

高レベル放射性廃棄物地層処分における性能評価パラメータの安全裕度評価方法の例示

江橋健*¹ 小尾繁*² 大井貴夫*¹

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムの頑健性を提示するための重要な対策のひとつとしては、設計において予め適切に安全裕度を見込んだパラメータの設定を行うことが考えられる。このため、このような安全裕度の評価においては、「それぞれのシナリオに対する適切な条件設定に基づいて、保守的な値を考慮した解析結果や感度解析結果から、線量目安値を満足するパラメータの値あるいは範囲、すなわち、裕度を見積もること」が求められる。本論文においては、包括的感度解析手法を高レベル放射性廃棄物の性能評価に適用し、性能評価パラメータの安全裕度を評価するための考え方について提案する。提案に際しては、工学的な対策により性能の高度化を見込める可能性があるパラメータ(ガラス固化体溶出率、オーバーパックの破損時期、緩衝材の厚さ)に着目し、天然バリアをきわめて保守的に設定した条件下における性能評価パラメータの安全裕度の評価を例示した。このような考え方に基づいて抽出される情報は、頑健なバリアの構築やシナリオ解析に資するものとする。

Keywords: 地層処分, 核種移行解析, 人工バリア, 感度解析, パラメータ, 不確実性, 頑健性, 安全裕度

In order to demonstrate the robustness of the design of a high-level waste (HLW) disposal system, an important measure is to preliminarily set parameter values, which take into account safety margins for an acceptable dose. In evaluating the safety margin, it is necessary to estimate a range of parameters for an acceptable dose by a sensitivity analysis based on the appropriate conditions for each scenario. In this study, the comprehensive sensitivity analysis method was applied to performance assessment of a HLW disposal system. This paper presents the approach to assess a safety margin for parameters. As a result, safety margins for the parameters of the engineered barrier system (glass dissolution rate, overpack failure time, buffer thickness) were illustrated under conservative conditions of the natural barrier. Such an approach will provide useful information for scenario analysis and offer insights into the design and construction of a robust system for HLW disposal concept.

Keywords: geological disposal, sensitivity analysis, parameter uncertainty, robustness, safety margin

1 はじめに

高レベル放射性廃棄物(以下、HLW という)の性能評価の信頼性を高めていくためには、不確実性を低減することおよびシステムの頑健性を提示することが重要となる。

不確実性を効果的に低減するためには、重要な不確実性を判断し、研究開発において優先的に知見を拡充すべき対象を明らかにすることが重要となる。一方、処分システムの頑健性を提示するための重要な対策のひとつとしては、処分システムの設計において予め適切な安全裕度を見込んだパラメータの設定を行うことが考えられる。処分システムが有する安全裕度をパラメータの観点から補完的に評価する場合には、「それぞれのシナリオに対する適切な条件設定に基づいて、保守的な値を考慮した解析結果や感度解析の結果から、線量目安値を満足するパラメータの範囲を算出し、その値と確からしい値との関係から、裕度をおおよそ見積もること」が求められるものとする[1]。このようなパラメータの安全裕度の評価においては、前提条件(対象とするモデルやパラメータの変動範囲など)の妥当性を確認することが重要である。

このような評価を行うための感度解析手法のひとつ

として、長半減期低発熱放射性廃棄物(TRU 廃棄物)の性能評価研究において開発された包括的感度解析手法[2, 3]がある。包括的感度解析手法は、個々の独立パラメータのランダムサンプリングと多数回の決定論解析結果の統計的処理に基づき、「評価結果に与える影響が大きいパラメータ(重要パラメータ)」、およびそれに基づく「設定した性能目標を満足するパラメータ範囲の組合せ(成立条件)」を抽出する手法である¹⁾。諸外国における類似の手法としては、たとえば、米国ユッカマウンテンのリスク評価に対して提案されている SPARC 解析[4]がある。これは、あるパラメータが好ましくない条件においても、設定した性能目標を達成することができるような他のパラメータの条件(救世主的な条件)およびその発生確率を抽出するものである。これらの手法においては、SPARC 解析が統計的手法を用いて救世主的な条件およびその発生確率を統計解析の結果から合理的に抽出可能であるのに対して、包括的感度解析は、設定したパラメータの範囲からランダムサンプリングによる統計解析あるいは固定した決定論解析を組み合わせるパラメータの影響特性を漸進的に把握しつつ成立条件を抽出可能であるという特徴の違いがある。

パラメータの安全裕度の評価において、保守的な天然バリアの条件下で主に人工バリアを対象とした成立条件が示される場合には、サイト選定に幅を持たせるとともに、地質環境の多様性に対する人工バリアの高い頑健性を示すための有用な情報になると考える。また、このような評価を通じて得られる人工バリアのパラメータの影響特性は、人工バリアにおける重要な不確実性を判断する際に有

Assessment approach for a safety margin of parameters on the high-level radioactive waste disposal by Takeshi Ebashi (ebashi.takeshi@jaea.go.jp), Shigeru Koo, Takao Ohi

*1 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

Geological Isolation Research Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency
〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

*2 株式会社 NESI
NESI Inc.

〒319-1112 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

(Received 5 March 2008; accepted 3 April 2009)

¹⁾ 重要パラメータおよび成立条件は、前提条件に大きく依存することに留意する必要がある。

益な情報になるものとする。

なお、処分システムの安全性は、多面的な議論、すなわち、シナリオの網羅性、モデルやパラメータの適切性、線量/リスクの基準との比較、補完的指標の適用、what-if シナリオの検討、残された不確実性に対する対策などに基づいて総合的に判断されるものである。このため、成立条件やそれに基づいて得られるパラメータの安全裕度は、示された前提条件の下で与えられる処分システムの性能を表す目安のひとつであり、汎用的なものではないことに留意する必要がある。

以上を踏まえ、本論文においては、HLW の性能評価に包括的感度解析手法を適用し、人工バリアのパラメータに着目してパラメータの安全裕度を評価するための考え方について提案する。具体的には、天然バリアをきわめて保守的に設定した条件下において、地層処分研究開発第 2 次取りまとめ[5](以下、第 2 次取りまとめという)の安全評価において支配的となった核種を対象として、工学的な対策により性能の高度化が可能という観点から、ガラス固化体溶出率、オーバーパックの破損時期、緩衝材の厚さに着目した解析結果について例示する。

2 方法論

本章においては、まず、包括的感度解析手法の特徴、HLW の地層処分の性能評価の特徴について記述する。そして、これらの特徴を踏まえ、包括的感度解析手法を適用する際の具体的な方法について記述する。

安全評価においては、地質環境調査や設計研究、室内試験等から得られる知見を活用しながら、システムの将来挙動が記述されるシナリオやそれを表現するためのモデルが検討され、モデルに必要なパラメータの値や範囲が設定される。このようにして設定される複数のパラメータの変動の影響を包括的感度解析手法を用いて調べる場合には、以下の特徴を考慮する必要がある。

- ・ 地層処分の性能評価のモデルは、複雑な入出力関係を有する。このことは、分析対象パラメータの影響特性が、他のパラメータの取りうる値によって変わることの意味する。そのため、パラメータの影響特性の見落としを回避するという観点から、多様な条件を考慮した網羅的な検討が必要となる。
- ・ 包括的感度解析手法を用いて多様な条件を考慮した網羅的な検討を実施するためには、まず、モデルに含まれるパラメータに幅広い変動範囲を設定し²⁾、感度解析を通じて、パラメータの不確実性が評価結果に及ぼす相対的な影響を把握することが必要となる。この際、相対的に影響の大きいパラメータの存在によって

他のパラメータの影響が見えにくくなり、分析対象パラメータの特性の把握が困難になることがある。このため、相対的に影響の小さいパラメータの特性を把握するためには、相対的に影響の大きいパラメータを特定の値に固定し、分析対象パラメータを変動させた感度解析が必要となる。その際、分析対象パラメータの影響特性を適切に把握するためには、相対的に影響の大きいパラメータをパターン化して固定し、その固定値に応じた複数の感度解析が必要となる。

一方、HLW の地層処分の性能評価の特徴として、Np や Th などの崩壊連鎖を構成するアクチノイド元素がシステムの性能を支配する核種に含まれること、および溶解度や収着分配係数などの元素依存パラメータがシステムの性能に比較的大きな影響を与えることがあげられる。このような特徴に対して包括的感度解析手法を適用する際の留意点は、以下の通りである。

- ・ パラメータ間に相関があり、定式化の可能なものは、関係式を用いて独立パラメータの数を減らす。定式化が困難なものは、相関関係を考慮したサンプリングを行う必要がある。とくに、崩壊連鎖核種については、親核種に与えられた溶解度、収着分配係数、実効拡散係数と子孫核種に与えられる溶解度、収着分配係数、実効拡散係数との間に地球化学的な整合性が確保される必要がある。影響が大きいパラメータに対してこの考慮がなされない場合には、解析結果が非現実的となる可能性がある。

以上を踏まえ、包括的感度解析手法を HLW の地層処分の性能評価に適用し、人工バリアのパラメータを対象に成立条件の抽出およびパラメータの安全裕度の評価を行うための具体的な手順を以下に示す。また、この手順の概略的なフローを Fig. 1 に示す。

解析条件および分析対象パラメータの設定：

- ・ 前述のように、パラメータの安全裕度の評価において、保守的な天然バリアの条件下で主に人工バリアを対象とした成立条件が示される場合には、サイト選定に幅を持たせるとともに、地質環境の多様性に対する人工バリアの高い頑健性を示すための有用な情報になると考える。ここでは、前提条件として、天然バリアにきわめて保守的な条件を想定する。また、分析対象パラメータについては、人工バリアのうち、工学的対策による性能の高度化が可能という観点から、人工バリアのうち、ガラス固化体溶出率、オーバーパックの破損時期、緩衝材の厚さに着目する。
- ・ きわめて保守的な天然バリアの条件として、線量に対して主要な影響を与えるパラメータである透水量係数分布の平均値に着目する。第 2 次取りまとめの評価体系に基づく結果から、透水量係数分布の平均値には、

²⁾ 本検討では、パラメータに確率密度関数を与えずに、発生確率を 1 として最大値と最小値の間に一様分布を設定し、ランダムサンプリングに基づいて多数の決定論解析を行う。このため、パラメータの不確実性を大きく見積もった場合にリスクを低く見積ること、いわゆる、リスク希釈[6, 7]の問題はない。

線量への影響が小さくなる閾値が存在することが示された(Fig. 2 参照)。これは、線量が緩衝材からの移行率に規定されるためである。Fig. 2 は、若杉ほか(2002)[8]の解析条件に基づき、透水量係数分布の平均値をより幅広に変動させた場合の統計解析の結果である。本検討では、人工バリアのパラメータに着目してパラメータの安全裕度を評価するための考え方について提案および例示することをねらいとしている。このため、ここで用いた透水量係数分布の平均値の変動幅は、線量に与える性能評価上の影響特性を把握することを目的としたものであり、人工バリアへの影響や実測値等を詳細に検討した値ではないことに注意が必要である。Fig. 2 より、透水量係数分布の平均値が $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ よりも大きい場合には、線量の変化率は小さくなることが概略的にわかる。

- 以上のことから、きわめて保守的な天然バリアの条件として、透水量係数分布の平均値については $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 、その他のパラメータについては核種移行が促進される値を設定する。

人工バリアパラメータの影響特性の把握：

- 分析対象パラメータよりも影響が大きいパラメータの存在の有無を把握するため、すべての人工バリアのパラメータを変動させた解析を行う。このような解析を通じて把握されるパラメータの影響特性は、人工バリアの重要な不確実性の判断や成立条件の抽出に資するものである。

