

JAERI-Research

2002-014



JP0250375



確率論的安全評価手法 GSRW-PSA による地層処分システムの不確かさ解析：  
パラメータ不確かさ及び天然バリアの概念モデル不確かさの検討

2002年7月

武田 聖司・木村 英雄

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

確率論的安全評価手法 GSRW-PSA による地層処分システムの不確かさ解析：  
パラメータ不確かさ及び天然バリアの概念モデル不確かさの検討

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター燃料サイクル安全工学部  
武田 聖司・木村 英雄

(2002年5月10日受理)

地層処分の安全評価では、廃棄物中に半減期の極めて長い放射性核種を含むことから、数万年以上の長期間にわたり、処分システム内の核種の移行挙動及び地層処分に伴う放射線影響を評価する必要がある。このような長期評価では、シナリオ不確かさ、モデル不確かさ、パラメータ不確かさの存在が考えられ、こうした不確かさの発生要因及び不確かさの影響（幅）を定量的に明らかにすることが、信頼性のある安全性の評価を行う上で極めて重要である。これらの不確かさの問題に対処するため、原研では、決定論的評価手法の他に、モンテカルロ法による確率論的評価手法の開発を進めている。

本研究では、評価に伴う不確かさのうち、パラメータ不確かさとモデル不確かさに起因した影響評価を目的として、確率論的評価手法（GSRW-PSA）の開発を行った。これら不確かさの影響評価の先立ち、原研、JNC、それぞれが開発している人工バリア及び天然バリア中の核種移行評価モデルに関して決定論的なベンチマーク計算を行い、個々の評価コードの特性・適用性を明らかにした。次に、GSRW-PSA を用いて、高レベル放射性廃棄物処分の重要核種である Cs-135 及び Se-79 を対象とした人工バリア及び天然バリアに関するパラメータの不確かさ解析を行った。その結果、セレンの溶解度、マトリックス中の分配係数（セシウム及びセレン）、亀裂内流速、マトリックス厚さ、亀裂開口幅が評価上重要なパラメータであることが明らかとなった。さらに、天然バリアにおける地質媒体の概念化の違いとして、多孔質媒体と亀裂性媒体による近似モデルを想定し、概念化の違いによる影響の評価を実施した。

Uncertainty Analyses for HLW Disposal System Using Probabilistic  
Safety Assessment Code (GSRW-PSA):  
Parameter Uncertainty and Conceptual Model Uncertainty in Natural Barrier

Seiji TAKEDA and Hideo KIMURA

Department of Fuel Cycle Safety Research  
Nuclear Safety Research Center  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 10, 2002)

In the safety assessment for a geological disposal of high-level radioactive waste, it is necessary to evaluate radionuclide migration in the disposal system and radiological consequences associated with the disposal over long time scales owing to the existence of long-lived radionuclides. It is considered that there are three kinds of uncertainties with respect to parameter values, scenario, and model in the long-term assessment. In order to achieve the more reliable safety assessment, it is essential to clarify the effects based on the quantitative estimates of the uncertainties and their factors.

The Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) has developed the probabilistic safety assessment code for HLW disposal system (GSRW-PSA) to estimate the uncertainties in parameters and conceptual models. The features and applicability of assessment codes were indicated through the bench-mark analyses for the source term models and radionuclide migration models in a generic geosphere, which have been developed by each institute, JAERI and Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC). The uncertainty analyses of the parameters on the engineered and natural barriers were performed for Cs-135 and Se-79 using the GSRW-PSA code. The analyses indicate that the important parameters identified by high PRCC value are solubility of selenium, distribution coefficients of cesium and selenium in rock matrix, velocity in fracture, maximum depth for matrix diffusion and fracture aperture. The effect of the uncertainty in the difference of conceptualization on a fractured medium in geosphere was estimated from the probabilistic analyses under the assumption of two conceptual models, homogeneous porous medium model and representative fracture medium model.

Keywords: Uncertainty Analyses, Probabilistic Safety Assessment Code, GSRW-PSA,

Geological Disposal, High Level Wastes, Parameter, Conceptual Models, Intercomparison

目 次

1. はじめに	1
2. 地層処分の安全評価における不確かさ	1
3. 地層処分における確率論的評価手法の開発	2
4. 評価コード特性の比較	4
4.1 ソースタームモデルの機能検証	4
4.2 亀裂性媒体モデルの機能検証	6
4.3 確率論的評価手法の比較	9
5. 不確かさ解析	11
5.1 パラメータ不確かさ解析	11
5.2 天然バリア概念モデル不確かさ解析	16
6. 結論	19
謝辞	20
参考文献	20

Contents

1. Introduction	1
2. Uncertainty in Safety Assessment for Geological Disposal	1
3. Development of Probabilistic Assessment Code System	2
4. Comparison with Respect to Characteristic of Assessment Codes	4
4.1 Verification of Source Term Model	4
4.2 Verification of Geosphere Model for a Fractured Medium	6
4.3 Comparison between Probabilistic Assessment Codes	9
5. Uncertainty Analyses	11
5.1 Parameter Uncertainty	11
5.2 Conceptual Model Uncertainty	16
6. Conclusion	19
Acknowledgement	20
References	20

## 1. はじめに

地層処分の安全評価では、廃棄物中に半減期の極めて長い放射性核種を含むことから、数万年以上の長期間にわたり、処分システム内の核種の移行挙動及び地層処分に伴う放射線影響を評価する必要がある。このような長期評価では、例えば、将来想定される評価シナリオを作成する際に生じる不確かさ(シナリオ不確かさ)、放射性核種の移行過程を数学モデルにより記述する際の不確かさ(モデル不確かさ)、数学モデルに用いられるパラメータ値の変動に起因する不確かさ(パラメータ不確かさ)等、評価の各段階において複数の不確かさの存在が考えられ、こうした不確かさの発生要因や不確かさの影響(幅)を定量的に明らかにすることが、信頼性のある安全性の評価を行う上で極めて重要である。これらの不確かさの問題に対処するため、原研では、決定論的評価手法 GSRW (Generic Safety assessment code for geologic disposal of Radioactive Waste) の他に、モンテカルロ法による確率論的評価手法 GSRW-PSA (GSRW for Probabilistic Safety Assessment) の開発を進めている。

高レベル放射性廃棄物に関して、核燃料サイクル開発機構(以下、JNC)により作成された地層処分研究開発第2次取りまとめ<sup>(1)</sup>(以下、第2次取りまとめ)が、平成11年11月に原子力委員会に提出され、その後、平成12年11月に、原子力安全委員会により、高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制の基本的考え方<sup>(2)</sup>が示された。第2次とりまとめでは、わが国の地質環境の特性を示し、その特性を考慮して適切に設計した処分施設の仕様条件のもと、具体化された地層処分システムに対する総合的な安全評価を実施した。そして、原子力委員会は、第2次取りまとめを審議・検討し、わが国における地層処分の技術的信頼性が示されていると判断している<sup>(3)</sup>。しかしながら、同報告書によれば、残された今後の課題の1つとして、地層処分に対する確率論的評価の必要性が指摘されている<sup>(3)</sup>。

こうした状況の下、原研は、平成8年度から核燃料サイクル開発機構と、地層処分システムの確率論的評価手法の研究に関する共同研究の協定を結び、研究開発を進めており、本研究では、その研究成果の一部を報告する。

本研究では、評価に伴う不確かさのうち、パラメータ不確かさとモデル不確かさに起因した影響評価を目的として、確率論的評価手法(GSRW-PSA)の開発を行った。これら不確かさの影響評価の先立ち、原研、JNC、それぞれが開発している人工バリア及び天然バリア中の核種移行評価モデルに関して決定論的なベンチマーク計算を行い、個々の評価コードの特性・適用性を明らかにした。また、GSRW-PSAを用いて、地層処分の第2次取りまとめにおける評価条件に基づき、高レベル放射性廃棄物処分の重要核種であるCs-135及びSe-79を対象とした人工バリア及び天然バリアに関するパラメータの不確かさ解析を行った。さらに、天然バリアにおける地質媒体の概念化の違いとして、多孔質媒体と亀裂性媒体による近似モデルを想定し、概念化の違いによる影響の評価を実施した。

## 2. 地層処分の安全評価における不確かさ

地層処分の安全性を評価する際に発生する不確かさは、シナリオ不確かさ、モデル不確かさ、パラメータ不確かさに分類され、既存の文献<sup>(4)</sup>、<sup>(5)</sup>、<sup>(6)</sup>によれば、以下の内容が各不確かさに含め

られる。

シナリオ不確かさは、人工バリア内に処分された放射性核種が処分施設から漏えいし、地下水を介して天然バリアを移行した後に、人間の生活圏に到達するまでの物理・化学的条件及び移行過程の推定に係る不確かさや、将来想定される評価シナリオを作成する際に生じる不確かさが挙げられる。その他に、地質環境の長期安定性の観点から重要な天然現象（地震、火山・火成活動、断層等）の発生に関する不確かさ等が考えられ、また、こうした個々の事象が将来発生する可能性（発生頻度）の不確かさもこれに含まれる。

地層処分の安全評価モデルを構築する際にも、いくつかの不確かさが想定される。評価モデルの構築では、シナリオで対象とする現象を、ナチュラルアナログ研究や室内及びフィールド試験等から得られた現象に対する知見及び理解を基に、概念モデルで表し、数学モデルによって記述する。概念モデル化の段階では、現象に対する不完全な情報及び理解、概念化の前提条件の違い等による不確かさが、数学モデル作成の段階では、現象の単純化された数式による近似に伴う不確かさが、それぞれ挙げられる。また、計算コード上の演算処理や、不完全なコード化もモデル不確かさに属すると考えられる。

パラメータ不確かさは、数学モデルに使用される評価パラメータの変動（ばらつき）に起因した不確かさである。こうした変動は、実験データの誤差、処分システム及び移行物質の物理的・化学的性質の空間的・時間的変動に起因した不確かさを含んでいる。

