

地層処分に係る安全確保の考え方

三枝博光*1

地層処分の対象とする放射性廃棄物は、原子力発電事業に伴って発生する使用済燃料の再処理等を行った後に生じる高レベル放射性廃棄物や、低レベル放射性廃棄物の中の半減期の長い核種を一定量以上含む廃棄物である。これらの放射性廃棄物は、地下 300m より深い安定な岩盤に地層処分を行うこととなっている。本報では、地層処分に係る安全確保の考え方について、高レベル放射性廃棄物を中心に概説する。

Keywords: 地層処分, 高レベル放射性廃棄物, 多重バリアシステム, リスク要因, 処分地選定調査

In Japan, geological disposal is the final disposal method of high-level radioactive waste and some kind of low-level radioactive wastes containing over a certain amount of long-lived nuclides, most of which are generated by reprocessing of spent nuclear fuel from commercial power reactors. These will be disposed of in a stable geological environment at depth greater than 300meters below ground surface. This paper outlines concept and strategy for ensuring the safe geological disposal.

Keywords: geological disposal, high-level radioactive waste, multibarrier system, risk factor, site investigations

1 地層処分対象となる放射性廃棄物

わが国では、放射性廃棄物のうち、原子力発電で使われた燃料（使用済燃料）の再処理過程の分離に残る放射能レベルの高い廃液（高レベル放射性廃液）をガラス固化したものを高レベル放射性廃棄物といい、これ以外の放射性廃棄物は、総じて低レベル放射性廃棄物と呼ばれている[1]。高レベル放射性廃液を取り扱いやすく安定した形態にするため、ガラス原料とともに高温で融かし、ステンレス製容器に入れて固めたものが「ガラス固化体」である。

原子燃料サイクルの過程では、再処理工場などの操作中や解体時に、高レベル放射性廃棄物に加えて、それと比較して放射能が低く発熱が小さい様々な放射性廃棄物が発生する。これを TRU 廃棄物と呼んでいる。TRU 廃棄物の一部は、半減期の長い核種を一定量以上含むため、放射能が十分に低くなるまで長期間にわたって隔離する必要がある。

これらガラス固化体および半減期の長い核種を一定量以上含む一部の低レベル放射性廃棄物は、2000 年に制定され、2007 年に改正された「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）の中で、地層処分対象となる放射性廃棄物として規定されている。

なお、本報では、ガラス固化体を「高レベル放射性廃棄物」、地層処分の対象となる低レベル放射性廃棄物を「地層処分相当低レベル放射性廃棄物」と称する。

2 地層処分の概念

地層処分は、長期的に危険性が残存する高レベル放射性廃棄物および地層処分相当低レベル放射性廃棄物を、長期間にわたり人間の生活環境から安全に隔離できる最適な方法として選択されたものである（例えば[2]）。地層処分では、これらの廃棄物を人間の生活環境から物理的に「隔離」とするとともに、長期にわたって廃棄物からの放射性物質の放出や分散を防止あるいは抑制し、処分場周辺に「閉じ込

め」しておくために、地下深部の安定な岩盤に埋設することが重要である。ここで廃棄体や人工バリアを設置する地下深部は、一般的に岩盤が稠密であるため透水性が小さいことや、地形の影響を受けにくく動水勾配が小さいことから、地表付近に比べて地下水の流れは極めて緩慢である。また、地下水と岩石の反応や微生物の活動等により酸素を消費しているため酸素がほとんどない還元環境であることから、腐食や溶解といった物質の変化が起こりにくいという特徴を有している。さらに、地下深部は、人間の活動や、台風や洪水、地すべりといった自然災害等の地上で遭遇する様々な自然現象の影響を受けにくいという特徴を有する。

安定した地下深部の岩盤という天然バリアに加えて、工学的対策である人工バリアを組み合わせることによって多重バリアシステム（図 1）を構成し、廃棄体を埋設する。この多重システムは、国際的に共通した安全確保の考え方である。

