

「地層処分低レベル放射性廃棄物の
安全評価解析と物量変動の処分場への
影響に関する検討・評価」
共同研究報告書

植田浩義, 兵藤英明, 大井貴夫
原子力発電環境整備機構

長谷川 信, 近藤 等士, 亀井 玄人, 平野 史生, 三原 守弘,
高橋 邦明, 船橋英之, 川妻 伸二
独立行政法人 日本原子力研究開発機構

2011年2月
原子力発電環境整備機構

本報告書の内容は日本原子力研究開発機構 技術報告書 JAEA-Research 2011-003 の内容と同じである。

2011年2月

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

〒108-0014 東京都港区芝4丁目1番地23号 三田NNビル2階
原子力発電環境整備機構 技術部
電話 03-6371-4004 (技術部) FAX 03-6371-4102

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Science and Technology Department
Nuclear Waste Management Organization of Japan
Mita NN Bldg, 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan
Phone +81-3-6371-4004 Fax +81-3-6371-4102

©原子力発電環境整備機構
(Nuclear Waste Management Organization of Japan) 2011

「地層処分低レベル放射性廃棄物の
安全評価解析と物量変動の処分場への
影響に関する検討・評価」
共同研究報告書

植田浩義, 兵藤英明, 大井貴夫
原子力発電環境整備機構

長谷川 信, 近藤 等士, 亀井 玄人, 平野 史生, 三原 守弘,
高橋 邦明, 船橋英之, 川妻 伸二
独立行政法人 日本原子力研究開発機構

2011年2月
原子力発電環境整備機構

目次

1.	はじめに	1
1.1.	背景	1
1.2.	検討会の設置	2
1.3.	報告書の内容	2
	参考文献	2
2.	地層処分における核種移行ベンチマーク解析	3
2.1.	目的	3
2.2.	解析方法	3
2.2.1.	核種移行解析コードの概要	4
2.2.2.	解析ケースの設定と考え方	4
2.2.3.	核種移行解析コードの概要	6
2.2.4.	解析ケースの入力条件	12
2.3.	解析結果及び考察	21
2.3.1.	第2次 TRU レポートの設定での結果	21
2.3.2.	最終処分計画に基づく設定での結果	22
2.4.	まとめ	26
	参考文献	27
3.	廃棄体物量の変動の処分場への影響検討	29
3.1.	目的	29
3.2.	廃棄体物量変動の考え方	29
3.3.	物量変動による核種移行解析の方法と結果	30
3.3.1.	ケース1（グループ1の物量を10%増加）	31
3.3.2.	ケース2（グループ2の物量を10%増加）	31
3.3.3.	ケース3（グループ3の物量を10%増加）	31
3.3.4.	ケース4（グループ4の物量を10%増加）	32
3.4.	処分施設設計への影響検討	33
3.4.1.	検討の目的	33
3.4.2.	検討の前提条件	33
3.4.3.	坑道設計への影響	35
3.4.4.	熱影響の考慮	41
3.4.5.	建設・操業・閉鎖への影響	41
3.4.6.	経済性への影響	45
3.5.	まとめ	46
	参考文献	46
4.	おわりに	47
	謝辞	47

図表目次

図 2.1-1	第2次 TRU レポートにおける核種移行解析モデル（第2次 TRU レポートより引用）	3
図 2.2.3-1	GoldSim による核種移行経路のモデル化とレファレンスの空間メッシュの設定	7
図 2.2.3-2	グループ1（ヨウ素を吸着させた廃銀吸着材）の核種放出率[Bq/y]の経時変化	8
図 2.2.3-3	グループ2（ハル・エンドピース）の核種放出率[Bq/y]の経時変化	8
図 2.2.3-4	グループ3（硝酸塩を含む廃棄体）の核種放出率[Bq/y]の経時変化	9
図 2.2.3-5	グループ4（その他の廃棄体）の核種放出率[Bq/y]の経時変化	9
図 2.2.3-6	Tiger による核種移行経路のモデル化とレファレンスの空間メッシュの設定（上図：グループ1及び2，下図：グループ3及び4）	10
図 2.2.3-7	母岩における亀裂及び断層のメッシュサイズの影響（第2次 TRU レポートのグループ1の物量を用いた解析）	11
図 2.2.4-1	隆起・侵食ケースにおける地質環境の模式図（第2次 TRU レポートの記述を一部編集）	19
図 2.3.1-1	第2次 TRU レポートのレファレンスケースにおける Tiger と GoldSim の線量比較結果	21
図 2.3.2-1	最終処分計画のレファレンスケースにおける Tiger と GoldSim の線量比較結果	22
図 2.3.2-2	人工バリア変質ケース（1,000年）における Tiger と GoldSim の線量比較結果	23
図 2.3.2-3	人工バリア変質ケース（10,000年）における Tiger と GoldSim の線量比較結果	23
図 2.3.2-4	人工バリア変質ケース（100,000年）における Tiger と GoldSim の線量比較結果	24
図 2.3.2-5	人工バリア変質ケース（1,000,000年）における Tiger と GoldSim の線量比較結果	24
図 2.3.2-6	隆起・侵食ケース（1mm/y）における Tiger と GoldSim の線量比較結果	25
図 2.3.2-7	母岩の透水性変動ケース（10倍）における Tiger と GoldSim の線量比較結果	26
図 3.4.2-1	標準の坑道断面仕様（原子力発電環境整備機構，2011a）	34
図 3.4.2-2	標準の平面レイアウト（原子力発電環境整備機構，2011a）	35
図 3.4.3-1	グループ1のみ廃棄体量を10%増加させた地下施設レイアウト	37
図 3.4.3-2	グループ2のみ廃棄体量を10%増加させた地下施設レイアウト	38
図 3.4.3-3	グループ3のみ廃棄体量を10%増加させた地下施設レイアウト	39
図 3.4.3-4	グループ4のみ廃棄体量を10%増加させた地下施設レイアウト	40
図 3.4.5-1	坑道掘削工事の工程の例（硬岩，深度1,000m）（原子力発電環境整備機構，2011a）	43

表 2.2.3-1	レファレンスの時間メッシュ	6
表 2.2.4-1	グループ毎の初期の核種量 (19,018m ³)	12
表 2.2.4-2	評価において使用する水理・地質環境の情報	13
表 2.2.4-3	各廃棄体に対する処分施設形状の諸元	13
表 2.2.4-4	人工バリア核種移行解析における水理パラメータ	13
表 2.2.4-5	溶解度	14
表 2.2.4-6	降水系還元性地下水 (降水系地下水) 環境下での収着分配係数設定	14
表 2.2.4-7	降水系還元性地下水 (降水系地下水) 環境下での実効拡散係数設定	15
表 2.2.4-8	天然バリア核種移行解析における主なパラメータ設定	15
表 2.2.4-9	降水系還元性地下水 (降水系地下水) および降水系酸化性地下水 (酸化性地下水) での実効拡散係数及び収着分配係数	16
表 2.2.4-10	レファレンス条件での線量への換算係数	17
表 2.2.4-11	人工バリア変質影響ケースにおけるデータ設定	18
表 2.2.4-12	人工バリア変質影響ケースにおけるセメントへの収着分配係数設定	18
表 2.2.4-13	降水系酸化性地下水 (酸化性地下水) 環境下での実効拡散係数	19
表 2.2.4-14	降水系酸化性地下水 (酸化性地下水) 環境下での収着分配係数設定	20
表 2.2.4-15	母岩の透水性の変動を考慮したケースにおけるデータ設定	20
表 3.2-1	廃棄体のグループ化	29
表 3.2-2	各ケースにおける廃棄体量	29
表 3.3-1	各ケースにおける初期の核種量	30
表 3.3.1-1	ケース 1 評価結果 (最大線量)	31
表 3.3.2-1	ケース 2 評価結果 (最大線量)	31
表 3.3.3-1	ケース 3 評価結果 (最大線量)	31
表 3.3.4-1	ケース 4 評価結果 (最大線量)	32
表 3.4.2-1	グループ別廃棄体形状, 本数等 (原子力発電環境整備機構, 2011a)	33
表 3.4.3-1	廃棄体及び廃棄体パッケージの 10%増しの数量	36
表 3.4.5-1	処分坑道の掘削量 (原子力発電環境整備機構, 2011b)	41
表 3.4.5-2	主要坑道等の掘削量 (原子力発電環境整備機構, 2011b)	41
表 3.4.5-3	掘削量合計 (原子力発電環境整備機構, 2011b)	41
表 3.4.5-4	処分坑道の緩衝材, 充填材量 (原子力発電環境整備機構, 2011b)	42
表 3.4.5-5	処分坑道グループ 2 の増分	42
表 3.4.5-6	主要坑道等の増分	42
表 3.4.5-7	処分坑道グループ 2 の緩衝材量増分	43
表 3.4.5-8	廃棄体及びパッケージの総数並びに 1 年及び 1 日あたりの取扱数 (原子力発電環境整備機構, 2011a)	44
表 3.4.5-9	埋め戻し期間の試算 (軟岩, 深度 500m, 円形断面の例)	44
表 3.4.6-1	処分事業費の全体概要 (硬岩, 深度 1,000m の例) (資源エネルギー庁, 2008)	45
表 3.4.6-2	グループ 2 の廃棄物量 10%増に伴う増分の坑道全体に対する割合	45

1. はじめに

1.1. 背景

平成19年6月に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（法律，2007）が改正され、地層処分対象廃棄物として、新たにTRU廃棄物の一部が追加されるとともに、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」（経済産業省，2008）（以下、「基本方針」という）が平成20年3月14日に閣議決定された。これらを受けて、原子力発電環境整備機構（以下、「原環機構」という）は、平成20年4月に地層処分の対象となるTRU廃棄物（以下、「地層処分低レベル放射性廃棄物」という）を地層処分事業の対象に加えた。

基本方針では、関係研究機関で実施された技術開発等の成果が最終処分事業や国の安全規制において有効に活用されることの重要性が示され、関係研究機関は成果の有効活用のため、総合的、計画的かつ効率的に当該技術開発等を進めることができるよう国、処分実施主体と連携及び協力すべきとされた。さらには、総合資源エネルギー調査会の放射性廃棄物処分技術ワーキンググループ中間取りまとめ（平成21年5月）においては、独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という）などの地層処分基盤研究開発実施機関から原環機構へ知識の継承・移転を確実に行うことの必要性が述べられている（総合資源エネルギー調査会，2009）。これらを受け、原環機構と原子力機構は、平成13年に締結した「特定放射性廃棄物の地層処分技術に関する協力協定」を平成21年10月7日に改定し、これまでの高レベル放射性廃棄物だけではなく、地層処分の対象となるTRU廃棄物も含めて技術協力を推進することとした。

放射性廃棄物の処分の研究開発と事業の協力体系がこのように整備される中、原環機構は平成21年4月に、高レベル放射性廃棄物と地層処分低レベル放射性廃棄物の両方を対象とした公募関係資料（原子力発電環境整備機構，2009）を作成し、各市町村に配布した。また、原環機構は、この公募関係資料に含まれる「処分場の概要」の中で記述されている地層処分低レベル放射性廃棄物の処分についてさらに深く理解し、安全性を確認していただくことを目的に「地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性」（原子力発電環境整備機構，2011a：原子力発電環境整備機構，2011b）を作成した。

この研究報告書では、電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構（現、原子力機構）でとりまとめた「TRU廃棄物処分技術検討書—第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ—」（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）（以下、「第2次TRUレポート」という）の考え方をベースとし、第2次TRUレポートにおいて示された重要な課題に対する対応や第2次TRUレポート以降の知見の整備について記述している。これらの検討においては、既存の評価との比較を容易にし、評価等の信頼性を向上させるため、これまで原子力機構において蓄積した技術や知見等と整合する技術等（例えば、同等の結果を示す解析コード等）を用いた合理的な検討が求められる。そのためには、原環機構と原子力機構において、「地層処分低レベル放射性廃棄物」の評価に係る技術情報の共有化が重要になる。

また、原子力機構では、今後予定している具体的な廃棄体の製作に向けて、安全性能を有しつつ低コストで製作が可能な廃棄体製作技術を開発することが重要な課題となっている。このような処分の安全性における廃棄体の特性の把握は原環機構とともに共有化すべき重要な情報である。

1.2. 検討会の設置

平成21年10月の「特定放射性廃棄物の地層処分技術に関する協力協定」（平成13年6月15日締結）改定に伴い、平成22年4月に「TRU廃棄物の処分に係る検討会」を設置し、地層処分低レベル放射性廃棄物の安全評価解析と物量変動の処分場への影響に関する検討を開始した。

1.3. 報告書の内容

本報告書は、地層処分低レベル放射性廃棄物に係る技術協力の一環として実施した共同研究「地層処分低レベル放射性廃棄物の安全評価解析と物量変動による処分場への影響に関する検討・評価」の結果について示すものである。本共同研究では、安全評価コードの信頼性を確認するため、原環機構と原子力機構において互いに異なるコードを用いたベンチマーク解析を行った。また、廃棄体物量の変動した場合の処分場への影響について共同で検討・評価を行った。なお、原子力機構では今回の結果を今後の廃棄体製作のための目標設定に資することを予定している。

参考文献

電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構（2005）：TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発とりまとめ－，JNC TY1400 2005-018，FEPC TRU-TR2-2005-02.

原子力発電環境整備機構（2009）：公募関係資料（特定放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域）2009年.

原子力発電環境整備機構（2011a）：地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性，NUMO-TR-10-03，2011.

原子力発電環境整備機構（2011b）：地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性－付録資料－，NUMO-TR-10-04，2011.

法律（2007）：特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律，最終改正 平成19年6月13日 .

経済産業省（2008）：特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針，平成20年3月14日閣議決定

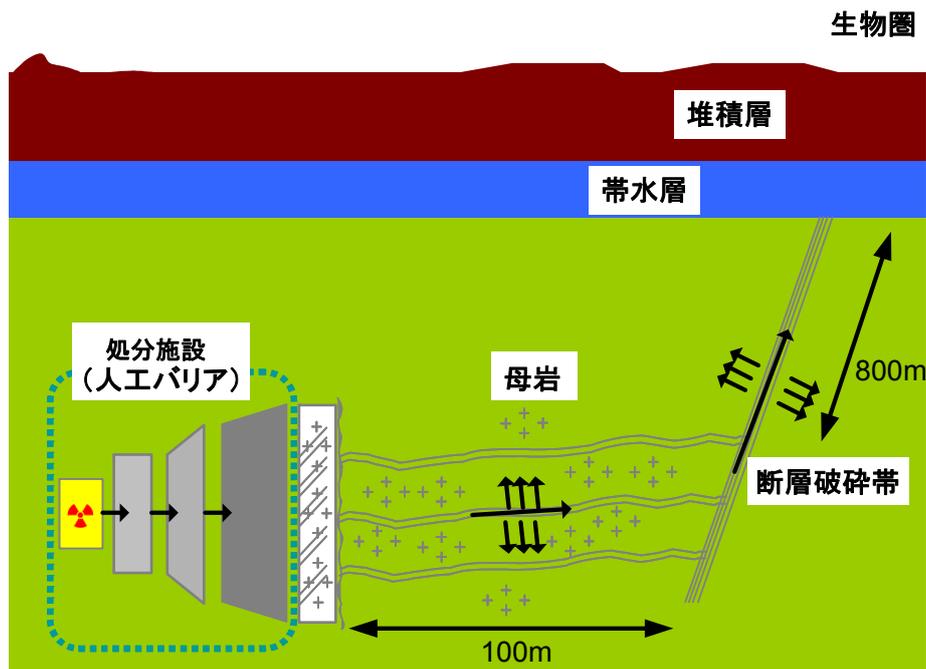
総合資源エネルギー調査会（2009）：総合資源エネルギー調査会 電気事業分科会原子力部会 放射性廃棄物小委員会 放射性廃棄物処分技術ワーキンググループ：放射性廃棄物処分技術ワーキンググループ 中間とりまとめ－地層処分研究開発に関する取組について－，2009年5月22日

2. 地層処分における核種移行ベンチマーク解析

2.1. 目的

第2次 TRU レポート（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005a）の核種移行解析は，主に原子力機構が開発してきた解析コード Tiger（Transport In a Geochemically Evolving Region）（三原・大井，2004）を用いて実施されている。この解析では，図 2.1-1 に示すように処分施設の形状を一次元に表現し，移流・分散方程式を解くことにより，処分施設からの核種の移行率を求めている。母岩の核種の移行については，地下水流速の異なる複数本の亀裂を想定することにより，亀裂を有する母岩の基質部への拡散を考慮した核種移行評価を実施している。

一方，原環機構では，2011年に公表した技術報告書「地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性」（原子力発電環境整備機構，2011a；原子力発電環境整備機構，2011b）において，汎用シミュレーションソフトウェア GoldSim（<http://www.goldsim.com/Index.asp>）を用いた安全評価を実施している。そこで，原環機構の GoldSim と原子力機構の Tiger のベンチマーク解析を行い，両者の結果を比較し，解析コードの信頼性について確認することとした。



※図中の矢印は核種移行経路を示す

図 2.1-1 第2次 TRU レポートにおける核種移行解析モデル（第2次 TRU レポートより引用）

2.2. 解析方法

本節では，ベンチマーク解析に関連する情報として，原環機構の GoldSim と原子力機構の Tiger の概要（2.2.1 項），解析ケースの設定と考え方（2.2.2 項），核種移行解析のメッシュ条件（2.2.3 項），解析ケースの入力条件（2.2.4 項）について述べる。

2.2.1. 核種移行解析コードの概要

(1) GoldSim の概要

GoldSim は、GoldSim Technology Group 社が開発した、状況に応じて解析条件やプログラムの構成を変化させることが可能な（動的）確率論的シミュレーションソフトウェア（GoldSim Technology Group, 2007）である。このソフトウェア（解析コード）は、動的システムに対する離散的なイベントの追加やモンテカルロシミュレーションの枠組みの中での動的シミュレーションの実行など、複数種のシミュレーションを組み合わせることで汎用的な利用を可能としている。特に、現在注目を集めている環境や工学分野におけるリスク分析での使用実績が顕著であり、水資源管理 (Rundle, 2009 ; Volpe and Voss, 2005), 資源採掘 (Eary, et al., 2008 ; Vermaak and Lindsay, 2006), 放射性廃棄物管理 (US DOE, 2008 ; Mattie, et al., 2007 ; Vopalka, et al., 2006), CO₂ 地中貯留 (Stauffer, et al., 2009 ; Zhang et al., 2006), 宇宙工学 (Mathias et al., 2008) などで積極的に活用されている。

GoldSim は、解析の基本機能単位として、移行経路を表現する「pathway」と、核種、液相、固相などを表現する「element」やそれらを統合する上位単位としての「container」を有している。これらの基本機能に対してその特徴を視覚的にわかりやすく表現したアイコンが付与されており、そのアイコンを対象とする解析領域において組み合わせることで複雑なシステム中での解析を可能とするとともに、その階層構造を視覚的に表現することが可能である。

