



JAEA-Data/Code

2006-013



JP0650463

## 決定木分析を用いた核種移行解析結果の感度分析の検討(Ⅱ)

Application of Decision Tree Technique to Sensitivity Analysis  
for Results of Radionuclide Migration Calculations(Ⅱ)

仲島 邦彦 \* 牧野 仁史

Kunihiko NAKAJIMA\* and Hitoshi MAKINO

地層処分研究開発部門

知識化グループ

Knowledge Management Group

Geological Isolation Research and Development Directorate

June 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-  
Data/  
Code

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。  
本レポート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下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課

Tel. 029-282-6387, Fax. 029-282-5920

This report was issued subject to the copyright of Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :

Intellectual Resources Section,

Intellectual Resources Department

2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN

Tel. 029-282-6387, Fax. 029-282-5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

## 決定木分析を用いた核種移行解析結果の感度分析の検討（II）

日本原子力研究開発機構地層処分研究開発部門

研究開発総括ユニット

仲島 邦彦\*, 牧野 仁史

(2006年3月3日 受理)

地層処分の安全評価では、天然の地質環境が有する場の不均質性、時間の経過に伴う地質環境条件の変化、あるいは理解や情報の不十分さから生ずるデータ不確実性が内在し、それらを完全に排除することは困難である。このようなデータ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果を対象に、どのパラメータの不確実性の影響が大きいかなどの知見を得ること（感度分析）は、地層処分の安全評価上重要である。

ここで、多変量解析手法の一つである決定木分析の感度分析への適用性については、上述した核種移行に関するモンテカルロシミュレーションの結果（総線量の最大値）を対象にした予察的な分析により見通しを得ている。

本検討では、感度分析を実施するにあたっての様々な切り口について検討し、総線量の最大値を含む様々な結果（総線量の最大値の発生時刻、支配核種など）を対象とした決定木分析を行うことにより、決定木分析の精度や適用範囲の確認を行った結果を示す。

その結果、ほとんどのケースにおいて「良好な分析が行えた分析ケース」または「比較的良好な分析となった分析ケース」という結果が得られ、決定木分析が感度分析を行う際の様々な目的に適用可能であることを示すことができた。

---

核燃料サイクル工学研究所（駐在）：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

\* 株式会社 N E S I

Application of Decision Tree Technique to Sensitivity Analysis  
for Results of Radionuclide Migration Calculations (II)

Kunihiro NAKAJIMA \* and Hitoshi MAKINO

Research and Development Integration Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura Naka-gun Ibaraki-ken

(Received March 3, 2006)

In the safety assessment of geological disposal system, data uncertainty is inherent by the heterogeneity of the field in the natural geological environment and the change of the geological environment condition with the progress in the time and insufficient of understanding and information, and it is difficult to perfectly remove them.

It is important to safety assessment that understanding influence of the uncertainty of parameter on the result of the Monte Carlo simulation considering data uncertainty.

In our study, examining the range of application and the accuracy of the decision tree analysis technique by various approaches in the sensitivity analysis, and examining the object various results including the maximum value of all doses (others, the time of the maximum value of all doses, the identification of dominant nuclides).

As a result, it was shown to be applicable for various purposes using the decision tree analysis technique to the sensitivity analysis.

Keywords : Geological Disposal System, Data Uncertainty, Decision Tree Analysis,  
Sensitivity Analysis

---

\* NESI Inc.

## 目 次

1 はじめに.....	1
2 感度分析の検討範囲の設定 .....	2
2.1 決定木分析による感度分析の対象.....	2
2.2 感度分析の対象および切り口 .....	3
2.3 分析における基本条件.....	6
3 決定木分析による感度分析の結果 .....	7
4 まとめと今後の課題 .....	11
参考文献 .....	12
付録 その他の分析結果 .....	13
各分析ケースで抽出された重要パラメータ .....	31

## Contents

1 Introduction.....	1
2 Setting of examination range of the sensitivity analysis .....	2
2.1 Object of the sensitivity analysis by the decision tree analysis .....	2
2.2 Object and approach of the sensitivity analysis .....	3
2.3 Basic requirements in the analysis .....	6
3 Result of the sensitivity analysis by the decision tree analysis.....	7
4 Summary and future problem .....	11
References.....	12
Appendix Other results of analysis.....	13
Important parameters extracted by the each analysis case .....	31

## 図 目 次

図 2.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果（総線量の最大値, 500 リアライゼーション）	2
図 2.2 分析の切り口および対象の組合せのイメージ図	5
図 3.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果（総線量の最大値, 500 リアライゼーション）のカテゴリー化（総線量の最大値を 3 枝ずつカテゴリー化）	7
図 3.2 決定木（総線量の最大値を 3 枝ずつカテゴリー化）	8
付図 1.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果（総線量の最大値, 500 リアライゼーション）のカテゴリー化（総線量の最大値を 2 枝ずつカテゴリー化）	13
付図 1.2 決定木（総線量の最大値を 2 枝ずつカテゴリー化）	14
付図 2.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果（総線量の最大値, 500 リアライゼーション）のカテゴリー化（総線量の最大値を 4 枝ずつカテゴリー化）	15
付図 2.2 決定木（総線量の最大値を 4 枝ずつカテゴリー化）	16
付図 3.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果（総線量の最大値, 500 リアライゼーション）のカテゴリー化（総線量の最大値の発生時間を $10^4 \sim 10^8$ 年の間の $10^6$ 年の境界でカテゴリー化）	17
付図 3.2 決定木（総線量の最大値の発生時間を $10^4 \sim 10^8$ 年の間の $10^6$ 年の境界でカテゴリー化）	18
付図 4.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果（総線量の最大値, 500 リアライゼーション）のカテゴリー化（支配核種をカテゴリー化）	19
付図 4.2 決定木（支配核種をカテゴリー化）	20
付図 5.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果（総線量の最大値, 500 リアライゼーション）のカテゴリー化（総線量の最大値を第 2 次取りまとめの R.C.における総線量の最大値を基準として高い結果と低い結果で 2 つにカテゴリー化）	21
付図 5.2 決定木（総線量の最大値を第 2 次取りまとめの R.C.における総線量の最大値を基準として高い結果と低い結果で 2 つにカテゴリー化）	22

付図 6.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果（総線量の最大値, 500 リアライゼーション）のカテゴリー化（総線量の最大値を第2次取りまとめの R.C.における総線量の最大値の発生時間を基準として早い結果と遅い結果で2つにカテゴリー化）	23
付図 6.2 決定木（総線量の最大値を第2次取りまとめの R.C.における総線量の最大値の発生時間を基準として早い結果と遅い結果で2つにカテゴリー化）	24
付図 7.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果（総線量の最大値, 500 リアライゼーション）のカテゴリー化（総線量の最大値の上位 100 のみをカテゴリー化）	25
付図 7.2 決定木（総線量の最大値の上位 100 のみをカテゴリー化）	26
付図 8.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果（総線量の最大値, 500 リアライゼーション）のカテゴリー化（総線量の最大値の発生時間が $10^7$ 年以降をカテゴリー化）	27
付図 8.2 決定木（総線量の最大値の発生時間が $10^7$ 年以降をカテゴリー化）	28
付図 9.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果（総線量の最大値, 500 リアライゼーション）のカテゴリー化（Cs135 が支配核種とするカテゴリー化）	29
付図 9.2 決定木（Cs135 が支配核種とするカテゴリー化）	30

## 表 目 次

表 2.1	モンテカルロシミュレーションで考慮したパラメータ不確実性の一覧	3
表 2.2	分析の切り口および対象の組合せに対応した分析ケース	5
表 2.3	分析ケース一覧	6
表 3.1	カテゴリー別の判別結果（総線量の最大値を3桁ずつカテゴリー化）	8
表 3.2	分析の対象および切り口のそれぞれの組合せに対応した分析ケースの分析結果	10
付表 1	カテゴリー別の判別結果（総線量の最大値を2桁ずつカテゴリー化）	13
付表 2	カテゴリー別の判別結果（総線量の最大値を4桁ずつカテゴリー化）	15
付表 3	カテゴリー別の判別結果（総線量の最大値の発生時間を $10^4\sim10^8$ 年の間の 10 <sup>6</sup> 年の境界でカテゴリー化）	17
付表 4	カテゴリー別の判別結果（支配核種をカテゴリー化）	19
付表 5	カテゴリー別の判別結果（総線量の最大値を第2次取りまとめのR.C.における 総線量の最大値を基準として高い結果と低い結果で2つにカテゴリー化）	21
付表 6	カテゴリー別の判別結果（総線量の最大値を第2次取りまとめのR.C.における 総線量の最大値の発生時間を基準として早い結果と遅い結果で2つに カテゴリー化）	23
付表 7	カテゴリー別の判別結果（総線量の最大値の上位100のみをカテゴリー化）	25
付表 8	カテゴリー別の判別結果（総線量の最大値の発生時間が10 <sup>7</sup> 年以降をカテゴリー化）	27
付表 9	カテゴリー別の判別結果（Cs135が支配核種とするカテゴリー化）	29
付表 10	各分析ケースで抽出された重要パラメータの一覧	31

## 1. はじめに

地層処分の安全評価では、天然の地質環境が有する場の不均質性、時間の経過に伴う地質環境条件の変化、あるいは理解や情報の不十分さから生ずるデータ不確実性<sup>1)</sup>が内在し、それらを完全に排除することは困難である。

このようなデータ不確実性が核種移行解析結果に及ぼす影響を定量的に評価するための技術として、複数のパラメータの不確実性が組み合わされた場合の影響を網羅的かつ効率的に評価することが可能な核種移行解析モデルを構築し、モンテカルロシミュレーションが実施されている<sup>2)</sup>。そして、その影響評価結果からどのパラメータの不確実性の影響が大きいかなどの知見を得ること（感度分析）は、地層処分の安全評価上重要であり、そのための方法として多変量解析手法の適用に関する検討を実施してきている<sup>2) 3)</sup>。

ここで、多変量解析手法の一つである決定木分析<sup>4)</sup>は、従来の感度分析手法である重回帰分析などで着目する「重要度の高い（結果に対する影響が相対的に高い）パラメータの抽出」に加えて、「それらパラメータがどのような値あるいは範囲の場合にその特徴が発生しているかの定量的な条件の把握」が可能であるという特徴がある。

本研究の「決定木分析を用いた核種移行解析結果の感度分析の検討」は、核種移行解析結果に関わる感度分析における決定木分析の適用手順の提示（体系化）を当面の目標としており、決定木分析の感度分析への適用性については、上述した核種移行に関するモンテカルロシミュレーションの結果（総線量の最大値<sup>2)</sup>）を対象にした予察的な分析により見通しを得ている<sup>3)</sup>。

本検討では、決定木分析を用いた感度分析の精度や適用範囲についての知見を拡充することを目標とした検討を実施する。決定木分析は比較的手軽な手法であり、結果がわかりやすいことから、地層処分の安全基準が成立する条件を抽出し、フィードバックによる研究開発の効率的実施への寄与は勿論のこと、加えて安全評価結果の詳細解釈や、ある感度分析を行うにあたって、予備的な分析またはある分析結果の妥当性を補うような分析ツールとして利用する手法として位置付け、様々な感度分析の目的に適用可能であることを示す。具体的には、上記のようなモンテカルロシミュレーションから、線量に関する情報、時間に関する情報、およびどの核種が重要になるかに関する情報（支配核種）などの物質移行挙動の特徴を異なる側面から理解するための複数の種類の情報が同時に得られること、また各情報からどのような知見を得ようとするかの分析の切り口も複数あり得ることから、それらを体系的に組み合わせた分析を行うことにより、決定木分析の精度や適用範囲を確認しその結果を示す。

---

<sup>1)</sup> 地層処分の安全評価で取り扱う不確実性は、データ（パラメータ）不確実性だけでなく、システムの理解、シナリオ、概念モデル、数学モデルに関する不確実性がそれぞれ存在する<sup>1)</sup>。

<sup>2)</sup> モンテカルロシミュレーションの各リアライゼーションにおける解析結果を、第2次取りまとめ<sup>5)</sup>のレファレンスケースで用いた線量への換算係数により、線量に換算して得られた各核種の線量の総和の最大値。

## 2. 感度分析の検討範囲の設定

### 2.1 決定木分析による感度分析の対象

本検討で決定木分析の適用を検討する対象は、高レベル放射性廃棄物の地層処分システム中の核種移行に関して、複数のパラメータの不確実性（幅として設定）の組み合わせを網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーション<sup>2)</sup>に「母岩の評価距離」と「断層の評価距離」の2つのパラメータを加え、モンテカルロシミュレーションを実施した結果である（図2.1）。図2.1は、横軸が処分後の時間（総線量の最大値の発生時間）、縦軸が総線量の最大値の散布図であり、総線量の最大値の支配核種の違いを色の違いで表現している。ここでは57のパラメータの不確実性を考慮し、500リアライゼーションの解析を実施している。不確実性を考慮した57パラメータの一覧を表2.1に示す。

この解析結果から、総線量の最大値のばらつきは十数オーダー、総線量の最大値の発生時間のばらつきは4オーダー以上に分布していることがわかる。また、総線量の最大値の支配核種は、ある程度のかたまりを形成しながら分布している。これらのばらつきは、複数のパラメータの不確実性の影響を含んだものである。

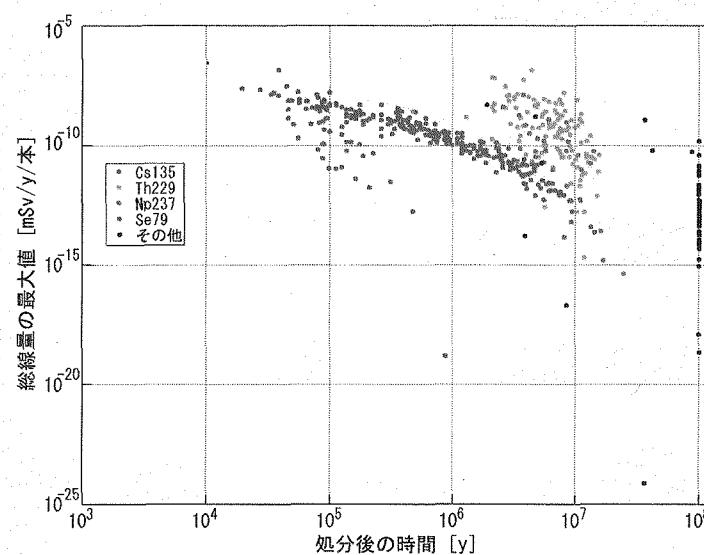


図2.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果  
(総線量の最大値, 500リアライゼーション)