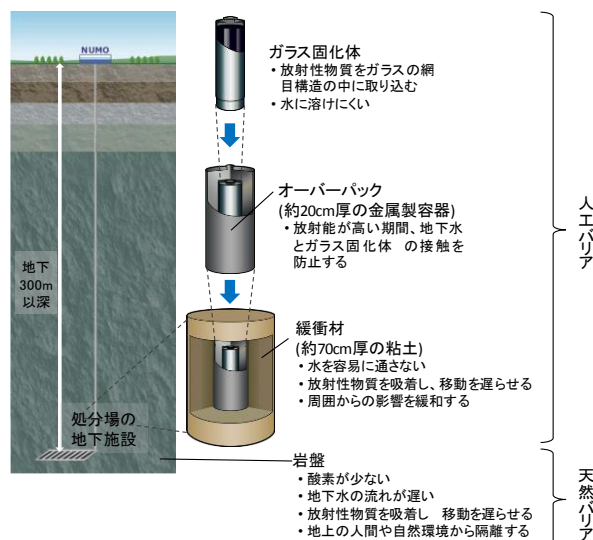


図 1 高レベル放射性廃棄物処分ににかかわる多重バリアシステム([3]を編集)

高レベル放射性廃棄物の人工バリアは、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敷設することによって構築することを想定している。

オーバーパックは、約 20cm の厚さを持つ炭素鋼製の容

Concept for ensuring the safe geological disposal by Hiromitsu SAEGUSA
(hsaegusa@numo.or.jp)

*1 原子力発電環境整備機構 技術部

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)

〒108-0014 東京都港区芝 4-1-23 三田 NN ビル 2 階

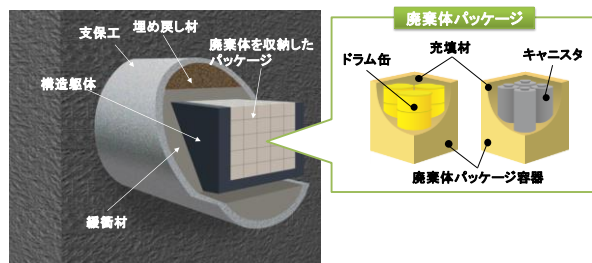
本稿は、日本原子力学会バックエンド部会 2017 年度バックエンド週末基礎講座における講演内容に加筆したものである。

器が考えられている。ガラス固化体を溶接封入したオーバーパックは、ガラス固化体の放射能や発熱量がある程度減衰するまでの（少なくとも1,000年間）、地下水とガラス固化体との接触を防止し、物理的に閉じ込めるものである。

緩衝材は、ベントナイトを主成分とする材料が考えられている。緩衝材は、オーバーパックを物理的に保護するとともに、オーバーパックの閉じ込め機能が失われた後も地下水の流れを抑制し、放射性物質を収着することで、放射性物質の移行を抑制することが期待されている。

これらに加えて、ガラス固化体中の放射性物質はガラスの網目構造の中に取り込まれているとともに、ガラス自体が溶けにくいという特性を有しており、地下水がガラス固化体と接触しても、放射性物質の地下水への浸出を抑制することが特徴である。なお、ガラス固化体が溶けきるまでの期間は約7万年以上と見積もられている[4]。

一方、地層処分相当低レベル放射性廃棄物は、高レベル放射性廃棄物と比べて放射能が低く発熱が小さいことから、高レベル放射性廃棄物のように1本ずつオーバーパックのような容器には収納せず、廃棄物を封入したキャニスタやドラム缶を金属製の廃棄体パッケージ容器にまとめて収納することを想定している（図2）。廃棄体を収納したパッケージ内の隙間は充填材で埋める。さらに、半減期が長く人工バリアや天然バリアへの収着性が低い核種を多く含む廃棄体については、閉じ込め性を高めるためにパッケージの外側を緩衝材で囲むことを考えている。これら充填材や緩衝材によって、地層処分相当低レベル放射性廃棄物の人工バリアを構成する。



※廃棄体定置のための構造躯体や処分のための坑道を構成する支保工なども表示

図2 地層処分相当低レベル放射性廃棄物の人工バリアの例([3]を編集)

