

## 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)

A Study for the Safety Evaluation of Geological Disposal of TRU Waste and Influence on Disposal Site Design by Change of Amount of TRU Waste (Joint Research)

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 植田 浩義 大井貴夫 兵藤 英明

Makoto HASEGAWA, Hitoshi KONDO, Gento KAMEI, Fumio HIRANO Morihiro MIHARA, Kuniaki TAKAHASHI, Hideyuki FUNABASHI, Shinji KAWATSUMA Hiroyoshi UEDA, Takao OHI and Hideaki HYODO

> バックエンド推進部門 バックエンド推進室

Nuclear Cycle Backend Co-ordination Office Nuclear Cycle Backend Directorate

February 2011

**Japan Atomic Energy Agency** 

日本原子力研究開発機構



本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<a href="http://www.jaea.go.jp">http://www.jaea.go.jp</a>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課 7319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 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)

# 日本原子力研究開発機構 バックエンド推進部門 バックエンド推進部

長谷川 信,近藤 等士,亀井 玄人+1,平野 史生+1,三原 守弘\*1,高橋 邦明+2, 船橋 英之+2,川妻 伸二+3,植田 浩義\*2,大井 貴夫\*2,兵藤 英明\*2

(2011年1月25日受理)

TRU 廃棄物の地層処分の安全評価においては、廃棄物発生者側が所有している情報と処分者側が所有している情報を共有し、合理的な処分に向けた検討を行っていくことは極めて重要である。また、研究開発機関と処分実施主体が処分の検討を行う際に両者が所有している情報を共有することも重要となる。原子力発電環境整備機構(以下、「原環機構」という。)と日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」という。)は、協力協定に基づき、2010年度から「TRU 廃棄物の処分に係る検討会」を設置し、TRU 廃棄物の処分のための検討を実施している。

今回の検討では、原子力機構が開発した Tiger コードと原環機構が今後の安全評価に使用を予定している GoldSim コードについて、同一条件でのベンチーマーク解析を行い、両者の結果を比較し、双方の信頼性について確認を行った。比較の結果、2つのコードの解析結果が同程度のものであったことから、両者の解析コードの信頼性について確認ができたものと考える。

また、処分場へ処分する想定物量(約 19,000m³)が変動した場合の処分場設計への影響について検討を行った。その結果、原環機構報告書「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」の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。

本研究は、日本原子力研究開発機構と原子力発電環境整備機構殿の協力協定に基づいて実施した「TRU 廃棄物の処分に係る検討会」の成果である。本報告書は、原子力発電環境整備機構 技術報告書 NUMO-TR-10-05 の内容と同じものである。

原子力科学研究所(駐在): 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

+1 地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット, +2 バックエンド推進部門 バックエンド技術開発ユニット, +3 経営企画部 (2010 年 8 月までバックエンド推進部門 バックエンド推進室), \*1 経済産業省へ出向中 (2010 年 6 月まで地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット), \*2 原子力発電環境整備機構 技術部

A Study for the Safety Evaluation of Geological Disposal of TRU Waste and Influence on Disposal Site Design by Change of Amount of TRU Waste (Joint Research)

Makoto HASEGAWA, Hitoshi KONDO, Gento KAMEI<sup>+1</sup>, Fumio HIRANO<sup>+1</sup>,
Morihiro MIHARA<sup>\*1</sup>, Kuniaki TAKAHASHI<sup>+2</sup>, Hideyuki FUNABASHI<sup>+2</sup>,
Shinji KAWATSUMA<sup>+3</sup>, Hiroyoshi UEDA<sup>\*2</sup>, Takao OHI<sup>\*2</sup> and Hideaki HYODO<sup>\*2</sup>

Nuclear Cycle Backend Co-ordination Office
Nuclear Cycle Backend Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 25, 2011)

In the safety evaluation of the geological disposal of the TRU waste, it is extremely important to share the information with the Research and development organization (JAEA: that is also the waste generator) by the waste disposal entrepreneur (NUMO). In 2009, NUMO and JAEA set up a technical commission to investigate the reasonable TRU waste disposal following a cooperation agreement between these two organizations.

In this report, the calculation result of radionuclide transport for a TRU waste geological disposal system was described, by using the Tiger code and the GoldSim code at identical terms. Tiger code is developed to calculate a more realistic performance assessment by JAEA. On the other hand, GoldSim code is the general simulation software that is used for the computation modeling of NUMO TRU disposal site. Comparing the calculation result, a big difference was not seen. Therefore, the reliability of both codes was able to be confirmed.

Moreover, the influence on the disposal site design (Capacity:19,000m³) was examined when 10% of the amount of TRU waste increased. As a result, it was confirmed that the influence of the site design was very little based on the concept of the Second Progress Report on Research and Development for TRU Waste Disposal in Japan.

Keywords: TRU Waste, Geological Disposal, Tiger, GoldSim, Radionuclide Transport Code

This work has been performed in "Technical Commission on TRU waste disposal" based on the cooperation agreement. This report is equivalent to NUMO Technical report, NUMO-TR-10-05

<sup>+1</sup> Geological Isolation Research Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate, +2 Nuclear Cycle Backend Technology Development Unit, Nuclear Cycle Backend Directorate, +3 Policy Planning and Administration Department (Nuclear Cycle Backend Co-ordination Office Nuclear Cycle Backend Directorate until August 2010), \*1 On loan to Ministry of Economy, Trade and Industry (Geological Isolation Research Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate until June 2010), \*2 Science and Technology Department, Nuclear Waste Management Organization of Japan

## 目次

1.	V	まじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
1		14.24	
1	4		
1		3 報告書の内容・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
		也層処分における核種移行ベンチマーク解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
		1 目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
2		2 解析方法	
		2.2.1 核種移行解析コードの概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
		2.2.2 解析ケースの設定と考え方‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥	
		2.2.3 核種移行解析のメッシュ条件‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥	
		2.2.4 解析ケースの入力条件‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 1	
2		71 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	21
		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	21
		2.3.2 最終処分計画に基づく設定での結果・・・・・・・・・・・・・ 2	22
2	2. 4	4 まとめ······ 2	26
			27
		111 4	27
		- 2021011 17 2700	27
3			28
			29
		·	29
			29
			30
		7 - 7 - 7 - 7 - 7 - 7 - 7 - 7 - 7 - 7 -	31
		12414	31
			31
		7 -1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1	33
			38
			39
			13
3	3. 5	5 まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4	14
1	4	おわりに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	45
т.	4		rU
謝	辞	· · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	15
			16

## Contents

1. Introduction ·····	$\cdots \cdots 1$
1.1 Background ·····	1
1.2 Reasons for establishing the commission ·····	1
1.3 Contents of the report ·····	2
2. Benchmark Analyses for the radionuclide transport in the geosphere ········	
2.1 Purpose · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
2.2 Method of analyses ·····	3
2.2.1 Outline of the radionuclide transport analysis codes (GoldSim, Tiger)	
2.2.2 Outline of the analysis cases ······	
2.2.3 Meshes data of the analysis code ······	6
2.2.4 Input data of each case ······	
2.3 Result & Consideration · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	21
2.3.1 Condition of Second Progress Report for TRU Waste Disposal in JAPAN	J ······21
2.3.2 Condition of the newest data of TRU Waste ······	
2.4 Conclusions ·····	26
3. Examination of the influence to the design of geological disposal site	
by increase of the waste ·	27
3.1 Purpose	
3.2 Analyses of the radionuclide transport in the geosphere by increase of the	
3.3 Result & Consideration of the analyses ·····	
3.3.1 Case1 ·····	
3.3.2 Case2 ·····	29
3.3.3 Case3 ·····	29
3.3.4 Case4 ·····	30
3.4 Examination of the influence to the design ······	31
3.4.1 Purpose	
3.4.2 Precondition ·····	31
3.4.3 Influence to the layout of the disposal tunnel ·····	33
3.4.4 Influence to the tunnel by generation of heat ······	
3.4.5 Influence to the construction, the operation and the closure	
3.4.6 Influence to the cost ······	
3.5 Conclusions ·····	44
4. Summary ······	45
Acknowledgements · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	45
References ·····	46

