

包括的感度解析ツールの体系化・高度化（その2）概要

（核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書）

2004年2月

日揮株式会社

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

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

電話:029-282-1122(代表)
ファックス:029-282-7980
電子メール:jserv@jnc.go.jp

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

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2004

包括的感度解析ツールの体系化・高度化（その2）概要
（核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書）

小山田潔* 池田孝夫*

要旨

本研究では、結晶質岩系のサイトを想定して TRU 核種を含む放射性廃棄物の地層処分に対応した処分概念を対象として、包括的感度解析手法を適用して、処分概念の成立性に資する詳細な評価を行った。地層処分の個々の概念や地下水移行シナリオの基本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、成立性を体系的かつ網羅的に抽出するための研究を実施した。

従来の TRU 廃棄物地層処分のバリアの構成は変更せずに、天然バリアのサイト特性や人工バリアの設計仕様のように将来定量的な情報を決定出来るような範囲のパラメータについて、核種移行に及ぼす影響を定量的に明らかにした。それらのパラメータのサイト選定および処分場設計における実現性を考慮し、それらの現実的なパラメータ範囲の組み合わせによる TRU 廃棄物地層処分の成立性を検討した。

今後の課題としては、各パラメータ間の整合化の範囲をより効率良く抽出可能な解析ツールの改良および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が挙げられる。また、本年度の解析をもとに、堆積岩系および結晶質岩系の TRU 地層処分概念の成立性の絞込みについてさらに解析を続けることも重要である。

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 Sensitivity Analysis
Program (Phase 2) Summary Document
(Document Prepared by Other Organization, Based on the Trust Contract)

Kiyoshi Oyamada* and Takao Ikeda*

Abstract

This study developed minute estimation by adopting comprehensive sensitivity analytical program for reliability of TRU waste repository concepts in a crystalline rock condition. We examined each components and groundwater scenario of geological repository and prepared systematic bases to examine the reliability from the point of comprehensiveness. Models and data are sophisticated to examine the reliability.

Based on an existing TRU waste repository concepts, effects of parameters to nuclide migration were quantitatively classified. Those parameters, that will be decided quantitatively, are such as site character of natural barrier and design specification of engineered barriers. Considering the feasibility of those figures of specifications, reliability is re-examined on combinations of those parameters within a practical range.

Future issues are ;

- Comprehensive representation of hybrid geosphere model including the fractured medium and permeable matrix medium.
- Sophistication of tools to develop the reliable combinations of parameters

It is significant to continue this study because the disposal concepts and specification of TRU nuclides containing waste on various sites 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.	包括的感度解析の実施.....	2
2.1	包括的感度解析に対するモデルの構築.....	2
2.1.1	核種移行モデル	2
2.1.2	平行平板重ね合わせモデルにおけるチャンネル本数に関する検討.....	6
2.2	地層処分のパラメータの設定.....	16
2.2.1	主要核種移行パラメータの区分設定	16
2.2.2	パラメータの設定.....	21
2.3	包括的感度解析の実施.....	22
2.3.1	解析対象とした廃棄体および核種.....	22
2.3.2	核種移行解析結果.....	22
2.4	重要パラメータの抽出.....	28
2.4.1	感度解析手法	28
2.4.2	重要パラメータの抽出結果	28
3.	「十分条件」の1次スクリーニング	30
3.1	抽出されたパラメータの分類.....	30
3.1.1	地質環境条件に依存するパラメータ	30
3.1.2	施設設計条件に依存するパラメータ	32
3.2	短半減期核種に関する補足	33
4.	十分条件の2次スクリーニングおよび処分概念成立性の確認	34
4.1	パラメータの現実的な制限による解析.....	34
4.1.1	グループ1	35
4.1.2	グループ2	37
5.	おわりに	40
6.	参考文献.....	42

表目次

表 2.1.1-1	グループ 1 および 2 の一次元解析におけるジオメトリの設定	4
表 2.1.1-2	グループ 3 および 4 の一次元解析におけるジオメトリの設定	5
表 2.1.2-1	解析条件	9
表 2.1.2-2	各チャンネルの設定値	10
表 2.2.1-1	各領域毎の溶解度範囲設定結果	19
表 2.2.2-1	包括的解析で使用する地質環境条件以外の主要パラメータ	21
表 2.4.2-1	感度分析結果のまとめ	29
表 4.1.1-1	グループ 1 十分条件の候補	35
表 4.1.2-1	グループ 2 における I-129 の核種移行率を制限するためのパラメータ範囲 ..	38

図目次

図 2.1.1-1	地層処分における坑道の概念図.....	2
図 2.1.1-2	グループ 1 および 2 の一次元解析の概念図.....	4
図 2.1.1-3	グループ 3 および 4 の一次元解析の概念図.....	5
図 2.1.2-1	一次元並行平板モデルの重ね合わせ概念図.....	8
図 2.1.2-2	マルチチャンネルとシングルチャンネルによる解析結果の比較、C-14 12
図 2.1.2-3	マルチチャンネルとシングルチャンネルによる解析結果の比較、I-129 12
図 2.1.2-4	一次元平行平板モデルの重ね合わせ結果（標準偏差 1、分散長比率 0.1） 13
図 2.1.2-5	一次元平行平板モデルの重ね合わせ結果（標準偏差 2、分散長比率 0.1）	... 14
図 2.1.2-6	一次元平行平板モデルの重ね合わせ結果（標準偏差 2、分散長比率 0.01）	. 15
図 2.2.1-1	水化学組成の区分	17
図 2.3.2-1	グループ 1 の最大被ばく線量の出現時刻と被ばく線量、流量分配を仮定 24
図 2.3.2-2	グループ 2 の最大被ばく線量の出現時刻と被ばく線量、流量分配を仮定 25
図 2.3.2-3	グループ 3 の最大被ばく線量の出現時刻と被ばく線量、流量分配を仮定 26
図 2.3.2-4	グループ 4 の最大被ばく線量の出現時刻と被ばく線量、流量分配を仮定 27
図 4.1.1-1	グループ 1 における決定論的解析結果	36
図 4.1.2-1	閉じ込め期間と亀裂透水量係数平均値の組み合わせによる成立条件の範囲 38
図 4.1.2-2	グループ 2 の十分条件における決定論的解析結果.....	39

1. はじめに

昨年度の「包括的性能評価ツールの体系化・高度化」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った。特に堆積岩系を想定した多孔質媒体のモデル化が可能な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。

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。

本研究では、結晶質岩系のサイトを想定して TRU 核種を含む放射性廃棄物の地層処分に対応した処分概念を対象として、検証されたツールに基づき、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。そのために、これまで構築したモデルや実施した評価の整備を行うとともに、地層処分の個々の概念や地下水移行シナリオの基本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、成立性を体系的かつ網羅的に抽出するための研究を実施した。

本研究では、従来の TRU 廃棄物地層処分のバリアの構成は変更しないものとし、緩衝材や廃棄体定置領域の大きさや厚さを可変のパラメータとした上で性能評価を実施し、これらバリア材の設計に資するための定量的な情報を得ることを図る。また、天然バリア及び人工バリアの地質環境条件および設計仕様が核種移行に及ぼす影響を定量的に明らかにし、それらのパラメータのサイト選定および処分場設計における実現性を考慮し、それらの現実的なパラメータ範囲の組み合わせによる TRU 廃棄物地層処分の成立性を検討する。

2. 包括的感度解析の実施

2.1 包括的感度解析に対するモデルの構築

2.1.1 核種移行モデル

(1) バリア構成の概要

核種の移行モデルは、図 2.1.1-1 に示す坑道概念を参考としてバリア構成を考えるものとする。

地層処分の処分坑道 (坑道断面図)	
<p>支保</p> <p>埋め戻し</p> <p>廃棄定置領域</p> <p>構造躯体</p> <p>緩衝</p>	<p>対象とする廃棄体: グループ 1、グループ 2</p> <p>容器: グループ 1: 200L ドラム缶 グループ 2: キャニスター + 収納容器</p> <p>充填材: モルタル 構造躯体: コンクリート + 鉄筋 緩衝材: ベントナイト + 砂 埋め戻し材: ベントナイト含有材料 支保工: コンクリート</p>
<p>支保</p> <p>埋め戻し</p> <p>材</p> <p>廃棄定置領域</p> <p>構造躯体</p> <p>体</p>	<p>対象とする廃棄体: グループ 3、グループ 4</p> <p>容器: グループ 3: 200L ドラム缶 グループ 4: 200L ドラム缶 + 角型容器</p> <p>充填材: モルタル 構造躯体: コンクリート + 鉄筋 埋め戻し材: ベントナイト含有材料 支保工: コンクリート</p>

図 2.1.1-1 地層処分における坑道の概念図

(a) 一次元核種移行概念モデル

グループ 1 および 2 に対する解析概念を図 2.1.1-2 に示し、各領域のジオメトリを表 2.1.1-1 に示す。

各領域の接続(境界条件)は、濃度および核種移行率が保存されるようにモデル化する。緩み域の流量は、処分施設を円筒で近似し、解析解を用いて緩み域の流量を算定するものとする。

グループ 3 および 4 に対する解析概念を図 2.1.1-3 に示し、各領域のジオメトリを表 2.1.1-2 に示す。

表 2.1.1-1 グループ1および2の一次元解析におけるジオメトリの設定

領域*	入り口高さ	出口の高さ	領域長さ	備考
廃棄体	廃棄体部の 2×高さ + 2×幅	入り口高さと同じ	廃棄体領域の断面 積/入り口高さ	拡散勾配が大きくなるような保守的な領域長さとした。
仮想領域	拡散寄与部： 廃棄体領域の 高さ + 2×幅 移流寄与部： 廃棄体領域の高 さ	入り口高さと同じ	核種移行に影響を 与えない程度の厚 さ(0.01m)	空隙率は、廃棄体領域と同じとする。 拡散寄与部の流速は、ガス影響時を除き、0とする。
緩衝材	仮想領域と同じ	拡散寄与部： 緩衝材領域の 高さ + 2×幅 移流寄与部： 緩衝材領域の高 さ	緩衝材厚さ	拡散寄与部の流速は、ガス影響時を除き、0とする。
緩み域	緩衝材領域の出口 高さと同じ	入り口高さと同じ	核種移行に影響を 与えない程度の厚 さ(0.01m)	

*領域の奥行きはトンネル長とする。

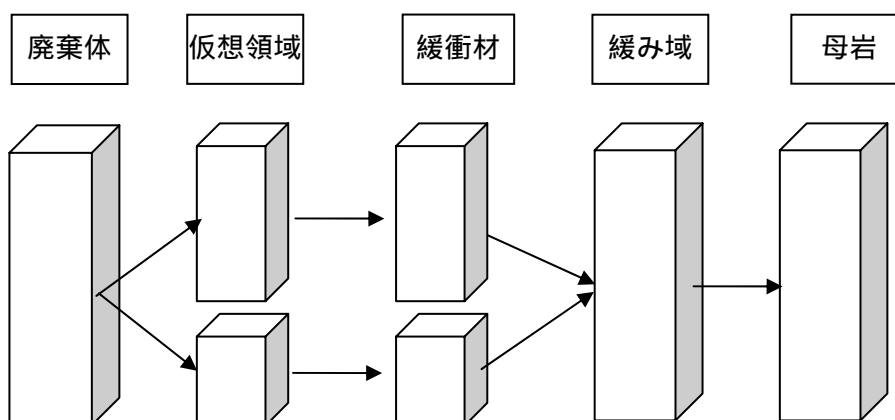


図 2.1.1-2 グループ1および2の一次元解析の概念図

表 2.1.1-2 グループ3および4の一次元解析におけるジオメトリの設定

領域*	入り口高さ	出口の高さ	領域長さ	備考
廃棄体	廃棄体部の 2×高さ + 2×幅	入り口高さに同 じ	廃棄体領域の断面 積 / 入り口高さ	拡散勾配が大き くなるような保守 的な領域長さとし た。
緩み域	廃棄体の出口高 さに同じ	入り口高さに同 じ	核種移行に影響を 与えない程度の厚 さ(0.01m)	

