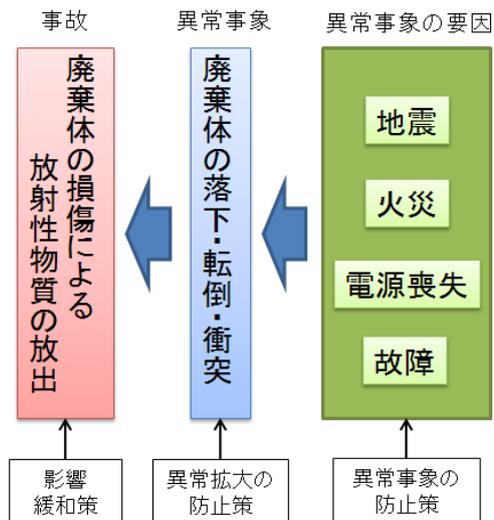


図 4-1 地層処分の放射線防護上の事故と異常事象の要因の関係

異常事象の発生に伴い、最終的に事故にまで発展するには、地震、火災、電源喪失などの異常事象の要因を起点として、作業中に廃棄体が装置から逸脱し落下、転倒し、あるいは搬送装置の逸走などにより施設壁面に衝突するような異常事象が発生し、さらに廃棄体が損傷するなどして、漏えいした放射性物質が空气中に放出されるという過程を経る。従って、異常事象に対する安全対策の考え方は、廃棄体の落下・転倒・衝突などの異常事象の発生防止対策を要因ごとに検討し、異常が発生した場合に備えて放射性物質の飛散などを防ぐためのフィルターなどの除染機能を有した機器を含む換気系設備などによる異常拡大防止対策を施した上で、万が一、事故にまで発展した場合は、除染などの事故の影響緩和策を実施することを基本とする。このような安全対策の例を付録-2 に示した。

4.2 一般労働安全の安全対策の考え方

一般労働安全とは、放射性物質の取り扱いを伴わない作業時の安全のことであり、一般労働安全を確保する期間は、現地で地質調査などを開始する精密調査地区選定段階から事業の廃止に至る閉鎖までの期間が対象である。一般労働安全では、労働災害対策と作業環境対策を安全対策とした。労働災害対策においては、自然災害（地震、津波、土砂崩れなどを要因とする労働災害）および人的災害（坑道内の落盤、水没、火災、爆発、酸素不足などを要因とする労働災害）に対する安全対策を講じる。施設の基本的な安全対策としては、災害の発生・拡大を防止する対策が要求されるとともに、災害時に労働者の人命が確保されるよう、避難経路の確保も要求される。作業環境とは、地下あるいは地上施設的环境（温度、湿度、酸素濃度、粉じん濃度、ラドン濃度、照度、騒音レベルなど）のことであり、安全対策の設定においては、これらの環境が労働に適するように改善または維持するための対策を講じる。

表 4-2 には、以上の安全対策をまとめて示した。

表 4-2 一般労働安全に対する安全対策の考え方

| 安全対策 | 説明 |
|-------------|-------------------------------|
| 災害の発生・拡大の防止 | 労働災害の要因となる事象の発生防止と拡大の対策を有すること |
| 災害時の避難経路確保 | 災害時の避難経路が確保されていること |
| 作業環境の維持 | 労働に適する環境を維持すること |

災害の発生・拡大の防止について、無支保での坑道掘削が可能な場合でも、落石による災害などを防止するため、坑壁を点検し確実に浮石を落とす。突発的な出水対策として、十分な排水能力をもつ排水設備を準備する。また、火災や爆発防止対策として、可燃性ガスが発生する場合には、坑道内への火気の持ち込み禁止措置や自動警報装置の設置を行う。

このように災害の発生や拡大を防止するとともに、発生の危険が予想される場合、あるいは発生した場合には、直ちに作業を中止し、労働従事者を安全な場所に避難させる。避難を確実にを行うため、サイレン、非常ベルなどの警報設備や電話等の通話装置を適切に配置、あるいは携帯させる。これらの避難のための設備や装置は、確実に稼動することを毎日点検する。また、所定の箇所に避難所をもうけ、呼吸用保護具、食料・水などを配備する。

作業環境対策として、排気ガスや粉じんにより視界が著しく制限される状態にある時には、換気量を増やし、水をまくなど、作業安全に行うために必要な視界を保持するための措置を講ずる。坑道内には適切な照明を設置する。坑道内温度は、適切に管理するとともに、定期的に測定する。

NUMO は、安全衛生管理組織及び災害防止組織を建設作業者ととともに組織し、事前に安全衛生管理計画をたて適切、かつ地下での作業環境に応じて柔軟に実施していく。

4.3 環境保全対策の考え方

事業期間中の環境保全対策は、対策を施す環境要素を分類し、それぞれの環境要素に対して適切な対策を実施する（NUMO，2004）。基本的な考え方を以下に示す。

- ・ 事業の各段階を通じて処分場を建設する地域の環境に十分配慮することが重要である。
- ・ 事業の各段階で生じる環境への影響について、それぞれの段階の前段階で調査、予測および評価を行い、環境に与える影響をできる限り回避、低減するとともに、必要に応じて代償措置（復元，創出）をとることを含めた適切な保全措置を講ずることができるようあらかじめ準備を行う。
- ・ 当該段階においては実際にモニタリングなどを行ってその効果を確認し、必要があれば保全措置の改善もしくは追加の措置を講ずるといった計画的かつ柔軟な対応が重要である。

対策を施す環境要素は、以下の環境要素を基本とし、表 4-3 に示す環境保全対策を行うことにより事業期間中の環境影響をできる限り回避、低減する。

表 4-3 環境保全対策の考え方

| 環境保全対策対象の環境要素 | | 環境保全対策の説明 | |
|------------------------|-------------|--|---|
| 環境の自然的構成要素の良好な状態の保持 | 大気環境 | 大気質 | 大気汚染物質の排出を低減する対策が施されていること |
| | | 騒音・振動 | 騒音・振動の対策が施されていること |
| | | 悪臭 | 悪臭物質の発生を低減する対策が施されていること |
| | 水環境 | 水質 | 水質汚染物質の排出を低減する対策が施されていること |
| | | 地下水 | 周辺環境に著しい影響を与える地下水位低下や地下水水質変化を低減する対策が施されていること |
| | 土 壌 環 境・その他 | 地形・地質 | 保全対象の地形・地質に影響を与えない対策が施されていること 地盤沈下などの有意な発生を低減する対策が施されていること |
| 土壌 | | 土壌汚染の影響を低減する対策が施されていること | |
| 生物の多様性の確保および自然環境の体系的保全 | 動物・植物・生態系 | 天然記念物や学術的価値の高い動物・植物への影響を低減する対策が施されていること 地域を特徴付ける生態系に対する影響を低減する対策が施されていること | |
| 環境への負荷低減 | 廃棄物 | 事業に伴い発生する廃棄物量を低減する対策が施されていること | |
| | 温室効果ガス | 温室効果ガスの排出量を低減する対策が施されていること | |

- ・ 環境の自然的構成要素の良好な状態の保持；人の健康，生活環境および自然環境に影響を及ぼす環境要素
- ・ 生物の多様性の確保および自然環境の体系的保全；動物・植物・生態系を対象にした環境要素
- ・ 環境への負荷低減；事業実施により発生する環境への負荷を対象にした環境要素

さらに，事業期間中は事前の環境影響評価結果を元に，上記の環境要素に対して必要な環境保全対策を実施し，事業の進展の適当な時期において再度環境影響評価を行い，環境保全対策の有効性を確認する。事業の途中段階での環境影響評価の結果，環境影響の程度が著しい場合には，追加の環境保全措置などを実施する。

4.4 事業期間中の安全確保の要件

4.4.1 安全確保の要件との処分施設の構成要素の関係

処分施設は、地上施設、地下施設および操業システムから構成され、事業期間中の安全を確保するためのさまざまな安全対策を有する。地上施設は、廃棄体受入・封入・検査施設や人工バリアの製造施設などから構成され、地下施設は、アクセス坑道、主要坑道、処分坑道などの坑道類から構成される。一方、操業システムは、廃棄体の受入と人工バリアの施工にかかわる一連の作業、設備を示す。操業システムを地上・地下施設の一部と捉え、施設ごとに技術要件を整理することもできるが、ここでは、操業にかかわる作業の相互の関係や、工程計画の連続性、および操業区画の設定などの観点から、廃棄体の取り扱いに関する作業を操業システムとして、総合的に安全対策を設定した。表 4-4 には、事業期間中の安全確保に関する基本的な安全対策と処分施設の構成要素ごとの「安全対策」との関係を示す。

「廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止」に関しては、操業期間中の放射性物質の漏えいを防止するために、廃棄体自身が放射性物質を密封する機能を有する。また、搬送機器・設備には、地震、故障などの際に異常事象の発生防止の機能を持たせるとともに、異常の拡大防止対策として、廃棄体への衝撃を緩和する機能をオーバーパックに期待し、また、施設からの放射性物質の放出の防止の安全対策を、廃棄体受入建屋に備える。

「放射線遮へい」については、廃棄体の取り扱いは遠隔操作を基本とし、遮へい壁を適切に設けることとする。また、搬送時には、搬送容器に遮へい機能を持たせることで、合理的に廃棄体からの放射線を遮へいする。

一般労働安全のうち作業環境として、空洞の力学的安定性、酸素濃度、温度・湿度、ラドン濃度の管理の機能を、地上・地下施設に設ける。このほかにもサイトの環境に応じて、必要に応じて作業環境の維持のための機能を追加する。災害の発生・拡大防止については、防火対策を挙げている。また、避難経路の確保についても地上・地下施設の設計時に考慮する。

表 4-4 事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係

| 基本的な安全対策 | | 安全対策 | 構成要素 |
|----------|------|---------------------|--------------------------|
| 放射線安全 | 操業時 | 廃棄体から放射性物質の漏えいの防止 | 廃棄体の密封 |
| | | 施設からの放射性物質の過大な放出の防止 | 搬送時の落下・転倒・衝突時の廃棄体への衝撃の緩和 |
| | 閉じ込め | 負圧管理および遠隔操作 | オーバーパック 廃棄体搬送機器・設備 |
| | | | 廃棄体受入建屋 |

| | | | | |
|-------------|-------------|--------------|---|--------------------------|
| | 放射線遮へい | | 遮へい壁による放射線の遮へい | 廃棄体受入建屋 廃棄体定置機器・設備 |
| | | | 搬送容器による放射線の遮へい | 廃棄体搬送機器・設備 |
| | 放射線被ばく管理 | 管理区域の設定 | 放射線管理区域の設定 | 廃棄体受入・封入・検査施設 地下施設の一部 |
| | | 被ばく管理・モニタリング | 作業従事者の被ばく管理および放射線取扱作業従事時間の制限，放射線モニタリングの実施 | 管理区域内（地上，地下） |
| | | モニタリングポストの設置 | 施設屋外 | |
| 一般労働安全 | 作業環境の維持 | | 空洞の力学的安定性の確保* | 地上施設 地下施設 |
| | | | 換気経路の確保 | |
| | | | 排水対策 | |
| | 災害の発生・拡大の防止 | | 防火対策 | |
| | | | その他の災害防止対策 | |
| 災害時の避難経路の確保 | | 避難経路の確保 | | |

(* 地下施設でのみ考慮する安全対策)

4.4.2 地上施設の技術要件

地上施設は、ガラス固化体を受入、地下に搬送し、処分するための所要の準備と地下施設で行われる作業を支援する一群の施設である。廃棄体受入・封入・検査施設、緩衝材の成型、加工に必要な施設に加え、排気・排水処理施設、掘削土置き場など地下施設の建設、操業に必要となる一連の施設で構成される。さらにサイトの地質環境特性によってはガラス固化体を受入のための港湾施設や専用道路も処分場の敷地内に設置する場合がある。これらの施設は、処分場の閉鎖に伴い最終的には撤去されるため、事業期間中の安全確保にかかわる技術要件についてのみ設定する（表 4-5）。

表 4-5 高レベル放射性廃棄物の地上施設の技術要件（NUMO，2004 に加筆）

| 施設名 | 技術要件 |
|------------------|--|
| ガラス固化体受入・封入・検査施設 | <ul style="list-style-type: none"> ・閉じ込め性を有する廃棄体を製作することができること ・ガラス固化体が発生する熱を、輸送容器表面、ガラス固化体及び廃棄体表面から適切に除去できること ・仮に電源が停止した場合にも移送物の落下を防止できるとともに、万一の移送物の落下によっても移送物の著しい損傷を防止できること ・誤操作防止を考慮するとともに、仮に誤操作が行われても安全性が損なわれないこと ・ガラス固化体及び廃棄体を取り扱う室からの排気を適切に処理できることに加え、万一放射性物質が、ガラス固化体や廃棄体から漏洩した場合でも、それぞれを取り扱う室から放射性物質が漏れ出すことがないように、取り扱い室を負圧に維持できること ・ガラス固化体及び廃棄体の検査ができること |

| | |
|--------------|--|
| 緩衝材製作・検査施設 | <ul style="list-style-type: none"> ・操業に必要とされる数量の緩衝材を確実に製作できること ・所定の品質の緩衝材を製作できること ・製作された緩衝材を安全にかつ所定の品質を維持して、確実に保管できること ・緩衝材原料の受入から地下施設への搬送までの各工程が円滑に行えること |
| プラグ製造施設 | <ul style="list-style-type: none"> ・操業あるいは閉鎖時に必要量のベントナイトプラグ材を確実に製作できること ・所定の品質のベントナイトプラグ材を製作できること ・製作されたベントナイトプラグ材を安全にかつ所定の品質を維持して、確実に保管できること ・ベントナイトプラグ材原料の受入から地下施設への搬送までの各工程が円滑に行えること |
| 埋め戻し材製作・検査施設 | <ul style="list-style-type: none"> ・操業、閉鎖に必要とされる数量の埋め戻し材を確実に製作できること ・所定の品質の埋め戻し材を製作できること ・製作された埋め戻し材を安全にかつ所定の品質を維持して、確実に保管できること ・埋め戻し材原料の受入から地下施設への搬送までの各工程が円滑に行えること |
| 管理棟 | <ul style="list-style-type: none"> ・建設、操業、閉鎖等に必要となる情報を確実に収集し、管理できること |
| 坑道換気施設 | <ul style="list-style-type: none"> ・処分場の建設、操業、閉鎖段階に必要とされる換気容量を確実に処理できること ・建設、閉鎖時においては、作業において発生する粉塵、排ガス等を処理できること ・操業時においては、放射線管理区域内の換気が確実にできること |
| 排水処理施設 | <ul style="list-style-type: none"> ・処分場の建設、操業、閉鎖段階に必要とされる排水処理容量を確実に処理できること ・建設、閉鎖時においては、作業において発生する地下施設内の湧水等を処理できること ・操業時においては、放射線管理区域内の排水処理が確実にできること |
| 廃棄物処理施設 | <p>液体廃棄物処理施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・排水の漏洩防止、漏洩の検出、漏洩発生時の拡大を防止できること ・予想される排水発生量に対して、十分な貯蔵容量を有すること ・万一、放射性物質の漏洩によって排水が汚染された場合、適切な処理がなされ得ること <p>固体廃棄物保管施設</p> <ul style="list-style-type: none"> ・固体廃棄物をドラム缶等に封入し、専用の貯蔵室に保管（廃棄）できること ・予想される固体廃棄物の発生量に対して、十分な貯蔵容量を有すること |
| 保安施設 | <ul style="list-style-type: none"> ・防火管理 ・犯罪等に対するセキュリティの確保 ・放射線業務従事者等の放射線管理区域への出入り及び物品の放射線管理区域への搬出入に対して、出入り管理、汚染監視及び各個人の被ばく監視ができること ・処分施設内外の主要な箇所における線量当量率、空気中の放射線物質濃度、放射線管理区域からの湧水中の放射性物質濃度等を測定、監視できること ・放射線監視設備からの主要な情報は、制御室において集中して監視できること ・排気口の放射線監視設備については、特に多重性を付与すること ・施設内の火事等に対し消防火できること ・施設外部からの危害や犯罪行為に対処できること |
| ユーティリティ施設 | <ul style="list-style-type: none"> ・建設、操業、閉鎖時に確実に各施設へ所要の電力、上水、工業用水、スチーム等を供給できること |
| 掘削土置き場 | <ul style="list-style-type: none"> ・所要数量の掘削土を保管できること ・周辺の一般公衆や環境に影響を与えないため、掘削土置き場からの粉塵や雨天に伴う泥水等を適切に処置できること |
| コンクリート供給施設 | <ul style="list-style-type: none"> ・建設時等に必要となるコンクリート量を供給できること |