## 表 目 次

表 2.2.3-1 レ	<i>、</i> ファレンスの時間メッシュ ····································	6
表 2.2.4-1 ク	ブループ毎の初期の核種量 (19,018m³) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	12
表 2.2.4-2 割	平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	ト廃棄体に対する処分施設形状の諸元・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	13
表 2.2.4-4 人	【エ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 落	\$解度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	14
表 2.2.4-6 降	幹水系還元性地下水(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	幹水系還元性地下水(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	<b>に然バリア核種移行解析における主なパラメータ設定・・・・・・・・・・・</b>	15
表 2.2.4-9 降	水系還元性地下水(降水系地下水)における実効拡散係数,収着分	
酉己个	係数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	
(VI	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 🛚	ぬ水系酸化性地下水(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	<b>軽棄体のグループ化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・</b>	27
表 3.2-2 各	トケースにおける廃棄体量・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	27
		28
表 3.3.1-1 ク	ケース1評価結果(最大線量)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	29
		29
	, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	29
	, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	30
表 3.4.2-1 ク	ブループ別廃棄体形状,本数等・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	31
		34
	*** := ::::::	39
		39
	<b>ヹ゚゚ヹ゚゚ヹ゚゚ヹ゚゚ヹ゚゚ヹ゚゚ヹ゚゚ヹ゚゚ヹ゚゚ヹ゚゚ヹ゚゚ヹ゚゚ヹ゚゚</b>	
	心分坑道の緩衝材,充填材量・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	型分坑道グループ2の増分・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	ヒ要坑道等の増分・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	40
表 3.4.5-7 奴	型分坑道グループ2の緩衝材量増分・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	41
	<b>を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・・・・・・・・・</b>	
	里め戻し期間の試算(軟岩深度 500m 円形断面の例) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
表 3.4.6-1 奴	型分事業費の全体概要(硬岩,深度 1,000m の例)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	43
表 3.4.6-2 ク	ブループ 2 の廃棄物量 10%増に伴う増分の坑道全体に対する割合 ・・・・・・・	43

## 図 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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1	0
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・・・・・・・・・・ 1	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) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1	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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2	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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2	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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2	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・・・・・ 2	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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	32
図 3.4.2-2 標準の平面レイアウト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3	3
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 3	35
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 3	36
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 ・・・・・・・・ 3	37
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	38
図 3.4.5-1 坑道掘削工事の工程の例(硬岩,深度 1,000m) ······ 4	11

#### 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」<sup>1)</sup>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」<sup>2)</sup>(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3。これらを受け、原子力機構と原環機構は、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<sup>4)</sup>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」<sup>5),6)</sup>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ー」<sup>7)</sup>(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

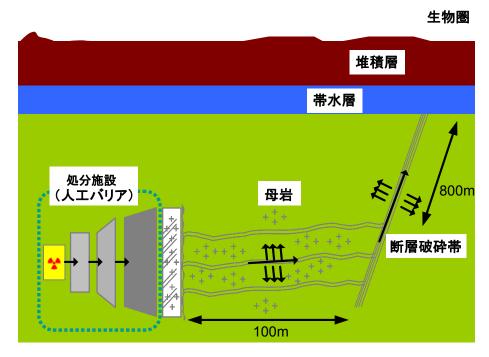
本報告書は、地層処分低レベル放射性廃棄物に係る技術協力の一環として実施した共同研究「地層処分低レベル放射性廃棄物の安全評価解析と物量変動による処分場への影響に関する検討・評価」の結果について示すものである。本共同研究では、安全評価コードの信頼性を確認するため、原環機構と原子力機構において互いに異なるコードを用いたベンチマーク解析を行った。また、廃棄体物量が変動した場合の処分場への影響について共同で検討・評価を行った。なお、原子力機構では今回の結果を今後の廃棄体製作のための目標設定に資することを予定している。

#### 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  $^{7)}$ 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)  $^{8)}$  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」 $^{5)}$ , $^{6)}$ 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 7)

#### 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  $^{9)}$  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  $^{10),11}$ 、資源採掘  $^{12),13}$ 、放射性廃棄物管理  $^{14),15),16}$ 、 $^{12}$ 、 $^{12}$  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  $^{8}$ 。

#### 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」 $^{21)}$  (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  $^{20}$  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  $^{4)}$  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  $^{5,6)}$  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 核種移行解析のメッシュ条件

#### (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	⊿t [年]
0	۲	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	~	<u>2</u> 5	20	0. 05
2	~	5	20	0. 15
5	~	1. 0E+01	20	0. 25
1. 0E+01	<b>\</b>	2. 0E+01	20	0. 5
2. 0E+01	<b>&gt;</b>	5. 0E+01	20	1.5
5. 0E+01	<b>~</b>	1. 0E+02	20 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	<b>~</b>	2. 0E+03	20	50
2. 0E+03	\	5. 0E+03	20	150
5. 0E+03	<b>\</b>	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	<b>~</b>	5. 0E+05	20	15000
5. 0E+05	<b>~</b>	1. 0E+06	20	25000
1. 0E+06	<b>~</b>	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。 $^{7}$ 

#### グループ1,2 廃棄体 + 充填材 (ダミー) 緩衝材 掘削影響領域 母岩 (ダミー) 断層 0.01m $1m (\angle L=0.1 m)$ 13 pipe 1 pipe pathways pathways (800m) (100m) グループ3,4 廃棄体+充填材 (ダミー) 掘削影響領域 母岩 (ダミー) 断層 0.01m 1 pipe 13 pipe pathways pathways (800m) (100m)