GoldSim は、また、移行経路を離散化し、疎行列反復解法ソルバーを用いて解くモデル (Cell Pathway: パラメータの時間変化を考慮する場合などに使用) や、移行経路を連続体として扱い、無限遠で濃度 0 とする条件のもと、ラプラス変換によって支配方程式を解く（半解析解）モデル (Pipe Pathway) など、複数の解析アルゴリズムを装備しており、状況に応じてユーザーが選択できる柔軟性を有している。

(2) Tiger の概要

Tiger は、汎用の解析コードである GoldSim とは異なり、放射性廃棄物処分における核種移行解析を目的として C++ 言語を用いて開発された解析コードである。数値解析手法として有限差分法が用いられており、Windows を搭載するパーソナルコンピュータ上での計算が可能である。TRU 廃棄物の処分施設の安全性をより現実的に評価するためには、核種移行パラメータの時間的変化を考慮した核種移行解析を行う必要がある。特に、処分施設の充填材や構造材料などに使用されるセメント系材料が地下水との接触に伴って徐々に溶解し、処分施設の化学環境が変遷していくことを考慮した核種移行解析を行うことが重要である。Tiger では、セメント系材料等のこうした化学的な長期的変遷を考慮してパラメータを時間的に変化させることが可能である (三原・大井, 2004)。

2.2.2. 解析ケースの設定と考え方

本章の GoldSim と Tiger による核種移行解析の検証では、第 2 次 TRU レポートでの物量、核種のインベントリおよび解析モデルを用いたケースと、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」(経済産業省, 2008) (以下、「最終処分計画」という) に基づいて、新たに原環機構によって設定された物量、核種のインベントリおよび解析モデルを対象とする 2 種類のケースについて解析を行った。

(1) 第2次 TRU レポートの設定を用いた解析

第2次 TRU レポートでは、地下水シナリオにおける「レファレンスケース」の地質環境条件として結晶質岩を想定し、処分施設の深度については、地下水の還元性条件を確保することが可能な 1,000m を仮定した。ここでは、このレファレンスケースの条件をベンチマーク解析の条件として設定した。これは、地層処分低レベル放射性廃棄物の安全評価においても基本となるケースであり、原子力委員会（原子力委員会，2006）においても議論された解析ケースである。

第2次 TRU レポートの解析では、当時の Tiger の特徴により、処分施設内を通過する地下水の流量を詳細に設定できなかった。その結果として、緩衝材を敷設しない処分概念では、実際に想定される放出率よりも2倍程度高い保守的な放出率が算出される結果となっていた。本解析においては、第2次 TRU レポートの結果を再現するため、この Tiger における保守的な結果の導出をあえて行うこととし、GoldSim の解析条件もこれを再現するように設定した。

(2) 最終処分計画に基づく設定を用いた解析

原環機構は、公募関係資料（原子力発電環境整備機構，2009）である「処分場の概要」の理解の向上と安全性の確認を目的として作成した技術報告書（原子力発電環境整備機構，2011a：原子力発電環境整備機構，2011b）において、最終処分計画に基づいて発生者より提示された廃棄物情報を用いて、廃棄物の物量、インベントリ等の情報を整理している。ここでは、この最新の情報に基づき、①最終処分計画のレファレンスケース、②人工バリアの変質を考慮したケース、③隆起・侵食を考慮したケース、④母岩の透水性の変動を考慮したケース、の4つの解析ケースを設定する。

なお、「最終処分計画に基づく設定を用いた解析」ケースでは、「第2次 TRU レポートの設定を用いた解析」ケースで設定した地下水流量の保守的な値に変えて、より現実に則した値を設定し、解析を実施した。

2.2.3. 核種移行解析コードの概要

(1) GoldSim の解析メッシュ条件

①時間メッシュ

表 2.2.3-1 に解析に用いるレファレンス (RF) の時間メッシュの設定詳細を示す。

表 2.2.3-1 レファレンスの時間メッシュ

時間区分 [年]		分割数	Δt [年]
0	~ 0.01	20	0.0005
0.01	~ 0.02	20	0.0005
0.02	~ 0.05	20	0.0015
0.05	~ 0.1	20	0.0025
0.1	~ 0.2	20	0.005
0.2	~ 0.5	20	0.015
0.5	~ 1	20	0.025
1	~ 2	20	0.05
2	~ 5	20	0.15
5	~ 1.0E+01	20	0.25
1.0E+01	~ 2.0E+01	20	0.5
2.0E+01	~ 5.0E+01	20	1.5
5.0E+01	~ 1.0E+02	20	2.5
1.0E+02	~ 2.0E+02	20	5
2.0E+02	~ 5.0E+02	20	15
5.0E+02	~ 1.0E+03	20	25
1.0E+03	~ 2.0E+03	20	50
2.0E+03	~ 5.0E+03	20	150
5.0E+03	~ 1.0E+04	20	250
1.0E+04	~ 2.0E+04	20	500
2.0E+04	~ 5.0E+04	20	1500
5.0E+04	~ 1.0E+05	20	2500
1.0E+05	~ 2.0E+05	20	5000
2.0E+05	~ 5.0E+05	20	15000
5.0E+05	~ 1.0E+06	20	25000
1.0E+06	~ 2.0E+06	20	50000
2.0E+06	~ 5.0E+06	20	150000
5.0E+06	~ 1.0E+07	20	250000
1.0E+07	~ 2.0E+07	20	500000
2.0E+07	~ 5.0E+07	20	1500000
5.0E+07	~ 1.0E+08	20	2500000

②空間メッシュ

GoldSim による核種移行経路のモデル化とレファレンスの空間メッシュの設定を図 2.2.3-1 に示す。レファレンスの設定では、天然バリア中の核種移行解析を Pipe Pathways モデルを用いて行うため、空間メッシュの設定は緩衝材領域においてのみ行われている。本解析においては、緩衝材領域の空間メッシュ分割数のレファレンス設定を 10 とした。

なお、図 2.2.3-1 に示すグループは廃棄体の分類を表すものである。地層処分低レベル放射性廃棄物の処分においては、現状、処分を合理的に行う観点から、廃棄体をその特性に応じて 4 つに分類して処分する概念を採用している（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、2005a）。

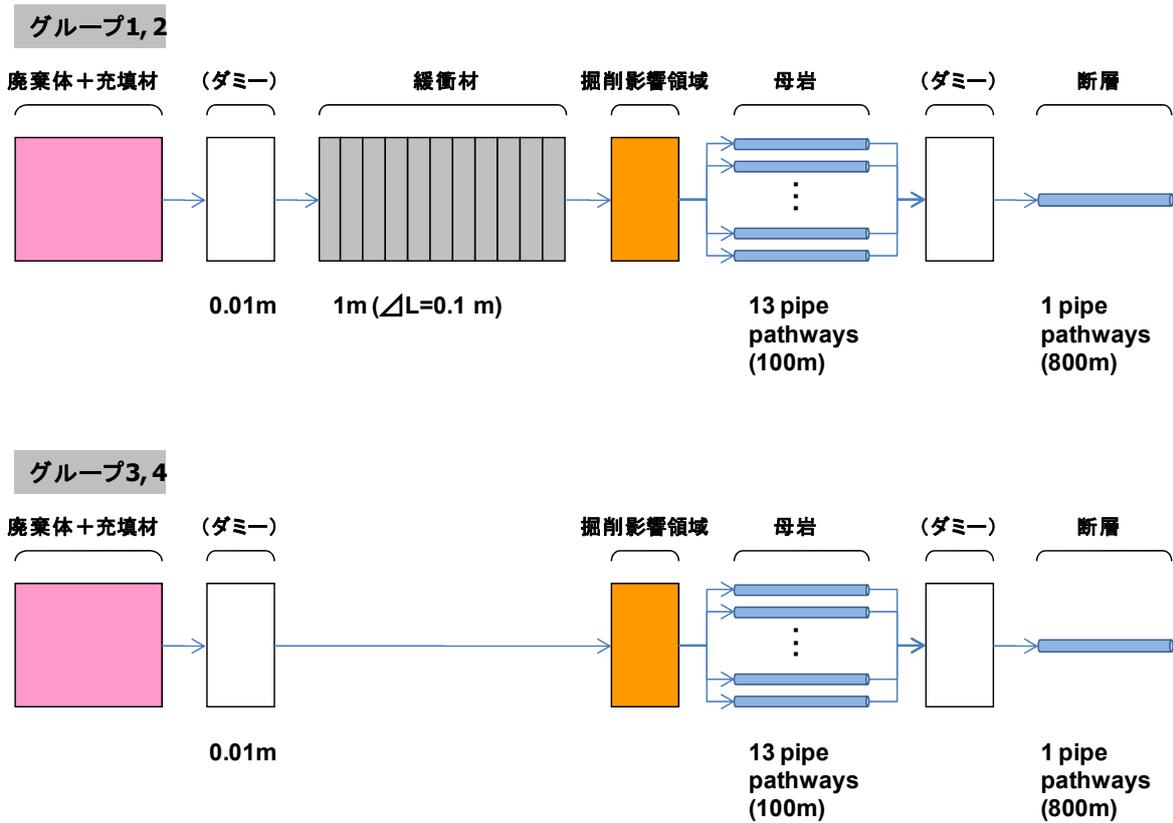


図 2.2.3-1 GoldSimによる核種移行経路のモデル化とレファレンスの空間メッシュの設定

③メッシュ分割の妥当性の確認

数値解析においては、メッシュ分割による依存性を確認した上で、解が収束するようにメッシュを作成する必要がある。そこで、前述の時間メッシュ、空間メッシュにおいて、解が収束することを確認するための予備解析を行った。時間メッシュについては、表 2.2.3-1 における各々の時間区分での分割数をレファレンスの設定に対して 1/2 倍、2 倍、及び 3 倍として核種放出率の感度解析を行った。空間メッシュ (cell 数) については、緩衝材領域の空間差分の詳細度をレファレンスの設定に対して 1/2 倍、及び 2 倍として、核種放出率の感度解析を行った。

なお、評価対象とする核種は、C-14, Cl-36, Se-79, I-129, Cs-137, Am-241, Np-237, Ra-226, Pb-210 とした。今回の解析においては、これらの核種を全てのグループにおいて共通に使用した。

予備解析の結果、核種放出率の絶対値が小さい核種 (Cs-137, Am-241, Np-237, Ra-226, Pb-210) において、誤差が数%を超える場合があるものの、核種放出率全体においては、時間メッシュ、空間メッシュのいずれに対しても、有効数字 3 桁までの範囲の誤差が数%未満であった。感度解析の各グループにおける核種全体の放出率[Bq/y]の経時変化を図 2.2.3-2~2.2.3-5 に示す。この結果から、本解析でレファレンスとして設定したメッシュ分割は収束した解を与えるものであることが示された。