影響が大きいパラメータをパターン化して固定：

- 分析対象パラメータよりも影響が大きいパラメータが存在する場合には、分析対象パラメータの影響特性に見落としがないように、地球化学的な整合性(例え

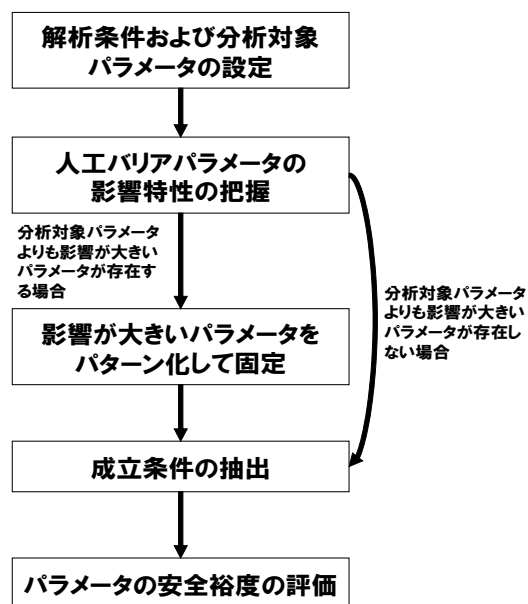


Fig. 1 Flow chart of this approach using comprehensive sensitivity analysis method

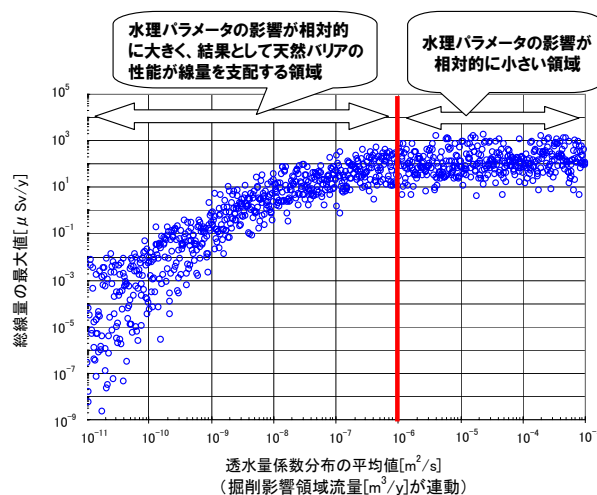


Fig. 2 Relationship between transmissivity [m^2/s] and maximum total dose [$\mu \text{ Sv/y}$] (analysis result considering widely change of transmissivity based on analysis condition which is shown in Wakasugi et al (2002) [8])

ば、溶解度や分配係数の値の組合せに対して、与えられた間隙水条件に対してありえない組合せが生じないようにすること)などを考慮して、それらの値をいくつかのパターンに分類して固定する。

成立条件の抽出：

- 固定したパターンごとに成立条件を抽出する。この際、全核種を一度に評価する場合には、変動パラメータの数が増大し、成立条件の抽出プロセスが複雑になると考える。本検討では、第2次取りまとめのレファレンスケースの解析結果において支配的となった核種を例として、単核種は単独で、崩壊連鎖核種はその崩壊系列のみで別々に解析し、性能指標に対する成立条件全体としての適合性については、最後にそれを合算することで確認する。
- なお、安ほか(1998)[9]においては、崩壊連鎖核種の子孫核種に関する保守的かつ簡略的な取扱いとして、「親核種のインベントリを対象とする子孫核種にあらかじめ加えること」が提案されている。本検討においては、安ほか(1998)[9]における取扱いを参考にして、親核種と娘核種のインベントリの違いを考慮した上で対象とする崩壊連鎖核種を選定する。また、単一の崩壊系列の取り扱いでは、系列をまたぐ同位体の溶解度分割[10]が考慮されないことになるため、親核種の同位体存在比が小さい場合は娘核種に対しては必ずしも保守的な取扱いとならない可能性がある³⁾。そのため、単一の崩壊系列核種の選定においては、親核種の同位体存在比に留意して選定することとした。

³⁾ 同位体存在比が小さい条件下で溶解度分割を考慮しない場合には、沈殿して子孫核種に崩壊するはずの親核種が沈殿せずに移行することが考えられる。そのため、子孫核種への崩壊量が減少し、子孫核種の移行率が非保守側に評価される可能性がある。

パラメータの安全裕度の評価:

- パラメータの安全裕度は、線量目安値を満足するパラメータの値(成立条件)と確からしい値や設計上の設定値などを比較することにより示される。確からしいと考えられる値や設計上の設定値は、サイトの環境条件や工学的対策に応じて決定されるものと考えられる。このため、ここでは、パラメータの安全裕度の評価を例示するための参考値として、第2次取りまとめのレファレンスケースにおいて設定されたパラメータ値を用いることとし、抽出した成立条件の値との比較を試みる。
- なお、このような比較を通じて示される各パラメータの安全裕度は、性能評価パラメータと性能評価結果の入出力関係が複雑な非線形性を有する場合があるため、他のパラメータと単純に比較するものではないことに注意が必要である。

3 解析条件

本章では、具体的な解析条件について述べる。

3.1 核種移行解析モデル

本検討においては、第2次取りまとめにおいて構築されたレファレンスケースの核種移行解析モデルを用いた。以下では、第2次取りまとめに基づくモデルの概要を示す。

人工バリア:

- 処分後のある時点において、すべてのオーバーバックが核種閉じ込め機能を喪失する。
- オーバーバック破損時には、緩衝材は地下水によって完全に飽和し、オーバーバックまわりに均質な低透水性バリアを形成する。
- オーバーバック破損後、直ちに緩衝材間隙水がガラス固化体と接触し、長期的なガラス固化体溶出率に従ってガラスマトリクスの溶解が進む。核種はガラス固化体中で均質に混合されており、ガラス固化体中での存在比に応じてガラスから溶出する(調和溶解)。
- ガラス固化体近傍あるいは緩衝材中での沈澱/溶解反応は、瞬時/可逆と仮定する。
- 核種は緩衝材中を拡散により移行し、緩衝材に収着することにより遅延される。この際、収着反応としては瞬時/線形/可逆を仮定する。
- コロイドは緩衝材の微細な間隙構造によりろ過されると仮定する。また、オーバーバックの腐食による水素の発生、放射線分解、微生物および有機物は核種の移行に影響を与えないと仮定する。
- 緩衝材の外側に到達した核種は、掘削影響領域を通過する地下水と瞬時に混合し、その全量が母岩中の亀裂に流入すると仮定する。なお、掘削影響領域中での収着などによる核種移行遅延効果は保守的に考慮しない。

い。

天然バリア:

- 核種は母岩および断層中を移流分散で移行する。
- 亀裂中の核種は、拡散により岩石基質部へ移行し、岩石基質内の鉱物表面への収着により遅延される。収着は瞬時/線形/可逆と仮定する。なお、亀裂表面への収着による遅延効果については考慮しない。

母岩中の核種移行モデルについては、亀裂の透水性の不均質性を考慮するため、透水性の異なる複数の1次元平行平板モデルを重ね合わせたモデルを適用する。1次元平行平板モデルの重ね合わせにおいては、亀裂の透水量係数分布を48分割し、分割した区間ごとに1次元平行平板モデルを適用する。母岩からの核種移行率は、分割した各透水量係数で求められる核種移行率に透水量係数分布の各区間の確率を乗じて足し合わせるにより算出する。一方、断層については、亀裂の透水量係数分布の最大値を用いて1次元平行平板モデルでの評価を行う。

生物圏:

本研究では、生物圏における不確実性については考慮しないこととし、河川水/平野モデルにおいて、現行法令に準拠して算出された線量への換算係数[11]を用いる。そして、評価においては、廃棄体1本あたりの断層からの核種移行率に、廃棄体の本数4万本および線量への換算係数を乗じるにより、線量を算出する。

3.2 解析コード

解析コードについては、入力パラメータ値を統計的にサンプリングする機能や、複数の入力データセットに対する繰り返し計算機能が整備されているシミュレーションプラットフォーム GoldSim [12]を用いることとした。なお、GoldSim については、第2次取りまとめにおいて用いられた解析コードとの比較検証を行い、その有効性が確認されている[8]。

また、GoldSim を用いて算出した解析結果を統計処理する際には、別途、重要パラメータや影響特性を把握するための統計処理用ソフトウェアを用いた。

3.3 対象核種

本検討においては、第2次取りまとめの解析結果において線量を支配した核種を対象とすることとした。本検討で対象とした核種およびその特徴を以下に示す。

- Se-79: 早い時期の総線量の支配核種である。
- Cs-135: 第2次取りまとめで考慮した多くのケースにおいて総線量の最大値の支配核種である。
- Th-229: 最大値の発生時刻は、Cs-135 よりも遅く、第2次取りまとめで考慮した多くのケースにおいて Cs-135 の次に線量が高い。

- ・ Np-237 : Th-229 の親核種のひとつ、第2次取りまとめの変動シナリオの解析において線量を支配する。

Se-79 については、第2次取りまとめと同様に、溶解度分割を考慮し、Se の安定同位体も考慮することとした。一方、Th-229 に対する親核種としては、簡略化のため、Np-237 のみを考慮することとした。Np-237 の親核種については、Np-237 のインベントリと比較して Am-241 等のインベントリが少ないこと、そして、Am-241, Np-237, Th-229 の3連鎖の解析結果と Np-237, Th-229 の2核種の連鎖の解析結果に大きな違いがないことから、Am-241 等の親核種を考慮しないこととした。また、この取扱いは、2章で記述したように、複数の崩壊系列を取り扱わないため、特に親核種の同位体存在比が小さい場合に、子孫核種に対して非保守側に評価される可能性がある。しかし、本検討では、対象とする Np-237 の同位体存在比がほぼ1に近い値であることから、子孫核種である Th-229 が非保守的に評価される可能性は小さいと考え、単一の崩壊系列に

よる評価を行うこととした。

3.4 性能目標値

パラメータの安全裕度を評価するためには、目安となる性能目標値を設定する必要がある。我が国の放射性廃棄物処分の安全規制については、現在、安全規制を考えていく上で共通する重要事項や検討の方向性が示され[13]、今後、HLW に関する安全基準の具体的な値について検討される状況にある。本検討では、安全基準の候補となるような具体的な値が示されている国際放射線防護委員会の勧告、我が国において先行的に進められている浅地中処分が可能な低レベル放射性廃棄物処分および余裕深度処分の検討状況を参考として、任意の性能目標値を設定することとした。

国際放射線防護委員会は、放射性廃棄物処分場などの個々の線源からの公衆の被ばくに対し、目安として個人の線量拘束値を定義し、1年間あたり 300 μ Sv を勧告している[14, 15]。また、我が国における浅地中可能な低レベル

