

# 包括的性能評価ツールの体系化・高度化 (概要)

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2003年2月

**日揮株式会社**

包括的性能評価ツールの体系化・高度化（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

TRU 核種を含む放射性廃棄物の一連の処分深度毎の処分概念およびシナリオの多様性を考慮し、処分概念の成立性、設計仕様等の絞込みに関する評価を実施するため、統計処理に基づく核種移行解析手法を基本とする評価ツール、評価手法の検討を進めた。コンクリートピット処分、余裕深度処分、および地層処分概念の基本シナリオにおける多孔質媒体中の評価体系を構築するため、パラメータ範囲の設定、モデル開発、解析データ処理方法の各々に関して、検討を加えた。

モデルは、パラメータの時間的変動に対する柔軟性を考慮して開発し、パラメータ範囲の設定に当たっては、一連の処分概念やベントナイト系人工バリアの性能を見るための範囲設定を行った。一方、各パラメータ範囲に対応する線量分布が基準値を満足する割合の増減を基準として、感度特性を明確にする評価手法を開発した。また、解析の結果として得られた核種移行に重要な影響を及ぼすパラメータの感度特性を明らかにした。

今後の課題として、亀裂性媒体等の異なる体系での十分条件もしくは感度特性のより包括的な明確化の検討が挙げられる。また、十分条件の信頼性についてもさらに検討すべき価値がある。それらの研究により TRU 核種を含む廃棄体の安全かつ合理的な処分システムの概念および仕様を決定することが可能となる。

---

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委託研究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

Systematization and Sophistication of a Comprehensive Performance Assessment  
Program

(Document Prepared by Other Institute, Based on the Trust Contract)

Takahito Miki\*, Kiyoshi Oyamada\* and Takao Ikeda\*

Abstract

This study developed analytical programs and procedures based on a method of stochastic radionuclide migration to estimate the feasibility of disposal concepts and to define design specifications, considering the variety of scenarios and disposal concepts divided by depth of repository for TRU nuclides containing waste. It is examined into parameter setting, development of models and data processing methods, to build up the estimate system for base case scenarios of each concrete-pit disposal, mid-depth disposal and deep geological disposal, those represented as multi pore medium.

Models are developed with flexibility against changes of time dependent data. Asset of parameters are set to estimate the performance of disposal concepts and a bentonite based engineered barrier. Otherwise an analytical method to clarify the sensitivity property was developed. The method will use a rate of increase or decrease to achieve the target value in total analysis cases. The sensitivity property of important parameters, which affect analytical results significantly, clarified.

Future issues are ;

- the comprehensive representation of sensitivity property including the fractured medium.
- the reliability of Sufficient condition.

The disposal concepts and specification of TRU nuclides containing waste shall be determined rationally and safely through these studies.

---

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.	モデル体系の整備およびモデル / 解析結果の検証.....	2
2.1	モデルの体系化.....	2
2.1.1	コンクリートピット処分.....	2
2.2	モデル/解析結果の検証.....	2
2.2.1	O <sub>3</sub> による解析モデルの構築.....	2
2.2.2	解析結果の検証.....	3
3.	感度構造の明確化並びに十分条件の網羅的抽出を合理的かつ効率的に実施 するための手法の開発.....	7
3.1	感度構造の網羅的把握のための手法の改良と新規手法の開発及び適用.....	7
3.1.1	応答曲面を用いた手法の検討.....	7
3.1.2	感度構造を把握する手法の開発.....	8
3.1.3	解析ケース数に関する考察.....	13
3.1.4	感度分析手法の組み合わせと利用方法の整理.....	13
3.2	安全指標を満足するような処分システムの十分条件の網羅的抽出を合理的 かつ効率的に実施するための手法の開発.....	16
4.	TRU 核種を含む放射性廃棄物のコンクリートピット処分、余裕深度処分お よび地層処分の十分条件の網羅的抽出並びに決定論的評価コード Nestor 等を用いた十分条件の詳細確認.....	17
4.1	十分条件の網羅的抽出.....	17
4.1.1	対象廃棄物の処分区分に関する検討方針.....	17
4.1.2	処分区分に関する検討.....	19
4.1.3	余裕深度処分および地層処分の評価モデルの検討.....	22
4.1.4	余裕深度処分および地層処分のパラメータの設定.....	27
4.1.5	余裕深度処分における感度分析結果.....	28

4.2	十分条件の抽出.....	33
4.2.1	感度分析ソフトウェアの改良.....	33
4.2.2	十分条件の抽出例.....	33
4.3	SI法を用いる場合の課題.....	39
5.	TRU核種を含む放射性廃棄物の地層処分の影響等を考慮した場合の他の 廃棄物の処分成立性の十分条件の例示的抽出.....	40
5.1	TRU廃棄物からの影響の想定.....	40
5.1.1	解析ケースの設定.....	40
5.1.2	解析結果.....	42
5.2	処分成立性の十分条件.....	43
6.	おわりに.....	45

## 表目次

表 3.1.1-1	応答曲面生成手法の相違による分散の比較結果 .....	8
表 4.1.2-1	各処分区分におけるインベントリ .....	21
表 4.1.3-1	解析ケースの一覧表 .....	26
表 4.1.5-1	余裕深度処分で $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る割合 (緩衝材あり) .....	29
表 4.1.5-2	余裕深度処分で $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る割合 (緩衝材なし) .....	30
表 4.1.5-3	各廃棄体グループでの支配的となる核種と大きな感度を持つパラ メータ .....	31
表 4.2.2-1	SI 法により抽出された大きな感度を有するパラメータ .....	34
表 4.2.2-2	90%以上の確からしさを達成するためのパラメータ範囲 .....	38
表 4.2.2-3	95%以上の確からしさを達成するためのパラメータ範囲 .....	38
表 5.1.1-1	堆積岩地層における高レベル放射性廃棄物の核種移行パラメータ の設定値 .....	41
表 5.1.1-2	人工バリアへの TRU 廃棄物の影響ケース .....	41
表 5.1.1-3	天然バリアへの TRU 放射性廃棄物影響ケース .....	42

## 図目次

図	2.2.1-1	O <sub>3</sub> システムによる解析モデルの設定案 .....	3
図	2.2.2-1	O <sub>3</sub> と Tiger の天然バリア出口フラックスの比較 .....	4
図	2.2.2-2	O <sub>3</sub> と Tiger の天然バリア出口フラックスの比較(地球化学異常を想定) .....	5
図	2.2.2-3	速度論的溶解沈殿反応モデルの検証(天然バリア出口でのフラックスの比較) .....	6
図	3.1.2-1	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.....	10
図	3.1.2-2	SI 法による感度分析の例 .....	11
図	3.1.4-1	包括的感度解析の適用フロー .....	15
図	4.1.1-1	処分区分検討フロー .....	18
図	4.1.3-1	母岩を多孔質媒体と想定する場合の地層処分および余裕深度処分における全体システム構成 .....	25
図	4.1.3-2	コロイドへの可逆吸着に対応する Mobility 関数(真性コロイド影響も含む) .....	26
図	4.1.3-3	ガス発生による人工バリア内部地下水排水のモデル.....	27
図	4.1.5-15	グループ 3 余裕深度処分の感度分析結果(50GBq/ton, 緩衝材あり) .....	32
図	4.2.2-1	SI 法により抽出された感度の大きなパラメータ単独で目標を達成するためのパラメータ範囲 .....	37
図	5.2-1	TRU 廃棄物の影響による高レベル放射性廃棄物からの核種放出率の変化の比較 .....	44

## 1. はじめに

放射性廃棄物処分に関する性能評価では、評価の対象となる期間が長期におよぶことや、この間に生じる現象の多様性、さらには処分システムの構成要素として含まれる地層の空間的不均一性のために、評価結果に不確実性が含まれることが不可避である。このため、評価結果が安全基準を満足することを証明するためには、処分の長期的安全性に関する種々の情報に基づく詳細な判断が必要と考えられている。性能評価の大きな役割は、このような検討を合理的に下すために適切な定量的情報を提供することにある。

本研究で行う、包括的性能評価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、上記の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。昨年度まで実施してきた「核種移行解析の網羅性の確認・評価」においては、TRU 核種を含む放射性廃棄物の処分に影響を及ぼす様々な事象を網羅的に考慮したモデルを構築することを主体とし、有意な感度を示すパラメータの抽出並びに想定される線量基準を下回るための十分条件を抽出することが可能な手法の開発を行い、地層処分及び余裕深度処分の概念に対してそれらの手法を適用し、その有効性を確認してきた。また、他のシナリオや処分概念への適用についても検討した。

今後は、TRU 核種を含む放射性廃棄物の処分概念やシナリオの多様性（コンクリートピット処分、余裕深度処分、地層処分/地下水シナリオ、変動シナリオ）を考慮し、検証されたツールに基づき、上記手法を用いて体系的に十分条件の網羅的抽出を行い、処分の成立性や重要研究の絞り込みに資する詳細な評価を行う必要がある。そのため、本研究では、これまで構築したモデルや実施した評価の整備及び検証の一部を行うとともに、コンクリートピット処分、余裕深度処分、地層処分の個々の概念や地下水シナリオに対する評価体系を整え、モデル・手法の高度化により、十分条件を体系的にかつ網羅的に抽出するための研究を実施した。



## 2. モデル体系の整備およびモデル/解析結果の検証

ここでは、本年度実施する包括的性能評価の対象である、コンクリートピット処分、余裕深度処分、及び地層処分に関する、基本シナリオにおける多孔質媒体中の核種移行について、それぞれ必要となる解析モデルの仕様を明確にした。また、仕様に基づき、既存の解析ツールのモデルを個々の処分概念毎に見直し、最新化を図るとともに、既存情報(文献/報告書等)や他のモデルを用いた計算結果と比較することにより検証した。

### 2.1 モデルの体系化

#### 2.1.1 コンクリートピット処分

コンクリートピット処分に関しては、原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会(1993)において、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の検討に使用されたモデルが存在する。また、発電所から発生する廃棄物については、既に事業許可申請がなされた例が存在する。そのため、本処分方式については、既に安全審査等を経て評価手法が確立されており、この手法を再現するような決定論的なモデルを用いることが適切であると考えられる。

また、コンクリートピット処分では線状ソースの取り扱いが重要であることから、その機能を有する1次元核種移行解析コード Nestor を用いることを基本とする。

### 2.2 モデル/解析結果の検証

#### 2.2.1 O<sub>3</sub>による解析モデルの構築

本年度の研究では、これまで展開してきたシャドウモデルをO<sub>3</sub>システム上で展開し、統計的解析の実施を行った。TRU 廃棄物の処分システムの特性を考慮し、図 2.2.1-1 に示すような解析モデルとして構築した。

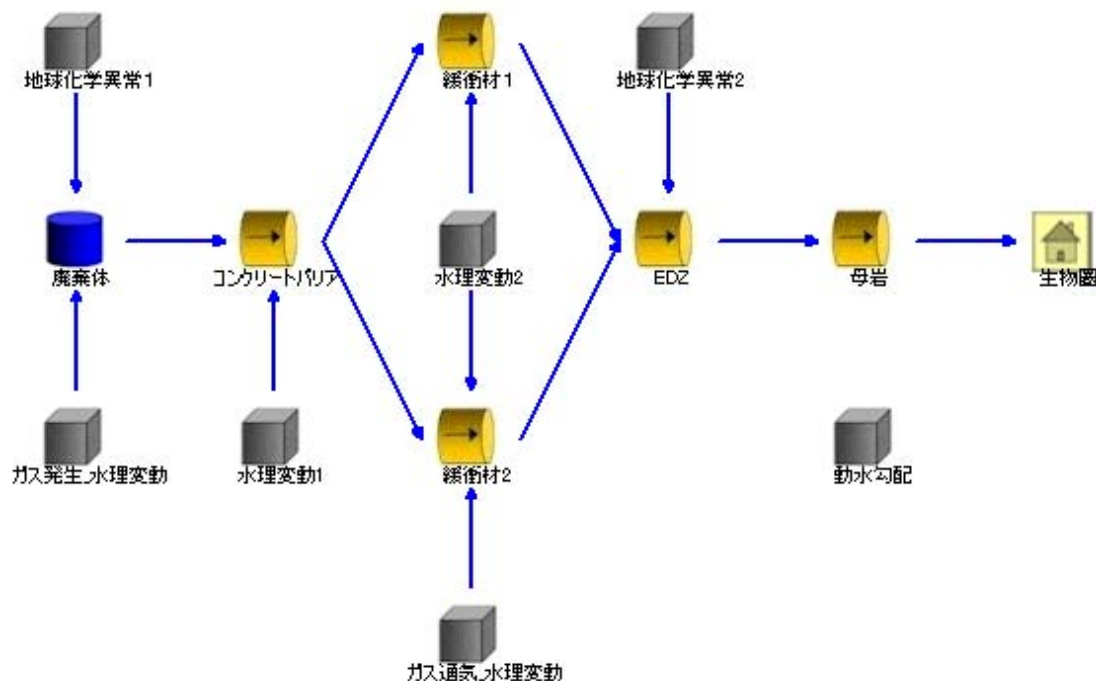


図 2.2.1-1 O<sub>3</sub>システムによる解析モデルの設定案

## 2.2.2 解析結果の検証

本年度の研究で用いる O<sub>3</sub>システムと、既存の解析コードである Tiger1.5 との比較を行い、解析結果の検証を実施した。以下、Tiger との比較結果をまとめる。