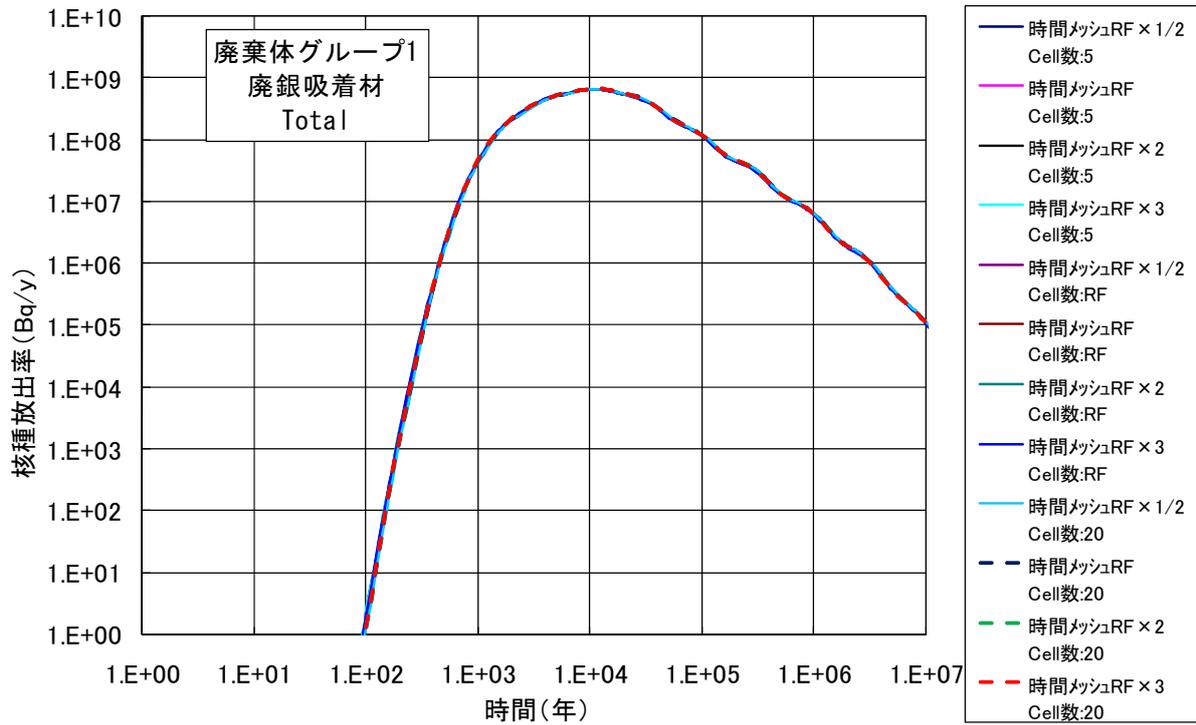


図 2.2.3-2 グループ1（ヨウ素を吸着させた廃銀吸着材）の核種放出率[Bq/y]の経時変化

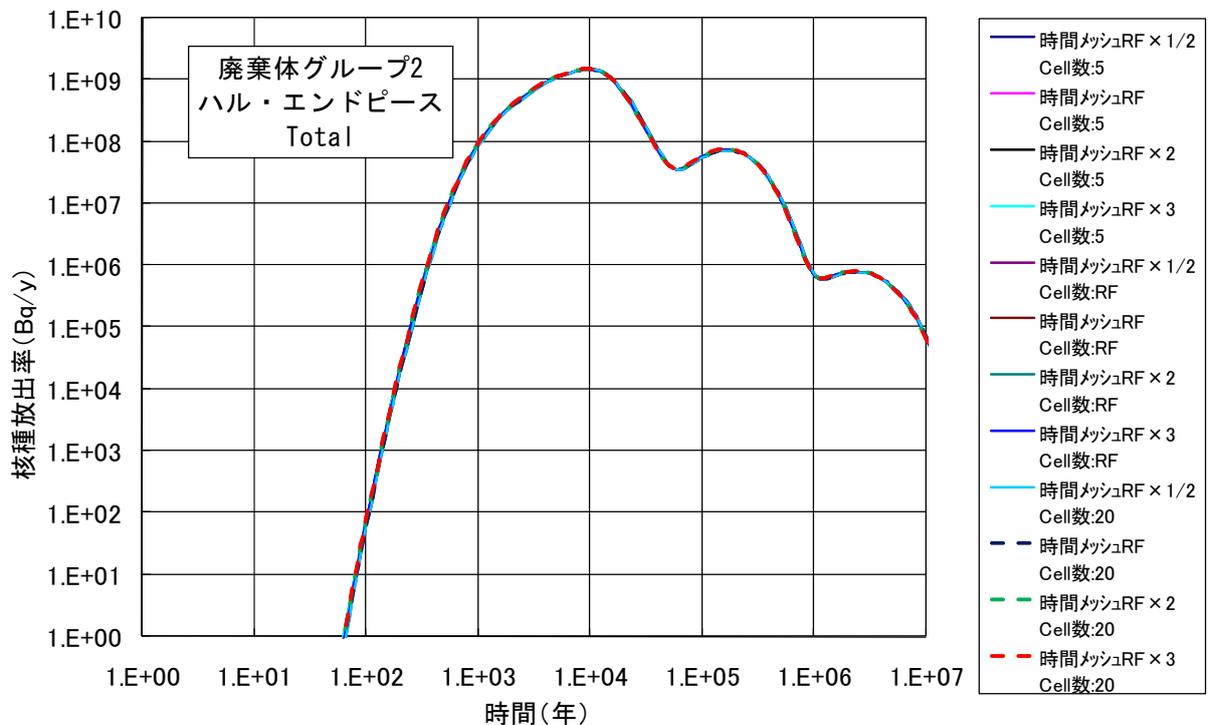


図 2.2.3-3 グループ2（ハル・エンドピース）の核種放出率[Bq/y]の経時変化

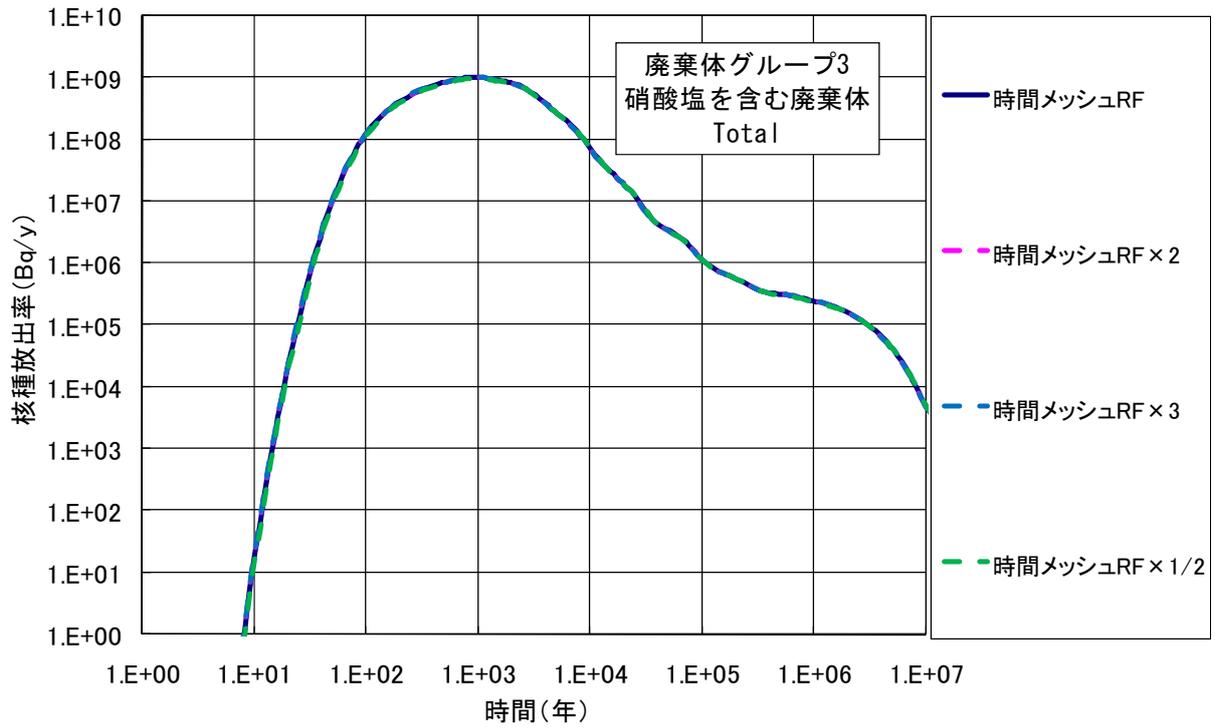


図 2.2.3-4 グループ3（硝酸塩を含む廃棄体）の核種放出率[Bq/y]の経時変化

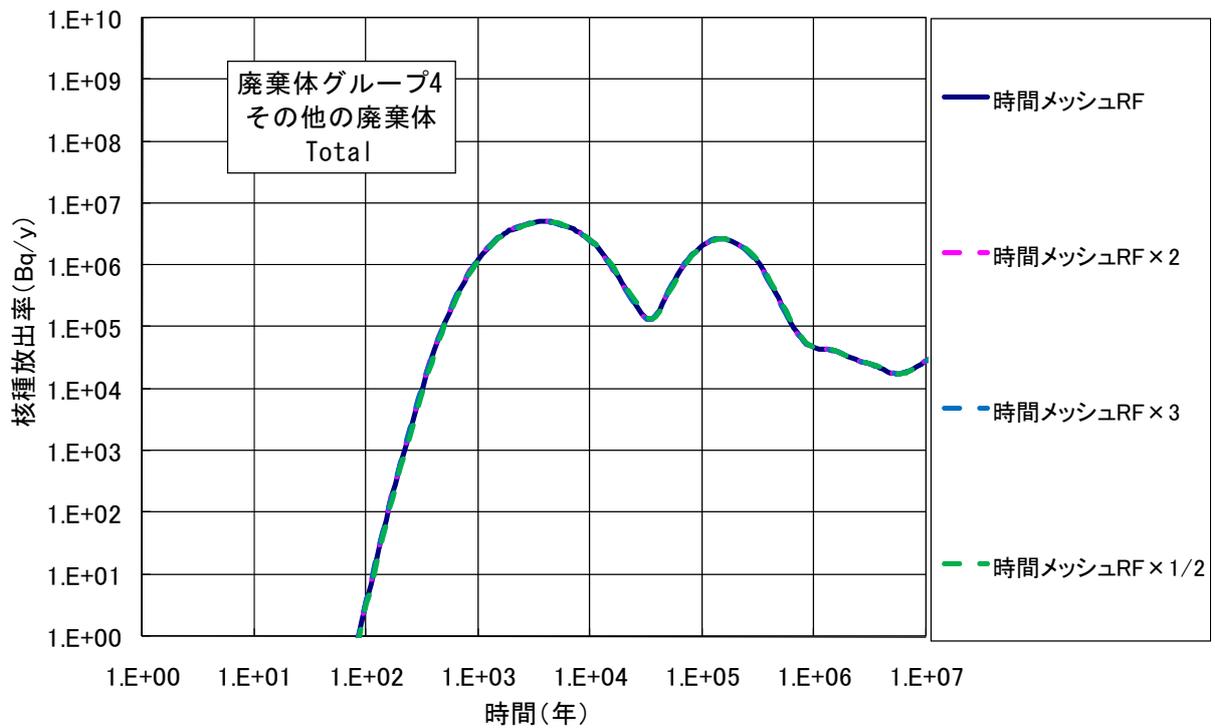


図 2.2.3-5 グループ4（その他の廃棄体）の核種放出率[Bq/y]の経時変化

(2) Tiger の解析メッシュ条件

Tiger では、時間メッシュの設定を自動で行うようにプログラムが作製されている。このアルゴリズムについては、高レベル放射性廃棄物処分の「第2次取りまとめ」(核燃料サイクル開発機構, 1999) で用いられた MESHNOTE コード (Wakasugi and Makino, 1999) と同じものである。すなわち、時間ステップ Δt で計算した値と Δt を2倍した時間ステップで計算した値が、ほぼ等しければ、時間ステップ数は自動的に大きく設定される。逆に、等しくなければ、 Δt は2分の1に設定される。このため、解析ユーザーは、時間ステップの設定に気を使う必要はない。ここでは、空間メッシュの設定について記載する。

Tiger による核種移行経路のモデル化とレファレンスの空間メッシュの設定を図 2.2.3-6 に示す。人工バリアの領域におけるメッシュの分割数、およびメッシュサイズについては、(1) で示した GoldSim の解析と同様とした。グループ1及び2を対象とした緩衝材を有する処分施設については、充填材の外側に厚さ1.0mの緩衝材(10分割)を設けて解析を実施した。

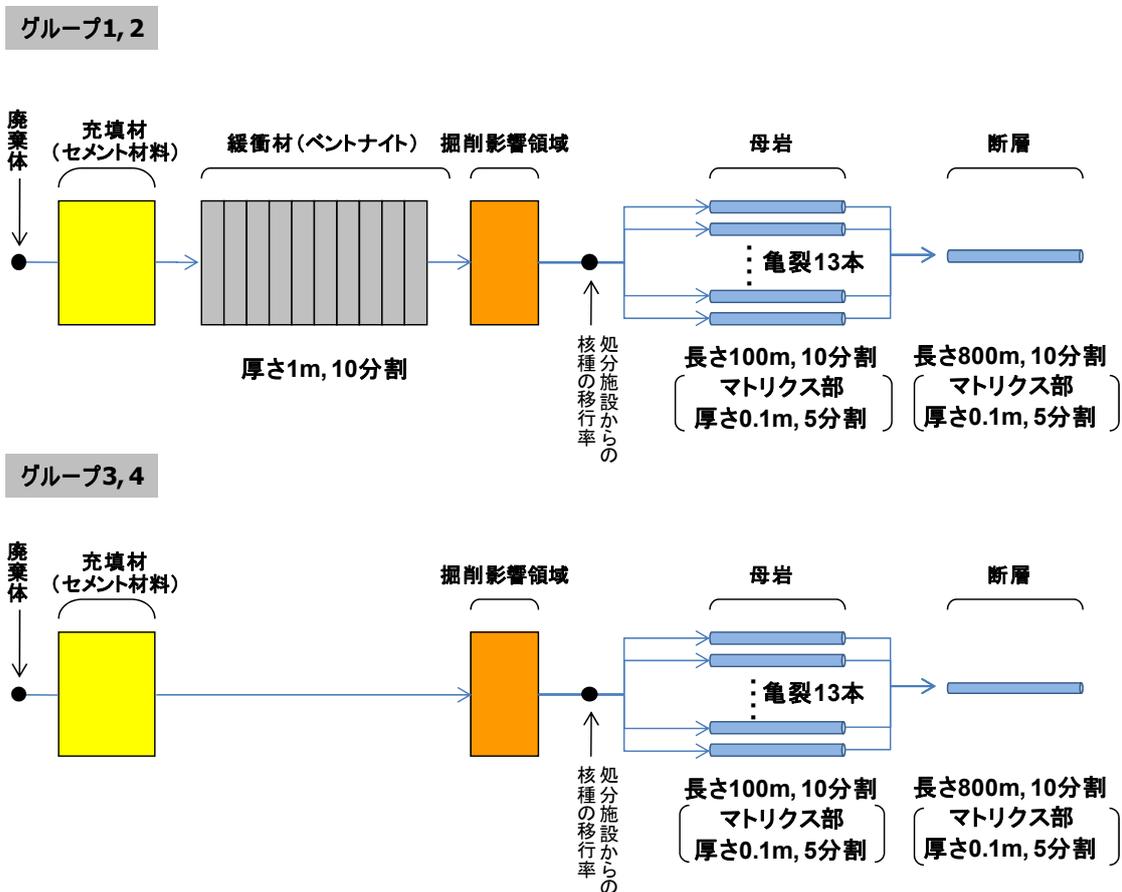


図 2.2.3-6 Tiger による核種移行経路のモデル化とレファレンスの空間メッシュの設定 (上図: グループ1及び2, 下図: グループ3及び4)

母岩及び断層における核種の移行については、GoldSim (Pipe Pathways モデルにより、移行経路を連続体としてモデル化し、無限遠で濃度0とする境界条件のもとで解析的に解く)とは異なり、Tiger では有限差分法を用いて数値的に解いている。母岩については、マトリクス拡散を有する地下水流速の異なる13本の亀裂(長さ100m)を設定し、それぞれの亀裂の長

さ方向の分割数を 10 とした。マトリックス拡散の深さは 0.1m とし、メッシュ分割数を 5 とした。100m の母岩の外側は、0 濃度境界となるように、数値解析上、極めて大きな地下水流速を与えた (10^{10} m/y)。断層については、長さ方向のメッシュ分割数を 10 とした。また、マトリックス拡散の深さを 0.1m、メッシュ分割数を 5 とした。

次に、上記の母岩における亀裂および断層におけるメッシュ分割数の妥当性を検証するため、母岩における亀裂メッシュ及び断層メッシュの分割数（レファレンスの場合、亀裂メッシュ 10 分割：メッシュサイズ 10m、断層メッシュ 10 分割：メッシュサイズ 80m）を、それぞれ 10 分割と 80 分割とするケース（メッシュサイズ 10m）と、100 分割と 800 分割とするケース（メッシュサイズ 1m）における核種移行解析を実施し、亀裂と断層のメッシュ分割数をどちらも 10 とする場合の最大線量と比較した。結果を図 2.2.3-7 に示す。亀裂および断層のメッシュ分割数を細かく設定する場合には、メッシュ分割数を 10 とする場合と比較して、立ち上がり初期では、ずれが見られるが、最大線量は $2.3 \mu\text{Sv/y}$ となり、ほぼ同じ結果が得られた。

これらの予備的な解析の結果から、母岩における亀裂および断層のメッシュサイズをそれぞれ 10m、および 80m に設定することで、最大線量が収束した値となることが確認された。メッシュサイズの設定は、効率的な解析を実施する上で重要な要素であり、立ち上がりの時間の違いが評価に及ぼす影響が小さいと考えられることから、これ以降の解析では、基本的に母岩における亀裂および断層のメッシュサイズをそれぞれ 10m、および 80m に設定することとする。

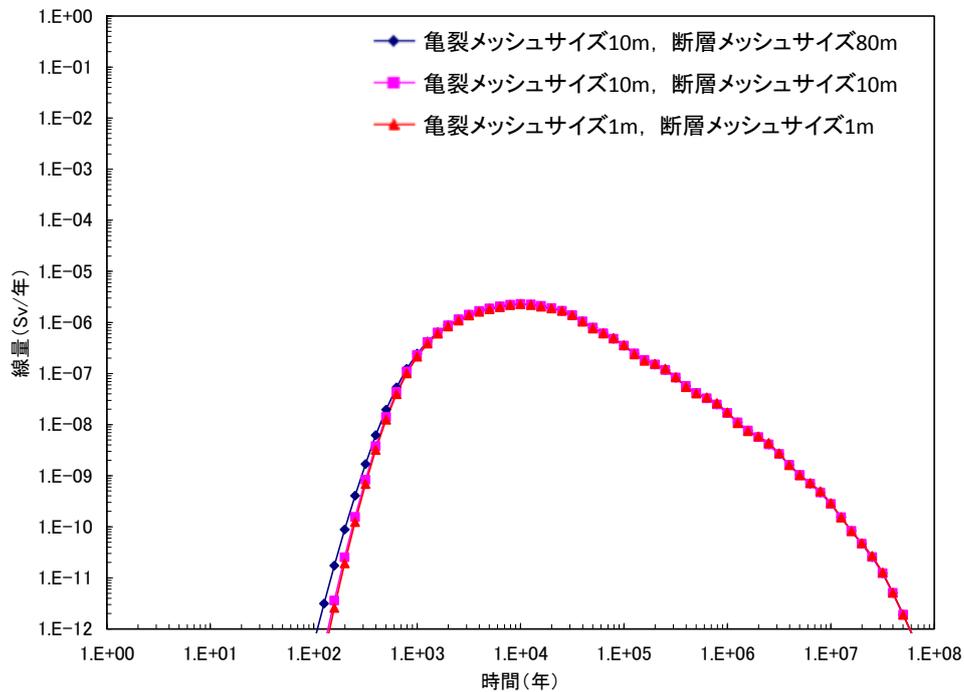


図 2.2.3-7 母岩における亀裂及び断層のメッシュサイズの影響
 (第 2 次 TRU レポートのグループ 1 の物量を用いた解析)

2.2.4. 解析ケースの入力条件

2.2.2 (1) で述べた「第2次 TRU レポートの設定を用いた解析」において使用する物量については、第2次 TRU レポートを参照されたい。ここでは、2.2.2 (2) で述べた「最終処分計画に基づく設定を用いた解析」において使用する物量を示す。また、物量以外のデータについては、第2次 TRU レポートで用いたデータ（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005a, 2005b : Mihara M, Sasaki R, 2005）を本解析においても使用する。以下に、これらの入力データもあわせて示す。

(1) 最終処分計画のレファレンスケース

以下ベンチマーク解析で用いる最終処分計画のレファレンスケースに対する入力データ（核種量，水理・地質環境の情報，処分施設形状の諸元，水理パラメータ，溶解度，吸着分配係数など）を示す。核種量については，基準年（日本原燃株式会社の廃棄物は炉取り出し後4年，原子力機構の廃棄物は炉取り出し後5年の時点）から25年の貯蔵期間を考慮した値（25年後）を処分時の核種量として使用した。

表 2.2.4-1 グループ毎の初期の核種量 (19,018m³)

グループ		1	2	3	4	総合計
発生本数(本)		1,673	31,332	27,441	30,138	90,584
発生量(m ³)		335	6,083	5,492	7,108	19,018
重量(t)		612	26,625	9,105	24,977	61,319
核種	半減期(y)*	25年後	25年後	25年後	25年後	25年後
C-14	5.73E+03	0.0E+00	5.9E+14	7.4E+12	2.7E+12	6.0E+14
Cl-36	3.01E+05	0.0E+00	9.2E+12	3.3E+11	5.0E+07	9.5E+12
Co-60	5.27E+00	1.2E+05	7.2E+16	4.5E+11	3.7E+15	7.5E+16
Ni-59	8.00E+04	5.5E+03	7.5E+15	4.8E+08	5.9E+13	7.5E+15
Ni-63	9.20E+01	7.1E+05	1.1E+18	5.5E+10	7.3E+15	1.1E+18
Se-79	6.50E+04	3.9E+05	3.2E+12	6.7E+09	2.2E+12	5.4E+12
Sr-90	2.91E+01	3.7E+10	3.2E+17	6.9E+14	2.0E+17	5.1E+17
Zr-93	1.53E+06	1.8E+06	3.7E+14	3.1E+10	1.7E+13	3.9E+14
Nb-94	2.03E+04	3.3E+06	2.6E+15	1.9E+06	6.8E+08	2.6E+15
Mo-93	3.50E+03	3.7E+01	5.6E+13	8.1E+06	6.8E+08	5.6E+13
Tc-99	2.13E+05	0.0E+00	6.9E+14	3.9E+11	1.1E+14	8.0E+14
Pd-107	6.50E+06	1.1E+05	5.5E+11	2.5E+09	5.5E+11	1.1E+12
Sn-126	1.00E+05	7.4E+05	3.8E+12	1.1E+10	3.9E+12	7.7E+12
I-129	1.57E+07	5.9E+13	2.6E+11	7.2E+11	4.6E+09	6.0E+13
Cs-135	2.30E+06	4.3E+05	3.6E+12	7.0E+09	2.4E+12	6.0E+12
Cs-137	3.00E+01	5.3E+10	4.1E+17	8.5E+14	3.0E+17	7.1E+17
Cm-244	1.81E+01	8.1E+08	6.0E+15	1.3E+12	6.2E+15	1.2E+16
Pu-240	6.54E+03	3.7E+08	2.7E+15	8.9E+13	1.7E+15	4.5E+15
U-236	2.34E+07	2.6E+05	1.0E+12	2.8E+10	3.6E+11	1.4E+12
Th-232	1.41E+10	3.2E-04	1.3E+03	3.5E+01	4.4E+02	1.7E+03
Ra-228	6.70E+00	2.1E-04	8.1E+02	2.2E+01	2.8E+02	1.1E+03
Th-228	1.91E+00	1.8E-04	6.9E+02	1.9E+01	2.4E+02	9.5E+02
Cm-245	8.50E+03	2.2E+05	8.6E+11	2.1E+09	1.7E+12	2.6E+12
Pu-241	1.44E+01	2.9E+10	1.9E+17	3.1E+16	7.5E+16	2.9E+17
Am-241	4.32E+02	3.0E+09	1.9E+16	2.4E+15	1.3E+16	3.5E+16
Np-237	2.14E+06	1.7E+04	2.5E+12	4.7E+10	3.3E+12	5.9E+12
U-233	1.59E+05	7.8E-01	5.6E+09	6.2E+06	3.9E+08	6.0E+09
Th-229	7.34E+03	5.4E-04	1.3E+07	9.3E+03	4.9E+05	1.3E+07
Cm-246	4.73E+03	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Pu-242	3.87E+05	1.6E+06	1.3E+13	3.7E+11	4.9E+12	1.8E+13
U-238	4.47E+09	2.2E+05	8.6E+11	2.4E+10	3.7E+11	1.3E+12
U-234	2.45E+05	1.9E+06	8.1E+12	3.2E+11	7.7E+12	1.6E+13
Th-230	7.70E+04	2.1E+02	2.5E+08	2.7E+07	5.2E+08	8.0E+08
Ra-226	1.60E+03	1.1E+00	1.1E+06	1.4E+05	2.7E+06	3.9E+06
Pb-210	2.23E+01	2.4E-01	2.0E+05	2.9E+04	5.8E+05	8.1E+05
Am-243	7.38E+03	1.8E+07	1.8E+15	5.5E+11	1.4E+14	1.9E+15
Pu-239	2.41E+04	2.4E+08	1.7E+15	5.7E+13	1.4E+15	3.1E+15
U-235	7.04E+08	1.5E+04	6.1E+10	1.7E+09	5.6E+10	1.2E+11
Pa-231	3.28E+04	8.1E+00	3.2E+07	9.2E+05	3.0E+07	6.3E+07
Ac-227	2.18E+01	2.5E+00	1.0E+07	2.8E+05	9.3E+06	2.0E+07

*半減期(年): ORIGEN2.1のライブラリーデータ使用

表 2.2.4-2 評価において使用する水理・地質環境の情報

ケース	レファレンス
地理	内陸
地形	平野 (丘陵, 山地)
岩種	結晶質岩
地下水組成	降水系地下水
透水量係数 (m ² /s)	10 ⁻¹⁰
動水勾配	0.01
岩盤種類	HR
有効間隙率 (-)	0.02
一軸圧縮強度 (MPa)	115
処分深度 (m)	1,000
生物圏	河川水