地上施設を構成する各施設には、個々の施設の機能に対応して技術要件を考慮するが、ここでは例として廃棄体受入・封入・検査施設の安全にかかわる技術要件を示す。廃棄体は地上施設（廃棄体受入・検査施設）からの払い出し時に表面汚染検査により汚染のないことが確認され、かつ、金属製オーバーパックに封入される。ただし、輸送中の廃棄体の振動などにより廃棄体の破損の可能性を考慮すると、地上施設のうち、廃棄体受入・封入・検査施設については、廃棄体などにより汚染する可能性がある。従って、廃棄体受入・封入・検査施設に対しては、一般的な建屋に対する技術要件に加えて、放射線防護対策と放射線被ばく管理を適切に行うことが技術要件となる。

また、環境保全の観点からは、地上施設のレイアウトでは、地上施設で最も面積を専有する掘削土置き場の景観について要件とするとともに掘削土置き場からの排水が環境に影響与えないよう対策を施し、適切な位置にレイアウトすることが重要である。

4.4.3 地下施設の技術要件

地下施設は、地上施設から廃棄体や建設資材などを搬送するためのアクセス坑道（立坑，斜坑）や連絡坑道，廃棄体を定置するための処分坑道あるいは処分孔（廃棄体を豎置きに定置する場合）などから構成される。表 4-6 には坑道の技術要件を示した。

表 4-6 地下施設の技術要件（NUMO，2004 に一部加筆）

| 坑道 | 技術要件 |
|----------------|---|
| アクセス坑道 連絡坑道 | <ul style="list-style-type: none"> ・安全に建設・操業・閉鎖が実施できること ・空洞の力学的安定性が確保されること ・建設に必要な空間が確保できること ・建設関連の物流経路が確保できること ・地理，地形，地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと ・操業に必要な空間が確保できること ・廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること ・閉鎖に必要な空間が確保できること ・核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされること |
| 処分坑道 (処分孔) | <ul style="list-style-type: none"> ・安全に建設・操業・閉鎖が実施できること ・空洞の力学的安定性が確保されること ・建設に必要な空間が確保できること ・建設関連の物流経路が確保できること ・地理，地形，地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと ・操業に必要な空間が確保できること ・廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること ・閉鎖後長期安全性を有すること ・核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされること ・長期的に健全であること ・人工バリアが安定するように埋め戻されること |

4.4.3.1 地下施設レイアウトの技術要件

地下の施設は地上と地下を結ぶアクセス坑道（立坑，斜坑），各処分パネルを結ぶ連絡坑道，処分パネルの外側に配される主要坑道，廃棄体が定置される処分坑道または処分孔（豎置きの場合）から構成される。また，地下での廃棄体，緩衝材の積み替えや排水設備，換気設備などを設置するための坑道が必要となる。

候補母岩の評価で設定した地下施設建設の可能領域内への廃棄体の適切な配置が技術要件となる。このため，地下施設建設可能領域での処分パネルの規模や数などを検討するために，対象とする岩盤の規模や空間的な広がり，割れ目の位置や長さ，幅，方向などの空間的な分布を考慮して地下施設レイアウトを設定する。

一般労働安全としては，施設内の作業従事者の安全を確保することを技術要件とし，空洞の力学的安定性確保の観点から，主たる地圧の方向と坑道の方向の関係を考慮する。また，酸素濃度，温度・湿度，ラドン濃度の管理においては，平常時や何らかの異常時においても，換気経路を確保することとし，かつ，風速が過大とならないよう，経路を設計する。また，火災・事故防止対策と緊急時の避難経路の確保についても，地下施設レイアウトに関する技術要件とする。

また，施工実現性の観点から，年間 1,000 体の廃棄体が定置できるよう，操業工程計画に支障がないことを技術要件とする。例えば，工期内に建設，操業，閉鎖ができることや物流

経路を確保すること、操業スケジュール変更に対応できることなどを考慮して操業用坑道、建設用坑道、換気坑道、排水坑道、避難用坑道などを適切に配置する。

4.4.3.2 坑道の技術要件

地下の施設は地上と地下を結ぶアクセス坑道(立坑, 斜坑), 各処分パネルを結ぶ連絡坑道, 処分パネルの外側に配される主要坑道, 廃棄体が定置される処分坑道または処分孔(竖置きの場合)から構成される。また, 地下での廃棄体, 緩衝材の積み替えや排水設備, 換気設備などを設置するための坑道が必要となる。

各坑道の利用目的にあわせた役割により, 各坑道が所要の内空断面(形状, 寸法, 断面積)を有していることと, 建設・操業・閉鎖の各作業段階を通じて力学的安定性が確保されていることを技術要件とする。

表 4-7 地下施設における坑道の役割 (JNC, 1999b に基づいて作成)

| 坑道の役割 | 技術要件 | アクセス坑道 | 主要・連絡坑道 | 処分坑道 |
|--------|----------------------------------|--------|---------|------|
| 廃棄体搬入路 | 廃棄体の搬入路を確保すること | ● | ● | ● |
| 人員の連絡路 | 人員が安全に移動できること | ● | ● | (●) |
| 資材の運搬路 | 資材の運搬路を確保すること 掘削ズリの搬出路を確保すること | ● | ● | ● |
| 換気路 | 換気設備を設置すること 換気に十分な面積を有すること | ● | ● | ● |
| 給水路 | 給水設備を設置すること | ● | ● | |
| 排水路 | 排水設備を設置すること | ● | ● | ● |
| 給電・通信路 | 給電・通信設備を設置すること | ● | ● | (●) |
| 避難路 | 避難経路を確保すること | ● | ● | |

● : 坑道に役割を設定するケース

(●) : 操業方法に依存して役割が不要となる可能性があるケース

5 まとめ

この報告書では、地層処分の安全確保の考え方にに基づき、閉鎖後長期の安全確保を達成するための要件を安全機能として示し、また、事業期間中の安全確保のための基本的な安全対策について述べた。

安全機能は、地層処分システムがどのように安全性を提供するかということを表現したものであり、システムの安全性の概念的な説明や、セーフティーケースを構築するための戦略的な枠組みとして各国の実施主体で利用されつつある。この報告書では、第2次取りまとめや第2次 TRU レポートで示された地層処分の安全確保の考え方を出発点としつつ、2000年以降の国際的なセーフティーケースの議論の進展や安全規制の考え方が整備されつつあること、および段階的なサイト選定プロセスを開始する前の段階にあることを踏まえて、地質環境の多様性に対応する安全確保の考え方として安全機能を整備した。

閉鎖後長期の安全確保については、「隔離」と「閉じ込め」を基本とする地層処分の安全確保の考え方を示し、多重バリアシステムの安全機能と構成要素の技術要件について示した。また、安全機能の安全評価への適用として、シナリオ構築において安全機能を基軸としたアプローチ法を試みた事例を示した。事業期間中の安全確保の要件については、地上施設や地下施設、操業設備を対象として放射線安全（操業時閉じ込め、放射線遮へい、放射線被ばく管理）、一般労働安全（作業環境の維持、災害の発生・拡大の防止、災害時の避難経路の確保）について述べ、また環境保全についても述べた。

ここで示した安全機能は、地層処分の安全確保において基本的な要件であり、今後もこれらの安全機能に基づいて処分場の設計・安全評価を進めていく。一方、技術要件については、人工バリア材料の基本特性や、長期健全性に関する知見などの技術開発の進捗に応じて、それらの必要性や、新たな技術要件の追加などを実施し、地層処分の安全確保が確実に進められるようにする。

参考文献

- Andra (2005) :Dossier Argile 2005.
- 電事連・JNC（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構）（2000）：TRU 廃棄物処分概念検討書.
- 電事連・JNC（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構）（2005）：TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013.
- 土木学会（2009a）：余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方.
- 原子力安全委員会（2010）：第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方.
- 原子力委員会（2006）：長半減期低発熱放射性廃棄物の地層処分の基本的考え方－高レベル放射性廃棄物との併置処分等の技術的成立性－.
- IAEA（International Atomic Energy Agency）（2006）：No. WS-R-4, Geological Disposal of Radioactive Waste.
- IAEA（International Atomic Energy Agency）（2011）：No.SSR-5, Disposal of Radioactive Waste.
- JNC（核燃料サイクル開発機構）（1999a）：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－, 総論レポート, JNC TN1400 99-020.
- JNC（核燃料サイクル開発機構）（1999b）：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）（2005）：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－, 一分冊2 工学技術の開発－. JNC TN1400 2005-015.
- 経済産業省（経済産業省告示第187号）（2001）：実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示.
- Nagra (2002) :Project Opalinus Clay: Safety Report, Nagra Technical Report 02-05, Nagra, Wettingen, Switzerland.
- OECD/NEA (2006) :Safety of Geological Disposal of High-level and Long-lived Radioactive Waste in France, An International Peer Review of the “Dossier 2005 Argile” Concerning Disposal in the Callovo-Oxfordian Formation, NEA No.6178, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, ISBN 92-64-02299-6.
- 日本原子力学会（2010）：地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント～地層処分において必要と考えられる高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の特性～報告書, 「地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント」特別専門委員会.
- NUMO（原子力発電環境整備機構）（2004）：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性, NUMO-TR-04-01.
- NUMO（原子力発電環境整備機構）（2011a）：地層処分事業のための安全評価技術の開発（I）－シナリオ構築技術の高度化－, NUMO-TR-10-09.
- NUMO（原子力発電環境整備機構）（2011b）：地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性, 「処分場の概要」の説明資料, NUMO-TR-10-03.

