

地層処分性能評価におけるシナリオ解析のための探索型アプローチの構築

牧野 仁史 石黒 勝彦 梅木 博之*
 小山田 潔*2 高瀬 博康*3 Peter GRINDROD*3

東海事業所 環境技術開発部
 * 環境技術開発推進本部
 *2 日揮株式会社
 *3 QuantiSci UK

資料番号: 107-8

Development of Exploratory Approach for Scenario Analysis in the
 Performance Assessment of Geological Disposal

Hitoshi MAKINO Katsuhiko ISHIGURO Hiroyuki UMEKI*
 Kiyoshi OYAMADA*2 Hiroyasu TAKASE*3 Peter GRINDROD*3

Waste Technology Development Division, Tokai Works

* Radioactive Waste Management Project, Head Office

*2 JGC Corporation

*3 QuantiSci UK

シナリオ解析は、地層処分システムの将来挙動を描き、性能評価の枠組みを定めるために実施されるが、従来のシナリオ解析手法は、考慮すべき現象が増えその組合せが増大するに従い、その適用が難しくなるという課題を有している。そこで、より広範囲にシナリオ解析を行う手法として、様々な現象の影響を包括的に取り込んだ物質移動モデルによる多数回の解析と、その結果に基づく感度構造の分析を中心とした「探索型アプローチ」を構築した。感度構造の分析では、クラスタ分析や主成分分析といった多変量解析手法を適用した。本アプローチの試運用を通じて、現象の複雑な組合せの中から、シナリオで考慮すべき影響因子を体系的かつ客観的に抽出できることを確認した。

It becomes difficult to apply the ordinary method for scenario analysis as number of the processes and complexity in their interrelations are increased. For this problem, an exploratory approach, that can perform scenario analysis on wider range of problems, was developed. The approach includes ensemble runs of a mass transport model, that was developed as a generic and flexible model and can cover effects of various processes on the mass transport, and analysis of sensitivity structure among the input and output space of the ensemble runs. The technique of clustering and principal component analysis were applied in the approach. As the result of its test application, applicability of the approach was confirmed to identify important processes from number of the processes in the systematic and objective manner.

キーワード

高レベル放射性廃棄物、地層処分、性能評価、シナリオ解析、探索型アプローチ、シャドウモデル、シャドウ関数、モンテカルロシミュレーション、クラスタ分析、主成分分析

High-Level Radioactive Waste, Geological Disposal, Performance Assessment, Scenario Analysis, Exploratory Approach, Shadow Model, Shadow Function, Monte Carlo Simulation, Cluster Analysis, Principal Component Analysis

1. はじめに

原子力発電所の使用済み燃料から有用なウランとプルトニウムを回収した後に残る高レベル放射性廃棄物の処分方法として、地層処分が考えられている。地層処分とは、高レベル放射性廃棄物を安定なガラスの形態に固化し、30年から50年間地上で貯蔵した後に、地下深い地層に処分する方法

である。地層処分では、安全を確保する仕組みとして、人工的な安全防護のシステム（ガラス固化体、オーバーバック、緩衝材からなる。総称して「人工バリア」と呼ばれる）が設けられる。さらに、この人工バリアと地層が本来備えている様々な安全防護の働き（「天然バリア」と呼ばれる）とを組み合わせた「多重バリアシステム」により、

安全を担保することが期待される。

これら地層処分システムの個々、または全体が有する放射性核種の人間環境への移動に対するバリア性能（核種の封じ込め機能、核種の溶出・移動の制限機能、地層中での核種の吸着・希釈・分散機能等）を定量的に示すことが、地層処分システムの性能を評価するうえで重要である。しかしながら、地層処分対象となる時間が非常に長期にわたること、また対象となる領域も広大であることから、実験などで直接的にバリア性能を示すことは困難である。そのため、まず地層処分システムの将来挙動を描いたうえで、それに伴う核種の移動挙動をモデルを用いて評価することにより、バリア性能を間接的に示していく手法がとられる。ここで、地層処分システムの将来挙動を描くためには、長期間のうちにシステムの状態の変化に寄与する可能性のある現象群を規定し、それらの組合せを検討することが必要である（「シナリオ解析」と呼ばれる）。

シナリオ解析では、これまで、地層処分システムの挙動及び物質の移動に関係する特性（Features）、事象（Events）、プロセス（Processes）（総称して「FEP」と呼ばれる）を抽出し、科学的な根拠あるいは専門家の判断等に基づき、それらFEPのスクリーニングや関係づけを行うボトムアップ的な手法が広く採用されてきている¹⁾。また、近年、この手法に基づくシナリオ解析をより体系的に進めるための工夫が試みられている^{2), 3)}。これらの手法は、ボトムアップ的な手順を経ることにより、その内容が理解しやすいという利点がある。一方、スクリーニングや関係づけの段階で重要となる定量的あるいは定性的な知見や専門家の主観的な判断が限られた範囲にとどまることから、FEPの数が増え、その組合せが増大するに従いその適用が難しくなり、シナリオの網羅性が課題として残る。