表 2.2.4-3 各廃棄体に対する処分施設形状の諸元

グループ	廃棄体定置領域長さ (m)	坑道径 (m)	廃棄体量 (m ³)	表面積 (m ²)	充填材体積 (m ³)	緩衝材厚さ (m)	緩衝材表面積 (m ²)	掘削影響領域の地下水流量 (m ³ /y)	
1	200Lドラム缶	25.5	12	335	663	717	1	961	6.38E-02
2	JNFL, JAEA ハル・イントピース	688.8	9.3	5,342	13,225	10,528	1	20,125	1.72E+00
	仏国返還廃棄物 固型物収納体 (CSD-C)	567.6	5	734	4,541	1,446	1	8,916	7.95E-01
	仏国返還廃棄物 低レベル廃液ガラス固 化体 (CSD-B)	1.2	9.3	7	19	11	1	35	3.00E-03
3	200Lドラム缶	258	12	5,492	9,726	23,687			1.95E+00
4	200Lドラム缶	270	12	5,766	10,179	24,770			2.04E+00
	角型容器	14.4	12	884	543	745			1.09E-01
	ドラム缶・インナバレル	376.2	5	458	5,909	6,929			1.24E+00

表 2.2.4-4 人工バリア核種移行解析における水理パラメータ

グループ	透水係数 (m/s)			流速, 流量	
	充填材	緩衝材	掘削影響領域	人工バリア内ダルシー流速	坑道長さ当たりの掘削影響領域地下水流量
1	4×10 ⁻⁶	2×10 ⁻¹¹	2×10 ⁻⁸	3×10 ⁻⁶ (m/y)	2.5×10 ⁻³ (m ³ /y/m)
2					
3		緩衝材なし		2×10 ⁻⁴ (m/y)	7.5×10 ⁻³ (m ³ /y/m)
4					

表 2.2.4-5 溶解度

地下水性状	還元性				酸化性	
	降水系		海水系		降水系	
	1	2	1	2	1	2
グループ						
C (無機)	1. E-01	1. E-01	5. E-01	5. E-01	1. E-01	1. E-01
C (有機)	溶解性	溶解性	溶解性	溶解性	溶解性	溶解性
Cl	溶解性	溶解性	溶解性	溶解性	溶解性	溶解性
Co	5. E-01	5. E-01	1. E-01	1. E-01	5. E-01	5. E-01
Ni	5. E-01	5. E-01	1. E-01	1. E-01	5. E-01	5. E-01
Se	5. E-03	5. E-03	5. E-02	5. E-02	溶解性	溶解性
Sr	5. E+00					
Zr	5. E-02	1. E+00	5. E-02	1. E+00	5. E-02	1. E+00
Nb	5. E+01					
Mo	1. E+00					
Tc	1. E-03	1. E-03	1. E-03	1. E-03	溶解性	溶解性
Pd	溶解性	溶解性	溶解性	溶解性	溶解性	溶解性
Sn	5. E+02	溶解性	5. E+02	溶解性	5. E+02	溶解性
I	溶解性	溶解性	溶解性	溶解性	溶解性	溶解性
Cs	溶解性	溶解性	溶解性	溶解性	溶解性	溶解性
Pb	5. E+01					
Ra	1. E-03					
Ac	5. E-07	1. E-05	5. E-07	1. E-05	5. E-07	1. E-05
Th	1. E-06	2. E-05	1. E-06	2. E-05	1. E-06	2. E-05
Pa	5. E-05	1. E-03	1. E-05	2. E-04	5. E-05	1. E-03
U	5. E-06	1. E-04	5. E-06	1. E-04	5. E+02	1. E+04
Np	5. E-06	1. E-04	5. E-06	1. E-04	5. E-02	1. E+00
Pu	1. E-07	2. E-06	1. E-07	2. E-06	5. E-03	1. E-01
Am	5. E-07	1. E-05	5. E-07	1. E-05	5. E-07	1. E-05
Cm	5. E-07	1. E-05	5. E-07	1. E-05	5. E-07	1. E-05

表 2.2.4-6 降水系還元性地下水（降水系地下水）環境下での収着分配係数設定

収着媒体	[m ³ /kg]					
	セメント				ベントナイト	
	1	2	3	4	1	2
グループ						
C (無機)	0.25	0.25	0.25	0.25	0	0
C (有機)	0.00025	0.00025	0	0.00025	0	0
Cl	0	0	0	0	0	0
Co	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.05	0.05
Ni	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.05	0.05
Se	0.0025	0.0025	0	0.0025	0	0
Sr	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.001	0.001
Zr	2.5	0.125	2.5	2.5	1	1
Nb	0	0	0	0	0.1	0.1
Mo	0.0025	0.0025	0.00025	0.0025	0	0
Tc	2.5	2.5	0	2.5	1	1
Pd	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.05	0.05
Sn	2.5	0.125	2.5	2.5	1	1
I	0.000125	0.00125	0	0.00125	0	0
Cs	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.05	0.05
Pb	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.05	0.05
Ra	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.001	0.001
Ac	0.25	0.0125	0.25	0.25	1	1
Th	0.25	0.0125	0.25	0.25	5	5
Pa	0.25	0.0125	0.25	0.25	5	5
U	0.25	0.0125	0.025	0.25	5	5
Np	0.25	0.0125	0.25	0.25	5	5
Pu	0.25	0.0125	0.025	0.25	5	5
Am	0.25	0.0125	0.25	0.25	1	1
Cm	0.25	0.0125	0.25	0.25	1	1

表 2.2.4-7 降水系還元性地下水（降水系地下水）環境下での実効拡散係数設定

移行媒体	セメント	ベントナイト
実効拡散係数 (m ² /s)	全元素共通で 8×10 ⁻¹⁰	Cs : 4×10 ⁻¹⁰
		Cl, I, Se, Mo : 4×10 ⁻¹¹
		それ以外 : 3×10 ⁻¹⁰

表 2.2.4-8 天然バリア核種移行解析における主なパラメータ設定

パラメータ	周辺岩盤	透水性断層
岩種	花崗岩（結晶質岩：酸性岩）	
地下水性状	FRHP 型地下水	
動水勾配	0.01	
移行距離 (m)	100	800
透水量係数 (m ² /s)	対数正規分布 対数平均値-9.99, 標準偏差 1.07, Min. 10 ⁻¹³ ~ Max. 10 ⁻⁷	周辺岩盤の透水量係数の最大 値 10 ⁻⁷
亀裂内地下水ダルシー流速	$\frac{1}{2}\sqrt{T} \times \Delta H$ T : 透水量係数, ΔH : 動水勾配	
縦方向分散長 (m)	10	80
マトリクス拡散寄与面積 (m ²)	0.5	
マトリクス拡散深さ (m)	0.1	
マトリクス間隙率	0.1	

表 2.2.4-9 降水系還元性地下水（降水系地下水）および降水系酸化性地下水（酸化性地下水）
での実効拡散係数及び収着分配係数

地下水		降水系地下水		酸化性地下水	
岩種		結晶質岩(酸性)		結晶質岩(酸性)	
		花崗岩(レファレンス)		花崗岩(レファレンス)	
間隙率 (%)		2			
乾燥密度 (Mg/m ³)		2.64			
実効拡散係数 (m ² /s)		3.E-12			
断層移行距離 (m)		800			
ケルブ°		1・2・4	3	1・2・4	3
収着分配係数 [m ³ /kg]	C(無機)	0.0001	0	0.0001	0
	C(有機)	0.0001	0	0.0001	0
	Cl	0.0001	0	0.0001	0
	Co	0.01	0.001	0.01	0.001
	Ni	0.01	0.001	0.01	0.001
	Se	0.01	0	0	0
	Sr	0.5	0.05	0.5	0.05
	Zr	0.1	0.1	0.1	0.1
	Nb	0.1	0.1	0.1	0.1
	Mo	0.0001	0	0.0001	0
	Tc	1	0	0	0
	Pd	0.1	0.1	0.1	0.1
	Sn	1	1	1	1
	I	0.0001	0	0.0001	0
	Cs	0.05	0.005	0.05	0.005
	Pb	0.1	0.1	0.1	0.1
	Ra	0.5	0.05	0.5	0.05
	Ac	5	5	5	5
	Th	1	1	1	1
	Pa	1	0.005	0.005	0.005
U	1	0.005	0.005	0.005	
Np	1	0.005	0.005	0.005	
Pu	1	0.05	0.05	0.05	
Am	5	5	5	5	
Cm	5	5	5	5	

表 2.2.4-10 レファレンス条件での線量への換算係数

単位 [(Sv/y)/(Bq/y)]

核種放出域	河川水			沿岸海域堆積層			被圧帯水層(深井戸)
	生態系	温暖気候	冷帯気候	ツンドラ気候	温暖気候	冷帯気候	
被ばくグループ	農作業従事者グループ			海洋漁業従事者グループ			農作業従事者グループ
適用	レファレンス条件	気候・海水準変動 内陸立地, 沿岸立地(海退時)		地下水タイプ 変更	気候・海水準変動 沿岸立地(海進時及び塩淡水境界領域時)		井戸掘削 影響ケース
C-14	6.4E-17	1.3E-17	1.8E-16	2.4E-17	2.4E-17	2.5E-17	3.2E-15
Cl-36	4.5E-17	1.6E-17	1.2E-16	5.5E-20	5.4E-20	1.9E-20	2.3E-15
Co-60	1.3E-16	4.5E-17	6.0E-17	5.3E-15	5.3E-15	1.8E-15	5.8E-15
Ni-59	3.7E-18	1.0E-18	1.8E-18	5.4E-18	4.6E-18	1.1E-18	1.8E-16
Ni-63	5.0E-18	2.0E-18	4.1E-18	4.5E-19	3.7E-19	1.1E-19	2.5E-16
Se-79	3.2E-15	1.7E-16	7.5E-16	6.6E-17	5.9E-17	4.1E-17	1.6E-13
Sr-90	1.1E-15	3.9E-16	3.8E-16	7.2E-17	6.7E-17	2.1E-17	5.2E-14
Zr-93	9.6E-18	3.3E-18	2.3E-18	4.6E-17	4.2E-17	1.0E-17	4.8E-16
Nb-93m	2.3E-18	1.5E-18	9.0E-19	1.2E-19	1.1E-19	3.3E-20	1.1E-16
Nb-94	7.5E-16	2.0E-16	2.2E-17	1.1E-12	1.1E-12	2.8E-13	3.7E-14
Mo-93	5.5E-17	3.2E-17	3.2E-17	5.0E-18	4.3E-18	1.4E-18	2.7E-15
Tc-99	2.6E-17	1.3E-17	1.8E-17	1.9E-18	1.7E-18	3.9E-19	1.3E-15
Pd-107	1.4E-18	5.4E-19	2.5E-19	3.1E-18	2.6E-18	5.4E-19	7.0E-17
Sn-126	1.0E-15	2.6E-16	5.9E-17	1.4E-12	1.4E-12	3.6E-13	4.9E-14
I-129	3.2E-15	2.0E-15	2.7E-15	5.7E-17	5.1E-17	1.0E-17	1.6E-13
Cs-135	1.2E-16	4.9E-17	6.2E-17	5.7E-17	4.6E-17	1.2E-17	6.0E-15
Cs-137	5.4E-16	2.2E-16	3.8E-16	6.3E-15	6.3E-15	2.1E-15	2.6E-14
Cm-244	2.4E-15	1.4E-15	8.2E-16	2.5E-16	2.3E-16	6.4E-17	1.2E-13
Pu-240	3.8E-15	2.1E-15	1.6E-15	3.4E-14	3.2E-14	7.6E-15	1.9E-13
U-236	8.8E-16	5.5E-16	3.5E-16	6.8E-16	6.2E-16	1.9E-16	4.4E-14
Th-232	1.5E-13	1.3E-14	2.2E-15	3.3E-12	3.3E-12	7.6E-13	7.7E-12
Ra-228	1.3E-14	7.2E-15	7.3E-15	7.2E-15	7.2E-15	2.4E-15	6.1E-13
Th-228	2.6E-15	1.5E-15	1.2E-15	1.3E-15	1.3E-15	4.3E-16	9.6E-14
Cm-245	1.1E-14	2.7E-15	1.4E-15	1.1E-13	1.0E-13	2.5E-14	5.2E-13
Pu-241	8.6E-17	3.9E-17	3.0E-17	1.9E-16	1.8E-16	5.4E-17	4.3E-15
Am-241	3.3E-15	1.7E-15	1.3E-15	5.7E-15	5.3E-15	1.6E-15	1.7E-13
Np-237	1.3E-15	9.5E-16	7.1E-16	5.5E-14	5.5E-14	1.6E-14	6.6E-14
Pa-233	1.8E-17	1.1E-17	5.8E-18	4.9E-18	4.9E-18	1.6E-18	8.5E-17
U-233	1.0E-15	6.0E-16	3.8E-16	9.6E-15	9.4E-15	2.3E-15	5.1E-14
Th-229	2.3E-14	6.8E-15	5.1E-15	3.1E-13	3.0E-13	7.5E-14	1.1E-12
Cm-246	7.4E-15	2.6E-15	1.4E-15	2.6E-14	2.4E-14	5.9E-15	3.7E-13
Pu-242	3.7E-15	2.0E-15	1.5E-15	4.8E-14	4.4E-14	9.6E-15	1.9E-13
U-238	9.0E-16	5.6E-16	3.6E-16	2.7E-15	2.6E-15	8.3E-16	4.5E-14
U-234	9.6E-16	5.9E-16	3.8E-16	3.6E-15	3.5E-15	7.8E-16	4.8E-14
Th-230	2.7E-14	4.6E-15	1.9E-15	1.0E-12	1.0E-12	2.1E-13	1.4E-12
Ra-226	3.2E-14	5.1E-15	3.5E-15	5.4E-13	5.3E-13	1.6E-13	1.6E-12
Pb-210	2.4E-14	1.3E-14	2.9E-14	9.1E-16	7.5E-16	2.1E-16	1.3E-12
Po-210	4.8E-15	2.7E-15	6.3E-15	3.2E-18	2.7E-18	7.5E-19	8.5E-14
Am-243	5.5E-15	1.8E-15	1.3E-15	1.5E-13	1.5E-13	3.7E-14	2.8E-13
Pu-239	3.9E-15	2.1E-15	1.6E-15	4.5E-14	4.1E-14	9.2E-15	1.9E-13
U-235	9.3E-16	5.6E-16	3.5E-16	1.8E-14	1.8E-14	5.2E-15	4.7E-14
Pa-231	6.5E-14	1.3E-14	4.8E-15	1.1E-12	1.1E-12	2.4E-13	3.3E-12
Ac-227	2.6E-14	1.6E-14	8.1E-15	7.1E-12	7.0E-15	2.3E-15	1.2E-12

(2) 人工バリアの変質を考慮したケース

人工バリアの変質を考慮したケースにおいて使用する入力データを表 2.2.4-11,12 に示す。処分後 1,000 年, 10,000 年, 100,000 年, 1,000,000 年で人工バリアが変質し, 収着性や止水性などの核種閉じ込め機能が喪失すると想定した 4 つのケースについて解析を行った。

表 2.2.4-11 人工バリア変質影響ケースにおけるデータ設定

影響を受けるパラメータ	単位	止水性喪失後の設定
溶解度	mol /dm ³	全元素を可溶性元素と仮定
セメントの収着分配係数	m ³ /kg	表 2.2.4-12 参照
緩衝材の収着分配係数	m ³ /kg	全元素で 0 と仮定
緩衝材透水係数	m /s	1×10 ⁻⁵
セメント間隙率	%	46
緩衝材実効拡散係数	m ² /s	全元素で 2×10 ⁻⁹

表 2.2.4-12 人工バリア変質影響ケースにおけるセメントへの収着分配係数設定

収着媒体	セメント			
	[m ³ /kg]			
グループ	1	2	3	4
C (無機)	0.25	0.25	0.25	0.25
C (有機)	0.00025	0.00025	0	0.00025
Cl	0	0	0	0
Co	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125
Ni	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125
Se	0.0025	0.0025	0	0.0025
Sr	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125
Zr	0.25	0.0125	0.25	0.25
Nb	0	0	0	0
Mo	0.0025	0.0025	0.000025	0.0025
Tc	0.25	0.25	0	0.25
Pd	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125
Sn	0.25	0.0125	0.25	0.25
I	0	0	0	0
Cs	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
Pb	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125
Ra	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125
Ac	0.25	0.0125	0.25	0.25
Th	0.25	0.0125	0.25	0.25
Pa	0.25	0.0125	0.25	0.25
U	0.25	0.0125	0.025	0.25
Np	0.25	0.0125	0.25	0.25
Pu	0.25	0.0125	0.025	0.25
Am	0.25	0.0125	0.25	0.25
Cm	0.25	0.0125	0.25	0.25

(3) 隆起・侵食を考慮したケース

隆起・侵食を考慮したケースでは、第2次 TRU レポートと同様の考え方で評価を行った。地表から深度 100m までは風化帯となっていると仮定し、同ゾーン内では地下水流速が増大するとともに酸化性雰囲気になっているとした（図 2.2.4-1 参照）。

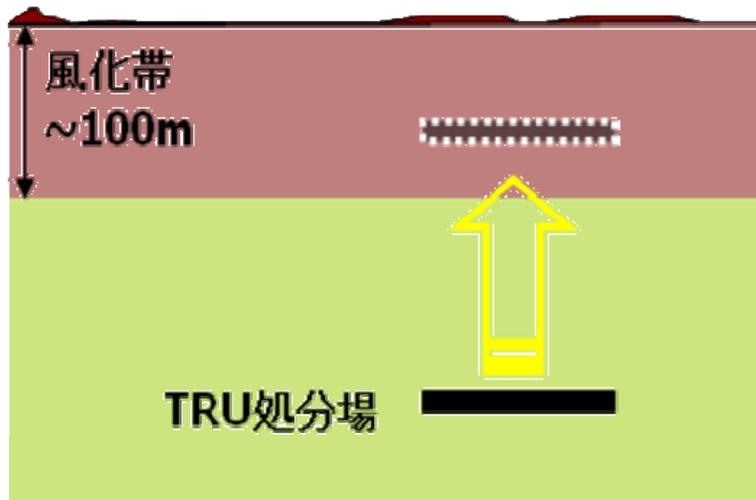


図 2.2.4-1 隆起・侵食ケースにおける地質環境の模式図
(第2次 TRU レポートの記述を一部編集)

