

知見レベルに基づく不確実性解析の HLW への適用例

加藤 和之*

高レベル廃棄物の地層処分では決定論的に決めることができない因子を含まざるを得ない。それらは、タイプ 1 の不確実性 (variability) とタイプ 2 の不確実性 (ignorance) に分けられ、前者がプロセスや事象が確率的に生起することによるのに対し、後者は、現象自体は確定的に生じるものの、評価に必要な情報が不足していることに起因するわれわれの知識の不確実性である。モデルの選択やパラメータ値の設定という評価における判断において、多くの場合は両者が混在している。安全評価においては、variability と ignorance の影響を統合的に評価することが重要なことは明らかである。

本研究では、タイプ 1 と 2 の不確実性を、それぞれ、確率論およびファジー理論を用いて統合的に取り扱う手法を開発し、高レベル廃棄物地層処分への適用性を検討した。タイプ 2 に対しては、専門家へのインタビューを通じてファジーメンバーシップ関数として定義し、タイプ 1 に対しては、既存のデータセットを基に確率密度関数として定義した。例題演習の結果、本手法の適用性が明らかとなり、専門家の意見に基づく不確実性の定量化および確からしさのレベルに応じた評価結果を示すことができた。さらに、開発した感度分析手法により、安全評価結果の不確実性を低減するために重要なパラメータを抽出できることを示した。これらの情報は、意志決定プロセスを支援するとともに、潜在被ばくに対する放射線防護を最適化するための処分システム開発の方向性を示すことに活用可能である。

Keywords:

Safety assessment for geological disposal of high level radioactive waste inevitably involves factors that cannot be specified in a deterministic manner. These are namely:

- (i) "variability" that arises from stochastic nature of the processes and features considered, e.g., distribution of canister corrosion times and spatial heterogeneity of a host geological formation;
- (ii) "ignorance" due to incomplete or imprecise knowledge of the processes and conditions expected in the future, e.g., uncertainty in the estimation of solubilities and sorption coefficients for important nuclides.

In many cases, a decision in assessment, e.g., selection among model options or determination of a parameter value, is subjected to both variability and ignorance in a combined form. It is clearly important to evaluate both influences of variability and ignorance on the result of a safety assessment in a consistent manner.

We developed a unified methodology to handle variability and ignorance by using probabilistic and possibilistic techniques respectively. The methodology has been applied to safety assessment of geological disposal of high level radioactive waste. Uncertainties associated with scenarios, models and parameters were defined in terms of fuzzy membership functions derived through a series of interviews to the experts while variability was formulated by means of probability density functions (pdfs) based on available data set. The exercise demonstrated applicability of the new methodology and, in particular, its advantage in quantifying uncertainties based on expert's opinion and in providing information on dependence of assessment result on the level of conservatism. In addition, it was also shown that sensitivity analysis could identify key parameters in reducing uncertainties associated with the overall assessment. The above information can be used to support the judgment process and guide the process of disposal system development in optimization of protection against potential exposure.

Keywords:

1 はじめに

地層処分の研究開発は、1976 年度に開始され、国の重要プロジェクトとして、動力炉・核燃料開発事業団（現核燃料サイクル開発機構）を中核に、関係研究機関が協力して研究が進められてきた。これらの成果は、核燃料サイクル開発機構により 1999 年 11 月に第 2 次とりまとめ[1]として提出され、高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性が示された。その後、平成 12 年 6 月、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」が公布され、高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けた枠組みが整備され、これを受けて、同年 10 月には、通商産業大臣の認可を得て「原子力発電環境整備機構」が設立され、処分事業の主体的役割を果たすこととなった。第 2 次とりまとめの提出により、地層処分に関する設計手法はほぼ確立したものと考えられ、今後は地層処分場の安全評価・安全審査はどうあるべきかの議

論が重要になっていくものとする。その際に、地層処分は今までに経験のない時間スケールにおよぶ安全確保策であるため、不確実性を把握しつつ対応していくことが重要である。

高レベル放射性廃棄物地層処分に関する安全評価には、決定論的に特定できない因子を含むことを避けられない。これらの不確実性は、以下の 2 つのタイプに分けられる [2,3]。

(i) タイプ 1 の不確実性

現象が確率的に生起することによる評価の不確実性であり、「variability」あるいは「aleatory uncertainty」と呼ばれるもので、オーバーパックの破損時期、天然バリアの空間的不均質性等が例としてあげられる。

(ii) タイプ 2 の不確実性

将来に予測されるプロセスや条件についての知識が不十分あるいは不正確であることに起因する不確実性であり、「ignorance」あるいは「epistemic uncertainty」と呼ばれる。地下深部環境での核種の特定岩体への吸着、あるいは溶解度等が例としてあげられる。

上記のように、タイプ 1 は現象の属性であるのに対し、

Application of Intelligence Based Uncertainty Analysis for HLW Disposal, by: Kazuyuki Kato (Kato.Kazuyuki@tepcoco.jp)

* 東京電力（株）技術開発研究所 R&D Center, Tokyo Electric Power Company

〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎 4-1

タイプ2は知見の属性であり、後者の不確実性の表現や取り扱いにおいては知見レベルに応じた手法が必要である。地層処分においては、地下深部における超長期の評価が必要とされることから、安全評価においてはタイプ2の不確実性を適切に取り扱うことが重要である。本研究では、文献[3]において有望とされているファジー理論を、実際の安全評価に適用し、その適用性および課題について検討した。

2 不確実性解析手法の検討

地層処分においては、モデルオプションの選択やパラメータ値の設定において、タイプ1とタイプ2の両者の不確実性を考慮しなければならない場合が多い。天然バリアにおける透水係数を例にすると、空間的不均質性に基づくタイプ1の不確実性に対応する確率分布に加えて、その平均値や分散については水理データが限られていることやソフトデータ[4]を含むことによる知識の不足に起因するタイプ2の不確実性も含むことになる。したがって、安全評価においてはタイプ1, 2の不確実性の影響を統合的に評価することが重要となる。

