

## 第2次取りまとめ第2ドラフトにおける地層処分システムの安全評価<sup>†</sup>

宮原 要<sup>††</sup> 牧野仁史<sup>††</sup> 内藤守正<sup>††</sup> 梅木博之<sup>††</sup>

本報告は、高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の第2次取りまとめ第2ドラフトにおける地層処分システムの安全評価で用いられた方法論と結果についてまとめたものである。第2次取りまとめにおける安全評価は、地層処分システムの設定、シナリオ解析、安全評価解析と結果の解釈からなる。わが国の幅広い地質環境を考慮した解析・評価により、地層処分システムの安全性に人工バリアとその周辺岩盤の性能が重要な役割を果たすことを示した。

**Keywords:** 第2次取りまとめ、安全評価、安全性確保の考え方、安全機能、地層処分システム、シナリオ解析、応答解析、全体性能解析

This paper outlines the approach used in the safety assessment of the second progress report for research and development for the geological disposal in Japan, and illustrates their application in evaluating the safety of Japanese HLW disposal systems. The safety assessment methodology in the second progress report consists of conceptualizing a geological disposal system, analyzing scenarios, assessing safety through performance assessment calculations and interpreting results. The key role of the engineered barriers and the surrounding host rock in the safety case for a generic system is illustrated in the safety assessment.

**Keywords:** the second progress report, safety assessment, safety concept, safety function, geological disposal system, scenario analysis, sensitivity analysis, total system performance analysis

### 1 はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の第2次取りまとめは、平成4年に公表された第1次取りまとめ[1]の成果を受けて、2000年前までに国に提出し、国による評価を経て、処分事業を進めるまでの処分予定地の選定、安全基準の策定の技術的拠り所を与えるとともに、2000年以降の研究開発の具体化にとってきわめて重要なものと位置づけられているものである。本報告は、「地質環境条件の調査研究」[2]、「処分技術の研究開発」[3]とともに第2次取りまとめにおける主要な研究開発分野の1つとして実施されてきた「性能評価研究」の第2次取りまとめ第2ドラフト(第2ドラフトは、2000年前までに公表を予定している地層処分研究開発第2次取りまとめの内容について専門家の方々に検討頂くための作業用資料であり、最終報告書に向けて適宜見直される。)までの成果を、地層処分システムの閉鎖後の安全評価としてまとめたものである[4,5]。

### 2 安全評価の前提

平成9年4月に公表された原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会報告書「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について」(以下、専門部会報告書)[6]に示された第2次取りまとめの安全評価の目的は、地層処分システムの安全評価手法の確立を図るとともに、それを用いてわが国における幅広い地質環境

を考慮した地層処分概念に対する評価解析を実施し、閉鎖後のシステムの安全性について検討を行うことである。

専門部会報告書では、第2次取りまとめの安全評価において、とくに時間の経過に対応させた評価と安全指標をどのように考えるべきかについて、以下のように求めている。

- ・諸外国の指針や基準、国際機関によって提案されている考え方を参照する。
- ・地層処分の安全評価の指標として放射線量を基本とする。
- ・評価期間に関する時間スケールについてはとくに限定せず、現在の人々との対比において人間への影響が最大となる時期やその期間がわかるように評価を行っておく。
- ・上述した安全評価の時間スケールにおいて将来の人間環境の予測の困難さを考慮し、長期については天然の放射線レベルに有意な影響のないことを確認するため補完的な解析結果を併せて示す。

### 3 安全評価の方法論

地層処分システムの安全性を考える上で取扱う必要のある主な不確実性は、地質環境の不均質性や天然現象による地質環境への影響の規模(程度と範囲)への理解が十分でないこと、さらに将来の人間の生活様式の予測の難しさや人工バリアシステムの将来挙動に関わるものに起因する。サイト選定、処分場の設計、安全評価の各段階において適切な方法を講じることにより、このような不確実性を可能な限り低減させつつ、安全評価解析に取り込む。残された不確実性の影響を受けにくいバリア機能に焦点を当てるとともに、シナリオの網羅性やモデル、データの信頼性を示しつつ過剰にならない程度に保守性

<sup>†</sup> Overview of safety assessment in the 2nd draft of the second progress report on research and development for the HLW disposal in Japan, by Kaname Miyahara(kaname@hq.jnc.go.jp), Hitoshi Makino, Morimasa Naito, Hiroyuki Umeiki

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第15回夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

<sup>††</sup> 核燃料サイクル開発機構 2000年レポートチーム統合化グループ  
Japan Nuclear Cycle Development Institute, Geological Isolation Research Project, Integration and Reporting Group〒100-8245 千代田区丸の内1-1-2 NKKビル

を考慮することにより、解析結果の信頼性を向上させることができることが可能である。

第2次取りまとめにおける安全評価の方法論は、まず、地層処分の安全性確保の考え方に基づき地層処分システムの安全機能を定義し、これを念頭にわが国において考慮すべき地質環境に対応させて処分場のデザインを組み合わせることにより、地層処分システムを設定する。これに基づきシステムの多様性を取扱うことができる。また、地層処分システムの安全評価に関わる不確実性を、シナリオ、モデルおよびデータの不確実性として取り扱う[7]。体系的なシナリオ解析により記述されるシステムの将来挙動を定量的に解析するために、地層処分システムの組合せとシナリオ、モデル、データの不確実性を考慮した複数の解析ケースを設定し、モデル、データを整える。モデルに関しては、まず、シナリオに沿ってシステムの挙動を定義するための仮定の集合である概念モデルを作成する。それにに基づき数学モデルと計算プログラムである解析コードを作成する。モデルに対応して必要となるパラメータや境界条件に関するデータは、室内やフィールドにおける実験等を通じて準備する。解析では、不確実性の分類毎に解析を行い、それら個々の不確実性に対する応答をシステム構成要素（人工バリア、天然バリア、生物圏）毎に調べる（応答解析という）。応答解析の結果を踏まえ、システムの全体性能を示すために、それら不確実性を組み合わせた解析を、地質環境のバリエーションを中心として実施する。全体性能の解析ケースの設定においては、整合のとれない要因の組合せを避けるとともに、応答解析の結果から鍵となる要因を抽出しその組合せを考慮することにより、可能な限りケース数を減らし、解析の追跡性や評価のわかりやすさを向上させる。

#### 4 地層処分システムの設定

第2次取りまとめ対象とする地層処分システムは、第1次取りまとめ同様、サイト選定によって得られる地下深部の安定な地質環境に、性能に十分な余裕を持たせた人工バリアシステム（ガラス固化体、オーバーパックと緩衝材で構成）を含む多重バリアシステムを構築するという概念に基づいている。地層処分による安全性の確保という観点からのサイト選定の意味は、まず地層処分システムの性能に大きな影響をもたらす可能性のある場所を避けることである。わが国は変動帶に位置しており、とくにこの観点から適切な処分サイトを選定することは重要である。関連する天然現象（例えば、火山・火成活動、断層活動、著しい隆起・侵食など）の活動履歴や地質環境への影響についての理解に基づいて、地層処分にとって重要な地質環境が少なくとも将来10万年程度まで安定とみなすこと

ができ、さらに長期にわたり安定と考えることができるサイトを選定することが可能であるとの見通しが示されている[2]。地震に関しては一般に地下深部では地表に比して影響は小さく、処分場を適切に設計することにより、安全上十分受け入れることのできる程度にその影響を低減することが可能である[3]。また将来の人間活動によって、地層処分システムが破壊されないように、利用される可能性のある天然資源が存在する地域についても処分サイトとして選定されないようにする。また、地層処分システムに期待される安全機能に対し、以下のようなできるだけ好ましい地質環境を選定することが可能である[2]。

- 人工バリアの健全性と放射性核種の移動抑制機能が保証されるように、岩盤が力学的に安定であること、および地下水の流束（フラックス）が小さくpHは中性から弱アルカリ性を示し化学的に還元性であること。
- 地質媒体が放射性核種の移行に関して大きな遅延性を有すること。
- 処分場から人間環境までの地下水の移行経路が長く、移行経路に沿った希釈分散効果が大きいこと。

また、処分場の設計は、現実的な技術により経済的に合理的なレベルで実現できるものである必要がある。実際の製作、施工に当たっては、厳密な品質管理／品質保証により人工バリアや処分施設に工学的な欠陥が生じないようになることが可能である[3]。

