JAEA-Research
2008-019

人工バリアと天然バリアのパラメータに関する感度解析

ー高レベル放射性廃棄物の地層処分性能評価への包括的感度解析手法の適用ー

Sensitivity Analysis of Parameters for Engineered Barrier and Natural Barrier
- Application of the Comprehensive Sensitivity Analysis Method
to HLW Geological Disposal Concept -

江橋 健　小尾 繁*　大井 貴夫

Takeshi EBASHI, Shigeru KOO* and Takao OHI

地層処分研究開発部門
システム性能研究グループ

Performance Assessment Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

人工バリアと天然バリアのパラメータに関する感度解析
-高レベル放射性廃棄物の地層処分性能評価への包括的感度解析手法の適用-

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
江橋 健，　小尾 繁*，　大井 貴夫

（2008 年 1 月 16 日 受理）

高レベル放射性廃棄物の性能評価の信頼性を高めていくためには，地質環境調査，設計研究，室内試験や原位置試験などの研究開発を通じて不確実性を低減することが重要となる。このような研究開発においては，地層処分計画が進展するにつれて，処分システムの性能に影響を与える重要な不確実性を重点的に取り扱っていくことが考えられる。この際，重要な不確実性を明らかにするために，感度解析を活用することが有効である。

一方，地層処分計画の初期段階においては，いつくかの設計オプションや具体的な地質環境が選択肢として残されたままであることが想定される。この際，設計研究の項目は，主に人工バリアのパラメータと関係付けられ，地質環境調査の項目は，主に天然バリアのパラメータと関係付けられる。このため，人工バリアと天然バリアに分類したパラメータの感度解析は，設計研究と地質環境調査への反映という観点から，有効なアプローチのひとつと考えられる。

このような感度解析を行うための手法のひとつとして，包括的感度解析手法が挙げられる。これは，パラメータが有する不確実性に着目した多数の決定論解析の結果から，「評価結果に与える影響が大きいパラメータ」を特定し，それに基づいて「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）」を抽出するというものである。

本検討においては，高レベル放射性廃棄物の性能評価に包括的感度解析手法を適用し，一方のバリアのパラメータを保守的に設定した条件下において，一方のバリアの分析対象パラメータに関する重要度や成立条件を抽出することができるかどうかについて検討することとした。

検討の結果，人工バリアおよび天然バリアのパラメータに関する重要度や成立条件をそれぞれ例示した（例えば，降水系間隙水および天然バリアが保守的な条件の場合に，ガラス溶解速度が 2.5g/m²/y 以下であれば，Cs-135 の最大線量は 10μSv/y を下回る）。

本検討を通じて，包括的感度解析手法が，上述のような保守的な条件下において，それぞれのバリアのパラメータに関する重要度や成立条件の抽出に適用可能であることを示した。本検討における手法の適用性確認や抽出された感度特性は，地層処分計画の初期段階におけるシナリオ解析や頑健なバリアの構築に資するものと考える。

核燃料サイクル工学研究所（駐在）：〒319-1194　茨城県那珂郡東海村村松 4-33
＊　株式会社　ＮＥＳＩ

Sensitivity Analysis of Parameters for Engineered Barrier and Natural Barrier -Application of the Comprehensive Sensitivity Analysis Method to HLW Geological Disposal Concept-

Takeshi EBASHI, Shigeru KOO* and Takao OHI

Geological Isolation Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura Naka-gun Ibaraki-ken

(Received January 16, 2008)

In order to increase confidence in performance assessments of the geological disposal of high-level radioactive waste, it is important to minimise uncertainty. Some uncertainties can be reduced by R&D including site characterization, design studies, experiments both in the laboratory and in underground test facilities. As a disposal programme matures, R&D will focus on key uncertainties. In order to identify key uncertainties affecting the performance of the disposal system, sensitivity analyses have been carried out. On initial stage of stepwise approach, it is assumed that a number of design options and sites may remain. Main parameters concerning design are related to engineered barrier. Meanwhile, main parameters concerning siting are related to natural barrier. Therefore, sensitivity analyses of parameters which are classified by engineered barrier and natural barrier need to be carried out from the point of view of design and siting.

One of sensitivity analysis techniques is the comprehensive sensitivity analysis method by which parameters having a large impact on maximum dose and threshold values of parameters and/or combinations yielding a "successful condition" where maximum dose does not exceed a target value are obtained.

In this study, comprehensive sensitivity analysis method was applied to HLW geological disposal concept. In this application, level of importance and successful condition for intended parameters on one barrier were extracted under conservative conditions of parameters on the other barrier, taking into account diverse uncertainties on initial stage of stepwise approach.

We achieved analysis results with level of importance and successful condition for intended parameters (e.g., under the fresh porewater and conservative conditions of natural barrier, if glass dissolution rate is less than 2.5g/m^2/y, maximum dose for Cs-135 results in less than 10 μSv/y).

In conclusion, the comprehensive sensitivity analysis method can be applied to extraction of sensitivity characteristics on each barrier, under the above conservative conditions. Such study on the applicability of method and the extracted sensitivity characteristics will contribute to construction of a robust barrier and a scenario analysis for initial stage of stepwise approach.

Keywords : Sensitivity Analysis, Parameter Uncertainty, HLW Disposal

---

＊ NESI Inc.

目　　次

Contents

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物(以下，HLW）の性能評価においては，場の不均質性や理解の不十分さに起因する多様な不確実性を適切に取り扱っていく必要がある。このような多様な不確実性を適切に取り扱うためには，個別現象研究の知見を活用し，多様な不確実性をシナリオ・モデル・パラメータの不確実性として定性的あるいは定量的に評価に組み込み，それらの不確実性が評価結果に及ぼす定量的な影響を把握することが重要となる。さらに，性能評価の信頼性を高めていくためには，不確実性が評価結果に及ぼす影響に関する定量的な情報に基づいて，不確実性を低減することやシステムの頑健性[1]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，不確実性の影響が大きい因子を判断し，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。このためには，個々の不確実性の影響の程度と個別現象研究において目標値として要求される処分システムの性能めやす値などの定量的な情報との比較が有効である。一方，システムの頑健性を提示するためには，十分な裕度を見込んだバリアを構築すること（付録 1 参照）が必要となる。このためには，多様な不確実性を考慮したとしても安全性が損なわれないようなシステムの条件などの定量的な情報を抽出し，個別現象研究の知見との比較などにより，工学的な対策やサイト特性において実現性が高い因子を対象とすることが重要となる。

これらの定量的な情報を得るための感度解析手法のひとつとして，包括的感度解析手法（Ohi et al, 2007[2)]：第２次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005[3)]：以下，「TRU 第２次取りまとめ」という））が挙げられる。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」（以下，重要パラメータという），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」（以下，成立条件[2]という）を抽出する手法である[3]。同様の手法として，SPARC 解析（Ghosh，2004[4)]）が挙げられる。これは，好ましくないパラメータの条件においても，設定した性能目標を達成することができるような救世主的なパラメータの条件およびその発生確率を抽出するものである。成立条件および救世主的なパラメータの条件の２つは，概念的に類似のものと考えられる。

本検討においては，HLW の性能評価に包括的感度解析手法を適用し，十分な裕度を見込んだバリアシステムの構築に資する定量的な情報を提示できるかどうかについて検討することとした。このような手法の有用性の検討や検討を通じて抽出される感度特性は，地層処分計画の初期段階におけるシナリオ解析や頑健なバリアの構築に資するものと考えられる。

---

[1] 頑健性の基本概念としては，システムのデザインや将来挙動の分析結果が，入力として用いられるデータや前提条件などの不確実性に対して影響を受けにくいことと定義される（Chapman and McCombie, 2003[1)]）。

[2] 包括的感度解析手法を用いて抽出される成立条件は，処分システムが成立するための必要条件ではない。

[3] 重要パラメータ及び成立条件は，前提条件やモデルやパラメータ設定等に依存することに留意する必要がある。

以下では，第 2 章において方法論，第 3 章において本研究における解析条件，第 4 章および第 5 章において得られた解析結果についてそれぞれ記述する。そして，第 6 章においては，本研究を通じて得られた成果をまとめるとともに，今後の課題について示す。

2. 方法論

本章においては，まず，包括的感度解析手法（図 2-1 参照：付録 2 参照）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の具体的な方法について記述する。この手法の採用により，十分な裕度を見込んだバリアシステムの構築に資する定量的な情報の提供が可能になると考える。

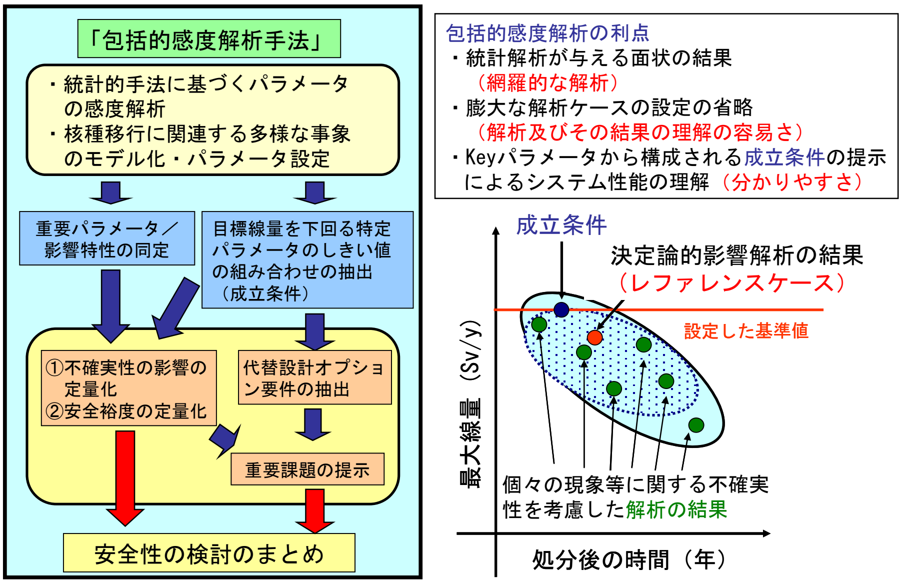


図 2-1 包括的感度解析手法のイメージ図（TRU 第2次取りまとめから抜粋）

複数のパラメータの幅広い変動が評価結果に及ぼす影響について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が非線形モデルであることから，パラメータの影響特性は線形ではない。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を意味する。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，核種移行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，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変動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分析対象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は，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る。このような特徴に対して，複数のパラメータを同時に変動させる包括的感度解析手法を HLW の地層処分の性能評価に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。特に，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，実効拡散係数が地球化学的に整合的である必要がある。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。

以上の特性，留意点を踏まえ，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，十分な裕度を見込んだバリアシステムの構築に資する定量的な情報を抽出する。

天然バリアは，地質環境調査により場の理解が進むものの，人工バリアと比較して不確実性が大きいという特徴を有する。一方，人工バリアは，所期の機能を発揮する可能性が高く，デザインや寸法の変更などの工学的対策が可能という特徴を有する。この際，工学的対策のみで安全性を確保することができる場合には，地質環境調査への要求を緩和させ，サイト選定に幅を持たせることを可能にすると考える。このため，ここでは，天然バリアの機能に期待しないという極端な条件を想定し，人工バリアのパラメータを対象に成立条件を抽出する。このような極端な条件下で抽出される成立条件は，工学的対策により十分な裕度を見込んだバリアシステムを構築する際の目標値のひとつになると考える。

一方，TRU 廃棄物との併置処分については，二つの処分施設の間に適切な離隔距離を設けることにより，相互に影響なく処分することができ，技術的に成立すると判断されている（原子力委員会，2006[5)]）。この際，サイト選定のみで安全性を確保することができる場合には，安全性および経済性の観点から工学的対策への要求を緩和させ，設計オプションに幅を持たせることを可能にすると考える。このため，ここでは，人工バリアの機能に期待しないという極端な条件を想定し，天然バリアのパラメータを対象に成立条件を抽出する。このような極端な条件下で抽出される成立条件は，サイト選定により十分な裕度を見込んだバリアシステムを構築する際の目標値のひとつになると考える。

以上を踏まえ，包括的感度解析手法を適用するための具体的な条件を，以下の i)および ii)に示す。なお，パラメータの重要度や影響特性の把握は，成立条件を見出す上で重要である。

<u>i)天然バリアの機能を期待しないケース：</u>

- 天然バリアのパラメータについては，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（若杉ほか，2002[6)]）に着目する。透水量係数分布の平均値は，任意の値よりも大きくなると，線量への影響が小さくなるという特性を有する。これは，線量が緩衝材からのフラックスに規定されるためと考えられる。図 2-2 は，既往の統計解析の解析条件（若杉ほか，2002[6)]）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。図 2-2 より，透水量係数分布の平均値が $10^{-6}m^2/s$ 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わかる。このような条件下で求められる人工バリアの重要パラメータや成立条件は，工学的な対策において保守的な性能を与える目標値のひとつと考えられる。このため，解析条件として，天然バリアのパラメータについては, 透水量係数分布の平均値を $10^{-6}m^2/s$ とする極めて保守的な天然バリア（以下，極端な天然バリア）を想定する。本検討においては，このような極端な天然バリアを想定した上で，人工バリアの重要パラメータや影響特性を把握し，成立条件を抽出する。

- 分析対象パラメータについては, 人為的な対策が可能という観点から, ガラス溶解速度, オーバーパックの破損時期，緩衝材の厚さに着目する。
- これらの分析対象パラメータの影響特性を把握するため，予察解析を通じて，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。
- 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，それらを様式化して固定し，様式毎に成立条件を抽出する。その際，溶解度や分配係数のように地球化学的環境に依存するパラメータについては，地球化学的な相関関係を考慮した設定を行うこととする。
- 全核種を一度に評価する場合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。そのため，ここでは，非崩壊連鎖核種は単独で，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。

<u>ii)人工バリアの機能を期待しないケース：</u>

- ガラスからの瞬時溶解，オーバーパックの早期破損，緩衝材の厚さ・溶解度制限・収着・拡散による遅延効果をほぼ無視するという極めて保守的な条件を想定し，核種移行を最も促進するパラメータ値を設定したケース。このような極めて保守的な人工バリア（以下, 極端な人工バリア）の条件下で求められる天然バリアの重要パラメータや成立条件は，サイト選定のみで安全性を確保するための目標値のひとつと考えられる。本検討においては，このような極端な人工バリアを想定し，天然バリアの重要パラメータや影響特性を把握し，成立条件を抽出する。
- 分析対象パラメータについては，水理パラメータ，および収着やマトリクス拡散に係るパラメータに着目する。
- これらの分析対象パラメータの影響特性を把握するため，予察解析を通じて，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。

- 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，それらを様式化して固定し，様式毎に成立条件を抽出する。
- 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しない場合には，予察解析の結果に基づき，成立条件を抽出する。
- 全核種を一度に評価する場合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。そのため，ここでは，非崩壊連鎖核種は単独で，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。

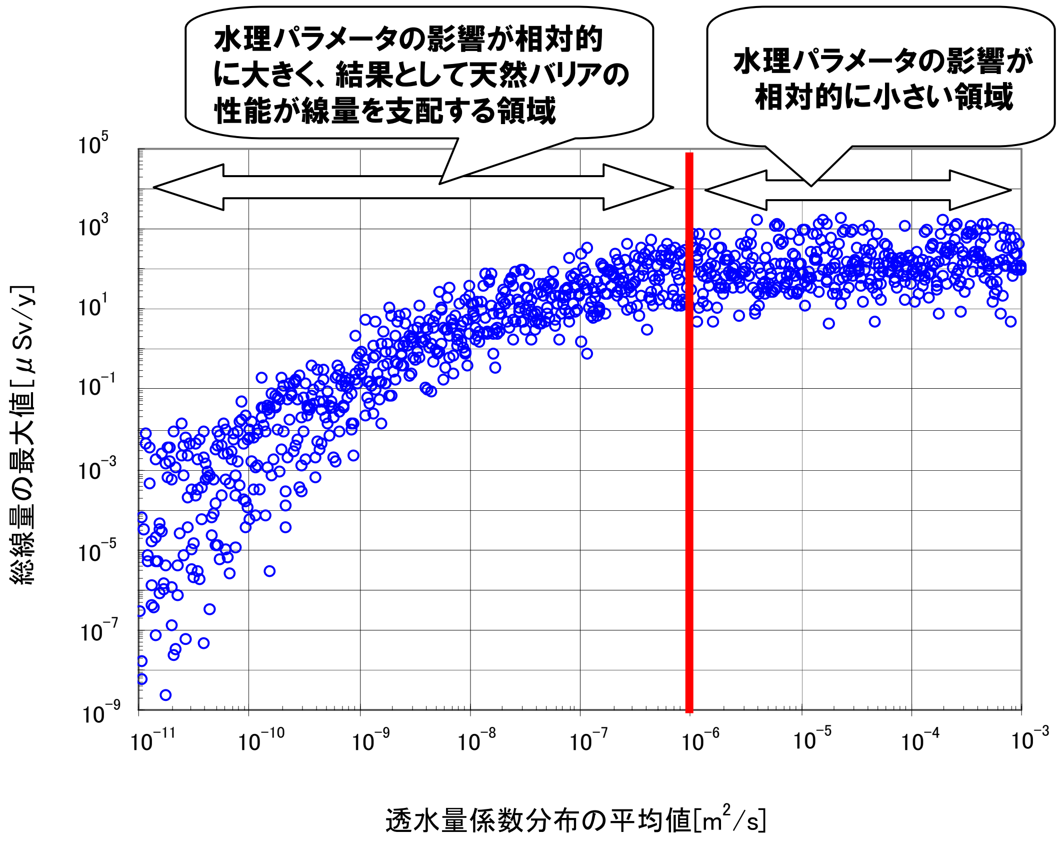


図 2-2 透水量係数分布の平均値と総線量の最大値との関係
（既往の解析条件（若杉ほか, 2002）に基づき, 透水量係数分布の平均値をより幅広に変動させた統計解析の結果）

3. 解析条件

本章においては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，地層処分研究開発第２次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構，1999[7]：以下，「第２次取りまとめ」という）において構築されたレファレンスケースの概念モデル（図 3.1-1 参照）をベースに核種移行解析モデルを設定した。第２次取りまとめに基づいて整理した核種移行解析モデルの概要を以下に示す。

人工バリア：

- 処分後のある時点において，すべてのオーバーパックが核種閉じ込め機能を喪失する。
- オーバーパック破損後，直ちに緩衝材間隙水がガラス固化体と接触し，長期的なガラス溶解速度に従ってガラスが溶解する。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）。なお，ガラス固化体の溶解にともなうガラスの表面積の時間的な減少は考慮せず，ガラス固化体は一定の速度で溶解する。
- 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。
- 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ものと仮定する。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。

天然バリア：

- 核種は母岩及び断層中を溶質として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ことにより算出する。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：

第２次取りまとめのレファレンスケースにおける生物圏評価では，断層から移行する核種の全量が帯水層に移行し，さらにその後河川へ流入すると仮定し，生物圏での移行と様々な被ばく経路を考慮した評価を行い，核種移行率から線量を導出するための線量への換算係数を算出した。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/平野モデルにより最新の知見を取り込んで算出された線量への換算係数を用いることとする(鈴木ほか，2005[8])。さらに，第２次取りまとめと同様，廃棄体１本に対する解析で求められる断層から帯水層への核種移行率を廃棄体の本数にあわせて４万倍し，その核種移行率に線量への換算係数を乗じることにより，線量という指標で示すこととする。

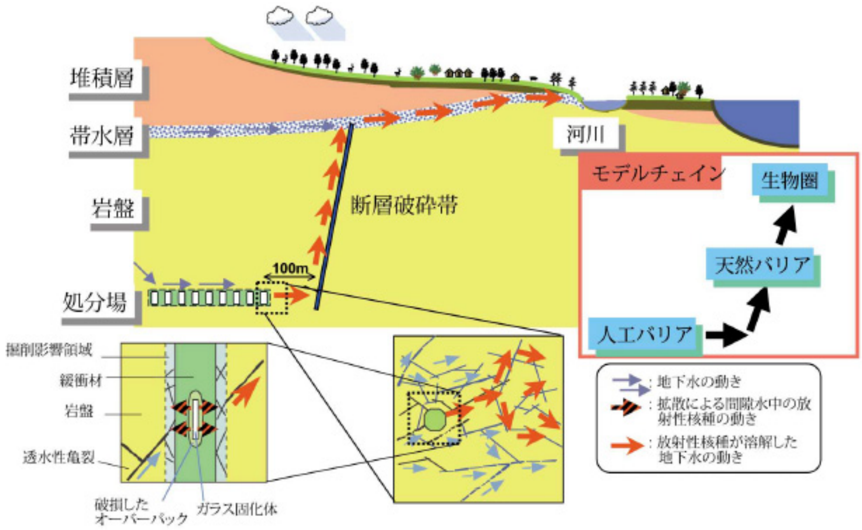


図 3.1-1 レファレンスケースの概念モデル（第２次取りまとめより引用）

3.2 解析コード

解析コードについては，データの不確実性による影響を評価するために必要な入力パラメータ値の統計的サンプリング機能や，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確率論的シミュレーションプラットホーム GoldSim（Golder Associates, 2002[9]）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，その有効性を確認した（付録３参照）。

また，GoldSim を用いて算出した多数回の決定論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

本検討における対象核種については，第２次取りまとめの解析結果に基づき，支配的になる可能性のある核種のみ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こと，
- 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こと
- 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 に対する半減期が長い親核種としては，Np-237 および U-233 が存在する。ここでは，Th-229 の挙動に影響を与える代表的な核種として，Np-237 を選択した。

なお，Se-79 については，第２次取りまとめと同様に，溶解度分割という観点から，Se の安定同位体も考慮することとした。なお，Th-229（半減期：7.34×10^{3}y）については，同位体が他の崩壊系列に含まれることから，ここでは，簡略化のため，溶解度分割を考慮しないこととした。

3.4 性能目標値

成立条件を抽出するためには，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，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（原子力安全委員会･原子力安全総合専門部会，2004[10)]），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及び我が国において先行的に進められている浅地中可能な低レベル放射性廃棄物処分を参考として，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て，重要な規準として個人の線量拘束値を定義し，1 年間あたり 300μSv を勧告している（ICRP，1998[11)]：ICRP，2000[12)]）。また，我が国における浅地中可能な低レベル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する一般公衆の線量限度を 1 年間あたり 10μSv と定義している（原子力安全委員会，1988[13)]）。

以上を踏まえ，本検討では，任意の性能目標値として，10μSv/y 及び 300μSv/y を設定することとした。

3.5 パラメータ設定

パラメータの変動範囲は，第２次取りまとめや TRU 第２次取りまとめなどの既往の検討に基づき，保守性を考慮して十分に幅広に設定した。設定した変動範囲を表 3.5-1 に，その設定根拠を付録 4 に示す。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，このために必要となるインベントリを表 3.5-2 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。また，変動範囲を設定せずに固定したパラメータの一覧を表 3.5-3 にそれぞれ示す。本解析においては，これらの変動範囲からランダムサンプリングを行い，2000 回の統計解析を実施することとした。

2 章で示した極端な天然バリアおよび極端な人工バリアの条件としては，表 3.5-1 に示すパラメータの変動範囲のうち，核種移行を最も促進すると考えられる値をそれぞれ用いることとした。

表 3.5-1 パラメータの変動範囲一覧

パラメータ			単位	変動範囲		RC*1における設定値
				最小値	最大値	
人工バリア	緩衝材厚さ		m	0.1	3	0.7
	オーバーパック破損時期		y	100, 1000, 10000		1000
	ガラス溶解速度		$g/m^2/y$	3.65×10^{-2}	2.43×10^{4}	0.365
	溶解度	Se	mol/l	5.1×10^{-11}	6.5×10^{-3}	3×10^{-9}
		Cs		可溶性		可溶性
		Np		1×10^{-9}	4×10^{-5}	2×10^{-8}
		Th		1×10^{-9}	1×10^{-5}	5×10^{-6}
	緩衝材への分配係数	Se	m^3/kg	1×10^{-6}	1×10^{-4}	0
		Cs		0.001	0.05	0.01
		Np		0.005	50	1
		Th		Npのアナログ		1
	緩衝材中拡散係数	Se	m^2/s	4.0×10^{-11}	6.3×10^{-10}	2×10^{-10}
		Cs		3.0×10^{-10}	6.3×10^{-9}	6×10^{-10}
		Np		3.0×10^{-11}	2.2×10^{-9}	3×10^{-10}
		Th		Npのアナログ		3×10^{-10}
天然バリア	動水勾配		－	0.001	0.23	0.01
	透水量係数分布の平均値		m^2/s	1×10^{-11}	1×10^{-6}	1×10^{-10}
	亀裂開口幅の係数		－	0.1	10	2
	縦方向分散長と移行距離の比		－	1	100	10
	マトリクス拡散深さ		m	0.01	1	0.1
	マトリクス拡散寄与面積率		－	0.01	1	0.5
	岩盤の間隙率*2		－	0.003	0.5	0.02
	母岩への分配係数	Se	m^3/kg	1×10^{-8}	0.1	0.01
		Cs		0.001	10	0.05
		Np		0.005	10	1
		Th		0.1	10	1

*1:第2次取りまとめのレファレンスケース
*2:空隙率(θ)と乾燥密度(ρ)と実効拡散係数(De)は，以下の相関関係を有する。
$\rho[kg/m^3]=2700\times(1-\theta)$, $De[m^2/s]=(10^{-12.20})\times\theta[\%]^{2.0}$

表 3.5-2 処分後 100 年，処分後 1,000 年，処分後 10,000 年時点でのインベントリ

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}

表 3.5-3 固定したパラメータ値一覧

パラメータ名		単位	設定値
ガラス表面積(A)		m^2/can	1.7
割れの増加率(F)		－	10
ガラス固化体の初期表面積(A×F)		m^2/can	17
ガラス固化体の初期体積		m^3/can	0.15
ガラス固化体の初期重量		g/can	4.12×10^{5}
ガラスの密度		g/m^3	2.75×10^{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
ガラス固化体近傍の仮想的な領域の体積		m^3	1×10^{-1}
掘削影響領域に対して設定した体積		m^3	1×10^{-3}
母岩の透水量係数分布の分割数		－	48
透水量係数分布の標準偏差		－	1.07
母岩の移行距離		m	100
断層の移行距離		m	800
線量への換算係数	Se	(mSv/y)/(Bq/y)	3.2×10^{-12}
	Cs		1.2×10^{-13}
	Np		1.3×10^{-12}
	Th		2.3×10^{-11}

4. 天然バリアの機能を期待しないケース

2 章で示した方法論に沿って，極端な天然バリアを想定し，ガラス溶解速度，オーバーパックの破損時期，緩衝材の厚さに着目して検討を行った。本章においてはその結果について記述する。

4.1 重要パラメータ及び影響特性の把握

ここでは，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，極端な天然バリアを想定した場合における予察的な解析を行い，包括的感度解析手法（付録 2 参照）を用いて，人工バリアの重要パラメータおよび影響特性を抽出･把握した。

4.1.1 Cs−135

Cs-135 を対象に，人工バリアのパラメータを表 3.5-1 にて設定した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を図 4.1.1-1 に，算出した相対的な重要度・影響度（付録 1 参照）を図 4.1.1-2 に示す。

図 4.1.1-1 において Cs-135 の最大線量が 100 年，1000 年，1 万年を起点としてばらつく原因は，オーバーパックの破損時期に discrete な分布を設定しているためである。また，図 4.1.1-2 から，Cs-135 の最大線量に対して，ガラス溶解速度が相対的に重要度の高いパラメータであることがわかる。これは，天然バリアの条件が悪い場合に，Cs-135 の最大線量が，Cs-135 のガラス固化体からの溶出率（ガラス固化体の溶出率[g/y]×ガラス固化体中の Cs-135 の存在率[-]）から受ける影響が大きいことを意味する。

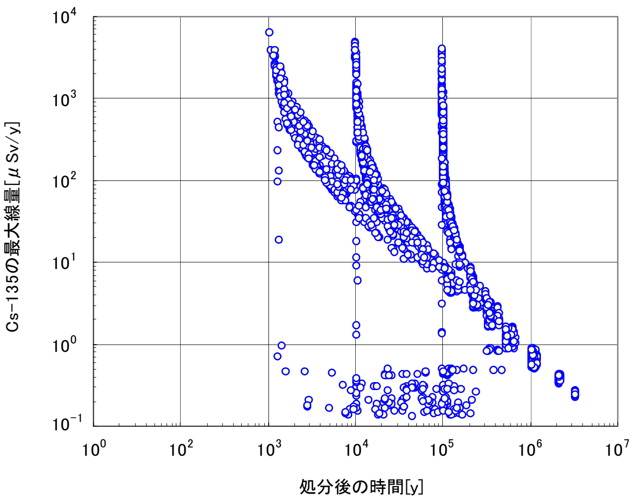


図 4.1.1−1 Cs−135 の統計解析結果

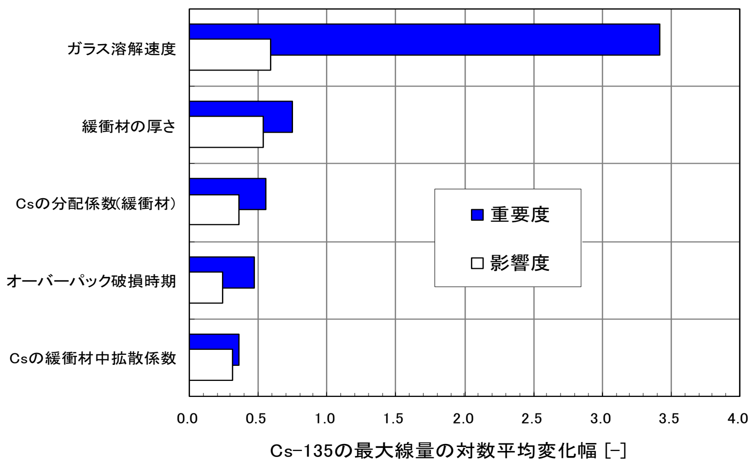


図 4.1.1-2 Cs-135 の統計解析結果から算出した相対的な重要度・影響度

ここで，横軸にガラス溶解速度，縦軸に Cs-135 の最大線量を取った結果を図 4.1.1-3 に示す。図 4.1.1-3 より，ガラス溶解速度が約 10g/m²/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る。このことは，ガラス溶解速度以外のパラメータが感度を持たないことを意味する。ガラス溶解速度が小さい場合には，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人工バリア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。ここで，ガラス溶解速度以外のパラメータが感度を持たないことを例示するため，拡散係数に本検討で設定した変動範囲の最小値（6.4×10^{-9}m²/s）および最大値（3.0×10^{-10}m²/s）をそれぞれ設定し，拡散係数以外の人工バリアのパラメータを第 2 次取りまとめのレファレンスケースの値で固定した決定論解析の結果を図 4.1.1-4 に示す。図 4.1.1-4 から，ガラス溶解速度が小さい場合に，Cs-135 の人工バリアからの移行率が定常に達し，人工バリアからの移行率がガラス固化体からの溶出率と等しくなること，そのため，拡散係数の変化が人工バリアからの移行率の最大値に影響を与えないことが示唆される。また，人工バリア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 の分配係数に比較的小さい値（0.001m³/kg～0.05m³/kg：表 3.5-1 参照）を設定しているため，緩衝材の厚さが大きくなったとしても Cs の人工バリアからの移行率の最大値を下げる効果をあまり期待できない。以上のことから，ガラス溶解速度が小さい場合においては，Cs-135 の最大線量に対して，緩衝材の厚さや分配係数や拡散係数の感度がほとんどないと考えられる。

一方，図 4.1.1-3 より，ガラス溶解速度が約 10g/m²/y 以上の領域において，Cs-135 の最大線量がばらついていることがわかる。このことは，ガラス溶解速度以外のパラメータが Cs-135 の最大線量を支配していることを意味する。ガラス溶解速度が大きい場合には，インベントリが短時間で枯渇するため，緩衝材中の収着等の影響により，緩衝材からの移行

率がガラス固化体からの溶出率と等しくならない（定常に達しない）。このため，ガラス溶解速度が大きい場合には，Cs-135 の最大線量がガラス溶解速度だけでなく，それ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考えられる。

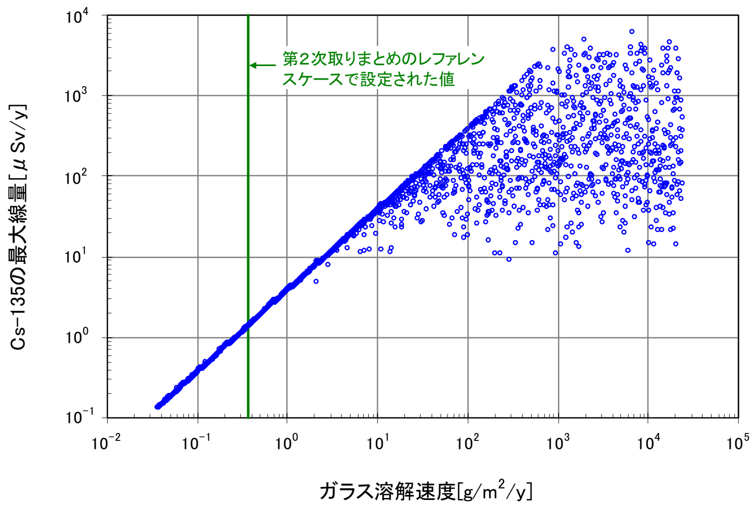


図 4.1.1-3　Cs-135 の最大線量に対するガラス溶解速度の影響特性

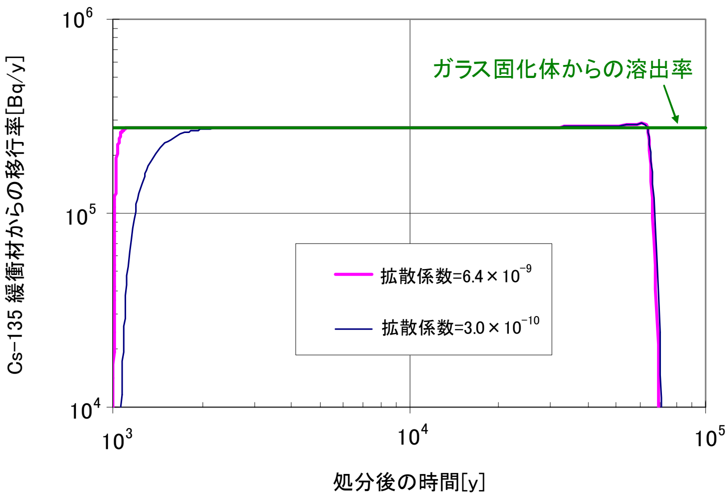


図 4.1.1-4　拡散係数を変化させた決定論解析の結果（その他の人工バリアのパラメータは第2次取りまとめのレファレンスケースの値に基づく）

4.1.2　Se-79

Se-79 を対象に，人工バリアのパラメータを表 3.5-1 にて設定した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を図 4.1.2-1 に，統計解析の結果から算出した相対的な重要度・影響度を図 4.1.2-2 に示す。図 4.1.2-2 より，天然バリアのパラメータを保守値で固定した場合には，Se の溶解度が相対的な重要度の高いパラメータであることがわかる。横軸に溶解度，縦軸に Se-79 の最大線量を取った結果及びその結果の近似曲線を図 4.1.2-3 に示す。図 4.1.2-3 より，Se-79 の最大線量に対して，Se の溶解度は正の相関を有

しており，Se の溶解度 10^{-7}mol/l を境界として，最大線量のばらつきの傾向が変わることがわかる。10^{-7}mol/l 以下の Se の溶解度が比較的小さい領域においては，Se 溶解度が Se-79 の最大線量をほぼ支配すると考えられる。一方，10^{-7}mol/l 以上の Se の溶解度が比較的大きい領域においては，ガラス溶解速度などの Se の溶解度以外のパラメータが Se-79 の最大線量に影響を及ぼすことが考えられる。

ここで，図 4.1.2-3 に，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（東ほか，1999）を示す。この図から，間隙水が降水系及び海水系の場合に，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 Se-79 の最大線量は Se の溶解度だけでなく他のパラメータにも依存することが概略的にわかる。

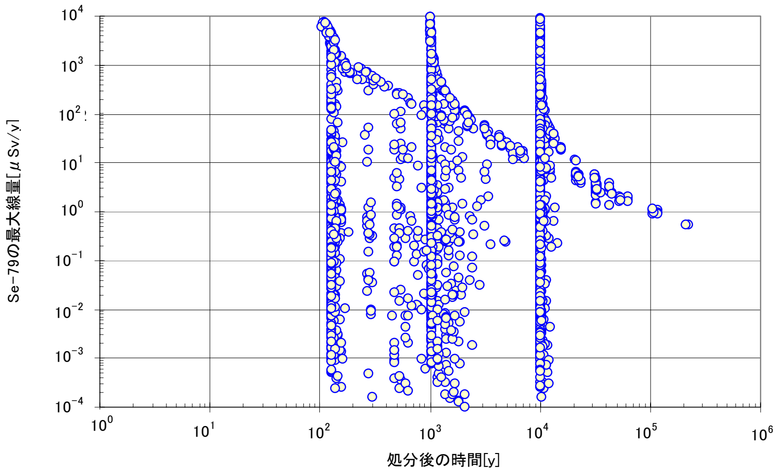


図 4.1.2-1　Se-79 の統計解析結果

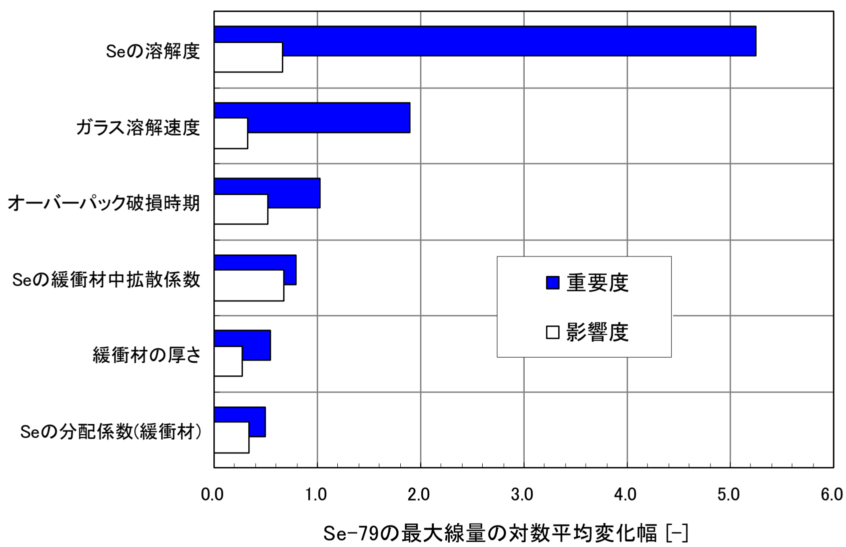


図 4.1.2-2　Se-79 の統計解析結果から算出した相対的な重要度・影響度

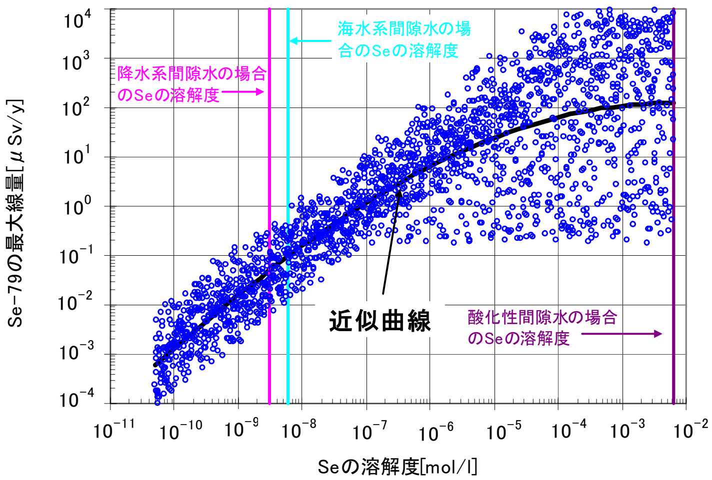


図 4.1.2-3 Se-79 の最大線量に対する Se の溶解度の影響特性

4.1.3 Np-237

Np-237 を対象に，人工バリアのパラメータを表 3.5-1 において設定した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を図 4.1.3-1 に，算出した相対的な重要度・影響度を図 4.1.3-2 に示す。図 4.1.3-2 から，Np-237 の最大線量に最も大きな影響を与えるパラメータが Np の溶解度であることがわかる。横軸に Np の溶解度，縦軸に Np-229 の最大線量を取った結果及びその結果の近似曲線を図 4.1.3-3 に示す。図 4.1.3-3 より，Np の溶解度が 10^{-6}mol/l 以下の領域において Np の溶解度の影響度が大きいことがわかる。これは，溶解度制限により，内側境界での Np の濃度が緩衝材からの移行率に与える影響が大きいためと考えられる。また，図 4.1.3-3 より，Np の溶解度が 10^{-6}mol/l 以上の領域において，溶解度の影響度が小さくなり，緩衝材への分配係数などの他のパラメータからの影響が大きくなることがわかる。これは，溶解度が高いため，内側境界での Np の濃度が溶解度ではなく，インベントリによって制限されるようになり，分配係数や拡散係数から受ける影響が相対的に大きくなるためと考えられる。Se-79 の最大線量に対する Se の溶解度の影響特性（図 4.1.2-3 参照）と比較すると，図 4.1.3-3 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。これは，Np の溶解度の次に相対的な重要度が高い Np の分配係数（緩衝材）が 4 桁の変動範囲を有しているためと考えられる。

図 4.1.3-3 に，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（東ほか，1999）をプロットした。代表値と近似曲線の関係から，間隙水が降水系及び海水系の場合には，Np の溶解度の影響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 の溶解度の影響度が小さい傾向にあることが概略的にわかる。

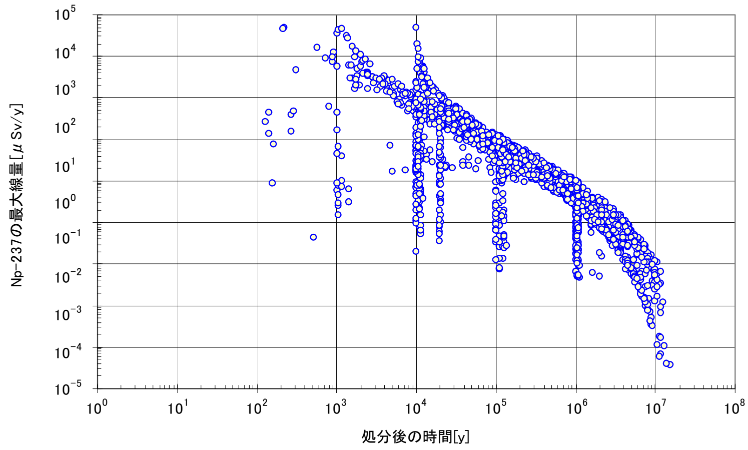


図 4.1.3-1 Np-237 の統計解析結果

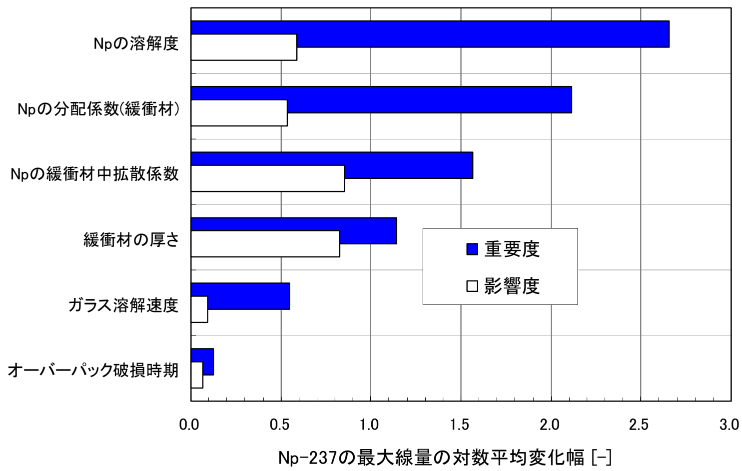


図 4.1.3-2 Np-237 の統計解析結果から算出した相対的な重要度・影響度

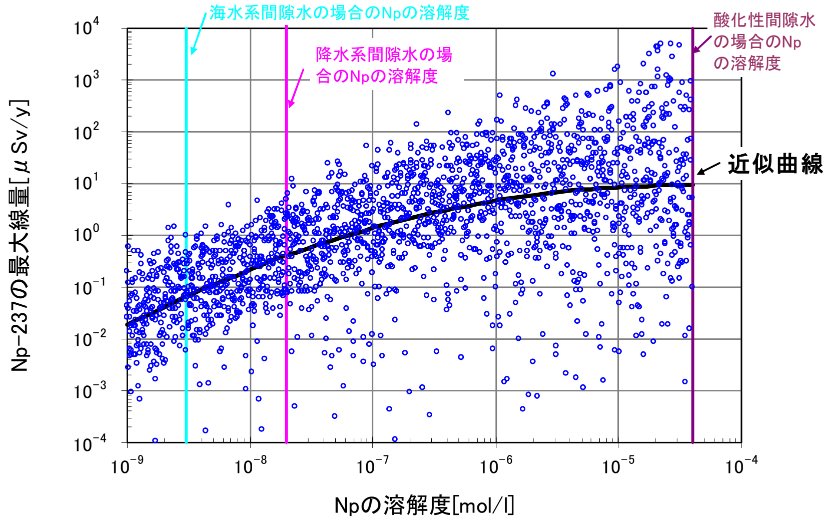


図 4.1.3-3 Np-237 の最大線量に対する Np の溶解度の影響特性

4.1.4 Th-229

Th-229については，崩壊系列核種であるため，Npの溶解度，Npの分配係数（緩衝材）及びNpの緩衝材中拡散係数を分析対象に含めておく必要がある。ここで，Npの分配係数（緩衝材）及びNpの緩衝材中拡散係数については，NpとThがアナログの関係にあることから独立なパラメータとしては取り扱わず，Thの分配係数（緩衝材）及びThの緩衝材中拡散係数とそれぞれ連動させて変化させることとした。このような条件下で，Th-229を対象に，人工バリアのパラメータを表3.5-1にて設定した変動範囲で変動させた統計解析を実施した。統計解析の結果を図4.1.4-1に，算出した相対的な重要度・影響度を図4.1.4-2に示す。

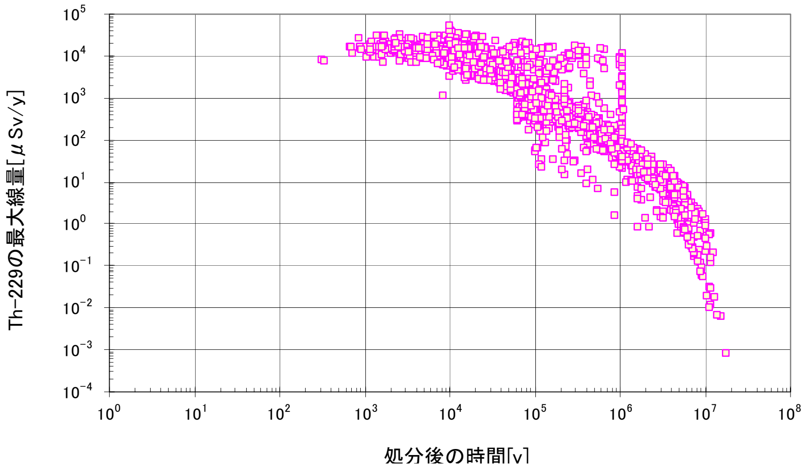


図 4.1.4-1 Th-229 の統計解析結果

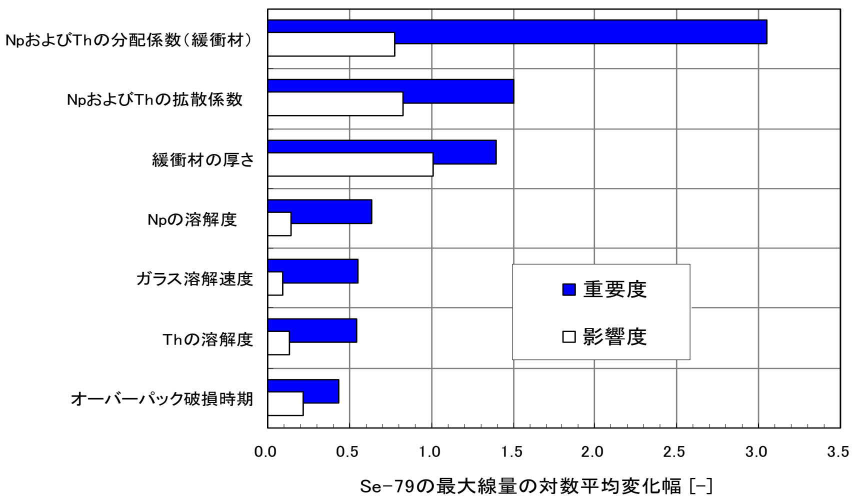


図 4.1.4-2 Th-229 の統計解析結果から算出した相対的な重要度・影響度

図4.1.4-2から，Th-229の最大線量に対して，最も重要度の高いパラメータはNpおよびThの分配係数であることがわかる。そこで，横軸にThの分配係数，縦軸にTh-229の最大線量を取った散布図及びその結果に対する近似曲線を図4.1.4-3に示す。図4.1.4-3より，以下のことがわかる。

- Th の分配係数が大きくなるに従い，Th の分配係数の感度が大きくなること（近似曲線参照）
- Th の分配係数が大きい場合には，Th-229 の最大線量のばらつきが大きいこと
- Th の分配係数が小さい場合には，Th-229 の最大線量のばらつきが小さいこと

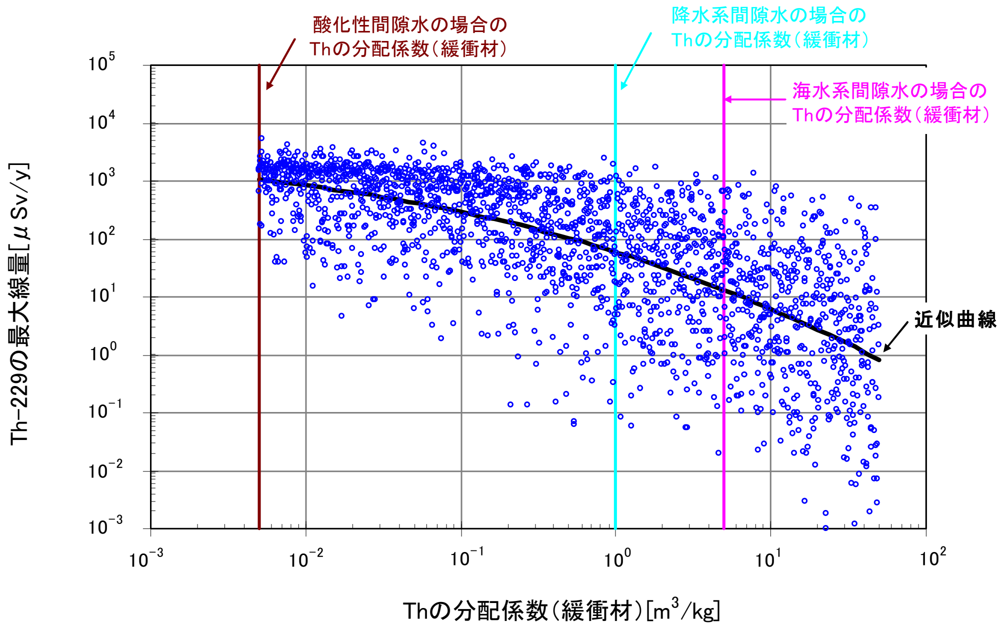


図 4.1.4-3 Th-229 の最大線量に対する Th の分配係数（緩衝材）の影響特性

これらの理由について以下に記述する。

ここで，分配係数，半減期および人工バリアからの移行率の関係を図 4.1.4-4 に示す。これは，崩壊を考慮，内側境界濃度と外側境界濃度が一定，外側境界濃度が 0 の場合における直交座標系の定常解析解を用いて算出したものである。この定常解析解を以下に示す。

$$C = \frac{C_0(\exp(\sqrt{a}x) - \exp(\sqrt{a}(2L - x)))}{1 - (\exp(2\sqrt{a}L)}$$

$$a = \frac{\lambda}{Da} \qquad Da = \frac{De}{(\varepsilon + (1-\varepsilon)Kd\,\rho)}$$

C ： 濃度（C_0 は初期濃度）

ε ： 緩衝材中の空隙率

Kd ： 分配係数

ρ ： 緩衝材の真密度

De ： 実効拡散係数（De= ε Dp：Dp は間隙水中の拡散係数）

λ ： 崩壊定数（λ=0.693/T：T は半減期）

L ： 緩衝材の厚さ

x ： 緩衝材中の移行距離

図 4.1.4-4 より，半減期が小さい場合には，分配係数による遅延効果が大きくなることがわかる。Th-229 は，半減期が 7340 年と比較的短く，非定常の移行挙動を示す核種である。このため，分配係数が大きい場合における遅延効果は，図 4.1.4-4 に示した定常状態の遅延効果よりもさらに大きくなると考えられる。このため，図 4.1.4-3 において，Th の分配係数が大きくなるに従い，Th の分配係数の感度が大きくなると考えられる。

