

地層処分の処分場閉鎖後における放射線安全の評価に対する ICRP 勧告の適用

石田圭輔*1

地層処分では安全確保に向け、長期安定性と THMC 状態の観点から選定した適切な地質環境に対して最適な処分施設を設計することで地層処分システムを構築し、このシステムを対象に処分場の閉鎖後における安全性が確保されているかを安全評価により判断する。包括的技術報告書では、これら一連の取り組みについて、最新の科学的知見等に基づき、安全な地層処分を実現するための方法を示した。当該報告書では、安全評価で必要となる指標や基準といった安全評価の枠組みについて、ICRP の勧告で示されたリスク論的考え方的一种である線量/確率分解アプローチを採用し、発生可能性の観点から 4 つのシナリオ区分を設定した上で各区分に設けた「めやす」となる線量等により評価する枠組みを設定した。本稿では、この枠組みに基づき包括的技術報告書で示した地層処分システムの安全性を論ずる。

Keywords: 処分場閉鎖後の安全評価, リスク論的考え方, 線量/確率分解アプローチ, 評価期間

To ensure safety in geological disposal, NUMO develops a geological disposal system by designing a disposal repository optimized for the appropriate geological environment selected from the perspective of long-term stability and THMC conditions. The post closure safety assessment is performed to determine whether the system ensures safety. NUMO developed a safety case based on the state-of-the-art scientific knowledge to explain the methodology of assuring the safety in geological disposal. In the safety case, a post-closure safety assessment framework, such as safety indicator and criteria, is based on and the disaggregated approach as a risk-informed approach recommended by ICRP. 4 scenario categories, dose targets and a risk target are set from the viewpoint of probability to assess the safety. This report overviews the safety of the geological disposal system shown in the safety case based on the framework.

Keywords: Post closure safety assessment, Risk-informed approach, Disaggregated approach, Evaluation period

1 はじめに

地層処分においては、放射性廃棄物を地下深部に埋設することで人間の生活環境から「隔離」し、地下深部の地質環境が有する廃棄物から地下水へへの放射性核種の溶出とその移行を抑制する機能に工学的な対策を組合せ、長期間にわたって処分場周辺に放射性核種を「閉じ込め」る多重バリアシステムを構築することにより、処分場閉鎖後長期の安全性を確保する。このために、文献調査、概要調査および精密調査からなるサイト選定プロセスにより長期安定性と熱的 (Thermal)、水理学的 (Hydrological)、力学的 (Mechanical)、化学的 (Chemical) な状態 (以下、THMC 状態) の観点から地層処分システムを構築するうえで適切な地質環境を選定し、選定した地質環境に対して最適な処分施設を設計することによって地層処分システムを構築する。そして、構築した地層処分システムにより処分場閉鎖後長期の安全性が確保されているかを安全評価で確認する。

上記の一連の取り組みについて、原子力発電環境整備機構 (以下、NUMO) は、最新の科学的知見やこれまでの技術開発成果に基づき、わが国の地質環境に対して安全な地層処分を実現するための方法を説明するため包括的技術報告書[1]を作成した。

この報告書の中では、安全性が確保されていることを判断するために必要な安全性を評価する期間 (以下、評価期間) や、安全性の指標とこれに対する基準といった枠組みについて、わが国においては今後規制機関によって整備されることになるものの、すでに ICRP[2-3]や IAEA[4-5]からは指標や基準といった枠組みに関する勧告が示されており、いくつかの国では安全規制が定められていることを踏まえ [6-12]、これらで示された考え方を参考に安全評価の枠組み

を設定した。

本稿においては、包括的技術報告書における安全評価の枠組みの設定根拠を説明した上で、この枠組みに基づき報告書で示した地層処分システムの安全性を論ずる。

2 安全評価の枠組み

2.1 評価期間

評価期間の設定における考慮事項として、諸外国における事例から以下の 5 つの点が挙げられている [13]。

- ・ 時間の経過に伴い増大する評価の不確実性
- ・ 廃棄物の放射能の低下
- ・ 計算された線量又はリスクの最大値の発生時期
- ・ 非常にゆっくりとした長期のプロセスと稀なイベントを適切に考慮することの必要性
- ・ ステークホルダーの懸念に対処することの必要性