Table 1 Range of input parameters for stochastic nuclide transport calculations

パラメータ		単位	変動範囲		備考	
			最小値	最大値		
人工バリア	緩衝材厚さ		m	0.1	3	第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ[3]における感度解析においては、緩衝材の厚さの現実的な設計範囲として、0.1m～3mが設定されている。ここでは、これらの値に基づいて変動範囲を設定した。
	オーバーバック破損時期		y	100, 1000, 10000		第2次取りまとめにおいては、環境条件の不確実性やナチュラアナログ研究を考慮した保守的な寿命評価に基づいて、レファレンスケースの値を1000年と設定している。さらには、腐食生成物などの影響による腐食速度の時間的な低下や溶接ミスなどによる不完全な密封の影響などを考慮して、感度解析的に100年および10000年を設定している。ここでは、これらの設定値に基づいて変動範囲を設定した。
	ガラス固化体溶出率		g/y	6.2×10^{-1}	4.1×10^5	第2次取りまとめにおいては、ガラス表面に生成される変質層の保護効果によるガラス溶解反応の抑制を考慮して、レファレンスケースの値から1桁小さい値を設定している。ここでも、最小値についてはこの設定値に基づき設定し、最大値については、ガラスの全量が1年で溶出することを想定した値を感度解析的に設定した。
	溶解度	Se*	mol/l	5.1×10^{-11}	6.5×10^{-3}	既存の検討[17]においては、降水系間隙水、海水系間隙水、コンクリート接触降水系間隙水、酸化性間隙水に対する溶解度が設定されている。さらには、降水系間隙水の不確実性、溶解度制限固相の不確実性、実測値の不確実性などを考慮した溶解度の変動範囲が設定されている。ここでは、これらの設定値の中から、最大値および最小値を選定した。
		Cs		可溶性		
		Np		1.0×10^{-9}	4.0×10^{-5}	
		Th		1.0×10^{-9}	1.0×10^{-5}	
	分配係数	Se	m ³ /kg	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}	既存の検討[18]においては、降水系間隙水、海水系間隙水、コンクリート接触降水系間隙水、酸化性間隙水に対する分配係数が設定されている。さらには、降水系間隙水に対する実測値のばらつきを考慮した分配係数の変動範囲が設定されている。ここでは、これらの設定値の中から、最大値および最小値を選定した。
		Cs		0.001	0.05	
		Np		0.005	50	
		Th		1	50	
	拡散係数	Se	m ² /s	4.0×10^{-11}	6.3×10^{-10}	第2次取りまとめにおいては、降水系間隙水、海水系間隙水、酸化性間隙水に対する拡散係数が設定されている。若杉ほか(2002)[8]においては、統計解析のために拡散係数の変動範囲が設定されている。Mihara(2005)[19]においては、降水系間隙水に対する拡散係数が設定されている。ここでは、これらの設定値の中から、最大値および最小値を選定した。
		Cs		3.0×10^{-10}	6.3×10^{-9}	
		Se・Cs以外		3.0×10^{-11}	2.2×10^{-9}	

*:Seの溶解度の最大値については、可溶性と同等と考えられる値を設定した。既存の検討[20]においては、緩衝材からの放出率が定常になる内側境界濃度の最大値の近似値を算出するための解析解が提案されている。ここでは、この解析解に第2次取りまとめのレファレンスケースの解析条件を入力して得られる値を最大値として用いた。

Table 2 Inventory at different failure time of overpack

元素	質量数	半減期(y)	処分後100年時点の インベントリ(mol/can)	処分後1,000年時点の インベントリ(mol/can)	処分後10,000年時点の インベントリ(mol/can)
Se	79	1.20×10^6	8.13×10^{-2}	8.12×10^{-2}	8.08×10^{-2}
	stable		6.86×10^{-1}	6.86×10^{-1}	6.86×10^{-1}
Cs	135	2.30×10^6	3.19	3.19	3.18
Np	237	2.14×10^6	3.13	3.74	3.92
Th	229	7.34×10^3	5.40×10^{-8}	2.51×10^{-6}	2.01×10^{-4}

Table 3 Fixing value of input parameters for stochastic nuclide transport calculations

パラメータ名			単位	設定値	備考
人工バリア	ガラス固化体の初期体積		m ³ /can	0.15	第2次取りまとめに基づく設定
	ガラス固化体の初期重量		g/can	4.1 × 10 ⁵	
	ガラスの密度		g/m ³	2.8 × 10 ⁶	
	緩衝材内側半径		m	0.41	
	緩衝材長さ(高さ)		m	2.14	
	緩衝材間隙率		－	0.41	
	緩衝材乾燥密度		Mg/m ³	1.6	
	緩衝材のメッシュ		－	22	
	掘削影響領域に対して設定した体積		m ³	10 ^{－3}	
天然バリア	透水量係数分布の平均値*		m ² /s	10 ^{－6}	Fig.2に基づいて保守的な値を設定
	動水勾配		－	0.23	文献調査から得られた動水勾配分布の最大値[21]を設定
	亀裂開口幅の係数		－	10	釜石鉱山で実施した単一亀裂を対象とした複数のトレーサ試験の評価結果のうち保守的な値[5]を設定
	縦方向分散長		m	1	縦方向分散長と移行距離との関係から保守的な値[5]を設定
	マトリクス拡散深さ		m	0.01	釜石鉱山における亀裂周辺の変質幅の分布[5]から、保守的に設定
	マトリクス拡散寄与面積率		－	0.01	原位置花崗岩中の亀裂へのセメントグラウト注入試験から求められた亀裂面全体に占める流路面積の割合[5]に基づき、保守的に設定
	岩盤の間隙率		－	0.5	第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ[3]の感度解析において堆積岩系岩盤を想定して用いられた保守的な値を設定
	母岩への分配係数	Se	m ³ /kg	0	既存の検討[22]においては、花崗岩類や砂岩類などの4種類の岩石と、降水系地下水や海水系地下水や酸性地下水などの6種類の地下水を想定して、岩石への分配係数が設定されている。さらには、花崗岩類・降水系地下水を対象として、有機物やコロイドの影響などを考慮して、変動範囲が設定されている。ここでは、ここでは、これらの設定値の中から、最小値を選定した。
		Cs		0.001	
		Np		0.005	
		Th		0.1	
	透水量係数分布の標準偏差		－	1.07	第2次取りまとめに基づく設定
	母岩の移行距離		m	100	
断層の移行距離		m	800		
生物圏	線量への換算係数	Se	(mSv/y) /(Bq/y)	3.2 × 10 ^{－12}	河川水/平野モデルを想定し、現行法令に準拠して算出された線量への換算係数[10]
		Cs		1.2 × 10 ^{－13}	
		Np		1.3 × 10 ^{－12}	
		Th		2.3 × 10 ^{－11}	

きわめて保守的な天然バリアの条件として設定したパラメータ値

*: 掘削影響領域流量には領域中の核種濃度が常に0になるような値を設定

放射性廃棄物処分に係る現行の安全規制においては、管理期間終了後の安全確保に必要な放射線防護上の目安として、その発生が一般的と考えられる通常のシナリオに対して一般公衆が受けるかもしれない年線量の評価値が $10\mu\text{Sv}$ を超えないことが定義されている[16]。また、余裕深度処分に関しては、リスク論的な考え方[13]を踏まえ、発生の可能性に着目してシナリオを3つに分類し、それぞれに対応する評価結果の判断の目安を $10\mu\text{Sv/y}$, $300\mu\text{Sv/y}$, 10mSv/y から 100mSv/y と設定することが検討されている[1]。

以上を踏まえ、本検討では、任意の性能目標値として、 $10\mu\text{Sv/y}$ および $300\mu\text{Sv/y}$ を設定することとした。

3.5 パラメータ設定

人工バリアのパラメータの変動範囲およびその設定根拠を Table 1 に示す。設定においては、既往の検討[3, 5, 8, 17-19]において示されている値から、それらの値が可能な限り内包されるよう上限および下限の値を設定することとした。

なお、オーバーパックの破損時期については、離散的に変動させることとした。このために必要となるインベントリを Table 2 に示す。なお、 Np-237 のインベントリについては、 Am-241 等の親核種のインベントリを加えておらず、処分後の各時間での存在量を設定している。

固定したパラメータの値およびその根拠を Table 3 に示す。Table 3 においては、2章で示したきわめて保守的な天然バリアの条件として設定したパラメータ値を網掛けして示す。これらの値は、人工バリアへの影響などの観点から検討したものではなく、既存の文献や解析から設定した性能評価上の設定値である。このため、このような仮想的な条件下で示される成立条件は、天然バリアがきわめて保守的な条件下で与えられる処分システムの性能を表す目安のひとつであることに留意する必要がある。

本検討では、人工バリアパラメータの影響特性を把握するため、Table 1 の変動範囲に基づいて、2000 回のランダムサンプリングによる統計解析を実施することとした。また、成立条件の抽出においては、溶解度、分配係数、拡散係数の影響が分析対象パラメータより大きい場合には、Table 1 の変動範囲から、地球化学的な整合性を考慮したパターン毎に溶解度、分配係数、拡散係数の値を固定し、統計解析を実施することとした。

4 解析結果

4.1 節において、分析対象パラメータの影響特性の結果を、4.2 節において、分析対象パラメータよりも影響が大きいパラメータをパターン化して固定した場合の成立条件の抽出およびパラメータの安全裕度の評価結果について例示する。

4.1 人工バリアパラメータの影響特性の把握

2章で記述したように、分析対象パラメータより影響の大きいパラメータが存在する場合は、そのようなパラメータの値を固定した検討が必要となる。そこで、以下では、分析対象パラメータより影響の大きいパラメータの存在の有無を把握するために実施した、天然バリアをきわめて保守的な条件で固定し、人工バリアのパラメータを変動させた場合の解析結果について記述する。解析結果から影響特性を把握する際には、横軸をパラメータの変動範囲、縦軸を最大線量とした 2 次元平面に展開し、以下の手順で近似曲線および与えられた前提条件下における相対的な重要度(以下、重要度という)を算出した[2, 3]。

- ・ パラメータの変動範囲をバンドに分割する。2000 回の統計解析に対するバンドの分割数としては、200 を設定した。
- ・ 分割した各バンドに含まれる解析結果(最大線量)の平均値を算出し、それらの平均値に最小二乗法を適用し、近似多項式(近似曲線)を求める。
- ・ 算出した近似曲線の最大値と最小値の差を、重要度として定義する。

4.1.1 Cs-135

Cs-135 を対象に、人工バリアのパラメータを Table 1 の変動範囲で変動させた統計解析を実施した。この統計解析の結果に基づいて算出した重要度を Fig. 3 に示す。Fig. 3 から、Cs-135 の最大線量に対しては、早期溶出を含む幅広い変動範囲を有するガラス固化体溶出率の重要度が高いことがわかる。これは、きわめて保守的な天然バリアにおいては、Cs-135 の最大線量が、ガラス固化体からの溶出率から大きな影響を受けることを意味する。

ここで、横軸にガラス固化体溶出率、縦軸に Cs-135 の最大線量を取った散布図を Fig. 4 に示す。Fig. 4 より、ガラス固化体溶出率が約 30 g/y 以下の領域においては、Cs-135 の最大線量のばらつきがほとんどないことがわか

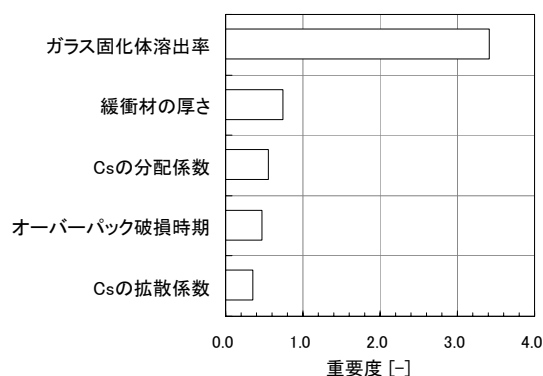


Fig. 3 Level of importance of parameters for maximum dose for Cs-135 under conservative condition of the natural barrier