従来の不確実性解析では、一つは Bounding Analysis と呼ばれる、十分な保守性を持った決定論的な評価が行われてきた。これは、レファレンスケースおよびこれに対する“もしこうだったら (What if)”形式の代替的解析ケースの設定によるものであり、各解析ケースの現象論的な意味を詳しく分析することが可能な一方、評価の網羅性や保守性の保証等の課題がある。

もう一つの方法は確率論的評価であり、歴史的には、既に数十年前から確率論的安全評価 (PSA) が主に原子炉の安全評価を目的に開発されてきており、自然な流れとして PSA が地層処分の安全評価に適用されてきた。タイプ1の不確実性に関しては、対象とするプロセスが出現頻度に基づく確率論で記述されるべき性質を持つため、PSA は至極妥当な手法である。しかし、不確実性を主観確率分布で表現した場合、そのパラメータ値の分布は、計測可能な頻度とは関係なく、知識の不足に対応する専門家の判断に対応したものと考えられる。このような主観確率分布をタイプ2の不確実性に適用した場合には下記のような問題点があるとされている。

(i) リスク希釈

不確実性を大きく見積もった場合、期待値として定義したリスク (例えば年間被ばく線量) は低減し、保守的に不確実性を見積もることにより評価結果は非安全側になる。

(ii) 概念的な不確実性の取り扱い

モデル不確実性やシナリオ不確実性は、包含/排他関係の定義が難しい場合には集合論的に扱うことは不可能である。さらに、全空間が既知でない場合に個々のオプションやシナリオに確率を付加しても、新たなオプションやシナリオの出現によって確率が影響を受けてしまうという

ことであり、確率の総和が1であることが保証されていない。

(iii) 不確実因子間の相関の取り扱い

PSA では事象やプロセスの相関を適切に取り扱わないと評価結果に重要な影響を与える。しかし、タイプ2の不確実性に関してはこの扱いは非常に難しい。

上記のような考察に基づき、タイプ2の不確実性を適切に評価する代替手法開発の要請を受け、EC の MUNVAR プロジェクト[3]では、シナリオ、モデルやパラメータの選択等に関して、不確実性存在下での意志決定の際の、確信の程度をファジーメンバーシップにより表現する手法が提案されている。

3 解析方法

3.1 解析ツールの整備

タイプ1に対する確率論的取り扱い[5]、およびタイプ2に関する確信度に応じた取り扱い[3]は個々には検討されている。本研究は、両者を統合的に取り扱えるハイブリッド型のフレームワークを構築した。安全評価の入力パラメータが上記の2種類あることに対応するために、プリ/ポストプロセッサとして FANTASY (Fuzzy ANd probabilistic Transport Analysis SYstem) を開発した。FANTASY は、確率密度分布関数あるいはファジーメンバーシップ関数で表現された入力データセットから、各々を統計的にサンプリングするプリプロセッサ機能と、核種移行解析の結果のファジー算法による処理、グラフ表示、期待値の算出等のポストプロセッサ機能を有する。FANTASY は核種移行解析コード MENTOR[6]と組み合わせて使用した。

MENTOR は、計算効率を向上させるために、二重空隙媒体 (亀裂状媒体) 部分の支配方程式を数値的 Laplace 変換、その他の全ての部分を有限差分法によって解法する。このため、二重空隙部分については支配方程式の線形性 (つまり、核種の化学形態変化としては線形吸着のみが考慮され、溶解度制限は適用されない) および全てのパラメータが時間的に一定であることが求められる。他方、他の全ての部分では非線形過程 (核種の溶解・沈殿平衡、およびラングミュア型非線形吸着) を考慮し、かつ、ほとんどの主要パラメータを時間的に変化させることが可能である。本研究では多孔質媒体モデルが適用可能な堆積岩を仮定するため、MENTOR は環境条件の変遷による様々なシナリオを取り扱うことが可能である。

なお、生物圏については第2次取りまとめ[1]においても、国際研究プロジェクトである BIOMASS において設定されたリファレンスモデルに基づき、コンパートメント型の生物圏中核種移行および被ばく解析モデルである AMBER を用いた計算により各核種の被ばく線量換算係数が設定されており、MENTOR の解析ではこの被ばく線量換算係数によって生物圏の効果が表現されている。

3.2 例題演習

本手法の適用性を検討するための例題演習では下記の処分システムを想定した。

- 地質環境条件等
 - 岩種 / サイト： 堆積岩 / 平野部
 - 処分場深度： 500m (核種移行距離は 100m および 1000m を想定)
 - 地下水条件： 天水起源, 高 pH 型地下水
- 人工バリア条件等
 - 設置方式等： 水平坑道横置き (TBM 掘削)
 - 支保： 鉄筋コンクリートセグメント (モルタル厚は 0.1m)
 - オーバーバック： 炭素鋼製, 厚さ 0.19m
 - 緩衝材： クニゲル V1 (80%), けい砂 (20%) の混合物
厚さ 0.4m 緩衝材周囲に合計で 0.05m のすき間
- その他
 - 評価対象核種： Se-79, Cs-135, Cs-137, Np-237, U-233, Th-229

本研究では, この処分システムに対する入力パラメータを専門家へのインタビューにより設定した。同様の手法は, 放射性廃棄物処分性能評価研究以外の分野においては, 専門家の知識, 経験を効果的に活用するための方法として以前から利用されている。そこで, 今回の検討ではプラントの安全評価審査である HAZOP(Hazard & Operability Study), およびエキスパートシステム (専門家システム) 構築におけるインタビュー方法を参照した。

タイプ2の不確実性を有するパラメータの設定においては, ファジーメンバーシップと呼ばれる「確からしさの尺度」を用いた。メンバーシップ関数は連続的であっても構わないが, ガイドラインとしていくつかの確からしさレベルをあらかじめ設定することにより, 結果の解釈を容易にすることができる。この際に, メンバーシップのレベルをあまりにも細かく設定すると, 全ての分野の専門家に共有されがたいため, Table 1 に示す, 4 つの段階を設定してインタビューに用いることにした。

Table 1 Definition of fuzzy membership

Membership	Plausibility
1.0	Must be considered
0.5	Should be considered
0.1	Could be considered
0	Need not be considered