そこで、本研究では、複雑なFEPの組合せまでを包含したシナリオ解析を行うためのアプローチとして、環境シミュレーション法⁴⁾を原型としたトップダウン的な手法を構築した。この手法は、様々な現象の影響を包括的に取り込んで物質の移動に関する解析とその結果に基づく重要因子の抽出を行い、バリア性能に影響を与える可能性のあるシナリオを逆抽出することを目的としたものである。以後この手法を、不特定多数のシナリオの中から物質の移動に対する影響の観点で重要なシナリオを探し当てるという意味で、「探索型アプローチ」と呼ぶこととする。探索型アプローチは、ボトムアップ式の手法にとって代わるものではな

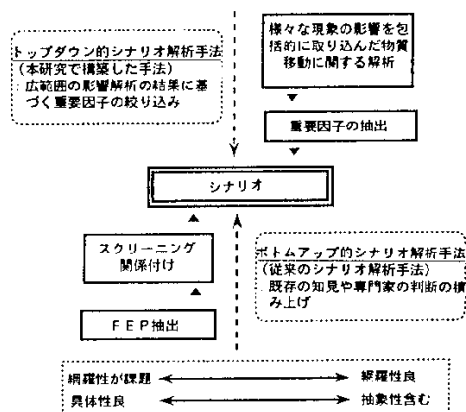


図1 シナリオ解析におけるボトムアップ的手法とトップダウン的手法の関係

く、重要なシナリオの抜け落ちを防ぐことにより、ボトムアップ式手法の課題であるシナリオの網羅性を補完する点で意味を持つものであり（図1）、今後の研究においては両手法を適切に組み合わせてシナリオ解析を進めていくことが重要であると考えている。

2. 探索型アプローチの構築

探索型アプローチを用いたシナリオ解析は、図2の流れに沿って進められる。

まず、ステップ1として、システム内外で生じる様々な現象の影響を包括的に取り込んで、物質の移動を解析するための物質移動モデルを作成す

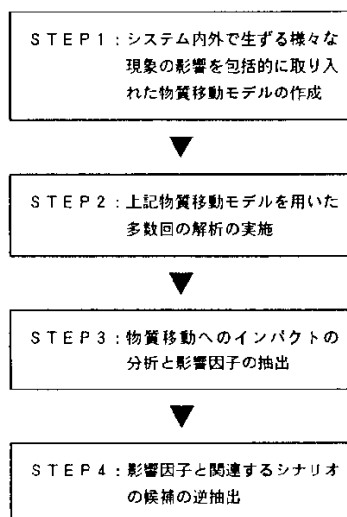


図2 探索型アプローチを用いたシナリオ解析の流れ

る。探索型アプローチの目的を達成するためには、この物質移動モデルに対して、現在の知見あるいは専門家の判断で“起こり得ない”ことが明確ではない現象を、基本的にすべて検討の対象とすることが求められる。この要求を満たすために、物質移動モデルの数学的表現において汎用的な関数群を採用し、それら関数に含まれるパラメータの値の多数の組合せにより、様々な現象の影響を包括的に表現するといった手法⁵⁾を適用した。ここで、汎用的な関数には、関数形自体を変化させるパラメータが含まれる。以上のことは、特定の現象にのみ適用可能な関数の組合せで物質の移動を表現する従来の物質移動モデルと大きく異なる点である。以降、このような考え方に基づき作成される物質移動モデルを「シャドウモデル」と呼び、その中で用いられる汎用的な関数を「シャドウ関数」と呼ぶ。

次にステップ2として、様々な現象の影響を取り込んだ物質移動解析を行うために、シャドウ関数に含まれるパラメータの統計的なサンプリングによる多数回のモンテカルロシミュレーションを行う。

ステップ3では、モンテカルロシミュレーションの結果に対して入力と出力の関係を明らかにし、物質の移動に対する主要な影響因子を抽出するために、多変量解析手法を組み合わせた感度分析を行う。この感度分析により、シャドウ関数のどのパラメータの変化が物質の移動にどの程度の影響を与えるかが定量的に示され、そのパラメータの変化に寄与する現象を影響因子として抽出することが可能になる。

最後のステップ4では、ステップ3で明らかにされた主要な影響因子の組合せにより、バリア性能に影響を与える可能性のあるシナリオを列举する。そのシナリオを、物質移動の定量的な結果（例えば、核種の移行率）とあわせて提示することにより、その起こり易さや妥当性をより具体的な情報に基づき検討していくことになる。

以下、これまでに構築した物質移動シャドウモデル、シャドウ関数及び感度分析手法について述べる。

2.1 人工バリア中物質移動シャドウモデル

ここでは、人工バリア中での物質の移動を解析するために構築したシャドウモデル（人工バリア中物質移動シャドウモデル）⁶⁾について述べる。

シャドウモデルの特徴は、質量保存のような物理的な法則に従いつつ、現在の知見あるいは専門家の判断で“起こり得ない”ことが明確ではない

現象を、基本的にすべて検討の対象とすることである。このため、シャドウモデルでは、現象の影響を表現する方法として、特定の現象を詳細に表現する関数ではなく、シャドウ関数を採用した。

