

核種移行の網羅性の確認・評価（その3） （概要）

（核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書）

2002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

Inquiries 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)
2002

核種移行解析の網羅性の確認・評価（その3）

（概要）

（核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書）

三木崇史* 小山田潔* 池田孝夫*

要旨

本研究では、余裕深度処分について、シナリオ、モデルそしてパラメータの各階層における評価上の不確実性を包含するような幅広い選択肢の範囲において、多数の統計的な核種移行解析を実施し、解析結果に対する体系的な感度解析を行うこと（TRU廃棄物処分についての包括的感度解析）を通じて、

- ・ 将来の潜在的な放射線影響の多様なパラメータに対する感度の構造を幅広い範囲にわたって明確化することにより、このような影響を低減するための合理的な方策を見出すこと
- ・ 新たな感度構造明確化の方法論を試行すること
- ・ 基本シナリオに関して、線量拘束値を十分に下回る目標線量を満足するような処分システムの仕様や地質環境条件の範囲を示すことにより、システム開発上の指針を示すこと
- ・ 変動シナリオを含めた広範なシナリオについて、線量拘束値を上回るような大きな影響の要因となるような条件の組み合わせを抽出することにより、避けるべき処分システムやシナリオの内容を明らかにすること

のそれぞれについて成果を得た。また、地層処分については、地層処分の変動シナリオに関する TRU 廃棄物処分の影響評価手法の検討を行った。

本報告書は、日揮株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した研究成果に関するものである。

機構担当部課室： 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分材料研究グループ

*：日揮株式会社

A Comprehensive Study on Nuclide Migration
Using Scenario Exploration Method (3)
(Document Prepared by Other Institute, Based on the Trust Contract)

Takahito Miki*, Kiyoshi Oyamada* and Takao Ikeda*

Abstract

In this study, for the mid-depth disposal system for TRU wastes, asset of stochastic simulations covering uncertainties corresponding to variety of scenarios, models and parameter values were conducted to;

- indicate measures to reduce potential exposure based on the knowledge of sensitivity structure
- introduce new methodology for clarify the requirement of repository system
- show guidelines of disposal system development by clarifying conditions in system specification for achieving a target which is well below the dose constraint for base scenarios
- identify scenarios and conditions that could lead to a radiological impact greater than the dose constraint for alternative scenarios

In the course of geological disposal for TRU waste, improvement of assessment methodology for the alternative scenarios was carried out.

This work was performed by JGC Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: JNC Tokai Works, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Waste Isolation Research Division, Material Research Group

* : JGC Corporation

目次

1. はじめに	1
2. 多様なパラメータに対する感度構造の明確化並びにこれらのパラメータの変動 の影響を低減あるいは避ける条件を網羅的に抽出可能な合理的手法の開発	2
2.1 感度構造の網羅的把握のための既存の手法	2
2.2 Response surface を用いた感度解析手法の開発	3
2.3 安全指標を満足するような処分システムの仕様や地質環境に関する条件を 網羅的に抽出可能な手法の開発	8
3. 余裕深度処分の基本シナリオに関して現実的な制約条件を満足しつつ線量目標 を達成するための十分条件の確定	12
3.1 基本シナリオにおける解析条件	12
3.2 基本シナリオ解析結果	19
4. 変動シナリオ	31
4.1 変動シナリオにおける解析条件	31
4.2 変動シナリオ解析結果	35
5. 地層処分シナリオに関する TRU 廃棄物処分の影響評価手法の検討	38
6. おわりに	39
7. 参考文献	40

図リスト

図-1	解析手順の概要	5
図-2	ムービングバンド法による解析結果からのパラメータ抽出手法の模式図	9
図-3	余裕深度処分における人工バリアおよび天然バリアの概念	18
図-4	被ばく線量の時間依存性（グループ3、廃棄体区分1～3）	20
図-5	ムービングバンド法による解析結果からのパラメータ抽出手法の模式図	23

表リスト

表-1	解析対象とする廃棄物および処分概念	13
表-2	グループ3で顕著な感度を持つパラメータ	24
表-3	グループ4で顕著な感度を持つパラメータ	25
表-4	10 μ Sv/y を下回るための十分条件、グループ3	27
表-5	10 μ Sv/y を下回るための十分条件、グループ4	27
表-6	地質環境条件を制約条件とする場合の十分条件抽出例	29
表-7	基本シナリオシャドウモデルで対応可能な事象と新たなモデルの追加が必要となる事象	33
表-8	変動シナリオにおいて感度を有したパラメータのまとめ、グループ3	36
表-9	変動シナリオにおいて感度を有したパラメータのまとめ、グループ4	36

1. はじめに

本研究で行う、包括的感度解析の目標とするところは、従来の性能評価における比較的少数の保守的かつ決定論的な解析を補い、安全性の判断に必要な定量的情報を提供することである。昨年度の研究では、これまで主として高レベル放射性廃棄物地層処分について開発・適用されてきた上記手法を発展させ、TRU 廃棄物の地層処分及び余裕深度処分に適用することにより上記の定量的情報を得ることを可能とした。また、それぞれの処分方式について、基本シナリオに限定した予備的解析を行い、安全確保に関する基本的な知見を得た。

本年度の研究では、余裕深度処分について、上記の予備的解析結果をさらに発展させ、シナリオ、モデルそしてパラメータの各階層における評価上の不確実性を包含するような幅広い選択枝の範囲において、多数の統計的な核種移行解析を実施し、解析結果に対する体系的な感度解析を行うこと（TRU 廃棄物処分についての包括的感度解析）を通じて、

- ・ 将来の潜在的な放射線影響の多様なパラメータに対する感度の構造を幅広い範囲にわたって明確化することにより、このような影響を低減するための合理的な方策を見出すこと
- ・ 基本シナリオに関して、線量拘束値を十分に下回る目標線量を満足するような処分システムの仕様や地質環境条件の範囲を示すことにより、システム開発上の指針を示すこと
- ・ 変動シナリオを含めた広範なシナリオについて、線量拘束値を上回るような大きな影響の要因となるような条件の組み合わせを抽出することにより、避けるべき処分システムやシナリオの内容を明らかにすること

のそれぞれについて最終的な成果を得ることを目標とした。また、地層処分については、地層処分の変動シナリオに関する TRU 廃棄物処分の影響評価手法の検討を行った。

2. 多様なパラメータに対する感度構造の明確化並びにこれらのパラメータの変動の影響を低減あるいは避ける条件を網羅的に抽出可能な合理的手法の開発

2.1 感度構造の網羅的把握のための既存の手法

2.1.1 シャドウモデルによる統計的解析

処分に起因する将来の放射線学的影響に影響を及ぼし得る現象は多種多様なものであり、これらの全てをくまなくモデル化することには大きな困難が伴う。しかしながら、これらの現象が放射線学的影響を直接規定することとなる核種移行に及ぼし得る影響の種類は限定されたものとなる。すなわち、地下水シナリオにおいては、いかなる現象も「核種移行の駆動力の増大あるいは減少」及び「核種自体の動きやすさの増大あるいは減少」という機構のいずれか、あるいは両方を介してのみ、核種移行挙動に影響を及ぼし得る。このことは、多種多様な現象の核種移行への影響は、上記の二つの影響機構を極力一般的に定式化しておくことにより、比較的少数のパラメータ群によって分類・定量化し得ることを意味している。包括的感度解析において用いるシャドウモデルは、このような背景のもとに、より具体的には、

- ・ 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化学形態変化（瞬時平衡モデル）
- ・ 溶解、沈殿、鉱物化、あるいは結晶化等の遅い反応による核種の化学形態変化（速度論モデル）
- ・ 各バリア材の化学反応あるいは天然事象の結果として生ずる地球化学条件の変化が上記二つの化学形態変化に与える影響
- ・ 核種の様々な化学形態における拡散性の相異
- ・ 人工バリア内の劣化やガス発生あるいは種々の天然事象の影響による地下水あるいはガス移行の時間的变化

をそれぞれ汎用的に定式化したものである。

2.1.2 統計的解析結果に対するデータマイニング

包括的感度解析におけるデータマイニングは、ムービングバンド法の適用を中心として、実施するものとした。また、これを補佐するための新規手法の開発に加え、ムービングバンド法によるパラメータ抽出手法に関して、より具体的な検討を行った。

核種移行解析結果の様に入力パラメータ数が非常に多く非線形性の強い感度構造に対しては、ムービングバンド法が有効である。ムービングバンド法は、以下の手順により、各入力パラメータがどの程度出力の変動に影響を及ぼしているかを定量化する手法であ

る。

K 個の出力を大きい順番に並べ直し、さらに、これらを k ($k \ll K$) 個の互いに重複しないバンドに分割する。

K/k 個のバンドのそれぞれについて、各入力パラメータの平均を計算する。

パラメータ i の j 番目のバンドにおける平均 μ_i^j と全域的な平均 μ_i との差異の統計的有意性を次式によって評価する。

$$S_i^j = \frac{\mu_i^j - \mu_i}{\sigma_k}$$

但し、全域的標準偏差を σ とした場合、 $\sigma_k = \sqrt{\left(\frac{1}{k} - \frac{1}{K}\right)}\sigma$ である。

ムービングバンド法により算出される S_i^j の推移がランダムなノイズである場合には、当該パラメータは顕著な感度を有さないと判断され、逆に、ある全域的なトレンドが見られる場合には感度があるものと判断される。

2.2 Response surface を用いた感度解析手法の開発

2.2.1 概要

本年度の研究では、近似モデルとして、非線形の response surface を構築し、これによって局所から大域までの各スケールにおける感度構造を一括して表現することを試みた。また、この response surface を用いて、ある代表点における局所的な感度構造を算出し、さらに、この情報に基づいて適切に（つまり、感度が大きく、かつ、設計変更や処分坑道位置の変更等によってコントロールすることの可能な）パラメータを変化させることを繰り返すことによって、目標とする被ばく線量を下回るための条件を見出すためのアルゴリズムを作成し、例題に適用した。

2.2.2 手法

(1) 手法の概要

解析手順の概要を図-1 にまとめる。

これまでの研究により、具体的な十分条件の抽出方法を検討し、ムービングバンド法を用いることにより、十分条件を満たすパラメータの範囲を抽出することが可能となった。ただし、抽出された結果は「ほぼ」十分条件を満足するものであったが、その確度に関しては必ずしも明確なものではなかった。

そこで本研究では、応答局面法を用いることにより、ムービングバンド法の適用の高度化を図り、これにより抽出された十分条件の「確からしさ」を確認するまでの手

法の構築を試みるものとした。

以下に、複数のパラメータ範囲を組み合わせた場合の、十分条件の確からしさの求めかたを示す。

X_i : i 番目のパラメータが所定の条件を満足する。 ($i=1,2,\dots,N$)

Y : 評価結果が目標線量を上回る。

を表すものとし、更に、各パラメータについての条件は、

独立($P(X_i \cap X_j) = P(X_i)P(X_j)$, for $\forall i, j$)であり、かつ、 $P(Y)$ を低下する様に設定され、