る。このことは、ガラス固化体溶出率以外のパラメータが感度を持たないことを意味する。以下では、この特性について検討する。

本検討においては、透水量係数分布の平均値の設定値 ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) に基づいて、掘削影響領域流量に、掘削影響領域中の核種濃度が常に 0 になるような大きな値を設定している。この条件は、緩衝材からの移行率が最大になる条件である。このような条件においても、ガラス固化体溶出率が小さい場合には、ガラスからの溶出期間が長くなり、緩衝材中の濃度プロファイルおよび緩衝材からの移行率が定常状態になりやすくなると考えられる。定常になった Cs の移行率は、ガラス固化体溶出率によって与えられる Cs の溶出率と等しくなるため、それ以外のパラメータには依存しない。緩衝材からの移行率の最大値を下げるためには、定常にならないように、ある程度の分配係数と緩衝材の厚さが必要になる。本検討においては、Cs の分配係数が比較的小さい範囲で変動するため (Table 1 参照)、緩衝材の厚さが大きくなったとしても Cs の緩衝材からの移行率が定常状態になる。以上のことから、ガラス固化体溶出率が小さい場合においては、Cs-135 の緩衝材からの移行率は定常になり、緩衝材の厚さや分配係数や拡散係数の影響はほとんどみられないと考えられる。

一方、Fig. 4 より、ガラス固化体溶出率が約 30 g/y 以上の領域において、Cs-135 の最大線量がばらついてきていることがわかる。このことは、ガラス固化体溶出率以外のパラメータが Cs-135 の最大線量に影響を与えることを意味する。ガラス固化体溶出率が大きい場合には、インベントリが短時間で枯渇し、緩衝材中の収着等の影響を受け、緩衝材からの移行率は定常に達しない (ガラス固化体溶出率と等しくならない)。このため、ガラス固化体溶出率が大きい場合には、Cs-135 の最大線量がガラス固化体溶出率以外のパラメータによっても影響を受けるようになると思われる。

このようなガラスの溶解等に関する影響特性の把握は、Cs-135 に対する頑健な人工バリアの構築に資するものと

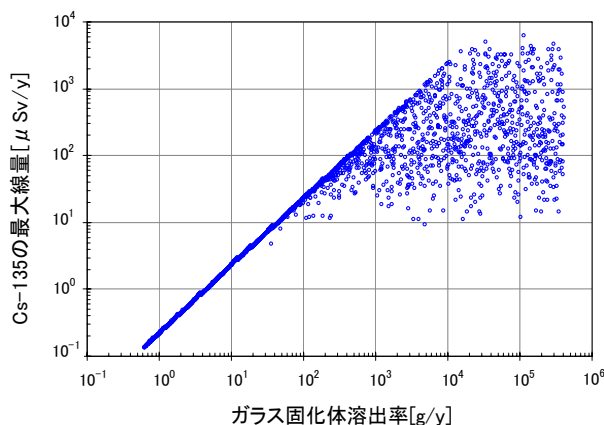


Fig. 4 Glass dissolution rate versus maximum dose for Cs-135 under conservative condition of the natural barrier

考える。さらには、ガラス固化体溶出率が約 30 g/y 以上の領域において、緩衝材の厚さなどの他のパラメータに着目して Cs-135 の最大線量を低減できる可能性があることが示唆される。

4.1.2 Se-79

Se-79 を対象に、人工バリアのパラメータを Table 1 にて設定した範囲で変動させた統計解析を実施した。この統計解析の結果に基づいて算出した重要度を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より、Se の溶解度が重要度の高いパラメータであることがわかる。

横軸に Se の溶解度、縦軸に Se-79 の最大線量を取った散布図およびその結果に対する近似曲線を Fig. 6 に示す。Fig. 6 の近似曲線より、Se の溶解度が小さい領域では、Se-79 の最大線量が主に Se の溶解度によって支配されており、Se の溶解度が大きい領域では、Se-79 の溶解度が最大線量へ与える影響が小さくなることがわかる。以下では、この理由について簡潔に述べる。溶解度制限によりガラス固化体近傍での Se の濃度が低いレベルに制限される場合には、緩衝材からの移行率は定常になりやすく、溶解度や拡散係数、緩衝材の厚さに依存して決まることになる。Se の溶解度が小さい領域におけるばらつきは、これらのパラメータの変動に依存するものである。一方、Se の溶解度

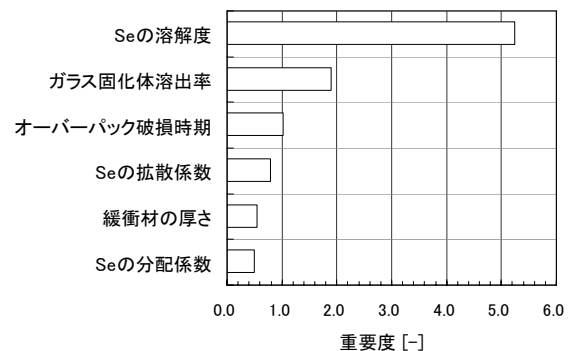


Fig. 5 Level of importance of parameters for maximum dose for Se-79 under conservative condition of the natural barrier

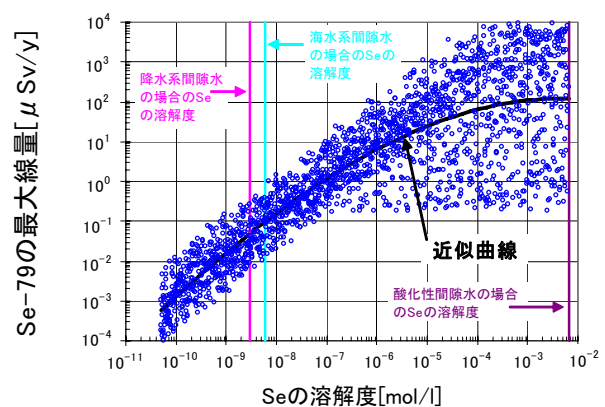


Fig. 6 Solubility versus maximum dose for Se-79 under conservative condition of the natural barrier

が大きい領域では、ガラス固化体近傍での Se の濃度が溶解度ではなく、インベントリやガラス固化体溶出率によって制限されるようになる。とくに、より高いガラス固化体の溶出率によって制限される場合は、緩衝材からの移行率が定常になりにくく、インベントリやガラス固化体溶出率、拡散係数、分配係数などの影響を受け、Fig. 6 にあるように大きなばらつきとなって現れる。

ここで、Fig. 6 に示した降水系間隙水、海水系間隙水、酸化性間隙水の場合におけるそれぞれの Se の溶解度の代表値[17]と近似曲線との関係から、間隙水が降水系および海水系の場合には、Se-79 の最大線量は Se の溶解度にほぼ依存し、間隙水が酸化性の場合には Se-79 の最大線量は Se の溶解度以外の他のパラメータにも依存することが概略的にわかる。

このような Se の溶解度に関する影響特性の把握は、Se-79 に対する頑健な人工バリアの構築に資するものと考ええる。さらに、Se の溶解度が好ましくない領域においては、ガラス固化体溶出率などに着目して Se-79 の最大線量を低減できる可能性があることが示唆される。

4.1.3 Np-237

Np-237 を対象に、人工バリアのパラメータを Table 1 において設定した範囲で変動させた統計解析を実施した。この統計解析の結果に基づいて算出した重要度を Fig. 7 に示す。Fig. 7 から、1 つのパラメータの重要度が突出しているのではなく、溶解度や分配係数などの複数のパラメータの重要度が高い傾向にあることがわかる。

ここで、横軸に重要度が最も高い Np の溶解度、縦軸に Np-237 の最大線量を取った散布図およびその結果に対する近似曲線を Fig. 8 に示す。Fig. 8 の近似曲線より、Np の溶解度が小さい領域では、Np の溶解度の感度が大きく、Np の溶解度が大きい領域では、Np の溶解度の感度が小さくなることがわかる。この理由は、4.1.2 項における Se の場合と同様であると考えられる。また、Se-79 の最大線量に対する Se の溶解度の影響特性(Fig. 6 参照)と比較すると、Fig. 8 における Np-237 の最大線量のプロットが大きくばらつ

いていることがわかる。これは、Np の分配係数や Np の拡散係数が比較的大きな範囲で変動しているためと考えられる(Table 1 および Fig. 7 参照)。

Fig. 8 に示した降水系間隙水、海水系間隙水、酸化性間隙水の場合におけるそれぞれの Np の溶解度の代表値[17]と近似曲線との関係から、間隙水が降水系および海水系の場合には、Np の溶解度の感度が大きい傾向にあること、および、間隙水が酸化性の場合には、Np の溶解度の感度が小さい傾向にあることが概略的にわかる。

このような Np の溶解度、分配係数、拡散係数に関する影響特性の把握は、Np-237 に対する頑健な人工バリアの構築に資するものと考ええる。さらには、Np-237 の最大線量を低減したい場合に、間隙水組成に留意することが示唆される。

4.1.4 Th-229

Th-229 については、Np-237 の子孫核種であるため、Np に対する溶解度、分配係数および拡散係数を分析対象に含めておく必要がある。そこで、Th-229 を対象に、人工バリアのパラメータを Table 1 にて設定した範囲で変動させた統計解析結果を実施した。この統計解析結果に基づいて算出した重要度を Fig. 9 に示す。Fig. 9 から、Th-229 の最

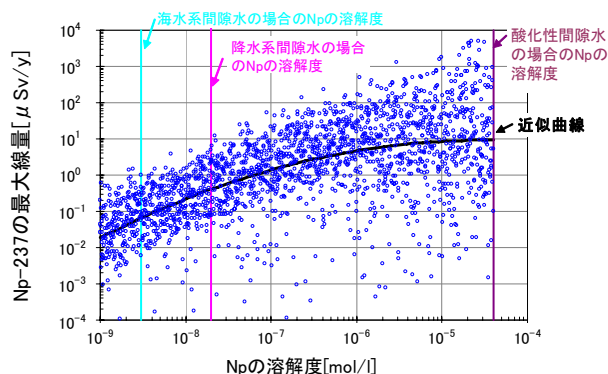


Fig. 8 Solubility versus maximum dose for Np-237 under conservative condition of the natural barrier

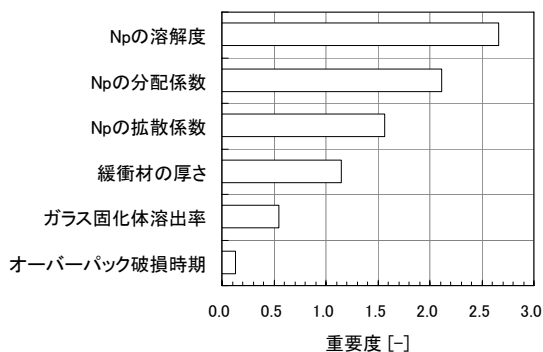


Fig. 7 Level of importance of parameters for maximum dose for Np-237 under conservative condition of the natural barrier

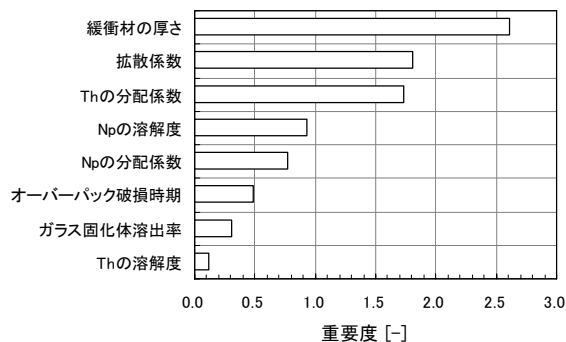


Fig. 9 Level of importance of parameters for maximum dose for Th-229 under conservative condition of the natural barrier