### (1) 時間的に一定で空間的に物性等が異なる領域に関する検証

ここでは、時間的には一定で空間的に物性等が異なる領域、人工バリアと天然バリアの存在を考慮したケースについて、Tiger の数値解析結果との比較により検証した。図 2.2.2-1 に天然バリアからの流出フラックスの比較を示す。両コードとも結果は良く一致している。

### (2) GA モデルに関する検証

ここでは、時間的には一定で空間的に物性等が異なる領域、人工バリアと天然バリアの存在を考慮したケースについて、Tiger の数値解析結果との比較により検証した。図 2.2.2-2 に天然バリアからの流出フラックスの比較を示す。両コードとも結果は良く一致している。

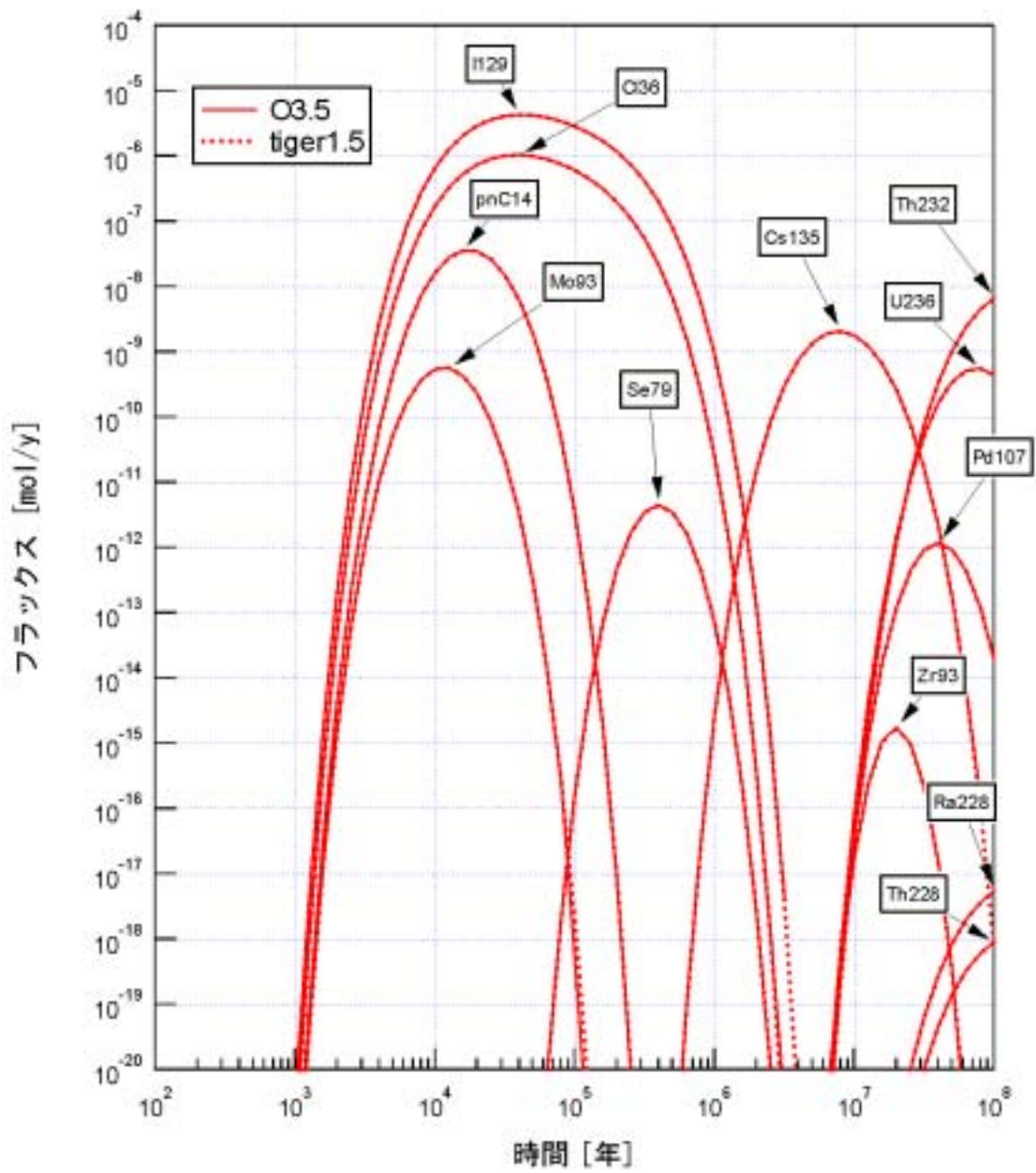


図 2.2.2-1 O<sub>3</sub>とTigerの天然バリア出口フラックスの比較

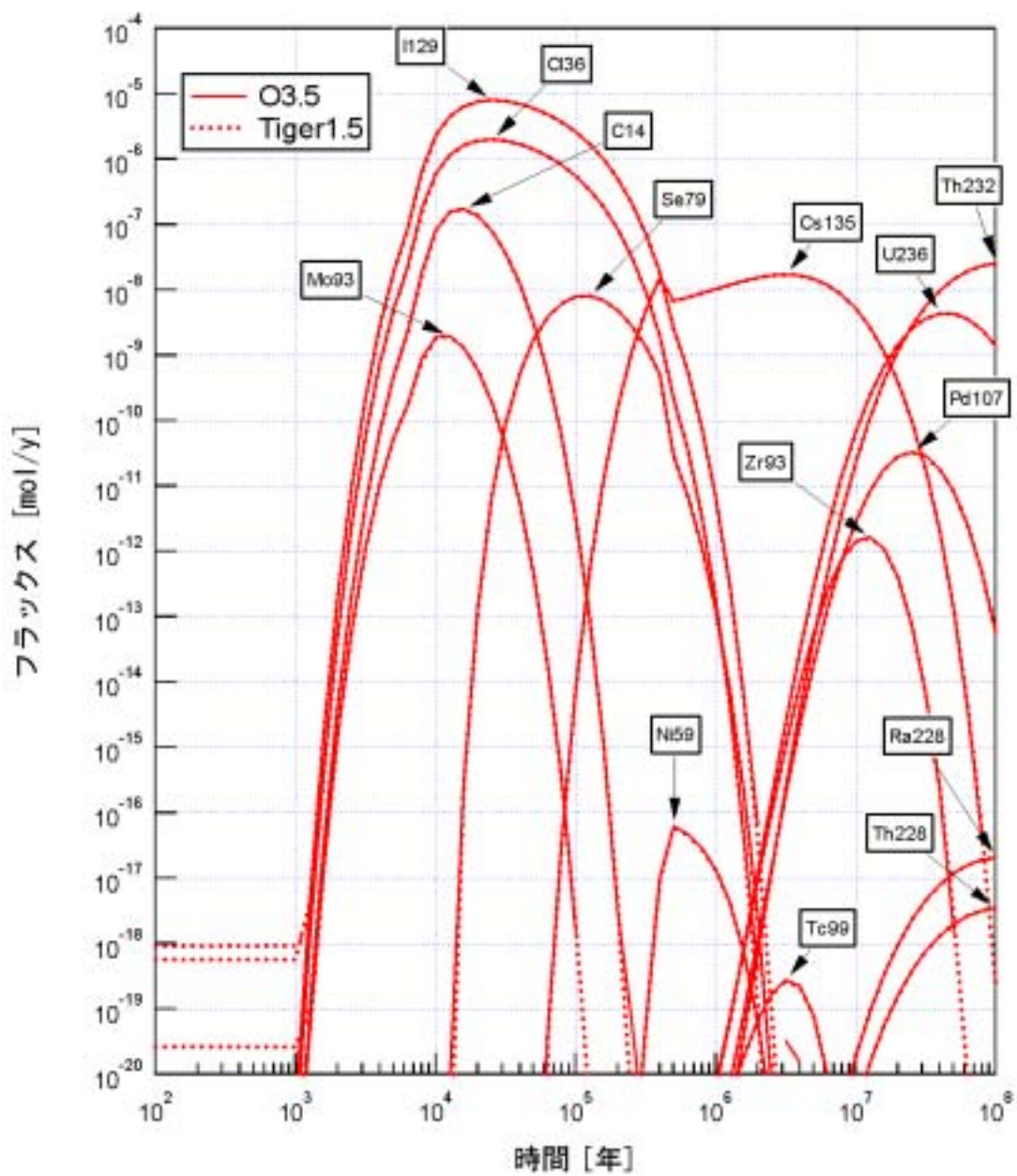


図 2.2.2-2 O<sub>3</sub>と Tiger の天然バリア出口フラックスの比較 (地球化学異常を想定)

## (3) 速度論的溶解沈殿反応モデルの検証

速度論的溶解沈殿反応に関しては、Np の移行について Tiger との比較を行った。天然バリア出口フラックスに関する計算結果の比較を図 2.2.2-3 に示す。図中には、速度論的溶解沈殿を考慮しない場合の結果も示してある。図からも判るように両コードの結果は非常に良く一致している。よって、速度論的沈殿溶解反応モデルは、正しく機能していることが検証できた。

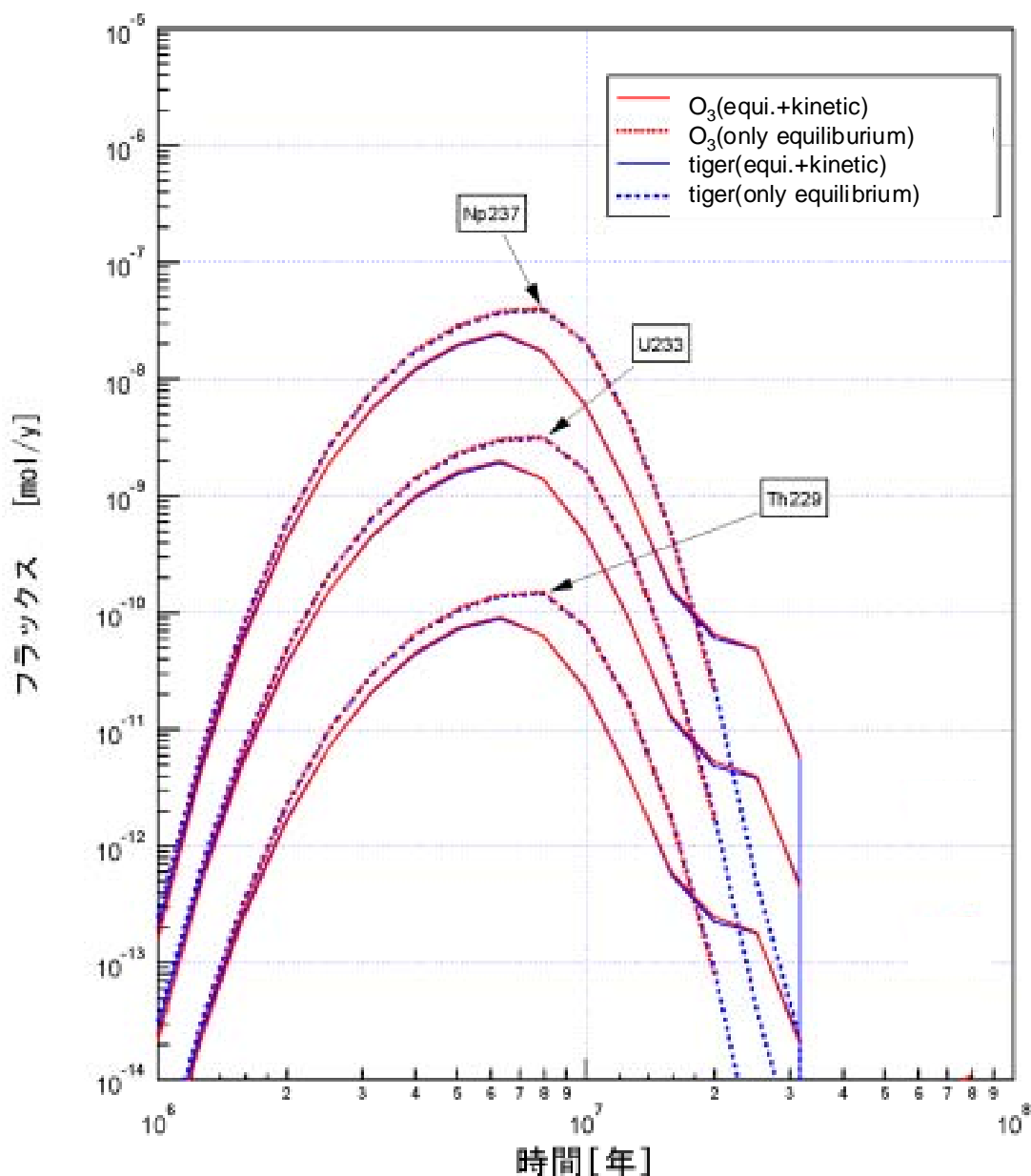


図 2.2.2-3 速度論的溶解沈殿反応モデルの検証  
(天然バリア出口でのフラックスの比較)