3 安全確保の基本的な考え方

地層処分においては、人と環境に対して影響を与える可能性のある様々なリスク要因を抽出し、その要因に応じた対策を講じるとともに、その対策の効果を確認することを安全確保の基本的な考え方としている（図3）。

処分地選定段階においては、文献調査、概要調査、精密調査の各段階で、『「立地による対応」と「設計による対応」の2つの対応策によって、安全が確保できるかを確認する（「安全性の確認」』という作業を、繰り返し実施する。その検討結果はセーフティケースレポート（安全説明書）として取りまとめるとともに、安全性が確認できれば次段階の調査地区の選定や、調査計画の立案を行い次段階に移行し、調査範囲を絞り込んだ上でより詳細な調査を実施する（図4）。

この際、「立地による対応」あるいは「設計による対応」を見直したとしても安全が確保できなければ、その場所は地層処分に不適と判断する。

なお、文献調査、概要調査、精密調査の各段階で実施すべき調査と、次の段階へ進むために満足すべき要件は、最終処分法によって定められている。各段階における調査の進め方の概要を以下に示す。

① 文献調査段階

調査対象区域に関する、公開されている地質図などの文献を調査して、火山、活断層、隆起・侵食などの「地層の著しい変動」を避ける。また、将来の人間侵入の動機となる可能性がある鉱物資源や地下施設建設が困難となる第四紀末固結堆積物も避ける。

② 概要調査段階

地上からの物理探査やボーリング調査などにより、火山や活断層などに加えて、坑道の掘削に支障がある場所や、岩盤中の破碎帯や地下水の流れが地下施設に著しい悪影響を及ぼすおそれが高い場所を避ける。

③ 精密調査段階

地下に建設する調査坑道を使って岩盤の物理的特性（岩石の強度など）や地下水の化学的性質（アルカリ性、酸性など）などを調べ、岩盤の特性や地下水の性質が地層処分に適している場所を選ぶ。

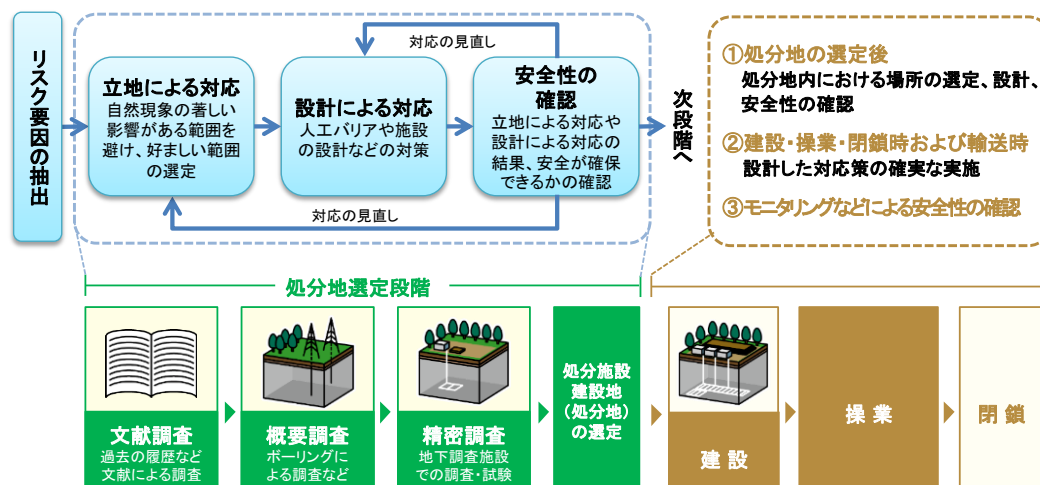


図3 リスク要因への対応の考え方([3]を編集)

