

# 核種移行解析の網羅性の確認・評価

(核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書概要)

2000年2月

**日揮株式会社**

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4-49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2000

## 核種移行解析の網羅性の確認・評価

小山田潔\*、池田孝夫\*

### 要旨

従来のシナリオ解析に基づく性能評価においては、設定の単純化を正当化するために、「保守性」という概念が持ち込まれてきた。本研究の主眼とするところは、通常のシナリオ作成や解析ケース設定の手順とは全く逆の新たな手法（以下、探索型システム性能評価と呼ぶ）を従来の手法に対して補完的に用いることにより、単純化された性能評価モデルやこれらに関する解析ケースの設定を正当化することにある。

探索型システム性能評価の雛形となる手法としては、環境シミュレーション法が挙げられる。この手法の重要な特徴の一つは、入力パラメータの値を統計的に変動させることにより、対象とするシステムの将来挙動の「あり得べき」姿を定量的かつ統計的に多数作り出すことが可能であるという点である。探索型システム性能評価では、特定の数学モデルを使用することによる網羅性の限界を克服するために、シャドウモデルという極めて汎用性及び柔軟性に富んだツールを用いることにより未だ専門家によって完全には否定されていない領域を含んだ全てのパラメータ/モデル空間を概括的に調べることとする。

本年度の研究では以下の課題に取り組むこととする。

- (1) 統合された探索型システム性能評価ツールを用いて全体システムについて概括的な感度解析を行い、全体的な感度構造を定量的に把握するとともに、第二次報告書における解析ケース群の網羅性の確認を行う。特に、同報告書で比較対象としている諸外国の安全基準あるいは我が国の天然放射線レベルを上回る可能性のあるケースについて体系的な抽出を行う。
- (2) 探索型性能評価の手法を TRU 廃棄物処分に適用可能なものにまで拡張するとともに、必要となる解析ツールの改良を行う。
- (3) 核種移行ソルバーである Tiger の改良を行い、非線形かつ時間依存の問題に対する計算効率や頑健性の向上を図る。

---

本報告書は、日揮株式会社が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究内容結果である。  
機構担当者部課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター処分研究部 システム解析グループ  
\*日揮株式会社 第2事業本部 PMT4部

## A Comprehensive Study on Nuclide Migration in Geological Disposal System Using Scenario Exploration Method

Kiyoshi Oyamada\*, Takao Ikeda\*

### Abstract

Under the past Performance Assessment based on the scenario analysis, "conservatism" is employed to justify such simplifications. In order to underpin and defend the definition of calculation cases and simplified PA models, we discuss a complementary approach which reverses the standard procedure of scenario development and case definition.

A methodology which is prototypical to the Scenario Exploration Method is called the Environmental Simulation Method. An important feature of this methodology is in its capability of producing large number of quantitative realizations of the future system behaviour by varying the input parameter values in a stochastic manner. To overcome the constraint in the coverage due to use of specific mathematical models, we design a set of extremely flexible mathematical tools called 'Shadow Models' for the particular purpose of 'scanning' the whole parameter/model space which has not yet been rejected by the experts rather than scrutinizing it.

In the current financial year, the objective of the study is:

- (1) To apply the Integrated Shadow Model to total system performance assessment and reveal sensitivity structure of the safety case treated in the second progress report of JNC. This, in turn, will be utilized to check comprehensiveness of the calculation cases defined and dealt with in the second progress report;
- (2) To extent methodology of the scenario exploration to safety assessment of TRU waste disposal and modify the tools accordingly;
- (3) To modify the nuclide transport solver, Tiger, so that its efficiency and robustness against nonlinear and time dependent nuclide migration problems.

---

This work was performed by JGC Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Agency.  
JNC Liaison: System Analysis Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works, Katsuhiko Ishiguro  
\*Project Management Department, JGC Corporation

## 目次

1. 研究目的及び概要	1
2. 高レベル放射性廃棄物地層処分の核種移行に対する包括的感度解析	2
2.1 探索型システム性能評価の方法論	2
2.2 人工バリア及びニアフィールド母岩領域における核種移行シャドウモデル	5
2.3 統計的感度解析	9
2.3.1 全域的解析	10
2.3.2 二次解析	16
2.4 まとめ	24
2.4.1 全域的解析及び各種の二次解析結果の比較	24
2.4.2 第二次とりまとめとの比較	26
3. TRU 処分概念に対する探索型性能評価ツールの適用性の検討及び改良	30
3.1 TRU 処分の性能評価のために求められる解析機能	30
3.2 STRIDER Version 2.0 の開発	31
3.3 テストケースについての解析	31
4. 人工バリア及び天然バリア中核種移行解析コード Tiger の改良	32
4.1 前バージョンの問題点	32
4.2 改良内容	33
4.2.1 ソーバーの改良	33
4.2.2 廃棄体中存在形態に応じた核種放出挙動の解析機能追加	35
4.2.3 被ばく線量算出機能追加	36
4.2.4 その他の改良	36
4.3 テストケースについての解析	36
5. まとめ及び今後の課題	38
参考文献	40

## 図リスト

- 図 2.1-1 探索型システム性能評価に於ける検討の流れ
- 図 2.2-1 全体システム構成
- 図 2.2-2 人工バリア中の移流の取り扱い
- 図 2.2-3 平均拡散係数及び平均移流速度
- 図 2.2-4 動水勾配の時間変化のモデル
- 図 2.2-5 チャンネル透水量係数の時間変化のモデル
- 図 2.2.3-1 ソフトウェア構成
- 図 2.3.1-1 全域的解析結果のスキャッタープロット
- 図 2.3.1-2 ムービングバンド法により顕著な感度の検出されたパラメータ及び感度の見られないものの例
- 図 3.3-1 規格化後のインベントリータイプ割合の分布
- 図 3.3-2 STRIEDER version 2.0 を用いたテストケースの解析結果 (ケース数 100)
- 図 4.3-1 TIGER と MENTOR のガス影響ケースに関する比較  
廃棄体グループ 2, 堆積岩系岩盤
- 図 4.3-2 TIGER と MENTOR のガス影響ケースに関する比較  
廃棄体グループ 3, 堆積岩系岩盤

## 表リスト

- 表 2.3.1-1 人工バリアの幾何形状に関するパラメータ入力値
- 表 2.3.1-2 緩衝材止水性低下を生じ得る FEPs の例
- 表 2.3.1-3 人工バリア近傍の水理に関するパラメータ
- 表 2.3.1-4 人工バリア近傍の平均動水勾配の変化を生じ得る FEPs の例
- 表 2.3.1-5 人工バリア中地球化学異常に関するパラメータ
- 表 2.3.1-6 人工バリア中地球化学異常を生じ得る FEPs の例
- 表 2.3.1-7 廃棄体からの核種放出に関するパラメータ
- 表 2.3.1-8 オーバーパックの破損に関する FEPs の例
- 表 2.3.1-9 ガラス固化体からの核種放出に関する FEPs の例
- 表 2.3.1-10 人工バリア中核種移行に関するパラメータ
- 表 2.3.1-11 人工バリア中の核種化学形態に関する FEPs の例
- 表 2.3.1-12 母岩中チャンネル及びマトリクスの幾何形状に関するパラメータ群
- 表 2.3.1-13 母岩中チャンネル幅に関する FEPs の例
- 表 2.3.1-14 マトリクス拡散に有効な亀裂表面割合に関する FEPs の例
- 表 2.3.1-15 母岩中チャンネル開口幅に関する FEPs の例
- 表 2.3.1-16 母岩中マトリクス拡散深さに関する FEPs の例
- 表 2.3.1-17 天然バリア中水理に関するパラメータ
- 表 2.3.1-18 天然バリア中平均動水勾配の変化を生じ得る FEPs の例
- 表 2.3.1-19 母岩中チャンネル透水量係数に関する FEPs の例
- 表 2.3.1-20 天然バリア中地球化学に関するパラメータ
- 表 2.3.1-21 天然バリア中地球化学異常を生じ得る FEPs の例
- 表 2.3.1-22 天然バリア中核種移行に関するパラメータ
- 表 2.3.1-23 天然バリア中の核種化学形態に関する FEPs の例
- 表 2.3.1-24 顕著な感度を有するパラメータ及び各パラメータの感度の特徴  
(全域的解析)
- 表 2.3.2-1 二次解析条件の設定
- 表 2.3.2-2 二次解析条件の設定
- 表 2.3.2-3 顕著な感度を有するパラメータ (リファレンスケース近傍)

表 2.3.2-4	顕著な感度を有するパラメータ（核種移行時間最短ケース近傍）
表 2.3.2-5	顕著な感度を有するパラメータ（核種 mobility 最大ケース近傍）
表 2.3.2-6	顕著な感度を有するパラメータ（水理学的異常ケース近傍）
表 2.3.2-7	顕著な感度を有するパラメータ（地球化学異常ケース近傍）
表 2.3.2-8	顕著な感度を有するパラメータ（水理及び地球化学異常ケース近傍）
表 2.4.1-1	ムービングバンド法によって抽出された主要なパラメータのまとめ
表 2.4.2-1	概括的感度解析によって抽出された重要な不確実性要因と第二次 とりまとめにおける解析との比較
表 3.3-1	STRIDER version 2.0 テストケースの入力条件
表 4.2.1-1	人工バリア中核種移行についてのテストケース解析結果
表 4.2.1-2	天然バリア人工バリア中核種移行についてのテストケース解析結果
表 4.3-1	TIGER と MENTOR による解析結果の比較



## 核種移行解析の網羅性の確認・評価

### - 概要版 -

#### 1. 研究目的及び概要

核燃料サイクル開発機構は、高レベル放射性廃棄物地層処分についての研究開発の成果をとりまとめた第二次報告書を作成し、まさに公開する段階となっている。この第二次報告書における性能評価の主眼とするところの一つは、極めて長期に及ぶ評価期間の中で想定し得る地層処分システムの様々な将来像、ならびにこれらを評価する側の概念及び手法上の選択肢の多様性を網羅することにより、評価結果に介在する不確実性の全体像と大きさを合わせて把握することである。

シャドウモデルの手法を用いた探索型システム性能評価の方法論は、第二次報告書の上記の目標を達成するための有力なアプローチの一つである。広義には、この手法は環境シミュレーションによるシナリオ作成法の一つであるという事が出来る。より古典的な言語ベースのシナリオ作成法と比較した場合、環境シミュレーション法の大きな特徴は、その定量性及び記述の厳密性（言語による概念の記述に比して、数式による記述には曖昧さや内部的な不整合の入り込む余地が極めて小さいと言うこと）にある。そして、探索型システム性能評価では、こうしたシミュレーション法の特徴を最大限に活かすために、シャドウモデルという概念を用いる。シャドウモデルは、通常の物理的なモデルとは異なり、ある現象についての特定の概念化や数式化のための特殊な仮定に対応するものではない。代わりに、シャドウモデルでは、幅広い可能性（数学的により丁寧な言い方をすれば、将来のシステムの状態を記述する関数空間の全体）のうち未だ否定されていない全ての選択肢を網羅することが目標となる。また、シャドウモデルはこの様な幅広い選択肢の集合に基軸（数学的には、関数空間に於ける基底）を導入することにより、莫大な数になりがちな選択肢群を体系的に管理・活用すること（空間に含まれる各関数を各基底に対応するパラメータ値のセットとして表現すること）を可能とする。これらの措置により、性能評価に通常含まれる種々のタイプの不確実性（シナリオ不確実性、概念モデル不確実性、数学モデル不確実性及びパラメータ不確実性）を一つの共通的な不確実性解析及び感度解析のフレームワークのもとで取り扱うことが可能となる。

昨1998年度には、ニアフィールド母岩中の核種移行問題に関して、以下の種々の核種移行挙動及びニアフィールド環境変化の核種移行への影響機構を表現することが可能な汎用性の高いシャドウ核種移行モデルを開発した。

- 液相での分種化、吸着、又はコロイド生成などの速い（瞬時平衡）反応による核種の質量配分

- 溶解／沈殿、鉱物化、結晶化などの遅い（速度論的）反応による核種の質量配分
- 核種の様々な化学形態での拡散、移流性の違い
- 亀裂内の移流及び母岩マトリクス中の拡散
- 時間依存の亀裂内地下水流が及ぼす核種移行への影響
- 亀裂及びマトリクス内の地球化学的変化（pH、Eh、温度などの変動）がもたらす核種の質量配分への影響

また、ニアフィールド母岩中で生ずる可能性のある核種移行の全体像を知るために、上記シャドウモデルを用いた統計解析を実施し、この結果について、主成分分析、及び各入力パラメーターの変化によってもたらされる出力の変化の分析を行うことにより、リファレンスケースを中心とした感度構造の理解が定性的にも定量的にも深まった。この結果は、第二次報告書における性能評価ケースの設定に於いて、どの様な具体的自然現象がクリティカルなシステム挙動をもたらすか、そして、これらの自然現象が物理的に生起可能か否か、更にはどの程度の確からしさを以て生起すると考えられているか、等について詳しく調べることの必要性を示唆するものである。つまり、本アプローチは、将来のシステム挙動についての各専門家の理解を促し、従来の性能評価手法を補完するものとして期待できるということが例証された。さらに、1997年度既に開発済みの人工バリア中核種移行シャドウモデルとニアフィールド母岩中シャドウモデルとを統合した探索型システム性能評価ツールを作成している。

以上の成果を踏まえ、本年度は、統合された探索型システム性能評価ツールを用いて全体システムについての概括的な感度解析を行い、全体的な感度構造を定量的に把握するとともに、第二次報告書における解析ケース群の網羅性の確認を行う。特に、同報告書で比較対象としている諸外国の安全基準あるいは我が国の天然放射線レベルを上回る可能性のあるケースについて体系的な抽出を行うこととする

以上に加えて、今後、上記の手法及びツールを高レベル放射性廃棄物地層処分あるいはそれ以外の廃棄物処分に適用していくための付随的な作業として、

- TRU 処分概念に対する探索型性能評価ツールの適用性の検討及び改良
- 人工バリア及び天然バリア中核種移行解析コード Tiger のサーバーの効率・頑健性の向上や廃棄物中の複数の核種形態を考慮するための改良を行うこととする。

## 2. 高レベル放射性廃棄物地層処分の核種移行に対する包括的感度解析

### 2.1 探索型システム性能評価の方法論

探索型システム性能評価に於ける検討の流れを図 2. -1 にまとめる[1]。

まず、第一の段階（図中 A）は評価の対象となるシステムを定義することである。ここでは、各構成要素（例、廃棄物、容器、緩衝材、ニアフィールド母岩、等）の仕様・寸法等が定義される。

第二の段階（図中 B）は、以下の様な評価上の前提を定義するものである。

- ・ 考慮すべき核種移行メカニズム
- ・ 性能指標（例、個人に対する年間被ばく線量、集団線量、個人に対する集積線量、及び/あるいは最大核種放出率）
- ・ 評価対象とすべき主要核種
- ・ 評価期間
- ・ バリア状態に関する仮定

第三の段階では、種々の事象及びプロセスがシステム性能（上記で選択される指標に基づく）に及ぼし得る影響についての検討が行われる。各性能指標は、いずれも基本的には放射性核種の移行率に依って規定されるものであるために、ここでの検討の焦点は、核種移行の経路とメカニズムとに置かれる。

将来の長期にわたって、ニアフィールドの内外では多種多様な事象及びプロセスが生ずるものと考えられるが、探索型システム性能評価の範囲はこれらの事象やプロセスの起源あるいは発生メカニズムではなく、これ等がシステムの特徴にどのような影響を及ぼし得るか、さらに究極的には性能指標の出力をどのように変動し得るかという事に特定されるべきである。これ等の影響に関する検討は、定性的なものから始まり、やがては定量的なシャドウモデルの定式化に至る（図中 C）。シャドウモデルの定式化は、当該性能指標を決定づけるシステムの特徴を抽出することによって行われる。例えば、最大核種放出率は、液相中の（あるいは他の可動な相での）核種濃度によって規定される。従って、シャドウモデルは、これ等の核種濃度を未知数とした微分方程式及び代数方程式の形式を採る。また、後述するように、シャドウモデルは上位のモデルの入力変数を下位の（より詳細な）モデルにより算出するという階層構造をとることも可能である。