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。

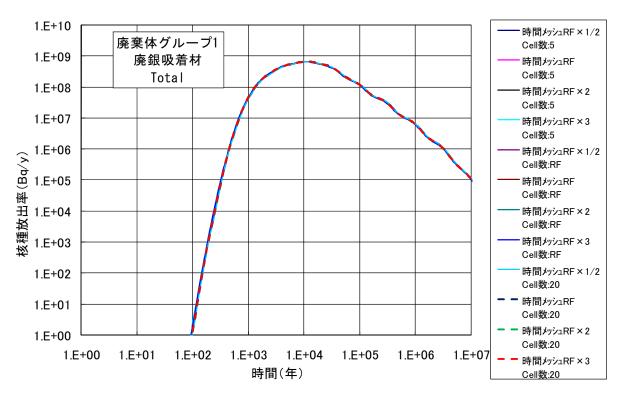


図 2.2.3-2 グループ 1 (ヨウ素を吸着させた廃銀吸着材)の 核種放出率[Bq/y]の経時変化

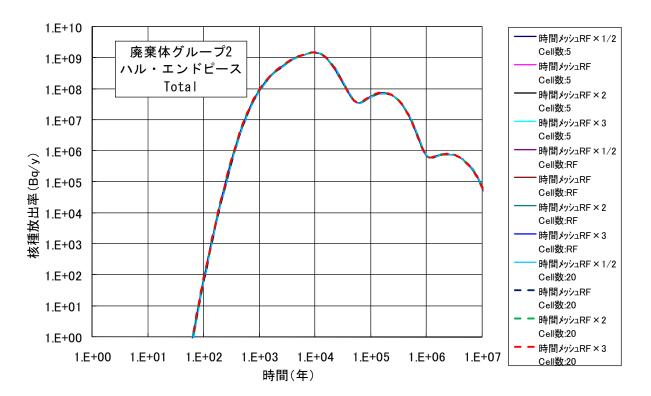


図 2.2.3-3 グループ2 (ハル・エンドピース) の核種放出率[Bq/y]の経時変化

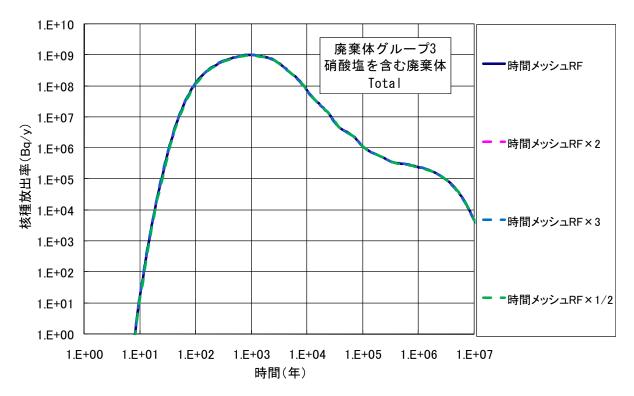


図 2.2.3-4 グループ3 (硝酸塩を含む廃棄体) の核種放出率[Bq/y]の経時変化

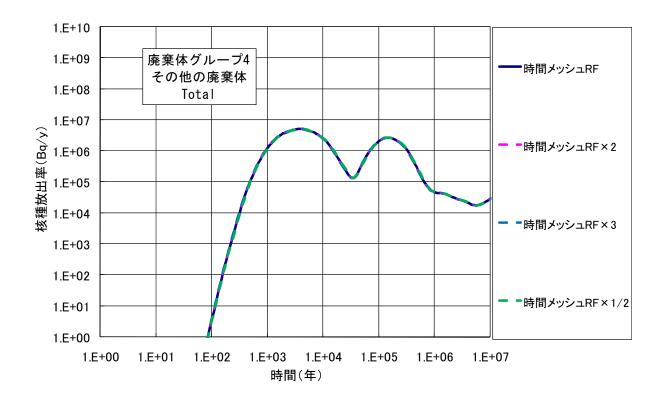


図 2.2.3-5 グループ4 (その他の廃棄体) の核種放出率[Bq/y]の経時変化

#### (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」 $^{22)}$ で用いられた MESHNOTE コード $^{23)}$  と同じものである。すなわち、時間ステップ $\Delta t$  で計算した値と $\Delta t$  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、 $\Delta t$  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。

#### グループ1,2

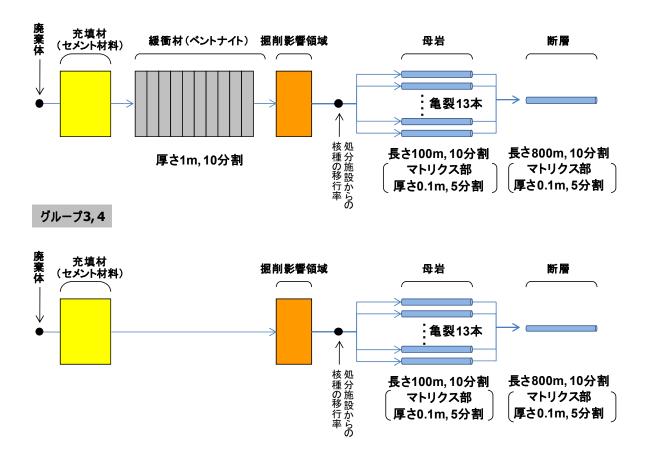


図 2.2.3-6 Tiger による核種移行経路のモデル化とレファレンスの空間メッシュの設定 (上図:グループ1及び2,下図:グループ3及び4)

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解的に解いている。母岩については、マトリッ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では、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 $\mu$  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。

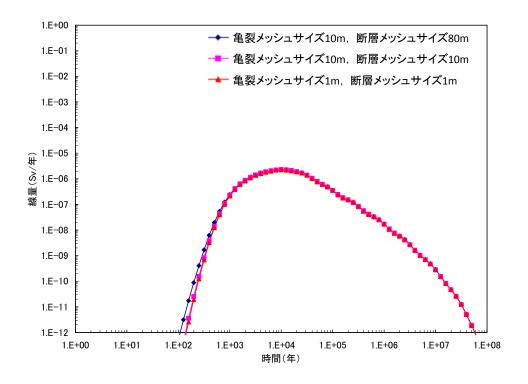


図 2.2.3-7 母岩における亀裂及び断層のメッシュサイズの影響 (第2次TRU レポートのグループ1の物量を用いた解析)

#### 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  $^{7}$  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  $^{7}$ ,24 $^{1}$ ,25 $^{1}$  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,収着分配係数など)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)

総合計 グループ 1,673 90, 584 発生本数(本) 31, 332 27, 441 30, 138 19,018 発生量(m<sup>3</sup>) 335 6.083 5.492 7. 108 重量(t) 612 26,625 9, 105 24, 977 61, 319 半減期(y)\* 核種 25年後 25年後 25年後 25年後 25年後 C-14 5. 73E+03 2 7F+12 6. 0E+14 0. 0E+00 5. 9E+14 7. 4E+12 CI-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 9. 20E+01 7. 1E+05 7. 3E+15 Ni-63 1. 1E+18 5. 5E+10 1. 1E+18 6. 50E+04 Se-79 3.9E+05 3. 2E+12 6. 7E+09 2. 2E+12 5. 4E+12 3. 2E+17 Sr-90 2. 91E+01 2. 0E+17 3. 7E+10 6. 9E+14 1E+17 1. 53E+06 1. 8E+06 3. 7E+14 1 7F+13 7r-93 3 1F+10 3 9F+14 Nb-94 2. 03E+04 3. 3E+06 2. 6E+15 1.9E+06 6.8E+08 2 6F+15 Mo-93 3. 50E+03 3. 7E+01 5. 6E+13 8.1E+06 6.8E+08 5. 6E+13 2. 13E+05 Tc-99 0. 0E+00 6. 9E+14 3. 9E+11 1.1E+14 8. 0E+14 6. 50E+06 1.1E+05 5. 5E+11 2. 5E+09 . 1E+12 1. 00E+05 Sn-126 7. 4E+05 3.8E+12 1. 1E+10 3.9E+12 7. 7E+12 I-129 5. 9E+13 2. 6E+11 4. 6E+09 6. 0E+13 1. 57E+07 7. 2E+11 Cs-135 2. 30E+06 4. 3E+05 3. 6E+12 7. 0E+09 2. 4E+12 6. 0E+12 3. 00E+01 Cs-137 5. 3E+10 4. 1E+17 8. 5E+14 3. 0E+17 7 1F+17 Cm-244 1.81E+01 8 1F+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 2. 34E+07 1. 0E+12 1. 4E+12 U-236 2. 6E+05 2.8E+10 1. 41E+10 Th-232 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 2. 4E+02 1.8E-04 6. 9E+02 1. 9E+01 9 5F+02 Cm-245 8. 50E+03 Pu-241 1. 44E+01 2. 6E+12 2. 1E+09 2. 2E+05 2. 9E+10 8. 6E+11 1. 7E+12 7. 5E+16 3. 1E+16 2. 9E+17 1 9F+17 3. 0E+09 Am-241 4. 32E+02 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 1. 59E+05 U-233 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 3E+07 Cm-246 4. 73E+03 0 0F+00 0 0F+00 0 0F+00 0 0F+00 0 0F+00 3. 87E+05 Pu-242 1. 6E+06 1. 3E+13 3. 7E+11 4. 9E+12 1.8E+13 4. 47E+09 U-238 2. 2E+05 8. 6E+11 2. 4E+10 3.7E+11 1.3E+12 U-234 2. 45E+05 Th-230 7. 70E+04 1. 9E+06 8. 1E+12 7. 7E+12 3. 2E+11 1. 6E+13 2. 1E+02 2. 5E+08 2. 7E+07 5. 2E+08 8. 0E+08 1. 60E+03 Ra-226 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 4F+08 1. 7E+15 5. 7E+13 1.4E+15 3. 1E+15 7. 04E+08 U-235 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

\*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 (m²/s)	10 <sup>-10</sup>
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 (m³)	表面積 (m²)	充填材体 積 (m³)	緩衝材 厚さ(m)	緩衝材表 面積(m²)	掘削影響領域 の地下水流量 (m³/y)
1	200Lドラム缶	25. 5	12	335	663	717	1	961	6. 38E-02
	JNFL, JAEA ハル・エント゛ヒ゜ース	688.8	9. 3	5, 342	13, 225	10, 528	1	20, 125	1. 72E+00
2	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
	ハル缶・インナーバ 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