本研究では、このうちパラメータ不確かさとモデル不確かさに起因した影響の定量的な評価を目的として、確率論的評価手法（GSRW-PSA）の開発を行った。

### 3. 地層処分における確率論的評価手法の開発

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価において考慮すべきシナリオは、処分された放射性物質が地下水により人間の生活環境に運ばれる事象を想定した「地下水移行シナリオ」と処分された高レベル放射性廃棄物が天然現象や人間活動に起因して人間の生活環境に到達する可能性を想定した「接近シナリオ」に大別される<sup>(2)</sup>。このうち、地下水移行シナリオは地層処分において一般的に起こりうるシナリオとして考えられ、原研では、こうした地下水移行シナリオに係る総合安全評価コードとして、決定論的評価コード GSRW を開発した<sup>(7), (8)</sup>。GSRW は、ソースタームモデル、天然バリアモデル、生態圏モデルの3つのサブモデルから構成される。ソースタームモデルは、ガラス固化体と地下水との接触によるガラスマトリックスからの放射性核種の溶出、及びベントナイト緩衝材から天然バリアへ移動する核種移行量を評価する。天然バリアモデルは、天然バリアに放出された核種が、地層中の鉱物へ収着／脱着を繰り返しながら、地層中の地下水流れ及び拡散により移動して生態圏へ流入する核種量を計算する。さらに、生態圏モデルにより、河川、農耕土壌等の環境媒体中の核種移行と、種々の被ばく経路に対する個人の被ばく線量を評価することが可能である。

こうしたサブモデルによる評価には様々なパラメータが必要とされるが、その多くのパラメータは確定した値をとらず、ある確率密度関数（PDF：Probability Density Function）に特徴づけられたばらつきがみられる。パラメータ値の確率密度関数に様々な分布型が想定されるような解析では、一般的に解析的に数式を解くことは困難であり、この場合、モンテカルロ法による確率



論的解析手法が用いられている。原研では、地層処分の長期評価に伴う評価パラメータ及び概念モデル不確かさの問題に対処するため、上述の決定論的評価コード GSRW を骨格としたモンテカルロ法による確率論的評価手法 (GSRW-PSA) の開発を行っている。開発した基本的なコードシステム (GSRW-PSA) の構成を図 1 に示す。パラメータ不確かさの評価においてサンプリング可能なパラメータは、ソースタームモデル、天然バリアモデル、及び生態圏モデルに関するほぼ全てのパラメータである。また、人工バリアの概念モデル不確かさとして、通常的人工バリアにおける核種移行評価モデルの他に、人工バリア材 (緩衝材) であるベントナイトの長期的な変質現象による透水性及び吸着性の時間的変化に対応したモデル (ベントナイト劣化モデル) を想定し、長期評価に伴う人工バリアのモデル不確かさの影響評価が可能である。天然バリアに関しては、地層媒体の概念化の違いとして、多孔質媒体及び亀裂性媒体としての近似モデルを想定し、概念化の違いによる影響を解析する手法を開発した。

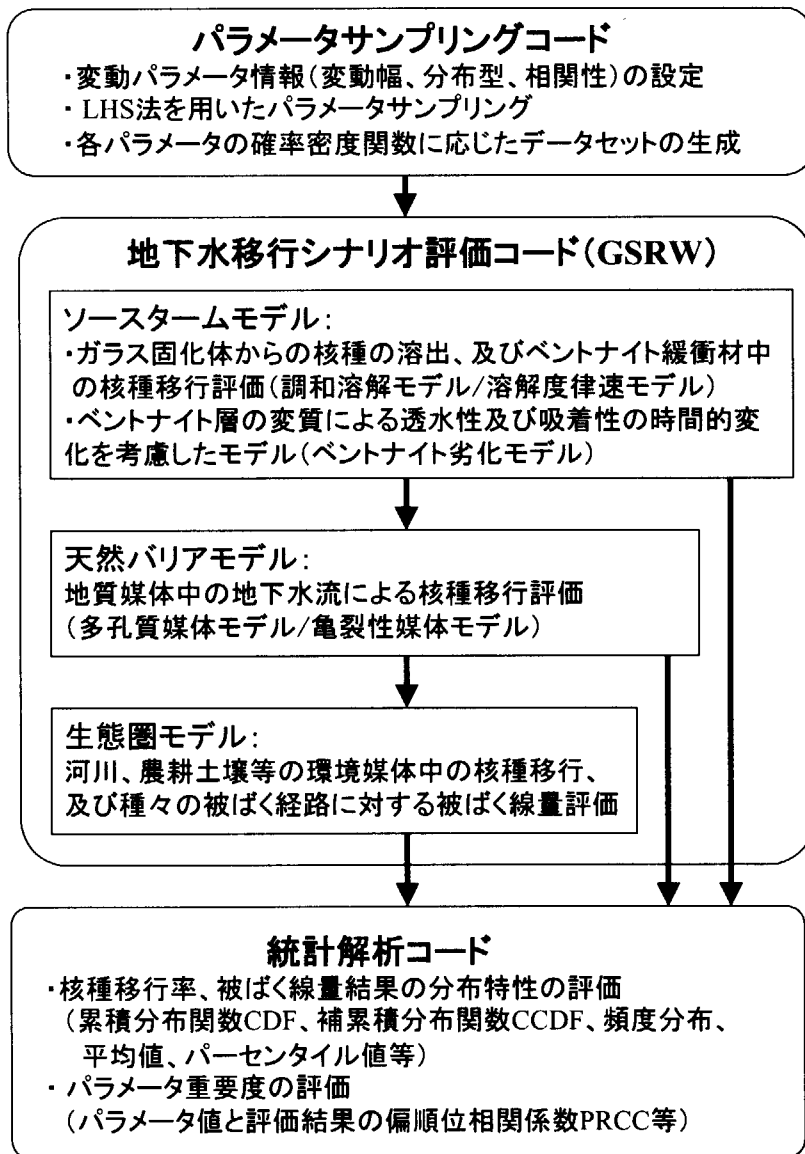


図 1 地層処分の確率論的評価コードシステムの構成

GSRW-PSA は、図 1 に示すように、GSRW コードの他に、評価パラメータのサンプリングを行うパラメータサンプリングコード及び評価結果に対する種々の統計量を求める統計解析コードから構成される。パラメータサンプリングコードでは、まず、GSRW の 3 つのサブモデルに使用されるパラメータのうち、不確かさの大きいと考えられる変動パラメータを選定し、その各パラメータに対し確率密度関数（変動幅、分布型）を設定する。パラメータの確率密度関数を記述する数式として、以下の関数型を設定することができる。

- ・ 一様分布
- ・ 対数一様分布
- ・ 正規分布
- ・ 対数正規分布

一様分布及び対数一様分布については、変動幅の上限値（最大値）及び下限値（最小値）により定義し、また、正規分布及び対数正規分布は 0.1 パーセントタイル値と 99.9 パーセントタイル値の組み合わせによって定義する。次に、パラメータサンプリングコードは、各パラメータについて設定した確率密度関数に従い、パラメータサンプリングを行い、サンプル数に応じたデータセットを発生させる。パラメータ値のサンプリング手法は Latin Hypercube Sampling (LHS) 手法<sup>(9)</sup>を用いた。LHS 手法は、各パラメータの確率密度関数が等面積になるようにサンプル数で分割し、その分割された各領域内から代表値をランダムに 1 つ選択し、最終的にパラメータ数に応じたパラメータ値の組み合わせを決定する。また、岩盤の亀裂開口幅と透水量係数のように相関性の考えられるパラメータについては、パラメータ間の相関係数を設定したパラメータサンプリングも可能である。

次に、LHS 手法によりサンプリングされた個々のデータセットに対し、GSRW サブモデルによる解析を行うことで、サンプル数個の解析結果（人工バリアあるいは天然バリアからの核種移行率、生態圏での被ばく線量等）が得られる。最終的に、こうして得られたサンプリング情報と解析結果に対して、統計解析手法を適用することにより、核種移行率、被ばく線量等の分布特性（累積分布関数 CDF : Cumulative Distribution Function、補累積分布関数 CCDF : Complementary Cumulative Distribution Function、頻度分布等）や、パラメータの重要度に関する情報（パラメータ値と被ばく線量結果との偏順位相関係数 PRCC : Partial Rank Correlation Coefficient 等）を得ることができる。

#### 4. 評価コード特性の比較

確率論的手法によるパラメータ不確かさとモデル不確かさの影響評価に先だって、各サブモデルの機能検証を行う必要がある。そこで、原研、JNC、それぞれが開発しているソースタームモデル及び天然バリア中の核種移行モデルの特性・適用性を把握するために、各モデルの機能及び特徴を整理するとともに、決定論的なベンチマーク計算を実施した。なお、GSRW コードの詳細については、文献(7)及び(8)に報告している。

##### 4.1 ソースタームモデルの機能検証

ガラス固化体からの核種溶出を評価するモデル（ソースタームモデル）として、JNCではMESHNOTE

を、原研ではGSRWのサブモデルを開発している。両コードの特徴をまとめたものを表1に示す。緩衝材中の支配方程式は、ともに崩壊系列を考慮した1次元拡散方程式であるが、まず、解析体系（球及び円柱座標系）及び解法（解析解及び有限差分法）に違いがみられる。また、両コードともガラス固化体の溶解に伴う核種の溶出をモデル化しており、間隙水中の核種濃度はその溶解度に制限されるモデルを採用している。その他の相違点として、JNCでは、緩衝材中の核種移行において、瞬時/可逆を仮定した沈殿/溶解反応を考慮できることと、固化体に含まれる各同位体の存在割合に応じて溶解度を分割設定できる点が挙げられる。また、GSRWでは、ガラス表面積の時間的減少を考慮した溶解速度の設定であるのに対し、MESHNOTEは一定のガラス溶解速度の他に、ガラス表面積の減少やその他の溶解モデルの取り扱いが可能である。さらに、表1に示すように、境界条件の取り扱いに関して異なる点が挙げられる。