シャドウモデルの作成にあたりまず行うべき事は、あり得るべきではないタイプ（implausible）の挙動を同定することである。（図中 D.及び E.）。これは、物理的あるいは化学的な法則（保存則、等）あるいは専門家の知見\*に基づき行われる。これに引き続いて、残された（即ち implausible ではない）挙動の全てを記述できる様な一般性の高い数学的定式化を行う。ここで重要な点は、特定の事象やプロセスを具体的にモデル化するのではなく、ある抽象的なレベルでモデルを作成することによりこれらの既知の事象やプロセスは勿論、implausible とは断定できない全ての挙動が少なくとも近似的には表現可能なもの

とすることである。

\*注) 従来のシナリオ解析とは異なり、専門家の知見が得られなくともシャドウモデルによる解析は可能である(ただし、この場合には、検討範囲、従って、専門家の知見は、それが確定したものである場合に限って用いられるべきである。

シャドウモデルの入力パラメータ空間の時間を媒介変数とした軌道は、前出の用語に対応すれば、事象及びプロセスの時間的系列(即ち、一つの将来像)となる。従って、次のステップとしては、この空間の中で多数の軌道に対して繰り返し出力値を算出すること(図中 F.)が必要となる。この様な統計的計算により、所定の範囲(アンサンブル)に含まれる異なる将来像のそれぞれについて、対応するシステムの応答を性能指標を尺度として調査することが可能となる。探索型システム性能評価の際だった特徴の一つは、従来のシナリオ解析の様にシステムの挙動を定性的な検討によって予め絞り込んでしまうのではなく、多数の統計的計算の結果に基づき重要性の高いケース群を自ずと浮き彫りにするという点である。

統計的計算に続くステップでは、特に性能評価上重要な結果(例えば、高い核種放出率)につながる様なクリティカルな将来像を明らかにするため、感度解析を行って、特に顕著な感度を有する支配的なパラメータを抽出するとともに、高放出率の目安(安全基準等)を上回る様な入力値の条件を固定する(図中 G.)。この様な感度解析の手法としては、非線形性の強い多成分系の問題に対して優れた適用性を有するムービングバンド法を用いる。さらに、局所的な感度を詳しく調べるために、クラスター分析によって類似した出力をもたらす将来像のグループ(クラスター)を同定し、また、各クラスター毎に線形回帰分析を行う(図中 H.)。

探索型システム性能評価の最後のステップは、感度分析の結果を専門家グループに報告し、各クラスの確からしさ(Plausibility)を評価する段階である(図中 I.)。この作業では、特に重要性の高い入力パラメータ(及びその組み合わせ)についてより詳しい検討を行う。この様に定量的な重要度を反映して、詳細な検討を特定のパラメータに限定できることは、この方法論の大きな特徴の一つである。勿論、各パラメータ値に対する専門家の判断は plausible と implausible という二つにはっきりと分けられるとは限らない。恐らく、より現実的には、いくつかのパラメータ範囲の生起の確からしさは中間的なものとなることが予想される。このような場合には、専門家の判断結果をファジー理論に於けるメンバーシップ関数あるいは主観確率として表現し、各計算ケースの出力をこれらによって重み付けした上で積算することにより、最終的な評価結果の統合と不確実性を見積もりを行うことが可能である。

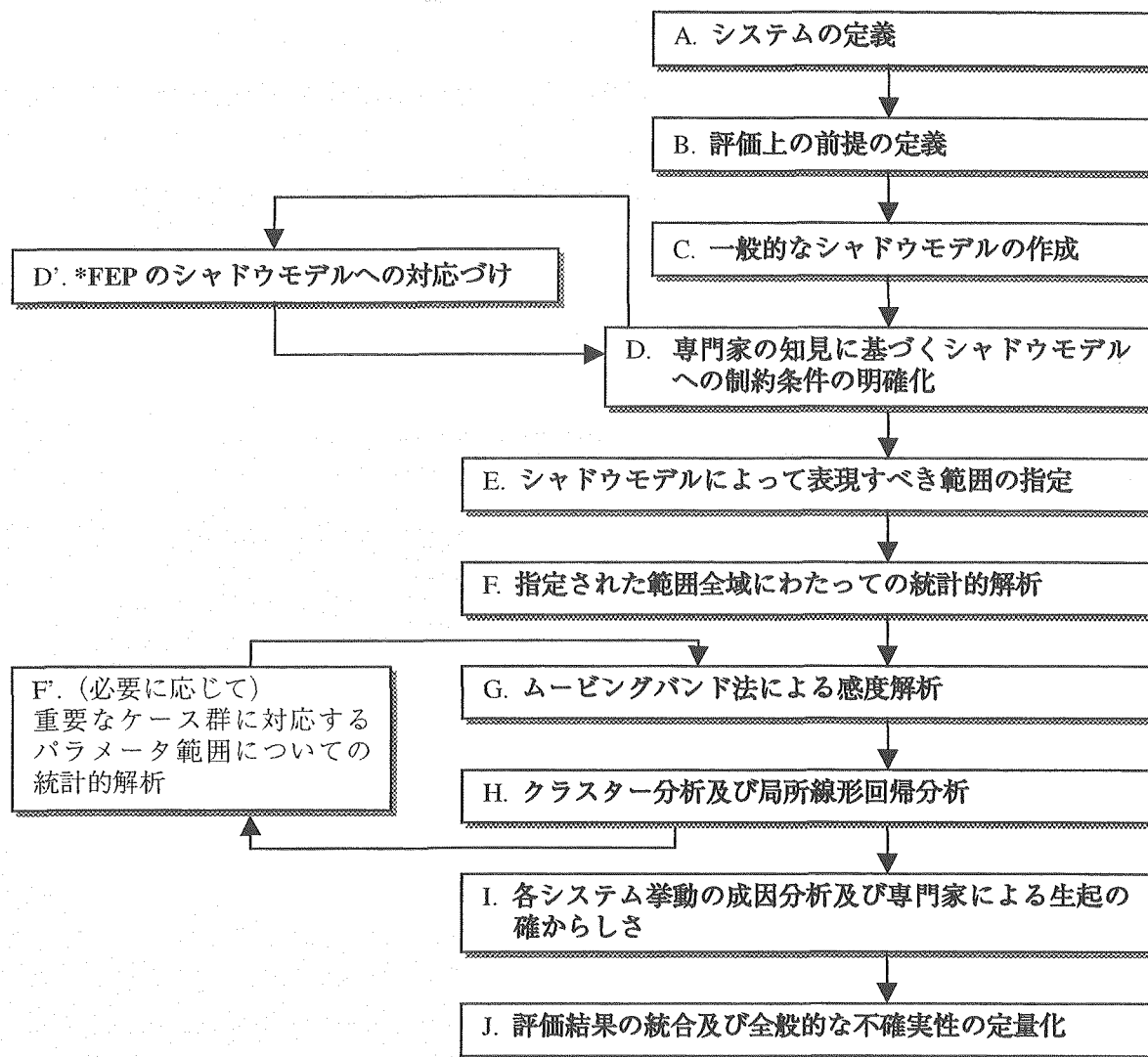


図 2.1-1 探索型システム性能評価に於ける検討の流れ

## 2.2 人工バリア及びニアフィールド母岩領域における核種移行シャドウモデル

全体システム構成を図 2.2-1 に示す。人工バリア中の移流については、流動経路が亀裂となる場合でも二重空隙モデルを用いることの必然性は少ない[2]ことから、本研究では以下人工バリアを連続体としたモデル[2]を用いることとする。核種移行及びこれに関連するプロセスとしては、以下のものを考慮する。

- 液相での分種化、吸着、あるいはコロイド生成などの（核種移行に比して）速い反応による核種の質量配分（瞬時平衡）
- 溶解／沈澱、鉍物化、結晶化等の遅い反応による核種質量の速度論的配分
- 核種の様々な化学形態における拡散性の相違
- 人工バリア内の空隙の形成とその再充填、及び核種の様々な化学形態に対応して異なる

流速を持つ移流現象

- 時間依存の地下水流が人工バリア内及びニアフィールド母岩中の核種移行に及ぼす影響
- 人工バリア内及びニアフィールド母岩中の地球化学的变化（pH、Eh、温度等の変動）がもたらす核種の質量配分への影響

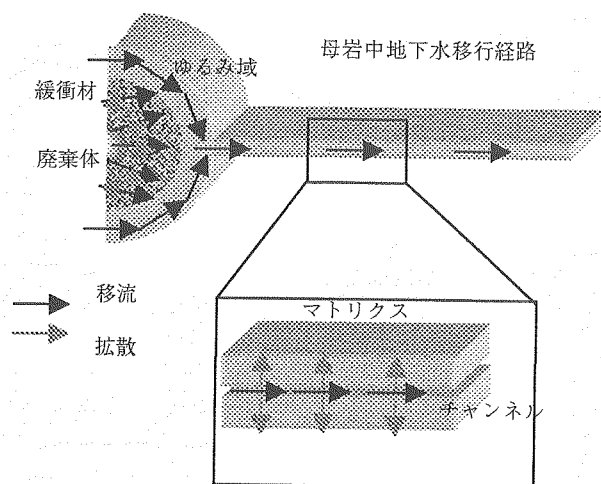


図 2.2-1 全体システム構成

### (1) 人工バリア

#### 水理

1. 緩衝材が健全である期間はゆるみ域より内側の人工バリア内は静水状態と仮定し、亀裂が生じた後には、指定した透水係数と動水勾配によって定まる流速が緩衝材中で生じるものとする。この時、拡散場と同一の体系で解析を行う制約上、地下水流向は外向き放射状であり、地下水流速は空間的に一様と仮定する。また、人工バリア中の地下水流量はゆるみ域中のそれを上回らないものとする。
2. 核種の物質収支を保証するためには、ゆるみ域中の地下水流量は、下流側に位置するチャンネル中の流量以下であることが必要である。簡単のため、これらの二つは常に等しいものと仮定する。
3. 緩衝材を内側と外側の二つの領域に分割し、外側領域（厚さ可変）では指定された時刻から一定期間透水係数が所定の非零の値となる。
4. 内側領域の厚さが一定値以下となった場合、亀裂存在時の外側領域と同一の地下水流速が内側でも生じる。
5. 廃棄体中の地下水流速は、常に緩衝材内側領域と同一である。

これらの仮定に基づき設定される人工バリア中の流れを、図 2.2-2 に模式的に示す。

## 地球化学

人工バリア中の地球化学的条件変化は、廃棄物あるいは系外から侵入する地球化学異常物質（例えば、酸素、あるいはコンクリート空隙水、等）によるものである。そして、これらの物質によって誘起される地球化学異常がどの程度の時間及び空間スケールにおいて伝播するかは、侵入する異常物質のフラックスと、異常物質を消費することにより地球化学条件の変化を緩衝し得るバリア材中の鉱物の量とのバランスに依存している。

人工バリア中核種移行シャドウモデルにおいては、地球化学異常の伝播は時間—空間平面上の楕円によって表現されていた。しかし、この方法では、専門家の知見との整合性が担保しにくいという問題があった。そこで、今年度作成した核種移行シャドウモデルでは、Tiger における定式化を参考として、地球化学異常物質の反応／移流／分散／マトリクス拡散問題についての偏微分方程式を数値的に解くこととした。但し、多数の統計的解析を効率的に実施するためには、各ケース毎に速度論的な反応／移行問題を計算することは現実的ではない。そこで、ここでは、局所瞬時平衡仮説を採用し、地球化学異常物質の濃度  $A$  は、緩衝作用を有する鉱物の濃度（より正確には、単位流体当たりの鉱物質量） $B$  が非零である限りは 0 に保持されるものとする。なお、地球化学以上物質流入点は、廃棄体及びゆるみ域の二カ所とする。

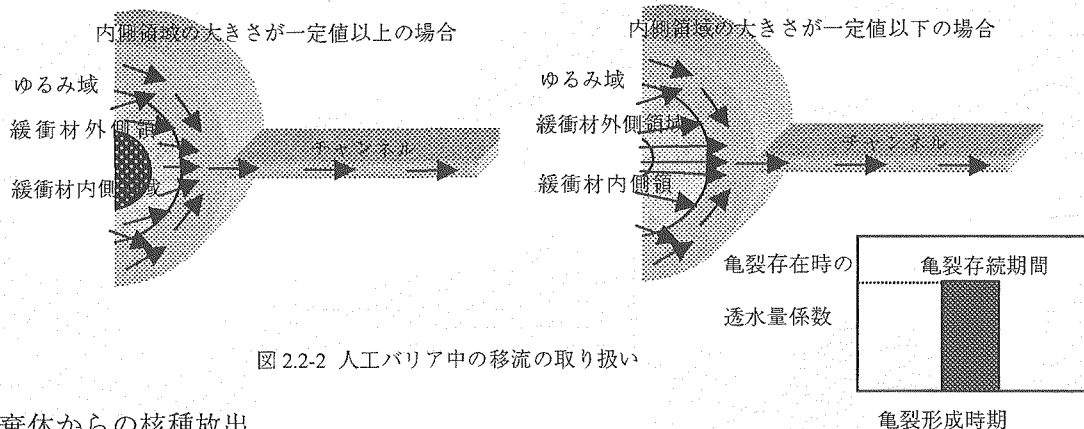


図 2.2-2 人工バリア中の移流の取り扱い

## 廃棄体からの核種放出

オーバーパックが健全な期間においては、核種は廃棄体中に完全に閉じこめられるものとし、また、オーバーパックが破損した時点で全面開口を仮定し、その後核種は一定の割合でガラス固化体から浸出するものとする。

## 核種移行

核種移行の立式においては、瞬時平衡グループという複数の移行形態の全濃度を考えることとする。瞬時平衡グループ内における種々の形態（溶質、吸着種、沈澱、コロイド、等）の濃度間には瞬時平衡が成立するものとする。このことは、ある地球化学条件の下で、それぞれの瞬時平衡グループの全濃度が与えられれば、当該グループに属する各移行形態

の濃度が一意に定まること、さらには、個々の移行形態の移動特性（拡散係数あるいは地下水に対する相対的な移流速度）が既知であればグループ全体としての移動特性が全濃度の関数として定まることを意味する。また、溶質を含む従って可動な瞬時平衡グループ（第一グループ）、及び移行しない形態のみのグループ（第二グループ）という二つを考え、これら二つのグループ間では速度論的な反応により質量交換が行われるものとする。なお、平均拡散係数及び平均移流速度の関数形は、図 2.2-3 に示す通りである。

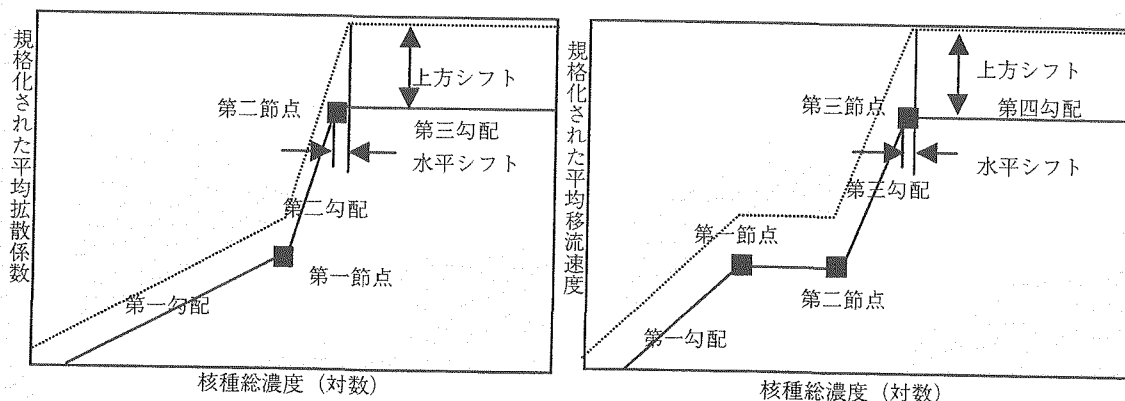


図 2.2-3 平均拡散係数及び平均移流速度

—— 平常時  
 - - - 地球化学異常

## (2) 天然バリア

### 水理

ダルシー則と水収支式を解くことにより算出する。なお、動水勾配及びチャンネル透水量係数の時間変化は、それぞれ図 2.2-4 及び 5 に示す通りである。

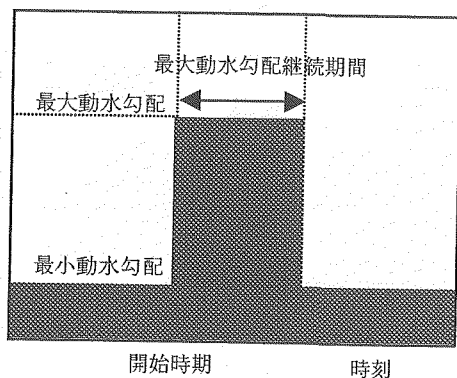


図 2.2-4 動水勾配の時間変化のモデル

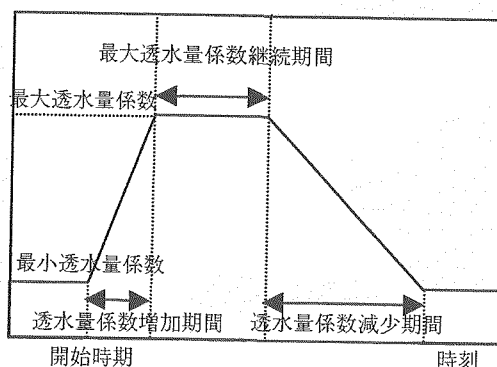


図 2.2-5 チャンネル透水量係数の時間変化のモデル

### 地球化学

ニアフィールド母岩中の地球化学的条件の変化は、チャンネル及びマトリクス内に廃棄物あるいは系外から侵入する地球化学異常物質（例えば、酸素、あるいはコンクリート空隙水、等）によるものである。そして、これらの物質によって誘起される地球化学異常がどの程度の時間及び空間スケールにおいて伝播するかは、侵入する異常物質のフラックス