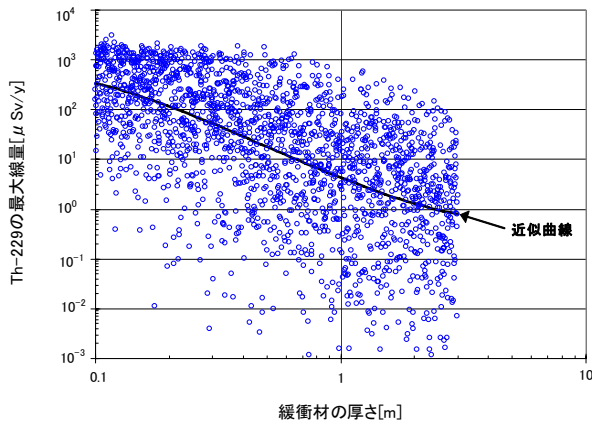


Fig. 10 Distribution coefficient versus maximum dose for Th-229 under conservative condition of the natural barrier

大線量に対して、最も重要度の高いパラメータは緩衝材の厚さであることがわかる。そこで、横軸に緩衝材の厚さ、縦軸に Th-229 の最大線量を取った散布図およびその結果に対する近似曲線を Fig. 10 に示す。Fig. 10 より、緩衝材の厚さが厚くなるに従い、Th-229 の最大線量のばらつきが大きくなる傾向にあることがわかる。これは、緩衝材の厚さが厚くなるに従い、緩衝材中での遅延効果が大きくなり、拡散係数や Th の分配係数などの違いによる崩壊の影響が大きく表れるようになるためと考えられる。

このため、緩衝材の厚さが厚い場合には、拡散係数や Th の分配係数の不確実性を補完し、Th-229 の最大線量を低減できる可能性があることが示唆される。

4.2 成立条件の抽出およびパラメータの安全裕度の評価

4.1 節に示した解析の結果から、きわめて保守的な天然バリアを想定した場合に、本検討で対象としていない人工バリアのパラメータ(溶解度や分配係数など)の相対的な影響が大きいことがわかる。前述のように、本検討においては、人工バリアの分析対象パラメータとして、工学的対策による性能の高度化が可能と考えられるガラス固化体溶出率、オーバーパックの破損時期、緩衝材の厚さに着目している。そこで、ここでは、間隙水組成の影響を受ける

Table 4 Representative values of solubility and distribution coefficient and diffusion coefficient for different porewater in this study

パラメータ		降水系間隙水を想定した場合	海水系間隙水を想定した場合	酸化性間隙水を想定した場合
溶解度	Cs	可溶性	可溶性	可溶性
	Se	3×10^{-9}	6×10^{-9}	可溶性
	Np	2×10^{-8}	3×10^{-9}	4×10^{-5}
	Th	5×10^{-6}	9×10^{-8}	5×10^{-6}
分配係数	Cs	0.01	0.001	0.01
	Se	0	0	0
	Np	1	1	0.005
	Th	1	1	1
拡散係数	Cs	6×10^{-10}	3×10^{-10}	6×10^{-10}
	Se	2×10^{-10}	3×10^{-10}	5×10^{-11}
	Np	3×10^{-10}	3×10^{-10}	3×10^{-11}
	Th	3×10^{-10}	3×10^{-10}	3×10^{-10}

主要なパラメータ(溶解度、分配係数、拡散係数)をパターン化して固定し、固定値ごとに成立条件を抽出する。この際、固定値の設定については、地球化学的な相関関係を考慮して、既往の検討[5, 17, 18]に基づき、主要な間隙水に対する代表値を設定した(Table 4 参照)。主要な間隙水としては、降水系間隙水および海水系間隙水に加えて、極端な地球化学環境の変化を考慮し酸化性間隙水を想定した。

なお、Np および Th の分配係数、溶解度、拡散係数については、Np が酸化還元状態に鋭敏である一方で、Th は酸化還元状態にさほど鋭敏ではないという特徴を踏まえて設定した。

以上の設定に基づいて抽出した成立条件およびそれに基づくパラメータの安全裕度の評価結果を 4.2.1 項に、成立条件抽出プロセスの例を 4.2.2 項に示す。

4.2.1 結果

きわめて保守的な天然バリアを想定し、間隙水および性能目標ごとに抽出した成立条件の一覧を Table 5 に示す。例示した成立条件の値は、線量という 1 つの視点から算出したものである。このため、抽出した値の妥当性については、前提条件となるモデルやパラメータの範囲、設計要件、経済性、実現性などの複数の視点から総合的に判断してい

Table 5 Examples of successful conditions and safety margins under conservative condition of natural barrier

性能目標: 10 μSv/y

パラメータ	線量との 関係	安全裕度係 数の評価式	降水系間隙水			海水系間隙水			酸化性間隙水			レファレンス ケース	
			成立条件	制限核種	安全裕度 係数	成立条件	制限核種	安全裕度 係数	成立条件	制限核種	安全裕度 係数		
ガラス固化体溶出率	g/y	↑	1)	42.5 以下	Cs-135	6.8	42.5 以下	Cs-135	6.8	1.53 以下	Np-237	0.25	6.2
緩衝材厚さ	m	↓	2)	2.1 以上	Th-229	0.3	1.75 以上	Th-229	0.4	1.0 以上	Th-229	0.70	0.7
オーバーパック破損時期	y	↓*	2)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1000

性能目標: 300 μSv/y

パラメータ	線量との 関係	安全裕度係 数の評価式	降水系間隙水			海水系間隙水			酸化性間隙水			安全裕度 係数	レファレンス ケース
			成立条件	制限核種	安全裕度 係数	成立条件	制限核種	安全裕度 係数	成立条件	制限核種			
ガラス固化体溶出率	g/y	↑	1)	1275 以下	Cs-135	205	1275 以下	Cs-135	205	5.61 以下	Th-229	0.90	6.2
緩衝材厚さ	m	↓	2)	0.75 以上	Th-229	0.93	0.75 以上	Th-229	0.93	-	-	-	0.7
オーバーパック破損時期	y	↓*	2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,000

↑: パラメータが大きくなると線量が増加する傾向を示す ↓: パラメータが大きくなると線量が減少する傾向を示す

-: 本検討で設定した変動範囲内であれば制限する必要がないことを意味する。

*: 厳密には、オーバーパックの破損時期の変動による線量の増減は核種に依存して変化する。ここでは、単純化のため、パラメータが大きくなると線量が減少する傾向で代表的に表現する。

く必要がある。これらの成立条件に対する比較考察については、5章に示す。

次に、これらの成立条件の値に基づいてパラメータの安全裕度の評価を試みる。ここでは、前述のように、パラメータの安全裕度の評価を例示するための参考値として、第2次取りまとめのレファレンスケースにおいて設定されたパラメータ値を用いることとする。パラメータと線量の関係については、パラメータが大きくなると線量が増加する傾向とパラメータが大きくなると線量が減少する傾向の2つがある。このため、本検討においては、値が増加すると線量が増加する関係を有するパラメータについては、以下の(1)式を用いて算出することとした。また、値が増加すると線量が減少する関係を有するパラメータについては、以下の(2)式を用いることとした。これらの式に基づいて算出されるパラメータの安全裕度係数は、各パラメータの参考値に対して規格化した値であり、参考値に対する裕度の有無を示すものである。なお、2章で述べたように、性能評価パラメータと性能評価結果は、複雑な入出力関係を有する場合がある。このため、パラメータの安全裕度係数が同じであったとしても、パラメータの影響特性に応じてその程度は異なる。例えば、パラメータ値が数桁変動しても線量にあまり変化がなく、パラメータの安全裕度の程度が変わらないケースもあれば、パラメータ値が倍になるだけで線量が大きく変動し、パラメータの安全裕度の程度が大きく変動するケースも考えられる。仮に、各パラメータの安全裕度の程度を相対的に表現しようとする際には、各パラメータの影響特性(どのような複雑な入出力関係を有するか)の情報と合わせて提示することが重要である。なお、これらのパラメータの影響特性の例については4.2.2項に示す。

パラメータの安全裕度係数 = 成立条件の値/参考値 (1)

パラメータの安全裕度係数 = 参考値/成立条件の値 (2)

この評価式に基づいて算出したパラメータの安全裕度係数を Table 5 に示す。

4.2.2 成立条件抽出プロセスの例示

本項では、一例として、きわめて保守的な天然バリアおよび降水系間隙水を想定した場合の成立条件の抽出およびパラメータの安全裕度の評価プロセスを例示的に示す。なお、海水系間隙水および酸化性間隙水については、抽出プロセスが同一であるため、割愛する。

まずは、降水系間隙水を想定して、溶解度・分配係数・拡散係数を Table 4 に示した値に基づいて固定し、ガラス固化体溶出率、緩衝材の厚さ、オーバーパックの破損時期を変動させた解析を実施した(1次解析)。この統計解析の結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11 より、Se-79 および Np-237 については、統計解析の結果が $10 \mu\text{Sv/y}$ および $300 \mu\text{Sv/y}$ をすべて下回ることがわかる。一方、Cs-135 および Th-229

については、統計解析の結果が $10 \mu\text{Sv/y}$ および $300 \mu\text{Sv/y}$ を下回らない場合も存在することがわかる。このため、これらの核種について、ガラス固化体溶出率、緩衝材の厚さおよびオーバーパックの破損時期を分析対象として、成立条件を抽出することとした。

(1) Cs-135

Cs-135 に対する1次解析の結果(Fig. 11 参照)に基づいて算出した重要度を Fig. 12 に示す。Fig. 12 より、Cs-135 の最大線量に対して重要度が大きいパラメータは、ガラス固化体溶出率であることがわかる。

そこで、横軸にガラス固化体溶出率、縦軸に Cs-135 の最大線量を取った散布図を Fig. 13 に示す。Fig. 13 においては、性能目標値、および第2次取りまとめのレファレンスケースにおいて設定されたガラス固化体溶出率の値についても合わせて示す。プロットされた結果と $10 \mu\text{Sv/y}$ ラインとの交点から、ガラス固化体溶出率が 42.5 g/y 以下であれば $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る可能性があることが推定される。また、プロットされた結果と $300 \mu\text{Sv/y}$ ラインとの交点から、ガラス固化体溶出率が 1275 g/y 以下であれば $300 \mu\text{Sv/y}$ を下回る可能性があることが推定される。これらの値は、緩衝材からの移行率が定常状態であるプロットと性

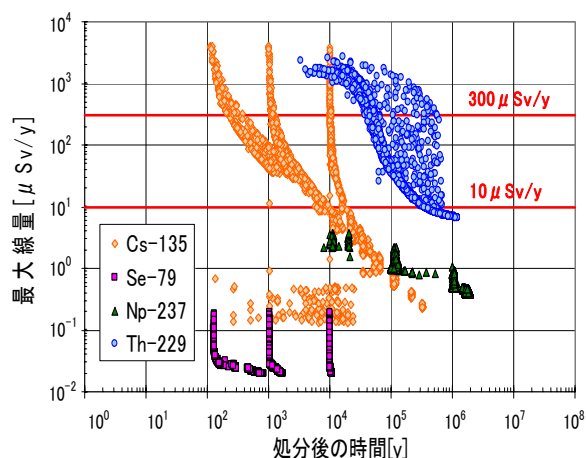


Fig. 11 Stochastic analysis result under fresh porewater type and conservative condition of the natural barrier

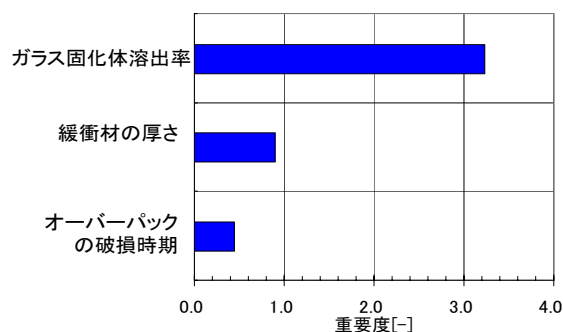


Fig. 12 Level of importance of parameters for maximum dose for Cs-135 under fresh porewater type and conservative condition of natural barrier