表1 ソースタームモデル（GSRWとMESHNOTE）の主な機能比較

コード	GSRW (JAERI)	MESHNOTE (JNC)
解析体系	球座標1次元	円柱座標1次元
支配方程式	崩壊系列を考慮した拡散方程式 (線形吸着を考慮)	複数崩壊系列を考慮した拡散方程式 (線形吸着及び沈殿を考慮、非線形吸着も設定可能)
解法	解析解	有限差分法
ガラス固化体の溶解	調和溶解 (表面積の時間的減少を考慮した溶解速度)	調和溶解 (一定の溶解速度、ガラス表面積の減少を設定可能、その他の溶解モデルあり)
溶解度	<ul style="list-style-type: none"> <li>U238とU234を対象に、その存在比に応じた溶解度の分配が可能</li> <li>溶解度の時間依存性が設定可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>各同位体の存在に応じた溶解度の分配が可能</li> <li>沈殿/溶解反応を考慮</li> </ul>
境界条件	周辺母岩との外側境界は濃度ゼロ (ゼロ濃度境界条件)	<ul style="list-style-type: none"> <li>周辺母岩との境界における掘削影響領域の通過流量に依存した境界条件</li> <li>ゼロ濃度境界条件</li> </ul>

MESHNOTE (JNC) 及びGSRW (JAERI) のソースタームモデルによるベンチマーク計算を行い、コード特性の把握を試みた。第2次取りまとめの評価から重要であると示されたCs-135とSe-79をベンチマーク計算の対象とした。計算条件は、第2次取りまとめのレファレンスケースで設定された条件を使用した。また、ガラス固化体から緩衝材へ放出されるCs-135のフラックスはガラス固化体の溶解速度に依存すると考えられることから、調和溶解モデルを適用し、Se-79には人工バリア内での溶解度が低いと考えられるため、溶解度律速モデルを適用した。人工バリアからの核種移行率の比較を図2に示す。境界条件については、両者のモデルで設定可能なゼロ濃度境界条件を設定した。第2次とりまとめのレファレンスケースでは、人工バリアと周辺母岩との境界に掘削影響領域を想定し、その通過流量に依存した境界条件を設定しているため、図2はその条件の結果もあわせて示している。Cs-135の結果では、GSRWのガラス固化体の溶解速度が、表面積の時間的減少を考慮したモデルであるため、一定溶解速度であるMESHNOTEの結果と比較して、Cs-135の核種移行率が徐々に低下している傾向が見られるが、核種移行率のピーク値については極めて良い一致が見られる。また、Se-79に対する核種移行率のピーク値に関する比較についても十分良い一致が確認できた。ただし、Se-79の結果には、核種移行率が一定値を示す時間の長さの違いが見られる。JNCの評価では、Seの安定同位体を考慮し、Se-79との同位体存在比に応じた溶解度の分割を行っており、Seの移行率の減少は、同位体比を考慮したSeの溶解度に対するSe-79の崩壊の影響によるものと考えられる。

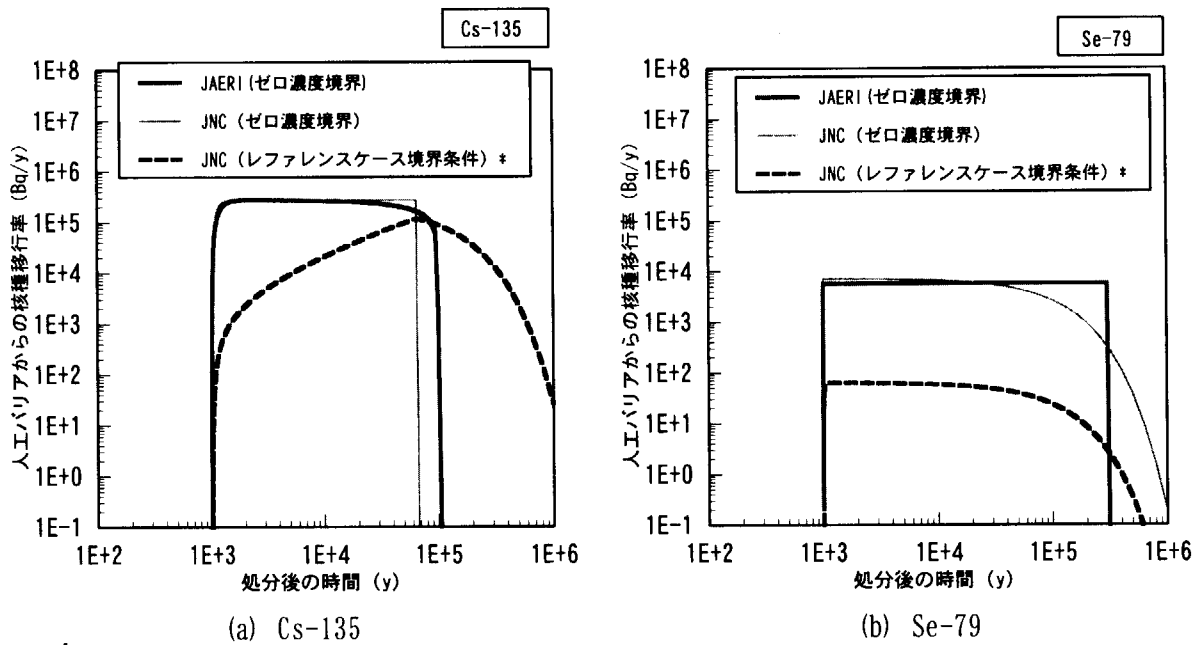


図2 ソースタームモデルのベンチマーク計算結果 (\*: 周辺母岩との境界に想定した掘削影響領域の通過流量に依存した境界条件、第2次取りまとめレファレンスケースの境界条件)

#### 4.2 亀裂性媒体モデルの機能検証

亀裂性媒体中の核種移行プロセスは、亀裂中の移流及び分散、亀裂内の収着、亀裂に接する岩石マトリクス部への拡散（以下、マトリクス拡散）及び収着遅延の移行現象、ならびに核種の崩壊連鎖現象等であると考えられ、MATRICS (JNC) 及びGSRW (原研) の亀裂性媒体モデルとも、これらの事象に対する数学モデルを構築している。また、MATRICSの解析手法は、ラプラス変換することにより得られた解析解を、タルボット法により数値的に逆ラプラス変換する手法を用いている。一方、GSRWの解析手法は、ラプラス変換ガラーキン有限要素法 (LTG) を採用している。よって、解析手法が異なるものの、亀裂性媒体中の核種移行に関する両者の数学モデルには、大きな違いは見当たらない。次に、解析解との比較及び2つの評価コードによるベンチマーク計算を通じて、各コードの機能を検証する。

##### (1) 亀裂内濃度分布の比較

Sudicky and Frind (1982)<sup>(10)</sup> は、亀裂中の移流・分散、マトリクス拡散、物理崩壊を考慮した解析解を報告しており、解析解と亀裂性媒体モデルとの比較からモデルの妥当性を検証する。なお、Sudicky and Frind (1982)の解析解は、亀裂内及びマトリクス中の収着を考慮していない。計算条件を表2に示す。核種はトリチウムを対象とし、ソースとして一定濃度条件を与えた。図3に、Sudicky and Frind (1982)の解析結果を、また、図4にGSRWコードによる解析結果を示す。図3は、移行距離300mに対する1000日、10000日、及び定常状態における濃度分布を表している。また、図4のGSRWに対する結果は、10年 (3650日)、30年 (10950日)、及び定常状態における同様の濃度分布を示している。解析解とGSRWの結果を比較すると、GSRWの濃度分布は、解析解と同様の時間変化を示しており、定常状態における亀裂内の濃度分布は、解析解による分布形と良く一致している。

表2 評価パラメータ (解析解 Sudicky and Frind (1982) との比較)

Parameters	value
Domain	300 m
darcy flux	0.1 m/day
Aperture	0.0001 m
pipe area	$1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
longitudinal dispersivity	0.1 m
Matrix porosity	0.01
Matrix tortuosity	0.1
Matrix depth	0.05m
Mass	$^3\text{H}$
decay constant	$1.54 \times 10^{-4} \text{ days}^{-1}$
Matrix diffusion coefficient	$1.38 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{day}$
Source	constant

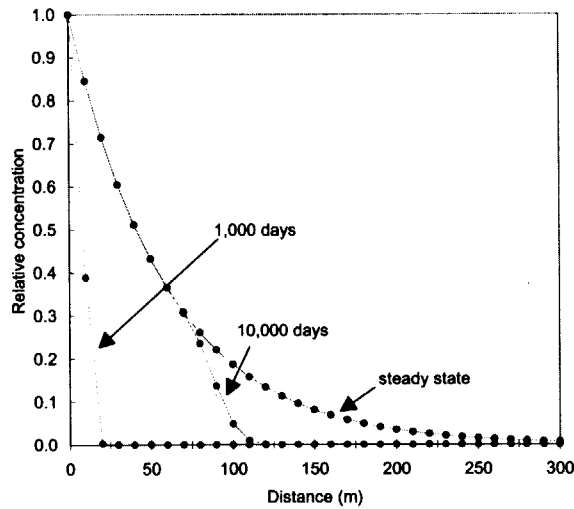


図3 Sudicky and Frind (1982) の解析解

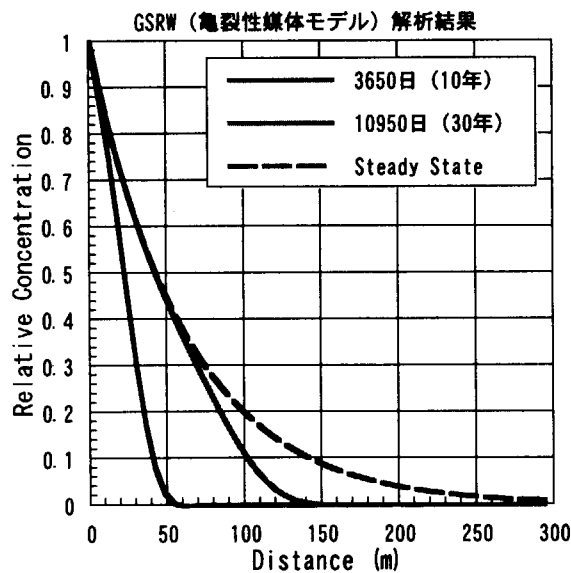


図4 GSRW (亀裂性媒体モデル) の解析結果

(2) 移行率経時変化の比較

岩石マトリックス内での収着現象を含めたモデルに関する検証のために、Zr-93を対象に表3の解析条件を設定し、MATRICSとGSRWコードによるベンチマーク計算を行った。天然バリアに流入するZr-93のフラックスは、図5に示すような時間変化の流入フラックス条件を設定した。また、これら条件のもと、MATRICSとGSRWコードによって計算された天然バリアからの核種移行率の比較を示す。両者の核種移行率の経時変化を比較すると、ピークフラックス及びその出現時間ともに十分な一致を確認することができた。

