

# NUMO セーフティケースに関する外部専門家ワークショップ

2016年9月21日 大阪科学技術センター

2016年9月23日 東京・三田NNホール

## 講演要旨

### 原子力発電環境整備機構

#### 目次

緒言.....	1
セッション（１）安全確保の基本的考え方.....	4
セッション（２）地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化.....	6
セッション（３）処分場の設計と工学技術.....	7
セッション（４）閉鎖前の安全性の評価.....	10
セッション（５）閉鎖後長期の安全性の評価.....	12
セッション（６）わが国における地層処分の技術的実現性.....	14
結言.....	15
参考.....	16

本資料および講演用スライドは、現在取りまとめを進めている包括的技術報告書「わが国における安全な地層処分の実現性 – サイト選定で規定される多様な地質環境を対象としたセーフティケース」の内容を作成途中でご紹介し、技術的な専門家の方々から幅広いご意見をいただくために用意したものです。本ワークショップでのご意見を踏まえ、最終的に作成する報告書では必要不可欠な部分的変更などを加えることとなりますので、その点ご注意ください。

○本資料に関するお問い合わせ先

NUMO 技術部 亀之園 弘幸 email:[hkamenosono@numo.or.jp](mailto:hkamenosono@numo.or.jp) Tel:03-6371-4131(直通)

プログラム（敬称略）

プログラム	時間 (質疑含)	座長 (大阪)	座長 (東京)	説明者/ NUMO
開会挨拶	9:30-9:40	—	—	大阪： 藤(副理事長) 東京： 近藤(理事長)
ワークショップ趣旨説明，報告書作成の背景等	9:40-10:00	—	—	出口 (技術部長)
配付資料確認，事務連絡など				亀之園
セッション（１） 安全確保の基本的考え方 ○内容：１章・２章	10:00-10:50	佐々木 隆之 (京都大学)	竹内 真司 (日本大学)	藤山
セッション（２） 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化 ○内容：３章	10:50-11:50	佐藤 努 (北海道大学)	梅田 浩司 (弘前大学)	太田
昼休憩	11:50-12:50	—	—	—
セッション（３） 処分場の設計と工学技術 ○内容：４章	12:50-14:00	小崎 完 (北海道大学)	佐藤 努 (北海道大学)	窪田
セッション（４） 閉鎖前の安全性の評価 ○内容：５章	14:00-14:45	小崎 完 (北海道大学)	小崎 完 (北海道大学)	山品
休憩	14:45-15:00	—	—	—
セッション（５） 閉鎖後長期の安全性の評価 ○内容：６章	15:00-16:20	桐島 陽 (東北大学)	佐々木 隆之 (京都大学)	藤崎
セッション（６） わが国における地層処分の技術的実現性 ○内容：７章・８章	16:20-17:20	佐々木 隆之 (京都大学)	佐々木 隆之 (京都大学)	鈴木
閉会挨拶	17:20-17:30	—	—	梅木(理事)

## 緒言

### わが国における地層処分事業にかかわるこれまでの経緯（資料 p.1-1）

高レベル放射性廃棄物などの長寿命放射性廃棄物の最終処分の方法に関しては1970年代より各国で検討が進められ、OECD/NEA や IAEA などの国際機関においても意見交換がなされてきた。その結果、現在では、長寿命放射性廃棄物の最終処分の最も適切な方法は、地下深部の安定な岩盤に廃棄物を埋設する地層処分であるとの認識が国際社会で共有されている。

わが国では、核燃料サイクル開発機構（現 日本原子力研究開発機構）が1976年以来地層処分の研究開発を進めてきており、1999年には、その成果を取りまとめた「第2次取りまとめ」報告書<sup>1</sup>を公表した。原子力委員会は、この報告書を評価し、地層処分の実現に向けて政策提言を行った。政府は、この提言を受けて「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（以下、最終処分法という）を2000年に国会に提出、成立した。その結果、この法律に基づいて最終処分の実施主体である原子力発電環境整備機構（以下、NUMO という）が設立され、わが国における地層処分事業がスタートした。NUMO は2002年より全国の市町村を対象に地層処分施設の設置可能性調査を受け入れる区域の公募を開始し、国や電気事業者と連携して地層処分事業に関するさまざまな理解活動や広聴・広報活動を続けてきたが、未だ文献調査を開始することができていない。

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波の襲来によって、東京電力福島第一原子力発電所で過酷事故が発生し、大量の放射性物質が環境中に放出され、多くの人々が長期間にわたり避難を余儀なくされた。このことによって、原子力事業者に対する国民の信頼が失われ、わが国において安全な地層処分が実施できるとの主張に対しても各方面から疑問が呈された。

こうした状況を受けて、政府は、2013年に地層処分事業の進め方の基本方針について再検討するため、総合資源エネルギー調査会に放射性廃棄物ワーキンググループ（放射廃棄物 WG）<sup>2</sup>と地層処分技術ワーキンググループ（地層処分技術 WG）<sup>2</sup>を設置した。これらの審議会では、第2次取りまとめ以降の地球科学などに関する新知見を考慮に入れて地層処分の技術的信頼性に対する再評価を実施するとともに、最終処分地の選定作業の遅れの原因を分析し、放射性廃棄物の管理手段とその有力な方法である地層処分の取り組みの今後のあり方について議論を重ね、以下のことが合意された。