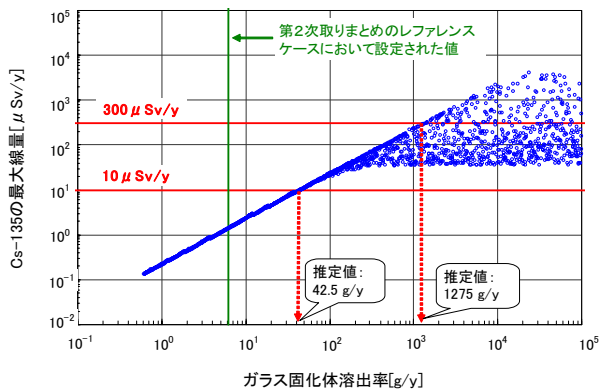


Fig. 13 Estimation of successful condition for Cs-135 under fresh porewater type and conservative condition of the natural barrier

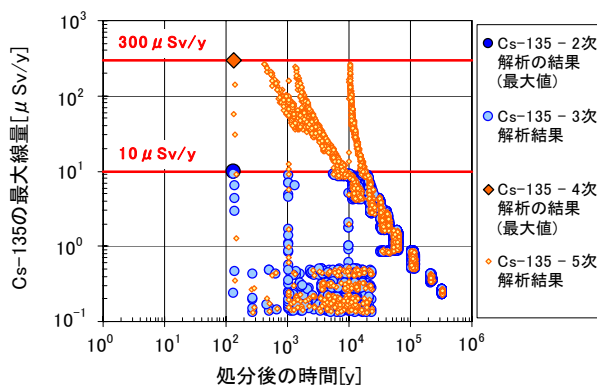


Fig. 14 Confirmation of the successful conditions under fresh porewater type and conservative condition of the natural barrier (Cs-135)

能目標値との交点から推定されるものである。定常状態の場合には、緩衝材からのCsの移行率がガラス固化体からのCsの溶出率と等しくなるため、ガラス固化体溶出率とCsの最大線量との関係は線形関係となる。このため、Fig. 13において、抽出される成立条件の推定値は、第2次取りまとめのレファレンスケースにおいて設定されたガラス固化体溶出率の値と比較して、性能目標が10 $\mu\text{Sv/y}$ の場合に約1桁弱、性能目標が300 $\mu\text{Sv/y}$ の場合に約2桁強の裕度があることがわかる。

次に、10 $\mu\text{Sv/y}$ の場合の成立条件を同定するために、緩衝材の厚さおよびオーバーパックの破損時期を保守値に設定し、ガラス固化体溶出率を42.5 g/yに設定した決定論解析を実施した(Cs-135 - 2次解析)。その結果、この決定論解析の結果の最大値が10 $\mu\text{Sv/y}$ を超えないことを確認した(Fig. 14 参照)。

また、同定した成立条件の妥当性を確認するために、ガラス固化体溶出率を42.5 g/y以下、緩衝材の厚さおよびオーバーパックの破損時期をTable 1の変動範囲で変動させた統計解析をそれぞれ実施した(Cs-135 - 3次解析: Fig. 14 参照)。Fig. 14より、統計解析の結果が10 $\mu\text{Sv/y}$ を下回っていることおよび先の決定論解析(Cs-135 - 2次解析)の結

果の最大値が統計解析(Cs-135 - 3次解析)の結果の上限を与えていることを確認できる。

一方、300 $\mu\text{Sv/y}$ の場合の成立条件を同定するために、緩衝材の厚さおよびオーバーパックの破損時期を保守値に設定し、ガラス固化体溶出率を1275 g/yに設定した決定論解析を実施した(Cs-135 - 4次解析)。その結果、この決定論解析の結果の最大値が300 $\mu\text{Sv/y}$ を超えないことを確認した(Fig. 14 参照)。

また、同定した成立条件の妥当性を確認するために、ガラス固化体溶出率を1275 g/y以下の範囲で、緩衝材の厚さおよびオーバーパックの破損時期をTable 1の変動範囲で変動させた統計解析をそれぞれ実施した(Cs-135 - 5次解析: Fig. 14 参照)。Fig. 14より、統計解析の結果が300 $\mu\text{Sv/y}$ をすべて下回っていることおよび先の決定論解析(Cs-135 - 4次解析)の結果の最大値が統計解析(Cs-135 - 5次解析)の結果の上限を与えていることが確認できる。

以上の検討から、きわめて保守的な天然バリアおよび降水系間隙水を想定した場合に、ガラス固化体溶出率が42.5 g/y以下であればCs-135の最大線量は10 $\mu\text{Sv/y}$ を超えない可能性があること、およびガラス固化体溶出率が1275 g/y以下であればCs-135の最大線量は300 $\mu\text{Sv/y}$ を超えない可能性があることが示唆された。

(2) Th-229

Th-229に対する1次解析の結果に基づいて算出した重要度をFig. 15に示す。Fig. 15より、Th-229の最大線量に対して重要度が大きいパラメータは、緩衝材の厚さであることがわかる。そこで、1次統計解析の結果に基づき、緩衝材の厚さを横軸に、Th-229の最大線量を縦軸に取った散布図をFig. 16に示す。Fig. 16には、性能目標値、および第2次取りまとめのレファレンスケースにおいて設定された緩衝材の厚さの値についても合わせて示す。プロットされた結果と10 $\mu\text{Sv/y}$ ラインとの交点から、緩衝材の厚さが2.1m以上であれば10 $\mu\text{Sv/y}$ を下回る可能性があることが推定される。また、プロットされた結果と300 $\mu\text{Sv/y}$ ラインとの交点から、緩衝材の厚さが0.75 m以上であれば300 $\mu\text{Sv/y}$ を下回る可能性があることが推定される。さ

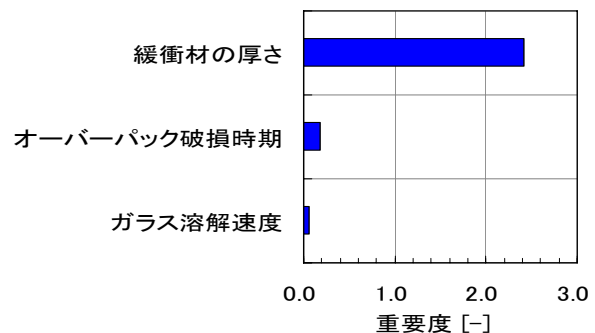


Fig. 15 Level of importance of parameters for maximum dose for Th-229 under fresh porewater type and conservative condition of the natural barrier

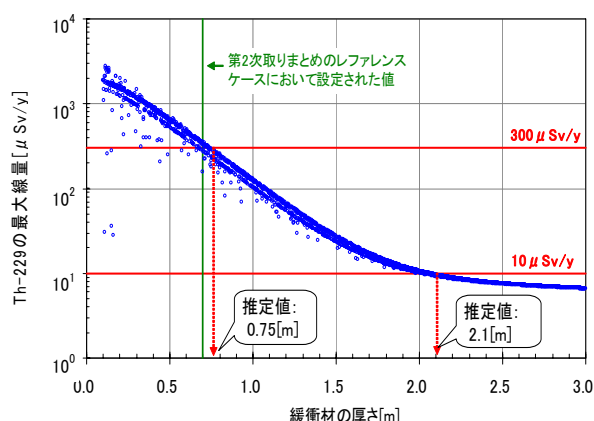


Fig. 16 Estimation of successful condition for Th-229 under fresh porewater type and conservative condition of the natural barrier

らに、Fig. 16 より、緩衝材の厚さと Th-229 の最大線量との関係は、非線形性を有することがわかる(例えば、緩衝材の厚さを第 2 次取りまとめのレファレンスケースにおける設定値から 3 倍にすると、Th-229 の最大線量が約 1/30 になる)。パラメータの安全裕度を提示する際には、このようなパラメータの影響特性を把握することが重要である。

なお、Fig. 16 より、緩衝材の厚さが約 0.1 m 程度の薄い場合に、Th-229 の最大線量が特異的にばらついており、線量が高い結果と低い結果が存在することがわかる。線量が高い結果は、ガラス固化体溶出率が大きい場合の結果であり、ガラス固化体近傍での Np-237 の沈殿・崩壊により、Th-229 の緩衝材からの移行率が高くなるために生じるものである。一方、線量が低いプロットは、ガラス固化体溶出率が小さい場合の結果であり、Np-237 の沈殿が発生しないため、緩衝材中での Np-237 の崩壊による Th-229 の生成が起こりにくく、Th-229 の緩衝材からの移行率が低くなるために生じるものである。

10 $\mu\text{Sv/y}$ の場合の成立条件を同定するために、ガラス固化体溶出率およびオーバーパックの破損時期を保守値に設定し、緩衝材の厚さを 2.1 m で固定した決定論解析を実施した(Th-229 - 2 次解析)。その結果、この決定論解析の結果が 10 $\mu\text{Sv/y}$ を超えないことを確認した(Fig. 17 参照)。

さらに、同定した成立条件の妥当性を確認するために、緩衝材の厚さを 2.1 m 以下、ガラス固化体溶出率およびオーバーパックの破損時期を変動させた統計解析をそれぞれ実施した(Th-229 - 3 次解析: Fig. 17 参照)。Fig. 17 より、統計解析の結果が 10 $\mu\text{Sv/y}$ を下回っていることおよび先の決定論解析(Th-229 - 2 次解析)の結果が統計解析(Th-229 - 3 次解析)の結果の上限を与えていることを確認できる。次に、300 $\mu\text{Sv/y}$ の場合の成立条件を同定するために、ガラス固化体溶出率およびオーバーパックの破損時期を保守値に設定し、緩衝材の厚さを 0.75 m で固定した決定論解析を実施した(Th-229 - 4 次解析)。その結果、この決定

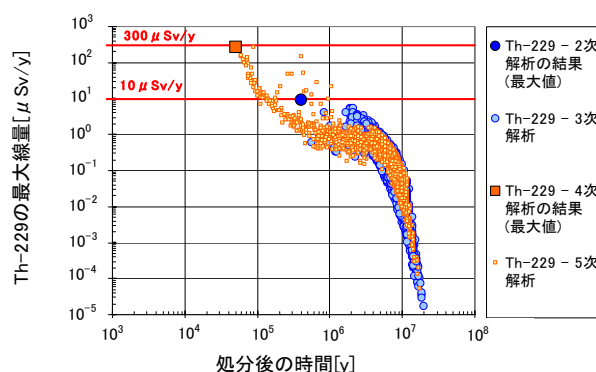


Fig. 17 Confirmation of the successful conditions under fresh porewater type and conservative condition of the natural barrier (Th-229)

論解析の結果が 300 $\mu\text{Sv/y}$ を超えないことを確認した(Fig. 17 参照)。

さらに、同定した成立条件の妥当性を確認するために、緩衝材の厚さを 0.75 m 以下、ガラス固化体溶出率およびオーバーパックの破損時期を変動させた統計解析を実施した(Th-229 - 5 次解析: Fig. 17 参照)。Fig. 17 より、統計解析の結果が 300 $\mu\text{Sv/y}$ を下回っていることおよび先の決定論解析(Th-229 - 4 次解析)の結果の最大値が統計解析(Th-229 - 5 次解析)の結果の上限を与えていることを確認した。