このため、任意の i について、

$$(c) \quad P(X_i | X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_{i-1} \cap Y) \leq P(X_i | Y)$$

が成立するものと仮定する。この時、 X_1, X_2, \dots, X_N が全て成立するという前提の下で、評価結果が線量目標を下回る確率について、以下の不等式が成立する。

$$1 - P(Y | X_1 X_2 \cap \dots \cap X_N) \geq 1 - P(Y) \cdot \prod_{i=1}^N \left(\frac{P(Y | X_i)}{P(Y)} \right)$$

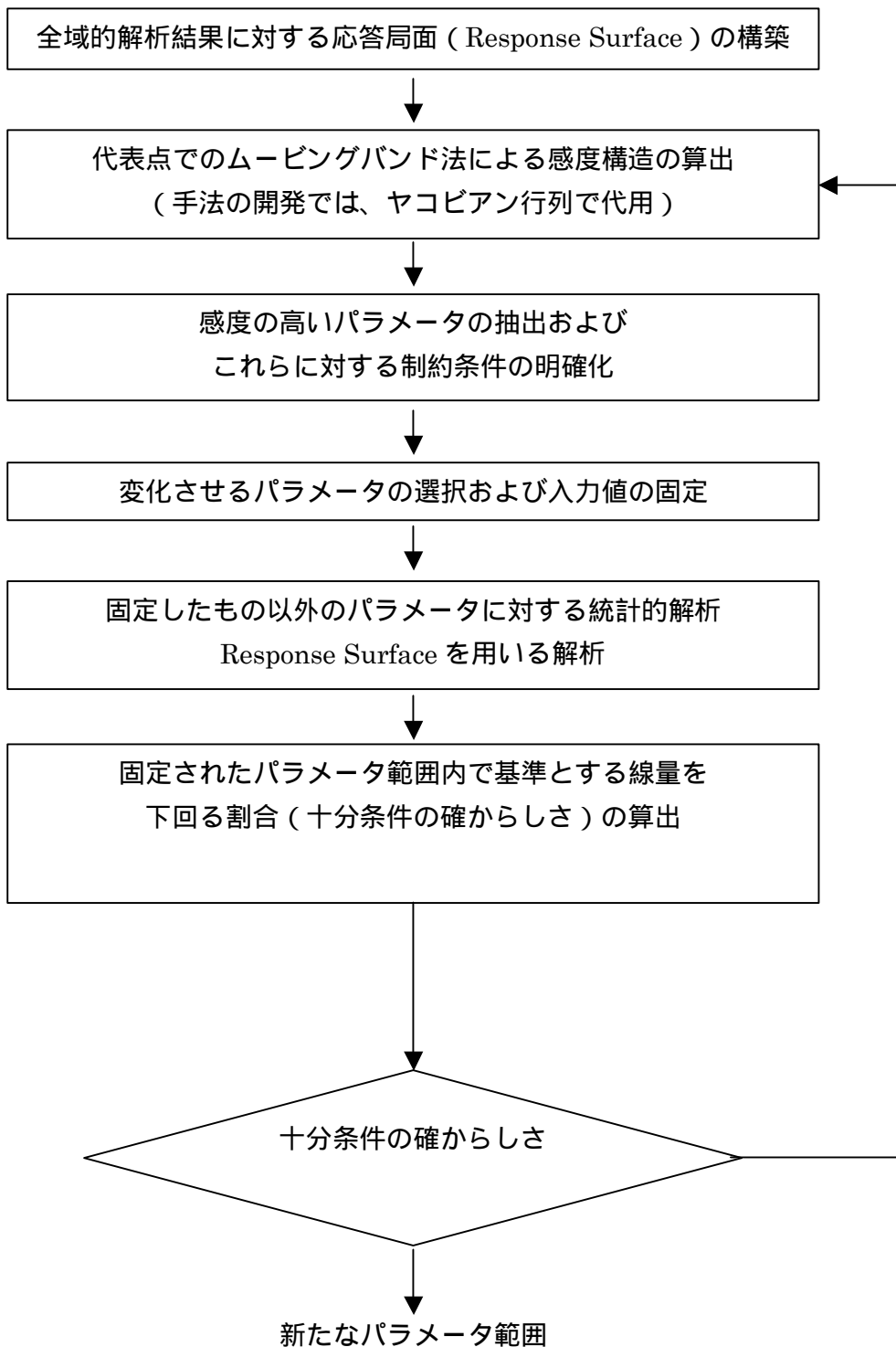


図-1 解析手順の概要

(2) 全域的解析結果に対する response surface の構築

ここでは、以下のような多項式を用いて全域的な解析結果を再現することを試みた。

$$S = a_0 + \sum_{i=1}^n a_{1,i} x_i + \sum_{i=1}^n a_{2,i} x_i^2 + \sum_{i,j=1}^n a_{11,ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n a_{3,i} x_i^3 + \sum_{i,j=1}^n a_{21,ij} x_i^2 x_j + \sum_{i,j=1}^n a_{12,ij} x_i x_j^2$$

ただし、n は着目する入力パラメータの数である。その結果、着目するパラメータ数の増大に伴って response surface の精度が向上し、全ての入力パラメータを取り入れたケース (n=59) では、ほぼ完全に全域的解析結果を再現できることがわかった。

2.2.3 局所的感度構造の把握及び条件探索の例

(1) 十分条件の探索

ここでは、例として、全ての入力パラメータについて、全域的解析における変動範囲の中央値を採ったケースを初期値として、反復的に十分条件を求めた結果をステップ毎にまとめる。

(a) ステップ 1

初期値における局所的な傾きであるヤコビアン行列をまとめる。

(b) ステップ 2

ステップ 1 において局所的な感度の大きいパラメータのうち、ここでは、例として、天然バリア透水係数及び動水勾配に着目し、これらがいずれも全域的な解析における各パラメータの変動範囲の中の最小値とすることができるという状況を想定した。さらに、この新たな代表点に対応して、天然バリア透水係数と動水勾配とをそれぞれ最小値に固定し、他のパラメータを全域的に変動させた解析 (100 ケース) を response surface を用いて実施した。その結果、目標線量を仮に $10 \mu\text{Sv/y}$ とした場合、全域的解析では 55% のケースがこれを超過していたが、天然バリア透水係数と動水勾配を固定したことによって、対数平均値は目標を一桁以上下回り、超過分は 29% に低下することがわかった。

(c) ステップ 3

ステップ 2 において抽出された感度の顕著なパラメータのうち、ここでは、例として、廃棄体からの地球化学異常発生継続期間、及び緩衝材劣化開始時刻に着目し、これらのパラメータをコントロールすることができる状況を想定した。ステップ 2 の場合と同様、新たな代表点の近傍で統計的解析 (100 ケース) を行った結果、頻度分布は左にシフトし、線量の上限が目標線量である $10 \mu\text{Sv/y}$ とほぼ同等となっ

ていることがわかる。つまり、

- ・天然バリア透水係数最小
- ・動水勾配最小
- ・廃棄体からの地球化学異常発生継続期間最小
- ・緩衝材劣化開始時刻最大

という条件の組み合わせは、十分条件の候補の一つである。

(2) 十分条件および必要条件の確からしさを伴う条件の探査

(1)と同じ初期値から出発して、十分条件および必要条件の探索を同様の手法によって行った。ここでの検討は、必要条件、すなわち、固定されたパラメータの範囲外では、 $10 \mu\text{Sv/y}$ を超える解析ケースの割合が増加するような、パラメータ範囲、および、その組み合わせの抽出を主眼として行う。その際、それらのパラメータの組み合わせにより十分条件（固定されたパラメータの範囲内で $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る解析ケースの割合）の確からしさの変化を、必要条件の確からしさと比較することによりパラメータ値を決定する。

ステップ2における仮定として、劣化後緩衝材透水係数と Th-229 線量換算係数に条件を与える。ここで選択するパラメータ範囲は、処分システムや地質環境条件を踏まえ、ステップ毎に検討すべきものであるが、ここでは、試算を目的とすることから分布の中央値から 1 程度、保守側の値を選択している。

この条件下で算出される、「確からしさが」、次のパラメータ選択における判断基準となる。すなわち、必要条件の確からしさを上げるか、または、十分条件の確からしさを増すかの判断を行い、次のパラメータの選択を行うものとなる。ここでは、ステップ3～5において、必要条件の確からしさを増すように、パラメータ範囲を固定し設定を行った。

以上から、目標線量を $10 \mu\text{Sv/y}$ とした場合に、これを下回るための十分条件および必要条件の例を導出した。必要条件の確からしさは高くなるものの、十分条件としての確からしさは、大きく改善されていない。すなわち、本検討のパラメータ範囲の組み合わせでは、このパラメータの範囲外では、概ね、線量は $10 \mu\text{Sv/y}$ を超えるが、パラメータ範囲の中であっても、約4割が $10 \mu\text{Sv/y}$ を超えるものと予想される。

2.2.4 今後の課題

今回開発した手法を用いて、約 1 万ケースに上る全域的解析の全出力について response surface を作成し、上記と同様の解析を行うことが必要である。

2.3 安全指標を満足するような処分システムの仕様や地質環境に関する条件を網羅的に抽出可能な手法の開発

実際の処分の安全評価においては、処分場仕様や地質環境条件に関する現実的な制約を考慮する必要がある。そのため、これらの制約条件を課した場合（つまり、各制約に対応するパラメータ値の範囲を限定した場合）に、他のパラメータの値がどのような範囲にあれば線量目標を満足することができるかを網羅的に明確にすることが必要である。しかしながら、制約条件が一義的には決定していないことから、ムービングバンド法等に基づく条件抽出に関する手法を自動化することにより、このような知見を効率的に探索することのできる後処理系を開発した。

2.3.1 ムービングバンド法によるデータ処理ソフトウェアの作成

ソフトウェアの開発は以下の手順で行った。

- Tiger の多数の入出力を保管し高速のリトリブを可能とするようなデータベースの設計
- ムービングバンド法による解析結果から各パラメータ感度の大小を判断するクライテリアの明確化及び判断アルゴリズムの定式化
- グラフィカルユーザーインターフェイス (GUI) の設計
- プログラミング
- テスト

(1) データ構成

ムービングバンド法では、以下の情報に元づき、統計的な解析を行う。

- 入力パラメータ名
- 各パラメータの値、または、パラメータ値の決定に用いられた乱数値
- 各パラメータを用いた解析結果

入力パラメータ名は、シャドウモデルで定義された具体的なパラメータの種類（例：動水勾配、等）を指す。各パラメータ値は、実際のパラメータ値またはパラメータ値を発生させるために用いられた乱数の値でもムービングバンド法の適用は可能である。

は、 の値を用い解析された結果であり、本研究では、核種放出率や被ばく線量の経時変化の最大値がこれに対応する。各々のデータはテキストファイルとして保存し、ソフトウェアへの入力、これを用いて行うものとする。

(2) ムービングバンド法による解析結果から各パラメータ感度の大小を判断するクライテリアの明確化及び判断アルゴリズムの定式化

ムービングバンド法によって感度を持つパラメータの分析は、本研究で新たに構築

したソフトウェアを用いて実施した。このソフトウェアにより感度を抽出するために、3つの抽出方法の適用可能性を検討し、最適と思われる手法を用いて感度を有するパラメータの抽出を行った。以下に検討した抽出法を図-2とともに説明する。