*領域の奥行きはトンネル長とする。

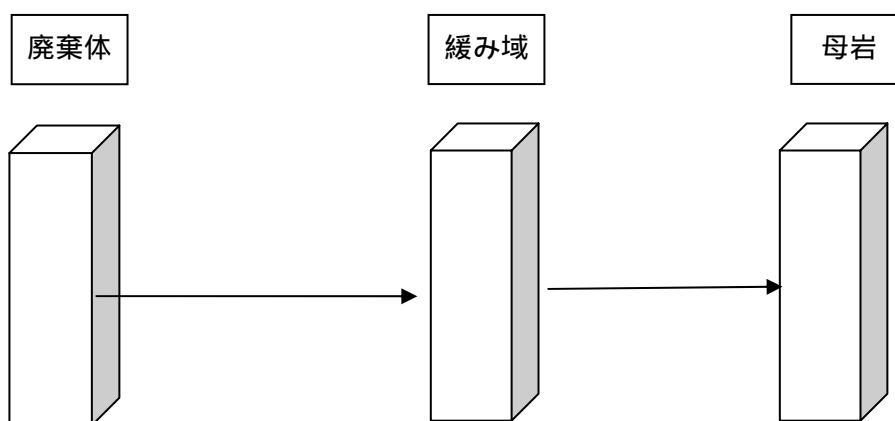


図 2.1.1-3 グループ3および4の一次元解析の概念図

2.1.2 平行平板重ね合わせモデルにおけるチャンネル本数に関する検討

(1) 予察解析の概要

亀裂状媒体における移行経路は透水量係数が数桁以上異なる(即ち流速が異なるものとなる)多数のチャンネルから構成されるものと考えられる。これに対して、従来の概括的感度解析では、単一のチャンネルで代表することとしていた。このような近似は単一の核種については可能と考えられるが、複数の異なる核種を対象とする場合には、全ての核種について代表性のある単一チャンネルを設定することは極めて困難と考えられる。そこで、本予察解析では、種々の半減期及び核種移行特性を持つ核種についてマルチチャンネルモデルの予察的解析を行い、考慮するチャンネルの本数と計算誤差の関係を把握する。その結果を評価し、多数の解析ケースについての計算を必要とする概括的感度解析において計算負荷と精度の両面から見て、適正となるチャンネル本数等を設定する。なお、マルチチャンネルの透水量係数分布については、第2次取りまとめのリファレンスケースを想定した。

(2) 予察解析上の留意点

マルチチャンネルモデルを採用する場合の問題点としては、以下の2点が考えられる。

透水量係数分布を、どの程度のチャンネル数で近似するか

緩み域(EDZ)から各チャンネルへの核種の移行率の取り扱い

に関しては、各チャンネルに設定される透水量係数の離散の度合いと、各チャンネルを通過する間の核種の分散の程度に依存するものと考えられる。例えば、EDZから各チャンネルへの核種の移行が、デルタ関数のような鋭いピークを持ち、かつ、チャンネル内部での分散がないような場合には、設定するチャンネル数が有限な限り、天然バリアからの核種放出率の時間的な変化は鋭いピークをもつ山の重ねあわせとなる。

また、各チャンネルで代表する透水量係数により想定される核種の移行時間が、評価対象とする核種の半減期を越えるか超えないかにより、近似誤差は大きく変動する。例えば、透水量係数の算術平均値を用いた単一チャンネル（マルチチャンネルの1例）で近似する場合、このチャンネルで想定される核種の移行時間は核種の半減期を越えるが、透水量係数の分布から半減期以前に核種の天然バリア中での移動が終了するような可能性をもつチャンネルの存在確率が大きな場合における核種移行率の近似誤差は、極めて大きくなることが予想される。

(3) 解析条件

解析条件を表 2.1.2-1 にまとめる。

天然バリアにおいて、比較的核種の分散が小さくなる条件として、母岩マトリクスへの分配係数を0とした。また、半減期の大きく異なる2つ核種として、C-14（半減期 5730年）、I-129（半減期 1.57×10^7 年）を対象として、解析を実施するものとする。

E D Z から各チャンネルへの核種の移行率設定に関しては、以下に示す高レベル放射性廃棄物処分と T R U 廃棄体地層処分の処分形態の相違を考慮して設定した。

T R U 廃棄物の地層処分においては、坑道処分が前提とされていることから、坑道毎に緩み域は連続している可能性が高い。そのため、マルチチャンネルモデルを想定する場合には、亀裂の本数分布よりも、各亀裂に想定される流量分布に従い、E D Z から各チャンネルへの核種の移行率を決定すべきであると考えられる。

解析ケースの組み合わせについては、透水量係数の標準偏差（対数）、亀裂内の分散長の相違が、重ね合わせを行うチャンネル本数の適正化に強く影響を与えられられることから、これらの標準偏差（対数）と亀裂内の分散長の組み合わせを変えて、チャンネル本数の適正化に関する感度解析を行うものとした。各チャンネルの組み合わせの詳細設定値を表 2.1.2-2 にまとめる。

(4) 解析モデル

核種移行解析ツールは、OZONEを用いた。解析概念モデルを図 2.1.2-1 に示す。

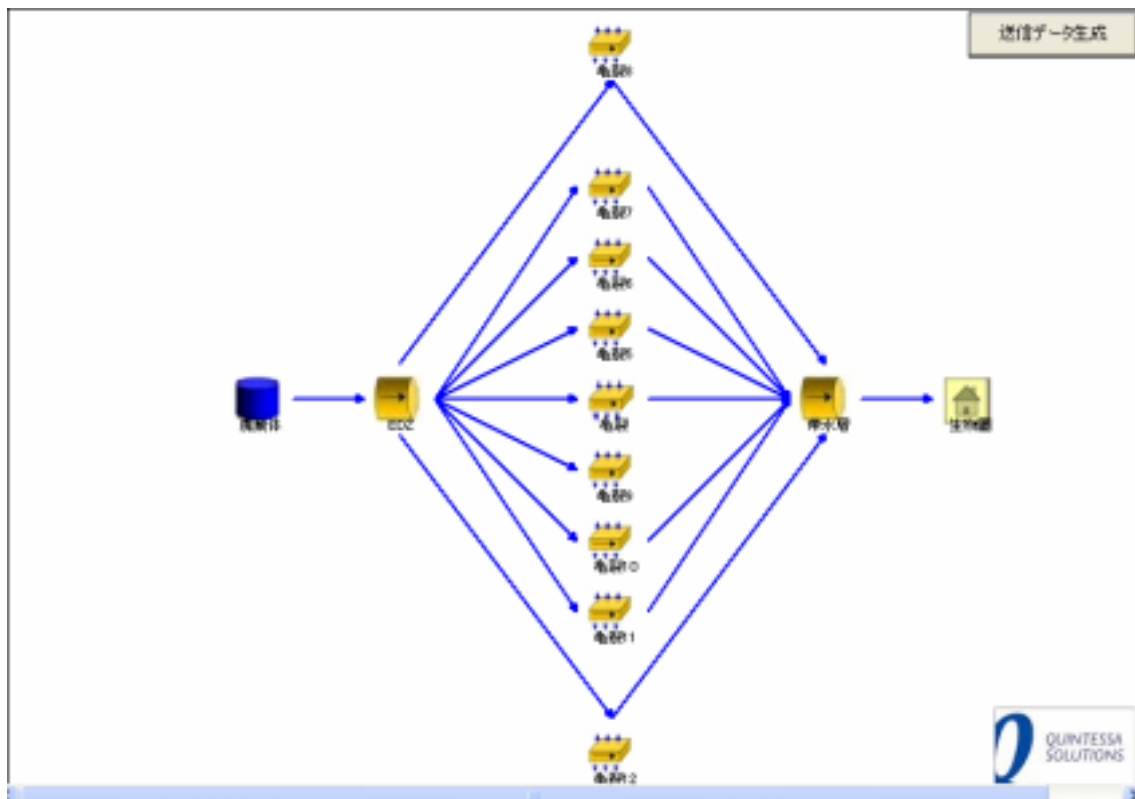


図 2.1.2-1 一次元並行平板モデルの重ね合わせ概念図

表 2.1.2-1 解析条件

領域	設定
廃棄体	ソース核種としては、I-129、C-14を想定する。 核種は、廃棄体内部で均一に分布しているものと仮定し、核種の廃棄体への吸着は考慮しないものとした。 インベントリ：1mol
E D Z	緩み域流量を $0.001\text{m}^3/\text{y}$ として、ミキシングセルモデルを適用する。また、E D Z内部での吸着による移行遅延は考慮しないものとする。
天然バリア	平行平板モデルを用いるものとし、2重空隙媒体を最大50チャンネル接続する。標準偏差の設定は表2.1.2-2を参照。 亀裂の透水量係数の対数平均値： $-10\text{ m}^2/\text{s}$
	マトリクス部 分配係数以外は、第2次取りまとめと同等の性能を見込むものとする。分配係数は0とした。 マトリクス実効拡散係数： $3 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ 母岩への拡散距離：10cm 有効拡散面積比率：0.5 間隙率：2% 分配係数： $0\text{ m}^3/\text{kg}$
帯水層	亀裂から放出された核種は、遅延を受けず、生物圏に放出されるものとした。
E D Zから各チャンネルへの核種の分配	E D Z内部の核種は、各亀裂の流量分布に応じて、各チャンネルに分配されるものとした。

各チャンネルの透水量係数は、透水量係数の対数平均値を $-10\text{ (m}^2/\text{s)}$ とし、標準偏差を1、または2として設定を行った。ただし、透水量係数の上限は、第2次取りまとめのデータである $10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ (核燃料サイクル開発機構,1999b)を参考として、 $10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ とした。これは、標準偏差が大きな場合において $10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ よりも大きな透水量係数を考慮すると、亀裂開口幅が数mといった、不自然な亀裂幅を有する亀裂が生じることを防ぐための設定である。

表 2.1.2-2 各チャンネルの設定値

標準偏差 および分散長比率	各チャンネルの透水量係数設定値
= 1 分散長比率 = 0.1	透水量係数の対数平均値：-10 最小の透水量係数： 10^{-13} m ² /s 各チャンネルに想定する透水量係数の幅（対数值） C-14：0.2、チャンネル本数 46 本（ケース 0） I-129：0.2、チャンネル本数 46 本（ケース A - 1） I-129：0.5、チャンネル本数 19 本（ケース A - 2） I-129：1.0、チャンネル本数 10 本（ケース A - 3）
= 2 分散長比率 = 0.1	透水量係数の対数平均値：-10 最小の透水量係数： 10^{-13} m ² /s 各チャンネルに想定する透水量係数の幅 I-129：0.2、チャンネル本数 46 本（ケース B - 1） I-129：0.5、チャンネル本数 19 本（ケース B - 2） I-129：1.0、チャンネル本数 10 本（ケース B - 3）
= 2 分散長比率 = 0.01	透水量係数の対数平均値：-10 最小の透水量係数： 10^{-13} m ² /s 各チャンネルに想定する透水量係数の幅 I-129：0.2、チャンネル本数 46 本（ケース C - 1） I-129：0.5、チャンネル本数 19 本（ケース C - 2） I-129：1.0、チャンネル本数 10 本（ケース C - 3）

(5) 解析結果

図 2.1.2-2 に C-14 の核種移行解析結果（ケース 0）を、図 2.1.2-3（ケース A - 1）に I-129 の核種移行解析結果を示す。シングルチャンネルによる解析結果は、亀裂の透水量係数を算術平均値($1.4 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)とする場合と、対数平均 ($10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) とする場合の両方を表示した。

C-14 の場合、マルチチャンネルによる解析結果とシングルチャンネルによる結果では、シングルチャンネルの透水量係数を分布の算術平均とする場合であっても、8 桁以上のピーク値の相違が見られる。これはシングルチャンネルで想定される核種の移行時間が、C-14 の半減期を越えるためと考えられる。これに対して、図 2.1.2-3 に示す I-129 の解析結果では、ピーク出現時間は大きく異なるものの、ピーク値を比較する限りでは、1 桁程度の差に収まる。このように、シングルチャンネルによりマルチチャンネルの核種移行を模擬させるためには、核種放出率の最大値に支配的となるチャンネルの選択が重要となる。しかしながら、核種の半減期や母岩の核種に対する遅延性能が核種毎に異なるため、マルチチャンネルを 1 つの代表するチャンネルで評価することは、困難と考えられる。そのため、本研究では、亀裂ネットワークを考慮したマルチチャンネルモデルにより解析を実施する。

図 2.1.2-4 ~ 図 2.1.2-6 に、マルチチャンネルを構成するチャンネルの本数、標準偏差および分散長を変化させて各種移行解析を実施した比較結果を示す。統計的解析に用いるためにケース毎の被ばく線量の最大値を得ることを目的とする場合には、各解析ケース間の透水量係数の差が 1 桁程度であってほぼ良好結果が得られている。ただし、核種放出率の時間的な変化の解析結果を用いて、核種移行性能に関する評価を行う場合には、透水量係数 1 桁あたり 2 本程度の間隔でチャンネルの設定を行うことが必要となる。