### 3. 感度構造の明確化並びに十分条件の網羅的抽出を合理的かつ効率的に実施するための手法の開発

#### 3.1 感度構造の網羅的把握のための手法の改良と新規手法の開発及び適用

本研究では、応答曲面の近似の精度を向上させることを目的に、応答曲面を用いた手法の一部を改良した。また、各パラメータ範囲に対応する線量の分布を用いた、感度構造を把握する手法を別途新たに開発し、補完的な感度情報を取得する手法を開発した。また本検討では、これまでの研究において開発された感度構造を把握するための手法を整理し、適切な利用方法と組み合わせ方について明確にした。

##### 3.1.1 応答曲面を用いた手法の検討

前年度の研究では、応答曲面を使うための応答曲面に用いるパラメータの個数や応答曲面を生成するためのデータ数に関して検討を加えたが、応答曲面により予測される核種放出率の精度は必ずしも高いものではなかった。前年度の研究では、以下の問題が指摘されている。

- ・ 応答曲面を作成するための応答曲面内の近似パラメータ数が多すぎる場合には、過学習の効果から、予測精度は低下する。
- ・ 入力データのパラメータの数が多く、かつ、予測に寄与しないパラメータが多く存在する場合には、予測精度が低下する。

そのため、本研究では、以下の方法を用い予測精度の向上を試みるものとした。

ステップ1：核種放出率の結果を核種毎に Bq/y または mol/y で出力を行う。

ステップ2：核種毎にムーピングバンド法による解析を実施し、核種毎に感度の大きなパラメータを抽出する。

ステップ3：核種毎に線量換算係数、または、線量換算係数のサンプル値を乗じて、これを加算し被ばく線量の最大値を求める。この際、核種毎に放出率が最大となる時刻が異なるため、最大値のみを加算する場合

と異なり予測値はオーバーエステメイトされる可能性があるが、それによる誤差は、上昇側に最大数倍程度であることから、予測精度を向上させるほうが優位となる。

ここでは新規手法の適用性を確認するために、8000 ケースの解析結果を用いて、応答曲面を生成し、1000 ケースの結果に対して、ブラインドテストを行った。核種毎の応答曲面の生成は、核種の放出率に対して、ムービングバンド法による解析を実施し、大きな感度を有するパラメータを抽出した。I-129、C-14、Np-237 それぞれ、19 個、21 個、22 個のパラメータが抽出され、それに基づき応答曲面を作成した。

応答曲面を作成した、データ（8000）とブラインドテストに用いたデータ（1000）に対して、解析値からの差を求め、分散を求めた結果を表 3.1.1-1 に示す。応答曲面を生成するために用いたデータでは、分散の差異はほとんど見られないものの、ブラインドテスト用のデータでは、明らかに、各核種からの放出率から得られる応答曲面の方が、精度が良いことがわかる。

表 3.1.1-1 応答曲面生成手法の相違による分散の比較結果

	総線量からの応答曲面の生成	核種毎の放出率からの応答曲面の生成
応答曲面生成に用いたデータ	0.55	0.56
ブラインドテスト	0.95	0.72

### 3.1.2 感度構造を把握する手法の開発

#### (1) ムービングバンド法

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 個の出力を降順に並べ直し、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 ( $\mu_{ij}$ ) と全域的な平均 ( $\mu_i$ ) との差異の統計的有意性を次式で評価する。

$$s_i^j = \frac{\mu_i^j - \mu_i}{\sigma_k} \quad (3.1.2-1)$$

但し、全域的標準偏差を  $\sigma$  とした場合、

$$\sigma_k = \sqrt{\left(\frac{1}{k} - \frac{1}{K}\right)} \sigma \quad (3.1.2-2)$$

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しないと判断され、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。

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。

ムービングバンド法により算出される  $s_i^j$  の推移から定量的に感度分析を行うために、近似式より求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、バンド毎に、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 3.1.2-1 参照)



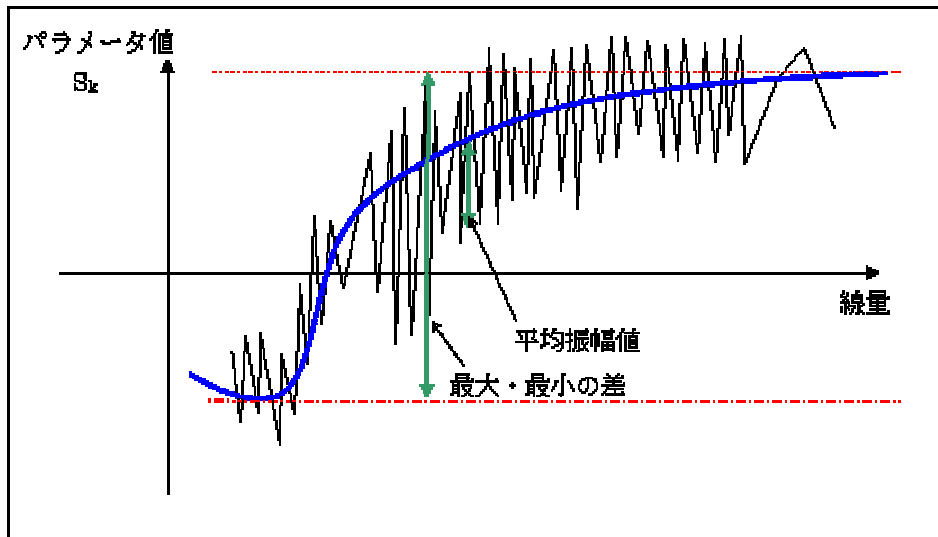


図 3.1.2-1 ムービングバンド法による解析結果からのパラメータ抽出方法の模式図

設定されたメッシュサイズの妥当性を確認するため、各バンドに含まれるデータ数をそれぞれ 5,20,100,500 として、昨年度実施した形跡結果を用いて感度分析を行い、メッシュサイズの違いについて検討した。その結果、メッシュサイズを 5 とした場合には、平均値、標準偏差ともに大きく振動することから、パラメータと線量の関係を直感的に判断することは難しくなる。メッシュサイズを 20 とした場合には、振動は幾分確認されるが、線量とパラメータの関係を目視により読み取ることは可能である。バンドのサイズが 100,500 の場合には、線量とパラメータの関係をよりはっきりと見分けることが可能となる。ただし、バンドのサイズが大きくなるに従い、局所的な変化が読み取りにくくなる可能性は否定できない。このことから、メッシュサイズを 20 程度とすることにより、適度な感度分析が可能となるものと考えられる。

## (2) Sufficiency Index (SI) 法

ムービングバンド法による感度解析は、各入力パラメータの変動範囲全域において結果に対して有意な影響が生じているか否かを標本統計の立場から判断する手法である。しかしながら、用途によっては、これとは異なる手法がより適切となる場合がある。特に重要な例としては、安全評価の出力（例えば、個人年間被ばく線量やリスク）について、ある規制上の目標が存在する場合、この目標値近傍での感度に注目する場合が挙げられる。SI 法はこのような場合に

用いることを目標として開発された感度解析の手法である。

多数の統計的シミュレーションケースのうち条件1を満足するものが $N_1$ 個あったとして、このうち、安全目標を満足するものが $n_1$ 個あるとすると、 $n_1/N_1$ として定義される。今回の解析のように、各パラメータ値の変動範囲のみを指定して確率分布を定義していない場合には、 $n_1/N_1$ は厳密な意味で確率と呼べるものではない。そこで、これを、SI (Sufficiency Index : 十分条件としての強さ) と呼ぶこととする。SI を用いた感度解析は、あるパラメータに着目して、そのパラメータの変動範囲を変えた場合に、安全目標を満足する可能性 (即ち SI) がどの程度変化するかを計算するものである。

図 3.1.2-2 は、SI 法による感度分析の例を示したものである。同図は、着目するパラメータ (この例では亀裂を含む透水係数の対数) を  $P^*$ 以上にした場合に SI(縦軸)がどのように変化するか (青線) 、そして同様に、 $P^*$ 以下にした場合に SI(縦軸)がどのように変化するか (赤線) を同時に表示しており、青線及び赤線がいずれも水平である場合には、当該パラメータの感度は無視でき、いずれかあるいは両方の線の傾きが顕著であればそれぞれの方向での感度が大きいということになる。

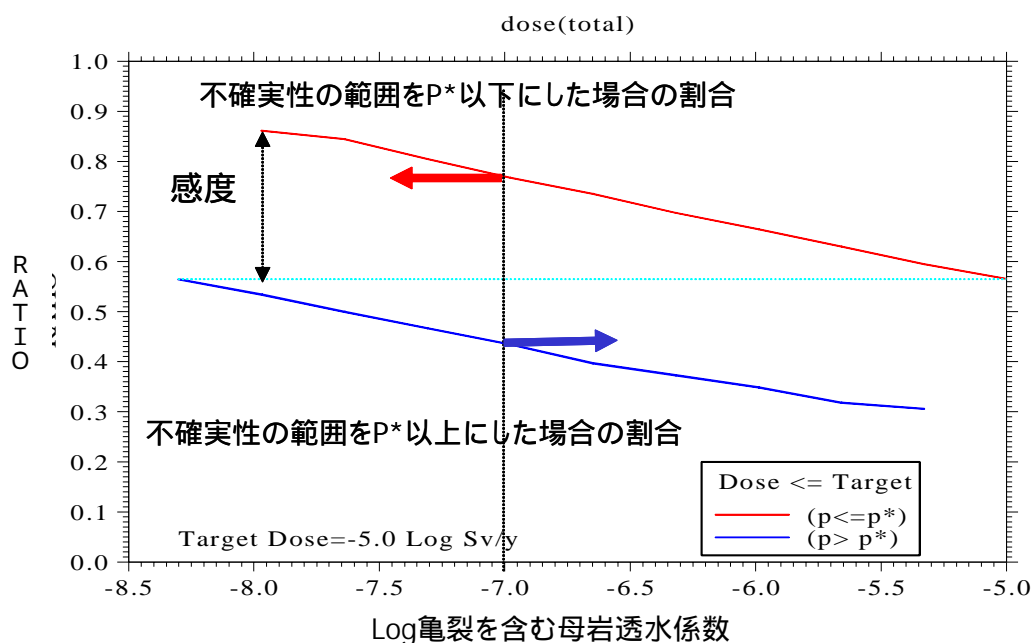


図 3.1.2-2 SI 法による感度分析の例

SI 法は基本的には個々のパラメータ単体について適用されるものであり、複数の制約条件を組み合わせた場合には、該当する部分集合のケース数が減少するために統計的な有意性が犠牲になることとなる。しかしながら、以下の定理を用いることによって、複数の条件を組み合わせた場合の SI の上昇の下限値を理論的に算出することが可能となる。

### 定理

$X_i$ :  $i$  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

$$(P(X_i \cap X_j) = P(X_i)P(X_j), \text{ for } \forall i, j)$$

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、

$$P(X_i | X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_{i-1} \cap Y) \leq P(X_i | Y) \quad (3.1.2-3)$$

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。

$$1 - P(Y | X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_N) \geq 1 - P(Y) \cdot \prod_{i=1}^N \left( \frac{P(Y | X_i)}{P(Y)} \right) \quad (3.1.2-4)$$

例えば、多数の解析ケースのうち、50%が目標線量を下回っており( $P(Y)=0.5$ )、パラメータ 1, 2, 及び 3 についての不確実性のある目標値まで低減させることによって、この割合が、それぞれ 90%, 80%, 70%に上昇する場合、上の定理を用いることによって、

$$1-0.5x[(1-0.9)/0.5]x[(1-0.8)/0.5]x[(1-0.7)/0.5]=0.976 \quad (3.1.2-5)$$

から、これらの三つの条件を組み合わせることによって、目標線量を下回る解析ケースの割合は97.6%以上に向上することが推定される。

以上のことは、SI法によって個々のパラメータの感度分析を行い、比較することに加えて、複数のパラメータに対してそれぞれ異なる方法で一定の不確実性を低減するという目標を立てた場合に、全体としてどの程度の効果が期待できるかを算出することができることを意味している。

### 3.1.3 解析ケース数に関する考察

シャドウモデルを用い感度解析を実施するためには、多数回の解析を実施することが求められる。数十次元のパラメータ空間においては、数万程度の解析を行ったとしても、データは不十分であり、疎に分布するものと予想される。しかしながら、数十次元のパラメータが全て、解析結果に対して強い感度を有しているわけではないことから、実際の解析においては、大きな感度を有するパラメータとそれらの組み合わせが、十分にサンプリングされた時点で、核種放出率(または線量)の分布は安定するものと予想される。そのため、解析結果が安定するまでのサンプリング数は解析条件により異なるものと考えられることから、本年度研究では、解析途中で、解析結果を出力し、サンプリング数を判断するものとする。