以上の検討から、きわめて保守的な天然バリアおよび降水系間隙水の場合に、緩衝材の厚さが 2.1 m 以上であれば Th-229 の最大線量は 10 $\mu\text{Sv/y}$ を超えない可能性があること、および緩衝材の厚さが 0.75 m 以上であれば、Th-229 の最大線量は 300 $\mu\text{Sv/y}$ を超えない可能性があることが示唆された。

(3) 合計線量

ここでは、抽出した個々の核種に対する成立条件が、Se-79, Cs-135, Np-237 および Th-229 の合計線量を指標とした場合においても性能目標を下回るかどうかを確認する。このため、(1)(2)で抽出した個々の核種に対する成立条件の値で固定し、それ以外のパラメータを Table 1 の変動範囲における保守値で固定した決定論解析を実施した(Fig. 18-19 参照)。Fig. 18-19 より、Se-79 および Np-237 の最大線量が溶解度制限により 10 $\mu\text{Sv/y}$ および 300 $\mu\text{Sv/y}$ をそれぞれ大きく下回ること、Cs-135 の最大線量および Th-229 の最大線量に対する発生時刻が異なることがわかる。このため、4 核種の合計線量が 10 $\mu\text{Sv/y}$ および 300 $\mu\text{Sv/y}$ をそれぞれ下回ったものと考えられる。

以下では、Fig. 18 および Fig. 19 の特徴について簡潔に示す。Cs-135 については、Fig. 18 より約 1 万年で急激に減少していること、Fig. 19 より約 300 年で急激に減少していることをそれぞれ把握できる。これは、ガラス固化体の全量が溶解する時間(ガラス固化体溶出率 42.5 g/y の場合の核種溶出期間は約 1 万年、ガラス固化体溶出率 1275 g/y

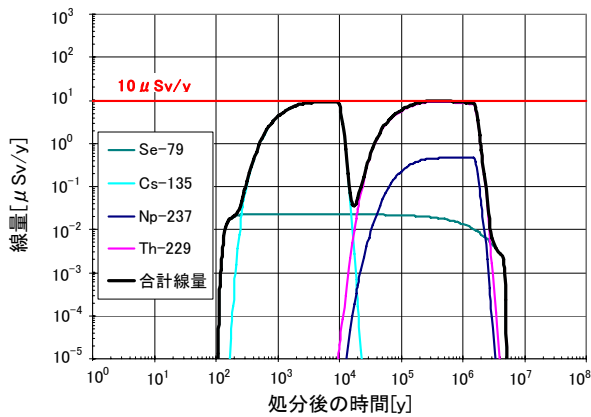


Fig. 18 Confirmation of the successful condition when the indicator is total dose and an acceptable dose is 10 μ Sv/y

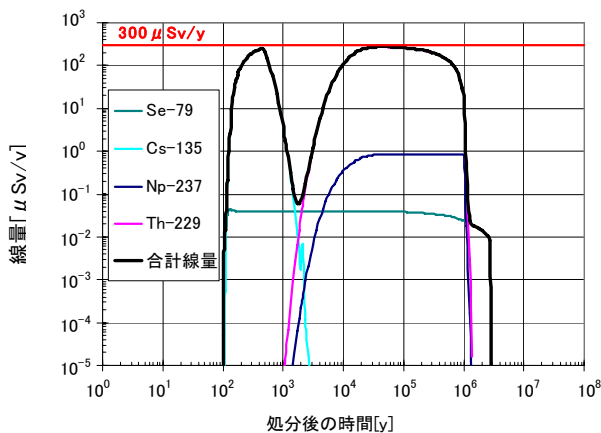


Fig. 19 Confirmation of the successful condition when the indicator is total dose and an acceptable dose is 300 μ Sv/y

の場合の核種溶出期間は約 300 年)とほぼ整合することから、インベントリの枯渇が原因と考えられる。さらには、Se-79 については、溶解度制限により 0.3 μ Sv/y 付近で定常に達していること、Np-237 および Th-229 については、放射平衡に達していることを把握できる。

5 人工バリアの成立条件に関する比較考察

本章においては、それぞれの間隙水毎に与えられた成立条件(Table 5 参照)を比較考察した内容について記述する。

Table 5 より、降水系間隙水と海水系間隙水を想定した場合の成立条件のうち、ガラス固化体溶出率の値を比較すると、10 μ Sv/y および 300 μ Sv/y のいずれにおいても、性能目標以下とするために必要となる値が同じとなることからわかる。Cs に対する降水系間隙水と海水系間隙水の条件の大きな違いは、分配係数が 1 桁異なることである(Table 4)。以下では、この違いが成立条件の値に影響を与えない理由について述べる。

ガラス固化体溶出率の制限は、Cs-135 の最大線量を性能目標以下にするために必要となるものである。Fig. 20 に、ガラス固化体溶出率と Cs-135 の最大線量の関係を間

隙水ごとにプロットした散布図および目標線量のラインを示す。Fig. 20 より、間隙水(分配係数)の違いの影響はガラス固化体溶出率が高い場合に出現していること、降水系間隙水および海水系間隙水の場合における線量の上限のラインに違いがないことがわかる。前者については、4.1.1 項にて述べたように、ガラス固化体溶出率が高い場合には、短時間でインベントリが枯渇して定常に達せず、緩衝材の収着が緩衝材からの移行率に与える影響が大きくなるためと考える。一方、後者については、緩衝材からの移行率が定常状態であり、分配係数の感度がないためと考えられる。以上のことから、降水系間隙水および海水系間隙水の条件下において、分配係数の違いが成立条件の値に影響を与えないと考えられる。

さらに、オーバーパックの破損時期を 100 年、緩衝材の厚さを 0.1 m, 1.0 m, 3.0 m とそれぞれ固定し、ガラス固化体溶出率を変化させた解析結果も Fig. 20 に示す。この解析結果とプロットの関係から、ガラス固化体溶出率が高い場合に、緩衝材の厚さを変えることによって Cs-135 の最大線量を抑え込める可能性があることを把握できる(例えば、緩衝材の厚さが 1.0 m 以上あればガラス固化体

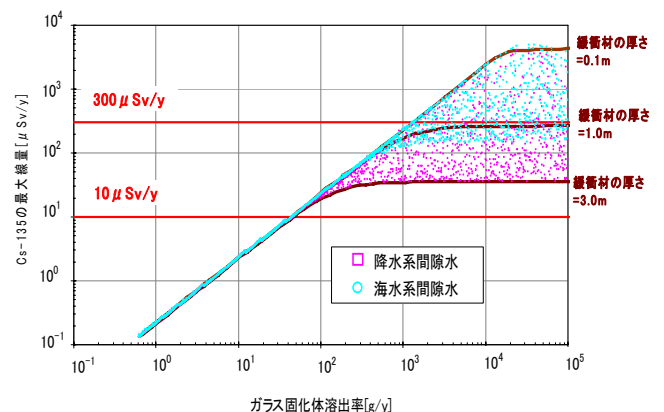


Fig. 20 Relationship between glass dissolution rate and maximum dose of Cs-135 for different porewater when the natural barrier is conservative condition

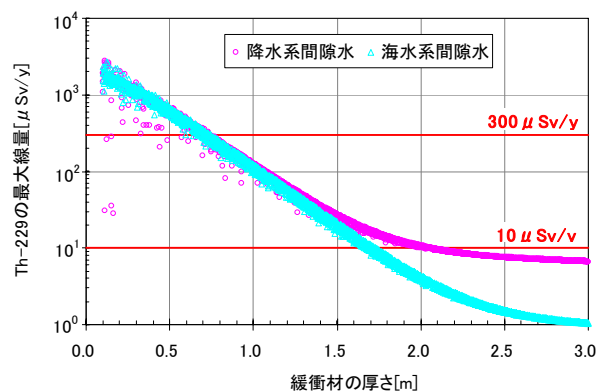


Fig. 21 Relationship between buffer thickness and maximum dose of Th-229 for different porewater when the natural barrier is conservative condition

溶出率の値に関係なく Cs-135 の最大線量が $300 \mu\text{Sv/y}$ 以下となる)。このため、緩衝材の厚さの設定は、Cs-135 に対して、ガラス固化体の溶出に関する不確実性を補完するための重要な研究課題となりうることが示唆される。

また、Table 5 より、降水系間隙水と海水系間隙水を想定した場合の成立条件のうち、緩衝材の厚さの値を比較すると、以下のことがわかる。

- $10 \mu\text{Sv/y}$ 以下にするために必要となる緩衝材の厚さが異なる(2.1 m と 1.75 m)
- $300 \mu\text{Sv/y}$ 以下にするために必要となる緩衝材の厚さが同じになる(0.75 m)

以下では、この違いが発生する理由について述べる。

緩衝材の厚さの制限は、Th-229 の最大線量を性能目標以下にするために必要となるものである。そこで、降水系間隙水と海水系間隙水における解析条件の違いが Th-229 の最大線量に与える影響について考察する。

ここでは、緩衝材の厚さと Th-229 の最大線量の関係を間隙水ごとに整理した散布図を Fig. 21 に示す。Fig. 21 には、性能目標値についてもあわせて示す。Fig. 21 より、以下のことがわかる。

- ① 緩衝材の厚さが薄い場合に、降水系間隙水と海水系間隙水における Th-229 の最大線量の違いが小さい($300 \mu\text{Sv/y}$ 付近)
- ② 緩衝材の厚さが厚い場合に、降水系間隙水と海水系間隙水における Th-229 の最大線量の違いが現れる($10 \mu\text{Sv/y}$ 付近)

Np と Th の降水系間隙水と海水系間隙水における解析条件の違いは、溶解度が約 1 桁異なることである(Table 4)。拡散係数および分配係数には違いがない。ここでは、Np-237 および Th-229 の特徴を踏まえ、前述の①②が発生する理由について以下に記述する。

Np-237 および Th-229 の特徴について：

- Np-237 は、インベントリが大きく、半減期が 214 万年と非常に長く、難溶性核種であるため、ガラス固化体近傍において多量に沈殿するという特徴を有する。
- Th-229 は、Np を親核種とする崩壊連鎖核種であり、インベントリが小さく、Np-237 と比較して半減期が短いという特徴を有する。また、緩衝材に流入する Th-229 の生成プロセスは、ガラス固化体からの溶出によるものとガラス固化体近傍において沈殿する Np からの崩壊によるものの 2 つがある。

①について：

- ここで、緩衝材の厚さが 0.1 m および他のパラメータが第 2 次取りまとめのレファレンスケースの場合に、Np-237 のガラス固化体近傍の沈殿量および人工バ

リアからの Np-237 と Th-229 の移行率を Fig. 22 に示す。Fig. 22 より、Np のガラス固化体近傍の沈殿量と Th-229 の人工バリアからの移行率のプロファイルが類似していることがわかる。このことは、緩衝材の厚さが薄い場合には、Th-229 の人工バリアからの移行率が、ガラス固化体からの溶出によるものではなく、ガラス固化体近傍における Np-237 の沈殿量によって依存したものであることを示唆するものである。

- 間隙水ごとの Np の溶解度のラインを Fig. 22 に示す。Fig. 22 より、それぞれの間隙水の Np の溶解度は、ともにガラス固化体近傍の Np-237 の沈殿濃度と比較して数桁小さいことがわかる。このため、間隙水の違い