と、異常物質を消費することにより地球化学条件の変化を緩衝し得る母岩中の鉱物の量とのバランスに依存している。

昨年度作成したニアフィールド母岩中核種移行シャドウモデルのプロトタイプにおいては、地球化学異常のフロントのみに着目し、その移動に関する常微分方程式として定式化していた。しかしながら、この方法では、フロントの移動を規定する種々の条件を表現するために多数のステップ関数が必要となり、このために計算効率が著しく低下する様な数値的に「硬い」問題を排除することが極めて難しいことがあきらかとなった。そこで、今年度作成した核種移行シャドウモデルでは、Tiger における定式化を参考として、地球化学異常物質の反応／移流／分散／マトリクス拡散問題についての偏微分方程式を数値的に解くこととした。但し、多数の統計的解析を効率的に実施するためには、各ケース毎に二重空隙媒体における速度論的な反応／移行問題を計算することは現実的ではない。そこで、ここでは、局所瞬時平衡仮説を採用し、地球化学異常物質の濃度  $A$  は、緩衝作用を有する鉱物の濃度（より正確には、単位流体当たりの鉱物質量） $B$  が非零である限りは 0 に保持されるものとする。

#### 核種移行

ニアフィールド母岩中核種移行シャドウモデルにおいても、溶質を含む従って可動な瞬時平衡グループ（第一グループ）、及び移行しない形態のみのグループ（第二グループ）という二つを考え、これら二つのグループ間では速度論的な反応により質量交換が行われるものとする。

#### (3)ソフトウェア構成及び数値解法

上述の数学的モデルは、核種移行ソルバである TIGER [3]によって解法される。また、TIGER の入力ファイル特に後述する統計的解析のための大規模のバッチファイルを作成するために、STRIDER[3]というプリプロセッサを用いる。

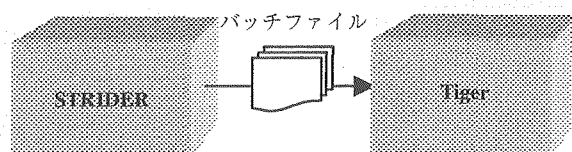


図 2.2.3-1 ソフトウェア構成

### 2.3 統計的感度解析

これまでの解析[1][2]と同様、統計的解析は以下の手順で実施した。

- 全域的解析；全入力パラメータを変動させた解析を行い、広い範囲の核種放出率を包含した全体的な感度構造を調査する。また、ムービングバンド法によって有意な感度を有するパラメータ群を抽出するとともに、クラスタ分析と局所線形回帰分析とを組み合わせ

せた感度分析を行う。

- 二次解析；全域的解析によって抽出された「感度の顕著な」パラメータ群の全てあるいは一部を代表的なケースにおいて固定し、その他のパラメータについて統計的なサンプリングを行うことによって各代表点近傍の局所的な感度をより詳しく調べる。

今回の解析の目標は、以下の点を明らかにすることにより、地層処分安全性が脅かされ得るケースの特徴を具体的に例示し、各分野の専門家が対応する条件の生起可能性に関する議論を行うための基礎情報を提供することである。

- (1) 天然の放射線レベルを上回る様な核種放出率が生じるためにはどのような条件が必要か
- (2) 第二次とりまとめにおいて比較対象としている諸外国の安全基準と同等以上の核種放出率が生じるためには、どのような条件が必要か

そこで、二次解析では、代表的ケースとして、全域的解析で感度の抽出されたパラメータに対応する多重バリアの各要素がそれぞれ所定の性能を発揮すると仮定したもの（対応する設定は二次とりまとめのリファレンスケース[4]に準ずるものとした）及び同じバリア要素の一つあるいは複数のものが十分な機能を発揮しないもの、をそれぞれ選定した。

#### 評価期間

原則として1000万年とするが、核種放出率の最大放出率がこの時期までに出現しない場合には評価期間を延長することとする。

#### 評価対象核種

これまでの解析と同じく Np-237 -> Th-229 を解析対象とする。

### 2.3.1 全域的解析

#### (1) 解析条件

表 2.3.1-1 人工バリアの幾何形状に関するパラメータ入力値

パラメータ	入力値	分布	単位
廃棄体半径	0.41	固定	[m]
緩衝材外側半径	1.11	固定	[m]
ゆるみ域半径	1.61	固定	[m]
廃棄体一体当たりの坑道長さ	2.14	固定	[m]
廃棄体空隙率	0.41	固定	[-]
緩衝材空隙率	0.41	固定	[-]
ゆるみ域空隙率	0.02	固定	[-]
人工バリア内移流開始時期	1.0 e0 - 1.0e7	log uniform	[yr]
人工バリア内移流継続期間	1.0 e0 - 1.0e7	log uniform	[yr]
人工バリア内移流領域大きさ	0 - 0.7	uniform	[m]
移流時の透水係数	1.0e-7 - 1.0e3	log uniform	[m/yr]

表 2.3.1-2 緩衝材止水性低下を生じ得る FEPs の例

・ブロック間のギャップ・トンネル崩落・母岩クリープ・断層活動・火成活動・ベントナイト化学変質（溶解、カルシウム化、イライト化、クロライト化、等）・母岩亀裂へのベントナイト侵入による密度低下
--

表 2.3.1-3 人工バリア近傍の水理に関するパラメータ

パラメータ	入力値	分布	単位
人工バリア内最小動水勾配	1.0e-3 - 1.0e-1	log uniform	[-]
人工バリア内最大動水勾配	1.0e-1 - 1.0e6	log uniform	[-]
人工バリア内強い流れの開始時期	1.0e-1 - 1.0e6	log uniform	[yr]
人工バリア内強い流れの継続期間	1.0e-1 - 1.0e6	log uniform	[yr]
移流時の緩衝材透水係数	1.0e-7 - 1.0e3	log uniform	[m/yr]

表 2.3.1-4 人工バリア近傍の平均動水勾配の変化を生じ得る FEPs の例

・ガス蓄積・塩水の影響・断層活動 (seismic pumping)・火成活動における熱対流・二次鉱物沈澱によるチャンネル閉塞・海水準変動・隆起/侵食あるいは沈降/堆積に伴う地形、処分場深度の変化

表 2.3.1-5 人工バリア中地球化学異常に関するパラメータ

パラメータ	入力値	分布	単位
廃棄体中異常物質濃度	1.0e-3 - 1.0e3	log uniform	[mol/m3]
廃棄体中緩衝鉱物濃度	1.0e-2 - 1.0e5	log uniform	[mol/m3]
緩衝材中緩衝鉱物濃度	1.0e-2 - 1.0e5	log uniform	[mol/m3]
ゆるみ域中緩衝鉱物濃度	1.0e-2 - 1.0e5	log uniform	[mol/m3]
人工バリア地球化学異常開始時刻	1.0e0 - 1.0e7	log uniform	[yr]
人工バリア地球化学異常継続期間	1.0e0 - 1.0e7	log uniform	[yr]

表 2.3.1-6 人工バリア中地球化学異常を生じ得る FEPs の例

・地下水放射線分解による酸化還元フロント・残存空気及びその反応・ガラスからのアルカリ金属等の浸出・ベントナイト・地下水反応・コンクリート反応水の侵入・炭素鋼及び腐食生成物との反応による化学的緩衝作用

表 2.3.1-7 廃棄体からの核種放出に関するパラメータ

パラメータ	入力値	分布	単位
オーバーバック腐食期間	1.0e0 - 1.0e6	log uniform	[yr]
ガラス溶解期間	1.0e0 - 1.0e6	log uniform	[yr]

表 2.3.1-8 オーバーバックの破損に関する FEPs の例

・炭素鋼の全面腐食 (酸性性及び還元性環境下での)・腐食生成物層による腐食速度低下・炭素鋼の孔食、すきま腐食及び水素脆化・腐食生成物の膨張による応力増大・容器の変形・破壊・溶接部の初期不良

表 2.3.1-9 ガラス固化体からの核種放出に関する FEPs の例

・ガラス溶解・表面変質層の形成による溶解速度低下・調和溶解・核種の選択的浸出・ひび割れによるガラス表面積増大・イエローフェーズ形成・結晶化

表 2.3.1-10 人工バリア中核種移行に関するパラメータ

パラメータ	入力値	分布	単位
緩衝材中の分子拡散係数	1.0e-2	固定	[m <sup>2</sup> /yr]
緩衝材中の分散長	1.0e-2 - 1.0e5	log uniform	[m]
緩衝材中拡散に対する遅延係数	5.0 - 4.0e5	log uniform	[m]
緩衝材中平均拡散係数の第一節点濃度	1.0e-11 - 0.1x 遅延係数	log uniform	[mol/m3]
緩衝材中平均拡散係数の第二節点濃度	1.0e-11 - 0.1x 遅延係数	log uniform	[mol/m3]
緩衝材中平均拡散係数の第一勾配	1.0	固定	[-]
緩衝材中平均拡散係数の第二勾配	0 - 2.0	uniform	[-]
緩衝材中平均拡散係数の第三勾配	0	固定	[-]
緩衝材中移流に対する遅延係数	1.0 - 4.0e5	log uniform	[m]
緩衝材中平均移流速度の第一節点濃度	1.0e-11 - 0.1x 遅延係数	log uniform	[mol/m3]
緩衝材中平均移流速度の第二節点濃度	1.0e-11 - 0.1x 遅延係数	log uniform	[mol/m3]
緩衝材中平均移流速度の第一勾配	1.0	固定	[-]
緩衝材中平均移流速度の第二勾配	0	固定	[-]
緩衝材中平均移流速度の第三勾配	0 - 2.0	uniform	[-]
緩衝材中平均移流速度の第四勾配	0	固定	[-]
瞬時平衡グループ I から II への反応速度	1.0e-6 - 1.0	log uniform	[1/yr]
瞬時平衡グループ II から I への反応速度	1.0e-6 - 1.0	log uniform	[1/yr]
地球化学異常時の水平 (右) シフト (対数)	0 - 10	uniform	[-]
地球化学異常時の上方シフト (対数)	0 - 5	uniform	[-]

表 2.3.1-11 人工バリア中の核種化学形態に関する FEPs の例

・溶解・安定相あるいは準安定相としての沈殿・溶解・沈殿反応の速度・真性あるいは疑似コロイド形成・線形・可逆吸着・非線形あるいは不可逆吸着・コロイド濾過・有機錯体の影響・微生物の効果・結晶化・鉱物化

表 2.3.1-12 母岩中チャンネル及びマトリクスの幾何形状に関するパラメータ群

パラメータ	入力値	分布	単位
チャンネル長さ	1.0e2	固定	[m]
チャンネル幅	1.0e-1 - 1.0e1	log uniform	[m]
マトリクス拡散に有効な亀裂表面積割合	1.0e-3 - 1.0	log uniform	[-]
開口幅の透水量係数依存性に関する定数	2.0 E-4 - 2.0 E-3	log uniform	[-]
チャンネル空隙率	1.0	固定	[-]
マトリクス拡散深さ	0 - 1.0	uniform	[m]
マトリクス空隙率	0.02	固定	[-]

\* 開口幅の透水量係数依存性に関する定数 A は、 $a = A\sqrt{T}$  により開口幅と透水量係数を関連づける。なお、上表中の A の範囲は、MKS 単位系では 1~10 に対応している。

表 2.3.1-13 母岩中チャンネル幅に関する FEPs の例

・亀裂内チャンネルリング・亀裂内分散・亀裂ネットワーク・亀裂ネットワーク内分散・ゆるみ域に沿った核種移行

表 2.3.1-14 マトリクス拡散に有効な亀裂表面積割合に関する FEPs の例

・チャンネルリング・亀裂内充填鉱物・亀裂表面の風化・亀裂表面のコートニング

表 2.3.1-15 母岩中チャンネル開口幅に関する FEPs の例

・トンネル崩落・母岩クリープ・断層活動・火成活動・二次鉱物沈殿によるチャンネル閉塞・母岩風化・隆起/侵食あるいは沈降/堆積に伴う応力条件の変化による亀裂開口幅変化

表 2.3.1-16 母岩中マトリクス拡散深さに関する FEPs の例

・隣接亀裂からのマトリクス拡散との濃度干渉・亀裂表面からの風化・二次鉱物沈殿によるマトリクス空隙の閉塞

表 2.3.1-17 天然バリア中水理に関するパラメータ

パラメータ	入力値	分布	単位
強い流れの開始時期	1.0 e-1 - 1.0 e6	log uniform	[yr]
強い流れの継続期間	1.0 e-1 - 1.0 e6	log uniform	[yr]
最大平均動水勾配	1.0 e 0- 1e5	log uniform	[-]
最小平均動水勾配	1.0 e-3 - 1.0	log uniform	[-]
最大透水量係数	1.0 e-7 - 1.0 e3	log uniform	[m2/yr]
最小透水量係数	1.0 e-7 - 1.0 e3	log uniform	[m2/yr]
透水量係数増加開始時刻	1.0 e-1 - 1.0 e6	log uniform	[yr]
透水量係数増加期間	1.0 e-1 - 1.0 e6	log uniform	[yr]
最大透水量係数継続期間	1.0 e-1 - 1.0 e6	log uniform	[yr]
透水量係数減少期間	1.0 e-1 - 1.0 e6	log uniform	[yr]

表 2.3.1-18 天然バリア中平均動水勾配の変化を生じ得る FEPs の例

・ガス蓄積・塩水の影響・断層活動 (seismic pumping)・火成活動における熱対流・二次鉱物沈殿によるチャンネル閉塞・海水準変動・隆起/侵食あるいは沈降/堆積に伴う地形、処分場深度の変化

表 2.3.1-19 母岩中チャンネル透水量係数に関する FEPs の例

・トンネル崩落・母岩クリープ・断層活動・火成活動・二次鉱物沈殿によるチャンネル閉塞・母岩風化・隆起/侵食あるいは沈降/堆積に伴う応力条件の変化による亀裂開口幅変化

表 2.3.1-20 天然バリア中地球化学に関するパラメータ

パラメータ	入力値	分布	単位
地下水中異常物質濃度	1.0e-3 - 1.0e3	log uniform	[mol/m3]
チャンネル部緩衝鉱物濃度	1.0e-2 - 1.0e5	log uniform	[mol/m3]
マトリクス部緩衝鉱物濃度	1.0e-2 - 1.0e5	log uniform	[mol/m3]
地下水中地球化学異常開始時刻	1.0e0 - 1.0e7	log uniform	[yr]
地下水中地球化学異常継続期間	1.0e0 - 1.0e7	log uniform	[yr]

表 2.3.1-21 天然バリア中地球化学異常を生じ得る FEPs の例

・塩淡境界の移動による塩水の侵入・火山活動、地熱の影響等による温度上昇・seismic pumping による異種の水塊の侵入・隆起/侵食による地表水の侵入・立坑に沿った地表水の侵入・火山活動による酸性地下水の侵入