シャドウ関数は、現段階で“起こり得ない”とは判断されないすべての現象の影響を取り入れるために、それらの現象が物質の移動へ与える影響のみを汎用的な関数で写しとるという考え方に立って設定される。言い方を変えれば、シャドウ関数は、物質移動に対する全影響を表す解空間に対して、“起こり得ない”と判断される現象に関係する部分を除いたすべての解空間を、パラメータの設定により近似可能な関数と言うことができる。ここで、従来の物質移動モデルで用いられている特定の現象を表現する関数は、シャドウ関数が表現する多様な入出力の関係の一つに相当する。また、シャドウ関数は現在注目されていない潜在的に重要な現象の影響までを含むことになる。ただし、シャドウ関数の設定にあたっては、引き続き行われるモンテカルロシミュレーションの計算時間を現実的な範囲に納めるために、既存の知見や専門家の判断などを有効に活用しながらその関数形やパラメータの範囲を適切かつ合理的に設定していくことが重要となる。そのための方策としては、関数形やパラメータの範囲の設定にあたって、専門家の意見を反映するステップを設けること、及び、本アプローチの運用において、まず広い範囲をある程度まばらに探索した後、その結果に基づいて密に探索すべき部分を絞り込むといった進め方が考えられる。

人工バリア中物質移動シャドウモデルの構築においては、質量保存式を中心に物質移動への影響のメカニズムに着目して複数のシャドウ関数を設定した。着目した影響のメカニズムとシャドウ関数の関係を表1に、質量保存式とシャドウ関数の関係を図3に示す。

表1 影響のメカニズムとシャドウ関数の関係

着目した影響のメカニズム	関係するシャドウ関数
化学種形態間の質量分配 (瞬時平衡反応あるいは速度論的 反応)	・ 拡散/移流移行特性シャドウ 関数 ・ 反応速度シャドウ関数
化学形態ごとの拡散による移動性	・ 拡散/移流移行特性シャドウ 関数
化学形態ごとの移流による移動性	・ 拡散/移流移行特性シャドウ 関数
地下水流れの時間的変遷	・ 流速場シャドウ関数
地球化学環境の時間・空間的変遷	・ 地球化学環境シャドウ関数
形状因子の時間・空間的変遷	・ 形状因子シャドウ関数

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \nabla \cdot (D_i \cdot \nabla u_i) + \nabla \cdot (v_i \cdot u_i) + R_i(u_i) + \lambda_i \cdot u_i - \lambda_i \cdot u_i + S_i$$

拡散移行特性を表現する項 移流移行特性を表現する項 速度論的反応を表現する項

$D_i \cdot \nabla u_i$: 拡散移行特性シャドウ関数 $R_i(u_i)$: 反応速度シャドウ関数

$v_i \cdot u_i$: 移流移行特性シャドウ関数 形状因子シャドウ関数

地球化学環境シャドウ関数 流運場シャドウ関数

ここで、 u_i : 物質全濃度 [mol/m³]
 λ_i : 崩壊定数 [1/y]
 S_i : ソース/シンク項 [mol/m³/y]

図3 物質移動に関する質量保存式とシャドウ関数の関係

ここで、既知の化学形態のうち、イオン種、吸着種、準安定固相及びコロイドは瞬時平衡反応のグループに属し、安定固相は速度論的反応のグループに属するとして以降の検討を行う。ただし、人工バリア中物質移動シャドウモデルの解析においては、化学形態の具体的な種別ではなく、瞬時平衡反応と速度論的反応のいずれのグループに属するかの区別のみが重要となる。

人工バリア中物質移動シャドウモデルの解析対象領域は、人工バリア（ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材）及び緩衝材周辺の母岩ゆるみ域（坑道掘削の影響を受ける領域）であり、互いに連結したボックス群として表現される（図4）。

ここで、緩衝材領域に相当するボックスは円筒次元、その他の領域に相当するボックスは単一セルとして扱う。また、オーバーパックの腐食に伴い生成する水素ガスの透気や緩衝材の初期欠陥