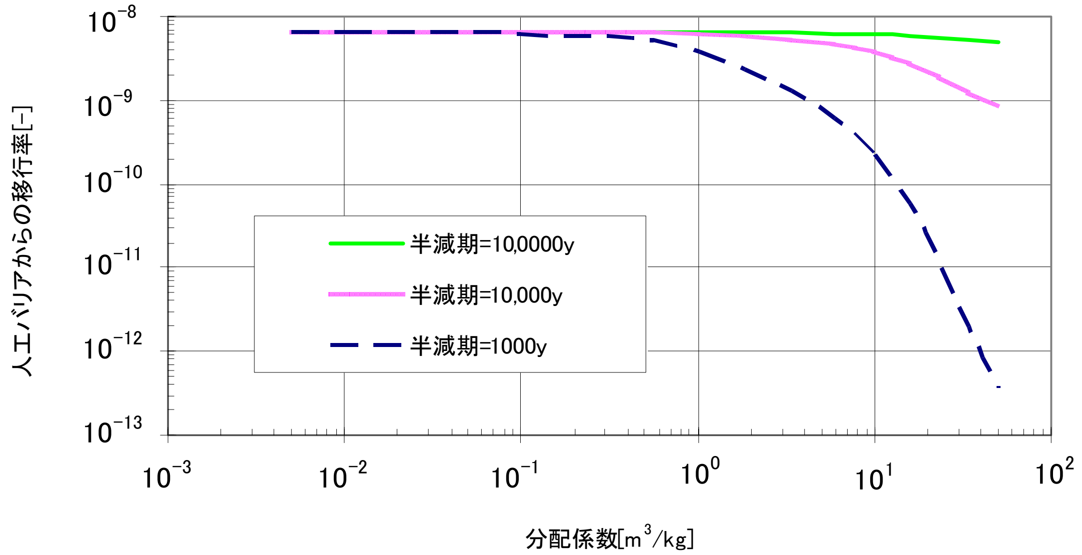


図 4.1.4-4 分配係数および半減期と人工バリアからの移行率の関係

Th の分配係数（緩衝材）が大きい場合には，緩衝材中での遅延効果が期待できる。このため，緩衝材の厚さや拡散係数が感度を有し，Th-229 の最大線量のばらつきが大きくなると考えられる。また，Th の分配係数（緩衝材）が小さい場合には，緩衝材中での遅延効果が期待できない。このため，拡散係数や緩衝材の厚さの感度が小さくなり，内側境界での Np の沈殿量に影響を与える溶解度やガラス溶解速度が感度を有する。このため，Th-229 の最大線量が相対的に小さい範囲でばらつくと考えられる。

ここで，図 4.1.4-3 に，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 Th の分配係数（緩衝材）の代表値（柴田ほか，1999）を示す。この図から，Th-229 の最大線量に対して，間隙水が降水系及び海水系の場合に，Th の分配係数（緩衝材）の感度が大きいこと，および，間隙水が酸化性の場合に，Th の分配係数（緩衝材）の感度が小さいことが概略的にわかる。

4.2 成立条件の抽出

4.1 項に示した予察的な解析の結果から，極端な天然バリアを想定した場合に，相対的な影響が比較的大きい人工バリアのパラメータは，溶解度や分配係数や拡散係数であることを把握できる。人工バリアの分析対象パラメータとしては，人為的な対策が可能という観点から，ガラス溶解速度，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。これらを踏まえ，ここでは，2 章で示した方法論に基づき，相対的な影響度が大きいパラメータ（溶解度，分配係数，拡散係数）を様式化して固定し，包括的感度解析手法（付録 2 参照）を用いて，固定値毎に成立条件を抽出することとした。

なお，相対的な影響度が大きいパラメータの固定値については，地球化学的な相関関係を考慮して，既往の検討（東ほか，1999[14)]：柴田ほか，1999[15)]：第 2 次取りまとめ）に基づき，主要な間隙水に対する代表値をそれぞれ設定した（表 4.2-1 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，隆起侵食や断層活動による地球化学環境の変化を考慮し酸化性間隙水を想定した。

表 4.2−1 本検討において様式化した間隙水に基づき設定した
溶解度・分配係数（緩衝材）・緩衝材中拡散係数の代表値*

パラメータ			間隙水の様式化		
			降水系	海水系	酸化性
溶解度	Se	mol/l	3×10^{-9}	6×10^{-9}	可溶性
	Cs		可溶性	可溶性	可溶性
	Np		2×10^{-8}	3×10^{-9}	4×10^{-5}
	Th		5×10^{-6}	9×10^{-8}	5×10^{-6}
緩衝材への分配係数	Se	m^3/kg	0	0	0
	Cs		0.01	0.001	0.01
	Np		1	1	0.005
	Th		Npのアナログ		
緩衝材中拡散係数	Se	m^2/s	2×10^{-10}	3×10^{-10}	5×10^{-11}
	Cs		6×10^{-10}	3×10^{-10}	6×10^{-10}
	Np		3×10^{-10}	3×10^{-10}	3×10^{-10}
	Th		Npのアナログ		

*:東ほか(1999)，柴田ほか(1999)および第2次取りまとめに基づき設定

4.2.1 降水系間隙水の場合

ここでは，溶解度・分配係数（緩衝材）・緩衝材中拡散係数を降水系間隙水の場合の代表値（表 4.2-1 参照）に基づき固定し，ガラス溶解速度，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（降水系間隙水 - 1 次統計解析：図 4.2.1-1 参照）。この結果，Se-79 及び Np-237 については，降水系間隙水の場合に統計解析の結果が 10μSv/y 及び 300μSv/y を全て下回ることがわかる。一方，Cs-135 及び Th-229 については，統計解析の結果が 10μSv/y 及び 300μSv/y を下回らない場合も存在する。そこで，ガラス溶解速度，緩衝材の厚さ及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。

1) Cs-135

まず，Cs-135 に対する成立条件の抽出を試みた。降水系間隙水 - Cs-135 - 1 次解析の結果から算出した重要度より，Cs-135 の最大線量に対する重要パラメータは，ガラス溶解速度であることがわかる（図 4.2.1-2）。そこで，横軸に Cs-135 の最大線量に対する重要度が大きいガラス溶解速度，縦軸に Cs-135 の最大線量を取った散布図を図 4.2.1-3 に示す。プロットされた結果と 10μSv/y ラインとの交点から，ガラス溶解速度が 2.5g/m²/y 以下であれば 10μSv /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 300μSv/y ラインとの交点から，ガラス溶解速度が 75g/m²/y 以下であれば 300μSv /y を下回る可能性があることが推定される。

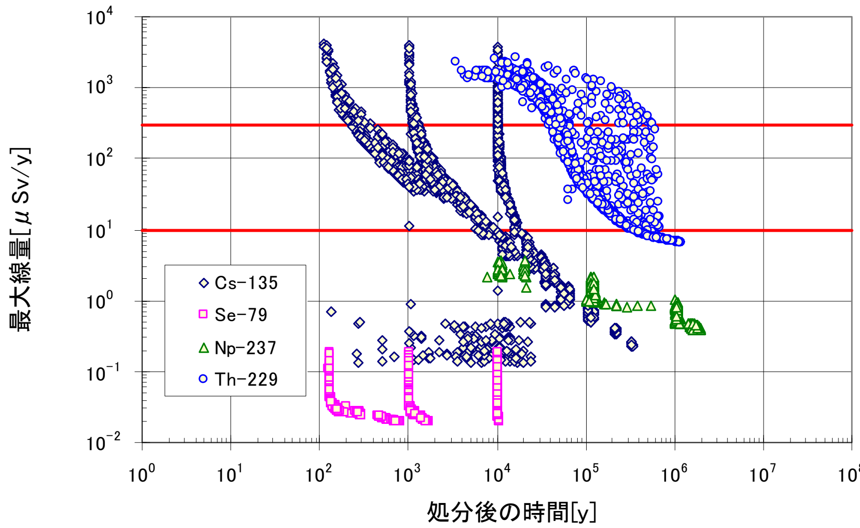


図 4.2.1-1 降水系間隙水 －1 次統計解析の結果

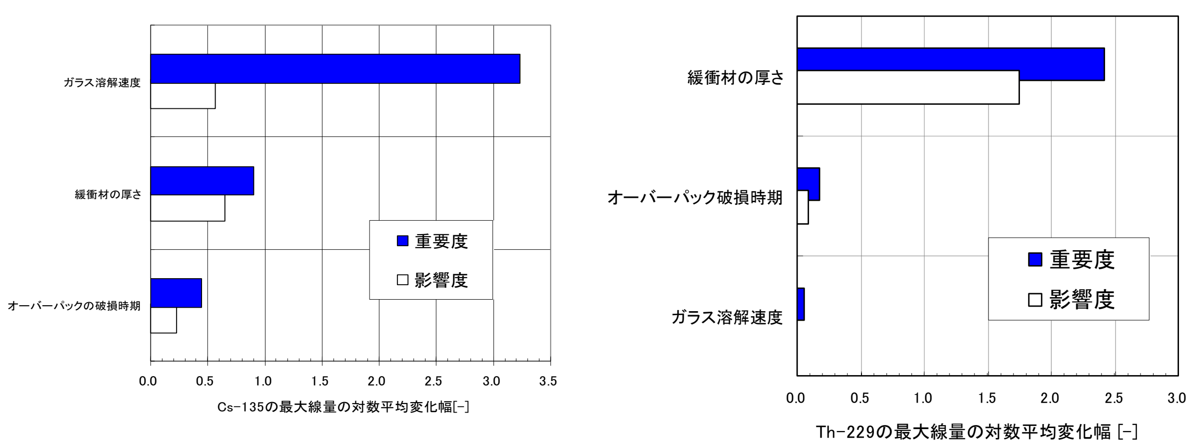


図 4.2.1-2 降水系間隙水 －1 次統計解析の結果から算出した重要度・影響度

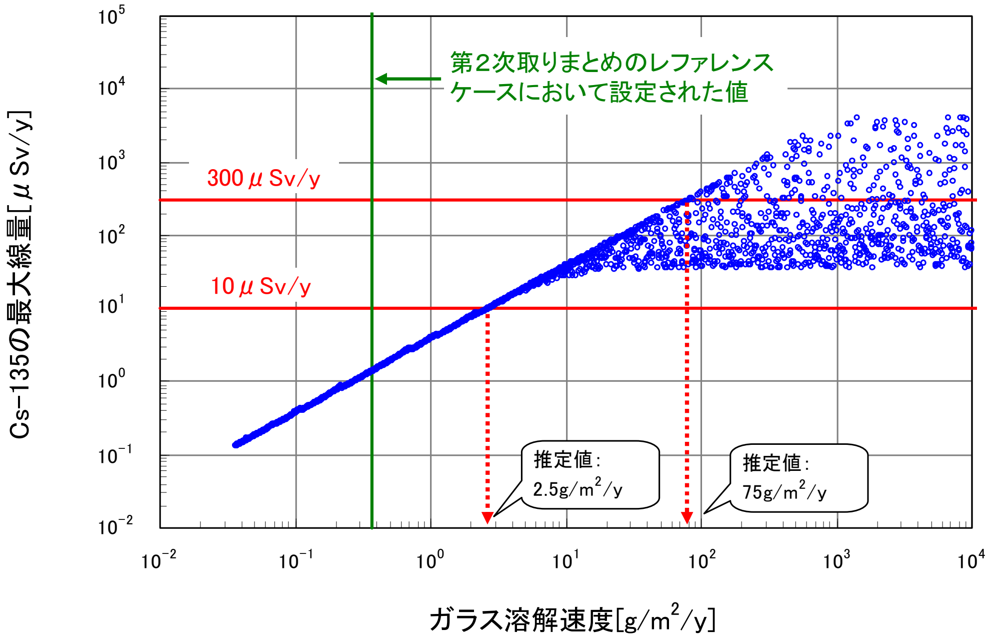


図 4.2.1-3 降水系間隙水 －1 次統計解析による成立条件の推定
（Cs-135:ガラス溶解速度）

ここで，10μSv/y の場合の成立条件を同定するために，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期を保守値に設定し，ガラス溶解速度を 2.5g/m²/y に設定した決定論解析を実施した（降水系間隙水 - Cs-135 - 2 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の結果が 10μSv/y を超えないことを確認した（図 4.2.1-4 参照）。

同定した成立条件の妥当性を確認するために，ガラス溶解速度を 2.5g/m²/y 以下，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期を表 3.5-1 の変動範囲で変動させた統計解析をそれぞれ実施した（降水系間隙水 - Cs-135 - 3 次統計解析：図 4.2.1-4 参照）。この結果，統計解析の結果が 10μSv/y を下回っていること及び先の決定論解析の結果が統計解析の結果の上限を与えていることが確認できる。

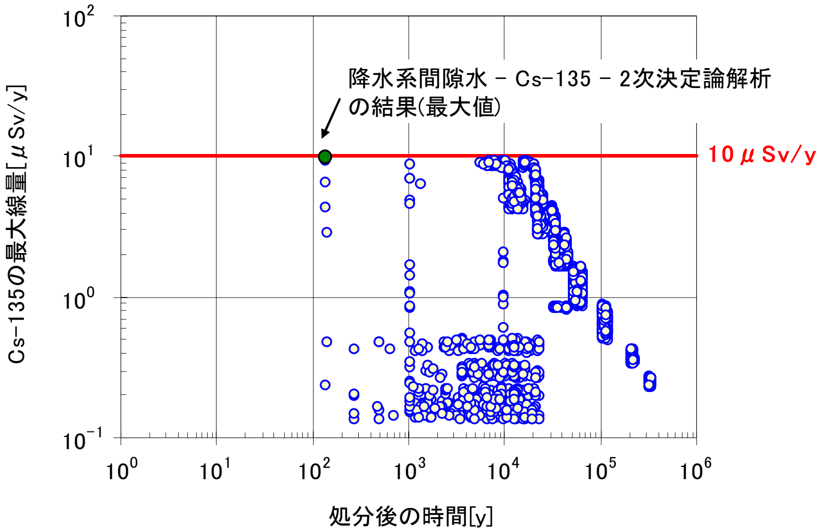


図 4.2.1-4 降水系間隙水 - Cs-135 - 3 次統計解析による
成立条件の妥当性確認(10 μ Sv/y)

一方，300 μ Sv/y の場合の成立条件を同定するために，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期を保守値に設定し，ガラス溶解速度を 75 g/m²/y に設定した決定論解析を実施した（降水系間隙水 - Cs-135 - 4 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の結果が 300 μ Sv/y を超えないことを確認した。

同定した成立条件の妥当性を確認するために，ガラス溶解速度を 75g/m²/y 以下の範囲で，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期を表 3.5-1 の変動範囲で変動させた統計解析をそれぞれ実施した（降水系間隙水 - Cs-135 - 5 次統計解析：図 4.2.1-5 参照)。その結果，統計解析の結果が 300 μ Sv/y をすべて下回っていること及び先の決定論解析（降水系間隙水 - Cs-135 - 4 次決定論解析）の結果が統計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，極端な天然バリアおよび降水系間隙水を想定した場合に，ガラス溶解速度が 2.5g/m²/y 以下であれば Cs-135 の最大線量は 10 μ Sv/y を超えないこと及びガラス溶解速度が 75g/m²/y 以下であれば Cs-135 の最大線量は 300 μ Sv/y を超えないことについての知見を得た。

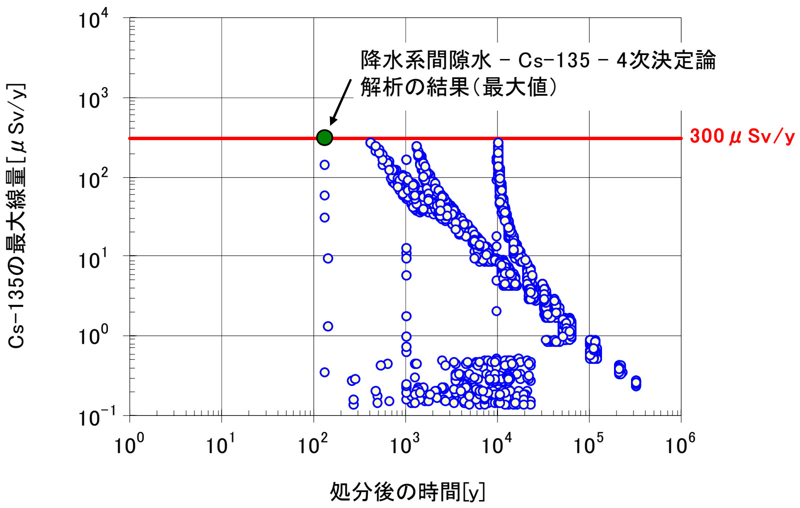


図 4.2.1-5 降水系間隙水 – Cs-135 – 5 次統計解析による
成立条件の妥当性確認(300μSv/y)

2) Th-229

次に，Th-229 に関する成立条件の抽出を試みた。ここで，降水系間隙水 - 1 次統計解析の結果に基づき，Th-229 の最大線量に対する重要度が大きい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図 4.2.1-6 に示す。プロットされた結果と 10μSv/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 10μSv /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 300μSv/y ラインとの交点から，緩衝材の厚さが 0.75m 以上であれば 300μSv /y を下回る可能性があることが推定される。

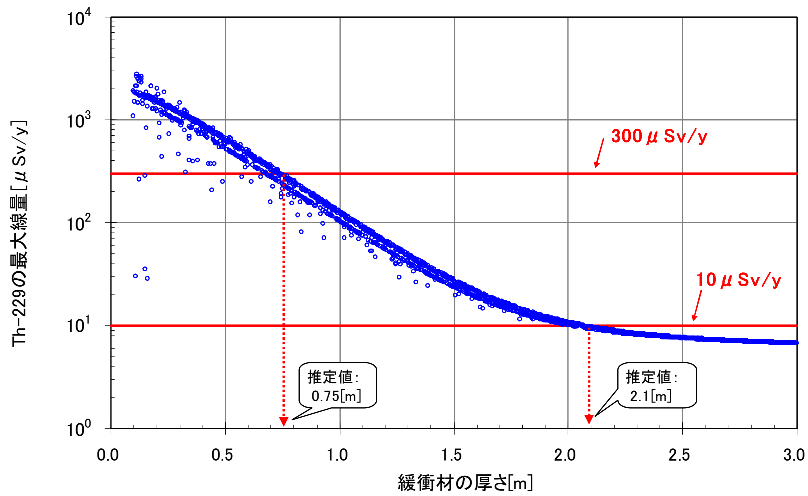


図 4.2.1-6 降水系間隙水 – 1 次統計解析による成立条件の推定(Th-229:緩衝材の厚さ)

なお, 図 4.2.1-6 より, プロットが 2 つのラインに分かれていることがわかる。以下では, この理由について述べる。

オーバーパックの破損時期が長くなるに従って，親核種からの崩壊の影響により，Np-237やTh-229のガラス固化体中のインベントリは増加する（表3.5-2参照)。本検討におけるオーバーパックの破損時期は，100年，1,000年，10,000年と離散的に変動させている。このため，オーバーパックの破損時期が長くなるに従って，Th-229の最大線量は増加し，離散的に表現される。図4.2.1-6における2つのラインのうち，上のラインは，オーバーパックの破損時期が10,000年の場合の結果である。同様に，下のラインは，オーバーパックの破損時期が100年と1000年の場合の結果である。オーバーパックの破損時期が100年と1000年の場合の結果がひとつのラインで示される理由は，以下の通りである。オーバーパックの破損時期が100年と1,000年の場合には，オーバーパックの破損時期が10,000年の場合と比較して，Th-229の最大線量の違いは小さく，図4.2.1-6のように対数を軸としてプロットすると，オーバーパックの破損時期が100年と1,000年の場合のTh-229の最大線量の違いがほとんど見えなくなる。このため，結果として，プロットが2つのラインに分かれたように見えると考えられる。この傾向は，図4.2.2-6，図4.2.3-6，図4.2.3-9においても同様である。

なお，図4.2.1-6より，緩衝材の厚さが約0.1m程度の場合に，Th-229の最大線量が特異的にばらついていることがわかる。この理由については，4.3節において述べる。

10μSv/yの場合の成立条件を同定するために，ガラス溶解速度及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2.1mで固定した決定論解析を実施した（降水系間隙水 - Th-229 - 2次決定論解析)。その結果，この決定論解析の結果が10μSv/yを超えないことをそれぞれ確認した。

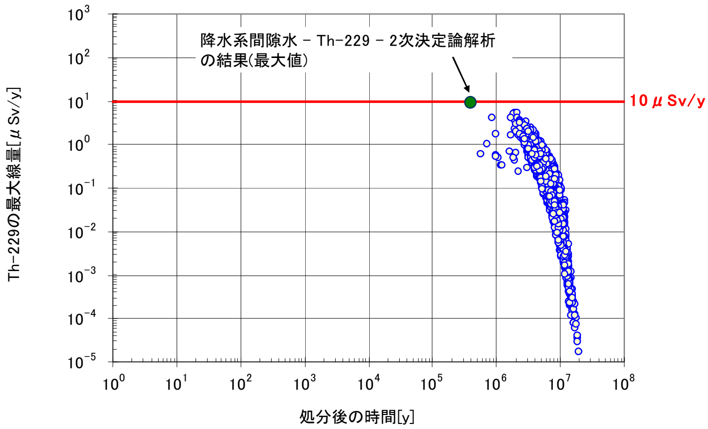


図 4.2.1−7 降水系間隙水 − Th−229 − 3 次統計解析による成立条件の妥当性確認(10μSv/y)

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2.1m以下，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期等の他のパラメータを変動させた統計解析をそれぞれ実施した（ケース1 - 降水系間隙水 - Th-229 - 3次統計解析：図4.2.1-7参照)。この

結果，統計解析の結果が 10μSv/y を下回っていること及び先の決定論解析（降水系間隙水 - Th-229 - 2 次決定論解析）の結果が統計解析の結果の上限を与えていることが確認できる。

300μSv/y の場合の成立条件を同定するために，ガラス溶解速度及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 0.75m で固定した決定論解析を実施した（降水系間隙水 - Th-229 - 4 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の結果が 300μSv/y を超えないことを確認した。

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，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期等を表 3.5-1 の変動範囲で変動させた統計解析を実施した（降水系間隙水 - Th-229 - 5 次統計解析：図 4.2.1-8 参照）。その結果，統計解析の結果が 300μSv/y を下回っていること及び先の決定論解析（降水系間隙水 - Th-229 - 4 次決定論解析）の結果が統計解析の結果の上限を与えていることを確認できる。

以上の検討から，極端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 2.1m 以上であれば Th-229 の最大線量は 10μSv を超えないこと，及びガラス溶解速度が 0.75m 以上であれば，Th-229 の最大線量は 300μSv を超えないことについての知見を得た。

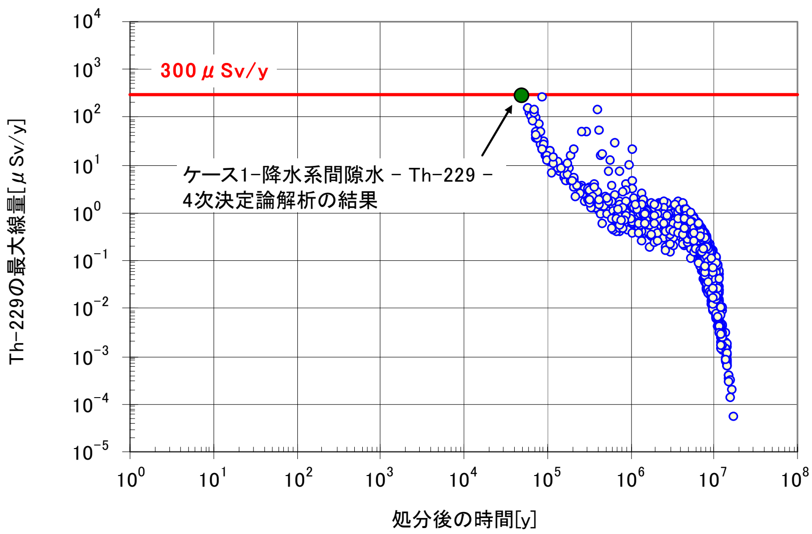


図 4.2.1-8 降水系間隙水 － Th-229 － 5 次統計解析による
成立条件の妥当性確認（300μSv/y）

3）合計線量

ここで，抽出した個々の核種に対する成立条件が，Se-79，Cs-135，Np-237 及び 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。そこで，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表 3.5-1 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。その結果，決定論解析の結果が 10μSv/y 及び 300μSv/y をそれぞれ超えないことを確認し（図 4.2.1-9 及び図 4.2.1-10 参照），成立条件を特定した（表 4.2.1-1 参照）。

Cs-135 については，図 4.2.1-9 より約 1 万年で急激に減少していること，図 4.2.1-10 より約 300 年で急激に減少していることを把握できる。これは，ガラス固化体の全量が溶解する時間（ガラス溶解速度 2.5g/m²/y の場合の核種溶出期間は約 1 万年，ガラス溶解速度 75g/m²/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。また，Se-79 については，溶解度制限により 0.3μSv/y 付近で定常に達していること，Np-237 及び 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。

表 4.2.1−1　極端な天然バリアおよび降水系間隙水を
想定した場合における成立条件の例

パラメータ			目標線量が10μSv/yの場合		目標線量が300μSv/yの場合	
緩衝材厚さ		m	2.1	以上	0.75	以上
オーバーパック破損時期		y	−	−	−	−
ガラス溶解速度		$g/m^2/y$	2.5	以下	75	以下
溶解度	Cs	mol/l	可溶性		可溶性	
	Se		3×10^{-9}		3×10^{-9}	
	Np		2×10^{-8}		2×10^{-8}	
	Th		5×10^{-6}		5×10^{-6}	
緩衝材への分配係数	Cs	m^3/kg	0.01		0.01	
	Se		0		0	
	Np		1		1	
	Th		Npのアナログ		Npのアナログ	
緩衝材中拡散係数	Cs	m^2/s	6×10^{-10}		6×10^{-10}	
	Se		2×10^{-10}		2×10^{-10}	
	Np		3×10^{-10}		3×10^{-10}	
	Th		Npのアナログ		Npのアナログ	

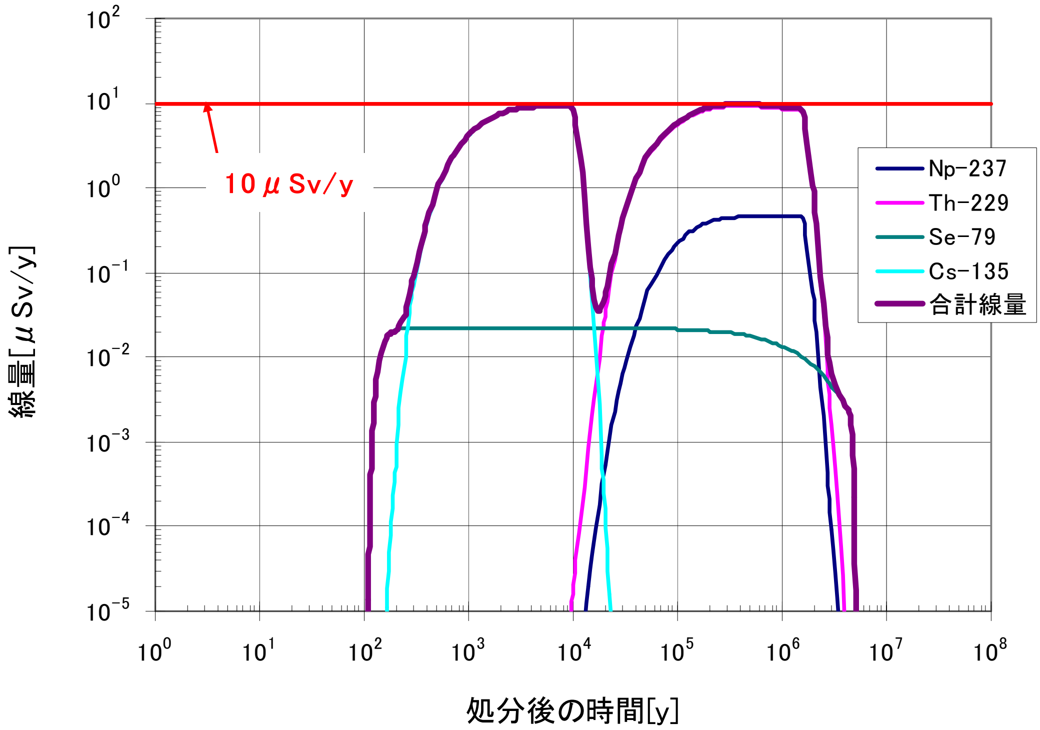


図 4.2.1-9 降水系間隙水 － 合計線量 － 決定論解析結果(10μSv/y)

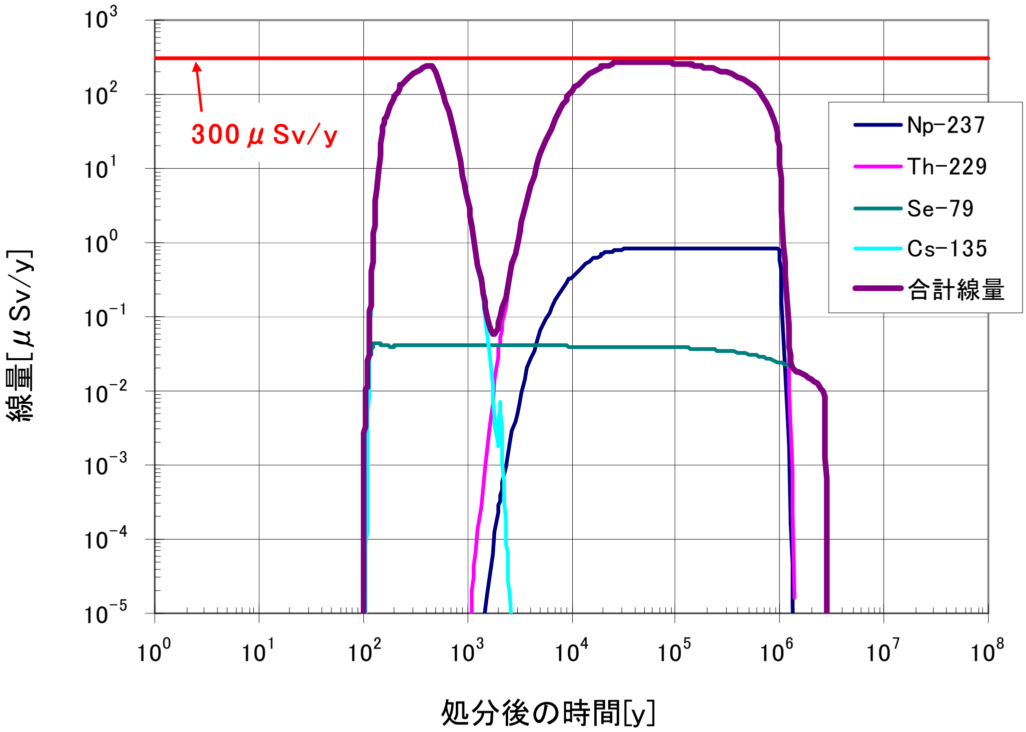


図 4.2.1-10 降水系間隙水 － 合計線量 － 決定論解析結果(300μSv/y)

4.2.2 海水系間隙水の場合

ここでは，溶解度・分配係数（緩衝材）・緩衝材中拡散係数を海水系間隙水の場合の代表値（表 4.2-1 参照）で固定し，ガラス溶解速度，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（海水系間隙水 - 1 次統計解析：図 4.2.2-1 参照)。この結果，Se-79 及び Np-237 については，降水系間隙水の場合に，統計解析の結果が 10 μ Sv/y 及び 300 μ Sv/y を全て下回ることがわかる。一方，Cs-135 及び Th-229 については，全てのプロットが 10 μ Sv/y 及び 300 μ Sv/y を下回るわけではないため，ガラス溶解速度，緩衝材の厚さ，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。

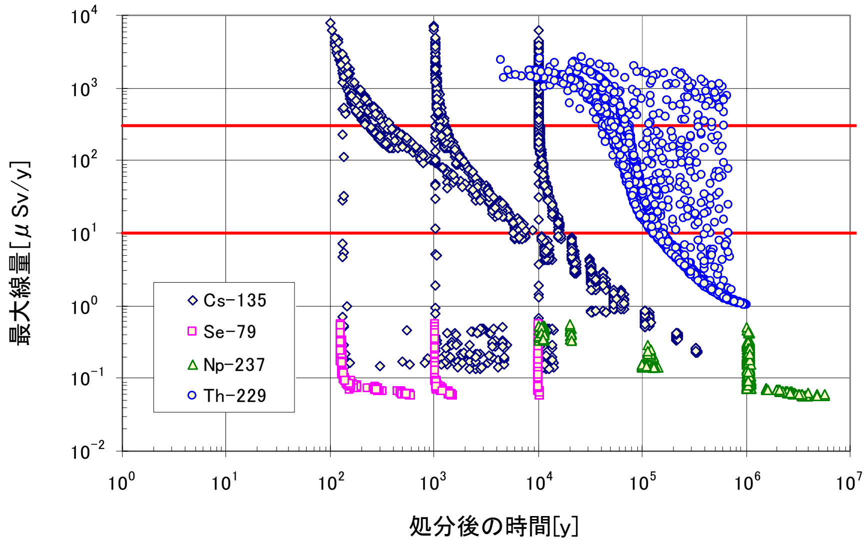


図 4.2.2-1 海水系間隙水 －1 次統計解析結果

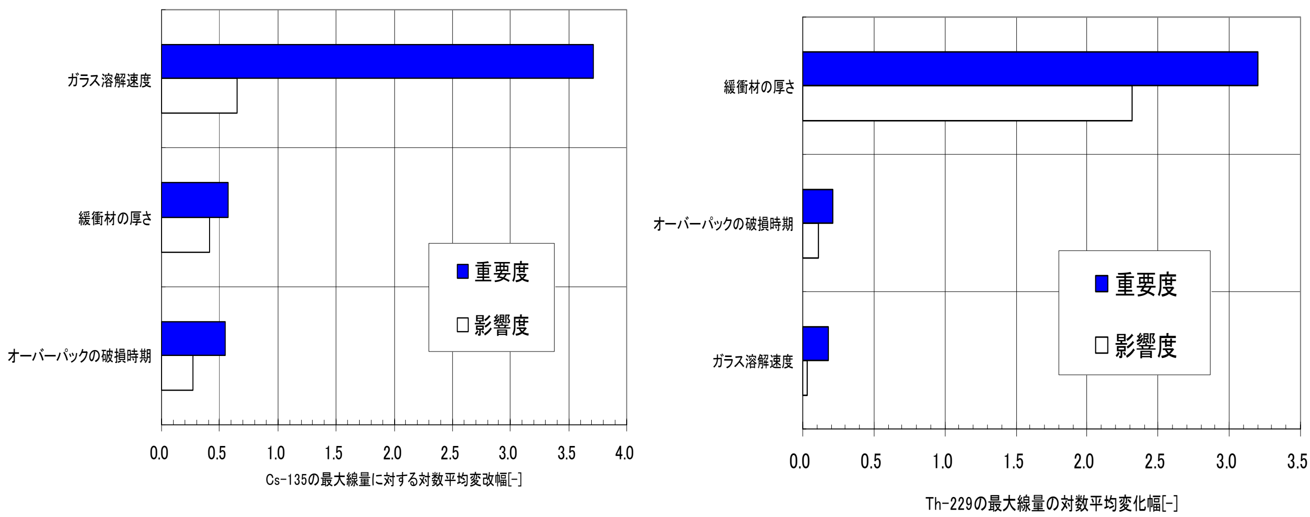


図 4.2.2-2 海水系間隙水 －1 次統計解析結果から算出した重要度・影響度

1) Cs−135

ここでは，まず，Cs-135 に対する成立条件の抽出を試みた。海水系間隙水 - 1 次統計解析の結果から算出した重要度より，Cs-135 の最大線量に対する重要パラメータは，ガラス溶解速度であることがわかる（図 4.2.2-2）。そこで，横軸にガラス溶解速度，縦軸に Cs-135 の最大線量を取った散布図を近似曲線とともにを図 4.2.2-3 に示す。プロットされた結果と 10μSv/y ラインとの交点から，ガラス溶解速度が 2.5g/m²/y 以下であれば 10μSv /y を下回る可能性があることが推定できる。また，プロットされた結果と 300μSv/y ラインとの交点から，ガラス溶解速度が 75g/m²/y 以下であれば 300μSv /y を下回る可能性があることが推定できる。

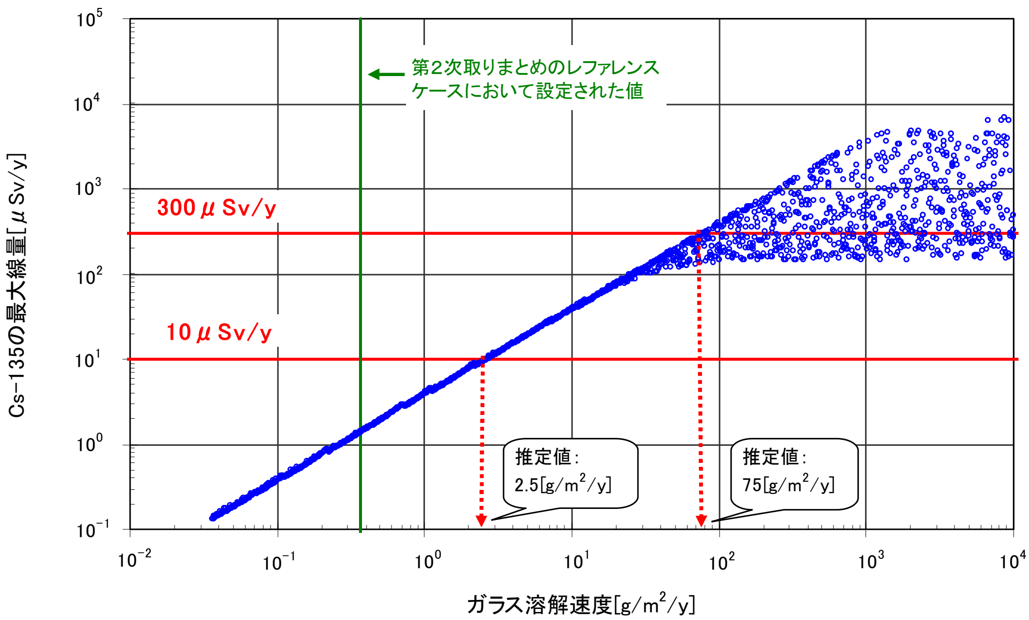


図 4.2.2−3 海水系間隙水 −1 次統計解析による成立条件の推定 (Cs−135：ガラス溶解速度)

そこで，まず，10μSv/y の場合の成立条件を同定するために，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期に表 3.5-1 の変動範囲における保守値を設定し，ガラス溶解速度を 2.5g/m²/y で固定した決定論解析をそれぞれ実施した（海水系間隙水 - Cs-135 - 2 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の結果が 10μSv/y を超えないことを確認した。

さらに，同定した成立条件の妥当性を確認するために，ガラス溶解速度を 2.5g/m²/y 以下の範囲で，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期を表 3.5-1 の変動範囲で変動させた統計解析を実施した（海水系間隙水 - Cs-135 - 3 次統計解析：図 4.2.2-4 参照)。その結果，この統計解析の結果が 10μSv/y を下回っていること，及び先の決定論解析（海水系間隙水 - Cs-135 - 2 次決定論解析）の結果が統計解析の結果の上限を与えていることを確認した。

次に，300μSv/y の場合の成立条件を同定するために，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期を保守値に設定し，ガラス溶解速度を 75g/m²/y で固定した決定論解析を実施し

た（海水系間隙水 - Cs-135 - 4 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の結果が 300μSv/y を超えないことを確認した。

さらに，同定した成立条件の妥当性を確認するために，ガラス溶解速度を 75g/m²/y 以下の範囲で，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期を表 3.5-1 の変動範囲で変動させた統計解析をそれぞれ実施した（海水系間隙水 - Cs-135 - 5 次統計解析：図 4.2.2-5 参照）。その結果，この統計解析の結果が 300μSv/y を下回っていること，及び先の決定論解析（海水系間隙水 - Cs-135 - 4 次決定論解析）の結果が統計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，極端な天然バリアおよび海水系間隙水を想定した場合に，ガラス溶解速度が 2.5g/m²/y 以下であれば Cs の最大線量は 10μSv/y を超えないこと及びガラス溶解速度が 75 g/m²/y 以下であれば Cs の最大線量は 300μSv/y を超えないことについての知見を得た。

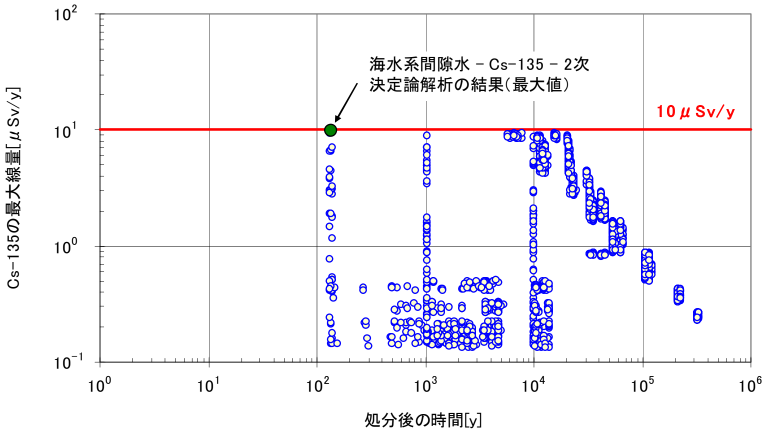


図 4.2.2-4 海水系間隙水 - Cs-135 - 3 次統計解析による成立条件の妥当性確認（10μSv/y）

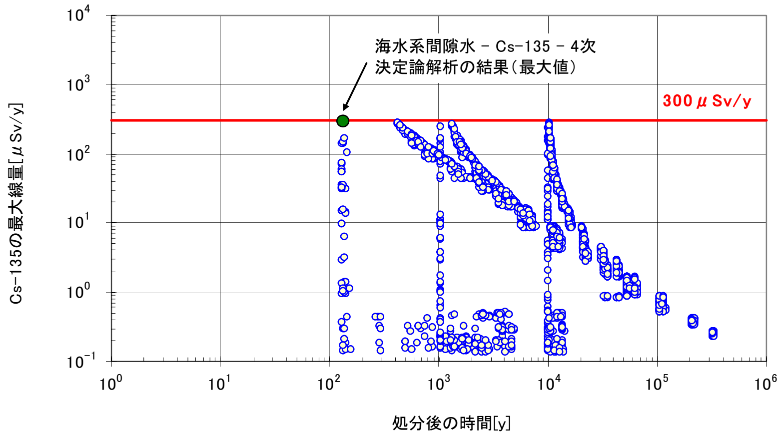


図 4.2.2-5 海水系間隙水 - Cs-135 - 5 次統計解析による成立条件の妥当性確認（300μSv/y）

2) Th-229

次に，Th-229 に対する成立条件の抽出を試みた。海水系間隙水 - 1 次統計解析の結果から算出した重要度より，Th-229 の最大線量に対する重要パラメータは緩衝材の厚さであることがわかる（図 4.2.2-2）。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を図 4.2.2-6 に示す。プロットされた結果と 10μSv/y ラインとの交点から，緩衝材の厚さが 1.75m 以上であれば 10μSv /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 300μSv/y ラインとの交点から，緩衝材の厚さが 0.75m 以上であれば 300μSv /y を下回る可能性があることが推定される。

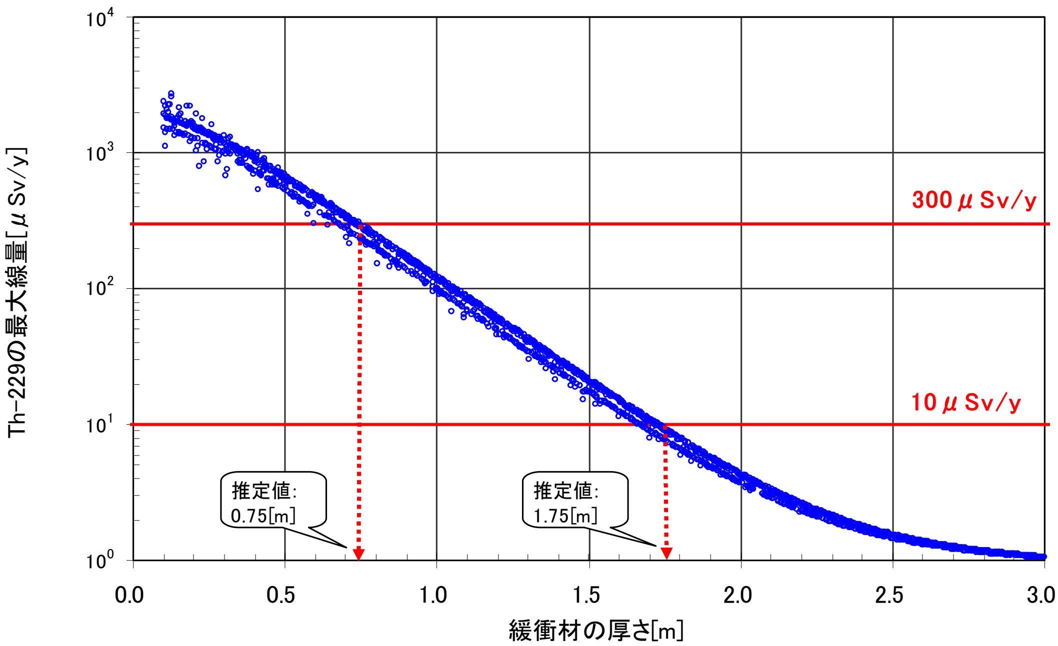


図 4.2.2-6 海水系間隙水 －1 次統計解析による成立条件の推定
(Th-229：緩衝材の厚さ)

そこで，まず，10μSv/y の場合の成立条件を同定するため，ガラス溶解速度及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 1.75m で固定した決定論解析をそれぞれ実施した（海水系間隙水 - Th-229 - 2 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の結果が 10μSv/y を超えないことを確認した。

成立条件の妥当性を確認するため，緩衝材の厚さを 1.75m 以下，ガラス溶解速度及びオーバーパックの破損時期を表 3.5-1 の範囲で変動させた統計解析をそれぞれ実施した（海水系間隙水 - Th-229 - 3 次統計解析：図 4.2.2-7 参照)。その結果，この統計解析の結果が 10μSv/y を下回っていること，及び先の決定論解析（海水系間隙水 - Th-229 - 2 次決定論解析）の結果が統計解析の結果の上限を与えていることを確認した。

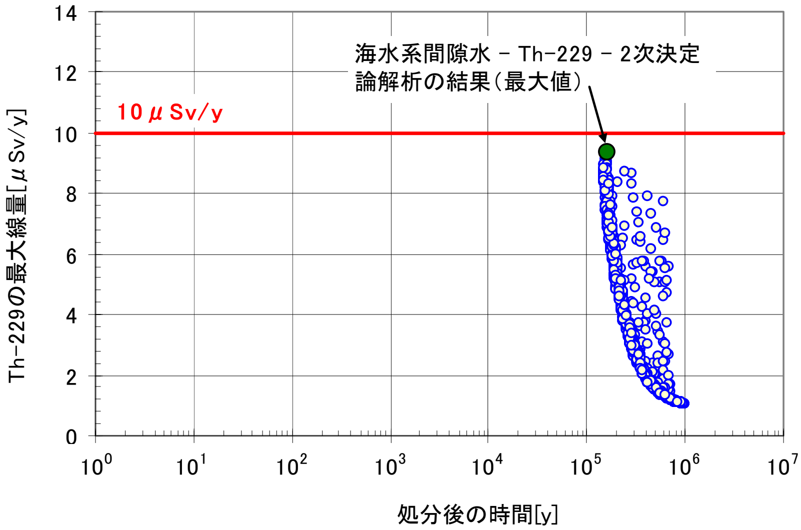


図 4.2.2-7 海水系間隙水 － Th-229 － 3 次統計解析による
成立条件の妥当性確認(10μSv/y)

また，300μSv/y の場合の成立条件を同定するため，ガラス溶解速度及びオーバーパックの破損時期に表 3.5-1 の範囲の保守値を設定し，緩衝材の厚さを 0.75m で固定した決定論解析を実施した（海水系間隙水 - Th-229 - 4 次決定論解析)。その結果，この決定論解析の結果が 300μSv/y を超えないことを確認した。

成立条件の妥当性を確認するため，緩衝材の厚さを 0.75m 以下，ガラス溶解速度及びオーバーパックの破損時期を表 3.5-1 の範囲で変動させた統計解析をそれぞれ実施した（海水系間隙水 - Th-229 - 5 次統計解析 : 図 4.2.2-8 参照)。その結果，この統計解析の結果が 300μSv/y を下回っていること，及び先の決定論解析（海水系間隙水 - Th-229 - 4 次決定論解析）の結果が統計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，極端な天然バリアおよび海水系間隙水を想定した場合に，緩衝材の厚さが 1.75m 以上であれば Th-229 の最大線量は 10μSv/y を超えないこと及び緩衝材の厚さが 0.75m 以上であれば Th-229 の最大線量は 300μSv/y を超えないことについての知見を得た。

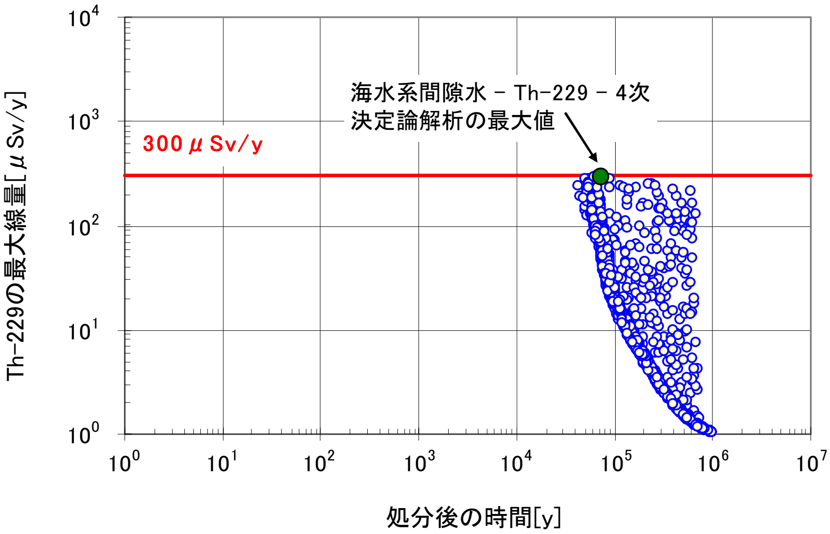


図 4.2.2−8 海水系間隙水 − Th−229 − 5 次統計解析による
成立条件の妥当性確認（300μSv/y）

3) 合計線量

ここでは，抽出した各核種に対する成立条件が，Se-79，Cs-135，Np-237 及び Th-229 の合計線量を指標とした場合でも性能目標を下回るかどうかを確認する。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表 3.5-1 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。その結果，決定論解析の結果が 10μSv/y 及び 300 μSv/y をそれぞれ超えないことを確認し（図 4.2.2-9 及び図 4.2.2-10 参照），成立条件を特定した（表 4.2.2-1 参照）。

図 4.2.2-9 および図 4.2.2-10 より，Cs-135 が約 1 万年で急激に減少していることおよび及び約 300 年で急激に減少していることを把握できる。このことは，ガラス溶解速度に基づくガラス固化体の全量が溶解する時間（ガラス溶解速度 2.5g/m²/y の場合の核種溶出期間は約 1 万年，ガラス溶解速度 75g/m²/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。また，Se-79 については，溶解度制限により 0.1μSv/y 付近で定常に達していること，Np-237 及び 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。

表 4.2.2-1 極端な天然バリアおよび海水系間隙水を
想定した場合における成立条件の例

パラメータ			目標線量が10μSv/yの場合		目標線量が300μSv/yの場合	
緩衝材厚さ		m	1.75	以上	0.75	以上
オーバーパック破損時期		y	−	−	−	−
ガラス溶解速度		$g/m^2/y$	2.5	以下	75	以下
溶解度	Cs	mol/l	可溶性		可溶性	
	Se		6×10^{-9}		6×10^{-9}	
	Np		3×10^{-9}		3×10^{-9}	
	Th		9×10^{-8}		9×10^{-8}	
緩衝材への分配係数	Cs	m^3/kg	0.001		0.001	
	Se		0		0	
	Np		1		1	
	Th		Npのアナログ		Npのアナログ	
緩衝材中拡散係数	Cs	m^2/s	3×10^{-10}		3×10^{-10}	
	Se		3×10^{-10}		3×10^{-10}	
	Np		3×10^{-10}		3×10^{-10}	
	Th		Npのアナログ		Npのアナログ	

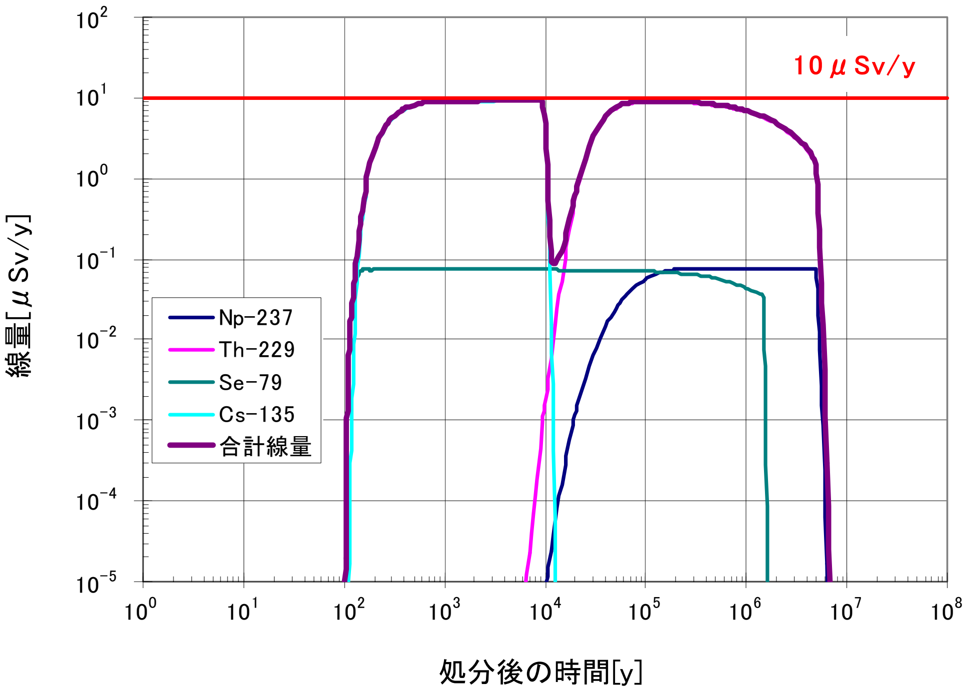


図 4.2.2-9 海水系間隙水- 合計線量 - 決定論解析結果(10μSv/y)