このような地層処分による安全性確保の考え方に基づけば、地層処分システムでは、次のような安全機能が期待できる。

- ・ 深部地質環境は力学的に安定で人工バリアを物理的に保護するとともに、地下水が還元性を有し、その動きが遅いことによって、人工バリアが所期の機能を発揮できるような環境を提供する。
- ・ ガラス固化体は、放射性核種を安定なガラス構造の中に取り込み、地下水への溶出を抑える。
- ・ オーバーパックは、ガラス固化体と地下水の接触を一定期間阻止する。
- ・ 緩衝材は周囲からの地下水の浸透やその中の流れを制限することに加え、地下水に溶出した放射性核種を吸着することによって、放射性核種の移動を抑制する。
- ・ 地質環境中では、地下水の動きが緩慢であるうえ、物質を吸着するという岩石の特性が放射性核種の移行を抑制する。また、岩盤中の複雑な間隙構造によって地下水中の放射性核種はいろいろな方向に分散し、次第に希釈される。

以上の安全機能が確保されれば、放射性核種が生物圏に到達するまでにはきわめて長い時間を要し、この間に

放射能は減衰、希釈されて、人間やその環境に有意な影響が及ばないように、安全に廃棄物を処分することができる。これら安全機能を念頭に地質環境条件と処分場のデザインの組み合わせることにより地層処分システムが設定される。

わが国では、一般に地下水の水位が高く、岩盤は地表付近まで地下水に満たされている。わが国の地質環境の特性（地下水の流動特性、地下水の地球化学特性、岩盤の熱・力学的特性、物質移動に関する特性）は、[2]において以下の地質環境の多様性を考慮して整理されている。

- －地形：山地、丘陵、平野（台地、低地）
- －地下水：降水起源、海水起源
- －岩種：結晶質岩、堆積岩
  - ・結晶質岩：酸性岩、塩基性岩
  - ・堆積岩：軟岩（砂質岩、泥質・凝灰質岩）  
硬岩（砂質岩、泥質・凝灰質岩）

また、わが国において考慮すべき地表環境は以下のように整理できる。

- －気候：温暖気候、寒冷気候
- －地図と生物圏とのインターフェイス（GBI）
  - ：河川水、河川堆積物、井戸、沿岸海域水、  
沿岸海域堆積層

処分場は、サイト特性調査に基づき、主要な地下水移行経路となり得る大規模な断層破碎帯まで必要に応じた距離を離して設計される。処分するガラス固化体の総本数としては、将来の原子力による総発電量の見通しと再処理工場の運転見通しに基づき40,000本を想定する。処分場の深度を十分にとることにより、力学的に安定で地下水が還元性でかつその動きが遅いといった人工バリアの所期の機能を発揮できるような地質環境が得られるとともに、処分場へ人間が容易に接近できないこととなる。廃棄体の定置方式としては横置きと豎置きが考えられている。処分坑道の掘削においては、掘削による損傷や応力解放などによる坑道周辺の岩盤の力学的・水理学的な擾乱（以下、このような擾乱を受ける領域を掘削影響領域という）は極力抑えられる。処分坑道の間隔や廃棄体の定置間隔は、緩衝材の変質を防ぐように温度が最大でも100°C未満となるように設計される[3]。

Table 1にわが国で考慮すべき地質環境条件（地表環境条件を含む）とデザインのオプションを、レファレンスケースでの設定（それぞれレファレンスケース地質環境、レファレンスケースデザインという）と併せて示す。レファレンスケース地質環境では、岩種としては必ずしも支保を必要とせず、1,000 mまでの深度に処分場を構築できる硬岩のうち、地質環境特性に関するデータが比較的多い花崗岩を、地形は隆起・侵食が著しくない低地を、またわが国で幅広くデータが得られている降水系高pH型地下水を選ぶ

こととする[2]。またレファレンスケースデザインは第1次取りまとめ評価対象としたデザインを合理性を考慮して見直したものに基づいている[3]。

## 5 シナリオの作成と解析ケースの設定

シナリオ解析では、国際的に認められている体系的アプローチ[例えば,8]を踏襲しながら、まず、システムの将来挙動に関する特質、事象および過程（FEP）を、諸外国の研究例や専門家の知見を踏まえ、重要な現象に見落としがないように留意してリスト化する。これらFEPとその相関関係に基づいて、先に述べた地層処分システムに期待される安全機能とそれに影響や擾乱を与える要因を分析することにより、システムの安全性に対する影響の可能性を抽出しそれをシナリオとして記述する。併せて、各シナリオで記述された可能性のある影響を定量的に評価するための解析ケースを設定する。これまでの諸外国の安全評価の多くが、解析ケースの設定までを一連のシナリオ解析の手続きの中に含めていないため、シナリオと解析ケースの相関関係について見通すことが容易ではなかった。第2次取りまとめのシナリオ解析では、地層処分システムの組合せとシナリオ、モデル、データの不確実性を考慮した複数の解析ケースの設定までをシナリオ解析に含めている。

シナリオを検討するために、まず、4で述べた地層処分システムの安全機能とそれに影響を与える可能性のある要因をより詳細に記述・検討できるように、それらに関するFEPのリストを作成する。この際、科学的な原理、原則や、室内および既存坑道などを利用したフィールドにおける観察や実験から得られる情報、国際的な協力により作成されている汎用的なFEPリスト[9]や専門家の科学的判断等を参考に、重要な現象に関して見落としがないように配慮する。併せて、わが国の地層処分概念と関係のないFEP（例えば、使用済燃料に固有のFEP）や地層処分本来の安全性を評価する上で対象外とすべきFEP（例えば、意図的な人間侵入に関わるFEP（専門部会報告書参照））については、第2次取りまとめの安全評価の目的・範囲から外れるためFEPリストに含めないようにする。

包括的FEPリストについては、科学的な知見や専門家の判断によりFEP間の相互関係を踏まえた上で影響の推定や発生確率の推定などを行い、これに基づいて個々のFEPの内容を記述する。その後、地層処分システムに期待する安全機能とそれに対する影響や擾乱の可能性を安全評価上十分にとらえることに留意しつつ、以下の視点により安全評価解析で考慮する必要のないFEPを除外する。

- ① 適切な処分サイトが選定されることによって、地層

Table 1 Geological environment conditions to be considered in Japan and design options

	わが国で考慮すべき地質環境条件	レファレンスケース地質環境
地形	・山地 ・丘陵 ・平野(台地, 低地)	平野(低地)
地下水	・降水起源 ・海水起源	降水系高 pH 型地下水
岩種	・結晶質岩: 酸性岩, 塩基性岩 ・堆積岩(軟岩): 砂質岩, 泥質・凝灰質岩 ・堆積岩(硬岩): 砂質岩, 泥質・凝灰質岩	花崗岩: 結晶質岩(酸性岩)
気候	・温暖気候 ・寒冷気候	現状の温暖気候
地図と生物圏のインターフェイス	・河川 ・河川堆積層 ・井戸 ・沿岸海域水 ・沿岸海域堆積層	河川
	デザインのオプション	レファレンスケースデザイン
ガラス固化体	・JNFL 仕様の固化体 ・COGEMA 仕様の返還固化体 ・BNFL 仕様の返還固化体 ・サイクル機構仕様の固化体	JNFL 仕様を参考してモデルガラス固化体を設定(40,000 本を処分対象と想定)
オーバーパック	・炭素鋼 ・複合オーバーパック : チタン-炭素鋼, 銅-炭素鋼	炭素鋼: 厚さ 0.19m (最小の設計寿命は 1,000 年程度)
緩衝材	・ペントナイトとケイ砂の混合	ペントナイト 70wt% + ケイ砂 30wt%, 乾燥密度 $1.6 \text{ Mg m}^{-3}$ , 厚さ 0.7m
埋め戻し材	・粒度調整したずりとペントナイトの混合	粒度調整したずりとペントナイトの混合材
プラグ材	・ペントナイト ・粒度調整したずり ・粒度調整したずりとペントナイトの混合材	粒度調整したずりとペントナイトの混合材
グラウト材	・粘土系材料 ・セメント系材料	粘土系材料
処分場の深度	・硬岩系では 1,000m 程度まで ・軟岩系では 500m 程度まで	硬岩系で 1,000m
坑道掘削技術	・発破掘削 ・機械掘削(トンネルボーリングマシン)	機械掘削(トンネルボーリングマシン)
処分場内の温度	熱解析に基づき人工バリア内の温度が 100°C を越えないように設定	処分後 1,000 年以降 60°C で一定 (地温 45°C の場合, 処分後 1,000 年で処分場内がほぼ均一で 60°C 以下となる)
支保	・コンクリート支保 ・鋼製支保	硬岩系では基本的に空洞は自立するため支保の使用は想定しない

処分システムの安全性に有意な影響を及ぼさないと判断されるFEP。

② 処分場の設計により、地層処分システムの安全性に有意な影響を及ぼさないと判断されるFEP。

③ 発生確率がきわめて小さいFEP。

④ 上記①～③以外で上記地層処分システムへの影響が無視できるほど小さいと判断されるFEP。

シナリオについては、地層処分システムの将来挙動の幅に起因する人間への影響の与え方により接近シナリオ(高レベル放射性廃棄物と人間との物理的距離が接近することによって人間環境に影響が及ぶ可能性に関するシナリオ)と地下水シナリオ(地下水により放射性物質が処分場から人間環境に運ばれる可能性に関するシナリオ)に分類する。