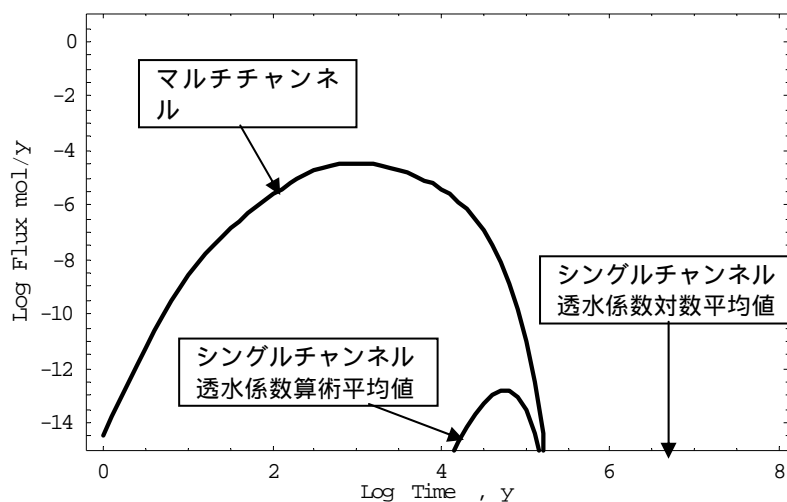


図 2.1.2-2 マルチチャンネルとシングルチャンネルによる解析結果の比較、C - 1 4

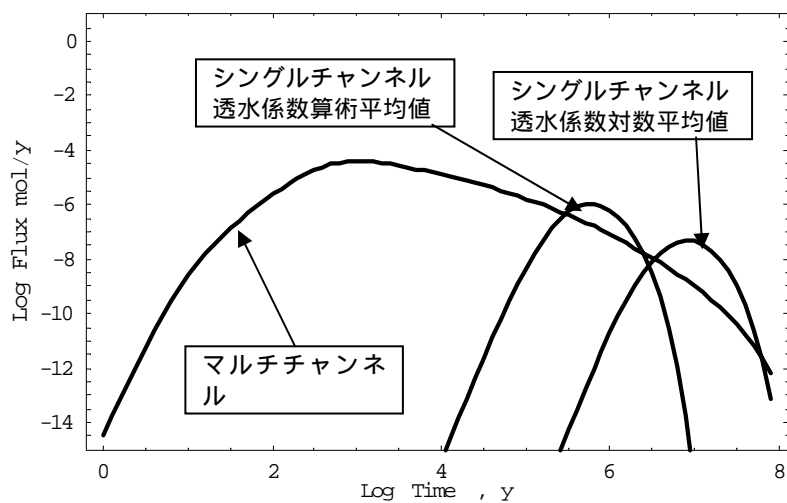


図 2.1.2-3 マルチチャンネルとシングルチャンネルによる解析結果の比較、I - 1 2 9

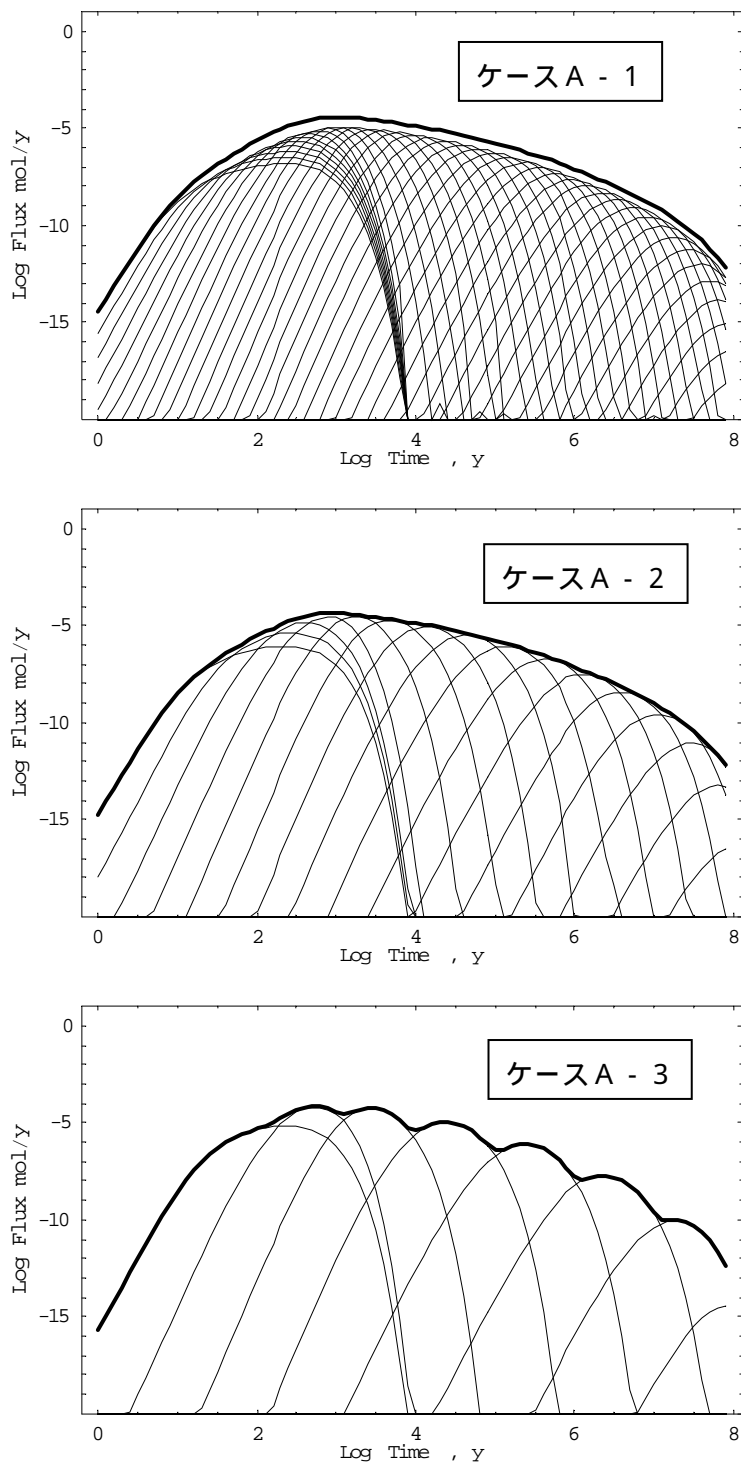


図 2.1.2-4 一次元平行平板モデルの重ね合わせ結果 (標準偏差 1、分散長比率 0.1)

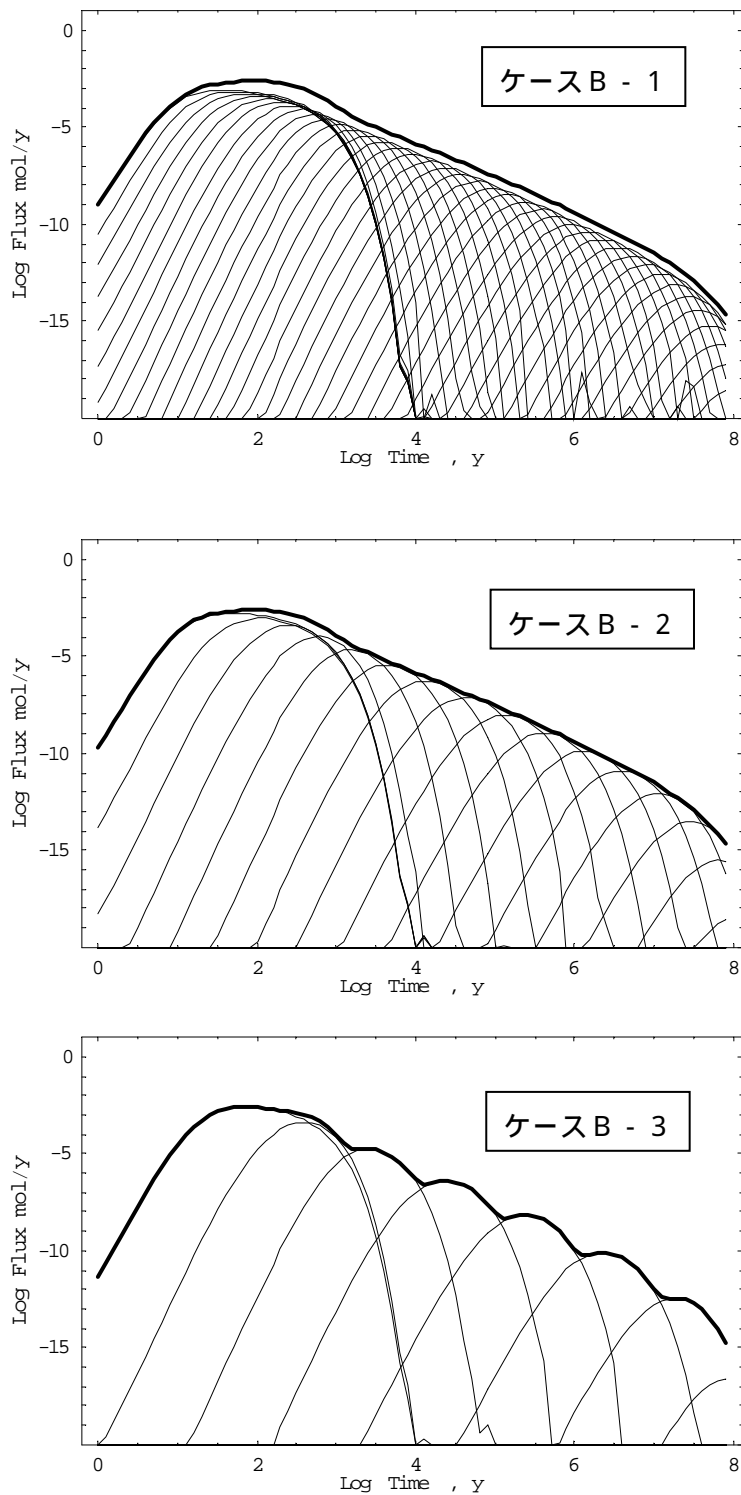


図 2.1.2-5 一次元平行平板モデルの重ね合わせ結果 (標準偏差 2、分散長比率 0.1)

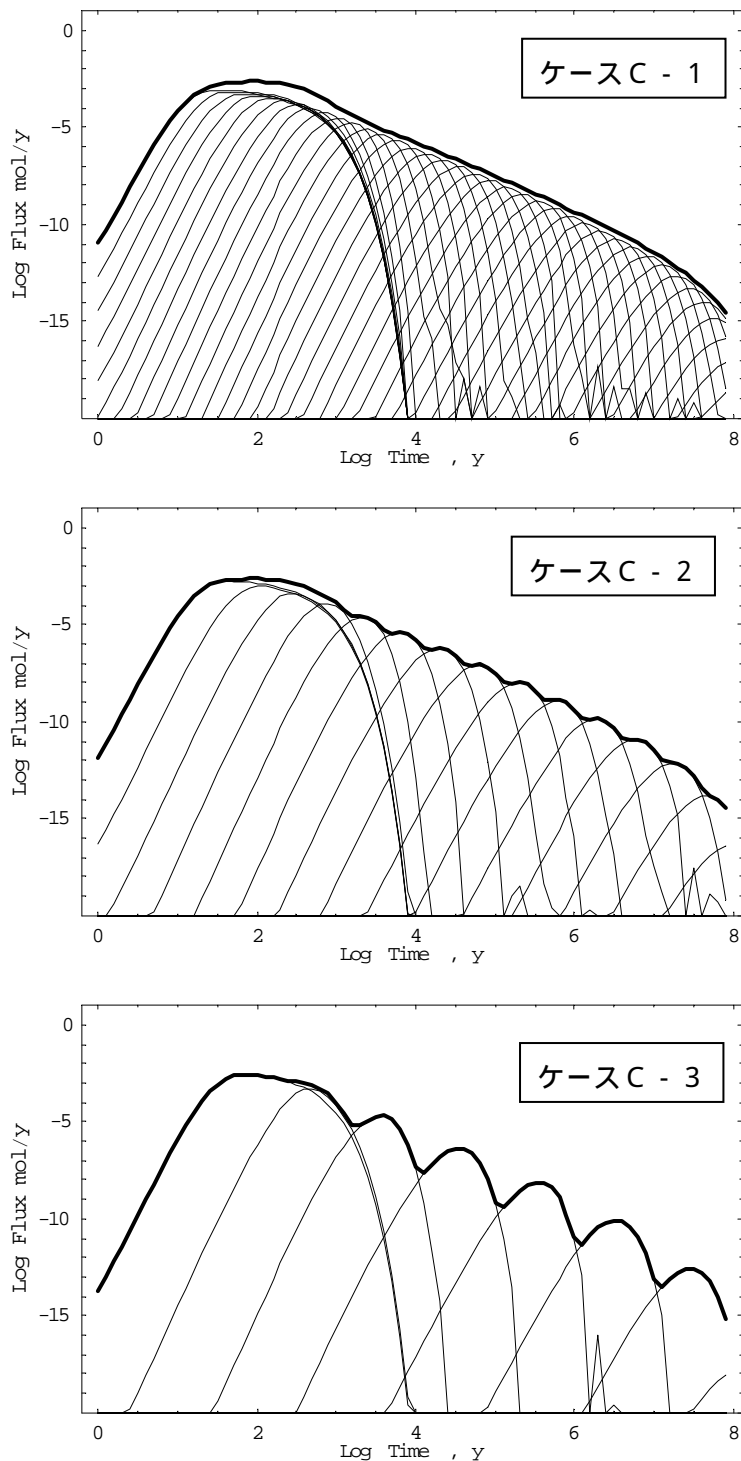


図 2.1.2-6 一次元平行平板モデルの重ね合わせ結果 (標準偏差 2、分散長比率 0.1)