また、断層破碎帯での核種移行を保守的に無視し、母岩を移行した核種は直接生物圏に流入すると仮定する。処分深度 1,000m、隆起・侵食速度を 1mm/y とすると、90 万年後に処分場環境は風化帯に遷移することとなる。そこで、隆起・侵食を考慮したケースでは、90 万年後にパラメータ値を時間変化させた解析を行うこととした。

なお、本解析ケースは地下水シナリオの範囲内での取り扱いであるため、処分場が風化帯に入った後、さらに地表に露出するまでの状況は想定しない。

隆起・侵食ケースの条件は以下の通りである。母岩での水理条件については、パラメータの時間変化の解析を単純なモデルで確認するため、単一の平行平板モデルで比較することとし、透水量係数が 1 桁上昇するものと仮定した。その他のパラメータについては、酸化性雰囲気での溶解度（表 2.2.4-5）、実効拡散係数（表 2.2.4-13）、収着分配係数（表 2.2.4-14）を使用した。また、酸化性条件での母岩（花崗岩）に対する実効拡散係数及び収着分配係数の設定値を表 2.2.4-9 に示す。

表 2.2.4-13 降水系酸化性地下水（酸化性地下水）環境下での実効拡散係数

移行媒体	セメント	ベントナイト
実効拡散係数 (m^2/s)	全元素共通で 8×10^{-10}	Cs : 4×10^{-10}
		Cl, I, Se, Mo, Tc, U, Np : 4×10^{-11}
		それ以外 : 3×10^{-10}

表 2.2.4-14 降水系酸化性地下水（酸化性地下水）環境下での収着分配係数設定

収着媒体 グループ	セメント				ベントナイト	
	1	2	3	4	1	2
C（無機）	0.25	0.25	0.25	0.25	0	0
C（有機）	0.00025	0.00025	0	0.00025	0	0
Cl	0	0	0	0	0	0
Co	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.05	0.05
Ni	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.05	0.05
Se	0.0125	0.0125	0	0.0125	0	0
Sr	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.001	0.001
Zr	2.5	0.125	2.5	2.5	1	1
Nb	0	0	0	0	0.1	0.1
Mo	0.0025	0.0025	0.00025	0.0025	0	0
Tc	0.000025	0.000025	0	0.000025	0	0
Pd	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.05	0.05
Sn	2.5	0.125	2.5	2.5	1	1
I	0.000125	0.00125	0	0.00125	0	0
Cs	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.05	0.05
Pb	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.05	0.05
Ra	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.001	0.001
Ac	0.25	0.0125	0.25	0.25	1	1
Th	0.25	0.0125	0.25	0.25	5	5
Pa	0.25	0.0125	0.25	0.25	1	1
U	0.025	0.00125	0.025	0.025	0.005	0.005
Np	0.25	0.0125	0.25	0.25	0.005	0.005
Pu	0.025	0.00125	0.025	0.025	10	10
Am	0.25	0.0125	0.25	0.25	1	1
Cm	0.25	0.0125	0.25	0.25	1	1

(4) 母岩の透水性の変動を考慮したケース

母岩の透水性の変動を考慮したケースにおける透水量係数の設定範囲と組み合わせを表 2.2.4-15 に示す。

表 2.2.4-15 母岩の透水性の変動を考慮したケースにおけるデータ設定

影響を受けるパラメータ	単位	最終処分計画のレファレンスケース	透水量係数変更ケース (平行平板の重ね合わせ)
母岩の透水量係数（平均値）	m ² /s	1×10 ⁻¹⁰	1×10 ⁻⁹
母岩の透水量係数（最大値）	m ² /s	1×10 ⁻⁷	1×10 ⁻⁶
断層の透水量係数	m ² /s	1×10 ⁻⁷	1×10 ⁻⁶

2.3. 解析結果及び考察

2.3.1. 第2次 TRU レポートの設定での結果

第2次 TRU レポートの設定での Tiger と GoldSim での解析結果を図 2.3.1-1 に示す。Tiger での解析結果は「第2次 TRU レポート」の解析結果と同じものである。どのグループに対しても、GoldSim の解析結果は、第2次 TRU レポートの解析結果とほぼ一致した。Tiger による線量の立ち上がりが GoldSim によるものより早い傾向があるが、これは移流分散方程式の解法として、GoldSim ではラプラス変換による解析解を利用しているのに対し、Tiger では有限差分法による数値解析を利用していることによるものである（数値解における数値分散の影響）。

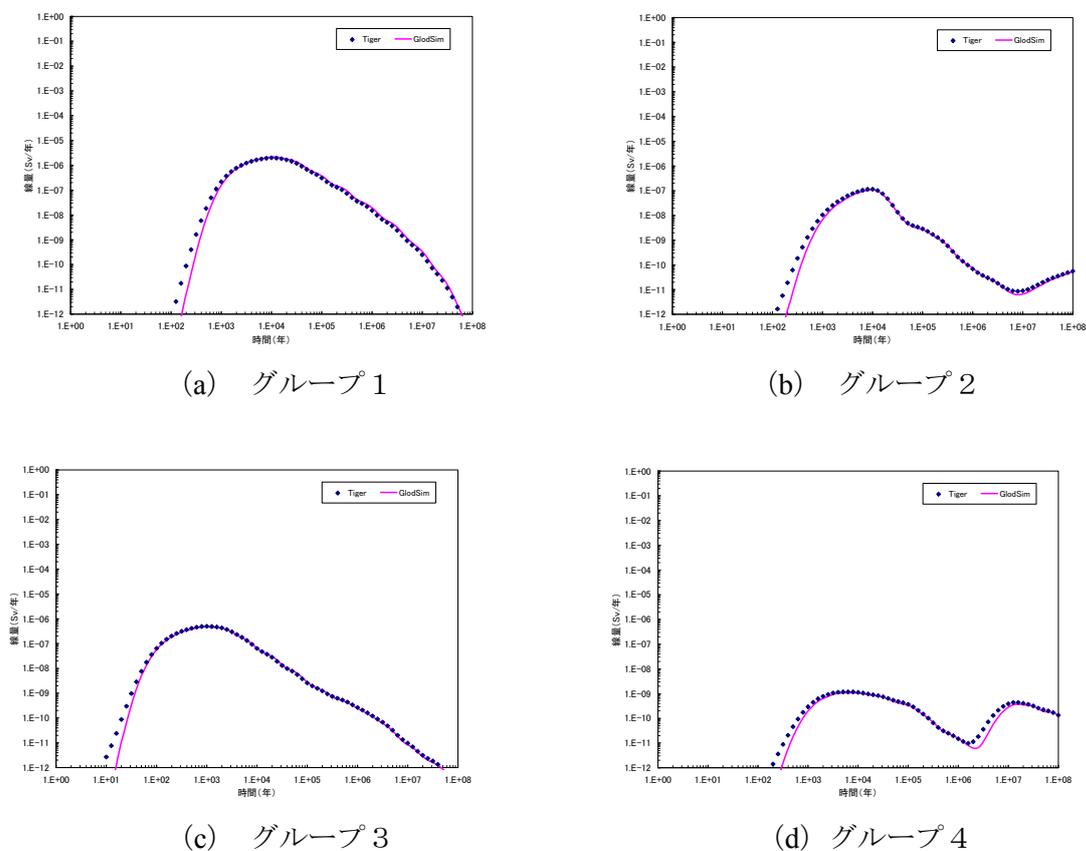


図 2.3.1-1 第2次 TRU レポートのレファレンスケースにおける Tiger と GoldSim の線量比較結果

2.3.2. 最終処分計画に基づく設定での結果

(1) 最終処分計画のレファレンスケース

グループ1からグループ4の Tiger と GoldSim による解析結果を図 2.3.2-1 に示す。第2次 TRU レポートの設定での結果と同様に、全てのグループにおいて 2.3.1 における解析結果と同様に、Tiger により求められた線量の立ち上がりは GoldSim に比べてやや早い傾向があるものの、最大線量は概ね一致した。

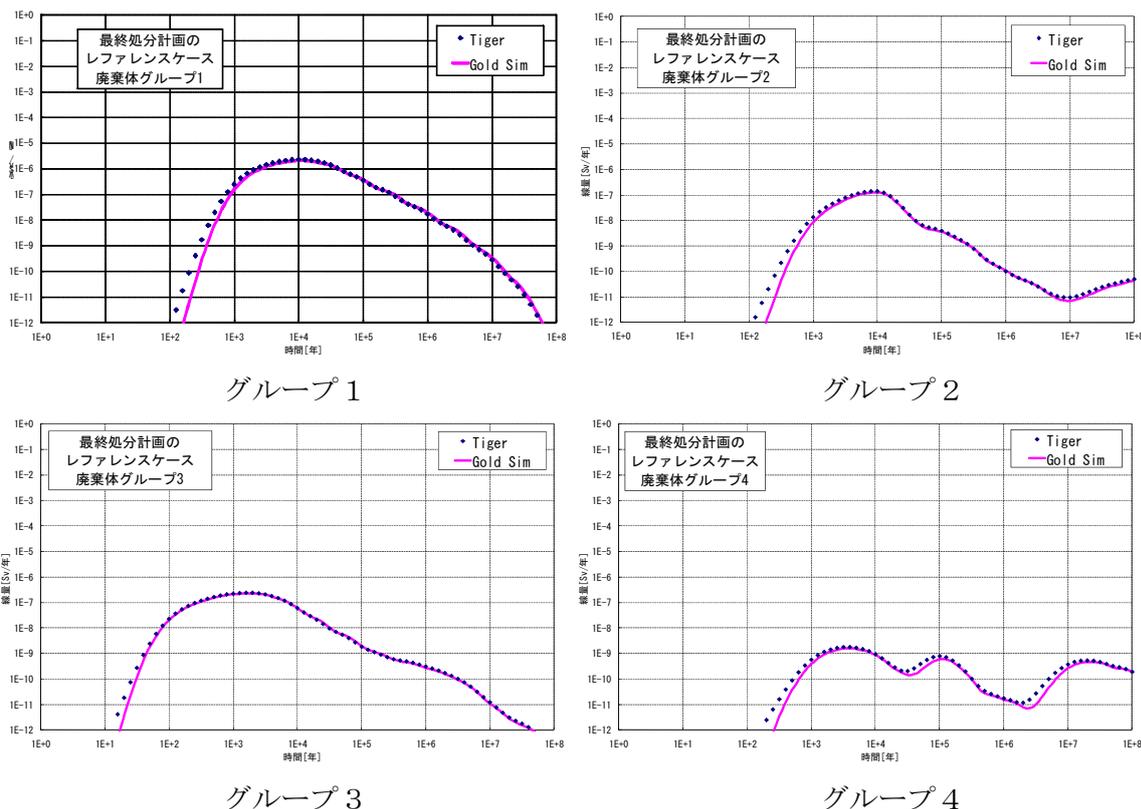
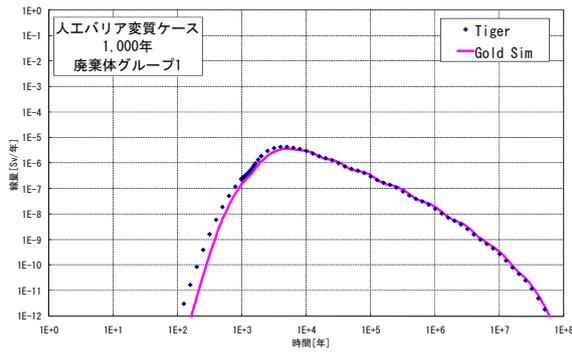


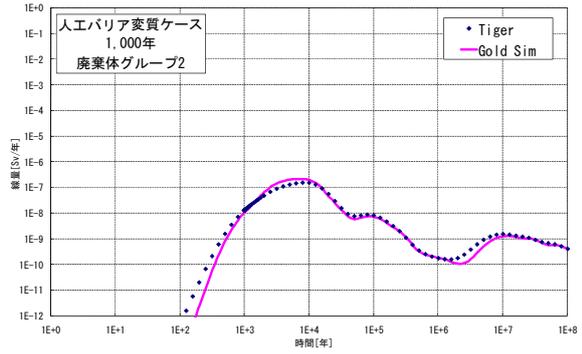
図 2.3.2-1 最終処分計画のレファレンスケースにおける Tiger と GoldSim の線量比較結果

(2) 人工バリアの変質を考慮したケース

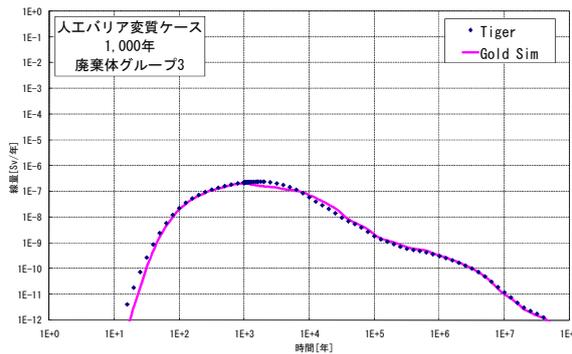
処分後 1,000 年, 10,000 年, 100,000 年, 1,000,000 年で人工バリアが変質するとした場合の Tiger と GoldSim による解析結果を図 2.3.2-2～図 2.3.2-5 に示す。いずれの場合においても、最終処分計画のレファレンスケースにおける解析結果と同様に、Tiger により求められた線量の立ち上がりは GoldSim に比べてやや早い傾向があるものの、最大線量は概ね一致した。



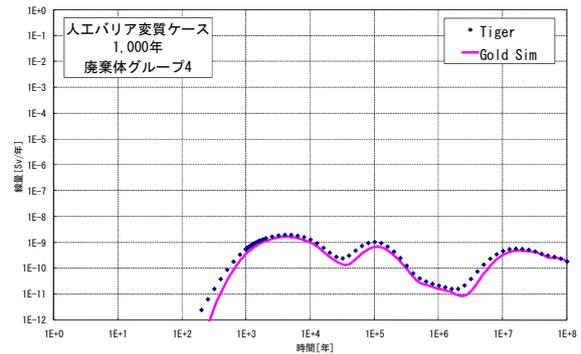
グループ 1



グループ 2

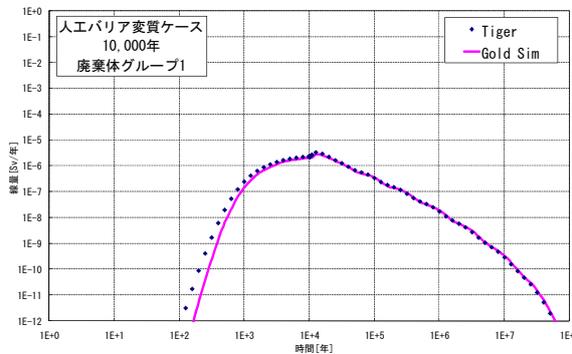


グループ 3

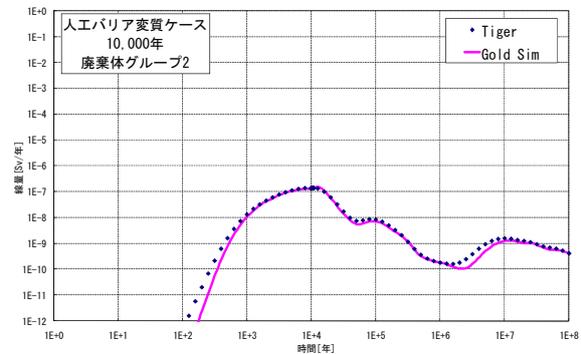


グループ 4

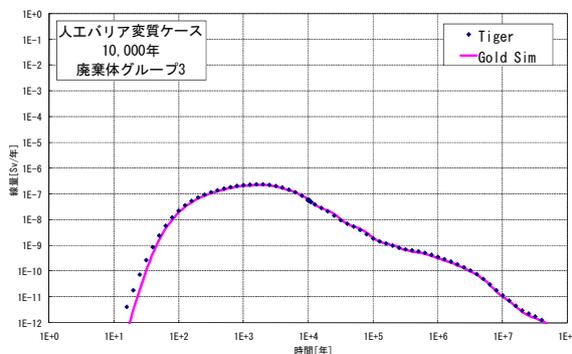
図 2.3.2-2 人エバリア変質ケース (1,000年) における Tiger と GoldSim の線量比較結果



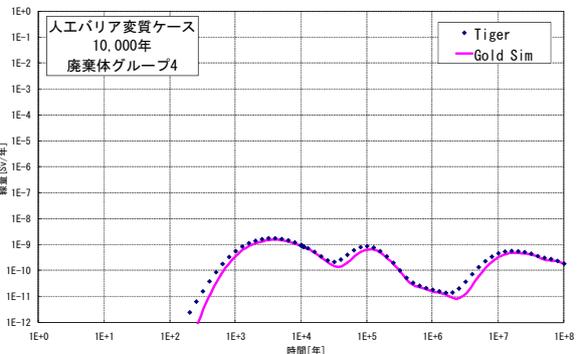
グループ 1



グループ 2

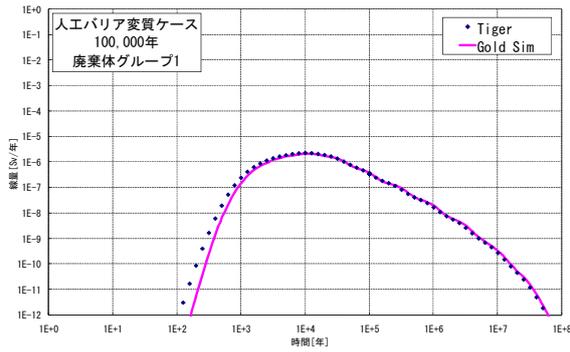


グループ 3

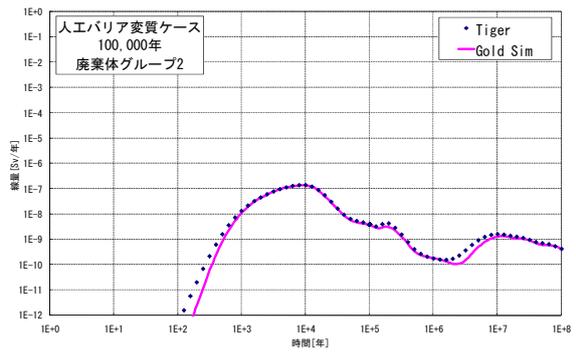


グループ 4

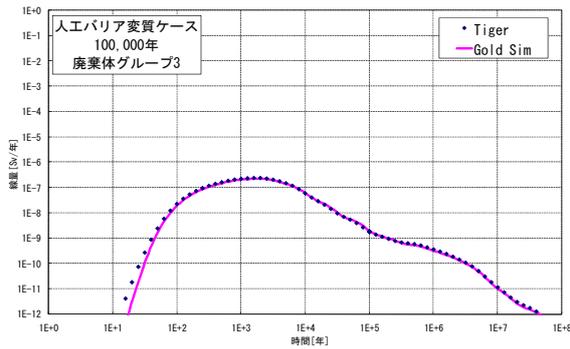
図 2.3.2-3 人エバリア変質ケース (10,000年) における Tiger と GoldSim の線量比較結果