一般の意識調査や意見聴取の取りまとめでは統計的な手法が通常有効と考えられているが, 専門家の知見を集約し, その結果をメンバーシップ関数として表現するためには, 以下の点に留意する必要がある。

- 専門家は, 各々の専門分野に関して何ほどの程度不確かかを知っている。したがって, 各専門家が統計的な処理を経ることなく自身でメンバーシップ関数として不確実性を定義することに意味がある。
- 一般的に, 特定分野の専門家の母集団は小さく, 回帰分析等の統計的処理には適さない。また, 個々の異なる理論や概念に基づくデータを画一的に処理しても意味がない。

しかしながら, 同時に複数の専門家が同一の不確実要因について, それぞれ異なる意見を持っていた場合, これら複数の意見を統合して全体としての不確実性を定義する方法がなければならない。本検討では, 不確実性を過小評価しない方法を優先させることとし, パラメータ値毎にメンバーシップ関数を集約する際には, 最大値をとって包絡線としてグループ全体の意見とした。Fig.1 にインタビューによって得られるメンバーシップ関数と, 2 人の専門家の意見を集約するイメージを示す。

専門家にインタビューした核種移行解析のための入力パラメータは下記のとおりである。

- オーバーバック腐食速度 (腐食代から閉じ込め時間に換算)
- ガラス溶解時間
- 緩衝材: 実効拡散係数, 実効厚さ, 透水係数
- 掘削影響領域: 領域の大きさ, 領域中の流速増倍比率
- コンクリート影響: Na および K が空隙水化学を支配する期間 の長さ, ポルトランライトが空隙水化学を支配する期間 の長さ
- 母岩: 透水係数対数平均値, 透水係数対数標準偏差, 実効空隙率, 動水勾配, 分散長

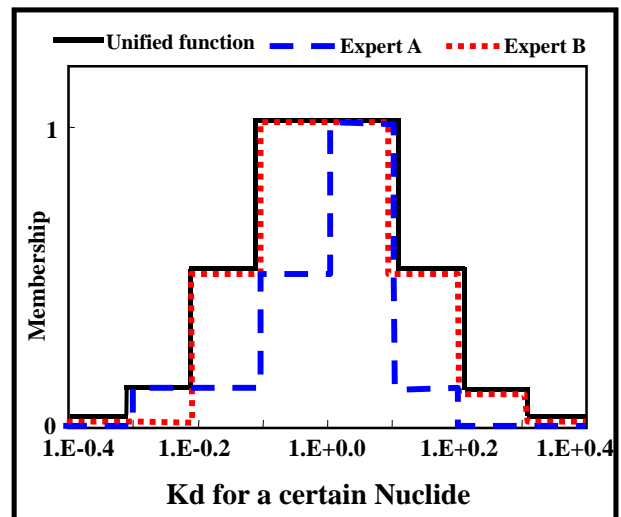


Fig.1 Example of fuzzy membership function

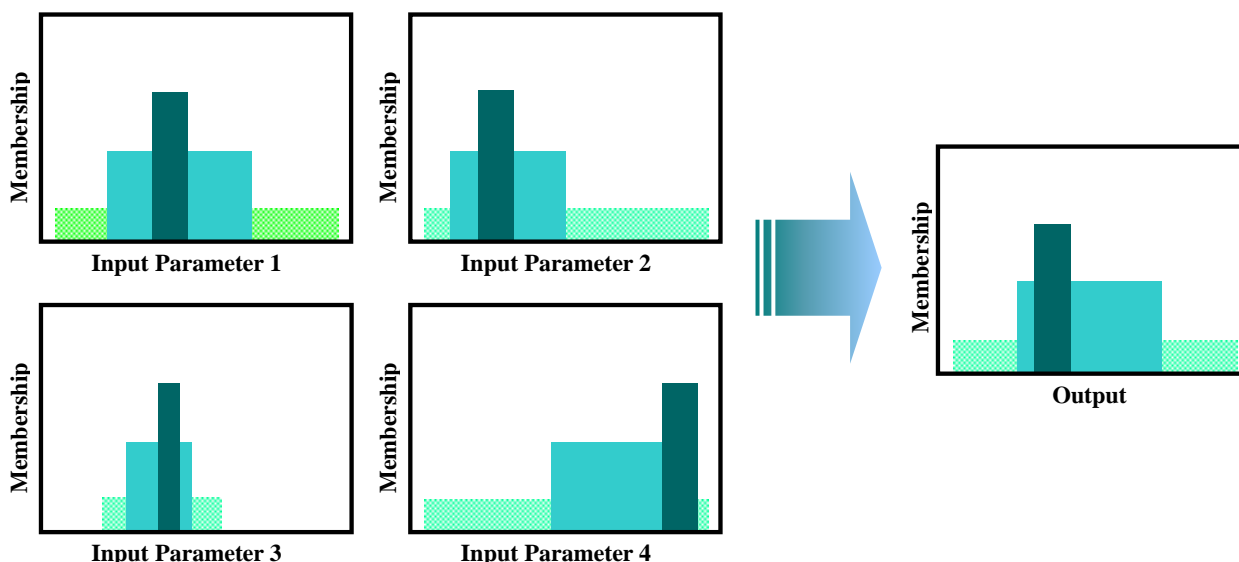


Fig.2 Nested intervals in fuzzy arithmetic

- 溶解度：緩衝材中 (Np,U,Th,Se) , 母岩中 (Np,U,Th)
- 分配係数：緩衝材中 (Np,U,Th,Se,Cs) , 母岩中 (Np,U,Th , Se,Cs)
- 希釈水量：現在の河川水量および井戸水揚水量が妥当な期間
- 被ばく換算係数：現在の河川水量に対して (Np,U,Th,Se , Cs) , 将来の河川水量に対して (Np,U,Th,Se,Cs)

なお、上記において、溶解度および分配係数に関しては、コンクリート影響に関して、期間 および と、ポルトランドライト枯渇後の期間 に対して、それぞれ設定した。核種移行解析においては期間毎に対応する入力パラメータを用いた解析を実施した。なお、インタビューによるパラメータ設定における専門家は、オーバーバック、緩衝材、水理、化学、および生物圏の5分野に分けて、各分野2名にご協力いただいた。