- ・ 火山・火成活動や断層活動などの天然現象の影響を受けにくく、地層処分に好ましい地質環境が長期間にわたって安定的に維持される場所を我が国においても選定できる見通しがあることを再確認した。

<sup>1</sup> 「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」という）

<sup>2</sup> 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会に設置されたワーキンググループ

- ・ 地層処分の取り組みを進めることは原子力発電の利益を享受した現世代の責任である。
- ・ 一方、その実施にあたっては可逆性・回収可能性を確保して将来世代に選択の余地を残すべきである。
- ・ 国、NUMO および関係研究機関は最終処分の技術的信頼性等に関して定期的な評価を行うべきである。
- ・ 国はより適性が高いと考えられる地域（科学的有望地）を示すべきである。

政府は、こうした審議会の意見を取り入れて、2015年5月に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」（以下、最終処分基本方針という）を改定した。

この最終処分基本方針を受け、地層処分技術WGにおいて、地球科学的な観点から「より適性の高いと考えられる地域」（科学的有望地）選定の要件・基準に関する検討が行われた。放射性廃棄物WGでは、科学的有望地を公表した後の国民や有望地に属する人々との対話の内容及びその進め方等について議論が継続されている。

#### **包括的技術報告書作成の背景**（資料 p.1-2）

政府におけるこれらの検討と並行して、NUMOが放射性廃棄物の地層処分を実現するという使命を達成するためには、社会から信頼される組織であること、調査を受け入れていただく地域（以下、候補サイトという）の方々との対話を重視すること、そして何より安全な処分を実現する技術力を強化することが必要であり、これらに必要な能力を強化する取り組みを開始した。技術力強化の取り組みに関しては、長期にわたる事業展開を見据えた技術開発と人材育成を内外の関連研究機関と連携しつつ、適切なマネジメントのもとで推進することとした。そのような成果を踏まえて、最新の科学技術的知見に基づき、安全な地層処分の実現性を示すことは、地層処分の技術的信頼性を高め、今後の事業を遂行する上で不可欠である。

#### **包括的技術報告書作成の目的**（資料 p.1-3～p.1-5）

本包括的技術報告書は、この取り組みの一環として作成するものであり、文献調査開始以降に整備するセーフティケースの雛型となることを目指している。本報告書では、「最新の科学的知見や技術開発成果に基づき、わが国における安全な地層処分の技術的な実現性を提示すること」を目的とする。

具体的には、以下の通りである。

- ① 最新の科学的知見等を踏まえ、地層処分という方法によって、事業期間中や閉鎖後長期の安全性が、わが国において確保できるかどうかをあらためて評価する。
- ② このため、
  - ・ 変動帯に位置するわが国で地層処分に適した地質環境を有する場所を選び、その特徴を把握するための調査・評価技術、

- ・ 地質環境の特徴を踏まえて処分場を設計し，建設・操業・閉鎖を安全に行うための工学的技術，
  - ・ 適切な地質環境に設計・建設された処分場が長期間にわたって安全を確保する機能を有しているかどうかを評価する技術
- が，事業を実施するうえで実用的なレベルで整っているかを確認する。
- ③ 以上を通じて今後取り組むべき技術課題を明らかにし，地層処分技術の信頼性をより高めるための技術開発計画の策定に資する。

## セッション（１）安全確保の基本的考え方

このセッションは、本報告書作成の背景と目的、ならびに事業を規定する各種の要件（放射性廃棄物の特性や法令等）に基づき、安全な地層処分を達成するための基本的な考え方を示すことを目的としている。

### 事業を規定する現段階の要件（資料 p.2-3～p.2-9）

地層処分が対象とする放射性廃棄物は、高レベル放射性廃棄物であるガラス固化体と TRU 廃棄物である。ガラス固化体の放射能は、時間とともに減衰するものの、長期間にわたって高い放射能と発熱量を有する。TRU 廃棄物は、ガラス固化体に比べると発熱量は小さいが、金属やモルタル、アスファルトなど、形態や特性が異なる廃棄物で構成される。そのため、これらの特徴を踏まえて４つのグループに分類する。

最終処分計画に基づき、処分するガラス固化体は 40,000 本、TRU 廃棄物の量は 19,000m<sup>3</sup> と想定する。TRU 廃棄物の処分に必要な地下施設の面積は、ガラス固化体に比べて 30 分の 1 程度であり、両者に共有できる施設も多いことから、本報告書ではこれらを併置処分する処分場を想定する。