表 2.1 モンテカルロシミュレーションで考慮したパラメータ不確実性の一覧

核種	溶解度 [mol l <sup>-1</sup> ]	分配係数 (緩衝材) [m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]	分配係数 (岩盤) [m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]
Se	U <sub>L</sub> [10 <sup>-10</sup> , 10 <sup>-6</sup> ]	U[0, 0.0001]	U[0, 0.1]
Zr	U <sub>L</sub> [10 <sup>-3</sup> , 10 <sup>-6</sup> ]	U[10, 15]	U <sub>L</sub> [10 <sup>-2</sup> , 10 <sup>1</sup> ]
Tc	U <sub>L</sub> [10 <sup>-3</sup> , 10 <sup>-6</sup> ]	U <sub>L</sub> [0.1, 20]	U <sub>L</sub> [0.05, 100]
Pd	U <sub>L</sub> [10 <sup>-9</sup> , 10 <sup>-7</sup> ]	U[0.1, 0.5]	U <sub>L</sub> [0.05, 1]
Sn	U <sub>L</sub> [10 <sup>-8</sup> , 10 <sup>-5</sup> ]	U <sub>L</sub> [1, 2 × 10 <sup>-1</sup> ]	U <sub>L</sub> [10 <sup>-1</sup> , 10 <sup>2</sup> ]
Cs	可溶性	U[0.01, 0.05]	U <sub>L</sub> [10 <sup>-3</sup> , 10 <sup>1</sup> ]
Pb	U[10 <sup>-6</sup> , 10 <sup>-3</sup> ]	U[0.1, 0.5]	U <sub>L</sub> [0.1, 10]
Ra	U <sub>L</sub> [10 <sup>-14</sup> , 10 <sup>-11</sup> ]	U[0.01, 0.02]	U[0.05, 0.5]
Ac	Amのアナログ	U[1, 5]	U <sub>L</sub> [0.05, 50]
Th	U <sub>L</sub> [10 <sup>-9</sup> , 10 <sup>-7</sup> ]	Uのアナログ	U <sub>L</sub> [10 <sup>-1</sup> , 10 <sup>1</sup> ]
Pa	U <sub>L</sub> [10 <sup>-3</sup> , 10 <sup>-7</sup> ]	Snのアナログ	U <sub>L</sub> [10 <sup>-1</sup> , 10 <sup>1</sup> ]
U	U <sub>L</sub> [10 <sup>-9</sup> , 10 <sup>-7</sup> ]	U <sub>L</sub> [1, 5 × 10 <sup>-1</sup> ]	U <sub>L</sub> [10 <sup>-1</sup> , 10 <sup>1</sup> ]
Np	U <sub>L</sub> [10 <sup>-9</sup> , 10 <sup>-7</sup> ]	Uのアナログ	U <sub>L</sub> [10 <sup>-1</sup> , 10 <sup>1</sup> ]
Pu	U <sub>L</sub> [10 <sup>-10</sup> , 10 <sup>-5</sup> ]	U <sub>L</sub> [10 <sup>1</sup> , 10 <sup>2</sup> ]	U <sub>L</sub> [10 <sup>-1</sup> , 10 <sup>1</sup> ]
Am	U <sub>L</sub> [10 <sup>-3</sup> , 10 <sup>-6</sup> ]	U <sub>L</sub> [10, 50]	U <sub>L</sub> [5 × 10 <sup>-2</sup> , 5 × 10 <sup>1</sup> ]
Cm	Amのアナログ	Amのアナログ	U <sub>L</sub> [5 × 10 <sup>-2</sup> , 5 × 10 <sup>1</sup> ]
Nb	U <sub>L</sub> [10 <sup>-8</sup> , 10 <sup>-4</sup> ]	U[1, 10]	U <sub>L</sub> [10 <sup>-2</sup> , 10 <sup>1</sup> ]
Sm	Amのアナログ	Acのアナログ	U <sub>L</sub> [0.05, 50]
その他のパラメータ		レンジ	
ガラス溶解速度 [g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]		U <sub>L</sub> [10 <sup>-4</sup> , 10 <sup>-2</sup> ]	
拡散係数 (Cs、Seを除く) [m <sup>2</sup> y <sup>-1</sup> ]		U[6 × 10 <sup>-3</sup> , 7 × 10 <sup>-2</sup> ]	
Csの拡散係数 [m <sup>2</sup> y <sup>-1</sup> ]		U[2 × 10 <sup>-2</sup> , 2 × 10 <sup>-1</sup> ]	
Seの拡散係数 [m <sup>2</sup> y <sup>-1</sup> ]		U[7 × 10 <sup>-3</sup> , 2 × 10 <sup>-2</sup> ]	
透水量係数分布の平均値 [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]		U <sub>L</sub> [10 <sup>-11</sup> , 10 <sup>-9</sup> ]	
縦方向分散長 [m]		U <sub>L</sub> [1, 10 <sup>3</sup> ]	
マトリクス拡散深さ [m]		U <sub>L</sub> [3 × 10 <sup>-2</sup> , 1]	
マトリクス拡散寄与面積率 [%]		U[10, 10 <sup>2</sup> ]	
岩盤の空隙率 [-]		U[10 <sup>-2</sup> , 3 × 10 <sup>-2</sup> ]	
経験則の係数 [-]		U <sub>L</sub> [10 <sup>-1</sup> , 10 <sup>1</sup> ]	
母岩の評価距離 [m]		U[10, 100]	
断層の評価距離 [m]		U[100, 1000]	

U : 一様分布 (確率密度関数が最大値と最小値の間で 1。それ以外で 0。)

U<sub>L</sub> : 対数一様分布 (確率密度関数が最大値の対数値と最小値の対数値の間で 1。それ以外で 0。)

57 パラメータの内訳 : 溶解度×14, 緩衝材での分配係数×13, 岩盤での分配係数×18,

その他のパラメータ×12

## 2.2 感度分析の対象および切り口

本検討では、図 2.1 に示した総線量の最大値と処分後の時間(総線量の最大値の発生時間)の散布図に対して、以下の 3 種類の情報を分析の対象とする :

対象 1 : 総線量の最大値 (図 2.1 の縦軸)

対象 2 : 総線量の最大値の発生時間 (図 2.1 の横軸)

対象 3 : 総線量の最大値の支配核種 (図 2.1 のプロットの色分け)

また、各情報から何を知りうるか (感度分析の切り口) については、以下のような 3 つの切り口が考えられる。

切り口 1 : 全体的なばらつきに寄与するパラメータとその定量的条件を把握

全体的なばらつきを 3 つ以上のカテゴリーに分けることにより離散的に表現し、それぞれのカテゴリーに属することを特徴付けるパラメータとその定量的条件を把握する。この結果をカテゴリー間で比較することにより、ばらつきの原因を把握する。なお、カテゴリーの数を多くするほど、ばらつきをスムー

ズに表現できるようになる。

切り口 2：あるしきい値を超えるあるいは下回る結果に寄与するパラメータとその定量的条件を把握

全体的なばらつきをある一つのしきい値により 2 つのカテゴリーに分け、それら 2 つのカテゴリーに属することをそれぞれ特徴付けるパラメータとその定量的条件を把握する。この結果により、あるしきい値を超えるあるいは下回る原因を把握する。

切り口 3：特定のある値の領域の発生に寄与するパラメータとその定量的条件を把握

全体的なばらつきの中から、特定の特徴をもつ結果を抽出し、それを含むカテゴリとそれ以外の 2 つのカテゴリーに分け、2 つのカテゴリーに属することをそれぞれ特徴付けるパラメータとその定量的条件を把握する。この場合には、特定の特徴をもつ結果が生ずる原因に着目する。

上記の分析の対象および切り口のそれぞれの組合せに対応した分析ケースをまとめたものを表 2.2 に示す。また、表 2.2 のそれぞれの分析ケースにおけるカテゴリー分けのイメージ図を図 2.2 に示す。さらに、表 2.2 の分析の対象および切り口のそれぞれの組合せに対応した分析ケースの一覧を表 2.3 に示す。

表 2.2 分析の切り口および対象の組合せに対応した分析ケース

分析の対象 分析の切り口	対象 1 : 総線量の最大値軸に着目	対象 2 : 処分後の時間軸に着目	対象 3 : まとまりに着目
切り口 1 : 全体的なばらつきに寄与するパラメータとその定量的条件を把握	・2 衍ずつカテゴリー化 ・3 衍ずつカテゴリー化 ・4 衍ずつカテゴリー化	$10^4 \sim 10^8$ 年の間の $10^6$ 年の境界でカテゴリー化	支配核種の違いをカテゴリー化
切り口 2 : あるしきい値を超えるあるいは下回る結果に寄与するパラメータとその定量的条件を把握	第 2 次取りまとめ <sup>5)</sup> のレファレンスケース.(以下 R.C. と言う)における総線量の最大値を基準	第 2 次取りまとめの R.C. における総線量の最大値の発生時間に基づく	—
切り口 3 : 特定の特徴を持つ結果の発生に寄与するパラメータとその定量的条件を把握	着目する総線量の最大値の上位 100 リアライゼーションとそれ以外をカテゴリー化	着目する総線量の最大値の発生時間が $10^7$ 年以降のリアライゼーションとそれ以外をカテゴリー化	着目する Cs135 が支配核種となるリアライゼーションとそれ以外をカテゴリー化

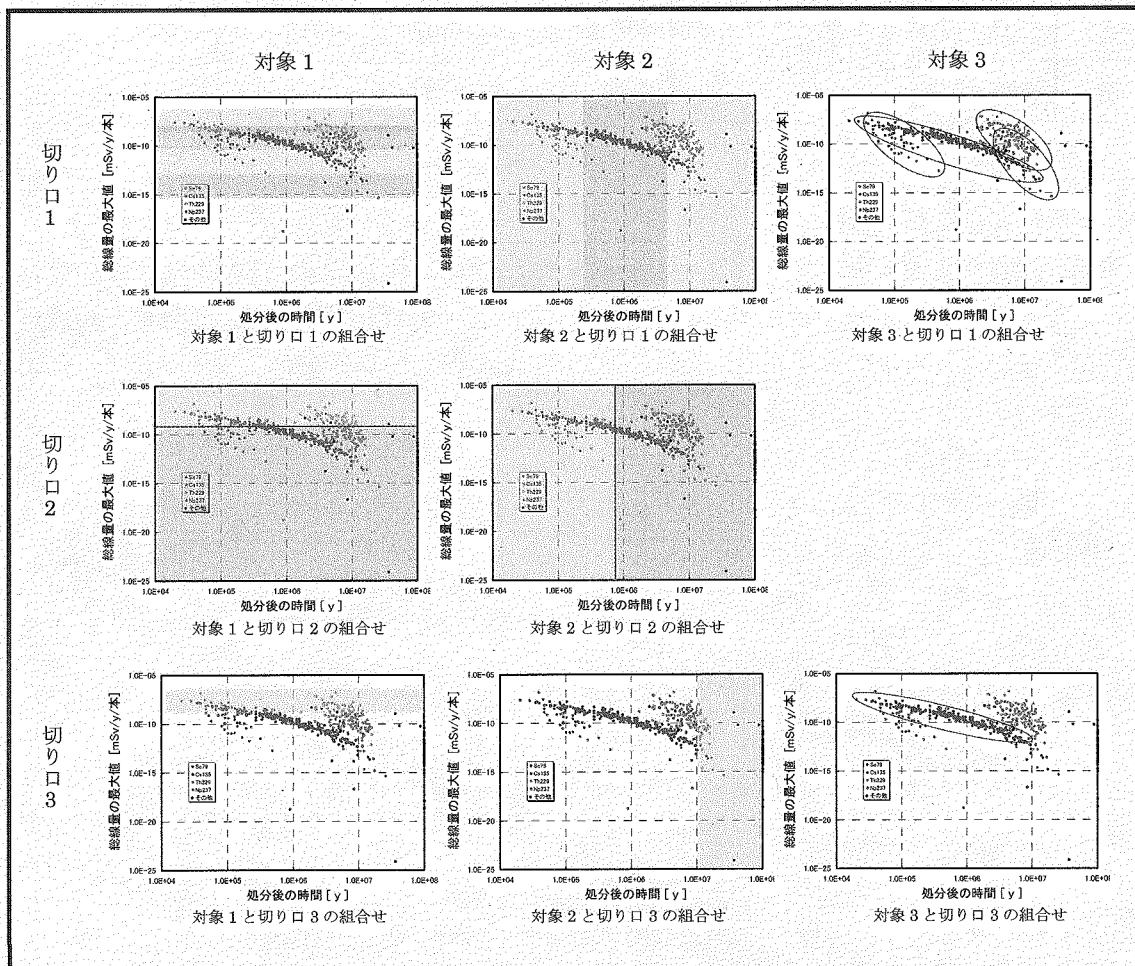


図 2.2 分析の切り口および対象の組合せのイメージ図

表 2.3 分析ケース一覧

分析 ケース	対象	切り口	カテゴリー化の内容
1	総線量の 最大値	全体的なばらつき に寄与するパラメータとその定量的 条件を把握	総線量の最大値を 2 桁ずつカテゴリー化
2			総線量の最大値を 3 桁ずつカテゴリー化
3			総線量の最大値を 4 桁ずつカテゴリー化
4	処分後の 時間		総線量の最大値の発生時間を $10^4 \sim 10^8$ 年の間の $10^6$ 年の境 界でカテゴリー化
5			支配核種をカテゴリー化
6	総線量の 最大値	あるしきい値を超 えるあるいは下回 る結果に寄与する パラメータとその 定量的条件を把握	総線量の最大値を第 2 次取りまとめ <sup>5)</sup> の R.C.における総線 量の最大値を基準として高い結果と低い結果で 2 つにカテ ゴリー化
7	処分後の 時間		総線量の最大値を第 2 次取りまとめの R.C.における総線量 の最大値の発生時間を基準として早い結果と遅い結果で 2 つにカテゴリー化
8	総線量の 最大値	特定の特徴を持つ 結果の発生に寄与 するパラメータと その定量的条件を 把握	総線量の最大値の上位 100 のみをカテゴリー化
9	処分後の 時間		総線量の最大値の発生時間が $10^7$ 年以降をカテゴリー化
10	まとまり		Cs135 が支配核種とするカテゴリー化

### 2.3 分析における基本条件

本検討では決定木分析のソフトウェアとして米国 StatSoft Inc. の STATISTICA のデシジョンツリーモジュール<sup>6)</sup> を利用した。本検討における STATISTICA による分析での設定条件は全てデフォルトの設定を用いた。STATISTICA のデシジョンツリーモジュールによる決定木分析のデフォルトの設定を以下に示す。

#### STATISTICA におけるデフォルトの設定

ノード分岐アルゴリズム<sup>3)</sup> : QUEST によるノード分岐

分岐停止ルール<sup>4)</sup> : 分岐停止事例数 : 5

事前確率<sup>5)</sup> : データから推定

誤分類コスト<sup>6)</sup> : すべて同じ重み

<sup>3</sup> 決定木の計算方法であり、STATISTICA のデシジョンツリーモジュールには QUEST 型分岐法（分岐ごとに統計手法を用いて最適な分岐点を計算し、迅速で偏りがない効率的な分析を行う分析アルゴリズム）と CART 型探索法（分岐ごとにすべてのパラメータに対して可能な分岐をすべてチェックし、最もよく分類を行うパラメータと分岐条件を決定する分析アルゴリズム）が採用されている。

<sup>4</sup> すべての終端ノードが純粹になるまで分類を続けた場合、非常に多くの分岐が発生してしまい非現実的な分析結果になってしまう可能性がある。その場合、分岐停止事例数を指定することにより、あるノード内でその値以下になったときに、分岐が停止するオプション。デフォルトではあるノードが 5 事例以下になった時に分岐を停止する。

<sup>5</sup> 分類・予測対象となる事例データが、あるカテゴリーに分類される傾向がどのくらいあるかを定義するもの。データから推定とはある事例がカテゴリーの 1 つに分類される可能性がカテゴリーサイズに比例するように指定するものである。