OECD/NEA (2009) : International experiences in safety cases for geological repositories (INTESC), Outcomes of INTESC project, Radioactive Waste Management, OECD Nuclear Energy Agency.

ONDRAF/NIRAS (2001) : Technical Overview of SAFIR-2: Safty Assessment and Feasibility Interim Report 2, ONDRAF/NIRAS Report NIRON2001-05E, Belgium.

PNC (動力炉・核燃料開発事業団) (1992) : 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書—平成3年度—, 動力炉・核燃料開発事業団技術資料, PNC TN1410 92-081.

SKB (2006) : Long-term safty for KBS-3 repositories at Formark and Laxemar – a first evaluaton, Main Report of the SR-CAN project, SKB Technical Report TR-06-09, SKB, Stockholm, Sweden.

総合資源エネルギー調査会 (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) (2006) : 放射性廃棄物安全小委員会報告書.

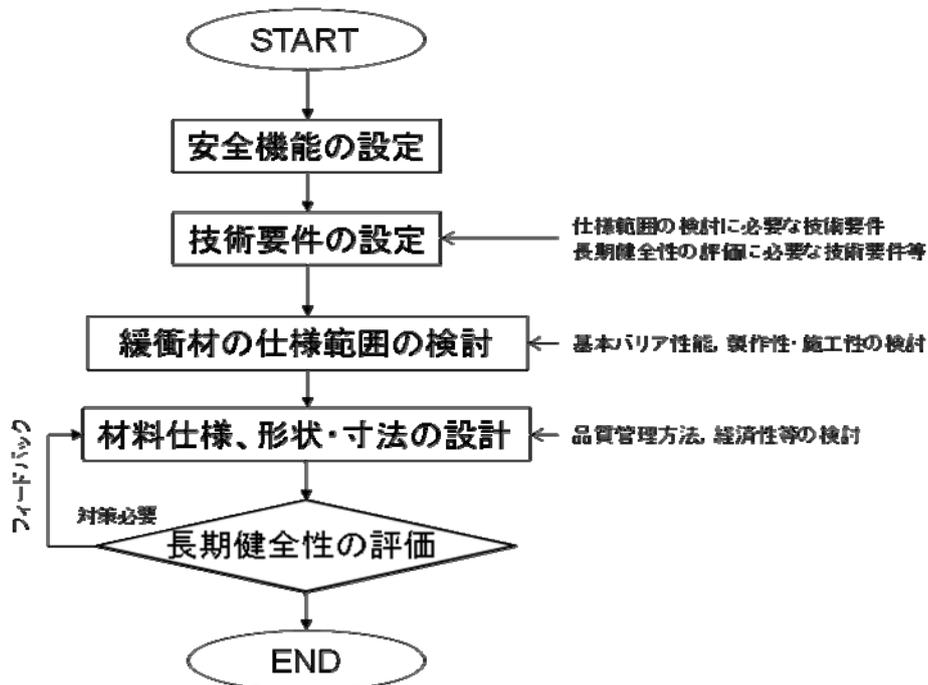
総合資源エネルギー調査会 (総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会) (2008) : 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について.

付録-1 緩衝材設計の技術要件の試行的な評価例

緩衝材，埋め戻し材に使用する主要な材料であるベントナイトは，塩分により膨潤特性が影響を受ける。そこで，2000年以降得られた塩水環境を対象とした人工バリア材料の基本特性に関する知見をもとに，海水系地下水環境下における緩衝材の設計について検討した事例を示す。

1 基本的な設計の流れ

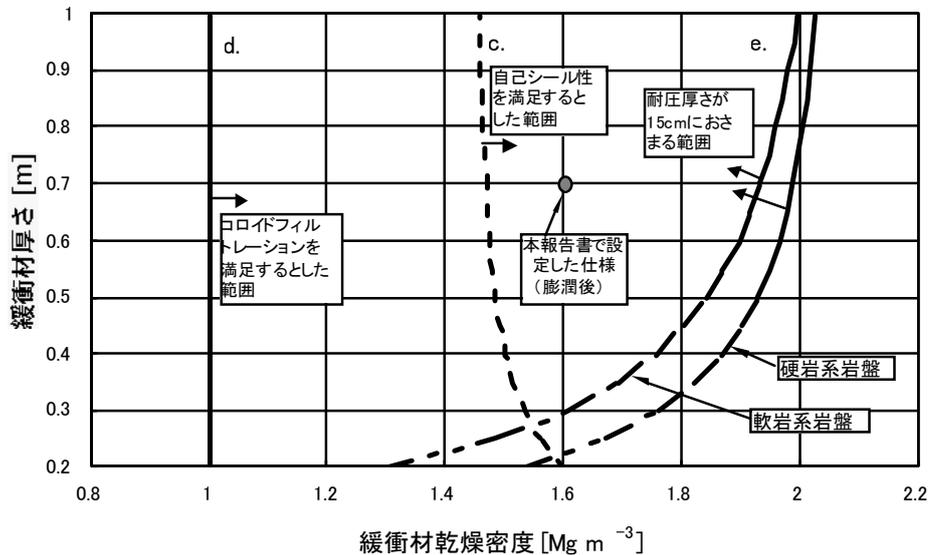
緩衝材の設計フローを付図 1-1 に示す。緩衝材には「放射性物質の移行抑制」として，「移流による移行の抑制」，「コロイド移行の防止・抑制」，「収着による移行遅延」の安全機能を設定した（3.3.4.5 参照）。これらの安全機能に対して，基本的なバリア性能を確保するための技術要件として，低透水性，コロイドろ過能，収着性を設定している（3.3.4.5 参照）。設計では，これらの技術要件と自己シール性，製作・施工性の技術要件が満たされるよう，緩衝材の仕様範囲を設定する。なお，高レベル放射性廃棄物に関しては，オーバーパックを变形から保護するために物理的緩衝性の技術要件についても，仕様範囲の設定で検討する。仕様範囲の中から，品質管理方法や経済性なども考慮して，材料設計および形状，厚さなどの仕様を決定する。



付図 1-1 緩衝材の設計フロー

付図 1-2 に，高レベル放射性廃棄物の緩衝材のブロック方式に対する緩衝材の仕様範囲の検討の一例として，緩衝材の乾燥密度と緩衝材厚さの仕様範囲を示す。図中の曲線のうち，c は自己シール性，d はコロイドろ過能，e は物理的緩衝性のそれぞれ技術要件に対応している。緩衝材の乾燥密度と厚さの仕様範囲は，曲線で囲まれた範囲（斜線部）となる。なお，技術

要件のうち、低透水性については、緩衝材の透水係数や周辺の母岩の動水勾配、透水係数などに基づいて別途評価するため、この図では示していない。また、収着性については、緩衝材の主要材料としてベントナイトを利用していることで技術要件を満たしていると判断しており、同じくこの図中には示していない。



付図 1-2 ブロック方式を一例とした緩衝材仮仕様の確認 (JNC, 1999 に一部加筆)

この仕様範囲から付図 1-1 のフローの後半にしたがい、緩衝材の製作、搬送、定置の方法に合わせて品質管理方法や経済性を考慮して、最終的な緩衝材の材料仕様や形状・寸法を決定する。現在の緩衝材の仕様は、施工方法としてブロック定置方式を採用した場合に、ケイ砂を 30 重量%混合したナトリウム型ベントナイトを乾燥密度 1.8 Mg/m^3 となるように圧縮成型したものとし (膨潤後の乾燥密度は 1.6 Mg/m^3)、緩衝材の形状は円筒形、厚さは 70 cm としている (NUMO, 2004)。