### 安全確保の基本的考え方（資料 p.2-10～p.2-18）

地層処分の安全確保に向けて、処分場の閉鎖前においては、操業時に放射性物質を閉じ込め、放射線を遮蔽する機能、および労働災害を防止し良好な作業環境を維持する機能を有することが必要である。また処分場の閉鎖後長期においては、放射性廃棄物を人間社会と地表の環境から長期間にわたって隔離し、人間や環境に悪影響を与えないように閉じ込めておく機能を有することが必要である。このような安全機能を有する処分場を構築するために、地層処分に適した安定した地質環境を有するサイトを選定し、調査で把握した地質環境情報を踏まえて多重バリアシステムからなる処分場を設計するとともに、安全評価を行ってその安全性を確認する。また、長期にわたる事業を見据えて、これらを的確に実施するためのマネジメントが重要となる。このような地層処分の安全確保に向けた、サイト選定、処分場の設計、安全評価、およびマネジメントにかかわる基本的な考え方を提示する。

### セーフティケース作成のアプローチ（資料 p.2-19～p.2-27）

現段階では、候補サイトが特定されておらず、安全規制も定められていない。このような条件下でのセーフティケースとして、本報告書では以下に示すアプローチを取った。

- ・ わが国の全国規模での地質環境に関する最新の文献情報をもとに、サイト選定で想定される多様な地質環境を考慮して代表的な候補母岩を設定し、断層の存

在など、わが国の現実的な地質環境の特徴を反映するという点に留意しながら、地下深部の候補母岩に関する地質環境のモデルを提示する。

- ・ これら候補母岩の地質環境モデルに対して処分場を設計し、構築される地層処分システムの安全評価を行うという、一連の作業を試行することで、実践的な方法論が整備されていることを示す。
- ・ 処分場の設計では、「第2次取りまとめ」および「第2次 TRU レポート」<sup>3</sup>で提示された処分概念を出発点として、閉鎖前と閉鎖後長期の安全性、および建設・操業・閉鎖の工学的実現性を充足する処分場の設計の仕様を具体的に提示する。
- ・ 安全評価では、国際的な動向等を参照して安全性を判断するための評価の枠組みと基準を仮設定し、わが国の地質環境に対する処分場の閉鎖前および閉鎖後長期の安全性の見通しを提示する。
- ・ 以上の一連の試行を通じて、事業の信頼性向上に向けた今後の技術開発項目を明らかにする。

---

<sup>3</sup> 電事連・JNC（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.

## セッション（２）地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化

このセッションは、わが国の多様な地質環境を対象に、サイトを適切に選定するための調査の進め方や評価技術の体系的な整備に加え、処分場の実現可能性および安全確保の見通しを示すための検討作業の基盤となる候補母岩の現実的な地質環境モデルの提示により、サイト選定に係る技術基盤の着実な整備を示すことが目的である。

### 地層処分に適した地質環境の選定に係る技術基盤の整備（資料 p.3-4～p.3-22）

サイト選定においては、段階的に調査の詳細度を高めつつ、最終処分法に示された法定要件に基づき段階的に整備する考慮事項や科学的有望地の提示に係る要件・基準の検討結果などに照らして、地質環境の安全機能を損なう可能性のある自然現象による著しい影響を回避することとしている。その上で、影響を回避したサイトにおいて、施設の安全な操業の確保および長期間の隔離・閉じ込め機能の維持のために、地下深部の地質環境特性の時間的・空間的変遷を把握することにより、その変化の幅を考慮に入れても地層処分にとって好ましい特性が長期にわたり安定に維持される地質環境を特定する。

これまでに「第2次取りまとめ」以降の最新の科学的知見を収集・整理した上で、地質環境の安全機能に影響を及ぼす要因に対するサイト選定上の対応を網羅的に整理し、変動帯に位置するわが国においても広く分布すると考えられる「安定な地質環境」を適切に選定するための考え方や進め方などを提示した。さらに、国の基盤研究開発機関などによる最新の技術開発成果など踏まえつつ、それぞれの段階で適用する調査・評価技術に係る技術的知見や適用事例などを体系的に取りまとめ、知識基盤の整備を進めた。また、横須賀実証研究などを通じて、調査計画を立案し、実施するための技術的知識や経験の蓄積を図った。

### 候補母岩の現実的な地質環境モデルの構築（資料 p.3-23～p.3-84）

「第2次取りまとめ」以降の最新の科学的知見に基づき、サイト選定において想定される地質環境を、地層処分システムの安全評価の観点（地下水流動および物質移動）および処分場の設計の観点（建設可能性や容易性）から重要な水みち構造、透水係数、有効間隙率、熱伝導率、一軸圧縮強さなどに着目して類型化し、候補母岩として想定される岩種として深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類を取り上げた。

さらに、それぞれの候補母岩を対象に、サイト調査の各段階に対応させながら、質および量が異なる複数の分野にわたる地質環境情報を統合的に解釈し、地質環境モデルとして統合した。この地質環境モデルは、広域スケール（数十 km×数十 km）、処分場スケール（5 km×5 km）およびより緻密で写実的なパネルスケール（800 m×800 m）に対応した詳細度を有する地質構造／水理地質構造モデルとともに、処分場の設計で重要となる処分場スケールにおける岩盤の熱特性や力学特性、および安全評価で重要となる地下水の水質で構成するように設定した。



### セッション（３）処分場の設計と工学技術

このセッションは、「第２次取りまとめ」および「第２次 TRU レポート」で提示された処分場概念を出発点として、候補母岩として想定される三種類の岩種の地質環境モデル（深成岩，新第三紀堆積岩，先新第三紀堆積岩）を対象に，実用性のある技術に基づいて，所要の安全機能を有する処分場の設計が可能であることを示すことが目的である。