ムービングバンドによる解析結果に対し、最小二乗法による多項式近似を行い、近似式を求める。近似式から得られる、基準とする線量（または、核種放出率）でのパラメータ値と、ムービングバンドの解析結果のなかで、パラメータが最大（または最小）となる被ばく線量を用い、被ばく線量基準値以上の領域での傾き（基準値以上勾配）を求め（図中、参照）その値の振る舞いからパラメータの抽出を行う。

と同じ方法により近似式を求める。近似式よりもとまるパラメータ値の最小値と最大値から、両者の差（最大・最小の差）を求める。また、各線量値で、近似式からの解析結果のずれ（振幅）をもとめ、それらの値から、振幅の平均値（平均振幅値）を求める。最大・最小の差と平均振幅値の2倍を比較することによって、パラメータ抽出の判断の指標とする。（図中、参照）

と同じ方法により近似式を求める。近似式を用いて、多項式近似解の微分演算より、その絶対値の最大値（最大勾配）を求め、その値の振る舞いからパラメータの抽出を行う。（図中、参照）

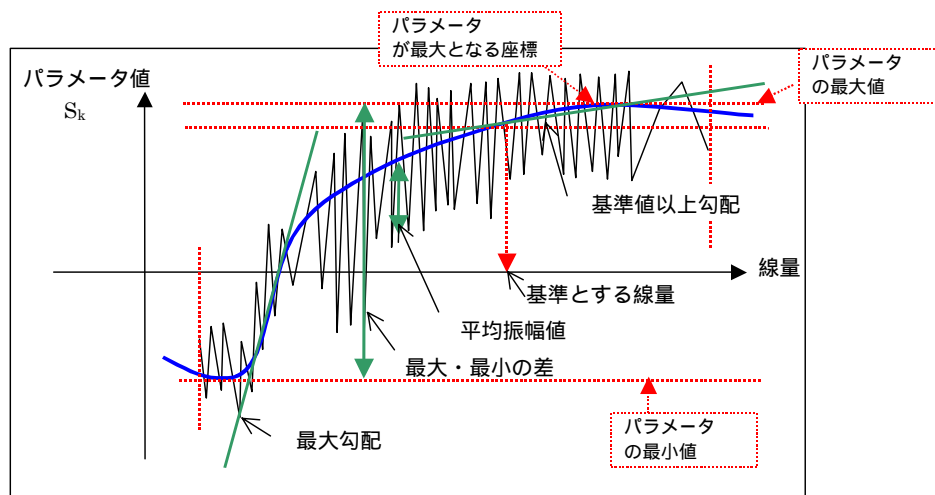


図-2 ムービングバンド法による解析結果からのパラメータ抽出方法の模式図

3つのパラメータ抽出手法のそれぞれの適応性を検討する。ここでも、実際の核種移行解析の結果を用いて、それぞれの手法を適応し、その結果を比較検討することによって、それぞれの手法の適応性を議論することとする。なお、グループ3の区分8の解析結果を用いて、それぞれの手法の比較検討を行った。

グループ3の区分8の解析結果では、基準値以上平均勾配(手法)と最大勾配(手法)の振る舞いはいずれもなだらかに変化しており、明らかなグループ分けを行えるような変化は認められない。一方、最大・最小の差(手法)の振る舞いを見ると、パラメータ番号42番と10番の間で大きな変化が認められる。また、同じパラメータ番号42番と10番の間で、最大・最小の差と平均振幅値の2倍の大小関係も逆転している。このことは、感度解析結果の振動幅よりも大きな最大・最小の差を有しているグループでは、このグループに属していないパラメータよりも、より顕著に最大・最小の値が大きいことを示しており、これらのパラメータが感度を有していることを強く示唆している。また、ムービングバンドの解析結果では、縦軸のパラメータ値は、 S_k に容易に規格化することが可能であり、 S_k は各バンドにおける平均値と全域的な平均値との差異の統計的有意性を表すものとなる(2.2参照)。このことから、最大・最小の値からパラメータを抽出する手法は、バンドの違いによる統計的有意性の違いも考慮した抽出法だと言える。また、平均振幅および最大・最小の差のいずれもが、 S_k の単位を有しており、平均振幅は他のパラメータからの寄与の程度を表すものであることから、最大・最小の差と平均振幅を比較することによって、各パラメータ自体の統計的有意性と他のパラメータの統計的有意性を直接比較することができる。近似式より求まるパラメータの最大・最小値は解析に用いられたパラメータの最大・最小値とは異なり、パラメータの影響の程度を表したものである。傾向の程度の減少とともに平均振幅が増加し、近似式よりもとまる最大・最小の差の上回るものと思われる。

一方、手法 、 は勾配を用いていることから、統計量である S_k の変動に基づくものではあるが、被ばく線量に対する傾きであることから、算出された値の統計的な有意性が不明確なものとなる。この点からも手法 がパラメータ抽出手法として適切であると考えられる。ただし、 や の手法は、線量範囲を限定し、感度の大きなパラメータを抽出する場合や、局所的な感度の大きさを検討する上では有効であり、これらの量に対する評価基準やパラメータの使用法に関しては今後の課題となる。

以上のことから、本研究においては、手法 をパラメータ抽出の方法として採用し、パラメータ抽出に用いる判断基準としては、最大・最小の値と平均振幅値の2倍の交点とすることとした。その際、平均振幅の値は、パラメータの種類により異なることから、パラメータ毎に、

最大・最小の値 / (平均振幅の2倍)

の値を求め、これを昇順に並べ、判断の基準とすることとした。

(3) GUI の設計およびプログラミング

プラットフォームとしては Tiger 自体と同様 Windows を想定し、プログラミング言語としては GUI の作成に適した Visual J++を用いた。

(4) パラメータ抽出基準のムービングバンド法におけるバンドサイズの相違による比較

バンドサイズを変化させることにより大きな感度を有するパラメータの抽出に与える影響を確認することを目的として、バンドサイズを変化させ、感度の大きなパラメータの抽出を行い、比較することとした。

その結果、バンドサイズが大きくなるに従い、抽出されるパラメータ数も増加する。バンドサイズが大きくなることは、任意のバンドに含まれるデータ数が増加することを意味する。そのため、バンドサイズが増加するのに従い、平均振幅は減少する。一方、多項式で近似された平均的な挙動を表す曲線は、バンド毎の平均値ではなく、線量 - パラメータの全データを用い近似曲線を作成していることから、バンドサイズの大きさに依存しない。全データを用い求められた近似曲線とバンド毎の平均値を用いた近似曲線を比較した場合、十分なデータ密度を有する領域では、バンドのサイズに拠らず、近似曲線は一致する。

よって、現在のバンドサイズ(20)が必ずしも最適であるとは判断できないものの、比較結果からは、妥当な選択であることが伺える。ただし、解析ケース数とバンドサイズの関係に関する理論的な考察は、今後、さらに検討が必要となる。

3. 余裕深度処分の基本シナリオに関して現実的な制約条件を満足しつつ線量目標を達成するための十分条件の確定

基本シナリオに関して昨年度行った予備的解析の結果を踏まえつつ、線量拘束値を十分に下回る目標線量を満足するような処分システムの仕様や地質環境条件の範囲を確定することにより、システム開発上の指針を示すことを目標とした研究を行う。研究は以下の手順で行う。

昨年度開発したモデル及び設定したパラメータ値変動範囲を見直し、解析条件を確定する。

の結果に従い、必要に応じて解析ツールに改良を加える。

本年度の成果を可能な限り活用し、これらを用いて全域的解析を実施するムービングバンド法等の各種の手法を用いて全域的解析結果に関する感度解析を行う。

3.1 基本シナリオにおける解析条件

3.1.1 基本シナリオにおけるモデル

本研究では、昨年度実施された放射能濃度の低い TRU 廃棄物の余裕深度処分に関して、処分の成立性を詳細に確認することを目的として、余裕深度処分におけるモデルおよびパラメータの見直しを行った。このため、余裕深度処分の解析条件を決定するために打ち合わせが実施された。同打ち合わせを通じて決定された評価対象とする処分オプション及びこれに対する解析の前提条件を以下にまとめる。

(1) 前提とする条件

本研究において、解析の対象とする廃棄体の種類とグループを表-1 にまとめる。廃棄体区分のグループは、TRU 処分概念検討書において廃棄体の種類とその性質および放射能濃度に基づく分類がなされる。本研究では、これに基づく廃棄体の分類を、さらに詳細に分類し、グループ毎に、処分する廃棄体の組み合わせを核種のインベントリを考慮することにより、決定し、廃棄体種類の組み合わせ毎に、処分の成立する条件を探るものとした。

(2) 対象とする核種

昨年度の研究と同様に、I-129、C-14、Np-237 の 3 核種を評価の対象とする。これは、既存研究の TRU 処分概念検討書での性能評価結果を参考として決定したものである。

表-1 解析対象とする廃棄物および処分概念

廃棄物グループ	廃棄物の特性	評価対象とする処分概念
グループ 3	低レベル濃縮廃液 (NaNO ₃ を主成分とする液体廃棄物) を、乾燥・造粒しセメント固化したもの、または、蒸発濃縮 (JNC)、化学処理 (返還廃棄物) したものをアスファルト固化した廃棄物 (200L ドラム缶に収納)	余裕深度処分
グループ 4	その他の廃棄物 (200L ドラム缶に収納)	

(3) 環境条件

余裕深度処分に関して第3次中間報告 (原子力委員会、2000) で想定されている条件を参考とし、処分対象地層の岩種としては、余裕深度処分では堆積岩を選択した。

(4) 人工バリア構成

グループ 3 A を余裕深度処分する場合の人工バリア構成と各バリアの仕様例を図-3 に示す。各領域のサイズに関しては別途設定し、必要に応じて一部感度解析の対象とする。

(5) シナリオおよび評価期間と性能指標

評価シナリオとしては、地下水移行シナリオのみを対象とし、接近シナリオは今回の解析には含めない。想定する現象は、基本シナリオにおける解析では、TRU 廃棄物処分の特徴であるコンクリート影響や硝酸塩影響に、焦点を当てるものとし、人間活動や天然事象に伴う外部事象の影響は考慮しないものとした。評価期間及び性能指標は、高レベル放射性廃棄物についての包括的感度解析の場合と同様とする。

(6) 基本シナリオに対応するシャドウモデル

(a) 概念モデル

人工バリアは多層の矩形構造を有しており、分子拡散による核種移行に有効な断面積は各層の内側と外側とで異なる。そこで、このような断面積の変化を一次元解析において表現するために、各層を台形によって近似することとした。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

の必然性は少ないことから、本研究では人工バリアを連続体としたモデルを用いることとする。

(b) 人工バリアにおける支配方程式

本解析では、人工バリアおよび天然バリア中の核種移行解析を、単位坑道長さ(坑道1m)からの核種放出を対象として実施するものとし、人工バリアおよび天然バリアへの核種放出率は、解析値に処分坑道の長さを乗じて評価を行うものとする。