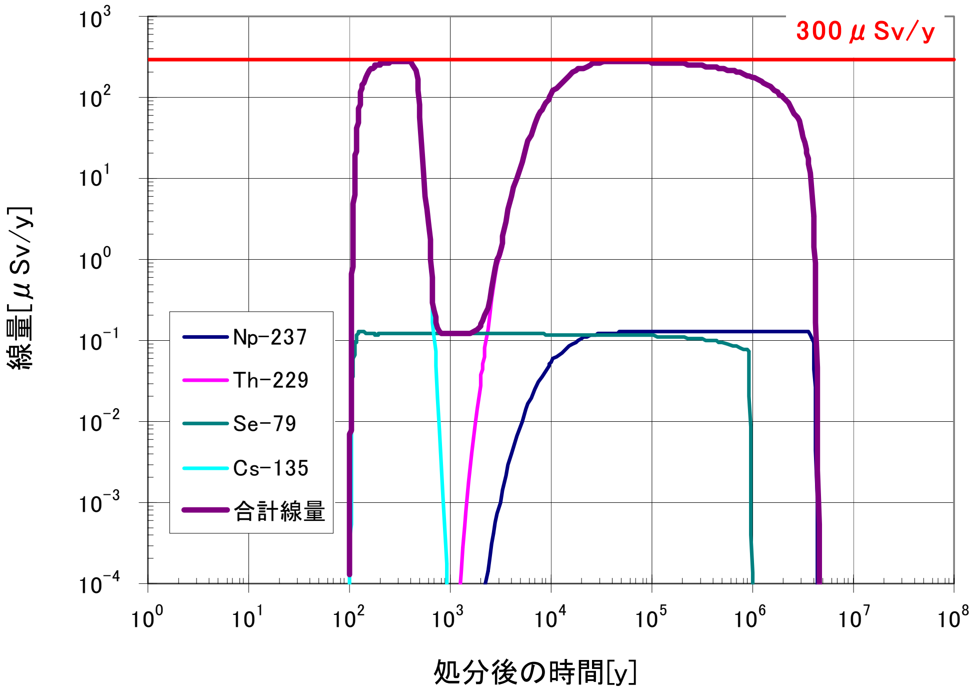


図 4.2.2-10 海水系間隙水- 合計線量 - 決定論解析結果(300μSv/y)

4.2.3　酸化性間隙水の場合

溶解度・分配係数（緩衝材）・緩衝材中拡散係数を酸化性間隙水の場合の代表値（表 4.2-1 参照）で固定し，ガラス溶解速度，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（酸化性間隙水 - 1 次統計解析：図 4.2.3-1 参照）。
この結果から，Th-229 については，極端な天然バリアを想定した場合に，統計解析の結果が 10μSv/y を全て上回ることがわかる。このため，本検討において設定したパラメータの変動範囲内においては，10μSv/y 以下とするための成立条件を見出せないことが示唆される。ここでは，性能目標を 10μSv/y とした場合の Th-229 についての成立条件の抽出の可能性について検討するとともに，Cs-135，Se-79，Np-237 及び性能目標を 300μSv/y とした場合の Cs-135，Se-79，Np-237，Th-229 について，ガラス溶解速度，緩衝材の厚さ及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。

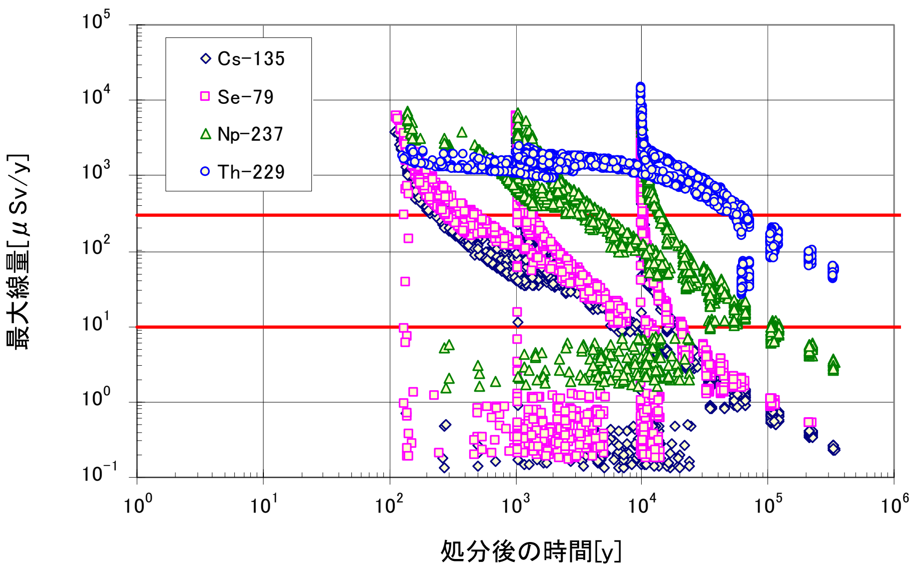


図 4.2.3-1　酸化性間隙水 －1 次統計解析結果

1）Cs-135

まず，Cs-135 については，降水系間隙水と酸化性間隙水の場合において，溶解度・分配係数（緩衝材）・緩衝材中拡散係数の代表値が同じであることから（表 4.2-1 参照），4.2.1 項において抽出した降水系間隙水の場合における成立条件を引用することが可能である。
このため，酸化性間隙水の場合に，ガラス溶解速度が 2.5g/m²/y 以下であれば Cs-135 の最大線量は 10μSv/y を超えないこと及びガラス溶解速度が 75g/m²/y 以下であれば Cs-135 の最大線量は 300μSv/y を超えないことについての知見を得た。

2）Se-79

次に，Se-79 に関する成立条件の抽出を試みた。酸化性間隙水 - Se-79 - 1 次解析の結果

から算出した重要度より，Se-79 の最大線量に対する重要パラメータはガラス溶解速度であることがわかる（図 4.2.3-2）。ここで，図 4.2.3-3 に，横軸にガラス溶解速度，縦軸に Se-79 の最大線量を取った散布図を示す。プロットされた結果と 10μSv/y ラインとの交点から，ガラス溶解速度が 1.9g/m²/y 以下であれば 10μSv /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 300μSv/y ラインとの交点から，ガラス溶解速度が 57g/m²/y 以下であれば 300μSv /y を下回る可能性があることが推定される。

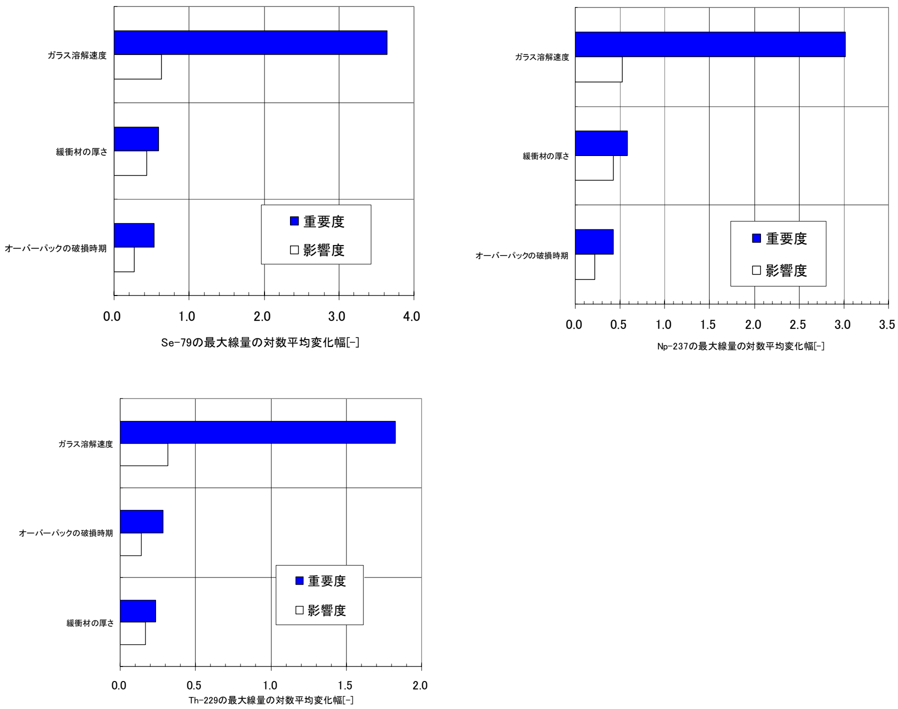


図 4.2.3-2 酸化性間隙水 －1 次統計解析結果から算出した重要度･影響度

10μSv/y の場合の成立条件を同定するために，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期を保守値に設定し，ガラス溶解速度を 1.9g/m²/y で固定した決定論解析をそれぞれ実施した（酸化性間隙水 - Se-79 - 2 次決定論解析）。この結果，ガラス溶解速度が 1.9g/m²/y の場合に 10μSv/y を超えないことを確認した。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 1.9g/m²/y 以下の範囲，緩衝材の厚さ及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（酸化性間隙水 - Se-79 - 3 次統計解析：図 4.2.3-4 参照）。その結果，この統計解析の結果が 10μSv/y を下回っていること，及び先の決定論解析（酸化性間隙水 - Se-79 - 2 次決定論解析）の結果が統計解析の結果の上限を与えていることを確認した。

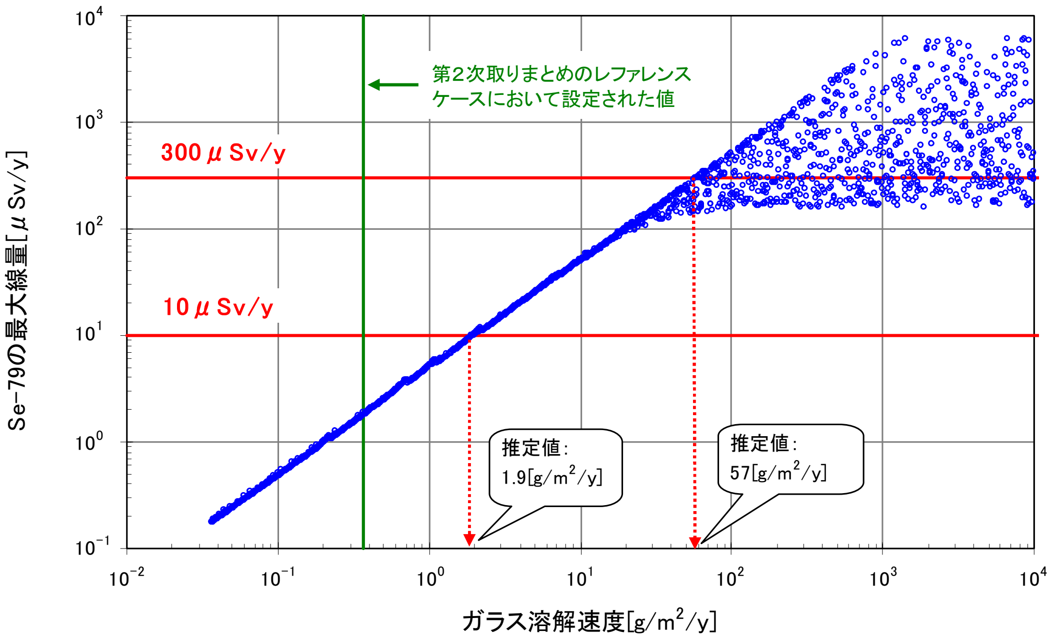


図 4.2.3-3 酸化性間隙水 －1 次統計解析による成立条件の推定
（Se-79：ガラス溶解速度）

次に，300μSv/y の場合の推定値を同定するために，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期を保守値に設定し，ガラス溶解速度を 57g/m²/y で固定した決定論解析をそれぞれ実施した（酸化性間隙水 - Se-79 - 4 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の結果が 300μSv/y を超えないことを確認した。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 57g/m²/y 以下の範囲，緩衝材の厚さ及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（酸化性間隙水 - Se-79 - 5 次統計解析：図 4.2.3-5 参照）。その結果，この統計解析の結果が 300μSv/y を下回っていること，及び先の決定論解析（酸化性間隙水 - Se-79 - 4 次決定論解析）の結果が統計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，極端な天然バリアおよび酸化性間隙水の場合に，ガラス溶解速度が 1.9g/m²/y 以下であれば Se-79 の最大線量は 10μSv/y を超えないこと，及びガラス溶解速度が 57g/m²/y 以下であれば Se-79 の最大線量は 300μSv/y を超えないことについての知見を得た。

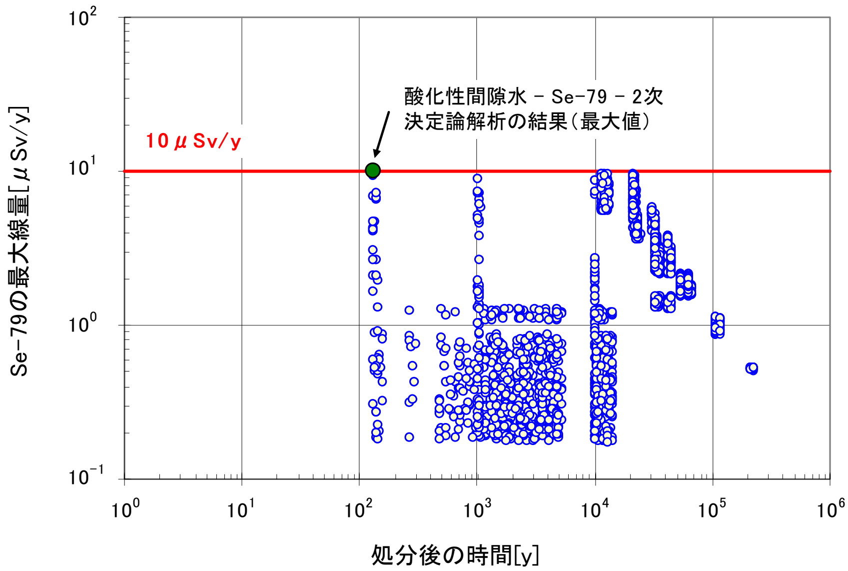


図 4.2.3-4 酸化性間隙水 – Se-79 – 3 次統計解析による成立条件の妥当性確認(10 μ Sv/y)

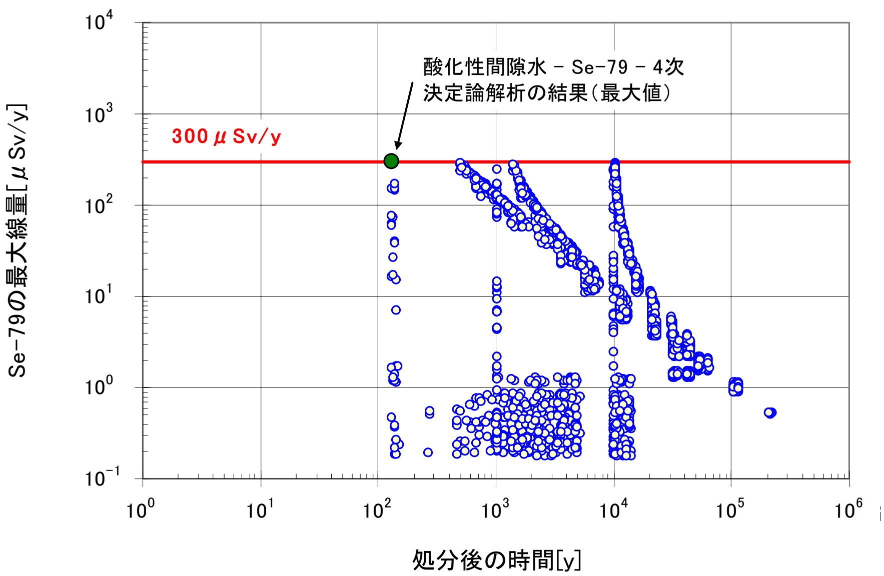


図 4.2.3-5 酸化性間隙水 – Se-79 – 5 次統計解析による成立条件の妥当性確認(300 μ Sv/y)

3）Np-237

次に，Np-237 に関する成立条件の抽出を試みた。酸化性間隙水 - 1 次解析の結果から算出した重要度より，Np-237 の最大線量に対する重要パラメータはガラス溶解速度であることがわかる（図 4.2.3-2）。そこで，横軸にガラス溶解速度，縦軸に Np-237 の最大線量を取った散布図を図 4.2.3-6 に示す。プロットの上限と 10μSv/y ラインとの交点から，ガラス溶解速度が 0.18g/m²/y 以下であれば 10μSv /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 300μSv/y ラインとの交点から，ガラス溶解速度が 5.4g/m²/y 以下であれば 300μSv /y を下回る可能性があることが推定される。

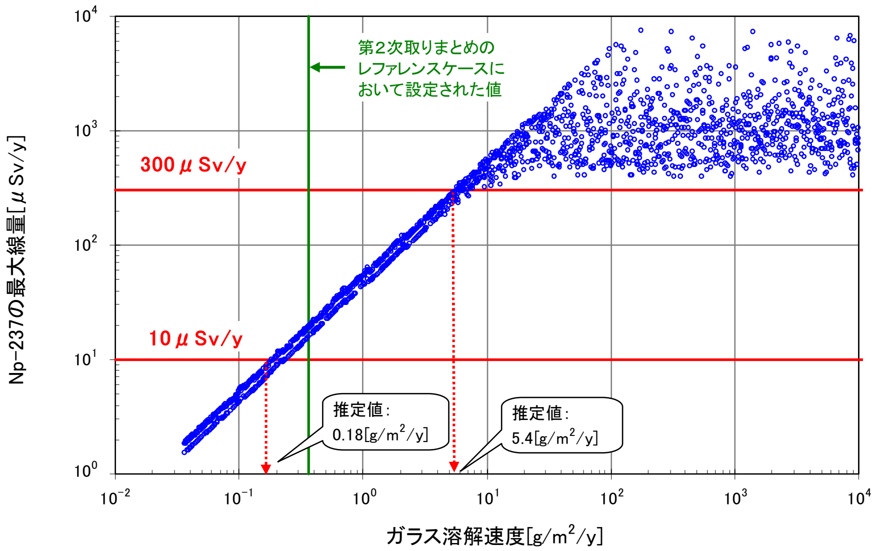


図 4.2.3-6　酸化性間隙水 －1 次統計解析による成立条件の推定
（Np-237：ガラス溶解速度）

10μSv/y の場合の成立条件を同定するために，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期を保守値に設定し，ガラス溶解速度を 0.18g/m²/y で固定した決定論解析を実施した（酸化性間隙水 - Np-237 - 2 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の結果が 10μSv/y を超えないことを確認した。

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 0.18g/m²/y 以下の範囲で，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期を表 3.5-1 の範囲で変動させた統計解析をそれぞれ実施した（酸化性間隙水 - Np-237 - 3 次統計解析：図 4.2.3-7 参照）。その結果，この統計解析の結果が 10μSv/y を下回っていること，及び先の決定論解析（酸化性間隙水 - Np-237 - 2 次決定論解析）の結果が統計解析の結果の上限を与えていることを確認した。

次に，300μSv/y の場合の成立条件を同定するために，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期を保守値に設定し，ガラス溶解速度を 5.4g/m²/y で固定した決定論解析を実施した（酸化性間隙水 - Np-237 - 4 次決定論解析：図 4.2.3-8 参照）。その結果，この決定論解析の結果が 300μSv/y を超えないことを確認した。

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 5.4g/m^2/y 以下の範囲で，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期を表 3.5-1 の範囲で変動させた統計解析をそれぞれ実施した（ケース 1 - 酸化性間隙水 - Np-237 - 5 次統計解析：図 4.2.3-7 参照）。その結果，この統計解析の結果が 300 μSv/y を下回っていること，及び先の決定論解析（酸化性間隙水 - Np-237 - 4 次決定論解析）の結果が統計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，極端な天然バリアおよび酸化性間隙水の場合に，ガラス溶解速度が 0.18g/m^2/y 以下であれば Np-237 の最大線量は 10 μSv/y を超えないこと，及びガラス溶解速度が 5.4g/m^2/y 以下であれば，Np-237 の最大線量は 300 μSv/y を超えないことについての知見を得た。

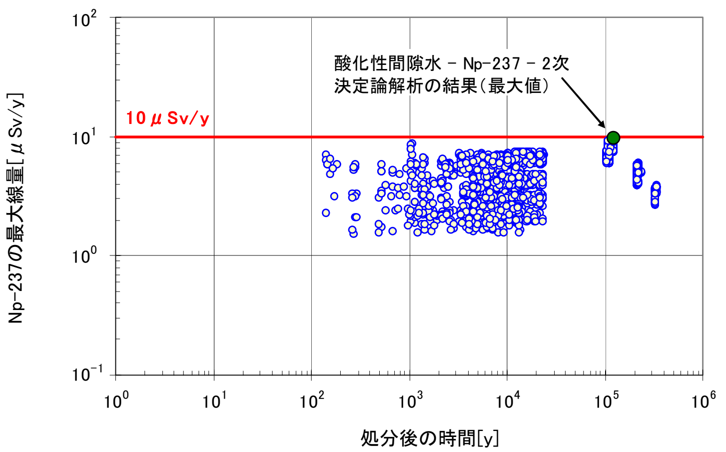


図 4.2.3-7 酸化性間隙水 － Np-237 － 3 次統計解析による
成立条件の妥当性確認（10 μ Sv/y）

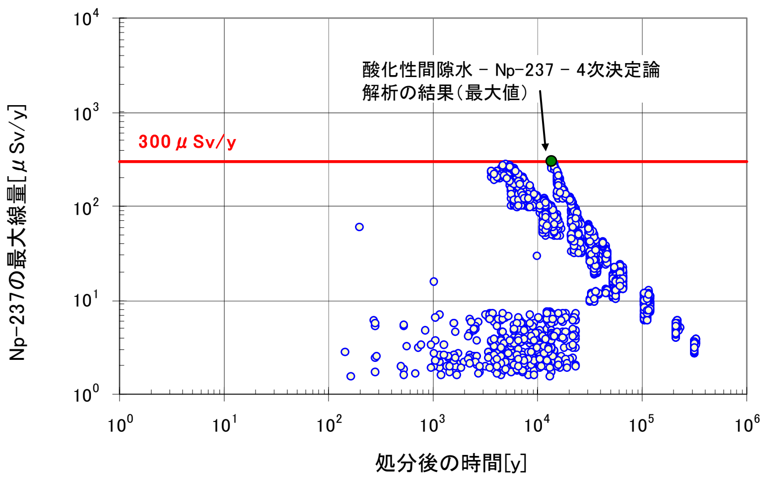


図 4.2.3-8 酸化性間隙水 － Np-237 － 5 次統計解析による
成立条件の妥当性確認（300 μ Sv/y）

4) Th-229

次に，Th-229 に関する成立条件の抽出を試みた。酸化性間隙水 - 1 次解析の結果から算出した重要度（図 4.2.3-2 参照）より，Th-229 の最大線量に対する重要パラメータはガラス溶解速度であることがわかる。そこで，横軸にガラス溶解速度，縦軸に Th-229 の最大線量を取った散布図を合わせて図 4.2.3-9 に示す。

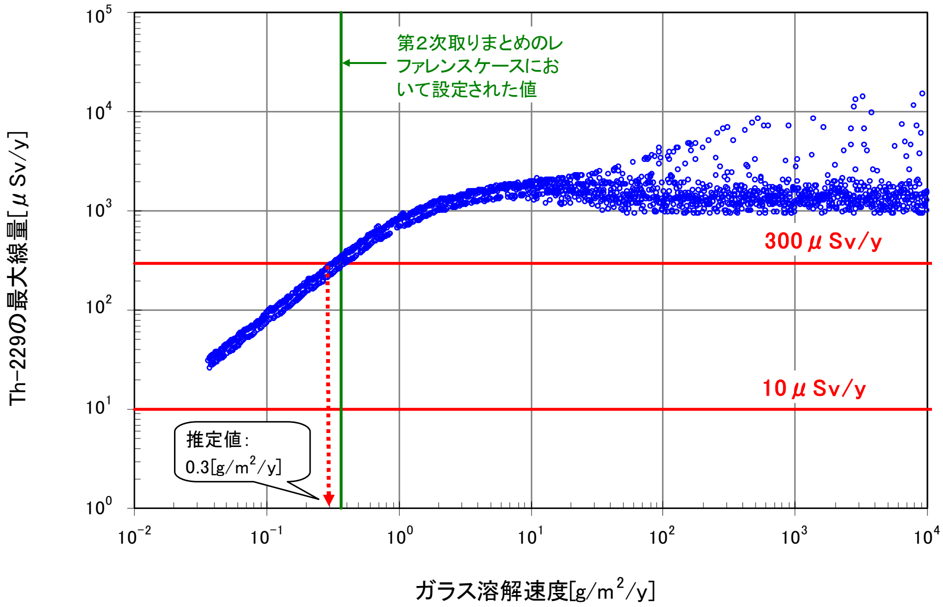


図 4.2.3-9 酸化性間隙水 －1 次統計解析による成立条件の推定
（Th-229：ガラス溶解速度）

図 4.2.3-9 より，プロットされた結果と 10μSv/y ラインとの交点から，ガラス溶解速度を本検討における変動範囲のうち最も非保守側の値（0.0365g/m²/y）に設定した場合においても，10μSv/y を下回らず，性能目標を 10μSv/y，極端な天然バリアおよび酸化性間隙水を想定した場合に，今回設定したパラメータの変動範囲においては，成立条件は見出せないことがわかる。今回の検討の結果は，成立条件として，より低溶解であるガラス固化体の溶解速度を要求する結果になった。表面積の増加を含めたガラスの溶解に関する今後の知見の拡充により，現実的なガラスの溶解速度が性能目標を 10μSv/y とした場合の成立条件として抽出される可能性に期待する。

一方，図 4.2.3-9 より，性能目標を 300μSv/y の場合には，プロットされた結果と 300μSv/y ラインとの交点から，ガラス溶解速度が 0.30g/m²/y 以下であれば 300μSv /y を下回る可能性があることがわかる。

ここで，性能目標を 300μSv/y の場合に推定した成立条件を同定するために，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期を保守値に設定し，ガラス溶解速度を 0.30g/m²/y で固定した決定論解析を実施した（酸化性間隙水 - Th-229 - 2 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の結果が 300μSv/y を超えないことを確認した。

さらに，同定した成立条件の妥当性を確認するために，ガラス溶解速度を 0.30g/m²/y 以

下の範囲で，緩衝材の厚さ及びオーバーパックの破損時期を表 3.5-1 の範囲で変動させた統計解析をそれぞれ実施した（酸化性間隙水 - Th-229 - 3 次統計解析：図 4.2.3-10 参照)。その結果，この統計解析の結果が 300μSv/y を下回っていること，及び先の決定論解析（酸化性間隙水 - Th-229 - 2 次決定論解析）の結果が統計解析の結果の上限を与えていることを確認した。

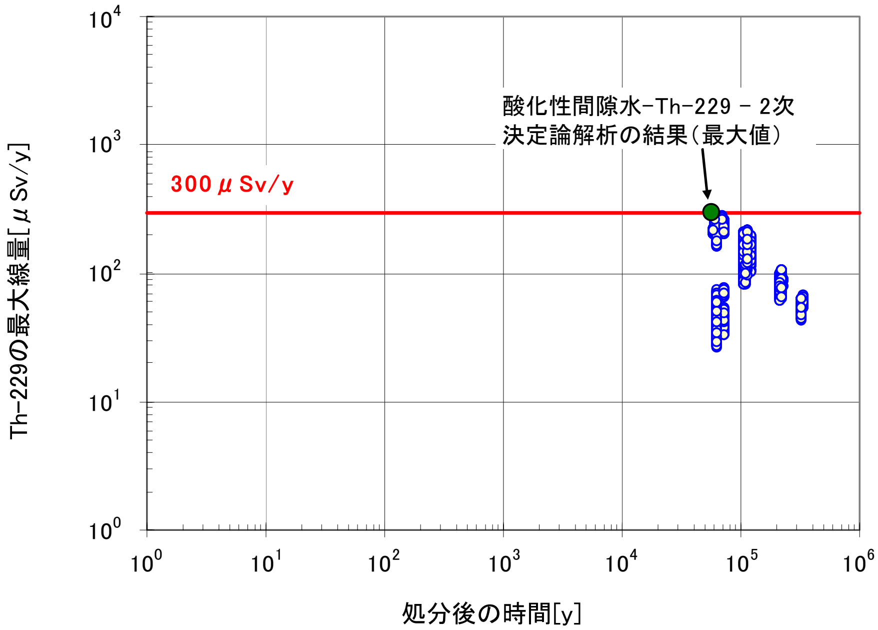


図 4.2.3-10 酸化性間隙水 - Th-229 - 3 次統計解析による成立条件の妥当性確認(300μSv/y)

以上の検討から，間隙水が酸化性の場合に，ガラス溶解速度が 0.3g/m²/y 以下であれば，Th-229 の最大線量は 300μSv/y を超えないことについての知見を得た。

5) 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 及び 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。抽出した個々の核種に対する成立条件の値で固定した決定論解析を実施した。その結果，この決定論解析の結果が 300 μ Sv/y を超えないことを確認し（図 4.2.3-11 参照），成立条件を特定した（表 4.2.3-1 参照）。

図 4.2.3-11 より，Th-229 については定常状態に達しないことがわかる。これは，リザーバー中で沈殿として存在する Np-237 からの崩壊により，Th-229 の生成量が増加するためと考えられる。また，合計線量は，処分後の時間が 10 万年弱の付近で急激に減少している。これは，ガラス溶解速度に基づくガラス固化体の全量が溶解する時間（ガラス溶解速度が $0.30 g/m^2/y$ の際の核種浸出期間は約 8 万年）と整合することから，インベントリの枯渇が原因と考えられる。

表 4.2.3-1 極端な天然バリアおよび酸化性間隙水を想定した場合における成立条件の例

パラメータ			目標線量が10 μ Sv/yの場合		目標線量が300 μ Sv/yの場合	
緩衝材厚さ		m	–	–	–	–
オーバーパック破損時期		y	成立条件見出せず		–	–
ガラス溶解速度		$g/m^2/y$	–	–	0.3	以下
溶解度	Cs	mol/l	可溶性		可溶性	
	Se		可溶性		可溶性	
	Np		4×10^{-5}		4×10^{-5}	
	Th		5×10^{-6}		5×10^{-6}	
緩衝材への分配係数	Cs	m^3/kg	0.01		0.01	
	Se		0		0	
	Np		0.005		0.005	
	Th		Npのアナログ		Npのアナログ	
緩衝材中拡散係数	Cs	m^2/s	6×10^{-10}		6×10^{-10}	
	Se		5×10^{-11}		5×10^{-11}	
	Np		3×10^{-10}		3×10^{-10}	
	Th		Npのアナログ		Npのアナログ	

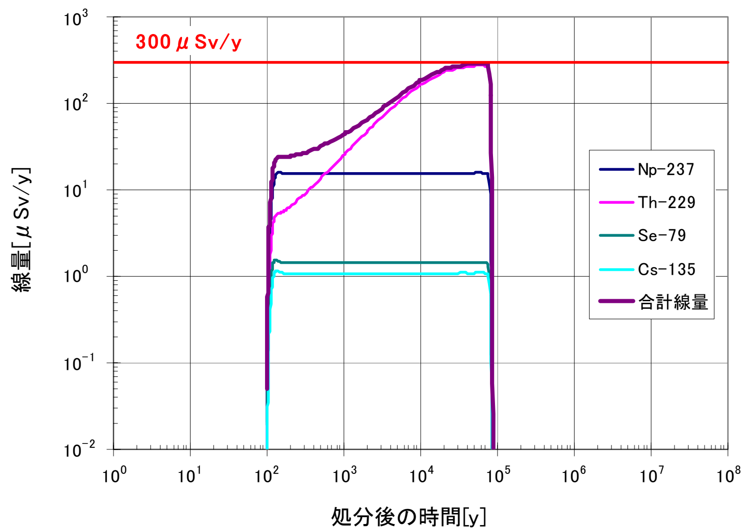


図 4.2.3-11 酸化性間隙水 － 合計線量 － 決定論解析結果（300 μ Sv/y）

4.3 人工バリアのパラメータの成立条件に関する考察

本節においては，極端な天然バリアを想定した場合に，人為的な対策が可能という観点から，ガラス溶解速度，オーバーパックの破損時期，緩衝材の厚さに着目して間隙水毎に抽出した成立条件について整理・考察する。

4.2 節において抽出した成立条件を以下に，成立条件の一覧を表 4.3-1 および表 4.3-2 にそれぞれ示す。

- 降水系間隙水を想定した場合に，本検討で設定した変動範囲内において，ガラス溶解速度が 2.5g/m²/y 以下および緩衝材の厚さが 2.1m 以上であれば，線量は 10μSv/y を下回る。
- 海水系間隙水を想定した場合に，本検討で設定した変動範囲内において，ガラス溶解速度が 2.5g/m²/y 以下および緩衝材の厚さが 1.75m 以上であれば，線量は 10μSv/y を下回る。
- 降水系間隙水を想定した場合に，本検討で設定した変動範囲内において，ガラス溶解速度が 75g/m²/y 以下および緩衝材の厚さが 0.75m 以上であれば，線量は 300μSv/y を下回る。
- 海水系間隙水を想定した場合に，本検討で設定した変動範囲内において，ガラス溶解速度が 75g/m²/y 以下および緩衝材の厚さが 0.75m 以上であれば，線量は 300μSv/y を下回る。
- 酸化性間隙水を想定した場合に，本検討で設定した変動範囲内において，ガラス溶解速度が 0.30g/m²/y 以下であれば，線量は 300μSv/y を下回る。

表 4.3-1 極端な天然バリアを想定した場合に人為的な対策が可能という観点から抽出した成立条件の例（性能目標：10μSv/y）

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
ガラス溶解速度		$g/m^2/y$	2.5 以下	2.5 以下	成立条件見出せず
緩衝材厚さ		m	2.1 以上	1.75 以上	
オーバーパック破損時期		y	変動範囲全域	変動範囲全域	
溶解度	Cs	mol/l	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}
緩衝材への分配係数	Cs	m^3/kg	0.01	0.001	0.01
	Se		0	0	0
	Np		1	1	0.005
	Th		Npのアナログ	Npのアナログ	Npのアナログ
緩衝材中拡散係数	Cs	m^2/s	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^{-10}
	Th		Npのアナログ	Npのアナログ	Npのアナログ

表 4.3-2 極端な天然バリアを想定した場合に人為的な対策が可能という観点から抽出した成立条件の例（性能目標：300μSv/y）

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
ガラス溶解速度		$g/m^2/y$	75 以下	75 以下	0.30 以下
緩衝材厚さ		m	0.75 以上	0.75 以上	変動範囲全域
オーバーパック破損時期		y	変動範囲全域	変動範囲全域	変動範囲全域
溶解度	Cs	mol/l	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}
緩衝材への分配係数	Cs	m^3/kg	0.01	0.001	0.01
	Se		0	0	0
	Np		1	1	0.005
	Th		Npのアナログ	Npのアナログ	Npのアナログ
緩衝材中拡散係数	Cs	m^2/s	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^{-10}
	Th		Npのアナログ	Npのアナログ	Npのアナログ

降水系間隙水と海水系間隙水を想定して抽出した成立条件においては，Cs-135 の最大線量を性能目標以下にするためにガラス溶解速度の値を，Th-229 の最大線量を性能目標以下にするために緩衝材の厚さの値をそれぞれ制限する必要がある（4.2.1 項および 4.2.2 参照）。また，酸化性間隙水を想定した場合には，各核種の最大線量を 300μSv/y 以下にするために，ガラス溶解速度の値を制限する必要がある（4.2.3 項参照）。

表 4.3-2 および表 4.3-3 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，ガラス溶解速度の値を比較すると，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がわかる。図 4.3-1 に，ガラス溶解速度と Cs-135 の最大線量の関係を間隙水毎にプロットし，Cs-135 のガラスからの溶出率に線量換算係数を乗じて算出したラインおよび性能目標値のラインを掲載した散布図を示す。図 4.3-1 より，任意のガラスの溶解速度によって与えられる降水系間隙水および海水系間隙水の場合の線量の上限が Cs-135 のガラスからの溶出率に線量換算係数を乗じて算出したラインで制限されていることがわかる。様々な人工バリアのパラメータの変動を考えた場合においても，Cs-135 の最大線量は緩衝材からのフラックスが定常になる場合に与えられる値であり，それは Cs-135 のガラスからの溶出率に依存して決まる。そのため，降水系間隙水および海水系間隙水の条件下においても，成立条件となるガラス溶解速度の値が同じになると考えられる。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 0.1m，1.0m，3.0m とそれぞれ固定し，ガラス溶解速度を変化させた解析結果も図 4.3-1 に示す。この解析結果とプロットの関係から，ガラス溶解速度が大きい場合に，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 1.0m 以上あればガラス溶解速度の値に関係なく Cs-135 の最大線量が 300μSv/y 以下となること）。

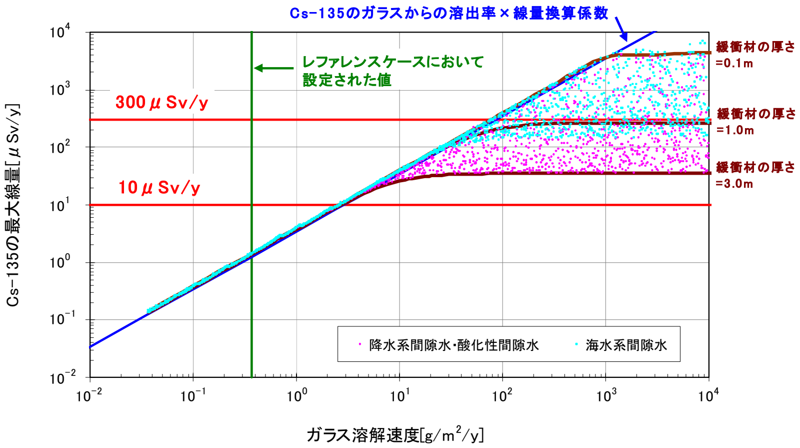


図 4.3-1　極端な天然バリアを想定した場合における
ガラス溶解速度と Cs-135 の最大線量の関係（間隙水毎）

また，表 4.3-2 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を比較すると，以下のことがわかる。

- 10μSv/y 以下にするために必要となる緩衝材の厚さが異なる（2.1m と 1.75m）
- 300μSv/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（0.75m）

この違いが発生する理由については，以下のように考える。

緩衝材の厚さは Th-229 に対して抽出された条件である。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という観点から考察する。

図 4.2.1-6 および図 4.2.2-6 においては，緩衝材の厚さと Th-229 の最大線量の関係が間隙水毎に個別に示されている。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の違いという観点から把握するため，図 4.2.1-6 および図 4.2.2-6 をひとつの図に整理した（図 4.3-2 参照)。なお，図 4.3-2 には，第 2 次取りまとめのレファレンスケースにおいて設定した緩衝材の厚さの値および性能目標値についてもあわせて示す。

図 4.3-2 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こと（300μSv/y 付近）

② 降水系間隙水で緩衝材の厚さが約 0.1m 程度の場合に，Th-229 の最大線量が特異的にばらついていること

③ 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こと（10μSv/y 付近）

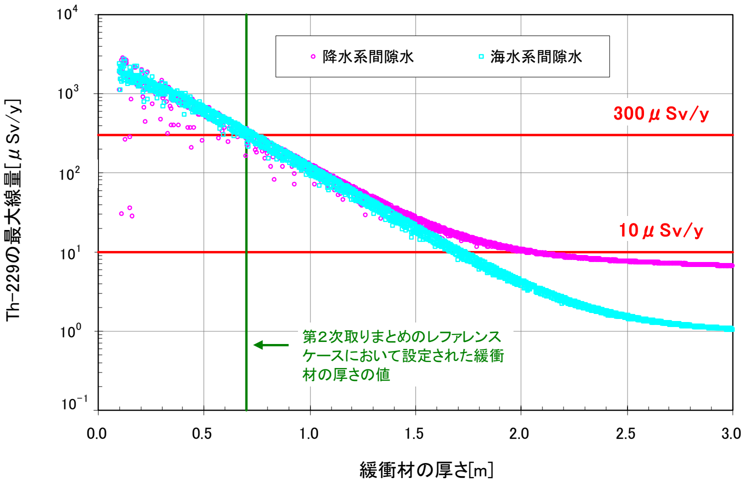


図 4.3-2 極端な天然バリアを想定した場合における
緩衝材の厚さと Th-229 の最大線量の関係(間隙水毎)

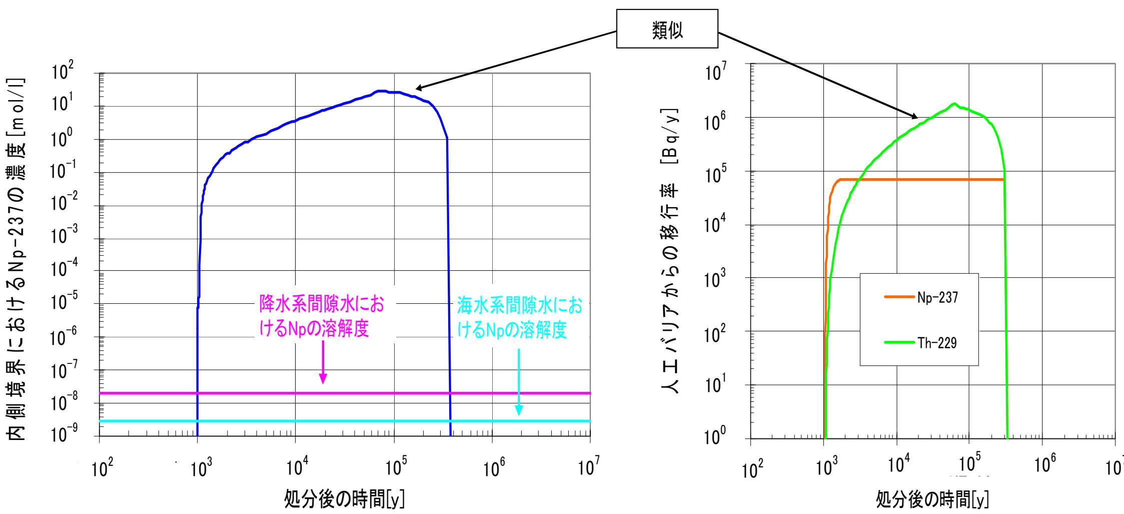


図 4.3-3 緩衝材の厚さが 0.1m の場合における内側境界の
Np-237 の濃度および人工バリアからの移行率

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(表 4.3-2 参照)。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①②③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，内側境界において Np-237 が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[4]であり，インベントリが小さく，半減

[4] 本検討では，Np-237→Th-229 の関係で代表させている（3.3 節参照)。

期が 7340 年と比較的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内側境界において沈殿する 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 0.1m および他のパラメータがレファレンスケースの場合に，Np-237 の内側境界の沈殿量および人工バリアからの Np-237 と Th-229 の移行率を図 4.3-3 に示す。図 4.3-3 より，Np の内側境界の沈殿量と 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。このため，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よりも，内側境界における Np-237 の沈殿量によって大きな影響を受けることが示唆される。
- また，間隙水毎の Np の溶解度のラインを図 4.3-3 に示す。図 4.3-3 より，それぞれの間隙水の Np の溶解度は，ともに内側境界の 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，間隙水の違いが内側境界での 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 の沈殿量に大きく依存する Th-229 の人工バリアからの放出率がほぼ同程度になると考えられる。

②について：

- ここで，緩衝材の厚さを①と同様に 0.1m とし，さらに，ガラス溶解速度を①の条件より 1 桁低い 0.0365g/m^2/y（本検討の変動範囲の最小値）とした場合における，内側境界での Np-237 の間隙水中濃度を間隙水毎に図 4.3-4 に示す。また，Np の溶解度のラインについても合わせて示す。図 4.3-4 より，以下のことがわかる。
  - ➢ 海水系間隙水の条件では，内側境界での Np-237 の間隙水中濃度が，Np の溶解度により制限されていること
  - ➢ 降水系間隙水の条件では，内側境界での Np-237 の間隙水中濃度が，降水系間隙水における Np の溶解度に達していないこと
- このため，降水系間隙水の条件では，緩衝材の厚さが約 0.1m 程度およびガラス溶解速度が小さい場合に，内側境界での Np-237 の沈殿が発生せず，ガラス固化体からの溶出が Th-229 の人工バリアからの移行率を規定し，図 4.3-3 において Th-229 の最大線量が特異的にばらつく結果になると考えられる。すなわち，このバラつきの原因は，ガラスの溶解速度が小さく，Np-237 の沈殿が発生しないことにより生じるものと考える。

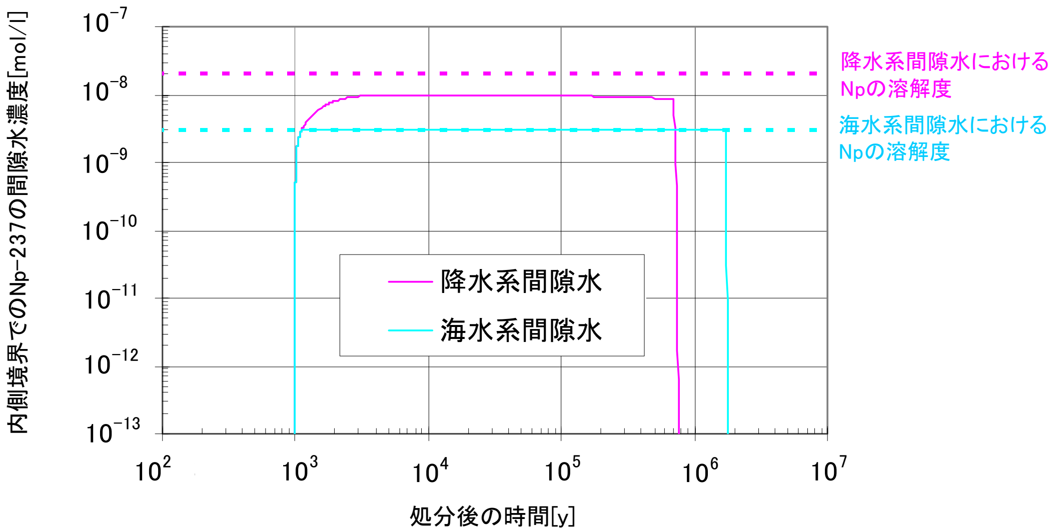


図 4.3-4　緩衝材の厚さが 0.1m およびガラス溶解速度が 0.0365g/m^2/y の場合における内側境界の Np-237 の間隙水濃度（間隙水毎）

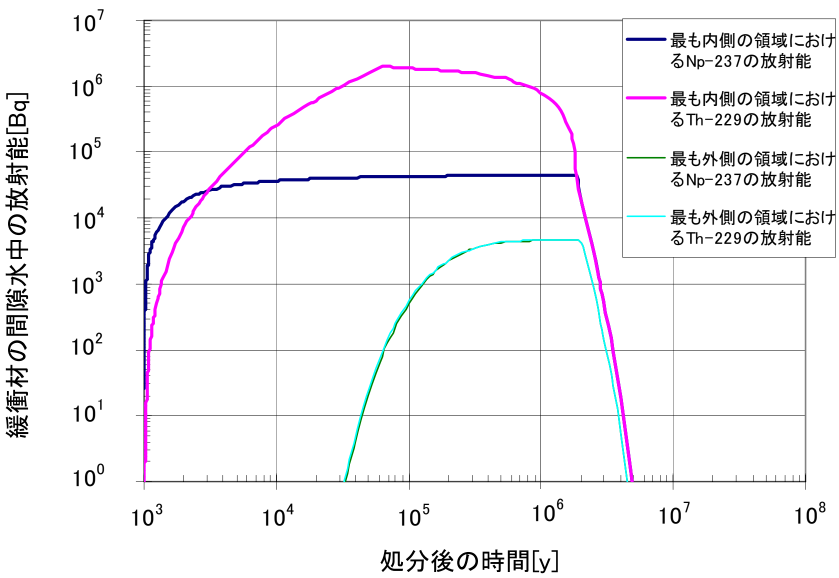


図 4.3-5　降水系間隙水および緩衝材の厚さが 3.0m の場合における緩衝材の間隙水中の放射能

③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 3.0m の場合に，緩衝材の最も内側の領域における間隙水中の放射能，および緩衝材の最も外側の領域における間隙水中の放射能を図 4.3-5 に示す。図 4.3-5 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，内側境界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が示唆される。緩衝材の間隙水中における Np-237 の存在量は，内側境界での 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，降水系間隙水と海水系間隙水における 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，表 4.3-2 および表 4.3-3 より，酸化性間隙水を想定した場合に，以下のことがわかる。

a) 10μSv/y 以下にするための成立条件を見出せなかったこと

b) 300μSv/y以下にするために海水系間隙水および降水系間隙水と比較して厳しい値が要求されること（ガラス溶解速度が 0.30g/m²/y 以下）

この主な要因は，酸化性間隙水の場合に，降水系間隙水と海水系間隙水の場合と比較して Th の緩衝材への分配係数が 2 桁以上小さくなり，Th-229 の移行が促進されるためと考えられる。なお，a)の結果は，成立条件として，より低溶解であるガラス固化体の溶解速度を要求する結果になった。このことから，表面積の増加を含めたガラスの溶解に関する今後の知見の拡充により，現実的なガラスの溶解速度が性能目標を 10μSv/y とした場合の成立条件として抽出される可能性に期待する。

以上の検討より，性能目標を 10μSv/y および極端な天然バリアを想定した場合の対策としては, 地球化学的な条件のひとつである酸化性間隙水を避けることの重要性が示唆される。また, 亀裂による表面積の増加を含めたガラスの溶解速度に関する研究の充実, および設計要件（応力緩衝性，自己シール性，熱伝導性など）の検討を含めた緩衝材の厚さの設定は，天然バリアの不確実性の影響を受けにくい頑健なバリアの構築という観点から, 重要な研究課題となりうることが示唆される。さらに, 緩衝材の厚さの設定は, Cs-135 に対して, ガラスの溶解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。

以上のような定量的な情報の例示は，段階的に進められる地層処分事業において，効率的な研究開発計画の策定に資するものと考える。なお，本検討は，工学的対策に基づく頑健なバリア構築という観点から，極端な天然バリアを想定し，固定した間隙水に応じて解析を実施した一例である。このため，工学的対策に関連するパラメータが性能指標に及ぼす影響を適切に把握するためには，他のパラメータをほかの値で固定し，その固定値に応じた解析,対象核種を拡充した解析,高度化された核種移行解析モデルを用いた解析などが必要となる。工学的対策に基づいて頑健なバリアを構築するためには，このような複数の解析から得られる情報を出発点として，個別現象研究と連携し，優先的に取り組むべき研究課題を同定していく必要がある。

5. 人工バリアの機能を期待しないケース

2 章で示した方法論に沿って，極端な人工バリアを想定し，水理パラメータおよび収着やマトリクス拡散に係るパラメータにそれぞれ着目して検討を行った。本章においては，その結果について記述する。

5.1 重要パラメータ及び影響特性の把握

ここでは，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，極端な人工バリアを想定した場合における予察的な解析を行い，包括的感度解析手法（付録 2 参照）を用いて，天然バリアの重要パラメータおよび影響特性を抽出した。

極端な人工バリアを想定したケースにおける各核種の重要パラメータを把握するため，人工バリアのパラメータを保守値で固定した上で，天然バリアのパラメータを表 3.5-1 にて設定した変動範囲で変動させた統計解析を実施した。各核種の統計解析の結果を図 5.1-1 に示す。

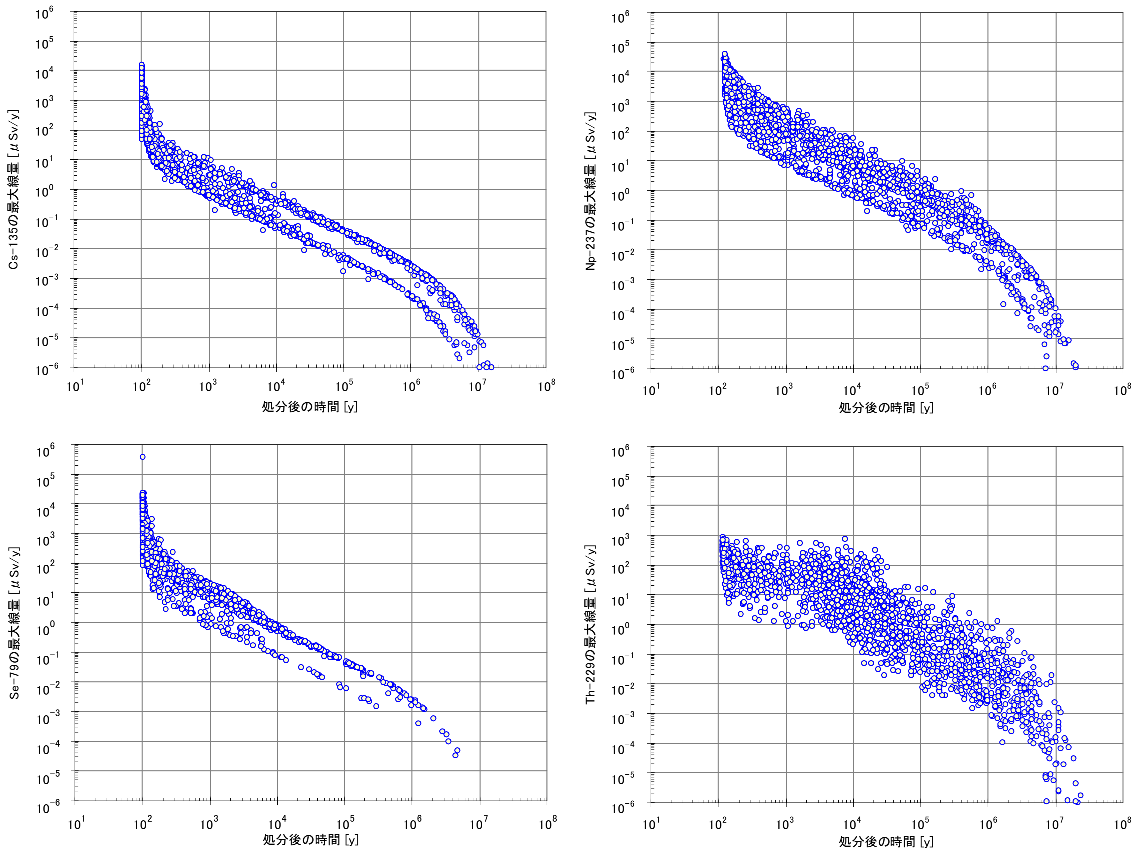


図 5.1-1 極端な人工バリアを想定したケースの統計解析結果

図 5.1-1 より，各核種の最大線量が 100 年を起点としてばらつくことがわかる。この原因は，極端な人工バリアの想定として，オーバーパックの破損時期を 100 年に設定しているためである。なお，Th-229 などの崩壊系列核種に対するオーバーパックの破損時期については, ガラス固化体中で親核種である Np-237 の崩壊量が多くなるように破損時期を遅くした方が保守的であるが，ここでは単純化のため 100 年を設定している。