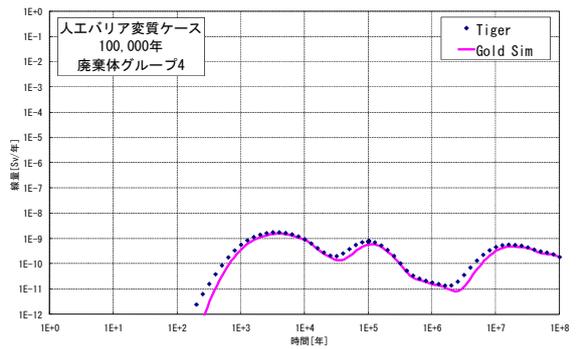
グループ 1



グループ 2

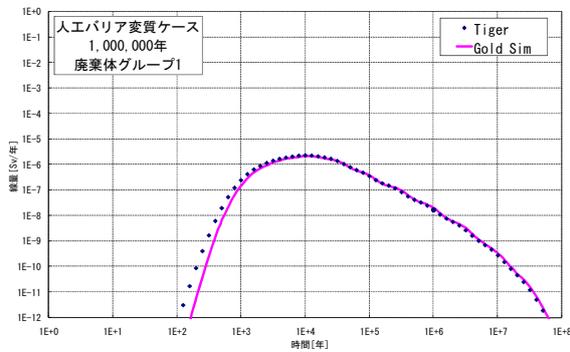


グループ 3

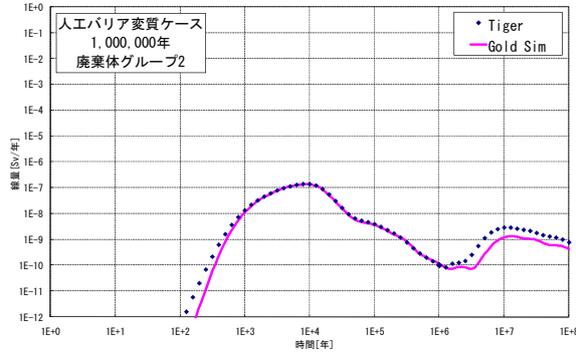


グループ 4

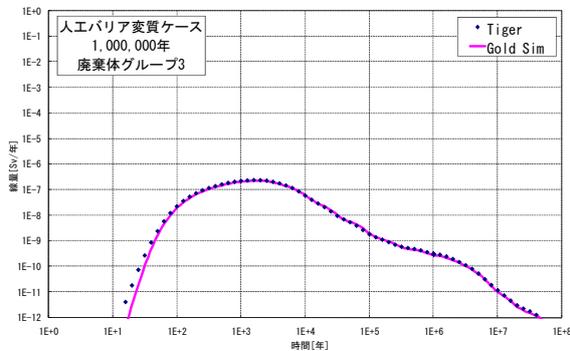
図 2.3.2-4 人工バリア変質ケース (100,000 年) における Tiger と GoldSim の線量比較結果



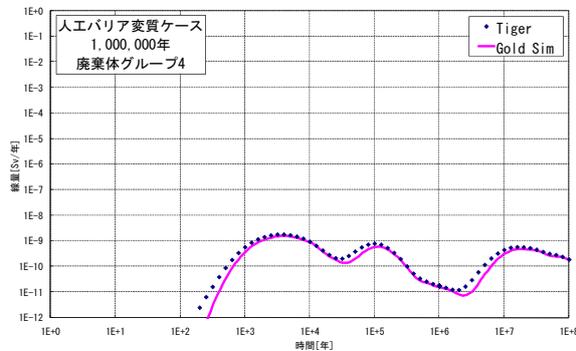
グループ 1



グループ 2



グループ 3



グループ 4

図 2.3.2-5 人工バリア変質ケース (1,000,000 年) における Tiger と GoldSim の線量比較結果

(3) 隆起・侵食を考慮したケース

隆起・侵食を考慮した場合の Tiger と GoldSim の解析結果を図 2.3.2-6 に示す。隆起・侵食ケースでは、処分後 90 万年で、亀裂の透水量係数を一桁増加させるとともに、核種移行パラメータを酸化性条件に変化させた。比較の結果、最大値については概ね一致していることがわかった。しかし、それよりも低い線量のレベルにおいて、時間との関係で示される放出率の形状等に違いが見られた。これらの違いについては、個々の解析コードの評価の信頼性を向上させるため、今後も検討していく必要がある。

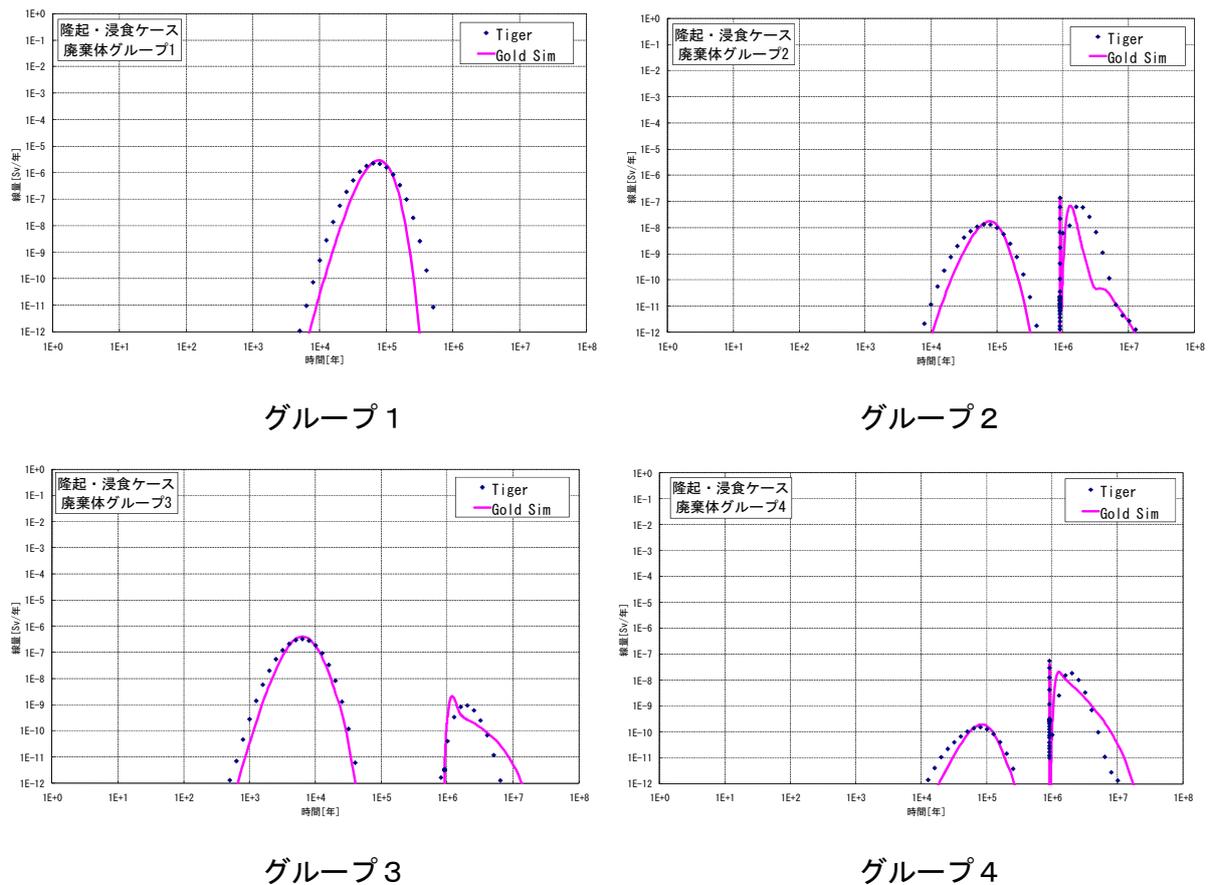


図 2.3.2-6 隆起・侵食ケース (1mm/y) における Tiger と GoldSim の線量比較結果

(4) 母岩の透水性の変動を考慮したケース

母岩の透水性をレファレンスの10倍とした場合の Tiger と GoldSim の解析結果を図 2.3.2-7 に示す。図からわかるように、Tiger と GoldSim による結果は、概ね一致した。

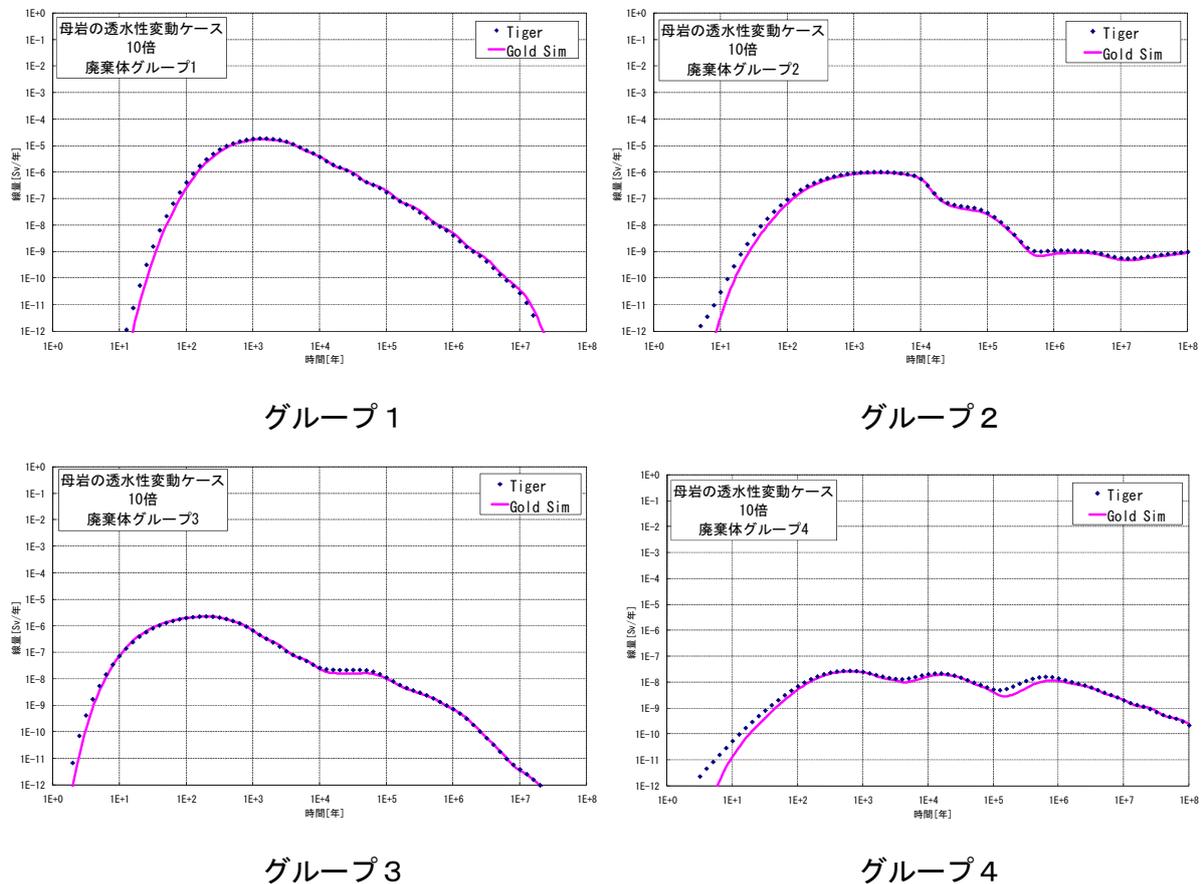


図 2.3.2-7 母岩の透水性変動ケース（10倍）における Tiger と GoldSim の線量比較結果

2.4. まとめ

GoldSim の解析結果と第2次 TRU レポートで使用された核種移行解析コード (Tiger) のベンチマーク解析を実施した。解析においては、2つのコードの違い (主要な違いは、GoldSim は離散化による解法と半解析解の2つの解法モデル、Tiger は有限差分法に基づくモデル) を把握した上で、それぞれの特徴や安全評価において想定されるケースを考慮して検討ケースを設定した。本ベンチマーク解析の結果、2つのコードの解析結果が同程度の結果を示したことから、GoldSim と Tiger の解析コードの信頼性について確認できたものとする。

参考文献

- Eary, T., Eshleman, J., Jakubowski, R. and Watson, A. (2008) : Applying Numerical Hydrochemical Models as Decision Support Tools for Mine Closure Planning, presented at Tailings and Mine Waste '08, October 19-22, 2008, Vail, Colorado.
- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 (2005a) : TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発とりまとめ－, JNC TY1400 2005-018, FEPC TRU-TR2-2005-02.
- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 (2005b) : TRU 廃棄物処分技術検討書 根拠資料集 分冊2, JNC TY1450 2005-001(2), FEPC TRU-TR2-2005-04.
- 原子力委員会 (2006) : 長半減期低発熱放射性廃棄物の地層処分の基本的考え方－高レベル放射性廃棄物との併置処分等の技術的成立性－, 原子力委員会 長半減期低発熱放射性廃棄物処分技術検討会.
- 原子力発電環境整備機構 (2009) : 公募関係資料 (特定放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域) 2009 年.
- 原子力発電環境整備機構 (2011a) : 地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性, NUMO-TR-10-03, 2011.
- 原子力発電環境整備機構 (2011b) : 地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性 ー付録資料ー, NUMO-TR-10-04, 2011.
- GoldSim Technology Group (2007) : GoldSim Contaminant Transport Module User's Guide, GoldSim Technology Group LLC.
- 核燃料サイクル開発機構 (1999) : 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－, 総論レポート, JNC TN 1400 99-020.
- 経済産業省 (2008) : 特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画, 平成20年3月14日閣議決定.
- Mathias, D.L., Go, S., Gee, K. and Lawrence, S. (2008) : Simulation Assisted Risk Assessment Applied to Launch Vehicle Conceptual Design, NASA Center for Aerospace Information (CASI) .
- Mattie, P. D., Knowlton, R.G. and Arnold, B.W. (2007) : A User's Guide to the GoldSim/BLT-MS Integrated Software Package: A Low-Level Radioactive Waste Disposal Performance Assessment Model. Sandia Report (SAND2007-1354) .
- 三原守弘, 大井貴夫 (2004) : パラメータの時間的変化を考慮した核種移行解析コード (TIGER) の開発, サイクル機構技報, No.22, pp.27-38.
- Mihara M, Sasaki R (2005) : RAdio-nuclides Migration Datasets (RAMDA) on Cement, Bentonite and Rock for TRU Waste Repository in Japan, JNC-TN8400 2005-027
- Rundle, Elaine (2009) : California Water Resources Uses CalLite Risk Simulation, Government Technology.
- Stauffer, P. H., Viswanathan, H.S., Pawar, R.J. and Guthrie, G.D. (2009) : A System Model for Geologic Sequestration of Carbon Dioxide, Environ. Sci. Technol., 2009, 43 (3) , pp 565–570.
- US DOE (2008) : Final Supplemental Environmental Impact Statement for a Geologic Repository for

the Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste at Yucca Mountain, Nye County, Nevada. Reports can be downloaded from DOE Web site ([hyperlink above](#)) . Details on the usage of GoldSim in YMP are given in FY01 Supplemental Science and Performance Analyses.

- Vermaak, J. and Lindsay, P. (2006) : A Numerical Model to Simulate the Effectiveness of Remedial Measures Aimed at Reducing Acidity and Metal Concentrations in the Ngakawau River and its Tributaries Near Stockton Coal Mine, West Coast, New Zealand, Proceedings of Water in Mining 2006, November 14-16, 2006, Brisbane, Australia.
- Volpe, J. and Voss, C. (2005) : Using Dynamic System Models for Water Use Accountability and Planning in Georgia, Proceedings of the 2005 Georgia Water Resources Conference, held April 25-27, 2005, at the University of Georgia.
- Vopálka, D., Lukin, D. and Vokál, A. (2006) : Modelling of processes occurring in deep geological repository — development of new modules in the GoldSim environment, Czechoslovak Journal of Physics, Volume 56, Supplement 4 / December, 2006.
- Wakasugi, K. and Makino (1999) : The Development of MESHNOTE Code for Radionuclide Migration in the Near Field, JNC TN8400 99-095.
- Zhang, Y., Oldenburg, C.M., Finsterle, S., and Bodvarsson, G.S. (2006) : System-Level Modeling For Geological Storage Of CO₂, PROCEEDINGS, TOUGH Symposium 2006, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, May 15–17, 2006.