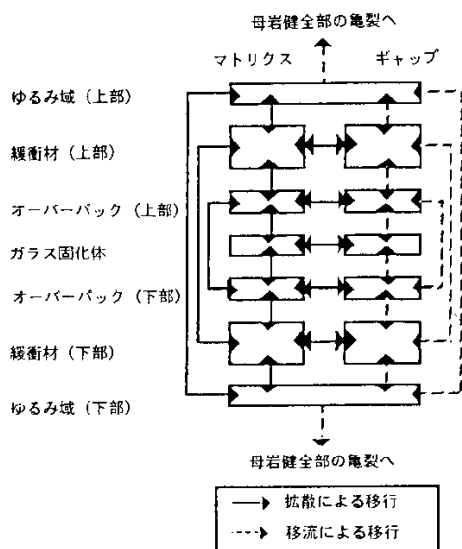


図4 解析対象領域のボックスモデルによる表現

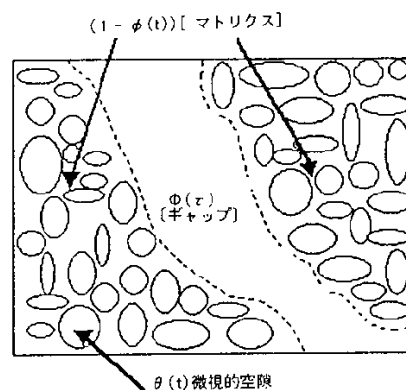


図5 マトリクス部とギャップ部の概念

等を想定して、移流による物質の移動の影響を調べることを可能とするために、人工バリアの各領域を、拡散が物質の移動を支配すると考えるマトリクス部と、移流が物質の移動を支配すると考えるギャップ部の2つの媒体から成るものとして扱う（図5）。

さらに、ガラス固化体を除く各領域を上部和下部に分割したことにより、母岩のゆるみ域における地下水流れの非対称性の影響等を調べることが可能である。

人工バリア中物質移動シャドウモデルによる解析の結果は、物質の移動に関する時間・空間的な多数の情報を含んでいるが、2.3項で述べる感度分析においては、緩衝材外側からの単位時間当たりの物質の移行量の最大値等を指標にする。

2.2 シャドウ関数

ここでは、拡散移行特性シャドウ関数を例としてシャドウ関数の特徴を示したあと、その他の関係するシャドウ関数の内容を概説する。

(1) 拡散移行特性シャドウ関数

拡散移行特性シャドウ関数は、物質の移行特性を表現するという意味で、人工バリア中物質移動シャドウモデルの中で最も重要である。本シャドウ関数は、従来の物質移動のモデルにおける拡散係数と物質濃度の積に相当する部分（図3の質量保存式での「 $D_i \cdot \nabla u_i$ 」）を一般化したものであり、媒体の単位体積中に含まれる物質の全濃度（すべての化学形態の濃度の総和）と拡散による移行のしやすさ（以下、拡散移行特性）の関係を、区分的に線形関数で表現する。作成した具体的な関数形を式(1)に、また、その関数により表現される全濃度と拡散移行特性の関係の例を図6に示す。本シャ

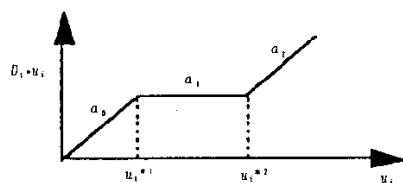


図6 拡散移行特性シャドウ関数による移行特性の表現例

ドウ関数は、拡散移行特性が全濃度の増加に伴い減少することはないという既存の知見や専門家の意見等を踏まえて、全濃度と拡散移行特性の少なくとも単調減少ではない関係を、線分の勾配や接点の位置の設定により多様に表現し得るものである。

$$D_i \cdot u_i = D_0 \frac{u_i^n}{R_d} \left\{ 1 + \left(\frac{u_i}{u_i^{*1}} \right)^{d_1} \right\}^{\frac{a_1 - a_0}{d_1}} \times \left\{ 1 + \left(\frac{u_i}{u_i^{*2}} \right)^{d_2} \right\}^{\frac{a_2 - a_1}{d_2}} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 D_0 : 核種iの標準的な拡散係数
 a_1 : 線分の勾配
 d_1 : 接点kでの連続性を表すパラメータ
 R_d : 低濃度領域での遅延特性
 u_i : 核種iの全濃度
 u_i^{*k} : 接点kにおける核種iの全濃度

図6からわかるように、本シャドウ関数は、そのパラメータである線分の勾配 (a_1 , a_2) や接点での全濃度 (u_i^{*1}) の設定により、従来の物質移動モデルで採用されている低濃度領域での吸着を含む移行挙動、あるいは溶解度による濃度制限の影響などについての関数的表現を再現することができる。さらに、これらパラメータのランダムなサンプリングにより、これまで考慮されていなかった影響パターンを包括的に表現することが可能になる。本シャドウ関数の主要なパラメータは、各線分の勾配、各接点での全濃度、低濃度領域での遅延特性等である。

(2) 移流移行特性シャドウ関数

移流移行特性シャドウ関数は、物質の移動特性を表現するという意味では、拡散移行特性シャドウ関数と同様に重要である。本シャドウ関数の形は、基本的に拡散移行特性シャドウ関数と同じであるが、標準状態での拡散係数の代わりに流速場シャドウ関数の結果である流速をパラメータとして持つ (図3参照)。本シャドウ関数の主要なパ