いくつかの国においては、こうした要素を勘案しつつ設定された評価期間が安全規制や実施主体が作成したセーフティケースに具体的に示されており、多くの場合、100 万年という時間枠が採用されている (表 1 参照)。包括的技術報告書では、地層処分システムの安全性に係るふるまいを理解するために十分な期間を考慮するため、計算上最大の線量が現れる時期を確認できる期間を評価期間とした。

2.2 リスク論的考え方に基づく評価

処分場閉鎖後長期の安全評価では、極めて長い時間スケール、および地質環境という不均質で広大な空間領域を対象とすることに起因する様々な不確実性の考慮が必要となる。こうした不確実性への対処として、考え得る将来の処分場の状態を過不足なく抽出したうえでシナリオを想定し、それぞれの発生可能性と仮に発生した場合の影響の程度を併せて捉えるリスク論的考え方が ICRP より提唱され [2-3]、

Application of ICRP recommendations to the assessment of post-closure radiological safety in geological disposal by Keisuke ISHIDA (kishida@numo.or.jp)

*1 原子力発電環境整備機構

Nuclear Waste Management Organization of Japan

〒108-0014 東京都港区芝 4 丁目 1 番 23 号三田 NN ビル 2 階

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会が主催した ICRP 国際シンポジウムサテライトイベントにおける講演内容に加筆したものである。

表 1 各国の閉鎖後長期の安全評価における評価期間

国名	期間 (万年)		主たる設定根拠
	規制上の設定	実施主体の設定	
Finland	—	100	・ 100 万年が諸外国で採用されている値であること[14] ・ 廃棄体 1 体の製造に必要なウラン鉱石との比較から設定[14]
Sweden	100[6]	—	・ 廃棄体 1 体の製造に必要なウラン鉱石との比較から設定[15]
France	—	100	・ 100 万年で放射性核種の減衰が十分であるということ[16] ・ 100 万年以降は地質学的な予測が困難となること[16]
Switzerland	100 (定量的評価期間) [9]	—	・ 既存のウラン鉱石と廃棄体 (HLW, SF) の比較から設定[17]
U.K.	—	100	・ 不確実性の観点から 100 万年以降は定量的評価の信頼性が低くなるため[18]
U.S.A.	100[11]	—	・ ユッカマウンテンの地質の不確実性の観点から設定[11]

これを IAEA も推奨している[5]。また、いくつかの国では地層処分の安全規制にリスク論的考え方を導入している[6,9,12]。包括的技術報告書においても、ICRP が提唱している考え方が、不確実性への対応として合理的と考え、安全評価の枠組みの基本とすることとした。

ICRP は、さらにリスク論的考え方として 2 つのアプローチを提案している[2-3]。すべてのシナリオの発生可能性を確率として定量化し、各シナリオを想定した場合の放射線学的影響の程度との積から導かれるリスクの総和をリスク拘束値と比較する「Aggregated approach (以下、統合アプローチ)」と、定性的な判断も許容してシナリオの発生可能性を検討し、発生可能性に基づきシナリオを区分し、その区分に属するシナリオを想定した場合の放射線学的影響と区分ごとに設定された線量基準と比較する「Disaggregated approach (以下、線量/確率分解アプローチ)」である。ICRP は後者のアプローチの方が線量を与える状況の生起確率とその影響を別々に考察できるため、意思決定のためにより多くの情報が得られることがあるとしている[2-3]。

包括的技術報告書においては、上記の背景に加え、評価対象期間が長期にわたることやサイトが特定されていないことから、シナリオの発生可能性をすべて定量的に検討することは難しいことを踏まえ、線量/確率分解アプローチを採用した。ただし、事象によっては、シナリオの確率を算出する手法が整備されつつあることから[19-22]、このような事象を対象としたシナリオについては、「シナリオ発生に伴う 1 年間の線量 (Sv/回)」に、「ICRP の勧告で示されている線量のリスクへの換算係数 (0.057 1/Sv) [23]」と「年間当たりのシナリオの発生確率 (回/y)」を乗じることでリスクを算出し、2.3 で後述する比較的発生可能性が高い事象を考慮したシナリオに対する基準であるリスク拘束値との比較を用いた評価も追加的に実施した。