	透水係数 (m/s)			流速,流量		
グループ	充填材	緩衝材	掘削影響領域	人工バリア内ダル	坑道長さ当たりの掘削	
			畑刊於著帜域	シー流速	影響領域地下水流量	
1		2×10 <sup>-11</sup>		$3 \times 10^{-6}  (\text{m/y})$	$2.5 \times 10^{-3}  (\text{m}^3/\text{y/m})$	
2	4×10 <sup>-6</sup>	2 ~ 10	$2 \times 10^{-8}$	3×10 (III/y)	2.5×10 (m /y/m)	
3	4 ^ 10	緩衝材	2 \ 10	$2 \times 10^{-4}  (\text{m/y})$	$7.5 \times 10^{-3}  (\text{m}^3/\text{y/m})$	
4		なし		2×10 (m/y)	7.3 × 10 (m /y/m)	

表 2.2.4-5 溶解度

 $[mol/m^3]$ 還元性 酸化性 地下水性状 降水系 海水系 降水系 ク゛ルーフ゜ 1. E-01 C (無機) 1. E-01 1. E-01 5. E-01 5. 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 5. E-01 5. E-01 1. E-01 1. E-01 5. E-01 Co 5 F-01 Νi 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 5. E+00 5. E+00 5. E+00 5. E+00 5. E+00 7r 5. E-02 1. E+00 5. E-02 1. E+00 5. E-02 1. E+00 Nh 5. E+01 5. E+01 5. E+01 5. E+01 5. E+01 5. E+01 Мо 1. E+00 1. E+00 1. E+00 1. E+00 1. E+00 1. E+00 Тс 1. E-03 1. E-03 1. E-03 1. E-03 溶解性 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 5. E+02 溶解性 溶解性 溶解性 溶解性 溶解性 溶解性 溶解性 1 Cs 溶解性 溶解性 溶解性 溶解性 溶解性 溶解性 Pb 5. E+01 5. E+01 5. E+01 5. E+01 5. E+01 5. E+01 Ra 1. E-03 1. E-03 1. E-03 1. E-03 1. E-03 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 1. E-04 5. E-06 1. E-04 5. E+02 U 5. E-06 1. E+04 1. E-04 5. E-06 1. E-04 5. E-02 Np 5. E-06 1. E+00 2. E-06 5. E-03 Pu 1. E-07 2. E-06 1. E-07 1. E-01 1. E-05 Am 5. E-07 1. E-05 5. E-07 5. E-07 1. E-05 5. E-07 1. E-05 5. E-07 1. E-05 5. E-07 1. E-05  $\mathsf{Cm}$ 

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

 $[m^3/kg]$ 収着媒体 セメント ベントナイト グループ 1 2 3 4 1 2 C (無機) 0.25 0.25 0.25 0.25 0 0 0.00025 0.00025 0.00025 0 C (有機) 0 0 0 0 0 0 СI 0 0 0. 0125 0.0125 0.0125 0.0125 0.05 0.05 Co 0.0125 0.0125 0.0125 0.0125 0.05 0.05 Νi 0.0025 0.0025 0 0.0025 0 0 Se 0.00125 0.00125 0.001 0.001 Sr 0.00125 0.00125 Zr 2.5 0.125 2.5 1 1 0 0 Nb 0 0 0.1 Мо 0.0025 0.0025 0.00025 0.0025 0 0 Тс 2.5 2. 5 0 2. 5 1 1 0.0125 0.05 0.05  $\mathsf{Pd}$ 0.0125 0.0125 0.0125 Sn 2.5 0.125 2. 5 2.5 1 1 1 0.000125 0.00125 0 0.00125 0 0 0.0025 0.0025 0.05 0.05 Cs 0.0025 0.0025 0.0125 0.0125 0.0125 0.0125 0.05 0.05 Ph Ra 0.00125 0.00125 0.00125 0.00125 0.001 0.001 0.25 0.0125 0.25 0.25 Ac 1 1 Th 0. 25 0.0125 0. 25 0. 25 5 5 0.25 0.0125 0.25 0.25 5 5 Pa 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  $\mathsf{Am}$ 0.25 0.0125 0.25 0.25 1 1 0.0125 0.25 0.25 Cm 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	全元素共通で	$Cs: 4 \times 10^{-10}$		
<del>大</del> 郊远散床数 (m²/s)	至九条共通 € 8×10 <sup>-10</sup>	Cl, I, Se, Mo: $4 \times 10^{-11}$		
(111 /5)	8 × 10	それ以外:3×10 <sup>-10</sup>		

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 (m²/s)	対数正規分布 対数平均値-9.99,標準偏差 1.07, Min. 10 <sup>-13</sup> ~ Max. 10 <sup>-7</sup>	周辺岩盤の透水量係数の最大値 10 <sup>-7</sup>		
<b>亀裂内地下水ダルシー流速</b>	$rac{1}{2}\sqrt{T} imes \Delta H$ T:透水量係数, $\angle$ H:動水勾配			
縦方向分散長 (m)	10	80		
マトリクス拡散寄与面積 (m²)	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	結晶質制		結晶質物				
	10 1±	花崗岩(	花崗岩(レファレンス) 花崗岩(レファレンス)					
	間隙率(%)	2						
卓	乞燥密度(Mg/m³)		2. 64					
実	効拡散係数(m <sup>2</sup> /s)		3.	E-12				
迷	所層移行距離 (m)		8	800				
	ク゛ルーフ゜	1 • 2 • 4	3	1 • 2 • 4	3			
	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			
/kg]	Mo	0. 0001	0	0. 0001	0			
[m <sup>3</sup> /	Tc	1	0	0	0			
트	Pd	0. 1	0. 1	0. 1	0. 1			
教	Sn	1	1	1	1			
配	I	0. 0001	0	0. 0001	0			
収着分配係数	Cs	0. 05	0. 005	0. 05	0.005			
以	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/v)/(Bg/v)]

							単位 [(Sv/y)/(Bq/y)]
核種放出域		河川水			沿岸海域堆積層	<b>暑</b>	被圧帯水層(深井戸)
生態系	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	ツンドラ気候	温暖気候
被ばくグループ	農	と 作業従事者グル・	ープ		海洋漁業従事者グル	<u></u> レープ	農作業従事者グループ
適用	レファレンス 気候・海水準変動 条件 内陸立地, 沿岸立地(海退時)		地下水タイプ変更			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
CI-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 <sup>3</sup>	全元素を可溶性元素と仮定
セメントの収着分配係数	m <sup>3</sup> /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 <sup>-5</sup>
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 <sup>-9</sup>

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

 $[m^3/kg]$ 

収着媒体						
ク゛ルーフ゜	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		
CI	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		
Мо	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)。

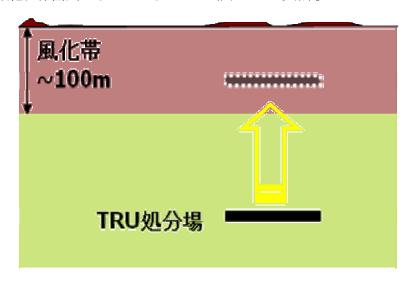


図 2. 2. 4-1 隆起・侵食ケースにおける地質環境の模式図 (第 2 次 TRU レポート<sup>7)</sup> の記述を一部編集)

また、断層破砕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。

移行媒体	セメント	ベントナイト
実効拡散係数	全元素共通で	$Cs: 4 \times 10^{-10}$
美郊拡散係数 $(\mathbf{m}^2/\mathbf{s})$	至九条共通 € 8×10 <sup>-10</sup>	Cl, I, Se, Mo, Tc, U, Np : $4 \times 10^{-11}$
(111 /8)	8 ^ 10	それ以外:3×10 <sup>-10</sup>