ラメータは、流速、各線分の勾配、各接点での全濃度、低濃度領域での遅延特性等である。

(3) 形状因子シャドウ関数

形状因子シャドウ関数は、ガラス固化体の体積変化を表現する関数と緩衝材中でのギャップ部 (図5参照) の生成・消滅を表現する関数を含んでいる。ギャップ部は、緩衝材中の任意の同心円と緩衝材外側との間のリング状の領域において、ある割合 ($\Phi(t)$) が存在するとして、ギャップ部の生成・消滅はそのリングの幅の時間的な変化として表現される。これは、オーバパックの腐食に伴い発生する水素ガスの透気や緩衝材の初期欠陥等が、物質移動に与える影響を一般化して表現するものである。本シャドウ関数の主要なパラメータは、オーバパックの腐食開始時間と継続時間、ガラス固化体の溶解開始時間と継続期間、リングの幅やその時間変化をコントロールするパラメータ等である。

(4) 流速場シャドウ関数

流速場シャドウ関数では、緩衝材中のギャップ部とゆるみ域での上部・下部それぞれの地下水の流れの状態を、部分的に均質な多重円筒モデルに基づく関数で表現する。この関数では、上部ゆるみ域から下部ゆるみ域に至る地下水の流れの割合を変えることにより、ゆるみ域の不均質性に起因するバイパス流の存在を取り扱うことができる。本シャドウ関数の主要なパラメータは、緩衝材ギャップ部とゆるみ域及び母岩部の透水係数、バイパス流の割合、動水勾配の最大値並びにその動水勾配が発生する時間と継続時間等である。

(5) 地球化学環境シャドウ関数

地球化学環境シャドウ関数では、緩衝材中での地球化学状態の時間・空間的变化を、特異な地球化学状態を表す図形群 (例えば楕円) の位置や広がりによって表現する (図7)。このような地球化学状

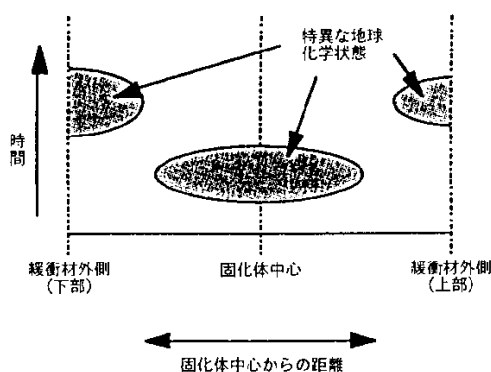


図7 特異な地球化学状態の時間・空間変化の表現

態の変化は、放射線分解に起因する酸化領域の生成・移動や地表水の浸入といった現象の影響に対応するものである。地球化学状態の変化は、拡散/移流移行特性シャドウ関数のパラメータにも影響を与える（図3参照）。なお、本シャドウ関数の主要なパラメータは、緩衝材外部及び内部の地球化学状態が変化し始める時間とその継続時間、並びに特異な地球化学状態が到達し得る緩衝材中での位置である。

(6) 反応速度シャドウ関数

反応速度シャドウ関数は、速度定数を含む関数であり、瞬時平衡反応のグループに属する物質と速度論的反応のグループに属する物質間での速度論的な物質の再分配を表現する。本シャドウ関数の主要なパラメータは、速度定数である。

以上のシャドウ関数群は、様々な現象の影響を意図的に一般化して取り込んでいるため、1つのシャドウ関数が複数の現象の影響を内包することになる。表2に、拡散移行特性シャドウ関数と地球化学環境シャドウ関数について、それらのシャドウ関数で表現可能な現象を例示する。ここで、シャドウ関数が、汎用的な関数の採用とそのパラメータのランダムなサンプリングにより、既存のモデルで表現可能な現象のみではなく、これまで重要視されていなかった現象、あるいは見落していた現象の影響までを表現し得る特徴を有することが重要である。

シャドウ関数群は、元素ごとに設定される計10のパラメータと、元素に依存しない計20のパラメータを含んでいる。人工バリア中の物質移動シャドウモデルを用いたモンテカルロシミュレーションは、これらシャドウ関数の多数のパラメータをランダムにサンプリングすることにより実施される。例えば、4元素を対象とした解析を行う場合、計60のパラメータについてサンプリングを行うことになる。

探索型アプローチにおけるシャドウモデル及びシャドウ関数を用いた解析は、2.3項で述べる感度分析に供する情報の蓄積を目的として行われる。また、シャドウモデル及びシャドウ関数の導入は、シナリオの不確実性のみではなく、特定の現象についてのモデルやパラメータの不確実性を、共通のフレームワークのもとで取り扱うことをも可能にする。このような分野への適用については、今後積極的に検討していく予定である。

2.3 感度分析手法

ここでは、多数回のモンテカルロシミュレーションの結果に対して、入力と出力の関係を明らかにするとともに、物質の移動に対する主要な影響因子を抽出するために適用した感度分析手法について述べる。感度分析の目的は、シャドウ関数のどのパラメータの変化が物質の移動にどの程度の影響を与えるか、客観的かつ定量的に示すことである。そのための手法として、既存の多変量解析手法であるクラスタ分析と主成分分析を組合わせた感度分析手法を適用した。図8に本感度分析手法の概念を示す。感度分析では、物質の移動挙動を比較するための指標として、緩衝材外側からの単位時間当たりの物質の移行量の最大値（最大移行率）を採用する。