2.2 地層処分のパラメータの設定

本研究のパラメータ項目および範囲の設定にあたっては、昨年度までの研究で設定したデータを見直し、文献調査を実施すると共に核燃料サイクル開発機構の専門家にインタビューを実施した。

本年度のパラメータ設定の特長としては、核種の移行特性に関する主要パラメータである放射性核種の溶解度と各バリア材への分配係数に関して、区分された地下水化学性状に対応したサンプリング方法を設定した。次項にその設定手順を示す。

2.2.1 主要核種移行パラメータの区分設定

(1) 水化学条件の振れ幅

放射性核種の溶解度と分配係数に関する解析パラメータの範囲を設定するために、地下水性状の振れ幅と TRU 廃棄体および処分場の構成材料に起因する地球化学異常を考慮した地下水および人工バリア間隙水の振れ幅を検討した。地球化学異常に関しては酸化還元電位、pH および硝酸イオンの影響を考慮した。

地下水性状の振れ幅に関しては、JNC 第 2 次取りまとめ第 1 分冊（核燃料サイクル開発機構，1999a， -71 頁）によれば、日本の深部地下水の酸化還元電位は、-385 ~ +365[mV]の範囲内にある。地層処分場では、建設及び操業期間中に大気平衡の酸素が供給される。このため TRU 廃棄物の処分では、廃棄体容器の初期欠陥との組み合わせを考慮して、第 2 次取りまとめ第 3 分冊（核燃料サイクル開発機構，1999b）を参照し、自然界に認められる大気平衡地下水の酸化還元電位を考慮して+480[mV]を上限とした。下限については、第 2 次取りまとめのリファレンスケースを参照して-276[mV]を採用した。前記のようにこの設定値よりも低い還元性地下水も認められるが、そのような場合には核種の溶解度はリファレンスケースと同等かもしくは低減するため、解析の保守性の観点からは、下限として-276[mV]を採用しても問題ないと考えた。

pH に関しては、通常の地下水は弱酸性からアルカリ性の範囲にあると考えられる。JNC 第 2 次取りまとめ第 1 分冊（核燃料サイクル開発機構，1999a， -71 頁）によれば、日本の深部地下水の pH は、6.3 ~ 10.3 [-]の範囲にある。サイト選定においては、例えば火山影響を直接受けるような極端な地球化学特性

のサイトは避けうると考えられることから、日本における深部地下水の pH の振れ幅は、上記を参照して、6.3~10.3 [-]とする。但し、人工バリア内部及び人工バリア近傍の母岩領域では、地下水もしくは間隙水がセメント系材料の使用により、アルカリ側に移行すると考えられることから、TRU 第 1 次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構,電気事業連合会, 2000）を参照して、地下水もしくは間隙水の pH 幅を、13.5~8.5 とする。ただし、この pH 範囲は、データの取得状況を勘案して見直すことも考慮する。

(2) データの全般的設定方法

前記の検討を踏まえて、対象核種毎に以下の 4 種の区分を想定し、最初から のいずれかの区分をランダムに選定する。次に選定した区分毎に溶解度及び分配係数のデータセットの幅の中から、ランダムに解析に使用する特定の値を選定する。これにより、分配係数と溶解度の地球化学的相関性および各核種間の分配係数や溶解度の地球化学的相関性のある程度維持することが可能となる。図 2.2.1-1 にこれらの区分結果を示す。

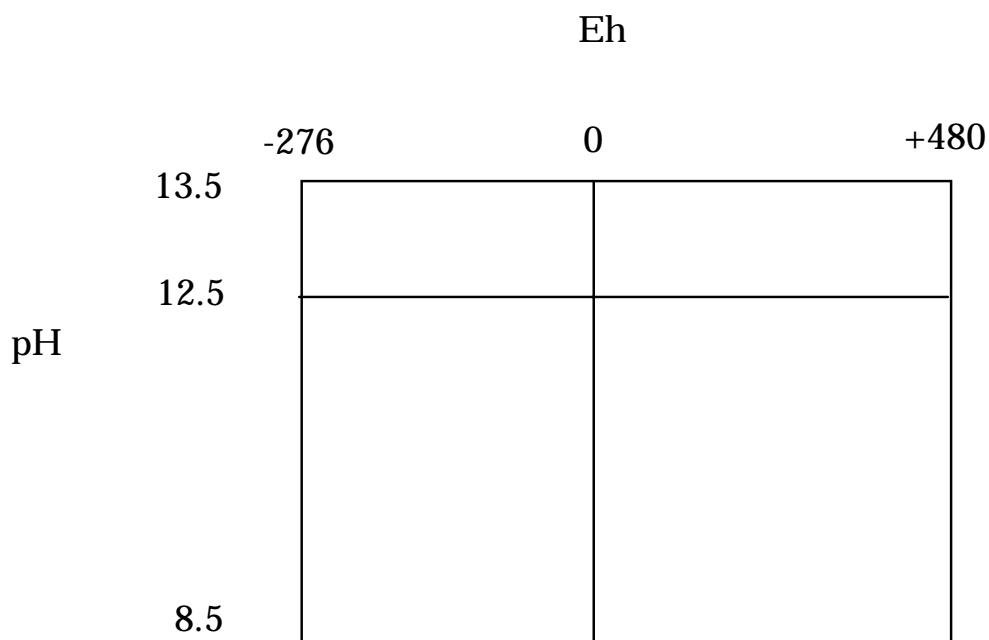


図 2.2.1-1 水化学組成の区分

(3) 核種溶解度データの設定方法

水化学組成の区分毎の溶解度は、Tc,Am,Np,U および Th の 5 核種について設定する。C,I,Cs の 3 核種については可溶性核種として溶解度制限を設定しない。C については、固相の存在形態が特定困難なことから保守的に可溶性核種として取り扱う。

溶解度を設定する上記 5 核種のうち、Th の溶解度は酸化還元電位及び pH の影響を受けにくいことから、第 2 次取りまとめのリファレンスである還元性降水系地下水である FRHP (核燃料サイクル開発機構, 1999d) の地下水組成における検証計算による解析を 1 ケース行うことに留めた。

その他の 4 種の核種については、核燃料サイクル開発機構の熱力学データベース (核燃料サイクル開発機構, 2003) を基に、図 2.2.1-1 の Eh と pH の交点となる 9 点に関して PhreeqcC により溶解度計算を実施した。計算の前提とする地下水イオン組成は、還元性降水系地下水である FRHP の地下水組成を基本として、さらにポルトランドセメントおよびベントナイトとの平衡水も考慮した。酸化性地下水の設定については、酸化性雰囲気を考慮した降水系地下水である FOHP (核燃料サイクル開発機構, 1999d) のデータを使用した。なお、両者の中間にあたる酸化還元電位 (標準水素電極) 0mV の地下水組成が見当たらなかったため、核種の溶解度に関する公開文献を参照し、比較的還元電位の近い FRHP lower HP (核燃料サイクル開発機構, 1999d) の地下水組成を代用した。

還元性雰囲気の溶解度制限固相は第 2 次取りまとめおよび関連資料を参照するとともに予備的計算を行い過飽和状態の有無を確認する。文献調査の結果得られた各元素の溶解度への pH および Eh の影響の傾向および予備解析を経て決定した制限固相について、溶解度計算を実施した。

さらに、これらのパラメータ範囲について核燃料サイクル開発機構の専門家と協議を行い、海外の溶解度設定例も参照して解析で使用する最終的な溶解度パラメータ範囲を表 2.2.1-1 に示す。

表 2.2.1-1 各領域毎の溶解度範囲設定結果

領域	核種	Tc	Th	U	Np	Am
		1E-7 ~ 1E-5	1E-10 ~ 1E-6	1E-10 ~ 1E-6	1E-10 ~ 1E-6	1E-10 ~ 1E-6
		SOLUBLE	1E-10 ~ 1E-6	1E-6 ~ SOLUBLE	1E-4 ~ 1E-2	1E-10 ~ 1E-6
		1E-9 ~ 1E-6	1E-10 ~ 1E-6	1E-10 ~ 1E-6	1E-10 ~ 1E-6	1E-10 ~ 1E-6
		SOLUBLE	1E-10 ~ 1E-6	1E-6 ~ SOLUBLE	1E-7 ~ 1E-6	1E-10 ~ 1E-6

(4) 核種の分配係数の設定方法

C,I,Cs, Tc,Am,Np,U および Th について設定する。固相は、ベントナイト、コンクリートおよび結晶質母岩（花崗岩）の3種とする。JNCの分配係数データベース(JNC-SDB)をもとに Eh と pH の交点となる9点を考慮してデータ範囲を設定する。酸化性領域での分配係数データが少なく適切な設定することが困難な核種に関しては、還元性と同じデータ範囲を設定する。本DBではCが含まれていない。また対象元素によっては酸化還元雰囲気についてあまり考慮されていないデータも多く存在する。さらに、pHの変動範囲も今回の解析データセットとして利用できるほど広範には広がっていない。データの不十分な点については、TRU廃棄物処分概念検討書の基礎データを参照した。データベース上で分配係数の測定データがpHが7～8.5の間で試験されたデータが多かったため、データベースの検索試験条件範囲として、下限を、8.5から7に変更した。

2.2.2 パラメータの設定

包括的解析で使用する地質環境条件以外の主要なパラメータを表 2.2.2-1 に示す。これらのパラメータ設定にあたっては、昨年度までの研究で設定したデータを見直し、文献調査を実施すると共に核燃料サイクル開発機構の専門家にインタビューを実施した。

表 2.2.2-1 包括的解析で使用する地質環境条件以外の主要パラメータ

処分量および廃棄体からの核種放出率に関するパラメータ	インベントリ
	廃棄体処分量
	核種浸出率
人工バリアの形状および仕様に関するパラメータ	廃棄体埋設比、断面積
	廃棄体 / バリア材の透水係数・拡散係数・空隙率
	バリア材 / 緩み領域の厚さ、透水係数、分散長
天然バリアの基本特性に関するパラメータ	核種移行距離
	マトリクス拡散関連パラメータ
核種の移行特性に関するパラメータ	対象放射性核種のバリア材への分配係数
	可逆吸着指数等のコロイド移行特性関連値
	核種溶解度
	分配係数、溶解度の回復率
水理に関するパラメータ	地下水接触開始時間、流速増加開始時間
	動水勾配、流速
	ガス発生速度等のガス関連パラメータ
地球化学異常に関するパラメータ	地球化学異常開始時間 / 継続期間
	バリア材劣化開始時間 / 継続期間
生物圏に関するパラメータ	線量換算係数

2.3 包括的感度解析の実施

2.1 節で構築された包括的感度解析のモデルに対応して昨年度までに開発した包括的感度解析ツールを改良し、2.2 節で決定されたパラメータの範囲を用いて、統計的解析を実施する。

統計的解析における天然バリア解析モデルは、保守性の観点から、亀裂透水量係数の分布に基づき想定される流量分布に基づく平行平板亀裂の重ね合わせのモデルを利用した。

2.3.1 解析対象とした廃棄体および核種

グループ 1 ~ 4 までを解析対象とするものとする。また、グループ 3、4 に関しては、1GBq / ton 以上の廃棄体を地層処分とするものとした。

解析対象核種としては、TRU 処分概念検討書において支配的な核種であった、C-14 および I-129 に加え、マルチチャンネルモデルで懸念される、短半減期核種の影響の可能性を踏まえ Cs-137、多様な化学環境で核種移行形態を変え、かつ、毒性度の高い Tc-99 を加えるものとした。また、TRU 核種の中では、毒性の高い Am-241、Np-237、U-233、Th-229 系列について解析するものとした。

2.3.2 核種移行解析結果

本年度研究においては、結晶質岩系の岩種を対象として、包括的感度解析を実施する。グループ 1 ~ 4 の解析結果を図 2.3.2-1 ~ 図 2.3.2-4 に示す。