#### 設計の基本的考え方（資料 p.4-4～p.4-10）

地層処分事業においては，サイト選定の進展に応じて地質環境特性に関する情報が段階的に詳細化される。このため，処分場の候補母岩となる地質環境の特徴を考慮し，その時点の最新の科学技術的知見を反映して，処分場の設計を柔軟に行う準備を整えておくことが，処分場の実現可能性と安全確保の観点から重要である。そこで，閉鎖前および閉鎖後長期の安全性，工学的成立性，回収可能性，経済的合理性などの要求事項（設計因子）を満たすための設計要件を設定し，これを基軸とした体系的な設計の方法論を構築した。

#### 人工バリアの設計（資料 p.4-11～p.4-23）

高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリアは，ガラス固化体，オーバーパックと緩衝材により構成される。「第２次取りまとめ」以降に得られている炭素鋼の腐食試験，放射線影響評価，緩衝材の塩水条件における膨潤性などの最新のデータに基づいて，人工バリアの仕様が安全性に余裕をもって設定されていること，および，塩濃度などが異なる様々な地下水の環境にも適用可能であることなどを確認した。また，TRU 廃棄物処分場についても，操業中の閉じ込めを確保するため，廃棄体パッケージ容器の仕様をあらたに設定するとともに，緩衝材を設置する廃棄体グループを見直した。

これらの人工バリアを地下施設で施工する際の実用性を向上させる技術開発が「第２次取りまとめ」以降進展しており，例えば，高レベル放射性廃棄物処分場では，従来の縦置き・ブロック方式に加え，横置き・PEM 方式について操業方法を示した。横置き・PEM 方式は，地上施設にてオーバーパックと緩衝材を鋼製容器内に一体化してから地下に搬送する方式であるため，縦置き・ブロック方式に比べて，人工バリア構築の品質管理が容易であるとともに，処分坑道内における定置作業の効率化や坑道面積の縮小化が図れること，および坑道内の湧水や滴水などの環境に対する適用性が高いといった特徴があることを示した。一方で，PEM は重量物であることから，搬送・定置装置技術や，定置後の坑道と PEM 間の隙間の充填技術に関して，今後も技術開発により実用性を確認していく必要がある。

### 地下施設・地上施設の設計（資料 p.4-24～p.4-49）

処分場を設置する候補母岩として想定される三種類の岩種（深成岩，新第三紀堆積岩，先新第三紀堆積岩）を対象として，地下施設のレイアウト設計で考慮すべき地質構造や地質環境特性への実用的な対応方法の検討を行った。考慮すべき地質構造を，断層などの施設のレイアウトを決定する地質環境特性（Layout Determining Features: LDF）と，人工バリアの定置の可否の判断で考慮すべき地質環境特性（Emplacement Determining Features: EDF）に大別した。候補母岩の処分場スケールの地質環境モデルを対象として，処分区画の設置位置の設計では LDF を考慮して処分区画をレイアウトした。また，処分場の規模を決定するプロセスでは EDF を考慮して緩衝材のパイピングによる流出や，湧水対策の合理性の観点から許容可能な湧水量を算出し，定置の可否の判断方法を示すとともに，パネルスケールの地質環境モデルに基づいて処分孔や処分坑道の湧水量を見積もり，予備的に準備する処分区画の規模や位置を設定する過程を示した。

また，坑道シーリングとして，埋め戻し材，力学プラグ，止水プラグの設計要件を設定し要件に適合する仕様を具体化した。

さらに，連絡坑道の配置に関しては，建設・操業が同時並行で進められることを考慮して，換気経路や作業動線を建設区画と操業区画で独立性を確保しつつ，連絡坑道の延長距離が合理的になるように設定するなど，一般労働安全のための工学的対策の検討を充実させた。

地上施設については，作業の流れを考慮して設備の配置設計および放射線管理区域の区分設定を行い，遮蔽・閉じ込めの安全機能を備えた廃棄体受入・検査・封入施設の設計例を提示した。この際，津波対策にも配慮し，廃棄体の搬入経路として想定しているアクセス斜坑の入口を地下化するなどの対応方を事例的に示した。

### 回収可能性に適用する技術（資料 p.4-50～p.4-52）

回収可能性とは，埋設した廃棄体を再度取り出す能力のことであり，地層処分の意思決定の可逆性を確保する手段の一つである<sup>4</sup>。回収可能性を維持する際には，埋設した人工バリアに対してできる限り影響を与えないような手段を準備しておく必要がある。

このため，回収可能性を維持することに伴い，坑道内に流入する酸素がオーバーパックスの腐食を促進しないことや，湧水による緩衝材の流出を抑制することなどに配慮する必要がある。こうした観点からは，廃棄体の埋設後は，処分坑道は速やかに埋め戻し，プラグをした状態で回収可能性を維持することが望ましい。

このような状態を対象として，回収可能性が技術的に実現可能であることを実証試験や回収手順の検討により示した。竖置き方式においては，オーバーパックスの周囲に

<sup>4</sup> OECD/NEA(2011): Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel, NEA/RWM/R(2011)4.