表 2.3.1-22 天然バリア中核種移行に関するパラメータ

パラメータ	入力値	分布	単位
チャンネル中の分散長	1.0 - 1.0e2	log uniform	[m]
マトリクス拡散に対する遅延係数	1.3e2 - 1.3e6	log uniform	[m]
マトリクス中平均拡散係数の第一節点濃度	1.0e-11 - 0.1x 遅延係数	log uniform	[mol/m3]
マトリクス中平均拡散係数の第二節点濃度	1.0e-11 - 0.1x 遅延係数	log uniform	[mol/m3]
マトリクス中平均拡散係数の第一勾配	1.0	固定	[-]
マトリクス中平均拡散係数の第二勾配	0 - 2.0	uniform	[-]
マトリクス中平均拡散係数の第三勾配	0	固定	[-]
チャンネル中移流に対する遅延係数	1.0 - 1.3e6	log uniform	[m]
チャンネル中平均移流速度の第一節点濃度	1.0e-11 - 0.1x 遅延係数	log uniform	[mol/m3]
チャンネル中平均移流速度の第二節点濃度	1.0e-11 - 0.1x 遅延係数	log uniform	[mol/m3]
チャンネル中平均移流速度の第一勾配	1.0	固定	[-]
チャンネル中平均移流速度の第二勾配	0	固定	[-]
チャンネル中平均移流速度の第三勾配	0 - 2.0	uniform	[-]
チャンネル中平均移流速度の第四勾配	0	固定	[-]
瞬時平衡グループ I から II への反応速度	1.0e-6 - 1.0	log uniform	[1/yr]
瞬時平衡グループ II から I への反応速度	1.0e-6 - 1.0	log uniform	[1/yr]
地球化学異常時の水平 (右) シフト (対数)	0 - 10	uniform	[-]
地球化学異常時の上方シフト (対数)	0 - 5	uniform	[-]

表 2.3.1-23 天然バリア中の核種化学形態に関する FEPs の例

・溶解・安定相あるいはとしての沈殿・溶解・沈殿反応の速度・真性コロイド形成・線形・可逆吸着・非線形あるいは不可逆吸着・疑似コロイド形成・コロイド濾過・有機錯体の影響・微生物の効果・結晶化・鋳物化

## (2)解析結果

前節に述べた変動範囲から統計的なサンプリングを行うことによって、約 2000 ケースの全域的解析を実施した。解析結果として得られた Np-237 及び Th-229 それぞれのニアフィールド及びファーフィールドからの核種放出率算出結果を図 2.3.1-1 にまとめる。Np-237 のニアフィールド及びファーフィールドからの核種放出率計算結果のプロット (図 2.3.1-1 左上) に見られる線状の密集領域は、ファーフィールドからの核種放出率がニアフィールドからの放出率と等しい、つまり、天然バリア機能が発揮されていないケース群に対応している。この線は、ニアフィールド及びファーフィールドそれぞれの核種放出率として  $1e-5$  Bq/yr/廃棄物から  $1e7.5$  Bq/yr/廃棄物程度にわたって認められる。また、この線よりも下に位置する点は、何らかの天然バリア性能によってファーフィールドからの核種放出率が低減されているケース群に対応している。これらの点と前出の線状の密集領域との間の上下の距離は、それぞれの解析ケースにおける天然バリア性能の寄与を示すものとなっており、天然バリア性能もまた 10 桁に近い変動を示している。

上記の線状の密集領域を上回るケースも少数ながら存在する。これらは、ファーフィールドからの放出率がニアフィールドからの放出率よりも大きいものであり、何らかの機構によって母岩中での核種の濃集及びこれに引き続く再動態化が生じたものと考えられる。

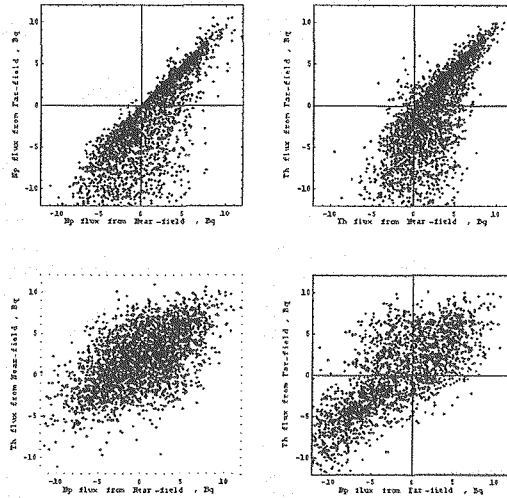


図 2.3.1-1 全域的解析結果のスキヤッタープロット

先ほどと同様に、これらの点と線状の密集との間の上下の距離は、濃集による核種放出スパイクの大きさ（対数スケールのため増倍比として）を示すものとなる。ニアフィールドからの放出率の大きさに依らず、増倍比としての濃集の程度はほぼ一定の範囲内にある。このことは、急放出され得る核種の濃集量は、ニアフィールドからの放出率自体と比例的であることを意味していると考えられる。Th-229 についての同様のプロット（図 2.3.1-1 右上）も同じ傾向を示すが、ここでは、天然バリア性能が働かないケースに対応する線状の密集よりも上にあるケース群の下図が比較的多いことが特徴である。これら h、Th-229 の場合には、上記の濃集・再動態化の機構に加えて、親核種である Np-237 からの崩壊によってもファーフールドからの放出率がニアフィールドからのそれを上回ることから説明される。図 2.3.1-1 の下二つのプロットは、Np-237 と Th-229 の放出率を、ニアフィールド及びファーフールドについてそれぞれ比較したものである。放射平衡に対応する斜め 45° の線状の構造は見られず、個々の核種の移行特性の相違に対応した幅広い非平衡が存在することがわかる。

なお、全域的解析に先立つ予備解析の結果、将来の動水勾配の上昇値が極端なケース（100 以上）については、Tiger のコントロールパラメータを調整しない場合にエラーとして計算が中断されるものが相当数含まれることがわかった。そこで、他のほとんどのケースについての計算効率を低下させることなく、これらのケースについても解析を実施するために、解析対象を二分して、全域的解析では過渡的な最大動水勾配 100 以下の範囲を対象とした。また、最大動水勾配が 100～100000 の範囲については、後に述べる補足的解析において、このような極端に大きい動水勾配の原因となり得る FEP (seismic pumping や将来の人間活動の影響) をある程度具体的に想定しつつ計算を行うものとした。

全域的解析に対するムービングバンド法による感度解析の結果のうち感度の顕著なもの及び感度が見られないものを図 2.3.1-2 にまとめる。図 2.3.1-2 の図は、それぞれ Np-237 及び Th-229 のニアフィールド及びファーフィールドからの核種放出率についての分析結果を示している。また、中央の水平な実線は、サンプリングされた各パラメータのメディアン値（均一分布の場合は平均値、対数均一分布の場合は対数平均値にそれぞれ等しい）を表し、これを挟む上下の点線は、各バンドを無作為標本抽出とみなした場合のバンド平均値についての 90%信頼区間を示す。つまり、各バンドにおける平均値がこの区間を越える場合には、当該バンドに含まれる解析ケースのパラメータ値がランダムな抽出ではなく、あるシステムティックなバイアスがかかっている（つまり感度がある）と見なす一つの判断基準となる。また、感度を判断する上でのもう一つの基準は、幅広い核種放出率値の範囲にまたがるトレンドの存在である。多くのパラメータでは、パラメータ入力値のバンド平均はメディアン値を中心にランダムに上下する挙動を示すが、中には、振動の中心が明らかに核種放出率に依存する様なトレンドを有するものがある。以下、これら二つの判断基準に基づき、顕著な感度を有するパラメータの抽出を行った（表 2.3.1-24）。

図 2.3.1-2 のファーフィールドからの核種放出率の図には二本の垂直な点線が描かれている。これらは、第二次とりまとめで比較対象としている諸外国の安全基準の下限値（100  $\mu$  Sv/yr）及び我が国における天然放射線レベルの下限値（900  $\mu$  Sv/yr）に対応する廃棄物一体当たりの核種放出率を示すものである。上記の基準によって顕著な感度を有すると判断されたパラメータについては、ムービングバンド法により求まる各パラメータ値の移動平均とこれらの線との交点を見ることによって、諸外国の安全基準や天然放射線レベルに対応する数値以上の核種放出率が生じる様なパラメータ値のおおよその目安を得ることができる（表 2.3.1-24）。

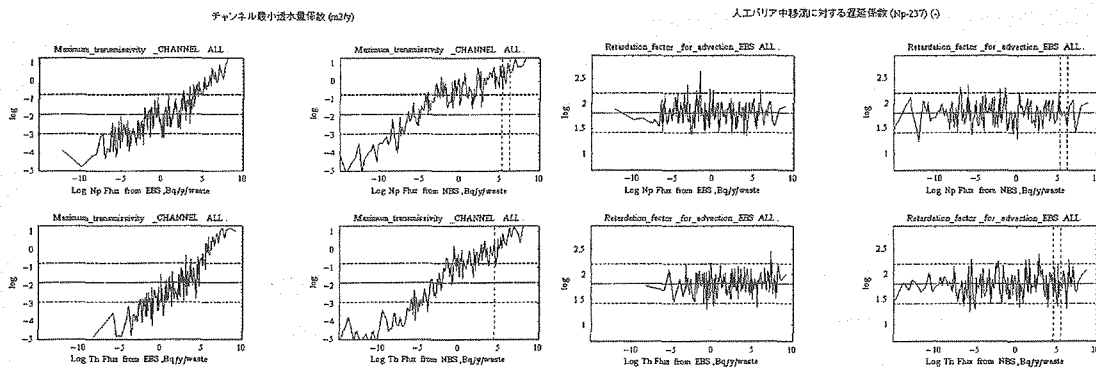


図 2.3.1-2 ムービングバンド法により顕著な感度の検出されたパラメータ（左）及び感度が見られないもの（右）の例

表 2.3.1-24 顕著な感度を有するパラメータ及び各パラメータの感度の特徴 (全域的解析)

番号	パラメータ	対応するバ リア性能	関連する 外部事象 の種類	感度の向き* <sup>2</sup>	諸外国の安全基準や天然放射線レベルと同等以上の核種放出率となるための条件の目安 ( ( ) 内は二次とりまとめリファレンスケースの設定)	
					Np-237	Th-229
1	オーバーバック 閉じこめ期間	移行遅延	-	負	_* <sup>3</sup>	_* <sup>3</sup>
19	チャンネル 最小透水量係数	移行遅延	-	正	約 3e-4 m2/yr 以上 (0.012 m2/yr) * <sup>5</sup>	約 3e-4 m2/yr 以上 (0.012 m2/yr) * <sup>5</sup>
20	チャンネル 最大透水量係数	-	水理	正	1 m2/yr 程度以上 (同上)	1 m2/yr 程度以上 (同上)
23	人工バリア中地球 化学異常継続期間	-	化学	正	_* <sup>4</sup>	_* <sup>4</sup>
24	天然バリア中地球 化学異常継続期間	-	化学	正	_* <sup>4</sup>	_* <sup>4</sup>
36 58	瞬時平衡グループIからIIへの反応速度* <sup>1</sup>	放出率制限	-	負	3e-4 /yr 程度以下 (0)	3e-4 /yr 程度以下 (0)
37 59	瞬時平衡グループIIからIへの反応速度* <sup>1</sup>	放出率制限	-	正	_* <sup>4</sup>	_* <sup>4</sup>
38 60	人工バリア中拡散に 対する遅延係数* <sup>1</sup>	移行遅延 放出率制限	-	負	500 程度以下 (3890) * <sup>6</sup>	500 程度以下 (3890) * <sup>6</sup>
41 63	チャンネル中移流に 対する遅延係数* <sup>1</sup>	移行遅延 放出率制限	-	負	300 程度以下 (1)	300 程度以下 (1)
42	人工バリア中拡散に 対する第二勾配	放出率制限	-	正	1.2 程度以上 (1)	_* <sup>4</sup>
51 73	チャンネル中移流に 対する第一節点濃度* <sup>1</sup>	放出率制限	-	正	1e-4 mol/m3 程度以上(該 当せず) * <sup>8</sup>	1e-4 mol/m3 程度以上(該 当せず) * <sup>9</sup>
57 79	地球化学異常におけ る上方シフト* <sup>1</sup>	-	化学	正	3 桁程度以上 (0)	2.5 桁程度以上 (0)

\*1 Np-237 及び Th-229 のいずれも該当。

\*2 各パラメータ値が増加した場合に核種放出率が増す方向を正とする。

\*3 感度を有するのはニアフィールドからの核種放出率であり、被ばく線量と対応づけるファーフィールドからの放出率には顕著な感度は見られない。

\*4 ファーフィールドからの放出率のトレンドは上記の目安を特定するほど大きな傾きを有していない。

\*5 対数平均値 9.99、標準偏差 1.07 の対数正規分布の算術平均値

\*6 分配係数 1 m3/kg に対応。

\*7 上記遅延係数から求めた溶解度 2.0 e-8 mol/l に対応する全濃度

\*8 溶解度 2.0 e-8 mol/l に対応 (表中の数値は mol/m3 の単位)。

\*9 溶解度 5.0 e-6 mol/l に対応 (表中の数値は mol/m3 の単位)。

### 2.3.2 二次解析

全域的解析の結果、顕著な感度を有するものとして抽出されたパラメータ群に着目し、これらの全てあるいは一部分を代表的なケースの数値で固定して他のパラメータについて統計的なサンプリングを行った。代表的なケースとしては、まず、顕著な感度を有するパラメータに対応する地質環境条件及びバリア性能がいずれも想定通りのものである場合を考えることとし、これらのパラメータ値を二次とりまとめのリファレンスケースの値に固定し、他のパラメータ群 (全域的解析と同じ範囲から統計的にサンプリングする) のいわば条件付きの感度を求めるための解析を実施した。以下、この解析をリファレンスケース近傍の二次解析と呼ぶ。次に、顕著な感度を有するパラメータに対応する地質環境条件



及びバリア性能の一部が想定とは異なり核種放出率が上昇する状況を仮定し、この条件下において多重バリアシステムの残りの部分の挙動に対応したパラメータの感度を求める解析を実施した。ここで、想定とは異なる条件を仮定する地質環境条件及びバリア性能については、前節におけるまとめを参考として以下の5つの組み合わせを考えることとした。

- 核種移行時間が短く十分な減衰が得られない場合（核種移行時間最短ケース）
- 可動な化学形態の濃度が高く移動性が高い場合（核種 mobility 最大ケース）
- 将来の過渡的な水理による核種の急激な移行（水理学的異常ケース）
- 母岩中での核種の濃集及び地球化学条件変化に伴う再動態化（地球化学異常ケース）
- 濃集・再動態化及び過渡的な水理による核種の移行（水理及び地球化学異常ケース）

なお、以上の二次解析では、パラメータ間の現象論的相関（例えば、核種の平均移動特性を規定する節点濃度同士あるいは節点濃度と勾配、等）を含めて、必要に応じてこれらのパラメータを一つのセットとして上記代表点において固定するものとした。リファレンスケース近傍及び上記の想定外の条件に対応した5つの代表ケース近傍の二次解析のための条件設定を表2.3.2-1にまとめる。

上記の5つの代表ケース近傍の二次解析結果に対して実施したムービングバンド法による感度解析により顕著な感度が見いだされたパラメータ、及び諸外国の安全基準や天然放射線レベル以上の核種放出率となる様な入力値の条件を表2.3.2-2～-8にまとめる。

表 2.3.2-1 二次解析条件の設定 (1)

	リファレンス ケース近傍	核種移行時間 最短ケース近傍	核種 mobility 最大ケース近傍	水理学的異常 ケース近傍	地球化学異常 ケース近傍	水理及び地球化学 異常ケース近傍
核種移行遅延機能	リファレンス 条件	喪失	統計的に変動	統計的に変動	統計的に変動	統計的に変動
放出率制限機能	リファレンス 条件	統計的に変動	濃集	統計的に変動	統計的に変動	統計的に変動
外部事象による 水理影響	なし	統計的に変動	統計的に変動	あり	統計的に変動	あり
外部事象による 化学的影響	なし	統計的に変動	統計的に変動	統計的に変動	あり	あり