### 3.1.4 感度分析手法の組み合わせと利用方法の整理

ここでは、上述までにおいて開発された感度構造を把握するための手法を整理し、適切な利用方法と組み合わせ方について明確にした。

#### (1) 感度構造の把握のための感度分析手法の適用性に関する検討

現在までに開発された手法のうち、ムービングバンド法が全線量範囲を対象として感度が大きいパラメータを抽出することが可能であるのに対し、SI法では着目している線量付近における感度の大きいパラメータを抽出することがで

きるという特徴を有する。そのため、これらは互いに補完しあう関係にあり、要求される感度情報に応じて適宜使い分ける必要がある。

また、感度の大きいパラメータに対して制約条件が与えられた場合に対して、全域的解析と同様の手法を用いて感度分析を行い、感度を有する「隠れた」パラメータを顕在化させることが必要である。

#### (2) F E P / シナリオのスクリーニングへの適用

本研究によって開発された手法によって重要なパラメータを網羅的に抽出することにより、線量評価の観点から F E P の重要度に関する情報を提供することが可能であると考えられる。今後は核種移行パラメータと F E P との関連づけをより明確にする手法が必要であると考えられる。

#### (3) 人工バリア仕様設定のための十分条件抽出手法の検討

ムービングバンド法では、複数存在すると考えられる十分条件の組み合わせのうち、1つの組み合わせしか提示できないという欠点を有する。また、制約条件が与えられた場合は、応答曲面などを利用することによってケース数を増幅し、再び感度分析を行う必要があった。それに対して本研究において提示されている SI 法では、パラメータの設定値の組み合わせを自由に選択でき、その組み合わせに対する Sufficiency Index(十分条件の強さ)を提示可能である。そのため、Sufficiency Index の許容範囲を予め決めておくことにより、任意の組み合わせが十分条件であるか否かの判断が容易にできる。そのため、人工バリア仕様の設定のために十分条件の抽出手法を適用するのであれば、制約条件に対してより柔軟性のある SI 法を利用した十分条件の抽出手法の方が、ムービングバンド法を利用した手法よりも適していると考えられる。

#### (4) 感度分析手法の適用フローの作成

以上の検討を基に、本研究によって開発された感度分析手法の適用方法をフローチャートにしてまとめた。図 3.1.4-1 に包括的感度解析の適用フローを示す。これらの感度分析手法は、F E P / シナリオのスクリーニングおよび人工バリア仕様の設定に利用可能であると考えられる。

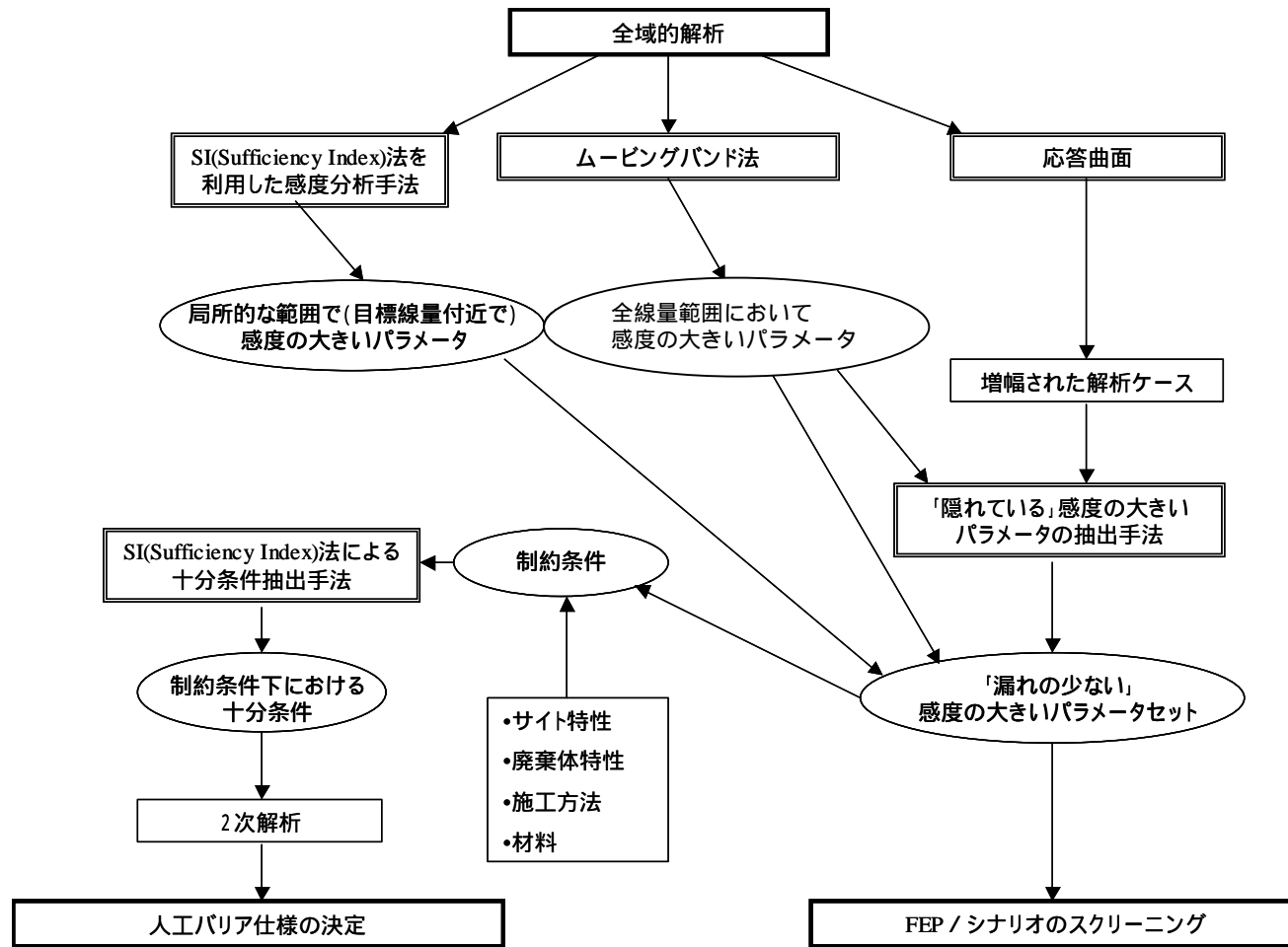


図 3.1.4-1 包括的感度解析の適用フロー

### 3.2 安全指標を満足するような処分システムの十分条件の網羅的抽出を合理的かつ効率的に実施するための手法の開発

本研究では、ムービングバンド法その他、S I法の開発を行ってきた。S I法は、パラメータ範囲を限定したときに、基準とする安全指標（線量）を下回るケースの割合を算出することに特化した手法である。この方法の利点は、複数のパラメータの範囲を限定したときに、瞬時に、基準線量を下回る割合の下限を算出できることにある。また、パラメータの範囲は、ユーザーが自由に選択できることから、ムービングバンド法によるパラメータ抽出と異なり、処分システムの状態や、研究目標に合せパラメータ範囲を限定できる。そのため、2次解析を実施する以前に、パラメータの範囲の予備的な検討がし易く、効率的に十分条件の抽出が可能となる。この方法を用いた場合の検討の手順を以下に示す。

複数個の入力データセットの生成

各ケースの核種移行解析

各解析結果の読み込み、最大値データの読み込み、全ケースの最大値をまとめた後処理用のファイルの生成

基準線量近傍での感度の大きなパラメータの抽出

パラメータ範囲の検討

基準を下回る割合の算出（ $\alpha$ 、 $\beta$  のイタレーション）

二次解析の実施

これを、効率的に実施するために、～ のステップにおいて、各ステップで使用されるプログラムの入出力、及び、各プログラム間でのファイルのやり取りを見直すと共に、S I法を具体化するための解析コードの改良を実施するものとした。

4. TRU 核種を含む放射性廃棄物のコンクリートピット処分、余裕深度処分および地層処分の十分条件の網羅的抽出並びに決定論的評価コード Nestor 等を用いた十分条件の詳細確認

#### 4.1 十分条件の網羅的抽出

TRU 核種を含む放射性廃棄物のうち一部のものは、既存のコンクリートピットに収容することが合理的と考えられる。そこで、ここでは、まず、この処分方式に関して既に確立されている評価手法を、決定論的解析コードである Nestor によって再現し、既存施設との重畳も考慮しつつ、コンクリートピットに収容することの可能な範囲の廃棄物の種類と量について検討を加えた。さらに、この検討結果を制約条件として、他の全ての TRU 核種を含む放射性廃棄物を対象とした包括的性能評価を地下水シナリオ及び多孔媒体を対象として実施し、これらの廃棄物を余裕深度処分あるいは地層処分した場合に、想定される線量目標を満足するための十分条件を網羅的に抽出した。

##### 4.1.1 対象廃棄物の処分区分に関する検討方針

本検討における検討フローを図 4.1.1-1 に示す。本検討では、まず政令濃度上限値、地下水移行シナリオ等によりコンクリートピット処分対象廃棄物を決定し、続いて政令濃度上限値、全濃度等を参考に余裕深度処分と地層処分の対象廃棄物の振り分けを行った。また、対象する廃棄体および濃度は、TRU 廃棄物処分概念検討書に示されている廃棄体とした。なお、コンクリートピット処分については、既に安全審査等を経て評価手法が確立されているといえ、全域的解析を実施する意義は小さく、この手法を再現するような決定論的なモデルを用いることが適切であると考えられる。



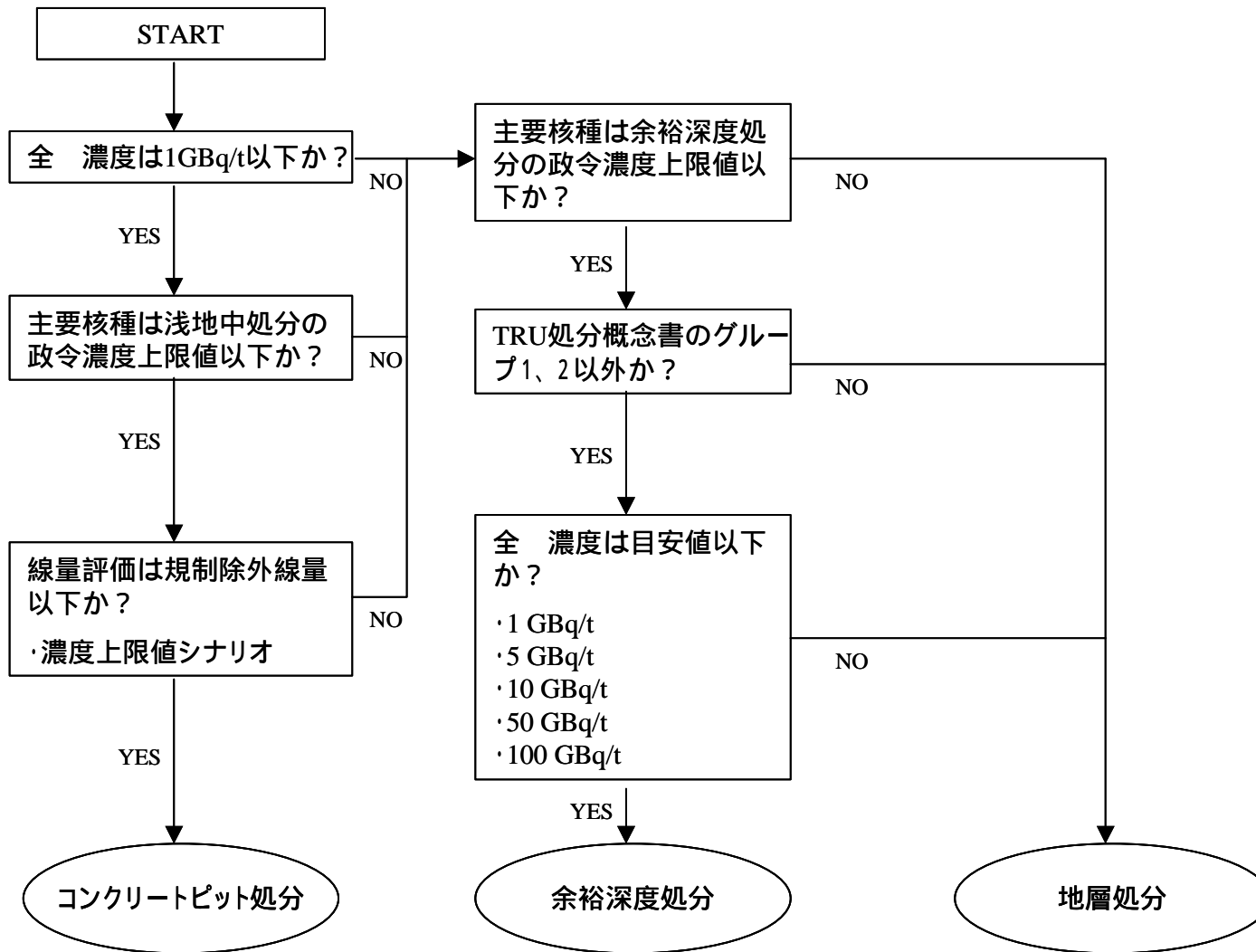


図 4.1.1-1 処分区分検討フロー

#### 4.1.2 処分区分に関する検討

ここでは、図 4.1.1-1 のフローに従って、各処分方式において処分可能な廃棄物の量を算出した。

##### (1) コンクリートピット処分可能性に関する検討

本検討では、まず全 濃度が 1GBq/t を超える廃棄体はコンクリートピット処分できないものと判定した。次に、原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会による報告書「低レベル放射性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2次中間報告)」に示された濃度上限値より高い濃度を有する廃棄体はコンクリートピット処分は不可能と判定した。最後に上記の濃度上限値の算出に用いられた「濃度上限値シナリオ」について、実際の廃棄体に適用し、目標とする線量を満足するか否かによってコンクリートピット処分が可能かどうかを判定した。本検討の結果、17種類の廃棄体がコンクリートピット処分可能であるという結果が得られた。