4で述べた地層処分による安全性確保の考え方に基づき、長期的に安定で資源の存在しない地質環境を選定し、併せて処分深度を適切に設定することにより、天然現象や将来の人間活動に基づく接近シナリオの発生の可能性はきわめて小さいものに抑えることが可能である。また、人間活動に基づく接近シナリオ(人間侵入シナリオ)については、上述したような対策に加え、土地利用制限等の法的規制、記録の保存やマーカーの設置等により処分場の存在を警告するといった対策がとられる。そのため、これらに関連するFEPは、基本的に①～③の視点で安全評価の解析対象から除外することができると考えられる。例えば、火山活動による処分場への影響は、適切なサイト選定が行われることにより回避できることと考えられるた

め、安全評価解析の対象からは除外することができる。しかし地層処分システムの安全評価上、このようなシナリオを想定し、それがどの程度の影響を及ぼすかを検討しておくことも意味があると考えられる。このため、今日の人間の生活様式を前提として、処分場へのボーリングによる侵入者への影響を発生確率も考慮して評価し、諸外国の基準と比較して問題にならないとの結果を得ている。

また、サイト選定や工学的対策が適切に行われ、長期的に安定な地質環境の下に注意深く設計された処分場を建設することによって構築されるため、天然現象、処分場の初期欠陥あるいは将来の人間活動がシステム性能に影響を及ぼす可能性を低減することが可能である。このことを勘案して、地下水シナリオについては、まず、

- 地層処分の観点から現在の地質環境は定常的な状態で将来まで継続する、
  - 人工バリアは設計通り機能する、
  - とすることが合理的である。さらに、生物圏については、
  - 現在の地表環境（気候、表層水系、人間の活動様式）が将来まで継続する、
- と仮定する。このようなシナリオを基本シナリオと名付ける。

安全評価解析で考慮すべき多数の要因についての解析を系統的に進めるとともに何の影響に着目した解析であるかを明らかにするために解析ケースをFig.1のように分類する。まず、結果を相互に比較するための基準となる解析ケースとしてレファレンスケースを設定する。レファレンスケースは、Table 1に示したレファレンスケース地質環境とレファレンスケースデザインの組合せ（レファレンスケース地層処分システム）に対して、地層処分システムに期待する安全機能とそれに関係する特性・現象とを関係づけながら現実性を考慮してレファレンスケース概念モデルとレファレンスケースデータを設定する。

基本シナリオの全体像は、レファレンスケースで考慮するシナリオの記述に対して、期待する安全機能を損なう可能性のある要因や、設計では期待していないがさらに安全の裕度を高める可能性のある要因を想定したり、地質環境条件のバリエーションやデザインのオプションを考慮することによる影響を付記することにより示される。安全機能を損なう可能性のある要因として、オーバーパックの腐食膨張による緩衝材の変形・圧密、緩衝材に接する岩盤中の亀裂への緩衝材の流入に伴う圧密状態の変化、および岩盤中でのコロイドによる核種の移行を考慮しその影響を付記する。安全機能に対してさらに安

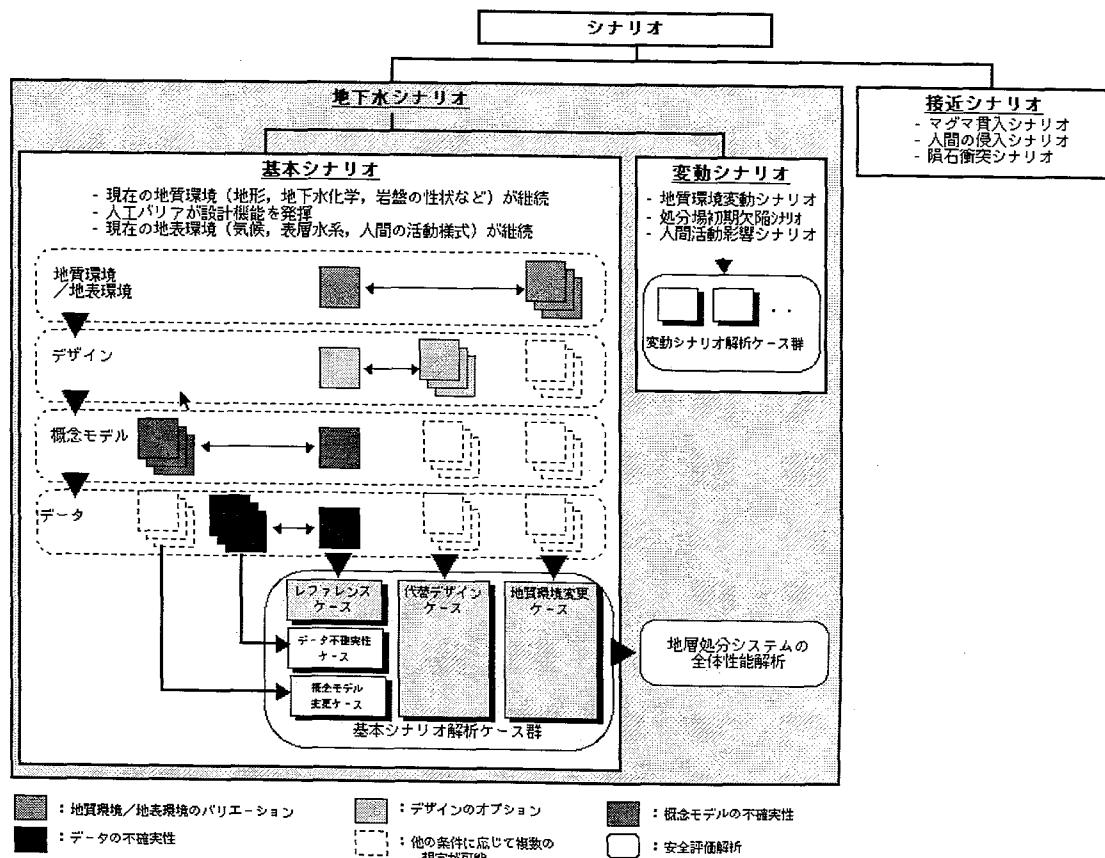


Fig. 1 Classification of scenarios and calculation cases

全の裕度を高める可能性のある要因として、オーバーパックの腐食生成物や掘削影響領域での核種の移行遅延、処分場レイアウトを考慮することによる核種移行遅延効果の向上、および処分場内での濃度干渉による人工バリアからの核種放出の抑制を考慮しその影響を付記する。また、地質環境条件（動水勾配、岩種、地下水組成）のバリエーションやデザインのオプションを考慮し、その影響を付記する。

安全機能に擾乱を与える可能性のある要因として天然現象、処分場の初期欠陥および将来の人間活動を想定し、それらが地質環境条件やバリアの諸特性に与える可能性のある影響を変動シナリオとして記述する。天然現象については、緩慢な現象の発生が影響を与える場合を想定する。隆起・侵食による影響の可能性として、処分場が地表に近づくことによる地下水組成および水理場の変化を想定する。また、気候・海水準変動については、周期的な氷期の発生を想定し、その影響の可能性として氷期における海水準の低下とそれに伴って塩淡境界が処分場を横切るように移動をすることを想定する。初期欠陥については、品質管理が適切に行われるため起こりにくくと考えられる製作・施工上の欠陥が検出・補修されないことをあえて想定する。初期欠陥に関するシナリオとしては、オーバーパックの溶接ミスなどによる不完全な密封を想定し、レファレンスケースに関係する基本シナリオの記述に対して、一部のオーバーパックの破損時期の早期化を付記する。人間活動については、将来の人間活動として井戸の採掘と採水およびボーリングによる掘削影響領域の発生をあえて想定する。井戸水摂取については、地圏と生物圏のインターフェースの変更として取り扱う。ボーリングによる掘削影響領域の発生については、地表からの酸化性地下水の浸入あるいは掘削影響領域が卓越的な地下水／核種の移行パスになることを想定する。

- 上記のシナリオの作成を踏まえ、まず、レファレンスケース概念モデルとレファレンスケースデータを、レファレンスケース地層処分システムに対して期待される安全機能に関係する特性やプロセスを考慮して設定する。次に安全機能やその安全機能に影響や擾乱を与える可能性のある要因についての検討を踏まえて、それらの地層処分システムの性能への影響の可能性を、以下の手続きにより、概念モデルやデータのレファレンスケースからの変更として具体化し安全評価解析上の取扱いを定める。
- レファレンスケースで用いられたデータについての不確実性の影響を調べるために、代替的なデータを考慮する。
- レファレンスケースで用いられたモデルについての不確実性の影響を調べるために、代替的なモデルを考慮する。