地層処分に係る安全確保の考え方

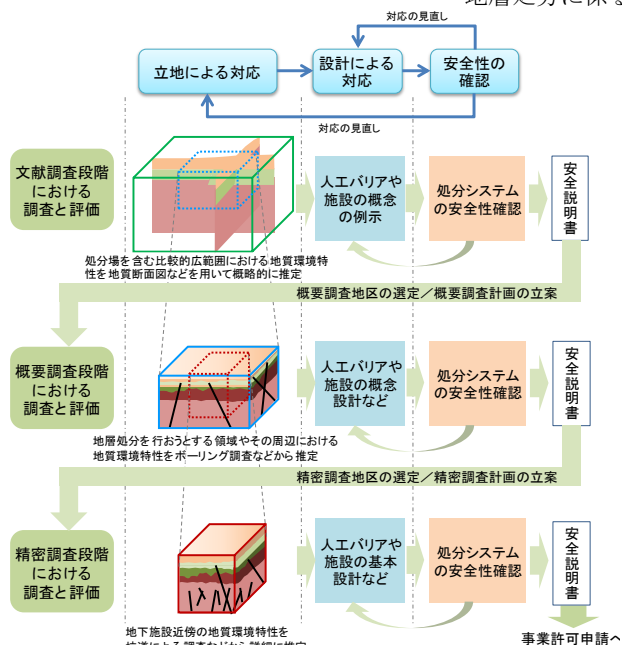


図4 段階的な処分地選定のための調査・評価
([3]を編集)

2017年7月28日に国により提示された、図5に示す科学的特性マップ[5]は、法律に基づく処分地選定調査の前段階において、全国各地の地下深部などの科学的な特性を客観的な情報として提供するものである。このマップは、地域が処分地として相応しい科学的特性を有するかどうかを確定的に示すものではないため、処分地を選定するまでには、科学的特性マップには含まれていない要素も含めて、法律に基づき段階的に調査・評価していく。

また、処分地選定後は、処分地内におけるより好ましい範囲の選定や、設計、安全性の確認を実施する。さらに、

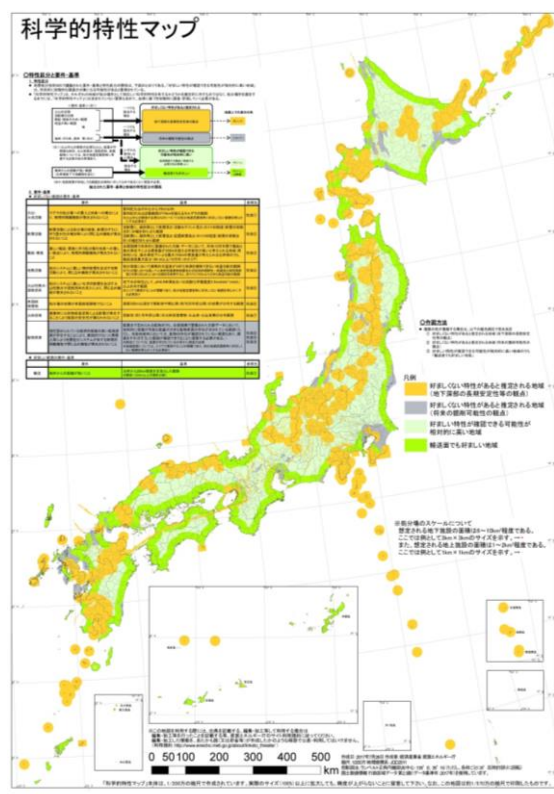


図5 科学的特性マップ[5]

建設・操業・閉鎖時および輸送時には、設計した対応策を確実に実施するとともに、モニタリングなどにより安全性を確認する。

4 考慮すべきリスク要因とその対応

地層処分に係る安全性に対して考慮すべきリスク要因とその対応について、廃棄体埋設後、長期間にわたって考慮すべきものと、建設・操業時・輸送時に考慮すべきものに大別して説明する。

4.1 廃棄体埋設後、長期間にわたって考慮すべきリスク要因とその対応

4.1.1 火山・火成活動など

(1) 考慮すべきリスク要因

- ・ マグマの処分場への貫入による隔離機能の喪失
- ・ 高い地温や、熱水や酸性地下水などの影響による閉じ込め機能の喪失
- ・ 深部流体の流入などともなう熱水や酸性地下水などの影響による閉じ込め機能の喪失