まず、クラスタ分析⁷⁾では、入力（M次元：シャドウ関数群のパラメータ数）と出力である最大移行率（N次元：核種数）からなるM×N次元の空間にプロットされるモンテカルロシミュレーション

表2 シャドウ関数で表現可能な現象の例

シャドウ関数名	具体的な現象名
拡散移行特性シャドウ関数	イオンの拡散移行 線形/非線形吸着 溶解/沈澱 コロイドの移行 表面拡散 媒体表面との電気的相互作用など
地球化学環境シャドウ関数	緩衝材との相互作用 放射線分解 ガラス成分溶解 オーバーバック腐食 緩衝材変質 コンクリート反応水浸入 天然事象による地表水浸入など

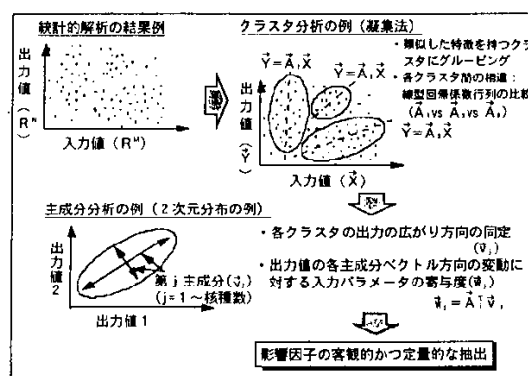


図8 感度分析手法の概念図

ョンの結果を、類似性の観点から複数の群（クラス）に分割する。このとき、クラスへの分割数を決める指標として、各クラスの線形回帰直線とクラス内の各点との二乗残差の総和を採用し、その総和の全クラスでの合計が有為に変化しなくなる分割数を選定することとした。分割された各クラスに対する線形回帰係数行列 ($\vec{A}_i$; $i=1\sim$ クラス数) は、各クラス内でのシャドウ関数パラメータと出力の感度構造を表すとともに、クラス間での感度構造の違いを表す。

次に、分割された各クラスに対して、その出力の広がり方向を同定するため主成分分析を行う。これにより、各クラスの出力の分布に対して変動の大きな軸がその大きさの順に抽出される（これらの軸はもともとの出力軸とは異なる）。この新しい軸のうち、出力の広がり最も寄与するものを第1主成分、次に寄与の大きいものを第2主成分と呼ぶ。

ここで、各クラスの線形回帰係数行列の転置行列 ($\vec{A}_i^T$) に対して、主成分の方向を表す固有ベクトル行列 ($\vec{v}_j$; $j=1\sim$ 主成分数、主成分数は対象核種数以下) を掛け合わせることで、それぞれの主成分方向の出力の変動に対するシャドウ関数パラメータの寄与度 ($\vec{w}_j$) を同定することができる (式(2))。

$$\vec{w}_j = \vec{A}_i^T \vec{v}_j \quad \dots\dots(2)$$

この操作は、各核種についての線形回帰係数に、主成分の方向に応じて重みをつけることに相当する。例えば、第1主成分の方向がある核種のもともとの出力軸に近ければ、その核種についての線形回帰係数に一番大きな重みが付与される。重みと各線形回帰係数の積を核種ごとに求め、さらにそれを全核種について足し合わせることで、各主成分方向への出力変動に対するシャドウ関数パラメータの寄与度が、行列 $\vec{w}_j$ の要素として定量化される（寄与度が大きい場合、絶対値が大きくなる）。このような操作は、各主成分方向ごとに行われる。これにより、各主成分方向の出力の変動にどのシャドウ関数パラメータがどの程度寄与しているかを客観的に示すことができる。

以上のような手法を用いて最大移行率の変動に対して寄与度の大きなシャドウ関数パラメータを抽出することとあわせて、特定の出力群（例えば、最大移行率が高い出力群）がどのシャドウ関数パラメータのどの値の範囲で生ずるかを調べることは有用である。その場合、式(3)を特定の出力群に適用することにより、その出力群が、どのシャド

ウ関数パラメータがどの程度の偏りを持つことにより生じているかを示すことができる。

$$d = |m - k| / st \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 m : 規格化された入力データの平均値

k : 規格化された全入力データの平均値

(入力データは[0,1]の範囲でランダムにサンプリングされるため $k=0.5$)

st : 規格化された入力データの標準偏差

このようにして得られたシャドウ関数パラメータの出力への感度をもとに、それらパラメータの変化に關与する現象を影響因子として抽出する。バリア性能に影響を与える可能性のあるシナリオは、このような影響因子の組み合わせとして表現される。ただし、シャドウモデルやシャドウ関数が“現象そのもの”ではなく“現象の結果としての影響”に焦点をあてるように工夫されているため、そこに含まれる感度の大きなパラメータが、必ずしもこれまでに着目されてきた現象と一対一対応になるとは限らない。このような場合には、既存の知見、表2に示すようなシャドウ関数と現象との対応あるいはFEP等に基づいて、そのシャドウ関数パラメータの変化に關し得る現象を複数抽出し、シナリオを見直すことになる。以上のような手順を踏まえることにより、重要となる可能性のあるシナリオを漏れなく検討の対象にすることが可能となる。また、このようにして作成されたシナリオは、物質移動を特徴づける定量的な指標（例えば、最大移行率）とあわせて示されるため、その起こり易さや妥当性がより具体的に検討できることとなる。