2.3 線量/確率分解アプローチに基づくシナリオ区分

ICRP[2,3]や IAEA[4,5]は地層処分の安全評価で考慮するシナリオを「自然過程」と「偶発的な人間侵入」とに大別しており、「自然過程」のうち、比較的発生可能性が高いものを考慮したシナリオに対しては、線量やリスクの総和が、一般公衆に対して推奨されている線量拘束値 300 μSv/y、ま

たはリスク拘束値 1×10^{-5} 1/y 以下となるように処分場を設計することを求めている。

包括的技術報告書では、比較的発生可能性が高い自然過程に該当するシナリオに対し、適切に選定されたサイトの地質環境を前提として設計された処分場に対して、生じる可能性が最も高いと考えられるシナリオ (以下、基本シナリオ) と、地質環境や処分施設の空間的、時間的不確実性や科学的知見の不足に伴う不確実性を踏まえ、基本シナリオに対し科学的に合理的と考えられる変動を考慮したシナリオ (以下、変動シナリオ) とに分類できると考え、これら 2 つのシナリオ区分を設定した。

ICRP や IAEA は、隔離機能や閉じ込め機能に著しい擾乱を与えるが、サイト選定等が適切に行われることにより発生可能性が極めて低いと考えられる自然過程に関するシナリオ (以下、稀頻度事象シナリオ) や偶発的な人間侵入に係わるシナリオ (以下、人間侵入シナリオ) についても言及しており[2-5]、処分場が有する地層処分システムとしての頑健性を評価するために使用できるとしている[3,5]。これらのシナリオに対して諸外国の安全規制では、線量基準を設けて安全評価の対象とする場合と、発生可能性が極めて低い、または発生を考慮の必要がないとして安全性の判断に用いない場合に大別される[6-12]。このような国際的な動向を踏まえ、これら 2 つのシナリオ区分も設定した。

2.4 評価に用いる安全性の「めやす」

基本シナリオは、地層処分システムが最も確からしいと考えられる状態にある地層処分システムの安全性を評価するシナリオとなる。このようなシナリオは、地層処分によるリスクを最小のものとするために、実施主体として最善を尽くしたサイト選定と処分施設設計に基づく地層処分システムを構築しているかを判断するためのものである。安全性の確保という観点からは、線量拘束値として勧告されている 300 μSv/y を下回ることが求められる。しかし、包括的技術報告書においては、上述のシナリオの目的を踏まえ、諸外国の安全規制において適用されているリスク基準や線量基準の中で最も厳しい 10 μSv/y を目標値として設定することとした[6,12]。

変動シナリオは、基本シナリオに対し、科学的な合理性

をもって考えられる範囲において安全評価上重要と考えられる変動要因を考慮したとしても、地層処分システムにより安全性が確保されることを評価するためのシナリオである。このようなシナリオに対しては、線量拘束値 300 $\mu\text{Sv/y}$ を用いて、安全性を論ずることとした。

稀頻度事象シナリオについては、サイト選定や処分施設設計が適切に行われることによって、想定のないほど発生の可能性が極めて小さいと考えられるシナリオである。また、人間侵入シナリオについても、300 m 以深での廃棄物の埋設や、経済的価値のある鉱物資源が分布する場所を回避していること、記録の保存、マーカーの設置、土地利用制限など制度的な管理対策をとることにより、その発生可能性は極めて小さいと考えられるシナリオである。これらのシナリオについては、発生したとしても地層処分システムが頑健性を有しており、著しい放射線学的影響がないことを評価するためのものと位置づけ、ICRP が示した「Natural disruptive events」と「Inadvertent human intrusion」とに対する考え方をを用いて「めやす」となる線量を設定した。具体的には、発生直後（1年間）は緊急時被ばく状況の参考レベルの幅（20～100 mSv）を、長期間の被ばく（2年目以降）については、現存被ばく状況に対応する参考レベルの幅（1～20 mSv/y）を「めやす」として設定した。また、これらのシナリオについては、わが国において発生確率を算出する技術が整備されつつあるため[19-22]、線量に加えてリスクも算出しリスク拘束値 $1 \times 10^{-5} \text{1/y}$ との比較を通じた安全性の見通しを論ずることとした。