グループ 1 では、I-129 が被ばく線量に関して支配的であった。

グループ 2 では、初期の数百年間は、Cs-137 が、数万年までは C-14、それ以降は、Th-229 が支配的となるケースが多かった。また、Tc-99 に関しては、数万年を超える時間スケールでは、C-14 に起因する被ばく線量を超えるケースが見られたが、その時間域では、Th-229 が支配的となるケースが多く、最大被ばく線量に支配的となるケースは少なかった。

グループ 3 では、概ね Th-229 が被ばく線量に対して支配的であるが、Cs-137 に起因する被ばく線量も高く、処分後 10 年以内に、 $10 \mu\text{Sv/y}$ を越えるケースも多く見られる。

グループ 4 においては、Cs-137 の寄与が、グループ 3 に比べ更に高く、広い

線量範囲で、被ばく線量に支配的な核種となっている。また、Am-241 および Th-229 による被ばく線量も $10 \mu\text{Sv/y}$ を超えるものが多かった。

解析結果は、何れのグループにおけるものであっても、処分後 10 年、100 年以内に高い線量結果が表出している。特に、グループ 3、4 は、Cs-137 に起因する被ばく線量が卓越している。この原因としては、平行平板重ね合わせモデルの適用において、

- ・ マルチチャンネルモデルでの、各チャンネルへの核種の分配方法。
- ・ マルチチャンネルの透水量係数の上限の設定。
- ・ 数値解析上の設定。

についての保守性が、過度なものとなっている可能性があり、今後、本手法を適用する場合に、モデル化において、重要なポイントとなるものと考えられる。

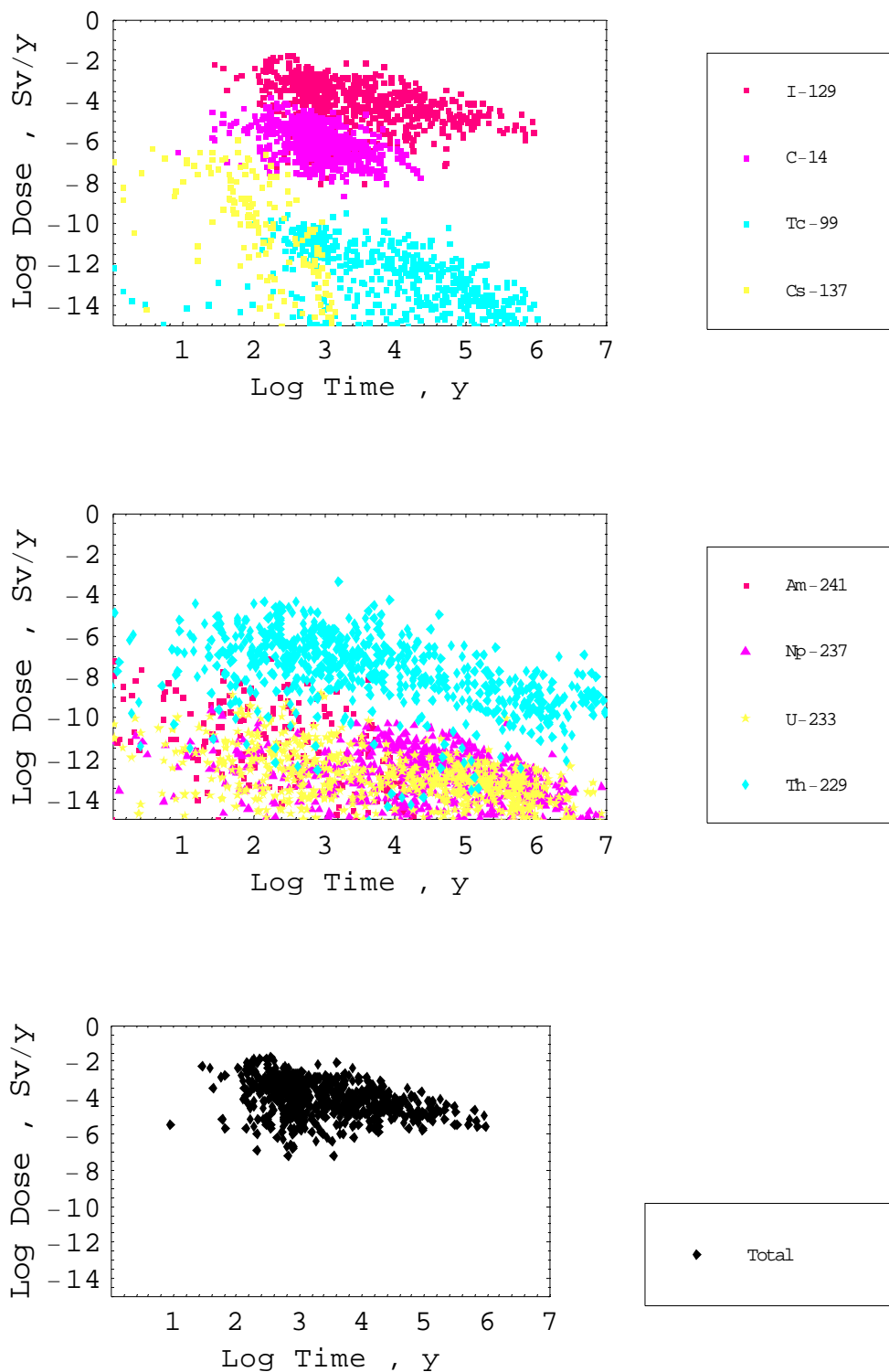


図 2.3.2-1 グループ 1 の最大被ばく線量の出現時刻と被ばく線量、流量分配を仮定

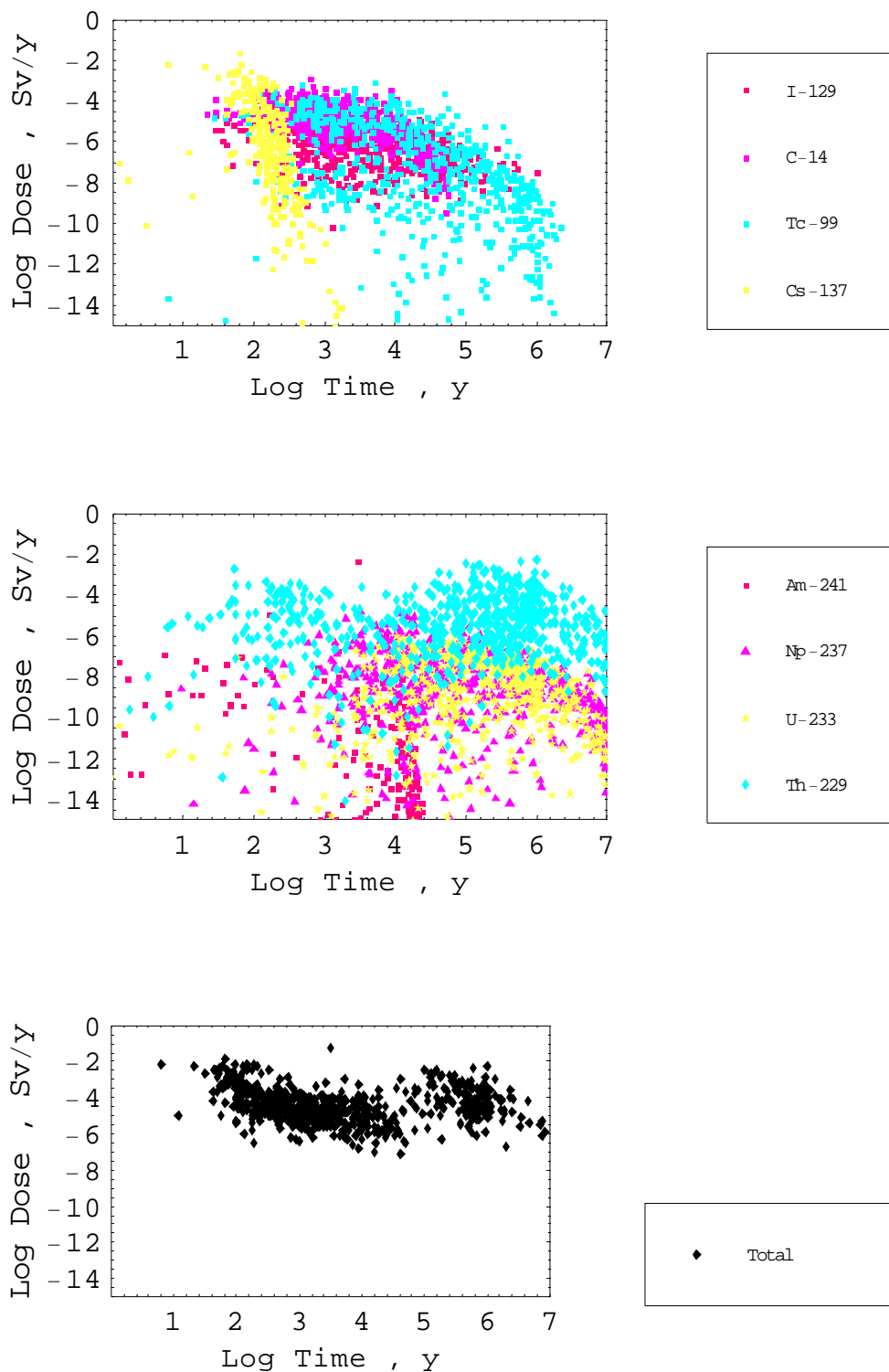


図 2.3.2-2 グループ 2 の最大被ばく線量の出現時刻と被ばく線量、流量分配を仮定

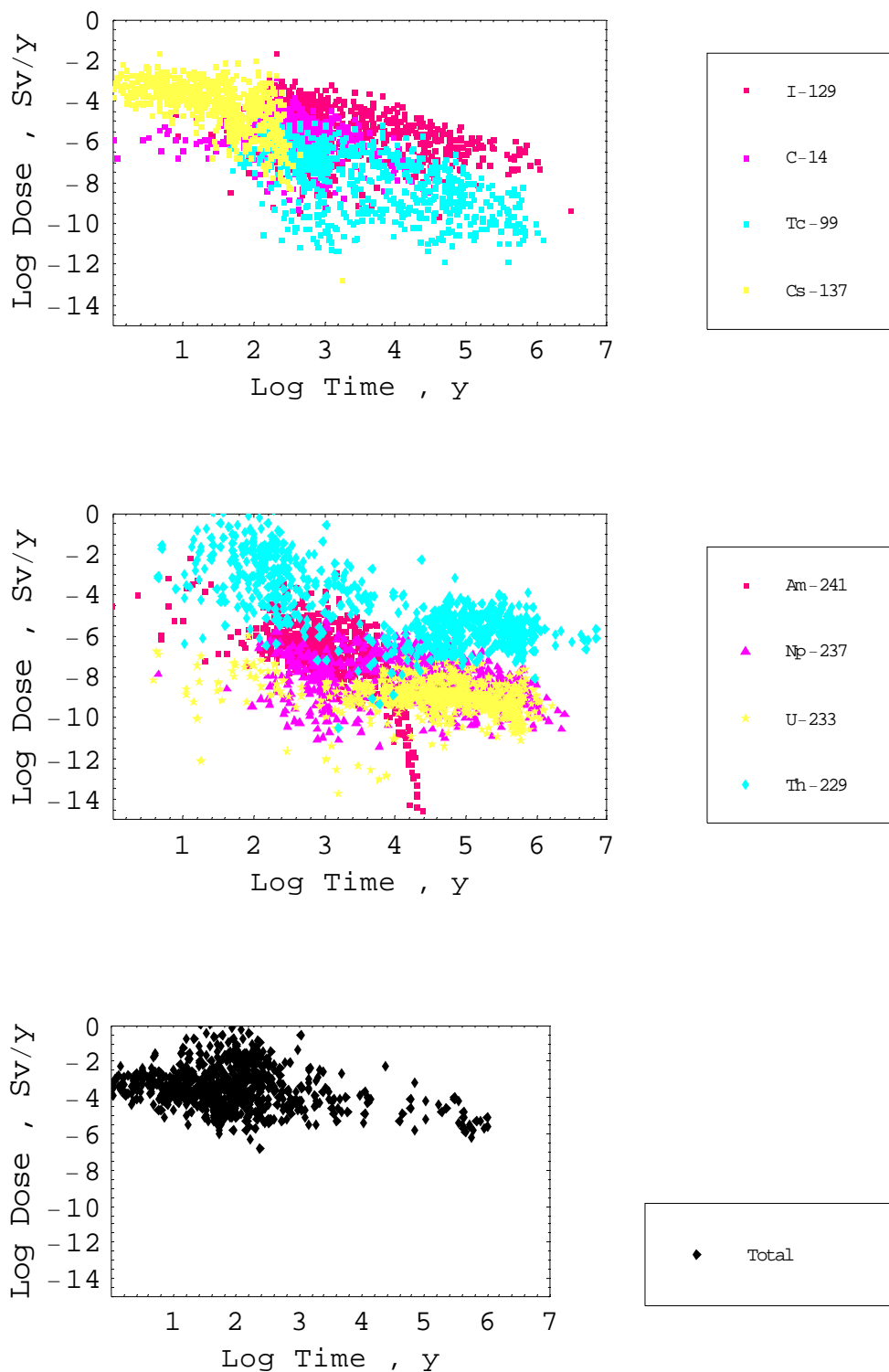


図 2.3.2-3 グループ 3 の最大被ばく線量の出現時刻と被ばく線量、流量分配を仮定

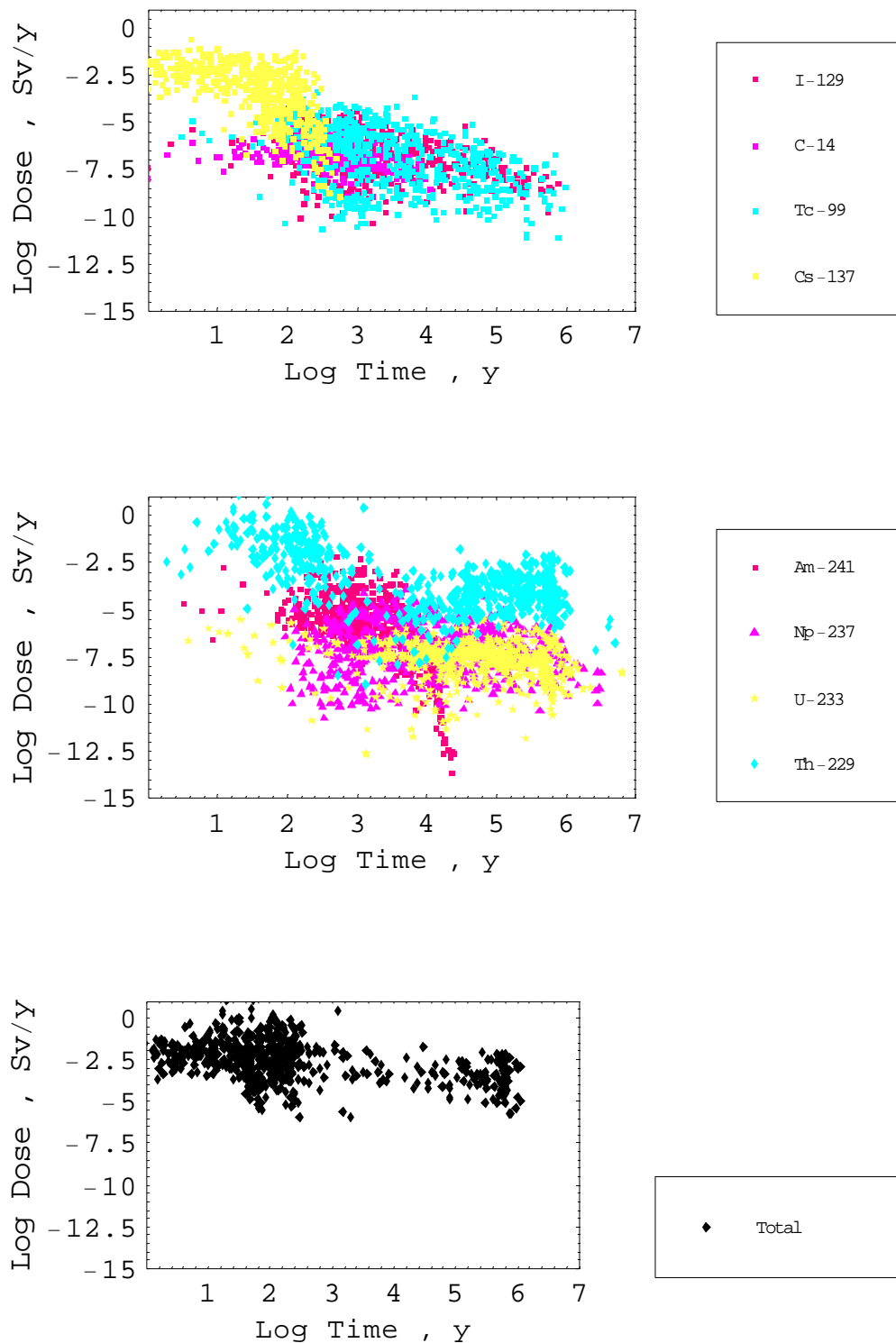


図 2.3.2-4 グループ 4 の最大被ばく線量の出現時刻と被ばく線量、流量分配を仮定

2.4 重要パラメータの抽出

統計的な解析結果については、これまで開発を行ってきたムービングバンド法や SI 法を用いて感度分析を行う。これらの分析によって、TRU 廃棄物処分の長期的安全性に大きな影響を及ぼす重要なパラメータの抽出を行うものとする。

2.4.1 感度解析手法

感度解析手法としては、前年度まで開発を実施してきた、ムービングバンド法と SI 法を適用し、実施するものとした。本研究の目標は、目標とする線量（例えば $10 \mu\text{Sv/y}$ ）を下回るための十分条件と抽出することにある。そのため、感度分析の主体は、局所的な感度の抽出に特化した、SI 法を中心とするものとした。

2.4.2 重要パラメータの抽出結果

SI 法およびムービングバンド法を用いて、全域的解析結果で、大きな感度を有するパラメータを抽出した。抽出結果を表 2.4.2-1 にまとめる。

表 2.4.2-1 感度分析結果のまとめ

グループ1	グループ2	グループ3	グループ4
廃棄体からの核種浸出率	核種放出開始時刻	亀裂透水量係数平均値	亀裂透水量係数平均値
化学異常中廃棄体分配係数(化学条件I,II,III)	亀裂透水量係数平均値	廃棄体からの核種浸出率	廃棄体からの核種浸出率
亀裂透水量係数平均値	ガス発生速度	廃棄体劣化前空隙拡散係数	動水勾配
廃棄体劣化後空隙拡散係数	緩衝材劣化前空隙拡散係数	化学異常中廃棄体Cs分配係数(化学条件I,II)	廃棄体劣化前空隙拡散係数
廃棄体からの化学異常物質放出期間	廃棄体劣化後空隙拡散係数	廃棄体劣化後空隙率	化学異常中廃棄体Cs分配係数(化学条件II)
廃棄体劣化開始時刻	廃棄体高pH時の化学条件	ガスによる流速上昇開始時刻	化学異常中緩衝材Th溶解度(化学条件I,III)
緩衝材劣化前空隙拡散係数	緩衝材劣化後空隙拡散係数	動水勾配	ガスによる流速上昇開始時刻
緩衝材初期の化学条件	緩衝材劣化開始時刻	廃棄体坑道断面積	廃棄体中コロイド濃度(Kc)
	廃棄体劣化開始時刻	廃棄体劣化開始時刻	
	亀裂頻度	化学異常後廃棄体U分配係数(化学条件IV)	
	廃棄体からの化学異常物質放出期間		

注1) 表中の黄色のマーキングは、天然バリアに関する感度パラメータであることを示す。

3. 「十分条件」の1次スクリーニング

3.1 抽出されたパラメータの分類

表 2.4.2-1 で抽出された、各廃棄体グループにおける重要パラメータを分類し、S I法を用いて、十分条件を抽出する。パラメータの分類は以下の観点から実施するものとした。

地質環境に依存するパラメータ

人工バリアの構成、設計に関連するパラメータ

1次スクリーニングでは、以上の分類に基づき、天然バリアまたは人工バリアの各バリア各々で想定されるパラメータで、S I値が90%を達成するパラメータの範囲を目安として、これを十分条件の候補とする。