##### (2) 余裕深度処分可能性の判定

次に、上記までの検討によりコンクリートピット処分が不可能とされた廃棄体を、余裕深度処分と地層処分に振り分ける必要がある。よって本検討では原子力安全委員会の報告書に示されている政令濃度上限値、地層処分におけるグルーピングおよび全 濃度を基準として、余裕深度処分が可能かどうかの判定を行った。全 濃度上限値については、濃度が 1GBq/t、5GBq/t、10GBq/t、50GBq/t および 100GBq/t を一応の区分値として、余裕深度処分が可能かどうかを判定した。この結果より、濃度上限値により余裕深度処分が可能な廃棄体の量が大きく変わることがわかる。

##### (3) 本研究において想定する処分区分の検討

以上の検討によって得られた、それぞれの濃度上限値における評価シナリオの場合の各処分形態のインベントリを表 4.1.2-1 に示す。これより、コンクリートピット処分対象のインベントリは余裕深度処分対象のインベントリよりも小さ

いケースが多いことがわかる。そのため、本研究では保守的にコンクリートピット処分対象のインベントリも余裕深度処分での評価対象に含めるものとした。なお、物量については、コンクリートピット処分対象廃棄物の物量は多いが、感度解析のパラメータとして廃棄体埋設比率を大きく変動させているため、これに含まれると考えられる。

また、濃度上限値は、詳細に区分を分けてもインベントリの変化が小さいため、本研究では 1GBq/t および 50GBq/t の 2 ケースを対象とした。

表 4.1.2-1 各処分区分におけるインベントリ

		コンクリート ピット	余裕深度処分		地層処分			
			Gr.3	Gr.4	Gr.1	Gr.2	Gr.3	Gr.4
C-14 (Bq)	1 GBq/t	2.24E+08	7.21E+11	1.53E+09	0.00E+00	1.10E+15	1.20E+13	1.82E+12
	5 GBq/t		4.45E+12	1.53E+09			8.29E+12	1.82E+12
	10 GBq/t		1.27E+13	4.01E+09			1.20E+10	1.82E+12
	50 GBq/t		1.27E+13	3.19E+11			1.20E+10	1.50E+12
	100 GBq/t		1.27E+13	3.19E+11			1.20E+10	1.50E+12
I-129 (Bq)	1 GBq/t	3.70E+09	2.19E+11	3.31E+07	3.47E+13	2.09E+11	7.16E+11	6.50E+09
	5 GBq/t		4.22E+11	3.31E+07			5.13E+11	6.50E+09
	10 GBq/t		8.72E+11	2.16E+08			6.24E+10	6.32E+09
	50 GBq/t		8.72E+11	5.95E+09			6.24E+10	5.82E+08
	100 GBq/t		8.72E+11	5.95E+09			6.24E+10	5.82E+08
Np-237 (Bq)	1 GBq/t	3.34E+08	3.15E+08	3.29E+09	0.00E+00	2.04E+12	7.22E+09	2.82E+11
	5 GBq/t		2.00E+09	3.33E+09			5.53E+09	2.82E+11
	10 GBq/t		5.75E+09	5.09E+09			1.79E+09	2.80E+11
	50 GBq/t		7.54E+09	1.33E+10			0.00E+00	2.72E+11
	100 GBq/t		7.54E+09	1.33E+10			0.00E+00	2.72E+11
物量 (t)	1 GBq/t	5.69E+04	8.46E+03	1.70E+04	3.35E+02	1.75E+04	1.06E+04	1.93E+04
	5 GBq/t		1.31E+04	1.74E+04			5.97E+03	1.89E+04
	10 GBq/t		1.71E+04	2.16E+04			1.95E+03	1.47E+04
	50 GBq/t		1.88E+04	2.82E+04			3.00E+02	8.15E+03
	100 GBq/t		1.88E+04	2.82E+04			3.00E+02	8.14E+03
物量 (m3)	1 GBq/t	2.33E+04	5.69E+03	9.29E+03	2.69E+02	4.91E+03	6.69E+03	5.81E+03
	5 GBq/t		8.35E+03	9.35E+03			4.03E+03	5.75E+03
	10 GBq/t		1.11E+04	1.03E+04			1.24E+03	4.82E+03
	50 GBq/t		1.21E+04	1.26E+04			2.70E+02	2.47E+03
	100 GBq/t		1.21E+04	1.26E+04			2.70E+02	2.47E+03

#### 4.1.3 余裕深度処分および地層処分の評価モデルの検討

##### (1) 概念モデル

母岩を多孔質媒体と想定する場合の地層処分および余裕深度処分における、全体システム構成を図 4.1.3-1 に示す。人工バリアは、緩衝材を用いる場合と用いない場合の 2 つの構成を地層処分および余裕深度処分それぞれについて考慮するものとした。

##### (2) 解析ケース

グループ 3 およびグループ 4 の廃棄体に関しては、余裕深度処分の可能性が否定できないことから、濃度上限値による廃棄体の区分に従い廃棄体を分類し、それぞれ、地層処分を行う場合と余裕深度処分を行う場合の 2 通りの解析ケースを想定した。また、グループ 1 ~ 4 の全ての廃棄体グループに対して、人工バリアに緩衝材を用いる場合と緩衝材を用いない場合に分け解析を実施するものとした。解析ケースを表 4.1.3-1 にまとめる。

##### (3) 人工バリアにおける支配方程式

###### (a) 核種の処分量及び廃棄体の核種浸出特性

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 1 m）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した。

###### (b) 水理に関するパラメータ

系内の地下水流動は、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。

###### (c) 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

球化学異常物質によるものである。そこで、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を、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。地球化学異常の原因となる物質としては、TRU 廃棄物の特徴を踏まえ、コンクリートが発生源となるアルカリプルームおよび硝酸塩を想定するものとした。

#### (d) 核種移行

本解析では、溶質の状態でも可動する核種を含む瞬時平衡グループ（第 1 グループ）および、第 1 グループとは異なる移行形態に推移し移動するグループ（第 2 グループ、具体的にはコロイドへの不可逆による移行を想定したグループ、後述のコロイド移行モデル参照）の 2 つの瞬時平衡グループを考へ、これら 2 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。また、核種の吸着が瞬時線型吸着であることを前提として、Mobility 関数により平均拡散係数および移流速度を表現する。

### (4) 天然バリアにおける支配方程式

#### (a) 幾何形状

本年度の研究対象とする余裕深度処分および地層処分の場合、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。

#### (b) 水理

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。また、通常時の動水勾配は、人工バリア部分と同一と仮定する。

#### (c) 地球化学

母岩中の地球化学的条件の変化は、母岩中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。そこで、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、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こととした。

(d) 核種移行

母岩中核種移行シャドウモデルにおいても、人工バリアでの定式化と同様に溶質および可動可能な沈殿生成物をそれぞれ含む2つの瞬時平衡グループを考える。

(5) コロイド移行モデル

コロイドによる影響としては、コロイドのタイプを考え以下の3つの核種の移動の形態を想定する。

真性コロイドとしての核種の移動

地下水中のコロイドへの核種の可逆吸着による移動

(a) 真性コロイド

本研究では、真性コロイドの生成と移動を表現するために、Mobility 関数を

図 4.1.3-2 に示すように変化させることにより対応するものとする。

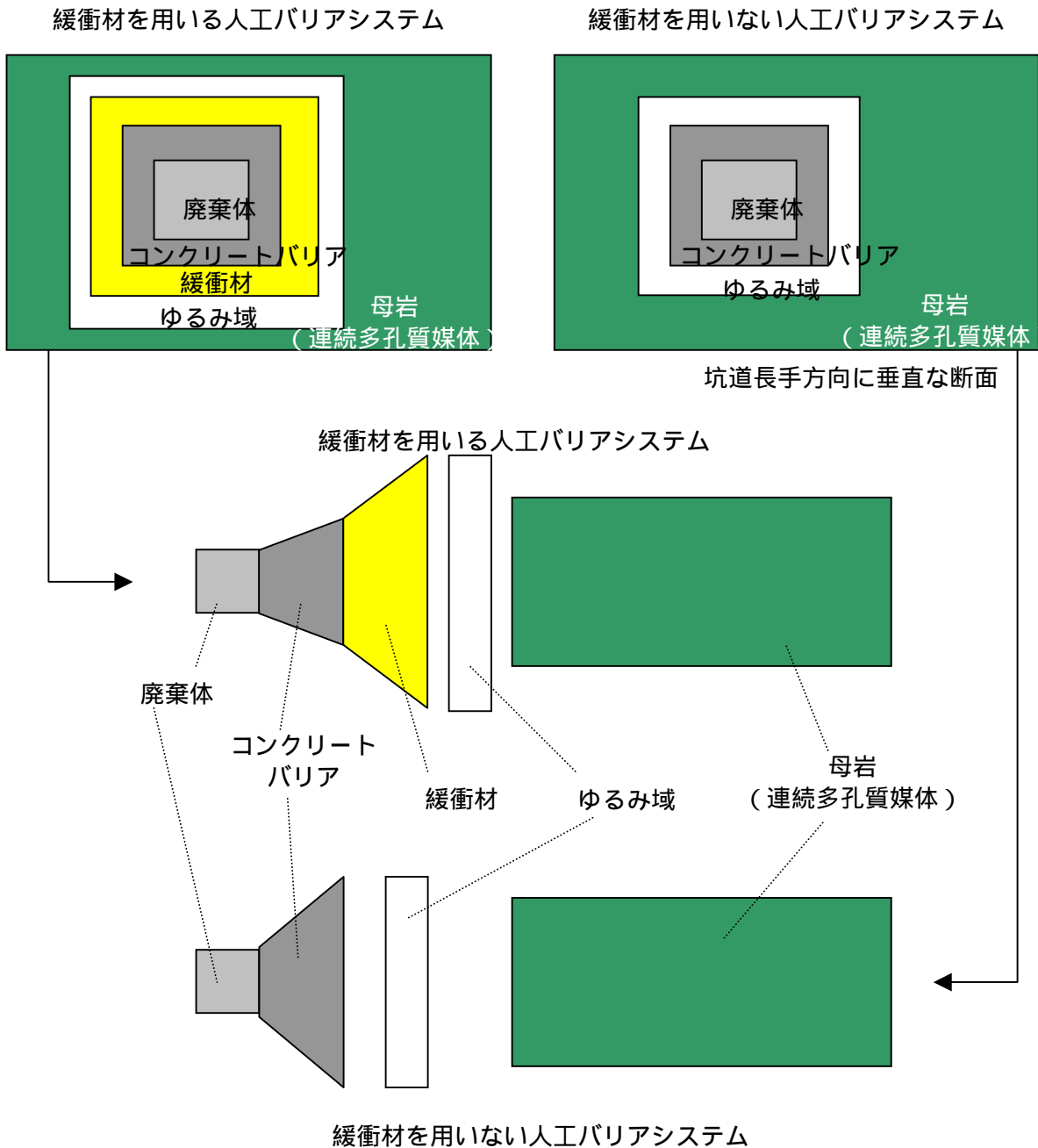
(b) 地下水中のコロイドへの核種の可逆吸着

本研究では、地下水中のコロイドへの吸着（疑似コロイドの生成）による影響は、真性コロイドの影響の評価と同様に、Mobility 関数を操作することにより、取り扱うものとする。

(6) 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、あるいはハル・エンドピース等のジルカロイ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。緩衝材を用いるケースの場合には、図 4.1.3-3 に示す通り、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の経路が想定される。本検討ではこの両方を考慮したモデルを本解析に用いることとする。