2.4 探索型アプローチの適用性の確認

ここでは、手法の適用性の確認を主目的として行った、探索型アプローチの試運用結果について述べる。

試運用にあたっては、先に述べた人工バリア中物質移動シャドウモデルとシャドウ関数のすべてを用いた。また、シャドウ関数のパラメータの幅については、動燃事業団内の専門家の意見等を取り入れて、非現実的ではない範囲で広く設定した。例えば、拡散移行特性シャドウ関数については、従来のモデルで溶解度に相当する第1接点濃度のパラメータ (u_1^{-1}) を $10^{-20} \sim 10^2 \text{ mol/m}^3$ の範囲に、また遅延係数に相当する低濃度領域での遅延特性のパラメータ (R_d) を $1 \sim 10^5$ の範囲に設定した。これらの設定は、既存の評価例^{8),9)}と比べて非常に大きな変動範囲をカバーするものである。

人にバリア中の物質移動シャドウモデルを用いたモンテカルロシミュレーションでは、4 元素 5 核種 ($\text{Am}^{243} \rightarrow \text{Pu}^{239} \rightarrow \text{U}^{235}$ 、 $\text{Np}^{237} \rightarrow \text{U}^{231}$) を対象として、計60のパラメータについて約1,000回のランダムサンプリングを行った。その結果得られる最大移行率に対してクラスタ分析を行い、12のクラスタを得た。ここで、主成分分析が可能なケース数を持つクラスタは上位の2つであり、残りのクラスタはパラメータ数に比べてケース数が十分ではなかった。ケース数が少ないことは、そのクラスタの重要性とは無関係であるため、本来ならばこれらのクラスタのケース数を増やすための追加的なモンテカルロシミュレーションを行うことになる。

次に、最もケース数が多くかつ高移行率のケースを含むクラスタについて主成分分析を行い、式(2)を用いて出力の変動に対するシャドウ関数パラメータの寄与度を分析した。その結果を図9に示す。

図9中の5つのスペクトル帯は、それぞれ第1主成分から第5主成分に対応するものであり、それぞれのスペクトルの色の濃淡が各パラメータの寄与度を表している。ここで、最初の10×4個のスペクトルが元素ごとに設定されるパラメータの寄与度を、残りの20個のスペクトルが元素に依存しないパラメータの寄与度を表す。この結果は、

例えば第1主成分方向の変動に最も寄与するパラメータが、ガラス溶解継続期間 (図9中で「WF」と表記、以下同様)、ゆるみ域や母岩での透水係数 (「EDZ HR」)、強い流れの程度と継続期間 (「Frac flow Cas」の第1、第3スペクトル)、地球化学環境変化の到達位置や継続期間 (「In Cas」の第2、第3スペクトル及び「Out Cas」の第2スペクトル) であることを示している。この結果は、地球化学環境の時間的な変化の影響を除けば、従来の物質移動モデルによる繰り返し計算の結果及びその結果に対する専門家の解釈^{(8), (9)}と整合している。このことは、本アプローチが、これまでの断片的な知見に基づく影響因子の予測を、体系的かつ客観的に再現可能であることを示していると考えられる。また、今後、多数回のモンテカルロシミュレーションを実施することにより、地球化学環境の時間的な変化のような、これまで見いだされていなかった、あるいは具体的な検討がなされていなかった現象を、影響因子として抽出することが可能になると想定される。

さらに、同じクラスタの中から移行率の高い50のケースを選び、式(3)を用いて高移行率が生じる場合のパラメータの組合せを分析した。その結果、図9で寄与度が大きいことが示されたパラメータとほぼ同じものが抽出された (図10)。これは、今回分析の対象としたクラスタが高移行率側のケ