2 塩水環境下における低透水性と自己シール性の検討

緩衝材の主成分であるベントナイトの低透水性は塩分濃度が高い地下水中では増加し、一方で、膨潤能は低下することが知られており、沿岸域など、地下水が海水を起源とする場合には低透水性 (表 3-10) と自己シール性 (表 3-11) の要件について影響を評価する必要がある。以下ではこれらの技術要件に着目して、塩水環境下における緩衝材の設計の考え方とその例を示す。

1.1 低透水性に対する影響の評価

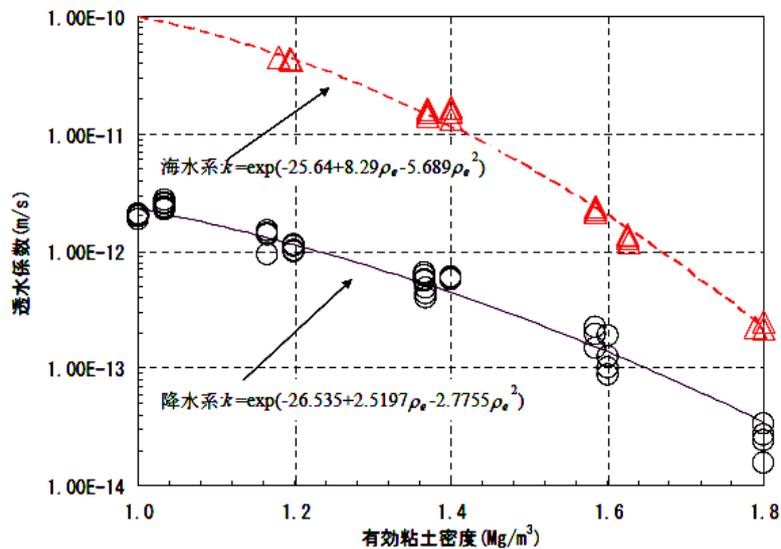
緩衝材の低透水性については、ペクレ数を暫定的な指標として評価する (JNC, 1999)。ペクレ数が 1 より十分小さい場合、緩衝材中の放射性物質の移行は拡散によるものが支配的となり、移流による移行が抑制されていると判断できる。

ペクレ数 P_e は次の式により表わすことができる。

$$P_e = KIL/D \quad (1)$$

ここで、 K は緩衝材の透水係数、 I は動水勾配、 L は代表長さ（ここでは、緩衝材厚さ 0.7m に設定） D は拡散係数（ $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ に設定）である。

付図 1-3 には、緩衝材の透水係数の乾燥密度依存性と塩分濃度の関係を示した。塩分濃度が高い条件では、透水係数は 10^{-13} から 10^{-10} m/s のオーダーの範囲にあり、塩分濃度が低い条件に比べ 10~50 倍程度高い透水係数となる。塩水環境下で取得した透水係数を用いて、動水勾配 I を 0.01 の条件で、ペクレ数を概略的に見積もったところ、有効粘土密度 $1.0 \sim 2.0 \text{ Mg/m}^3$ の領域で 0.003 未満の値であり、移流による移行が抑制されると判断できる。



付図 1-3 透水係数と乾燥密度依存性と塩分濃度の関係
(電事連・JNC, 2005)

1.2 自己シール性の評価方法

施工時に発生する隙間は、緩衝材の施工方法により異なる。ブロック方式では、周辺岩盤と緩衝材外側及びオーバーパックと緩衝材内側との間に施工上の隙間が発生する。ブロックが分割される場合には、ブロック間の隙間も発生する。現位置締固め方式では、オーバーパックと緩衝材内側との間に隙間が発生する。

隙間の体積割合 θ と人工バリアの仕様の関係は次式に示すとおりである。

$$\theta = \frac{(D_B + d_B)^2 + 2(D_B + d_B)(R_{OP} + d_{OP})}{(D_B)^2 + 2(D_B)(R_{OP} + d_{OP})} \quad (2)$$

D_B : 緩衝材厚さ

d_B : 緩衝材—岩盤間の隙間

R_{OP} : オーバーパックの外半径

d_{OP} : 緩衝材—オーバーパックの隙間

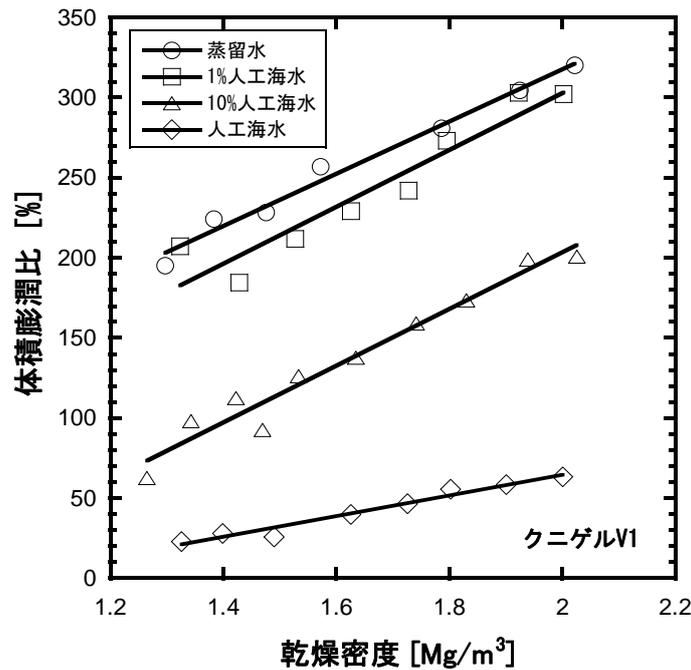
自己シール性は、地下水と緩衝材が接触し、膨潤することにより、施工時の隙間が充填された状態をもって判断することとする。そこで、緩衝材が含水した際の膨潤量（体積膨潤比）が隙間量（隙間の体積割合）を超過した場合に隙間が充填されたとみなして自己シール性を評価した。

2.2.1 体積膨潤比の乾燥密度と塩分濃度に対する依存性

田中，中村（2004）では、産地の異なる複数のベントナイトを用いて、膨潤変形試験を実施している。この試験では、圧縮ベントナイトを封入した試験セルの上方から一定荷重で載荷し、あらかじめ塩分濃度を調整した試験用液を接触させた際の荷重載荷方向への膨潤変形量をダイヤルゲージで計測した。膨潤変形量から、体積膨潤比を算出し、乾燥密度との関係を求めた。試験溶液には、蒸留水と人工海水、および人工海水を 10%、1%に希釈した溶液を使用した。

付図 1-4 には、体積膨潤比の乾燥密度依存性と塩分濃度の関係を示した。体積膨潤比は、乾燥密度が増加するほど、増大し、また、塩分濃度が高いほど低下する傾向がある。また、載荷圧を増大させるほど（0.0098 から 0.294 MPa の範囲）、体積膨潤比は低下した。ただし、体積膨潤比や塩分濃度、乾燥密度への依存性は、使用したベントナイトの種類により異なっていた（田中，中村，2004）。

体積膨潤比と乾燥密度の関係を、塩分濃度毎に乾燥密度に関する 1 次式で近似した。



付図 1-4 体積膨潤比の乾燥密度依存性と塩分濃度の関係 (載荷圧 0.0098MPa)
(データは、田中・中村, 2004 を使用)

2.2.2 自己シール性の評価

自己シール性の評価は、緩衝材の体積膨潤比 ε が、隙間の体積割合 θ を超過した場合に隙間が充填されたとして評価することとした。ここでは、超過の目安として、隙間の体積割合の2倍量を暫定的な指標とし、 $\varepsilon > 2\theta$ となる緩衝材の厚さと乾燥密度を求めた。

体積膨潤比は、2.2.1 で紹介した田中, 中村 (2004) のデータを1次式で近似した値を使用した。なお、緩衝材を製作する際には、ベントナイトにケイ砂を混合する場合もある。その場合は、ここで示した乾燥密度を有効粘土密度として、ケイ砂混合率を考慮して換算しなおす必要がある。有効粘土密度とは、緩衝材の単位体積あたりに含まれるベントナイトの重量を、単位体積からケイ砂の占める体積を除いた値 (ベントナイトの占める体積) で割ることにより得られる密度のことで、次式により表される (鈴木ほか, 1999)。