なお，図 5.1-1 においては，Cs-135 のプロットが 2 つのグループに分かれる（最大線量の出現時間が，速いグループと遅いグループに分かれる）事象が発生している。この理由については，付録 5 において述べる。なお，以降の章節において，同様の最大線量のプロットが 2 つのグループに分かれる結果が存在するが，その原因は付録 5 に示す発生メカニズムと同様のものと考えられる。

次に，各核種の統計解析の結果を用いて算出した重要度・影響度を図 5.1-2 に示す。図 5.1-2 より，地下水流速に関わるパラメータである透水量係数分布の平均値が最も重要度の高いパラメータであることがわかる。これは，透水量係数分布の平均値は，地下水流速だけではなく，掘削影響領域を通過する地下水流量にも影響を及ぼすため，天然バリア中の全ての核種の移行に与える影響が大きくなり，全ての核種の最大線量に対する重要度が高くなったと考えられる。また，地下水流速に関わるパラメータである動水勾配と，天然バリアへの収着に関わるパラメータである核種の分配係数（岩盤）および岩盤の間隙率が重要度の上位に入っていることがわかる。このことから，天然バリアからの最大線量は，地下水流速に関わるプロセスおよび天然バリア中の岩盤への収着に関わるプロセスに着目することが成立条件を抽出する上で重要になると考えられる。

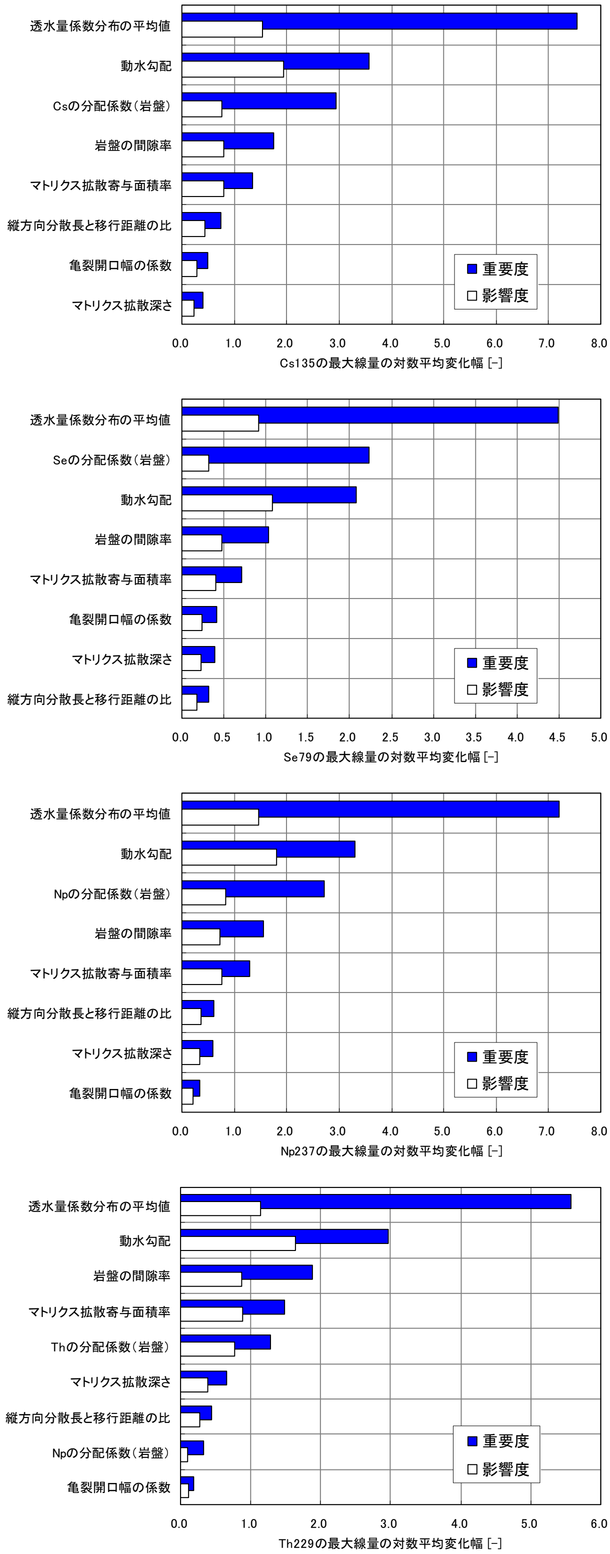


図 5.1-2 極端な人工バリアを想定したケースの統計解析結果から算出した各核種の重要度・影響度

ここで，全ての核種に対して最も重要度が高いパラメータである透水量係数分布の平均値の影響特性をより詳細に把握するために，透水量係数分布の平均値と各核種の最大線量の関係およびその結果に対する近似曲線を図 5.1-3 に示す。

図 5.1-3 より，透水量係数分布の平均値は，各核種の最大線量に対して正の相関を有していることがわかる。また，透水量係数分布の平均値が小さい領域では，透水量係数分布の平均値の感度が大きく，最大線量のプロットのばらつきも大きくなっていることがわかる。このことは，透水量係数分布の平均値の感度が大きい一方で，他のパラメータも最大線量に対する感度が比較的大きいことを意味する。これは，透水量係数分布の平均値が小さい領域では，天然バリア中を移行する核種が天然バリア外側に到達するまでの時間が長くなり収着やマトリクス拡散の影響を受けやすくなるためであると考えられる。一方，透水量係数分布の平均値が大きい領域では，透水量係数分布の平均値の感度が小さくなり，最大線量のプロットのばらつきも小さくなっていることがわかる。このことは，透水量係数分布の平均値が最大線量を支配しているものの，この領域では透水量係数分布の平均値自体の感度が小さくなっていることを意味する。これは，透水量係数分布の平均値が大きい領域では，天然バリア中を移行する核種が天然バリア外側に到達するまでの時間が短くなり収着やマトリクス拡散の影響を受けにくくなり，各核種の最大線量が人工バリア外側からの移行率で規定されるためと考えられる。特に，Th-229 については，透水量係数分布の平均値が大きい領域において感度が小さくなる傾向が顕著に現れている。これは，透水量係数分布の平均値が 10^{-8} m²/s より大きい領域では収着および Np-237 からの崩壊の影響が小さくなり，Th-229 の天然バリア外側からの移行率が人工バリア外側からの移行率によって支配されるため，天然バリア外側での Th-229 の最大線量は人工バリア外側での Th-229 の最大線量を上限としてばらついたと考えられる。

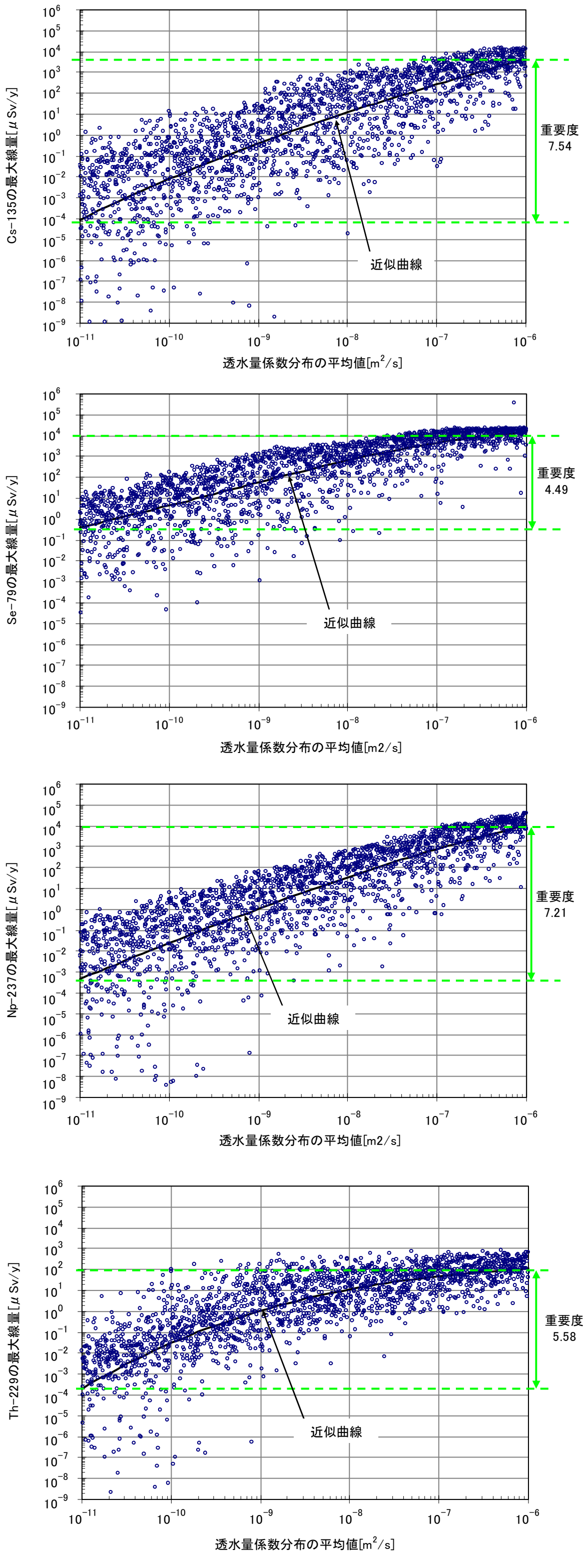


図 5.1-3 各核種の最大線量に対する透水量係数分布の平均値の影響特性

（極端な人工バリアを想定したケースの場合）

5.2 成立条件の抽出

5.1 項に示した予察的な解析の結果から，透水量係数分布の平均値を主とした水理パラメータが線量に与える影響が大きいことを把握できる。天然バリアの分析対象パラメータとしては，水理パラメータ，および収着やマトリクス拡散に係るパラメータに着目している。これらを踏まえ，ここでは，まず，予察的な解析の結果に基づき，水理パラメータを分析対象として成立条件を抽出する（5.2.1 項参照）。さらに，水理パラメータの不確実性を補完するようなシステムの条件を見出すために，相対的な影響が大きい水理パラメータ（透水量係数分布の平均値，動水勾配，亀裂開口幅の係数）を様式化して固定し，水理パラメータ以外のパラメータを分析対象として成立条件を固定値毎に抽出する（5.2.2 項および 5.2.3 項参照）。なお，水理パラメータの固定値については，透水量係数分布の平均値に $10^{-10}m^2/s$ および $10^{-8}m^2/s$ をそれぞれ設定し，動水勾配および亀裂開口幅については，第２次取りまとめのレファレンスケースの値で固定することとした（表 5.2-1 参照）。これ以降，透水量係数分布の平均値が $10^{-10}m^2/s$ の場合をパターン１，透水量係数分布の平均値が $10^{-8}m^2/s$ の場合をパターン２と定義する。

表 5.2-1 本検討において様式化した水理パラメータの代表値

パラメータ		パターン1	パターン2
流速(v)*	[m/y]	1.6	16.0
透水量係数分布の平均値(T)	[m²/s]	1×10^{-10}	1×10^{-8}
動水勾配(i)	[−]	0.01	0.01
亀裂開口幅の係数(c)	[−]	2	2

＊流速v[m/s]は，以下の式により設定する。

$$v = \frac{T \times i}{c\sqrt{T}}$$

5.2.1 水理パラメータに着目した場合

1）Cs−135

ここでは，Cs-135 に対して，相対的に重要度の高い透水量係数分布の平均値（図 5.1-2 参照）を対象として，成立条件の抽出を試みる。図 5.1-1 の解析結果に基づき，横軸に透水量係数分布の平均値，縦軸に Cs-135 の最大線量を取った散布図および性能目標値ラインを図 5.2.1-1 に示す。プロットされた結果と 300μSv/y ラインとの交点から，透水量係数分布の平均値が約 $10^{-9}m^2/s$ であれば 300μSv/y を下回る可能性があることが推定される。

そこで，300μSv/y の場合の成立条件を同定するために，透水量係数分布の平均値に表 3.5-1 の変動範囲を設定し，その他のパラメータを表 3.5-1 の変動範囲における保守値で固定した統計解析を実施した（水理パラメータ - Cs-135 - 2 次統計解析）。この統計解析の結果を用いて，透水量係数分布の平均値を横軸に，Cs-135 の最大線量を縦軸にプロットした散布図を図 5.2.1-2 に示す。図 5.2.1-2 より，透水量係数分布の平均値が $9\times10^{-10}m^2/s$ 以下であれば Cs-135 の最大線量が 300μSv/y を下回ることがわかる。

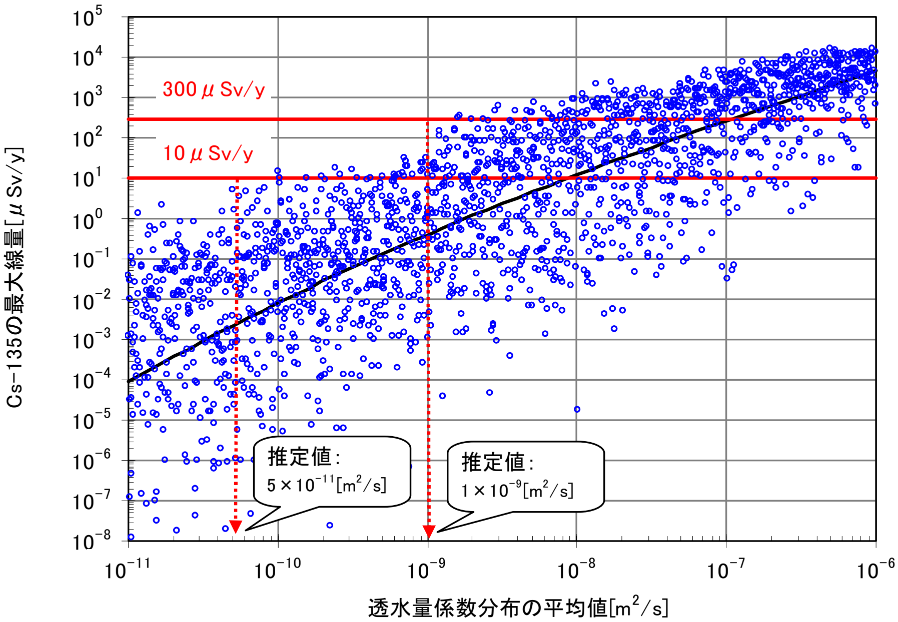


図 5.2.1−1 極端な人工バリアを想定した統計解析による成立条件の推定
（透水量係数分布の平均値，Cs−135 の最大線量）

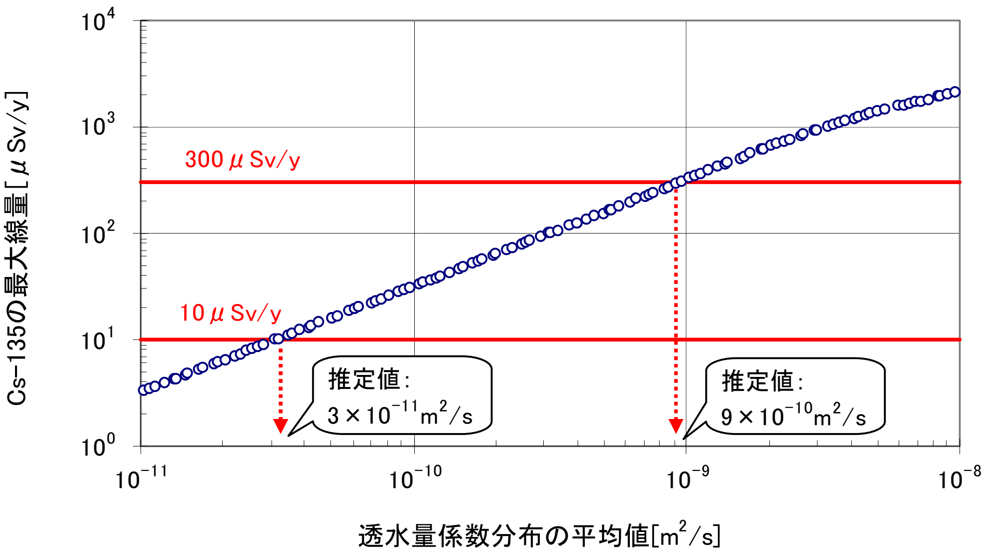


図 5.2.1−2 水理パラメータ －Cs−135－2 次統計解析による成立条件の推定

同定した成立条件の妥当性を確認するために，透水量係数分布の平均値に 9×10-10m2/s 以下，その他のパラメータに表 3.5-1 における変動範囲を設定した統計解析を実施した(水理パラメータ ‐Cs-135‐3 次統計解析)。その結果，水理パラメータ ‐Cs-135‐2 次統計解析のうち，透水量係数分布の平均値が 9×10-10m2/s の場合の最大線量が，水理パラメータ ‐Cs-135‐3 次統計解析の結果の上限を与えていることを確認できる（図 5.2.1-3 参照)。

以上の検討から，透水量係数分布の平均値に 9×10-10m2/s 以下であれば，Cs-135 の最大

線量が 300μSv/y を超えないことについて見通しを得た。

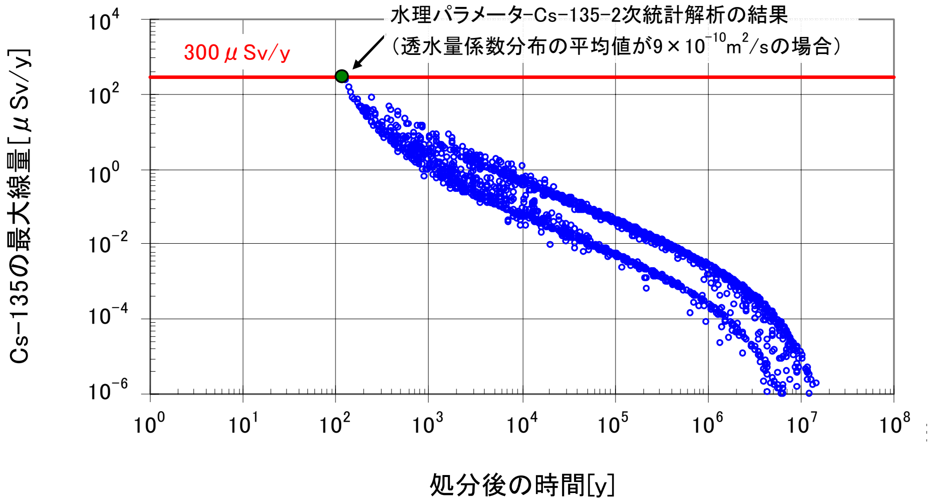


図 5.2.1-3 水理パラメータ － Cs-135 － 3 次統計解析による妥当性確認
（性能目標：300μSv/y）

次に，性能目標が 10μSv/y の場合における成立条件の抽出を試みる。

図 5.2.1-1 より，プロットされた結果と 10μSv/y ラインとの交点から，透水量係数分布の平均値が $5\times10^{-11}m^2/s$ 以下であれば 10μSv/y を下回る可能性があることが推定される。

そこで，透水量係数分布の平均値に表 3.5-1 の変動範囲を設定し，その他のパラメータを表 3.5-1 の変動範囲における保守値で固定した統計解析（水理パラメータ - Cs-135 - 2 次統計解析）の結果を用いて，成立条件を同定することとした。図 5.2.1-2 から，透水量係数分布の平均値が $3\times10^{-11}m^2/s$ 以下であれば Cs-135 の最大線量が 10μSv/y を下回ることが推定される。

同定した成立条件の妥当性を確認するために，透水量係数分布の平均値に $3\times10^{-11}m^2/s$ 以下，その他のパラメータに表 3.5-1 における変動範囲を設定した統計解析を実施した（水理パラメータ - Cs-135 - 4 次統計解析）。その結果，水理パラメータ - Cs-135 - 2 次統計解析のうち，透水量係数分布の平均値が $3\times10^{-11}m^2/s$ の場合の最大線量が，この統計解析の結果の上限を与えていることが確認できる（図 5.2.1-4 参照）。

以上の検討から，透水量係数分布の平均値に $3\times10^{-11}m^2/s$ 以下であれば，Cs-135 の最大線量が 10μSv/y を超えないことについて見通しを得た。

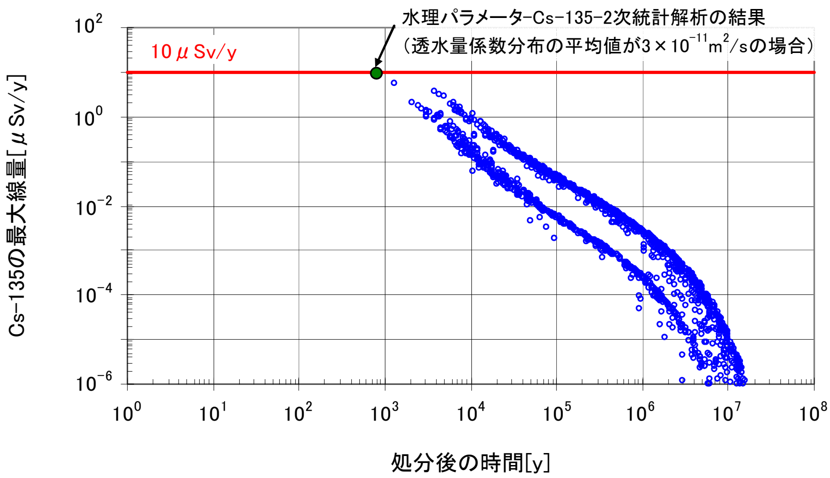


図 5.2.1-4 水理パラメータ － Cs-135 － 4 次統計解析による妥当性確認
（性能目標：10μSv/y）

2）Se-79

ここでは，Se-79 に対して，相対的に重要度の高い透水量係数分布の平均値（図 5.1-2 参照）を対象として，成立条件の抽出を試みることとした。図 5.1-1 に基づき，横軸に透水量係数分布の平均値，縦軸に Se-79 の最大線量を取った散布図および性能目標値ラインを図 5.2.1-5 に示す。図 5.2.1-5 より，透水量係数分布の平均値が 1.1×10^{-10}m^2/s 以下の場合に，300μSv/y を下回る可能性があることがわかる。

ここで，成立条件を同定するために，透水量係数分布の平均値に 1.1×10^{-10}m^2/s を設定し，透水量係数分布の平均値以外のパラメータに保守値を設定した決定論解析を実施した（水理パラメータ - Se-79 - 2 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の結果が 300μSv/y を下回った（図 5.2.1-6 参照）。

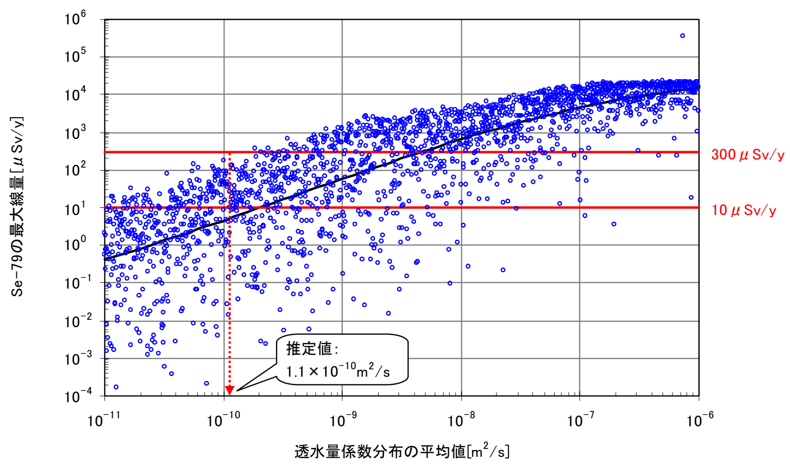


図 5.2.1-5 極端な人工バリアを想定した統計解析による成立条件の推定
（透水量係数分布の平均値，Se-79 の最大線量）

同定した成立条件の妥当性を確認するために，透水量係数分布の平均値に 1.1×10^{-10}m^2/s 以下，その他のパラメータに表 3.5-1 における変動範囲を設定した統計解析を実施した（水理パラメータ - Se-79 - 3 次統計解析）。その結果，先の決定論解析の結果がこの統計解析の結果の上限を与えていることが確認できる（図 5.2.1-6 参照）。

以上の検討から，透水量係数分布の平均値に 1.1×10^{-10}m^2/s 以下であれば，Se-79 の最大線量が 300μSv/y を超えないことについて見通しを得た。

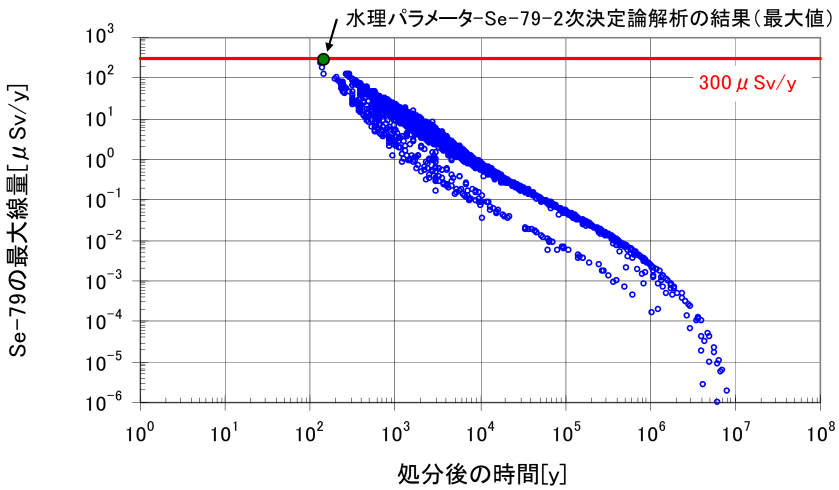


図 5.2.1-6 水理パラメータ － Se-79 － 3 次統計解析による妥当性確認（性能目標：300μSv/y）

次に，性能目標が 10μSv/y の場合における成立条件の抽出を試みる。

図 5.2.1-5 より，プロットされた結果と 10μSv/y ラインとの交点から，透水量係数分布の平均値が表 3.5-1 の変動範囲の中で最も非保守側の値である 10^{-11}m^2/s であったとしても，Se-79 の最大線量が 10μSv/y を上回ることが推定される。

このため，水理パラメータの中で最も重要度が高い透水量係数分布の平均値に表 3.5-1 の変動範囲の中で最も非保守側の値である 10^{-11}m^2/s を設定し，その他の水理パラメータである動水勾配と亀裂開口幅の係数に変動範囲を設定し，その他のパラメータを変動範囲における保守値に設定した統計解析を実施した（水理パラメータ - Se-79 - 4 次統計解析）。この解析結果から，動水勾配および亀裂開口幅の係数をそれぞれ縦軸・横軸にとり，Se-79 の最大線量が 10μSv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした結果を図 5.2.1-7 に示す。さらに，Se-79 の最大線量が 10μSv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線を合わせて示す。この境界線よりも左上の領域は，Se-79 の最大線量が 10μSv/y 以下となる動水勾配および亀裂開口幅の係数の組み合わせの候補を表している。ここでは，成立条件の推定値の例として，図 5.2.1-7 中に示した黒丸の組み合わせ（動水勾配：0.0015[-]，亀裂開口幅の係数 8[-]）を任意に選択し，成立条件の推定値とした。

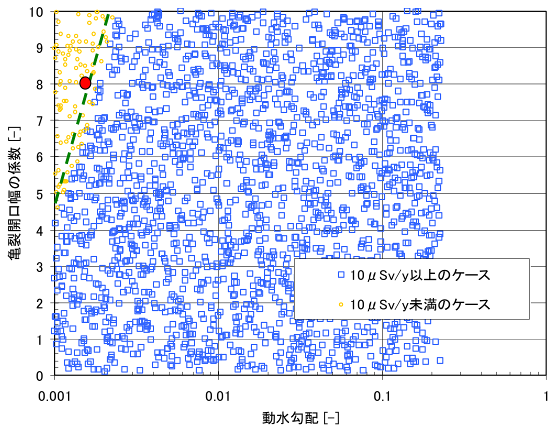


図 5.2.1-7 水理パラメータ － Se-79 － 4 次統計解析による成立条件の推定
（性能目標：10 μ Sv/y，動水勾配，亀裂開口幅の係数）

ここで，成立条件を同定するために，透水量係数分布の平均値に $10^{-11}m^2/s$，動水勾配に 0.0015，亀裂開口幅の係数に 8 を設定し，その他のパラメータに保守値を設定した決定論解析を実施した（水理パラメータ - Se-79 - 5 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の結果が 10 μ Sv/y を下回ることを確認した（図 5.2.1-8 参照）。

同定した成立条件の妥当性を確認するために，透水量係数分布の平均値に $10^{-11}m^2/s$，動水勾配を 0.0015 以下，亀裂開口幅の係数を 8 以上，その他のパラメータに表 3.5-1 における変動範囲を設定した統計解析を実施した（水理パラメータ - Se-79 - 6 次統計解析）。その結果，先の決定論解析の結果がこの統計解析の結果の上限を与えていることを確認した（図 5.2.1-8 参照）。

以上の検討から，透水量係数分布の平均値が $10^{-11}m^2/s$ 以下，動水勾配が 0.0015 以下，亀裂開口幅の係数が 8 以上であれば，Se-79 の最大線量が 10 μ Sv/y を超えないことについて見通しを得た。

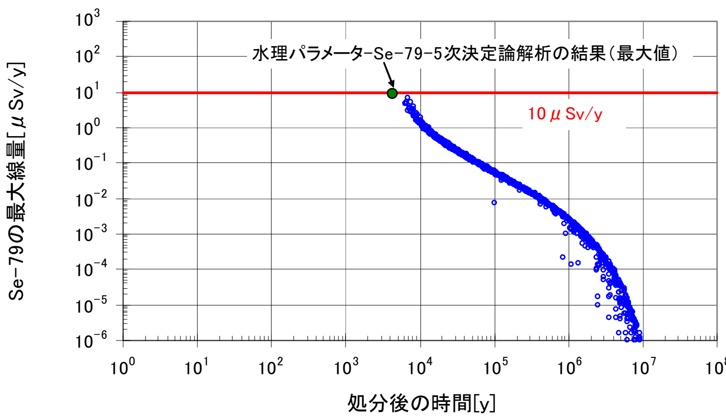


図 5.2.1-8 水理パラメータ － Se-79 － 6 次統計解析による妥当性確認
（性能目標：10 μ Sv/y）

3) Np-237

ここでは，まず，Np-237 に対して，相対的に重要度の高い透水量係数分布の平均値（図 5.1-2 参照）から，成立条件の抽出を試みる。図 5.1-1 の解析結果に基づき，横軸に透水量係数分布の平均値，縦軸に Np-237 の最大線量を取った散布図および性能目標値ラインを図 5.2.1-9 に示す。

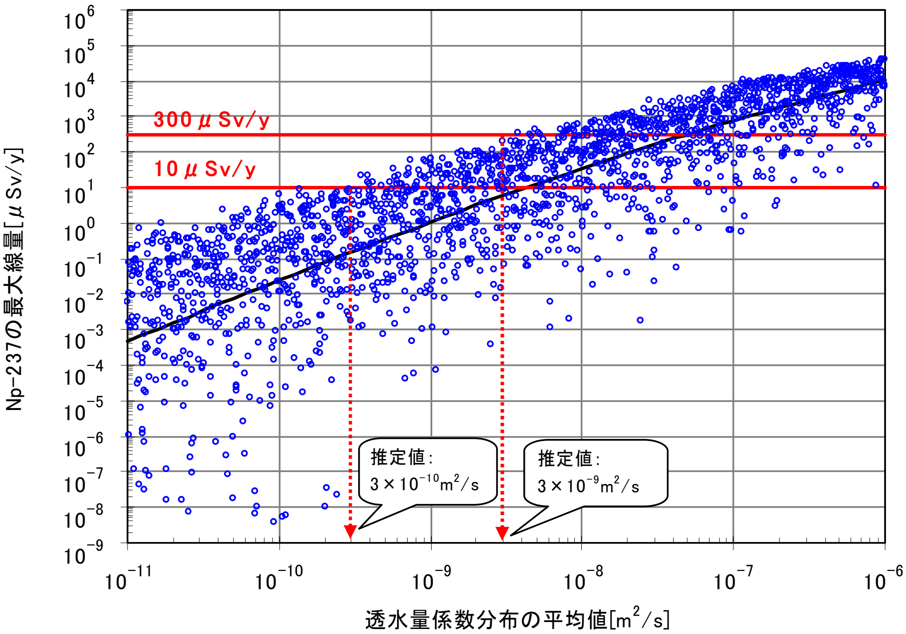


図 5.2.1-9 極端な人工バリアを想定した統計解析による成立条件の推定
（透水量係数分布の平均値，Np-237 の最大線量）

図 5.2.1-9 より，プロットされた結果と 300μSv/y ラインとの交点から，透水量係数分布の平均値が 3×10^{-9} m²/s 程度であれば 300μSv/y を下回る可能性があることが推定される。

そこで，300μSv/y の場合の成立条件を同定するために，透水量係数分布の平均値に表 3.5-1 の変動範囲を設定し，その他のパラメータを表 3.5-1 の変動範囲における保守値で固定した統計解析を実施した（水理パラメータ -Np-237-2 次統計解析）。この結果，透水量係数分布の平均値が 2.3×10^{-9} m²/s 以下であれば Np-237 の最大線量が 300μSv/y を下回ることが推定された（図 5.2.1-10 参照）。

この成立条件の妥当性を確認するために，透水量係数分布の平均値に 2.3×10^{-9} m²/s 以下，その他のパラメータに表 3.5-1 における変動範囲を設定した統計解析を実施した（水理パラメータ -Np-237-3 次統計解析）。その結果，水理パラメータ -Np-237-2 次統計解析のうち，透水量係数分布の平均値が 2.3×10^{-9} m²/s の場合の結果が，水理パラメータ -Np-237-3 次統計解析の結果の上限を与えていることが確認できる（図 5.2.1-11 参照）。

以上の検討から，透水量係数分布の平均値に 2.3×10^{-9} m²/s 以下であれば，Np-237 の最大線量が 300μSv/y を超えないことについて見通しを得た。

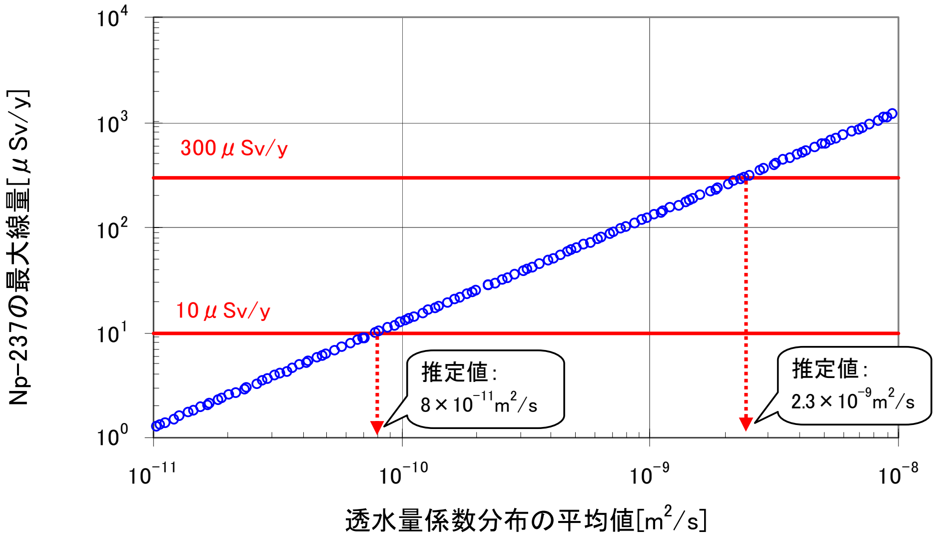


図 5.2.1-10 水理パラメータ － Np-237 － 2 次統計解析による成立条件の推定

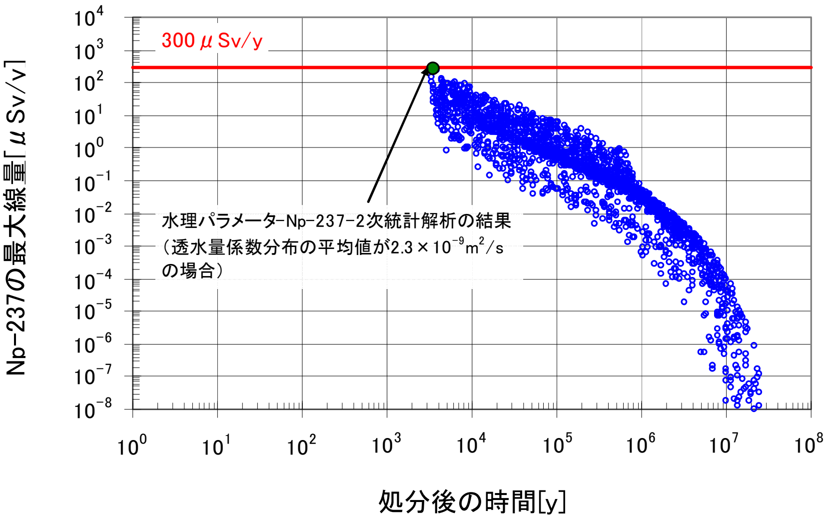


図 5.2.1-11 水理パラメータ － Np-237 － 3 次統計解析による妥当性確認
（性能目標：300μSv/y）

次に，性能目標が 10μSv/y の場合における成立条件の抽出を試みる。

図 5.2.1-9 より，プロットされた結果と 10μSv/y ラインとの交点から，透水量係数分布の平均値が $3\times10^{-10}m^2/s$ 程度であれば 10μSv/y を下回る可能性があることが推定される。

そこで，透水量係数分布の平均値に表 3.5-1 の変動範囲を設定し，その他のパラメータを表 3.5-1 の変動範囲における保守値で固定した統計解析の結果（図 5.2.1-10 参照）を用いて成立条件を同定することとした。その結果，透水量係数分布の平均値が $8\times10^{-11}m^2/s$ 以下であれば Np-237 の最大線量が 10μSv/y を下回ることが推定された。

成立条件の妥当性を確認するために，透水量係数分布の平均値に $8\times10^{-11}m^2/s$ 以下，その他のパラメータに表 3.5-1 における変動範囲を設定した統計解析を実施した（水理パラメ

ータ ‐Np-237‐4次統計解析)。その結果,水理パラメータ ‐Np-237‐2次統計解析のうち,透水量係数分布の平均値が 8×10^{-11}m^2/s の場合の結果が，水理パラメータ ‐Np-237‐4 次統計解析の結果の上限を与えていることが確認できる（図 5.2.1-12 参照)。

以上の検討から，透水量係数分布の平均値に 8×10^{-11}m^2/s 以下であれば，Np-237 の最大線量が 10μSv/y を超えないことについて見通しを得た。

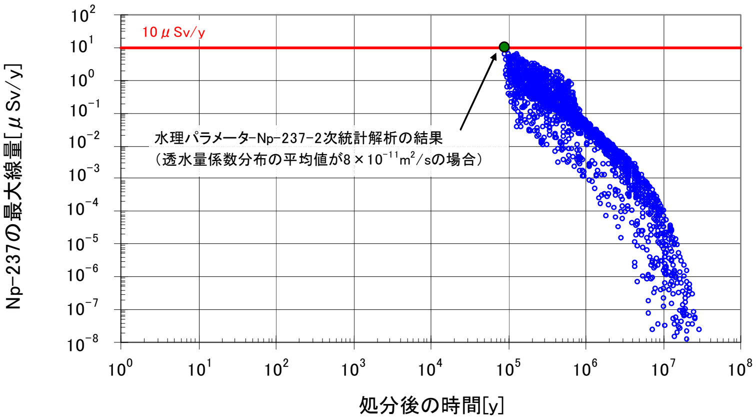


図 5.2.1-12 水理パラメータ － Np-237 － 4 次統計解析による妥当性確認
（性能目標：10μSv/y）

4）Th-229

ここでは，Th-229 に対して，相対的に重要度の高い透水量係数分布の平均値（図 5.1-2 参照）を対象として，成立条件の抽出を試みる。図 5.1-1 に基づき，横軸に透水量係数分布の平均値，縦軸に Th-229 の最大線量を取った散布図および性能目標値ラインを図 5.2.1-13 に示す。プロットされた結果と 300μSv/y ラインとの交点から，透水量係数分布の平均値が1×10^{-11}~1×10^{-10}m^2/s程度であれば300μSv/yを下回る可能性があることが推定される。

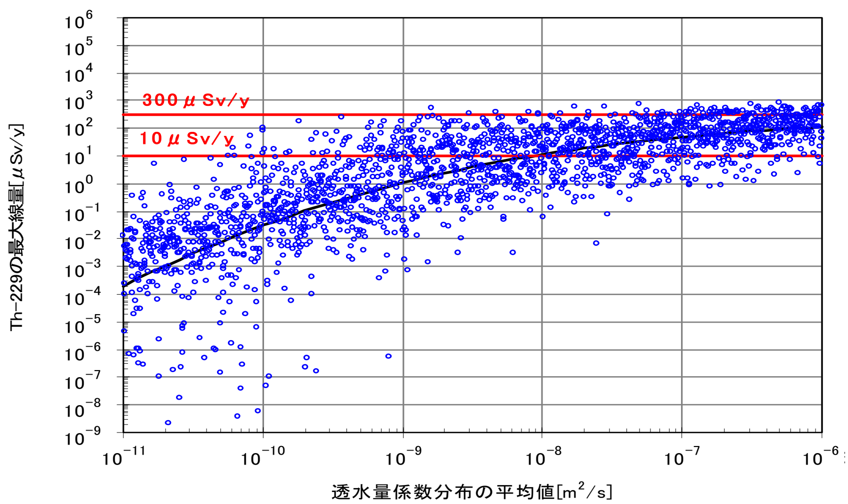


図 5.2.1-13 極端な人工バリアを想定した統計解析による成立条件の推定
（透水量係数分布の平均値，Th-229 の最大線量）

そこで，成立条件を同定するために，透水量係数分布の平均値に変動範囲を設定し，その他のパラメータを表 3.5-1 の変動範囲における保守値で固定した統計解析を実施した（水理パラメータ - Th-229 - 2 次統計解析）。その結果，透水量係数分布の平均値が 1.4×10^{-11}m²/s 以下であれば Th-229 の最大線量が 300μSv/y を下回ることが推定された（図 5.2.1-14 参照）。

この成立条件の妥当性を確認するために，透水量係数分布の平均値に 1.4×10^{-11}m²/s 以下，その他のパラメータに表 3.5-1 における変動範囲を設定した統計解析を実施した（水理パラメータ - Th-229 - 3 次統計解析）。その結果，水理パラメータ - Th-229 - 2 次統計解析結果のうち，透水量係数分布の平均値が 1.4×10^{-11}m²/s の場合の結果が，水理パラメータ - Th-229 - 3 次統計解析の結果の上限を与えていることが確認できる（図 5.2.1-15 参照）。

以上の検討から，透水量係数分布の平均値に 1.4×10^{-11}m²/s 以下であれば，Th-229 の最大線量が 300μSv/y を超えないことについて見通しを得た。

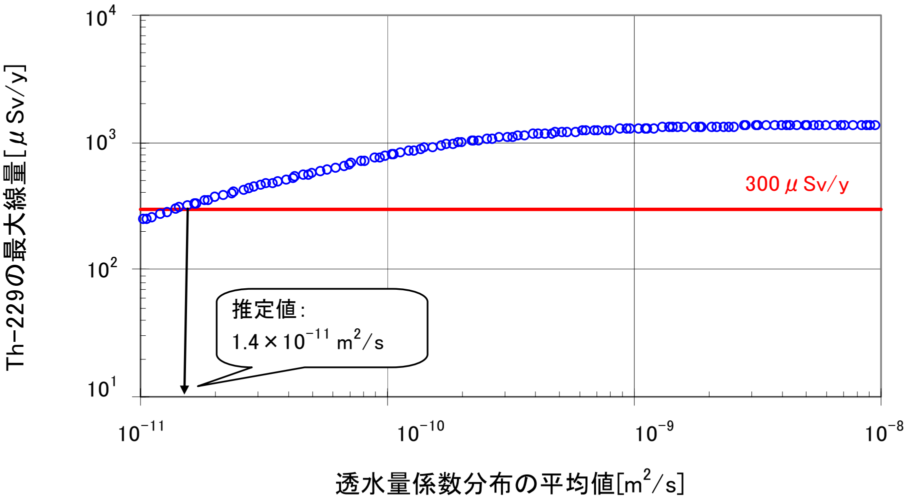


図 5.2.1-14 水理パラメータ － Th-229 － 2 次統計解析による成立条件の推定

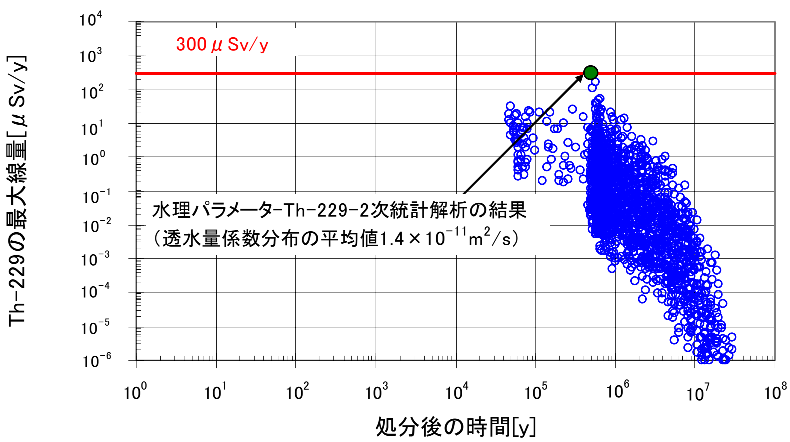


図 5.2.1-15 水理パラメータ － Th-229 － 3 次統計解析による妥当性確認
（性能目標：300μSv/y）

次に，性能目標が 10μSv/y の場合における成立条件の抽出を試みる。

図 5.2.1-13 より，プロットされた結果と 10μSv/y ラインとの交点から，透水量係数分布の平均値が $1\times10^{-11}m^2/s$ 程度以下でないと 10μSv/y を下回ることができないことが推定される。

そこで，成立条件を同定するために，透水量係数分布の平均値だけでなく，相対的に重要度が高い動水勾配に変動範囲を設定し，その他のパラメータを表 3.5-1 の変動範囲における保守値で固定した統計解析を実施した（水理パラメータ - Th-229 - 4 次統計解析）。この解析結果から，透水量係数分布の平均値および動水勾配をそれぞれ縦軸・横軸にとり，Th-229 の最大線量が 10μSv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした結果を図 5.2.1-16 に示す。さらに，Th-229 の最大線量が 10μSv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線を合わせて示す。この境界線よりも左下の領域は，Th-229 の最大線量が 10μSv/y 以下となる透水量係数分布の平均値および動水勾配の組み合わせの候補を表している。ここでは，成立条件の推定値の例として，図 5.2.1-16 中に示した黒丸の組み合わせ（透水量係数分布の平均値：$1\times10^{-11}m^2/s$，動水勾配：0.002）を任意に選択し，成立条件の推定値とした。

この成立条件の妥当性を確認するために，透水量係数分布の平均値に $1\times10^{-11}m^2/s$ 以下，動水勾配に 0.002 以下，その他のパラメータに表 3.5-1 における変動範囲を設定した統計解析を実施した（水理パラメータ - Th-229 - 5 次統計解析）。その結果，水理パラメータ - Th-229 - 4 次統計解析のうち，透水量係数分布の平均値が $1\times10^{-11}m^2/s$ および動水勾配が 0.002 の場合の解析結果が，水理パラメータ - Th-229 - 5 次統計解析の結果の上限を与えていることが確認できる（図 5.2.1-17 参照）。

以上の検討から，透水量係数分布の平均値 $1\times10^{-11}m^2/s$ 以下および動水勾配 0.002 以下であれば，Th-229 の最大線量が 10μSv/y を超えないことについて見通しを得た。

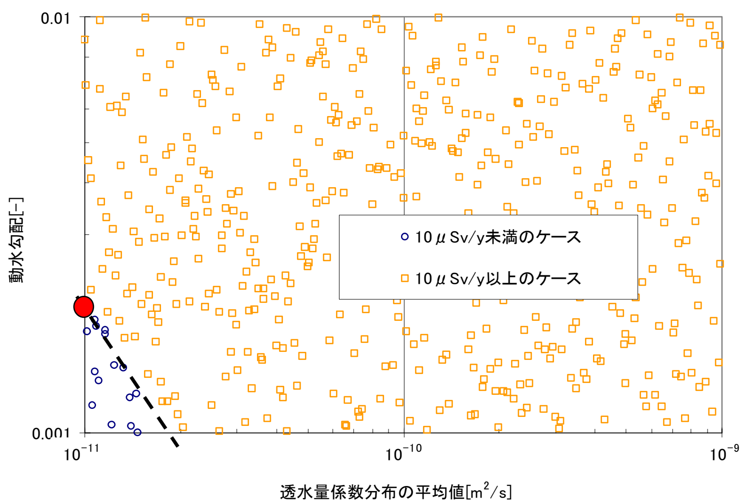


図 5.2.1-16 水理パラメータ − Th-229 − 4 次統計解析による成立条件の推定
（性能目標：10μSv/y，透水量係数分布の平均値・動水勾配）

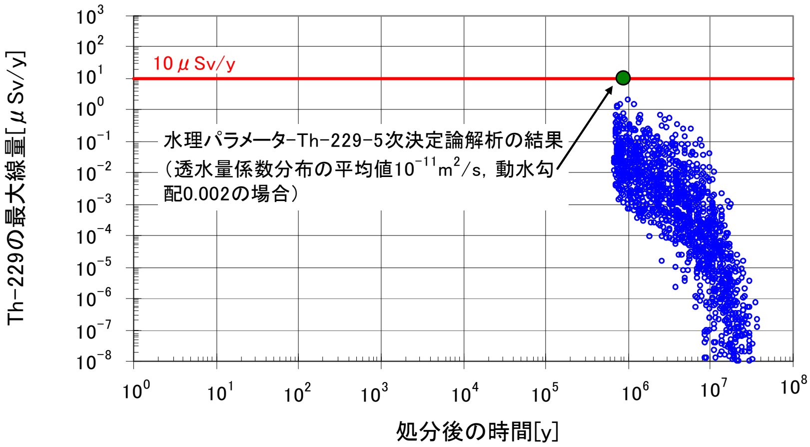


図 5.2.1-17　水理パラメータ － Th-229 － 5 次統計解析による妥当性確認
（性能目標：300μSv/y）

5）合計線量

ここでは，Cs-135，Se-79，Np-237，Th-229 に対する個々の成立条件（表 5.2.1-1 および表 5.2.1-2 参照）が，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。この際，核種に共通的なパラメータについては抽出された成立条件の値のうち最も保守的な値で固定し，その他のパラメータについては成立条件の値あるいは表 3.5-1 の変動範囲の保守値で固定した決定論解析を実施した。その結果，4 核種の合計線量が，10 μSv/y および 300μSv/y を越えないことをそれぞれ確認し（図 5.2.1-18 及び図 5.2.1-19 参照），成立条件を特定した（表 5.2.1-3 参照）。

表 5.2.1-1　極端な人工バリアの場合において水理パラメータに着目して
抽出した核種毎の成立条件の例（性能目標 10μSv/y）

パラメータ	制限範囲			
	Cs-135	Se-79	Np-237	Th-229
透水量係数分布の平均値[m²/s]	3×10^{-11}　以下	1×10^{-11}　以下	8×10^{-11}　以下	1×10^{-11}　以下
動水勾配[-]	変動範囲全域	0.0015　以下	変動範囲全域	0.002　以下
亀裂開口幅の係数[-]	変動範囲全域	8　以上	変動範囲全域	変動範囲全域

表 5.2.1-2　極端な人工バリアの場合において水理パラメータに着目して
抽出した核種毎の成立条件の例（性能目標 300μSv/y）

パラメータ	制限範囲			
	Cs-135	Se-79	Np-237	Th-229
透水量係数分布の平均値[m²/s]	9×10^{-10}　以下	1.1×10^{-10}　以下	2.3×10^{-9}　以下	1.4×10^{-11}　以下
動水勾配[-]	変動範囲全域	変動範囲全域	変動範囲全域	変動範囲全域
亀裂開口幅の係数[-]	変動範囲全域	変動範囲全域	変動範囲全域	変動範囲全域

パラメータ	制限範囲		変動範囲			第2次取りまとめレファレンスケースの設定値
	目標線量：10μSv/yの場合	目標線量：300μSv/yの場合				
透水量係数分布の平均値[m^2/s]	1×10^{-11} 以下	1.4×10^{-11} 以下	1×10^{-11}	～	1×10^{-6}	1×10^{-10}
動水勾配[-]	0.0015 以下	変動範囲全域	0.001	～	0.23	0.01
亀裂開口幅の係数[-]	8 以上	変動範囲全域	0.1	～	10	2
縦方向分散長と移行距離の比[-]	変動範囲全域	変動範囲全域	1	～	100	10
マトリクス拡散深さ[m]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.01	～	1	0.1
マトリクス拡散寄与面積率[-]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.01	～	1	0.5
岩盤の間隙率[-]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.003	～	0.5	0.02
Csの分配係数（岩盤）[m^3/kg]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.001	～	10	0.05
Seの分配係数（岩盤）[m^3/kg]	変動範囲全域	変動範囲全域	1×10^{-8}	～	0.1	0.01
Npの分配係数（岩盤）[m^3/kg]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.005	～	10	1
Thの分配係数（岩盤）[m^3/kg]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.1	～	10	1