また、緩衝材を使用しない処分概念では、通気を妨げる緩衝材がないことから、施設内ボイドの排水の効果のみを評価するものとした。



(\*) 余裕深度処分および地層処分の何れに関しても両方の概念モデルを適用するものとする。

図 4.1.3-1 母岩を多孔質媒体と想定する場合の地層処分  
および余裕深度処分における全体システム構成



表 4.1.3-1 解析ケースの一覧表

廃棄体グループ	グループ 1	グループ 2	グループ 3	グループ 4
地層処分	緩衝材あり	緩衝材あり	緩衝材あり/1GBq/t	緩衝材あり/1GBq/t
			緩衝材あり/100 GBq/t	緩衝材あり/100GBq/t
	緩衝材なし	緩衝材なし	緩衝材なし/1G GBq/t	緩衝材なし/1GBq/t
			緩衝材なし/100GBq/t	緩衝材なし/100GBq/t
余裕深度処分	-	-	緩衝材あり/1GBq/t	緩衝材あり/1GBq/t
			緩衝材あり/100GBq/t	緩衝材あり/100GBq/t
			緩衝材なし/1GBq/t	緩衝材なし/1GBq/t
			緩衝材なし/100GBq/t	緩衝材なし/100GBq/t

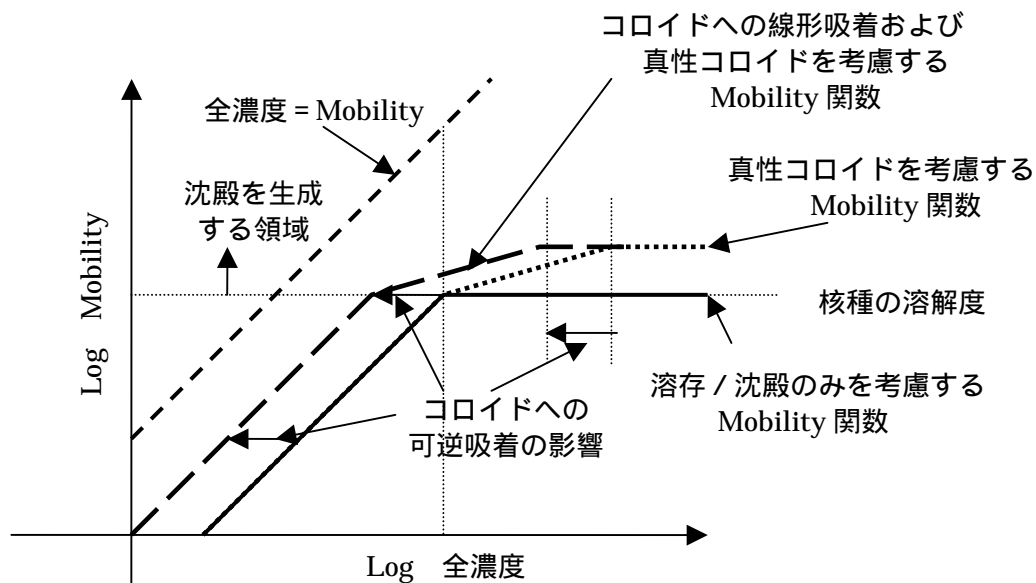


図 4.1.3-2 コロイドへの可逆吸着に対応する Mobility 関数  
(真性コロイド影響も含む)

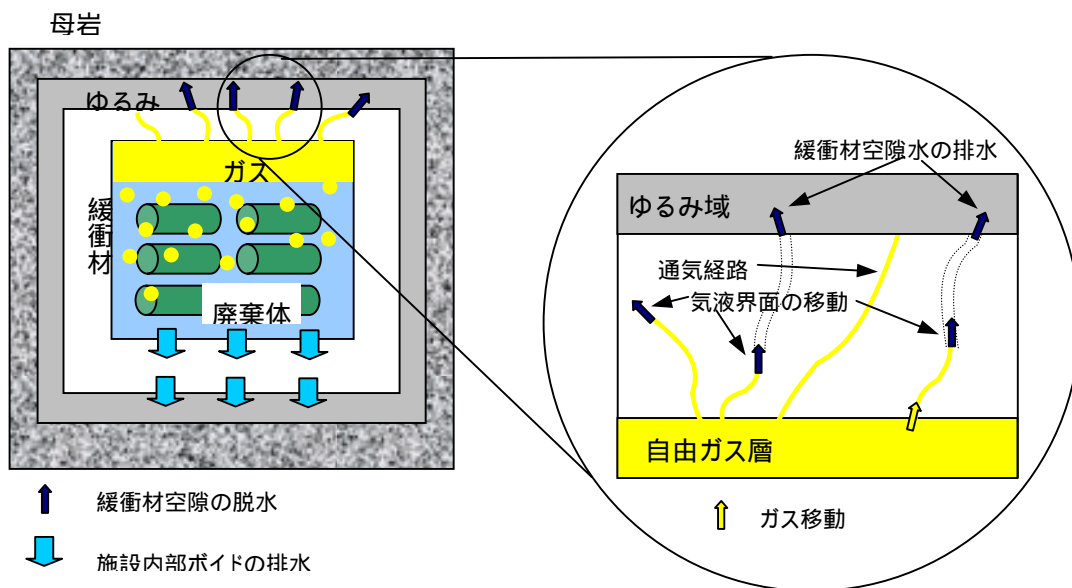


図 4.1.3-3 ガス発生による人工バリア内部地下水排水のモデル

#### 4.1.4 余裕深度処分および地層処分のパラメータの設定

本研究におけるパラメータ設定にあたっては、核燃料サイクル機構殿の専門家にインタビューを実施した。また、地層処分の地質環境については、地形条件、岩種、水理条件、地下水化学環境および核種移行距離の各条件を想定し、それに基づいて地質環境のパラメータ範囲を決定した。

#### 4.1.5 余裕深度処分における感度分析結果

##### (1) 余裕深度処分における核種移行解析結果

余裕深度処分では、以下の4ケースの廃棄物区分の核種移行解析を実施した。

廃棄体グループ3	50GBq/ton 以下の廃棄体を処分する場合
廃棄体グループ4	50GBq/ton 以下の廃棄体を処分する場合
廃棄体グループ3	1 GBq/ton 以下の廃棄体を処分する場合
廃棄体グループ4	1 GBq/ton 以下の廃棄体を処分する場合

##### (a) ベントナイトを用いる処分概念

これらの廃棄体グループでの $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る割合を表 4.1.5-1 にまとめる。グループ3および4の50GBq/tonを超える廃棄体を余裕深度処分する場合の前年度の解析結果と比較すると、本年度解析結果が、より多い割合で $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る結果となっている(前年度報告書参照)。この変動の原因として考えられることは、前年度の解析とは、パラメータの選択範囲が異なることと、今年度の解析では、線量換算係数について、標準的な値(核燃料サイクル開発機構他、2000)を用いたことが大きく影響しているためと考えられる。全域的な解析結果では、どの廃棄体グループにおいても、 $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る解析ケースの割合は50%を超える。特に、グループ3の1GBq/ton以下の廃棄体を処分する場合には、95%以上の割合で $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る。何れの廃棄体グループにおいても基準とする線量を越える原因となりうる核種は、Np-237系列のTh-229であった。これに続き、I-129、Np-237が、 $10 \mu\text{Sv/y}$ を超える原因となっている。

いずれの廃棄体グループにおいても、I-129、C-14に起因する被ばく線量の最大値は、 $10^3$ 年~ $10^4$ 年に出現する。これに対し、Np系列核種による被ばく線量の最大値は、 $10^4$ 年以降となっている。また、被ばく線量の加算値では、グループ3(50GBq/ton, 1GBq/ton)が、I-129およびTh-229の2つの核種によって、最大被ばく線量を与える結果となっている。これに対して、グループ4は、Np系列核種(特に、Th-229)に依存して、最大被ばく線量を与えられる結果となっている。

表 4.1.5-1 余裕深度処分で  $10 \mu\text{Sv/y}$  を下回る割合（緩衝材あり）

余裕深度処分	核種					
	I-129	C-14	Np-237	U-233	Th-229	Total
廃棄体グループ						
グループ3 50GBq/ton	98.4%	99.5%	97.2%	99.8%	77.1%	74.3%
グループ4 50GBq/ton	100.0%	100.0%	91.0%	99.4%	54.5%	53.2%
グループ3 1GBq/ton	99.5%	100.0%	99.9%	100.0%	97.2%	96.5%
グループ4 1GBq/ton	100.0%	100.0%	99.0%	100.0%	89.3%	88.7%

## (b) 緩衝材を用いないケース

緩衝材を用いない処分概念での解析結果を表 4.1.5-2 にまとめる。解析ケースは(a)と同様に、以下の4ケースである。

廃棄体グループ3 50GBq/ton 以下の廃棄体を処分する場合

廃棄体グループ4 50GBq/ton 以下の廃棄体を処分する場合

廃棄体グループ3 1GBq/ton 以下の廃棄体を処分する場合

廃棄体グループ4 1GBq/ton 以下の廃棄体を処分する場合

緩衝材を用いるケースと比較すると、基準を下回るケースの割合は、低下するものとなった。ただし、グループ4 1GBq/ton の場合のように廃棄体の区分によっては割合の変化は小さく、緩衝材の有無により大きな変動が見られない場合もある。

グループ3 (50GBq/ton、1GBq/ton) では、緩衝材を使用するケースに比較して、I-129、C-14、Np-237 単独で  $10 \mu\text{Sv/y}$  を超えるケースが増加している。これに対して、Th-229 によって  $10 \mu\text{Sv/y}$  を越えるケースの割合は、緩衝材を用いるケースに比較して増加している。これは、Np-237 が崩壊し、Th-229 が生成される前に、Np が生物圏へ放出されているためと考えられる。

I-129、C-14 の処分量が少なく Np-237 の処分量が多いグループ4 (50GBq/ton 以上を地層処分とする場合) では、Np-237、Th-229 の SI 値は、緩衝材を用いる場合に比較して低下している。特に、Np-237 の SI 値の低下

は著しく、結果として、緩衝材を用いない場合には、用いた場合に較べて、被ばく線量の合計値は増加することになる。

表 4.1.5-2 余裕深度処分で  $10 \mu\text{Sv/y}$  を下回る割合（緩衝材なし）

余裕深度処分	核種					
	I-129	C-14	Np-237	U-233	Th-229	Total
廃棄体グループ						
グループ 3 50GBq	71.8%	78.5%	82.0%	100.0%	80.5%	43.0%
グループ 4 50GBq	99.9%	99.5%	58.2%	99.9%	48.3%	28.7%
グループ 3 1GBq	84.3%	97.3%	97.6%	100.0%	98.8%	79.4%
グループ 4 1GBq	100.0%	100.0%	92.9%	100.0%	93.5%	87.0%

## (2) 感度分析結果

感度分析による被ばく線量に感度の大きなパラメータの抽出は、SI 法およびムービングバンド法を用いて実施した。主に、本年度開発を行った手法である SI 法による分析を主とするが、本研究で基準線量の目標としている  $10 \mu\text{Sv/y}$  を超える割合が少ない場合（基準線量を下回る割合がほとんどの場合）には、SI 法による感度抽出が難しいことから、ムービングバンド法を併用した。また、SI 法では、感度の大きい順に並べたパラメータのどこまでを抽出すべきかの基準がなく、この手法の適正化は今後の課題となる。

例として、グループ 3 の廃棄体を対象として  $50 \text{GBq/ton}$  の濃度区分値を適用した場合の余裕深度処分の評価について、図 4.1.5-1 にムービングバンド法および SI 法により大きな感度を持つパラメータをまとめる。また、表 4.1.5-3 に SI 法およびムービングバンドで抽出された感度の大きなパラメータの一覧を示す。

各廃棄体グループに共通して、被ばく線量の増加に影響するパラメータは、以下のものであった。

- ・ 天然バリア空隙率
- ・ 天然バリア透水係数
- ・ 動水勾配

表 4.1.5-3 各廃棄体グループでの支配的となる核種と大きな感度を持つパラメータ

緩衝材を用いる場合 (SI 値から、上位 5 つのパラメータを抽出)

	グループ3 50GBq/ton	グループ4 50GBq/ton	グループ3 1Gq/ton	グループ4 1Gq/ton
核種浸出率				
廃棄体劣化後空隙拡散係数				
緩衝材劣化後透水係数				
天然バリア長さ				
天然バリア透水係数				
天然バリア空隙率				
廃棄体健全時の C 分配係数				
母岩の Np の分配係数				
母岩の U の分配係数				
廃棄体での NP コロイド吸着指数				
母岩での NP コロイド吸着指数				
コロイドによる移行速度の上限				
動水勾配				
緩衝材劣化開始時刻				

緩衝材を未使用 (SI 値から、上位 5 つのパラメータを抽出)

	グループ3 50GBq/ton	グループ4 50GBq/ton	グループ3 1Gq/ton	グループ4 1Gq/ton
核種浸出率				
廃棄体劣化後空隙拡散係数				
緩衝材劣化後透水係数	-	-	-	-
天然バリア長さ				
天然バリア透水係数				
天然バリア空隙率				
廃棄体健全時の C 分配係数				
母岩の Np の分配係数				
母岩の U の分配係数				
廃棄体での NP コロイド吸着指数				
母岩での NP コロイド吸着指数				
コロイドによる移行速度の上限				
動水勾配				
緩衝材劣化開始時刻	-	-	-	-