3. 廃棄体物量の変動の処分場への影響検討

3.1. 目的

処分対象の廃棄体物量については、現時点で実用可能な廃棄体化技術を基に算出を行っているが、ほとんどの廃棄体がこれから製作されるものであり、廃棄体化施設の建設もまだ行われていない。そのため、今後の計画の見直し等により、物量の変動の可能性がある。

このような廃棄体物量の変動が処分場へ与える影響について検討する。

3.2. 廃棄体物量変動の考え方

廃棄体発生量については、処分場の施設設計で用いる予定の物量（19,018m³）（原子力発電環境整備機構，2011a：原子力発電環境整備機構，2011b）をケース0とし、これを表3.2-1に示す4つのグループに分け、それぞれのグループの物量を10%増加させたケース1～4を設定する。各ケースにおける想定廃棄体量を表3.2-2に示す。

表 3.2-1 廃棄体のグループ化

グループ	主な廃棄体	グルーピングの根拠
1	廃銀吸着材のセメント混練固化体	人工バリア，天然バリアへの収着性が低い I-129 を多く含む廃棄体
2	ハル・エンドピースの圧縮体 返還廃棄体	人工バリア，天然バリアへの収着性が低い C-14 を多く含み，発熱量の比較的大きい廃棄体
3	低レベル濃縮廃液のアスファルト固化体 およびモルタル充填固化体など	硝酸塩を多く含み，核種の収着性・溶解度へ影響を及ぼす可能性のある廃棄体
4	可燃，難燃，不燃廃棄物のモルタル充填固化体など	その他の廃棄体

表 3.2-2 各ケースにおける廃棄体量

グループ	ケース 0	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
1	335	369	335	335	335
2	6,083	6,083	6,693	6,083	6,083
3	5,492	5,492	5,492	6,042	5,492
4	7,108	7,108	7,108	7,108	7,820
合計	19,018	19,052	19,628	19,568	19,730

XXX：物量を10%増加させた部分

(単位：m³)

3.3. 物量変動による核種移行解析の方法と結果

ケース1～4における核種移行解析について Tiger を使用して行った。計算の条件としては、2.2.4 で使用した最終処分計画のレファレンスケースを基に、物量増加（10%）に比例して変更となる部分（総インベントリ量、坑道長等）を考慮した条件を用いて評価を行った。評価に用いた初期の核種量を表 3.3-1 に示す。また、坑道長については後述の図 3.4.3-1～3.4.3-4 を参照されたい。

表 3.3-1 各ケースにおける初期の核種量

核種	[Bq]				
	ケース0	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
C-14	6.0E+14	6.0E+14	6.6E+14	6.0E+14	6.0E+14
Cl-36	9.5E+12	9.5E+12	1.0E+13	9.5E+12	9.5E+12
Co-60	2.0E+18	2.0E+18	2.2E+18	2.0E+18	2.0E+18
Ni-59	7.5E+15	7.5E+15	8.3E+15	7.5E+15	7.5E+15
Ni-63	1.3E+18	1.3E+18	1.5E+18	1.3E+18	1.3E+18
Se-79	5.4E+12	5.4E+12	5.7E+12	5.4E+12	5.6E+12
Sr-90	9.3E+17	9.3E+17	9.9E+17	9.3E+17	9.7E+17
Zr-93	3.9E+14	3.9E+14	4.3E+14	3.9E+14	3.9E+14
Nb-94	2.6E+15	2.6E+15	2.9E+15	2.6E+15	2.6E+15
Mo-93	5.6E+13	5.6E+13	6.1E+13	5.6E+13	5.6E+13
Tc-99	8.0E+14	8.0E+14	8.7E+14	8.0E+14	8.2E+14
Pd-107	1.1E+12	1.1E+12	1.2E+12	1.1E+12	1.2E+12
Sn-126	7.7E+12	7.7E+12	8.1E+12	7.7E+12	8.1E+12
I-129	6.0E+13	6.5E+13	6.0E+13	6.0E+13	6.0E+13
Cs-135	6.0E+12	6.0E+12	6.4E+12	6.0E+12	6.3E+12
Cs-137	1.3E+18	1.3E+18	1.3E+18	1.3E+18	1.3E+18
Cm-244	3.2E+16	3.2E+16	3.3E+16	3.2E+16	3.3E+16
Pu-240	4.5E+15	4.5E+15	4.8E+15	4.5E+15	4.7E+15
U-236	1.4E+12	1.4E+12	1.5E+12	1.4E+12	1.4E+12
Th-232	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Ra-228	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Th-228	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Cm-245	2.6E+12	2.6E+12	2.7E+12	2.6E+12	2.7E+12
Pu-241	9.8E+17	9.8E+17	1.0E+18	9.9E+17	1.0E+18
Am-241	1.3E+16	1.3E+16	1.3E+16	1.3E+16	1.4E+16
Np-237	5.7E+12	5.7E+12	6.0E+12	5.7E+12	6.1E+12
U-233	5.3E+09	5.3E+09	5.9E+09	5.3E+09	5.3E+09
Th-229	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Cm-246	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Pu-242	1.8E+13	1.8E+13	1.9E+13	1.8E+13	1.9E+13
U-238	1.3E+12	1.3E+12	1.3E+12	1.3E+12	1.3E+12
U-234	1.6E+13	1.6E+13	1.7E+13	1.6E+13	1.7E+13
Th-230	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Ra-226	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Pb-210	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Am-243	1.9E+15	1.9E+15	2.1E+15	1.9E+15	1.9E+15
Pu-239	3.1E+15	3.1E+15	3.2E+15	3.1E+15	3.2E+15
U-235	1.2E+11	1.2E+11	1.3E+11	1.2E+11	1.2E+11
Pa-231	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Ac-227	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00

各ケースとも、物量の増加に比例して各グループの最大線量は増加しているが、ケース1のI-129の最大線量がグループ1～4の最大線量の合計値（以下、「総線量」という）の80%以上を占めており、グループ2～4の物量が10%程度増加しても総線量にはほとんど影響がなかった。以下に詳細を示す。

3.3.1. ケース1（グループ1の物量を10%増加）

評価結果を、表3.3.1-1に示す。

表 3.3.1-1 ケース1 評価結果（最大線量）

グループ	ケース0	ケース1	支配核種
1	2.3×10^{-6}	2.6×10^{-6}	I-129
総線量	2.3×10^{-6}	2.6×10^{-6}	I-129

（単位：Sv/y）

- ・グループ1のI-129の線量が増加したことにより、総線量も10%程度増加した。

3.3.2. ケース2（グループ2の物量を10%増加）

評価結果を、表3.3.2-1に示す。

表 3.3.2-1 ケース2 評価結果（最大線量）

グループ	ケース0	ケース2	支配核種
2	1.4×10^{-7}	1.5×10^{-7}	C-14
総線量	2.3×10^{-6}	2.3×10^{-6}	I-129

（単位：Sv/y）

- ・グループ2のC-14の線量が増加したことにより、グループ2の最大線量が10%程度増加するが、グループ1の最大線量（ 2.3×10^{-6} Sv/y）が大きいため、総線量にほとんど変化はない。

3.3.3. ケース3（グループ3の物量を10%増加）

評価結果を、表3.3.3-1に示す。

表 3.3.3-1 ケース3 評価結果（最大線量）

グループ	ケース0	ケース3	支配核種
3	2.4×10^{-7}	2.6×10^{-7}	I-129
総線量	2.3×10^{-6}	2.3×10^{-6}	I-129

（単位：Sv/y）

- ・グループ3のI-129の線量が増加したことにより、グループ3の最大線量が10%程度増加するが、グループ1の最大線量（ 2.3×10^{-6} Sv/y）が大きいため、総線量にほとんど変化はない。

3.3.4. ケース4（グループ4の物量を10%増加）

評価結果を、表3.3.4-1に示す。

表 3.3.4-1 ケース4 評価結果（最大線量）

グループ	ケース0	ケース4	支配核種
4	1.8×10^{-9}	2.0×10^{-9}	C-14
総線量	2.3×10^{-6}	2.3×10^{-6}	I-129

（単位：Sv/y）

- ・グループ4のC-14の線量が増加したことにより、グループ4の最大線量が10%程度増加するが、グループ1の最大線量（ 2.3×10^{-6} Sv/y）が大きいため、総線量にほとんど変化はない。

3.4. 処分施設設計への影響検討

3.4.1. 検討の目的

最終処分計画のレファレンスケース（19,018m³）から、グループ1～4のうちの特定期間の廃棄体物量をそれぞれ10%増加させた4ケースについて、坑道の設計、熱影響の考慮、操業・経済性等への影響を確認する。

3.4.2. 検討の前提条件

(1) 物量変動前の標準の廃棄体本数

グループ及びグループ内細分別の廃棄体形状、本数、パッケージ内収納本数、パッケージ数を表3.4.2-1に示す。

グループ内の廃棄体内容器及び発熱性状の違いからグループ2は「キャニスタ（ハル・エンドピース）」、「キャニスタ（仏国返還、固型物収納体）」及び「キャニスタ（仏国返還、低レベル廃液ガラス固化体）」の3種類に、グループ4は「ドラム缶」、「角形容器」、「ハル缶」及び「インナーバレル」の4種類に細分した。

表 3.4.2-1 グループ別廃棄体形状、本数等（原子力発電環境整備機構，2011a）

グループ	廃棄体	本数	パッケージ内収納本数	パッケージ数
1	200L ドラム缶	1,673	4	419
2	キャニスタ（ハル・エンドピース）	27,522	4	6,881
	キャニスタ（仏国返還、固型物収納体）	3,780	4	945
	キャニスタ（仏国返還、低レベル廃液ガラス固化体）	30	4	8
3	200L ドラム缶	27,441	4	6,861
4	200L ドラム缶	28,663	4	7,166
	角型容器	287	1	287
	ハル缶	54	2	27
	インナーバレル	1,134	2	567

(2) サイト環境条件と断面形状

サイト環境条件として硬岩（結晶質岩）と軟岩（堆積岩）、断面形状として円形断面と幌型断面があるが、原環機構の検討と同時に、原子力機構で性能評価の検討が実施されることから、第2次 TRU レポート（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）や「地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性」（原子力発電環境整備機構，2011a：原子力発電環境整備機構，2011b）の性能評価で対象としている硬岩（結晶質岩）かつ円形断面のみとした。

(3) 硬岩（結晶質岩）かつ円形断面のレイアウト

各坑道の断面を図 3.4.2-1 に示す。平面レイアウトを図 3.4.2-2 に示す。

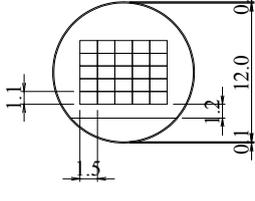
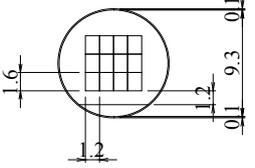
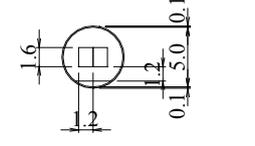
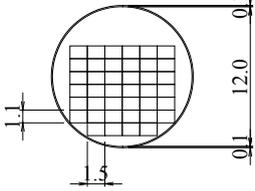
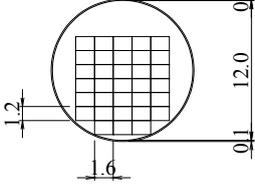
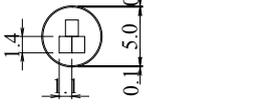
グループ 1	<p>パッケージ：□1.5m×H1.1m (廃棄体：200L ドラム缶)</p>	 <p>25 パッケージ/断面</p>
グループ 2	<p>パッケージ：□1.2m×H1.6m (廃棄体：キャニスタ (ハル・エンドピース))</p>	 <p>12 パッケージ/断面</p>
	<p>パッケージ：□1.2m×H1.6m (廃棄体：キャニスタ (仏国返還))</p>	 <p>2 パッケージ/断面</p>
グループ 3, 4	<p>パッケージ：□1.5m×H1.1m (廃棄体：200L ドラム缶)</p>	 <p>40 パッケージ/断面</p>
	<p>角形容器：□1.6m×H1.2m</p>	 <p>33 パッケージ/断面</p>
	<p>パッケージ：1.1m×1.9m×H1.4m (廃棄体：インナーバレル, ハル缶)</p>	 <p>3 パッケージ/断面</p>

図 3.4.2-1 標準の坑道断面仕様（原子力発電環境整備機構，2011a）

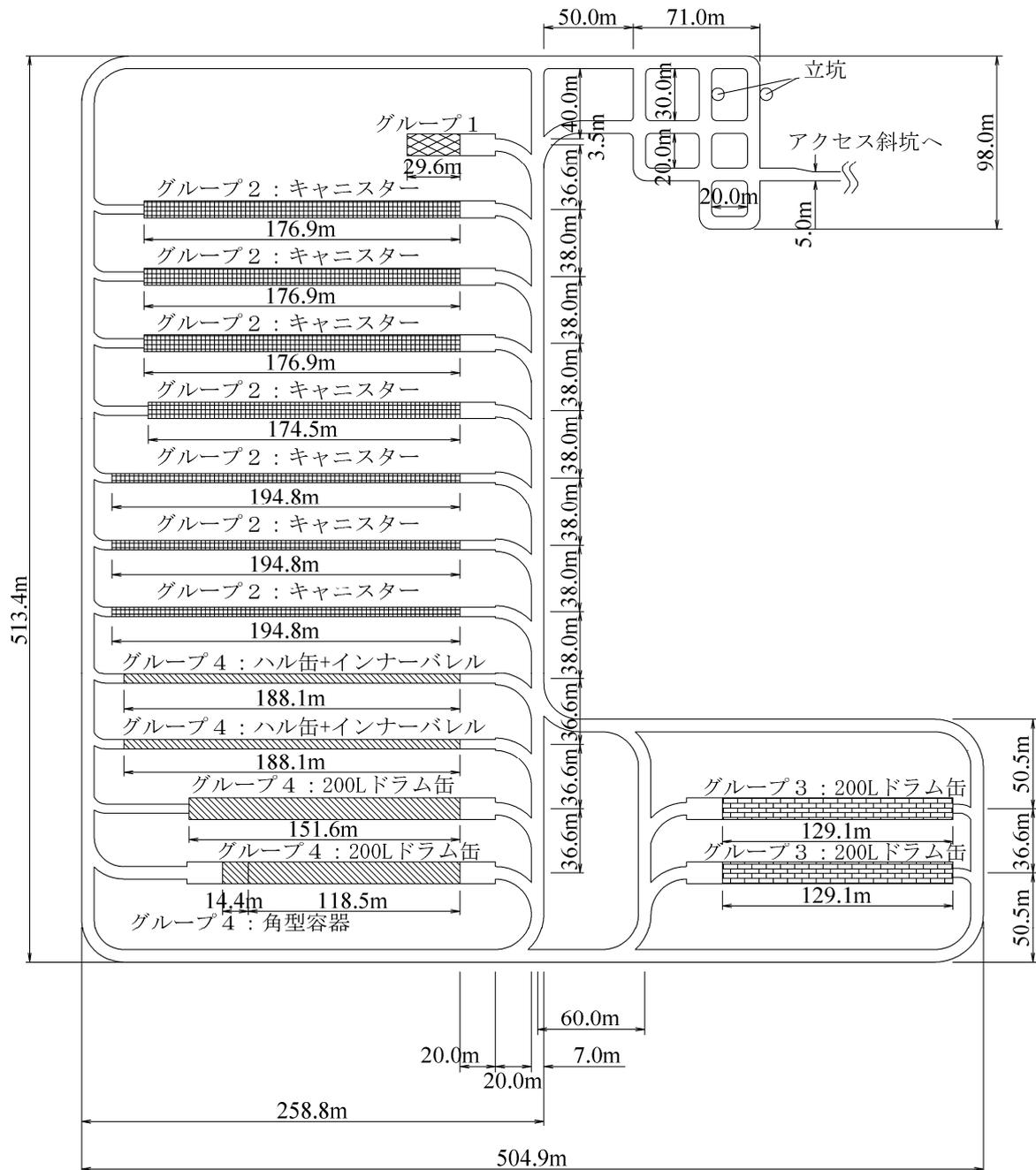


図 3.4.2-2 標準の平面レイアウト (原子力発電環境整備機構, 2011a)

3.4.3. 坑道設計への影響

(1) 「10%増加」の設定方法

表 3.4.2-1 で示した, グループ及びグループ内細分別ごとに廃棄体本数を 10%増加させ (小数点以下は切り上げ), その本数に応じた廃棄体パッケージ数 (小数点以下は切り上げ) を求めた結果を表 3.4.3-1 に示す。

表 3.4.3-1 廃棄体及び廃棄体パッケージの 10%増しの数量

グループ	廃棄体	本数	パッケージ数
1	200L ドラム缶	1,841	461
2	キャニスタ (ハル・エンドピース)	30,275	7,569
	キャニスタ (仏国返還, 固型物収納体)	4,158	1,040
	キャニスタ (仏国返還, 低レベル廃液ガラス固化体)	33	9
3	200L ドラム缶	30,186	7,547
4	200L ドラム缶	31,530	7,883
	角型容器	316	316
	ハル缶	60	30
	インナーバレル	1,248	624

(2) 処分坑道諸元の変更

目的である「グループ 1~4 のうちの特定グループの物量をそれぞれ 10%増加させた 4 ケース」については、下記のように断面内定置数は変えずに坑道長を延ばすことで対応した。

グループ 1, 3 はその合計に対するパッケージ数量を求め、断面内定置数は変えずに次項の方法で必要定置坑道長を求めた。グループ 2, 4 は細分別に 10%増加廃棄体量に対するパッケージ数量を求め、断面内定置数は変えずに次項の方法で必要定置坑道長を求めた。

10%増加への対応として坑道数を増やす選択肢もあるが、今回は各坑道長さを延長することとする。グループ 2 の仏国返還廃棄物などの坑道長に余裕が無いが、その場合平面レイアウト左下の 258.8m (図 3.4.2-2 参照) を延長した。

(3) 坑道長の設定方法

次のように、第 2 次 TRU レポートと同じ方法とした。

- ・奥行き方向にパッケージ同士は間を空けず定置する。
- ・廃棄体が多い場合は定置部長さが概ね 200m 程度に収まるように、複数の坑道とする。
- ・グループ 1, 2 は定置部両端に厚さ 2.0m の緩衝材を設置する。
- ・廃棄体定置部分は廃棄体を搬入する連絡坑道や廃棄体を搬入しない連絡坑道で主要坑道に接続する。
- ・廃棄体を搬入する連絡坑道に接する処分坑道には 20m の作業エリアを設ける。
- ・搬入しない連絡坑道に接する処分坑道端部の坑道長方向に厚さ 0.1m の端部支保工を設置する。グループ 2, 4 の一部の連絡坑道の断面が処分坑道断面より大きい場合、端部支保工は無い。

(4) 変更後の平面レイアウト

以上のような方針で作成した地下施設全体レイアウトを示す。以下の 4 種類である。

- ・グループ 1 のみ廃棄体量を 10%増加させた場合 (図 3.4.3-1)
- ・グループ 2 のみ廃棄体量を 10%増加させた場合 (図 3.4.3-2)
- ・グループ 3 のみ廃棄体量を 10%増加させた場合 (図 3.4.3-3)
- ・グループ 4 のみ廃棄体量を 10%増加させた場合 (図 3.4.3-4)