表 5.2.1-3 極端な人工バリアの場合において水理パラメータに着目して抽出した成立条件の例

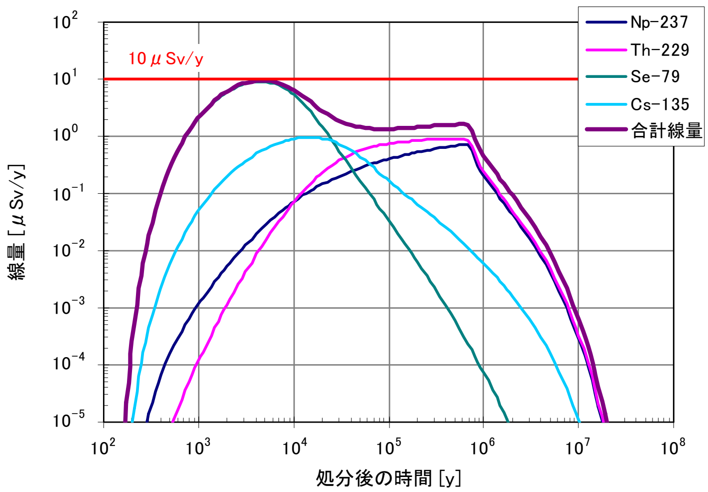


図 5.2.1-18 水理パラメータ － 合計線量 － 決定論解析の結果（性能目標：10μSv/y）

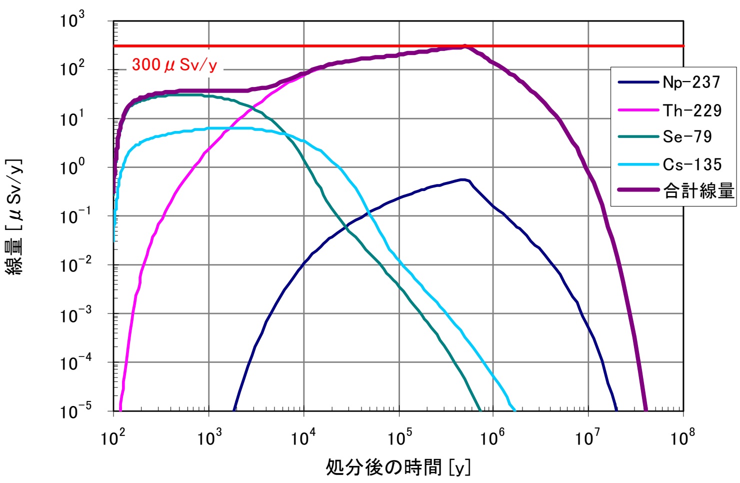


図 5.2.1-19 水理パラメータ － 合計線量 － 決定論解析の結果（性能目標：300μSv/y）

5.2.2 収着およびマトリクス拡散に係るパラメータに着目した場合（水理パラメータをパターン1で固定）

1) Cs-135

極端な人工バリアを想定し，水理パラメータをパターン１の条件（透水量係数分布の平均値：10^{-10}[m²/s]，動水勾配：0.01[-]，亀裂開口幅の係数：2[-]）で固定し，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 の範囲で変動させた統計解析を実施した（パターン１- Cs-135 - 1 次統計解析）。統計解析の結果を図 5.2.2-1 に，算出した重要度・影響度を図 5.2.2-2 に示す。

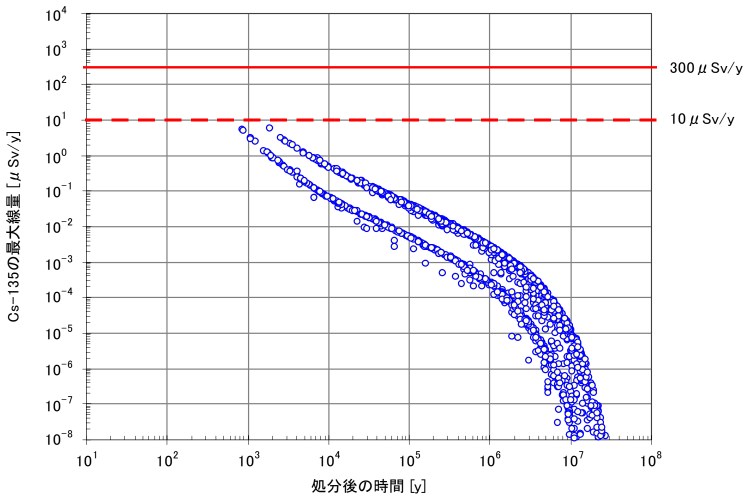


図 5.2.2-1　パターン 1 － Cs−135 － 1 次統計解析の結果

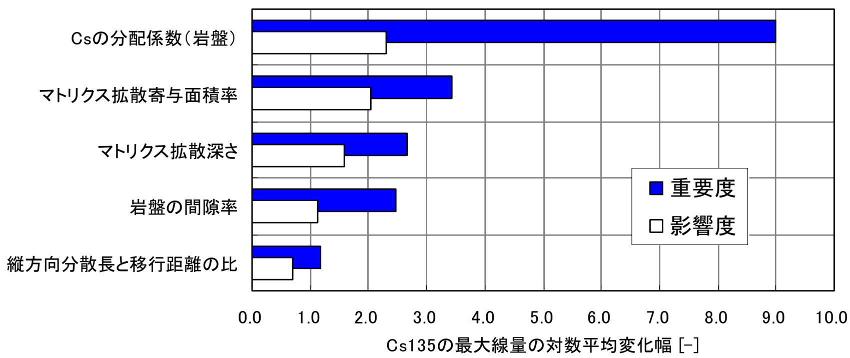


図 5.2.2-2　パターン 1 － Cs−135 － 1 次統計解析結果から算出した重要度・影響度

図 5.2.2-1 より，水理パラメータがパターン１の場合には，Cs-135 の最大線量が 10μSv/y 及び 300μSv/y を下回る可能性があることが推定される。このことを確認するため，水理パラメータ以外の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 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（パターン１- Cs-135 - 2 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の結果が 300μSv/y は下回るものの，10μSv/y を上回ることがわかる（図 5.2.2-3 参

照)。このことから，水理パラメータがパターン１の条件であれば Cs-135 の最大線量が 300 μSv/y を超えないことを確認するとともに，性能目標が 10μSv/y の場合については水理パラメータ以外の感度の高いパラメータを用いて成立条件を見出す必要があることがわかる。

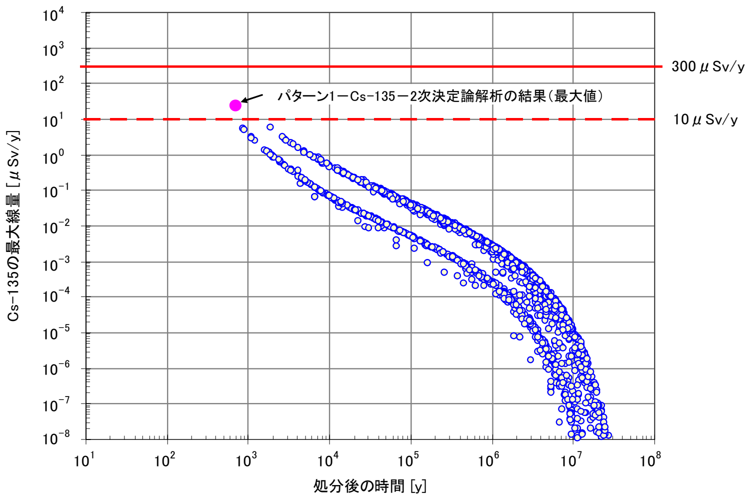


図 5.2.2-3 パターン 1 – Cs-135 – 成立条件の妥当性確認(性能目標:300μSv/y)

そこで，パターン 1 - Cs-135 - 1 次統計解析の結果から算出した重要度（図 5.2.2-2 参照）に基づき，重要度の高い Cs の分配係数（岩盤）とマトリクス拡散寄与面積率に着目し，これらの組み合わせにより Cs-135 の成立条件を推定することとした。ここでは，10μSv/y 近傍の感度特性をより詳細に把握するため，Cs の分配係数（岩盤）とマトリクス拡散寄与面積率を表 3.5-1 の変動範囲で変動させ，その他の天然バリアのパラメータを変動範囲における保守値に設定した統計解析を実施した（パターン 1 - Cs-135 - 3 次統計解析）。図 5.2.2-4 に，この統計解析の結果を用いて，Cs の分配係数（岩盤）およびマトリクス拡散寄与面積率をそれぞれ縦軸，横軸にとり，Cs-135 の最大線量が性能目標を超える場合と超えない場合を区別してプロットした結果を示す。さらに，図 5.2.2-4 に，Cs-135 の最大線量が 10μSv/y を超える場合と超えない場合の境界線を合わせて示す。この境界線よりも右上の領域は，Cs-135 の最大線量が 10μSv/y 以下となるマトリクス拡散寄与面積率と Cs の分配係数の組み合わせの候補を表している。この境界線から，Cs の分配係数が 0.01m^3/kg 以上期待できる場合，あるいはマトリクス拡散寄与面積率が 0.1 以上期待できる場合には，Cs-135 の最大線量が 10μSv/y を下回る可能性が高いと考えられる。

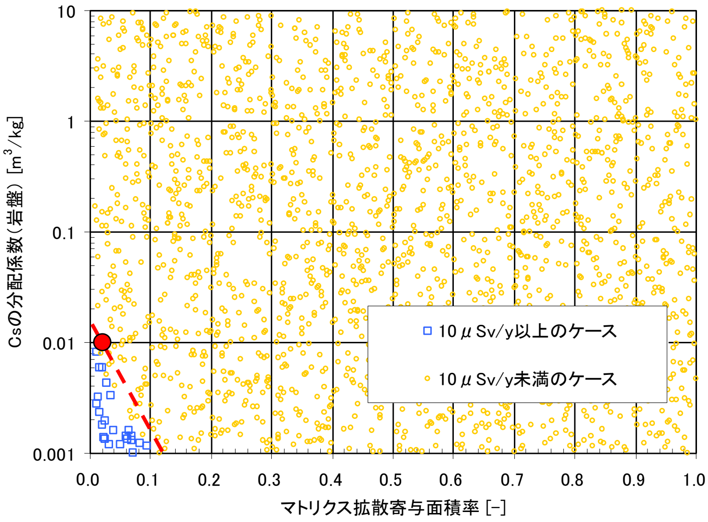


図 5.2.2-4 パターン 1 − Cs−135 − 3 次統計解析における成立条件の推定
（性能目標：10μSv/y，Cs の分配係数（岩盤），マトリクス拡散寄与面積率）

ここでは，成立条件の推定値の例として，図中に示した黒丸の部分（Cs の分配係数（岩盤）：0.01m³/kg，マトリクス拡散寄与面積率：0.02）を推定値として任意に選択し，それに基づく成立条件を同定することとした。

推定した成立条件を同定するために，Cs の分配係数（岩盤）とマトリクス拡散寄与面積率を推定値で固定し，その他の天然バリアのパラメータを変動範囲における保守値で固定した決定論的解析を実施した（パターン 1‐Cs-135‐4 次決定論解析）。この結果，決定論的解析の結果が 10μSv/y を下回ることを確認した（図 5.2.2-5 参照）。

同定した Cs-135 の成立条件の妥当性を確認するために，Cs の分配係数（岩盤）を 0.01m³/kg 以上の変動範囲で，マトリクス拡散寄与面積率を 0.02 以上の変動範囲で，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 における変動範囲に設定した統計解析を実施した（パターン 1‐Cs-135‐5 次統計解析）。この結果から，先の決定論解析（パターン 1‐Cs-135‐4 次決定論解析）の結果が統計解析の結果の上限を与えていることが確認できる（図 5.2.2-5 参照）。

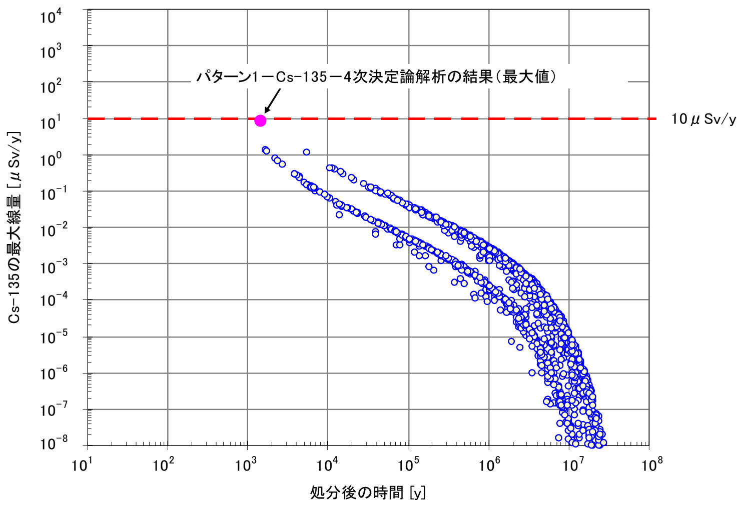


図 5.2.2-5 パターン 1 – Cs-135 – 5 次統計解析における
成立条件の妥当性確認（性能目標：10μSv/y）

以上の検討から，極端な人工バリアおよび水理パラメータがパターン 1 を想定した場合には，Cs の分配係数（岩盤）が 0.01m³/kg 以上で，かつマトリクス拡散寄与面積率が 0.02 以上であれば, Cs-135 の最大線量が 10μSv/y を超えないことを確認した。抽出した Cs-135 の成立条件を性能目標毎に表 5.2.2-1 に示す。

表 5.2.2-1 極端な人工バリアおよび水理パラメータがパターン 1 を
想定した場合における Cs-135 の成立条件の例

パラメータ	制限範囲 目標線量：10μSv/yの場合	制限範囲 目標線量：300μSv/yの場合	変動範囲	H12レファレンスケース設定値
透水量係数分布の平均値[m²/s]	1×10⁻¹⁰		1×10⁻¹¹ ～ 1×10⁻⁶	1×10⁻¹⁰
動水勾配[-]	0.01		0.001 ～ 0.23	0.01
亀裂開口幅の係数[-]	2		0.1 ～ 10	2
縦方向分散長と移行距離の比[-]	変動範囲全域	変動範囲全域	1 ～ 100	10
マトリクス拡散深さ[m]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.01 ～ 1	0.1
マトリクス拡散寄与面積率[-]	0.02 ～ 1	変動範囲全域	0.01 ～ 1	0.5
岩盤の間隙率[-]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.003 ～ 0.5	0.02
Csの分配係数（岩盤）[m³/kg]	0.01 ～ 10	変動範囲全域	0.001 ～ 10	0.05

表 5.2.2-1 より，極端な人工バリアを想定したケースにおいて水理パラメータがパターン 1 の場合には，変動範囲を設定したパラメータに対して制限をかけなくても Cs-135 の線量は 300μSv/y を下回ることがわかる。また，重要度が高い 2 つのパラメータにわずかな制限（Cs の分配係数（岩盤）が 0.01m³/kg 以上で，かつマトリクス拡散寄与面積率が 0.02 以上）を与えるだけで，Cs-135 線量は 10μSv/y を下回ることがわかる。このことから，極端な人工バリアを想定したケースにおいて水理パラメータがパターン 1 の場合には，変動範囲を設定したパラメータの不確実性が Cs-135 の線量に及ぼす影響は小さいと考えられる。

2) Se-79

極端な人工バリアを想定し，水理パラメータをパターン１の条件で固定し，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 の変動範囲で変動させた統計解析を実施した（パターン１ - Se-79 - 1 次統計解析）。統計解析の結果を図 5.2.2-6 に，算出した重要度・影響度を図 5.2.2-7 に示す。

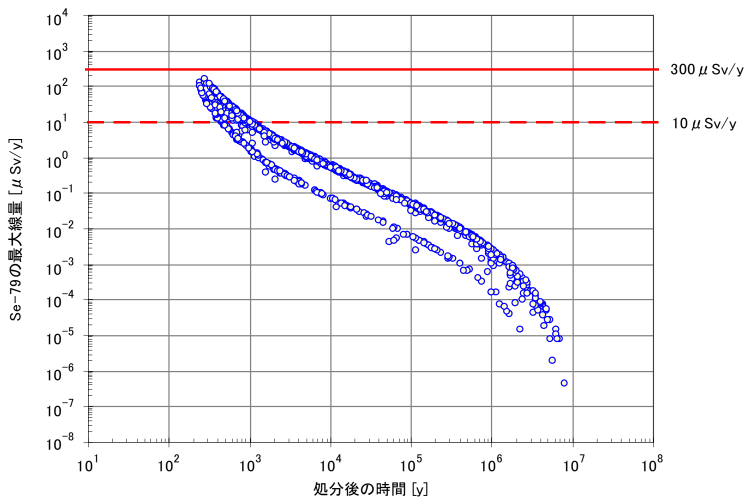


図 5.2.2−6　パターン 1 − Se−79 − 1 次統計解析の結果

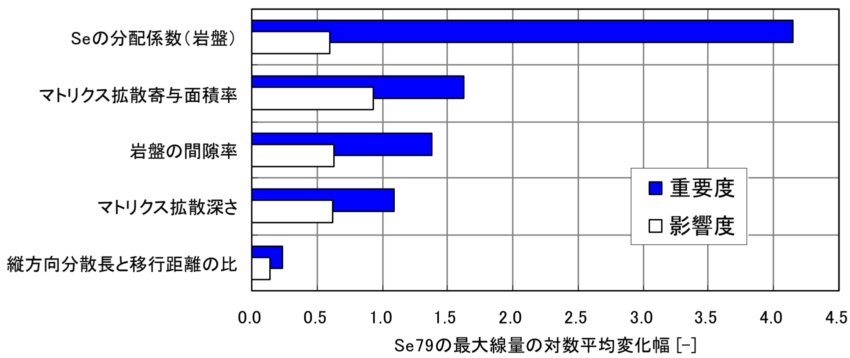


図 5.2.2−7　パターン 1 − Se−79 − 1 次統計解析の結果から算出した重要度・影響度

図 5.2.2-6 より，水理パラメータがパターン１の場合には，Se-79 の最大線量が 300μSv/y を下回る可能性があることが推定される。このことを確認するため，水理パラメータ以外の天然バリアのパラメータを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（パターン１ - Se-79 - 2 次決定論解析）。その結果，決定論解析の結果が 300μSv/y を超えないことを確認した（図 5.2.2-8 参照）。このことから，水理パラメータがパターン１の条件であれば，Se-79 の最大線量が 300μSv/y を超えないことを確認するとともに，性能目標が 10μSv/y の場合については，水理パラメータ以外の感度の高いパラメータを用いて成立条件を見出す必要があることがわかる。

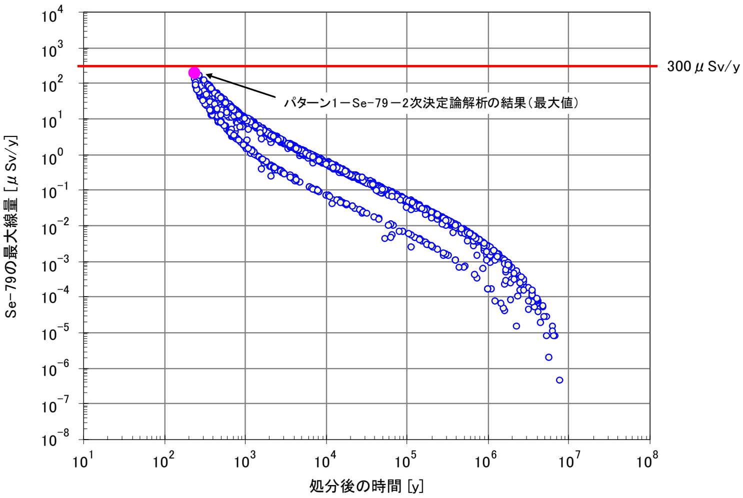


図 5.2.2-8 パターン 1 − Se-79 − 成立条件の妥当性確認（性能目標：300 μ Sv/y）

そこで，性能目標が 10 μ Sv/y の場合における成立条件の抽出を試みた。パターン 1 - Se-79 - 1 次統計解析の結果から算出した重要度（図 5.2.2-7 参照）に基づき，重要度の高い Se の分配係数（岩盤）とマトリクス拡散寄与面積率に着目し，これらの組み合わせにより Se-79 の成立条件を推定することとした。ここでは，10 μ Sv/y 近傍の感度特性をより詳細に把握するために，Se の分配係数（岩盤）とマトリクス拡散寄与面積率を変動範囲で変動させ，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 の変動範囲における保守値に設定した統計解析を実施した（パターン 1 - Se-79 - 3 次統計解析）。図 5.2.2-9 に，この統計解析の結果を用いて，Se の分配係数（岩盤）およびマトリクス拡散寄与面積率をそれぞれ縦軸，横軸にとり，Se-79 の最大線量が性能目標を超える場合と超えない場合とに区別してプロットした結果を示す。

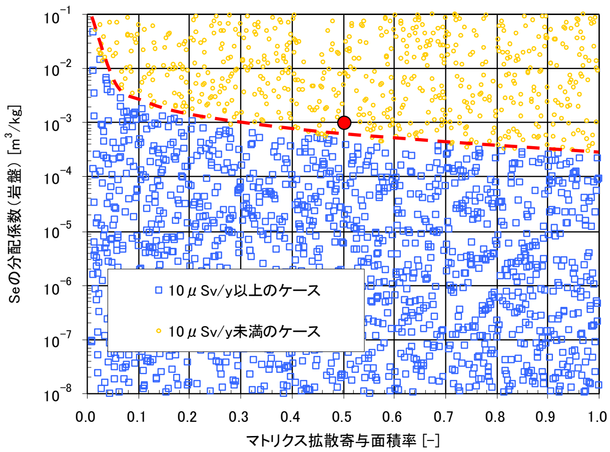


図 5.2.2-9 パターン 1 − Se-79 − 3 次統計解析における成立条件の推定
（性能目標：10 μ Sv/y，Se の分配係数（岩盤），マトリクス拡散寄与面積率）

図 5.2.2-9 より，図中に示した点線よりも上側の領域が，Se-79 の最大線量が 10μSv/y 以下となるマトリクス拡散寄与面積率と Se の分配係数の組み合わせの候補を表している。ここでは，成立条件の推定値の例として，図中に示した黒丸の部分（Se の分配係数（岩盤）：1e-3m^3/kg，マトリクス拡散寄与面積率：0.5）を推定値として任意に選択し，それに基づく成立条件を同定することとした。

推定した成立条件を同定するために，Se の分配係数（岩盤）とマトリクス拡散寄与面積率を推定値で固定し，その他の天然バリアのパラメータを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（パターン 1 - Se-79 - 4 次決定論解析）。この結果，決定論解析の結果が 10μSv/y を下回ることを確認した（図 5.2.2-10 参照）。

同定した Se-79 の成立条件の妥当性を確認するために，Se の分配係数（岩盤）を 1e-3m^3/kg 以上の変動範囲で，マトリクス拡散寄与面積率を 0.5 以上の変動範囲で，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 における変動範囲に設定した統計解析を実施した（パターン 1 - Se-79 - 5 次統計解析）。この結果から，先の決定論解析（パターン 1 - Se-79 - 4 次決定論解析）の結果が統計解析の結果の上限を与えていることが確認できる（図 5.2.2-10 参照）。

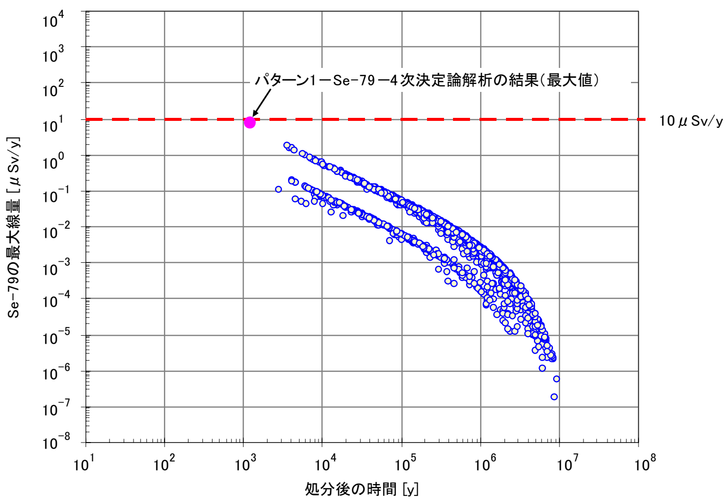


図 5.2.2-10 パターン 1 − Se-79 − 5 次統計解析における
成立条件の妥当性確認（性能目標：10μSv/y）

以上の検討から，極端な人工バリアおよび水理パラメータがパターン 1 を想定した場合には，Se の分配係数（岩盤）が 1×10^{-3}m^3/kg 以上で，かつマトリクス拡散寄与面積率が 0.5 以上であれば，Se-79 の最大線量が 10μSv/y を超えないことを確認した。抽出した Se-79 の成立条件を性能目標毎に表 5.2.2-2 に示す。

表 5.2.2-2 極端な人工バリアおよび水理パラメータがパターン 1 を想定した場合における Se-79 の成立条件の例

パラメータ	制限範囲		変動範囲			H12レファレンスケース設定値
	目標線量:10μSv/yの場合	目標線量:300μSv/yの場合				
透水量係数分布の平均値[m^2/s]	1×10^{-10}		1×10^{-11}	～	1×10^{-6}	1×10^{-10}
動水勾配[−]	0.01		0.001	～	0.23	0.01
亀裂開口幅の係数[−]	2		0.1	～	10	2
縦方向分散長と移行距離の比[−]	変動範囲全域	変動範囲全域	1	～	100	10
マトリクス拡散深さ[m]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.01	～	1	0.1
マトリクス拡散寄与面積率[−]	0.5 ～ 1	変動範囲全域	0.01	～	1	0.5
岩盤の間隙率[−]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.003	～	0.5	0.02
Seの分配係数(岩盤)[m^3/kg]	1×10^{-3} ～ 0.1	変動範囲全域	1×10^{-8}	～	0.1	0.01

表 5.2.2-2 より，極端な人工バリアを想定したケースにおいて水理パラメータがパターン１の場合には，変動範囲を設定したパラメータに対して制限をかけなくても Se-79 の線量は 300μSv/y を下回ることがわかる。また，重要度が高い２つのパラメータのうち，Se の分配係数（岩盤）に第 2 次取りまとめレファレンスケース設定値より 1 桁小さい値で制限を与え（Se の分配係数（岩盤）が $1\times10^{-3}m^3/kg$ 以上），さらにマトリクス拡散寄与面積率に第 2 次取りまとめレファレンスケース設定値で制限を与えるだけで（マトリクス拡散寄与面積率が 0.5 以上），Se-79 の線量は 10μSv/y を下回ることがわかる。このことから，極端な人工バリアを想定したケースにおいて水理パラメータがパターン１の場合には，変動範囲を設定したパラメータの不確実性が Se-79 の線量に及ぼす影響は小さいと考えられる。

なお，目標線量が 10μSv/y の場合における制限範囲は，重要度が高い２つのパラメータのみを用いて設定しているため表 5.2.2-2 で示す制限範囲となったが，３つ以上のパラメータを考慮する形で制限範囲を設定すれば重要度が高い２つのパラメータの制限範囲はさらに余裕を持たせることができると考えられる。

3) Np-237

極端な人工バリアを想定し，水理パラメータをパターン１の条件で固定し，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 の範囲で変動させた統計解析を実施した（パターン１‐Np-237‐１次統計解析）。統計解析の結果を図 5.2.2-11 に，算出した重要度・影響度を図 5.2.2-12 に示す。

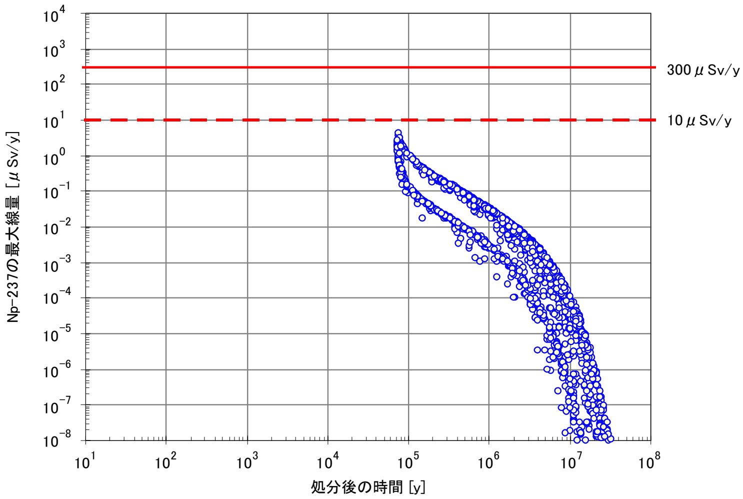


図 5.2.2-11　パターン１－Np-237－１次統計解析の結果

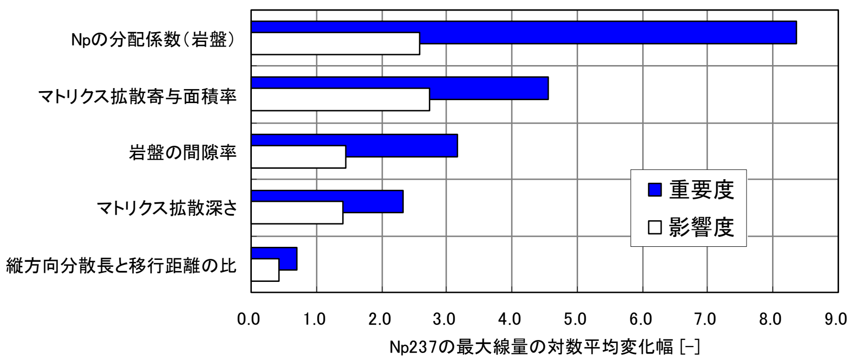


図 5.2.2-12　パターン１－Np-237－１次統計解析の結果から算出した重要度・影響度

図 5.2.2-11 より，水理パラメータがパターン１の場合には，Np-237 の最大線量が 10μSv/y 及び 300μSv/y を下回る可能性があることが推定される。このことを確認するため，水理パラメータ以外のパラメータを表 3.5-1 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（パターン１‐Np-237‐２次決定論解析）。その結果，この決定論解析の結果は 300μSv/y を下回るものの，10μSv/y を上回ることがわかる（図 5.2.2-13 参照）。このことから，水理パラメータがパターン１の条件であれば Np-237 の最大線量が 300μSv/y を越えないことを確認するとともに，性能目標が 10μSv/y の場合については水理パラメータ以外の感度の高いパラメータを用いて成立条件を見出す必要があることがわかる。

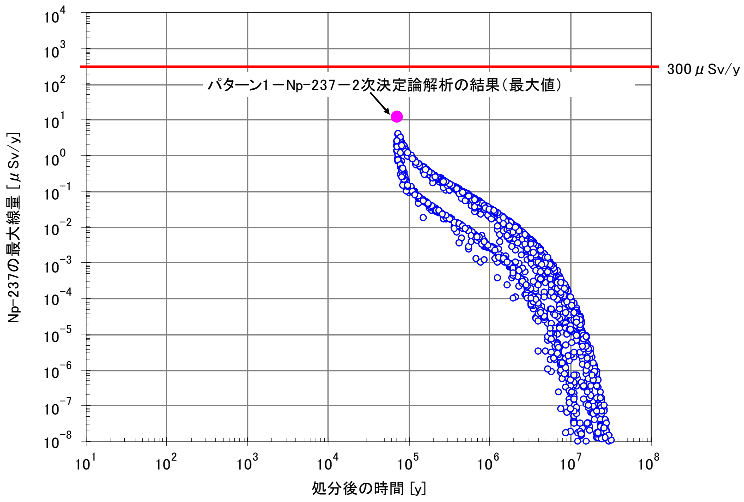


図 5.2.2-13 パターン 1 － Np-237 － 成立条件の妥当性確認（性能目標：300 μ Sv/y）

そこで，性能目標が 10 μ Sv/y の場合における成立条件の抽出を試みた。パターン 1 - Np-237 - 1 次統計解析の結果から算出した重要度（図 5.2.2-12 参照）に基づき，重要度の高い Np の分配係数（岩盤）に着目して Np-237 の成立条件を推定することとした。ここでは，10 μ Sv/y 近傍の感度特性をより詳細に把握するために，Np の分配係数（岩盤）を表 3.5-1 の変動範囲で変動させ，その他の天然バリアのパラメータを変動範囲における保守値に設定した統計解析を実施した（パターン 1 - Np-237 - 3 次統計解析）。この統計解析の結果を，Np の分配係数（岩盤）と Np-237 の最大線量との関係としてまとめたものを図 5.2.2-14 に示す。図 5.2.2-14 より，Np の分配係数（岩盤）が 0.02m³/kg 以上であれば 10 μ Sv/y を下回る可能性があることが推定される。

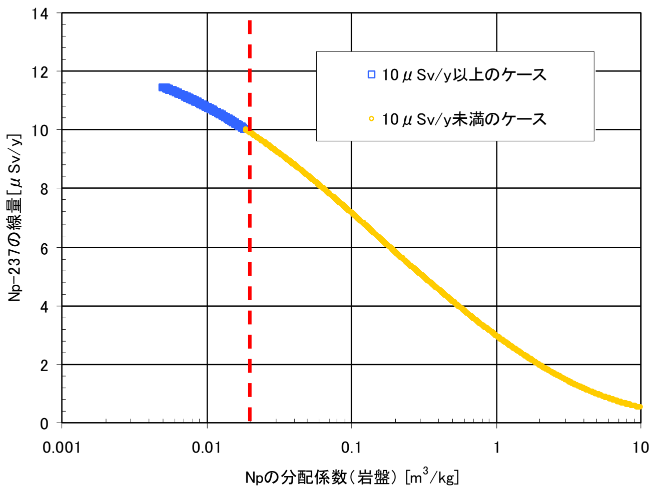


図 5.2.2-14 パターン 1 － Np-237 － 3 次統計解析における成立条件の推定
（性能目標：10 μ Sv/y，Np の分配係数（岩盤））

推定した成立条件を同定するために，Np の分配係数（岩盤）を推定値で固定し，その他の天然バリアのパラメータを変動範囲における保守値で固定した決定論的解析を実施した（パターン 1 - Np-237 - 4 次決定論解析）。この結果から，決定論的解析の結果が 10μSv/y を下回ることを確認した(図 5.2.2-15 参照)。

同定した Np-237 の成立条件の妥当性を確認するために，Np の分配係数（岩盤）を 0.02m³/kg 以上の変動範囲で，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 における変動範囲に設定した統計解析を実施した（パターン 1 - Np-237 - 5 次統計解析）。その結果，先の決定論解析（パターン 1 - Np-237 - 4 次決定論解析）の結果が統計解析の結果の上限を与えていることが確認できる（図 5.2.2-15）。

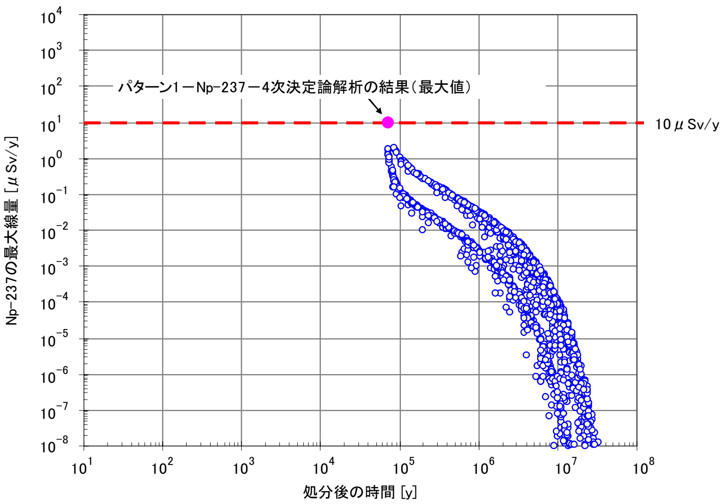


図 5.2.2-15 パターン 1 － Np-237 － 5 次統計解析における成立条件の妥当性確認（性能目標：10μSv/y）

以上の検討から，極端な人工バリアおよび水理パラメータがパターン 1 を想定した場合には，Np の分配係数（岩盤）が 0.02m³/kg 以上であれば Np-237 の最大線量が 10μSv/y を超えないことを確認した。抽出した Np-237 の成立条件を性能目標毎に表 5.2.2-3 に示す。

表 5.2.2-3 極端な人工バリアおよび水理パラメータがパターン 1 を想定した場合における Np-237 の成立条件の例

パラメータ	制限範囲			変動範囲		H12レファレンスケース設定値
	目標線量：10μSv/yの場合	目標線量：300μSv/yの場合				
透水量係数分布の平均値[m²/s]	1×10⁻¹⁰		1×10⁻¹¹	～	1×10⁻⁶	1×10⁻¹⁰
動水勾配[-]	0.01		0.001	～	0.23	0.01
亀裂開口幅の係数[-]	2		0.1	～	10	2
縦方向分散長と移行距離の比[-]	変動範囲全域	変動範囲全域	1	～	100	10
マトリクス拡散深さ[m]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.01	～	1	0.1
マトリクス拡散寄与面積率[-]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.01	～	1	0.5
岩盤の間隙率[-]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.003	～	0.5	0.02
Npの分配係数(岩盤)[m³/kg]	0.02 ～ 10	変動範囲全域	0.01	～	10	1

表 5.2.2-3 より，極端な人工バリアを想定したケースにおいて水理パラメータがパターン１の場合には, 変動範囲を設定したパラメータに対して制限をかけなくても Np-237 の線量は 300 μ Sv/y を下回ることがわかる。また，重要度が高いパラメータである Np の分配係数にわずかな制限（Np の分配係数（岩盤）が 0.02m³/kg 以上）を与えるだけで，Np-237 の線量は 10 μ Sv/y を下回ることがわかる。このことから，極端な人工バリアを想定したケースにおいて水理パラメータがパターン 1 を想定した場合には，変動範囲を設定したパラメータの不確実性が Np-237 の線量に及ぼす影響は小さいと考えられる。

4) Th-229

極端な人工バリアを想定し，水理パラメータをパターン１の条件で固定し，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 の変動範囲で変動させた統計解析を実施した（パターン１- Th-229 - 1 次統計解析）。統計解析の結果を図 5.2.2-16 に，算出した重要度・影響度を図 5.2.2-17 に示す。

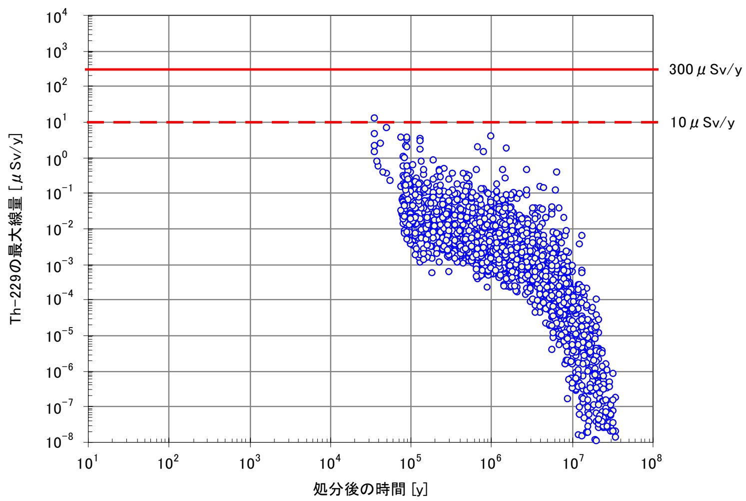


図 5.2.2-16　パターン１ – Th-229 – 1 次統計解析の結果

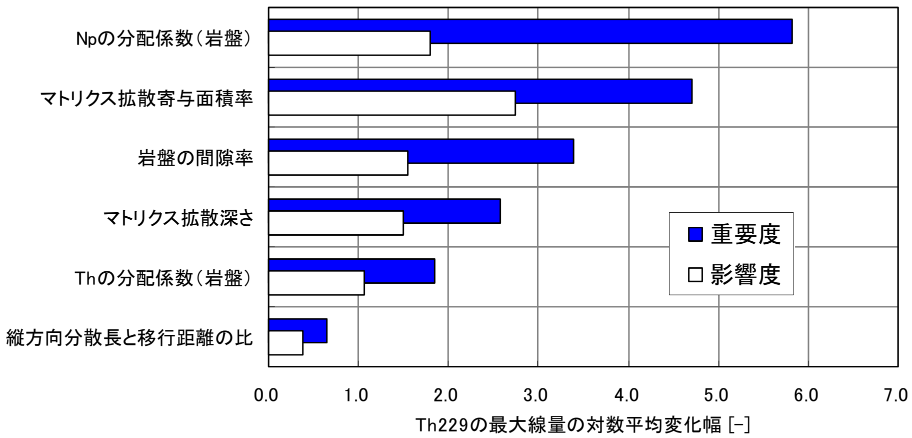


図 5.2.2-17　パターン１ – Th-229 – 1 次統計解析の結果から算出した重要度・影響度

図 5.2.2-16 より，水理パラメータがパターン１の場合には，Th-229 の最大線量が 300μSv/y を下回る可能性があることがわかる。このことを確認するため，水理パラメータ以外の天然バリアのパラメータを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（パターン１- Th-229 - 2 次決定論解析）。その結果，決定論解析の結果が 300μSv/y を上回ることを確認した（図 5.2.2-19 参照）。このことから，性能目標が 10μSv/y および 300μSv/y それぞれの場合について，水理パラメータ以外のパラメータを用いて成立条件を見出す必要があることがわかる。

そこで，性能目標が 300μSv/y の場合における成立条件の抽出を試みた。パターン 1 - Th-229 - 1 次統計解析の結果から算出した重要度（図 5.2.2-17）に基づき，重要度の高い Np の分配係数（岩盤）とマトリクス拡散寄与面積率に着目し，これらの組み合わせにより，Th-229 の成立条件を推定することとした。ここでは，300μSv/y 近傍の感度特性をより詳細に把握するために，Np の分配係数（岩盤）とマトリクス拡散寄与面積率を変動範囲で変動させ，その他の天然バリアのパラメータを変動範囲における保守値に設定した統計解析を実施した（パターン 1 - Th-229 - 3 次統計解析）。図 5.2.2-18 に，この統計解析の結果を用いて，Np の分配係数（岩盤）およびマトリクス拡散寄与面積率をそれぞれ縦軸，横軸にとり，Th-229 の最大線量が性能目標である 300μSv/y を超える場合と超えない場合とに区別してプロットした結果を示す。

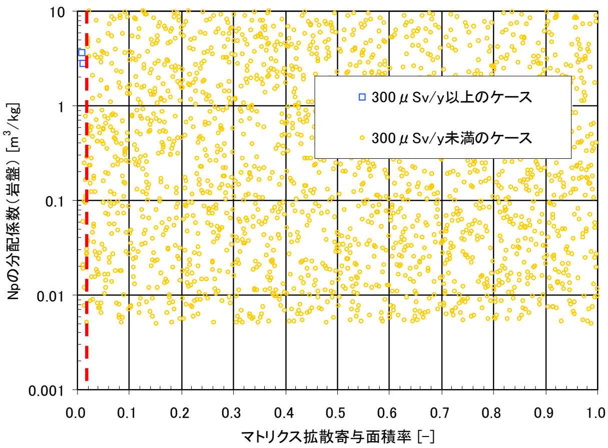


図 5.2.2-18　パターン 1 – Th-229 – 3 次統計解析における成立条件の推定
（性能目標：300μSv/y，Np の分配係数（岩盤），マトリクス拡散深さ）

図 5.2.2-18 より，マトリクス拡散寄与面積率が 0.02[-]以上であれば 300μSv /y を下回る可能性があることが推定される。

推定した成立条件を同定するために，マトリクス拡散寄与面積率を推定値で固定し，その他の天然バリアのパラメータを変動範囲における保守値で固定した決定論的解析を実施した（パターン 1 - Th-229 - 4 次決定論解析）。その結果，決定論的解析の結果が 300μSv/y を下回ることを確認した（図 5.2.2-19 参照）。

同定した Th-229 の成立条件の妥当性を確認するために，マトリクス拡散寄与面積率を 0.02 以上の変動範囲で，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 における変動範囲に設定した統計解析を実施した（パターン 1 - Th-229 - 5 次統計解析）。この結果から，先の決定論解析（パターン 1 - Th-229 - 4 次決定論解析）の結果が統計解析の結果の上限を与えていることが確認できる（図 5.2.2-19）。

以上の検討から，極端な人工バリアおよび水理パラメータがパターン 1 を想定した場合には，マトリクス拡散寄与面積率が 0.02 以上であれば Th-229 の最大線量が 300μSv/y を超えないことを確認した。

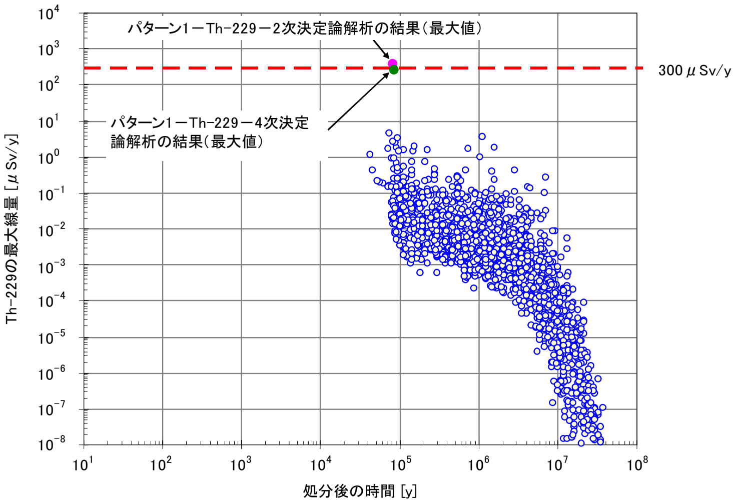


図 5.2.2-19 パターン 1 － Th-229 － 5 次統計解析の妥当性確認（性能目標：300μSv/y）

次に，性能目標が 10μSv/y の場合における Th-229 の成立条件の抽出を試みた。ここでは，性能目標が 300μSv/y の場合と同様に，重要度の高い Np の分配係数（岩盤）とマトリクス拡散寄与面積率に着目し，これらの組み合わせにより成立条件を推定することとした。パターン 1 - Th-229 - 3 次統計解析の結果を用いて，Np の分配係数（岩盤）およびマトリクス拡散寄与面積率をそれぞれ縦軸，横軸にとり，Th-229 の最大線量が性能目標を超える場合と超えない場合とに区別してプロットした結果を図 5.2.2-20 に示す。図 5.2.2-20 より，マトリクス拡散寄与面積率が 0.91[-]以上であれば 10μSv /y を下回る可能性があることが推定される。

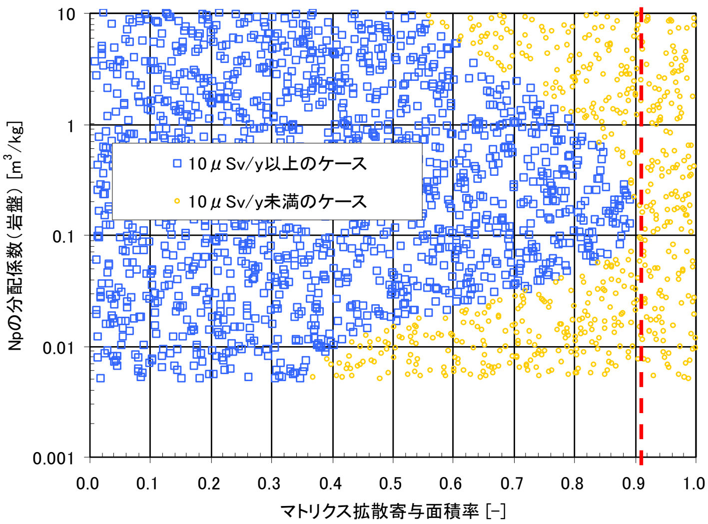


図 5.2.2-20 パターン 1 － Th-229 － 3 次統計解析における成立条件の推定
（性能目標：10μSv/y，Np の分配係数（岩盤），マトリクス拡散寄与面積率）

なお，図 5.2.2-20 において，10μSv/y 以上のケース（青のプロット）と 10μSv/y 以下のケース（黄色のプロット）の境界が非線形の曲線になっていることがわかる。この理由については，付録 5 において記述する。

ここで，図 5.2.2-20 を用いて推定した成立条件を同定するために，マトリクス拡散寄与面積率を推定値で固定し，その他の天然バリアのパラメータを変動範囲における保守値で固定した決定論的解析を実施した（パターン 1 - Th-229 - 6 次決定論解析）。その結果，決定論的解析の結果が 10μSv/y を下回ることを確認した（図 5.2.2-21 参照）。

同定した Th-229 の成立条件の妥当性を確認するために，マトリクス拡散寄与面積率を 0.91 以上の変動範囲で，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 における変動範囲に設定した統計解析を実施した（図 5.2.2-21）。その結果，先の決定論解析（パターン 1 - Th-229 - 6 次決定論解析）の結果がこの統計解析の結果の上限を与えていることが確認できる。

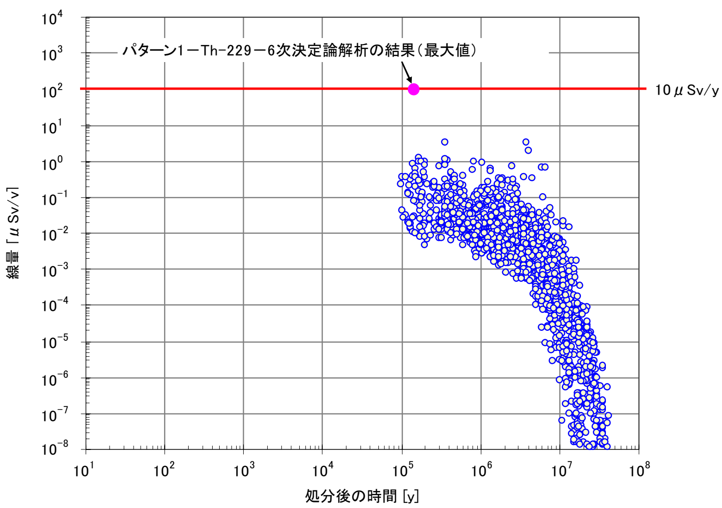


図 5.2.2-21 パターン 1 - Th-229 - 成立条件の妥当性確認（性能目標：10μSv/y）

以上の検討から，極端な人工バリアおよび水理パラメータがパターン 1 を想定した場合には，マトリクス拡散寄与面積率が 0.91 以上であれば Th-229 の最大線量が 10μSv/y を超えないことを確認した。抽出した Th-229 の成立条件を性能目標毎に表 5.2.2-4 に示す。

表 5.2.2-4 より，極端な人工バリアを想定したケースにおいて水理パラメータがパターン 1 の場合には，重要度が高いパラメータであるマトリクス拡散寄与面積率にわずかな制限（マトリクス拡散寄与面積率が 0.02 以上）を与えるだけで，Th-229 の線量は 300μSv を下回ることがわかる。また，マトリクス拡散寄与面積率に非常に厳しい制限（マトリクス拡散寄与面積率が 0.91 以上）を与えれば，変動範囲を設定したその他のパラメータに対して制限をかけなくても Th-229 の線量は 10μSv/y を下回ることがわかる。このことから，極端な人工バリアを想定したケースにおいて水理パラメータがパターン 1 を想定した場合

には，重要度が高いパラメータのパラメータの不確実性が Th-229 の線量に及ぼす影響が大きいと考えられる。

なお，目標線量が 10μSv/y の場合におけるマトリクス拡散寄与面積率の制限範囲は，重要度が高い１つのパラメータのみを用いて設定しているため非常に厳しい制限（マトリクス拡散寄与面積率が 0.91 以上）となったが，重要度が高い２つ以上のパラメータを考慮する形で制限範囲を設定すればマトリクス拡散寄与面積率の制限範囲に余裕を持たせることができると考えられる。

表 5.2.2-4 極端な人工バリアおよび水理パラメータがパターン1を想定した場合おける Th-229 の成立条件の例

パラメータ	制限範囲		変動範囲			H12レファレンスケース設定値
	目標線量:10μSv/yの場合	目標線量:300μSv/yの場合				
透水量係数分布の平均値[m^2/s]	1×10^{-10}		1×10^{-11}	～	1×10^{-6}	1×10^{-10}
動水勾配[-]	0.01		0.001	～	0.23	0.01
亀裂開口幅の係数[-]	2		0.1	～	10	2
縦方向分散長と移行距離の比[-]	変動範囲全域	変動範囲全域	1	～	100	10
マトリクス拡散深さ[m]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.01	～	1	0.1
マトリクス拡散寄与面積率[-]	0.91 ～ 1	0.02 ～ 1	0.01	～	1	0.5
岩盤の間隙率[-]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.003	～	0.5	0.02
Npの分配係数(岩盤)[m^3/kg]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.01	～	10	1
Thの分配係数(岩盤)[m3/kg]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.1	～	10	1

5）合計線量

ここでは， Cs-135，Se-79，Np-237，Th-229 に対する個々の成立条件（表 5.2.2-1～表 5.2.2-4）が，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。この際，核種間に共通する成立条件のパラメータについては，最も保守的な値を採用し，その他のパラメータについては，保守値で固定することとする。このような条件下で決定論解析を性能目標毎に実施した（図 5.2.2-22 及び図 5.2.2-23 参照）。その結果，4 核種の合計線量が，10μSv/y および 300μSv/y を越えないことをそれぞれ確認し，成立条件を特定した（表 5.2.2-5 参照）。

表 5.2.2-5 極端な人工バリアおよび水理パラメータがパターン1を想定した場合における成立条件の例

パラメータ	制限範囲		変動範囲			H12レファレンスケース設定値
	目標線量:10μSv/yの場合	目標線量:300μSv/yの場合				
透水量係数分布の平均値[m^2/s]	1×10^{-10}		1×10^{-11}	～	1×10^{-6}	1×10^{-10}
動水勾配[-]	0.01		0.001	～	0.23	0.01
亀裂開口幅の係数[-]	2		0.1	～	10	2
縦方向分散長と移行距離の比[-]	変動範囲全域	変動範囲全域	1	～	100	10
マトリクス拡散深さ[m]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.01	～	1	0.1
マトリクス拡散寄与面積率[-]	0.91 ～ 1	0.02 ～ 1	0.01	～	1	0.5
岩盤の間隙率[-]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.003	～	0.5	0.02
Csの分配係数(岩盤)[m^3/kg]	0.01 ～ 10	変動範囲全域	0.001	～	10	0.05
Seの分配係数(岩盤)[m^3/kg]	0.001 ～ 0.1	変動範囲全域	1×10^{-8}	～	0.1	0.01
Npの分配係数(岩盤)[m^3/kg]	0.02 ～ 10	変動範囲全域	0.01	～	10	1
Thの分配係数(岩盤)[m3/kg]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.1	～	10	1