- レファレンスケースで考慮していないが起こる可能性のある好ましい要因あるいは好ましくない要因の影響を、レファレンスケースからのデータあるいはモデルの変更として記述する。
- レファレンスケース地層処分システム以外の地質環境やデザインの組み合わせの特徴を、レファレンスケースからのデータあるいはモデルの変更により考慮する。
- 地質環境や期待される安全機能に対して擾乱となる可能性のある要因について、その影響をレファレンスケースからのデータあるいはモデルの変更として記述する。これらは変動シナリオに対応する解析ケースとなる。

このような手順に従い解析ケースとその内容を明らかにすることにより、レファレンスケースを基準として、安全評価解析におけるそれぞれの解析ケースが何の影響をどのような考えに基づいて検討するものなのかを示すことができる。

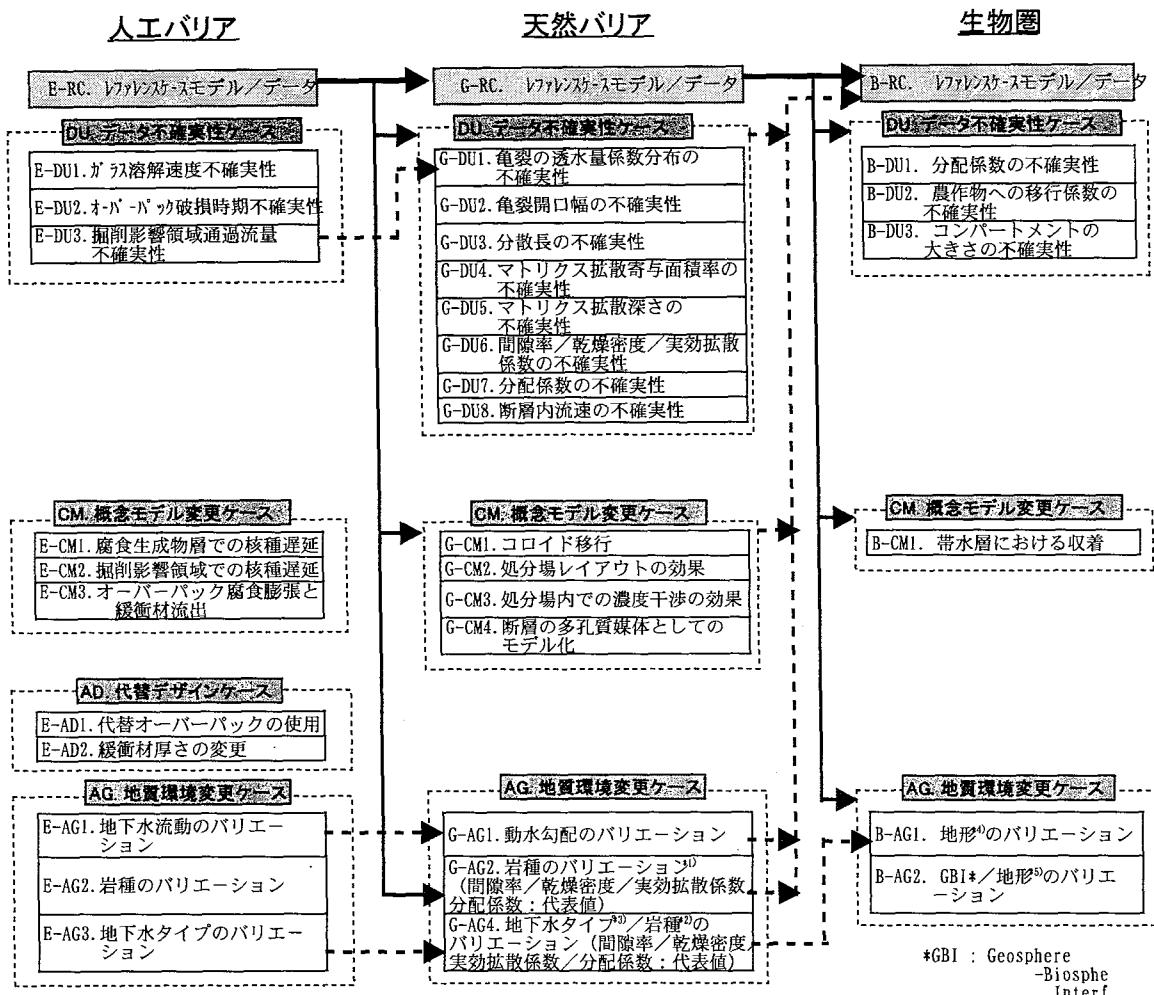
以上の手続きより、レファレンスケースおよび応答解析のための100ケースの解析ケースを設定した。基本シナリオの解析ケースをFig.2に示す。

## 6 レファレンスケースの解析

地下水シナリオについての安全評価解析を行うためのモデル体系は、人工バリア、天然バリアおよび生物圏における核種移行に関わる主要なプロセスを取り扱う安全評価モデルチェインと、これとは独立して地下水流动や溶解度など安全評価モデルチェインの初期条件や境界条件、パラメータなどの設定を行うための個別プロセスに関する支援モデル群により構築される。安全評価解析は、各解析ケースについて、安全評価モデルチェインや支援モデル群に現象や環境条件に即したモデルおよびデータの設定を行い、プロセス間でのデータの受け渡しを行なながら実施される。

人工バリア核種移行評価においては、ガラス固化体の溶解挙動と核種の溶出、人工バリア周辺の掘削影響領域中での地下水流れによる母岩中の核種流出を取り扱え、時間・空間ごとに同位体の存在比に応じて元素の溶解度を分配して各同位体の沈殿／溶解量を決定することができるMESHNOTEコード（円筒一次元座標系、有限差分法）を用いた。

母岩に対しては、100 mスケールを対象とした3次元亀裂ネットワークモデル（FracMan/LTGコード）による核種移行解析結果を移行経路の不均質性を考慮した1次元モデル（MATRICCSコード）の重ね合わせにより近似できることを確認し、これを処分場領域から下流側断層までの母



\*1):結晶質岩(塩基性),先新第三紀堆積岩(砂岩),先新第三紀堆積岩(凝灰岩,泥岩),  
新第三紀堆積岩(砂岩),新第三紀堆積岩(凝灰岩,泥岩)

\*2):結晶質岩(酸性),結晶質岩(塩基性),先新第三紀堆積岩(砂岩),先新第三紀堆積岩(凝灰岩,泥岩),  
新第三紀堆積岩(砂岩),新第三紀堆積岩(凝灰岩,泥岩)

\*3):海水系地下水

\*4):丘陵,山地

\*5):河川堆積層,井戸,海洋,海洋堆積層(海水系地下水の場合,海洋,海洋堆積層のみ)／平野,丘陵,山地

Fig. 2 Calculation cases for sensitivity analysis: normal evolution scenario

岩に対する解析において用いた。断層に対しては、断層粘土部への拡散による遅延効果は保守的に無視し、断層角礫部に対して、マトリクス拡散を考慮した1次元平行平板モデル (MATRICESコード) により評価する。

生物圏評価における解析コードとしては、表面土壤などの主要な生物圏構成要素をコンパートメントとして取り扱い、核種移行をコンパートメント間の核種の移動として表現するコンパートメントモデルを取扱うAMBERを採用した。生物圏の取扱いにおいては、将来においても現在と同様の生活様式を仮定するとともに、生物圏を合理的に設定し適切な評価指標に変換するための道具としてとらえるレファレンスバイオスフィア (Reference Biosphere) の概念を取り入れた[10]。また、被ばくモード

を特定するにあたり、3つの被ばくグループ (農作業従事者グループ、淡水漁業従事者グループ、海洋漁業従事者グループ) に分け、地圏と生物圏のインターフェイスに応じて最も影響を受けると考えられるグループを評価に用いることとした。

安全評価解析においては、以下の手続きにより信頼性の向上を図った。解析に用いる数学モデルは、概念モデルとして示される現象の取り扱いや仮定を正しく表現していることが重要であるため、数学モデルを解析コード化する場合には、要求機能が満たされていることを確認するとともに、その解析コードが数学モデルを正しく解法していることを解析解や他コードとの比較により確認した。また、これらモデルとコードの適用性を、室内で

の実験、フィールドでの観察や試験あるいは国際的な検証／確証プロジェクトなどを活用しながら確認した。さらに、解析コードの開発・改良に当たってはその履歴を適切に管理した。モデル／コードにあてはめるデータについては、対象とする現象が実際に起こる条件（例えば、実際の地下深部の条件）を十分に考慮した実験や観察などから得られたものを採用することによりデータの質を高めた。さらに、データ選定のためのクライテリアを設定し、データをクライテリアに応じた手続きで取得するか、または既存のデータがこのクライテリアを満たしていることを確認することによって、信頼性の高いデータを評価、選定した。安全評価解析作業については、解析コードおよびデータを用いた解析手続きが目的通りに行われていることを、入力データの管理、使用する入力データや解析コードの選択などの解析手順（内容）の管理、および解析結果の管理により確認した。