関連する不確実性要因及び FEP	
核種移行時間 最短ケース近傍	母岩中の亀裂特性とその空間分布についての不確実性 緩衝材及び母岩に対する核種吸着特性についての不確実性
核種 mobility 最大ケース近傍	核種の溶解度についての不確実性 緩衝材及び母岩に対する核種吸着特性についての不確実性 沈殿速度 / 真性あるいは疑似コロイド形成 / 非線形吸着 / 有機錯体の影響 / 微生物の影響
水理学的異常 ケース近傍	ガス蓄積 / 塩水の影響 / 断層活動 (seismic pumping) / 火成活動による熱対流 / 二次鉱物沈殿によるチャンネル閉塞 / 海水準変動 / 隆起・浸食による地形や処分場深度の変化 /
地球化学異常 ケース近傍	地下水放射線分解による酸化還元フロント / 残存空気及びその影響 / ガラスからのアルカリ金属等の浸出 / ベントナイト-地下水反応 / コンクリート反応水の侵入 / 炭素鋼及び腐食生成物との反応による化学的緩衝作用
水理及び地球化学 異常ケース近傍	ガス蓄積 / 塩水の影響 / 断層活動 (seismic pumping) / 火成活動による熱対流 / 二次鉱物沈殿によるチャンネル閉塞 / 海水準変動 / 隆起・浸食による地形や処分場深度の変化 / 地下水放射線分解による酸化還元フロント / 残存空気及びその影響 / ガラスからのアルカリ金属等の浸出 / ベントナイト-地下水反応 / コンクリート反応水の侵入 / 炭素鋼及び腐食生成物との反応による化学的緩衝作用

表 2.3.2-2 二次解析条件の設定 (1) (○は統計的サンプリングを行うことを示す)

	全域的解析 の感度	リファ レンス ケース近傍	核種移行 時間最短 ケース近傍	核種 mobility 最大ケース 近傍	水理学的 異常 ケース近傍	地球化学 異常 ケース近傍	水理及地球 化学異常 ケース近傍
オーバーバック閉じこめ期間	有	○	○	○	○	○	○
ガラス溶解時間		○	○	○	○	○	○
人工バリア内移流開始時刻		○	○	○	○	○	○
人工バリア内移流継続期間		○	○	○	○	○	○
人工バリア内移流領域大きさ		○	○	○	○	○	○
移流時の人工バリア透水係数		○	○	○	○	○	○
強い流れの開始時期		○	○	○	10 万年後	○	10 万年後
強い流れの継続期間		○	○	○	○	○	○
人工バリア内最小動水勾配		○	最大値 (1.0e-1)	○	○	○	○
人工バリア内最大動水勾配		○	該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○	○
チャンネル内最小動水勾配		リファレン ス	最大値(1.0)	○	○	○	○
チャンネル内最大動水勾配		○	該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○	○
チャンネル透水量係数 増加開始時刻		該当せず <sup>*4</sup>	該当せず <sup>*4</sup>	○	10 万年後	○	10 万年後
チャンネル透水量係数増加期 間		該当せず <sup>*4</sup>	該当せず <sup>*4</sup>	○	1 年	○	1 年
チャンネル透水量係数 継続期間		該当せず <sup>*4</sup>	該当せず <sup>*4</sup>	○	1000 万年間	○	1000 万年間
チャンネル透水量係数 減少期間		該当せず <sup>*4</sup>	該当せず <sup>*4</sup>	○	該当せず <sup>*4</sup>	○	該当せず <sup>*4</sup>
チャンネル幅		○	○	○	○	○	○
開口幅の透水量係数依存性 に関する定数		○	最小値 <sup>*5</sup> (2.0e-4)	○	○	○	○
チャンネル最小透水量係数	有	リファレン ス <sup>*1</sup>	最大値 (1.0e3)	○	最大値 (1.0e3)	○	最大値 (1.0e3)
チャンネル最大透水量係数	有	該当せず <sup>*4</sup>	上と同じ	○	○	○	○
人工バリア中地球化学異常 開始時刻		該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○	10 万年後	10 万年後
天然バリア中地球化学異常 開始時刻		該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○	10 万年後	10 万年後
人工バリア中地球化学異常 継続期間	有	該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○	○	○
天然バリア中地球化学異常 継続期間	有	該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○	○	○
人工バリア中地球化学異常 物質濃度		該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○	○	○
天然バリア中地球化学異常 物質濃度		該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○	○	○
廃棄体中緩衝鉱物濃度		該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○	○	○

表 2.3.2-2 二次解析条件の設定 (2) (○は統計的サンプリングを行うことを示す)

	全域的解析 の感度	リファ レンス ケース近傍	核種移行 時間最短 ケース近傍	核種 mobility 最大ケース 近傍	水理学的 異常 ケース近傍	地球化学 異常 ケース近傍	水理及び 地球化学 異常ケース 近傍
緩衝材中緩衝鉱物濃度		該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○	○	○
ゆるみ域中緩衝鉱物濃度		該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○	○	○
母岩チャンネル部 緩衝鉱物濃度		該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○	○	○
母岩マトリクス部 緩衝鉱物濃度		該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○	○	○
マトリクス拡散深さ		○	○	○	○	○	○
人工バリア中分散長		○	○	○	○	○	○
天然バリア中分散長		○	○	○	○	○	○
マトリクス拡散有効な 亀裂表面割合		○	○	○	○	○	○
瞬時平衡グループIからII への速度	有	最小値 (1.0e-6)	○	最小値 (1.0e-6)	○	○	○
瞬時平衡グループIIからI への速度	有	最大値(1.0)	○	最大値(1.0)	○	○	○
人工バリア中拡散に対する 遅延係数	有	リファレン ス	最小値(5.0)	最小値(5.0)	○	○	○
マトリクス拡散に対する 遅延係数		○	最小値 (1.3e2)	最小値 (1.3e2)	○	○	○
人工バリア中移流に対する 遅延係数		○	最小値(1.0)	最小値(1.0)	○	○	○
チャンネル中移流に対する 遅延係数	有	リファレン ス	最小値(1.0)	最小値(1.0)	○	○	○
人工バリア中拡散に対する 第二勾配	有	リファレン ス <sup>*2</sup>	○	○	○	○	○
マトリクス拡散に対する 第二勾配		○	○	○	○	○	○
人工バリア中移流に対する 第三勾配		○	○	○	○	○	○
チャンネル中移流に対する 第三勾配		○	○	○	○	○	○
人工バリア中拡散に対する 第一節点濃度		リファレン ス <sup>*2</sup>	○	十分大きい 数値 <sup>*6</sup>	○	○	○
マトリクス拡散に対する 第一節点濃度		○	○	十分大きい 数値 <sup>*6</sup>	○	○	○
人工バリア中拡散に対する 第二節点濃度		該当せず <sup>*4</sup>	○	該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○
マトリクス拡散に対する 第二節点濃度		○	○	該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○
人工バリア中移流に対する 第一節点濃度		○	○	十分大きい 数値 <sup>*6</sup>	○	○	○

表 2.3.2-2 二次解析条件の設定 (3) (○は統計的サンプリングを行うことを示す)

	全域的解析 の感度	リファ レンス ケース近傍	核種移行 時間最短 ケース近傍	核種 mobility 最大ケース 近傍	水理学的 異常 ケース近傍	地球化学 異常 ケース近傍	水理及び 地球化学 異常ケース 近傍
チャンネル中移流に対する 第一節点濃度	有	○ <sup>*3</sup>	○	十分大きい 数値 <sup>*6</sup>	○	○	○
人工バリア中移流に対する 第二節点濃度		○	○	該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○
チャンネル中移流に対する 第二節点濃度		○	○	該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○
人工バリア中移流に対する 第三節点濃度		○	○	該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○
チャンネル中移流に対する 第三節点濃度		○	○	該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○
地球化学異常における 水平シフト		該当せず <sup>*4</sup>	○	該当せず <sup>*4</sup>	○	最大値(10)	最大値(10)
地球化学異常における 上方シフト	有	該当せず <sup>*4</sup>	○	○	○	最大値(5)	最大値(5)

- \*1 リファレンスケースでは考慮していないため、これらの変化は生じないものとした。
- \*2 リファレンスケースにおける溶解度制限を表現するために、第二勾配を0として第一節点を溶解度に対応する全濃度で固定した。また、この場合、第二節点濃度を定義する必要はない。
- \*3 リファレンスケースでは母岩中の溶解度が規定されていないため、統計的なサンプリングの対象とした。
- \*4 他のパラメータの設定に伴い、当該パラメータの指定が意味を有さないものとなっている。
- \*5 チャンネル内流速を大きくするために開口幅が最小となる様な設定を用いた。
- \*6 溶解度制限が働かない様、第一節点を解析上現れる最大全濃度よりも大きくした。

表 2.3.2-3 顕著な感度を有するパラメータ (リファレンスケース近傍)

番号	パラメータ	感度の向き <sup>*2</sup>	諸外国の安全基準や天然放射線レベルと同等以上の核種放出率となるための条件の目安 (( )内は二次とりまとめリファレンスケースの設定)	
			Np-237	Th-229
7	人工バリア内強い流れの 開始時期	正	N/A <sup>*1</sup>	1000 yr 程度以上 (該当せず <sup>*3</sup> )
12	チャンネル内最大動水勾配	正	N/A <sup>*1</sup>	1 程度以上 (該当せず <sup>*3</sup> )
17	チャンネル横幅	正	N/A <sup>*1</sup>	1m 程度以上 (設定値なし <sup>*4</sup> )
32	マトリクス拡散深さ	負	N/A <sup>*1</sup>	0.4 m 程度以下 (0.1)
35	マトリクス拡散に有効な亀裂表面積割合	負	N/A <sup>*1</sup>	0.02 程度以下 <sup>*5</sup> (0.5)
39 61	マトリクス拡散に対する遅延係数	負	N/A <sup>*1</sup>	5000 程度以下 (1.3e5)
43 65	マトリクス拡散に関する第二勾配	正	N/A <sup>*1</sup>	1 以上 (該当せず <sup>*3</sup> )
51 73	チャンネル中移流に対する 第一節点濃度	正	N/A <sup>*1</sup>	1e-3 mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (該当せず <sup>*3</sup> )
53 75	チャンネル中移流に対する 第二節点濃度	正	N/A <sup>*1</sup>	1mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (該当せず <sup>*3</sup> )
55 77	チャンネル中移流に対する 第三節点濃度	正	N/A <sup>*1</sup>	感度なし

固定したパラメータ	チャンネル内最小動水勾配 チャンネル最小透水量係数 瞬時平衡グループⅠからⅡへの速度 瞬時平衡グループⅡからⅠへの速度 人工バリア中拡散に対する遅延係数 チャンネル中移流に対する遅延係数 人工バリア中拡散に対する第二勾配 人工バリア中拡散に対する第一節点濃度
該当しないパラメータ	チャンネル透水量係数増加開始時刻 チャンネル透水量係数増加期間 チャンネル最大透水量係数継続期間 チャンネル透水量係数減少期間 チャンネル最大透水量係数 人工バリア中地球化学異常開始時刻 天然バリア中地球化学異常開始時刻 人工バリア中地球化学異常継続期間 天然バリア中地球化学異常継続期間 人工バリア中地球化学異常物質濃度 天然バリア中地球化学異常物質濃度 廃棄体中緩衝鉱物濃度 緩衝材中緩衝鉱物濃度 ゆるみ域中緩衝鉱物濃度 母岩チャンネル部緩衝鉱物濃度 母岩マトリクス部緩衝鉱物濃度 人工バリア中拡散に対する第二節点濃度 地球化学異常における水平シフト 地球化学異常における上方シフト

\*1 核種放出率のバンド平均値が基準あるいは天然放射線レベルに達するものがなかった。

\*2 各パラメータ値が増加した場合に核種放出率が増す方向を正とする。

\*3 リファレンスケースでは該当する現象を考慮していない。

\*4 チャンネル横幅は、廃棄体一体当たりに関係する亀裂の幅の合計である。従って、1mという数値は例えば直径5mの坑道を横切る亀裂が廃棄体5体当たり1本存在する状況に対応する。

チャンネル横幅が感度を有するというのは、実際には、亀裂類度の感度を代表しているものと考えられる。

\*5 他の条件が全てリファレンスケースと同一であれば、マトリクス拡散に有効な亀裂表面積が0.02%まで低下しても諸外国の基準を上回ることはない。但し、本解析では、上記の諸パラメータを統計的に変動させており、これらが好ましくない数値をとった場合には、この限りではない。特に、チャンネル内最大動水勾配とチャンネル横幅（亀裂類度）が大きな値をとり、ゆるみ域流量が増して人工バリアからの核種放出率が増した場合は重要であり、これに、人工バリア内の流れが加わった場合、この傾向が顕著となる。

表 2.3.2-4 顕著な感度を有するパラメータ（核種移行時間最短ケース近傍）

番号	パラメータ	感度の向き <sup>*1</sup>	諸外国の安全基準や天然放射線レベルと同等以上の核種放出率となるための条件の目安（（ ）内は二次とりまとめリファレンスケースの設定）	
			Np-237	Th-229
1	オーバーバック閉じこめ期間	負	1000 yr 程度以下 (1000yr)	感度が非単調なため決定困難
2	ガラス溶解時間	負	1000 yr 程度以下 (約 70000 年)	3000 yr 程度以下 (約 70000 年)
23	人工バリア中地球化学異常継続期間	正	3000yr 程度以上 (該当せず)	感度なし
36 58	瞬時平衡グループⅠからⅡへの反応速度	負	1e-3 /yr 程度以下 (0)	5e-3 /yr 程度以下 (0)
37 59	瞬時平衡グループⅡからⅠへの反応速度	正	1e-3 /yr 程度以上 (0)	5e-4 /yr 程度以上 (0)
42 64	人工バリア中拡散に対する第二勾配	正	1 程度以上 (1)	0.8 程度以上 (1)
46 68	人工バリア中拡散に対する第一節点濃度	正	1e-5.5 mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (1e-4) <sup>*1</sup>	1e-7 mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (2.5e-2) <sup>*1</sup>
48 70	人工バリア中移流に対する第二節点濃度	正	1e-3 mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (1e-4) <sup>*1</sup>	1e-4mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (2.5e-2) <sup>*1</sup>
51 73	チャンネル中移流に対する第一節点濃度	正	1e-6.5 mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (該当せず)	感度なし

固定したパラメータ	人工バリア内最小動水勾配 チャンネル内最小動水勾配 開口幅の透水量係数依存性に関する定数 チャンネル最小透水量係数 人工バリア中拡散に対する遅延係数 マトリクス拡散に対する遅延係数 人工バリア中移流に対する遅延係数 チャンネル中移流に対する遅延係数
該当しないパラメータ	人工バリア内最大動水勾配 チャンネル中最大動水勾配 チャンネル透水量係数増加開始時刻 チャンネル透水量係数増加期間 チャンネル最大透水量係数継続期間 チャンネル透水量計数減少期間 チャンネル最大透水量計係数

\*1 遅延係数については、二次解析の設定値 (=5)を仮定した数値。

表 2.3.2-5 顕著な感度を有するパラメータ (核種 mobility 最大ケース近傍)

番号	パラメータ	感度の向き <sup>*1</sup>	諸外国の安全基準や天然放射線レベルと同等以上の核種放出率となるための条件の目安 ( ( ) 内は二次とりまとめリファレンスケースの設定)	
			Np-237	Th-229
1	オーバーバック閉じこめ期間	負	1000 年程度以下 (1000 年)	感度が非単調なため 判断困難
2	ガラス溶解時間	負	5000 年程度以下 (約 70000 年)	5000 年程度以下 (約 70000 年)
5	人工バリア内移流領域の大きさ	正	0.35m 程度以上 (該当せず <sup>*2</sup> )	0.35m 程度以上 (該当せず <sup>*2</sup> )
7	人工バリア内強い流れの開始時期	正	500 年程度以上 (該当せず <sup>*2</sup> )	500 年程度以上 (該当せず <sup>*2</sup> )
8	人工バリア内強い流れの継続期間	負	500 年程度以下 (該当せず <sup>*2</sup> )	500 年程度以下 (該当せず <sup>*2</sup> )
19	チャンネル最小透水量係数	正	3e-4 m <sup>2</sup> /yr 程度以上 (0.012)	3e-4 m <sup>2</sup> /yr 程度以上 (0.012)
20	チャンネル最大透水量係数	正	1 m <sup>2</sup> /yr 程度以上 (該当せず <sup>*2</sup> )	1m <sup>2</sup> /yr 程度以上 (該当せず <sup>*2</sup> )

固定したパラメータ	瞬時平衡グループ I から II への速度 瞬時平衡グループ II から I への速度 人工バリア中拡散に対する遅延係数 マトリクス拡散に対する遅延係数 人工バリア中移流に対する遅延係数 チャンネル中移流に対する遅延係数 人工バリア中拡散に対する第一節点濃度 マトリクス拡散に対する第一節点濃度 人工バリア中移流に対する第一節点濃度 チャンネル中移流に対する第一節点濃度
該当したパラメータ	人工バリア中拡散に対する第二節点濃度 マトリクス拡散に対する第二節点濃度 人工バリア中移流に対する第二節点濃度 チャンネル中移流に対する第二節点濃度 人工バリア中拡散に対する第三節点濃度 チャンネル中移流に対する第三節点濃度 地球化学異常における水平シフト