3.3 解析フロー

ファジー理論に基づいて不確実性解析を行う場合の最大の利点は、Min-Max ルールを用いることにより、入力(シナリオ、モデルおよびパラメータ値)に対する「確からしさ」のレベルが全く質を変えることなく解析結果に受け継がれるという点であり、次式で表される。

$$\mu(y - \sigma/2; y + \sigma/2) = \text{Max}_{\{x^i\}} \{ \text{Min}_j [\mu(x_j^i)] \}, j = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

$$x^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i) \mid y - \sigma/2 \leq f(x^i) \leq y + \sigma/2$$

ここで、 x は不確実性を有するパラメータに対する入力値のベクトルであり、 $y = f(x)$ はその出力であり、 x に対応する放出率あるいは線量率である。 μ は入力値 x あるいは出力値 y のファジーメンバーシップ関数を表す。

ファジー算法のこの性質は Fig.2 に示すように、Nested set あるいは Nested interval と呼ばれる。この性質を用いれば、メンバーシップは必ずしも数値とする必要はなく、定

性的なレベル等、任意の全順序集合であればよい。逆に言えば、メンバーシップの数値には順序以上の意味は無いことに注意が必要である。

詳細な解析手順は別報[7]に譲るが、例題演習においては、不確実性をタイプ 1, 2 に分類し、それぞれ確率論およびファジー理論に基づく手法を用いるため、Fig.3 に示すような複合的なフローとなる。まず、タイプ 2 の不確実性に対応するパラメータの数値をモンテカルロ法によりサンプリングし(2000 ケース)、次に、これらのパラメータについてサンプリングされた数値を固定した状態でタイプ 1 の不確実性に対応するパラメータ値を複数サンプリング(5 ケース)する。この操作を多数繰り返すことによって、多数の(10000 ケース)パラメータセットが設定される。

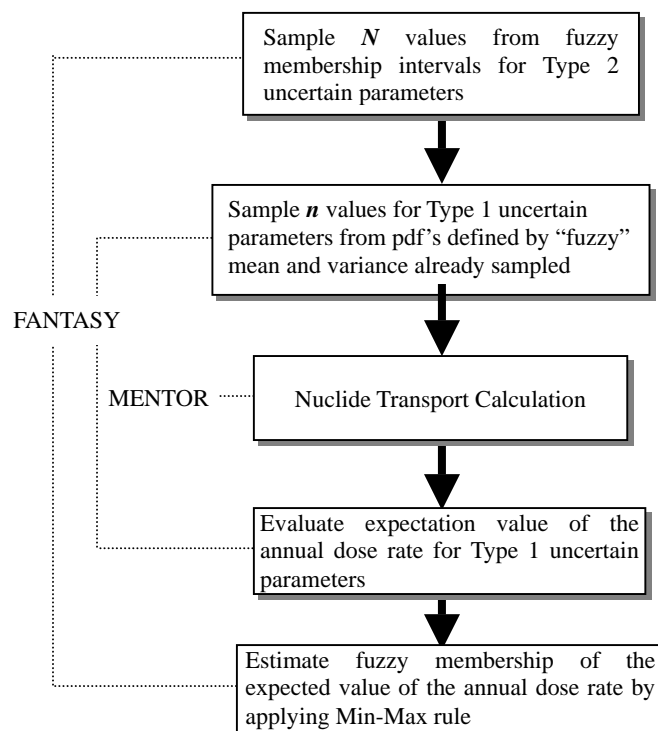


Fig.3 Dual sampling scheme of hybrid probabilistic and possibilistic safety assessment