<sup>6</sup> あるカテゴリー内の事例を別のカテゴリーに属すると誤分類してしまうコストを指定する。ある特定のカテゴリーについて他のカテゴリーよりも正確な分類を行いたければ、ユーザー指定によりある特定のカテゴリーの分析に他のカテゴリーの分析よりも大きな重みを付ける。

### 3. 決定木分析による感度分析の結果

ここでは表 2.3 の分析ケースからケース 2 の「総線量の最大値を 3 衔ずつカテゴリー化」したケースの分析結果について示す。その他の分析ケースの結果は付録に示す。また、各分析ケースにおいて決定木分析により各カテゴリーに属することを特徴付けるために抽出された重要パラメータの一覧を付表 10 に示す。

はじめに、総線量の最大値と処分後の時間の散布図を基にしたカテゴリー化についての説明図（図 3.1）を示す。この図ではカテゴリーの範囲に色分けを行い、また、それぞれのカテゴリー名とその事例数を示したものである。黄色の領域がカテゴリー Gr1（事例数：135）、ピンクの領域がカテゴリー Gr2（事例数：301）、水色の領域がカテゴリー Gr3（事例数：57）、そして  $10^{-15}$  より低い領域をカテゴリー Low（事例数：7）と指定した。

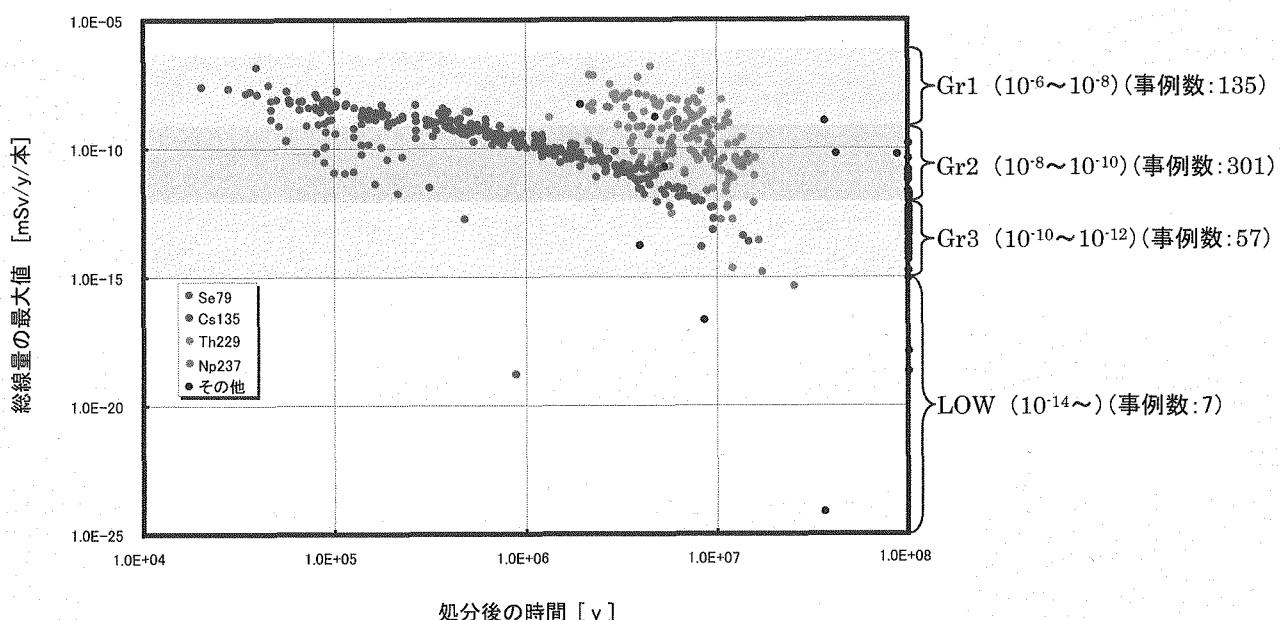


図3.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果（総線量の最大値、500アライゼーション）のカテゴリー化（総線量の最大値を3桁ずつカテゴリー化）

次にカテゴリー別判別割合（実際のカテゴリーに属する事例数に対する、決定木分析によってそのカテゴリーに正しく判別された事例数の割合）を表 3.1 に示す。表 3.1 の場合、Gr1, Gr2, Gr3, Low の 4 つのカテゴリーに判別されている。列が実際の各カテゴリー、行が決定木分析により判別されたカテゴリーである。なお、各列を縦方向に見ていくことにより、実際の各カテゴリーの事例のうちのいくつが、決定木分析によりどのカテゴリーに判別されたかが分かるようになっている。Gr1 について見てみると、Gr1 は実際には 135 事例（表の最終行第 2 列参照）あるのに対して、決定木分析により Gr1 に判別された事例数は黄色で強調されている 106 事例（表の第 2 行第 2 列参照）である。よって、Gr1 が正しく判別された割合は 79% である (=106/135 : の第 2 行最終列参照)。また、本来 Gr1 であるはずの 29 事例が決定木分析によって Gr2 に誤判別されている（表の第 3 行第 2 列参

照)。これと同様にして決定木分析による各カテゴリーの判別割合を確認することができる。

表 3.1 カテゴリー別の判別結果（総線量の最大値を 3 桁ずつカテゴリー化）

実際の 判別された カテゴリー	Gr1	Gr2	Gr3	LOW	カテゴリー別 判別割合(%)
Gr1	106	30	0	0	79%
Gr2	29	261	30	2	87%
Gr3	0	10	27	5	47%
LOW	0	0	0	0	0%
実際の 事例数	135	301	57	7	

そして図 3.2 は決定木であり、透水量係数分布の平均値、Cs の岩盤での分配係数、マトリクス拡散深さという 3 つの重要パラメータのみを含み、その 3 つのパラメータのみで判別されている。例えばカテゴリー Gr1 は、赤線の 2 つの経路に沿ったパラメータの定量的な条件の組み合わせにより 2 つの終端ノードとして判別されており、全体として表 3.1 にあるように実際の 135 事例のうち 106 事例、確率で言うと 79% の割合で判別できている。

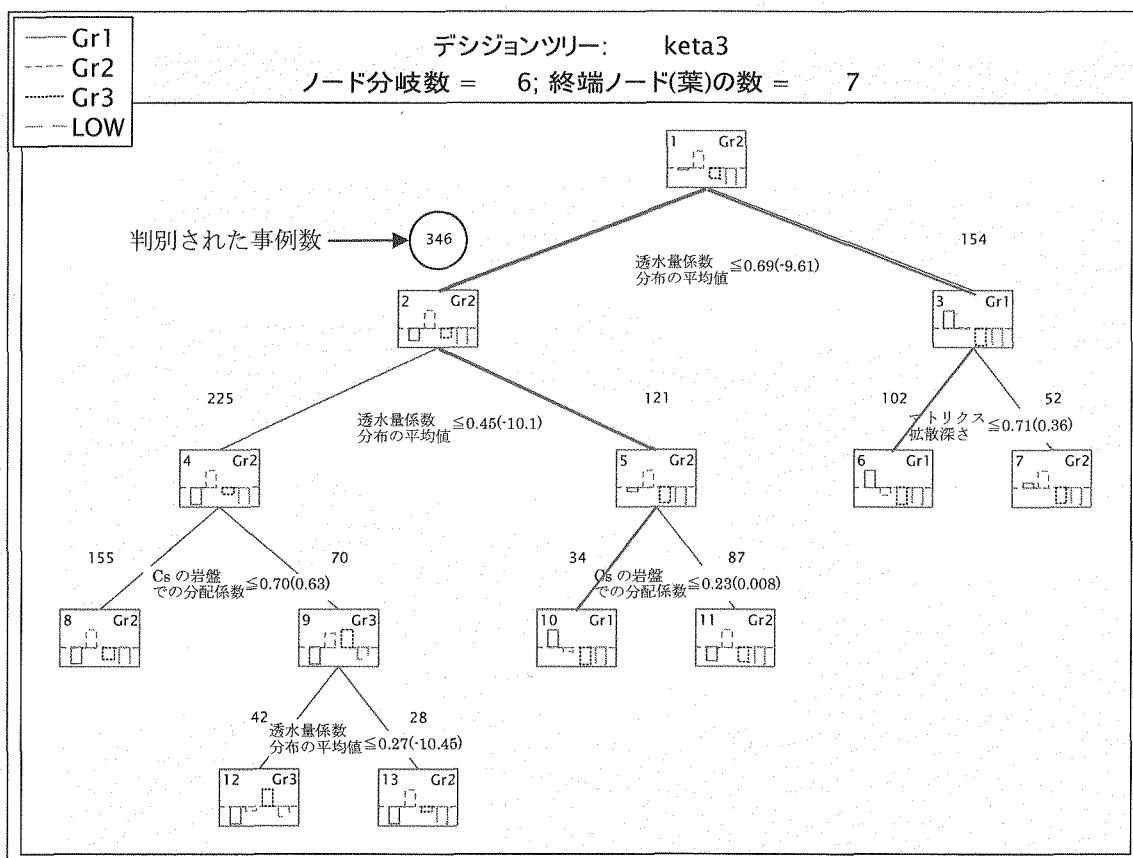


図 3.2 決定木(総線量の最大値を 3 桁ずつカテゴリー化)

ここで、図 3.2 中の丸で囲んだ数字は条件分岐により各ノードに含まれると判別された事例数を示している。また、分岐の際のパラメータの定量的条件で用いられている数値は、決定木分析では、パラメータの定量的条件を得ることを目的にしているため、単位や値の範囲が異なるパラメータ間の比較を容易にしておく必要がある。そこで、表 2.1 に示したモンテカルロシミュレーションで用いたパラメータの値 ( $x$ ) を、以下の式を用いて 0 から 1 の値 ( $x'$ ) に規格化した：

(一様分布の場合)

$$x' = \frac{(x - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} \quad (\text{式 } 1)$$

(対数一様分布の場合)

$$x' = \frac{(\log x - \log x_{\min})}{(\log x_{\max} - \log x_{\min})} \quad (\text{式 } 2)$$

ここで  $x$  : 表 2.1 に示した範囲からサンプリングされた各パラメータの値  
 $x_{\max}$  : 表 2.1 に示した範囲での各パラメータの最大値  
 $x_{\min}$  : 表 2.1 に示した範囲での各パラメータの最小値

さらに、カッコ内の数値は実際のモンテカルロシミュレーションで用いた値に直したものである。枝の分かれ方は分岐条件に対して yes の場合は左側へ分かれ、no の場合は右側へ分かれる。

なお、2.3 に述べたように本検討では決定木分析のソフトウェアのデフォルト設定での分析結果を示しており、決定木分析による感度分析への適用性について検討した既往の報告書<sup>3)</sup>では、判別精度の向上にある程度効果のあるオプションの設定を行っているため、分析結果を比較すると違いが生じている。

実施した分析の対象および切り口のそれぞれの組合せに対応した分析ケースの結果を表 3.2 にまとめた。表 3.2 の整理では、各分析ケースの結果を、「良好な分析が行えた分析ケース（青網掛け）」「比較的良好な分析が行えた分析ケース（黄網掛け）」「比較的悪い分析となった分析ケース（ピンク掛け）」の 3 つに分類している。この分類においては、

- ・各カテゴリーの判別割合（判別の精度に関係）が高い（約 60% 以上）
- ・決定木の状態（ノードの数など）（判別結果の複雑さに関係）が比較的簡単
- ・抽出された重要パラメータの数（判別結果の複雑さに関係）が比較的少ない

等を指標にし、その指標をすべて満たした分析ケースを「良好な分析が行えた分析ケース」、概ね満たした分析ケースを「比較的良好な分析が行えた分析ケース」、そして満たせなかつた分析ケースを「比較的悪い分析となった分析ケース」とした。

全体的に決定木の状態は比較的簡単であり、また、抽出された重要パラメータの数も1～6程度と比較的少なかった（ほとんどのケースで1～3であり、重要パラメータが最も多いのは「支配核種の違いをカテゴリー化したケース」であるが、それでも6つ程度）。したがって、「支配核種の違いをカテゴリー化したケース」を除く、ほとんどの分析ケースにおける分析結果の分類には各カテゴリーの判別割合のみ指標として使われた。

表 3.2 分析の対象および切り口のそれぞれの組合せに対応した分析ケースの分析結果

分析の対象 分析の切り口	対象 1： 総線量の最大値軸に着目	対象 2： 処分後の時間軸に着目	対象 3： まとまりに着目
切り口 1： 全体的なばらつきに寄与するパラメータとその定量的条件を把握	2桁ずつカテゴリー化 3桁ずつカテゴリー化 4桁ずつカテゴリー化	$10^4 \sim 10^8$ 年の間の $10^6$ 年の境界でカテゴリー化	支配核種をカテゴリー化
切り口 2： あるしきい値を超えるあるいは下回る結果に寄与するパラメータとその定量的条件を把握	総線量の最大値を第2次取りまとめ <sup>5)</sup> のR.C.(以下R.C.と言う)における総線量の最大値を基準	総線量の最大値を第2次取りまとめのR.C.における総線量の最大値の発生時間を基準	—
切り口 3： 特定のある値の領域の発生に寄与するパラメータとその定量的条件を把握	総線量の最大値の上位100リニアライゼーションのみをカテゴリー化	総線量の最大値の発生時間が $10^7$ 年以降をカテゴリー化	Cs135が支配核種とするカテゴリー化

また、表3.2において「良好な分析が行えた分析ケース（青網掛け）」としている「総線量の最大値軸を3桁ずつカテゴリー化したケース」では、カテゴリーGr1, Gr2の判別割合は79%, 87%と高いが、Gr3では47%と低くなっている。この場合、本来では「比較的良好な分析が行えた分析ケース」に分類するはずの分析ケースであるが、総線量の最大値が高い領域のほうが低い領域よりも安全評価上重要と思われるため、総線量の最大値が高い領域に該当するGr1とGr2の判別割合を重視し、「良好な分析が行えた分析ケース」とした。このように、上で述べた指標のほかに安全評価上重要であるかというウェイトの置き方を今回はしている。

一方、「比較的悪い分析となった分析ケース（ピンク掛け）」とした「総線量の最大値を第2次取りまとめのR.C.における総線量の最大値の発生時間を基準としてカテゴリー化したケース」では、基準値よりも早い結果（カテゴリーtime1）の判別割合が47%で、基準値よりも遅い結果（カテゴリーtime2）で判別割合が97%という結果になっていた。表3.2の整理では、総線量の最大値の発生時間が早い結果（カテゴリーtime1）の方が安全評価上重要と思われるため、本ケースを「比較的悪い分析となった分析ケース」としているが、遅い結果（カテゴリーtime2）を重視する分析であれば、この分析ケースは「良好な分析が行えた分析ケース」となり、感度分析結果として有効となり得る。同様に「支配核種をカ

「テゴリー化したケース」の「抽出された重要パラメータの数が比較的多い」という指標を用いた結果の分類を除く、その他の「比較的良い分析となった分析ケース」および「比較的悪い分析となった分析ケース」でも、判別割合が90%を超えるカテゴリーが存在しており、感度分析において何を重視するかによって、「良好な分析が行えた分析ケース」と「比較的悪い分析となった分析ケース」の分類が逆転する場合もあり得る。