\*1 各パラメータ値が増加した場合に核種放出率が増す方向を正とする。

\*2 リファレンスケースでは該当する現象を考慮していない。

\*3 人工バリア内最大動水勾配との間の相関により、短期的ながら強い流れが重要であることを示す。

表 2.3.2-6 顕著な感度を有するパラメータ (水理学的異常ケース近傍)

番号	パラメータ	感度の向き <sup>*1</sup>	諸外国の安全基準や天然放射線レベルと同等以上の核種放出率となるための条件の目安 (( ) 内は二次とりまとめリファレンスケースの設定)	
			Np-237	Th-229
1	オーバーバック閉じこめ期間	負	1000 年程度以下 (1000 年)	1000 年程度以下 (1000 年)
36 58	瞬時平衡グループ I から II への反応速度	負	3e-4 /yr 程度以下 (該当せず) <sup>*1</sup>	1e-3 /yr 程度以下 (該当せず) <sup>*1</sup>
37 59	瞬時平衡グループ II から I への反応速度	正	1e-3 /yr 程度以上 (該当せず) <sup>*1</sup>	1e-3 /yr 程度以上 (該当せず) <sup>*1</sup>
38 60	人工バリア中拡散に対する遅延係数	負	500 程度以下 (3890)	1000 程度以下 (3890)
41 63	チャンネル中移流に対する遅延係数	負	300 程度以下 (1)	1000 程度以下 (1)
42 64	人工バリア中拡散に対する第二勾配	正	1 程度以上 (1)	感度なし
46 68	人工バリア中拡散に対する第一節点濃度	正	5e-5 mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (8.8e-2)	感度なし
48 70	人工バリア中拡散に対する第二節点濃度	正	1e-1 mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (8.8e-2)	感度なし
51 73	チャンネル中移流に対する第一節点濃度	正	5e-5 mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (該当せず) <sup>*1</sup>	1e-5 mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (該当せず) <sup>*1</sup>
57 79	地球化学異常における上方シフト	正	2.5 桁程度以上 (0)	2 桁程度以上 (0)

固定したパラメータ	強い流れの開始時期 チャンネル透水量係数増加開始時刻 チャンネル透水量係数増加期間 チャンネル最大透水量係数継続期間 チャンネル最小透水量係数
該当しないパラメータ	チャンネル透水量係数減少期間

\*1 リファレンスケースでは該当する現象を考慮していない。

表 2.3.2-7 顕著な感度を有するパラメータ (地球化学異常ケース近傍)

番号	パラメータ	感度の向き <sup>*1</sup>	諸外国の安全基準や天然放射線レベルと同等以上の核種放出率となるための条件の目安 (( ) 内は二次とりまとめリファレンスケースの設定)	
			Np-237	Th-229
19	チャンネル最小透水量係数	正	3e-4 m <sup>2</sup> /yr 程度以上 (0.012 m <sup>2</sup> /yr)	3e-4 m <sup>2</sup> /yr 程度以上 (0.012 m <sup>2</sup> /yr)
20	チャンネル最大透水量係数	正	1 m <sup>2</sup> /yr 程度以上 (同上)	1 m <sup>2</sup> /yr 程度以上 (同上)
23	人工バリア中地球化学異常継続期間	正	3000 年程度以上 (該当せず) <sup>*1</sup>	3000 年程度以上 (該当せず) <sup>*1</sup>
24	天然バリア中地球化学異常継続期間	正	10000 年程度以上 (該当せず) <sup>*1</sup>	10000 年程度以上 (該当せず) <sup>*1</sup>
26	天然バリア中地球化学異常物質濃度	正	1 mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (該当せず) <sup>*1</sup>	1 mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (該当せず) <sup>*1</sup>
36 58	瞬時平衡グループ I から II への反応速度	負	3e-4 /yr 程度以下 (0)	3e-4 /yr 程度以下 (0)
37 59	瞬時平衡グループ II から I への反応速度	正	1e-3 /yr 程度以上 (該当せず) <sup>*1</sup>	1e-3 /yr 程度以上 (該当せず) <sup>*1</sup>
41 53	チャンネル中移流に対する遅延係数	負	500 程度以下 (1)	500 程度以下 (1)
51 73	チャンネル中移流に対する第一節点濃度	正	1e-4 mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (該当せず) <sup>*1</sup>	感度なし

固定したパラメータ	人工バリア中地球化学異常開始時刻 天然バリア中地球化学異常開始時刻 地球化学異常における水平シフト 地球化学異常における上方シフト
-----------	--

\*1 リファレンスケースでは該当する現象を考慮していない。

表 2.3.2-8 顕著な感度を有するパラメータ（水理及び地球化学異常ケース近傍）

番号	パラメータ	感度の向き <sup>*1</sup>	諸外国の安全基準や天然放射線レベルと同等以上の核種放出率となるための条件の目安（（ ）内は二次とりまとめリファレンスケースの設定）	
			Np-237	Th-229
23	人工バリア中地球化学異常継続期間	正	5000 年程度以上 (該当せず) <sup>*1</sup>	5000 年程度以上 (該当せず) <sup>*1</sup>
25	人工バリア中地球化学異常物質濃度	正	1mol (該当せず) <sup>*1</sup>	1mol (該当せず) <sup>*1</sup>
26	天然バリア中地球化学異常物質濃度	正	1mol (該当せず) <sup>*1</sup>	1mol (該当せず) <sup>*1</sup>
30	母岩チャンネル部緩衝鉱物濃度	負	30 mol/m <sup>3</sup> 程度以下 (該当せず) <sup>*1</sup>	30 mol/m <sup>3</sup> 程度以下 (該当せず) <sup>*1</sup>
36 58	瞬時平衡グループIからIIへの反応速度	負	1e-3 /yr 程度以下 (0)	1e-3 /yr 程度以下 (0)
37 59	瞬時平衡グループIIからIへの反応速度	正	1e-3 /yr 程度以下 (0)	1e-3 /yr 程度以下 (0)
41 63	チャンネル中移流に対する遅延係数	負	1000 程度以下 (1)	1000 程度以下 (1)
42 64	人工バリア中拡散に対する第二勾配	正	1 程度以上 (1)	感度なし
46 68	人工バリア中拡散に対する第一節点濃度	正	1e-4.5 mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (該当せず) <sup>*1</sup>	感度なし
48 70	人工バリア中拡散に対する第二節点濃度	正	1e-2.5 mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (8.0e-2)	感度なし
51 73	チャンネル中移流に対する第一節点濃度	正	1e-4.5 mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (該当せず)	1e-4.5 mol/m <sup>3</sup> 程度以上 (該当せず)

固定したパラメータ	強い流れの開始時期 チャンネル透水量係数増加開始時刻 チャンネル透水量係数増加期間 チャンネル最大透水量係数継続期間 チャンネル最小透水量係数 人工バリア中地球化学異常開始時刻 天然バリア中地球化学異常開始時刻 地球化学異常における水平シフト 地球化学異常における上方シフト
該当しないパラメータ	チャンネル透水量係数減少期間

\*1 各パラメータ値が増加した場合に核種放出率が増す方向を正とする。

\*2 4 ファーフィールドからの放出率のトレンドは上記の目安を特定するほど大きな傾きを有していない。

## 2.4 まとめ

### 2.4.1 全域的解析及び各種の二次解析結果の比較

全域的解析及び各種の二次解析結果に基づき抽出された、顕著な感度を有する主要なパラメータ群を表 2.4.1-1 にまとめる。

全般的な解析において感度の明らかとなったパラメータについて数値を固定してより詳細な二次解析を行う場合には、一般には、より詳細な感度構造を見ることが可能となるため、以下の様に、顕著な感度を示すパラメータが新たに付加されることとなる。

- オーバーパック閉じこめ期間、チャンネル最小及び最大透水量係数、人工バリア中拡散に関する諸パラメータ、及びチャンネル内遅延係数を固定したリファレンスケースにおいては、チャンネル内最大動水勾配やチャンネル幅といった水理条件に関する他



のパラメータが、また、チャンネル内遅延係数に代わって、マトリクス拡散に関する諸パラメータやチャンネル内の第二、第三の節点濃度の感度が顕在化している。

- 地下水流速を最大とし、また、遅延係数を最小とした最短核種移行時間ケース近傍では、付加的な放出率制限機構としてガラス溶解時間の重要性が増すとともに、緩み域流量の増大によってチャンネル内の溶解度制限の効果が低下し、人工バリア中の拡散についての第一及び第二節点濃度の感度が顕在化している。
- 核種 mobility 最大ケース近傍では、上と同じ理由からガラス溶解時間の重要性が増すことに加えて、人工バリア内の移流の感度が顕著なものとなっている。
- 水理的異常ケース近傍では、外部事象発生時の天然バリア機能の低下に伴い、人工バリア内での核種保持の重要性が増し、人工バリア中拡散の第一及び第二節点濃度の感度が現れている。
- 地球化学異常ケース近傍では、天然バリア中の地球化学異常フロントが伝播するか否かを左右する因子として、天然バリア中異常物質濃度の感度が顕在化している。
- 水理と地球化学異常が同時に生起することを想定したケース群では、水理的異常と地球化学異常においてそれぞれ個別に感度の見いだされたパラメータに加えて、人工バリア中異常物質濃度と母岩チャンネル中緩衝鉱物濃度の感度が増している。これは、水理的異常に伴い生じる急激な核種放出率増加のスパイク期間中に地球化学異常のフロントが破過し、さらなる放出率の上昇に寄与し得るか否かが、化学異常フロントの伝播速度によって左右されることに呼応するものである。

他方、二次解析において、全域的解析において見られていた感度が見られなくなるという例外的な状況も存在する。

- 水理的異常ケース近傍においてオーバーバック寿命の長期化が放出率を制限する効果を有するのは、水理的異常が生じた際にオーバーバックがまだ健全であれば、系内に蓄えられた可動な核種の急激な放出は生じないためである。これに対して、地球化学異常の場合には、フロントが人工バリアそして天然バリアを破過するまでにはさらに時間遅れが存在するために、地球化学異常の開始時刻にオーバーバックが健全であっても、核種の急激な放出が生じ得るため、オーバーバック寿命長期化の感度は顕在化していない。
- 水理的異常が生じる場合には、ピーク値はチャンネル最大透水量係数によって支配されるため、最小透水量係数の感度は顕在化していない。
- 核種 mobility 最大ケースの近傍では、地球化学異常が生じた場合の核種移行特性の変化が小さいこと、及び核種放出率のピークが水理的異常に支配されるケースが多いことから、地球化学異常に関連するパラメータの感度は見られない。

- 水理学的異常が生じる際には、ピークはこの事象の生起時期に限られており、このため、発生時期の変動する地球化学異常に関するパラメータの感度は鈍化している。
- 核種移行時間最短ケースの近傍では、天然バリア中で地球化学異常が生じていても遅延係数に変化がない（予め 1 に設定されている）ため感度は見られない。但し、人工バリア中では遅延係数の初期値が 5 であるため、若干の感度が示されている。
- 水理及び地球化学異常ケース近傍においては、これらの外部事象は同時に生じているものの、地球化学異常の場合にはフロントの伝播に起因する時間遅れがあるために、水理学的異常の直後に生じる核種放出のスパイクに寄与しない場合が多い。特に天然バリア中の地球化学異常に関するパラメータの感度が鈍くなっているのは、この時間遅れのためと考えられる。
- 水理学的異常も含めた核種放出率のピークが出現する際に、人工バリア中の地球化学異常は破過している場合が多いため、人工バリア中の遅延係数や第二勾配の感度は顕在化していない。

#### 2.4.2 第二次とりまとめとの比較

概括的感度解析によって感度が見いだされた主要なパラメータを

- 人工バリア長期挙動
- 現在の水理学的特性
- 人工バリア内拡散挙動
- チャンネル内移流挙動
- マトリクス拡散挙動
- 遅い反応による固定化（グループⅡ）に伴う移行遅延
- 外部事象による水理学的影響
- 外部事象による地球化学的影響

の 8 つに区分し、それぞれについて、第二次とりまとめにおける安全評価上の取り扱いをまとめた（表 2.4.2-1）。この結果、顕著な感度を有するパラメータ群のうち多くのものについて、第二次とりまとめでもその重要性が認識されていることがわかる。但し、例外的なものとして、以下に示す影響機構（表 2.4.2-2）が第二次とりまとめの報告書中には明記されておらず、安全評価の網羅性をより高度なものとするためには、今後、検討を加えていく必要があるものと考えられる。

#### 人工バリア内移流と地球化学異常との組み合わせ

水素ガス通気時の緩衝材中移流の可能性は明確には否定されておらず（分冊 3:4.2.3.3）、可能性の有無の明確化あるいは影響解析の実施が必要である。また、

隆起浸食時に母岩の拘束圧が低下した場合の緩衝材透水係数上昇の可能性は否定されていない（分冊 3:6.2.1.1）。これに対して、概括的感度解析の結果は、隆起・浸食に伴い化学環境が酸化性へと移行する際に、同時に緩衝材中が移流支配となった場合には第二次とりまとめにおける解析より重篤な影響が生じ得ることを示唆しており、地表近傍で緩衝材が移流支配となる可能性を否定するか、あるいはこの可能性を考慮した影響解析が必要と考えられる。

#### 地球化学異常と水理学的異常との組み合わせ

概括的感度解析の結果は、水理学的異常が人工バリア内の核種溶解度の変化を伴う場合に、その影響が大きくなり得ることを示唆している。このことから、断層活動ケースにおいて、地下水流量の増大及び分配係数の低下に加えて、断層に沿って深部から流入する地下水が高温である等の理由により、核種溶解度がリファレンス値よりも上昇する可能性について検討を要する。

#### チャンネル内での核種沈殿生成とその後の水理学的異常の組み合わせ

概括的感度解析において、チャンネル中移流に関する第二節点濃度の正の感度が見いだされたことは、亀裂中の沈殿が水理学的異常の際に急激に放出される機構が重要なことを示唆しており、このことは、天然バリア中の核種沈殿を無視することは必ずしも保守的ではないことを意味する。また、支保工の影響を受けた地下水や海水系地下水では核種溶解度がリファレンス値よりも若干小さいこと（分冊 3:6.1.3）から、支保工反応時あるいは海水系への地下水水質変化時に緩衝材外側に核種沈殿が生じ、その後の水理学的異常により急激に放出される機構について検討を要する。

#### 遅い反応による固定化（グループⅡ）による外部事象の影響の制限

遅い反応による移行遅延機構を考慮しないことは保守側であると考えられるが、概括的感度解析における結果は、水理あるいは地球化学異常に関連するシナリオにおいて、このような遅延機構が多重バリアシステムに頑健性を与えることを示しており、この機構の定量的なモデル化やデータ取得は、変動シナリオのより現実的な評価のための重要な課題と考えられる。

表 2.4.1-1 ムービングバンド法によって抽出された主要なパラメータのまとめ

	全域的 解析	リファ レンス ケース近傍	最短核種移行 時間ケース 近傍	核種 mobility 最大ケース 近傍	水理学的 異常ケース 近傍	地球化学 異常ケース 近傍	水理及び 地球化学 異常ケース 近傍
オーバーパック閉じこめ期間	○	固定	○	○	○		○
ガラス溶解時間			○	○			
強い流れの開始時期		○		○	固定		
人工バリア内移流領域の 大きさ				○			
人工バリア内移流継続期間							○
チャンネル内最大動水勾配		○	該当せず				
チャンネル横幅		○					
チャンネル最小透水量係数	○	固定	固定	○		○	
チャンネル最大透水量係数	○	該当せず	該当せず	○	固定	○	固定
マトリクス拡散深さ		○					
マトリクス拡散に有効な 亀裂表面積割合		○					
人工バリア中地球化学異常 継続期間	○	該当せず	○			○	○
天然バリア中地球化学異常 継続期間	○	該当せず				○	
人工バリア中地球化学異常 物質濃度							○
天然バリア中地球化学異常 物質濃度						○	○
母岩チャンネル部緩衝 鉱物濃度							○
瞬時平衡グループIからII への反応速度	○	該当せず	○	固定	○	○	○
瞬時平衡グループIIからI への反応速度	○	該当せず	○	固定	○	○	○
人工バリア中拡散に対する 遅延係数	○	固定	固定	固定	○		
マトリクス拡散に関する 遅延係数		○	固定	固定			
チャンネル中移流に対する 遅延係数	○	固定	固定	固定	○	○	○
人工バリア中拡散に対する 第二勾配	○	固定	○	固定	○		○
マトリクス拡散に対する 第二勾配		○		固定			
人工バリア中拡散に対する 第一節点濃度		固定	○	固定	○		○
人工バリア中拡散に対する 第二節点濃度		固定	○	固定	○		○
チャンネル中移流に対する 第一節点濃度	○	○	○	固定	○	○	○
チャンネル中移流に対する 第二節点濃度		○		固定			
チャンネル中移流に対する 第三節点濃度		○		固定			
地球化学異常における 上方シフト	○	該当せず	○		○	固定	固定