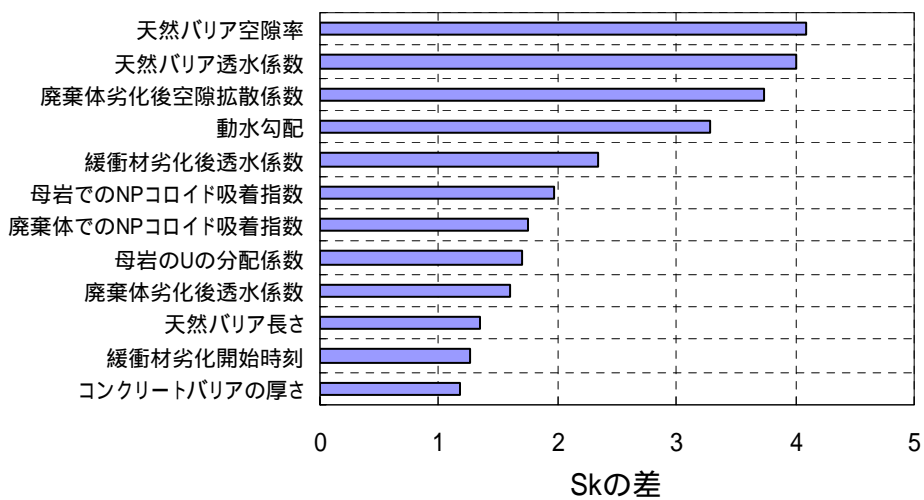
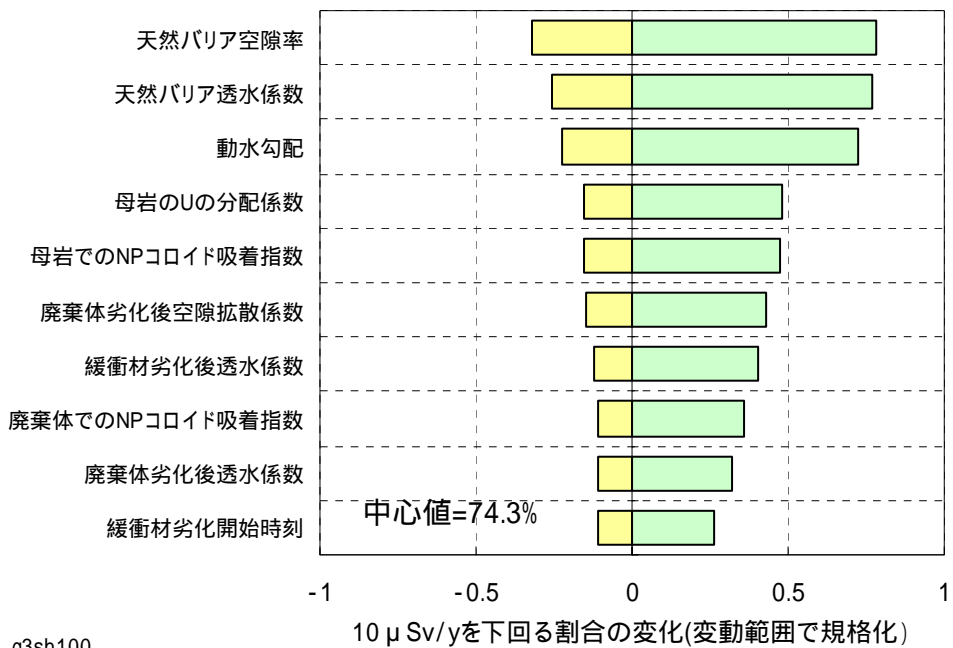


図 4.1.5-1 グループ 3 余裕深度処分の感度分析結果 (50GBq/ton, 緩衝材あり)

## 4.2 十分条件の抽出

4.1 で実施された、感度分析結果に基づき十分条件の網羅的抽出を行う。

十分条件を満たすパラメータの組み合わせは無限に存在し、これをリストまたは図として表すことは困難である。また、十分条件の抽出は、評価すべき処分システムの内容や目標とする線量によって実施すべきである。そのため、本研究では、感度分析のソフトウェアを改良し、目的に則した十分条件の抽出が可能となるよう試みた。

### 4.2.1 感度分析ソフトウェアの改良

ソフトウェアは、以下の機能を達成すべく機能追加を行った。

任意のパラメータについて、パラメータ値の範囲の制限が可能であること。

パラメータ範囲の組み合わせを考慮した確からしさ「SI 値」が算出されること。

この2つの機能により、感度分析結果（のファイル）から、目標とする SI 値を達成するためのパラメータ範囲の組み合わせを抽出することが可能となった。

### 4.2.2 十分条件の抽出例

表 4.2.2-1 にグループ 3 で 50GBq/ton 以上の廃棄体を余裕深度処分する場合の統計的解析の結果から、 $10 \mu\text{Sv/y}$  を下回る割合の変化（SI 値）で、大きな感度を有するパラメータをまとめる。



表 4.2.2-1 SI 法により抽出された大きな感度を有するパラメータ

パラメータ	上昇割合	低下割合
天然バリア空隙率	0.23	0.24
天然バリア透水係数	0.21	0.22
動水勾配	0.15	0.12
廃棄体劣化後空隙拡散係数	0.13	0.06
母岩での Np コロイド吸着指数	0.12	0.15
母岩の U の分配係数	0.1	0.12
緩衝材劣化開始時刻	0.09	0.06
廃棄体での Np コロイド吸着指数	0.09	0.08
廃棄体劣化後透水係数	0.08	0.08
緩衝材劣化後透水係数	0.08	0.05
母岩の Np の分配係数	0.05	0.03
天然バリア長さ	0.05	0.11
高pH時の C 溶解度	0.05	0.01

この中から、上位4つのパラメータを選択し、これらを組み合わせることにより、 $10 \mu\text{Sv/y}$  を下回る割合が 90%（または 95%）を超えるためのパラメータの範囲を策定するものとした。

上位3つのパラメータについては、特に大きな感度を有する。また、この3つを用いて導かれる母岩中の実地下水流速をパラメータとして評価を実施することが可能である。このことから、目標線量を下回る確からしさが、この3つのパラメータの範囲を組み合わせることにより「確からしさが」どの様に変化するかを確認するものとした。また、地下水流速のとり得る範囲と第4位のパラメータである廃棄体劣化後の空隙拡散係数の取りうる範囲によって達成できる確からしさの範囲を調べるものとした。

## (1) パラメータ範囲の抽出方法

パラメータ範囲の抽出は以下の手法により実施するものとした。

### 4つのパラメータからの範囲の抽出（段階的抽出）

4つのパラメータが独立で、 $10\ \mu\text{Sv/y}$  を下回る割合が90%以上の確からしさをもつ各パラメータの範囲。

上位のパラメータに現実的な範囲を想定し、他のパラメータとの組み合わせにより、90%以上の確からしさを達成可能な各パラメータの範囲。

### 実地下水流速を律する3つのパラメータの組み合わせ

SI法の解析パッケージを用い、3つのパラメータについて50000ケースのパラメータ範囲の組み合わせとその確からしさを出力する。

それら組み合わせの中から、目標線量を下回るための確からしさが90または95%以上のケースを抽出し、パラメータ範囲の組み合わせを求める。

### 実地下水流速と廃棄体劣化後拡散係数の組み合わせ

SI法の解析パッケージを用い、実地下水流速および廃棄体劣化後空隙拡散係数について50000ケースのパラメータ範囲の組み合わせとその確からしさを出力する。

それら組み合わせの中から、目標線量を下回るための確からしさが90または95%以上のケースを抽出し、パラメータ範囲の組み合わせを求める。

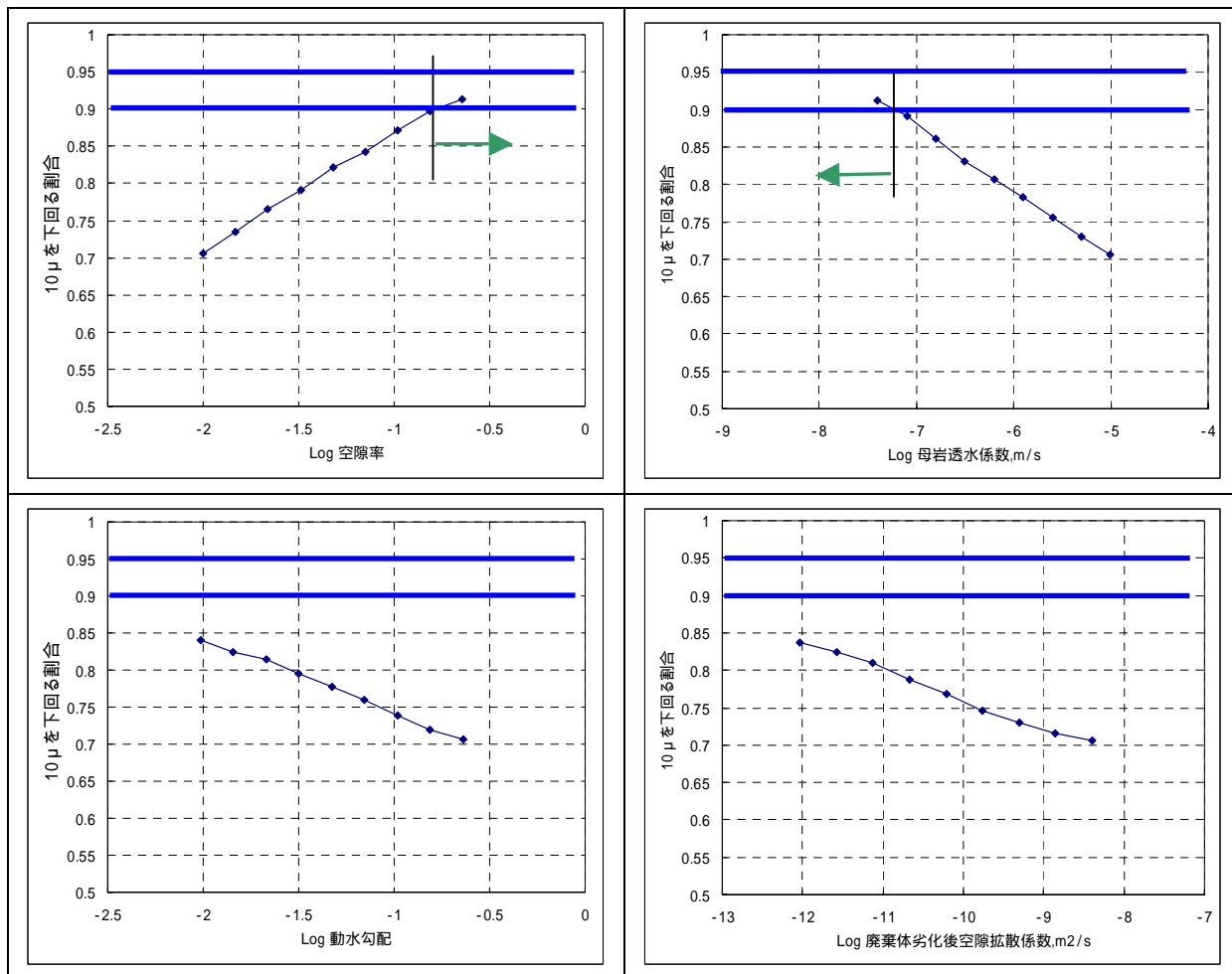
## (2) パラメータ範囲の段階的抽出

SI法により抽出された上位4つのパラメータに関して、パラメータ範囲の変動による目標線量を下回るための確からしさの変化を図4.2.2-1に示す。全域的な解析結果では、約70%が $10\ \mu\text{Sv/y}$ を下回るケースである。各パラメータ単独で範囲を絞り、目標とする線量を下回る確からしさ90%以上を達成するためには、母岩の空隙率または母岩の透水係数を確からしさの上昇する側の狭いパラメータ範囲に限定する必要がある。動水勾配または廃棄体劣化後空隙拡散

係数のみでは、パラメータ範囲を絞り込んでも目標を達成する確からしさ 90% 以上のレベルには到達しない。95%の確からしさレベルには、どの4つパラメータの範囲を絞り込んだとしても、達しなかった。

母岩の空隙率を 0.05 (長谷川ほか、2001) 以上に固定したケースでは、他の3つのパラメータ範囲を限定することにより、90%以上の確からしさを達成できるものの、95%以上の確からしさレベルには、到達できない。

母岩の空隙率および透水係数を固定(透水係数  $1 \times 10^{-7}$  m/s)したケースでは、この2つのパラメータの範囲を限定することにより、動水勾配および廃棄体劣化後空隙拡散係数が全域的な変動範囲にあったとしても、90%以上の確からしさレベルは達成可能であり、95%以上の確からしさレベルを達成するためのパラメータ範囲も、より現実的なものとなっている。表 4.2.2-2 および表 4.2.2-3 に、 $10 \mu\text{Sv/y}$  を下回るための 90%および 95%以上の確からしさを達成するためのパラメータの範囲をまとめる。