レファレンスケースにおける主な概念モデルの仮定は以下のとおりである（Fig.3参照）。

- ・オーバーパックは少なくとも1,000年間破損しないよう設計され、腐食による強度の低下により処分後1,000年以降に機械的に破損する。
- ・緩衝材は所期の性能（低透水性、膨潤性、化学的緩衝性、核種遅延性、コロイドフィルトレーションなど）を発揮し、核種移行に有意な影響を与えるような形状や性能の変化はない。また、オーバーパックは緩衝材により保持され、施工時の位置から移動することはない。

- ・ガラス固化体近傍あるいは緩衝材中の核種濃度は、同位体の存在比に応じて分割された溶解度により制限される。また、沈澱／溶解は瞬時／可逆の反応を仮定する。
- ・核種は緩衝材中を拡散により移動する。また、緩衝材中の核種の拡散移行は、収着により遅延される。収着反応は瞬時／可逆／線形を仮定する。コロイドの移行は緩衝材の微細な間隙構造によりろ過される。炭素鋼オーバーパックの腐食による水素の発生、放射線分解、微生物および有機物は核種の移行に影響を与えない。
- ・コロイド、微生物、有機物が核種移行に及ぼす影響については、確立された評価手法やデータが乏しいことから、レファレンスケースでは考慮しない。
- ・岩盤中の亀裂の大きさや透水性などの亀裂特性は不均質でその分布は統計量に従う。
- ・処分場全体からの核種放出量は、処分場領域内の各処分坑道から下流側断層までの移行距離を一律100 mと仮定し、処分場領域内の母岩による核種遅延効果を保守的に無視する。
- ・核種は母岩中に不均質に分布する亀裂中を溶質として移流・分散で移行する。
- ・亀裂中の核種は、拡散によりマトリクス部へ移行し、マトリクス内の鉱物粒子表面への線形／瞬時／可逆な収着により遅延される（亀裂表面への収着による遅延は考慮しない）。
- ・母岩中を移行してきた核種は、処分場下流側100 m に

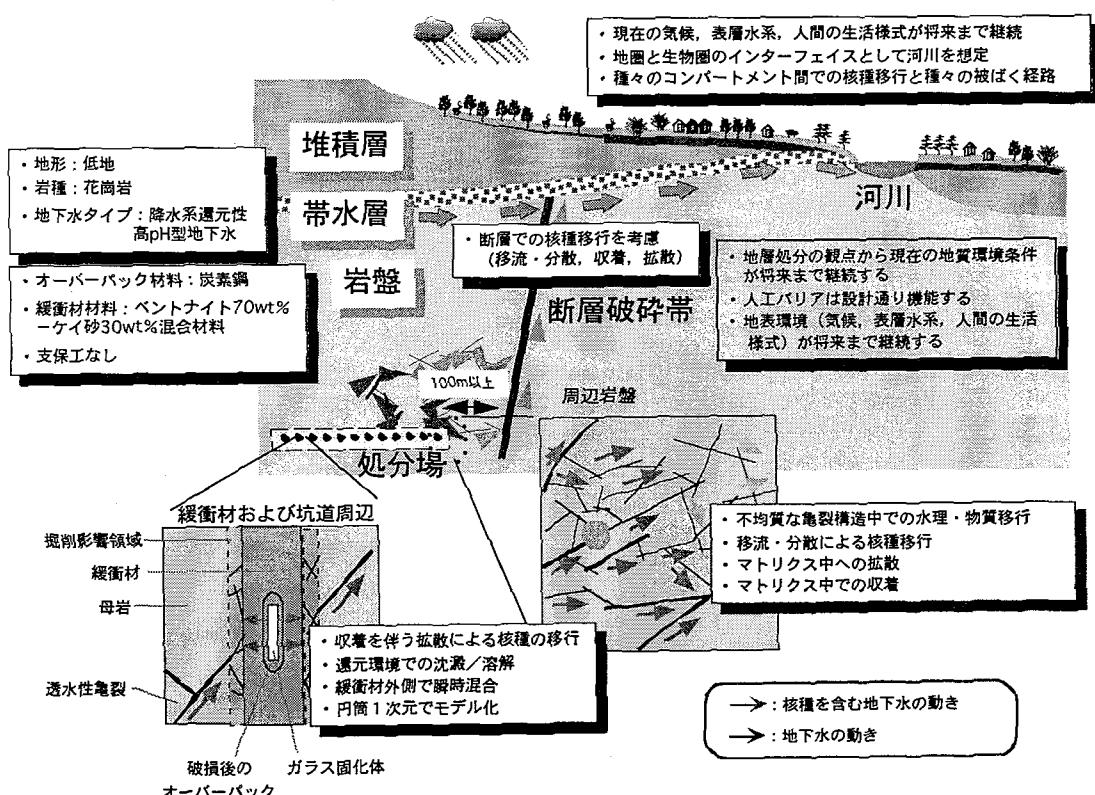


Fig. 3 An overview of nuclide migration processes considered in the Reference Case

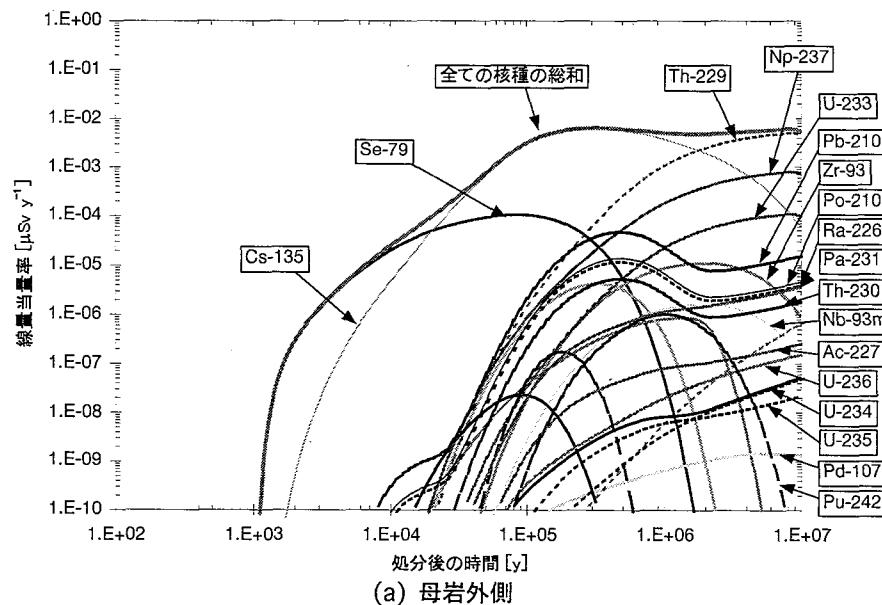
ある断層に放出され、その断層破碎帶内を上向きに移行して生物圏に放出される。

- ・河川水を地圈と生物圏のインターフェイスとして設定し、帶水層での収着による核種の移行遅延や崩壊の効果を考慮せず、帶水層に達したすべての核種が河川水に流入することを想定する。

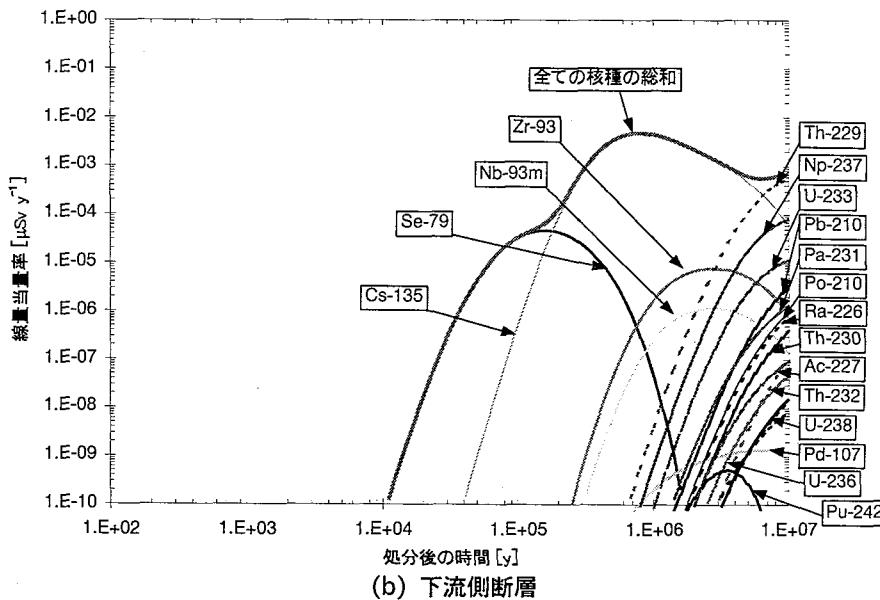
レファレンスケースにおける母岩外側からの核種移行率および下流側断層からの核種移行率を、農業従事者グループに対する線量への換算係数を用いて線量当量率に換算した結果をそれぞれFig.4(a), Fig.4(b)に示す。母岩外側から放出される核種の線量当量率については、処分後数千年はSe-79、数百万年までは、Cs-135が支配的となり、