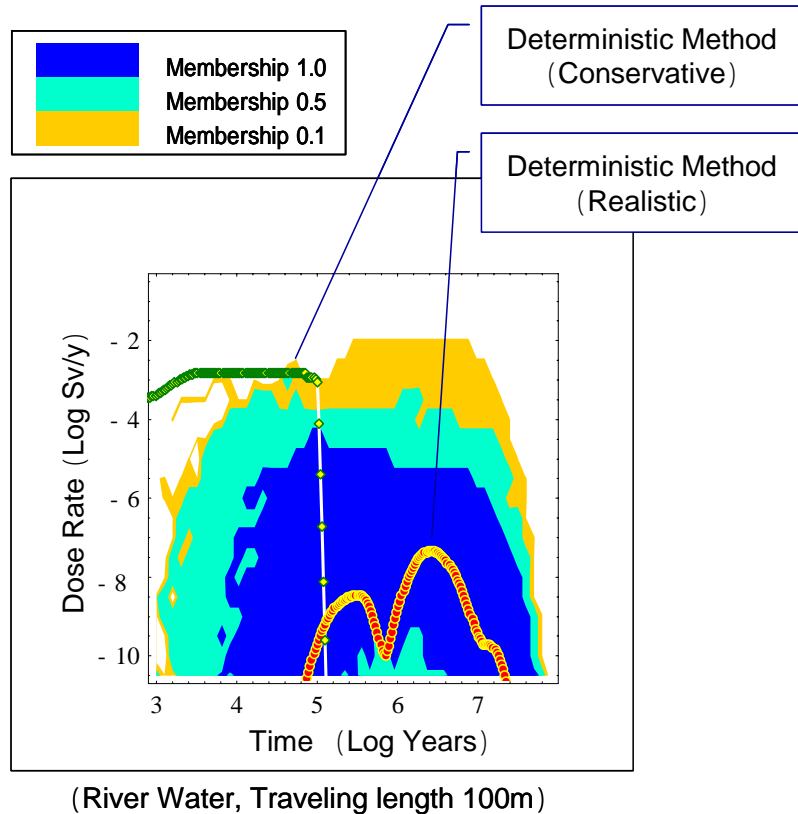


Fig.4 Example of safety assessment considering the degree of belief

次に、各ケースに対して核種移行解析を実施した後、まず、タイプ2についてのサンプル毎に、それぞれの下位に位置する複数のタイプ1のサンプルに対する解析結果から確率論的な期待値を算出する（2000 ケース）。そして最後に、タイプ2についてのサンプル毎に、こうして算出された確率論的期待値について、ファジー算法を適用することによって、Fig.4 に示すような、出力（被ばく線量）のメンバーシップ分布を計算する。Fig.4 には専門家に同時にインタビューした各パラメータの最良推定値（現実的）および保守的の設定値（保守的）に対する決定論的評価の結果もあわせて示してある。現実的評価結果は、最も確からしさの高いレベルの範囲に入っているが、必ずしも当該範囲の上限に近い結果とはなっていない。また、保守的評価結果は、初期の不確実性は十分に Bounding しているが、パラメータ値の組合せによっては生じ得る数百万年後のピーク値は包含できていない。これはソースタームからの核種漏洩が速く、比較的初期に核種放出が終了してしまうために長期間後に生じ得る不確実性の影響を受けないことによる。これは、前述の保守的な決定論的評価における、保守性の保証が難しいことを示す一例といえる。

なお、本研究では一次評価結果から重要なパラメータを抽出し、そのパラメータに対して専門家へのインタビューを再度実施し、上記のフローを繰り返し実施した。一次評価では本手法の適用性を判断し、課題を抽出することを主目的とし、二次評価においては、一次評価で抽出された課題に対して手法を改善することを目的とした。以上で述べ

た、本研究における例題演習のフローを Fig.5 に示す。

4 解析結果の評価

非決定論的な解析の特徴は非常に多くの解析を実施することにより、網羅性を担保することにある。一方、それ故に現象論的な解釈が困難であり、膨大な解析結果に対する有効な分析手法が必要となる。核種移行解析は、入力パラメータ数が多く、非線形性の強い感度構造を持つために、通常の回帰分析では限界があり、より精度の高い回帰モデルを得ようとする解析サンプル数をさらに増やす必要が生じ、効率的ではない。そこで、本研究ではこのような感度構造を有する問題に対して適用性の高いムービングバンド法を用いた。

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（被ばく線量）に影響を及ぼしているかを定量化する手法である。

- (1) K 個の出力を大きい順番に並べ直し、さらに、これを k ($k \ll K$) 個の互いに重複しないバンドに分割する。
- (2) 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値を計算する。
- (3) 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 s_i^j を次式によって評価する。

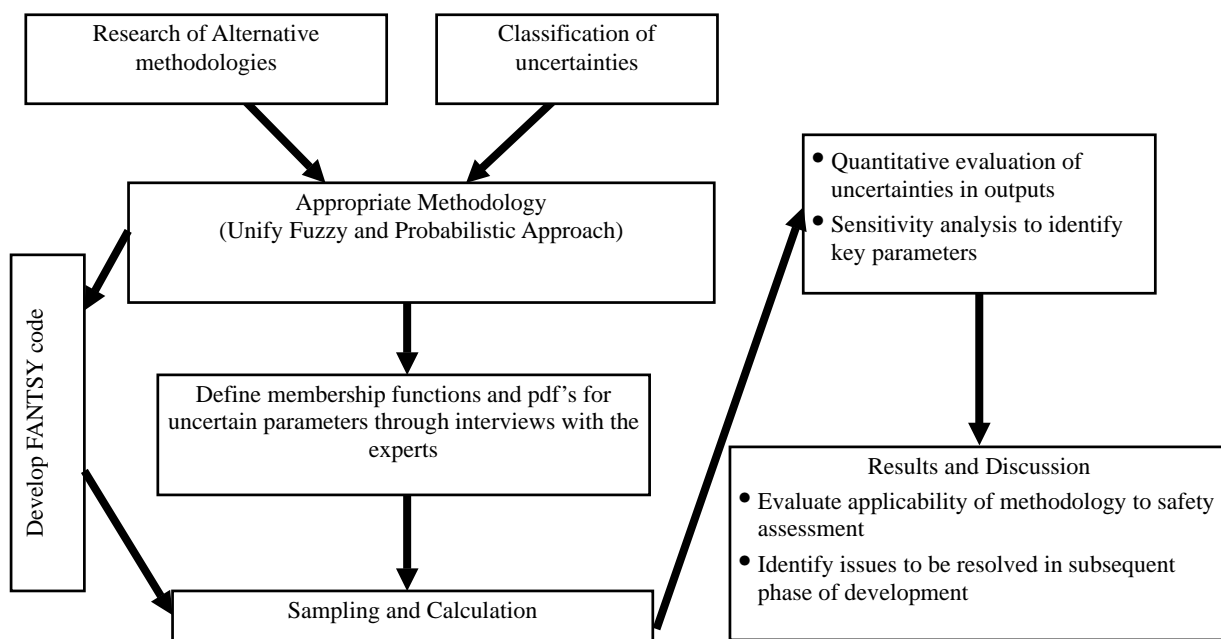


Fig.5 Flow chart of study

$$s_i^j = \frac{\mu_i^j - \mu_i}{\sigma_k} \quad (2)$$

ただし、全域的標準偏差を k とした場合、下記のようになる。

$$\sigma_k = \sqrt{\left(\frac{1}{k} - \frac{1}{K}\right)\sigma} \quad (3)$$

ムービングバンド法によって算出される 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、全域的あるいは部分的領域において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。この例を、Fig.6 に示すが、回帰モデルを特定せずに分析対象の非線形に対応するため、過度に多くの解析サンプル数を必要としない点が本手法のメリットである。図中の波線はノイズとトレンドの区別に関する

目安として示してあり、各バンドを無作為標本抽出と見なした場合のバンド平均値についての 90%信頼区間に対応している。

ムービングバンド法を用いて、二次評価の結果から重要なパラメータを抽出した結果を Table 2 に示す。表中において上向き矢印は当該パラメータ値が大きくなると被ばく線量が高くなることを表し、下向き矢印はその逆の傾向を示している。また、その傾向が全領域にわたる特性か、高線量側あるいは低線量側のみに限定される傾向なのかを示している。この結果から、全てのメンバーシップ(確からしさのレベル=保守性の程度)において、動水勾配、母岩透水係数分布の対数標準偏差、ガラス溶解時間、Se 溶解度、および母岩へのアクチニドの分配係数が有意な感度を持つことがわかった。したがって、不確実性低減のために重要な研究開発課題としては、