3.1.1 地質環境条件に依存するパラメータ

全ての廃棄体グループにおいて亀裂透水量係数の平均値が、被ばく線量最大値の増減に影響を与えている。しかしながら、廃棄体グループにより透水量平均値の変動が被ばく線量最大値に及ぼす影響の程度は異なることから、各廃棄体グループで支配的となる核種の特性を踏まえ、処分システムとして成立性の高いパラメータ範囲を絞る必要がある。

(1) グループ1

グループ1では、被ばく線量の最大値に支配的となる核種がI-129であることから、天然バリアにおける核種の移行遅延および移行遅延による減衰が大きくは期待できないものと予想される。解析結果からも、亀裂透水量係数の平均値の変動に伴うS I値の変動幅は20%程度であり、亀裂透水量係数の平均値が $10^{-10}\text{m}^2/\text{s}$ 以下の場合であってもS I値は25%程度に止まる。したがって、グループ1に関しては、人工バリアの性能と構成を考慮して、十分条件を決定する必要がある。

(2) グループ 2

グループ 2 では、C-14 に起因する被ばくが支配的となる。C-14 の半減期が 5730 年と I-129 等に比較して短いことから、亀裂透水量係数平均値の変動による影響は、グループ 1 での影響の程度に比較して、より顕著になっている。亀裂透水量係数の平均値を $10^{-10}\text{m}^2/\text{s}$ とすることにより、S I 値は 37% から 67% へと上昇する。亀裂透水量係数の平均値が $10^{-10.5}\text{m}^2/\text{s}$ の場合は、S I 値は 80% まで上昇する。これに加えて、亀裂頻度を 1 本/m 以下の観察結果が得られる地質環境を選定すれば、S I 値は 83% まで上昇する。しかしながら、当該のパラメータの組み合わせのみでは、90% の S I 値に達することはなく、グループ 1 と同様に、人工バリア構成と合わせて十分条件を決定する必要がある。

(3) グループ 3

グループ 3 では、Cs-137 核種が、早い時期から生物圏に到達し、被ばく線量の最大値を支配するという特徴がある。Cs-137 の半減期は 30 年と他の核種に比較して短いことから、数百年程度の地下水移行時間が期待できる処分体系であれば、被ばく線量は、低減される。

解析結果では、亀裂透水量係数の平均値および動水勾配の変動が、被ばく線量の最大値の変動に影響を与えることが示唆されている。しかしながら、亀裂透水量係数の平均値を $10^{-10.5}\text{m}^2/\text{s}$ 以下に制限できたとしても、S I 値は 12% から 53% までにしか上昇しなかった。これに、動水勾配の範囲を 0.01 以下に制約する条件を付加したとしても、S I 値は、54% までにしか到達しない。

亀裂透水量係数の平均値が小さな条件であったとしても、S I 値が大きく上昇しない理由としては、本研究で採用したマルチチャンネルモデルでは、流速の早い亀裂が低頻度ではあるがモデル中に存在しているためと考えられる。天然バリアの地下水流動モデルを精緻化し、現実的な地下水移行時間及び核種移行時間を反映するモデル化がなされれば、Cs-137 の被ばくへの影響を、排除できる可能性が高い。

処分後早期の核種閉じ込めを保証するような処分システムが構成可能であれば、グループ 3 の被ばく線量の最大値を支配する核種は I-129 となる。その場合、亀裂透水量係数の平均値を $10^{-10.5}\text{m}^2/\text{s}$ 以下に制限できれば、S I 値は 92%

となる。

(4) グループ 4

グループ 4 では、亀裂透水量係数の平均値および動水勾配が感度の高いパラメータとして抽出されている。S I 値は全域的解析で 20%、亀裂透水量係数の平均値を $10^{-10}\text{m}^2/\text{s}$ 以下に制限することにより、68% に上昇する。さらに、 $10^{-10.5}\text{m}^2/\text{s}$ 以下に制限することが可能であれば、S I 値は 78% まで上昇する。

グループ 4 は、グループ 3 と同様に Cs-137 に起因する被ばく線量が目標線量を超えるケースにおいて支配的であることから、Cs-137 を効果的に押さえ込む処分システムが望ましいものとする。

Cs-137 を効果的に押さえ込むシステムでは、Am-241 およびその系列核種、もしくは Tc-99 が被ばく線量の最大値に支配的となる。その場合には、亀裂透水量係数の平均値を $10^{-10}\text{m}^2/\text{s}$ 以下に制限するのみで、94% (Am-241 のみを対象として感度分析) の S I 値が達成可能である。

3.1.2 施設設計条件に依存するパラメータ

(1) グループ 1

グループ 1 廃棄体では、被ばくに支配的となる I-129 の半減期が長く分配係数が小さいことから、天然バリアでの移行遅延による減衰に期待するよりも、むしろ、人工バリアからの核種放出率を低下させるほうが望ましいものと考えられる。感度分析の結果においても、核種浸出率や廃棄体での分配係数が核種放出率に対して大きな感度を有している。また、分配係数の時間的な変動の原因となる地球化学異常も被ばく線量に影響を与えている。