以上のベンチマーク計算より、JNC及び原研で開発した亀裂性媒体モデルに関する亀裂内の移流・拡散、マトリックス内の拡散・収着、及び物理崩壊等に関する数学モデルの機能を検証することができた。

表3 評価パラメータ (岩石マトリックス収着考慮ケース、Zr-93)

Parameters	value
Domain	100 m
Velocity	20 m/year
Aperture	$3.16 \times 10^{-4}$ m
longitudinal dispersivity	0.5 m
matrix porosity	0.02
matrix tortuosity	1
matrix depth	0.03m
Mass	$^{93}\text{Zr}$
decay constant	$4.53 \times 10^{-7}$ year <sup>-1</sup>
diffusion coefficient	$1.58 \times 10^{-3}$ m <sup>2</sup> /year
matrix retardation factor	135001

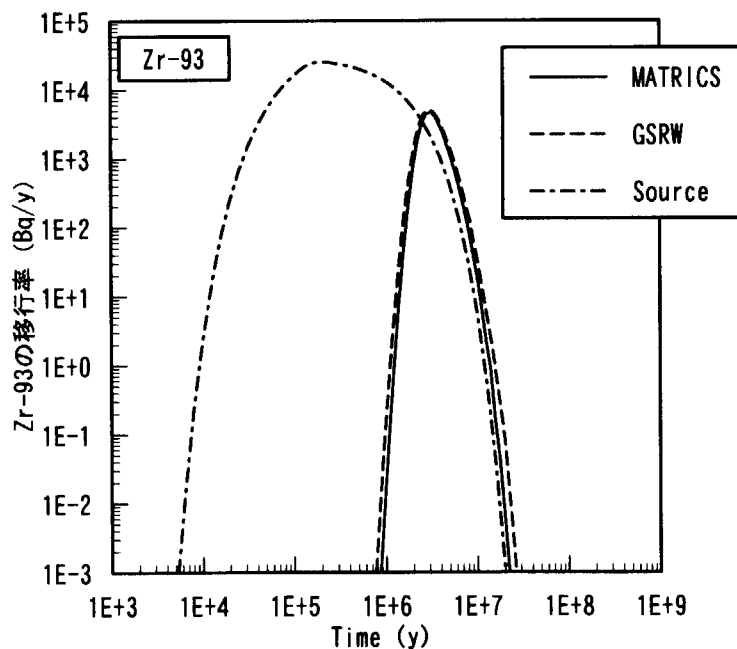


図5 MATRICS及びGSRWコードの結果比較 (岩石マトリックス収着考慮ケース、Zr-93)

### 4.3 確率論的評価手法の比較

前述までのベンチマーク計算等により、原研、JNC が、それぞれ開発しているソースタームモデル及び天然バリア中の核種移行モデルの特性・適用性を明らかにすることができた。次に、確率論的評価手法の比較・検討を行う。

JNC 第2次取りまとめレファレンスケースにおける母岩（亀裂性媒体）中の核種移行評価では、亀裂中の透水量係数に対するばらつきをある確率密度の分布型で表現し、その分布型の影響を考慮した1次元平行平板モデルにより解析している。この確率的な評価手法は、亀裂の透水量係数について対数正規分布を設定し、その分布型を等分割した各区間（48区間）から得られる透水量係数の中央値とその分布確率に依存した各核種移行率を計算し、全区間の結果の重ね合わせにより母岩からの核種移行率を求める方法である<sup>(1)</sup>。

一方、GSRW-PSAは、上述したように、モンテカルロ法に基づいた確率論的評価手法であり、両者の評価手法に違いが見られる。そこで、次章の人工バリア及び天然バリアのパラメータ不確かさ解析に先立ち、レファレンスケースの条件をGSRW-PSAによって再現した確率論的解析を行い、両者の確率論的評価手法の違いによる影響の定量的な把握を試みた。

レファレンスケースにおける透水量係数は、 $1E-13 \sim 1E-7 \text{ m}^2/\text{s}$ の範囲の対数正規分布として設定されている<sup>(1)</sup>。また、第2次取りまとめでは、亀裂開口幅は以下の経験則から算出されている。

$$2b = C\sqrt{T} \quad (C=2) \quad (1)$$

ここで、 $2b$ は亀裂開口幅(m)、 $T$ は透水量係数( $\text{m}^2/\text{s}$ )である。このとき、亀裂内流速 $V$ は、透水量係数、亀裂開口幅、動水勾配 $i$  ( $=0.01$ )、より、以下の式により求められている。

$$V = \frac{T \times i}{2b} \quad (2)$$

また、レファレンスケースでは、亀裂内の分散係数 $D_L$ は、式(2)より求められる亀裂内流速 $V$ 、分散長 $\alpha_L$  (10m)、自由水中の拡散係数 $D_0$ から、以下の式により決定されている。

$$D_L = \alpha_L V + D_0 \quad (3)$$

よって、第2次取りまとめレファレンスケースでは、上述のように、透水量係数の分布型を等分割した各区間から得られるその中央値、及び式(1)～(3)から亀裂開口幅、亀裂内流速、亀裂内の分散係数を求め、それらの各パラメータ値に基づいて計算される各核種移行率を重ね合わせることににより、母岩からの核種移行率を算出している。こうしたJNCのレファレンスケースにおける解析手法に対し、GSRW-PSAによる比較計算では、個々の評価パラメータに対し確率密度関数を設定することを基本とするため、同様の取り扱いが困難である。そこで、GSRW-PSAの評価では、透水量係数の分布に依存している亀裂開口幅、亀裂内流速、亀裂内分散係数の3つのパラメータに対し対数正規分布を想定し、式(1)～(3)の関係式から計算される確率密度関数を決定した。また、亀裂内流速と開口幅、及び亀裂内流速と分散係数との間に順位相関係数0.9の条件を与えて、パラメータサンプリングを行った。発生させるパラメータセットのサンプル数は、計算結果の収束性を考慮し1000個とした。図6に、LHS法によりサンプリングされた3つのパラメータの相関性を示す。LHS法によるサンプリング結果は、レファレンスケースにおける流速と開口幅、及び流速と分散係数との間の相関性を極めてよ

表4 GSRW-PSAにおける確率密度関数の設定

パラメータ	単位	最小値	最大値	分布型	備考
透水量係数 $T$	m <sup>2</sup> /s	1.0E-13	1.0E-07	対数正規	レファレンスケース条件
亀裂の開口幅 $2b$	m	6.0E-07	6.0E-04	対数正規	$2b = 2\sqrt{T}$ により最小及び最大値を計算
亀裂内流速 $V$	m/y	5.4E-02	5.4E+01	対数正規	$V = T \times 0.01/2b$ より最小及び最大値を計算
亀裂内分散係数 $D_L$	m <sup>2</sup> /y	5.4E-01	5.4E+02	対数正規	$D_L = (\alpha_L \times V) + D_0$ より推定、 $\alpha_L$ は10m

(注) 最小及び最大値は、対数正規分布の0.1及び99.9%タイル値を表す。

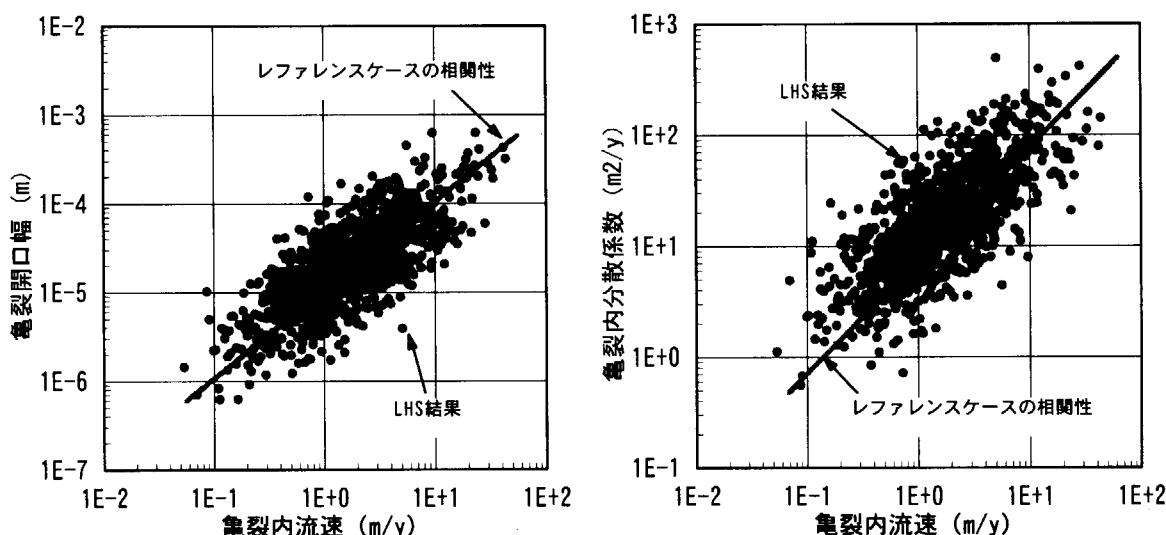


図6 LHSによりサンプリングされたパラメータの相関性 (サンプリング数 1000)

く表現している結果が得られた。

レファレンスケースの条件をGSRW-PSAによって再現した確率論的解析を行い、両者の解析結果を比較した。対象核種はCs-137とし、また、人工バリア出口における境界条件は、ゼロ濃度境界条件に設定した。図7に、Cs-135に対する天然バリア(母岩)からの核種移行率の計算結果を示す。GSRW-PSAでは、各パラメータの分布型からサンプリングした値を解析に用いるため、その計算結果はサンプル数及びパラメータの分布特性に依存した確率分布で表される。図7では、GSRW-PSAによるCs-135の移行率を、補累積分布関数(CCDF)により示している。一方、JNCの計算結果は、透水量係数の分布型に依存した核種移行率の重ね合わせにより計算しているため、その分布型全体を考慮した1つの計算値であり、GSRW-PSAの確率分布による結果表示と異なっている。GSRW-PSAより計算される核種移行率の95%信頼区間は、下限値(P=0.975) 1.0E-5Bq/y、上限値(P=0.025) 6.8E+4Bq/yであり、また、中央値(P=0.5)は4.6E+0Bq/yである。JNCの平行平板亀裂の重ね合わせ手法による母岩からの核種移行率は約2.1E+3Bq/yである。よって、レファレンスケースの条件を対象として、原研及びJNCの確率論的手法の違いに起因した計算結果を整理すると、JNCの移行率は、GSRW-PSAの中央値よりも3桁程度高く、補累積確率の約0.2に相当する結果となった。