系内の地下水流動は常に定常であるものとし、ガスによる排出の生じない通常の状態では、多重のバリア構造の内部における流れについては、施設形状を同心円状の多層の2次元円筒で近似し、これに対する解析解を用い、各層中の地下水流量を求め、これを各層の流量として与えることとした。

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、コンクリート空隙水、あるいは硝酸塩等)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。そこで、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。

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し、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。

TRU 廃棄物処分を対象とした本解析では、溶質を含む、従って可動な瞬時平衡グループのみを考える。この場合、この瞬時平衡グループについての反応/分散/移流方程式は以下の様に定式化される。

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta \frac{\partial (d_L v \beta + D \alpha) c}{\partial x} \right) - \frac{\partial \theta v \beta c}{\partial x} - \theta \{ \lambda c - \tilde{\lambda} \tilde{c} \}$$

但し、 c は全濃度、 λ は崩壊定数であり、 $\tilde{\lambda}, \tilde{c}$ はそれぞれ親核種の該当パラメータを表す。また、 α 及び β はそれぞれ瞬時平衡グループの平均拡散係数並びに平均移流速度に対応する。

(c) 天然バリアにおける支配方程式

余裕深度処分の場合、堆積岩である母岩中の地下水移行経路は、連続多孔質媒体

として表現される。解析対象領域の大きさを規定するパラメータのみは時間に依らず固定する。系内の地下水流動は、定常かつ飽和であり、ダルシー則によって表現されるものとする。母岩中の地球化学的条件の変化は、地球化学異常物質の反応/移流/分散についての偏微分方程式を数値的に解く。母岩中核種移行シャドウモデルにおいても、可動な瞬時平衡グループを考える。余裕深度処分の場合の支配方程式は、次式の通り容易に得られる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta d_L \frac{\partial \beta c}{\partial x} \right) - \frac{\partial \theta \beta c}{\partial x} - \theta \{ \lambda c - \tilde{\lambda} \tilde{c} \}$$

(d) ガス影響モデル

TRU 廃棄物に含まれるドラム缶やキャニスター等の鉄系材料の還元性環境での腐食により発生する水素ガスは、廃棄物周辺から外部に向けての動水勾配を与えるため、放射性核種を含む人工バリア内部の空隙水を排出する可能性がある。このような汚染空隙水の排出経路としては 緩衝材空隙水の脱水および 施設内部ボイドの排水の二つが想定される。本検討では二つの経路のいずれも考慮した以下のモデルを本解析に用いることとする。

(e) ソフトウェア構成及び数値解法

上述の数学的モデルは、核種移行ソープである TIGER 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 というプリプロセッサを用いる。

3.1.2 基本シナリオにおけるパラメータ

3.1.1 にそれぞれ述べた前提条件と解析モデルを踏まえ、核燃料サイクル開発機構の関連する各分野の専門家に対してインタビューを行い、それぞれのパラメータについて解析上考慮すべき入力値の範囲を設定した。

(1) 核種インベントリ

「TRU 廃棄物処分概念検討書」(核燃料サイクル開発機構、電気事業連合、2000) (以下、概念検討書)では、核種濃度が 1GBq/t を超える廃棄体を「地層処分」対象廃棄体とみなした評価が行われた。しかし、「余裕深度処分」と呼ばれる、より濃度の低い廃棄体を対象とした処分概念が構築され、「地層処分」も含め、より合理的な処分概念の構築が求められている。

そこで、本研究では、概念検討書において「TRU 核種を含む廃棄物」の対象とされ

た廃棄物の内、グループ1および2に分類された「廃銀吸着材」と「ハル・エンドピース」を除く全ての廃棄物において、余裕深度処分での処分の可能性を探るものとした。

また、概念検討書に従い、廃棄体は以下のようにグルーピングするものとした。

- ・ グループ3：アスファルト、硝酸塩を多く含む核種の吸着性・溶解度への影響を及ぼす可能性のある廃棄体
- ・ グループ4：その他の廃棄体

本解析では、以下の手順により処分される核種の量を決定するものとし、処分される核種の量をパラメータとすることにより、余裕深度処分への各廃棄物の適用性を検討するものとした。

グループ3またはグループ4に分類された廃棄体の種類を、被ばく線量に支配的となる核種のインベントリを基準として、昇順に並べ替る。

昇順に並べられた廃棄体種類の順序に従い、基準となる核種のインベントリ、他の核種のインベントリおよび発生量に関して、累積値を求める。

処分を想定する廃棄体の種類を選択（乱数を発生させサンプリング）し、その廃棄体を含む、累積発生量（インベントリおよび処分体積）を求め、これを核種移行解析の入力値とする。

(2) 廃棄体グループ毎のガス発生速度設定

ガス発生は、廃棄体のドラム缶及び廃棄体中の金属の腐食によって発生するものとする。グループ3の金属量はドラム缶のみの金属量と考え、概念検討書のグループ1と同じと仮定する。一方、不燃性廃棄物を含むグループ4の金属量はグループ1,3とは異なることが想定されることから、ここでは概念検討書のグループ2と同じと仮定する。

(3) 動水勾配の分布

東濃鉱山周辺(丘陵地帯)を対象とした地下水流動解析の結果から深度0~500mでは分布のピークは0.02付近に認められるが、0.04以上の部分の頻度も全体の約20%あり、ばらつきの大きな結果となっている。動水勾配は、地層条件のみならず地形にも影響されることから、これを一般的な動水勾配としてすべての処分条件に適用させることはできないものの、余裕深度処分における処分深度100mを含む範囲のデータであることと、東濃地区は堆積岩層であり、本研究で余裕深度処分に想定する地質環

境に近いことから、データに基づき本研究でのパラメータ入力範囲とするものとした。

(4) ベントナイト空隙率

本研究における空隙率の設定条件としては、Noy ら (2000) の解析結果を考慮し、緩衝材劣化時の空隙率の最大値を 0.65 とした。また、最小の空隙率を緩衝材の初期値 (0.4) とした。

(5) 地下水流速増加開始時刻

廃棄体に含まれる金属が還元環境下において腐食する際に地下水の分解に伴い発生する水素ガスは、人工バリア内部での地下水の移動の駆動力となるものと考えられている。本研究で想定するような、金属を含む廃棄物がモルタル充填されるケースでは、廃棄体中の酸素の消費は速やかに進行するものと予想されるが、酸素が消費される部位が緩衝材や母岩となる場合には、廃棄体内部の酸素が消費されるまでには、数百年の期間を要するものとなる。そこで、本研究でのシャドウパラメータの範囲としては、0 ~ 1000 年を想定するものとした。

(6) 緩衝材中の地球化学異常緩衝物質濃度

本研究では、緩衝材中のアルカリ緩衝性鉱物を考慮して緩衝物質の総量に関しては 100mol を上限として、解析を実施するものとした。また、地球化学異常物質として想定する硝酸塩プルームは、緩衝材や母岩鉱物との反応性が低いものと予想される。そのため、地球化学異常緩衝物質濃度の下限値は、0mol/l として解析を実施するものとした。

(7) 緩衝材空隙水の脱水による核種直接放出の継続期間

ベントナイト・砂混合物に対する数センチメートルスケールの透気試験において、破過までの期間が数週間から数ヶ月であること、ならびに、破過に要する期間は緩衝材厚さの二乗にほぼ比例する傾向があることから、本解析で想定する緩衝材厚さの範囲に対する継続期間として 1 年 ~ 1000 年の間でサンプリングすることとした。

<p style="text-align: center;">余裕深度処分における処分坑道</p>	
	<p>対象とする廃棄体：グループ 3、グループ 4</p> <p>容器：200L ドラム缶、またはキャニスター</p> <p>充填材：モルタル</p> <p>構造躯体：コンクリート</p> <p>緩衝材：ベントナイト+砂</p> <p>埋め戻し材：ベントナイト含有材料</p> <p>支保工：コンクリート</p>
<p>余裕深度処分における人工バリア構成</p>	<p>バリアの仕様</p>
	<p>余裕深度処分における処分概念</p> <p>トンネル型、あるいはサイロ型施設</p> <p>施設全体の規模は 200x200m</p>

政令濃度上限値算出での概念（原子力安全委員会、2000）

図-3 余裕深度処分における人工バリアおよび天然バリアの概念

3.2 基本シナリオ解析結果

3.2.1 被ばく線量解析結果

前年度の研究では、線量拘束値を下回る目標線量を満足するような処分システムの仕様や地質環境条件の範囲を示すことを目標として、予備的な解析を実施し、ムービングバンド法により、目標線量を下回るための仕様の十分条件を導出する方法を検討した。今年度の研究では、基本シナリオのパラメータ範囲を見直すとともに、処分を想定する廃棄体の区分を制約条件とし、目標線量を下回るためのシステム仕様についての定量的なパラメータの範囲を求めることが可能となった。本年度の研究は、2章で紹介したソフトウェアを用い、感度解析を実施した。

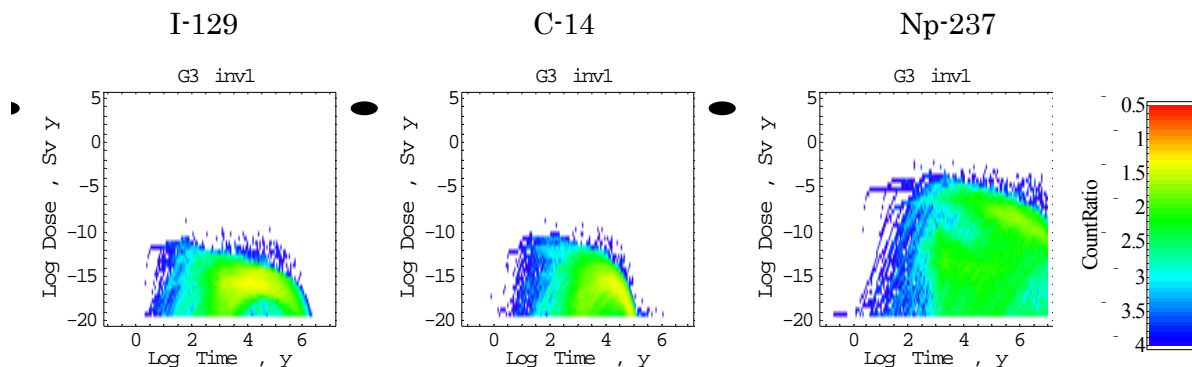
基本シナリオにおける解析結果を以下に示す。

(1) 被ばく線量解析結果

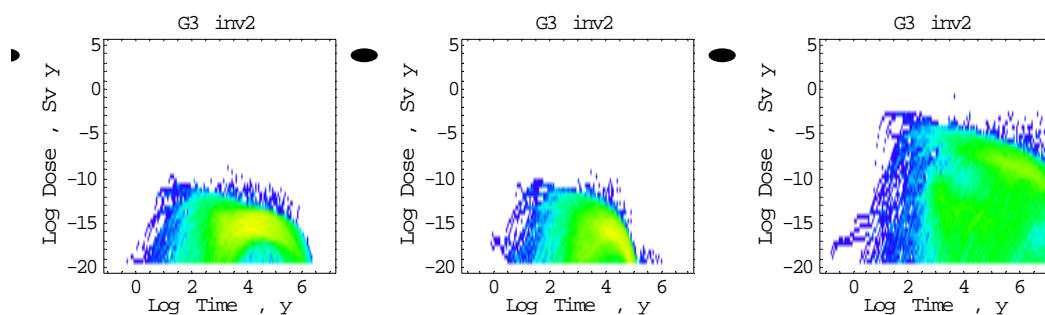
図-4 にグループ 3 についての解析結果を例示する。なお、グループ 4 についても同様にまとめている。図は、グループ 3 およびグループ 4 について、各グループで約 10000 ケースの解析を実施し、廃棄体の区分毎に（ただし、グループ 4 に関しては 6 つの区分に分類）被ばく線量の時間変化を示した結果である。