しかしながら、これらの人工バリアの性能を決定するパラメータの内、特定の 1 つのパラメータにより、目標とする割合 (S I 値: 90%) を達成することは、困難であった。そのため、グループ 1 に関しては、地質環境と人工バリア環境をあわせて、十分条件を見つけるべきである。

(2) グループ 2

グループ 2 では、被ばく線量に支配的となる核種が C-14 であることから、現

在研究途上にある「廃棄体からの核種放出開始時刻」(廃棄体の閉じ込め期間)が、高い感度を持つ。廃棄体閉じ込め期間が 10,000 年を超える場合には、このバリア機能のみにより目標とする「目標 (10^{-5} Sv/y) を下回る割合 90 %」が達成可能となる。それ以外で SI 値に感度を持つパラメータである、ガス発生速度、緩衝材の劣化前の空隙拡散係数、廃棄体劣化後の空隙拡散係数等は、これら単独では、SI 値の上昇に大きな効果は望めない。

(3) グループ 3 および 4

グループ 3、4 共に Cs-137 の影響を除くならば、SI 値は高いレベルで達成できる。本研究で採用した解析モデルのように地下水移行時間の不確実性が大きな条件下では、「核種放出開始時間」もしくは「核種放出率」を人工バリアにより制御する設計上の検討が重要である。天然バリアの地下水流動モデルを精緻化し、現実的な地下水移行時間を反映するモデル化がなされれば、人工バリアに課せられる性能上の負荷は、低減できる。

3.2 短半減期核種に関する補足

グループ 3 および 4 において、短半減期核種である Cs-137 による被ばくが顕著であった。Cs-137 が減衰する以前に地層から放出される原因は、すでに述べたように、核種移行に用いたマルチチャンネルモデルの流速の早いチャンネルに依存するためと考えられる。

4. 十分条件の2次スクリーニングおよび処分概念成立性の確認

3.章では、各廃棄物グループに対して、線量目標（ $10 \mu\text{Sv/y}$ を仮定）を下回るために、制限すべきパラメータを抽出した。ここでは、これらパラメータに具体的な数値を設定することにより、処分概念を成立させるための十分条件を探索するものとする。ここでは、毒性の高い、グループ1、グループ2について、十分条件を抽出するものとする。

4.1 パラメータの現実的な制限による解析

被ばく線量解析結果では、何れの廃棄物のグループにおいても、単独のパラメータ、および、地質環境に関するパラメータ、または、人工バリア構成に関するパラメータの組み合わせを制限するのみでは、目標とする線量を下回することはできなかった。そのため、各廃棄物グループについて、天然バリアおよび人工バリアのパラメータの組み合わせを考え、支配的となるパラメータについて、十分条件を抽出する。

本解析結果は、第2次取りまとめで用いられた、マルチチャンネルモデルの近似手法である平行平板モデルの重ね合わせ手法を用いると共に、これにTRU廃棄物の特性を考え、保守性に富んだ設定を加えたことにより、大きな線量解析結果となっている。そのため、今後、マルチチャンネルモデルを適用し、包括的感度解析を実施するために、重要となる、モデル化手法の問題点についても抽出し、今後の解析に資するものとする。

4.1.1 グループ 1

ムービングバンド法の結果からは、以下のパラメータについてのパラメータ目標値が得られる。

表 4.1.1-1 グループ 1 十分条件の候補

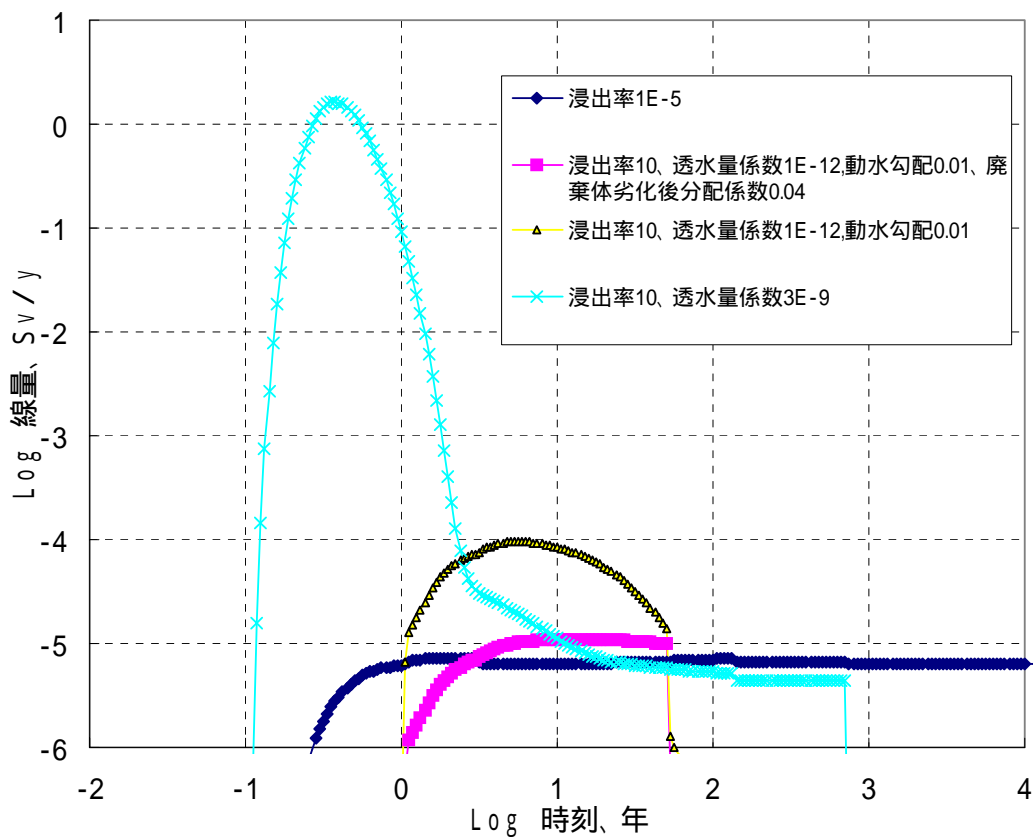
パラメータ		設定値	単位
● 廃棄体からの核種浸出率	<	2.51E-03	1/y
● 化学異常中廃棄体I分配係数（化学条件II）	>	3.98E-03	m3/kg
● 化学異常中廃棄体I分配係数（化学条件I）	>	3.16E-03	m3/kg
● 亀裂透水量係数平均値	<	3.16E-09	m2/s
● 廃棄体劣化後空隙拡散係数	<	5.01E-11	m2/s
● 廃棄体からの化学異常物質放出期間	>	3.98E+04	y
● 廃棄体劣化開始時刻	>	2.00E+03	y
● 緩衝材劣化前空隙拡散係数	<	1.00E-10	m2/s
● 化学異常中廃棄体I分配係数（化学条件III）	>	1.58E-04	m3/kg
● 緩衝材初期の化学条件		化学条件I	-

グループ 1 では、天然バリアの条件として、亀裂透水量係数の平均値が小さいことが求められる。また、化学異常中の I の分配係数が大きく、かつ、地球化学異常（高 pH 状態）の継続期間の長いほうが有利となっている。上記条件を全て考慮した SI 値は、約 48% であり、これらのパラメータの制限のみでは、目標線量を確実に下回ることはできなかった。

最も感度の大きな廃棄体からの核種浸出率については、SI 法の解析結果からは、核種の浸出率が 10^{-4} 以下であっても、 $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回るケース割合は 10% 程度の増加に止まっている。核種浸出率が 10^{-5} のときの廃棄体からの核種移行率が $9 \mu\text{Sv/y}$ （廃棄体からの浸出率に線量換算係数を乗じた値）である。これは、健全時の廃棄体からの核種浸出率が低くとも、地球化学異常による人工バリアの劣化により、人工バリア内部に蓄積した長半減期の I-129 が一時的に大きな移行フラックスが生じるためと考えられる。

上記の包括的解析の結果を踏まえた上での、決定論的解析の結果を図 4.1.1-1 に示す。核種浸出率 $1\text{E-}5/\text{y}$ で、かつ、環境変化がない場合には、目標線量を下

回る。環境変化を前提とする場合には、表 4.1.1-1 で想定される亀裂透水量平均値のみの制限では、線量は 1 Sv/y を超える結果となる。線量目標 (10 μ Sv/y を仮定) を下回るためには、母岩の透水量係数を $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ および動水勾配 0.01 とすることに加えて、劣化後の廃棄体の分配係数として $0.04 \text{m}^3/\text{kg}$ がグループ 1 に関する処分概念成立性の十分条件として必要となる。



浸出率 1E-5 以外のケースは、劣化開始時刻を 0 年と考える

図 4.1.1-1 グループ 1 における決定論的解析結果

4.1.2 グループ 2

グループ 2 では、比較的半減期の短い C-14 による被ばくが有意であることから、初期の廃棄体閉じ込め期間が 10,000 年以上であることにより、主要核種の C-14 に起因する被ばく線量は、 $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回るものとなる。透水量係数の設定のみで同等の性能を得るためには、透水量係数平均値が $10^{-10}\text{m}^2/\text{s}$ 以下であっても $10 \mu\text{Sv/y}$ を上回るケースが見受けられる。

図 4.1.2-1 に C-14 からの被ばく線量の最大値に対する、透水量係数および廃棄体による核種の閉じ込め期間の範囲について、パラメータを組み合わせた結果を示す。図 4.1.2-1 に示されるように、核種の閉じ込め性能を亀裂透水量平均値との組み合わせにより低減するためには、亀裂透水量係数の平均値が、 $3 \times 10^{-11}\text{m}^2/\text{s}$ 以下の良好な母岩が必要となる。それ以上の亀裂透水量係数平均値では、核種の閉じ込め性能を緩和するためには、ガス発生速度や動水勾配等のその他のパラメータについて制限を設ける必要が生じる。感度解析結果によれば、グループ 2 では、上述の 2 つのパラメータが突出した感度を有しており、他のパラメータを制限してもさほど効果は見られないものと予想される。

C-14 を「确实」に抑えるためには、C-14 の線量換算係数およびインベントリと半減期から逆算して、7 万年の閉じ込め期間が必要となる。これに、各バリアの最小の性能を付加して、1 万年の核種閉じ込め機能が必要となるものと考えられる。

C-14 の次に、被ばく線量に支配的となる核種は I-129 である。I-129 の SI 値は、全域的解析で 90% であった。また、SI 法で、I-129 からの被ばく線量を目標値とした $10 \mu\text{Sv/y}$ 以下に制限するために、効果の大きなパラメータとしては、母岩の亀裂透水量係数の平均値、動水勾配、および劣化後の廃棄体の空隙拡散係数が抽出された。天然バリア条件である前者の 2 つのパラメータで、これに現実的な制限を加える場合の SI 値の変化を表 4.1.2-1 に示す。仮想的に 98% 以上の SI 値を十分条件とすると、表 4.1.2-1 中の または の制限を考えることにより I-129 に対する線量目標を達成できるものと考えられる。

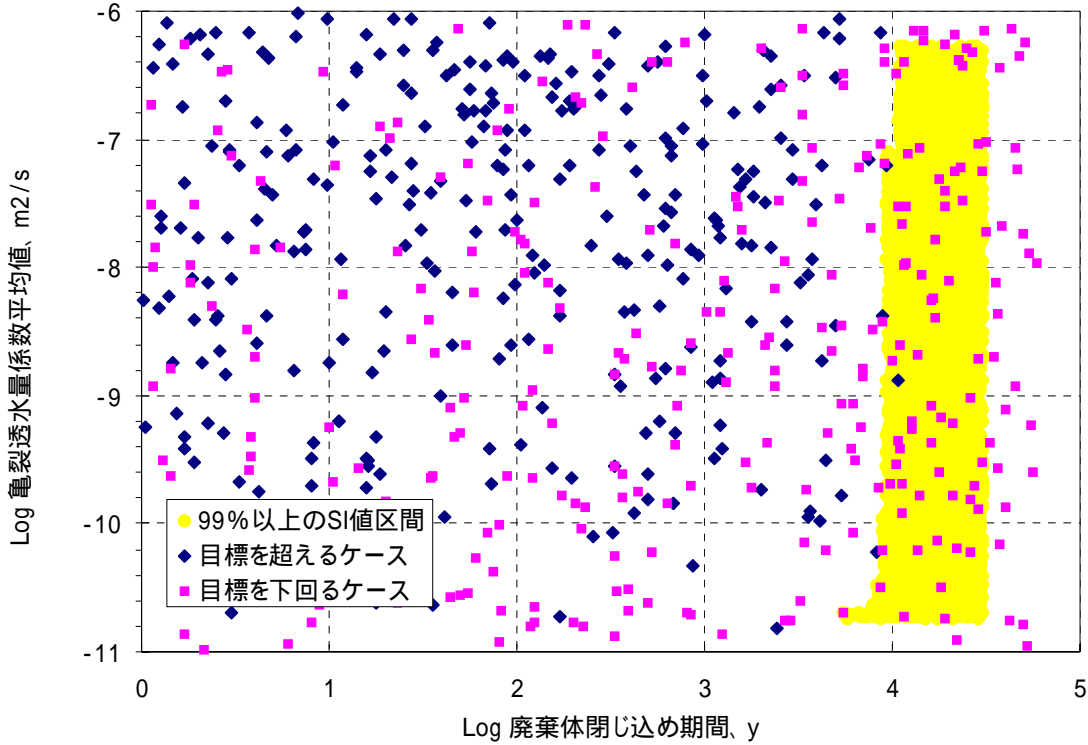


図 4.1.2-1 閉じ込め期間と亀裂透水量係数平均値の組み合わせによる成立条件の範囲

表 4.1.2-1 グループ2におけるI-129の核種移行率を制限するためのパラメータ範囲

パラメータ	制限値	SI 値
亀裂透水量係数平均値	$10^{-9}m^2/s$ 以下	95.7%
	$10^{-10}m^2/s$ 以下	100%
動水勾配	0.01 以下	96.6%
亀裂透水量係数平均値 + 動水勾配	$10^{-9}m^2/s$ 以下 0.01 以下	98.5%