#### 4.まとめと今後の課題

本検討では、データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションから、物質移行挙動の特徴を異なる側面から理解するための複数の種類の情報（分析の対象）から、どのような知見を得ようとするかの様々な分析の切り口について検討を行った。

分析の対象を以下に示す。

対象1：総線量の最大値

対象2：総線量の最大値の発生時間

対象3：総線量の最大値の支配核種

また、分析の切り口を以下に示す。

切り口1：全体的なばらつきに寄与するパラメータとその定量的条件を把握

切り口2：あるしきい値を超えるあるいは下回る結果に寄与するパラメータとその定量的条件を把握

切り口3：特定のある値の領域の発生に寄与するパラメータとその定量的条件を把握

それらを体系的に組み合わせた分析を行うことにより、決定木分析の精度や適用範囲を確認した。その結果、ほとんどのケースにおいて「良好な分析が行えた分析ケース」または「比較的良い分析となった分析ケース」という結果が得られ、決定木分析が感度分析を行う際の様々な目的に適用可能であることを示すことができた。

分析結果において、「比較的良い分析となった分析ケース」または「比較的悪い分析となった分析ケース」と分類されたケースについて見てみると、カテゴリー間の事例数に偏りがあることが共通している。この場合、事例数が多いカテゴリーに有利な分析が行なわれていると考えられ（標本誤差）、その結果、分析精度を悪くする要因となる可能性がある。この場合、幾つかの統計的手法を用いることにより分析精度の向上が期待できる可能性がある。例えば、事例数の少ないカテゴリーに対し事例を複製（オーバーサンプリングという）することにより分析精度の向上が図れる可能性がある。または、着目しているカテゴリーの判別割合が低い場合、そのカテゴリーに他のカテゴリーよりも大きな重みを付ける（誤分類コストの設定）ことで、良好な結果が得られる可能性がある。このように、「比較的悪い分析となった分析ケース」に対しての分析精度の改善、さらには「比較的良い分析となった分析ケース」についても、より分析精度の高い結果が得られるような改善の余地があると考えられる。今後は、それら改善策を個別に具体化するとともに、これまでの分

析作業により得られた知見とノウハウを集約した形で、決定木分析による核種移行解析結果の感度分析を行う人の参考となるような決定木分析手法の適用手順を提示していく予定である。

さらには重回帰分析などの他の感度分析手法との組み合わせによる多角的な分析手法の整備を進め反映先、対象および切り口のそれぞれの組み合せに対して適切な分析手法を検討し、それらを体系的な技術としてまとめていくことが重要となる。これにより複数の分析結果を比較・検証することにより結果の信頼性を高める効果が期待できる。また、複数の多変量解析手法について、それぞれの長所を活かし欠点を補い合うように組合せた分析手法を構築することにより、単独の多変量解析手法の場合よりも有用な結果を得ることが期待できると考える。

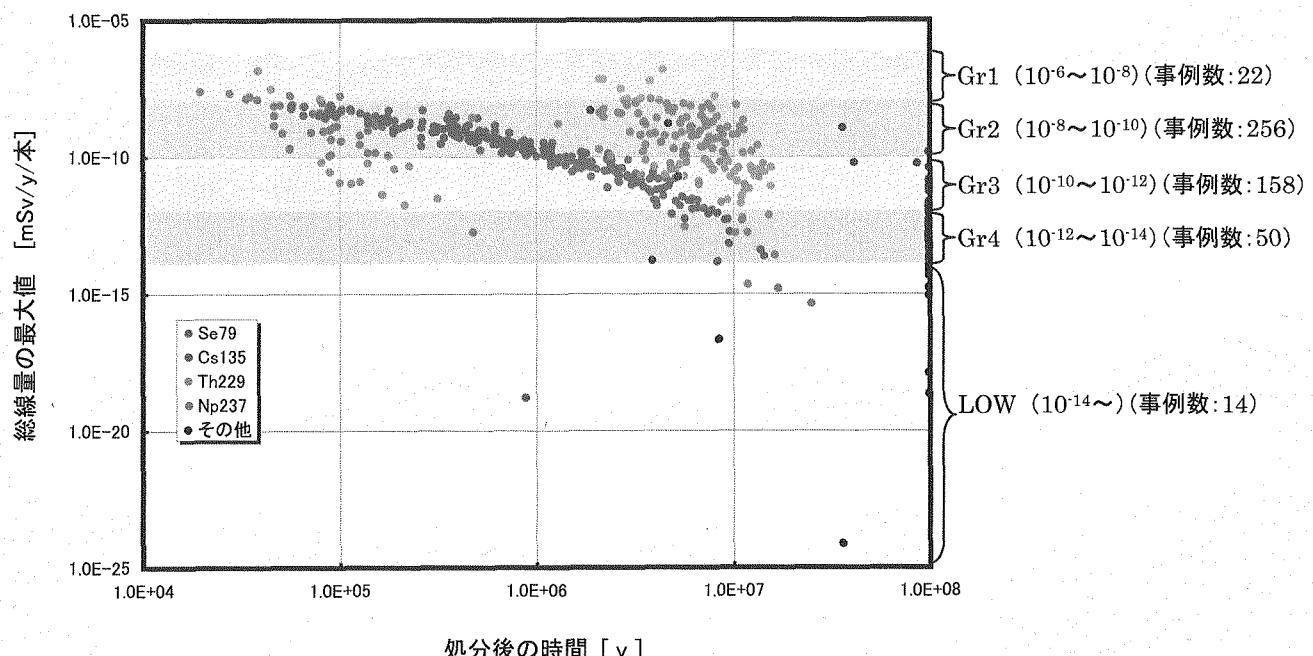
### 参考文献

- 1) IAEA: "Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes" Technical Reports Series No.413 (2003).
- 2) 若杉圭一郎, 小尾 繁, 牧野仁史: "モンテカルロシミュレーションによる高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価に対するデータ不確実性解析", サイクル機構技報, No14, pp.149-160 (2002).
- 3) 仲島邦彦, 牧野仁史: "決定木分析を用いた核種移行解析結果の感度分析の検討", 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2005-001(2005).
- 4) マイケル J.A.ベリー, ゴードン・リノフ: データマイニング手法 (SAS インスティチュートジャパン, 江原淳, 佐藤栄作 共訳), 海文堂, pp.157-210(1999).
- 5) 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 分冊 3 地層処分システムの安全評価", サイクル機構技術資料, JNC TN1400 99-023 (1999).
- 6) スタットソフトジャパン株式会社: STATISTICA デシジョンツリー操作ガイド (2000).

### 付録 その他の分析結果

分析ケース：総線量の最大値を2桁ずつカテゴリー化

- (1) 分析の切り口：全体的なばらつきに寄与するパラメータとその定量的条件を把握
- (2) 分析の対象：総線量の最大値軸に着目
- (3) 分析の目的：総線量の最大値を2桁ずつカテゴリー化することにより、全体的なばらつきを擬似的に表現した場合の各カテゴリーの判別



付図1.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果(総線量の最大値, 500リアルイゼーション)のカテゴリー化  
(総線量の最大値を2桁ずつカテゴリー化)

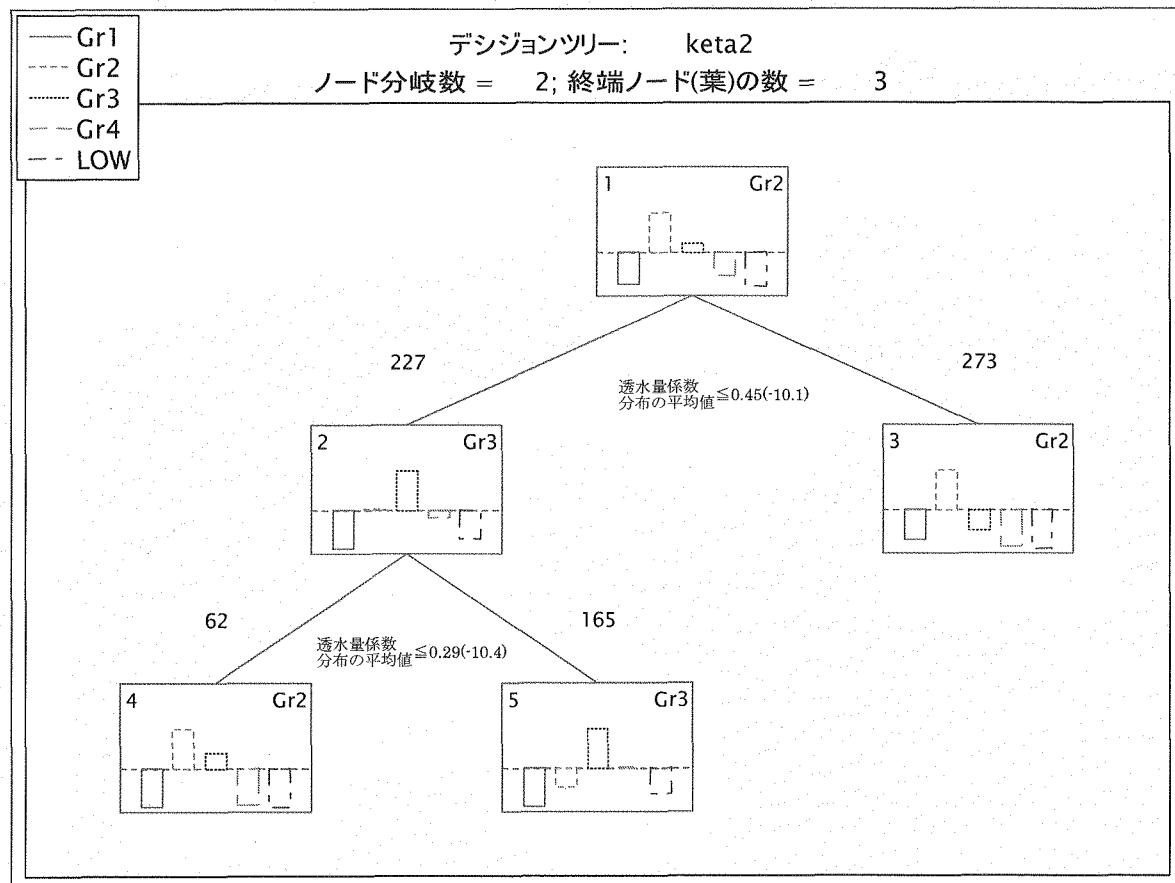
#### (4) 各カテゴリーの判別割合

付表1 カテゴリー別の判別結果 (総線量の最大値を2桁ずつカテゴリー化)

実際の 判別された カテゴリー	Gr1	Gr2	Gr3	Gr4	LOW	カテゴリー別 判別割合(%)
Gr1	0	0	0	0	0	0%
Gr2	22	235	72	6	0	92%
Gr3	0	21	86	44	14	54%
Gr4	0	0	0	0	0	0%
LOW	0	0	0	0	0	0%
実際の 事例数	22	256	158	50	14	

学習事例 N = 500

## (5) 決定木



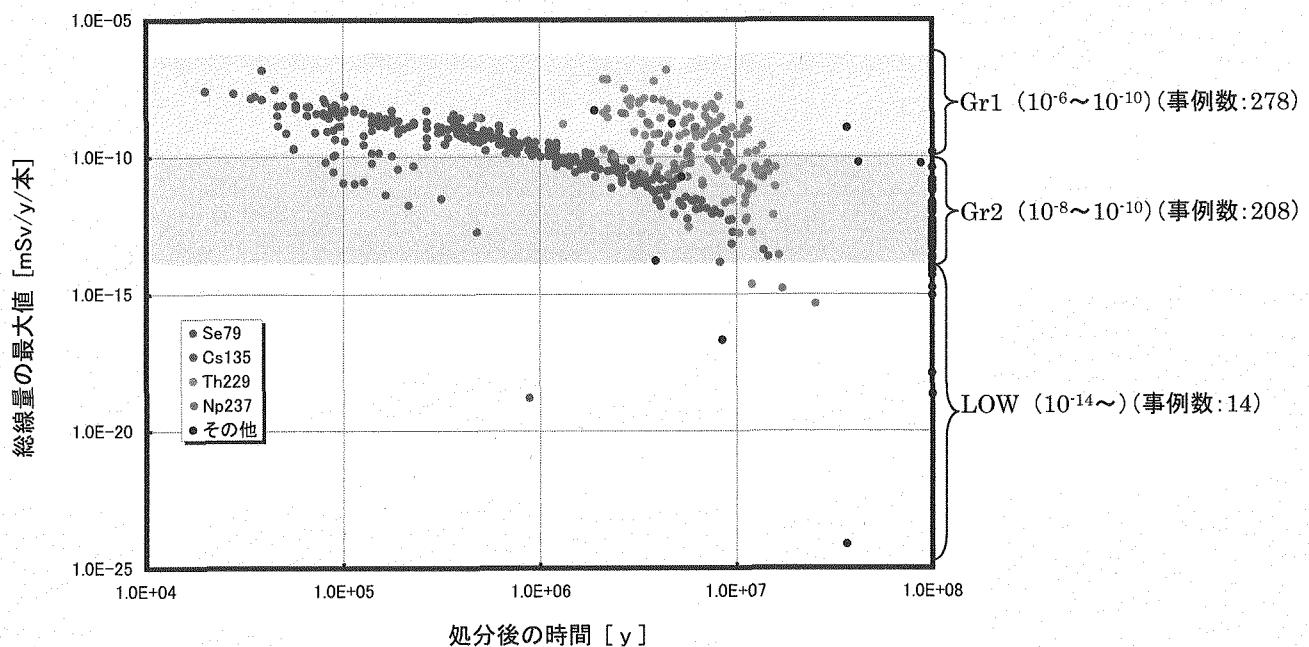
付図 1.2 決定木(総線量の最大値を 2 衍ずつカテゴリー化)

## (6) 判別結果

付表 1 のカテゴリー別の判別結果から、Gr2 が正しく判別された割合が 92% と最も高く、次に Gr3 が 54% の割合で判別された。Gr1 は Gr2 に、Gr4 の殆どと LOW は Gr3 に、それぞれ誤判別されている。また、決定木のツリーの状態は比較的簡単であり、抽出された重要パラメータは透水量係数分布の平均値のみであった。なお、本分析ケースの分析結果は「比較的悪い分析となった分析ケース」として分類した。

### 付分析ケース：総線量の最大値を4桁ずつカテゴリー化

- (1) 分析の切り口：全体的なばらつきに寄与するパラメータとその定量的条件を把握
- (2) 分析の対象：総線量の最大値軸に着目
- (3) 分析の目的：総線量の最大値を4桁ずつカテゴリー化することにより、全体的なばらつきを擬似的に表現した場合の各カテゴリーの判別



付図2.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果(総線量の最大値, 500アライゼーション)のカテゴリー化  
(総線量の最大値を4桁ずつカテゴリー化)