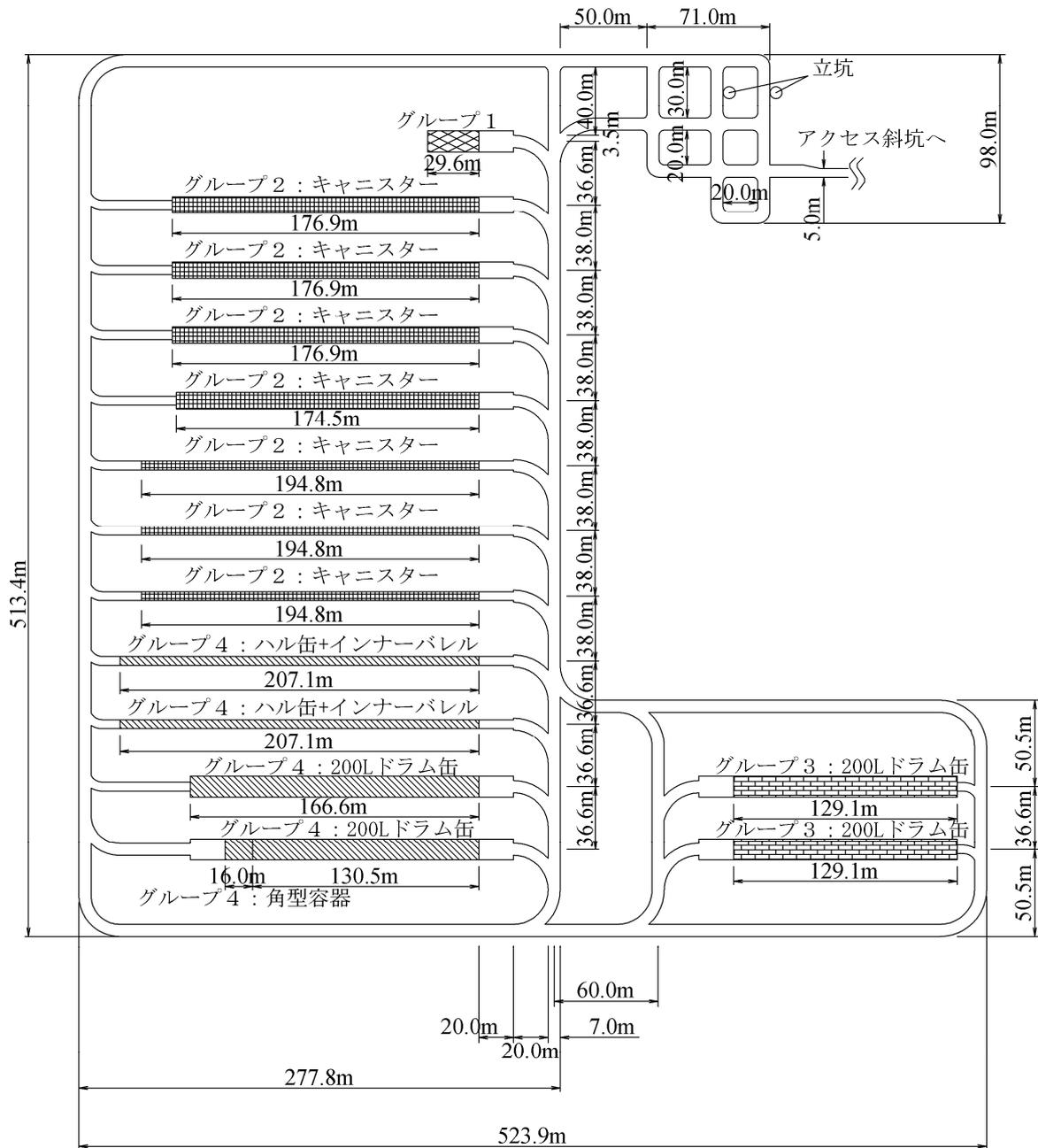


図 3.4.3-4 グループ 4 のみ廃棄体量を 10%増加させた地下施設レイアウト

3.4.4. 熱影響の考慮

もともと、熱影響の考慮に関する解析は断面2次元で検討しており（原子力発電環境整備機構，2011a），上記のように断面及び坑道離間距離を変えないので，影響は無い。

3.4.5. 建設・操業・閉鎖への影響

廃棄体量増に対する，坑道長，掘削量，緩衝材量等の増加を見積もった。また，工程への影響を簡単に把握した。ここでは，最も物量変動が大きい「グループ2のみ廃棄体量を10%増加させた場合」について検討した。

(1) 標準の主要数量

廃棄体物量を変動させる前の標準での掘削量などの主要数量を以下に示す。

表 3.4.5-1 処分坑道の掘削量（原子力発電環境整備機構，2011b）

		延長(m)	断面積(m ²)	体積(m ³)
グループ2	ハル・エントピース	785.2	70.9	55,671
	仏国返還	644.4	21.2	13,661
グループ2小計		1429.6		69,332
全グループ合計		2,538		159,085

表 3.4.5-2 主要坑道等の掘削量（原子力発電環境整備機構，2011b）

	延長(m)	断面積(m ²)	体積(m ³)
主要坑道	2,370	40.5	95,985
連絡坑道 I *	503	40.5	20,372
連絡坑道 II *	251	23.6	5,924
坑底施設	465	40.5	18,833
合計	3,589		141,113

* 処分坑道群を取り囲んでいるのが主要坑道であり，処分坑道と主要坑道を結ぶのが連絡坑道である。連絡坑道 I は廃棄体を搬入する坑道で，II はその他の坑道である。

表 3.4.5-3 掘削量合計（原子力発電環境整備機構，2011b）

	延長(m)	体積(m ³)
アクセス	16,328	429,282
主要・連絡坑道等	3,589	141,113
処分坑道	2,538	159,085
合計	22,455	729,480

表 3.4.5-4 処分坑道の緩衝材、充填材量（原子力発電環境整備機構，2011b）

		坑道長 (m)		断面積(m ²)		体積(m ³)		
		端部	一般部	緩衝材 端部	緩衝材 一般部	緩衝材 材端部	緩衝材 一般部	緩衝材 合計
グループ 2	ハル・エントピース	16.0	688.8	58.3	35.3	933	24,315	25,247
	仏国返還	12.0	572.4	16.9	13.1	203	7,498	7,701
グループ 2 小計		28.0	1261.2			1,136	31,813	32,948
全グループ合計		32.0	2,205.4			1,478	32,940	34,418

(2) 廃棄体量変動後の数量

坑道延長の変更を前述の図 3.4.3-2 より読み取り、それに応じた数量の変更について前項を参照して求めた。

まず処分坑道の延長や掘削量の増分及びこれらが変更前のグループ 2 の数量に対する比率を表 3.4.5-5 に示す。延長増分及び掘削量の増分が処分坑道全体の坑道長 2,538m、掘削量 159,085m³に対する比率は 5%、4%程度である。

表 3.4.5-5 処分坑道グループ 2 の増分

	延長(m)			断面積(m ²)	増分体積(m ³)
	変更後	変更前	増分		
ハル・エントピース	853.6	785.2	68.4	70.9	4,850
仏国返還	702.0	644.4	57.6	21.2	1,221
合計	1,555.6	1,429.6	126.0		6,071
対変更前比率			8.81%		8.76%

処分坑道の延長増に伴い、連絡坑道Ⅱや主要坑道が若干延びる。坑道延長と掘削量の増分を表 3.4.5-6 に示す。増分体積が主要坑道等の全体掘削量 141,113m³に対する比率は 3%程度である。

表 3.4.5-6 主要坑道等の増分

	延長(m)			断面積(m ²)	増分体積(m ³)
	変更後	変更前	増分		
主要坑道	2,408.4	2,370	38.4	40.5	1,555
連絡坑道Ⅱ	336.2	251	85.2	23.6	2,011
合計	2,744.6	2,621	123.6		3,566

坑道延長増に伴い坑道一般部の緩衝材が増える。端部は変わらない。増分及びこれらが変更前のグループ 2 の数量に対する比率を表 3.4.5-7 に示す。増分体積が全体緩衝材 34,418m³に対する比率は 9%程度である。

表 3.4.5-7 処分坑道グループ2の緩衝材量増分

	一般部延長(m)			断面積(m ²)	増分体積(m ³)
	変更後	変更前	増分		
ハル・エンドピース	757.2	688.8	68.4	35.3	2,415
仏国返還	630	572.4	57.6	13.1	755
合計	1387.2	1261.2	126.0		3,169
対変更前比率			9.99%		9.62%

(3) 工程への影響

廃棄体量変更前の標準レイアウトを前提とした工程検討例を図 3.4.5-1 に示す。硬岩、深度 1,000m、円形断面の例である。

最も時間がかかる斜坑の地上からの掘進と並行して、精密調査段階ですでに構築済みの立坑 2 本を用いて地下の水平坑道の掘削に着手する。まず、主要坑道を 2 方向から掘り進め接続して周回坑道を完成し各処分坑道への寄り付となる連絡坑道を掘削したあと、処分坑道の掘削を 2 断面ずつ掘削する。

前項で示したように、グループ 2 の廃棄体量のみ 10%増加させた場合には、処分坑道の他に主要坑道、連絡坑道の施工量も若干増加する。図では主要坑道→連絡坑道→処分坑道グループ 2 の作業が一連であるので、掘削機などの能力が同じであれば、施工期間が主要・連絡坑道部分で若干、処分坑道部分で約 3 年の 1 割弱、全体で数ヶ月程度の増加が想定される。第 2 次 TRU レポート では建設期間 10 年を見込んでいるが、この中には収まりそうである。

上記はアクセス坑道による掘削土搬出能力が十分である場合に成立する。掘削土は 2 本の立坑及び斜坑を用いて搬出する。斜坑の搬出能力には十分余裕があるため、上記のグループ 2 のみ 10%増加した場合の掘削土増量程度は十分対応可能である。

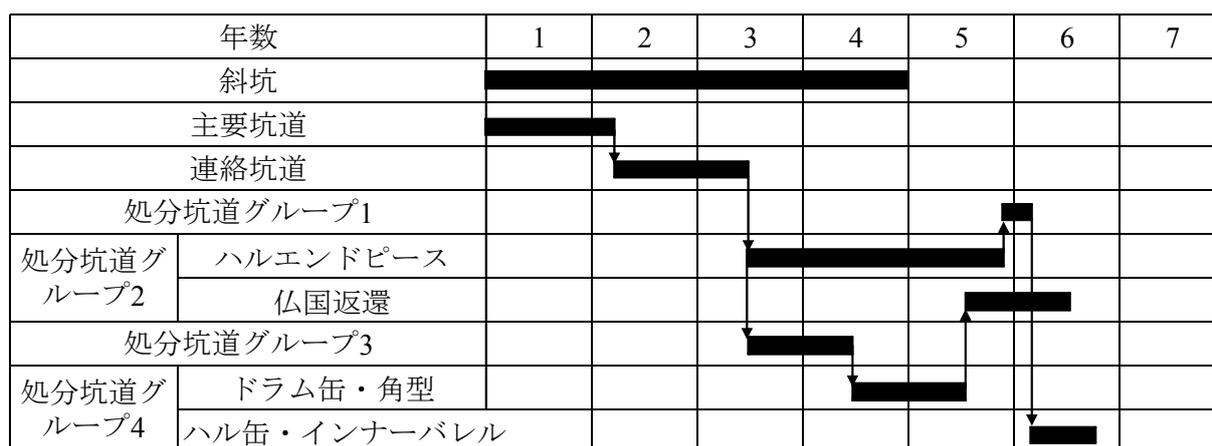


図 3.4.5-1 坑道掘削工事の工程の例（硬岩、深度 1,000m）（原子力発電環境整備機構，2011a）

第 2 次 TRU レポートと同じ「操業期間：25 年」「年間運転日数：200 日／年」の条件で算出した廃棄体数量の 1 年あたり及び 1 日あたりの搬送・定置に関する取り扱い数が表 3.4.5-8 である。地下へ搬送される廃棄体数が多いのは、グループ 2 のキャニスタ、グループ 3 のドラム缶、グループ 4 のドラム缶の 3 種類であり、1 日 1 パッケージ以上の数量がある。グループ 2 のパ

パッケージ数を10%増やした場合、1年当たり、1日当たりの取り扱い数は、

$$8,618 \text{ パッケージ} / 25 \text{ 年} = 345 \text{ パッケージ} / \text{年}, \quad / 200 \text{ 日} = 1.7 \text{ パッケージ} / \text{日}$$

であり、もともと切り上げていたパッケージ数2以下であるため、大きな影響は無いと考えられる。

表 3.4.5-8 廃棄体及びパッケージの総数並びに1年及び1日あたりの取扱数
(原子力発電環境整備機構, 2011a)

廃棄体形状		総数		1年あたり		1日あたり	
		廃棄体	パッケージ	廃棄体	パッケージ	廃棄体	パッケージ
グループ 1	200L ドラム缶	1,673	419	67	17	—	—
グループ 2	キャニスタ	31,332	7,834	1,253	314	7	2
グループ 3	200L ドラム缶	27,441	6,861	1,098	275	6	2
グループ 4	200L ドラム缶	28,663	7,166	1,147	287	6	2
	角型容器	287	287	12	12	—	—
	ハル缶	54	27	3	2	—	—
	インナーバレル	1,134	567	46	23	—	—
単純な合計		90,584	23,161	3,628	931		
(参考)高レベル		40,000	40,000	1,000	1,000	5	5

注) 1未満の場合は「—」を記載。1以上で整数に満たない部分は切り上げている。角型容器はパッケージにも廃棄体と同じ値を記載している。

「地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性」(原子力発電環境整備機構, 2011a) では、軟岩、深度 500m の場合について埋め戻し期間を試算している(表 3.4.5-9)。大まかには立坑の期間が殆どを占め、次に斜坑及び主要坑道等の期間であり、処分坑道の期間は比較的短い。硬岩、深度 1,000m でも事情は同じである。したがって、グループ 2 の廃棄体量を 10%増やしても大きな影響は無いと考えられる。

以上のように、「グループ 2 のみ廃棄体量を 10%増加させた場合」の建設・操業・閉鎖工程へ与える影響は大きくないと考えられる。他のグループを増加させるケースはこの場合より変動量が小さいため、さらに影響は小さいと考えられる。

表 3.4.5-9 埋め戻し期間の試算(軟岩、深度 500m、円形断面の例)

	埋戻し断面積	施工速度	延長	所要日数
立坑	28.3m ²	0.67(m/日)	1,044 m	1,558 日(52 月)
斜坑	22.3m ²	48 (m/日)	5.953m	124 日(4.1 月)
主要・連絡坑道 I, 坑底施設	38.8m ²	27 (m/日)	3,280 m	121 日(4.0 月)
処分坑道グループ 1 定置部	14.7m ²	72 (m/日)	29.5 m	0.4 日
処分坑道グループ 2 (ハル・エンドピース) 定置部	7.9m ²	134 (m/日)	426.0m	3.2 日

3.4.6. 経済性への影響

3.4.5 で求めた変更数量を基に増分費用を概算した。なお、標準とすべき費用については、3.4.2 で示した今回検討の前提条件である標準の平面レイアウトに対するものが無いため、下記に示す 2008 年の最終処分計画（経済産業省，2008）に基づく拠出金算定のための費用を標準とする。このときのレイアウトは、3.4.2 のレイアウトとは若干異なるものの、廃棄体量は同じであるため、処分費用に大幅な差は無いと考えられる。

(1) 標準の処分費用の概要

最終処分計画（経済産業省，2008）に基づく拠出金算定のための費用概要は表 3.4.6-1 のとおりである。影を付けた部分が今回の検討に関連する項目であり、合計は 3,591 億円である。

表 3.4.6-1 処分事業費の全体概要（硬岩，深度 1,000m の例）（資源エネルギー庁，2008）

項目	費用（億円）
技術開発費	661
調査費及び用地取得費	1,001
設計及び建設費	1,566
操業費	1,922
解体及び閉鎖費	103
モニタリング費	735
プロジェクト管理費	1,586
消費税	278
合計	7,871

増分費用を正確に算定するには、これらの費用の内訳の分析が必要であるが、ここでは簡単に増分数量の坑道全体に対する割合で、増分費用を推定する。

3.4.5 で述べた、グループ 2 の廃棄体量 10%増に伴う処分坑道、主要坑道等の延長増分、体積増分は下記に示すようにアクセス坑道等も含めた全坑道の全長（約 22km）、全体積（約 73 万 m³）の 1%程度である。

したがって、この比率（1%）で関連する費用も増加すると仮定すると、高々 36 億円程度の増加であり、事業費全体に対しては、0.5%程度の増加である。

表 3.4.6-2 グループ 2 の廃棄物量 10%増に伴う増分の坑道全体に対する割合

	増分延長(m)	増分体積(m ³)
処分坑道合計	126.0	6,071
主要連絡坑道合計	123.6	3,566
総計	249.6	9,637
地下坑道全体に対する割合	／22,455＝1.11%	／729,480＝1.32%

3.5. まとめ

「地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性」（原子力発電環境整備機構，2011a：原子力発電環境整備機構，2011b）における既存の処分概念（第2次TRU レポート（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）の処分概念と同等）に基づき，廃棄体量が10%増加した場合の処分場の性能，設計，建設・操業・閉鎖への影響について検討を行った。

性能については，最大総線量は，グループ2～4の廃棄体量が10%程度増加しても，現在の設計の範囲内で十分対処できることが確認できた。また，グループ1の廃棄体量が増加する場合は，増加に比例して総線量が増加することになるため，注意が必要であることがあらためて確認された。

設計，建設・操業・閉鎖については，各グループの廃棄体量がそれぞれ10%増加した場合の地下施設レイアウトを，性能評価で対象とした硬岩，深度1,000m，円形断面について示し，最も影響が大きいと考えられるグループ2が増加した場合について，建設規模・工程，操業工程，埋戻し工程及び経済性への影響を概算した。掘削量や緩衝材量の規模は当初の全体量の数%の増加に収まり，建設工程は数ヶ月の増加，操業工程・埋戻し工程は殆ど変化無し，経済性は全事業費の1%以下の増加に収まることが想定された。

以上のことより，廃棄体量が10%程度増加した場合でも，処分場の性能，設計，建設・操業・閉鎖へ与える影響は小さいことを確認した。

この結果より，廃棄物を廃棄体へ処理する減容率，充填率等には余裕があると考えられ，原子力機構では廃棄体化のコスト削減のための技術開発の選択肢をより広げることが可能となると考えられる。

なお，本検討は，上記の既存の処分概念に基づき検討したものである。今後，新たな知見や技術開発の結果が得られた場合は，それらを取り入れ，対応していく必要があると考えられる。

参考文献

電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構（2005）：TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発とりまとめ－，JNC TY1400 2005-018，FEPC TRU-TR2-2005-02.

原子力発電環境整備機構（2011a）：地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性，NUMO-TR-10-03，2011.

原子力発電環境整備機構（2011b）：地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性 ー付録資料ー，NUMO-TR-10-04，2011.

経済産業省（2008）：特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画，平成20年3月14日閣議決定.

資源エネルギー庁（2008）：TRU 廃棄物の最終処分費用，拠出金単価の算定について

4. おわりに

原環機構と原子力機構の「地層処分低レベル放射性廃棄物」の安全評価に用いる解析コードの信頼性検証を目的として、両者が所有している解析コード（GoldSim と Tiger）のベンチマークテストを行った。数種類の解析ケースで評価した結果、両解析コードの結果は概ね一致し、どちらのコードを使用しても妥当な結果を得られることが確認できた。また、評価において設定した解析ケースは、安全評価で想定されるシナリオにおいて想定されるパラメータの変動やそれに対応したモデルの利用を含むものである。それらの結果を両者で共有できたことは、今後、多様な条件に対する安全評価において、両コードの評価の信頼性を確保することに役立つものである。

さらに、「地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性」（原子力発電環境整備機構，2011a：原子力発電環境整備機構，2011b）における既存の処分概念に基づき評価した場合、10%程度の廃棄体量増加に対して、原環機構が進めている現状の処分場設計に大きな影響がないことが確認できた。

謝 辞

GoldSim を用いた解析については、日揮株式会社 千葉 保様，中川 辰雄様にご協力をいただいた。また、「3.4 処分施設設計への影響検討」については、鹿島建設 高村 尚様にご協力をいただいた。ここに深く感謝申し上げます。