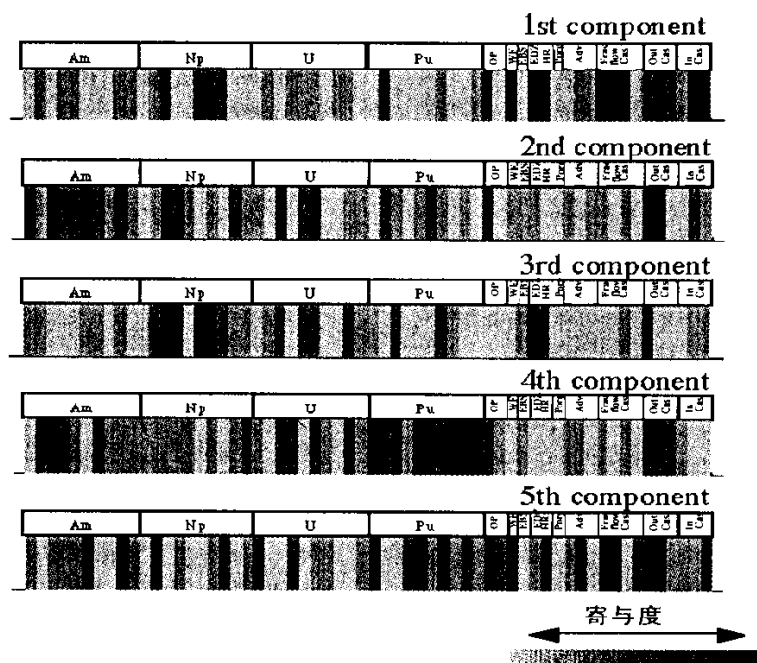


図9 シャドウ関数パラメータの寄与度の分析例

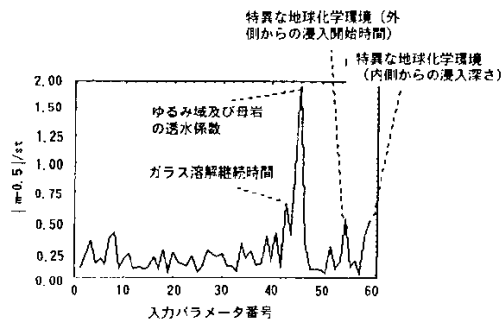


図10 高移行率に寄与するシャドウ関数パラメータの分析例

ースを多く含むものであったためと考えられる。

このようにして抽出された寄与度の大きなパラメータを対象に、それらに関する現象あるいはその組合せの抽出を試みた。その結果、高い移行率が生ずる場合として、「ガラスが短期間で溶解したのち、地球化学環境の違いに起因する物質の高移動性／低移動性の境界が緩衝材内側から外側に進み、最終的にその境界がゆるみ域に到達する。さらにその時のゆるみ域と母岩での地下水の流れが速い」という現象及び状況の組合せが想定された。このような、影響を中心としたシナリオから、さらにそのような影響が生じ得る発端事象を逆にたどることにより、例えば、「放射線分解による酸化領域が長期間存在し緩衝材外側まで到達することと、地震／断層活動により透水性あるいは動水勾配が増加することが同時に起こるか？」といったよりトップダウン的な質問を専門家などに問いかけることが可能になる。

以上のことから、探索型アプローチが、シナリオで考慮すべき影響因子の候補を、複雑なFEPの組合せの中から体系的かつ客観的に抽出できるものであり、従来のボトムアップ的なシナリオ解析の支援・補完に役立つものであることを確認できたと考える。

3. おわりに

本研究では、複雑なFEPの組合せまでを包含したシナリオ解析を行うための手法として、様々な現象の影響を包括的に取り込んだ、物質の移動に関する解析とその結果の分析に基づく影響因子の抽出を中心とした「探索型アプローチ」を構築した。

また、人工バリア中での物質移動を対象とした本アプローチの試運用を通じて、本アプローチが、シナリオで考慮すべき影響因子の候補を、複雑なFEPの組合せの中から体系的かつ客観的に抽出できるものであることを確認した。今後は、シャドウモデルの対象領域を天然バリアまで拡張するとともに、人工バリア中の物質移動に関する本アプローチの適用を進め、従来のボトムアップ的な手法に基づくシナリオ解析で得られた成果を支援・補完していく予定である。

参考文献

- 1) OECD/NEA: "Systematic Approaches to Scenario Development", A Report of the NEA Working Group on the Identification and Selection of Scenarios for Performance Assessment of Radioactive Waste Disposal. (1992).
- 2) SKI: "System Analysis, Scenario Construction and Consequence Analysis Definition for SITE-94", *SKI Report* 95: p26 (1995).
- 3) 動燃事業団: "地層処分研究開発の現状 (平成8年度)", 動燃事業団技術資料, PNC TN1410 96-071 (1996).
- 4) T.J. Summerling et al.: "Dry Run 3: A trial assessment of underground disposal of radioactive wastes based on probabilistic risk analysis", U.K.DoE Report No. DoE/HMIP/RR/92_040 (1992).
- 5) H. Takase, P. Grindrod, et al.: "HOW CAN COUPLED SYSTEMS EVOLVE? A SCENARIO SIMULATION METHODOLOGY", *High Level Radioactive Waste Management Proceedings of the Seventh Annual International*, p258-260 (1996).
- 6) H. Takase, P. Grindrod, et al.: "On EBS Modelling for Performance Assessment: Using Shadow Models to Identify Robust System Performance" (発刊準備中のScientific Basis for Nuclear Waste Management Vol.506 21号に掲載予定).
- 7) B.S. Everitt: "Cluster Analysis, 3rd Edition", Edward Arnold (1993).
- 8) NAGRA: "Kristallin-I Safety Assessment Report", *Nagra NTB* 93-22 (1994).
- 9) 動燃事業団: "高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書—平成3年度—", 動燃事業団技術資料, PNC TN1410 92-081 (1992).