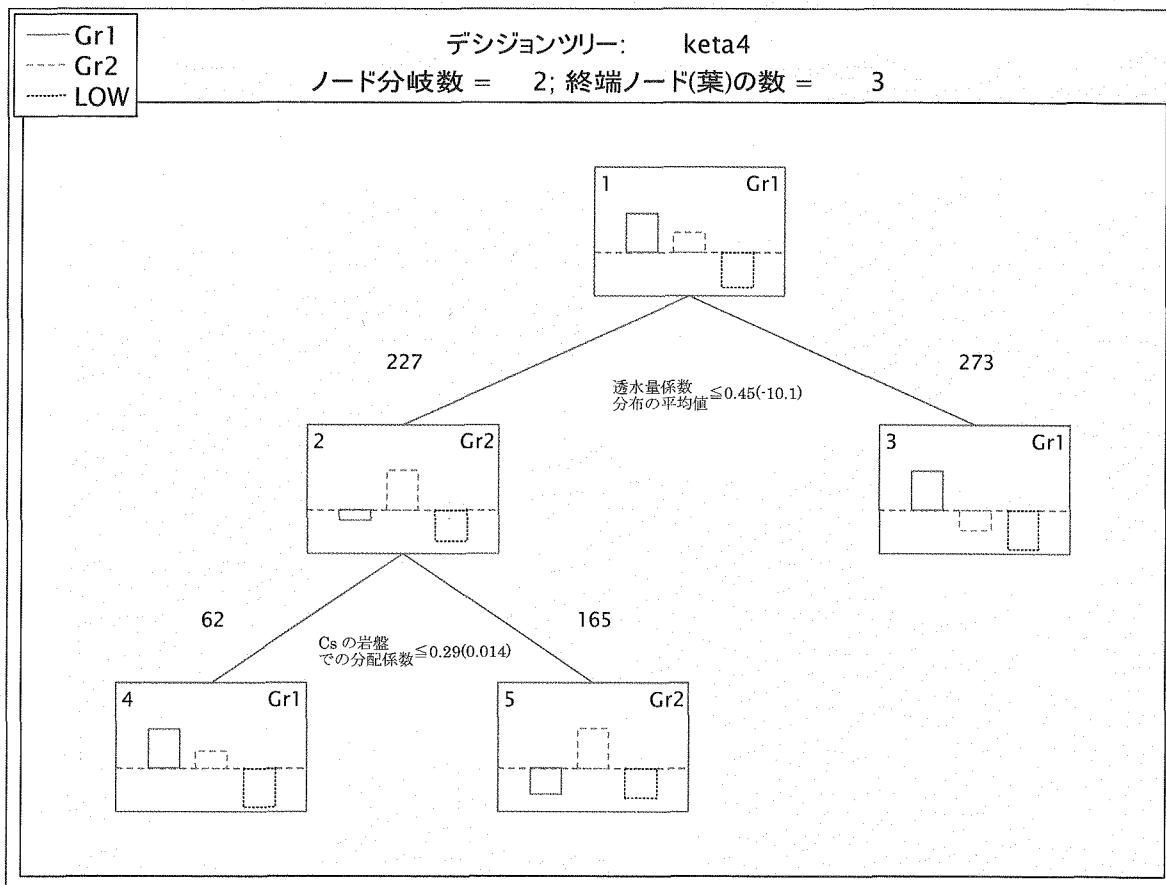
### (4) 各カテゴリーの判別割合

付表2 カテゴリー別の判別結果(総線量の最大値を4桁ずつカテゴリー化)

実際の 判別された カテゴリー	GR1	GR2	LOW	カテゴリー別 判別割合(%)
GR1	257	78	0	92%
GR2	21	130	14	63%
LOW	0	0	0	0%
実際の 事例数	278	208	14	

学習事例 N = 500

## (5) 決定木



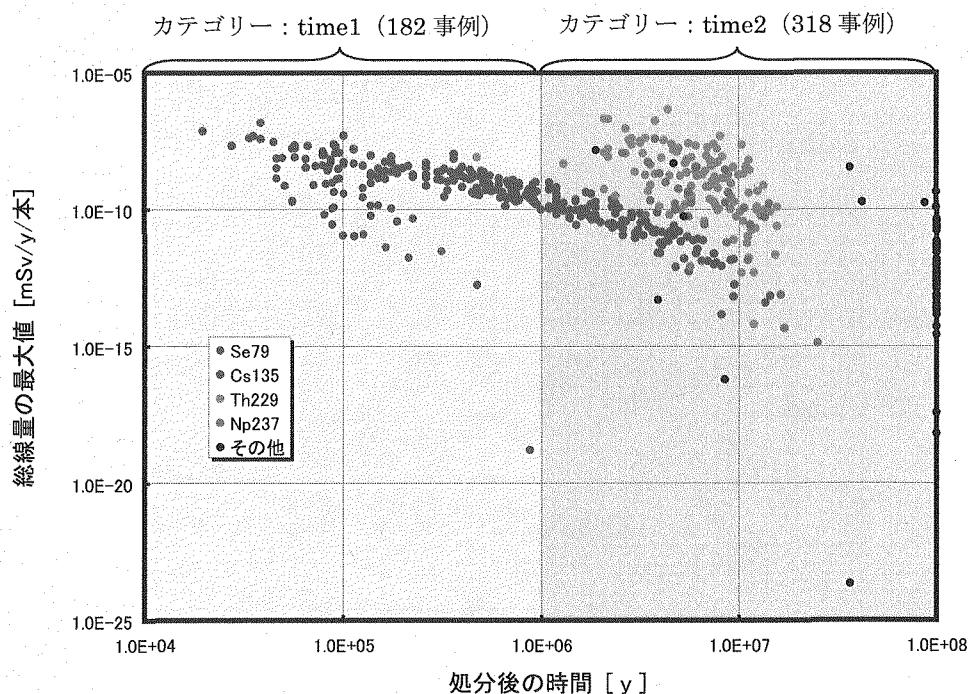
付図 2.2 決定木(総線量の最大値を 4 枝ずつカテゴリー化)

## (6) 判別結果

付表 2 のカテゴリー別の判別結果から、Gr1 が正しく判別された割合が 92% と最も高く、次に Gr2 が 63% の割合で判別され、LOW は Gr2 に誤判別されている。また、決定木のツリーの状態は比較的簡単であり、抽出された重要パラメータは透水量係数分布の平均値、 $C_s$  の岩盤での分配係数の 2 つのみであった。なお、本分析ケースの分析結果は「良好な分析が行えた分析ケース」として分類した。

分析ケース：総線量の最大値の発生時間を  $10^4\sim10^8$  年の間の  $10^6$  年の境界でカテゴリー化

- (1) 分析の切り口：全体的なばらつきに寄与するパラメータとその定量的条件を把握
- (2) 分析の対象：処分後の時間軸に着目
- (3) 分析の目的：処分後の時間を  $10^4\sim10^8$  年の間の  $10^6$  年の境界でカテゴリー化することにより、総線量の最大値の発生時刻のばらつきを擬似的に表現した場合の各カテゴリーの判別



付図3.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果(総線量の最大値, 500リアライゼーション)のカテゴリー化  
(総線量の最大値の発生時間を  $10^4\sim10^8$  年の間の  $10^6$  年の境界で  
カテゴリー化)

#### (4) 各カテゴリーの判別割合

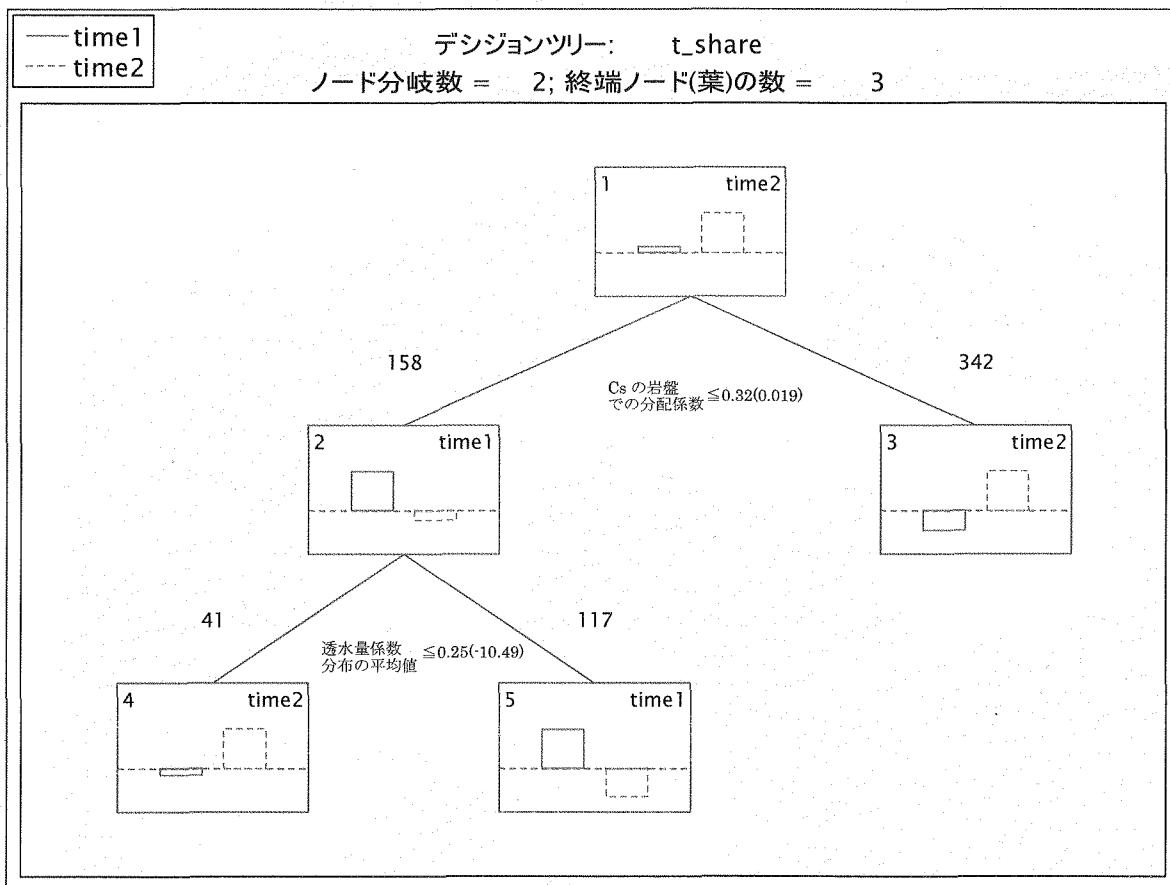
付表 3 カテゴリー別の判別結果

(総線量の最大値の発生時間を  $10^4\sim10^8$  年の間の  $10^6$  年の境界でカテゴリー化)

実際の 判別された カテゴリー	time1	time2	カテゴリー別 判別割合(%)
time1	103	14	57%
time2	79	304	96%
実際の 事例数	182	318	

学習事例 N = 500

## (5) 決定木



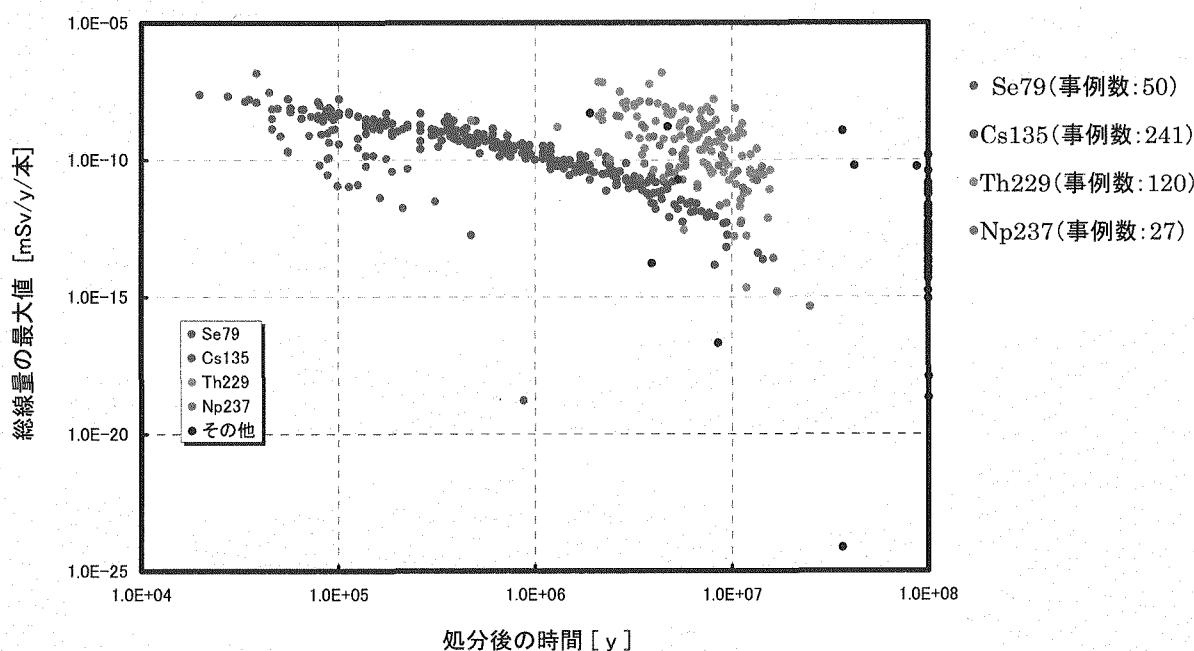
付図 3.2 決定木(総線量の最大値の発生時間を  $10^4 \sim 10^8$  年の間の  $10^6$  年の境界で  
カテゴリー化)

## (6) 判別結果

付表 3 のカテゴリー別の判別結果から, time2 が正しく判別された割合が 96% と最も高く, time1 は 57% の割合で判別されている。また、決定木のツリーの状態は比較的簡単であり、抽出された重要パラメータは透水量係数分布の平均値, Cs の岩盤での分配係数の 2 つのみであった。なお、本分析ケースの分析結果は「比較的良好な分析が行えた分析ケース」として分類した。ただし、総線量の最大値の発生時間が早い結果（カテゴリー time1）の方が安全評価上重要と思われるため、本ケースを「比較的良好な分析が行えた分析ケース」としているが、遅い結果（カテゴリー time2）を重視する分析であれば、この分析ケースは「良好な分析が行えた分析ケース」となり得る。

### 分析ケース：支配核種をカテゴリー化

- (1) 分析の切り口：全体的なばらつきに寄与するパラメータとその定量的条件を把握
- (2) 分析の対象：まとまりに着目
- (3) 分析の目的：支配核種の違いが総線量の最大値やその発生時間のばらつきと関係していることに着目して、支配核種の変化に寄与するパラメータを判別



付図4.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果(総線量の最大値, 500アライゼーション)のカテゴリー化  
(支配核種をカテゴリー化)