その後はTh-229 (Np-237と放射平衡) が支配的となり総線量当量率の最大は約0.006  $\mu\text{Sv}/\text{y}$ となる。また、下流側断層から放出される核種の線量当量率については、処分後数万年以降でSe-79が出現はじめ、数十万年以降でCs-135が支配核種となり、総線量当量率の最大は約0.005  $\mu\text{Sv}/\text{y}$ と母岩外側に比べてわずかに低減される。なお、 $10^7$  年以降これらの最大値を越えることはない。

レファレンスケースにおいて、ガラス固化体、緩衝材、母岩、断層の各バリアからの放出率を、潜在的危険度を用いて表すと、ガラス固化体からの放出率は、仮想的に処分後1年間でガラス固化体中の放射性核種が全量放出される場合の値と比較すれば約6桁下回り、緩衝材からの



(a) 母岩外側



(b) 下流側断層

Fig. 4 Dose corresponding to release rate from the host rock (a) and the fault (b) for 40,000 waste package

放出率は、ガラス固化体からの放出率に比べさらに4~5桁下回る。したがって、人工バリアシステムが核種放出の低減にきわめて有効であることがわかる。また、緩衝材からの放出率に比べ天然バリア（母岩と断層）でさらに2~3桁程度下回る。この解析結果では、天然バリアに関しては、人工バリア近傍の数m程度の岩盤で約2桁下回っている。これらにより多重バリアシステムにおける人工バリアとその近傍の岩盤によるバリア性能の有効性が示されている。

## 7 レファレンスケース以外の解析ケース（応答解析）

基本シナリオにおけるバリア性能に関する検討結果や地層処分システムに関するさまざまな不確実性に対するシステム性能の応答に関する検討結果から得られた核種移行挙動に関する主な知見を以下にまとめる。

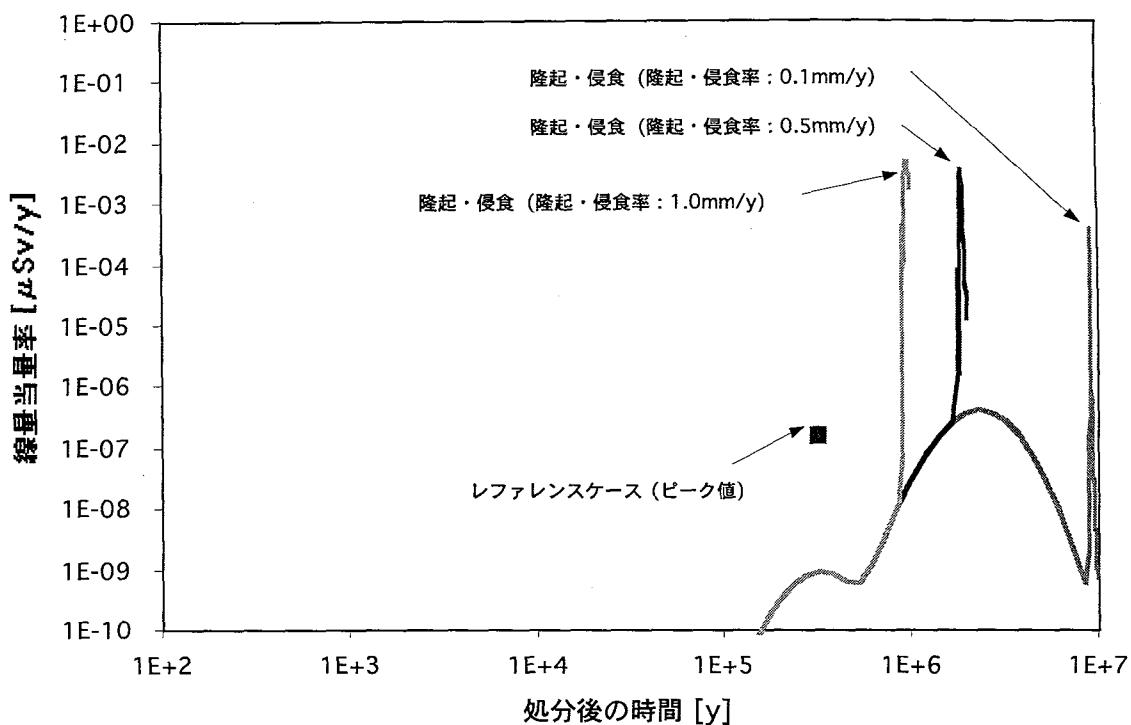
- ・可溶性である核種やガラス固化体中での存在量が小さい核種は沈殿による濃度制限を受けない。そのため、ガラス固化体との調和溶解の速度がそれら核種の移行率に大きく寄与する。とくに Cs-135 は、ガラス固化体中での存在量も多く、緩衝材中での収着による遅延も小さいと考えられるため、ガラス溶解速度がその移行率を支配する大きな要因となる。
  - ・透水性や動水勾配により決まる地下水の流動は、人工バリア中および天然バリア中の核種移行の両方に大きく影響する。
  - ・緩衝材中では、還元環境下での低い溶解度と高い収着性により多くの核種の移行が抑制され、核種が長期間緩衝材中に保持される。とくに、半減期の短い核種は、収着などにより緩衝材中に保持されることでその崩壊が進み移行率が低減する。
  - ・岩盤中では、マトリクス拡散が核種の移行抑制に大きく寄与しており、マトリクス部への拡散やそこでの収着に係る特性が重要となる。また、マトリクス拡散による核種移行抑制効果は、地下水の流動状況に応じて変化する。
  - ・断層については、そこでの流速が小さい場合には大きな移行抑制が期待でき、また高い収着性が期待できる場合にも大きな移行抑制効果が期待できる。
  - ・地圏と生物圏のインターフェイス (GBI) ごとの線量への換算係数は、レファレンスケース（河川水をGBIとしたケース）と比較して沿岸海域水をGBIとしたケースでは低く、深井戸や河川堆積層、沿岸海域堆積層をGBIとしたケースでは同程度あるいは最大で約2桁高くなつた。
- 変動シナリオで設定した解析ケースのうち、隆起・侵食シナリオは、仮に隆起・侵食が一定に進行するとすれば、地下深部に処分場を設けても、遠い将来においては、処分場が地表に到達すると考えられるため最も重要である。隆起・侵食速度を0.1, 0.5, 1 mm/yでそれぞれ一定に継続すると仮定した場合、地表に到達するまでの線量の最大値はレファレンスケースに比べ4桁程度大きいものの、地表に達した時点での影響を、侵食により生じる放射性核種のフラックスで評価した場合、U-238に換算してウラン鉱床が侵食される場合のフラックスを下回るとともに、隆起・侵食速度が 0.1 mm/yの場合花崗岩が侵食される場合のフラックスを下回ることが示された（Fig.5参照）。隆起・侵食速度に関する地質環境の場所による依存性や詳細なサイトの情報の不足より、サイトを特定しない現時点では断定的な言い方はできないが、このシナリオによる潜在的な影響は諸外国の基準や天然の放射性核種のフラックスと同等かそれらを下回ることが示された。