上記に示したシナリオ区分と「めやす」となる線量の関係を表 2 に示す。

3 処分場閉鎖後の長期安全評価の手順

3.1 安全性の評価の対象となる地層処分システム

包括的技術報告書の作成段階においては、特定のサイトが選定されていないことから、わが国の地質環境における最新の科学的知見に基づき、サイト選定において対象となる可能性があり、安全機能が長期にわたって維持されると考えられる深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類を検討対象母岩として設定し、JAEA の深地層の研究施設などで取得されたデータを活用して各岩種に対して地下水中の Cl⁻濃度の観点から 2 つの異なる地下水組成を有する地質環境モデルを構築した。次に、構築した地質環境モデルに対して、処分施設の操業時における廃棄体定置手順なども考慮しながら、処分パネルや地上へのアクセス坑道を配するとともに、高レベル放射性廃棄物については人工バリアの構成は同じものの定置方式等が異なる縦置き・ブロック方式と横置き・PEM 方式を設計した。TRU 等廃棄物に関しては特性に応じてグループを 5 つに分類し、処分坑道については、廃棄体の発熱性等の違いから、処分坑道については緩衝材を設置するものと設置しないものを設計した。さらに、廃棄物を収納する廃棄体パッケージについては、閉じ込め性を期待しない上蓋を取り付けないものと、上蓋を取り付けることによって 300 年程度の閉じ込め性を期待するもの 2 種類を設計した。

3.2 閉鎖後長期の安全評価の手順

3.1 に示した地層処分システムを対象として、まず、最新の科学的知見に基づいて、システムに期待する安全機能が処分場の閉鎖後長期にわたってどのように機能するかを地層処分システムのふるまいとして記述する。次に、2.3 で述べたシナリオ区分に応じて、ふるまいの記述に基づき最も可能性が高いと考えられるシステムに応じた核種移行に関

表 2 シナリオ区分と「めやす」となる線量、および各シナリオ区分に設定した解析ケース

シナリオ区分	「めやす」となる線量	No.	解析ケース
基本シナリオ	300 $\mu\text{Sv/y}$ 10 $\mu\text{Sv/y}$ (基本シナリオに対する目標値)	1	基本ケース（廃棄体から溶出した核種が地下水を介して地表に到達するシナリオの中で最も可能性が高いものに該当）
変動シナリオ		2	ガラス溶解速度の不確実性ケース
		3	ハル・エンドピース腐食速度の不確実性ケース
		4	構造躯体の劣化に関する不確実性ケース
		5	硝酸ブルームの広がりに関する不確実性ケース
		6	母岩の割れ目の連結性に関する不確実性ケース
		7	緩衝材への核種の収着分配係数の不確実性ケース
		8	緩衝材中の核種の実効拡散係数の不確実性ケース
		9	母岩への核種の収着分配係数の不確実性ケース
		10	母岩中の核種の実効拡散係数の不確実性ケース
		11	溶解度設定における温度影響の不確実性ケース
		12	溶解度制限固相の熱力学データの不確実性ケース
稀頻度事象シナリオ	20～100 mSv (事象発生直後の 1 年間)	13	新規火山発生ケース
人間侵入シナリオ	1～20 mSv/y (事象発生から 2 年目以降)	14	断層伸展ケース
		15	ボーリング作業従事者被ばくケース
		16	ボーリング孔核種移行ケース

するシナリオ（以下、基本シナリオ）と、これに対する不確実性を分析して科学的合理性を有する不確実性を考慮したシナリオ（以下、変動シナリオ）、発生の可能性は極めて小さいが安全機能への影響は無視できないと考えられる要因を含むシナリオ（以下、稀頻度事象シナリオ）を作成する。作成したシナリオに基づき、核種移行を定量的に解析するためのモデルやパラメータの考え方を解析ケースとして設定し（表 2 参照）、これに基づき準備した解析モデルとデータセットを用いて算出した線量やリスクを 2.4 に示した「めやす」と比較する。