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

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

 $[m^3/kg]$ 

	[m <sup>3</sup> /kg						
収着媒体		セメ	ント		ベント	ナイト	
ク゛ルーフ゜	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	
CI	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)	$m^2/s$	$1 \times 10^{-10}$	1×10 <sup>-9</sup>
母岩の透水量係数 (最大値)	$m^2/s$	1×10 <sup>-7</sup>	1×10 <sup>-6</sup>
断層の透水量係数	$m^2/s$	$1 \times 10^{-7}$	1×10 <sup>-6</sup>

#### 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)。

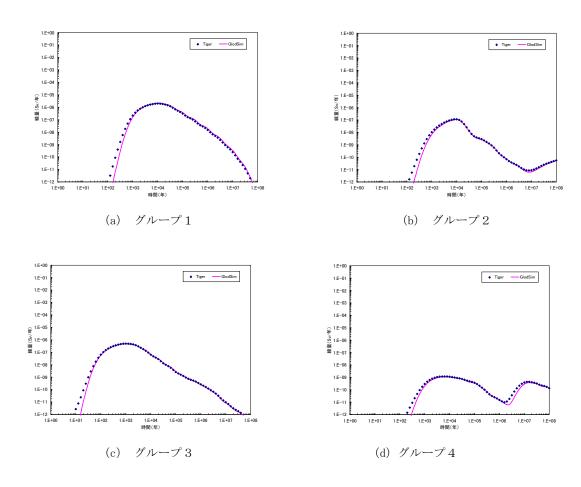


図 2. 3. 1-1 第 2 次 TRU レポートのレファレンスケースにおける Tiger と GoldSim の線量比較結果

#### 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。

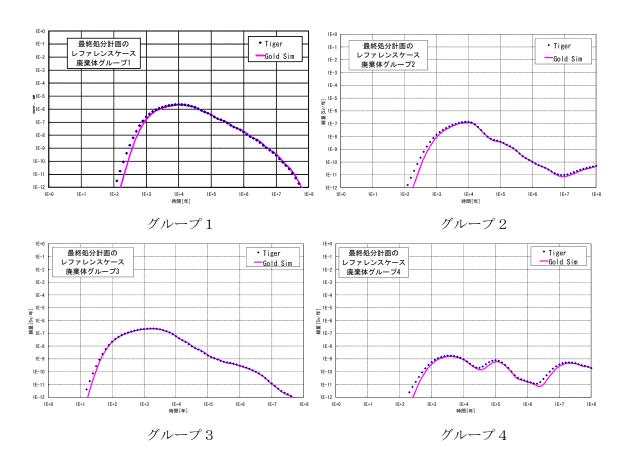


図 2.3.2-1 最終処分計画のレファレンスケースにおける Tiger と GoldSim の線量比較結果

#### (2) 人工バリアの変質を考慮したケース

処分後 1,000 年,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。

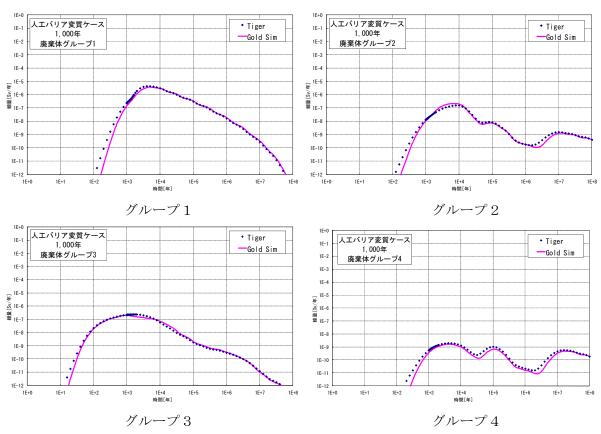


図 2.3.2-2 人工バリア変質ケース(1,000年)における Tiger と GoldSim の線量比較結果

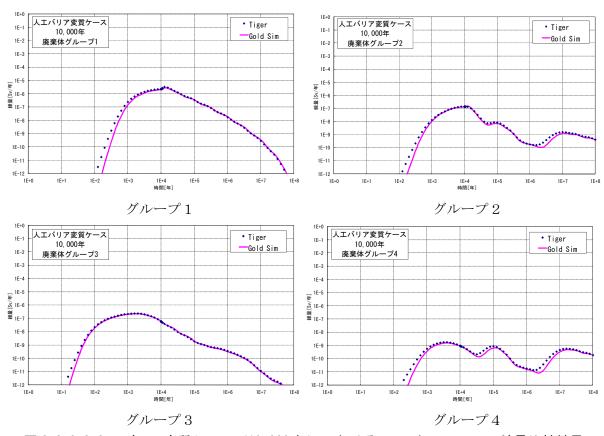


図 2.3.2-3 人工バリア変質ケース (10,000年) における Tiger と GoldSim の線量比較結果

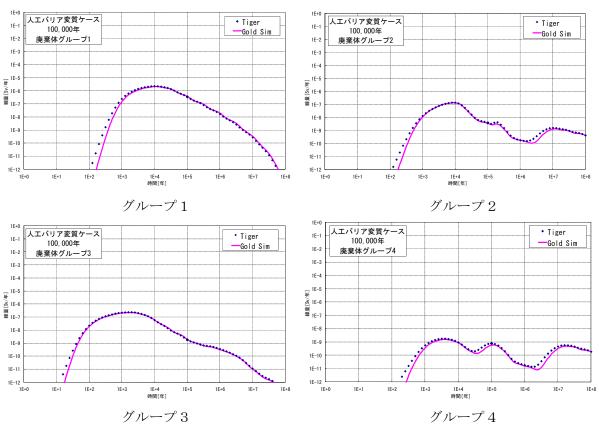


図 2.3.2-4 人工バリア変質ケース (100,000 年) における Tiger と GoldSim の線量比較結果

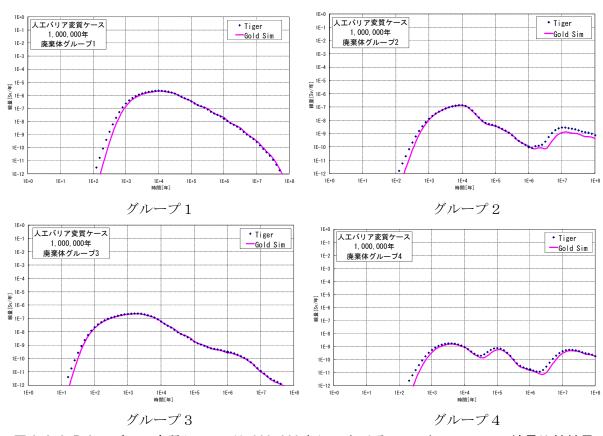


図 2.3.2-5 人工バリア変質ケース (1,000,000 年) における Tiger と GoldSim の線量比較結果

#### (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。

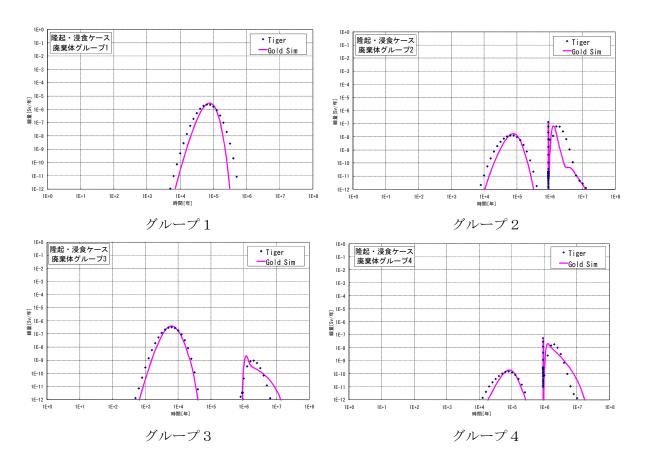


図 2.3.2-6 隆起・侵食ケース (1mm/y) における Tiger と GoldSim の線量比較結果

#### (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。

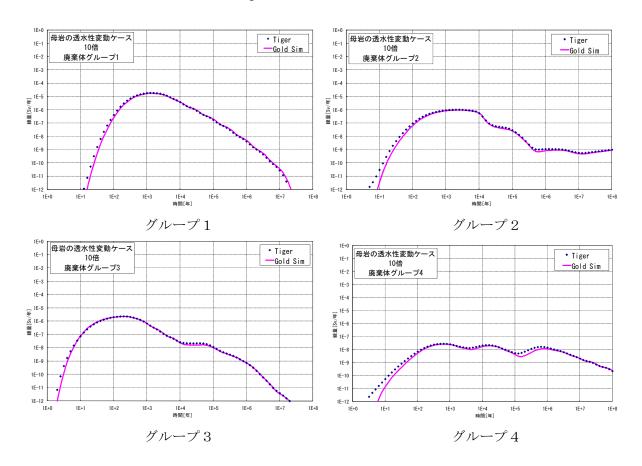


図 2.3.2-7 母岩の透水性変動ケース(10 倍)における Tiger と GoldSim の線量比較結果

#### 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考える。

#### 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(19,018 $\mathrm{m}^3$ ) $^{5),6)}$  をケース 0 とし、これを表 3.2.1-1 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 3.2.1-2 に示す。