グループ 3 では、処分核種量が最も少ない区分（区分 1、低レベル濃縮廃液（F 再））の処分においても、Np-237 によって被ばく線量が $10 \mu\text{Sv/y}$ を超えるケースが見られた。同様に区分 2～区分 4（返還低レベル廃棄物 ビチューメン固化体以下の廃棄体）までは、Np-237 が $10 \mu\text{Sv/y}$ を超える高線量側の被ばくの主因となる。区分 5 以上の廃棄物の処分においては、I-129 および C-14 が被ばくの原因となる場合が増える。

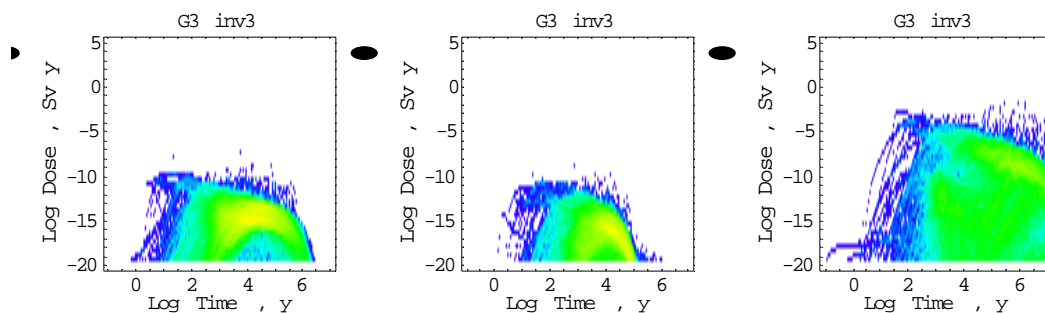
グループ 4 では、廃棄体の区分 20（民間再処理操業廃棄物 不燃性廃棄物（F 再-3）（低汚染部位））以下では、 $10 \mu\text{Sv/y}$ を超えるケースは僅少であった。処分の対象とする廃棄体区分が 20 以上の場合には、区分の増加に従い、 $10 \mu\text{Sv/y}$ を超える割合は増加する。区分 3 までは、最大線量を支配する核種は Np-237 であり、区分 4～20 までは、I-129 または Np-237 が最大被ばく線量を支配する。それ以上の区分では Np-237 が再び被ばく線量の最大値を支配する。



1. 民間再処理操業廃棄物 低レベル濃縮廃液□(F 再)



2. 民間再処理操業廃棄物 低レベル濃縮廃液(F 再-1) (運開後5年間)



3. 民間再処理操業廃棄物 低レベル濃縮廃液(F 再-2) (運開後6年以降)

図-4 被ばく線量の時間依存性 (グループ 3、廃棄体区分 1 ~ 3)

(2) 感度解析のための解析結果の補正

ムービングバンドによる感度解析の結果をより確実にするための方法としては、解析のケース数を増やすことにより、統計的に結果を安定にさせることが考えられる。しかしながら、本研究における廃棄体の区分はグループ3で8区分、グループ4で43区分と多く、これらの全ての区分において、個別に統計的な解析を実施することは、効率的であるとは考えられない。

本研究では、核種移行に影響を及ぼすプロセスとして、瞬時平衡の核種の溶解および沈殿を想定している。そのため、核種の沈殿生成量は空隙水中の核種の濃度によって決定される。核種が沈殿を生成しないような地下水化学環境の場合、核種の移行率は、処分される核種の量に比例する。

本年度の全域的解析での、グループ3の廃棄体区分における N_p 核種の最大の濃度は、区分4の返還低レベル廃棄物までの廃棄物を処分する場合となる (0.00098mol/m^3)。処分後、核種が速やかに廃棄体空隙中水に溶解し、コンクリート固化体と分配平衡に達するならば、コンクリート空隙水中における核種の濃度は、

廃棄体の初期空隙率：0.15

廃棄体で想定される N_p の分配係数の最小値：0.1 m^3/kg

(遅延係数は、約 1530)

空隙水中の濃度 = 全濃度 / (遅延係数 x 空隙率)

であることから、約 $4 \times 10^{-6}\text{mol/m}^3$ となり、この値は、本件等で想定している N_p の溶解度の範囲の最小値である $5 \times 10^{-6}\text{mol/m}^3$ を下回る。すなわち、グループ3の廃棄体においては、 N_p の沈殿が生成される可能性はない。グループ4の廃棄体の場合には、 N_p が最大の濃度となる廃棄体区分は43 (グループ4に含まれる全の廃棄体を処分する場合) では、想定される N_p の最大の濃度は $3.4 \times 10^{-5}\text{mol/m}^3$ となる。この場合においては、 N_p は沈殿を生成する可能性はある。したがってグループ4に関しては、区分43のグループにおいて、再解析を実施しその影響を確認するものとした。

グループ4の場合には、JNCMOX 操業廃棄物 (廃棄体区分 41 以上) を加えない限り、 N_p が沈殿を生成する可能性はない。

しかしながら、空隙水中の地下水濃度が高くなる条件下で、溶解度の数倍の核種の濃度に止まることから、全域的解析におけるパラメータの組み合わせのなかでは、沈殿を生成しているケース数は少ないことが予想される。そのため、全域的解析結果に対すムービングバンドによる解析結果に及ぼす影響は小さいものと判断する。

これらのことから、廃棄体の区分が異なる解析結果に対し、インベントリーの補正

を行うことにより、見かけ上の解析ケース数を増加させ、ムービングバンド法による感度解析を実施するものとした。

(3) グループ4 区分4 3における溶解度の影響

前葉で、グループ4の廃棄体区分4 1～4 3では、溶解度や分配係数等の条件によっては、核種の沈殿が生成される可能性が示された。そのため、区分4 3について、10000 ケースの解析を実施し、溶解度の影響を確認するものとした。

その結果、区分4 3の補正值を用いた解析結果と、4 3のみの解析を実施した場合、何れの解析結果においても、Npの溶解度に対する感度は見受けられなかった。

(4) 補正值を用いた解析結果

グループ3における解析結果を以下にまとめる。

- ・ 1～8の全ての区分において、各ケースの最大被ばく線量は、 $10 \mu\text{Sv/y}$ を大きく超える (0.01Sv/y に達する)。
- ・ 最大の被ばく線量に対しては、区分6まではNp-237が支配的であり、区分7、8ではC-14が支配する。ただし、 $10 \mu\text{Sv/y}$ を超える割合においては、Np-237が全ての区分において支配的となる。
- ・ 廃棄体区分1～3では、全解析ケースのうち、 $10 \mu\text{Sv/y}$ を越える割合は0.06であった。
- ・ グループ3の全廃棄体を処分するケース(区分8)のうち、 $10 \mu\text{Sv}$ を超える割合は約0.4であった。

グループ4における解析結果を以下にまとめる。

- ・ 廃棄体区分3までは、解析ケースのうち、 $10 \mu\text{Sv/y}$ の基準を超えるケースはなかった。
- ・ 全解析ケースのうち、廃棄体区分20で $10 \mu\text{Sv/y}$ を超える割合は約2%であった。
- ・ グループ4の全廃棄体を処分するケース(区分43)では、 $10 \mu\text{Sv/y}$ を超える割合は約52%であった。

3.2.2 感度解析結果

(1) 感度を持つパラメータの抽出方法

ムービングバンド法によって感度を持つパラメータの分析は、既に、紹介した新規ソフトウェアを用いて実施した。このソフトウェアにより感度を抽出する手順は、2章に記述した手法であり、以下に図とともに示す。

ムービングバンドによる解析結果に対し、最小二乗法による多項式近似を行い、近似式を求め。近似式よりもとまるパラメータ値の最小値と最大値から、両者の差(最大・最小の差)を求め。また、各線量値で、近似式からの解析結果のずれ(振幅)をもとめ、それらの値から、振幅の平均値(平均振幅値)を求め。最大・最小の差と平均振幅値の大小関係から、パラメータ抽出を行う。

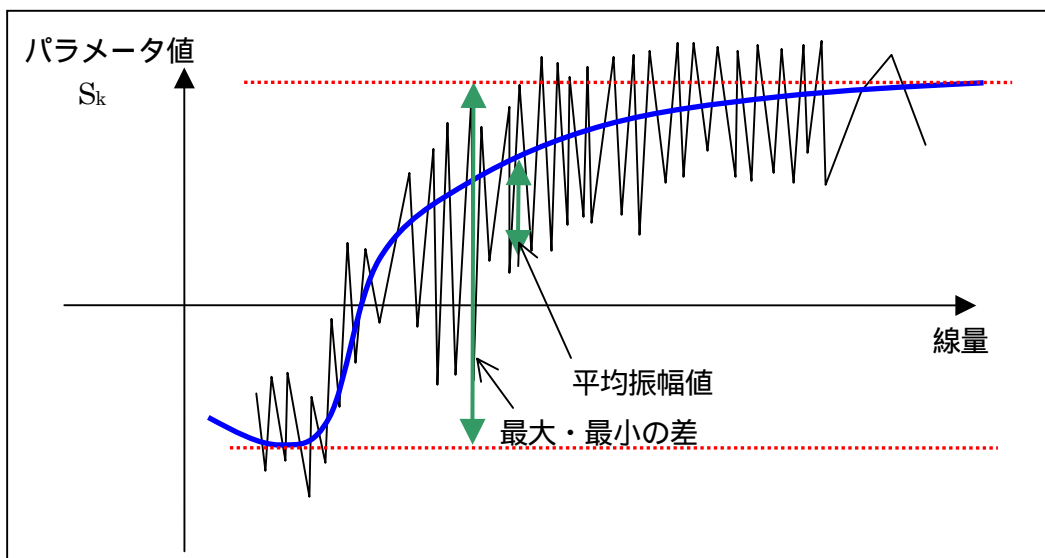


図-5 ムービングバンド法による解析結果からのパラメータ抽出方法の模式図

(2) グループ3の廃棄体に関する感度解析の結果

グループ3の廃棄体を処分対象とする場合の被ばく線量に対するムービングバンド法による感度解析結果から得られた、感度を有するパラメータを表-2にまとめた。表に示す矢印は、ムービングバンド法の解析結果の出力結果から、感度の方向を確認した結果である。