3.3 各シナリオ区分に対する解析ケースの評価結果

3.3.1 基本シナリオと変動シナリオに対する解析ケース

3.1 で示した三岩種と 2 つの地下水条件を対象に構築した地層処分システムについて線量を算出した。基本ケースについては最大でも 2 $\mu\text{Sv/y}$ 程度となり、基本シナリオの目標値を満たしていた（図 1 参照）。変動シナリオに区分される解析ケースも安全性の「めやす」とする線量 300 $\mu\text{Sv/y}$ と比較して十分に低かった（図 1 参照）。これらの結果から、包括的技術報告書で示したサイトを特定せず全国規模のデータを活用して設定した地質環境とこれに応じて処分施設を設計した地層処分システムは、安全性確保の見通しがあることと判断できる。

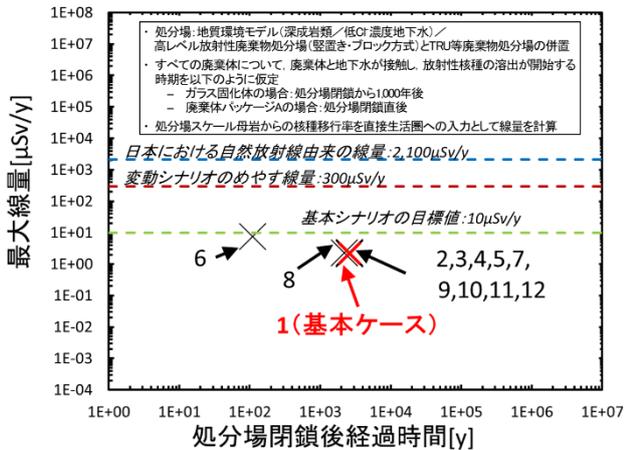


図 1 基本シナリオと変動シナリオに該当する解析ケースの最大線量とその算出時期の例（深成岩類処分場の低 CI 濃度地下水における高レベル放射性廃棄物処分場（堅置き・ブロック方式）と TRU 等廃棄物処分場（上蓋を取り付けた廃棄体パッケージ）の併置を想定、番号は表 2 の解析ケース No. に対応）

3.3.2 稀頻度事象シナリオに対する解析ケース

稀頻度事象シナリオに該当する「新規火山発生ケース」（図 2 参照）については、まず、処分場の閉鎖後 10 万年の時点で新規火山が形成されマグマが処分場を直撃し、火道に位置する廃棄体に含まれる放射能を含んだマグマが地表に噴出することを想定した。次に、マグマは地表に噴出物（火山灰）として堆積し、これと地表の放射性核種を含まない既存の土壌とが均一に混合した土壌の上で人が生活して被ばくすることを想定した。なお、処分場閉鎖から 10 万

年の間、核種は廃棄体中に閉じ込められ、放射性崩壊によってのみ減少すると設定した。日本の火山で報告されている火道と火山灰の情報に基づき、被ばく線量を算出した結果、最大でも 0.09 mSv/y となり、表 1 で示した稀頻度事象シナリオの「めやす」となる線量を十分下回る結果となった。さらに、NUMO が整備しつつある ITM-TOPAZ の手法 [19-22] により、専門家の判断に基づく新規火山の発生確率が試行的に求められている。新規火山の発生確率は、地域的な特徴に大きく依存するが、例えば、東北日本の地域においては、科学的特性マップ [24] で示された第四紀火山中心から半径 15 km の範囲を回避してサイトを選定すれば、将来 100 万年間の 100 km² の領域における 1 年あたりの火山発生確率は 10⁻⁶ 以下であることが試行により算出されている。これを用いて、上記の線量に基づきリスクを算出すると 1×10⁻¹² 1/y となり、リスク拘束値 10⁻⁵ 1/y を大きく下回っている。