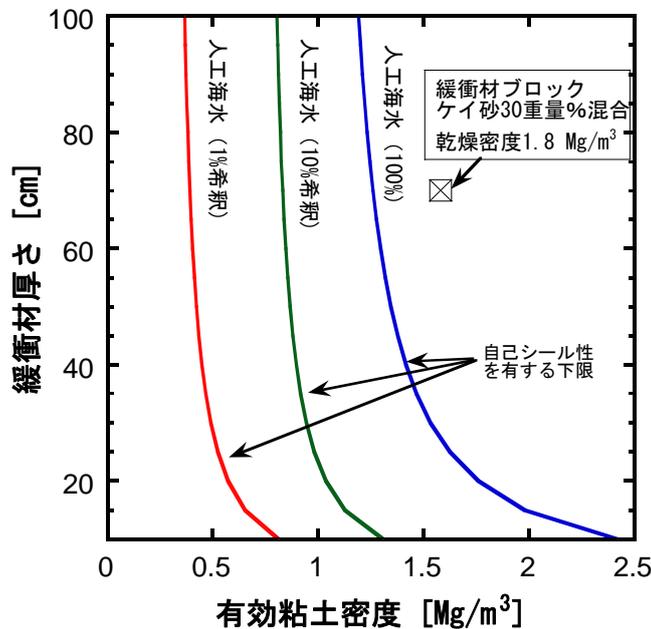
$$\rho_e = \frac{W_b}{V_b + V_a} = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \frac{\rho_d R_s}{\rho_s}} \quad (3)$$

ここで、 ρ_e は有効粘土密度[Mg/m³]、 W_b はベントナイトの乾燥質量[Mg]、 V_b はベントナイトの容積[m³]、 V_a は空隙の容積[m³]、 ρ_d は乾燥密度[Mg/m³]、 R_s はケイ砂混合率[wt%]、 ρ_s はケイ砂の土粒子密度[Mg/m³]である。

付図 1-5 には、JNC (1999) と同様に岩盤と緩衝材ブロックの間の隙間を 4 cm、緩衝材ブロックとオーバーパックの隙間を 2 cm と設定した場合の自己シール性を有すると判断できる下限の曲線を示した。自己シール性を確保するために必要な有効粘土密度の下限は、緩衝材が厚いほど低くなる。70 cm の厚さで、有効粘土密度を見積もると、人工海水程度の塩分濃度

の地下水では 1.26 Mg/m^3 以上となる（付表 1-1。第 2 次取りまとめで示された緩衝材ブロックの仕様（ケイ砂混合率 30 重量%で乾燥密度は 1.8 Mg/m^3 ）では，有効粘土密度に換算すると 1.58 Mg/m^3 であるため，人工海水中でも自己シール性を有すると判断できる。塩分濃度が海水の 10%，1%ではそれぞれ，自己シール性を有する有効粘土密度の範囲は， 0.83 Mg/m^3 以上， 0.40 Mg/m^3 以上となる。このように，塩分濃度が低いほど自己シール性を確保するのに必要な密度は低くなる。また，施工時の隙間が上記の設定よりも大きい場合などは，施工時の隙間の割合を見積もり，必要な自己シール性を確保するために，有効粘土密度を高くするなどの対策を検討する。

なお，以上の検討に加えて，工学的な実現性の技術要件を考慮して，緩衝材ブロックが自立性を有する下限値，圧縮成型できる上限値などを考慮して緩衝材の仕様を決定する（杉野ほか，1999）。



付図 1-5 塩分濃度をパラメータとした自己シール性を確保するために必要な有効粘土密度と緩衝材厚さの関係

付表 1-1 自己シール性を満足する有効粘土密度の範囲

| 緩衝材厚さ | 1%海水 | 10%海水 | 人工海水 |
|-------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 40cm | 0.45 Mg/m^3 以上 | 0.90 Mg/m^3 以上 | 1.42 Mg/m^3 以上 |
| 70cm | 0.39 Mg/m^3 以上 | 0.83 Mg/m^3 以上 | 1.26 Mg/m^3 以上 |

3 課題

本検討では，緩衝材の自己シール性について，最近のベントナイトの膨潤に関する試験結果などを取り入れて再評価を試みた。今回の見積もりは体積膨潤比に基づいたものであるが，設計検討を進める上では，以下のような点についても検討を進める必要がある。

- ・ 処分孔の不陸などの掘削精度，緩衝材施工時の隙間量などの施工に関する品質

- ・ 再冠水による隙間充填後の緩衝材の密度分布の性能への影響

また、自己シール性の評価方法としては、体積膨潤比と隙間の体積割合から評価する方法以外にも、膨潤後の発生圧力を指標とする自己シール性の評価方法もあるので（JNC, 2005, 小峰他, 2009）、今後、緩衝材の膨潤性に関する技術開発成果も踏まえ、設計手順や指標を設定する。

付録-1 参考文献

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次とりまとめ－分冊2 地層処分の工学的技術，JNC TN1400 99-022.

JNC（核燃料サイクル開発機構）（2005）：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－，一分冊2 工学技術の開発－. JNC TN1400 2005-015.

小峯秀雄，安原一哉，村上哲（2009）：人工海水環境下におけるベントナイトの一次元自己シール性，土木学会論文集 C，Vol. 65，No. 2，pp. 389-400.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2004）：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性，NUMO-TR-04-01.

鈴木英明，藤田朝雄：緩衝材の膨潤特性（1999）：JNC TN8400 99-038.

杉野弘幸，藤田朝雄，谷口航，長谷川宏，岩佐健吾：緩衝材設計の考え方（1999）：，JNC TN8400 99-096.

田中幸久，中村邦彦（2004）：海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響，電力中央研究所報告 研究報告：N04007.

付録-2 異常事象に対する安全対策の検討例

NUMO は、さまざまな異常事象の抽出とその異常事象による影響、並びにそれらに対する対策の検討を実施している。具体的には、「異常事象」（通常運転を逸脱させるような何らかの要因が施設もしくは廃棄体に加えられた事象と定義）に対する対策は、まず、“異常事象の防止”の対策を十分に施し、それでも異常事象が発生したときには“異常拡大の防止”の対策を施す。“異常事象の防止”の対策と、“異常拡大の防止”の対策に加えて、異常事象が万一事故にまで発展した場合をも想定して、“影響の緩和策”の対策を適切に実施する（4.1.3 参照）。

想定される異常事象と対策の例を付表 2-1 に示す。これらの異常事象に対する対策は、サイト条件や最新の技術の進展を踏まえて、適宜、安全性の向上に留意して見直す。

付表 2-1 操業中に想定される異常事象と安全対策
(原環センター, 2001 を参考に作成)