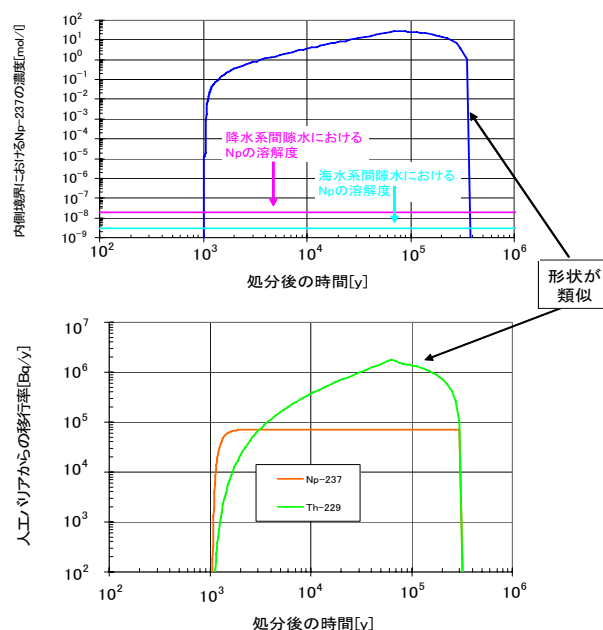


Fig. 22 Concentration of Np-237 in the vicinity of the vitrified waste and release rate from EBS when parameters except buffer thickness are based on reference case of H12 report(buffer thickness is 0.1 m)

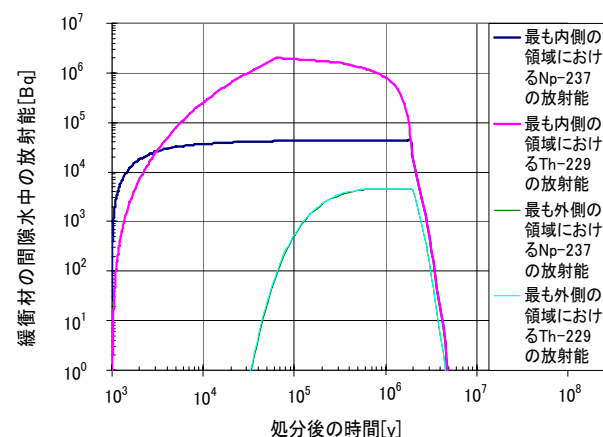


Fig. 23 Radioactivity of Np-237 and Th-229 in the porewater of buffer when porewater type is fresh and buffer thickness is 3.0 m

がガラス固化体近傍での Np-237 の沈殿量の違いに与える影響は小さいことがわかる。

- ・ 以上のことから、緩衝材の厚さが薄い場合には、降水系間隙水と海水系間隙水における Np の沈殿量に大きな違いはなく、Np の沈殿量に依存する Th-229 の人工バリアからの移行率がほぼ同程度になると考えられる。

②について：

- ・ ここで、降水系間隙水の条件下において、緩衝材の厚さが 3.0 m の場合に、緩衝材の最も内側の領域⁴⁾において間隙水中に存在する核種量から求めた放射能、および緩衝材の最も外側の領域⁵⁾において間隙水中に存在する核種量から求めた放射能を Fig. 23 に示す。Fig. 23 より、緩衝材の最も外側の領域においては、Np-237 および Th-229 の放射能がほぼ等しくなっていることがわかる。これは、緩衝材の厚さが厚い場合には、ガラス固化体近傍で生成され緩衝材を移行して外側境界に至る Th-229 の量がほとんど無視できるほど小さく、Np-237 と Th-229 が緩衝材中で放射平衡に達しているためと考えられる。
- ・ このため、Th-229 の人工バリアからの移行率は、緩衝材の間隙水中における Np-237 の存在量に規定されることになる。緩衝材の間隙水中における Np-237 の存在量は、ガラス固化体近傍での Np の溶解度に依存して決まると考えられる。
- ・ 以上のことから、緩衝材の厚さが比較的大きい場合には、Np-237 の溶解度の違いに依存した緩衝材の外側近傍での Np-237 の存在量の違いに起因して Th-229 の最大線量の違いが現れると考えられる。

一方、Table 5 より、酸化性間隙水の場合について、降水系間隙水、海水系間隙水の場合と比較から、以下のことがわかる。

- a) Th-229 を制限するために、ガラス固化体溶出率により低い値が要求されること
- b) Th-229 を制限するために、緩衝材の厚さに関する成立条件の値が緩和されていること

以下では、この理由について述べる。

降水系間隙水、海水系間隙水の場合には、Th-229 の生成プロセスとしては、ガラス固化体近傍において沈殿する Np からの崩壊の影響が大きい。一方、酸化性間隙水の場合には、Np について、溶解度の上昇および分配係数の低下により、ガラス固化体近傍の沈殿量が減少するとともに緩衝材中にとどまる量が減少する。このため、Th-229 の生成プロセスとしてはガラス固化体からの溶出

の影響が大きくなる。このため、Th-229 を制限するために、ガラス固化体溶出率により低い値が要求され、緩衝材の厚さの値が緩和されているものと考えられる。

以上の検討より、きわめて保守的な天然バリアを想定したとしても、ガラス固化体溶出率および緩衝材の厚さを組み合わせることにより、頑健な人工バリアを構築できる可能性が示唆される。

6 おわりに

本論文では、人工バリアのパラメータに着目し、性能評価パラメータの安全裕度を評価するための考え方について提案した。提案に際しては、天然バリアがきわめて保守的な条件下において、ガラス固化体溶出率、オーバーパックの破損時期、緩衝材の厚さに着目した解析を行い、それに基づく成立条件の抽出および性能評価パラメータの安全裕度について例示した。本検討において例示した成立条件とそれに基づくパラメータの安全裕度は、代表的な核種を対象として抽出した一例である。このため、パラメータの安全裕度を個別現象研究にフィードバックし、工学的対策や不確実性の低減について検討するためには、評価対象として含めるべき核種をより詳細に検討する必要がある。その際には、パラメータの増加による解釈の困難さ、線量を支配する核種の変遷、個々の核種を対象に抽出した成立条件の合算方法などが課題となる。さらには、分析対象パラメータの感度特性を適切に把握し、地質環境の多様性に対して頑健性の高い人工バリアを構築していくためには、天然バリアや生物圏に属するパラメータを他の値で固定あるいは変動させた解析、高度化された核種移行解析モデルを用いた解析などについても検討する必要がある。これらの解析に対しては、SI 法[23]などの他の統計手法や、既報[9]にて提案されている崩壊連鎖核種に関する取扱いなどを参考としつつ、作業を効率化することも重要である。

また、本検討において実施した人工バリアの成立条件に関する比較考察は、今後、複数の場が与えられた場合に、間隙水組成と人工バリアのパラメータに関する成立条件との関係について理解を深めるために有益と考える。

謝辞

本稿を取りまとめるにあたり、日本原子力研究開発機構の宮原要氏および稲垣学氏には、貴重なご意見を頂くとともに有益な議論をさせて頂きました。また、査読者および事務局の方々からも、多数の有益なご意見を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 原子力安全委員会：低レベル放射性廃棄物埋設に関

⁴⁾ 緩衝材の最も内側の領域は、解析上分割された緩衝材領域のうち、ガラス固化体に最も近い領域を意味する。

⁵⁾ 緩衝材の最も外側の領域は、解析上分割された緩衝材領域のうち、ガラス固化体から最も遠い領域、すなわち掘削影響領域に最も近い領域を意味する。

- する安全規制の基本的考え方(中間報告). 平成 19 年 7 月 12 日(2007).
- [2] Ohi, T., Takase, H., Inagaki, M., Oyamada, K., Sone, T., Mihara, M., Ebashi, T., Nakajima, K.: Application of a comprehensive sensitivity analysis method on the safety assessment of TRU waste disposal in JAPAN. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXX (Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 985) (Dunn, D. and Poinssot, C. and Begg, B. ed.), Boston, Massachusetts, U.S.A, November 27- December 1, 2006, pp.129-134 (2007).
- [3] 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構: TRU 廃棄物処分技術検討書ー第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめー. JNC TY1400 2005-013 FEPC-TR2-2005-02, pp.4-175-4-188 (2005).
- [4] Ghosh, S. T.: Risk-Information Decisions about High-Level Nuclear Waste Repositories, Dr.Thesis, Massachusetts Institute of Technology, (2004).
- [5] 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ー地層処分研究開発第2次取りまとめー 分冊3 地層処分システムの安全評価. JNC TN1400 99-023 (1999).
- [6] OECD/NEA: Management of Uncertainty in Safety Cases and the Role of Risk, Workshop Proceedings Stockholm, Sweden, February 2-4, 2004, OECD/NEA, pp.197-216 (2004).
- [7] Savage, D.: The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of Radioactive waste, JOHN WILEY & SONS, Chichester, UK (1995).
- [8] 若杉圭一郎, 小尾繁, 牧野仁史: モンテカルロシミュレーションによる高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価に対するデータ不確実性解析. JNC TN1340 2001-010, pp.149-160 (2002).
- [9] 安俊弘, Greenspan, E., Chambre, P.L.: 地層処分された高レベル廃棄物による臨界現象発生メカニズムとその可能性. 原子力バックエンド研究 4, No.2, 3-20 (1998).
- [10] Wogan, K. J., Apted, M. J.: The Effect of Precipitation Fronts induced by Radionuclide Chain Decay and Elemental Solubility Limits on Near-field Mass Transport. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XV (Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 257) (Sombret, D. G. ed.), Strasbourg, France, November 4-7, 1991, pp.705-712 (1992).
- [11] 鈴木祐二, 牧野仁史, 加藤智子: 線量換算係数の改訂に伴う地層処分生物圏評価の再検討(研究報告). JNC TN8400 2005-004 (2005).
- [12] GoldSim Technology Group LLC: GoldSim Contaminant Transport Module User's Guide., GoldSim Technology Group LLC (2007).
- [13] 原子力安全委員会: 放射性廃棄物の処分の安全規制における共通的な重要事項について. 平成 16 年 6 月 10 日(2004).
- [14] ICRP: Radiological Protection Policy for the Disposal of Radioactive waste: ICRP Publication 77, Pergamon press, Oxford, UK (1998).
- [15] ICRP: Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste: ICRP Publication 81, Pergamon press, Oxford, UK (2000).
- [16] 原子力安全委員会: 放射性廃棄物埋設施設の安全審査の基本的考え方. 昭和 63 年 3 月 17 日 (1988).
- [17] 東侍郎, 柴田雅博, 油井三和, 澁谷朝紀, 能登屋信, 吉田泰: 地層処分研究開発第2次取りまとめにおける放射性元素の溶解度評価. JNC TN8400 99-071 (1999).
- [18] 柴田雅博, 佐藤治夫, 小田治恵, 油井三和: 地層処分研究開発第2次取りまとめにおける緩衝材への放射性元素の分配係数の設定. JNC TN8400 99-072 (1999).
- [19] Mihara, M. and Sasaki, R.: Radio-nuclides Migration Datasets (RAMDA) on cement, bentonite and rock for the performance assessment of TRU waste repository in Japan. JNC TN8400 2005-027 (2005).
- [20] 大井貴夫, 仲島邦彦: 人工バリアからの核種放出に対する溶解度等の影響特性の把握. 動燃技報, No.102, PNC TN1340 97-002 (1997).
- [21] 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ー地層処分研究開発第2次取りまとめー 分冊1 わが国の地質環境. JNC TN1400 99-021 (1999).
- [22] 澁谷朝紀, 陶山忠宏, 柴田雅博: 性能評価で用いる岩石に対する核種の分配係数. JNC TN8410 99-051 (1999).
- [23] 高瀬博康, 稲垣学, 須山泰宏: 地質環境条件の空間的不均質性に応じた施設レイアウト等の工学的対策によるシステム全体性能の改善の可能性について. 原子力バックエンド研究 13, No.1, 13-22 (2006).