(2) リスク要因への対応

地表踏査や地下調査などを行い、影響が著しい場所や将来の影響範囲を回避する。

図6に火山の中心と側火山等の関係の例と主な調査項目を示す。地表踏査では、火山噴出物の分布や年代などを調査し、過去の火山活動の規模や時期などを把握する。また、火山周りの側火山、岩脈などの分布範囲から過去・現在のマグマ活動の範囲を概略的に把握する。

一方、地下調査では、電磁探査や地震波探査により、岩盤などの硬さや電気抵抗の違いを利用して、マグマの分布などを推定する。また、ボーリング調査による地下の温度測定、および採取した火山岩の年代測定などを実施する。さらに、地下水に含まれるガスの成分により、マグマの存在の可能性を調査する。

深部流体の流入については、地下水の化学成分の調査や、物理探査、ボーリング調査などの地下の状況の調査を通じて、その分布を把握し、著しい影響が考えられる範囲を回避する。

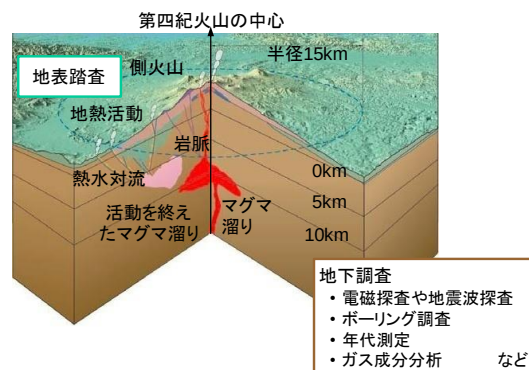


図6 火山の中心と側火山等の関係の例と主な調査項目(複成火山の場合) ([3]を編集)

4.1.2 断層活動

(1) 考慮すべきリスク要因

- ・断層のずれに伴う人工バリアを構成するオーバーパックなどの破壊、断層とその周辺の透水性の増加などによる閉じ込め機能の喪失。

(2) リスク要因への対応

地表踏査やトレンチ調査、物理探査、ボーリング調査などを行い、断層活動（断層のずれ）の影響が著しい場所を回避する。

図7に活断層の概要と主な調査項目を示す。これらの調査は、①断層の位置の把握、②断層面周辺の破碎帯（断層破碎帯）などの性状の把握、③断層の過去の活動時期の推定、を目的として実施する。また、過去の活動の傾向を把握し、将来、断層が伸展したり、分岐するような場所を推定する。さらに、断層面やその周りの破碎帯などの透水性などを把握する。

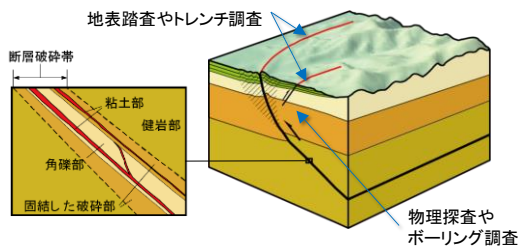


図7 活断層の概要と主な調査項目〔3〕を編集

4.1.3 隆起・侵食

(1) 考慮すべきリスク要因

- ・地下深部に設置した地下施設が岩盤と一緒に隆起したり、地表面が侵食されることによって徐々に人間の生活環境と廃棄物との距離が接近したりすることによる隔離機能の喪失

(2) リスク要因への対応

地表踏査などを実施し、隆起・侵食の影響が著しい場所を回避する。

地表踏査では、段丘の地層中に堆積した過去の火山灰などにより段丘の形成時期を調べ、段丘の標高と合わせて、過去の隆起の速さを推定する。図8に海岸付近における隆起・侵食の概念図を示す。

侵食については、例えば、最近もっとも海面が低下した時の侵食の深さを、その時期から堆積した沖積層の基底の深度から推定する。

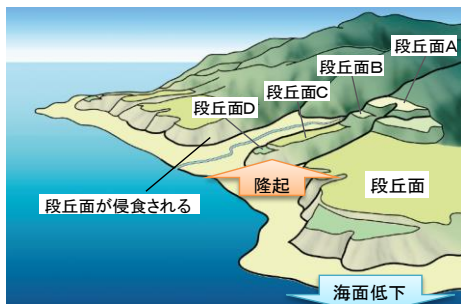


図8 海岸付近における隆起・侵食の概念図〔3〕

4.1.4 鉱物資源

(1) 考慮すべきリスク要因

- ・鉱物資源の探査・採掘などにもなう廃棄物と人間との接近による隔離機能の喪失

(2) リスク要因への対応

文献調査やそれ以降の現地調査結果に基づき、鉱物資源の採掘などによる廃棄物と人間とが接近するおそれがある場所として、経済的に価値の高い鉱物資源が存在する場所を回避する。