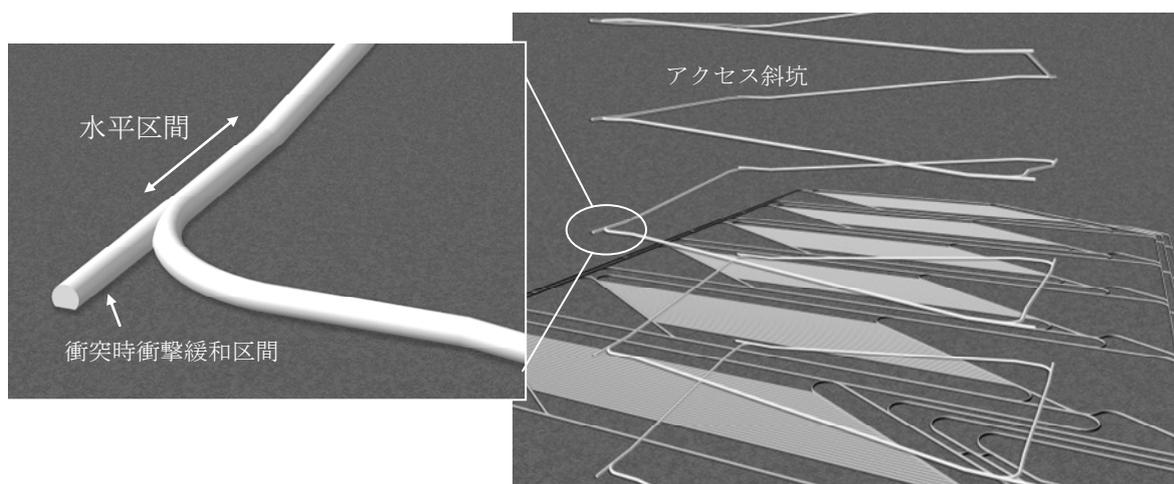
| 要 因 | | 異 常 事 象 | 安 全 対 策 |
|-----------------|------------------------------|---|--|
| | | | 安 全 対 策 の 例 |
| 装置・設備に起因する異常事象 | 搬送・定置設備の故障, 損傷 | ・搬送・定置設備の機能停止によるガラス固化体または廃棄体の転倒, 落下 | <ul style="list-style-type: none"> ・重要機能へのインターロックの設置 (過走行防止, 吊り上げ高さ制限) ・転倒防止機能, 脱輪防止機能の設置 ・多重化措置 (吊りワイヤの二重化など) ・吊り荷の確実な保持機構の採用 ・搬送・定置設備の定期点検の実施 |
| | 運転操作のミス | ・建屋, 他設備との衝突によるガラス固化体または廃棄体の転倒, 落下 | <ul style="list-style-type: none"> ・運転範囲の制限 ・運転要領書の整備 ・ヒューマンエラー防止機能の設置 (フールプルーフ機能設置) |
| | 電源喪失 | ・搬送・定置設備の機能停止によるガラス固化体または廃棄体の転倒, 落下 | <ul style="list-style-type: none"> ・フェイルセーフ機能の設置 (安全側に保持) |
| 自然現象などに起因する異常事象 | 地震 | <ul style="list-style-type: none"> ・搬送・定置設備の揺れによるガラス固化体または廃棄体の転倒, 落下 ・建屋の倒壊 ・坑道, 処分孔の崩落 | <ul style="list-style-type: none"> ・搬送・定置設備の耐震性の評価 ・建屋, 坑道, 処分孔の耐震性の評価 |
| | 落盤 | <ul style="list-style-type: none"> ・落石による廃棄体の転倒, 落下 ・坑道, 処分孔の崩落 | <ul style="list-style-type: none"> ・支保工の品質管理と施工管理 |
| | 火災・爆発 | ・搬送・定置設備の延焼 | <ul style="list-style-type: none"> ・警報・消火設備の設置 ・不燃性・難燃性材料の使用 ・着火源の排除 ・必要に応じて可燃性ガス対策 ・異常な温度上昇の防止対策 |
| | 地震以外の自然現象 (台風, 浸水, 出水, 豪雪など) | <ul style="list-style-type: none"> ・搬送・定置設備の機能停止によるガラス固化体または廃棄体の転倒, 落下 ・建屋の倒壊 ・搬送・定置設備や坑道の浸水 | <ul style="list-style-type: none"> ・転倒防止機能, 脱輪防止機能の設置 ・風, 積雪荷重などを考慮した建屋の設計 ・防水堤, 排水設備の設置 |

また、NUMO で検討している安全対策検討のうち、地上から地下への廃棄体搬送を対象とした検討例を以下に説明する。

検討の流れは、まず、a 異常事象を抽出し、b 異常事象を防止するための安全対策を施す（異常事象の防止策）。c それでも発生するかもしれない異常事象を想定し、d 異常事象が発生したときの自動対応機構を準備する（異常拡大の防止策）。e 次に、その対応機構が作動しない場合にはさらに次の機構が作動するという多重化を施す（異常拡大の防止策）。f さらに重大な事象として、敷地外に放出された放射性物質による影響（事故）を評価する。実際の操業において事故が発生した場合には、除染などの影響緩和策を実施する。

この流れに従い「斜坑における廃棄体搬送車両の逸走」の検討例を以下に示す。

- a 事故事象として、「斜坑における廃棄体搬送車両の逸走」を抽出する。
- b ガラス固化体はオーバーパックに封入され、さらに遮へい容器に入れられて搬送される。制限速度以上になった場合、駆動力を車輪に伝達せず、自動的に制動する車両設計とする。
- c 制御がきかず重力により加速する状態になった場合を想定する。
- d 曲線に入るまでに速度を減じて停止するように、水平区間を設ける。
- e それでも速度を減じない場合を想定して、衝突時衝撃緩和区間を設けておく。斜坑の安全設計例を付図 3-1 に示す。
- f ガラス固化体が損傷して飛散した微粉などが外部へ出るかどうかについて衝突解析や試験による破壊の有無の評価を行う。万一破壊が想定される場合には、逸走の衝突速度から固化ガラス微粉発生率を導出し、この微粉のキャニスタ外への放出、空気中への移行、建物から大気中への移行を保守的に影響などについて評価する。大気中へ移行した放射性物質による敷地外一般公衆への影響が基準値以下であることを確認する。



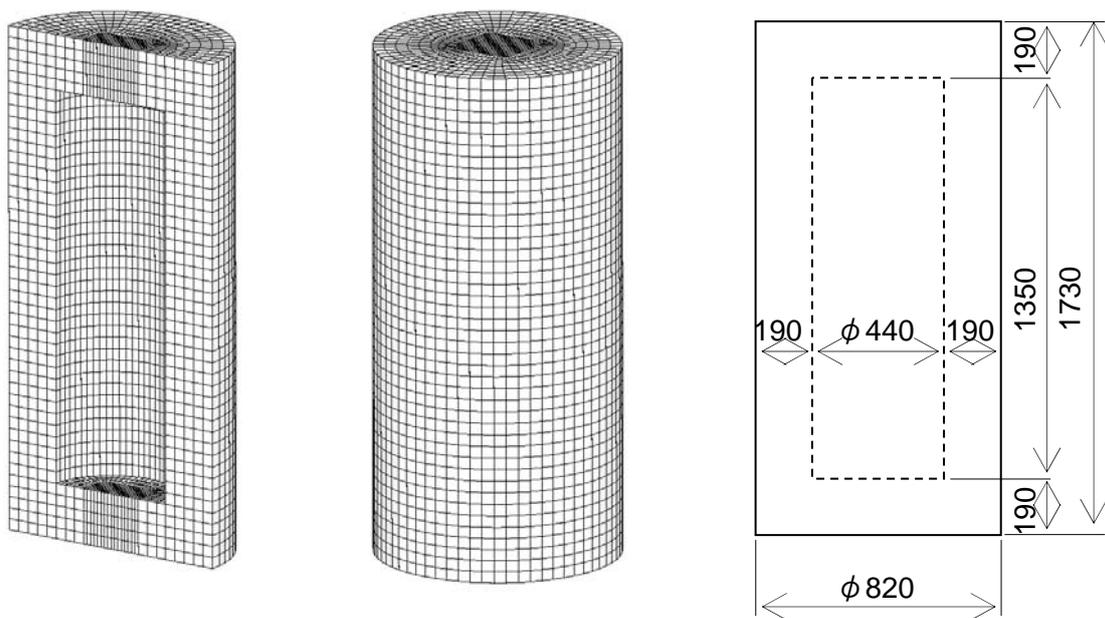
付図 3-1 斜坑の安全設計例

なお、高レベル放射性廃棄物の処分施設では、地上施設の一部を除いて、ガラス固化体はオーバーパックに封入され、さらに、輸送中は遮へい容器に封入されている。しかし、この評価においては、仮想的にオーバーパックが直接坑道壁面に衝突することを想定し、オーバーパックの破壊について評価した。

解析には有限要素法衝撃解析コード LS-DYNA (Livermore Software Technology Corporation) を使用した。LS-DYNA は、衝突・落下問題、塑性加工など非線形現象を精度良く解析する有限要素プログラムである。

衝突解析では、保守的にオーバーパックが格納容器に格納されていない状態で、アクセス斜坑搬送中に搬送車が逸走し、剛壁に衝突した場合を想定した。衝突時のオーバーパックの健全性を、オーバーパックに発生する相当塑性ひずみと材料の破断ひずみとの比較により評価した。このような比較評価は余裕深度処分処分容器の構造健全性評価でも行われている(電中研, 2009)。

衝突速度は、勾配 11% のアクセス斜坑を搬送車が 50m 程度逸走した場合を想定し 9.7m/s と設定した。解析モデルを付図 2-2 に示す。オーバーパックは第 2 次取りまとめで示されている炭素鋼オーバーパックと設定し、Solid 要素にてモデル化した。内容物はモデル化せず、慣性力をあわせるために容器重量を内容物込みの重量 (6,111kg) とした。オーバーパックの材質は JIS G 3201 炭素鋼鍛鋼品の SF340A とした。破断ひずみは 27% である。材料定数を付表 2-2 に示す。