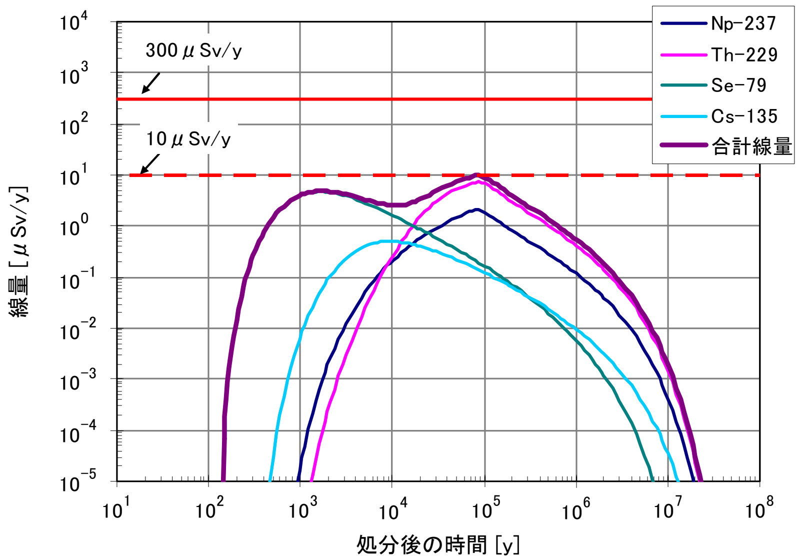


図 5.2.2-22 パターン 1 － 合計線量 － 決定論解析の結果（性能目標：10 μ Sv/y）

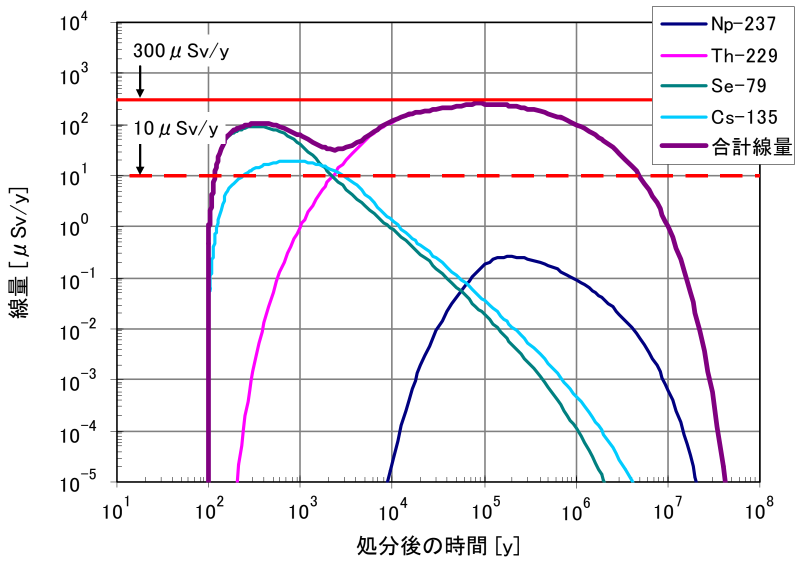


図 5.2.2-23 パターン 1 － 合計線量 － 決定論解析の結果（性能目標：300 μ Sv/y）

5.2.3 収着およびマトリクス拡散に係るパラメータに着目した場合（水理パラメータをパターン２で固定）

1） Cs-135

水理パラメータをパターン２（透水量係数分布の平均値 10^{-8}[m²/s]，動水勾配 0.01[-]，亀裂開口幅の係数 2[-]）で固定し，水理パラメータ以外の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 の範囲で変動させた統計解析を実施した（パターン２‐Cs-135‐１次統計解析：図 5.2.3-1 参照）。この統計解析の結果から算出した重要度・影響度を図 5.2.3-2 に示す。相対的に重要度が高い重要パラメータは Cs の分配係数（岩盤）及び岩盤の間隙率などであり，Cs-135 の最大線量に対しては収着遅延が重要なプロセスであることが示唆される。この傾向は，パターン１の場合と同様のものであった。

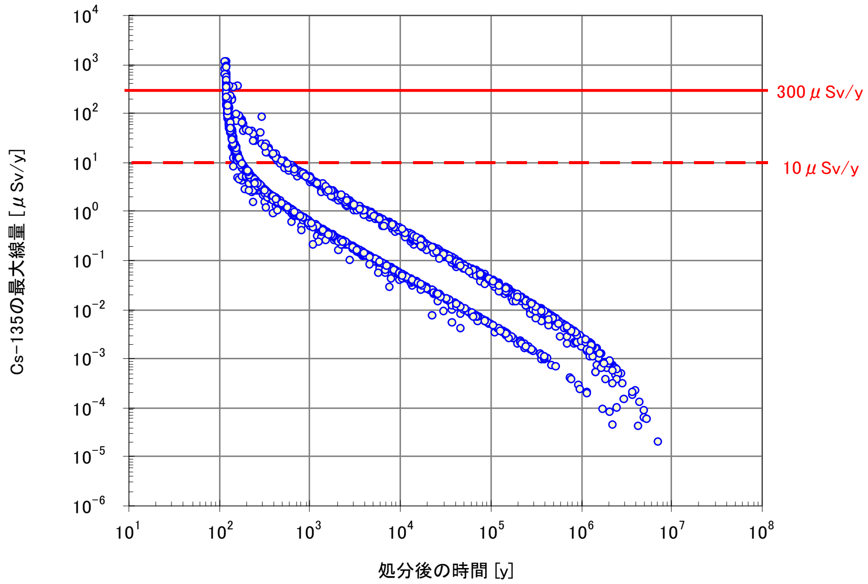


図 5.2.3-1 パターン２－Cs-135－１次統計解析の結果

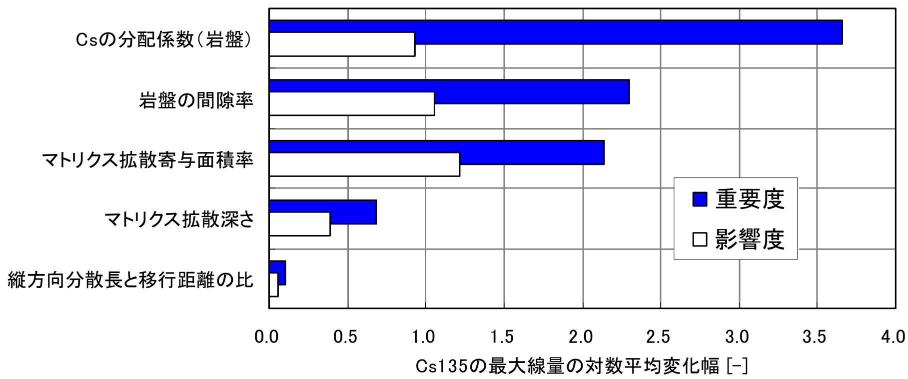


図 5.2.3-2 パターン２－Cs-135－１次統計解析の結果から算出した重要度・影響度

まず，ここでは，相対的な重要度の高い Cs の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の組み合わせにより，性能目標が 10μSv/y の場合における成立条件の抽出を試みることとした。パ

ターン 2 - Cs-135 - 1 次統計解析の結果を用いて，Cs の分配係数（岩盤）および岩盤の間隙率をそれぞれ横軸，縦軸にとり，Cs-135 の最大線量が 10 μ Sv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした結果を図 5.2.3-3 に示す。さらに，Cs-135 の最大線量が 10 μ Sv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線を合わせて示す。この境界線よりも右側の領域は，Cs-135 の線量が 10 μ Sv/y 以下となる Cs の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の組み合わせの候補を表している。ここでは，成立条件の推定値の例として，図中に示した黒丸の部分（Cs の分配係数（岩盤）: 0.3m³/kg)，岩盤の間隙率：0.1）を任意に選択し，それを成立条件の推定値とした。

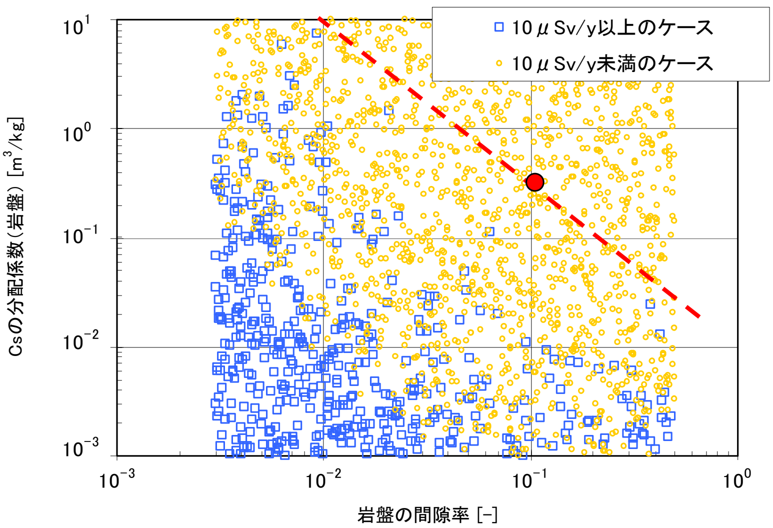


図 5.2.3-3 パターン 2 – Cs-135 – 1 次統計解析による成立条件の推定
（性能目標：10 μ Sv/y，Cs の分配係数，岩盤の間隙率）

ここで，推定した成立条件を確認するために，Cs の分配係数（岩盤）を 0.3m³/kg，岩盤の間隙率を 0.1 で固定し，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 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（パターン 2 - Cs-135 - 2 次決定論解析)。その結果，この決定論解析の最大値は 10 μ Sv/y を上回った（図 5.2.3-5 参照)。このため，成立条件の推定値を改めて見直すこととした。

10 μ Sv/y 近傍の感度特性をより明確に把握するため，Cs の分配係数（岩盤）及び岩盤の間隙率に表 3.5-1 の変動範囲を設定し，その他のパラメータを表 3.5-1 の変動範囲の保守値で固定した統計解析を実施した（パターン 2 - Cs-135 - 3 次統計解析)。この統計解析の結果を用いて，Cs の分配係数（岩盤）および岩盤の間隙率をそれぞれ横軸，縦軸にとり，Cs-135 の最大線量が 10 μ Sv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした結果を図 5.2.3-4 に示す。さらに，Cs-135 の最大線量が 10 μ Sv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線についても合わせて示す。この境界線よりも右上の領域は，Cs-135 の線量が 10 μ Sv/y 以下となる Cs の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の組み合わせの候補を表している。ここでは，成立条件の推定値の例として，図中に示した黒丸の部分（Cs の分配係

数（岩盤）：5m³/kg），岩盤の間隙率：0.09）を任意に選択し，それを成立条件の推定値とした。

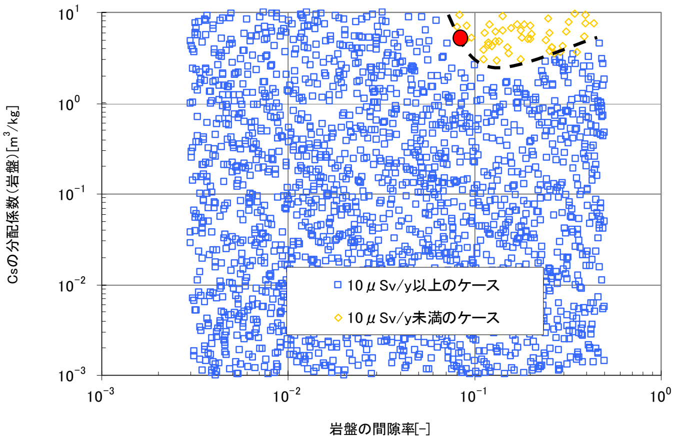


図 5.2.3-4 パターン 2 – Cs-135 – 3 次解析による成立条件の再推定
（性能目標：10μSv/y，Cs の分配係数（岩盤），岩盤の間隙率）

なお，図 5.2.3-4 において，10μSv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線が非線形の曲線になっていることがわかる（図 5.2.3-9 においても同様の傾向が見られる）。この理由については，付録 5 において記述する。

次に，推定した成立条件を確認するために，Cs の分配係数（岩盤）を 5m³/kg，岩盤の間隙率を 0.09 で固定し，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 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（パターン 2 - Cs-135 - 4 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の最大値は 10μSv/y を下回った（図 5.2.3-5 参照）。

この成立条件の妥当性を確認するために，Cs の分配係数（岩盤）を 5m³/kg 以下，岩盤の間隙率を 0.09 以上，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 の変動範囲に設定した統計解析を実施した（パターン 2 - Cs-135 - 5 次統計解析）。その結果から，先の決定論解析（パターン 2 - Cs-135 - 4 次決定論解析）の結果がこの統計解析の結果の上限を与えることを確認した（図 5.2.3-5 参照）。

以上の検討から，天然バリアがパターン 2 の場合に，Cs の分配係数（岩盤）が 5m³/kg 以下及び岩盤の間隙率が 0.09 以上の条件であれば，Cs-135 の最大線量は 10μSv/y を下回るとの知見を得た（表 5.2.3-1 参照）。

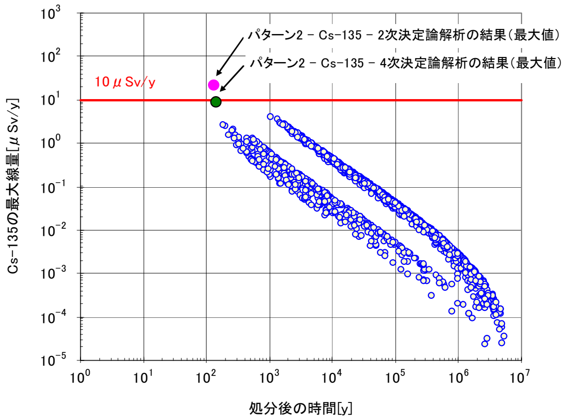


図 5.2.3-5 パターン 2 – Cs-135 – 5 次統計解析による妥当性確認（性能目標：10μSv/y）

次に，相対的な重要度の高い Cs の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の組み合わせにより，性能目標が 300μSv/y の場合における成立条件の抽出を試みた。パターン 2‐Cs-135‐1 次統計解析の結果を用いて，Cs の分配係数（岩盤）および岩盤の間隙率をそれぞれ横軸，縦軸にとり，Cs-135 の最大線量が 300μSv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした（図 5.2.3-6 参照）。さらに，Cs-135 の最大線量が 10μSv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線を合わせて示す。この境界線よりも右側の領域は，Cs-135 の最大線量が 300μSv/y 以下となる Cs の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の組み合わせの候補を表している。

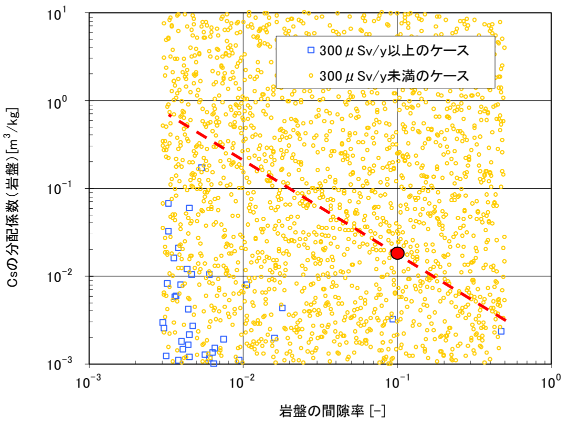


図 5.2.3-6 パターン 2 – Cs-135 – 1 次解析による成立条件の推定
（性能目標：300μSv/y，Cs の分配係数，岩盤の間隙率）

ここでは，成立条件の推定値の例として，図中に示した黒丸の部分（Cs の分配係数（岩盤）：0.02m³/kg，岩盤の間隙率：0.1）を任意に選択し，それを成立条件の推定値とした。

ここで，推定した成立条件を確認するために，Cs の分配係数（岩盤）を 0.02m³/kg，岩盤の間隙率を 0.1，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 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（パターン 2 - Cs-135 - 6 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の最大値は，300μSv/y を上回った（図 5.2.3-8 参照）。

そこで，成立条件の推定値を見直すために，Cs の分配係数（岩盤）及び岩盤の間隙率に表 3.5-1 の変動範囲を設定し，その他のパラメータを表 3.5-1 の変動範囲の保守値で固定した統計解析を実施した（パターン 2 - Cs-135 - 7 次統計解析）。この統計解析の結果を用いて，Cs の分配係数（岩盤）および岩盤の間隙率をそれぞれ横軸，縦軸にとり，Cs-135 の最大線量が 300μSv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした結果を図 5.2.3-7 に示す。さらに，図 5.2.3-7 に，Cs-135 の最大線量が 300μSv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線を合わせて示す。この境界線よりも右上の領域は，Cs-135 の線量が 300μSv/y 以下となる Cs の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の組み合わせの候補を表している。この境界線が非線形の曲線となっているのは，図 5.2.3-4 と同様の理由である。

ここでは，成立条件の推定値の例として，図 5.2.3-7 中に示した黒丸の部分（Cs の分配係数（岩盤）: $1 m^3/kg$，岩盤の間隙率 : 0.01）を任意に選択し，それを成立条件の推定値とした。

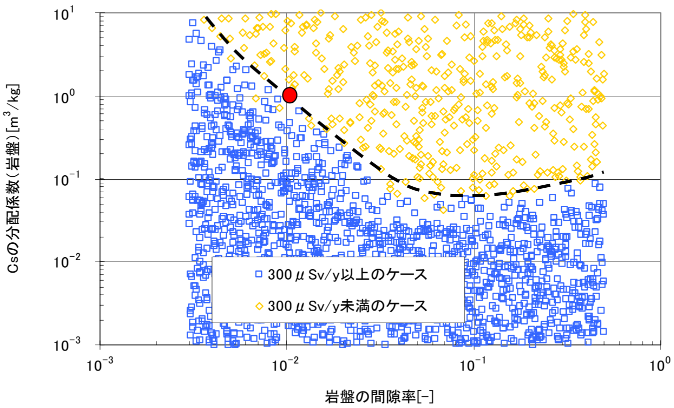


図 5.2.3−7 パターン 2 − Cs−135 − 7 次統計解析による成立条件の再推定
（性能目標：300μSv/y，Cs の分配係数，岩盤の間隙率）

ここで，推定した成立条件を確認するために，Cs の分配係数（岩盤）を $1 m^3/kg$，岩盤の間隙率を 0.01, その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 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（パターン 2 - Cs-135 - 8 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の最大値は，300μSv/y を下回ることを確認した（図 5.2.3-8 参照）。

この成立条件の妥当性を確認するために，Cs の分配係数（岩盤）を $1 m^3/kg$ 以上，岩盤の間隙率を 0.01 以上，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 の変動範囲に設定した統計解析を実施した（パターン 2 - Cs-135 - 9 次統計解析）。その結果，先の決定論解析の結果（パターン 2 - Cs-135 - 8 次決定論解析）がこの統計解析の結果の上限を与えることを確認した（図 5.2.3-8 参照）。

以上の検討から，天然バリアがパターン 2 の場合に，Cs の分配係数（岩盤）が $1 m^3/kg$ 以下及び岩盤の間隙率が 0.01 以上の条件であれば，Cs-135 の最大線量は 300μSv/y を下

回るとの知見を得た（表 5.2.3-1 参照）。

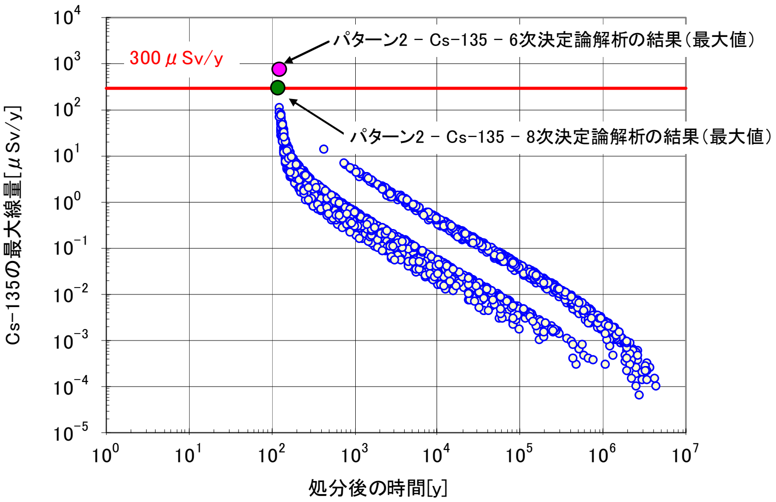


図 5.2.3-8　パターン 2 － Cs-135 － 9 次統計解析による妥当性確認（性能目標：300μSv/y）

表 5.2.3-1　極端な人工バリアおよび水理パラメータがパターン 2 を想定した場合における Cs-135 の成立条件の例

パラメータ	成立条件		変動範囲	第2次取りまとめレファレンスケース設定値
	目標線量：10μSv/yの場合	目標線量：300μSv/yの場合		
透水量係数分布の平均値[m²/s]	1×10^{-8}		1×10^{-11} ～ 1×10^{-6}	1×10^{-10}
動水勾配[-]	0.01		0.001 ～ 0.23	0.01
亀裂開口幅の係数[-]	2		0.1 ～ 10	2
縦方向分散長と移行距離の比[-]	変動範囲全域	変動範囲全域	1 ～ 100	10
マトリクス拡散深さ[m]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.01 ～ 1	0.1
マトリクス拡散寄与面積率[-]	変動範囲全域	変動範囲全域	0.01 ～ 1	0.5
岩盤の間隙率[-]	0.09 ～ 0.5	0.01 ～ 0.5	0.003 ～ 0.5	0.02
Csの分配係数（岩盤）[m³/kg]	5 ～ 10	1 ～ 10	0.001 ～ 10	0.05

2）Se-79

極端な人工バリアを想定し，水理パラメータをパターン 2（透水量係数分布の平均値を 10^{-8}[m²/s]，動水勾配 0.01[-]，亀裂開口幅の係数 2[-]）で固定し，水理パラメータ以外の天然バリアのパラメータを変動させた統計解析を実施した（パターン 2 - Se-79 - 1 次統計解析：図 5.2.3-9 参照）。この統計解析の結果から算出した重要度・影響度を図 5.2.3-10 に示す。図 5.2.3-10 より，相対的に重要度が高い重要パラメータは Se の分配係数（岩盤）及び岩盤の間隙率などであり，Se-79 の最大線量に対しては収着遅延が重要なプロセスであることが示唆される。この傾向は，パターン 1 の場合と同様のものであった。

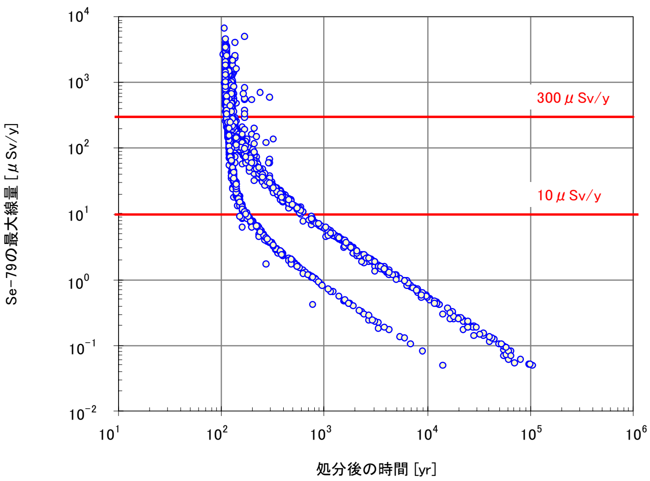


図 5.2.3-9 パターン 2 − Se−79 − 1 次統計解析の結果

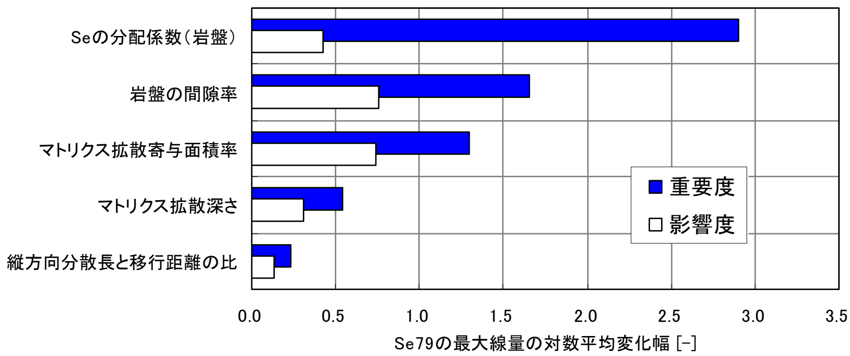


図 5.2.3-10 パターン 2 − Se−79 − 1 次統計解析の結果から算出した重要度・影響度

まず，ここでは，相対的な重要度の高い Se の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の組み合わせにより，性能目標が 10 μ Sv/y の場合における成立条件の抽出を試みることとした。パターン 2 - Se-79 - 1 次解析の結果を用いて，Se の分配係数（岩盤）および岩盤の間隙率をそれぞれ横軸，縦軸にとり，Se-79 の最大線量が 10 μ Sv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした結果を図 5.2.3-11 に示す。

図 5.2.3-11 より，Se の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の組み合わせから，Se-79 の線量を 10 μ Sv/y 以下とするための成立条件を見出すことは困難であることが推測される。このため，Se の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率以外のパラメータを加えて，成立条件を見出す必要がある。

ここでは，成立条件を効率的に見出すことができそうな領域として，Se の分配係数（岩盤）を 0.01 m^3/kg 以上及び岩盤の間隙率を 0.1 以上の領域（図 5.2.3-11 中の緑色の線で囲まれた領域）に着目する。そして，Se の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の次に相対的な重要度が高いパラメータであるマトリクス拡散寄与面積率およびマトリクス拡散深さに変

動範囲を設定し，その他のパラメータに保守値を設定した統計解析を実施した（パターン 2 - Se-79 - 2 次統計解析）。この統計解析の結果から，マトリクス拡散寄与面積率およびマトリクス拡散深さをそれぞれ縦軸，横軸にとり，Se-79 の最大線量が 10μSv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした結果を図 5.2.3-12 に示す。さらに Se-79 の最大線量が 10μSv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線を合わせて示す。この境界線よりも右上の領域は，Se-79 の線量が 10μSv/y 以下となるマトリクス拡散寄与面積率およびマトリクス拡散深さの組み合わせの候補を表している。ここでは，成立条件の推定値の例として，図 5.2.3-12 中に示した黒丸の部分（マトリクス拡散寄与面積率：0.5，マトリクス拡散深さ：0.13[-]）を任意に選択し，それを成立条件の推定値とした。

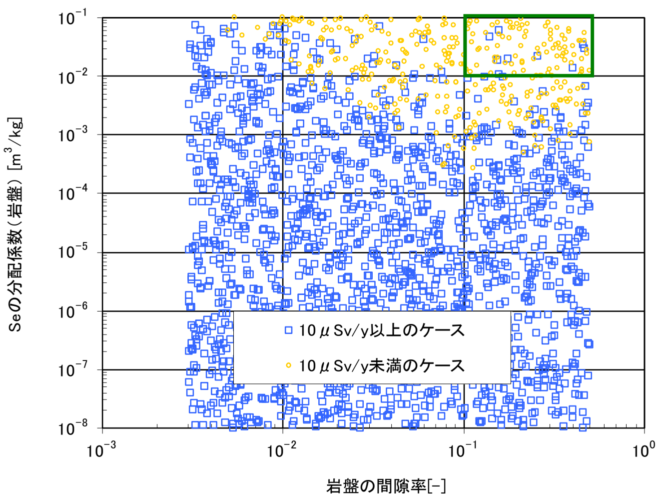


図 5.2.3-11 パターン 2 – Se-79 – 1 次統計解析による成立条件の推定
（性能目標：10μSv/y，Se の分配係数，岩盤の間隙率）

推定した成立条件を確認するために，マトリクス拡散寄与面積率を 0.5，マトリクス拡散深さを 0.13m，Se の分配係数（岩盤）を 0.01m^3/kg，岩盤の間隙率を 0.1，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 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（パターン 2 - Se-79 - 3 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の最大値は，10μSv/y を下回ることを確認した（図 5.2.3-13 参照）。

この成立条件の妥当性を確認するために，マトリクス拡散寄与面積率を 0.5 以上，マトリクス拡散深さを 0.13m 以上，Se の分配係数（岩盤）を 0.01 m^3/kg 以上，岩盤の間隙率を 0.1 以上，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 の変動範囲に設定した統計解析を実施した（パターン 2 - Se-79 - 4 次統計解析）。その結果，決定論解析の結果（パターン 2 - Se-79 - 3 次決定論解析）の結果がこの統計解析の結果の上限を与えることを確認した（図 5.2.3-13 参照）。

以上の検討から，天然バリアがパターン 2 の場合に，Se の分配係数（岩盤）が 0.01m^3/kg 以上，岩盤の間隙率が 0.1 以上，マトリクス拡散寄与面積率を 0.5 以上，マトリクス拡散深

さを 0.13m 以上の条件であれば, Se-79 の最大線量は 10μSv/y を下回るとの知見を得た(表 5.2.3-2 参照)。

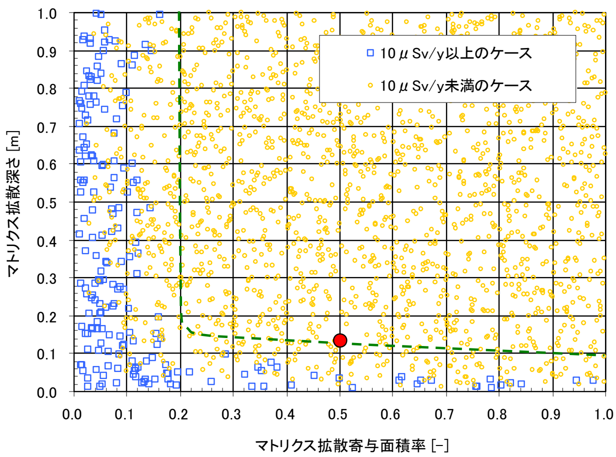


図 5.2.3-12 パターン 2 − Se-79 − 2 次統計解析による成立条件の再推定
（性能目標：10μSv/y, マトリクス拡散寄与面積率, マトリクス拡散深さ）

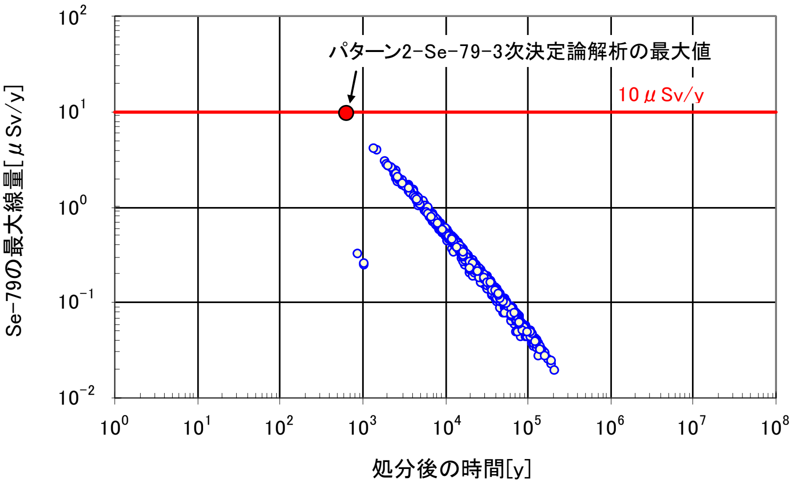


図 5.2.3-13 パターン 2 − Se-79 − 4 次統計解析による
成立条件の妥当性確認(性能目標：10μSv/y)

次に，性能目標が 300μSv/y の場合における Se-79 の成立条件の抽出を試みた。

ここでは，パターン 2 - Se-79 - 1 次統計解析の結果を用いて，Se の分配係数（岩盤）および岩盤の間隙率をそれぞれ横軸，縦軸にとり，Se-79 の最大線量が 300μSv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした(図 5.2.3-14 参照)。さらに, 図 5.2.3-14 に, Se-79 の最大線量が 300μSv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線を合わせて示す。この境界線よりも右側の領域は，Se-79 の線量が 300μSv/y 以下となる Cs の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の組み合わせの候補を表している。ここでは，成立条件の推定値の例として，図 5.2.3-14 中に示した赤丸の部分（Se の分配係数（岩盤）：0.06m³/kg，岩盤の間

隙率：0.01）を任意に選択し，それを成立条件の推定値とした。

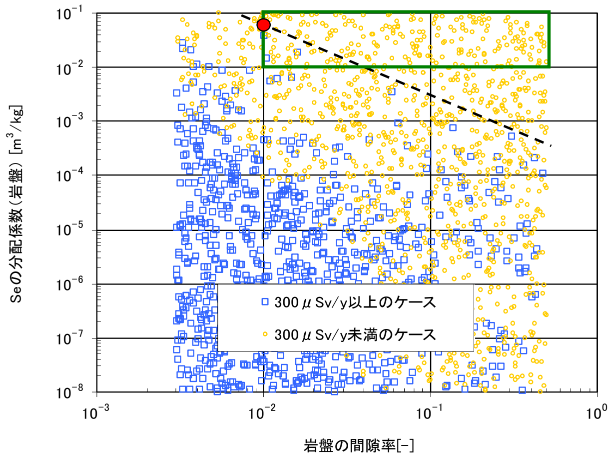


図 5.2.3-14 パターン 2 − Se-79 − 1 次統計解析による成立条件の推定
（性能目標:300μSv/y，Se の分配係数(岩盤)，岩盤の間隙率）

ここで，推定した成立条件を確認するために，Se の分配係数（岩盤）を 0.06m^3/kg，岩盤の間隙率を 0.01 で固定し，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 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（パターン 2 - Se-79 - 5 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の最大値は 300μSv/y を上回った（図 5.2.3-17 参照）。同様に，図 5.2.3-14 中に示した境界線よりも右側の領域における任意の各点についても検討した結果，決定論解析の最大値が 300μSv/y を上回り，成立条件の推定値とはなりえなかった。このため，Se の分配係数（岩盤）及び岩盤の間隙率以外のパラメータを加えて，成立条件の推定値を見直すこととした。

ここでは，成立条件を効率的に見出すことができそうな領域として，Se の分配係数（岩盤）を 0.01 m^3/kg 以上及び岩盤の間隙率を 0.01 以上の領域（図 5.2.3-14 中の緑色の線で囲まれた領域）に着目することとした。そこで，Se の分配係数（岩盤）および岩盤の間隙率の次に相対的な重要度が高いパラメータであるマトリクス拡散寄与面積率およびマトリクス拡散深さに変動範囲を設定し，その他のパラメータに保守値を設定した統計解析を実施した（パターン 2 - Se-79 - 6 次統計解析）。この統計解析の結果を用いて，Se の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の次に相対的な重要度が高いパラメータであるマトリクス拡散寄与面積率およびマトリクス拡散深さをそれぞれ横軸，縦軸にとり，Se-79 の最大線量が 300μSv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした結果を図 5.2.3-15 に示す。さらに，Se-79 の最大線量が 300μSv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線についても合わせて示す。この境界線よりも右側の領域は，Se-79 の線量が 300μSv/y 以下となる Se の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の組み合わせの候補を表している。ここでは，成立条件の推定値の例として，図中に示した黒丸の部分（マトリクス拡散寄与面積率：0.12）を任意に選択し，それを成立条件の推定値とした。

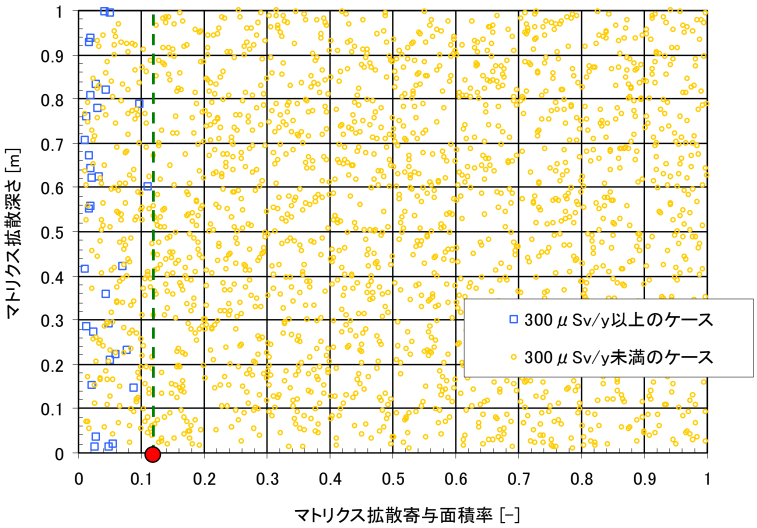


図 5.2.3-15　パターン 2 − Se−79 − 6 次統計解析による成立条件の再推定
（性能目標：300μSv/y，マトリクス拡散深さ，マトリクス拡散寄与面積率）

この推定した成立条件を確認するために，マトリクス拡散寄与面積率を 0.12，Se の分配係数（岩盤）を 0.01m³/kg，岩盤の間隙率を 0.01，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 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（パターン 2 - Se-79 - 7 次決定論解析）。その結果，この決定論解析結果の最大値は 300μSv/y を上回った（図 5.2.3-17 参照）。

そこで，成立条件の推定を容易にするために，相対的な重要度の高い上位 2 つのパラメータである Se の分配係数(岩盤)および岩盤の間隙率に制限範囲における保守値を設定し，その次に相対的な重要度が高いパラメータであるマトリクス拡散寄与面積率およびマトリクス拡散深さに変動範囲を設定し，その他のパラメータに変動範囲における保守値を設定した統計解析を実施した（パターン 2 - Se-79 - 8 次統計解析）。この統計解析の結果を用いて，マトリクス拡散寄与面積率およびマトリクス拡散深さをそれぞれ横軸，縦軸にとり，Se-79 の最大線量が 300μSv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした結果を図 5.2.3-16 に示す。さらに，Se-79 の最大線量が 300μSv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線についても合わせて示す。この境界線よりも右側の領域は，Se-79 の線量が 300μSv/y 以下となる Se の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の組み合わせの候補を表している。図 5.2.3-16 より，マトリクス拡散寄与面積率が 0.18 以上であれば，300μSv/y を下回る可能性が高いことが示唆される。ここでは，成立条件の推定値の例として，図中に示した黒丸の部分（マトリクス拡散寄与面積率：0.18）を任意に選択し，それを成立条件の推定値とした。

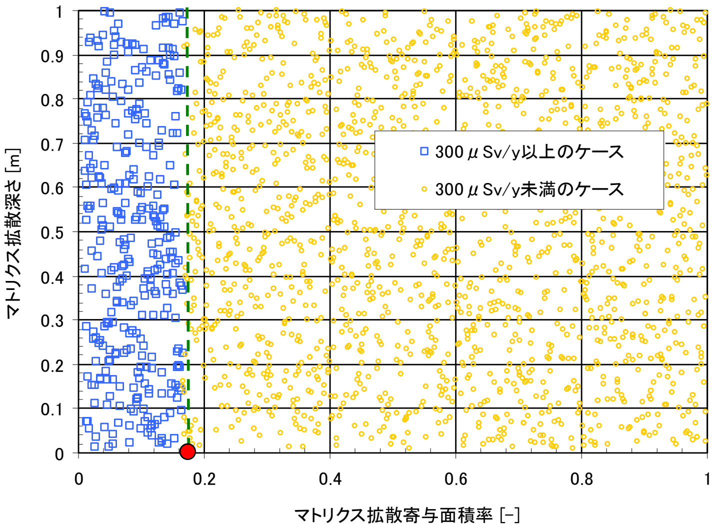


図 5.2.3-16 パターン 2－Se-79－8 次統計解析による成立条件の再推定
（性能目標：300μSv/y，マトリクス拡散深さ，マトリクス拡散寄与面積率）

この推定した成立条件を確認するために，マトリクス拡散寄与面積率を 0.18，Se の分配係数（岩盤）を 0.01m^3/kg，岩盤の間隙率を 0.01，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 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（パターン 2 - Se-79 - 9 次決定論解析）。その結果，この決定論解析結果の最大値は 300μSv/y を下回った（図 5.2.3-17 参照）。

この成立条件の妥当性を確認するために，マトリクス拡散寄与面積率を 0.18 以上，Se の分配係数（岩盤）を 0.01 m^3/kg 以上，岩盤の間隙率を 0.01 以上，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 の変動範囲に設定した統計解析を実施した（パターン 2 - Se-79 - 10 次統計解析）。この結果，決定論解析（パターン 2 - Se-79 - 9 次決定論解析）の結果がこの統計解析の結果の上限を与えることが確認した（図 5.2.3-17 参照）。

以上の検討から，天然バリアがパターン 2 の場合に，Se の分配係数（岩盤）が 0.01m^3/kg 以上，岩盤の間隙率が 0.01 以上，マトリクス拡散寄与面積率を 0.18 以上の条件であれば，Se-79 の最大線量は 300μSv/y を下回るとの知見を得た（表 5.2.3-2 参照）。

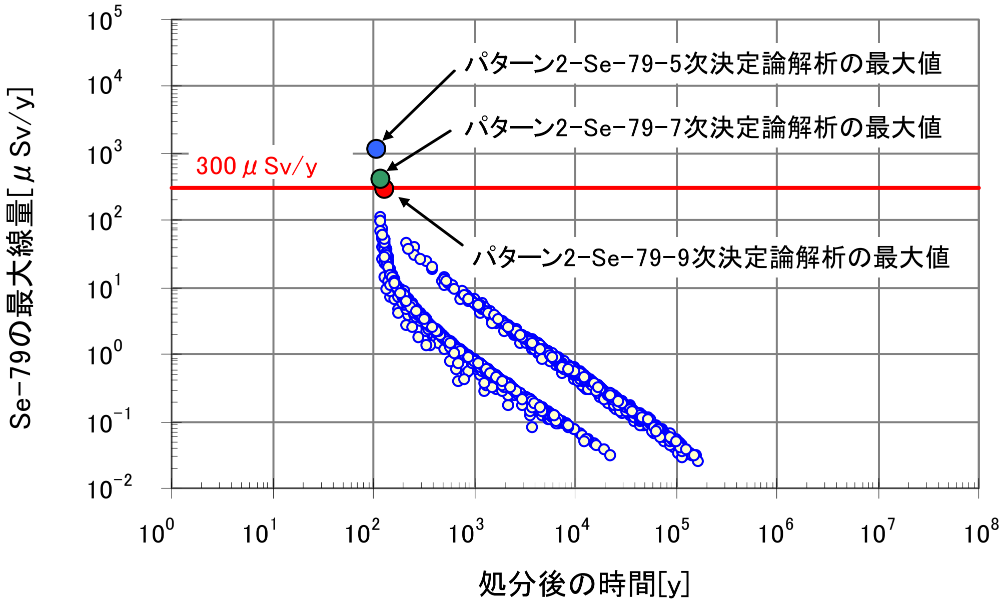


図 5.2.3-17 パターン 2 – Se-79 – 10 次統計解析における成立条件の妥当性確認(性能目標:300μSv/y)

表 5.2.3-2 極端な人工バリアおよび水理パラメータがパターン 2 を想定した場合における Se-79 の成立条件の例

パラメータ	成立条件		変動範囲	第2次取りまとめレファレンスケースの設定値
	目標線量:10μSv/yの場合	目標線量:300μSv/yの場合		
透水量係数分布の平均値[m^2/s]	1×10^{-8}		1×10^{-11} ～ 1×10^{-6}	1×10^{-10}
動水勾配[-]	0.01		0.001 ～ 0.23	0.01
亀裂開口幅の係数[-]	2		0.1 ～ 10	2
縦方向分散長と移行距離の比[-]	変動範囲全域	変動範囲全域	1 ～ 100	10
マトリクス拡散深さ[m]	0.13 ～ 1	変動範囲全域	0.01 ～ 1	0.1
マトリクス拡散寄与面積率[-]	0.5 ～ 1	0.18 ～ 1	0.01 ～ 1	0.5
岩盤の間隙率[-]	0.1 ～ 0.5	0.01 ～ 0.5	0.003 ～ 0.5	0.02
Seの分配係数(岩盤)[m^3/kg]	0.01 ～ 0.1	0.01 ～ 0.1	1×10^{-8} ～ 0.1	0.01

3) Np-237

極端な人工バリアを想定し，水理パラメータをパターン 2（透水量係数分布の平均値を 10^{-8}[m^2/s]，動水勾配 0.01[-]，亀裂開口幅の係数 2[-]）で固定し，水理パラメータ以外の天然バリアのパラメータを変動させた統計解析を実施した（パターン 2 - Np-237 - 1 次統計解析：図 5.2.3-18 参照)。この統計解析の結果から算出した重要度・影響度を図 5.2.3-19 に示す。相対的に重要度が高い重要パラメータは Np の分配係数（岩盤）及び岩盤の間隙率などであり，Np-237 の最大線量に対しては収着遅延が重要なプロセスであることが示唆される。この傾向は，パターン 1 の場合と同様のものであった。

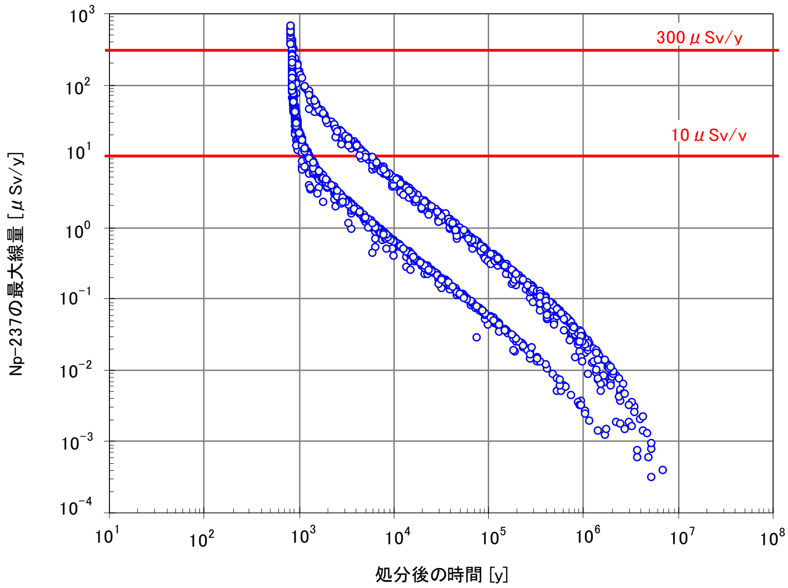


図 5.2.3-18 パターン 2 – Np-237 – 1 次統計解析の結果

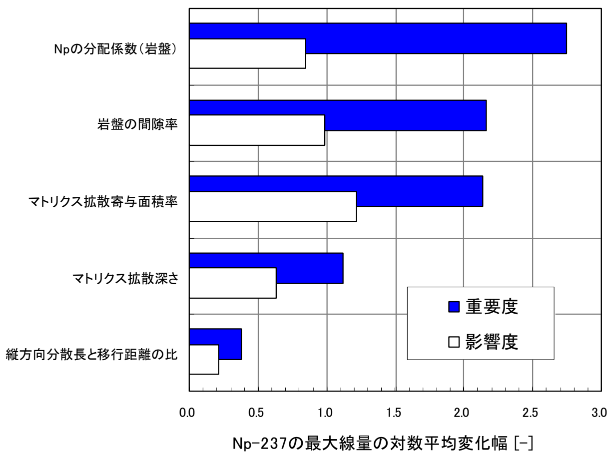


図 5.2.3-19 パターン 2 – Np-237 – 1 次統計解析の結果から算出した重要度・影響度

まず，ここでは，相対的な重要度の高い Np の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の組み合わせにより，性能目標が 10μSv/y の場合における成立条件の抽出を試みることとした。パターン 2 - Np-237 - 1 次統計解析の結果を用いて，Np の分配係数（岩盤）および岩盤の間隙率をそれぞれ横軸，縦軸にとり，Np-237 の最大線量が 10μSv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした結果を図 5.2.3-20 に示す。また，図 5.2.3-20 には Np-237 の最大線量が性能目標を超える場合と超えない場合のおおよその境界線を合わせて示す。この境界線よりも右上の領域が，Np-237 の線量が 10μSv/y 以下となる Np の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の組み合わせの候補を表している。ここでは，成立条件の推定値の例として，図中に示した赤丸の部分（Np の分配係数（岩盤）: 1.6m^3/kg，岩盤の間隙率 : 0.1）を任意に選択し選び，それを成立条件の推定値とすることとした。

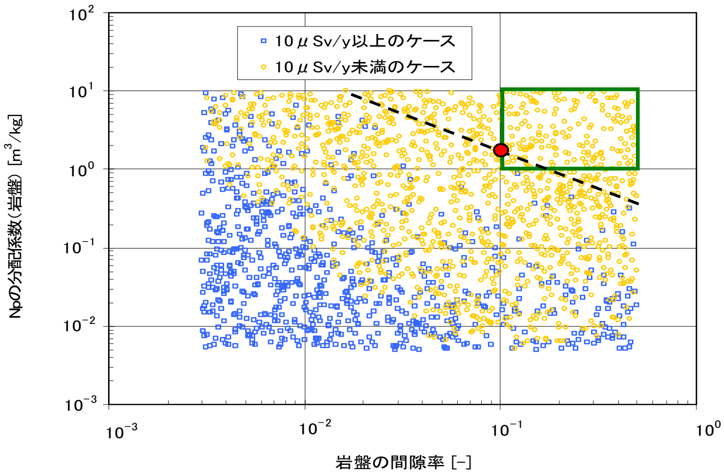


図 5.2.3-20 パターン 2 − Np-237 − 1 次統計解析による成立条件の推定
（性能目標：10μSv/y，Np の分配係数（岩盤），岩盤の間隙率）

推定した成立条件を確認するために，Np の分配係数（岩盤）を 1.6m^3/kg，岩盤の間隙率を 0.1 で固定し，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 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（パターン 2 - Np-237 - 2 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の最大値は 10μSv/y を上回ることを把握した（図 5.2.3-22 参照）。同様に，図 5.2.3-20 中に示した境界線よりも右側の領域における任意の各点について検討した結果，決定論解析の最大値が 10μSv/y を上回り，成立条件の推定値とはなりえなかった。このため，Np の分配係数（岩盤）及び岩盤の間隙率以外のパラメータを加えて，成立条件の推定値を見直すこととした。

ここでは，成立条件を効率的に見出すことができそうな Np の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の領域として，Np の分配係数（岩盤）を 1m^3/kg 以上及び岩盤の間隙率を 0.1 以上の領域（図 5.2.3-20 中の緑色の線で囲まれた領域）に着目し，その他の天然バリアのパラメータに変動範囲を設定した統計解析を実施した（パターン 2 - Se-79 - 3 次統計解析）。この統計解析結果から，マトリクス拡散寄与面積率およびマトリクス拡散深さをそれぞれ縦軸，横軸にとり，Np-237 の最大線量が 10μSv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした結果を図 5.2.3-21 に示す。さらに，Np-237 の最大線量が 10μSv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線を合わせて示す。この境界線よりも右側の領域は，Np-237 の線量が 10μSv/y 以下となるマトリクス拡散寄与面積率およびマトリクス拡散深さの組み合わせの候補を表している。ここでは，成立条件の推定値の例として，図 5.2.3-21 中に示した黒丸の部分（マトリクス拡散寄与面積率：0.07，マトリクス拡散深さ：0.1m）を任意に選択し，それを成立条件の推定値とした。

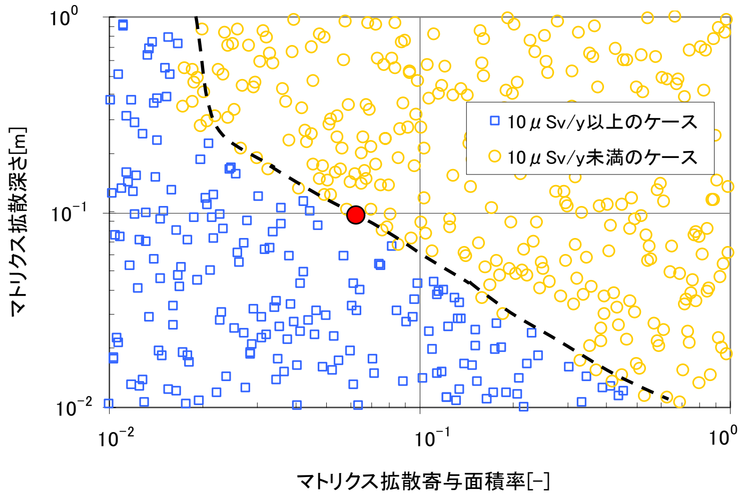


図 5.2.3-21 パターン 2 − Np-237 − 3 次統計解析による成立条件の推定
（性能目標：10μSv/y，マトリクス拡散寄与面積率，マトリクス拡散深さ）

推定した成立条件を確認するために，マトリクス拡散寄与面積率を 0.07，マトリクス拡散深さを 0.1m，Np の分配係数（岩盤）を 1m³/kg，岩盤の間隙率を 0.1，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 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（パターン 2 - Np-237 - 4 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の最大値は 10μSv/y を下回った（図 5.2.3-22 参照）。

成立条件の妥当性を確認するために，マトリクス拡散寄与面積率を 0.07 以上，マトリクス拡散深さを 0.1m 以上，Np の分配係数（岩盤）を 1m³/kg 以上，岩盤の間隙率を 0.1 以上，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 の変動範囲に設定した統計解析を実施した（パターン 2 - Np-237 - 5 次統計解析）。この結果から，先の決定論解析（パターン 2 - Np-237 - 4 次決定論解析）の結果が，この統計解析の結果の上限を与えることを確認した（図 5.2.3-22 参照）。

以上の検討から，天然バリアがパターン 2 の場合に，Np の分配係数（岩盤）が 1m³/kg 以上，岩盤の間隙率が 0.1 以上，マトリクス拡散寄与面積率を 0.07 以上，マトリクス拡散深さを 0.1 以上の条件であれば，Np-237 の最大線量は 10μSv/y を下回るとの知見を得た（表 5.2.3-3 参照）。