具体的には、文献調査では、鉱業法第3条第1項の鉱物を対象に検討するとともに、採掘権の設定の有無、品位、可採量などを調査する。

4.1.5 地質環境特性

(1) 考慮すべきリスク要因

- ・好ましい地質環境特性でない場合による、天然バリアや人工バリアの閉じ込め機能への影響

(2) リスク要因への対応

段階的に地下深部の地質環境特性を把握し、地下施設の配置や人工バリアの仕様などを検討する。

地質環境特性に係る調査については、好ましい地質環境特性が長期にわたり安定に維持される地質環境を適切に選定することが重要である。なお、天然バリアおよび人工バリアに対する影響の観点から「好ましい地質環境特性」とは以下のとおりである。

① 熱環境（T）

地温が 100℃を大きく超える期間が長期にわたり継続し、緩衝材の熱変質（イライト化）による機能喪失を招かないようにするため、「地温が低い」こと

② 水理場（H）

地下水流動に伴う放射性核種の移行時間を増大させ移行率を低減させるため、動水勾配が小さいまたは岩盤の透水性が低いことにより「地下水流動が緩慢である」こと

③ 力学場（M）

オーバーパックの破損を招かないようにするため、圧縮強度や弾性率が大きく、クリープ変形等が小さいことにより「岩盤の変形が小さい」こと

④ 化学場（C）

ガラスの溶解、オーバーパックの局部腐食および不動態化、緩衝材の変質、緩衝材および岩盤の収着能の低下、放射性核種の溶解度の上昇を抑制するため、地下水は「高 pH あるいは低 pH ではない」、「酸性性雰囲気ではない」、「炭酸化学種濃度が高くない」こと

調査によって把握する地質環境特性を踏まえ、断層や亀裂から離すなどの対策を講じて地下施設の配置を検討するとともに、人工バリアの仕様などを検討する。例えば、高透水性の断層破碎帯が分布する場合は、適切な隔離距離を設けて処分パネル（図9参照）を配置したり、廃棄体を埋設するには好ましくない場所が局所的に存在する場合は、処分孔を設置しないなどの対策を検討する。また、人工バリアは、必要な機能が発揮できるように、材料や寸法、形状などを検討する。

最終的には、処分場の地下施設の位置や深度、廃棄体間の距離、人工バリアの仕様などは、様々な観点から総合的に検討して判断する。地下施設のイメージを図9に示す。

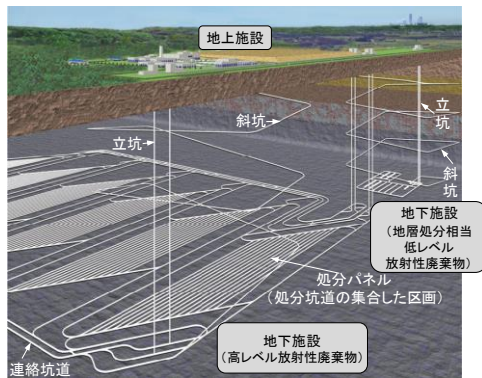


図9 地下施設のイメージ([3]を編集)

4.1.6 安全性の確認

リスク要因を抽出し、それにより人間の生活環境に与える影響が、4.1.1～4.1.5項で述べた、立地や設計での対応によって十分小さくなるかどうかを図10に示す手順および以下の考え方に基づき評価する。

- ① 解析により処分システムの性能を把握し、その安全性を確認する（図11）。
- ② 安全性に及ぼす影響が大きい項目を抽出し、地下施設の配置などの設計に反映し、その結果を安全基準と比較することで、安全性を確認する。この手順を繰り返すことで、リスクをできる限り最小化を図る。
- ③ 安全性を確認した結果、安全基準を満たさなければ、その場所は地層処分に不適と判断する。