	衣 5.2 1 院未体の フル フロ						
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 3.2-1 廃棄体のグループ化

表 3.2-2	冬ヶ	ース1	こおし	ナス	廃棄体量
14 U. L L	77	$\sim$	- a.) I	1 101	

	五 0. 2 2	u / / /	1 - 05 17 9 70 2	KITT-	
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

(単位: m³)

XXX: 物量を 10%増加させた部分

#### 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

					[Bq]
核種	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
CI-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  $1\sim4$  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  $2\sim4$  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	$2.3{ imes}10^{-6}$	$2.6{ imes}10^{-6}$	I-129
総線量	$2.3 imes10^{-6}$	$2.6 \times 10^{-6}$	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 <sup>-7</sup>	$1.5 \times 10^{-7}$	C-14
総線量	$2.3 \times 10^{-6}$	$2.3{ imes}10^{-6}$	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  $(2.3\times10^{-6}\,\mathrm{Sv/y})$  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	$2.4 \times 10^{-7}$	$2.6 \times 10^{-7}$	I-129
総線量	$2.3 \times 10^{-6}$	$2.3 \times 10^{-6}$	I-129

(単位:Sv/v)

・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  $(2.3\times10^6\,\mathrm{Sy/y})$  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 <sup>-9</sup>	$2.0 \times 10^{-9}$	C-14
総線量	$2.3 \times 10^{-6}$	$2.3 \times 10^{-6}$	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  $(2.3\times10^{-6}\,\mathrm{Sy/y})$  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 のうちの特定グループ 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 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。

	X 5. 1.2 1 777 7 3370.X (1777) 77.						
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	<b>200</b> L ドラム缶	1,673	4	419			
	キャニスタ (ハル・エンドピース)	27,522	4	6,881			
2	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			
	<b>200</b> L ドラム缶	28,663	4	7,166			
4	角型容器	287	1	287			
	ハル缶	54	2	27			
	インナーバレル	1,134	2	567			

表 3.4.2-1 グループ別廃棄体形状. 本数等 5)

## (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<sup>7)</sup>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」<sup>5),6)</sup>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	パッケージ:□1.5m×H1.1m (廃棄体:200L ドラム缶)	25 パッケージ/断面
グル	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))	12 パッケージ/断面
グループ2	パッケージ:□1.2m×H1.6m (廃棄体:キャニスタ (仏国返還))	2 パッケージ/断面
	パッケージ:□1.5m×H1.1m (廃棄体:200L ドラム缶)	40 パッケージ/断面
グループ3, 4	角形容器:□1.6m×H1.2m	33 パッケージ/断面
	パッケージ: 1.1m×1.9m×H1.4m (廃棄体:インナーバレル,ハル缶)	3 パッケージ/断面

図 3.4.2-1 標準の坑道断面仕様 5)

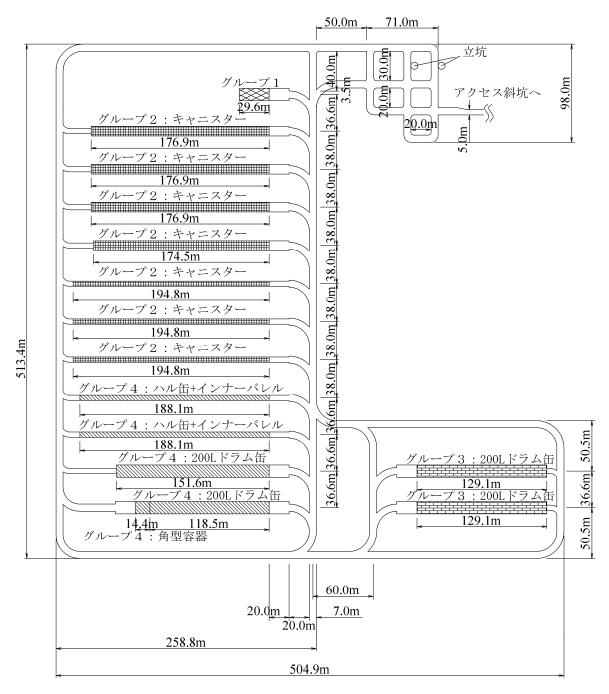


図 3.4.2-2 標準の平面レイアウト 5)

## 3.4.3 坑道設計への影響

# (1)「10%増加」の設定方法

表 3.4.2 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。

	公					
グループ	廃棄体	本数	パッケージ数			
1	200L ドラム缶	1,841	461			
	キャニスタ (ハル・エンドピース)	30,275	7,569			
2	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	<b>200</b> L ドラム缶	30,186	7,547			
	<b>200</b> L ドラム缶	31,530	7,883			
4	角型容器		316			
4	ハル缶	60	30			
	インナーバレル	1,248	624			