設置した緩衝材を除去することの技術的難易度が比較的高い。そこで、緩衝材の除去方法としては、周辺の緩衝材を機械的に除去するオーバーコアリング方法や、高水圧で高速噴射した塩水により緩衝材を除去する方法の開発が進められている。これらの技術は、横置き方式にも適用可能である。また、連絡坑道を操業期間中開放した状態で維持することについては、既往のトンネルの維持管理の実績等に基づいて、少なくとも 100 年程度は維持が可能である。このように、操業期間中の回収可能性は確保可能であることを示した。

## セッション（４）閉鎖前の安全性の評価

このセッションは、処分場の設計の結果に基づいて、主に操業期間中における周辺公衆の放射線防護について評価した結果を示すことが目的である。

なお、評価においては、ガラス固化体を取り扱う施設としての類似性を考慮して、「廃棄物管理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」を参考に評価シナリオを作成し、周辺公衆に対する放射線防護について検討した。

### 平常状態<sup>5</sup>の評価（資料 p.5-9～p.5-13）

閉鎖前の処分施設は、遮蔽と閉じ込めの安全機能を有するように設計するが、事業所周辺の線量を ALARA<sup>6</sup>の考え方の下、合理的に達成できる範囲で、周辺への影響を可能な限り低減することが必要である。施設の設計においては、施設内の作業員の被ばくを低減するという観点から管理区域を設定したうえで必要となる遮蔽壁の厚さを設定した。この施設の仕様に基づいて、対象施設からの直接線およびスカイシャイン線による周辺公衆への影響を評価したところ、上述の規則で示されている線量目標値を下回る様に施設を設計することが可能であることを確認した。閉じ込めの機能については、放射性物質を収容する系統および機器は放射性物質の漏えいを防止した設計であること、放射性物質による汚染のおそれがある区域はその内部を負圧状態に維持すること、放射性廃棄物を搬送する設備は落下などの防止を考慮した設計であることなどを要件として設計することが可能である。

### 異常状態<sup>7</sup>の評価（資料 p.5-16～p.5-21）

あらかじめ準備する施設や放射性廃棄物の異常発生防止策や異常拡大防止策のすべてが無効化することを想定した評価を実施した。放射性廃棄物の地上施設で想定される異常状態を、上述の規則を参考に「放射性廃棄物の落下」、「施設の火災および爆発」、「その他機器などの破損、故障、誤作動または作業員の誤操作等」に分類し、イベントツリーを作成して評価シナリオを設定した。

例えば、地上施設内でガラス固化体およびオーバーパックを天井クレーンで吊り上げて搬送車両に積載する際、仮にさまざまな落下防止の対策が失敗し、落下することを想定して評価した。オーバーパックの吊り上げ最大高さを施設の設計仕様に基づき 9m として、弾塑性解析によりその影響を評価したところ、オーバーパックは若干の変形を生じるものの、貫通亀裂の発生には至らず、オーバーパックが破損することはないという結果が得られた。そのほか、評価シナリオに基づいて搬送車両の火災、TRU 廃棄物処

<sup>5</sup> 設計において通常の操業として想定する施設の状態

<sup>6</sup> “as low as reasonably achievable”の略語。国際放射線防護委員会が 1977 年勧告で示した放射線防護の基本的考え方を示す概念であり、「すべての被ばくは社会的、経済的要因を考慮に入れながら合理的に達成可能な限り低く抑えるべきである」という基本精神に則り被ばく線量を制限すること

<sup>7</sup> 火災や機器故障などの異常な状態が発生し、計画された操業状態（平常状態）から逸脱した状態

分の作業時の異常状態も検討したが、これまでのところ、放射性物質の漏えいにつながるような異常状態は見いだされていない。

#### **異常状態からの復旧策**（資料 p.5-22～p.5-23）

落下や火災などが発生後には、現場を復旧する必要がある。そこで、オーバーパックを遠隔操作により除去する工程を検討し、評価を実施した。その結果、放射性物質の漏えいに至るような異常状態は見いだされなかったが、万一、放射性物質の漏洩が検知された場合には、坑道換気を緊急換気設備に速やかに切り替え、施設の外部に放射性物質が飛散しないようにする対策を備えることが可能である。また、現場復旧においては作業員の放射線防護を第一として、適切に放射線被ばく管理を実施し、復旧作業を進める。こうした復旧対策を検討する上で、海外の復旧事例などを事例ベースとして整備しておくことが有効である。

## セッション（５）閉鎖後長期の安全性の評価

このセッションでは、処分場が人間とその環境に有意な放射線学的影響を与えないことを、候補サイトの地質環境とそれに応じて設計された処分場の設計を対象として評価によって確認することを目的としている。

地層処分の安全性を考慮すべき期間は、数万年以上といった極めて長期間に及ぶが、その間、処分場や周辺の地質環境で自然現象や熱、水理、力学、化学反応などのさまざまな事象の発生が想定される。そこで、事象の発生可能性や現象理解に対する不確実性などを考慮して、シナリオを作成し、数学モデルとデータを用いてその影響を予測的に評価することが国際的に認められた基本的なアプローチ法となっている。本報告書では、国際的な議論を踏まえ、各国で適用されているリスク論的アプローチに従い、シナリオの発生可能性を考慮して安全性を評価した。