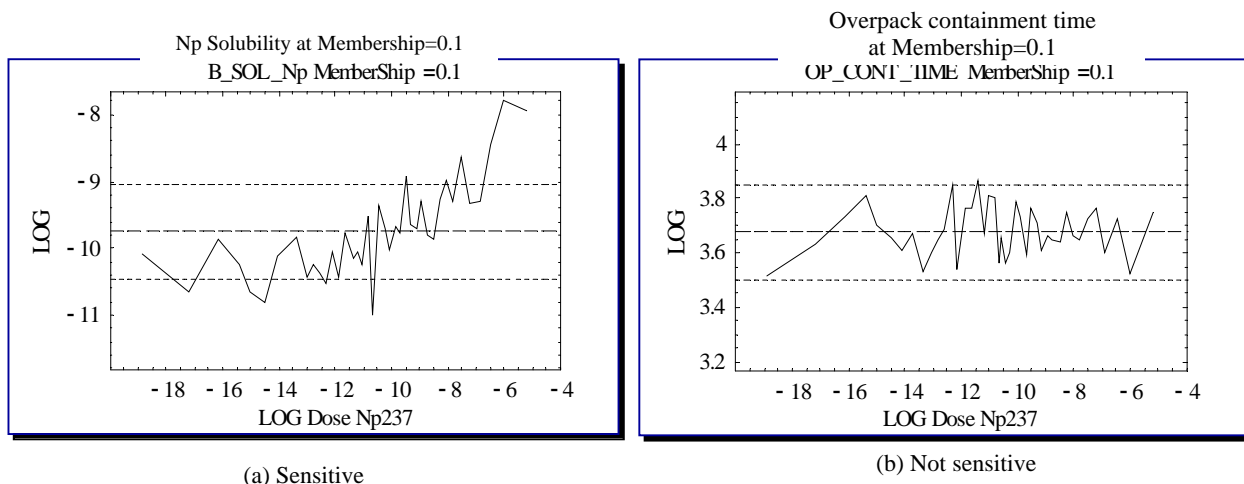


Fig.6 Example of sensitivity information derived using Moving Band technique;
(a) Sensitivity of Np solubility in buffer pore water on the dose rate of Np,
(b) Sensitivity of canister corrosion time on the dose rate of Np

Table 2 Summary of sensitivity analyses

	Parameter	Membership 1.0			Membership 0.5			Membership 0.1		
		Low Dose	High Dose	Sensitive Nuclides	Low Dose	High Dose	Sensitive Nuclides	Low Dose	High Dose	Sensitive Nuclides
Buffer	Effective diffusion coefficient in buffer pore water							↗		Np237,U233,Se79
Hydraulics	Hydraulic gradient under fresh water		↗	All Nuclides		↗	All Nuclides		↗	All Nuclides
	Flow rate in EDZ		↘	Cs135					↘	Cs135
	Log-mean value of hydraulic conductivity in host rock					↗	All Nuclides		↗	All Nuclides
	Logarithmic standard deviation of hydraulic conductivity in host rock		↗	All Nuclides		↗	All Nuclides		↗	All Nuclides
Chemistry	Glass dissolution time		↘	Cs135		↘	Cs135 and Se79 are sensitive at high dose		↘	Cs135
	Np solubility in buffer pore water					↗	Np237		↗	Np237
	Se solubility in buffer pore water		↗	Se79		↗	Se79		↗	Se79
	Np solubility in host rock					↗	Np237			
	Se solubility in host rock under fresh water		↗	Se79		↗	Se79		↗	Se79
	Kd of Np in the matrix of host rock		↘	Np237,U233,Th229		↘	Np237,U233,Th229		↘	Np237
	Kd of U in the matrix of host rock		↘	U233,Th229		↘	U233		↘	U233
	Kd of Th in the matrix of host rock		↘	Th229		↘	Th229		↘	Th229
	Kd of Se in the matrix of host rock		↘	Se79		↘	Se79			
	Ionic strength of ground water		↗	Cs135		↗	Cs135		↗	Cs135
Biosphere	Equilibrium constant of ion exchange reaction		↘	Cs135						
	Dose conversion factor of Np (Future)		↗	Np237		↗	Np237		↗	Np237
	Dose conversion factor of U (Future)		↗	U233		↗	U233		↗	U233
	Dose conversion factor of Th (Future)					↗	Th229		↗	Th229
	Dose conversion factor of Se (Future)		↗	Se79		↗	Se79		↗	Se79
	Dose conversion factor of Cs (Future)		↗	Cs135		↗	Cs135		↗	Cs135
	Dose conversion factor of Cs (Present)								↗	Cs135

- 各スケールでの地下水循環系の理解
 - 限られた数の実測データによる地層不均質性把握
 - 当該地下水条件での FP ソースタームの確定
 - 分配係数データの品質管理
- があげられる。

ここで、地下水循環系の理解が重要でありながら、母岩透水係数の対数平均値がメンバーシップ 1.0 で感度を有していないが、今回のパラメータ設定においては、メンバーシップ 1.0 のレベルでは当該パラメータは幅として設定されておらず、一点の値で設定されていたため感度分析が実施できなかったことによる。Table 2 からわかるように他のメンバーシップにおいては母岩透水係数の対数平均値は全域的に有意な感度を有している。

上記のように、ムービングバンド法は個々のパラメータの感度を見る上では有効であるが、より詳細な分析、例えば、複数の入力パラメータがある条件を同時に満足する場合に初めて生じるような高被ばく線量の原因を探るためには限界がある。特に、安全基準策定にあたっては、各確からしさの領域における高被ばく線量のケース群の原因をその発生の可能性と合わせて議論する必要があり、「どのような条件で高い被ばく線量が得られるか」について具体的な情報を得ることは重要である。そこで、標本統計を用いて入力パラメータの複合的な影響を検討した。