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

### (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)

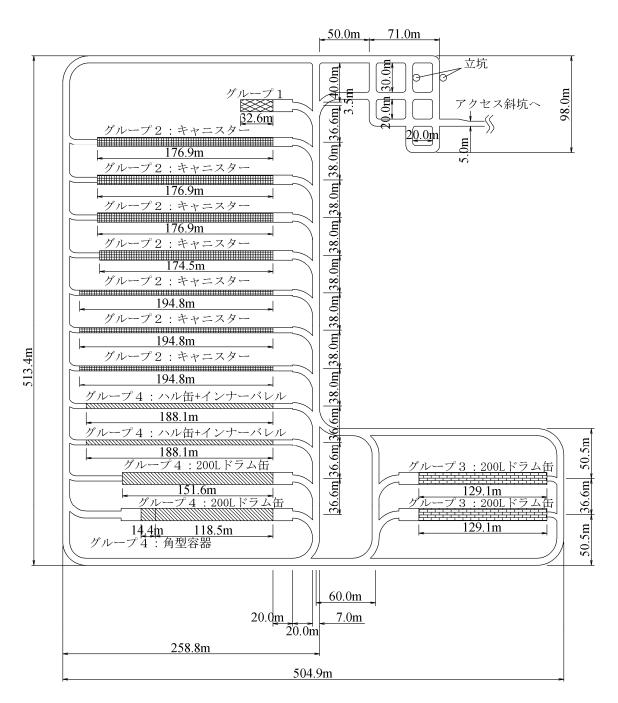


図 3.4.3-1 グループ 1 のみ廃棄体量を 10%増加させた地下施設レイアウト

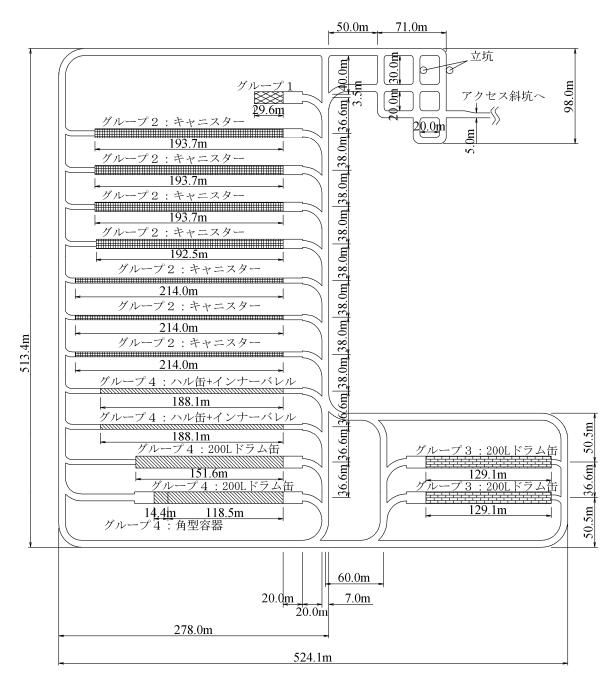


図 3.4.3-2 グループ 2 のみ廃棄体量を 10%増加させた地下施設レイアウト

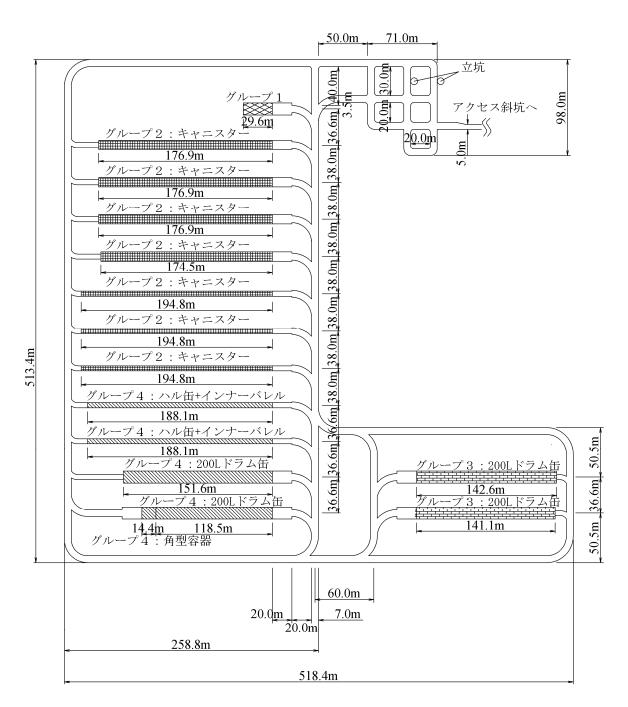


図 3.4.3-3 グループ3のみ廃棄体量を10%増加させた地下施設レイアウト

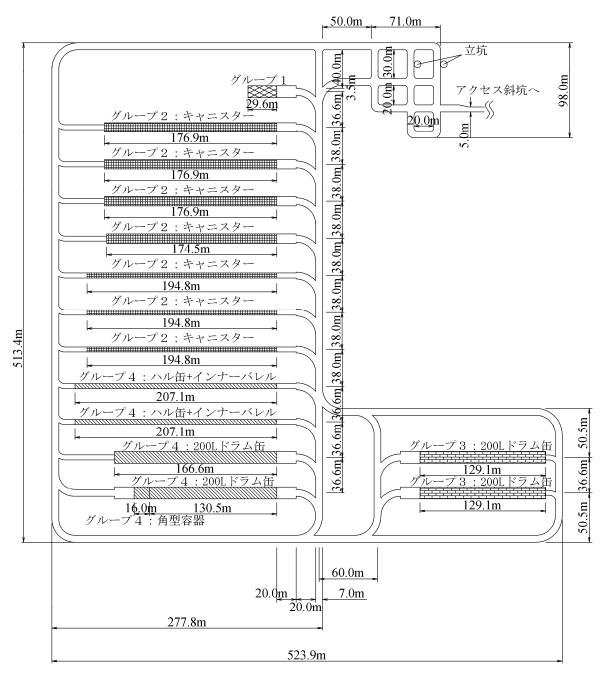


図 3.4.3-4 グループ 4 のみ廃棄体量を 10%増加させた地下施設レイアウト

## 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  $^{5)}$ 、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。

延長(m) 断面積(m²) 体積(m³) グループ ハル・エント゛ヒ゜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 3.4.5-1 処分坑道の掘削量 6)

表 3.4.5-2 主要坑道等の掘削量 6)

× × // // // // // // // // // // // // /						
	延長(m)	断面積(m²)	体積(m³)			
主要坑道	2,370	40.5	95,985			
連絡坑道 [*)	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 6)

	延長(m)	体積(m³)
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

断面積(m²) 坑道長 (m) 体積(m³) 緩衝 緩衝材 緩衝材 緩衝材 緩衝材 端部 一般部 材端 端部 一般部 一般部 合計 部 ハル・エント゛ヒ゜ グル 16.0 688.8 58.3 35.3 933 24,315 25,247 ープ 2 仏国返還 12.0 572.4 16.9 13.1 203 7,498 7,701 グループ2小計 1,136 28.0 1261.2 31,813 32,948 全グループ合計 34,418 32.0 2,205.4 1,478 32,940

表 3.4.5-4 処分坑道の緩衝材, 充填材量 6)

## (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。

		延長(m)		断面積(m²)	增分体積(m³)
	変更後	変更前	増分	例即傾(III )	增分净值(III)
ハル・エント゛ヒ゜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%

表 3.4.5-5 処分坑道グループ2の増分

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。

延長(m) 断面積(m²) 增分体積(m³) 変更後 変更前 増分 主要坑道 2,408.4 40.5 1,555 2,370 38.4 連絡坑道Ⅱ 336.2 251 85.2 23.6 2,011 123.6 合計 2,744.6 2,621 3,566

表 3.4.5-6 主要坑道等の増分

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。

	20	. ,			
	一般部延長(m)			₩元誌( <b></b> <sup>2</sup> )	+ 前八/木毛(m³)
	変更後	変更前	増分	断面積(m²)	増分体積(m³)
ハル・エント゛ヒ゜ース	757.2	688.8	68.4	35.3	2,415
仏国返還	630	630 572.4		13.1	755
合計	1387.2	1261.2	126.0		3,169
対変更前比率			9.99%		9.62%

表 3.4.5-7 処分坑道グループ2の緩衝材量増分

#### (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。

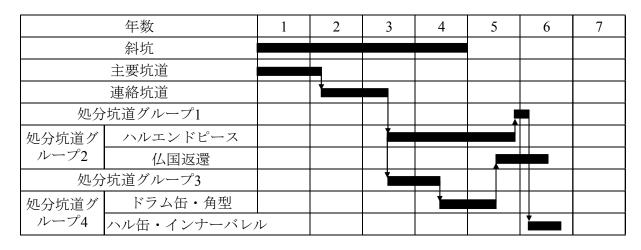


図 3.4.5-1 坑道掘削工事の工程の例(硬岩、深度 1.000m) 5)

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 パッケージ/25 年=345 パッケージ/年, /200 日=1.7 パッケージ/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。

<b>주소</b> 3	廃棄体形状		総数		1年あたり		1日あたり	
<b>)</b>		廃棄体	ハ゜ッケーシ゛	廃棄体	ハ゜ッケーシ゛	廃棄体	ハ゜ッケーシ゛	
ク゛ルーフ゜ 1	200L ドラム缶	1,673	419	67	17	_	_	
ク゛ルーフ゜ 2	キャニスタ	31,332	7,834	1,253	314	7	2	
ク゛ルーフ゜ 3	200L ドラム缶	27,441	6,861	1,098	275	6	2	
	200L ドラム缶	28,663	7,166	1,147	287	6	2	
	角型容器	287	287	12	12	_	_	
ク゛ルーフ゜ 4	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	き) 高レベル	40,000	40,000	1,000	1,000	5	5	

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5)

「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」<sup>5)</sup> 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。

	埋戻し断面積	施工速度	延長	所要日数
立坑	$28.3\text{m}^2$	0.67 (m/日)	1,044 m	1,558 日(52 月)
斜坑	$22.3m^2$	48 (m/目)	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 <sup>2</sup>	134 (m/日)	426.0m	3.2 日