自然過程を対象とした評価シナリオは、科学的知見に基づいて設定する発生可能性に応じて基本シナリオ、変動シナリオ、稀頻度事象シナリオに区分した。また、国際的な基準の考え方などを参考に区分ごとに比較の基準となるめやす線量を暫定的に設定した（p.6-4）。

評価シナリオの作成にあたっては、安全機能を指標として人工バリアおよび天然バリアの状態変化を関係づけることによって記述する方法を採用し、FEP<sup>8</sup>により、これを補完した。この方法により、シナリオの作成過程の説明性が向上した（p.6-7～p.6-9）。将来の人間活動の影響については、海外の事例などを参考に様式化による方法を適用して、人為過程を対象としたシナリオを作成した（p.6-54, p.6-55）。

核種移行解析では、三種類の候補母岩の地質構造の特徴、断層や割れ目の三次元分布や、処分場の設計仕様（縦置き・ブロック方式と横置き・PEM方式、TRU廃棄物処分における人工バリア構成など）の特徴をより現実的に評価するため、ニアフィールド周辺に対して、三次元の物質移行を取り扱うことのできる計算コードを開発した。なお、被ばく線量の計算には、三次元的な物質移行の結果を一次元核種移行解析で取り扱えるようにしたマルチチャンネルモデルを適用した。これらの手法の開発により、母岩や処分場の設計オプションを取り入れて安全評価を実施できるようになった（p.6-23～p.6-29）。

核種移行解析に用いる収着や拡散などの核種移行データの設定に必要な、地下水の化学組成は、候補母岩毎に設定した一般化した地下水モデルに基づいて設定した。核種移行データは、JAEA<sup>9</sup>と共同で開発した方法を適用し、最新のデータベースを参照して設定した。この際、試験データが十分に整備されていない核種については、化学的に類似な元素のデータなどを参考とした（p.6-14）。

各シナリオ区分に属するシナリオに対して、候補母岩と対応する設計仕様毎に核種移

<sup>8</sup> FEP: Feature Event Process の略。シナリオ評価で想定する事象の総称。

<sup>9</sup> 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

行解析を実施し、生活圏の評価を実施して被ばく線量を計算した結果、いずれもめやす線量を下回ることを確認した (p.6-33～p.6-44)。このことから、サイト選定で想定される母岩に対して構築された地層処分システムにより安全性を確保できる見通しを示すことができたと考えられる。

## セッション（6）わが国における地層処分の技術的実現性

このセッションでは、ここまでのセッションにおいて示した安全確保の考え方および検討成果に基づいて、サイト選定前の段階における、わが国の多様な地質環境を対象とした安全な地層処分の技術的実現性について総括する。

地層処分の安全確保の基本的な考え方は、地層処分に適した地質環境を有する地下深部の母岩を選定し、母岩の特性に応じて所要の安全機能を有する処分場を設計することである。さらに、閉鎖後の長期において、処分場と周辺の母岩で発生する様々な事象やその不確実性を考慮して作成するシナリオに基づいた評価を実施し、安全性の判断材料とする（資料 p.7-3, p.7-9）。

この考え方に基づいて、段階的な地質環境の調査・評価を進め、候補サイトから火山活動や断層活動などの著しい影響が想定される場所を回避することで、地層処分に適した地質環境を選定する。地質環境の調査・評価技術については、深地層の研究施設計画に基づく調査および建設などを通じて、実績および経験が蓄積されてきている（資料 p.7-8）。

人工バリアの製作・施工技術は、実規模レベルでの実証試験により実用性が確認されつつあり、また、処分場の建設技術は、国内外の地下研究施設や様々な地下構造物の建設を通じて、その実用性が確認されている。これらを活用することで、将来、処分場を建設・操業することは可能である（資料 p.7-8）。

地質環境モデルの構築、処分場の設計および安全評価の試行では、対象とした母岩の特徴に応じて、水理解析モデルや工学的対策、さらには核種移行解析データの設定を工夫して実施した。そこで、これらの経験に基づいて、今後、同種の母岩が対象となった場合の安全確保の考え方をまとめた。（資料 p.7-10～p.7-13）。

なお、本報告書の作成を通じて抽出した、地層処分の信頼性の向上に必要な技術開発項目については、今後、関係機関との役割分担などを調整しながら、中期技術開発計画に反映する（資料 p.7-14～p.7-16）。