他の変動シナリオの解析結果については、レファレンスケースに比べ線量の最大値の増加は大きくとも1桁程度であった。

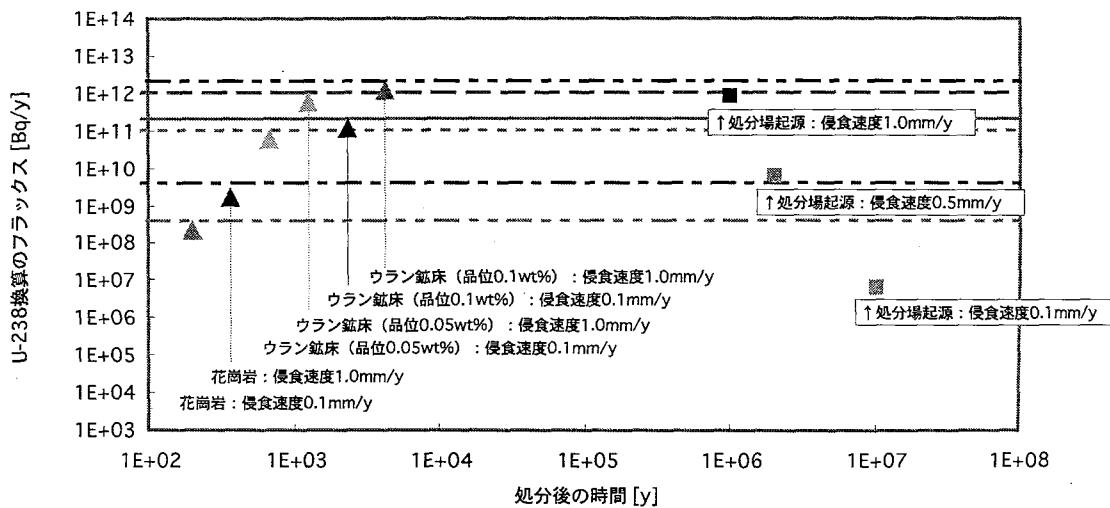
## 8 全体性能解析

全体性能を評価するためには、システムの多様性や、評価で取扱うべき不確実性を総合的に考慮した解析を行う必要がある。第2次取りまとめにおいては、レファレンスケースに対する地質環境のバリエーションを中心として全体性能を評価する解析を実施する。このことは、地質環境を幅広く考えるという第2次取りまとめの目的に沿っている。ここで、地質環境のバリエーションは、サイト選定や工学的対策が適切に行われることを考慮して過度に保守的とならないように設定する。また、データやモデルの不確実性の取扱いについては、サイト特性調査や設計が適切に行われればその不確実性の低減が期待されることなどを勘案して、適切な議論を踏まえて、過度に保守的にならないように留意することとした。

わが国で想定しうる岩種、地下水、動水勾配（水理地質環境）のバリエーションを考え、その組み合わせを検討することにより、全体性能解析において対象とする地質環境のバリエーションを設定する。全体性能解析における不確実性の取扱いについては、応答解析の結果を踏まえ、人工バリア中核種移行と天然バリア中核種移行に大きく影響するデータ（ガラス溶解速度、亀裂の透水量係数分布、岩盤への分配係数）についてそれらデータの不確実性を組み合わせたケースを設定する。また、非現実的な想定ではあるが、人工バリアから放出した核種が岩盤の遅延効果などを受けずに生物圏に至ると仮定するケースを設定する。このケースは、人工バリアシステムのみの効果を端的に例示したものになる。これらの考え方に基づき全



(a) 総線量当量率（ガラス固化体 1 本あたり）



(b) 露出した処分場、ウラン鉱床および花崗岩についての U-238 換算フラックスの比較

(U-238 換算フラックス：侵食により生ずる核種ごとのフラックスを「経口摂取の場合における年摂取限度」で一旦除算したうえで足し合わせ、それを U-238 と等価のフラックスに置換えたもの)

Fig. 5 Results of uplift/erosion cases

体性能解析のために設定した解析ケースをTable 2にまとめる。

母岩と断層のそれぞれでの線量当量率の最大値とその時間および支配核種を整理したFig.6(a)から、全体性能解析で設定したすべての解析ケースにおいて、線量の最大値は0.01 mSv/yを下回ることがわかる。また、Fig.6(b)では、i) 地質環境のバリエーションによる影響を把握するために地下水と動水勾配の組み合わせ毎に6岩種についての解析結果をまとめて示すとともに、ii) それらの結果に生物圏と地圏のインターフェイスの設定の違いによる線量当量率の幅の最大値と最小値を追記することにより、以下のことがわかる。

- ・ 岩種の違いによる結果の幅はどの条件でもほぼ1桁以内。
- ・ 地下水や動水勾配の違いを組み合わせた場合の結果の幅はレファレンスケースを基準にして高い側と低い側にともに1桁程度。
- ・ 生物圏と地圏のインターフェイスとして河川あるいは海洋堆積層を想定した場合の線量当量率の最大値は諸外国の安全基準を3桁程度下回っている。
- ・ 地質環境のバリエーションに生物圏と地圏のインター

ーフェイスのバリエーションを組み合わせた場合の最も保守的な線量換算結果についても、諸外国の安全基準(0.1~0.3 mSv/y)に比べて1桁以上の裕度を有するとともに、わが国の自然放射線レベル(0.9~1.2 mSv/y)を十分に下回った。

全体性能解析の結果から、地質環境のさまざまなバリエーションについてその組合せを考慮したとしても、諸外国の安全基準やわが国の自然放射線レベルを十分に下回ることが示された。また、データ不確実性を保守的に組み合わせた場合、あるいは天然バリアの効果を考慮せずに人工バリア外側からの核種移行率に着目した場合についても、その線量当量率の最大値は諸外国の安全基準を充分に下回った。したがって、第2次取りまとめで考慮した地層処分システムの性能が蓋然性の高いものであり、人工バリアによる核種移行抑制を中心としてその周辺の比較的小さな岩盤の領域を考えることにより十分なバリア性能を期待できることが示された。

以上のことから、第2次取りまとめで示した地層処分システムの概念により、わが国の幅広い地質環境に対して高レベル放射性廃棄物を安全に処分することが十分に可能であることが示されたと考える。

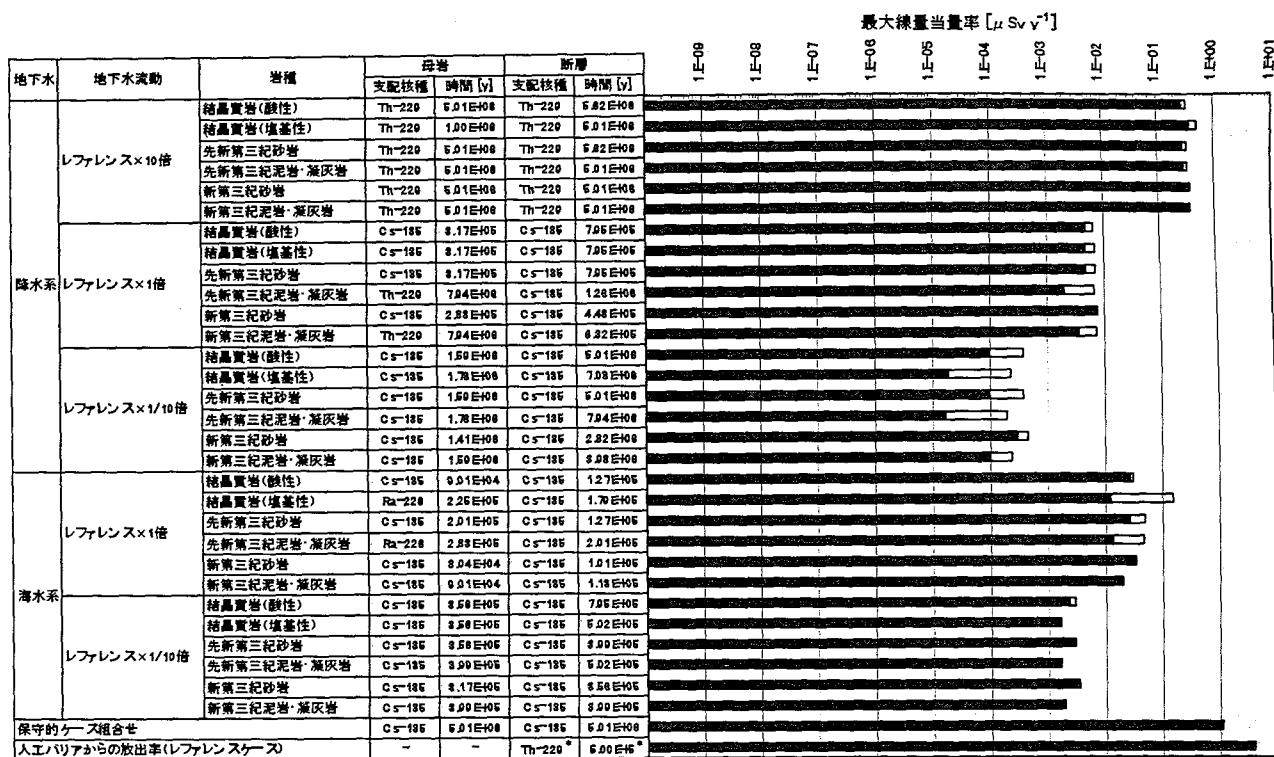
Table 2 Summary of total system assessment cases

解析ケースの分類	地下水	岩種	動水勾配	生物圏評価 <sup>1)</sup>	
地質環境の バリエーションの 組み合わせを考慮	降水系 高pH型 地下水	酸性結晶質岩(花崗岩)	0.001~0.1 <sup>2)</sup>	河川堆積層	
		塩基性結晶質岩		河川水	
		先新第三紀砂岩		井戸	
		先新第三紀泥岩・凝灰岩		海水	
		新第三紀砂岩		海洋堆積層	
		新第三紀泥岩・凝灰岩			
	海水系 高pH型 地下水	酸性結晶質岩(花崗岩)	0.001~0.01 <sup>3)</sup>	海水	
		塩基性結晶質岩		海洋堆積層	
		先新第三紀砂岩			
		先新第三紀泥岩・凝灰岩			
		新第三紀砂岩			
		新第三紀泥岩・凝灰岩			
データの不確実性の 組み合わせを考慮	保守的なデータ設定: ガラス溶解速度、岩盤中分配係数、透水量係数 上記以外は、レファレンスケースと同じ設定				
天然バリアの効果を 考慮しない	非現実的な過剰に保守的な設定ではあるが、人工バリアから放出した核種が天然バリアの効果を受けずに生物圏に至るとして線量を評価。				