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)<sup>5)</sup>

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。

注) 1 未満の場合は「一」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。

### 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 <sup>21)</sup> 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  $^{21)}$  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。

m That was to a	,, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,
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

表 3.4.6-1 処分事業費の全体概要 (硬岩, 深度 1,000m の例) <sup>26)</sup>

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  $万 <math>m^3$ )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。

	増分延長(m)	增分体積(m³)
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%

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

#### 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」5<sup>1,6</sup>における既存の処分概念 (第2次TRUレポート<sup>7)</sup>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。

### 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」<sup>5),6)</sup>における既存の処分概念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る。

## 参考文献

- 1) 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 .
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 原子力発電環境整備機構: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
- 5) 原子力発電環境整備機構: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).
- 6) 原子力発電環境整備機構: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, 一付録資料―, NUMO-TR-10-04 (2011).
- 7) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構: 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ー, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02. (2005)
- 8) 三原守弘,大井貴夫: 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 (2004).
- 9) GoldSim Technology Group LLC: GoldSim Contaminant Transport Module User's Guide. (2007)
- 10) Rundle, Elaine: California Water Resources Uses CalLite Risk Simulation, Government Technology. (2009)
- 11) Volpe, J. and Voss, C.: Using Dynamic System Models for Water Use Accountability and Planning In Georgia, Proceedings of the 2005 Georgia Water Resources Conference, April 25-27, 2005, Georgia. (2005)
- 12) Eary, T., Eshleman, J., Jakubowski, R. and Watson, A.: 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. (2008)
- 13) Vermaak, J. and Lindsay, P.: 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.
- 14) US DOE: 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. (2008)
- 15) Mattie, P.D., Knowlton, R.G. and Arnold, B.W.: 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).

- Vopálka, D., Lukin, D. and Vokál, A.: 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.
- 17) Stauffer, P.H., Viswanathan, H.S., Pawar, R.J. and Guthrie, G.D.: A System Model for Geologic Sequestration of Carbon Dioxide, Environ. Sci. Technol., 2009, 43 (3), pp. 565–570.
- 18) Zhang, Y., Oldenburg, C.M., Finsterle, S., and Bodvarsson, G.S.: System-Level Modeling For Geological Storage Of CO2, PROCEEDINGS, TOUGH Symposium 2006, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, May 15–17, 2006.
- 19) Mathias, D.L., Go, S., Gee, K. and Lawrence, S.: Simulation Assisted Risk Assessment Applied to Launch Vehicle Conceptual Design, NASA Center for AeroSpace Information (CASI) (2008).
- 20) 原子力委員会: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. (2006)
- 21) 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.
- 22) 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次取りまとめー,総論レポート, JNC TN 1400 99-020.
- 23) Wakasugi, K., Makino, H. and Robinson, P.: The Development of MESHNOTE Code for Radionuclide Migration in the Near Field, JNC TN8400 99-095. (1999)
- 24) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構: TRU 廃棄物処分技術検討書 根拠資料集 分冊 2, JNC TY1450 2005-001, FEPC TRU-TR2-2005-04. (2005)
- 25) Mihara M, Sasaki R: RAdio-nuclides Migration Datasets (RAMDA) on Cement, Bentonite and Rock for TRU Waste Repository in Japan, JNC TN8400 2005-027
- 26) 資源エネルギー庁: TRU 廃棄物の最終処分費用, 拠出金単価の算定について (2008)

This is a blank page.

# 国際単位系(SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本i	単位
本半里	名称	記号
長 さ	メートル	m
質 量	キログラム	kg
時 間	秒	s
電 流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光 度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
和立里	名称	記号
面	積 平方メートル	$m^2$
体	積 立法メートル	$m^3$
速 さ , 速	度メートル毎秒	m/s
加速	度メートル毎秒毎秒	$m/s^2$
波	数 毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密	度キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面 積 密	度キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比 体	積 立方メートル毎キログラム	m³/kg
電 流 密	度アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強	さアンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> ,濃	度 モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質 量 濃	度キログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝	度 カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈 折 率	(b) (数字の) 1	1
比 透 磁 率	(b) (数字の) 1	1

- (a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度
- (albatine concentration) ともよばれる。 (substance concentration) ともよばれる。 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

衣 3.	直有の名称と記す	アじ衣さ		
			SI 組立単位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による
		記り	表し方	表し方
	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 (p)	m/m
	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	$m^{2/}m^2$
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		$s^{-1}$
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
	パスカル	Pa	$N/m^2$	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷,電気量	クーロン	C		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静 電 容 量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁 束 密 度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
	ヘンリー	Н	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	$^{\circ}$ C		K
· ·	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 (f)	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		$s^{-1}$
吸収線量, 比エネルギー分与,	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
カーマ	-	ау	o/Kg	III S
線量当量, 周辺線量当量, 方向	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
性線量当量,個人線量当量	シーベルト、。	NG	J/Kg	
	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol
(.)CT松高部以田士の女好1.97日かん	- ~ 40 -> H (-> 1. 40 7. A	1- 11 4 E	ト田 - ペキッ 1 J. 1 4次元章	キャルトリ モガルルショルル

- 酸素活性|カタール kat | s¹mol (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
  (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
  (e) 池外学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している(d) へルソは周頻現象についてのみ、ペクレルは放射性接種の統計的過程についてのみ使用される。(d) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きなは同である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はとちらの単位で表しても同じである。(f) 放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。(g) 単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表 4 単位の由に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

表 4 . 単位 0	)中に固有の名称と記号を含		立の例
	S.	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘 度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表 面 張 力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
熱容量,エントロピー		J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比熱容量,比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^{-2}$
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> sA
	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>-3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg⁻¹sA
吸 収 線 量 率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$
放射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s
放射輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol

	表 5. SI 接頭語									
ľ	乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号				
	$10^{24}$	ヨ タ	Y	10 <sup>-1</sup>	デ シ	d				
	$10^{21}$	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c				
	$10^{18}$	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m				
	$10^{15}$	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ				
	$10^{12}$	テラ	Т	10-9	ナーノ	n				
	$10^{9}$	ギガ	G	10-12	ピコ	р				
	$10^{6}$	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f				
	$10^{3}$	丰 口	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a				
	$10^{2}$	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z				
	$10^1$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	у				

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位							
名称	記号	SI 単位による値					
分	min	1 min=60s					
時	h	1h =60 min=3600 s					
目	d	1 d=24 h=86 400 s					
度	۰	1°=(п/180) rad					
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad					
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad					
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>					
リットル	L, l	1L=11=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>					
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg					

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

	衣される数値が美験的に待られるもの							
名称				記号	SI 単位で表される数値			
電	子力	ベル	ト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J			
ダ	ル	卜	ン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg			
統-	一原子	質量单	单位	u	1u=1 Da			
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m			

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位 記号 SI 単位で表される数値 名称 1 bar=0.1MPa=100kPa=10<sup>5</sup>Pa bar 水銀柱ミリメートル nmHg 1mmHg=133.322Pa オングストローム  $1 \text{ Å=0.1nm=100pm=10}^{-10} \text{m}$ Å 海 里 1 M=1852m Μ  $1 b=100 \text{fm}^2=(10^{-12} \text{cm})2=10^{-28} \text{m}^2$ バ b kn 1 kn=(1852/3600)m/s ネ Np SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。 11 В ル dB -

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダ イ ン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{m}^2 \text{ s}^{-1}$
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フ ォ ト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガ ウ ス	G	1 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10³/4π)A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≦ 」は対応関係を示すものである。

表10 SIに届さないその他の単位の例

	表10. SIに属さないての他の単位の例							
名称 記号				記号	SI 単位で表される数値			
牛	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq		
$\nu$	ン	卜	ゲ	ン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$		
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy		
$\nu$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv		
ガ		ン		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T		
フ	x		ル	3		1フェルミ=1 fm=10-15m		
メー	ートル	系	カラ:	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg		
卜				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa		
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa		
力	口		IJ	ı	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー),4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)		
3	ク		U	ン		1 u =1um=10 <sup>-6</sup> m		