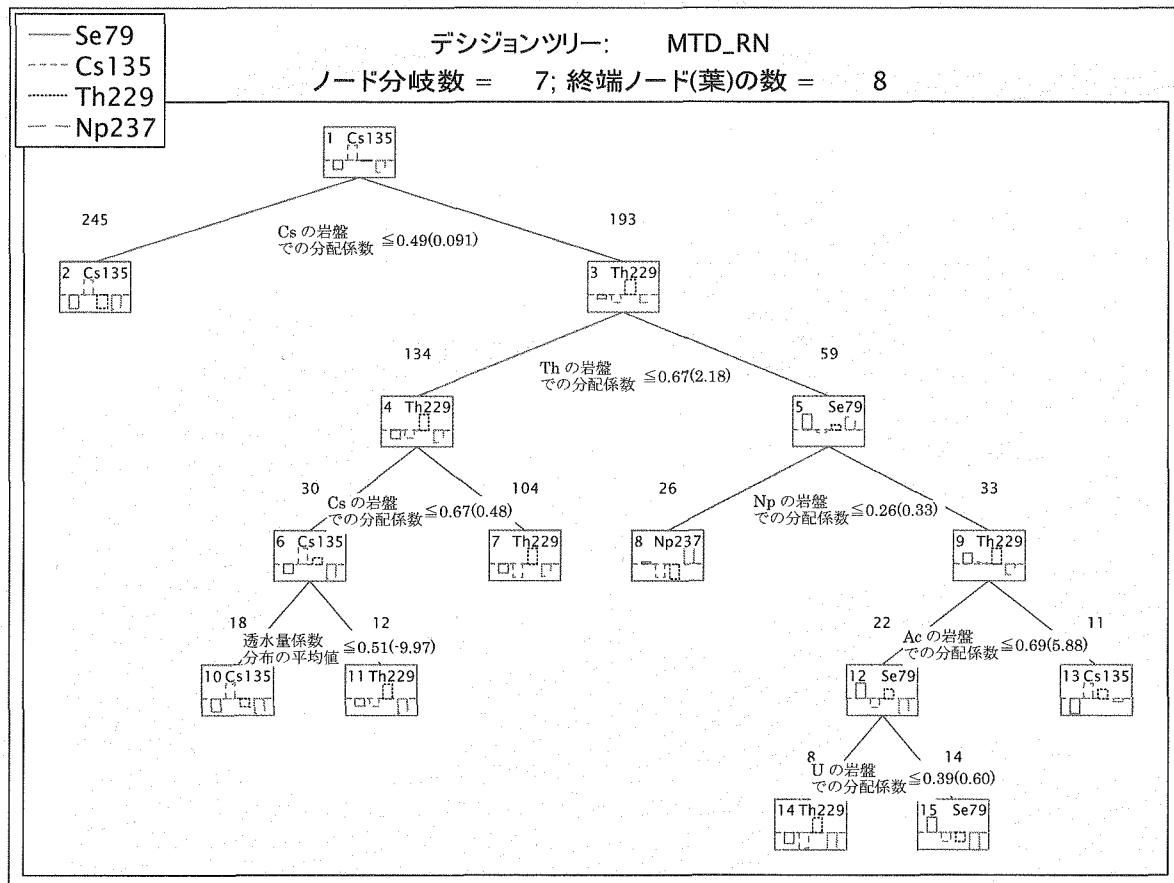
### (4) 各カテゴリーの判別割合

付表4 カテゴリー別の判別結果 (支配核種をカテゴリー化)

実際の 判別された カテゴリー	Se79	Cs135	Th229	Np237	カテゴリー別 判別割合(%)
Se79	10	2	2	0	20%
Cs135	13	233	24	4	97%
Th229	18	5	94	7	78%
Np237	9	1	0	16	59%
実際の 事例数	50	241	120	27	

学習事例 N = 438

## (5) 決定木



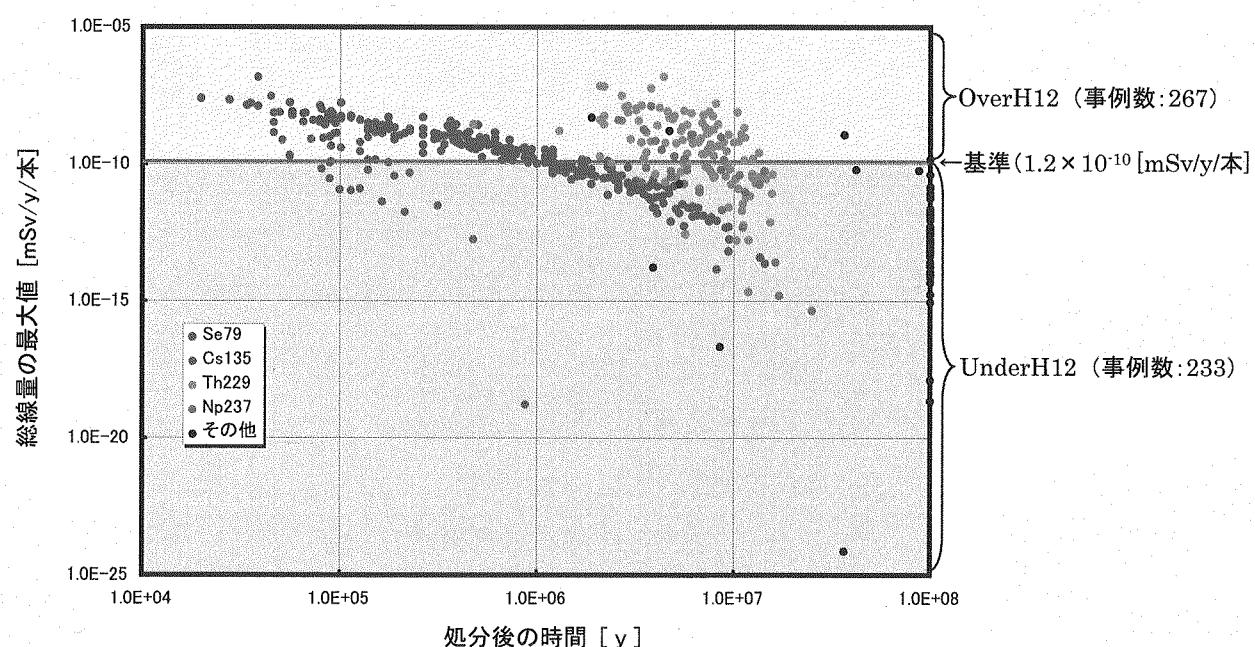
付図 4.2 決定木(支配核種をカテゴリー化)

## (6) 判別結果

付表 4 のカテゴリー別の判別結果から、Cs135 が正しく判別された割合が 97% と最も高く、次に Th229 が 78% の割合で判別され、Np237 の判別割合は 59% であった。さらに、Se79 は 20% の割合で判別された。また、決定木のツリーの状態は比較的複雑であり、抽出された重要パラメータにおいても透水量係数分布の平均値、Cs の岩盤での分配係数、Th の岩盤での分配係数、Np の岩盤での分配係数、Ac の岩盤での分配係数、U の岩盤での分配係数の 6 つと比較的多かった。なお、本分析ケースの分析結果は「比較的良好な分析が行えた分析ケース」として分類した。

分析ケース：総線量の最大値を第2次取りまとめのR.C.における総線量の最大値を基準として高い結果と低い結果で2つにカテゴリー化

- (1) 分析の切り口：あるしきい値を超えるあるいは下回る結果に寄与するパラメータとその定量的条件を把握
- (2) 分析の対象：総線量の最大値軸に着目
- (3) 分析の目的：総線量の最大値を第2次取りまとめのR.C.における総線量の最大値を基準として高い結果と低い結果の判別



付図5.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果(総線量の最大値, 500アライゼーション)のカテゴリー化  
(総線量の最大値を第2次取りまとめのR.C.における総線量の最大値を基準として高い結果と低い結果で2つにカテゴリー化)

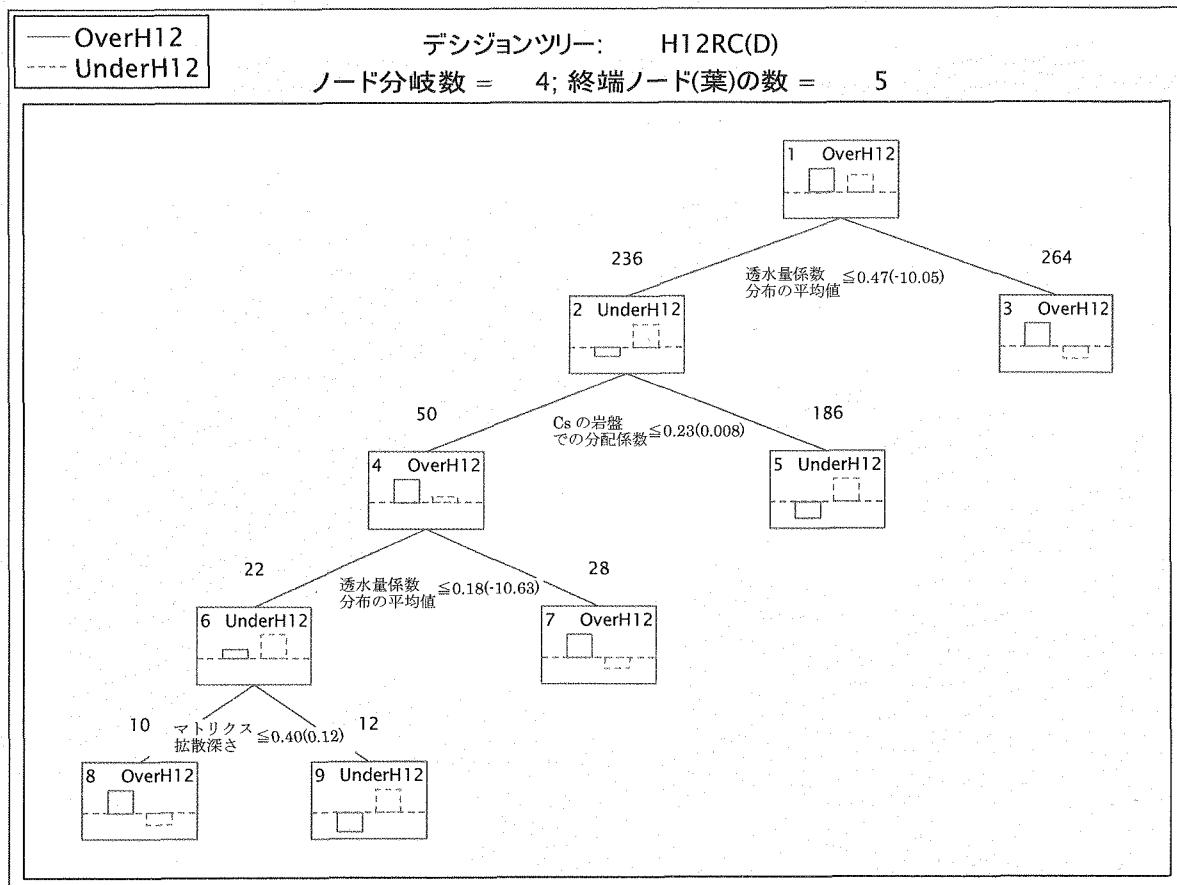
#### (4) 各カテゴリーの判別割合

付表5 カテゴリー別の判別結果(総線量の最大値を第2次取りまとめのR.C.における総線量の最大値を基準として高い結果と低い結果で2つにカテゴリー化)

実際の 判別された カテゴリー	OverH12	UnderH12	カテゴリー別 判別割合(%)
OverH12	242	60	91%
UnderH12	25	173	74%
実際の 事例数	267	233	

学習事例 N = 500

## (5) 決定木



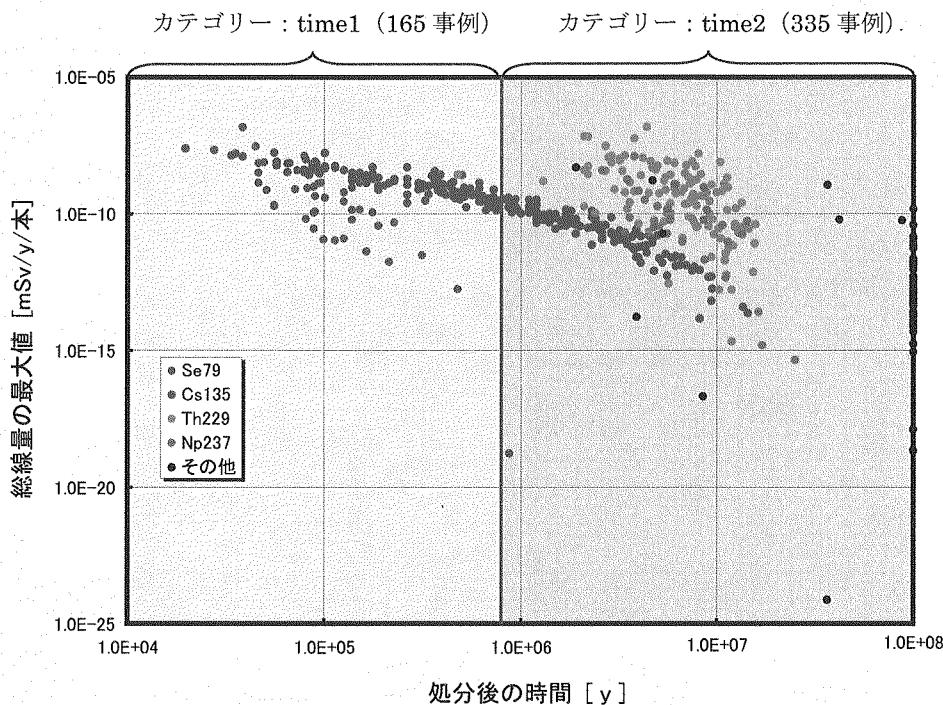
付図 5.2 決定木(総線量の最大値を第2次取りまとめの R.C.における総線量の最大値を基準として高い結果と低い結果で2つにカテゴリー化)

## (6) 判別結果

付表 5 のカテゴリー別の判別結果から、OverH12 が正しく判別された割合が 91% と最も高く、UnderH12 は 74% の割合で判別されている。また、決定木のツリーの状態は比較的複雑であるが、抽出された重要パラメータは透水量係数分布の平均値、Cs の岩盤での分配係数、マトリクス拡散深さの 3 つのみであった。なお、本分析ケースの分析結果は「良好な分析が行えた分析ケース」として分類した。

分析ケース：総線量の最大値を第2次取りまとめのR.C.における総線量の最大値の発生時間に基づいて早い結果と遅い結果で2つにカテゴリー化

- (1) 分析の切り口：あるしきい値を超えるあるいは下回る結果に寄与するパラメータとその定量的条件を把握
- (2) 分析の対象：処分後の時間軸に着目
- (3) 分析の目的：総線量の最大値を第2次取りまとめのR.C.における総線量の最大値の発生時間を基準として早い結果と遅い結果の判別



付図6.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果(総線量の最大値, 500アライゼーション)のカテゴリー化  
(総線量の最大値を第2次取りまとめのR.C.における総線量の最大値の発生時間を基準として早い結果と遅い結果で2つにカテゴリー化)