表 2.4.2-1 概括的感度解析によって抽出された重要な不確実性要因と  
第二次とりまとめにおける解析との比較 (1)

区分	対応するパラメータ	概括的感度解析の結果	第二次とりまとめにおける解析
人工バリア 長期挙動	オーバーバック閉じこめ期間	水理学的異常開始時にオーバーバックが健全な場合、スパイクが低下。	データ不確実性ケースとして現実的なオーバーバック寿命 (1 万年) を想定。顕著な感度なし。
	ガラス溶解期間	核種移行時間が短い場合及び核種の mobility が大きい場合のみ顕著な感度を有する。	データ不確実性ケースとして考慮。可溶性元素については溶解が遅い場合には感度を有するが、溶解が速くなる場合には顕著な感度は見られない。(緩衝材外側の地下水流量によって放出が制限されているため。)
	移流領域の大きさ 移流継続期間	核種の mobility が大きい場合、あるいは地球化学異常と組み合わせられた場合に顕著な感度を有する。	考慮せず
現在の 水理学的 特性	チャンネル最小透水量 係数 チャンネル横幅	mobility が大きい場合、第二次とりまとめのリファレンス値は諸外国の基準を上回る様な影響につながる可能性がある。	亀裂透水量係数分布を変動させた解析を実施。また、これと組み合わせマトリクス中の核種分配係数を低下させた解析も行っており、諸外国の安全基準を下回ることを確認。
人工バリア 内拡散挙動	人工バリア中拡散遅延 係数	水理学的異常が生じる場合に顕著な感度を有する。	地質環境変更ケースにおいて緩衝材中分配係数の変化を考慮しているが、Np と Th については入力値に差異なし。断層活動ケースにおいて、水理学的異常と緩衝材中分配係数低下を同時に考慮している。
	人工バリア中拡散第二 勾配 人工バリア中拡散第一 節点濃度 人工バリア中拡散第二 節点濃度	核種移行時間が短い場合及び水理学的異常が生じる場合に顕著な感度を有する。	地質環境変更ケースにおいて考慮。断層活動ケースでは、溶解度はリファレンス値から変更していない。
チャンネル 内移流挙動	チャンネル中移流遅延 係数	ほとんどの場合に顕著な感度を有する。	考慮せず
	チャンネル中移流第一 節点濃度 チャンネル中移流第二 節点濃度 チャンネル中移流第三 節点濃度	チャンネル中移流第一節点濃度はほとんどの場合において顕著な感度を有する。第二及び第三節点濃度はリファレンスケース近傍において顕著な感度を示す。	考慮せず
	マトリクス拡散深さ 有効亀裂表面積割合 マトリクス拡散遅延係 数 マトリクス拡散第二勾 配	リファレンスケース近傍においてのみ顕著な感度を有する。(他のケースでは、チャンネル中の遅延機構の影響に支配されているため)	マトリクス拡散深さ、有効亀裂表面積割合及び遅延係数についてはデータ不確実性ケースにおいてそれぞれ考慮。

表 2.4.2-1 概括的感度解析によって抽出された重要な不確実性要因と  
第二次とりまとめにおける解析との比較 (2)

区分	対応するパラメータ	概括的感度解析の結果	第二次とりまとめにおける解析
遅い反応による移行遅延	反応速度(グループIからII) 反応速度(グループIIからI)	ほとんど全ての場合に顕著な感度を有している。	考慮せず
外部事象による水理学的影響	強い流れの開始時期 チャンネル内最大動水勾配 チャンネル最大透水係数	最大透水量係数はほとんど全ての場合において顕著な感度を示している。 強い流れの開始時期と最大動水勾配はリファレンスケース近傍で感度を有する。	水理学的影響を伴う事象としては、断層活動、隆起・浸食、シーリングミスそしてボーリングの影響を考慮している。
外部事象による地球化学的影響	継続期間(人工バリア) 継続期間(天然バリア) 異常物質濃度(人工バリア) 異常物質濃度(天然バリア) 母岩チャンネル緩衝鉱物濃度 地球化学異常上方シフト	地球化学異常に関連する諸パラメータの中では、継続期間及び核種 mobility の上方シフトが最も顕著な感度を示している。これは、地球化学異常フロントの人工あるいは天然バリア中の破過の有無が、その影響が顕在化するかどうかを支配していること、そして、フロントの破過が生じた場合には、核種の溶解及び脱着が重要であることを意味する。 地球化学異常は、水理学的異常と組み合わせられた時に大きな影響につながり、逆に、速度論的な遅延効果によって影響が抑制されるという傾向を示す。	外部事象による化学的条件の変化は、隆起・浸食、気候・海水準変動、及びボーリングによる酸化性地下水の侵入において考慮されている。いずれの場合にも、この様な外部事象の継続期間と分配係数の変化について明確な設定が行われている。

### 3. TRU 処分概念に対する探索型性能評価ツールの適用性の検討及び改良

#### 3.1 TRU 処分の性能評価のために求められる解析機能

2.に述べた高レベル放射性廃棄物地層処分の核種移行に対する包括的感度解析に用いた評価ツール (STRIDER 及び Tiger) は、多様な核種移行現象及び外部事象の影響を取り扱うことのできるいずれも極めて汎用性の高いものであり、他の放射性廃棄物処分の性能評価にもこのツールを適用することが可能と考えられる。しかしながら、同時に、各廃棄物に固有の特性や現象については適宜ツールの変更を施すことも必要である。ここでは、今後、特に TRU 廃棄物の処分に探索型性能評価ツールを適用するために行った変更及び改良点をまとめる。

高レベル放射性廃棄物地層処分と比較した場合の TRU 廃棄物処分の安全評価上の特徴は、以下の様にまとめることができる。

- 廃棄物の種類が多く、また、各放射性核種は様々な形態で廃棄物中に存在している。
- 有機物や硝酸塩等の廃棄物中の放射性核種以外の物質が溶出することにより、核種の移行特性に影響を及ぼす可能性がある。
- 廃棄物中あるいは構造材として大量のコンクリート系材料が用いられ、地下水との反応により超アルカリ性プルームを生じる。このプルームの影響により、他のバリア材の特性及び核種移行特性に影響を受ける可能性がある。

このうち(1)の特徴に対応しては、次の様な改良を STRIDER あるいは Tiger に施すことが必要となる。

- (a) 現在、核種数 2 までしか取り扱うことのできない STRIDER の制約を排除し、任意数の

核種についての移行解析を実施可能とすること。なお、Tiger は複数崩壊系列で任意数の核種を取り扱うことが既に可能である。

- (b) 廃棄物中の個々の放射性核種に対して、存在形態に対応した異なる核種浸出期間を定義可能とする様、Tiger を改良すること。また、これと対応して STRIDER の入力フォームを変更すること。

また、前出の改良を要する箇所のうち(2)及び(3)についてはいずれも既に STRIDER 及び Tiger の有する地球化学異常解析機能によって取り扱うことが可能である。

### 3.2 STRIDER Version 2.0 の開発

前節に述べた改良を要する事項に対応して、以下の通り STRIDER の改定を行い、Version2.0 を作成した。

- (1) 複数崩壊系列、任意数の核種についての入力ができるものとした。
- (2) 廃棄物中の核種の存在形態に応じてインベントリーを区分し、それぞれに異なる浸出期間を定義できるものとした。
- (3) 後述する Tiger の改良に対応して、被ばく線量換算係数についても Strider 上で統計的サンプリングを行い、出力を被ばく線量の分布としてまとめることのできるものとした。

### 3.3 テストケースについての解析

改良後の STRIDER version 2.0 及び 4. に詳述する Tiger version 1.4.2 を用いて約 100 ケースの統計的解析を行った。解析に用いた入力データは、2.5 において述べた高レベル廃棄物を対象とした全域的解析と同様のものであり、今回の STRIDER 改良箇所のみを変更した。入力データの変更点を表 3.3-1 にまとめる。ただし、同表中のインベントリータイプの割合は Tiger の入力と同様に、規格化されていないものである。規格化された割合の例を図 3.3-1 に示す。

解析結果として得られた被ばく線量の分布を図 3.3-2 にまとめる。

表 3.3-1 STRIDER version 2.0 テストケースの入力条件  
(高レベル廃棄物を対象とした全域的解析からの変更点)

パラメータ	数値	分布
インベントリータイプ1 浸出期間	1e0 - 1e6 (y)	log uniform
インベントリータイプ2 浸出期間	1e0 - 1e6 (y)	log uniform
インベントリータイプ3 浸出期間	1e0 - 1e6 (y)	log uniform
タイプ1のインベントリー割合(Np-237)	1e0 - 1e3 (-)	log uniform
タイプ2のインベントリー割合 (Np-237)	1e0 - 1e3 (-)	log uniform
タイプ3のインベントリー割合(Np-237)	1e0 - 1e3 (-)	log uniform
タイプ1のインベントリー割合(Th-229)	1e0 - 1e3 (-)	log uniform
タイプ2のインベントリー割合(Th-229)	1e0 - 1e3 (-)	log uniform
タイプ3のインベントリー割合 (Th-229)	1e0 - 1e3 (-)	log uniform
被ばく線量換算係数(Np-237)	1e-17 - 1e-13 (Sv/Bq)	log uniform
被ばく線量換算係数(Th-229)	1e-16 - 1e-12 (Sv/Bq)	log uniform

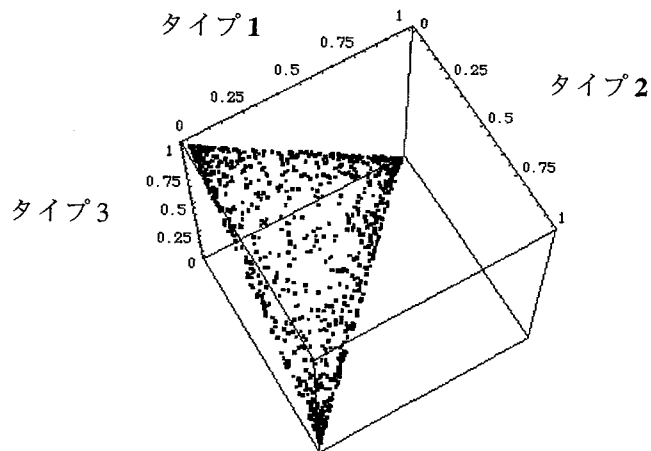


図 3.3-1 規格化後のインベントリタイプ割合の分布

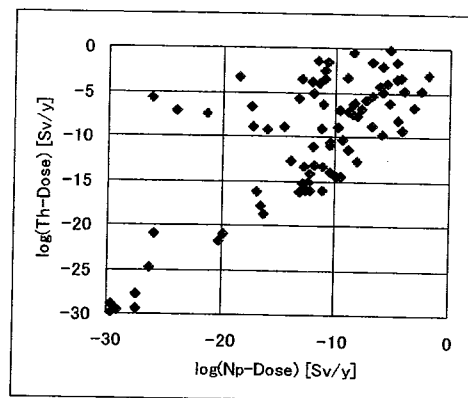


図 3.3-2 STRIDER version 2.0 を用いたテストケースの解析結果 (ケース数 100)

#### 4. 人工バリア及び天然バリア中核種移行解析コード Tiger の改良

##### 4.1 前バージョンの問題点

人工バリア及び天然バリア中核種移行解析コード Tiger は、多様な核種移行プロセスとこれらに対する水理学あるいは地球化学的条件の時間・空間的変動の影響を考慮可能な柔軟かつ汎用性の高い解析コードである。

昨年度までに実施した開発及び試解析の結果、前バージョンの Tiger はほとんどの解析条件において十分な精度と効率を持って計算を行うことが可能であることが明らかとなっているが、比較的少数のケースにおいては、計算管理上のパラメータ設定によって計算精度が損なわれたり、あるいは計算が異常終了する場合が見いだされている。

上記の問題が生ずる原因は、いずれも数学的には Tiger の解くべき微分・代数方程式系が堅い、つまり対応する係数行列が特異化すること、に帰着する。このような状況の生成機構



は、現象論的には次の二点に大別することができる。

- (1) 急激な水理・地球化学条件の変動や非線形吸着の影響
- (2) 崩壊連鎖に含まれる極短半減期核種のマスが極めて小さいものとなること

短半減期核種が長半減期の親核種によってサポートされていない場合には、後者の問題に対応する係数行列は時間の経過に従って特異的なものへと発散していく。この問題を解決するために、例えば MESHNOTE コード[5]では、予め支配方程式に指数関数を乗じておくことによって未知数から崩壊項を分離する変形を行っている。しかしながら、この方法は時間的に変化しない定数を逆に指数関数的に成長させることとなるため、Tiger の様に複雑な環境変動を取り扱うコードに導入することは極めて難しい。

以上を踏まえ、上記二つの問題に対するコードの性能向上を目的とした改良を実施するとともに、入出力機能の追加等を行い、Tiger Version1.4.2 を作成した。

## 4.2 改良内容

### 4.2.1 ソーバーの改良

Tiger で用いている Dylan は、ギア法に基づく微分・代数方程式系(DAE)ソーバーである。そこで、前出の第一の問題に対するソーバーの効率及び頑健性を増すために、以下の改良を行った。

- ラングミュア型の吸着等温線については、対応する代数方程式を Newton 法ではなく、解析的に解くこととした。
- ギア法のタイムステップングでは、急激な変化に対応する不連続的でタイムステップをどんどん細かくするため、前バージョンでは計算がストップしていたが、現バージョンでは、この場合、変化後の状態を初期値として自動的にリスタートする様にした。

第二の問題である核種濃度が小さくなった場合の解の不安定性については、まず、問題点の探索を行ったところ、次式によって定義される、溶存イオン濃度を含む瞬時平衡グループについての同位体  $n$  の存在比  $\gamma^n$  が原因と成っていることがわかった。

$$\gamma^n = \frac{c^n}{C^e}$$

ただし、

$c^n$ : 同位体  $n$  の全濃度

$C^e$ :  $n$  を含む元素  $e$  の全濃度

である。

$C^e$  が極めて小さいもの (tolerance と scale の積よりも小さい値) となった場合には、数値

誤差により各同位体濃度に小さな負の数値が現れることがあるが、この時、 $\gamma^n$ は1を上回ったり、逆に負の値を採ることとなり、誤差が増幅されることとなる。これが、以前のバージョンの問題点であった。

この問題を回避するために、上記の様な不安定な状況が生じるのは $C^e$ が極めて小さい、すなわち、沈殿の生じない状況に限られることに注目し、この様な場合には、そもそも shared solubility を考慮する必要がなく、各同位体の吸着濃度 $c_s$ と液相濃度 $c_d$ の比は同位体によらず一定であることから、この比を実効遅延係数 $R_{eff}(c_d) = 1 + \frac{c_s}{c_d}$ として定義することとした。

Tigerでは、常に $c_s$ は $c_d$ の(一般的には非線形の、しかしながら単調な)関数によって予め定義されていることから、この変数は、 $\gamma^n$ と異なり、 $C^e$ が極めて小さいものとなった場合にも振動することはない。この変更に伴い、液相中同位体濃度 $c_d^n$ は、次の式によって表現されることとなる。

(溶解限度以上の場合) 
$$c_d^n = \gamma^n C^e$$

(溶解限度以下の場合) 
$$c_d^n = \frac{c^n}{V\theta R_{eff}}$$
 但し、 $\theta$ は空隙率。

上式は、複数崩壊連鎖の問題に含まれる各同位体濃度についての偏微分方程式系を、溶解限度以上では連立して、溶解限度以下の濃度では分離して個別に解くことを意味している。

改良後のTiger (Version 1.4.2)を用いて、前バージョンを用いたテストケース[6]の計算を実施した。両者の結果の比較を表 4.2.1-1 及び-2 にまとめる。