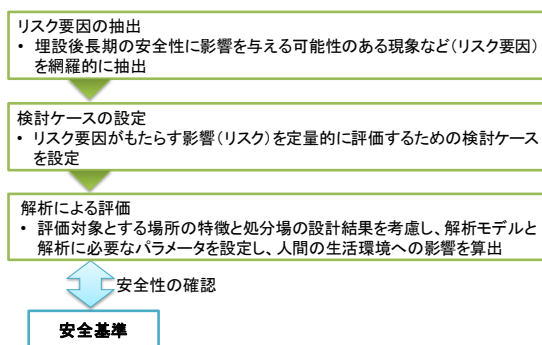


図10 安全性の確認の手順([3]を編集)

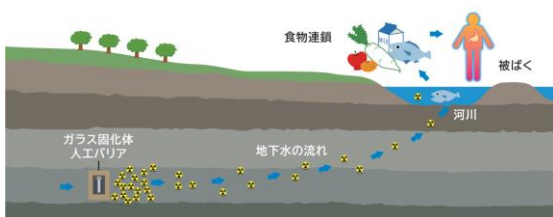


図11 地下水により放射性物質が地表まで運ばれる安全評価用のモデルのイメージ([3])

4.2 建設・操業時・輸送時に考慮すべきリスク要因とその対応

4.2.1 岩盤の性質など

(1) 考慮すべきリスク要因

- ・湧水や坑道崩落、作業員の作業環境の悪化などによる作業員の安全性への影響

(2) リスク要因への対応

地下施設の設置場所の選定や地下深部の特性に応じた坑道設計・施工を行う。

具体的には、未固結堆積物や、地熱・温泉、膨張性地山などや、湧水、有害ガスがある場所は、掘削した坑道が崩落するおそれや作業員の作業環境を悪化させる可能性があると考えられる。よって、これらを考慮して以下の対応を講じる。

- ・地下施設を設置しようとする深度に未固結堆積物が存在する場所を回避
- ・建設前と建設中に十分に岩盤の水理特性などを調査し、湧水を抑制するためのグラウトの施工など、事象に応じた対策を実施する。
- ・地下施設の建設や操業に対して影響の程度が大きい場合は、その要因となる地質構造などから離して坑道を設置
- ・地下深部の地圧に対して、支保の施工などにより、坑道の崩落防止

4.2.2 自然現象や人為的な現象

(1) 考慮すべきリスク要因

- ・地震、津波、火山などの自然現象や、近隣工場の火災などの人的な現象による施設の損傷

(2) リスク要因への対応

日本原燃(株) 高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター(青森県六ヶ所村)などの既存の原子力施設に対しては規制基準が定められており、その実績などを参照して地震や津波などの対応を検討する。具体的には、以下のとおり。

- ・廃棄物を受入れて取り扱う施設など、放射性物質を扱う重要な施設は、堅固な支持地盤に設置
- ・処分地で考えられる最大級の地震動や津波の規模を設定し、それに耐えることができる施設を設計（図12）
- ・地震・津波以外にも、火山などの自然現象による影響や、近隣工場の火災などの人的な現象による影響などを考慮
- ・施設の設計や配置などにより対応できない場合は避け、対応できる場合はその対策を実施

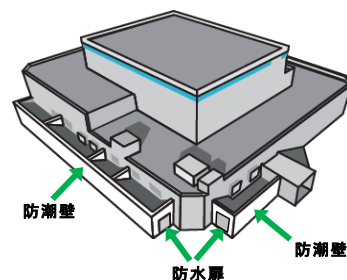


図12 津波時の地上施設への浸水防止策([6]を編集)