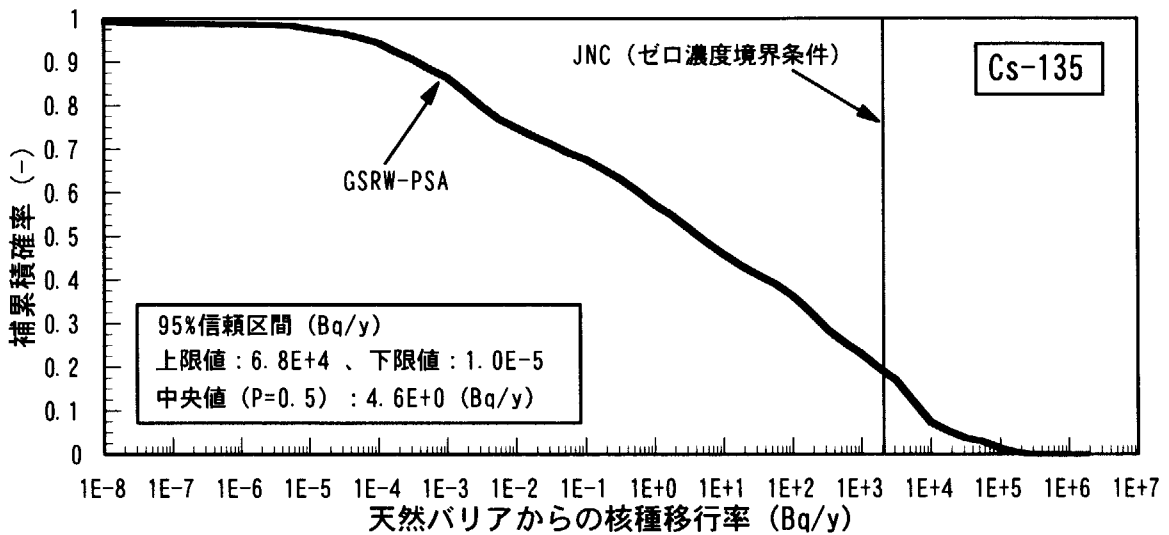


図7 天然バリア(母岩)からのCs-135核種移行率に関する補累積分布関数

## 5. 不確かさ解析

### 5.1 パラメータ不確かさ解析

「4. 評価コード特性の比較」では、確率論的解析コード GSRW-PSA の骨格を構成するソースタムモデル及び天然バリア中の核種移行モデルに関して、JNC の評価モデルとの決定論的な種々のベンチマーク計算を行い、特性・適用性を明らかにした。さらに、原研及び JNC の確率論的評価手法の違い（パラメータ不確かさの取り扱いの違い）を整理し、レファレンスケース条件に対する確率論的解析により、その影響を定量的に調べた。次に、GSRW-PSA を用いて、人工バリア及び天然バリア（亀裂性媒体）に関する評価パラメータの不確かさを定量的に把握することを目的としたパラメータ不確かさ解析を実施する。

対象核種は、第2次取りまとめ評価において重要核種として示された Cs-135（半減期：230 万年）及び Se-79（半減期：6.5 万年）とする。パラメータ不確かさ解析の対象としたパラメータを表5に示す。表5のパラメータの変動範囲は、第2次取りまとめのデータ不確かさの条件等より設定した。また、分布型については、基本的に一様分布とし、文献、既存データより分布型の推定が可能な分配係数、亀裂開口幅、流速に対しては対数正規分布を与え、オーダーの変動が考えられるガラス溶解速度及び溶解度は対数一様分布を設定した。亀裂内流速と開口幅、及び亀裂内流速と分散係数との間に順位相関係数 0.9 の条件を与えてパラメータサンプリングを行った。なお、天然バリアは、レファレンスケースにおける移行距離 100m の範囲の母岩とする。

表5 亀裂性媒体モデルによる確率論的解析の評価パラメータ条件

パラメータ	単位	下限値	上限値	分布形	
＜人工バリア関連パラメータ＞					
ガラス溶解速度	g/m <sup>2</sup> /d	1.0E-04	1.0E-02	対数一様	
Seの溶解度	mol/l	1.0E-10	1.0E-06	対数一様	
緩衝材Kd	Cs	m <sup>3</sup> /kg	5.0E-03	5.0E-02	対数正規
	Se		1.0E-05	1.0E-04	
緩衝材中の拡散係数	Cs	m <sup>2</sup> /y	2.0E-02	2.0E-01	一様
	Se		7.0E-03	2.0E-02	
＜天然バリア関連パラメータ＞					
亀裂開口幅	m	7.1E-06	1.4E-02	対数正規	
亀裂内実流速	m/y	2.2E-02	4.6E+01	対数正規	
マトリックス部Kd	Cs	m <sup>3</sup> /kg	1.0E-03	1.0E+01	対数正規
	Se		1.0E-05	1.0E-01	
マトリックス厚さ	m	3.0E-02	1.0E+00	一様	
マトリックス拡散寄与面積率	%	1.0E+01	1.0E+02	一様	
間隙率		1.0E-02	3.0E-02	一様	

図8及び図9に、Cs-135及びSe-79のパラメータ不確かさ解析結果を示す。これらの図は、GSRW-PSAによる天然バリアからの核種移行率のピーク値に対する補累積確率を示している。また、JNCのモデルによる、ゼロ濃度境界条件とレファレンスケースの境界条件（人工バリアと周辺母岩との境界における掘削影響領域の通過流量に依存した境界条件）の結果を併せて示している。これらのJNCの結果は、「4.3 確率論的評価手法の比較」で述べた方法によって、主に透水量係数分布の不確かさを考慮して計算された核種移行率であり、表5に示した人工バリア及びマトリックス拡散に関連するパラメータの不確かさの影響を反映していない。

表6は、図8及び図9の補累積分布関数（CCDF）から得られる人工バリア及び天然バリアのパラメータの不確かさに起因する核種移行率の変動範囲をまとめたものである。核種移行率の確率50～97.5%上限値の範囲は、Cs-135で約4桁、Se-79で約3桁と計算され、上位50%以上の核種移行率のばらつきはSe-79の方が1桁程度小さくなる結果となった。また、GSRW-PSAとJNCの結果（ゼロ濃度境界条件）を比較すると、Cs-135のケースで、図8よりJNCの結果はGSRW-PSAの補累積確率0.25に相当し、保守側の結果であることを示している。同様に、Se-79のケースを比較すると、図9より、主に透水量係数分布の不確かさを考慮したJNCの結果は、表5に挙げた全てのパラメータ不確かさを考慮したGSRW-PSAによる核種移行率の変動範囲のほぼ中央値を示す結果が得られた。

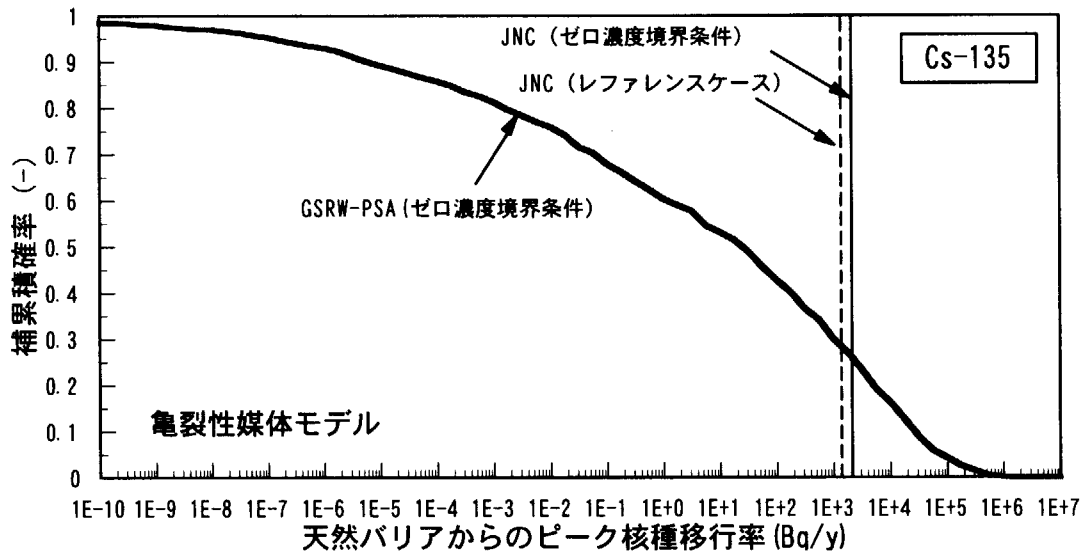


図8 Cs-135 のパラメータ不確かさ解析結果 (補累積分布関数 CCDF)

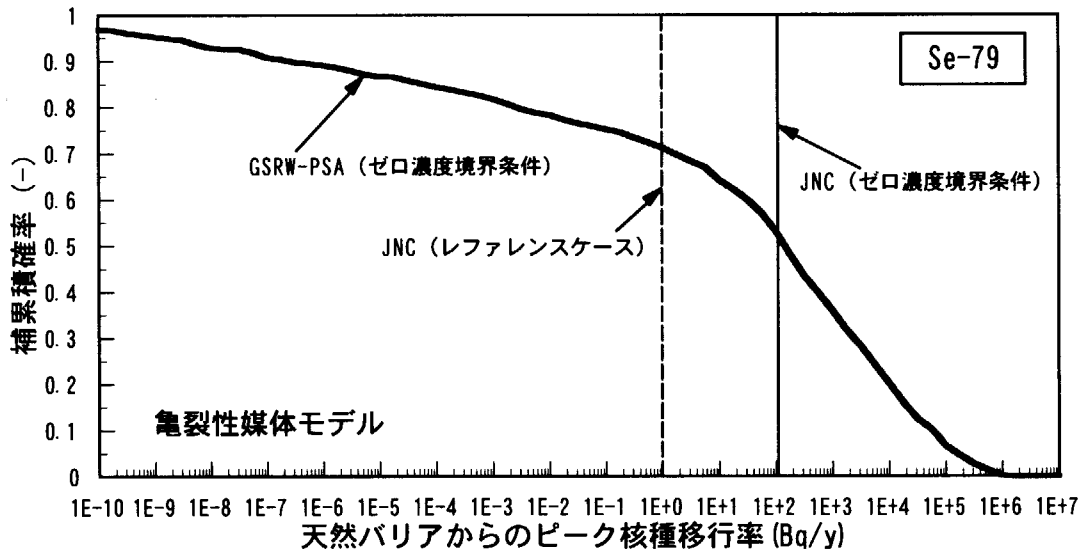


図9 Se-79 のパラメータ不確かさ解析結果 (補累積分布関数 CCDF)