多数の解析ケース群の中で、特に被ばく線量の高いグループに着目した場合、このグループにおけるパラメータ i の平均値と、解析ケース全体における同パラメータの平均値を比較することにより、高被ばく線量グループ内の各ケースが当該パラメータについてどの程度「特異な」値をとっているかを把握することができる。そして、それらのパラメータ値の組合せが高い被ばく線量の原因となってい

ることを統計的に推定することが可能である。

具体的には、高被ばく線量グループ内の平均値 μ_i の全域的平均 M_i からのずれを標本分散 によって規格化することによって得られる S_i

$$S_i = \left| \frac{\mu_i - M_i}{\sigma} \right| \tag{4}$$

によって定量化することとする。高被ばく線量グループにおけるパラメータ i の入力値の選択が無作為抽出であったとすると、 S_i の累積確率密度は次式で表される自由度 n-1 の t 分布にしたがうことが知られている。

$$P(S_i) = \int_s^\infty \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{\sqrt{\pi(n-1)}\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \left(1 + \frac{\xi^2}{n-1}\right)^{-\frac{n}{2}} d\xi \tag{5}$$

つまり、高被ばく線量グループにおける、あるパラメータ i の平均値が、全域的平均値から S_i だけ離れているような状況が無作為抽出の結果「偶然に」生じているという仮説の確からしさは $P(S_i)$ によって表されることとなり、 $P(S_i)$ が小さくなればなるほど、この仮説を棄却すること、つまり、「パラメータ i の平均値が、全域的平均から S_i だけ離れていることが原因で、当該解析グループの出力（被ばく線量）が高くなっている」という仮説の確からしさが増すことになる。このことから、 $1/P(S_i)$ を、高被ばく線量の要因としてパラメータ i が寄与している程度の指標として用いた。この手法により、入力パラメータの複合的影響を検討した例を Fig.7 に示す。横軸は、上記の $1/P(S_i)$ であり、値が大きくなるほど、あるいは小さくなるほど当該パラメータの寄与が大きいことを示す。

Fig.5 に示したように、本研究では、一次評価結果の感度分析において、重要なパラメータを抽出し、そのパラメータに対して専門家へのインタビューを再度実施し、上

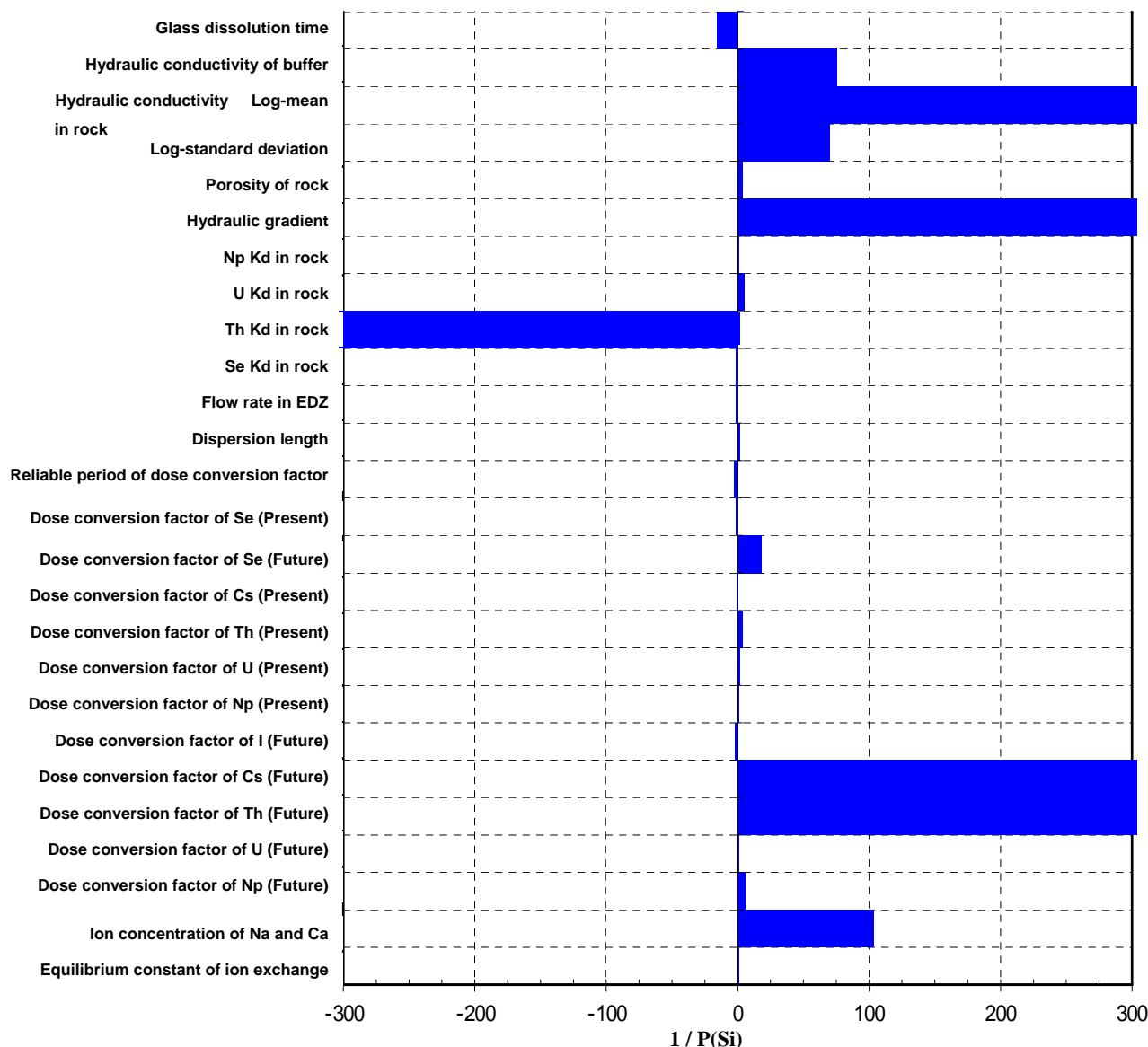


Fig.7 Evaluation example of combined effect of parameters (Membership 0.1, part of results is extracted)