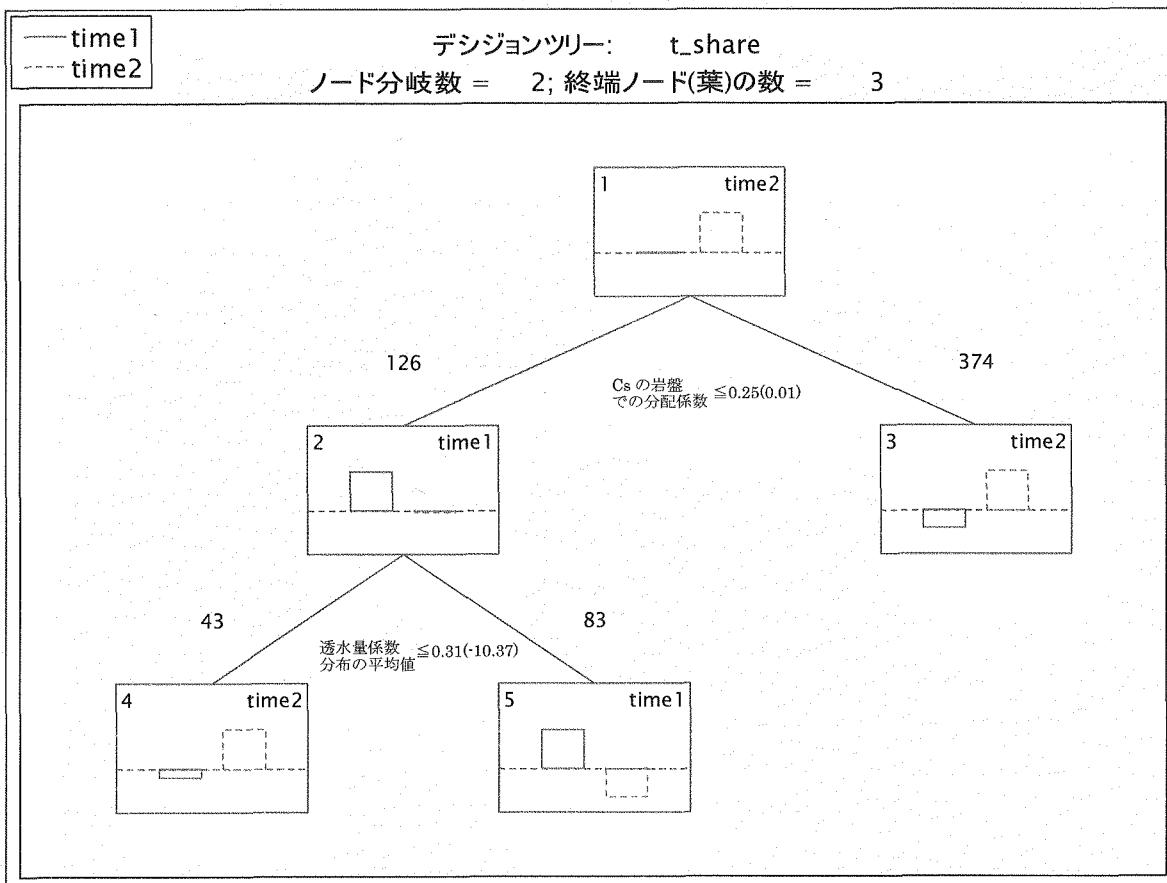
#### (4) 各カテゴリーの判別割合

付表6 カテゴリー別の判別結果 (総線量の最大値を第2次取りまとめのR.C.における総線量の最大値の発生時間を基準として早い結果と遅い結果で2つにカテゴリー化)

実際の 判別された カテゴリー	time1	time2	カテゴリー別 判別割合(%)
time1	73	10	44%
time2	92	325	97%
実際の 事例数	165	335	

学習事例 N = 500

## (5) 決定木



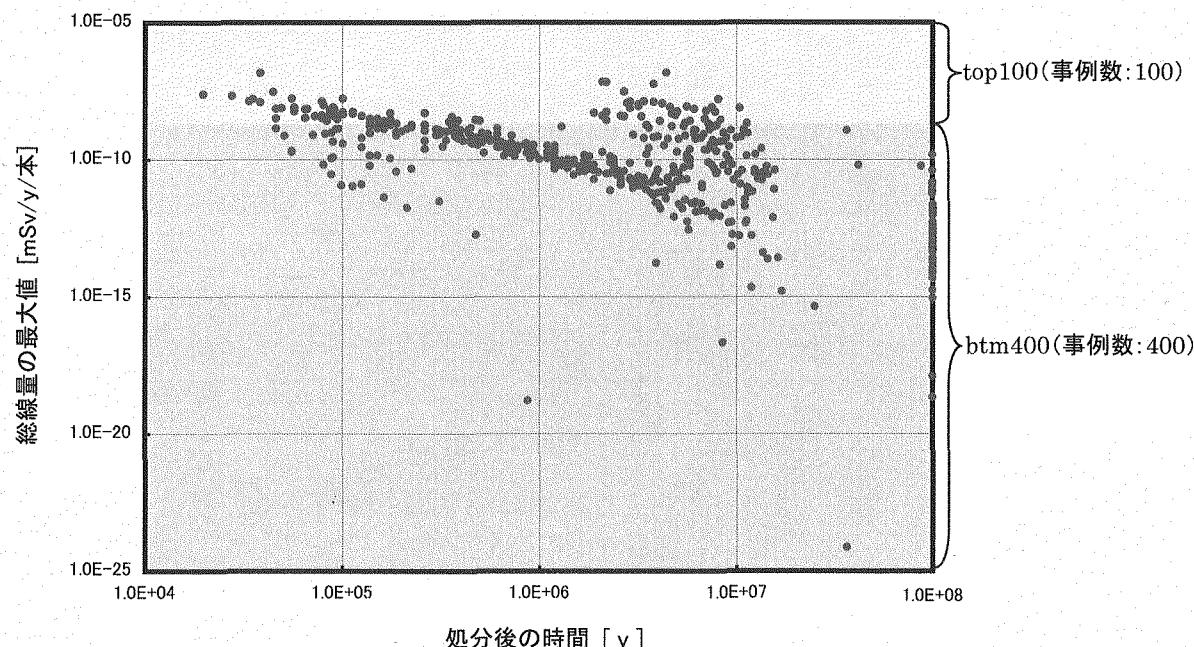
付図 6.2 決定木(総線量の最大値を第2次取りまとめの R.C.における総線量の最大値の発生時間を基準として早い結果と遅い結果で2つにカテゴリー化)

## (6) 判別結果

付表 6 のカテゴリー別の判別結果から, time2 が正しく判別された割合が 97% と最も高く, time1 は 44% の割合で判別されている。また、決定木のツリーの状態は比較的簡単であり、抽出された重要パラメータは透水量係数分布の平均値, Cs の岩盤での分配係数の 2 つのみであった。なお、本分析ケースの分析結果は「比較的悪い分析となった分析ケース」として分類した。ただし、総線量の最大値の発生時間が早い結果（カテゴリー time1）の方が安全評価上重要と思われるため、本ケースを「比較的悪い分析となった分析ケース」としているが、遅い結果（カテゴリー time2）を重視する分析であれば、この分析ケースは「良好な分析が行えた分析ケース」となり得る。

### 分析ケース：総線量の最大値の上位 100 のみをカテゴリー化

- (1) 分析の切り口：特定のある値の領域の発生に寄与するパラメータとその定量的条件を把握
- (2) 分析の対象：総線量の最大値軸に着目
- (3) 分析の目的：総線量の最大値から上位 100 リアライゼーションだけをカテゴリー化し、  
その他のリアライゼーションのカテゴリー化との判別



付図7.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの  
結果(総線量の最大値, 500リアライゼーション)のカテゴリー化  
(総線量の最大値の上位 100 のみをカテゴリー化)

- (4) 各カテゴリーの判別割合

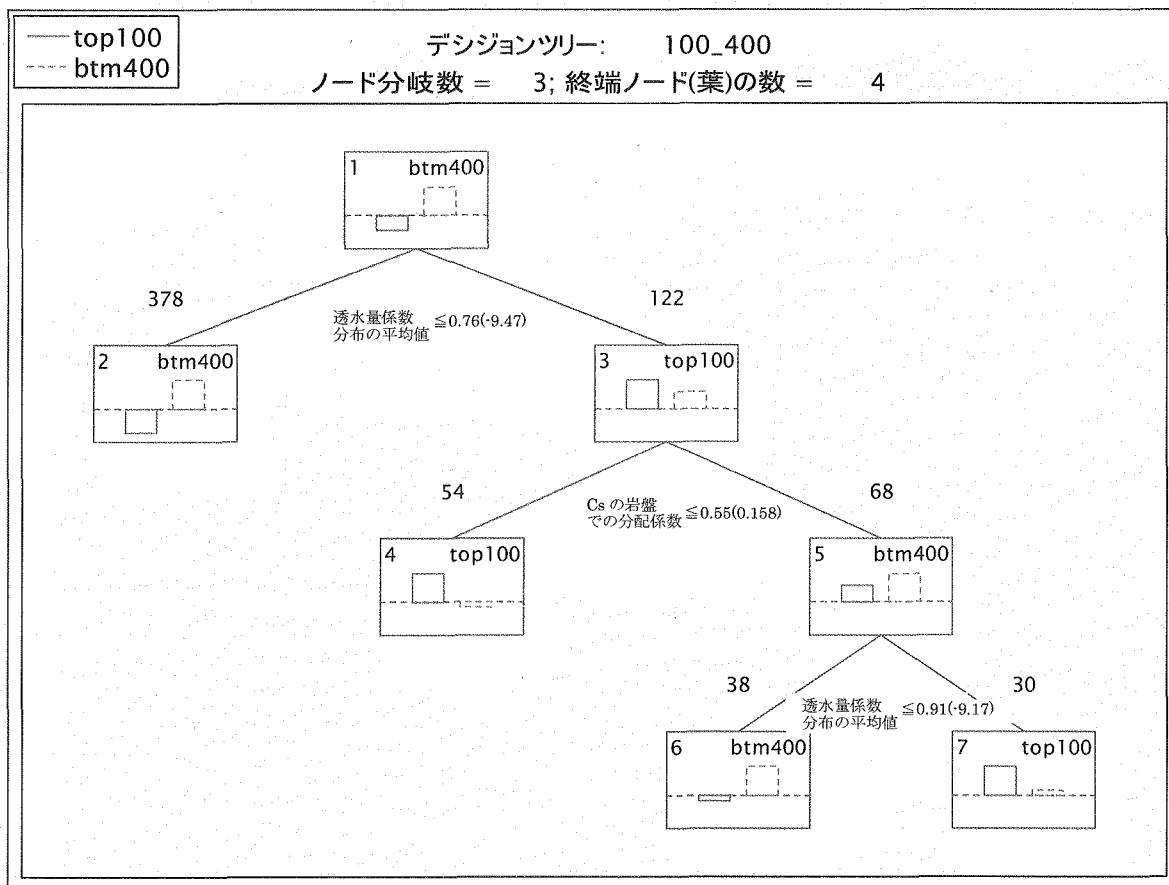
付表 7 カテゴリー別の判別結果

(総線量の最大値の上位 100 のみをカテゴリー化)

実際の 判別された カテゴリー	top100	btm400	カテゴリー別 判別割合(%)
top100	57	27	57%
btm400	43	373	93%
実際の 事例数	100	400	

学習事例 N = 500

## (5) 決定木



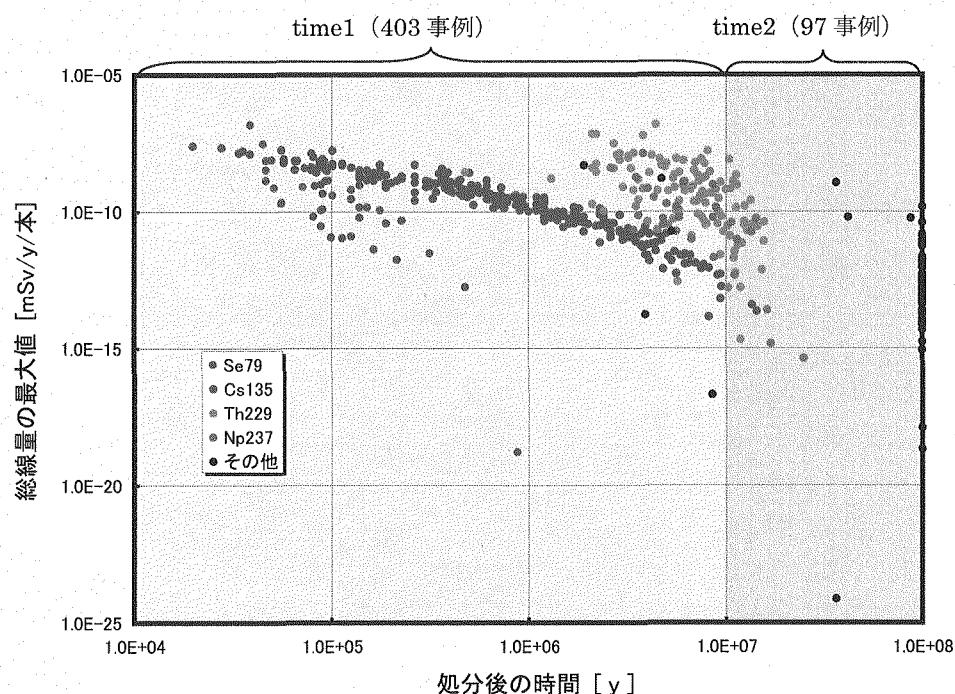
付図 7.2 決定木(総線量の最大値の上位 100 のみをカテゴリー化)

## (6) 判別結果

付表 7 のカテゴリー別の判別結果から、btm400 が正しく判別された割合が 93% と最も高く、top100 は 57% の割合で判別されている。また、決定木のツリーの状態は比較的簡単であり、抽出された重要パラメータは透水量係数分布の平均値、Cs の岩盤での分配係数の 2 つのみであった。なお、本分析ケースの分析結果は「比較的良好な分析が行えた分析ケース」として分類した。ただし、総線量の最大値が高い結果（カテゴリー top100）の方が安全評価上重要と思われるため、本ケースを「比較的良好な分析が行えた分析ケース」としているが、低い結果（カテゴリー btm400）を重視する分析であれば、この分析ケースは「良好な分析が行えた分析ケース」となり得る。

分析ケース：総線量の最大値の発生時間が  $10^7$  年以降をカテゴリー化

- (1) 分析の切り口：特定のある値の領域の発生に寄与するパラメータとその定量的条件を把握
- (2) 分析の対象：処分後の時間軸に着目
- (3) 分析の目的：総線量の最大値の発生時間が  $10^7$  年以降のカテゴリーとそれ以前のカテゴリーの判別



付図8.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果（総線量の最大値、500アライゼーション）のカテゴリー化  
(総線量の最大値の発生時間が  $10^7$  年以降をカテゴリー化)