表-2 グループ3で顕著な感度を持つパラメータ

	区分1		区分2		区分3		区分4		区分5		区分6		区分7		区分8	
	低側	高側	低側	高側	低側	高側	低側	高側	低側	高側	低側	高側	低側	高側	低側	高側
廃棄体劣化後透水係数		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗
緩衝材厚さ		↘		↘		↘		↘		↘		↘		↘		↘
緩衝材劣化後透水係数		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗
天然バリア透水係数		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗
廃棄体でのコロイド影響指標		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗
緩衝材でのコロイド影響指標		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗
母岩でのコロイド影響指標		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗
動水勾配		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗
ガスにより上方に押し出される緩衝材中の空隙水の割合		↗		↗		↗										
廃棄体からの地球化学異常発生継続期間		↗		↗		↗										
緩衝材劣化開始時刻		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗
I-129の線量換算係数								↗		↗		↗		↗		↗
C-14の線量換算係数												↗		↗		↗
Np-237の線量換算係数		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗		↗

ハッチング部分の区分とパラメータの組み合わせでは、有意な感度が見られなかった

(3) グループ 4 の廃棄体に関する感度解析の結果

グループ 4 の廃棄体を処分対象とする場合の被ばく線量に対するムービングバンド法による感度解析結果から得られた感度の高いパラメータを表-3 に示す。区分 1 ~ 3 に関しては、 $10 \mu\text{Sv/y}$ を超えるケース数が少ないことから、ムービングバンド法による感度の抽出は実行しなかった。

表-3 グループ 4 で顕著な感度を持つパラメータ

	区分 10		区分 20		区分 30		区分 37		区分 43	
	低側	高側	低側	高側	低側	高側	低側	高側	低側	高側
廃棄体劣化後透水係数 (m/s)		↗		↗		↗		↗		↗
緩衝材厚さ (m)		↘		↘		↘		↘		↘
緩衝材劣化後透水係数 (m/s)		↗		↗		↗		↗		↗
緩衝材劣化後空隙拡散係数 (m ² /s)		↗		↗						
天然バリア透水係数 (m/s)		↗		↗		↗		↗		↗
緩衝材劣化後の Np 分配係数 (m ³ /kg)						↘		↘		↘
廃棄体でのコロイド影響指標 (-)				↗		↗		↗		↗
緩衝材でのコロイド影響指標 (-)						↗		↗		↗
母岩でのコロイド影響指標 (-)		↗		↗		↗		↗		↗
動水勾配 (-)		↗		↗		↗		↗		↗
廃棄体からの地球化学異常発生継続期間 (年)								↗		↗
緩衝材劣化開始時刻 (年)		↘		↘		↘		↘		↘
I-129 の線量換算係数 (Sv/y)		↗		↗		↗		↗		↗
Np-237 の線量換算係数 (Sv/y)		↗		↗		↗		↗		↗

ハッチング部分の区分とパラメータの組み合わせでは、有意な感度が見られなかった

3.2.3 現実的な制約を考慮した具体的な十分条件の網羅的な提示

本年度の基本シナリオにおける解析では、TRU 廃棄物のグループ3 および4 の廃棄体の廃棄体を対象として、余裕深度処分において想定される環境に対応したパラメータ群が、核種放出率に及ぼす影響の確認を行った。ここでは、ムービングバンドによる十分条件の抽出手法を用い、処分環境や処分条件に現実的な制約条件が想定される場合に、これらのパラメータ群に対する十分条件を探るものとした。

(1) 制約条件

本検討では、能動的に調整可能と考えられるパラメータである核種インベントリーと、受動的とならざるを得ない、地質条件の2つを制約条件として選び、十分条件の抽出を試みるものとした。

制約条件となる地質条件として、「低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について（第3次中間報告）」（原子力安全委員会、2000）で提示された地質環境条件を制約条件とした。本研究では、応答曲面を利用することにより、この制約条件を想定する場合に、十分条件がどのように変化するかを検討を行った。

(2) 十分条件の抽出結果

3.2.2 の感度解析の結果から得られる重要パラメータに対して、 $10 \mu\text{Sv/y}$ を基準として、これを下回るための十分条件を表-4 及び表-5 にまとめる。

表-4 10 μSv/y を下回るための十分条件、グループ3

		区分1	区分2	区分3	区分4	区分5	区分6	区分7	区分8
廃棄体劣化後透水係数 (m/s)	<	1.9E-08	1.9E-08	1.8E-08	1.2E-08	1.1E-08	1.0E-08	9.0E-09	8.2E-09
緩衝材厚さ (m)	>	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8
緩衝材劣化後透水係数 (m/s)	<	1.4E-08	1.3E-08	1.3E-08	6.6E-09	5.7E-09	4.6E-09	3.3E-09	2.4E-09
天然バリア透水係数 (m/s)	<	7.4E-07	7.3E-07	7.1E-07	4.6E-07	4.2E-07	3.8E-07	3.3E-07	3.0E-07
廃棄体でのコロイド影響指標 (-)	<	0.61	0.61	0.61	0.54	0.54	0.53	0.52	0.52
緩衝材でのコロイド影響指標 (-)	<	0.57	0.57	0.57	0.52	0.52	0.52	0.51	
母岩でのコロイド影響指標 (-)	<	0.68	0.68	0.67	0.57	0.55	0.54	0.53	0.52
動水勾配 (-)	<	4.7E-02	4.7E-02	4.6E-02	3.9E-02	3.7E-02	3.5E-02	3.3E-02	3.1E-02
ガスにより上方に押し出される緩衝材中の空隙水の割合 (-)	<	1.0E-03	1.0E-03	1.1E-03					
廃棄体からの地球化学異常発生継続期間 (年)	<	3.4E+04	3.4E+04	3.5E+04					
緩衝材劣化開始時刻 (年)	<	1.3E+05	1.3E+05	1.3E+05	8.8E+04	8.5E+04	8.8E+04	1.0E+05	1.4E+05
I-129の線量換算係数 (Sv/y)	<				4.4E-15	4.6E-15	4.8E-15	4.6E-15	4.6E-15
C-14の線量換算係数 (Sv/y)	<						1.7E-15	1.8E-15	1.7E-15
Np-237の線量換算係数 (Sv/y)	<	7.5E-12	7.5E-12	7.2E-12	3.2E-12	2.9E-12	2.6E-12	2.4E-12	2.3E-12

ハッチング部分は被ばく線量に強い感度が見られなかったパラメータ

表-5 10 μSv/y を下回るための十分条件、グループ4

		区分10	区分20	区分30	区分37	区分43
廃棄体劣化後透水係数 (m/s)	<	9.6E-08	5.7E-08	2.3E-08	1.2E-08	7.6E-09
緩衝材厚さ (m)	>	1.5	1.6	1.7	1.8	2.0
緩衝材劣化後透水係数 (m/s)	<	5.6E-08	3.7E-08	1.4E-08	5.7E-09	1.6E-09
緩衝材劣化後空隙拡散係数 (m ² /s)	<	1.0E-10	1.3E-10			
天然バリア透水係数 (m/s)	<	2.2E-06	1.5E-06	7.9E-07	4.6E-07	2.6E-07
緩衝材劣化後のNp分配係数 (m ³ /kg)	>			6.8E-02	7.2E-02	6.5E-02
廃棄体でのコロイド影響指標 (-)	<		0.61	0.59	0.53	0.47
緩衝材でのコロイド影響指標 (-)	<			0.55	0.52	0.48
母岩でのコロイド影響指標 (-)	<	0.59	0.67	0.64	0.56	0.46
動水勾配 (-)	<	6.8E-02	6.2E-02	4.6E-02	3.6E-02	2.8E-02
廃棄体からの地球化学異常発生継続期間 (年)	<				3.2E+04	3.4E+04
緩衝材劣化開始時刻 (年)	>	7.4E+04	1.3E+05	1.1E+05	9.5E+04	1.7E+05
I-129の線量換算係数 (Sv/y)	<	2.0E-14	7.4E-15	3.5E-15	3.1E-15	3.0E-15
Np-237の線量換算係数 (Sv/y)	<	3.3E-12	5.8E-12	5.7E-12	3.6E-12	1.7E-12

ハッチング部分は被ばく線量に強い感度が見られなかったパラメータ

(3) Response Surface を用いた十分条件の抽出例

基本シナリオの解析結果から十分条件を抽出することを目的として、2.2 で示された応答曲面法 (Response Surface) を用いて、試解析を実施した。解析の対象とした廃棄体は、グループ3区分8である。

本研究では、2.2 節で示された応答曲面法を、ムービングバンド法によるデータ処理ソフトウェアに組み込み、解析を実施した。

(a) 応答曲面法による近似誤差の評価

2.2 節で述べたように、応答曲面法を用いるためには、これにより推測される誤差の範囲を明確にしておく必要がある。これを、目的として以下の手順により、応答曲面法による近似誤差の推定を行った。

ムービングバンド法による解析結果から各パラメータの感度の大小を判断するためのアルゴリズムに基づき、応答曲面の作成に必要なパラメータの抽出 (2.3.1 項参照)

10000 ケースのデータの中から任意の 9000 ケースのデータを用い、応答曲面を作成する。

応答曲面の作成に用いなかった 1000 ケースの入力値を用い、誤差評価を行う。

までの結果では、近似に用いるパラメータの数と、項数を増やせば、解析値と応答曲面からの推定値はより一致する傾向を示した。ただし、の結果では、9000 ケースの場合に、解析値と推定値がもっともよく一致していた解析条件の場合が、1000 ケースでは解析値と推定値の一致は最も悪い。また、一方、パラメータ数および項数が最も少ない解析条件で、1000 ケースの解析値と推定値は最も一致している。パラメータ数および項数を増やすことが、必ずしも精度の向上には結びつかないことが明らかであり、今回検討を加えた解析条件の中では、パラメータ数、項数ともに最も少ない条件 2 が最も小さな標準誤差 (0.59) を示した。

これは、パラメータの数や項数を増やすことによって、応答曲面の作成や値を推定する各段階において、感度をほとんど有していないパラメータの寄与が増大していくことが原因と考えられる。これは、ニューロネットワーク法による近似などでよく知られている「過学習」に相当するものと考えられる。

(b) 解析値と応答曲面法適用結果の比較

応答曲面法により作成されたデータと解析値のムービングバンド法による解析結果及び十分条件の抽出結果を比較した場合、両者の結果は良く一致しており、現実的な制約条件を考慮する場合において、応答曲面法とムービングバンド法を併用することの有用性が認められる。

(c) 拘束条件を考慮する場合の十分条件の抽出例

地質条件制約となる条件としては、(1)で述べたように「低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分安全規制に関する基準値について(第3次中間報告)」(原子力安全委員会、2000)で提示された地質環境条件を制約条件とした。また、解析対象とした廃棄体の種類は、グループ3区分8である。また、解析条件としては、動水勾配および透水係数に条件以下の分布を想定する場合と、固定値とする場合の2通りの検討を行った。