1) 地圏と生物圏のインターフェースのうち降水系地下水環境では河川水(農業従事者グループ)、海水系地下水環境では海洋堆積層(漁業従事者グループ)を中心に評価を実施する。

2) 降水系地下水環境として内陸地域を想定する場合は、想定しうる地質環境のうち動水勾配が極端に大きな地域はサイト選定の段階で回避できることと、地下深部の動水勾配は地下水表面の勾配より推定された動水勾配よりも小さいと考えられることを勘案して設定。

3) 海水系地下水環境として沿岸地域を想定する場合は、一般に、陸水と海水の密度差の影響により海水は陸水の下へ陸側に向かって緩やかに流れ、塩淡境界に運ばれてきた核種は陸水側の上昇流によって海岸付近に放出される可能性が考えられる。また、塩淡境界から離れ地下深部にいくほど海水の流れは小さくなると考えられる。これらのことと勘案して設定。

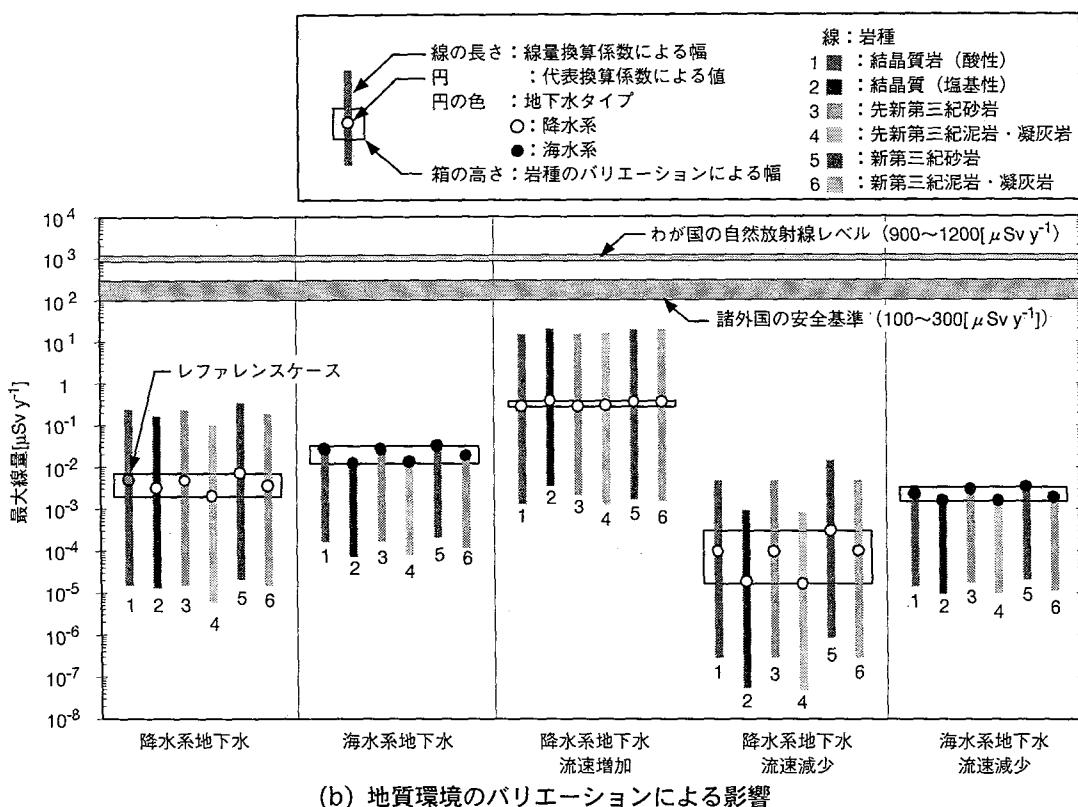


\* : 人工バリアからの放出率を、便宜的に断層からの放出率として表現した。

□母岩

■断層

(a) 線量当量率の最大値とその時期および支配核種



(b) 地質環境のバリエーションによる影響

Fig. 6 Results of total system performance analysis

## 9 結論

第2次取りまとめの安全評価において、シナリオの作成と解析ケースの設定に関する体系的な方法論を適用した。解析においては第1次取りまとめ以降の研究開発により、信頼性を向上させつつ整備されたモデルとデータを用いた。専門部会報告書に沿って、地層処分の安全評価の指標として放射線量を基本として用い、諸外国の指針や基準、国際機関によって提案されている考え方を参考するとともに、評価期間に関する時間スケールについてはとくに限定せず、現在の人々との対比において人間への影響が最大となる時期やその期間がわかるように評価を行った。また、安全評価の時間スケールにおいて将来の人間環境の予測の困難さを考慮し、長期については天然の放射線レベルに有意な影響のないことを確認するため補完的な解析結果を併せて示した（例えば、隆起・侵食シナリオ）。提案した多重バリアシステムに基づく地層処分概念とその長期性能の評価手法は、これまで諸外国で実施してきた手法と整合がとれている。

安全評価の結果は、適切なサイト選定、サイト特性調査と処分場の設計に基づけばわが国における高レベル放射性廃棄物の地層処分が信頼性をもって成立することを示している。とくに、全体性能解析の結果は、すべてのケースにおいて諸外国の安全基準を下回り、わが国において考慮すべき幅広い岩種において長期安全性が成立し、内陸地域と沿岸地域を想定した幅広い水理地質学的条件において安全性が成立することが示された。

地下水流动は、人工バリアと天然バリアの両者の性能に影響を及ぼすため、線量の最大値でみて全体性能への感度が高い。それにもかかわらず、地質環境のバリア性能を考慮しない場合においても、人工バリアの機能を十分に発揮させる環境条件を与えさえすればシステム性能には十分に余裕があり、線量の最大値は諸外国の安全基準を十分に下回ることが示された。したがって、人工バリアシステムは地質環境の不均質性や不確実性を考慮しても地層処分システムの安全性に重要な役割を果たすことがわかる。地質環境を特定しない現段階における幅広い地質環境を考慮して得られるデータは、東濃鉱山とその周辺地域や釜石鉱山での研究や既存の文献に基づいて整備された。パラメータとモデルの不確実性を考慮した評価により、地層処分システムの性能にとって鍵となる影響要因を抽出することができた。地層処分システムの安全機能に関わる信頼性をさらに向上させ、設計を最適化するための今後の研究開発課題は、具体的な地質環境のこれらの要因に関し不確実性を可能な限り低減させることに焦点がおかれるべきと考える。

## 参考文献

- [1] 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－平成3年度－. PNC TN 1410 92-081 (1992).
- [2] 核燃料サイクル開発機構: 地層処分研究開発第2次取りまとめ第2ドラフト 分冊1 地質環境条件の調査研究. JNC TN 1400 99-007 (1999).
- [3] 核燃料サイクル開発機構: 地層処分研究開発第2次取りまとめ第2ドラフト 分冊2 地層処分の工学技術. JNC TN 1400 99-008 (1999).
- [4] 核燃料サイクル開発機構: 地層処分研究開発第2次取りまとめ第2ドラフト 分冊3 地層処分システムの安全評価. JNC TN 1400 99-009 (1999).
- [5] 核燃料サイクル開発機構: 地層処分研究開発第2次取りまとめ第2ドラフト 総論レポート わが国における地層処分の技術的信頼性. JNC TN 1400 99-006 (1999).
- [6] 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会: 高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について (1997).
- [7] OECD/NEA: Review of safety assessment methods. A Report of the Performance Assessment Advisory Group of the Radioactive Waste Management Committee, OECD Nuclear Energy Agency (1991).
- [8] OECD/NEA: Systematic approaches to scenario development. A Report of the NEA Working Group on the Identification and Selection of Scenarios for Performance Assessment of Radioactive Waste Disposal (1992).
- [9] OECD/NEA: Safety assessment of radioactive waste repositories - Systematic approaches to scenario development - An international database of features, events and processes. Draft Report (24/6/1997) of the NEA Working Group on Development of a Database of Features, Events and Processes Relevant to the Assessment of Post-Closure Safety of Radioactive Waste Repositories (1997).
- [10] BIOMASS: Long-term releases from solid waste disposal facilities: The reference biosphere concept. BIOMASS Theme 1 Working Document 1, International Atomic Energy Agency, Vienna (1998).