表6 パラメータ不確かさによる核種移行率の変動範囲

核種	中央値 (P=0.5)	95%信頼区間	
		下限値 (P=0.975)	上限値 (P=0.025)
Cs-135	2.5E+01	1.8E-09	1.8E+05
Se-79	1.3E+02	2.5E-11	3.4E+05

次に、各評価パラメータの核種のピーク移行率に対する偏順位相関係数 (PRCC) を求め、人工バリア及び天然バリアの亀裂性媒体に関するパラメータの重要度 (感度) を調べた。図 10 に、各パラメータの PRCC 値の比較を示す。偏順位相関係数の絶対値は、評価結果 (ここでは、核種移行率) に対するパラメータの感度の程度を表し、また、正負の記号は評価結果との相関性を表している。Cs-135 の PRCC の結果は、人工バリアに関するパラメータの重要度は低く、亀裂性媒体に関するパラメータの重要度が高い傾向を示している。重要度の最も高いパラメータは岩石マトリックスにおける Cs の分配係数であり、その他のマトリックス部に関するパラメータ (厚さ、マトリックス拡散寄与面積率) も負の相関を示し、0.3 以上の比較的高い PRCC 値を示す。また、亀裂内流速及び亀裂開口幅は核種移行率に対して正の相関を示し、その PRCC も 0.3 以上であり、相対的に重要度の高いパラメータであるといえる。Se-79 のケースでは、最も重要度の高いパラメータは、人工バリアにける Se の溶解度となった。また、亀裂性媒体に関するパラメータの Se-79 の結果に対する感度は、Cs-135 の感度の傾向と同様であった。さらに、Cs-135 と Se-79 の緩衝材中の分配係数に対する PRCC の値は、共通して低いことから、処分システム全体を通じた核種移行評価において、緩衝材よりもマトリックスにおける分配係数の不確かさの方が、結果の不確かさに与える影響が大きいことが明らかとなった。

PRCC の結果から、人工バリア及び亀裂性媒体に関するパラメータについて、重要性の高いパラメータを順にあげると、以下ようになる。

- ・Cs-135: マトリックス中の Cs 分配係数、亀裂内流速、マトリックス厚さ、亀裂開口幅、マトリックス拡散寄与面積率
- ・Se-79: Se 溶解度、マトリックス中 Se 分配係数、マトリックス厚さ、亀裂内流速、マトリックス拡散寄与面積率、亀裂開口幅

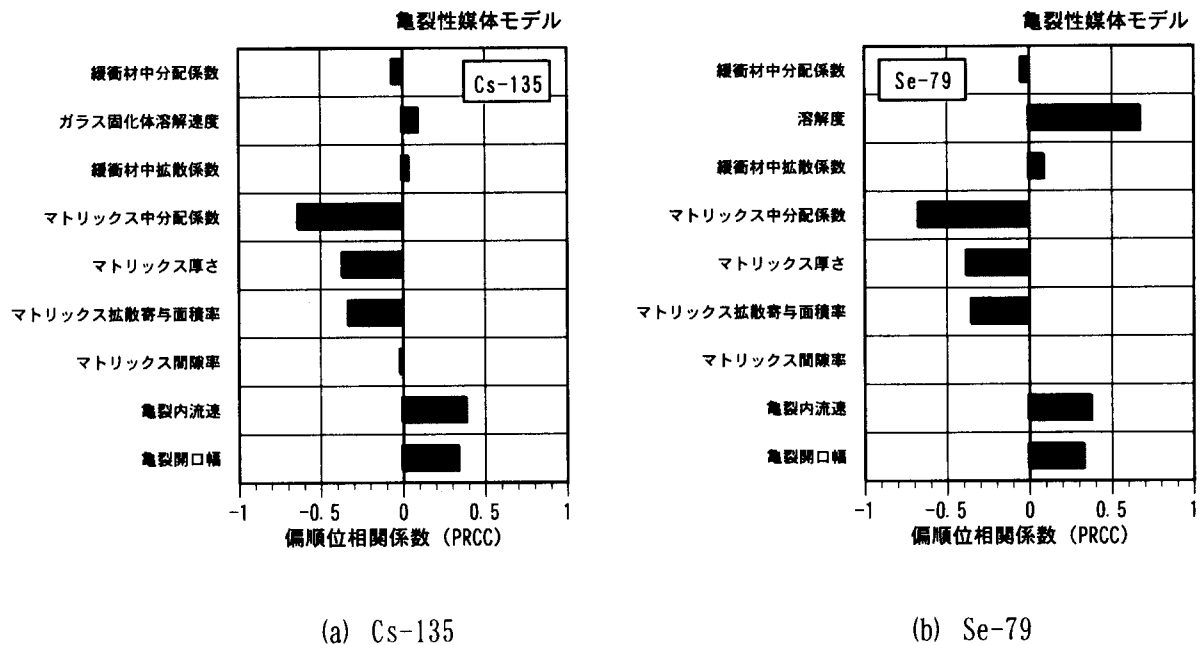
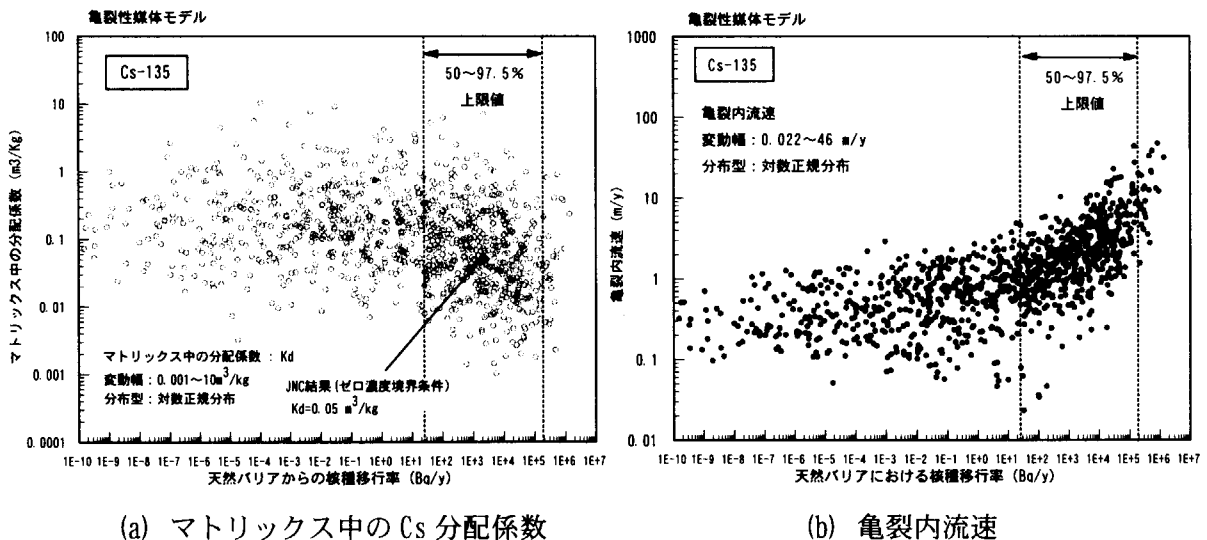
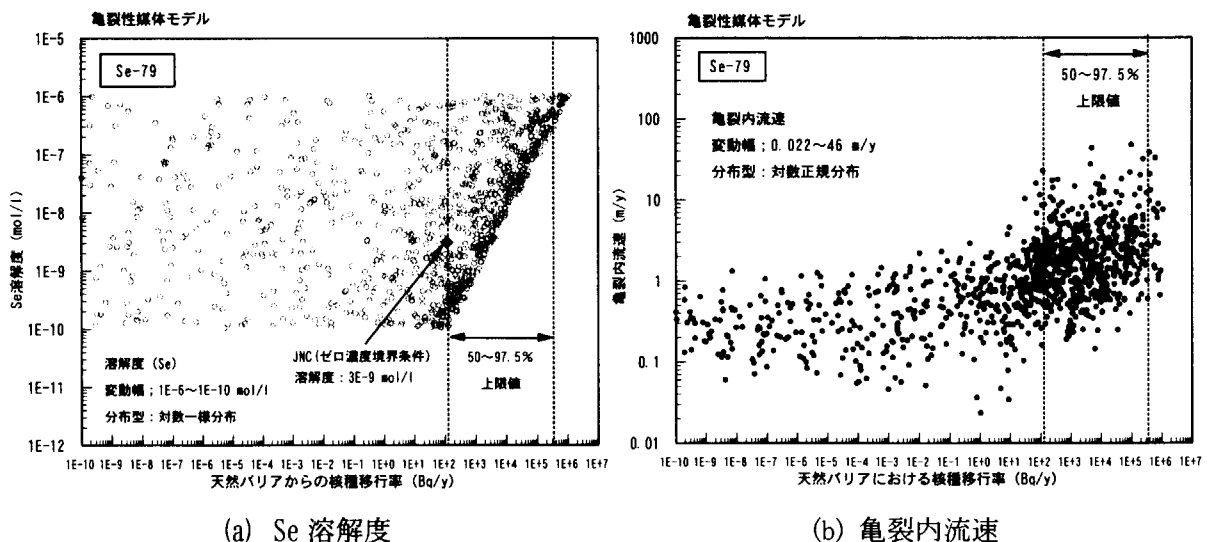


図 10 母岩からの核種移行率に対する評価パラメータの偏順位相関係数 (PRCC)