## 結言（資料 p.7-17）

安全な地層処分の実現性について、セーフティケースの作成を通じて検討した結果を以下に示す。

- ・ 放射性廃棄物を長期にわたって隔離し閉じ込めるための、処分場を設置する地質環境に必要な条件と望ましい条件が明確になっており、これらの条件に応じた適切な地質環境を選定する技術を整備している。
- ・ わが国で地層処分の対象となり得る代表的な三種類の候補母岩について、地下深部で得られている断層の存在状況等の地質環境特性を反映し地質環境モデルを作成する技術を有し、このモデルに応じて要求機能を満足する処分場を設計することが可能となっている。報告書で示した結果は、設計および建設・操業・閉鎖に関する技術開発成果に基づいており、実用性を有する。
- ・ 地質環境や設計した処分場の仕様の特徴を現実的に取り扱って、閉鎖前及び閉鎖後長期にわたる安全評価を行うことが可能となっている。その結果から、国際機関や諸外国の規制に示された、あるいは国内類似施設に関する安全基準等に照らして、安全を確保できる見通しが得られている。
- ・ 処分場の設計・建設・操業に関する安全評価技術の信頼性や、わが国の地質環境に対する適応力を高めるため、今後、取り組む必要がある技術開発項目を抽出した。また、品質保証、知識管理、人材育成に適切に取り組む必要があり、そのための基盤を整えつつある。

以上のことから、わが国の地質環境において高レベル放射性廃棄物および TRU 廃棄物の安全な地層処分ができる見通しが一段と高まった。また、今後文献調査等を受け入れていただいた地域において、その特性を踏まえて処分場の設置に適した場所を選び、安全な処分を実現するために、より信頼性の高い技術を整備しつつ、段階的に事業を進めていくための一連の準備ができていると結論する。

## 参考

包括的技術報告書の検討成果に関して、これまで以下の対外発表を実施（あるいは予定）しています。

- (1) 米国原子力学会, 2015 International High-Level Radioactive Waste Management Conference (2015年4月, チャールストン)

タイトル	著者
Development of the NUMO Safety Case -Overview	藤原啓司, 出口朗, 植田浩義, ○藤山哲雄, 梅木博之
Development of the NUMO Safety Case -Geological characterisation and synthesis	○太田久仁雄, 後藤淳一, 吉村公孝, 守屋俊文, 國丸貴紀, 武田精悦
Development of the NUMO Safety Case -Repository design and engineering	○窪田茂, 藤崎淳, 鈴木覚, 出口朗
Development of the NUMO Safety Case -Safety assessment	○稲垣学, 黒澤進, 澁谷早苗, 石黒勝彦

- (2) 2015 IGSC Scenario Development Workshop (2015年6月, イシー・レ・ムリノー)

タイトル	著者
Scenario development for the risk-informed safety assessment of geological disposal	A. Makiuchi, K. Ishida, S. Kurosawa, M. Inagaki, K. Ishiguro, H. Umeki, T.Ebashi, K. Wakasugi, H. Makino, and M. Shibata

- (3) NUMO 技術開発成果報告会 2015 (2015年6月, 東京)

タイトル	著者
包括的技術報告書作成の背景・目的	藤原啓司
地層処分に適した地質環境の把握とそのモデル化	吉村公孝
処分場の設計と建設・操業・閉鎖技術	窪田茂
処分場の安全性の評価	稲垣学
今後の進め方	出口朗

- (4) 日本原子力学会秋の年会 (2015年9月, 静岡)

タイトル	著者
NUMO セーフティケースにおける候補母岩のモデル化 (1) 基本的考え方および候補母岩の分類	○太田久仁雄, 國丸貴紀
NUMO セーフティケースにおける候補母岩のモデル化 (2) 花崗岩類を対象とした現実的な地質構造・水理地質構造のモデル化	○田中達也, 戸田亜希子, プライネス・パトリック, 橋本秀爾, 太田久仁雄, 國丸貴紀
NUMO セーフティケースにおける候補母岩のモデル化 (3) 新第三紀堆積岩類を対象とした現実的な地質構造・水理地質構造のモデル化	○戸谷成寿, 田中達也, 戸田亜希子, プライネス・パトリック, 太田久仁雄, 國丸貴紀

## (5) 地質学会 (2015年9月, 長野)

タイトル	著者
地層処分の観点からのわが国の深部地質環境の分類 - NUMO セーフティケースにおける候補母岩の設定	○太田久仁雄, 國丸貴紀
わが国の新第三紀堆積岩類を対象とした地質構造モデルの構築 - NUMO セーフティケースにおける候補母岩のモデル化	○戸田亜希子, 田中達也, プライネス・パトリック, 戸谷成寿, 太田久仁雄, 國丸貴紀

## (6) GLOBAL 2015 (2015年9月, パリ)

タイトル	著者
The NUMO 2015 Safety Case	○T. Fujiyama, H. Fujihara, A. Deguchi, H. Umeki
Assuring Operational Safety of a Japanese Geological Repository	○S. Suzuki, S. Kubota, H. Hyodo, H. Fujihara
Challenges for the next generation of radionuclide transport models	○K. Ishida, S. Shibutani, M. Inagaki, K. Ishiguro, H. Umeki
Advances in scenario development for a deep geological repository in Japan	○S. Kurosawa, H. Takase, M. Inagaki, K. Ishida, A. Makiuchi, K. Ishiguro, H. Umeki