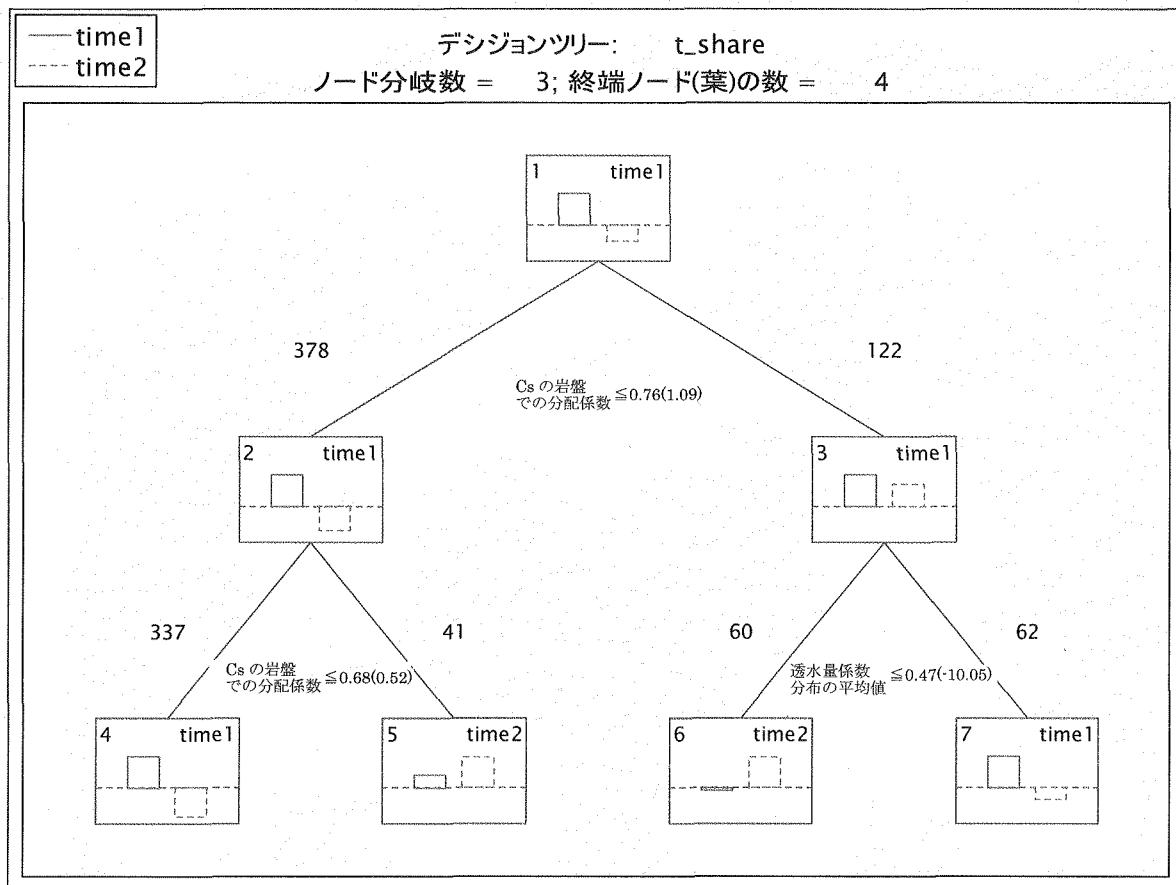
## (4) カテゴリーの判別割合

付表 8 カテゴリー別の判別結果  
(総線量の最大値の発生時間が  $10^7$  年以降をカテゴリー化)

実際の 判別された カテゴリー	time1	time2	カテゴリー別 判別割合(%)
time1	367	32	91%
time2	36	65	67%
実際の 事例数	403	97	

学習事例 N = 500

## (5) 決定木

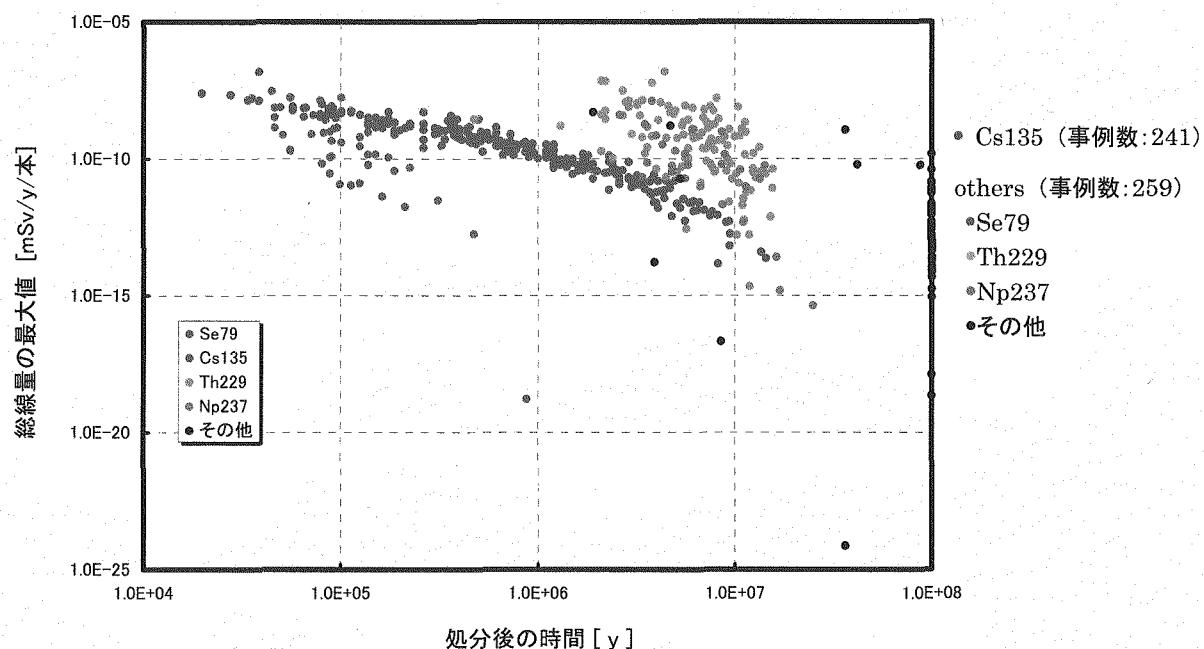
付図 8.2 決定木(総線量の最大値の発生時間が  $10^7$  年以降をカテゴリー化)

## (6) 判別結果

付表 8 のカテゴリー別の判別結果から、time1 が正しく判別された割合が 91% と最も高く、time2 は 67% の割合で判別されている。また、決定木のツリーの状態は比較的簡単であり、抽出された重要パラメータは透水量係数分布の平均値、Cs の岩盤での分配係数の 2 つのみであった。なお、本分析ケースの分析結果は「良好な分析が行えた分析ケース」として分類した。

### 分析ケース：Cs135 が支配核種とするカテゴリー化

- (1) 分析の切り口：特定のある値の領域の発生に寄与するパラメータとその定量的条件を把握
- (2) 分析の対象：まとまりに着目
- (3) 分析の目的：総線量の最大値の中から Cs135 が支配核種とするカテゴリーの判別



付図9.1 データ不確実性を網羅的に考慮したモンテカルロシミュレーションの結果(総線量の最大値, 500リアライゼーション)のカテゴリー化  
(Cs135 が支配核種とするカテゴリー化)

### (4) 各カテゴリーの判別割合

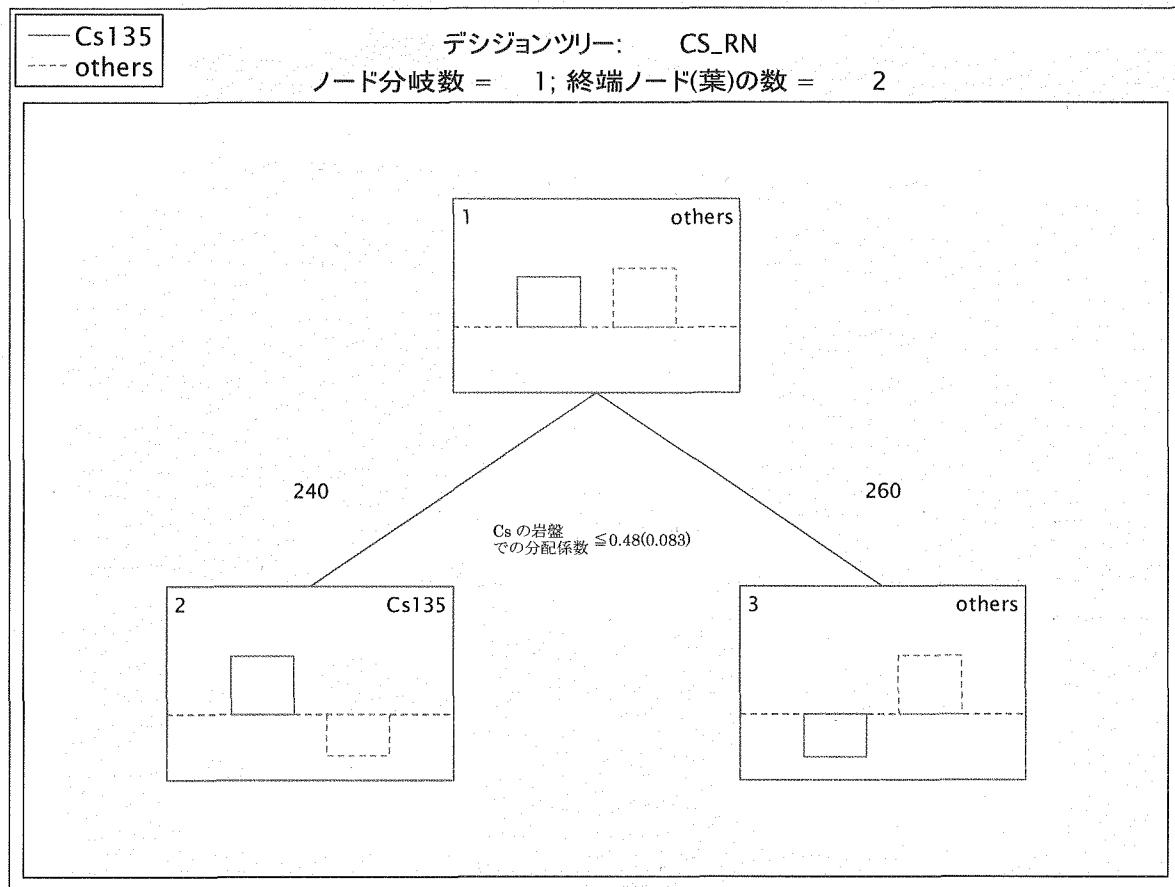
付表 9 カテゴリー別の判別結果

(Cs135 が支配核種とするカテゴリー化)

実際の 判別された カテゴリー	Cs135	others	カテゴリー別 判別割合(%)
Cs135	211	29	88%
others	30	230	89%
実際の 事例数	241	259	

学習事例 N = 500

## (5) 決定木



付図 9.2 決定木(Cs135 が支配核種とするカテゴリー化)

## (6) 判別結果

付表 9 のカテゴリー別の判別結果から, Others が正しく判別された割合が 89% と最も高く, Cs135 は 88% の割合で判別されている。また、決定木のツリーの状態は簡単であり、抽出された重要パラメータも Cs の岩盤での分配係数のみであった。なお、本分析ケースの分析結果は「良好な分析が行えた分析ケース」として分類した。

### 各分析ケースで抽出された重要パラメータ

ここでは、各分析ケースにおいて決定木分析により各カテゴリーに属することを特徴付けるために抽出された重要パラメータの一覧を付表 10 に示す。

付表 10 各分析ケースで抽出された重要パラメータの一覧

分析ケース	総線量の最大値を 2 枝ずつカテゴリー化											
重要パラメータ	透水量係数分布の平均値											
分析ケース	総線量の最大値を 3 枝ずつカテゴリー化											
重要パラメータ	透水量係数分布の平均値	Cs の岩盤での分配係数	マトリクス拡散深さ									
分析ケース	総線量の最大値を 4 枝ずつカテゴリー化											
重要パラメータ	透水量係数分布の平均値	Cs の岩盤での分配係数										
分析ケース	総線量の最大値の発生時間を $10^4 \sim 10^8$ 年の間の $10^6$ 年の境界でカテゴリー化											
重要パラメータ	透水量係数分布の平均値	Cs の岩盤での分配係数										
分析ケース	支配核種をカテゴリー化											
重要パラメータ	透水量係数分布の平均値	Cs の岩盤での分配係数	Th の岩盤での分配係数	Np の岩盤での分配係数	Ac の岩盤での分配係数							
分析ケース	総線量の最大値を第 2 次取りまとめの R.C.における総線量の最大値を基準として高い結果と低い結果で2つにカテゴリー化											
重要パラメータ	透水量係数分布の平均値	Cs の岩盤での分配係数	マトリクス拡散深さ									
分析ケース	総線量の最大値を第2次取りまとめの R.C.における総線量の最大値の発生時間を基準として早い結果と遅い結果で2つにカテゴリー化											
重要パラメータ	透水量係数分布の平均値	Cs の岩盤での分配係数										
分析ケース	総線量の最大値の上位 100 のみをカテゴリー化											
重要パラメータ	透水量係数分布の平均値	Cs の岩盤での分配係数										
分析ケース	総線量の最大値の発生時間が $10^7$ 年以降をカテゴリー化											
重要パラメータ	透水量係数分布の平均値	Cs の岩盤での分配係数										
分析ケース	Cs <sup>135</sup> が支配核種とするカテゴリー化											
重要パラメータ	Cs の岩盤での分配係数											

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	名称	記号
長さ	メートル	m	
質量	キログラム	kg	
時間	秒	s	
電流	アンペア	A	
熱力学温度	ケルビン	K	
物質量	モル	mol	
光度	カンデラ	cd	

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>	
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>	
速度	メートル毎秒	m/s	
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>	
波数	メートル毎秒	m <sup>-1</sup>	
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>	
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg	
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>	
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m	
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>	
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>	
屈折率	(数の)1	1	1

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨーダ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エク	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ベタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘク	h	10 <sup>-21</sup>	ゼット	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
压力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー, 仕事, 熱量	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
功率, 放射束	ワット	W	$m^3 \cdot kg \cdot s^{-2}$
電荷, 電気量	クーロン	C	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V	$W/A$
静電容量	アラド	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
コンダクタンス	ジemens	S	$V/A$
磁束密度	ウエーバー	Wb	$A/V$
インダクタンス	テスラ	T	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
セルシウス温度	ヘルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C	$Wb/m^2$
光束度	ルーメン	lm	$Wb/A$
(放射性核種の)放射能吸収線量, 質量エネルギー一分率, カーマ	ベクレル	Bq	$K$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	グレイ	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$
			$J/kg$
			$m^2 \cdot s^{-2}$
			$cd \cdot sr^{(c)}$
			$lm \cdot m^2$
			$lm/m^2$
			$lm \cdot m^2 \cdot cd = cd$
			$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
			$s^{-1}$
			$m^2 \cdot s^{-2}$
			$J/kg$
			$m^2 \cdot s^{-2}$
			$J/kg$
			$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表 4 に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号 rad 及び sr が用いられるが、習慣として組立単位としての記号 “1” は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号 sr を単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度 m°C のように SI 接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
の分子量	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エンタルピー	毎ケルビン	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^2 \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	$m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^2$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエンタルピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^3 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル	W/(m <sup>2</sup> ·sr)	$m^2 \cdot m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$
ダイナ	dyn	$1 \text{ dyn} = 10^{-5} \text{ N}$
ボアズ	P	$1 P = 1 \text{ dyn} \cdot s/cm^2 = 0.1 \text{ Pa} \cdot s$
ストークス	St	$1 St = 1 cm^2/s = 10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G = 10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe = (1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx = 10^{-8} Wb$
スチール	sb	$1 sb = 1 cd/cm^2 = 10^4 cd/m^2$
ホーリー	ph	$1 ph = 10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal = 1 cm/s^2 = 10^{-2} m/s^2$

表 10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R = 2.58 \times 10^{-2} C/kg$
ラド	rad	$1 rad = 1 Gy = 10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem = 1 Sv = 10^{-2} Sv$
X線単位		$1 X unit = 1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9} T$
ジアンスキュー	Jy	$1 Jy = 10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi = 1 fm = 10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
標準大気圧	atm	$1 Torr = (101.325/760) Pa$
カリヨン	cal	$1 atm = 101.325 Pa$
ミクロ	μ	$1 \mu = 1 pm = 10^{-6} m$