図 2 新規火山発生ケースの概念図

もう一つの解析ケースである「断層伸展ケース」については、断層破砕帯やプロセスゾーンの領域は一度の断層活動で急激に発達する可能性は小さいものの [25]、評価においては断層が一度の活動で十分に発達し、処分区画を直撃するという極端な状態を想定した。断層の規模については起震断層の長さに関する頻度分布の中央値である 20 km ([1] の付属書 3-35 参照) とし、発生時期については、特定することが困難なため、処分場閉鎖から 1,000 年後、1 万年後、10 万年後にこの事象が発生すると想定した。また、これらの発生時期まで、すべての核種は放射性崩壊によってのみ減少すると設定した。算出された最大線量は 14 mSv/y であり、稀頻度事象シナリオに対する事象発生後 2 年目以降の「めやす」となる線量（1~20 mSv/y）の範囲に収まっている。ここで、「新規火山発生ケース」と同様にリスクを算出する。20 km 規模の断層が処分場スケールの領域に発生し、それが処分場に直接的な影響を与える 1 年間あたりの発生頻度を簡易な方法で算出すると、2.2×10⁻⁷ 回/y となる ([1] の付属書 3-35 参照)。この値と上記の線量を用いて、リスクを算出すると 2×10⁻¹⁰ 1/y となり、リスク拘束値である 10⁻⁵ 1/y を大きく下回っている。

これらの結果から、構築した地層処分システムは稀頻度事象に対して頑健性を有していると判断できる。

3.3.3 人間侵入シナリオに対する解析ケース

国内外の地層処分における報告書 [2-5, 26-28] を参考に、

人間侵入シナリオの選定の考え方を整理し、これに基づき、包括的技術報告書においては温泉開発に伴うボーリングによる掘削活動を人間侵入シナリオの評価対象とした。このシナリオでは、ボーリング孔が廃棄体又は処分坑道を直撃し、ボーリング作業者が被ばくするケース（「ボーリング作業従事者被ばくケース」と、ボーリング孔を経由して地表に到達した放射性核種により一般公衆が被ばくするケース（「ボーリング孔核種移行ケース」）を評価した（図3参照）。人間侵入については、記録保存の有効性またはボーリングに対するオーバーパック等の物理的抵抗性が維持される期間は回避されるとして、発生時期を300年、1,000年、18,000年（TRU等廃棄物のみ）、35,000年（高レベル放射性廃棄物のみ）と設定し、廃棄体に含まれる放射性核種は、事象発生まで放射性崩壊によってのみ減少するとした。

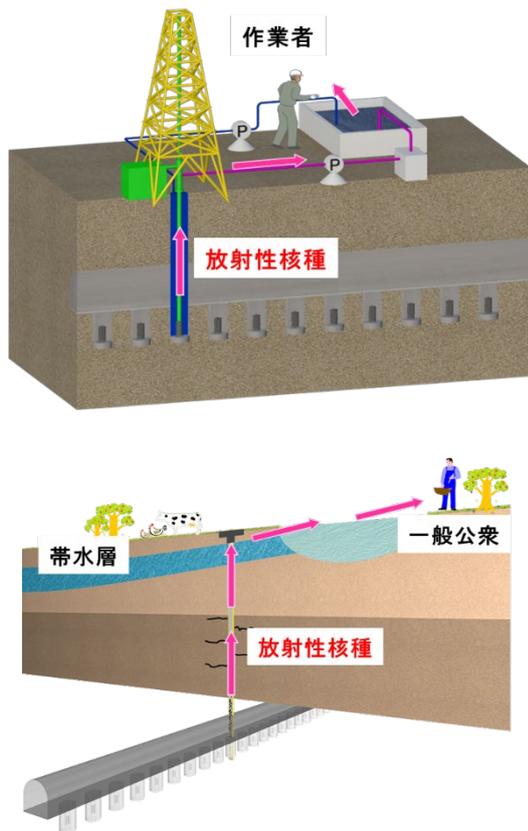


図3 「ボーリング作業従事者被ばくケース」(上図)と「ボーリング孔核種移行ケース」(下図)の概念図

表3に発生時期ごとの最大線量を示す。ボーリング作業従事者被ばくケースについては、ボーリング掘削開始後1年以内に、作業が終了するまたは作業者が異変に気付くことを想定して、事象発生から1年間の「めやす」となる線量(20~100 mSv)を適用し、ボーリング孔核種移行ケースでは、事象発生後、長期間にわたってその影響を受け続ける可能性があることから、一般公衆に対して、1年目は「めやす」となる線量20~100 mSvと比較し、2年目以降については線量1~20 mSv/yと比較した。表3に示した結果から、「めやす」となる線量の範囲に収まっていることが分かる。さらに、稀頻度事象シナリオと同様にリスクを算出した。日本全国の深度300 mから1,000 mまでの範囲で温泉