C-14、I-129 以外の核種は、全域的な解析において $10 \mu Sv/y$ を超えるケースは少なく、SI は、全域的な解析においても 98%を越えている。したがって、グループ 2 では、C-14 および I-129 を押さえ込むことにより、線量目標を達成できるものと予想される。その際、確実性の高い十分条件は以下の値となる。

廃棄体の閉じ込め期間： 10^4 年以上

母岩の亀裂透水量係数平均値： 10^{-9} m²/y

母岩の動水勾配： 10^{-2}

以上の設定条件において、決定論解析を実施した結果を図 4.1.2-2 に示す。上記に示したパラメータ以外については、バリアが健全な状態における保守値（性能として低めの値）を用いることとした。なお、グループ1で議論された核種の蓄積および再放出については、核種放出開始時の瞬時放出を仮定する限り、考慮する必要性はないものと考えられる。ただし、ガス影響については、核種の放出開始と同時に生じるものと設定した。

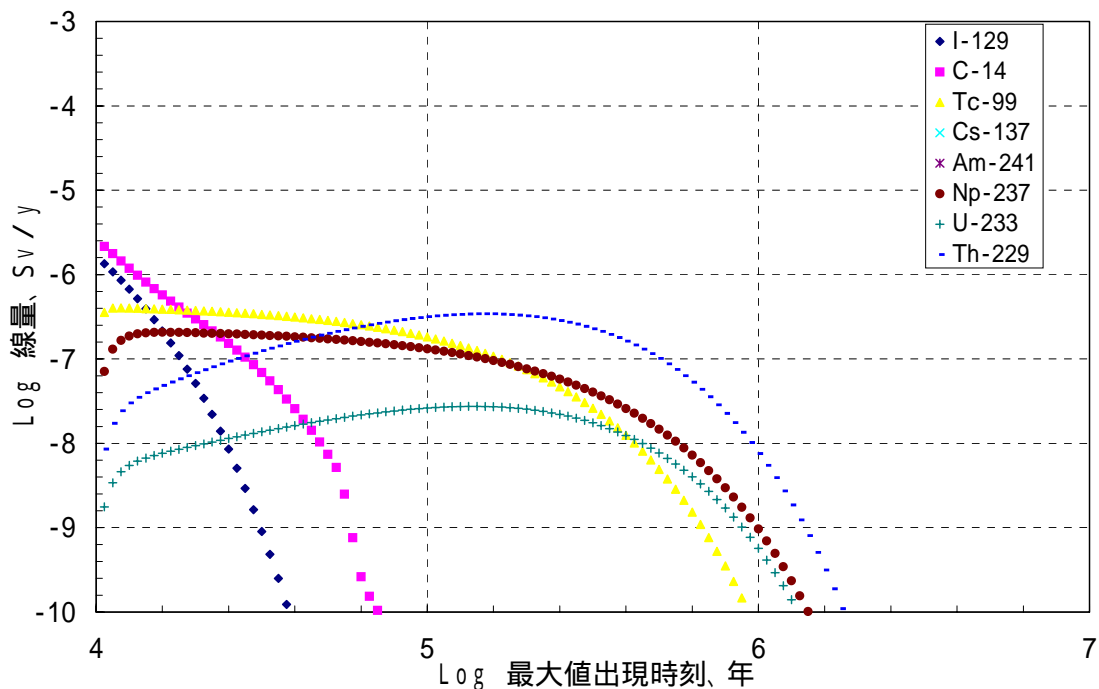


図 4.1.2-2 グループ2の十分条件における決定論的解析結果

5. おわりに

本研究では、結晶質岩系のサイトを想定して TRU 核種を含む放射性廃棄物の地層処分に対応した処分概念を対象として、包括的感度解析手法を適用して、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った。地層処分の個々の概念や地下水移行シナリオの基本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、成立性を体系的かつ網羅的に抽出するための研究を実施した。

本研究では、従来の TRU 廃棄物地層処分のバリアの構成は変更せずに、天然バリアのサイト特性や人工バリアの設計仕様のように将来定量的な情報を決定出来るような範囲のパラメータについて、核種移行に及ぼす影響を定量的に明らかにした。それらのパラメータのサイト選定および処分場設計における実現性を考慮し、それらの現実的なパラメータ範囲の組み合わせによる TRU 廃棄物地層処分の成立性を検討した。

前提としたモデル体系において十分条件の解析結果は、母岩の透水量係数の平均値等、主要なバリア機能に高い性能が求められている。これは、過度なモデルの保守性である以下の点が反映されているものと考えられる。

マルチチャンネルモデルに対して、人工バリアからの核種放出量を流量分配していること。

マルチチャンネルモデルにおける上限の透水量係数について $10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ と非現実的な上限を与えていること。

以上の2点により、天然バリアの性能が過度に保守的に評価されているものと予想される。ただし、処分概念の十分条件の観点からは、母岩の透水量係数ばかりでなく、劣化後の廃棄体の分配係数など、他のバリア特性と組み合わせて概念を構築する必要がある。

今後、これらの、保守性について再吟味すると共に、解析数を増やし、処分の成立条件を探ることが重要となる。

今後の課題としては、各パラメータ間の整合化の範囲とそれらの整合性を反映した解析ツールの改良および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が挙げられる。また、本年度の解析をもとに、堆積岩系および結晶質岩系の TRU

地層処分概念の成立性の絞込みについてさらに解析を続けることも重要である。

また、TRU 廃棄物処分に特徴的な、環境変化（パラメータの時間的变化）については、コントロールリリースを主体とするか、または、閉じ込め型の処分を前提とするかを考慮した処分概念や処分の考え方を再構築する必要があり、今後、環境変化の取り扱いについて、方針を明確にする必要がある。

6. 参考文献

朝野英一，他：“TRU 廃棄物廃棄体の開発(1)開発計画”，日本原子力学会「2002 秋の大会」予稿集 F34, p634 (2002a)

朝野英一，他：“TRU 廃棄物廃棄体の開発(7)チタン複合金属容器廃棄体の材料選定”，日本原子力学会「2002 秋の大会」予稿集 F40, p.640 (2002b)

Atkinson,A.：“The time dependence of pH within a repository for radioactive waste Disposal”. UKAEA, AERE-R11777, (1985)

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

動力炉・核燃料開発事業団：“化学形態を考慮したヨウ素の移行挙動研究(III)”，委託研究成果報告書, PNC TJ1262 91-001, (1992a)

動力炉・核燃料開発事業団：“高レベル放射性廃棄物 地層処分研究開発の技術報告書”，PNC TN1410 92-081 (1992b)

動力炉・核燃料開発事業団：“模擬ハル圧縮体 X線 CT 撮影”，依頼試験成果報告書, PNC TJ8124 95-010 (1995)

動力炉・核燃料開発事業団：“核燃料施設の安全研究の成果(平成3年度～平成7年度)”，PNC TN 1410 97-009”,(1997)

福本雅弘，須黒寿康：“廃ヨウ素吸着剤の銅マトリックス固化体の腐食速度測定試験 (II)”，日本原子力学会「2001 春の年会」要旨集 L11, p.609 (2001)

原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会：“低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について（第2次中間報告）”（1993）

原子力安全委員会：“放射性廃棄物安全基準専門部会,低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について（第三次中間報告）”（2000）

Idemitsu. K, et al: “Diffusion paths of cesium in water-saturated mortar”, Nuclear Technology, Vol. 118, No.3, pp.233-241 (1997)

Impey M.D., et al: “Technical Evaluation of Gas Effects for the Rokkasho Phase II Shallow Land Burial Facility”, QuantiSci IE5011A-2 (1997)

稲場房恵, 他：“セメント系材料中での実効拡散係数に及ぼす材料の物理的及び化学的変化の影響”, 日本原子力学会「1998春の年会」要旨集 L4, p.588 (1998)

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次とりまとめ-総論レポート”, JNC TN1400 99-020 (1999a)

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次とりまとめ-分冊1 わが国の地質環境”, JNC TN1400 99-021 (1999b)

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次とりまとめ-分冊2 地層処分の工学技術”, JNC TN1400 99-022 (1999c)

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次とりまとめ-分冊3 地層処分システムの安全評価”, JNC TN1400 99-023 (1999d)

核燃料サイクル開発機構：“ニアフィールドにおける酸化還元状態の変遷に関する予察的解析”，JNC TN8400 99-027 (1999e)

核燃料サイクル開発機構：“地層処分第2次取りまとめにおける放射性元素の溶解度評価”，JNC TN8400 99-071 (1999f)

核燃料サイクル開発機構：“人工バリアシステム中のガスの移動に関する研究(V)”，JNC TJ8400 2000-032 (2000)

核燃料サイクル開発機構,電気事業連合会：“TRU 廃棄物処分概念検討書”，JNC TY1400 2000-001,TRU TR-2000-01 (2000)

核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発 - 平成13年度報告 - ”，JNC TN1400 2002-003 (2002)

核燃料サイクル開発機構：サイクル機構 熱力学・収着 データベース (2003)

黒沢進, 他：“圧縮ベントナイト中のコロイド移行に関する研究”，放射性廃棄物研究, vol.1, No.2, p.177 ~ 186

Mayer G., et al: “Experimental determination and numerical simulation of the permeability of cementitious materials” Nuclear Engineering and Design Vol.138, pp.171-177 (1992)

三原守弘, 他：“カルシウム型ベントナイトのトリチウム,セシウム,ヨウ素および炭素の実効拡散係数の取得”，JNC TN8430 99-011 (1999)

三原守弘, 他：“低酸素かつアルカリ条件における炭素鋼,ステンレス鋼及びジルカロイからのガス発生率及び腐食速度の評価”,サイクル機構技報, No.15 p.91-102 (2002)

日本原燃：“六ヶ所低レベル放射性廃棄物貯蔵センター廃棄物埋設事業許可申請書一部補正”(1889)

日揮株式会社：“核種移行解析の網羅性の確認・評価(その2)”,JNC TJ8400 2001-032 (2001)

岡田清, 他：土木材料科学, 国民科学社

坂口, 他：“中空円筒コンクリート構造物の長期透水性評価試験”,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, NO.1, p.643 ~ 648 (1997)

斎藤典之, 他：“放射性よう素の固定化技術の開発(1)”, 日本原子力学会「2001 秋の大会」予稿集 O28, p.906 (2001)

佐藤治夫, “放射性廃棄物地層処分における緩衝材および岩体中の各種移行に関する研究” PNC TN8410 97-202, (1998)

九石正美, 他：“模擬アスファルト固化体からの可溶性元素の浸出挙動”, 日本原子力学会「1997 秋の年会」I21, p.663 (1997)

高瀬博康, 他：“オンライン オブジェクト指向型性能評価環境の開発 (その1) オンライン オブジェクト指向型性能評価の方法論”, 日本原子力学会「2002 春の年会」要旨集 M1, p.663 (2002)

Urs Berner, : KRISTALLIN-I: Estimates of Solubility Limits for Safety Relevant Radionuclides, PSI Bericht, Nr.95-07, (1995)

安田和弘, 他：“複合バリア施設の長期的性能評価(3/3)セメント”, 日本原子力学会「2002 春の年会」要旨集 M50, p.712 (2002)

若杉桂一郎, 他 : “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, No.14 , JNC TN1340 2001-010, p.149-160(2002)