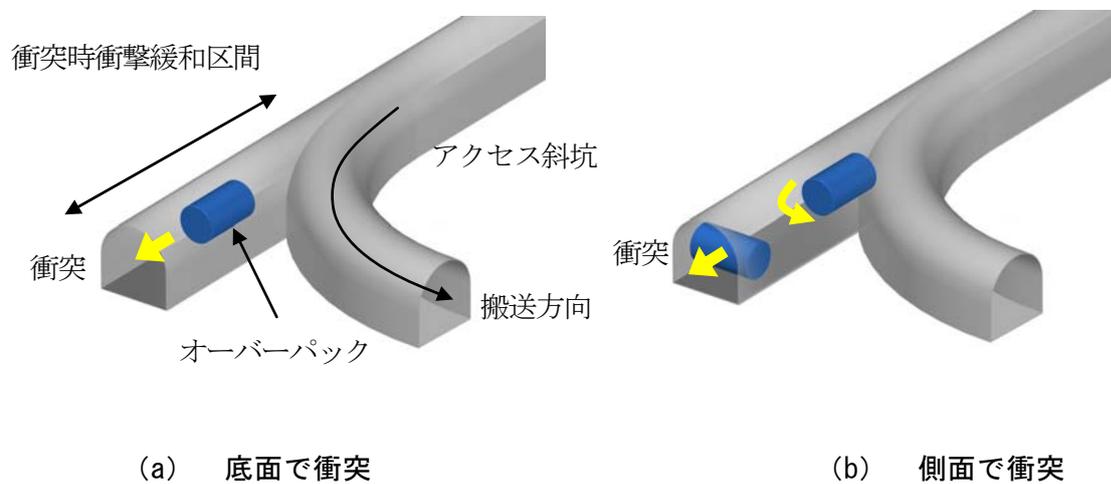


付図 2-2 解析モデル

付表 2-2 材料定数 (炭素鋼鍛鋼品 SF340A)

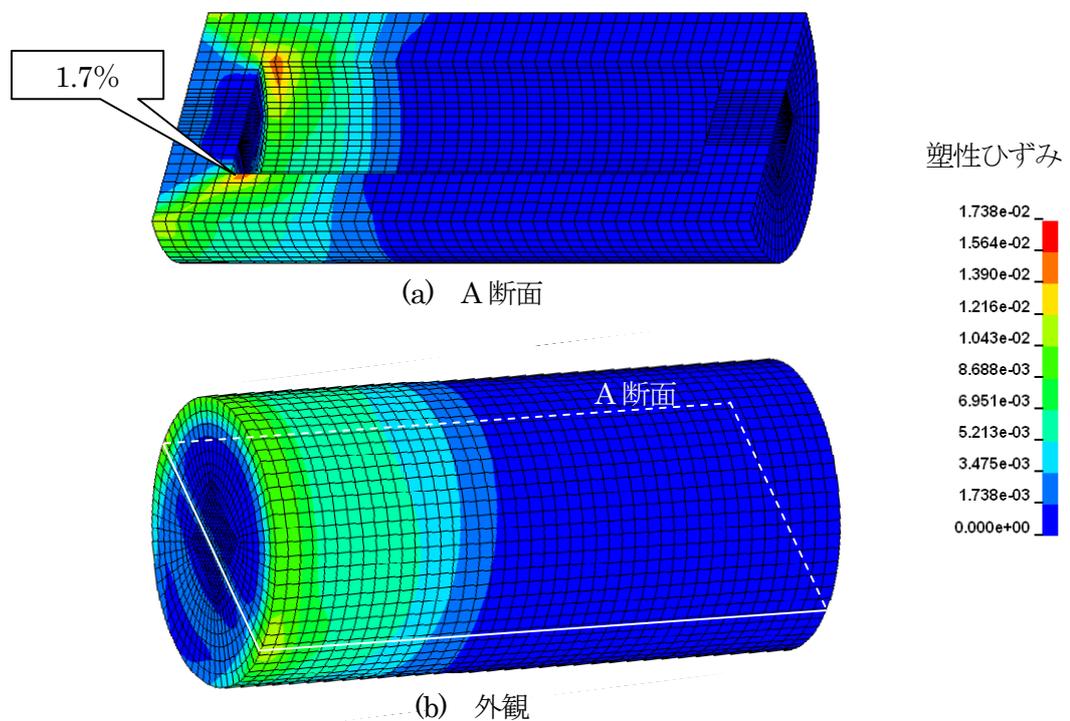
| | | |
|-------|--------|-----|
| ヤング率 | 203000 | MPa |
| ポアソン比 | 0.3 | |
| 降伏応力 | 175 | MPa |
| 引張強さ | 340 | MPa |
| 破断ひずみ | 27 | % |

衝突方向として、付図 2-3 に示すようにオーバーパックが底面で坑壁に衝突する場合（付図 2-3 (a)）と、衝突前に横に回転し側面で坑壁に衝突する場合（付図 2-3 (b)）の 2 とおりを想定した。

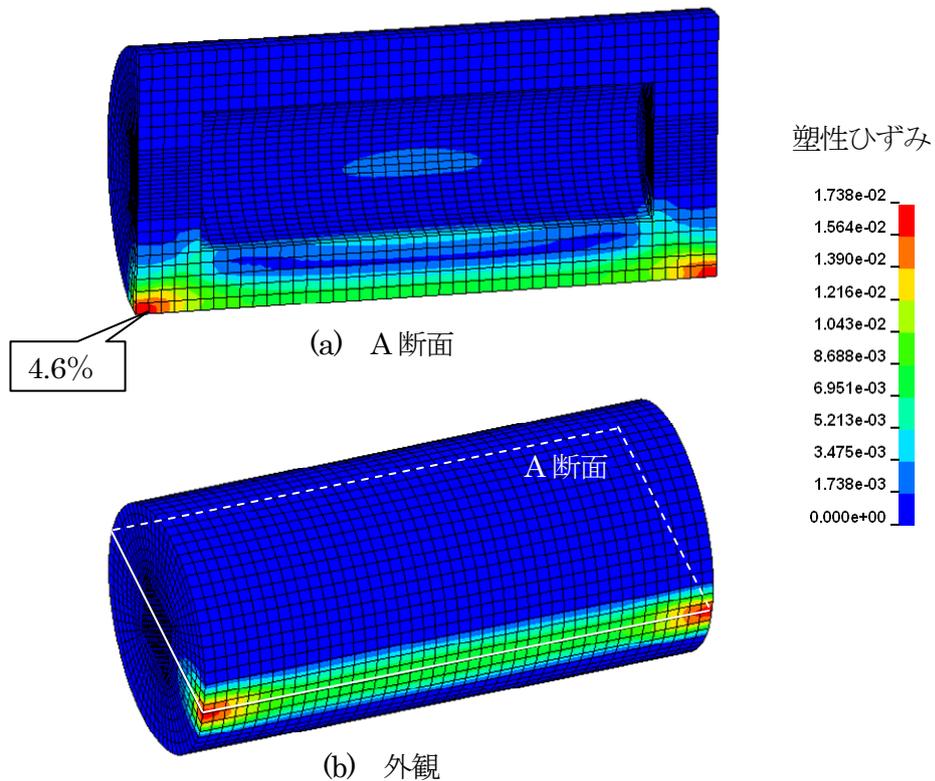


付図 2-3 衝突方向

付図 2-4 と付図 2-5 に各ケースの相当塑性ひずみ分布図を示す。それぞれの図には最大相当塑性ひずみ発生位置とその値も示した。



付図 2-4 相当塑性ひずみ分布図（底面で衝突）



付図 2-5 相当塑性ひずみ分布図（側面で衝突）

オーバーパックが底面および側面で坑壁に衝突するときの最大相当塑性ひずみは1.7%および4.6%である。底面で衝突する場合、オーバーパック内部の角、側面で衝突する場合は、オーバーパック外部の角に最大相当塑性ひずみの発生が見られる。これらの値は、破断ひずみ（27%）以下であることから、オーバーパックは破損しない可能性が高いと考えられる。

実際には、オーバーパックは、遮へい容器に封入されていることから、遮へい容器に衝突緩衝機能などを付加すれば、さらに、破損の可能性は低くなると考えられる。そのため、今後、衝突速度、方向あるいは格納容器の有無の影響など、より現実的な異常事象を詳細に想定し安全性を確認する。

付録-2 参考文献

原環センター（原子力環境整備促進・資金管理センター）（2001）：平成12年度、高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査報告書（第2分冊）－遠隔操作技術高度化調査－，経済産業省資源エネルギー庁委託事業報告。

電中研（電力中央研究所）（2009）：有限要素法による余裕深度処分用処分容器の構造健全性評価，研究報告 N08071，平成21年7月，電力中央研究所報告。