次に、PRCC より重要性が高いことが示されたパラメータ値と亀裂性媒体からの核種移行率との関係（散布図）を図 11 及び図 12 に示す。図 11 は、Cs-135 のマトリックス中 Cs 分配係数と亀裂内流速の散布図を示している。上位 50%以上の結果に対して、分配係数の散布図に負の相関性、及び亀裂内流速の散布図に正の相関性があらわれている。図 12 は、Se-79 の PRCC 結果より最も重要性の高い Se 溶解度と亀裂内流速の散布図を示している。上位 50%以上の結果に対して、相関性が顕著に現れる傾向は Se-79 の結果にも見られるが、特に Se 溶解度の上位 50%以上の結果には極めて強い正の相関が顕著にあらわれている。これには、2つの理由が考えられる。1つは、Se が吸着性の低い元素であるため移行時間が短く、相対的に各バリアの閉じ込め（減衰）効果の影響が小さくなり、核種の溶解量を定める溶解度の変動の影響がピーク移行率にダイレクトにあらわれやすくなるからである。2つ目の理由は、分配係数、流速の分布型に対数正規分布を設定しているに対し、溶解度の分布型に対数一様分布を設定しており、上限及び下限値付近の溶解度まで一様に解析条件としてサンプリングされるからである。



(a) マトリックス中の Cs 分配係数 (b) 亀裂内流速  
 図 11 主要パラメータと核種移行率 (Cs-135) との相関関係



(a) Se 溶解度 (b) 亀裂内流速  
 図 12 主要パラメータと核種移行率 (Se-79) との相関関係

## 5.2 天然バリア概念モデル不確かさ解析

前述までの評価では、天然バリアにおける地質媒体を、マトリックス拡散現象を取り込んだ亀裂性媒体としてモデル化した。また、結晶質岩等の地質媒体の概念モデル化に関しては、図 13 に示すように、亀裂性媒体の他に多孔質媒体による近似モデルが考えられ、解析に用いられている<sup>(11)</sup>。また、多孔質近似モデルは、例えば、亀裂性の地質媒体に対する透水係数の測定に関する前提として用いられており、孔間透水試験等による測定データの多くは、亀裂部及び亀裂周辺のある範囲の変質部分を含めた亀裂領域を対象としている。そこで、対象とする地質媒体に対し、亀裂性媒体近似の他に多孔質媒体近似したモデルによる確率論的解析を実施し、天然バリアの概念化の違いによる影響評価を行った。

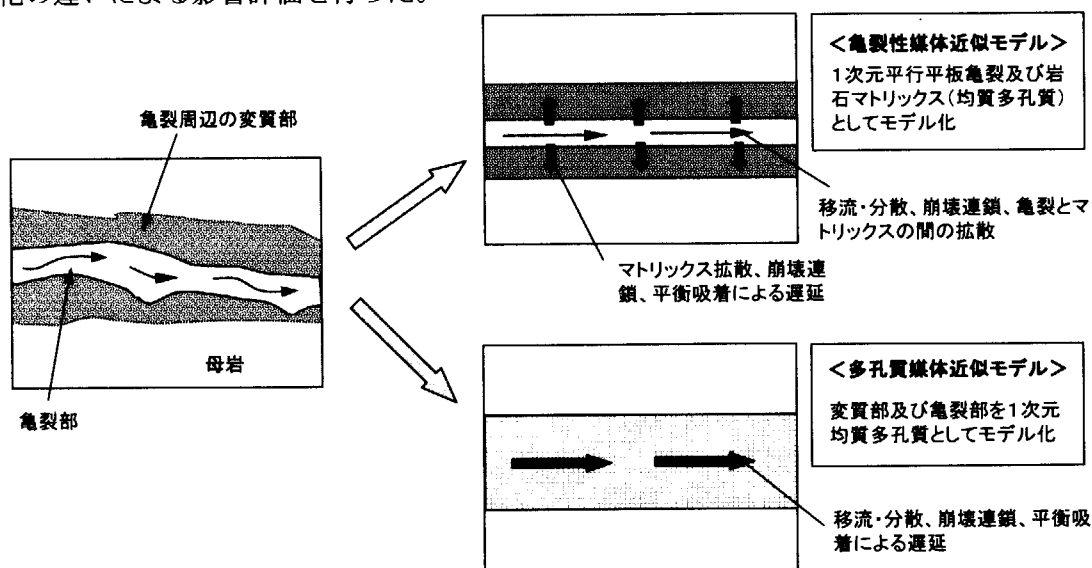


図 13 結晶質岩等の地質媒体に対する概念モデル化

図 13 に、亀裂性媒体と多孔質媒体の概念モデルの違いを示す。亀裂性媒体モデルでは、亀裂とその周辺の変質部を、1次元平行平板亀裂と岩石マトリックス（マトリックス拡散が生じる部分）としてモデル化した。多孔質媒体モデルでは、亀裂部と変質部を併せた領域を1つの均質多孔質としてモデル化し、地質媒体中の核種移行を平衡吸着及び崩壊連鎖を考慮した1次元移流-分散方程式で記述する。多孔質媒体モデルによる確率論的解析の評価パラメータの条件を表7に示す。亀裂性媒体を等価な多孔質媒体により近似するため、以下のようにパラメータを設定した。

- ・ 亀裂及び変質部の厚さ数十 cm 程度の領域内では、主要な亀裂の他にその亀裂から派生する複数の微小亀裂、または、微視的な間隙の連結が考えられるため、均質多孔質媒体により近似可能な領域を亀裂部及びその周辺の変質部と仮定し、その厚さをレファレンスケースのマトリックス拡散厚さ ( $H$ ) 10cm の2倍に設定した。
- ・ 上記の仮定に基づき、亀裂性媒体モデルで設定したマトリックス間隙率 ( $\epsilon$ ) 2%、動水勾配 ( $i$ ) 0.01、及び透水量係数 ( $\tau$ ) の範囲 ( $5E-13 \sim 2E-6 \text{ m}^2/\text{s}$ ) から、下記の式により多孔質媒体の実流速 ( $v$ ) の範囲を設定した。

$$v = \frac{\tau \times i}{2H \times \epsilon} \quad (3)$$

- ・ 多孔質媒体中の吸着性は、亀裂性媒体モデルにおけるマトリックス中の吸着性と同等とし、同一の分配係数を設定した。

また、多孔質媒体モデルでは、亀裂及びマトリックス部を直接表現していないため、マトリックス拡散現象を取り扱うことはできず、評価パラメータとして設定していない。人工バリアに関するパラメータについては、亀裂媒体モデルで設定したパラメータ条件と同じである。

表7 多孔質媒体モデルによる確率論的解析の評価パラメータ条件

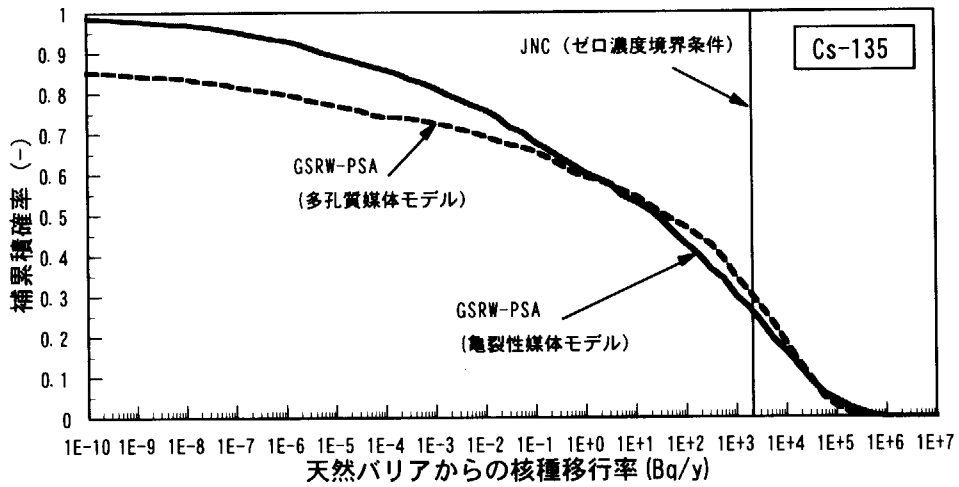
パラメータ	単位	下限値	上限値	分布形	
＜人工バリア関連パラメータ＞					
ガラス溶解速度	g/m <sup>2</sup> /d	1.0E-04	1.0E-02	対数一様	
Seの溶解度	mol/l	1.0E-10	1.0E-06	対数一様	
緩衝材Kd	Cs	m <sup>3</sup> /kg	5.0E-03	5.0E-02	対数正規
	Se		1.0E-05	1.0E-04	
緩衝材中の拡散係数	Cs	m <sup>2</sup> /y	2.0E-02	2.0E-01	一様
	Se		7.0E-03	2.0E-02	
＜天然バリア関連パラメータ＞					
地下水流速	m/y	4.0E-05	1.6E+02	対数正規	
多孔質媒体Kd	Cs	m <sup>3</sup> /kg	1.0E-03	1.0E+01	対数正規
	Se		1.0E-05	1.0E-01	
間隙率		1.0E-02	3.0E-02	一様	

図14に、多孔質媒体モデルにより計算されたCs-135とSe-79の母岩からのピーク核種移行率の補累積確率を示す。亀裂性媒体モデル及び多孔質媒体モデルの結果を比較すると、Se-79の場合、2つのCCDFのグラフに大きな違いは見られない。これは、表7に示すように、Se-79が地層への吸着性の小さい核種であり、マトリックス拡散を伴った岩石マトリックスへの吸着に関するモデル化の差による影響をあまり受けないためである。よって、Se-79に代表されるように、地質媒体中の吸着性が小さい核種は、天然バリアの概念化の違いによる影響が小さいことが明らかになった。一方、Cs-135に対する2つのCCDFを比較すると、補累積確率0.2~0.6にかけて、亀裂性媒体モデルよりも多孔質媒体モデルによる結果がより保守的であり、特に補累積確率0.6以上で2つのCCDFに違いが見られる。よって、表7に見られるように、地層中の吸着性の不確かさが大きい(Kd:0.001~10m<sup>3</sup>/kg)Cs-135のような核種は、特にマトリックス拡散現象のモデル化の差による影響を受けやすいことが示唆される。