制約条件1：動水勾配 < 0.01
母岩の透水係数 < 1E-7 m/s

制約条件2：動水勾配 = 0.01
母岩の透水係数 = 1E-7 m/s

以上の2つの制約条件を課す場合に、応答局面を用い抽出されるパラメータ範囲を表-6にまとめる。

表-6 地質環境条件を制約条件とする場合の十分条件抽出例

		全域的解析	拘束条件1	拘束条件2
			母岩透水係数 < 1E-7 母岩動水勾配 < 0.01	母岩透水係数=1E-7 母岩動水勾配=0.01
廃棄体劣化後透水係数	m/s	8.2E-09	(感度の低下)	(感度の低下)
廃棄体劣化後空隙拡散係数	m ² /s	-	2.6E-10	2.4E-10
緩衝材厚さ	m	1.8E+00	1.6E+00	1.7E+00
緩衝材劣化後透水係数	m/s	2.4E-09	(感度の低下)	4.2E-09
緩衝材劣化後空隙拡散係数	m	-	-	1.3E-10
天然バリア長さ		-	2.6E+02	2.7E+02
天然バリア透水係数	m/s	3.0E-07	3.6E-08	(固定値)
天然バリア空隙率	-	1.0E+00	5.4E-02	6.4E-02
廃棄体でのコロイド影響指数	-	5.2E-01	5.8E-01	5.4E-01
緩衝材でのコロイド影響指数	-	-	-	5.0E-01
母岩でのコロイド影響指数	-	5.2E-01	6.0E-01	5.5E-01
動水勾配	-	3.1E-02	(感度の低下)	(固定値)
緩衝材劣化開始時刻	-	1.4E+05	6.7E+04	8.1E+04
I-129の線量換算係数	y	4.6E-15	7.8E-15	6.1E-15
C-14の線量換算係数	Sv/y	1.7E-15	2.1E-15	2.0E-15
Np-237の線量換算係数	Sv/y	2.3E-12	2.9E-12	2.3E-12

グループ3区分8

(4) 十分条件に基づく2次解析

全域的解析で求められた十分条件に基づき、グループ3区分8およびグループ4区分43に対して2次解析を実施した。解析は、ムービングバンドの結果から大きな感度を有するとして選択されたパラメータについては十分条件の範囲内で、その他のパラメータについては全域的解析と同様のパラメータ範囲でサンプリングを行い、各廃棄体についてそれぞれ10000ケースの解析を実施することにより、どの程度の割合が基準とした $10\mu\text{Sv/y}$ を上回るかの確認を行った。その結果、グループ3区分8及びグループ4区分43のいずれに対しても、求められた十分条件の範囲でほとんどのケースが $10\mu\text{Sv/y}$ の線量を下回ることが確認された。

また、抽出された十分条件に当該パラメータを固定し、他のパラメータに対しては保守値を用いるような、決定論的な解析を試みた。その結果、線量の最大値は、目標線量である 10^{-5}Sv/y を大きく超える結果となった。これは、統計的な解析では、この決定論的解析のようにこれらが同時に保守側の組み合わせとなることは稀であり、決定論的な解析において特異性を有するような条件設定は、統計的解析結果に反映されない可能性があるためと考えられる。そのため、どの様な組み合わせにおいて「特異」な条件となるかの判断をシステムチックに行う手法や、より適切なパラメータ抽出方法について検討することが、今後の課題であるといえる。

4. 変動シナリオ

本年度の研究では、基本シナリオとして人工バリアでの変動事象を考慮したシャドウモデルを決定し、これに対応するパラメータ範囲の確定を行い、評価を実施した。しかしながら、余裕深度処分の安全性に関する判断を確実なものとするためには、想定される範囲の外部事象に関しても、その影響を定量的に判断することが必要である。

そこで本検討では、評価すべき外部発端事象の抽出を行うと共に、外部発端事象の影響を、地球化学的あるいは水理学的な擾乱（地下水移行への影響）と、放射性核種の生物圏への直接放出に関与するものに分け、各々の発端事象から想定されるシナリオに対応するシャドウモデルとこれに対応するパラメータについて検討し包括的な感度解析を実施した。

4.1 変動シナリオにおける解析条件

4.1.1 発端事象の抽出とその分類

外部発端事象としては、第 2 次取りまとめで示された、包括的 FEP リストに基づき以下のものを想定する。

- ・ 天然現象
 - 地震・断層活動
 - 火山・火成活動
 - 隆起・侵食
 - 気候・海水準変動
- ・ 将来の人間活動
 - ボーリング
 - 井戸の掘削・採水
- ・ 工学的初期欠陥
 - ボーリング孔、トンネルのシール不良/変質

この発端事象に起因するシナリオは、専門部報告書において示されているように、地球化学的あるいは水理学的な擾乱（地下水移行への影響）と、放射性核種の生物圏への直接放出に関与するものに分けるものとした。

4.1.2 地下水移行へ影響を与えるシナリオとシャドウモデル、パラメータ

(1) 評価するシナリオ

各発端事象で想定される、地下水移行への影響を以下にまとめる。これらの事象の選択に関しては、既存の研究である第 2 次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構、

1999) 及び地層処分システムのための概括的感度解析手法の高度化(動力炉・核燃料開発事業団、1998)を参考として、内容の抽出を行った。

(2) 評価モデル

変動シナリオにおいて、基本シナリオに追加する必要があるモデルは次のものとなる。

天然バリアの破壊や変質に伴う母岩透水性の経時的な変化のモデル
動水勾配の経時的な変化のモデル
処分場及び母岩での核種の化学形態が経時的に変動する影響のモデル
影響を受ける廃棄体数に関するモデル化
動水勾配および地球化学環境の緩やかな変動に関するモデル化
動水勾配、地下水化学環境の周期的な変化

表-7に基本シナリオシャドウモデルで対応可能な事象と新たなモデルの追加が必要となる事象の区分を示す。

これらの変更を施すことにより、基本シナリオのシャドウモデルは外部発端事象に起因する影響に対応が可能となり、基本シナリオと変動シナリオを内包する幅広いシャドウモデルへと拡張される。

表-7 基本シナリオシャドウモデルで対応可能な事象と
新たなモデルの追加が必要となる事象

発端事象	各発端事象の地下水移行への影響	基本シナリオシャドウモデルでの対応	新規モデルで対応
地震・断層活動	<ul style="list-style-type: none"> ・人工バリアの破壊 ・天然バリアの破壊による母岩の透水性の上昇 ・サイズミックポンピングによる流速の上昇 ・サイズミックポンピングによる異種地下水の浸入 ・影響を受ける廃棄体の割合 		
火山・火成活動	<ul style="list-style-type: none"> ・人工バリアの破壊、変質 ・天然バリアの破壊、変質 ・熱対流の発生 ・温度上昇、あるいは火山性ガスの混入による地下水性状の変化 		
隆起・侵食	<ul style="list-style-type: none"> ・深度変化に伴う応力場の変動、拘束圧の変化による人工バリア形状の変化と特性の変化 ・地形、深度変化に伴う動水勾配の変化 ・処分場の深度変化に伴う地下水の地球化学的な変化 ・地下水化学環境の変動に伴う固相の変化(酸化等) ・流速、地下水化学環境の緩やかな変動 		
気候・海水準変動	<ul style="list-style-type: none"> ・塩淡境界の通過に伴う流速の上昇 ・塩水の浸入 		
シールミス	<ul style="list-style-type: none"> ・立坑に沿った水の流れの発生 ・立坑からの地表水の浸入 ・影響を受ける廃棄体の割合 		
ボーリング	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング孔に沿った水の流れの発生 ・ボーリング孔からの地表水の浸入 ・影響を受ける廃棄体の割合 		
井戸の掘削・採水	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水の採取利用 		

(3) 新規に加わるシャドウモデル

(a) 時間的な変動に関するモデル

変動シナリオの解析では、事象の発生そのものに不確実性が伴うことや核種移行に対する影響度が幅広いことが想定されることから、本研究では、人工バリアの内部影響に起因する時間的な変動と、外部事象に起因する変動を分けてモデル化するものとした。

時間的な変動に関する条件設定は、以下の手順で行うものとした。

- ・ 地質環境が変動の回数を決定する。
- ・ 回数毎に、変動開始時刻および環境の変動する期間を決定する。
- ・ これらを重ね合わせることによる、時間的な変動を決定する。

(b) 人工バリアおよび母岩透水性の経時変化に関するモデル

人工バリアや母岩の透水性は、事象の発生に伴い不可逆的な変化が予想される。そのため、事象の影響の期間が終了した後においても、透水性は回復しないものとした。

(c) 動水勾配の経時変化に関するモデル

動水勾配は、発端となる事象の影響が継続する期間内のみ変動するものとする。ただし、事象発生毎の動水勾配の取りうる範囲は、変動事象の影響時に想定される範囲で独立に、サンプリングを行うものとする。

(d) 母岩および人工バリアの吸着性の経時変化

外部変動が核種の吸着性に及ぼす影響としては、海水準変動に伴う塩水影響や、火成活動に伴う温度影響が考えられる。これらの場合には、必ずしも領域に変質が生じるものとは限らない。そのため、各々の変動における吸着性の変化は可逆的であるととした。

(4) パラメータ

変動シナリオにおけるシャドウモデルと基本シナリオにおけるシャドウモデルでは、一部、共通のパラメータを用いることになるが、発端事象の影響の程度を考え、パラメータ範囲を見直した。変動シナリオに対応するシャドウモデルで必要となる新たなパラメータを追加した。

4.2 変動シナリオ解析結果

4.2.1 被ばく線量解析結果

変動シナリオにおける核種移行評価では、基本シナリオと同様にグループ3およびグループ4について各10000ケースの解析を実施した。

グループ3では、 $300 \mu\text{Sv/y}$ の基準とした線量値を超える割合は、区分4から上位の廃棄体では、解析ケース全体の50%を超え、区分8では約76%まで上昇する。また、区分4～6では、 Np-237 と I-129 が同程度の割合で基準とする線量を超えており、区分7、8では、 C-14 も同等の割合で、基準となる線量を超える結果となっている。

グループ4では、 $300 \mu\text{Sv/y}$ の基準とする値を超える割合は、廃棄体区分29を超える区分においては、 Np-237 が支配的となる。グループ4の最大処分量となる区分43では、77%程度の解析ケースが $300 \mu\text{Sv/y}$ の基準値を超える結果となっている。

4.2.2 感度解析結果

(1) グループ3の廃棄体に関する感度解析の結果

グループ3の廃棄体を処分対象とする場合の、感度を有するパラメータとして抽出された結果を表-8にまとめる。これは、線量の基準値を 0.3mSv/y として解析を行った結果である。