— 目標とした 10 μSv/y を下回る割合 ( 90% )

→ 目標を達成するためのパラメータの範囲

図 4.2.2-1 SI 法により抽出された感度の大きなパラメータ単独で  
目標を達成するためのパラメータ範囲

表 4.2.2-2 90%以上の確からしさを達成するためのパラメータ範囲

パラメータ		パラメータ独立		範囲限定		
天然バリア空隙率	-	>0.16	-	>0.050		
天然バリア透水係数	m/s	-	$<6.3 \times 10^{-8}$	$<3.2 \times 10^{-7}$		-
動水勾配	-	-	-	-	<0.013	-
廃棄体劣化後空隙拡散係数	m <sup>2</sup> /s	-	-	-		$<1.6 \times 10^{-12}$

ハッチング部分は、固定したパラメータ

表 4.2.2-3 95%以上の確からしさを達成するためのパラメータ範囲

パラメータ		パラメータ独立	範囲限定	範囲限定	
天然バリア空隙率	-	-	>0.050	>0.050	
天然バリア透水係数	m/s	-	$<3 \times 10^{-8}$	$<1.0 \times 10^{-7}$	
動水勾配	-	-	-	<0.032	-
廃棄体劣化後空隙拡散係数	m <sup>2</sup> /s	-	-	-	$<1.0 \times 10^{-11}$

ハッチング部分は、固定したパラメータ

### 4.3 SI 法を用いる場合の課題

SI 法を用い十分条件を抽出するために、

全域的解析

感度抽出

核種放出率に影響の大きな感度をパラメータの範囲の検討

2 次解析を実施し十分に SI 値の大きなパラメータの組み合わせを設定

決定論解析により、値を決定したいパラメータについて解析

十分条件の提示

の手順で検討を実施した。十分条件の抽出に至るまでの手順は、多くのバリエーションが考えられる。例えば、2 次解析の後、数個の注目するパラメータのみを変動させ、他のパラメータについては、保守側の設定を行う。これにより評価すべきパラメータ空間は狭くなり、少数の解析により目標を下回る組み合わせについての検討が可能になると思われる。

今後、SI 値の数値としての意味合い（90%、95%の確からしさとは何か）を明確にし、判断基準とする SI 値について検討を加える必要がある。

## 5. TRU 核種を含む放射性廃棄物の地層処分の影響等を考慮した場合の他の廃棄物の処分成立性の十分条件の例示的抽出

この検討は、適切な区分に応じた合理的な処分方策の検討に資することを目的としており、スイスおよびフランスにおける処分概念のように地層処分場に高レベル放射性廃棄物と TRU 核種を含む放射性廃棄物が処分される場合を仮定する。

### 5.1 TRU 廃棄物からの影響の想定

前年度の研究において、TRU 廃棄物の特徴から、アルカリプルームの影響が示唆されている。本研究では、以下の 2 つの想定を行い、高レベル放射性廃棄物からの核種移行解析を実施するものとした。

#### 人工バリアへの影響

アルカリプルームが人工バリアへ達した場合の影響としては、オーバーパック孔食に伴う、オーバーパック早期の開口を想定した、高温時のガラス固化体の溶解を想定する。

#### 天然バリアへの影響

天然バリアへのアルカリプルームの影響としては、核種移行経路の母岩とアルカリプルームの反応に伴う母岩の透水性の変化が想定される。母岩とアルカリプルームの反応では、鉱物の溶解および沈殿が予想されるが、溶解する部分の透水性の上昇および沈殿部での透水性の低下を考慮すると、母岩の平均的な透水性変化の影響を設定することは難しいが、透水係数の不均質性が増大し、透水性が大きくなるものと仮定し解析を行うものとする。

#### 5.1.1 解析ケースの設定

天然バリアの条件としては、堆積岩地質環境、深度 500mでの処分を想定する。表 5.1.1-1 に標準としたパラメータをまとめる。また、アルカリプルーム影響による人工バリアで変動するパラメータを表 5.1.1-2 にまとめる。

天然バリアの不均質性の評価においては、平行するマルチチャンネルでの評価を行うものとした。変動条件を表 5.1.1-3 にまとめる。

表 5.1.1-1 堆積岩地層における高レベル放射性廃棄物の核種移行パラメータの設定値

## 人工バリア

パラメータ	設定値
緩衝材厚さ	40 c m
緩み域厚さ	2.5m 坑道直径 5m、廃棄体ピッチ 4m
緩み域透水係数	母岩健全部 × 10 倍
緩み域流量	0.48m <sup>3</sup> /y
オーバーパック開口まで時間	67500 年
ガラス溶解時間	30 でのガラス溶解度を想定 4 x 10 <sup>-5</sup> g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> のガラス溶解速度 ガラス溶解時間は 1750000 年
分配係数、溶解度、拡散係数	第 2 次取りまとめと同じ (表-2~5 参照)

## 天然バリア

パラメータ	設定値
処分対象層移行距離	100m
処分対象層透水係数	1 x 10 <sup>-8</sup> m/s
処分対象層での地下水流速	5 x 10 <sup>-3</sup> m/y
処分対象層での分配係数、溶解度、拡散係数	第 2 次取りまとめ泥質・凝灰質岩と同じ (表 1~4 参照)
処分対象層空隙率	0.1
上部層移行距離	750m
上部層透水係数	5 x 10 <sup>-8</sup> m/s
上部層での地下水流速	2.5 x 10 <sup>-2</sup> m/y
上部層での分配係数、溶解度、拡散係数	第 2 次取りまとめ砂質岩と同じ
上部層空隙率	0.05

表 5.1.1-2 人工バリアへの TRU 廃棄物の影響ケース

## 人工バリア

パラメータ	設定値
オーバーパック開口まで時間	50 年
ガラス溶解時間	オーバーパック開口後 150 年間 (処分後 50~200 年) 100 でのガラス溶解速度 8 x 10 <sup>-3</sup> g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> 処分後 200 年~ 30 でのガラス溶解度 4 x 10 <sup>-5</sup> g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
他の条件：基本ケースと同じ	



表 5.1.1-3 天然バリアへの TRU 放射性廃棄物影響ケース

## 人工バリア

パラメータ	設定値
緩み域流量	母岩流速の算術平均値を用い設定 標準偏差 0.4 の場合 流量 1.44m <sup>3</sup> /y 標準偏差 1.2 の場合 流量 58.6m <sup>3</sup> /y

## 天然バリア

パラメータ	設定値
移行距離	100m
地下水流速	<b>対数正規分布を仮定</b> 対数平均値： $1 \times 10^{-2}$ m/y  標準偏差： 0.4 (ケース 3-1) 平均値から $\pm 3$ の範囲を想定 流速算術平均値： $1.5 \times 10^{-2}$ m/y  標準偏差： 1.2 (ケース 3-2) 平均値から $\pm 5$ 桁の範囲で設定 流速算術平均値： $6.1 \times 10^{-1}$ m/y
解析チャンネル数	10 本

## 5.1.2 解析結果

5.1.1 で示す条件に従い、決定論的な解析を実施した。

人工バリアのみの劣化を考慮する場合の核種移行解析結果は、標準とするケースと大きく異なることはなく、Se-79 が被ばく線量の最大値に支配的となった。

天然バリア劣化ケースでは、劣化の程度により核種移行解析結果が大きく異なり、母岩透水係数の標準偏差（対数値の標準偏差）が大きくなる場合には、核種放出率は 2 桁程度上昇している。標準偏差の大小によらず、被ばく線量に支配的となる核種は Th-229 であった。

人工バリア劣化ケースと天然バリア劣化ケースを複合させた場合、標準偏差が 0.4 では、人工バリア劣化の影響として核種の放出が開始される時刻が早まるものの（Se-79、Cs-135）最大線量は変化しない。これに対して、標準偏差 1.2 の場合には、比較的半減期の短い Cs-137 が被ばく線量に寄与している。

## 5.2 処分成立性の十分条件

図 5.2-1 に、検討を行ったケースの最大被ばく線量値を比較する。高レベル放射性廃棄物の処分成立性の条件を  $10 \mu\text{Sv/y}$  とすると、人工バリアの劣化よりも、天然バリアの劣化の程度がより重要となるものと予想される。また、人工バリアおよび天然バリアの劣化が複合するケースでは、Cs-137 等の短半減期・高毒性の影響を避けることが重要となり、アルカリ環境下でのオーバーパックの開口が 300 年以上、または、300 年間アルカリ環境とならないことが望まれる。

処分成立の条件としては、以下の条件が考えられる。

- ・ 母岩劣化による母岩透水係数の不均質性の程度が標準偏差で 0.4 以下

また、処分の成立性の条件として評価期間が設けられる場合を想定する（仮に 10 万年とする）と、人工バリアが健全で母岩透水係数の不均質性が 1.2 に増加する場合にも、10 万年以前に目標線量を超えることはない。ただし、これに、オーバーパックの早期開口が重複するケースでは、Cs-137 の影響により、目標を超える線量となった。Cs-137 の影響が顕著な期間でかつ温度の高い条件の継続は、約 300 年程度と予想されることから、処分成立の条件としては、以下の条件が考えられる。

- ・ アルカリ環境下でのオーバーパックの開口が 300 年以上、または、300 年間アルカリ環境とならないこと

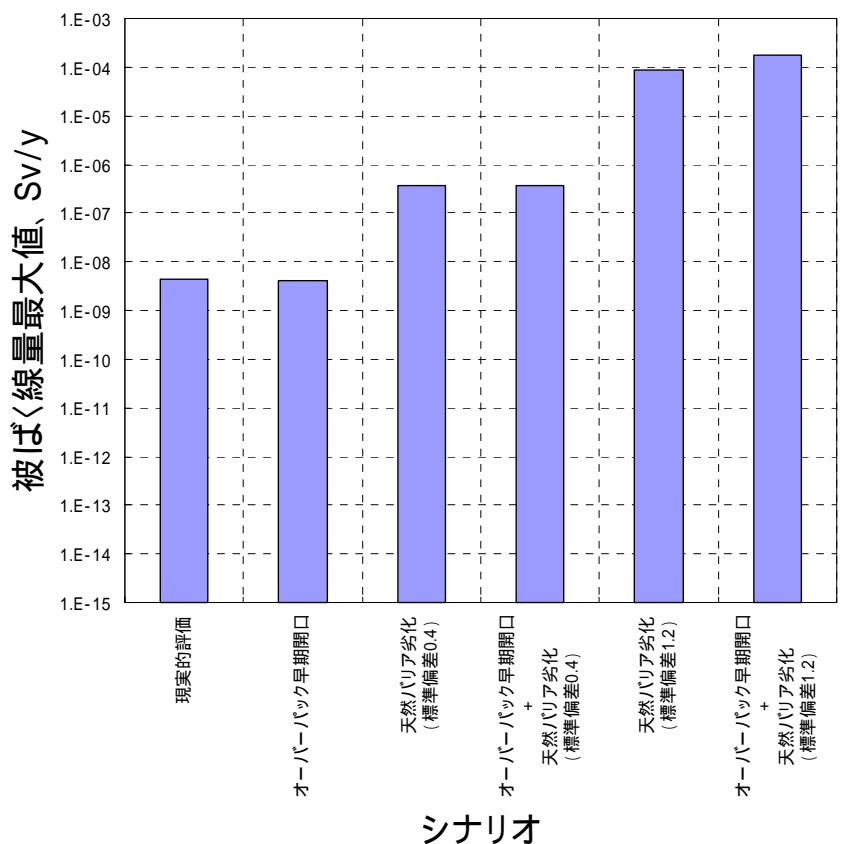


図 5.2-1 TRU 廃棄物の影響による高レベル放射性廃棄物からの核種放出率の変化の比較

## 6. おわりに

今年度の研究では、感度解析の手法としてムービングバンド法による感度解析手法に加え、SI 法を開発し、十分条件の探索に用いた。また、統計的データ生成のステップから感度解析に至るステップまでのデータの流れを検討し、解析体系をまとめた。

コンクリートピット処分および余裕深度処分、地層処分を想定し、濃度上限値で分類したTRU廃棄物を対象として、核種移行解析を実施した。これに上記ツールを用い感度分析を行い、安全評価上重要となる感度の大きなパラメータを抽出するとともに十分条件を探索する手法を確立した。

SI 法に関しては、今年度、新たに導入した感度分析手法であるが、この有用性が確認されたことから、今後、同手法の熟成が望まれる。また、今年度の解析対象とした、多孔質媒体以外の地質環境である、亀裂性媒体、亀裂と透水性多孔質媒体のハイブリットな地質環境のモデル化と、それら地質環境でのTRU廃棄物の処分を想定した感度解析、分析を実施し、包括的にTRU廃棄物処分の安全性とこれら廃棄物を処分する場合の十分条件を確認する必要がある。