表 4.2.1-1 人工バリア中核種移行についてのテストケース解析結果

		拡散のみ		移流含む	
		Version 1.3	Version 1.4	Version 1.3	Version 1.4
単核種	連続放出	○	○	○	○
	有限期間放出	○	○	○	○
	非線形吸着	計算終了せず	○	計算終了せず	○
	遅いガラス溶解	○	○	○	○
	分配係数のステップ時間変化	○	○		
	溶解度のステップ時間変化	○	○		
	拡散係数のステップ時間変化	○	○		
	ダルシー流速のステップ時間変化	○	○	○	○
	拡散係数のステップ空間変化	○	○		
	ダルシー流速のステップ空間変化			○	○
	地球化学異常	○	○		
	崩壊連鎖	単一連鎖	Pu-241 を省いて計算終了	○	○
極短半減期メンバー		○	○	○	○
複数崩壊系列		Pu-241 を省いて計算終了	○	Cm,Am,Pu を分けて計算	○
分岐		出力時刻を増して計算終了	○	○	○

表 4.2.1-2 天然バリア中核種移行についてのテストケース解析結果

			バンドリリース入力		MESHNOTE 出力を入力	
			Version 1.3	Version 1.4	Version 1.3	Version 1.4
単一 チャンネル	単一 核種	マトリクス中 非吸着	線形のテールを付 して計算終了	○		
		マトリクス中 線形吸着	計算終了せず	○		
		マトリクス中 非線形吸着	$\beta$ 小の場合のみ計 算可	○		
		分配係数のステップ 時間変化	○	○		
		拡散係数のステップ 時間変化	○	○		
		地下水流速のステッ プ時間変化	○	○		
		地球化学異常	強制終了	○		
	崩壊 連鎖	単一連鎖			○	○
		極短半減期核種を含 む複数連鎖			○	○
	チャンネルネットワーク			○	○	

表からも明らかな通り、以前のバージョンで計算を行うことのできなかった全てのケースについて安定した解を得ることができた。なお、計算管理上のパラメータ (tolerance 及び scale) についてはデフォルト設定あるいはこれよりもさらに厳しい設定を使用することができる。一般的に、ピーク近傍での核種放出率を精度良く解くためには、デフォルトの設定で十分であり、計算効率の観点からもこの設定を用いることが合理的と考えられる。但し、解析解等との比較において、数値解の傾向である初期のフラックスの過大評価を抑える等、ピーク値よりもかなり小さい範囲も精度良く解くことが必要な場合には、より厳しい設定を用いることも考えられる。この場合、tolerance と scale の積が、デフォルトの場合よりも 2~4 桁程度小さいことが必要である。なお、セルサイズについては、グリッドペクレ数が 1 よりも十分小さくなる様に設定する必要がある。

なお、計算効率については、前バージョンで計算可能だったケースに要する時間が 1/2 から 1/3 程度になっており、ソーパーの効率が向上したことがわかる。但し、前バージョンで計算できなかった地球化学異常ケースには、現バージョンでも 1 日以上 of 計算時間を要するものも含まれる。

#### 4.2.2 廃棄体中存在形態に応じた核種放出挙動の解析機能追加

TRU 廃棄物処分等においては、複数種類の廃棄物が処分場内に共存する場合があります、また、単一の廃棄物の中にも一つの核種が異なる形態あるいは場所に含まれる可能性がある。これらの問題では、一般に、核種の存在形態毎に異なる放出期間を考慮する必要があり、Tiger Version1.4 では、各放射性核種のインベントリーをいくつかのフラクションに分割し、

それぞれに対して異なる浸出期間を定義する機能を追加した。

#### 4.2.3 被ばく線量算出機能追加

前バージョンの Tiger では、計算結果の出力は核種のフラックスあるいは濃度に限定されていた。Version 1.4 では、ユーザーが被ばく線量換算係数を入力することにより、被ばく線量の時間変化を出力することが可能である。

#### 4.2.4 その他の改良

Tiger Version 1.4 におけるその他の改良点を以下に挙げる。

- 出力時刻の有効数字が 5 桁から 7 桁へ変更された。このことにより、長期経過時点で生じる短期間の変動を表現することが可能となった。
- 入力ファイル中の各行の文字数が増加された。このことにより、外部で計算された人工バリアからの核種放出率を Tiger による天然バリア解析の入力として用いる際の自由度が増した。

### 4.3 テストケースについての解析

前節までに述べた改良を行った後の TIGER Version 1.4.2 を検証するため、TRU レポートの核種移行解析で用いられたデータ及びコード MENTOR による解析結果と比較した。MENTOR の人工バリア部分及び天然バリア部分は、それぞれ MESHNOTE 及び CRYSTAL と同様のものであり、人工バリアを差分で、天然バリアを半解析解(Talbot 法による数値的ラプラス変換による)で計算するコードである。また、人工バリアと天然バリアの境界条件は、ミキシングセルモデルで接合されている。

これに対し、TIGER は人工バリア及び天然バリアを一括して差分で解くコードであり、MENTOR や MESHNOTE のようなミキシングセルモデルは用いていない。

比較対象としたケースは、ガス影響ケース(ガス影響がある間は人工バリア内での沈澱・吸着を考慮しない)である。また、炭素は有機形態と仮定されている。対象とした廃棄物グループは、ベントナイトを用いて処分される廃棄物グループ2(ハル・エンド廃棄物、放射化金属など)とベントナイトを用いない廃棄物グループ3(有機物や硝酸塩を多く含む廃棄物)とした。天然バリアは、結晶質岩及び堆積岩の両方について考慮した。主な解析条件を表 4.3-1 に示す。

ガス発生の影響は、沈澱や吸着を無視するだけでなく、ガスの発生による人工バリア内間隙水の押し出しも考慮して人工バリア内の流速の変化もモデル化されている。ただし、MENTOR の掘削影響領域に関するデータは、モデル上の掘削影響領域の断面積を現実的に

設定するために利用した2次元移行解析コード AZURE を用いたガス影響のないケース（レファレンスケース）の計算結果である。MENTOR では、掘削影響領域がミキシングセルでモデル化されているが、TIGER では、人工バリアの一つの領域としてモデル化した。

多くのデータは、TIGER と MENTOR または MESHNOTE（人工バリア部分を対象とする核種移行解析コードであり、MENTOR と同様ミキシングセルを利用する）、CRYSTAL で共通に用いることができるが、人工バリアと天然バリアの接合部については、MENTOR のデータを TIGER のデータに変換する場合に注意を要する。MENTOR では、人工バリアからミキシングセルへの流入量よりミキシングセルから天然バリアの流出量の方が少ない場合でもその逆の場合でも、核種の質量は保存されるが、TIGER では、流出量の方が少ない場合、余剰分が系外に流失すると考えられ解析対象となっている天然バリアには流入しない。これを防ぐため、TIGER を利用した解析では、特にベントナイトのない系等の人工バリア流量が天然バリア流量よりも大きな場合（グループ3がこれに該当する）を考慮して、2通りの解析を行った。ケース1は、人工バリア内の大きな流速を MENTOR に合わせ、流量の不整合が起きないように、掘削影響領域及び天然バリアの断面積を大きく調整するケースとした。ケース2は、断面積を MENTOR の条件に合わせ、人工バリア内の流速を小さめに調整したケースである。

表 4.3-1、図 4.3-1 及び図 4.3-2 に解析結果の比較例を示す。流速を調整したケース2の方が MENTOR の結果とよく一致している。これは、MENTOR では、ミキシングセルまで人工バリア内の速い流速により核種が移動するが、天然バリアでのダルシー流速が律速となって、核種がミキシングセル内に滞留し、結果として掘削影響領域から天然バリアに流入するフラックスが小さくなるからである。これを TIGER で表わすには、人工バリア内の流量を MENTOR より小さくしても、掘削影響領域の断面積を MENTOR と同程度に小さく抑えることにより、移行の程度を揃える方が、より効果的である。

図 4.3-2 に示す堆積岩系岩盤における廃棄体グループ3の解析結果において、TIGER のケース1が他と大きく異なっているのは、人工バリアと天然バリアの核種の質量を保存するため、天然バリアの断面積を調整して約1万倍に大きくしたため、流量が帯水層とほぼ同じとなり、天然バリアでの核種の濃度が低下し、天然バリアから帯水層への拡散の効果が小さくなったためと考えられる。

以上の結果より、TIGER Version 1.4.2 は、特に今回の改良で追加された、溶出速度の異なる廃棄物が混在するケースを1回の計算で解く機能および各核種のフラックスを線量当量に換算して出力する機能について、正しく動作していることが確認された。

表 4.3-1 TIGER と MENTOR による解析結果の比較

天然バリア	廃棄体グループ	解析コード・ケース	最大線量当量率		時間	
			[Sv/y]	比率 [-]	[年]	比率[-]
結晶質岩系岩盤	グループ 2	MENTOR	4.47E-07		1.58E+04	
		TIGER Case1	6.94E-07	1.55	1.58E+04	1.00
		Case2	6.25E-04	1.40	1.59E+04	1.01
	グループ 3	MENTOR	5.42E-08		1.36E+04	
		TIGER Case1	7.47E-08	1.38	1.17E+04	0.86
		Case2	5.81E-08	1.07	1.36E+04	1.00
堆積岩系岩盤	グループ 2	MENTOR	1.17E-07		1.85E+04	
		TIGER Case1	1.27E-07	1.09	1.85E+04	1.00
		Case2	1.24E-07	1.07	1.85E+04	1.00
	グループ 3	MENTOR	1.29E-08		1.85E+04	
		TIGER Case1	4.14E-09	0.32	2.51E+04	1.36
		Case2	1.37E-08	1.06	1.85E+04	1.00

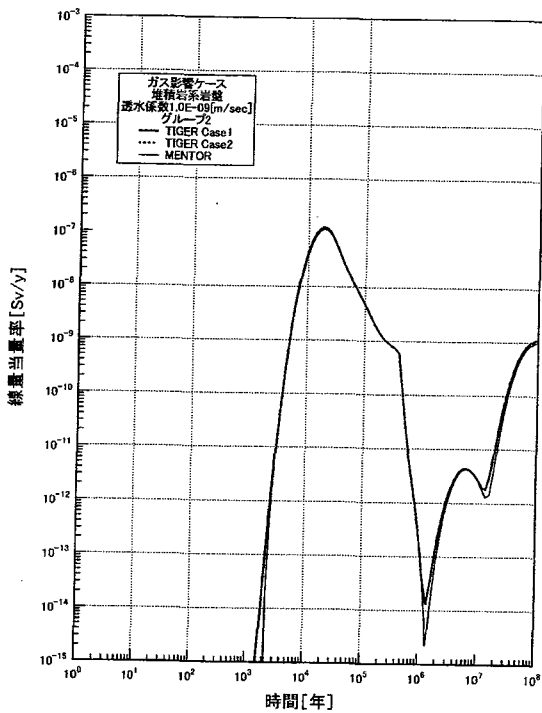


図 4.3-1 TIGERとMENTORのガス影響ケースに関する比較  
廃棄体グループ2、堆積岩系岩盤

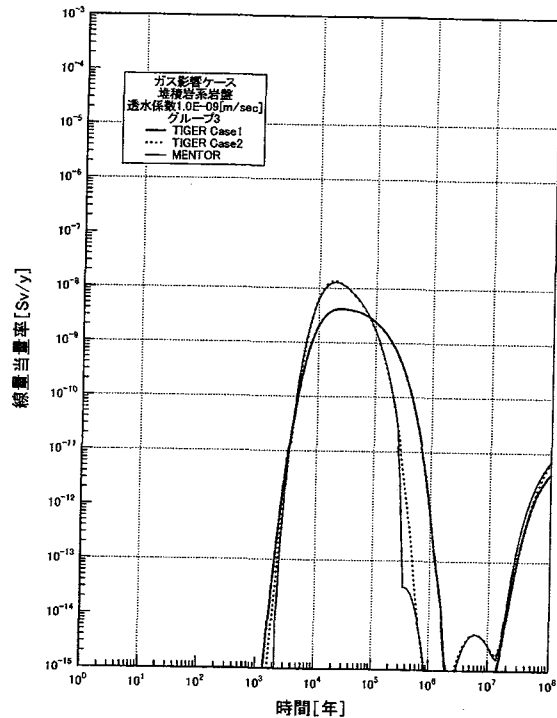


図 4.3-2 TIGERとMENTORのガス影響ケースに関する比較  
廃棄体グループ3、堆積岩系岩盤

## 5. まとめ及び今後の課題

これまでに開発を行ってきた概括的感度解析手法を総括し、シャドウモデルと呼ばれる汎用性の高い解析モデルを用いたモンテカルロシミュレーションと、クラスター分析、主成分分析、局所線形回帰分析及びムービングバンド分析といった統計的な感度解析手法と

を組み合わせることによって、高レベル放射性廃棄物地層処分の核種移行に関するパラメータ空間全域及びリファレンスケースや大影響ケース近傍の感度構造の概要を調べた。また、この感度解析の結果に基づき、主要な入力パラメータについて、第二次とりまとめで比較対象としている諸外国の安全基準や天然放射線レベルを上回る影響が生じる様な値の範囲を同定した。さらに、これらの結果と第二次とりまとめにおける解析ケース群の設定とを比較することにより、第二次とりまとめの解析の網羅性について確認を行った。

以上の解析のうち、感度解析の方法は統計的手法であるために、結果として得られる感度構造は「頻度」によって重み付けされた、いわばパラメータ空間内の各位置における「多数派」によって支配されたものであった。この様な統計的な手法は、極めて次元の高いパラメータ空間を鳥瞰し、その感度構造の概要を把握する上では最も効率的な手法であるが、今後の地層処分の事業化に向かい精度と網羅性を向上する必要がある。特に将来の安全規制のあり方を議論する際には、この様な感度構造の「概要」に加えて、例え低頻度であっても、影響が大きいかつ他の（多数派の）ケース群とは異なる影響機構を有するケースのそれぞれについて詳しい検討が要求されることとなる。従って、今後の研究では、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結果に対する決定論的な分析によって、大きな影響（被ばく線量あるいは核種放出率）をもたらす様な「全て」のケースについて、これらの影響をそれぞれ許容できるレベルにまで低減するための入力パラメータの条件（＝安全要件）を明確化する手法を作成し、かつ、この手法を用いて安全要件の体系的な「リスト」を作成することについて検討を行うことが必要と考えられる。

概括的感度解析に用いる探索型性能評価ツールを、今後 TRU 廃棄物処分に適用していくために必要となる改良点を明確化し、また、これらの改良を施すことによって核種移行解析コード Tiger のフロントエンド STRIDER の新バージョン（Version1.4）を作成するとともに、テストケースについての解析を行い、改良が適切に行われていることを確認した。

Tiger についても、TRU 廃棄物処分への適用を主眼として複数の廃棄物や廃棄物中での同一核種の複数の存在形態を考慮することが可能となる様に改良を行った。また、被ばく線量としての解析結果の出力機能等、いくつかの新たな機能の追加を行うとともに、ソルバーの改良及び最適化を行って、非線形吸着、急激な水理条件の変動、及び地球化学異常時の核種移行特性の変化といった所謂硬い問題を解法する効率や頑健性の向上を図った。

今後の課題としては、改良された上記のツールを用いて、TRU 廃棄物処分についても高レベル廃棄物地層処分の場合と同様の概括的感度解析を行い、別途実施されている決定論的な解析におけり解析ケースの網羅性を確認することが挙げられる。

#### 参考文献

- [1] 動力炉・核燃料開発事業団: 地層処分システム性能評価のための概括的感度解析手法の高度化(II) 研究委託内容報告書, JNC ZJ1281 98-005, 1998 年 2 月
- [2] 核燃料サイクル開発機構: 地層処分システム性能評価のための概括的感度解析手法の高度化(III) 研究委託内容報告書, JNC TJ1400 99-017, 1999 年 2 月
- [3] 核燃料サイクル開発機構: 探索型性能評価ツールの統合・最適化, JNC TJ1400 99-001, 1999 年 2 月
- [4] 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 次とりまとめ- 分冊 3 地層処分システムの安全評価 JNC TN1400 99-023, 平成 11 年 11 月 26 日
- [5] 動力炉・核燃料開発事業団: 地層処分研究開発の現状 (平成 8 年度) PNC TN1410 96-071, 1996 年
- [6] 核燃料サイクル開発機構: セルロース系有機物の分解及び核種移行への影響に関する研究(II) JNCZJ8400 99-010, 1999 年