開発を目的としたボーリングの発生頻度を地形などによらず深度100 mごとに算出した例[29]から、深度300 mから1,000 mの範囲のボーリングの100 mごとの発生頻度における上限を用いて、発生確率を保守的に 7.84×10^{-9} 本/m²/yと仮定し、表3に示した最大の線量60 mSvを利用してリスクを算出すると 2×10^{-7} 1/yとなった。この結果は、リスク拘束値 10^{-5} 1/yを下回っている。

これらの結果から、構築した地層処分システムは人間侵入に対して頑健性を有していると判断できる。

表3 人間侵入シナリオの発生時期に応じた最大線量

	発生時期 (年)			
	制度的管理		物理的抵抗性	
	300	1,000	18,000	35,000
作業員 [mSv]	60	20	6	0.7
一般公衆 [mSv/y]	7	2	2	9×10^{-5}

4 結言

NUMOが地質調査・評価、処分場設計、安全評価といった一連の作業を実施した包括的技術報告書では、ICRP勧告に示された線量/確率分解アプローチに基づきシナリオ区分と各区分に対して「めやす」となる線量を設定し線量結果との比較を行った。加えて、発生確率が算出できるシナリオについてはリスクを算出しリスク拘束値との比較も実施した。全てのシナリオ区分における線量結果が、「めやす」とする線量以下となり、発生確率が算出できるシナリオについてはリスク拘束値を十分下回ることを示した。

包括的技術報告書に対して、2021年11月から2023年1月にわたり経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA)によって国際レビューが実施された。上記に示した安全評価に対してレビュー報告書[30]では、「NUMOは、安全評価を実施し、特にNEA[31]やIAEA[5]が提案する国際的な勧告や慣行、およびその他の国際慣行に沿った形でセーフティケースを作成している。」との評価をいただいている。

これらのことから、包括的技術報告書でNUMOが示した安全評価の枠組みは適切に設定されており、これに基づき判断した地層処分システムにより処分場閉鎖後の安全性の見通しは適切であるものと考えられる。

レビュー報告書には事業を円滑に進めるための提言や指摘事項についても言及されている。例えば、処分場の性能をより確からしく評価するための技術開発の強化や、規制機関の期待事項や廃棄体の放射能インベントリといった特性を把握するための規制当局や廃棄物発生者とのコミュニケーションの強化、優先度が高い技術開発をNUMOから関係研究機関へ適切に示すためのコミュニケーション強化などが挙げられている。NUMOは、これらを含むレビュー報告書の提言や指摘事項を今後の技術整備やセーフティケース開発に着実に活かしていくこととし、その対応を取りまとめた[32]。