(2) グループ4の廃棄体に関する感度解析の結果

グループ3の廃棄体を処分対象とする場合の、感度を有するパラメータとして抽出された結果を表-9にまとめる。

表-8 変動シナリオにおいて感度を有したパラメータのまとめ、グループ3

		区分1	区分2	区分3	区分4	区分5	区分6	区分7	区分8
緩衝材厚さ(m)	>	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
母岩でのコロイド影響指数(-)	<	0.52	0.52	0.52					
変動シナリオ継続期間1(y)	>	1.9E+03	1.9E+03	1.9E+03	4.1E+03	4.5E+03	4.8E+03	5.2E+03	5.5E+03
事象継続期間内の人工バリア透水係数1(m/s)	<	1.7E-09	1.7E-09	1.7E-09	1.1E-09	1.0E-09	9.4E-10	7.7E-10	6.4E-10
事象継続期間内の動水勾配1(-)	<	1.3E+00	1.3E+00	1.5E-14	6.4E-01	5.9E-01	5.6E-01	5.1E-01	4.8E-01
事象継続期間内の動水勾配2(-)	<	1.2E+00	1.2E+00	1.2E+00	6.2E-01	5.6E-01	5.3E-01	4.9E-01	4.6E-01
事象継続期間内の動水勾配3(-)	<	1.1E+00	1.1E+00						
I-129の線量換算係数(Sv/y)	<				2.1E-14	1.5E-14	1.1E-14	8.6E-15	6.4E-15
C-14の線量換算係数(Sv/y)	<	1.5E-14	1.5E-14	1.3E+00	1.2E-14	1.0E-14	8.7E-15	6.6E-15	5.4E-15
Np-237の線量換算係数(Sv/y)	<	1.3E-12	1.3E-12	1.2E-12	3.9E-13	3.5E-13	3.3E-13	2.9E-13	2.7E-13
変動シナリオ発生回数(-)	<	6.0	6.0	6.0	5.3	5.2	5.0	4.8	4.6
処分場全域が変動するまでの期間(y)	>	6.9E+01	6.9E+01	7.0E+01	1.1E+02	1.3E+02	1.3E+02	1.5E+02	1.6E+02
変動発生最大の母岩透水係数(m/s)	<	3.2E-06	3.2E-06	3.2E-06	2.4E-06	2.3E-06	2.2E-06	2.0E-06	1.8E-06
変動発生最大の人工バリア透水係数(m/s)	<	6.1E-07	6.1E-07	6.1E-07	2.5E-07	2.2E-07	1.9E-07	1.4E-07	1.0E-07
変動発生最大の動水勾配(-)	<	1.4E+02	1.4E+02	1.3E+02	2.9E+01	2.4E+01	2.0E+01	1.6E+01	1.3E+01
変動発生最小のNp分配係数(m ³ /kg)	>	1.0E-05	1.0E-05	4.4E+05	1.6E-05	1.7E-05	1.8E-05	2.1E-05	2.4E-05
変動発生最大の事象継続期間(y)	>	4.3E+05	4.3E+05	1.0E-05	4.2E+05	4.1E+05	3.9E+05	3.5E+05	3.2E+05

ハッチング部分はパラメータの感度が見られなかった区分を示す

表-9 変動シナリオにおいて感度を有したパラメータのまとめ、グループ4

		区分10	区分20	区分30	区分37	区分43
核種浸出率(1/y)	<	3.7E-02	4.0E-02			
緩衝材厚さ(m)	>				2.0	2.0
緩衝材劣化開始時刻(y)	>				2.9E+05	
変動シナリオ継続期間1(y)	>	2.1E+03	2.0E+03	2.3E+03	3.6E+03	6.0E+03
変動シナリオ継続期間2(y)	>	2.1E+03	2.0E+03	2.7E+03	4.1E+03	5.8E+03
事象継続期間内の人工バリア透水係数1(m ² /s)	<	1.3E-09	1.4E-09	1.4E-09	1.2E-09	6.0E-10
事象継続期間内の動水勾配1(-)	<	1.3E+02	1.4E+02	1.3E+02	9.7E+01	5.0E+01
事象継続期間内の動水勾配2(-)	<	1.3E+02	1.4E+02	1.3E+02		
I-129の線量換算係数(Sv/y)	<	8.3E-13	2.1E-13	5.2E-14	3.1E-14	2.3E-14
C-14の線量換算係数(Sv/y)	<					2.8E-15
Np-237の線量換算係数(Sv/y)	<	5.7E-13	7.3E-13	5.7E-13	3.5E-13	1.5E-13
変動シナリオ発生回数(-)	<	4.5	5.5	5.8	5.9	5.9
処分場全域が変動するまでの期間(y)	>	7.5E+01	7.2E+01	8.4E+01	1.2E+02	1.7E+02
変動発生最大の母岩透水係数(m ² /y)	<	3.0E-06	3.1E-06	3.0E-06	2.7E-06	1.7E-06
変動発生最大の人工バリア透水係数(m ² /y)	<	4.3E-07	4.8E-07	4.8E-07	3.7E-07	8.8E-08
変動発生最大の動水勾配(-)	<	4.7E+04	5.2E+04	4.4E+04	2.9E+04	7.5E+03
変動発生最小のNp分配係数(m ³ /kg)	<	1.2E-05	1.2E-05	1.2E-05	1.4E-05	2.8E-05

(3) 余裕深度処分変動シナリオのまとめ

グループ 3 およびグループ 4 の何れの廃棄体のグループにおいても、それぞれ約 1 万ケースの解析結果のうち、8 割程度のケースが $300 \mu\text{Sv/y}$ を超える結果となった。また、

被ばく線量に対するムービングバンドによる解析結果では、以下のパラメータが特に強い感度もつことが判った。

- ・ 線量換算係数 (I-129 および Np-237)
- ・ 複数回の変動事象発生の中で最大となるの動水勾配
- ・ シナリオの発生回数
- ・ 複数回の変動事象発生の中で最小となる母岩の透水係数
- ・ 複数回の変動事象発生の中で最小となる人工バリアの透水係数

これらのパラメータは、廃棄体のグループや区分に拠らず、被ばく線量に対して強い感度を有している。特に、動水勾配の範囲の設定において、サイズミックポンピング等を意識し、変動幅を $0.01 \sim 10^6$ と広い範囲に設定していることから、変動時の動水勾配は、被ばく線量に関して高い感度を示している。

一方、基本シナリオで確認された、被ばく線量に対して強い感度を持つパラメータはこれらの強い感度の影に隠れ、明確な感度が表れていない。

しかしながら、複数回の変動事象発生の中で最小となる人工バリアの透水係数が強い感度を有しており、これは、変動事象発生時に人工バリアが十分な止水性を保つことが重要となることを示唆するものである。

また、複数回の変動事象発生の中で最小となる母岩の透水係数や人工バリアの透水係数、最大となる動水勾配が顕著な感度を有することから、核種の放出率は、複数回の変動事象の中で、最も厳しい条件に依存するものと考えられる。

5. 地層処分変動シナリオに関する TRU 廃棄物処分の影響評価手法の検討

ここでは、4章の結果を踏まえ、地層処分の変動シナリオの評価手法を検討した。

地層処分の変動シナリオに関する TRU 廃棄物処分の影響評価手法の検討を行う場合、想定される変動シナリオでは、地層処分でも余裕深度処分でも、同様の事象が解析対象となる。一方、両者で異なる点は、処分される廃棄物の特性や、深度の違いによる地質環境条件が挙げられる。

地層処分と余裕深度処分の主な相違点は以下の3つである。

- ・ 廃棄体の相違
- ・ 処分地層の相違
- ・ 核種の放出挙動の相違

地層処分されるグループ 1、2 では廃銀吸着材やハル・エンドピースなどのより多くの金属を含んでいる点が、グループ 3、4 とは異なる点と言える。廃棄体に、より多くの金属が含まれている場合、金属が難溶性のために金属に含まれている核種も地下水中には溶けにくい。

変動シナリオを評価の対象とした場合、核種が突発的に放出される事象が生じることから、難溶性金属に補足されていた核種が、ある時期に多量に地下水中に放出される可能性もある。したがって、より多くの金属を含むグループ 1、2 を地層処分する場合には、変動シナリオで考慮している事象が生じる時刻での核種放出率を記述できるようなモデルを構築する必要があると思われる。

また、地層処分と余裕深度処分それぞれについて想定される地質環境条件の両者の主な違いは、岩種が余裕深度処分では多孔質媒体であるが、地層処分では亀裂性媒体であるということである。亀裂性媒体の場合には、変動シナリオで想定する各事象が生じた場合、亀裂ネットワークの状態が変化し、それによって、多孔質媒体では生じえない核種移行の著しい促進の可能性も否定できない。したがって、変動シナリオを念頭においた核種移行解析を行う場合には、亀裂開口幅や、亀裂自体の幅の変動をより詳細に検討し、核種移行に反映させることが可能なモデルを構築する必要があると思われる。

さらに、昨年度の解析結果によれば、I-129 の核種放出率（被ばく線量）の比較においては、地層処分の方が、余裕深度処分の放出率に比較して、線量の分布と核種の放出される時期の何れにおいても、幅広く分布している。そのため、外部事象の発生する時期および継続期間の影響が地層処分に対して、より顕著に影響を与える可能性がある。

6. おわりに

本研究では、TRU 処分概念検討書(核燃料サイクル開発機構、電気事業連合会、2000)に示されたグループ3およびグループ4の廃棄物を余裕深度処分することを想定し、探查型性能評価ツールを用いて2万回程度の核種移行解析を実施し、それらの結果を統計的に整理するためのツールの開発を行った。また、そのツールを用いて余裕深度処分における支配的なパラメータの抽出を行い、処分が想定される廃棄体の種類毎に十分条件となるパラメータの組み合わせを抽出した。

制約条件が与えられた場合の必要条件の抽出手法については、response surface を用いることにより、必要条件を抽出できる見通しを得た。しかしながら、response surface の作成に使用するパラメータの数が多すぎる場合には過学習の作用により解析値と推定値の誤差が大きくなる現象が見られ、パラメータの数を適切に設定する必要性が明らかになった。今後は、response surface の作成に必要なパラメータの適切な設定方法について検討することは、本手法の信頼性を向上するために重要であると考えられる。

また、本研究では余裕深度処分における変動シナリオにおける評価手法の検討を行い、包括的感度解析を実施した。これにより、余裕深度処分を想定するときの留意すべきシナリオを明らかにした。具体的には、動水勾配及び最初に変動が起きる時刻が顕著な感度を揺ることが解った。なお、動水勾配が大きく変動する可能性のある事象としては、地震・断層活動によるサイズミックポンピングや、気候・海水準変動による塩淡境界の通過に伴う流速の上昇が考えられる。しかしながら本研究においては、これらの一部のパラメータの感度が非常に顕著なことから、有意な感度を持つその他のパラメータが潜在している可能性がある。これらのパラメータの感度を顕在化させるためには、本研究で実施した方法論をさらに発展させ、変動シナリオの影響を細分化したモデル化をすることにより、より詳細な感度構造を明確にすることが重要であると考えられる。

7 . 参考文献

“TRU 廃棄物処分概念検討書”、JNC TY1400 2000-001、TRU TR-2000-01 (2000)

“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次とりまとめ-分冊3”、JNC TY1400 99-023 (1999)

D. Noy, D. Savage : “Modelling of the Interaction of Bentonite with Hyperalkaline Fluids:A sensitivity study”. QSR-Report 1008B-2, (2000)

原子力安全委員会 : “低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について(第3次中間報告)”, (2000)