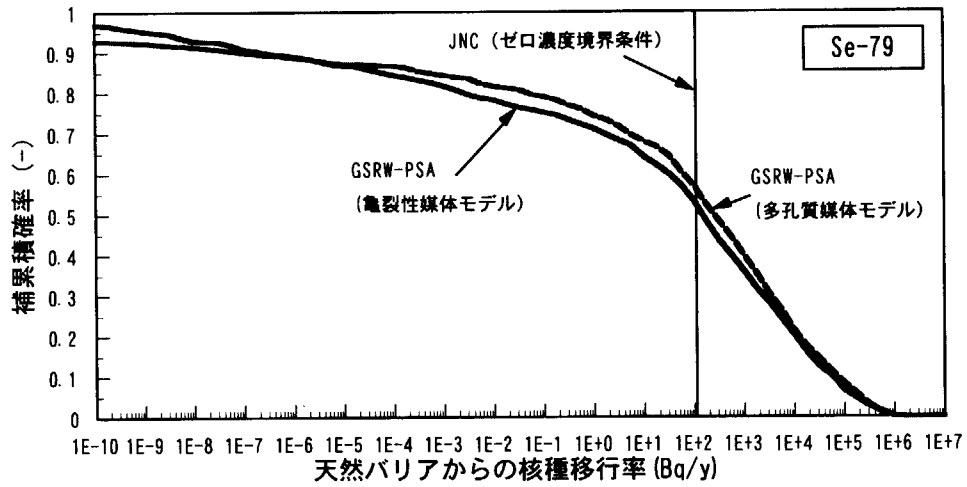
次に、多孔質媒体モデルに関する評価パラメータの偏順位相関係数(PRCC)を図15に示す。重要性の高いパラメータを順にあげると、以下のようになる。

- ・Cs-135: 地下水流速、多孔質媒体Cs分配係数、多孔質媒体の間隙率
- ・Se-79: 地下水流速、多孔質媒体Se分配係数、Se溶解度、多孔質媒体の間隙率

多孔質媒体モデルの場合、Cs-135、Se-79ともに、地質媒体における地下水流速と分配係数の重要度が極めて高い結果となった。また、Se-79の場合、Seの溶解度も重要性の高いパラメータとなる結果が得られ、亀裂性媒体モデルによるパラメータ重要度の結果(図10参照)と同様の傾向となった。



(a) Cs-135



(b) Se-79

図 14 亀裂性媒体モデルと多孔質媒体モデルにより計算された核種移行率の補累積分布関数

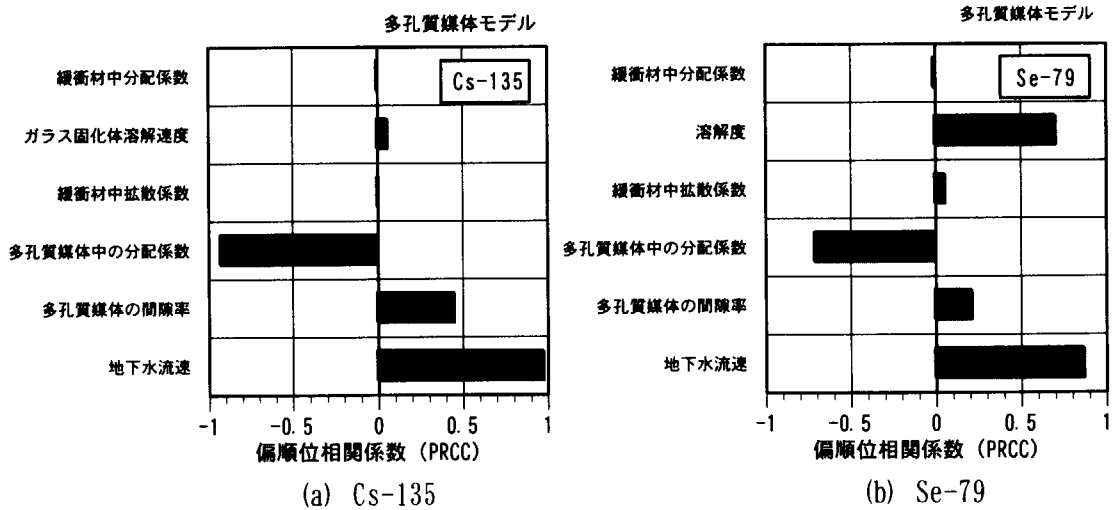


図 15 多孔質媒体モデルに関する評価パラメータの偏順位相関係数 (PRCC)



## 6. 結論

地層処分の安全評価では、廃棄物中に半減期の極めて長い放射性核種を含むことから、数万年以上の長期間にわたり、処分システム内の核種の移行挙動及び地層処分に伴う放射線影響を評価する必要がある。このような長期評価では、シナリオ不確かさ、モデル不確かさ、パラメータ不確かさの存在が考えられ、こうした不確かさの発生要因及び不確かさの影響（幅）を定量的に明らかにすることが、信頼性のある安全性の評価を行う上で極めて重要である。これらの不確かさの問題に対処するため、原研では、決定論的評価手法の他に、モンテカルロ法による確率論的評価手法の開発を進めている。

本研究では、評価に伴う不確かさのうち、パラメータ不確かさとモデル不確かさに起因した影響評価を目的として、確率論的評価手法（GSRW-PSA）の開発を行った。これら不確かさの影響評価の先立ち、原研、JNC、それぞれが開発している人工バリア及び天然バリア中の核種移行評価モデルに関して決定論的なベンチマーク計算を行い、個々の評価コードの特性・適用性を明らかにした。次に、GSRW-PSAを用いて、地層処分の第2次取りまとめにおける評価条件に基づき、高レベル放射性廃棄物処分の重要核種であるCs-135及びSe-79を対象とした人工バリア及び天然バリアに関するパラメータの不確かさ解析を行い、その結果は以下のようにまとめられる。

- ・ GSRW-PSA による解析から、パラメータ不確かさによる結果の変動は、補累積分布関数（CCDF）により定量化することができた。
- ・ JNC の結果に対し、パラメータ不確かさの影響を評価すると、Cs-135 のケースで、JNC の結果は GSRW-PSA の補累積確率 0.25 に相当し、保守側の結果であることが示された。同様に、Se-79 のケースを比較すると、JNC の結果は GSRW-PSA のほぼ中央値を示すことがわかった。
- ・ 偏順位相関係数（PRCC）の結果から、人工バリア及び天然バリア（亀裂性媒体）に関するパラメータの重要度を調べた。その結果、Cs-135、Se-79 とともに、マトリックス中の分配係数、亀裂内流速、マトリックス厚さ、亀裂開口幅等の亀裂性媒体に関するパラメータが評価上重要であることがわかり、Se-79 では、その溶解度が特に重要なパラメータであることが明らかとなった。

また、天然バリアにおける地質媒体の概念化の違いとして、多孔質媒体と亀裂性媒体による近似モデルを想定し、概念化の違いによる影響の評価を実施し、その結果以下のことが明らかとなった。

- ・ 亀裂性媒体モデル及び多孔質媒体モデルの結果を比較すると、Se-79 の場合、2つの CCDF のグラフに大きな違いは見られなかった。よって、Se-79 のような地質中の吸着性が小さい核種は、天然バリアの概念化の違いによる影響が小さいことが明らかになった。
- ・ Cs-135 の場合、多孔質媒体モデルによる CCDF の変動幅がより大きく、補累積確率 0.2～0.6 にかけて、亀裂性媒体モデルよりも多孔質媒体モデルによる結果がより保守的となった。よって、地層中における吸着性の不確かさの大きい Cs-135 のような核種は、特にマトリックス拡散現象のモデル化の差による影響を受けやすいことが示唆される。

謝辞

本報は、平成8年～12年度における、原研・核燃料サイクル開発機構との地層処分システムの確率論的評価手法の開発に関する共同研究の研究成果の一部を報告したものであり、本報を取りまとめるにあたり、若杉圭一郎氏（核燃料サイクル開発機構）、澤田淳氏（同上）、石黒勝彦氏（同上）には、有益な助言を頂きました。ここに感謝いたします。

参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構：「我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－」、平成11年
- [2] 原子力安全委員会 放射性廃棄物安全規制専門部会：「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第1次報告）」、平成12年
- [3] 原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会：「我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価」、平成12年
- [4] N. Cadelli, P. Escalier des Orres, et al., "Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final storage of radioactive waste: Everest project", EUR 17122 EN, 1996.
- [5] Nagra, "Kristallin-I, Safety Assessment Report, Nagra Technical Report NTB93-22, 1994.
- [6] ICRP, "ICRP Publication 81: Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste", 1999.
- [7] H. Kimura, T. Takahashi, S. Shima, H. Matsuzuru: "A Generic Safety Assessment Code for Geologic Disposal of Radioactive Waste: GSRW Computer Code User's Manual", JAERI-M92-161, 1992.
- [8] H. Kimura, T. Takahashi, S. Shima, H. Matsuzuru: "Safety and Sensitivity Analyses of a Generic Geologic Disposal System for High-Level Radioactive Waste", JAERI-Research 94-028, 1994.
- [9] R. L. Iman and H. J. Shortencarier: "A FORTRAN 77 Program and User's Guide for the Generation of Latin Hypercube and Random Samples for Use with Computer Models", NUREG/CR-3624, 1984.
- [10] E. A. Sudicky, and E. O. Frind: "Contaminant transport in fractured porous media: Analytical solutions for a system of parallel fractures", Water Resour. Res., 18(3), pp. 1634-1642, 1982.
- [11] H. Kimura, and M. Munakata: "Validation studies of tracer tests in a fracture zone at the Finnsjon research area", Advances in Water Resources, 15, pp. 63-74, 1992.

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ - ン	b
バ - ル	bar
ガ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラ	rad
レ	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>6</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー!・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)  
= 4.184 J (熱化学)  
= 4.1855 J (15 °C)  
= 4.1868 J (国際蒸気表)  
仕事率 1 PS (仏馬力)  
= 75 kgf·m/s  
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

確率論的安全評価手法 GSRW-PSA による地層処分システムの不確かさ解析：パラメータ不確かさ及び天然バリアの概念モデル不確かさの検討

**R100**

古紙配合率100%  
白色度70%再生紙を使用しています