謝辞

本稿の作成にあたっては、原子力発電環境整備機構の梅木博之博士、山田基幸氏から多くのご支援をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 原子力発電環境整備機構: 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 -適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築-. NUMO-TR-20-03, NUMO (2021).
- [2] ICRP: Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste. *Publication 81, Annals of the ICRP* **28**, (4), (1998)
- [3] ICRP: Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste. *Publication 122, Annals of the ICRP* **42**, (3), (2013).
- [4] IAEA: Disposal of radioactive waste, Specific Safety Requirements. IAEA Safety Standards Series, No. SSR-5, IAEA (2011).
- [5] IAEA: The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste. Specific Safety Guide, IAEA Safety Standards Series, No. SSG-23, IAEA (2012).
- [6] SSM: The Swedish radiation safety authority's regulations concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste. SSMFS2008:37., IAEA (2008).
- [7] STUK: Disposal of nuclear waste. STUK YVL D.5. (2013).
- [8] ASN: Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde. (2008).
- [9] ENSI: Specific design principles for deep geological repositories and requirements for the safety case. Guideline for Swiss nuclear installations, G03/e. (2009).
- [10] EA (Environment Agency) ・ NIEA (Northern Ireland Environment Agency) : Geological Disposal Facilities on Land for Solid Radioactive Wastes. (2009).
- [11] EPA: Disposal of high-level radioactive wastes in a geologic repository at Yucca Mountain. Nevada (10 CFR Part63). (2009).
- [12] BMU: Safety requirements governing the final disposal of heat-generating radioactive waste. (2010).
- [13] OECD/NEA: Considering timescales in the post-closure safety of geological disposal of radioactive waste. NEA No. 6424, 原子力発電環境整備機構 (2009).
- [14] Posiva: Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto-Synthesis 2012. POSIVA 2012-12, 原子力発電環境整備機構 (2012).
- [15] SKB: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project. SKB TR-11-01, 原子力発電環境整備機構 (2011).
- [16] ANDRA: Dossier 2005 Argile Tome, Safety evaluation of a geological repository, 原子力発電環境整備機構 (2005).
- [17] Nagra: Project Opalinus Clay Safety Report - Demonstration of disposal feasibility for spent fuel vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste, NAGRA NTB-02-05, 原子力発電環境整備機構 (2002).
- [18] NDA: Geological Disposal Generic Post-closure Safety Assessment. NDA Report no. NDA/RWMD/030, 原子力発電環境整備機構 (2010).
- [19] Chapman, N., Apted, M., Beavan, J., Berryman, K., Cloos, M., Connor, C., Connor, L., Jaquet, O., Litchfield, N., Mahony, S., Smith, W., Sparks, S., Stirling, M. and Wallace, L.: Development of methodologies for the identification of volcanic and tectonic hazards to potential HLW repository sites in Japan. The Tohoku case study, NUMO-TR-08-03, NUMO (2009).
- [20] Chapman, N., Apted, M., Beavan, J., Berryman, K., Cloos, M., Connor, C., Connor, L., Hasenaka, T., Jaquet, O., Kiyosugi, K., Litchfield, N., Mahony, S., Miyoshi, M., Smith, W., Sparks, S., Stirling, M., Villamor, P., Wallace, L., Goto, J., Miwa, T., Tsuchi, H. and Kitayama, K.: Development of methodologies for the identification of volcanic and tectonic hazards to potential HLW repository sites in Japan. The Kyushu case study, NUMO-TR-09-02, NUMO (2009).
- [21] Chapman, N., Apted, M., Aspinall, W., Berryman, K., Cloos, M., Connor, C., Connor, L., Jaquet, O., Kiyosugi, K., Scourse, E., Sparks, S., Stirling, M., Wallace, L. and Goto, J.: TOPAZ project: Long-term tectonic hazard to geological repositories: An extension of the ITM probabilistic hazard assessment methodology to 1 Myr. NUMO-TR-12-05, NUMO (2012).
- [22] Connor, C., Connor, L., Jaquet, O., Wallace, L., Kiyosugi, K., Chapman, N., Sparks, S. and Goto, J.: Spatial and temporal distribution of future volcanism in the Chugoku Region. NUMO-TR-13-03, NUMO (2013).
- [23] ICRP: Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste. *Publication 122, Annals of the ICRP* **42** (3), (2007).
- [24] 経済産業省:「科学的特性マップ」の説明資料 (online). http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/maps/setsumei.pdf (accessed 2020 - 8 - 31).
- [25] 高井静霞, 武田聖司, 酒井隆太郎, 島田太郎, 宗像雅広, 田中忠夫: 派生断層の成長による地層処分システム周辺の地下水流動への影響評価. 日本原子力学会和文論文誌 **16**, (1), pp. 34-48. (2017).
- [26] OECD/NEA: Safety assessment of radioactive waste repositories, Future human actions at disposal site. (1995).
- [27] 原子力安全委員会: 放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について. (2004).
- [28] 原子力安全委員会: 高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について (第1次報告).

(2000).

- [29] 長澤寛和, 武田聖司, 木村英雄, 佐々木利久: 人間侵入に関する安全評価手法の開発 その 1—ボーリングシナリオを対象としたデータベースの整備—. JAEA-Data/Code 2010-018, JAEA (2010).
- [30] OECD/NEA: The Nuclear Waste Management Organization of Japan's Pre-siting Safety Case Based on the Site Descriptive Model: An International Peer Review of the NUMO Safety Case. OECD Publishing, Paris. (2023).
- [31] OECD/NEA: "International Peer Reviews for Radioactive Waste Management General Information and Guidelines". NEA No. 6082, OECD Publishing, Paris. (2005).
- [32] NUMO: OECD/NEA による包括的技術報告書の国際レビューコメントを受けた原子力発電環境整備機構の対応について, NUMO (2023).