## (7) 日本原子力学会春の年会 (2016年3月, 仙台)

タイトル	著者
NUMO セーフティケースの開発(1) 基本戦略	○藤山哲雄, 鈴木覚, 出口朗, 梅木博之
NUMO セーフティケースの開発(2) 適切なサイトの選定とモデル化	○太田久仁雄, 後藤淳一, 國丸貴紀, 三枝博光, 山田彩織
NUMO セーフティケースの開発(3) 処分場の設計と工学技術	○鈴木覚, 藤崎淳, 山本陽一, 窪田茂
NUMO セーフティケースの開発(4) 閉鎖前の安全評価	○山品和久, 鈴木覚, 藤崎淳, 窪田茂
NUMO セーフティケースの開発(5) 閉鎖後長期の安全評価	○藤崎淳, 黒澤進, 稲垣学, 澁谷早苗, 石田圭輔, 藤本秋恵, 浜本貴史, 石黒勝彦, 塚本正樹
NUMO セーフティケースの開発(6) FEP データベースの開発と安全評価におけるデータセット	○黒澤進, 浜本貴史, 石田圭輔, 藤本秋恵, 稲垣学, 澁谷早苗, 藤崎淳, 石黒勝彦, 塚本正樹
NUMO セーフティケースにおける自然現象に関するシナリオの構築(1) 将来における火山活動の発生可能性とその影響	○山田彩織, 太田久仁雄, 國丸貴紀, 石田圭輔
NUMO セーフティケースにおける自然現象に関するシナリオの構築(2) 将来における断層活動の発生可能性とその影響	○國丸貴紀, 太田久仁雄, 山田彩織, 石田圭輔

NUMO セーフティケースにおける自然現象に関するシナリオの構築(3) 火山活動および断層活動に係るシナリオの構築と評価	○石田圭輔, 國丸貴紀, 山田彩織, 太田久仁雄
NUMO セーフティケースにおける人間侵入シナリオの評価	○藤本秋恵, 石田圭輔, 藤崎淳, 稲垣学

(8) 第26回ゴールドシュミット国際会議 (2016年6月, 神奈川)

タイトル	著者
The use of natural system evidence in NUMO's pre-selection site-specific Safety Case	○Kunio Ota, Saori Yamada, Tetsuo Fujiyama, W.Russell Alexander

(9) 日本原子力学会バックエンド夏期セミナー (2016年8月, 鹿児島)

タイトル	著者
NUMO セーフティケースの全体概要	出口朗
閉鎖前の安全性	鈴木覚
閉鎖後長期の安全性	藤山哲雄
信頼性向上に向けた今後の取り組み	藤山哲雄

(10) 日本原子力学会秋の年会総合講演 (2016年9月, 久留米)

タイトル	著者
セーフティケース構築の考え方とアプローチ	藤山哲雄
適切なサイトの選定と地質環境モデルの構築	太田久仁雄
地層処分システムの設計と工学的実現性	鈴木覚
地層処分システムの安全性の評価	藤崎淳

(11) 土木学会全国大会 (2016年9月, 仙台)

タイトル	著者
地層処分場 地下施設の換気システムの成立性検討 (その1 全体概要)	○窪田茂, 勝又尚貴, 野尻慶介, 矢萩良二, 竹内伸光, 戸栗智仁
地層処分場 地下施設の換気システムの成立性検討 (その2 通気網解析)	○勝又尚貴, 野尻慶介, 窪田茂, 矢萩良二, 戸栗智仁
地層処分場 地下施設の換気システムの成立性検討 (その3 温熱対策)	○矢萩良二, 戸栗智仁, 勝又尚貴, 野尻慶介, 窪田茂
パイピングによる緩衝材の流出現象を考慮した高レベル放射性廃棄物定置率の検討	○後藤考裕, 鈴木覚, 窪田茂, 田中達也, 橋本秀爾
地層処分における止水プラグ設計の考え方	○山本陽一, 窪田茂, 鈴木覚

(12) 地質学会 (2016年9月, 東京)

タイトル	著者
わが国の先新第三紀付加体堆積岩類を対象とした地質環境モデルの構築- NUMO セーフティケースにおける候補母岩のモデル化-	○太田久仁雄, 國丸貴紀, 三枝博光, 山田彩織, 戸田亜希子, 戸谷成寿, 田中達也, 橋本秀爾
NUMO セーフティケースにおける将来の自然現象の発生可能性とその影響の評価の考え方	○山田彩織, 太田久仁雄, 國丸貴紀, 石田圭輔

( 1 3 ) 2nd Conference on Key Topics in Deep Geological Disposal, Challenges of a Site Selection Process: Society – Procedures – Safety (2016年9月, ケルン)

タイトル	著者
Site characterisation and synthesis into SDMs- Development of NUMO's pre-selection site-specific safety case (NUMO Safety Case) -	○ Kunio Ota, Takanori Kunimaru, Hiromitsu Saegsa, Saori Yamada

( 1 4 ) IAEA, International Conference on the Safety of Radioactive Waste Management (CN-242) (2016年11月, ウイーン)

タイトル	著者
Assessment of pre- and post-closure safety in the NUMO safety case for a geological repository	S. Suzuki, K. Fujisaki, S. Kurosawa, K. Yamashina, A. Deguchi, H. Umeki
Development of the NUMO pre-selection, site-specific safety case	T. Fujiyama, S. Suzuki, A. Deguchi, H. Umeki