4.2.3 廃棄体からの放射線

(1) 考慮すべきリスク要因

- ・廃棄体からの放射線が適切に管理されないことや、停電などの事故による設備の機能低下による近隣の方々や作業員への放射線の影響

(2) リスク要因への対応

既存の原子力施設に対する規制基準にかかわる実績などを参照して、以下の対応により周辺環境や作業員の放射線安全を確保する。

- ・遮へい対策や放射性物質の周辺環境への漏えい防止策
- ・高線量区域における遠隔操作
- ・万一の事故発生の場合を考慮した多重性などの考え方による対策

様々なリスク要因に応じた立地による対応と設計による対応の検討結果を踏まえ、また、その場所の特徴に応じて地上施設のレイアウトを設定する（図13）。さらに、十分な安全対策のなか、廃棄体を地下へ搬送し処分坑道に埋設する。



図13 地上施設のイメージ([3]を編集)

4.2.4 輸送時における廃棄体からの放射線

(1) 考慮すべきリスク要因

- ・廃棄体からの放射線が適切に管理されないことや、自然現象による輸送車両などの損傷による、近隣の方々や作業員への放射線の影響

(2) リスク要因への対応

基準に適合した輸送容器に入れ、適切な経路を専用船や専用車両などを用いて輸送する（図14）。



図14 ガラス固化体の専用輸送船・車両([3]を編集)

輸送容器は、放射性物質の閉じ込めや放射線の遮へいが行われるよう、車両の衝突などの万一の事故なども考慮した厳しい基準[7][8]に基づき設計・製作されるものを使用する。輸送船は、万一の衝突などを考慮して、船体は二重構造、衝突防止システムや防火設備などが装備したものを、輸送車両は、輸送容器の転落防止のための設計や、ブレーキの二重化など十分な安全対策を講じたものを使用する。

また、港湾や道路などの設置場所に応じて地震や津波を適切に考慮し、必要な対策を講じる。

陸上輸送を行う際には、運搬重量などの制約条件や一般交通への影響を考慮して、専用道路などを設けるなどの検討を行う。

4.2.5 安全性の確認

リスク要因に対応した立地や設計によって、安全が確保されることを解析やモニタリングにより確認する。具体例を以下に示す。

- ・設計した地下施設や地上施設に対する地圧、地震動、津波などの影響を考慮した解析やシミュレーションによって、施設が十分に安全性が確保できることを確認
- ・放射線が施設の壁で十分に遮へいされていることなどを解析により確認
- ・地下坑道の壁面の変位を計測し、設定で考慮した値より小さいことを確認
- ・温度、湿度、湧水量などの地下での作業環境に係るモニタリングを実施
- ・地上施設やその周辺の放射線量を常時モニタリングし、設定で考慮した値や、安全基準以下であることを確認
- ・環境中の放射能や放射線管理が必要な施設からの排水、排気の放射能などのモニタリングを実施

5 まとめ

本報では、地層処分の安全確保の考え方の概要をまとめた。具体的には、地下深部の岩盤中に廃棄体を埋設した後の、数万年以上の長期間にわたって考慮すべきリスク要因や、建設・操業時および廃棄体の輸送時に考慮すべきリスク要因を整理し、それぞれの要因に応じた具体的な対策をまとめた。

NUMOは、「放射性廃棄物の地層処分を実現する」という使命を果たす事業を進めるにあたって、あらゆる取組みにおいて安全の確保を最優先するとともに、国民のみなさまの声に注意深く耳を傾け、取組みに活かしていく。

参考文献

- [1] 総合資源エネルギー調査会：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，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）.
- [2] 増田純男：高レベル放射性廃棄物を地下深く終う地層処分，原子力環境整備促進・資金管理センター（2016）.
- [3] NUMO（原子力発電環境整備機構）：地層処分 安全確保の考え方，
<http://www.numo.or.jp/kagakutekitokusei_map/pdf/anzen.pdf>.
- [4] 核燃料サイクル開発機構：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 99-021（1999）.
- [5] 経済産業省：科学的特性マップ，2017年7月28日，

<http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/>, (2017).

- [6] 日本原子力文化財団：原子力・エネルギー図面集 (10-3-2).
- [7] IAEA：Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material 2012 Edition, IAEA Safety Standards Series No. SSR-6(2012).
- [8] 木倉宏成，亘真澄，溝渕博紀，高月英毅：改訂核燃料物質等の安全輸送の基礎，有富正憲，志村重孝監修，ERC 出版(2013).