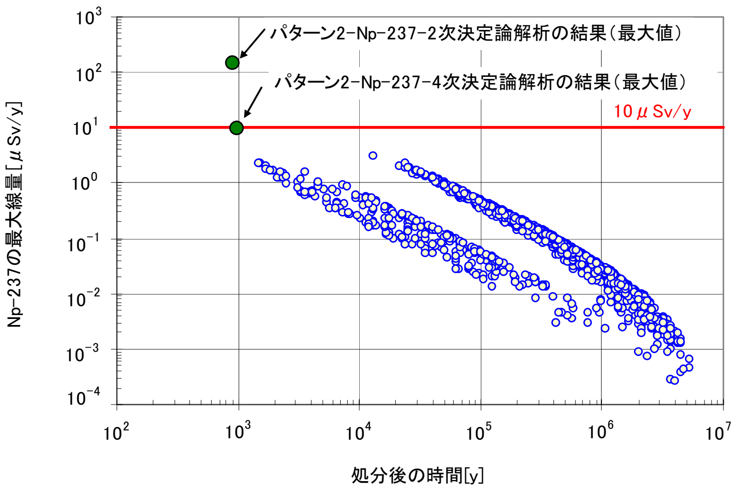


図 5.2.3-22 パターン 2 − Np−237 − 5 次統計解析による妥当性確認(性能目標:10μSv/y)

次に,相対的な重要度の高い Np の分配係数(岩盤)と岩盤の間隙率の組み合わせにより,性能目標が 300μSv/y の場合における Np-237 の成立条件の抽出を試みた。ここでは,パターン 2 - Np-237 - 1 次解析の結果を用いて,Np の分配係数（岩盤）および岩盤の間隙率をそれぞれ横軸,縦軸にとり,Np-237 の最大線量が 300μSv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした（図 5.2.3-23 参照）。さらに,Np-237 の最大線量が 300μSv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線を合わせて示す。この境界線よりも右側の領域は,Np-237 の線量が 300μSv/y 以下となる Np の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の組み合わせの候補を表している。ここでは,成立条件の推定値の例として,図中に示した黒丸の部分（Np の分配係数（岩盤）: 0.05m^3/kg,岩盤の間隙率 : 0.03）を任意に選択し,それを成立条件の推定値とした。

推定した成立条件を確認するために,Np の分配係数（岩盤）を 0.02m^3/kg,岩盤の間隙率を 0.03,その他の天然バリアのパラメータを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（パターン 2 - Np-237 - 6 次決定論解析）。その結果,この決定論解析の最大値が 300μSv/y を上回ることを確認した（図 5.2.3-25 参照）。このため,成立条件の推定値を見直すこととした。

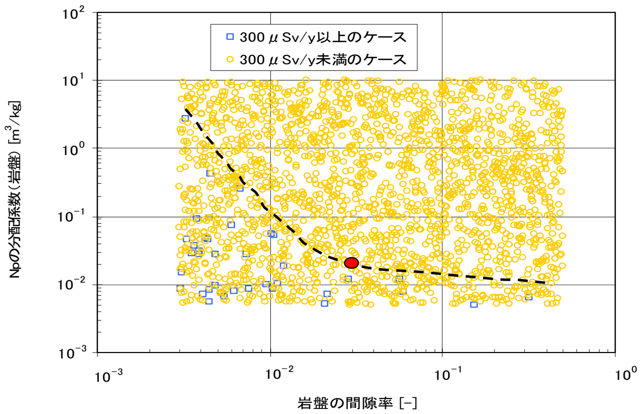


図 5.2.3-23 パターン 2 − Np-237 − 1 次統計解析による成立条件の推定
（性能目標：300 μ Sv/y，Np の分配係数（岩盤），岩盤の間隙率）

そこで，Np の分配係数（岩盤）及び岩盤の間隙率に表 3.5-1 の変動範囲を設定し，その他のパラメータを表 3.5-1 の変動範囲の保守値で固定した統計解析を実施した（パターン 2 - Np-237 - 7 次統計解析）。この統計解析の結果を用いて，Np の分配係数（岩盤）および岩盤の間隙率をそれぞれ横軸，縦軸にとり，Np-237 の最大線量が 300 μ Sv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした結果を図 5.2.3-24 に示す。さらに，図 5.2.3-24 に，Np-237 の最大線量が 10 μ Sv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線を合わせて示す。この境界線よりも右側の領域は，Np-237 の線量が 300 μ Sv/y 以下となる Np の分配係数（岩盤）と岩盤の間隙率の組み合わせの候補を表している。この境界線が非線形の曲線となっているのは，図 5.2.3-4 と同様の理由である。

ここでは，成立条件の推定値の例として，図中に示した黒丸の部分（Np の分配係数（岩盤）: 1[m³/kg]），岩盤の間隙率 : 0.02[-]）を任意に選択し，それを成立条件の推定値とした。

ここで，推定した成立条件を確認するために，Np の分配係数（岩盤）を 1m³/kg，岩盤の間隙率を 0.02, その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 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（パターン 2 - Np-237 - 8 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の最大値は，300 μ Sv/y を下回った（図 5.2.3-25 参照）。

この成立条件の妥当性を確認するために，Np の分配係数（岩盤）を 1m³/kg 以上，岩盤の間隙率を 0.02 以上，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 の変動範囲に設定した統計解析を実施した（パターン 2 - Np-237 - 9 次統計解析）。この結果から，先の決定論解析（パターン 2 - Np-237 - 8 次決定論解析）の結果がこの統計解析の結果の上限を与えることを確認した（図 5.2.3-25 参照）。

以上の検討から，天然バリアがパターン 2 の場合に，Np の分配係数（岩盤）が 1m³/kg 以上，岩盤の間隙率が 0.02 以上であれば，Np-237 の最大線量は 300 μ Sv/y を下回るとの知見を得た（表 5.2.3-3 参照）。

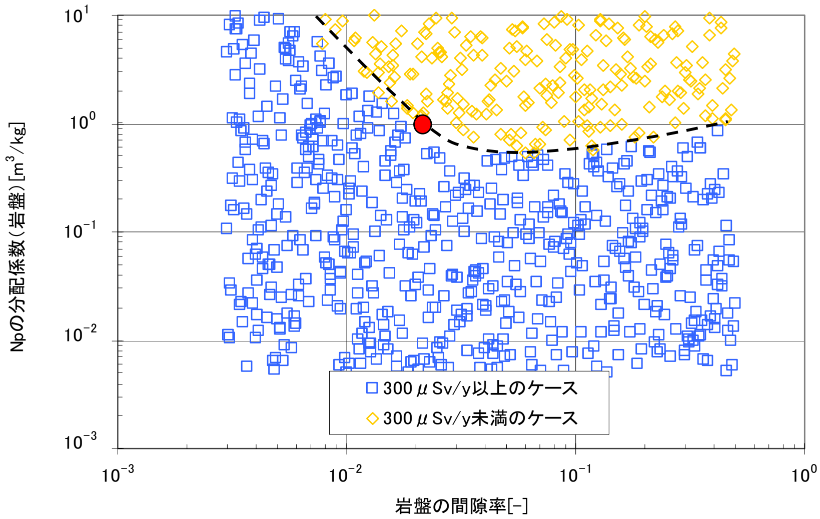


図 5.2.3-24 パターン 2 – Np-237 – 7 次統計解析による成立条件の推定

（性能目標：300 μ Sv/y，Np の分配係数，岩盤の間隙率）

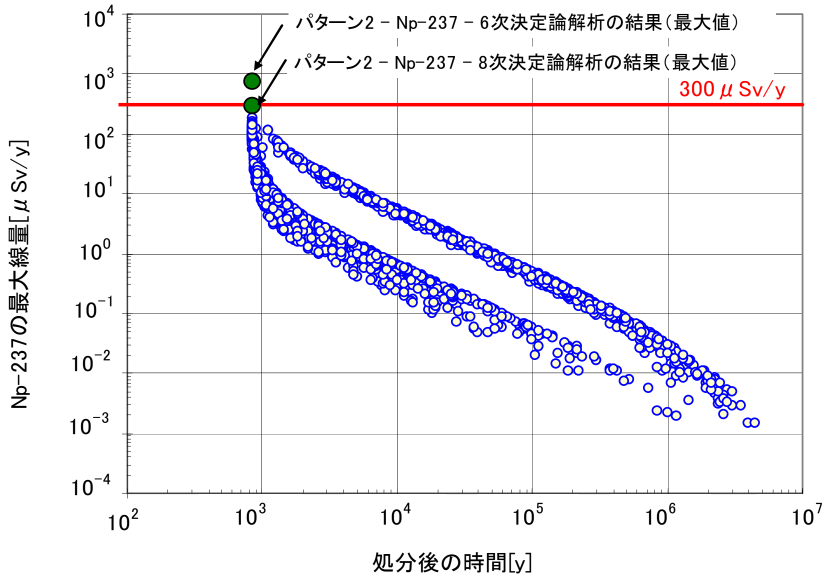


図 5.2.3-25 パターン 2 – Np-237 – 9 次統計解析による

成立条件の妥当性確認（性能目標：300 μ Sv/y）

表 5.2.3-3 極端な人工バリアおよび水理パラメータがパターン 2 を

想定した場合における Np-237 の成立条件の例

パラメータ	成立条件						変動範囲			第2次取りまとめレファレンスケースの設定値
	目標線量：10 μ Sv/yの場合			目標線量：300 μ Sv/yの場合						
透水量係数分布の平均値[m^2/s]	1×10^{-8}						1×10^{-11}	～	1×10^{-6}	1×10^{-10}
動水勾配[-]	0.01						0.001	～	0.23	0.01
亀裂開口幅の係数[-]	2						0.1	～	10	2
縦方向分散長と移行距離の比[-]	変動範囲全域			変動範囲全域			1	～	100	10
マトリクス拡散深さ[m]	0.1	～	1	変動範囲全域			0.01	～	1	0.1
マトリクス拡散寄与面積率[-]	0.07	～	1	変動範囲全域			0.01	～	1	0.5
岩盤の間隙率[-]	0.1	～	0.5	0.02	～	0.5	0.003	～	0.5	0.02
Npの分配係数（岩盤）[m^3/kg]	1	～	10	1	～	10	0.005	～	10	1

4) Th-229

極端な人工バリアを想定し，水理パラメータをパターン 2（透水量係数分布の平均値を 10^{-8}[m^2/s]，動水勾配 0.01[-]，亀裂開口幅の係数 2[-]）で固定し，水理パラメータ以外の天然バリアのパラメータを変動させた統計解析を実施した（パターン 2 - Th-229 - 1 次統計解析：図 5.2.3-26 参照)。この統計解析の結果から算出した重要度・影響度を図 5.2.3-27 に示す。相対的に重要度が高い重要パラメータはマトリクス核酸寄与面積率，岩盤の間隙率及び Th の分配係数（岩盤）などであり，Th-229 の最大線量に対しては，マトリクス拡散及び収着遅延が重要なプロセスであることが示唆される。

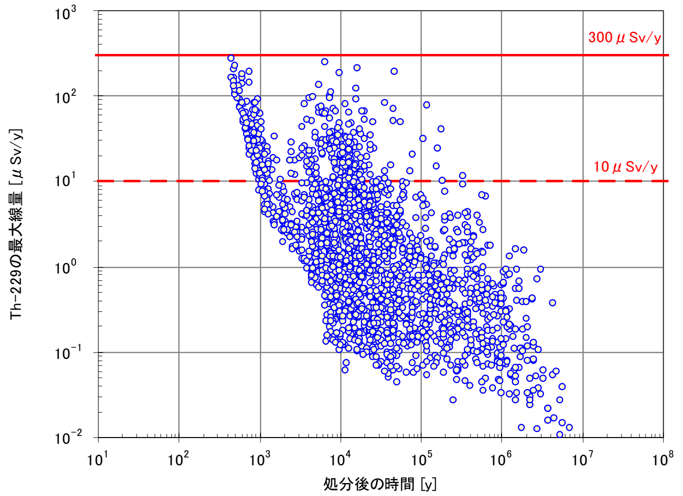


図 5.2.3-26 パターン 2 – Th-229 – 1 次統計解析の結果

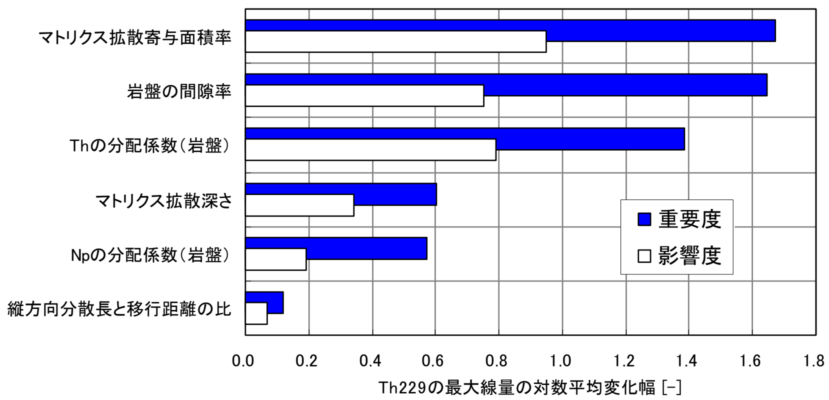


図 5.2.3-27 パターン 2 – Th-229 – 1 次統計解析の結果から算出した重要度・影響度

まず，ここでは，性能目標が 10μSv/y の場合に，相対的な重要度の高いマトリクス拡散寄与面積率と岩盤の間隙率の組み合わせから成立条件の抽出を試みることとした。パターン 2 - Th-229 - 1 次統計解析の結果を用いて，マトリクス拡散寄与面積率および岩盤の間隙率をそれぞれ横軸，縦軸にとり，Th-229 の最大線量が 10μSv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした結果を図 5.2.3-28 に示す。さらに，Th-229 の最大線量が 10

μSv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線を合わせて示す。この境界線よりも右側の領域は，Th-229 の線量が 10μSv/y 以下となるマトリクス拡散寄与面積率と岩盤の間隙率の組み合わせの候補を表している。ここでは，成立条件の推定値の例として，図中に示した赤丸の部分（マトリクス拡散寄与面積率：0.5，岩盤の間隙率：0.3）を任意に選択し，それを成立条件の推定値とした。

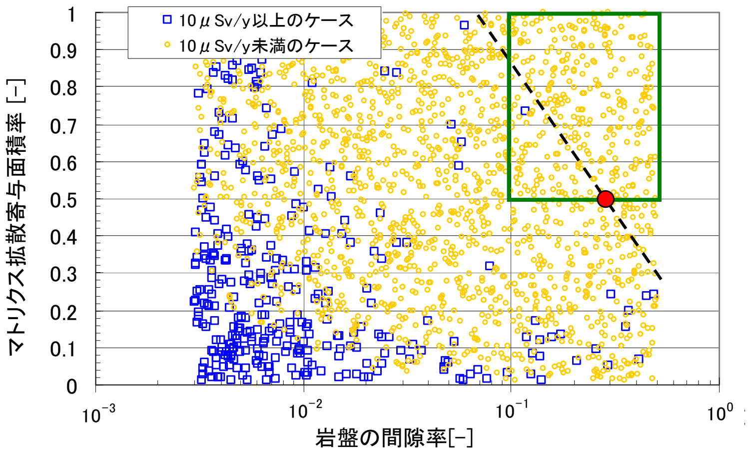


図 5.2.3-28　パターン 2 − Th-229 − 1 次解析による成立条件の推定
（性能目標：10μSv/y，マトリクス拡散深寄与面積率，岩盤の間隙率）

ここで，推定した Th-229 の成立条件（性能目標：10μSv/y）を同定するために，マトリクス拡散寄与面積率を 0.5，岩盤の間隙率を 0.3，その他の天然バリアのパラメータを変動範囲における保守値で固定した決定論的解析を実施した（パターン 2 - Th-229 - 2 次決定論解析）。その結果，この決定論解析結果の最大値は 10μSv/y を上回った（図 5.2.3-30 参照）。同様に，図 5.2.3-28 中に示した境界線よりも右側の領域における任意の各点についても検討した結果，決定論解析結果の最大値が 10μSv/y を上回り，成立条件の推定値とはなりえなかった。このため，マトリクス拡散寄与面積率及び岩盤の間隙率以外のパラメータを加えて，成立条件の推定値を見直す必要がある。

ここでは，成立条件を効率的に見出すことができそうなマトリクス拡散寄与面積率と岩盤の間隙率の領域として，マトリクス拡散寄与面積率 0.5 以上及び岩盤の間隙率 0.1 以上の領域（図 5.2.3-28 中の緑色の線で囲まれた領域）に着目した。そして，着目した領域の変動範囲および，これらのパラメータの次に重要度が高い Th の分配係数（岩盤）とマトリクス拡散深さに表 3.5-1 の変動範囲を設定し，その他のパラメータに保守値を設定した統計解析を実施した（パターン 2 - Th-229 - 3 次統計解析）。この統計解析の結果から，マトリクス拡散寄与面積率およびマトリクス拡散深さをそれぞれ縦軸，横軸にとり，Th-229 の最大線量が 10μSv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした結果を図 5.2.3-29 に示す。さらに，Th-229 の最大線量が 10μSv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線についても合わせて示す。この境界線よりも右側の領域は，Th-229 の線量が 10μSv/y 以下となる Th の分配係数（岩盤）とマトリクス拡散深さの組み合わせの候補を表し

ている。ここでは，成立条件の推定値の例として，図中に示した黒丸の部分（Th の分配係数（岩盤）：1 m³/kg，マトリクス拡散深さ：0.2m）を任意に選択し，それを成立条件の推定値とした。

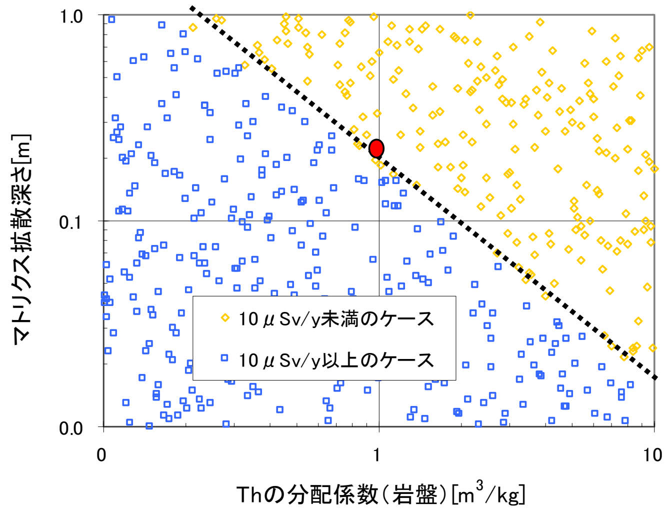


図 5.2.3-29 パターン 2 – Th-229 – 3 次統計解析による成立条件の再推定
（性能目標：10μSv/y，Th の分配係数（岩盤），マトリクス拡散寄与面積率）

ここで，推定した成立条件を確認するために，Th の分配係数（岩盤）を 1m³/kg，マトリクス拡散深さを 0.2m，マトリクス拡散寄与面積率 0.5，岩盤の間隙率を 0.1，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 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（パターン 2 - Th-229 - 4 次決定論解析）。その結果，この決定論解析結果の最大値が 10μSv/y を下回ることを確認した（図 5.2.3-30 参照）。

この成立条件の妥当性を確認するために，Th の分配係数（岩盤）を 1m³/kg 以上，マトリクス拡散深さを 0.2m 以上，マトリクス拡散寄与面積率 0.5 以上，岩盤の間隙率を 0.1 以上，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 の変動範囲に設定した統計解析を実施した（パターン 2 - Th-229 - 5 次統計解析）。その結果，先の決定論解析（パターン 2 - Th-229 - 4 次決定論解析）の結果がこの統計解析の結果の上限を与えることを確認した（図 5.2.3-30 参照）。

以上の検討から，天然バリアがパターン 2 の場合に，Th の分配係数（岩盤）を 1m³/kg 以上，マトリクス拡散深さを 0.2m 以上，マトリクス拡散寄与面積率 0.5 以上，岩盤の間隙率を 0.1 以上の条件であれば，Th-229 の最大線量は 10μSv/y を下回るとの知見を得た（表 5.2.3-4 参照）。

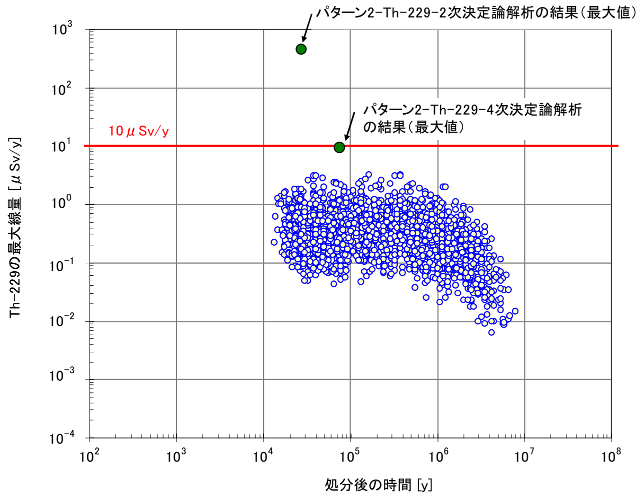


図 5.2.3-30 パターン 2 - Th-229 - 5 次統計解析による
成立条件の妥当性確認(性能目標:10μSv/y)

次に，相対的な重要度の高いマトリクス拡散寄与面積率及び岩盤の間隙率の組み合わせにより，性能目標が 300μSv/y の場合における成立条件の抽出を試みることとした。

ここでは，300μSv/y 近傍の感度特性をより詳細に把握するために，重要度が高いパラメータであるマトリクス拡散寄与面積率及び岩盤の間隙率に表 3.5-1 の変動範囲を設定し，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 の変動範囲における保守値を設定した統計解析を実施した（パターン 2 - Th-229 - 6 次統計解析）。この統計解析の結果を用いて，マトリクス拡散寄与面積率および岩盤の間隙率をそれぞれ横軸，縦軸にとり，Th-229 の最大線量が 300μSv/y を超える場合と超えない場合を区別してプロットした結果を図 5.2.3-31 に示す。さらに，Th-229 の最大線量が 300μSv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線を図 5.2.3-31 に合わせて示す。この境界線よりも右側の領域は，Th-229 の線量が 300μSv/y 以下となるマトリクス拡散寄与面積率と岩盤の間隙率の組み合わせの候補を表している。

ここでは，成立条件の推定値の例として，図中に示した黒丸の部分（マトリクス拡散寄与面積率：0.9，岩盤の間隙率：0.09）を任意に選択し，それを成立条件の推定値とした。

ここで，推定した成立条件を確認するために，マトリクス拡散寄与面積率を 0.9，岩盤の間隙率を 0.09, その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 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（パターン 2 - Th-229 - 7 次決定論解析）。その結果，この決定論解析の最大値は，300μSv/y を下回ることを確認した（図 5.2.3-32 参照）。

この成立条件の妥当性を確認するために，マトリクス拡散寄与面積率を 0.9 以上，岩盤の間隙率を 0.09 以下，その他の天然バリアのパラメータを表 3.5-1 の変動範囲に設定した統計解析を実施した（パターン 2 - Th-229 - 8 次統計解析）。その結果，先の決定論解析の結果（パターン 2 - Th-229 - 6 次決定論解析）の結果が，この統計解析の結果の上限を与えることが確認できる（図 5.2.3-34 参照）。

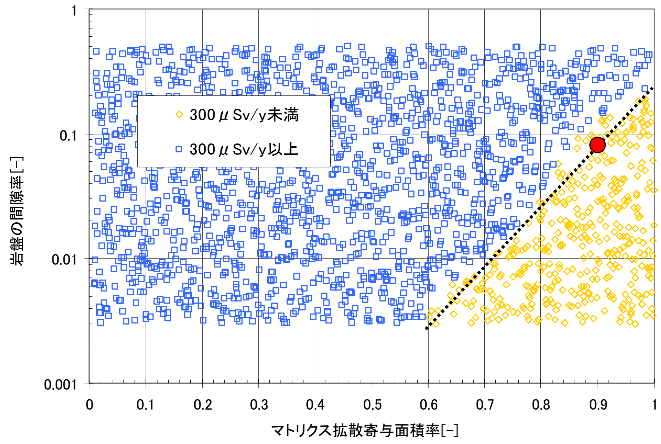


図 5.2.3-31　パターン 2 – Th-229 – 6 次統計解析による成立条件の推定
（性能目標：300 μ Sv/y，マトリクス拡散深さ，岩盤の間隙率）

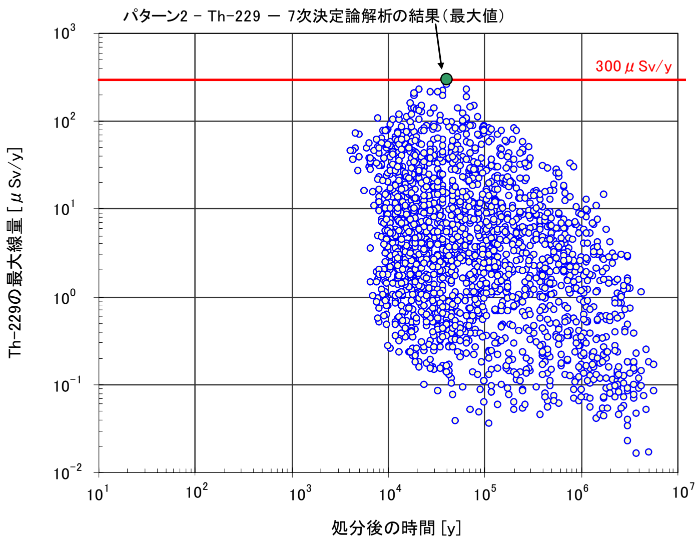


図 5.2.3-32　パターン 2 – Th-229 – 8 次統計解析による
成立条件の妥当性確認（性能目標 300 μ Sv/y）

以上の検討から，天然バリアがパターン 2 の場合に，マトリクス拡散寄与面積率が 0.8 以上，岩盤の間隙率が 0.02 以下であれば，Th-229 の最大線量は 300 μ Sv/y を下回るとの知見を得た（表 5.2.3-4 参照）。

表 5.2.3-4　極端な人工バリアおよび水理パラメータがパターン 2 を
想定した場合における Th-229 の成立条件の例

パラメータ	成立条件						変動範囲			第2次取りまとめレファレンスケースの設定値
	目標線量：10 μ Sv/yの場合			目標線量：300 μ Sv/yの場合						
透水量係数分布の平均値[m²/s]	1×10^{-8}						1×10^{-11}	～	1×10^{-6}	1×10^{-10}
動水勾配[−]	0.01						0.001	～	0.23	0.01
亀裂開口幅の係数[−]	2						0.1	～	10	2
縦方向分散長と移行距離の比[−]	変動範囲全域			変動範囲全域			1	～	100	10
マトリクス拡散深さ[m]	0.2	～	1	変動範囲全域			0.01	～	1	0.1
マトリクス拡散寄与面積率[−]	0.5	～	1	0.9	～	1	0.01	～	1	0.5
岩盤の間隙率[−]	0.1	～	0.5	0.003	～	0.09	0.003	～	0.5	0.02
Npの分配係数（岩盤）[m³/kg]	変動範囲全域			変動範囲全域			0.005	～	10	1
Thの分配係数（岩盤）[m³/kg]	1	～	10	変動範囲全域			0.1	～	10	1

5) 合計線量

ここでは，個々の核種毎に抽出した成立条件（表 5.2.3-1～表 5.2.3-4）が，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。この際，核種間に共通する成立条件のパラメータについては，抽出した成立条件のうち最も保守的な値で固定し，その他のパラメータについては，表 3.5-1 の変動範囲のうちの保守値で固定した決定論解析を実施した。その結果，4 核種の合計線量が，10μSv/y および 300μSv/y を越えないことをそれぞれ確認し（図 5.2.3-33 及び図 5.2.3-34 参照），成立条件を特定した（表 5.2.3-5 参照）。

表 5.2.3-5 極端な人工バリアおよび水理パラメータがパターン 2 を想定した場合における成立条件の例

パラメータ	成立条件		変動範囲	第2次取りまとめレファレンスケースの設定値
	目標線量:10μSv/yの場合	目標線量:300μSv/yの場合		
透水量係数分布の平均値[m^2/s]	1×10^{-8}		1×10^{-11} ～ 1×10^{-6}	1×10^{-10}
動水勾配[−]	0.01		0.001 ～ 0.23	0.01
亀裂開口幅の係数[−]	2		0.1 ～ 10	2
縦方向分散長と移行距離の比[−]	変動範囲全域	変動範囲全域	1 ～ 100	10
マトリクス拡散深さ[m]	0.2 ～ 1	変動範囲全域	0.01 ～ 1	0.1
マトリクス拡散寄与面積率[−]	0.5 ～ 1	0.9 ～ 1	0.01 ～ 1	0.5
岩盤の間隙率[−]	0.1 ～ 0.5	0.02 ～ 0.09	0.003 ～ 0.5	0.02
Csの分配係数（岩盤）[m^3/kg]	5 ～ 10	1 ～ 10	0.001 ～ 10	0.05
Seの分配係数（岩盤）[m^3/kg]	0.01 ～ 0.1	0.01 ～ 0.1	1×10^{-8} ～ 0.1	0.01
Npの分配係数（岩盤）[m^3/kg]	1 ～ 10	1 ～ 10	0.005 ～ 10	1
Thの分配係数（岩盤）[m^3/kg]	1 ～ 10	変動範囲全域	0.1 ～ 10	1

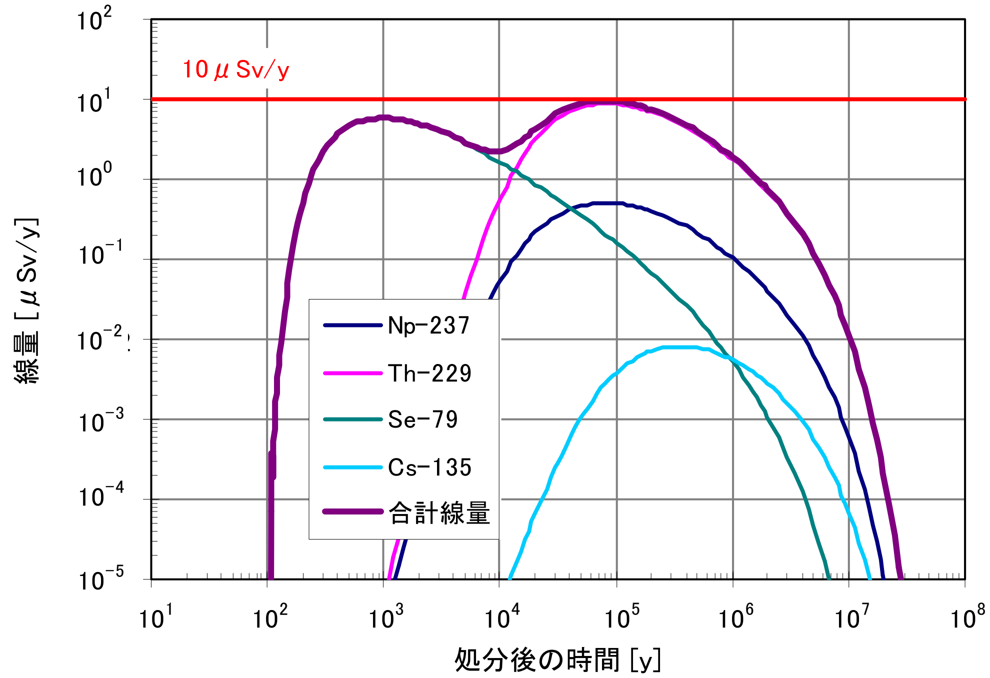


図 5.2.3-33 パターン 2 − 合計線量 − 決定論解析の結果(性能目標:10 μ Sv/y)

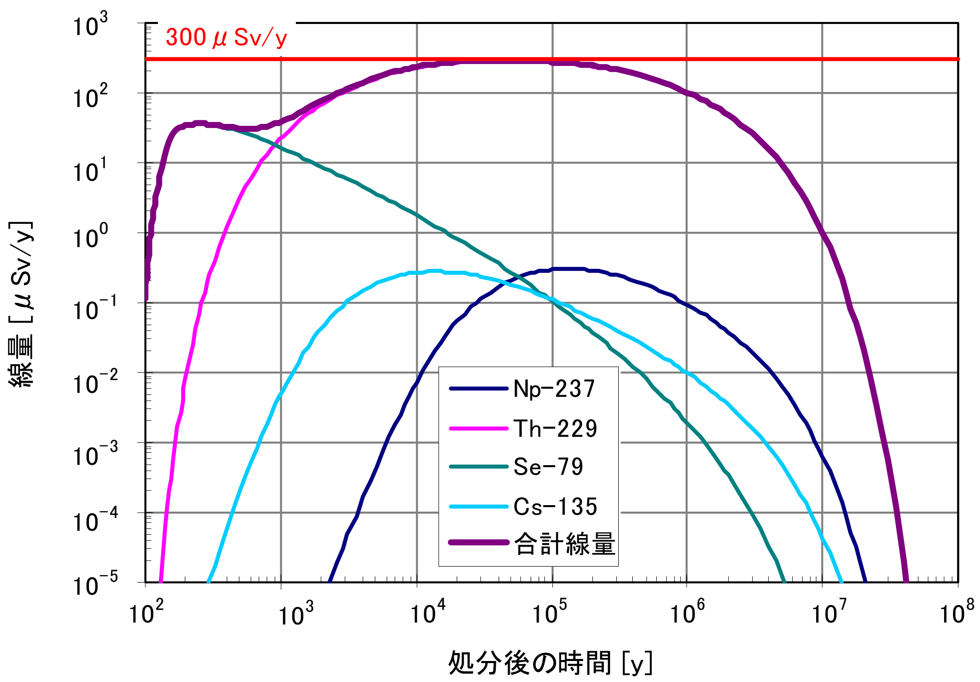


図 5.2.3-34 パターン 2 − 合計線量 − 決定論解析の結果(性能目標:300 μ Sv/y)

5.3 天然バリアのパラメータの成立条件に関する考察

本節では，極端な人工バリアを想定して，水理パラメータ，および収着とマトリクス拡散に係るパラメータに着目して抽出した成立条件について整理・考察する。

5.2 節において抽出した成立条件を以下に示す。また，成立条件の一覧を表 5.3-1 および表 5.3-2 に示す。

- 本検討で設定した変動範囲内において，透水量係数分布の平均値が $1\times10^{-11}m^2/s$ 以下，動水勾配が 0.0015 以下，亀裂開口幅の係数が 8 以上であれば，線量は 10 μSv/y を下回る。
- 水理パラメータがパターン 1 の場合に，本検討で設定した変動範囲内において，マトリクス拡散寄与面積率が 0.91 以上，Se の分配係数が $0.001m^3/kg$ 以上，Cs の分配係数が $0.01m^3/kg$ 以上, および Np の分配係数が $0.02m^3/kg$ 以上であれば，線量は 10 μSv/y を下回る。
- 水理パラメータがパターン 2 の場合に，本検討で設定した変動範囲内において，マトリクス拡散寄与面積率が 0.5 以上，マトリクス拡散深さが 0.2m 以上，岩盤の空隙率が 0.1 以上，Se の分配係数が $0.01m^3/kg$ 以上，Cs の分配係数が $5m^3/kg$ 以上，Np の分配係数が $1m^3/kg$ 以上，および Th の分配係数が $1m^3/kg$ 以上であれば，線量は 10 μSv/y を下回る。

- 本検討で設定した変動範囲内において, 透水量係数分布の平均値が $1.4\times10^{-11}m^2/s$ 以下であれば，線量は 300 μSv/y を下回る。
- 水理パラメータがパターン 1 の場合に，本検討で設定した変動範囲内において，マトリクス拡散寄与面積率が 0.02 以上であれば，線量は 300 μSv/y を下回る。
- 水理パラメータがパターン 2 の場合に，本検討で設定した変動範囲内において，マトリクス拡散寄与面積率が 0.9 以上，岩盤の空隙率が 0.02 から 0.09 の範囲，Se の分配係数が $0.01m^3/kg$ 以上，Cs の分配係数が $1m^3/kg$ 以上，および Np の分配係数が $1m^3/kg$ 以上であれば，線量は 300 μSv/y を下回る。なお，この成立条件を性能目標が 10 μSv の成立条件と比較すると，性能目標が 300 μSv/y の場合におけるマトリクス拡散寄与面積率は，厳しい値が要求されている。これは，性能目標が 300 μSv/y の場合には，マトリクス拡散深さを制限する必要がない代わりに，マトリクス拡散寄与面積率をより高く制限する必要があるためと考える。

10 μSv/y および 300 μSv/y を下回るためには，透水量係数分布の平均値および動水勾配などの水理パラメータの条件が厳しくなればなるほど，それ以外のパラメータ，すわなち，収着やマトリクス拡散に係るパラメータに対する制約は大きくなる。これは，本検討における対象核種に対して，透水量係数分布の平均値や動水勾配の変動に応じて，それぞれの

核種の最大線量が大きく変動するため（図 5.1-3 参照）である。このような天然バリアの補完的な性能を利用することにより，頑健なバリアを構築できる可能性がある.

表 5.3-1 極端な人工バリアを想定して抽出した成立条件の例（性能目標：10μSv/y）

パラメータ		単位	水理パラメータに着目		収着およびマトリクス拡散に係るパラメータに着目（パターン1）		収着およびマトリクス拡散に係るパラメータに着目（パターン2）	
透水量係数分布の平均値		m^2/s	1×10^{-11}	以下	1×10^{-10}		1×10^{-8}	
動水勾配		−	0.0015	以下	0.01		0.01	
亀裂開口幅の係数		−	9	以上	2		2	
縦方向分散長と移行距離の比		−	変動範囲全域		変動範囲全域		変動範囲全域	
マトリクス拡散深さ		m	変動範囲全域		変動範囲全域		0.2	以上
マトリクス拡散寄与面積率		−	変動範囲全域		0.91	以上	0.5	以上
岩盤の空隙率		−	変動範囲全域		変動範囲全域		0.1	以下
分配係数（岩盤）	Se	m^3/kg	変動範囲全域		0.001	以上	0.01	以上
	Cs		変動範囲全域		0.01	以上	5	以上
	Np		変動範囲全域		0.02	以上	1	以上
	Th		変動範囲全域		変動範囲全域		1	以上

表 5.3-2 極端な人工バリアを想定して抽出した成立条件の例（性能目標：300μSv/y）

パラメータ		単位	水理パラメータに着目		収着およびマトリクス拡散に係るパラメータに着目（パターン1）		収着およびマトリクス拡散に係るパラメータに着目（パターン2）	
透水量係数分布の平均値		m^2/s	1.4×10^{-11}	以下	1×10^{-10}		1×10^{-8}	
動水勾配		−	変動範囲全域		0.01		0.01	
亀裂開口幅の係数		−	変動範囲全域		2		2	
縦方向分散長と移行距離の比		−	変動範囲全域		変動範囲全域		変動範囲全域	
マトリクス拡散深さ		m	変動範囲全域		変動範囲全域		変動範囲全域	
マトリクス拡散寄与面積率		−	変動範囲全域		0.02	以上	0.9	以上
岩盤の空隙率		−	変動範囲全域		変動範囲全域		0.02 ～	0.09
分配係数（岩盤）	Se	m^3/kg	変動範囲全域		変動範囲全域		0.01	以上
	Cs		変動範囲全域		変動範囲全域		1	以上
	Np		変動範囲全域		変動範囲全域		1	以上
	Th		変動範囲全域		変動範囲全域		変動範囲全域	

以上の検討より，抽出した成立条件を個別現象研究における目標値の例として，水理パラメータに関する研究の充実は，重要な研究課題となりうることが示唆された。また，岩盤への収着及びマトリクス拡散に関する研究の充実は，水理パラメータの不確実性を補完するための頑健なバリア構築という観点から，重要な研究課題となりうることが示唆された。

以上のような定量的な情報の例示は，段階的に進められる地層処分事業において，効率的な研究開発計画の策定に資するものと考える。なお，本検討は，極端な人工バリアを想定して，水理パラメータ，あるいは,収着やマトリクス拡散に係るパラメータに着目して検討した一例である。このため，サイト特性に関連するパラメータが性能指標に及ぼす影響を適切に把握するためには，人工バリアのパラメータなどを他の値で固定し，その固定値に応じた解析，対象核種を拡充した解析や高度化された核種移行解析モデルを用いた解析などが必要となる。サイト特性に基づいて十分な裕度を見込んだバリアシステムを構築するためには，このような複数の解析から得られる情報を出発点として，個別現象研究と連携し，優先的に取り組むべき研究課題を同定していく必要がある。

6. おわりに

本検討を通じて，十分な裕度を見込んだバリアシステムの構築に資する定量的な情報を，包括的感度解析手法を用いて抽出可能であることを示した。さらには，一方のバリアが保守的な条件下での，人工バリアと天然バリアのパラメータの成立条件が抽出された。このような手法の適用性の検討や抽出された成立条件は，地層処分計画の初期段階におけるシナリオ解析や十分な裕度を見込んだバリアシステムの構築に資するものと考える。

なお，本検討を通じて抽出された人工バリアと天然バリアの成立条件は，保守的な条件において，工学的対策およびサイト特性の観点から検討した一例である。このため，分析対象とするパラメータの感度特性を適切に把握するためには，他のパラメータを他の値で固定した解析，対象核種を拡充した解析や高度化された核種移行解析モデルを用いた解析などの多様な解析を行う必要がある。また，多様な解析を効率的に行うために，包括的感度解析手法の高度化（たとえば，SI 法（高瀬ほか，2006[16)]）などの他の統計手法を取り込み）に関して検討する必要がある。さらに，多様な解析から抽出される感度特性を適切にシナリオ解析へ反映するために，その具体的な方法論に関して検討する必要がある。

謝辞

本報告書を作成するにあたり，地層処分研究開発部門　地層処分基盤研究開発ユニット　システム性能研究グループ　宮原要グループリーダー，および同部門，同ユニット，核種移行研究グループ　吉川英樹サブグループリーダーには，有益な助言を頂きました。また，地層処分研究開発部門　地層処分基盤研究開発ユニット　システム性能研究グループ　稲垣学氏，川村淳氏，河内進氏，加藤智子氏，仲島邦彦氏，鈴木祐二氏および蛯名貴憲氏には，研究計画の策定や解析結果の解釈について貴重な議論をさせて頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

[1]Chapman,N. and McCombie,C.: "PRINCIPLES AND STANDARDS FOR THE DISPOSAL OF LONG-LIVED RADIOACTIVE WASTES", Waste Management Series Volume 3, ELSEVIER, pp.195-199 (2003).

[2]Takao Ohi, Hiroyasu Takase, Manabu Inagaki, Kiyoshi Oyamada, Tomoyuki Sone, Morihiro Mihara, Takeshi Ebashi and Kunihiko Nakajima: "Application of a comprehensive sensitivity analysis method on the safety assessment of TRU waste disposal in JAPAN", Mater. Res.Soc. Symp. Proc. Vol. 985, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXX, 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－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－", 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, pp.36-65 (2004).

[5]原子力委員会・長半減期低発熱放射性廃棄物処分技術検討会: "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－", 平成 18 年 4 月 18 日 (2006).

[6]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", サイクル機構技報, No14, JNC TN1340 2001-010, pp.149-160 (2002).

[7]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－ 分冊 3 地層処分システムの安全評価", サイクル機構技術資料, JNC TN1400 99-023（1999）.

[8]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）", サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2005-004 (2005).

[9]Golder Associates: "GoldSim Contaminant Transport Module User's Guide", Golder Associates Inc (2002).

[10]原子力安全委員会・原子力安全総合専門部会: "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 3 月 10 日 (2004).

[11]ICRP: "Radiological Protection Policy for the Disposal of Radioactive waste", ICRP Publication77, Pergamon press, Oxford, UK (1998).

[12]ICRP: "Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste", ICRP Publication81, Pergamon press, Oxford, UK (2000).

[13]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", (1988).

[14]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"，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-071 (1999).

[15]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"，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-072 (1999).

[16]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,Vol.13, No.1, pp.13-22 (2006).

付録 1 頑健性に関する整理

頑健性に関しては，既往の文献において，以下のような整理がなされている（付図1-1 参照）。

頑健性の基本概念としては，システムのデザインや将来挙動の分析結果が，入力として用いられるデータや前提条件などの不確実性に対して影響を受けにくいことと定義される（Chapman and McCombie,2003）。

この頑健性の基本概念は，システムの頑健性と，頑健性が確保されたシステムに対する頑健な性能評価に分類される（Chapman and McCombie,2003:McCombie et al.,1991）。

システムの頑健性は，

- 理解や透明性を向上させるような複雑でない地質学的特徴，物理的性質，化学的性質，システムのデザイン
- 個々の構成要素における十分な安全係数
- 処分システムのある程度の冗長性

に基づくものである。なお，OECD/NEA(1999)においては，システムの頑健性を以下のように分類して表現している。

- レイアウトの変更やバリア寸法の増加やより耐久性の高い廃棄体などの安全性に関する性能を改良するような工学的対策に基づく頑健性
- 有害な現象や不確実性要因を避けるようなサイト選定や工学的対策に基づく固有の頑健性

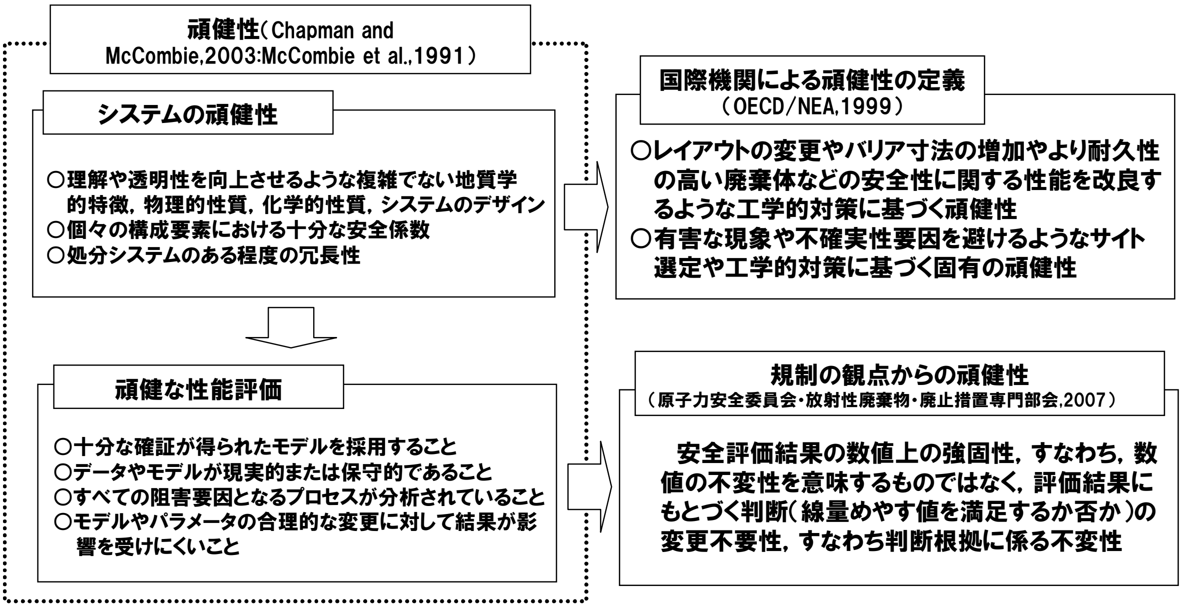
一方，頑健性が確保されたシステムに対する頑健な性能評価は，

- 十分な確証が得られたモデルを採用すること
- データやモデルが現実的または保守的であること
- すべての阻害要因となるプロセスが分析されていること
- モデルやパラメータの合理的な変更に対して結果が影響を受けにくいこと

に基づくものである。なお，原子力安全委員会・放射性廃棄物・廃止措置専門部会(2007)においては，頑健性を，「安全評価結果の数値上の強固性，すなわち，数値の不変性を意味するものではなく，評価結果にもとづく判断（線量めやす値を満足するか否か）の変更不要性，すなわち判断根拠に係る不変性」と定義している。このことは，上述の頑健な性能評価に資するものと考えられる。

これらの文献では，頑健な性能評価のためにはシステムの頑健性の確保が必要と捉えられている。本検討の着眼点は，十分な裕度を見込んだバリアシステムの構築に資する定量的な情報の抽出である。このため，上述のシステムの頑健性と頑健な性能評価の関係とは逆に，保守的なデータを用いた感度解析を通じて，多様な不確実性を考慮したと

しても安全性が損なわれないようなシステムの条件を，工学的対策およびサイト特性の観点から抽出することとする。



付図 1-1　既往の文献に基づく頑健性の整理

参考文献

[1]Chapman,N. and McCombie,C.: "PRINCIPLES AND STANDARDS FOR THE DISPOSAL OF LONG-LIVED RADIOACTIVE WASTES", Waste Management Series Volume 3, ELSEVIER, pp.195-199 (2003).

[2]McCombie,C., Zuidema,P. and McKinley,I.G.: "Sufficient Validation:The value of robustness in performance assessment and system design", Validation of geosphere flow and transport models(Geoval), OECD/NEA, Paris, France (1991).

[3]OECD/NEA: "Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories -Its Development and Communication-", pp.29-34 (1999).

[4]原子力安全委員会・放射性廃棄物・廃止措置専門部会: "低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方（中間報告）（案）", 平成 19 年 7 月 5 日 (2007).