記のフローを繰り返し実施した。第1回目のフローは本手法の適用性を判断し、課題を抽出することを主目的として実施し、地層処分の問題に適用可能であることを確認するとともに、専門家によるパラメータ設定の信頼性・客観性向上が課題としてあげられた。2回目の評価（二次評価）においては、一次評価で抽出された重要パラメータに絞って専門家への再インタビューを実施し、一次評価よりも詳細に検討するとともに、判断を支援する情報を充実し、安全評価の具体性と信頼性に寄与できることがわかった。最も重要な点は、反復的に評価を実施することである。これにより、専門家は各自の知見を性能評価モデルの入力パラメータとして表現（写像）することの意味についての理解が深まり、より適切なパラメータ設定が可能となる。また、インタビューする側も専門家の知見を引き出すノウハウを蓄積するとともに、科学的知見からパラメータ設定に至る過程における不確定因子の相関構造についての理解が

深まることを指摘しておく。

5 本手法の適用性

ICRP Pub.81[8]においては、「固体放射性廃棄物処分の安全性にかかわる期間が長大なものであり、安全評価には多様な不確実性が介在することが不可避であることから、将来生ずるかもしれない被ばく（Potential exposure）がある定量的な安全基準を満足することを証明することは極めて困難である。このことは、処分に対する放射線防護原則の適用が、科学的な証明ではなく、むしろ実践的な意志決定の問題であることを意味し、この中で、安全評価によって提示される定量的な影響の程度は、意志決定に対する情報提供として位置付けられるべきである」という思想で一貫している。また、Constrained optimization（拘束値を組み込んだ最適化）を適用すれば、線量限度あるいはリスク限

度を直接用いる必要がなくなる、とされている。つまり、ICRP で提案されている放射線防護原則の適用は、「潜在被ばくが、定量的な線量限度を下回ることを証明するのではなく、それが線量拘束値の範囲内にあり、かつ、合理的に達成可能な他の手段によってもはや低減できないことを確かめる」と理解できる。

この観点からは、地層処分の安全評価においては、

- 不確実性の程度およびその原因把握
- 不確実性低減のために必要な研究開発課題の優先順位の明確化

が必要であり、前述のように、比較的少数の代表的な保守的な決定論的解析結果のみを示すアプローチでは、意志決定のための材料提供として不十分である。それに対して、本手法は、安全評価結果に含まれる不確実性の幅が定量的に示され、さらに、この幅に対して代表的な保守的解析ケースを比較することによって、「保守的な」評価結果がどのような不確実性を Bound しているのかを明示することが可能となる点が重要である。また、本研究の「確からしさを区分した不確実性解析手法」は、文献[8]において提案されている、Disaggregated approach、すなわち狭義の PSA のように確率論的なリスクを用いて多様な不確実性の影響を足し合わせるのではなく、不確実因子を区分し、それぞれの区分における潜在被ばくの大きさと確からしさ（必ずしも確率として表される必要はない）がバランスしているか否かを判断するというアプローチ、を具現化した一例といえる。以上のことは、本手法が安全規制上の判断に対して通常の決定論的な解析よりも多くの情報を提供し得るものであり、放射性廃棄物処分の規制のあり方に貢献し得るものであることを示唆する。

意志決定に対する支援という観点からは、既に示した感度分析が果たす役割は大きい。本研究では、膨大な解析結果の中から主要な不確実要因を抽出するとともに、その感度を定量的に示すことができ、また、高線量をもたらすケースの特徴を把握するために、該当するケース群の入力パラメータの組合せを把握できる手法を開発した。これは、処分事業を段階的に進める際に、各段階における研究開発項目の目標到達度とそれによる不確実性低減の程度を示すことに活用可能である。同様に、次段階で残されている不確実性の程度とその重要因子を抽出することにより、合理的な研究開発計画の策定に寄与できるものと考えられる。

6 おわりに

放射性廃棄物地層処分を合理的に進めるためには、全体システムを俯瞰し、不確実要因をその重要性も含めて把握することが重要であり、不確実性解析とその感度分析の役割は大きい。特に、段階的アプローチにおいては、前段階での進展を評価し、次段階の進め方を検討する上で本手法

は有効と考えられる。また、合理的な安全規制体系を構築する上では、専門家間の合意形成を図りつつ、検討すべきケースの蓋然性を明らかにする必要があり、そのために本手法を適用するためには、パラメータ設定の透明性・客観性をより向上する必要があり、引き続き手法の高度化を進める予定である。高度化に際しては、安全評価モデル自体が実現象を高度に抽象化（abstraction）したものであるため、入力パラメータの下部構造（現象解析モデル群、データベース群）を考慮し、不確実要因をより限定的に把握する必要があるものと考えられる。

参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構：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次取りまとめ。JNC TN1400 99-020, (1999)
- [2] OECD/NEA: "Uncertainty Analysis for Performance Assessments of Radioactive Waste Disposal Systems", Proceedings of an NEA Workshop (1987)
- [3] European Commission: Robinson, P.C. and N.S.ed "Review on development of methodologies for modelling with uncertainty and variability: Munvar project", EUR16174EN (1995)
- [4] Bardossy, A., Bogardi, I., and Kelly, W.E.: Imprecise (Fuzzy) Information in Geostatistics, *Mathematical Geology*, **20**, 287-311 (1988)
- [5] Chiles J-P., and Delfiner, P.: Geostatistics; Modeling Spatial Uncertainty, John Wiley and Sons, New York (1999)
- [6] Maul, P.R., Cooper, N.S., and Robinson, P.C.: MENTOR Version 2.1: A Computer Code for Assessing Disposal Options for TRU Wastes, Intera Information Technologies Technical Note IS3576-2 Version 2 (1994)
- [7] Kato, K., et al.: Hybrid Probabilistic and Possibilistic Safety Assessment: Methodology and Application, The 8th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation (ICEM'01), September 30 – October 4, Session 47-3, Bruges, Belgium (2001)
- [8] ICRP: Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication 81, Pergamon Press, Oxford, UK (2000)