付録 2 包括的感度解析手法

包括的感度解析手法の主な構成要素は，統計的手法に基づくパラメータの感度解析と様々な現象を可能な限り取り込んだパラメータ設定である。ここでは，統計的手法に基づくパラメータの感度解析について，第２次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005：以下，「TRU 第２次取りまとめ」という）に基づき，重要パラメータの抽出，パラメータの影響特性の把握，成立条件の抽出についての各手順を再掲する。なお，成立条件の抽出手順については，本検討において若干の改良を加えていることから，TRU 第２次取りまとめの記述に一部加筆した。

重要パラメータの抽出及びパラメータの影響特性の把握

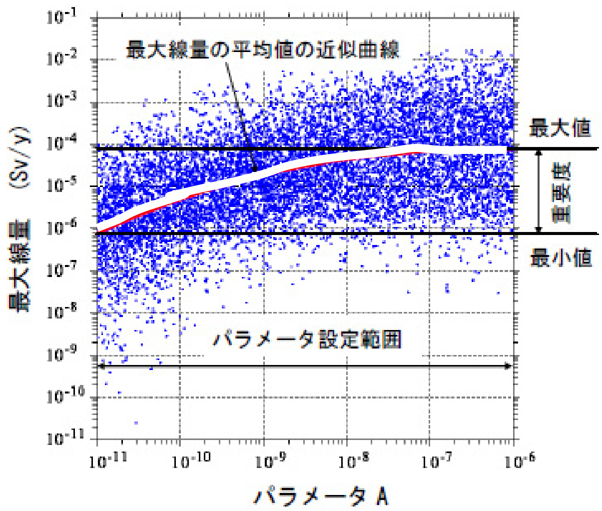
包括的感度解析手法においては，複数のパラメータに保守性を考慮した変動範囲を設定する。この際，それぞれ異なる変動範囲を有するパラメータから，解析に用いるパラメータ値をサンプリングし，それらを組み合わせ，十分な統計量が得られるように多数回の核種移行解析を行う。このようにして得られる結果を，横軸にパラメータの変動範囲（対数），縦軸に最大線量（対数）とした 2 次元平面に展開し，以下の手順で重要度の高いパラメータを同定する（付図 2-1 参照）。

① パラメータを任意の数のバンドに分割する。

② それぞれのバンドに含まれる解析結果（最大線量）の平均値をバンドごとに算出し，それらの平均値に最小二乗法を適用し，近似多項式を求める。

③ 近似多項式で表現される近似曲線の最大値と最小値の差を重要度として算出する。

④ パラメータの変動率（最大値-最小値）に対する重要度の比（重要度／パラメータの変動率）を影響度として算出する。



付図 2-1 重要度の高いパラメータの同定事例（TRU 第2取りまとめより引用）

このようにして定量化された個々のパラメータの重要度を相対的に比較し，重要度の高いパラメータを同定する。さらに，ここで得られる近似曲線は，パラメータの変動による線量の変化の傾向が得られる重要な情報となる。これらの傾向を様々な観点から検討することによりパラメータの影響特性が得られる。

成立条件の抽出

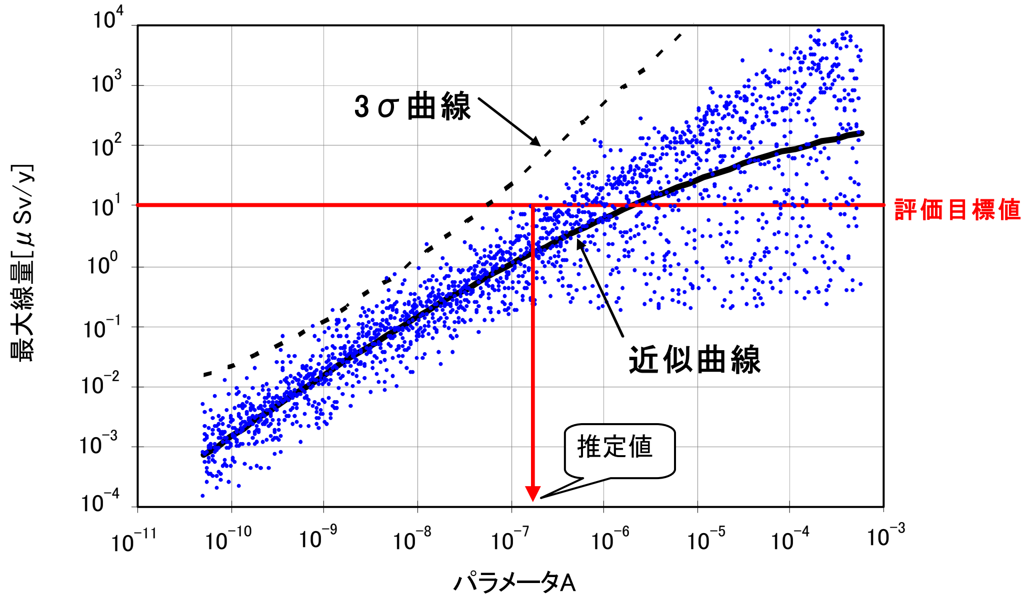
成立条件の抽出においては，工学技術や地質環境調査への反映という観点から，重要度の高い少数のパラメータで構成されることが効率的と考えられる。

以下に，成立条件の推定，成立条件の同定，成立条件の妥当性確認という抽出手順について示す。

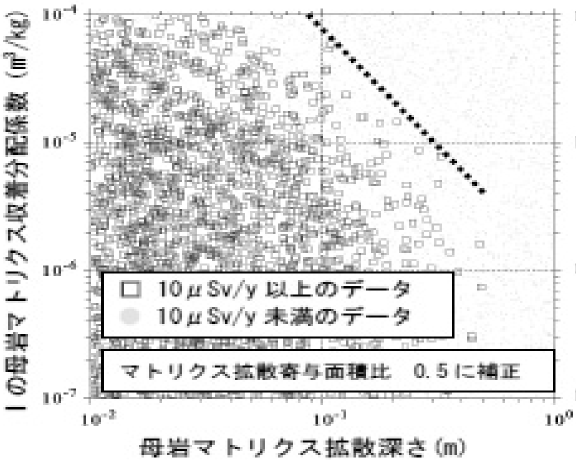
成立条件の推定：

従来の包括的感度解析手法では，バンドごとに平均値から3σの値を算出し，その3σのラインと目標とする評価目標値のラインの交点の存在の有無を目安に，成立条件の候補となる値を推定していた。しかしながら，この推定方法では，統計解析結果のバラツキが大きい場合にσの値が過剰に評価され，成立条件の推定値が効率的に見出せなくなるという問題が生じる。

そこで，本検討では，評価目標値のラインとプロットの上限との交点（付図 2-2 参照），あるいは，評価目標値を下回るパラメータの組合せ（付図 2-3 参照）から成立条件の推定値を見出すこととした。



付図 2-2 評価目標のラインとプロットの上限との交点から推定値を抽出する例



付図 2-3　評価目標値を下回るパラメータの組み合わせから推定値を抽出する例
（TRU 第2取りまとめより引用）

成立条件の同定：

成立条件を同定するため，推定した成立条件に係るパラメータを推定値で固定し，さらに，それ以外のパラメータを変動範囲内の保守値に設定した決定論的な解析を行い，この結果と評価目標値を比較し，評価目標値以下となることを確認する。

目標線量にならない場合は，推定した成立条件に係るパラメータを変動範囲内で変動させ，それ以外のパラメータを変動範囲内の保守値に設定した解析や，推定した成立条件に係るパラメータについて効果的に成立条件を見出せそうな範囲で制限した解析を行い，この結果と目標線量を比較し，目標線量となるパラメータの値又は，それらの組み合わせ値を特定する。

成立条件の妥当性確認：

同定した成立条件に係るパラメータ以外のパラメータを変動させた統計解析を行い，成立条件の同定において用いた決定論的解析の結果が，統計解析の結果の上限を与えることを確認する。

統計解析の結果が決定論的解析の結果を上回る場合には，その原因を探るとともに，成立条件の同定において実施したパラメータの保守値の設定について見直しを行う。

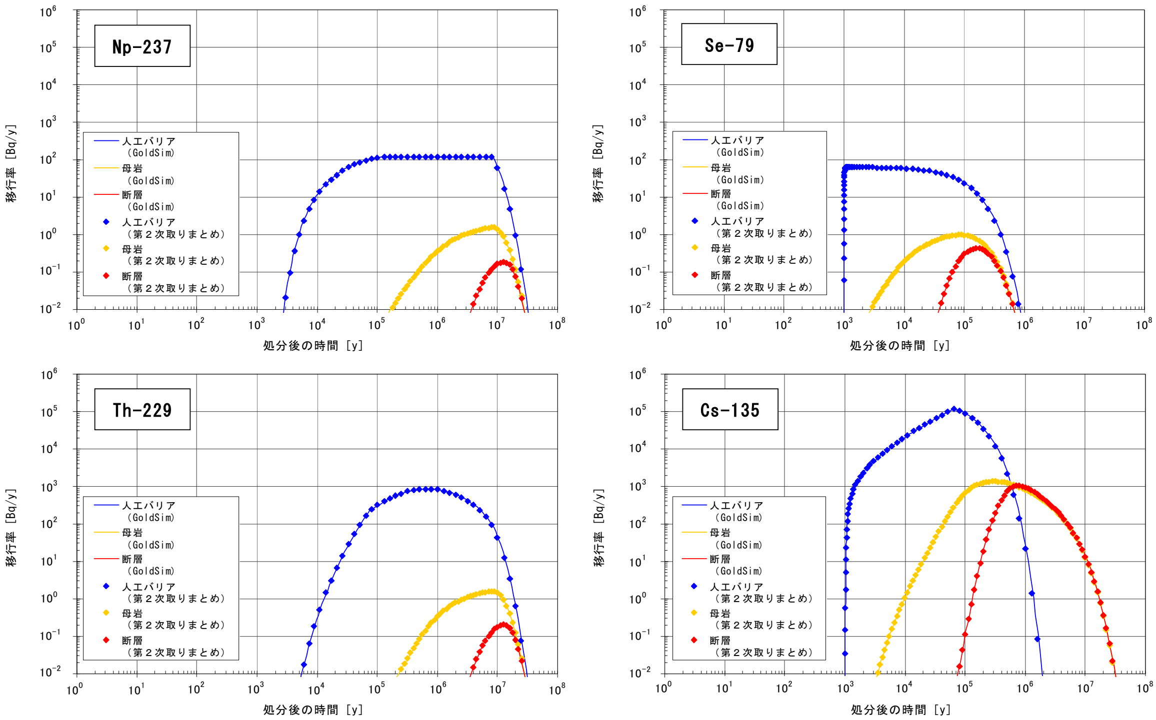
参考文献

[1]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－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－”，JNC TY1400 2005-013，FEPC-TR2-2005-02 (2005).

付録 3 解析コードの確認

ここでは，核種移行モデルの検証を行うために，GoldSim を用いて構築された核種移行モデルから得られる移行率と第２次取りまとめにおいて用いられた解析コードである MESHNOTE 及び MATRICS から得られる移行率との比較を行った（付図 3-1 参照）。

その結果，GoldSim を用いて算出した各バリアからの核種移行率が，MESHNOTE(Wakasugi et al,1999)および MATRICS（白川ほか，2000）から算出した各バリアからの核種移行率とほぼ一致していることを確認した。



付図 3-1 ベンチマーク計算の結果

参考文献

[1]Golder Associates: “GoldSim Contaminant Transport Module,User’s Guide”, Golder Associates Inc (2002).

[2]Wakasugi.K, Makino.H, et al.: “The Development of MESHNOTE Code for Radionuclide Migration in the Near Field”, JNC TN8400 99-095 (1999).

[3]白川敏彦，井尻裕二，他: “核種移行解析コード MATRICS による解析の信頼性の検証”, JNC TN8400 2000-021 (2000).

付録 4 パラメータ設定

統計解析においては，解析結果が設定したパラメータの変動範囲に依存することから，パラメータの変動範囲の設定は重要である。本検討におけるパラメータの変動範囲については，考えられる様々な現象をパラメータの不確実性として可能な限り取り込むため，保守性を考慮して幅広に設定した（本文表 3.5-1 参照）。具体的には，地層処分研究開発第２次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構，1999：以下，「第２次取りまとめ」という）や第２次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ（電気事業連合会･核燃料サイクル開発機構，2005：以下，「TRU 第２次取りまとめ」という）などの既往の検討におけるデータの上限及び下限から設定した（付表 4-1～4-2 及び付図 4-1～4-6 参照）。

なお，分布型については，Saltelli et al(2000) に基づき，詳細な分布を設定するために必要となる情報が十分に整備されていないことから，一様分布あるいは対数一様分布を設定した。

付表 4-1 人工バリアパラメータの変動範囲(1/2)

パラメータ	単位	レファレンスケース	変動範囲			備考
			最小値	最大値	分布型	
ガラス溶解速度	g/m^2/y	0.365	0.0365	2.43×10^4	対数一様	最大値については，TRU 第2次取りまとめを参考に，1 年で瞬時に全て溶出する値を設定した。 最小値については，第2次取りまとめのデータ不確実性ケースに基づき設定した。
オーバーパックの破損時期	y	1000	100	10000	discrete	処分後のある時点において，全てのオーバーパックが核種閉じ込め機能を喪失するという仮定においては，オーバーパックの破損時期に応じたインベントリが必要となる。ここでは，そのための計算ツールが十分に整備されていないことから，discrete な分布を設定した。 設定値については，第2次取りまとめのレファレンスケースを基準として感度解析的に 1 桁変動させた値を設定した。
緩衝材厚さ	m	0.7	0.1	3	一様	TRU 第2次取りまとめに基づき設定した。

付表 4-1 人工バリアパラメータの変動範囲(2/2)

パラメータ		単位	レファレンスケース	変動範囲			備考
				最小値	最大値	分布型	
実効拡散係数	Se	m^2/s	2×10^{-10}	4×10^{-11}	6.3×10^{-10}	一様	最小値は Mihara et al(2005)に基づき設定した。最大値は若杉ほか(2002)に基づき設定した。
	Cs		6×10^{-10}	4×10^{-10}	6.3×10^{-9}	一様	
	Np		3×10^{-10}	3×10^{-11}	2.2×10^{-9}	対数一様	
	Th		Np のアナログ				
溶解度	Se	mol/l	3×10^{-9}	5.1×10^{-11}	6.5×10^{-3}*1	対数一様	種々の間隙水の条件下(降水系，海水系，混合系，コンクリート接触降水系，酸化性など)における代表値や幅(東ほか，1999)より，最大値及び最小値を設定した。
	Cs		可溶性	可溶性			
	Np		5×10^{-6}	1×10^{-9}	4×10^{-5}	対数一様	
	Th		2×10^{-8}	1×10^{-9}	1×10^{-5}	対数一様	
分配係数(緩衝材)	Se	m^3/kg	0	1×10^{-6}*2	1×10^{-4}	対数一様	種々の間隙水の条件下(降水系，海水系，混合系，コンクリート接触降水系，酸化性など)における代表値や幅(柴田ほか，1999)より，最大値及び最小値を設定した。
	Cs		0.01	0.001	0.05	一様	
	Np		1	0.005	50	対数一様	
	Th		1	Np のアナログ			

*1：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。大井ほか(1997)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可溶性の値として設定した。

*2：Se の分配係数の最小値は，ゼロと同等と考えられる値を設定した。ここでは，分配係数 0 に相当する値として，緩衝材の密度(ρ：1,600[Kg/m^3])と空隙率(ε：0.41[−])を遅延係数(R)の式($R=1+(1-\varepsilon)\rho Kd/\varepsilon$)に入力し，遅延係数が 1 に近似可能と判断できる分配係数の値を設定した。

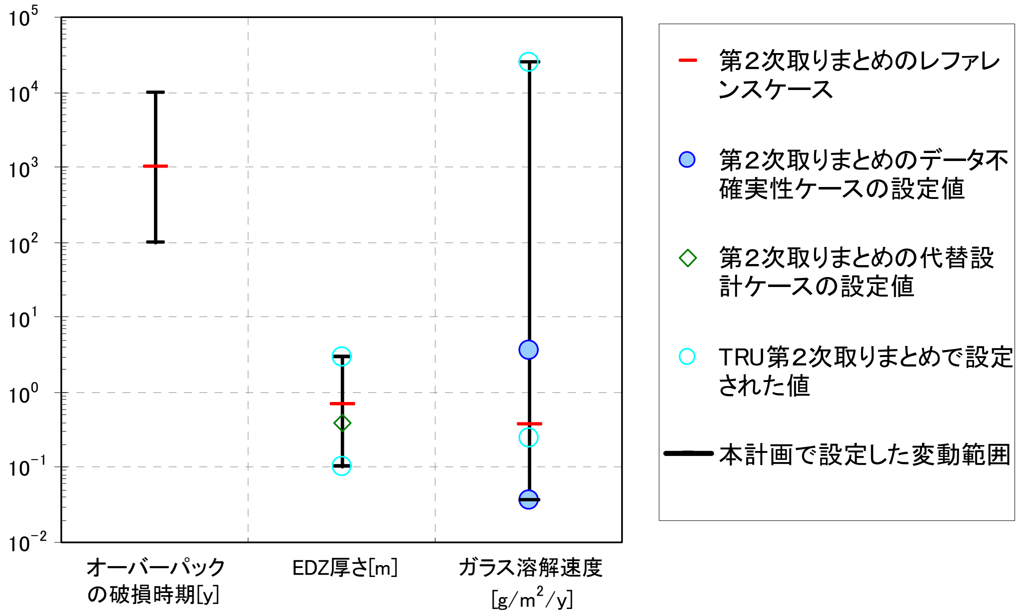
付表 4-2 天然バリアパラメータの変動範囲

パラメータ		単位	レファレンスケース	変動範囲			備考
				最小値	最大値	分布型	
動水勾配		－	0.01	0.001	0.23	一様	第2次取りまとめにおける動水勾配の最大値及び最小値に基づき設定した。
透水量係数の平均値*1		m^2/y	1×10^{-10}	1×10^{-11}	1×10^{-6}	対数一様	TRU 第2次取りまとめに基づき設定した。
亀裂開口幅の係数		－	2	0.1	10	一様	第2次取りまとめのデータ不確実性ケース及び TRU 第2次取りまとめに基づき設定した。
縦方向分散長と移行距離の比		－	10	1	100	一様	第2次取りまとめのデータ不確実性ケース及び TRU 第2次取りまとめに基づき設定した。
マトリクス拡散深さ		m	0.1	0.01	1	一様	TRU 第2次取りまとめに基づき設定した。
マトリクス拡散寄与面積率		－	0.5	0.01	1	一様	第2次取りまとめに基づき幅広に設定した。
岩盤の空隙率*2		－	0.02	0.003	0.5	対数一様	TRU 第2次取りまとめに基づき設定した。
分配係数（岩盤）	Se	m^3/kg	0.01	1×10^{-8}*3	0.1	対数一様	種々の地下水と岩を想定して設定された代表値や幅（澁谷ほか，1999）より，最大値及び最小値を設定した。
	Cs		0.05	0.001	10	対数一様	
	Np		1	0.005	10	対数一様	
	Th		1	0.1	10	一様	

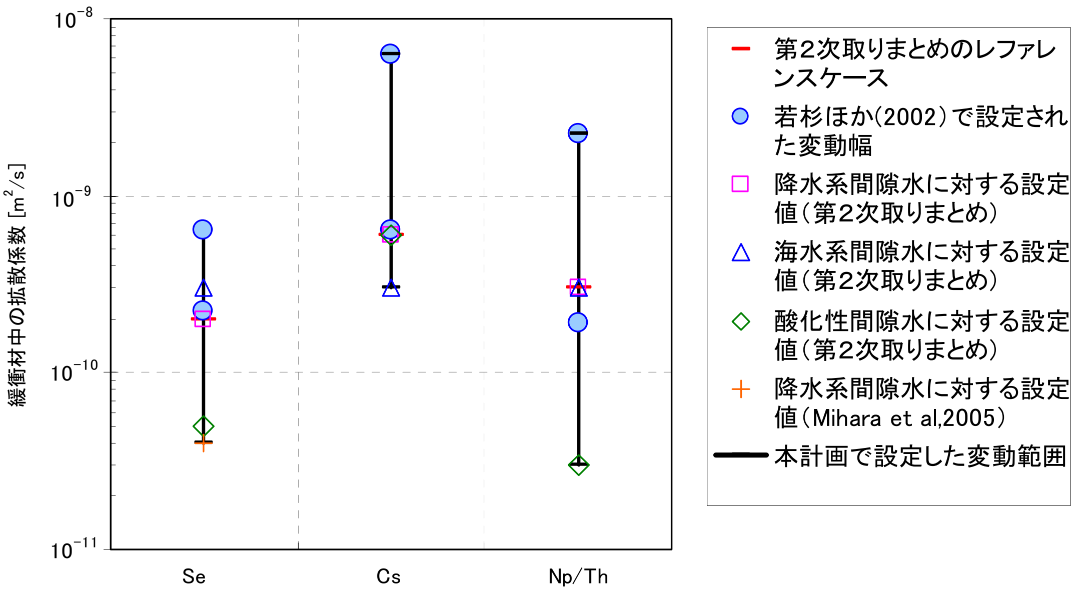
*1：EDZ 流量と相関関係を有する。

*2：乾燥密度及びマトリクス中の実効拡散係数と相関関係を有する。

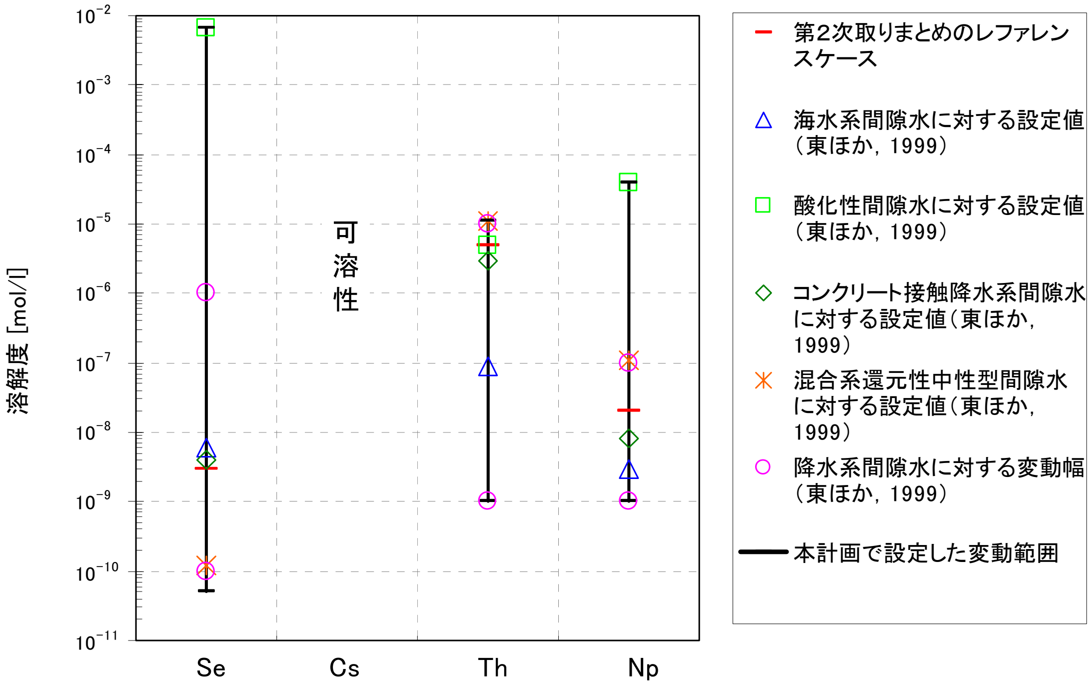
*3：Se の分配係数の最小値は，ゼロと同等と考えられる値を設定した。ここでは，岩盤の乾燥密度（ρ：2,700[Kg/m^3]）と岩盤の空隙率（θ：0.003[−]）を遅延係数(R)の式（$R=1+(1-\theta)\rho Kd/\theta$）に入力し，遅延係数が 1 に近似可能と判断できる分配係数の値を設定した。



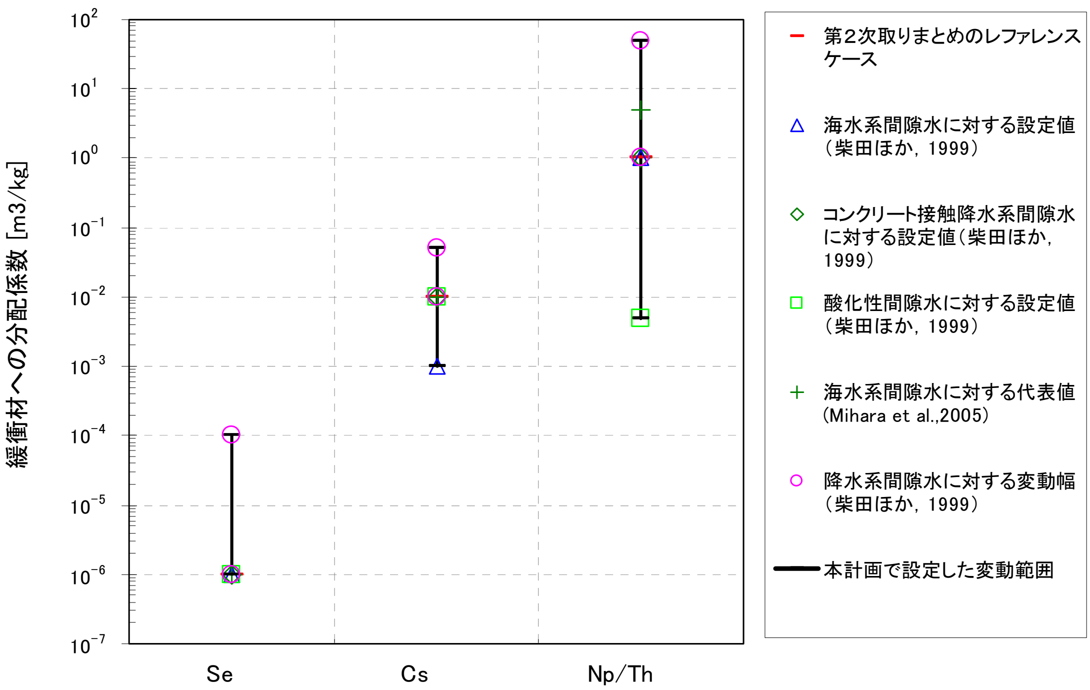
付図 4-1　オーバーパックの破損時期，緩衝材の厚さ，ガラス溶解速度の変動範囲



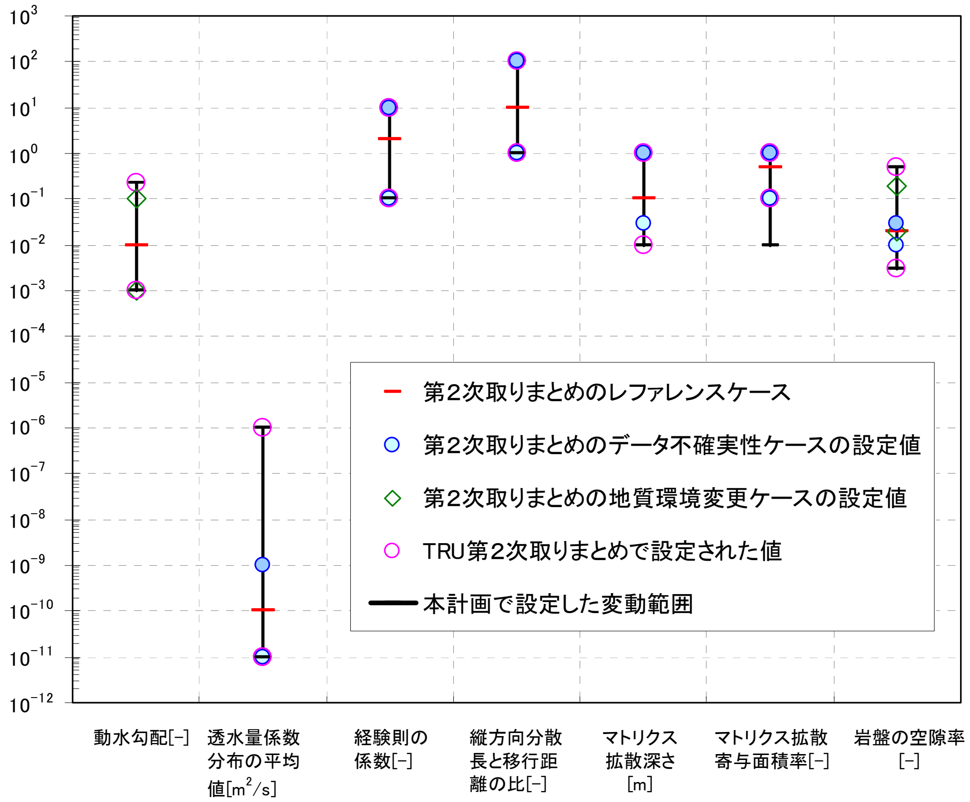
付図 4-2　緩衝材中拡散係数の変動範囲



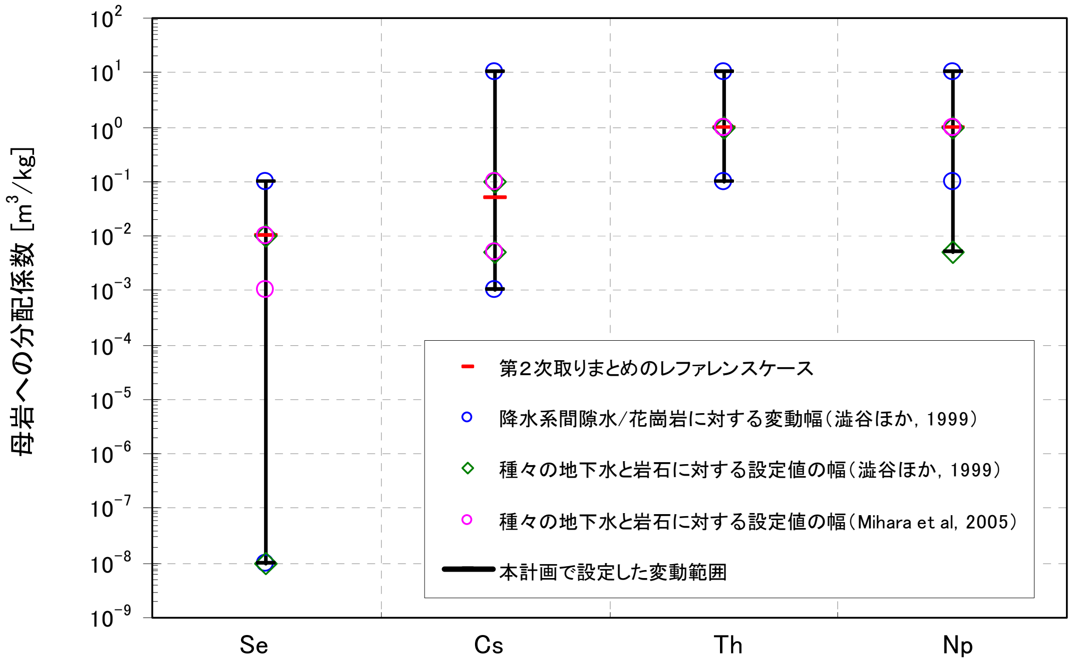
付図 4-3　溶解度の変動範囲



付図 4-4　緩衝材への分配係数の変動範囲



付図 4-5　地質環境パラメータの変動範囲



付図 4-6　母岩への分配係数の変動範囲

参考文献

[1]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− 分冊 3 地層処分システムの安全評価”, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 99-023（1999）.

[2]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－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－”, JNC TY1400 2005-013 FEPC-TR2-2005-02, pp.4-175-4-188 (2005).

[3]Saltelli.A, Chan.K, Scott.E.M.: ”Sensitivity Analysis”, WILEY, p.20-28 (2000).

[4]Mihara.M, 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).

[5]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”, サイクル機構技報, No14, JNC TN1340 2001-010, pp.149-160 (2002).

[6]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”, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-071(1999).

[7]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”, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-072 (1999).

[8]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).

[9]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”,サイクル機構技術資料, JNC TN8410 99-051 (1999).

付録 5 パラメータの感度特性に関する追加分析

ここでは，以下のパラメータの感度特性について追加分析を行った結果を示す。

- Cs-135 の統計解析結果が 2 つのグループに分割されるメカニズム
- Np の分配係数（岩盤）とマトリクス拡散寄与面積率が Th-229 の最大線量に与える影響
- 岩盤の空隙率および Cs の分配係数（岩盤）が Cs-135 の最大線量に与える影響

1. Cs-135 の統計解析結果が 2 つのグループに分割されるメカニズム

本文中の図 5.1-1 においては，Cs-135 のプロットが 2 つのグループに分かれる（最大線量の出現時間が，速いグループと遅いグループに分かれる）事象が発生している。以下では，この事象の発生メカニズムについて記述する。

まず，図 5.1-1 において出現時間が速いグループと遅いグループの中から一例として数ケースを抽出し，各ケースにおける母岩および断層からの線量をグラフ化した結果を付図 5-1 に示す。付図 5-1 より，次のことがわかる。

<u>天然バリアモデルの特徴：</u>

・ 母岩については，1 次元平行平板モデルの重ね合わせを適用する。
・ 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（対数正規分布）を 48 区間に分割し，分割した区間ごとに 1 次元平行平板モデルを適用する。
・ 母岩外側からの線量は，分割した各透水量係数を用いた亀裂から求められた線量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ことにより算出する。なお，付図 5-1 では，亀裂番号が増加するにつれて亀裂の透水量係数値が増加することとなる。
・ 断層については，母岩中の亀裂の透水量係数分布の中での最大値を適用した 1 次元平行平板モデルを用いて評価を行う。このため，断層外側における最大線量の低減は小さいと考えられる。また，断層の評価距離が長く（800m）核種の移行に時間がかかるために，断層外側における最大線量の出現時間は遅くなると考えられる。

<u>最大線量の出現時間が速いグループ：</u>

・ 最大線量の出現時間が速いグループの場合，母岩亀裂の透水量係数が小さくなるにつれて（母岩亀裂番号が小さくなるにつれて）最大線量が低減していることがわかる。
・ このため，1 次元平行平板モデルの重ね合わせから求めた母岩外側からの線量は，立ち上がりから最大線量までは最も大きい透水量係数が設定された母岩亀裂 48 の

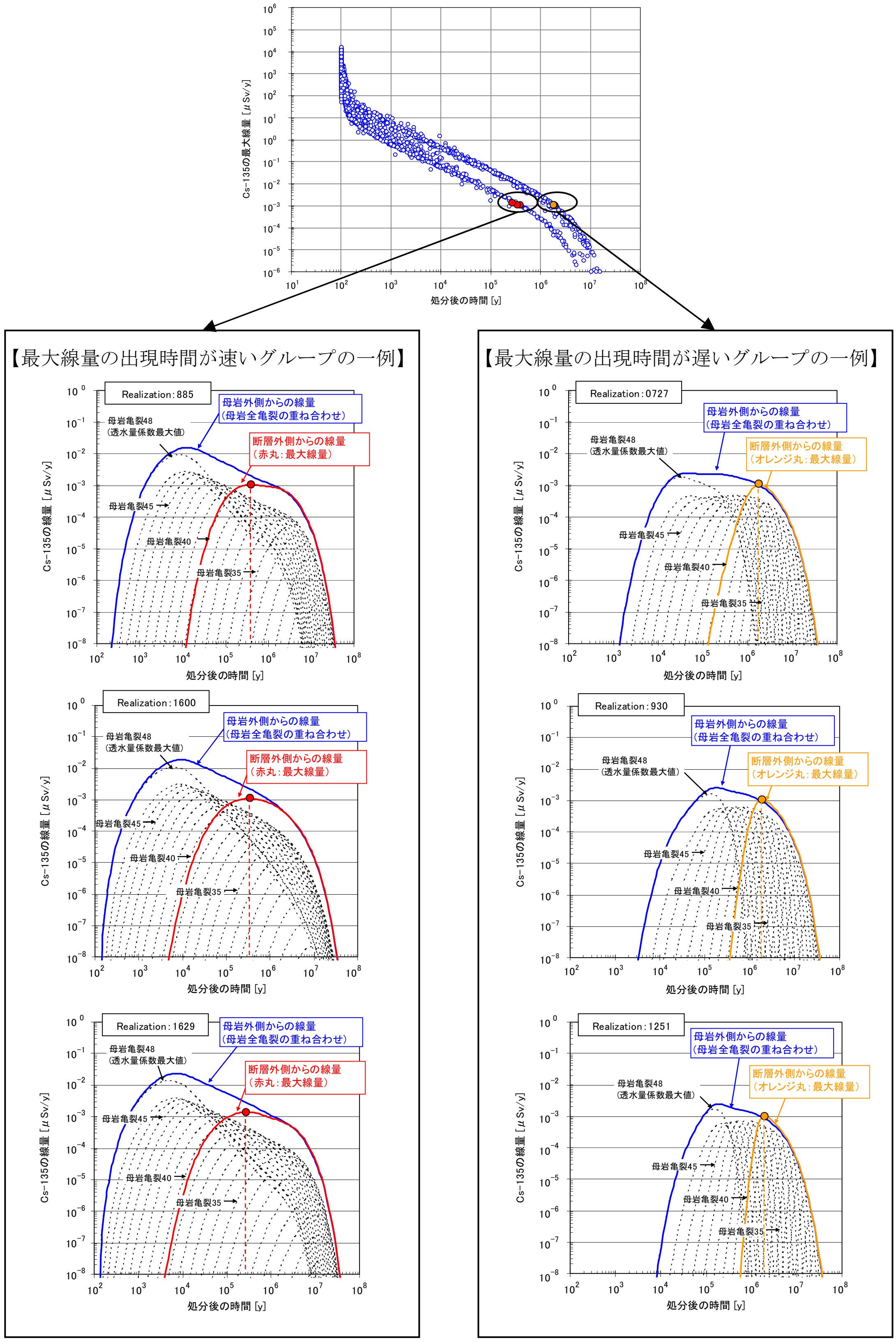
影響が支配的となり[1], その後時間の経過と共に線量が低減していく右下がりの傾向を示すことがわかる。

・ このような母岩外側からの線量が断層に入った場合，母岩において最も大きい透水量係数が設定された亀裂からの線量の影響が引き続き大きくなる。このため，断層外側における最大線量の出現時間が速くなったと考えられる。

最大線量の出現時間が遅いグループ：

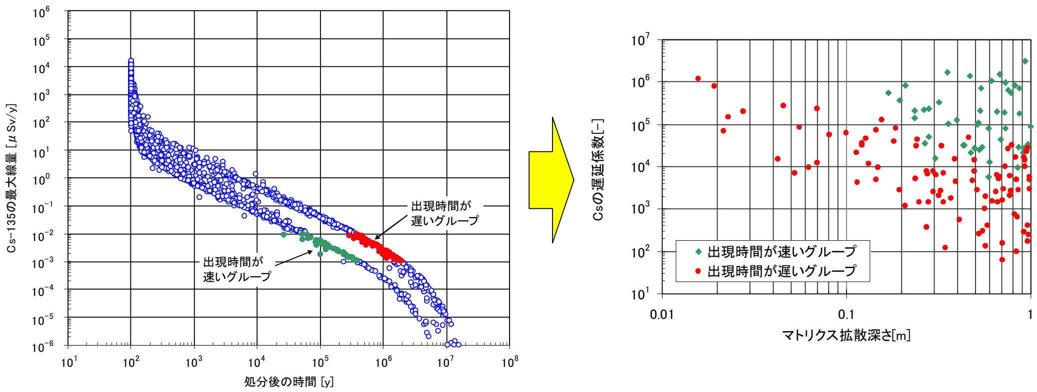
・ 最大線量の出現時間が遅いグループの場合，母岩亀裂の透水量係数が小さくなるにつれて各母岩亀裂からの最大線量が低減するものの，透水量係数が比較的大きい値に設定された母岩亀裂（母岩亀裂番号 47～40）では最大線量が比較的低減していないことがわかる。
・ このため，1 次元平行平板モデルの重ね合わせから求めた母岩外側からの線量は，立ち上がりから最大線量までは最も大きい透水量係数が設定された母岩亀裂 48 の影響が支配的となるものの, 比較的大きい透水量係数が設定された母岩亀裂 47～40 の区間における線量が比較的低減しないため，最大線量の出現時間以降しばらくの間は線量がほとんど変化しない傾向を示すことがわかる。
・ このような母岩外側からの線量が断層に入った場合，断層によって移行に時間がかかるために, 母岩外側における最大線量の出現時間付近で断層に入った核種が遅れ，母岩線量がほとんど変化しない状態で推移している時間帯における断層外側での移行率を増加させることになる。これにより，母岩線量がほとんど変化しない状態で推移している時間帯に断層外側の最大線量がシフトしてしまったため断層外側での最大線量の出現時間が遅くなり，結果的に断層外側での最大線量のプロットが２つに分かれてしまったものと考えられる。

[1] 付図 5-1 の各ケースにおいて，最も大きい透水量係数が設定された母岩亀裂 48 の線量が不規則に増加しているが，これは亀裂の透水量係数分布（対数正規分布）を 48 分割した際に，対数正規分布における無限大までの確率を母岩亀裂 48 の区間の確率に足し合わせているため，この亀裂の確率が高めに設定されるためであると考えられる。



付図 5-1 極端な人工バリアを想定したケースの Cs-135 統計解析結果に関する詳細分析①

上述の母岩線量の右下がりの傾向がどのようなメカニズムに依存しているかを確認するために，図 5.1-1 における Cs-135 の統計解析結果において最大線量が $1\times10^{-2}\mu$Sv/y～$1\times10^{-3}\mu$Sv/y のケースを対象に，最大線量の出現時間が速いグループと遅いグループを天然バリアの各パラメータを用いて分類できるかどうかについて検討した。その結果，Cs の遅延係数[2]とマトリクス拡散深さをそれぞれ縦軸・横軸にとり，出現時間が速いグループと遅いグループを区別してプロットすると，これらのグループを明確に分類できることがわかった（付図 5-2）。



付図 5-2　極端な人工バリアを想定したケースの Cs-135 統計解析結果に関する詳細分析②

付図 5-2 より，母岩線量の右下がりの傾向の発生メカニズムは次のように説明することができる。最大線量の出現時間が速いグループでは，マトリクス拡散深さおよび Cs の遅延係数が大きくなる右上側の領域を中心にプロットが分布していることから，核種が収着およびマトリクス拡散による遅延の影響が大きい条件下で発生していることがわかる。このような条件下において母岩亀裂の透水量係数が小さくなってくると，亀裂内をゆっくりとした速度で移行している核種が収着およびマトリクス拡散によって遅延される割合が大きくなると考えられる。このため，付図 5-1 における最大線量の出現時間が速いグループでは，母岩亀裂の透水量係数が小さくなるにつれて母岩亀裂からの最大線量が低減することとなり，母岩外側からの線量の経時変化が右下がりの傾向を示したと考えられる。

反対に，最大線量の出現時間が遅いグループでは，マトリクス拡散深さが小さくなる左側の領域，または Cs の遅延係数が小さくなる下側の領域を中心にプロットが分布していることがわかる。マトリクス拡散深さが等しい場合は，Cs の遅延係数が小さい方に最大線量の出現時間が遅いグループが分布することとなり，Cs の遅延係数が等しい場合は，マトリクス拡散深さが小さい方に最大線量の出現時間が遅いグループが分布することとなる。こ

2　Cs の遅延係数（岩盤）R_{Cs}[-]は，岩盤の間隙率Θ[-]，岩盤の乾燥密度 ρ 及び Cs の分配係数（岩盤）Kd_{Cs} より以下の式により算出した。

$$R_{Cs} = 1 + \frac{\rho \, Kd_{Cs}}{\Theta}$$

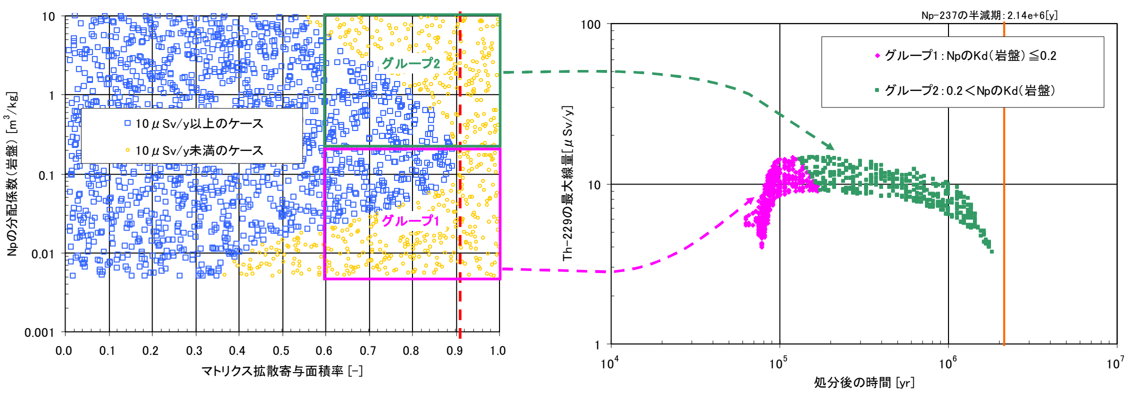
のことから，最大線量の出現時間が遅いグループでは，核種が収着またはマトリクス拡散による遅延の影響が小さい条件下で発生していることがわかる。このような条件下では，遅延の影響が小さいために，母岩亀裂の透水量係数が比較的小さくなったとしても亀裂内をゆっくりとした速度で移行している核種が収着またはマトリクス拡散によって遅延される割合が小さくなると考えられる。このため，付図 5-1 における最大線量の出現時間が遅いグループでは，比較的大きい透水量係数が設定された母岩亀裂（母岩亀裂番号 47～40）の最大線量が比較的低減せず，母岩線量が最大線量の出現時間以降しばらくの間ほとんど変化しない傾向を示すことになった（右下がりの傾向を示さなかった）と考えられる。

2. Np の分配係数（岩盤）とマトリクス拡散寄与面積率が Th-229 の最大線量に与える影響

本文中の図 5.2.2-20 においては，10μSv/y 以上のケースと 10μSv/y 未満のケースの境界が非線形の曲線になっている。以下では，この理由について記述する。

これは，親核種である Np の分配係数（岩盤）とマトリクス拡散寄与面積率の変化に応じて，Np-237 からの崩壊の影響が変化するためであると考えられる。これについては，非線形の曲線が現れているマトリクス拡散寄与面積率が 0.6[-]以上のケースを対象に，解析ケースを以下の２つのグループに分類した上で記述することとする。この２つのグループの Th-229 の最大線量およびその発生時間をプロットした結果を付図 5-3 に示す。

- グループ１：マトリクス拡散寄与面積率が 0.6[-]以上で，かつ Np の分配係数（岩盤）が 0.2[m³/kg]未満のケース
- グループ２：マトリクス拡散寄与面積率が 0.6[-]以上で，かつ Np の分配係数（岩盤）が 0.2[m³/kg]より大きいケース



付図 5-3　各グループにおける Th-229 の最大線量とその発生時間

Th-229 の特徴：

- Th-229 は Np-237 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，半減期が 7340 年と比較的短いため，天然バリア中の Th-229 の核種量は主に Np-237 からの崩壊量に依存することとなる。

グループ 1 ：

- グループ 1 では，Np の分配係数が小さい領域であり，Np-237 の天然バリア中での収着量が少なくなるため，Np-237 からの崩壊による Th-229 の生成量は比較的少ない。
- このため，グループ 1 では，Np-237 からの崩壊による Th-229 の生成量が大きくなる条件，すなわち Np の分配係数が大きくなる条件が Th-229 の最大線量を増加させると考えられる。
- また，半減期が比較的短い Th-229 がマトリクス中を拡散しているときに崩壊してしまうと天然バリア中での Th-229 の存在量が少なくなると考えられる。このため，グループ 1 では Th-229 がマトリクス中を拡散しない条件，すなわちマトリクス拡散寄与面積率が小さくなる条件が Th-229 の最大線量を増加させることになると考えられる。
- 以上をまとめると，Np-237 の分配係数が等しい場合は，マトリクス拡散寄与面積率が小さい方が Th-229 の線量は高くなり 10μSv/y を越えるケースが分布することとなる。マトリクス拡散寄与面積率が等しい場合は，Np-237 の分配係数が大きいほうが Th -229 の線量は高くなり 10μSv/y を越えるケースが分布することとなる。そのため，付図 5-3 におけるグループ 1 の領域（ピンク色で囲まれた領域）では，マトリクス拡散寄与面積率が小さく，Np の分配係数が大きい領域である左上の領域を中心に 10μSv/y を越えるケースが分布することとなり，その結果としてグループ 1 の境界線が生じたものと考えられる。

グループ 2：

- 付図 5-3 より，グループ 2 の場合は，Np の分配係数が大きくなるにつれて，Th-229 の最大線量が 10μSv/y を越えにくくなることがわかる。
- Np の分配係数が大きい場合は，Np-237 はマトリクス内で多量に収着する。このとき，マトリクス内で収着した Np-237 からの崩壊によって生成された Th-229 の多くは，マトリクス中で崩壊すると考えられる。このため，グループ 2 では，親核種である Np-237 がマトリクス内で収着しにくい条件，すなわち Np の分配係数が小さくなる条件が Th-229 の最大線量を増加させることになると考えられる。
- また，半減期が比較的短い Th-229 がマトリクス中を拡散しているときに崩壊してしまうと天然バリア中での Th-229 の存在量が少なくなると考えられる。このため，グループ 2 もグループ 1 と同様に，Th-229 がマトリクス中を拡散しない条件，す

なわちマトリクス拡散寄与面積率が小さくなる条件が Th-229 の最大線量を増加させることになると考えられる。

- 以上をまとめると，Np-237 の分配係数が等しい場合は，マトリクス拡散寄与面積率が小さい方が Th-229 の線量は高くなり 10 μSv/y を越えるケースが分布することとなる。マトリクス拡散寄与面積率が等しい場合は，Np-237 の分配係数が小さいほうが Th -229 の線量は高くなり 10 μSv/y を越えるケースが分布することとなる。そのため，付図 5-3 におけるグループ 2 の領域（緑色で囲まれた領域）では，マトリクス拡散寄与面積率が小さく，Np の分配係数が小さい領域である左下の領域を中心に 10 μSv/y を越えるケースが分布することとなり，その結果としてグループ 2 の境界線が生じたものと考えられる。

3. 岩盤の空隙率および Cs の分配係数（岩盤）が Cs-135 の最大線量に与える影響

本文中の図 5.2.3-4 において, 10 μSv/y を超える場合と超えない場合のおおよその境界線が非線形の曲線になっている。以下では，この理由について記述する。

ここで，5.2.3 節におけるパターン 2 - Cs-135 - 3 次統計解析の結果に基づき，岩盤の空隙率と Cs の分配係数による天然バリア中での遅延効果の分布を付図 5-4 に示す。付図 5-4 より，以下のことがわかる。

- 岩盤の空隙率および Cs の分配係数（岩盤）が線量に与える非線形な影響（例えば，本文中の図 5.2.3-4 のような非線形の境界）は，Cs の分配係数（岩盤）が大きい場合にのみ発生しているわけではないこと
- 岩盤の空隙率が遅延効果に与える影響は，Cs の分配係数の値によって，変化すること

分配係数，岩盤の間隙率，実効拡散係数が線量に与える個々の影響には，次のような関係がある。

- 分配係数が大きい場合には，吸着量が多くなり（遅延係数が大きくなり），線量が減少する。
- 岩盤の空隙率が小さい場合には，吸着媒体の体積が増加することから吸着量が多くなり（遅延係数が大きくなり），線量が減少する。
- 実効拡散係数が大きい場合（空隙率が大きい場合）には，マトリクスへの移行量が増加するため，線量が減少する。

本検討において，岩盤の空隙率は，実効拡散係数および遅延係数と相関関係を有する[3]。

---

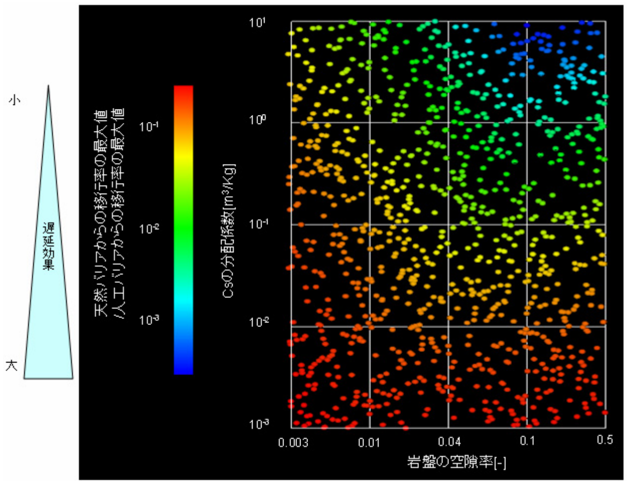
[3] Cs の遅延係数（岩盤）R_{Cs}[-]および実効拡散係数 De は，岩盤の間隙率Θ[-]，岩盤の乾燥密度 ρ 及び Cs の分配係数（岩盤）Kd_{Cs} より以下の式により算出される。これらの相関関係は，第２次取りまとめに基づくものである。

$$R_{Cs} = 1 + \frac{\rho K d_{Cs}}{\Theta} \quad De[m^2/s] = (10^{-12.20}) \times \theta\,[\%]^{2.0}$$

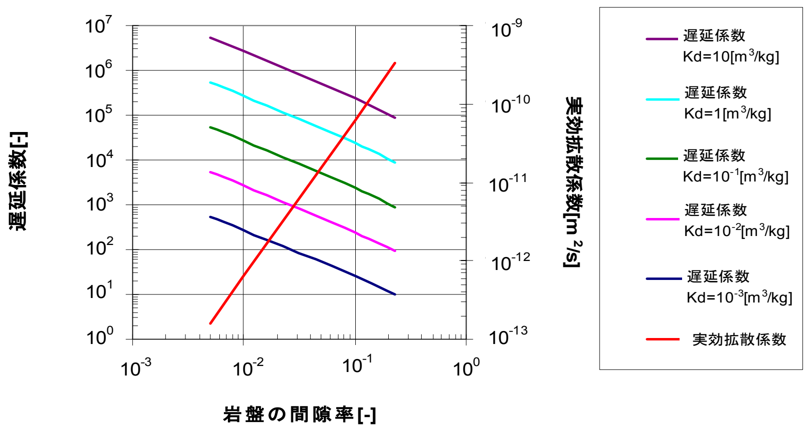
岩盤の空隙率および遅延係数および実効拡散係数の関係を付図 5-5 に示す。付図 5-5 より，以下のことがわかる。

- 空隙率が小さい場合には，実効拡散係数の減少により，線量が増加する一方で，遅延係数の増加により，線量が減少する傾向がある。
- 空隙率が大きい場合には，実効拡散係数の増加により，線量が減少する一方で，遅延係数の減少により，線量が増加する傾向がある。
- このため，吸着とマトリクス拡散が相反するように作用し，線量への影響が非線形になるものと考えられる。この際，吸着による遅延効果の程度は，分配係数の値によって変化する。

なお，実際の核種移行計算において，吸着とマトリクス拡散の遅延効果は，線量に対して同程度の影響をもつわけではないことが考えられる。このため，Cs の分配係数の値に応じて，岩盤の空隙率が線量に与える影響が非線形に変化すると考えられる。



付図 5-4 Cs の分配係数（岩盤）および岩盤の間隙率による遅延効果の分布



付図 5-5 岩盤の間隙率と遅延係数と実効拡散係数の関係

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m-1
密度（質量密度）	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
質量体積（比体積）	立法メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
（物質量の）濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率	（数の）１	1

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表３．固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[(a)]	rad		$m\cdot m^{-1}=1^{(b)}$
立体角	ステラジアン[(a)]	$sr^{(c)}$		$m^2\cdot m^{-2}=1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\cdot kg\cdot s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\cdot kg\cdot s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N・m	$m^2\cdot kg\cdot s^{-2}$
工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\cdot kg\cdot s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s・A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\cdot kg\cdot s^{-3}\cdot A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\cdot kg^{-1}\cdot s^4\cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\cdot kg\cdot s^{-3}\cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\cdot kg^{-1}\cdot s^3\cdot A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	V・s	$m^2\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[(d)]	℃		K
光束	ルーメン	lm	$cd\cdot sr^{(c)}$	$m^2\cdot m^{-2}\cdot cd=cd$
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^2\cdot m^{-4}\cdot cd=m^{-2}\cdot cd$
（放射性核種の）放射能	ベクレル	Bq		s^{-1}
吸収線量，質量エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\cdot s^{-2}$
線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量，組織線量当	シーベルト	Sv	J/kg	$m^2\cdot s^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表４に示されている。
(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“１”は明示されない。
(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表４．単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa・s	$m^{-1}\cdot kg\cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	$m^2\cdot kg\cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s^2	$m\cdot m^{-1}\cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\cdot s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot K^{-1}$
質量熱容量（比熱容量），質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	$m^2\cdot s^{-2}\cdot K^{-1}$
質量エネルギー（比エネルギー）	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\cdot s^{-2}\cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	$m\cdot kg\cdot s^{-3}\cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\cdot kg\cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\cdot kg\cdot s^{-3}\cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\cdot s\cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\cdot s\cdot A$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\cdot kg^{-1}\cdot s^4\cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot mol^{-1}$
モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	$m^2\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot K^{-1}\cdot mol^{-1}$
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\cdot s\cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\cdot m^{-2}\cdot kg\cdot s^{-3}=m^2\cdot kg\cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\cdot sr)$	$m^2\cdot m^{-2}\cdot kg\cdot s^{-3}=kg\cdot s^{-3}$

表６．国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1° =(π/180) rad
分	’	1’ =(1/60)° =(π/10800) rad
秒	”	1” =(1/60)’ =(π/648000) rad
リットル	l、L	$1l=1\ dm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表７．国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49)\times10^{-19}J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10)\times10^{-27}kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30)\times10^{11}m$

表８．国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1海里=1852m
ノット		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	$1a=1\ dam^2=10^2m^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1\ hm^2=10^4m^2$
バール	bar	$1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10^5Pa$
オングストローム	Å	$1Å=0.1nm=10^{-10}m$
バーン	b	$1b=100fm^2=10^{-28}m^2$

表９．固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\cdot s/cm^2=0.1Pa\cdot s$
ストークス	St	$1\ St=1cm^2/s=10^{-4}m^2/s$
ガウス	G	$1\ G \triangleq 10^{-4}T$
エルステッド	Oe	$1\ Oe \triangleq (1000/4\pi)A/m$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx \triangleq 10^{-8}Wb$
スチルブ	sb	$1\ sb=1cd/cm^2=10^4cd/m^2$
ホト	ph	$1\ ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1\ Gal=1cm/s^2=10^{-2}m/s^2$

表10．国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
X線単位		$1X\ unit=1.002\times10^{-4}nm$
ガンマ	γ	$1\gamma=1\ nT=10^{-9}T$
ジャンスキー	Jy	$1\ Jy=10^{-26}W\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}$
フェルミ		$1\ fermi=1\ fm=10^{-15}m$
メートル系カラット		$1\ metric\ carat = 200\ mg = 2\times10^{-4}kg$
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	
ミクロン	μ	$1\ \mu=1\mu m=10^{-6}m$

（第７版，1998年改訂）